

2009학년도 중등학교 화학교사 신규임용후보자 선정경쟁시험: 분석화학분야 문제분석 및 풀이

글 | 이범규(조선대학교 화학과, bglee@chosun.ac.kr)

올해의 중등학교 화학교사 신규임용후보자 선정경쟁시험에서 분석화학이 차지하는 비중은 7문항 13점으로, 문항수로 환산한 비중은 17.5%이고, 배점으로 환산한 비중은 16.2%이었다. 비교적 분석화학과 기기분석의 전 분야에서 고루 출제가 되었으며, 분석화학분야의 지식을 평가하고 변별력을 판단해 볼 수가 있었다.

대부분 문제의 배점이 1.5~2점이므로 수험생의 편에서는 어떤 특정분야를 집중적으로 공부할 필요는 없었다. 그러나 표 1에서 볼 수 있는 것처럼, 각 평가영역에 1문제씩 고루 출제했으나 어떤 분야에서는 2문제를 출제하였다. 아마도 KICE에서 제안된 출제비율과 문항수를 고려하여 균형을 정확히 맞추기는 어려웠을 것으로 판단된다. 그리고 이번 시험 중 분석화학분야의 평가영역은 비교적 명확하게 구분되는 경향이 있었다.

물론 이런 것도 개념에 대한 이해를 하는 측면에서는 필요했지만, 앞으로의 시험에서는 복합적인 문제 또는 통합적인 사고를 묻는 문제를 추가하여 2~3 평가영역을 동시에 포함하는 문제가 출제될 것을 배제할 수 없으므로 대비해야 할 것이다. 즉, 앞으로 단편적인 사고보다는 수험생들의 종합적 사고를 평가하는 문제를 출제하는 것이 전반적인 추세이므로, 이런 방향에서 접근하고 준비하는 것이 필요할 것이다. 이런 방향이 보다 훌륭한 교육자가 되고 선진의 과학교육을 하도록 유도하는데 더욱 요구될 것으로 판단되기 때문이다.

또한 분석화학에서 분석실험과 계산과정이 중요한 부분인데, 평가영역에서도 보면 분석화학실험의 분야도 평가하는 단계가 예정되어 있으므로, 이 부분에 대한 꾸준한 준비와 노력이 이루어져야 할 것이다. 물론 이번 시험에서도 각 문제에 실

표 1. 분석화학 영역 평가요소 및 출제비율

평가영역	평가내용	문항수	점수	문항번호	출제비율(%)	
					실제	제안 ^①
화학분석의 기초	표준물첨가법	1	1.5	34	11.5	12
화학평형, 침전평형, 착물적정	EDTA 적정	1	1.5	38	11.5	18
산-염기 평형과 적정	산-염기 적정	1	2	37	15.4	18
산화환원, 전기화학	산화-환원 적정	1	2	39	15.4	18
기기분석	형광광도법, 크로마토그래피	2	4	36, 40	30.8	18
분석화학 실험	무게분석	1	2	35	15.4	16
계		7	13		100	100

① KICE 연구보고 CRE 2008-6-5, 84쪽

험적인 부분이 조금씩 연관이 있다고 볼 수 있지만, 학생들 스스로 실험시간에 시험과정을 보면서 단순히 따라하는 차원을 넘어, 원리와 이유를 되새기면서 실험에 관련된 것들을 정리해 보는 노력도 필요할 것이다.

풀이

2009학년도 中等학교 化学교사 新舊任用후보자 選定 경쟁시험

34. 定量分析에서 미지시료의 농도를 결정할 때에 주로 검정곡선법이 사용되지만 다른 방법으로 표준물 첨가법과 내부 표준물법이 있다. 이 중 표준물 첨가법에 대한 설명으로 옳은 것을 <보기>에서 모두 고른 것은? [1.5점]

- <보기>
- ㄱ. 검정곡선법과 비교하면 매트릭스보정에 더 효과적이다.
 - ㄴ. 첨가하는 표준물의 전체 몰수가 미지시료의 몰수와 차이가 클수록 측정오차는 커진다.
 - ㄷ. 첨가하는 표준물의 원소 또는 분자가 시료에 존재하지 않아야 한다.
 - ㄹ. 기기의 표류잡음(drift noise) 보정에 적합하다.

- ① ㄱ, ㄴ ② ㄱ, ㄷ ③ ㄷ, ㄹ
- ④ ㄱ, ㄴ, ㄹ ⑤ ㄴ, ㄷ, ㄹ

배점 1.5점:

기기분석에서 표준물첨가법에 관한 지식을 물어보는 문제이다.

정답: ①

배경지식:

기기분석을 사용하는 분석에서 주로 사용되는 방법으로는 1) 검정곡선법, 2) 표준물첨가법, 3) 내부표준물법의 세 가지가 있다. 이 중에서도 표준물첨가법은 시료의 조성이 잘 알려져 있지 않거나, 시료중의 일부 물질이 분석신호에 영향을 주는 경우에 많이 사용되는 방법이다.

풀이:

검정곡선법은 매트릭스가 간단하여 시료 중의 일부 물질이 분석신호에 영향을 주지 않는 경우에 사용되지만, 표준물첨가법은 시료의 조성이 잘 알려져 있지 않거나 시료중의 일부 물질

이 분석신호에 영향을 주는 경우에 많이 사용되는 방법이다.

주어진 <보기>의 각 설명을 살펴보자.

ㄱ. 맞는 설명

『검정곡선법과 비교하면 매트릭스 보정에 효과적이다』는 맞는 설명이다. 검정곡선법을 사용하여 실험할 경우에는 방해하는 화학종이 유사한 매트릭스를 갖는 표준용액을 만들기가 어렵기 때문이다. 표준물첨가법은 『시료의 조성이 잘 알려져 있지 않거나, 시료중의 일부 물질이 분석신호에 영향을 주는 경우에 많이 사용되는 방법』이기 때문에, 매트릭스가 잘 알려져 있지 않거나, 매트릭스 중에 들어있는 일부 성분이 방해하는 영향을 주는 경우에는 표준물첨가법을 사용하는 것이 좋다. 왜냐하면, 표준물첨가법은 모든 시료가 유사한 매트릭스 환경에 놓여있는 상태에서 분석하기 때문이다.

ㄴ. 맞는 설명

『첨가하는 표준물의 전체 몰수가 미지시료의 몰수와 차이가 클수록 측정오차는 커진다』는 맞는 설명이다. 표준물첨가법에서는 매트릭스가 첨가하는 표준물에 미치는 영향이 미지시료의 원래 분석물질에 주는 영향과 같다고 가정하고 분석하는 방법이므로, 원래의 분석농도의 1.5~3배 범위에서 첨가하는 것이 가장 좋다. 첨가하는 표준물의 몰수가 미지시료의 몰수보다 너무 크면 매트릭스의 영향이 다르므로 오차를 유발한다. 또한 전기화학적 표준물첨가법으로 분석하는 경우에도 첨가하는 표준물의 몰수가 너무 크면 이온세기가 달라서 이온분위기가 다른 효과가 나타나서 전극의 전위에 오차가 나타난다.

㉔. 틀린 설명

『첨가하는 표준물의 원소 또는 분자가 시료에 존재하지 않아야 한다』라는 설명은 틀린 설명이다. 표준물 첨가법에서는 분석하고자하는 물질의 표준물을 첨가하는 것이므로, 오히려 반드시 시료 중에 존재하는 물질의 표준물을 첨가하여야 한다.

㉕. 틀린 설명

『기기의 표류잡음 보정에 적합하다』라는 설명은 기기분석을 사용하는 분석에서 내부표준법에 대한 설명이다. 내부표준법은 분석하고자하는 물질이 아닌 다른 표준물을 첨가하는 것이므로, 기기의 이상이나 시료의 손실 등에 의한 오차를 극복할 수 있는 경우에 사용되는 분석법이다. 따라서 내부표준법은 크로마토그래피에서 정량에 자주 사용된다.

35. 침전 무게분석법에서 침전을 만들 때에는 콜로이드 용액이 되지 않도록 조심해야 하며 무게를 정확하게 측정해야 한다. 용액 내 미량의 Ni을 침전 무게분석법으로 정량분석하는 개략적인 실험과정은 다음과 같다.

- (가) DMG(dimethyl glyoxime)를 직접 넣지 않고 하이드록실아민(NH₂OH)과 비아세틸(C₄H₆O₂)을 시료용액에 넣어 DMG를 생성시켜서 Ni(DMG)₂ 침전을 만든다.
- (나) 만들어진 침전용액을 가열한 후, 수 시간 동안 방치한다.
- (다) 침전 생성물을 거르고 묽은 염산용액으로 씻는다.
- (라) 씻은 침전 생성물을 건조 오븐에서 말린 후, 기계식 저울로 무게를 재어 Ni의 양을 구한다.

이 실험에 대한 설명으로 옳은 것을 <보기>에서 모두 고른 것은?

<보기>

- ㄱ. (가)에서는 균일침전법(homogeneous precipitation)으로 핵생성(nucleation, 핵심생성)을 천천히 일으킨다.
- ㄴ. 묽은 염산으로 씻는 주된 이유는 전기이중층을 유지하여 침전의 풀림(peptization)을 막기 위한 것이다.
- ㄷ. 기계식 저울을 사용하였으므로 정확한 무게 측정을 위해 제작회사와 실험실의 중력 차이에 대한 보정을 해야 한다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
- ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

배점 2.0점:

침전을 만들어서 무게를 측정하여 분석하는 무게분석법에 관한 지식을 물어보는 문제이다. 침전적정법에서는 침전이 만들어지는 반응을 적정에 이용하는 경우이므로 약간 다르다.

정답: ③

배경지식:

침전을 이용하여 분석하는 방법은 침전무게분석법과 침전적정법의 두 가지가 있다. 침전무게 분석법에서는 분석물을 침전으로 만들어 무게를 측정하므로 콜로이드성 입자보다는 큰 결정성 입자를 만드는 노력이 필요하다. 그러나 침전적정법에서는 적정에 침전반응을 이용하므로 큰 입자의 침전을 만드는 노력이 소용없다.

큰 결정성 입자의 침전을 만드는 방법 중에 균일용액을 이용한 침전법이 있다. 균일용액을 이용한 침전법은 화학반응에 의하여 침전제를 직접 용액 중에서 생성시켜 침전을 만들므로, 일반적으로 침전제를 직접 첨가하여 침전을 만드는 경우보다 균일하고 큰 결정성 입자의 침전이 만들어진다.

만들어진 침전은 침전물이 분해되지 않도록 휘발성 전해질로 씻어 건조시킨 후, 미리 보정된 저울을 사용하여 무게를 측정한다.

풀이:

설명 (가)는 Ni 금속 이온과 선택적인 침전을 이루는 DMG 시약을 침전제로서 직접 첨가하지 않고, 화학반응에 의하여 침전제인 DMG를 직접 용액 중에서 생성시켜 침전을 만드는 균일용액을 이용한 침전법을 설명하고 있다. DMG 시약을 생성시키는 반응과 침전반응을 반응식으로 나타내면 다음과 같다.

DMG 생성 반응:



설명 (나)는 삭임(digestion)을 설명하고 있다. 삭임은 보통 가열하면서 방치시키는데, 침전의 느린 재결정화(recrystallization)를 촉진시켜 침전입자의 크기는 증가시키

대부분의 분자에서 들뜬상태의 진동에너지 준위 간격은 바닥상태의 진동에너지 준위 간격과 매우 유사하여, 들뜸 스펙트럼과 방출 스펙트럼은 마치 거울상과 같이 대칭으로 얻어지는 경우가 많다.

주어진 보기의 각 설명을 살펴보자.

ㄱ. 맞는 설명

『들뜸 스펙트럼과 방출 스펙트럼의 모양이 근사적으로 대칭이 된다면, 진동에너지준위 간격은 전자 바닥상태와 들뜬상태에서 서로 비슷하다』는 맞는 설명이다. 분자의 에너지는 전자에너지+진동에너지+회전에너지로 구성되어 있으며, 대부분의 분자에서 들뜬상태의 진동에너지 준위 간격은 바닥상태의 진동에너지 준위 간격과 매우 유사하므로 근사적 대칭적인 스펙트럼이 나타난다.

ㄴ. 틀린 설명

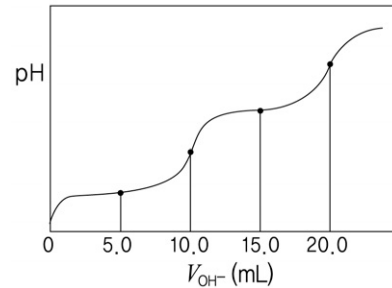
『들뜸 스펙트럼의 세기는 들뜬상태에 있는 분자의 수에 비례하고, 방출 스펙트럼의 세기는 바닥상태에 있는 분자의 수에 비례한다』는 틀린 설명이다. 형광의 메카니즘은 여러 가지의 다른 경로들인 내부전환, 계간전이, 외부전환, 비복사이완 등과 경쟁하며 일어나며, 온도나 점도 등의 외부적인 변수들의 영향이 매우 큰 예민한 분석법이다. 형광의 세기는 양자수득률과 밀접하고, 양자수득률이 높을수록 분자의 형광이 크게 측정되며, 외부적인 요인의 영향으로서는 온도가 낮을수록 용액의 점도가 클수록 형광이 세다.

ㄷ. 틀린 설명

『방출 스펙트럼은 진동이완 후에 얻어지므로 들뜸 스펙트럼보다 파장이 짧거나 같다』는 틀린 설명이다. 분자는 들뜸 과정에서 몇 가지 진동준위 중에 어느 한 준위로 들뜬다. 용액에서 들뜬 화학종 분자들은 용매 분자 사이에 충돌로 빠른 전이를 유발하므로, 들뜬 분자의 수명은 매우 짧아서 들뜬상태의 가장 낮은 진동준위에서 방출 전이를 일으킨다. 따라서 방출 스펙트럼은 진동이완 후에 얻어지므로 에너지가 작아져서, 들뜸 스펙

트럼보다 파장이 길거나 같다.

37. 그림은 0.10 M BH_2^{2+} 용액 20.0 mL를 0.20 M NaOH 용액으로 적정해서 얻은 적정곡선이다.



들어간 염기의 부피(V_{OH^-})에 따른 적정곡선과 용액에 대한 설명으로 옳지 않은 것은? (단, 약산 BH_2^{2+} 의 해리상수는 각각 $K_{a1} = 1.00 \times 10^{-4}$, $K_{a2} = 1.00 \times 10^{-8}$ 이다.)

- ① V_{OH^-} 가 5.0 mL일 때 용액에는 BH_2^{2+} 와 BH^+ 가 1:1로 존재한다.
- ② V_{OH^-} 가 10.0 mL일 때 용액의 pH를 결정하는 주 화학종은 BH^+ 이며, pH는 6.0이다.
- ③ V_{OH^-} 가 15.0 mL일 때 용액의 pH는 $\text{p}K_{a2}$ 와 같다.
- ④ V_{OH^-} 가 17.0 mL일 때 용액에서 B와 BH^+ 의 몰비는 7:3이다.
- ⑤ V_{OH^-} 가 20.0 mL일 때 용액의 pH는 $11 + \log \sqrt{5}$ 이다.

배점 2.0점:

산-염기 적정에 관한 지식을 물어보는 문제이다. 다양성자성산을 센염기로 적정하는 경우이다.

정답: ⑤

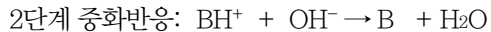
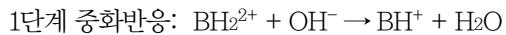
배경지식:

다양성자산은 산성의 수소를 두개 이상 포함하고 있으므로, 단계적으로 적정이 일어난다. 당량점은 이양성자성산의 경우에는 두개까지 가능하며, 제1 당량점까지 소비되는 부피와 제2 당량점까지 소비되는 부피는 같다.

적정의 단계별 pH의 계산은 먼저 적정 반응에서 몰수를 계산한 후, 반응 후 남은 H^+ 또는 OH^- 의 농도를 구하여 pH를 계산한다.

풀이:

이양성자산인 BH_2^{2+} 는 센염기인 NaOH와 다음과 같이 두 단계로 중화반응을 일으킨다.

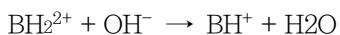


적정을 시작하여 제1 당량점에 필요한 부피는 10.0 mL이고, 제2 당량점까지 도달하는데 필요한 부피는 20.0 mL이다. 제1 당량점에 도달하면 용액 중에 pH에 영향을 줄 수 있는 화학종은 중간형인 BH^+ 가 된다.

주어진 보기의 각 설명을 살펴보자.

① 맞는 설명

『 V_{OH^-} 가 5.0 mL일 때 용액에는 BH_2^{2+} 와 BH^+ 가 1:1로 존재한다』는 맞는 설명이다. V_{OH^-} 가 5.0 mL일 때의 mmol수 변화를 살펴보자.



처음	2	1		
나중	1	-	1	

∴ mmol BH_2^{2+} : mmol BH^+ = 1:1이다.

② 맞는 설명

『 V_{OH^-} 가 10.0 mL일 때 용액의 pH를 결정하는 주화학종은 BH^+ 이며, pH는 6.0이다』는 맞는 설명이다. V_{OH^-} 가 10.0 mL일 때는 제1 당량점에 해당한다. 제1 당량점에서의 mmol 수 변화를 살펴보자.



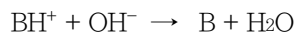
처음	2	2		
나중	-	-	2	

용액 중에 pH에 영향을 줄 수 있는 것은 BH^+ 뿐이고, 생성된 BH^+ 는 중간형이다. 중간형에서 대략의 $pH \approx (pK_1 + pK_2)/2 =$

$(4 + 8)/2 = 6.0$ 이다.

③ 맞는 설명

『 V_{OH^-} 가 15.0 mL일 때 용액의 pH는 pK_{a2} 와 같다』는 맞는 설명이다. V_{OH^-} 가 15.0 mL일 때의 mmol수 변화를 살펴보자.

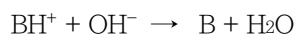


처음	2	1		
나중	1	-	1	

∴ $pH = pK_2 + \log(B/BH^+) = pK_2 + \log(1/1) = pK_2$

④ 맞는 설명

『 V_{OH^-} 가 17.0 mL일 때 용액에서 B와 BH^+ 의 몰비는 7:3이다』는 맞는 설명이다. V_{OH^-} 가 17.0 mL일 때의 mmol수 변화를 살펴보자.

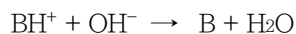


처음	2	1.4		
나중	0.6	-	1.4	

∴ mmol B: mmol BH^+ = 1.4:0.6 = 7:3

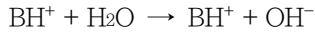
⑤ 틀린 설명

『 V_{OH^-} 가 20.0 mL일 때 용액의 pH는 $11 + \log \sqrt{5}$ 이다』는 틀린 설명이다. V_{OH^-} 가 20.0 mL일 때는 제2 당량점에 해당한다. 제2 당량점에서의 mmol수 변화를 살펴보자.



처음	2	2		
나중	-	-	2	

용액 중에 pH에 영향을 줄 수 있는 것은 B 뿐이다. 생성된 농도는 $[B] = (2/40) = 0.05$ M 이다. 농도는 역반응의 해리를 생각하여 pH를 계산하자.



$$\frac{x^2}{0.05-x} = K_{b_1} = \frac{K_w}{K_{a_2}} = 1 \times 10^{-6}$$

$$\therefore x = [\text{OH}^-] \approx \sqrt{1 \times 10^{-6} \times 0.05} = 10^{-4} \sqrt{5}$$

pOH=4-log($\sqrt{5}$)이므로 pH=14-4+log($\sqrt{5}$)=10+log($\sqrt{5}$)이다.

38. 다음은 Mg²⁺와 Pb²⁺를 포함하고 있는 미지 시료에 대한 정량분석과정이다.

- (가) 미지시료 10.00 mL를 완충용액에서 0.0050 M EDTA 표준 용액으로 적정하였더니 당량점까지 20.00 mL가 소모되었다.
 (나) 이 용액에 가리움제(masking agent)를 과량으로 넣어서 이미 형성된 금속 착화합물에서 EDTA를 유리하였다. (이 가리움제는 Mg²⁺와 착화합물을 형성하지 않는다.)
 (다) 유리된 EDTA를 0.0020 M Mg²⁺ 표준용액으로 적정하였더니 당량점까지 30.00 mL가 소모되었다.

미지 시료 용액에서 $\frac{[\text{Mg}^{2+}]}{[\text{Pb}^{2+}]}$ 의 농도비로 옳은 것은? [1.5점]

- ① 0.40 ② 0.67 ③ 0.81 ④ 1.5 ⑤ 1.7

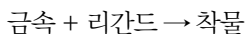
배점 1.5점:

착물 적정에 관한 지식을 물어보는 문제이다.

정답: ②

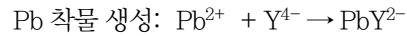
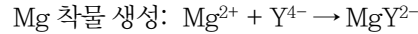
배경지식:

착물화 반응은 금속과 리간드 사이의 배위결합으로 이루어진다. 한자리 리간드 보다는 여러자리 리간드가 금속 이온들과 훨씬 안정된 착물을 이용하므로, 착물화 적정은 금속의 정량에 널리 이용되어 왔다. 특히 EDTA는 6자리 리간드로서 금속과의 결합상수가 매우 크므로, 정량적인 응용에 사용된다.



풀이:

착물화 적정은 금속과 EDTA 리간드(Y⁴⁻) 사이에 일어나는 반응을 주로 이용하는데, 이들의 착물 생성반응은 다음과 같이 나타낼 수 있다.



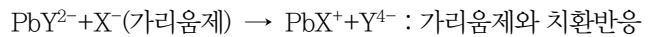
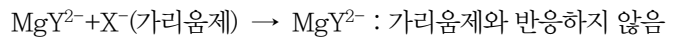
일반적인 조건에서 착물화 적정은 많은 금속 이온들이 EDTA와 결합하여 착물을 생성하지만, 가리움제(masking agent) 같은 시약을 사용하거나 pH 등을 조절하여 EDTA와 선택적인 반응을 시킬 수가 있다.

주어진 설명을 자세히 살펴보자.

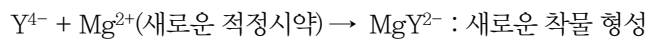
(가)에서는 미지시료 속에 Mg²⁺와 Pb²⁺가 함께 들어 있으므로, 각각 EDTA와 정량적으로 반응하여 착물 MgY²⁻와 PbY²⁻를 생성할 것이다. 따라서 적정의 결과를 가지고 전체 금속 이온의 농도를 구하자.

$$\text{전체 } [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Pb}^{2+}] = 0.01 \text{ M}$$

(나)에서는 (가) 용액에 가리움제를 첨가하면 Pb²⁺는 가리우지만, Mg²⁺는 가리우지 못한다고 하였으므로, 이들의 반응을 다음과 같이 나타낼 수가 있다.



(다)에서는 (나) 용액에서 유리되어 나온 EDTA를 Mg²⁺ 표준용액으로 적정하였는데, 이 반응은 다음과 같이 나타낼 수가 있다. 적정 결과를 이용하여 유리된 EDTA의 농도를 구하면, 이것이 바로 미지용액 중의 [Pb²⁺]가 된다.

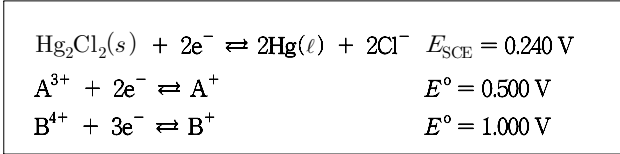
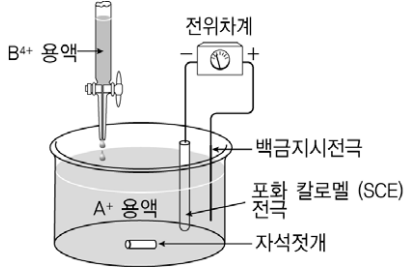


$$[\text{Y}^{4-}] = \frac{0.0020 \text{ M} \times 30.00 \text{ mL}}{10.00 \text{ mL}} = 0.0060 \text{ M} = [\text{Pb}^{2+}]$$

이제는 문제의 질문에 답하자.

$$\therefore \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{[\text{Pb}^{2+}]} = \frac{0.0040 \text{ M}}{0.0060 \text{ M}} = 0.67$$

39. 강한 산성 용액 속에서 0.050 M A³⁺ 용액 100 mL를 0.10 M B⁴⁺ 용액으로 적정하였다. 그림은 전위차를 측정하기 위한 장치이다.



적정이 50%와 100% 진행된 지점에서 측정된 전위(V)가 옳게 연결된 것은? (단, E°는 표준환원전위이다.)

	50% 진행된 지점	100% 진행된 지점
①	0.260	0.510
②	0.260	0.560
③	0.260	0.760
④	0.500	0.760
⑤	0.560	0.760

배점 2.0점:

전위차법 적정에 관한 지식을 물어보는 문제이다. 전극의 전위와 산화환원 개념을 알고 있어야 한다.

정답: ②

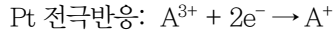
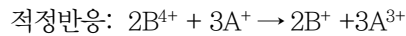
배경지식:

전위차법 적정은 산화환원 적정을 이용하는 것으로서 적정의 종말점을 전위차계로 측정하는 방법을 말한다.

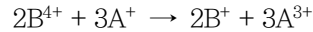
풀이:

우선, A³⁺와 B⁴⁺사이의 산화환원 반응의 적정 반응을 나타내자. B⁴⁺/B⁺ 반쪽반응에는 2를 곱하고, A³⁺/A⁺ 반쪽반응에는 3을

곱하여 두 식에서 전자를 소거하면 다음의 반응이 얻어진다.



50% 적정이 진행된 지점에서, mmol수 변화를 살펴서 전위차계의 전압을 계산하자.



처음mmol	5	
나중mmol	2.5	2.5

A³⁺/A⁺ 반쪽반응의 Nernst 식을 이용하여 전지의 전위차를 계산하자.

$$\begin{aligned} \therefore E = E_+ - E_- &= (0.500 - \frac{0.0592}{2} \log \frac{[\text{A}^+]}{[\text{A}^{3+}]}) - 0.240 \\ &= 0.500 - 0.240 = 0.260 \text{ V} \end{aligned}$$

100% 적정이 진행된 지점인 당량점에서, mmol수 변화를 살펴서 전위차계의 전압을 계산하자.

$$\text{A}^{3+}/\text{A}^+ \text{ 반쪽반응: } E_+ = 0.500 - \frac{0.0592}{2} \log \frac{[\text{A}^+]}{[\text{A}^{3+}]} \quad \text{--- ①}$$

$$\text{B}^{4+}/\text{B}^+ \text{ 반쪽반응: } E_- = 1.000 - \frac{0.0592}{3} \log \frac{[\text{B}^+]}{[\text{B}^{4+}]} \quad \text{--- ②}$$

$$\text{①} \times 2 + \text{②} \times 3 \text{을 계산하면: } 5E_+ = 4 - 0.0592 \log \frac{[\text{A}^+][\text{B}^+]}{[\text{A}^{3+}][\text{B}^{4+}]}$$

당량점에서는 2[A⁺]=3[B⁴⁺] 그리고 2[A³⁺]=3[B⁺]이므로 대입하여 정리하면 다음을 얻는다. 즉, 5E₊=4가 된다.

$$\therefore E = E_+ - E_- = 4/5 - 0.240 = 0.560 \text{ V}$$

