

Biofilter에서 체류시간이 혼합 벤젠과 에틸렌 분해에 미치는 영향

김종오*

목포대학교 환경교육과

Effect of Residence time on Mixed Benzene and Ethylene Degradation in Biofilters

Jong-O Kim*

Department of Environmental Education, Mokpo National University

ABSTRACT

A biofilter study was performed in order to remove mixed benzene and ethylene emitted from soil and groundwater remediation. In particular, more than 96% of ethylene was removed at residence times of 10~15 min, and the possibility of use of the biofilter was obtained. The benzene removal efficiency was achieved as much as 100% at residence times of 2~15 min. With a residence time of 15 min, the maximum elimination capacity of benzene and ethylene was 4.3 g/m³hr and 1.4 g/m³hr, respectively. The maximum elimination capacity of benzene was 3 times higher than that of ethylene. Carbon dioxide concentration decreased as residence times were lowered due to low ethylene degradation rate. The maximum carbon dioxide production rate of 3,169 [mg-CO₂/(g-C₂H₄+C₆H₆)] was investigated when benzene and ethylene were completely removed. It was found that dominant bacteria in the benzene-degrading microorganisms were identified as *Bacillus mycoides* and *Pseudomonas fluorescens*. Dominant bacteria in the ethylene-degrading microorganisms were identified as *Pseudomonas putida* and *Pseudomonas fluorescens*.

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

요약문

토양 및 지하수 복원 과정에서 벤젠과 에틸렌이 혼합되어 배출될 경우 이를 biofilter에 의해 처리한 결과, 에틸렌은 생분해가 잘 되지 않는 화합물인데도 불구하고 체류시간이 10~15분에서는 96%이상 높은 생물학적 처리를 보여 biofilter 운전 가능성이 제시되었다. 2~15분 체류시간에서 혼합 VOCs 중 벤젠은 모든 조건에서 100% 제거되었다. 체류시간이 15분일 경우 벤젠과 에틸렌의 최대 제거능은 각각 4.3과 1.4 g/m³hr로서 벤젠이 에틸렌에 비해 3배 정도 컸다. 체류시간이 작을수록 에틸렌 분해율 감소로 인하여 이산화탄소 발생도 감소함을 발견하였으며 벤젠과 에틸렌이 모두 제거되는 운전에서 최고 이산화탄소 발생률은 3,169 [mg-CO₂/(g-C₂H₄+C₆H₆)]이었다. 벤젠 산화 미생물은 *Bacillus mycoides*와 *Pseudomonas fluorescens*로 동정되었고, 에틸렌 산화 미생물은 *Pseudomonas putida*와 *Pseudomonas fluorescens*로 각각 동정되었다.

주제어 : 활성탄, 벤젠, Biofilter, 분해, 에틸렌, 여자

1. 서 론

유류오염과 관련되는 토양 및 지하수 복원공정과 석유 산업 및 폐수처리장에서 발생하는 VOCs(volatile organic

compounds)는 주변 생활환경에 심각한 영향을 주고 있다¹⁾. 일반적으로 VOCs는 낮은 끓는점과 높은 휘발성을 가지고 있어 대기 중에 방출되는 경우 악취를 유발하고 광화학 반응에 의해 2차 오염물질인 오존 농도를 발생시켜 환

*Corresponding author : jongokim@mokpo.ac.kr

원고접수일 : 2002. 6. 27 계재승인일 : 2003. 2. 17

경문제를 심화시키고 있다²⁾.

일반적으로 VOCs를 제거시키기 위하여 물리적 처리법(흡수, 흡착), 화학적 처리법(촉매산화), 생물학적 처리법(biofilter)³⁾ 이용되고 있는데, 여러 가지 공정에서 발생하는 VOCs의 효율적인 제어 및 관리를 위해서 생물학적 처리기술인 biofilter가 점차 많이 도입되고 있다. 흡수와 흡착은 2차 오염물질을 유발하여 재처리해야하며, 흡착법에서는 빈번한 흡착제의 교환으로 많은 처리비용이 요구된다. 화학적 처리기술인 촉매산화나 소각은 처리비용과 유해한 화합물의 사용 때문에 문제가 되고 있다²⁾. 물리화학적 처리방법과 비교하여 친환경적인 생물학적 처리법 중의 하나인 biofilter는 처리효율이 높으면서 경제성 등의 장점으로 미국과 유럽에서는 1970년부터 연구가 활발하게 이루어지고 있다^{2,3)}.

벤젠은 우리나라에서는 유독물질과 배출허용기준으로 규제하는 물질이며 미국에서도 유해 대기오염물로 정하여 관리하는 화합물이다. 에틸렌은 석유화학 공장에서 대량 배출되는 VOCs중의 하나인데 식물의 생장에 영향을 주고 노화현상을 일으킨다^{4,5)}. 에틸렌은 흡착도 잘 되지 않는 화합물로 알려져 있어 처리에 어려움이 있다.

지금까지, 벤젠 또는 에틸렌을 단일 성분으로 biofilter 기술을 적용한 연구는 있었으나 벤젠과 에틸렌과 혼합하여 분해성을 검토한 연구는 없는 실정이다^{6,7)}. 미생물 콤소시엄을 이용한 biofilter에서 단일 성분으로 벤젠 처리를 위한 연구가 발표되었으며⁷⁾, 에틸렌의 경우 입구농도가 2 ppm에서 퇴비 biofilter와 *Mycobacterium strain E3*을 적용하여 87% 제거율을 보인 결과도 있다⁸⁾. Elsgaard⁹⁾은 Strain RD-4 고정미생물을 biofilter에 적용시켜 에틸렌 입구농도가 낮은 조건에서 99% 처리 효율을 보인 연구결과를 발표하였다.

본 연구는 biofilter에서 처리할 VOCs로 지하수 및 토양 복원 과정에서 발견되는 벤젠과 에틸렌을 선택하여 동시에 생분해하는 처리 기술 개발에 주목적이 있다. Biofilter의 여재로서 활성탄을 이용하여 벤젠과 에틸렌이 혼합된 상태에서 체류시간 변화에 따른 운전을 수행하여, 제거율, 제거능(elimination capacity)과 이산화탄소의 변화를 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1. 미생물

하수처리장의 유입수에서 벤젠 또는 에틸렌을 탄소원으로 사용하는 미생물을 동정, 배양하였다. 초기에 글루코스

를 부가 영양원으로 주입한 후 벤젠의 경우 1,000 ppm으로 10 mL/day로 주입하였고, 에틸렌의 경우는 310 ppm 농도로 지속적으로 주입하면서 14일 동안 25°C에서 배양하였다. 벤젠 산화 미생물과 에틸렌 산화 미생물을 순수 배양하고 이중 개체수가 많은 순서로 2개씩의 균주를 다시 분리한 후 형태학적 관찰과 생리·생화학 특성 조사를 실시하였다. 분리된 세균의 형태학적 관찰을 위하여 LB 고체배지에 배양한 다음, Gram 염색을 하여 세균의 형태 및 배열상태를 관찰하였다. 생리·생화학적 특성조사는 NFT-API 20 NE와 API 50 CHB(BioMeriuissa, Marcy-l'Etoile, France) 동정 kit을 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. 이러한 결과를 API 데이터 베이스에 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 biofilter에 미생물 성장을 위하여 정량펌프(Masterflex, USA)를 이용하여 주입하였다. 1 L의 증류수에 영양소로 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 Extract가 함유되어 있었다.

2.2. VOCs

벤젠은 미국 Fisher Scientific에서 구입하였고, 에틸렌은 가스 실린더 농도가 99~452 ppm가 되게 광주에 있는 천일 가스 제조회사에 주문 제작하였다. 벤젠 농도는 액상상태의 100 ppm의 표준용액(Chem Service, USA)을 사용하여 헨리의 상수를 근거로 하여 결정하였다¹⁰⁾. 여기서 사용된 증류수는 Barnstead Megapure 증류장치(USA)에서 생산된 물을 Nanopure 장치로 통과시킨 초순수 증류수이다.

2.3. 활성탄

입상 활성탄은 신기화학에서 구입하였다. 활성탄의 물리적 성질로서 표면적은 900-1100 m²/g, Iodine No.는 900-1100 mg/g, bulk density는 0.4-0.5 g/cc이었다.

Biofilter에 채우기 전에 8 Mesh(2.36 mm)과 32 Mesh(0.5 mm)사이 크기만 채 분리한 후 물로 씻어 건조시켰다.

2.4. Biofilter 연구

2조의 biofilter를 PVC로 제작하여 벤젠과 에틸렌 처리를 위한 반응조로 사용하였고 연결된 재료는 테프론과 스틸이다. Biofilter의 그림은 발표한 논문에서 찾아볼 수 있으며 벤젠 유입농도를 조절하기 위하여 주사기 펌프(Cole-Parmer, USA)를 이용하였고 유량조절은 mass flow controller(Unit Instruments, USA)와 유량계(Dwyer, USA)를 사용하였다⁷⁾. Biofilter의 여재의 무게는 500 g이었고 empty bed의 부피는 860 mL이며, 혼합에 사용된 미생물농도(VSS)는 40 mg/L이었다.

2.5. 시료 채취

기체 시료는 열립 장치와 septum이 부착된 1.6-L tedlar 백을 이용하였다. 기체시료는 biofilter에 연결된 채취구에서 20분 이상 포집하였고 백을 재사용시에는 오염되지 않은 공기를 2-3회 채웠다가 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 column(0.32 mm × 60 m)을 사용하여 오븐, 주입, 검출 온도는 각각 30°C, 200°C, 200°C로 한 후 10°C/min되게 승온 시켰다. 운반 기체는 helium이며 유량은 30.4 mL/min이었고 split ratio는 10:1이었다. CO₂의 분석은 GC(Shimadzu, 14A)에 Porapak-Q column설치하여 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 주사기에 기체 시료를 채취하여 직접 주입하였다. 에틸렌과 CO₂의 분석조건은 Porapak-Q column을 GC에 설치하여 오븐, 주입기, 검출기 온도를 90°C, 120°C, 100°C로 하였고 운반 기체는 헬륨이며 유량은 20 mL/min이며 시료 주입량은 1 mL이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 체류시간에 따른 처리율 비교

벤젠과 에틸레이 혼합된 VOCs 가스를 체류시간이 각각 2분, 5분, 10분, 15분으로 변화시켜 biofilter를 운전하였다. 오염물질 제거율은 biofilter의 EBRT(empty bed

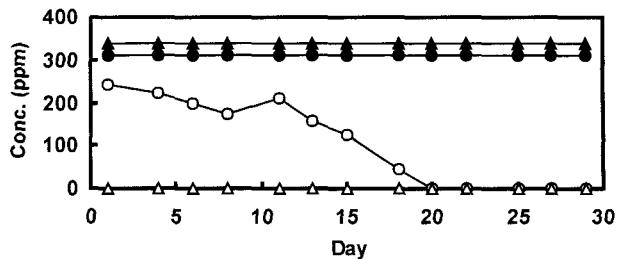


Fig. 1. Benzene and ethylene concentrations of inlet and outlet gas treated at a residence time of 15 min: inlet benzene (▲), outlet benzene (△), inlet ethylene (●), outlet ethylene (○).

residence time)과 관계가 있는데 여기서 구한 체류시간은 EBRT이다. 체류시간을 감소시킬수록 많은 유량의 VOCs를 제거 할 수 있어 현장 설계에 있어서 중요한 변수가 된다. 따라서 체류시간 변화와 유입농도에 따른 실험은 최적조건을 제시하는데 중요한 실험이 된다. 에틸렌은 회사에서 구입하여 일정농도로 유지되고 있으나 벤젠농도는 에틸렌 유량에 따라 달라지므로 유입농도가 체류시간이 바뀌면서 약간 차이가 있었다. Fig. 1에서와 biofilter에 벤젠과 에틸렌을 혼합하여 29일 동안 운전하였다. 체류시간이 15분인 조건에서 벤젠과 에틸렌 입구농도는 340과 310 ppm이었는데 벤젠은 초기부터 에틸렌은 정상상태에서 모두 100% 제거되었다. 벤젠 농도만 160 ppm으로 변한 조건에서 체류시간을 10분으로 바꾸었을 경우 벤젠은 100% 제거되었으나 에틸렌은 약 96~97% 제거되었다(Fig. 2). Fig. 3에서는 체류시간이 5분인 조건에서 운전결과인데 입구농도는 체류시간이 10분일 때와 같은 160과 310 ppm이었으며 벤젠은 100% 제거되었고 에틸렌은 65%가 생분해되었다. Fig. 4는 체류시간이 2분인 조건에서 위와 같은 입구농도에서 벤젠은 100% 제거되었고 에틸렌은 약 52% 제거되어 체류시간이 감소할수록 에틸렌의 생분해율은 낮아지고 있는 것으로 조사되었다. 이와 같이 체류시간 변화에 따른 혼합 VOCs의 처리율 변화를

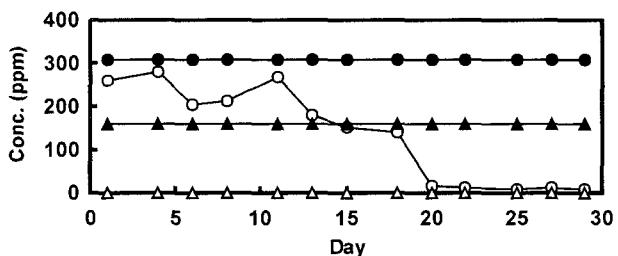


Fig. 2. Benzene and ethylene concentrations of inlet and outlet gas treated at a residence time of 10 min: inlet benzene (▲), outlet benzene (△), inlet ethylene (●), outlet ethylene (○).

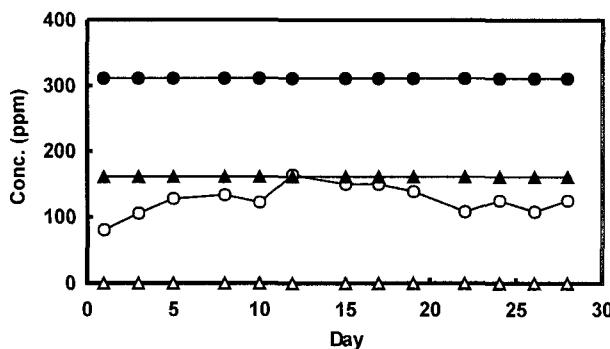


Fig. 3. Benzene and ethylene concentrations of inlet and outlet gas treated at a residence time of 5 min: inlet benzene (\blacktriangle), outlet benzene (\triangle), inlet ethylene (\bullet), outlet ethylene (\circ).

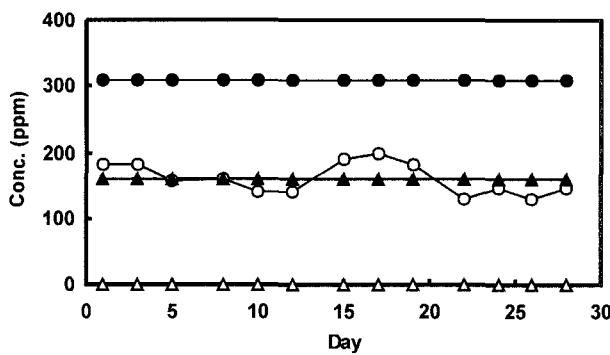


Fig. 4. Benzene and ethylene concentrations of inlet and outlet gas treated at a residence time of 2 min: inlet benzene (\blacktriangle), outlet benzene (\triangle), inlet ethylene (\bullet), outlet ethylene (\circ).

Fig. 5에 요약하여 제시하였다. 벤젠은 낮은 체류시간에서도 100% 생분해되어 다른 연구에서와 같이 분해가 잘되는 오염물질로 조사된 반면 에틸렌은 체류시간이 10분 이상에서는 96%이상 고효율로 처리되는 조건이었으나 2분과 5분에서는 52-65%로 처리효율이 급속하게 감소하였다. 알맞은 체류시간은 벤젠은 2분이었으며 에틸렌은 10분 정도가 위와 같은 농도에서 최적의 운전조건이었다.

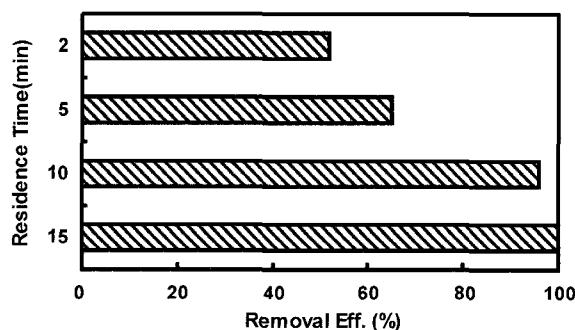


Fig. 5. Ethylene removal efficiency for different residence times.

연구결과 활성탄을 사용한 biofilter에서 벤젠과 에틸렌이 혼합된 경우 biofilter에 의해 잘 처리됨을 알 수 있었다. 여기에는 각 기질 산화 미생물도 긍정적인 영향을 주어 전체적으로 높은 처리 효율을 보였다. 특히 에틸렌은 생분해가 잘 되지 않는 화합물인데도 불구하고 높은 생물학적 처리를 보여 biofilter 운전 가능성이 제시되었다. 체류시간과 입구농도 변화에 따른 혼합 VOCs 처리에서는 벤젠은 모든 조건에서 100% 제거되었다.

3.2. 제거능 비교

일반적으로 biofilter의 효율은 제거능(elimination capacity; EC)을 사용하여 정량화 할 수 있으며 다음 식으로 표현된다¹¹⁾:

$$EC = (C_{in} - C_{out}) \cdot \frac{Q}{V} = C_{in} \cdot RE \cdot \frac{Q}{V} = \Delta C \cdot \frac{60}{EBRT}$$

여기서, C_{in} : 입구농도, C_{out} : 출구농도, RE: 제거효율, ΔC : (입구 - 출구) 농도 차, V: 여재 부피이다.

체류시간 변화에 따른 벤젠과 에틸렌의 최대 제거능 계산 결과를 Table 1에 요약하였다. 최대 제거능은 제거효율이 가장 높을 때를 기준으로 결정하였다. 체류시간이 15분일 경우 벤젠과 에틸렌의 최대 제거능은 각각 4.3과 1.4 g/m³hr로서 벤젠이 에틸렌에 비해 3배 정도 커졌다. 벤젠의 최대 제거능 경우 체류시간이 10분으로 증가함에 따라 3.1 g/m³hr로 감소하였으며, 이는 입구농도가 340에서 160 ppm으로 변했기 때문으로 판단된다. 같은 입구농도에서는 체류시간이 감소하면서 유량이 증가하므로 최대 제거능도 커졌다. 벤젠은 모든 체류시간에 100% 제거되므로 체류시간이 10분에서 2분으로 5배 감소 할 경우 최대 제거능도 약 5배 증가하였다.

에틸렌의 최대 제거능도 체류시간 감소에 따라 들어가

Table 1. Maximum elimination capacity for benzene and ethylene

Compound	Residence Time (min)	Inlet conc. (ppm)	Maximum elimination capacity (g/m ³ hr)
Benzene	2	160	15.3
	5	160	6.1
	10	160	3.1
	15	340	4.3
Ethylene	2	310	5.5
	5	310	2.8
	10	310	2.0
	15	310	1.4

는 유량이 증가하여 증가하는 경향을 보여 주고 있다. 체류시간이 10분에서 2분으로 5배 감소 할 경우 최대 제거능도 약 2.8배 증가하였다. 이는 벤젠과 비교하여 작은 값으로 제거율이 연관이 있었다. Elsgaard⁹⁾은 Strain RD-4 고정미생물을 퇴비 biofilter에 적용시켜 에틸렌 입구농도가 117 ppm^o이고 체류시간이 9.4분일 경우 99% 이상처리 효율을 보인 연구결과를 발표하였다. 이 연구는 순수 미생물을 이용한 경우로 최대 제거능은 0.89 g/m³hr 이었다. 본 연구와 단순히 비교는 어려우나 비슷한 체류시간(10분)에서 2배 이상 높은 수치를 보여 혼합된 VOCs 처리에서도 높은 분해율을 보여 주었다. 또한 기존 연구⁷⁾로서 체류시간이 14분에서 개별적 에틸렌 최대 제거능 계산이 혼합된 조건과 유사하게 조사되어 방해 작용 없이 잘 처리되고 있음을 알 수 있다.

3.3. 이산화탄소 발생률

Fig. 6에서는 벤젠과 에틸렌이 혼합된 상태에서 이산화탄소 발생률을 체류시간에 따라 나타내었다. 유입 이산화탄소 농도가 0이므로 biofilter내에서 미생물이 존재 또는 성장하는 것을 보여 주는 하나의 지표이다. 그림에서와 같이 체류시간이 10분에서 최고 이산화탄소 발생률은 3,169 [mg-CO₂/(g-C₂H₄+C₆H₆)]이었으며, 체류시간이 작을수록 이산화탄소 발생률은 점차 감소하는 경향을 보여주고 있다. 체류시간을 5분으로 변화시킨 후 이산화탄소의 발생률도 앞의 실험보다 감소하여 안정화된 후 716-916 [mg-CO₂/(g-C₂H₄+C₆H₆)]으로 거의 일정하게 배출되고 있었다. Fig. 6에서와 같이, 체류시간을 5분에서 2분으로 감소시켰을 경우 이산화탄소 발생률도 380-490 [mg-CO₂/(g-C₂H₄+C₆H₆)]으로 감소되는데 에틸렌 분해율 감소로 이산화탄소 발생률도 감소하였기 때문이다. 체류시간이 2분과 5분일 경우와 비교해 보았을 때 하루 이산화탄소 발생률은 체류시간이 2분일 경우 발생률이 330-420 [mg-CO₂/(g-C₂H₄+C₆H₆)] 더 낮았다. 이 조건에서 에틸렌 처리효율은 약 52% 이었다. 미생물에 의해서 생물학적 분해의 결과로 이산화탄소와 수증기가 생성되는데 분해에 의해 배출된 이산화탄소 농도를 보여주고 있다. VOCs가 생분해되면서 여재 표면에 미생물막이 점차 두꺼워 지고 두께도 증가되면서 미생물의 활동도 활발해져 이산화탄소 농도가 커지고 있음을 보여주고 있었다. 연구결과를 비교해 보았을 때 체류시간이 낮을수록 에틸렌 분해율 감소로 인하여 이산화탄소 발생률도 감소함을 발견하였으며 벤젠과 에틸렌이 모두 제거되는 운전에서 최고 이산화탄소 발생률은 3,169 [mg-CO₂/(g-C₂H₄+C₆H₆)]이었다.

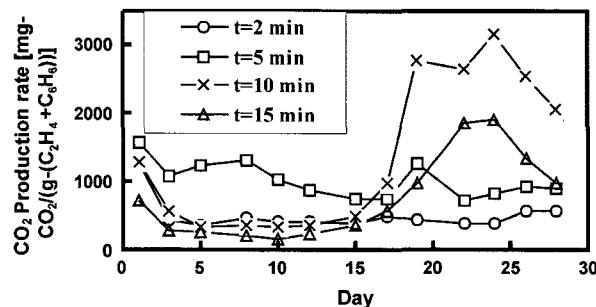


Fig. 6. Carbon dioxide production rate for different residence times.

4. 결 론

토양 및 지하수 복원 과정에서 발생되는 벤젠과 에틸렌이 혼합된 경우 biofilter에 의해 잘 처리됨을 알 수 있었다. 여기에는 각 기질 산화 미생물도 긍정적인 영향을 주어 전체적으로 높은 처리 효율을 보였다. 특히 에틸렌은 생분해가 잘 되지 않는 화합물인데도 불구하고 체류시간이 10분 이상에서는 96%이상 높은 생물학적 처리를 보여 biofilter 적용 가능성이 제시되었다. 체류시간과 입구 농도 변화시킨 실험조건에서 혼합 VOCs 중 벤젠은 100% 제거되었다. 일정한 벤젠의 입구농도에서는 체류시간이 감소함에 따라 유량이 증가하므로 제거능도 증가하였다. 에틸렌의 경우 체류시간 감소에 따라 들어가는 유량이 증가하여 최대 제거능은 증가하는 경향을 보여 주고 있다. 체류시간이 10분에서 2분으로 5배 감소 할 경우 최대 제거능도 약 2.8배 증가하였다. 기존 연구와 비교할 경우 최대 제거능이 2배 이상 높은 수치를 보여 혼합된 VOCs 처리에서도 높은 분해율을 보여 주었다. 체류시간이 낮을수록 에틸렌 분해율 감소로 인하여 이산화탄소 발생도 감소함을 발견하였으며 벤젠과 에틸렌이 모두 제거되는 운전에서 최고 이산화탄소 발생률은 3,169 [mg-CO₂/(g-C₂H₄+C₆H₆)]이었다.

사 사

본 연구는 2001년도 환경부 차세대 핵심 연구 과제의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- Ergas, S. J., Schroeder, E. D., Chang, D. P. Y. and Morton, R., "Control of volatile organic compound emissions from a POTW using a compost biofilter," Presentation at the 85th

- Annual Meeting & Exhibition of AWMA, Kansas City, Missouri, USA, 92-116.02 (1992).
2. Ottengraf, S. P. P., "Exhaust gas purification," Biotechnology, Rehm, H.-J., Reed, G. Edition, VCH, Weinheim, 8 (1986).
 3. Prokop, W. H. and Bohn, H. L., "Soil bed system for control of rendering plant odors," *J. Air Pollution Control Association*, **35**(12), pp. 1332-1338 (1985).
 4. Abeles, F. B., "Ethylene as an air pollutant," *Agric. For. Bulletin*, **5**, pp. 4-12 (1982).
 5. Freedman, D. L. and S. D. Herz, "Use of ethylene and ethane as primary substrates for aerobic cometabolism of vinyl chloride," *Water Environment Research*, **68**(3), pp. 320-328 (1996).
 6. Chitwood, D. E. and Devinny, J. S., "Evaluation of a two-stage biofilter for treatment of POTW waste air," *Environmental Progress*, **18**(3), pp. 212-221(1999).
 7. Kim, J. O. and Lee, W. B., "Biodegradation of gaseous benzene with microbial consortium in a biofilter," *Environmental Technology*, **23**(4), pp. 437-444 (2002).
 8. van Ginkel, C. G., Welten, H. G. J. and de Bont, J. A. M., "Growth and stability of ethene-utilizing bacteria on compost at very low substrate concentrations," *FEMS Microbiology Ecology*, **45**, pp. 65-69 (1987).
 9. Elsgaard, L., "Ethylene removal by a biofilter with immobilized bacteria," *Applied and Environmental Microbiology*, **64**(11), pp. 4168-4173 (1998).
 10. Mackay, D. and Shiu, W. Y., "A critical review of Henry's law constant for chemicals of environmental interest," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **10**(4), pp. 1175-1190 (1981).
 11. Lehr, J., Hyman, M, Gass, T. E. and Seevers, W. J., Handbook of complex environmental remediation problems, McGraw-Hill Co., (2002).