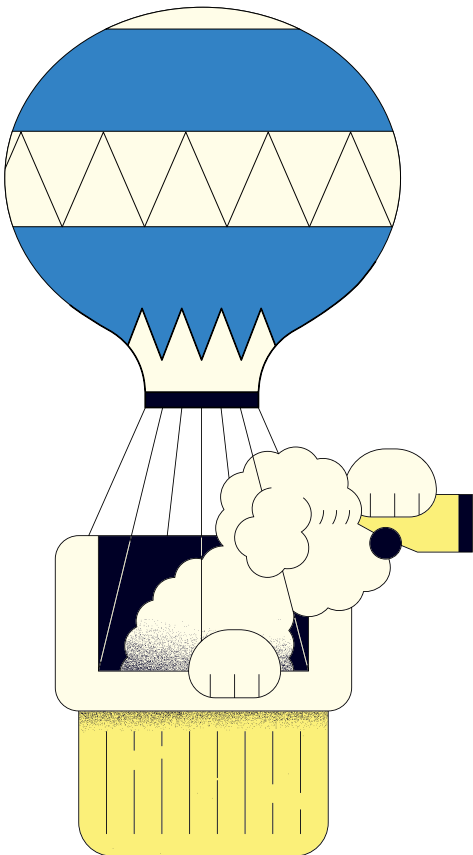


고등학교

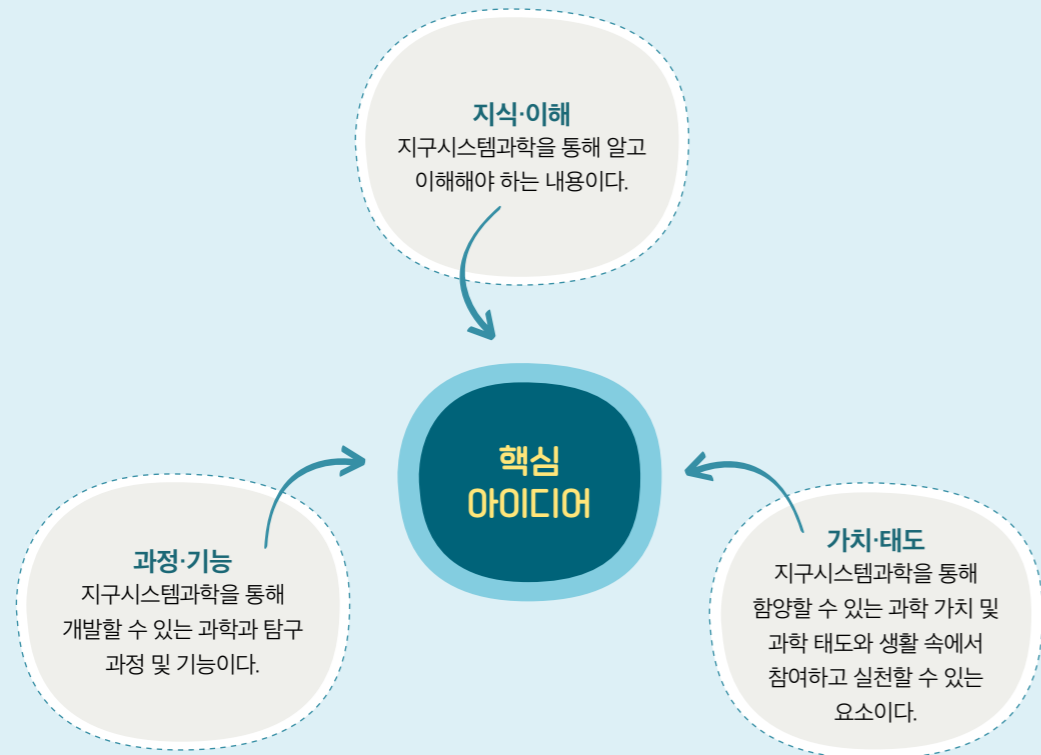
# 지구시스템과학

김연귀  
문무현  
박창용  
박재용  
장유순  
최윤옥





**지구시스템과학 교과서**를 통해 다양한 활동과 탐구를 중심으로 한 학습을 하면서 지식·이해, 과정·기능, 가치·태도의 세 차원을 상호 보완적으로 함양함으로써 핵심 아이디어에 도달할 수 있다.



지구는 매우 역동적인 행성으로 육지와 바다, 대기 그리고 인간을 비롯해 수많은 생명체로 이루어져 있다. 이러한 요소들은 상호작용을 통해 에너지와 물질을 교환하고 있으며, 이 과정에서 다양한 자연 현상들이 발생한다. 지구의 구성 요소들은 지금도 끊임없이 상호작용을 하고 있으며, 이러한 상호작용은 우리의 삶에 큰 영향을 미치고 있다. 지구시스템과학은 지구를 하나의 시스템으로 보고, 지구시스템을 구성하는 요소들이 어떻게 상호작용을 하면서 서로 영향을 주고받는지 연구하는 학문이다.

이 교과서는 새로운 교육과정에 맞춰 지구시스템의 구성 및 구성 권역들의 상호작용에 대한 기본 개념을 이해하고, 지구과학 탐구 능력과 태도를 기를 수 있도록 구성했다. 또 생물권을 포함해 시공간적으로 밀접하게 관련된 지구시스템에서 일어나는 현상을 과학적으로 이해하고, 민주 시민으로서 개인과 사회 문제를 과학적으로 해결하고 참여·실천하는 역량을 함양할 수 있도록 구성했다. 이를 통해 일반선택 과목인 지구과학의 지식과 실천을 연계하여 미래 사회를 살아가는 데 필요한 역량을 함양할 수 있도록 했다.

이 교과서의 내용은 지구 탄생과 생동하는 지구, 해수의 운동과 순환, 강수 과정과 대기의 운동 등 세 영역으로 구성되어 있다. 지구 탄생과 생동하는 지구에서는 지권의 시공간적인 변화와 지구시스템의 구성 물질과 변천을 다룬다. 해수의 운동과 순환에서는 수권을 중심으로 해수를 움직이는 힘과 해류의 발생과 운동, 해파와 조석의 발생 등 해수의 운동과 순환을 종합적으로 다룬다. 그리고 강수 과정과 대기의 운동에서는 기권을 중심으로 지구 열수지와 온실 효과, 구름 생성에서 대기 연직 운동의 중요성, 대기의 운동과 순환에 작용하는 힘, 지상풍과 지균풍, 편서풍 파동 등을 다룬다.

이 교과서를 학습한 학생이 지식·이해뿐만 아니라 과정·기능, 가치·태도를 균형 있게 발달시키고, 우리 주변에서 일어나는 다양한 자연 현상의 본질을 꿰뚫어 볼 수 있는 지혜롭고 현명한 눈 하나를 더할 수 있기를 바란다. 나아가 행위 주체로서 자신의 역량을 키워 미래 사회의 주역이 되기를 기대한다.

# 이 책의 구성과 특징



## 대단원 시작 학습

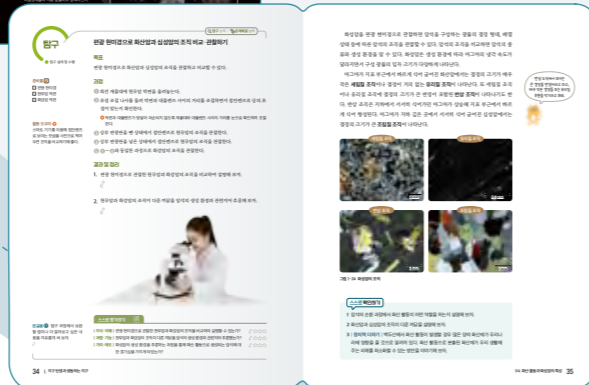


- ### 대단원 도입
- 대단원 내용을 아우르는 개방형 질문에 대해 보면서 호기심을 가질 수 있다.
  - 이 단원에서 학습해야 할 지식·이해, 과정·기능, 가치·태도를 확인할 수 있다.
  - 중학교 과학, 통합과학, 지구과학과의 연계를 통해 학습 구조를 파악할 수 있다.

## 단원 학습



- ### 학습 도우미
- 용어에 대한 보충 설명
  - 과학 잇기 다른 과학 영역과의 연계 설명
  - 다른 단원, 다른 학년 단원과의 연계 설명
  - 디지털 인터넷을 통해 자료를 얻거나 학습할 수 있는 누리집 등을 소개해 디지털 소양 함양
  - 자료 연계 물음으로 자료 분석과 수리 역량 강화
  - QR 코드를 통해 시뮬레이션, 누리집 방문 등 디지털 콘텐츠 활용



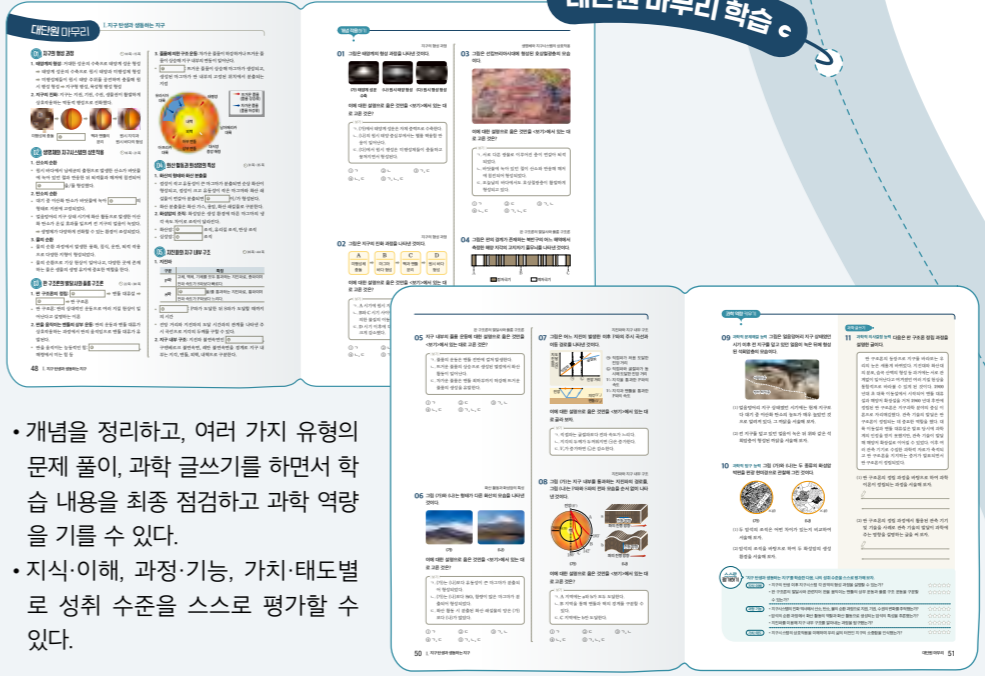
**소단원 도입**  
일상생활에서 경험할 수 있는 소재로 단원을 시작하며 학습에 흥미를 느낄 수 있다.

**본문**  
다양한 시각 자료를 보면서 학습 개념을 쉽게 이해할 수 있다.

**해 보기 / 탐구**  
조사, 실험, 자료 분석 등 다양한 활동으로 학습 개념을 이해하고 과학 역량을 키우며, 활동을 스스로 평가하고 점검할 수 있다.

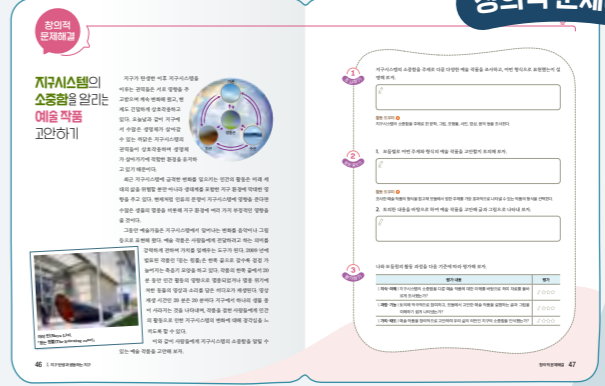
**스스로 확인하기**  
소단원별 학습 내용을 스스로 평가하고 창의력을 키울 수 있다.

## 대단원 마무리 학습



- 개념을 정리하고, 여러 가지 유형의 문제 풀이, 과학 글쓰기를 하면서 학습 내용을 최종 점검하고 과학 역량을 기를 수 있다.
- 지식·이해, 과정·기능, 가치·태도별로 성취 수준을 스스로 평가할 수 있다.

## 창의적 문제해결



산출물 제작, 프로젝트, 토의/토론 등의 활동을 하면서 다양한 문제를 창의적으로 해결할 수 있다.

단원과 관련된 진로, 직업 내용을 읽고 스스로 진로를 탐색할 수 있고, 창의적 활동을 하면서 가치·태도를 함양할 수 있다.



## 과학과 미래-진로



# 이 책의 차례



## I 지구 탄생과 생동하는 지구

01 지구의 형성 과정	10
02 생명체와 지구시스템의 상호작용	16
03 판 구조론의 발달사와 플룸 구조론	22
04 화산 활동과 화성암의 특성	31
05 지진파와 지구 내부 구조	36
● 과학과 미래	45
● 창의적 문제해결	46
● 대단원 마무리	48

## II 해수의 운동과 순환











01 해수를 움직이는 힘	54
02 지형류	58
03 해파	62
04 해일	66
05 조석	70
● 과학과 미래	75
● 창의적 문제해결	76
● 대단원 마무리	78

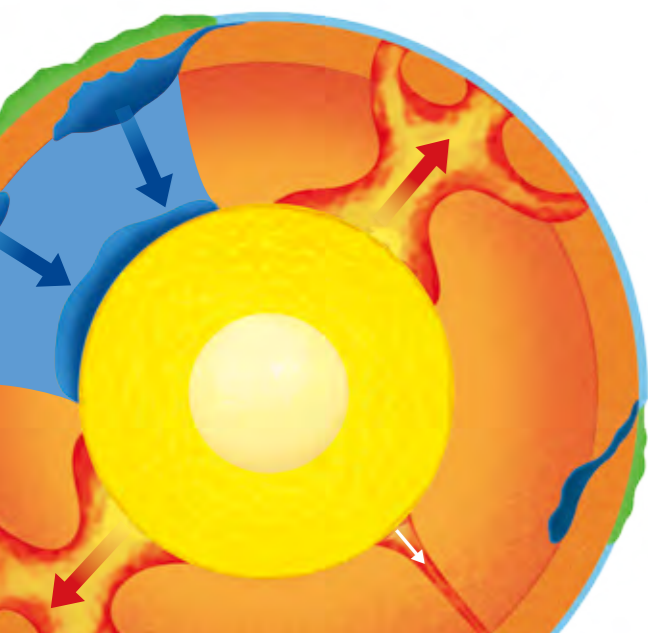
## III 강수 과정과 대기의 운동

01 지구의 대기와 생명체	84
02 지구 열수지	88
03 대기 안정도와 강수	92
04 기압의 연직 분포와 대기를 움직이는 힘	100
05 여러 가지 바람	104
06 편서풍 파동	108
● 과학과 미래	115
● 창의적 문제해결	116
● 대단원 마무리	118



### 실험실 안전 기호

-  **피복 안전**  
화학 물질이나 뜨거운 물질로부터 피부와 옷을 보호하기 위해 실험복을 입는다.
-  **눈 안전**  
화학 물질이나 열, 깨진 유리 기구로부터 눈을 보호하기 위해 보안경을 쓴다.
-  **손 안전**  
화학 물질이나 뜨거운 기구를 사용할 때는 실험용 장갑을 낀다.
-  **도구 주의**  
가위, 칼과 같은 날카로운 물체에 찔리거나 베이지 않게 주의한다.
-  **부식 주의**  
부식성 화학 물질이 피부나 옷에 묻지 않도록 하고, 피부에 묻었을 때는 흐르는 물에 충분히 씻는다.
-  **유리 기구 주의**  
유리 기구는 깨지기 쉬우므로 주의해서 다루고, 깨진 유리를 처리할 때는 선생님의 안내에 따른다.
-  **약품 주의**  
독성 화학 물질이 피부에 닿지 않게 하고, 독성 기체를 흡입하지 않는다. 독성 기체를 흡입했을 때는 신선한 공기가 있는 곳으로 이동해 안정을 취한다.
-  **화재 주의**  
가열 장치를 사용할 때는 화재의 위험이 있으므로 주의한다.
-  **폐기물 처리 안전**  
실험에 사용한 화학 약품이나 유리 조각은 선생님의 안내에 따라 처리한다.
-  **전기 주의**  
젖은 손으로 전기 기구를 만지지 않는다.



# I

# 지구 탄생과 생동하는 지구

지구의 탄생 이후 지구시스템을 구성하는 지권, 기권, 수권, 생물권이 형성되었고, 권역들의 상호작용으로 지구는 역동적 행성으로 진화했다.

지구시스템의 권역들은 어떻게 형성되었으며 이들이 상호작용하는 과정에서 어떤 자연 현상이 발생했을까?

### 이 단원의 학습 내용

- 01 지구의 형성 과정
- 02 생명체와 지구시스템의 상호작용
- 03 판 구조론의 발달사와 플룸 구조론
- 04 화산 활동과 화성암의 특성
- 05 지진파와 지구 내부 구조

**지식·이해**

- 지구의 탄생 이후 지구시스템 각 권역의 형성 과정을 설명할 수 있다.
- 판 구조론의 발달사와 관련지어 판을 움직이는 맨틀의 상부 운동과 플룸 구조 운동을 구분할 수 있다.

**과정·기능**

- 지구시스템의 진화 역사에서 산소, 탄소, 물의 순환 과정으로 지권, 기권, 수권의 변화를 추적할 수 있다.
- 암석의 순환 과정에서 화산 활동의 역할과 화산 활동으로 생성되는 암석의 특성을 추론할 수 있다.
- 지진파를 이용해 지구 내부 구조를 알아내는 과정을 탐구할 수 있다.

**가치·태도**

- 지구시스템의 상호작용을 이해하며 우리 삶의 터전인 지구의 소중함을 인식할 수 있다.

**창의적 문제해결** 지구시스템의 소중함을 알리는 예술 작품 고안하기



# 01

## 지구의 형성 과정

### 학습 목표

- 태양계 성운에서 태양계가 형성되는 물리적 과정을 설명할 수 있다.
- 지구의 탄생 이후 지구시스템 각 권역의 형성 과정을 추론할 수 있다.



우주에서 지구를 보면 바다와 육지, 구름, 얼음 등이 파란 유리구슬 속에 들어있는 것처럼 보인다. 이러한 모습의 지구는 언제, 어떤 과정을 거쳐 형성되었을까?

### 태양계의 형성

지구를 포함한 태양계 천체들은 우리은하 나선팔에서 수소, 헬륨 등이 모여 이루어진 거대한 성운이 뭉쳐져 형성된 것으로 알려져 있다. 약 50억 년 전 초신성 폭발로 발생한 충격으로 우리은하에 있던 거대한 성운이 수축해 **태양계 성운**이 형성되었다. 태양계 성운은 자체 중력으로 수축하며 서서히 회전하기 시작했고, 성운을 이루는 물질들이 점점 중심으로 모이면서 성운의 회전 속도가 빨라졌다. 이때 수축이 강하게 일어나는 중심부에는 성운을 이루는 물질의 대부분이 모였고, 바깥쪽에는 성운을 이루는 물질의 일부가 모여 납작한 원반이 형성되었다.

이후 태양계 성운이 계속 수축하면서 중심부가 가열되었고, 주변의 기체와 먼지를 끌어들이며 성장해 밀도가 큰 **원시 태양**이 되었다. 원시 태양은 계속된 중력 수축으로 중심부의 온도가 상승했고, 결국 수소 핵융합 반응이 일어나는 온도에도 달하면서 스스로 빛을 내는 태양이 되었다.

태양계의 재료가 되는 물질의 형성 과정은 통합과학1에서 배웠다.

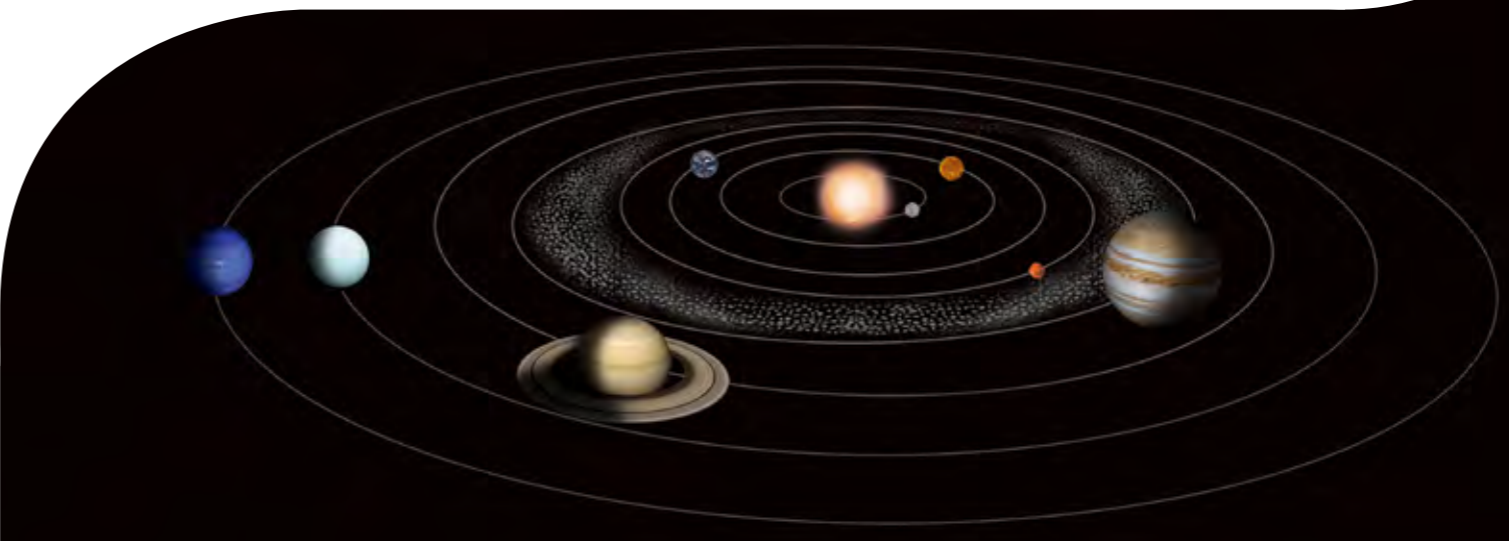
### 과학 잇기 물리학

성운의 회전 속도가 빨라진 까닭 각운동량은 회전하는 물체의 운동량으로, 외부로부터 힘이 작용하지 않으면 물체의 각운동량은 일정하게 보존된다. 이에 따라 물체의 질량이 일정하면 회전 속도는 물체와 회전 반지름에 반비례한다. 성운이 수축해 회전 반지름이 작아지면 각운동량 보존 법칙에 따라 회전 속도가 빨라진다.

태양계 성운의 온도가 서서히 낮아지면서 회전하던 원반 내의 물질들은 한데 엉겨 붙어 고체 입자가 형성되었다. 이 고체 입자들이 충돌하고 합쳐지면서 서로 다른 크기의 수많은 **미행성체**가 형성되었고, 미행성체들이 원시 태양의 주위를 공전하며 서로 충돌하고 뭉쳐져 **원시 행성**이 형성되었다.

원시 태양 부근의 원반 안쪽은 원시 태양에 가까워 온도가 높았기 때문에 가볍거나 휘발성이 있는 성분은 대부분 날아갔고, 철, 니켈 등의 금속 물질이나 규산염 물질과 같은 무거운 성분의 미행성체가 형성되었다. 그 결과 태양과 가까운 곳에는 암석으로 이루어지고 밀도가 크며 질량이 작은 **지구형 행성**이 형성되었다.

원시 태양에서 먼 원반 바깥쪽은 온도가 낮았기 때문에 기체와 얼음 상태의 입자들이 분포해 있었다. 얼음 상태의 입자가 암석 성분의 먼지와 합쳐져 미행성체가 형성되었고, 미행성체가 성장할 때 주변의 기체 물질을 끌어모았다. 그 결과 태양에서 먼 곳에는 밀도가 작고 질량이 큰 **목성형 행성**이 형성되었다.



태양과 가까운 곳에 지구형 행성이 형성되었고, 태양에서 먼 곳에 목성형 행성이 형성되었다.

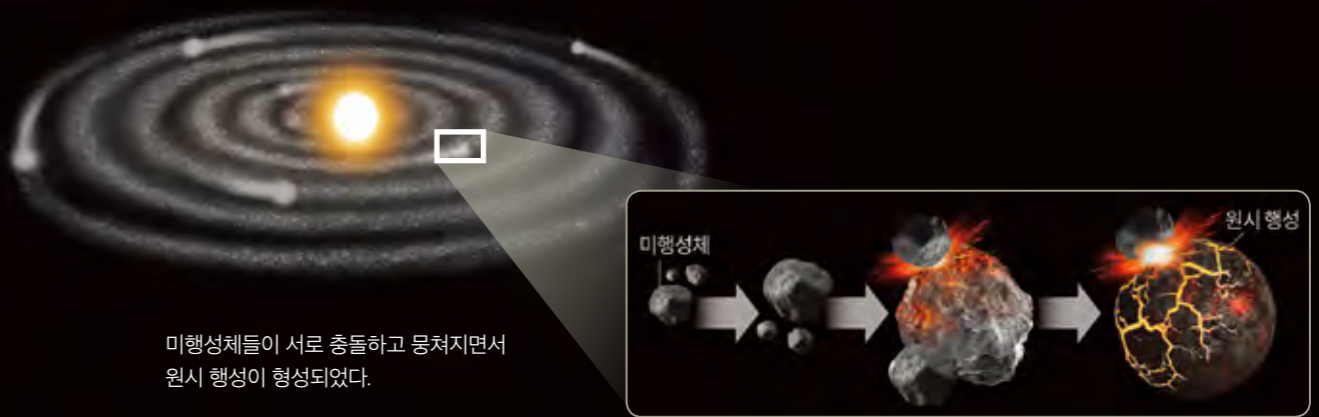
그림 I-1 태양계의 형성 과정 태양계는 거대한 성운이 응축, 집적, 분화되는 과정을 거쳐 형성되었다.



거대한 성운이 수축해 태양계 성운이 형성되었다.

태양계 성운이 자체 중력으로 수축하면서 회전하기 시작했다.

태양계 성운의 중심부에는 원시 태양이 형성되었고 바깥쪽에는 납작한 원반이 형성되었다.



미행성체들이 서로 충돌하고 뭉쳐지면서 원시 행성이 형성되었다.



과학 잇기 **물리학**

방사성 동위원소가 붕괴할 때 열이 발생하는 까닭

원시 지구를 구성하는 암석과 금속에는 우라늄, 칼륨, 토륨 등 방사성 동위원소가 포함되어 있다. 방사성 동위원소는 시간이 지나면 붕괴되면서 질량이 줄어든다. 이때 줄어든 질량에 해당하는 열에너지가 발생한다.

**지구의 진화**

원시 지구는 형성된 이후에도 미행성체가 계속 충돌해 크기가 점점 더 커졌다. 이때 미행성체의 충돌로 발생한 열, 지구 내부에서 방사성 동위원소의 붕괴로 발생한 열 등에 의해 원시 지구의 온도가 점점 높아졌다. 이에 따라 원시 지구를 이루던 물질이 대부분 녹아 **마그마 바다**가 형성되었다.

마그마 바다가 형성된 뒤 철과 니켈 등 밀도가 큰 금속 물질은 지구 중심부로 가라앉아 핵이 되었고, 상대적으로 밀도가 작은 규산염 물질은 바깥쪽으로 떠올라 맨틀이 되었다. 이렇게 지구 내부는 핵과 맨틀이 분리된 층상 구조를 이루게 되었다.

이후 미행성체의 충돌이 줄어들면서 지구 표면이 서서히 식었고, 지구 표면의 온도가 암석의 용융점 이하로 내려가면서 맨틀 위에 얇은 **원시 지각**이 형성되었다. 대부분 마그마 상태였던 지구 내부도 점차 식어서 고체 상태의 맨틀이 되었으며, 핵은 액체 상태인 외핵과 고체 상태인 내핵으로 나뉘어졌다. 또 마그마 바다가 냉각되는 과정에서 대규모의 화성암이 형성되었고, 이때의 지구는 거대한 화성암 위주의 암석질 물질이 철과 니켈이 주성분인 핵을 감싼 형태였다.

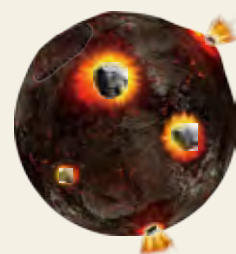
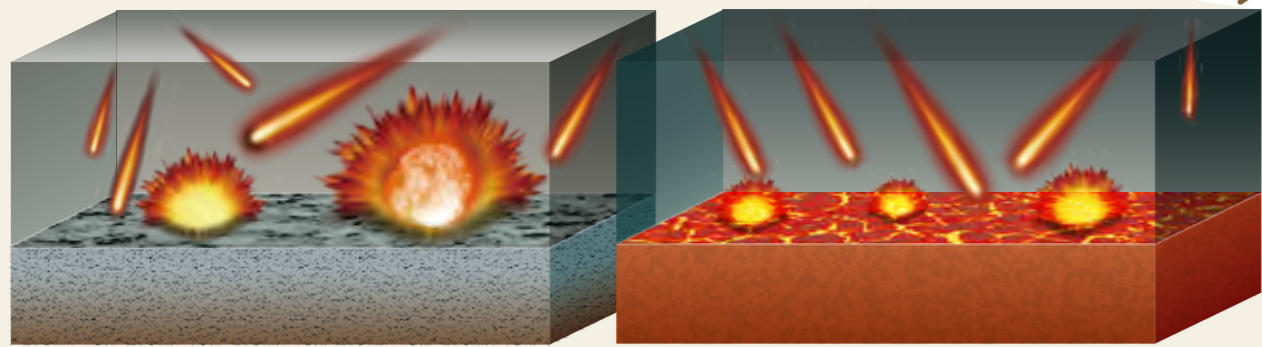
원시 지구가 진화하는 과정에서 화산 활동이 활발하게 일어났고, 대량의 화산 가스가 방출되어 **원시 대기**가 형성되었다. 수증기와 이산화 탄소 등으로 이루어진 원시 대기의 성분은 오늘날의 대기과 큰 차이가 있었으며, 이때는 수증기와 이산화 탄소 등이 온실 효과를 일으켜 지구의 기온이 매우 높았다.

지구 표면이 충분히 식은 뒤 원시 대기에 포함된 수증기가 응결해 많은 양의 비가 내렸고, 빗물이 낮은 곳에 모여 **원시 바다**가 형성되었다. 이후 해저 화산 활동으로 방출된 염소, 황 등이 바닷물에 녹아들었고, 육지에서 나트륨, 마그네슘, 칼슘 등이 빗물과 강물에 녹아 바다로 운반되었다. 이에 따라 바닷물의 염분이 점차 증가했다. 또 대기 중의 이산화 탄소가 바닷물에 녹아들면서 농도가 낮아졌다.

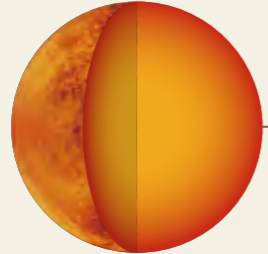
약 35억 년 전에는 바다에서 광합성을 하는 생명체가 출현해 산소가 생성되기 시작했고, 약 25억 년 전부터 산소가 대기로 방출되어 기권에 축적되기 시작했다. 대기 중 산소의 농도가 높아지면서 형성된 오존층이 자외선을 흡수해 바다뿐만 아니라 육지에서도 생명체가 살아갈 수 있는 환경이 조성되었다.

이처럼 원시 지구가 탄생한 이후 지권, 기권, 수권, 생물권이 형성되었고, 지구는 각 권역이 활발하게 상호작용하는 역동적 행성으로 진화했다.

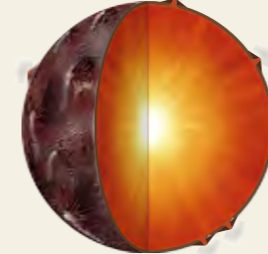
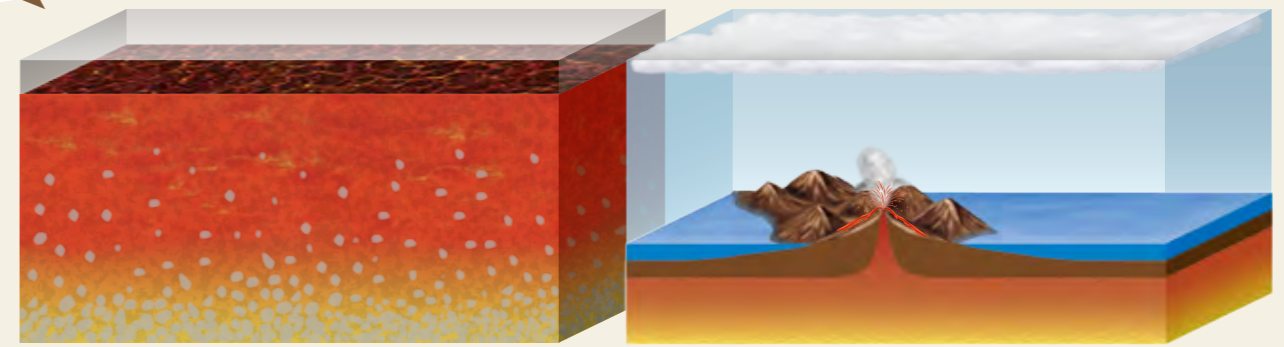
그림 I-2 지구의 진화 과정



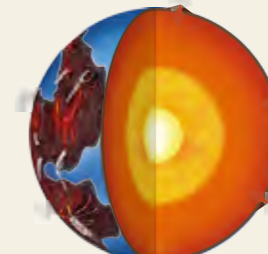
**미행성체 충돌**  
원시 지구에 미행성체가 계속 충돌해 크기가 점점 커졌다.



**마그마 바다 형성**  
미행성체의 충돌 열 등으로 원시 지구의 대부분이 녹아 마그마 바다가 형성되었다.



**핵과 맨틀의 분리**  
철, 니켈 등의 물질은 지구 중심부로 가라앉아 핵이 되었고, 규산염 물질은 위로 떠올라 맨틀이 되었다.



**원시 지각과 원시 바다의 형성**  
지구 표면이 식어 원시 지각이 형성되었고, 대기 중의 수증기가 응결해 비로 내려 원시 바다가 형성되었다.



자료 분석 및 해석 / 결론 도출 및 일반화

탐구 능력 | 의사결정 능력

## 지구가 역동적 행성으로 진화한 이유를 다른 고체 행성의 진화 과정과 비교하기

### 목표

지구가 역동적 행성으로 진화한 까닭을 금성, 화성의 진화 과정과 비교해 추론할 수 있다.

### 과정

표는 금성, 지구, 화성의 특징을 나타낸 것이다.

(출처: 《지구의 이해》, 2018.)

구분	금성	지구	화성
행성의 표면과 내부 구조			
	■ 지각	■ 맨틀	■ 핵
			I 암석권
태양과의 거리(지구=1)	0.73	1	1.54
반지름(지구=1)	0.95	1	0.53
질량(지구=1)	0.81	1	0.11
대기압(지구=1)	95	1	0.01
주요 대기 성분	이산화 탄소	질소, 산소	이산화 탄소
평균 표면 온도	480 °C	15 °C	-63 °C
액체 상태의 물의 존재	없음.	있음.	거의 없음.

- 1 금성, 지구, 화성에 각각 어떤 권역이 존재하는지 조사한다.
- 2 행성의 진화 과정에서 태양과의 거리, 행성의 크기, 질량, 대기 성분 등이 각 행성의 권역 형성에 어떤 영향을 주었는지 토의한다.

### 결과 및 정리

1. 금성, 지구, 화성에 존재하는 권역들을 쓰고, 각 행성의 특징이 행성의 권역 형성에 어떤 영향을 주었는지 설명해 보자.
2. 지구가 역동적 행성으로 진화한 까닭을 금성, 화성의 진화 과정과 비교하여 설명해 보자.

금성, 지구, 화성과 같은 지구형 행성은 모두 과거에 행성 내부의 대부분이 녹았다가 진화 과정에서 구성 물질의 밀도에 따라 여러 층으로 분화되었다. 그러나 오늘날 지구형 행성이 각각 다른 모습으로 진화한 까닭은 무엇일까?

행성의 크기는 행성의 지질 활동에 영향을 준다. 크기가 큰 행성의 내부 온도는 크기가 작은 행성보다 더 오랫동안 높게 유지된다. 행성의 내부가 맨틀 대류를 일으킬 수 없을 정도로 식으면 화산 활동이나 판의 이동과 같은 지질 활동이 발생하지 않는다. 상대적으로 크기가 큰 지구와 금성은 여전히 내부 온도가 높아 현재까지도 지질 활동이 활발하게 발생하고 있지만, 상대적으로 크기가 작은 화성은 내부에 남아 있는 열이 적어 지질 활동이 거의 발생하지 않는다.

행성의 질량은 대기의 유지와 관련이 있다. 상대적으로 질량이 큰 지구와 금성은 화산 활동으로 방출된 화산 가스를 붙잡아 둘 수 있어 현재까지 대기를 유지하고 있다. 반면 화성은 상대적으로 질량이 작아 대기를 유지하기 어려웠고 현재는 대기가 매우 희박하다. 행성의 대기와 더불어 태양과 행성 사이의 거리는 액체 상태의 물의 존재 여부에 영향을 준다. 지구보다 태양과 가까운 금성은 지구보다 표면 온도가 높아 액체 상태의 물이 증발해 사라지고, 대기 중에 이산화 탄소만 남게 되었다. 이 때문에 강한 온실 효과가 일어나 기온이 더욱 높아져 금성에는 액체 상태의 물이 존재할 수 없었다. 지구보다 태양에서 먼 화성은 지구보다 표면 온도가 낮고 대기가 희박해 액체 상태의 물이 얼거나 수증기로 증발해 사라졌다.

생명체의 존재 여부도 행성의 진화와 관련이 있다. 지구에서는 생명체가 광합성을 하면서 이산화 탄소를 흡수하고 산소를 방출해 다양한 생명체가 탄생할 수 있는 터전을 형성했다.

지구는 다른 지구형 행성과 달리 행성의 크기, 질량, 태양과의 거리, 생명체의 존재 여부 등의 다양한 조건이 지권, 기권, 수권, 생물권의 활발한 상호작용에 기여하며 역동적 행성으로 진화할 수 있었다.

#### 행성의 크기와 지질 활동

행성의 크기가 작아 빨리 식으면 단단한 암석권의 두께가 두꺼워져 마그마가 지표로 분출되기 어렵고, 판을 움직이는 힘이 커져서 지질 활동이 발생하기 어렵다.

#### 스스로 확인하기

- 1 태양계 성운에서 태양계가 형성된 물리적 과정을 설명해 보자.
- 2 지구의 진화 과정에서 지구시스템을 구성하는 각 권역이 형성된 과정을 설명해 보자.
- 3 | 창의력 더하기 | 수성이 역동적 행성으로 진화하지 못한 까닭을 지구의 진화 과정과 비교하여 설명해 보자.



수성

- 준비물  스마트 기기

#### 스스로 평가하기

[지식·이해] 지구가 역동적 행성으로 진화한 까닭을 설명할 수 있는가? ☆☆☆

[과정·기능] 자료를 조사하고 분석한 결과를 바탕으로 하여 지구, 금성, 화성의 진화 과정을 비교했는가? ☆☆☆

[가치·태도] 다른 고체 행성과 비교해 가장 역동적 행성으로 진화할 수 있었던 지구의 가치를 인식했는가? ☆☆☆

한결음  탐구 과정에서 보낼 점이나 더 알아보고 싶은 내용을 자유롭게 써 보자.

# 02

## 생명체와 지구시스템의 상호작용

**학습 목표** 지구시스템이 진화해 온 역사에서 산소, 탄소, 물의 순환 과정을 통해 지권, 기권, 수권이 변화해 왔음을 추적할 수 있다.

자철석이나 방해석은 지구의 형성 초기에는 없었지만 산소를 발생시키는 생명체가 출현해 생성될 수 있었다. 생명체와 지구시스템은 어떤 영향을 주고받으며 진화해 왔을까?



### 지구의 진화와 지구시스템의 상호작용

생명체와 지구시스템을 이루는 권역들의 상호작용은 태양계의 다른 행성에서 찾아볼 수 없는 지구만의 특징이다. 지구시스템의 진화 과정에서 생명체와 지구시스템은 어떻게 영향을 주고받으며 변화해 왔는지 알아보자.

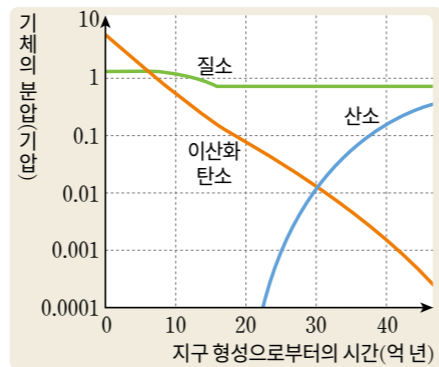
### 해보기

#### 지구 대기의 조성 변화 분석하기

문제해결 능력

그림은 지구의 탄생 이후 지구 대기를 구성하는 주요 기체의 조성 변화를 나타낸 것이다.

1. 대기 중 질소, 이산화 탄소, 산소의 비율은 시간에 따라 어떻게 달라졌는지 설명해 보자.
2. 이와 같은 대기의 조성 변화가 나타난 까닭을 설명해 보자.



원시 지구 대기의 조성은 오늘날의 대기와 크게 달랐다. 원시 지각이 형성된 뒤 계속된 화산 활동으로 수증기, 이산화 탄소, 질소 등이 대기에 공급되어 원시 대기를 이루었고, 산소는 거의 존재하지 않았다. 원시 대기의 성분 중 가장 많은 양을 차지했던 수증기는 응결해 비로 내려 원시 바다를 형성했고, 이산화 탄소의 농도는 원시 바다가 형성된 뒤 급격하게 감소했다. 산소의 농도는 바다에서 생물이 광합성을 하면서 높아지기 시작했다.

지권, 기권, 수권, 생물권 등 지구시스템 내에서 물질이 이동하며 순환하는 현상을 물질의 순환이라고 한다. 지구시스템이 진화해 온 역사를 살펴보면 산소, 탄소, 물과 같은 물질의 순환을 통해 지권, 기권, 수권이 변화해 왔음을 알 수 있다.

### 산소의 순환

산소는 규산염 광물과 산화 광물의 형태로 지각과 맨틀에 가장 많이 들어 있지만 고체 상태로 고정되어 있다. 따라서 산소의 순환을 일으키는 주된 요인은 생물의 광합성이다.

원시 바다에 광합성 생물이 출현하기 전에는 바닷물 속 산소의 농도가 낮아 철이 바닷물에 녹아 있었다. 약 35억 년 전 원시 바다에서 최초의 광합성 생물인 남세균이 출현해 광합성을 하면서 바다로 산소를 방출하기 시작했다. 이 산소는 바닷물에 녹아 있던 철과 반응해 자철석이나 적철석과 같은 철 산화 광물이 생성되는 데 쓰였다. 이러한 광물은 퇴적물과 함께 해저에 침전되어 그림 I-3과 같이 호상철광층을 형성했다.

**남세균과 스트로마톨라이트**  
남세균에 의해 만들어진 퇴적 구조를 스트로마톨라이트라고 한다. 스트로마톨라이트의 단면에는 남세균과 퇴적물이 쌓여 만들어진 층리가 나타난다.



산소는 규산염 광물이 생성되는 데에도 쓰였는데, 해저에서 산화 철 성분과 규질 성분이 많은 층이 번갈아 퇴적되며 얇은 띠 모양의 호상철광층이 형성되었어요.

그림 I-3 호상철광층 진한 붉은색 부분이 철 산화 광물이 풍부한 층이다.

이러한 과정은 산소가 생물권에서 발생해 수권과 지권을 순환한 결과로, 바닷물에 녹아 있던 철의 대부분이 없어질 때까지 계속되었으며 이후 바다와 대기에 산소가 축적되기 시작했다.

이 밖에도 암석에 포함된 산소가 풍화 작용으로 방출되거나 해양 생물의 껍데기에 포함된 산소가 해저에 퇴적되어 석회암을 생성하는 등 산소는 여러 권역을 오가며 순환했다.

산소는 반응성이 큰 원소이므로 오랜 시간이 지나면 농도가 감소되어야 하지만, 생물의 광합성으로 대기 중에 산소가 지속적으로 공급되고 있다. 오늘날 광합성을 하는 생물이 산소를 발생시키면 생물의 호흡이나 화학 작용을 통해 대기 중 산소의 농도가 일정하게 유지되고 있다.

## 탄소의 순환

탄소는 지구시스템의 각 권역에 다양한 형태로 존재하며, 각 권역의 상호작용이 일어나는 과정에서 끊임없이 순환한다.

원시 대기의 주요 성분인 이산화 탄소는 원시 바다가 형성된 뒤 농도가 급격하게 감소했다. 대기 중의 이산화 탄소는 탄산 이온의 형태로 바닷물에 녹아 들어간 뒤 칼슘 이온과 반응해 탄산염으로 해저에 침전되거나 해양 생물체에 흡수되어 석회암의 형태로 지권에 고정되었다. 이 과정에서 대기의 조성이 변했을 뿐만 아니라 바닷물의 성분이 변했고, 그림 I-4와 같이 지권에 대규모의 석회암 퇴적층이 형성되었다.



그림 I-4 석회암 퇴적층 탄산염과 조개류, 유공충 등의 석회질 껍데기가 쌓여 만들어진 석회암 퇴적층은 탄소를 기권이나 수권으로부터 격리해 오랫동안 지권에 저장하는 역할을 한다.

현재 지구에서는 암석의 풍화, 침식 작용으로 바닷물에 유입된 칼슘 이온이 바닷물에 녹아 있는 탄산 이온과 반응해 석회암이 생성되기 때문에 자연적 원인으로서는 대기 중 이산화 탄소의 농도가 크게 높아지지 않는다. 그러나 과거 지구 전체

가 두꺼운 얼음으로 덮인 얼음덩어리 지구 상태였던 시기에는 대기 중의 이산화 탄소가 바다에 녹는 과정이 중단되어 이산화 탄소의 농도가 계속 상승했다. 계속된 화산 활동으로 발생한 이산화 탄소가 온실 효과를 일으켜 지구의 평균 온도를 크게 상승시켰고, 그 결과 전 지구를 덮고 있던 얼음이 녹게 되었다. 이후 액체 상태의 바다에 대기 중의 이산화 탄소가 녹아 농도가 낮아졌고, 그 과정에서 그림 I-5와 같이 빙하 퇴적층 위에 두꺼운 석회암층이 형성되기도 했다.



그림 I-5 석회암층과 빙하 퇴적층

얼음덩어리 지구는 지구 표면이 모두 눈과 얼음으로 덮여 지구가 커다란 얼음덩어리처럼 보이는 상태예요.

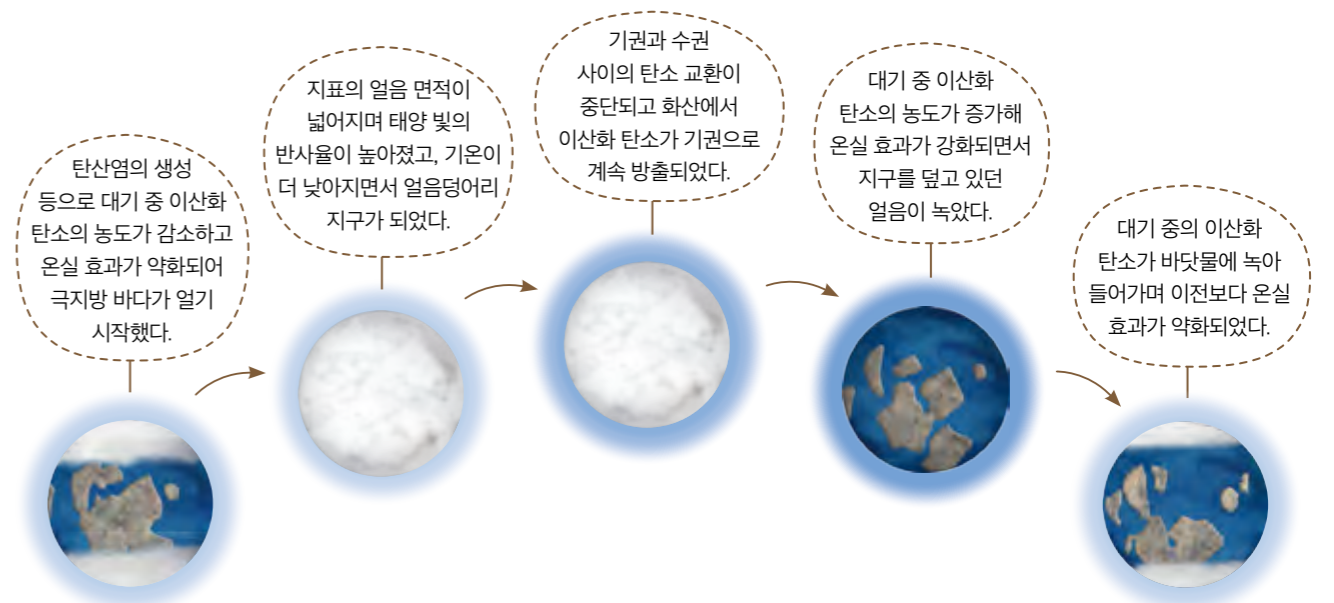


그림 I-6 탄소의 순환과 얼음덩어리 지구의 생성, 소멸 과정

탄소의 순환이 지구의 온도 변화에 영향을 주는 과정은 지권, 기권, 수권뿐만 아니라 생물권에도 큰 영향을 주었다. 선캄브리아시대 말기에 얼음덩어리 지구 상태가 되기 전에는 지구에 단세포 생물이 주를 이루고 있었다. 얼음덩어리 지구 상태를 거치고 온난해진 지구에서는 생명체가 다양하게 진화할 수 있는 환경이 조성되어 다양한 다세포 생물이 출현할 수 있었다.

### 자료실 얼음덩어리 지구와 다세포 생물의 출현

얼음덩어리 지구가 생성된 원인은 명확하게 밝혀지지 않았지만 약 23억 년 전, 약 7억 년 전, 약 6억 5천만 년 전에 얼음덩어리 지구 상태였던 시기가 있었다는 것은 사실로 받아들여지고 있다.

6억 3500만 년 전부터 독특하게 생긴 다양한 다세포 생물이 출현했는데, 이러한 생물들이 나타나게 된 것은 얼음덩어리 지구 상태에서 벗어나는 과정과 밀접한 관련이 있다. 얼음덩어리 지구 상태에서도 해저 화산 활동이 일어나고 있었으며 생명체의 영양분이 되는 물질이 바다에 축적되었다. 얼음덩어리 지구 상태에서 벗어난 뒤 온난해진 지구에서는 이산화 탄소와 영양 물질이 풍부해 광합성을 하는 생물이 빠르게 성장할 수 있었고, 이에 따라 지구상 산소의 농도가 빠르게 상승했다. 이후 지구상의 생명체는 산소를 이용해 다양하게 진화할 수 있었다.

이렇게 진화한 다세포 생물의 화석은 여러 지역에서 발견되었으며, 특히 호주 남부의 에디아카라 지역에서 많이 발견되었다. 이 지역의 이름을 따서 이 시기에 출현했던 다세포 생물의 무리를 에디아카라 생물군이라고 부른다.



에디아카라 생물군 중 하나인 디킨슨리아 화석

## 물의 순환

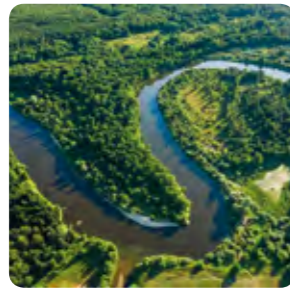
물은 지권, 기권, 수권, 생물권에 다양한 형태로 존재하며, 물의 대부분은 바다에 있다. 육지의 물은 대부분 빙하의 형태로 존재하며, 지하나 하천, 호수 등에 분포하고 토양이나 퇴적물 속에도 포함되어 있다. 기권에서 물은 수증기의 형태로, 생물권에서는 생명체를 구성하는 성분으로 존재한다.

물은 기체, 액체, 고체로 상태가 변하면서 지구시스템의 각 권역 사이를 끊임없이 순환하며, 이 과정에서 지권의 변화에 영향을 준다. 다음 활동에서 물의 순환이 지형의 형성에 주는 영향을 알아보자.

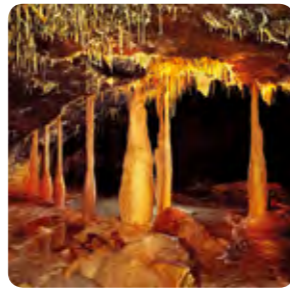
### 해보기

#### 물의 순환에 의한 지형의 형성 과정 추론하기

그림은 여러 가지 지형의 모습이다.



곡류



석회 동굴



해식 동굴

1. 각 지형의 형성 과정을 추론해 보자.
2. 물의 순환이 지형의 형성에 주는 영향을 설명해 보자.

바다와 육지의 물이 증발하거나 식물의 증산 작용에 의해 대기 중으로 이동한 수증기는 응결해 구름을 생성하고 강수의 형태로 지표에 떨어진다. 이렇게 육지로 이동한 물의 일부는 지표면을 따라 낮은 곳으로 이동하면서 하천이나 지하수를 형성해 바다로 이동하고, 일부는 빙하가 되기도 한다. 이러한 물의 순환 과정에서 발생하는 다양한 작용은 지권을 끊임없이 변화시킨다.

지표를 흐르는 물은 지표의 경사에 따라 유속이 달라지면서 풍화, 침식, 운반, 퇴적 작용을 일으켜 다양한 지형을 형성한다. 또 석회암 지대에서 지하로 스며 들어간 물은 석회 동굴을 형성한다. 바닷가에서는 바닷물이 침식, 퇴적 작용을 일으켜 해식 절벽이나 해빈 등의 지형을 형성한다. 빙하가 있는 지역에서는 빙하가 중력에 의해 낮은 곳으로 이동하면서 침식, 운반, 퇴적 작용을 일으키며 지형을 형성한다.



그림 1-7 물의 순환 과정에서 형성되는 다양한 지형

물의 순환 과정에서 비나 눈, 태풍과 같은 여러 기상 현상이 일어나며, 물의 증발량과 강수량은 기후에 영향을 준다. 하천이나 바다의 물은 수중 생물의 서식처가 되고, 토양으로 스며든 물은 식물의 광합성에 쓰이는 등 생물의 생명 유지에도 중요한 역할을 한다. 오늘날 우리가 경험하는 여러 자연 현상은 물의 순환 과정에서 일어나는 지구시스템 권역들의 상호작용에 의한 결과이다.

약 46억 년 전 지구가 탄생한 이래로 지권, 기권, 수권이 서로 영향을 주고받는 과정에서 생명체가 발생할 수 있는 환경이 조성되었고, 이후 생명체는 지구시스템과 영향을 주고받으며 함께 진화해 왔다. 산소, 탄소, 물의 순환 과정은 생명체와 지구시스템의 긴밀한 상호작용을 보여 주는 예이다. 즉 지구의 역사는 생명과 행성이 공진화해 온 시간의 기록이라고도 할 수 있다.

● **공진화**  
밀접한 관계를 가지는 둘 이상의 대상이 상대방의 진화에 서로 영향을 주고받으며 함께 진화하는 현상이다.

#### 스스로 확인하기

- 1 약 35억 년 전부터 바다에서 남세균이 산소를 방출했지만 대기 중 산소의 농도는 이 시기에 바로 증가하지 않았다. 그 까닭을 설명해 보자.
- 2 지구가 얼음덩어리 지구 상태에서 벗어날 수 있었던 과정을 탄소의 순환과 관련지어 설명해 보자.
- 3 | 창의력 더하기 | 지구 환경과 생명체를 주제로 하는 시를 지어 발표해 보자.



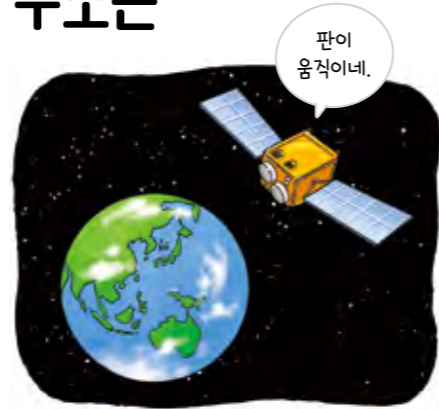
# 03

## 판 구조론의 발달사와 플룸 구조론

학습 목표

- 판 구조론의 정립 과정을 설명할 수 있다.
- 판을 움직이는 맨틀의 상부 운동과 플룸에 의한 구조 운동을 구분할 수 있다.

우리는 판의 움직임을 느낄 수 없지만 인공위성을 이용한 범지구위성정위시스템(GPS)으로 판이 움직이는 방향이나 속도를 알 수 있다. 판을 움직이는 힘은 무엇일까?



### 판 구조론의 발달

지구에서는 대륙의 이동, 해양 지각의 생성과 소멸, 대규모 습곡 산맥이나 호상 열도의 형성, 지진, 화산 활동 등의 지질 현상이 일어난다. 판 구조론이 정립되면서 독립적으로 발생한다고 여겨지던 지질 현상들을 종합적으로 설명할 수 있게 되었다.

### 대륙 이동설 >>

베게너는 대서양을 사이에 두고 있는 남아메리카 대륙과 아프리카 대륙의 해안선 모양이 잘 들어맞는다는 점에서 두 대륙이 원래 하나로 붙어 있었다고 생각했고, 이를 뒷받침하는 증거를 수집했다. 이후 1912년 베게너는 약 3억 년 전에 판게아라는 초대륙이 존재했고, 약 2억 년 전부터 판게아가 분리되고 이동해 오늘날과 같은 수륙 분포가 이루어졌다는 **대륙 이동설**을 주장했다.

베게너는 그림 I-8과 같이 대륙 이동에 관한 여러 가지 과학적인 증거를 제시했다. 하지만 대륙 이동의 원동력을 제대로 설명하지 못했기 때문에 대부분의 과학자는 대륙 이동설을 받아들이지 않았다.

<p>해안선 유사성, 지질 구조 연속성 대륙의 해안선 모양과 산맥의 지질 구조, 암석 구성이 유사하다.</p>	<p>고생물 화석 분포의 연속성 멀리 떨어진 여러 대륙에서 발견된 화석의 분포가 연속적으로 이어진다.</p>	<p>빙하의 흔적 각 대륙에 남아 있는 빙하의 흔적과 이동 방향이 남극을 중심으로 분포한다.</p>

그림 I-8 베게너가 제시한 대륙 이동설의 증거

**맨틀 대류설 >>** 1929년 홀스는 방사성 동위원소가 붕괴해 생성된 열로 맨틀이 대류하는 과정에서 대륙이 이동한다는 **맨틀 대류설**을 발표했다.

맨틀 대류설에 따르면 그림 I-9와 같이 맨틀이 상승하는 곳에서는 대륙 지각이 분리되면서 새로운 섬과 해양이 형성된다. 또 맨틀이 하강하는 곳에서는 횡압력이 작용하면서 산맥이 형성되고 지각이 맨틀 속으로 들어간다. 그러나 당시의 탐사 기술로는 맨틀 대류를 확인할 수 없었기 때문에 홀스의 주장은 받아들여지지 않았다.

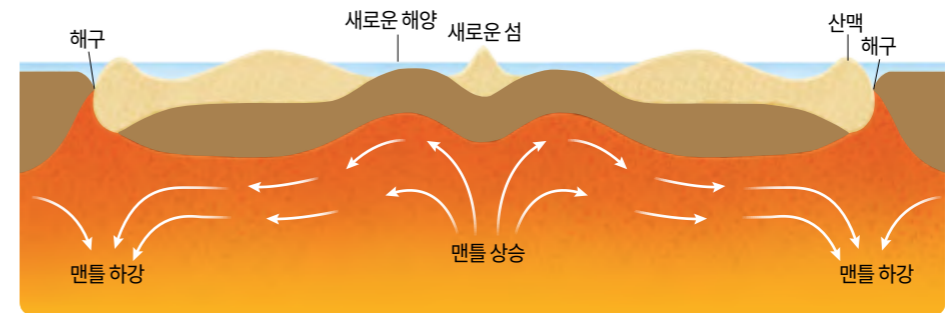


그림 I-9 맨틀 대류설

**해양저 확장설 >>** 대서양 중앙에 해저 산맥이 있다는 것은 오래전부터 알려져 있었지만, 이 산맥이 전 지구적으로 연결되어 있다는 것은 1900년대 초기에 음향 측심기를 이용한 해저 지형 탐사로 알아냈다. 이 탐사로 얻은 결과는 해양저 확장설이 등장하는 데 기초가 되었다.

**음향 측심법**은 해양 탐사선에서 발사한 음파가 해저면에서 반사되어 되돌아오는 데 걸리는 시간을 측정해 수심을 알아내는 방법으로, 이를 이용해 해저 지형의 모습을 자세히 알 수 있었다. 그림 I-10과 같이 육지에 가까운 대륙 주변부는 대륙붕, 대륙 사면 등으로 이루어져 있고, 육지에서 멀리 떨어진 심해저에는 심해저 평원, 해산, 화산섬, 해령 등이 분포한다는 것을 알아냈다. 특히 해령의 양쪽으로 멀어질수록 수심이 깊어진다는 것과, 수심이 급격하게 증가하는 해구가 존재한다는 것이 밝혀졌다.

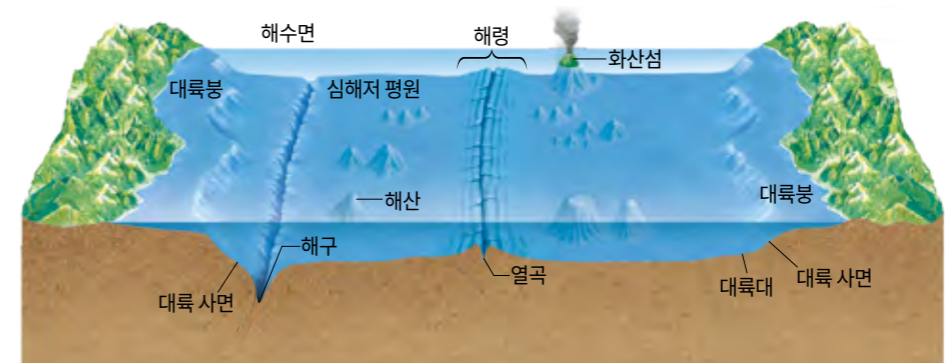


그림 I-10 해저 지형 모식도

**홀스 (Holmes, A., 1890~1965)**  
영국의 지질학자. 방사성 동위원소가 붕괴하면서 생성된 열로 맨틀이 용융된다는 것을 처음으로 주장했다. 이후 맨틀 대류로 대륙의 이동과 산맥의 형성 과정을 설명했다.

**음향 측심법으로 수심을 구하는 방법**  
음파가 해저면에서 반사되어 되돌아오는 데 걸린 시간을  $t$ , 음파의 평균 속력을  $v$ 라고 하면 수심은  $\frac{1}{2}vt$ 와 같다.



**디지털 탐색**  
GeoMapApp 누리집(<https://www.geomapapp.org>)에서 제공하는 애플리케이션에서 전 세계 해양의 수심을 확인할 수 있다.

1962년 헤스(Hess, H. H., 1906~1969)와 디츠(Dietz, R. S., 1914~1995)는 해저 지형을 관측한 자료를 바탕으로 하여 해양 지각을 생성하고 이동하는 힘의 근원에 대한 생각을 정리해 **해양저 확장설**을 발표했다. 해양저 확장설에 따르면 해령 아래에서 뜨거운 맨틀 물질이 올라와 새로운 해양 지각을 생성하고, 해양 지각은 맨틀 대류로 해령의 양쪽으로 이동하다가 해구에서 침강해 맨틀로 들어간다. 이러한 해양저 확장설의 대표적인 증거로는 해양 탐사로 측정한 암석의 고지자기와 해양 지각의 나이가 있다.

암석이 생성될 때 자성을 띠는 광물은 당시 지구 자기장의 방향에 따라 배열되는데, 이를 통해 암석에 남아 있는 고지자기 정보를 알아낼 수 있다. 1950년대에 자력계를 이용해 지구상에 분포하는 여러 암석의 고지자기를 조사한 결과, 과거 여러 차례에 걸쳐 **지자기 역전**이 일어났고 그림 I-11과 같이 정자극기와 역자극기가 대서양 중앙 해령을 중심으로 대칭적으로 나타난다는 것을 알게 되었다.

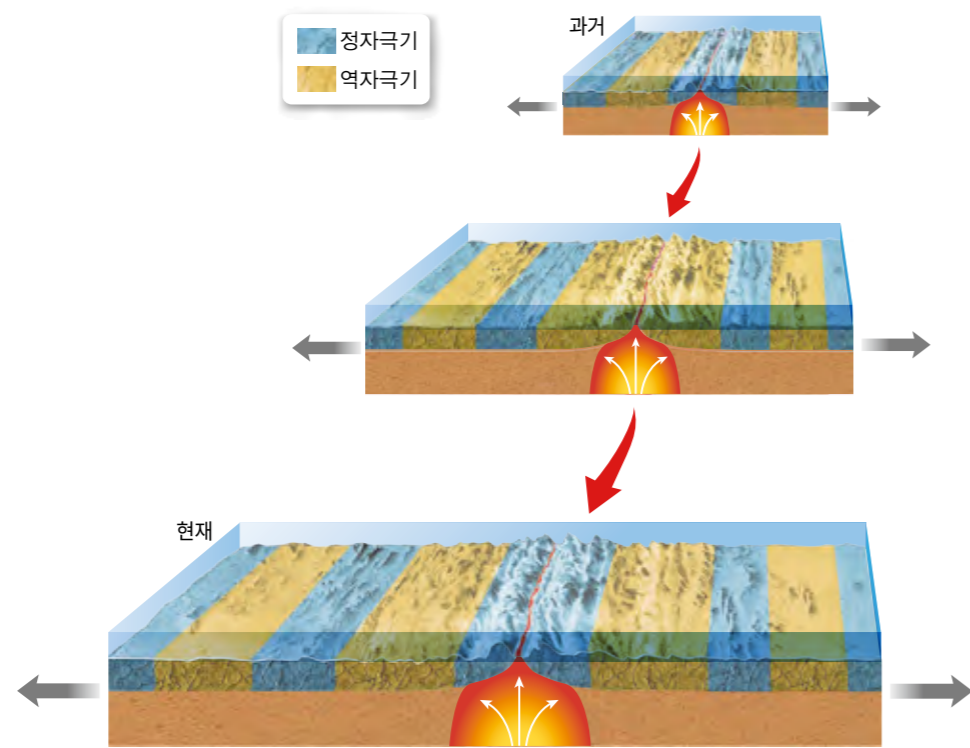


그림 I-11 해양저 확장고 고지자기 줄무늬

1963년 바인(Vine, F., 1939~)과 매슈스(Matthews, D., 1931~1997)는 해양 지각에서 나타나는 고지자기 줄무늬의 형성 원인을 해양저 확장설과 관련지어 설명했다. 고지자기 줄무늬가 해령을 중심으로 대칭적으로 나타나는 것은 해령에서 생성된 해양 지각이 당시 지구 자기장의 방향을 기록한 채 해령에서 양쪽으로 이동했다는 것으로, 이는 해양저 확장설을 뒷받침하는 중요한 증거가 되었다.

**암석의 고지자기**

용암이 식으면서 자성을 띠는 광물들이 생성 당시의 지구 자기장 방향으로 자화된다. 이에 따라 시대별 지자기 기록이 화산암에 그대로 보존된다.

**지자기 역전**

지구 자기장의 남극과 북극이 바뀌는 현상이다. 지자기의 극이 현재와 같은 방향으로 배열된 시기를 정자극기라고 하며, 현재와 반대 방향으로 배열된 시기를 역자극기라고 한다.

1960년대 후반에 심해저 시추로 대서양 중앙 해령을 가로지르며 해양 지각의 나이를 측정했다. 그 결과 해령에서 양쪽으로 멀어질수록 해양 지각의 나이가 대칭적으로 증가하며 퇴적물의 두께가 두꺼워진다는 것이 밝혀졌다. 이는 과학자들이 해양저 확장설을 받아들이는 결정적인 계기가 되었다. 그림 I-12는 전 세계 해양 지각의 나이 분포를 나타낸 것으로, 가장 오래된 해양 지각의 나이는 대부분 2억 년을 넘지 않는다. 이는 해양저 확장설에서 주장한 대로 해령에서 생성된 해양 지각이 이동하다가 해구에서 맨틀로 섭입해 소멸하기 때문이다.

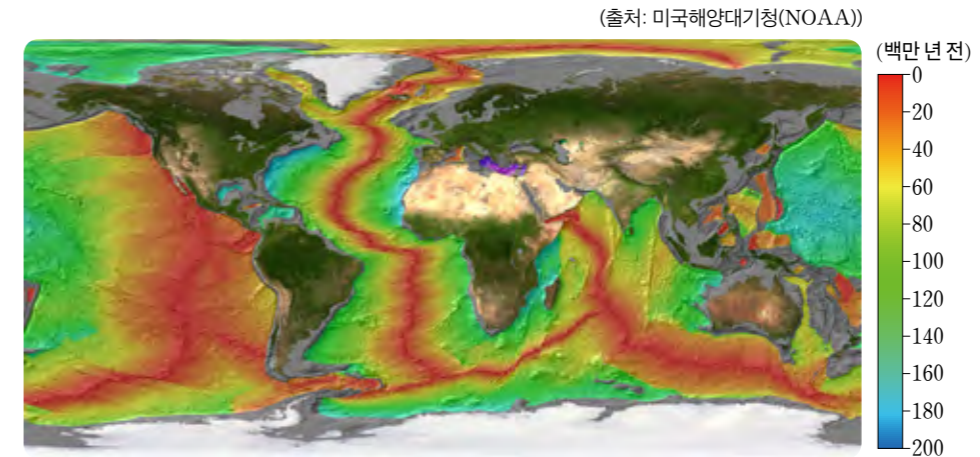


그림 I-12 전 세계 해양 지각의 나이 분포

해령으로부터 90 km 거리에 있는 지점의 해양 지각 나이가 360만 년이라면 이 해역에서 해양 지각의 평균 확장 속도(cm/년)는 얼마인가?

대서양의 경우 약 1억 8000만 년 전에 형성되기 시작해 이보다 오래된 해양 지각은 존재하지 않아요.

**판 구조론의 정립**

1950년대 후반 해저 지형 탐사로 대서양 중앙 해령이 연속적으로 이어진 구조가 아니라 수많은 단층으로 어긋나 있으며, 해령에서 시작된 단층이 양쪽으로 길게 발달해 있다는 것을 알아냈다. 1960년대 초 해저에서 발생한 지진 자료를 분석한 결과, 지진이 주로 해령과 해령 사이의 단층 구간에서 발생한다는 것을 알게 되었다. 1965년 윌슨은 이러한 해령과 해령 사이에 존재하는 단층을 새로운 형태의 단층이라고 생각해 **변환 단층**이라는 이름을 붙였다.

그림 I-13과 같이 해령에서 생성된 해양 지각이 서로 반대 방향으로 이동하는 변환 단층에서는 지진이 자주 발생하지만, 같은 방향으로 이동하는 구간에서는 지진이 거의 발생하지 않는다. 이러한 변환 단층의 발견은 판 구조론의 정립에 중요한 계기가 되었다.

**윌슨**  
(Wilson, J. T., 1908~1993)  
캐나다의 지질학자. 변환 단층이라는 용어를 처음으로 사용하고 변환 단층의 생성 원인을 밝혀 판 구조론 정립에 기여했다.

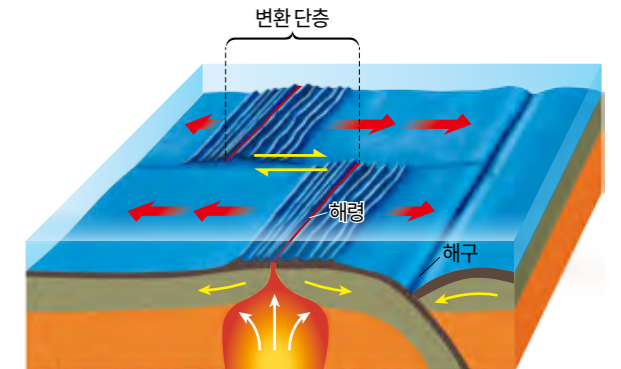


그림 I-13 변환 단층

**세계 표준 지진 관측망**  
전 세계 약 120 개의 지진 관측소로 이루어진 관측망이다. 관측소마다 동일한 장비를 갖추고 자료 수집과 자료 처리 방법을 표준화했다.

1960년대에는 세계 표준 지진 관측망을 구축해 전 지구적으로 지진이 발생한 위치와 깊이를 정확하게 측정할 수 있게 되었다. 그 결과 지진은 주로 해령, 변환 단층, 해구 주변에서 발생하며, 그림 I-14와 같이 해구에서는 섭입대를 따라 대륙 쪽으로 갈수록 지진이 발생하는 깊이가 더 깊어진다는 것을 알게 되었다. 이는 지진이 해양 지각의 생성, 이동, 소멸과 관련이 있다는 것을 의미하며, 특히 섭입대에서 발생한 지진의 특성은 해양 지각의 소멸을 설명하는 증거가 되었다.

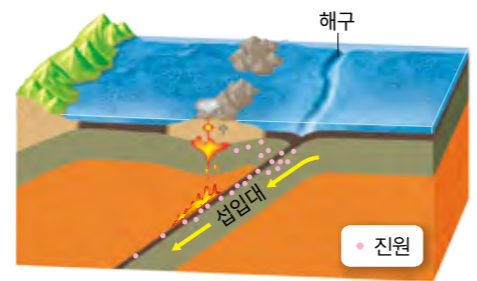


그림 I-14 해구 부근에서 발생하는 지진 해구 부근에서는 해양판이 맨틀로 섭입하는 과정에서 지진이 자주 발생한다.

**판 구조론에서 판의 구조**  
지각과 상부 맨틀의 일부를 포함하며 평균 두께가 약 100 km 이고 단단한 암석으로 이루어진 부분을 암석권이라고 한다. 암석권은 여러 개의 조각으로 나뉘어져 있는데 이를 판이라고 한다. 판 아래에는 고체이지만 유동성을 띠는 부분인 연약권이 있다.

1960년대 후반에는 아이작스(Isacks, B. L., 1936~)가 판은 지각과 상부 맨틀로 이루어져 있음을 밝혔고, 매켄지(McKenzie, D., 1942~), 모건(Morgan, W. J., 1935~2023) 등이 판 경계에서 나타나는 현상을 종합적으로 다룬 연구 결과들을 발표하며 오늘날과 같은 판 구조론이 정립되었다.

**판 구조론**은 그림 I-15와 같이 지구 표면이 10여 개의 크고 작은 판으로 구성되어 있으며, 판의 상대적인 운동으로 지진이나 화산 활동 등 여러 지질 현상이 일어난다고 설명하는 이론이다.

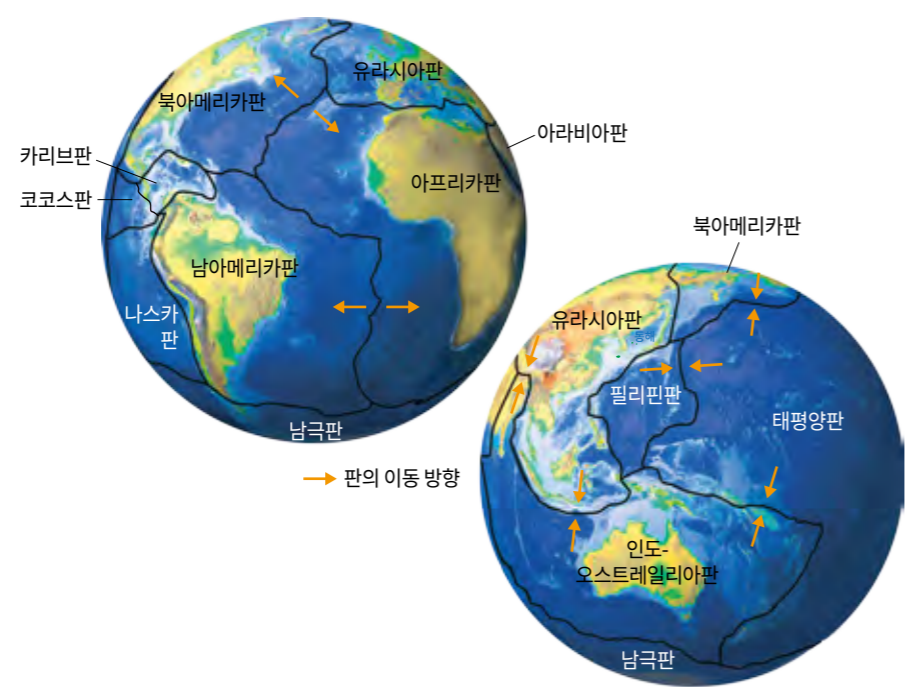
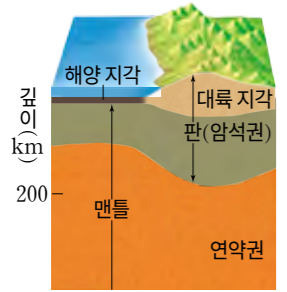


그림 I-15 판의 경계와 이동 방향

## 탐구 관측 기기의 발달과 관련지어 판 구조론 정립의 역사 추적하기

자료 수집 / 의사소통과 협업

### 목표

판 구조론 정립의 역사를 관측 기기의 발달과 관련지어 설명할 수 있다.

### 과정

그림은 판 구조론이 정립되는 과정에서 핵심적인 자료를 제공했던 관측 기기를 나타낸 것이다.



- 모둠별로 한 가지 관측 기기를 정한 뒤 해당 관측 기기가 판 구조론의 정립에 준 영향을 조사한다.
  - 모둠에서 정한 관측 기기의 발달 시기를 함께 조사한다.
- 각 모둠에서 조사한 자료를 발표하고 공유한다.
- 모둠별로 공유한 자료를 종합해 판 구조론 정립의 역사를 관측 기기의 발달과 관련지어 정보 그림으로 나타낸다.

### 결과 및 정리

- 판 구조론 정립의 역사를 관측 기기의 발달과 관련지어 설명해 보자.
- 창의** 판 구조론은 여러 가설이 등장한 뒤 과학적 증거에 기반한 검증 과정을 반복적으로 거치며 정립되었다. 새로운 관측 기기가 발달된다면 판 구조론의 발전에 어떤 영향을 줄지 토의해 보자.

### 스스로 평가하기

- 지식·이해** 판 구조론 정립의 역사를 관측 기기의 발달과 관련지어 설명할 수 있는가? ☆☆☆
- 과정·기능** 정보 그림을 나타내는 과정에서 판 구조론 정립의 역사와 직접적인 관련이 있는 자료를 바르게 수집하고 활용했는가? ☆☆☆
- 가치·태도** 판 구조론 정립에 과학기술의 발달이 어떤 영향을 주는지 인식했는가? ☆☆☆

준비물  스마트 기기

**활동 도우미**  
 • 모둠별로 조사한 결과를 공유 플랫폼을 이용해 다른 모둠과 공유한다.  
 • 정보 그림은 판 구조론의 정립에 이바지한 여러 과학자의 성과와 관측 기기를 중심으로 나타낸다.



**힌트** 탐구 과정에서 보완할 점이나 더 알아보고 싶은 내용을 자유롭게 써 보자.

### 판을 움직이는 맨틀의 상부 운동

과학기술이 발달하면서 최근에는 인공위성을 이용한 범지구위치결정시스템(GPS)으로 판의 분포나 이동 속도 등을 정밀하게 측정한다. 판은 일 년에 평균 수 cm 정도씩 움직이며 판마다 움직이는 방향과 속도는 서로 다르다. 판의 이동 속도는 매우 느리지만 오랜 시간에 걸쳐 판이 이동하면서 크고 작은 지각 변동을 일으킨다.

판 구조론 정립 초기에 과학자들은 상부 맨틀의 대류로 판이 수동적으로 이동한다고 생각했다. 즉 맨틀 물질이 상승하는 해령에서는 마그마가 분출해 새로운 해양 지각이 생성되고, 해양 지각은 맨틀 대류의 흐름을 따라 컨베이어 벨트처럼 양옆으로 이동한 뒤 해구에서 대륙판 아래로 섭입한다는 것이었다. 그러나 최근에는 판의 운동과 맨틀 대류가 상호작용하며, 그 과정에서 판의 움직임으로 맨틀 대류가 유발된다는 사실이 밝혀졌다. 판을 움직이는 능동적인 힘에는 섭입하는 판이 당기는 힘, 해령에서 미는 힘 등이 있는 것으로 설명한다.

해령에서 생성되어 해구까지 이동해 온 해양판은 차갑고 밀도가 커서 맨틀로 침강한다. 이때 침강하는 해양판의 무게는 판의 나머지 부분을 잡아당기는 힘으로 작용한다. 이처럼 섭입하는 판이 당기는 힘은 판을 움직이는 주요 원인이다.

해령의 중심부에서는 판이 중력에 의해 해령의 경사면을 따라 완만하게 미끄러져 내려간다. 이때 해령의 경사면을 미끄러져 내려가는 판의 무게는 해령에서 판을 미는 힘으로 작용한다. 이는 섭입하는 판이 당기는 힘보다 영향력이 작지만 판을 움직이는 원인이 된다.

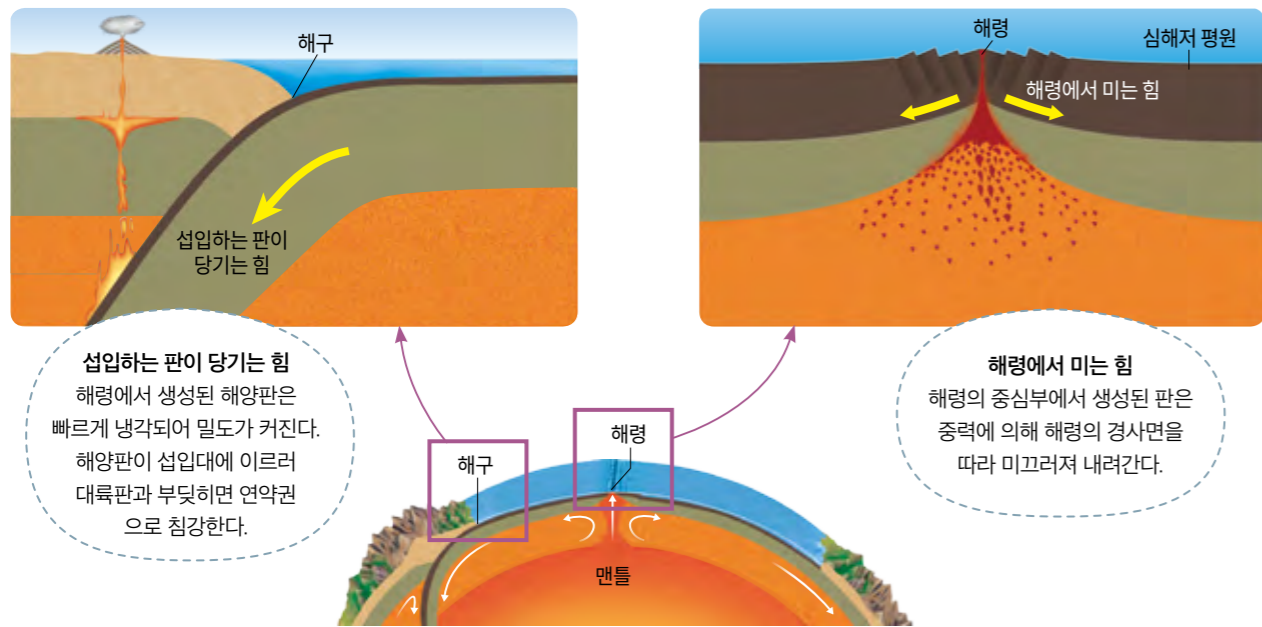


그림 I-16 판을 움직이는 능동적인 힘

### 플룸에 의한 구조 운동

판 구조론으로 지표에서 발생하는 다양한 지질 현상을 종합적으로 설명할 수 있지만, 모든 지질 현상을 판 구조론으로 설명할 수 있는 것은 아니다.

대부분의 화산 활동은 판의 경계에서 발생하지만 판의 내부에서 발생하는 화산 활동은 판의 운동으로 설명하기 어렵다. 그림 I-17과 같이 하와이 열도는 판 내부의 고정된 위치에서 마그마가 상승해 지표로 분출하면서 형성된 것이다. 이렇게 맨틀 내부의 고정된 위치에서 생성된 마그마가 지속적으로 분출하는 지점을 **열점**이라고 한다.

(출처: 《Essentials of Oceanography》, 2018.)

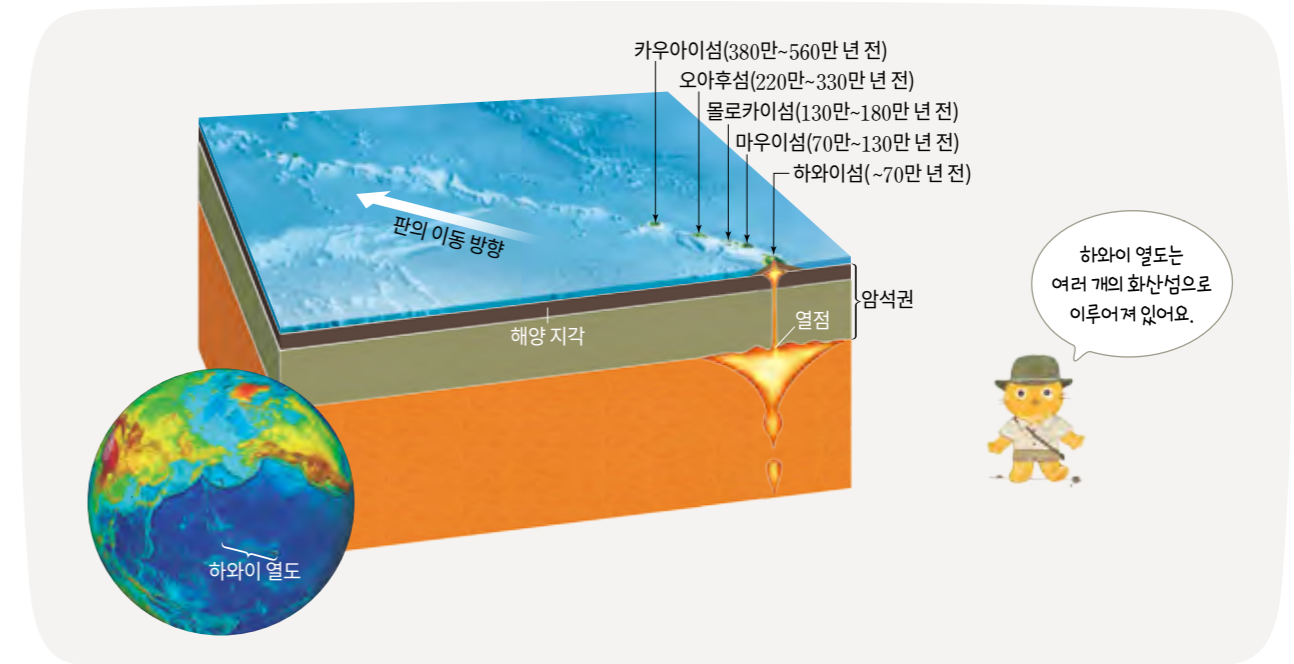


그림 I-17 열점과 하와이 열도를 이루는 화산섬의 나이

하와이 열도는 나이가 가장 적은 하와이섬에서 북서쪽으로 갈수록 화산섬의 나이가 많아진다. 이는 열점에서 형성된 화산섬이 태평양판의 이동에 따라 열점에서 멀어지고, 열점에서 새로운 화산섬이 계속 형성되었기 때문이다.

현재 지구상에는 수십 개의 열점이 분포한다. 열점은 하와이섬처럼 판의 내부에 존재하는 것도 있고, 아이슬란드처럼 판의 경계에 존재하는 것도 있다.

(출처: 《Essentials of Oceanography》, 2018.)

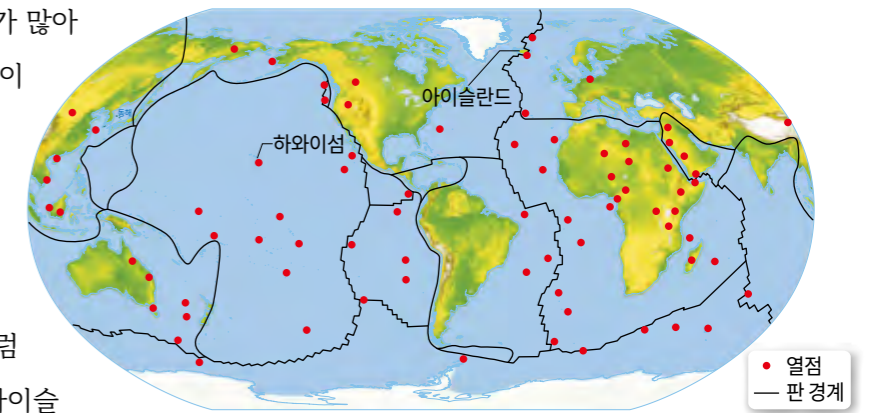
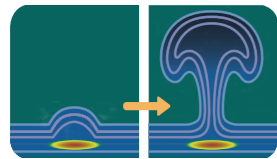


그림 I-18 판의 경계와 주요 열점의 분포

**상승하는 플룸의 모양**

맨틀과 외핵의 경계에서 가열되어 상승하는 플룸은 버섯과 비슷한 모양을 보이는 것으로 알려져 있다.



열점과 같이 판의 내부에서 발생하는 대규모 화산 활동은 플룸 구조론으로 설명한다. 플룸은 맨틀과 외핵의 경계에서 원기둥 모양으로 상승하거나 지각에서 맨틀 하부로 하강하는 물질 덩어리로, 플룸의 상승이나 하강으로 지구 내부의 변동이 일어난다고 설명하는 이론이 **플룸 구조론**이다.

지진파를 이용해 지구 내부를 조사한 결과 그림 I-19와 같이 지구 내부에는 뜨거운 플룸과 차가운 플룸이 존재하는 것으로 밝혀졌다. 맨틀과 외핵의 경계에서 형성된 뜨거운 플룸이 상승해 마그마가 생성되고, 생성된 마그마가 분출되는 지점이 열점에 해당한다. 차가운 플룸은 섭입하는 해양판에 의해 형성되는데, 섭입

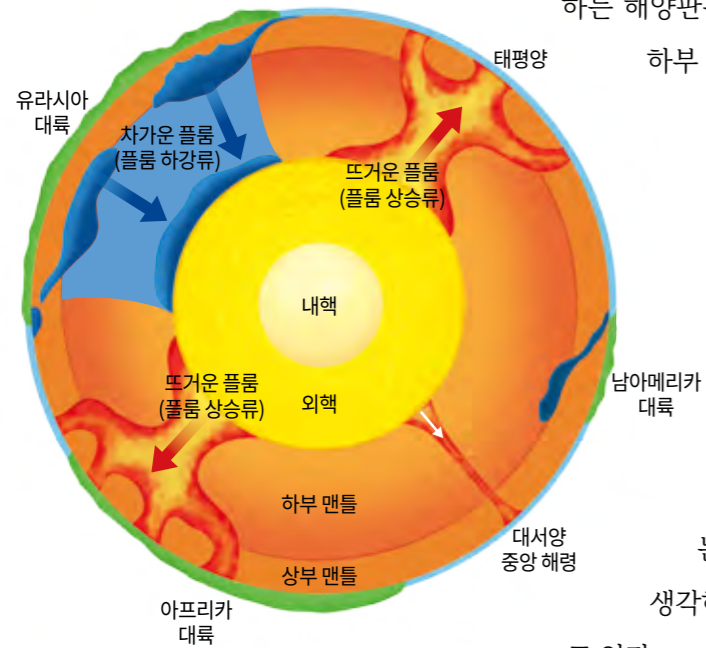


그림 I-19 지구 내부의 플룸 운동 모식도

하는 해양판은 상부 맨틀과 하부 맨틀의 경계에 쌓여 있다가 하부 맨틀로 하강한다.

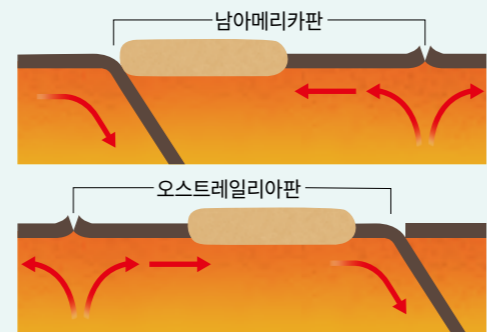
차가운 플룸이 하강해 맨틀과 외핵의 경계에 도달하면 상대적으로 온도가 높은 주변 맨틀 물질의 일부가 상승해 뜨거운 플룸이 형성된다고 알려져 있다. 과학자들은 맨틀 전반에 걸친 뜨거운 플룸과 차가운 플룸의 운동이 지구 내부의 변동을 일으키는 것으로 추정하고 있다.

오늘날 과학자들은 지각과 상부 맨틀에서 발생하는 판의 운동과 맨틀 전반에 걸쳐 발생하는 플룸의 운동은 서로 밀접한 관련이 있을 것으로 생각하며, 지권이 변화하는 원인을 밝히기 위해 노력하고 있다.

고 있다.

**스스로 확인하기**

- 1 판을 움직이는 힘을 설명해 보자.
- 2 열점이 형성되는 과정을 플룸 구조론으로 설명해 보자.
- 3 | 창의력 더하기 | 남아메리카판의 이동 속력은 오스트레일리아판의 이동 속력의 절반 이하이다. 이러한 차이가 나타나는 까닭을 판 주변 모식도를 이용하여 설명해 보자.



**04**

**화산 활동과 화성암의 특성**

**학습 목표**

- 암석의 순환 과정에서 화산 활동의 역할을 설명할 수 있다.
- 화산 활동으로 생성되는 암석의 특성을 추론할 수 있다.



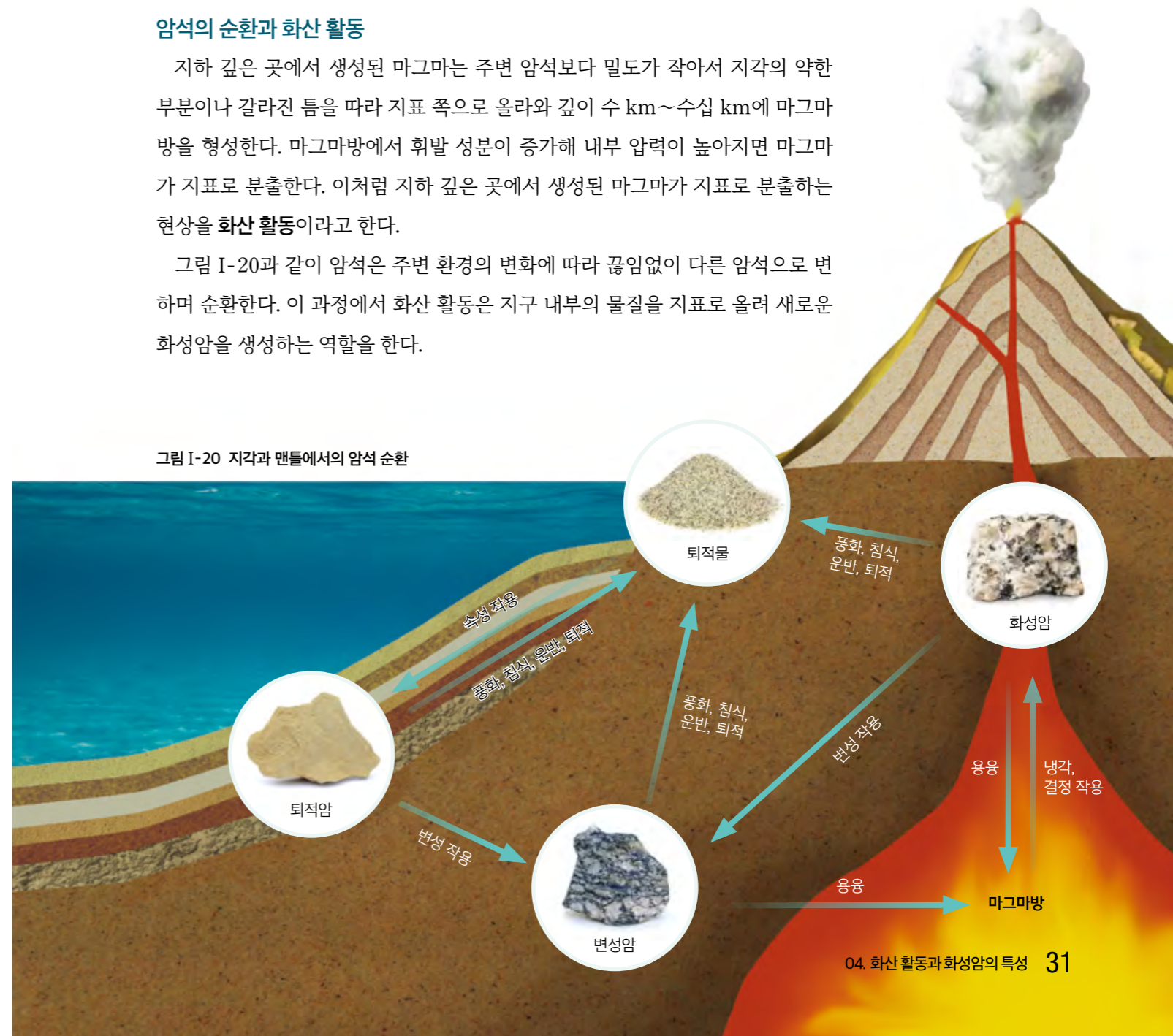
필리핀의 피나투보산에서 화산 활동이 발생해 보폭했던 산 정상이 사라지고 화산재가 약 40 km 높이까지 솟아올랐다. 이렇게 격렬한 화산 활동이 일어난 까닭은 무엇일까?

**암석의 순환과 화산 활동**

지하 깊은 곳에서 생성된 마그마는 주변 암석보다 밀도가 작아서 지각의 약한 부분이나 갈라진 틈을 따라 지표 쪽으로 올라와 깊이 수 km~수십 km에 마그마 방을 형성한다. 마그마방에서 휘발 성분이 증가해 내부 압력이 높아지면 마그마가 지표로 분출한다. 이처럼 지하 깊은 곳에서 생성된 마그마가 지표로 분출하는 현상을 **화산 활동**이라고 한다.

그림 I-20과 같이 암석은 주변 환경의 변화에 따라 끊임없이 다른 암석으로 변하며 순환한다. 이 과정에서 화산 활동은 지구 내부의 물질을 지표로 올려 새로운 화성암을 생성하는 역할을 한다.

그림 I-20 지각과 맨틀에서의 암석 순환



**화산의 또 다른 형태**  
 층상 화산은 점성이 크고 유동성이 작은 안산암질 또는 유문암질 마그마가 지표로 분출해 형성된 화산으로, 경사가 급하다. 분석구는 화산 쇄설물이 분화구 주위에 쌓여서 형성된 작은 화산체이다.

### 화산의 형태와 화산 분출물

마그마는 화학 조성, 온도 등에 따라 점성이 달라지는데, 일반적으로 SiO<sub>2</sub> 함량이 적고 온도가 높을수록 마그마의 점성은 작아지고 유동성은 커진다. 또 마그마에는 수증기, 이산화 탄소, 이산화 황, 염화 수소 등의 기체가 녹아 있는데, 기체 함량이 많을수록 마그마가 폭발적으로 분출한다.

화산의 형태는 주로 마그마의 성질에 따라 결정된다. 점성이 작고 유동성이 큰 마그마가 분출되면 경사가 완만한 **순상 화산**이 형성된다. 점성이 크고 유동성이 작은 마그마와 화산 활동으로 분출되는 암석 조각인 화산 쇄설물이 번갈아 분출되면 비교적 경사가 급하고 층상 구조를 띤 **성층 화산**이 형성된다.



그림 I-21 미국 마우나로아산



그림 I-22 미국 레이니어산

**화산 분출물**은 기체 상태인 화산 가스, 액체 상태인 용암, 고체 상태인 화산 쇄설물로 구분하는데, 마그마의 성질에 따라 분출되는 물질의 종류가 달라진다.

마그마가 지표 가까운 곳으로 올라오면 마그마 주변의 압력이 감소해 마그마에 녹아 있던 기체가 분리되어 나온다. 이것을 화산 가스라고 하며, 수증기가 대부분을 차지한다. 마그마가 지표로 올라와 분출한 것을 용암이라고 하며, 화산 활동으로 분출되는 크고 작은 암석 조각을 화산 쇄설물이라고 한다. 화산 쇄설물은 기체 함량이 많고 점성이 큰 마그마가 분출될 때 흔히 발생하며, 입자의 크기에 따라 화산진, 화산재, 화산력, 화산암괴 등으로 분류한다.

**화산 쇄설물의 종류와 입자 크기**  
 (출처: 《지질환경과학》, 2016.)

종류	입자의 크기
화산진	0.063 mm 이하
화산재	0.063 mm~2 mm
화산력	2 mm~64 mm
화산암괴	64 mm 이상

### 편광 현미경으로 관찰한 화성암의 조직

화산 활동으로 생성되는 화성암은 마그마의 냉각 속도에 따라 암석의 조직이 달라진다. 화성암의 조직은 화성암을 분류하는 기준이 되는데, 맨눈으로도 화성암의 대략적인 조직을 관찰할 수 있지만 편광 현미경을 이용하면 조직을 더 자세하게 관찰할 수 있다.

**편광 현미경**은 암석을 이루는 광물의 크기와 모양, 배열 등의 특징을 관찰하는데 사용하는 현미경으로, 일정한 방향으로 진동하는 빛만 통과시키는 편광판이 장착되어 있다. 하부 편광판은 회전 재물대 아래쪽에 고정되어 있고, 상부 편광판은 경통에 넣거나 뺄 수 있다.

편광 현미경에서 상부 편광판을 뺀 상태를 개방 니콜이라고 하고, 상부 편광판을 넣은 상태를 직교 니콜이라고 한다. 광원에서 나오는 빛이 하부 편광판을 통과하면 한 방향으로만 진동하는 빛이 재물대 위의 광물에 도달한다. 빛이 광물을 통과하면서 굴절되어 집안렌즈로 들어오게 된다.

**자연광과 편광**  
 자연광은 빛의 진행 방향에 대해 직각인 평면의 모든 방향으로 진동하지만, 편광판은 일정한 방향으로 진동하는 빛만 통과시킴으로 편광판을 통과한 빛은 한 방향으로만 진동한다.

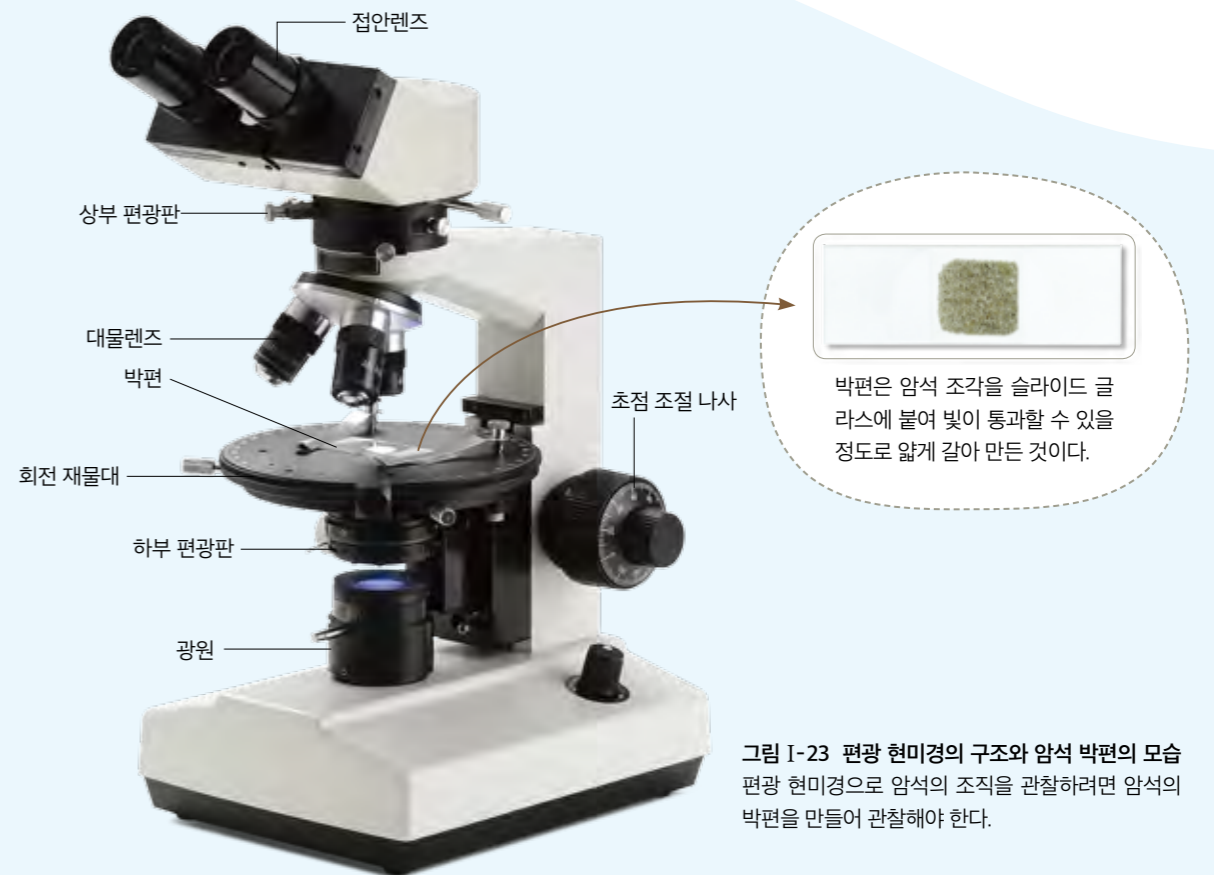
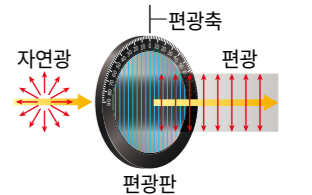


그림 I-23 편광 현미경의 구조와 암석 박편의 모습  
 편광 현미경으로 암석의 조직을 관찰하려면 암석의 박편을 만들어 관찰해야 한다.

## 편광 현미경으로 화산암과 심성암의 조직 비교·관찰하기

### 목표

편광 현미경으로 화산암과 심성암의 조직을 관찰하고 비교할 수 있다.

### 과정

- 회전 재물대에 현무암 박편을 올려놓는다.
- 초점 조절 나사를 돌려 박편과 대물렌즈 사이의 거리를 조절하면서 접안렌즈로 상의 초점이 맞는지 확인한다.
  - 박편과 대물렌즈가 맞닿아 파손되지 않도록 재물대와 대물렌즈 사이의 거리를 눈으로 확인하며 조절한다.
- 상부 편광판을 뺀 상태에서 접안렌즈로 현무암의 조직을 관찰한다.
- 상부 편광판을 넣은 상태에서 접안렌즈로 현무암의 조직을 관찰한다.
- ①~④와 동일한 과정으로 화강암의 조직을 관찰한다.

### 결과 및 정리

- 편광 현미경으로 관찰한 현무암과 화강암의 조직을 비교하여 설명해 보자.
- 현무암과 화강암의 조직이 다른 까닭을 암석의 생성 환경과 관련지어 추론해 보자.



### 스스로 평가하기

**한 걸음 더** 탐구 과정에서 보완할 점이나 더 알아보고 싶은 내용을 자유롭게 써 보자.

- 지식·이해** | 편광 현미경으로 관찰한 현무암과 화강암의 조직을 비교하여 설명할 수 있는가? ☆☆☆
- 과정·기능** | 현무암과 화강암의 조직이 다른 까닭을 암석의 생성 환경과 관련지어 추론했는가? ☆☆☆
- 가치·태도** | 화산암의 생성 환경을 추론하는 과정을 통해 화산 활동으로 생성되는 암석에 대한 호기심을 가지게 되었는가? ☆☆☆

화산암을 편광 현미경으로 관찰하면 암석을 구성하는 광물의 결정 형태, 배열 상태 등에 따른 암석의 조직을 관찰할 수 있다. 암석의 조직을 비교하면 암석의 종류와 생성 환경을 알 수 있다. 화산암은 생성 환경에 따라 마그마의 냉각 속도가 달라지면서 구성 광물의 입자 크기가 다양하게 나타난다.

마그마가 지표 부근에서 빠르게 식어 굳어진 화산암에서는 결정의 크기가 매우 작은 **세립질 조직**이나 결정이 거의 없는 **유리질 조직**이 나타난다. 또 세립질 조직이나 유리질 조직에 결정의 크기가 큰 반정이 포함된 **반상 조직**이 나타나기도 한다. 반상 조직은 지하에서 서서히 식어가던 마그마가 상승해 지표 부근에서 빠르게 식어 형성된다. 마그마가 지하 깊은 곳에서 서서히 식어 굳어진 심성암에서는 결정의 크기가 큰 **조립질 조직**이 나타난다.

반상 조직에서 보이는 큰 결정을 반정이라고 하고, 매우 작은 결정들 또는 유리질 부분을 석기라고 해요.

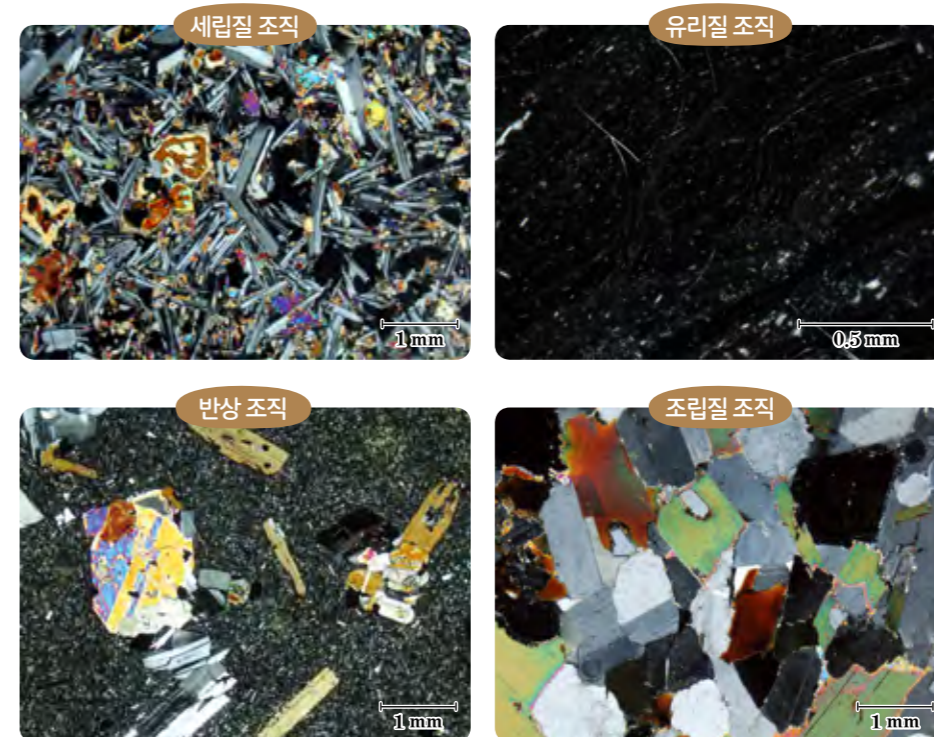


그림 I-24 화산암의 조직

### 스스로 확인하기

- 암석의 순환 과정에서 화산 활동이 어떤 역할을 하는지 설명해 보자.
- 화산암과 심성암의 조직이 다른 까닭을 설명해 보자.
- 창의력 더하기** | 백두산에서 화산 활동이 발생할 경우 많은 양의 화산재가 우리나라에 영향을 줄 것으로 알려져 있다. 화산 활동으로 분출된 화산재가 우리 생활에 주는 피해를 최소화할 수 있는 방안을 이야기해 보자.

# 지진파와 지구 내부 구조

- 학습 목표**
- 지진파의 종류와 특성을 설명할 수 있다.
  - 지진파를 이용하여 지구 내부 구조를 알아내는 과정을 설명할 수 있다.



의사들은 X선이나 초음파 등을 이용해 우리 몸 안의 구조를 확인하고 건강 상태를 판단한다. 지구 내부 구조와 지구 내부를 이루는 물질의 상태는 어떤 방법으로 알 수 있을까?

## 지진의 발생

지진은 지각에 오랫동안 축적된 탄성 에너지가 한계점을 넘어섰을 때 급격하게 방출되면서 지표면이 흔들리는 현상이다. 지진은 주로 단층 활동으로 발생하지만 화산 활동이나 마그마의 이동, 지하 동굴의 붕괴, 대규모 사태 등으로도 발생할 수 있다.

그림 I-25와 같이 최초로 지진이 발생한 지구 내부의 지점을 **진원**이라고 하고, 진원에서 연직 방향으로 지표면과 만나는 지점을 **진앙**이라고 한다.

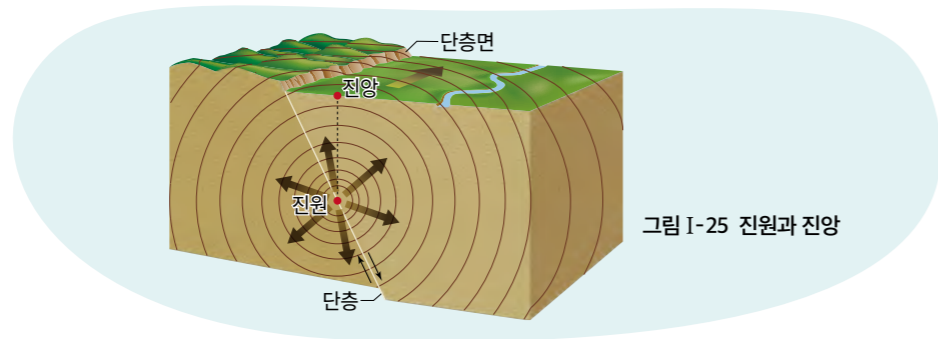
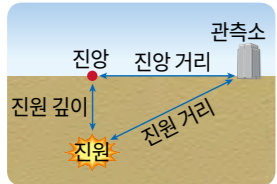


그림 I-25 진원과 진앙

지진의 세기는 규모와 진도로 나타낸다. **규모**는 지진이 발생해 진원으로부터 방출된 에너지의 양을 나타내는 수치로, 동일한 지진이라면 장소에 상관없이 규모가 모두 같다. **진도**는 어느 한 지점에서 사람이 지진을 느끼는 정도나 피해가 발생한 정도를 나타내는 수치로, 동일한 지진이라도 장소에 따라 진도가 달라진다. 따라서 세계 여러 지역에서 발생한 지진의 세기를 비교할 때는 주로 지진 자체의 크기를 나타내는 규모를 사용한다.

한반도는 판의 경계에서 약간 떨어져 있지만 최근에 규모 5.0 이상의 지진이 발생하는 등 크고 작은 지진이 발생하고 있어 지진에 안전한 지대가 아니다. 다음 활동에서 한반도 지진의 분포 특성을 분석하고 지진 발생 가능성을 예측해 보자.

진원 거리와 진앙 거리, 진원 깊이



- 진원 거리: 관측소에서 진원까지의 거리
- 진앙 거리: 관측소에서 진앙까지의 거리
- 진원 깊이: 진앙에서 진원까지의 거리

## 탐구

### 한반도 지진의 분포 특성과 지진 발생 가능성 예측하기

자료 수집 / 자료 분석 및 해석

#### 목표

한반도에서 발생한 지진의 분포 특성을 알고 지진 발생 가능성을 예측할 수 있다.

#### 과정

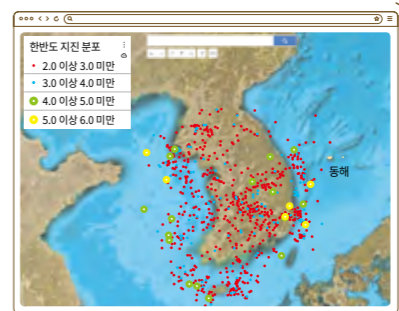
1. 최근 20년 동안 한반도에서 발생한 지진 정보 자료를 규모 범위별로 수집한다.

##### 빅데이터 활용하기

- 지진 정보 자료는 기상청 날씨누리(<https://www.weather.go.kr>)에서 수집한다.
  - 지진·화산 > 지진 조회 > 국내 > 발생 기간, 규모 범위 설정 > 검색하기 > 스프레드시트 자료 다운로드
  - 스프레드시트를 이용해 수집한 자료의 첫 행에 표 제목이 오도록 편집한다.

2. 지도 애플리케이션을 이용해 최근 20년 동안 지진이 발생했던 지역을 지도에 규모 범위별로 표시한다.

규모 범위별로 표시 모양 또는 색깔을 다르게 하면 구분하기 쉽다.



#### 결과 및 정리

1. 최근 한반도에서 발생한 지진의 분포 특성을 설명해 보자.



2. 한반도 지진의 분포 특성을 바탕으로 하여 앞으로 지진이 발생할 가능성을 예측해 보자.



3. **창의** 우리나라에서 지진의 디지털 관측이 이루어지기 전인 1998년까지 연간 지진 발생 횟수는 현저히 낮았다. 이러한 결과가 나타난 까닭을 설명해 보자.



#### 스스로 평가하기

- | 지식·이해 | 한반도에서 발생한 지진의 분포 특성을 설명할 수 있는가? ☆☆☆
- | 과정·기능 | 자료 분석 결과를 바탕으로 하여 한반도에서 지진이 발생할 가능성을 예측했는가? ☆☆☆
- | 가치·태도 | 한반도에서 발생할 수 있는 지진에 대한 경각심을 가지게 되었는가? ☆☆☆

준비물  스마트 기기

#### 활동 도우미

- 지진 정보 자료를 수집할 때 지진의 규모 범위는 다음과 같이 설정한다.
  - 2.0 이상 3.0 미만
  - 3.0 이상 4.0 미만
  - 4.0 이상 5.0 미만
  - 5.0 이상 6.0 미만
- 지도 애플리케이션에서 규모 범위별 지진 정보 스프레드시트 파일을 각각 불러오면 지도에 규모 범위별로 지진 발생 지역을 쉽게 표시할 수 있다.

**한 걸음 더** 탐구 과정에서 보완할 점이나 더 알아보고 싶은 내용을 자유롭게 써 보자.

## 지진파

지진이 발생해 진원에서 방출된 에너지가 파동의 형태로 전파되는 것을 **지진파**라고 한다. 지진파는 실체파와 표면파로 구분한다.

### 지진파의 특징

종류	속도 (km/s)	진폭	피해
P파	5~8	작다.	작다.
S파	3~4	중간	중간
표면파	2~3	크다.	크다.

P파와 S파는 각각 Primary wave와 Secondary wave의 앞 글자를 따온 것이다.

**실체파**는 진원에서 모든 방향으로 지구 내부를 통과해 전파되는 지진파로, 통과하는 물질에 따라 속도가 변하는 특성이 있어 지구 내부 구조를 확인하는 데 이용된다. 실체파에는 고체, 액체, 기체를 모두 통과하는 **P파**와 고체만 통과하는 **S파**가 있다. 그림 I-26과 같이 P파는 파의 진행 방향과 매질의 진동 방향이 나란한 종파로, 전파 속도가 S파보다 빠르다. S파는 파의 진행 방향과 매질의 진동 방향이 수직인 횡파로, 전파 속도가 P파보다 느리다.

**표면파**는 진앙에서부터 지표면을 따라 전파되는 지진파로, 속도는 느리지만 진폭이 커서 이로 인해 큰 피해가 발생한다.

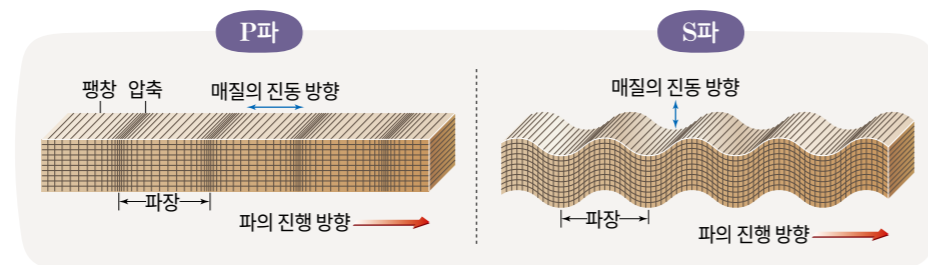


그림 I-26 P파와 S파의 전파

지진파는 지진 관측소에 설치된 지진계에 그림 I-27과 같이 기록된다. 지진이 발생하면 전파 속도가 가장 빠른 P파가 지진 관측소에 먼저 도달하며, 이후 S파, 표면파 순으로 도달한다. P파가 도달한 뒤 S파가 도달할 때까지의 시간을 **PS시**라고 하며 진원에서 지진 관측소까지의 거리가 멀어질수록 커진다. 따라서 P파와 S파의 속도를 알고 PS시를 측정하면 진원 거리를 구할 수 있다.

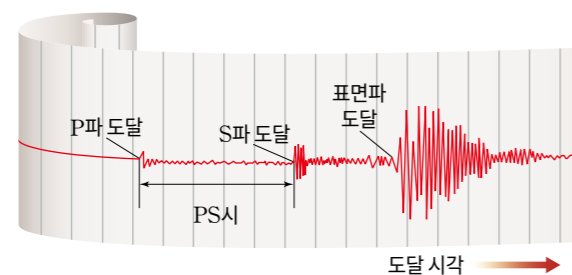


그림 I-27 지진 기록 PS시는 P파와 S파 도달 시간 사이의 간격이다.

P파와 S파의 속도가 각각  $V_p, V_s$ 로 일정하다고 가정하면  $PS시(t)$ 와 진원 거리( $d$ )는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d = \frac{V_p \times V_s}{V_p - V_s} \times t$$

진앙 거리와 지진파가 도달하는 데 걸리는 시간과의 관계를 나타낸 그래프를 **주시 곡선**이라고 한다. PS시를 알면 그림 I-28과 같이 주시 곡선을 이용해 진앙 거리를 구할 수 있다.

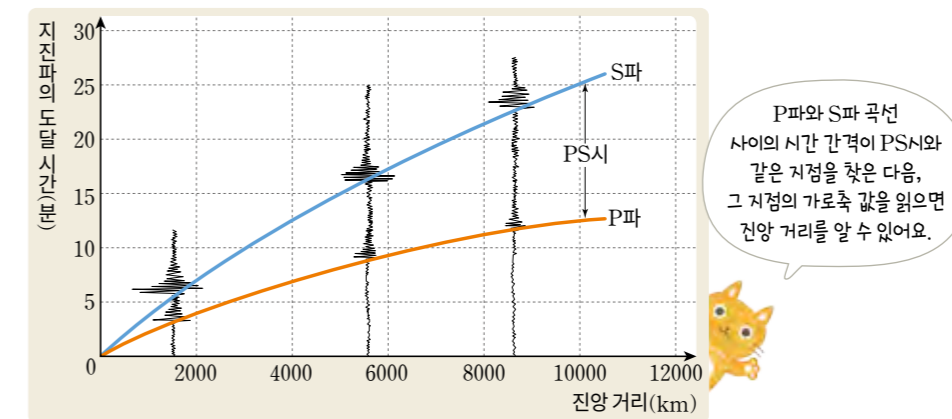


그림 I-28 주시 곡선

지진파는 매질의 성질에 따라 속도가 변하며 서로 다른 매질의 경계에서 반사되거나 굴절한다. 일반적으로 매질의 밀도가 클수록 지진파의 속도가 증가하므로 지각을 통과할 때보다 맨틀을 통과할 때 지진파의 속도가 더 빠르다. 따라서 지구 내부를 통과한 지진파의 속도와 경로를 측정하면 지각의 두께를 구할 수 있다.

그림 I-29는 지각과 맨틀을 통과해 온 지진파의 주시 곡선을 나타낸 것이다. 지각만을 통과해 온 P파를 **직접파**라고 하고, 맨틀까지 통과해 온 P파를 **굴절파**라고 한다. 직접파와 굴절파의 도달 시간이 같은 지점까지의 거리를 **교차 거리**라고 한다.

A 지점에는 직접파가 먼저 도달하고, C 지점에는 굴절파가 먼저 도달한다. B 지점은 직접파의 경로가 굴절파의 경로보다 짧지만, 굴절파는 전파 도중에 지진파의 속도가 빠른 맨틀을 통과해 오므로 직접파와 굴절파가 동시에 도달하게 된다. 따라서 B 지점에 지진파가 도달하는 시간을 이용하면 지각의 두께를 구할 수 있다.

교차 거리를  $l$ , 직접파의 속도를  $V_1$ , 굴절파의 속도를  $V_2$ 라고 하면 지각의 두께( $d$ )는 다음과 같다.

$$d = \frac{l}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}$$

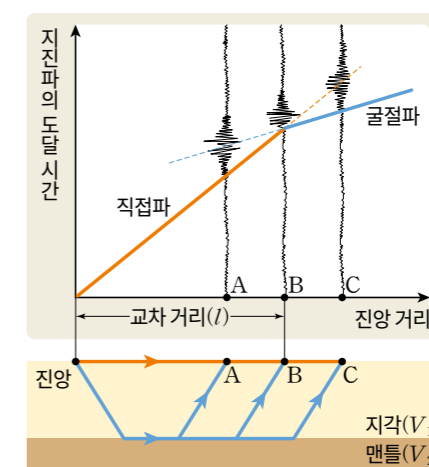


그림 I-29 지진파의 전파와 주시 곡선

### 과학 잇기 물리학

#### 지진파가 굴절하는 까닭

파동은 어느 한 곳에서 다른 곳으로 진행할 때 시간이 가장 짧게 걸리는 경로를 따른다. 지진파도 통과하는 매질이 달라져 속도가 변하면 시간이 가장 짧게 걸리는 경로를 따라 굴절한다.

#### 주시 곡선에서 P파의 속도

주시 곡선에서 직접파와 굴절파의 기울기는 P파 속도의 역수에 해당하므로, 주시 곡선의 기울기를 구하면 지각과 맨틀을 통과하는 P파의 속도를 알 수 있다.



자료 분석 및 해석 / 수학적 사고와 모형 활용

탐구 능력 | 문제해결 능력

## 지진파 자료를 활용하여 지각의 두께 구하기

### 목표

지진파 자료를 활용해 우리나라 지각의 두께를 구할 수 있다.

### 과정

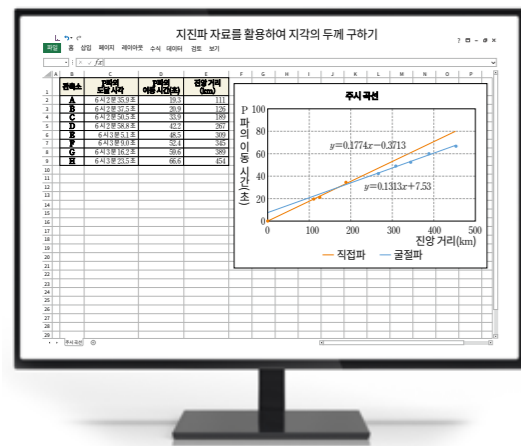
다음은 어느 해 우리나라에서 발생한 지진을 여러 관측소에서 측정한 지진파 자료이다.

지진 발생 시각	7월 4일 6시 2분 16.6초		
진앙 위치	35.14°N, 127.39°E	진원 깊이	10 km

관측소	P파의 도달 시각	P파의 이동 시간(초)	진앙 거리(km)
A	6시 2분 35.9초	19.3	111
B	6시 2분 37.5초	20.9	126
C	6시 2분 50.5초	33.9	189
D	6시 2분 58.8초	42.2	267
E	6시 3분 5.1초	48.5	309
F	6시 3분 9.0초	52.4	345
G	6시 3분 16.2초	59.6	389
H	6시 3분 23.5초	66.6	454

### 활동 도우미 +

- 추세선은 점그래프에서 자료의 분포를 바탕으로 하여 자료의 추세를 나타낸 선이다.
- 스프레드시트를 이용해 작성한 그래프에서 추세선 기틀기의 역수를 구하면 P파의 속도를 알 수 있다.



- 스프레드시트를 이용해 각 관측소에서 측정한 진앙 거리를 가로축으로 하고 P파의 이동 시간을 세로축으로 하는 점그래프를 작성한다.
- 그래프에서 자료의 추세가 꺾이는 지점을 찾아 그 지점의 진앙 거리(교차 거리)를 찾는다.

- 진앙 거리가 가까운 관측소에는 직접파가 먼저 도달하고 진앙 거리가 먼 관측소에는 굴절파가 먼저 도달한다는 점을 이용해 추세가 꺾이는 지점을 찾는다.
- 자료의 추세가 꺾이는 지점을 기준으로 구간을 구분한 뒤, 구간별 자료에 추세선을 각각 추가한다.
  - 첫 구간의 그래프는 (0, 0)을 포함해 작성한다.
  - 두 구간의 추세선 모두 수식이 나타나도록 설정해 기틀기를 확인한다.
- 그래프를 바탕으로 하여 직접파(지각만을 통과하는 P파)와 굴절파(맨틀을 통과하는 P파)의 속도를 구한다.
- 지각의 두께를 구하는 식을 이용해 우리나라 지각의 두께를 구한다.

### 결과 및 정리

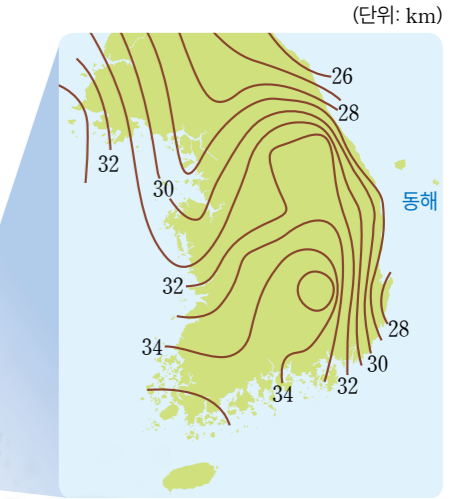
- 그래프를 바탕으로 하여 찾은 교차 거리, 직접파와 굴절파의 속도는 각각 얼마인가?



- 지진파 자료를 바탕으로 하여 구한 우리나라 지각의 두께는 얼마인가?



- 장외** 그림은 지진파를 이용해 알아낸 우리나라 지각의 두께 분포이다. 지역마다 지각의 두께가 다르게 나타나는 까닭을 추론해 보자.

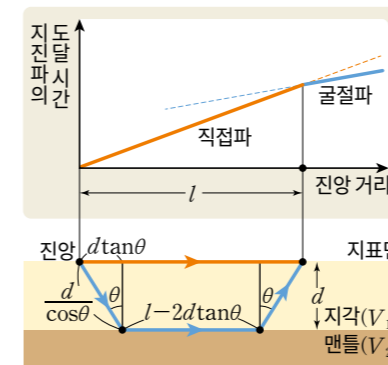


### 스스로 평가하기

- 지식·이해** | 지진파 자료를 활용해 우리나라 지각의 두께를 구할 수 있는가? ☆☆☆
- 과정·기능** | 주어진 자료를 문제해결에 적합한 형태로 변환한 뒤 합리적으로 분석해 결과를 도출했는가? ☆☆☆
- 가치·태도** | 우리나라에서 발생한 지진 자료를 분석하며 우리나라의 지질 현상에 호기심을 가지게 되었는가? ☆☆☆

**한 걸음 더** 탐구 과정에서 보완할 점이나 더 알아보고 싶은 내용을 자유롭게 써 보자.

### 자료실 주시 곡선을 이용해 지각의 두께를 구하는 방법의 유도



지각의 두께는 진앙 거리가  $l$ 인 지점에  $V_1$ 층을 통과해 온 직접파와  $V_2$ 층을 통과해 온 굴절파가 동시에 도달한다는 사실을 이용해 다음과 같이 구할 수 있다.

- 직접파의 도달 시간( $t_1$ ) =  $\frac{l}{V_1}$
- 굴절파의 도달 시간( $t_2$ ) =  $2 \times \frac{1}{V_1} \times \frac{d}{\cos\theta} + \frac{l - 2d \tan\theta}{V_2}$
- 직접파와 굴절파의 도달 시간이 같다는 것( $t_1 = t_2$ )과 굴절 법칙( $\sin\theta = \frac{V_1}{V_2}$ )을

이용해 구한 지각의 두께( $d$ )는  $\frac{l}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}$  이다.

## 지구 내부 구조

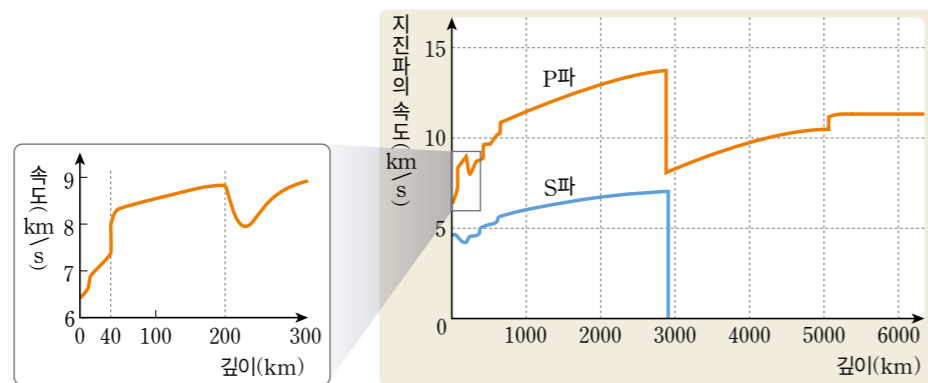
지구 내부를 통과해 온 지진파를 분석하면 지구 내부의 구조와 구성 물질의 상태를 추정할 수 있다. 다음 활동에서 지구 내부의 깊이에 따른 지진파의 속도 분포로 지구 내부의 구조와 구성 물질의 상태를 알아보자.

### 해보기

#### 지진파의 속도 분포로 지구 내부 구조 추정하기

그림은 지구 내부의 깊이에 따른 지진파의 속도 분포를 나타낸 것이다.

(출처: 《Earth: Portrait of a planet》, 2019.)



1. 깊이에 따라 P파와 S파의 속도는 어떻게 변하는지 설명해 보자.
2. P파와 S파의 속도 변화를 바탕으로 하여 지구 내부를 몇 개의 층으로 구분할 수 있는지 설명해 보자.
3. 깊이 약 200 km 부근에서 P파의 속도가 느려지는 까닭을 설명해 보자.

지구 내부가 균질하다면 지진파는 지구 내부에서 같은 속도로 전파될 것이다. 그러나 실제 지진 관측 기록에서는 지진파의 속도가 변한다. 이를 통해 지구 내부는 깊이에 따라 구성 물질의 종류와 상태가 다르다는 것을 알 수 있다.

지진파의 속도 분포로 지구 내부에 불연속면이 존재하고 이 불연속면을 경계로 지구 내부는 지각, 맨틀, 외핵, 내핵의 층상 구조를 이루고 있다는 것이 밝혀졌다.

모호로비치치는 지진 기록을 분석해 진앙에서 먼 관측소에서는 지각을 통과해 온 직접파보다 먼저 도착하는 굴절파가 있다는 것을 발견했다. 이를 통해 약 40 km 깊이에 지진파의 속도가 급격하게 빨라지는 경계면의 존재를 알아냈다. 이 경계면을 모호로비치치 불연속면 또는 모호면이라고 하며, 이를 경계로 상부를 지각, 하부를 맨틀로 구분한다.

**모호로비치치**  
(Mohorovičić, A., 1857~1936)  
크로아티아 출신의 지진학자. 1909년 발칸반도에서 발생한 지진 기록을 분석해 지각과 맨틀 사이에 불연속면이 존재한다는 사실을 발견했다.

모호면의 깊이는 지각의 두께를 의미해요.



구텐베르크는 그림 I-30과 같이 진앙에서의 각거리가 103°~180°인 지역에는 S파가 도달하지 않는 S파 암영대가 있고, 각거리가 103°~142°인 지역에는 P파가 도달하지 않는 P파 암영대가 있다는 것을 발견했다. S

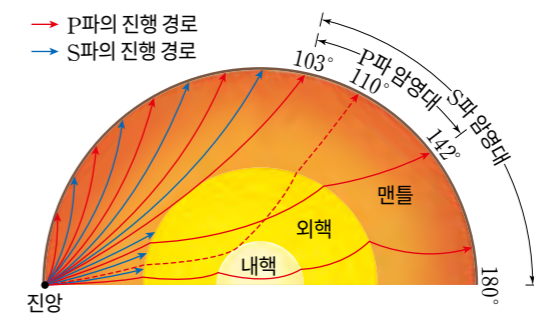


그림 I-30 지구 내부를 통과하는 지진파의 경로

파 암영대는 S파가 액체를 통과하지 못하기 때문에 나타나는데, 이를 통해 외핵이 액체 상태임을 알 수 있다. P파 암영대는 맨틀과 외핵의 경계면에서 P파의 속도가 급격하게 줄어들며 크게 굴절하기 때문에 나타난다. 깊이 약 2900 km에 있는 이 경계면을 구텐베르크 불연속면이라고 하며, 이를 경계로 맨틀과 핵을 구분한다.

레만은 진앙에서의 각거리가 110°인 지역에 약한 P파가 도달한다는 사실로부터 P파가 핵을 통과하는 동안 속도가 급격하게 증가하는 경계면이 있다는 것을 발견했다. 깊이 약 5100 km에 있는 이 경계면을 레만 불연속면이라고 하며, 이를 경계로 액체 상태인 외핵과 고체 상태인 내핵을 구분한다.

한편 지각과 맨틀은 구성 물질의 상태에 따라 암석권, 연약권, 중간권으로 구분하기도 한다. 상부 맨틀에는 구성 물질의 일부가 부분적으로 용융되어 있어 지진파의 속도가 급격하게 감소하는 층이 나타나는데, 이 부분을 연약권이라고 한다. 연약권 위에 있고 단단한 암석으로 이루어진 부분을 암석권이라고 한다. 중간권은 하부 맨틀에 해당하는 부분으로, 단단한 암석으로 이루어져 있으며 깊이에 따라 압력이 증가해 밀도가 커진다.

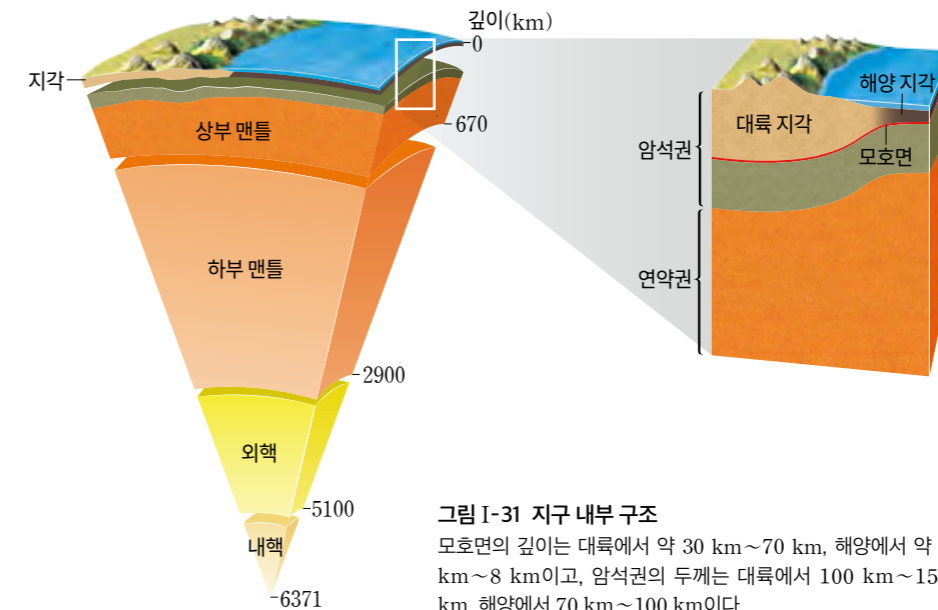
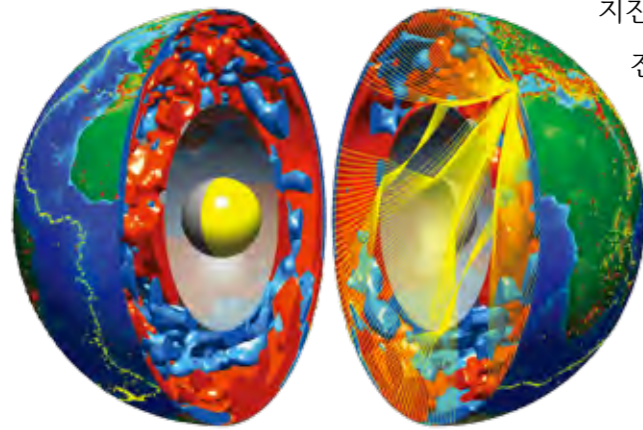


그림 I-31 지구 내부 구조  
모호면의 깊이는 대륙에서 약 30 km~70 km, 해양에서 약 5 km~8 km이고, 암석권의 두께는 대륙에서 100 km~150 km, 해양에서 70 km~100 km이다.

**구텐베르크**  
(Gutenberg, B., 1889~1960)  
독일 출신 지진학자. 지진파의 굴절 현상과 지진파가 도달하지 않는 암영대를 연구해 약 2900 km 깊이에 불연속면이 존재한다는 사실을 발견했다.

**레만**  
(Lehmann, I., 1888~1993)  
덴마크의 지구물리학자. 뉴질랜드에서 발생한 지진 기록을 분석해 약 5100 km 깊이에 불연속면이 존재한다는 것과 내핵의 존재를 발견했다.

최근 과학기술의 발달로 지구 내부의 구조를 밝히기 위한 새로운 기술이 도입되고 있다. 이 중 하나가 지진파 단면 영상이다. 지진파 단면 영상은 수많은 지진으로 발생한 P파와 S파가 관측소에 도달하는 시간을 분석해 지구 내부의 구조를 영상화하는 기술이다.



지진파의 속도는 통과하는 물질의 상태에 따라 변하고 지진파는 여러 방향으로 지구 내부를 통과해 전 세계에 설치된 수천 개의 지진 관측소에서 측정된다. 따라서 이를 이용하면 지구 내부의 3차원 구조를 알 수 있다. 또 섭입대의 구조, 화산체 아래에 있는 마그마방의 크기, 플룸의 분포 등을 추정하는 데 필요한 정보를 얻을 수 있다.

지진파는 침강하는 해양판과 같이 상대적으로 온도가 낮고 밀도가 큰 물질을 통과할 때 속도가 빨라요.

그림 I-32 지진파 단면 영상으로 나타낸 3차원 지구 내부 구조

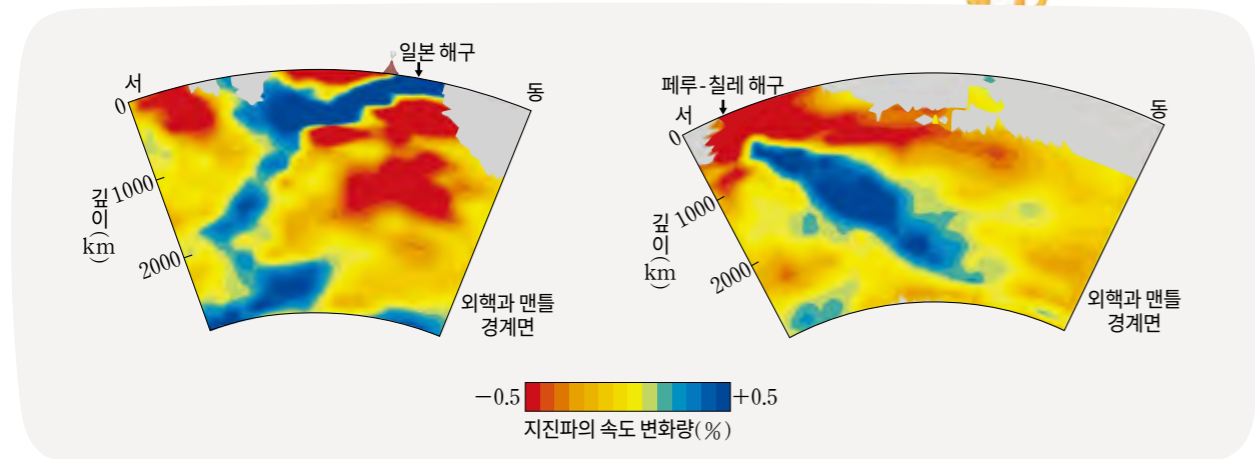


그림 I-33 지진파 단면 영상으로 나타낸 플룸의 구조 지진파 단면 영상으로 일본 해구에서 섭입한 태평양판과 페루-칠레 해구에서 나스카판에 의해 형성된 차가운 플룸이 맨틀과 외핵의 경계에 도달하는 것을 알 수 있다.

### 스스로 확인하기

- 1 지진파의 종류와 특성을 설명해 보자.
- 2 지진파를 분석해 지구 내부의 구조와 구성 물질의 상태를 파악할 수 있는 까닭을 설명해 보자.
- 3 | 창의력 더하기 | 2016년 경주에서 발생한 지진은 2017년 포항에서 발생한 지진보다 규모가 더 컸지만 피해는 포항에서 더 크게 발생했다. 이와 같이 규모 외에 지진의 피해에 영향을 주는 요인들을 추론해 보자.



### 과학과 미래 진로

## 화산을 감시하는 사람들, 화산학자



용암 시료를 채취하는 화산학자



분출 중인 화산을 감시하는 화산학자

화산 활동이 발생할 것으로 예측되는 지역은 매우 위험하다. 화산 활동이 시작되면 뜨거운 용암과 많은 양의 화산 가스, 화산재가 뿜어져 나오고 화산 쇄설물이 산비탈을 따라 빠른 속도로 흘러내리기 때문이다. 이러한 위험을 무릅쓰고 화산 지역을 찾는 사람들이 있다. 바로 화산을 연구하고 화산 활동을 예측하는 화산학자이다.

화산학자는 활동 중인 화산에 접근해 화산 분출물을 채취하고 분석하며, 마그마의 활동을 연구해 화산 활동 가능성을 예측한다. 화산 활동 가능성과 그 위험 정도를 예측할 수 있다면 화산 활동이 인간 및 생태계에 주는 피해를 최소화할 수 있다.

화산학자는 주로 연구 기관에서 연구를 수행한다. 우리나라의 대표적인 화산 연구 기관으로 한국지질자원연구원이 있으며, 외국에는 미국지질조사국(USGS), 세계화산관측소조직(WOVO) 등이 있다. 이러한 기관에서 화산학자들은 화산 활동에 대한 과학적 이해를 바탕으로 하여 화산 활동의 위험으로부터 지구상에 있는 생명체들을 보호하기 위해 노력하고 있다.

한국지질자원연구원 누리집에서 '화산학자'와 관련된 정보를 볼 수 있다.



### 활동하기

화산학자들이 화산 활동의 전조 현상을 감시하는 다양한 방법을 조사하여 발표해 보자.



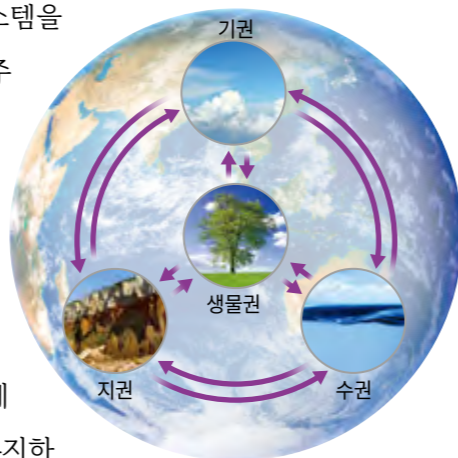
### 관련 학과

지구물리학과, 지질학과, 지구시스템과학과, 지구환경과학과 등



# 지구시스템의 소중함을 알리는 예술 작품 고안하기

지구가 탄생한 이후 지구시스템을 이루는 권역들은 서로 영향을 주고받으며 계속 변화해 왔고, 현재도 긴밀하게 상호작용하고 있다. 오늘날과 같이 지구에서 수많은 생명체가 살아갈 수 있는 까닭은 지구시스템의 권역들이 상호작용하며 생명체가 살아가기에 적합한 환경을 유지하고 있기 때문이다.



최근 지구시스템에 급격한 변화를 일으키는 인간의 활동은 미래 세대의 삶을 위협할 뿐만 아니라 생태계를 포함한 지구 환경에 막대한 영향을 주고 있다. 현재처럼 인류의 문명이 지구시스템에 영향을 준다면 수많은 생물의 멸종을 비롯해 지구 환경에 여러 가지 부정적인 영향을 줄 것이다.

그동안 예술가들은 지구시스템에서 일어나는 변화를 음악이나 그림 등으로 표현해 왔다. 예술 작품은 사람들에게 전달하려고 하는 의미를

강력하게 전하며 가치를 일깨우는 도구가 된다. 2009년에 발표된 작품인 「듣는 원뿔」은 한쪽 끝으로 갈수록 점점 가늘어지는 축음기 모양을 하고 있다. 작품의 한쪽 끝에서 20분 동안 인간 활동의 영향으로 멸종되었거나 멸종 위기에 처한 동물의 영상과 소리를 담은 비디오가 재생된다. 영상 재생 시간인 20분은 20분마다 지구에서 하나의 생물 종이 사라지는 것을 나타내며, 작품을 접한 사람들에게 인간의 활동으로 인한 지구시스템의 변화에 대해 경각심을 느끼도록 할 수 있다.

이와 같이 사람들에게 지구시스템의 소중함을 알릴 수 있는 예술 작품을 고안해 보자.



마야 린(Maya Lin), 「듣는 원뿔(The listening cone)」

## 1 조사하기

지구시스템의 소중함을 주제로 다룬 다양한 예술 작품을 조사하고, 어떤 형식으로 표현했는지 설명해 보자.

**활동 도우미 +**  
지구시스템의 소중함을 주제로 한 문학, 그림, 조형물, 사진, 영상, 음악 등을 조사한다.

## 2 토의 글쓰기

1. 모둠별로 어떤 주제와 형식의 예술 작품을 고안할지 토의해 보자.

**활동 도우미 +**  
조사한 예술 작품의 형식을 참고해 모둠에서 정한 주제를 가장 효과적으로 나타낼 수 있는 작품의 형식을 선택한다.

2. 토의한 내용을 바탕으로 하여 예술 작품을 고안해 글과 그림으로 나타내 보자.

## 3 평가하기

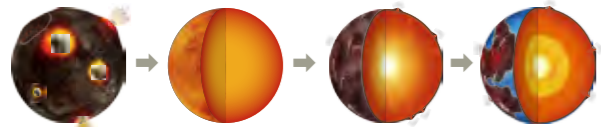
나와 모둠원의 활동 과정을 다음 기준에 따라 평가해 보자.

평가 내용	평가
지식·이해   지구시스템의 소중함을 다룬 예술 작품에 대한 이해를 바탕으로 하여 자료를 올바르게 조사했는가?	✍ ☆☆☆
과정·기능   토의에 적극적으로 참여하고, 모둠에서 고안한 예술 작품을 설명하는 글과 그림을 이해하기 쉽게 나타냈는가?	✍ ☆☆☆
가치·태도   예술 작품을 창의적으로 고안하며 우리 삶의 터전인 지구의 소중함을 인식했는가?	✍ ☆☆☆

### 01 지구의 형성 과정

10 쪽 ~ 15 쪽

- 태양계의 형성:** 거대한 성운의 수축으로 태양계 성운 형성
  - 태양계 성운의 수축으로 원시 태양과 미행성체 형성
  - 미행성체들이 원시 태양 주위를 공전하며 충돌해 원시 행성 형성 → 지구형 행성, 목성형 행성 형성
- 지구의 진화:** 지구는 지권, 기권, 수권, 생물권이 활발하게 상호작용하는 역동적 행성으로 진화했다.



미행성체 충돌 ① 핵과 맨틀의 분리 원시 지각과 원시 바다의 형성

### 02 생명체와 지구시스템의 상호작용

16 쪽 ~ 21 쪽

- 산소의 순환**
  - 원시 바다에서 남세균의 출현으로 발생한 산소가 바닷물에 녹아 있던 철과 반응한 뒤 퇴적물과 해저에 침전되어 ② 을/를 형성했다.
- 탄소의 순환**
  - 대기 중 이산화 탄소가 바닷물에 녹아 ③ 의 형태로 지권에 고정되었다.
  - 얼음덩어리 지구 상태 시기에 화산 활동으로 발생한 이산화 탄소가 온실 효과를 일으켜 전 지구의 얼음이 녹았다. → 생명체가 다양하게 진화할 수 있는 환경이 조성되었다.
- 물의 순환**
  - 물의 순환 과정에서 발생한 풍화, 침식, 운반, 퇴적 작용으로 다양한 지형이 형성되었다.
  - 물의 순환으로 기상 현상이 일어나고, 다양한 곳에 존재하는 물은 생물의 생명 유지에 중요한 역할을 한다.

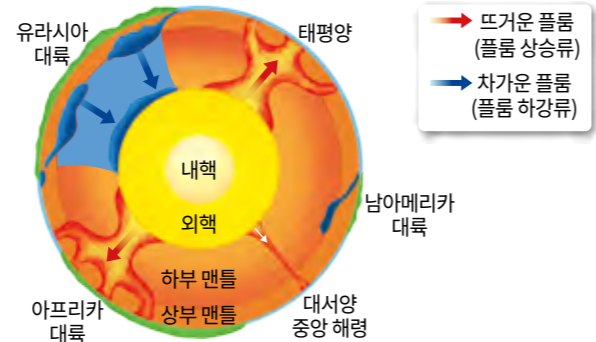
### 03 판 구조론의 발달사와 플룸 구조론

22 쪽 ~ 30 쪽

- 판 구조론의 정립:** ④ → 맨틀 대류설 → ⑤ → 판 구조론
  - 판 구조론: 판의 상대적인 운동으로 여러 지질 현상이 일어난다고 설명하는 이론
- 판을 움직이는 맨틀의 상부 운동:** 판의 운동과 맨틀 대류가 상호작용하는 과정에서 판의 움직임으로 맨틀 대류가 유발된다.
  - 판을 움직이는 능동적인 힘: ⑥, 해령에서 미치는 힘 등

**3. 플룸에 의한 구조 운동:** 차가운 플룸이 하강하거나 뜨거운 플룸이 상승해 지구 내부의 변동이 일어난다.

- ⑦: 뜨거운 플룸이 상승해 마그마가 생성되고, 생성된 마그마가 판 내부의 고정된 위치에서 분출되는 지점



### 04 화산 활동과 화성암의 특성

31 쪽 ~ 35 쪽

- 화산의 형태와 화산 분출물**
  - 점성이 작고 유동성이 큰 마그마가 분출되면 순상 화산이 형성되고, 점성이 크고 유동성이 작은 마그마와 화산 쇄설물이 번갈아 분출되면 ⑧ 이/가 형성된다.
  - 화산 분출물은 화산 가스, 용암, 화산 쇄설물로 구분한다.
- 화성암의 조직:** 화성암은 생성 환경에 따른 마그마의 냉각 속도 차이로 조직이 달라진다.
  - 화산암: ⑨ 조직, 유리질 조직, 반상 조직
  - 심성암: ⑩ 조직

### 05 지진파와 지구 내부 구조

36 쪽 ~ 44 쪽

#### 1. 지진파

구분	특징
P파	고체, 액체, 기체를 모두 통과하는 지진파로, 종파이며 전파 속도가 S파보다 빠르다.
S파	⑪ 을/를 통과하는 지진파로, 횡파이며 전파 속도가 P파보다 느리다.

- ⑫: P파가 도달한 뒤 S파가 도달할 때까지의 시간
  - 진앙 거리와 지진파의 도달 시간과의 관계를 나타낸 주시 곡선으로 지각의 두께를 구할 수 있다.
- 2. 지구 내부 구조:** 지진파 불연속면인 ⑬, 구텐베르크 불연속면, 레만 불연속면을 경계로 지구 내부는 지각, 맨틀, 외핵, 내핵으로 구분한다.

## 개념 적용하기

지구의 형성 과정

### 01 그림은 태양계의 형성 과정을 나타낸 것이다.



(가) 태양계 성운 수축 (나) 원시 태양 형성 (다) 원시 행성 형성

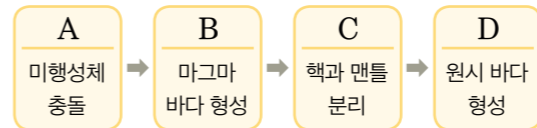
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

- <보기>
- ㄱ. (가)에서 태양계 성운은 자체 중력으로 수축한다.
  - ㄴ. (나)의 원시 태양 중심부에서는 헬륨 핵융합 반응이 일어난다.
  - ㄷ. (다)에서 원시 행성은 미행성체들이 충돌하고 뭉쳐지면서 형성된다.

- ① ㄱ      ② ㄴ      ③ ㄱ, ㄷ  
④ ㄴ, ㄷ    ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

지구의 형성 과정

### 02 그림은 지구의 진화 과정을 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

- <보기>
- ㄱ. A 시기에 원시 지각이 형성되었다.
  - ㄴ. B와 C 시기 사이에 지구 내부에서 밀도 차이에 의한 물질의 이동이 일어났다.
  - ㄷ. D 시기 이후에 대기 중 이산화 탄소의 농도가 크게 감소했다.

- ① ㄱ      ② ㄴ      ③ ㄱ, ㄷ  
④ ㄴ, ㄷ    ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

생명체와 지구시스템의 상호작용

### 03 그림은 선캄브리아시대에 형성된 호상철광층의 모습이다.



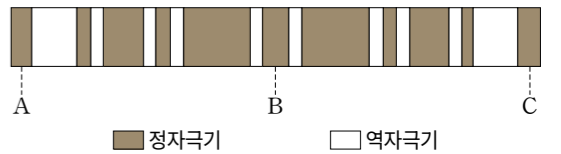
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

- <보기>
- ㄱ. 서로 다른 광물로 이루어진 층이 번갈아 퇴적되었다.
  - ㄴ. 바닷물에 녹아 있던 철이 산소와 반응해 해저에 침전되어 형성되었다.
  - ㄷ. 오늘날의 바다에서도 호상철광층이 활발하게 형성되고 있다.

- ① ㄱ      ② ㄷ      ③ ㄱ, ㄴ  
④ ㄴ, ㄷ    ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

판 구조론의 발달사와 플룸 구조론

### 04 그림은 판의 경계가 존재하는 북반구의 어느 해역에서 측정된 해양 지각의 고지자기 줄무늬를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

- <보기>
- ㄱ. 이 해역에 발산형 경계가 존재한다.
  - ㄴ. 퇴적물의 두께는 A가 B보다 두껍다.
  - ㄷ. C에서의 고지자기 방향은 현재 자기장의 방향과 반대이다.

- ① ㄱ      ② ㄷ      ③ ㄱ, ㄴ  
④ ㄴ, ㄷ    ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

05 지구 내부의 플룸 운동에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

- 보기
- ㄱ. 플룸의 운동은 맨틀 전반에 걸쳐 발생한다.
  - ㄴ. 뜨거운 플룸의 상승으로 생성된 열점에서 화산 활동이 일어난다.
  - ㄷ. 차가운 플룸은 맨틀 최하부까지 하강해 뜨거운 플룸의 생성을 유발한다.

- ① ㄱ            ② ㄷ            ③ ㄱ, ㄴ
- ④ ㄴ, ㄷ       ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

06 그림 (가)와 (나)는 형태가 다른 화산의 모습을 나타낸 것이다.



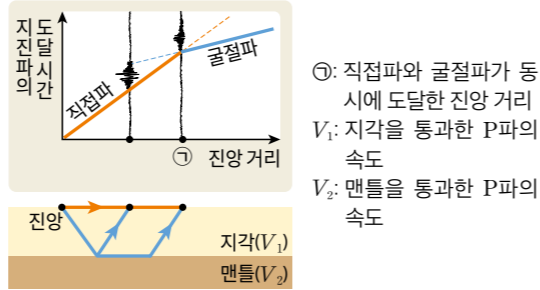
(가) (나)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

- 보기
- ㄱ. (가)는 (나)보다 유동성이 큰 마그마가 분출되어 형성되었다.
  - ㄴ. (가)는 (나)보다 SiO<sub>2</sub> 함량이 많은 마그마가 분출되어 형성되었다.
  - ㄷ. 화산 활동 시 분출된 화산쇄설물의 양은 (가)보다 (나)가 많았다.

- ① ㄱ            ② ㄷ            ③ ㄱ, ㄴ
- ④ ㄱ, ㄷ       ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

07 그림은 어느 지진이 발생한 이후 P파의 주시 곡선과 이동 경로를 나타낸 것이다.

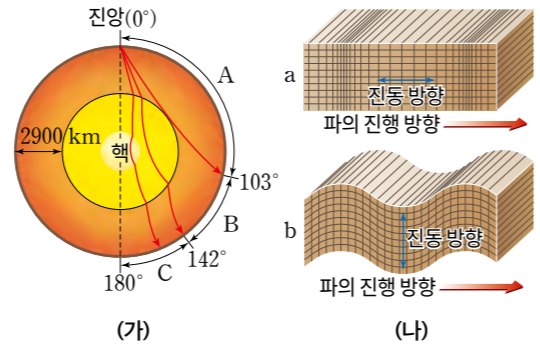


①: 직접파와 굴절파가 동시에 도달한 진앙 거리  
 $V_1$ : 지각을 통과한 P파의 속도  
 $V_2$ : 맨틀을 통과한 P파의 속도

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 골라 보자.

- 보기
- ㄱ. P파의 속도는 지각보다 맨틀에서 빠르다.
  - ㄴ. 지각의 두께가 두꺼울수록 ①은 증가한다.
  - ㄷ.  $V_2$ 가 증가하면 ①은 감소한다.

08 그림 (가)는 지구 내부를 통과하는 지진파의 경로를, 그림 (나)는 P파와 S파의 전파 모습을 순서 없이 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

- 보기
- ㄱ. A 지역에는 a와 b가 모두 도달한다.
  - ㄴ. B 지역을 통해 맨틀과 핵의 경계를 구분할 수 있다.
  - ㄷ. C 지역에는 b만 도달한다.

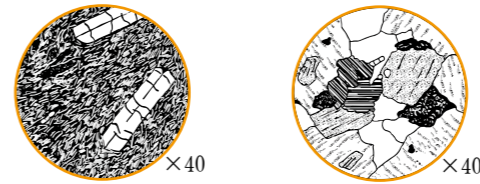
- ① ㄱ            ② ㄷ            ③ ㄱ, ㄴ
- ④ ㄴ, ㄷ       ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

09 과학적 문제해결 능력 그림은 얼음덩어리 지구 상태였던 시기 이후 전 지구를 덮고 있던 얼음이 녹은 뒤에 형성된 석회암층의 모습이다.



- (1) 얼음덩어리 지구 상태였던 시기에는 현재 지구보다 대기 중 이산화 탄소의 농도가 매우 높았던 것으로 알려져 있다. 그 까닭을 서술해 보자.
- (2) 전 지구를 덮고 있던 얼음이 녹은 뒤 위와 같은 석회암층이 형성된 까닭을 서술해 보자.

10 과학적 탐구 능력 그림 (가)와 (나)는 두 종류의 화성암 박편을 편광 현미경으로 관찰해 그린 것이다.



- (1) 두 암석의 조직은 어떤 차이가 있는지 비교하여 서술해 보자.
- (2) 암석의 조직을 바탕으로 하여 두 화성암의 생성 환경을 서술해 보자.

11 과학적 의사결정 능력 다음은 판 구조론 정립 과정을 설명한 글이다.

판 구조론의 등장으로 지구를 바라보는 우리의 눈은 새롭게 바뀌었다. 지진대와 화산대의 분포, 습곡 산맥의 형성 등 과거에는 서로 관계없이 일어난다고 여겨졌던 여러 지질 현상을 통합적으로 바라볼 수 있게 된 것이다. 1900년대 초 대륙 이동설에서 시작되어 맨틀 대류설과 해양저 확장설을 거쳐 1960년대 후반에 정립된 판 구조론은 지구과학 분야의 중심 이론으로 자리매김했다. 관측 기술의 발달은 판 구조론이 정립되는 데 중요한 역할을 했다. 대륙 이동설과 맨틀 대류설은 발표 당시에 과학계의 인정을 받지 못했지만, 관측 기술이 발달해 해양저 확장설로 이어질 수 있었다. 이후 여러 관측 기기로 수집한 과학적 자료가 축적되고 판 구조론을 지지하는 증거가 발표되면서 판 구조론이 정립되었다.

- (1) 판 구조론의 정립 과정을 바탕으로 하여 과학 이론이 정립되는 과정을 서술해 보자.

.....

.....

- (2) 판 구조론의 정립 과정에서 활용된 관측 기기 및 기술을 사례로 관측 기술의 발달이 과학에 주는 영향을 설명하는 글을 써 보자.

.....

.....

스스로 평가하기

- ‘지구 탄생과 생동하는 지구’를 학습한 다음, 나의 성취 수준을 스스로 평가해 보자.
- 지식-이해**
    - 지구의 탄생 이후 지구시스템 각 권역의 형성 과정을 설명할 수 있는가? ☆☆☆☆☆
    - 판 구조론의 발달사와 관련지어 판을 움직이는 맨틀의 상부 운동과 플룸 구조 운동을 구분할 수 있는가? ☆☆☆☆☆
  - 과정-기능**
    - 지구시스템의 진화 역사에서 산소, 탄소, 물의 순환 과정으로 지권, 기권, 수권의 변화를 추적했는가? ☆☆☆☆☆
    - 암석의 순환 과정에서 화산 활동의 역할과 화산 활동으로 생성되는 암석의 특성을 추론했는가? ☆☆☆☆☆
    - 지진파를 이용해 지구 내부 구조를 알아내는 과정을 탐구했는가? ☆☆☆☆☆
  - 가치-태도**
    - 지구시스템의 상호작용을 이해하며 우리 삶의 터전인 지구의 소중함을 인식했는가? ☆☆☆☆☆

# II

## 해수의 운동과 순환

파도가 밀려오는 해안뿐만 아니라 잔잔해 보이는 대양의 바닷물도 끊임없이 움직이고 있다. 해수를 움직이는 힘은 무엇이며, 해수의 운동과 순환으로 나타나는 현상에는 어떤 것들이 있을까?

### 이 단원의 학습 내용

- 01 해수를 움직이는 힘
- 02 지형류
- 03 해파
- 04 해일
- 05 조석

**지식·이해**


- 해수를 움직이는 여러 가지 힘을 설명할 수 있다.
- 에크만 수송과 지형류의 발생 원리를 설명할 수 있다.

**과정·기능**

- 탐구 활동을 통해 해파의 발생 및 전파 과정을 해석할 수 있다.
- 실측 자료를 이용해 각 지역에서의 조석 양상을 분석하고 추론할 수 있다.

**가치·태도**

- 해일의 피해 사례를 조사하고 대처 방안을 제안하며 재해 예방의 중요성을 인식할 수 있다.

 **창의적 문제해결** 연안 침식 문제 대응 방안 결정하기



# 01

## 해수를 움직이는 힘

- 학습 목표**
- 해수의 정역학 평형을 설명할 수 있다.
  - 해수를 움직이는 여러 가지 힘을 설명할 수 있다.

바다 밑에서 잠수부가 숨을 내쉴 때 나오는 기포는 해수면으로 올라갈수록 크기가 점점 커지는데, 그 까닭은 무엇일까?



해양에서는 해류와 같이 수평 방향으로 해수의 움직임이 나타나지만, 용승과 침강 등을 제외하면 연직 방향으로의 해수의 움직임이 거의 나타나지 않는다. 그 까닭을 해수에 작용하는 힘과 관련지어 알아보자.

### 수압 경도력과 정역학 평형

수압은 물의 무게 때문에 발생하는 압력으로, 단위 면적에 수직으로 작용하는 힘이다. 같은 수심에서 해수의 양쪽 측면에 작용하는 수압은 크기가 같고 방향이 반대이므로 상쇄된다. 그러나 수압은 수심이 깊어질수록 커지기 때문에 아래에 있는 해수가 받는 압력이 위에 있는 해수가 받는 압력보다 크다. 이와 같이 두 지점 사이에 수압 차이가 생기면 수압 경도력이 작용한다. 따라서 그림 II-1과 같이 연직 수압 경도력이 아래에서 위로 작용한다.

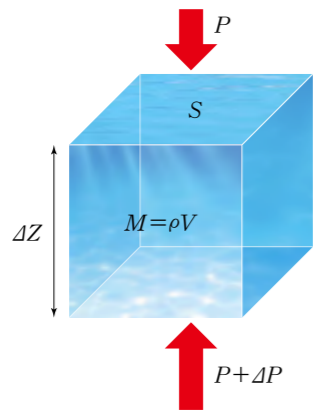


그림 II-1 연직 수압 경도력 수심이 깊어질수록 수압이 커지므로, 아래에서 위로 연직 수압 경도력이 작용한다.

단면적이  $S$ 인 해수에  $\Delta P$ 만큼 수압 차이가 나타난다면, 이 해수가 연직 방향으로 받는 힘( $F$ )의 크기는  $\Delta P \times S$ 이다. 해수의 질량( $M$ )은 밀도( $\rho$ ) × 부피( $V$ )이고, 부피( $V$ )는 단면적( $S$ ) × 깊이 차( $\Delta Z$ )이다. 따라서 단위 질량의 해수에 작용하는 연직 수압 경도력( $P_v$ )의 크기는 다음과 같다.

$$P_v = \frac{F}{M} = \frac{\Delta P \times S}{\rho \times S \times \Delta Z} = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{\Delta Z}$$

해수에 연직 수압 경도력만 작용한다면 해수는 항상 아래에서 위로 움직일 것이다. 그러나 해수에는 위에서 아래로 중력이 작용하므로 그림 II-2와 같이 연직 수압 경도력과 중력이 힘의 평형을 이루고 있는데, 이러한 상태를 정역학 평형이라고 한다. 이때 단위 질량의 해수에 작용하는 연직 수압 경도력( $\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{\Delta Z}$ )과 중력( $g$ )의 크기가 같으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

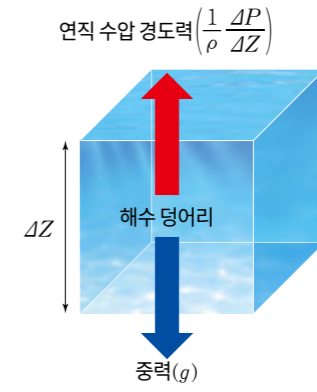


그림 II-2 정역학 평형 연직 수압 경도력과 중력이 평형을 이룬다.

정역학 평형은 'III. 강수 과정과 대기의 운동'에서도 배운다. → 101 쪽

이 식을 정역학 방정식이라고 하고, 연직 수압 경도력과 중력의 방향이 반대임을 고려해 (-) 부호를 사용하기도 해요.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{\Delta Z} = g, \quad \Delta P = \rho g \Delta Z$$

해수는 정역학 평형 상태에 있으므로 연직 방향으로의 움직이기 어렵지만, 수평 방향으로 수압 차이가 생기면 쉽게 움직일 수 있다. 수평 방향의 수압 차는 주로 해수면의 높이 차 또는 해수의 밀도 차이가 생길 때 발생한다. 다음 활동에서 수평 방향으로 물이 흐르는 원리를 알아보자.

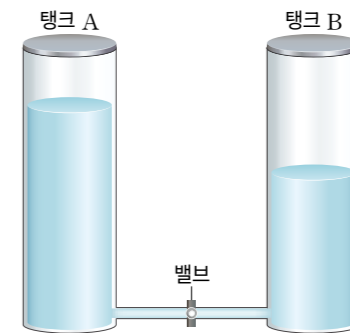
## 해보기

### 수평 방향으로 물이 흐르는 원리 알아보기

탐구 능력

그림은 탱크 A, B에 밀도가 같은 물을 넣은 모습을 나타낸 것이다.

1. 탱크 A와 B의 수면 높이 차이가 1 m일 때 수압 차는 몇 hPa인지 계산해 보자. (단, 물의 밀도( $\rho$ )는  $1000 \text{ kg/m}^3$ , 중력 가속도( $g$ )는  $10 \text{ m/s}^2$ 이다.)
2. 밸브를 열었을 때 물의 이동 방향을 예상해 보고, 수면의 높이 차이가 더 커지면 물 흐름의 세기가 어떻게 변할지 수압 경도력 식을 이용하여 설명해 보자.



**압력의 단위 변환**  
 $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ kg/m} \cdot \text{s}^2$   
 $100 \text{ Pa} = 1 \text{ hPa}$

3. A, B에 밀도가 서로 다른 액체를 같은 높이로 넣은 뒤 밸브를 열었을 때 물의 이동 방향을 예상해 보자.

해수면에 경사가 생기는 까닭  
해수면 경사는 바람, 기압, 중력,  
해수의 밀도 변화, 해수의 수렴  
과 발산 등 다양한 원인으로 생  
긴다.

그림 II-3과 같이 밀도가  $\rho$ 로 일정하고 길이가  $\Delta X$ , 단면적이  $S$ , A면과 B면에 작용하는 수압 차( $P_A - P_B$ )가  $\Delta P$ 인 해수를 가정해 보자. 이 해수에 수평 방향으로 작용하는 힘( $F$ )의 크기는  $\Delta P \times S$ 이고, 해수의 질량( $M$ )은  $\rho \times V = \rho \times S \times \Delta X$ 이다. 따라서 단위 질량의 해수에 작용하는 수평 수압 경도력( $P_H$ )의 크기는 다음과 같다.

$$P_H = \frac{F}{M} = \frac{\Delta P \times S}{\rho \times S \times \Delta X} = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{\Delta X}$$

해수가 정역학 평형 상태라면  $\Delta P = \rho g \Delta Z$ 이므로, 수평 수압 경도력( $P_H$ ) =  $g \frac{\Delta Z}{\Delta X}$ 로 나타낼 수 있다. 따라서 수평 수압 경도력의 크기는 중력 가속도( $g$ )와 해수면 경사( $\frac{\Delta Z}{\Delta X}$ )에 비례한다.

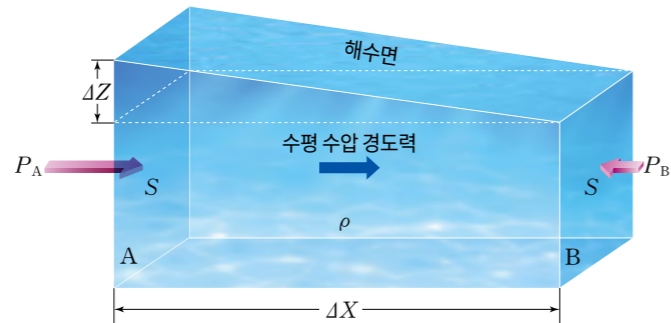


그림 II-3 해수면 경사로 발생하는 수평 수압 경도력

수평 수압 경도력은 해수의 밀도가 서로 다른 경우에도 발생한다. 그림 II-4와 같이 밀도는 수평 방향의 수압 차가 없지만, 밀도가 작은 따뜻한 해수가 있는 A 지점의 해수면 높이는 밀도가 큰 찬 해수가 있는 B 지점의 해수면 높이보다 높다. 따라서 등수압면 사이의 간격은 따뜻한 해수 쪽이 찬 해수 쪽보다 넓다. 그러므로 A와 B의 수압을 비교하면 A의 수압이 B의 수압보다 높아 A에서 B로 수평 수압 경도력이 작용한다.

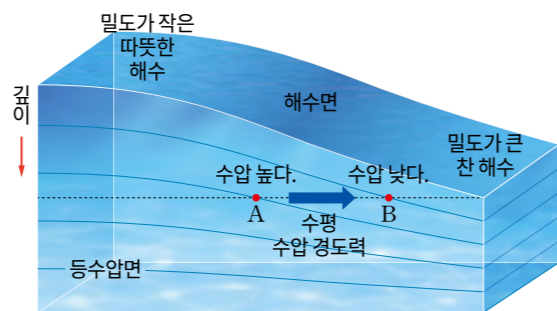


그림 II-4 밀도 차로 발생하는 수평 수압 경도력

해수의 밀도는  
수온이 낮을수록, 염분과  
수압이 높을수록 높아져요. 일부 극  
지방을 제외하면 수온 변동 폭이 염분  
변동 폭보다 크므로 주로 수온에 의한  
밀도 변화를 고려하면 돼요.



전향력

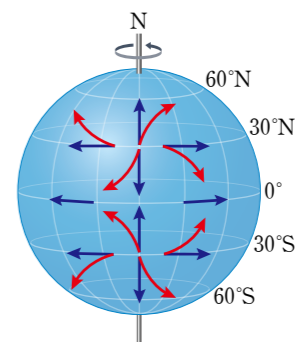
그림 II-5와 같이 시계 반대 방향으로 회전하고 있는 원반에서 던져진 공은 원래 의도한 목표 지점에서 오른쪽으로 치우쳐 떨어진다. 공의 이동 경로가 예상 경로의 오른쪽으로 휘어 보이는 까닭은 공이 이동하는 동안 다른 힘이 작용한 것이 아니라 관찰자가 회전하기 때문이다.



그림 II-5 전향력의 작용 회전 원반 위에서 물체를 던지면 물체의 이동 방향이 휘어지는 것처럼 보인다.

이처럼 회전하는 표면 위에서 운동하는 물체에는 운동 방향을 휘어지게 하는 가상의 힘인 **전향력**이 작용한다. 그림 II-6과 같이 지구상에서 움직이는 모든 물체는 지구 자전으로 생기는 전향력의 영향을 받는다. 전향력은 북반구에서는 물체 운동 방향의 오른쪽 직각 방향으로 작용하고, 남반구에서는 왼쪽 직각 방향으로 작용한다.

지구 자전 각속도를  $\Omega$ 라고 하고, 위도  $\phi$ 인 지점에서 단위 질량의 물체가 속력  $v$ 로 운동할 때 작용하는 전향력의 크기는  $2v\Omega \sin\phi$ 이다. 따라서 전향력은 극에서 가장 크고 저위도로 갈수록 작아져 적도에서 0이 된다. 운동의 규모가 작은 경우는 전향력의 효과를 고려하지 않아도 된다. 그러나 해류와 같이 큰 규모의 운동에서는 전향력을 반드시 고려해야 한다.



→ 물체의 처음 운동 방향  
→ 전향력에 의한 물체의 운동 경로

그림 II-6 전향력이 작용하는 방향

전향력은 'III. 강수 과정과 대기의 운동'에서도 배운다.  
→ 102 쪽

코리올리  
(Coriolis, G. G., 1792~1843)  
프랑스의 수학자이자 과학자.  
회전하는 좌표계에서 물체의 운동을 수학적으로 설명했다. 이 학자의 이름을 따서 전향력을 '코리올리 힘'이라고도 한다.

지구 자전 각속도( $\Omega$ )  
 $\Omega = \frac{2\pi}{\text{지구 자전 주기}}$   
 $\approx 7.29 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$

스스로 확인하기

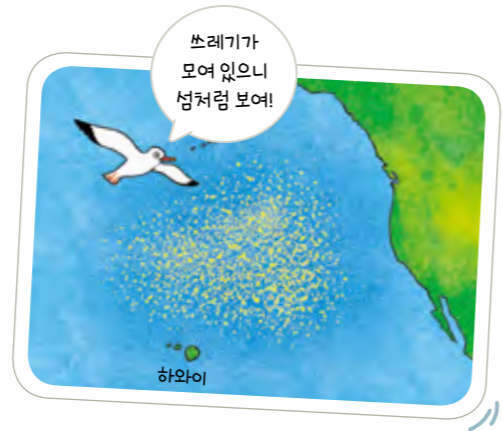
- 1 수평 수압 경도력이 해수면 경사에 비례함을 정역학 방정식을 이용하여 설명해 보자.
- 2 지구상에서 물체가 움직일 때 전향력이 작용하지 않는 지역은 어디인지 설명해 보자.
- 3 | 창의력 더하기 | 지구의 자전 방향이 반대로 바뀐다면 전향력의 방향이 어떻게 달라질지 유추해 보자.

# 02

## 지형류

- 학습 목표**
- 에크만 수송을 설명할 수 있다.
  - 지형류의 발생 원리를 설명할 수 있다.

미국 하와이와 캘리포니아 사이에는 우리나라 면적의 16 배가 넘는 거대한 쓰레기 섬이 있다고 한다. 쓰레기들이 일정한 해역에 모이는 까닭은 무엇일까?



대기와 해수의 상호작용으로 형성된 표층 해류는 각각 거의 일정한 세기와 방향으로 흐르면서 그림 II-7과 같이 표층 순환을 형성한다. 이러한 해류는 어떻게 형성되는지 알아보자.

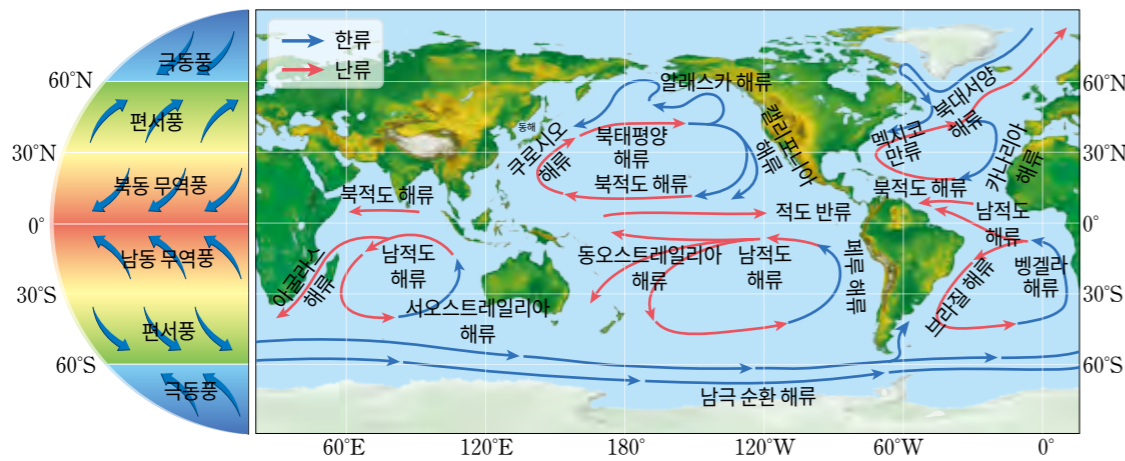


그림 II-7 대기 대순환과 해수의 표층 순환

### 에크만 수송

북반구에서 바람이 일정한 방향으로 계속해서 불면 표면 해수는 전향력의 영향으로 풍향의 오른쪽 45° 방향으로 움직인다. 해수는 점성이 있기 때문에 표면 해수의 움직임이 하층으로 전달되고 해수의 마찰에 의해 깊어질수록 유속이 감소하며 전향력에 의해 흐름의 방향도 점점 오른쪽으로 치우친다. 이러한 해수의 운동을 수평면에 투영하면 나선이 그려지는데, 이를 **에크만 나선**이라고 한다.

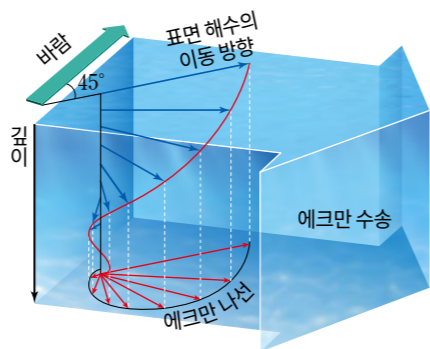


그림 II-8 북반구에서의 에크만 나선과 수송 방향

**에크만**  
(Ekman, V. W., 1874~1954)  
스웨덴의 해양 물리학자. 난센(Nansen, F., 1861~1930)이 북극해 항해에서 관찰한 빙산의 이동 모습을 나선 이론을 도입해 수학적으로 설명했다.

에크만 나선에서 해수가 이동하는 방향이 표면과 정반대가 되는 깊이를 마찰저항심도라고 하며, 표면부터 마찰저항심도까지를 **에크만층** 또는 **마찰층**이라고 한다. 에크만층에서 해수의 평균 이동 방향이 북반구에서는 풍향의 오른쪽 90° 방향으로 나타나고 남반구에서는 풍향의 왼쪽 90° 방향으로 나타나는데, 이를 **에크만 수송**이라고 한다.

에크만 수송은 해수의 수렴과 발산, 이에 따른 용승과 침강 등 해수의 운동을 설명하는 데 중요하다.

### 지형류 평형

에크만 수송이 일어나 해수가 이동하면 그림 II-9와 같이 해수면에 경사가 생긴다. 해수면 경사로 수압 경도력이 발생하고 수압이 높은 곳에서 낮은 곳으로 해수가 움직이기 시작한다. 해수가 움직이기 시작하면 전향력이 작용해 북반구에서 해수의 이동 방향은 점점 오른쪽으로 휘어진다. 결국 북반구에서 해수는 수압 경도력의 오른쪽 직각 방향으로 등수압선에 나란하게 흐른다. 이처럼 수압 경도력과 전향력이 평형을 이룬 상태를 **지형류 평형**이라고 하고, 이때 해수의 흐름을 **지형류**라고 한다.

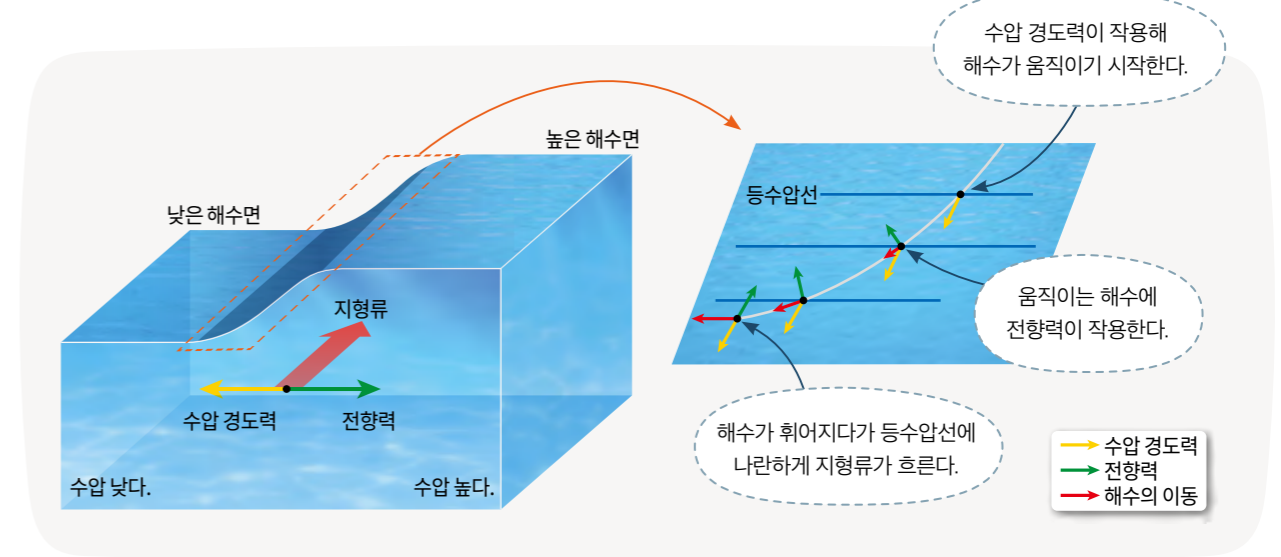


그림 II-9 북반구에서의 지형류 형성 과정 수압 경도력과 전향력이 평형을 이루어 등수압선과 나란하게 흐르는 지형류가 형성된다.

지형류는 수압 경도력과 전향력이 평형을 이루므로  $g \frac{\Delta Z}{\Delta X} = 2v\Omega \sin\phi$ 의 관계가 성립한다. 따라서 지형류의 유속  $v = \frac{1}{2\Omega \sin\phi} \cdot g \frac{\Delta Z}{\Delta X}$ 이고 위도가 낮을수록, 해수면 경사가 클수록 유속이 빠르다.

실제 해양에서는 대기 대순환의 영향으로 해수면 경사가 나타난다. 그림 II-10과 같이 북반구 아열대 해양에서 편서풍과 북동 무역풍이 불면 에크만 수송이 일어나 위도 30°N에서 해수면 높이가 높아진다. 따라서 수압 경도력이 남쪽 또는 북쪽으로 작용해 위도 0°~30°N에서는 서쪽 방향으로 지형류가 흐르고, 위도 30°N~60°N 해역에서는 동쪽 방향으로 지형류가 흐른다.

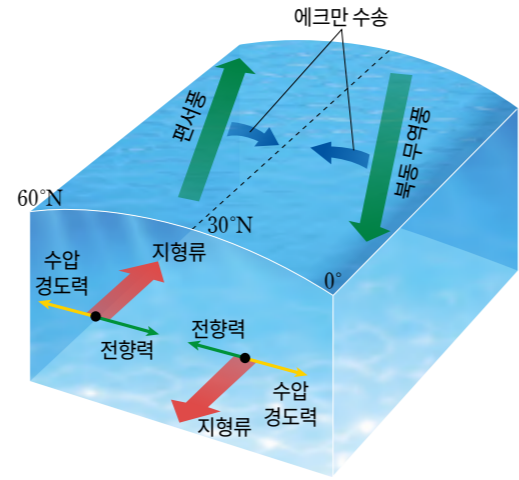


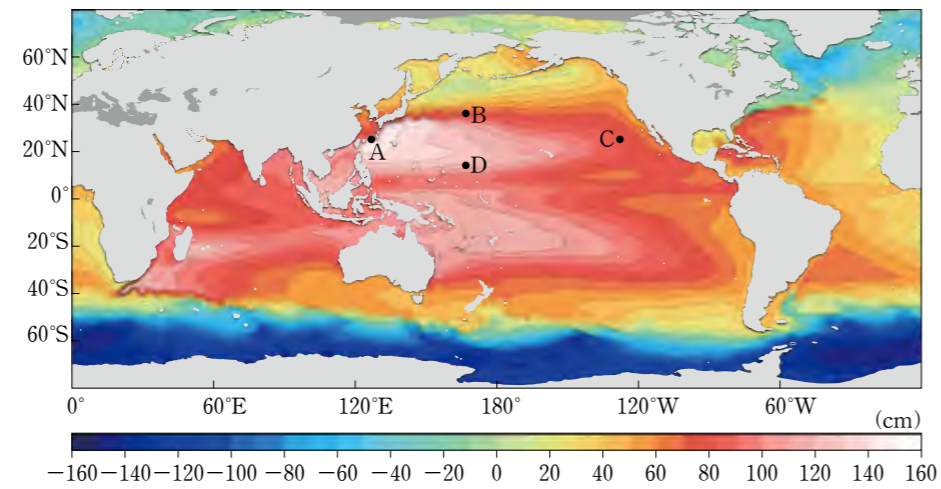
그림 II-10 북반구 아열대 해양에서 지형류의 발생

동서 방향으로 흐르던 지형류는 육지와 부딪쳐 남북으로 나누어지며 북반구 아열대 해양을 중심으로 커다란 시계 방향의 순환을 형성하는데, 이러한 순환을 구성하는 해류는 모두 지형류에 해당한다. 다음 활동에서 실제 해양의 해수면 높이와 지형류의 방향을 알아보자.

### 해보기 전 세계 해양의 해수면 높이와 지형류 분석하기

그림은 인공위성을 이용해 1993년~2017년 동안 관측한 평균 해수면 높이 분포를 나타낸 것이다.

(출처: 유럽지구과학협회(EGU), 2021.)



1. A~D에서 수압 경도력, 전향력, 지형류의 방향을 각각 나타내 보자.
2. A와 C에서 지형류 세기를 비교해 보고, 그렇게 판단한 까닭을 설명해 보자.

인공위성에서 해수면에 전파를 발사한 후 반사파의 수신 시간을 측정하면 해수면의 높이를 정확히 측정할 수 있어요.



전 세계 해양의 해수면 높이 분포를 자세히 살펴보면 해수면이 가장 높은 해역은 해수 순환의 중심에서 서쪽으로 치우쳐 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 그림 II-11과 같이 수압 경도력이 해양의 동쪽보다 서쪽에서 크게 작용해 해양의 서쪽에서 해류가 더 강하게 흐른다.

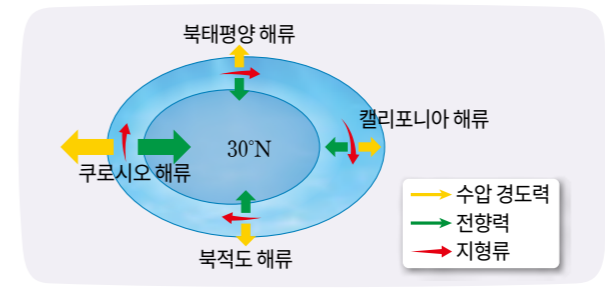


그림 II-11 북태평양 아열대 순환을 구성하는 해류에 작용하는 힘의 평형

### 자료실 해양 대순환을 연구한 과학자

오늘날 우리가 알고 있는 해양 대순환의 원리는 세 명의 과학자에 의해 정립되었다고 해도 과언이 아니다. 노르웨이의 탐험가이자 과학자인 난센(Nansen, F., 1861~1930)은 1893년 자신이 직접 설계한 프람호를 타고 북극해를 향해하던 중 빙산이 풍향의 오른쪽 20°~40° 방향으로 이동하는 현상을 관찰했다. 난센은 탐험을 마치고 스웨덴의 해양학자 에크만(Ekman, V. W., 1874~1954)에게 관측 자료를 전달했다. 에크만은 지구 자전 효과를 도입해 난센의 관측 결과를 설명했으며, 나선 이론을 발표하여 수심에 따른 해수의 이동도 설명했다. 이후 에크만 나선 이론은 해양 운동뿐만 아니라 대기 운동에서도 적용된다는 사실이 알려지며 다양하게 응용되었다. 해양 순환이 대기 순환과 가장 크게 다른 점은 동서 방향으로 흐르던 해류가 대륙에 막혀 남북으로 나뉘면서 시계 또는 반시계 방향의 환류를 형성한다는 것이다. 특히 대양의 서쪽으로 흐르는 해류는 동쪽으로 흐르는 해류보다 강하게 흐르는 특징이 있는데, 미국 출신의 해양학자인 스토멜(Stommel, H. M., 1920~1992)은 위도에 따른 지구 자전 효과의 차이 때문에 이러한 현상이 나타난다는 사실을 역학적으로 설명했다.

세 명의 과학자는 해양 대순환 이론을 정립했을 뿐만 아니라, 난센 채수기, 에크만 유속계, 무인 해양 관측 기기를 고안하는 등 해양 관측 분야에도 크게 기여했다. 이들의 업적은 해양 대순환 이론의 완성과 함께 물리해양학 발전에 큰 영향을 미쳤다.



### 스스로 확인하기

- 1 우리나라 동해안에 남풍이 불 때 에크만 수송 방향을 설명해 보자.
- 2 지형류에 작용하는 두 가지 힘은 무엇인지 설명해 보자.
- 3 | 창의력 더하기 | 적도에서 지형류가 흐를 수 있는지 생각해 보자.

## 해파

**학습 목표**

- 해파의 발생 과정을 설명할 수 있다.
- 천해파와 심해파의 차이점을 비교·설명할 수 있다.

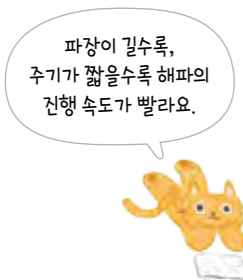
바다에 빠진 공은 해안으로 잘 밀려오지 않는다.  
파도가 해안으로 밀려오더라도 공은 파도를 따라  
해안으로 쉽게 오지 않는 까닭은 무엇일까?



### 해파의 특징

해수면에서 생긴 교란이 파동의 형태로 퍼져 나가면서 발생하는 물 입자의 주기적인 상하 운동을 **해파**라고 한다.

그림 II-12는 해파의 모양을 간단히 나타낸 것이다. 해파에서 해수면이 가장 높은 곳을 **마루**, 해수면이 가장 낮은 곳을 **골**이라고 하고, 골에서 마루까지의 높이를 **파고**라고 한다. 마루에서 마루 또는 골에서 골까지의 거리를 **파장**이라고 한다. 또 해파의 마루나 골이 해수면 위의 고정된 한 지점을 지나간 뒤, 다음 마루나 골이 지나갈 때까지의 시간을 **주기**라고 한다. 해파의 파장과 주기를 알면 해파의 진행 속도를 구할 수 있다.



$$\text{해파의 진행 속도} = \frac{\text{파장}}{\text{주기}}$$

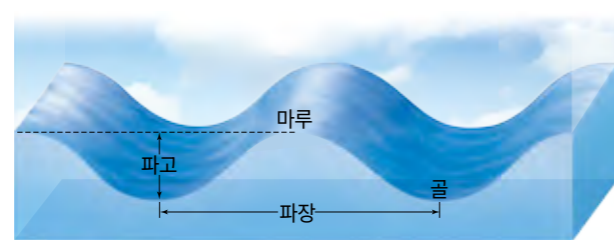


그림 II-12 해파

**?** 움직이지 않는 배에서 전파 속도가 2 m/s인 파의 마루가 통과한 뒤 다음 마루가 통과할 때까지 2 초가 걸렸다면, 이 해파의 파장은 몇 m인가?

**해파의 발생**  
대부분의 해파는 바람이 불어 발생하며 이를 풍파라고 한다. 해파는 바람 외에도 큰 선박의 항해, 해저 지진, 화산 활동 등으로 발생한다.

### 해파의 발생 및 전파

대부분의 해파는 바람이 불어 발달하는데, 큰 바다에서 바람이 계속해서 불면 바람의 세기 등에 따라 다양한 해파가 만들어진다. 다음 활동에서 해파의 발생과 전파 모습을 간단히 알아보자.

## 해파 발생 및 전파 실험하기

● 탐구 설계 및 수행

### 목표

바람이 불 때 해파가 발생하는 원리와 전파되어 가는 과정을 설명할 수 있다.

### 과정

- 1 사각 수조에 물을 채우고 수평과 수직으로 자를 설치한 뒤 여러 개의 스티로폼 조각을 물 위에 띄운다.
- 2 손선풍기를 작동시켜 수조의 한쪽 구석에 바람을 일으킨 뒤 스티로폼 조각의 움직임을 관찰한다.
- 3 손선풍기의 바람 세기를 다르게 하면서 수면의 높이 변화를 관찰한다.



### 결과및정리

1. 해파가 진행함에 따라 스티로폼 조각은 어떻게 움직이는가?
2. 바람의 세기에 따라 수면의 높이가 어떻게 달라지는가?
3. 해파의 발생 원리와 해파가 전파되어 가는 과정을 설명해 보자.

### 스스로 평가하기

- | 지식·이해 |** 해파가 발생하는 원리와 해파에 영향을 주는 요인을 설명할 수 있는가? ☆☆☆
- | 과정·기능 |** 스티로폼 조각이 움직이고 이동해 가는 과정을 정확하게 관찰했는가? ☆☆☆
- | 가치·태도 |** 실험 활동에 적극적으로 참여하고 해파의 발생과 전파 과정에 흥미를 느꼈는가? ☆☆☆

### 준비물

- 사각 수조  물
- 자 2 개  손선풍기
- 스티로폼 조각

### 안전

손선풍기가 물에 닿지 않도록 주의한다.

### 활동 도우미

- 수조 벽면에서 반사된 파들이 영향을 주지 않도록 수조는 가능한 한 50 cm 이상 길고 넓은 것으로 준비한다.
- 손선풍기 바람이 스티로폼 조각에 직접 닿지 않도록 유의한다.
- 약한 바람에 의해 발생한 작은 파의 입자 운동도 잘 관찰할 수 있도록 스티로폼 조각은 작은 것으로 준비한다.

**한 걸음 더** 탐구 과정에서 보완할 점이나 더 알아보고 싶은 내용을 자유롭게 써 보자.

그림 II-13은 해파가 전파될 때 바다 위에 떠 있는 갈매기의 모습을 나타낸 것이다. 갈매기는 해수면 위에서 물 입자의 운동에 따라 움직이는데, 해파가 진행함에 따라 좌측 위로 올라갔다 회전하며 내려오는 운동을 하며 처음 위치로 돌아오는 것을 알 수 있다. 실제로 물 입자는 주기적으로 원운동 또는 타원 운동을 하면서 에너지만 전달하며, 해파의 진행 방향으로 직접 이동하지 않는다. 파의 마루와 골의 위치가 번갈아 바뀔 때 따라 해수가 이동하는 것처럼 보이는 것이다.

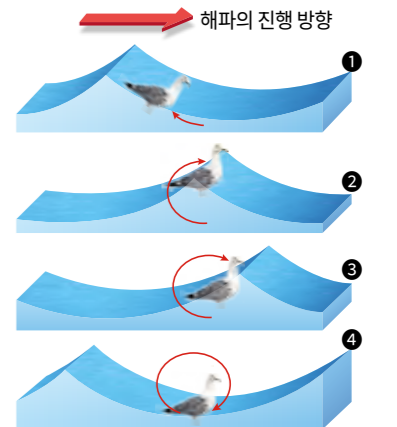


그림 II-13 해파의 진행과 물 입자의 운동

그림 II-14와 같이 해파는 모양에 따라 크게 풍랑, 너울, 연안 쇄파로 구분한다. 바람의 세기와 방향 변화에 따라 다양한 파장과 주기의 해파가 만들어지고, 계속 바람 에너지가 들어가서 마루가 보족하게 된 **풍랑**이 발생한다. 풍랑은 바람의 세기가 클수록, 바람이 부는 지속 시간이 길수록, 바람이 부는 해역이 넓을수록 크게 발달한다.

풍랑이 전파되어 바람이 부는 해역을 벗어나면 파의 마루가 둥글고 파장이 비교적 고르고 긴 해파로 변하는데, 이를 **너울**이라고 한다. 너울이 해안에 가까워지면서 수심이 얕아지면 속도가 느려지고 파장이 짧아지며 파고는 높아져 결국 파의 형태를 유지하지 못하고 부서지는데, 이를 **연안 쇄파**라고 한다.

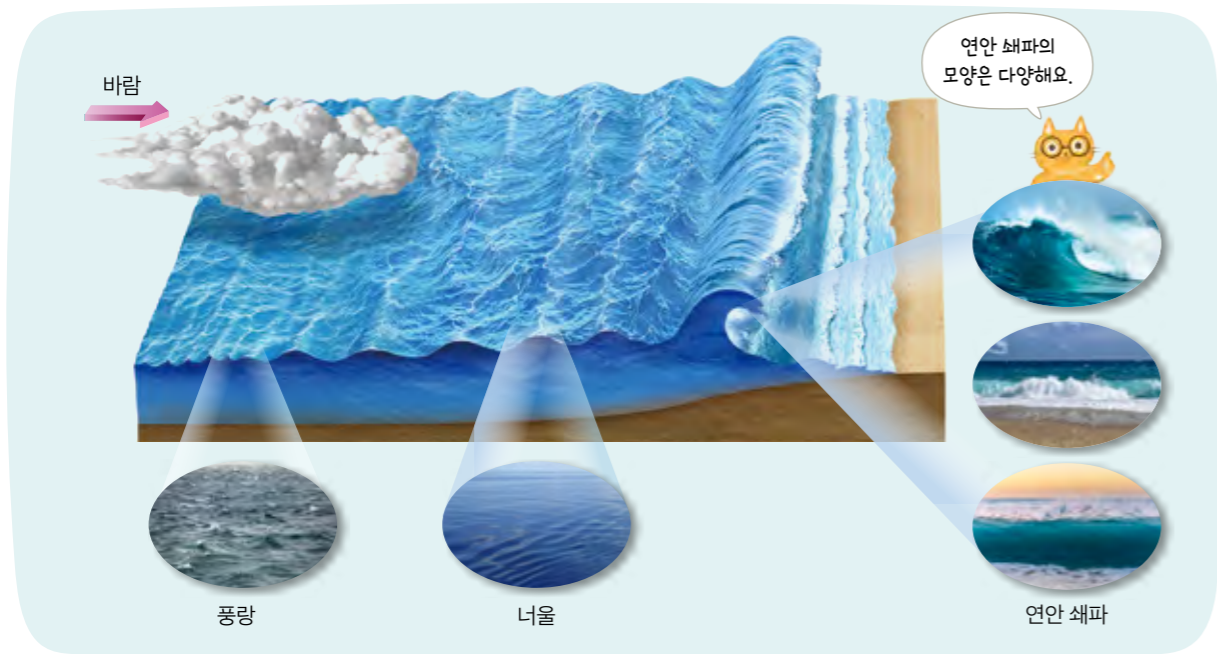


그림 II-14 모양에 따른 해파의 종류 바다에서 바람 때문에 풍랑이 발생하고 너울, 연안 쇄파의 형태로 해안 쪽으로 전파된다.

### 심해파와 천해파

해파는 파장과 수심의 비에 따라 심해파, 천이파, 천해파로 구분할 수 있다. 수심이 파장의 약  $\frac{1}{2}$ 보다 깊은 곳에서 해저의 영향을 받지 않고 전달되는 해파를 **심해파**라고 한다. 심해파의 물 입자는 원운동을 하고, 원의 지름은 표면에서는 파고와 같지만 수심이 깊어질수록 감소해 파장의  $\frac{1}{2}$ 이 되는 깊이에서는 무시할 수 있을 정도로 작아진다. 심해파의 속도는 파장으로 결정되며, 파장이 길수록 전파 속도가 빨라진다.

수심이 파장의 약  $\frac{1}{20}$ 보다 얇은 곳에서 해저의 영향을 받으며 전달되는 해파를 **천해파**라고 한다. 천해파의 물 입자는 타원 운동을 하고, 수심이 깊어질수록 그 모양이 납작해져 해저에서는 수평으로 왕복 운동을 한다. 천해파의 속도는 수심으로 결정되며, 수심이 얇을수록 전파 속도가 느려진다.

한편 심해파가 해안으로 전파되면서 수심이 파장의 약  $\frac{1}{20}$ 보다 깊고  $\frac{1}{2}$ 보다 얇은 해역에서는 심해파와 천해파의 중간에 해당하는 성질을 가지게 되는데, 이를 **천이파** 또는 **전이파**라고 한다.

심해파는 해안에 접근함에 따라 천이파, 천해파 순서로 변형된다. 천해파는 수심이 계속 얕아지면 파의 이동 속도가 느려지기 때문에 해안에 접근할수록 파장이 짧아지고 파고는 높아진다.

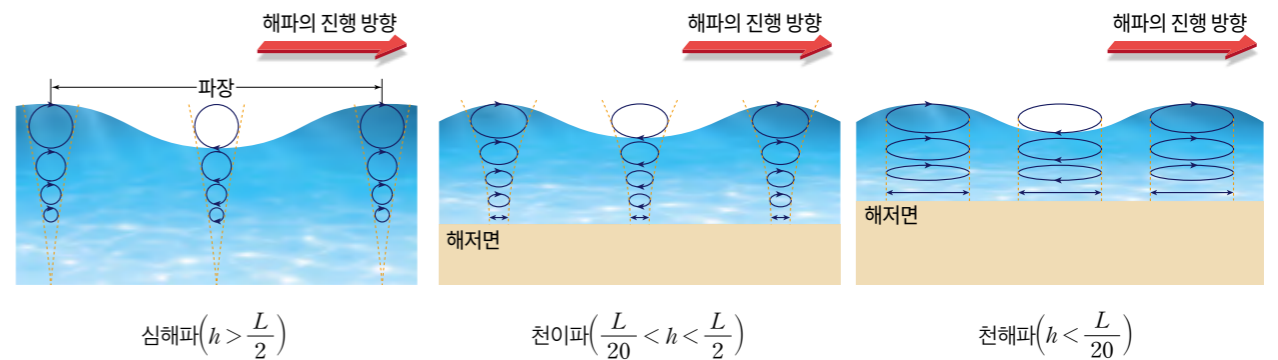


그림 II-15 파장(L)과 수심(h)의 관계에 따른 해파의 분류

해파가 해안에 비스듬히 접근하거나 곳이나 만 등 수심의 변화가 큰 해역에서는 해파의 진행 속도의 차이로 해파의 굴절이 일어난다. 그림 II-16과 같이 천해파가 해안으로 접근할 때 곳의 수심이 얕아 파의 속도가 감소하므로 해파는 곳으로 굴절한다. 따라서 곳에서는 해파의 에너지가 집중되어 침식 작용이 활발해 해식 절벽 등 침식 지형이 형성된다. 반대로 만에서는 해파의 에너지가 분산되어 퇴적 작용이 활발해 모래사장이 형성된다.

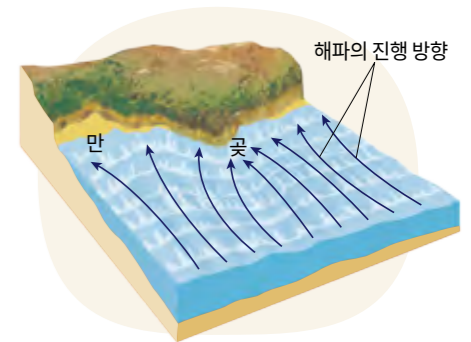
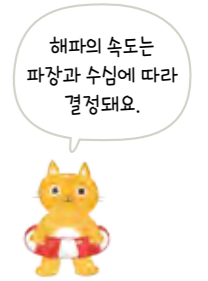


그림 II-16 해안선에 접근하는 해파의 모습

**심해파와 천해파의 속도**  
 심해파의 속도 =  $\sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$   
 천해파의 속도 =  $\sqrt{gh}$   
 (g: 중력 가속도, L: 파장, h: 수심)



### 스스로 확인하기

- 1 해파의 발생과 전파 과정을 설명해 보자.
- 2 심해파, 천이파, 천해파로 구분하는 기준을 설명해 보자.
- 3 | 창의력 더하기 | 대부분의 파도가 해안선에 나란하게 밀려오는 까닭을 설명해 보자.

# 04

## 해일

학습  
목표

- 해일이 발생하는 여러 가지 원인을 설명할 수 있다.
- 해일의 피해 사례를 조사하고 대처 방안을 제안할 수 있다.

큰 지진이 발생하거나 태풍이 지나가면

파도가 방파제를 넘어 해안가에 큰 피해를 준다.

지진이나 태풍이 이처럼 큰 파도를 일으키는 까닭은 무엇일까?



태풍이나 해저 지진, 해저 화산 폭발, 운석 충돌 등 여러 가지 원인으로 해수면이 상승해 바닷물이 육지로 밀려드는 현상을 **해일**이라고 한다. 그중에서 태풍과 지진에 의한 해일은 비교적 자주 발생하므로 피해를 줄일 수 있도록 대처 방안을 마련해야 한다.

### 폭풍 해일

태풍 등 강한 저기압이 해안으로 접근해 올 때 해수면이 높아져 바닷물이 내륙으로 밀려 들어오는 현상을 **폭풍 해일**이라고 한다. 태풍은 강한 바람과 많은 비를 동반하며 큰 피해를 주는데, 특히 해안가에서는 폭풍 해일 때문에 발생하는 피해가 매우 크다.

저기압의 중심은 기압이 낮으므로 해수면이 주변보다 높아지는데, 해면 기압이 1 hPa 낮아지면 해수면은 약 1 cm 높아진다. 만약 중심 기압이 주위보다 50 hPa 낮은 강한 태풍이 통과한다면 해수면은 약 50 cm 높아질 것이고, 여기에 태풍에 동반된 강풍이 바닷물을 밀어 올리면 폭풍 해일이 크게 발생할 수 있다.

그림 II-17과 같이 태풍의 위험 반원에 해안이 위치하게 될 때는 해안 쪽으로 부는 바람 때문에 해수면이 더욱 높아져 해안 지역에 큰 피해가 발생할 수 있다. 특히 해수면이 높아지는 만조 때 태풍이 통과한다면 해일의 피해가 더 커진다.

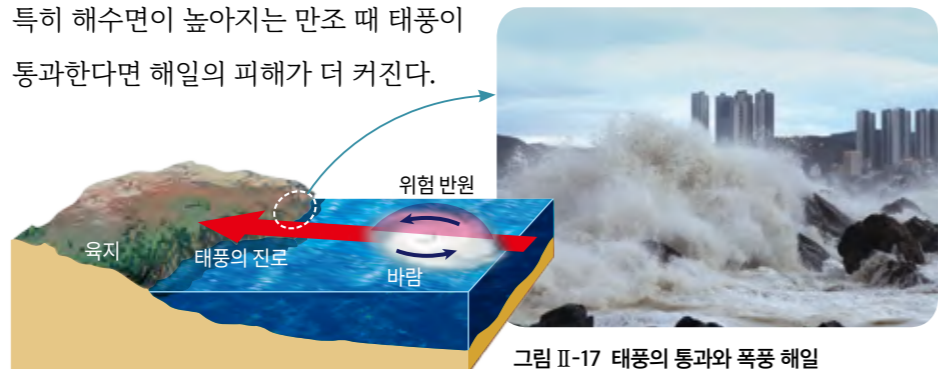


그림 II-17 태풍의 통과와 폭풍 해일

### 지진 해일

해저에서 지진, 화산 폭발, 산사태 등이 일어나 해수면의 높이가 급격히 변하면 파장이 매우 긴 해파가 형성된다. 이 해파가 해안가로 밀려와서 생긴 해일을 **지진 해일** 또는 **쓰나미**라고 한다. 지진 해일은 파장이 100 km~200 km로 매우 길기 때문에 평균 수심이 4 km 정도인 대양 한가운데에서도 천해파의 특징을 나타낸다.

천해파의 속도는 수심의 제곱근에 비례하므로 수심이 깊은 대양에서의 지진 해일 속도는 매우 빠르다. 그림 II-18과 같이 빠른 속도로 해안에 접근한 지진 해일은 전파 속도가 점점 느려지는 대신 파장이 짧아지고 파고가 수 m~수십 m로 높아지므로 바닷물이 내륙까지 밀려 들어와 큰 피해가 발생한다.

① 수심 4 km에서 지진 해일의 속도는 얼마인가?  
(단, 중력 가속도( $g$ )는  $10 \text{ m/s}^2$ 이다.)

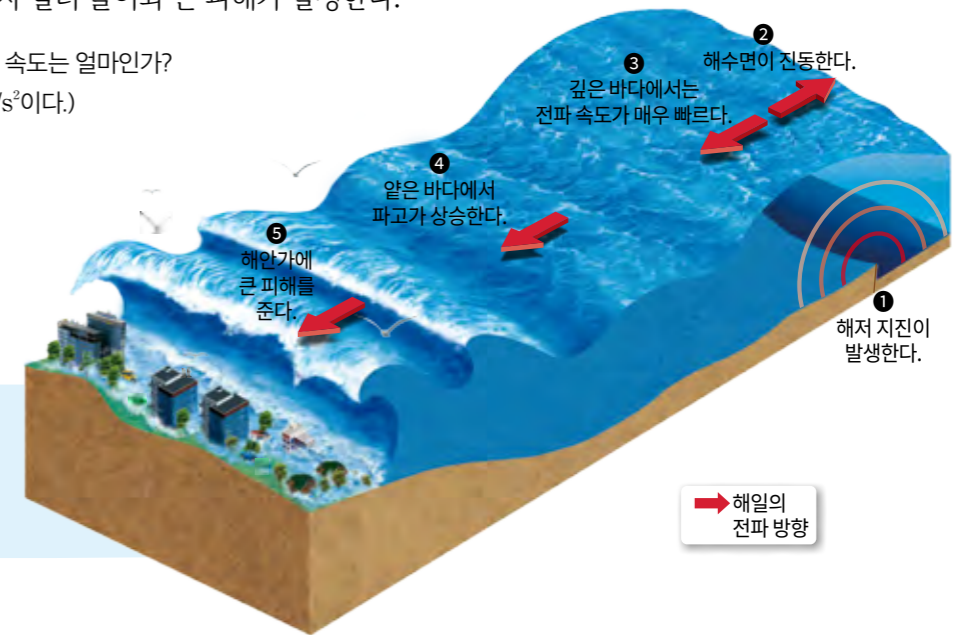


그림 II-18 지진 해일의 발생 및 전파 과정 지진 해일은 수심에 비해 파장이 매우 긴 천해파의 특징을 나타낸다.

● **쓰나미(tsunami)**  
쓰나미는 항구에서 발생하는 큰 파도라는 뜻으로 모든 해일을 지칭하는 용어였다. 그러나 최근에는 주로 지진에 의해 발생한 지진 해일을 의미한다.

그림 II-19와 같이 2004 년 12 월 인도네시아 수마트라 북부 서해안에서 규모 9.1의 강한 지진이 일어났다. 이 지진 때문에 발생한 지진 해일로 많은 인명과 재산 피해가 발생했다. 또 2011 년 일본 북동부 지역에서는 규모 9.1의 강한 지진으로 지진 해일이 발생해 원자력 발전소의 방사능 물질이 유출되는 등 많은 피해가 발생했다.



그림 II-19 지진 해일의 피해 사례 지진 해일 발생 전과 후의 항공 사진을 비교하면 피해 상황을 확인할 수 있다(인도네시아 수마트라의 2003 년 1 월과 2004 년 12 월 비교 사진).

지진 해일의 약 86 %는 지진과 화산 활동이 활발한 환태평양 조산대를 따라 발생한다. 다음 활동에서 전 세계에서 발생한 지진 해일의 피해 사례를 조사하고 대처 방안을 토의해 보자.

## 탐구

자료 분석 및 해석 / 의사소통과 협업

준비물

스마트 기기

### 활동 도우미

- 자연재해 뷰어의 왼쪽 항목에서 쓰나미와 관련된 모든 요소를 선택한다.
- 화면에서 등치선은 해일의 이동 시간, 막대그래프는 최대 파고를 나타내며 컴퓨터 시뮬레이션으로 구현한 결과이다.
- 진앙의 중심원을 클릭해 지진 및 해일 관측 정보를 추가로 파악할 수 있다.

### 스스로 평가하기

**| 지식·이해 |** 지진 해일의 대처 방안을 설명할 수 있는가? ☆☆☆

**| 과정·기능 |** 다양한 자료를 활용해 지진 해일의 피해 사례를 조사했는가? ☆☆☆

**| 가치·태도 |** 지진 해일의 피해를 조사하고 피해를 최소화하기 위한 대처 방안을 토의하면서 재해 예방의 중요성을 인식했는가? ☆☆☆

**한결음** 탐구 과정에서 보완할 점이나 더 알아보고 싶은 내용을 자유롭게 써 보자.

탐구 능력 | 문제해결 능력 | 의사결정 능력

## 지진 해일의 피해 사례와 대처 방안 조사 및 발표하기

### 목표

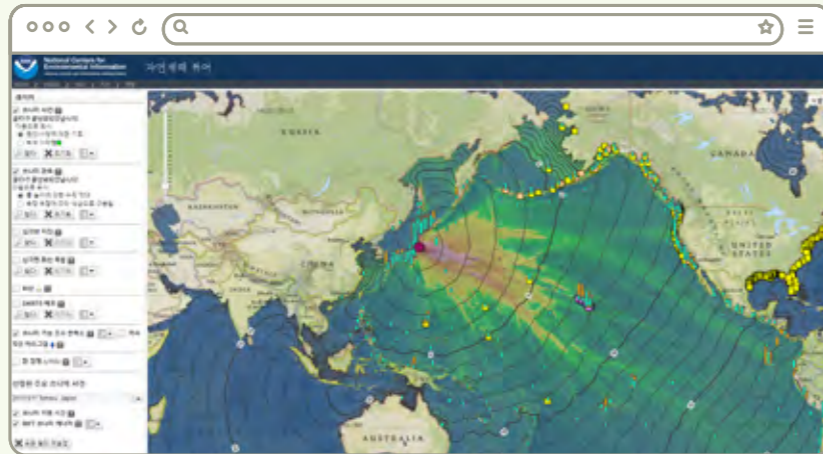
빅데이터와 시뮬레이션을 활용해 전 세계에서 발생한 지진 해일의 피해 사례를 조사하고, 피해를 최소화하기 위한 대처 방안을 토의하고 발표할 수 있다.

### 조사 및 토의하기

1. 미국국립환경정보센터 누리집을 방문해 자연재해 뷰어를 실행한다.
2. 모둠별로 조사하고 싶은 지진 해일을 선택하고 최대 파고, 해일의 이동 시간, 에너지 전파 모습 등을 확인한다.

#### 시뮬레이션 활용하기

- 미국국립환경정보센터 자연재해 뷰어(<https://www.ncei.noaa.gov/maps/hazards>) > 선정된 주요 쓰나미 사건(Selected Significant Tsunami Events)



2011년 3월 11일 일본 지진 해일을 선택한 화면의 예

3. 선택한 지진 해일로 발생한 인명 피해 및 경제적 피해 규모를 조사하고, 피해를 최소화할 수 있는 대처 방안을 토의한다.

### 발표하기

1. 모둠별로 조사한 지진 해일의 피해 사례를 발표해 보자.
2. 지진 해일의 피해를 줄일 수 있는 대처 방안을 발표해 보자.

열대 태평양에서 발생한 태풍이 우리나라로 이동하면서 해안 지역을 중심으로 폭풍 해일의 피해가 자주 발생한다. 폭풍 해일은 태풍의 진로와 강도를 예측해 비교적 빠르게 예보할 수 있지만, 피해 규모를 정확히 예측하기 위해서는 해일 발생 당시의 기압, 만조 시각, 해안 및 해저 지형 등의 다양한 요소를 고려해야 한다.



그림 II-20 폭풍 해일 태풍 카눈(2023년)의 영향으로 폭풍 해일이 발생했다.

또 우리나라 주변 해역에서 큰 지진이 발생한다면 지진 해일의 피해를 입을 가능성이 있다. 지진 해일은 주기적으로 나타나는 현상이 아니므로 정확하게 예보하기 어렵지만, 지진파의 속도는 지진 해일의 속도보다 빠르므로 지진 관측과 동시에 지진 해일 대비 주의보를 발령할 수 있다. 그러므로 체계적인 해일 경보 시스템 운영, 지속적인 경보 시스템 강화, 해안 방파제 정비, 신속한 대피 훈련 등을 통해 인명 및 재산 피해를 최소화하도록 노력해야 한다.



그림 II-21 차수벽 설치 모습  
해일을 막기 위해 기립식 방재벽인 차수벽을 설치하고 있다 (경상남도 창원시).

### 자료실 지진 해일 발생 시 행동 요령

- 지진 해일 특보가 발령되면 모든 수단을 동원해 모두에게 알린다.
- 해안에서 지진을 느껴거나 지진 해일 특보가 발령되면 즉시 해안이나 하천에서 벗어나 긴급 대피 장소나 높은 곳으로 대피한다. 피할 시간이 없다면 주변 튼튼한 건물의 3층 이상인 곳 또는 해발 고도 10m 이상의 언덕 등으로 이동한다.
- 지진 해일이 오기 전 해안의 바닷물이 갑자기 빠져나가거나 큰 소리가 나기도 하므로, 위험 신호를 느끼면 신속히 높은 곳으로 대피한다.
- 지진 해일은 한 번의 큰 파도로 끝나지 않고 수 시간 동안 여러 번 반복될 수 있다. 지진 해일 특보가 해제될 때까지 낮은 곳으로 가지 않는다.
- 해안가에서 조업 중인 선박은 시간적 여유가 있다면 수심이 깊은 지역으로 이동한다.
- 지진 해일 특보가 발령되면 재난 경보 안내 방송에 따라 행동한다.

### 디지털 탐색

국민재난안전포털에서 '해일 특보 시 행동 요령'을 확인할 수 있다.



### 스스로 확인하기

- 1 폭풍 해일의 피해가 커지는 경우를 설명해 보자.
- 2 지진 해일이 천해파의 특징을 나타내는 까닭을 설명해 보자.
- 3 | 창의력 더하기 | 최근 기후 변화의 영향으로 폭풍 해일의 피해 규모는 어떻게 달라질지 예상해 보고, 그 까닭을 설명해 보자.

# 05 조석

- 학습 목표**
- 조석의 발생 과정을 설명할 수 있다.
  - 조석 자료 해석을 통해 각 지역에서의 조석 양상을 설명할 수 있다.

우리나라 서해안과 남해안에 넓게 발달한 갯벌은 유네스코 세계유산 목록에 등재된 세계 5대 갯벌 중 하나이다. 이러한 갯벌을 잘 관찰할 수 있는 시간은 언제일까?



## 조석

해안에서 그림 II-22와 같이 주기적으로 해수면의 높이가 높아졌다 낮아지는 현상을 조석이라고 한다. 하루 중 해수면이 가장 높을 때를 만조 또는 고조, 가장 낮을 때를 간조 또는 저조라고 한다. 만조와 간조 사이에는 썰물이 나타나고 간조와 만조 사이에는 밀물이 나타나며, 이러한 해수의 흐름을 조류라고 한다. 또 만조와 간조의 해수면 높이 차를 조차라고 한다.

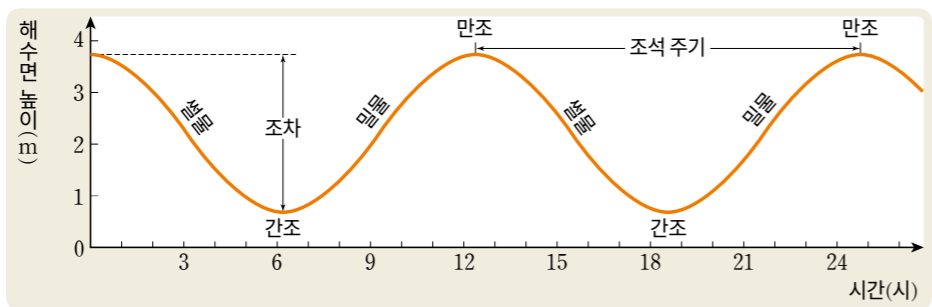


그림 II-22 조석 주기와 조차

우리나라 서해안과 남해안은 조차가 크고 조류의 흐름이 빠른 것으로 유명해요.



만조



간조

그림 II-23 우리나라 서해안에서 만조와 간조 때의 모습 우리나라 서해안의 최대 조차는 약 9 m이고, 간조 때 갯벌을 잘 관찰할 수 있다.

## 기조력

조석을 일으키는 힘을 기조력이라고 한다. 기조력은 지구와 달의 공통 질량 중심을 기준으로 지구가 원운동을 하면서 생긴 원심력과 달이 지구에 작용하는 인력의 합력이다. 태양의 영향으로도 기조력이 발생하지만 달보다 지구로부터 더 멀리 있으므로 그 크기는 달의 약  $\frac{1}{2}$  배이다.

그림 II-24와 같이 달의 인력은 지구상의 위치에 따라 크기와 방향이 모두 달라진다. 달의 인력은 달에 가까울수록 커지므로 달을 향한 방향으로 해수면이 높아진다.

한편 지구와 달은 지구 내부에 있는 지구와 달의 공통 질량 중심을 기준으로 회전하고 있다. 따라서 지구상의 모든 지점에서는 동일한 크기와 방향의 원심력을 받으며, 원심력의 방향은 달에서 멀어지는 방향이므로 달의 반대 방향으로도 해수면이 높아진다.

그 결과 달에서 가까운 쪽에서는 인력이 원심력보다 커서 기조력이 달을 향한 방향으로 작용하고, 반대로 달에서 먼 쪽에서는 원심력이 인력보다 커서 기조력이 달의 반대 방향으로 작용한다. 그러므로 해수면은 달에서 가장 가까운 쪽과 달에서 가장 먼 쪽에서 모두 높아진다. 이러한 상태로 지구가 자전하고 있기 때문에 하루 동안 만조와 간조가 반복해 나타난다.

**과학 잇기 물리학**

궤도 운동을 하는 두 천체 사이의 공통 질량 중심 질량이 있는 두 천체가 궤도 운동을 할 때 각각의 천체는 공통 질량 중심을 중심으로 운동한다. 지구의 질량이 달의 질량보다 약 80 배 크기 때문에 공통 질량 중심은 지구 내부에 존재한다.

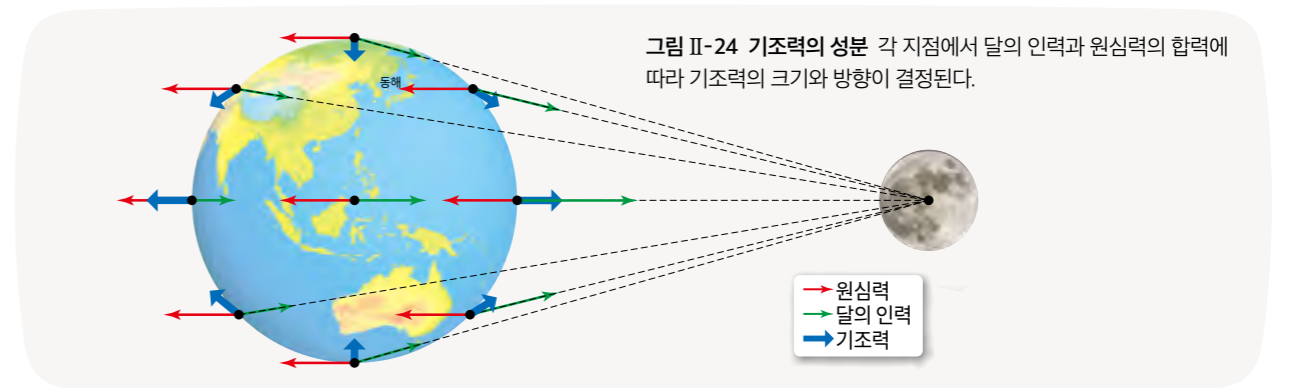
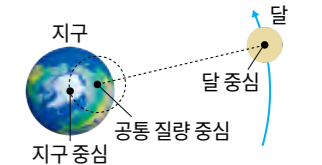


그림 II-24 기조력의 성분 각 지점에서 달의 인력과 원심력의 합력에 따라 기조력의 크기와 방향이 결정된다.

## 자료실 바다 갈라짐 현상

바다 갈라짐이란 간조 시에 주변보다 수심이 얇은 지형이 해수면 위로 드러나 육지와 섬 또는 섬과 섬 사이에 바닷길이 생기며 바다를 양쪽으로 갈라놓은 것처럼 보이는 현상이다. 우리나라 서해안과 남해안처럼 해저 지형이 복잡하고 조차가 큰 지역에서는 바다 갈라짐 현상이 나타나는 곳이 많아 관광지로 주목받고 있다. 국립해양조사원 누리집(<https://www.khoa.go.kr>)에서 제공하는 바다 갈라짐 예보를 확인하고 이를 체험하기 위한 여행 계획을 세울 수 있다.



진도 바닷길 축제

## 조석 주기 및 양상

지구는 달의 방향과 달의 반대 방향으로 해수면이 높아진 상태에서 자전하기 때문에 주기적으로 밀물과 썰물이 번갈아 나타난다. 그러나 그림 II-25와 같이 지구가 반 바퀴 자전하는 동안 달도 같은 방향으로 약 6.5° 공전한다. 그러므로 다음 만조가 될 때까지 지구는 약 6.5° 더 자전해야 한다. 지구가 6.5° 자전하는 데 약 25 분이 걸리므로 조석 주기는 약 12 시간 25 분이다.

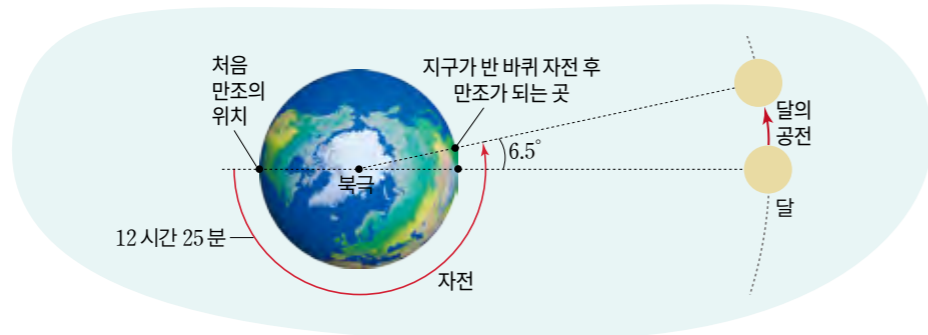


그림 II-25 조석 주기

지구의 적도면은 달의 공전 궤도에 대해 약 28.5° 기울어져 있으므로, 지역에 따라 만조와 간조의 횟수, 해수면의 높이가 달라진다. 하루 동안 나타나는 조차와 양상은 그림 II-26과 같이 지역에 따라 달라질 수 있다.

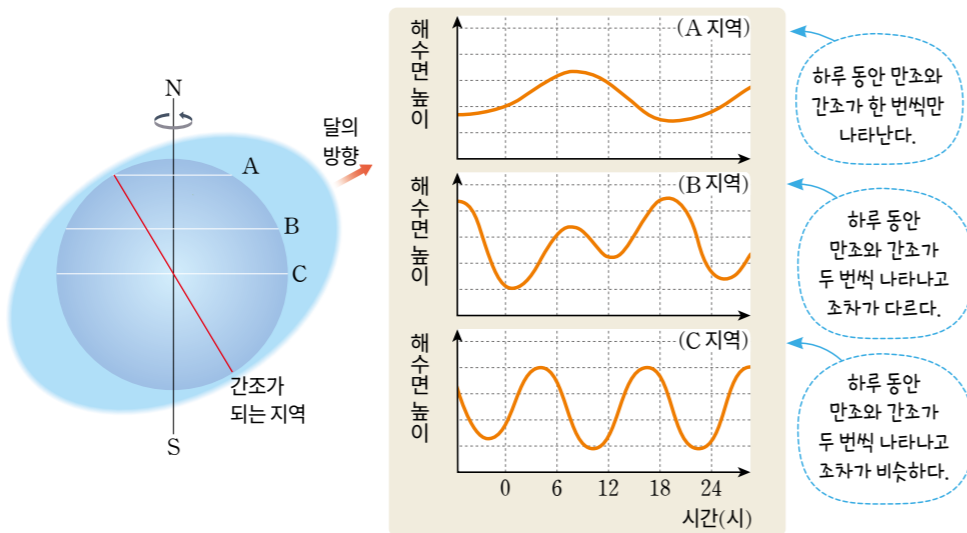


그림 II-26 조석 양상

달은 지구 주위를 타원 궤도로 공전하므로 달과 지구 사이의 거리 변화에 따라 기조력의 크기가 달라진다. 이러한 천문학적 요인 이외에 지형 및 해저 수심의 영향으로 실제 조석은 지역마다 매우 다른 복잡한 양상을 보인다. 우리나라의 동해안과 서해안도 위도가 비슷하지만 조석 양상은 매우 다르게 나타난다.

## 달의 위상에 따른 조석 변화

조석 현상이 뚜렷한 지역에서 한 달 이상 조석을 관찰하면 약 15 일을 주기로 조차가 커졌다가 작아지는 현상이 반복되는 것을 볼 수 있다. 이는 달의 위상 변화와 밀접한 관련이 있다. 그림 II-27과 같이 달의 위상이 삭 또는 망일 때 달의 기조력과 태양의 기조력이 합쳐져 조차가 가장 크게 나타나는데, 이를 **사리** 또는 **대조**라고 한다. 반면에 달의 위상이 상현 또는 하현일 때 두 천체의 기조력이 직각 방향으로 상쇄되어 조차가 가장 작게 나타나는데, 이를 **조금** 또는 **소조**라고 한다.



그림 II-27 태양과 달의 상대적 위치에 따른 조석 변동 달의 위상 변화에 따라 조차가 가장 큰 사리와 조차가 가장 작은 조금은 한 달에 두 번씩 번갈아 나타난다.

그림 II-28은 우리나라 인천 앞바다의 한 달 동안의 조석 변동을 나타낸 것이다. 그래프를 보면 조석 주기가 12 시간보다 약간 길고, 연속된 만조 또는 간조의 해수면 높이가 다르다는 것을 확인할 수 있다. 또 달의 위상 변화에 따른 뚜렷한 조차 변화도 확인할 수 있다.

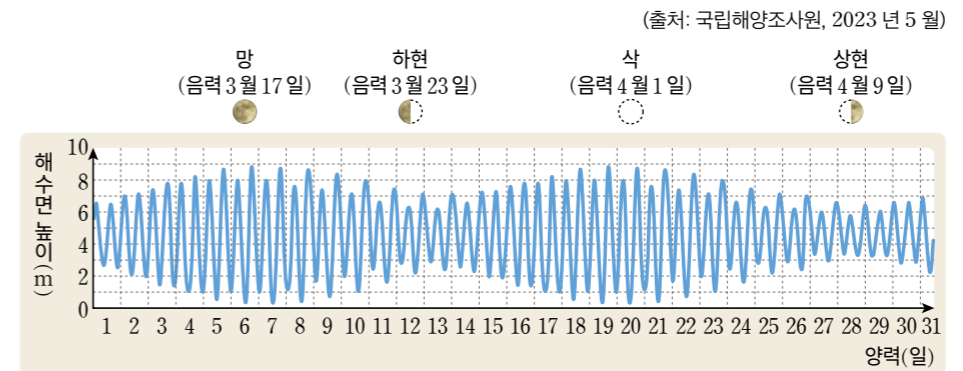


그림 II-28 한 달 동안의 조석 변동 달의 위상 변화에 따라 한 달 동안 조차가 커지는 기간과 작아지는 기간이 반복된다.

**태양과 달의 기조력 크기**  
기조력의 크기는 천체의 질량에 비례하고 천체까지의 거리의 세 제곱에 반비례한다. 태양은 질량이 크지만 달보다 지구에서 매우 멀리 떨어져 있기 때문에 태양의 기조력은 달의 기조력의 절반 정도 크기이다.

달의 공전 궤도가 타원이기 때문에 음력 15일에 항상 보름달이 뜨지는 않아요. 바닷물과 마찰 등으로 실제 조차와 달의 위상이 정확히 일치하지 않는 경우도 있어요.

## 탐구

자료 수집 / 자료 분석 및 해석 / 결론 도출 및 일반화

준비물  
스마트 기기

디지털 탐색

전 세계의 조석 자료는 하와이 대학교 해수면 센터 누리집(<https://uhslc.soest.hawaii.edu>) 또는 영국 해양 자료 센터 누리집(<https://psmsl.org>)에서 찾을 수 있다.

스스로 평가하기

**| 지식·이해 |** 조석 자료를 보고 조석 양상을 설명할 수 있는가?  
☆☆☆

**| 과정·기능 |** 조차와 달의 위상 관계를 유추해 조석 양상을 해석했는가?  
☆☆☆

**| 가치·태도 |** 실시간 조석 자료가 조석 현상의 양상을 추론하는데 유용함을 인식했는가?  
☆☆☆

**한 걸음 더** 탐구 과정에서 보완할 점이나 더 알아보고 싶은 내용을 자유롭게 써 보자.

탐구 능력 | 문제해결 능력 | 의사결정 능력

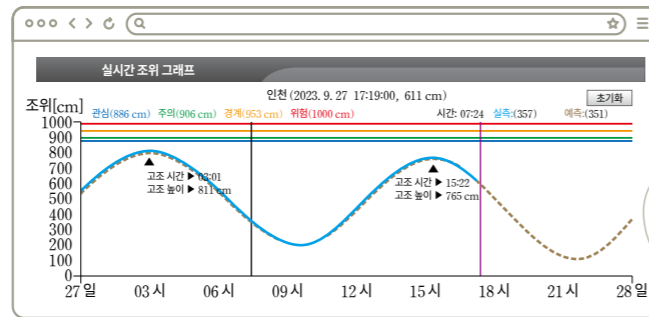
## 실시간 자료를 이용한 조석 현상의 양상 추론하기

### 목표

실시간 자료를 이용해 우리나라 연안 지역의 조석 양상을 해석하고 추론할 수 있다.

### 과정

- 1 국립해양조사원 누리집(<https://www.khoa.go.kr>)에서 해양정보 > 해양생활 > 실시간 고조 정보를 선택해 원하는 지역의 조위 그래프를 확인하고 조석 주기를 기록한다.



조위는 일정한 기준면에서 해수면을 측정했을 때의 높이를 말해요.

- 2 스마트 조석 예보에서 자신이 원하는 지역의 한 달 동안의 조석 자료를 내려받은 뒤, 스프레드시트 프로그램을 이용해 조석 변동 그래프를 그려 본다.
- 3 2의 그래프에서 사리와 조금을 찾고, 그 시기의 달의 위상을 확인한다.
- 4 다른 지역을 추가로 선택해 동일한 방법으로 조석 자료를 분석한다.

### 결과 및 정리

- 1 과정 1에서 확인한 조석 주기를 이용해 내일의 만조와 간조 시각을 예측해 보자.
- 2 사리와 조금이 나타나는 시기와 달의 위상 관계를 추론해 보자.
- 3 각 지역의 조석 양상을 비교하고, 다르게 나타나는 까닭을 추론해 보자.

### 스스로 확인하기

- 1 기조력의 발생 원리를 설명해 보자.
- 2 사리와 조금일 때 달의 위상은 각각 무엇인지 설명해 보자.
- 3 **| 창의력 더하기 |** 달이 지금보다 더 빨리 공전한다면 조석 주기가 어떻게 변할지 추론해 보자.

## 과학과 미래

### 진로

# 바다위기상을 연구하는 해양기상 전문가

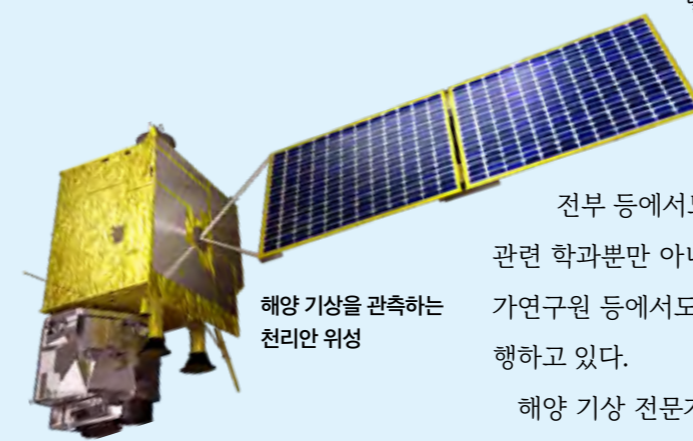
육상 자원의 부족과 기후 변화 등으로 바다에 관심이 높아지고 있으며, 바다 날씨의 관측 및 예보에 관한 중요성이 더욱 커지고 있다. 특히 삼면이 바다로 둘러싸여 있는 우리나라는 다양한 어업 활동, 해상 교통, 무역 및 레저 활동 등이 매우 활발하게 이루어지고 있어 해양 기상 전문가 양성이 중요한 때이다.

우리나라에서 바다 예보를 담당하고 있는 기상청은 해양 기상의 관측 및 예보 기술을 지원하는 해양 기상과를 별도로 운영하고 있다. 또 수치모

델링센터, 국가기상위성센터, 기상레이더센터 등과 긴밀하게 협력해 바다 위 기상을 책임지고 있다. 해양수산부에서도 국립해양조사원, 수산과학원 등에 해양 기상 관측 및 예측 전문 인력이 근무하고 있으며, 행정안전부 등에서도 전문 인력 확충이 필요한 상황이다. 이에 따라 대학의

관련 학과뿐만 아니라 한국해양과학기술원, 국립기상과학원, 환경정책평가연구원 등에서도 해양 기상 전문 연구 인력을 양성하고 관련 연구를 수행하고 있다.

해양 기상 전문가가 된다면 해양 조사 기관, 관측 장비 개발 업체, 해운 및 선박 관련 회사, 조선소, 풍력 관련 업체 등 다양한 민간 기업에서도 전문성을 발휘하며 일할 수 있다.



해양 기상을 관측하는 천리안 위성

### 활동하기

과학, 기술, 사회적 측면으로 나누어 해양 기상 전문가가 필요한 까닭을 조사하여 발표해 보자.

커리어넷에서 '해양 기상 전문가와 관련된 정보'를 볼 수 있다.



### 관련 학과

지구환경과학부, 지구해양과학과, 해양학과, 해양공학과, 해양환경과학과, 대기과학과, 대기환경과학과 등

국립해양조사원의 해양 관측선





# 연안 침식 문제 대응 방안 결정하기

현재의 해안선은 마지막 빙하기 이후 해수면이 약 120 m 상승해 형성되었다. 그 이후 육상 및 해상 퇴적물의 운반, 파도에 의한 침식 등으로 해안선이 변해 왔다. 그러나 최근 과도한 연안 개발과 지구 온난화에 따른 해수면 상승으로 연안 침식이 가속화되고 있어 여러 가지 문제가 발생하고 있다.

강력한 허리케인이 빈번하게 상륙하는 미국의 멕시코만 주변, 해양 관광지로 큰 인기를 누리고 있는 하와이, 인도네시아, 투발루 등 세계 곳곳에서 심각한 연안 침식 문제가 나타나고 있다. 연안 침식 문제는 삼면이 바다로 둘러싸인 우리나라도 예외는 아니다. 해양수산부가 실시한 최근의 연안 침식 실태 조사 결과를 살펴보면 우리나라의 주요 해안에서도 연안 침식이 방대하게 진행되고 있다. 모래사장이 줄어들어 바위나 위험 구조물이 드러나고 태풍이나 해일의 피해 가능성이 커지고 있다.

국가 정책에 근거해 체계적인 정비 사업을 실시하고, 이를 통해 연안 생태계의 장기적인 회복력을 키울 수 있도록 더욱 적극적으로 관리해야 한다. 아름다운 해변을 후손에게 물려줄 수 있도록 연안 침식 문제를 해결하기 위한 대응 방안을 결정해 보자.

연안 침식을 막기 위해 쌓아 놓은 돌망태



연안 침식으로 사라지는 모래사장



연안 침식으로 드러난 해변의 나무뿌리

## 1 조사하기

1. 연안 침식을 일으킬 수 있는 자연적 원인과 인위적 원인을 각각 조사해 보자.

2. 우리나라와 다른 나라에서 발생하는 다양한 연안 침식 사례를 조사해 보자.

### 활동 도우미 +

해양수산부의 연안 포털 누리집(<https://coast.mof.go.kr>)을 방문할 수 있다.

## 2 토의하기

1. 연안 침식을 최소화할 수 있는 대응 방안을 토의해 보자.

2. 침식된 연안을 회복시킬 방안을 토의해 보자.

3. 토의한 내용을 바탕으로 하여 해양 공학자, 기후 변화 전문가, 경제학자의 입장에서 분야별 대응 방안을 제안하고 최종 방안을 결정해 보자.

## 3 평가하기

나와 모둠원의 활동 과정을 다음 기준에 따라 평가해 보자.

평가 내용	평가
지식·이해   연안 침식의 원인을 설명할 수 있는가?	☆☆☆
과정·기능   다양한 입장을 고려해 연안 침식을 최소화하고 연안 생태계를 회복시킬 방안을 토의했는가?	☆☆☆
가치·태도   연안 침식의 심각성을 인식하고 대응 방안을 제안했는가?	☆☆☆

01 해수를 움직이는 힘

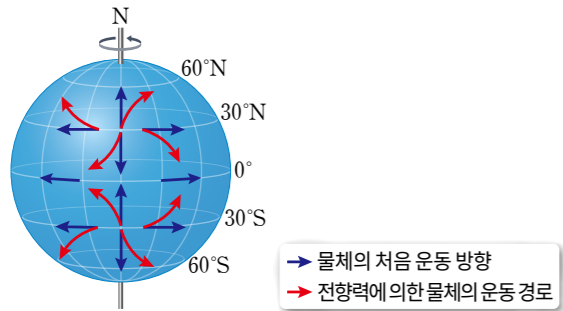
54 쪽~57 쪽

1. 수압 경도력과 정역학 평형

- 수압 차이가 있는 두 지점 사이에는 ① 이/가 작용한다.
- 정역학 평형: 연직 수압 경도력과 ② 이/가 평형을 이룬 상태이다.
- 해수의 밀도가 일정할 때 수평 수압 경도력의 크기는 해수면 경사에 비례한다.

2. 전향력

- 방향: 북반구에서는 물체 운동 방향의 ③ 직각 방향으로, 남반구에서는 왼쪽 직각 방향으로 작용한다.



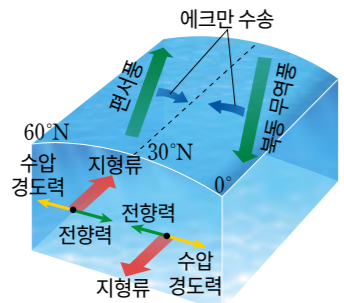
- 크기: 극에서 가장 크고 ④ 에서 0이 된다.

02 지형류

58 쪽~61 쪽

- 1. **에크만 수송:** 표층에서 ⑤ 의 영향이 미치는 깊이까지의 평균적인 해수의 흐름을 말하며, 에크만층에서 해수의 평균 이동 방향은 북반구에서는 풍향의 오른쪽 90° 방향으로, 남반구에서는 왼쪽 90° 방향으로 나타난다.

- 2. **지형류 평형:** 수압 경도력과 ⑥ 이/가 평형을 이룬 상태이다.



북반구 아열대 해양에서 지형류의 발생

03 해파

62 쪽~65 쪽

- 1. **해파:** 해수면에서 생긴 교란이 파동의 형태로 퍼져 나가면서 발생하는 물 입자의 주기적인 상하 운동

2. 해파의 발생 및 전파

- 해파는 모양에 따라 풍랑, ⑦, 연안 쇄파로 구분한다.
- 해파의 전파: 물 입자는 해파의 진행 방향으로 직접 이동하지 않으며, ⑧ 만 전달한다.

- 3. **심해파와 천해파:** 수심이 파장의 약  $\frac{1}{2}$  보다 깊은 곳에서 전달되는 해파를 ⑨ (이)라고 하고, 수심이 파장의 약  $\frac{1}{20}$  보다 얇은 곳에서 전달되는 해파를 천해파라고 한다.

04 해일

66 쪽~69 쪽

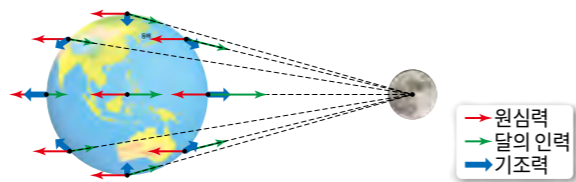
- 1. **폭풍 해일:** ⑩ 등 강한 저기압이 통과할 때 해수면이 높아져 바닷물이 육지로 밀려드는 현상

- 2. **지진 해일:** 해저에서 지진 등이 일어나 발생한 해일로 ⑪ (이)라고도 한다. 수심에 비해 파장이 매우 길어 천해파의 특징을 나타낸다.

05 조석

70 쪽~74 쪽

- 1. **기조력:** 지구와 달의 공통 질량 중심을 기준으로 지구가 원운동을 하면서 생긴 원심력과 달이 지구에 작용하는 인력의 합력



2. 조석 주기 및 양상

- 하루 중 해수면이 가장 높을 때를 ⑫, 가장 낮을 때를 ⑬ (이)라고 한다.
- 한 달 중 조차가 가장 높은 시기를 ⑭ 또는 ⑮ (이)라고 하며, 이때 달의 위상은 망 또는 삭이다.
- 한 달 중 조차가 가장 낮은 시기를 조금 또는 소조라고 하며, 이때 달의 위상은 ⑯ 또는 ⑰ (이)이다.

개념 적용하기

해수를 움직이는 힘

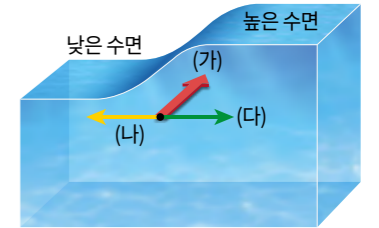
01 해수를 움직이는 힘에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

**보기**

- ㄱ. 수압은 수심이 깊어질수록 높아진다.
- ㄴ. 정역학 평형은 중력과 연직 수압 경도력이 평형을 이루는 상태이다.
- ㄷ. 밀도가 일정할 때 수평 수압 경도력은 해수면이 높은 곳에서 낮은 곳으로 작용한다.
- ㄹ. 운동 규모에 상관없이 전향력을 고려해야 한다.
- ㅁ. 남반구에서 전향력은 운동하는 물체의 오른쪽 직각 방향으로 작용한다.

- ① ㄱ, ㄴ                      ② ㄷ, ㅁ
- ③ ㄱ, ㄴ, ㄷ                ④ ㄴ, ㄷ, ㄹ
- ⑤ ㄷ, ㄹ, ㅁ

03 그림은 지형류가 흐르는 북반구 어느 해역에서 해수의 밀도가 일정할 때 해수면 경사를 나타낸 것이다.

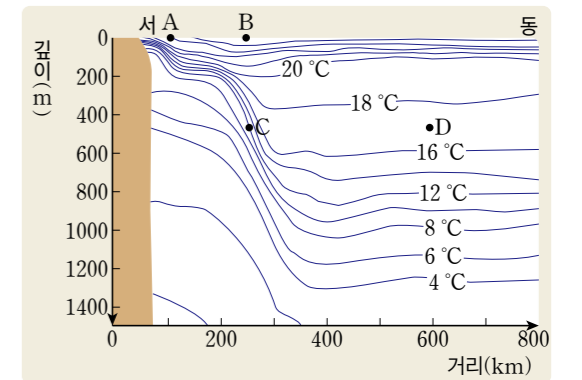


(가)~(나)가 각각 무엇을 의미하는지 써 보자.

지형류

지형류

04 그림은 지형류가 흐르는 북반구 어느 해역의 동일 위도에서 깊이에 따른 수온 변화를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?(단, 해수의 밀도는 수온에 의해서만 결정된다고 가정한다.)

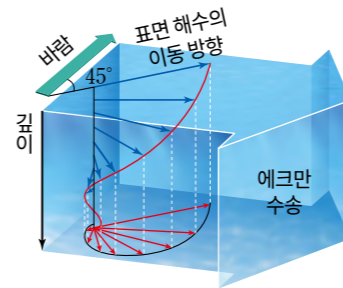
**보기**

- ㄱ. 해수면의 높이는 A가 B보다 낮다.
- ㄴ. 지형류의 유속은 C가 D보다 빠르다.
- ㄷ. C 지점의 해수에 작용하는 전향력의 방향은 동쪽이다.

- ① ㄱ                            ② ㄴ                            ③ ㄱ, ㄷ
- ④ ㄴ, ㄷ                      ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

02 그림은 에크만 나선과 에크만 수송을 나타낸 것이다.

지형류



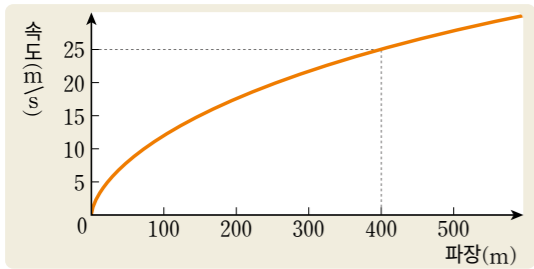
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

**보기**

- ㄱ. 이 해역은 북반구에 위치한다.
- ㄴ. 수심에 따라 해수의 이동 방향이 바뀌는 것은 전향력 때문이다.
- ㄷ. 마찰저항심도에서 해수의 이동 방향은 바람의 방향과 정반대이다.

- ① ㄱ                            ② ㄷ                            ③ ㄱ, ㄴ
- ④ ㄴ, ㄷ                      ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

05 그림은 어느 해파의 파장과 속도의 관계를 나타낸 것이다.

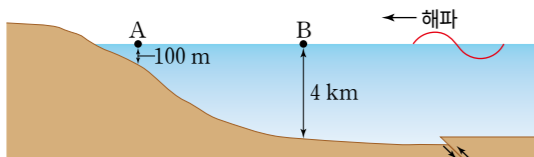


이 해파에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?(단, 이 해파는 심해파와 천해파 중 하나이다.)

- 보기**
- ㄱ. 심해파이다.
  - ㄴ. 물 입자는 타원 운동을 한다.
  - ㄷ. 파장이 400 m일 때 주기는 16 초이다.

- ① ㄱ
- ② ㄴ
- ③ ㄱ, ㄷ
- ④ ㄴ, ㄷ
- ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

06 그림은 해저 지진으로 발생한 해파의 이동 모습을 간단히 나타낸 것이다.

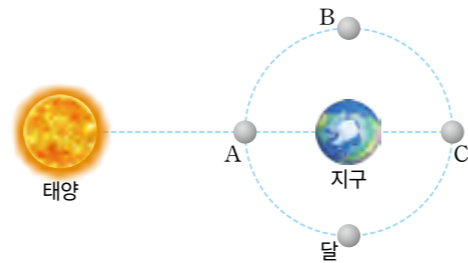


이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

- 보기**
- ㄱ. A 지점에서 파장은 B 지점에서보다 크다.
  - ㄴ. A 지점에서 속도는 B 지점에서보다 느리다.
  - ㄷ. B 지점에서 파장은 80 km보다 길다.

- ① ㄱ
- ② ㄴ
- ③ ㄱ, ㄷ
- ④ ㄴ, ㄷ
- ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

07 그림은 태양, 지구, 달의 상대적 위치를 나타낸 것이다.

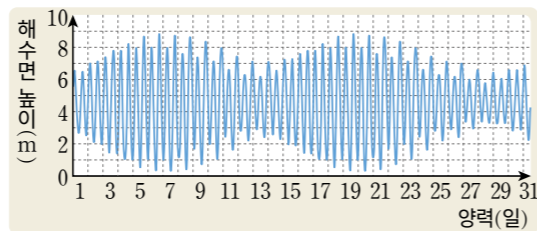


이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?(단, 태양과 달의 기초력 이외의 조석 변동 요인은 고려하지 않는다.)

- 보기**
- ㄱ. 태양의 기초력이 달의 기초력보다 크다.
  - ㄴ. 달이 A에 위치할 때는 B에 위치할 때보다 조차가 크다.
  - ㄷ. 달이 C에 위치할 때, 우리나라는 정오에 간조가 나타난다.

- ① ㄱ
- ② ㄴ
- ③ ㄱ, ㄷ
- ④ ㄴ, ㄷ
- ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

08 그림은 우리나라 인천 앞바다에서 한 달 동안 측정된 조석 자료를 나타낸 것이다.

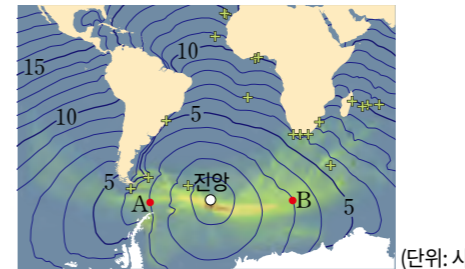


이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

- 보기**
- ㄱ. 최대 조차는 약 4 m 이내이다.
  - ㄴ. 만조와 간조가 하루에 한 번씩 나타난다.
  - ㄷ. 13 일 무렵의 달의 위상은 상현 또는 하현이다.

- ① ㄱ
- ② ㄷ
- ③ ㄱ, ㄴ
- ④ ㄴ, ㄷ
- ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

09 과학적 의사결정 능력 그림은 어느 지진에 의해 발생한 지진 해일의 도착 시간을 나타낸 것이다.



진앙에서 A까지의 평균 수심과 진앙에서 B까지의 평균 수심 중 어느 쪽이 더 깊은지 쓰고, 그렇게 판단한 근거를 서술해 보자.

10 과학적 탐구 능력 표는 우리나라 서해안의 어느 지역에서 이들 동안 조석 현상을 관측한 것이다.

날짜 (양력)	날짜 (음력)	시각 (시:분)	조위 (cm)	비고
11 월 14 일	10 월 2 일	05:02	787	만조
		11:17	35	간조
		17:26	876	만조
		23:54	108	간조
11 월 15 일	10 월 3 일	05:38	779	만조
		11:52	28	간조
		18:02	876	만조

- (1) 11 월 15 일에 간조가 두 번 나타나지 않는 까닭을 서술해 보자.
- (2) 11 월 16 일의 조차는 어떻게 변할지 예상해 보고, 그렇게 판단한 근거를 서술해 보자.

11 과학적 문제해결 능력 다음은 쓰레기 섬을 설명한 글이다.

전 세계 대양의 특정 해역에는 쓰레기 더미가 뭉쳐서 떠다니는 쓰레기 섬이 존재한다고 한다. 바다에 버려진 부유성 쓰레기들이 특정 해역에 존재하는 까닭은 해수의 순환과 관련이 있다.

북태평양에 형성된 쓰레기 섬의 규모는 한반도 면적의 약 16 배나 된다. 태평양뿐만 아니라 대서양, 인도양에도 쓰레기 섬이 있으며, 크기가 매년 증가한다고 한다.

대양에 있는 쓰레기의 대부분은 육지에서 떠 내려온 것이고 일부는 선박에서 버려진 것으로 추정된다. 이러한 쓰레기의 약 90 %가 썩지 않는 비닐과 플라스틱으로 이루어져 있으며, 해양 생태계에 많은 문제를 일으키고 있다.

(1) 쓰레기 섬이 특정 해역에서 주로 발견되는 까닭을 해수의 순환과 이를 구성하는 해류와 관련지어 구체적으로 서술해 보자.

.....

(2) 개인과 국가 차원에서 쓰레기 섬의 크기를 줄이기 위한 방안을 제안하는 글을 써 보자.

.....

스스로 평가하기

- ‘해수의 운동과 순환’을 학습한 다음, 나의 성취 수준을 스스로 평가해 보자.
- 지식-이해**
    - 해수를 움직이는 여러 가지 힘을 설명할 수 있는가? ☆☆☆☆☆
    - 에크만 수송과 지형류의 발생 원리를 설명할 수 있는가? ☆☆☆☆☆
  - 과정-기능**
    - 탐구 활동을 통해 해파의 발생 및 전파 과정을 해석했는가? ☆☆☆☆☆
    - 실측 자료를 이용해 각 지역에서의 조석 양상을 분석하고 추론했는가? ☆☆☆☆☆
  - 가치-태도**
    - 해일의 피해 사례를 조사하고 대처 방안을 제안하며 재해 예방의 중요성을 인식했는가? ☆☆☆☆☆

# III


## 강수 과정과 대기의 운동

지구의 대기는 태양 복사와 지구 복사, 인간 활동 등의 영향을 받으며, 다양한 요인이 복합적으로 상호작용하면서 끊임없이 운동하고 있다. 이러한 대기의 운동은 어떻게 발생할까?

### 이 단원의 학습 내용

- 01 지구의 대기과 생명체
- 02 지구 열수지
- 03 대기 안정도와 강수
- 04 기압의 연직 분포와 대기를 움직이는 힘
- 05 여러 가지 바람
- 06 편서풍 파동

- 지식·이해**
  - 대기의 선택적 흡수를 이해하고, 지구 생명체의 존재 조건을 설명할 수 있다.
  - 대기 안정도와 정역학적 균형을 이해하고, 여러 바람과 행성파의 발생 원리를 설명할 수 있다.
- 과정·기능**
  - 지표와 대기의 열 출입과 관련된 물리 과정과 전 지구 평균 열수지를 해석할 수 있다.
  - 단열 변화를 통해 구름이나 안개가 생성되는 과정 및 강수 과정을 분석할 수 있다.
  - 지상 고·저기압 발달에서 편서풍 파동의 역할을 평가할 수 있다.
- 가치·태도**
  - 강수 과정과 대기의 운동에 흥미를 가지고 지구 대기의 가치를 인식할 수 있다.

 **창의적 문제해결** 기상 제어의 실효성과 개선 방안 토론하기



# 01

## 지구의 대기과 생명체

### 학습 목표

- 대기를 구성하는 기체들이 선택적 흡수체임을 설명할 수 있다.
- 지구 생명체의 존재 조건을 추론할 수 있다.



지구의 대기는 눈에 보이지 않지만 우리가 살고 있는 지구 주위를 둘러싸고 있으며 생명체를 보호한다. 대기는 어떤 물질로 이루어져 있으며 어떻게 생명체를 보호할까?

지구의 대기는 여러 종류의 기체로 이루어져 있다. 대기의 구성 성분은 시간과 장소에 따라 다르지만 그림 III-1과 같이 대기의 대부분은 질소와 산소가 차지한다. 이 밖에도 대기 중에서 차지하는 양은 적지만 지구시스템에 큰 영향을 미치는 수증기, 이산화 탄소, 오존 등이 포함되어 있다.

(출처: 《알기 쉬운 대기과학》, 2020.)

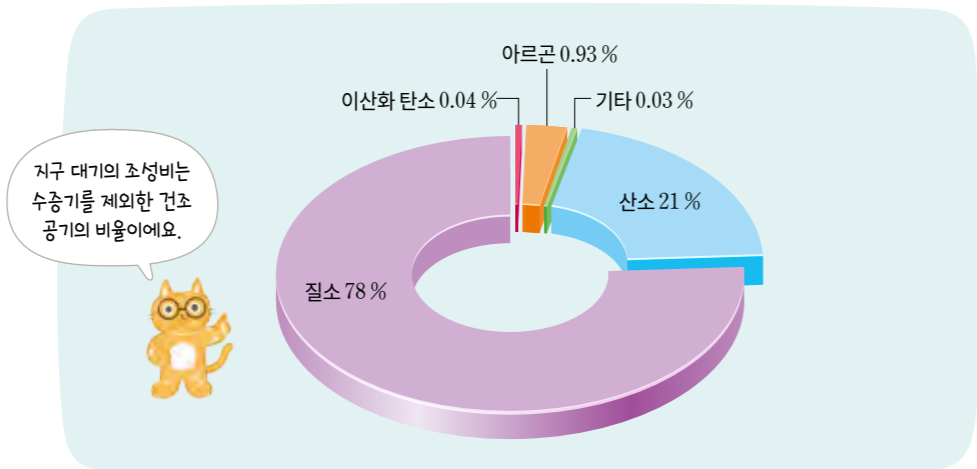


그림 III-1 지구 대기의 조성(부피비)

### 지구 대기의 선택적 흡수

지구의 대기는 특정 파장의 복사 에너지는 흡수하고 다른 파장의 복사 에너지는 투과시키는 **선택적 흡수체**이다. 그림 III-2와 같이 지구에는 표면 온도가 약 5800 K인 태양이 우주 공간으로 방출한 감마선, X선, 자외선, 가시광선, 적외선, 전파 등 다양한 파장의 복사 에너지가 도달한다. 평균 표면 온도가 약 288 K인 지구는 대부분 적외선 영역의 복사 에너지를 방출한다. 복사 에너지의 파장과 지구의 대기를 이루는 성분에 따라 복사 에너지의 흡수율은 달라진다.

### 태양 복사와 지구 복사

태양은 지구보다 상대적으로 짧은 파장의 복사 에너지를 방출하기 때문에 태양 복사를 단파 복사, 지구 복사를 장파 복사라고도 한다.

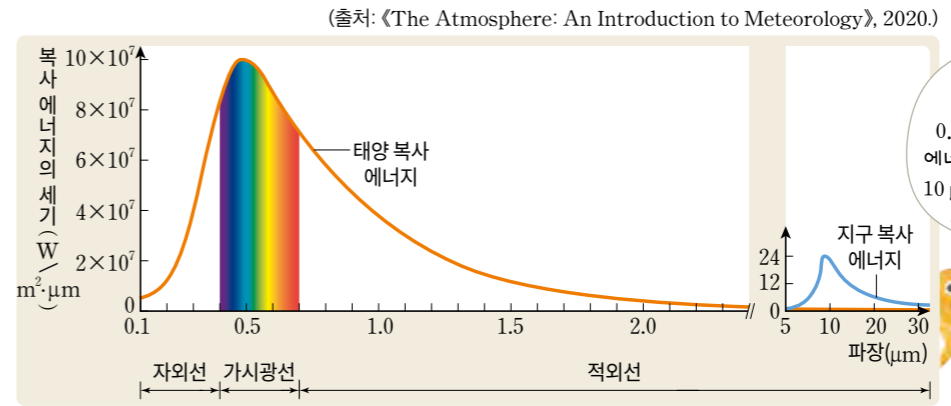


그림 III-2 태양 복사 에너지와 지구 복사 에너지의 세기

그림 III-3은 대기 성분별 복사 에너지 흡수율을 나타낸 것이다. 오존과 산소 분자는 지구에 도달한 태양 복사 에너지 중 파장이 짧은 자외선을 선택적으로 흡수한다. 수증기, 이산화 탄소 등은 주로 파장이 긴 적외선을 선택적으로 흡수한다. 가시광선은 대기에 거의 흡수되지 않고 지표까지 도달한다.

지구 복사 에너지도 대기를 통과하는 동안 수증기, 이산화 탄소 등에 흡수된다. 이 기체들은 적외선 영역의 지구 복사 에너지를 흡수했다가 지표로 재복사해 지표의 온도를 높이는 온실 효과를 일으킨다. 8 μm~13 μm인 파장 영역의 지구 복사 에너지는 대부분 우주 공간으로 빠져나가는데, 이 영역을 **대기의 창**이라고 한다.

(출처: 《The Atmosphere: An Introduction to Meteorology》, 2020.)

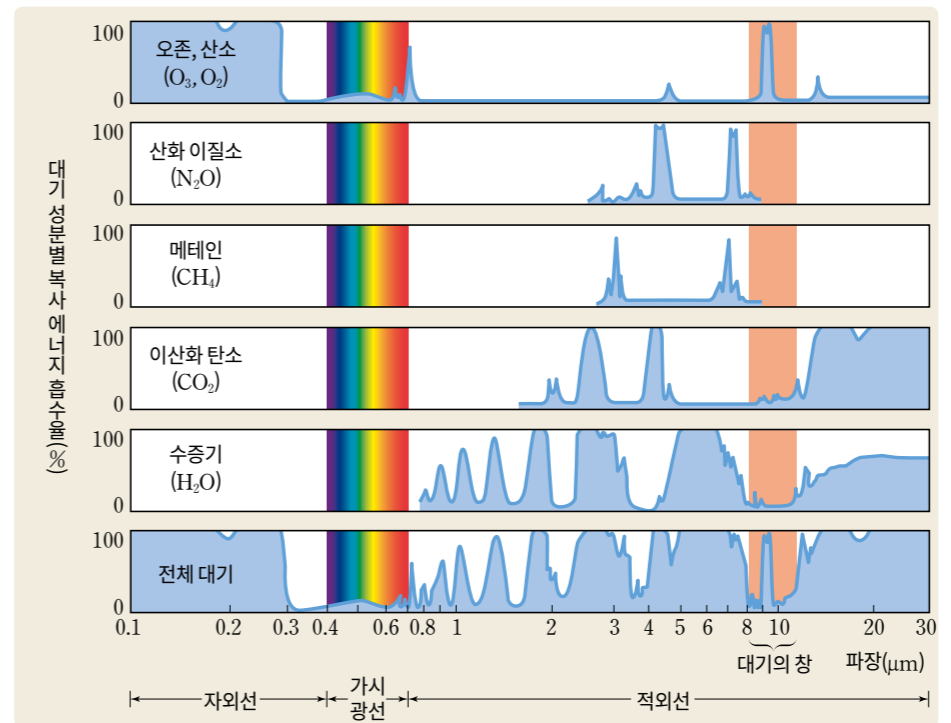


그림 III-3 대기 성분별 복사 에너지 흡수율

**생명 가능 지대의 범위**

과학자들은 행성에 액체 상태의 물이 존재하는 것이 생명체가 존재하기 위한 가장 필수적인 요소로 보고 있다. 따라서 이를 기준으로 생명 가능 지대의 범위를 결정한다.

**지구 생명체의 존재 조건**

지구는 수많은 생명체가 살고 있는 행성이다. 행성에 생명체가 존재하려면 주변에 에너지를 안정적으로 공급해 주는 별이 있어야 하고, 행성 표면에 액체 상태의 물이 있어야 한다. 별의 주위에서 액체 상태의 물이 존재할 수 있는 거리의 범위를 **생명 가능 지대**라고 한다. 그러나 생명 가능 지대 안에 있는 행성이라고 해서 생명체가 존재할 수 있는 것은 아니다. 다음 활동에서 지구에서 생명체가 발생하고 존재할 수 있었던 까닭을 알아보자.

**해보기**

**지구 생명체의 존재 조건 추론하기**

문제해결 능력 | 의사결정 능력

다음은 지구 생명체의 발생과 존재 조건에 관련된 지구의 특징을 나타낸 것이다.

- 지구에는 액체 상태의 물이 풍부하게 존재한다.
- 지구는 여러 종류의 기체로 이루어진 적당한 두께의 대기를 가지고 있다.
- 지구에서 최초의 생명체는 바다에서 출현했으며, 이후 육지로 진출했다.

1. 액체 상태의 물은 어떤 특성이 있는지 조사한 다음, 최초의 생명체가 바다에서 출현한 까닭을 물의 특성과 관련지어 설명해 보자.
2. 바다에서 출현한 생명체가 지구의 다양한 곳으로 진출하는 과정에서 대기가 어떤 역할을 했는지 설명해 보자.
3. 지구에서 생명체가 발생하고 존재할 수 있는 조건을 추론해 보자.

그림 III-4와 같이 주계열성의 질량이 클수록 광도가 증가해 생명 가능 지대는 별에서 멀어지고 폭도 넓어진다. 태양계의 생명 가능 지대는 태양계에서 유일한 별인 태양으로부터의 거리, 행성의 대기 성분 등에 따라 달라질 수 있지만 현재는 금성과 화성 사이에 위치하며, 태양은 현재까지 지구에 에너지를 안정적으로 공급해 주고 있다.

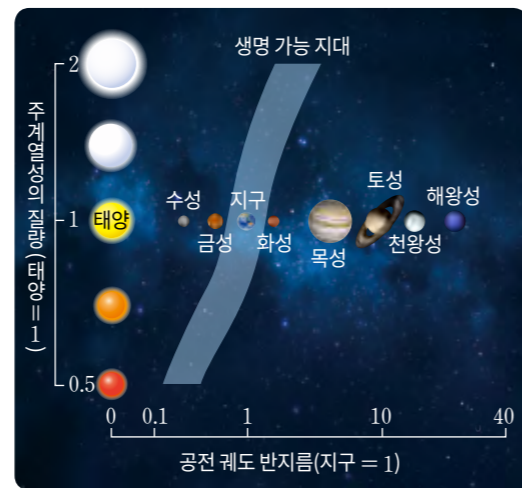


그림 III-4 주계열성의 질량에 따른 생명 가능 지대 태양계 행성의 크기와 행성 사이의 거리는 실제 비율과 다르다.

지구는 태양으로부터 1 AU만큼 떨어진 거리에서 태양 주위를 거의 원에 가까운 궤도로 공전하고 있으며, 표면에 액체 상태의 물이 풍부하게 존재한다. 물은 비열이 커서 쉽게 가열되거나 냉각되지 않으며, 다양한 물질을 쉽게 녹이는 성질이 있어 생명체가 발생하고 진화하기에 적당한 환경을 제공한다. 액체 상태의 물은 고체 상태인 얼음보다 밀도가 크기 때문에 기온이 낮아져 강이나 호수의 물이 얼더라도 수면부터 얼게 된다. 따라서 기온이 낮은 겨울에도 수중 생명체들이 생존할 수 있다.

지구는 크기가 적당하고 중력을 가지고 있어 대기를 유지할 수 있다. 지구의 대기는 생명체의 생명 활동에 필요하고, 자외선과 같이 유해한 복사 에너지로부터 생명체를 보호한다. 파장이 짧은 자외선은 동물의 유전자를 변형시키고 식물의 엽록소를 파괴하는 등 생명체에 해로운 영향을 준다. 성층권에 존재하는 오존층은 지구에 도달하는 태양 복사 에너지 중 자외선을 흡수해 자외선이 지표까지 들어오는 것을 막아 준다.

또 지구의 대기는 온실 효과를 일으켜 생명체가 살기에 적합한 환경을 유지시켜 준다. 온실 효과는 수증기, 이산화 탄소와 같은 적외선을 흡수하는 온실 기체에 의해 일어난다. 온실 기체는 지표에서 방출된 적외선이 우주 공간으로 직접 빠져나가는 것을 막아 지구의 평균 표면 온도를 약 15 °C로 유지시켜 준다.

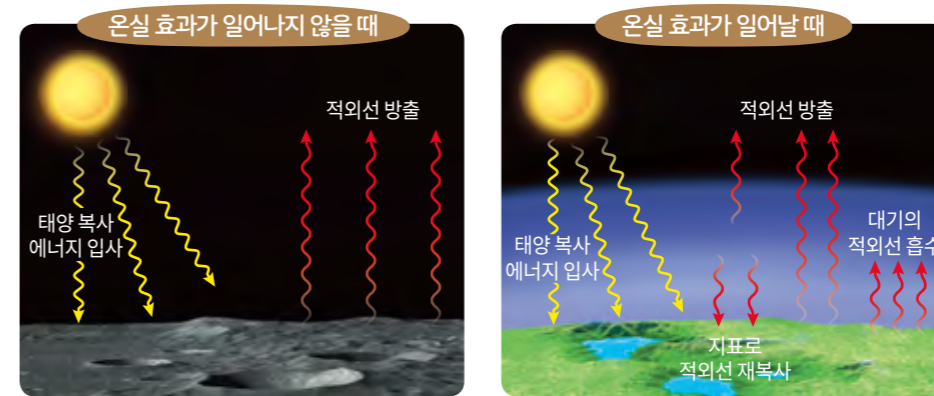


그림 III-5 대기에서 온실 효과가 일어나지 않을 때와 일어날 때의 차이

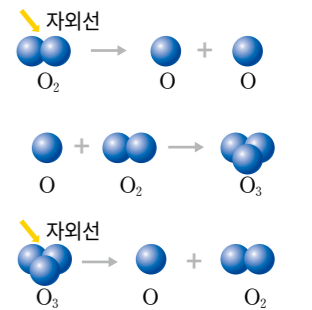
**스스로 확인하기**

- 1 지구의 대기를 구성하는 기체들이 선택적 흡수체임을 설명해 보자.
- 2 오존층이 지구 생명체의 존재에 어떤 역할을 하는지 설명해 보자.
- 3 | 창의력 더하기 | 태양의 광도가 현재보다 증가한다면 태양계의 생명 가능 지대는 현재와 비교해 어떻게 달라질지 설명해 보자.

**1 AU(천문단위)**  
태양과 지구 사이의 평균 거리로, 약  $1.5 \times 10^8$  km이다.

**오존층에서 자외선을 흡수하는 과정**

산소 분자가 자외선을 흡수해 산소 원자로 분해되고, 산소 원자가 산소 분자와 결합하면 오존이 생성된다. 오존이 다시 자외선을 흡수해 산소 원자와 산소 분자로 분해된다.



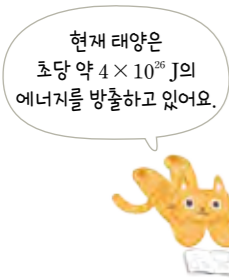
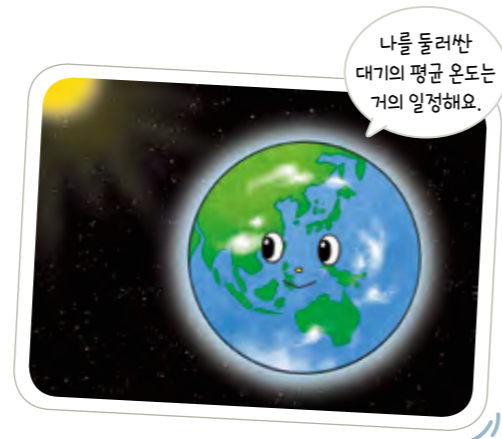
# 02

## 지구 열수지

### 학습 목표

- 지표와 대기의 열 출입과 관련된 물리 과정을 설명할 수 있다.
- 전 지구 평균 열수지를 해석할 수 있다.

지구는 태양으로부터 끊임없이 에너지를 받고 있지만 지구의 평균 기온은 거의 일정하게 유지되고 있다. 지구의 기온이 계속 상승하지 않는 까닭은 무엇일까?



태양은 매 순간 엄청난 양의 에너지를 우주 공간으로 방출하며, 지구에는 태양이 방출하는 에너지의 약 20억분의 1이 도달한다. 이 에너지가 지구의 대기를 지나는 동안 여러 가지 상호작용을 하며 지구시스템에 영향을 준다.

### 지표와 대기의 열 출입

태양 복사 에너지가 지구의 대기에 도달하면 산란, 반사, 흡수, 굴절과 같은 물리 과정이 일어나면서 지표와 대기의 열 출입에 영향을 준다.

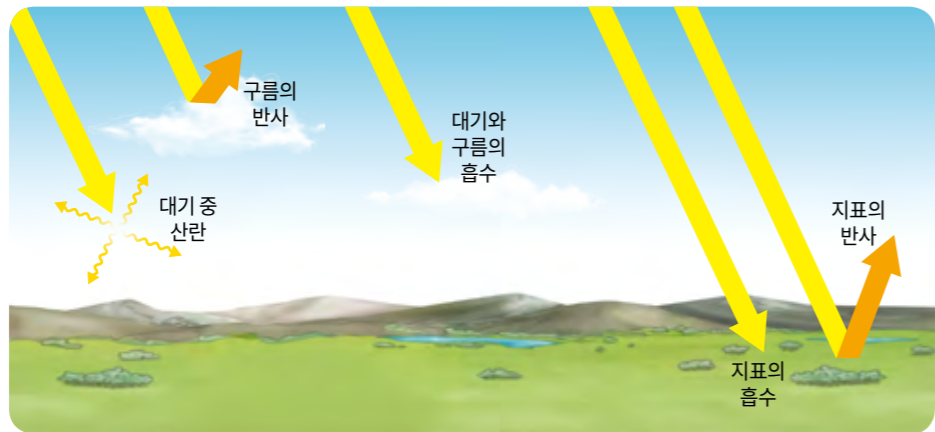


그림 III-6 지표와 대기의 열 출입 과정

대기에 도달한 태양 빛이 질소, 산소와 같은 기체나 미세한 먼지 입자 등을 만나면 진행하던 방향과 다르게 여러 방향으로 흩어지는 산란이 일어난다. 산란은 태양 빛의 진행 방향을 바꾸어 태양 복사 에너지의 일부를 우주 공간으로 되돌아 나가게 하거나 지표로 향하게 한다. 낮에 하늘이 파랗게 보이거나 저녁 무렵 태양이 붉게 보이는 것은 대기 중 태양 빛의 산란으로 나타나는 현상이다.

대기 중 산란으로 나타나는 현상 가시광선 중 파장이 짧은 파란색 빛은 파장이 긴 붉은색 빛보다 산란이 잘 일어난다. 태양 고도가 높을 때는 파란색 빛이 산란되어 우리 눈에 들어오므로 하늘이 파랗게 보인다. 태양 고도가 낮아지면 태양 빛이 통과하는 대기의 두께가 두꺼워져, 파란색 빛은 대부분 산란되어 사라지고 붉은색 빛만 우리 눈에 들어오므로 태양이 붉게 보인다.

태양 빛은 구름이나 지표에서 반사되어 우주 공간으로 되돌아 나가기도 한다. 물체가 빛을 받았을 때 반사하는 정도를 반사율이라고 하는데, 반사율은 구름의 양이나 지표가 눈, 흙, 식물 등으로 덮인 정도에 따라 달라진다. 일반적으로 금방 내린 눈이나 두꺼운 구름은 반사율이 높은 반면, 어두운색을 띠는 흙이나 풀, 두께가 얇은 구름은 반사율이 낮다.

구름과 다양한 표면의 반사율 (출처: 《대기과학》, 2016.)

구분	반사율(%)
두꺼운 구름	70~90
얇은 구름	25~30
눈	50~90
젖은 흙	15~25
풀	5~25
모래사장	20~40

태양 복사 에너지는 구름이나 대기 중 오존, 수증기 등에 흡수되거나 지표에 흡수된다. 산란이나 반사와 달리 흡수는 대기와 지표의 온도를 직접적으로 상승시킨다. 그림 III-7과 같이 대기는 파장에 따라 태양 복사 에너지를 선택적으로 흡수하지만, 지표는 거의 모든 파장의 태양 복사 에너지를 흡수한다.

(출처: 《알기 쉬운 대기과학》, 2020.)

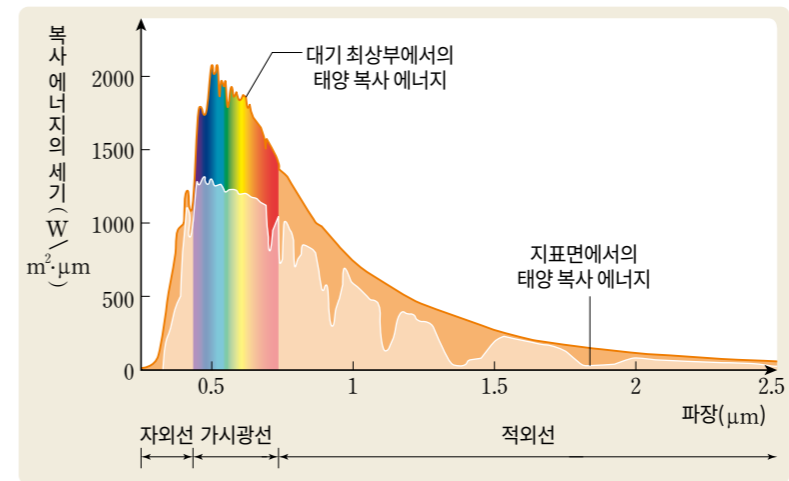


그림 III-7 지구 대기 최상부와 지표면에 도달하는 태양 복사 에너지의 세기 대기 중 오존, 산소, 수증기, 이산화 탄소 등이 특정 파장의 빛을 흡수하므로 지표면에 도달하는 태양 복사 에너지의 세기는 대기 최상부에 도달하는 태양 복사 에너지의 세기보다 작다.

빛은 밀도가 서로 다른 매질을 통과하면 굴절된다. 이러한 현상은 빛이 통과하는 매질에 따라 빛의 속도가 달라지기 때문에 일어난다. 대기의 밀도는 지표에 가까워질수록 커지는데, 대기에 도달한 태양 빛은 밀도가 높은 상층에서 밀도가 낮은 지표 쪽으로 진행할수록 속도가 느려지면서 지표를 향해 굴절된다. 일몰 때 태양이 수평선 아래로 내려간 뒤에도 한동안 태양이 보이는 것은 태양 빛이 대기를 통과하면서 굴절되기 때문이다.

그림 III-8 수평선 위로 보이는 태양 실제 태양은 이미 수평선 아래로 내려갔지만 태양 빛의 굴절로 태양이 수평선에 걸려 있는 것처럼 보인다.



지구는 태양으로부터 많은 양의 에너지를 지속적으로 받고 있지만 지구 전체의 평균 기온은 거의 일정하게 유지된다. 이것은 지구가 태양으로부터 받는 만큼의 에너지를 우주 공간으로 방출해 균형을 이루고 있기 때문이다. 지구가 태양으로부터 흡수하고 방출하는 에너지의 양을 **지구 열수지**라고 한다. 다음 활동에서 지구는 어떻게 에너지의 균형을 이루고 있는지 알아보자.

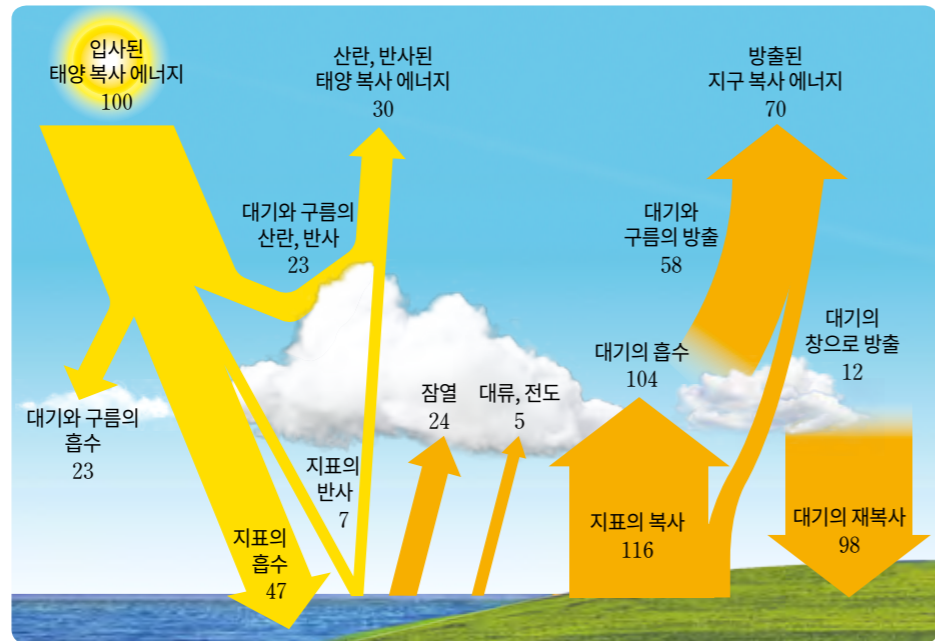
### 해보기

### 지구 평균 열수지 해석하기

Q 탐구 능력 | 문제해결 능력

그림은 지구에 도달하는 태양 복사 에너지의 양을 100이라고 했을 때 지구의 평균 열수지를 나타낸 것이다.

(출처: 미국해양대기청(NOAA), 2023.)



1. 지구에 도달하는 태양 복사 에너지 중 대기와 지표에서 반사되는 에너지는 모두 얼마인가?
2. 대기와 지표가 흡수하는 에너지와 방출하는 에너지는 각각 얼마인가?
3. 대기 중 온실 기체의 농도가 증가한다면 지구 표면 온도가 어떻게 달라질지 시뮬레이션해 보자.

지구에 도달하는 태양 복사 에너지의 양을 100이라고 하면, 30은 대기에서 산란되거나 구름과 지표에서 반사되어 우주 공간으로 되돌아 나간다. 나머지 70 중 23은 대기와 구름에 흡수되고 47은 지표에 흡수된다.

지구에서 우주 공간으로 방출되는 지구 복사 에너지의 양은 70으로, 대기와 구름에서 방출된 58과 지표에서 대기의 창을 통해 방출된 12를 더한 값이다. 이는 대기와 구름, 지표에 흡수된 에너지의 양과 같다.

#### 대기에서의 열수지

<b>흡수</b> 태양으로부터 23 + 지표로부터 133		=	<b>방출</b> 우주로 58 + 지표로 98	
------------------------------------	--	---	------------------------------	--

대기에서 흡수하는 에너지 중 일부는 온실 효과 때문에 지표로 재복사되어 지표의 온도를 높이고, 지표는 이 에너지를 다시 대기로 방출한다. 이러한 과정이 반복되면서 지구는 대기가 존재하지 않을 때보다 높은 온도를 유지할 수 있다.

#### 지표에서의 열수지

<b>흡수</b> 태양으로부터 47 + 대기로부터 98		=	<b>방출</b> 우주로 12 + 대기로 133	
-----------------------------------	--	---	-------------------------------	--

지표에서 대기로 이동하는 에너지 중 24는 잠열의 형태로, 6은 복사의 형태로, 5는 대류와 전도의 형태로 이동하므로, 잠열의 효과가 가장 크다. 잠열은 물이 수증기로 증발할 때 흡수하는 열과 수증기가 물로 응결할 때 방출하는 열로, 이러한 에너지의 이동 과정에서 구름이 생성되고 비나 눈이 내리는 기상 현상이 일어난다.

이처럼 대기와 지표는 태양 복사 에너지를 흡수하고 방출하며, 상호 간에도 에너지를 주고 받으면서 균형을 이루고 있다. 그러나 이러한 열수지의 균형이 깨지면 기후 변화가 일어날 수 있다.

최근의 지구 온난화는 산업 혁명 이후 화석 연료 사용량이 증가해 대기 중 온실 기체의 농도가 높아진 것이 주요 원인이다. 대기 중에 온실 기체가 많아지면 온실 효과가 강화되고 지구 열수지에 변화가 일어나 평균 온도가 상승하게 된다.

#### 스스로 확인하기

- 1 태양 복사 에너지가 지구의 대기에 도달할 때 일어나는 물리 과정을 설명해 보자.
- 2 지구 전체의 평균 기온이 거의 일정하게 유지되는 까닭을 설명해 보자.
- 3 | 창의력 더하기 | 밤에 바람이 불지 않고 구름이 두껍게 낀 경우가 구름이 없는 경우보다 기온이 높다. 그 까닭을 설명해 보자.

#### 지표와 대기의 가열

대기를 투과해 지표에 도달하는 태양 복사 에너지는 대기의 온도에 직접적으로 영향을 주지 않는다. 지표에 흡수된 에너지는 지표면을 가열하고, 가열된 지표면에 의해 대기 하층이 가열된다.

지표에서 대기로 이동하는 에너지 중 복사의 형태로 이동하는 에너지의 양은 지표에서 대기로 복사된 104에서 대기에서 지표로 재복사된 98을 뺀 것과 같아요.



#### 디지털 시뮬레이션

미국 PhET 시뮬레이션 누리집에서 대기 중 온실 기체의 농도에 따른 지구 표면 온도의 변화를 시뮬레이션하면서 지구 열수지와 지구 온난화의 관련성을 알아볼 수 있다.



# 03

## 대기 안정도와 강수

### 학습 목표

- 기온의 연직 분포와 대기 안정도와의 관계를 설명할 수 있다.
- 단열 변화를 통해 구름이나 안개가 생성되는 과정 및 강수 과정을 분석할 수 있다.

어느 날에는 하늘에 두꺼운 구름이 떠 있고, 다른 날에는 얇은 구름이 떠 있기도 한다. 또 구름이 떠 있는 높이가 달라지기도 한다.

이처럼 구름의 모양과 위치가 다른 까닭은 무엇일까?



### 단열 변화

지구의 대기는 지표 부근에 많이 분포해 있고 위로 올라갈수록 희박하므로 지표면에서 높이가 높아질수록 기압이 낮아진다. 따라서 공기 덩어리가 상승하면 공기 덩어리의 내부 압력이 주위 압력보다 높아 공기가 팽창한다. 이때 공기 분자의 운동 에너지 중 일부가 공기를 팽창시키는 데 사용되어 공기 덩어리의 내부 온도가 낮아지는데, 이를 **단열 팽창**이라고 한다.

이와 반대로 공기 덩어리가 하강하면 공기 덩어리의 내부 압력이 주위 압력보다 낮아 공기가 압축된다. 이때 공기 분자의 운동 에너지가 증가해 공기 덩어리의 내부 온도가 높아지는데, 이를 **단열 압축**이라고 한다. 이처럼 공기 덩어리가 외부와 열을 주고받지 않으면서 부피 변화로 온도가 변하는 현상을 **단열 변화**라고 한다.

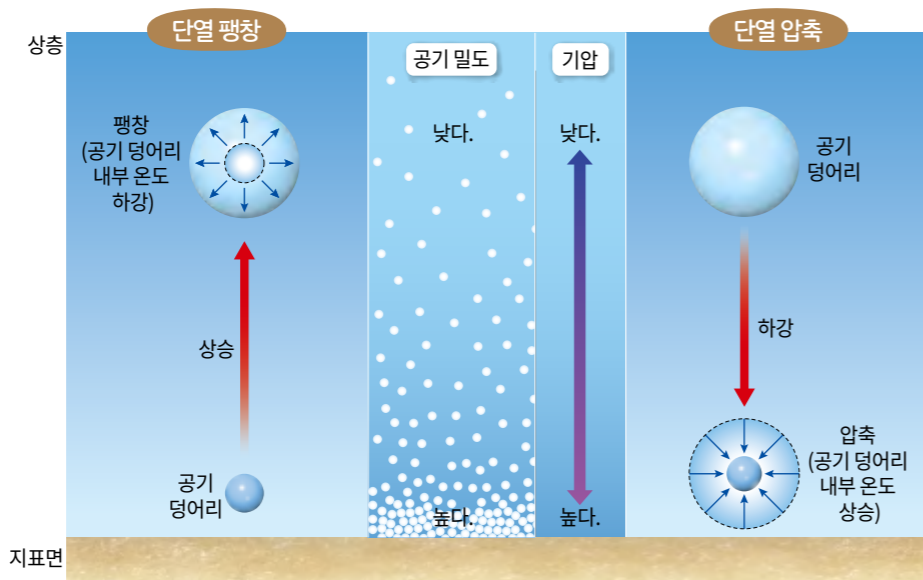


그림 III-9 단열 변화 공기 덩어리가 상승할 때는 단열 팽창, 하강할 때는 단열 압축이 일어난다.

공기의 단열 변화가 일어나는 예 풍선을 크게 불었다가 놓으면 풍선을 빠져나온 공기의 부피가 팽창하면서 시원한 바람이 분다. 또 펌프로 자전거 바퀴에 공기를 넣으면 공기가 압축되면서 자전거 바퀴가 따뜻해진다.

### 건조 단열 감률과 습윤 단열 감률

공기 덩어리의 단열 변화가 일어날 때 기온이 변하는 정도는 수증기의 포화 여부에 따라 달라진다. 불포화 상태의 공기 덩어리는 높이가 1 km 높아질 때마다 기온이 약 10 °C씩 낮아지고, 높이가 1 km 낮아질 때마다 기온이 약 10 °C씩 높아진다. 이와 같이 불포화 상태의 공기 덩어리가 상승하거나 하강할 때 일어나는 단열 변화를 건조 단열 변화라고 하고, 이때의 기온 변화율을 **건조 단열 감률**이라고 한다.

불포화 상태의 공기 덩어리가 상승하면서 냉각되어 기온이 이슬점과 같아지면 포화 상태가 된다. 포화 상태의 공기 덩어리가 상승할 때는 수증기가 응결하면서 응결열이 방출되어 단열 팽창에 의한 기온 하강 효과가 부분적으로 상쇄된다. 따라서 포화 상태의 공기 덩어리가 상승할 때의 기온 변화는 불포화 상태의 공기 덩어리가 상승할 때보다 작다. 응결열의 양은 공기 덩어리의 온도에 따라 다르지만, 평균적으로 포화 상태의 공기 덩어리는 높이가 1 km 높아질 때마다 기온이 약 5 °C씩 낮아진다. 이와 같이 포화 상태의 공기 덩어리가 상승하거나 하강할 때 일어나는 단열 변화를 습윤 단열 변화라고 하고, 이때의 기온 변화율을 **습윤 단열 감률**이라고 한다.

포화 상태인 공기는 기온이 높을수록 수증기가 응결할 때 더 많은 물을 생성하기 때문에 더 많은 응결열을 방출해요.

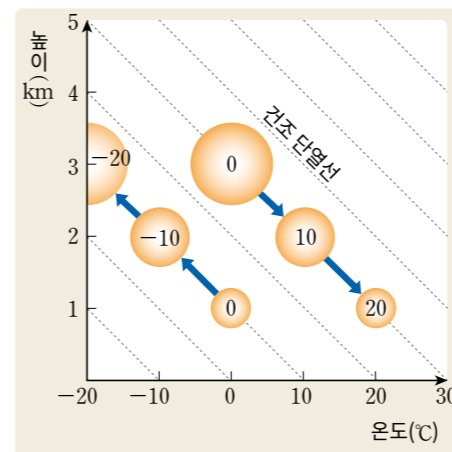


그림 III-10 건조 단열 변화

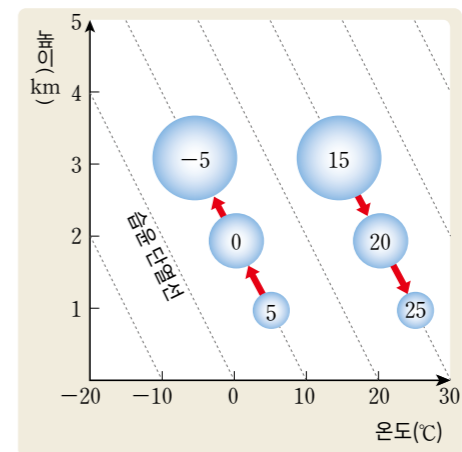


그림 III-11 습윤 단열 변화

❶ 지표면에서 기온이 20 °C인 공기 덩어리가 불포화 상태로 높이 1 km까지 상승하면 기온은 몇 °C가 되는가?

공기 덩어리가 상승해 부피가 팽창하면 공기 덩어리의 내부 온도가 낮아져 수증기압이 낮아지기 때문에 이슬점도 낮아진다. 불포화 상태의 공기 덩어리가 상승할 때 이슬점은 높이가 1 km 높아질 때마다 약 2 °C씩 낮아진다. 포화 상태의 공기 덩어리가 상승할 때 이슬점은 습윤 단열 감률과 마찬가지로 높이가 1 km 높아질 때마다 약 5 °C씩 낮아진다. 이를 **이슬점 감률**이라고 한다.

### 상대 습도와 이슬점

상대 습도는 현재 기온에서의 포화 수증기량에 대해 현재 공기 중에 포함된 수증기량의 비를 백분율로 나타낸 것이다. 이슬점은 상대 습도가 100 %에 도달해 수증기가 응결하기 시작할 때의 기온이다.

### 단열 변화에서 습도의 변화

불포화 상태의 공기는 이슬점이 기온보다 낮으므로 상대 습도가 100 % 미만이고, 포화 상태의 공기는 이슬점이 기온과 같으므로 상대 습도가 100 %이다.

### 공기가 상승해 구름이 생성되는 경우

구름은 작은 물방울이나 얼음 결정이 하늘에 떠 있는 것으로, 지표면이 국지적으로 가열될 때나 저기압 중심으로 공기가 모여 상승할 때 생성된다. 또 공기가 전선면을 타고 상승할 때나 공기가 산 사면을 타고 상승할 때 구름이 생성된다.

그림 Ⅲ-12와 같이 지표면에서 불포화 상태의 공기 덩어리가 상승하면 단열 팽창해 기온과 이슬점은 각각 건조 단열 감률과 이슬점 감률에 따라 낮아진다. 공기 덩어리가 상승해 기온과 이슬점이 같아지면 상대 습도는 100 %가 되고 수증기가 응결하면서 구름이 생성되기 시작한다. 이때의 높이를 **상승 응결 고도**라고 한다.

공기 덩어리가 상승 응결 고도 이상으로 계속 상승하면 기온이 습윤 단열 감률에 따라 낮아지고 구름이 더욱 두껍게 발달한다. 지표면에서 상승하기 시작한 공기의 온도를  $T$ , 이슬점을  $T_d$ 라고 하면 상승 응결 고도( $H$ )는 다음과 같다.

$$T - \frac{10^\circ\text{C}}{1\text{ km}} \times H = T_d - \frac{2^\circ\text{C}}{1\text{ km}} \times H$$
$$H(\text{km}) = \frac{1}{8}(T - T_d)$$

불포화 상태의 공기 덩어리가 높은 산을 만나면 산 사면을 타고 상승한다. 이때 기온과 이슬점은 각각 건조 단열 감률과 이슬점 감률에 따라 낮아지다가 상승 응결 고도에 도달하면 구름이 생성된다. 이후 산 정상까지 상승할 때는 기온과 이슬점이 습윤 단열 감률에 따라 낮아지면서 비나 눈이 내린다. 산 정상을 넘은 공기 덩어리가 하강할 때 기온과 이슬점은 각각 건조 단열 감률과 이슬점 감률에 따라 높아진다. 따라서 산을 넘은 공기 덩어리는 산을 넘기 전보다 기온이 높아지고 습도는 낮아진다. 이처럼 불포화 상태의 공기 덩어리가 높은 산을 넘어오면서 고온 건조해지는 현상을 **퓌인**이라고 한다.

그림 Ⅲ-13과 같이 우리나라에서도 퓌인 나타나는데, 동풍이 불 때 태백산맥을 넘어 영서 지방으로 고온 건조한 바람이 분다. 이것을 **높새바람**이라고 한다.



그림 Ⅲ-13 높새바람 우리나라에서 퓌인 동풍이 불 때 잘 나타나며 영서 지방의 농작물에 큰 피해를 주기도 한다.

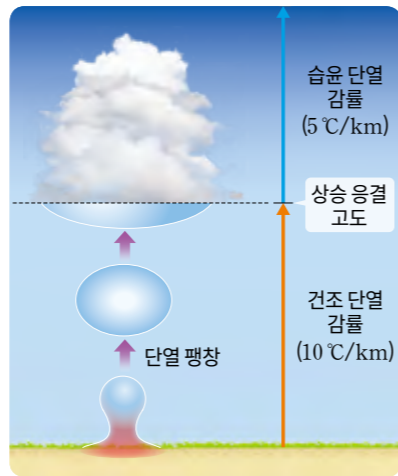


그림 Ⅲ-12 상승 응결 고도

### 대기 안정도와 구름의 생성

공기 덩어리를 강제로 상승 또는 하강시켰을 때, 공기 덩어리가 원래의 위치로 되돌아가려고 하거나 원래의 위치에서 멀어지려고 하는 경향을 **대기 안정도**라고 한다. 대기 안정도는 상승하거나 하강하는 공기 덩어리의 온도와 주위 공기의 온도를 비교해 판단할 수 있다. 공기 덩어리를 강제로 상승시켰을 때 주위 공기보다 온도가 낮으면 원래의 위치로 하강하려고 하고, 강제로 하강시켰을 때 주위 공기보다 온도가 높으면 원래의 위치로 상승하려고 한다.

그림 Ⅲ-14의 A와 같이 기온 감률이 습윤 단열 감률보다 작으면 포화 여부와 관계없이 공기 덩어리가 원래의 위치로 되돌아가려고 하는데, 이러한 대기의 상태를 **절대 안정**이라고 한다. B와 같이 기온 감률이 건조 단열 감률보다 크면 포화 여부와 관계없이 공기 덩어리가 원래의 위치에서 멀어지려고 하는데, 이러한 대기의 상태를 **절대 불안정**이라고 한다. C와 같이 기온 감률이 건조 단열 감률보다 작고 습윤 단열 감률보다 크면 공기 덩어리의 포화 여부에 따라 안정도가 달라지는데, 이러한 대기의 상태를 **조건부 불안정**이라고 한다. 조건부 불안정 상태일 때 공기 덩어리가 불포화 상태이면 안정하고, 포화 상태이면 불안정하다.

그림 Ⅲ-15와 같이 대기의 상태가 절대 안정일 때 지표면의 공기 덩어리가 강제로 상승하면 공기 덩어리의 온도는 주위 공기보다 항상 낮다. 따라서 이 공기 덩어리는 포화 여부와 관계없이 강제로 상승시키는 힘이 없다면 원래의 위치로 되돌아가려고 한다. 이렇게 절대 안정 상태인 대기에서는 공기 덩어리가 포화되어 구름이 생성되더라도 연직 운동이 억제되기 때문에 두께가 얇은 **층운형 구름**이 생성된다.

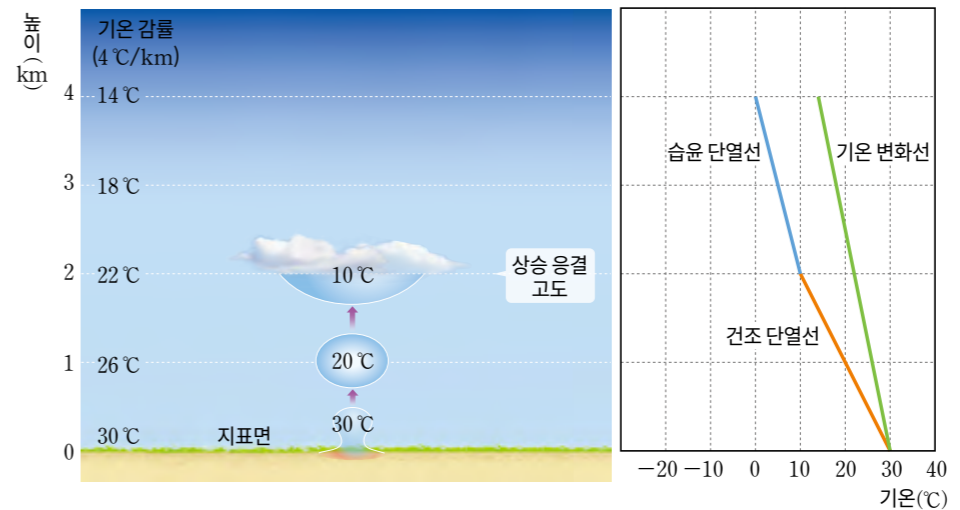


그림 Ⅲ-15 절대 안정 상태인 대기에서 구름의 생성 과정

기온 감률은 높이에 따라 기온이 낮아지는 비율이고, 단열 감률은 공기 덩어리의 단열 변화로 기온이 낮아지는 비율이에요.

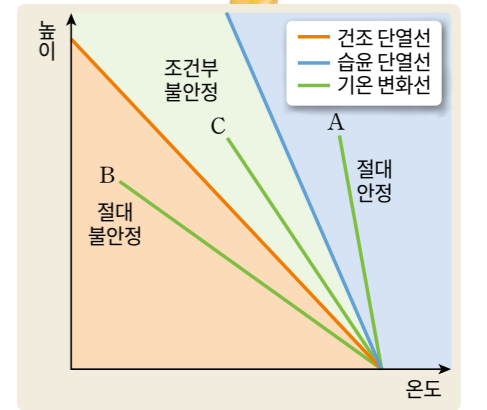
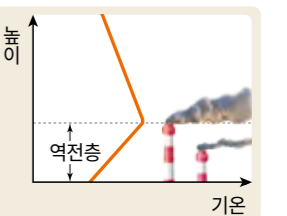


그림 Ⅲ-14 대기 안정도

### 역전층

높이가 높아질수록 기온이 높아지는 절대 안정 상태인 대기층으로, 바람이 약하고 맑은 날 새벽에 지표면의 복사 냉각으로 형성되는 경우가 많다. 역전층이 형성되면 오염 물질이 잘 확산되지 않아 대기 오염이 심해질 수 있다.



층운형 구름과 적운형 구름의 모습



층운형 구름



적운형 구름

그림 III-16과 같이 대기의 상태가 절대 불안정일 때 지표면의 공기 덩어리가 상승하면 공기 덩어리의 온도는 주위 공기보다 항상 높다. 따라서 이 공기 덩어리는 포화 여부와 관계없이 원래의 위치에서 멀어지려고 하며 연직 운동이 활발하게 일어난다. 이렇게 절대 불안정 상태인 대기에서는 공기 덩어리가 상승 응결 고도에 도달해 구름이 생성되기 시작한 뒤에도 계속 상승하기 때문에 두께가 두꺼운 **적운형 구름**이 생성된다.

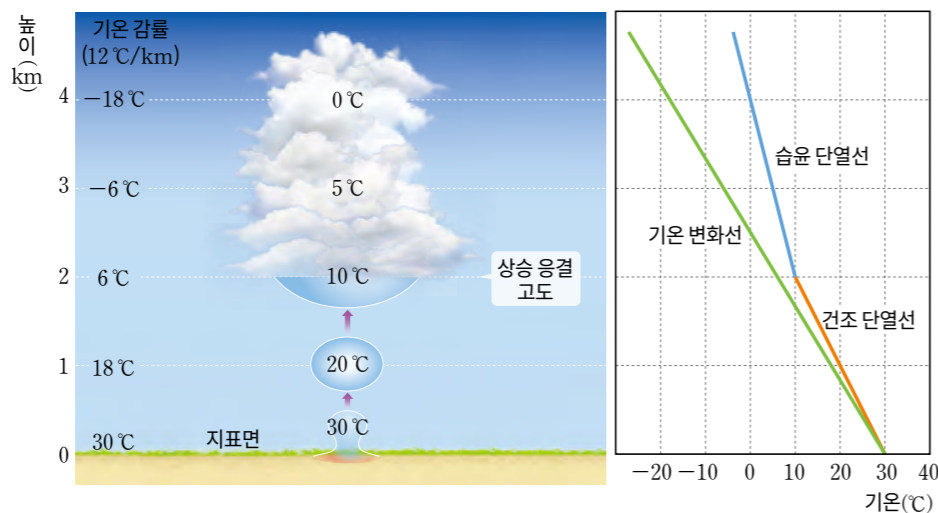


그림 III-16 절대 불안정 상태인 대기에서 구름의 생성 과정

그림 III-17과 같이 대기의 상태가 조건부 불안정일 때 지표면의 공기 덩어리가 강제로 상승하면 공기 덩어리의 온도는 건조 단열 감률에 따라 낮아지다가 상승 응결 고도에 도달해 포화 상태가 된다. 이때는 층운형 구름이 생성된다. 이후 공기 덩어리가 계속 상승해 공기 덩어리의 온도가 주위 공기보다 높아지면 강제로 상승시키는 힘이 없어도 저절로 상승하며 적운형 구름이 생성된다.

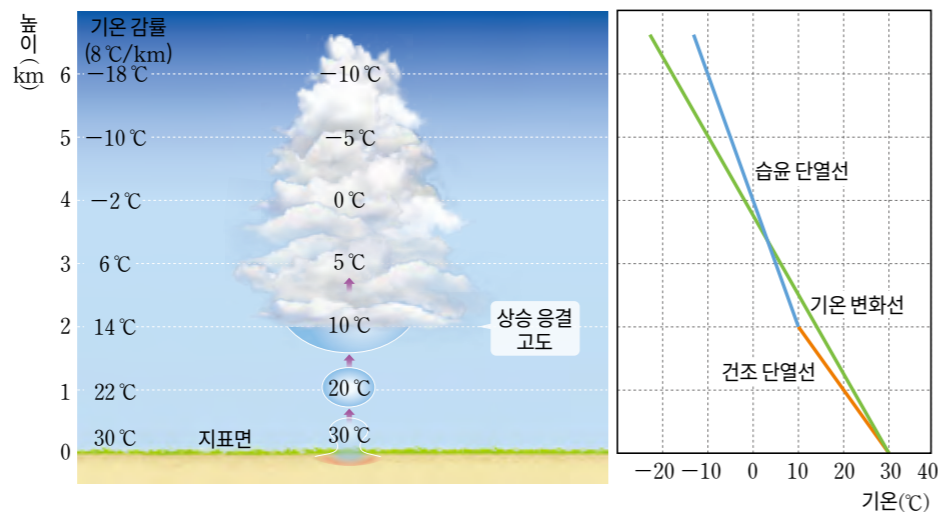


그림 III-17 조건부 불안정 상태인 대기에서 구름의 생성 과정

## 탐구

### 단열선도를 이용하여 대기 안정도 해석하기

자료 분석 및 해석

#### 목표

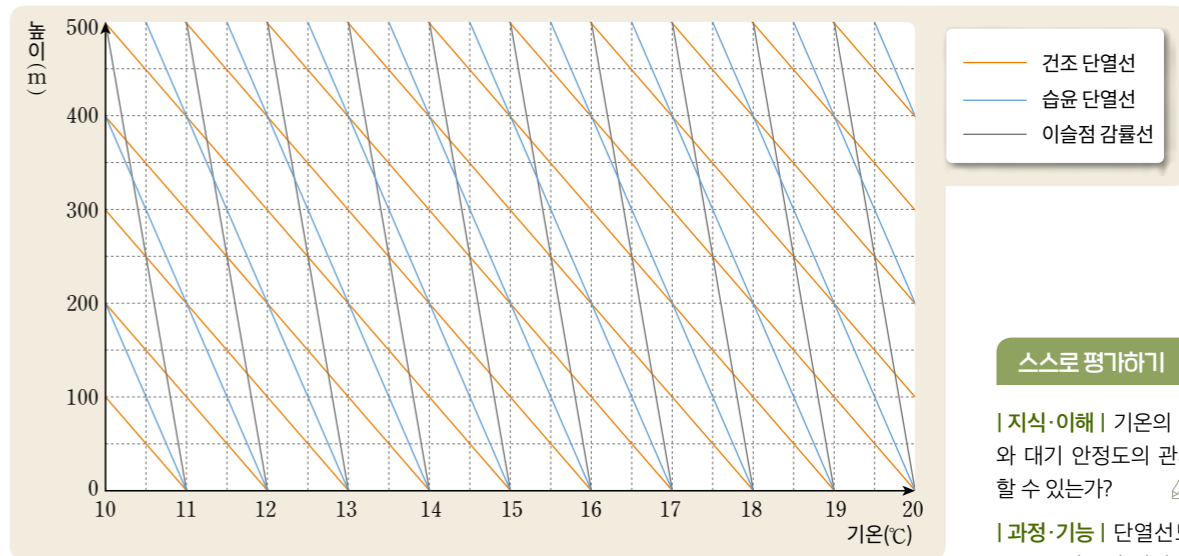
높이에 따른 기온 분포와 단열선도를 이용해 대기 안정도를 해석할 수 있다.

#### 과정

표는 (가) 지점과 (나) 지점에서 높이에 따라 측정한 기온을 나타낸 것이다.

높이 (m)	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
(가)	12.0	12.5	13.0	13.5	14.0	14.5	15.0	14.3	13.6	12.9	12.2
(나)	16.0	15.7	15.4	15.1	14.8	14.5	14.2	13.9	13.6	13.3	13.0

(가) 지점과 (나) 지점의 높이에 따른 기온 분포를 단열선도에 서로 다른 색깔로 나타낸 다음, 단열선과 비교해 대기 안정도를 판단한다.



#### 결과 및 정리

- (가) 지점과 (나) 지점의 대기 안정도를 높이에 따라 절대 안정, 절대 불안정, 조건부 불안정으로 구분하여 설명해 보자.
- ☞ 창의** (가) 지점의 높이 300 m에서 주위 공기와 온도가 같은 대기 오염 물질이 배출된다면 어느 방향으로 퍼져 나갈지 설명해 보자.

#### 준비물

- 색연필
- 자

#### 활동 도우미

단열선도는 상승하거나 하강하는 공기 덩어리의 성질 변화를 효과적으로 분석하기 위해 기온과 건조 단열선, 습윤 단열선, 이슬점 감률선 등을 함께 나타낸 그래프이다.

#### 스스로 평가하기

**| 지식·이해 |** 기온의 연직 분포와 대기 안정도의 관계를 설명할 수 있는가? ☆☆☆

**| 과정·기능 |** 단열선도에 기온 분포를 바르게 나타내고, 단열선과 비교해 대기 안정도를 해석했는가? ☆☆☆

**| 가치·태도 |** 대기의 상태를 판단하는 데 사용되는 대기 안정도의 유용성을 인식했는가? ☆☆☆

**한 걸음 더** 탐구 과정에서 보유했던 점이나 더 알아보고 싶은 내용을 자유롭게 써 보자.

## 안개의 생성

### 안개의 또 다른 종류

찬 공기가 따뜻한 수면 위로 이동할 때 수면에서 증발한 수증기가 응결해 안개가 생성되기도 하는데, 이를 증발 안개라고 한다. 전선 부근에서 내린 빔방울이 차가운 공기층에서 증발해 안개가 생성되기도 하는데, 이를 전선 안개라고 한다. 증발 안개와 전선 안개는 수증기량이 증가해 생성된다.

지표면 부근에서 수증기가 응결해 생성된 작은 물방울이 공기 중에 떠 있는 것을 안개라고 한다. 그림 III-18과 같이 바람이 거의 없고 맑은 날 지표면의 복사 냉각으로 기온이 이슬점까지 내려가면 안개가 생성되는데, 이를 **복사 안개**라고 한다. 또 그림 III-19와 같이 온난 습윤한 공기가 차가운 지표면 위로 이동하면 기온이 이슬점까지 내려가 안개가 생성되는데, 이를 **이류 안개**라고 한다. 복사 안개와 이류 안개는 주로 대기가 안정할 때 지표면 부근의 공기가 냉각되어 생성된다.



그림 III-18 복사 안개



그림 III-19 이류 안개

그림 III-20과 같이 지표면 부근의 온난 습윤한 공기가 산을 만나면 산 사면을 따라 상승하는 과정에서 안개가 생성되기도 하는데, 이를 **활승 안개**라고 한다. 활승 안개는 단열 팽창으로 공기가 냉각되어 생성된다.



그림 III-20 활승 안개

## 강수 과정

강수 과정은 중학교 과학에서 배웠다.

구름을 이루는 물방울이나 얼음 알갱이가 비나 눈, 우박 등의 형태로 지표에 떨어져 내리는 것을 **강수**라고 한다. 강수가 시작하려면 구름 입자가 빔방울 크기로 성장해야 한다.

저위도 지방이나 여름철 중위도 지방의 강수 과정은 **병합설**로 설명한다. 이 지방의 구름은 주로 0℃ 이상으로, 구름이 대부분 물방울로 이루어져 있다. 크기가 다른 물방울들이 상승, 하강하면서 서로 충돌하고 합쳐지면 물방울이 성장하고, 무거워지면 떨어져 비가 된다. 물방울의 낙하 속도는 물방울의 크기에 따라 달라지므로 구름 속 물방울이 다양한 크기로 분포하면 빔방울로 잘 성장할 수 있다.

고위도 지방이나 중위도 지방의 강수 과정은 **빙정설**로 설명한다. 이 지방의 구름에서 0℃ 이상인 하층은 주로 물방울로 이루어져 있고 -40℃ 이하인 상층은 주로 빔정으로 이루어져 있으며, -40℃~0℃인 중간층에는 빔정과 과냉각 물방울이 함께 존재한다. 그림 III-21과 같이 -40℃~0℃ 사이에서는 같은 온도일 때 과냉각 물방울의 포화 수증기압이 빔정의 포화 수증기압보다 높다. 따라서 빔정과 과냉각 물방울이 함께 존재할 때 공기가 빔정에 대해서는 과포화 상태, 과냉각 물방울에 대해서는 불포화 상태가 되면 과냉각 물방울에서 증발이 일어나고, 이 수증기가 빔정에 달라붙는다. 이렇게 성장한 빔정이 무거워져서 떨어지면 눈이 되고, 떨어지다가 녹으면 비가 된다.

● **과냉각 물방울**  
0℃ 이하에서도 얼지 않고 액체 상태로 존재하는 물방울이다.

(출처: 《대기과학개론》, 2012.)

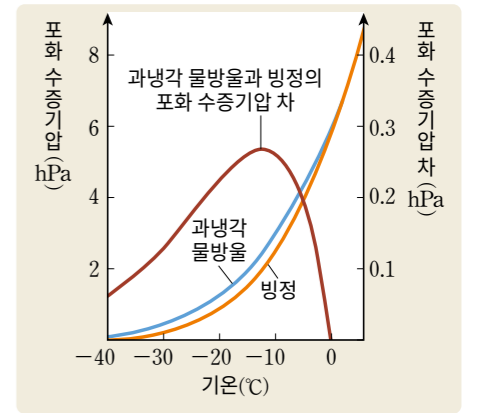


그림 III-21 과냉각 물방울과 빔정의 포화 수증기압

? 그래프에서 공기가 빔정에 대해 과포화 상태이고 과냉각 물방울에 대해 불포화 상태인 영역은 어디인가?

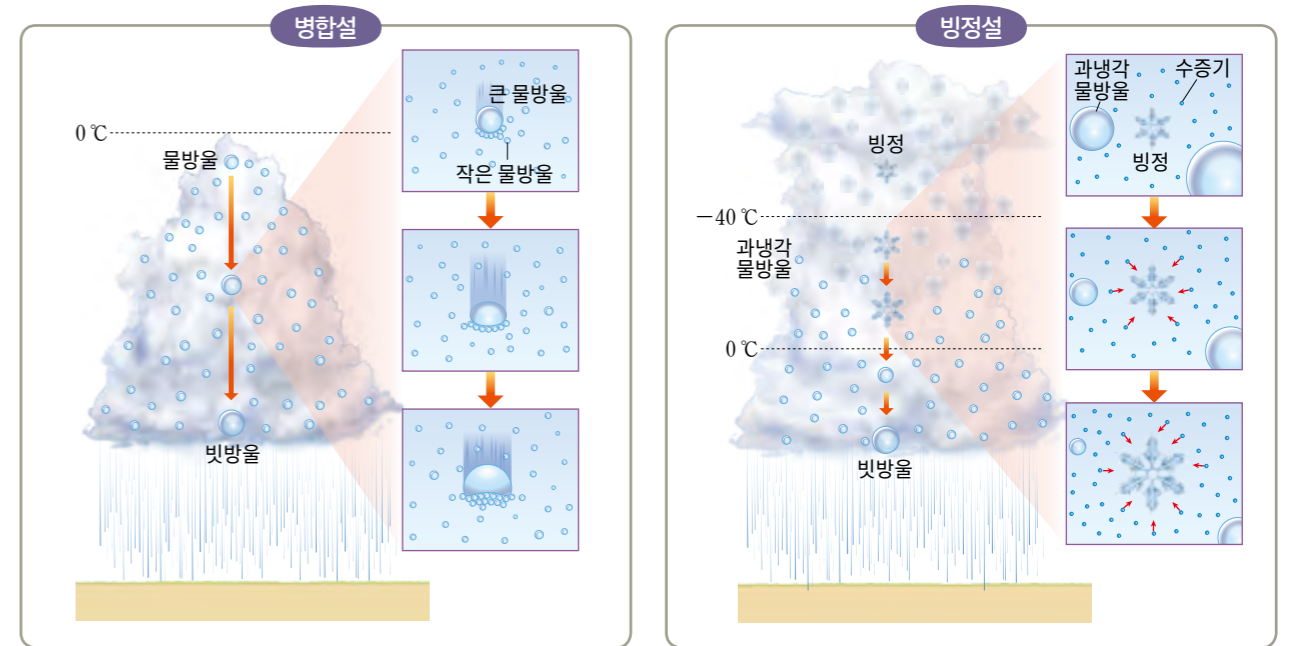


그림 III-22 병합설과 빔정설

### 스스로 확인하기

- 1 대기 안정도를 판단하는 방법을 기온 감률과 단열 감률을 이용하여 설명해 보자.
- 2 절대 안정 상태인 대기와 절대 불안정 상태인 대기에서 구름이 생성되는 과정을 단열 변화와 관련지어 설명해 보자.
- 3 | **창의력 더하기** | 저위도 지방에서 내리는 비를 따뜻한 비, 고위도 지방이나 중위도 지방에서 내리는 비를 찬비라고도 한다. 이를 강수 과정과 관련지어 설명해 보자.

# 04

## 기압의 연직 분포와 대기를 움직이는 힘

학습 목표

- 기압의 연직 분포로 정역학적 균형을 이해하고 대기 중 연직 운동의 발생 원인을 추론할 수 있다.
- 대기를 움직이는 다양한 힘을 설명할 수 있다.



하늘로 날린 풍선은 높이 올라가면 점점 커지다가 저절로 터지고, 높은 하늘을 나는 비행기 안의 과자 봉지는 부풀어 오른다. 이러한 현상이 나타나는 까닭은 무엇일까?

기압이 작용하는 예  
물이 가득 담긴 컵에 종이를 덮어 뒤집어도 물이 쏟아지지 않는다. 이는 기압이 작용하기 때문이다.



토리첼리  
(Torricelli, E., 1608~1647)  
이탈리아의 과학자. 1643년에 수은을 이용한 실험으로 수은 기압계의 원리를 알아냈다.

### 기압의 연직 분포와 정역학 평형

단위 면적에 작용하는 공기의 힘을 기압이라고 한다. 대기 중의 공기 분자들은 모든 방향으로 끊임없이 움직이므로 기압은 모든 방향으로 똑같이 작용한다.

기압의 단위는 주로 hPa(헥토파스칼)을 사용하는데, 1 hPa은 1 m<sup>2</sup>의 면적에 100 N의 힘이 작용할 때의 압력이다. 해수면에서의 기압을 표준 기압 또는 1 기압이라고 하며, 이는 약 1013 hPa이다. 1643년 토리첼리는 그림 III-23과 같이 실험으로 지표면에 작용하는 대기압의 크기가 76 cm의 수은 기둥 무게에 해당한다는 것을 알아냈다.

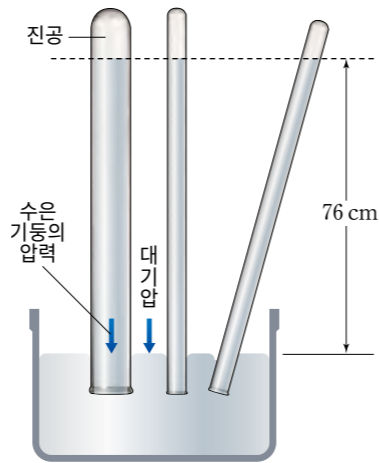


그림 III-23 기압의 크기 측정

기압은 시간과 장소에 따라 달라진다. 대기 중의 두 지점 사이에 기압 차가 생기면 발생하는 힘을 기압 경도력이라고 하며, 이 힘에 의해 공기는 기압이 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동한다. 그림 III-24와 같이 높이가 높아질수록 공기의 밀도가 작아져 공기 분자의 운동에 따른 충돌 횟수가 적어지기 때문에 기압이 낮아진다. 따라서 지표에서 위쪽으로 기압 경도력이 작용하는데, 이를 연직 기압 경도력이라고 한다.

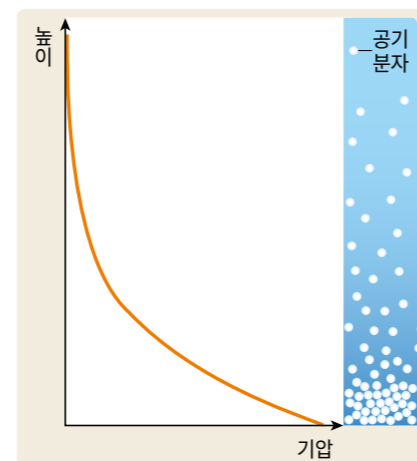


그림 III-24 기압과 공기 밀도의 연직 분포

공기에는 질량이 있어 중력도 작용하기 때문에 공기는 연직 방향으로 잘 이동하지 않는다.

그림 III-25와 같이 대부분의 공기 덩어리는 위쪽으로 작용하는 연직 기압 경도력과 아래쪽으로 작용하는 중력의 크기가 같기 때문에 정역학 평형을 이루고 있다. 정역학 평형이 이루어지지 않을 경우에는 대기의 연직 운동이 발생한다. 다음 활동에서 대기의 연직 운동이 발생하는 까닭을 알아보자.

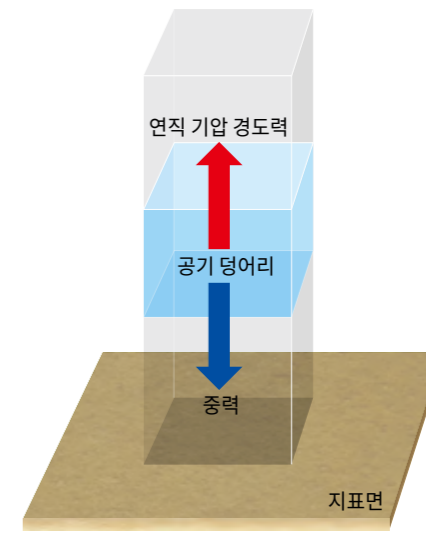


그림 III-25 정역학 평형

정역학 평형은 'II. 해수의 운동과 순환'에서도 배웠다. → 55 쪽

정역학 평형을 이용한 기압 계산  
토리첼리의 기압 실험 결과인 수은 기둥의 높이(76 cm), 수은의 밀도(13.6 g/cm<sup>3</sup>), 중력 가속도(980 cm/s<sup>2</sup>)를 정역학 방정식인 ΔP = ρgΔZ에 대입하면 1 기압은 다음과 같다.

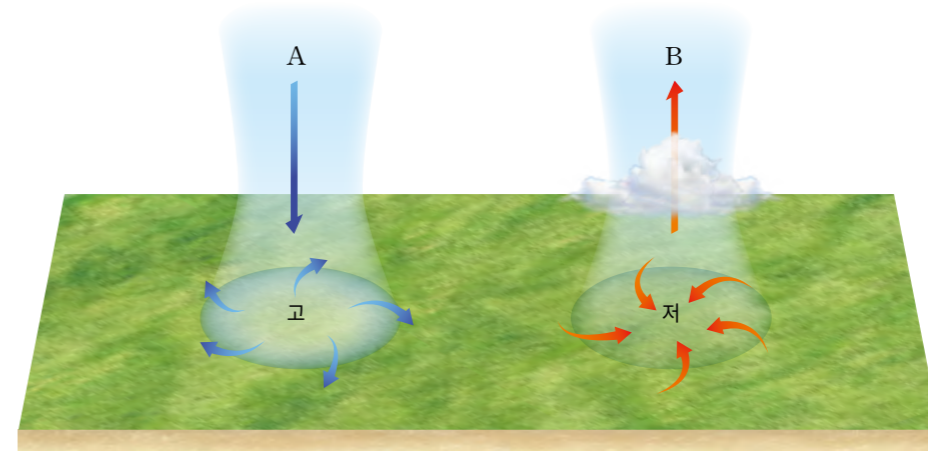
$$\begin{aligned}
 1 \text{ 기압} &= 13.6 \text{ g/cm}^3 \times 980 \text{ cm/s}^2 \times 76 \text{ cm} \\
 &\approx 1013000 \text{ g/cm} \cdot \text{s}^2 \\
 &= 101300 \text{ Pa} \\
 &= 1013 \text{ hPa}
 \end{aligned}$$

### 해보기

#### 대기의 연직 운동이 발생하는 까닭 알아보기

문제해결 능력

그림은 북반구 지상의 고기압과 저기압에 따른 대기의 연직 운동을 나타낸 것이다.



1. A 지점과 B 지점의 공기에 작용하는 연직 기압 경도력과 중력의 크기를 각각 비교하고, 이를 바탕으로 하여 각 지점에서 연직 운동이 일어나는 까닭을 설명해 보자.
2. 대기의 연직 운동이 활발하게 일어나는 기상 현상을 찾아 설명해 보자.

일반적으로 대기의 연직 운동 속도는 수평 운동 속도에 비해 매우 느리다. 그러나 연직 기압 경도력과 중력의 차이가 커져 대기의 연직 운동이 활발해지면 구름이 생성되고 태풍이나 뇌우가 발생하는 등 다양한 기상 현상이 일어난다. 이때 대기의 연직 운동 속도는 수십 cm/s에서 수 m/s까지 관측되기도 한다.

### 대기를 움직이는 힘

#### 기압 경도력의 작용 방향

기압 경도력은 연직 성분과 수평 성분의 합력으로, 기압이 높은 곳에서 낮은 곳으로 등압선의 수직 방향으로 작용한다. 수평 방향의 공기 흐름인 바람에 작용하는 기압 경도력은 모두 수평 기압 경도력을 의미한다.

**기압 경도력** >> 대기 중의 두 지점 사이에 기압 차가 생기면 기압 경도력이 작용해 공기 덩어리가 이동한다. 기압 경도력은 바람을 일으키는 근본적인 힘이다.

그림 III-26과 같이 두 지점의 간격이  $\Delta L$ , 단면적이  $S$ 인 공기 덩어리의 A, B면에 작용하는 기압 차를  $\Delta P$ 라고 하면 공기 덩어리에 작용하는 힘  $F$ 는  $\Delta P \times S$ 이다. 공기의 질량이  $M$ , 밀도가  $\rho$ 일 때 단위 질량의 공기 덩어리에 작용하는 기압 경도력( $P_H$ )의 크기는 다음과 같다.

$$P_H = \frac{F}{M} = \frac{\Delta P \times S}{\rho \times S \times \Delta L} = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{\Delta L}$$

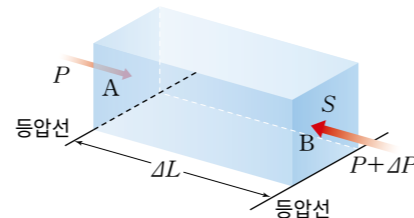


그림 III-26 기압 경도력

**전향력** >> 지구 자전의 영향을 받는 큰 규모의 공기 덩어리가 기압 경도력의 작용으로 움직이기 시작하면 전향력이 작용해 공기 덩어리가 이동하는 방향이 바뀐다. 다음 활동에서 운동하는 물체에 작용하는 전향력의 영향을 알아보자.

**탐구**  
● 결론 도출 및 일반화

- 준비물  회전 원판  종이  쇠구슬  집게  스탬프인크  굴림대

### 회전 원판을 이용한 전향 효과 실험하기

#### 목표

회전 원판을 이용한 실험으로 전향 효과를 설명할 수 있다.

#### 과정

- 회전 원판에 종이를 올려놓은 다음, 정지한 원판의 중심에서 가장자리 방향으로 잉크를 묻힌 쇠구슬을 굴러 운동 경로를 관찰한다.
- 회전 원판을 시계 반대 방향과 시계 방향으로 각각 회전시키면서 ①과 같은 방법으로 쇠구슬의 운동 경로를 관찰한다.
- 회전 원판을 시계 반대 방향으로 속도를 더 빠르게 회전시키면서 ①과 같은 방법으로 쇠구슬의 운동 경로를 관찰한다.



#### 결과 및 정리

- 회전 원판이 정지해 있을 때와 회전할 때, 회전 원판의 회전 방향이 다를 때, 회전 속도를 더 빠르게 했을 때 쇠구슬의 운동 경로 차이를 각각 비교하여 설명해 보자.
- 실험 결과를 바탕으로 하여 운동하는 물체에 작용하는 전향 효과를 설명해 보자.

#### 스스로 평가하기

**| 지식·이해 |** 운동하는 물체에 작용하는 전향 효과를 설명할 수 있는가? ☆☆☆

**| 과정·기능 |** 원판의 회전 방향과 회전 속도에 따른 쇠구슬의 운동 경로 차이를 바르게 비교했는가? ☆☆☆

**| 가치·태도 |** 실험 장치를 바르게 조작하고 탐구 활동에 적극적으로 참여했는가? ☆☆☆

탐구 능력

전향력은 북반구에서 물체가 운동하는 방향의 오른쪽 직각 방향으로 작용하고, 남반구에서 왼쪽 직각 방향으로 작용한다. 위도  $\phi$ 인 지점에서 단위 질량의 물체가 속도  $v$ 로 운동할 때 작용하는 전향력( $C$ )의 크기는 다음과 같다.

$$C = 2v\Omega \sin\phi \quad (\Omega: \text{지구 자전 각속도})$$

공기 덩어리에 작용하는 전향력의 크기는 공기 덩어리의 속력에 비례하고, 고위도로 갈수록 커진다.

**구심력** >> 원운동을 하는 물체의 궤적이 유지되려면 운동의 중심 방향으로 물체가 운동하는 방향을 지속적으로 바꾸는 힘이 필요한데, 이 힘을 구심력이라고 한다. 그림 III-27과 같이 물체의 회전 반지름을  $r$ , 회전 속도를  $v$ 라고 할 때 단위 질량의 물체에 작용하는 구심력의 크기는  $\frac{v^2}{r}$ 이다. 등압선이 곡선일 때 부는 바람에도 이와 같은 원리의 구심력이 작용한다.

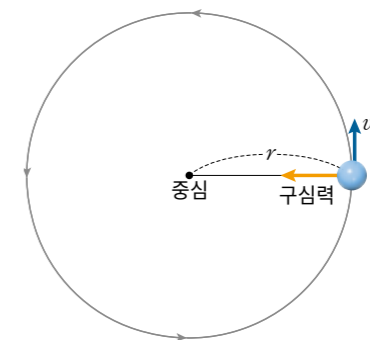


그림 III-27 구심력

**마찰력** >> 물체가 운동하는 방향과 반대 방향으로 작용해 물체의 운동 속도를 감소시키는 힘을 마찰력이라고 한다. 지표 부근에서 부는 바람은 마찰의 영향을 크게 받는다. 바람에 작용하는 마찰력은 풍속과 지표면의 거칠기가 클수록 크게 작용한다. 일반적으로 거칠기는 해양보다 지표에서 더 크며, 지표에서는 평야 지대보다 숲이 우거진 산악 지역에서 더 크다.

그림 III-28과 같이 지표면의 마찰 효과는 대기 상층으로 갈수록 감소하는데, 마찰력이 영향을 미치는 높이 약 1 km까지의 대기층을 대기 경계층 또는 마찰층이라고 하고, 그 위의 대기층을 자유 대기라고 한다.

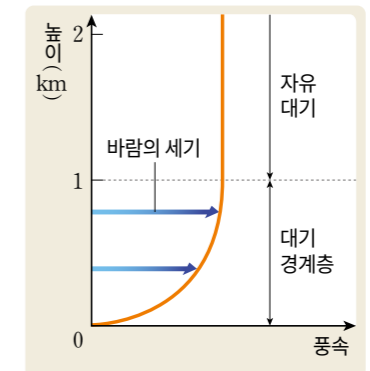
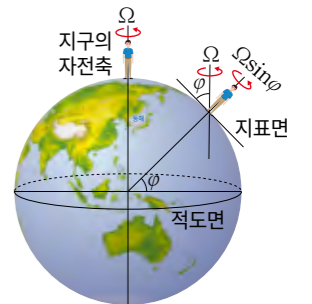


그림 III-28 대기 경계층과 자유 대기

전향력은 II. 해수의 운동과 순환'에서도 배웠다.  
→ 57 쪽

#### 위도에 따른 회전 각속도의 크기



지표면에 수직인 축을 중심으로 회전하는 각속도의 크기는 적도에서 0이고 극에서는 최대이다. 위도  $\phi$ 에 위치한 관측자의 회전 각속도 크기는  $\Omega \sin\phi$ 이다.

#### 스스로 확인하기

- 정역학 평형 상태에서 대기의 연직 운동을 설명해 보자.
- 대기를 움직이는 힘인 기압 경도력, 전향력, 구심력, 마찰력을 설명해 보자.
- | 창의력 더하기 |** 기압 경도력이 일정할 때 적도 해양에서 고위도 육지로 갈수록 바람의 방향과 속력이 어떻게 달라지는지 대기를 움직이는 힘과 관련지어 설명해 보자.

# 05

## 여러 가지 바람

### 학습 목표

- 지균풍, 경도풍, 지상풍의 발생 원리를 설명할 수 있다.
- 여러 가지 바람과 관련된 힘의 작용을 설명할 수 있다.

높은 하늘에 있는 구름이 움직이는 방향과 지상과 가까운 곳에 있는 깃발이 날리는 방향이 서로 다를 때가 있다. 이러한 현상이 나타나는 까닭은 무엇일까?



### 상층에서 부는 바람

**지균풍** >> 지표면으로부터 높이 약 1 km 이상의 상층 대기는 지표면의 영향을 거의 받지 않아 마찰력이 무시할 수 있을 정도로 작다. 그림 III-29와 같이 상층에서 수평 방향으로 두 지점 사이에 기압 차가 생기면 기압 경도력이 작용해 정지해 있던 공기가 기압이 낮은 쪽으로 움직이기 시작한다. 공기가 움직이면 북반구에서는 전향력이 운동 방향의 오른쪽 직각 방향으로 작용하므로 풍향이 오른쪽으로 휘어진다. 기압 경도력이 계속 작용해 풍속이 증가하면 전향력의 크기도 커져서 풍향은 더욱 오른쪽으로 휘게 된다. 결국 기압 경도력과 전향력이 평형을 이루게 되고 이때 바람은 등압선에 나란하게 부는데, 이를 **지균풍**이라고 한다.

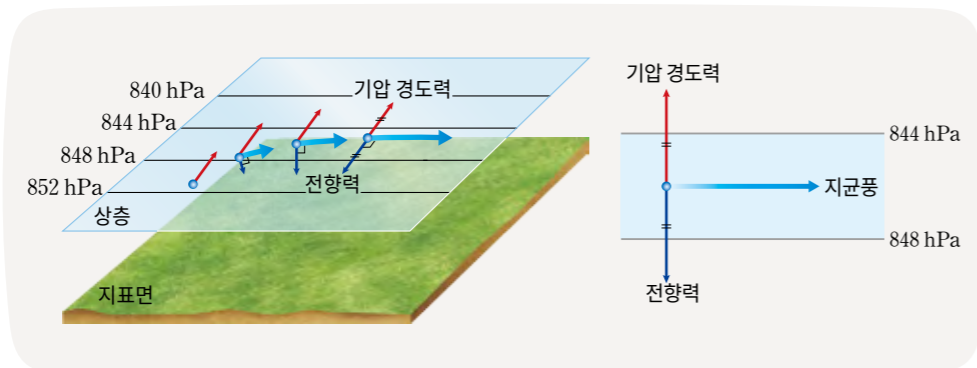


그림 III-29 지균풍의 형성 과정(북반구)

지균풍에서 기압 경도력과 전향력은 크기가 같고 방향은 반대로 작용한다. 따라서 기압 차를  $\Delta P$ , 등압선 간격을  $\Delta L$ 이라고 하면 지균풍의 풍속( $v$ )은 다음과 같다.

$$v = \frac{1}{2\rho\Omega\sin\varphi} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \quad (\rho: \text{공기의 밀도}, \Omega: \text{지구 자전 각속도}, \varphi: \text{위도})$$

지균풍의 풍속은 위도가 같을 때 기압 경도력이 클수록 빠르고, 기압 경도력의 크기가 같을 때 위도가 낮을수록 빠르다.

**경도풍** >> 상층에서 등압선이 원형이거나 곡선일 때 바람은 기압 경도력과 전향력뿐만 아니라 구심력의 영향을 받는다.

그림 III-30과 같이 상층의 저기압 부근에 정지해 있던 공기에 기압 경도력이 작용하면 공기가 저기압 중심 쪽으로 움직이기 시작하고, 전향력이 오른쪽 직각 방향으로 작용해 풍향이 오른쪽으로 휘어진다. 풍속이 증가해 전향력의 크기도 커지면 바람이 시계 반대 방향으로 등압선에 나란하게 분다. 이때 저기압 중심을 향하는 기압 경도력과 바깥쪽을 향하는 전향력의 차이가 바람을 원형으로 불게 하는 구심력으로 작용한다. 상층의 고기압 부근에서는 고기압 중심을 향하는 전향력과 바깥쪽을 향하는 기압 경도력의 차이가 구심력으로 작용해 바람이 시계 방향으로 등압선에 나란하게 분다. 이와 같이 상층에서 기압 경도력, 전향력, 구심력이 균형을 이루며 원형으로 부는 바람을 **경도풍**이라고 한다.

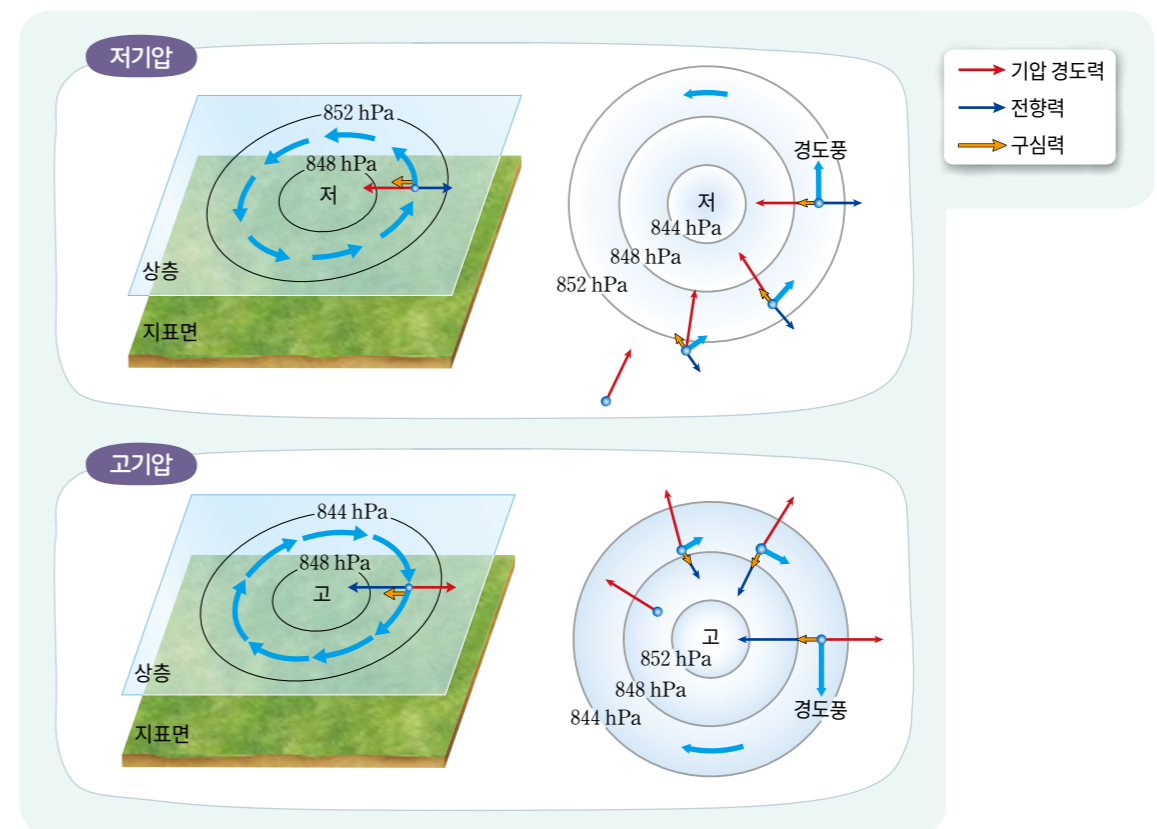


그림 III-30 경도풍의 형성 과정(북반구)

전향력의 크기는 풍속에 비례하므로 경도풍의 풍속은 기압 경도력과 구심력의 차로 결정된다. 힘의 크기만 고려하면 중심부가 저기압일 때 전향력의 크기는 기압 경도력과 구심력의 차와 같고, 중심부가 고기압일 때 전향력의 크기는 기압 경도력과 구심력의 합과 같다. 따라서 기압 경도력이 일정할 때 고기압 부근의 경도풍은 저기압 부근의 경도풍보다 풍속이 빠르다.

**경도풍에 작용하는 힘의 관계**  
저기압과 고기압 부근의 경도풍에 작용하는 힘 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.  
• 저기압:  
전향력=기압 경도력-구심력  
• 고기압:  
전향력=기압 경도력+구심력

## 지상에서 부는 바람

지표면으로부터 높이 약 1 km까지의 지상에서는 지표면의 마찰이 바람에 영향을 준다. 마찰력은 바람이 불어 가는 방향의 반대 방향으로 작용하므로 지표 부근에서는 풍속이 감소하면서 전향력의 크기도 작아진다. 그 결과 그림 III-31과 같이 마찰력과 전향력의 합력이 기압 경도력과 평형을 이루며 바람이 등압선을 비스듬하게 가로질러 분다. 이와 같이 지상에서 기압 경도력, 전향력, 마찰력이 평형을 이루며 부는 바람을 **지상풍**이라고 한다. 지상풍이 등압선과 이루는 각( $\theta$ )을 경각이라고 하는데, 마찰력이 크게 작용할수록 경각이 커진다.

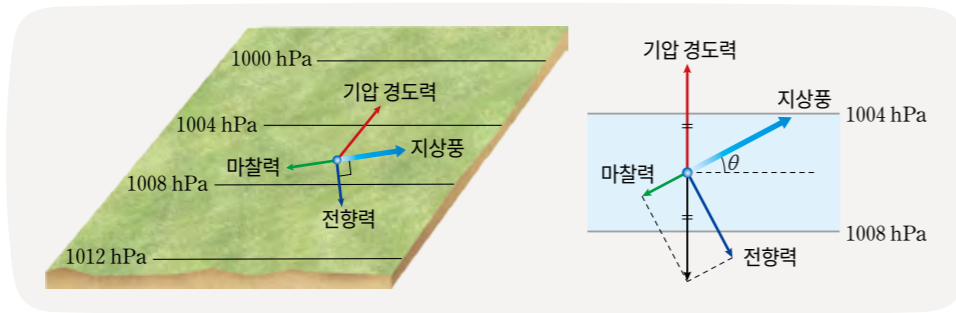
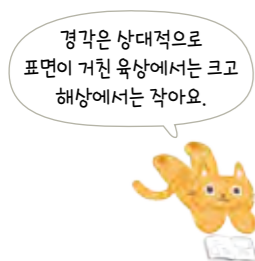


그림 III-31 등압선이 직선일 때 지상풍의 형성 과정(북반구)

지상에서 등압선이 원형이거나 곡선일 때 지상풍은 기압 경도력, 전향력, 마찰력뿐만 아니라 구심력의 영향을 받는다. 상층에서는 바람이 등압선에 나란하게 불지만 지표 부근에서는 마찰력이 작용해 풍속을 감소시키므로 바람이 등압선을 가로지르며 분다. 그림 III-32와 같이 지상의 저기압 부근에서는 바람이 시계 반대 방향으로 불어 들어가고, 고기압 부근에서는 바람이 시계 방향으로 불어 나간다.

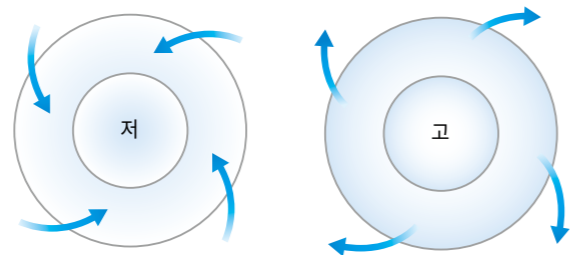


그림 III-32 등압선이 원형일 때 지상풍이 부는 방향(북반구)

## 지상 일기도와 상층 일기도

**지상 일기도**는 우리가 사는 지상 대기의 날씨 정보를 나타낸 일기도로, 기압이 같은 지점을 연결한 등압선으로 기압의 분포를 나타낸다. **상층 일기도**는 상층 대기의 날씨 정보를 나타낸 일기도로, 특정 기압에서 등압면의 고도가 같은 지점을 연결한 등고선으로 기압의 분포를 나타낸다.

상층 일기도에서 등압면의 고도가 높은 지역은 고도가 낮은 지역보다 기압이 높다. 그림 III-33과 같이 500 hPa 등압면의 평균 높이를 나타내는 수평면상의 A 지점은 기압이 500 hPa보다 높고, B 지점은 기압이 500 hPa보다 낮다.

상층 일기도에서 등고선은 지상 일기도의 등압선과 마찬가지로 기압을 나타내는 것이며, 등고선이 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 기압 경도력이 작용한다. 다음 활동에서 지상 일기도와 상층 일기도를 비교해 보자.

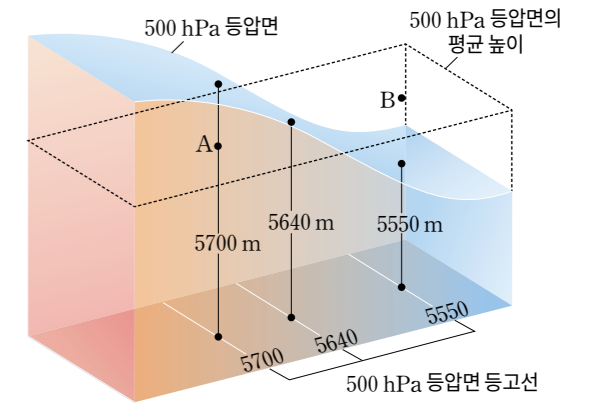


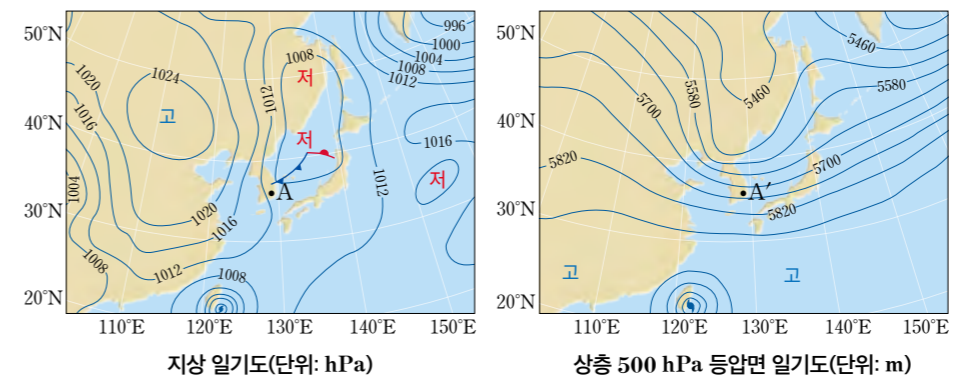
그림 III-33 등압면과 등고선

## 해보기

### 지상 일기도와 상층 일기도 비교하기

탐구 능력 | 문제해결 능력

그림은 같은 날 같은 시각의 지상 일기도와 상층 500 hPa 등압면 일기도를 나타낸 것이다.



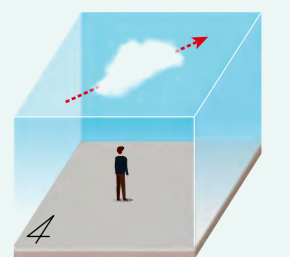
1. 지상 일기도의 A 지점과 상층 일기도의 A' 지점에서 기압 경도력이 작용하는 방향을 각각 화살표로 나타내 보자.
2. 지상 일기도의 A 지점과 상층 일기도의 A' 지점에서 기압 경도력이 작용하는 방향과 풍향은 어떤 차이가 있는지 비교해 보고, 차이가 나는 까닭을 설명해 보자.

### 디지털 탐색

기상청 날씨누리(<https://www.weather.go.kr>)에서 지상 일기도와 상층 일기도를 찾아볼 수 있다.

### 스스로 확인하기

- 1 기압 경도력의 크기가 같을 때 지표면의 풍속은 위도에 따라 어떻게 달라지는지 설명해 보자.
- 2 북반구의 지상과 상층에서 각각 등압선이 원형이고 중심부가 고기압일 때 부는 바람의 방향을 비교하여 설명해 보자.
- 3 | 창의력 더하기 | 상층의 구름이 남서쪽에서 북동쪽으로 이동하고 있다면 상층의 기압은 어떻게 배치되어 있을지 설명해 보자.



# 06

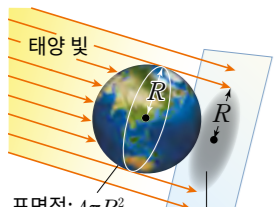
## 편서풍 파동

- 학습 목표**
- 행성파의 발달 과정을 설명할 수 있다.
  - 지상 고·저기압 발달에서 편서풍 파동의 역할을 평가할 수 있다.

미국에서 우리나라로 비행할 때의 시간이 우리나라에서 미국으로 비행할 때보다 더 오래 걸린다. 같은 거리를 비행하는데 비행 시간에 차이가 나는 까닭은 무엇일까?



지구에 도달하는 태양 복사 에너지의 양



R: 지구 반지름  
I: 태양 상수  
단면적: πR²

단위 시간 동안 지구의 단위 면적에 도달하는 평균 태양 복사 에너지의 양은 342 W/m²이다.

$$\frac{\pi R^2 I}{4\pi R^2} = \frac{1}{4} I = \frac{1367}{4} \approx 342 \text{ W/m}^2$$

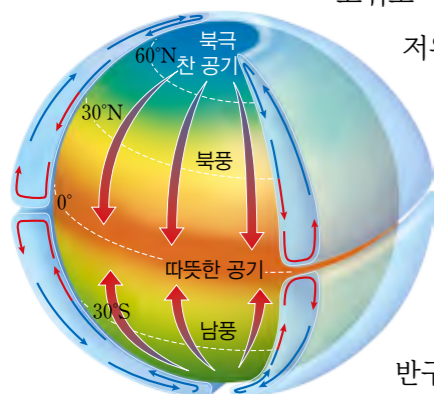


그림 III-35 단일 세포 순환

### 대기 대순환

태양에서 방출된 에너지는 지구 대기권에 도달할 때까지 어떤 간섭도 받지 않고 우주 공간을 통과한다. 단위 시간 동안 지구 대기권의 최상부에서 태양 빛에 수직인 단위 면적에 도달하는 태양 복사 에너지의 양은 약 1367 W/m²로, 이를 **태양 상수**라고 한다. 단위 시간 동안 지구의 단위 면적에 도달하는 평균 태양 복사 에너지의 양은 태양 상수의 1/4 배이다.

지구는 태양 복사 에너지를 흡수하고 지구 복사 에너지를 방출해 지구 전체적으로는 복사 평형을 이루고 있다. 그러나 그림 III-34와 같이 저위도 지방은 에너지의 흡수량이 방출량보다 많아 에너지 과잉 상태이고, 고위도 지방은 에너지의 방출량이 흡수량보다 많아 에너지 부족 상태이다. 이때 저위도 지방의 따뜻한 공기는 고위도 지방으로, 고위도 지방의 차가운 공기는

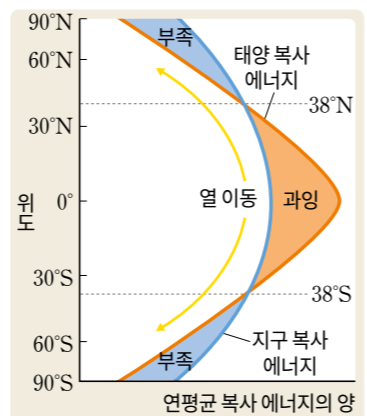


그림 III-34 지구 위도별 에너지 분포

저위도 지방으로 이동하면서 에너지 불균형이 해소된다. 이러한 현상은 지구 전체를 둘러싼 대기의 평균적인 흐름인 대기 대순환이 발생하는 원인이 된다.

지구가 자전하지 않고 표면이 균질하다면 그림 III-35와 같이 적도 지방에서 가열된 공기가 상승해 양 극지방으로 이동하고, 극지방에서 냉각된 공기가 하강해 다시 적도 지방으로 이동한다. 따라서 북반구와 남반구에 각각 하나의 대기 순환 세포가 형성되는데, 이러한 대기 대순환 모델을 **단일 세포 순환**이라고 한다.

지구는 자전하기 때문에 전향력이 작용해 바람의 방향이 바뀌고, 지구 표면이 균질하지 않아 가열되는 정도가 다르므로 단일 세포 순환은 실제 현상과 일치하지 않는다. 지구의 자전을 고려하면 그림 III-36과 같이 북반구와 남반구에 각각 3개의 대기 순환 세포가 형성되는데, 이러한 대기 대순환 모델을 **3세포 순환 모델**이라고 한다.

적도 지방에서는 가열된 공기가 상승해 적도 저압대를 형성한다. 적도 저압대에서 상승한 공기는 고위도 쪽으로 이동하면서 냉각되어 위도 30° 부근에서 하강해 중위도 고압대를 형성한다. 중위도 고압대에서 하강한 공기의 일부는 다시 적도 지방으로 돌아가면서 무역풍을 형성하며 순환하는데, 이를 **해들리 순환**이라고 한다. 극지방에서는 냉각된 공기가 하강해 극고압대를 형성하고 저위도 쪽으로 이동하며 극동풍을 형성한다. 극동풍은 위도 60° 부근에서 편서풍과 만나 한대 전선대를 형성하고 다시 상승해 극지방으로 돌아가는데, 이를 **극순환**이라고 한다. 중위도 지방에서는 중위도 고압대에서 하강한 공기의 일부가 고위도로 이동하면서 편서풍을 형성하고 한대 전선대에서 상승해 순환을 이루는데, 이를 **페렐 순환**이라고 한다. 이는 해들리 순환과 극순환에 의해 형성된 간접적인 순환이다.

실제 대기의 순환은 대륙과 해양의 분포, 지형, 계절에 따른 남북 간의 기온 차등에 의해 3세포 순환 모델과는 달리 복잡하게 나타난다.

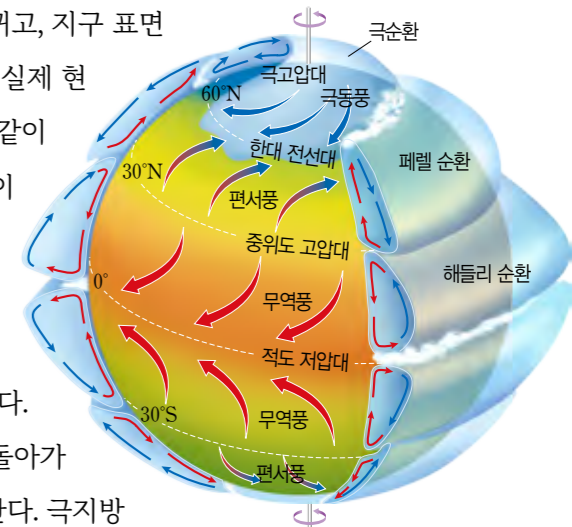


그림 III-36 3세포 순환 모델

해들리 순환과 극순환은 열대류로 형성되는 직접 순환이고, 페렐 순환은 역학적으로 형성된 간접 순환이에요.



### 편서풍 파동

대기로 덮여 있는 지구에서는 위도에 따른 자전 효과 차이 때문에 파동이 형성되는데, 이를 **행성파** 또는 로스비파라고 한다. 중위도 지방의 상층에는 파장이 수천 km에 이르고 전 지구를 감싸면서 회전하는 행성파가 나타나는데, 이를 **편서풍 파동**이라고 한다. 편서풍 파동은 남북 방향으로 굽이치면서 지구의 에너지 불균형을 해소하는 역할을 한다.

그림 III-37은 편서풍 파동의 모습을 볼 수 있는 상층 일기도이다. 편서풍 파동은 파장이 긴 여러 개의 파동으로 이루어져 있으며, 상층의 공기는 편서풍 파동을 따라 이동한다. 편서풍 파동을 경계로 북쪽의 차가운 공기와 남쪽의 따뜻한 공기가 접하고 있다.

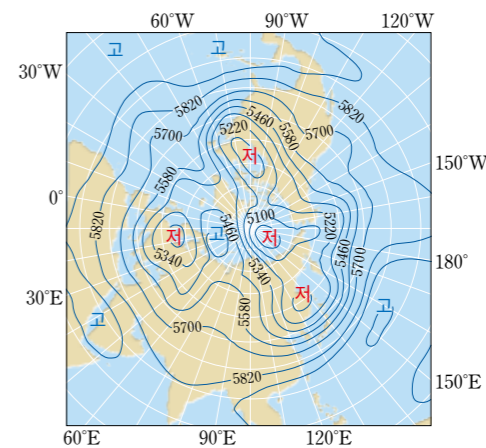


그림 III-37 상층 500 hPa 등압면 일기도의 편서풍 파동(단위: m)

**로스비**  
(Rossby, C. G. A., 1898~1957)  
스웨덴 출신의 기상학자. 1939년에 상층의 편서풍대에서 대규모 파동이 생성되는 과정을 이론적으로 설명했다.

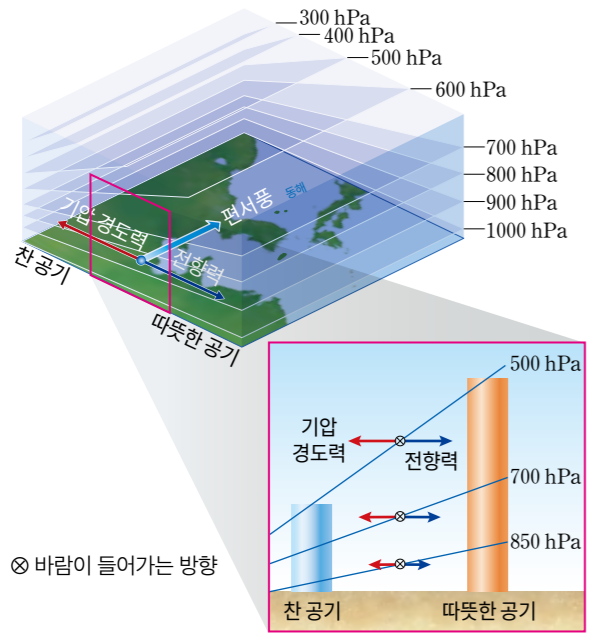


그림 III-38 대기 상층에서 편서풍이 부는 원리(북반구)

편서풍 파동은 고위도와 저위도의 기온 차 및 지구 자전에 의한 전향력 때문에 발생한다. 고위도 지방의 차가운 공기는 저위도 지방의 따뜻한 공기보다 밀도가 크므로 상층으로 갈수록 기압이 급격하게 감소한다. 따라서 그림 III-38과 같이 등압면이 북쪽을 향해 아래로 기울어져 있으며, 저위도에서 고위도로 갈수록 등압면의 간격이 좁아진다. 그 결과 상층에서 기압 경도력은 저위도에서 고위도 쪽으로 작용하고, 이와 반대 방향으로 작용하는 전향력과 평형을 이루면서 서쪽에서 동쪽으로 편서풍이 불게 된다.

등압면의 기울기는 지표면에서 상층으로 올라갈수록 증가해 대류권 계면 부근에서 가장 크다. 따라서 편서풍 파동 내의 풍속은 상층으로 갈수록 증가해 대류권 계면 부근에서 가장 강하게 나타난다. 이렇게 편서풍 파동 내에서 주위보다 풍속이 매우 강한 흐름을 제트류라고 한다.

한대 전선대의 대류권 계면 부근에서는 남북 간의 기온 차이가 매우 크므로 주위보다 등압면의 기울기가 가파르다. 이에 따라 강한 기압 경도력이 작용해 제트류가 형성되는데, 이를 한대 전선 제트류라고 한다. 남북 간의 기온 차는 겨울에 크기 때문에 한대 전선 제트류는 겨울에 강해지고 저위도 쪽으로 이동하며, 여름에는 약해지고 고위도 쪽으로 이동한다.

또 중위도 고압대의 대류권 계면 부근에서도 남북 간의 기온 차이가 커서 제트류가 형성되는데, 이를 아열대 제트류라고 한다. 아열대 제트류는 한대 전선 제트류보다 고도가 높은 곳에 형성되며 상대적으로 풍속이 약하다.

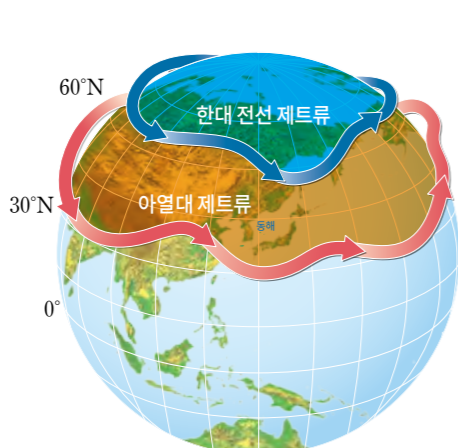


그림 III-39 한대 전선 제트류와 아열대 제트류



그림 III-40 대류권 계면에서 제트류가 발생하는 위치

## 탐구

### 행성과 시뮬레이션 실험하기

● 탐구 설계 및 수행

#### 목표

회전 원통을 이용한 실험으로 행성파가 발생하는 과정을 시뮬레이션할 수 있다.

#### 과정

- 1 준비물을 바탕으로 하여 행성과 시뮬레이션 실험 과정을 예상해 본다.
- 2 회전 원통 실험 장치의 세 원통에 모두 물을 넣는다.
- 3 바깥쪽 원통의 물을 5 분 정도 가열한 뒤 안쪽 원통에 얼음을 넣는다.
- 4 중간 원통에 잉크를 뿌린 뒤 송홑가루를 뿌린다.
- 5 원통을 느리게 회전시키면서 중간 원통에서 나타나는 현상을 관찰한 다음, 원통의 회전 속도를 높여 다시 관찰한다.

준비물

- 실험복  면장갑
- 회전 원통 실험 장치
- 물  얼음
- 수성 잉크(파란색)
- 송홑가루
- 약솔가라

안전

회전 원통 실험 장치의 물을 가열할 때는 화상을 입지 않도록 주의한다.



이 실험은 위도에 따른 전향력의 차이를 고려하지 않고 있어 실제 지구에서 나타나는 행성파와 차이가 있어요.



#### 스스로 평가하기

- [지식·이해]** 실험으로 행성파가 발생하는 과정을 설명할 수 있는가? ☆☆☆
- [과정·기능]** 실험 결과와 실제 지구에서 나타나는 현상을 바르게 비교했는가? ☆☆☆
- [가치·태도]** 행성과 시뮬레이션 실험을 통해 대기의 운동에 흥미를 가지게 되었는가? ☆☆☆

**한결음** 탐구 과정에서 보완할 점이나 더 알아보고 싶은 내용을 자유롭게 써 보자.

#### 결과 및 정리

- 1 원통의 회전 속도에 따라 실험 결과는 어떤 차이가 있는지 설명해 보자.
- 2 안쪽 원통과 바깥쪽 원통은 실제 지구의 어느 지역에 해당하는지 설명해 보자.
- 3 실험 결과와 실제 지구에서 나타나는 현상은 어떤 차이가 있는지 설명해 보자.
- 4 **장외** 안쪽 원통과 바깥쪽 원통 속 물의 온도 차를 더 크게 하면 실험 결과는 어떻게 달라질지 설명해 보자.

편서풍 파동은 저위도 지방의 에너지를 고위도 지방으로 수송하는 데 중요한 역할을 한다. 이때 수송되는 에너지의 양은 편서풍 파동의 형태에 따라 달라진다.

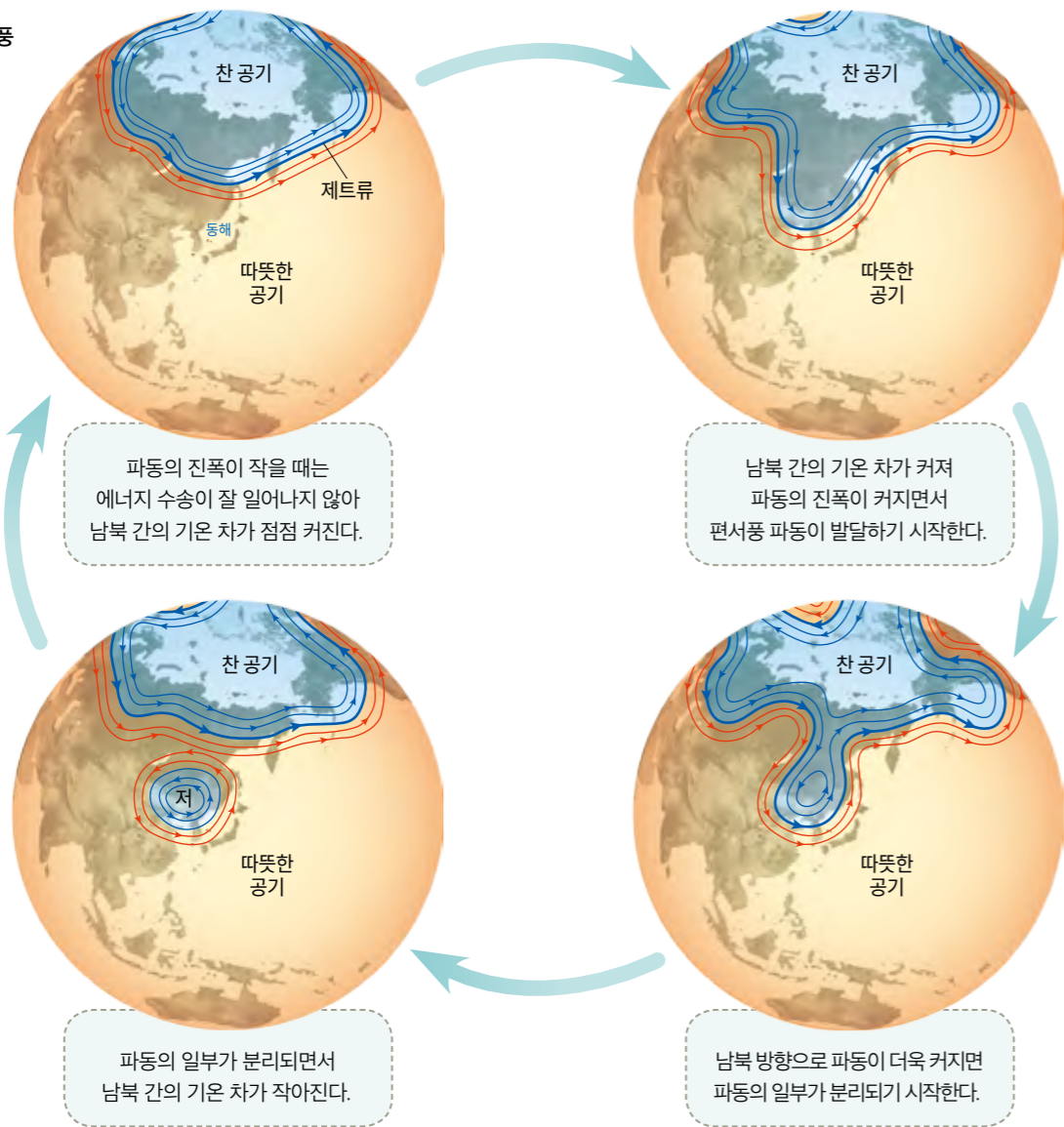
그림 III-41은 편서풍 파동의 변동 과정을 나타낸 것이다. 초기에는 파동의 진폭이 작아 거의 직선에 가까운 형태의 파동이 형성된다. 또 남북 간의 에너지 수송이 잘 일어나지 않아 기온 차가 점점 커진다. 이러한 기온 차이가 더욱 커지면 파동의 진폭이 커지면서 편서풍 파동이 발달하기 시작한다. 저위도 지방의 따뜻한 공기가 고위도 지방으로 이동하고, 고위도 지방의 찬 공기가 저위도 지방으로 이동하면서 에너지 수송이 활발하게 일어난다.

남북 방향으로 파동이 더욱 커지면 파동의 일부가 분리되면서 남북 간의 기온 차이가 작아진다. 분리된 공기 덩어리가 주위 공기와 섞여 소멸하면 파동은 다시 처음과 같이 진폭이 작은 상태로 돌아간다.

파동의 진폭이 클수록 따뜻한 공기가 북쪽으로, 차가운 공기가 남쪽으로 더 활발하게 수송돼요.



그림 III-41 편서풍 파동의 변동 과정



### 편서풍 파동과 날씨

상층에서 발달한 편서풍 파동은 지상의 기압 배치와 날씨에도 영향을 준다. 그림 III-42와 같이 상층 일기도에서 등고선이 고위도 쪽으로 올라간 부분을 **기압 마루**라고 하고, 등고선이 저위도 쪽으로 내려간 부분을 **기압골**이라고 한다.

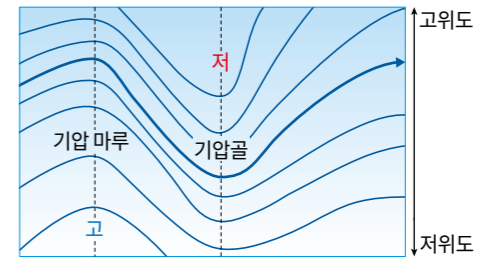


그림 III-42 편서풍 파동에서 기압 마루와 기압골의 위치

그림 III-43에서 기압 마루를 돌아서 부는 고기압성 경도풍은 기압골을 돌아서 부는 저기압성 경도풍보다 풍속이 강하다. 따라서 바람이 기압 마루에서 기압골로 불어 갈 때는 풍속이 점점 감소하면서 공기의 수렴이 일어나고, 기압골에서 기압 마루로 불어 갈 때는 풍속이 점점 증가하면서 공기의 발산이 일어난다. 그 결과 기압골의 서쪽에는 하강 기류가 형성되어 지상에 고기압이 발달하고, 기압골의 동쪽에는 상승 기류가 형성되어 지상에 저기압이 발달한다.

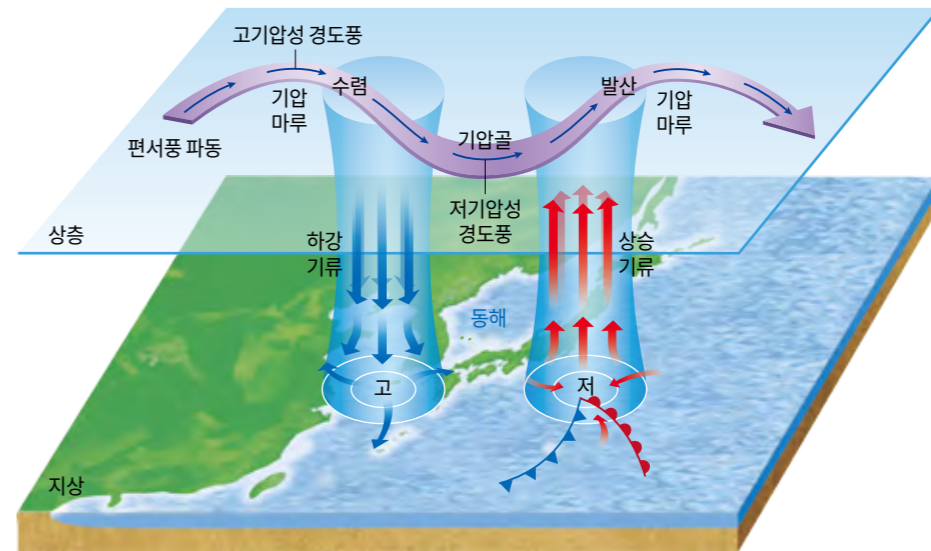


그림 III-43 편서풍 파동과 지상 고기압, 저기압의 발달

상층의 기압골과 기압 마루는 편서풍 파동과 함께 서쪽에서 동쪽으로 이동한다. 이에 따라 상층에서 수렴하는 구역과 발산하는 구역도 함께 이동하므로 지상의 고기압과 저기압도 서쪽에서 동쪽으로 이동한다. 이때 상층의 바람은 하층보다 빠르므로 상층에서 발산하는 구역이 지상의 저기압 상공에서 벗어나 지상에서 수렴한 공기가 더 이상 상층에서 발산하지 못하게 되면 저기압이 악화되어 소멸한다.

이렇게 상층 대기의 운동은 대기의 연직 운동을 발생시켜 지상의 날씨에 영향을 준다. 따라서 지상의 날씨를 정확하게 예측하려면 상층 대기의 운동을 파악하는 것이 매우 중요하다.

### 디지털 탐색

기상청 날씨누리 영상·일기도의 분석 일기도에서 보조 일기도, 북반구 500 hPa를 선택하면 '상층 일기도'에서 편서풍 파동과 제트류가 발생하는 곳을 확인할 수 있다.



# 탐구

자료 분석 및 해석

준비물

색연필

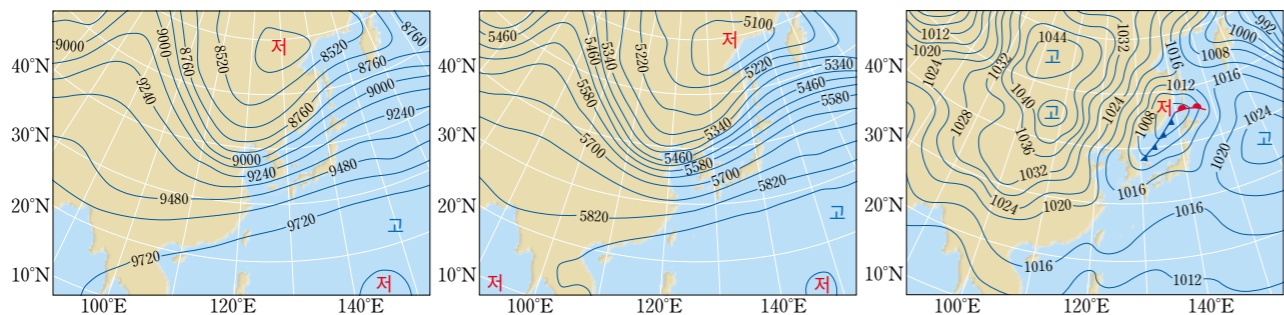
## 편서풍 파동 및 제트류와 관련지어 상층 일기도 해석하기

### 목표

상층 일기도를 해석해 편서풍 파동 및 제트류가 지상의 기압 배치에 미치는 영향을 평가할 수 있다.

### 과정

그림은 같은 날 같은 시각의 상층 일기도와 지상 일기도를 나타낸 것이다.



(가) 상층 300 hPa 등압면 일기도(단위: m)

(나) 상층 500 hPa 등압면 일기도(단위: m)

(다) 지상 일기도(단위: hPa)

### 스스로 평가하기

**| 지식·이해 |** 편서풍 파동과 제트류가 지상의 기압 배치에 미치는 영향을 설명할 수 있는가?

☆☆☆

**| 과정·기능 |** 과학적 사고에 근거해 상층 일기도와 지상 일기도를 해석했는가?

☆☆☆

**| 가치·태도 |** 상층과 지상 대기의 운동에 대한 호기심을 가지게 되었는가?

☆☆☆

**한결음 ④** 탐구 과정에서 보완할 점이나 더 알고 싶은 내용을 자유롭게 써 보자.

- ① (가)에서 제트류가 나타날 것으로 예상되는 영역을 찾아 빨간색 선으로 표시한다.
- ② (나)에서 편서풍 파동의 기압 마루와 기압골을 찾아 검은색 선으로 표시한다.
- ③ (나)에서 수렴과 발산이 일어날 것으로 예상되는 영역을 찾아 표시한다.
- ④ 과정 ③에서 표시한 영역의 지상 기압 분포를 (다)에서 찾아 비교한다.

### 결과 및 정리

1. 편서풍 파동의 기압 마루, 기압골, 제트류가 나타나는 위치와 지상에서 고기압, 저기압이 발달한 위치를 비교하여 설명해 보자.



2. 편서풍 파동과 제트류가 지상의 기압 배치에 어떤 영향을 미치는지 설명해 보자.



### 스스로 확인하기

- 1 대기 대순환과 편서풍 파동이 발생하는 원인을 설명해 보자.
- 2 편서풍 파동이 지상의 기압 배치와 어떤 관계가 있는지 설명해 보자.
- 3 **| 창의력 더하기 |** 지구의 자전 속도가 현재보다 느려진다면 해들리 순환은 어떻게 변할지 설명해 보자.

## 과학과 미래

### 진로

# 맞춤형 기상 정보를 제공하는 기상 컨설턴트

날씨는 태양 에너지를 이용하는 태양광 발전이나 바람의 힘을 이용하는 풍력 발전에 중요한 영향을 미치는 요소이다. 또 농업에서 농작물의 생산성이나 건설업에서 건축물의 품질은 날씨의 영향을 크게 받는다. 이 밖에도 운송업이나 어업, 관광업과 같이 날씨는 우리 생활뿐만 아니라 여러 산업 분야에 영향을 준다. 따라서 기상 정보를 파악하고 산업 활동에 활용하는 기업들이 늘고 있다. 이렇게 기상 정보가 필요한 개인이나 기업들을 대상으로 맞춤형 기상 정보를 제공하는 직업이 바로 기상 컨설턴트이다.

기상 컨설턴트는 날씨에 대한 빅데이터를 이용해 고객이 필요로 하는 정보를 중심으로 자료를 분석한다. 날씨와 해당 산업의 상관관계를 분석하고 날씨가 어떤 부분에 영향을 미칠지 제안하며 대처 방안을 제시해 주기도 한다. 또 날씨 위험 관리 전략을 제공하고 날씨에 맞게 마케팅 전략을 세워 기업의 이익을 최대화할 수 있도록 돕는다.

기상 컨설턴트가 되려면 대기 과학 지식뿐만 아니라 통계학이나 경영학, 마케팅 등의 분야에 대한 지식도 필요하며, 컨설팅에 필요한 의사소통 능력도 갖추어야 한다.

### 관련 학과

대기과학과, 대기환경과학과, 지구환경과학과, 기후에너지시스템공학과 등



커리어넷에서 '기상 컨설턴트'와 관련된 정보를 볼 수 있다.

### 활동하기

산업에서 기상 정보를 마케팅에 활용한 사례를 조사하여 발표해 보자.



태양광 발전량 예측



농작물 생산성 관리



# 기상 제어의 실효성과 개선 방안 토론하기

인공적으로 기상을 조절하는 것을 기상 제어 또는 기상 조절이라고 한다. 바람을 막기 위해 방풍림을 조성하거나 새벽에 서리가 내리는 것을 막기 위해 연기를 피우는 방법 등은 오래전부터 사용했던 기상 제어 기술의 예이다.

기상 제어 기술이 발전한 것은 인공 강우 실험에 성공하면서부터이다. 인공 강우는 구름 입자를 물방울이나 빙정으로 성장시키는 물질을 구름 속에 뿌려 비가 내리게 하는 기술이다. 인공 강우 기술에 처음 사용된 물질은 드라이아이스로,  $-78^{\circ}\text{C}$ 에서 승화하면서 주위 공기를 냉각시킨다. 이때 수증기가 응결해 작은 물방울이 생성되고 얼어서 빙정이 되며 비가 내리게 된다.

이후에 사용된 물질인 아이오딘화 은(AgI)은 결정 구조가 빙정과 유사해 효과적인 역할을 한다. 또 따뜻한 지역의 구름에는 소금 입자를 뿌려 수분을 끌어당기도록 해 구름 입자를 생성시키고 충돌과 병합 과정에 의해 빗방울이 생성되도록 유도한다. 이러한 인공 강우 기술은 안개를 없애거나 대기 중의 미세 먼지를 제거하는 데 이용되기도 한다.

이 밖에 군사적인 목적이거나 더위를 해소하기 위해 안개를 생성하기도 하고, 태풍의 피해를 줄이기 위해 태풍을 약화하는 기술, 천둥이나 번개, 우박을 제어하는 기술도 연구되고 있다. 하지만 인



인공 안개를 분사해 더위를 해소하는 모습

위적으로 기상을 제어했을 때 홍수나 가뭄과 같이 예상하지 못한 재해가 발생하는 등 부작용이 나타나기도 한다.

기상 제어 기술을 활용한 예를 조사해 보고 실제 우리 생활에 효과적인 영향을 줄지, 어떤 점을 개선하면 좋을지 토론을 통해 글로 정리해 보자.

## 1 조사하기

기상 제어 기술이 활용된 예를 조사하고 해당 기술의 긍정적인 효과와 부작용을 조사해 보자.

## 2 토론 글쓰기

1. 모둠별로 기상 제어 기술의 활용에 대한 찬성 또는 반대 입장을 선택한다.
2. 조사한 내용을 바탕으로 하여 자신의 입장에 대한 근거를 들어 모둠원과 자유롭게 토론한다.
3. 모둠원의 다양한 의견을 고려해 기상 제어 기술의 실효성과 개선 방안에 대해 정리하고 글로 써 보자.

## 3 평가하기

나와 모둠원의 활동 과정을 다음 기준에 따라 평가해 보자.

평가 내용	평가
지식·이해   기상 제어 기술이 활용된 예와 긍정적인 효과, 부작용 등을 바르게 조사했는가?	✍ ☆☆☆
과정·기능   과학적 사고를 통해 자신의 입장에 대한 근거를 들어 적극적으로 토론에 참여했는가?	✍ ☆☆☆
가치·태도   기상 제어 기술의 실효성과 개선 방안에 대해 합리적인 결론을 제안했는가?	✍ ☆☆☆

01 지구의 대기과 생명체

84 쪽~87 쪽

1. 지구 대기의 선택적 흡수: 대기는 특정 파장의 복사 에너지를 흡수하고 다른 파장의 복사 에너지는 투과시키는 선택적 흡수체이다.
2. 지구 생명체의 존재 조건: 지구는 ① 안에 있어 표면에 액체 상태의 물이 존재하고 대기의 자외선 차단 효과, 온실 효과로 생명체가 존재할 수 있다.

02 지구 열수지

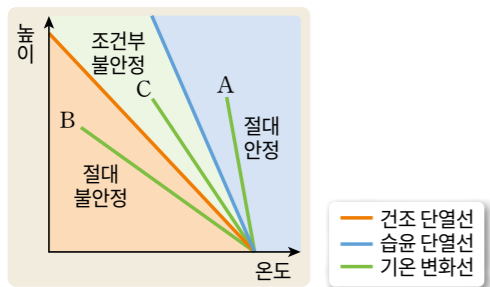
88 쪽~91 쪽

1. 지표와 대기의 열 출입: 태양 복사 에너지가 지구의 대기에 도달하면 ②, 반사, 흡수, 굴절이 일어나면서 지표와 대기의 열 출입에 영향을 준다.
2. 지구 열수지 균형: 지구가 태양으로부터 흡수하고 방출하는 에너지의 양이 같아 평균 기온이 일정하게 유지된다.

03 대기 안정도와 강수

92 쪽~99 쪽

1. 단열 변화
  - ③: 불포화 상태의 공기가 높이 변화에 따라 단열 변화할 때의 기온 변화율 → 약 10 °C/km
  - ④: 포화 상태의 공기가 높이 변화에 따라 단열 변화할 때의 기온 변화율 → 약 5 °C/km
  - 상승 응결 고도: 불포화 상태의 공기가 상승하면서 단열 변화가 일어나고 구름이 생성되기 시작하는 고도
2. 대기 안정도와 구름의 생성



대기 안정도	기온 감률 조건
절대 안정(A)	기온 감률 < 습윤 단열 감률
절대 불안정(B)	기온 감률 > 건조 단열 감률
조건부 불안정(C)	습윤 단열 감률 < 기온 감률 < 건조 단열 감률 → 공기가 불포화 상태이면 안정, 포화 상태이면 불안정하다.

- 안정 상태: 연직 운동 억제 → ⑤ 구름 생성
- 불안정 상태: 연직 운동 활발 → ⑥ 구름 생성

3. 안개의 생성: 지표면 부근의 공기 냉각, 단열 팽창으로 인한 공기 냉각으로 수증기가 응결해 안개가 생성된다.
4. 강수 과정
  - 병합설: 저위도 지방, 여름철 중위도 지방의 강수 과정  
- 구름 속 물방울이 서로 충돌하고 합쳐지면서 성장해 지표로 떨어진다.
  - 빙정설: 고위도 지방, 중위도 지방의 강수 과정  
- 구름 속 ⑦ 에서 증발이 일어나 수증기가 빙정에 달라붙으면서 빙정이 성장해 지표로 떨어진다.

04 기압의 연직 분포와 대기를 움직이는 힘

100 쪽~103 쪽

1. 기압의 연직 분포와 정역학 평형
  - 정역학 평형: 공기 덩어리에 작용하는 연직 기압 경도력과 ⑧ 이/가 평형을 이루고 있는 상태
2. 대기를 움직이는 힘: 대기를 움직이는 힘에는 ⑨, 전향력, 구심력, 마찰력이 있다.

05 여러 가지 바람

104 쪽~107 쪽

1. 상층에서 부는 바람
  - ⑩: 기압 경도력과 전향력이 평형을 이루며 등압선에 나란하게 부는 바람
  - 경도풍: 기압 경도력, 전향력, 구심력이 균형을 이루며 등압선에 나란하게 원형으로 부는 바람
2. 지상에서 부는 바람: 지상풍
  - 등압선이 직선일 때: 기압 경도력, 전향력, ⑪ 이/가 평형을 이루며 등압선을 가로질러 분다.
  - 등압선이 곡선일 때: 기압 경도력, 전향력, 마찰력, 구심력이 균형을 이루며 등압선을 가로질러 분다.

06 편서풍 파동

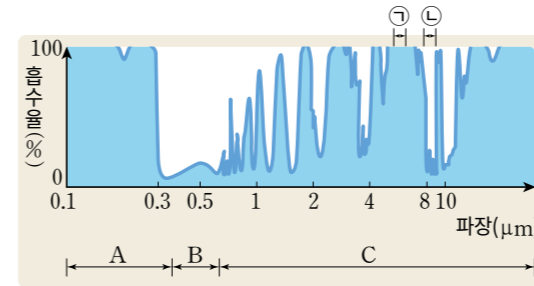
108 쪽~114 쪽

1. 편서풍 파동: 중위도 지방의 상층에서 파장이 긴 파동의 형태로 전 지구를 감싸면서 회전하는 행성파
  - ⑫: 편서풍 파동 내에서 주위보다 풍속이 매우 강한 흐름
2. 편서풍 파동과 날씨
  - 기압골 서쪽: 상층 공기 수렴 → 하강 기류 형성 → 지상 ⑬ 발달
  - 기압골 동쪽: 상층 공기 발산 → 상승 기류 형성 → 지상 ⑭ 발달

개념 적용하기

지구의 대기과 생명체

01 그림은 지구 대기의 태양 복사 에너지 흡수율을 파장에 따라 나타낸 것이다.



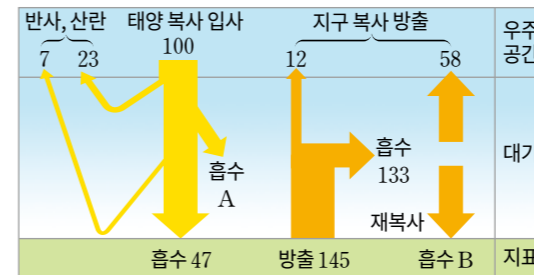
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

- 보기
- ㉠. A는 대부분 지표에 도달한다.
  - ㉡. 대기 중의 온실 기체에 흡수되는 에너지의 양은 B가 C보다 많다.
  - ㉢. 인공위성으로 지표의 정보를 얻고자 할 때는 ㉠ 영역보다 ㉡ 영역을 이용하는 것이 유리하다.

- ① ㉠
- ② ㉡
- ③ ㉠, ㉡
- ④ ㉠, ㉡
- ⑤ ㉠, ㉡, ㉢

지구 열수지

02 그림은 복사 평형 상태에 있는 지구 열수지를 나타낸 것이다.

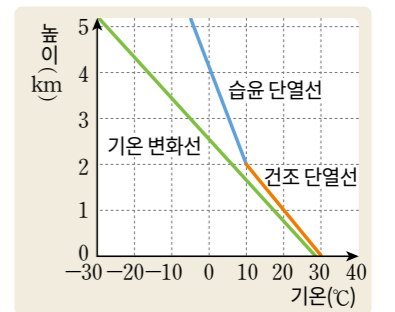


이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 골라 보자.

- 보기
- ㉠. A는 B보다 크다.
  - ㉡. 성층권 오존의 양이 감소하면 A가 감소한다.
  - ㉢. 대기 중 온실 기체의 양이 증가하면 B가 증가한다.

대기 안정도와 강수

03 그림은 어느 지역의 높이에 따른 기온 분포와 단열선을 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

- 보기
- ㉠. 지표면~2 km 구간의 기층은 절대 안정 상태이다.
  - ㉡. 2 km~5 km 구간의 기층은 절대 불안정 상태이다.
  - ㉢. 지표면에서 단열 상승한 공기 덩어리의 온도는 주위 공기보다 항상 높다.

- ① ㉠
- ② ㉡
- ③ ㉠, ㉡
- ④ ㉠, ㉡
- ⑤ ㉠, ㉡, ㉢

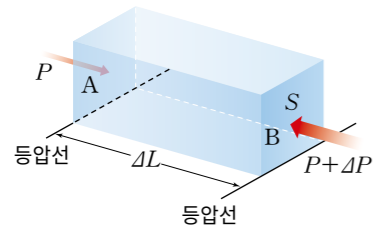
대기 안정도와 강수

04 강수 과정에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

- 보기
- ㉠. 빙정설에 따르면 과냉각 물방울에서 증발이 일어난다.
  - ㉡. 병합설에 따르면 구름 속 물방울의 크기가 다양하게 분포할 때 빙방울로 잘 성장한다.
  - ㉢. 우리나라에서 일어나는 강수 현상은 주로 병합설로 설명한다.

- ① ㉠
- ② ㉡
- ③ ㉠, ㉡
- ④ ㉠, ㉡
- ⑤ ㉠, ㉡, ㉢

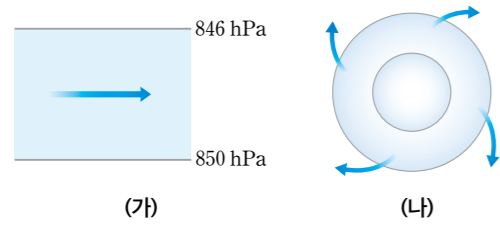
기압의 연직 분포와 대기를 움직이는 힘  
**05** 그림은 연직 방향으로 정역학 평형을 이루는 공기 덩어리에 수평 방향으로 기압 차가 발생한 모습을 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 골라 보자(단, 공기 덩어리의 밀도는  $\rho$ ,  $\Delta P > 0$  이다).

- 보기**
- ㉠. A에 작용하는 힘은 B에 작용하는 힘보다 크다.
  - ㉡. 기압 경도력은 B에서 A 쪽으로 작용한다.
  - ㉢. 단위 질량의 공기 덩어리에 작용하는 기압 경도력의 크기는  $\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{\Delta L}$ 이다.

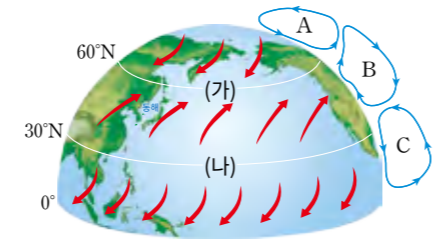
여러 가지 바람  
**06** 그림 (가)와 (나)는 북반구의 지상과 상층에서 부는 바람을 순서 없이 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

- 보기**
- ㉠. 바람이 부는 고도는 (가)가 (나)보다 높다.
  - ㉡. (나)의 중심부는 저기압이다.
  - ㉢. (가)와 (나)는 모두 지표면에 의한 마찰력의 영향을 받지 않는다.

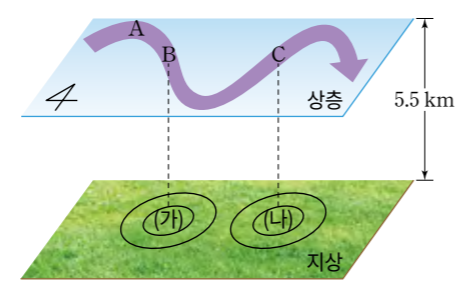
편서풍 파동  
**07** 그림은 북반구의 대기 대순환을 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

- 보기**
- ㉠. (가)에는 저압대가, (나)에는 고압대가 형성된다.
  - ㉡. A와 C는 직접 순환이고 B는 간접 순환이다.
  - ㉢. 지구가 자전하지 않는다면 A, B, C는 하나의 순환을 형성하게 될 것이다.

편서풍 파동  
**08** 그림은 북반구 중위도 상층의 편서풍 파동과 지상의 기압 배치를 나타낸 것이다.

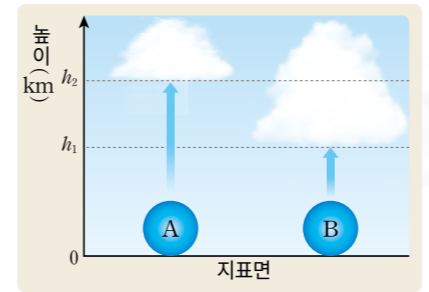


이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

- 보기**
- ㉠. A에서는 저기압성 경도풍이 분다.
  - ㉡. B에서는 공기의 수렴이, C에서는 공기의 발산이 일어난다.
  - ㉢. (가)에는 고기압이, (나)에는 저기압이 발달한다.

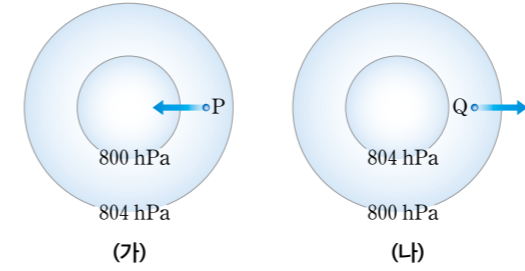
과학 역량 키우기

**09** 과학적 탐구 능력 그림은 지표면에서 온도가 같은 공기 덩어리 A와 B가 상승해 구름이 생성되는 모습을 나타낸 것이다.



- (1) 지표면에서 공기 덩어리 A와 B의 이슬점을 비교해 보자.
- (2) 공기 덩어리 B가 지표면에서 높이  $h_2$ 까지 상승하는 동안에 일어나는 단열 변화를 서술해 보자.

**10** 과학적 문제해결 능력 그림 (가)와 (나)는 북반구의 위도가 같은 두 지점 P와 Q에서 경도풍이 불 때 바람에 작용하는 기압 경도력을 나타낸 것이다(단, P와 Q에서 기압 경도력의 크기는 같고, 화살표는 힘의 방향만을 나타낸다).



지점 P와 Q에 작용하는 전향력의 크기와 풍속을 비교하여 서술해 보자.

**스스로 평가하기**

‘강수 과정과 대기의 운동’을 학습한 다음, 나의 성취 수준을 스스로 평가해 보자.

- 지식-이해**
  - 대기의 선택적 흡수와 지구 생명체의 존재 조건을 설명할 수 있는가? ☆☆☆☆☆
  - 대기 안정도와 정역학적 균형, 여러 바람과 행성파의 발생 원리를 설명할 수 있는가? ☆☆☆☆☆
- 과정-기능**
  - 지표와 대기의 열 출입과 관련된 물리 과정과 전 지구 평균 열수지를 해석했는가? ☆☆☆☆☆
  - 단열 변화를 통해 구름이나 안개가 생성되는 과정 및 강수 과정을 분석했는가? ☆☆☆☆☆
  - 지상 고·저기압 발달에서 편서풍 파동의 역할을 평가했는가? ☆☆☆☆☆
- 가치-태도**
  - 강수 과정과 대기의 운동에 흥미를 가지고 지구 대기의 가치를 인식했는가? ☆☆☆☆☆

과학 글쓰기  
**11** 과학적 의사결정 능력 다음은 말 위도대라고 불리던 아열대 무풍대를 설명한 글이다.

위도  $30^\circ$  부근에는 바람이 거의 없거나 매우 약하게 불고, 대체로 날씨가 맑으며 덥고 건조한 위도대가 있다. 옛날 사람들은 이 지역을 말 위도대(horse latitudes)라고 불렀다. 이는 범선을 이용해 항해를 하던 시기에 스페인의 항해사들이 붙인 이름이다. 항해사들이 대서양을 종단하는 동안 때때로 바람이 거의 불지 않아 배가 멈추어 장기간 이동할 수 없게 되었다. 이때 배에 싣고 있던 말에게 먹이를 먹일 수 없게 되자 말을 바다에 던져 버려야 했던 것으로부터 말 위도대라는 이름이 붙여졌다. 오늘날에는 이 지역을 아열대 무풍대 또는 아열대 고기압대라고 한다. 이 지역은 굉장히 건조하기 때문에 사하라 사막이나 아라비아 사막과 같이 세계적으로 유명한 사막이 많이 분포해 있다.

- (1) 위도  $30^\circ$  부근의 날씨가 대체로 맑고 건조한 까닭을 대기 대순환과 관련지어 서술해 보자.  
 .....  
 .....
- (2) 말 위도대는 여름에 북상하고 겨울에 남하한다. 그 까닭에 대해 설명하는 글을 써 보자.  
 .....  
 .....

# 부록

## 학습 자료실

- 단위와 상수
- 지구과학사
- 암석의 박편

## 정답 및 해설

## 찾아보기

## 자료 출처



### 기본 단위(국제 단위계: SI)

양	단위 기호	단위 간의 관계
길이	m	1 μm = 10 <sup>-6</sup> m 1 Å = 10 <sup>-10</sup> m
질량	kg	1 t = 10 <sup>3</sup> kg
시간	s	1 년 ≈ 3.2 × 10 <sup>7</sup> s
온도	K	온도 차 1 K = 1 °C 0 °C = 273.15 K

### 유도 단위(국제 단위계: SI)

양	단위 기호	단위 간의 관계
속도	m/s	
가속도	m/s <sup>2</sup>	
힘	N(뉴턴)	1 N = 1 kg·m/s <sup>2</sup>
압력	Pa(파스칼)	1 Pa = 1 N/m <sup>2</sup> 100 Pa = 1 hPa = 1 mb = 10 <sup>-6</sup> kb
일	J(줄)	1 J = 1 N·m
일률	W(와트)	1 W = 1 J/s

### 지구과학의 주요 상수

만유인력 상수( $G$ ) $G = 6.67408 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$	태양 반지름 $6.96 \times 10^5 \text{ km}$
표준 중력 가속도( $g_n$ ) $g_n = 9.80665 \text{ m/s}^2$	태양 표면 온도 약 5800 K
진공에서의 빛의 속도( $c$ ) $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$	지구 표면 온도 약 288 K
슈테판-볼츠만 상수( $\sigma$ ) $\sigma = 5.670367 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\cdot\text{K}^4$	지구 질량 $5.972 \times 10^{24} \text{ kg}$
천문단위(AU) $1 \text{ AU} = 1.4959787 \times 10^{11} \text{ m}$	지구 적도 반지름 $6.378135 \times 10^3 \text{ km}$
광년(LY) $1 \text{ LY} = 9.46073 \times 10^{15} \text{ m}$ $= 6.324 \times 10^4 \text{ AU}$	지구 공전 속도 $2.9783 \times 10^4 \text{ m/s}$
파섹(pc) $1 \text{ pc} = 206264.806 \text{ AU}$ $= 3.26156 \text{ 광년} = 3.0857 \times 10^{16} \text{ m}$	지구 자전 각속도 $7.292 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$
태양 질량( $M_\odot$ ) $M_\odot = 1.9891 \times 10^{30} \text{ kg}$	달 질량 $7.35 \times 10^{22} \text{ kg}$
태양 광도( $L_\odot$ ) $L_\odot = 3.839 \times 10^{26} \text{ W}$	달 반지름 $1.738 \times 10^3 \text{ km}$
태양 상수( $I$ ) $I = 1367 \text{ W/m}^2$	황도 경사 $23^\circ 26' 21'' 406$

고대~18세기

과학 혁명은 16세기 중반부터 18세기 초반에 일어났던 자연 과학 분야의 혁명을 일컫는 말이다. 코페르니쿠스에서 시작된 과학 혁명은 케플러와 갈릴레이를 거쳐 뉴턴이 제시한 새로운 역학 이론으로 마무리되었다. 과학 혁명을 거치면서 자연의 모든 과정이 인과 법칙의 지배를 받으며, 인간의 이성으로 그 인과 관계를 파악하고 설명할 수 있다는 인식이 빠르게 확산되었다.



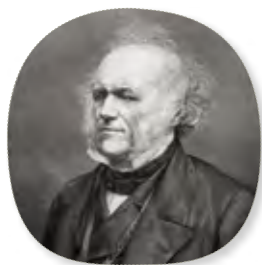
코페르니쿠스(1473~1543)



케플러(1571~1630)



코리올리(1792~1843)



라이엘(1797~1875)

연대	과학자	주요 업적
B.C. 240경	에라토스테네스	지구의 크기 측정
B.C. 140경	히파르코스	세차 운동과 별의 운동의 불규칙성 발견, 별의 밝기 등급 창안
150	프톨레마이오스	지구 중심설(천동설) 주장, 48 개의 별자리 설정
1543	코페르니쿠스	태양 중심설(지동설) 주장
1570	브라헤	규칙적인 천체 관측 시작, 초신성 발견
1610	갈릴레이	최초로 망원경을 사용해 천체 관측, 목성의 4 개 위성 관측
1619	케플러	행성 운동의 세 가지 경험 법칙 발견
1643	토리첼리	수은 기압계의 원리 발명
1669	스테노	수평퇴적의 법칙, 지층 누층의 법칙 제안
1687	뉴턴	만유인력 법칙 발견, 반사 망원경 발명
1735	해들리	1 개의 대류 세포로 이루어진 대기 대순환 모델 제안
1760	메시에	103 개의 성단과 성운을 정리한 메시에 목록 발표
1781	허셜	천왕성 발견, 은하계의 개념 확립
1785	허턴	저서 《지구의 이론》에서 동일과정의 원리 주장
1789	라플라스	태양계의 기원에 관한 성운설 발표
1799	스미스	화석으로 지층의 순서를 밝히는 층서학의 기초 확립

19세기

19세기에는 과학이 점차 고유의 영역으로 구축되었다. 실험 장치 및 관측 기술의 발달과 더불어 과학의 다양한 분야에서 현대 과학으로 이어지는 발견과 발명이 이루어졌다.

연대	과학자	주요 업적
1814	프라운호퍼	태양 스펙트럼 중 흡수선 발견
1814	피아치	왜소행성 세레스 발견, 항성의 목록 발표
1828	코리올리	지구 자전에 의한 전향력 발견
1830	라이엘	저서 《지질학 원리》에서 지질학의 근대적 체계 확립
1842	도플러	도플러 효과 발견
1846	홍볼트	페루 연안을 흐르는 홍볼트 해류 조사
1851	푸코	푸코 진자를 제작해 지구의 자전 증명
1856	펠렐	지구 자전을 고려해 3 개의 대류 세포로 이루어진 대기 대순환 모델 제안

20세기

20세기 과학의 발전은 그동안 인류가 전혀 경험하지 못했던 새로운 시대를 열었다. 지질 분야에서는 지진파를 이용해 지구 내부 구조를 파악했고, 판 구조론의 정립으로 여러 지각 변동을 종합적으로 해석할 수 있게 되었다. 대기 분야에서는 대기 대순환을 비롯해 전선과 제트류 등의 형성 과정이 밝혀졌으며, 해양 분야에서는 대규모 해저 지형 탐사 프로젝트가 진행되었다. 천문 분야에서는 우주에 수많은 은하가 존재한다는 것과 우주가 팽창하고 있다는 사실이 밝혀졌다. 또 빅뱅 우주론으로 우주의 기원을 설명할 수 있게 되었다.

연대	과학자	주요 업적
1905~1915	아인슈타인	특수 상대성 이론, 일반 상대성 이론 발표
1906	리드	지진 발생 원인에 관한 탄성 반발설 발표
1908	클라크	지각의 8대 원소 함량비 분석
1909	모호로비치치	지각과 맨틀의 경계면 발견
1910	에크만	에크만 나선, 에크만 수송 이론 발표
1912	베게너	대륙 이동설 제안
1913	러셀	H-R도 제안
1918	비야크네스	중위도 저기압 발생 제안, 대기 대순환 연구
1919	구텐베르크	맨틀과 외핵의 경계면 발견
1920	캐넌	별의 분광형 분류 체계 확립
1922	보웬	화성암의 성인론(조암 광물이 마그마에서 형성되는 경향성) 발표
1927	오르트	은하계의 회전 증명, 은하의 나선 구조 파악
1929	허블	우주 팽창에 관한 허블-르메트르 법칙 발표
1929	흠스	맨틀 대류설 발표
1936	레만	외핵과 내핵의 경계면 발견
1939	베테	별의 에너지원이 핵융합 반응으로 생성된다고 주장
1952	베니오프	해구 부근의 베니오프대 발견
1956	가모프	빅뱅 우주론 제안
1962	헤스, 디츠	해양저 확장설 주장
1964	펜지어스, 윌슨	우주 배경 복사 발견
1965	윌슨	변환 단층 개념 제안, 판 구조론 정립에 크게 공헌

최근 들어 과학기술은 훨씬 빠르게 발달하고 있으며, 이에 따라 지구과학도 비약적으로 발전하고 있다. 고도화된 측정 장비나 인공위성을 이용해 지질, 대기, 해양 관측 자료를 빠르고 정확하게 수집하고 있으며, 우주 망원경과 우주 탐사선 등을 이용해 우주의 탄생과 기원을 이해하기 위한 광범위한 연구를 수행하고 있다.



베게너(1880~1930)



비야크네스(1897~1975)

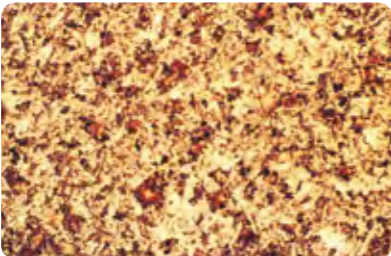
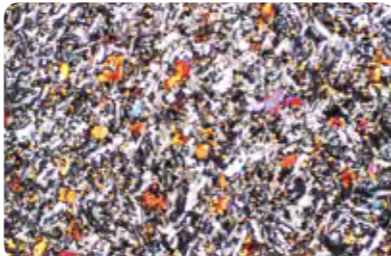
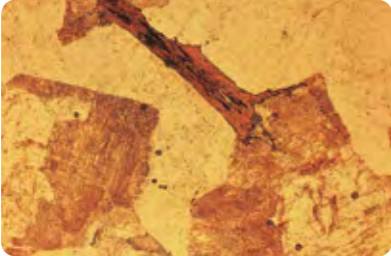

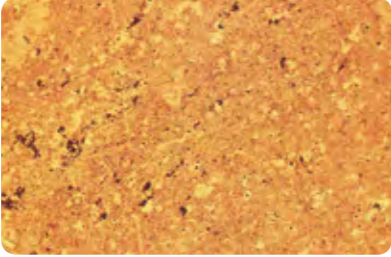

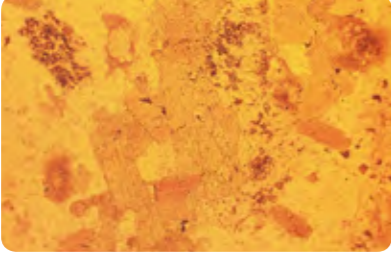


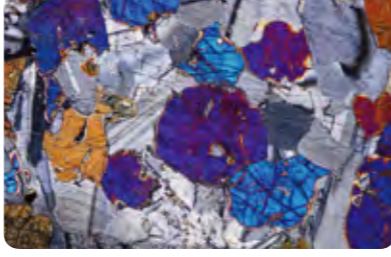


캐넌(1863~1941)

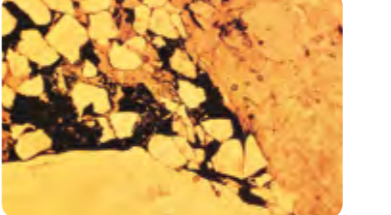
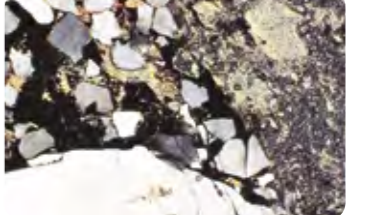
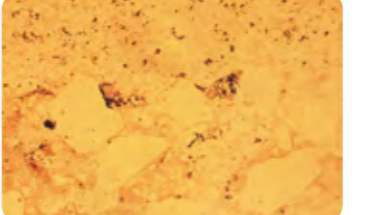



레만(1888~1993)



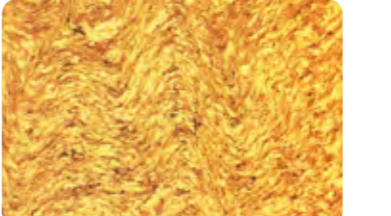
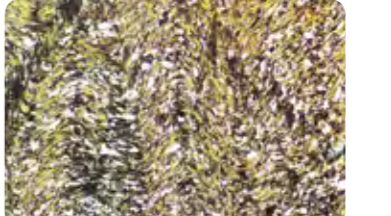
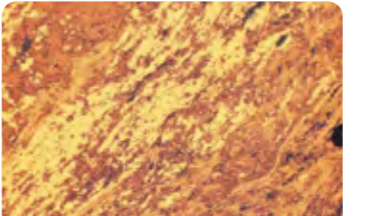
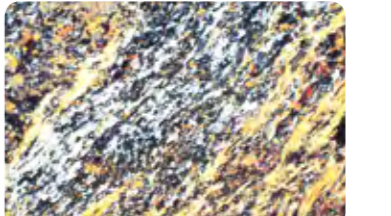
화성암

암석	개방 니콜	직교 니콜
현무암		
화강암		
유문암		
섬록암		
반려암		

퇴적암

암석	개방 니콜	직교 니콜
역암		
사암		

변성암

암석	개방 니콜	직교 니콜
점판암		
천매암		
편암		

\*암석 박편의 모습은 모두 30 배율로 나타낸 것임.

I 지구 탄생과 생동하는 지구

물음

25 쪽 | 2.5 cm/년

스스로 확인하기

- 15 쪽 | 1. 태양계 성운의 수축과 회전으로 중심부에는 원시 태양이, 바깥쪽에는 납작한 원반이 형성되었다. 원시 태양은 중력 수축으로 수소 핵융합 반응이 일어나는 온도에 도달하면서 태양이 되었다. 원반에서 형성된 미행성체들이 서로 충돌하고 뭉치지면서 태양과 가까운 곳에는 지구형 행성이, 태양에서 먼 곳에는 목성형 행성이 형성되었다.
2. 미행성체의 충돌이 줄어들고 원시 지구의 표면과 내부가 식으면서 지권(원시 지각)이 형성되었고, 원시 지구가 진화하는 과정에서 화산 활동이 활발하게 일어나 기권(원시 대기)이 형성되었다. 원시 대기에 포함된 수증기가 응결해 비로 내려 수권(원시 바다)이 형성되었고, 수권에서 생명체가 등장해 생물권이 형성되었다.
3. 예시 답안 수성은 크기가 작아 내부 온도를 오랫동안 높게 유지할 수 없어서 지질 활동이 지속적으로 발생하기 어려웠다. 또 수성은 지구보다 질량이 작아 대기를 유지할 수 없었고, 태양과의 거리가 가까워서 액체 상태의 물이 존재할 수 없었다.
- 21 쪽 | 1. 남세균이 출현한 뒤 발생한 산소는 바닷물에 녹아 있던 철과 반응해 철 산화 광물이 생성되는 데 쓰였기 때문이다. 바닷물에 녹아 있던 철의 대부분이 철 산화 광물로 된 뒤, 바다와 대기에 산소가 축적되기 시작했다.
2. 대기 중의 이산화 탄소는 바닷물에 녹아 들어가거나 생물체에 흡수되어 석회암의 형태로 지권에 고정된다. 그러나 얼음덩어리 지구 상태에서는 대기 중의 이산화 탄소가 바다에 녹는 과정이 중단되어 이산화 탄소의 농도가 계속 상승했고, 온실 효과가 일어나 지구의 평균 온도가 크게 높아지며 전 지구를 덮고 있던 얼음이 녹게 되었다.
3. 예시 답안 < 이상하고 아름다운 지구 >  
거칠어 보이는 땅과 넓고 푸른 바다가 있어.  
비가 갠 하늘에 무지개가 나타나고  
물이 태양 빛을 반사하며 구불구불 굽이쳐 흘러가.  
수많은 생명체가 땅을 딛고, 하늘을 날며, 물속을 헤엄치는 곳.  
이곳은 정말 이상하고도 아름다운 곳이야.
- 30 쪽 | 1. 해령에서 생성되어 해구까지 이동해 온 해양판이 맨틀로 침강할 때 해양판의 무게가 판의 나머지 부분을 잡아당기는 힘으로 작용한다. 또 해령의 중심부에서 판이 중력에 의해 해령의 경사면을 따라 미끄러져 내려갈 때 판의 무게가 해령에서 판을 미는 힘으로 작용한다.

2. 맨틀과 외핵의 경계에서 형성된 뜨거운 플룸이 상승해 마그마가 생성되고, 생성된 마그마가 판 내부의 고정된 위치에서 분출하면서 열점이 형성된다.
3. 예시 답안 남아메리카판에는 판을 당기는 힘이 작용하지 않지만 오스트레일리아판은 해구에서 섭입할 때 판을 당기는 힘이 작용해 이동 속력이 더 빠르다.

- 35 쪽 | 1. 암석의 순환 과정에서 화산 활동은 지구 내부의 물질을 지표로 올려 새로운 화성암을 생성하는 역할을 한다.
2. 화성암은 마그마의 냉각 속도에 따라 조직이 달라진다. 마그마가 지표 부근에서 빠르게 식어 굳어진 화산암에서는 세립질 조직이나 유리질 조직, 반상 조직이 나타나고, 마그마가 지하 깊은 곳에서 서서히 식어 굳어진 심성암에서는 조립질 조직이 나타난다.
3. 예시 답안 화산재가 떨어질 것에 대비해 방진 용품이나 구급약품, 손전등 등을 미리 준비한다. 화산재가 떨어질 때는 화산재에 노출되지 않도록 방진 마스크를 착용하고 라디오 등의 재난 방송을 청취한다. 야외에 있을 때는 주변 건물이나 자동차로 대피한다. 실내에서는 모든 문과 창문을 닫고 테이프나 물을 묻힌 수건으로 빈틈을 막는다.
- 44 쪽 | 1. P파는 고체, 액체, 기체를 통과하며 파의 진행 방향과 매질의 진동 방향이 나란한 종파이다. S파는 고체만 통과하며 파의 진행 방향과 매질의 진동 방향이 수직인 횡파이다. 표면파는 진앙에서부터 지표면을 따라 전파되는 지진파이다.
2. 지진파는 통과하는 매질의 성질에 따라 속도가 변하며, 서로 다른 매질의 경계에서 반사되거나 굴절한다. 따라서 지구 내부를 통과해 온 지진파를 분석하면 지구 내부의 구조와 구성 물질의 상태를 파악할 수 있다.
3. 예시 답안 지진의 피해 정도는 지진의 규모 외에도 진원 깊이, 지진 발생 지역의 지반 특성, 건축물의 설계 특성, 도시화 정도, 지진 대비 정도 등에 따라 달라질 수 있다.

48 쪽~51 쪽

대단원 마무리

- |                    |                 |
|--------------------|-----------------|
| ① 마그마 바다 형성        | ② 호상철광층         |
| ③ 석회암              | ④ 대륙 이동설        |
| ⑤ 해양저 확장설          | ⑥ 섭입하는 판이 당기는 힘 |
| ⑦ 열점               | ⑧ 성층 화산         |
| ⑨ 세립질              |                 |
| ⑩ 조립질              | ⑪ 고체            |
| ⑫ PS시              |                 |
| ⑬ 모호로비치치 불연속면(모호면) |                 |

- 01 ③      02 ④      03 ③      04 ③  
 05 ⑤      06 ④      07 ㄱ, ㄴ, ㄷ  
 08 ③      09 (1) 해설 참조 (2) 해설 참조  
 10 (1) 해설 참조 (2) 해설 참조  
 11 (1) 해설 참조 (2) 해설 참조

- 01 태양계 성운은 자체 중력으로 수축하면서 회전하기 시작했다. 이후 형성된 원시 태양은 계속된 중력 수축으로 중심부의 온도가 상승했고 수소 핵융합 반응이 일어났다. 미행성체들은 원시 태양의 주위를 공전하며 서로 충돌하고 뭉쳐져 원시 행성이 형성되었다.
- 02 마그마 바다가 형성된 뒤 철과 니켈 등 밀도가 큰 물질은 지구 중심부로 가라앉아 핵이 되었고, 밀도가 작은 규산염 물질은 바깥쪽으로 떠올라 맨틀이 되었다. 원시 지각은 핵과 맨틀이 분리된 이후에 형성되었다. 원시 바다가 형성된 뒤 대기 중의 이산화 탄소가 바닷물에 녹아 들어 농도가 크게 감소했다.
- 03 호상철광층은 산화 철 성분과 규질 성분이 많은 층이 번갈아 퇴적된 구조이다. 남세균이 방출한 산소는 바닷물에 녹아 있던 철과 반응해 철 산화 광물이 생성되는 데 쓰였고, 이러한 광물은 퇴적물과 함께 해저에 침전되었다. 오늘날 바다에서는 과거만큼 화산 활동이 발생해 철이 바다에 공급되지 않으며, 철이 바다에 많이 공급되더라도 바닷물에 녹아 있는 산소가 많아 철과 반응해 주변 퇴적물과 바로 섞여서 퇴적되기 때문에 호상철광층이 형성되기 어렵다.
- 04 B를 중심으로 고지자기 줄무늬가 대칭적으로 나타나는 것으로 보아 발산형 경계에서 나타나는 고지자기 분포이다. B는 해령에 해당하고 퇴적물의 두께는 해령에서 멀어질수록 두꺼워지므로 퇴적물의 두께는 A가 B보다 두껍다. C에서 나타나는 고지자기 줄무늬는 현재 해양 지각이 생성되고 있는 B에서의 고지자기 줄무늬와 같으므로 C에서의 고지자기 방향은 현재 자기장의 방향과 같다.
- 05 차가운 플룸은 맨틀과 외핵의 경계까지 하강하며, 뜨거운 플룸은 맨틀과 외핵의 경계에서 맨틀 상부까지 상승하므로 플룸의 운동은 맨틀 전반에 걸쳐 발생한다. 열점은 뜨거운 플룸이 상승해 화산 활동이 일어나는 현상이다. 차가운 플룸이 상승해 화산 활동이 일어나는 현상이다. 차가운 플룸이 맨틀과 외핵의 경계에 도달하면 상대적으로 온도가 높은 주변 맨틀 물질의 일부가 상승해 뜨거운 플룸의 형성을 유발한다.
- 06 (가)는 순상 화산, (나)는 성층 화산이다. 마그마의 SiO<sub>2</sub> 함량이 적을수록 점성은 작아지고 유동성은 커진다. 점성이 작고 유동성이 큰 마그마가 분출되면 경사가 완만한 순상 화산이, 점성이 크고 유동성이 작은 마그마와 화산 쇄설물이 번갈아 분출되면 비교적 경사가 급한 성층 화산이 형성된다. 따라서 (가)는 (나)보다 SiO<sub>2</sub> 함량이 적고 유동성이 큰 마그마가 분출되어 형성되었다. 화산 쇄설물은 기체 함량이 많고 점성이 큰 마그마가 분출될 때 흔히 발생한다. 따라서 화산 활동 시 분출된 화산 쇄설물의 양은 (가)가 (나)보다 적었을 것이다.
- 07 교차 거리에 해당하는 ㉠에는 직접파와 굴절파가 동시에 도달한다. 그러나 지각만을 통과한 직접파보다 지각과 맨

- 틀을 통과한 굴절파의 전파 경로가 더 길다. 따라서 P파의 속도는 지각보다 맨틀에서 더 빠르다는 것을 알 수 있다. 지각이 두꺼울수록 굴절파가 V<sub>1</sub>의 속도로 이동하는 거리가 증가한다. 따라서 교차 거리인 ㉠도 증가한다. V<sub>2</sub>가 증가하면 굴절파가 지각과 맨틀의 경계면에서 더 빠르게 전파된다. 따라서 굴절파의 도달 시간이 단축되어 직접파와 빨리 교차하므로 ㉠은 감소한다.
- 08 그림 (나)의 a는 P파, b는 S파의 전파 모습이다. A 구역에는 지각을 통과한 지진파가 도달하므로 a와 b가 모두 도달한다. 맨틀과 핵의 경계에서는 P파가 크게 굴절되고 S파는 통과하지 못하므로 암염대(B 구역)가 생긴다. 따라서 이 암염대(B 구역)로부터 맨틀과 핵의 경계를 구분할 수 있다. C 구역에 도달한 지진파는 액체 상태의 외핵을 통과한 지진파이다. 따라서 a는 도달하지만 b는 도달하지 못한다.
- 09 (1) 예시 답안 지구 전체가 두꺼운 얼음으로 덮인 얼음덩어리 지구 상태에서는 대기 중의 이산화 탄소가 바다에 녹는 과정이 중단되었고, 화산 활동이 계속 일어나고 있었기 때문에 대기 중 이산화 탄소의 농도가 계속 상승했다.
- (2) 예시 답안 전 지구를 덮고 있던 얼음이 녹은 뒤 대기 중의 이산화 탄소가 탄산 이온의 형태로 바닷물에 녹아 들어가 칼슘 이온과 반응해 탄산염(석회암)으로 해저에 침전되었기 때문이다.
- 10 (1) 예시 답안 (가)는 유리질 조직에 결정의 크기가 큰 반정이 포함되어 있고, (나)는 결정의 크기가 큰 조립질 조직이다.
- (2) 예시 답안 (가)는 지하에서 서서히 식어가던 마그마가 상승해 지표 부근에서 빠르게 식어 형성되었다. (나)는 마그마가 지하 깊은 곳에서 서서히 식어 형성되었다.
- 11 (1) 예시 답안 판 구조론은 대륙 이동설, 맨틀 대류설, 해양저 확장설을 거쳐 정립되었다. 이처럼 과학 이론은 많은 가설이 등장한 뒤 검증되고 수정되는 과정을 거쳐 정립된다. 또 과학 이론의 정립 과정에서 관측 기기 및 기술의 발달로 수집된 새로운 증거는 과학 이론이 바뀌거나 새롭게 정립되는 요인이 된다.
- (2) 예시 답안 음향 측심기를 이용해 해저 지형의 모습을 알아낼 수 있었고, 자력계를 이용해 해양저 확장의 증거를 찾을 수 있었다. 또 지진계를 이용해 지진이 발생한 위치와 깊이를 정확하게 측정할 수 있게 되었고, 심해저 시추기로 전 세계 해양 지각의 나이를 측정할 수 있었다. 이처럼 관측 기기 및 기술의 발달로 판 구조론에 대한 가설의 과학적 증거가 축적되며 판 구조론이 정립될 수 있었다. 이와 같이 관측 기기 및 기술의 발달은 과학 이론이 정립되는 데 큰 역할을 하며, 과학의 발전을 이끄는 중요한 배경이 된다.



91 쪽 | 1. 지구의 대기에 도달한 태양 빛은 질소, 산소와 같은 기체 나 미세한 먼지 입자 등에 의해 산란되거나, 구름이나 지표에서 반사되어 우주 공간으로 되돌아 나가기도 한다. 또 구름이나 지표, 대기 중 오존, 수증기 등에 흡수되기도 한다. 대기의 밀도는 지표에 가까워질수록 커져 대기에 도달한 태양 빛이 지표를 향해 굴절되기도 한다.

2. 지구가 태양으로부터 받는 만큼의 에너지를 우주 공간으로 방출해 균형을 이루고 있기 때문이다.

3. 예시 답안 구름은 지표에서 방출되는 에너지를 흡수했다가 다시 지표로 방출한다. 이러한 과정이 반복되면 지표가 냉각되는 속도는 느려지므로 밤에 바람이 불지 않고 구름이 두껍게 낀 경우가 구름이 없는 경우보다 기온이 높다.

99 쪽 | 1. 기온 감률이 습윤 단열 감률보다 작으면 절대 안정 상태, 기온 감률이 건조 단열 감률보다 크면 절대 불안정 상태, 기온 감률이 건조 단열 감률보다 작고 습윤 단열 감률보다 크면 조건부 불안정 상태이다. 조건부 불안정 상태일 때 공기 덩어리가 불포화 상태이면 안정하고, 포화 상태이면 불안정하다.

2. 대기의 상태가 절대 안정일 때 지표면의 공기 덩어리가 강제로 상승하면 공기 덩어리의 온도는 주위 공기보다 항상 낮다. 따라서 이 공기 덩어리는 강제로 상승시키는 힘이 없다면 원래의 위치로 되돌아가려고 한다. 이러한 상태에서는 연직 운동이 억제되어 두께가 얇은 층운형 구름이 생성된다. 대기의 상태가 절대 불안정일 때 지표면의 공기 덩어리가 상승하면 공기 덩어리의 온도는 주위 공기보다 항상 높다. 따라서 이 공기 덩어리는 원래의 위치에서 멀어지려고 한다. 이러한 상태에서는 연직 운동이 활발해 두께가 두꺼운 적운형 구름이 생성된다.

3. 예시 답안 저위도 지방이나 여름철 중위도 지방의 구름은 주로 0℃ 이상으로, 이 구름에서 만들어진 빔방울이 지표로 떨어지면 따뜻한 비가 된다. 고위도 지방이나 중위도 지방의 구름은 0℃ 이하로 온도가 낮아, 이 구름에서 만들어진 빔방울이 지표로 떨어지면 찬비가 된다.

103 쪽 | 1. 정역학 평형 상태에서는 연직 기압 경도력과 중력의 크기가 같기 때문에 대기의 연직 운동 상태가 변하지 않는다.

2. 기압 경도력은 두 지점 사이의 기압 차에 의해 발생하는 힘으로, 기압이 높은 곳에서 낮은 곳으로 작용한다. 전향력은 지구 자전에 의해 발생하는 힘으로, 북(남)반구에서는 물체의 운동 방향의 오른쪽(왼쪽) 직각 방향으로 작용한다. 구심력은 원운동을 하는 물체의 궤적이 유지되도록 물체의 운동 방향을 바꾸는 힘으로, 운동의 중심 방향으로 작용한다. 마찰력은 물체의 운동 속도를 감소시키는 힘으로, 물체의 운동 방향과 반대 방향으로 작용한다.

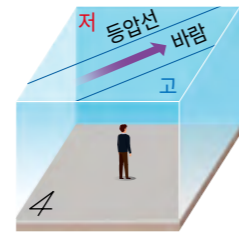
3. 예시 답안 기압 경도력이 일정할 때 적도 해양에서 고

위도 육지로 갈수록 전향력이 크게 작용하므로 북반구에서는 풍향이 공기 이동 방향의 오른쪽으로, 남반구에서는 왼쪽으로 바뀔 것이다. 마찰력은 해양보다 육지에서 더 크게 작용하므로 적도 해양에서 고위도 육지로 갈수록 풍속이 줄어들 것이다.

107 쪽 | 1. 지균폭은 기압 경도력과 전향력이 평형을 이루며 등압선에 나란하게 부는 바람으로, 기압 경도력의 크기가 같을 때 위도가 낮을수록 풍속이 빠르다.

2. 지상에서는 바람이 고기압의 중심부에서 바깥쪽으로 등압선을 가로지르며 시계 방향으로 불어 나가고, 상층에서는 바람이 시계 방향으로 등압선에 나란하게 분다.

3. 예시 답안 상층에서는 바람이 등압선에 나란하게 불고 구름은 바람에 의해 이동하므로, 상층에서 구름이 남서쪽에서 북동쪽으로 이동하고 있다면 구름 이동 방향의 북서쪽에는 저기압이, 남동쪽에는 고기압이 배치되어 있을 것이다.



114 쪽 | 1. 대기 대순환과 편서풍 파동은 고위도와 저위도의 기온 차 및 지구 자전에 의한 전향력 때문에 발생한다.

2. 편서풍 파동에서 기압골의 서쪽에는 하강 기류가 형성되어 지상에 고기압이 발달하고, 기압골의 동쪽에는 상승 기류가 형성되어 지상에 저기압이 발달한다.

3. 예시 답안 지구의 자전 속도가 현재보다 느려진다면 전향력의 세기가 현재보다 작아지므로, 적도 지방에서 상승해 고위도 지방으로 이동하는 공기의 흐름이 현재보다 더 고위도 쪽으로 이동한 뒤에 하강하게 될 것이다. 따라서 해들리 순환의 크기는 현재보다 더 커지게 될 것이다.

대단원 마무리

118 쪽~121 쪽

- ① 생명 가능 지대
- ② 산란
- ③ 건조 단열 감률
- ④ 습윤 단열 감률
- ⑤ 층운형
- ⑥ 적운형
- ⑦ 과냉각 물방울
- ⑧ 중력
- ⑨ 기압 경도력
- ⑩ 지균폭
- ⑪ 마찰력
- ⑫ 제트류
- ⑬ 고기압
- ⑭ 저기압

- 01 ②
- 02 나, 다
- 03 ④
- 04 ③
- 05 나, 다
- 06 ①
- 07 ⑤
- 08 ④
- 09 (1) 해설 참조 (2) 해설 참조
- 10 해설 참조
- 11 (1) 해설 참조 (2) 해설 참조

01 A는 자외선으로 대부분 대기 중에 흡수되어 지표면에 거의 도달하지 않는다. B는 가시광선, C는 적외선으로, 수증기나 이산화 탄소 등의 온실 기체에 흡수되는 에너지의 양은 가시광선보다 적외선이 더 많다. ㉠은 대기의 창 영역으로, 지구 복사 에너지가 대부분 우주 공간으로 빠져나가는 영역이다. 인공위성으로 지표의 정보를 얻고자 할 때 대기의 창을 이용하면 유용하다.

02 A는 대기와 구름이 흡수하는 태양 복사 에너지로 23이고, B는 대기의 재복사로 지표가 흡수하는 에너지로 98이다. 성층권에 있는 오존층은 지구에 도달한 태양 복사 에너지 중 자외선을 흡수하므로 성층권 오존의 양이 감소하면 대기가 흡수하는 태양 복사 에너지의 양이 감소한다.

03 지표면~2 km 구간의 기층은 기온 감률이 건조 단열 감률보다 크므로 절대 불안정 상태이다. 절대 안정 상태의 대기에서는 기온 감률이 건조 단열 감률과 습윤 단열 감률보다 작다.

04 고위도 지방이나 중위도 지방의 강수 과정은 빙정설로, 저위도 지방이나 여름철 중위도 지방의 강수 과정은 병합설로 설명한다. 우리나라는 북반구의 중위도 지방에 위치해 있으며 우리나라에서 일어나는 강수 현상은 빙정설로 설명할 수 있다.

05 대기 중의 두 지점 사이에 기압 차가 생기면 기압 경도력이 작용해 공기 덩어리가 이동한다. A에 작용하는 힘은 B에 작용하는 힘보다 작으므로 기압 경도력은 B에서 A 쪽으로 작용한다. 단위 질량의 공기 덩어리에 작용하는 기압 경도력의 크기는  $\frac{DP \times S}{\rho \times S \times \Delta L} = \frac{1}{\rho} \frac{DP}{\Delta L}$  이다.

06 (가)는 상층에서 등압선에 나란하게 부는 바람인 지균폭을, (나)는 지상에서 등압선을 가로지르며 부는 바람인 지상풍을 나타낸 것이다. 북반구 지상의 고기압 부근에서는 바람이 시계 방향으로 불어 나가고, 저기압 부근에서는 바람이 시계 반대 방향으로 불어 들어간다. 따라서 (나)의 중심부는 고기압이다. (가)는 상층에서 부는 바람이므로 마찰력의 영향을 받지 않으며, (나)는 지상에서 부는 바람이므로 마찰력의 영향을 받는다.

07 A는 극순환, B는 페렐 순환, C는 해들리 순환이다. A와 B에서 상승 기류가 나타나는 (가)에는 저압대인 한대 전선대가 형성되고, B와 C에서 하강 기류가 나타나는 (나)에는 중위도 고압대가 형성된다.

08 북반구 중위도 상층에서 발생하는 편서풍 파동의 기압 마루(A)에서는 고기압성 경도풍이 불고, 기압골에서는 저기압성 경도풍이 분다. 기압골의 서쪽(B)에서는 공기의 수렴이 일어나고 지상인 (가)에는 고기압이 발달하며, 기압골의 동쪽(C)에서는 공기의 발산이 일어나고 지상인 (나)에는 저기압이 발달한다.

09 (1) 예시 답안 불포화 상태의 공기 덩어리가 상승해 기온과 이슬점이 같아지면 상대 습도는 100%가 되면서 구름이 생성되기 시작하는데, 이때의 높이를 상승 응결 고도라고 한다. 상승 응결 고도는 기온과 이슬점의 차가 클수록 높다. 지표면에서 A와 B의 기온이 같으므로 이슬점은 상승 응결 고도가 높은 A가 B보다 낮다.

(2) 예시 답안 불포화 상태의 공기 덩어리가 상승할 때는 건조 단열 변화가, 포화 상태의 공기 덩어리가 상승할 때는 습윤 단열 변화가 일어난다. B는 지표면에서 상승해 높이  $h_1$ 에서 구름이 생성되기 시작한다. 따라서 B는 지표면에서  $h_1$ 까지 상승하는 동안 건조 단열 변화가 일어나고,  $h_1$ 에서  $h_2$ 까지 상승하는 동안 습윤 단열 변화가 일어난다.

10 예시 답안 P 지점에서 전향력의 크기는 기압 경도력에서 구심력을 뺀 것과 같고, Q 지점에서 전향력의 크기는 기압 경도력과 구심력을 더한 것과 같다. 따라서 P 지점보다 Q 지점에 작용하는 전향력의 크기가 크고 풍속이 빠르다.

11 (1) 예시 답안 적도 지방에서 가열된 공기가 상승해 고위도 쪽으로 이동하면서 점차 냉각되고 위도 30° 부근에서 하강한다. 따라서 위도 30° 부근에는 하강 기류에 의해 고압대(중위도 고압대)가 형성되므로 대체로 맑고 건조한 날씨가 나타난다.

(2) 예시 답안 북반구의 여름에는 남반구보다 북반구에 입사하는 태양 복사 에너지의 양이 더 많고, 남반구의 여름에는 북반구보다 남반구에 입사하는 태양 복사 에너지의 양이 더 많다. 따라서 해들리 순환의 하강 기류가 나타나는 지역의 위치는 북반구의 여름에 북쪽으로, 남반구의 여름에 남쪽으로 이동한다. 이에 따라 말 위도대도 여름에는 북상하고 겨울에는 남하한다.

ㄱ

간조 70  
 건조 단열 감률 93  
 경도풍 105  
 고조 70  
 고지자기 24  
 골 62  
 교차 거리 39  
 구심력 103  
 구텐베르크 불연속면 43  
 굴절 89  
 굴절파 39  
 규모 36  
 극고압대 109  
 극동풍 109  
 극순환 109  
 기압 100  
 기압 경도력 100, 102  
 기압 마루 113  
 기압골 113  
 기조력 71

ㄴ

너울 64  
 늪새바람 94

ㄷ

단열 변화 92  
 단열 압축 92  
 단열 팽창 92  
 단일 세포 순환 108  
 대기 대순환 108  
 대기 안정도 95

대기의 창 85  
 대륙 이동설 22  
 대조 73

ㄹ

레만 불연속면 43

ㄴ

마그마 바다 12  
 마루 62  
 마찰력 103  
 만조 70  
 맨틀 대류설 23  
 모호로비치치 불연속면(모호면) 42  
 목성형 행성 11  
 무역풍 109  
 미행성체 11

ㄷ

반사 89  
 반상 조직 35  
 변환 단층 25  
 병합설 98  
 복사 안개 98  
 빙정설 99

ㄷ

사리 73  
 산란 88  
 3세포 순환 모델 109  
 상승 응결 고도 94

상층 일기도 106  
 생명 가능 지대 86  
 선택적 흡수체 84  
 성층 화산 32  
 세립질 조직 35  
 소조 73  
 수압 54  
 수압 경도력 54  
 순상 화산 32  
 습윤 단열 감률 93  
 실체파 38  
 심해파 64  
 쓰나미 67

ㄷ

아열대 제트류 110  
 암석권 43  
 암영대 43  
 얼음덩어리 지구 18  
 S파 38  
 에크만 나선 58  
 에크만 수송 59  
 에크만층 59  
 연안 쇄파 64  
 연약권 43  
 연직 기압 경도력 100  
 연직 수압 경도력 54  
 열점 29  
 온실 효과 87, 91  
 용암 32  
 원시 대기 13  
 원시 바다 13  
 원시 지각 12  
 원시 태양 10  
 원시 행성 11  
 유리질 조직 35

음향 측심법 23  
 이류 안개 98  
 이슬점 감률 93

ㄷ

저조 70  
 적도 저압대 109  
 적운형 구름 96  
 전이파 65  
 전향력 57, 102  
 절대 불안정 95  
 절대 안정 95  
 정역학 방정식 55  
 정역학 평형 55, 101  
 제트류 110  
 조건부 불안정 95  
 조금 73  
 조류 70  
 조립질 조직 35  
 조석 70  
 조석 주기 72  
 조차 70  
 주기 62  
 주시 곡선 39  
 중간권 43  
 중위도 고압대 109  
 지구 열수지 90  
 지구형 행성 11  
 지균풍 104  
 지상 일기도 106  
 지상풍 106  
 지진 36  
 지진 해일 67  
 지진파 38  
 지진파 단면 영상 44  
 지형류 59

지형류 평형 59  
 직접파 39  
 진도 36  
 진앙 36  
 진원 36

ㄷ

천이파 65  
 천해파 65  
 층운형 구름 95

ㄷ

코리아올리 힘 57

ㄷ

태양 상수 108  
 태양계 성운 10

ㄷ

파고 62  
 파장 62  
 판 구조론 26  
 페렐 순환 109  
 편광 현미경 33  
 편서풍 109  
 편서풍 파동 109  
 폭풍 해일 66  
 핀 94  
 표면파 38  
 풍랑 64

플룸 구조론 30  
 PS시 38  
 P파 38

ㄷ

한대 전선 제트류 110  
 한대 전선대 109  
 해구 26, 28  
 해들리 순환 109  
 해령 24, 28  
 해양저 확장설 24  
 해일 66  
 해파 62  
 행성파 109  
 호상철광층 17  
 화산 가스 32  
 화산 분출물 32  
 화산쇄설물 32  
 화산 활동 31  
 화성암 33  
 활승 안개 98  
 흡수 89

### I 지구 탄생과 생동하는 지구

- ▶ 8 쪽(파묵칼레), 11 쪽(화성, 토성), 15 쪽(지구 환경의 모습), 17 쪽(스트로마톨라이트 단면), 18 쪽(석회암 퇴적층), 19 쪽(디킨 소니아 화석), 20 쪽(곡류, 석회 동굴, 해식 동굴), 21 쪽(지구 환경의 모습), 27 쪽(지진계, 심해저 시추기), 31 쪽(피나투보산, 퇴적물, 퇴적암, 화성암, 변성암), 32 쪽(마우나로아산, 레이니어 산), 40 쪽(모니터), 45 쪽(용암을 채취하는 화산학자, 화산을 감시하는 화산학자), 46 쪽(지권, 수권, 생물권), 50 쪽(순상 화산, 성층 화산): 게티이미지코리아
- ▶ 10 쪽(지구), 11 쪽(목성), 12 쪽(원시 지구), 31 쪽(바다), 45 쪽(화산 활동), 46 쪽(지구, 기권): 셔터스톡
- ▶ 11 쪽(태양, 수성, 금성, 지구, 천왕성, 해왕성), 15 쪽(수성): 미국항공우주국(NASA)
- ▶ 14 쪽(금성, 지구, 화성의 특징): John P. Grotzinger 외, 이의 형 외 역, 《지구의 이해》7판, 시그마프레스, 2018.
- ▶ 17 쪽(호상철광층), 18 쪽(석회암층과 빙하 퇴적층), 27 쪽(음향 측심기): 위키미디어커먼즈
- ▶ 25 쪽(전 세계 해양 지각의 나이 분포): 미국해양대기청(NOAA)
- ▶ 27 쪽(자력계): Emil Kring Lauridsen 외, 《The History of Astatic Magnet Systems and Suspensions》, Centaurus 40(2), 2007.
- ▶ 29 쪽(열점과 하와이 열도를 이루는 화산섬의 나이, 판의 경계와 주요 열점의 분포): Alan P. Trujillo 외, 《Essentials of Oceanography》12th, Pearson, 2018.
- ▶ 32 쪽(화산 쇄설물의 종류와 입자 크기): Frederick K. Lutgens 외, 함세영 외 역, 《지질환경과학》12판, 시그마프레스, 2016.
- ▶ 35 쪽(세립질 조직, 유리질 조직, 반상 조직, 조립질 조직): <https://www.alexstrekeisen.it>
- ▶ 40 쪽(우리나라 지진파 자료): 이기화, 《On Crustal Structure of the Korean Peninsula》, 대한지질학회지 15(4), 1979.
- ▶ 41 쪽(우리나라 지각의 두께 분포): Sung-Joon Chang 외, 《Crustal Structure in Southern Korea from Joint Analysis of Teleseismic Receiver Functions and Surface-Wave Dispersion》, Bulletin of the Seismological Society of America 95(4), 2005.
- ▶ 42 쪽(지진파의 속도 분포): Stepen Marshak, 《Earth: Portrait of a planet》6th, W. W. Norton&Company, 2019.

- ▶ 44 쪽(3차원 지구 내부 구조): <https://eos.org/research-spotlights/massive-ancient-tectonic-slab-found-below-the-indian-ocean>
- ▶ 44 쪽(플룸의 구조): Duncan Hawley 외, 《Plate update: refreshing ideas for teaching plate tectonics》, Teaching Geography 42(1), 2017.
- ▶ 46 쪽(듣는 원뿔): <https://www.mayalinstudio.com/memory-works/the-listening-cone>

### II 해수의 운동과 순환

- ▶ 52 쪽(바닷가), 54 쪽(바닷속), 54 쪽(바닷물), 64 쪽(풍랑, 연안 쇄파 3 개): 셔터스톡
- ▶ 58 쪽(해수의 표층 순환, 북반구에서의 에크만 나선과 수송 방향), 72 쪽(조석 양상 그래프), 73 쪽(태양과 달의 상대적 위치에 따른 조석 변동): Tom Garrison, 이상룡 외 역, 《해양학》7판, 센게이지러닝코리아(주), 2021.
- ▶ 60 쪽(전 세계 해양의 평균 해수면 높이 분포): 유럽지구과학협회(EGU), <https://doi.org/10.5194/os-17-789-2021>
- ▶ 63 쪽(해파의 진행과 물 입자의 운동), 65 쪽(해파의 분류, 해안선에 접근하는 해파의 모습), 66 쪽(태풍의 통과와 폭풍 해일), 67 쪽(지진 해일의 발생 및 전파 과정), 71 쪽(기조력의 성분): Alan P. 외, 《Essentials of Oceanography》, Pearson, 2017.
- ▶ 66 쪽(폭풍 해일 사진), 69 쪽(폭풍 해일, 차수벽 설치 모습), 76 쪽(연안 침식을 막기 위해 쌓아 놓은 돌망태): 연합뉴스
- ▶ 67 쪽(지진 해일 발생 전후 사진): 게티이미지코리아
- ▶ 68 쪽(시뮬레이션 활용하기): <https://www.ncei.noaa.gov/maps/hazards/?layers=0>
- ▶ 70 쪽(갯벌): <https://whc.unesco.org/en/documents/172483>
- ▶ 70 쪽(우리나라 서해안에서 만조와 간조 때의 모습): 필름피아
- ▶ 71 쪽(진도 바닷길 축제), 75 쪽(해양 관측선): 뉴스뱅크
- ▶ 73 쪽(한 달 동안의 조석 변동 그래프), 74 쪽(실시간 조위 그래프): 국립해양조사원
- ▶ 75 쪽(천리안 위성): 한국항공우주연구원
- ▶ 76 쪽(사라지는 모래사장, 드러난 나무뿌리): <https://coast.mof.go.kr/coastErosion/introduce/introduceErosion1.do?dt3=221>

### III 강수 과정과 대기의 운동

- ▶ 7 쪽(패러글라이더): 셔터스톡
- ▶ 82 쪽(패러글라이딩), 89 쪽(일몰), 96 쪽(층운형 구름, 적운형 구름), 98 쪽(복사 안개, 활승 안개), 115 쪽(태양광 발전), 116 쪽(인공 강우): 게티이미지코리아
- ▶ 84 쪽(지구 대기의 조성), 89 쪽(지구 대기 최상부와 지표면에 도달하는 태양 복사 에너지의 세기): 한국기상학회, 《알기 쉬운 대기과학》, 시그마프레스, 2020.
- ▶ 85 쪽(태양 복사 에너지와 지구 복사 에너지의 세기, 대기 성분별 복사 에너지 흡수율), 89 쪽(구름과 다양한 표면의 반사율): Frederick K. Lutgens 외, 《The Atmosphere: An Introduction to Meteorology》14th, Pearson, 2020.
- ▶ 90 쪽(지구 평균 열수지): <https://www.noaa.gov/jetstream/atmosphere/energy>
- ▶ 98 쪽(이류 안개), 116 쪽(인공 안개): 뉴스뱅크
- ▶ 99 쪽(포화 수증기압 그래프): 한국기상학회, 《대기과학개론》, 시그마프레스, 2012.
- ▶ 107 쪽(2023년 10월 4일 지상 일기도, 상층 일기도), 114 쪽(2023년 11월 23일 상층 일기도, 지상 일기도), 115 쪽(2023년 12월 20일 위성 영상, 상층 일기도, 지상 일기도): 기상청 기상자료개방포털
- ▶ 109 쪽(2023년 11월 29일 상층 일기도): 기상청 날씨누리
- ▶ 115 쪽(모니터): 클립아트코리아
- ▶ 115 쪽(농업): 이미지투데이

### 부록

- ▶ 124 쪽(코페르니쿠스, 케플러, 코리올리, 라이엘), 125 쪽(베게너, 캐넌): 게티이미지코리아
- ▶ 125 쪽(비야크네스, 레만): 위키미디어커먼즈
- ▶ 126 쪽(화성암 박편), 127 쪽(퇴적암 박편, 변성암 박편): 이창진 외, 《편광 현미경으로 본 암석의 세계》, 교육과학사, 2000.
- ▶ 126 쪽(반려암 박편): [http://jm-derochette.be/plutonic\\_rocks/K\\_gabbro\\_scotland.htm](http://jm-derochette.be/plutonic_rocks/K_gabbro_scotland.htm)

※ 집필진의 직접 집필인 경우 출처를 밝히지 않았음.  
 ※ 출처 표시를 안 한 사진 및 삽화는 저작자 및 발행사에서 저작권을 가지고 있는 경우임.

### URL 목록

- ▶ 45 쪽(화산학자): <https://www.kigam.re.kr/menu-es?mid=a10404030100>
- ▶ 69 쪽(해일 특별 시 행동 요령): <https://www.safekorea.go.kr/idsiSFK/neo/sfk/cs/contents/prevent/prevent10.html?menuSeq=126>
- ▶ 75 쪽(해양 기상 전문가): [https://www.career.go.kr/cnet/front/web/movie/catMapp/catMappView.do?ARCL\\_SER=1034449](https://www.career.go.kr/cnet/front/web/movie/catMapp/catMappView.do?ARCL_SER=1034449)
- ▶ 90 쪽(지구 표면 온도 변화 시뮬레이션): [https://phet.colorado.edu/sims/html/greenhouse-effect/latest/greenhouse-effect\\_all.html?locale=ko](https://phet.colorado.edu/sims/html/greenhouse-effect/latest/greenhouse-effect_all.html?locale=ko)
- ▶ 113 쪽(상층 일기도): <https://www.weather.go.kr/w/image/chart/analysis.do>
- ▶ 115 쪽(기상 컨설턴트): [https://www.career.go.kr/cnet/front/base/job/jobViewGb3.do?SEQ=3\\_B\\_B001\\_10023](https://www.career.go.kr/cnet/front/base/job/jobViewGb3.do?SEQ=3_B_B001_10023)

## 연구 위원

김연귀(서울 혜원여자고등학교)\*

문무현(서울 장충고등학교)

\* 대표 연구 위원

## 집필 위원

김연귀(서울 혜원여자고등학교)\*

문무현(서울 장충고등학교)

박창용(서울 이화여자고등학교)

박재용(서울 서울교육대학교)

장유순(충남 공주대학교)

최윤옥(인천 부평여자고등학교)

\* 대표 집필 위원

## 심의 기관

전북특별자치도교육청

## 심의 위원

개발 책임	하남규
편집	오진경 박윤경 정지현 심희연 주현하
디자인 책임	손현지
디자인	김기욱 장병진 원유희 땡큐마더
삽화	김일주 이진호 디자인앤 모먼트시리즈
사진 촬영	필름피아

교육부장관의 위임을 받아 전북특별자치도교육감이 2024년 0월 00일 인장 승인을 하였음.

## 고등학교 지구시스템과학

초판 발행	2025. 3. 1.	정가	원
지은이	김연귀 외 5인		
발행인	(주)미래엔(서울특별시 서초구 신반포로 321)		
인쇄인	(주)미래엔(서울특별시 서초구 신반포로 321)		

이 교과서의 본문 용지는 우수 재활용 제품 인증을 받은 재활용 종이를 사용하였습니다.

교과서에 대한 문의 사항이나 의견이 있으신 분은 교육부와 한국교과서연구재단이 운영하는 '교과서민원바로처리센터 (전화 1566-8572, [www.textbook114.com](http://www.textbook114.com) 또는 [www.교과서114.com](http://www.교과서114.com))'에 문의하여 주시기 바랍니다.

이 도서에 게재된 저작물에 대한 보상금은 문화체육관광부 장관이 정하는 기준에 의거  
사단법인 한국문학예술저작권협회(전화 02-2608-2800, [www.kolaa.kr](http://www.kolaa.kr))에서 저작권산권자에게 지급합니다.

내용 관련 문의 (주)미래엔 과학팀 전화 1800-8890 전송 02-541-8150

개별 구입 문의 [mall.mirae-n.com](mailto:mall.mirae-n.com)(미래엔 도서몰) 전화 1800-8890