

## Biofilter에 의한 VOCs 및 악취물질의 제거특성에 관한 연구

박진도·서정호·이학성  
울산대학교 생명화학공학과, \*울산과학대학 환경생활화학과  
(2005년 4월 15일 접수; 2005년 8월 24일 채택)

### A Study on the removal characteristics of VOCs and Odors with Biofilter

Jin-Do Park, Jung-Ho Suh\* and Hak-Sung Lee

School of Chemical Engineering & Bioengineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea  
\*Department of Environmental & Life Chemistry, Ulsan College, Ulsan 680-749, Korea  
(Manuscript received 15 April, 2005; accepted 24 August, 2005)

The objective of this research was to investigate the removal efficiencies of VOCs and odors with newly developed biofilter which was designed to sustain the biofilm constantly on the packed media. Initially, four types of media, for example, fiber, activated carbon, ceramic and the mixture of activated carbon and ceramic(A/C mixture), were used for packed materials of biofilter. When ethylalcohol was selected as a test gas for media efficiency, fiber and A/C mixture had better removal efficiencies of ethylalcohol than others. Removal efficiencies for acetaldehyde, ethylalcohol, butylalcohol, ethylacetate and diethylamine in biofilter with fiber and A/C mixture as packed media were increased as the residence time increased. Butylalcohol, especially, showed the maximum removal efficiency among all used VOCs and odors. In case of ethylacetate, the difference of removal efficiencies between low and high residence times was wide remarkably.

Key Words : Biofilter, Rasching ring, Diethylamine, Acetaldehyde, Ethylacetate, Odor, VOCs

#### 1. 서론

우리나라는 1995년 12월에 개정된 대기환경보전법에 대기환경 규제지역에서의 VOCs 배출시설관리를 1999년 1월부터 시행하도록 규정하였고, 1996년 9월에 여천공단이 특별대책지역으로 지정되면서 공단지역에서의 VOCs 규제관리가 시작되었다<sup>1)</sup>. 1997년 7월 울산·미포 및 온산 국가산업단지내의 VOCs 배출방지 정책이 고시되면서 공단지역에서의 VOCs를 1999년 1월 1일부터 배출규제를 시행할 예정이었으나, 국내의 관련 연구와 기술 수준이 미비하고 사업장 적용의 경험이 부족하여 주어진 기한 내에 배출시설의 환경규제기준을 만족시킬 수 없고, 경제적인 부담을 가능한 최소화하는 기술의 선택에 어려움이 있어 2000년 1월 1일부로 시행되어지고 있다<sup>2)</sup>.

VOCs의 저감 시설은 물질의 종류, 배출농도에 따라 적용하는 방법이 여러 가지가 있으며, 산업 현장에 적용되어 사용되어지고 있는 설비로는 축열식 소각로(RTO)에 의한 제거시설, 흡착에 의한 제거시설, 응축에 의한 제거시설, 축열식 촉매산화(RCO)연소장치, Biofilter에 의한 제거시설 등이 있다<sup>3)</sup>. VOCs 및 악취물질의 처리규제가 예정 고시를 거쳐 시행되어 졌지만 초기 설비의 도입에 충분한 기술적 검토가 없어서 처리 설비를 각 공장의 실정에 맞지 않게 도입된 곳이 많다.

생물학적으로 VOCs 물질을 제거하는 여러 가지 방법이 있지만 미생물 충전재를 충전시킨 반응기를 이용하여 VOCs 및 악취가스를 처리하는 packed bed biofilter 방식은 주로 유럽과 일본에서 개발되었다<sup>4)</sup>. 생물학적 처리기술은 다른 처리기술에 비해 운전비용이 매우 저렴하고, 운전관리가 간단하며, 2차 오염의 염려가 없다는 특징을 가지고 있다. 이러한 기술은 작은 규모의 설비로 효율을 극대화시킬 수 있으므로, 사업장에서 면적이 좁은 공간에 설치하여

Corresponding Author : Hak-Sung Lee, School of Chemical Engineering & Bioengineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea  
Phone: +82-52-259-2252  
E-mail: hslee@mail.ulsan.ac.kr

VOCs<sup>5)</sup> 및 악취물질의 저감에 적절히 사용되고 있다.

Biofilter에 의한 VOCs 및 악취물질의 생물학적 처리는 대상 물질이 미생물에 의해서 잘 분해 되는지의 여부에 달려있다. 화학공장의 경우, 여러 가지의 원료를 사용하여 여러 제품을 생산하므로 각 물질별 생물학적 분해특성을 확인하여 biofilter를 도입하여야 한다.

본 연구에서는 현재 축열식 소각로(RTO)설비를 이용하여 VOCs 및 악취물질을 처리하고 있으나 경제성에 문제점을 내포하고 있는 울산석유화학공단 내에 위치한 K산업(주)에서 제품 및 원료물질로부터 발생하는 VOCs 및 악취물질을 대상으로 하여 biofilter에 의한 처리가능성 여부를 검토하였다.

반응기의 형태는 bioscrubber(BS)와 biotrickling filter(BTF)의 장·단점을 보완하도록 반응기를 제작하여 실험하였다. 반응기의 특성을 확인하기 위해서 생물학적으로 분해가 잘되는 에탄올을 4종류의 충전재를 각 반응기에 충전하고 동일한 조건에서 처리하여 각 충전재별 제거효율 및 운전 특성이 양호한 2종류를 선택하고 이들 충전재가 충전된 biofilter에 acetaldehyde, butylalcohol, ethylacetate, diethylamine을 단일 성분으로 공탐체류시간(EBRT) 및 농도를 변화시켜 공급하여 각 성분별 처리효율과 생물분해 특성을 비교 실험하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 실험 장치

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 직경 9 cm, 높이 72 cm의 원형 아크릴관으로 실험장치를 구성하고, 4개의 column에 각각 다른 충전재를 충전하였다. 각 column 내에 충전재를 Table 1에 나타낸 것과 같이 fiber, activated carbon<sup>6)</sup>, ceramic 및 activated carbon과 ceramic(1:1 무게비, 이하 A/C column이라 한다)을 혼합하여 충전하였다. Column 1의 fiber는 H사에 제작한 폐수처리용 충전재로서 섬모상이며, column 2의 activated carbon은 시판되고 있는 pellet 형태를 구입하여 사용하였으며, column 3, column 4의 ceramic 충전물은 saddle 형태를 사용하였다. VOCs 및 악취물질을 일정한 농도로 공급하기 위해서 bubble bottle에 기질물질을 넣고 압축공기

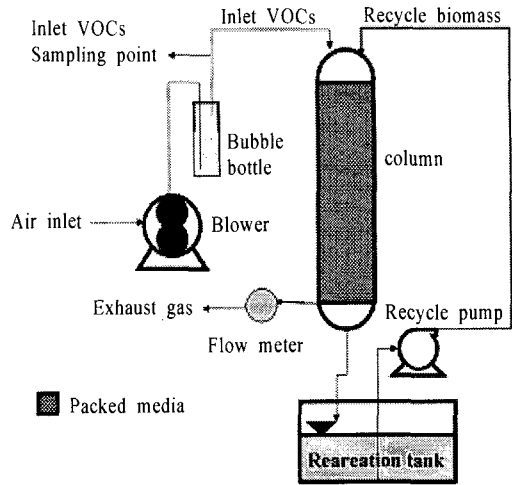


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

를 불어 넣어 일정한 농도로 VOCs gas를 발생시켰다. 각 농도 단계별로 bubble bottle의 용량을 결정하고 VOCs inlet부분을 통하여 유입시켜 실험을 수행하였다.

### 2.2. 실험 및 분석

미생물 시료는 본 연구에서 사용된 VOCs 및 악취물질을 생산하는 K산업(주)의 포기조에서 채취하여 본 실험장치의 포기조에 투입한 후 압축공기를 공급하여 충분한 용존산소가 존재하는 상태로 배양을 실시하였다. 포기조액을 간헐적으로 공급하면서 수분 조절을 하였고, 미생물 영양제는 수분 공급과 동시에 투입하였다.

실험에 사용할 충전재를 포기조에 투입한 후 약 2주간 영양제 및 유기물질을 주입하면서 미생물의 부착 및 적응을 실시하였다. 충전재를 포기조에서 꺼내어 실험에 사용할 각 column에 투입하고 일정속도의 공기와 수분, 유기물, 영양물질(무기물 및 N, P 성분)을 투입하여 미생물이 적응하도록 약 1주간 관리를 하였다.

운전은 bioscrubber(BS)와 biotrickling filter(BTF)<sup>8)</sup>의 혼합형태로 충전재 상부에서 포기조 혼합액을 간헐적으로 뿌려 주어 충전재에 미생물을 재공급하고, 하부로 흐르는 혼합액이 충전재의 세척작용을 하여

Table 1. Biofilter dimensions for 4 types of columns

Column	Media Type	Diameter (cm)	Bed height (cm)	Bed volume (cm <sup>3</sup> )	Bed porosity
1	Fiber	9	68	4,324	0.52
2	Activated carbon	9	66	4,196	0.66
3	Ceramic	9	67	4,260	0.79
4	Ceramic + Activated carbon	9	68	4,324	0.43

순수한 BS공정에 비하여 channeling현상이 감소되도록 실시하였다.

본 실험에서 사용한 VOCs 및 악취물질은 acetaldehyde, ethylalcohol, butanol, diethylamine을 각각 약 100ppm의 농도로 biofilter column에 공급하였다(공탐체류시간: 80초). 분석 시료의 채취는 흡수 장치를 이용하여 포집 및 농축하였으며, VOCs의 종류에 따라 흡수 용매를 선택하였다<sup>9)</sup>. 수용성의 경우는 순수를 사용하여 시료가스를 포집하였고, 불수용성 시료는 메탄올 또는 에탄올에 흡수시켜 분석 시료를 제조하고 GC/FID(VARIAN 3800CX, VARIAN 3400CX)로 분석하였다. GC-FID의 column으로는 HP-1(Crosslinked Silicon Gum, 30 m×0.53 mm×0.88 μm filmness)를 사용하였고, carrier gas는 He을 85 ml/min 유량으로 공급하였다. Detector 및 injector의 온도는 각각 200℃, 150℃로 설정하였고, oven 온도는 initial temperature 40℃/3min, 6℃/min, 70℃(0 min), 20℃/min, 150℃에서 3분간 머무르도록 설정하여 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 충전재 종류에 따른 제거율 실험

실험에 사용된 각 충전재에 미생물의 부착 여부 및 개략적인 처리효율을 비교하기 위하여 에탄올을 사용하였으며, 예비 실험 결과를 Fig. 2.에 나타내었다. 에탄올의 농도를 점진적으로 증가(114 ppm~285 ppm)시키면서 공탐체류시간(EBRT)을 60 sec로 실험한 결과 fiber를 충전시킨 column 1에서 다른 column에 비해 양호한 처리 결과(제거효율 97%)를 얻었다.

Activated carbon을 충전한 column 2에서의 제거율은 약 75%~90%로 나타나 다른 column에 비해

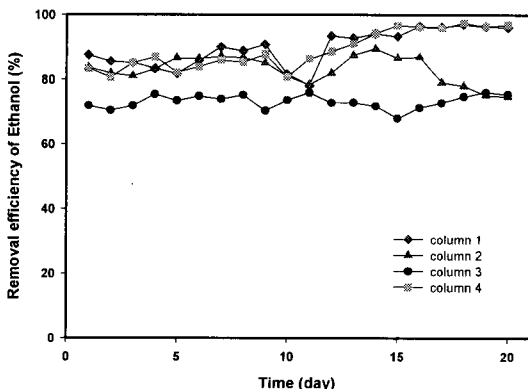


Fig. 2. Removal efficiencies of ethanol by various packed media(No.1: Fiber, No.2: Active carbon, No.3: Ceramics, No.4: A/C). EBRT : 60 sec.

제거율이 낮게 나타났다. 이는 실험이 진행되는 동안 activated carbon이 미세하게 부서져 bed의 용적 감소현상이 일어나면서 공극을 막아 단로(channeling)를 형성하여 제거율이 저하된 것으로 판단된다<sup>10)</sup>.

Ceramic을 충전한 column 3에서는 실험 초기부터 다른 충전재에 비하여 제거율이 현저히 낮았다. 이는 다른 충전물에 비하여 ceramic의 공극률이 훨씬 높아 미생물의 부착될 수 있는 접촉면적이 다소 떨어지는 것으로 판단된다. Lava stone과 pall ring, raschig ring의 공극률 차이에 따른 비교실험에서도 이와 유사한 결과가 보고 되었다<sup>11)</sup>.

Activated carbon과 ceramic을 혼합 충전한 column 4에서의 ethanol 제거율은 97%로 높은 처리효율을 나타내었다. column 4의 경우, ceramic의 미생물 부착 능력 감소에 의한 처리효율의 저하를 activated carbon이 보완하고, activated carbon의 충전재 파손에 의한 단로 현상이 ceramic에 의해 저하되어 처리효율이 양호하게 된 것으로 판단된다.

이와 같은 예비실험의 결과를 바탕으로 충전재 4 종류를 사용하여 예비 실험을 한 결과 처리효율이 저조한 ceramic과 activated carbon 단독으로 사용한 column 2, column 3을 본 실험에서 배제하고, column 1과 column 4를 사용하여 VOCs 및 악취물질에 대하여 처리효율을 비교 실험하였다.

#### 3.2. Acetaldehyde의 제거 실험

Fiber를 단독으로 충전한 column 1과 activated carbon과 ceramic을 혼합 충전한 column 4를 사용하여 acetaldehyde의 제거효율을 공탐체류시간에 따라 비교 실험한 결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이, fiber를 단독으로 충

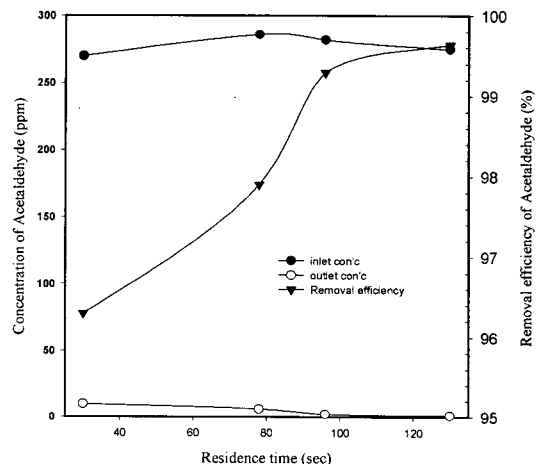


Fig. 3. Removal efficiency of acetaldehyde for fiber column according to EBRT.

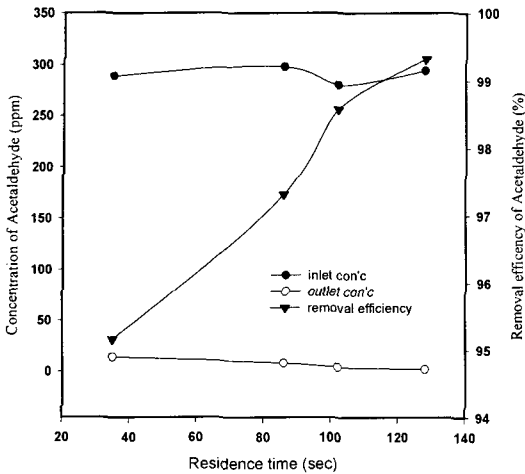


Fig. 4. Removal efficiency of acetaldehyde for A/C column according to EBRT.

전한 경우, acetaldehyde의 농도를 270~286 ppm (Loading rate 7.62~32.40 g/m<sup>3</sup>·hr)으로 공급하였을 때 각 공탑체류시간별 처리효율을 비교하였다. 공탑체류시간 30초에서는 제거율이 96.3%, 78초에서는 제거율이 97.9%, 96초에서 99.3%, 130초에서는 제거율이 99.6%로 나타나 공탑체류시간이 증가할수록 acetaldehyde의 제거율이 증가하는 것을 알 수 있었다.

Activated carbon과 ceramic을 혼합 충전한 A/C column에서 acetaldehyde 농도를 289~298 ppm (Loading rate 8.27~29.73 g/m<sup>3</sup>·hr)으로 공급하며 공탑체류시간별 acetaldehyde의 처리효율을 비교 실험한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fiber 단독 충전 column에서와 마찬가지로 공탑체류시간 35~128초에서 제거율이 95% 이상으로 나타났으며, acetaldehyde의 경우 생물학적으로 분해가 잘 됨을 알 수 있었다. 또한 공탑체류시간 100초 이상에서는 99% 이상의 아주 우수한 제거효율 얻을 수 있었다. 따라서 acetaldehyde는 biofilter를 이용할 경우, 초기 유입 농도가 약 300 ppm 정도의 높은 농도에서도 우수한 처리효율을 얻을 수 있으므로 현장 적용이 가능할 것으로 판단된다.

### 3.3. Ethylacetate의 제거 실험

Fiber column에서 ethylacetate의 농도를 131~142 ppm (loading rate 4.12~11.79 g/m<sup>3</sup>·hr)으로 공급하여 공탑체류시간별 처리효율을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에 나타난 바와 같이, 공탑체류시간 40초에서 처리효율은 61.8%, 56초에서는 78.2%, 88초에서는 98.5%, 118초에서는 99.1%의 제거율을 나타내었다. Ethylacetate의 미생물에 의한 생분해도는 문

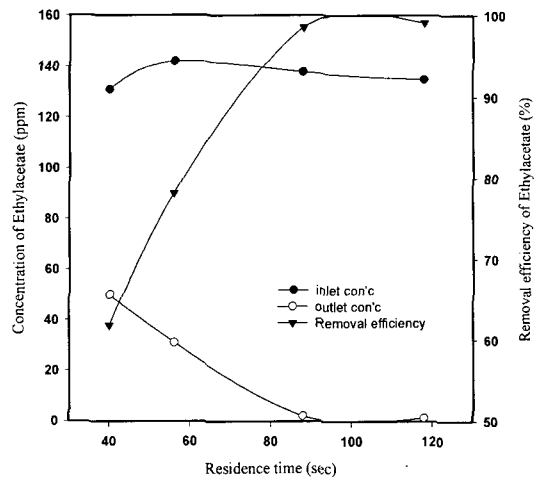


Fig. 5. Removal efficiency of ethylacetate for fiber column according to EBRT.

헌<sup>12)</sup>에 의하면 잘 제거되는 것으로 나타나 있으나, 본 실험에서는 acetaldehyde의 제거효율과 비교할 때 공탑체류시간이 짧을 때는 제거율이 현저히 낮은 것을 알 수 있었다.

A/C column에서 ethylacetate의 농도를 132~145 ppm (loading rate 4.26~11.31 g/m<sup>3</sup>·hr)으로 공급하여 공탑체류시간별 처리효율을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에 나타난 것과 같이 공탑체류시간 42초에서 처리효율은 71.2%, 52초에서는 82.6%, 84초에서는 96.9%, 115초에서는 97.8%의 제거율을 나타내었다.

Acetaldehyde의 실험 결과와 마찬가지로 ethylacetate의 제거율이 공탑체류시간 80초 이상에서는 fiber column이 우수한 것으로 나타났으나, 공탑체류시간이 약 60초 이하로 낮은 경우에는 오히려 A/C

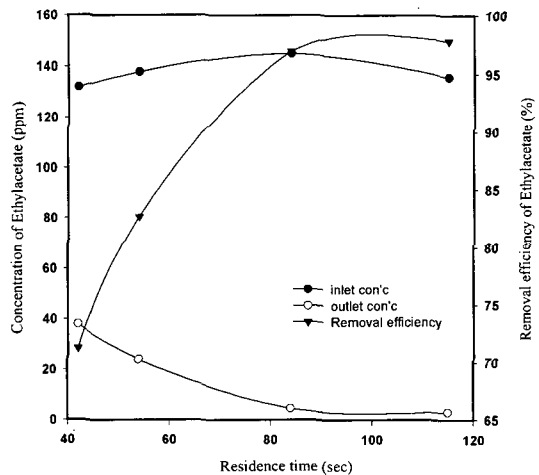


Fig. 6. Removal efficiency of ethylacetate for A/C column according to EBRT.

## Biofilter에 의한 VOCs 및 악취물질의 제거특성에 관한 연구

column에서 처리 효율이 높은 것으로 나타났다.

95% 이상의 제거효율을 얻기 위해서는 공탑체류시간을 80초 이상을 유지하여야 한다. Ethylacetate의 경우 공정설계 시, 공탑체류시간을 충분히 고려하여야 할 것으로 판단된다. 본 실험의 결과는 Lava stone을 충전재로 충전한 bench scale biofilter를 사용하여 residence time 168초에서 약 90% 정도의 제거효율을 나타낸 연구결과<sup>13)</sup>에 비해 제거효율이 우수한 것으로 나타나 공정 운전방법에 따라 제거효율이 달라 질 수 있다는 결론을 얻었다.

### 3.4. Butylalcohol의 제거 실험

Fiber column에서 butylalcohol의 농도를 54~59 ppm( $1.32 \sim 10.6 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hr}$ )으로 공급하여 공탑체류시간별 처리효율을 비교하였다. Fig. 7에 나타낸 바와 같이, 공탑체류시간 20초에서 처리효율은 95.7%, 35초에서는 97.6%, 55초에서는 99.1%, 80초에서는 99.8%, 147초에서는 99.9%의 제거율을 나타내었다. Ethylacetate, butylalcohol의 경우는 공탑체류시간 20초에서도 제거율이 95% 이상으로 높게 나타났다.

A/C column에서 butylalcohol의 농도를 57~62 ppm( $1.33 \sim 11.60 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hr}$ )으로 공급하여 공탑체류시간별 처리효율을 비교하였다. Fig. 8에서와 같이 공탑체류시간 18초에서 처리효율은 95.2%, 26초에서는 96.0%, 51초에서는 98.7%, 89초에서는 99.8%, 160초에서는 99.9%의 제거율을 나타내었다. 유입부하량  $11.60 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hr}$ 에서 최대 제거용량은  $11.14 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hr}$ 로 나타났다. 다른 물질에 비하여 loading rate가 낮은 경향은 있지만, 알코올류의 물질은 biofilter에 의하여 잘 분해되는 것으로 판단된다. A/C column의 경우는 공탑체류시간 18초에서도 제거율이 95% 이상으로 높게 나타났다.

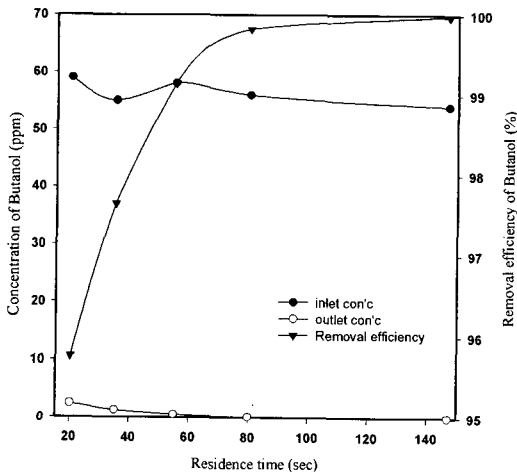


Fig. 7. Removal efficiency of butanol for fiber column according to EBRT.

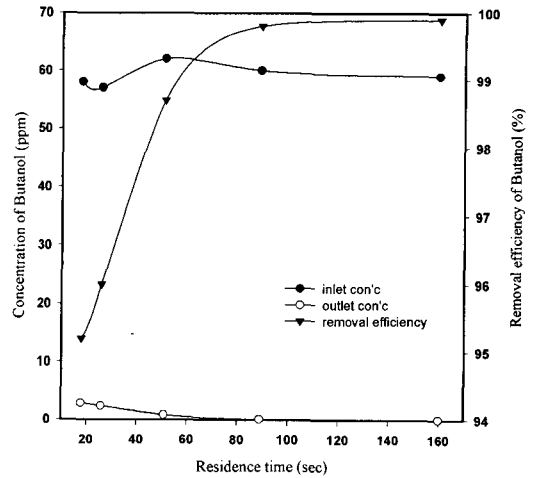


Fig. 8. Removal efficiency of butanol for A/C column according to EBRT.

### 3.5. Diethylamine의 제거 실험

Fiber column에서 diethylamine의 농도를 57~60 ppm( $2.94 \sim 12.70 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hr}$ )으로 공급하여 공탑체류시간별 처리효율을 비교하였다. Fig. 9에서와 같이 본 column에서는 38초에서 88초 사이에서 급격히 제거율이 상승하였다. Diethylamine의 최대제거용량은  $4.93 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hr}$ 이었으며, 이 때의 유입부하량은  $5.68 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hr}$ 이었다. 95%의 제거율을 얻기 위해서는 공탑체류시간 80초 이상을 유지하여야 할 것으로 판단된다.

A/C column에서 diethylamine의 농도를 92~97 ppm( $2.25 \sim 10.27 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hr}$ )으로 공급하여 공탑체류시간별 처리효율을 비교하였다. Fig. 10에서와 같이 본 column에서는 34초에서 62초 사이에

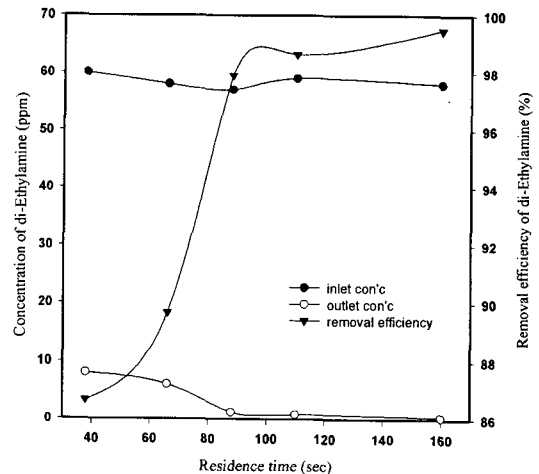


Fig. 9. Removal efficiency of diethylamine for fiber column according to EBRT.

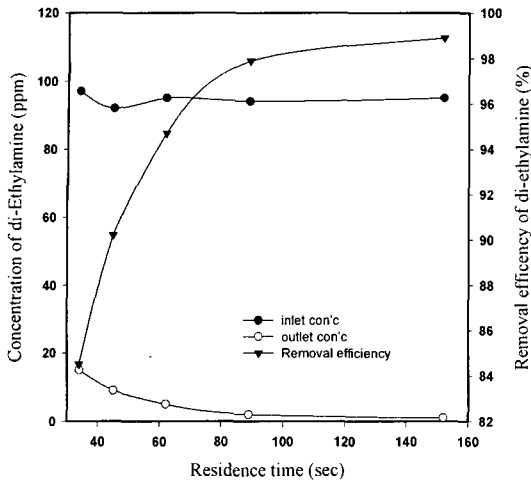


Fig. 10. Removal efficiency of diethylamine for A/C column according to EBRT.

서 급격히 제거율이 상승하였다. 유입부하량 10.27 g/m<sup>3</sup> · hr에서 최대 제거용량은 8.96 g/m<sup>3</sup> · hr로 나타났다. 95%의 제거율을 얻기 위해서는 공탑체류시간 70초 이상을 유지하여야 할 것으로 판단된다.

A/C 및 fiber column에서 diethylamine의 제거율은 에탄올이나 아세트알데히드 등에 비하여 공탑체류시간이 짧을 경우, 제거효율이 낮았다. 이 등<sup>14)</sup>의 활성탄/폴리우레탄을 충전재로 한 톨루엔의 제거실험에서 공탑체류시간이 짧아짐에 따라 제거율이 하락한 것과 동일한 결과를 얻었다. 이는 유입된 VOCs 및 악취물질이 공탑체류시간이 길어짐에 따라 미생물과의 접촉시간이 길어져 제거율을 향상시킨 것으로 판단된다.

전통적인 biofilter에 Lava stone을 여재로 사용한 diethylamine의 제거실험에서 공탑체류시간 84초, loading rate 118 g/m<sup>3</sup> · hr에서 88%정도의 처리율을 확인한 실험<sup>11)</sup>에서 보다 개량된 본 실험장치에서는 비교적 높은 처리효율을 나타내었다. 하지만 본 실험에서는 loading rate를 상승시켰을 때 제거율의 변화를 관찰하지 못하였다.

### 3.6 각 물질의 공탑체류시간에 따른 제거율

Table 2는 충전재를 달리하여 유사한 범위의 공탑체류시간에 따른 각 물질별 제거율을 나타내었다. 충전재를 fiber, A/C로 사용한 각 column에서 공탑체류시간이 78~89초의 범위에서 모든 물질의 제거율이 약 97%를 상회하였고, 알콜류의 경우 각 column 모두 99.8%의 제거율을 나타내었다.

## 4. 결론

Biofilter를 이용한 VOCs 및 악취물질의 제거에 있어서 미생물 충전재에 따른 제거 특성을 실험한 결과 공극률과 충전재의 물리적 특성에 따라 제거율이 다르게 나타났다. 충전재의 특성을 비교하기 위해 생물분해성<sup>15)</sup>이 좋은 에탄올을 점진적으로 농도를 증가(114 ppm~285 ppm)시키면서 실험한 결과, fiber를 충전시킨 column에서는 다른 것에 비하여 양호한 처리 결과(제거효율 97%)를 나타내었다.

Activated carbon을 충전한 column에서는 제거율이 다소 낮은 경향을 나타내었다. 이러한 원인은 실험 초기 bed의 용적보다 약 10%의 용적감소율을 나타낸 것으로 보아 activated carbon이 미세하게 부서져 공극을 막았고, 이로 인하여 단로(channelling)를 형성하여 제거율이 저하된 것으로 보여진다<sup>16)</sup>.

Ceramic을 충전시킨 column에서는 실험 초기부터 다른 충전재에 비하여 제거율이 현저히 낮았다. 이는 공극률이 0.79로 다른 충전물에 비하여 훨씬 높은 이유에 의해서 미생물의 부착 능력 및 접촉면적의 부족 등으로 사료된다<sup>17)</sup>.

A/C column은 ceramic의 미생물 부착 능력 감소에 의한 처리효율의 저하를 보완하고, activated carbon 충전재 파쇄에 의한 단로현상을 서로 상호 보완한 결과 처리효율이 양호하게 된 것으로 판단되어진다.

A/C column과 fiber column을 사용하여 공탑체류시간(EBRT)의 변화를 주면서 제거율을 실험한 결과, acetaldehyde 및 butanol의 경우 두 개의 column에서 공탑체류시간 80초 부근에서 97% 이상의 제거

Table 2. Results of removal efficiency for acetaldehyde, ethylacetate, butylalcohol and diethylamine at about the same EBRT(78~89 sec)

Substrate	Fiber				A/C			
	EBRT (sec)	Loading rate (g/m <sup>3</sup> · hr)	removal rate (g/m <sup>3</sup> · hr)	Removal efficiency(%)	EBRT (sec)	Loading rate (g/m <sup>3</sup> · hr)	removal rate (g/m <sup>3</sup> · hr)	Removal efficiency(%)
Acetaldehyde	78	13.20	12.92	97.9	86	12.47	12.20	97.3
Ethylacetate	88	5.65	5.56	98.5	84	6.21	6.05	96.9
Butylalcohol	80	2.52	2.51	99.8	89	2.43	2.42	99.8
Diethylamine	85	2.33	2.28	97.8	89	3.80	3.74	97.9

효율을 얻었으며, ester류인 ethylacetate는 A/C column에서 공탑체류시간 84초에서 96.9%, fiber column에서는 공탑체류시간 88초에서 98.5%의 제거효율을 얻었다.

Diethylamine과 ethylacetate의 경우는 alcohol류, aldehyde에 비하여 짧은 공탑체류시간에서는 제거율이 현저히 낮았지만, 80초를 초과한 공탑체류시간에서는 제거율이 95%를 상회하였다. 그러나 lava stone을 충전한 biofilter 실험에서 diethylamine, ethylacetate를 본 실험보다 낮은 loading rate로 공급하여 처리한 실험 보고와 비교하면 본 실험에서의 제거효율이 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 반응기 운전방법의 변경에 의한 처리율 상승으로 사료된다.

### 감사의 글

이 논문은 2004년 울산대학교의 연구비에 의하여 연구되었습니다.

### 참고 문헌

- 1) 한화진, 1994, 유해 대기오염물질 규제에 관한 국내 대응 방안 연구, 한국환경정책평가원, 12pp.
- 2) 한국산업안전공단, 1998, VOCs의 안전·환경적 처리기술, 120pp.
- 3) Govind, R. and D. F. Bishop, 1994, Recent advances in biofiltration, The 20th annual RREL research symposium proceedings, USEPA-600-R-94-011, 115-121pp.
- 4) 한국환경정책평가연구원, 1997, VOCs방지기술 현황 및 적용사례, 19pp.
- 5) Wittorf, F., J. Klein, K. Korner, O. Unterlohner and H. Ziehr, 1993, Biocatalytic treatment of waste air, Chem. Eng. Technol., 16, 40-45.
- 6) 이학성, 2000, 화학공장의 VOCs 저감기술 연구, 울산지역환경기술개발센터, 150-151.
- 7) Edwards, F. G. and N. Nirmalakhandan, 1996,

Biological treatment of airstreams contaminated with VOCs, The 18th IAWQ biennial international conference and exhibition, Book 1; nutrient removal, Singapore, 274-280pp.

- 8) 오계현, 김종철, 1996, 부착막 컬럼반응조내에서 과립활성탄상에 고정된 미생물에 의한 BTX의 제거, 대한환경공학회지, 18(4), 489-497.
- 9) 백성욱, 1996, 환경대기중 휘발성유기화합물의 포집과 분석방법, 대기보전학회지, 12(1), 1-13.
- 10) Pirbazari, M., V. Ravindran, B. N. Badriyha, S. Craig and M. J. McGuire, 1993, GAC adsorber design protocol for the removal of off-flavors, Wat. Res., 27, 1153-1166.
- 11) 이학성, 박진도, 2000, 화산석을 이용한 biofilter에서 VOCs 및 악취저감, 한국대기환경학회 춘계학술대회는논문집, 274-275pp.
- 12) 벽산엔지니어링, 1997, VOC처리 기술검토, 벽산엔지니어링주식회사, Document 97-PS-001, 23pp.
- 13) Oh, Y. S. and S. C. Choi, 1997, Characterization of BTX-degrading bacteria and identification of substrate interactions during their degradation, J. Microbiol., 35, 193-199.
- 14) 이민규, 전평조, 이동환, 감상규, 2003, 활성탄/폴리우레탄 복합담체를 충전한 Biofilter에서 기상 Toluene의 제거, 한국공업화학회지, 14(7), 864-868.
- 15) Dawson, D. S., 1993, Biological treatment of gaseous emissions, Wat. Env. Res., 65, 368-371.
- 16) Kim, J. O., 1997, Removal of gaseous trichloroethylene and tetrachloroethylene by an activated carbon biofilter, Environ. Eng. Res., 2, 9-19.
- 17) Leson, G. and A. M. Winer, 1991, Biofiltration; an innovative air pollution control technology for VOCs emissions, J. Air Waste Manage. Assoc., 41, 1045-1054.