



화학 평형과 평형 이동

차례

Part 1 · 개념 정리	1
화학 평형	1
평형 상수	2
화학 평형의 이동	7
평형 이동의 응용	12
상평형	14
Part 2 · 기본문제	17
Part 3 · 심화문제	22
Part 4 · 정답과 해설	32
개념 체크 정답	32
기본문제 해설	33
심화문제 해설	36

Part 1 · 개념 정리

1 화학 평형

(1) 가역 반응과 비가역 반응

① **가역 반응**: 농도, 압력, 온도 등의 반응 조건에 따라 정반응과 역반응이 모두 일어날 수 있는 반응으로, 화학 반응식에서 $\rightleftharpoons$ 로 나타낸다. 정반응은 화학 반응식에서 오른쪽으로 진행되는 반응이고, 역반응은 왼쪽으로 진행되는 반응이다.

예 $2\text{NO}_2(\text{g}) \rightleftharpoons \text{N}_2\text{O}_4(\text{g})$ / $\text{N}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{NH}_3(\text{g})$

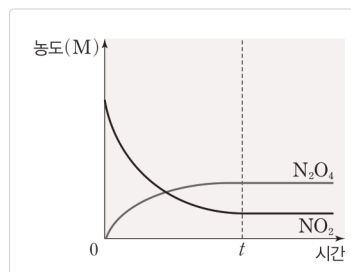
② **비가역 반응**: 한쪽 방향으로만 진행되는 반응으로, 정반응에 비해 역반응이 무시할 수 있을 만큼 거의 일어나지 않는다.

예 연소 반응: $\text{C}_3\text{H}_8(\text{g}) + 5\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 3\text{CO}_2(\text{g}) + 4\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ / 앙금 생성 반응: $\text{Na}_2\text{CO}_3(\text{aq}) + \text{CaCl}_2(\text{aq}) \rightarrow \text{CaCO}_3(\text{s}) + 2\text{NaCl}(\text{aq})$

(2) 화학 평형 상태

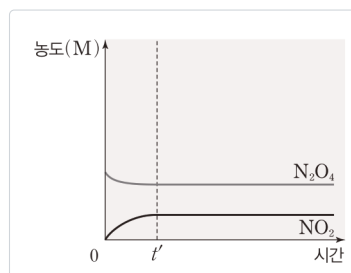
가역 반응에서 반응물과 생성물의 농도가 변하지 않아서 겉으로 보기에 반응이 정지된 것처럼 보이는 상태를 화학 평형 상태라고 한다. 그러나 반응이 정지된 것이 아니라 실제로 정반응과 역반응이 같은 속도로 일어나고 있는 동적 평형 상태이다.

❶ **반응 용기에 NO_2 만 넣었을 때**: 정반응이 진행되어 시간이 지남에 따라 NO_2 의 농도는 감소하고 N_2O_4 의 농도는 증가한다. N_2O_4 가 생성되면 역반응도 진행된다. 시간 t 이후에는 NO_2 와 N_2O_4 의 농도가 각각 일정하며, 겉으로 보기에 반응이 정지된 것처럼 보이는 화학 평형 상태이다.



반응 용기에 NO_2 만 넣었을 때

❷ **반응 용기에 N_2O_4 만 넣었을 때**: 역반응이 진행되어 시간이 지남에 따라 N_2O_4 의 농도는 감소하고 NO_2 의 농도는 증가한다. 시간 t' 이후에는 NO_2 와 N_2O_4 의 농도가 각각 일정해지며, 이때가 화학 평형 상태이다.



반응 용기에 N_2O_4 만 넣었을 때

(3) 화학 평형 상태의 성질

- ① 화학 평형 상태에서 외부 조건(온도, 압력 등)이 변하지 않으면 반응물과 생성물의 농도는 각각 일정하게 유지된다.
- ② 용기에 반응물이나 생성물만 넣어도 반응이 진행된다면 화학 평형 상태에 도달한다.
- ③ 화학 평형 상태에서 반응물과 생성물의 농도비는 화학 반응식의 계수비와 무관하다.

	$\text{N}_2(g) + 3\text{H}_2(g) \rightleftharpoons 2\text{NH}_3(g)$		
초기 농도(M)	1.000	1.000	0
반응 농도(M)	-0.079	-0.237	+0.158
평형 농도(M)	0.921	0.763	0.158

⇒ 평형 농도비 ≠ 1:3:2

암모니아 합성 반응의 평형 농도비는 계수비와 무관하다

핵심 정리 가역 반응은 반응 조건에 따라 정반응과 역반응이 모두 일어날 수 있는 반응이고, 화학 평형 상태는 반응물과 생성물의 농도가 변하지 않아 겉으로 보기에 반응이 정지된 것처럼 보이는 동적 평형 상태이다.

개념 체크 A 빈칸을 채우고, ○ 또는 ×로 답하십시오. (정답은 교재 말미 해설)

1. 정반응과 역반응이 모두 일어날 수 있는 반응을 _____ 반응이라고 한다.
2. 연소 반응과 같이 한 방향으로만 진행되는 반응을 _____ 반응이라고 한다.
3. 정반응과 역반응이 모두 일어나고 있는 가역 반응에서 반응물의 농도와 생성물의 농도가 일정하게 유지되는 상태를 _____ 상태라고 한다.
4. 화학 평형 상태에서는 정반응 속도와 역반응 속도가 _____ 다.

개념 체크 B 빈칸을 채우고, ○ 또는 ×로 답하십시오. (정답은 교재 말미 해설)

1. 가역 반응에서 반응물만 넣을 경우 _____ 이 우세하게 진행되어 _____ 에 도달한다.
2. 화학 평형 상태에서 반응물과 생성물의 농도비는 화학 반응식의 계수비와 항상 같다. ()

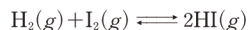
2 평형 상수**(1) 화학 평형 법칙**

일정한 온도에서 어떤 가역 반응이 화학 평형 상태에 있을 때, 반응물의 농도 곱에 대한 생성물의 농도 곱의 비는 항상 일정하다. 화학 평형 상태에서 이 값을 평형 상수(K)라고 한다.

과학 돋보기

평형 상수

표는 일정한 온도에서 다음 반응이 화학 평형 상태에 도달했을 때, 각 물질의 평형 농도와 평형 농도 사이의 관계를 나타낸 것이다.



실험	평형 농도(M)			평형 농도 사이의 관계		
	[H ₂]	[I ₂]	[HI]	$\frac{[\text{HI}]}{[\text{H}_2][\text{I}_2]}$	$\frac{2 \times [\text{HI}]}{[\text{H}_2][\text{I}_2]}$	$\frac{[\text{HI}]^2}{[\text{H}_2][\text{I}_2]}$
I	0.252	0.119	1.228	40.950	81.899	50.286
II	0.055	0.055	0.390	128.926	257.851	50.281
III	0.165	0.165	1.170	42.975	85.950	50.281

실험 I, II, III에서 화학 평형 상태에서의 농도가 다르더라도 $\frac{[\text{HI}]^2}{[\text{H}_2][\text{I}_2]}$ 의 값은 항상 일정하다.

➡ 일정한 온도에서 반응물의 평형 농도 곱에 대한 생성물의 평형 농도 곱의 비는 일정하며, 이를 평형 상수라고 한다.

과학 돋보기 — 평형 상수

(2) 평형 상수(K)

반응물 A와 B가 반응하여 생성물 C와 D가 생성되는 반응에서 평형 상수는 각 물질의 평형 농도(M)로부터 다음과 같이 구할 수 있으며, 평형 상수는 단위가 없다.

$$a\text{A} + b\text{B} \rightleftharpoons c\text{C} + d\text{D} \quad (a \sim d : \text{반응 계수})$$

$$\text{평형 상수}(K) = \frac{[\text{C}]^c [\text{D}]^d}{[\text{A}]^a [\text{B}]^b}$$

([A], [B], [C], [D]는 각각 A, B, C, D의 평형 농도(M))

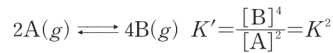
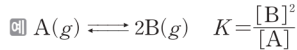
- ① 평형 상수는 온도에 의해서만 달라지며 농도나 기체의 압력에 의해서는 달라지지 않는다.
- ② 정반응의 평형 상수가 K일 때 역반응의 평형 상수(K')는 $\frac{1}{K}$ 이다.
- ③ 고체 물질이나 용매는 평형 상수식에 나타내지 않는다.

예 $\text{CaCO}_3(s) \rightleftharpoons \text{CaO}(s) + \text{CO}_2(g)$ $K = [\text{CO}_2]$

과학 돋보기

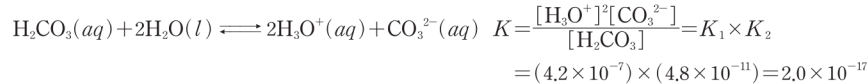
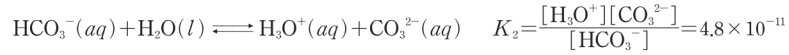
화학 반응식과 평형 상수

1. 정반응의 평형 상수가 K 일 때 화학 반응식의 반응 계수를 n 배하면 평형 상수는 K^n 이 된다.

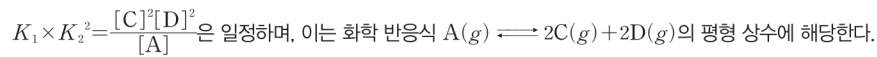
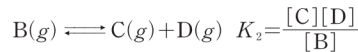
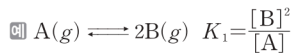


2. 전체 반응의 평형 상수는 각 단계 반응의 평형 상수를 이용하여 구할 수 있다.

예 25°C에서 탄산(H_2CO_3)의 이온화 반응에서 평형 상수



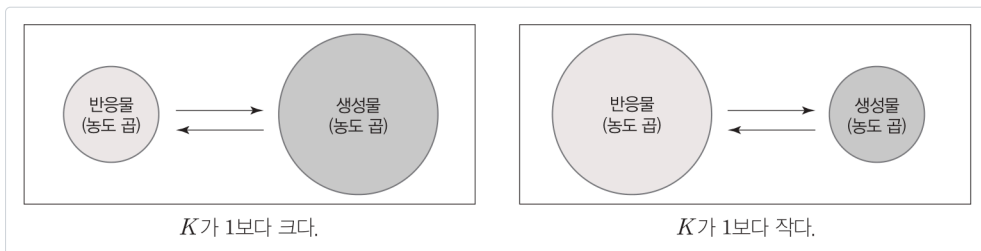
3. 온도가 일정한 1개의 반응 용기에서 2가지 화학 반응이 평형을 이루고 있을 때, 2개의 평형 상수를 곱하거나 나누어도 일정하다.



과학 돋보기 — 화학 반응식과 평형 상수

(3) 평형 상수(K)의 의미

- ① K 가 1보다 큰 경우: 화학 평형 상태에서 반응물의 농도 곱에 비해 생성물의 농도 곱이 크다.
 ② K 가 1보다 작은 경우: 화학 평형 상태에서 생성물의 농도 곱에 비해 반응물의 농도 곱이 크다.



핵심 정리 평형 상수는 일정한 온도에서 평형 상태에 있는 어떤 반응의 반응물의 농도 곱에 대한 생성물의 농도 곱의 비이며, 온도에 의해서만 달라진다.

개념 체크 C 빈칸을 채우고, ○ 또는 ×로 답하시오. (정답은 교재 말미 해설)

1. 일정한 온도에서 어떤 가역 반응이 화학 평형 상태에 있을 때, 반응물의 농도 곱에 대한 생성물의 농도 곱의 비를 _____ 라고 한다.
2. 반응 $\text{H}_2(\text{g}) + \text{I}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{HI}(\text{g})$ 의 평형 상수식은 _____ 이다.
3. 반응 $\text{A}(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{B}(\text{g})$ 에서 용기에 A 1 M, B 2 M가 화학 평형 상태에 있을 때 평형 상수는 _____ 이다.
4. 정반응의 평형 상수가 K 이면 역반응의 평형 상수는 _____ 이다.
5. $\text{A} \rightleftharpoons 2\text{B}$ 의 평형 상수가 K 이면 $2\text{A} \rightleftharpoons 4\text{B}$ 의 평형 상수는 _____ 이다.
6. $2\text{A} \rightleftharpoons \text{B}$ 의 평형 상수가 K_1 이고, $\text{B} \rightleftharpoons \text{C} + \text{D}$ 의 평형 상수가 K_2 이면 $2\text{A} \rightleftharpoons \text{C} + \text{D}$ 의 평형 상수는 _____ 이다.

(4) 평형 상수의 계산

- ① 화학 반응식을 완결하고 평형 상수식을 쓴다.
- ② 화학 반응의 양적 관계를 이용하여 화학 평형 상태에서 각 물질의 몰 농도를 구한다.
- ③ 평형 상수식에 각 물질의 평형 농도(M)를 대입하여 평형 상수를 구한다.

(5) 반응 지수(Q)를 통한 화학 반응의 진행 방향 예측

- ① **반응 지수(Q)**: 평형 상수식에 반응물과 생성물의 현재 농도(M)를 대입하여 구한 값이다.

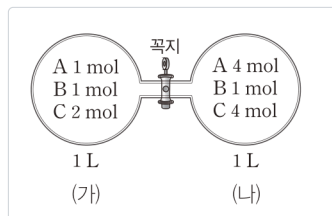
$$aA + bB \rightleftharpoons cC + dD \quad (a \sim d : \text{반응 계수})$$

$$\text{반응 지수}(Q) = \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b}$$

([A], [B], [C], [D]는 각각 A, B, C, D의 현재 농도(M))

- ② **화학 반응의 진행 방향 예측**: 같은 온도에서 반응 지수(Q)를 평형 상수(K)와 비교하여 반응의 진행 방향을 예측할 수 있다. Q와 K가 같으면 화학 평형 상태이고, 평형에 도달하지 않은 반응은 Q가 K와 같아질 때까지 정반응 또는 역반응이 우세하게 진행된다.

구분	생성물의 농도	반응의 진행 방향
$Q < K$	현재 상태 < 평형 상태	생성물의 농도가 커져야 하므로 정반응이 우세하게 진행
$Q = K$	현재 상태 = 평형 상태	화학 평형 상태
$Q > K$	현재 상태 > 평형 상태	생성물의 농도가 작아져야 하므로 역반응이 우세하게 진행



꼭지를 열었을 때 반응의 진행 방향 예측

핵심 정리 $Q < K$ 이면 정반응이, $Q > K$ 이면 역반응이 우세하게 진행되며, $Q = K$ 이면 화학 평형 상태이다.

개념 체크 D 빈칸을 채우고, ○ 또는 ×로 답하시오. (정답은 교재 말미 해설)

1. 평형 상수 $K > 1$ 이면 화학 평형 상태에서 반응물의 농도 곱보다 생성물의 농도 곱이 _____ 다.
2. 반응물과 생성물의 현재 농도를 평형 상수식에 대입하여 구한 값을 _____ 라고 한다.
3. 반응 지수 $Q > K$ 일 때 _____ 이 우세하게 진행된다.
4. 반응 지수 $Q < K$ 일 때 _____ 이 우세하게 진행된다.

3 화학 평형의 이동

(1) 평형 이동 법칙(르사틀리에 원리)

화학 평형 상태에 있는 화학 반응에서 농도, 온도, 압력 등의 반응 조건을 변화시키면, 그 변화를 상쇄하려는 방향으로 반응이 진행되어 새로운 평형에 도달하게 된다.

(2) 평형 이동에 영향을 미치는 요인

① **농도 변화에 의한 평형 이동**: 평형 상태에 있는 화학 반응에서 반응물이나 생성물의 농도를 변화시키면 농도 변화를 상쇄하려는 방향으로 반응이 진행되어 새로운 평형에 도달한다. 농도 변화에 의한 평형 이동이 일어나도 온도가 변하지 않으면 평형 상수(K)는 변하지 않는다.

조건 변화	평형 이동	속도 비교
반응물의 농도 증가 또는 생성물의 농도 감소	정반응 쪽으로 평형 이동 (반응물의 농도 감소, 생성물의 농도 증가 방향)	정반응 속도 > 역반응 속도
반응물의 농도 감소 또는 생성물의 농도 증가	역반응 쪽으로 평형 이동 (반응물의 농도 증가, 생성물의 농도 감소 방향)	정반응 속도 < 역반응 속도

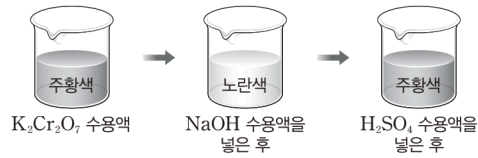
개념 체크 E 빈칸을 채우고, ○ 또는 ×로 답하시오. (정답은 교재 말미 해설)

- $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons 2\text{CrO}_4^{2-}(\text{aq}) + 2\text{H}^+(\text{aq})$ 반응이 평형 상태에 있을 때 NaOH 수용액을 소량 첨가하면 평형은 _____ 쪽으로 이동하고, H_2SO_4 수용액을 소량 첨가하면 평형은 _____ 쪽으로 이동한다.
- 강철 용기 안에서 $\text{N}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{NH}_3(\text{g})$ 반응이 화학 평형에 있을 때 N_2 를 추가하면 반응 지수(Q)가 평형 상수(K)보다 _____ 므로 평형은 _____ 쪽으로 이동한다.

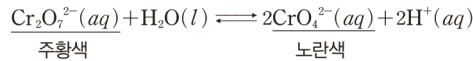
탐구자료 살펴보기 다이크로뮴산 이온($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$)과 크로뮴산 이온(CrO_4^{2-}) 사이의 평형 이동

- 실험 과정**
1. 다이크로뮴산 칼륨($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 수용액에 수산화 나트륨(NaOH) 수용액을 넣고 색깔 변화를 관찰한다.
 2. 과정 1의 용액에 황산(H_2SO_4) 수용액을 넣고 색깔 변화를 관찰한다.

- 실험 결과**
- 다이크로뮴산 칼륨($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 수용액은 주황색을 띤다. 이 용액에 수산화 나트륨(NaOH) 수용액을 넣었더니 노란색으로 변하였다.
 - 과정 1의 용액에 황산(H_2SO_4) 수용액을 넣었더니 다시 주황색으로 변하였다.



- 분석 point**
- 다이크로뮴산 칼륨($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)을 물에 녹이면 다음과 같이 평형을 이룬다.



$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 수용액에 NaOH 수용액을 넣으면 수산화 이온(OH^-)이 수소 이온(H^+)과 반응하므로 수용액 속 H^+ 의 농도가 감소한다. H^+ 의 농도가 감소하면 평형은 정반응 쪽으로 이동하여 CrO_4^{2-} 의 농도가 증가하므로 수용액의 색이 노란색으로 변한다.

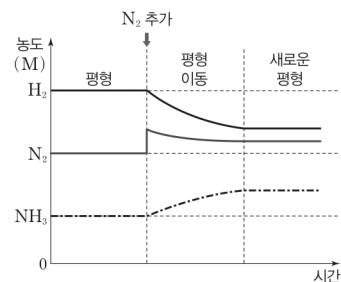
- 과정 1의 용액에 황산(H_2SO_4) 수용액을 넣으면 H^+ 의 농도가 증가한다. H^+ 의 농도가 증가하면 평형은 역반응 쪽으로 이동하여 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 의 농도가 증가하므로 수용액의 색이 주황색으로 변한다.

탐구자료 살펴보기 — $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 과 CrO_4^{2-} 사이의 평형 이동

과학 돋보기 농도와 평형 이동

그림은 강철 용기 안에서 일어나는 $\text{N}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{NH}_3(\text{g})$ 반응의 화학 평형 상태에서 N_2 를 추가했을 때 각 물질의 농도를 시간에 따라 나타낸 것이다. (단, 온도는 일정하다.)

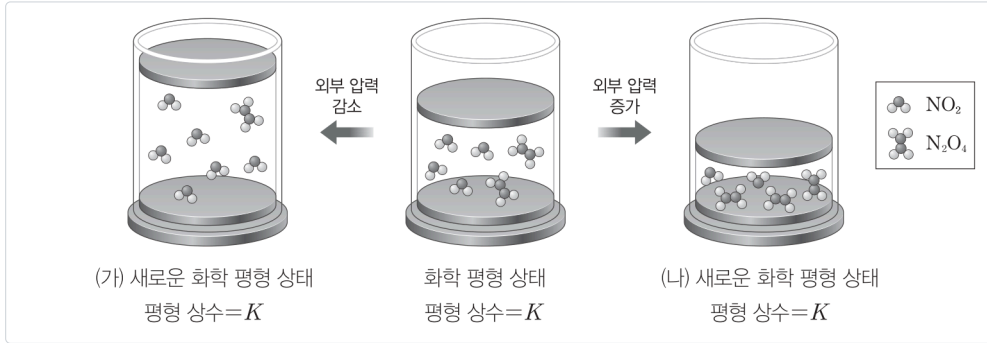
- N_2 를 추가한 시점 : N_2 의 농도가 급격하게 증가한다.
- 평형 이동의 원리 : N_2 의 농도를 감소시키는 방향으로 평형이 이동한다.
- N_2 를 추가하면 반응 지수(Q) < 평형 상수(K)이며, Q 가 K 와 같아질 때까지 N_2 와 H_2 의 농도는 작아지고, NH_3 의 농도는 커져야 하므로 정반응이 우세하게 반응이 진행되어 새로운 평형에 도달한다.
- 새로운 평형 : 각 물질의 농도가 일정하게 유지되는 새로운 평형에 도달한다. 이때 온도는 변하지 않았으므로 새로운 평형에서의 평형 상수는 처음 평형에서의 평형 상수와 같다.



과학 돋보기 — 농도와 평형 이동

② **압력 변화에 의한 평형 이동**: 화학 평형 상태에 있는 화학 반응에서 압력을 높이면 압력을 낮추는 방향으로 평형이 이동하고, 압력을 낮추면 압력을 높이는 방향으로 평형이 이동한다.

- 고체와 액체의 농도는 압력의 영향을 받지 않고, 기체의 경우에는 압력의 영향을 받는다. 예 $\text{CaCO}_3(\text{s}) \rightleftharpoons \text{CaO}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$ 반응에서 CaCO_3 과 CaO 이 고체이므로 압력 변화에 의한 평형의 이동은 CO_2 의 압력에 의해 좌우된다.
- 압력 변화에 의한 평형 이동이 이루어지더라도 온도가 변하지 않으면 평형 상수(K)는 변화가 없다.



$\text{N}_2\text{O}_4(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{NO}_2(\text{g})$ 반응에서 압력 변화와 평형 이동

- 부피가 일정한 용기에서 비활성 기체 등 반응에 영향을 주지 않는 기체를 첨가한 경우에는 반응물이나 생성물의 몰 농도(M)가 변하지 않으므로 평형이 이동하지 않는다.

핵심 정리 화학 평형 상태에서 압력을 높이면 압력을 감소시키는 방향으로, 즉 전체 기체 분자 수가 감소하는 방향으로 평형이 이동한다.

개념 체크 F 빈칸을 채우고, ○ 또는 ×로 답하십시오. (정답은 교재 말미 해설)

- 강철 용기 안에서 $\text{N}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{NH}_3(\text{g})$ 반응이 평형 상태에 있을 때 H_2 의 농도를 증가시키면 N_2 의 농도는 _____ 하고 NH_3 의 농도는 _____ 하는 방향으로 평형이 이동한다.
- 화학 평형 상태에 있는 화학 반응에서 압력을 증가시키면 압력을 _____ 시키는 방향으로 평형이 이동한다. (단, 기체 반응물의 계수 합과 기체 생성물의 계수 합은 다르다.)

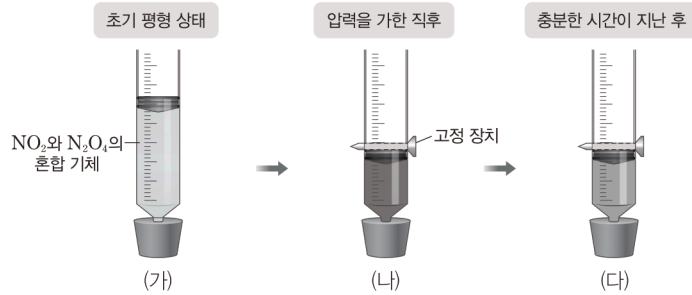
개념 체크 G 빈칸을 채우고, ○ 또는 ×로 답하십시오. (정답은 교재 말미 해설)

- $\text{A}(\text{g}) + \text{B}(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{C}(\text{g})$ 반응이 평형 상태에 있을 때 부피를 증가시키면 기체의 압력이 _____ 하지만 평형 이동은 일어나지 않는다.
- $\text{N}_2\text{O}_4(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{NO}_2(\text{g})$ 반응이 화학 평형 상태에 있을 때 부피를 감소시켜 압력을 높이면 _____ 이 우세하게 진행되어 평형에 도달한다.

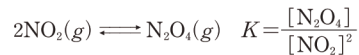
탐구자료 살펴보기 기체의 압력 변화에 따른 평형 이동

- 실험 과정**
1. 주사기에 이산화 질소(NO_2)와 사산화 이질소(N_2O_4)의 혼합 기체를 넣고 밀폐한 후 충분한 시간이 지난 후에 색을 관찰한다.
 2. 주사기에 압력을 가하여 부피를 $\frac{1}{2}$ 배로 감소시킨 직후와 피스톤을 고정하고 충분한 시간이 지난 후 혼합 기체의 색을 관찰한다.

- 실험 결과**
- 과정 1의 결과 혼합 기체는 연한 갈색을 띠었다.
 - 부피를 $\frac{1}{2}$ 배로 감소시킨 직후 갈색이 매우 짙어졌다가 충분한 시간이 지난 후 조금 열어졌지만 과정 1의 연한 갈색보다 조금 진한 갈색이 유지되었다.



- 분석 point**
- 다음은 이산화 질소(NO_2)로부터 사산화 이질소(N_2O_4)가 생성되는 반응의 화학 반응식과 평형 상수이다.



- 과정 1의 평형 상태 (가)에서 적갈색의 이산화 질소(NO_2)와 무색의 사산화 이질소(N_2O_4)가 혼합되어 연한 갈색을 띠었을 때의 평형 상수를 K 라고 할 때, 압력을 가하여 부피를 $\frac{1}{2}$ 배로 감소시킨 직후인 (나)에서 NO_2 와 N_2O_4 의 농도가 (가)에서보다 각각 2배가 되므로 기체의 색이 (가)보다 진하게 변한다. 이 경우 반응 지수 $Q = \frac{2[\text{N}_2\text{O}_4]}{(2[\text{NO}_2])^2} = \frac{K}{2}$ 가 되고, $Q < K$ 이므로 정반응이 우세하게 진행되므로 적갈색의 NO_2 는 감소하고 무색의 N_2O_4 는 증가하여 충분한 시간이 지난 후 (다)에서 기체의 색은 (나)보다 다소 연해진다.

탐구자료 살펴보기 — 기체의 압력 변화에 따른 평형 이동

과학 돋보기 압력 변화에 의한 평형 이동과 화학 반응식의 계수 관계

$aA(g) + bB(g) \rightleftharpoons cC(g) + dD(g)$ 반응의 화학 평형 상태에서

- 압력을 증가시켰을 때 정반응 쪽으로 평형이 이동하였다.
 - ➔ 전체 기체 분자 수가 감소하는 방향으로 평형이 이동하므로 반응물의 계수 합이 생성물의 계수 합보다 크다.
 - ➔ $a + b > c + d$
- 압력을 감소시켰을 때 정반응 쪽으로 평형이 이동하였다.
 - ➔ 전체 기체 분자 수가 증가하는 방향으로 평형이 이동하므로 반응물의 계수 합이 생성물의 계수 합보다 작다.
 - ➔ $a + b < c + d$
- 압력을 증가시키거나 감소시켰는데도 평형의 이동이 없다.
 - ➔ 반응물의 계수 합과 생성물의 계수 합이 같다.
 - ➔ $a + b = c + d$

과학 돋보기 — 압력 변화에 의한 평형 이동과 화학 반응식의 계수 관계

③ **온도 변화에 의한 평형 이동**: 화학 평형 상태에 있는 화학 반응에서 온도를 높이면 열을 흡수하는 흡열 반응 쪽으로 평형이 이동하고, 온도를 낮추면 열을 방출하는 발열 반응 쪽으로 평형이 이동한다.

• 평형 상태에서 온도가 일정할 때 농도나 압력이 변해 새로운 평형 상태에 도달해도 평형 상수는 일정하지만, 온도가 변하면 평형 상수가 달라진다. 정반응이 흡열 반응일 때 온도를 높이면 평형 상수는 증가하고, 온도를 낮추면 평형 상수는 감소한다. 정반응이 발열 반응일 때는 그 반대이다.

온도(K)	평형 상수	온도(K)	평형 상수
300	2.6×10^8	500	1.7×10^2
400	3.9×10^4	600	4.2

$\text{N}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{NH}_3(\text{g})$ 반응($\Delta H = -92.2 \text{ kJ}$)의 온도에 따른 평형 상수

④ **촉매와 평형 이동**: 촉매는 반응 속도에는 영향을 미치지만 평형을 이동시키지는 않는다. 따라서 촉매는 평형 상수나 생성물의 양에는 영향을 주지 않는다.

핵심 정리 온도가 증가할 때 평형 상수가 증가하는 반응은 $\Delta H > 0$, 온도가 증가할 때 평형 상수가 감소하는 반응은 $\Delta H < 0$ 이다.

개념 체크 H 빈칸을 채우고, ○ 또는 ×로 답하십시오. (정답은 교재 말미 해설)

1. 온도가 감소할수록 평형 상수가 감소하는 반응은 ΔH _____ 0이다.
2. 온도 변화에 의한 평형 이동이 일어나면 평형 상수(K)는 (일정하다 / 변한다).
3. 촉매를 사용해도 평형 상수는 변하지 않는다. ()

탐구자료 살펴보기 온도에 따른 평형 이동

실험 과정

1. 시험관에 0.2 M 염화 코발트(II) 수용액($\text{CoCl}_2(aq)$) 3 mL와 진한 염산($\text{HCl}(aq)$) 2 mL를 넣고 색 변화를 관찰한다.
2. 과정 1의 시험관을 90°C의 물에 넣고 색 변화를 관찰한다.
3. 과정 2의 시험관을 얼음물에 넣고 색 변화를 관찰한다.

실험 결과

- 붉은색 염화 코발트(II) 수용액 3 mL에 진한 염산 2 mL를 넣었더니 붉은색과 푸른색이 섞여 혼합 용액의 색이 보라색이 되었다.
- 시험관을 90°C의 물에 넣었더니 푸른색으로 변하였다.
- 시험관을 얼음물에 넣었더니 붉은색으로 변하였다.

0.2 M 염화 코발트(II) 수용액 3 mL + 진한 염산 2 mL (보라색) → 90°C 물에 넣음 → 푸른색 → 얼음물에 넣음 → 붉은색

분석 point $\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$ 이 Cl^- 과 반응하여 CoCl_4^{2-} 으로 되는 반응은 흡열 반응이다.

$$\underbrace{\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}(aq)}_{\text{붉은색}} + 4\text{Cl}^-(aq) \rightleftharpoons \underbrace{\text{CoCl}_4^{2-}(aq)}_{\text{푸른색}} + 6\text{H}_2\text{O}(l) \quad \Delta H = 50 \text{ kJ}$$

온도를 높이면 흡열 반응인 정반응이 우세하게 진행되어 푸른색의 CoCl_4^{2-} 의 농도가 증가하고, 온도를 낮추면 발열 반응인 역반응이 우세하게 진행되어 붉은색의 $\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$ 의 농도가 증가한다.

탐구자료 살펴보기 — 온도에 따른 평형 이동

4 평형 이동의 응용

(1) 수득률

화학 반응에서 이론상 최대를 얻을 수 있는 생성물의 양에 대한 실제로 얻어진 생성물의 양의 비율이다.

$$\text{수득률}(\%) = \frac{\text{실제로 얻어진 생성물의 양}}{\text{이론상 최대를 얻을 수 있는 생성물의 양}} \times 100$$

① **압력에 의한 영향:** 기체 분자 수가 감소하는 반응의 경우에는 압력을 높이면 정반응 쪽으로 평형이 이동하므로 수득률은 증가하고, 압력을 낮추면 역반응 쪽으로 평형이 이동하므로 수득률은 감소한다.

② **온도에 의한 영향:** 정반응이 흡열 반응인 경우에는 온도를 높이면 정반응 쪽으로 평형이 이동하므로 수득률은 증가하고, 온도를 낮추면 역반응 쪽으로 평형이 이동하므로 수득률은 감소한다.

(2) 실생활에서의 화학 평형 이동

① 고압 산소 치료실은 산소의 압력이 높기 때문에 헤모글로빈(Hb)이 산소와 결합하는 반응이 정반응 쪽으로 평형 이동하게 되어 폐를 통해 혈액 속으로 산소가 많이 녹아 들어가 상처 치료가 빨라진다. $\text{Hb}(aq) + 4\text{O}_2(g) \rightleftharpoons \text{Hb}(\text{O}_2)_4(aq)$

② 설탕이 물에 용해되는 반응은 흡열 반응이므로 온도를 높이면 설탕이 물에 잘 용해된다. $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}(s) \rightleftharpoons \text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}(aq)$
 $\Delta H > 0$

③ 이산화 탄소가 물에 용해되는 반응은 발열 반응이므로 온도를 낮추면 이산화 탄소가 물에 잘 용해된다. 따라서 밀폐되지 않은 탄산음료를 상온에 보관하면 툭 쏘는 느낌이 적어진다. $\text{CO}_2(g) + \text{H}_2\text{O}(l) \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3(aq)$ $\Delta H < 0$

핵심 정리 수득률은 화학 반응에서 이론상 최대를 얻을 수 있는 생성물의 양에 대한 실제로 얻어진 생성물의 양의 비율이다.

개념 체크 I 빈칸을 채우고, ○ 또는 ×로 답하시오. (정답은 교재 말미 해설)

1. 화학 반응에서 이론상 최대로 얻을 수 있는 생성물의 양에 대한 실제로 얻어진 생성물의 양을 비율로 나타낸 것을 _____ 이라고 한다.
2. 정반응이 흡열 반응인 경우 온도를 _____ 면 생성물의 수득률을 높일 수 있다.
3. 정반응이 기체 분자 수가 감소하는 반응인 경우 압력을 _____ 면 생성물의 수득률을 높일 수 있다.

과학 돋보기

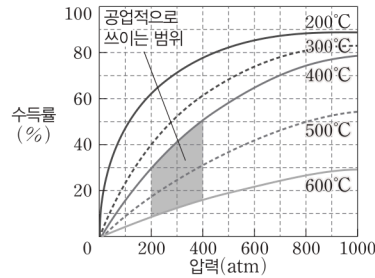
암모니아 합성과 수득률

1. 암모니아 합성 반응의 열화학 반응식



2. 암모니아의 수득률 : 정반응이 발열 반응이므로 온도가 낮을수록 수득률이 증가한다. 정반응이 기체 분자 수가 감소하는 반응이므로 압력이 높을수록 수득률이 증가한다.

3. 하버·보슈법 : 공업적으로 암모니아를 합성할 때 압력이 높을수록 수득률이 증가하지만 압력을 너무 높이면 반응 용기를 제작하기 어렵고, 온도가 낮을수록 수득률이 증가하지만 온도가 너무 낮으면 반응 속도가 느려진다. 따라서 적절한 촉매를 사용하고 400~600°C, 200~400 atm 정도의 조건에서 반응시켜 암모니아를 대량으로 합성한다.



과학 돋보기 — 암모니아 합성과 수득률

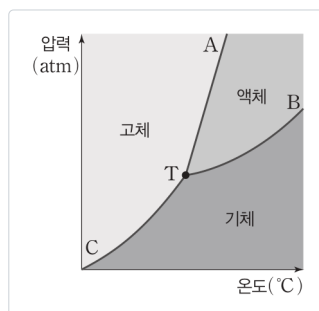
5 상평형

(1) 온도와 압력에 의한 상태 변화

- ① 온도에 의한 상태 변화: 얼음에 열을 가하여 온도를 높이면 물이 되고, 온도를 더 높이면 수증기가 된다.
- ② 압력에 의한 상태 변화: 얼음에 압력을 가하면 물이 된다. 고압의 가스통에 들어 있는 액체 뷰테인은 밸브를 열면 기체로 빠져나온다.

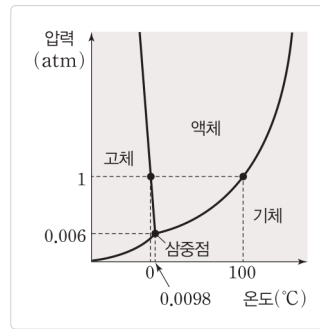
(2) 상평형 그림

온도와 압력에 따른 물질의 상태를 나타낸 그림이다. 승화 곡선, 증기 압력 곡선(기화 곡선), 용해 곡선으로 이루어져 있고, 곡선 상의 모든 점에서 2가지 상태가 공존하여 평형을 이룬다. (단, 삼중점에서는 3가지 상태가 공존하여 평형을 이룬다.)



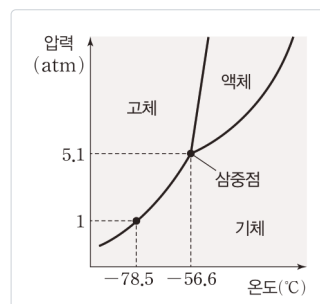
상평형 그림

- ① 용해 곡선(AT): 고체와 액체가 상평형을 이루는 온도와 압력을 나타낸 곡선이다.
- ② 증기 압력 곡선(기화 곡선, BT): 액체와 기체가 상평형을 이루는 온도와 압력을 나타낸 곡선이다.
- ③ 승화 곡선(CT): 고체와 기체가 상평형을 이루는 온도와 압력을 나타낸 곡선이다.
- ④ 삼중점(T): 고체, 액체, 기체의 3가지 상태가 공존하여 평형을 이루는 온도와 압력이다.
- ⑤ 어는점(녹는점): 고체와 액체가 상평형을 이루는 온도이다. 끓는점: 액체와 기체가 상평형을 이루는 온도이다.

(3) 물의 상평형 그림

물의 상평형 그림

- ① 물은 융해 곡선의 기울기가 음(-)의 값을 가지므로 외부 압력이 커지면 어는점이 낮아진다.
- ② 물은 삼중점의 압력이 0.006 atm이므로 1 atm에서는 온도를 높일 때 고체에서 액체를 거쳐 기체로 상태가 변하지만, 0.006 atm보다 낮은 압력에서는 온도를 높일 때 고체 상태에서 액체 상태를 거치지 않고 기체 상태로 승화가 일어난다.

(4) 이산화 탄소의 상평형 그림

이산화 탄소의 상평형 그림

- ① 이산화 탄소는 융해 곡선의 기울기가 양(+)의 값을 가지므로 외부 압력이 커지면 어는점이 높아진다.
- ② 이산화 탄소는 삼중점의 압력이 5.1 atm으로 1 atm보다 크므로 1 atm에서 온도를 높이면 고체 이산화 탄소(드라이아이스)는 승화한다.
- ③ 액체 이산화 탄소를 만들기 위해서는 5.1 atm 이상의 압력이 필요하다.

핵심 정리 상평형 그림은 온도와 압력에 따른 물질의 상태를 나타낸 그림이며, 삼중점은 고체·액체·기체의 3가지 상태가 공존하여 평형을 이루는 온도와 압력이다. 물은 융해 곡선의 기울기가 음(-)의 값을 가진다.

개념 체크 J 빈칸을 채우고, ○ 또는 ×로 답하시오. (정답은 교재 말미 해설)

1. _____ 은 온도와 압력에 따른 물질의 상태를 나타낸 그림이다.
2. 상평형 그림에서 _____ 은 고체와 액체가, _____ 은 액체와 기체가, _____ 은 고체와 기체가 상평형을 이루는 온도와 압력을 나타낸다.
3. _____ 은 고체, 액체, 기체의 3가지 상태가 공존하여 평형을 이루는 온도와 압력이다.
4. 물은 융해 곡선의 기울기가 음(-)의 값이므로 외부 압력이 커지면 어는점이 높아진다. ()

탐구자료 살펴보기
액체 이산화 탄소 만들기

실험 과정

1. 일회용 플라스틱 스포이트의 끝을 잘라 입구를 넓힌 후 막자사발에서 곱게 간 드라이아이스를 넣는다.
2. 과정 1의 스포이트의 입구를 접고 펜치로 기체가 빠져나가지 않게 막은 후 플라스틱 수조의 물속에 넣는다.

실험 결과

- 수조의 물속에 넣은 스포이트 속 드라이아이스가 액체로 변하였다가 스포이트가 터졌다.

분석 point

수조의 물속에 넣은 스포이트 속 드라이아이스가 빨리 승화되어 기체 이산화 탄소가 생성되고 생성된 기체 이산화 탄소가 빠져나가지 못하므로 스포이트 내부의 압력이 커지게 된다. 이산화 탄소의 삼중점의 압력인 5.1 atm 이상이 되었을 때 드라이아이스가 용해된다. 스포이트가 터진 것은 스포이트 내부 압력이 크기 때문이다.

탐구자료 살펴보기 — 액체 이산화 탄소 만들기

(5) 상평형 그림과 물질의 상태 변화

- ① 물의 상평형 그림에서 증기 압력 곡선을 보면 압력이 커질수록 끓는점이 높아지는 것을 알 수 있다. 압력솥에서 밥을 지을 경우 1 atm보다 큰 압력으로 인해 물의 끓는점이 100°C보다 높아지므로 높은 온도에서 밥이 빨리 된다. 반면 높은 산에서 냄비로 밥을 지을 경우 1 atm보다 작은 압력으로 인해 물의 끓는점이 100°C보다 낮아지므로 밥이 설익는다.
- ② 물의 상평형 그림에서 용해 곡선을 보면 압력이 커질수록 녹는점이 낮아지는 것을 알 수 있다. 양쪽에 무거운 추가 달린 실을 얼음에 올리면 압력 증가에 의해 얼음이 녹아 실이 얼음 속으로 들어간다.
- ③ 동결 건조 식품은 재료의 온도를 급속히 낮추어 얼린 후 삼중점에서의 압력보다 작은 압력에서 얼음을 수증기로 승화시켜 건조한 식품이다. 저온에서 건조하므로 맛과 향, 영양소 파괴가 적다.

개념 체크 K 빈칸을 채우고, ○ 또는 ×로 답하시오. (정답은 교재 말미 해설)

1. 이산화 탄소의 상평형 그림에서 삼중점에서의 압력이 1 atm보다 크므로 드라이아이스는 1 atm에서 온도를 높이면 승화한다. ()
2. 액체 이산화 탄소를 만들기 위해서는 _____ 에서의 압력인 5.1 atm 이상의 압력이 필요하다.

Part 2 · 기본문제

20문항 · 정답과 해설은 Part 4.

01 다음은 A(g)와 B(g)가 반응하여 C(g)가 생성되는 반응의 화학 반응식과 온도 T에서 농도로 정의되는 평형 상수(K)이다.

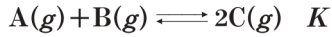
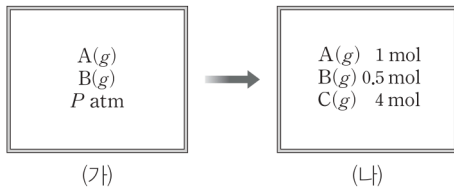


그림 (가)는 온도 T에서 부피가 1 L인 강철 용기에 A(g)와 B(g)를 전체 기체의 압력이 P atm이 되도록 넣은 초기 상태를, (나)는 (가)에서 반응이 진행되어 도달한 평형 상태를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 온도는 T로 일정하다.)

◀ 보기 ▶

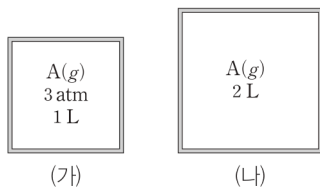
- ㄱ. (가)에서 A(g)의 양은 3 mol이다.
- ㄴ. $K=8$ 이다.
- ㄷ. (나)에서 전체 기체의 압력은 P atm이다.

- ① ㄴ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

02 다음은 A(g)로부터 B(g)가 생성되는 반응의 화학 반응식이다.



그림 (가)와 (나)는 각각 부피가 1 L와 2 L인 강철 용기에 A(g)가 들어 있는 초기 상태를 나타낸 것이다. (가)와 (나)에서 각각 반응이 진행되어 평형 상태에 도달했을 때, 용기 속에 들어 있는 전체 기체의 압력은 4 atm으로 같았다.



평형 상태에 도달한 후 (나)에서 B(g)의 몰 분율은? (단, (가)와 (나)에서 온도는 각각 T로 일정하다.)

- ① $\frac{1}{6}$ ② $\frac{1}{4}$ ③ $\frac{1}{3}$ ④ $\frac{1}{2}$ ⑤ $\frac{2}{3}$

03 다음은 A(g)로부터 B(g)가 생성되는 반응의 화학 반응식이다.

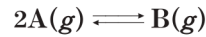
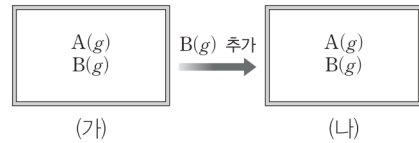


그림 (가)는 강철 용기 속 A(g)와 B(g)가 평형을 이루고 있는 상태를, (나)는 (가)의 용기에 B(g)를 소량 추가한 후 도달한 새로운 평형 상태를 나타낸 것이다.



(나)에서 (가)에서보다 큰 값을 갖는 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 온도는 T로 일정하다.)

◀ 보기 ▶

- ㄱ. 온도 T에서 농도로 정의되는 평형 상수(K)
- ㄴ. B(g)의 몰 농도
- ㄷ. 전체 기체의 압력

- ① ㄴ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄴ, ㄷ

04 다음은 A(g)로부터 B(g)와 C(g)가 생성되는 반응의 화학 반응식과 온도 T에서 농도로 정의되는 평형 상수(K)이다.



표는 온도 T에서 강철 용기에 A(g)와 C(g)를 넣고 반응이 진행될 때, 용기 속 기체의 농도를 반응 시간에 따라 나타낸 것이다. t_1 과 t_2 는 시간 순서가 아니고, 둘 중 하나는 평형에 도달했을 때의 시간이다.

반응 시간	0	t_1	t_2
[A](M)	a	5	3
[B](M)		1	2
[C](M)	c	5	6

$\frac{a}{c} \times K$ 는? (단, 온도는 T로 일정하다.)

- ① $\frac{7}{20}$ ② $\frac{2}{5}$ ③ $\frac{4}{3}$ ④ $\frac{7}{3}$ ⑤ $\frac{20}{3}$

05 다음은 A(g)와 B(g)가 반응하여 C(g)가 생성되는 반응의 열화학 반응식이다.

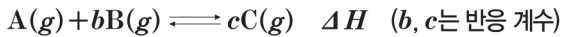
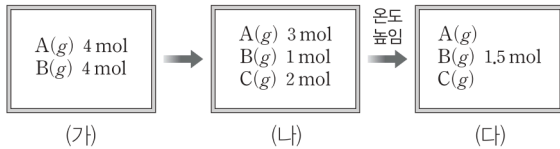


그림 (가)는 부피가 1 L인 강철 용기에 A(g)와 B(g)를 넣은 초기 상태를, (나)는 (가)에서 반응이 진행되어 도달한 평형 상태를, (다)는 (나)에서 온도를 높여 도달한 새로운 평형 상태를 나타낸 것이다.



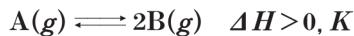
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

◀ 보기 ▶

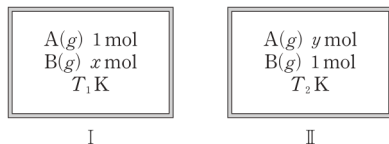
- ㄱ. $b > c$ 이다.
- ㄴ. (나)에서 농도로 정의되는 평형 상수(K)는 $\frac{4}{3}$ 이다.
- ㄷ. $\Delta H > 0$ 이다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

06 다음은 A(g)로부터 B(g)가 생성되는 반응의 열화학 반응식과 농도로 정의되는 평형 상수(K)이다.



그림은 부피가 1 L인 2개의 강철 용기에 A(g) 2 mol을 넣고, 서로 다른 온도 T_1 K, T_2 K에서 각각 반응이 진행되어 도달한 평형 상태 I과 II를 나타낸 것이다.



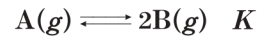
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, I과 II에서 온도는 각각 T_1 K, T_2 K로 일정하다.)

◀ 보기 ▶

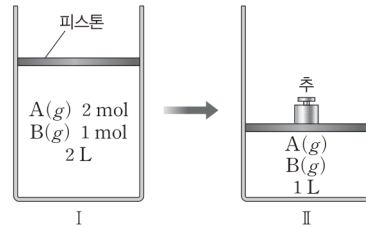
- ㄱ. $\frac{y}{x} = \frac{3}{4}$ 이다.
- ㄴ. $\frac{T_2 \text{ K에서의 } K}{T_1 \text{ K에서의 } K} = \frac{1}{6}$ 이다.
- ㄷ. $T_1 > T_2$ 이다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

07 다음은 A(g)로부터 B(g)가 생성되는 반응의 화학 반응식과 온도 T 에서 농도로 정의되는 평형 상수(K)이다.



그림은 온도 T 에서 실린더에 A(g) n mol을 넣고 반응이 진행되어 도달한 평형 상태 I과, I에서 피스톤에 추를 올린 후 반응이 진행되어 도달한 새로운 평형 상태 II를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 온도와 대기압은 각각 T 와 1 atm으로 일정하고, 피스톤의 질량과 마찰은 무시한다.)

◀ 보기 ▶

- ㄱ. $K = \frac{1}{4}$ 이다.
- ㄴ. 반응 전 A(g) n mol의 부피는 $\frac{4}{3}$ L이다.
- ㄷ. $\frac{\text{II에서 전체 기체의 압력}}{\text{I에서 전체 기체의 압력}} = 2$ 이다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

08 다음은 A(g)와 B(g)가 반응하여 C(g)가 생성되는 반응의 화학 반응식과 온도 T 에서 농도로 정의되는 평형 상수(K)이다.



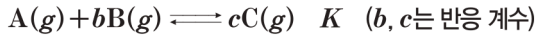
표는 온도 T 에서 강철 용기 I~III에 들어 있는 A(g)~C(g)의 초기 농도를 나타낸 것이다.

용기	[A](M)	[B](M)	[C](M)
I	0.1	0.2	0.1
II	0.1	0.4	0.2
III	0.2	0.1	0.4

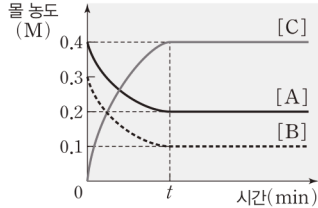
I~III에서 각각 반응이 진행되어 평형 상태에 도달하였을 때, A(g)의 몰 농도를 비교한 것으로 옳은 것은? (단, I~III에서 온도는 각각 T 로 일정하다.)

- ① I > II > III ② I > III > II ③ II > I > III
 ④ II > III > I ⑤ III > II > I

09 다음은 A(g)와 B(g)가 반응하여 C(g)가 생성되는 반응의 화학 반응식과 온도 T에서 농도로 정의되는 평형 상수(K)이다.



그림은 온도 T에서 강철 용기에 A(g)와 B(g)를 넣고 반응이 진행될 때 시간에 따른 A(g)~C(g)의 몰 농도를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?
(단, 온도는 T로 일정하다.)

◀ 보기 ▶

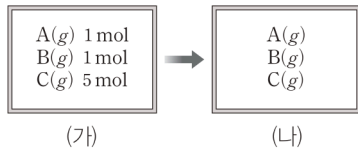
- ㄱ. t min 이후에는 정반응이 일어나지 않는다.
ㄴ. $c = 2b$ 이다. ㄷ. $K = 8$ 이다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄷ ④ ㄱ, ㄴ ⑤ ㄴ, ㄷ

10 다음은 A(g)와 B(g)가 반응하여 C(g)가 생성되는 반응의 화학 반응식과 온도 T에서 농도로 정의되는 평형 상수(K)이다.



그림 (가)는 온도 T에서 부피가 1 L인 강철 용기에 A(g)~C(g)가 들어 있는 초기 상태를, (나)는 (가)에서 반응이 진행되어 도달한 평형 상태를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?
(단, 온도는 T로 일정하다.)

◀ 보기 ▶

- ㄱ. (가)에서 (나)에 도달하기 전까지 역반응이 우세하게 진행된다.
ㄴ. (나)에서 C(g)의 몰 분율은 $\frac{2}{3}$ 이다.
ㄷ. (나)에 A(g) 1 mol, B(g) 1 mol, C(g) 2 mol을 추가하면 평형은 이동하지 않는다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

11 다음은 A(g)로부터 B(g)가 생성되는 반응의 화학 반응식과 온도 T에서 농도로 정의되는 평형 상수(K)이다.

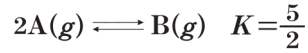
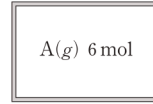
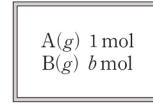


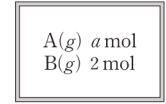
그림 (가)는 온도 T에서 부피가 1 L인 강철 용기에 A(g)를 넣은 초기 상태를, (나)와 (다)는 각각 반응이 진행될 때 용기에 들어 있는 기체의 양(mol)을 반응 시간 순서와 관계없이 나타낸 것이다.



(가)



(나)



(다)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?
(단, 온도는 T로 일정하다.)

◀ 보기 ▶

- ㄱ. $b > a$ 이다. ㄴ. 반응 시간 순서는 (나) → (다)이다.
ㄷ. (나)에서는 정반응 속도가 역반응 속도보다 빠르다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

12 다음은 $\text{CoCl}_2(aq)$ 과 $\text{HCl}(aq)$ 의 혼합 용액에서 일어나는 반응의 열화학 반응식이다.

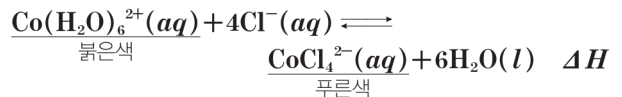
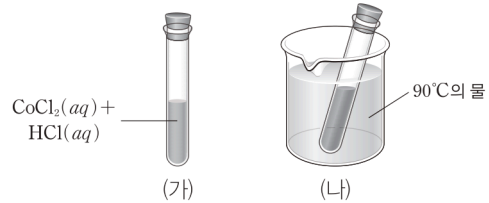


그림 (가)는 $\text{CoCl}_2(aq)$ 과 $\text{HCl}(aq)$ 을 혼합한 25°C의 수용액이 평형에 도달한 것을, (나)는 (가)의 시험관을 90°C의 물에 넣고 새로운 평형에 도달한 것을 나타낸 것이다.



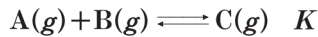
시험관에 들어 있는 혼합 용액의 색이 (가)와 (나)에서 각각 보라색과 푸른색을 나타내었다고 할 때, 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

◀ 보기 ▶

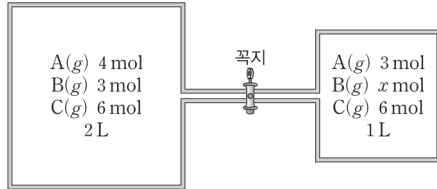
- ㄱ. $\Delta H > 0$ 이다.
ㄴ. 25°C에서 (가)의 혼합 용액에 $\text{HCl}(aq)$ 을 추가하면 용액의 색은 $\text{HCl}(aq)$ 을 추가하기 전보다 붉게 변한다.
ㄷ. (가)의 혼합 용액을 얼음물에 담그면 $\text{CoCl}_4^{2-}(aq)$ 의 농도는 얼음물에 담그기 전보다 작아진다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

13 다음은 A(g)와 B(g)가 반응하여 C(g)가 생성되는 화학 반응식과 온도 T에서 농도로 정의되는 평형 상수(K)이다.



그림은 온도 T에서 꼭지로 분리된 2개의 강철 용기에서 A(g)~C(g)의 혼합 기체가 각각 평형에 도달한 상태를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 온도는 T로 일정하고, 연결관의 부피는 무시한다.)

◀ 보기 ▶

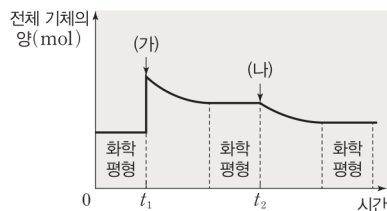
- ㄱ. $K = \frac{1}{2}$ 이다.
- ㄴ. $x = 2$ 이다.
- ㄷ. 꼭지를 열어도 평형은 이동하지 않는다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄷ ④ ㄱ, ㄴ ⑤ ㄴ, ㄷ

14 다음은 A(g)로부터 B(g)가 생성되는 반응의 열화학 반응식이다.



그림은 A(g)와 B(g)가 평형을 이루고 있는 강철 용기에 변화(가)와 (나)를 주었을 때, 시간에 따른 전체 기체의 양(mol)을 나타낸 것이다.

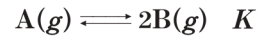


다음 중 (가)와 (나)로 가장 적절한 것은?

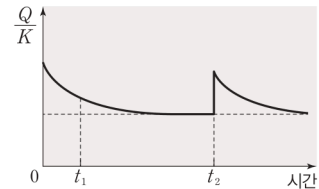
(가) (나)

- ① A(g) 추가 온도 높임
- ② A(g) 추가 온도 낮춤
- ③ B(g) 추가 온도 높임
- ④ B(g) 추가 온도 낮춤
- ⑤ 온도 낮춤 B(g) 추가

15 다음은 A(g)로부터 B(g)가 생성되는 반응의 화학 반응식과 농도로 정의되는 평형 상수(K)이다.



그림은 온도 T에서 강철 용기에 A(g)와 B(g)를 넣고 반응이 진행될 때 시간에 따른 $\frac{Q}{K}$ 를 나타낸 것이다. 반응 시간이 t_2 일 때 A(g)와 B(g) 중 하나를 추가하였다.



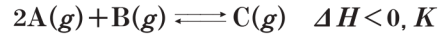
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 온도는 T로 일정하다.)

◀ 보기 ▶

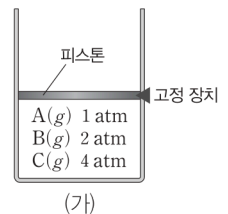
- ㄱ. t_1 일 때 역반응 속도가 정반응 속도보다 빠르다.
- ㄴ. t_2 일 때 용기에 A(g)를 추가하였다.
- ㄷ. K는 t_1 일 때가 t_2 일 때보다 크다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

16 다음은 A(g)와 B(g)가 반응하여 C(g)가 생성되는 반응의 열화학 반응식과 농도로 정의되는 평형 상수(K)이다.



그림은 T K에서 고정 장치로 고정된 실린더에 A(g)와 B(g)를 넣고 반응이 진행되어 T K에서 평형에 도달한 상태 (가)를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 외부 압력은 1 atm으로 일정하고, 피스톤의 질량과 마찰은 무시한다.)

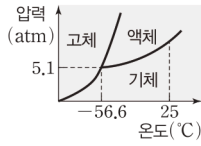
◀ 보기 ▶

- ㄱ. 반응 전 실린더 속 기체의 양(mol)은 A(g)가 B(g)의 $\frac{3}{2}$ 배이다.
- ㄴ. (가)에서 온도를 2T K로 변화시키면 K는 T K일 때보다 커진다.
- ㄷ. (가)에서 온도를 T K로 유지한 채 고정 장치를 제거하고 새로운 평형에 도달했을 때 C(g)의 양(mol)은 (가)에서보다 감소한다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

17 다음은 X의 상변화에 대한 실험이다.

[자료] ○ X의 상평형 그림

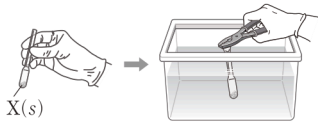


[실험 과정]

(가) 그림과 같이 뾰족한 입구 부분을 잘라 낸 일회용 스포이트에 잘게 부순 X(s)를 조금 넣는다.

(나) (가)의 스포이트 입구를 집고 펜치로 스포이트 입구를 세게 잡는다.

(다) 25°C의 물이 들어 있는 수조에 (나)의 스포이트를 넣고 내부를 관찰한다.



[실험 결과]

○ (다)에서 스포이트 내부에 X(l)가 생성되었다.

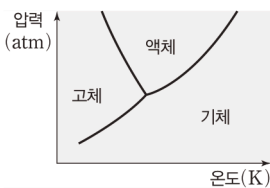
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

◀ 보기 ▶

- ㄱ. 25°C, 1 atm에서 X의 안정한 상은 고체이다.
- ㄴ. X(l)가 생성된 주된 이유는 스포이트 내부의 압력이 증가하였기 때문이다.
- ㄷ. (다)에서 25°C의 물 대신 0°C의 물을 사용해도 스포이트 내부에 X(l)가 생성된다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

18 그림은 물질 X의 상평형 그림을, 표는 X의 온도와 압력에 따른 안정한 상을 나타낸 것이다. $P_1 > P_3$ 이다.



온도 (K)	압력 (atm)	X의 안정한 상
T_1	P_1	고체, 액체
T_1	P_2	기체
T_2	P_3	액체, 기체

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

◀ 보기 ▶

- ㄱ. $T_2 > T_1$ 이다.
- ㄴ. $P_3 > P_2$ 이다.
- ㄷ. T_1 K, P_3 atm에서 X의 안정한 상은 고체이다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

19 다음은 물질 X에 대한 자료이다.

- t_1 °C에서 2가지 상이 평형을 이루는 압력은 P_1 atm, P_2 atm이다.
- 삼중점의 온도는 t_1 °C보다 높다.
- P_2 atm에서 X의 끓는점은 t_2 °C이다.

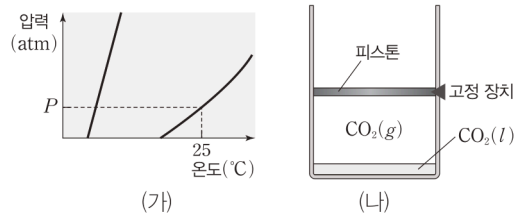
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, X는 고체, 액체, 기체의 3가지 상만 갖는다.)

◀ 보기 ▶

- ㄱ. $P_2 > P_1$ 이다.
- ㄴ. 삼중점의 압력은 P_1 atm보다 낮다.
- ㄷ. t_2 °C, P_1 atm에서 X의 안정한 상은 기체이다.

- ① ㄴ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

20 그림 (가)는 CO₂의 상평형 그림의 일부를, (나)는 25°C에서 피스톤이 고정된 실린더에서 CO₂(l)과 CO₂(g)가 평형을 이루고 있는 것을 나타낸 것이다. CO₂의 삼중점 압력은 5.1 atm이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 대기압은 1 atm으로 일정하다.)

◀ 보기 ▶

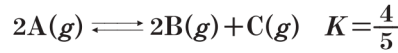
- ㄱ. (나)에서 CO₂(g)의 압력은 P atm이다.
- ㄴ. 25°C, 5.1 atm에서 CO₂의 안정한 상은 기체이다.
- ㄷ. (나)에서 온도를 25°C로 유지한 채 고정 장치를 제거하고 충분한 시간이 지나면 실린더 속에는 CO₂(l)만 존재한다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

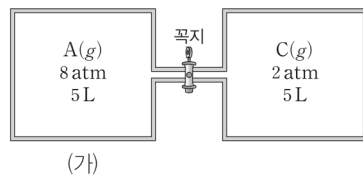
Part 3 · 심화문제

20문항 · 정답과 해설은 Part 4. 각 문항의 접근 Point는 해설에 수록.

01 다음은 A(g)로부터 B(g)와 C(g)가 생성되는 반응의 화학 반응식과 온도 T에서 농도로 정의되는 평형 상수(K)이다.



그림은 온도 T에서 꼭지로 분리된 용기에 A(g)와 C(g)가 들어 있는 초기 상태를 나타낸 것이다. 꼭지를 열고 반응이 진행되어 도달한 평형 상태에서 용기 (가)에 들어 있는 C(g)의 몰 분율은 $\frac{1}{3}$ 이다.



평형 상태에서 (가)에 들어 있는 A(g)의 양(mol)은? (단, 온도는 T로 일정하고, 연결관의 부피는 무시한다.)

- ① $\frac{3}{2}$ ② $\frac{5}{2}$ ③ 3 ④ 4 ⑤ 6

02 다음은 A(g)와 B(g)가 반응하여 C(g)가 생성되는 반응의 열화학 반응식이다.

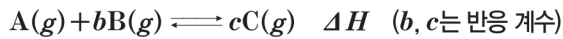
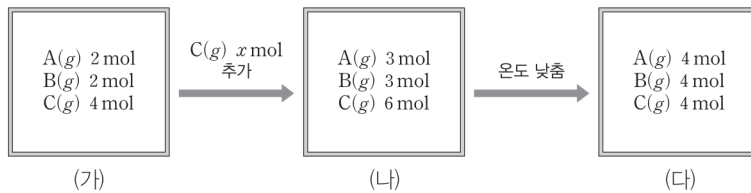


그림 (가)는 강철 용기에 A(g)와 B(g)를 넣고 반응이 진행되어 도달한 평형 상태를, (나)는 (가)에 C(g) x mol을 추가하여 도달한 평형 상태를, (다)는 (나)에서 온도를 낮추어 도달한 평형 상태를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

◀ 보기 ▶

- ㄱ. $b=c$ 이다.
 ㄴ. $\Delta H > 0$ 이다.
 ㄷ. $x=3$ 이다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄷ ④ ㄱ, ㄴ ⑤ ㄴ, ㄷ

03 다음은 $A(g)$ 와 $B(g)$ 가 반응하여 $C(g)$ 가 생성되는 반응의 화학 반응식과 온도 T 에서 농도로 정의되는 평형 상수(K)이다.

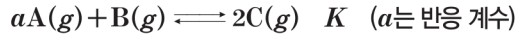
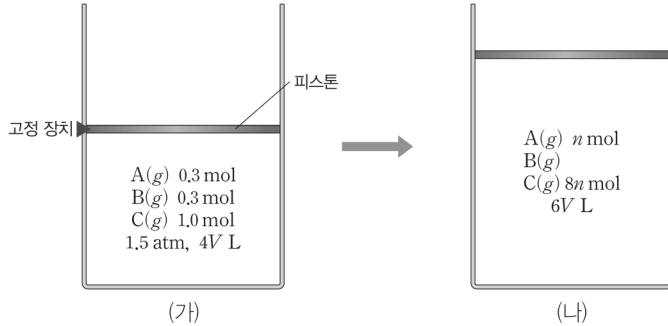


그림 (가)는 온도 T 에서 실린더에 $A(g) \sim C(g)$ 가 들어 있는 초기 상태를, (나)는 (가)의 고정 장치를 제거하고 반응이 진행되어 도달한 평형 상태를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 온도와 대기압은 각각 T 와 1 atm 으로 일정하고, 피스톤의 질량과 마찰은 무시한다.)

◀ 보기 ▶

- ㄱ. (가)에서 (나)에 도달하기 전까지 정반응이 우세하게 진행된다.
- ㄴ. $a \times n > 0.2$ 이다.
- ㄷ. $K = 64$ 이다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

04 다음은 $A(g)$ 로부터 $B(g)$ 가 생성되는 반응의 열화학 반응식과 농도로 정의되는 평형 상수(K)이다.



표는 강철 용기 (가)~(다)에 각각 $A(g) \ n \text{ mol}$ 을 넣고 온도 T_1 과 T_2 에서 반응이 진행되어 도달한 평형 상태에 대한 자료이다. $T_2 > T_1$ 이고, $z > y > x$ 이다.

용기	부피(L)	온도	$A(g)$ 의 몰 분율
(가)	1	T_1	x
(나)	2	T_1	y
(다)	2	T_2	z

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, (가)~(다)에서 온도는 각각 T_1 , T_1 , T_2 로 일정하다.)

◀ 보기 ▶

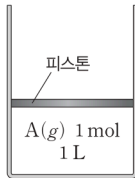
- ㄱ. $a > b$ 이다.
- ㄴ. K 는 T_2 에서가 T_1 에서보다 크다.
- ㄷ. 평형 상태에서 용기 내 전체 기체의 압력은 (가)에서가 (나)에서의 2배이다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

05 다음은 A(g)로부터 B(g)와 C(g)가 생성되는 반응의 화학 반응식과 온도 T에서 농도로 정의되는 평형 상수(K)이다.



그림은 온도 T에서 실린더에 A(g)가 들어 있는 초기 상태를, 표는 실린더에서 반응이 진행될 때 반응 시간에 따른 실린더 속 B(g)의 몰 분율(X_B)과 반응 자수(Q)를 반응 시간에 따라 나타낸 것이다. t_1 , t_2 , t_3 은 시간 순서가 아니다.



반응 시간	t_1	t_2	t_3
X_B	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{6}$	
Q			1

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 온도와 대기압은 각각 T와 1 atm으로 일정하고, 피스톤의 질량과 마찰은 무시한다.)

◀ 보기 ▶

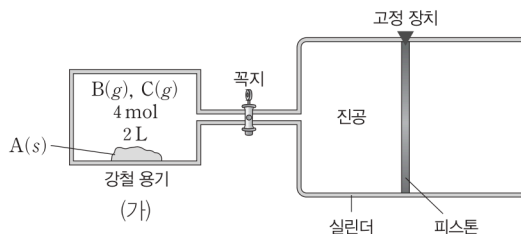
- ㄱ. t_2 일 때 정반응 속도가 역반응 속도보다 빠르다.
- ㄴ. t_3 일 때 실린더 속 전체 기체의 부피는 $\frac{4}{3}$ L이다.
- ㄷ. $K = \frac{4}{3}$ 이다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

06 다음은 A(s)로부터 B(g)와 C(g)가 생성되는 반응의 화학 반응식과 온도 T에서 농도로 정의되는 평형 상수(K)이다.



그림은 온도 T에서 꼭지로 분리된 강철 용기와 실린더에 A(s) n mol을 강철 용기에 넣고 반응이 진행되어 도달한 평형 상태 (가)를 나타낸 것이다. (가)에서 꼭지를 열고 고정 장치를 제거하여 새로운 평형 상태에 도달하였을 때 실린더 속 기체의 부피가 4 L가 되었다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 온도와 외부 압력은 각각 T, 1 atm으로 일정하고, 고체의 부피와 연결관의 부피, 피스톤의 마찰은 무시한다.)

◀ 보기 ▶

- ㄱ. $K = 1$ 이다.
- ㄴ. 강철 용기에 들어 있는 A(s)의 양(mol)은 (가)에서 새로운 평형 상태에서보다 많다.
- ㄷ. B(g)의 부분 압력은 새로운 평형에서 (가)에서보다 크다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

07 다음은 $A(g)$ 와 $B(g)$ 가 반응하여 $C(g)$ 가 생성되는 반응의 화학 반응식과 온도 T 에서 농도로 정의되는 평형 상수(K)이다.

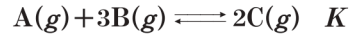
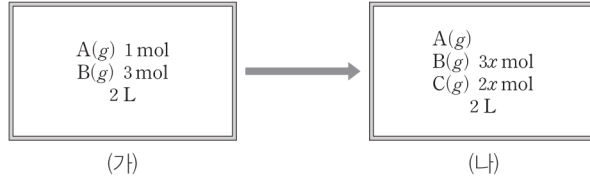


그림 (가)는 온도 T 에서 부피가 2 L인 강철 용기에 $A(g)$ 와 $B(g)$ 가 들어 있는 초기 상태를, (나)는 (가)에서 반응이 진행되어 도달한 평형 상태를 나타낸 것이다.



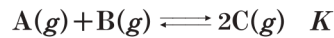
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 온도는 T 로 일정하다.)

◀ 보기 ▶

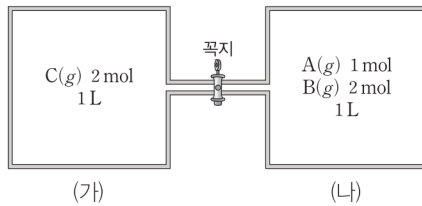
- ㄱ. (나)에서 $A(g)$ 의 몰 분율은 $\frac{1}{6}$ 이다.
- ㄴ. $K = \frac{16}{27}$ 이다.
- ㄷ. 전체 기체의 압력은 (나)에서가 (가)에서의 $\frac{3}{4}$ 배이다.

- ① ㄴ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

08 다음은 $A(g)$ 와 $B(g)$ 가 반응하여 $C(g)$ 가 생성되는 반응의 화학 반응식과 온도 T 에서 농도로 정의되는 평형 상수(K)이다.



그림은 온도 T 에서 꼭지로 분리된 강철 용기 (가)와 (나)에 $A(g) \sim C(g)$ 가 들어 있는 초기 상태를 나타낸 것이다. (가)와 (나)에서 각각 반응이 진행되어 $t \text{ min}$ 일 때 모두 평형 상태에 도달하였고, $t \text{ min}$ 일 때 (가)에서 $A(g)$ 의 몰 분율은 $\frac{1}{4}$ 이다.



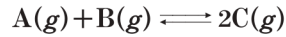
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 온도는 T 로 일정하고, 연결관의 부피는 무시한다.)

◀ 보기 ▶

- ㄱ. $K = 4$ 이다.
- ㄴ. $t \text{ min}$ 일 때 $B(g)$ 의 몰 분율은 (나)에서가 (가)에서보다 크다.
- ㄷ. $t \text{ min}$ 이후에 꼭지를 열면 정반응이 우세하게 진행되어 새로운 평형 상태에 도달한다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

09 다음은 A(g)와 B(g)가 반응하여 C(g)를 생성하는 반응의 화학 반응식이다.



표는 온도 T에서 강철 용기에 A(g)~C(g)의 초기 농도를 달리하여 넣고 반응을 진행시킨 실험 I~Ⅲ에 대한 자료이다.

실험	초기 농도(M)			평형 농도(M)		
	[A]	[B]	[C]	[A]	[B]	[C]
I	0.3	0.3	0		0.1	
Ⅱ	x	0		1.0		2.0
Ⅲ	0.4	0.4	1.0			y

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, I~Ⅲ에서 온도는 각각 T로 일정하다.)

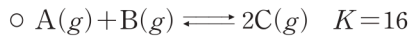
◀ 보기 ▶

- ㄱ. I의 평형 상태에서 C(g)의 몰 분율은 $\frac{2}{3}$ 이다.
- ㄴ. Ⅲ에서 평형 상태에 도달하기 전까지 역반응이 우세하게 진행된다.
- ㄷ. $x \times y > 1$ 이다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

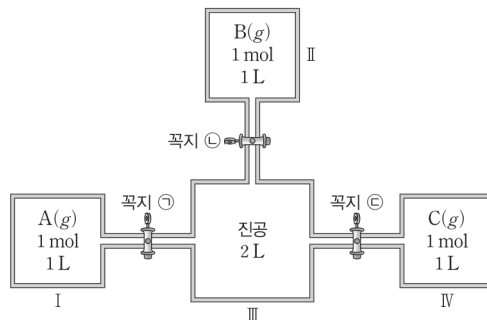
10 다음은 화학 평형의 이동과 관련된 실험이다.

[화학 반응식과 온도 T에서 농도로 정의되는 평형 상수(K)]



[실험 과정]

- (가) 온도 T에서 꼭지로 분리된 강철 용기 I~Ⅳ에 A(g)~C(g)를 그림과 같이 넣는다.
- (나) 꼭지 ㉠과 ㉡을 열어 반응을 진행시킨 후 평형에 도달하면 ㉠과 ㉡을 동시에 닫는다.
- (다) 꼭지 ㉢을 열어 반응을 진행시킨 후 충분한 시간 동안 놓아둔다.



[실험 결과]

- (나) 과정 후 II에 들어 있는 A(g)의 양은 a mol이다.
- (다) 과정 후 IV에 들어 있는 B(g)의 양은 b mol이다.

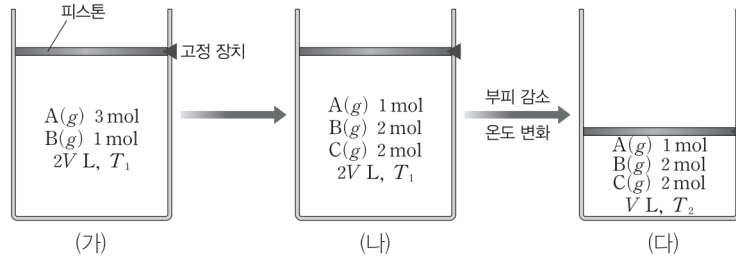
a + b는? (단, 온도는 T로 일정하고, 연결관의 부피는 무시한다.)

- ① $\frac{1}{12}$ ② $\frac{1}{9}$ ③ $\frac{5}{36}$ ④ $\frac{7}{36}$ ⑤ $\frac{5}{12}$

11 다음은 A(g)로부터 B(g)와 C(g)가 생성되는 반응의 열화학 반응식과 농도로 정의되는 평형 상수(K)이다.



그림 (가)는 온도 T_1 에서 실린더에 A(g)와 B(g)가 들어 있는 초기 상태를, (나)는 (가)에서 반응이 진행되어 도달한 평형 상태를, (다)는 (나)에서 실린더의 부피를 줄이고 온도를 T_2 로 변화시켜 도달한 새로운 평형 상태를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

◀ 보기 ▶

- ㄱ. $b+c=3$ 이다.
- ㄴ. $\frac{T_2 \text{에서의 } K}{T_1 \text{에서의 } K} = 4$ 이다.
- ㄷ. $T_2 > T_1$ 이다.

- ① ㄴ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

12 다음은 A(g)로부터 B(g)와 C(g)가 생성되는 반응의 화학 반응식이다.



표는 온도 T 에서 강철 용기에 A(g)~C(g)의 초기 농도를 달리하여 넣고 반응을 진행시켜 평형 상태에 도달한 실험 I~Ⅲ에 대한 자료이다.

실험	초기 농도(M)			평형 농도(M)		
	[A]	[B]	[C]	[A]	[B]	[C]
I	x	0.1	0	1.0	0.2	0.1
Ⅱ	$2x$	0	0.2	2.0	0.2	0.4
Ⅲ	$2x$	0.9			$2y$	y

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, I~Ⅲ에서 온도는 각각 T 로 일정하다.)

◀ 보기 ▶

- ㄱ. $a > b$ 이다.
- ㄴ. Ⅲ에서 평형에 도달할 때까지 정반응이 우세하게 진행된다.
- ㄷ. $y > 0.4$ 이다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

13 다음은 $A(s)$ 와 $B(g)$ 가 반응하여 $C(l)$ 와 $D(g)$ 가 생성되는 반응의 화학 반응식과 온도 T 에서 농도로 정의되는 평형 상수(K)이다.

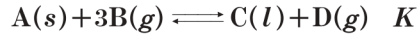
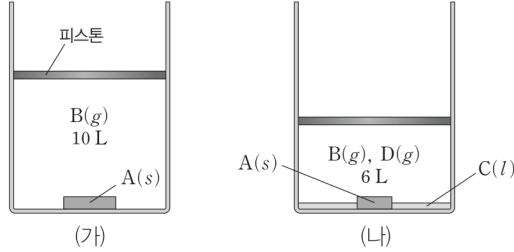


그림 (가)는 온도 T 에서 실린더에 $A(s)$ 와 $B(g)$ 가 들어 있는 초기 상태를, (나)는 (가)에서 반응이 진행되어 도달한 평형 상태를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 온도와 대기압은 각각 T 와 1 atm 으로 일정하고, 고체와 액체의 부피 및 증발, 피스톤의 질량과 마찰은 무시한다.)

◀ 보기 ▶

ㄱ. 평형 상수식은 $K = \frac{[D]}{[B]^3}$ 이다.

ㄴ. (나)에서 $D(g)$ 의 부분 압력은 $\frac{1}{3} \text{ atm}$ 이다.

ㄷ. (나)에서 피스톤 위에 추를 올리면 실린더 속 $A(s)$ 의 양(mol)은 증가한다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

14 다음은 $A(g)$ 로부터 $B(g)$ 와 $C(g)$ 가 생성되는 반응의 화학 반응식과 온도 T 에서 농도로 정의되는 평형 상수(K)이다.

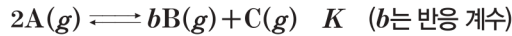
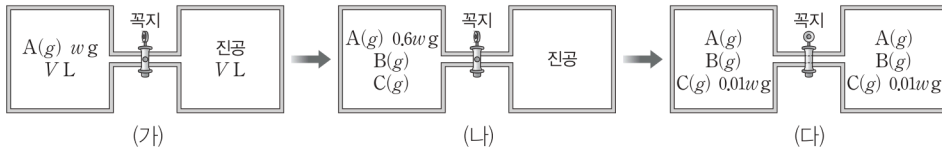


그림 (가)는 온도 T 에서 꼭지로 분리된 강철 용기에 $A(g)$ 가 들어 있는 초기 상태를, (나)는 (가)에서 반응이 진행되어 도달한 평형 상태를, (다)는 꼭지를 연 후 도달한 새로운 평형 상태를 나타낸 것이다.

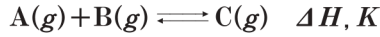
$\frac{A \text{의 분자량}}{C \text{의 분자량}} = 10$ 이다.



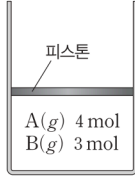
$\frac{B \text{의 분자량}}{C \text{의 분자량}} \times K$ 는? (단, 온도는 T 로 일정하고, 연결관의 부피는 무시한다.)

- ① $\frac{6}{19}$ ② $\frac{10}{9}$ ③ $\frac{5}{3}$ ④ $\frac{19}{9}$ ⑤ $\frac{19}{3}$

15 다음은 A(g)와 B(g)가 반응하여 C(g)가 생성되는 반응의 열화학 반응식과 농도로 정의되는 평형 상수(K)이다.



그림은 T K에서 실린더에 A(g)와 B(g)가 들어 있는 초기 상태를, 표는 T K에서 반응이 진행되어 도달한 평형 상태 I과, I에서 온도를 2T K로 변화시켜 도달한 평형 상태 II에 대한 자료이다. I에서 A(g)와 C(g)의 부분 압력은 같다.



평형 상태	온도 (K)	전체 기체의 부피(L)	평형 상수
I	T	10	K_1
II	2T	18	K_2

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 외부 압력은 일정하고, 피스톤의 질량과 마찰은 무시한다.)

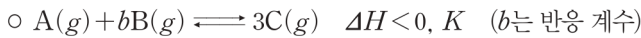
◀ 보기 ▶

ㄱ. $\Delta H > 0$ 이다. ㄴ. I에서 B(g)의 몰 분율 = $\frac{9}{25}$ 이다. ㄷ. $K_2 = 60$ 이다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

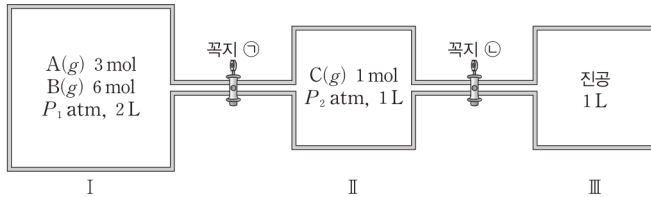
16 다음은 화학 평형의 이동과 관련된 실험이다.

[열화학 반응식과 농도로 정의되는 평형 상수(K)]



[실험 과정]

- (가) 온도 T에서 꼭지로 분리된 강철 용기 I~III에 A(g)~C(g)를 그림과 같이 넣는다.
 (나) 꼭지 ㉠을 열어 반응을 진행시킨 후 평형에 도달할 때까지 놓아둔다.
 (다) 꼭지 ㉡을 열고 온도를 2T로 높여 반응을 진행시킨 후 평형에 도달할 때까지 놓아둔다.



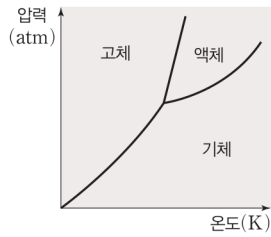
[실험 결과]

- (나) 과정 후 I에 들어 있는 B(g)의 부분 압력과 C(g)의 부분 압력은 각각 $\frac{2}{3}P_2$ atm, $\frac{7}{3}P_2$ atm이다.
 ○ (다) 과정 후 III에 들어 있는 B(g)의 부분 압력은 $\frac{5}{4}P_2$ atm이다.

2T에서 K는? (단, 연결관의 부피는 무시한다.)

- ① $\frac{5}{4}$ ② $\frac{5}{2}$ ③ $\frac{25}{4}$ ④ $\frac{49}{2}$ ⑤ $\frac{125}{4}$

17 그림은 물질 X의 상평형 그림을, 표는 온도와 압력에 따른 X의 안정한 상을 나타낸 것이다. ㉠~㉣은 고체, 액체, 기체를 순서 없이 나타낸 것이고, $T_2 > T_1$, $P_2 > P_1$ 이다.



온도(K)	압력(atm)	X의 안정한 상
T_1	P_1	㉠, ㉡
T_1	P_2	㉠
T_2	P_2	㉠, ㉣

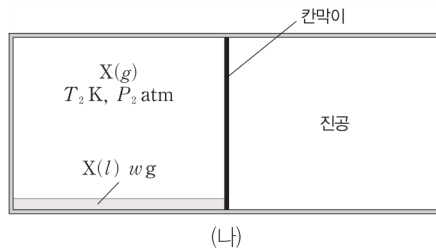
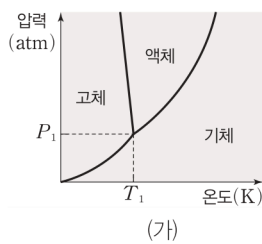
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

◀ 보기 ▶

- ㄱ. X의 삼중점 온도는 T_1 K보다 높다.
- ㄴ. ㉠은 고체이다.
- ㄷ. T_2 K, P_1 atm에서 X의 안정한 상은 ㉣이다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

18 그림 (가)는 물질 X의 상평형 그림을, (나)는 칸막이로 분리된 강철 용기에서 $X(l)$ 와 $X(g)$ 가 평형을 이루고 있는 상태를 나타낸 것이다. (나)에서 온도를 T_2 K로 유지한 채 칸막이를 제거하여 평형 상태에 도달했을 때 강철 용기 속 $X(g)$ 의 압력은 P_3 atm이었다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 액체의 부피는 무시한다.)

◀ 보기 ▶

- ㄱ. $P_2 > P_3$ 이다.
- ㄴ. 칸막이를 제거하여 도달한 평형 상태에서 강철 용기 속 $X(l)$ 의 질량은 w g보다 작다.
- ㄷ. $\frac{T_1 + T_2}{2}$ K, P_3 atm에서 X의 안정한 상은 기체이다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄷ ④ ㄱ, ㄴ ⑤ ㄴ, ㄷ

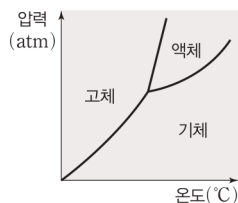
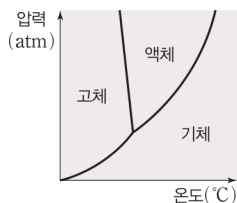
19 표는 CO_2 의 온도와 압력에 따른 안정한 상의 수를 나타낸 것이다. $T_4 > T_3 > T_2 > T_1$ 이고, $P_4 > P_3 > P_2 > P_1$ 이다.

온도(K)	압력(atm)	안정한 상의 수
T_1	P_1	2
T_2	P_2	3
T_3	P_4	2
T_4	P_3	2

㉠ T_2 K, P_4 atm에서 CO_2 의 안정한 상과 ㉡ T_3 K, P_3 atm에서 안정한 CO_2 의 상은? (단, CO_2 는 고체, 액체, 기체의 3가지 상만 갖는다.)

- | | | | |
|------|----|------|----|
| ㉠ | ㉡ | ㉠ | ㉡ |
| ① 고체 | 액체 | ② 고체 | 기체 |
| ③ 액체 | 기체 | ④ 액체 | 고체 |
| ⑤ 기체 | 고체 | | |

20 그림은 물질 X와 Y의 상평형 그림을 순서 없이 나타낸 것이고, 표는 X에 대한 자료이다. $t_3 > t_2 > t_1$ 이고, $t_1^\circ\text{C}$, P_4 atm에서 X의 안정한 상은 액체이다.



압력 (atm)	안정한 상의 수		
	$t_1^\circ\text{C}$	$t_2^\circ\text{C}$	$t_3^\circ\text{C}$
P_1	2		
P_2		3	
P_3	2		2

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, X는 고체, 액체, 기체의 3가지 상만 갖는다.)

◀ 보기 ▶

- ㄱ. $P_1 > P_2$ 이다.
 ㄴ. $t_1^\circ\text{C}$, P_2 atm에서 X의 안정한 상은 고체이다.
 ㄷ. X의 (끓는점 - 녹는점)은 P_3 atm에서가 P_4 atm에서보다 크다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄷ ④ ㄱ, ㄴ ⑤ ㄴ, ㄷ

Part 4 · 정답과 해설

1 개념 체크 정답

A	1. 가역	2. 비가역	3. 화학 평형	4. 같
B	1. 정반응, 화학 평형 상태		2. ×	
C	1. 평형 상수 5. K^2	2. $[HI]^2/([H_2][I_2])$ 6. $K_1 \times K_2$	3. 4	4. $1/K$
D	1. 크	2. 반응 지수	3. 역반응	4. 정반응
E	1. 정반응, 역반응		2. 작으, 정반응	
F	1. 감소, 증가		2. 감소	
G	1. 감소		2. 역반응	
H	1. >	2. 변한다	3. ○	
I	1. 수득률	2. 높이	3. 높이	
J	1. 상평형 그림	2. 용해 곡선, 증기 압력 곡선(기화 곡선), 승화 곡선	3. 삼중점	4. ×
K	1. ○		2. 삼중점	

2 기본문제 해설

정답

01	④	02	④	03	⑤	04	④	05	③	06	⑤	07	①	08	⑤
09	⑤	10	③	11	①	12	③	13	②	14	②	15	①	16	③
17	④	18	⑤	19	④	20	③								

01 화학 평형 상태

반응 계수비가 $A(g) : B(g) : C(g) = 1 : 1 : 2$ 이므로 $A(g)$ 와 $B(g)$ 가 각각 1 mol씩 반응하면 $C(g)$ 가 2 mol 생성된다.

㉠. 평형 상태에서 $C(g)$ 의 양이 4 mol이므로 반응한 $A(g)$ 의 양은 2 mol이다. 따라서 (가)에서 넣어 준 $A(g)$ 의 양은 3 mol이다.

㉡. 평형 상태에서 $[A] = 1 \text{ M}$, $[B] = 0.5 \text{ M}$, $[C] = 4 \text{ M}$ 이므로 $K = \frac{[C]^2}{[A][B]} = \frac{4^2}{1 \times 0.5} = 32$ 이다.

㉢. 반응물의 반응 계수 합과 생성물의 반응 계수가 같으므로 반응이 진행되어도 전체 기체의 양(mol)은 변하지 않는다. 온도와 부피가 일정하므로 전체 기체의 압력은 전체 기체의 양(mol)에 비례한다. 따라서 (나)에서 전체 기체의 압력은 반응 전과 같은 $P \text{ atm}$ 이다.

02 화학 평형 상태

온도가 일정할 때 기체의 양(mol)은 기체의 압력×부피에 비례하므로 (가)에서 반응 전 $A(g)$ 의 양을 $3n \text{ mol}$, 평형에 도달할 때까지 감소한 $A(g)$ 의 양을 $x \text{ mol}$ 이라고 하면, 평형 상태에서 $A(g)$ 의 양은 $(3n - x) \text{ mol}$, $B(g)$ 의 양은 $2x \text{ mol}$ 이므로 전체 기체의 양은 $(3n + x) \text{ mol} = 4n \text{ mol}$ 이다. 이를 만족하는 $x = n$ 이므로 평형 상태에서 $A(g)$ 와 $B(g)$ 의 양은 $2n \text{ mol}$ 로 같다. (나)에서 전체 기체의 부피가 2배이고, 평형 상태에서 전체 기체의 압력이 4 atm 으로 (가)에서와 같으므로 평형 상태에서 전체 기체의 양은 $8n \text{ mol}$ 로 (가)에서의 2배이며, 평형 상수가 (가)에서와 (나)에서가 같으므로 (나)의 평형 상태에서 $A(g)$ 와 $B(g)$ 의 양은 각각 $4n \text{ mol}$ 이다. 따라서 평형 상태에 도달한 후 (나)에서 $B(g)$ 의 몰 분율은 $\frac{1}{2}$ 이다.

03 화학 평형 이동

(가)에 $B(g)$ 를 추가하면 역반응 쪽으로 평형이 이동한다.

㉡. 온도가 일정하므로 평형 상수(K)는 (가)에서와 (나)에서가 같다.

㉢. 역반응 쪽으로 평형이 이동하므로 $A(g)$ 의 몰 농도는 (나)에서 (가)에서보다 크다. 평형 상수가 일정하므로 $B(g)$ 의 몰 농도도 (나)에서 (가)에서보다 크다.

㉣. 증가한 $A(g)$ 의 양(mol)은 감소한 $B(g)$ 의 양(mol)의 2배이므로 전체 기체의 양(mol)이 (나)에서 (가)에서보다 많다. 따라서 전체 기체의 압력은 (나)에서 (가)에서보다 크다.

04 반응의 진행 방향과 평형 상수

강철 용기에 $A(g)$ 와 $C(g)$ 를 넣었으므로 정반응이 진행되어 평형 상태에 도달하게 된다. 평형 상태에 도달할 때까지 $[A]$ 는 감소하므로 t_2 일 때가 평형 상태에 도달한 시점이다. $K = \frac{[B][C]}{[A]^2} =$

$\frac{2 \times 6}{3^2} = \frac{4}{3}$ 이고, 평형 상태에 도달할 때까지 감소한 $[A]$ 를 $2x \text{ M}$ 라고 하면 평형 상태에서 $[A] = (a - 2x) \text{ M} = 3 \text{ M}$, $[B] = x \text{ M} = 2 \text{ M}$, $[C] = (c + x) \text{ M} = 6 \text{ M}$ 이므로 $x = 2$, $a = 7$, $c = 4$ 이다. 따라서 $\frac{a}{c} \times K = \frac{7}{4} \times \frac{4}{3} = \frac{7}{3}$ 이다.

05 온도 변화와 화학 평형 이동

(가) → (나)에서 감소한 $A(g)$ 의 양이 1 mol, 감소한 $B(g)$ 의 양이 3 mol이고, 증가한 $C(g)$ 의 양이 2 mol이므로 반응 몰비는 $1 : b : c = 1 : 3 : 2$ 이다.

㉠. $b = 3$, $c = 2$ 이므로 $b > c$ 이다.

㉢. (나)에서 $K = \frac{[C]^2}{[A][B]^3} = \frac{2^2}{3 \times 1^3} = \frac{4}{3}$ 이다.

㉡. (나)에서 온도를 높였을 때 $B(g)$ 의 양(mol)이 증가한 것으로 보아 역반응 쪽으로 평형이 이동하였음을 알 수 있다. 따라서 정반응은 발열 반응이므로 $\Delta H < 0$ 이다.

06 온도 변화와 평형 상수

㉠. I에서 $A(g)$ 와 $B(g)$ 의 양(mol)은 각각 1, 2이고, II에서 $A(g)$ 와 $B(g)$ 의 양(mol)은 각각 1.5, 1이므로

$\frac{y}{x} = \frac{1.5}{2} = \frac{3}{4}$ 이다.

㉢. $\frac{T_2 \text{ K에서의 } K}{T_1 \text{ K에서의 } K} = \frac{\left(\frac{1}{1.5}\right)^2}{\left(\frac{2}{1}\right)} = \frac{1}{6}$ 이다.

㉣. 정반응이 흡열 반응이고, 평형 상수는 $T_1 \text{ K}$ 에서 $T_2 \text{ K}$ 에서 보다 크므로 $T_1 > T_2$ 이다.

07 압력에 따른 평형 이동

㉠. $K = \frac{[B]^2}{[A]} = \frac{\left(\frac{1}{2}\right)^2}{\left(\frac{2}{2}\right)} = \frac{1}{4}$ 이다.

✕. 반응이 진행되어 평형 상태 I에 도달할 때까지 생성된 B(g)의 양이 1 mol이므로 감소한 A(g)의 양은 0.5 mol이다. 따라서 반응 전 A(g)의 양(n)은 2.5 mol이고, 온도와 압력이 일정하므로 기체의 부피는 기체의 양(mol)에 비례하며, A(g) 2.5 mol의 부피를 V L라고 하면 2.5 mol : V L = 3 mol : 2 L를 만족하는 $V = \frac{5}{3}$ 이다.

✕. II에서 부피는 I에서의 $\frac{1}{2}$ 배가 되었고 압력이 증가하여 역반응 쪽으로 평형이 이동하여 전체 기체의 양(mol)이 감소하므로 전체 기체의 압력은 II에서가 I에서의 2배보다 작다. 따라서 $\frac{\text{II에서 전체 기체의 압력}}{\text{I에서 전체 기체의 압력}} < 2$ 이다.

08 반응 지수와 반응의 진행 방향

반응 지수(Q) < 평형 상수(K)이면 정반응이 우세하게, 반응 지수(Q) > 평형 상수(K)이면 역반응이 우세하게 진행되며, 반응 지수(Q) = 평형 상수(K)이면 평형 상태이다. I에서 반응 지수 $Q = \frac{[C]^2}{[A][B]} = \frac{0.1^2}{0.1^2 \times 0.2} = 5 < K$ 이므로 I에서는 정반응이 우세하게 진행되고, II에서 $Q = \frac{0.2^2}{0.1^2 \times 0.4} = 10 = K$ 이므로 II는 평형 상태, III에서 $Q = \frac{0.4^2}{0.2^2 \times 0.1} = 40 > K$ 이므로 III에서는 역반응이 우세하게 진행된다. 따라서 평형 상태에서 A(g)의 몰 농도는 $\text{III} > \text{II} > \text{I}$ 이다.

09 화학 평형 상태

평형 상태에 도달할 때까지 감소한 $[A] = [B] = 0.2$ M, 증가한 $[C] = 0.4$ M이므로 반응 몰비가 A(g) : B(g) : C(g) = 1 : b : c = 1 : 1 : 2이다.

✕. t min일 때 화학 평형 상태에 도달하였고, 화학 평형 상태는 정반응과 역반응이 같은 속도로 일어나 반응물과 생성물의 농도 변화가 없는 상태이다. 하지만 정반응과 역반응은 계속해서 일어나고 있는 동적 평형 상태이다.

○. b = 1, c = 2이므로 c = 2b이다.

○. $K = \frac{[C]^2}{[A][B]} = \frac{0.4^2}{0.2 \times 0.1} = 8$ 이다.

10 반응 지수와 반응의 진행 방향

○. (가)의 반응 지수 $Q = \frac{[C]^2}{[A][B]} = \frac{5^2}{1 \times 1} > K$ 이므로 (가)에서는 역반응이 우세하게 진행되어 평형 상태에 도달하게 된다.

○. 평형에 도달할 때까지 감소한 C(g)의 양을 2x mol이라고 하면 평형 상태에서 $[A] = [B] = (1+x)$ M, $[C] = (5-2x)$ M이다. 평형 상수 $K = \frac{(5-2x)^2}{(1+x) \times (1+x)} = \left(\frac{5-2x}{1+x}\right)^2 = 16$ 을 만

족하는 $x = \frac{1}{6}$ 이다. 반응이 진행되어도 전체 기체의 양(mol)은

변하지 않으므로 (나)에서 C(g)의 몰 분율은 $\frac{5-2 \times \frac{1}{6}}{7} = \frac{2}{3}$ 이다.

✕. (나)에 A(g) 1 mol, B(g) 1 mol, C(g) 2 mol을 추가했을 때 반응 지수 $Q = \frac{\left(\frac{14}{3} + 2\right)^2}{\left(\frac{7}{6} + 1\right)^2} = \left(\frac{40}{13}\right)^2 < K$ 이므로 정반응 쪽으로 평형이 이동한다.

11 반응 지수와 반응의 진행 방향

반응 계수비가 A(g) : B(g) = 2 : 1이므로 A(g) 2 mol이 반응하면 B(g) 1 mol이 생성된다.

○. 부피가 1 L이므로 (나)에서 $[A] = 1$ M이므로 $[B] = 5 \text{ M} \times \frac{1}{2} = 2.5$ M이고, (다)에서 $[B] = 2$ M이므로 $[A] = (6 - 2 \times 2) \text{ M} = 2$ M이다. a = 2, b = 2.5이므로 b > a이다.

✕. 평형에 도달할 때까지 A(g)의 양(mol)은 계속 감소하므로 반응 시간 순서는 (다) → (나)이다.

✕. (나)에서 $[A] = 1$ M, $[B] = 2.5$ M이므로 반응 지수 $Q = \frac{2.5}{1^2} = K$ 이다. 따라서 (나)는 평형 상태이고, 정반응 속도와 역반응 속도가 같다.

12 화학 평형 이동

(가)의 혼합 용액을 90°C의 물에 넣었을 때(온도를 높였을 때) 용액의 색이 푸른색이 된 것으로 보아 온도를 높였을 때 정반응 쪽으로 평형이 이동했음을 알 수 있다.

○. 온도를 높였을 때 정반응 쪽으로 평형이 이동하였으므로 정반응은 흡열 반응이다. 따라서 $\Delta H > 0$ 이다.

✕. (가)의 혼합 용액에 HCl(aq)을 추가하면 정반응 쪽으로 평형이 이동하므로 용액의 색은 HCl(aq)을 추가하기 전보다 푸르게 변한다.

○. (가)의 혼합 용액을 얼음물에 담그면 발열 반응 쪽(역반응 쪽)으로 평형이 이동하므로 $\text{CoCl}_4^{2-}(\text{aq})$ 의 농도는 얼음물에 담그기 전보다 작아진다.

13 평형 상수와 반응 지수

✕. $K = \frac{[C]}{[A][B]} = \frac{\frac{6}{2}}{\frac{4}{2} \times \frac{3}{2}} = 1$ 이다.

○. 온도가 일정하면 평형 상수(K)는 같으므로 $\frac{6}{3 \times x} = 1$ 이며, x = 2이다.

✕. 꼭지를 열면 반응 지수 $Q = \frac{\frac{12}{3}}{\frac{7}{3} \times \frac{5}{3}} = \frac{36}{35} > K$ 이므로 역반응 쪽으로 평형이 이동한다.

14 화학 평형 이동

(가)에서 전체 기체의 양(mol)이 갑자기 증가하였으므로 기체가 추가되었음을 알 수 있고, 시간이 지나면서 전체 기체의 양(mol)이 감소하는 방향(정반응)으로 평형이 이동하였으므로 (가)에서 추가된 물질은 A(g)임을 알 수 있다. (나)에서도 전체 기체의 양(mol)이 감소하는 방향(정반응)으로 평형이 이동하였는데, 전체 기체의 양(mol)이 (가)에서와 같이 갑자기 증가하지 않고 서서히 감소하였으므로 온도를 변화시켰음을 알 수 있으며, 정반응이 발열 반응이므로 (나)에서는 온도를 낮추었음을 알 수 있다.

15 반응 지수와 반응의 진행 방향

반응 지수 $Q = \frac{[B]^2}{[A]}$ 이고, 온도가 일정할 때 평형 상수(K)는 일정하며, 변화를 주기 전까지 $\frac{Q}{K}$ 가 계속 감소하므로 역반응이 우세하게 진행된다.

- ㉠. t_1 일 때 $Q > K$ 이므로 역반응 속도가 정반응 속도보다 빠르다.
- ㉡. t_2 일 때 Q가 갑자기 증가하였으므로 생성물인 B(g)가 추가되었다.
- ㉢. 온도가 일정하므로 K는 t_1 일 때와 t_2 일 때가 같다.

16 압력 변화와 평형 이동

평형에 도달할 때까지 온도와 부피가 일정하므로 기체의 양(mol)은 기체의 부분 압력에 비례한다.

- ㉠. (가)에서 C(g)의 양을 $4n$ mol이라고 하면 A(g)와 B(g)의 양은 각각 n mol, $2n$ mol이며, (가)에 도달할 때까지 증가한 C(g)의 양이 $4n$ mol이므로 감소한 A(g)와 B(g)의 양은 각각 $8n$ mol과 $4n$ mol이다. 따라서 반응 전 A(g)와 B(g)의 양은 각각 $9n$ mol과 $6n$ mol이므로 A(g)가 B(g)의 $\frac{3}{2}$ 배이다.

㉡. 정반응이 발열 반응이므로 (가)에서 온도를 $2T$ K로 증가시키면 흡열 반응(역반응) 쪽으로 평형이 이동하게 되어 평형 상수(K)는 T K일 때보다 작아진다.

- ㉢. 고정 장치를 제거하면 실린더 내 전체 기체의 압력은 1 atm이 되어 전체 기체의 부피는 증가하게 된다. 따라서 역반응 쪽으로 평형이 이동하게 되므로 C(g)의 양(mol)은 (가)에서보다 감소한다.

17 CO₂의 상평형 그림

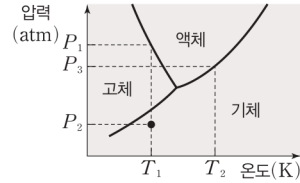
㉠. 25°C, 1 atm에서 X의 안정한 상은 기체이다.

- ㉡. 온도가 일정하고, 스포이트 내부의 압력이 높아져 증기 압력 곡선에 도달하게 되면 X는 기체에서 액체로 상변화가 일어나게 된다.

㉢. 0°C의 물을 사용해도 X(s) → X(g)로의 변화가 일어나 스포이트 내부의 압력이 증가하게 되고 증기 압력 곡선에 도달하게 되면 X(g) → X(l)로의 변화가 일어나 X(l)가 생성된다.

18 용해 곡선의 기울기가 음인 물질의 상평형 그림

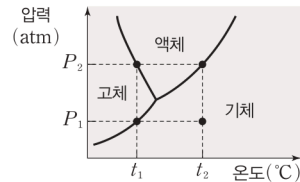
T_1 K, P_1 atm은 용해 곡선 위의 지점, T_2 K, P_3 atm은 증기 압력 곡선 위의 지점이고, $P_1 > P_3$ 이며, T_1 K, P_2 atm에서 X의 안정한 상이 기체이므로 이를 X의 상평형 그림에 나타내면 다음과 같다.



- ㉠. T_1 K는 삼중점보다 온도가 낮고, T_2 K는 삼중점보다 온도가 높으므로 $T_2 > T_1$ 이다.
- ㉡. P_2 atm은 삼중점보다 압력이 낮고, P_3 atm은 삼중점보다 압력이 높으므로 $P_3 > P_2$ 이다.
- ㉢. T_1 K, P_3 atm은 삼중점보다 온도가 낮고, 압력은 삼중점보다는 높고, P_1 atm보다는 낮은 지점이므로 X의 안정한 상은 고체이다.

19 용해 곡선의 기울기가 음인 물질의 상평형 그림

용해 곡선의 기울기가 음(-)이면 $t_1^\circ\text{C}$ 에서 2가지 상이 평형을 이루는 지점이 두 군데가 되기 위해서는 각각의 지점은 승화 곡선 위의 지점과 용해 곡선 위의 지점이어야 한다. 이 경우 삼중점의 온도는 $t_1^\circ\text{C}$ 보다 높다. 용해 곡선의 기울기가 양(+)이면 특정 온도($t_1^\circ\text{C}$)에서 2가지 상이 평형을 이루는 지점이 두 군데가 되기 위해서는 각각의 지점은 증기 압력 곡선 위의 지점과 용해 곡선 위의 지점이어야 한다. 이 경우에는 삼중점의 온도가 $t_1^\circ\text{C}$ 보다 낮다. X의 삼중점 온도는 $t_1^\circ\text{C}$ 보다 높으므로 X의 용해 곡선의 기울기는 음(-)이고 X의 상평형 그림은 다음과 같다.



- ㉠. $t_1^\circ\text{C}$, P_1 atm은 승화 곡선 위의 지점이고, $t_1^\circ\text{C}$, P_2 atm은 용해 곡선 위의 지점이다. 따라서 $P_2 > P_1$ 이다.
- ㉡. X의 삼중점 압력은 P_1 atm보다 높고, P_2 atm보다 낮다.
- ㉢. $t_2^\circ\text{C}$ 는 삼중점 온도보다 높고, P_1 atm은 삼중점 압력보다 낮으므로 $t_2^\circ\text{C}$, P_1 atm에서 X의 안정한 상은 기체이다.

20 CO₂의 상평형 그림

- ㉠. (나)에서 CO₂(l)와 CO₂(g)가 평형을 이루고 있으므로 25°C에서 CO₂(g)의 압력은 P atm이다.

㉡. $P > 5.1$ 이므로 25°C, 5.1 atm에서 CO₂의 안정한 상은 기체이다.

㉢. (나)에서 고정 장치를 제거하면 CO₂(g)의 압력이 1 atm이 되므로 25°C, 1 atm에서 CO₂의 안정한 상은 기체이다. 따라서 온도가 25°C로 일정할 때 충분한 시간이 지나면 실린더에는 CO₂(g)만 존재하게 된다.

3 심화문제 해설

정답

01	④	02	②	03	③	04	①	05	③	06	③	07	④	08	⑤
09	①	10	④	11	④	12	①	13	③	14	④	15	⑤	16	⑤
17	③	18	②	19	①	20	②								

심화 01번

접근 Point 꼭지를 열면 A(g)와 C(g)만 용기에 들어 있으므로 정반응이 우세하게 진행되어 평형에 도달한다.

01 평형 상수

온도가 일정할 때 기체의 양(mol)은 압력과 부피의 곱에 비례하므로 반응 전 A(g)와 C(g)의 양(mol)을 각각 8n, 2n, 꼭지를 열어 평형 상태에 도달할 때까지 증가한 C(g)의 양(mol)을 x라고 하면, 반응의 양적 관계는 다음과 같다.

	2A(g)	⇌	2B(g)	+	C(g)
반응 전(mol)	8n		0		2n
반응(mol)	-2x		+2x		+x
평형(mol)	8n-2x		2x		2n+x

평형 상태에서 (가)에 들어 있는 C(g)의 몰 분율은 $\frac{\frac{1}{2}(2n+x)}{\frac{1}{2}(10n+x)} =$

$\frac{1}{3}$ 이므로 $x=2n$ 이다. 평형 상수 $K = \frac{[B]^2[C]}{[A]^2} = \frac{\left(\frac{4n}{10}\right)^2 \times \left(\frac{4n}{10}\right)}{\left(\frac{4n}{10}\right)^2}$

$= \frac{2}{5}n = \frac{4}{5}$ 이므로 $n=2$ 이다. 따라서 평형 상태에서 (가)에 들어 있는

A(g)의 양(mol)은 $\frac{1}{2}(8n-2x) = \frac{1}{2}(8n-4n) = 2n = 4$ 이다.

심화 02번

접근 Point 평형 상태에서 생성물을 추가하면 역반응 쪽으로 평형이 이동하고, 온도를 낮추면 발열 반응 쪽으로 평형이 이동한다.

02 화학 평형 이동

(나) → (다)에서 온도를 낮추었을 때 역반응 쪽으로 평형이 이동하였고, 증가한 A(g)와 B(g)의 양이 각각 1 mol, 감소한 C(g)의 양이 2 mol이므로 반응 몰비는 A(g) : B(g) : C(g) = 1 : b : c = 1 : 1 : 2이다.

✕. b=1, c=2이다.

○. 온도를 낮추었을 때 역반응 쪽으로 평형이 이동하였으므로 정반응은 흡열 반응이다. 따라서 $\Delta H > 0$ 이다.

✕. (가)에 추가한 C(g)의 양이 x mol이고, (가) → (나)에서 역반응 쪽으로 평형이 이동하며, 증가한 A(g)와 B(g)의 양이 각각 1 mol, 감소한 C(g)의 양이 2 mol이다. (나)에서 C(g)의 양(mol)이 $4+x-2=6$ 이므로 $x=4$ 이다.

심화 03번

접근 Point 온도가 일정하면 기체의 양(mol)은 기체의 압력과 부피의 곱에 비례한다.

03 반응의 진행 방향과 평형 상수

전체 기체의 압력은 (가)에서 1.5 atm, (나)에서 1 atm이며, 기체의 부피가 각각 4V L, 6V L이므로 (가)와 (나)에서 전체 기체의 양(mol) 변화는 없다(온도가 일정할 때 기체의 양(mol)은 압력과 부피의 곱에 비례한다). 따라서 이 반응은 반응물의 계수합과 생성물의 계수가 같은 반응이고, $a=1$ 이다.

○. $\frac{C(g) \text{의 양(mol)}}{A(g) \text{의 양(mol)}}$ 이 (가)에서는 $\frac{10}{3}$, (다)에서는 8이므로 (가)에서 (나)에 도달하기 전까지 정반응이 우세하게 진행된다.

✕. (가)에서 전체 기체의 양이 1.6 mol이므로 (나)에서도 전체 기체의 양은 1.6 mol이고, (나)에서 A(g)와 B(g)의 양은 같으므로 $1.6=10n$ 을 만족하는 $n=0.16$ 이다. 따라서 $a \times n = 0.16$ 이다.

○. $K = \frac{\left(\frac{8n}{6}\right)^2}{\left(\frac{n}{6}\right) \times \left(\frac{n}{6}\right)} = 64$ 이다.

심화 04번

접근 Point 온도를 높이면 흡열 반응 쪽으로 평형이 이동하고, 부피를 줄이면 압력이 증가하므로 분자 수가 감소하는 방향으로 평형이 이동한다.

04 온도와 압력 변화에 따른 평형 이동

(나) → (다)로의 변화 관점에서 보면 온도를 T_1 에서 T_2 로 높였을 때 A(g)의 몰 분율이 증가($z > y$)하였으므로 역반응 쪽으로 평형이 이동했음을 알 수 있다. 따라서 정반응이 발열 반응이므로 $\Delta H < 0$ 이다.

○. (나) → (가)로의 변화 관점으로 보면 부피가 $\frac{1}{2}$ 배로 감소하여 압력이 일시적으로 2배 증가하였는데, 반응물(A)의 몰 분율이 감소($y > x$)하였으므로 정반응은 전체 기체의 양(mol)이 감소하는 반응이다. 따라서 $a > b$ 이다.

✕. 정반응이 발열 반응이므로 온도가 높아지면 평형 상수는 작아진다. 따라서 K는 T_1 에서 T_2 에서보다 크다.

✕. (나) → (가)로의 변화 관점에서 보면 부피가 $\frac{1}{2}$ 배 감소하여 압력이 일시적으로 2배가 되지만 기체의 양(mol)이 감소하는 방향으로 평형이 이동하므로 용기 내 전체 기체의 압력은 (가)에서 (나)에서의 2배보다 작다.

심화 05번

접근 Point $Q < K$ 이면 정반응이, $Q > K$ 이면 역반응이 우세하게 진행되어 평형 상태에 도달하고, $Q = K$ 이면 평형 상태이다.

05 반응 지수와 평형 상수

t_1 일 때 $B(g)$ 의 양을 x mol이라고 하면, $A(g)$ 의 양은 $(1-2x)$ mol, $C(g)$ 의 양은 $2x$ mol이므로 전체 기체의 양은 $(1+x)$ mol이다. $X_B = \frac{x}{1+x} = \frac{1}{4}$ 이므로 $x = \frac{1}{3}$ 이다. 온도와 압력이 일정하므로 실린더 속 기체의 부피는 기체의 양(mol)에 비례하며, 전체 기체의 양이 $(1+\frac{1}{3}) = \frac{4}{3}$ mol이므로 기체의 부피는 $\frac{4}{3}$ L가 된다. t_2 일 때 $B(g)$ 의 양을 y mol이라고 하면, $A(g)$ 의 양은 $(1-2y)$ mol, $C(g)$ 의 양은 $2y$ mol이므로 전체 기체의 양은 $(1+y)$ mol이다. $X_B = \frac{y}{1+y} = \frac{1}{6}$ 이므로 $y = \frac{1}{5}$ 이다. 전체 기체의 양이 $(1+\frac{1}{5}) = \frac{6}{5}$ mol이므로 실린더 속 전체 기체의 부피는 $\frac{6}{5}$ L가 된다. 실린더 속 $A(g) \sim C(g)$ 의 양(mol)을 각각 $n_A \sim n_C$, 전체 기체의 부피를 V L라고 하면, $Q = \frac{[B][C]^2}{[A]^2} = \frac{1}{V} \times \frac{n_B \times n_C^2}{n_A^2}$ 이다. t_1 일 때 $n_A = \frac{1}{3}$ mol, $n_B = \frac{1}{3}$ mol, $n_C = \frac{2}{3}$ mol이며, $V = \frac{4}{3}$ L이므로 $Q = \frac{1}{\frac{4}{3}} \times \frac{(\frac{1}{3}) \times (\frac{2}{3})^2}{(\frac{1}{3})^2} = 1$ 이고, t_2 일 때 $n_A = \frac{3}{5}$ mol, $n_B = \frac{1}{5}$ mol, $n_C = \frac{2}{5}$ mol이며, $V = \frac{6}{5}$ L이므로 $Q = \frac{1}{\frac{6}{5}} \times \frac{(\frac{1}{5}) \times (\frac{2}{5})^2}{(\frac{3}{5})^2} = \frac{2}{27}$ 이다.

㉠. t_1 일 때와 t_3 일 때의 반응 지수(Q)가 같은 값을 가지므로 t_1 과 t_3 은 평형 상태이고, t_2 일 때는 Q 가 t_1 (또는 t_3)일 때보다 작으므로 평형 상태에 도달하기 전이다. 따라서 t_2 일 때 정반응 속도가 역반응 속도보다 빠르다.

㉡. t_3 일 때는 평형 상태이므로 전체 기체의 부피가 $\frac{4}{3}$ L이다.

㉢. 평형 상태일 때는 $Q=K$ 이므로 $K=1$ 이다.

심화 06번

접근 Point 꼭지를 열면 전체 기체의 압력이 감소하므로 전체 기체 분자 수가 증가하는 방향으로 평형이 이동한다.

06 압력 변화와 평형 이동

(가)에서 꼭지를 열고 고정 장치를 제거하면 전체 기체의 압력이 감소하므로 정반응 쪽으로 평형이 이동한다.

㉠. $A(s)$ 가 1 mol 분해되어 $B(g)$ 와 $C(g)$ 가 각각 1 mol씩 생

성되는 반응이므로 평형 상태 (가)에서 $B(g)$ 와 $C(g)$ 의 양은 각각 2 mol이다. 부피가 2 L이므로 $[B]=[C]=1$ M이고, $K=[B][C]=1$ 이다.

㉡. (가)에서 꼭지를 열고 고정 장치를 제거하면 정반응 쪽으로 평형이 이동하므로 강철 용기에 들어 있는 $A(s)$ 의 양(mol)은 (가)에서가 새로운 평형 상태에서도 많다.

㉢. (가)에서 새로운 평형 상태까지 생성된 $B(g)$ 의 양(mol)을 x 라 하면, 부피가 6 L이므로 $K = \left(\frac{2+x}{6}\right) \times \left(\frac{2+x}{6}\right) = 1$ 을 만족하는 $x=4$ 이다. 온도가 일정하므로 기체의 부분 압력은 기체의 양(mol)에 비례하고, 부피에 반비례하는데, 새로운 평형 상태에서 $B(g)$ 의 양(mol)과 부피는 각각 3배가 되므로 $B(g)$ 의 부분 압력은 새로운 평형에서와 (가)에서가 같다.

심화 07번

접근 Point 평형에 도달할 때까지 증가한 $C(g)$ 의 양이 $2x$ mol이면 감소한 $A(g)$ 와 $B(g)$ 의 양은 각각 x mol, $3x$ mol이다.

07 화학 평형과 평형 상수

(가)에서 반응이 진행되어 평형에 도달할 때까지 생성된 $C(g)$ 의 양이 $2x$ mol이므로 반응의 양적 관계는 다음과 같다.

	$A(g) + 3B(g) \rightleftharpoons 2C(g)$		
반응 전(mol)	1	3	0
반응(mol)	$-x$	$-3x$	$+2x$
평형(mol)	$1-x$	$3-3x$	$2x$

$3-3x=3x$ 이므로 $x=\frac{1}{2}$ 이다. 따라서 평형 상태에서 각 기체의 양은 $A(g)$ 가 $\frac{1}{2}$ mol, $B(g)$ 는 $\frac{3}{2}$ mol, $C(g)$ 는 1 mol이다.

㉠. (나)에서 $A(g)$ 의 몰 분율은 $\frac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{2} + \frac{3}{2} + 1} = \frac{1}{6}$ 이다.

㉢. 기체의 부피가 2 L이므로 평형 상수 $K = \frac{[C]^2}{[A][B]^3} = \frac{(\frac{1}{2})^2}{(\frac{1}{4}) \times (\frac{3}{4})^3} = \frac{64}{27}$ 이다.

㉤. 온도와 부피가 일정하므로 전체 기체의 압력은 전체 기체의 양(mol)에 비례한다. 전체 기체의 양은 (가)에서가 4 mol, (나)에서가 3 mol이므로 전체 기체의 압력은 (나)에서가 (가)에서의 $\frac{3}{4}$ 배이다.

심화 08번

접근 Point 전체 기체 분자 수가 변하지 않는 반응이므로 (가)에서 $A(g)$ 의 몰 분율이 $\frac{1}{4}$ 이면 $B(g)$ 와 $C(g)$ 의 몰 분율은 각각 $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ 이다.

08 반응 지수와 반응의 진행 방향

전체 기체 분자 수가 일정한 반응이고, t min일 때 (가)에 들어 있는 $A(g)$ 의 몰 분율이 $\frac{1}{4}$ 이므로 $A(g)$ 는 $\frac{1}{2}$ mol, $B(g)$ 는 $\frac{1}{2}$ mol, $C(g)$ 는 1 mol이 들어 있다.

㉠. 평형 상수 $K = \frac{[C]^2}{[A][B]} = \frac{1^2}{\frac{1}{2} \times \frac{1}{2}} = 4$ 이다.

㉡. (나)에서 평형 상태에 도달하기까지 반응한 $A(g)$ 의 양(mol)을 x 라고 하면 평형 상태에서 $A(g)$ 의 양(mol)은 $1-x$, $B(g)$ 의 양(mol)은 $2-x$, $C(g)$ 의 양(mol)은 $2x$ 이며, 온도가 일정하므로 평형 상수는 같다.

$$K = \frac{(2x)^2}{(1-x)(2-x)} = 4 \text{ 이므로 } x = \frac{2}{3} \text{ 이고, (나)에 들어 있는 } A(g) \text{의 양은 } \frac{1}{3} \text{ mol, } B(g) \text{의 양은 } \frac{4}{3} \text{ mol, } C(g) \text{의 양은 } \frac{4}{3} \text{ mol이다. 따라서 } t \text{ min 일 때 } B(g) \text{의 몰 분율은 (가)에서 } \frac{1}{4}, \text{ (나)에서 } \frac{4}{9} \text{ 이므로 (나)} > \text{(가)이다.}$$

㉢. t min 이후에 꼭지를 열게 되면 부피가 2 L가 되므로 $[A] = \frac{5}{12}$ M, $[B] = \frac{11}{12}$ M, $[C] = \frac{7}{6}$ M가 된다.

반응 지수 $Q = \frac{\left(\frac{7}{6}\right)^2}{\frac{5}{12} \times \frac{11}{12}} < K (=4)$ 이므로 정반응이 우세하게 진행되어 평형 상태에 도달한다.

심화 09번

접근 Point I에서는 초기 $[C] = 0$ M이므로 정반응이, II에서는 초기 $[B] = 0$ M이므로 역반응이 우세하게 일어나서 평형 상태에 도달한다.

09 화학 평형 상태

I에서 평형에 도달할 때까지 감소한 $[A] = [B] = 0.2$ M이므로 평형 상태에서 $[C] = 0.4$ M이고, 평형 상수 $K = \frac{[C]^2}{[A][B]} = \frac{0.4^2}{0.1 \times 0.1} = 16$ 이다.

㉠. I의 평형 상태에서 $C(g)$ 의 몰 분율은 $\frac{0.4}{0.1+0.1+0.4} = \frac{2}{3}$ 이다.

㉡. III에서 반응 초기의 반응 지수 $Q = \frac{1.0^2}{0.4 \times 0.4} = \frac{25}{4} < K$ 이므로 정반응이 우세하게 진행되어 평형 상태에 도달한다.

㉢. II의 평형 상태에서 $[B] = z$ M라고 하면, $K = \frac{2.0^2}{1.0 \times z} = 16$ 을 만족하는 $z = \frac{1}{4} = 0.25$ 이다. II는 역반응이 우세하게 진행되어 평형 상태에 도달하고, 증가한 $[A] = [B] = 0.25$ M이므로 $x = 0.75$ 이다. III에서 평형에 도달할 때까지 감소한 $[A] = [B] = n$ M라고 하면, 증가한 $[C] = 2n$ M이므로 $K = \frac{(1+2n)^2}{(0.4-n)^2} = 16$ 이다. 이를 만족하는 $n = 0.1$ 이고, $y = 1 + 2n = 1.2$ 이다. 따라서 $x \times y = 0.75 \times 1.2 = 0.9 < 1$ 이다.

심화 10번

접근 Point (나)에서 꼭지 ㉠과 ㉡을 동시에 닫으면 II에는 I~III에 들어 있는 기체의 1/4만큼, III에는 1/2만큼 들어 있게 된다.

10 화학 평형과 화학 평형 이동

(나)에서 꼭지 ㉠과 ㉡을 열어 반응을 진행시킨 후 평형 상태에 도달할 때까지 반응한 $A(g)$ 와 $B(g)$ 의 양을 x mol이라 하면, 반응의 양적 관계는 다음과 같다.

	$A(g) + B(g) \rightleftharpoons 2C(g)$		
반응 전(mol)	1	1	0
반응(mol)	$-x$	$-x$	$+2x$
평형(mol)	$1-x$	$1-x$	$2x$

평형 상수 $K = \frac{[C]^2}{[A][B]} = \frac{\left(\frac{2x}{4}\right)^2}{\left(\frac{1-x}{4}\right)^2} = 16$ 을 만족하는 $x = \frac{2}{3}$ 이

므로 평형 상태에서 $A(g)$ 와 $B(g)$ 의 양은 각각 $\frac{1}{3}$ mol, $C(g)$ 의 양은 $\frac{4}{3}$ mol이다. 꼭지 ㉠과 ㉡을 동시에 닫으면 II에는 I~III에 들어 있던 기체의 $\frac{1}{4}$ 만큼, III에는 $\frac{1}{2}$ 만큼 들어 있게 되므로 (나) 과정 후 II에 들어 있는 $A(g)$ 의 양은 $\frac{1}{12}$ mol이다. 따라서 $a = \frac{1}{12}$ 이다. III에는 $A(g)$ 와 $B(g)$ 가 각각 $\frac{1}{6}$ mol, $C(g)$ 가 $\frac{2}{3}$ mol 들어 있고, (다)에서 꼭지 ㉢을 열면 역반응 쪽으로 평형이 이동하므로 반응한 $C(g)$ 의 양을 $2y$ mol이라 하면, 반응의 양적 관계는 다음과 같다.

	$A(g) + B(g) \rightleftharpoons 2C(g)$		
반응 전(mol)	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{5}{3}$
반응(mol)	$+y$	$+y$	$-2y$
평형(mol)	$\frac{1}{6}+y$	$\frac{1}{6}+y$	$\frac{5}{3}-2y$

평형 상수 $K = \frac{\left(\frac{\frac{5}{3}-2y}{3}\right)^2}{\left(\frac{\frac{1}{6}+y}{3}\right)^2} = 16$ 을 만족하는 $y = \frac{1}{6}$ 이다. IV에는

III과 IV에 들어 있는 전체 기체의 $\frac{1}{3}$ 만큼 들어 있게 되므로 (다) 과정 후 IV에 들어 있는 $B(g)$ 의 양은 $\left(\frac{1}{6} + \frac{1}{6}\right) \times \frac{1}{3} = \frac{1}{9}$ mol이다. 따라서 $b = \frac{1}{9}$ 이므로 $a+b = \frac{1}{12} + \frac{1}{9} = \frac{7}{36}$ 이다.

심화 11번

접근 Point 정반응이 흡열 반응이므로 온도를 높이면 평형 상수가 커지고, 온도를 낮추면 평형 상수가 작아진다.

11 온도 변화와 화학 평형 이동

(가)에서 (나)로 변화할 때 감소한 $A(g)$ 의 양은 2 mol, 증가한 $B(g)$ 와 $C(g)$ 의 양은 각각 1 mol, 2 mol이므로 반응 계수비는 $A(g) : B(g) : C(g) = 2 : 1 : 2 = 2 : b : c$ 이다.

㉠. $b=1$, $c=2$ 이므로 $b+c=3$ 이다.

$$\times. T_1 \text{에서 평형 상수 } K = \frac{[B][C]^2}{[A]^2} = \frac{\left(\frac{2}{2V}\right) \times \left(\frac{2}{2V}\right)^2}{\left(\frac{1}{2V}\right)^2} = \frac{4}{V}$$

$$\text{이고, } T_2 \text{에서 평형 상수 } K = \frac{\left(\frac{2}{V}\right) \times \left(\frac{2}{V}\right)^2}{\left(\frac{1}{V}\right)^2} = \frac{8}{V} \text{이므로}$$

$$\frac{T_2 \text{에서의 } K}{T_1 \text{에서의 } K} = 2 \text{이다.}$$

㉡. 정반응이 흡열 반응이므로 온도를 높이면 평형 상수가 커지고, 온도를 낮추면 평형 상수가 작아진다. 평형 상수가 T_2 에서가 T_1 에서보다 크므로 $T_2 > T_1$ 이다.

심화 12번

접근 Point 농도로 정의되는 평형 상수는 $K = \frac{[B]^b[C]^c}{[A]^a}$ 이고, 온도가 같으면 평형 상수가 같다.

12 평형 상수

실험 I에서 평형에 도달할 때까지 증가한 $[B]=[C]=0.1 \text{ M}$ 이므로 $b=1$ 이다. 온도가 일정하므로 실험 I과 II에서 평형 상수 (K)가 같다. $K = \frac{[B][C]}{[A]^a} = \frac{0.2 \times 0.1}{1.0^a} = \frac{0.2 \times 0.4}{2.0^a}$ 를 만족하는 $a=2$ 이다.

실험 II에서 평형에 도달할 때까지 $[C]$ 가 0.2 M 증가하므로 $[A]$ 는 0.4 M 감소하여 $2x-0.4=2.0$ 을 만족하는 $x=1.2$ 이다.

㉠. $a=2$, $b=1$ 이므로 $a > b$ 이다.

$\times$. 실험 I에서 평형 상수 $K = \frac{0.2 \times 0.1}{1.0^2} = 0.02$ 이고, 온도가 일정하므로 실험 III에서의 평형 상수도 실험 I과 같으며, B와 C의 평형 농도가 각각 $2y \text{ M}$, $y \text{ M}$ 이므로 $K = \frac{2y \times y}{[A]^2} = 0.02$

를 만족하는 A의 평형 농도는 $10y \text{ M}$ 이다. 실험 III에서 A와 B의 초기 농도가 각각 2.4 M, 0.9 M이므로 정반응이 우세하게 진행되어 평형에 도달하게 된다면, 평형에 도달할 때까지 증가한 $[B]=z \text{ M}$ 라고 할 때 평형에서 $[A] : [B] = (2.4-2z) : (0.9+z)$ 이므로 $[A] : [B] = 5 : 1$ 이 될 수 없다. 따라서 실험 III에서는 역반응이 우세하게 진행되어 평형에 도달하게 된다.

$\times$. III에서 평형에 도달할 때까지 감소한 $[B]=z \text{ M}$ 라고 하면, 평형에서 $[A] = (2.4+2z) \text{ M}$, $[B] = (0.9-z) \text{ M}$ 이므로 $(2.4+2z) : (0.9-z) = 5 : 1$ 을 만족하는 $z=0.3$ 이고, 평형에서 $[B] = (0.9-z) \text{ M} = 0.6 \text{ M} = 2y \text{ M}$ 이므로 $y=0.3$ 이다.

심화 13번

접근 Point 평형 상수식에 고체나 액체의 농도는 포함되지 않는다.

13 고체나 액체 상태 물질이 포함된 반응의 평형 상수

㉠. 평형 상수식에 고체나 액체의 농도는 포함되지 않으므로

$$K = \frac{[D]}{[B]^3} \text{이다.}$$

㉡. 온도와 압력이 일정하므로 기체의 부피는 기체의 양(mol)에 비례한다. 반응 전 $B(g)$ 의 양을 $10n \text{ mol}$, 평형에 도달할 때까지 감소한 $B(g)$ 의 양을 $3x \text{ mol}$ 이라고 하면, 반응의 양적 관계는 다음과 같다.

	$A(s) + 3B(g) \rightleftharpoons C(l) + D(g)$	
반응 전(mol)	10n	0
반응(mol)	-3x	+x
평형(mol)	10n-3x	x

전체 기체의 양은 $(10n-2x) \text{ mol} = 6n \text{ mol}$ 을 만족하는 $x=2n$ 이다. 따라서 (나)에서 $B(g)$ 의 양은 $4n \text{ mol}$, $D(g)$ 의 양은 $2n \text{ mol}$ 이고, 전체 기체의 압력이 1 atm이므로 $D(g)$ 의 부분 압력은 $\frac{1}{3} \text{ atm}$ 이다.

$\times$. (나)에서 피스톤에 추를 올리면 전체 기체의 압력이 증가하므로 전체 기체의 양(mol)이 감소하는 방향(정반응)으로 평형이 이동한다. 따라서 $A(s)$ 의 양(mol)은 (나)에서보다 감소한다.

심화 14번

접근 Point A(g) w g의 양을 n mol이라고 하면 A(g) 0.6w g은 0.6n mol이다.

14 압력 변화와 평형 이동

(가)에서 A(g) w g을 n mol이라고 하면, (나)에서 A(g) 0.6w g은 0.6n mol이다. (가)에서 (나)로의 반응에 대한 양적 관계는 다음과 같다.

	$2A(g) \rightleftharpoons bB(g) + C(g)$		
반응 전(mol)	n	0	0
반응(mol)	-0.4n	+0.2bn	+0.2n
평형(mol)	0.6n	0.2bn	0.2n

(다)에서 용기에 들어 있는 C(g)의 전체 질량은 0.02w g이며, C의 분자량이 A의 $\frac{1}{10}$ 이므로 C(g) 0.02w g은 0.2n mol이다.

(나)에서 꼭지를 열어 기체의 부피가 2배가 되어도 C(g)의 양(mol)이 변하지 않았으므로 부피 변화에 따른 평형 이동은 일어나지 않았으며, 반응물의 계수와 생성물의 계수 합이 같다. 따라서

$$\text{서 } b=1 \text{이고, (나)에서 평형 상수 } K = \frac{[B][C]}{[A]^2} = \frac{\frac{0.2n}{V} \times \frac{0.2n}{V}}{\left(\frac{0.6n}{V}\right)^2} = \frac{1}{9} \text{이다.}$$

반응 전과 후의 질량은 보존되므로 (가) → (다)에서 감소한 A(g)의 질량이 0.4w g일 때, 증가한 B(g)와 C(g)의 질량이 각각 0.38w g, 0.02w g이며, 반응 몰비가 B : C = 1 : 1이므로 분자량비는 B : C = 19 : 1이다. 따라서 $\frac{B \text{의 분자량}}{C \text{의 분자량}} \times K = \frac{19}{1} \times \frac{1}{9} = \frac{19}{9}$ 이다.

심화 15번

접근 Point 기체 분자 수와 외부 압력이 일정할 때 온도가 T K에서 2T K로 증가하면 기체의 부피는 2배가 되어야 하지만, 평형 이동이 일어나 기체 분자 수가 변하면 부피는 2배가 되지 않는다.

15 온도 변화와 평형 이동

T K에서 평형 상태 I에 도달할 때까지 반응한 A(g)의 양을 x mol이라고 하면 반응의 양적 관계는 다음과 같다.

	$A(g) + B(g) \rightleftharpoons C(g)$		
반응 전(mol)	4	3	0
반응(mol)	-x	-x	+x
평형(mol)	4-x	3-x	x

I에서 A(g)와 C(g)의 부분 압력이 같으므로 $4-x=x$ 를 만족하는 $x=2$ 이다. I에서 실린더에 들어 있는 기체는 A(g) 2 mol, B(g) 1 mol, C(g) 2 mol이다.

㉠ I에서 온도를 2T K로 변화시키면 압력이 일정하므로 기체의 부피는 20 L가 되어야 하지만 평형 상태 II에서 기체의 부피가 18 L이므로 정반응 쪽으로 평형이 이동하였음을 알 수 있다. 온도를 높였을 때 정반응 쪽으로 평형이 이동하였으므로 정반응은 흡열 반응($\Delta H > 0$)이다.

㉡ I에서 반응이 진행되어 II에 도달할 때까지 변화된 C(g)의 양을 y mol이라고 하면, 반응의 양적 관계는 다음과 같다.

	$A(g) + B(g) \rightleftharpoons C(g)$		
반응 전(mol)	2	1	2
반응(mol)	-y	-y	+y
평형(mol)	2-y	1-y	2+y

압력이 일정하므로 기체의 부피는 기체의 양(mol)과 온도의 곱에 비례한다. 10 L : 18 L = 5 mol × T K : (5-y) mol × 2T K를 만족하는 $y = \frac{1}{2}$ 이며, II에서 실린더에 들어 있는 기체는 A(g) $\frac{3}{2}$ mol, B(g) $\frac{1}{2}$ mol, C(g) $\frac{5}{2}$ mol이다. 따라서

$$\frac{\text{I에서 B(g)의 몰 분율}}{\text{II에서 C(g)의 몰 분율}} = \frac{\frac{1}{5}}{\frac{5}{5}} = \frac{9}{25} \text{이다.}$$

$$\text{㉢ } K_2 = \frac{\frac{5}{2}}{\frac{3}{2} \times \frac{1}{2}} = 60 \text{이다.}$$

심화 16번

접근 Point 온도가 일정할 때 기체의 압력은 기체의 양(mol)에 비례하고, 부피에 반비례한다.

16 온도 변화와 평형 이동

온도가 일정할 때 기체의 압력은 기체의 양(mol)에 비례하고, 부피에 반비례한다. (가)에서 기체의 몰비는 I : II = 9 : 1이고, 부피비는 I : II = 2 : 1이므로 전체 기체의 압력비는 I : II = 9 : 2이다. 따라서 $P_2 = \frac{2}{9}P_1$ 이다. ㉠을 열어 평형에 도달하였을 때 I에 들어 있는 C(g)의 부분 압력이 $\frac{7}{3}P_2$ atm인데, C(g)의 부피는 3배가 되고, 압력은 $\frac{7}{3}$ 배가 되므로 C(g)의 양(mol)은

반응 전의 7배가 된다. 따라서 ㉠을 열어 평형에 도달할 때까지 증가한 $C(g)$ 의 양은 6 mol이며, 반응의 양적 관계는 다음과 같다.

$$A(g) + bB(g) \rightleftharpoons 3C(g)$$

반응 전(mol)	3	6	1
반응(mol)	-2	-2b	+6
평형(mol)	1	6-2b	7

부분 압력비가 $B(g) : C(g) = (6-2b) : 7 = 2 : 7$ 이므로 $b=2$ 이다.

(나) 과정 후 I과 II에 들어 있는 기체의 양은 $A(g)$ 가 1 mol, $B(g)$ 가 2 mol, $C(g)$ 가 7 mol이고, $B(g)$ 와 $C(g)$ 의 부분 압력이 각각 $\frac{2}{3}P_2$ atm, $\frac{7}{3}P_2$ atm이므로 $A(g)$ 의 부분 압력은 $\frac{1}{3}P_2$ atm이며, I과 II에 들어 있는 전체 기체의 압력은 $\frac{10}{3}P_2$ atm이다.

꼭지 ㉠을 열면 부피가 $\frac{4}{3}$ 배 증가하고, 온도를 $2T$ 로 높이면 반응물의 계수 합과 생성물의 계수가 같으므로 전체 기체의 양(mol)은 변하지 않아 (다) 과정 후 전체 기체의 압력은 (나) 과정 후의 $\frac{3}{2}$ 배가 된다. (나) 과정 후 전체 기체의 압력은 $\frac{10}{3}P_2$ atm이므로 (다) 과정 후 전체 기체의 압력은 $\frac{10}{3}P_2 \times \frac{3}{2} = 5P_2$ atm이고, (다) 과정 후 III에 들어 있는 $B(g)$ 의 부분 압력이 $\frac{5}{4}P_2$ atm

이므로 $B(g)$ 의 몰 분율은 $\frac{\frac{5}{4}P_2}{5P_2} = \frac{1}{4}$ 이다. 정반응이 발열 반응이므로 온도를 높이면 역반응 쪽으로 평형이 이동하게 되며, 반응한 $C(g)$ 의 양을 $3x$ mol이라고 하면 반응의 양적 관계는 다음과 같다.

$$A(g) + 2B(g) \rightleftharpoons 3C(g)$$

반응 전(mol)	1	2	7
반응(mol)	+x	+2x	-3x
평형(mol)	1+x	2+2x	7-3x

(다) 과정 후 III에 들어 있는 $B(g)$ 의 몰 분율 $\frac{2+2x}{10} = \frac{1}{4}$ 을 만족하는 $x = \frac{1}{4}$ 이므로 I ~ III에 들어 있는 기체의 양은 $A(g)$ 가 $\frac{5}{4}$ mol, $B(g)$ 가 $\frac{5}{2}$ mol, $C(g)$ 가 $\frac{25}{4}$ mol이다. 전체 기체의 부피가 4 L 이므로 $2T$ 에서 평형 상수 $K = \frac{[C]^3}{[A][B]^2} = \frac{\left(\frac{25}{4} \times \frac{1}{4}\right)^3}{\left(\frac{5}{4} \times \frac{1}{4}\right) \times \left(\frac{5}{2} \times \frac{1}{4}\right)^2} = \frac{125}{4}$ 이다.

심화 17번

접근 Point T_1 K, P_1 atm과 T_2 K, P_2 atm에서는 X의 안정한 상이 각각 2가지이므로 상평형 그림에서 승화 곡선, 용해 곡선, 증기 압력 곡선 위에 있어야 한다.

17 상평형 그림

T_1 K, P_1 atm과 T_2 K, P_2 atm에서는 X의 안정한 상이 각각 2가지이므로 상평형 그림에서 승화 곡선, 용해 곡선, 증기 압력 곡선 위에 있어야 한다. $T_2 > T_1$ 이므로 T_1 이 삼중점의 온도보다 낮다면 T_1 K, P_1 atm이 승화 곡선 위에 있어야 하며(X의 안정한 상은 고체와 기체), T_2 K, P_2 atm은 용해 곡선 또는 증기 압력 곡선 위에 있어야 한다. T_2 K, P_2 atm이 용해 곡선 위에 있다면 X의 안정한 상은 고체와 액체이므로 ㉠은 고체, ㉡은 기체, ㉢은 액체이며, T_1 K, P_2 atm에서 X의 안정한 상이 ㉠(고체)이므로 주어진 조건을 만족하게 된다. T_2 K, P_2 atm이 증기 압력 곡선 위에 있다면 X의 안정한 상은 액체와 기체이므로 ㉠은 기체, ㉡은 고체, ㉢은 액체이며, T_1 K, P_2 atm에서 X의 안정한 상이 ㉢(고체)이 되므로 조건에 모순이 된다.

T_1 K가 삼중점의 온도보다 높다면 T_1 K, P_1 atm이 용해 곡선과 증기 압력 곡선 위에 있어야 하고, T_2 K, P_2 atm은 증기 압력 곡선 또는 용해 곡선 위에 있어야 한다. T_1 K, P_1 atm이 용해 곡선(X의 안정한 상은 고체와 액체), T_2 K, P_2 atm이 증기 압력 곡선(X의 안정한 상은 액체와 기체) 위에 있다면 ㉠은 액체, ㉡은 고체, ㉢은 기체이며, T_1 K, P_2 atm에서 X의 안정한 상이 ㉢(고체)이 되므로 조건에 모순이 된다. T_1 K, P_1 atm이 증기 압력 곡선(X의 안정한 상은 액체와 기체), T_2 K, P_2 atm이 용해 곡선(X의 안정한 상은 고체와 액체) 위에 있다면 ㉠은 액체, ㉡은 기체, ㉢은 고체이며, T_1 K, P_2 atm에서 X의 안정한 상이 ㉢(고체)이 되므로 조건에 모순이 된다. 따라서 T_1 K, P_1 atm과 T_2 K, P_2 atm은 각각 승화 곡선과 용해 곡선 위의 지점이며, ㉠은 고체, ㉡은 기체, ㉢은 액체이다.

㉠. T_1 K, P_1 atm은 승화 곡선 위에 있으므로 X의 삼중점 온도는 T_1 K보다 높다.

㉡. ㉠은 T_1 K, P_2 atm에서 X의 안정한 상이므로 고체이다.

㉢. T_2 K, P_1 atm에서 X의 안정한 상은 기체이므로 ㉢이다.

심화 18번

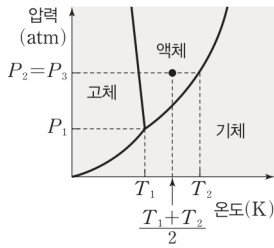
접근 Point T_2 K, P_2 atm에서 X는 액체와 기체가 평형을 이루고 있으므로 증기 압력 곡선 위에 위치한다.

18 압력 변화와 상평형

㉢. T_2 K, P_2 atm에서 X는 증기 압력 곡선 위에 위치한다. (나)에서 온도를 T_2 K로 유지한 채 칸막이를 제거하면 압력은 순간적으로 P_2 atm보다 작아져 X는 기체가 안정한 상이 되고 $X(l) \rightarrow X(g)$ 로의 변화가 $X(g) \rightarrow X(l)$ 로의 변화보다 우세하게 일어나게 된다. 따라서 T_2 K에서 평형에 도달하게 되면 $X(g)$ 의 압력은 다시 P_2 atm이 되므로 $P_2 = P_3$ 이다.

㉣. $X(l) \rightarrow X(g)$ 로의 변화가 $X(g) \rightarrow X(l)$ 로의 변화보다 우세하게 일어나게 되어 칸막이를 제거하여 평형 상태에 도달했을 때 강철 용기 속 $X(l)$ 의 질량은 w g보다 작다.

㉤. $\frac{T_1+T_2}{2}$ K, P_3 atm에서 X의 안정한 상은 액체이다.

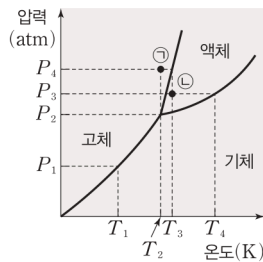


심화 19번

접근 Point 안정한 상의 수가 3인 지점은 삼중점이다.

19 상평형 그림과 안정한 상의 수

T_2 K, P_2 atm은 CO_2 의 안정한 상의 수가 3이므로 삼중점이고, T_1 K, P_1 atm은 안정한 상의 수가 2이고, $T_2 > T_1$ 이므로 승화 곡선 위의 지점이다. T_3 K, P_4 atm과 T_4 K, P_3 atm은 각각 안정한 상의 수가 2이므로 용해 곡선과 증기 압력 곡선 위의 지점인데, $T_3 > T_2$ 이므로 CO_2 의 용해 곡선의 기울기는 양(+)이다. $T_4 > T_3$ 이고, $P_4 > P_3$ 이므로 T_3 K, P_4 atm은 용해 곡선 위의 지점, T_4 K, P_3 atm은 증기 압력 곡선 위의 지점이다. CO_2 의 상평형 그림은 다음과 같다.



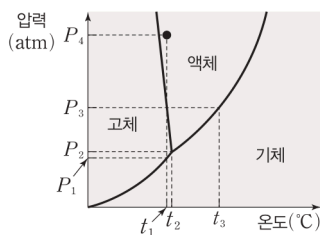
따라서 T_2 K, P_4 atm에서 CO_2 의 안정한 상(㉠)은 고체, T_3 K, P_3 atm에서 안정한 CO_2 의 상(㉡)은 액체이다.

심화 20번

접근 Point $t_2^\circ\text{C}$ 는 삼중점의 온도이고, $t_2 > t_1$ 이며, $t_1^\circ\text{C}$ 에서 P_1 atm과 P_3 atm에서 안정한 상의 수가 각각 2이므로 X의 상평형 그림에서 용해 곡선의 기울기는 음(-)이다.

20 상평형 그림과 안정한 상의 수

$t_2^\circ\text{C}$, P_2 atm에서 X의 안정한 상의 수가 3이므로 $t_2^\circ\text{C}$, P_2 atm은 삼중점이다. P_3 atm에서 안정한 상의 수가 $t_1^\circ\text{C}$ 와 $t_3^\circ\text{C}$ 에서 각각 2이므로 X의 용해 곡선의 기울기가 양(+)이면 $t_2 < t_1$ 이 되므로 조건에 모순이 된다. 따라서 X의 용해 곡선의 기울기는 음(-)이고, $t_1^\circ\text{C}$, P_3 atm은 용해 곡선 위의 지점이고, $t_3^\circ\text{C}$, P_3 atm은 증기 압력 곡선 위의 지점이다. $t_1^\circ\text{C}$, P_1 atm은 X의 안정한 상의 수가 2이므로 승화 곡선 위의 지점이므로 X의 상평형 그림은 다음과 같다.



✕. $P_2 > P_1$ 이다.