02 평형 이동

• 농도, 압력, 온도 변화에 따른 화학 평형의 이동을 관찰하고 르샤틀리에 원리로 설명할 수 있다.

1 농도 변화에 따른 평형 이동

화학 반응이 평형 상태일 때 농도, 압력, 온도가 일정하면 평형 상태가 유지된다. 그러나 농도, 압력, 온도가 달라지면 정반응 또는 역반응이 우세하게 진행된 뒤 새로운 평형 상태에 도달하는데 이를 **평형 이동**이라고 한다.

화학 반응이 평형 상태일 때 반응물이나 생성물의 농도를 다르게 하면 평형이 어떻게 이동하는지 다음 탐구로 알아보자.

탐구 / 실험

과학적 사고력 • 탐구 능력 • 문제 해결력

농도 변화에 따른 평형 이동 실험하기

목표 | 농도 변화에 따른 평형 이동을 설명할 수 있다.

준비물 | 0.1 M 다이크로뮴산 칼륨 수용액, 0.1 M 크로뮴산 칼륨 수용액, 1.0 M 수산화 나트륨 수용액, 1.0 M 염산, 비커, 6홈 판, 일회용 스포이트, 보안경, 실험용 장갑

안전하게 활동하기

- 시약을 사용할 때에는 보안경을 착용하며, 시약이 피부나 옷에 묻지 않게 주의한다.
- 실험을 마치면 남은 물질은 지정된 곳에 모아 처리한다.

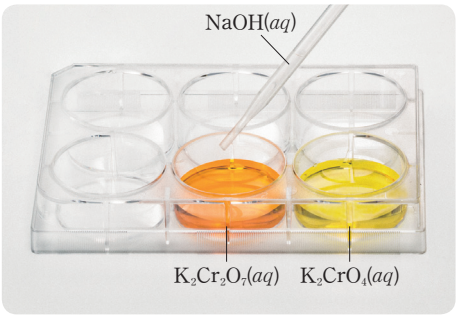
| 문제 인식 | 다이크로뮴산 이온($Cr_2O_7^{2-}$)과 크로뮴산 이온(CrO_4^{2-})은 다음과 같이 평형을 이룬다.

$$\underset{\text{주황색}}{Cr_2O_7^{2-}(aq)} + H_2O(l) \rightleftarrows \underset{\text{노란색}}{2CrO_4^{2-}(aq)} + 2H^+(aq)$$

수소 이온(H^+) 농도를 다르게 하면 평형은 어떻게 이동할까?

| 탐구 설계와 수행 |

1. 홈 판의 한 홈에 0.1 M 다이크로뮴산 칼륨($K_2Cr_2O_7$) 수용액을, 다른 홈에 0.1 M 크로뮴산 칼륨(K_2CrO_4) 수용액을 각각 4 mL씩 넣는다.
2. 과정 1의 수용액에 1.0 M 수산화 나트륨(NaOH) 수용액을 각각 한 방울씩 떨어뜨리면서 색의 변화를 관찰한다.



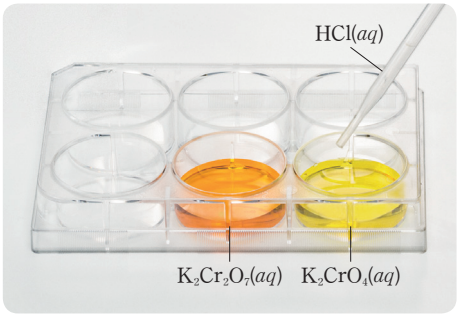
❓ 수용액의 색은 어떻게 변하는가?

구분	$K_2Cr_2O_7(aq) + NaOH(aq)$	$K_2CrO_4(aq) + NaOH(aq)$
수용액의 색 변화	주황색 → ( )	노란색 → ( )

3. 다른 홈 판을 준비하여 과정 1과 같이 다이크로뮴산 칼륨($K_2Cr_2O_7$) 수용액과 크로뮴산 칼륨(K_2CrO_4) 수용액을 각각 4 mL씩 넣는다.

4. 과정 3의 수용액에 1.0 M 염산($HCl(aq)$)을 각각 한 방울씩 떨어뜨리면서 색의 변화를 관찰한다.

? 수용액의 색은 어떻게 변하는가?



구분	$K_2Cr_2O_7(aq) + HCl(aq)$	$K_2CrO_4(aq) + HCl(aq)$
수용액의 색 변화	주황색 → ( )	노란색 → ( )

자료 해석과 논의

1. 과정 2에서 수산화 나트륨 수용액을 넣으면 각 용액의 평형은 어떻게 이동하는가?

2. 과정 4에서 염산을 넣으면 각 용액의 평형은 어떻게 이동하는가?

결론 도출

농도가 달라지면 평형이 어떻게 이동하는지 설명해 보자.

과학적 탐구 능력 더 키우기

1.0 M 아세트산(CH_3COOH)은 수용액에서 다음과 같이 이온화하여 평형을 이룬다.

$$CH_3COOH(aq) + H_2O(l) \rightleftarrows CH_3COO^-(aq) + H_3O^+(aq)$$

이 반응에서 농도를 다르게 하여 역반응이 우세하게 진행되다가 새로운 평형 상태에 도달하는 실험을 설계해 보자.

평가 길잡이

- ☐ 인성 적극적으로 실험을 수행하였는가?
- ☐ 과정 2, 4에서 평형이 이동하는 까닭을 옳게 설명하였는가?
- ☐ 농도 변화에 따른 평형 이동 원리를 옳게 설명하였는가?

02

평형 상태인 반응물이나 생성물의 농도를 다르게 하였을 때 평형의 이동 방향은 어떻게 설명할 수 있을까?

다이크로뮴산 이온($Cr_2O_7^{2-}$)과 크로뮴산 이온(CrO_4^{2-})이 평형 상태인 수용액에 수산화 나트륨(NaOH) 수용액을 넣으면 수산화 이온(OH^-)이 수소 이온(H^+)과 중화 반응하여 H^+의 농도가 묽어진다. 따라서 이 변화를 줄이려고 H^+이 생성되는 정반응이 우세하게 진행되어 새로운 평형 상태에 도달한다.

한편 $Cr_2O_7^{2-}$과 CrO_4^{2-}이 평형 상태인 수용액에 묽은 염산($HCl(aq)$)을 넣으면 H^+의 농도가 진해진다. 따라서 이 변화를 줄이려고 H^+이 소모되는 역반응이 우세하게 진행되어 새로운 평형 상태에 도달한다.

연계 화학 I

중화 반응

산 수용액과 염기 수용액을 섞으면 수소 이온(H^+)과 수산화 이온(OH^-)이 반응하여 물(H_2O)이 생성되고, 산의 음이온과 염기의 양이온으로 이루어진 염이 생성된다.

H^+의 농도가 묽어지면 H^+이 생성되는 방향으로 평형 이동

$$Cr_2O_7^{2-}(aq) + H_2O(l) \rightleftharpoons 2CrO_4^{2-}(aq) + 2H^+(aq)$$

H^+의 농도가 진해지면 H^+이 소모되는 방향으로 평형 이동

이와 같이 화학 평형에서 반응물이나 생성물의 농도를 진하게 하면 진해진 물질의 농도가 묽어지는 방향으로 반응이 진행되다가 새로운 평형 상태에 도달한다. 반대로 반응물이나 생성물의 농도를 묽게 하면 묽어진 물질의 농도가 진해지는 방향으로 반응이 진행되다가 새로운 평형 상태에 도달한다.

즉 화학 반응이 평형 상태에 있을 때 농도를 다르게 하면 농도 변화의 반대 방향으로 평형 이동이 일어나 새로운 평형 상태에 도달한다.

1884년 프랑스의 과학자 르샤틀리에(Le Chatelier, H. L., 1850~1936)는 화학 평형의 이동에 관한 법칙으로 이 현상을 설명하였다. 그는 "어떤 가역 반응의 평형 상태에서 농도, 압력, 온도 등의 변화가 일어나면 그 변화를 줄이는 방향으로 평형이 이동하여 새로운 평형 상태에 도달한다."라고 하였는데, 이를 **르샤틀리에 원리**라고 한다.

농도가 달라져 평형 이동이 일어난 예로 고산병이 있다. 고산병은 일반인이 높은 산에 올라갔을 때 산소 부족으로 두통이나 구토 등의 증상이 나타나고, 심하면 호흡 곤란을 겪거나 의식을 잃는 병이다.

호흡 과정에서 우리 몸속에 들어온 산소(O_2)는 헤모글로빈(Hb)과 결합하여 산소 헤모글로빈($Hb(O_2)_4$)을 생성한 뒤 혈액을 따라 이동하여 세포에 산소를 공급한다.

$$Hb(aq) + 4O_2(aq) \rightleftarrows Hb(O_2)_4(aq)$$

그런데 높은 산에 올라가면 공기가 희박해지므로 Hb과 결합할 수 있는 O_2의 농도도 묽어진다. 따라서 $Hb(O_2)_4$이 O_2와 Hb으로 해리되어 우리 몸은 산소 결핍 상태가 되므로 고산병 증세가 나타난다.

확인 05 평형 상태인 다음 화학 반응에서 농도 조건을 바꾸었을 때 평형이 어떻게 이동하는지 설명해 보자.

(1) $H_2O(g) + CO(g) \rightleftarrows H_2(g) + CO_2(g)$ [CO_2 첨가]

(2) $N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftarrows 2NH_3(g)$ [NH_3 제거]

과학 이야기

르샤틀리에 원리와 유사한 현상

르샤틀리에 원리는 가역 반응의 평형 상태에서 반응 조건을 다르게 하였을 때 반응의 진행 방향을 예측하는 데 사용한다. 이 원리는 1884년 르샤틀리에가 발표하였는데, 1887년 독일의 과학자 브라운(Braun, K. F., 1850~1918)도 연구하여 같은 원리를 발표하였기 때문에 '르샤틀리에-브라운 법칙'이라고도 한다.

르샤틀리에와 브라운이 제안한 원리와 유사한 현상은 과학의 다른 분야에서도 확인할 수 있다. 물리학에서는 전자기 유도, 생명 과학에서는 항상성이 대표적인 예이다.

전자기 유도는 어떠한 원인으로 유도 전류가 발생하면 유도 전류의 원인을 방해하는 방향으로 전류가 흐르는 현상이다.

항상성은 외부 환경과 생물체 내의 변화에 대응하여 생물체 자신의 내부 환경을 일정하게 유지하려는 현상을 말하며, 온도가 높으면 땀을 흘려서 체온을 일정하게 유지하는 현상이 대표적인 예이다.

2 압력 변화에 따른 평형 이동

기체는 고체나 액체와 달리 압력에 따라 부피가 크게 변하므로 농도가 달라진다. 따라서 기체 반응에서는 압력 변화가 평형 상태에 영향을 줄 수 있다. 기체의 반응이 평형 상태일 때 압력을 높이거나 낮추면 평형이 어떻게 이동하는지 다음 탐구로 알아보자.

고학적 사고력

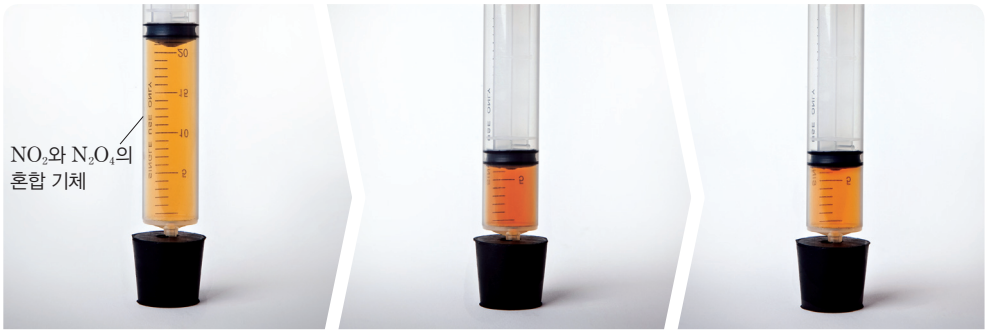
탐구 자료 해석 압력 변화에 따른 평형 이동 해석하기

목표 | 압력 변화에 따른 평형 이동을 설명할 수 있다

이산화 질소(NO_2)와 사산화 이질소(N_2O_4)는 다음과 같이 평형을 이룬다.

$$\underset{\text{적갈색}}{2NO_2(g)} \rightleftharpoons \underset{\text{무색}}{N_2O_4(g)}$$

다음과 같이 NO_2와 N_2O_4의 혼합 기체를 주사기 안에 넣고 압력을 가하면 처음에는 색이 진해지지만, 시간이 지나 새로운 평형 상태에 도달하면 색이 연해진다.

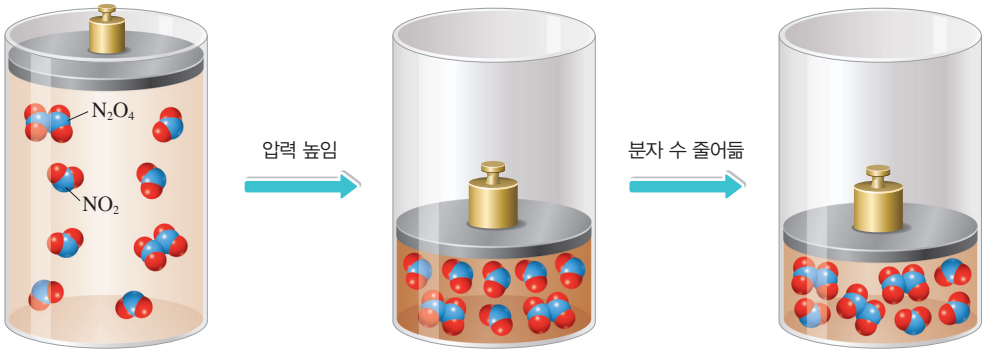


(가) 처음 평형 상태 (나) 압력을 가한 직후 (다) 새로운 평형 상태

| 정리 |

- (가)에 비해 (나)의 색이 진한 까닭을 설명해 보자.
- (나)에 비해 (다)의 색이 연한 까닭을 설명해 보자.
- 압력을 가했을 때 위 반응의 평형은 어느 방향으로 이동하는지 설명해 보자.
- 압력 변화가 기체의 평형 상태에 어떤 영향을 주는지 토의해 보자.

기체의 반응이 평형 상태일 때 압력을 높이면 르샤틀리에 원리에 따라 압력이 낮아지는 방향, 즉 기체의 분자 수가 줄어드는 방향으로 평형이 이동한다. 따라서 |그림 2-4|와 같이 일정한 온도에서 이산화 질소(NO_2)와 사산화 이질소(N_2O_4)가 평형을 이룰 때 압력을 가하여 반응 용기를 압축하면 처음 평형 상태보다 NO_2의 분자 수는 줄어들고, N_2O_4의 분자 수는 늘어나서 새로운 평형 상태에 도달한다.



|그림 2-4| $2NO_2(g) \rightleftarrows N_2O_4(g)$ 반응에서 압력 변화에 따른 평형 이동

반대로 기체의 반응이 평형 상태일 때 압력을 낮추면 압력이 높아지는 방향, 즉 기체의 분자 수가 늘어나는 방향으로 평형이 이동한다. 따라서 NO_2와 N_2O_4가 평형을 이룰 때 반응 용기의 압력을 낮추면 처음 평형 상태보다 N_2O_4의 분자 수는 줄어들고, NO_2의 분자 수는 늘어나서 새로운 평형 상태에 도달한다.

압력이 높아지면 분자 수가 줄어드는 방향으로 평형 이동

$$2NO_2(g) \rightleftharpoons N_2O_4(g)$$

압력이 낮아지면 분자 수가 늘어나는 방향으로 평형 이동

그러나 기체의 반응에서 압력 변화가 항상 평형 상태에 영향을 주는 것은 아니다. 예를 들어 수소(H_2)와 플루오린(F_2)이 반응하여 플루오린화 수소(HF)가 생성되는 반응에서 반응 전후에 기체의 분자 수에는 변화가 없다.

$$H_2(g) + F_2(g) \rightleftarrows 2HF(g)$$

이처럼 반응 전후에 기체의 분자 수가 변하지 않는 반응에서는 압력을 높이거나 낮추어도 평형은 이동하지 않는다.

맞다 O 틀리다 X

NO_2와 N_2O_4가 평형을 이루는 금속 용기 안에 NO_2와 N_2O_4의 반응에 영향을 주지 않는 He을 넣으면 정반응이 우세하게 진행되어 새로운 평형 상태에 도달한다. (O, X)

왜냐하면

확인 06 평형 상태인 다음 화학 반응에서 압력 조건을 바꾸었을 때 평형이 어떻게 이동하는지 설명해 보자.

(1) $2SO_2(g) + O_2(g) \rightleftarrows 2SO_3(g)$ [반응 용기의 압력을 높인다.]

(2) $N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftarrows 2NH_3(g)$ [반응 용기의 압력을 낮춘다.]

3 온도 변화에 따른 평형 이동

화학 반응이 평형 상태일 때 온도를 높이거나 낮추면 평형이 어떻게 이동하는지 다음 탐구로 알아보자.

탐구 / 실험

과학적 탐구 능력 • 문제 해결력

온도 변화에 따른 평형 이동 실험하기

목표 | 온도 변화에 따른 평형 이동을 설명할 수 있다.

준비물 | 0.1 M 염화 코발트(Ⅱ) 수용액, 진한 염산, 얼음물, 더운물, 시험관, 스포이트, 보안경, 실험용 장갑

안전하게 활동하기

- 시약을 사용할 때에는 보안경을 착용하며, 시약이 피부나 옷에 묻지 않게 주의한다.
- 진한 염산의 증기를 흡입하면 알레르기 반응, 호흡 곤란 등이 일어날 수 있으므로 환기를 잘 시키고, 흡입하지 않도록 주의한다.
- 실험을 마치면 남은 물질은 지정된 곳에 모아 처리한다.

문제 인식 | 염화 코발트(Ⅱ)($CoCl_2$)는 물에 녹아 $Co(H_2O)_6^{2+}$과 Cl^-으로 존재하며, 이 수용액은 진한 염산($HCl(aq)$)과 반응하여 다음과 같이 평형을 이룬다.

$$\underset{\text{붉은색}}{Co(H_2O)_6^{2+}(aq)} + 4Cl^-(aq) \rightleftarrows \underset{\text{파란색}}{CoCl_4^{2-}(aq)} + 6H_2O(l),\ \Delta H > 0$$

평형 상태인 용액의 온도를 높이거나 낮추면 평형은 어떻게 이동할까?

탐구 설계와 수행 |

1. 시험관에 0.1 M $CoCl_2$ 수용액을 5 mL 넣고, $CoCl_2$ 수용액의 색이 변할 때까지 시험관에 진한 염산($HCl(aq)$)을 넣어 준다.
   주의 진한 염산($HCl(aq)$)은 휘발성이 강하므로 뚜껑을 열어놓지 않는다.
2. 과정 1의 시험관을 얼음물에 넣고 수용액의 색 변화를 관찰한다.
3. 과정 2의 시험관을 더운물에 넣고 수용액의 색 변화를 관찰한다.

자료 해석과 논의 |

1. 과정 2에서 색이 변한 까닭을 평형 이동으로 설명해 보자.
2. 과정 3에서 색이 변한 까닭을 평형 이동으로 설명해 보자.

결론 도출 |

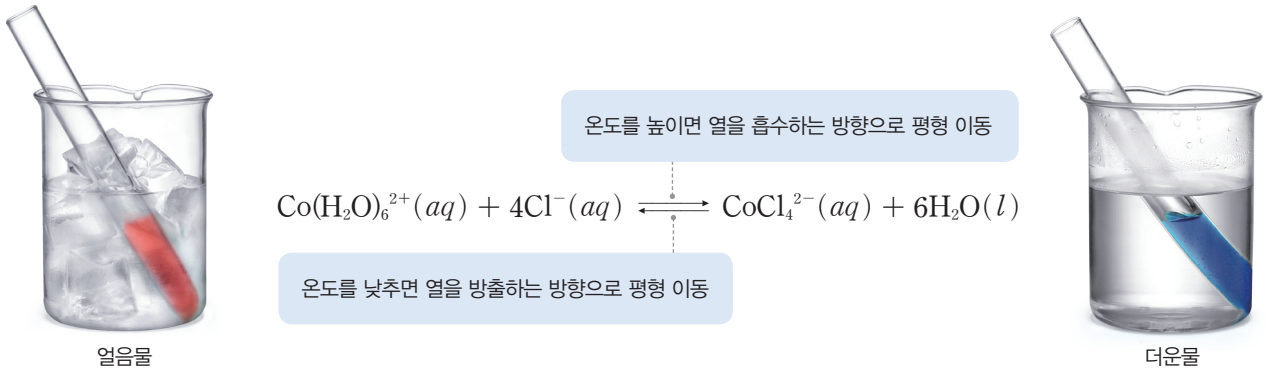
르샤틀리에 원리를 이용하여 온도를 높이거나 낮추면 평형이 어떻게 이동하는지 설명해 보자.

평가 길잡이

- ☐ 인성 적극적으로 실험을 수행하였는가?
- ☐ 과정 2, 3에서 평형이 이동하는 까닭을 옳게 설명하였는가?
- ☐ 르샤틀리에 원리를 이용하여 온도 변화에 따른 평형 이동 원리를 옳게 설명하였는가?

평형 상태에서 온도를 높이면 르샤틀리에 원리에 따라 온도를 낮추는 방향, 즉 열을 흡수하는 방향으로 평형이 이동한다. 따라서 염화 코발트(Ⅱ) 수용액과 염산의 반응은 흡열 반응이므로 |그림 2-5|와 같이 정반응이 우세하게 진행되어 용액이 파란색으로 변한다.

반대로 평형 상태에서 온도를 낮추면 온도를 높이는 방향, 즉 열을 방출하는 방향으로 평형이 이동한다. 따라서 염화 코발트(Ⅱ) 수용액과 염산의 반응에서는 역반응이 우세하게 진행되어 용액이 붉은색으로 변한다.



|그림 2-5| $Co(H_2O)_6^{2+}$과 $CoCl_4^{2-}$의 평형에서 온도에 따른 색 변화

화학 반응이 평형 상태일 때 온도를 높이거나 낮추면 그 온도 변화를 줄이는 방향으로 반응이 일어나다가 새로운 평형 상태에 도달한다. 즉 평형 상태에서 온도를 높이면 흡열 반응 쪽으로 반응이 일어나다가 새로운 평형 상태에 도달하고, 온도를 낮추면 발열 반응 쪽으로 반응이 일어나다가 새로운 평형 상태에 도달한다.

반응 온도가 달라지면 평형 상수가 변하지만, 일정한 온도에서는 농도나 압력이 달라져 새로운 평형 상태가 이루어지더라도 평형 상수는 변하지 않는다. 발열 반응에서 온도를 낮추면 정반응이 우세하게 진행되어 새로운 평형 상태에 도달하기까지 반응물의 농도는 묽어지고 생성물의 농도는 진해지므로 평형 상수가 커진다. 또한 발열 반응에서 온도를 높이면 역반응이 우세하게 진행되어 새로운 평형 상태에 도달하기까지 반응물의 농도는 진해지고 생성물의 농도는 묽어지므로 평형 상수가 작아진다.

반응 온도에 따른 평형 이동의 예로 자동차의 일산화 질소(NO) 생성 반응이 있다.

$$N_2(g) + O_2(g) \rightleftharpoons 2NO(g),\ \Delta H > 0$$

상온에서는 NO가 거의 생성되지 않지만 자동차 엔진 내부와 같이 온도가 매우 높은 조건에서는 르샤틀리에 원리에 따라 평형이 흡열 반응 쪽으로 이동하므로 NO가 많이 생성된다.

르샤틀리에 원리는 산업 현장에서 생성물의 수득률을 높이는 데 이용된다. 대표적인 예로 비료의 주성분인 암모니아(NH_3) 합성 반응을 들 수 있다.

$$N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftarrows 2NH_3(g),\ \Delta H < 0$$

암모니아가 합성되는 반응은 발열 반응이고, 기체의 분자 수가 줄어든다. 따라서 암모니아의 수득률을 높이려면 온도를 낮추고 압력을 높여서 평형을 정반응 쪽으로 이동하게 하는 것이 좋다. 그러나 온도가 너무 낮으면 반응이 느려져 생성물을 얻는 데 시간이 많이 걸리고, 압력을 크게 높이려면 큰 압력을 견딜 수 있는 반응 용기를 설치하는 데 비용이 많이 든다. 따라서 산업 현장에서는 보통 400 ℃~600 ℃, 200기압~400기압 정도에서 암모니아를 합성한다.

확인 07 평형 상태인 다음 화학 반응에서 온도를 높이면 평형이 어떻게 이동하는지 설명해 보자.

$$2SO_2(g) + O_2(g) \rightleftarrows 2SO_3(g),\ \Delta H < 0$$

창의 활동 우리 주변에서 르샤틀리에 원리가 적용된 예를 조사해 보자.

• **수득률**
물질의 합성 반응에서 화학 반응식에 따라 이론적으로 얻을 수 있는 생성물의 양과 실제로 얻은 생성물의 양의 비

맞다 O 틀리다 X

암모니아 합성 반응에서 온도를 높이면 평형 상수가 커진다. (○, ×)

왜냐하면

자료실 농도, 압력에 따른 평형 이동과 평형 상수

농도와 압력에 따른 평형 이동은 르샤틀리에 원리뿐만 아니라 평형 상수(K)로도 설명할 수 있다. 일정한 온도에서 평형 상수는 농도, 압력에 관계없이 일정하므로 반응물이나 생성물의 농도가 달라져 새로운 평형 상태에 도달하여도 평형 상수는 변하지 않는다.

어떤 온도에서 이산화 질소(NO_2)와 사산화 이질소(N_2O_4)가 평형 상태에 있을 때 평형 상수는 다음과 같다.

$$2NO_2(g) \rightleftarrows N_2O_4(g) \qquad K = \frac{[N_2O_4]}{[NO_2]^2}$$

[농도의 영향]

같은 온도에서 이 평형 상태에 NO_2를 첨가하면 $[NO_2]$가 진해지므로 반응 지수(Q)는 평형 상수(K)보다 작아진다.

$$Q = \frac{[N_2O_4]}{[NO_2]^2} < K$$

Q가 K와 같아지려면 $[NO_2]$는 묽어지고, $[N_2O_4]$는 진해져야 한다. 따라서 정반응이 우세하게 진행되어 새로운 평형 상태에 도달한다.

반대로 NO_2를 제거하여 $[NO_2]$가 묽어지면 $Q > K$이므로, 역반응이 우세하게 진행되어 새로운 평형 상태에 도달한다.

[압력의 영향]

같은 온도에서 평형 상태의 압력이 2배로 높아지면 $[NO_2]$와 $[N_2O_4]$는 평형 농도의 2배가 되므로 $Q < K$이다.

$$Q = \frac{[N_2O_4]}{[NO_2]^2} = \frac{2}{2^2}K = \frac{1}{2}K < K$$

Q가 K와 같아지려면 $[NO_2]$는 묽어지고 $[N_2O_4]$는 진해져야 한다. 따라서 정반응이 우세하게 진행되어 새로운 평형 상태에 도달한다.

반대로 압력을 낮추면 $Q > K$이므로, 역반응이 우세하게 진행되어 새로운 평형 상태에 도달한다.