

설펜산형 비드와 섬유 혼성체를 이용한 도금수세수 중의 니켈 흡착 특성

황택성[†] · 조상연

충남대학교 공과대학 화학공학과
(2002년 9월 26일 접수, 2002년 12월 4일 채택)

Adsorption Properties of Nickel Ion from Plating Rinse Water Using Hybrid Sulfonated Bead and Fibrous Ion Exchanger

Taek-Sung Hwang[†] and Sang-Yean Cho

Department of Chemical Engineering, College of Engineering,
Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

[†]e-mail: tshwang@cuvic.cnu.ac.kr

(Received September 26, 2002; accepted December 4, 2002)

초록 : 본 연구에서는 도금폐수 중 니켈이온의 분리 회수를 위한 혼성 이온교환체의 제조 및 흡착 특성을 확인하였다. 니켈 흡착량은 이온교환체의 혼합비에 큰 영향이 없었으며, 비드상 이온교환수지 양이 증가할수록 증가하였다. 또한 Langmuir와 Freundlich 흡착 등온식이 직선성을 보였으며 이로부터 니켈의 이온교환 친화력이 큰 것을 확인하였다. 또한 충전방식에 따른 압력손실은 다단충전법에서 적층수가 많아질수록 작아졌고, 혼합충전법에서는 비드 이온교환수지의 양이 증가할수록 압력손실은 감소하였다. 한편, 연속식 흡착실험 결과 다단충전방식의 경우 적층수가 증가할수록 초기 파괴 시간은 짧아졌으며, 최종 파괴 시간은 거의 동일한 것으로 나타났다. 반면, 혼합충전방식의 경우 이온교환섬유의 양이 증가할수록 흡착파괴 시간이 짧았으며, 이때 최대 흡착량은 각각 2.51 meq/g과 2.69 meq/g이었다. 한편, 모든 이온교환체의 흡착된 니켈이온의 탈착은 10분 이내에 98% 이상 탈착되었다.

ABSTRACT : In this study, we have investigated the preparation of mixed bead and fiber type hybrid ion-exchanger for recovering nickel ion from plating rinse water. There was little dependence of adsorption capacity for nickel ion on the mixing ratio of resin type and fiber type of ion exchangers. However, it increased with increasing the resin content in the mixed bed. It was shown that the data Langmuir and Freundlich's adsorption isotherm model were well fitted to the linear. Affinity between the functional groups in the ion exchanger and nickel ion in the process was confirmed. The pressure drop decreased with increasing the number of stage in the multistage bed, but it increased with increasing the resin content in the mixing bed. The initial breakthrough time in the multistage bed was short due to the increase of number of stage in the continuous process. It was found that the final breakthrough time of the multistage bed was little changed. The breakthrough time decreased with increasing the amount of fibrous ion exchanger in the mixed bed. The maximum adsorption capacities of the mixed and multistage beds were 2.51 meq/g and 2.69 meq/g, respectively. The desorption time for the nickel ion with 1N H₂SO₄ solution was lower than 10 minutes and the yield of desorption was greater than 98 percent.

Keywords : hybrid ion-exchanger, nickel recovery, adsorption equilibrium, rinse water, pressure drop.

1. 서론

니켈전기도금은 철강 및 구리합금 등에 직접 도금을 하여 방식, 장식 및 최종 도금에 앞선 하지도금 등의 목적으로 널리 사용되고 있다.¹ 하나의 니켈전기도금 제품을 생산하기 위해서는 한 번 또는 두 번의 수세공정을 거치게 되는데, 수세액에는 약 1800~2000 ppm의 니켈이온이 존재하게 된다. 니켈과 같은 중금속 폐수의 처리는 폐수처리공정 설치 및 운전의 어려움과 고가의 운전비로 인하여 소규모의 폐수배출 공정에 적용하기는 어렵기 때문에 처리공정을 거치지 않고 방출하고 있는 실정이며, 중금속 함유 폐수의 방류는 자원의 낭비라는 경제적인 측면과 수계오염이라는 환경적인 측면에서 볼 때 심각한 문제라고 볼 수 있다. 니켈은 환경 위험도와 자원고갈 속도를 고려한 회수 우선도에서 구리, 코발트와 같은 중간의 회수 우선도를 가지며, 니켈전기도금 수세수에는 수세액 중의 니켈이온 분리 회수기술 개발은 고가 유용금속자원의 회수, 공업용수의 재활용 및 환경오염 방지라는 차원에서 매우 중요하다 할 수 있다.^{2,4}

최근, 이들 중금속 이온을 제거를 위해 연구되고 있는 방법들은 활성 탄소, zeolite와 같은 무기물 흡착제를 이용한 흡착법,^{5,6} 유화성 액막을 사용하는 방법,⁷ 고체막을 이용한 저압 여과법,⁸ 생물 흡착제를 이용한 생물학적 처리법,⁹ 이온교환수지 및 이온교환섬유를¹⁰⁻¹² 사용한 이온교환법 등 다양한 방법들이 연구되고 있다.

그 중 이온교환법은 잘 알려진 기술이며 물의 연성화와 초순수 제조 및 중금속제거에 이용되고 있다. 이온교환법은 주로 고체 이온교환체가 영구적인 구조변화 없이 액체 상의 이온들과 가역적으로 교환되어 흡·탈착이 가능하다. 고체 이온교환체는 수지와 섬유형태가 있는데, 수지를 이용한 이온교환법은 이온교환 용량이 크고, 금속 이온에 대한 선택성이 크며, 흡착능이 일정하게 유지된다는 장점이 있으나 압력손실이 크고, 용매에 대한 팽윤과 수축율이 매우 커서 수명이 짧으며, 칼럼내 확산이동저항이 매우 크다는 단점을 가지고 있다.¹³ 반면, 섬유상 이온교환체는 제조가 간단하며 흡착속도가 빠르고, 여러 공정에 적용할 수 있도록 형상제조가 간편하나 섬유 특성상 충전 밀도가 낮다는 단점을 지니고 있다.¹⁴

따라서, 본 연구에서는 니켈도금 수세액 중의 니켈이온을 분리·회수하기 위하여 비드상 및 섬유상 이온교환체의 단점을 보완하고 처리 속도 및 흡착 용량을 극대화하기 위하여 비드와 섬유상 수지를 일정 비율로 혼합한 이온교환 복합체를 제조하여 이들의 충전비에 따

른 니켈흡착 특성 실험을 하고, 이를 토대로 최적 흡착 조건을 규명하였다.

2. 실험

시약. 본 연구에서 사용한 이온교환체는 (주)삼양사의 DIAION PK228 이온교환수지비드와 (주)시온텍의 양이온교환섬유(K-1)를 사용하였다. 또한, 모의 니켈도금 폐수는 Aldrich Chemical사의 nickel (II) sulfate ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 특급시약을 사용하여, 전처리 과정을 거친 도금 폐수의 농도와 같은 1800 ppm, pH 3.3~4.5로 제조하여 사용하였다. 또한, pH 표준용액, HCl, NaOH, H_2SO_4 등의 용매는 Wako Pure Chemical사의 특급시약을 사용하였다.

이온교환체의 전처리.³ 이온교환체를 Na^+ 형으로 전환하기 위해 1 M NaOH로 수직칼럼 내에서 처리한 뒤 유출수의 pH가 10이하로 될 때까지 탈이온수를 사용하여 세척하였다. 불순물 제거 및 Na^+ 형으로 전환된 이온교환체를 다시 H^+ 형으로 전환하기 위해 1 M H_2SO_4 를 흘려준 뒤 유출수의 pH가 4 이상으로 될 때까지 탈이온수를 사용하여 여러 번 세척한 후 데시케이터 안에서 안정화시켜 H^+ 형으로 전환하여 사용하였다 (Table 1).

실험 장치. 본 연구에서는 이온교환수지와 섬유를 사용하여 혼성 이온교환체를 제조함에 있어 혼합비 및 충전 형태에 따른 니켈이온의 흡·탈착 특성 및 압력손실 측정이 가능하도록 Figure 1과 같은 장치를 제작

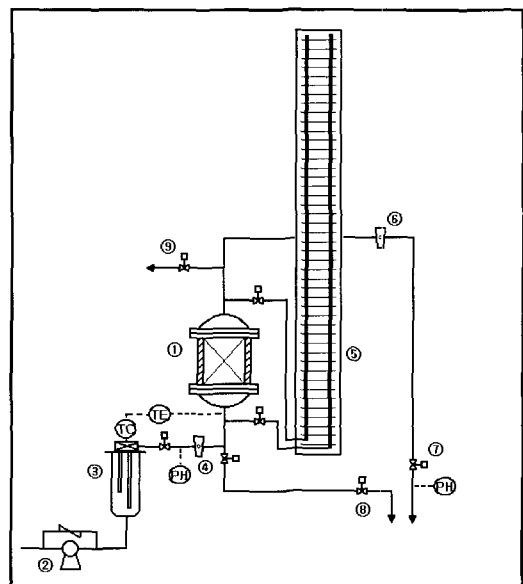


Figure 1. Schematic diagram of continuous packed column : ① Column, ② Pump, ③ Immersion Heater, ④ pH meter, ⑤ Manometer, ⑥ Flowmeter, ⑦ Solenoid Valve, ⑧ Drain Valve, ⑨ Sample Port.

Table 1. Characteristics of Ion-Exchange Resin and Fiber

IEC parameters	resin (PK228)	fiber (K-1)
matrix	PS-DVB	PP-ST-DVB
functional group	-SO ₃ ⁻	-SO ₃ ⁻
capacity	2.05 meq/mL	2.5~4.0 meq/g
water uptake	37~43%	50~200%
diameter	1190~297 μm	30~55 μm

하였다. 장치에는 기존의 흡·탈착 실험장치에 고정층 부피와 유속 등의 다른 변수를 배제하기 위하여 지름 50 mm, 높이 50 mm 규격의 고정부피를 갖는 아크릴 칼럼을 부착하였으며 칼럼의 상·하부에 혼성 이온교환체의 압력손실(ΔP) 측정이 가능하도록 마노미터를 부착하였고, 유속을 조절할 수 있는 유량계와 펌프를 부착하였다.

이온교환 평형실험.^{15,16} 비드와 섬유 혼성 이온교환체의 니켈이온 흡착량 측정을 위한 회분식 이온교환 평형 실험 및 혼합비에 따른 니켈도금폐수의 평형농도와 수지에 흡착된 니켈이온 양 사이의 관계로부터 이온교환 현상의 친화도를 알아보기 위한 실험을 하였다. 혼성 이온교환체의 니켈이온 흡착량 측정은 250 mL의 삼각 플라스크에 이온교환체 1 g과 모의 니켈도금폐수 100 mL를 넣은 후에 25 °C에서 24시간 교반하여 흡착·평형시키고 정치시킨 후 분취한 시료를 ICP-AES 분석한 후 다음의 (1) 식을 이용하여 이온교환능을 측정하였다.

$$Q_{Ni} = \frac{(C_0 - C_E) \times V}{m \times 1000} \quad (1)$$

여기서 Q_{Ni} 는 흡착된 니켈이온의 양이고 (mg/g), C_0 와 C_E 는 초기 및 평형에서 니켈이온의 농도이며 (mg/L), V 는 니켈 수용액의 부피 (mL), m 은 사용된 이온교환체의 양 (g)이다.

이온친화도 측정.^{15,16} 혼합비에 따른 이온교환 현상의 친화도는 Langmuir 흡착 등온식과 Freundlich 흡착 등온식을 이용하여 구하였다. 모의 니켈용액 100 mL에 이온교환체를 각각 1, 2, 3 g씩 넣은 후 이온교환 평형 실험과 동일한 방법으로 측정하였다. 이때 사용한 Langmuir 흡착 등온식 (2)에서 K_L 과 b 는 이온교환용량과 흡착에너지에 관계된 Langmuir 상수이고, q_e 는 이온교환체에 흡착된 니켈이온의 양 (mg/g), C_e (mg/L)는 평형농도이다.

$$(1/q_e) = (1/K_L b) \times 1/C_e + (1/K_L) \quad (2)$$

한편, Freundlich 흡착 등온식 (3)에서 K 와 $1/n$ 은 Freundlich 상수이다.

$$\ln q_e = \ln k + (1/n) \ln C_e \quad (3)$$

본 연구에서는 (2)와 (3)식을 이용하여, 이온교환체의 금속 이온흡착 세기와 공정 효율의 수학적 접근 방식으로 예측하였다.

압력강하 실험. 비드와 섬유 혼성 이온교환체를 충전한 칼럼에서 유속의 변화는 흡착능에 많은 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서도 충전칼럼에 대한 압력변화를 측정하였는데 압력 손실의 측정은 니켈이온의 흡착 실험에 앞서 칼럼 상·하부에 연결된 마노미터를 이용하여 유속에 따른 수두압의 차이를 측정하여 (4)식을 이용하여 측정하였다. (4)식에서 ρ 는 사용된 유체의 밀도이고, g 는 중력 가속도, h_1 과 h_2 는 각각 칼럼 상부와 하부에 연결된 마노미터에서 측정된 유체의 높이이다. 이때 칼럼에는 수지층과 섬유층을 일정 두께로 번갈아 충전한 다단베드와 두 수지의 혼합비를 달리하여 충전한 혼성베드를 사용하여 탈이온수를 하부에서 상부로 이동시켜 압력강하를 측정하였다.

$$\Delta P = \rho_1 g h_1 - \rho_2 g h_2 = \rho g (h_1 - h_2) \quad (4)$$

흡·탈착 성능 실험.^{17,18} 비드 및 섬유상 이온교환체의 혼합비 및 충전 형태에 따른 니켈이온의 흡·탈착 성능을 알아보기 위하여 연속식 흡·탈착 실험을 하였다. 이때 일정 농도의 니켈 모의용액을 칼럼에 통과시킨 후 일정시간 간격으로 30 mL씩 분취하여 ICP-AES 분석을 통해 이온교환체의 니켈이온 흡착량을 구하였으며 흡착된 이온교환체의 칼럼에 1 N H₂SO₄ 용액을 통과시켜 탈착시킨 후 흡착과 동일한 방법으로 사용하여 ICP-AES 분석을 통해 탈착량을 측정하였다.

3. 결과 및 토론

이온교환 평형실험. 회분식 이온교환 평형실험을 통하여 각 이온교환체의 조건에 따른 니켈 흡착량을 측정하였는데, 그 결과가 Table 2에 나타나 있다. Table 2는 비드와 섬유 이온교환체의 분쇄 전후의 흡착성능 변화를 관찰한 것으로 Table 2에서 보는 바와 같이 분쇄한 비드 이온교환수지와 절단한 섬유의 니켈 흡착량의 변화는 비드의 경우 분쇄전 이온교환체보다 500 mesh

Table 2. Adsorption Conditions for Ni²⁺ by Hybrid Ion-Exchanger

exp. no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
materials	DIAION (PK228)	crushed DIAION	fiber (K-1)	chopped fiber	DIAION : fiber				
					7 : 3	6 : 4	5 : 5	4 : 6	3 : 7
nickel uptake (meq/g)	2.99	3.95	2.61	2.75	2.89	2.82	2.76	2.70	2.66

이하로 분쇄한 수지의 니켈 흡착량이 약 32% 증가하였고, 섬유유 경우의 절단 전후의 니켈 흡착량에는 거의 변화가 없었다. 비드 이온교환체의 경우, 입도의 차이에 따른 흡착량의 변화는 분쇄한 수지의 비표면적이 증가되어 니켈이온과의 접촉시간이 증가되기 때문이며 섬유유 경우 흡착량에 차이가 없는 것은, 섬유유의 이온교환체 내의 비표면적의 변화가 그다지 크게 변하지 않기 때문으로 사료되었다. 그러나 섬유유를 잘게 절단하면 동일 부피의 칼럼에 분쇄전보다 충전밀도를 높일 수 있어 흡착량은 증가될 것으로 사료된다.

한편, 혼성 이온교환체의 비드와 섬유 혼합비에 따른 니켈이온의 흡착량은 혼성 이온교환체중 섬유 이온교환체의 양이 증가할수록 니켈 흡착량은 감소하였다. 이렇게 니켈이온의 흡착량이 감소하는 이유는 섬유유의 부피가 크고 충전밀도가 낮아져 흡착속도는 빨라질 수 있으나 비드에 비해 흡착량이 낮기 때문으로 사료되었다. 그러나 섬유 이온교환체와 혼합하여 사용함으로써 비드 이온교환체의 느린 처리속도를 개선할 수 있어 오히려 단일 수지를 사용한 경우보다 혼성 이온교환체의 흡착량이 증가하는 것으로 사료되었다.

등온흡착 실험. 이온교환체의 등온흡착곡선에 의하여 흡착이온과 이온교환 관능기 간의 이온친화력 예측이 가능하다. 따라서, 본 연구에서도 흡착이온의 이온친화력을 확인하기 위하여 이온교환체에 흡착된 니켈의 양과 모의 도금폐수의 평형농도 사이의 관계를 Langmuir와 Freundlich 흡착 등온식으로 나타내었다. Figure 2와 Figure 3은 Langmuir 흡착 등온식에 의한 농도변화와 니켈흡착 평형관계를 plot한 결과로 Figure 2와 Figure 3에서 보는 바와 같이 분쇄 전후 이온교환수지의 이온교환성능은 분쇄전 비드 이온교환수지가 가장 크게 나타났고, 이들을 혼합한 복합 이온교환체의 경우 수지의 양이 많을수록 이온교환성능이 우수한 것으로 나타났다. 한편, Figure 4와 Figure 5의 Freundlich 흡착 등온식에 의한 이온교환성능도 Langmuir 흡착 등온식에 의한 그래프에서와 동일한 결과를 얻을 수 있었으며, 이온교환체와 니켈이온과의 이온친화력을 알아보기 위하여 두 식의

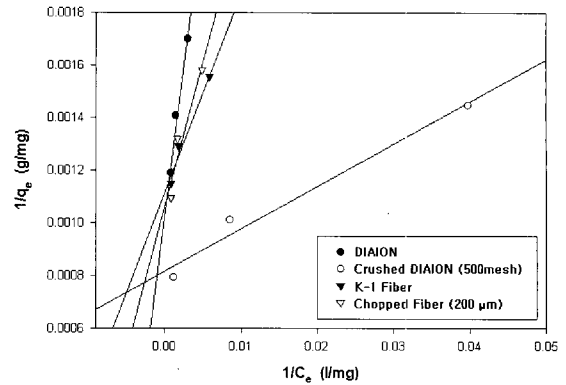


Figure 2. Relation between equilibrium Ni²⁺ concentration and its uptake by Langmuir isotherm model.

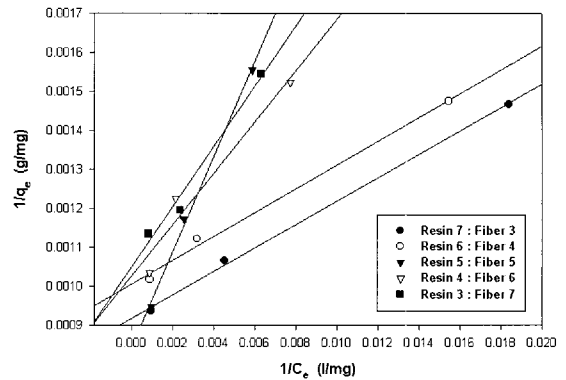


Figure 3. Relation between equilibrium Ni²⁺ concentration and its uptake by Langmuir isotherm model.

상수 값은 최소 자승법을 적용하여 계산한 결과 Table 3에서 보는 바와 같이 이온교환체에 대하여 두 식의 기울기가 양의 값으로 나타나는 것으로 보아 니켈이온과 이온교환체 사이의 이온교환 현상은 매우 잘 일어나는 것을 확인할 수 있었다.

충전비에 따른 압력강하. 칼럼충전 연속 흡착에서 압력강하는 이온교환체의 흡착능에 많은 영향을 준다. 따라서, 본 연구에서도 이러한 영향을 관찰하기 위하여 충전밀도의 변화에 따른 압력강하를 측정하였는데 그 결과가 Figures 6~8에 나타나 있다. Figure 6은 혼성 이온교환 베드에서 유속변화에 따른 비드 및 이온교환 섬유유의 압력강하의 영향을 알아보기 위해 유속과 압력강하의 관계를 plot한 결과이다. Figure 6에서 보는 바와 같이 칼럼 유속이 증가함에 따라 섬유유의 경우 동일 충전밀도(0.8)에서 비드보다 압력강하가 크게 나타났으며, 비드의 경우 압력강하는 유속변화에 따라 약간 증가하였으나 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 또한, 섬

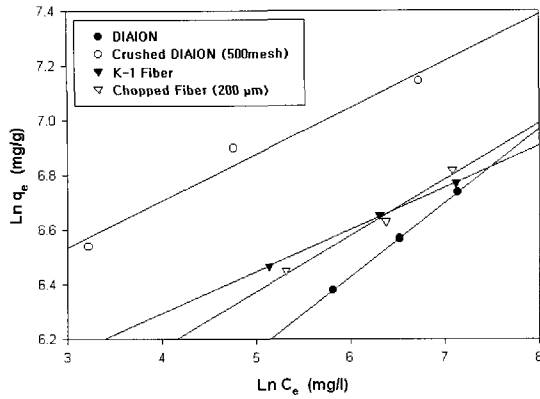


Figure 4. Relation between equilibrium Ni²⁺ concentration and its uptake by Freundlich isotherm model.

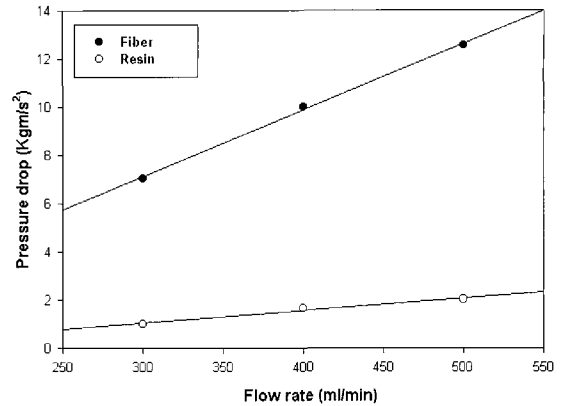


Figure 6. Plot of flow rate and pressure drop in the packed column. (packing ratio : 0.8).

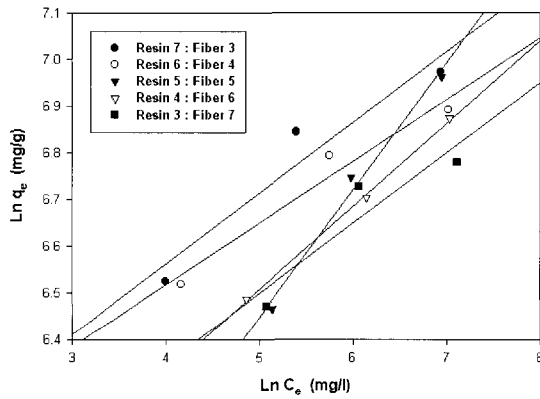


Figure 5. Relation between equilibrium Ni²⁺ concentration and its uptake by Freundlich isotherm model.

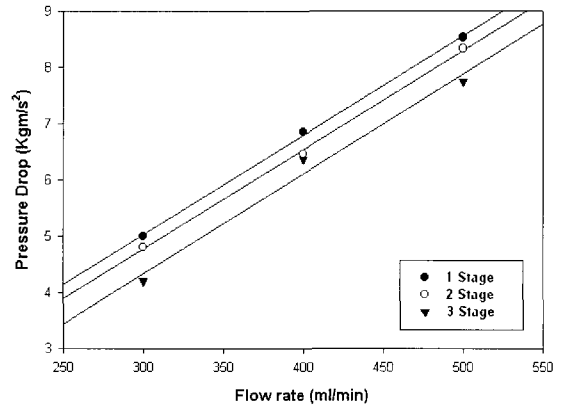


Figure 7. Plot of flow rate and pressure drop for multi -stage hybrid ion-exchange bed.

유의 경우도 충전밀도가 0.5 이하일 경우 오히려 비드보다 낮은 압력강하를 보였으며 이론부터 본 연구에서 혼성베드 제조시 섬유 충전밀도를 0.5 이하로 유지하는 것이 압력강하가 없는 이상 혼성베드가 될 것으로 사료되었다.

한편, Figure 7과 Figure 8은 충전방식 및 비드와 섬유 혼합비가 압력강하에 미치는 영향을 알아보기 위해 유속과 압력강하의 관계를 plot한 결과이다. Figure 7은 비드와 섬유 이온교환체를 일정 두께로 적층하여 충전한 후 압력손실을 측정된 결과로 Figure 7에서 보는 바와

같이 압력손실은 적층수가 많을수록 낮아졌으며 유속의 증가에 따라 압력손실 또한 적층수가 증가할수록 감소하였다. 비드 수지 만의 충전칼럼에 비해 압력강하는 약 1/5로 감소하였고 이는 비드형 수지 이온교환체 단독 충전칼럼의 압력강하와 비슷한 경향을 보였다.

한편 Figure 8에서 보는 바와 같이 유속이 증가함에 따라 비드와 섬유를 혼합한 칼럼의 압력손실은 섬유의 양이 증가할수록 압력손실이 증가하는 경향을 보였는데 이는 섬유 이온교환체가 비드형 이온교환체내에 고루 분포되어 공극의 부피가 작아지기 때문으로 사료

Table 3. Constants of Langmuir and Freundlich Adsorption Isotherm Equations

exp. no. parameters		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Langmuir adsorption isotherm	K_L	1000.0	125.00	909.09	909.09	1111.1	1000.0	1250.0	1000.0	1000.0
	b	0.0044	0.4969	0.0146	0.0100	0.0299	0.0328	0.0065	0.0152	0.0129
Freundlich adsorption isotherm	k	122.37	414.01	293.57	210.08	386.26	398.38	161.61	276.11	313.72
	n	3.7023	5.8824	6.5317	4.8709	6.6050	7.5586	3.6711	5.6338	6.6622

되었다. 또한, 다단충전과 혼합충전방식의 압력강하를 비교하여 보면 압력손실면에서는 큰 차이는 없으나 니켈이온과 이온교환체의 접촉면적을 고려할 때 적층법보다도 비드와 섬유 이온교환체를 혼합한 혼합충전법의 흡착능이 우수한 것으로 확인되었다.

Ni²⁺ 흡·탈착 시험. 동일한 베드부피 및 유속, 농도에서 비드 수지·섬유 이온교환체 및 혼성 이온교환체의 혼합비에 따른 니켈이온의 흡착실험을 하였는데 그 결과가 Figures 9~11에 나타나 있다. Figure 9는 흡착시간에 따른 비드와 섬유 이온교환체의 흡착평형 실험을 한 결과로 Figure 9에서 보는 바와 같이 섬유 이온교환체의 경우 약 30분에서 파괴되는 반면 비드 이온교환체는 약 120분에서 파괴가 일어났는데 이는 비드 이온교환체가 평운상태에서 니켈이온의 내부확산현상에 의한 이온교환이 이루어져 흡착평형시간이 길어지는 것으로 사료되었다.

한편, Figure 10은 일정량의 비드와 섬유 이온교환체

를 1~3단 적층하여 칼럼충전시킨 후 Figure 9와 동일한 조건에서 니켈이온의 흡착실험을 한 결과를 나타내었다. Figure 10에서 보는 바와 같이 흡착파괴는 충전단수가 클수록 빠르게 진행되면 흡착평형은 약 70분으로 적층단수에 관계 없이 거의 비슷한 경향을 보였으며 이때 최대 흡착용량은 2.51 meq/g으로 섬유 이온교환체 단독 흡착실험 결과보다 높게 나타났다.

또한, Figure 11은 비드와 섬유 이온교환체의 양을 달리하여 균일하게 혼합하여 충전한 후 흡착실험을 행한 결과로 Figure 11에서 보는 바와 같이 섬유 이온교환체의 양이 증가할수록 흡착파괴가 빠르게 진행되었으며 흡착파괴 시간은 비드와 섬유의 혼합비가 1:1인 경우 적층베드의 흡착용량과 거의 비슷한 결과를 나타내었다. 그러나 비드 함량이 1.5배인 경우 흡착용량은 2.69 meq/g으로 적층 혼성베드나 단독으로 충전한 충전베드보다 크게 나타났으며 파괴시간도 길어지는 것으로 보아 비드와 섬유의 혼합비가 1.5:1이 최적인 것으로 판

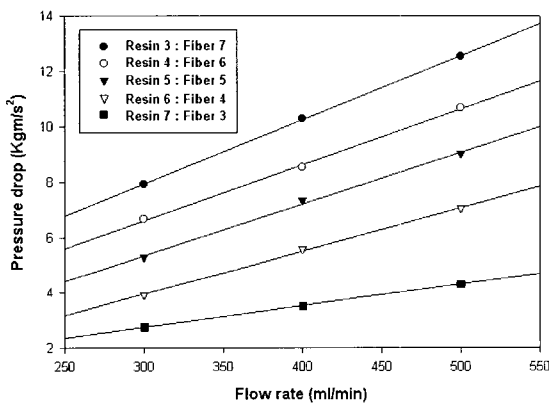


Figure 8. Plot of flow rate and pressure drop for different mixing ratio of the ion-exchange resin and fiber.

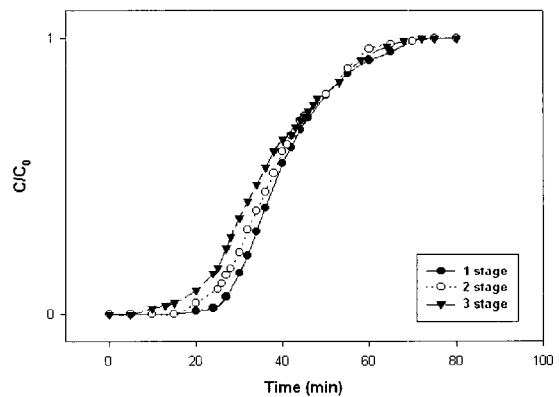


Figure 10. Normalized breakthrough curve for multi-stage Hybrid ion-exchange resin and fiber.

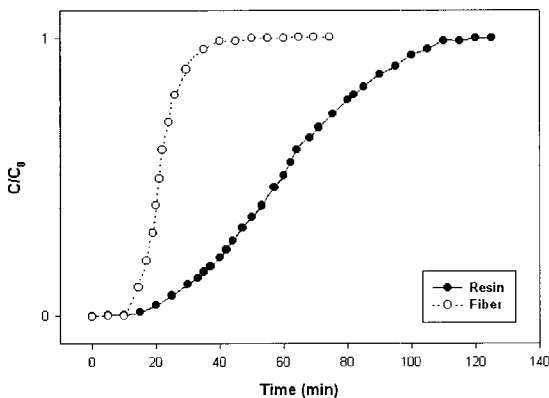


Figure 9. Normalized breakthrough curve for the ion-exchange resin and fiber.

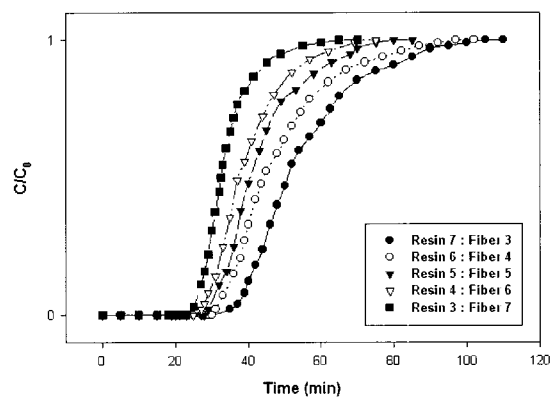


Figure 11. Normalized breakthrough curve for various mixing ratios of ion-exchange resin and fiber.

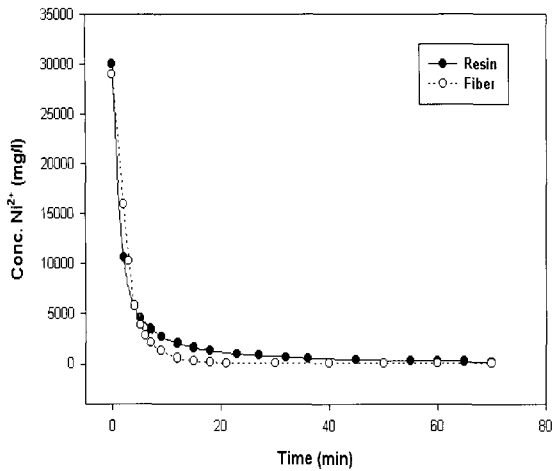


Figure 12. Desorption curve for the ion-exchange resin and fiber.

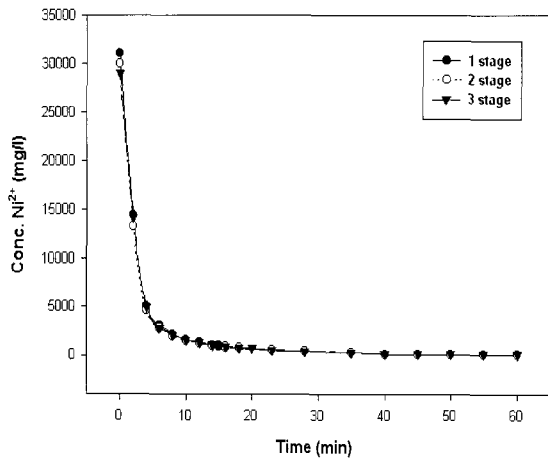


Figure 13. Desorption curve for the multi-stage hybrid ion-exchange bed.

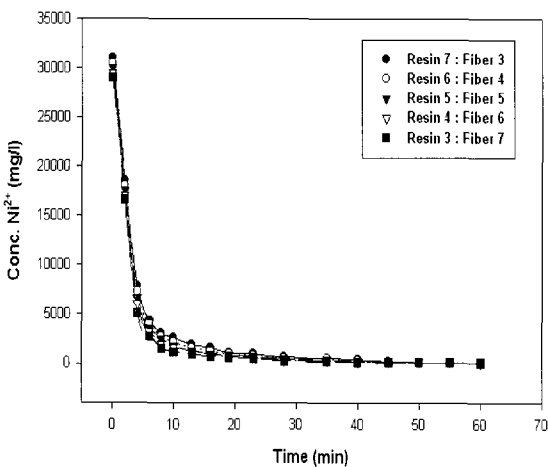


Figure 14. Desorption curve for various mixing ratios of ion-exchange resin and fiber.

단되었다.

한편, Figures 12~14는 흡착 후 1N H₂SO₄를 이용하여 탈착실험을 한 결과로 Figures 12~14에서 보는 바와 같이 충전방법 및 충전비에 관계없이 모두 10분 이내에 98% 이상 탈착되는 것으로 나타났다.

4. 결론

설피산형 비드와 이온교환섬유를 혼합한 혼성 이온교환체를 이용한 니켈이온의 흡착실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 이온교환섬유와 비드형태의 수지를 분쇄한 후 혼합 제조한 복합 이온교환체의 니켈이온 흡착에 미치는 분쇄효과는 비드의 경우 증가하였으나 섬유는 큰 영향이 없었다.

2. 흡착등온실험 결과 흡착이온농도와 흡착 평형이온농도의 기울기는 양의 값을 나타내었으며 니켈이온의 친화력이 큰 것으로 예측되었다.

3. 흡착 압력손실 측정은 다단충전법에서 반복층의 수가 많아질수록 작아졌으며, 유속의 증가에 따른 압력손실은 층의 수에 상관없이 동일한 비율로 증가하였다. 또한, 혼합충전법에서의 압력손실은 섬유의 양이 많을수록 압력손실 및 유속에 따른 압력손실 증가의 폭이 적은 것으로 나타났다.

4. 다단충전법은 반복단수가 증가할수록 초기 파괴시간이 빨라졌으며, 최대 흡착용량은 평균 2.51 meq/g이었다. 또한, 균일 혼성베드의 경우 이온교환섬유의 양이 증가할수록 빠른 파괴를 보였으며, 최대 흡착용량은 2.69~2.41 meq/g으로 다단 충전베드보다 크게 나타났다. 또한, 니켈이온의 탈착은 10분 이내에 98% 이상 탈착되었다.

감사의 글: 본 연구는 2000년 산업 폐기물 재활용 기술 개발 사업 연구 기금으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. H. T. Yeom and J. S. Lee, *Plating and Surface Treatment*, Moon-un-dang, Seoul, Vol 1, p162 (2000).
2. G. Orhan, C. Arslan, H. Bombach, and M. Stelter, *Hydrometallurgy*, **64**, 1 (2002).
3. R. Koivua, J. Lehto, L. Pajo, and T. Gale, *Hydrometallurgy*, **56**, 93 (2002).
4. A. G. Chmielewski, T. S. Urbaski, and W. Migdal, *Hydrometallurgy*, **45**, 333 (1997).

5. M. V. Mier, R. L. Callejas, R. Gehr, B. E. J. Cisneros, and P. J. J. Alvarez, *Wat. Res.*, **35**, 373 (2001).
6. Y. M. Gao, A. K. Sengupta, and D. Simpson, *Wat. Res.*, **29**, 2195 (1995).
7. T. Kakoi, N. Horinouchi, M. Goto, and F. Nakashio, *J. Membr. Sci.*, **118**, 63 (1996).
8. F. S. Wong, J. J. Qin, M. N. Wai, A. L. Lim, and M. Adiga, *Separation and Purification Technology*, **29**, 41 (2002).
9. Q. Yu, J. T. Matheickal, P. Yin, and P. Kaewsarn, *Wat. Res.*, **33**, 1534 (1999).
10. J. L. Cortina, R. A. Yellin, N. Miralles, A. M. Sastre, and A. Warshawsky, *React.Funct. Polym.*, **38**, 269 (1998).
11. J. A. S. Tenrio and D. C. R. Espinosa, *Waste Management*, **21**, 637 (2001).
12. V. S. Soldatov, A. A. Shunkevich, I. S. Elinson, J. Johann, and H. Iraushek, *Desalination*, **124**, 181 (1999).
13. J. G. Kim, and M. Kim, *Prospectives of Industrial Chemistry*, **4**, 53 (2001).
14. S. Lacour, J. C. Bollinger, B. Serpud, P. Chantron, and R. Arcos, *Anal. Chim. Acta*, **428**, 121 (2000).
15. K. Kesenci, R. Say, and A. Denizli, *Eur. Polym. J.*, **38**, 1444 (2002).
16. N. Z. Misak, *React. Funct. Polym.*, **43**, 154 (2000).
17. N. L. Ricker, E. F. Pittman, and C. J. King, *J. Sep. Pro. Tech.*, **1**, 23 (1980).
18. R. S. Juang and T. C. Chou, *Sep. Sci. Tech.*, **31**, 1409 (1996).