

2段의 슬러지-固定狀 反應器에서 페놀 함유 廢水의 嫌氣性 處理에 關한 研究

정종식 · 안재동 · 박동일 · 신승훈 · 장인용

건국대학교 화학공학과

A Study on the Anaerobic Treatment of the Phenol-bearing Wastewater with two Sludge Blanket-Packed Bed Reactors in Series

Jong Sik Jeong, Jae Dong Ahn, Dong Il Park,
Seung Hun Shin and In Yong Chang

Department of Chemical Engineering, KonKuk University

ABSTRACT

This study was carried to investigate the biodegradability of phenol in the wastewater with the two sludge blanket-packed bed reactor in series. Each reactor had a dimension of 0.09 m i.d. and 1.5 m height and consisted of two regions. The lower region was a sludge blanket of 0.5 m height and the upper region was a packed-bed of 1 m height. The packed bed region was charged with ceramic raschig rings of 10 mm i.d., 15 mm o.d. and 20 mm length. The reactors were operated at 35°C and the hydraulic retention time(HRT) was maintained 24 hours.

The synthetic wastewater composed of glucose and phenol as major components was fed into the reactor in a continuous mode with increasing phenol concentration. In addition, the nutrient trace metals(Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, PO₄³⁻, NH₄⁺, Co²⁺, Fe²⁺ etc.) were added for growing anaerobes.

The phenol concentration of the effluent, the overall gas production, the composition of product gas, the efficiency of COD reduction and the duration of acclimation period were measured to determine the performance of the anaerobic wastewater treatment system as the phenol concentration of the influent was increased from 600 to 2400 mg/l.

Successfully stable biodegradation of phenol could be achieved with the anaerobic treatment system from 600 to 1,800 mg/l of the influent phenol concentration. The upper level of influent phenol loading was high enough to meet most of the practical requirement. The duration of acclimation increased with the phenol loading.

At steady state of the influent phenol concentration of 1800 mg/l, the treatment performance indicated the phenol reduction efficiency of 99%, the COD reduction efficiency of 99% and the gas production rate of 37 l/day. At the influent phenol concentration of 2400 mg/l, however, the operation of the treatment system was noted unstable.

While the concentration of methane in biogas decreased with increasing the influent phenol loading, the carbon dioxide was increased. However, the concentration of hydrogen was varied negligibly. The concentration of methane was high enough to be used as a fuel. As a result, it is suggested that anaerobic phenol wastewater treatment was economical in the sense of energy recovery and wastewater treatment.

Keywords : phenol bearing wastewater, anaerobic treatment, phenol removal efficiency, COD removal efficiency

I. 서 론

최근 산업이 발달하고 공업화가 가속됨에 따라 공장에서 배출되는 폐수는 양적 증가와 더불어 질적인 면에서도 매우 독성이 강하고, 난분해성인 악성 폐수가 되면서 환경오염의 심각성을 더해 주고 있다. 이에 따라 배출수의 규제치가 더욱 더 강화되어 폐수 처리 기술의 고도화가 요구되고 있으며, 이에 보다 효율적이고 경제적인 처리 시스템의 개발이 절실히 요구되고 있다.

공장에서 배출되는 여러 가지 악성 폐수 중 페놀 폐수는 인체 및 생물에 대해 치명적이고 대표적인 난분해성 폐수 중의 하나이다. 페놀 및 그 화합물은 미국 EPA(Environmental Protection Agency)에서도 대표적인 오염 물질로 간주되고 있으며,¹⁾ 미량이라도 하천에 방류시 생물에 매우 치명적으로 작용하고, 폐수 처리 공정에서도 염소 이온과 함께 존재시 심각한 악취를 유발하는 등 많은 문제점을 발생시킨다.

페놀은 석유 정제, 코우크스 공장, 페인트 도료 공정, 석탄 가스화 공정, 탈그리스 공정, 석유 화학, 화학비료, 석탄 전환 공정, 의약품 제조, 염료 제조 공정 등에서 주로 방류되고 있다.

페놀을 함유하는 폐수의 처리 방법에는 적당한 용제를 이용하는 추출법,^{2,3)} 흡착물질(활성탄, 실리카겔, 제올라이트 등)을 사용하는 흡착법,^{4,5)} 산화제(오존, 염소, 과산화수소 등)를 이용한 화학적 산화법,^{6,7)} 전기화학법, 막을 이용하는 방법,⁸⁾ 소각법, 습식 산화법,⁹⁾ 호기성 소화법,¹⁰⁾ 혐기성 소화법^{11,12)} 등 여러 가지가 있다.

이 중에서 혐기성 소화법은 페놀 화합물이 혐기성 미생물에 의해 분해되어 메탄을 포함한 biogas를 생성함으로써 안정화되는 생물학적 처리 공법으로 페놀 함유 폐수를 처리시 다른 처리 공법에 비해 많은 이점을 가지고 있다.

페놀의 분해로 인해 생성된 메탄가스는 에너지로 이용이 가능하며, 호기성 처리 공법에 비해 생성되는 슬러지의 양이 적어 2차 처리를 해야 하는 페슬러지의 양이 감소된다. 또한 공정이 간단하고, 산소 공급을 위한 폭기 동력이 필요없어 에너지가 적게 소비된다. 그러나 혐기성 미생물은 환경 인자(온도, pH, 독성 물질) 등에 민감할 뿐만 아니라 메탄생성균의 느린 성장 속도 등 몇 가지 문제점을 가지고 있다.

이와 같은 문제점 해소 및 효율적인 혐기성 처리를 위하여 반응기 내부에 미생물을 고농도를 유

지함으로써 고효율 혐기성 소화가 가능하여진다. 미생물의 유실을 방지하고 미생물을 반응기 내부에 고농도로 유지하기 위한 대표적인 반응기는 혐기성 슬러지 반응기, 혐기성 고정층 반응기, 혐기성 유동층 반응기 등이 있다. 슬러지 반응기는 미생물의 floc을 형성하기 위한 운전 조건이 매우 어렵고 head space에서 효율적인 고액 분리 장치가 필요하다. 고정층 반응기는 유체의 편류현상으로 인하여 반응기 하부에서 미생물과 기질간의 물질 전달이 효율적으로 일어나지 못한다. 따라서 각 반응기의 단점을 보완하고, 최적의 공정을 위해 각 반응기의 장점만을 이용하는 시스템의 개발이 필요하다.

이에 본 실험에서는 슬러지 반응기와 고정상 반응기의 단점을 보완하여 반응기의 하부는 granule floc을 형성하여 고농도의 sludge bed를 유지시키고, 상부에는 담체를 충전시켜 미생물을 포획 또는 부착시켜 하부에서 미세거된 유기물을 처리하고, filter로 인해 미생물 유출을 최소화하는 혐기성 슬러지-고정상 반응기(sludge blanket-packed bed reactor, SBPBR)를 2단형으로 제작하여 연속식으로 실험을 하였다.

또한 본 연구에서는 연속식 SBPBR을 이용하여 효율적인 유기물 처리를 위한 반응기의 구성, 고농도의 페놀 함유 폐수의 처리 가능성 및 혐기성 미생물의 페놀에 대한 한계 농도를 실험함으로써, 산업체에서 페놀 폐수의 연속 처리 시스템에 대한 기초 자료를 제시하고자 하였다.

II. 실험장치 및 방법

1. 실험 장치

본 실험 장치는 reactor 1과 reactor 2로 구성된 2단형 혐기성 슬러지-고정상 반응기 시스템이며, 개략적인 장치는 Fig. 1과 같다. 반응기는 내경 9 cm, 높이 150 cm, 부피 9.5 l인 아크릴 수지 원통으로 제작되었으며, 일정한 온도(35°C)를 유지하기 위하여 반응기 외부에 water jacket을 설치하였다. 반응기 높이 50 cm까지는 sludge bed이며, 50 cm에서 150 cm까지는 ceramic raschig ring으로 충전된 packed bed로 되어 있다. 반응기 상부에 U자관을 설치해 기·액분리를 하였으며, biogas는 포화 식염수에 의해 포획되었다.

폐수는 정량 펌프를 사용하여 0.3 l/hr의 일정한 유속으로 유입되었으며, 수리학적 체류 시간(HRT)은 24hr으로 고정하였다. 전체 SBPBR 처리 시스템은 reactor 1의 유출수가 다시 reactor 2로 유입

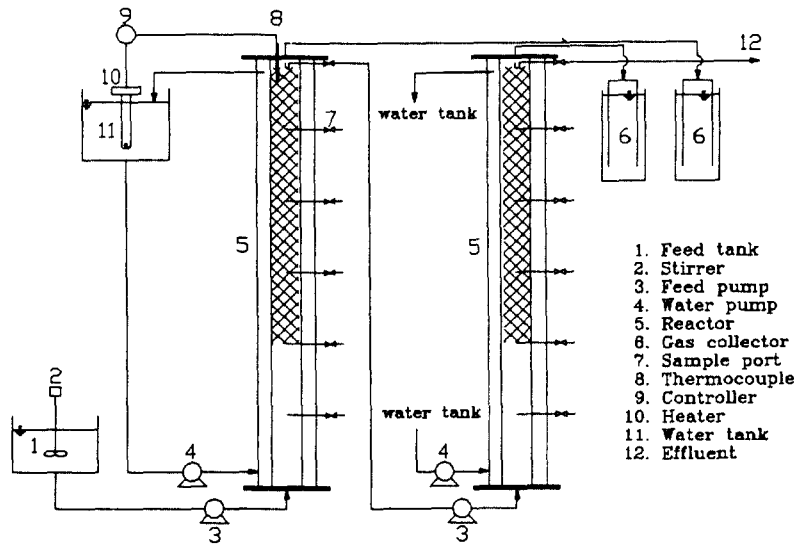


Fig. 1. Schematic diagram of the SBPBR.

되는 2단형으로 구성되었다. 또한, 페놀 함유 폐수의 농도가 reactor 1은 고농도로 유입되고 reactor 2는 저농도로 유입되므로 고농도와 저농도에서 미생물의 적응 상태 및 처리 능력을 관찰하기 위해서 2단형으로 분리하여 실험을 하였다.

2. 페놀 함유 폐수 제조

페놀 함유 폐수의 정성 및 정량적인 처리 특성을 연구하기 위하여, 농도 및 조성이 일정한 페놀 함유 폐수를 제조하여 사용하였으며, 탄소원으로 글루코우스와 페놀을 사용하였다. 글루코우스를 사용한 이유는 본 실험에 사용된 미생물이 페놀을 분해하는 특정한 미생물이 아니라 중량천 종말 처리장 메탄 발효조의 미생물이 페놀을 처리할 수 있는지의 여부를 예측하지 못하였기 때문이며, 현재까지의 연구 배경이 대부분 글루코우스로 이루어졌기 때문이다. 유입 폐물 농도의 증가에 따른 페놀 함유 폐수의 혐기성 처리 가능성 및 한계 농도를 예측하기 위하여, 600, 1,200, 1,800, 2,400 mg/l의 페놀을 함유한 페놀 함유 폐수를 사용하였다. 미생물의 성장에 필요한 필수 무기 영양분 및 완충 작용을 위해 다음과 같은 화합물을 첨가하였다. NaHCO₃ 1,500 mg/l, NH₄HCO₃ 3,800 mg/l, K₂HPO₄ 280 mg/l, MgCl₂·6H₂O 250 mg/l, CaCl₂·2H₂O 100 mg/l, CoCl₂·6H₂O 57.5 mg/l, FeSO₄·7H₂O 57.5 mg/l.

3. 분석 방법

페놀은 GC(Hewlett Packard 5890 Series II)의

Table 1. Experimental conditions

Carbon source		COD (mg/l)	Loading rate (kg COD/m ³ ·day)
Glucose conc. (mg/l)	Phenol conc. (mg/l)		
5,000	600	6,200	6.2
5,000	1,200	7,400	7.4
5,000	1,800	8,600	8.6
5,000	2,400	9,800	9.8

FID에 의해 측정되었다. 사용된 column은 capillary column(0.32 mm×30 m, HP-5 crosslinked 5% PH Me silicon)이었으며, micro syringe를 사용하여 1 μl의 시료를 주입하였다. 온도는 주입구 220℃, 검출기 250℃의 조건에서 oven 온도를 55℃에서 150℃까지 30℃/min로 승온시켰다.

가스 조성은 GC(Hewlett Packard 5890 Series II)의 TCD에 의해 CH₄, CO₂, H₂ 등이 분석되었다. 시료는 매일 일정한 시간에 채취되었으며, autosampler(HP 7673A)에 의해 GC에 주입되었다. 오븐, 주입구, 검출기의 온도는 각각 70℃, 80℃, 100℃이었으며, column은 porapack Q를 사용하였다. 가스 성분은 표준 가스(CH₄ 61.8%, CO₂ 38.2%)를 기준으로 정성 및 정량되었다. COD(chemical oxygen demand)는 Standard Methods에 의해 측정되었다.¹³⁾

4. 운전 조건

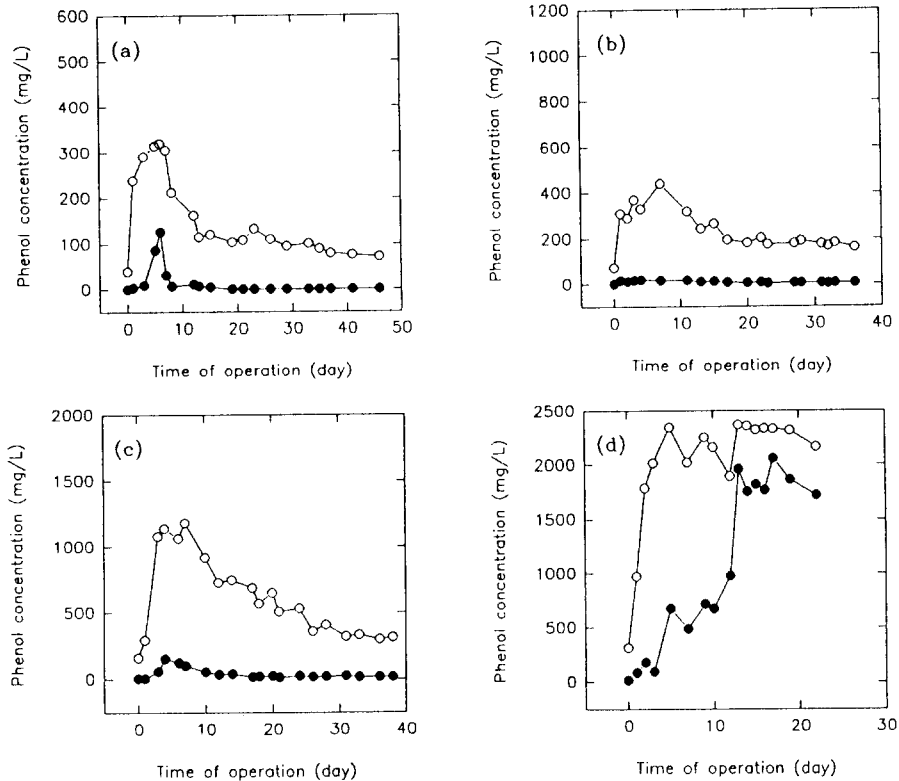


Fig. 2. Effluent phenol concentration with increasing phenol concentration at 5,000 mg/L of glucose in the SBPBR; (○): Reactor 1, (●): Reactor 2. (a) 600 mg/L, (b): 1,200 mg/L, (c): 1,800 mg/L, (d): 2,400 mg/L.

서울시 중랑천 종말 처리장의 메탄 발효조에서 혐기성 미생물을 채취하여 standard sieve 200 mesh로 거른 다음 정치시킨 후 반응기에 주입하였고, 5,000 mg/l의 글루코우스와 200 mg/l의 케놀로 구성된 케놀 함유 폐수에 60일간 순응시켰다. 그 후 유입 케놀 농도를 600, 1,200, 1,800, 2,400 mg/l로 증가시키면서 실험을 하였다. 이때 케놀 농도의 증가에 따른 실험 조건은 Table 1과 같다.

III. 결과 및 고찰

1. 유출 케놀 농도

5,000 mg/l의 글루코우스와 200 mg/l의 케놀에 적응된 미생물에게 유입 케놀 증가로 인한 2단 SBPBR의 처리 특성을 연구하기 위하여 글루코우스 5,000에 케놀 농도를 600, 1,200, 1,800, 2,400 mg/l로 증가시켜 제조한 케놀 함유 폐수를 주입하였다.

Fig. 2의 (a)는 5,000 mg/l의 글루코우스와 600

mg/l의 케놀이 함유된 케놀 함유 폐수가 유입되었을 때, 2단 SBPBR의 반응기 1과 반응기 2에서 소화 일수에 대해 유출되는 케놀의 농도를 나타낸 것이다.

반응기 1에서는 6일까지 320 mg/l의 케놀이 유출되었으며, 그 이후 소화 일수 13일까지 급격히 감소하였고, 13일부터는 케놀 농도가 서서히 감소하기 시작하여 소화 일수 46일에는 72 mg/l로 안정화되었다. 반응기 2에서는 6일까지 125 mg/l의 케놀이 유출되었으며, 그 이후 감소하였으며, 10일부터 안정화 단계가 되었고, 19일부터는 유입 케놀이 100% 제거되었다.

정상 상태에서 케놀의 제거 효율에 대해서는 반응기 1은 88%이었으며, 반응기 2에서는 반응기 1에서 미처리된 케놀이 100% 제거됨을 알 수 있었다.

Fig. 2의 (b)는 5,000 mg/l의 글루코우스와 1,200 mg/l의 케놀이 함유된 케놀 함유 폐수가 유입되었을 때, 2단 SBPBR의 반응기 1과 반응기 2에서 소화

일수에 대한 유출되는 페놀의 농도를 나타낸 것이다. 반응기 1에서는 17일 후에 안정화되기 시작하였으며, 소화 일수 36일에 유출되는 페놀 농도는 160 mg/l이었다. 반응기 2는 17일부터 안정화되기 시작하였으며, 소화 일수 36일에는 4 mg/l의 페놀이 유출되었다. 정상 상태에서 페놀의 제거 효율은 반응기 1이 87%이며, 반응기 2는 97%를 나타냈다.

Fig. 2의 (c)는 5,000 mg/l의 글루코우스와 1,800 mg/l의 페놀이 함유된 페놀 함유 폐수가 유입되었을 때, 2단 SBPBR의 반응기 1과 반응기 2에서 소화 일수에 대한 유출되는 페놀의 농도를 나타낸 것이다. 반응기 1에서는 26일 후에 안정화되기 시작하였으며, 소화 일수 38일에서 유출되는 페놀 농도는 314 mg/l이었다. 반응기 2는 17일부터 안정화되기 시작하였으며, 소화 일수 38일에는 16 mg/l의 페놀이 유출되었다. 정상 상태에서 페놀의 제거 효율은 반응기 1이 83%이며, 반응기 2는 95%를 나타냈다.

Fig. 2의 (d)는 5,000 mg/l의 글루코우스와 2,400 mg/l의 페놀이 함유된 페놀 함유 폐수가 유입되었을 때, 2단 SBPBR의 반응기 1과 반응기 2에서 소화 일수에 대한 유출되는 페놀의 농도를 나타낸 것이다. 반응기 1에서는 운전 초기에 유출되는 페놀의 농도가 증가하여 소화 일수 5일까지 2,165 mg/l의 페놀이 유출되었으며, 그 이후 약간 감소 경향을 보이다가 소화 일수 13일 후부터 페놀은 거의 제거되지 못했다. 또한, 운전 초기부터 반응기 하부의 슬러지층이 흰색으로 변하기 시작하였고 13일 후부터는 슬러지 부상현상이 발생하였으며, 페놀의 제거 효율도 10%로 반응기 1에서 페놀은 거의 제거되지 않았다. 반응기 2에서도 반응기 1에서 제거되지 않은 페놀의 유입으로 인하여 제거 효율이 급격히 떨어져 제거 효율이 20%로 나타났다.

페놀은 미생물에 저해(inhibition)작용을 하는 대표적 물질로써 한계 농도 이상이 유입되었을 경우 미생물은 대사 기능을 잃고 성장이 중지되고 사멸된다. 본 반응기에 2,400 mg/l의 페놀이 유입되었을 때 미생물은 더 이상의 페놀을 분해하지 못하고 자체 분해 및 변성되어 슬러지색의 변화 및 부상현상이 유발되었다. 따라서 본 실험의 조건에서는 2,400 mg/l 이상의 페놀 처리는 불가능하며, 페놀 농도가 1,800 mg/l 정도 이하는 처리가 대체적으로 양호한 것으로 나타났다.

Fig. 3은 5,000 mg/l의 글루코우스와 200 mg/l의 페놀에 적용된 미생물에게 유입 페놀 농도를 600 mg/l에서 2,400 mg/l까지 점차적으로 증가시키면서 운전하였을 때 정상 상태에서의 페놀 제거 효율을

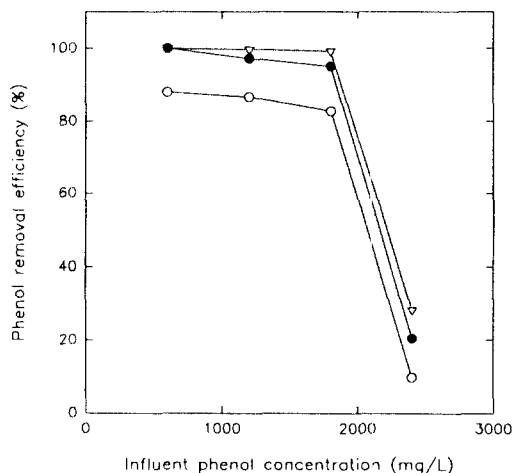


Fig. 3. Phenol removal efficiency vs. influent phenol concentration at steady state in the SBPBR; (○): Reactor 1, (●): Reactor 2, (▽): Total.

나타낸 것이다. 반응기 1과 반응기 2는 페놀의 농도가 1,800 mg/l까지 전반적으로 유입되는 페놀의 농도가 증가할수록 페놀의 제거 효율은 약간 감소하였고, 유입되는 페놀의 농도가 2,400 mg/l에서는 페놀 제거 효율이 급격히 떨어짐을 알 수 있다.

2. Biogas 생산율

5,000 mg/l의 글루코우스와 200 mg/l의 페놀에 적용된 미생물에게 페놀 농도를 600, 1,200, 1,800, 2,400 mg/l로 증가시켜 제조한 페놀 함유 폐수의 유입으로 인한 biogas 생산량을 고찰하였다.

Fig. 4의 (a)는 5,000 mg/l의 글루코우스 폐수에 페놀 농도가 600 mg/l인 페놀 함유 폐수가 유입되었을 때 소화 일수의 증가에 따라 생성되는 biogas량을 나타낸 것이다. 반응기 1에서는 운전 시작후 10일 정도까지 증가하다가 그 후에는 정상 상태에 도달함을 볼 수 있으며, 반응기 2에서는 많은 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 정상 상태에서 반응기 1은 23 l/day, 반응기 2는 2 l/day의 biogas 생성량을 나타냈다.

Fig. 4의 (b)는 페놀 농도가 1,200 mg/l인 페놀 함유 폐수가 유입되었을 때 소화 일수의 증가에 따라 생성되는 biogas량을 나타낸 것이다. 반응기 1에서는 운전 초기에 biogas량이 감소하였다가 다시 증가하여 10일 후부터는 정상 상태에 도달함을 볼 수 있다. 이것은 미생물이 운전 초기에 증가된 페놀의 독성에 영향을 받다가 점점 순응되어 정상 상태에 도달된

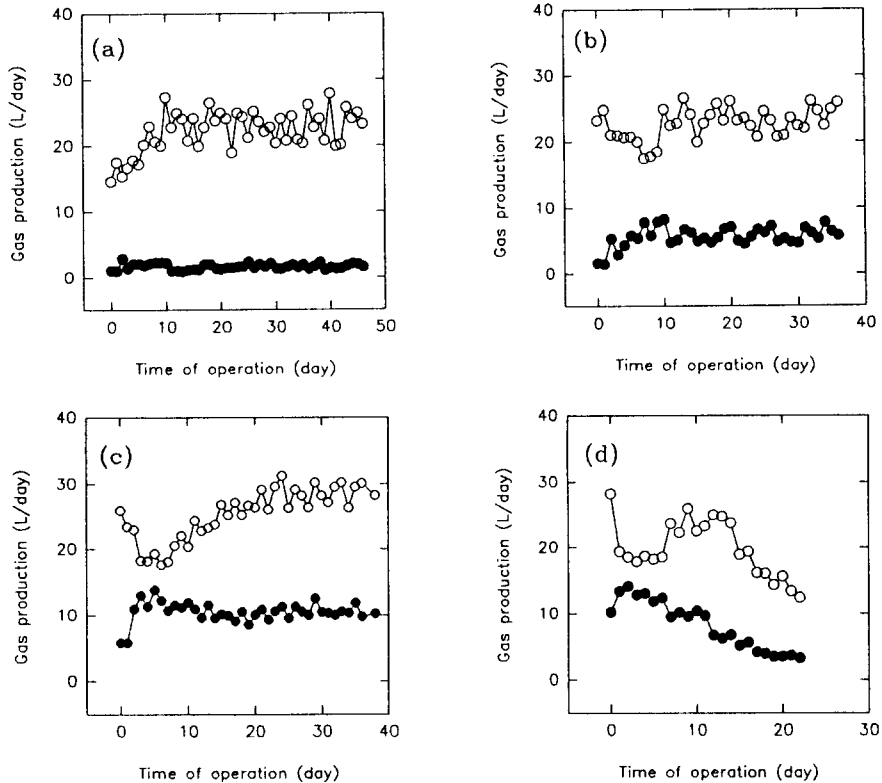


Fig. 4. Gas production with increasing phenol concentration at 5,000 mg/L of glucose in the SBPBR; (○): Reactor 1, (●): Reactor 2, (a) 600 mg/l, (b): 1,200 mg/l, (c): 1,800 mg/l, (d): 2,400 mg/l.

것으로 사료된다. 반응기 2에서는 반응기 1에서 미처리된 케놀이 탄소원으로 작용하기 때문에 이것을 처리함으로써 운전 초기에 biogas량은 증가하였으며, 소화 일수 10일 이후부터 정상 상태에 도달하였다. 정상 상태의 biogas 발생량은 반응기 1이 26 l/day였으며, 반응기 2는 6 l/day였다.

Fig. 4의 (c)는 5,000 mg/l의 글루코우스 페수에 케놀 농도가 1,800 mg/l인 케놀 함유 폐수가 유입되었을 때 소화 일수의 증가에 따라 생성되는 biogas량을 나타낸 것이다. 반응기 1에서는 운전 초기에 biogas량이 감소한 후 다시 증가하여 소화 일수 20일 후부터는 정상 상태에 도달함을 볼 수 있으며, 반응기 2에서는 반응기 1에서 미처리된 케놀이 탄소원으로 작용하는 원인으로 인해 운전 초기에 증가하였다가 서서히 감소하였으며, 소화 일수 15일 후부터는 정상 상태에 도달되었다. 정상 상태에서 반응기 1은 29 l/day, 반응기 2는 10 l/day의 biogas 생성량을 나타냈다.

Fig. 4의 (d)는 케놀 농도가 2,400 mg/l인 케놀

함유 폐수가 유입되었을 때 소화 일수의 증가에 따라 생성되는 biogas량을 나타낸 것이다. 반응기 1은 운전 초기에 약간 감소하였다가 소화 일수 8일부터 다시 증가하는 경향을 보였으나 13일에 슬러지 부상의 영향으로 다시 감소하기 시작하였다. 반응기 2는 반응기 1에서 미처리된 케놀의 독성 영향으로 인하여 biogas량이 계속 감소하였다. 소화 일수 22일에는 반응기 1이 13 l/day, 반응기 2가 3 l/day를 각각 보였다.

Fig. 5는 정상 상태에서 케놀 함유 폐수의 케놀 농도 증가에 따른 biogas생성량을 나타낸 것이다. 반응기 1은 케놀의 농도가 증가할수록 biogas량이 증가하였고, 케놀 농도가 1,800 mg/l로 주입될 때 최대치를 나타냈으며, 케놀 농도가 2,400 mg/l일 때는 케놀의 미생물에 대한 독성 영향으로 biogas 발생량도 줄어들었다. 반응기 2도 케놀의 농도가 1,800 mg/l일 때 최대치를 나타냈으며, 1,800 mg/l까지는 케놀의 농도가 증가할수록 biogas의 생성량도 증가하였다.

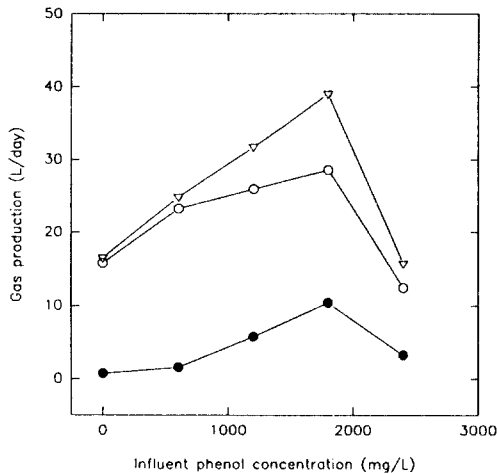


Fig. 5. Gas production vs. influent phenol concentration at steady state in the SBPBR; (○): Reactor 1, (●): Reactor 2, (▽): Total.

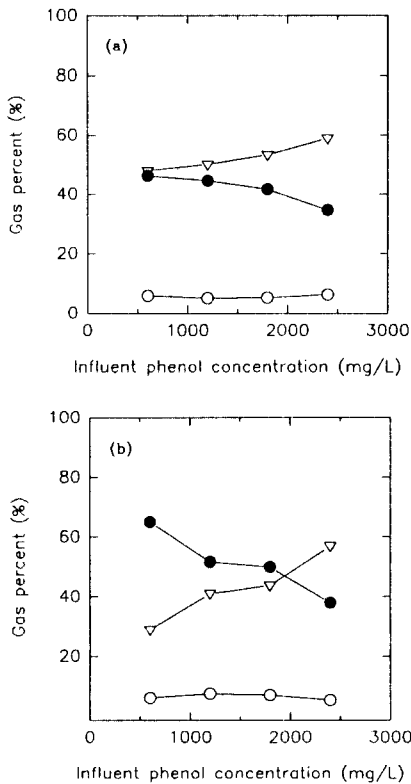


Fig. 6. Gas percent with increasing phenol concentration at 5,000 mg/L of glucose in the SBPBR; (●): CH₄, (○): H₂, (▽): CO₂, (a): Reactor 1, (b): Reactor 2.

3. Biogas 조성

5,000 mg/l의 글루코우스와 200 mg/l의 페놀에 적용된 미생물에게 5,000 mg/l에 페놀 농도를 600, 1,200, 1,800, 2,400 mg/l로 증가시켜 제조한 페놀 함유 폐수의 유입으로 인한 biogas 조성에 대하여 고찰하였다.

Fig. 6의 (a)는 정상 상태에서 유입 페놀 농도의 증가에 따른 reactor 1의 biogas 성분을 나타낸 것이다. Reactor 1은 유입페놀농도가 증가할수록 메탄가스의 성분은 감소하였고, 이산화탄소의 함량은 증가하였으며, 수소는 변함이 거의 없는 것으로 나타났다.

Fig. 6의 (b)는 정상 상태에서 유입 페놀 농도의 증가에 따른 reactor 2의 biogas 성분을 나타낸 것이다. Reactor 2에서도 유입 페놀 농도가 증가할수록 메탄 성분의 함량은 감소하였고, 이산화탄소는 증가하였으며, 수소는 큰 변화가 없음을 나타냈다. 따라서 reactor 1과 reactor 2는 유입 페놀 농도가 증가함에 따라 메탄가스의 성분은 감소하며, 이산화탄소의 성분은 증가하고, 수소는 변화가 별로 없는 것으로 나타났다.

전반적으로 페놀을 함유한 폐수의 혐기성 처리시 메탄 함량이 40% 이상이 되었기 때문에 유입페놀농도가 1,800 mg/l까지 생성되는 biogas는 에너지로의 사용이 충분히 가능함을 알 수 있었다. 그러나 2,400 mg/l의 페놀이 함유된 폐수가 유입되었을 때에는 메탄함량이 40%이하가 되므로 에너지로의 사용은

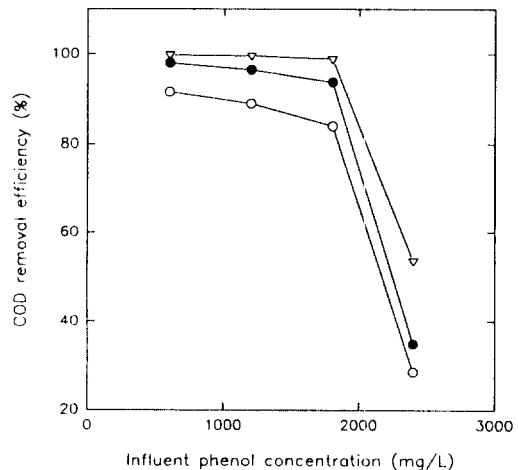


Fig. 7. COD removal efficiency vs. influent phenol concentration at steady state in the SBPBR; (○): Reactor 1, (●): Reactor 2, (▽): Total.

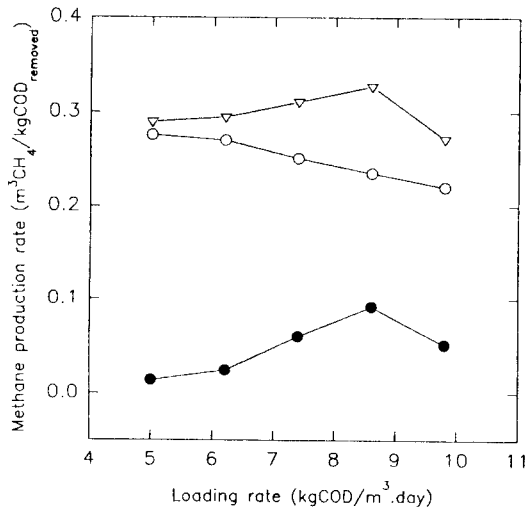


Fig. 8. Methane production rate vs. loading rate at steady state in the SBPBR; (○): Reactor 1, (●): Reactor 2, (▽): Total.

문제를 일으킬 것으로 사료된다.

4. COD 제거 효율

Fig. 7은 5,000 mg/l의 글루코우스와 200 mg/l의 케놀에 적용된 미생물에게 5,000 mg/l의 글루코우스에 케놀 농도를 600, 1,200, 1,800, 2,400 mg/l로 증가시켜 제조한 케놀 함유 폐수가 유입되었을 때, 각각의 정상 상태에서 COD제거 효율을 나타낸 것이다. 먼저 reactor 1에서는 유입 케놀 농도가 600, 1,200, 1,800 mg/l일 때 COD 제거 효율이 각각 92, 89, 84%로 약간 감소하는 경향을 나타냈다. 그러나 유입 케놀 농도가 2,400 mg/l일 때 COD제거 효율은 28.6%로 급격히 감소하였다. Reactor 2에서는 유입 케놀 농도가 600, 1,200, 1,800 mg/l일 때 COD 제거 효율이 각각 98, 96, 94%로 큰 차이가 없었으며, 2,400 mg/l일 때는 35%로 급격히 감소하였다.

Reactor 1과 reactor 2는 케놀 농도 1,800 mg/l까지 케놀이 증가함에 따라 COD 제거 효율은 조금씩 감소하는 경향을 나타냈으나, 케놀 농도가 2,400 mg/l일 때는 급격히 감소하였다. Reactor 2를 기준으로 케놀 농도 1,800 mg/l까지는 COD제거 효율이 99% 이상으로 고농도의 폐수까지 처리가 잘되는 것으로 나타났다.

5. 메탄 생성율

Fig. 8은 5,000 mg/l의 글루코우스와 200 mg/l의 케놀에 적용된 미생물에게 5,000 mg/l의 글루코우스

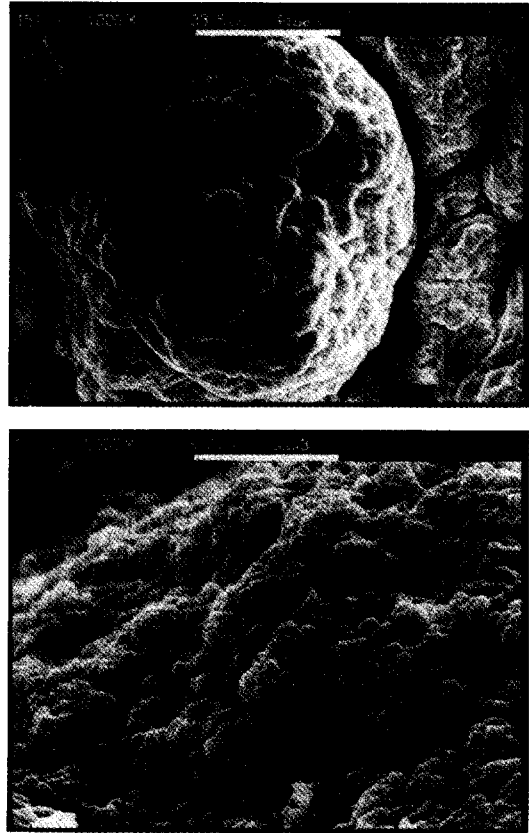


Fig. 9. Scanning electron microscopy of anaerobes in the ASFR.

스에 케놀 농도를 600, 1,200, 1,800, 2,400 mg/l로 증가시켜 제조한 케놀 함유 폐수가 유입되었을 때, 제거된 COD당 메탄가스 생성 속도를 나타낸 것이다. 유입되는 케놀 농도가 증가함에 따라 reactor 1은 메탄가스 생성율이 0.28에서 0.22 m³CH₄/kgCOD_{removed}로 감소하였으며, Reactor 2는 유입 케놀 농도 1,800 mg/l까지 0.01에서 0.09 m³CH₄/kgCOD_{removed}로 증가하였고, 유입 케놀 농도가 2,400 mg/l일 때는 0.05 m³CH₄/kgCOD_{removed}로 감소하였다. 시스템 전체적으로 볼 때 유입 케놀 농도가 증가함에 따라 메탄가스 생성율은 증가하였으며, 유입 케놀 농도 1,800 mg/l에서 가장 높은 값 0.27 m³CH₄/kgCOD_{removed}를 나타냈다. 케놀이 유입되지 않을 때 즉, 순수한 글루코우스만 유입될 때 메탄가스 생성율은 0.289 m³CH₄/kgCOD_{removed}이었고 케놀의 농도가 600, 1,200, 1,800, 2,400 mg/l로 증가할 때 메탄가스 생성율은 각각 0.294, 0.31, 0.327, 0.272 m³CH₄/kgCOD_{removed}이었다.

6. SEM 사진 고찰

글루코우스와 페놀을 분해하는 미생물의 형태를 살펴보기 위하여 SEM 사진을 찍었다. Fig. 9의 (a)는 페놀이 유입되기 전의 본 반응기에 존재하는 대표적인 미생물을 나타낸 것으로 일반 혐기성 미생물의 형태와 유사하였다. Fig. 9의 (b)는 페놀이 유입된 후 reactor 1의 미생물의 상태를 나타낸 것이다. 본 반응에 존재하는 혐기성 미생물은 서로 엉켜져 있어 부착 능력이 뛰어났으며, 독성을 가진 페놀이 유입되어도 처리를 잘하였다. 따라서 특정한 미생물이 아닌 일반 혐기성 미생물도 페놀의 처리 효율이 매우 높은 것을 알 수 있었다. 이에 페놀을 유출하는 공장 폐수도 혐기성 미생물로 처리가 충분히 가능하며, 다른 폐수와의 혼합에서도 처리가 가능한 것을 알 수 있었다.

IV. 결 론

2단으로 연결한 슬러지-고정상 반응기(sludge blanket-packed bed reactor, SBPBR)에서 페놀 농도를 증가시킨 페놀 함유 폐수를 연속적으로 유입시켰을 때 처리 특성을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 실험에 사용된 혐기성 슬러지-고정상 반응기는 처리효율이 우수한 반응기임을 알 수 있었다.

2. 특정 미생물이 아닌 일반 혐기성 미생물로도 고농도의 페놀 함유 폐수의 혐기성 처리가 가능하였고, 본 실험에 사용된 혐기성 미생물은 유입되는 페놀의 농도가 증가할수록 순응 시간이 점점 길어졌으며 새로운 환경 변화에 대하여 잘 적응함을 알 수 있었다.

3. 유입되는 페놀의 농도가 1,800 mg/l까지 페놀 함유 폐수의 처리는 양호하였으며, 페놀 제거 효율, COD제거 효율, 가스 생산량은 각각 99%, 99%, 37 l/day임을 알 수 있었다. 그러나 2,400 mg/l 이상의 페놀을 포함한 페놀 함유 폐수가 유입되었을 경우 처리가 불가능하였다.

4. 혐기성 슬러지 고정상 반응기를 2단으로 연결하여 실험한 결과 고농도와 저농도의 모든 범위에서 페놀함유폐수의 혐기성 처리가 가능함을 알 수 있었다.

5. 페놀함유폐수의 혐기성 분해로 생성된 메탄가스를 함유한 biogas를 에너지로 사용할 수 있어 페놀 함유 폐수의 자원화가 가능하였다.

참고문헌

1) Hickman, G. T. and Novak, J. T. : Acclimation

of activated sludge to pentachlorophenol. *J. WPCF*, Vol. 56, No. 4, 1984.

2) Greminger, D. C., Burns, G. P., Lynn, S., Hanson, D. N. and King, C.J. : Solvent extraction of phenols from water. *Ind. Engng Chem. Process Res. Dev.* **21**, 51-54, 1982.

3) Khodadoust, Amid P., Wagner, Julie A., Suidan, Makram T., Safferman, Steven I. : Solvent washing of PCP contaminated soils with anaerobic treatment of wash fluids, *Water Env. Res.*, Vol. 66, No. 5, 692-697, 1994.

4) Sorial, George A., Suidan, Makram T., Vidic, Radisav D., Brenner, Richard C. : Effect of GAC characteristics on adsorption of organic pollutants. *Water Env. Res.*, Vol. 65, No. 1, 53-57, 1993.

5) Nakhla, G., Abuzaid, N., Farooq, S. : Activated carbon adsorption of phenolics in oxic systems: Effect of pH and temperature variations, *Water Env. Res.*, Vol. 66, No. 6, 842-850, 1994.

6) Patterson J. W. : Wastewater Treatment Technology, Ann Arbor Science, Ann Arbor, Mich., 199-214, 1975.

7) Devlin, Howard R. and Harris, Iestyn J. : Mechanism of the Oxidation of Aqueous Phenol with Dissolved Oxygen, *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, **23**, 387-392, 1984. (산)

8) Vigneswaran, S., Puetpaiboon, U. and Kim, S. I. : Treatment of Agro-based Industrial Wastewater by Anaerobic Digestion Combined with Membrane Separation Process, Proc. APBioCHEC'90, 545-547, 1990.

9) Joglekar, H. S., Samant, S. D. and Joshi, J. B. : Kinetics of wet air oxidation of phenol and substituted phenols, *Water Res.*, Vol. 25, No. 2, 135-145, 1991.

10) Melcer, H., Bedford, W. K. : Removal of pentachlorophenol in municipal activated sludge systems. *J. WPCF*, Vol. 60, No. 5, 1988.

11) K. A. Khan, M. T. Suidan and W. H. Cross : Anaerobic activated carbon filter for the treatment of phenol-bearing wastewater. *J. WPCF*, Vol. 53, No. 10, 1981.

12) Fox, Peter., Suidan, Makram T., Pfeffer, John T. : Anaerobic treatment of a biologically inhibitory wastewater, *J. WPCF*, Vol. 60, No. 1, 1988.

13) Standard methods for the examination of water and wastewater, 18th Ed., (1992).