

# 복합 음이온교환 수지를 이용한 NOx 제거 특성

송상현 · 이형근\* · 박보령\* · 황의환\*\* · 이범재 · 황택성†

충남대학교 바이오응용화학부, \*한국에너지기술연구원 에너지전환연구부, \*\*공주대학교 화학공학부  
(2006년 9월 6일 접수, 2006년 10월 25일 채택)

## Removal Properties of NOx by Hybrid Anion Exchanger

Sang-Hun Song, Hyung-Keun Lee\*, Bo-Ryeong Park\*, Eui-Hwan Hwang\*\*, Bum-Jae Lee, and Taek-Sung Hwang†

School of Applied Chemistry and Biological Engineering, Chungnam National University,  
Daejeon 305-764, Korea

\*Energy Conversion Research Department, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

\*\*School of Applied Chemical Engineering, Kongju National University, Cheonan 314-712, Korea

(Received September 6, 2006; accepted October 25, 2006)

본 연구는 이온교환 수지와 섬유를 복합한 이온교환체를 이용하여 NO<sub>2</sub>의 흡착특성을 고찰하였다. 수지량의 변화에 따른 NO<sub>2</sub>의 흡착은 흡착시간이 경과함에 따라 증가하였다. 초기농도 변화에 따른 NO<sub>2</sub> 흡착은 초기 농도가 증가함에 따라 흡착량이 증가하였으며 900 ppm의 경우 20 min 내외에 약 40% 흡착되었다. 한편 유속변화에 따른 NO<sub>2</sub>의 흡착은 유속이 증가함에 따라 20~40 L/min까지 흡착량은 감소하였고, 유속이 10 L/min에서 최대 45% 흡착되었으며, 함수율 변화에 따른 NO<sub>2</sub> 흡착량은 10 min 전후에서 약 15%로 매우 낮게 나타났다.

The adsorption properties for NO<sub>2</sub> by hybrid ion exchange fiber with resins were investigated. The adsorption of NO<sub>2</sub> was increased with increasing of adsorption time and the initial concentration. At the initial NO<sub>2</sub> concentration of 900 ppm, approximately 40% of initial NO<sub>2</sub> was adsorbed around 20 min. And the adsorption of NO<sub>2</sub> was decreased with increasing of flow rate from 20 to 40 L/min. The maximum adsorbed amount of initial NO<sub>2</sub> was 45% at the flow rate of 10 L/min. The amount of adsorption was increased with increasing the water content.

**Keywords:** hybrid anion ion exchanger, adsorption, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>

### 1. 서 론

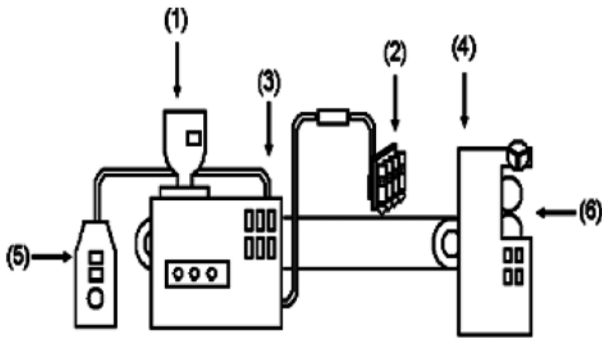
최근 산업의 발전과 더불어 대기오염이 심각한 실정으로 대기오염은 산성비, 지구온난화 및 스모그 등의 주요 원인으로 국민 보건환경 저해는 물론 자연 생태계 파괴의 주범으로 이의 처리가 시급한 실정이다. 이들 중 특히 SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> 등에 의한 산성비는 토양의 산성화는 물론 식물 등 생태계를 파괴시키는 원인으로 이들의 발생을 저감하거나 제거기술의 개발이 필수적이다. 지금까지 알려진 SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> 등 산성가스의 제거방법으로는 선택적 촉매환원법(SCR, Selective Catalytic reduction)과 비촉매 환원법(SNCR)이 주로 이용되고 있으며, 플라즈마, 전자선, X-선 등을 이용한 처리방법과 나노기술을 활용한 방법 등이 최근 개발되어 이용되고 있다[1]. 또한 SO<sub>x</sub>의 제거방법으로는 석회석 슬러리법, 황산으로 회수하는 방법, 가성소다 용액을 이용하는 방법 등이 알려져 있다[2].

이들 방법 중 SCR 법은 350 ℃ 부근에서 NO<sub>x</sub>를 N<sub>2</sub>로 환원하여 제거하는 방법으로 매우 효율적인 처리기술이나 촉매의 마모, 교환, 피

독성으로 인하여 NO<sub>x</sub>의 전환율을 감소시키거나 제거반응 전에 환원제의 산화 등 부반응에 의한 NH<sub>3</sub> 슬립 등의 단점이 있다. 따라서 이러한 단점을 극복하기 위한 기술이 개발되고 있으나 상용화 하는데 많은 문제점이 있어 새로운 소재의 개발이 시급한 실정이다. 따라서 최근 들어 관심의 대상이 되고 있는 소재가 이온교환 수지를 이용한 처리기술이다. 이온교환법은 특정 물질에 대한 선택흡착성이 있으며, 재생이 가능하고, 비드, 섬유, 막 등 다양한 형태로 합성할 수 있으며, 값이 싸고 내구성과 선택흡착 효율이 우수한 장점을 지니고 있다 [3-6].

지금까지 보고된 이온교환에 의한 배가스 처리에 관한 연구로 Nho 등[7]은 숄론화 이온교환 섬유를 이용한 암모니아의 제거에 매우 탁월한 효과가 있다고 보고하였으며, Hwang 등[8]은 아민형 음이온교환 섬유를 합성하고 이를 이용하여 SO<sub>x</sub>와 NO<sub>x</sub>의 흡착에 관한 연구를 수행한 바 있다. 그 외에 일부 연구자들에 의해 간헐적인 연구가 수행되고 있으나 이 분야에 대한 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 판단되어진다. 지금까지 연구에서는 주로 이온교환 섬유를 사용하였으나, 이온교환 섬유는 압력손실이 낮고, 흡착속도가 빠른 장점을 지니고 있으나 이온교환 용량이 낮아 사용에 한계성을 지니고 있다[9,10]. 따

† 주 저자 (e-mail: tshwang@cnu.ac.kr)



- (1) Hot melt hopper
- (2) Multi nozzle
- (3) Hot compressed air line
- (4) IXR
- (5) Compressor
- (6) Roller

Figure 1. Manufacture System of Hybrid anion exchanger.

Table 1. The Specification of Gas Analyzer

No	Analyzer	Specification	Maker
1	SO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> Analyzer	SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> : Infrared type	Siemens (Germany)
		O <sub>2</sub> : Chemical cell type	
		Model : Ultramat 23	
		SO <sub>2</sub> : 0~5000 ppm	
2	SO <sub>2</sub> , NO Analyzer	O <sub>2</sub> : 0~25%	Siemens (Germany)
		CO <sub>2</sub> : 0~25%	
		Model : Ultramat 23	
		Sensor : Infrared type	
3	NO-NO <sub>2</sub> -NO <sub>x</sub> Analyzer	Range :	Thermo Environmental Inst.
		SO <sub>2</sub> : 0~5000 ppm	
		NO : 0~5000 ppm	
		Chemiluminescent type	
4	N <sub>2</sub> O Analyzer	Model : 42C	Thermo Environmental Inst.
		NO : 0~1000 ppm (5 range)	
		Gas flow rate : 0.95 L/min	
		Gas filter Correlation type	
		Model : 46C	
		NO : 0~1000 ppm (6 range)	
		Gas flow rate : 0.5~2 L/min	

라서 본 연구에서는 배가스의 선택 흡착 제거를 위해 이온교환 용량이 크지만 압력손실이 높은 비드상 수지와 이온교환 섬유를 혼합하여 제조한 복합이온교환 섬유를 제조하여 이를 이용한 NO<sub>x</sub>의 선택흡착에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 시약 및 재료

흡착 실험을 위한 NO<sub>2</sub> 및 SO<sub>2</sub> 가스는 (주)대한표준가스에서 제조한 일정농도의 표준가스를 사용하였으며, 음이온교환 수지는 삼양사 제품의 비드(AMT16.5H)를 사용하였고, 이온교환 섬유는 Fiban A-6 형태의 아민기를 함유한 것으로 (주)시온텍에서 제공을 받아 사용하였다. 또한 수지를 섬유에 고정하기 위해 사용한 접착제는 (주)빅솔사 제품의 스티렌계 접착 수지를 사용하였다. 기타 용매는 1급 시약을 정제없이 사용하였다.

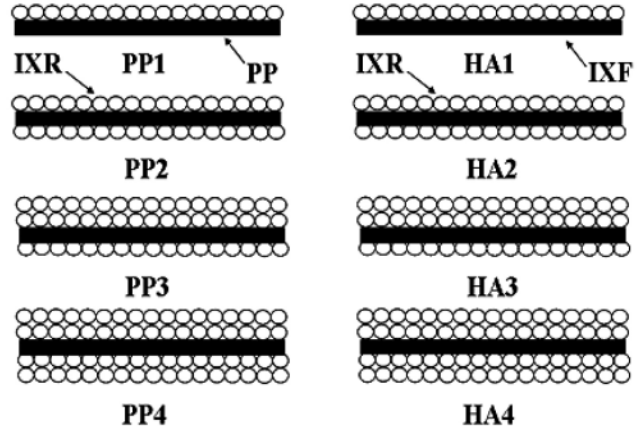


Figure 2. Preparation Scheme of Hybrid anion exchanger.

Table 2. Experimental Conditions of Adsorption Test

Parameters	Values
Anion (Ply)	1~7
NO <sub>2</sub> concentration (ppm)	100~900
Gas flow rate (L/min)	10~40
Water content (gH <sub>2</sub> O/gIEC)	0~1.5
Mixing with SO <sub>2</sub> (ppm)	300~900

### 2.2. 복합 음이온교환체의 제조

흡착실험에 사용된 복합 이온교환체는 Figure 1과 같은 장치를 사용하여 제조하였다. 복합 이온교환체는 일정크기의 음이온교환 섬유 부직포에 접착제를 이용하여 부착시켜 제조하였다. 여기서 부직포에 비드를 부착하는 방법에 따라 Figure 2와 같이 분류를 하였다.

### 2.3. 산성가스 흡착 실험

제조한 복합 이온교환 섬유를 직경 5 cm 되게 절단한 후 증류수에 담가 팽윤시키고 여과하여 자유수를 제거하여 Figure 3과 같은 흡착 장치 칼럼에 충전하고 흡착실험을 하였다. 이때 칼럼에서 유입되는 SO<sub>2</sub> 및 NO<sub>2</sub> 가스의 농도는 200 ppm의 표준가스를 사용하였으며, 가스유량을 변화시켜 MFC (Sierra Instruments사, 600 series)로 유량을 제어하였다. Table 2와 같은 실험조건하에서 Figure 3과 같은 gas analyzer가 부착된 Hybrid Recorder (Yokogawa, HR2300)를 이용하여 각 조건에서의 가스흡착량을 연속적으로 기록하여 흡착실험을 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 수지량에 따른 NO<sub>2</sub> 흡착 특성

본 연구에서는 Polypropylene (PP)부직포와 메트릭스에 수지의 양을 달리하여 복합 소재를 이용한 NO<sub>2</sub> 흡착실험을 하고, 그 결과가 Figure 4에 나타나 있다. PP1~PP4의 비드부착량은 각각 78.38 wt%, 83.16 wt%, 85.77 wt%, 87.15 wt%이다. Figure 4는 가스 유속을 30 L/min, NO<sub>2</sub> 초기농도 200 ppm, 함수율 1.5 gH<sub>2</sub>O/g IEC로 고정하고 섬유기체에 수지의 적층량을 달리하여 제조한 복합 이온교환체를 칼

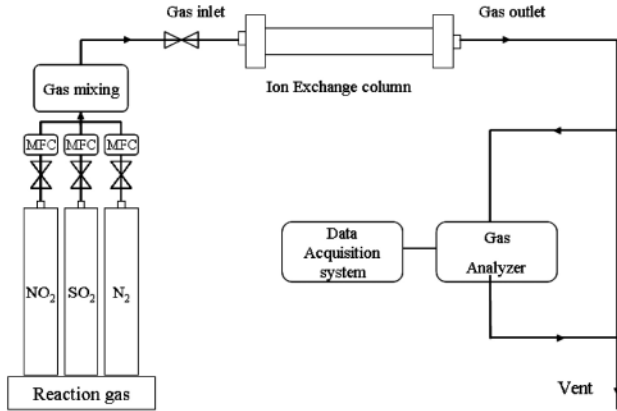


Figure 3. Schematic Diagram of gas Removal apparatus.

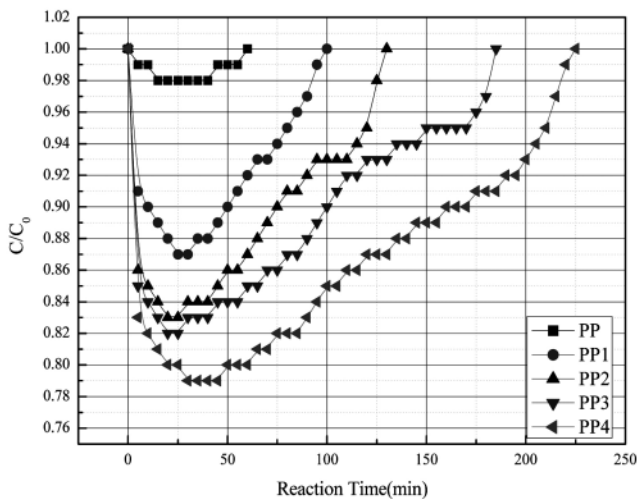


Figure 4. Effects of the PPI~4 on NO<sub>2</sub> removal (Ply: 10, Flow rate: 30 L/min, Inlet NO<sub>2</sub> concentration: 200 ppm, Water content: 1.5 g H<sub>2</sub>O/gIEC).

럼 충전하고 NO<sub>2</sub>에 대한 흡착실험 결과이다. Figure 4에서 보는 바와 같이 NO<sub>2</sub>의 흡착은 흡착시간이 경과함에 따라 PP 매트릭스의 경우 거의 변화가 없었으며, PP 매트릭스에 부착된 수지의 양이 증가함에 따라 흡착량은 증가하였고, 최대 21%까지 흡착되었다. 그러나 최대 흡착이 21%로 이는 실제 현장에 적용하기에는 매우 미흡한 흡착량으로 사료되어 흡착량을 증가시키기 위하여 기재 또는 흡착방법을 변화시키는 것이 필요하다고 사료되었다.

3.2. 이온교환섬유와 수지 복합섬유의 NO<sub>2</sub> 흡착 특성

PP 부직포를 기재로 사용한 복합섬유와 동일한 조건으로 이온교환 섬유(HA)를 기재로한 복합 이온교환 섬유의 NO<sub>2</sub>에 대한 흡착실험을 하였는데 그 결과가 Figure 5에 나타나 있다. HA1~HA4의 비드부착량은 각각 61.43 wt%, 71.17 wt%, 79.31 wt%, 79.93 wt%이다. Figure 5는 이온교환 섬유와 이들 섬유에 수지를 적층한 복합 이온교환 섬유의 반응시간에 따른 NO<sub>2</sub> 흡착과의 관계를 나타낸 것으로 Figure 5에서 보는 바와 같이 흡착시간이 지남에 따라 순수한 이온교환 섬유(HA)의 경우 20 min 이내에 흡착 과파가 일어났으며 최대 흡착은 약 15%이었다. 반면 수지를 적층한 복합 이온교환 섬유(HA1~HA4)의

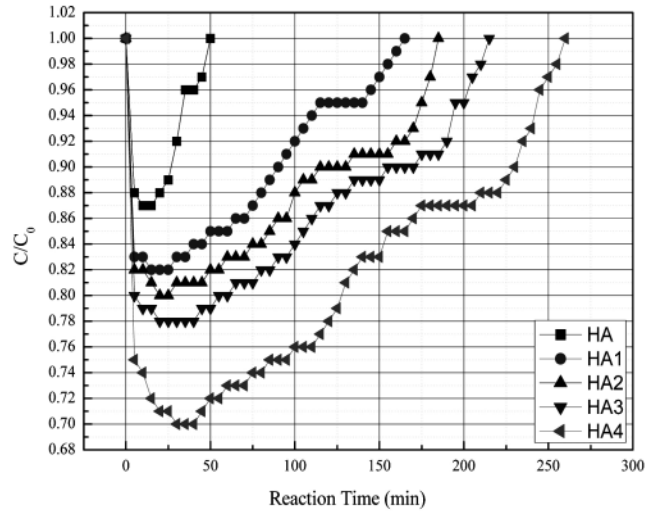


Figure 5. Effects of the HA1~4 on NO<sub>2</sub> removal (Ply: 10, Flow rate: 30 L/min, Inlet NO<sub>2</sub> concentration: 200 ppm, Water content: 1.5 g H<sub>2</sub>O/gIEC).

경우 순수한 이온교환 섬유보다 모두 흡착 과파시간이 늦어졌으며, 수지의 적층수가 증가함에 따라 NO<sub>2</sub> 흡착량 또한 증가하였고 최대 30%의 제거율을 보였다. 이렇게 수지의 적층량에 따라 흡착 과파시간이 길어지고 NO<sub>2</sub> 제거율이 증가하는 이유는 이온교환 섬유와 수지에 의한 이온교환 용량이 증가하기 때문으로 사료되었다.

3.3. 복합 이온교환 섬유의 충전량에 따른 NO<sub>2</sub> 흡착 특성

이온교환 방식에 의한 NO<sub>2</sub> 가스의 흡착에 있어 복합 이온교환 섬유의 충전량에 따른 흡착특성을 알아보기 위해 실험하였는데 그 결과를 Figure 6에 나타내었다. Figure 6은 이온교환 섬유에 수지를 4층 적층한 복합 이온교환 섬유의 충전밀도(1 ply~7 ply)를 달리하여 NO<sub>2</sub>에 대한 흡착실험을 행한 결과로 Figure 6에서 보는 바와 같이 동일조건(유속 : 30 L/min, NO<sub>2</sub> 초기농도 200 ppm, 함수율 : 1.5 gH<sub>2</sub>O/g IEC)에서 충전밀도가 증가할수록 흡착량은 증가하였으며 복합 이온교환 섬유를 5 ply와 7 ply 적층한 경우 흡착 과파시간 약 25 min에서 최대 15% 흡착되었으며 큰 변화를 보이지 않았다. 이로부터 복합 이온교환 소재의 최대 충전밀도는 5 ply가 최적임을 확인하였다. 그러나 최대 흡착량으로 보았을 때 흡착량이 15% 내외로 매우 낮아 복합 이온교환 섬유를 NO<sub>2</sub> 흡착 소재로 사용하기 위하여는 유속, 함수율 등의 변수를 고려하여야 할 것으로 사료된다.

3.4. 농도 변화에 따른 NO<sub>2</sub> 흡착 특성

복합 이온교환 섬유의 초기농도 변화에 따른 NO<sub>2</sub> 흡착 특성을 관찰한 것으로 Figure 7에서 보는 바와 같이 NO<sub>2</sub> 초기 농도가 증가함에 따라 흡착량이 증가하였으며 초기농도 900 ppm의 경우 20 min 내외에 약 40%의 흡착량을 보였다. 이렇게 초기농도가 증가함에 따라 흡착량이 증가하는 이유는 반응계 내에 NO<sub>2</sub> 가스 농도가 높아져 복합 이온교환 섬유의 관능기와 이온교환 반응이 활발히 진행되기 때문으로 사료되었다. 또한 고농도에서 흡착 과파시간이 길어지는 이유는 충전된 복합 이온교환 섬유의 이온교환 용량이 크기 때문으로 판단된다[10].

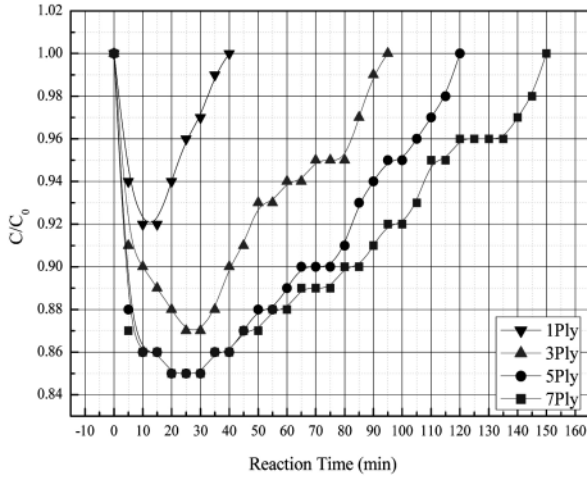


Figure 6. Effects of the ply of HA4 on NO<sub>2</sub> removal (Flow rate: 30 L/min, Inlet NO<sub>2</sub> concentration: 200 ppm, Water content: 1.5 g H<sub>2</sub>O/gIEC).

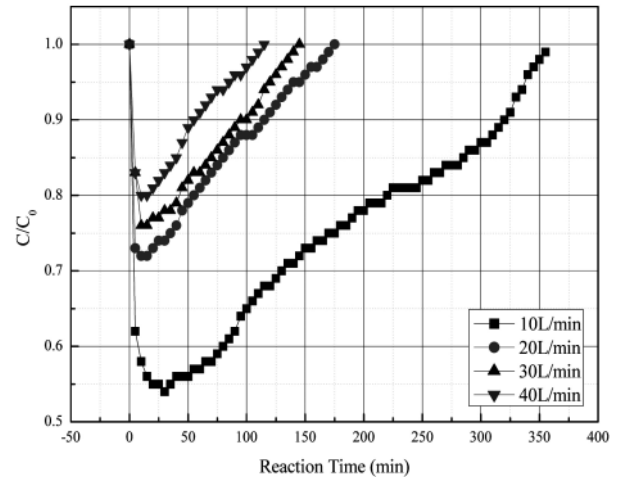


Figure 8. Amount of adsorbed NO<sub>2</sub> for various Flow rate (Ply: 5, Inlet NO<sub>2</sub> concentration: 500 ppm, Water content: 1.0 g H<sub>2</sub>O/g IEC).

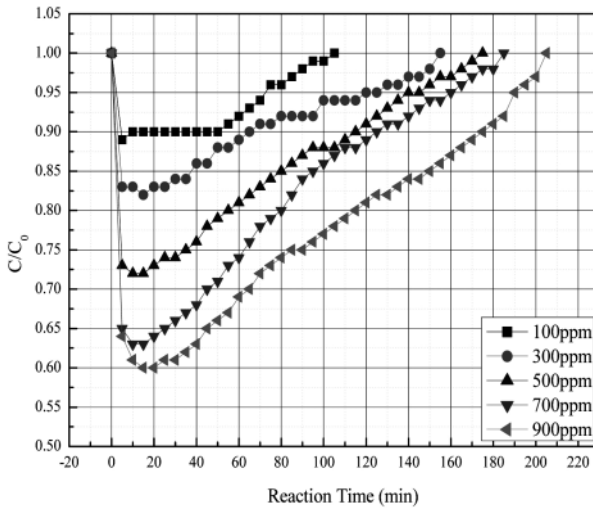


Figure 7. Amount of adsorbed NO<sub>2</sub> for various inlet concentrations (Ply: 5, Flow rate: 20 L/min, Water content: 1.0 g H<sub>2</sub>O/gIEC).

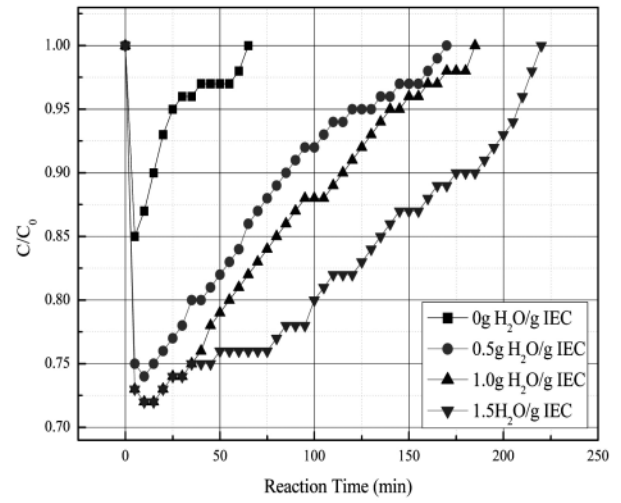


Figure 9. Effects of the water content in the hybrid anion ion exchanged on the NO<sub>2</sub> removal (Ply: 5, Flow rate: 20 L/min, Inlet NO<sub>2</sub> concentration: 500 ppm).

3.5. 유속 변화에 따른 NO<sub>2</sub> 흡착 특성

초기 농도 및 복합 이온교환 섬유의 적층수를 동일하게 하고, 유속을 달리하여 NO<sub>2</sub>의 흡착실험을 행한 결과가 Figure 8에 나타나 있다. Figure 8은 유속변화에 따른 NO<sub>2</sub>의 흡착량과의 관계를 나타낸 것으로 Figure 8에서 보는 바와 같이 NO<sub>2</sub>의 흡착은 유속이 증가함에 따라 20~40 L/min까지 흡착량은 감소하였으나 거의 동일한 경향으로 증가하였으며 20 L/min 이하에서는 급격한 흡착량의 변화를 보였다. 또한 유속이 10 L/min에서 최대 45%의 NO<sub>2</sub> 흡착량을 나타내었다. 이렇게 유속이 높은 경우 흡착량이 낮은 이유는 가스의 유속이 낮아 복합 이온교환 섬유와의 접촉시간은 낮아지는 것으로 인한 이온교환 반응이 낮아져 흡착량이 낮은 것으로 판단되었으며, 유속 10 L/min에서 흡착량이 급속히 증가하는 이유는 유속의 감소에 따른 이온교환 섬유와의 접촉시간이 증가되어 이온교환 반응이 활발히 일어나기 때문으로 사료되었다[11]. 또한 흡착과파시간이 길어지는 이유의 Figure 7에서 설명한 바와 같이 이온교환 용량의 차이에 의한 것으로 판단된다.

3.6. 함수율 변화에 따른 NO<sub>2</sub> 흡착 특성

Figure 9는 복합 이온교환 섬유의 함수율 변화에 따른 NO<sub>2</sub>의 흡착량의 변화와의 관계를 나타낸 것으로 Figure 9에서 보는 바와 같이 건조한 상태의 복합 이온교환 섬유의 NO<sub>2</sub> 흡착량은 10 min 전후에서 약 15%로 매우 낮게 나타났으며 함수율이 증가함에 따라 흡착량은 증가하였고 함수율 1.5 g H<sub>2</sub>O/g IEC 이상에서 흡착량은 동일하게 나타나는 경향을 보였다. 이렇게 함수율이 0%에서 흡착량이 15% 나타나는 이유는 복합 이온교환 섬유 자체의 비표면적이 있어 물리적 흡착에 기인하는 것으로 사료되었고, 함수율의 증가에 따라 흡착량이 증가하는 것은 복합 이온교환 섬유 내에 수분 함량이 증가함에 따라 작용기의 이온화가 증가하여 흡착량이 증가하는 것으로 판단된다. 그러나 함수율 1.5 g H<sub>2</sub>O/gIEC 이상에서 동일한 흡착량을 나타내는 것은 복합 이온교환 섬유내의 작용기의 이온화가 100% 진행되었기 때문에 흡착량에 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다.

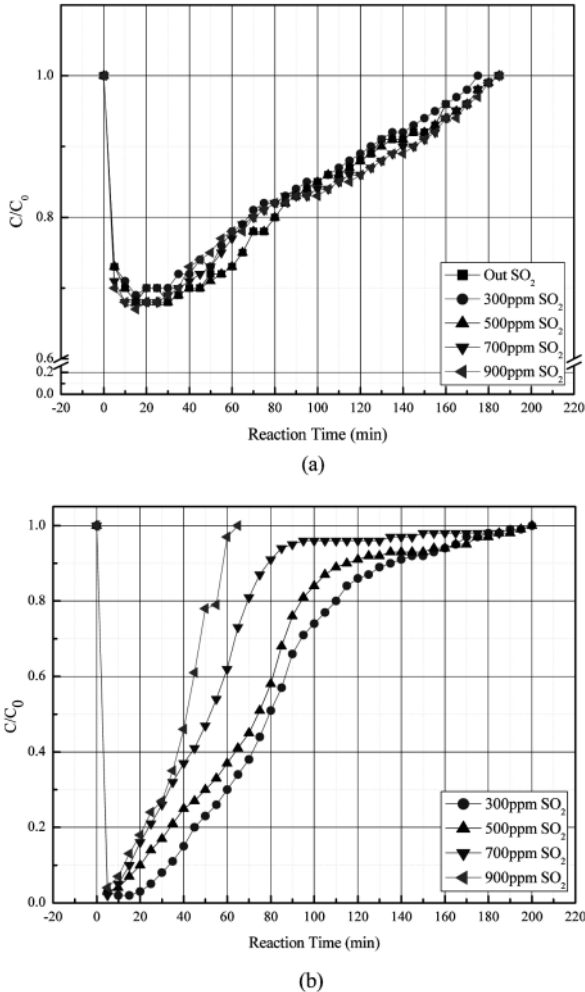


Figure 10. Breaththrough curves for SO<sub>2</sub> with the mixed gases of NO<sub>2</sub> (fixed 500 ppm) and SO<sub>2</sub> (varying initial concentration).

### 3.7. SO<sub>2</sub>/NO<sub>2</sub> 혼합 가스에 대한 흡착 특성

NO<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub> 혼합가스에 대한 복합 음이온교환 섬유의 흡착특성을 시험하였는데 그 결과가 Figure 10에 나타나 있다. Figure 10은 NO<sub>2</sub>에 대한 SO<sub>2</sub>의 농도를 달리하여 제조한 혼합가스의 흡착특성을 나타낸 것으로 Figure 10에서 보는 바와 같이 SO<sub>2</sub>의 농도가 증가함에 따라 흡착 파과 시간은 빠르게 나타나는 경향을 보였으며 초기농도 700 ppm 이상에서는 90% 이상 흡착을 보였다. 그러나 그 이하의 농도에서는 흡착 파과시간이 늦어지고 흡착량 또한 낮았는데 이는 혼합가스상에서 NO<sub>2</sub>와 SO<sub>2</sub>의 이온화 경향의 차이 및 이온의 활동도의 차이에 의한 경쟁반응에 기인하는 것으로 사료되었다. 이는 Hwang 등의 결과와 동일 하였다[9].

## 4. 결 론

이온교환 섬유와 수지를 조합하여 제조한 복합 음이온교환 섬유를 이용하여 NO<sub>2</sub>와 SO<sub>2</sub>의 흡착실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 첨가된 이온교환 수지량에 따른 복합소재의 NO<sub>2</sub>의 흡착은 흡착 시간이 경과함에 따라 PP 매트릭스의 경우 거의 변화가 없었으며, PP 매트릭스에 부착된 수지의 양이 증가함에 따라 흡착량은 증가하였다.

2) 반응시간에 따른 NO<sub>2</sub> 흡착은 흡착시간이 길어짐에 따라 순수한 이온교환 섬유의 경우 20 min 이내에 흡착 파과가 되었으며, 최대 15% 흡착되었다. 또한 복합 이온교환 섬유의 흡착 파과시간은 순수 이온교환체보다 길어졌고, 수지의 적층수가 증가함에 따라 NO<sub>2</sub> 흡착량은 증가되었으며 최대 30% 흡착되었다.

3) NO<sub>2</sub> 흡착은 충전밀도가 증가할수록 흡착량은 증가하였으며 복합이온교환 섬유를 5 ply 이상 적층한 경우 흡착 파과시간 약 25 min에서 최대 15% 흡착되었다. 또한 초기농도 변화에 따른 NO<sub>2</sub> 흡착은 초기 농도가 증가함에 따라 흡착량이 증가하였으며 900 ppm의 경우 20 min 내외에 약 40% 흡착되었다.

4) 유속에 따른 NO<sub>2</sub>의 흡착은 유속이 증가함에 20~40 L/min 까지 흡착량은 감소하였으나 거의 동일한 경향으로 감소하였으며 10 L/min 이상에서는 급격한 흡착량의 변화를 보였다. 또한 유속이 10 L/min에서 최대 45% 흡착되었다.

5) 함수율 변화에 따른 NO<sub>2</sub>의 흡착이온교환 섬유의 NO<sub>2</sub> 흡착량은 10 min 전후에서 약 15%로 매우 낮게 나타났으며 함수율이 증가함에 따라 흡착량은 증가하였고 함수율 1.5 gH<sub>2</sub>O/gIEC 이상에서 흡착량은 동일하게 나타나는 경향을 보였다.

6) NO<sub>2</sub>와 SO<sub>2</sub> 혼합가스상에서의 흡착은 SO<sub>2</sub>의 농도가 증가함에 따라 흡착파과 시간은 빠르게 나타나는 경향을 보였으며 초기농도 700 ppm 이상에서는 90% 이상 흡착을 보였다.

## 감사의 글

본 연구는 2005년 중소기업청 기술연구회사업의 지원에 의해 이루어 졌으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. A. M. Rubel and J. M. Stencel, *Fuel*, **76**, 521 (1997).
2. J. K. Yoon, K. H. Lee, J. H. Park, S. I. Yoon, B. K. Ha, and Y. S. Mok, *材料麻堂*, **13** (2000).
3. A. Chakrabarti, A. Mizuno, K. Shimizu, T. Matsuoka, and S. Furuta, *IEEE Transactions on Industry Application*, **31**, 500 (1994).
4. Y. L. M. Creighton, E. M. van Veldhuizen, and W. R. Rutgers, *Electrical and optical study of pulsed positive corona*, Springer-Verlag Pub. Co., 205 (1993).
5. S. J. Scott, *A long life, high repetition rate electron beam source*, Springer-Verlag Pub. Co., 339 (1993).
6. S. Pekarek, J. Rosenkranz, and H. Lonekova, *Generation of electron beam for technological processes*, Springer-Verlag Pub. Co., 345 (1993).
7. T. Hori, K. Saito, S. Frusaki, T. Sugo, and J. Okamoto, *Chem. Soc. Japan*, **12**, 1792 (1986).
8. J. Okamoto, T. Sugo, A. Katakai, and H. Omichi, *J. Appl. Polym. Sci.*, **30**, 2967 (1985).
9. T.-S. Hwang, Y.-S. Kim, J.-W. Park, and H.-K. Lee, *J. Ind. Eng. Chem.*, **10**, 139 (2004).
10. J. K. Choi, H. S. Yang, O. H. Kwon, and Y. C. Nho, *Applied Chemistry*, **3**, 69 (1999).
11. J. M. Smith., *Chemical Engineering Kinetics*, McGraw-Hill New York (1981).