

2024학년도 대학 신입학생 수시모집 일반전형

면접 및 구술고사 — 생명과학

문항·제시문 원문과 예시답안 재조판

문제 1-1. 원시 생명체의 진화

원시 생명체의 진화에 영향을 미친 환경 변화 요인 중 하나는 산소의 출현이다. 지구 대기 중 산소 농도의 증가는 원시 미생물 그룹 Snucoceaceae(분류단계-과)의 각 분류군 특성에 따라 종 다양성에 다르게 영향을 미쳤다.

아래 그림은 i) 지구가 탄생한 46억 년 전부터 현재까지 대기 중 산소 농도 변화와 생물의 종수 관계, ii) Snucoceaceae에 속하는 5개 속(분류단계) A~E의 종 수 변화, iii) 각 속의 계통 관계와 주요 특성을 보여 준다.

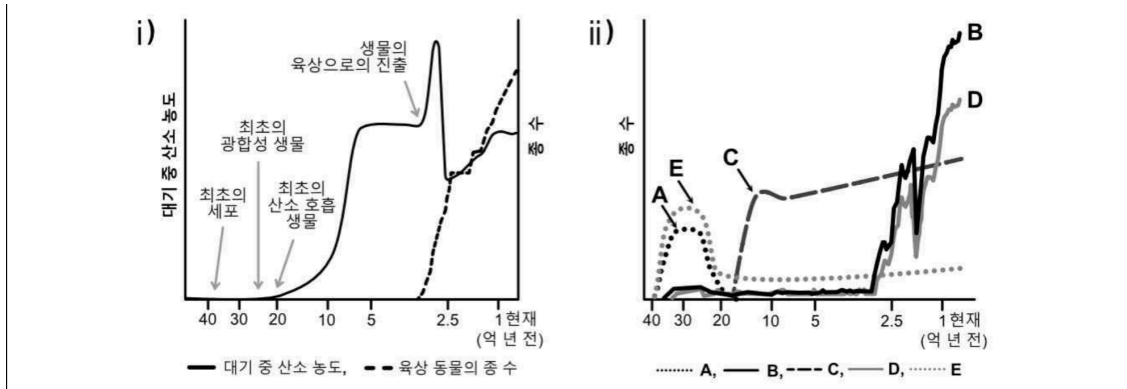


그림 i) 대기 중 산소 농도(실선)와 육상 동물의 종 수(점선)의 시간 변화.
그림 ii) 5개 속 A~E의 종 수 변화(A: 점선, B: 굵은 실선, C: 파선, D: 회색 실선, E: 가는 점선).

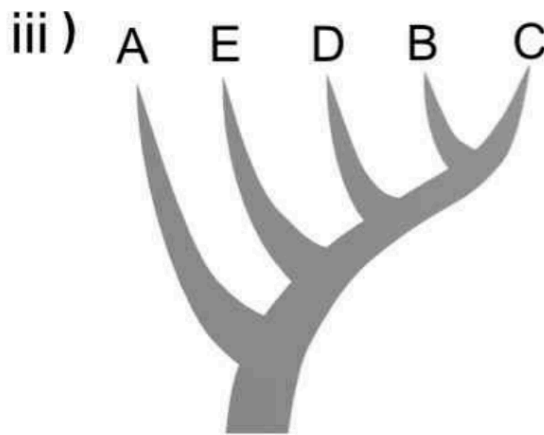


그림 iii) 5개 속 A, E, D, B, C의 계통수(진화적 유연관계).

아래 표는 각 속(A~E)의 주요 특성(산소 호흡, 영양 섭취 방식, 셀룰로스 분해, 산성·산소 노출에 대한 저항성, 단백질 분해, 서식지)을 정리한 것이다. 표의 ㉠~㉣는 문항에서 추론해야 할 미지 항목이다.

특성 / 속	A	B	C	D	E
산소 호흡	×	×	○	×	×

특성 / 속	A	B	C	D	E
영양 섭취 방식	독립영양	㉠	종속영양	종속영양	독립영양
셀룰로스 분해	×	○	○	×	×
산성에 대한 저항성	×	㉡	○	○	○
산소 노출에 대한 저항성	×	㉢	○	○	×
단백질 분해	○	㉣	○	○	○
서식지	바다 표층, 얕은 물	갯벌, 동물 장내	토양	갯벌, 동물 장내	바다 표층, 심해 열수구

(1) 그림 ii)에서 A, C, E의 종 수가 현재와 같이 변화한 이유를 각 속의 특성과 연관 지어 설명하시오.

(2) 그림 iii)에 제시된 B의 특성 ㉠~㉣를 추론하여 설명하고, 그림 i)에서 B의 종 수가 증가한 이유를 대기 중 산소 농도의 변화 및 새로운 생명체 출현과 연관 지어 설명하시오.

예시답안 — 문제 1-1

핵심 개념. 대기 중 산소 농도의 증가는 각 속이 지닌 특성(산소 호흡 여부, 산소·산성 저항성, 영양 방식, 서식지)에 따라 자연선택의 방향을 다르게 작용시켰다. 산소는 산소 호흡을 하지 못하는 혐기성 생물에게는 독성으로 작용하고(활성산소에 의한 손상), 산소 호흡을 할 수 있거나 산소에 저항성을 가진 생물에게는 유리하게 작용한다.

(1) A, C, E의 종 수 변화

- 속 **A**는 산소 호흡을 하지 못하고(×) 산소 노출에 대한 저항성도 없으며(×), 서식지가 “바다 표층·얕은 물”로 산소가 먼저 축적되는 환경이다. 따라서 대기·표층수의 산소 농도가 증가하기 시작한 초기(그림 ii의 20~30억 년 전 구간)에 잠시 번성했다가, 산소 농도가 더 높아지자 산소 독성을 견디지 못하고 종 수가 급격히 감소하여 사라졌다. → 산소 저항성 부재 + 산소가 먼저 축적되는 서식지 때문에 초기 증가 후 소멸.
- 속 **E**도 산소 호흡을 못하지만(×) 산소 노출에 저항성이 없다(×). 그러나 서식지가 “바다 표층·심해 열수구”로, 심해 열수구는 산소가 잘 도달하지 않는 혐기적 피난처(refugium)를 제공한다. 따라서 A와 비슷하게 산소 증가에 취약하지만, 심해라는 피난처 덕분에 A만큼 급격히 사라지지 않고 낮은 수준에서 명맥을 유지한다. → 산소 취약성은 A와 같으나 혐기적 서식지 확보로 완만한 변화.
- 속 **C**는 유일하게 산소 호흡을 하며(○), 산성·산소 노출 모두에 저항성이 있다(○, ○). 따라서 산소 농도가 높아질수록 산소 호흡을 통해 더 많은 에너지를 얻어 경쟁에서 유리해지고, 산소 농도가 크게 증가한 시점(그림 ii의 파선이 상승하는 구간)부터 종 수가 크게 증가하여 다양하게 분화하였다. → 산소 호흡 능력 + 산소·산성 저항성이 산소 증가 환경에서 강한 이점.

(2) B의 특성 ㉠~㉣ 추론과 종 수 증가

계통수(iii)에서 B는 C와 가장 가까운 유연관계(자매군)에 있고, 서식지가 “갯벌·동물 장내”이며 셀룰로스·단백질 분해 능력을 갖는다. 이를 근거로 미지 특성을 다음과 같이 추론한다.

- ㉠ **영양 섭취 방식 = 종속영양.** B는 스스로 유기물을 합성하는 독립영양의 근거(광합성·화학합성 관련 특성)가 없고, 동물 장내·갯벌에서 다른 생물이 만든 유기물(셀룰로스·단백질)을 분해해 이용한다. 셀룰로스 분해(○)·단백질 분해 능력을 갖는 점, C(종속영양)와 자매군인 점에서 종속영양으로 판단한다.
- ㉡ **산성에 대한 저항성 = ○.** 동물 장내(특히 위·소화관)는 강한 산성 환경이다. 이런 서식지에서 생존하려면 산성 저항성이 필요하므로 ○.
- ㉢ **산소 노출에 대한 저항성 = ○.** 갯벌·장내는 산소 농도가 변동하는 환경이고, 산소 농도가 증가한 시기 이후에도 종 수가 늘었으므로(그림 i·ii) 산소에 대한 저항성을 갖는 것으로 추론한다. ○.
- ㉣ **단백질 분해 = ○.** 동물 장내에서 단백질(먹이·숙주 유래)을 분해해 영양분으로 삼아야 하므로 ○.

B의 종 수 증가 이유. 대기 중 산소 농도가 증가하면서 산소 호흡을 하는 다세포 동물(육상 동물 포함)이 출현·번성하였다(그림 i의 점선 상승). 이들 동물의 몸속(장내)과 사체·배설물은 B에게 셀룰로스·단백질이 풍부한 새로운 서식지·먹이원을 제공한다. B는 산소·산성 저항성을 갖추어 이 환경에서 생존할 수 있으므로, 동물의 다양화와 함께 이용 가능한 서식지가 넓어져 종 수가 증가하였다. 즉 (i) 산소 증가에 견디는 저항성과 (ii) 산소 호흡 동물의 출현이 만든 새로운 생태적 지위가 결합하여 B의 적응방산이 일어났다.

문제 1-2. “해충나방” 개체군의 유전자풀 변화와 개체군 성장

“해충나방”은 유충일 때 잎을 섭취하여 나무에 직접적인 피해를 입힌다. 최근 해충나방이 존재하지 않던 여러 국가에 해충나방이 유입되어 생태계를 위협하고 있다.

국가 (가)에 자생하던 해충나방 개체군이 해충나방이 없던 국가 (나)와 (다)에 유입되어 새로운 개체군을 구성하였다고 가정하자. 각 국가에 서식하는 해충나방은 국가별로 100개 지역에서 1년간 채집하여 개체군의 형질 X에 대한 유전자풀을 조사하였다. 해충나방은 3가지 대립유전자 a, b, c에 의해 결정되는 형질 X를 가지고 있으며, 형질 X의 표현형은 A형, B형, C형으로 나타난다. (단, 대립유전자의 조합에 따른 형질 표현형 결정은 고려하지 않는다.)

아래 그림은 i) 국가별 개체군의 형질 X의 표현형 구성 비율, ii) 국가별 월평균 기온, iii) 표현형에 따른 성장 가능 온도 범위를 나타낸 것이다.

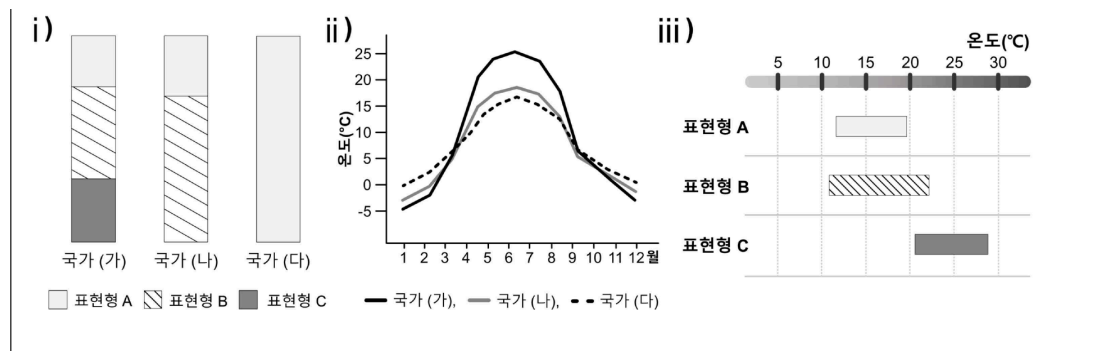
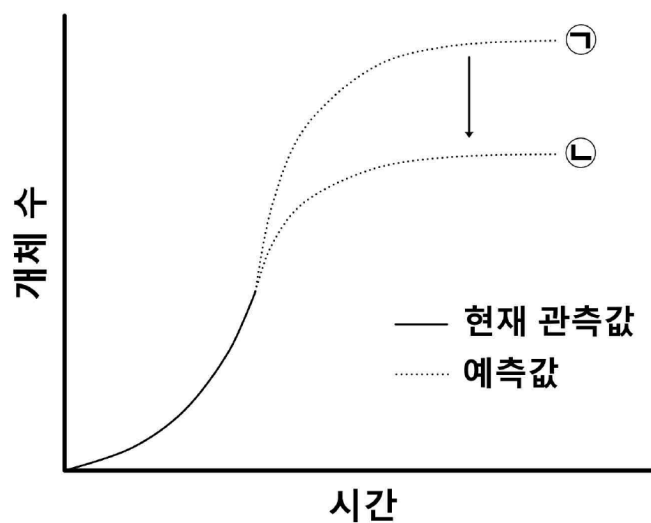


그림 i) 국가 (가)·(나)·(다) 개체군의 표현형 A·B·C 구성 비율.
그림 ii) 국가별 월평균 기온. 그림 iii) 표현형 A·B·C별 성장 가능 온도 범위.

(1) 국가 (나)와 (다)의 해충나방 개체군 유전자풀(형질) 요인을 각각 설명하시오.

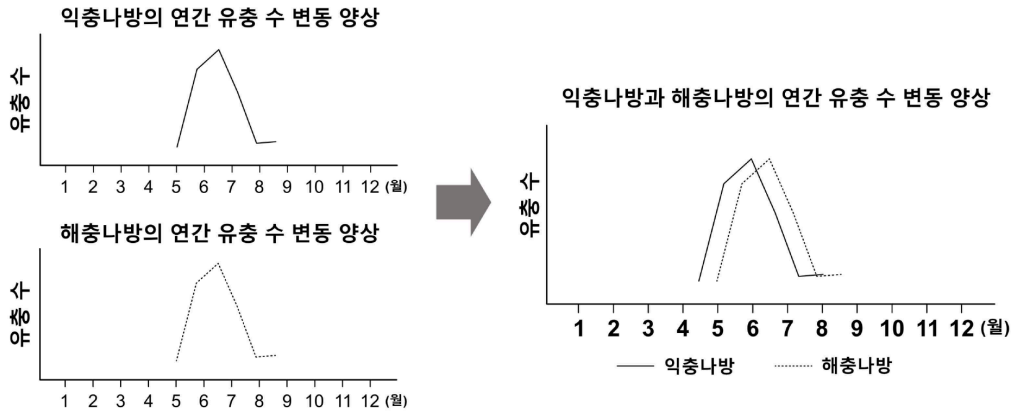
(2) 아래 그림은 국가 (다)에 유입된 해충나방 개체군의 초기 성장곡선과 이를 기반으로 예측한 성장곡선이다. 현재와 같은 초기 성장곡선이 앞으로 ㉠과 같이 변화할 것으로 예측되는 이유를 설명하시오. 그리고 예측한 성장곡선 ㉠을 ㉡으로 변화시킬 수 있는 방안을 제시해 보시오.



현재 관측값(실선)과 예측값(점선). ㉠: 유입 초기의 지수적 예측, ㉡: 환경저항이 작용한 로지스틱(S자) 곡선.

(3) 국가 (다)는 “익충나방”이 우점한 생태계였으며, 익충나방의 연간 유충 수 변동 양상은 아래 왼쪽 위 그림과 같았다. 그러나 해충나방 개체군이 유입됨에 따라 오른쪽 그림과 같이 익충나방의 연간 유충 수 변동 양상이 변화

하였다. 해충나방 개체군의 유입에 따라 익충나방의 유충 수 변동 양상이 변화한 이유를 설명하시오. (단, 익충나방과 해충나방은 서로 다른 종이지만 생태적 지위는 같고, 해충나방의 연간 유충 수 변동 양상은 아래 오른쪽 아래 그림과 같다.)



왼쪽: 유입 전 익충나방(실선)과 해충나방(점선)의 연간 유충 수 변동.
 오른쪽: 유입 후 익충나방·해충나방이 공존할 때의 연간 유충 수 변동 양상.

예시답안 — 문제 1-2

(1) 국가 (나)·(다)의 유전자풀 형성 요인

그림 i)을 보면 원 개체군인 국가 (가)는 표현형 A·B·C가 모두 존재하나, (나)는 A·B만(C 소실), (다)는 A만 존재한다. 유입은 (가) 집단의 일부만 이동한 것이므로 두 경우 모두 **창시자 효과(founder effect)** — 즉 소수 개체가 새 지역을 개척할 때 원집단과 대립유전자 빈도가 달라지는 **유전적 부동** — 이 1차 요인이다. 이후 각 국가의 기온(그림 ii)과 표현형별 성장 가능 온도(그림 iii)에 의한 **자연선택**이 유전자풀을 추가로 변화시킨다.

- **국가 (나) — A, B형 존재(C형 소실).** 유입 시 표본에 c 대립유전자가 적게 포함되었거나 우연히 소실된 창시자 효과가 작용하였다. 또한 (나)의 월평균 기온 범위가 C형의 성장 가능 온도대(약 20~30°C의 고온역)와 잘 맞지 않아 C형은 정착·번식하지 못하고, A형(저온~중온)·B형(중온역)이 생존에 유리하여 자연선택으로 A·B형이 유지되었다.
- **국가 (다) — A형만 존재.** 유입 표본에 a만 우세하게 포함된 강한 창시자 효과에 더해, (다)의 기온이 A형의 성장 가능 온도 범위(비교적 저온역)에만 부합하여 B·C형이 정착하지 못하고 도태되었다(자연선택). 소수 개체에서 시작한 만큼 이후 유전적 부동의 영향도 크다.

(요약: 두 국가 모두 “유입에 따른 창시자 효과(유전적 부동) + 국가별 기온에 의한 자연선택”의 결합. 유전자 흐름은 유입 자체가 (가)→(나)·(다)로의 gene flow에 해당한다.)

(2) 생장곡선이 ㉠으로 예측되는 이유와 ㉡으로 바꾸는 방안

㉠으로 예측되는 이유. 유입 초기에는 개체 수가 적고 먹이(잎)·공간 등 자원이 상대적으로 풍부하며 천적·경쟁자·질병 등 환경저항이 거의 없다. 이 시기에는 개체당 출생률이 사망률을 크게 웃돌아 개체군이 **기하급수적(지수) 생장(J자형)**을 하므로, 초기 관측값(실선)을 외삽하면 계속 가파르게 증가하는 ㉠으로 예측된다.

실제 자연에서는 개체 수가 늘수록 먹이 부족·서식 공간 제한·노폐물 축적·경쟁·천적·질병 등 **환경저항**이 커져 출생률은 낮아지고 사망률은 높아진다. 그 결과 생장률이 점차 감소하여 **환경수용력(K)** 부근에서 평형에 이르는 **로지스틱 생장(S자형)**으로 수렴한다. 문제의 예측 그림에서 ㉠보다 낮은 값에서 평평해지는 곡선이 ㉡에 해당한다.

㉠ → ㉡으로 낮추는 방안(환경저항 증대·환경수용력 감소).

- 천적·기생생물·병원체 등 **생물적 방제 요인**을 도입하여, 예를 들어 해충나방을 잡아먹는 포식자나 기생벌, 특이 병원균을 이용해 사망률을 높인다.
- 먹이 자원(기주 식물)·산란 장소를 제한하거나 개체를 직접 제거(포획·페로몬 트랩·불임화 방사)하여 출생률을 낮추고 K를 낮춘다.
- 이러한 밀도의존적 환경저항을 강화하면 평형 도달 개체 수 자체가 ㉡ 수준으로 내려간다.

(3) 해충나방 유입에 따른 익충나방 유충 수 변동 변화

익충나방과 해충나방은 **생태적 지위가 같은 서로 다른 종**이므로, 같은 먹이·서식 공간을 두고 **종간 경쟁**을 벌인다. 오른쪽 아래 그림에서 해충나방의 유충 발생 시기는 익충나방보다 조금 늦되 크게 겹친다.

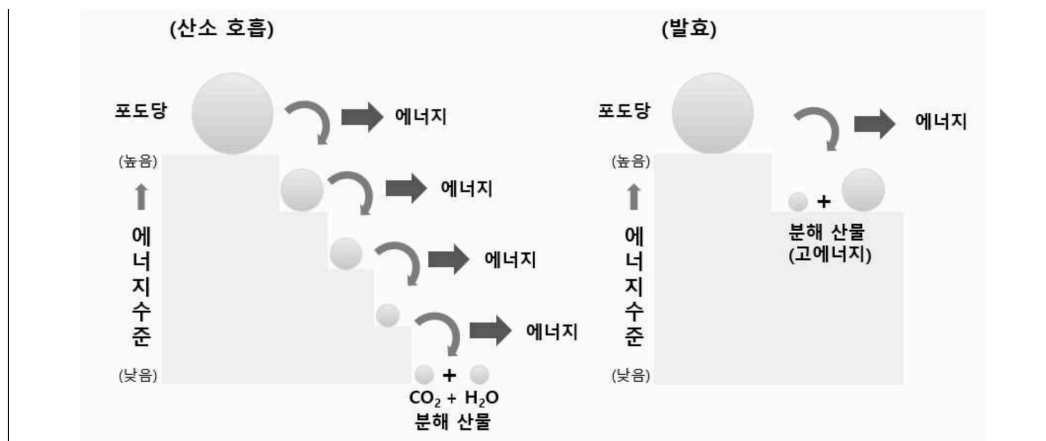
- 유입 전에는 익충나방이 자원을 독점하여 유충 수가 크게 증가하는 뚜렷한 봉우리를 보였다(왼쪽 위).
- 유입 후에는 발생 시기가 겹치는 해충나방과 한정된 자원(잎)을 나눠 쓰게 되어, 익충나방이 이용할 수 있는 자원이 줄고 경쟁에서 밀린다. 그 결과 익충나방 유충 수의 봉우리가 낮아지고(개체 수 감소), 해충나방과의 경쟁을 피하는 방향으로 발생 시기가 다소 앞당겨지거나 폭이 좁아지는 등 변동 양상이 바뀐다(오른쪽 합성 그림에서 익충나방 곡선이 해충나방보다 먼저·낮게 나타남).

즉, 생태적 지위가 같은 해충나방의 유입이 **경쟁적 배타·자원 분할**을 일으켜 익충나방의 유충 수 최대치를 감소시키고 발생 시기 분포를 변화시켰다.

문제 2. 세포 호흡과 발효

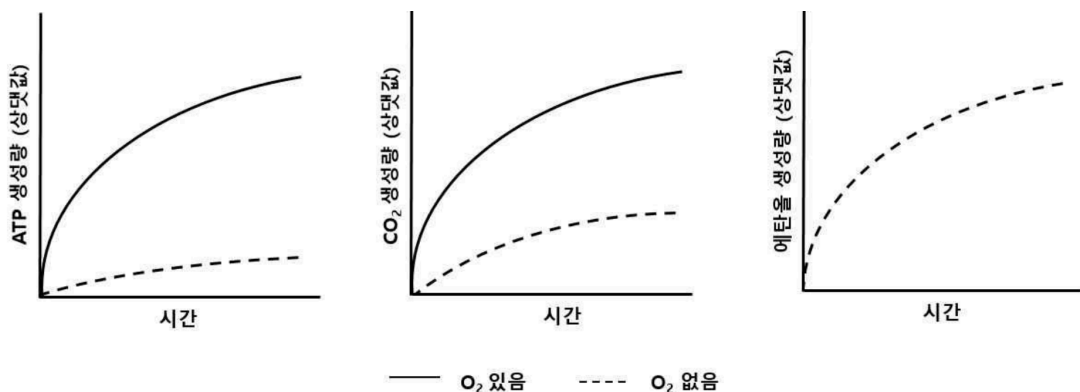
생물은 유기물 분해를 통하여 생명 활동에 필요한 에너지를 얻는다. 산소를 이용한 세포 호흡(산소 호흡)에서는 해당 과정을 통해 세포질에서 포도당이 피루브산으로 분해되고, 미토콘드리아 기질로 들어와 TCA 회로를 통해 CO_2 로 완전히 분해된다. 이러한 과정에서 방출된 고에너지 전자는 미토콘드리아 내막의 전자 전달계를 거쳐 산소에 전해져 H_2O 로 변환되고, 최종적으로 산화적 인산화를 통해 다량의 ATP가 생성된다.

효모나 일부 미생물은 산소가 없는 상태에서 전자 전달계를 거치지 않고 해당 과정을 통해서만 ATP를 생성하는데, 이를 발효라고 한다. 알코올 발효, 젖산 발효 등으로 구분된다. 발효 과정을 통해서서는 세포 호흡에 비해 적은 양의 ATP가 생성되며 포도당이 CO_2 와 H_2O 로 완전히 분해되지는 않는다.



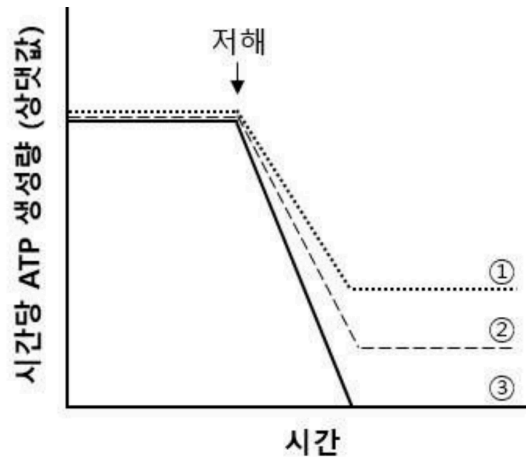
산소 호흡(왼쪽)은 포도당의 에너지를 여러 단계로 조금씩 방출하여 다량의 ATP를 얻고 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 로 완전 분해한다. 발효(오른쪽)는 해당 과정만 거쳐 소량의 에너지를 얻으며 고에너지 분해 산물이 남는다.

2-1. 아래 그림은 산소가 있는 조건과 없는 조건에서 효모가 생성하는 ATP, CO_2 , 에탄올의 양을 상대적으로 나타낸 것이다. 산소 존재 유무에 따라 ATP와 CO_2 , 에탄올의 차이가 나는 이유를 설명하시오. (단, 세포 호흡과 발효 과정에서 생성된 ATP, CO_2 , 에탄올로 국한한다.)



효모의 ATP· CO_2 ·에탄올 생성량(상대값)의 시간 변화. 실선: O_2 있음, 점선: O_2 없음.

2-2. 아래 그림은 산소가 있는 조건에서 배양하는 효모의 TCA 회로, 전자 전달, 산화적 인산화 과정을 각각 저해했을 때, 시간당 ATP 생성량의 변화를 보여주는 것이다. ①~③은 TCA 회로, 전자 전달, 산화적 인산화 과정을 저해했을 때의 결과를 순서 없이 나타낸 것이다(전자 전달 저해는 전자 전달계를 통한 전자의 흐름을 저해하고, 산화적 인산화 과정 저해는 미토콘드리아 내막을 경계로 한 H^+ 의 농도 기울기가 형성되지 못하도록 한다). ①~③의 결과는 각각 어떤 과정을 저해했을 때 나타나는 양상인지 추론하고, 그 근거를 ATP 생성 과정과 연관 지어 설명하시오.



저해 시점 이후 시간당 ATP 생성량(상댓값)의 변화. ①·②·③은 저해 후 도달하는 ATP 수준이 서로 다르다.

2-3. 알코올 발효와 젖산 발효에서는 해당 과정을 통해 포도당으로부터 분해된 피루브산이 기질로 사용된다.

(1) 알코올 발효와 젖산 발효의 차이점을 설명하시오.

(2) 급격한 운동을 할 때, 사람의 근육세포에서 일어나는 발효는 무엇이며, 이러한 발효를 통해 얻는 이점을 설명하시오.

예시답안 — 문제 2

핵심 수치. 포도당 1분자당 산소 호흡은 이론상 약 30~32 ATP(해당 2 + TCA·산화적 인산화 다수)를 만들고, 발효는 해당 과정의 2 ATP만 순생산한다. 발효에서 NADH는 전자 전달계로 가지 못하므로 피루브산을 에탄올(효모)이나 젖산(동물 근육)으로 환원시켜 NAD⁺를 재생하고 해당 과정을 지속시킨다.

2-1 O₂ 유무에 따른 ATP·CO₂·에탄올 차이

- **ATP.** O₂ 있음(실선)이 훨씬 많다. 산소가 있으면 해당 과정에 더해 TCA 회로·전자 전달·산화적 인산화가 모두 작동하여 포도당당 30여 개의 ATP를 얻는다. O₂ 없음(점선)은 알코올 발효로 해당 과정의 2 ATP만 얻으므로 생성량이 낮고 완만하다.
- **CO₂.** O₂ 있음이 더 많다. 산소 호흡에서는 피루브산이 TCA 회로에서 CO₂로 완전히 분해되어 다량의 CO₂가 나온다. 알코올 발효에서도 피루브산 → 아세트알데하이드 단계에서 CO₂가 나오지만(포도당당 2 CO₂) TCA 회로가 없어 그 양이 적다. 따라서 O₂ 없음의 CO₂는 O₂ 있음보다 적다(0은 아님).
- **에탄올.** O₂ 없음에서만 생성된다(점선만 증가). 에탄올은 알코올 발효의 산물로, 산소가 없을 때 NAD⁺를 재생하기 위해 아세트알데하이드를 환원해 만든다. 산소가 있으면 발효가 억제되어(NADH가 전자 전달계로 감) 에탄올이 거의 만들어지지 않는다(≈0).

2-2 ①·②·③의 저해 과정 추론

저해 후 도달하는 ATP 생성량이 높을수록 “덜 상류(하류에 가까운)”를 막은 것이고, 낮을수록 더 많은 ATP 생성 단계를 함께 막은 것이다. 세 저해의 파급 범위는 다음과 같다.

- **TCA 회로 저해** → TCA에서 나오는 NADH·FADH₂ 공급이 끊겨 전자 전달·산화적 인산화도 함께 멈춘다. 남은 ATP 생성은 해당 과정(2 ATP)뿐이지만, 이 저해는 산소 호흡 ATP 생성의 가장 상류를 막아 파급이 가장 크다.
- **전자 전달 저해** → 전자가 전달계를 흐르지 못해 H⁺ 기울기가 형성되지 않고 산화적 인산화가 멈춘다. TCA 회로도 NAD⁺·FAD 재생이 막혀 곧 정체된다.
- **산화적 인산화 저해(H⁺ 기울기 형성 차단)** → ATP 합성효소를 통한 ATP 생산만 직접 막는다. 다만 이 문제의 정의대로 H⁺ 기울기가 “형성되지 못하게” 하면 전자 전달과 TCA에서 얻는 기질 수준 ATP·NADH 재생은 부분적으로 남을 수 있어, 세 저해 중 ATP가 가장 덜 떨어진다.

따라서 저해 후 ATP 수준이 높은 것부터 ① > ② > ③ 순이므로:

- ① = 산화적 인산화 과정 저해 (가장 하류만 차단 → ATP가 가장 덜 감소).
- ② = 전자 전달 저해 (전자 전달과 그에 의존한 산화적 인산화가 함께 멈춤 → 중간).
- ③ = TCA 회로 저해 (NADH·FADH₂ 공급원 자체가 끊겨 전자 전달·산화적 인산화까지 연쇄 정지 → ATP가 거의 해당 과정 수준까지 최저).

근거: ATP 생성은 “해당 → TCA → 전자 전달 → 산화적 인산화”의 순차 흐름이므로, 더 상류를 막을수록 하류 전체가 멈춰 잔여 ATP가 낮아진다. 세 곡선의 최종 높이 순서로 저해 지점을 역추론할 수 있다.

2-3 발효의 종류와 근육 발효의 이점

(1) 알코올 발효 vs 젖산 발효. 두 발효 모두 해당 과정의 2 ATP만 생산하고 NADH로 피루브산을 처리해 NAD⁺를 재생한다는 점은 같다. 차이는 최종 산물과 경로다.

- **알코올 발효 (효모·일부 미생물):** 피루브산 → (CO₂ 방출) → 아세트알데하이드 → (NADH 산화) → 에탄올. CO₂가 발생하고 최종 산물은 에탄올이다.
- **젖산 발효 (동물 근육·젖산균):** 피루브산이 곧바로 NADH에 의해 환원되어 젖산이 된다. CO₂가 발생하지 않고 최종 산물은 젖산이다.

(2) 근육세포의 발효와 이점. 급격한 운동 시 산소 공급이 부족한 근육세포에서는 젖산 발효가 일어난다. 이점은, 전자 전달계를 쓰지 못하는 무산소 조건에서도 NADH를 NAD⁺로 재생하여 해당 과정을 계속 돌릴 수 있다는 것이다. 그 덕분에 산소 공급이 근육의 에너지 요구를 따라가지 못하는 순간에도 (비록 소량이지만) 빠르게 ATP를 계속 공급받아 강한 근수축을 지속할 수 있다.