

## 황화수소와 암모니아를 함유한 악취폐가스의 세미파일럿 규모 바이오필터 처리: 1. *Thiobacillus sp.* IW 및 반송슬러지를 고정한 담체를 충전한 바이오필터 운전

이은주 · 박혜리 · 임광희<sup>†</sup>

대구대학교 화학공학과, 산업 및 환경폐가스연구소  
712-714 경북 경산시 진량읍 내리리 15  
(2013년 8월 4일 접수, 2013년 8월 30일 수정본 접수, 2013년 9월 6일 채택)

### Semi-pilot Scaled Biofilter Treatment of Malodorous Waste Air Containing Hydrogen Sulfide and Ammonia: 1. Performance of Biofilter Packed with Media with Immobilized *Thiobacillus sp.* IW and Return-sludge

Eun Ju Lee, Hyeri Park and Kwang-Hee Lim<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, Research Institute for Industrial and Environmental Waste Air Treatment, Daegu University,  
15 Naeri-ri, Jillyang-eup, Gyungsan-si, Gyungbuk 712-714, Korea  
(Received 4 August 2013; Received in revised form 30 August 2013; accepted 6 September 2013)

#### 요 약

퇴비공장 또는 공공시설에서 발생하는 악취폐가스의 대표적인 제거대상 오염원인 황화수소와 암모니아를 포함한 악취폐가스를 처리하기 위하여 여러 운전 조건 하에서의 *Thiobacillus sp.* IW 및 반송슬러지를 고정한 담체를 충전한 semi-pilot 바이오필터 시스템을 운전하였다. Semi-pilot 바이오필터 운전 초반 및 중반에서는 황화수소 제거효율은 암모니아 부하와 무관하였으나, 암모니아 제거효율은 황화수소 부하가 커짐에 따라서 감소하였다. 그럼에도 불구하고 semi-pilot 바이오필터 운전 후반에서는 황화수소 부하가 커짐에도 불구하고 암모니아 제거효율이 영향을 받지 않았다. 이것은 semi-pilot 바이오필터 운전 후반의 buffer solution의 지속적 투입으로 인하여 semi-pilot 바이오필터담체의 산성화가 크지 않음에 기인한다고 간주된다. Semi-pilot 바이오필터시스템으로 황화수소와 암모니아의 동시제거를 할 때에 황화수소와 암모니아의 최대 elimination capacity 값은 각각 약 58 및 30 g/m<sup>3</sup>/h이었다. 이와 같이 semi-pilot 바이오필터 운전의 의하여 황화수소와 암모니아를 동시 제거한 경우에는 실험실규모 바이오필터의 유사한 운전조건 하에서 둘 중의 하나만을 함유한 경우보다 제거용량이 각각 약 39와 46% 만큼 감소하여서, 황화수소와 암모니아를 동시 제거한 경우에 암모니아 최대제거용량이 황화수소 최대제거용량보다 7% 만큼 더 감소하였다.

**Abstract** – A semi-pilot biofilter packed with media with immobilized *Thiobacillus sp.* IW and return sludge, was operated under various operating conditions in order to treat malodorous waste air containing both hydrogen sulfide and ammonia which are major air pollutants emitted from composting factories and many publicly owned treatment works (POTW). At the incipient and middle stages of a semi-pilot biofilter operation, the hydrogen sulfide-removal efficiency behaves regardless of an inlet-load of ammonia. However, the ammonia-removal efficiency decreased as an inlet-load of hydrogen sulfide increased. Nevertheless, at the final stage of the semi-pilot biofilter operation, the ammonia-removal efficiency was not affected by the increase of hydrogen sulfide-inlet load. It is attributed to that a serious acidification of semi-pilot biofilter-media did not occur due to continuous injection of buffer solution at the final stage of the semi-pilot biofilter operation. When both hydrogen sulfide and ammonia contained in malodorous waste air were treated simultaneously by semi-pilot biofilter, the maximum elimination capacities of hydrogen sulfide and ammonia turned out to be ca. 58 and 30 g/m<sup>3</sup>/h, respectively. These maximum elimination capacities were estimated to be ca. 39 and 46% less than those for lab-scaled biofilter-separate elimination of hydrogen sulfide and ammonia, respectively. Thus, for the simultaneous biofilter-treatment of hydrogen sulfide and ammonia, the maximum elimination capacity of ammonia decreased by 7% more than that of hydrogen sulfide.

Key words: Semi-pilot Biofilter, Malodorous Waste-air, Hydrogen Sulfide, Ammonia

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: khlim@daegu.ac.kr

## 1. 서 론

생물학적 악취제거 방법은 담체에 악취분해미생물을 고정화시켜서 반응기에 충전한 바이오필터 처리 등이 있는데, 경제적이고 2차 오염을 유발하지 않는 바이오필터는 다른 프로세스보다 악취제거에 뛰어나다고 보고되고 있다[1-11]. 황화수소는 석유정제, 펄프 및 제지와 푸드 공정뿐만 아니라 공공처리설비(POTWs)에서 주로 배출되며, 공기보다 무겁고 무색이며 독성과 연소성이 있고 최저감지농도는 0.47 ppbv에 불과하다[4]. 황화수소는 하수처리시스템에서 부식문제를 일으키며 8 ppbv의 낮은 농도에서도 불쾌한 악취를 유발한다[10]. 황화수소는 대부분 가성/hypochlorite 또는 가성/과산화수소 스크리버와 같은 화학적 스크리버를 사용하여 처리하고 있으나 높은 에너지비용, 높은 화학약품비 및 처리비용 등의 운전비가 비싼 문제가 있다. 바이오필터를 사용한 생물학적인 처리는 황화수소를 함유한 악취폐가스 처리를 위한 경제적인 대안으로 제시되고 있다[4]. 바이오필터를 이용한 황화수소를 함유한 악취폐가스 처리는 여러 연구자에 의하여 수행되었다[4,9,10,12-15].

암모니아는 가장 우려되는 산업폐기물 중의 하나로서 세상에서 두 번째로 많이 생산되는 화학물질이다[16]. 암모니아는 질소비료 생산, 농업, 목축업 특히 양계장에서 배출되는 주요 악취원으로서 고농도의 암모니아에 노출된 농업종사자들이 산업재해로서 여러 가지 호흡기질환에 시달린다고 보고되고 있다[17]. 또한 건설공사에서 콘크리트 부동제로 사용되는 우레아(urea)를 함유한 혼화제에서 암모니아가 배출되며 배출된 암모니아를 함유한 공기를 정화시키는 것은 현안이 되었다. 암모니아를 함유한 악취가스에 대한 바이오필터 처리 실험으로서, Lee 등[18]과 Lee와 Lim[19]은 동부피의 페타이어담체와 compost를 충전하고 반송슬러지 또는 분리 동정한 미생물을 고정한 바이오필터와 그의 하이브리드시스템의 암모니아 제거특성을 각각 조사하였다. 또한 Lee와 Lim[20]은 암모니아 흡수처리조를 악취폐가스의 바이오필터 가습조로 설계하고 광촉매반응공정을 포함한 하이브리드시스템을 이용하여 고농도의 암모니아, 저농도의 황화수소 및 톨루엔을 동시 함유한 악취폐가스를 처리하였다. Chen 등[21]은 compost와 슬러지를 충전물로 활용한 바이오필터를 운전하여 암모니아 배출가스 처리를 수행하였는데, 각각 288 및 243 g/m<sup>3</sup>/day의 최대 암모니아 제거율을 보고하였다. 한편 biotrickling filter 또는 바이오필터에서 이와 비슷한 방식을 부가하여 악취폐가스에 함유된 황화수소와 암모니아의 동시제거를 수행하였음이 보고되었다[9,22,23]. Galera 등[24]은 rock wool-compost 바이오필터를 사용하여 암모니아, 황화수소 및 톨루엔 제거를 수행하였는데, 암모니아와 황화수소의 최대제거용량은 각각 약 24 및 39 g/m<sup>3</sup>/day이었다.

본 연구에서는 폐비공장 또는 공공시설에서 발생하는 악취폐가스의 대표적인 제거대상 오염원인 황화수소와 암모니아를 동시 함유 악취폐가스를 처리하기 위하여 여러 운전 조건 하에서 바이오필터시스템의 황화수소와 암모니아 각각의 제거 특성을 조사하고 바이오필터의 적정운전조건을 구축하였다.

## 2. 실험

### 2-1. Semi-pilot 바이오필터시스템 장치 및 운전

#### 2-1-1. Semi-pilot 바이오필터

황화수소 및 암모니아 각각의 inlet load량과 농도를 여러 가지 단계에서 변화시켜서 황화수소와 암모니아 각각의 바이오필터에서의 시간에 따른 처리추이를 관찰하기 위하여 황화수소와 암모니아를 동시 함유한 악취폐가스처리실험을 수행하였다. 실험의 수행을 위하여 아크릴을 소재로 한 바이오필터를 하향류 방식으로 운전하기 위하여 아크릴관(내경=9.5 cm; 길이=16 cm)의 5단으로 이루어진 반응기(총 높이=80 cm)를 제작하였다. 당 실험은 바이오필터시스템에서 5개의 sampling port를 각각 설치하고, feed, 바이오필터 3단 및 exit에서 폐가스의 처리분석을 하였다. 바이오필터는 담체를 바이오필터 각 단에 7.5 cm의 높이로 각각 채워 넣어서 바이오필터의 총 유효높이는 37.5 cm로 하였다. 바이오필터에는 평균지름(Dp)이 3 mm인 입상 활성탄(GAC), 0.6 mm인 compost 및 자체 제작한 페타이어담체[25] 각각을 같은 부피로 혼합한 담체를 사용하였다. 담체의 일부분은 유기담체(compost)로 선정하여 미생물에 필요한 무기영양소를 자체 공급하였고 바이오필터의 윗부분에서 peristaltic pump(Masterflex)를 사용하여 바이오필터 내의 담체의 pH와 수분 유지를 위하여 buffer solution을 바이오필터 위에서 밑으로 간헐적으로 공급되게 하였다. 각 바이오필터는 temperature controller가 부착된 heating band로 감아서 반응기의 온도유지(30 °C)를 하였고 각 장치의 fitting은 swagelok fitting으로 사용하였다. 본 실험의 수행을 위하여 바이오필터시스템을 Fig. 1과 같이 구축하였다.

#### 2-1-2. 황화수소 및 암모니아 함유 폐가스 공급장치

Blower (DBR-032, 동부산업기계공업; 토출압력, 0.4 Kg/cm<sup>2</sup>, 최대유량, 1,650 L/min)에서 공급되는 공기는 향온수조(J-PW B2, 제일과학)에 의하여 약 40~50 °C로 유지되는 humidifier 칼럼 3개를 통과하여 상대습도가 95~99%를 유지하며 이 공급공기는 mixing chamber로 투입되었다. 이 mixing chamber에는 황화수소의 경우는 Na<sub>2</sub>S 용액을 peristaltic pump (Masterflex)를 이용하여 염산에 공급하여 일정농도의 황화수소를 발생시키고 보조 blower (Youngnam Yasunnaga; 토출압력, 0.12 Kg/cm<sup>2</sup>, 최대유량, 43 L/min)를 활용하여 발생한 황화수소 가스를 lead acetate 용액을 통과시킨 후에 mixing

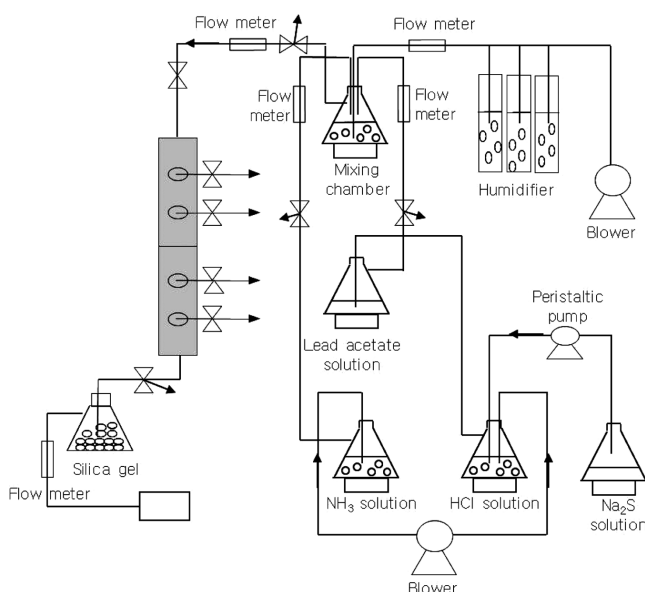


Fig. 1. Schematic diagram of semi-pilot biofilter-system.

chamber에 공급하였다. 한편 암모니아의 경우는 황화수소의 경우와 같이 보조 bower를 활용하여 암모니아수에서 발생한 일정농도의 암모니아 가스를 mixing chamber에 공급하였다. Mixing chamber에서 가습된 공기와 황화수소 및 암모니아가스를 혼합하여서 바이오필터의 운전조건에 설정된 인입농도로 맞춘 후에 하향류 방식으로 바이오필터로 인입하였다. Blower에서 공기를 이송하는 관은 tygon 관으로 사용하였고 mixing chamber에서 바이오필터까지는 황화수소의 경우 내산성이 있는 viton관을, 암모니아의 경우는 tygon관을 각각 사용하여 배관하였다.

## 2-2. Semi-pilot 바이오필터시스템 운전

황화수소 및 암모니아 혼합가스를 효율적으로 제거하기 위하여 *Thiobacillus sp.* IW를 미생물담체에 접종한 후에 반송슬러지를 순환시켜서 바이오필터 담체에 고정화시킨 후에 황화수소 및 암모니아를 동시 함유한 악취폐가스를 효율적으로 처리하기 위한 semi-pilot 바이오필터시스템을 Table 1과 같은 semi-pilot 규모의 운전조건으로 운전하였다. 본 운전조건 전반 및 중반부에는 계분배공장 등의 배기가스 특성을 고려하여 비교적 낮은 농도의 황화수소 및 비교적 높은 농도의 암모니아를 동시에 포함하고, 후반부에는 둘 다 비교적 높은 농도의 암모니아와 황화수소를 동시에 포함한 악취폐가스에 대한 semi-pilot 바이오필터시스템의 동적 특성을 관찰하였다. 황화수소 및 암모니아를 동시 함유한 악취폐가스의 처리를 위하여 semi-pilot 바이오필터 시스템을 50일(2회/1일의 회수로 총 100회 실험값 측정) 동안 30 °C의 온도조건 하에서 semi-pilot 규모의 운전조건으로 운전하였다.

## 2-3. Semi-pilot 바이오필터 미생물 접종 및 개체수 산정

### 2-3-1. 미생물 고정화

황화수소에 대한 분해능이 있는 미생물을 바이오필터의 담체에 접종하기 위하여 *Thiobacillus sp.* IW를 부산대학교에서 분양받아 참고문헌[14]에서 사용한 방법으로 배양하고 바이오필터 담체에 접종하였다. 한편 암모니아의 분해균주의 접종을 위해서 암모니아의 질산화와 탈질화를 위하여 호기조와 무산소조가 상하로 연결되어 있는 폐타이저형 다단반응조(특허출원번호 10-2002-0057775)에 페타이어담체를 충전시키고 peristaltic pump (Masterflex)를 이용하여 경산 수질관리소의 반송슬러지를 연속적으로 recycle 주입하여 페타이어담체에 고정화시켰다.

### 2-3-2. 미생물 개체수 산정

미생물 접종 후에 담체에 고정된 미생물 개체수는 참고문헌[14]에서 사용한 방법으로 산정하였다. 또한 미생물담체에 고정하는 미생물 혼합물의 분포특성을 확인하기 위하여 실험이 끝난 후에 적용된 페타이어담체의 표면 및 내부, 활성탄 표면 및 compost 표면에 부착된 미생물에 대한 SEM image (Field Emission Scanning Electron

Microscope S-4300, Hitachi Ltd.)를 관찰하였다.

## 2-4. 황화수소 및 암모니아 분석방법

Flame photometric detector (FPD)와 silica capillary column (30 m×0.32 mm, 4 μm thickness)을 장착한 가스크로마토그래피(GC-2010AF, Shimadzu)를 RiGas에서 주문하여 구입한 황화수소(1 ppmv) 및 암모니아(15.4 ppmv) 각각의 표준가스로 calibration을 수행하였고 injection port, 오븐 및 detector의 온도는 각각 100 °C, 50~230 °C와 225 °C를 유지하였다. 공기, 헬륨 및 수소의 유량은 82, 4 및 85 ml/min을 유지하였다. 황화수소 또는 암모니아를 각각 함유한 폐가스가 들어가는 바이오필터의 인입구, 처리되어 나오는 배출구 및 바이오필터 3단에 용량이 1 L인 테트라 백을 연결시켜서 가스크로마토그래피(GC-2010AF, Shimadzu) 또는 황화수소 및 암모니아용 검지관(Gastec, 4LK-4LT 및 4L-4LL(황화수소), 3L-3La 및 3M(암모니아))을 사용하여 각각의 가스내의 황화수소 및 암모니아의 농도를 측정하였다.

## 2-5. 미생물담체의 pH, 밀도, 내부공극율 및 moisture 양 측정

바이오필터 내부에 장착된 미생물담체의 pH 및 moisture 양 조절은 원활한 바이오필터의 운전을 위하여 반드시 필요한 요소이다. 담체의 적정 pH 유지를 위하여 Lim과 Park[14]이 사용한 buffer solution을 peristaltic pump (Masflex)를 사용하여 semi-pilot 바이오필터 하단바닥까지 떨어지지 않을 정도로 미량(2 ml/hr)으로 바이오필터 상부로부터 간헐적으로 바이오필터담체에 공급하였다. 그러나 semi-pilot 바이오필터 운전 후반부의 운전조건에 따라서 황화수소 부하량이 증가함에 따라서 buffer solution 공급유량을 4 ml/hr로 제고하여 semi-pilot 바이오필터로 수시로 공급하였다. 담체의 pH, 밀도, 내부공극율 및 moisture 양을 Lee 등[18]의 방법으로 각각 구하였다.

## 2-6. Semi-pilot 바이오필터시스템의 제거효율 및 제거성능

바이오필터 시스템의 황화수소와 암모니아 처리효율(removal efficiency)을 Eq. (1)에 준하여 각각 계산하였다.

$$\text{Removal efficiency (\%)} = \frac{C_i - C_o}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

where and denote the concentrations of hydrogen sulfide or ammonia of waste air fed to the process of concern and waste air treated by the process of concern, respectively.

또한 바이오필터시스템의 황화수소 또는 암모니아 부하(inlet load) 및 제거용량(elimination capacity)을 각각 Eq. (2) 및 Eq. (3)에 준하여 계산하였다.

$$\text{Inlet load (g/m}^3\text{/h)} = \frac{C_i}{\tau} \times 100 \quad (2)$$

Table 1. Experimental schedule on feed conditions of hydrogen sulfide and ammonia

Description	stage 1 (10 days)	stage 2 (10 days)	stage 3 (10 days)	stage 4 (5 days)	stage 5 (5 days)	stage 6 (5 days)	stage 7 (5 days)
Q	10 L/min (0.6 m <sup>3</sup> /hr)	20 L/min (1.2 m <sup>3</sup> /hr)	20 L/min (1.2 m <sup>3</sup> /hr)	10 L/min (0.6 m <sup>3</sup> /hr)	10 L/min (0.6 m <sup>3</sup> /hr)	10 L/min (0.6 m <sup>3</sup> /hr)	10 L/min (0.6 m <sup>3</sup> /hr)
C <sub>go</sub> (H <sub>2</sub> S)	25 ppm	12 ppm	12 ppm	25 ppm	50 ppm	100 ppm	200 ppm
C <sub>go</sub> (NH <sub>3</sub> )	240 ppm	120 ppm	180 ppm	160 ppm	160 ppm	240 ppm	240 ppm

[a] Q and C<sub>g</sub> denote air flow rate and feed condition, respectively.

$$\text{Elimination capacity (g/m}^3\text{/h)} = \frac{C_i - C_o}{\tau} \times 100 \quad (3)$$

where  $C_p$ ,  $C_o$  and  $\tau$  denote the concentrations (g-N/m<sup>3</sup>) of hydrogen sulfide or ammonia of waste air fed to the process of concern and waste air treated by the process of concern, and retention time (h), respectively.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 바이오필터시스템의 악취폐가스처리 실험결과

황화수소 및 암모니아를 동시 함유한 폐가스의 처리를 위하여 semi-pilot 바이오필터시스템을 50일(2회/1일의 회수로 총 100회 실험값 측정) 동안 30 °C의 온도조건 하에서 Table 1과 같은 조건으로 운전하였다. 바이오필터의 feed inlet, 처리가스의 exit 및 바이오필터 3단에서 측정된 황화수소와 암모니아의 농도 추이 및 제거효율은 각각 Figs. 2(a)와 (b) 및 Figs. 3(a)와 (b)와 같다. 한편 semi-pilot 바이오필터 운전에서 시간에 따른 황화수소 부하량과 황화수

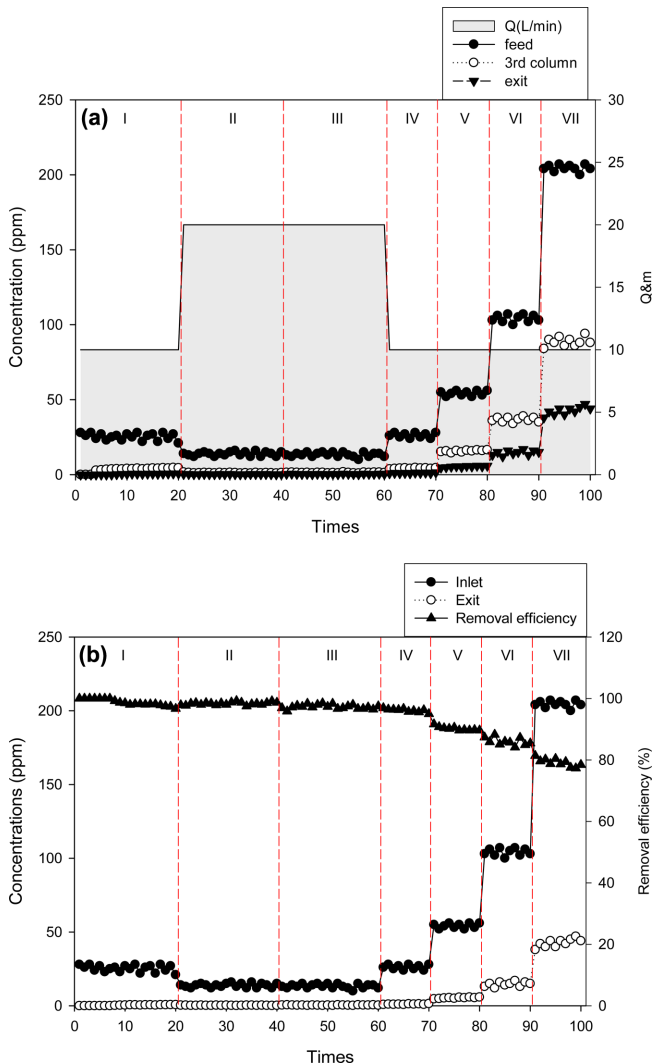


Fig. 2. (a) Various hydrogen sulfide concentrations of a semi-pilot biofilter at each sampling port versus experimental times. (b) Removal efficiency, inlet and exit-hydrogen sulfide concentrations versus times.

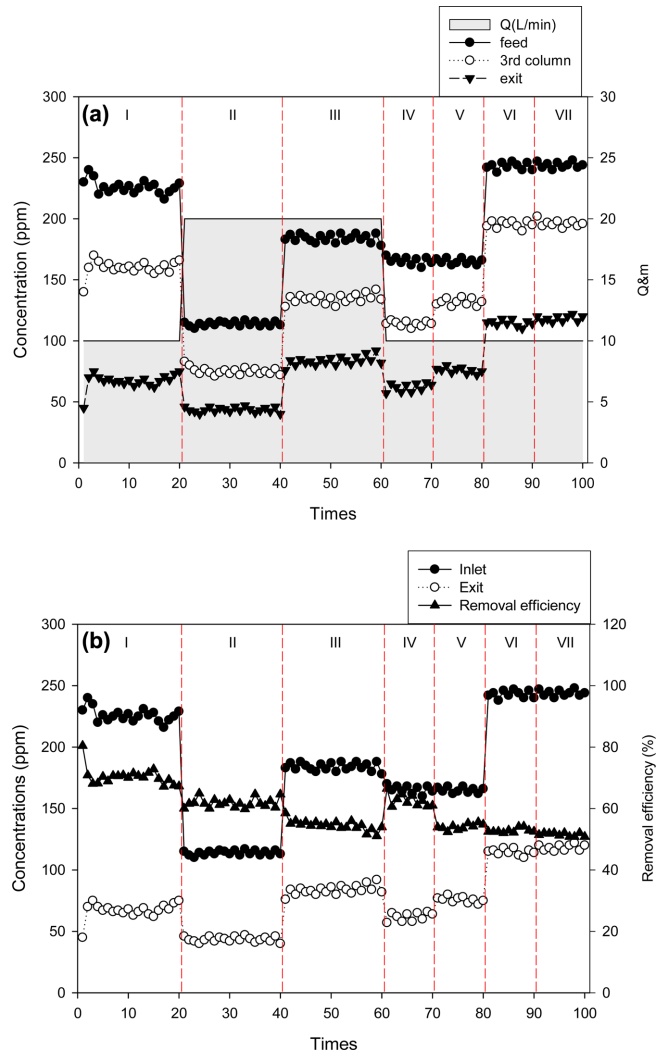


Fig. 3. (a) Various ammonia concentrations of semi-pilot biofilter at each sampling port versus experimental times. (b) Removal efficiency, inlet and exit-ammonia concentrations versus times.

소 제거용량의 추이는 Fig. 4(a)와 같으며, 각 황화수소 부하량에 대응되는 각 황화수소 제거용량은 Fig. 4(b)에 나타나 있다. 마찬가지로 암모니아의 경우에 시간에 따른 암모니아 부하량과 암모니아 제거용량의 추이는 Fig. 5(a)와 같으며, 각 암모니아 부하량에 대응되는 각 암모니아 제거용량은 Fig. 5(b)와 같다.

Semi-pilot 바이오필터의 황화수소의 제거효율은 Fig. 2(b)와 같이 운전 전반 및 중반에는 약 100%이었으나 황화수소의 부하 커짐에 따라서 점차 감소하여 운전 후반에는 약 80%이었다. 한편 암모니아의 제거효율은 Fig. 3(b)과 같이 운전 초반(stage 1과 2)에는 60 내지 70%를 유지하였으나 암모니아 부하가 stage 3에서 증가하여 약 50%로 감소하였다. 그러나 stage 4에서 암모니아 부하가 감소하여 암모니아 제거율은 약 60%로 증가하였다. 운전 후반인 stage 5에서 황화수소 부하가 증가함에 따라서 암모니아 제거율이 약 50%로 감소하고, 황화수소 부하가 stage 6에서 2배가 되었음에도 불구하고 암모니아 제거효율은 약 50%를 유지하였다. 따라서 Stage 2 및 3에서 같은 유량으로 암모니아농도가 증가할 때 황화수소에 대한 제거효율은 변화가 거의 없었고, stage 4 및 5에서 같은 유량으로 황화

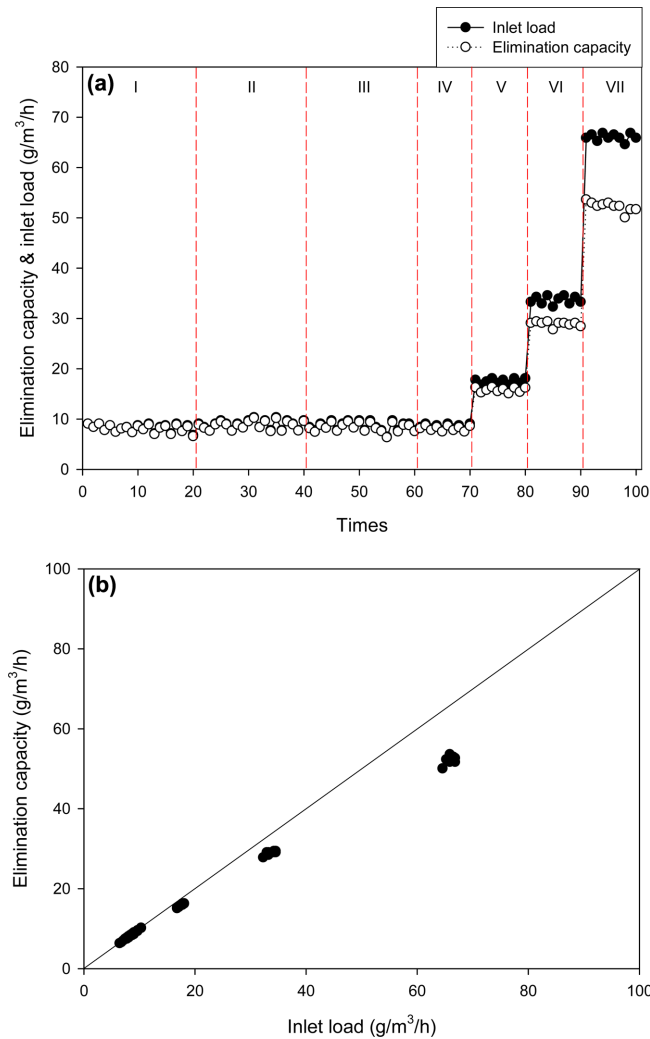


Fig. 4. (a) Elimination capacity and inlet load of hydrogen sulfide versus times. (b) Elimination capacity versus inlet load of hydrogen sulfide at the exit of semi-pilot biofilter.

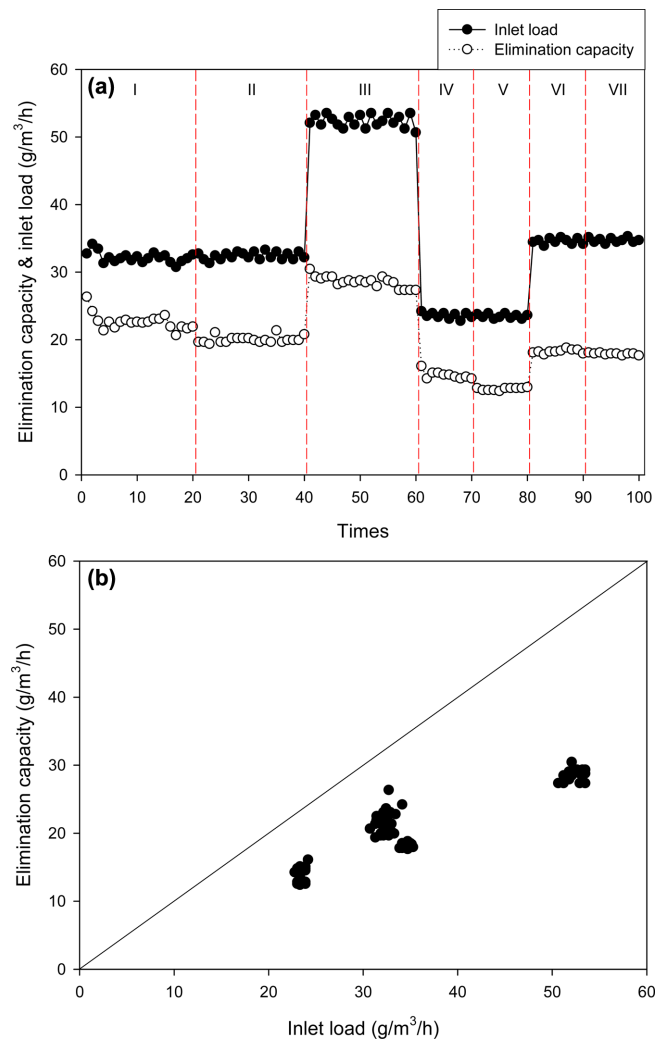


Fig. 5. (a) Elimination capacity and inlet load of ammonia versus times. (b) Elimination capacity versus inlet load of ammonia at the exit of semi-pilot biofilter.

수소농도가 증가할 때 암모니아에 대한 제거효율은 60에서 50%로 감소하였다. 그러나 stage 6 및 7에서와 같이 같은 유량에서 황화수소 농도를 계속 증가시켜도 stage 4 및 5보다 더 높은 암모니아 부하 및 농도 조건에서 암모니아 제거효율은 그대로 유지되었다. 이와 같이 semi-pilot 바이오필터 운전 초반 및 중반에서는 황화수소 제거효율은 암모니아 부하와 무관하였으나, 암모니아 제거효율은 황화수소 농도가 높아져서 황화수소 부하가 커짐에 따라서 감소하였다. 그럼에도 불구하고 semi-pilot 바이오필터 운전 후반에서는 황화수소 부하가 커짐에도 불구하고 암모니아 제거효율이 영향을 받지 않았다. 한편 semi-pilot 바이오필터 운전에서의 황화수소의 최대제거용량은 Figs. 4(a)와 (b)에서와 같이 약 58 g/m³/h이었고 암모니아의 최대제거용량은 Figs. 5(a)와 (b)에서와 같이 약 30 g/m³/h 정도이었다. Galera 등[24]은 rock wool-compost 바이오필터를 사용하여 암모니아, 황화수소 및 톨루엔 제거를 수행하였는데, 암모니아와 황화수소의 최대제거용량은 각각 약 24 및 39 g/m³/day이었다. 따라서 본 연구에서의 암모니아와 황화수소 제거용량은 Galera 등[24]보다 각각 25 및 48% 제고되었다. 이것은 Galera 등[24]의 연구에서 폐가스에 함유된 톨루엔의 추가부하에 주로 기인한다고 사료된

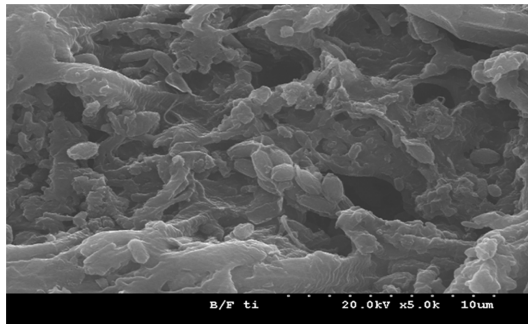
다. 한편 실험실규모의 유사한 운전조건의 바이오필터 운전결과[14, 18]와 비교하였을 때에, 황화수소만을 함유한 약취폐가스처리[14]에서의 황화수소 최대제거용량은 95 g/m³/h이었고, 암모니아만을 함유한 약취폐가스처리[18]에서의 암모니아 최대제거용량은 약 55 g/m³/h이었다. 따라서 바이오필터 운전에 의하여 황화수소와 암모니아를 동시 제거한 경우에는 둘 중의 하나만을 함유한 경우보다 제거용량이 각각 약 39%와 46% 만큼 감소하여서 암모니아 최대제거용량이 황화수소 최대제거용량보다 7% 만큼 더 감소하였다.

### 3-2. 바이오필터 담체 특성

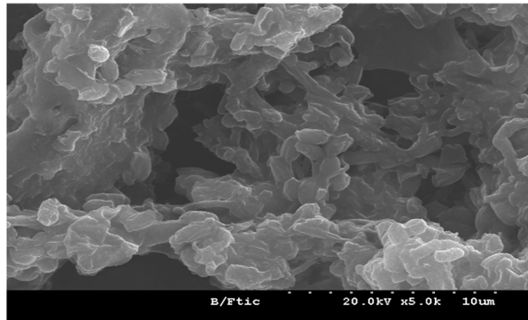
3-2-1. 페타이어담체의 겉보기 밀도 및 담체 내부 공극율 측정 결과  
본 실험에서 사용된 것과 동일한 compost의 겉보기밀도는 0.37 g/ml이었고 본 실험에서 사용된 것과 동일한 페타이어담체의 겉보기 밀도는 0.31 g/ml이었고 내부공극율은 24%이었다[18,19].

### 3-2-2. pH 및 moisture양 측정결과

Semi-pilot 바이오필터 내부의 미생물 담체(페타이어담체+활성탄+compost)의 pH는 1단, 3단 및 5단에서 각각 5.23, 5.87 및 6.55이



(a)



(b)

Fig. 6. SEM image of waste tire crumb-media: (a) surface; (b) cross-section.

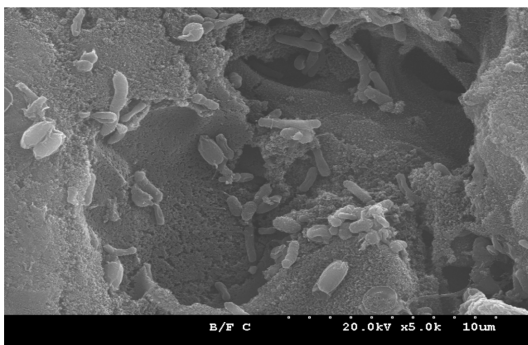


Fig. 7. SEM image of the surface of GAC.

었다. 한편 함수율은 담체의 활성탄/compost의 경우는 평균 55.1%를 나타내었고 페타이어담체는 평균 57.0%를 보였다. 따라서 미생물 담체의 1단, 2단 및 3단에서의 평균함수율은 56.1%를 보였다.

### 3-2-3. 미생물 개체수 산정결과

Semi-pilot 바이오필터의 1단, 3단 및 5단 내부에서 채취한 미생물 담체 1 g을 DAPI 염색시켜 형광현미경으로 관찰계수한 *Thiobacillus sp.* IW를 포함한 간균은 평균  $1.6809(\pm 0.3933) \times 10^9/\text{g}$ 이었다. 한편 간균을 제외한 비간균은 평균  $1.4978(\pm 0.3735) \times 10^9/\text{g}$ 이었다. Semi-pilot 바이오필터담체에 고정하는 미생물이 *Thiobacillus sp.* IW와 하수처리장의 반응슬러지의 혼합물이므로 그 분포특성을 확인하기 위하여 실험이 끝난 후에 적용된 페타이어담체의 표면(Fig. 6(a)) 및 내부(Fig. 6(b)), 활성탄 표면(Fig. 7) 및 compost 표면(Fig. 8)에 부착된 미생물에 대한 SEM image (Field Emission Scanning Electron Microscope. Hitachi, S-4300)를 나타내었다

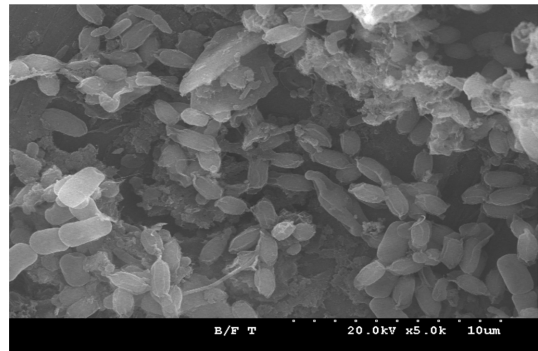


Fig. 8. SEM image of the surface of compost.

## 4. 결 론

Semi-pilot 바이오필터시스템으로 황화수소와 암모니아의 동시 제거를 할 때에 황화수소와 암모니아의 최대 elimination capacity 값은 각각 약 58 및 30 g/m<sup>3</sup>/h이었다. 한편 semi-pilot 바이오필터 운전 초반 및 중반에서는 황화수소 제거효율은 암모니아 부하와 무관하였으나, 암모니아 제거효율은 황화수소 부하가 커짐에 따라서 감소하였다. 그럼에도 불구하고 semi-pilot 바이오필터 운전 후반에서는 황화수소 부하가 커짐에도 불구하고 암모니아 제거효율이 영향을 받지 않았다. 이것은 semi-pilot 바이오필터 운전 후반의 buffer solution의 지속적 투입으로 인하여 semi-pilot 바이오필터담체의 산성화가 비교적 크지 않음에 기인한다고 간주된다. Semi-pilot 바이오필터 운전에서 의하여 황화수소와 암모니아를 동시 제거한 경우에는 실험실규모 바이오필터의 유사한 운전조건 하에서 둘 중의 하나만을 함유한 경우보다 제거용량이 각각 약 39%와 46% 만큼 감소하여서, 황화수소와 암모니아를 동시 제거한 경우에 암모니아 최대 제거용량이 황화수소 최대제거용량보다 7% 만큼 더 감소하였다.

## 감 사

이 논문은 대구대학교 학술연구비지원(혹은 일부지원)에 의한 논문입니다.

## References

1. Hirai, M., Ohtake, M. and Shoda, M., "Removal Kinetics of Hydrogen Sulfide, Methanethiol and Dimethyl Sulfide by Peat Biofilters," *J. Ferment. Bioeng.*, **70**, 334-339(1990).
2. Chris, E., Chris, Q., Peter, B., Jay, W. and Dirk, A., "Odor and Air Emissions Control Using Biotechnology for Both Collection and Wastewater Treatment Systems," *Chem. Eng. J.*, **113**, 93-104 (2005).
3. Islander, R. I., Devanny, J. S., Mansfield, F., Postyn, A. and Shin, H., "Microbial Ecology of Crown Corrosions in Sewers," *J. Environ. Eng.*, **117**, 751-770(1990).
4. Oyarzun, P., Arancibia, F., Canales, C. and Aroca, G. E., "Bio-filtration of High Concentration of Hydrogen Sulfide Using *Thiobacillus thioautotrophicus*," *Process Biochem.*, **39**(2), 165-170(2003).
5. Cho, K.-S., Ryu, H. W. and Lee, N. Y., "Biological Deodoriza-

- tion of Hydrogen Sulfide Using Porous Lava as a Carrier of *Thiobacillus thiooxidans*,” *J. Biosci. Bioeng.*, **90**, 25-31(2000).
6. Wani, A. H., Branion, M. R. and Lau, A. K., “Effects of Periods of Starvation and Fluctuating Hydrogen Sulfide Concentration on Biofilter Dynamics and Performance,” *J. Hazard. Mater.*, **60**, 287-303(1998).
  7. Chung, Y.-C., Huang, C. and Tseng, C.-P., “Biodegradation of Hydrogen Sulfide by a Laboratory-scale Immobilized *Pseudomonas putida* CH11 Biofilter,” *Biotechnol. Prog.*, **12**, 773-778(1996a).
  8. Chung, Y.-C., Huang, C. and Tseng, C.-P., “Operation Optimization of *Thiobacillus thioparus* CH11 in a Biofilter for Hydrogen Sulfide Removal,” *J. Biotechnol.*, **52**, 31-38(1996b).
  9. Chung, Y.-C., Huang, C. and Tseng, C.-P., “Biological Elimination of  $H_2S$  and  $NH_3$  from Wastegases by Biofilter Packed with Immobilized Heterotrophic Bacteria,” *Chemosphere*, **43**, 1043-1050(2001).
  10. Cox, H. H. J. and Deshusses, M. A., “Co-treatment of  $H_2S$  and Toluene in a Biotrickling Filter,” *Chem. Eng. J.*, **87**, 101-110(2002).
  11. Shareefdeen, Z., Herner, B., Webb, D., Verhaeghe, L. and Wilson, S., “An Odor Predictive Model for Rendering Applications,” *Chem. Eng. J.*, **113**, 215-220(2005).
  12. Hirai, M., Kamamoto, M., Yani, M. and Shoda, M., “Comparison of the Biological  $H_2S$  Removal Characteristics Among Four Inorganic Packing Materials,” *J. Biosci. Bioeng.*, **91**, 396-402(2001).
  13. Elias, A., Barona, A., Arreguy, A., Rios, J., Aranguiz, I. and Penas, J., “Evaluation of a Packing Material for the Biodegradation of  $H_2S$  and Product Analysis,” *Process Biochem.*, **37**, 813-820(2002).
  14. Lim, K.-H. and Park, S.-W., “Transient Behavior of Biofilter Inoculated with *Thiobacillus* sp. IW to Treat Waste-air Containing Hydrogen Sulfide,” *Korean J. Chem. Eng.*, **23**(6), 965-971(2006).
  15. Lim, D. J. and Lim, K.-H., “Characteristics on the Incubation of Sulfur Compound-oxidizing Strains Separated for the Removal of Malodor,” *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **47**(6), 788-794(2009).
  16. Kaneko, M., Gokan, G., Katakura, N., Takei, Y. and Hoshino, M., “Artificial Photochemical Nitrogen Cycle to Produce Nitrogen and Hydrogen from Ammonia by Platinized  $TiO_2$  and its Application to a Photofuel Cell,” *Chem. Commun.*, 1625-1627(2005).
  17. Jester, R. C. and Malone, G. W., “Respiratory Health on the Poultry Farm,” National Ag Safety Database (NASD), <http://www.cdc.gov/nasd/docs/d000101-d000200/d000146/d000146.html>.
  18. Lee, E. J., Park, S. W., Nam, D. V., Chung, C. H. and Lim, K.-H., “Treatment of Malodorous Waste Air Containing Ammonia Using Biofilter System,” *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **48**(3), 391-396(2010).
  19. Lee, E. J. and Lim, K.-H., “Treatment of Malodorous Waste Air Containing Ammonia Using Hybrid System Composed of Photocatalytic Reactor and Biofilter System,” *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **51**(2), 272-278(2013).
  20. Lee, E. J. and Lim, K.-H., “Treatment of Malodorous Waste Air Using Hybrid System,” *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **48**(3), 382-390(2010).
  21. Chen, Y.-X., Yin, J. and Wang, K.-X., “Long-term Operation of Biofilters for Biological Removal of Ammonia,” *Chemosphere*, **58**, 1023-1030(2005).
  22. Jiang, X. and Tay, J. H., “Operational Characteristics of Efficient co-removal of  $H_2S$  and  $NH_3$  in a Horizontal Biotrickling Filter Using Exhausted Carbon,” *J. Hazard. Mater.*, **176**, 638-643(2010).
  23. Chung, Y.-C., Lin, Y.-Y. and Tseng, C.-P., “Removal of High Concentration of  $NH_3$  and Coexistent  $H_2S$  by Biological Activated Carbon (BAC) Biotrickling Filter,” *Bioresour. Technol.*, **96**, 1812-1820(2005).
  24. Galera, M. M., Cho, E., Tuuguu, E., Park, S.-J., Lee, C. and Chung, W.-T., “Effects of Pollutant Concentration Ratio on the Simultaneous Removal of  $NH_3$ ,  $H_2S$  and Toluene Gases Using Rock Wool-compost Biofilter,” *J. Hazard. Mater.*, **152**, 624-631(2008).
  25. Lim, K.-H., Jung, Y.-J., Park, L. S. and Min, K.-S., “Preparation and Characteristics of Media from Waste Tire Powder for Wastewater Treatment,” *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **39**(5), 600-606(2001).