

생물여과반응기에서 폐가스의 VOC 제거에 대한 전자수용체의 영향

백 병 천 · Xueqing Zhu*

여수대학교 환경공학과

*미국 신시네티대학 토목환경공학과

Effect of Electron Acceptors on VOC Removal from Waste Gases in Trickle Bed Biofilter

Byeong Cheon Paik · Xueqing Zhu*

*Department of Environmental Engineering, Yosu National University,
Yosu, chonnam, 550-749, Korea*

**Department of Civil and Environmental Engineering, University of Cincinnati,
Cincinnati, Ohio, 45221-0071, U.S.A.*

ABSTRACT

Biofiltration is fast becoming the technology of choice for the control of the volatile organic compounds (VOCs) present in air streams due to its cost-effectiveness. This study was carried out to investigate the effects of electron acceptors on the performance of biofiltration process treating diethyl ether as a VOC substrate in waste gases. Two trickle bed biofilters with pelletized synthetic media were operated co-currently at a empty bed hydraulic retention time of 25 seconds, inlet gas flow rate of 8.64 m³/day, nutrient liquid flowrate of 1 L/day, and COD loading rate from 1.8 to 7.1kg COD/m³.day. Nitrate and oxygen were used as the electron acceptor for the VOC (ether) biodegradation. By increasing the concentration of oxygen in the feed to this biofilter from 21% (ambient air) to 50% and 100% while maintaining an influent VOC (ether) concentration of 133 ppm_v and a feed nitrate concentration of 67mg/l, the performance of the biofilter was not significantly affected. However, the VOC (ether) removal efficiencies improved with increasing influent nitrate concentration, which suggest that nitrate is a good electron acceptor more than oxygen. It was also found that nitrate was rate limiting as a growth nutrient rather than as an electron acceptor, and that resistance to the transport of nitrate into the biofilm led to nutrient limitations in the deeper layers of the biofilm.

Key Words : Biofiltration, Trickle Bed Biofilter, VOC Removal, Electron Acceptor, Nutrient

1. 서 론

VOCs (volatile organic compounds)는 대기중에서 이동성이 강하고 냄새를 유발할 뿐 아니라, 마취성이 강한 오염물질로 알려져 있다. 또한 잠재적인 독성 및 발암성을 가지고 있을 뿐 아니라 산화질소 및 다른 화학물질과 광화학적으로 반응하여 오존을 형성하기 때문에 이들에 의한 환경오염은 특별한 관심을 집중시키고 있는 실정이다. 미국의 Clean Air Act에서 190여종의 대상물질(Hazardous Air Pollutant, HAP)를 규제하는 개정법안이 1990년에 통과된 후에 대기중의 VOCs의 방류는 엄격한 규제대상이 되어 VOCs 제거기술의 개발이 활발하게 추진되고 있다^{1,2,3)}.

VOCs의 생물학적 처리법은 처리비용 면에서 소각이나 흡착처리법에 비하여 매우 유리하며, 특히 저농도의 VOCs를 함유하고 처리규모가 클 경우에는 열 및 화학적 산화 공정에 비하여 운전비용이 적게드는 장점이 있고, 시설비에 있어서도 매우 경제적인 뿐 아니라 유지관리비도 유리하여 현재 선진 외국의 경우 이 공정에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다^{4,5,6,7)}. 이러한 VOCs의 생물학적 제거는 반응기에 충전된 여체에 미생물을 부착시켜 처리하는 고정상 생물여과공법이 주로 이용되고 있으며, 공정의 성공적인 운전을 위하여 매질의 선정, 수분 및 pH 조절, 미생물 조절 등의 운전인자들에 대한 평가가 활발히 연구되고 있다^{7,8,9,10)}.

생물여과 공법에서 영양물질의 공급은 미생물의 성장과 매우 밀접한 관계가 있는 바, 퇴비물질, 나무껍질 등과 같은 매질이 사용될 경우에 사용된 매질에서 영양물질이 공급되기 때문에 영양물질이 공정의 효율을 제한하는 결과를 초래하게 된다¹¹⁾. 따라서 인공매질을 이용할 경우에는 적절한 영양물질의 공급이 매우 중요하다. 한편, VOCs는 인공매질에 부착된 다양한 미생물에 의하여 처리되는 데, 매질 표면에 부착된 미생물의 경우에는 대

부분 호기성 미생물로 구성되어 있어 VOCs의 물질대사과정에서 전자수용체를 산소를 이용하게 된다. 그러나 이러한 산소는 VOCs를 제거하지 않는 화학독립영양균의 경우에도 전자수용체로 이용하게 되므로 생물막 표면에는 이러한 미생물의 증가를 초래할 수 있다. 특히, 영양물질로서 암모니아 질소를 사용할 경우에는 화학독립영양균인 질산화균의 성장으로 인해 VOCs 처리 성능을 저하시키는 요인이 된다^{7,10)}.

따라서 영양물질을 고려한 적절한 전자 수용체의 선정은 생물여과반응기의 성능에 영향을 주게 되므로, 본 연구에서는 VOC 제거에 대한 전자수용체의 영향이 조사되었다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험장치

본 연구를 위한 실험장치의 개요는 Fig. 1에 나타내었다. 생물여과반응기는 내경이 76mm인 유리 칼럼으로 5개 부분으로 나뉘어져 있다. 반응기의 윗부분은 61cm이고 나머지 각부분의 높이는 15.2cm이며, 각 부분의 중앙부에 반응기 내의 시료채취가 가능하도록 시료채취 장치를 만들었다. 이 생물여과반응기 내에는 직경 4mm정도 크기의 다공성 세라믹 매질이 반응기 61cm정도 높이까지 채워져 있다. 그리고 이 반응기는 물을 이용하여 역세정이 가능하도록 장치되었으며, 오염된 공기와 영양물질은 반응기 상부에서 들어와서 반응기 하부로 나가도록 되어 있다.

한편, 이 반응기들은 5-40℃ 온도조절이 가능한 chamber에 장치되어 있으며, 반응기에 유입되는 공기는 물, oil, CO₂, VOCs, 입자, 미생물 등이 완전히 제거되어 정화된 공기가 유입하게 된다. 이때 처리대상 VOC는 syringe pump를 사용하여 공기 주입 line에 처리하고자 하는 농도로 주입되며,

영양물질은 반응기내에 고르게 공급되도록 충전매질 상부에 설치된 노즐에서 분사된다.

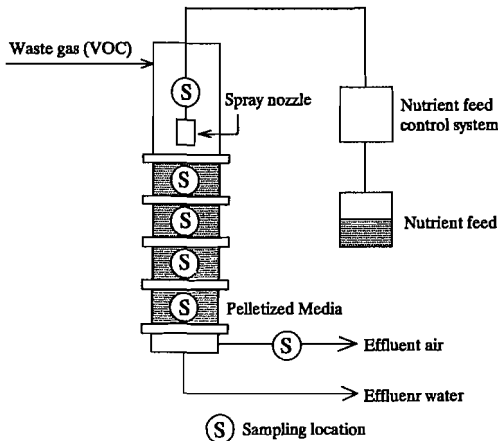


Fig. 1. Schematic diagram of the biofiltration process

2.2. 유입기질

본 실험에서는 VOC의 대상 물질로서 디에틸 에테르를 사용하였다. 에테르는 비점이 35°C이고 20°C에 증기압이 442mmHg이며, 20°C에서 용해도는 69g/l 이다. 사용된 영양물질은 미생물에 필요한 영양분을 공급하기 위해 Stock Solution를 제조하여 희석 사용하였다. Table 1은 유입 영양물질의 성상을 보여주며, Vitamin solution은 P-Aminobenzoic acid 10mg/l, Biotin 3.9mg/l, Cyanocobalamin 0.2mg/l, Folic acid 3.9mg/l, Nicotinic acid 10mg/l, Pantothenic acid 10mg/l, Pyridoxine HCl 20mg/l, Riboflavin 10mg/l, Thiamin HCl 10mg/l, Thiocetic acid 10mg/l 으로 구성되었으며, Trace Salt Solution은 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 69mg/l, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 38mg/l, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 157mg/l, $\text{CoCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 95mg/l, ZnCl_2 99mg/l, CuCl_2 68mg/l 로 구성되어 있다.

Table 1. Composition of the nutrient solution

Components	Concentration (mg/l)
NaNO_3	405.94
$\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	58.97
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	3.62
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.99
KHSO_4	6.06
FeCl_3	0.028
NaHCO_3	48.0
Vitamin Solution	0.114 ml
Trace Salt	0.446 ml

2.3. 실험방법

먼저 다공성 세라믹 매질이 충전된 2개의 생물여과반응기에 미생물을 식중하였다. 식중된 미생물은 도시하수처리장에서 가져온 활성슬러지를 조사대상 VOC인 에테르에서 배양하였다. 운전초기 반응기에 정화된 공기의 주입량을 6L/min(8.6 m³/day), syringe pump에 의한 VOC 주입량을 0.1ml/hr로 하였으며, 이들은 반응기에 주입전에 충분히 혼합되어 주입되도록 장치하였다. 이때 EBHRT는 25sec, VOC 유입농도는 67ppmv(206 mg/m³), 반응기의 유기물 부하율은 1.8kg COD/m³.day 였다. 유입영양물질은 액체상태로 1 L/day로 공급되며, 반응기의 온도는 27°C로 운전되었다. 반응기가 정상상태에 도달하게 되면 반응기의 EBHRT를 고정시킨 후 유입 VOC 농도를 67-267ppmv로 변화시키면서 반응기의 성능을 조사하였다.

2.4. 분석방법

본 실험에서는 기체 및 액체의 시료분석이 이루어졌다. 기체분석의 경우에는 유량, VOC의 유입 및 유출 농도, CO₂, O₂가 분석되었다. VOC는 5% Carbowax와 60/80 Carbowax B-DA로 충전된 1.8m 유리칼럼과 FID가 부착된 Gas Chromatograph(HP 5890, Series II, Hewlett-Packard, Palo Alto, CA)로 분석하였다. CO₂와 O₂의 분석은 TCD가 부착된 GC를 이용하여 분석하였다. 액체분석의 경우에는 유량, VOC, pH, 무기탄소, 유기탄소, NH₄⁺,

NO_3^- 이 분석되었으며, 탄소성분은 TOC Analyzer (Shimazu TOC 5000), 질산성질소는 Spectrophotometer(HP8452), VOC는 30m megabore column (DB 624 J & W Scientific, Folsom, CA)으로 liquid sample concentrator (LSC 200, Tekmar), PID가 장착된 GC를 이용하여 분석하였다. 그 밖의 다른 분석들은 Standard Method에 따라 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 처리효율

초기운전 동안 두개의 반응기에 유입 VOC 농도는 67ppm_v ($0.1\text{m}^3 \text{ ether/hr}$)이었으며, 유입 2주 후에는 처리효율이 현저하게 증가하는 경향을 보여 식종미생물이 VOC에 잘 순화된 것을 보여주었다. 반응기의 운전은 총 371일동안 실시되었다. 운전 70일까지 두 생물반응기에 VOC 유입농도는 67ppm_v 로 유지하였고, 이 때 유기물 평균 부하량은 $1.8\text{kg COD/m}^3\cdot\text{day}$ 이었다. 운전 70일부터 304일 동안에 A 반응조의 유입 VOC 농도는 67ppm_v 를 유지하였고, B 반응조의 유입 VOC 농도는 133

ppm_v 으로 운전되어 B 반응조의 평균 부하량은 $3.6\text{kg COD/m}^3\cdot\text{day}$ 이었다. 운전 304일부터 371일 동안은 A 반응기의 경우 200ppm_v , B 반응기의 경우 267ppm_v 로 운전되었으며, 이때 각 반응기의 유기물 부하량은 각각 $5.3\text{kg COD/m}^3\cdot\text{day}$ 와 $7.1\text{kg COD/m}^3\cdot\text{day}$ 이었다. 질소성 영양물질은 1L/day 로 공급되는 유입영양물질과 함께 질산성 질소이온 농도를 $34\text{--}1067\text{mg NO}_3\text{--N/l}$ 로 변화시키면서 각 반응기에 주입하면서 반응기의 처리효율을 조사하였다.

Table 2는 운전기간동안 유입 VOC 농도에 따른 처리효율을 보여준다. Table 2에서 나타난 바와 같이 67ppm_v 로 유입되는 VOC는 평균 $91.8\sim 99.8\%$ 의 처리효율을 보였으며, VOC가 133ppm_v ($3.6\text{kgCOD/m}^3\cdot\text{day}$)으로 유입되었을 경우에는 평균 제거율은 $67.3\sim 99.90\%$ 의 범위를 보였다. 그리고 유입 VOC가 200ppm_v ($5.3 \text{ kgCOD/m}^3\cdot\text{day}$)에서는 평균제거율이 $98.3\sim 98.9\%$ 의 범위를 보였고, 유입 VOC가 267ppm_v ($7.1\text{kgCOD/m}^3\cdot\text{day}$)에서는 평균제거율은 $92.6\sim 97.7\%$ 의 범위로 나타났다. Table 2에서 보여주는 바와 같이 같은 유입 VOC 농도에서는 유입영양물질과 함께 공급되는 질산성질소이온 농도가 높을수록 처리효율이 증가하는 것으로 조사되었다. 유입 VOC를 67ppm_v , 질산성 질소 이

Table 2. Summary of VOC removal efficiency during influent nitrate variations

Influent concentration (ppm_v)	COD loading rate ($\text{kgCOD/m}^3\cdot\text{day}$)	Influent nitrate concentration ($\text{mg NO}_3\text{--N/l}$)	VOC removal efficiency
67	1.8	34	91.8 ± 5.0
		67	99.2 ± 0.3
		133	99.9 ± 0.1
		267	99.8 ± 0.1
133	3.6	34	67.3 ± 7.5
		67	88.4 ± 5.3
		133	95.5 ± 1.0
		267	99.0 ± 1.0
200	5.3	267	98.3 ± 2.2
		533	98.9 ± 2.4
		1067	98.7 ± 2.6
267	7.1	267	92.6 ± 3.1
		533	97.7 ± 2.6
		1067	97.4 ± 2.3

은 농도를 34mg NO₃-N/l로 유입시켰을 때 VOC 제거효율은 평균 91.8%를 유지하였으나, 질산성질소이온 농도를 133mg NO₃-N/l로 증가시키자 처리효율은 평균 99.9%를 유지하였다. 이러한 현상은 유입 VOC 농도를 133, 200, 267ppm_v로 각각 유입한 경우에도 같은 현상이 관찰되었는데, 전자공여체로서 공급되는 질산성 질소이온의 농도가 VOC 처리효율에 크게 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 한편, 운전기간 동안 1L/day가 유출되는 영양물질이 포함된 액체 내에 존재하는 VOC양은 1μg/L이하로 무시할 수 있을 정도의 극소량이 측정되었다.

3.2. 질산성 질소이온의 영향

영양물질의 질소성분으로 암모니아성 질소(NH₄⁺-N)를 공급할 경우에는 반응기에서 질산화가 일어나 VOC 제거율을 감소시키므로 질소성분으로 질산성 질소이온(NO₃⁻-N)을 공급하는 것이 효과적이다.⁹⁾ Table 3은 반응기 운전기간 동안 조사된 VOC 제거율에 대한 유입 COD : N ratio의 영향을 보여준다. 유입 VOC가 67ppm_v로 공급될 때

COD : N ratio가 33:1일 경우가 VOC 제거율이 99.9%로 가장 높게 나타나는 것으로 조사되었다. 유입 VOC가 133ppm_v로 공급될 경우에도 COD : N ratio가 33:1일 경우가 VOC 제거율이 99.0%로 가장 높게 나타나는 것으로 조사되었으며, 유입 VOC가 200ppm_v로 공급될 때에는 COD : N ratio가 25:1일 경우가 VOC 제거율이 98.9%로 가장 높게 나타나는 것으로 조사되었다. 그리고 유입 VOC가 267ppm_v로 공급될 경우에도 COD : N ratio가 33:1일 경우가 VOC 제거율이 97.7%로 가장 높게 나타난 바, VOC의 효율적인 제거를 위한 최적 유입 COD : N ratio는 33 : 1인 것으로 조사되었다.

Fig. 2는 생물여과반응기에서 VOC 유입농도가 133ppm_v으로 운전되는 동안 VOC 제거에 대한 질산성 질소 이온의 효과를 보여준다. 생물여과반응기에서 VOC 유입농도는 133ppm_v, 질산성질소이온 농도를 34mg NO₃-N/l로 공급하였을 때 VOC 제거효율은 평균 67.3%이었으나, 질산성질소이온 농도를 67, 134, 267mg NO₃-N/l로 증가시켰을 때 VOC 평균 제거율은 각각 88.4, 95.5, 99.0%로 증가하였다.

Table 3. Summary of VOC removal efficiency during influent nitrate variations

Influent concentration (ppm _v)	VOC removal efficiency	Influent COD : N ratio
67	91.8 ± 5.0	133 : 1
	99.2 ± 0.3	67 : 1
	99.9 ± 0.1	33 : 1
	99.8 ± 0.1	17 : 1
133	67.3 ± 7.5	267 : 1
	88.4 ± 5.3	133 : 1
	95.5 ± 1.0	67 : 1
	99.0 ± 1.0	33 : 1
200	98.3 ± 2.2	50 : 1
	98.9 ± 2.4	25 : 1
	98.7 ± 2.6	12 : 1
267	92.6 ± 3.1	67 : 1
	97.7 ± 2.6	33 : 1
	97.4 ± 2.3	17 : 1

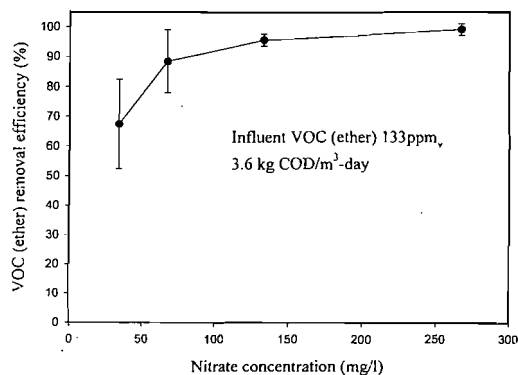


Fig. 2. Nitrate effect on VOC(ether) removal

3.3. 산소의 영향

일반적으로 생물막에서 산소의 확산에 대한 저항은 생물막 내에 산소농도를 감소시키기 때문에 호기성 생물여과 공정에서는 산소의 부족은 심각한 문제를 야기시킬 수 있다. 따라서 호기성 조건 하에서 VOC를 산화시키는 데 일차 전자수용체로서 작용하는 산소의 농도를 증가시켜 생물막 내로 전달된 산소의 역할을 조사하였다. Kirchner¹⁰⁾는 생물막에서 산소의 확산이 VOC 제거율을 결정짓는 것을 발견하였다. Fig. 3은 VOC 제거에 대한 질산성질소이온과 산소의 효과를 보여준다.

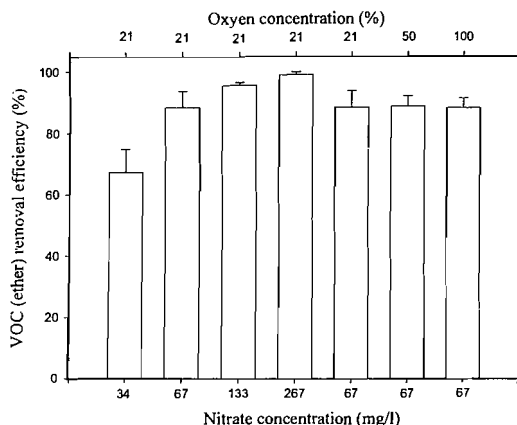


Fig. 3. Comparison of oxygen and nitrate effects on VOC(ether) removal

생물여과반응기에서 VOC 유입농도는 133ppm_v, 질산성 질소이온 농도는 67mg NO₃-N/l로 운전되는 동안 Kirchner¹⁰⁾가 사용한 방법으로 산소의 농도를 21%(ambient air), 50%, 100%로 증가시키면서 산소가 VOC 제거에 미치는 영향을 조사하였다. Fig. 3에서 보여주듯이 21%의 산소가 공급되었을 때 평균 VOC 제거율은 92.4%이었고, 50%의 산소가 공급되었을 때 평균 제거율은 90%이었으며, 100%의 산소가 공급되었을 경우 89%의 제거율을 보여 산소농도의 증가는 VOC 제거율 증가에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그러나 같은 유기물 부하 조건에서 운전되는 생물여과 반응기에 질산성 질소이온 농도를 133mg NO₃-N/l 및 267mg NO₃-N/l로 증가시켰을 때 VOC 제거율은 각각 98.6%, 99.5%로 증가하였다. 이러한 결과는 생물여과 반응기에서 VOC의 제거를 위해서는 전자수용체로서 산소보다는 질산성질소의 이용이 유리한 것임을 시사해 준다.

3.4. 질산성질소의 역할

질산성 질소이온이 미생물 성장을 위해 영양분으로서 사용되어 VOC의 제거율이 증가한 것인지 VOC가 분해되는 동안 전자수용체로서 역할을 하여 VOC 제거율이 증가하는 지가 명확하지 않다. Fig. 4는 VOC의 제거율에 대한 질산성 질소이온의 물질전달 효과를 보여준다. 여기서 질산성 질소이온의 기하평균농도(log mean concentration)는 $(C_{in}-C_{out})/\ln(C_{in}/C_{out})$ 으로 계산되었으며 이는 생물막에서 질산성 질소이온의 확산을 위한 평균 운동량을 의미한다고 할 수 있다. Fig. 4에서 보여주듯이 생물여과반응기에서 VOC가 133ppm_v로 유입될 때 질산성 질소이온의 물질전달 운동량이 증가할수록 VOC의 제거율 및 제거능이 증가하고 있음을 알 수 있는 데, 이는 생물막에서 질산성 질소이온의 전달에 대한 저항이 제한 요소임을 시사하고 있다.

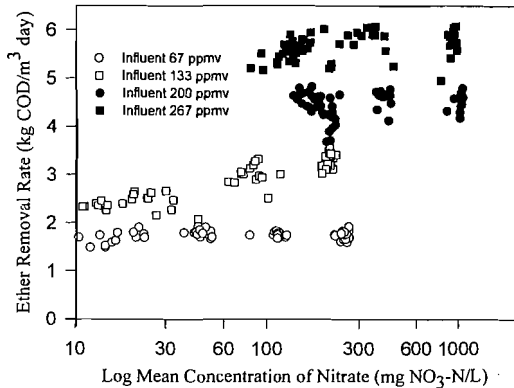


Fig. 4. Effect of log concentration VOC(ether) removal rate

이러한 결과는 생물여과반응기에서 질산성 질소 이온이 미생물성장에 필요한 영양분으로서 작용이 율속단계 역할을 하고 있음을 시사하며, 아울러 질산성 질소이온의 낮은 유입농도에서는 생물막에서 질산성 질소이온의 전달에 대한 저항으로 인하여 생물막 깊은 안쪽부분에서 미생물 성장에 필요한 영양분의 부족 현상이 일어나고 있음을 말해 주고 있다. 또한 이러한 결과는 생물여과반응기의 성능은 공급되는 질산성 질소이온 농도를 조정함으로써 향상시킬 수 있음을 시사한다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. VOC가 평균 267ppmv으로 유입되는 7.1kg COD/m³.day의 유기물부하로 운전되는 생물여과반응기에서도 98% 이상의 VOC 제거효율을 얻을 수 있었다.
2. 생물여과반응기에서 이용된 질산성 질소이온 농도가 높을수록 반응기에서 제거된 COD 양은 증가하였으며, 운전기간동안 VOC의 효율적인 제거를 위한 최적 유입 COD : N ratio는 33 : 1인 것으로 조사되었다.

3. 생물여과반응기에 유입되는 VOC 효율적인 제거를 위해서는 전자수용체로서 산소보다 질산성 질소를 사용하는 것이 높은 처리효율을 얻을 수 있는 것으로 나타났다.
4. 생물막에 전달되는 산소의 확산이 VOC 제거효율에 영향을 미치지 않았으며, 질산성 질소이온은 전자수용체의 역할보다는 생물막에서 미생물 성장에 필요한 영양분으로서의 역할에 큰 비중을 차지하고 있는 바, 질산성 질소이온의 농도가 VOC 제거에 율속단계로 작용하였다.

참 고 문 헌

1. OTA, Office of Technology Assessment, Protecting the Nation's Groundwater from Cincinnati, Vol. 1, pp. 19-60, OTA-o-233, Washington D.C.(1984).
2. Leson, G. and Winner, A.M. "Biofiltration an innovative air pollution control technology for VOC emissions," *J. Air Waste Management Assoc.* 41(8), 1045-1054(1991).
3. Leson, G. Biofiltration-Investigation of a novel air pollutioncontrol technology for the south coast air basin, Dept. Env. Thesis, University of California, Los Angeles, CA(1992).
4. Ruddy, E.N. and Carroll, L.A., "Select the best VOC control strategy," *Chem. Eng. Prog.*, 89(7), 28-35(1993).
5. Ottengraf, S.P.P., Meesters, J.J.P., Oever, A.H.C. and van den Rozema, H.R. "Biological Elimination of Volatile Xenobiotic Compounds in Biofilters," *Bioprocess Eng.*, 1, 61-69(1986).
6. Ottengraf, S.P.P. "Exhaust gas purification," *In: Rehm H-J, Reed G(eds) Biotechnology*, VCH, Weinham, 8, 425-452(1986).
7. Ronald, A., Jager, P., Mark E., Lang, M. E. and Saltmarsh, K. J. "Biofilter Design and

- Performance Evaluation", *the 68th Water Environmental Federation Annual Conference*, Anaheim, CA, Oct. 3-7, pp. 481-491(1993).
8. Sorial, G.A., Smith, F.L., Smith, P.J., Suidan, M.T., Biswas, P. and Brenner, R.C. "Evaluation of biofilter media for treatment of air streams containing VOC," *the 68th Conference Water Environmental Federation*, Anaheim, CA, Oct. 3-7, pp. 429-438(1993).
 9. Sorial, G.A., Smith, F.L., Smith, P.J., Suidan, M.T., Biswas, P. and Brenner, R.C. "Biofilters treat contaminated air," *Water Environment and Technology*, 4, 50-54(1994).
 10. Kircher, K., Wagner, S. and Rehm, H.J. "Exhaust gas purification using biocatalysts (Fixed bacteria mono cultures)-The influence of biofilm diffusion rate (O_2) on the overall reaction rate," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 37, 277-279(1992).
 11. Morgenroth, E., Dchroeder, E.D., Chang, D.P.Y. and Scow, K. M., "Nutrient limitation in a compost biofilter degrading hexane," *J. of the Air & Waste Management Assoc.*, 46, 300-308(1996).