



KAIST

화학

해설편

수시 입학전형 면접 및 구술고사 기출 문항집

2019~2026 · 28문항 (8개년) · 전 학년도 예시답안·채점 기준 수록

목차

2026학년도

문제 1	미지 원소의 추론 · 산화 환원 반응 · 동소체	5
문제 2	반응 속도식 · 1차 반응과 반감기 · 연대 측정	7

2025학년도

문제 1	반응 속도와 촉매 · 반감기	12
문제 2	인체 구성 원소 · 전자 배치, 전기 음성도, 결합 에너지	15

2024학년도

문제 1	화학 평형과 기체의 압력	20
문제 2	수소 생성 반응과 에너지	22

2023학년도

문제 9	화학 반응식과 이상 기체의 압력	27
문제 10	양자수와 전자 배치 · 수산화물의 결합과 액성	30
문제 11	화학 평형 상수와 분자식의 결정	32
문제 12	반응 속도와 반감기 · 반응 엔탈피 · 전기 분해	34

2022학년도

문제 1	날숨 속 이산화 탄소와 탄산의 이온화 상수	38
문제 2	삼투압과 몰 농도	39
문제 3	이산화 탄소의 전기화학적 환원과 분자 구조	40
문제 4	기체 반응의 양적 관계와 질량 보존	42
문제 5	산화·환원 반응과 제철	44
문제 6	중화 반응과 약산의 이온화 상수	46

2021학년도

문제 1	상평형 그림과 삼중점	50
문제 2	광합성 · 결합 에너지와 반응 엔탈피	52
문제 3	약산의 이온화 평형 · 완충 용액 · pH	54
문제 4	화학 평형의 이동 · 르샤틀리에 원리	57
문제 5	총괄성 · 삼투압 · 분자량 결정	58
문제 6	수소 연료 전지 · 헤스의 법칙 · 최대 전기에너지	60

2020학년도

문제 1	기체의 확산 속도와 화학 평형	63
문제 2	동위원소와 분자량 분포	64
문제 3	물의 전기분해와 삼투압	65

2019학년도

문제 1	2차원 세계의 오비탈과 이온화 에너지의 주기성	69
문제 2	가수 분해 반응 속도와 활성화 에너지	70
문제 3	일산화탄소의 완전 연소 후 용기 내부의 압력	71

2026학년도 · 해설편

문제 1 미지 원소의 추론 · 산화 환원 반응 · 동소체
문제 2 반응 속도식 · 1차 반응과 반감기 · 연대 측정

단원 물질의 구조 · 평형·반응 속도 · 산·염기·산화환원
핵심 개념 산화 환원 반응, 화학 반응에서의 양적 관계, 아보가드로 법칙, 탄소 동소체, 반응
 속도식, 1차 반응과 반감기
문항 수 2문항 (소문항 6개) · 10점

II. 예시답안

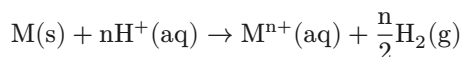
문제 1 미지 원소의 추론 · 산화 환원 반응 · 동소체

양적 관계 · 산화수 · 탄소 동소체

(1) 시료 A = 마그네슘 Mg (원자량 24, 원자 번호 12), 기체 B = 수소 H₂

(a) (나)로 A가 금속임을 정한다 — BTB 지시약은 산성에서 노란색, 중성에서 초록색, 염기성에서 파란색을 띤다. A의 산화물 수용액이 파란색이므로 이 산화물은 **염기성 산화물**이다. 비금속 산화물(CO₂, SO₂ 등)은 물에 녹아 산성을 띠고 금속 산화물만 염기성을 띠므로, A는 금속이다. 또 그 산화물이 흰색 가루라는 점도 MgO, CaO 같은 2족 금속 산화물의 특징과 맞는다.

(b) (가)로 기체 B를 정한다 — 이온화 경향이 수소보다 큰 금속은 묽은 염산에 녹으면서 염산의 H⁺를 환원시킨다.



따라서 발생하는 기체 B는 **수소 H₂**이다.

(c) 발생한 기체의 몰수 — 상온·상압에서 1몰이 24 L = 24000 mL이므로

$$n(H_2) = \frac{60 \text{ mL}}{24000 \text{ mL/mol}} = 2.5 \times 10^{-3} \text{ mol} = 2.5 \text{ mmol}$$

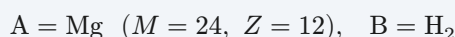
(d) 원자가를 미지수로 두고 원자량을 구한다 — A의 원자가(내놓는 전자 수)를 n 이라 하면 (b)의 반응식에서 금속 1몰 당 수소 $n/2$ 몰이 나오므로

$$n(A) = \frac{2}{n} \times 2.5 \text{ mmol} = \frac{5}{n} \text{ mmol}, \quad M_A = \frac{60 \text{ mg}}{5/n \text{ mmol}} = 12n \text{ g/mol}$$

한편 제시문에서 **평균 원자량 = 원자 번호의 두 배**이므로 원자 번호는 $Z = M_A/2 = 6n$ 이다. 원자가 n 은 정수이므로 경우를 모두 따져 보면 다음과 같다.

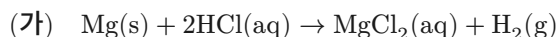
원자가 n	염산과의 반응	원자량 $12n$	원자 번호 $6n$	판정
$n = 1$	$2A + 2HCl \rightarrow 2ACl + H_2$	12	$6 \rightarrow C$	탄소는 비금속이고 원자가가 4이며 염산과 반응하지 않는다 → 모순
$n = 2$	$A + 2HCl \rightarrow ACl_2 + H_2$	24	$12 \rightarrow Mg$	2족 금속이므로 원자가가 실제로 2 → 일치
$n = 3$	$2A + 6HCl \rightarrow 2ACl_3 + 3H_2$	36	$18 \rightarrow Ar$	18족 비활성 기체로 금속도 아니고 반응도 하지 않는다 → 모순

세 경우 가운데 (나)의 “금속”이라는 조건과 원자가가 동시에 들어맞는 것은 $n = 2$ 뿐이다.



되짚어 보면 $n(Mg) = 60 \text{ mg} / 24 \text{ g/mol} = 2.5 \text{ mmol}$ 이므로 H₂ 도 2.5 mmol, 부피로는 $2.5 \times 10^{-3} \times 24000 = 60 \text{ mL}$ 로 관찰값과 일치한다.

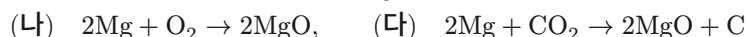
(e) 세 실험이 모두 Mg 로 설명되는지 확인 — 얻은 답을 되짚으면



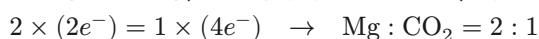
(나) $2Mg(s) + O_2(g) \rightarrow 2MgO(s)$ (흰색 가루), $MgO(s) + H_2O(l) \rightarrow Mg(OH)_2(aq)$ (염기성 → BTB 파란색)이고, (다)의 **밝은 백색광**은 마그네슘 연소의 대표적 특징이다. 마그네슘은 연소 온도가 매우 높아 이산화탄소 속에서도 계속 탈 수 있으며, 이때 흰색 MgO 와 검은색 탄소 가루가 함께 남는다. 세 실험이 모두 모순 없이 설명되므로 A는 마그네슘이다.

(2) (나)의 흰색 가루 = MgO, (다)의 흰색 가루 = MgO — (다)가 일어나는 까닭은 Mg 이 C 보다 산소와 결합하려는 경향(산화되기 쉬운 정도)이 훨씬 크기 때문이다

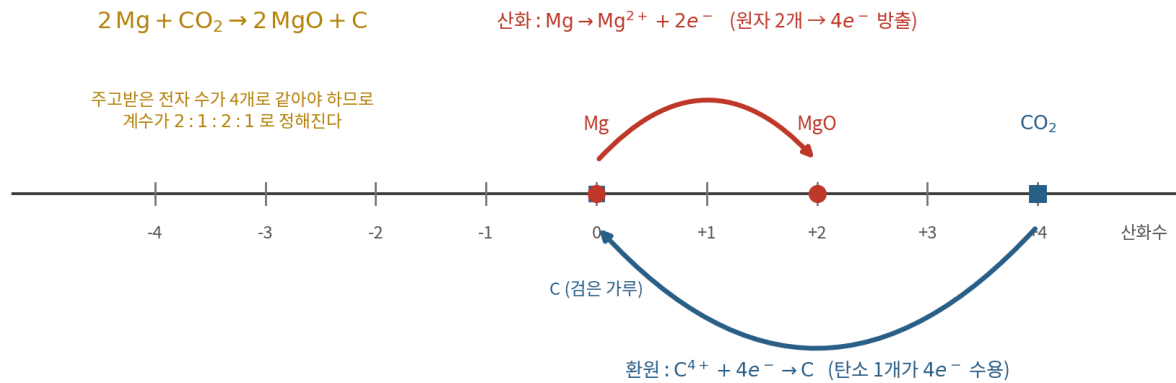
(a) 두 흰색 가루는 같은 물질이다 — (나)는 산소와의 직접 결합, (다)는 이산화탄소로부터 산소를 빼앗는 반응이지만 마그네슘이 산소와 만나 만들 수 있는 안정한 산화물은 MgO 하나이므로 결과물은 같다.



(b) (다)의 계수는 전자 수지로 정해진다 — 산화수를 매기면 Mg 는 $0 \rightarrow +2$ 로 늘어 산화되고(원자 하나가 $2e^-$ 를 잃음), CO₂ 의 탄소는 $+4 \rightarrow 0$ 으로 줄어 환원된다(탄소 하나가 $4e^-$ 를 얻음). 주고받은 전자 수가 같아야 하므로



이 되어 계수가 2 : 1 : 2 : 1 로 결정된다. 주어진 화학식에 따라 산화제로 작용한다.



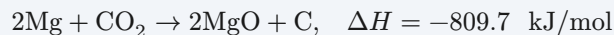
[답안 그림 1] $2\text{Mg} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{MgO} + \text{C}$ 의 산화수 변화. 주고받은 전자가 4개로 같아야 계수가 2 : 1 : 2 : 1로 맞는다.

- (c) 왜 마그네슘이 탄소에게서 산소를 빼앗을 수 있는가 — 두 원소가 산소를 놓고 경쟁할 때 이기는 쪽은 산화물이 더 안정한(생성 엔탈피가 더 낮은) 쪽이다. 마그네슘은 이온화 에너지가 작아 원자가 전자를 쉽게 내주고, 생긴 Mg^{2+} 는 반지름이 작고 전하가 커서 O^{2-} 와 매우 강한 이온 결합을 이룬다. 반면 CO_2 는 공유 결합 분자여서 결합 에너지가 그만큼 크지 않다. 실제로 표준 생성 엔탈피 $\Delta H_f^\circ(\text{MgO}) = -601.6$, $\Delta H_f^\circ(\text{CO}_2) = -393.5$ kJ/mol 을 쓰면

$$\Delta H = 2\Delta H_f^\circ(\text{MgO}) - \Delta H_f^\circ(\text{CO}_2) = 2(-601.6) - (-393.5) = -809.7 \text{ kJ/mol}$$

로 크게 발열이다. 이 열이 (다)에서 관찰된 “많은 열”과 밝은 백색광의 정체이며, 한 번 불이 붙으면 그 열이 다음 반응을 계속 일으켜 스스로 이어진다.

- (d) 금속의 반응성 서열로도 같은 결론 — 산소와 결합하려는 경향은 $\text{Mg} > \text{Al} > \text{C} > \text{Fe} > \text{Cu}$ 순이다. 서열에서 위에 있는 원소가 아래 원소의 산화물에서 산소를 빼앗을 수 있으므로, C 보다 위인 Mg은 CO_2 를 환원시킬 수 있다. 반대로 C는 MgO에서 산소를 빼앗지 못한다. (제철소에서 코크스가 Fe_2O_3 를 환원시키는 것은 C가 Fe보다 위에 있기 때문으로, 같은 원리의 반대 사례이다.)



이산화탄소도 상대에 따라서는 산화제가 될 수 있다. 마그네슘 화재에 이산화탄소 소화기를 쓰면 불이 꺼지기는커녕 더 거세지는 것이 이 반응의 실제 결과이다.

(3) 검은색 가루는 탄소 C 이고, 같은 화학식을 가지면서 결합 구조·배열이 다른 물질(동소체)로 흑연과 다이아몬드를 들 수 있다

(a) 동소체란 무엇인가 — 같은 원소만으로 이루어졌으나 원자의 결합 방식이나 배열이 달라 물리적·화학적 성질이 다른 홑원소 물질을 서로 동소체라 한다. 탄소는 원자가 전자가 4개여서 sp^3 , sp^2 , sp 등 여러 방식으로 혼성될 수 있고, 자기 자신과도 잘 결합(카테네이션)하므로 동소체가 특히 많다. 화학식은 모두 C 로 같지만 결합 구조가 다르므로 성질이 전혀 달라진다.

(b) 구조 → 성질 → 응용

동소체	결합 구조·배열	그로부터 나오는 성질	응용
흑연	sp^2 혼성, 육각형 평면층이 층층이 쌓인 구조. 층 안은 강한 공유 결합, 층 사이는 약한 분산력	남은 p 전자가 층을 따라 비편재화되어 전기가 잘 통함. 층이 서로 쉽게 미끄러져 무름. 층 방향 열전도가 큼. 화학적으로 안정	연필심, 윤활제, 이차전지 음극재·전극 재료, 원자로 중성자 감속재, 방열판, 활성탄(기체 흡착)
다이아몬드	sp^3 혼성, 각 탄소가 네 이웃과 정사면체로 이어진 3차원 그물(공유 결정)	원자가 전자가 모두 σ 결합에 묶여 자유 전자가 없으므로 전기 절연체. 그러나 격자 진동 전달이 뛰어나 열전도는 물질 중 최고. 경도 최대, 녹는점 매우 높음, 굴절률 큼	정밀 절삭·연마·시추 공구, 반도체 방열 기판, 고압 실험용 앤빌, 광학창, 보석
플러렌 C_{60}	sp^2 육각형·오각형이 이어진 축구공 모양의 닫힌 분자	분자 결정이라 유기 용매에 녹음. 휘어진 표면 때문에 π 전자가 불안정해 전자를 잘 받아들임	벌크 이종접합 태양전지의 전자수용체, 광촉매
그래핀	흑연에서 한 층만 떼어낸 원자 한 겹의 평면	전하 이동도가 매우 크고 투명하며 잘 휘어짐. 비표면적이 매우 큼	유연 디스플레이용 투명 전극, 배터리 첨가제, 광촉매·전기화학 촉매

(c) 응용을 가르는 것은 결국 결합 구조이다 — 같은 탄소인데 흑연은 전극이 되고 다이아몬드는 절연체가 되는 까닭은 원자가 전자 4개 가운데 몇 개가 σ 결합에 묶여 있는냐의 차이 하나로 설명된다. 흑연은 3개만 묶이고 1개가 층을 따라 자유롭게 움직여 전도성을 주며, 다이아몬드는 4개가 모두 묶여 자유 전자가 하나도 없다. 마찬가지로 흑연이 윤활제가 되고 다이아몬드가 절삭 공구가 되는 것도 결합이 2차원 층인지 3차원 그물인지의 차이에서 곧바로 나온다.

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	주어진 자료를 해석하여 시료 A와 기체 B를 추론하고, 그 근거를 설명할 수 있는가?	2점
(2)	주어진 자료를 해석하여 실험 (나), (다)에서 생성된 물질의 화학식을 제시하고, 실험 (다) 반응이 일어날 수 있는 이유를 논리적으로 설명하는가?	2점
(3)	탄소 동소체 2가지를 제시하고 응용 사례를 설명할 수 있는가?	1점

문제 2 반응 속도식 · 1차 반응과 반감기 · 연대 측정

반감기의 일정성 · 속도비 · 계통 오차

(1) $v = k[X]$ (Y의 생성 속도 = $k[X]$, X에 대한 1차 반응)

(a) 표에서 반감기를 읽는다 — 처음 5몰이

$$5 \rightarrow 1.25 = 5 \times \left(\frac{1}{2}\right)^2, \quad 5 \rightarrow 0.625 = 5 \times \left(\frac{1}{2}\right)^3$$

이므로 11,400년은 반감기가 두 번, 17,100년은 세 번 지난 시점이다. 따라서

$$t_{1/2} = \frac{11400}{2} = 5700 \text{ 년}, \quad t_{1/2} = \frac{17100}{3} = 5700 \text{ 년}$$

으로 두 값이 같다. 즉 남아 있는 양이 4분의 1이든 8분의 1이든 반감기는 항상 5,700년으로 일정하다.

(b) 반감기가 일정하다는 것이 곧 1차 반응이라는 뜻 — 반응 차수별로 반감기를 구해 비교하면 판정이 분명해진다.

차수	속도식	반감기	남은 양이 줄어들면
0차	$v = k$	$t_{1/2} = [X]_0 / (2k)$	점점 짧아진다
1차	$v = k[X]$	$t_{1/2} = \ln 2 / k$	변하지 않는다
2차	$v = k[X]^2$	$t_{1/2} = 1 / (k[X]_0)$	점점 길어진다

관측된 반감기는 남은 양과 무관하게 5,700년으로 일정하므로 이 반응은 1차 반응이다.

(c) 적분형으로 확인한다 — 1차 반응의 속도식을 적분하면

$$-\frac{d[X]}{dt} = k[X] \rightarrow [X] = [X]_0 e^{-kt}, \quad t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} = 5700 \text{ 년} \rightarrow k = \frac{\ln 2}{5700} \approx 1.22 \times 10^{-4} \text{ 년}^{-1}$$

이고, $t = 11400$ 년을 넣으면 $[X] = 5e^{-2\ln 2} = 5/4 = 1.25$ 몰, $t = 17100$ 년을 넣으면 $5e^{-3\ln 2} = 5/8 = 0.625$ 몰로 표의 값과 정확히 맞는다.

(d) Y의 생성 속도로 옮겨 적는다 — 반응은 $X \rightarrow Y$ 로 화학량론 계수가 1 : 1 이므로 X가 사라지는 만큼 Y가 생긴다.

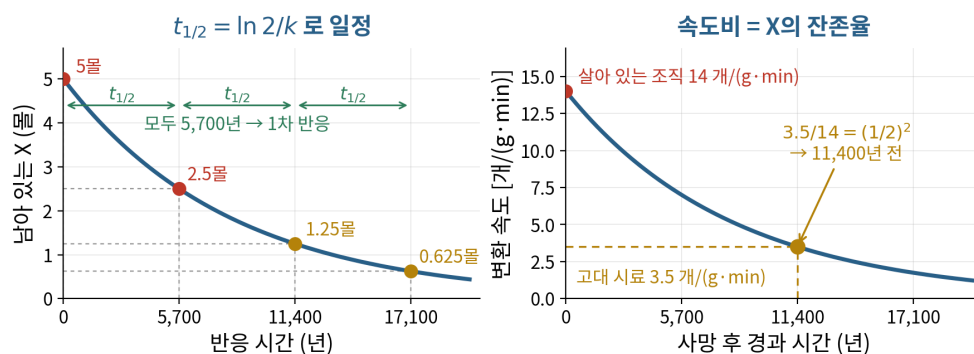
$$\frac{d[Y]}{dt} = -\frac{d[X]}{dt} = k[X]$$

(e) [Y] 와 [Z] 가 속도식에 들어가지 않는 이유 — 속도식에는 반응에 실제로 참여하는 화학종의 농도만 들어간다.

- Y 는 생성물이며 제시문에서 안정하여 더 이상 변화하지 않으므로 역반응이 없다. 따라서 [Y] 는 속도에 영향을 주지 못한다.
- Z 는 이 반응에 아예 관여하지 않는 안정한 원소로, 살아 있는 동안 X와의 개수비를 재는 **기준자** 구실만 한다. 그러므로 [Z] 도 속도식에 들어가지 않는다.

만약 Y나 Z가 속도식에 들어간다면 반감기가 시간에 따라 달라져야 하는데, 표는 반감기가 일정함을 보여 주므로 관측 자체가 이를 배제한다.

$$v = \frac{d[Y]}{dt} = -\frac{d[X]}{dt} = k[X], \quad k = \frac{\ln 2}{5700 \text{ 년}}$$



[답안 그림 2] (왼쪽) 남은 X의 양이 얼마이든 반감기가 5,700년으로 같아 1차 반응임을 알 수 있다. (오른쪽) 1차 반응에서는 변환 속도가 남은 X의 양에 비례하므로 속도비가 곧 잔존율이 된다.

(2) 약 11,400년 전에 사망하였다

(a) 사망 시점의 “출발선”을 정한다 — 살아 있는 동안에는 X/Z 비율이 일정하게 유지되므로, 조직 1 g당 1분에 변환되는 X의 개수도 살아 있는 생명체와 같은 14개로 유지된다. 죽는 순간 X의 보충이 끊기고 그때부터 X는 1차 반응으로 줄어들기 시작하므로, 사망 시점의 값이 곧 붓고 곡선의 출발선 $A_0 = 14 \text{ 개}/(\text{g} \cdot \text{min})$ 이다.

(b) 고대 시료의 현재 속도를 같은 단위로 환산한다 — 측정값은 조직 4 g에서 2시간 동안 1680개이다. 기준값이 “1 g당 1분당”이므로 질량과 시간으로 모두 나누어 준다.

$$A = \frac{1680 \text{ 개}}{4 \text{ g} \times 2 \text{ h}} = \frac{1680 \text{ 개}}{4 \text{ g} \times 120 \text{ min}} = \frac{1680}{480} = 3.5 \text{ 개}/(\text{g} \cdot \text{min})$$

- (c) 속도비가 곧 X의 잔존율 — (1)에서 $v = k[X]$ 이므로 같은 k 를 갖는 두 시료의 속도비는 X의 양의 비와 같다. 따라서

$$\frac{A}{A_0} = \frac{[X]}{[X]_0} = \frac{3.5}{14} = \frac{1}{4} = \left(\frac{1}{2}\right)^2$$

로, 반감기가 정확히 2번 지났다.

- (d) 연대를 구한다 — (1)에서 $t_{1/2} = 5700$ 년이고 반감기가 2번 지났으므로 $t = 2t_{1/2} = 2 \times 5700 = 11400$ 년이다. 반감기 횟수가 정수가 아닌 경우까지 포함하도록 지수식에서 직접 풀어도 값은 같다.

$$A = A_0 e^{-kt} \rightarrow t = \frac{1}{k} \ln \frac{A_0}{A} = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \ln 4 = 5700 \times \frac{2 \ln 2}{\ln 2} = 11400 \text{ 년}$$

$$t = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \ln \left(\frac{A_0}{A} \right) = 5700 \times \log_2 \left(\frac{14}{3.5} \right) = 5700 \times 2 = 11400 \text{ 년 전}$$

- (e) 단위 환산을 빠뜨리면 답이 달라진다 — 이 문항에서 실수가 나오는 자리는 계산이 아니라 환산이다.

- 시료가 4 g이므로 1680개를 그대로 쓰면 조직 1 g 기준인 14개와 견줄 수 없다.
- 측정 시간이 2시간이므로 분 단위로 바꾸어야 한다(2 h = 120 min).
- 두 환산을 모두 거쳐야 비로소 3.5 : 14 라는 같은 단위의 비가 나온다. 만약 질량으로 나누지 않으면 $14/14 = 1$ 이 되어 “방금 죽었다”는 엉뚱한 결론에, 시간으로 나누지 않으면 잔존율이 $1/240$ 이 되어 반감기가 약 8회 지난 것으로 잘못 계산된다.

또 이 방법이 성립하려면 (1)의 1차 반응 성질이 반드시 필요하다. 1차 반응이 아니라면 속도비와 잔존율이 같지 않아 속도만으로는 남은 양을 알 수 없기 때문이다.

(3) 실제보다 더 오래된 것으로 추정된다

- (a) 연대 계산이 어떤 가정 위에 서 있는가 — (2)에서 쓴 식은

$$t_{\text{추정}} = t_{1/2} \log_2 \left(\frac{A_0}{A} \right)$$

이고, 여기서 A 는 실제로 측정한 값이지만 $A_0 = 14$ 는 “그 시절에도 살아 있는 생명체의 X/Z가 지금과 같았을 것”이라는 가정에서 가져온 값이다. 측정하지 않고 가정한 이 출발선이 틀어지면 연대도 그만큼 틀어진다.

- (b) 틀어진 정도를 계산한다 — 그 시기의 실제 X/Z가 평상시의 f 배($0 < f < 1$)였다면 실제 출발선은 $A'_0 = fA_0$ 이므로 실제 연대는

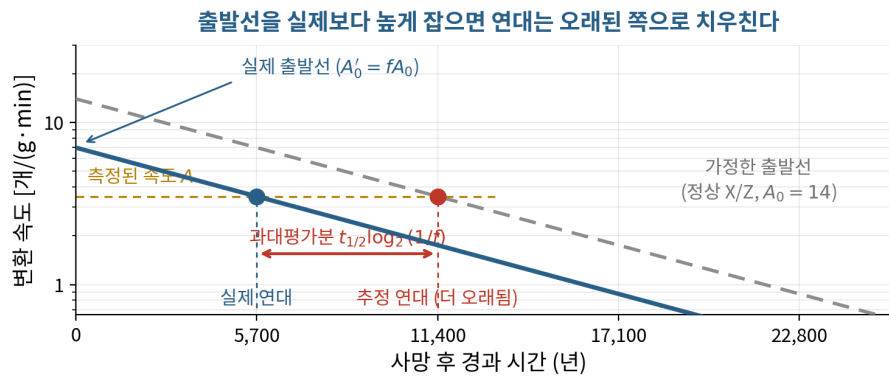
$$t_{\text{실제}} = t_{1/2} \log_2 \left(\frac{A'_0}{A} \right) = t_{1/2} \log_2 \left(\frac{fA_0}{A} \right)$$

이다. 두 값을 빼면

$$t_{\text{추정}} - t_{\text{실제}} = t_{1/2} \left[\log_2 \left(\frac{A_0}{A} \right) - \log_2 \left(\frac{fA_0}{A} \right) \right] = t_{1/2} \log_2 \left(\frac{1}{f} \right) > 0$$

즉 추정 연대가 실제 연대보다 **항상 크다**. 이 오차는 시료가 얼마나 오래되었는지와 무관하게 f 하나로만 정해지는 **계통 오차**이다. 예컨대 $f = 1/2$ 였다면 모든 시료가 정확히 반감기 하나만큼, 곧 5,700년씩 더 오래된 것으로 나온다.

- (c) 직관적인 설명 — 그 시기에 묻힌 생명체는 죽는 순간부터 이미 X가 평상시보다 적었다. 그런데 연대를 계산하는 쪽은 이 사실을 모르고 “X가 정상값에서 출발해 붕괴로 줄어들었다”고 보므로, 원래부터 부족했던 몫까지 전부 붕괴한 것으로 잘못 세계 된다. 붕괴가 더 많이 일어났다고 판단하면 그만큼 시간이 더 흘렀다는 결론이 나오므로 연대는 과대평가된다.



[답안 그림 3] 같은 측정값 A 라도 출발선을 실제보다 높게 잡으면 붕괴 곡선을 따라 오른쪽으로 밀려 읽히므로 연대가 $t_{1/2} \log_2(1/f)$ 만큼 과대평가된다. 그림은 $f = 1/2$ 인 경우.

- (d) **반대 경우와 보정** — 같은 논리로 그 시기의 X/Z 가 평상시보다 **높았다면** ($f > 1$) $\log_2(1/f) < 0$ 이 되어 연대는 실제보다 **더 젊게** 추정된다. 어느 쪽이든 오차의 원인은 측정이 아니라 **가정한 출발선**에 있으므로, 정밀도를 아무리 높여도 줄어들지 않는다. 이런 오차를 없애려면 연대를 이미 알고 있는 시료로 그 시기의 실제 X/Z 를 되짚어 구해 보정 곡선을 만들어야 한다.

$$t_{\text{추정}} - t_{\text{실제}} = t_{1/2} \log_2 \left(\frac{1}{f} \right) > 0 \quad (0 < f < 1)$$

X/Z 가 평상시보다 낮았던 시기의 시료는 실제보다 오래된 것으로 추정되며, 그 차이는 시료의 나이와 무관하게 일정하다.

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	주어진 자료를 해석하여 원소 Y가 생성되는 반응 속도식을 기술하고, 그 근거를 반감기를 이용하여 설명할 수 있는가?	1점
(2)	주어진 자료를 이용하여 반감기 횟수를 추론하고, 고대 생명체가 사망한 시점을 정확히 계산할 수 있는가?	3점
(3)	가정한 생명체 내의 X/Z 비율 조건에서 추정된 연대가 실제 연대와 비교하여 어떻게 달라지는지 설명할 수 있는가?	1점

2025학년도 · 해설편

- 문제 1** 반응 속도와 촉매 · 반감기
문제 2 인체 구성 원소 · 전자 배치, 전기 음성도, 결합 에너지
-

- 단원** 물질의 구조 · 화학 결합 · 분자간 힘 · 평형 · 반응 속도
핵심 개념 반응 속도와 촉매, 표면적과 반응 속도, 반감기, 탄소 화합물과 물, 보어의 원자 모형과 전자 배치, 전기 음성도와 결합의 극성, 평균 결합 에너지
문항 수 2문항 (소문항 4개) · 10점

II. 예시답안

문제 1 반응 속도와 촉매 · 반감기

표면적 의존성 · 반응 차수

(1) 초기 속도 = $3.2w$ (a) 속도식의 꼴을 정한다 — 고체 촉매 표면에서 일어나는 반응이므로 속도는 기체가 실제로 닿을 수 있는 촉매의 노출 표면적 S 와 반응물의 부분압력에 의존한다.

$$v = c \cdot S \cdot P_{\text{H}_2}^m \cdot P_{\text{O}_2}^n$$

네 실험 모두 수소는 1 atm으로 같고, 제시문에서 반응 중에도 수소의 부분압력이 거의 변하지 않는다고 했으므로 $P_{\text{H}_2}^m$ 은 상수로 흡수할 수 있다. 따라서 비교해야 할 변수는 S 와 P_{O_2} 두 개뿐이다.

정육면체 촉매 한 개는 면이 6개이지만 **바닥면 1개가 상자 바닥에 맞닿아 기체가 출입할 수 없다**. 한 면의 넓이를 a^2 이라 하면 (가)의 노출 표면적은 $S_{\text{가}} = 5a^2$ 이다.

(b) 산소에 대한 반응 차수 — (가)와 (다)의 비교 — 두 실험은 촉매가 1개로 같아 S 가 같고 산소 압력만 2배이다.

$$\frac{v_{\text{다}}}{v_{\text{가}}} = \frac{2w}{w} = 2 = \left(\frac{2 \times 10^{-6}}{1 \times 10^{-6}} \right)^n = 2^n \Rightarrow n = 1$$

즉 산소의 부분압력에 대해 **1차 반응**이다.(c) 표면적에 대한 의존성 — (가)와 (나)의 비교 — (나)는 촉매 2개가 서로 닿지 않으므로 각각 5면씩 노출되어 $S_{\text{나}} = 10a^2$ 로 2배이고, 압력은 (가)와 같다.

$$\frac{v_{\text{나}}}{v_{\text{가}}} = \frac{2w}{w} = 2 = \frac{S_{\text{나}}}{S_{\text{가}}} = \frac{10a^2}{5a^2} = 2$$

이므로 속도는 노출 표면적에도 정비례한다. 두 결과를 합치면 속도식은

$$v = c \cdot S \cdot P_{\text{O}_2}$$

(d) (라)의 노출 표면적 — 촉매 2개를 옆면이 완전히 밀착하도록 나란히 두면, 각 정육면체에서 막히는 면은

- 바닥면 1개 — 상자 바닥과 맞닿음
- 맞댄 옆면 1개 — 상대 촉매와 맞닿음

으로 2개이다. 따라서 정육면체 하나당 노출 면은 $6 - 2 = 4$ 면이고, 두 개를 합치면

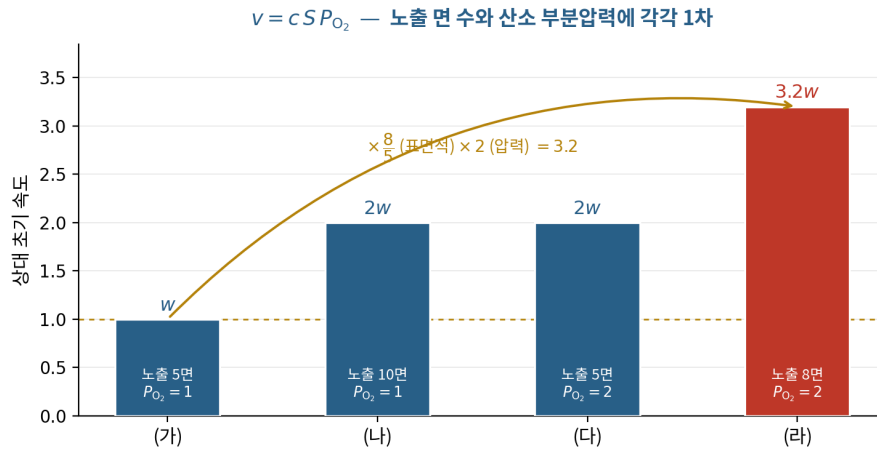
$$S_{\text{라}} = 2 \times 4a^2 = 8a^2 = \frac{8}{5}S_{\text{가}} = 1.6S_{\text{가}}$$

이다. (나)의 10면과 견주면 맞댄 2면이 그대로 죽어 8면이 된 셈이다.

(e) 초기 속도 — (라)는 (가)에 견주어 표면적이 8/5배, 산소 압력이 2배이고 속도는 두 인자 각각에 1차이므로

$$\frac{v_{\text{라}}}{v_{\text{가}}} = \frac{S_{\text{라}}}{S_{\text{가}}} \cdot \frac{P_{\text{라}}}{P_{\text{가}}} = \frac{8}{5} \times 2 = 3.2$$

$$v_{\text{라}} = 3.2w$$



[답안 그림 1] 네 조건의 상대 초기 속도. 노출 면 수와 산소 부분압력 두 인자의 곱으로 결정된다.

의미 해석 — 촉매를 2개 넣었는데도 (나)를 산소 2배 조건으로 옮긴 값 $4w$ 에 미치지 못한다. 맞댄 2면이 전체 10면 중 20%를 차지하며 죽어 버리기 때문이며, 실제로 $4w \times 8/10 = 3.2w$ 로 같은 값이 나온다. 촉매는 넣은 양이 아니라 반응 물과 닿는 **겉넓이**만큼만 일한다는 것이 이 문항의 핵심이다.

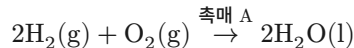
(2) 생성된 물이 촉매 표면을 덮어 유효 표면적 $S(t)$ 가 줄어드는 것이 원인이므로, 물을 표면에서 계속 걷어내 S 를 초기 값으로 되돌리고 $S \cdot P_{\text{O}_2}$ · 온도를 함께 키우면 속도와 촉매의 효율을 높일 수 있다

(a) 관측이 왜 이상한가 — (1)에서 얻은 속도식 $v = cSP_{\text{O}_2}$ 에서 S 가 일정하다면 이 반응은 산소에 대한 1차 반응이므로

$$-\frac{dP}{dt} = kP \quad (k = cS) \rightarrow P = P_0 e^{-kt}, \quad t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k}$$

이고 반감기는 초기 농도와 무관하게 일정해야 한다. 그런데 반감기가 회를 거듭할수록 길어졌다는 것은 유효 속도 상수 k_{eff} 가 시간이 지남에 따라 작아졌다는 뜻이다. 온도와 촉매의 양은 그대로이고 산소 압력이 줄어드는 효과는 이미 속도식의 P 에 들어 있으므로, 남아서 줄어들 수 있는 것은 **기체와 실제로 닿는 표면적 S** 하나뿐이다.

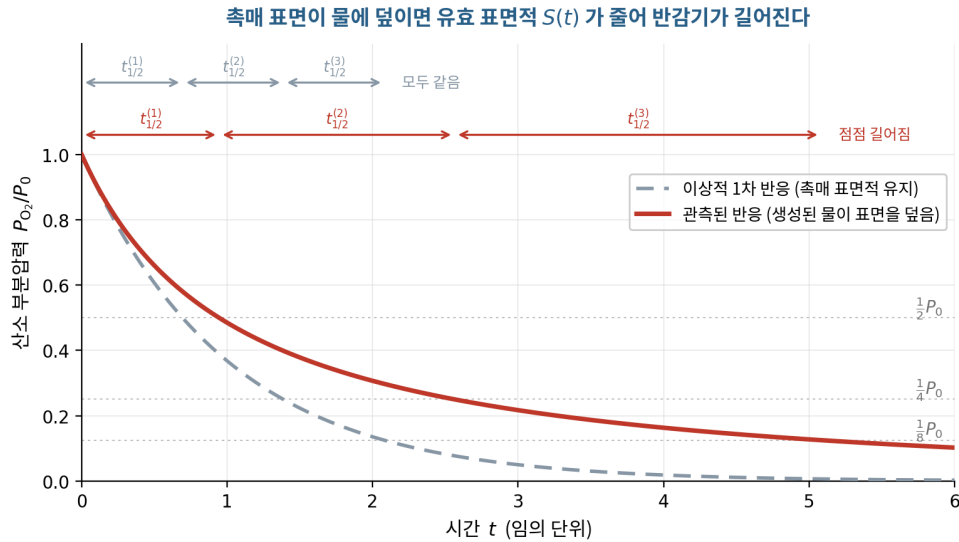
(b) 무엇이 표면을 줄이는가 — 이 반응의 생성물은 액체 물이다.



상온에서 촉매 표면에 맺힌 물방울이 그대로 남아 활성 자리를 덮으면 그 부분에는 기체가 접근할 수 없다. (라)에서 맞댄 면이 죽는 것과 똑같은 일이 반응이 진행되는 내내 계속 일어나는 것이다. 덮인 넓이는 그때까지 생성된 물의 양, 곧 소모된 산소의 양에 비례하므로 비례 상수를 α 라 하면

$$S(t) = S_0 \left[1 - \alpha \frac{P_0 - P}{P_0} \right] \rightarrow -\frac{dP}{dt} = cS_0 \left[(1 - \alpha) + \alpha \frac{P}{P_0} \right] P$$

가 된다. P 가 줄어들수록 대괄호 안의 값이 작아지므로, 남은 절반을 없애는 데 걸리는 시간이 앞 구간보다 길어진 다 — 관측된 현상과 정확히 일치한다.



[답안 그림 2] 표면적이 유지되면 반감기가 일정하지만($t_{1/2} = \ln 2/k$), 물이 표면을 덮으면 반감기가 회를 거듭할수록 길어진다.

(c) 해결 전략 ① — 표면을 되살린다 (반감기가 길어지는 원인 제거)

- **촉매 표면을 소수성으로 처리한다.** 물과의 접촉각이 커져 물이 얇게 퍼지지 않고 방울로 뭉쳐 굴러떨어지므로 같은 양의 물이 생겨도 덮이는 넓이가 최소가 된다.
- **촉매의 모양을 바꾼다.** 정육면체 대신 관(빨대)·원뿔·수직 판·그물 모양으로 만들면 생성된 물이 중력으로 곧바로 흘러내린다. 덩으로 겉넓이 자체도 같은 부피의 정육면체보다 훨씬 커진다.
- **촉매를 회전시키거나 진동시킨다.** 물이 한곳에 고이지 못하고 계속 떨어져 나가므로 활성 자리가 계속 노출된다.
- **물을 게 밖으로 뺀다.** 상자 안에 건조제나 촉매보다 차가운 냉각판(콜드 트랩)을 함께 두면, 증발한 물이 그쪽에 붙잡혀 촉매 표면으로 되돌아오지 않는다.
- **온도를 100 °C 이상으로 올린다.** 생성된 물이 액체로 맺히지 않고 기체로 떠나므로 표면이 덮이지 않는다. 게다가 아레니우스 식 $k = Ae^{-E_a/RT}$ 에 따라 속도 상수 자체도 커진다.

(d) 해결 전략 ② — 속도식의 각 인자를 키운다 — $v = cSP_{O_2}$ 의 세 인자를 차례로 본다.

- **S 를 키운다.** 같은 질량의 촉매를 잘게 쪼개거나 다공성으로 만들면 겉넓이가 커진다. 다만 (라)가 보여 주듯 조각끼리 맞닿으면 그만큼 손해이므로, (나)처럼 서로 떨어뜨려 배치하거나 지지체 위에 흩뿌려 조각끼리 접촉하지 않게 해야 한다. 이것이 곧 **단위 질량당 속도**, 즉 촉매 효율을 높이는 길이다.
- **P_{O_2} 를 키운다.** 산소에 대해 1차이므로 부분압력을 올린 만큼 그대로 빨라진다. 나아가 소모된 산소를 계속 보충해 P_{O_2} 를 일정하게 유지하면 반감기가 길어지는 문제 자체가 사라진다.
- **c 를 키운다.** 온도를 올리거나(아레니우스), 활성화 에너지가 더 낮은 촉매 물질로 바꾸거나, 조촉매를 더해 활성 자리의 성질을 개선한다.

$$k_{\text{eff}}(t) = c \cdot S(t) \rightarrow \text{물이 표면을 덮어 } S(t) \downarrow \rightarrow t_{1/2} \uparrow$$

따라서 모든 대책의 목표는 하나이다 — $S(t)$ 가 시간에 따라 줄지 않게 지키고, 가능하면 $S \cdot P_{O_2} \cdot c$ 를 함께 키우는 것.

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	주어진 자료를 해석하여 초기 조건에 따른 반응 속도를 구할 수 있는가?	2점
(2)	1차 반응에서 반감기가 증가하는 실험 상황의 문제를 발견하고, 이를 해결할 창의적인 방안을 제안할 수 있는가? (현실성보다는 학생이 발견한 문제를 해결하는 방안을 논리적으로 설명하는 과정을 평가)	3점

문제 2 인체 구성 원소 · 전자 배치, 전기 음성도, 결합 에너지

물과 개수비

(1) $H : O : C : N = 26 : 5 : 10 : 1$ (a) 개수비를 물수의 언어로 옮긴다 — 개수비 $66 : 25 : 10 : 1$ 은 화학식 단위 $H_{66}O_{25}C_{10}N_1$ 하나에 각 원자가 66, 25, 10, 1개 들어 있다는 뜻이다. 주어진 원자량으로 화학식량을 확인하면

$$66(1) + 25(16) + 10(12) + 1(14) = 66 + 400 + 120 + 14 = 600$$

으로 제시된 값과 맞는다. 몸무게가 M g인 사람의 몸에는 이 화학식 단위가 $M/600$ mol 들어 있으므로, 원자별 전체 몰수는

$$n(H) = \frac{66M}{600}, \quad n(O) = \frac{25M}{600}, \quad n(C) = \frac{10M}{600}, \quad n(N) = \frac{M}{600}$$

(b) 물이 가져가는 몫 — 체중의 60%가 물이므로 물의 질량은 $0.6M$ g이고, H_2O 의 분자량이 18이므로

$$n(H_2O) = \frac{0.6M}{18} = \frac{M}{30} \text{ mol}$$

이다. 물 한 분자에는 H가 2개, O가 1개이므로 물의 형태로 묶여 있는 원자는

$$n_{\text{물}}(H) = 2 \times \frac{M}{30} = \frac{40M}{600}, \quad n_{\text{물}}(O) = \frac{M}{30} = \frac{20M}{600}$$

(c) 물을 뺀 나머지 — 탄소와 질소는 물에 들어 있지 않으므로 그대로 남는다.

$$n'(H) = \frac{66M}{600} - \frac{40M}{600} = \frac{26M}{600}, \quad n'(O) = \frac{25M}{600} - \frac{20M}{600} = \frac{5M}{600}$$

$$n'(C) = \frac{10M}{600}, \quad n'(N) = \frac{M}{600}$$

네 값에 공통으로 들어 있는 $M/600$ 이 모두 약분되므로 개수비는 몸무게 M 에 전혀 의존하지 않는다.

$$H : O : C : N = 26 : 5 : 10 : 1$$

(d) 몸무게 60 kg으로 확인 — $M = 60000$ g으로 잡으면 $M/600 = 100$ 이므로

	H	O	C	N
전체 (mol)	6600	2500	1000	100
물 속 (mol)	4000	2000	0	0
물을 뺀 나머지 (mol)	2600	500	1000	100

$$H_{66}O_{25}C_{10}N_1 : \frac{60000}{600} = 100 \text{ mol} \rightarrow H \ 6600, O \ 2500, C \ 1000, N \ 100 \text{ mol}$$

$$H_2O : \frac{60 \text{ kg} \times 60\%}{18 \text{ g/mol}} = \frac{36000}{18} = 2000 \text{ mol} \rightarrow H \ 4000, O \ 2000 \text{ mol}$$

빼고 남은 $2600 : 500 : 1000 : 100 = 26 : 5 : 10 : 1$ 로 (c)와 같다.

(e) 의미 해석 — 물을 건어내면 수소는 $66 \rightarrow 26$ 으로 약 60%, 산소는 $25 \rightarrow 5$ 로 80%가 사라지는 데 반해 탄소와 질소는 하나도 줄지 않는다. 즉 몸에서 물을 뺀 “마른 몸”의 원자 구성은 사실상 탄소와 수소가 뼈대를 이루고($C : H = 10 : 26$, 대략 $CH_{2.6}$ 골의 탄화수소 골격) 여기에 산소와 질소가 작용기로 붙어 있는 형태이다. 단백질·지질·탄수화물·핵산이 모두 탄화수소 골격에 $-OH$, $-NH_2$, $C=O$ 같은 작용기가 달린 분자라는 사실과 정확히 맞아떨어진다.

(2) ① 전자 배치도 — 원자가 전자 수가 4·3·2·1로 갖춰져 골격과 작용기의 다양성이 확보된다

② 전기 음성도 — 무극성부터 강한 극성까지의 스펙트럼이 수소 결합과 친수성·소수성을 함께 구현한다

③ 결합 에너지 — 체온에서 스스로 끊어지지 않을 만큼 강하되 효소가 다를 수 있을 만큼 약한 중간 세기이다

① 전자 배치도 — 결합 수 4·3·2·1이 만드는 골격·작용기·마개의 역할 분담

제시된 배치도에서 가장 바깥 껍질의 전자 수를 읽으면 H는 K 껍질에 1개(최대 2), C·N·O는 L 껍질에 각각 4·5·6개(최대 8)이다. 옥텟(H는 듀엣)을 채우는 데 필요한 공유 결합의 수는 곧 부족한 전자 수이므로

- **C — 결합 4개**: 네 방향으로 결합하므로 사슬·가지·고리를 자유롭게 만들고, 결합 자리를 나눠 쓰면 단일·이중·삼중 결합이 모두 가능하다. 자기 자신과도 잘 결합해(카테네이션) 길이에 사실상 제한이 없는 골격을 만든다. → **뼈대**
- **N — 결합 3개 + 비공유 전자쌍 1개, O — 결합 2개 + 비공유 전자쌍 2개**: 남은 비공유 전자쌍 덕분에 $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{COOH}$, $\text{C}=\text{O}$, 펩타이드 결합 등 다양한 작용기를 만들고, 그 전자쌍이 다시 염기성·수소 결합 수용·금속 이온 배위를 담당한다. → **반응성과 인식**
- **H — 결합 1개**: 결합을 하나밖에 못 만들어 골격의 끝을 막는다. → **마개**

결합 수 4·3·2·1이 모두 갖추어져 있어 “뼈대(C) - 작용기(N, O) - 마개(H)”의 역할 분담이 자연스럽게 성립한다. 또 이들은 모두 1·2주기 원소여서 원자 반지름이 작고 $2p$ 궤도의 옆쪽 껍침이 효과적이므로 π 결합, 즉 이중·삼중 결합을 잘 만든다. 같은 그림의 다른 원소가 이 역할을 못 하는 까닭도 함께 읽힌다 — He·Ne은 껍질이 이미 다 차 결합을 만들지 않고, Li·Be은 전자를 내주어 이온이 되며, F는 결합을 하나밖에 못 만들어 골격이 될 수 없다.

② 전기 음성도 — 무극성에서 강한 극성까지 이어지는 스펙트럼

주어진 값 H 2.1, C 2.5, N 3.0, O 3.5로 결합의 전기 음성도 차 ΔEN 을 구하면

결합	C-H	C-N	N-H	C-O	O-H
ΔEN	0.4	0.5	0.9	1.0	1.4

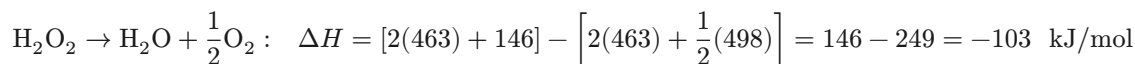
- **모두 공유 결합이다**. 이온 결합이 되는 기준(대략 $\Delta EN \geq 1.7$)에 어느 것도 이르지 못한다. 그러므로 C·H·N·O가 만드는 것은 이온 결정이 아니라 **개별 분자**이며, 분자여야 물에 녹아 확산하고 필요할 때 조립·해체될 수 있다.
- **동시에 폭이 넓다**. C-H 결합(0.4)은 사실상 무극성이라 소수성이고, O-H(1.4)·N-H(0.9)는 강한 극성이라 친수성이다. 한 분자 안에 두 부분을 함께 넣을 수 있으므로 인지질 같은 양친매성 분자가 만들어지고, 이것이 세포막 인지질 이중층, 단백질의 소수성 중심부와 친수성 표면, 미셀 형성 같은 자기조립의 원동력이 된다.
- **수소 결합이 만들어진다**. 전기 음성도가 큰 N·O는 반지름까지 작아 여기에 붙은 H의 부분 양전하가 강하게 드러나고, N·O가 가진 비공유 전자쌍이 상대의 짝이 되어 $\text{O}-\text{H}\cdots\text{O}$, $\text{N}-\text{H}\cdots\text{O}$, $\text{N}-\text{H}\cdots\text{N}$ 수소 결합이 형성된다. 그 세기는 약 20 kJ/mol로 공유 결합 O-H(463 kJ/mol)의 약 1/20 수준이지만, 체온에서의 열에너지 $RT \approx 2.6$ kJ/mol보다는 여전히 여러 배 크다. 이 절묘한 중간 세기 덕분에 물의 높은 끓는점과 큰 비열, DNA 이중 나선의 염기쌍(A-T 2개, G-C 3개), 단백질의 α 나선과 β 병풍, 효소-기질의 선택적 인식이 **안정하면서도 되돌릴 수 있게** 유지된다.
- **산화수의 다양성으로도 이어진다**. 전기 음성도가 H보다 크고 O보다 작은 탄소는 CH_4 의 -4에서 CO_2 의 +4까지 넓은 산화수를 가질 수 있다. 그래서 호흡과 광합성 같은 대사가 여러 단계로 잘게 나뉘어 산화·환원의 사슬로 설계될 수 있다.

③ 결합 에너지 — 안정성과 가역성을 동시에 만족하는 중간 세기

(ㄱ) 긴 골격을 만들 수 있는 것은 탄소뿐이다. C—C 348 kJ/mol은 O—O 146 kJ/mol의 약 2.4배이고 F—F 159와 견주어도 두 배가 넘는다. O나 F처럼 비공유 전자쌍이 많은 원자끼리 이어 붙이면 이웃한 전자쌍끼리 반발해 결합이 약해지기 때문이다. 체온 310 K에서 열에너지가 $RT \approx 2.6$ kJ/mol이므로 볼츠만 인자 $e^{-E/RT}$ 로 비교하면

$$\frac{e^{-146/2.58}}{e^{-348/2.58}} = e^{202/2.58} \approx 1 \times 10^{34}$$

로, O—O가 열적으로 끊어질 확률이 C—C의 10^{34} 배나 된다. 실제로 과산화물의 O—O 결합은 주어진 값만으로도

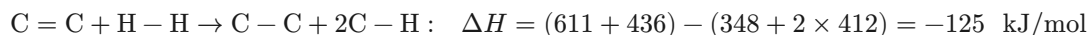


처럼 스스로 끊어지는 쪽이 발열이라 저절로 분해된다. 그래서 산소로는 긴 사슬을 만들 수 없고, 탄소로만 원자 수 천 개짜리 거대 분자를 안정하게 이어 붙일 수 있다.

(ㄴ) 생체 결합의 세기가 한 구간에 모여 있다. N—C 305, C—C 348, N—H 391, C—H 412, O—H 463 — 모두 300~470 kJ/mol 구간이다. 체온의 $RT \approx 2.6$ kJ/mol과 견주면 가장 약한 N—C조차 약 118배나 크므로 그냥 두어서는 결코 저절로 끊어지지 않는다(안정성). 그러면서도 이 정도 세기는 효소가 활성화 에너지를 낮추 주면 37 °C의 온화한 조건에서 끊고 다시 이을 수 있는 범위이다(가역성). 만약 F—H 565처럼 더 강했다면 한 번 만들어진 결합을 되돌릴 수 없어 대사가 성립하지 못하고, O—O 146처럼 약했다면 구조가 저절로 무너졌을 것이다.

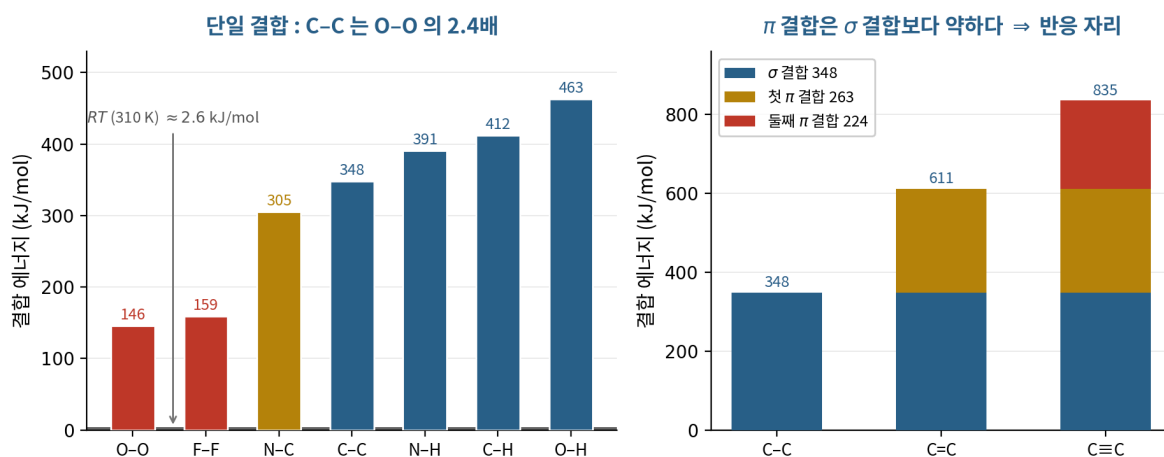
(ㄷ) 가장 약한 골격 결합이 N—C라는 점도 뜻이 있다. 단백질의 펩타이드 결합, 핵산의 염기-당 결합이 모두 C—N 결합인데, 이것이 골격 결합 가운데 가장 약한 고리(305 < 348)이므로 가수 분해로 끊어 단위체를 재활용하기에 알맞다. 튼튼한 C—C 골격에 정해진 절단 지점이 심어져 있는 셈이다.

(ㄹ) 다중 결합이 반응 자리를 제공한다. C—C 348에서 C=C 611로 갈 때 늘어난 값은 $611 - 348 = 263$, C=C에서 C≡C 835로 갈 때 늘어난 값은 $835 - 611 = 224$ 로, 어느 쪽도 σ 결합 348보다 작다. 즉 π 결합이 σ 결합보다 약해 먼저 끊어지므로, 다중 결합은 골격을 유지한 채 반응할 수 있는 자리가 된다. 실제로 이중 결합에 수소를 붙이는 첨가 반응은



로 발열이어서 잘 일어난다. 지방산의 포화·불포화 전환이 이 성질을 이용한다.

(ㄴ) 연료로서도 알맞다. 약한 C—H(412)·C—C(348)를 끊고 강한 O—H(463) 결합을 만드는 방향이 발열이므로, C—H 결합이 많은 분자일수록 좋은 연료가 된다. 이미 산소가 많이 붙은 탄수화물보다 C—H가 훨씬 많은 지방이 단위 질량당 두 배 이상의 에너지를 내는 것이 그 결과이다.



[답안 그림 3] (왼쪽) C—C는 O—O의 2.4배로 긴 골격을 지탱하고, 생체 결합은 모두 체온의 RT 보다 두 자릿수 이상 크다. (오른쪽) π 결합은 σ 결합보다 약해 다중 결합이 반응 자리가 된다.

- ① 전자 배치 — 원자가 전자 4·3·2·1 → 뼈대(C)·작용기(N, O)·마개(H)의 역할 분담과 다중 결합
- ② 전기 음성도 — $\Delta EN = 0.4 \sim 1.4$ (모두 공유 결합) → 소수성과 친수성의 공존, 수소 결합에 의한 자기조립과 분자 인식
- ③ 결합 에너지 — 300~470 kJ/mol의 중간 세기 → 체온에서의 안정성과 효소에 의한 가역성의 양립

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	주어진 자료로부터 각 원자의 비를 바르게 구하는가?	2점
(2)	주어진 전자배치도, 전기음성도, 결합에너지로 원소가 생체 분자 구성이나 분자간 상호 작용에서 유용함을 논리적으로 설명하는가?	3점

2024학년도 · 해설편

- 문제 1 화학 평형과 기체의 압력
문제 2 수소 생성 반응과 에너지

-
- 단원 반응과 에너지 · 평형·반응 속도 · 산-염기·산화환원 · 상태·용액
핵심 개념 몰 농도와 이상 기체 방정식, 부분 압력 법칙, 화학 평형 상수와 평형 이동, 르샤틀리에 원리, 산화·환원과 산화수, 결합 에너지와 반응 엔탈피, 헤스 법칙, 수소 연료 전지
문항 수 2문항 (소문항 6개) · 총 10점

II. 예시답안

문제 1 화학 평형과 기체의 압력

평형 상수 · 부분 압력 법칙

(1) 용기 내 기체의 총 압력 = 25 atm (D의 분압 24 atm + 갇힌 공기 1 atm)

(a) 기체가 차지하는 공간을 먼저 정한다 — 용기의 전체 부피는 1 L이고 용액이 600 mL를 채우므로, 기체가 존재할 수 있는 공간은

$$V_g = 1.0 - 0.6 = 0.4 \text{ L}$$

이다. 용액의 부피 $V_l = 0.6 \text{ L}$ 는 반응 전후로 변하지 않는다고 했으므로 V_g 도 0.4 L로 고정된다. 또 입구를 닫는 순간 1 기압·300 K의 공기가 이 0.4 L 공간에 갇힌다.

(b) 평형 상수에 들어가는 농도의 기준이 서로 다르다 — 이 문항의 핵심이다. A, B, C는 용액에 녹아 있으므로 몰농도의 분모가 $V_l = 0.6 \text{ L}$ 인 반면, D는 용액에 거의 녹지 않아 전량이 기체 공간에 있으므로 분모가 $V_g = 0.4 \text{ L}$ 이다. 즉 같은 몰수라도 D의 몰농도가 C보다 $0.6/0.4 = 1.5$ 배 크다.

(c) 몰수를 기준으로 평형 계산 — 처음 들어 있는 몰수는

$$n_A = 1 \text{ M} \times 0.6 \text{ L} = 0.6 \text{ mol}, \quad n_B = 2 \text{ M} \times 0.6 \text{ L} = 1.2 \text{ mol}$$

이다. 반응한 몰수를 $x \text{ mol}$ 이라 하면 계수비가 모두 1이므로

(단위 mol)	A(aq)	B(aq)	C(aq)	D(g)
반응 전	0.6	1.2	0	0
변화	$-x$	$-x$	$+x$	$+x$
평형	$0.6 - x$	$1.2 - x$	x	x

이고, (b)의 기준에 따라 농도로 바꾸면

$$[A] = \frac{0.6 - x}{0.6}, \quad [B] = \frac{1.2 - x}{0.6}, \quad [C] = \frac{x}{0.6}, \quad [D] = \frac{x}{0.4}$$

이다. 평형 상수식에 대입하면

$$K = \frac{[C][D]}{[A][B]} = \frac{(x/0.6)(x/0.4)}{((0.6 - x)/0.6)((1.2 - x)/0.6)} = \frac{x^2/0.24}{(0.6 - x)(1.2 - x)/0.36} = \frac{1.5x^2}{(0.6 - x)(1.2 - x)}$$

이고, 이것이 $3/2 = 1.5$ 와 같으므로 양변의 1.5가 약분되어

$$x^2 = (0.6 - x)(1.2 - x) = 0.72 - 1.8x + x^2 \Rightarrow 1.8x = 0.72 \Rightarrow x = 0.4 \text{ mol}$$

를 얻는다. ($x = 0.4 < 0.6$ 이므로 A가 남아 있어 물리적으로 타당하다.)

- (d) **D의 분압** — 생성된 D 0.4 mol이 0.4 L의 기체 공간에 있으므로 $[D] = 0.4/0.4 = 1$ M이고,

$$P_D = \frac{n_D RT}{V_g} = \frac{0.4 \times 0.08 \times 300}{0.4} = [D]RT = 1 \times 0.08 \times 300 = 24 \text{ atm}$$

이다.

- (e) **갇힌 공기의 분압** — 밀폐하는 순간 0.4 L 공간에 1 atm의 공기가 있었고, 이 공기는 반응에 참여하지 않으며 부피 (0.4 L)와 온도(300 K)도 변하지 않으므로 분압은 그대로 1 atm이다. 달톤의 부분 압력 법칙으로 총 압력은 각 성분의 분압의 합이다.

$$P_{\text{tot}} = P_D + P_{\text{공기}} = 24 + 1 = 25 \text{ atm}$$

- 별해 농도만으로 푸는 방법** — 평형에서 $[C] = x$ M으로 두면, 같은 몰수가 부피가 $0.4/0.6 = 2/3$ 배인 공간에 들어가므로 $[D] = 1.5x$ M이다. 또 A, B는 처음 농도에서 x 만큼 줄어드니

$$K = \frac{x \times 1.5x}{(1-x)(2-x)} = \frac{3}{2} \Rightarrow x^2 = (1-x)(2-x) = 2 - 3x + x^2 \Rightarrow x = \frac{2}{3} \text{ M}$$

이고 $[D] = 1.5 \times 2/3 = 1$ M으로 (d)와 같은 값을 얻는다.

- (2) **평형은 정반응 쪽으로 이동하고, 새로운 평형에서 총 기체의 몰농도는 0.25 M이다**

- (a) **평형 이동 방향** — 실린더를 연결하면 기체가 차지할 수 있는 부피가 0.4 L보다 커진다. 용액의 부피는 그대로이므로 $[A]$, $[B]$, $[C]$ 는 순간적으로 변하지 않지만, 기체인 D의 몰농도 $[D] = n_D/V_g$ 만 부피가 늘어난 만큼 작아진다. 그러면 반응 지수가

$$Q = \frac{[C][D]}{[A][B]} < K$$

가 되므로 반응은 Q 를 다시 K 까지 키우는 방향, 즉 **정반응(오른쪽) 쪽으로 이동**한다. 르샤틀리에 원리로 보아도 기체 D의 농도가 감소한 것을 상쇄하려고 D를 더 만드는 쪽으로 평형이 옮겨 간다.

- (b) **추 1개가 피스톤에 가하는 압력** — 그림 (라)가 이 값을 읽어 내라고 주어진 자료이다. 같은 기체가 온도 일정하게

- 추 1개를 올렸을 때: 압력 $1 + X$ (대기압 + 추), 부피 1 L
- 추를 치웠을 때: 압력 1 atm (대기압만), 부피 3.5 L

로 변했으므로 보일 법칙 $P_1 V_1 = P_2 V_2$ 에서

$$(1 + X) \text{ atm} \times 1 \text{ L} = 1 \text{ atm} \times 3.5 \text{ L} \Rightarrow 1 + X = 3.5 \Rightarrow X = 2.5 \text{ atm}$$

이다.

- (c) **그림 (다)에서 기체가 받는 외부 압력** — 피스톤의 질량과 마찰을 무시하므로 피스톤이 정지한 새 평형에서 내부 기체의 압력은 피스톤을 누르는 외부 압력과 정확히 같다. 그림 (다)의 피스톤 위에는 **추가 2개** 올려져 있으므로

$$P_{\text{내부}} = P_{\text{대기}} + 2P_{\text{추}} = 1 + 2 \times 2.5 = 6 \text{ atm}$$

이다.

- (d) **총 기체의 몰농도** — 실린더와 용기의 기체 공간은 연결관으로 통해 있어 하나의 기체 계를 이루며, 압력 6 atm·온도 300 K가 어디서나 같다. 이 계 안의 기체는 공기와 D를 합한 것이고, 이상 기체 방정식 $PV = nRT$ 를 몰농도 n/V 에 대해 풀면

$$\frac{n}{V} = \frac{P}{RT} = \frac{6}{0.08 \times 300} = \frac{6}{24} = 0.25 \text{ M}$$

이다. 즉 D가 얼마나 더 생성되었는지, 공기가 얼마나 섞여 있는지와 **무관하게** 총 기체의 몰농도는 압력과 온도만으로 정해진다.

$$\text{정반응 쪽으로 이동, } P = 1 + 2 \times 2.5 = 6 \text{ atm} \rightarrow \frac{n}{V} = \frac{P}{RT} = 0.25 \text{ M}$$

팽창 전 0.4 L에서 25 atm이던 기체가 6 atm까지 떨어졌으므로 기체 공간은 크게 넓어졌고, 그만큼 $[D]$ 가 줄어 (a)의 결론대로 정반응이 더 진행된다. 실제로 새 평형을 풀면 기체 부피는 약 2.2 L, 반응한 양은 0.4 mol에서 약 0.52 mol로 늘어나지만, 묻고 있는 총 몰농도는 이 값들과 관계없이 $P/(RT)$ 로 결정된다.

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	농도로 정의된 평형 상수를 이용하여 평형에서 D의 압력을 찾고, 공기의 압력을 함께 고려하여 기체의 총 압력을 올바르게 계산하면 3점. 두 과정 중 하나를 빼먹거나 오류가 있는 경우 부분 점수 제공.	3점
(2)	정반응 쪽으로 평형이 이동함을 설명하고, 새로운 평형 상태에서 기체의 몰 농도를 올바르게 계산한 경우 2점. 평형 이동을 올바르게 설명하였으나 농도의 계산에 오류가 있는 경우 부분 점수 제공.	2점

문제 2 수소 생성 반응과 에너지

산화수 · 결합 에너지 · 헤스 법칙

(1) 산화되는 반응물: CH_4 / 환원되는 반응물: H_2O

(a) 산화수 배정 — 전기음성도가 큰 원자가 공유 전자쌍을 모두 가져간다고 보고 산화수를 매긴다. 탄소는 수소보다 전기음성도가 크고, 산소는 탄소·수소보다 크다.

- CH_4 : H는 +1, 따라서 C는 -4
- H_2O : H는 +1, O는 -2
- CO_2 : O는 -2, 따라서 C는 +4
- H_2 : 홑원소 물질이므로 H는 0

(b) 산화수의 변화 — 반응 전후를 비교하면

C: $-4 \rightarrow +4$ (증가 8), H: $+1 \rightarrow 0$ (감소 1), O: $-2 \rightarrow -2$ (변화 없음)

이다. 산화수가 커지는 것이 산화, 작아지는 것이 환원이므로 탄소는 산화되고 수소는 환원된다. 탄소를 가진 반응물은 CH_4 뿐이므로 산화되는 반응물은 CH_4 이고, 산화되는 원소 없이 환원만 일어나는 반응물은 H_2O 이므로 환원되는 반응물은 H_2O 이다. 곧 CH_4 가 환원제, H_2O 가 산화제로 작용한다.

(c) 전자 수지로 확인 — 탄소 원자 1개가 잃는 전자는 8개이다. 한편 생성된 4H_2 의 수소 원자 8개가 각각 전자 1개씩을 얻으므로 얻은 전자도 8개로, 잃은 전자 수와 얻은 전자 수가 정확히 같다. 이 8개의 H 중 4개는 CH_4 에서, 4개는 $2\text{H}_2\text{O}$ 에서 온 것이지만, 반응물을 하나씩 분류할 때는 그 안에 산화되는 원소를 포함하는지가 기준이 되므로 위와 같이 답한다.

$$\text{CH}_4 \text{ (C: } -4 \rightarrow +4 \text{)} \rightarrow \text{산화}, \text{ H}_2\text{O (H: } +1 \rightarrow 0 \text{)} \rightarrow \text{환원}$$

(2) $\Delta H = +138 \text{ kJ/mol}$ (흡열 반응) $\rightarrow$ 수득률을 높이려면 온도를 높여야 한다

- (a) 결합 에너지로 반응 엔탈피 구하기** — 결합 에너지는 기체 상태의 결합 1 mol을 끊는 데 필요한 에너지이므로, 반응물의 결합을 모두 끊고 생성물의 결합을 모두 만든다고 보면

$$\Delta H = \sum (\text{반응물의 결합 에너지}) - \sum (\text{생성물의 결합 에너지})$$

이다. 각 분자가 가진 결합을 세면

- 반응물 CH_4 1분자: C-H 4개 / H_2O 1분자: O-H 2개 $\rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ 는 O-H 4개
- 생성물 CO_2 1분자: C=O 2개 / H_2 1분자: H-H 1개 $\rightarrow 4\text{H}_2$ 는 H-H 4개

이므로

$$\sum_{\text{반응물}} = 4 \times 410 + 4 \times 460 = 1640 + 1840 = 3480 \text{ kJ}, \quad \sum_{\text{생성물}} = 2 \times 799 + 4 \times 436 = 1598 + 1744 = 3342 \text{ kJ}$$

$$\Delta H = 3480 - 3342 = +138 \text{ kJ/mol}$$

- (b) 온도를 어떻게 바꿀 것인가** — $\Delta H > 0$ 이므로 정반응은 **흡열 반응**이다. 흡열 반응은 열을 반응물 쪽에 넣어 준 것으로 볼 수 있으므로



로 쓸 수 있다. 온도를 올리는 것은 계에 열을 더해 주는 것이고, 르샤틀리에 원리에 따라 평형은 더해 준 열을 소모하는 방향, 즉 **흡열 방향인 정반응 쪽**으로 이동한다. 그 결과 평형 상수 K 가 커져 수소의 수득률이 높아진다. 문제에서 “모든 온도에서 빠르게 평형에 도달한다”고 했으므로 반응 속도는 고려할 필요가 없고, 오직 평형의 위치만 따지면 된다.

$$\Delta H = +138 \text{ kJ/mol} > 0 \text{ (흡열)} \rightarrow \text{온도} \uparrow \rightarrow K \uparrow, \text{ 수소 수득률} \uparrow$$

표에 함께 주어진 O=O 498 kJ/mol은 이 반응식에 등장하지 않으므로 여기서는 쓰지 않는다. 이 값은 (3)의 연소·연료 전지 반응에서 쓰인다.

(3) 두 방법이 내는 총 에너지는 같다 — 차이는 0 kJ (둘 다 $\Delta H = -802 \text{ kJ}$)

- (a) 방법 A: 두 단계로 나누어 계산** — 메테인 1 mol에서 수소 4 mol을 만들고, 그 4 mol을 전부 연료 전지에 넣는다.

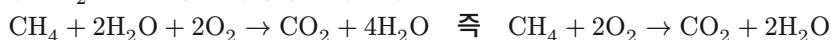
① 수소 생성: $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$ $\Delta H_1 = +138 \text{ kJ}$ ((2)에서 구함)

② 연료 전지: $4\text{H}_2 + 2\text{O}_2 \rightarrow 4\text{H}_2\text{O}$

②의 반응 엔탈피는 끊는 결합이 H-H 4개와 O=O 2개, 만드는 결합이 O-H 8개이므로

$$\Delta H_2 = (4 \times 436 + 2 \times 498) - (8 \times 460) = (1744 + 996) - 3680 = 2740 - 3680 = -940 \text{ kJ}$$

이다. 두 단계를 더하면 H_2 4 mol이 상쇄되어 알짜 반응은



이고, 총 엔탈피 변화는 $\Delta H_A = 138 + (-940) = -802 \text{ kJ}$ 이다.

- (b) 방법 B: 완전 연소를 직접 계산** — $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ 에서 끊는 결합은 C-H 4개와 O=O 2개, 만드는 결합은 C=O 2개와 O-H 4개이므로

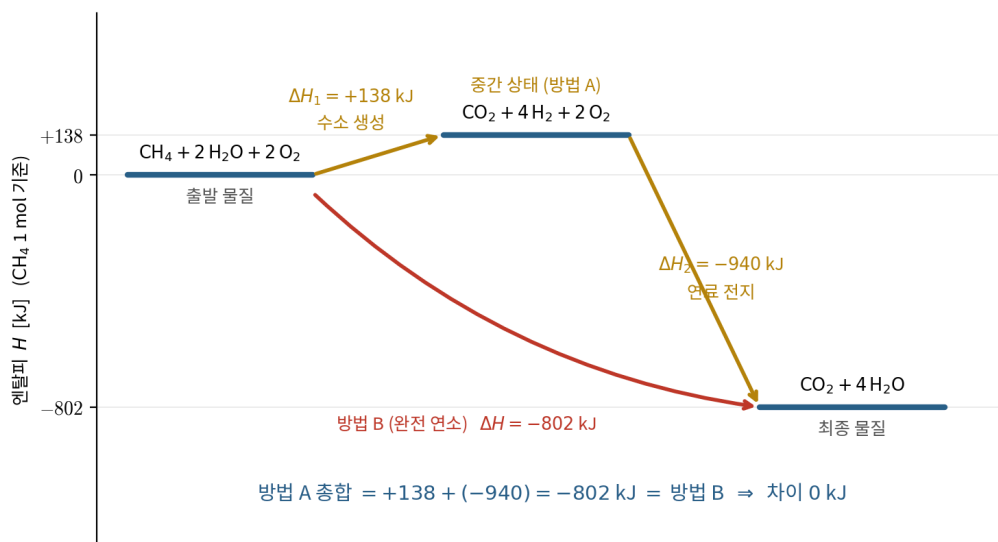
$$\Delta H_B = (4 \times 410 + 2 \times 498) - (2 \times 799 + 4 \times 460) = (1640 + 996) - (1598 + 1840) = 2636 - 3438 = -802 \text{ kJ}$$

이다.

- (c) 왜 같을 수밖에 없는가** — 엔탈피는 상태 함수이므로 처음 상태와 나중 상태만 같으면 경로에 관계없이 ΔH 가 같다 (헤스 법칙). 방법 A는 $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 + 2\text{O}_2$ 라는 중간 상태를 한 번 거쳐 갈 뿐, 출발 물질($\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{O}_2$)과 최종 물질($\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$)이 방법 B와 완전히 같다. 수소를 만드는 데 흡수한 138 kJ은 연료 전지 단계에서 그만큼 덜 회수될 뿐, 어디로도 사라지거나 새로 생기지 않는다.

$$\Delta H_A = +138 + (-940) = -802 \text{ kJ} = \Delta H_B \rightarrow \text{에너지 차이} = 0 \text{ kJ}$$

헤스 법칙 — 경로가 달라도 처음·나중 상태가 같으면 총 엔탈피 변화는 같다



[도해] 메테인 1 mol 기준 엔탈피 준위 — 방법 A(중간 상태 경유)와 방법 B(직접 연소)의 처음·나중 상태가 같다

(4) 문제점: 수소 1 mol을 얻을 때마다 온실가스 CO_2 가 배출된다 / 대안: 물의 전기 분해 $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$

(a) 환경친화적 관점에서의 문제점 — 제시된 반응 $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$ 는 메테인의 탄소를 최종적으로 CO_2 로 내보낸다. 메테인 1 mol당 CO_2 1 mol, 즉 수소 4 mol을 얻을 때마다 CO_2 1 mol이 반드시 함께 생긴다. 질량으로 따지면 수소 $4 \times 2 = 8$ g을 얻을 때 CO_2 44 g이 나오므로

$$\frac{44 \text{ g } \text{CO}_2}{8 \text{ g } \text{H}_2} = 5.5 \rightarrow \text{수소 1 kg당 } \text{CO}_2 \text{ 약 5.5 kg 배출}$$

이다. 게다가 (2)에서 보았듯 이 반응은 흡열($\Delta H = +138 \text{ kJ/mol}$)이고 수득률을 높이려면 고온을 유지해야 하는데, 그 열을 화석 연료를 태워 얻는다면 추가로 CO_2 가 배출된다. 결국 “청정 연료”라는 수소가 생산 단계에서 이미 온실가스를 수반하게 된다.

(b) 대안 — 탄소를 포함하지 않는 원료를 쓴다 — 반응물에 탄소 원자가 아예 없으면 CO_2 는 원리적으로 생길 수 없다. 가장 대표적인 방법이 물의 전기 분해이다.



부산물인 O_2 뿐이므로 온실가스 배출이 없다. 다만 이 반응은 에너지를 넣어 주어야 진행된다. 표의 결합 에너지로 확인하면 끊는 결합이 O-H 4개, 만드는 결합이 H-H 2개와 O=O 1개이므로

$$\Delta H = 4 \times 460 - (2 \times 436 + 498) = 1840 - 1370 = +470 \text{ kJ} \rightarrow \text{H}_2 \text{ 1 mol당 } +235 \text{ kJ}$$

로 흡열이며, 이는 (3)에서 구한 연료 전지 반응 $\Delta H_2 = -940 \text{ kJ}$ 를 수소 4 mol로 나눈 -235 kJ/mol 과 크기가 정확히 같다. 즉 전기 분해는 연료 전지에서 꺼내 쓸 에너지를 미리 저장해 두는 과정이므로, 그 전기를 태양광·풍력 등 재생 에너지로 공급해야 비로소 전 과정에서 탄소가 나오지 않는다.

(c) 그 밖의 예 —

- 암모니아 분해: $2\text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2 + 3\text{H}_2$ — 부산물이 대기의 주성분인 N_2 이므로 온실가스가 나오지 않는다.
- 메테인 열분해: $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C}(\text{s}) + 2\text{H}_2$ — 원료는 여전히 메테인이지만 탄소가 기체 CO_2 가 아니라 고체 탄소로 고정되어 대기로 방출되지 않는다.

문제점: 수소 4 mol당 온실가스 CO_2 1 mol 배출 (+ 고온 유지를 위한 추가 배출)

대안: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$, $2\text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2 + 3\text{H}_2$, $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C}(\text{s}) + 2\text{H}_2$

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	산화되는 반응물 CH_4 , 환원되는 반응물 H_2O 를 모두 올바르게 제시한 경우 점수 부여.	1점
(2)	반응 엔탈피와 온도 변화를 모두 올바르게 제시한 경우에 점수 부여.	1점
(3)	방법 A와 B 모두 방출되는 에너지는 같아서 차이가 0 kJ/mol이라고 답한 경우 점수 부여.	1점
(4)	CO_2 와 같은 온실가스가 생성되는 단점을 언급하고, 친환경적인 수소 생산 과정을 화학 반응식으로 바르게 표현한 경우 2점. 둘 중 하나만 올바르게 답변한 경우 부분 점수 부여.	2점

2023학년도 · 해설편

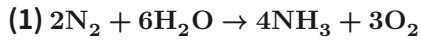
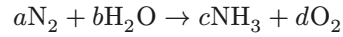
문제 9	화학 반응식과 이상 기체의 압력
문제 10	양자수와 전자 배치 · 수산화물의 결합과 액성
문제 11	화학 평형 상수와 분자식의 결정
문제 12	반응 속도와 반감기 · 반응 엔탈피 · 전기 분해

단원	물질의 구조 · 화학 결합·분자간 힘 · 반응과 에너지 · 평형·반응 속도 · 산·염기·산화환원 · 상태·용액
핵심 개념	화학 반응식과 양적 관계, 이상 기체 상태 방정식, 양자수와 바닥상태 전자 배치, 이온 결합과 수소 결합, 산·염기 액성과 르샤틀리에 원리, 화학 평형 상수, 반응 차수와 반감기, 결합 에너지와 반응 엔탈피, 전기 분해
문항 수	4문항 · 문항 9~12 (소문항 13개)

II. 예시답안

문제 9 화학 반응식과 이상 기체의 압력

양적 관계 · 이상 기체 상태 방정식

반응물은 N_2 와 H_2O , 생성물은 NH_3 와 O_2 이므로 계수를 미지수로 두고

라 하자. 원자 수 보존을 원소별로 쓰면

$$\bullet \text{N: } 2a = c \quad \bullet \text{H: } 2b = 3c \quad \bullet \text{O: } b = 2d$$

이다. $a = 2$ 로 잡으면 $c = 4, b = 3c/2 = 6, d = b/2 = 3$ 이 되어 모두 정수이다.

(2) 수은주 높이차 = 22.8 cm (압력 차로는 $\Delta P = 0.3 \text{ atm} = 22.8 \text{ cmHg}$)

(a) 반응 전 몰수와 한계 반응물 — 몰 질량이 N_2 는 28 g/mol, H_2O 는 18 g/mol이므로

$$n(\text{N}_2) = \frac{28}{28} = 1 \text{ mol}, \quad n(\text{H}_2\text{O}) = \frac{54}{18} = 3 \text{ mol}$$

이고, 이 비 1 : 3은 반응식의 계수비 2 : 6 = 1 : 3과 정확히 같다. 따라서 한계 반응물 없이 두 반응물이 모두 소모된다(효율 100%).

(b) 반응 후 기체의 총 몰수 — N_2 1 mol 기준으로 계수비에 따라

$$n(\text{NH}_3) = 1 \times \frac{4}{2} = 2 \text{ mol}, \quad n(\text{O}_2) = 1 \times \frac{3}{2} = 1.5 \text{ mol}$$

이다. 반응 후 남는 액체·고체는 없고(촉매 1 mg의 부피는 무시), 두 생성물은 모두 기체이므로

$$n_{\text{tot}} = 2 + 1.5 = 3.5 \text{ mol}$$

(c) 꼭지를 열기 전의 상태 — 수은주 오른쪽은 대기(1 기압 = 76 cmHg)에 열려 있다. 높이차 76 cm만으로는 용기 쪽 압력이 $76 - 76 = 0$ 이거나 $76 + 76 = 152 \text{ cmHg}$ 인 두 경우가 모두 가능하지만, 그림에서 용기 쪽(왼쪽) 수은면이 대기에 열린 오른쪽보다 높다. 즉 내부 압력이 대기압보다 낮은 쪽이므로 답은

$$P_{BC} = 76 - 76 = 0 \text{ cmHg}$$

이고, 용기 B와 C는 진공 상태이다. 한편 기체 3.5 mol은 모두 꼭지가 닫힌 용기 A(50 L)에 갇혀 있다.

(d) 꼭지를 연 뒤의 압력 — 어림 조건 “1 기압·상온에서 1 mol이 20 L”를 이상 기체 상태 방정식 $PV = nRT$ 에 넣으면 상온에서

$$RT = \frac{PV}{n} = \frac{(1 \text{ atm})(20 \text{ L})}{1 \text{ mol}} = 20 \text{ L} \cdot \text{atm/mol}$$

이다. 꼭지를 열면 기체는 A + B + C 전체로 퍼지므로 부피는

$$V = 50 + 1 + 49 = 100 \text{ L}$$

이고, 온도는 상온 그대로이므로

$$P = \frac{n_{\text{tot}}RT}{V} = \frac{3.5 \text{ mol} \times 20 \text{ L} \cdot \text{atm/mol}}{100 \text{ L}} = 0.7 \text{ atm}$$

(e) 수은주 높이차 — 내부 압력 0.7 atm이 대기압 1 atm보다 작으므로 대기가 수은을 용기 쪽으로 밀어 올린다. 압력 차는

$$\Delta P = 1 - 0.7 = 0.3 \text{ atm}, \quad 0.3 \text{ atm} \times \frac{76 \text{ cmHg}}{1 \text{ atm}} = 22.8 \text{ cmHg}$$

이다. 여기서 cmHg는 압력의 단위이고, ΔP 를 떠받치는 수은 기둥의 길이가 곧 높이차이므로 22.8 cmHg에 대응하는 높이차는 22.8 cm이다.

$$P = 0.7 \text{ atm}, \quad \Delta P = 0.3 \text{ atm} = 22.8 \text{ cmHg} \rightarrow h = 22.8 \text{ cm}$$

(참고: 꼭지를 열기 전 용기 A만의 압력은 $3.5 \times 20/50 = 1.4 \text{ atm}$ 이었고, 부피가 2배가 되면서 압력이 절반인 0.7 atm으로 떨어진 셈이다.)

(3) 높이차는 커진다

- (a) **압력은 같고 온도만 다른 계** — 세 용기는 꼭지가 열린 채로 연결되어 있으므로 압력 P 는 어디서나 같지만, 온도는 A·C가 상온 T_0 , B가 $T_B = 77$ K로 서로 다르다. 각 용기의 몰수 $n_i = PV_i/(RT_i)$ 를 모두 더한 값(전체 몰수 3.5 mol)은 변하지 않으므로

$$n_{\text{tot}} = \frac{P}{R} \left(\frac{V_A}{T_0} + \frac{V_B}{T_B} + \frac{V_C}{T_0} \right) \Rightarrow P = \frac{n_{\text{tot}} R}{V_A/T_0 + V_B/T_B + V_C/T_0}$$

- (b) **냉각의 효과** — T_B 를 T_0 에서 77 K로 낮추면 분모의 V_B/T_B 항이 커지므로 P 는 반드시 **작아진다**. 분자 수준에서 보면 냉각으로 용기 B의 단위 부피당 분자 수 $n_B/V_B = P/(RT_B)$ 가 늘어나, 압력을 다시 맞추는 동안 A·C에 있던 분자가 B 쪽으로 옮겨 간다. 그 결과 전체가 공유하는 압력이 내려간다.
- (c) **수은주에 나타나는 결과** — 내부 압력이 낮아질수록 대기압과의 차 $\Delta P = 1 - P$ 가 커지고, 수은주 높이차는 ΔP 를 떠받치는 길이이므로 함께 커진다. (문제는 대소 관계만 묻고 있고, 77 K에서는 NH_3 와 O_2 가 실제로는 응축·응고하여 이상 기체 식이 그대로 성립하지 않으므로 구체적인 수치는 구하지 않는다. 다만 응축이 일어나면 기체 분자 수가 더 줄어 압력이 더욱 낮아지므로, **높이차가 커진다는 결론은 어느 쪽으로 보아도 같다.**)
- (d) **나머지 두 선택지를 배제하는 근거**

- “**작아진다**” — 높이차가 작아지려면 내부 압력이 대기압에 가까워져야 하고, 그러려면 $\sum V_i/T_i$ 가 줄어야 한다. 그러나 냉각은 V_B/T_B 를 키우기만 하므로 이 값이 줄어들 수 없다.
- “**일정하다**” — 용기 B의 부피가 1 L로 작기는 하지만 0은 아니므로 V_B/T_B 의 변화가 상쇄되지 않고 남는다. 게다가 꼭지가 열려 세 용기가 연결되어 있어 B에서 일어난 변화가 A·C의 압력에까지 그대로 전달되므로, 압력은 반드시 (조금이라도) 내려간다.

$$T_B \downarrow \rightarrow P \downarrow \rightarrow \Delta P = 1 - P \uparrow \rightarrow \text{수은주 높이차 증가}$$

(4) 용기 B+C 쪽(따라서 용기 C)의 압력이 더 크다

- (a) **꼭지를 잠그는 순간의 몰수 분배** — (3)의 최종 상태에서 압력은 P' 로 공통이고, A와 C는 T_0 , B는 77 K이다. 각 부분의 몰수는 $n_i = P'V_i/(RT_i)$ 이므로

$$n_A = \frac{P'}{R} \cdot \frac{50}{T_0}, \quad n_B = \frac{P'}{R} \cdot \frac{1}{77}, \quad n_C = \frac{P'}{R} \cdot \frac{49}{T_0}$$

이다. 꼭지를 잠그면 이 몰수들이 그대로 갇힌다.

- (b) **어느 쪽에 분자가 더 많은가** — 두 값을 빼면

$$n_{B+C} - n_A = \frac{P'}{R} \left(\frac{1}{77} + \frac{49}{T_0} - \frac{50}{T_0} \right) = \frac{P'}{R} \left(\frac{1}{77} - \frac{1}{T_0} \right) > 0 \quad (T_0 > 77 \text{ K})$$

즉 B+C 쪽에 분자가 더 많다. 이는 차가운 B가 같은 압력을 내려면 단위 부피당 분자 수가 상온보다 $T_0/77 \approx 4$ 배 많아야 하기 때문이며, 그렇게 B에 과하게 쌓인 분자가 꼭지를 잠그는 순간 B+C 쪽에 갇힌다.

- (c) **온도를 되돌린 뒤의 압력 비교** — 수조를 제거해 온도가 모두 T_0 로 같아졌을 때 부피는

$$V_A = 50 \text{ L}, \quad V_{B+C} = 1 + 49 = 50 \text{ L}$$

로 서로 같다. 같은 부피·같은 온도에서 압력은 몰수에 비례하므로($P = nRT_0/V$), 갇힌 몰수가 더 많은 B+C 쪽의 압력이 더 크다.

$$P_{B+C} - P_A = \frac{RT_0}{50 \text{ L}} (n_{B+C} - n_A) > 0 \rightarrow P_C = P_{B+C} > P_A$$

B와 C는 서로 연결된 채 갇혀 있으므로 용기 C의 압력이 곧 P_{B+C} 이다. 결론은 $T_0 > 77 \text{ K}$ 라는 사실만으로 나오므로 상온의 구체적인 값은 필요 없다. 또 77 K에서 일부 기체가 실제로 응축한다면 그만큼 더 많은 물질이 B에 갇히므로 부등호의 방향은 오히려 강화된다.

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	화학 반응식을 바르게 작성하면 1점. 화학 반응 계수로 표현하여도 정답으로 인정.	1점
(2)	꼭지를 열었을 때 내부 기체의 압력을 계산하고, 수은주의 높이 차이를 바르게 설명하면 2점. 꼭지를 열었을 때 내부 기체의 압력만 설명하면 1점.	2점
(3)	온도가 낮아지면 내부 압력이 감소하여 수은주의 높이 차이가 커짐을 설명하면 1점.	1점
(4)	부피는 같지만 분자 수가 다를 수를 통해 용기 B+C의 압력이 더 큼을 바르게 설명하면 1점.	1점

문제 10 양자수와 전자 배치 · 수산화물의 결합과 액성

양자수 · 이온 결합 · 액성과 평형 이동

(1) $A = \text{Li}$, $B = \text{H}$, $C = \text{B(붕소)}$, $D = \text{Al}$ / $W = 1$, $X = 1$, $Y = 3$, $Z = 3$ (a) 표의 세 항목이 뜻하는 것 — $l = 0$ 인 전자는 s 오비탈에, $l = 1$ 인 전자는 p 오비탈에 들어 있는 전자이다. 한편 스핀 자기 양자수는 $m_s = \pm 1/2$ 이고 한 오비탈을 짝지어 채운 두 전자는 $+1/2$ 와 $-1/2$ 로 상쇄되므로,

$$\sum m_s = \frac{1}{2} \times (\text{홀전자 수})$$

이다. 따라서 $\sum m_s = 1/2$ 는 홀전자가 1개라는 뜻이다.(b) 원소의 결정 — 바닥상태이므로 쌓음 원리에 따라 $1s < 2s < 2p < 3s < 3p$ 순으로 채운다.

- **A** — s 전자가 3개이다. 3개를 쌓음 원리대로 채우면 $1s^2 2s^1$ 이고, $2s$ 가 반만 찬 상태에서 $2p$ 에 전자가 들어갈 수는 없으므로 p 전자는 0개이다. 전자 총수 3, 즉 원자 번호 3인 **Li**. 홀전자는 $2s^1$ 하나뿐이라 $\sum m_s = 1/2$ 로 표와 일치한다.
- **B** — s 전자가 1개이다. $1s$ 가 비어 있는데 다른 오비탈이 먼저 채워질 수 없으므로 배치는 $1s^1$, 전자 총수 1, 즉 원자 번호 1인 **H**. 홀전자 1개로 $\sum m_s = 1/2$ 와 맞는다.
- **C** — p 전자가 1개이다. p 전자가 처음 등장하는 것은 $2p$ 이고, 그 아래 $1s \cdot 2s$ 는 모두 차 있어야 하므로 $1s^2 2s^2 2p^1$, 전자 총수 5, 즉 원자 번호 5인 **B(붕소)**. ($3p^1$ 이라면 그 아래 $2p^6$ 이 이미 채워져 $l = 1$ 인 전자가 7개가 되어 표와 어긋난다.)
- **D** — 표가 D에 대해 주는 정보는 홀전자가 1개라는 것뿐이다. A~C와 달리 이 조건 하나만으로는 원소가 하나로 정해지지 않는다(H, Li, B, F, Na, Al, Cl, K, ... 가 모두 홀전자 1개이고, 수산화물이 존재한다는 조건을 더해도 $\text{NaOH} \cdot \text{KOH}$ 등이 남는다). 여기서는 A(2주기 1족)·B(1주기 1족)·C(2주기 13족)에 이어 (라)까지 수산화물 계열을 완성하는 **3주기 13족** 원소로 읽어 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$ 의 **Al**로 본다. 실제로 $3p^1$ 의 홀전자 1개로 $\sum m_s = 1/2$ 를 만족한다.

즉 A, B, C는 표만으로 유일하게 결정되고, D는 위와 같이 계열을 완성하는 원소로 읽은 결과이다.

(c) 수산화물의 실험식 — OH는 -1가의 원자단이므로 중심 원자가 내놓는 원자가 전자 수(또는 산화수)만큼 OH가 결합한다.

- Li: 1족, 원자가 전자 1개 $\rightarrow \text{Li}^+$ 과 OH^- 가 1 : 1로 결합해 LiOH , 즉 $W = 1$.
- H: 원자가 전자 1개 $\rightarrow \text{HOH} = \text{H}_2\text{O}$, 즉 $X = 1$.
- B: 13족, 원자가 전자 3개 $\rightarrow \text{B(OH)}_3$, 즉 $Y = 3$.
- Al: 13족, 원자가 전자 3개 $\rightarrow \text{Al(OH)}_3$, 즉 $Z = 3$.

(가) LiOH , (나) H_2O , (다) B(OH)_3 , (라) $\text{Al(OH)}_3 \rightarrow W = X = 1$, $Y = Z = 3$

단, (라)의 D는 표의 조건(홀전자 1개)만으로는 유일하게 결정되지 않으며 위 계열 해석에 따른 것이다.

(2) (가)는 이온 결합 결정, (나)는 수소 결합으로 뭉친 분자 결정이기 때문

녹는점은 고체를 이루는 구성 입자를 붙잡고 있는 힘의 세기로 결정되며, 분자 내부의 결합 세기와는 다르다.

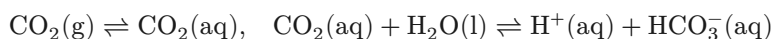
- **(가) LiOH — 이온 결합 물질(735 K):** 구성 입자가 Li^+ 과 OH^- 이온이고, 이들이 3차원 격자를 이루며 정전기적 인력(이온 결합)으로 강하게 묶여 있다. 녹으려면 이 이온 결합을 실제로 끊어야 하므로 매우 높은 온도가 필요하다.
- **(나) H_2O — 분자성 물질(273 K):** 분자 내부의 O-H 결합은 460 kJ/mol의 강한 공유 결합이지만, 얼음이 녹을 때 끊어지는 것은 분자 사이의 수소 결합뿐이다. 수소 결합은 분자 간 힘 중에서는 세지만 이온 결합에 비하면 훨씬 약하므로 녹는점이 낮다.

녹는점: 이온 결합(격자 전체를 붙잡는 정전기적 인력) $\gg$ 분자 간 수소 결합
 $\rightarrow \text{LiOH (735 K)} \gg \text{H}_2\text{O (273 K)}$

(같은 1족 원소의 수산화물처럼 보이지만, 금속인 Li는 전자를 내주어 이온 결합을, 비금속인 H는 전자를 공유하여 분자를 만든다는 점이 결정적 차이이다.)

(3) (가) > (나) > (다)

이산화탄소가 물에 녹는 과정은 다음 평형들로 이어진다.



즉 녹은 CO_2 는 산으로 작용해 H^+ 를 내놓는다. 따라서 용액이 H^+ 를 없애 주면(염기성) 평형이 오른쪽으로 밀려 CO_2 가 더 많이 녹고, 용액이 이미 H^+ 를 갖고 있으면(산성) 공통 이온 효과로 평형이 왼쪽으로 밀려 덜 녹는다.

- **(가) LiOH 수용액 — 염기성:** $\text{LiOH}(\text{aq}) \rightarrow \text{Li}^+(\text{aq}) + \text{OH}^-(\text{aq})$ 로 완전히 해리한다. 생성된 OH^- 가 H^+ 를 중화하여 제거하므로 르샤틀리에 원리에 따라 위 평형이 계속 오른쪽으로 진행된다. 알짜 반응은 $\text{CO}_2(\text{aq}) + 2\text{OH}^-(\text{aq}) \rightarrow \text{CO}_3^{2-}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$ 로, CO_2 가 화학적으로 붙잡히므로 용해량이 가장 크다.
- **(나) 순수한 물 — 중성:** H^+ 를 더하지도 빼지도 않는 기준 상태이다.
- **(다) B(OH)_3 수용액 — 약산성:** 붕산은 $\text{B(OH)}_3(\text{aq}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{B(OH)}_4^-(\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$ 로 약한 산으로 작용해 용액에 H^+ 를 공급한다. 늘어난 H^+ 때문에 CO_2 의 해리 평형이 왼쪽으로 밀려 용해량이 가장 작다.

이산화탄소 용해량: (가) LiOH > (나) H_2O > (다) B(OH)_3

다만 (나)와 (다)의 차이는 (가)와의 차이에 비하면 훨씬 작다. 붕산은 $pK_a \approx 9.2$ 로 매우 약한 산이어서 내놓는 H^+ 가 이산화탄소 자신이 만드는 산성에 비해 미미하므로, (다)에서의 억제 효과는 크지 않다. 순서는 위와 같지만 (나)와 (다)는 사실 상 비슷하다고 보아야 한다.

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	W~Z의 값과 그 이유를 바르게 서술하면 각 0.5점씩 부여.	2점
(2)	(가)와 (나)의 녹는점 차이를 화학 결합의 종류를 언급하여 바르게 설명하면 1점.	1점
(3)	화합물 (가)~(다)의 액성을 바르게 서술하고 각 용액에서 이산화탄소의 용해도를 르샤틀리에 원리를 적용하여 바르게 설명하면 2점. 화합물 (가)~(다)의 액성을 바르게 서술했으나 각 용액에서 이산화탄소의 용해도를 르샤틀리에 원리를 적용하여 설명하지 않으면 1점. 화합물 (가)~(다)의 액성은 바르지 않으나 이산화탄소의 용해도 설명 시 르샤틀리에 원리를 바르게 적용할 줄 알면 1점.	2점

문제 11 화학 평형 상수와 분자식의 결정

평형 상수 · 실험식과 분자식 · ICE 표

(1) $M_X = 120 \text{ g/mol}$

수용액의 부피가 $V = 1 \text{ L}$ 이므로 몰농도의 값은 몰수의 값과 같다. 물질 X의 몰 질량을 M_X 라 하면, 복합체 A-X는 A 한 분자와 X 한 분자가 결합한 것이므로 그 몰 질량은 $(1500 + M_X) \text{ g/mol}$ 이다. 평형 상태의 각 농도는

$$[A] = \frac{10}{1500} = \frac{1}{150} \text{ M}, \quad [X] = \frac{10}{M_X} \text{ M}, \quad [A-X] = \frac{9}{1500 + M_X} \text{ M}$$

이다. 평형 상수의 정의 $K = [A-X]/([A][X]) = 10$ 에 대입하면

$$\frac{9}{1500 + M_X} = 10 \times \frac{1}{150} \times \frac{10}{M_X} = \frac{100}{150M_X} = \frac{2}{3M_X}$$

양변에 $3M_X(1500 + M_X)$ 를 곱하면

$$27M_X = 2(1500 + M_X) = 3000 + 2M_X \Rightarrow 25M_X = 3000$$

한편 이 평형은 두 입자가 하나로 합쳐지는 반응이므로 K 는 무차원이 아니라 농도의 역수 차원을 가진다. 즉 문제의 $K = 10$ 은 정확히는 $10 \text{ M}^{-1} = 10 \text{ L/mol}$ 이며, 위 계산에서 농도를 모두 M 단위로 넣었으므로 그대로 쓰면 된다.

$$M_X = \frac{3000}{25} = 120 \text{ g/mol}$$

(2) X의 분자식 = $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_4$

구성 원자의 개수비가 $\text{C} : \text{H} : \text{O} = 1 : 2 : 1$ 이므로 X의 실험식은 CH_2O 이고, 실험식량은

$$12 + 2 \times 1 + 16 = 30$$

이다. 분자식은 실험식의 정수배 $(\text{CH}_2\text{O})_n$ 꼴이고 분자량은 (1)에서 구한 몰 질량 120 g/mol 에 해당하므로

$$n = \frac{\text{분자량}}{\text{실험식량}} = \frac{120}{30} = 4$$

$$X = (\text{CH}_2\text{O})_4 = \text{C}_4\text{H}_8\text{O}_4$$

(3) $[X]_0 = 0.15 \text{ M}$

투약 직후 X의 초기 농도를 c , 반응한 농도를 x 라 하고 ICE 표를 쓰면 (단위 M)

	단백질 A	물질 X	복합체 A-X
초기 (I)	0.1	c	0
변화 (C)	$-x$	$-x$	$+x$
평형 (E)	$0.1 - x$	$c - x$	x

A와 X는 1 : 1로 결합하므로 A가 줄어든 만큼 X도 줄고 복합체가 생긴다. 조건은 A의 농도를 초기의 50% 이하, 즉 $0.1 - x \leq 0.05$ 이고, X를 **최소량**으로 넣으려면 등호가 성립해야 하므로

$$x = 0.05 \text{ M} \rightarrow [A] = 0.05, [A-X] = 0.05, [X] = c - 0.05$$

이다. 이를 평형 상수 식에 넣으면

$$K = \frac{[A-X]}{[A][X]} = \frac{0.05}{0.05(c - 0.05)} = \frac{1}{c - 0.05} = 10$$

$$\Rightarrow c - 0.05 = 0.1 \Rightarrow c = 0.15$$

르샤틀리에 원리에 따라 c 를 키울수록 평형은 정반응 쪽으로 더 밀려 x 가 커지고 $[A]$ 는 단조 감소한다. 따라서 $c = 0.15 \text{ M}$ 이 조건 “ $[A] \leq 0.05 \text{ M}$ ”을 만족시키는 **최솟값**이다.

$$[X]_0 = 0.15 \text{ M}$$

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	물질 X의 몰 질량을 구하는 과정과 결과를 바르게 설명하면 2점.	2점
(2)	물질 X의 분자식을 바르게 구하면 1점.	1점
(3)	체액에 투입한 물질 X의 초기 농도를 구하는 과정과 결과를 바르게 설명하고 그 값을 구하면 2점. 물질 X의 초기 농도를 정성적으로 바르게 구했으나 정량적 값을 틀리게 구하면 1점.	2점

문제 12 반응 속도와 반감기 · 반응 엔탈피 · 전기 분해

반감기 · 결합 에너지 · 산화·환원

(1) A, B, C 모두 1차 반응 / 산화철 촉매 2배, 카탈라제 10^{10} 배

(a) 반응 차수 — 표에서 농도가 절반씩 줄어드는 데 걸린 시간(반감기)을 구간별로 읽으면

용기	$1 \rightarrow 0.5 \text{ M}$	$0.5 \rightarrow 0.25 \text{ M}$	$0.25 \rightarrow 0.125 \text{ M}$
A	1000 초	1000 초	1000 초
B	500 초	500 초	500 초
C	1×10^{-7} 초	1×10^{-7} 초	1×10^{-7} 초

로 세 용기 모두 반감기가 초기 농도에 무관하게 일정하다. 반감기가 농도와 무관한 것은 1차 반응의 특징이다. 실제로

$$0\text{차: } t_{1/2} = \frac{[A]_0}{2k} \propto [A]_0, \quad 1\text{차: } t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} = \text{일정}, \quad 2\text{차: } t_{1/2} = \frac{1}{k[A]_0} \propto \frac{1}{[A]_0}$$

이므로, 0차라면 다음 반감기가 절반(500초)으로 줄고 2차라면 두 배(2000초)로 늘어야 하는데 표는 그렇지 않다.

(b) 평균 반응 속도 비교 — 첫 반감기 동안 과산화수소 소모를 기준으로 한 평균 속도 $\bar{v} = -\Delta[\text{H}_2\text{O}_2]/\Delta t$ 는

$$\bar{v}_A = \frac{0.5 \text{ M}}{1000 \text{ s}} = 5 \times 10^{-4} \text{ M/s}, \quad \bar{v}_B = \frac{0.5}{500} = 1 \times 10^{-3} \text{ M/s},$$

$$\bar{v}_C = \frac{0.5}{1 \times 10^{-7}} = 5 \times 10^6 \text{ M/s}$$

이고, 촉매가 없는 A를 기준으로 비를 취하면

$$\frac{\bar{v}_B}{\bar{v}_A} = \frac{1 \times 10^{-3}}{5 \times 10^{-4}} = 2, \quad \frac{\bar{v}_C}{\bar{v}_A} = \frac{5 \times 10^6}{5 \times 10^{-4}} = 1 \times 10^{10}$$

산화철 촉매는 2배, 카탈라제 효소는 10^{10} 배 빠르게 한다. 촉매는 반응 엔탈피 ΔH 와 평형(최종 도달 상태)은 바꾸지 않는다. 반면 반응 차수는 원리상 바꿀 수 있다 — 촉매는 반응 경로(메커니즘) 자체를 바꾸기 때문이며, 실제로 효소 반응은 기질 농도가 높으면 효소가 포화되어 0차로 거동하기도 한다. 다만 이 문제에서는 세 용기 모두 반감기가 일정하다는 실험 사실로부터 A, B, C가 모두 1차 반응임이 확인된다.

(2) 용기 A의 온도가 가장 낮다 ($\Delta H = -140$ kJ, 발열 반응)

(a) 결합 에너지로 반응 엔탈피 계산 — 과산화수소의 구조는 H-O-O-H이므로 분자당 O-H 결합 2개와 O-O 결합 1개를 갖고, 물은 분자당 O-H 결합 2개, 산소는 O=O 결합 1개를 갖는다. 반응식 $2\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq}) \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{O}_2(\text{g})$ 기준으로

- 끊는 결합: O-H $\times$ 4, O-O $\times$ 2
- 만드는 결합: O-H $\times$ 4, O=O $\times$ 1

$$\begin{aligned}\Delta H &= \sum(\text{끊는 결합 에너지}) - \sum(\text{만드는 결합 에너지}) \\ &= [4(460) + 2(180)] - [4(460) + 1(500)] = (1840 + 360) - (1840 + 500) \\ &= 2200 - 2340 = -140 \text{ kJ}\end{aligned}$$

이다. ($\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq})$ 와 $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ 의 기화열이 같다고 했으므로 용액 상태의 보정이 서로 상쇄되어 기체 상태의 결합 에너지를 그대로 쓸 수 있다.) 값이 음수이므로 발열 반응이며, 과산화수소 1 mol당 $140/2 = 70$ kJ의 열을 낸다. 결합 에너지만 보아도 약한 O-O 결합(180 kJ/mol) 2개가 끊어지고 강한 O=O 결합(500 kJ/mol) 1개가 생기므로 발열임을 알 수 있다.

(b) 2000초 동안의 반응 진행도 — (1)의 반감기를 쓰면 2000초는

$$\text{A: } \frac{2000}{1000} = 2 \text{ 반감기, B: } \frac{2000}{500} = 4 \text{ 반감기, C: } \frac{2000}{10^{-7}} = 2 \times 10^{10} \text{ 반감기}$$

이고, 남은 농도는 $[\text{H}_2\text{O}_2] = 1 \times (1/2)^N$ 이므로

- A: 남은 농도 0.25 M $\rightarrow$ 소모량 0.75 mol (1 L 기준)
- B: 남은 농도 0.0625 M $\rightarrow$ 소모량 0.9375 mol
- C: 사실상 0 M $\rightarrow$ 소모량 1 mol (거의 즉시 완결)

(c) 방출 열량과 온도 — 발열량은 소모된 과산화수소의 몰수에 비례하여 $Q = n \times 70$ kJ이므로

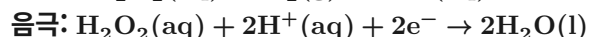
$$Q_A = 0.75 \times 70 = 52.5 \text{ kJ, } Q_B = 0.9375 \times 70 \approx 65.6 \text{ kJ, } Q_C = 1 \times 70 = 70 \text{ kJ}$$

이다. 여기서 $\Delta T = Q/C$ (C는 계의 열용량)이므로, 아래 가정 아래에서 온도 상승은 Q에 비례한다.

- 열량계는 단열이어서 발생한 열이 밖으로 새지 않는다.
- 세 용기의 열용량이 사실상 같다. 용액 1 L의 열용량이 약 4180 J/K인 데 비해 B에 넣은 산화철 10 g의 열용량은 약 6.5 J/K로 0.2% 미만이고, 카탈라제 1 mg은 더욱 작다.
- 발생한 $\text{O}_2(\text{g})$ 가 빠져나가며 가져가는 열은 무시한다.
- 반감기는 등온 조건의 값으로 근사한다(발열로 온도가 오르면 속도가 더 빨라지지만, 세 용기에 같은 방향으로 작용하므로 대소 관계는 바뀌지 않는다).

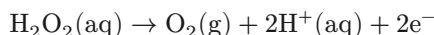
$$Q_A < Q_B < Q_C \rightarrow \Delta T_A < \Delta T_B < \Delta T_C \rightarrow \text{용기 A의 온도가 가장 낮다}$$

측매는 반응 엔탈피 자체를 바꾸지 않으므로 최종적으로 완전히 반응하면 세 용기의 총 발열량은 같아진다. 2000초라는 중간 시점에서 차이가 생기는 이유는 오직 반응 속도(진행도)의 차이 때문이다.

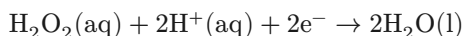
(3) 양극: $\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq}) \rightarrow \text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^-$ 

과산화수소에서 산소의 산화수는 -1로, 홑원소 물질 O_2 의 0과 물의 -2 사이의 중간값이다. 따라서 H_2O_2 는 산화될 수도, 환원될 수도 있다. 물이 전기 분해되지 않는 조건이므로 양극·음극 모두에서 반응하는 것은 과산화수소이다.

- 양극(산화 전극) — 산화수가 -1 $\rightarrow$ 0으로 올라가며 전자를 잃고 산소 기체가 발생한다.



- 음극(환원 전극) — 산화수가 -1 $\rightarrow$ -2로 내려가며 전자를 얻어 물이 생성된다.



두 반쪽 반응은 전자 수가 2개로 이미 같으므로 그대로 더하면 H^+ 와 e^- 가 상쇄되어



제시문의 카탈라제 반응과 같은 알짜 반응(과산화수소의 불균등화)이 얻어진다. 염기성 전해질을 쓴 경우에는 양극 $\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq}) + 2\text{OH}^-(\text{aq}) \rightarrow \text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 2\text{e}^-$, 음극 $\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-(\text{aq})$ 로 쓸 수 있으며 알짜 반응은 같다. 물이 전기 분해된다면 양극에서 $2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{O}_2(\text{g}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + 4\text{e}^-$, 음극에서 $2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g}) + 2\text{OH}^-(\text{aq})$ 가 일어나 음극에서 수소 기체가 나오게지만 르제이 조거에서는 그렇지 않다.

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	반응 차수와 반응 속도를 바르게 비교하면 각각 1점. 반응 차수는 A, B, C에서 반감기가 일정함을 이용해 각각 1차 반응임을 알아낼 수 있고 각 반응 차수를 답하면 1점. 평균 반응 속도 비교 시 산화철 촉매는 과산화수소 분해 반응을 2배, 카탈라제 효소는 반응 속도를 10^{10} 배만큼 빠르게 함을 알아내면 1점.	2점
(2)	일정한 반응 시간 동안 A에서 반응이 가장 덜 진행됨을 이용해 온도 변화를 비교하여 A의 온도가 가장 낮음을 설명하면 1점. 결합 에너지를 이용해 반응 엔탈피를 구해 발열 또는 흡열 여부를 판단하면 1점.	2점
(3)	양극(산화 전극)과 음극(환원 전극)에서 일어나는 화학 반응식을 바르게 작성하면 1점.	1점

2022학년도 · 해설편

문제 1	날숨 속 이산화 탄소와 탄산의 이온화 상수
문제 2	삼투압과 몰 농도
문제 3	이산화 탄소의 전기화학적 환원과 분자 구조
문제 4	기체 반응의 양적 관계와 질량 보존
문제 5	산화·환원 반응과 제철
문제 6	중화 반응과 약산의 이온화 상수

단원	화학 결합·분자간 힘 · 반응과 에너지 · 평형·반응 속도 · 산·염기·산화환원 · 상태·용액
핵심 개념	이상 기체 방정식과 몰 농도, 탄산의 이온화 상수, 삼투압과 반트 호프 법칙, 이산화 탄소의 전기화학적 환원, 전자쌍 반발 이론과 분자 구조, 기체 반응의 양적 관계, 산화·환원과 제철, 중화 반응과 이온화 상수
문항 수	6문항 (소문항 14개) · 20점

II. 예시답안

문제 1 **날숨 속 이산화 탄소와 탄산의 이온화 상수**

이상 기체 · 수화 평형 · 이온화 상수

(1) $K_a = 1.11 \times 10^{-7}$ (a) **기체가 차지하는 부피** — 풍선 내부의 전체 부피 3.5 L 가운데 물이 차지하는 몫을 먼저 뺀다. 물의 밀도가 1 kg/L이므로 500 g = 0.5 kg의 물은 0.5 L를 차지한다.

$$V_{\text{기체}} = 3.5 - 0.5 = 3.0 \text{ L}$$

(b) **이산화 탄소의 부피와 몰수** — 날숨의 부피비가 4 %이므로

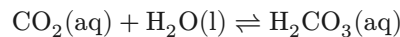
$$V_{\text{CO}_2} = 3.0 \times 0.04 = 0.12 \text{ L}$$

이고, 이상 기체 상태 방정식에 $P = 1 \text{ atm}$, $T = 300 \text{ K}$, $R = 0.08 \text{ atm} \cdot \text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 을 넣으면

$$n_{\text{CO}_2} = \frac{PV}{RT} = \frac{1 \times 0.12}{0.08 \times 300} = \frac{0.12}{24} = 5.0 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

(c) **물에 녹은 이산화 탄소의 농도** — 그 절반이 물에 녹고, 물의 부피는 0.5 L이므로

$$n_{\text{녹은}} = \frac{1}{2} \times 5.0 \times 10^{-3} = 2.5 \times 10^{-3} \text{ mol}, \quad [\text{CO}_2]_{aq} = \frac{2.5 \times 10^{-3}}{0.5} = 5.0 \times 10^{-3} \text{ M}$$

(d) **수화 평형 — 탄산의 농도** — 녹아 있는 이산화 탄소가 모두 탄산인 것은 아니다. 물에 녹은 이산화 탄소는 대부분 $\text{CO}_2(\text{aq})$ 그대로 있고, 그중 500분자에 1분자만 물과 결합하여 탄산이 된다.

$$[\text{H}_2\text{CO}_3]_0 = \frac{5.0 \times 10^{-3}}{500} = 1.0 \times 10^{-5} \text{ M}$$

이것이 이온화하기 전 탄산의 명목 농도이다.

(e) **이온화 평형 — 이온의 농도** — pH가 6이므로 $[\text{H}_3\text{O}^+] = 1.0 \times 10^{-6} \text{ M}$ 이다. 순수한 물에 탄산만 녹아 있으므로 H_3O^+ 의 공급원은 탄산의 첫째 이온화뿐이고(물의 자동 이온화 10^{-7} M 는 무시), 전하 균형에서

$$[\text{HCO}_3^-] = [\text{H}_3\text{O}^+] = 1.0 \times 10^{-6} \text{ M}$$

이온화한 만큼 탄산이 줄어드므로 평형에서 남은 탄산은

$$[\text{H}_2\text{CO}_3] = 1.0 \times 10^{-5} - 1.0 \times 10^{-6} = 9.0 \times 10^{-6} \text{ M}$$

(f) 이온화 상수

$$K_a = \frac{[\text{HCO}_3^-][\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]} = \frac{(1.0 \times 10^{-6})(1.0 \times 10^{-6})}{9.0 \times 10^{-6}} = \frac{1.0 \times 10^{-12}}{9.0 \times 10^{-6}} = 1.11 \times 10^{-7}$$

$$K_a = 1.11 \times 10^{-7}$$

(g) 세 가지 확인

- 분모에서 빼는 것을 잊으면 안 된다. 이온화한 비율이 $10^{-6}/10^{-5} = 10\%$ 나 되므로 “약산은 거의 이온화하지 않는다”는 근사가 통하지 않는다. 명목 농도 $1.0 \times 10^{-5} \text{ M}$ 를 그대로 쓰면 $K_a = 1.0 \times 10^{-7}$ 로 약 10 % 작게 나온다.
- 무엇이 이온화 상수인가. 여기서 구한 것은 반응식대로 **탄산 자체**의 이온화 상수이다. 만약 분모에 녹아 있는 이산화 탄소 전체 $5.0 \times 10^{-3} \text{ M}$ 를 쓰면 $10^{-12}/(5.0 \times 10^{-3}) = 2.0 \times 10^{-10}$ 으로 약 555배나 작아진다. 문제에서 “500분자당 1분자”라는 수화 비율을 따로 준 이유가 바로 이 구별에 있다.
- 둘째 이온화는 무시해도 되는가. HCO_3^- 가 다시 이온화하여 CO_3^{2-} 가 되는 반응은 K_{a2} 가 K_{a1} 보다 훨씬 작아, pH 6에서는 그 양이 무시할 만하다.

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	이상 기체 방정식을 이용하여 풍선 속 이산화 탄소의 몰수를 계산할 수 있는가? 물에 녹은 탄산의 몰 농도를 구할 수 있는가? 주어진 반응식의 이온화 상수를 구할 수 있는가?	3점

문제 2 삼투압과 몰 농도

수두압 · 반트 호프 법칙 · 농도 환산

(1) 3.75 g/L (= 0.01875 M)

- (a) 평형에서 무엇이 균형을 이루는가 — 순수한 물이 반투막을 통과해 주머니로 들어가면 관 속의 액면이 올라간다. 액면이 더 이상 올라가지 않는 것은, 솟아오른 액체 기둥의 무게가 만드는 압력이 물을 밀어 넣으려는 삼투압과 정확히 같아졌기 때문이다. 따라서

$$\Pi = \rho gh$$

- (b) 수두압 계산 — $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $g = 9 \text{ m/s}^2$, $h = 5 \text{ m}$ 이므로

$$\Pi = 1000 \times 9 \times 5 = 45000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} = 45000 \text{ Pa} = \frac{45000}{100000} = 0.45 \text{ atm}$$

- (c) 대기압 2 atm은 왜 쓰이지 않는가 — 대기압은 비커의 수면과 관 위쪽 액면에 똑같이 작용하므로 두 지점의 압력을 비교할 때 서로 소거된다. 압력 차를 만드는 것은 오직 두 액면의 높이 차 h 뿐이다. 즉 2 atm은 답에 영향을 주지 않는 자료이다.

- (d) 반트 호프 법칙으로 몰 농도 구하기 — 묽은 용액의 삼투압은 용질 입자의 몰 농도에만 비례한다. 온도는 $27^\circ\text{C} = 27 + 273 = 300 \text{ K}$ 이므로

$$\Pi = cRT \rightarrow c = \frac{\Pi}{RT} = \frac{0.45}{0.08 \times 300} = \frac{0.45}{24} = 0.01875 \text{ mol/L}$$

분자 A는 이온화하지 않는 하나의 분자이므로 반트 호프 인자는 $i = 1$ 이며, 이 값이 곧 A의 몰 농도이다.

- (e) 질량 농도로 환산 — 분자량이 200 g/mol이므로

$$0.01875 \text{ mol/L} \times 200 \text{ g/mol} = 3.75 \text{ g/L}$$

$$\Pi = \rho gh = 0.45 \text{ atm} \rightarrow c = \frac{\Pi}{RT} = 0.01875 \text{ M} \rightarrow 3.75 \text{ g/L}$$

- (f) 의미 해석 — 겨우 0.01875 M, 곧 리터당 3.75 g의 묽은 용액이 5 m나 되는 물기둥을 밀어 올린다. 삼투압이 총괄성 가운데 가장 민감한 성질인 이유가 여기에 있으며, 고분자나 단백질처럼 몰 농도가 매우 낮은 용질의 분자량을 재는데 삼투압법이 쓰이는 것도 같은 까닭이다. 한편 물이 들어오면서 주머니 속 용액은 묽어지므로 위에서 구한 것은 엄밀히는 평형에서의 농도이다. 주머니와 관의 부피가 주어지지 않아 희석의 정도를 따로 계산할 수는 없다.

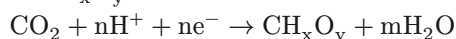
채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	삼투압을 계산할 수 있는가? 반트 호프 법칙을 이용하여 용액의 몰 농도를 계산할 수 있는가? 알아낸 몰 농도를 주어진 농도로 변환할 수 있는가?	3점

문제 3 이산화 탄소의 전기화학적 환원과 분자 구조

계수 유도 · 산화수 · 전자쌍 반발 이론

(1) 아래 표의 7가지 생성물 — 전자쌍 반발 이론으로 구조를 예측한다

(a) 반응식의 계수부터 맞춘다 — 생성물을 CH_xO_y 라 하면 반응식은

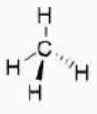
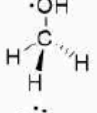
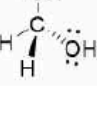
이고, 원자와 전하가 각각 맞아야 하므로

- 탄소: 왼쪽 1개, 오른쪽 1개 → 자동으로 맞춤
- 산소: 왼쪽 2개, 오른쪽 $y + m$ 개 → $m = 2 - y$
- 수소: 왼쪽 n 개, 오른쪽 $x + 2m$ 개 → $n = x + 2m = x + 4 - 2y$
- 전하: 왼쪽 $(+n) + (-n) = 0$, 오른쪽 0 → 맞춤

(b) 전자 수는 곧 산화수의 감소량 — CO_2 에서 탄소의 산화수는 +4이다. 생성물 CH_xO_y 에서 H를 +1, O를 -2로 두면 탄소의 산화수는 $2y - x$ 이므로, 산화수의 감소량은

$$4 - (2y - x) = x + 4 - 2y = n$$

으로 (a)에서 얻은 n 과 정확히 같다. 즉 전자 1개가 산화수를 1만큼 내린다는 산화·환원의 기본 관계가 그대로 성립한다.(c) 가능한 생성물 — x 와 y 에 작은 값을 넣어 실제로 존재하는 안정한 화학종을 고르면 아래 표의 7가지가 얻어진다. n 은 모두 짝수인데, 이는 $n = x + 4 - 2y$ 에서 x (수소 원자 수)가 짝수이기 때문이다.

x	y	화학식	구조
0	0	C	흑연은 탄소 원자 1개에 다른 탄소 원자 3개가 평면에서 정육각형 모양으로 결합한 층상 구조임. 다이아몬드는 탄소 원자 1개에 다른 탄소 원자 4개와 정사면체 모양으로 결합한 3차원 그물 구조.
0	1	CO	$\text{:C}\equiv\text{O:}$ 직선형
2	1	CH_2O	 평면 삼각형
4	0	CH_4	 정사면체
2	2	CH_2O_2	 평면 삼각형
4	1	CH_4O	 사면체
4	2	CH_4O_2	 사면체

[답안 그림 1] 이산화 탄소 환원으로 얻을 수 있는 생성물의 화학식과 구조 (전자를 적게 쓰는 것부터 차례로)

(d) **전자쌍 반발 이론으로 구조를 예측하는 방법** — 중심 원자 주위의 **전자쌍 덩어리 수**(결합 전자쌍 + 비공유 전자쌍)를 세고, 그 덩어리들이 서로 최대한 멀어지도록 배치한다. 이때 이중·삼중 결합은 여러 쌍이 한 방향에 몰려 있으므로 **덩어리 하나로** 센다.

- CO — 루이스 구조 : $C \equiv O :$ 에서 탄소 주위에 삼중 결합 1개 + 비공유 전자쌍 1개 = 덩어리 2개 → **직선형**
- CH_2O (포말데하이드) — 탄소 주위에 $C=O$ 1개, $C-H$ 2개 = 덩어리 3개, 비공유 전자쌍 없음 → **평면 삼각형**(약 120°)
- CH_2O_2 (포산 $HCOOH$) — 중심 탄소 주위에 $C=O$, $C-O$, $C-H$ = 덩어리 3개 → **평면 삼각형**
- CH_4 (메테인) — 단일 결합 4개 → **정사면체**(109.5°)
- CH_4O (메탄올 CH_3OH) — 탄소 주위에 단일 결합 4개 → **사면체**
- CH_4O_2 (메테인다이올 $CH_2(OH)_2$) — 탄소 주위에 단일 결합 4개 → **사면체**
- C(탄소 단체) — 분자가 아니라 원자 결정이다. 흑연은 탄소 하나가 다른 탄소 3개와 결합해(덩어리 3개, 평면 삼각형) 정육각형 그물의 층상 구조를 이루고, 다이아몬드는 탄소 4개와 결합해(덩어리 4개, 정사면체) 3차원 그물 구조를 이룬다.

산소 원자 쪽도 같은 규칙을 따른다. $-OH$ 의 산소는 결합 2개 + 비공유 전자쌍 2개 = 덩어리 4개이므로 결합각이 약 104° 인 굽은 모양이다.

(2) $n = 6$ (생성물은 메탄올 CH_3OH , 물의 계수는 $m = 1$)

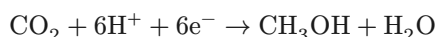
(a) **조건을 식으로** — 탄소의 산화수가 -2 이므로 (1)-(b)의 관계에서

$$2y - x = -2$$

(b) **해당하는 생성물 찾기** — 표의 7가지 가운데 이 조건을 만족하는 것은 $(x, y) = (4, 1)$, 곧 $CH_4O = CH_3OH$ 하나뿐이다. 실제로 메탄올에서 탄소는 수소 3개와 결합해 -3 , 산소 1개와 결합해 $+1$ 을 얻으므로 산화수가 $-3 + 1 = -2$ 이다. (다른 것들은 CO , CH_2O_2 가 $+2$, C , CH_2O , CH_4O_2 가 0 , CH_4 가 -4 이다.)

(c) **계수**

$$n = x + 4 - 2y = 4 + 4 - 2 = 6, \quad m = 2 - y = 1$$



검산하면 탄소 $1 = 1$, 산소 $2 = 1 + 1$, 수소 $6 = 4 + 2$, 전하 $0 = 0$ 으로 모두 맞는다.

$$n = 6$$

(3) **1 : 4**

(a) **전자 수를 가르는 것은 산화수의 변화폭** — (1)-(b)에서 n 은 탄소 산화수의 감소량과 같으므로, 산화수가 가장 적게 내려간 생성물이 전자를 가장 적게 쓰고 가장 많이 내려간 생성물이 전자를 가장 많이 쓴다.

- 가장 적게: $+4 \rightarrow +2$, 감소량 2 → CO 와 CH_2O_2 (포산), **전자 2개**
- 가장 많게: $+4 \rightarrow -4$, 감소량 8 → CH_4 (메테인), **전자 8개**

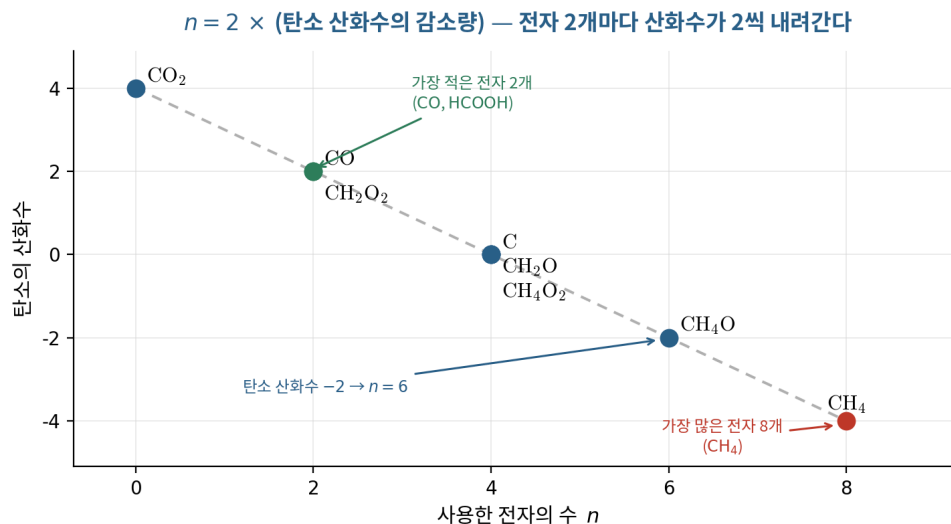


(b) **비율**

$$2 : 8 = 1 : 4$$

$$\text{전자 수의 비} = 2 : 8 = 1 : 4$$

(c) **의미 해석** — 같은 양의 이산화 탄소를 처리하더라도 메테인까지 완전히 환원하려면 일산화 탄소를 만들 때보다 4배의 전하가 필요하다. 전압이 같다면 전기 에너지도 4배가 든다는 뜻이므로, 전기화학적 이산화 탄소 환원에서는 “무엇을 만들 것인가”가 곧 전력 소모를 결정한다. 반대로 생성물의 연료로서의 가치도 전자를 많이 넣은 쪽이 크다.



[답안 그림 2] 생성물의 탄소 산화수와 사용한 전자 수. 기울기 -1 의 직선 위에 놓이는 것이 $n = \text{산화수 감소량}$ 이라는 관계이다.

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	이산화 탄소 환원 반응의 생성물을 예측하고, 그 구조를 정확히 표현할 수 있는가? 6개 이상의 화학식과 구조를 설명하면 2점, 5개의 화학식과 구조를 설명하면 1점, 4개 이하이면 0점.	2점
(2)	탄소의 산화수가 -2 인 화합물의 계수 n 을 올바르게 구하면 1점.	1점
(3)	가장 적은 전자와 가장 많은 전자를 사용한 반응의 전자 수 비를 올바르게 구하면 1점.	1점

문제 4 기체 반응의 양적 관계와 질량 보존

아보가드로 법칙 · 계수비 · 질량 보존

(1) B의 분자량 = 34 g/mol

(a) B가 차지한 부피 — 온도와 압력이 그대로이므로 아보가드로 법칙에 따라 부피는 몰수에 비례한다. A만 있을 때 6 L, B를 넣은 뒤 18 L이므로 B가 차지한 부피는

$$V_B = 18 - 6 = 12 \text{ L}$$

(b) 몰수와 분자량 — 20 °C, 1기압에서 기체 1몰의 부피가 24 L이므로

$$n_B = \frac{12}{24} = 0.5 \text{ mol}, \quad M_B = \frac{17}{0.5} = 34 \text{ g/mol}$$

$$M_B = 34 \text{ g/mol}$$

같은 방법으로 $n_A = 6/24 = 0.25 \text{ mol}$, $M_A = 16/0.25 = 64 \text{ g/mol}$ 이다.

(2) A : B : C = 1 : 2 : 2

(a) 반응 전의 몰수 — (1)에서 $n_A = 0.25 \text{ mol}$, $n_B = 0.5 \text{ mol}$ 이다.

(b) 반응 후의 기체 몰수 — 반응이 끝난 뒤 온도는 130 °C이고 그 온도에서 기체 1몰의 부피는 33 L이다. 생성물 가운데 D는 고체이므로 기체의 부피에 사실상 기여하지 않는다. 따라서 16.5 L는 모두 기체 C가 차지한 부피이고

$$n_C = \frac{16.5}{33} = 0.5 \text{ mol}$$

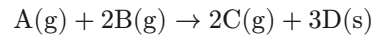
(c) 계수비 — 반응이 완결되어 A와 B가 모두 소모되었다면, 소모·생성된 몰수의 비가 곧 반응식의 계수비이다.

$$A : B : C = 0.25 : 0.5 : 0.5 = 1 : 2 : 2$$

$$A : B : C = 1 : 2 : 2$$

(3) D의 분자량 = 32 g/mol

(a) 전체 반응식 — (2)의 1 : 2 : 2에 C : D = 2 : 3을 이어 붙이면



(b) D의 몰수 — $n_C = 0.5 \text{ mol}$ 이므로 계수비에서

$$n_D = 0.5 \times \frac{3}{2} = 0.75 \text{ mol}$$

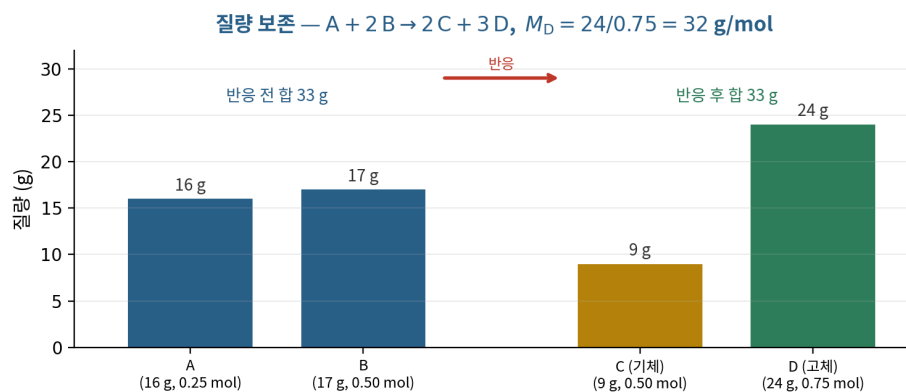
(c) 질량 보존 — 반응 전후 질량의 합은 변하지 않는다. 반응 전 총 질량은 16 + 17 = 33 g이고, 생성된 C의 질량은 18 g/mol × 0.5 mol = 9 g이므로

$$m_D = 33 - 9 = 24 \text{ g}$$

(d) 분자량

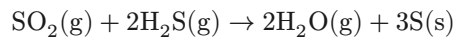
$$M_D = \frac{24 \text{ g}}{0.75 \text{ mol}} = 32 \text{ g/mol}$$

$$M_D = 32 \text{ g/mol}$$



[답안 그림 3] 질량 보존으로 D의 질량을 얻고, 계수비로 얻은 몰수로 나누어 분자량을 구한다.

(e) 의미 해석 — 어떤 물질인가 — 지금까지 얻은 값은 $M_A = 64$, $M_B = 34$, $M_C = 18$, $M_D = 32$ 이고 D만 고체이다. 이 네 값은 각각 SO_2 , H_2S , H_2O , S와 맞아떨어지며, 계수비까지 넣으면



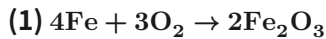
가 되어 원자 수(S 1 + 2 = 3, O 2 = 2, H 4 = 4)가 모두 맞는다. 이산화 황과 황화 수소로부터 황을 회수하는, 실제로 널리 쓰이는 반응이다. 계산 결과가 실재하는 반응과 일치한다는 점이 각 단계의 답이 옳다는 강한 방증이 된다.

채점 기준

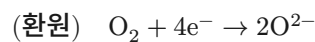
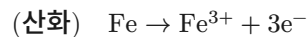
하위 문항	채점 기준	배점
(1)	이상 기체 방정식과 질량을 이용해 B 기체의 몰수와 분자량을 정확히 구할 수 있는가?	1점
(2)	반응 전후의 몰수 변화를 이용하여 화학 반응식의 계수비 A, B, C를 정확히 구할 수 있는가?	1점
(3)	질량 보존의 법칙을 이용하여 생성물 D의 분자량을 정확히 구할 수 있는가?	1점

문제 5 산화·환원 반응과 제철

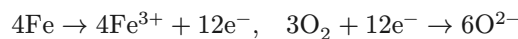
반쪽 반응 · 전자 수 맞추기 · 반응 속도

(a) 생성물의 화학식 — 산화철(III)이므로 철의 산화수는 +3이고 산화물 이온의 산화수는 -2이다. 전기적으로 중성이 되려면 Fe^{3+} 2개와 O^{2-} 3개가 필요하므로 화학식은 Fe_2O_3 이다.

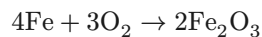
(b) 반쪽 반응



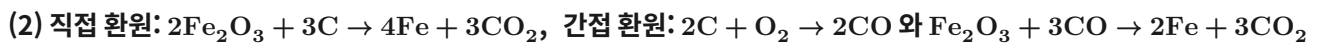
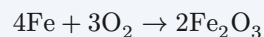
(c) 전자 수를 맞추다 — 잃은 전자와 얻은 전자의 수가 같아야 하므로 산화 반쪽을 4배, 환원 반쪽을 3배 하여 전자 12개로 맞춘다.



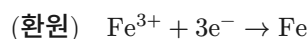
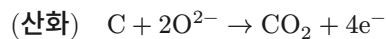
두 식을 더하고 이온을 결합시키면



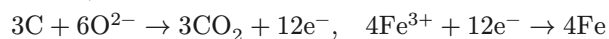
원자 수(Fe 4 = 4, O 6 = 6)와 전하(0 = 0)가 모두 맞는다.



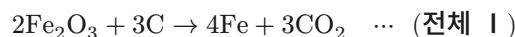
(a) 코크스가 직접 환원제로 작용하는 경우 — 탄소는 0에서 +4로 산화되며 전자 4개를 내놓고, 철은 +3에서 0으로 환원되며 전자 3개를 받는다.



전자 12개로 맞추면 산화 반쪽을 3배, 환원 반쪽을 4배 하여

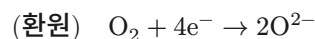
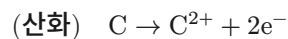


↓



원자 수는 Fe 4 = 4, O 6 = 6, C 3 = 3으로 맞는다.

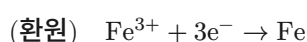
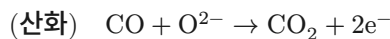
(b) 코크스를 태워 일산화 탄소를 먼저 만드는 경우 — 산소가 모자란 조건에서 탄소는 +2까지만 산화된다.



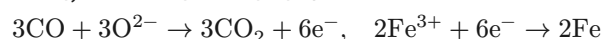
전자 4개로 맞추면



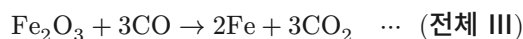
(c) 그 일산화 탄소가 산화철(III)을 환원시키는 반응 — 이번에는 탄소가 +2에서 +4로 산화되며 전자 2개를 내놓는다.



전자 6개로 맞추면 산화 반쪽을 3배, 환원 반쪽을 2배 하여



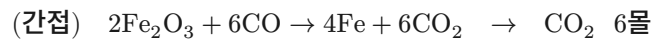
↓



원자 수는 Fe 2 = 2, C 3 = 3, O 3 + 3 = 6 = 3 × 2로 맞는다.

(3) 같은 양의 철당 이산화 탄소는 직접 환원이 절반(1 : 2), 반응 속도는 일산화 탄소 쪽이 유리하다

(a) 철 4몰을 기준으로 맞춘다 — 두 경로를 철의 양이 같아지도록 정리하면



따라서 생성되는 이산화 탄소의 비는 $3 : 6 = 1 : 2$ 이다. 소비되는 탄소에 따져도 마찬가지이다 — 간접 경로에서 CO 6몰을 만들려면 전체 II에 따라 코크스 6몰이 필요하므로, 직접 경로의 3몰보다 두 배가 든다.

(b) 따라서 이산화 탄소 저감에는 직접 환원이 유리하다 — 같은 양의 철을 얻으면서 배출하는 이산화 탄소가 절반이기 때문이다.

(c) 반응물의 상과 반응 속도 — 반응은 반응물 입자가 충돌해야 일어나므로, 단위 시간당 유효 충돌 횟수가 속도를 결정한다.

• **직접 환원(고체 + 고체)**: 코크스 입자와 산화철 입자가 서로 맞닿은 접촉면에서만 반응할 수 있다. 접촉 면적이 전체 표면 가운데 극히 일부이고, 입자가 움직이지 못하므로 새로운 접촉면이 잘 생기지 않는다. 게다가 반응이 진행되면 생성된 철이 사이를 막아 더욱 느려진다.

• **간접 환원(기체 + 고체)**: 일산화 탄소 분자는 열운동으로 자유롭게 움직이며 산화철 덩어리의 표면 전체, 나아가 세공 내부까지 닿을 수 있다. 충돌 빈도가 비교할 수 없이 크고, 소모된 기체는 확산으로 곧바로 보충되며 생성된 이산화 탄소는 빠져나가므로 반응이 계속 유지된다.

따라서 단위 시간당 얻을 수 있는 철의 양은 일산화 탄소를 환원제로 쓰는 쪽이 훨씬 많다.

이산화 탄소 배출량: 직접 : 간접 = 1 : 2 (직접이 유리)

반응 속도: 기체-고체 반응인 간접 환원이 유리 → 두 기준이 서로 반대 방향을 가리킨다

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	철과 산소의 산화·환원 반응식을 바르게 작성하면 1점. 반쪽 반응식의 계수가 틀리더라도 전체 반응식의 계수비를 바르게 작성하면 정답.	1점
(2)	산화철(III)이 코크스와 직접 반응하는 산화·환원 반응식을 작성할 수 있는가? 코크스가 산소와 반응하여 생성된 일산화 탄소가 산화철(III)과 반응하는 산화·환원 반응식을 작성할 수 있는가?	1점
(3)	산화·환원 반응식을 이용하여 생성물의 양적 관계를 비교하고, 반응물의 상이 반응 속도에 미치는 영향을 설명할 수 있는가?	1점

문제 6 중화 반응과 약산의 이온화 상수

이온화 상수 · 전하 균형 · 물질 수지

(1) $K_a = 2 \times 10^{-6}$ (a) pH에서 이온 농도를 읽는다 — pH가 3이므로 $[H_3O^+] = 1.0 \times 10^{-3} \text{ M}$ 이다. 이 용액에는 HA만 녹아 있고 이온의 공급원이 HA의 이온화뿐이므로, 전하 균형에서

$$[A^-] = [H_3O^+] = 1.0 \times 10^{-3} \text{ M}$$

(b) 이온화 평형표

$HA + H_2O \rightleftharpoons H_3O^+ + A^-$	HA	H_3O^+	A^-
초기 농도 (M)	0.5	≈ 0	0
변화 (M)	-1.0×10^{-3}	$+1.0 \times 10^{-3}$	$+1.0 \times 10^{-3}$
평형 농도 (M)	$0.5 - 1.0 \times 10^{-3}$	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}

(c) 이온화 상수

$$K_a = \frac{[H_3O^+][A^-]}{[HA]} = \frac{(1.0 \times 10^{-3})^2}{0.5 - 1.0 \times 10^{-3}} = \frac{1.0 \times 10^{-6}}{0.499} = 2.0 \times 10^{-6}$$

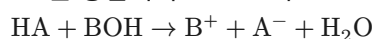
$$K_a = 2 \times 10^{-6} \quad (\Rightarrow \text{p}K_a = 6 - \log 2 = 5.70)$$

(d) 근사의 타당성 — 이온화한 비율이 $10^{-3}/0.5 = 0.2\%$ 에 지나지 않으므로 $0.5 - 10^{-3} \approx 0.5$ 로 두어도 $K_a = 2.0 \times 10^{-6}$ 으로 같은 값이 나온다. 약산이 진한 농도로 있을 때는 근사가 잘 통한다.(2) $x \approx 9.6 \times 10^{-3} \text{ M}$

(a) 혼합 직후의 물질량 — 두 용액을 모두 섞으면 전체 부피는 100 mL가 된다.

$$n(\text{HA})_{\text{총}} = 0.5 \text{ M} \times 50 \text{ mL} = 25 \text{ mmol}, \quad n(\text{BOH}) = x \text{ M} \times 50 \text{ mL} = 50x \text{ mmol}$$

(b) 중화가 바꾸는 것과 바꾸지 않는 것 — BOH는 강염기이므로 HA와 1:1로 중화된다.

이때 산의 총량(HA와 A^- 를 합한 양)은 25 mmol 그대로이고, 형태만 HA에서 A^- 로 옮겨 갈 뿐이다. B^+ 는 반응에 참여하지 않는 구경꾼 이온으로 $50x \text{ mmol}$ 이 그대로 남는다.(c) 전하 균형과 물질 수지 — 최종 pH가 4이므로 $[H_3O^+] = 1.0 \times 10^{-4} \text{ M}$ 이고, $[OH^-] = 10^{-10} \text{ M}$ 는 무시할 수 있다. 전체 부피 100 mL이므로 $[B^+] = 50x/100 = 0.5x \text{ M}$ 이다.

$$\text{전하 균형: } [B^+] + [H_3O^+] = [A^-] \rightarrow [A^-] = 0.5x + 1.0 \times 10^{-4}$$

$$\text{물질 수지: } [HA] + [A^-] = \frac{25}{100} = 0.25 \rightarrow [HA] = 0.25 - 0.5x - 1.0 \times 10^{-4}$$

(d) 이온화 상수 식에 대입하여 x 를 구한다

$$K_a = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{A}^-]}{[\text{HA}]} = \frac{10^{-4}(0.5x + 10^{-4})}{0.25 - 0.5x - 10^{-4}} = 2 \times 10^{-6}$$

양변을 10^{-4} 로 나누면 A^- 와 HA 의 농도비 조건이 된다.

$$\begin{aligned}\frac{0.5x + 10^{-4}}{0.25 - 0.5x - 10^{-4}} &= \frac{2 \times 10^{-6}}{10^{-4}} = 0.02 \\ 0.5x + 10^{-4} &= 0.02(0.25 - 0.5x - 10^{-4}) = 5.0 \times 10^{-3} - 0.01x - 2 \times 10^{-6} \\ 0.51x &= 5.0 \times 10^{-3} - 2 \times 10^{-6} - 1.0 \times 10^{-4} = 4.898 \times 10^{-3} \\ x &= \frac{4.898 \times 10^{-3}}{0.51} = 9.60 \times 10^{-3} \text{ M}\end{aligned}$$

$$x \approx 9.6 \times 10^{-3} \text{ M} \quad (\approx 0.01 \text{ M})$$

(e) 헨더슨-하셀바흐 식으로 계산 — $\text{p}K_a = 5.70$ 이므로 pH 4에서

$$4 = 5.70 + \log \frac{[\text{A}^-]}{[\text{HA}]} \rightarrow \frac{[\text{A}^-]}{[\text{HA}]} = 10^{-1.70} = 0.02$$

산의 총량 0.25 M를 이 비로 나누면 $[\text{A}^-] = 0.25 \times 0.02/1.02 = 4.90 \times 10^{-3} \text{ M}$ 이고, 전하 균형 $[\text{A}^-] = 0.5x + 10^{-4}$ 에서 $0.5x = 4.80 \times 10^{-3}$, 곧 $x = 9.6 \times 10^{-3} \text{ M}$ 로 같다.

(f) 의미 해석 — 넣은 염기의 양은 $50 \times 9.6 \times 10^{-3} = 0.48 \text{ mmol}$ 로, 산의 총량 25 mmol의 2 %도 되지 않는다. 그런데도 pH는 3에서 4로 한 자리나 올라갔다. 처음 용액은 A^- 가 거의 없어 아직 완충 영역에 들어가지 않은 상태였기 때문이다. 실제로 $[\text{A}^-]/[\text{HA}]$ 가 0.002에서 0.02로 정확히 10배 커졌고, 그것이 pH 1단위의 상승으로 나타났다.

(3) 약 $5.3 \times 10^2 \text{ mL}$ (약 532 mL)

(a) pH 3이 요구하는 조건은 “농도비”이다 — 온도가 일정하면 K_a 가 일정하므로, pH가 3이라는 것은 곧

$$\frac{[\text{A}^-]}{[\text{HA}]} = \frac{K_a}{[\text{H}_3\text{O}^+]} = \frac{2 \times 10^{-6}}{10^{-3}} = 2.0 \times 10^{-3} = \frac{1}{500}$$

이라는 뜻이다. 같은 용액 안에서는 농도의 비가 곧 몰수의 비이므로 $n(\text{HA}) = 500 \cdot n(\text{A}^-)$ 이다.

(b) 물질 수지 — 1 M HA 용액을 $k \text{ mL}$ 넣으면 산의 총량은 $25 + k \text{ mmol}$, 전체 부피는 $100 + k \text{ mL}$ 가 된다.

$$n(\text{A}^-) + n(\text{HA}) = 25 + k \rightarrow 501 \cdot n(\text{A}^-) = 25 + k$$

(c) 전하 균형 — B^+ 는 (2)에서 넣은 그대로 $n(\text{B}^+) = 50x = 0.48 \text{ mmol}$ 이고, $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-3} \text{ M}$ 이므로 그 물질량은 $10^{-3} \times (100 + k) \text{ mmol}$ 이다.

$$n(\text{B}^+) + n(\text{H}_3\text{O}^+) = n(\text{A}^-) \rightarrow n(\text{A}^-) = 0.48 + 0.1 + 0.001k = 0.58 + 0.001k$$

(d) 연립하여 k 를 구한다

$$\begin{aligned}501(0.58 + 0.001k) &= 25 + k \\ 290.6 + 0.501k &= 25 + k \rightarrow 0.499k = 265.6 \rightarrow k = 532 \text{ mL}\end{aligned}$$

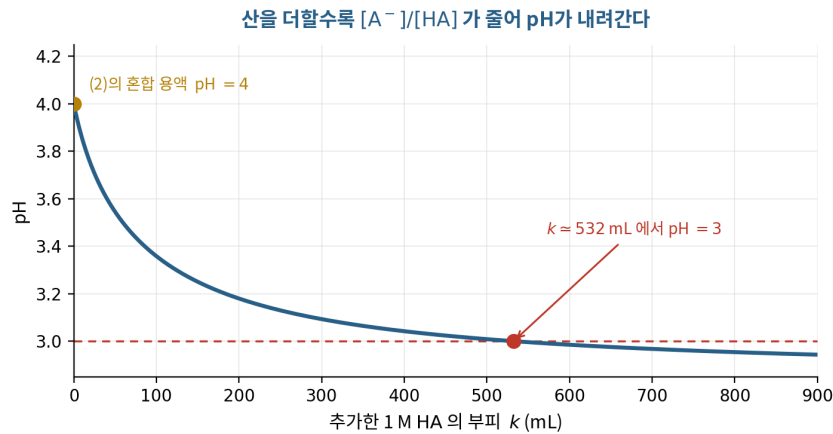
$$k \approx 5.3 \times 10^2 \text{ mL} \quad (\approx 532 \text{ mL})$$

(2)의 x 를 $1.0 \times 10^{-2} \text{ M}$ 로 반올림해서 쓰면 $n(\text{B}^+) = 0.5 \text{ mmol}$ 이 되어 $k \approx 552 \text{ mL}$ 가 된다.

(e) 다른 관점으로 확인 — 처음 왼쪽 비커의 0.5 M HA 용액은 이미 pH 3이었다. 같은 산이므로 pH가 3인 두 용액은 $[\text{A}^-]/[\text{HA}]$ 비가 서로 같고, 비가 같은 용액끼리 섞으면 비가 그대로 유지되어 pH도 3이다. 그러므로 “BOH 50 mL와 새로 넣는 1 M HA만으로 pH 3을 만들면 된다”고 생각해도 된다. 이 경우 전체 부피는 $50 + k \text{ mL}$ 이므로

$$501(0.48 + 0.001(50 + k)) = k \rightarrow 265.5 + 0.501k = k \rightarrow k = 532 \text{ mL}$$

로 같은 값이 나온다.



[답안 그림 4] 1 M HA를 더할수록 $[A^-]/[HA]$ 가 줄어 pH가 내려간다. pH 4에서 출발해 약 532 mL에서 pH 3에 이른다.

- (f) 왜 이렇게 많은 산이 필요한가 — 넣는 HA 가운데 A^- 로 남는 것은 501분의 1뿐이고 나머지는 그대로 HA로 존재한다. 즉 “염기를 되받아치는 데 실제로 쓰이는 몫”이 매우 작아, 겨우 0.48 mmol의 염기를 상쇄하는 데 532 mmol이나 되는 산이 필요하다. 같은 이유로 (2)의 x 를 0.01 M로 반올림하면 염기가 0.02 mmol 늘어난 셈이 되어 필요한 산의 부피가 20 mL나 달라진다. 이 문항에서는 x 를 반올림하지 않고 그대로 쓰는 편이 정확하다.

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	초기 수용액의 농도와 pH로 이온화 상수 K_a 를 구할 수 있는가? 이온화 상수 K_a 를 바르게 구하면 1점.	1점
(2)	두 용액이 혼합되었을 때, 이온화 상수 K_a 에 대한 식을 바르게 표현할 수 있는가? 이온화 상수 K_a 에 대한 식을 이용하여 염기의 농도를 구할 수 있는가?	2점
(3)	주어진 상황에 적합한 산의 부피를 구할 수 있는가?	1점

2021학년도 · 해설편

문제 1	상평형 그림과 삼중점
문제 2	광합성 · 결합 에너지와 반응 엔탈피
문제 3	약산의 이온화 평형 · 완충 용액 · pH
문제 4	화학 평형의 이동 · 르샤틀리에 원리
문제 5	총괄성 · 삼투압 · 분자량 결정
문제 6	수소 연료 전지 · 헤스의 법칙 · 최대 전기에너지

단원	화학 결합·분자간 힘 · 반응과 에너지 · 평형·반응 속도 · 산·염기·산화환원 · 상태·용액
핵심 개념	상평형 그림과 삼중점, 결합 에너지와 반응 엔탈피, 약산의 이온화 평형·완충 용액·pH, 르샤틀리에 원리, 총괄성과 삼투압, 헤스의 법칙과 수소 연료 전지
문항 수	6문항 (소문항 17개) · 20점

II. 예시답안

문제 1 상평형 그림과 삼중점

삼중점의 불변성 · 상평형 그림 판독

(1) 달라지지 않는다 — 행성 X에서도 삼중점은 그대로 0.006 atm, 273.2 K이다

- (a) **삼중점이란 무엇인가** — 삼중점은 고체·액체·기체 세 상이 동시에 평형을 이루는 온도와 압력의 짝이다. 상평형 그림에서는 승화 곡선 A, 용해 곡선 B, 기화 곡선 C 세 곡선이 한 점에서 만나는 점 D가 그것이다. 세 곡선이 만나는 점은 하나뿐이므로 삼중점은 물질마다 딱 하나로 정해진다.
- (b) **왜 환경이 바뀌어도 변하지 않는가** — 세 상의 화학 퍼텐셜이 모두 같아야 한다는 조건이 세 상 사이에 두 개의 등식을 만들고, 이 두 식이 미지수 T 와 P 를 완전히 결정해 버린다. 즉 삼중점에서는 온도도 압력도 고를 여지가 없다(자유도 0). 그 값은 H_2O 분자 사이의 상호작용, 곧 물질 자체의 성질만으로 정해지므로, 밀도·녹는점·끓는점 같은 물질 고유의 상수와 마찬가지로 어느 행성에 있든 동일하다.
- (c) **행성 X의 조건은 무엇을 바꾸는가** — 행성 X의 213 K, 0.006 atm은 상평형 그림 위에서 “지금 H_2O 가 어느 점에 놓여 있는가”를 가리키는 좌표일 뿐이다. 좌표가 바뀌면 어느 상에 있는지는 달라지지만, 그림(=삼중점을 포함한 경계선들) 자체는 조금도 움직이지 않는다.

삼중점 = 물질의 고유 상수 → 행성 X에서도 273.2 K, 0.006 atm으로 동일

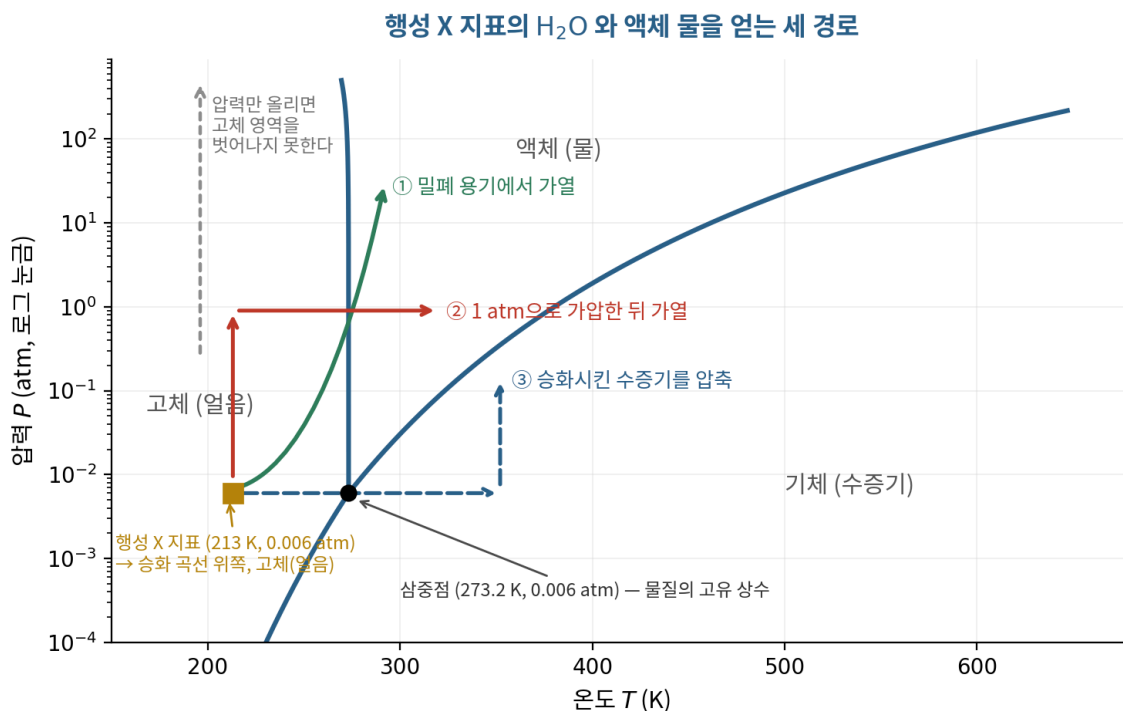
(2) 고체(얼음)로 존재한다. ① 밀폐 용기에서 가열, ② 1 atm까지 가압한 뒤 가열, ③ 승화시킨 수증기를 압축하여 응축

- (a) **어느 상인가** — 그림에서 점의 위치를 읽는다 — 승화 곡선 A는 원점 쪽에서 올라와 삼중점 D(273.2 K, 0.006 atm)에 닿는 곡선이므로, 온도가 낮을수록 그 위의 압력이 작아진다. 따라서 213 K에서 고체와 기체가 평형을 이루는 압력(승화 압력)은 0.006 atm보다 훨씬 작다. 행성 X의 지표 압력은 0.006 atm으로 그보다 크므로, 점 (213 K, 0.006 atm)은 승화 곡선 A의 위쪽에 놓인다. 또 213 K < 273.2 K이므로 용해 곡선 B의 왼쪽이기도 하다. 두 조건을 함께 만족하는 영역은 고체뿐이므로 H_2O 는 얼음으로 존재한다.
- (b) **액체가 되기 위한 조건** — 그림에서 액체 영역은 용해 곡선 B의 오른쪽이면서 기화 곡선 C의 위쪽인 영역이고, 두 곡선이 만나는 점이 바로 삼중점이다. 따라서 액체가 되려면 반드시

$$P > 0.006 \text{ atm (삼중점 압력보다 높을 것)} \quad \text{그리고} \quad T > 273.2 \text{ K (그 압력에서의 용해 온도보다 높을 것)}$$

를 동시에 만족해야 한다. 지금은 둘 다 만족하지 못하므로 온도와 압력을 함께 삼중점 위로 끌어올려야 한다.

- (c) **방법 ① — 밀폐 용기에 얼음을 담고 가열한다.** 용기를 닫아 두면 승화한 수증기가 빠져나가지 못해 내부 압력이 스스로 올라간다. 온도가 오르는 동안 계는 승화 곡선 A를 따라 삼중점 D까지 올라가고, 계속 가열하면 용해 곡선 B를 넘어 액체 영역으로 들어간다. 가열 하나로 온도와 압력이 함께 올라가는 것이 이 방법의 장점이다.
- (d) **방법 ② — 먼저 압력을 1 atm까지 올린 뒤 가열한다.** 기밀 돔이나 압력 용기에 기체를 채워 넣어 0.006 → 1 atm으로 가압하면, 계는 그림에서 수직으로 올라가 여전히 고체 영역에 있다. 이 상태에서 온도를 273.2 K 이상(예: 300 K)으로 올리면 용해 곡선 B를 가로질러 액체가 된다. 지구의 지표 환경을 그대로 재현하는 방법이다.
- (e) **방법 ③ — 승화시켜 얻은 수증기를 압축하여 응축시킨다.** 압력을 0.006 atm으로 둔 채 온도만 올리면 계는 승화 곡선 A를 넘어 기체 영역으로 들어가므로 얼음이 곧바로 수증기가 된다. 이 수증기를 모아 압축기로 압력을 올리면, 273.2 ~ 373 K 사이의 온도에서 기화 곡선 C를 위로 가로질러 물방울로 응축된다. (예를 들어 300 K에서 0.03 atm 이상으로 압축하면 된다.)



[답안 그림 1] 행성 X 지표 조건에서 출발하는 세 경로. 세 방법 모두 “온도와 압력을 함께 삼중점 위로 올린다”는 하나의 원리를 순서만 바꾸어 실행한 것이다.

(f) 빠지기 쉬운 함정 — 한쪽만 바꾸어서는 안 된다

- **압력만 올리는 경우:** 물의 융해 곡선 B는 기울기가 음이어서(얼음이 물보다 밀도가 작기 때문) 압력을 올리면 녹는점이 내려가기는 한다. 그러나 그림에서 보듯 B는 거의 수직에 가까울 만큼 기울기의 절대값이 작다. 213 K는 삼중점보다 60 K나 낮으므로, 압력을 그림의 눈금 끝(218 atm)까지 올려도 여전히 B의 왼쪽, 곧 고체 영역을 벗어나지 못한다.
- **온도만 올리는 경우:** 압력이 삼중점 압력과 같은 0.006 atm에 묶여 있으므로 계는 삼중점을 스치듯 지나 곧바로 기화 곡선의 아래쪽, 즉 기체 영역으로 들어간다. 액체 물은 얻어지지 않고 수증기만 남는다.

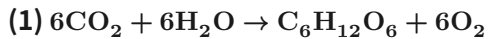
액체 물을 얻는 조건 = $P > P_{\text{삼중점}}$ 그리고 $T > T_{\text{융해}}$ → 온도와 압력을 함께 올려야 한다

채점 기준

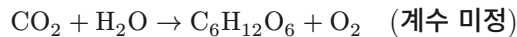
하위 문항	채점 기준	배점
(1)	3중점이 물질의 고유한 성질임을 이해하고 3중점이 변하지 않음을 설명할 수 있다.	1점
(2)	3중점을 이용하여 물질의 상태 변화를 설명할 수 있다.	2점

문제 2 광합성 · 결합 에너지와 반응 엔탈피

계수 유도 · 결합 수 세기 · 반응 엔탈피



(a) 반응물과 생성물 — 제시문에서 반응물은 물과 이산화 탄소, 생성물은 포도당과 산소이다.



(b) 계수 유도 — 포도당의 계수를 1로 두고 $a\text{CO}_2 + b\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + c\text{O}_2$ 라 하면

- 탄소: 왼쪽 a 개, 오른쪽 6개 $\rightarrow a = 6$
- 수소: 왼쪽 $2b$ 개, 오른쪽 12개 $\rightarrow b = 6$
- 산소: 왼쪽 $2a + b = 12 + 6 = 18$ 개, 오른쪽 $6 + 2c$ 개 $\rightarrow c = 6$

세 원소가 모두 맞으므로 계수는 6, 6, 1, 6이다.



(2) 흡열 반응이다

- (a) 직접적인 근거 — 빛이 있어야만 일어난다 — 제시문에 “햇빛 에너지를 사용하여” 만드다고 명시되어 있다. 즉 이 반응은 주위(태양)로부터 에너지를 받아들여야만 진행되며, 빛을 차단하면 멈춘다. 계가 주위에서 에너지를 흡수하는 반응이므로 $\Delta H > 0$, 곧 흡열 반응이다.
- (b) 에너지 관점의 해석 — 흡수한 태양 에너지는 사라지지 않고 생성물의 화학 결합 속에 저장된다. 따라서 생성물 ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + \text{O}_2$)이 반응물($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$)보다 높은 에너지 상태에 있다. 이것이 식물이 태양 에너지를 화학 에너지로 저장한다는 말의 뜻이다.
- (c) 역반응으로 확인 — 이 반응의 역반응은 포도당이 산소와 반응하여 이산화 탄소와 물이 되는 반응, 곧 세포 호흡(또는 포도당의 연소)이다. 연소는 열을 내는 발열 반응이므로 그 역반응인 광합성은 반드시 흡열이어야 한다. 정반응과 역반응의 ΔH 는 부호만 반대이기 때문이다.
- (d) 열적 특성을 아는 방법 — 위와 같은 정성적 근거 외에, (3)처럼 결합 에너지 자료로 ΔH 를 직접 계산하거나, 표준 생성 엔탈피의 차 $\Delta H = \sum \Delta H_f(\text{생성물}) - \sum \Delta H_f(\text{반응물})$ 를 이용하면 흡열·발열 여부를 정량적으로 판정할 수 있다.

(3) $\Delta H = +2722 \text{ kJ/mol}$ — 흡열 반응

- (a) 원리** — 결합을 끊는 데는 에너지가 들고(흡열), 결합이 만들어질 때는 에너지가 나온다(발열). 반응물의 결합을 모두 끊어 낱알의 원자로 만든 뒤 생성물의 결합을 새로 만든다고 보면

$$\Delta H = \sum (\text{끊는 결합의 에너지}) - \sum (\text{만드는 결합의 에너지})$$

- (b) 반응물 쪽 결합 세기** — CO_2 는 $\text{O}=\text{C}=\text{O}$ 이므로 분자마다 $\text{C}=\text{O}$ 이중 결합 2개, H_2O 는 분자마다 $\text{O}-\text{H}$ 결합 2개이다. 각각 6분자씩이므로

$$\text{C}=\text{O} : 6 \times 2 = 12 \text{ 개}, \quad \text{O}-\text{H} : 6 \times 2 = 12 \text{ 개}$$

$$\sum_{\text{반응물}} = 12(799) + 12(463) = 9588 + 5556 = 15144 \text{ kJ}$$

- (c) 생성물 쪽 결합 세기 — 포도당 구조식 읽기** — 그림 2의 고리는 탄소 5개와 산소 1개로 이루어진 6원자 고리이고, 여기에 CH_2OH 의 탄소 1개가 곁가지로 붙어 탄소가 모두 6개이다. 결합을 종류별로 세면

- $\text{C}-\text{C}$: 고리 안의 탄소-탄소 결합 4개 + 곁가지 1개 = 5개
- $\text{C}-\text{O}$: 고리 안의 탄소-산소 결합 2개 + $-\text{OH}$ 5개의 $\text{C}-\text{O}$ = 7개
- $\text{O}-\text{H}$: $-\text{OH}$ 5개 = 5개
- $\text{C}-\text{H}$: 고리 탄소 5개에 각 1개 + CH_2 의 2개 = 7개

원자 수로 계산하면 $\text{H} = 7 + 5 = 12$, $\text{O} = 5 + 1 = 6$, $\text{C} = 6$ 으로 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 과 정확히 맞는다. 여기에 O_2 6분자의 $\text{O}=\text{O}$ 결합 6개를 더하면

$$\begin{aligned} \sum_{\text{생성물}} &= 5(348) + 7(358) + 7(413) + 5(463) + 6(495) \\ &= 1740 + 2506 + 2891 + 2315 + 2970 = 12422 \text{ kJ} \end{aligned}$$

(d) 반응 엔탈피

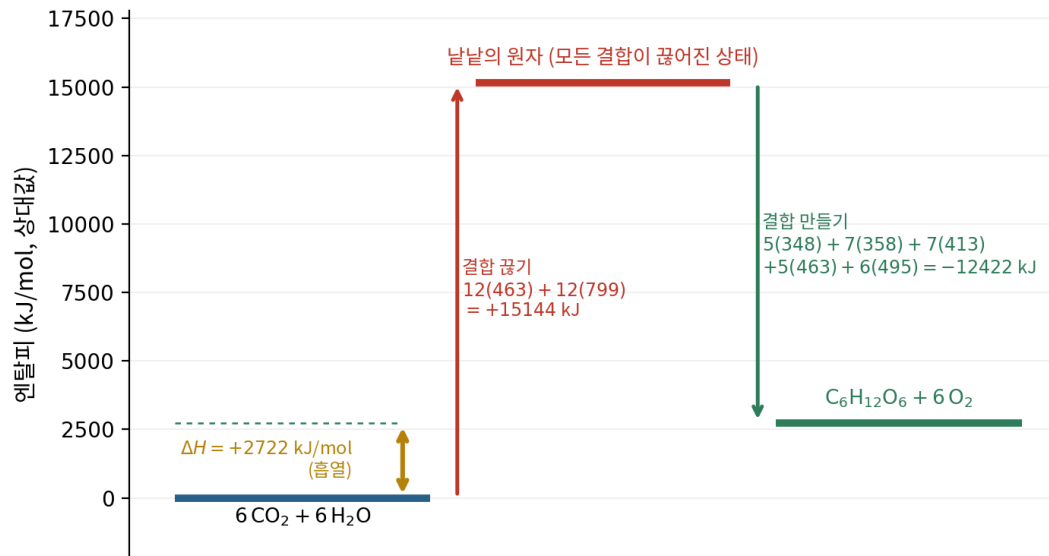
$$\Delta H = 15144 - 12422 = +2722 \text{ kJ/mol} > 0$$

부호가 양이므로 **흡열 반응**이며, 이는 (2)에서 빛의 필요성으로 내린 정성적 판단과 정확히 일치한다.

$$\Delta H = \sum_{\text{반응물}} - \sum_{\text{생성물}} = 15144 - 12422 = +2722 \text{ kJ/mol} \quad (\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \text{ 1 mol 기준, 흡열})$$

- (e) 의미 해석** — 포도당 1 mol을 만드는 데 태양 에너지 약 2722 kJ이 필요하고, 그 에너지가 포도당 분자 안에 그대로 저장된다. 뒤집어 말하면 포도당 1 mol을 완전히 태우면 약 2722 kJ이 방출된다는 뜻이다. 결합의 관점에서 보면, 광합성은 매우 강한 $\text{C}=\text{O}$ 결합(799)을 끊고 그보다 약한 $\text{C}-\text{O}(358) \cdot \text{C}-\text{H}(413) \cdot \text{O}=\text{O}(495)$ 결합으로 바꾸는 과정이므로 에너지가 들 수밖에 없다. 이산화 탄소가 탄소 화합물 가운데 가장 안정한(에너지가 낮은) 형태라는 사실이 바로 이 흡열성의 근원이다.

광합성의 결합 에너지 수지 — 끊는 데 든 에너지가 더 크다



[답안 그림 2] 결합 에너지 수지. 반응물의 결합을 끊는 데 든 15144 kJ이 생성물의 결합에서 되돌려받는 12422 kJ보다 크므로 차이 +2722 kJ만큼 흡열이다.

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	광합성 반응을 반응물과 생성물로 나누어 화학 반응식으로 바르게 표현할 수 있다.	0.5점
(2)	광합성 반응이 흡열 반응임을 판단할 수 있다.	1점
(3)	반응 엔탈피 ΔH 를 구하면 0.5점, 흡열 반응인지 판단하면 0.5점.	1점

문제 3 약산의 이온화 평형 · 완충 용액 · pH

막 평형 · 헨더슨-하셀바흐 · 물질 수지

(1) 중성 형태의 HA

- (a) 무엇이 같아질 수 있는가 — 평형이란 알짜 이동이 멎은 상태이다. 알짜 이동이 일어날 수 있는 화학종은 막을 통과할 수 있는 것뿐이므로, 양쪽 농도가 같아질 수 있는 후보도 막을 통과하는 화학종에 한정된다. 제시문에서 막을 통과하는 것은 오직 중성 분자 HA이다.
- (b) 왜 농도가 같아지는가 — HA의 알짜 이동이 멎으려면 양쪽에서 HA의 화학 퍼텐셜이 같아야 하고, 묽은 용액에서 화학 퍼텐셜은 $\mu = \mu^\circ + RT \ln[HA]$ 이므로 이는 곧 농도가 같다는 뜻이다.
- $$[HA]_L = [HA]_R \equiv h$$
- (c) 나머지 화학종은 왜 같아지지 않는가 — A^- , H^+ , 물, 완충 성분은 막을 통과하지 못하므로 양쪽이 서로 물질을 주고받을 수 없다. 실제로 오른쪽은 pH 8, 왼쪽은 산성이어서 $[H^+]$ 가 크게 다르고, 이 pH 차이 때문에 $[A^-]$ 도 뒤에서 보듯 10^4 배나 차이 난다.

농도가 같은 화학종 = 중성 형태의 HA (막을 통과하는 유일한 화학종)

(2) $[HA]_L = [HA]_R = 1.0 \times 10^{-4} \text{ M}$

(a) **오른쪽 — 완충 용액이 정해 주는 비율** — 오른쪽은 pH 8의 완충 용액이므로 HA가 넘어와도 $[H^+]_R = 10^{-8} \text{ M}$ 이 그대로 유지된다. 이온화 평형 $HA \rightleftharpoons H^+ + A^-$ 의 이온화 상수 식을 A^- 와 HA의 비로 정리하면

$$K_a = \frac{[H^+][A^-]}{[HA]} \rightarrow \frac{[A^-]_R}{[HA]_R} = \frac{K_a}{[H^+]_R} = \frac{10^{-4}}{10^{-8}} = 10^4$$

같은 관계를 로그로 쓴 것이 헨더슨-하셀바흐 식이다. 양변에 상용로그를 취하면

$$\log[H^+] + \log \frac{[A^-]}{[HA]} = \log K_a \rightarrow \text{pH} = \text{p}K_a + \log \frac{[A^-]}{[HA]}$$

$\text{p}K_a = 4$ 이므로 오른쪽에서는 $8 = 4 + \log([A^-]/[HA])$, 곧 그 비가 10^4 이다. 넘어온 산의 99.99 %가 A^- 로 바뀌어 갇힌다.

(b) **왼쪽 — 스스로 정해지는 pH** — 왼쪽은 완충되어 있지 않다. 이온의 공급원이 HA의 이온화뿐이므로 전하 균형에서 $[H^+]_L = [A^-]_L$ 이고(물의 자동 이온화는 나중에 확인), 이온화 상수 식에 넣으면

$$K_a = \frac{[A^-]_L^2}{h} \rightarrow [A^-]_L = \sqrt{K_a h}$$

(c) **산의 총량 보존** — 산은 처음에 왼쪽에만 1 M로 있었고 밖으로 빠져나갈 수 없다. 양쪽 부피가 V 로 같으므로

$$\underbrace{(h + \sqrt{K_a h})V}_{\text{왼쪽}} + \underbrace{(h + 10^4 h)V}_{\text{오른쪽}} = 1 \cdot V$$

$$(10^4 + 2)h + 0.01\sqrt{h} = 1$$

(d) **풀이** — 좌변에서 압도적으로 큰 항은 $10^4 h$ 이다. 우선 이 항만 남기면 $h \approx 10^{-4} \text{ M}$ 이고, 이 값을 나머지 항에 넣어 보면

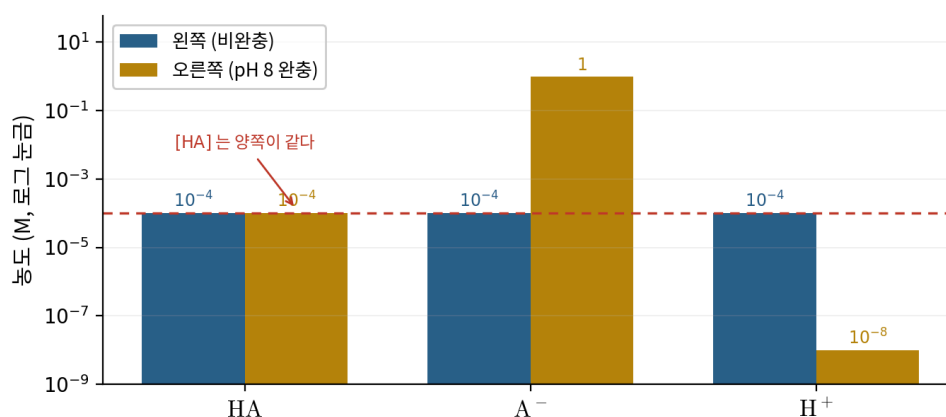
$$2h = 2 \times 10^{-4}, \quad 0.01\sqrt{h} = 0.01 \times 10^{-2} = 10^{-4}$$

로 둘을 합쳐도 1의 0.03 %에 지나지 않는다. 따라서 근사는 매우 좋으며, 남은 항까지 넣어 정확히 풀면 $h = 9.997 \times 10^{-5} \text{ M}$ 로 유효숫자 두 자리에서 $1.0 \times 10^{-4} \text{ M}$ 와 같다.

$$[HA]_L = [HA]_R = 1.0 \times 10^{-4} \text{ M}$$

(e) **의미 해석 — 이온 포획** — 이때 오른쪽의 $[A^-]_R = 10^4 h \approx 1.0 \text{ M}$ 로, 처음 왼쪽에 있던 산의 대부분이 오른쪽으로 옮겨가 이온 형태로 갇혀 있다. 막을 통과하는 것은 중성 분자뿐인데 염기성 쪽에서 곧바로 이온으로 바뀌어 되돌아 오지 못하기 때문이다. 중성 분자만 막을 통과할 수 있을 때 pH가 높은 쪽에 약산이 축적되는 이 현상을 이온 포획이라 한다.

평형에서의 화학종 분포 — 산의 99.99 %가 A^- 로 오른쪽에 갇힌다



[답안 그림 3] 평형에서의 화학종 분포(로그 눈금). HA만 양쪽이 같고, A^- 는 10^4 배 차이가 난다.

(3) $\text{pH}_L = 4.0$ (a) **왼쪽에 남은 것** — (2)에서 평형 상태의 왼쪽 용액은 순수한 물에 HA가 1.0×10^{-4} M 녹아 있고 그것이 스스로 이온화한 상태이다. 이온화 평형표를 평형 농도로 직접 쓰면

왼쪽 수용액	HA	H^+	A^-
평형 농도 (M)	1.0×10^{-4}	y	y

전하 균형에서 $[\text{H}^+]_L = [\text{A}^-]_L = y$ 임을 이미 썼다.(b) **이온화 상수 식에 대입**

$$K_a = \frac{[\text{H}^+][\text{A}^-]}{[\text{HA}]} = \frac{y^2}{1.0 \times 10^{-4}} = 10^{-4}$$

$$y^2 = 10^{-8} \rightarrow y = 1.0 \times 10^{-4} \text{ M}$$

$$\text{pH}_L = -\log_{10}(1.0 \times 10^{-4}) = 4.0$$

$$\text{pH}_L = 4.0$$

(c) **세 가지 확인**

- 물의 자동 이온화를 무시해도 되는가 — $[\text{H}^+]_L = 10^{-4}$ M는 순수한 물의 10^{-7} M보다 1000배 크므로 무시해도 좋다.

- “약산은 거의 이온화하지 않는다”는 근사를 쓴 것은 아닌가 — 여기서는 $[\text{HA}] = [\text{A}^-] = 10^{-4}$ M로 절반이 이온화해 있다. 그러나 (2)에서 평형 농도 $[\text{HA}] = 10^{-4}$ M가 이미 확정되었으므로, 초기 농도에서 출발하는 근사를 쓸 필요 없이 그 값을 그대로 대입한 것이다.

- 헨더슨-하셀바흐 식과 맞는가 — $[\text{A}^-]_L = [\text{HA}]_L$ 이므로 $\log([\text{A}^-]/[\text{HA}]) = 0$, 따라서 $\text{pH} = \text{p}K_a = 4$. 정확히 일치한다.

(d) **두 용액의 대비** — 오른쪽은 pH 8로 $\text{p}K_a$ 보다 4만큼 높아 A^- 가 10^4 배 우세하고, 왼쪽은 pH가 정확히 $\text{p}K_a$ 와 같아 HA와 A^- 가 반반이다. 중성 분자 HA의 농도만 양쪽이 같도록 맞춰지고, 나머지는 각 용액의 pH가 결정한다는 것이 이 문제의 구조이다.

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	분리막을 통과할 수 있는 물질과 통과할 수 없는 물질을 이해하고, 왼쪽과 오른쪽 수용액에 녹아 있는 화학종 중 농도가 같은 것을 이해하고 있다.	1점
(2)	HA의 농도와 계산 과정을 바르게 설명하고 있다.	2점
(3)	왼쪽 용액의 pH 값과 계산 과정을 바르게 설명하고 있다.	1점

문제 4 화학 평형의 이동 · 르샤틀리에 원리

부분압과 반응 지수 Q

반응식 $3\text{NO}(\text{g}) \rightleftharpoons \text{N}_2\text{O}(\text{g}) + \text{NO}_2(\text{g})$ 에서 기체의 몰수는 왼쪽 3몰, 오른쪽 1 + 1 = 2몰이며, 정반응은 발열이다. 압력 평형 상수와 반응 지수는

$$K_p = \frac{P_{\text{N}_2\text{O}} P_{\text{NO}_2}}{P_{\text{NO}}^3}, \quad Q = \text{같은 몰의 현재 값}$$

이고, $Q < K_p$ 이면 정반응(오른쪽), $Q > K_p$ 이면 역반응(왼쪽)으로 이동한다.

(1) 오른쪽(정반응)으로 이동한다

- (a) **정성적 근거** — 온도가 일정한 채 부피가 줄면 모든 기체의 부분압이 커진다. 르샤틀리에 원리에 따라 계는 압력이 커진 것을 완화하는 쪽, 곧 **기체 분자 수가 줄어드는 쪽**으로 이동한다. 왼쪽 3몰 → 오른쪽 2몰이므로 오른쪽이다.
- (b) **Q 로 확인** — 부피를 $1/\lambda$ 배로 줄이면 ($\lambda > 1$) 모든 부분압이 λ 배가 되므로

$$Q = \frac{(\lambda P_{\text{N}_2\text{O}})(\lambda P_{\text{NO}_2})}{(\lambda P_{\text{NO}})^3} = \frac{\lambda^2}{\lambda^3} K_p = \frac{K_p}{\lambda} < K_p$$

$Q < K_p$ 이므로 정반응이다. 지수의 차 $3 - 2 = 1$ 이 그대로 λ 의 지수로 나타난다.

(2) 오른쪽(정반응)으로 이동한다

- (a) **열을 화학종처럼 취급한다** — 정반응이 발열이므로 반응식을 $3\text{NO}(\text{g}) \rightleftharpoons \text{N}_2\text{O}(\text{g}) + \text{NO}_2(\text{g}) + \text{열}$ 로 쓸 수 있다. 온도를 낮추는 것은 열을 빼앗는 것이므로, 계는 빼앗긴 열을 보충하는 쪽, 곧 열이 생기는 **정반응** 쪽으로 이동한다.
- (b) **평형 상수의 온도 의존성** — 반트 호프 식 $d(\ln K)/dT = \Delta H/(RT^2)$ 에서 발열 반응은 $\Delta H < 0$ 이므로 T 가 내려가면 $\ln K$ 가 커진다. K 자체가 커지므로 현재의 Q 는 상대적으로 K 보다 작아지고, 따라서 정반응이 진행되어 생성물이 늘어난다.

(3) 왼쪽(역반응)으로 이동한다

- (a) **무슨 일이 일어나는가** — 전체 압력과 온도를 일정하게 유지한 채 비활성 기체를 넣으면 전체 몰수 n 이 늘어난다. $PV = nRT$ 에서 P 와 T 가 고정이므로 부피 V 가 그만큼 커져야 한다.
- (b) **반응 기체에 미치는 효과** — 부피가 λ 배로 커지면 NO , N_2O , NO_2 의 몰수는 그대로인데 부피만 커지므로 각각의 부분압이 $1/\lambda$ 배로 모두 낮아진다. 이는 반응계만 놓고 보면 팽창시킨 것과 완전히 같은 상황이다.

$$Q = \frac{(P_{\text{N}_2\text{O}}/\lambda)(P_{\text{NO}_2}/\lambda)}{(P_{\text{NO}}/\lambda)^3} = \lambda K_p > K_p$$

$Q > K_p$ 이므로 역반응, 곧 기체 몰수가 많은 왼쪽으로 이동한다. 르샤틀리에 원리로 말하면 “부분압이 낮아진 것을 완화하려고 분자 수를 늘리는 쪽”이다.

(4) 이동하지 않는다

- (a) **부분압이 하나도 변하지 않는다** — 부피와 온도가 고정된 용기에 비활성 기체를 넣으면 전체 압력은 그 기체의 부분 압만큼 커진다. 그러나 반응에 참여하는 각 기체는 몰수도 부피도 그대로이므로

$$P_i = \frac{n_i RT}{V} \rightarrow \text{모든 } P_i \text{ 불변} \rightarrow Q = K_p$$

가 되어 평형이 이미 만족된 상태 그대로이다. 따라서 이동은 없다.

- (b) **비활성 기체가 하는 일** — 비활성 기체는 반응에 참여하지도 않고 다른 기체의 농도를 바꾸지도 않는다. 이상 기체에서는 각 기체가 서로 무관하게 자기 몫의 압력을 낼 뿐이므로(돌턴의 부분압 법칙), 전체 압력만 올라갈 뿐 평형에는 아무 영향이 없다.

- (c) (3)과 (4)의 대비 — 조작은 똑같이 “비활성 기체 첨가”이지만 **무엇을 고정했는가**가 결과를 가른다.

조작	고정된 양	반응 기체의 부분압	Q 와 K_p	이동
(3) 비활성 기체 첨가	P, T (V 증가)	모두 $1/\lambda$ 배로 감소	$Q > K_p$	왼쪽
(4) 비활성 기체 첨가	V, T (P 증가)	변화 없음	$Q = K_p$	없음

평형을 움직이는 것은 **전체 압력**이 아니라 **반응에 참여하는 기체 각각의 부분압**이다.

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	평형의 이동 방향과 이유를 바르게 설명하면 0.5점.	0.5점
(2)	평형의 이동 방향과 이유를 바르게 설명하면 0.5점.	0.5점
(3)	평형의 이동 방향과 이유를 바르게 설명하면 1점.	1점
(4)	평형이 이동하지 않는다는 것과 그 이유를 바르게 설명하면 1점.	1점

문제 5 총괄성 · 삼투압 · 분자량 결정

입자 수 · 유효 삼투질 · 막삼투압법

(1) 소금 수용액의 끓는점이 더 높다

- (a) **끓는점 오름은 입자 수만 따진다** — 끓는점 오름은 총괄성이므로 용질의 종류나 크기와 무관하게 **용해된 입자의 몰랄 농도**에만 비례한다.

$$\Delta T_b = K_b \cdot m \cdot i \quad (i: \text{한 화학식 단위가 내놓는 입자 수})$$

- (b) **두 용액의 입자 농도** — 제시문의 가정에 따라 몰 농도를 그대로 몰랄 농도로 쓰면

• 설탕: 비전해질이므로 $i = 1 \rightarrow$ 입자 $0.002 \times 1 = 0.002 \text{ m}$

• 소금: 물에서 완전히 이온화하여 양이온과 음이온 2개를 내놓으므로 $i = 2 \rightarrow$ 입자 $0.0015 \times 2 = 0.003 \text{ m}$

- (c) **비교** — $0.003 > 0.002$ 이므로 소금 수용액의 입자 농도가 1.5배 크고, 따라서 끓는점 오름도 1.5배 커서 **소금 수용액의 끓는점이 더 높다**.

소금 $0.0015 \times 2 = 0.003 \text{ m} >$ 설탕 $0.002 \text{ m} \rightarrow$ 소금 수용액의 끓는점이 더 높다

- (d) **주어진 분자량은 왜 쓰이지 않는가** — 342 g/mol 와 60 g/mol 는 몰 농도를 이미 알고 있는 이 비교에서는 필요하지 않다. 총괄성은 입자가 무겁든 가볍든 **개수**만 세기 때문이다. 두 분자량은 (3)에서 단백질의 분자량을 구할 때와 같은 계산의 감각을 주기 위한 자료이다.

(2) 설탕 수용액을 넣은 쪽의 수면이 더 높다

- (a) **막이 무엇을 막는지가 핵심이다** — 이 반투과성 막은 물과 이온은 통과시키고 설탕만 막는다. 소금이 내놓은 이온은 막을 자유롭게 오갈 수 있으므로 충분한 시간이 지나면 U자관 양쪽에 같은 농도로 골고루 퍼진다.
- (b) **유효 삼투질만이 삼투압 차를 만든다** — 양쪽에 같은 농도로 존재하는 용질은 양쪽 삼투압에 똑같이 기여하므로 차이를 만들지 못한다. 삼투압의 차이를 만드는 것은 막을 통과하지 못하는 용질, 곧 설탕뿐이다.

$$\Delta\Pi = (\Delta c)RT = (0.002 - 0) \times RT$$

$R = 0.08 \text{ atm}\cdot\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, $T = 300 \text{ K}$ 로 계산하면 $\Delta\Pi = 0.002 \times 0.08 \times 300 = 0.048 \text{ atm}$ 이다.

- (c) **물이 흐르는 방향** — 물은 유효 삼투질 농도가 낮은 쪽에서 높은 쪽으로 이동한다. 여기서는 소금 수용액 쪽(유효 농도 0) → 설탕 수용액 쪽(유효 농도 0.002 M)이다. 따라서 설탕 쪽의 물기둥이 올라가고 소금 쪽은 내려가, **설탕 수용액을 넣은 쪽의 수면이 더 높아진다**. 그림 4의 오른쪽이 이 상태이다.
- (d) **(1)과 방향이 반대인 이유** — (1)에서는 소금 쪽 입자 농도가 더 컸는데 (2)에서는 설탕 쪽이 이긴다. 모순이 아니라, 세는 대상이 다르기 때문이다. 끓는점 오름에는 막이 없으므로 녹아 있는 모든 입자가 세어지지만, 삼투에는 막을 통과하지 못하는 입자만 세어진다. 소금 이온은 막을 통과하므로 삼투에서는 아예 없는 것과 같다.

(3) 소금 수용액 쪽에 넣어야 하며, 단백질의 분자량은 5000 g/mol이다

- (a) **어느 쪽에 넣는가** — 단백질은 큰 고분자이므로 반투과성 막을 통과하지 못한다. 즉 설탕과 마찬가지로 유효 삼투질로 작용한다. 지금은 설탕 쪽의 유효 농도가 0.002 M만큼 더 크므로 물이 소금 쪽에서 설탕 쪽으로 흐르고 있다. 이를 멈추려면 **부족한 쪽, 곧 소금 수용액 쪽에 단백질을 넣어 유효 삼투질을 보충해야 한다**. (설탕 쪽에 넣으면 차이가 더 벌어져 높이 차이가 오히려 커진다.)
- (b) **얼마나 넣어야 하는가** — 양쪽 물기둥의 높이가 같다는 것은 두 용액 사이에 압력 차이가 없다는 뜻이고, 이는 양쪽의 유효 삼투압이 같다는 뜻이다.

$$\Pi_{\text{설탕쪽}} = \Pi_{\text{소금쪽}} \rightarrow c_{\text{설탕}}RT = c_{\text{단백질}}RT \rightarrow c_{\text{단백질}} = c_{\text{설탕}} = 0.002 \text{ M}$$

RT 가 양변에서 약분되므로 온도 300 K는 결과에 영향을 주지 않는다.

- (c) **몰수와 분자량** — 물기둥의 높이가 처음과 같아졌다는 것은 물의 알짜 이동이 없었다는 뜻이므로 양쪽 부피는 처음의 1 L 그대로이다. 따라서

$$n_{\text{단백질}} = c_{\text{단백질}} \times V = 0.002 \text{ M} \times 1 \text{ L} = 0.002 \text{ mol}$$

$$M = \frac{\text{질량}}{\text{몰수}} = \frac{10 \text{ g}}{0.002 \text{ mol}} = 5000 \text{ g/mol}$$

단백질은 소금 수용액 쪽에, $M = 10/0.002 = 5.0 \times 10^3 \text{ g/mol}$

- (d) **의미 해석 — 삼투압으로 분자량을 재는 법** — 이 문제가 보여 주는 것이 바로 막삼투압법(membrane osmometry)이다. 질량은 저울로 재고, 몰수는 삼투압(여기서는 물기둥 높이)으로 세면 그 비가 곧 분자량이다. 이때 삼투압은 $\Pi = cRT = 0.002 \times 0.08 \times 300 \approx 0.048 \text{ atm}$ 이고, 물기둥으로 환산하면

$$h = \frac{\Pi}{\rho g} = \frac{0.048 \times 10^5 \text{ Pa}}{1000 \text{ kg/m}^3 \times 9.8 \text{ m/s}^2} \approx 0.49 \text{ m}$$

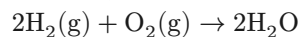
로 약 50 cm에 이른다. 같은 질량이라도 분자량이 클수록 입자 수가 적어 삼투압이 작아지므로, 고분자의 분자량이 클수록 측정이 어려워진다. 반대로 삼투압은 이렇게 눈에 보이는 높이로 증폭되어 나타나므로 끓는점 오름이나 어는점 내림보다 훨씬 민감한 방법이다.

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	소금과 설탕 수용액의 끓는점 오름을 비교하고 그 이유를 바르게 설명할 수 있다.	0.5점
(2)	삼투 현상에 따른 U자관의 양쪽 높이 변화를 이유와 함께 설명할 수 있다.	1점
(3)	삼투 현상을 이용하여 단백질의 분자량을 계산할 수 있다.	1.5점

문제 6 수소 연료 전지 · 헤스의 법칙 · 최대 전기에너지

결합 에너지 · 상변화 · 이상 기체 · 전자 몰수

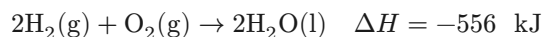
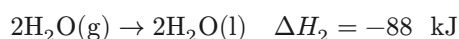
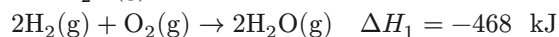
(1) 최대 전기에너지 = 9.73×10^5 kJ (= 973,000 kJ)(a) 알짜 반응과 계수 — 수소가 산소와 반응해 물이 되므로 $a\text{H}_2 + b\text{O}_2 \rightarrow c\text{H}_2\text{O}$ 라 두면, 수소 원자 수에서 $2a = 2c$, 산소 원자 수에서 $2b = c$ 이다. $b = 1$ 로 잡으면 $c = 2$, $a = 2$ 이므로(b) 1단계 — 기체 물까지의 반응 엔탈피 — 참고 정보 1의 평균 결합 에너지를 쓴다. 끊는 결합은 H-H 2개와 O=O 1개, 만드는 결합은 H₂O 2분자에 들어 있는 O-H $2 \times 2 = 4$ 개이다.

$$\Delta H_1 = [2(436) + 1(500)] - [4(460)] = 1372 - 1840 = -468 \text{ kJ}$$

(c) 2단계 — 상변화 — 참고 정보 2의 도표에서 수증기는 물보다 44 kJ/mol 높은 곳에 있으므로, 수증기가 물로 응축 될 때 1몰당 44 kJ이 방출된다. 물이 2몰이므로

$$\Delta H_2 = -2 \times 44 = -88 \text{ kJ}$$

(도표의 6 kJ/mol은 물이 얼음이 될 때의 값이다. 이 문제는 상온 1기압 조건이므로 생성물은 액체 물이고, 이 값은 쓰이지 않는다.)

(d) 헤스의 법칙 — 두 단계를 더하면 중간의 2H₂O(g)가 소거되어

즉 수소 2몰이 반응할 때 556 kJ, 수소 1몰당 278 kJ의 에너지를 낼 수 있다.

(e) 탱크에 든 수소의 몰수 — 이상 기체 상태 방정식에 $P = 700 \text{ atm}$, $V = 120 \text{ L}$, $T = 300 \text{ K}$, $R = 0.08 \text{ atm}\cdot\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 을 넣으면

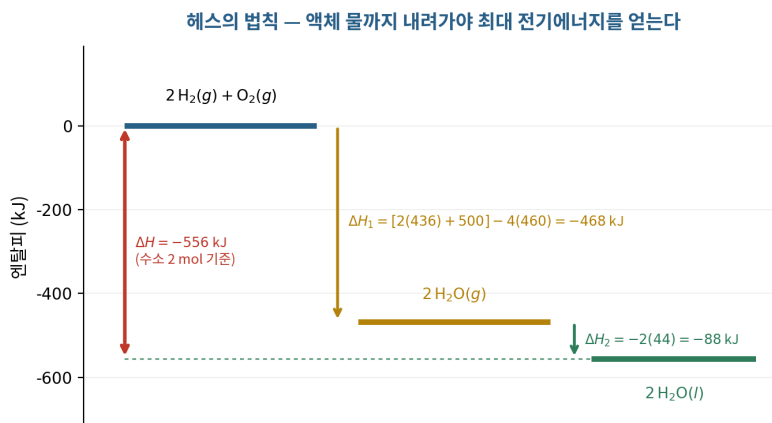
$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{700 \times 120}{0.08 \times 300} = \frac{84000}{24} = 3500 \text{ mol}$$

(f) 최대 전기에너지 — 화학 에너지가 모두 전기에너지로 바뀐다고 가정하므로

$$E_{\max} = 278 \text{ kJ/mol} \times 3500 \text{ mol} = 973000 \text{ kJ}$$

$$E_{\max} = \frac{556}{2} \times 3500 = 9.73 \times 10^5 \text{ kJ} \quad (= 973,000 \text{ kJ})$$

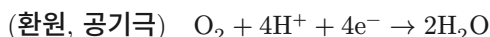
생성물을 수증기로 보면 $468/2 \times 3500 = 8.19 \times 10^5$ kJ이 되지만, 상온 1기압에서 생성되는 물은 액체이므로 응축 엔탈피까지 회수한 9.73×10^5 kJ이 이 조건에서의 최대값이다.



[답안 그림 4] 헤스의 법칙에 따른 엔탈피 경로. 결합 에너지로 얻은 ΔH_1 에 응축 엔탈피 ΔH_2 를 더해야 액체 물까지의 ΔH 가 된다.

(2) 최대 전압 = 1.39 V

(a) 회로를 지나는 전자의 몰수 — 수소 연료 전지의 두 전극에서 일어나는 반쪽 반응은



이다. 수소 1몰이 산화될 때 전자 2몰이 외부 회로를 따라 흐르므로, 수소 3500몰이 모두 반응하면

$$n_{\text{e}^-} = 2 \times 3500 = 7000 \text{ mol}$$

(b) 참고 정보 3의 해석 — “1 V에서 전자 1몰이 이동할 때 최대 100 kJ”이라 했으므로, 전압 V에서 전자 n_{e^-} 몰이 이동할 때 얻을 수 있는 최대 전기에너지는

$$E = n_{\text{e}^-} \times 100 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{V}^{-1} \times V$$

이다. 이를 V에 대해 풀면 $V = E/(n_{\text{e}^-} \times 100)$ 이다.

(c) 대입

$$V_{\text{max}} = \frac{973000 \text{ kJ}}{7000 \text{ mol} \times 100 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}} = \frac{973000}{700000} = 1.39 \text{ V}$$

$$V_{\text{max}} = 1.39 \text{ V}$$

수증기까지만 생성된다고 보면 $819000/700000 = 1.17 \text{ V}$ 가 된다.

(d) 의미 해석 — 전압은 전하 1단위가 나르는 에너지이므로, 몰수에는 무관하고 전자 1몰당 에너지로만 정해진다. 실제로

$$\frac{556 \text{ kJ}}{2 \text{ mol H}_2} \times \frac{1 \text{ mol H}_2}{2 \text{ mol e}^-} = 139 \text{ kJ/mol e}^- \rightarrow \frac{139}{100} = 1.39 \text{ V}$$

로 (1)의 탱크 크기와 무관하게 값이 나온다. 탱크를 두 배로 키우면 얻는 에너지는 두 배가 되지만 전압은 그대로이고 전류가 흐르는 시간이 길어질 뿐이다.

또한 이 값은 반응 엔탈피 전체가 전기로 바뀐다는 가정에서 나온 **상한**이다. 실제 전지에서는 엔트로피 변화에 해당하는 몫이 열로 빠져나가고 내부 저항에서도 손실이 생기므로, 실제 전압은 이보다 낮다.

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	$2\text{H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ 의 반응 엔탈피 $\Delta H_1 = -468 \text{ kJ}$ 을 바르게 구하면 1점. 헤스의 법칙을 적용하여 $2\text{H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ 의 반응 엔탈피 $\Delta H = -556 \text{ kJ}$ 을 바르게 구하면 1점. 최대 전기에너지 973,000 kJ (또는 819,000 kJ만 구한 경우)을 구하면 1점.	3점
(2)	최대 전압 1.39 V 또는 1.17 V를 바르게 구하면 1점.	1점

2020학년도 · 해설편

문제 1	기체의 확산 속도와 화학 평형
문제 2	동위원소와 분자량 분포
문제 3	물의 전기분해와 삼투압

단원	물질의 구조 · 평형·반응 속도 · 산·염기·산화환원 · 상태·용액
핵심 개념	확산 속도와 화학 평형, 동위원소와 평균 원자량, 물의 전기분해와 삼투압, 결합 엔탈피와 르샤틀리에의 원리, 산·염기 평형과 끓는점 오름, 이상기체 상태 방정식과 전자쌍 반발 이론
문항 수	전형별 3문항, 총 6문항

II. 예시답안

일반전형

문제 1 기체의 확산 속도와 화학 평형

그레이엄의 법칙 · 부분압력 · 평형상수

(1) 두 기체의 분자량 비 — 그레이엄의 법칙에 의하면 기체의 확산 속도 v 는 기체 분자량 M 의 제곱근에 반비례한다.

$$\frac{v_2}{v_1} = \sqrt{\frac{M_1}{M_2}}$$

같은 시간 동안 기체 A는 왼쪽 끝에서 60 cm, 기체 B는 오른쪽 끝에서 40 cm 이동하여 서로 만났으므로 두 기체가 이동한 거리, 즉 확산 속도의 비는 3 : 2 이다. 이를 그레이엄의 법칙에 적용하면

$$\frac{v_A}{v_B} = \frac{3}{2} = \sqrt{\frac{M_B}{M_A}} \rightarrow \frac{M_B}{M_A} = \left(\frac{3}{2}\right)^2 = 2.25$$

기체 B의 분자량이 기체 A의 **2.25배** 이다. 즉 $M_A : M_B = 4 : 9$.

(다른 풀이) 같은 온도에서 기체 분자의 평균 운동에너지 $E_K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT$ 가 서로 같으므로 mv^2 이 일정하고, 따라서 $v \propto 1/\sqrt{M}$ 이라는 그레이엄의 법칙을 그대로 유도할 수 있다.

(2) 평형에 도달한 후 유리관 내의 압력 — 각 기체의 부분 압력을 이용하여 평형상수를 나타내면 다음과 같다.

$$K = \frac{P_C}{P_A \times P_B} \quad (P_A, P_B, P_C \text{ 는 각 기체의 부분 압력})$$

밸브를 연 후 전체 부피는 2 L + 1 L + 1 L = 4 L 이므로, 반응이 일어나기 전 각 기체의 부분압력은

$$P_A = \frac{1\text{기압} \times 2\text{L}}{4\text{L}} = 0.5\text{기압}, \quad P_B = \frac{1\text{기압} \times 1\text{L}}{4\text{L}} = 0.25\text{기압}$$

전체 부피가 일정한 경우 부분압력은 몰수에 비례하고 반응 계수비가 1 : 1 : 1 이므로, 반응 후 C의 부분압력을 x 라 하면

$$K = \frac{x}{(0.5 - x)(0.25 - x)} = 4 \rightarrow 4x^2 - 4x + 0.5 = 0$$

$$x = \frac{2 \pm \sqrt{2}}{4} = 0.5 \pm 0.35 \rightarrow x = 0.85 \text{ 또는 } 0.15$$

P_C 는 0.25기압 이하여야 하므로 $x = 0.15$ 기압이다. 따라서 평형 상태에서 각 기체의 부분압력은

$$P_A = 0.35\text{기압}, \quad P_B = 0.1\text{기압}, \quad P_C = 0.15\text{기압}$$

이다. 평형 상태에서 유리관 내에 존재하는 기체는 A, B, C와 공기의 네 가지이며, 공기는 다른 기체와 반응하지 않고 그 부분압력은

$$P_{\text{공기}} = \frac{1\text{기압} \times 1\text{L}}{4\text{L}} = 0.25\text{기압}$$

이다.

$$P_A + P_B + P_C + P_{\text{공기}} = 0.35 + 0.1 + 0.15 + 0.25 = 0.85 \text{ 기압}$$

문제 2 동위원소와 분자량 분포

평균 원자량 · 동위원소 존재비 · 파스칼의 삼각형

(1) 브롬 원자의 개수 — 브롬의 안정한 동위원소는 ^{79}Br (원자량 78.9)과 ^{81}Br (원자량 80.9)이고 평균 원자량이 정확히 그 중간값인 79.9이므로, 두 동위원소는 자연계에서 1 : 1 의 비율로 존재한다.

분자가 Br 원자를 1개 포함하면 ^{79}Br 을 갖는 분자군과 ^{81}Br 을 갖는 분자군이 1 : 1 로 존재하여 M, M+2의 두 분자량이 관찰된다. Br 원자를 2개 포함하면 (^{79}Br , ^{79}Br), (^{79}Br , ^{81}Br), (^{81}Br , ^{81}Br) 조합이 1 : 2 : 1 로 존재하여 M, M+2, M+4의 세 분자량이 관찰된다. 이처럼 Br 원자가 n 개이면 주된 분자량은 $n + 1$ 개가 나타나고 그 상대 세기는 파스칼의 삼각형의 n 행과 같다.

Br 0개	→	1					
Br 1개	→	1	1				
Br 2개	→	1	2	1			
Br 3개	→	1	3	3	1		
Br 4개	→	1	4	6	4	1	
Br 5개	→	1	5	10	10	5	1

분자 내 Br 원자 개수에 따른 동위원소 분자군의 상대적 분포 — 파스칼의 삼각형

분자 A는 M, M+2, M+4, M+6의 네 개의 주된 분자군을 보이므로 $n + 1 = 4$ 이고, 실제 관측된 세기비 1 : 3 : 3 : 1 (가운데 두 봉우리가 높음)도 이와 일치한다.

분자 A에 포함된 브롬 원자의 개수는 $Y = 3$ 이다.

(2) M+1, M+3, M+5, M+7이 소량 존재하는 이유 — 자연계에 존재하는 탄소에는 ^{12}C (원자량 12.000)와 ^{13}C (원자량 13.003)의 두 동위원소가 있고 평균 원자량이 12.011이므로, 존재비를 f 라 하면

$$12.000f + 13.003(1 - f) = 12.011 \rightarrow f = 0.98903$$

즉 ^{12}C 가 98.903%, ^{13}C 가 1.097% 존재한다.

한편 수소는 문제에서 주어진 평균 원자량 1.008이 ^1H 의 원자량과 같으므로, 이 값으로부터 구해지는 ^1H 의 분포 비율은 100.0%이다. 따라서 M+1 계열의 봉우리는 수소가 아니라 탄소의 영향으로 보아야 한다.

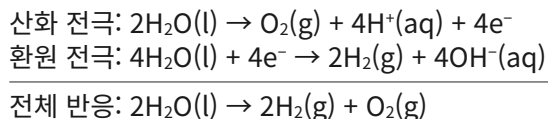
M+1, M+3, M+5, M+7 군은 M, M+2, M+4, M+6 군과 같은 분포 패턴을 보이면서 분자량만 1만큼 크다. 이는 분자 내에 ^{13}C 이 1개 포함된 경우에 해당한다. 탄소 원자가 5개인 분자 A에서 ^{13}C 이 1개 포함될 확률은 약 $5 \times 1.097\% = 5.485\%$ 이므로, 이 분자군들이 대응하는 주 분자군의 약 5.5% 수준으로 소량만 나타난다.

M+1, M+3, M+5, M+7에 해당하는 분자군은 ^{13}C 을 1개 포함한 분자이다.

문제 3 물의 전기분해와 삼투압

패러데이 법칙 · 이상기체 상태 방정식 · 반트 호프 법칙

물의 전기분해 — Na^+ 나 F^- 는 수용액에서 산화·환원되기 어렵다. 그렇기 때문에 H_2O 의 전기분해 반응이 일어나며, 이 때 반쪽 반응식은 아래와 같다.



생성된 기체의 몰수 — 3,860초 동안 0.1 A의 전류를 흘려주었으므로 전체 전하량은 $3860 \times 0.1 = 386 \text{ C}$ 이며, 이동한 전자의 몰수는 $386/96500 = 0.004 \text{ mol}$ 이다. 전자 4몰당 물 2몰이 소모되어 수소 기체 2몰과 산소 기체 1몰이 생성되므로

$$n_{\text{H}_2} = \frac{0.004}{4} \times 2 = 0.002 \text{ mol}, \quad n_{\text{O}_2} = \frac{0.004}{4} = 0.001 \text{ mol}$$

이며, 생성된 기체는 모두 0.003 mol이다.

상부 기체의 압력 변화 — 오른쪽 수용액 상부의 밀폐된 기체에 대하여

- 전기분해 반응 전: $P_1 = 1$ 기압, $V_1 = 48 \text{ mL}$ 이므로

$$n_1 = \frac{P_1 V_1}{RT} = \frac{1 \times 0.048}{0.08 \times 300} = 0.002 \text{ mol}$$

- 전기분해 반응 후: 수용액의 부피 변화를 무시하므로 $V_2 \approx V_1 = 48 \text{ mL}$ 이고

$$n_2 = n_1 + 0.003 = 0.005 \text{ mol} \rightarrow P_2 = \frac{n_2 RT}{V_2} = \frac{0.005 \times 0.08 \times 300}{0.048} = 2.5 \text{ 기압}$$

삼투압과 NaF의 몰농도 — 최종적으로 양쪽 유리관의 액체 높이가 같으므로, 대기압에서 추가된 압력만큼 삼투압과 같아야 한다. 즉 $\Pi = 2.5 - 1 = 1.5$ 기압이다. 반트 호프 법칙 $\Pi = CRT$ 로부터 오른쪽 수용액의 용질 전체 농도는

$$C = \frac{\Pi}{RT} = \frac{1.5}{0.08 \times 300} = 0.0625 \text{ M}$$

삼투압은 총괄성이므로 용질 입자의 개수에만 의존한다. NaF가 모두 이온화되어 NaF 1몰당 용질 2몰을 생성하므로

$$[\text{NaF}] = \frac{0.0625}{2} = 0.03125 \text{ M} \quad (= 1/32 \text{ M})$$

학교장추천전형 · 고른기회전형

문제 1 암모니아 합성 공정의 반응성과 수득률

결합 엔탈피 · 활성화 에너지 · 르샤틀리에의 원리

반응 엔탈피 — 결합 엔탈피로부터 반응 엔탈피를 구하면, 끊어지는 결합은 $\text{N} \equiv \text{N}$ 1개와 $\text{H}-\text{H}$ 3개, 생성되는 결합은 $\text{N}-\text{H}$ 6개이므로

$$\Delta H = (945 + 3 \times 436) - (6 \times 390) = 2253 - 2340 = -87 \text{ kJ/mol}$$

즉 이 반응은 **발열 반응**이다. 한편 기체의 몰수가 4몰에서 2몰로 감소하여 엔트로피는 감소한다.

(1) 상온·1기압에서 반응이 거의 일어나지 않는 이유

반응 엔탈피가 음수(발열 반응)여서 열역학적으로는 유리하지만, $\text{N} \equiv \text{N}$ 삼중결합을 끊어야 하므로 **활성화 에너지가 너무 커서** 상온에서는 활성화 에너지 이상의 에너지를 가진 반응물 분자가 충분하지 않다. 즉 열역학적 이유가 아니라 반응속도론적 이유로 반응이 진행되지 않는다.

(2) 암모니아의 수득률을 높이는 방법

- **정촉매를 사용한다.** 촉매는 활성화 에너지를 낮추어 반응이 실제로 일어날 수 있게 하고 평형에 빨리 도달하게 한다.
- **온도를 높인다.** 발열 반응이지만 현재 조건에서는 반응이 아예 일어나지 않으므로, 온도를 높여 활성화 에너지 이상의 에너지를 갖는 분자를 충분히 확보한다.
- **압력을 높인다.** 르샤틀리에의 원리에 따라 압력을 증가시키면 기체의 몰 수가 감소하는 방향(4몰 → 2몰), 즉 정반응 쪽으로 평형이 이동한다.
- **생성물인 암모니아를 제거한다.** 르샤틀리에의 원리에 따라 생성물을 계속 제거하면 평형이 정반응 쪽으로 이동한다.
- **위 조건을 결합한 순환 공정을 사용한다.** 고온·고압 조건에서 반응을 진행시킨 뒤 생성된 암모니아를 냉각·응축시켜 제거하고, 남은 질소와 수소를 다시 고온·고압 조건으로 되돌려 반응시키는 과정을 반복한다.

문제 2 산·염기 평형과 끓는점 오름

이온화 상수 · 중화 반응 · 총괄성

(1) 처음 넣어준 염화나트륨의 몰수 — 염기 수용액의 pH가 12이므로 $[H^+] = 10^{-12}$ M이고 $[OH^-] = 10^{-2}$ M이다. 염기의 초기 농도를 x 라 할 때, 염기의 이온화상수가 0.01이므로

$$K_b = \frac{[B^+][OH^-]}{[BOH]} = \frac{10^{-2} \cdot 10^{-2}}{x - 10^{-2}} = 0.01 \rightarrow x = 0.02 \text{ M}$$

따라서 평형 상태에서 염기 용액의 용질의 총 농도는

$$[BOH] + [B^+] + [OH^-] = 0.01 + 0.01 + 0.01 = 0.03 \text{ M}$$

이다. 또한 두 용액의 끓는점 오름이 같으므로 두 용액 내 총 용질(입자)의 농도가 같음을 알 수 있다. 염화나트륨은 물에 완전히 이온화되어 1몰당 입자 2몰을 내놓으므로, 용질의 총 농도가 0.03 M이 되기 위해 물 1 L 당 필요한 몰 수는

$$n_{NaCl} = \frac{0.03 \text{ M} \times 1 \text{ L}}{2} = 0.015 \text{ mol}$$

(2) 미지의 산 용액의 끓는점 — 염기의 초기 농도가 0.02 M이므로 염기 용액 1 L에는 염기가 0.02몰 들어 있다. 중화점에 이르렀다는 조건으로부터 넣어준 산도 0.02몰이며, 이것이 0.5 L에 들어 있으므로 산의 농도는

$$C_{HA} = \frac{0.02 \text{ mol}}{0.5 \text{ L}} = 0.04 \text{ M}$$

이다. 이때 산은 100% 이온화하므로 산 용액 내 용질의 총 농도는 $2 \times 0.04 = 0.08$ M이 된다. 문제의 조건에서 몰랄농도와 몰농도는 같고 끓는점 오름은 몰랄농도에 비례하므로, 미지 산 용액의 끓는점 오름 ΔT_b 는

$$\Delta T_b = 0.00153 \text{ }^\circ\text{C} \times \frac{0.08}{0.03} = 0.00408 \text{ }^\circ\text{C}$$

이 된다.

미지의 산 용액의 끓는점은 $100.00408 \text{ }^\circ\text{C}$ 이다.

(끓는점 오름 상수를 먼저 구해도 된다. $k_b = 0.00153/0.03 = 0.051 \text{ }^\circ\text{C/m}$ 이므로 $\Delta T_b = 0.051 \times 0.08 = 0.00408 \text{ }^\circ\text{C}$.)

문제 3 인의 기체 분자와 삼차원 구조

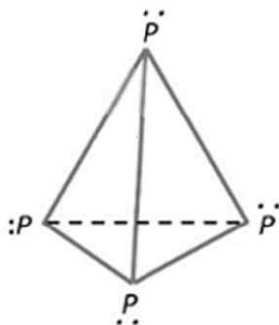
이상기체 상태 방정식 · 전자쌍 반발 이론 · 결합 차수

(1)-(a) 분자식 — 기체 상의 인을 이상 기체로 가정하면 $PV = nRT = (w/M_w)RT$ 이므로, 밀도 $d = w/V$ 를 이용하여

$$M_w = \frac{wRT}{PV} = d \frac{RT}{P} = \frac{1}{3} \text{ g/L} \times \frac{0.08 \text{ atm} \cdot \text{L/mol} \cdot \text{K} \times 465 \text{ K}}{0.1 \text{ atm}} = 124 \text{ g/mol}$$

이다. (밀도 $1/3 \text{ kg/m}^3 = 1/3 \text{ g/L}$ 이다.) 인의 원자량이 31 g/mol 이므로 $124/31 = 4$, 즉 기체를 구성하고 있는 인 화합물의 분자식은 P_4 이다.

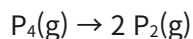
(1)-(b) **삼차원 구조** — 인의 원자가 전자는 5개이고 이것을 루이스 구조로 나타내면 비공유 전자쌍 1개와 홀전자(결합 전자) 3개가 된다. 각 인 원자가 나머지 세 인 원자와 하나씩 결합하며, 전자쌍 반발 이론에 따라 네 원자가 서로 가장 멀리 떨어지도록 배치되므로 아래와 같은 **정사면체** 형태의 구조를 갖는다.



P₄ 분자의 정사면체 구조 — 각 P는 비공유 전자쌍 1개를 가진다

(1)-(c) **결합의 수** — 위 분자 구조를 살펴보면 다중 결합은 없으며 정사면체의 여섯 모서리에 해당하는 **단일 결합(P-P) 6개**가 존재한다. 이중결합과 삼중결합은 0개이다.

(2) **분해되어 생성되는 분자** — P₄가 분해 반응을 통해 동일한 두 개의 기체 분자를 생성하므로 P₄는 아래와 같이 반응한다.



(a) **분자식** — 생성된 기체의 분자식은 P₂이다.

(b) **삼차원 구조** — 두 개의 원자로만 이루어졌으므로 전자쌍 반발 원리를 적용하면 **선형(직선형)** 구조를 갖는다.

(c) **결합의 수** — 인은 질소족(15족)이므로 P₂의 루이스 구조식은 N₂와 마찬가지로 삼중결합을 갖는 :P≡P: 구조이다. 따라서 **삼중결합 1개**만 있고 단일결합과 이중결합은 0개이다.

2019학년도 · 해설편

문제 1	2차원 세계의 오비탈과 이온화 에너지의 주기성
문제 2	가수 분해 반응 속도와 활성화 에너지
문제 3	일산화탄소의 완전 연소 후 용기 내부의 압력

단원	물질의 구조 · 반응과 에너지 · 평형·반응 속도 · 상태·용액
핵심 개념	오비탈과 이온화 에너지의 주기성, 전자쌍 반발과 활성화 에너지, 이상 기체 상태 방정식과 양적 관계, 연소 반응의 양적 관계, 금속 결합과 결합 에너지, 화학 평형과 평형 상수
문항 수	전형별 3문항, 총 6문항

II. 예시답안

일반전형

문제 1 2차원 세계의 오비탈과 이온화 에너지의 주기성

오비탈 · 전자 배치 · 이온화 에너지

2주기에 존재할 수 있는 원소의 수 — 2차원 세상에서 p 오비탈은 x 축과 y 축 방향의 두 개(p_x, p_y)뿐이므로, 2주기(주양자수 $n = 2$)에서 사용할 수 있는 오비탈은 $2s$ 1개와 $2p$ 2개로 모두 3개이다. 파울리 배타 원리에 따라 오비탈 하나에 스핀이 반대인 전자가 최대 2개까지 채워지므로

오비탈 3 개 $\times$ 오비탈당 전자 2 개 = 6 개의 전자
 $\rightarrow$ 2차원 세상의 2주기에는 **6개**의 원소가 존재한다.

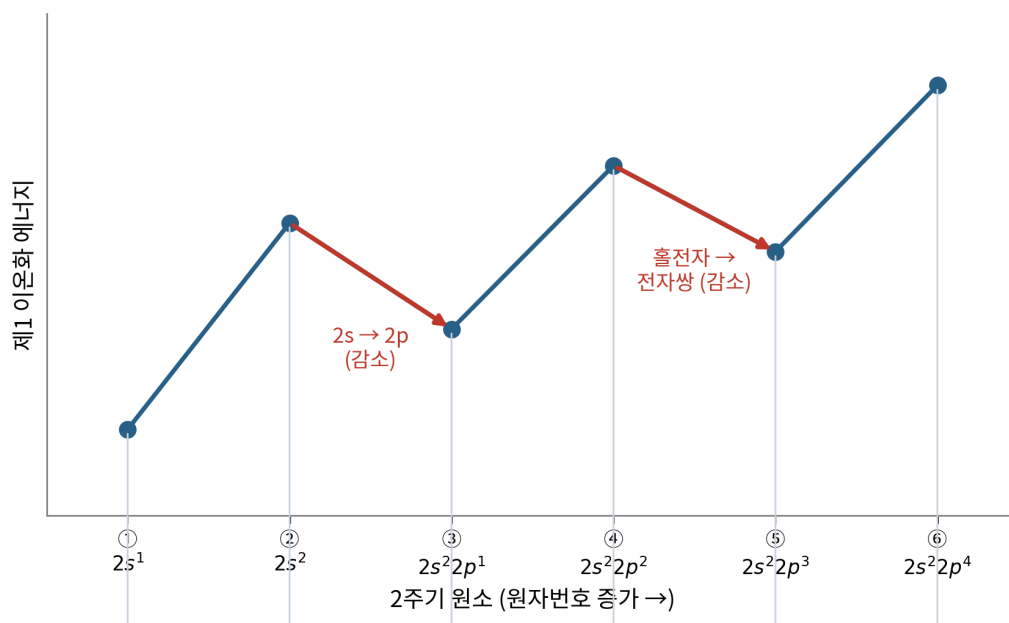
이 6개 원소의 바닥상태 전자 배치는 차례로 $2s^1, 2s^2, 2s^22p^1, 2s^22p^2, 2s^22p^3, 2s^22p^4$ 이다.

이온화 에너지의 경향성 — 같은 주기에서는 원자번호가 커져도 전자가 채워지는 껍질은 그대로이고 가려막기 효과의 증가보다 핵전하의 증가가 크므로, 유효 핵전하가 커져 **이온화 에너지는 전체적으로 증가**한다. 다만 다음 두 곳에서 예외적인 감소가 나타난다.

- (i) ② $2s^2 \rightarrow$ ③ $2s^22p^1$: 새로 채워지는 $2p$ 전자는 $2s$ 전자보다 에너지 준위가 높고 안쪽 전자에 의한 가려막기를 더 크게 받아 핵에 약하게 붙들려 있다. 따라서 세 번째 원소의 이온화 에너지가 두 번째 원소보다 오히려 작다.
- (ii) ④ $2s^22p^2 \rightarrow$ ⑤ $2s^22p^3$: 2차원 세상에서는 $2p$ 오비탈이 2개뿐이므로 훈트 규칙에 따라 네 번째 원소까지는 p_x, p_y 에 홀전자가 하나씩 들어가 **반만 채워진 불안정한 배치**가 된다. 다섯 번째 원소부터는 이미 전자가 들어 있는 $2p$ 오비탈에 반대 스핀의 전자가 짝지어 들어가므로 전자쌍 반발이 커져 이온화 에너지가 감소한다.

전체적으로 증가하되 ② $\rightarrow$ ③ 과 ④ $\rightarrow$ ⑤ 에서 감소하는 톱니 모양의 주기적 경향을 보인다.

(3차원 세상의 2주기에서 Be $\rightarrow$ B, N $\rightarrow$ O 에서 나타나는 감소와 같은 원리이며, 오비탈 수가 달라져 원소 수와 감소 지점의 위치만 바뀔 뿐 경향성의 원인은 동일하다.)



예시 작도 — 2차원 세상 2주기 원소의 제1 이온화 에너지 변화

문제 2 가수 분해 반응 속도와 활성화 에너지

전자쌍 반발 · 고리 변형 · 활성화 에너지

반응물의 구조와 안정성 — 다이메틸에테르의 산소는 sp^3 혼성에 가까운 굽은 구조로, 전자쌍 반발 이론이 예측하는 결합각(약 109.5°)에 가깝게 배치되어 있어 안정하다. 반면 에틸렌옥사이드는 C-C-O 삼각형 고리를 이루므로 결합각이 약 60° 로 강제되어 있다. 결합 전자쌍과 산소의 비공유 전자쌍이 서로 매우 가까이 놓여 강하게 반발하고, 결합축과 궤도 방향이 어긋나 결합도 약해진다.

따라서 삼각 고리에 저장된 **고리 변형 에너지**만큼 에틸렌옥사이드의 엔탈피가 다이메틸에테르보다 **높다**. 즉 반응물이 더 불안정한 상태에서 출발한다.

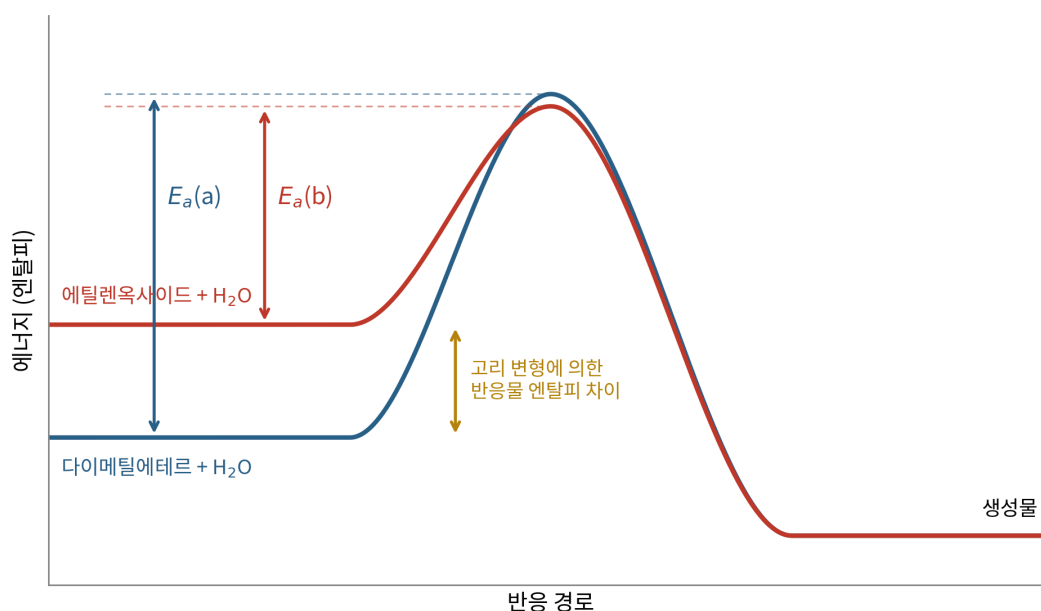
전이 상태와 활성화 에너지 — 두 반응은 모두 산 촉매가 에테르 산소를 양성자화한 뒤 물 분자가 탄소를 공격하는 같은 방식으로 진행되므로, 전이 상태의 구조가 서로 비슷하고 그 에너지도 비슷하다. 게다가 에틸렌옥사이드는 반응이 진행되면서 고리가 열려 변형이 해소되므로 전이 상태가 오히려 더 안정해진다. 활성화 에너지는

$$E_a = E(\text{전이 상태}) - E(\text{반응물})$$

이므로, 전이 상태의 에너지가 비슷한데 반응물의 엔탈피가 높은 에틸렌옥사이드 쪽의 활성화 에너지가 더 작다.

$$E_a(\text{에틸렌옥사이드}) < E_a(\text{다이메틸에테르})$$

활성화 에너지가 작을수록 그 장벽을 넘을 수 있는 분자의 비율이 크므로 반응 속도가 빠르다. 그래서 에틸렌옥사이드는 상온의 산 촉매 조건에서도 빠르게 가수 분해되어 에틸렌 글리콜을 만들지만, 다이메틸에테르는 같은 조건에서 매우 느리고 더 높은 온도가 필요하다.

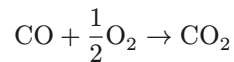


예시 작도 — 반응 경로에 따른 에너지 변화 (전이 상태의 에너지는 서로 비슷하고 반응물의 엔탈피만 다르다고 가정)

문제 3 일산화탄소의 완전 연소 후 용기 내부의 압력

양적 관계 · 한계 반응물 · 이상 기체

연소 반응식과 반응 전 몰수 — 일산화탄소의 완전 연소 반응식은



밸브를 열기 전 각 기체는 서로 다른 용기에 있었으므로, 이상 기체 상태 방정식 $n = PV/(RT)$ 를 각각 적용하면

$$n_{\text{CO}} = \frac{2 \times 3}{RT} = \frac{6}{RT} \text{ 몰}, \quad n_{\text{O}_2} = \frac{3.4 \times 5}{RT} = \frac{17}{RT} \text{ 몰}$$

한계 반응물의 판정 — $6/(RT)$ 몰의 CO를 모두 연소시키는 데 필요한 산소는 그 절반인 $3/(RT)$ 몰인데, 실제 산소는 $17/(RT)$ 몰이므로 산소가 충분하다. 즉 **CO가 한계 반응물**이고 CO는 모두 소모된다.

구분	CO	$\frac{1}{2}\text{O}_2$	CO ₂
반응 전	$6/(RT)$	$17/(RT)$	0
반응	$-6/(RT)$	$-3/(RT)$	$+6/(RT)$
반응 후	0	$14/(RT)$	$6/(RT)$

반응 후 전체 압력 — 반응 후 남아 있는 기체의 총 몰수는

$$n_{\text{전체}} = \frac{14}{RT} + \frac{6}{RT} = \frac{20}{RT} \text{ 몰}$$

밸브를 열었으므로 전체 부피는 $V_{\text{전체}} = 3 + 5 = 8 \text{ L}$ 이고, 반응 후 온도는 $3T$ 이다. 이상 기체 상태 방정식에 대입하면

$$P_{\text{전체}} = \frac{n_{\text{전체}} R(3T)}{V_{\text{전체}}} = \frac{\frac{20}{RT} \times R \times 3T}{8} = \frac{60}{8}$$

$$P_{\text{전체}} = 7.5 \text{ 기압}$$

반응물의 몰수 RT 는 상쇄되어 사라지므로, R 와 T 의 구체적인 값을 몰라도 압력이 결정된다.

학교장추천전형 · 고른기회전형

문제 1 탄화수소의 완전 연소와 양적 관계

원자 수 보존 · 화학 반응식

(1) m, n, x 구하기 — 화학 반응이 일어나도 원자의 종류와 수는 변하지 않는다. 연소 전에는 C_mH_n 2몰과 O_2 50몰이, 연소 후에는 CO_2 x 몰, H_2O 22몰, O_2 $(x-1)$ 몰이 있으므로 원자별로 식을 세운다.

(C) 탄소 원자: $2m = x$

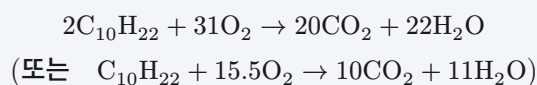
(H) 수소 원자: $2n = 2 \times 22 = 44 \rightarrow n = 22$

(O) 산소 원자: $50 \times 2 = 2x + 22 + 2(x-1) \rightarrow 100 = 4x + 20 \rightarrow x = 20$

$x = 20$ 을 탄소 식에 넣으면 $2m = 20$ 이므로 $m = 10$ 이다.

$$m = 10, \quad n = 22, \quad x = 20 \rightarrow \text{탄화수소는 } C_{10}H_{22}$$

(2) 연소 반응식 — $C_{10}H_{22}$ 1몰이 완전 연소하면 CO_2 10몰과 H_2O 11몰이 생기고, 이때 필요한 산소는 산소 원자 수 $2 \times 10 + 11 = 31$ 개, 즉 O_2 15.5몰이다.



검산 — 탄화수소 2몰이 소모하는 산소는 31몰이므로 남는 산소는 $50 - 31 = 19$ 몰이고, 이는 문제의 $x - 1 = 20 - 1 = 19$ 몰과 일치한다.

문제 2 리튬 결정의 해리 에너지와 금속 결합

배위수 · 결합 에너지 · 금속 결합

(1) **결합 에너지로 예측한 반응 에너지** — 체심 입방 구조에서 한 원자에 가장 가까운 이웃 원자는 체심(또는 꼭짓점) 방향의 8개이므로 **배위수는 8**이다. 즉 원자 하나는 8개의 결합에 참여한다. 그런데 결합 하나에는 두 개의 원자가 함께 참여하므로, 원자 1개에 배당되는 결합 수는

$$\frac{8}{2} = 4 \text{ 개}$$

(단위 격자로 세어도 같다. 체심 입방 격자의 단위 격자 안에는 원자가 $8 \times \frac{1}{8} + 1 = 2$ 개 있고 체심 원자가 만드는 결합 8개가 격자 안에 들어 있으므로, 원자당 결합 수는 $8/2 = 4$ 개이다.)

결합을 모두 끊어 단원자 기체로 만들어야 하므로 반응은 흡열이고,

$$\Delta E = 24 \text{ kcal/mol} \times \frac{8}{2} = +96 \text{ kcal/mol}$$

(2) **실험값과의 비교** — 실제 값은 37.6 kcal/mol 로, 예측값 96 kcal/mol 의 약 0.39 배에 지나지 않는다. 즉 결합 에너지와 배위수만으로 한 예측은 실제보다 약 2.6배 과대평가한다.

차이의 원인 — 끊어지는 결합의 개수에 결합 에너지를 곱해 반응 에너지를 예측하는 방법은, 두 원자 사이에 전자쌍이 국재화되어 있는 **공유 결합** 물질에서만 타당하다.

- 리튬 이합체 Li-Li 는 두 원자가 각각 원자가 전자 1개씩을 내어 만든 전자쌍 하나로 이루어진 공유 결합이다.
- 그러나 금속 리튬 결정에서 원자가 전자는 특정한 두 원자 사이에 묶여 있지 않고 결정 전체에 **비편재화**되어 자유 전자로 존재하며, 금속 양이온과 자유 전자 바다 사이의 정전기적 인력이 결합을 유지한다.
- 리튬 원자의 원자가 전자는 1개뿐이므로, 8개의 이웃 각각과 온전한 2전자 공유 결합을 만드는 것은 애초에 불가능하다. 이웃 하나당 결합에 쓰이는 전자 수가 이합체보다 훨씬 적다.

금속 결합은 공유 결합과 결합의 원리 자체가 다르므로, 이합체의 결합 에너지에 배위수를 곱하는 방식은 실제 금속 결정의 해리(원자화) 에너지를 크게 과대평가하게 된다.

문제 3 기체 반응의 평형 상수와 부피 변화

몰 분율 · 분압 · 평형 상수

(1) 평형에서의 조성 — 반응 초기에는 생성물 C만 있고 B는 전혀 없으므로, 평형에 도달할 때까지 역반응이 진행된다. 역반응의 진행 정도를 x 라 하면

구분	2A	B	2C	전체
반응 초기	$3n$	0	$4n$	$7n$
변화	$+2x$	$+x$	$-2x$	$+x$
평형	$3n + 2x$	x	$4n - 2x$	$7n + x$

평형에서 B의 몰 분율이 $1/8$ 이므로

$$\frac{x}{7n+x} = \frac{1}{8} \rightarrow 8x = 7n+x \rightarrow x = n$$

따라서 평형에서 A는 $5n$ 몰, B는 n 몰, C는 $2n$ 몰이고 전체는 $8n$ 몰이다.

분압과 평형 상수 — 피스톤의 질량과 마찰을 무시하므로 실린더 내부의 전체 압력은 외부 기압과 같은 4기압이다. 각 기체의 분압은 전체 압력에 몰 분율을 곱한 값이므로

$$P_A = 4 \times \frac{5n}{8n} = 2.5 \text{ 기압}, \quad P_B = 4 \times \frac{n}{8n} = 0.5 \text{ 기압}, \quad P_C = 4 \times \frac{2n}{8n} = 1 \text{ 기압}$$

이상 기체 상태 방정식 $PV = nRT$ 에서 몰 농도는 $n/V = P/(RT)$ 이므로, $RT = 25$ 를 이용하면

$$[A] = \frac{2.5}{25} = 0.1, \quad [B] = \frac{0.5}{25} = 0.02, \quad [C] = \frac{1}{25} = 0.04 \quad (\text{몰/L})$$

$$K = \frac{[C]^2}{[A]^2[B]} = \frac{(0.04)^2}{(0.1)^2 \times 0.02} = \frac{0.0016}{0.0002}$$

$$K = 8$$

분압으로 계산해도 같다. $K_p = P_C^2 / (P_A^2 P_B) = 1 / (2.5^2 \times 0.5) = 0.32$ 이고, $\Delta n = 2 - 3 = -1$ 이므로 $K = K_p(RT)^{-\Delta n} = 0.32 \times 25 = 8$ 이다. 두 방법 모두 n 의 값과 무관하게 결정된다.

(2) 온도를 $2T$ 로 올렸을 때 — 주어진 반응은 $\Delta H > 0$ 인 흡열 반응이다.

평형 상수 — 르샤틀리에 원리에 따라 온도를 높이면 열을 흡수하는 방향, 즉 정반응 쪽으로 평형이 이동한다. 반응물 A, B의 양은 줄고 생성물 C의 양은 늘어나므로

$K = ([C]^2)/([A]^2[B])$ 에서 분자는 커지고 분모는 작아지므로 평형 상수는 증가한다.

부피 — 외부 압력이 4기압으로 일정하므로 $V = n_{\text{전체}} RT/P$ 에서 부피는 전체 몰수와 절대 온도에 각각 비례한다. 두 요인이 반대 방향으로 작용한다.

i) 온도가 $T \rightarrow 2T$ 로 2배가 되는 효과 $\rightarrow$ 부피를 2배로 늘린다.

ii) 정반응이 진행되면 $2A + B \rightarrow 2C$ 에서 몰수가 줄어드는 효과 $\rightarrow$ 부피를 줄인다.

그런데 몰수 감소에는 한계가 있다. 정반응이 최대로 진행되어도 한계 반응물인 B(n 몰)가 모두 소모되는 데서 멈추고, 이때 전체 몰수는 $8n \rightarrow 7n$ 으로 $7/8$ 배까지만 줄어든다.

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{n_2}{n_1} \times \frac{2T}{T} \geq \frac{7}{8} \times 2 = \frac{7}{4} = 1.75$$

실제로는 B가 완전히 소모되지는 않으므로 V_2/V_1 은 1.75배와 2배 사이의 값이 되며, 어느 경우에도 1보다 크다. 즉 온도 상승에 의한 부피 증가가 몰수 감소에 의한 부피 감소보다 훨씬 크므로 전체 부피는 증가한다.

핵심 개념 색인

각 학년도 문항이 다루는 핵심 개념과 그 개념이 등장한 학년도. 같은 개념이 여러 해에 반복되는지 한눈에 확인할 수 있다.

1차 반응과 반감기	2026
결합 에너지와 반응 엔탈피	2024, 2023, 2021
결합 엔탈피와 르샤틀리에의 원리	2020
금속 결합과 결합 에너지	2019
기체 반응의 양적 관계	2022
동위원소와 평균 원자량	2020
르샤틀리에 원리	2024, 2021
몰 농도와 이상 기체 방정식	2024
물의 전기분해와 삼투압	2020
반감기	2025
반응 속도식	2026
반응 속도와 촉매	2025
반응 차수와 반감기	2023
보어의 원자 모형과 전자 배치	2025
부분 압력 법칙	2024
산·염기 역성과 르샤틀리에 원리	2023
산·염기 평형과 끓는점 오름	2020
산화 환원 반응	2026
산화·환원과 산화수	2024
산화·환원과 제철	2022
삼투압과 반트 호프 법칙	2022
삼평형 그림과 삼중점	2021
수소 연료 전지	2024
아보가드로 법칙	2026
약산의 이온화 평형·완충 용액·pH	2021
양자수와 바닥상태 전자 배치	2023
연소 반응의 양적 관계	2019
오비탈과 이온화 에너지의 주기성	2019
이산화 탄소의 전기화학적 환원	2022
이상 기체 방정식과 몰 농도	2022
이상 기체 상태 방정식	2023
이상 기체 상태 방정식과 양적 관계	2019
이상기체 상태 방정식과 전자쌍 반발 이론	2020
이온 결합과 수소 결합	2023
전기 분해	2023
전기 음성도와 결합의 극성	2025
전자쌍 반발 이론과 분자 구조	2022
전자쌍 반발과 활성화 에너지	2019
중화 반응과 이온화 상수	2022
총괄성과 삼투압	2021
탄산의 이온화 상수	2022
탄소 동소체	2026
탄소 화합물과 몰	2025
평균 결합 에너지	2025
표면적과 반응 속도	2025
헤스 법칙	2024
헤스의 법칙과 수소 연료 전지	2021
화학 반응식과 양적 관계	2023
화학 반응에서의 양적 관계	2026
화학 평형 상수	2023
화학 평형 상수와 평형 이동	2024
화학 평형과 평형 상수	2019
확산 속도와 화학 평형	2020

KAIST 화학 기출 문항집

해설편 · 2019-2026 · 28문항 (8개년)

발행일	2026년 8월 17일 초판 발행
발행인	김민용
발행처	연주미디어
연락처	blueslap@naver.com
사업자등록번호	459-94-01364

문항과 제시문의 저작권은 원 출제 기관에 있으며, 편집·구성 및 예시답안의 저작권은 연주미디어에 있습니다.

이 책의 내용 일부 또는 전부를 저작권자의 서면 동의 없이 복제·배포·전송할 수 없습니다. 잘못 만들어진 책은 구입처에서 바꾸어 드립니다.

써봄 AI 논술 자동 첨삭

쓴 글을 올리면, 바로 채점과 피드백이 돌아옵니다.

무료

3회 무료 분석

회원가입만 하면 3회까지 무료로 분석해 드립니다.

결제 정보 없이 바로 시작할 수 있습니다. 첨삭 결과는 PDF 리포트로 내려받을 수 있습니다.

네 가지 영역을 점수로 보여 줍니다

- 논리 구조
- 근거 타당성
- 주장 명확성
- 언어 표현

받아 보는 것

영역별 점수와 함께 **강점, 개선점, 구체적 제안사항**이 담긴 상세 피드백이 나옵니다.

이런 분께

혼자 쓴 답안을 바로 점검하고 싶은 **수험생**, 여러 학생 글을 한 번에 채점해야 하는 **논술 교사·강사·학원**.



writegrow.net

QR 을 찍으면 바로 열립니다

이용 방법

1

회원가입

이메일로 가입하면 곧바로 무료 분석 3회가 주어집니다.

2

답안 올리기

PDF · DOCX · TXT 파일을 올립니다. 한 번에 최대 10편까지 일괄 처리됩니다.

3

첨삭 받기

영역별 점수와 상세 피드백을 확인하고 PDF 리포트로 내려받습니다.