

바이오 필터에 의한 벤젠과 에틸렌 처리실험에 대한 고찰

Review on the Removal of Benzene and Ethylene by a Biofilter

김 종 오* · 이 우 범¹⁾

목포대학교 환경교육과, ¹⁾여수대학교 건설환경공학부

(2002년 8월 9일 접수, 2003년 2월 6일 채택)

Jong-O Kim* and Woo-Bum Lee¹⁾

Department of Environmental Education, Mokpo National University

¹⁾Division of Civil & Environmental Engineering, Yosu National University

(Received 9 August 2002, accepted 6 February 2003)

Abstract

A biofilter study was conducted by changing inlet concentration and residence time for the removal of gaseous benzene and ethylene. In addition, carbon dioxide produced from the biofilters was investigated. Over 96% of benzene was removed at the residence times of 2 and 4.3 min, and inlet benzene concentrations of 220~300 ppm. The ethylene biofilter was capable of achieving ethylene removal efficiency as much as 100% at a residence time of 14 min, and inlet concentrations of 99~290 ppm. At a steady state, the carbon dioxide of 409~611 ppm was produced with an ethylene inlet concentration of 290 ppm. Most of benzene and ethylene were degraded at lower part of the biofilters where more microbial activity occurred.

Key words : Activated carbon, Benzene, Biofilter, Ethylene, Filter media

1. 서 론

유류오염과 관련되는 토양복원, 석유산업 및 폐수 처리장에서 발생하는 VOCs (Volatile Organic Compounds)는 주변 생활환경에 심각한 영향을 주고 있다 (Ergas *et al.*, 1992). VOCs는 낮은 끓는점과 높은 휘발성의 특성에 의해 대기 중에 방출되어 악취 문제와 광화학 반응에 의해 오존 농도를 증가시켜 환

경문제를 심화시키고 있다 (Ottengraf, 1986). 여러 경로에서 배출되는 유해가스에는 여러 가지 VOCs가 존재하는데 대표적으로 방향족과 지방족으로 나눌 수 있다.

본 연구에서는 석유화학 물질을 다루는 여러 가지 공정에서 발생하는 VOCs의 효율적인 제어 및 관리를 위해서 생물학적 처리기술인 바이오 필터를 도입하고자 한다. VOCs를 제거시키기 위하여 물리적 처리법 (흡수, 흡착), 화학적 처리법 (촉매산화), 생물학적 처리법 (바이오 필터)이 이용되고 있다. 흡수와 흡착은 2차 오염물질을 유발하여 재처리해야 하

* Corresponding author

Tel : +82-(0)61-450-2782, E-mail : jongokim@mokpo.ac.kr

며, 흡착법에서는 빈번한 흡착제의 교환으로 많은 처리비용이 요구된다. 화학적 처리기술인 촉매산화나 소각은 처리비용과 유해한 화합물의 사용 때문에 문제가 되고 있다(Ottengraf, 1986).

물리 화학적 처리방법과 비교하여 친환경적인 생물학적 처리법 중의 하나인 바이오 필터는 처리효율이 높으면서 경제성의 장점으로 미국과 유럽에서는 1970년부터 연구가 활발하게 이루어지고 있다(Bohn and Bohn, 1999; Leson and Winer, 1991). Kleinheinz (1999)은 기존의 바이오 필터 공정의 문제점을 종합적으로 분석하여 제2세대 바이오 필터 개념을 도입하여 더욱 향상된 바이오 필터 운전 조건을 제시하였다. Zilli, M. *et al.* (2001)은 톨루엔과 스티렌 가스를 바이오 필터 내에 각각 산화 미생물을 적용하여 90% 제거율을 보였다.

본 연구에서는 바이오 필터에서 처리할 VOCs로 벤젠과 에틸렌을 선택하였다. 벤젠은 우리나라에서 유독물질과 배출허용기준으로 규제하는 물질이며 미국에서도 유해 대기오염물로 정하여 관리하는 화합물이다. 에틸렌은 석유화학 공장에서 대량 배출되는 VOCs 중의 하나인데 에틸렌은 식물의 생장에 영향을 주고 노화현상을 일으킨다(Abeles, 1982). 각 식물에 미치는 에틸렌의 초기농도는 다르나 1 ppm 이상일 경우 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Freedman and Herz, 1996). 에틸렌은 흡착도 잘 되지 않는 화합물로 알려져 있어 처리에 어려움이 있다. 따라서, 벤젠과 에틸렌 제거를 위하여 2차 오염물질이 재발하지 않는 환경 친화적 기술인 바이오 필터 기술을 적용하였다. 바이오 필터내의 여재로는 활성탄을 이용하여 벤젠과 에틸렌의 유입농도 또는 체류시간 변화에 따른 운전률 수행하였다. 그리고 CO₂의 물질수지와 바이오 필터 높이에 따른 농도 변화에 관한 연구를 수행하였다.

2. 실험방법

2.1 미생물

하수처리장의 유입수에서 수거한 시료에 존재하는 미생물에 기질을 벤젠 또는 에틸렌으로만 적합한 미생물을 배양하였다. 실온에서 초기에는 미생물 배양기 내에서 글루코스를 기질로 영양소와 같이

주입한 후 벤젠 농도(1,000 ppm)를 10 mL/day로 주입하였고, 에틸렌의 경우는 310 ppm 농도를 지속적으로 주입하면서 각각 14일과 28일 동안 25°C에서 배양하였다. 이 중 개체수가 많은 순서로 2개씩의 균주를 다시 분리한 후 벤젠 산화 미생물과 에틸렌 산화 미생물로 구분하여 형태학적 관찰과 생리·생화학 특성 조사를 실시하였다.

분리된 세균의 형태학적 관찰을 위하여 LB 고체 배지에 배양한 다음, Gram 염색을 하여 세균의 형태 및 배열상태를 관찰하였다. 생리·생화학 특성 조사는 NFT-API 20 NE와 API 50 CHB (BioMerius-sa, Marcy-l'Etoile, France)를 이용하여 수행하였다. 선별된 분리세균에 대한 Gram 염색 결과, 벤젠 산화 미생물은 Gram 양성 및 장 간균이었고, 다른 벤젠 산화 미생물과 에틸렌 산화 미생물은 Gram 음성에 짧은 간균이었다. 이들은 NFT-API 20NE와 API 50 CHB 동정 Kit을 이용하여 생리·생화학 실험 결과를 얻었으며, 이러한 결과를 API 데이터베이스에 의해 분석한 결과는 다음과 같았다.

벤젠 산화 미생물은 *Bacillus mycoides*와 *Pseudomonas fluorescens*로 동정되었고, 에틸렌 산화 미생물은 *Pseudomonas putida*와 *Pseudomonas fluorescens*로 각각 동정되었다. 미생물 배양에 필요한 영양소 조제를 다음과 같이 조제하여 미생물 배양기와 바이오 필터에 미생물 성장을 위하여 정량펌프를 이용하여 주입하였다. 1 L의 증류수에 50 mg NaH₂PO₄, 85 mg KH₂PO₄, 165 mg K₂HPO₄, 100 mg NH₄Cl, 0.1 mg MgSO₄ · 7H₂O, 0.12 mg FeSO₄ · 7H₂O, 0.036 mg MnSO₄ · H₂O, 0.03 mg ZnSO₄ · 7H₂O, 0.01 mg CoCl₂ · 6H₂O, 0.1 mg CaCl₂ · 2H₂O, 0.5 mg Yeast Extract 이 함유되어 있다.

2.2 VOCs

벤젠은 미국 Fisher Scientific에서 구입하였고, 에틸렌은 가스 실린더 농도가 99~452 ppm가 되게 가스제조회사에 주문하였다. 벤젠의 농도를 결정하기 위하여 액상상태의 100 ppm의 표준용액(Chem Service, USA)을 구입한 후 헨리의 상수를 근거로 하여 250 mL 갈색병 내부의 기체상태 농도가 0, 10, 50, 100, 500 ppm가 되게 하여 GC/MS로 분석하여 검량선을 작성하였다(Mackay and Shiu, 1981). 표준 벤젠용액의 희석에 사용된 증류수는 Barnstead

Megapure 증류장치에서 생산된 물을 Nanopure 장치로 통과시킨 초순수 증류수이다.

2.3 활성탄

입상 활성탄은 신기화학에서 구입하였다. 활성탄의 물리적 성질은 표 1과 같고 채우기 전에 8 Mesh (2.36 mm)과 32 Mesh (0.5 mm)사이 크기만 체 분석한 후 물로 씻어 건조시켰다.

2.4 바이오 필터 운전

그림 1과 같은 바이오 필터를 제작하여 벤젠과 에틸렌 처리를 위한 반응조로 사용하였고 연결된 재료는 테프론과 스틸이다. 유입농도를 조절하기 위하여 주사기 펌프(Cole-Parmer, USA)나 수욕조를 이용하였고 유량조절은 Mass flow controller (Unit Instruments, USA)와 유량계(Dwyer, USA)를 사용하

였다. 수욕조 내의 벤젠의 경우 공기와 혼합하여 농도를 조절하는데 장기간 운전 기간 동안 일정한 농도를 얻기 어려워 주사기 펌프로 대체하여 농도조절을 한 결과 좋은 결과를 얻었다. 바이오 필터의 여재의 무게는 500g이었고 혼합에 사용된 미생물 농도(VSS)는 40mg/L이었다.

2.5 시료 채취

기체 시료는 열림 장치와 Septum이 부착된 1.6-L tedlar 백을 이용하였다. 기체시료는 바이오 필터에 연결된 채취구에서 20분 이상 포집하였고 백을 재사용시에는 오염되지 않은 공기를 수번씩 채웠다 가 비운 후 사용하였다.

2.6 분석방법

유입 및 배출 벤젠 농도는 GC/MS(Shimadzu, QP-5050A)로 분석하였다. 1 mL Pressure-Lok 주사기(Baton Rouge, USA)에 기체 시료를 채취하여 직접 주입하는데, 분석조건은 J & W Scientific의 DB-1 Capillary 칼럼 (0.32 mm × 60 m)을 사용하여 오븐, 주입, 검출 온도는 각각 30°C, 200°C, 200°C로 한 후 10°C/min되게 승온시켰다. 운반 기체는 헬륨이며 유량은 30.4 mL/min이었고 Split ratio는 10 : 1이었다. CO₂의 분석은 GC(Shimadzu, 14A)에 Porapak-Q 칼럼을 설치하여 오븐, 주입, 검출 온도는 90°C, 120°C, 100°C로 하였고 운반 기체는 Helium이며 유량은 20 mL/min이며 시료 주입은 1 mL이었다.

입구 및 출구 에틸렌 농도는 GC(Shimadzu, 14A, Japan)로 분석하였다. 에틸렌은 1 mL Pressure-Lok 주사기(Baton Rouge, USA)에 기체 시료를 채취하여 직접 주입하였다. 에틸렌과 CO₂의 분석조건은 Porapak-Q 칼럼을 GC에 설치하여 오븐, 주입기, 검출기 온도를 90°C, 120°C, 100°C로 하였고 운반 기체는 헬륨이며 유량은 20 mL/min이며 시료 주입량은 1 mL이었다.

Table 1. Physical properties of activated carbon.

Surface area (m ² /g)	900~1,100
Iodine no. (mg/g)	900~1,100
Bulk density (g/cc)	0.4~0.5
Mesh size	8×32
Hardness (%)	90 Minimum

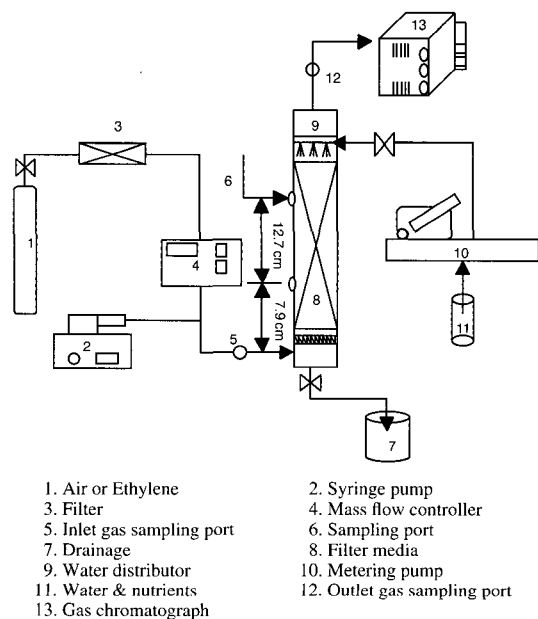


Fig. 1. Schematic diagram of a biofilter.

3. 결과 및 고찰

3.1 벤젠 바이오 필터 운전

그림 2에 나타난 것과 같이 체류시간(t)이 4.3분과 2분인 조건에서 벤젠 유입농도 변화가 1,281

ppm (평균), 300 ppm, 220 ppm으로 변화시켰을 때 벤젠의 처리효율을 보여주고 있다. 그리고 표 2는 운전조건을 요약한 것이다. 벤젠 유입농도는 약 1,000~1,700 ppm (평균 1,281 ppm)으로 일정하지 않는 것은 공기와 수목조에서 배출되는 벤젠 증기와 혼합이 항상 일정하게 유지하기가 어려웠기 때문이었다. 배출농도는 35일 동안 120 ppm 이하로서 90% 이상 벤젠이 제거되었다. 운전일수가 증가할수록 배출 벤젠 농도가 증가하는데 초기에는 여재와 미생물막에 충분히 흡착되어 배출되지 않았으나 차츰 처리 한계점에 도달하여 상승하고 있다. 운전 39~45일 경에는 배출농도가 약 400 ppm으로 측정되어 처리효율이 70%로 감소하였다. 고농도 벤젠은 분해가 잘되지 않고 운전일수가 증가할수록 배출 벤젠 농도가 증가하는 경향을 보이고 있어 45일 경에는 70%까지 감소하는 현상으로 나타나 유입농도를 감소시킬 필요가 있었다.

초기에 유입농도가 일정하지 않는 문제점이 있어 주사기 펌프를 사용하여 벤젠의 유입농도를 300 ppm으로 변화시켜 일정하게 하였다. 배출농도는 초기에 119 ppm이었으나 차츰 감소하여 15일 이후는 실험 기간동안 6~15 ppm으로 일정하게 배출되었는데 처리효율이 98%까지 가능하였다. 유입농도를 약 1/4 정도로 감소시킨 결과 매우 높은 처리 효율을 얻을 수 있었다.

체류시간을 4.3분에서 2분으로 줄이고 유입농도는 220 ppm 한 운전결과, 배출농도는 8~16.9 ppm으로 최고 96% 이상 처리효율을 보이고 있다. 앞의 연구결과와 비교해 보았을 때 체류시간이 2분이고 유입농도가 220 ppm일 경우 벤젠을 높은 처리효율로 제거 할 수 있음을 발견하였다. 다른 연구에서는

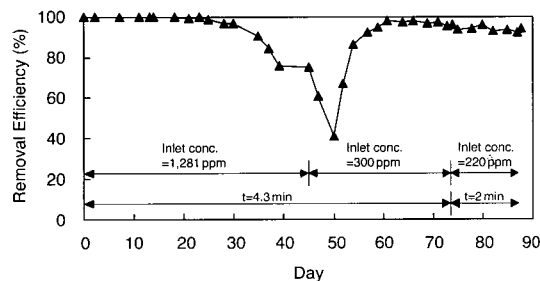


Fig. 2. Variations of benzene removal efficiency as a function of inlet concentration and residence time.

Table 2. Operation conditions of each biofilter.

	Gas flow rate (mL min ⁻¹)	Residence time (min)	Inlet conc. (ppm)	Operation period (day)
Benzene	430	2	220	14
	200	4.3	300	29
	200	4.3	1,281	45
Ethylene	61	14	99	29
	61	14	290	26
	61	14	452	37

25 ppm의 유입 벤젠과 그 외 화합물을 혼합 처리할 경우도 90% 정도 처리 효율을 보였다(Utgikar, 1993; Ergas *et al.*, 1992). 본 연구는 상대적으로 높은 유입농도와 낮은 체류시간에서 제거효율이 90% 이상이 되는 결과를 얻을 수 있었다.

3. 2 에틸렌 바이오 필터 운전

그림 3은 에틸렌의 유입농도 변화, 즉 452 ppm, 290 ppm, 99 ppm에서 운전을 각각 약 4주 정도를 수행하였을 때, 처리효율을 보여주고 있다. 표 2는 운전조건을 요약한 것인데, 체류시간 (t)은 모두 14분이었다. 초기 입구농도가 452 ppm에서 운전결과, 출구농도는 에틸렌의 입구농도에 비해 큰 차이가 없는데 10~15% 정도로 낮은 제거 효율을 보이고 있었다. 이는 에틸렌의 특성상 상온에서 기체로 존재하면서 흡수 또는 흡착이 되지 않기 때문으로 생각된다. 입구농도 변화 뿐만 아니라 에틸렌 산화 미생물의 활성도 문제가 있다는 가정 하에 미생물 배양기에서 장기간 미생물을 배양시킨 후 바이오 필터에 다시 주입하였다.

낮은 효율 때문에 에틸렌 입구농도를 99 ppm으로 변화시킨 후 바이오 필터의 운전을 4주 정도 하였으며 그 결과는 그림 3에 나타내었다. 초기에는 에틸렌이 높은 농도를 보이던 점차 감소하여 6일경에는 90% 이상 처리 효율을 보이고 있으며 8일 이후부터는 100% 처리 효율을 보이고 있다. 이는 에틸렌의 물리 화학적 특성상 높은 휘발성과 낮은 흡착율로 적응 기간이 필요하였으며 점점 처리효율이 증가하는 것으로 생각된다. 이 조건에서 100% 처리 효율을 보여주어 바이오 필터 운전에 의한 방지시설 설치 가능성을 보여주었다. 하지만 14분이라는 체류시간과 99 ppm이라는 저농도 문제점을 극복하는 것이 관건이어서 입구농도의 증가나 체류시간

감소하는 연구가 요구되었다.

다음에는 입구농도를 290 ppm으로 증가 시켜 운전을 수행한 결과, 15일 이후 출구 에틸렌농도는 0이었다. 그림 4와 같이, 입구농도가 99~290 ppm일 경우 체류시간이 14분인 조건에서 운전 15일 이후에는 100% 처리가 되는 것으로 조사되었다. Elsgaard (1998)은 Strain RD-4 고정미생물을 바이오 필터에 적용시켜 에틸렌 입구농도가 117 ppm일 경우 99% 이상처리 효율을 보인 연구결과를 발표하였다. 본 연구는 혼합 미생물 (*Pseudomonas putida*와 *Pseudomonas fluorescens*)로서 입구농도가 117 ppm보다 약

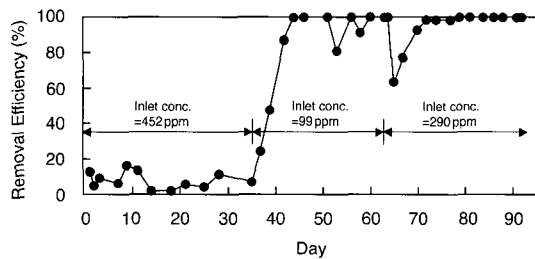


Fig. 3. Variations of ethylene removal efficiency as a function of inlet concentration.

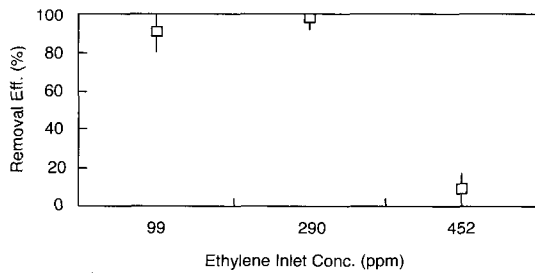


Fig. 4. Removal efficiency of ethylene as a function of inlet concentration.

160 ppm 높은 조건에서 높은 처리효율을 보여 이러한 연구를 현장에 적용하였을 경우 훨씬 유리한 조건이 될 것으로 판단된다.

3.3 CO₂ 발생

유입된 벤젠이 벤젠 산화 미생물에 의해서 생물학적 분해의 결과로 CO₂와 H₂O가 생성되는데 표 3은 배출되는 CO₂의 농도를 보여주고 있다. 유입 CO₂ 농도가 0이므로 바이오 필터 내에서 미생물이 존재 또는 성장하는 것을 보여 주는 하나의 지표이다. 평균 유입농도가 1,281 ppm에서는 최고 3,143 ppm의 CO₂가 생성되어 배출되었다. 벤젠이 생분해되면서 여재 표면에 미생물막이 점차 두꺼워지고 두께도 증가되면서 미생물의 활동도 활발해져 CO₂ 농도가 커지고 있음을 보여주고 있다. 입구농도를 300 ppm으로 변화시킨 후 CO₂의 발생도 앞의 실험보다 감소하여 최고 1,818 ppm까지 배출되었다가 점차 안정화되어 일정하게 배출되는 경향을 보여 주었다.

표 3에서와 같이, 에틸렌 입구농도가 99 ppm에서는 안정화된 후 CO₂ 배출량은 328~354 ppm으로 거의 일정하게 배출되고 있었다. 그리고 입구농도가 290 ppm에서는 CO₂ 배출량은 409~611 ppm으로 배출되었다. 이들 조건에서는 CO₂의 발생량이 거의 일정하게 배출되어 생분해가 잘 되면서 운전되고 있음을 보여주었다. 이 조건에서 에틸렌 처리효율은 85~93%이었다. 표 3은 벤젠과 에틸렌의 탄소에 관한 물질 수지로서 안정화된 후 측정된 CO₂와 계산된 CO₂ 농도를 요약하였다. 이론적으로 완전 산화가 이루어질 경우, 1 ppm의 벤젠과 에틸렌은 각각 6 ppm 및 2 ppm의 CO₂를 배출하므로 이를 근거로 계산된 CO₂ 농도를 산출하였다. 이는 측정된 CO₂ 농도와 계산된 CO₂ 농도를 비교를 위한 것으로 에틸

Table 3. Mass balance of carbon in biofilters.

Comp'd	Residence time (min)	Inlet conc. (ppm)	Measured outlet CO ₂ conc. at steady state (ppm)	Calculated outlet CO ₂ conc. (ppm)
Benzene	2	220	515~726	1,270
	4.3	300	1,010~1,818	1,760
	4.3	1,281	1,281~3,143	5,280
Ethylene	14	99	328~354	200
	14	290	409~611	580
	14	452	71~140	100

렌의 경우 서로 유사하였다. 벤젠의 경우는 측정된 CO₂ 농도가 계산된 CO₂보다 낮는데 이는 일부 벤젠이 흡착되어 있거나 분해가 되지 않은 것으로 추측된다.

3.4 바이오 필터 높이별 농도 분포

본 연구에서는 바이오 필터에 Septum이 연결된 시료 채취구를 설치하여 주사기를 직접 이용해 위치별로 벤젠 및 에틸렌 농도를 측정할 수 있게 하였다(그림 5). 그림에서 입구(0 cm)에서 최고의 농도를 나타내고 배출에서 최저의 농도를 보이고 있다. 벤젠의 경우 입구에서 1,186 ppm이었을 때 20.6 cm 높이에서는 285 ppm으로 측정되었다. 바이오 필터 유입에서 7.9 cm 떨어진 지점에서 50% 이상 제거되어 아래 부분에서 더 많은 벤젠이 생분해되고 있음을 예측할 수 있었다. 유입농도가 300 ppm에서는 7.9 cm 높이에서 53 ppm으로 80% 정도가 7.9 cm 아래 높이에서 생분해되는 것으로 발견되었다. 이는 바이오 필터 내에서 생분해가 일어나 농도가 출구 쪽에 가까울수록 감소하는 것을 알 수 있다. 이를 근거로 많은 연구자는 높이에 따른 농도 분포를 모델화하여 예측하는 기법도 도입하고 있다. CO₂는 반대로 유입에서는 0 ppm이었으나 출구에서 높은 농도를 보였다. 이는 바이오 필터 내에서 미생물에 의해 생분해가 일어나 농도가 출구에 가까울수록 증가하는 것을 알 수 있다.

에틸렌은 입구(0 cm)에서 99 ppm이었고 7.9 cm 높이에서는 72 ppm, 20.6 cm 높이에서는 32 ppm으로 감소하였고 출구에서는 10 ppm까지 떨어졌다. 이는

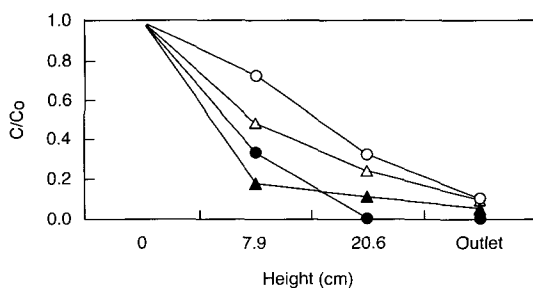


Fig. 5. Concentration profiles as a function of biofilter height: inlet benzene conc. = 300 ppm (▲), inlet benzene conc. = 1186 ppm (△), inlet ethylene conc. = 99 ppm (○), inlet ethylene conc. = 290 ppm (◆).

바이오 필터 내에서 미생물에 의해 생분해가 일어나 농도가 출구에 가까울수록 감소하는 것을 알 수 있다. 입구에서 CO₂는 0 ppm이었으나, 7.9 cm와 20.6 cm 높이에서 CO₂는 각각 145 ppm, 449 ppm으로 감소하였고 출구에서는 731 ppm으로 점점 증가하는 경향을 보였다. 입구농도가 290 ppm일 경우 7.9 cm 높이에서는 96 ppm, 20.6 cm 높이와 출구에서는 0 ppm이었다. 입구에서 CO₂는 0 ppm이었으나 출구에서는 611 ppm으로 최고 농도를 보였다.

4. 결 론

본 연구에서는 VOCs 중 벤젠과 에틸렌을 선택하여 바이오 필터 연구로서 유입농도 또는 체류시간 변화에 따른 운전을 수행하였다. 연구결과, 체류시간이 2분과 4.3분에서 벤젠 유입농도가 220과 300 ppm일 경우 96% 이상 처리효율로 제거할 수 있음을 발견하였다. 벤젠 입구농도가 300 ppm에서는 CO₂ 배출량은 1,010~1,818 ppm으로 거의 일정하게 배출되고 있었다. 유입농도에 따라 바이오 필터 유입에서 7.9 cm 떨어진 지점에서 50% 또는 80% 이상 제거되어 아래 부분에서 더 많은 벤젠이 생분해되고 있음을 알 수 있었다.

에틸렌 입구농도가 99~290 ppm에서는 100%까지 제거되었는데 순수 미생물이 아닌 혼합 에틸렌 산화 미생물(*Pseudomonas putida*와 *Pseudomonas fluorescens*)에서 높은 처리효율을 얻었다. 이는 현장에 적용하였을 경우 훨씬 유리한 조건이 될 것으로 판단된다. 에틸렌의 입구농도가 290 ppm일 경우, 7.9 cm와 20.6 cm 높이에서는 각각 96 ppm과 0 ppm이었다. 입구에서 CO₂는 0 ppm이었으나 출구에서 611 ppm으로 최고 농도를 보였다. 높이에 따른 농도 분포를 모델화하여 예측하는 기법을 수행할 경우 현장에서 농도를 예측하는데 도움이 될 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- Ergas, S.J., E.D. Schroeder, D.P.Y. Chang, and R. Morton (1992) Control of volatile organic compound emissions from a POTW using a compost biofilter, Pre-

- sentation at the 85th Annual Meeting & Exhibition of AWMA, Kansas City, Missouri, USA, 92-116.02.
- Ottengraf, S.P.P. (1986) Exhaust gas purification. *Biotechnology*. Rehm, H.-J., Reed, G. Edition. VCH, Weinheim. 8.
- Leson, G. and A.M. Winer (1991) Biofiltration: An innovative air pollution control technology for VOC emissions, *AWMA*, 41.
- Bohn, H.L. and K.H. Bohn (1999) Moisture in biofilters, *Environmental Progress*, 18(3), 156.
- Kleinheinz, G. (1999) Development of a "second generation" biofiltration system, 92nd Annual Meeting & Exhibition of AWMA, St. Louis, USA, 99-106.
- Zilli, M., E. Palazzi, L. Sene, A. Converti, and M.D. Borghi (2001) Toluene and styrene removal from air in biofilters, *Process Biochemistry*, 37, 423-429.
- Abeles, F.B. (1982) Ethylene as an air pollutant, *Agric. For. Bulletin*, 5, 4-12.
- Freedman, D.L. and S.D. Herz (1996) Use of ethylene and ethane as primary substrates for aerobic cometabolism of vinyl chloride, *Water Environment Research*, 68(3), 320-328.
- Mackay, D. and W.Y. Shiu (1981) A critical review of Henry's law constant for chemicals of environmental interest, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 10(4), 1175-1190.
- Utgikar, V.P. (1993) Fundamental studies on the biodegradation of volatile organic chemicals in a biofilter, Ph.D. Dissertation, University of Cincinnati, Cincinnati, Ohio, USA.
- Elsgaard, L. (1998) Ethylene removal by a biofilter with immobilized bacteria, *Applied and Environmental Microbiology*, 64(11), 4168-4173.