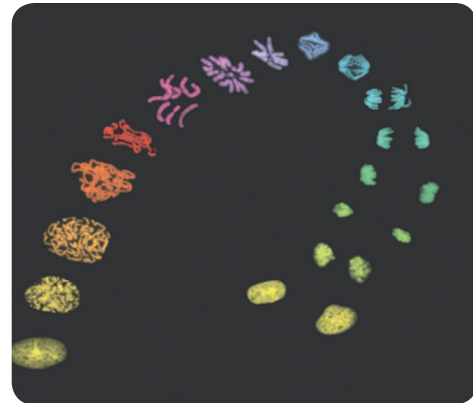


2. 세포분열

- 01. 염색체
- 02. 세포주기
- 03. 체세포분열
- 04. 생식세포분열



세포분열 시 염색체 모습 하나의 동물세포가 2개로 분열할 때 보이는 염색체 모습이다.

생물과 무생물을 구분할 수 있는 특징 중 하나가 생식을 통해 종족을 유지하고 번식시키는 것이다. 모든 세포는 세포로부터 나오므로 생명의 연속성은 세포분열에 기초해서 이루어진다. 세포분열은 생물체의 일생에서 여러 가지 중요한 역할을 한다. 아메바 같은 단세포 생물은 세포분열로 자손을 만들어 내는 반면, 다세포 생물은 세포분열을 통해 몸이 커지기도 하고 생식세포의 분열을 통해 자손을 만들어 낸다. 세포분열 과정은 세포주기의 필수적인 과정이며 이 과정을 통해 모세포는 딸세포에게 동일한 유전 물질을 전달해주게 된다.

이 장에서는 세포 내에 존재하는 염색체의 특성, 세포주기, 체세포분열과 생식세포분열에 대해 알아보도록 하자.

01

염색체

학·습·목·표

- 염색체의 구조를 알 수 있다.
- 핵형 분석 결과를 해석할 수 있다.

세포의 구조와 기능을 조절하는 유전 정보는 DNA에 존재한다. DNA의 특정 부분은 특정 형질을 결정하는 유전 정보를 가지고 있는데, 이를 **유전자**라고 한다. 유전자를 가지고 있는 DNA는 단백질과 함께 염색체를 이루고 모세포에서 딸세포로 세포분열을 통해 정확하게 전달된다. 염색체는 어떤 구조를 가지고 있을까?

탐구 활동 1

염색체 관찰 및 핵형 분석

사람이 가지고 있는 염색체를 관찰할 수 있는 방법에는 어떤 것이 있을지 생각해 보고, 염색체 관찰 결과를 바탕으로 사람에 대해서 알 수 있는 것에는 어떤 것이 있을지 예측해 보자.

준비물

기구: 광학 현미경, 가위, 풀, 돋보기

재료: 사람의 염색체 프레파라트, 염색체 그림, 핵형 분석 용지(A4 용지 크기)

방법 및 절차

사람의 염색체 관찰

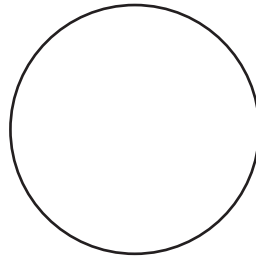
사람의 염색체 프레파라트를 이용하여 사람의 염색체를 관찰해 보자.

사람의 핵형 분석

- (1) 사람 염색체 그림을 가위로 오려낸다.
- (2) 염색체를 크기순으로 배열한 후, 동원체의 위치, 팔의 길이, 밴드 형태 등을 고려하여 분류한다.
- (3) 상동 염색체를 찾아 해당하는 곳에 부친다.

결과 및 논의

- (1) 현미경으로 관찰한 사람의 염색체를 그려보자.



()

- (2) 부록에 있는 핵형도를 완성해 보자. 이 사람의 성은 무엇인가?

(※부록의 핵형분석지, p.438 참고)

연구 과제

- (1) 사람의 염색체의 일부는 크기나 구조만 비교해서는 구별하기가 어렵다. 이런 경우에는 어떤 방법을 사용하는지 조사하여 보자.

분열 중인 세포를 전자현미경으로 관찰하면 실 모양의 구조물이 복잡하게 얽혀 있는 것을 볼 수 있다. 이 실 모양의 구조물을 **염색사**라고 하며, 염색사는 DNA와 단백질로 이루어져 있다. 염색사는 세포분열이 시작되면 응축되어 분열기의 전기에 두 개의 염색 분체로 보인다. 두 염색 분체는 세포주기의 S기에 합성되어 복제된 것으로 동원체에 연결되어 있다. 동원체는 세포가 분열할 때 염색 분체가 분리될 수 있도록 방추사가 연결되는 곳이다.

생물의 체세포에 있는 염색체를 비교해 보면 크기와 모양이 똑같은 염색체가 쌍으로 존재하는데, 이렇게 쌍을 이루는 염색체들을 **상동 염색체**라고 한다. 상동 염색체는 생식 과정을 통해서 부모로부터 한 개씩 물려받은 것이다. 생물의 종류에 따라 염색체의 수, 크기 및 모양은 일정하다. 또한 염색체에는 **상염색체**와 **성염색체**가 있다. 성염색체는 성에 따라 차이를 보이는 염색체로 성을 결정하는 유전자를 가지고 있다. 성염색체 이외의 염색체를 상염색체라고 하며, 생물의 여러 가지 형질을 결정하는 유전자를 가지고 있다.

사람의 핵형은 46개의 염색체로 이루어져 있는데, 그 중 22쌍은 상염색체이고 한 쌍은 성염색체인데 여성은 XX, 남성은 XY를 가진다. 만일 염색체 수에 이상이 생기거나 일부 염색체 구조에 결함이 생기면 유전적 이상을 초래하는 경우가 많다. 따라서 핵형 분석을 통하여 그 사람의 유전적 결함 유무를 확인할 수 있기 때문에 태아를 대상으로 태어나기 전에 핵형 검사를 하기도 한다.

핵형 분석을 위해 세포 핵분열 중기의 염색체를 염색한 후 현미경으로 관찰하면서 사진을 찍는다. 이렇게 준비된 염색체 사진을 확대한 후, 상동염색체 쌍을 구하여 크기 순서로 배열하면 그 개체나 생물 종의 핵형 특징을 알 수 있다. 핵형 분석을 정확하게 하기 위해서 염색체의 길이, 동원체의 위치, 팔의 길이, 염색체의 밴드 형태 등을 참고한다.



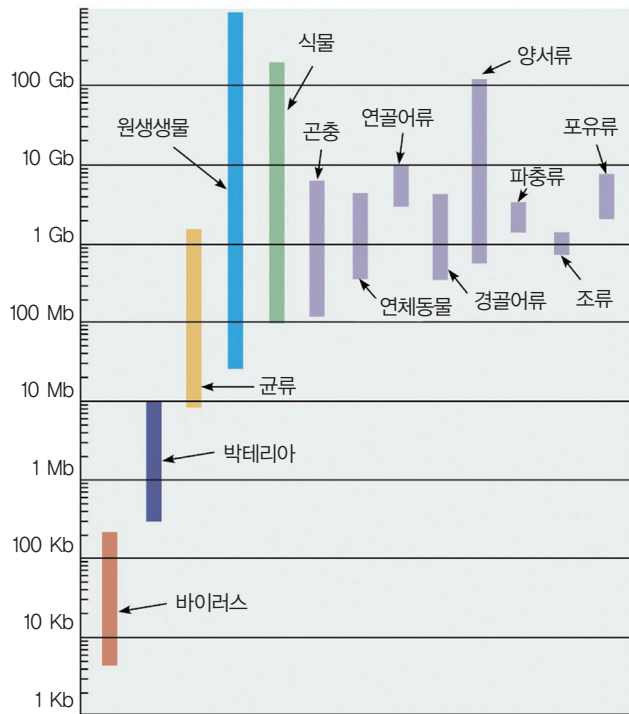
조사하기

박테리아의 염색체 구조와 진핵세포의 염색체 구조는 어떻게 다른지 조사해 보자.

〈그림 1-21〉 사람 염색체
① 여자의 염색체, ② 남자의 염색체

1) 염색체의 구성과 미세 구조

염색체는 생물의 종류에 따라 수와 형태가 일정하다. 박테리아와 같은 원핵생물의 세포는 하나의 염색체만을 갖고 있다. 그러나 진핵생물의 체세포는 생물 종마다 고유한 숫자의 염색체를 가지고 있으며, 그 수는 종마다 매우 다양하다. 하나의 세포 속에 들어 있는 DNA의 양을 **유전체(genome)**라고 하는데, 일반적으로 고등한 생물일수록 유전체의 크기가 커진다. 그러나 일부 동식물 세포는 사람 세포보다 훨씬 많은 양의 DNA를 가지고 있다.



〈그림 1-22〉 유전체 크기 반수체(n)인 상태에서 염기쌍 수를 센 것이다.

세포 속에 들어 있는 염색체는 세포 주기에 따라 그 형태와 길이가 다양하게 변한다. 세포가 분열을 준비하는 시기와 분열중인 시기의 염색체 모양과 크기는 매우 다르다. DNA가 자기 복제 또는 유전 정보의 발현을 위해서는 풀어야 하는 반면, 세포 분열시에는 이동하기 쉽게 길이가 짧아져야 한다. 따라서 DNA 분자는 세포 속에서 고도로 조직화되어 있다.

조사하기

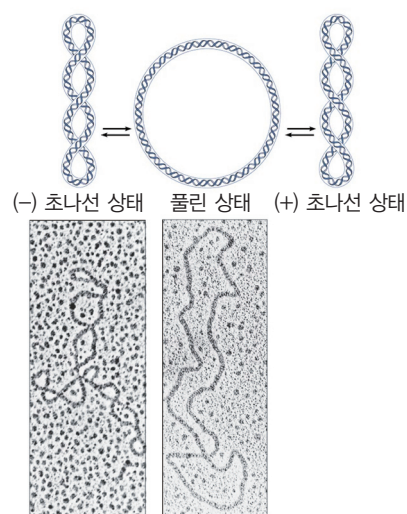
다양한 진핵생물의 염색체 수는 얼마나 되는지 조사해 보자.

원핵세포의 염색체 구조 원핵세포의 한 종류인 대장균 속에는 길이가 약 1,100 μm 인 DNA가 직경이 약 1~2 μm 인 세포 속에 약 4×10^6 개의 염기쌍으로 되어 있는 원형 DNA가 하나 들어 있다. 이 DNA는 작은 세포 속에 들어갈 수 있도록 특수한 단백질과 결합하여 고도로 접혀진 상태로 존재한다.

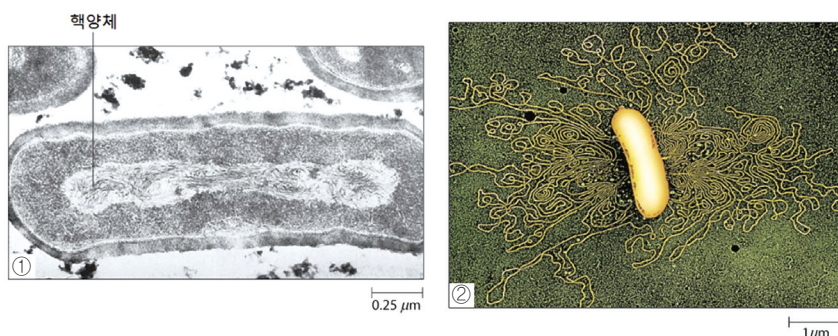
이렇게 응축된 DNA 분자는 50개 정도의 고리를 형성하고 있으며 각 고리에 해당되는 DNA는 이중 나선 자체가 더 꼬여 있는 초나선(supercoil) 상태를 하고 있다. 그리고 이 고리들은 조밀한 단백질을 함유한 스캐폴드(scaffold)라고

하는 구조에 결합되어 있다. 이와 같은 DNA의 초나선 상태는 바이러스에서 사람에게 이르기까지 모든 생물의 염색체 속에 존재하는 DNA의 중요한 형태이다. 특히 박테리아에서 이와 같은 초나선 형태의 DNA가 단백질 분자들과 결합한 형태를 **핵양체**라고 하며, 핵양체는 세포막에 결합된 형태로 세포질에 노출되어 있다.

일부 박테리아는 주염색체 DNA 이외에 **플라스미드(plasmid)**라고 하는 작은 원형의 DNA를 갖고 있다. 플라스미드 DNA는 박테리아 세포의 효소를 이용하여 복제되며, 박테리아가 분열할 때 모세포에서 딸세포로 전달된다. 플라스미드는 몇 종류의 단백질에 대한 유전자만 가지고 있으며, 보통 이 단백질은 박테리아 생존에 필수적인 것은 아니다. 그러나 종종 플라스미드는 항생제와 같은 약품에 대한 내성 유전자를 갖고 있거나 다른 박테리아를 죽일 수 있는 독성 물질에 대한 유전자도 갖고 있다.



〈그림 1-23〉 초나선 상태

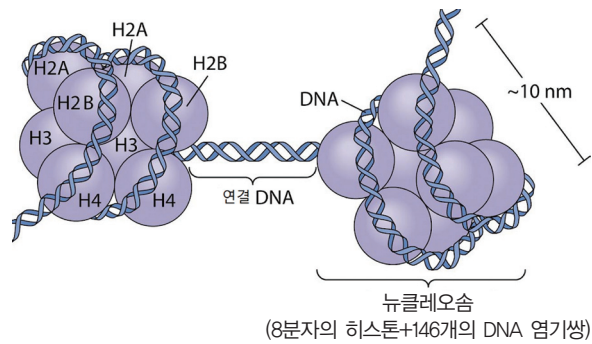


〈그림 1-24〉 대장균 ① 핵양체 부분 ② DNA가 세포 밖으로 방출된 모습

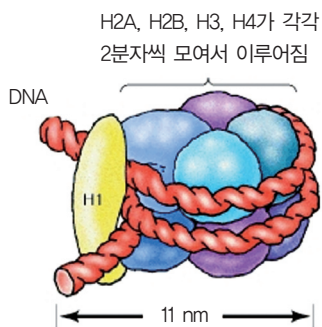
진핵세포의 염색체 구조 진핵세포에는 약 2 m의 DNA가 10 μm보다 작은 구형의 핵 속에 들어있다. 진핵세포의 간기 핵으로부터 분리된 염색질에서는 염색체의 형태를 볼 수 없고 대신 불규칙적으로 모여 있는 핵단백질이 관찰된다. 핵단백질은 많은 DNA와 소량의 RNA를 포함하고 있다. 이 단백질은 염색질의 중요한 구조적 역할을 하는 염기성의 히스톤 단백질과 DNA나 RNA합성 등에 관여하는 비히스톤 단백질로 되어 있다.

히스톤 단백질은 H1, H2A, H2B, H3, H4라고 하는 5종류의 단백질로 구성되어 있으며 이는 다른 생물 중에서도 매우 유사하다. 히스톤 단백질은 아미노산 중에서 아르기닌과 리신을 20~30% 함유하고 있어서 양전하를 띤 염기성 분자이다. 이런 전기적인 특성은 음전하를 띤고 있는 DNA와 결합하여 안정된 염색체 구조를 만드는데 중요한 역할을 한다.

1974년 콘버그(Roger Kornberg)는 염색질을 분리하여 전자 현미경으로 관찰한 결과 가는 실에 구슬을 매달아 놓은 것과 같은 형태를 확인하고 이 구슬 모양의 구조를 뉴클레오솜(nucleosome)이라고 명명하였다.



〈그림 I-25〉 뉴클레오솜



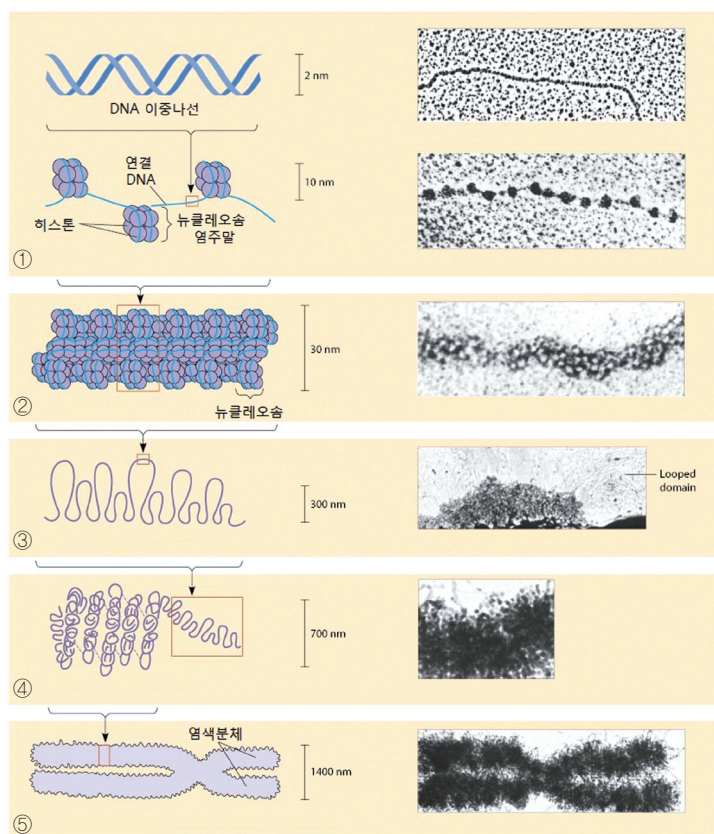
〈그림 I-26〉 크로마토솜 모형

뉴클레오솜은 H2A, H2B, H3, H4 이 각각 두 분자씩으로 구성된 히스톤 단백질이 핵심 입자를 구성하고 약 146개 염기쌍 길이의 DNA가 입자 주위를 감고 있는 모양을 하고 있다. 한편 H1 히스톤 단백질은 핵심 입자를 감는 DNA의 매듭 부위에 결합되어 있는 형태를 하고 있으며, 뉴클레오솜과 H1 히스톤 단백질을 합쳐 크로마토솜(chromatosome)이라고 한다.

세포 분열의 중기 염색체를 전자현미경으로 보면 단단하게 꼬여 있는 덩어리 또는 포개져 있는 섬유 형태를 볼 수 있으며, 이와 같은 염색질 섬유들은 평균 직경이 30 nm 정도이다. 이러한 구조가 어떻게 생기는지 정확히 알려져 있지는 않지만 뉴클레오솜들이 모여 일단 10 nm 정도의 뉴클레오솜 섬유를 만든 다음, 이 섬유가 다시 감겨 30 nm의 염색질 섬유를 구성하는 것으로 추정된다. 한편 이 염색질 섬유들이 세포 분열의 중기에서 관찰되는 염색체 구조로 어떻게 응축되는지는 알려져 있지 않다.

복제된 염색체의 염색분체는 중앙에 비 히스톤 단백질로 구성된 기본 골격이 있으며, 이 부위로부터 DNA는 매우 많은 수의 고리 모양으로 뻗어 나온다. 이런 상태의 구조가 세포 분열 중기에 관찰되는 염색체의 세부 구조로 생각된다.

진핵생물의 염색체들은 원핵세포와 다르게 여러 번 반복되는 일부 DNA 염기 배열을 갖고 있다. 이렇게 반복된 염기 배열들을 갖고 있는 DNA를 반복 DNA(repetitive DNA)라고 한다. 특히, 고도로 반복되어 있는 DNA 염기 배열이 포함되어 염색이 진하게 되는 염색질을 이질 염색질이라고 한다. 이질 염색질



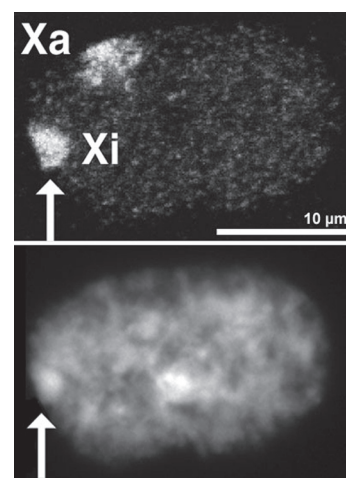
〈그림 1-27〉 진핵세포 염색체의 단계별 구조 ① 뉴클레오솜(염주형태) ② 30 nm 염색사 ③ 고리부위 ④ 이질염색질 ⑤ 고도로 응축된 분열하는 세포의 복제된 염색체

은 세포의 간기 동안에도 심하게 응축되어 있기 때문에 유전적으로 불활성 상태이며, 염색체의 동원체 또는 말단 부위에서 흔히 발견된다. 여자의 체세포가 갖고 있는 2개의 X 염색체 가운데 하나는 무작위로 발생 초기 단계에 이질 염색화됨으로써 유전적으로 불활성화 된다.

한편, 간기 염색질의 나머지 부분은 진정 염색질이라고 하며, 이질 염색질보다는 덜 응축되어 염색이 연하게 된다. 진정 염색질은 간기 동안 현미경에 의해서 거의 관찰되지 않지만 대부분의 유전자를 포함하고 있다.

창의적 생각

사람 여자의 경우, X 염색체 중 하나가 불활성화 되는 이유는 무엇인가?



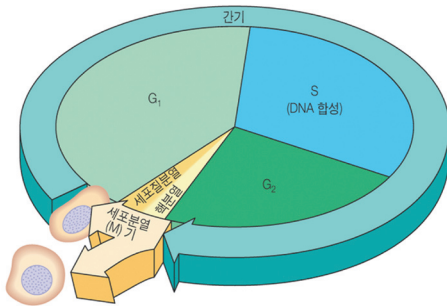
〈그림 1-28〉 여자의 세포 속에 들어 있는 불활성화된 X 염색체(바소체)

02

세포주기

학·습·목·표

- 세포주기가 무엇인지 설명할 수 있다.
- 세포주기 각 단계를 설명할 수 있다.



〈그림 1-29〉 세포주기는 크게 간기와 분열기로 나누어진다.

세포분열이 활발한 조직의 세포들은 일정한 기간을 두고 세포분열을 반복하며, 이 과정을 통해 만들어진 딸세포는 자라서 모세포가 되고 다시 분열을 하게 된다. 이와 같이 분열을 끝낸 딸세포가 자라서 다시 분열을 마칠 때까지를 세포주기로 한다.

세포주기는 세포가 분열하는 **분열기**와 **간기**로 구성된다. 간기는 분열기와 분열기 사이의 기간으로 〈그림 1-29〉에서 보듯이 세포주기의 대부분을 차지한다. 세포는 분열하기 전에 분열에 대비하여 유전 물질인 DNA의 양을 2

배로 늘린다. 간기는 세포가 분열을 하지는 않지만 물질 대사가 활발히 일어나고, 세포의 생장이 이루어지는 역동적인 시기이다. 염색체의 복제에 필요한 DNA의 합성은 간기 중간에 일어나며, 이 때를 중심으로 간기를 G₁기, S기, G₂기로 구분한다.

G₁기는 세포분열 후 DNA 합성이 일어나기 전까지의 기간으로 단백질이 합성되고 미토콘드리아나 리보솜 등의 세포 기관들의 수가 증가하면서 세포가 커지는 시기이다. 보통 분열하지 않는 세포는 G₁기에서 세포주기가 정지되어 있다. S기는 DNA가 합성되어 복제되는 시기이고, G₂기는 DNA가 복제된 후 세포분열을 준비하는 시기이다.

분열기(M)는 G₂기에 이어서 일어나며, 간기에 비해 매우 짧으며, 전기, 중기, 후기, 말기로 구분된다. 분열기에는 세포가 분열하여 두 개의 딸세포를 형성하고 간기에 합성한 DNA가 딸세포에 고르게 분배된다.

세포주기는 세포의 종류와 환경에 따라 달라진다. 사람의 경우, 성인이 된 후에 신경세포와 근육세포 등은 G₁기에서 S기로 진행되지 않기 때문에 더 이

상 세포분열이 일어나지 않는다. 그러나 초기 발생 단계의 배세포들은 세포 주기가 매우 빠르게 진행되며, 피부세포나 골수세포들은 성인이 된 후에도 세포 주기가 계속 진행되므로 세포분열을 계속 할 수 있다.

〈표 1-3〉 세포주기 시간의 비교

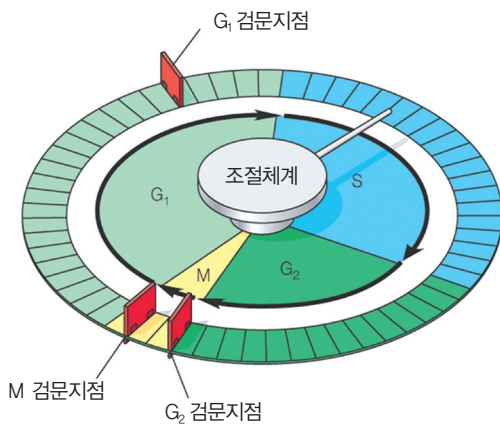
세포 종류	개구리의 초기 배 세포	효모세포	사람	
			위 상피세포	골수세포
세포주기(시간)	0.5	1.5~3	24	18

조사하기

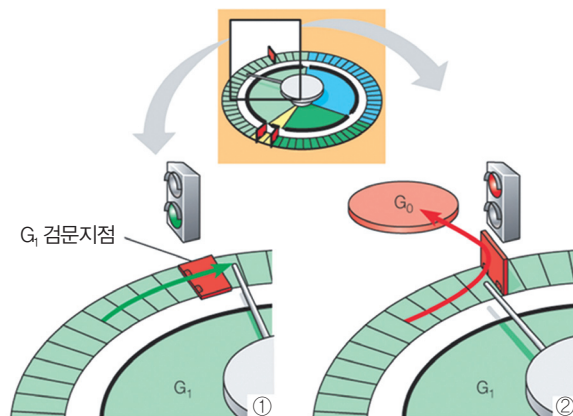
신경세포의 세포주기는 어떤 상태에 있으며, 분열하지 못하는 이유는 무엇일지 조사해 보자.

1) 세포주기의 조절

세포주기는 세포주기 조절 시스템에 의하여 조절된다. 아래 그림과 같이 세포 주기에는 검문지점이 존재하며, 이 검문지점은 세포주기의 진행과 정지를 결정해주는 부분으로 특히 G_1 지점이 가장 중요한 지점이다.



〈그림 1-30〉 세포주기 조절 시스템 세포주기의 조절 부위는 G_1 , G_2 , M 지점이 있는데, 가장 중요한 부위는 G_1 부위이다.

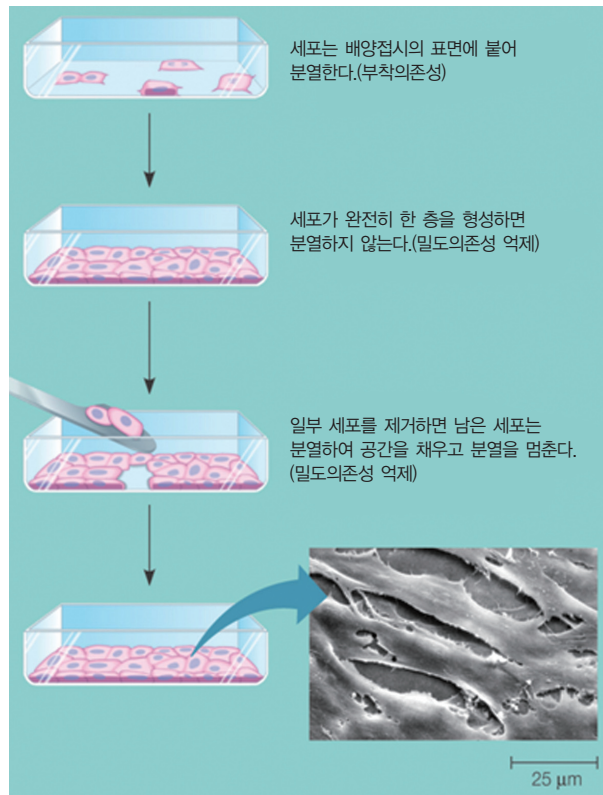


〈그림 1-31〉 G_1 검문지점의 조절 ① 출발 신호를 받으면 세포주기를 계속 진행한다. ② 출발 신호를 받지 않으면 세포주기를 벗어나 G_0 상태로 간다.

G_1 지점에서 출발 신호가 주어지면 대부분의 세포는 S와 G_2 , M기를 지나 세포 분열을 마친다. 그러나 G_1 지점에서 출발 신호가 주어지지 않으면 G_0 기라고

불리는 분열이 일어나지 않는 상태로 전환이 된다.

동물세포를 배양접시에서 배양하면 세포가 배양접시 바닥에 하나의 층을 이룰 때 까지 분열을 계속하다가 세포들이 서로 접촉하게 되면 분열을 멈춘다. 이러한 현상을 **밀도 의존성 억제**라고 한다. 이는 세포의 밀도가 높아질수록 세포분열 속도가 감소된다는 것을 의미한다. 그러나 한 층의 세포로 완전히 덮힌 배양접시에서 일부 세포를 제거하면 제거된 지역의 세포들이 다시 분열을 시작하여 빈 공간을 채울 때까지 세포분열이 지속된다. 이러한 밀도 의존성 억제는 피부에 상처가 난 경우, 상처가 난 부위에서만 세포분열이 일어나 새로운 세포로 상처가 치유되는 것과 유사하다.



〈그림 I-32〉 밀도 의존성 억제

또한 대부분의 동물세포는 **부착 의존성**이 있다. 세포가 분열하기 위해서는 배양용기의 표면이나 조직의 세포 외기질과 같은 기저층에 부착되어야만 한다.

창의적 생각

세포분열이 조절되는 과정에 참여하는 물질과 그 기작을 조사하고 이를 이용하여 암을 치료할 수 있는 가능성에 대해 생각해보자.

읽을거리 세포주기 조절과 암

세포주기 조절은 암 발생과 밀접한 관계가 있다. 세포가 손상되면 세포는 세포주기를 멈추고 손상을 복구하게 되는데 세포주기 조절 시스템에 이상이 생기면 손상이 복구되지 않은 채 세포주기가 계속돼 손상이 누적되고 결국 암으로 이어지게 된다.

서울대 생명과학부 설재홍 교수 연구팀은 2009년 네이처 셀 바이올로지(Nature Cell Biology)에 발표한 논문에서 세포분열기에 세포가 손상됐을 때 세포주기를 지연시켜 손상이 회복되도록 조절하는 단백질(Chfr)의 작용 메커니즘을 규명하였는데, 이 단백질이 암 발생과 전이에 중요한 역할을 한다는 사실을 밝혔다.

Chfr은 대부분 정상조직에서 발현되지만 암세포에서는 발현되지 않거나 발현이 되더라도 제대로 기능하지 못하는 형태로 존재하기 때문에 암과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 왔으나, 정확한 작용 메커니즘은 밝혀지지 않았었다. 이 연구 결과, Chfr은 특정 유전자의 발현에 관여하는 히스톤 단백질을 조절하는 'HDAC1'과 직접 상호작용을 하는 것으로 밝혀졌다. 세포 손상이 일어나면 Chfr이 활성화되고 그 결과 HDAC1의 분해가 촉진되면서 HDAC1에 의해 발현이 억제되는 것으로 알려진 세포주기 조절 단백질인 'p21'의 발현이 증가한다는 것이다.

연구진은 Chfr이 HDAC1의 분해를 촉진해 그 기능을 저해함으로써 세포주기 조절 유전자(p21)와 암 전이를 억제하는 유전자(KAI1, E-cadherin)의 발현을 증가시켜 암 발생과 전이를 억제한다는 사실을 규명했다. 설 교수는 "이 연구는 Chfr이 HDAC1과 상호작용해 손상된 세포의 세포주기를 조절, 암 발생과 전이에 관여하는 메커니즘을 밝힌 것"이라며 "Chfr 손상으로 생긴 암세포의 경우 Chfr 기능을 회복시켜 암 생성 및 전이를 막는 데 기여한다는 것을 바탕으로 암 치료제 개발에 중요한 단서를 제공한다는 데 큰 의미가 있다"고 말했다.

03

체세포분열

학·습·목·표

- 세포가 분열하는 이유를 설명할 수 있다.
- 체세포분열의 각 단계를 설명할 수 있다.

수정란에서 출발하여 하나의 생명체가 완성되는 과정에서 세포분열은 가장 기본적인 현상이며, 이 과정은 생명 현상의 기본적 특성인 생장, 생식, 분화의 바탕이 된다.

창의적 생각

우리 몸에서 세포분열이 갑자기 멈추고 세포가 커지지만 한다면 어떤 현상이 나타날까?

탐구 활동 2

세포분열이 필요한 이유?

세포분열은 왜 일어나야 하며, 그 이유는 무엇인지 생각해 보고 조원들과 함께 토의해 보자.

준비물

기구: 자, 면도날, 비커, 전자레인지

재료: 한천, 0.1M NaOH 용액, 페놀프탈레인 용액, 증류수

방법 및 절차

(1) 모듈별로 제시된 준비물을 이용해 세포 분열이 일어나야 하는 이유를 알아보기 위한 실험을 설계해보자.

(2) 왜 그렇게 설계했는가?

(3) 설계한 과정에 따라 실험을 실시하자.

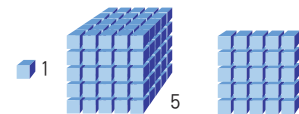
결과 및 고찰

(1) 자신이 설계한 실험 결과를 토대로 세포가 분열해야 하는 이유를 설명해보자.

세포 내에서 물질대사가 적절하게 일어나기 위해서는 세포의 크기가 적당해야 한다. 세포는 세포막을 통해 세포에 필요한 산소와 양분을 제공받고, 세포 내에서 만들어진 노폐물 역시 세포막을 통해 내보낸다. 세포막을 통과하는 물질의 양은 세포 표면적 대 부피의 비율에 의해 결정되기 때문에 세포의 크기는 물질의 교환에 중요하다.

세포의 전체 부피를 감당할 수 있을 만큼 표면적이 넓어야 하기 때문에 세포는 무작정 커질 수 없다. 길이가 2배 늘어나면 표면적은 4배 늘어나지만 부피는 8배 늘어나기 때문이다. 따라서 세포의 크기가 커지면 전체 부피에 필요한 산소와 양분의 공급, 노폐물의 배출에 차질이 생기므로 크기가 커지는 대신 분열이 일어나서 표면적 대 부피의 비를 크게 한다.

그러면, 세포분열은 어떤 과정을 거쳐 일어나는지 관찰하여 보자.



전체 표면적	6	150	750
전체 부피	1	125	125
표면적과 부피의 비율	6	1.2	6

〈그림 1-33〉 표면적과 부피의 비율

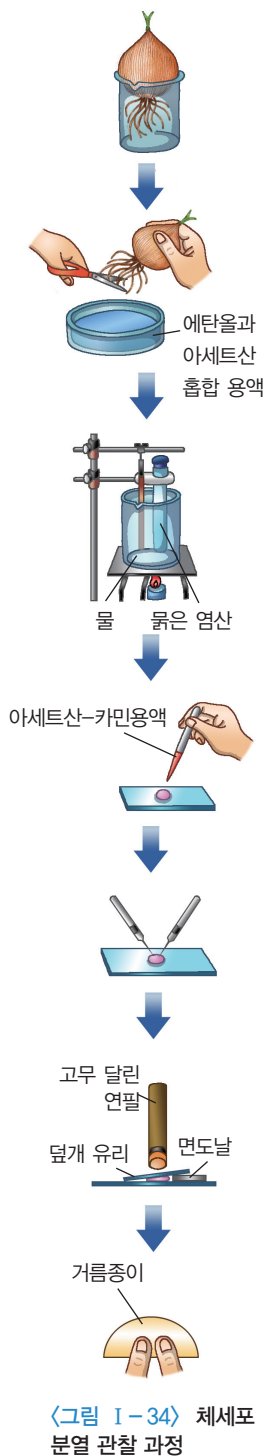
실험 1

체세포분열의 관찰

세포분열은 생물체의 생존에 필수적이다. 따라서 세포분열에 문제가 생기면 생물체의 생존에 치명적인 문제가 발생한다. 세포분열에는 어떤 단계들이 있어야 할지 생각해 보고, 각 단계에 문제가 생기면 어떤 문제가 생길지 추측해 보자.

준비물

기구: 현미경, 해부침, 페트리접시, 받침 유리, 덮개 유리, 거름종이, 항온수조, 거즈, 면도날, 온도계, 고무달린 연필, 성냥
 재료: 양파 뿌리, 1N HCl, 에탄올, 부탄올, 아세트산, 아세트산-카민, 카나다발삼, 이멀전 오일



방법 및 절차

양파 뿌리 고정

- (1) 유리잔이나 병에 물을 담고 양파의 끝이 물에 잠기도록 하여 뿌리가 내리도록 하자.
- (2) 뿌리의 길이가 1~2 cm 정도 되었을 때 뿌리의 끝으로부터 약 1 cm 를 절단하고 이것을 고정액(에탄올3 : 아세트산1)에 16~24시간 정도 고정하자.

조직의 해리 방법

- (1) 비커에 1N HCl을 넣고 55℃인 항온수조에 두어 55℃가 된 후, 고정 된 근단을 거즈에 싸서 넣고 8분간 방치하자.
- (2) 근단을 하나 골라내어 받침 유리 위에 올려놓고 면도날로 근단의 끝 으로부터 약 1 mm를 잘라낸 뒤 아세트산-카민 용액을 한 방울 떨어 뜨린 다음, 해부침 2개를 이용하여 잘게 찢자.
- (3) 잘게 찢은 근단 위에 덮개 유리를 기포가 생기지 않도록 주의하면서 가볍게 올려놓고 10분간 방치하자.
- (4) 10분이 지나면 고무가 달린 연필로 덮개 유리를 가볍게 두드려 세포 들이 잘 분산되도록 하자.
- (5) 거름종이를 덮개 유리 위에 덮고 엄지손가락으로 세게 눌러준 후 현 미경으로 관찰하자.

영구 표본 제작

- (1) 영구 표본을 만들 때는 부탄올과 아세트산을 1 : 1로 혼합한 용액 에 임시 표본을 거꾸로 넣어두어 덮개 유리를 받침 유리로부터 떨어뜨리자.
- (2) 받침 유리를 부탄올에 넣고 시료를 탈수시킨 후 카나다발삼으로 봉 입하자.

표본의 관찰

- (1) 저배율에서 분열하는 부분을 찾은 후에 고배율로 관찰한다.
- (2) 더 세밀한 관찰을 하기 위해서는 이물질 오일을 한 방울 떨어뜨리고 1000배로 관찰한다.

결과 및 논의

- (1) 관찰한 체세포분열의 모습을 각 시기별로 스케치하고 각 부분의 명칭을 기입하라.

심화

- (1) 임의의 세포 50개를 관찰하고 각 시기의 세포 수를 조사하여 다음 표를 완성하라.

구분	간기	전기	중기	후기	말기
관찰된 빈도 수					

- (2) 양파의 1회 분열에 소요되는 시간을 100분이라고 가정하고, (1)의 자료를 토대로 각 시기에 소요되는 시간은 얼마나 되는지 계산해 보자.

연구과제

- (1) 살아 있는 상태에서 세포분열 과정을 관찰하려면 어떤 과정이 필요하겠는가?

체세포분열은 하나의 모세포로부터 1회의 분열로 2개의 딸세포가 생성되는 과정으로 핵분열과 세포질분열 단계로 구성된다.

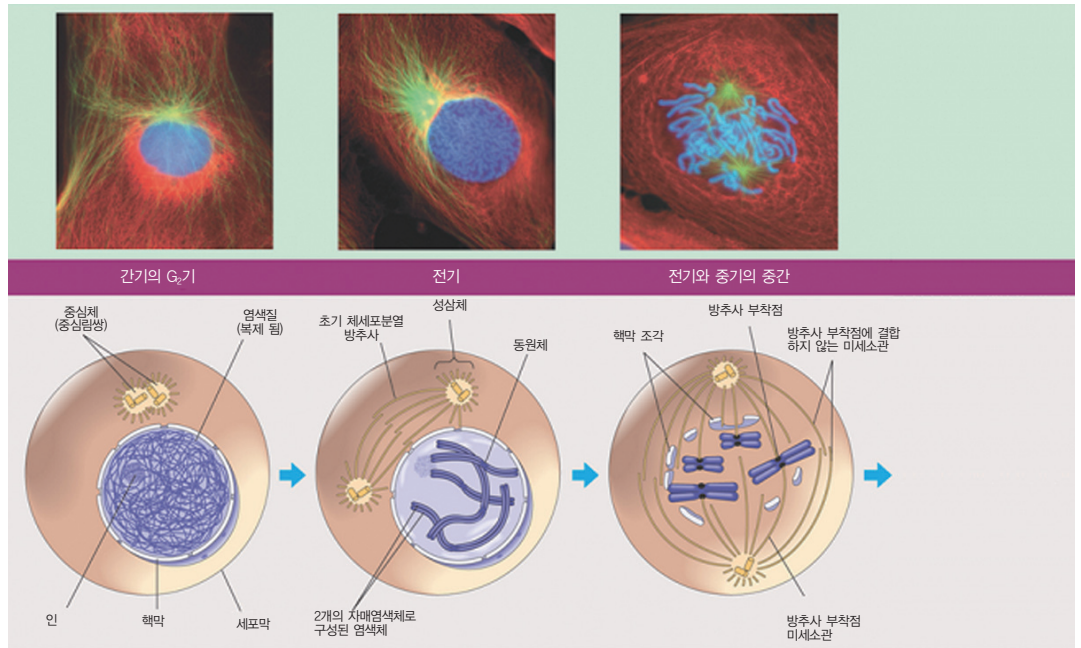
핵분열 단계는 전기, 중기, 후기, 말기의 4가지 소단계로 구분할 수 있으며, 소단계는 염색체의 형태와 배열양상 및 핵막의 존재 유무 등을 기준으로 구분한다.

전기에는 간기 동안 염색질로 풀려 있던 염색체가 응축되어 광학현미경으로 관찰이 가능하게 되며 인이 소실된다. 또한 중심체로부터 방추사가 형성된다.

핵막이 사라지면서 방추사가 염색체의 동원체에 부착하게 되어 이동을 준비하면서 중기가 시작된다. **중기**에는 염색체가 최대 응축되며 세포 중앙의 적도판에 배열된다. 이 시기가 염색체를 관찰하기에 가장 좋은 시기이다.

후기는 적도판에 배열되었던 염색체의 염색분체가 동원체에 연결된 방추사에 의해서 각각 양 극으로 이동하게 된다. 이렇게 분리된 이후에는 각각 독립된 염색체로 본다.

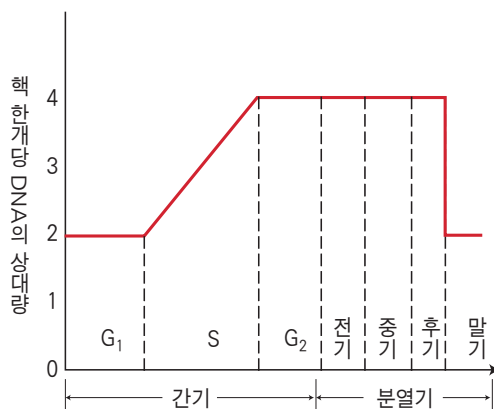
말기에는 양극에 도달한 염색체가 새로 형성되는 핵막에 둘러싸이면서 인이



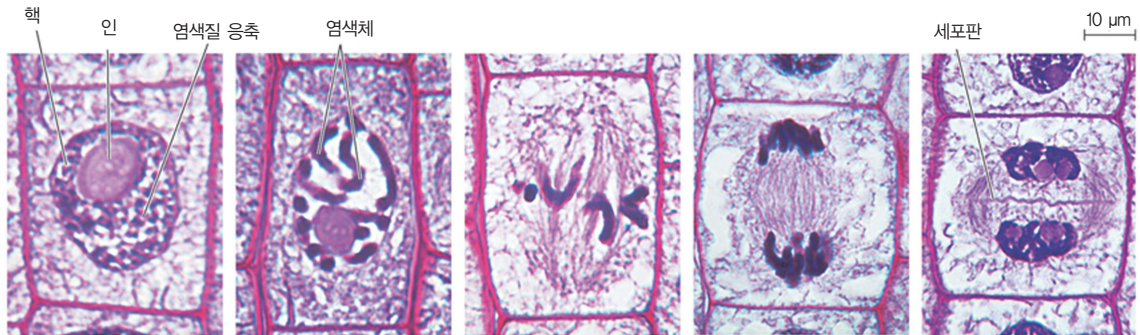
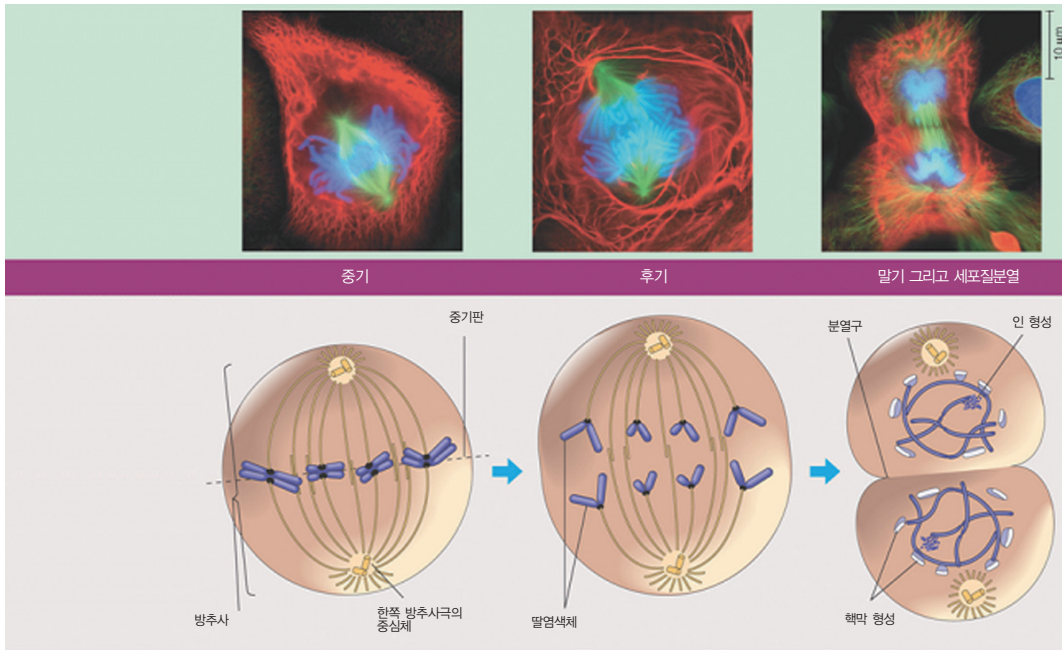
〈그림 I-35〉 동물세포의 체세포분열 과정 세포분열은 핵분열(전기, 중기, 후기, 말기)과 세포질분열로 나뉜다.

다시 나타난다. 응축되었던 염색체는 다시 풀려 염색사 상태가 되며 방추사가 사라지고 두 개의 핵막이 나타난다.

핵분열이 끝나고 나면 세포질이 둘로 나누어지는 **세포질분열**이 일어난다. 동물세포에서는 적도판 부근에서 세포막이 바깥쪽에서 안쪽으로 함입되어 들어가 세포질이 둘로 나뉘어 두 개의 딸세포를 형성한다. 식물의 경우에는 세포 중앙에 형성된 세포판이 바깥쪽으로 성장하면서 세포질을 둘로 분리하여 두 개의 딸세포를 형성한다.



〈그림 I-36〉 체세포분열에서의 DNA 양의 변화



- ① **전기:** 염색질이 응축되고 인이 소실되기 시작한다. 현미경상으로는 뚜렷하지 않지만 체세포분열 방추사가 형성되기 시작한다.
- ② **전중기:** 이제 염색체를 볼 수 있다. 각각은 2개의 동일한 자매염색분체로 구성되어 있다. 전중기의 뒷부분에서는 핵막의 분해가 일어날 것이다.
- ③ **중기:** 방추사가 완전해지며, 동원체에 미세소관이 결합된 염색체가 모두 중기판에 위치한다.
- ④ **후기:** 각 염색체의 염색분체가 분리됨. 방추사부착점 미세소관이 짧아짐에 따라 딸 염색체가 세포의 양끝으로 이동한다.
- ⑤ **말기:** 딸핵이 형성된다. 한편 세포질분열이 시작되는데, 세포질을 둘로 나눌 세포판이 모세포의 중앙에서 바깥쪽 방향으로 자라난다.

〈그림 I-37〉 식물세포의 체세포분열

조사하기

세포분열 후기에서 염색체가 양 극으로 이동할 때 미세소관은 동원체 쪽에서 짧아지는지, 극 쪽에서 짧아지는지 조사해 보자.

04

생식세포분열

학·습·목·표

- 감수분열의 개념을 설명할 수 있다.
- 감수분열의 각 단계를 설명할 수 있다.

유성 생식이란 암수 두 가지 배우자가 수정이라는 과정에 의해 합체하여 새로운 개체를 형성하는 방법을 말한다. 그러나 배우자 형성 과정에서 모세포의 염색체가 그대로 전달된다면 세대가 한번 바뀔 때마다 자손의 염색체는 부모가 가진 염색체의 2배로 증가하게 된다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방법이 감수분열이다.

조사하기

동물과 식물의 감수 분열은 어떻게 차이가 나며, 또한 동물의 정자와 난자가 형성되는 감수 분열은 어떤 차이가 있는지 조사해보자.

탐구 활동 ⑧

감수분열

세포분열 중에서 감수분열은 부모와 자손의 염색체 수가 같아지기 위해서 체세포분열과는 다른 분열이 일어나야 한다. 감수분열은 어떤 점에서 체세포분열과 달라야 하는지 추정해 보자.

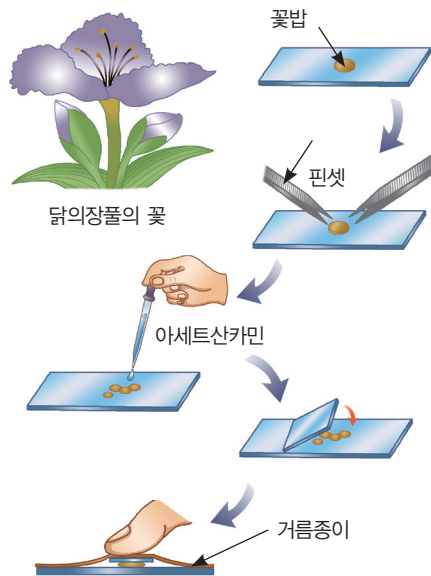
준비물

기구: 현미경, 해부기, 페트리접시, 덮개 유리, 받침 유리, 거름종이, 항온수조, 면도날, 온도계, 핀셋

재료: 닭의장풀의 꽃봉오리, 생쥐(수컷), 1N HCl, 에탄올, 부탄올, 아세트산, 아세트산 카민

방법 및 절차

식물의 감수분열 관찰



〈그림 1-38〉 닭의장풀 꽃밥 관찰 방법

- (1) 꽃이 피지 않은 닭의장풀의 꽃봉오리 중에서 크기가 3~4 mm 정도인 어린 것을 골라 꽃밥을 들어낸 후 받침 유리 위에 놓자.
- (2) 꽃밥을 핀셋으로 떨어뜨린 후 아세트산-카민액을 한 방울 떨어뜨리고 덮개 유리를 덮자.
- (3) 약 5분 경과 후 거름종이를 덮개 유리 위에 덮고 엄지손가락으로 압착하여 세포들이 잘 퍼지도록 하자.
- (4) 저배율에서 분열하는 부분을 찾은 후에 고배율로 관찰하자.
- (5) 더 세밀한 관찰을 하기 위해서는 이물질 오일을 한 방울 떨어뜨리고 1000배로 관찰하자.
- (6) 같은 꽃대의 위와 아래에서 관찰한 것보다 작거나 큰 꽃봉오리를 채취하자.
- (7) 마찬가지로 요령으로 꽃밥을 관찰하자.

동물의 감수분열 관찰

- (1) 생쥐의 정소를 떼어낸 후, 부정소를 제거하고 여러 조각으로 자른 다음 45% 아세트산에서 5분간 고정하자.

- (2) 한 조각을 받침 유리에 올려놓고 아세트산-카민 용액을 한 방울 떨어뜨리고 덮개 유리로 덮자.
- (3) 약 5분 경과 후 거름종이를 덮개 유리 위에 덮고 엄지손가락으로 압착하여 정소의 세포들이 잘 퍼지도록 하자.
- (4) 저배율에서 분열하는 부분을 찾은 후에 고배율로 관찰하자.
- (5) 더 세밀한 관찰을 하기 위해서는 이물질 오일을 한 방울 떨어뜨리고 1000배로 관찰하자.

결과 및 논의

- (1) 관찰한 결과를 각 시기별로 스케치하고, 각 부분의 명칭을 쓴다.
- (2) 닭의장풀과 생쥐의 반수체는 각각 염색체가 몇 개인가?

심화

- (1) 체세포분열과 마찬가지로 감수분열에서도 감수 제1분열을 하고 있는 100개의 세포 중에서 각 시기별로 나타나는 세포 수를 조사하여 아래 표에 작성한다.

구분	간기	전기	중기	후기	말기
관찰된 빈도 수					

관찰한 시기별 세포 수를 바탕으로 각 시기에 소요되는 시간은 얼마나 걸리는지 상대적인 시간을 추정해본다.

연구과제

- (1) 동물의 난자도 정자와 비슷한 감수분열 모습을 보이겠는가? 동물의 난자와 정자의 감수분열 과정을 조사, 비교해 보자.

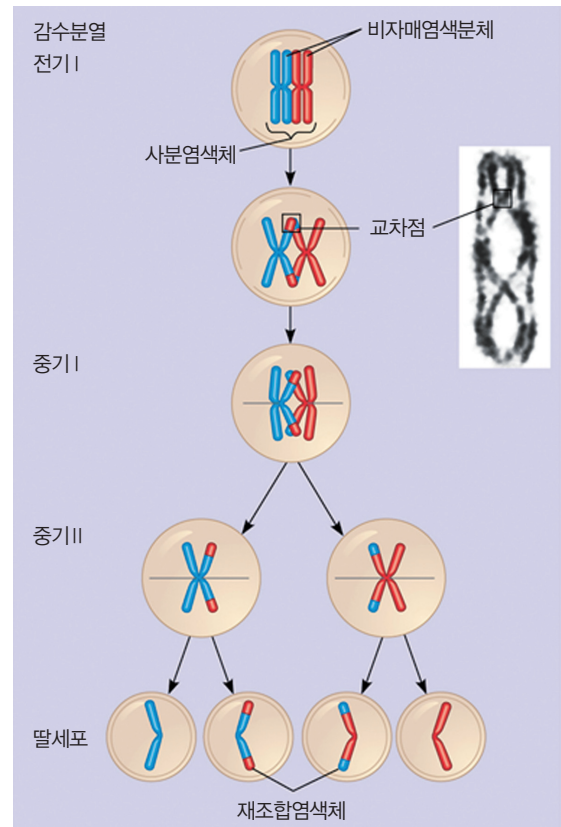
감수분열은 생식소에서 생식세포 형성시 일어나는 분열이며 연속된 2회의 분열로 4개의 딸세포가 만들어진다. 체세포분열과 비교할 때 감수분열 과정에서는 제1분열과 제2분열 사이에 간기가 거의 없거나 매우 짧다.

분열 과정의 전체적인 과정은 전기→중기→후기→말기(전기)→중기→후기→

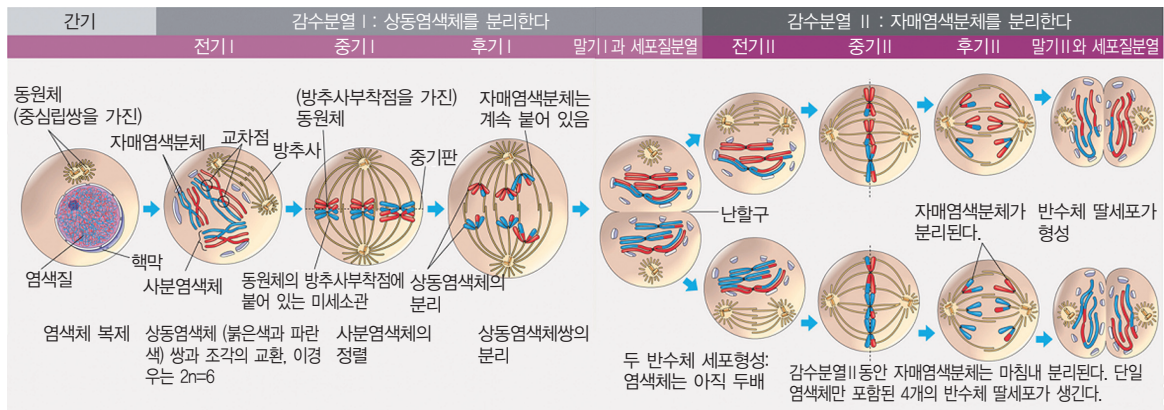
말기의 과정을 거친다. 가장 큰 특징으로는 제1분열의 전기와 중기에는 상동염색체가 서로 접합한 2가 염색체를 관찰할 수 있고, 제1분열 결과 염색체 수가 반으로 줄어든다.

감수분열 과정을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다. 감수분열은 제1분열과 제2분열로 이루어진다. 제1분열 전기에 들어가기 전에 세포의 염색체는 이미 복제되어 있는 상태이다. 제1분열 전기에는 두 개의 염색 분체가 동원체에 결합된 상태로 상동 염색체끼리 접합하여 2가 염색체를 형성한다. 2가 염색체는 4개의 염색분체가 붙어 있어 4분 염색체라고도 부른다. 이 시기에는 상동 염색체 사이에 교차가 일어난다. 중기에는 2가 염색체가 세포의 적도판에 배열되며, 후기에는 2가 염색체를 구성하는 상동 염색체가 분리되어 양 극으로 이동한다. 말기에는 상동 염색체가 양극에 도달하고 세포질 분열이 일어나 두 개의 딸세포가 만들어지며, 이 딸세포들의 염색체 수는 모세포의 절반이 된다.

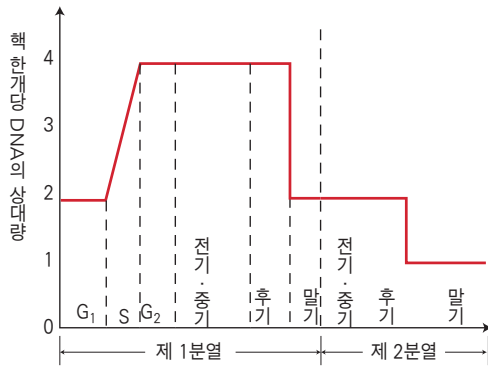
대부분의 생물들은 제1분열이 끝난 후 간기를 거치지 않고 곧바로 제2분열로 들어간다. 제2분열에서는 염색체나 DNA의 복제 없이 짧은 전기를 지나 염색체들이 적도판에 배열되는 중기로 들어간다. 후기에는 염색분체들이 분리되어 양 극으로 이동한다. 말기에는 세포 양극에 핵이 만들어지고, 세포질분열이 일어나



〈그림 I-39〉 감수분열 중 일어나는 교차



〈그림 I-40〉 감수분열 과정 감수분열은 두 번의 연속적인 분열에 의해 완성된다.



〈그림 I-41〉 감수분열에서의 DNA 량의 변화

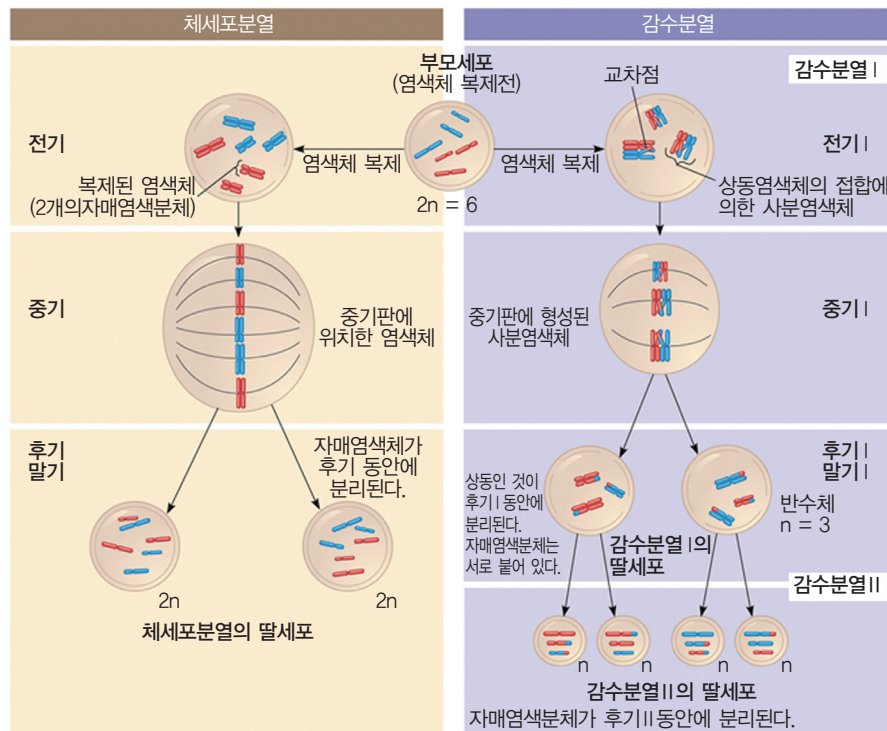
서 염색체 수가 체세포의 절반인 4개의 딸세포가 형성된다.

체세포분열에서 모세포와 딸세포의 염색체 수와 DNA 양이 동일하지만, 감수분열에서는 동일하지 않다. 감수분열에서는 두 번의 연속적인 분열을 통해 염색체수가 반으로 줄어든 4개의 생식세포를 만든다. 감수 제1

분열에서는 염색체수가 반감되고, 제2분열에서는 체세포분열과 같이 염색체의 수는 변하지 않고 DNA 양만 반감된다.

감수분열은 두 번 분열이 일어나므로 4개의 딸세포가 만들어진다. 감수분열 결과로 염색체 수는 반으로 줄어들어 딸세포는 반수체가 된다. 또한 감수 제1분열 전기에 유전자의 교차가 일어나기 때문에 부모와 딸세포는 유전적으로 달라진다. 교차로 인해 발생하는 부모와 딸세포 간의 유전적인 차이는 유전자의 새로운 조합을 만들어 주기 때문에 유전적인 다양성을 만들어주는 중요한 원인이 된다.

체세포분열과 감수분열의 차이를 비교해 보면 다음과 같다.



특성	체세포분열	감수분열
DNA 복제	체세포분열이 시작되기 전인 간기에 일어남	감수분열 I 이 시작되기 전인 간기에 일어남
분열 횟수	전가, 중기, 후기, 말기를 포함하는 한 번	각각의 전가, 중기, 후기, 말기를 포함하는 두 번
상동염색체의 접합	일어나지 않음	전기 I 에서 일어나 사분염색체를 형성하며 비자매염색체 사이의 교차와 관련됨
딸세포의 수와 유전적 구성	2개, 각각은 2배체($2n$), 유전적으로 부모세포와 동일	4개, 각각은 반수체(n), 부모세포와 비교하여 절반의 염색체 가짐, 유전적으로 부모세포 및 다른 딸세포와는 다름
동물 몸에서의 역할	접합자가 다세포 성체로 자랄 수 있게 해 줌: 성장과 조직의 회복을 위한 세포생성	배우자 형성: 염색체 수를 반으로 줄이고 배우자의 유전적 다양성을 제공

〈그림 1-42〉 체세포분열과 감수분열의 비교

창의적 생각

감수분열과 유성생식은 자손을 유지하는데 어떤 장점을 가지는지 생각해 보자.

- 세포 핵에 존재하는 실 모양의 구조물을 염색사라고 한다.
- 분열 중인 세포에 실 모양의 구조물이 복잡하게 얽혀 있는 것을 염색체라 한다.
- 염색사는 세포분열이 시작되면 응축되어 분열기의 전기에 두 개의 염색 분체로 보인다.
- 동원체는 세포가 분열할 때 염색분체가 분리될 수 있도록 방추사가 연결 되는 곳이다.
- 분열을 끝낸 딸세포가 자라서 다시 분열을 마칠 때까지를 세포주기라고 한다.
- 세포주기 조절은 세포주기 조절 시스템에 의해 조절된다.
- 체세포분열은 체세포가 분열하여 딸세포를 만드는 과정으로 분열 전후에 염색체 수 변화가 없다.
- 생식세포분열은 생식세포를 형성할 때 일어나는 세포분열이다. 2회의 연속 분열을 통해 4개의 딸세포를 형성하며 염색체 수와 DNA 양이 절반으로 줄어든다.

정리하기

1. 세포에 염색체가 상동 염색체로 존재하는 이유는 무엇인가?
2. 세포주기에 영향을 주는 분자 수준의 조절 메커니즘을 설명해 보시오.
3. 단세포 생물과 다세포 생물에서 세포분열은 각각 어떤 의미를 가지고 있는가?

논술 및 토의