12. 수용액 평형의 응용

1. 약산 H_2A의 중화 : ⑤

H_2A의 이온화 상수는 $K_{a1} = 2.0 \times 10^{-6}$, $K_{a2} = 1.0 \times 10^{-10}$이므로 H_2A는 약산으로 1단계 이온화가 2단계 이온화보다 훨씬 크다. pH는 H_2A의 1단계 이온화로 대부분 결정되며, $pH = 9.0$이면 주된 화합물이 NaHA이며 Na_2A는 가수분해로 생성되는 물질이 아니다. 완전 중화에는 NaOH 용액 40.0 mL가 필요하고, 약산인 것과 중화에 필요한 염기 부피는 무관하다. $pH = 7.00$인 용액의 $[H^+] = 10^{-pH}$이고, $\frac{K_{a1}}{[H^+]} = \frac{[HA^-]}{[H_2A]}$이며, $H_2A : HA^- : A^{2-} = 50 : 1000 : 1$이다.

2. 암모니아 수와 염산의 적정 : ②

암모니아가 약염기이고, 염산이 강산이므로 중화로 생기는 염은 산성 영역이고, 염기성에서 변색되는 페놀프탈레인은 적절하지 않다. 처음의 pH는 5 % 규칙에서 $NH_3 + H_2O \rightarrow NH_4^+ + OH^-$이므로 $K_b = \frac{[NH_4^-][OH^-]}{[NH_3]} = \frac{y^2}{0.010 - y} = 2.0 \times 10^{-5}$ 적용해 계산한다. 지시약은 약산이거나 약염기이므로 영향을 줄이는 게 좋고, 중화 적정에서 산이나 염기의 세기는 중요하지 않다.

3. 완충 용액의 pH : ③

$pH = pK_a + \log\frac{[C_2H_3O_2^-]}{[HC_2H_3O_2]}$이므로 $pH = 4.75 - \log 2.0 = 4.45$이다. 이 완충 용액의 수소 이온 농도($[H^+]$)는 10^{-pH}이다.

4. 앙금 생성 : ③

$Pb^{2+} + 2Cl^- \rightarrow PbCl_2\downarrow$와 $Pb^{2+} + S^{2-} \rightarrow PbS\downarrow$ 반응으로 앙금이 생성된다.

5. pH와 pK_a : ②

$pH = pK_a + \log\frac{[A^-]}{[HA]}$이고 0.010 M HA 20.0 mL를 0.010 M의 NaOH로 10.0 mL만(절반만) 중화했으므로 용액은 짝산(HA)과 짝염기(A^-)가 1 : 1이고 $pH = pK_a$이다.

6. 산의 이온화 상수(K_a, 산의 세기) 예측 : ③

K_a값이 크면 산성이 강하다. pK_a는 $CH_3COOH < C_6H_5OH < CH_3NH_2 < C_6H_5Cl < CH_3CH_3$ 순이며 염기성이 크면 K_a가 작다.

7. 아미노산의 성질 : ②

아미노산은 양쪽성 이온(zwitterion)이고 다양성자성 산으로 작용한다. pH가 1.0(강한 산성)이면 주로 양이온 상태이고, pH 13.0(강한 염기성)인 용액에서 주로 음이온이며, 아미노산은 산성기와 염기성기를 모두 가진다. R에 산성 작용기가 결합하면 삼양성자 산이 될 수도 있다.

8. 중화 적정 : ③

강산과 강염기의 적정 반응이 $\mathrm{H^+ + OH^- \rightarrow H_2O}$이므로 반응하는 $\mathrm{H^+ : OH^- = 1 : 1}$임을 이용한다. $\mathrm{H^+}$ 몰 수 $= 0.10\ \mathrm{M} \times 60\ \mathrm{mL} \times 2 - 0.010\ \mathrm{M} \times (100 + 60)\ \mathrm{mL} = \mathrm{OH^-}$ 몰 수 $= x\ \mathrm{M} \times 100\ \mathrm{mL}$에서 x를 계산하면 0.104 M이다.

9. 지시약의 원리 : ①

강산과 강염기 중화, 강산과 약염기 중화에 적합한 지시약은 산성에서 변색되는 것이 좋고, $\frac{K_{\mathrm{HInd}}}{[\mathrm{H^+}]} = \frac{[\mathrm{Ind^-}]}{[\mathrm{HInd}]}$이므로 변색 범위는 pH $4.7 \sim 6.7$이다. 지시약이 약산이나 약염기로 중화점 근처에서 색깔이 변하므로 중화에 영향을 주지 않으려면 지시약은 1~2방울 정도를 넣는 게 좋다.

10. 완충 용액(1) : ④

(a), (c), (d)는 HF와 $\mathrm{F^-}$로 만들어진 완충 용액이다. 계산을 위해 부피를 각각 10.0 mL라고 가정하면, (b)는 HF를 NaOH로 완전 중화하는 반응이고, (c)에서 $\mathrm{F^- + H^+ \rightarrow HF}$ 반응, (d)에서는 $\mathrm{HF + OH^- \rightarrow F^- + H_2O}$ 반응으로 $\mathrm{HF : F^- = 1 : 1}$이 성립한다.

11. 완충 용액(2) : ④

$\mathrm{pH} = \mathrm{p}K_a + \log\frac{[\text{짝염기}]}{[\text{짝산}]}$, $\mathrm{pOH} = \mathrm{p}K_b + \log\frac{[\text{짝산}]}{[\text{짝염기}]}$이다. 짝산과 짝염기 농도가 같으면 $\mathrm{pH} = \mathrm{p}K_a$, $\mathrm{pOH} = \mathrm{p}K_b$이고 $\mathrm{pH + pOH} = 14$를 이용하여 pH를 결정할 수 있다.

12. 이양성자 산의 중화 : ③

처음 용액의 pH는 1단계 이온화에 의존한다. 이온화 정도를 x라 하면 $K_{a1} = \frac{x^2}{0.20 - x}$이고 5% rule을 적용해 $x^2 = [\mathrm{H^+}]^2$이므로 양변에 $-\log$를 잡으면 $2\mathrm{pH} = 7.00$이다. NaOH 용액 20.0 mL를 넣은 용액은 1차 중화로 $\mathrm{H_2CO_3}$가 대부분 $\mathrm{HCO_3^-}$로 변한다. 2차 중화로 $\mathrm{Na_2CO_3}$가 생성된다. 0.010 M NaOH를 충분히 가하면 $\mathrm{pH} \approx 12.00$이다. 탄산과 NaOH로 만들 수 있는 완충 용액은 pH에 따라 $\mathrm{H_2CO_3/NaHCO_3}$와 $\mathrm{NaHCO_3/Na_2CO_3}$ 두 가지가 가능하다.

13. 앙금 생성과 알짜 이온 반응식 : ④

질산 바륨과 황산 소듐 용액을 섞으면 반응은 $\mathrm{Ba(NO_3)_2 + Na_2SO_4 \rightarrow BaSO_4 \downarrow + 2NaNO_3}$이므로 알짜 반응식은 $\mathrm{Ba^{2+} + SO_4^{2-} \rightarrow BaSO_4}$이다.

14. 약염기와 강산의 적정 : ①
산-염기 지시약은 적정 상황에 따라 선택한다. 약한 산(CH_3COOH)과 강한 염기(NaOH)의 중화가 염기성 영역에서 이루어지므로 염기성 영역에서 변색하는 게 좋다.

15. 선택적 금속 분리 : ①
염산을 가하면 AgCl 앙금이 생기고 $ZnCl_2$는 앙금을 만들지 않아 분리가 가능하다. 아세트산과 질산 이온은 어느 이온과도 앙금을 만들지 않고, Ag_2S와 ZnS는 모두 앙금을 만든다.

16. 앙금 생성 반응 방향 : ④
Ba^{2+} 몰 수 $= 4.0 \times 10^{-4}\,\mathrm{M} \times 0.100\,\mathrm{L} = 4.0 \times 10^{-4}\,\mathrm{mol}$, 같은 방법으로 계산하면 SO_4^{2-} 몰 수 $= 1.8 \times 10^{-4}\,\mathrm{mol}$이다. $Q_{sp} = [Ba^{2+}]_0[SO_4^{2-}]_0 = \frac{4 \times 10^{-4}\mathrm{mol}}{0.4\,\mathrm{L}} \times \frac{1.8 \times 10^{-4}\mathrm{mol}}{0.4\,\mathrm{L}}$ 이므로 $Q_{sp} > K_{sp}$이고 $BaSO_4$ 앙금이 생성된다.

17. 용해도 곱 상수 : ①
수산화 철(III)이 물에 녹으면 다음과 같이 이온화한다.
$Fe(OH)_3(s) \rightleftarrows Fe^{3+}(aq) + 3OH^-(aq)$, $K_{sp} = [Fe^{3+}][OH^-]^3$이며, pH = 4.00 수용액 속 철 이온(Fe^{3+}) 농도는 $K_{sp} = [Fe^{3+}] \times (10^{-10})^3 = 4.0 \times 10^{-38}$ 식을 만족한다.

18. 아미노산의 성질 : ④
pH가 낮은 용액에서 아미노산은 양이온으로 존재할 수 있고, 강한 염기성 용액에서는 아미노산이 음이온으로 존재할 수 있다. 양쪽성 이온(zwitter ion)으로 존재할 수 있을 때의 pH를 등전점이라 한다. R 부분에 $-COOH$가 있으면 산성 아미노산이지만, $-CONH_2$가 있으면 중성 아미노산이다. $-CONH_2$에서 질소가 가진 비공유 전자쌍은 공명 구조 때문에 염기성을 띠기 어렵다.

19. 용해도 곱과 몰 용해도 : ③
몰 용해도(mol/L)를 s라 하면 $K_{sp} = s^2 = 2.0 \times 10^{-10}$이므로 $s = \sqrt{2} \times 10^{-5}$이다.

20. 강산과 강염기 중화 : ①
몰 농도(M)와 부피(V)를 곱하여 부피 단위가 L이면 용질 mol, 부피 단위가 mL이면 mmol이다. 강산과 강염기가 중화하면 (소모된 H^+ 몰 수) = (소모된 OH^- 몰 수)이다. H_2SO_4에서 양성자(H^+) 수는 2이다.

21. 약산과 강염기 중화 : ②

약산인 아세트산(CH_3COOH) 0.10 M 50.0 mL에는 아세트산 5.0 mmol이 있다. NaOH 0.20 g은 5.0 mmol이므로(부피 변화는 무시할 수 있다) 완전 중화해 염 CH_3COONa이 5.0 mmol 생성된다. 염이 완전히 이온화해 x만큼 가수분해하면 $CH_3COO^- + H_2O \rightleftarrows CH_3COOH + OH^-$가 생기고 CH_3COO^-의 $K_b = \frac{1}{2} \times 10^{-9}$($K_a \times K_b = K_w$로 계산) 이용하고, $K_b = \frac{x^2}{0.10 - x}$에 5% rule을 적용해 계산하면 $pH = 8.85$이다.

22. 약염기와 강산의 중화 : ④

0.10 M HCl을 사용하므로 염산을 충분히 첨가하면 $pH = 1.00$이다. 처음 암모니아 수용액은 수산화 이온(OH^-)을 생성해 염기성을 띤다. $NH_3 + H_2O \rightleftarrows NH_4^+ + OH^-$에서 $K_a = \frac{1}{2} \times 10^{-9}$이고, $x^2 = ([H^+])^2 \approx \frac{1}{2} \times 10^{-10}$이므로 $pH = 5.15$이다. 약염기 NH_3와 강산인 HCl의 중화 반응이므로 완전 중화한 용액은 산성이다. 염산 25.0 mL를 첨가하면 반만 중화하고 염기성을 나타낸다. 암모니아 용액을 완전 중화하려면 염산 50.0 mL가 소모된다.

23. 약산과 약염기 중화 반응의 평형 상수(K_n) : ①

K_a와 K_b를 보면 각 산과 염기는 약산과 약염기로 판단할 수 있다.

$$HA \rightleftarrows H^+ + A^-, \qquad K_a = 2.0 \times 10^{-5}$$

$$B + H_2O \rightleftarrows BH^+ + OH^-, \quad K_b = 2.0 \times 10^{-5}$$

$$H^+ + OH^- \rightleftarrows H_2O, \qquad \frac{1}{K_w} = 1.0 \times 10^{14}$$

$$HA + B \rightleftarrows BH^+ + A^-, \qquad K_n = K_a \times K_b \times \frac{1}{K_w} = 4.0 \times 10^4$$

24. K_a와 $[H^+]$ 관계식 변형 : ④

K_a는 온도에만 영향을 받으므로 $K_a = \frac{[H^+][A^-]}{[HA]}$ 식을 변형해 적용하면, $[H^+] = K_a \times \frac{[HA]}{[A^-]}$에서 $pH = 6.00 - \log 2.0 + \log \frac{2}{1} = 6.00$이다.

25. 완충 용액의 구성 : ④

완충 용액은 약산이나 약염기가 짝산/짝염기 형태를 띤다. 강산과 그 짝염기나 강염기와 그 짝산으로 이루어진 용액은 완충 효과를 갖지 않는다. 염소산($HClO_3$)은 강산이므로 완충 용액을 구성할 수 없다.

26. 완충 용액 : ⑤

약산과 약염기에서 짝산과 짝염기를 /로 표시하는데, $\mathrm{pH} = \mathrm{p}K_a + \log\frac{[\text{짝염기}]}{[\text{짝산}]}$이므로 짝염기와 짝산 비율이 1 : 1이면 $\mathrm{pH} = \mathrm{p}K_a$이다($\log 1 = 0$). $\mathrm{NaHCO_3} \rightarrow \mathrm{Na^+} + \mathrm{HCO_3^-}$, $\mathrm{HCO_3^-} \rightarrow \mathrm{H^+} + \mathrm{CO_3^{2-}}$이므로 탄산($\mathrm{H_2CO_3}$)은 두 단계를 거쳐 이온화하여 $\mathrm{HCO_3^-}/\mathrm{CO_3^{2-}}$로 pH에 따라 완충 용액을 선택할 수 있다.

27. 지시약의 변색 범위 : ④

지시약의 이온화 상수를 변형해 $\frac{1.0\times10^{-5}}{[\mathrm{H^+}]} = \frac{(\text{염기성형})}{(\text{산성형})}$으로 나타내면, 사람 눈이 구분할 수 있는 농도가 10배 차이 이상 있을 때이므로 지시약의 변색 범위는 pH 4~6이다.

28. 이양성자성 염기의 적정 : ①

처음 적정할 때 $\mathrm{CO_3^{2-}}$의 $K_{1b} = \frac{K_w}{K_{a2}}$이므로 $K_{1b} = \frac{1}{6}\times10^{-3}$이고, $\mathrm{pOH} = 2.39$이다. 염산을 12.5 mL 넣으면 $[\mathrm{CO_3^{2-}}] = [\mathrm{HCO_3^-}]$이고, 염산 25.0 mL를 넣으면 1차 중화가 되며 대부분 $\mathrm{HCO_3^-}$로 전환된다. 탄산($\mathrm{H_2CO_3}$)은 이양성자산이므로 두 가지 종류 화학종을 완충 용액에 이용할 수 있다. 짝산/짝염기 형태로 구성하며, 그 중 하나는 산성 pH에서 $\mathrm{H_2CO_3}/\mathrm{HCO_3^-}$이고, 다른 하나는 염기성 pH에서 $\mathrm{HCO_3^-}/\mathrm{CO_3^{2-}}$이다. 탄산($\mathrm{H_2CO_3}$)은 분해되어 물($\mathrm{H_2O}$), 이산화탄소($\mathrm{CO_2}$)가 된다.

29. 몰 용해도 : ①

$\mathrm{Ag_2SO_4(s)} \rightleftarrows 2\mathrm{Ag^+(aq)} + \mathrm{SO_4^{2-}(aq)}$에서 $K_{sp} = 1.4\times10^{-5}$이다. $\mathrm{Ag_2SO_4}$의 몰 용해도(mol/L)를 s라 하면, $K_{sp} = 4s^3$이므로 $s = \sqrt[3]{10}\times10^{-2}$(mol/L)이다.

30. 양이온의 선택적 분리 : ②

$\mathrm{Pb^{2+}}$와 $\mathrm{Cu^{2+}}$ 이온을 분리하려면 어느 하나만 앙금을 생성하는 것을 생각하면 된다. $\mathrm{HNO_3}$를 넣으면 모두 수용성이고, HCl 수용액을 넣으면 $\mathrm{PbCl_2}$는 앙금을 생성하지만 $\mathrm{CuCl_2}$는 수용성이므로 분리할 수 있다. HCN, $\mathrm{H_2S}$를 넣으면 모두 앙금이 생기고 $\mathrm{CH_3COOH}$를 넣으면 모두 수용성이다.