

카르복실 이온교환수지의 암모니아 흡착에 대한 전위차 적정곡선

김 태 일[†] · 손 원 근*

충남대학교 화학공학공학과, *고분자공학과
(1999년 4월 13일 접수, 1999년 9월 14일 채택)

The Potentiometric Titration Curves on Ammonia Absorption of Carboxylic Ion Exchanger

T. I. Kim[†] and W. K. Son*

Department of Chemical Engineering, *Department of Polymer Science & Engineering,
Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea
(Received April 13, 1999; accepted September 14, 1999)

요약: 본 연구에서는 카르복실산 약산성 양이온교환수지인 Fiban K-4를 이용하여 NH_4OH 용액에서의 가수분해 정도와 전위차 적정곡선에 의한 암모니아 흡착 특성을 알아보았다. 여러가지 농도의 지지전해질 (NH_4)₂ SO_4 에서 NH_4OH 의 농도에 따른 pH 값은 실험 값과 이론 값이 잘 일치되었다. 암모니아의 평형 흡착곡선으로부터 pH에 따른 이온교환수지의 NH_3 흡착량을 계산할 수 있었다. 또한 지지전해질의 농도가 낮아지거나 pH가 감소함에 따라 가수분해 정도가 증가하는 것을 알 수 있으며, 전해질의 농도가 감소함에 따라 0.01 M 이하의 모노 이온형태를 갖기 위해서는 pH값을 증가시켜야 하는 것을 알 수 있었다. 그러므로 이들의 결과로부터 전해질의 농도와 pH의 값이 결정된다.

Abstract: In this work, we studied the degree of hydrolysis of ion exchanger in NH_4OH solution and sorption characteristics of NH_3 by potentiometric titration curves with using carboxylic acid ion exchanger Fiban K-4. We knew that the theoretical pH values agreed with the experimental pH values on the NH_4OH concentrations in various concentrations of supporting electrolyte (NH_4)₂ SO_4 . The sorption values of NH_3 using the ion exchanger can be calculated from equivalent sorption curves for various pH. Also, the degree of hydrolysis increased with decreasing concentration of supporting electrolyte and pH. In order to obtain the mono ion form below 0.01 M as the decreasing concentration of supporting electrolyte, the pH values should be increased. From these results, therefore, the concentrations of supporting electrolyte and pH values were determined.

Keywords: ion exchanger, carboxylic ion exchanger, potentiometric titration, equilibrium constant, adsorption ammonia

1. 서 론

새로운 세기의 전개를 눈앞에 두고 있는 지금, 세계 각국은 다가오는 미래가 환경과 에너지의 시대가 될 것임을 공통적으로 인식하고 변화된 상황에서도 지속적인 국가 발전을 도모할 수 있는 그린 정책 및 그린 경영전략 마련에 부심하고 있다. 이를 위해 최근 그린소재의 개발이 절실히 요청되고 있는데, 이를 조금 더 세부적으로 살펴보면 다음의 두 가지 범주로 구분할 수 있다. 첫째, 사용 후 폐기되었을 때 환경의 신진대사 사이클에 따라 분해되어 없어짐으로써 결과적으로 환경오염원으로 작용하지 않도록 고안된 환경친화형 소재, 일명 환경 분해성 소재이다. 두 번째 범주에 드는 것은 환경문제 해결의 현장에서 직접 투입되어 환경오염원을 감소시키고 오염된 환경을 정화하는 기능을 가지는 소재들로서 자동차 혹은 각종 공장 배기가스의 정화와 폐수 및 음료수의 정수작용을 하는 흡착제가 대표적이다. 흡착제는 물리적 흡착제와 화학적 흡착제로 나눌 수 있다. 오래 전부터 사용되고 있는 일반적인 흡착제는 활성탄[1]이나 제올라이트[2] 등과 같은 무기물이 주류이지만 암모니아 가스, 황화수소, 질소산화물 등의 유해가스에 대한 흡착능력이 극히 낮은 뿐만 아니라 이들의 흡착제는 입상이기 때문에 성형 가공면에서 한계가 있다. 따라서 이러한 단점을 보완하고 흡착능

이 우수한 재료를 개발하기 위하여 화학적 방법으로 고분자에 관능기를 도입한 이온교환수지나 chelating resin(CR)를 합성하여 중금속 및 공해물질을 제거하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다[3-6]. 이온교환수지나 CR는 회수 및 반복사용이 용이하고, 화학적으로 안정하며, 고분자 매트릭스에 대한 작용기들을 보호할 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 널리 사용되고 있다.

환경 유해가스는 그 성질에 의해 염기성, 중성, 산성으로 나뉘어진다. 유해가스 성분을 화학결합으로 흡착 제거하기 위해서는 이온교환수지는 유해가스 성질에 따라 각각 다른 것을 사용해야 한다. 즉 염기성가스 성분에 대해서는 양이온교환수지, 산성가스 성분에 대해서는 음이온교환수지가 각각 유효하다[7-9].

염기성 가스성분의 고정 발생원으로는 축산농업, 사료 및 비료제조공장, 식품제조공장, 하수처리, 분뇨처리 등이 있고, 이동 발생원으로는 자동차 등이 있다. 이들 염기성 가스성분은 암모니아와 트리메틸아민이며, 양이온교환수지에 의해서 처리될 수 있다.

이러한 이온교환수지는 전해질의 일종으로 이들의 이온교환용량을 결정하기 위해 전위차 적정(potentiometric titration)법을 가장 많이 사용하고 있다. 그러나 이온교환수지는 일정한 평형상수를 갖지 못하고 전해질의 농도에 따라 변하기 때문에 명확한 변곡점을 나타내지 못하는 것으로 알려져 있다[10-13].

따라서 본 연구에서는 카르복실산 약산성 양이온교환수지인 Fiban K-4를 이용하여 NH_4OH 용액에서의 가수분해 정도와 전위차 적정곡선에 의한 암모니아 흡착 특성을 알아보려고 한다.

[†] 주 저자 (e-mail: tikim@hanbat.chungnam.ac.kr)

Table 1. Acidity Parameter of Carboxylic Ion Exchangers

Ion Exchanger	pK^0	$\Delta p\bar{K}$	b
Fiban K-4	4.85	1.97	0.16

2. 실험

2.1. 재료

본 연구에 사용한 이온교환수지는 백러시아 Ecofil-Deco(주)에서 생산되는 상품명 Fiban K-4로 폴리프로필렌 부직포에 Co^{60} - γ 선을 조사하여 acrylic acid를 그라프트시킨 섬유형태로 이들의 이온교환용량과 팽윤값이 각각 4.90 meq/g, 0.81 H₂O/g인 이온교환수지를 사용하였다. 이들의 산성도 매개변수를 Table 1에 나타내었다[14]. 또한 NaOH, NH₄OH, (NH₄)₂SO₄ 등의 표준용액은 특급시약을 사용하여 제조하였으며, 그 밖의 NaCl, 완충용액 등은 특급 및 일급시약을 그대로 사용하였다.

2.2. 전위차 적정실험

Fiban K-4의 NH₄OH 용액에서의 전위차 적정실험을 하기 위해 0.5 N의 HCl과 NaOH용액으로 3회 반복 흡·탈착을 한 후 H-form으로 만들어 충분히 세척하였다. 그리고 이들의 흡착능을 결정하기 위해 알카리(NH₄OH) 수용액에 넣은 후 20±1 °C에서 평형에 도달하도록 3일 동안 방치하였다. 상등액 10 mL를 취한 후 눈금이 0.02 mL의 마이크로 뷰렛을 사용하여 0.1 N의 HCl 표준용액으로 적정하였으며, 이때 적정오차는 ±0.02 mL 이하였다. 또한 지지전해질이 이온교환 특성에 대한 영향을 알아보기 위해 (NH₄)₂SO₄의 지지전해질의 농도를 1.0과 10⁻² mol/L로 달리한 후 평형에 도달하도록 3주 동안 방치하였다. 그리고 이들 평형용액의 상등액을 분취하여 pH의 변화를 측정하였다.

2.3. 가수분해 정도 계산

Fiban K-4의 이온교환수지를 이용해서 NaCl과 NH₄OH 용액에서의 전위차 적정실험은 위의 방법과 같게 하였고, 가수분해가 가장 많이 일어나는 변곡점 부근에서의 중화도 $\bar{\chi}$ 와 pH 값으로부터 가수분해 정도를 계산하였다. 양이온 교환수지의 가수분해 정도 h는 H-form에서 평형 값과 같다.

$$h = 1 - \bar{\chi} \quad (2.1)$$

가수분해 정도는 이온교환수지에 목적 이온을 흡착시킨 후 다시 이온을 교환 할 수 있는 고정이온(H-form)을 갖는 이온교환수지로 재생할 때 필요하다.

2.4. 모노이온 형태를 얻기 위한 조건

이온교환수지의 이온들에 대한 가수분해 문제를 해결하기 위해서는 모노 이온형태를 얻기 위한 조건을 계산해야 한다. 이온교환에 관련된 실험에 있어서 모노 이온형태를 얻기 위한 조건은 아직까지 명확하게 밝혀지지 않았다. 이온교환수지의 가수분해를 막기 위해 pH가 중성이 될 때까지 충분히 세척하거나 알코올로 세척하게 된다. 이온교환수지의 세척방법이 적당하지 않으면 모노 이온형태를 얻기 위한 조건에 대한 오차가 크게 될 것이고 이온교환수지는 크게 가수분해될 것이다. 이온교환수지의 모노 이온형태는 해리상수가 낮은 이온교환수지들에 대해 특히 중요하다. 왜냐하면 중화도 $\bar{\chi}=1$ 이상인 이온교환수지를 얻는다는 것은 불가능하며, 실제로 $\bar{\chi}=1$ 이하이다. 그러므로 조건적인 몇 가지의 $\bar{\chi}$ 에서 이온교환수지

의 모노 이온형태를 얻을 수 있다고 본다. 이는 이온교환수지에서 양이온의 양을 정확하게 결정하는 것과 연관되어 있으며, 보통 1%를 넘지 못한다. 모노 이온형태가 1% 이하라면 $\bar{\chi}$ 는 0.99보다 크거나 같게 된다. 그러므로 식 (2.1), (2.2), (2.3)과 (2.4)를 이용하여 전해질이나 염기로 처리한 이온교환수지의 세척공정에서 얻어진 용액의 숫자적인 의미인 C와 pH를 계산할 수 있다[15-17].

$$\log \frac{\bar{\chi}^{-1/2}}{(1 - \bar{\chi})} - pH - \frac{1}{z} \log a - \frac{1}{z} \log z + \left(\frac{1}{z} - 1\right) \log (z \bar{C}_M + \bar{C}_H) + p\bar{K}(\bar{\chi}) = 0 \quad (2.2)$$

$$\bar{\chi} = \frac{g - (10^{-pOH} - 10^{-pH})V}{E} \quad (2.3)$$

$$z_M C_M = Z_A C_A + 10^{-pOH} + 10^{-pH} \quad (2.4)$$

$$p\bar{K} = pK^0 + \Delta p\bar{K}(\bar{\chi} - \frac{1}{2}) + b \cdot \log C_A \quad (2.5)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. NH₄OH 용액에서의 전위차 적정곡선

물과 공기의 환경오염 물질로 널리 알려진 암모니아 흡착 특성을 알아보기 위해 여러 농도의 황산암모늄[(NH₄)₂SO₄]를 포함하는 용액에서 Fiban K-4와 암모니아의 관계를 이해하므로써 효과적인 흡착량을 계산할 수 있다. 여기서 암모니아 이온의 흡착량을 계산하기 위하여 무기 단원자 이온들의 교환과 마찬가지로 Na⁺-NH₄⁺를 동일하게 1로서 가정하였다. 또한 pH, NH₄⁺의 농도 및 음이온의 농도와와의 관련되는 식을 첨가해야 하는데 이는 NH₄OH의 해리상수식 (3.1), 전하 평형식 (3.2) 및 질소와 관련된 질량 균형식 (3.3)을 사용하면 된다.

$$\bar{K} = \frac{[NH_4^+][OH]}{[NH_4OH]} \quad (3.1)$$

$$[NH_4^+] + [H^+] = \frac{1}{z} [A^z] + [OH^-] \quad (3.2)$$

$$C_{NH_3} + \frac{1}{z} [A^z] = [NH_4^+] + [NH_4OH] \quad (3.3)$$

여기서 C_{NH_3} 는 (NH₄)₂A 용액 1 L에 녹아있는 암모니아의 몰수로서 handbook에서 찾을 수 있다. 그리고 나머지 조건에서 $\bar{\chi}_{NH_3}$ 의 계산은 (2.2)을 암모니아에 관계된 식으로 바꾸어준 (3.4)식을 이용하여 계산할 수 있다[14].

$$\log \frac{\bar{\chi}_{NH_3}^{-1/2}}{(1 - \bar{\chi}_{NH_3})} - pH - \frac{1}{z} \log a_{NH_4^+} - \frac{1}{z} \log z + \left(\frac{1}{z} - 1\right) \log (z \bar{C}_{NH_4^+} + \bar{C}_H) + p\bar{K}(\bar{\chi}_{NH_3}, C_{NH_4^+}) = 0 \quad (3.4)$$

여기서 z=1임으로 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$\log \frac{\bar{\chi}_{NH_3}^{-1/2}}{(1 - \bar{\chi}_{NH_3})} - pH - \log a_{NH_4^+} + p\bar{K}(\bar{\chi}_{NH_3}, C_{NH_4^+}=1) = 0 \quad (3.5)$$

여기서 $a_{NH_4^+}$ 은 counterion의 활동도이므로 $C_{NH_4^+}$ 으로 대체할 수 있으며 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

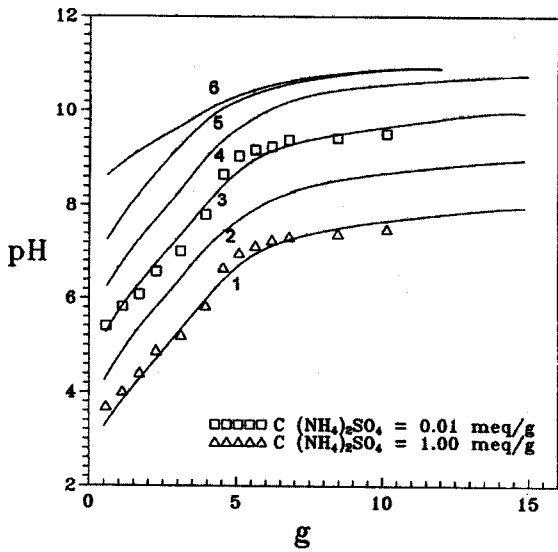


Figure 1. The potentiometric titration curves of ion exchanger Fiban K-4 in various concentrations of supporting electrolyte $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$: (1) 1.0, (2) $1 \cdot 10^{-1}$, (3) $1 \cdot 10^{-2}$, (4) $1 \cdot 10^{-3}$, (5) $1 \cdot 10^{-4}$, (6) $1 \cdot 10^{-5}$ meq/g. The points are experimental data. The lines are theoretical data.

$$\log \frac{\bar{\chi}_{\text{NH}_3}^{1/2}}{(1 - \bar{\chi}_{\text{NH}_3})} - pH - \log C_{\text{NH}_4^+} + p\bar{K}(\bar{\chi}_{\text{NH}_3}, C_{\text{NH}_4^+} = 1) = 0 \quad (3.6)$$

$$\log \frac{\bar{\chi}_{\text{NH}_3}^{1/2}}{(1 - \bar{\chi}_{\text{NH}_3})} - pH + p\bar{K}(\bar{\chi}_{\text{NH}_3}, C_{\text{NH}_4^+} = 1) = 0 \quad (3.7)$$

(3.1), (3.2), (3.3)와 (3.7)의 관계식으로부터 중화도 $\bar{\chi}_{\text{NH}_3}$ 에 따른 pH 값을 구할 수 있다. 또한 계산된 전위차 적정곡선을 그리기 위한 g값은 식 (3.8)을 이용해서 구할 수 있다.

$$g = \frac{1}{z}(E \bar{\chi}_{\text{NH}_3} + V C_{\text{OH}^-} - V C_{\text{H}^+}) \quad (3.8)$$

E는 이온교환능, V는 평형용액의 부피이다. z=1임으로 (3.8)식을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$g = E \bar{\chi}_{\text{NH}_3} + V(10^{pH-14} - 10^{-pH}) \quad (3.9)$$

그러므로 (3.8)식을 이용해서 pH에 따른 g값을 계산하면 된다. Figure 1에서 점들의 값은 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 의 농도가 0.01과 1.0 M에 대한 실험 값을 나타낸 것이고, 선들은 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 의 농도가 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.0$ 에서의 이론적으로 곡선을 나타낸 것이다. Figure 1에서 보는 바와 같이 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 의 농도가 1.0 M일 때조차도 변곡점이 나타나고 있지 않지만 실험 값과 이론 값이 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이는 관계식 (3.4)의 계가 실제적인 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 용액 계에서 Fiban K-4의 이온교환수지 특성에 잘 맞게 설명하고 있다는 것을 증명하는 것이다. 또한 실제 실험하지 않은 다른 농도 0.1, 0.001, 0.0001과 0.00001 M에서의 전위차 적정곡선을 이론적으로 그릴 수 있고, 이는 다음에 언급되는 암모니아의 흡착량 및 최적의 흡착 조건을 얻는데 유용하다.

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 용액 계에서 Fiban K-4의 이온교환수지가 암모니아를 흡착한 후 재생하기 위해 황산수용액을 사용하여 세척한다. 그리고

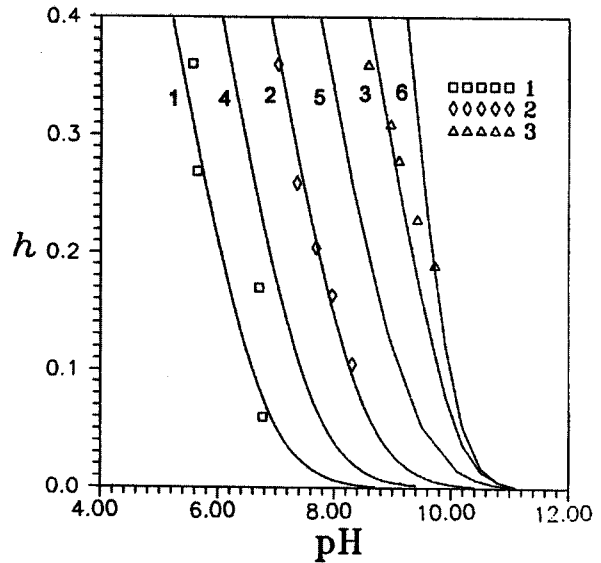


Figure 2. The relation between degree of hydrolysis(h) and pH for ion exchanger Fiban K-4 in various concentrations of supporting electrolyte NaCl: (1) 1.0, (2) $1 \cdot 10^{-1}$, (3) $1 \cdot 10^{-2}$, (4) $1 \cdot 10^{-3}$, (5) $1 \cdot 10^{-4}$, (6) $1 \cdot 10^{-5}$ meq/g. The points are experimental data. The lines are theoretical data.

남아있는 잔류의 황산용액을 제거하기 위해 증류수로 여러 번 세척하여야 한다. 그러므로 Figure 1을 이용하여 암모니아 흡착과 탈착 공정의 기술적인 조건 선택을 위해 필요한 여러 가지의 pH에서 이온교환수지에 의한 암모니아의 흡착 등온선을 계산하여 Figure 2에 나타내었다. Figure 2에서 보는 바와 같이 Fiban K-4 이온교환수지의 흡착량 G(kg NH_3 /kg)은 다음과 같이 계산하였고, 실험 값과 이론적 계산 값이 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

$$G = 0.017 E \cdot \bar{\chi}_{\text{NH}_3} \quad (3.10)$$

여기서 0.017은 NH_3 의 분자량을 Kg 단위로 환산하여 나타낸 값이고, E는 실제 이온교환용량 값이다. (3.10)식은 다양한 pH의 영역에서 암모니아의 흡착에 대한 최적조건을 선택할 수 있게 해준다.

3.2. 가수분해 정도 계산

Figure 3은 여러 가지 농도의 NaCl 지지전해질 용액에서 pH에 따른 Fiban K-4 이온교환수지의 가수분해 정도의 관계를 (2.1)식으로부터 계산하여 나타낸 것이다. Figure 3에서 보는 바와 같이 일정한 pH에서 가수분해 정도는 지지전해질의 농도가 낮을 때 더 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다. Fiban K-4를 pH 9의 알칼리 용액으로 세척할 경우 전해질의 농도가 1.0에서는 가수분해 정도가 0이지만 0.1, 0.01, 0.001 및 0.0001 M은 각각 약 1.0, 3.0, 12.5 및 30%의 가수분해 정도를 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 일정한 전해질의 농도에서 pH가 감소함에 따라 가수분해 정도가 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 카르복실산기에 흡착된 나트륨의 이온이 지지전해질의 농도가 낮아지거나 pH가 감소함에 따라 쉽게 분해되어 나트륨의 모노이온 형태로 되려는 경향이 증가되기 때문에 가수분해 정도가 증가되는 것으로 생각된다. 그러므로 이들은 이온교환수지들의 모노이온 형태를 얻으려고 할 때 반드시 고려되어야 한다.

특히 이와 같은 가수분해 정도는 해리상수가 낮은 약산성 양이온교환수지나 전해질의 농도가 낮은 용액에서 반드시 고려되어야

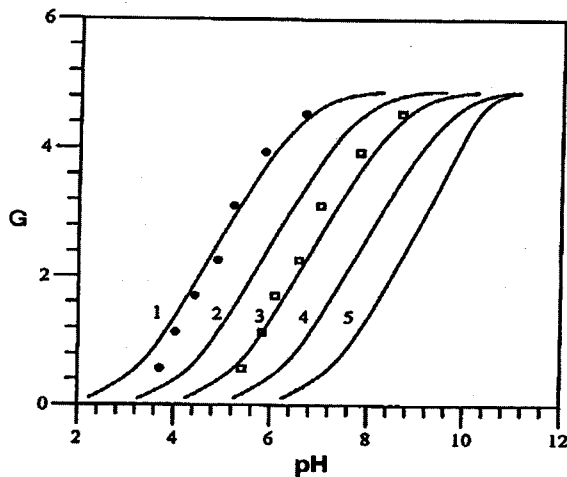


Figure 3. Sorption curves of ammonia by ion exchanger Fiban K-4 in various concentrations of supporting electrolyte $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$: (1) 1.0, (2) $1 \cdot 10^{-1}$, (3) $1 \cdot 10^{-2}$, (4) $1 \cdot 10^{-3}$, (5) $1 \cdot 10^{-4}$ eq/L. The points are experimental data. The lines are theoretical data.

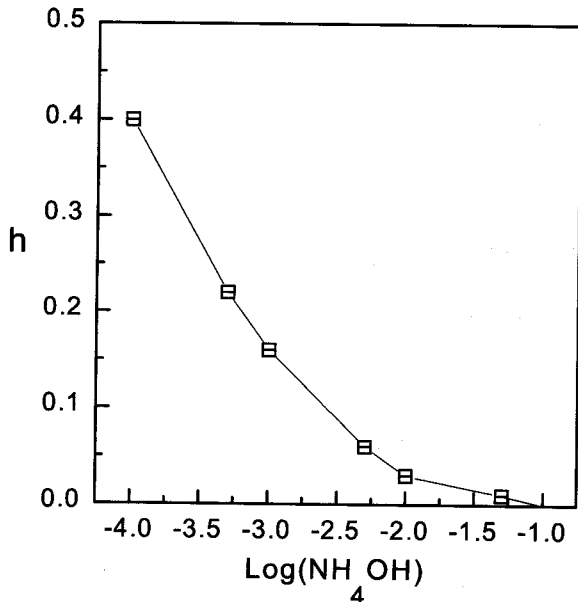


Figure 4. The degree of hydrolysis of ion exchanger Fiban K-4 for various concentration of NH_4OH .

만 한다. Figure 4는 Fiban K-4의 약산성 양이온교환수지의 암모늄형태의 가수분해정도를 NH_4OH 의 농도에 따라 나타낸 것이다. Figure 4에서 보는 바와 같이 NH_4OH 의 농도가 낮을 수록 가수분해 정도가 증가하는 것을 알 수 있다. NH_4OH 의 농도가 0.01 M과 0.001 M일 경우 각각 가수분해정도는 0.027과 0.162로 약 2.7과 16.2% 정도의 가수분해 정도를 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 NH_4OH 의 농도가 낮아짐에 따라 pH가 낮아지기 때문에 가수분해 정도가 높아지는 것으로 생각된다.

3.3. 모노이온 형태를 얻기 위한 조건

양이온교환수지는 이온교환수지가 내놓을 수 있는 모든 H^+ 이온을 중화시키기 위해서 매우 높은 용액의 알칼리로 처리한 다음에 물로 세척하거나 묽은 전해질 용액으로 일정한 pH가 될 때까지

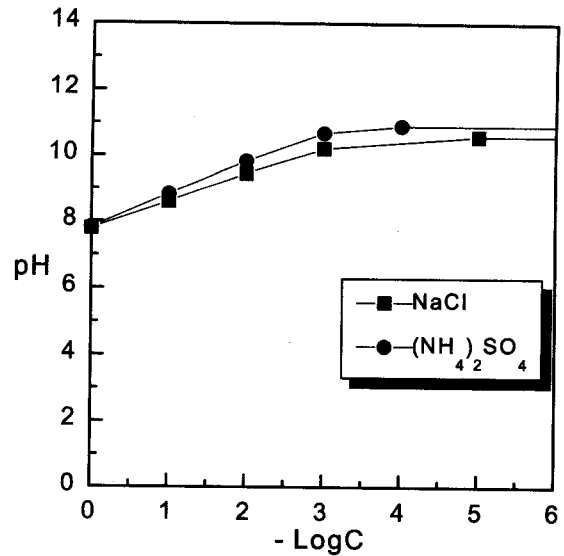


Figure 5. The relations between pH and concentration of supporting electrolytes as degree of hydrolysis of ion exchanger Fiban K-4. Under the lines are mixed form of ion exchanger. Over the lines mean that mono ion Na^+ and NH_4^+ forms are below 0.01 M in ion exchanger.

세척한다. Figure 5는 Fiban K-4에 대한 NaOH-NaCl 과 $\text{NH}_4\text{OH}-(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 의 수용액 계에서 Na^+ 과 NH_4^+ 의 모노 이온형태로 가수분해될 때 가수분해 정도가 0.01 M에 해당하는 전해질 농도와 pH를 계산하여 나타내었다. Figure 5에서 보는 바와 같이 일정한 pH에서 전해질의 농도가 증가하면 할수록 낮은 모노 이온형태로 존재하게 된다. 이는 전해질의 농도가 증가함에 따라 가수분해 정도가 적어지는 것으로 생각할 수 있다. 또한 전해질의 농도가 10^{-4} M까지 감소함에 따라 0.01 M 이하의 모노 이온형태를 갖기 위해서는 pH값을 증가시켜야 하는 것을 알 수 있다. 그러므로 이들의 결과로부터 가수분해의 정도를 낮추기 위해서는 전해질의 농도를 증가시켜 주거나 pH를 높여주어야 한다. 또한 이들의 결과는 Figures 3, 4와 잘 일치하는 것을 알 수 있으며, 모노이온의 형태로 존재할 때 전해질의 농도와 pH의 값을 결정할 수 있게 해주고, 이온교환수지에서 양이온의 양을 정확하게 결정할 수 있도록 해준다.

4. 결 론

본 연구에서는 카르복실산 약산성 양이온교환수지인 Fiban K-4를 이용하여 NH_4OH 용액에서의 가수분해 정도와 전위차 적정곡선에 의한 암모니아 흡착 특성을 알아본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 여러 가지 농도의 지지전해질 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 에서 NH_4OH 에 따른 pH 값이 실험 값과 이론 값이 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 암모니아의 흡착 등온선으로부터 pH에 따른 이온교환수지의 흡착량인 G값을 계산할 수 있었다. 또한 카르복실산 약산성 양이온교환수지인 Fiban K-4는 지지전해질의 농도가 낮아지거나 pH가 감소함에 따라 가수분해 정도가 증가하는 것을 알 수 있었다. 전해질의 농도가 10^{-4} M까지 감소함에 따라 0.01 M 이하의 모노 이온 형태를 갖기 위해서는 pH값을 증가시켜야 하는 것을 알 수 있었으며, 모노 이온의 형태로 존재할 때 전해질의 농도와 pH의 값을 결정할 수 있었다.

사 용 기 호

- a : activity
- b : correction for the apparent constant shift with changing supporting electrolyte
- C : concentration of supporting electrolyte (mol/L)
- g : number of moles of alkali to 1 g of ion exchanger
- E : exchange capacity (meq/g)
- K : equilibrium constant
- \bar{K} : apparent equilibrium constant
- pK^0 : thermodynamic constant of ion exchanger
- $\Delta p\bar{K}$: difference of the apparent equilibrium constant at complete and zeroth neutralization of the ion exchanger
- V : solution volume, mL/g of ion exchanger
- $\bar{\chi}$: equivalent fraction
- z : ion charge

참 고 문 헌

1. K. Kaneko, S. Ozeki, and K. Inouye, *Nippon Kagaku Kaishi*, 1351 (1985).
2. J. M. Goupil, J. F. Hemidy, and D. Cornet, *Zeolites*, 2, 47 (1982).
3. N. Toshima, H. Asanuma, K. Yamaguchi, and H. Hirai, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 62, 563 (1989).
4. G. Tuenter, W. F. van Leeuwen, and J. M. Leo, *Ind. Eng. Chem. Prod. Rev. Dev.*, 25, 633 (1986).
5. S. Yoshkado et al., *Solid State Ionics*, 9/10, 1305 (1983).
6. S. Yoshkado et al., *Solid State Ionics*, 40/41, 142 (1992).
7. T. Hori, K. Saito, S. Frusaki, T. Sugo, and J. Okamoto, *Chem. Soc. Japan*, 12, 1792 (1986).
8. S. Tsuneda, K. Saito, and S. Furusaki, *J. Membrane Sci.*, 58, 221 (1991).
9. J. Okamoto, T. Sugo, A. Katakai, and H. Omichi, *J. Appl. Polym. Sci.*, 30, 2967 (1985).
10. L. Gustafson, H. F. Fillius and R. Kunin, *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 9, 221 (1970).
11. R. Kunin and S. Fisher, *J. Phys. Chem.*, 66, 2275 (1962).
12. V. S. Soldatov, *J. Phys. chem. (USSR)*, 1, 42, 2287 (1968).
13. V. S. Soldatov, *Nauka Tech (Minsk)*, 162 (1972).
14. T. I. Kim, T. S. Hwang, W. K. Son, D. M. Choi, I. S. Oh, and V. S. Soldatov, *Polymer (Korea)*, 23, 5 (1999).
15. V. S. Soldatov, *Dokl. Akad. Nauk (USSR)*, 314, N3, 664 (1990).
16. V. S. Soldatov, *Reactive Polym.*, 19, 105 (1993).
17. V. S. Soldatov, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 34, 2605 (1995).