

고리형 에테르의 생물학적 처리 특성

이성열 · 정연구*

대한주택공사 시설관리처, *금오공과대학교 토목환경공학부
(2007년 11월 6일 접수; 2008년 1월 8일 채택)

Removal Characteristics of Cyclic Ethers in Biological Wastewater Treatment System

Sung-Ryul Lee and Yeon-Koo Jeong*

Korea National Housing Corporation, Division of Facility Management, Gyeonggi 463-704, Korea

**Department of Civil and Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology 1, Gyeongbuk 730-701, Korea*

(Manuscript received 6 November, 2007; accepted 18 January, 2008)

Abstract

The fate of two cyclic ethers, THF(Tetrahydrofuran) and 1,4-Dioxane, in conventional biological wastewater treatment plants was investigated using sequential activated sludge process. Removal efficiency of THF were about 86% in average, which was greater than that of 1,4-Dioxane, 30%. However, it was not clear whether the removal of cyclic ethers in biological system was caused by microbial activity or not. Thus treatability tests were conducted by batch experiments. The effects of mixing, aeration and the addition of activated sludge on the removal of cyclic ethers were investigated in batch experiments. THF was totally removed by mixing and aeration in 24 hours while removal ratio of 1,4-Dioxane was at most 30% for the same period. This results could be ascribed to the differences in Henry's law constants between the two chemicals. In addition, biological degradation including biosorption was not obviously observed in these batch tests.

Key Words : THF, 1,4-Dioxane, Sequencing activated sludge, Mixing, Aeration

1. 서 론

대표적인 고리형 에테르인 THF(Tetrahydrofuran)와 1,4-Dioxane은 용매로서의 탁월한 특성으로 인해 다양한 산업에서 사용되고 있다. THF는 PTMEG (polytetramethylene ether glycol) 합성공정의 원료로 주로 사용되고 있으며, 그 외 자기테이프 코팅, PVC 반

응기 세척제, 반응용매 등으로 사용된다. 1,4-Dioxane은 염소계 용제의 안정화물질, 의약품용 용제로 사용된다. 또 과거에는 유기용매인 1,1,1-Trichloroethane에 안정제(stabilizing agent)로 주로 사용되었으며, 이는 지하수의 1,4-Dioxane 오염의 원인으로 지적되고 있다¹⁾.

또 이러한 고리형 에테르는 일부 폴리머 제조공정에서 부산물로 발생되기도 한다. 우선 THF는 PBT(polybutylene terephthalate) 합성공정에서 부산물로 생성된다. PBT는 통상적으로 BD (1,4-Butanediol)

Corresponding Author : Yeon-Koo Jeong, Department of Civil and Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongbuk 730-701, Korea
Phone: +82-54-478-7631
E-mail: jeongyk@kumoh.ac.kr

과 DMT(Dimethyl terephthalate) 또는 TPA(terephthalic acid)를 이용하여 합성하는데, BD는 산성조건에서 고리화 반응에 의해 물과 THF로 전환된다^{2,3}. 1,4-Dioxane도 PET (polyethylene terephthalate) 제조 공정에서 부산물로 생성된다⁴.

1,4-Dioxane은 2000년부터 낙동강 수계에서 0.6 ~ 217 $\mu\text{g/l}$ 로 검출된 것으로 보고된 바 있다⁵. 이에 정부에서는 1,4-Dioxane의 배출원을 확인하고 자율규제를 통해 배출량 저감 노력을 기울이고 있다. 1,4-Dioxane 처리기술 개발하기 위해 다양한 연구가 진행된 바 있다. 임 등⁶은 상수원수에 대해 오존, 오존과 과산화수소를 적용하여 1,4-Dioxane 처리 특성을 조사하였다. 또 펜톤공정, 초음파 등의 산화공법을 이용한 1,4-Dioxane 처리기술에 대한 연구도 진행되었다^{7,8}. 최근에는 구리 촉매와 과산화수소를 사용하여 1기압, 100°C 조건에서 고농도의 1,4-Dioxane 폐수를 효과적으로 처리할 수 있는 CWPO(Catalytic Wet Peroxide Oxidation) 공법이 개발되었다⁹. 국외적으로도 고급산화공정을 통한 1,4-Dioxane 처리 사례가 많이 보고되고 있다¹⁰⁻¹². 또 THF 및 1,4-Dioxane을 분해할 수 있는 미생물을 분리하여 분해특성을 조사한 연구도 다수 존재한다¹³⁻¹⁵. 특히 Zenker 등¹⁵은 살수여상법으로 THF를 탄소원으로 하여 1,4-Dioxane을 공동대사(Cometabolism)로 처리하였다. 하지만 THF의 처리특성에 관한 국내 연구사례는 거의 없는 것으로 파악되고 있다.

이에 본 연구에서는 대표적인 고리형 에테르인 THF와 1,4-Dioxane의 처리특성을 국내 산업체에서 보편적으로 채택하고 있는 생물학적 폐수처리 시스템을 모사하여 평가하였다. 이는 고리형 에테르 배출업체에서 사용하고 있는 처리시설에서의 처리 특성을 평가하기 위함이다. 아울러 생물학적 처리공정에서의 고리형 에테르 제거 과정을 명확히 규명하기 위하여 회분식 실험을 실시하였다. 즉, 혼합, 폭기, 활성슬러지에 의한 생분해 및 흡착 등 다양한 인자가 고리형 에테르의 제거에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연속회분식 활성슬러지(SBR) 실험

고리형 에테르의 생물학적 처리공정에서의 제거

특성은 회분식 활성슬러지 공정으로 조사하였다. 유효용적이 6.75 L인 반응기를 사용하였으며, PLC (programmable logic controller)를 이용하여 유입, 혼합, 폭기, 배출 등의 조작을 자동화하였다. SBR 반응기는 105 rpm으로 회전하는 패들로 혼합하였다. HRT는 유입기, 침강 및 배출기를 각각 1 hr, 2 hr로 고정하고 반응시간을 조절하여 2일 또는 1일로 유지하였다. 식종슬러지는 THF와 1,4-Dioxane 배출업체가 위치하고 있는 G시의 하수종말처리장에서 채취하였으며, 초기 농도가 3,300 mg/l이 되도록 주입하였다.

실험에 이용한 합성폐수의 조성은 Table 1과 같다. 고리형 에테르가 포함된 산업폐수와 유사한 성상으로 합성폐수를 제조하기 위해 PBT 및 PET 제조의 원료인 BD(1,4-Butanediol)와 EG(Ethylene glycol), 폴리머 합성과정에서 생성되는 메탄올과 포도당도 첨가하였다. 물론 THF와 1,4-dioxane이 동시에 포함된 산업폐수는 없을 것으로 판단되었지만, 1,4-Dioxane은 THF를 분해하는 미생물에 의해 공동대사에 의해 분해된다는 연구 결과가 보고된 바 있으므로 두 물질을 혼합하여 실험하였다¹⁵. 폐수의 COD는 약 500~1,000 mg/l가 되도록 하였으며, 고리형 에테르 농도는 실험조건에 따라 조정하였다. 우선 1, 2단계에서는 THF만 각각 50 mg/l, 500 mg/l 첨가하였으며, 3, 4단계에서는 THF와 함께 1,4-

Table 1. Chemical composition of synthetic wastewater used

Materials		Concentration (mg/l)
Organics	THF	50~500
	1,4-Dioxane	100
	Glucose	100~300
	Methanol	40
	Ethylene Glycol	50
	1,4-Butanediol	30
Nutrients and minerals	NH ₄ Cl-N	35.3
	KH ₂ PO ₄ -P	7.5
	NaHCO ₃	250
	Yeast extract	1
	FeCl ₃ · 6H ₂ O	0.375
	MgSO ₄ · 7H ₂ O	50.0
	MnSO ₄ · H ₂ O	0.038
	CaCl ₂ · 2H ₂ O	10.0
ZnSO ₄ · 7H ₂ O	0.035	

Dioxane을 각각 100 mg/l씩 첨가하였다. 1~3단계까지는 HRT 2일로 운전하였으며, 4단계에서는 HRT를 1일로 단축하였다. 그리고 4단계에서는 하수 슬러지를 새로 식종하여 2,500 mg/l가 되도록 하였다.

2.2. 회분식 실험

회분식 실험은 비커에 고리형 에테르가 포함된 합성폐수를 1 L를 넣어 진행하였다. 자석 교반기(길이 38mm, 450±30rpm)로 혼합하였으며, 공기는 Air pump와 산기석을 사용해 0.99 l/min로 주입하였다. 전체적인 회분식 실험 조건은 Table 2와 같으며, Run 1 ~ Run 3은 각각 단순 혼합, 혼합 및 폭기, 공기량이 고리형 에테르 제거에 미치는 영향을 조사하기 위한 실험이다. Run 3은 공기주입량의 영향을 조사하기 위한 것으로 공기를 분당 0.22, 0.42, 0.99 L를 주입하였다. Run 4과 Run 5는 각각 하수슬러지 첨가 및 독성물질에 의한 미생물 활성 저해가 고리형 에테르 제거에 미치는 영향을 조사하기 위한 것으로 G시 하수처리장 슬러지를 3,300 mg/l 첨가하였다. Run 5에서는 HgCl₂ 500 mg/l 투입하여 미생물의 활성을 저해하였다. Run 2-2와 Run 2-2', Run 2-4와 Run 2-4'는 같은 조건의 반복실험이다. 합성폐수는 포도당, THF, 1,4-Dioxane을 각각 200 mg/l 정도 첨

가하여 제조하였다.

2.3. 분석 방법

고리형 에테르는 GC-FID (DS6200A, Donam Instrument)를 사용하여 정량하였으며, 1,3-Dioxane (Aldrich, 97%)을 내부표준물로 첨가하였다¹⁶⁾. GC의 운전조건은 주입구 250℃, 검출기 300℃, 분리관은 50℃(0분), 8℃/분(20분), 210℃(0분)으로 설정하였다. 분리관은 모세분리관인 DB 624(L=30m, I.D.=0.53mm, Film=3μm)를 사용하였으며, 수용액 시료를 그대로 주입하였다. COD는 Standard methods에 따라 분석하였다¹⁷⁾. 그리고 실험에 사용한 THF, 1,4-Dioxane, EG, BD는 모두 Sigma-Aldrich 사의 제품이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 연속회분식 활성슬러지(SBR)

3.1.1. COD 제거

SBR 반응기의 COD 제거 특성은 Fig. 1과 같다. 고리형 에테르 중에서 THF만 50 mg/l, 500 mg/l씩 첨가한 1단계와 2단계에서의 유출수 COD는 각각 22 mg/l, 44 mg/l로 나타나 COD 제거율은 95% 이상 유지되었다. 이러한 결과는 THF를 포함하여 합성폐수에 포함된 물질이 거의 제거됨을 의미하며, THF

Table 2. Experimental conditions of batch removal tests

Conditions		THF			1,4-Dioxane		
Run 1		Run 1-1	Run 1-2	Run 1-3	Run 1-4		
	Mixing	×	○	×	○		
Run 2		Run 2-1	Run 2-2	Run 2-3	Run 2-4		
	Mixing	○	○	○	○		
	Aeration	×	○	×	○		
Run 3		Run 3-1	Run 3-2	Run 2-2'	Run 3-3	Run 3-4	Run 2-4'
	Mixing	○	○	○	○	○	○
	Air flow rate (l/min)	0.22	0.42	0.99	0.22	0.42	0.99
Run 4 ¹⁾		Run 4-1	Run 4-2	Run 4-3	Run 4-4		
	Mixing	○	○	○	○		
	Aeration	×	○	×	○		
	Seeding	○	○	○	○		
Run 5 ^{1,2)}		Run 5-1	Run 5-2	Run 5-3	Run 5-4		
	Mixing	○	○	○	○		
	Aeration	×	○	×	○		
	Seeding, HgCl ₂	○	○	○	○		

¹⁾MLSS: 3,300 mg/l, ²⁾HgCl₂: 500 mg/l

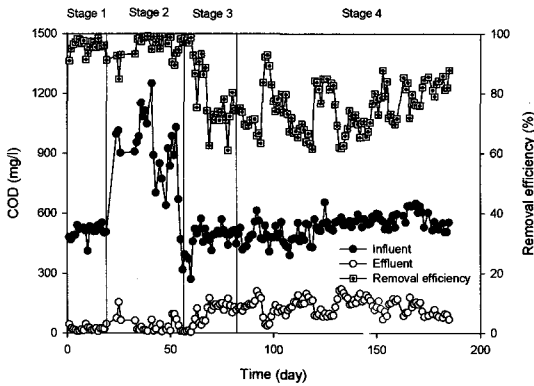


Fig. 1. COD variations in sequencing batch reactors.

가 500 mg/l 수준으로 증가하여도 다른 물질의 제거에는 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

3, 4단계에서는 THF, 1,4-Dioxane, 포도당을 각각 100 mg/l로 조정하여 유입수 COD가 약 500 mg/l가 되도록 하였다. HRT를 2일로 유지한 3단계의 COD 제거율은 약 81% 수준으로 나타났다. 한편 HRT를 1일로 줄이고 하수슬러지를 다시 식중환 4단계에서는 평균적 COD 제거율은 75% 정도를 보였다. THF만 첨가한 1, 2단계보다 3, 4단계에서 COD 제거율이 낮은 것은 1,4-Dioxane의 영향으로 판단된다. 즉, 1,4-Dioxane이 쉽게 제거되지 않았기 때문에 전반적으로 COD 제거율이 낮아진 것으로 판단된다.

3.1.2. 고리형 에테르

3단계 실험부터 THF와 1,4-Dioxane의 농도를 분석하였으며, 그 결과는 Fig. 2와 같다. 3단계에서

THF는 84% 정도의 제거율을 보인 반면 1,4-Dioxane은 약 26%의 제거율을 보였다. HRT를 1일로 단축시킨 4단계의 THF 및 1,4-Dioxane의 평균 제거율은 각각 87%, 32%로 나타나 3단계와 큰 차이가 없었다. 고리형 에테르 중에서 THF는 비교적 높은 제거율을 보였으나 1,4-Dioxane은 제거율이 낮음을 보였다. 하지만 유출수 1,4-Dioxane 농도는 큰 폭으로 변동되어 안정적인 제거시스템이 형성되지 않은 것으로 판단된다. 한편 Abe¹⁾는 1,4-Dioxane 제거율은 순응된 활성슬러지의 경우 50 ~ 60% 정도이며, 일반 하수처리장의 활성슬러지의 경우에는 거의 제거가 되지 않거나 약 30% 정도 제거된다고 보고하였다. 본 연구결과는 이와 유사한 것으로 판단된다.

THF는 오랫동안 생물학적인 분해가 곤란하다고 알려져 있던 물질이었으나 Bernhardt와 Dickmann¹⁴⁾가 THF 분해능을 갖는 *Rhodococcus rubber*를 분리함으로써 생분해될 수 있음이 밝혀졌으며, 가상적인 분해 경로도 제시하였다. Kohlweyer 등¹³⁾은 폐수처리장에서 THF 분해능을 갖는 미생물을 분리한 결과 *Pseudonocardia sp.*에 속하였으며, 1,440 mg/l의 THF는 72시간 내에 거의 분해하는 것으로 보고한 바 있다. Zenker 등¹⁵⁾은 살수여상법으로 1,4-Dioxane을 처리하면서 THF의 처리특성을 조사한 결과 5 ~ 25 mg/l 수준의 THF는 살수여상공정으로 18 µg/l 이하로 완벽하게 처리할 수 있다고 보고하였다¹⁸⁾.

Klecka and Gonsior는 BOD 실험을 통해 20일이 경과하여도 용존산소 소비가 없었으며, 하수처리

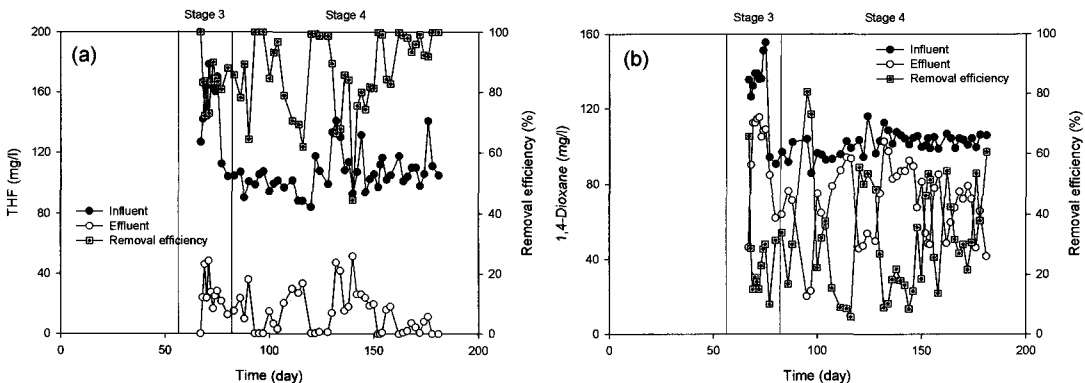


Fig. 2. Changes of THF & 1,4-Dioxane concentration in sequencing activated sludge processes. a) THF, b) 1,4-Dioxane.

미생물을 1년 정도 1,4-Dioxane에 노출하여도 분해 능력이 생성되지 않는다고 보고하였다. 그러나 Roy 등¹⁹⁾은 호흡량 측정기를 이용하여 1,4-Dioxane는 150 mg/l 까지 분해할 수 있었다고 보고하였다. 또 Parales 등²⁰⁾은 1,4-Dioxane을 탄소 및 에너지원으로 이용하는 방선균을 분리하였으며, 이 미생물은 THF, 1,3-Dioxane 등 유사 구조를 갖는 물질도 분해할 수 있다고 보고하였다²⁰⁾. Zenker 등¹⁵⁾은 회분식 실험을 통해 THF가 존재하는 상태에서 공동대사에 의해 1,4-Dioxane이 분해되는 것을 확인한 바 있다. 또 Kelly 등²¹⁾은 *Amycolata sp.*를 이용하여 실험한 결과 Poplar root extract를 사용하는 경우 1,4-Dioxane의 분해도를 증가시킬 수 있었다. 이상의 연구결과를 토대로 보면 THF보다 1,4-Dioxane의 생물학적 분해는 매우 제한적인 것으로 판단된다. 따라서 실험에서 나타난 고리형 에테르의 제거가 전적으로 생물학적인 과정을 통해 이루어졌다고 판단하기에 무리가 있어 폭기 등 물리적 인자가 제거에 미치는 영향을 조사하기 위한 회분식 실험을 실시하였다.

3.2. 회분식 실험

3.2.1. 혼합 및 폭기

혼합 여부에 따른 고리형 에테르의 제거 특성은 Fig. 3과 같다. THF는 단순 정치하여도 12시간 후에는 13% 정도 제거되었으며, 혼합을 실시하면 약 50% 정도 제거되었다. 그러나 1,4-Dioxane은 혼합 여부에 관계없이 12시간 동안 제거율은 약 5% 수준

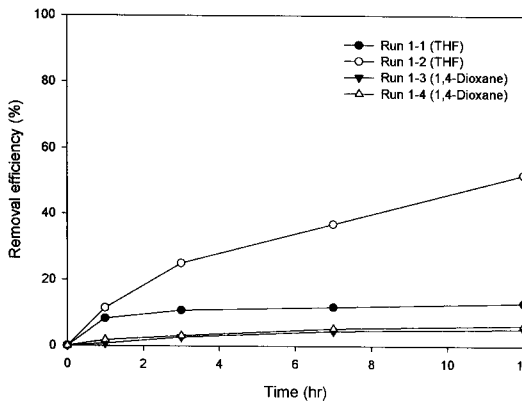


Fig. 3. The effect of mixing on the removal of THF and 1,4-Dioxane.

이었다. 폭기 여부에 따른 제거 특성 변화는 Fig. 4와 같다. 자석교반기로 동일하게 교반하는 상태에서 Run 2-2, Run 2-4에서만 공기를(0.99 l/min) 주입하였다. THF의 경우 혼합만 실시한 Run 2-1의 12시간 후 제거율은 같은 조건인 Run 1-2와 비슷하게 약 60% 정도로 나타났으며, 48시간 후에는 98% 정도 제거되었다. 혼합과 폭기를 동시에 실시한 Run 2-2에서는 약 12시간 만에 대부분의 THF가 제거되었다. 1,4-Dioxane도 혼합과 폭기를 동시에 실시한 Run 2-4에서 단순히 혼합만 실시한 Run 2-3 보다 높은 제거율을 보였다.

또 공기 주입량이 증가할수록 고리형 에테르 제거율은 Fig. 5와 같이 증가하는 것으로 나타났다.

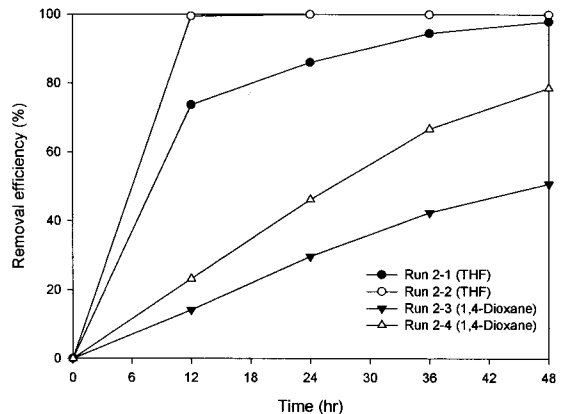


Fig. 4. The effect of mixing and aeration on removal of THF and 1,4-Dioxane.

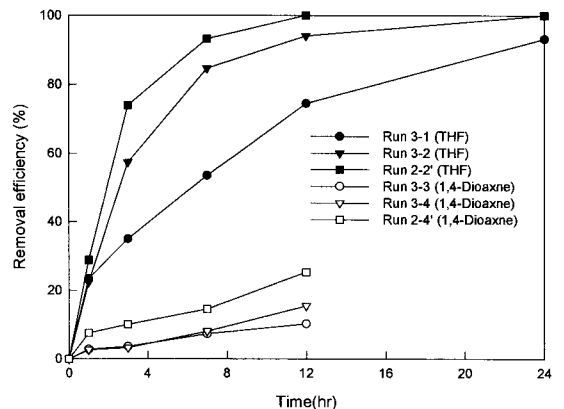


Fig. 5. The effect of air flow rate on the removal of THF and 1,4-Dioxane.

THF의 경우 공기량을 0.22 l/min으로 주입한 경우 12시간 후 제거율은 약 74%이나 0.42 l/min으로 주입하면 약 94%가 제거되었다. 이러한 경향은 1,4-Dioxane의 경우에도 관찰되어 공기량이 0.22 l/min에서 0.42 l/min으로 증가하면 12시간 후 제거율은 10%에서 15%로 증가하였다. 또 혼합과 폭기 조건을 동일하게 유지하여 실험한 Run 2-2와 Run 2-2', Run 2-4와 Run 2-4'에서 THF 및 1,4-dioxane의 12시간 제거율은 각각 99%, 100%와 23%, 25%로 매우 유사하였다.

고리형 에테르는 혼합 및 폭기에 의해 제거되는 것을 확인할 수 있었다. 또 1,4-Dioxane보다는 THF가 혼합과 폭기에 의해 더 쉽게 제거되는 것으로 나타났다. 다른 실험조건이 동일하다는 점을 고려하면 THF와 1,4-Dioxane의 제거 특성의 차이는 두 물질의 헨리상수 차이에 의한 것으로 판단된다. Zenker (2000)에 의하면 THF와 1,4-Dioxane의 헨리상수는 각각 $9.63 \times 10^{-3} \text{ atm}\cdot\text{m}^3/\text{mol}$, $4.88 \times 10^{-6} \text{ atm}\cdot\text{m}^3/\text{mol}$ 로 THF가 1,4-Dioxane보다 약 2,000배 가까이 크다¹⁶⁾. 하지만 US EPA의 헨리상수 추정 모델에 제시된 THF의 헨리상수의 실험치는 $7.05 \times 10^{-5} \text{ atm}\cdot\text{m}^3/\text{mol}$ 이며, 결합구조로 추정된 값은 $8.43 \times 10^{-5} \text{ atm}\cdot\text{m}^3/\text{mol}$ 이다²²⁾. 또 같은 모델로 추정된 1,4-Dioxane의 헨리상수는 $5.91 \times 10^{-6} \text{ atm}\cdot\text{m}^3/\text{mol}$ 이다²²⁾. 따라서 문헌에 따라 헨리상수 값이 다소 차이는 있지만 THF가 1,4-Dioxane보다는 더 쉽게 휘발될 수 있음을 알 수 있다. 한편 Watts (1997)는 $\text{atm}\cdot\text{m}^3/\text{mol}$ 로 표시된 헨

리상수가 1×10^{-5} 이상이면 대부분의 물에서 휘발이 상당한 수준이라고 주장하였다²³⁾.

3.2.2. 활성슬러지 첨가

활성슬러지를 첨가하여 고리형 에테르의 거동을 조사한 결과는 Fig. 6과 같다. 활성슬러지를 첨가한 상태에서 혼합만 실시한 Run 4-1의 12시간 경과 후 THF 제거율은 약 52%로 나타났다. 이는 동일한 조건에서 미생물을 첨가하지 않은 Run 1-2와 유사하다. 또한 활성슬러지를 첨가한 상태에서 혼합과 폭기를 실시한 Run 4-2의 12시간 경과 후 THF 제거율은 약 98%로 나타나 역시 미생물을 첨가하지 않은 Run 2-2와 비슷한 결과를 보였다. 이로부터 활성슬러지를 첨가함으로써 추가로 제거되는 THF는 없음을 알 수 있다. 즉, 미생물에 의한 생물학적 분해 또는 생물흡착에 의한 제거 등이 나타나지 않았다. 생물흡착에 의한 THF의 추가적인 제거가 없다는 것은 독성물질 첨가실험에서도 확인되었다. 독성물질로 HgCl_2 를 500 mg/l로 첨가한 Run 5-1, Run 5-2의 실험에서도 Run 4-1, Run 4-2와 매우 유사한 결과가 나타났다.

Run 4-3과 Run 4-4에서 12시간 동안 관찰된 1,4-Dioxane 제거율은 각각 7%, 25%로 나타났다. 이러한 결과도 미생물이 첨가되지 않은 Run 1-4, Run 2-4와 큰 차이가 없으며, 이는 1,4-Dioxane도 미생물에 의한 생물학적 분해 및 생물흡착에 의한 추가 제거가 없는 것으로 판단된다. 이는 독성물질을 첨가

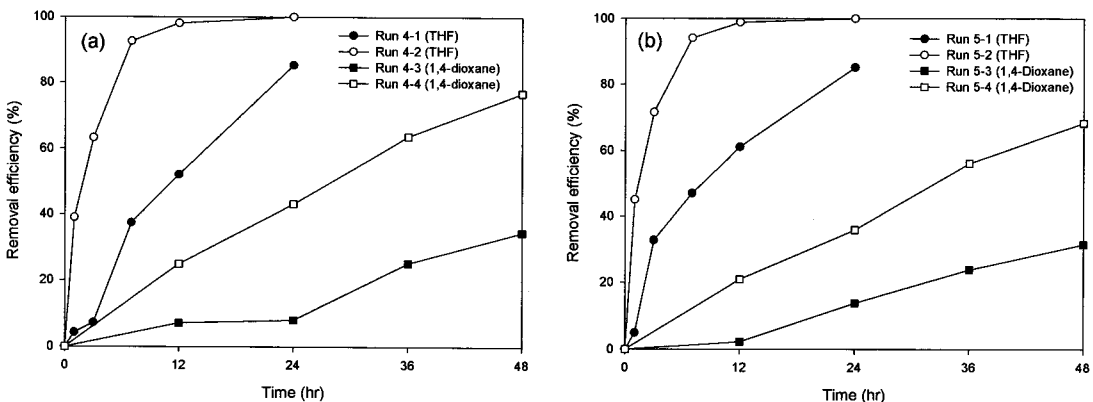


Fig. 6. The Effects of activated sludge on the removal of THF and 1,4-Dioxane. a) Without HgCl₂, b) With HgCl₂.

한 Run 5-3, Run 5-4에서도 확인되었다.

이상의 회분식 실험에서는 THF나 1,4-Dioxane이 생물학적으로 분해된다는 것은 관찰되지 않았다. 특히 기존의 연구에서 생물학적 분해가 비교적 용이한 것으로 보고된 THF도 생물학적으로 분해되지 않았다. 이는 회분식 실험에서 사용한 식중미생물이 고리형 에테르에 순응되지 않은 데에도 부분적인 원인이 있을 것으로 판단된다. 하지만 THF의 경우 비교적 휘발이 용이하기 때문에 생물학적 분해능이 과도하게 평가되었을 가능성도 있는 것으로 생각된다. 전술한 회분식 활성슬러지 시스템에서의 THF의 높은 제거율에는 혼합 및 폭기가 기여한 부분이 있을 것으로 추정된다. 그리고 THF나 1,4-Dioxane이 미생물체에 생물학적으로 흡착되는 양도 무시할 수 있을 정도로 작음이 확인되었다. 미생물체에 대한 흡착은 오염물질의 옥탄올-물 분배계수(K_{ow})로 단순히 평가할 수 있는데, THF와 1,4-Dioxane의 $\log K_{ow}$ 는 각각 0.46, -0.27로 매우 작다¹⁶⁾. 특히 1,4-Dioxane은 n-옥탄올보다는 물에 분배되는 양이 더 많다.

4. 결 론

고리형 에테르 함유폐수의 생물학적 처리 특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 회분식 활성슬러지 실험으로부터 THF는 평균적으로 약 86% 수준으로 제거되었으며, 1,4-Dioxane은 30% 정도의 제거율을 보였다. 또 HRT 변화에 의한 제거율 차이는 크지 않았다. 또 회분식 실험 결과 THF는 혼합, 혼합 및 폭기에 의해 12시간 후 제거율은 각각 50% 이상, 98% 이상의 나타나는 양호한 결과를 보였다. 1,4-Dioxane 제거율은 혼합만 하는 경우 약 12시간 후에 약 5~14%정도 였으나 혼합과 폭기를 동시에 실시하는 경우 같은 시간 동안 6~23%로 제거율이 다소 향상되었다.

(2) 회분식 실험을 통해 사용한 식중슬러지 미생물에 의한 THF, 1,4-Dioxane의 생물학적 분해는 확인되지 않았으며, 미생물체에 의한 생물 흡착도 무시할 수 있는 수준으로 나타났다. 따라서 고리형 에테르 중에서도 THF의 생물학적 처리시설에서의 제거율 평가 시에는 혼합, 폭기 등의 물리적 인자의 영향을 고려해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 경북지역환경기술개발센터의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Abe A., 1999, Distribution of 1,4-Dioxane in relation to possible sources in the water environment, *Sci. Total Environ.*, 227, 41-47.
- 2) Banach T. E., Berti C., Colonna M., Fiorini M., Marianucci E., Messori M., Pilati F., Toselli M., 2001, New catalysts for poly(butylene terephthalate) synthesis I. Titanium- lanthanides and Titanium-hafnium systems, *Polymer*, 42, 7511-7516.
- 3) Limbeck U., 2001, Rate expression for THF synthesis on acidic ion exchange resin, *Chem. Eng. Sci.*, 56, 2171-2178.
- 4) Popoola A. V., 1991, "Mechanism of reaction involving the formation of dioxane by-product during the production of poly(ethylene terephthalate), *J. Appl. Polym. Sci.* 43, 1875-1877.
- 5) <http://www.imnews.com>.
- 6) 임재림, 이경혁, 채신하, 김순홍, 안효원, 2004, 정수처리시스템에서 1,4-Dioxane의 제거 방안, *대한환경공학회지*, 26(11), 1238-1243.
- 7) 이병렬, 김창균, 서형준, 2003, 1,4-Dioxane의 고도산화 및 생화학적 분해 특성 연구", *대한환경공학회지*, 25(2), 240-247.
- 8) 김현승, 조성혜, 윤기용, 김일규, 2005, 고급산화법을 이용한 다이옥산 처리 연구, *대한토목학회논문집*, 25(5B), 413-417.
- 9) 경상남도 보건환경연구원, 2005, 폐수중의 1,4-다이옥산 처리기술 개발, CWPO(Catalytic Wet Peroxide Oxidation) 공법을 이용한 1,4-다이옥산 폐수처리 요약보고서, 1pp.
- 10) Adams C. D., Scanlan P. A., Secrist N. D., 1994, Oxidation and biodegradability enhancement of 1,4-Dioxane using hydrogen peroxide and ozone, *Environ. Sci. Technol.*, 28, 1812-1818.
- 11) Stefan M. I., Bolton J. R., 1998, Mechanism of the degradation of 1,4-Dioxane in dilute aqueous solution using the UV/hydrogen peroxide process, *Environ. Sci. Technol.*, 32, 1588-1595.
- 12) Maurino V., Calza P., Minero C., Pelizzetti E., Vincenti M., 1997, Light-assisted 1,4-Dioxane degradation, *Chemosphere*, 35(11), 2675-2688.
- 13) Kohlweyer U., Thieme B., Schrader T., Andreesen J. R., 2000, Tetrahydrofuran degradation by a newly iso-

- lated culture of *Pseudonocardia sp. strain K1*, FEMS Microbiol. Lett., 186, 301-306.
- 14) Bernhardt D., Diekmann, H., 1991, Degradation of dioxane, tetrahydrofuran and other cyclic ethers by an environmental *Rhodococcus strain*, Appl. Microbiol. Biotechnol., 36(1), 120-123.
 - 15) Zenker M. J., Borden R. C., Barlaz M. A., 2000, Mineralization of 1,4-Dioxane in the presence of a structural analog, Biodegradation, 11, 239-246.
 - 16) Zenker M. J., 2000, Biodegradation of Cyclic and Alkyl Ethers in Subsurface and Engineered Environments, Ph. D. Dissertation, Dept. of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh.
 - 17) APHA, AWWA, WEF, 1995, Standard methods for the examination of water and wastewater, 19th ed., American Public Health Association 5-12pp.
 - 18) Klecka G. M., Gonsior S. J., 1986, Removal of 1,4-Dioxane from wastewater, J. Hazard. Mater., 13, 161-168.
 - 19) Roy D., Anagnostu G., Chaphalkar P., 1994, Biodegradation of dioxane and diglyme in industrial waste, J. Environ. Sci. Health part A, 29(1), 129-147.
 - 20) Parales R. E., Adamus J. E., White N., May H. D., 1994, Degradation of 1,4-Dioxane by an actinomycete in pure culture, Appl. Environ. Microbiol., 60, 4527-4530.
 - 21) Kelley S. L., Aitchison E. W., Deshpande M., Schnoor J. L., Alvarez, P. J. J., 2001, Biodegradation of 1,4-Dioxane in planted and unplanted soil: effect of bioaugmentation with *Amycolata sp. CB1190*, Wat. Res., 35(16), 3791-3800.
 - 22) US EPA, 2000, Henrywin, Version 3.
 - 23) Watts R. J., 1997, Hazardous wastes: sources, pathways, receptors, John Wiley & Sons, Inc., 306pp.