

Web Spray 법을 이용한 복합 양이온교환섬유의 제조 및 암모니아 흡착특성

박승욱 · 이추근* · 이영우 · 정부영** · 황택성†

충남대학교 바이오응용화학부, *한국 신발피혁연구소
(2007년 6월 19일 접수, 2007년 7월 25일 채택)

Preparation of Hybrid Cation Ion Exchange Fibers by Web Spray and Their Adsorption Properties for Ammonia Gas

Seong-Wook Park, Hoo-Kun Lee*, Young-Woo Rhee, Boo-Young Jung**, and Taek Sung Hwang†

Department of Chemical & Biological Engineering, College of Engineering,
Chungnam National University, 220 Gung Dong, Yuseong-Gu, Daejeon 305-764, Korea

*Kael Co. Ltd., Sinil-dong, Daedeok-gu, Daejeon 306-230, Korea

**Korea Institute of Footwear & Learther Technology,

Danggam-dong, Busanjin-gu, Busan 786-50, Korea

(Received June 19, 2007; Accepted July 25, 2007)

초록 : 본 연구는 점착제 분사방식으로 고성능 hybrid ion exchange fiber(HIEF)를 제조하고 이들의 암모니아 흡착성능 및 기본물성을 측정하였다. HIEF의 이온교환용량은 수지 부착량이 증가함에 따라 증가하였으며 단일 수지와 이온교환섬유의 이온교환용량보다 크게 나타났다. 또한 암모니아의 제거율은 HIEF의 충전밀도가 증가할수록 증가하였으며 흡착 통과시간은 270분으로 섬유나 수지에 비해 길게 나타났고 최대 암모니아 흡착량은 94%이었다. 또한 암모니아 흡착 통과시간은 유량 및 농도가 증가함에 따라 빠르게 진행되었다. 암모니아 반응속도 상수(k)는 유입되는 가스농도의 증가에 따라 증가하였으며, 질량이 증가할수록 감소하였으며 가스 유속이 증가할수록 반응속도 상수(k)가 증가하였다.

Abstract : In this study, the hybrid ion exchange fibers (HIEF) were prepared by using web spraying method with hot melt adhesive. Characteristics of HIEF and their adsorption properties for ammonia gas were investigated. The ion exchange capacity (IEC) of HIEF was increased with increasing the resin contents and their values were higher than those of pure resin and ion exchange fabrics. The removal efficiency for ammonia gas increased with an increase in packing density of hybrid ion exchange fabrics in the column. The adsorption breakthrough time was 270 min, which was slower than those of the resin and fibers. The maximum value of adsorption for ammonia gas was 94%. The breakthrough time was also increased with increasing the concentration and flow rate of ammonia gas. The reaction constant (k) for ammonia gas was increased with increasing the concentration and flow rate of the gas, while it was decreased as the mass was increased.

Keywords : hybrid ion exchange fabrics, web spray, ammonia gas, adsorption.

서 론

최근 반도체산업의 발전과 더불어 고품질의 제품생산을 위한 클린룸설비가 필수적이다. 이러한 클린룸은 외부 공기를 물리화학적 방법으로 정화하여 폐쇄공간에 주입시켜 실내 공기를 정화시키는 설비로 외부의 미세입자 등과 같은 불순한 입자를 여과하는 prefilter와 ULPA, HEPA 필터를 이용한 물리적 여과 설비와 이온교환방식에 의한 외부 화학가스를 제거하는 화학필터로 구성되어 있다. 이들 중 화학필터용 소재로는 주로 이온교환섬유를 일정한 형태로

성형하여 규격화한 제품을 사용하고 있는데 이들 성능은 우수하나 섬유형태로 부피가 크고 값이 비싼 단점이 있어 최근 들어 이온교환수지를 화학적으로 안정한 섬유에 고정시켜 사용하고 있다. 그러나 이들은 비드형태로 충전밀도는 높으나 유로에서 공기의 저항이 크고 일정량 이상의 성능발휘를 위해 사용한 비드양의 증가로 무게 위 사용에 많은 문제점이 있다.

또한 256 MRAM 이상의 반도체 생산에 필수적인 클린룸의 경우 공정 중에 발생하는 암모니아와 같은 극히 저농도의 미량 유해 가스를 제거하기 위해서는 기존 사용하는 소재의 성능을 현저히 개선할 필요성이 있다.^{1,2} 지금까지 이 부분에 대한 연구결과를 살펴보면 Egawa 등은 전자선 조사에 의해 이온교환섬유를 합성하고 이

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: tshwang@cnu.ac.kr

들의 흡착성능을 평가하였으며, Okamoto 등도 방사선 조사방법으로 PP 섬유를 기재로 여기에 styrene을 그래프트시키고 설펜산기를 도입하여 양이온교환섬유를 합성하였고 이들의 금속이온에 대한 흡착성능을 통하여 선택흡착성이 우수하다고 보고하였다. 한편 Soldatov 등은 방사선 조사방법과 가수분해법을 이용하여 polyacryl 고분자 기재에 styrene, acrylic acid 등을 그래프트시키고 관능화하여 양, 음이온교환섬유를 합성하였고 이들의 암모니아와 같은 기체와 중금속에 대한 선택흡착성을 시험하였고 가스 스크러버에 적용시켜 상업화하였다고 보고한 바 있다.

또한, 최근 들어 Nho, Hwang 등은 core와 shell의 구조가 서로 다른 폴리올레핀 섬유를 기재로 방사선, 전자선 및 UV 조사를 이용하여 다양한 관능기 구조의 이온교환섬유를 합성하였으며 이들의 유해가스에 대한 흡착성능을 시험한 바 있다.³⁻⁶

그러나 지금까지의 연구결과는 주로 이온교환섬유에 국한한 연구로 이를 반도체 클린룸에 적용하기 위해서는 상기에서 언급한 바와 같이 섬유의 단점을 극복해야 할 필요성이 있다. 따라서 본 연구에서는 이온교환섬유의 장점과 수지의 장점을 살려 성능이 우수한 새로운 클린룸용 화학필터 소재를 제조하기 위하여 작업공정이 간편하고 공정 부생가스 발생으로 인한 2차 오염이 없는 핫멜트를 이용한 web spray법을 이용하여 수지와 이온교환섬유가 이상적으로 결합된 HIEF를 제조하고 이들의 이온교환용량, 부착강도, 모폴로지 등 기본성질을 확인하였고 유속, 가스농도 등을 변수로 암모니아 가스에 대한 흡착특성을 고찰하였다.

실 험

재료 및 시약. 본 연구에 사용된 이온교환섬유는 (주)시온텍에서 공급받은 Table 1과 같은 물성을 지닌 강산성 이온교환섬유(K-1)와 약산성 이온교환섬유(AK-22)를 사용하였다. 한편, 이온교환수지는 (주)삼양사 제품의 양이온교환수지(SRC-BH)를 사용하였으며 이들의 기본물성은 Table 1에 표시하였다. 또한 핫멜트 점착제는 박솔(주)의 Table 2와 같은 물성을 지닌 styrene계(SIS)와 polyolefin(APAO)계 점착제를 사용하였다. 암모니아 가스는 (주)대한

Table 1. Basic Properties of Fibrous and Resin Ion Exchangers

Type	Functional group	Matrix	Ion exchange capacity (meq/g)	pH Working range
Resin (SCR-BH)	-SO ₃ H ⁺	St-g-DVB	1.9	0-14
Fiber (K-1)	-SO ₃ H ⁺	PP-g-St	3.0	0-14
Fiber (AK-22)	-NH ₂ ⁻ -COOH	PAN fiber	1.5 2.5	1-12

Table 2. Physical Properties of Hot Melt Adhesive

Type	Melt viscosity at 180 °C (cps)	Softening point (°C)	Color
SIS ^a	350~500	79~84	Light yellow
APAO ^b	2400~3500	118~123	White

^aSIS : Styrene-isoprene-styrene. ^bAPAO : Amorphouse α -polyolefin.

Table 3. Preparation Conditions of Hybrid Ion Exchange Fabrics

Adhesive	Linear velocity (cm/s)	Temperature (°C)	Layer No	Pressure (psi)	Resin
SIS	3.2~49.9	160, 170, 180	1~4	20~60	SCR-BH AMP-160
APAO	3.2~49.9	160, 170, 180	1~4	20~60	SCR-BH AMP-160

표준가스에서 생산된 순도 99.9%의 표준가스를 구입하여 농도기준에 따라 고순도 질소로 일정비율 희석하여 사용하였다.

실험방법.

HIEF의 제조 : 자체 제작한 spray 장치를 이용하여 핫멜트 web spray 분사방법으로 이온교환수지와 섬유가 결합된 HIEF를 제조하기 위하여 설펜형(K-1)과 카복실(AK-22) 이온교환섬유를 40×400 cm 크기로 절단하고 증류수로 세척, 건조한 후 건조된 시료의 무게를 측정하였다. 이들을 web spray 장치에 고정하고 일정량의 SIS, APAO 핫멜트를 분사후 여기에 각기 다른 양의 수지를 부착시켜 HIEF를 제조하였다. 본 실험의 구체적인 실험 조건을 Table 3에 나타내었다.

HIEF의 물성 : 점착제의 함량에 따라 제조한 이온교환섬유의 수지 부착강도를 측정하기 위하여 직경 50 mm의 아크릴 칼럼에 섬유를 고정하고 일정 유속에서 시간에 따른 무게 변화를 측정하여 수지의 섬유 부착강도를 측정하였다. 한편 HIEF의 수지 부착에 따른 압력강하를 직경 50 mm의 아크릴 칼럼에 고정하고 유속을 0.7~1.7 m/s로 변화시켜 압력 변화로 HIEF내 수지 부착강도를 측정하였다.

SEM 관찰 : HIEF의 수지 점착 상태 및 기공 변화를 관찰하기 위하여 JEOL사의 Model JSM-840A 전자현미경을 이용하여 시편을 홀더에 붙인 뒤 ion sputter 내에서 ion current 5 mA로 gold coating한 후 100~250배의 배율로 관찰하였다.

이온교환용량 : HIEF의 이온교환용량을 측정하기 위하여 1 N HCl과 NaOH 수용액으로 세척하고, 이를 다시 세척수의 pH가 중성이 될 때까지 증류수를 이용하여 세척한 후, 60 °C의 진공 오븐에서 건조하였다. 건조된 화학필터 소재를 정량하여 250 mL 삼각플라스크에 넣은 후 0.1 N NaOH 수용액 100 mL를 가하고 24시간 교반하여 평형에 도달하도록 하였다. 교반 후 상등액 20 mL를 분취하여 0.1 N HCl 용액으로 적정한 후, 식 (1)을 이용하여 이온교환용량을 측정하였다. 또한 각각의 이온교환용량은 5회 측정하여 그 결과값의 평균치를 구하였다.

$$IEC(\text{meq/g}) = \frac{(V_{\text{NaOH}} \times N_{\text{NaOH}}) - 5 \times (V_{\text{HCl}} \times N_{\text{HCl}})}{\text{Weight of sample}} \quad (1)$$

여기서 IEC는 이온교환용량을 나타내며 V_{HCl} 와 V_{NaOH} 은 HCl과 NaOH의 전체 부피이며, N_{HCl} 과 N_{NaOH} 은 노르말 농도이다.

흡착가스 분석 : HIEF의 암모니아 흡착 성능을 시험하기 위하여 Figure 1과 같은 Sierra Instruments사의 모델 600 series를 flow sensor 및 Thermo Electron Co. Ltd., Genesis 및 Interscan co. Ltd.,의 Gas analyzer 4000 series를 이용하여 Table 4와 같은

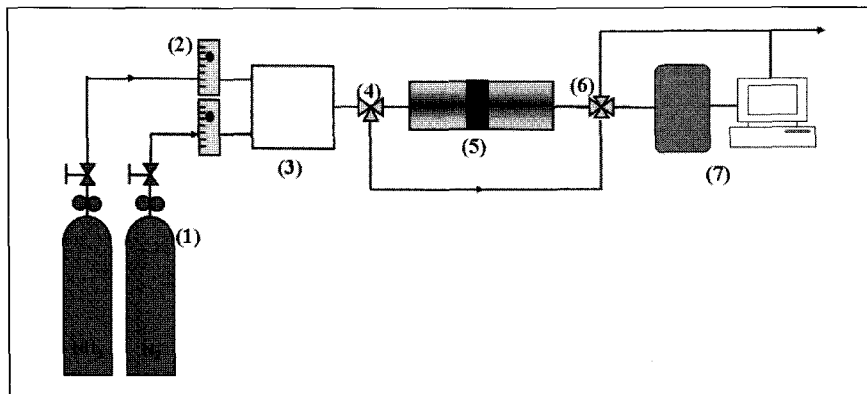


Figure 1. Schematic diagram of gas analyzer system. (1) gas, (2) mass flow controller, (3) gas mixing chamber, (4) 3-way valve, (5) adsorption column, (6) 3-way valve, and (7) Analyzer.

Table 4. Adsorption Conditions of Ammonia Gas by Hybrid Ion Exchange Fabrics

Resin(g)	NF(g)	HNF(g)	C ₀ (ppm)	Flow rate(L/min)
0	5	5	20	5, 10, 20, 30
			50	5, 10, 20, 30
			100	5, 10, 20, 30
			200	5, 10, 20, 30
10	10	10	20	5, 10, 20, 30
			50	5, 10, 20, 30
			100	5, 10, 20, 30
			200	5, 10, 20, 30
20	15	35	20	5, 10, 20, 30
			50	5, 10, 20, 30
			100	5, 10, 20, 30
			200	5, 10, 20, 30
30	20	50	20	5, 10, 20, 30
			50	5, 10, 20, 30
			100	5, 10, 20, 30
			200	5, 10, 20, 30
40	25	65	20	5, 10, 20, 30
			50	5, 10, 20, 30
			100	5, 10, 20, 30
			200	5, 10, 20, 30

* NF : Non woven Fabric, HNF : Hybrid Non woven fabric.

조건하에서 암모니아 흡착실험을 행하였다.

흡착반응 속도 : HIEF의 암모니아 흡착반응에서의 반응 속도론적 해석은 Thomas에 의한 속도론적 접근법, 혹은 Fornwalt와 Hutchins에 의한 확대접근법이 적용될 수 있다. 본 실험에서는 Thomas의 속도론적 접근법을 사용하였으며, 흡착 컬럼의 식은 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 계산하였다.

$$C/C_0 \cong \frac{1}{1 + e^{\frac{k_1}{Q}(q_0 M - C_0 V)}} \quad (2)$$

$$\ln(C_0/C - 1) = \frac{k_1 q_0 M}{Q} - \frac{k_1 C_0 V}{Q} \quad (3)$$

여기서 C/C₀는 outlet gas와 inlet 암모니아 가스의 농도비이고, k₁,

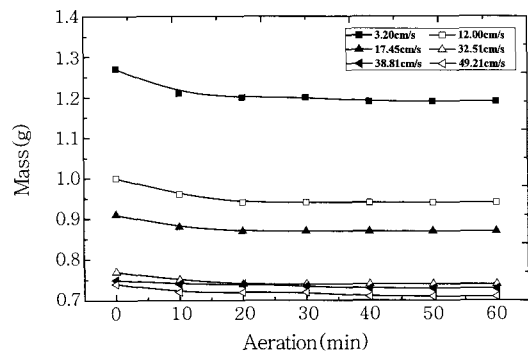


Figure 2. Plots of changing mass and aeration time (pressure : 50 psi, adhesive : APAO).

q_0 , M 은 각각 반응속도상수, 화학필터 소재의 최대 이온교환용량 (mg/g), 화학필터소재의 양(g)이며, V 와 Q 는 용액의 부피(mL) 및 유량(L/hr)이다. 또한 C_0 는 암모니아 가스의 초기 농도(g/L)이다.⁷⁻⁹

결과 및 토론

HIEF의 물성. 제조된 화학필터 소재의 부착강도를 측정된 결과를 Figure 2에 나타내었다. Figure 2는 압력 50 psi에서 시간을 변수로 소재의 무게변화를 나타낸 것으로 Figure 2에서 보는 바와 같이 이온교환섬유의 무게는 10분까지 0.05 g 감소하였고 그 이후에서는 무게 변화가 없었다. 이로부터 본 연구에서 제조한 HIEF의 기계적 물성은 우수한 것으로 판단되었다.

모폴로지 관찰. HIEF내에 섬유기체와 수지간의 계면 결합 형태를 관찰하기 위하여 전자현미경 사진을 관찰하였는데 그 결과가 Figure 3에 나타나 있다. Figure 3은 섬유와 수지의 결합을 위해 도포한 점착제의 분포와 이로 인한 표면의 형태를 관찰한 SEM사진으로 Figure 3(a)는 이온교환섬유의 SEM 사진이며 Figure 3(b)~(d)는 단층의 (b) 표면, (c) 단면, (d) 경계면을, (e)~(f)는 이중층의 (e) 표면, (f) 경계면을 관찰한 SEM 사진이다. 이온교환섬유에 핫멜트 점착제를 분사하고 거기에 이온교환수지가 부착된 형태의 SEM 사진으로 Figure 3(c)~(f)에서 보는 바와 같이 이온교환섬유 표면에 점착제가 거미줄 형태로 분산되어 있고 여기에 수지가 부착되어 있

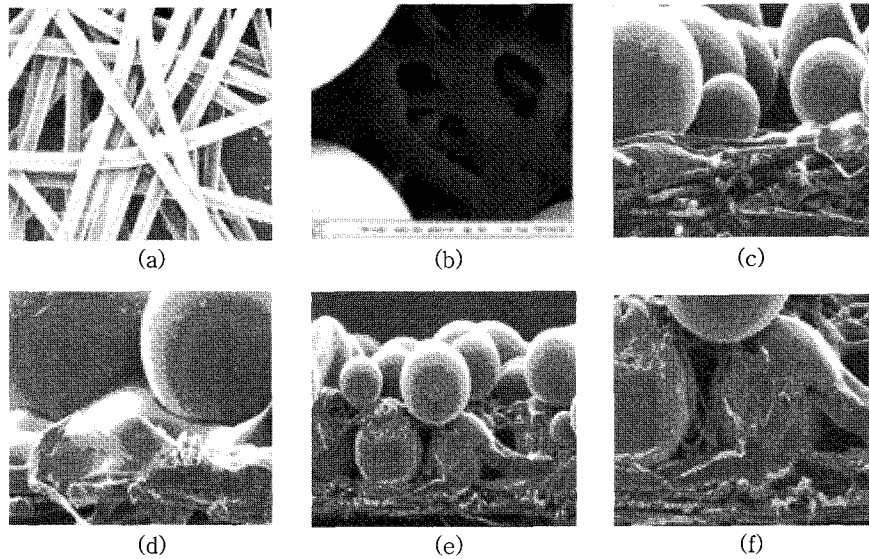


Figure 3. SEM photographs of hybrid ion exchange fabrics. (a) IEF (X250), (b) single layer (X250), (c) single layer (X100), (d) single layer (X250), (e) double layers (X100), and (f) double layers (X250).

Table 5. Ion Exchange Capacities for Resin, Fiber, and Hybrid Ion Exchange Fabrics

Items	Resin(g)	Fabric(g)	IEC(meq/g)
PR	10	-	2.20
PF	-	5.0	2.40
R-1	10	5.0	2.31
R-2	20	5.0	2.27
R-3	30	5.0	2.25
R-4	40	5.0	2.23

* PR : pure resin, PF : pure fiber, R-1 : 1 layer, R-2 : 2 layers, R-3 : 3 layers, R-4 : 4 layers.

는 형태로 접착제에 의한 수지 표면에 필름이 형성되지 않아 접착제에 의한 수지의 기능저하가 없는 것으로 판단되었다. 또한 수지를 2층 이상으로 적층하였을 경우에도 Figure 3(e)와 (f)에서 보는 바와 같이 접착제에 의한 수지의 표면에 완전히 코팅되어 있지 않아 수지와 섬유 이온교환체 본래의 기능저하가 없다는 것을 확인할 수 있었다.

이온교환용량 측정. 수지 및 섬유와 이들을 조합한 HIEF의 이온교환용량을 측정하였는데 그 결과가 Table 5에 나타나 있다. Table 5에서 보는 바와 같이 HIEF의 이온교환용량은 수지 부착량이 증가함에 따라 증가하였으며 단일 수지와 이온교환섬유의 이온교환용량과 거의 비슷한 경향을 보였다. 이는 이온교환섬유에 수지를 결합시키기 위한 접착제가 섬유와 수지의 일부분을 감싸고 있어 이온교환용량이 작게 나타나는 것으로 사료되었다.

암모니아 흡착. HIEF의 염기성 가스에 대한 흡착성능을 확인하기 위하여 흡착가스의 농도, 유속 및 흡착소재의 양에 따른 흡착실험을 한 결과가 Figures 4~7에 나타나 있다.

Figure 4는 상온에서 100 ppm NH₃를 5 L/min으로 고정하고 이온교환섬유에 수지의 적층량을 달리하여 제조한 HIEF의 암모니아에 대한 흡착실험을 행한 결과로 암모니아 가스에 대한 흡착률은 수지

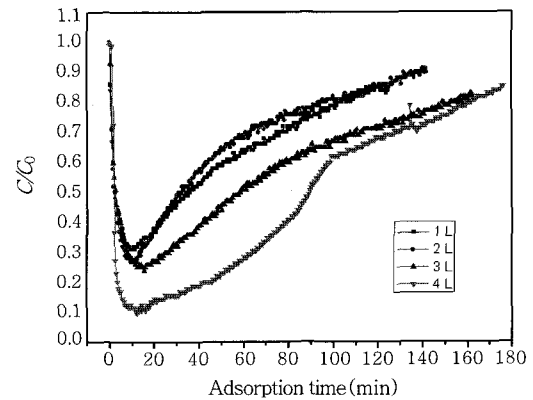


Figure 4. Adsorption breakthrough curves of hybrid cation ion exchange fabrics for 100 ppm NH₃ gas in 5 L/min. Layer of ion exchange resin (1L : 1.25 g, 2L : 1.9 g, 3L : 2.5 g, 4L : 3.4 g).

의 적층량이 증가함에 따라 증가하였으며 R-4 소재의 경우 최대 94%의 흡착률을 보였으며 이들의 흡착률은 동일 조건하에서 수지나 섬유에 비해 높게 나타났다. 이들 소재에 대한 흡착과파 시간 또한 적층량이 증가할수록 증가하였으며 이들 결과는 앞에서 설명한 이온교환용량과 잘 일치하는 경향을 보였다.

한편, Figure 5는 R-4 흡착소재의 칼럼 충전량을 달리하여 일정한 농도와 유속에서 흡착실험을 행한 결과로 흡착소재의 충전량이 증가할수록 흡착 과파시간은 증가하였으며 소재를 10장 충전한 실험 결과 흡착 과파시간이 270분으로 매우 느려지는 것을 확인할 수 있었다. 이렇게 흡착시간이 길어지는 원인은 흡착제 양의 증가로 인하여 암모니아의 소재 내부 확산에 의한 접촉시간이 증가하기 때문이며 이로 인한 흡착효율도 증가하여 흡착과파 시점에서 최대 98%의 흡착률을 보였다.

Figure 6은 100 ppm의 NH₃의 유량 변화에 따른 흡착 과파시간을 알아본 결과로 암모니아 흡착 과파시간은 유량이 증가함에 따라

동일조건 하에서 빠르게 진행되었으며 유량 30 L/min에서 흡착과파는 약 40분에서 이루어 졌으며 5 L/min로 낮은 유량에서 흡착 과파 시간은 200분으로 길게 나타났다. 이렇게 유량이 낮을 때 흡착 과파 시간이 길어지는 이유는 암모니아의 농도가 낮아 동일 유속에서 복합소재 내부까지 내부 확산이 용이해져 흡착과파 시간이 길어지는 것으로 사료되었다.

한편, Figure 7은 암모니아의 농도를 달리하여 흡착실험을 한 결과로 암모니아의 농도가 증가함에 따라 흡착 과파시간은 짧아졌으며

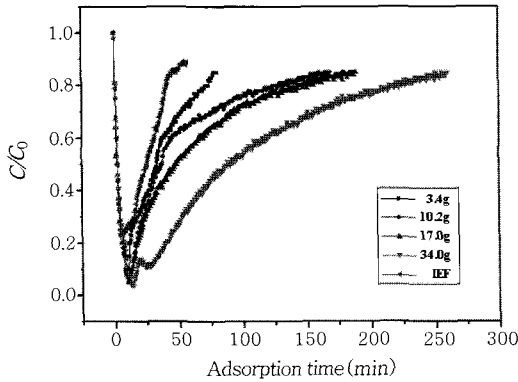


Figure 5. Adsorption breakthrough curves of hybrid ion exchange fabrics for 100 ppm NH₃ gas in 5 L/min. Mass of HIEF (3.4, 10.2, 17.0, 34.0 g).

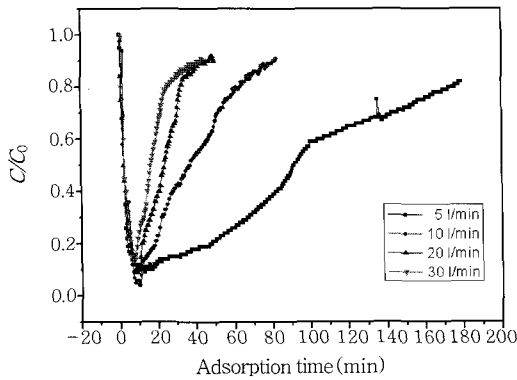


Figure 6. Effects of gas flow rate and adsorption time on the removal efficiency (100 ppm NH₃ gas, 3 plies : 10.2 g).

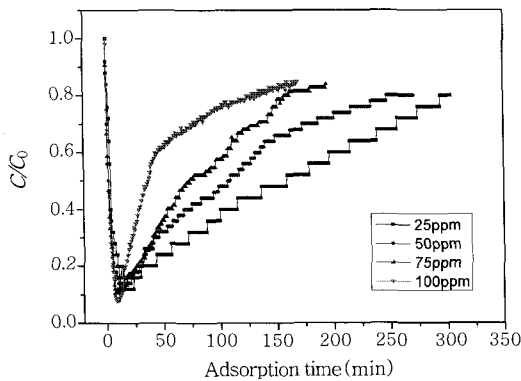


Figure 7. Effects of gas concentration and adsorption time on the removal efficiency (flow rate : 20 L/min, 3 plies : 10.2 g).

흡착효율은 95%로 높게 나타났다. 반면, 암모니아의 농도가 낮을 경우 흡착 과파시간은 길어졌으나 흡착률은 낮아 암모니아의 농도가 25 ppm일 경우 과파시간은 300분이었으며 흡착률은 80%로 낮은 경향을 보였다. 따라서 본 연구결과 흡착소재의 암모니아에 대한 흡착효율과 과파시간을 증가시키기 위해서는 농도를 50 ppm 이상으로 유지하는 것이 바람직하다고 사료된다.¹⁰⁻¹⁴

흡착반응 속도. 연속식 흡착 컬럼에서의 흡착반응 속도를 규명하기 위하여 Thomas에 의한 속도론적 방법을 이용하여 각각의 조건에서의 k 값을 알아보았다. 식 (3)은 V 항을 변수로 하였을 때 k_1 을 기울기로 하고 $k_1 q_0 M/Q$ 를 절편으로 하는 선형의 그래프가 그려지기 때문에 이를 이용하여 반응속도 상수 k_1 을 구할 수 있었다. Figures 8, 9는 가스의 초기농도, 화학필터 소재의 양, 가스의 유량에 대하여 $\ln(C_0/C-1)$ 을 V 에 대해 도기한 결과이다. Figures 8, 9에서 보는 바와 같이 V 에 따른 $\ln(C_0/C-1)$ 값은 선형에 가깝게 나타났고, 이들 직선의 기울기와 절편으로서 반응속도 상수 k_1 을 얻을 수 있었다. Figure 9에서 농도가 증가할수록 선형에서 벗어나는 현상을 볼 수 있는데 이는 Thomas method가 농도가 증가할수록 일치하지 않는 결과를 보임을 확인할 수 있었다. Figure 10에서 보는 바와 같이 유입 가스 농도가 증가함에 따라 반응속도 상수 k_1 는 증가하는 경향을 나타내었으며, 적층한 수지의 양이 증가할수록 반응속도 상수 k_1 는 감소하였다.¹⁵⁻¹⁷ 또한 Figure 11에서 보는 바와 같이 유입가스 농도가 증가함에 따라 반응속도 상수는 증가하였으며, 가스 유량이 증가

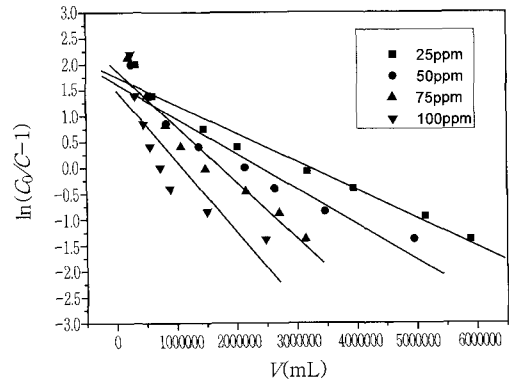


Figure 8. Kinetic approach results with inlet gas concentration in NH₃ gas by Thomas method (flow rate=20 L/min, 3 plies : 10.2 g).

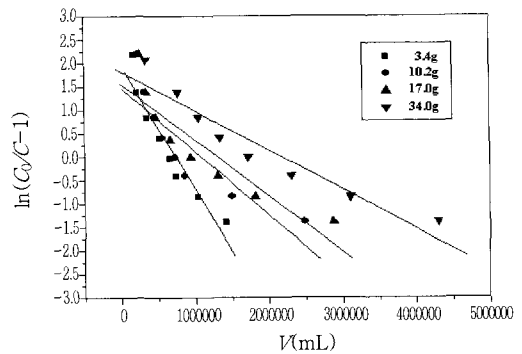


Figure 9. Kinetic approach results with in NH₃ gas by Thomas method (C_0 =100 ppm, flow rate=20 L/min).

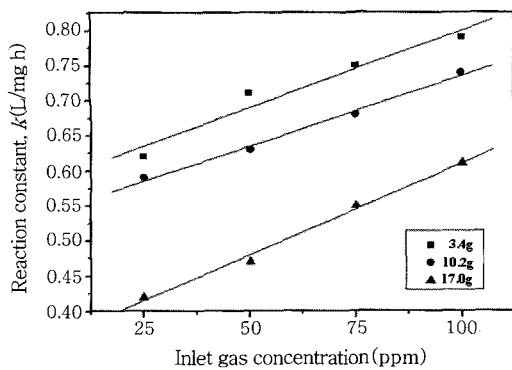


Figure 10. Plot of reaction constant and inlet gas concentration for hybrid chemical filter.

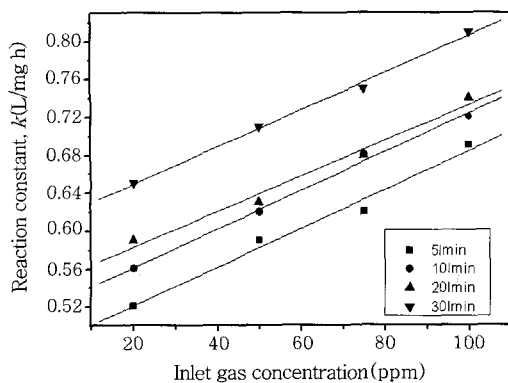


Figure 11. Effects of inlet gas concentration on reaction constant.

함에 따라 반응속도 상수는 증가함을 확인하였다. 또한, Thomas 흡착 모델과 이에 따른 파라미터 값 등을 통하여 이온교환 평형 흡착 용량을 예측할 수 있다.

결론

HIEF의 암모니아 가스에 대한 흡착거동을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 이온교환섬유의 무게는 10분까지 0.05 g 감소하였고 그 이후에서는 무게 변화가 없는 것으로부터 HIEF의 기계적 물성 저하가 없는 것을 확인하였다. 또한 점착제가 이온교환섬유 표면에 거미줄 형태로 분산되어 있어 점착제에 의한 이온교환용량의 저하가 없는 것을 확인하였다.

2) HIEF의 이온교환용량은 수지 부착량이 증가함에 따라 증가하였으며 단일 수지와 이온교환섬유의 이온교환용량보다 크게 나타났다.

3) 암모니아 가스에 대한 흡착률은 수지의 적층량이 증가함에 따라 증가하였으며 최대 94%의 흡착률을 보였다. 또한 이들의 흡착률은 동일 조건하에서 수지나 섬유에 비해 높게 나타났다.

4) 흡착소재의 총전량이 증가할수록 흡착 파과시간은 증가하였으며 최대 흡착 파과시간은 270분이었다. 또한 암모니아 흡착 파과시간은 유량이 증가함에 따라 빠르게 진행되었으며 유량 30 L/min에서 흡착파과는 약 40분 이었고 유량 5 L/min에서 흡착 파과시간은 200분이었다. 한편 암모니아의 농도가 증가함에 따른 흡착 파과시간은 짧아졌으며 흡착효율은 95%이었다. 그러나 농도 25 ppm 일 경우 파과시간은 300분 이었으며 흡착률은 80%로 낮게 나타났다.

5) HIEF의 흡착반응 속도는 초기농도 및 유량이 증가함에 따라 반응속도 상수 k 가 증가하였고, 질량의 증가에 따른 반응속도 상수 k 는 감소하였다.

감사의 글 : 본 연구는 2005년 중소기업청 기술연구회 지원사업에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. J. Fritsch, O. F. Sankey, K. E. Schmidt, and J. B. Page, *Surf. Sci.*, **427**, 298 (1999).
2. M. Sasaki, S. Sugawara, and S. Yamamoto, *Surf. Sci.*, **433**, 811 (1999).
3. Y. C. Nho, J. L. Garnett, and P. A. Dworgany, *J. Polym. Sci.*, **31**, 163 (1993).
4. J. S. Park, Y. C. Nho, and T. S. Hwang, *Polymer(Korea)*, **21**, 701 (1997).
5. J. S. Park, Y. C. Nho, and J. H. Jin, *Polymer(Korea)*, **22**, 39 (1998).
6. J. S. Park and Y. C. Nho, *Polymer(Korea)*, **22**, 47 (1998).
7. J. Netting, *Nature*, **406**, 928 (2000).
8. K. H. Kim, *Atmos. Environ.*, **39**, 2235 (2005).
9. K. Sugasaka, S. Katoh, N. Taki, A. Takahashi, and Y. Umezawa, *Sep. Sci. Technol.*, **18**, 4, 307 (1983).
10. V. S. Soldatov, G. I. Sergeev, and R. V. Martsinkevich, *Dokl. Akad. Nauk, USSR*, **28**, 1009 (1984).
11. V. S. Soldatov, *Izvest Acad. and Nauk BSSR, Chem. Ser.*, **6**, 39 (1982).
12. J. S. Kim, H. K. Park, S. D. Kim, H. S. Yu, and K. I. Rhee, *J. Kor. Inst. of Met. & Mater.*, **30**, 600 (1992).
13. C. S. Shin and T. H. Lee, *J. Kor. Inst. Chem. Eng.*, **27**, 588 (1989).
14. T. Kawai, K. Saito, K. Sugita, T. Kawakami, J. Kanno, A. Katakai, N. Seko, and T. Sugo, *Radi. Phys. Chem.*, **59**, 405 (2000).
15. I. Langmuir, *J. Am. Chem. Soc.*, **40**, 1361 (1918).
16. J. M. Smith, *Chemical Engineering Kinetics*, McGraw-Hill, New York, p.132 (1981).
17. I. Langmuir, *J. Am. Chem. Soc.*, **40**, 1361 (1918).
18. H. Freundlich, *Colloid and Capillary Chemistry*, Methuen, London, p.198 (1926).