

## 페놀계 고농도 유기성 폐수의 생물학적 고도처리 운전인자

홍성동 · 박철휘

서울시립대학교 환경공학부

(2000년 1월 17일 접수, 2000년 2월 25일 채택)

# Operation Parameters on Biological Advanced Treatment of Phenolic High-Strength Wastewater

Sung-Dong Hong · Chul-Hwi Park

*Dept. of Environmental Engineering, The University of Seoul*

### ABSTRACT

The objectives were to compare the biodegradable threshold concentrations of phenol with the different composition of the influent carbon source and examine the SMA (Specific Methanogenic Activity) and the possibility of simultaneous removal of high-strength organics and nitrogen compounds in UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) - PBR (Packed Bed Reactor) process. The results showed that UASB reactors were efficient to remove phenol and phenol + glucose from synthetic wastewater. At phenol conc. of 600 mg/L and SCOD conc. of 2100 mg/L in UASB reactor (with only phenol as substrate), the removal efficiencies of phenol and SCOD were over 99% and 93% respectively, under MLVSS of 20 g. The activity of microorganism was 0.112 g phenol/g VSS · d, 0.351 g SCOD/g VSS · d. The gas production rate was 0.115 L/g VSS · d and CH<sub>4</sub> content in gas was about 70%. At phenol conc. of 760 mg/L and SCOD conc. of 4300 mg/L in UASB reactor (with phenol + glucose as substrates), the removal efficiencies of phenol and of SCOD were over 99% and 90% respectively, under MLVSS of 20 g. The activity of microorganism was 0.135 g phenol/g VSS · d, 0.696 g SCOD/g VSS · d. The gas production rate was 0.257 L/g VSS · d and CH<sub>4</sub> content in gas was about 70%. Serum bottle test showed that the activity of granule was inhibited over 1600 mg/L phenol conc. and denitrification and methanogenesis simultaneously took place in UASB granules under co-substrates conditions. PBR reactor packed with cilium type media, was efficient in nitrification. In condition of 0.038 kg NH<sub>4</sub>-N/m<sup>3</sup> media · d, 10~12 mg/L phenol conc. and 200~500 mg/L SCOD conc., nitrification efficiency was over 90% and phenol removal efficiency was over 98%.

## 요 약 문

본 연구는 탄소원으로서는 페놀과 공동기질로서 글루코스를 함유한 인공합성폐수를 만들어 실험실 규모의 UASB(Upflow Anaerobic Sludge Blanket) - PBR(Packed Bed Reactor) 공정을 운전하면서 페놀의 유일한 탄소원으로서의 이용특성과 공동기질로서 글루코스를 주입한 경우의 이용특성, 미생물의 활성도 및 질소의 동시제거 가능성에 대한 연구를 수행하였다. 실험결과 페놀을 유일한 탄소원으로 주입한 경우 페놀유입농도 600 mg/L에서도 페놀제거율 99% 이상, SCOD 2100 mg/L 농도에서 제거율 93% 이상을 보였다. 조내 미생물의 양은(VSS) 약 20 g이었고 이때 미생물의 활성도는 0.112 g phenol/g VSS · d이었고 SCOD 제거율은 0.351 g SCOD/g VSS · d이며 가스발생율은 0.115 L/g VSS · d, 메탄가스의 함유율은 70%로 나타났다. 공동기질로 페놀과 글루코스를 주입한 경우 페놀유입농도 760 mg/L하에서 페놀제거율 98% 이상, SCOD 4300 mg/L 농도에서 제거율 90% 이상을 보였다. 조내 미생물의 양은(VSS) 약 20 g이었고 이때 미생물의 활성도는 0.135 g phenol/g VSS · d이었고 SCOD 제거율은 0.696 g SCOD/g VSS · d이며 가스발생율은 0.257 L/g VSS · d, 메탄가스의 함유율은 70%로 나타났다. 회분실험결과 페놀농도 1600 mg/L 이상의 농도에서 활성의 저해를 받았으며 메탄화 반응과 탈질반응이 동시에 일어나는 것으로 관찰되었다. 질산화는 수리학적 체류시간 24시간으로 하여 암모니아성 질소 0.038 kg NH<sub>4</sub>-N/m<sup>3</sup>·media · d 부하조건과 유입수내 페놀농도 10~12 mg/L, SCOD 200~500 mg/L 조건하에서 저해를 받지 않고 90% 이상의 질산화율을 보였고 페놀의 제거효율은 98% 이상을 보였다.

주제어 : 페놀, 상향류식 혐기성 블랭킷 반응조, 담체 충전 반응조, 공동기질, 메탄활성능, 글루코스

## 1. 서 론

대부분의 산업으로부터 배출되는 페놀은 특유한 냄새를 지니는 무색 결정으로서 염료, 농약, 살충제, 살리실산 등의 중요한 전구체이며, 페놀수지, 에폭시수지, 카보네이트 수지의 원료로 이용되고 있다. 벤젠고리를 가지는 구조적 특징 때문에 인체에 독성을 나타내는데, 특히 염소와 결합하여 클로로페놀(chlorophenol)이 되면서 악취가 무려 200~300배 강해지고, 농도가 1 ppm을 넘으면 암이나 태아 이상, 중추신경마비 등 신체에 치명적인 영향을 미친다. 이러한 페놀문제를 해결하기 위한 방법 중의 하나로 미생물을 이용한 처리가 많이 연구되어왔다. 기존의 연구로서는 호기성 미생물을 이용한 처리, 오존산화법을 이용한 처리 등이 광범위하게 수행되었으며 최근 들어 혐기성 처리에 관한 관심이 증폭되고 있다.

또한 최근 들어 동아시아 등지에서 지하수 및 지표수의 페놀류 화합물과 농업 및 식료생산공장 등에서

배출되는 질소성분에 의한 환경오염이 심각한 문제로 대두됨에 따라 페놀류 화합물과 질소물질의 동시제거에 대한 고도처리에 관심이 증폭되고 있다.<sup>6)</sup> 이러한 페놀의 분해에 관한 기존의 연구보고를 살펴보면 다음과 같다.

페놀 화합물의 혐기성 분해경로는 다음과 같이 제시되었다.<sup>8)</sup>

- ① phenol - ② cyclohexanol -
- ③ cyclohexanone - ④ organic acid →
- ⑤ CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>

그러나 1989년 Kobayashi는 일련의 실험결과 다음과 같은 페놀의 분해경로를 제시하였다.<sup>3)</sup>

- ① phenol - ② benzoate -
- ③ cyclohexane carboxylic acid -
- ④ heptanoate - ⑤ valerate, propionate, acetate 형성( $\beta$ -oxidation: Keith *et. al.*, 1978) or
- ⑤ propionate and butyrate - ⑥ acetate 형성

(Fina et. al.,1978)

또한 폐놀의 혐기성분해에 있어 pepton의 첨가는 분해를 촉진시키는 역할을 하며 sulfate ion 또는 chloride ion 등은 영향을 미치지 않으며, 배양가스의 조성에 의한 영향은 H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 가스배양 조건 하에서 폐놀의 분해는 촉진되었지만 중간대사산물인 benzoate가 축적되어 더 이상 분해되지 않는 경향을 나타내었다. N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 가스배양조건의 경우 폐놀의 분해가 가장 빨리 수행되었으며 benzoate의 축적현상도 거의 일어나지 않았다. 이러한 결과를 토대로 benzoate가 중간대사산물로서 생성되며 이 단계가 폐놀분해 경로의 율속단계로 보고되었다. 온도의 영향을 살펴보면 48 hrs에 걸쳐 온도를 37℃에서 20℃로 저하시켰을 때 gas 발생량은 약 64% 감소하였고 gas 발생량의 회복은 5일 걸렸지만 전체적으로 미생물의 활성을 회복하는 데는 40여일이 소요되어 phenol이외의 다른 기질을 이용한 실험에서 약 2일 후에 활성을 회복한 것과 비교하면 phenol을 처리하는 미생물이 온도에 상당히 민감하다는 것을 알 수 있다.<sup>4)</sup>

폐놀의 탈질 조건하에서의 분해는 Tschech and Fuchs(1987) 등에 의해 폐놀의 para-carboxylation에 의해 4-hydroxybenzoate로의 전환, 즉 'Kolbe-Schmidt carboxylation' 단계가 폐놀 분해의 첫 단계라고 발표하였다. 또한 *Pseudomonas* sp. strain K172에 의한 탈질조건하에서의 폐놀분해연구가 많은 연구자들에 의해 수행되었다. 기존의 연구결과를 통해 메탄생성균과 탈질균의 경쟁관계가 규명되었으며<sup>10)</sup> phenol을 이용하여 실험한 결과 C/N비 3.34 이하에서는 메탄생성반응이 저해를 받으며 그 이상의 조건에서 메탄이 생성되는 것으로 나타났다.<sup>6)</sup>

폐놀의 호기성 분해는 광범위하게 연구되어 왔다. Bacteria, fungi 등에 의해 공동기질로서 폐놀의 제거가 가능하고 또한 유일한 탄소원으로서 폐놀의 사용이 가능한 것으로 밝혀졌다.<sup>9)</sup>

이러한 배경으로 본 실험에서는 UASB-PBR반응조를 이용하여 보다 안정적인 효율적인 폐놀의 처리방법의 모색, 즉 일반산업폐수 및 하수의 주요성분인 글루코스를 공동기질로 이용하여 폐놀분해효율의 증진과 후단 질산화 반응조를 연결하여 탄소원과 질소원의 동시처리가능성에 대해 연구하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험장치

전체 공정도는 Fig. 1과 같으며 UASB는 내경 10.6 cm( $A_s = 88 \text{ cm}^2$ ), 높이 50 cm의 아크릴 원통형으로 유효용적 3.6 L, 침전부를 포함한 전체용적은 5 L이다. 원수는 Peristaltic Pump(MINIPLUS-3)를 이용하여 정량적으로 하부의 distributor를 통해 상향류식으로 유입되도록 하였다.

반응조온도는 온도센서가 달린 chamber를 이용하여  $35 \pm 1^\circ\text{C}$  유지하였으며 HRT는 24 hrs, 조내 미생물(VSS)은 20 g으로 하였다. 원수로 사용한 합성 폐수의 조성은 Table 1과 같다. 원수는 질소가스로 purge하여 용존산소를 제거한 후 4℃ 냉장고에서 펌프로 주입하였다.

PBR 반응조는 내경 9 cm( $A_s = 64 \text{ cm}^2$ ), 높이 53 cm의 원통형 칼럼으로 유효용적 3.4 L를 사용하였다. 사용한 매디아는 폴리프로필렌과 나일론을 재질로 만들어진 구형의 섬모접촉여재로서 가운데 축을 중심으로 짧은 섬모가 붙어있는 형태이다. 하나의 부피가 3.375 cm<sup>3</sup>인 매디아 900개를 충전하여 반응

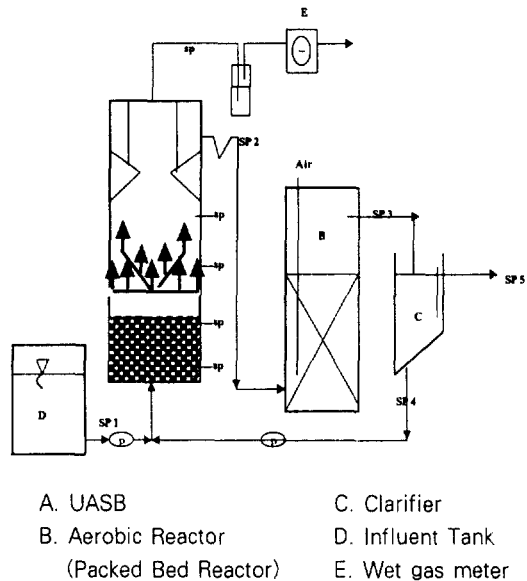


Fig. 1. Schematic diagram of UASB-PBR process.

Table 1. Characteristics of synthetic wastewater

Organic source	Concentration (g/L)		Trace salts material	Concentration (mg/L)
	phenol + glucose	phenol		
Glucose	1.0	0	FeCl <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	2000
CH <sub>3</sub> COONa	0.5	0	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	50
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.08	0.08	ZnCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	50
CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	0.08	0.08	CuCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	40
NaHCO <sub>3</sub>	2	2	MnCl <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	500
NH <sub>4</sub> Cl	0.25~1.0	0.25~0.5	(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> MoO <sub>7</sub> · 2H <sub>2</sub> O	50
Phenol	0.1~0.8	0.1~0.8	AlCl <sub>3</sub>	30
TSM	10 ml/L	10 ml/L	CoCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	150
			NiCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	100
			MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	50

Item	Concentration	
	phenol + glucose	phenol
pH	7.2 ~ 7.4	7.2 ~ 7.4
Alkalinity(mg/L)	1200 ~ 1500	1200 ~ 1500
SCOD(mg/L)	1500 ~ 4500	1500 ~ 2800
TKN(mg/L)	60 ~ 240	60 ~ 120
PO <sub>4</sub> -P(mg/L)	7 ~ 15	7 ~ 15

조 용적대비 88%를 차지하였다. 유입수는 UASB의 유출수로 수두차를 이용하여 직접 상향류로 유입되도록 하였으며 산기관을 하부에 설치하였다.

## 2.2. 분석항목 및 방법

UASB에는 VSS 등을 용이하게 측정할 수 있도록 높이별로 sampling port를 두었다. UASB침전부에는 가스유출구를 만들어 Wet gas meter(SINA-GAWA, WN-K 1A)를 설치하고 매일 가스발생량을 기록하였다. pH(Orion-290A), alkalinity는 매일 측정하였으며, port별 SCODcr, VSS는 Standard Method에 준하여 분석하였다.<sup>12)</sup> NO<sub>x</sub>-N과 PO<sub>4</sub>-P는 Ion Chromatography(Dionex-100)로, NH<sub>4</sub>-N는 Flow Injection Analysis(Quick Chem 8000, method 10-107-06-1-B)로 분석하였다. UASB에서 나오는 가스 성분분석은 GC-TCD(GC-8A SHIMAZU, JAPAN)로 분석하였으며 고무 septum이 달린 sampling port를 두어 gas tight syringe를 직접 주입하여 시료를 채취하였고 그 양은 300  $\mu$ L로 하였다.

Phenol분석은 HPLC(Waters, USA)를 이용하였으며 시료는 0.45  $\mu$ m membrane filter로 여과한 후 syringe를 이용하여 시료량을 40  $\mu$ L를 주입하였다.

## 2.3. 실험조건 및 방법

### 2.3.1. 활성회복실험

반응조는 기존에 glucose를 대상폐수로 SCOD 3500 mg/L의 인공 합성폐수를 대상으로 약 95%이상의 제거효율로 운전되었던 것으로 탄소원의 공급을 중단한 채로 각각 100일간, 50일간 방치된 상태로서 새로운 실험을 위해 granule의 활성능에 대한 실험을 하였다. Glucose를 탄소원으로 3500 mg SCOD/L의 유입원수를 희석하여 주입하면서 활성회복실험을 실시하였다.

### 2.3.2. 페놀을 유일한 탄소원으로 주입한 UASB

회복실험이후 glucose농도를 줄이고 phenol의 농도를 서서히 증가시키며 입상슬러지를 페놀에 순응시켰다. 약 80일간의 순응 이후 페놀을 유일한 탄소

원으로 약 420 mg/L 농도로 주입하기 시작하여 800 mg/L까지 단계적으로 증가시켰다.

### 2.3.3. 글루코스를 공동기질로 주입한 UASB

회복실험이후 glucose의 농도를 2000 mg/L로 유지하며 약 40일간 폐놀의 농도를 100 mg/L에서 200 mg/L로 증가시켜가며 실험하였고 그 이후에는 glucose의 농도를 1000 mg/L로 고정하고 폐놀의 농도를 약 800 mg/L까지 증가시키며 처리특성을 실험하였다.

### 2.3.4. 호기성 생물막 반응조

J 하수처리장의 반응슬러지를 이용하여 담체 개체당 38.46 mg의 미생물을 부착시킨 후 공동기질을 주입한 UASB반응조의 유출수를 수두차를 이용하여 상향류식으로 유입하였다. 체류시간은 24 hrs. DO는 3~4 mg O<sub>2</sub>/L, 온도는 20~25℃로 운전하였다.

## 2.4. 회분실험방법

158 mL serum bottle을 이용하여 회분실험을 하였다. Bottle은 15분간 멸균(autoclave)을 실시하고 배양온도(35±1℃) 조건에서 안정화한 후 대상 원수 및 미량 영양물질, 그리고 granule을 주입하고 알루미늄을 이용하여 capping하고 He 가스를 이용하여 0.5 mL/min의 유속으로 15분간 purging을 실시하였다.<sup>11)</sup>

Waterbath에서 180 rpm으로 진탕시켜 반응시키며 최초 15분간 발생한 가스는 오차발생을 막기 위해 제거하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1. 활성회복실험

Fig. 2에 나타난 것과 같이 탄소원의 공급에 의해 바로 gas가 발생하였으며 원수의 SCOD 농도가 증가함에 따라 gas의 발생량도 각각 40 mL/hr, 150 mL/hr, 400 mL/hr로 발생량이 증가하는 결과를

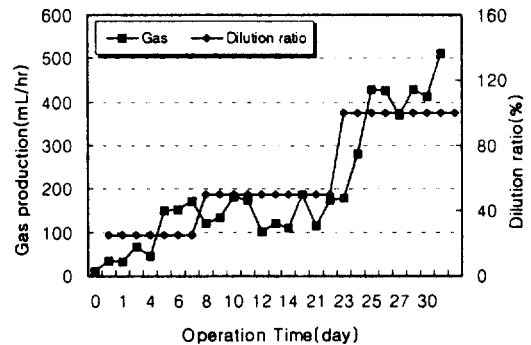


Fig. 2. Gas production in activity recovery test.

나타내었다. 결과적으로 granule의 약 50일간의 방치는 미생물의 활성에 거의 영향을 미치지 않았음을 알 수 있었다.

### 3.2. 폐놀을 유일한 탄소원으로 주입한 UASB

#### 3.2.1. 폐놀 분해특성

일정기간의 순응 후 폐놀의 농도를 1000 mg/L까지 점차적으로 증가시켜 가며 실험을 하였다. Fig. 3에서와 같이 600 mg/L 농도까지 95% 이상의 제거효율을 보여 37일째 1000 mg/L까지 증가시키자 갑작스런 충격부하에 의한 영향으로 제거효율이 20%로 떨어졌다. 농도를 800 mg/L로 회석하여 주입하였으나 크게 회복경향을 보이지 않아 다시 약 500 mg/L까지 회석하여 주입하자 제거효율이 95% 이상으로 회복되었다. 다시 유입농도를 증가시켜 800 mg/L로 주입하자 약 80%까지 효율이 저하되었다가 90%이상까지 회복되었다. 그러나 운전 64일째 유입수 조성의 실수로 pH가 5.0인 유입수가 4일간 주입이 되면서 급격한 효율저하현상이 나타났다. 반응조의 MLSS도 짙은 검은 색의 granule이 갈색으로 퇴색되어 폐놀의 독성영향을 알 수 있었으며 폐놀의 활성회복에는 약 40일 정도가 소요된 후에야 570 mg/L의 주입농도에 대해 안정적인 95% 이상의 제거효율을 얻을 수 있었다. 약 600 mg/L의 유입농도 하에서 폐놀의 제거효율은 99% 이상으로 안정적인 제거효율을 나타내었으며 이때의 MLVSS농도는 20 g/L로 나타났다. 미생물활성은 0.112 g phenol/g VSS · d, 총 제거된 SCOD는 0.351 g SCOD/g

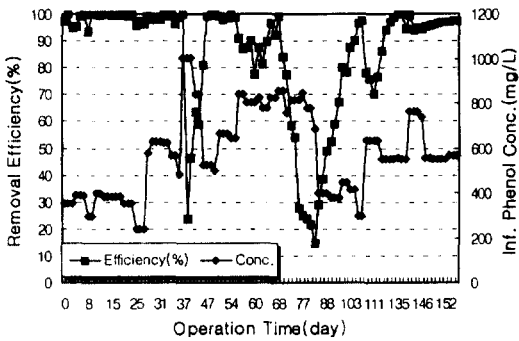


Fig. 3. Removal efficiency by influent phenol concentration.

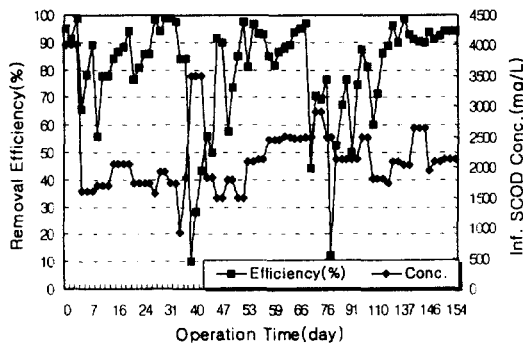


Fig. 4. Removal efficiency by influent SCOD concentration.

VSS · d로 나타났다.

### 3.2.2. SCOD 제거효율

Fig. 4의 SCOD는 페놀분해경향과 비슷한 경향을 나타내고 있으나 그 변동폭이 더 크게 나타나고 있다. 이는 페놀의 분해산물로써 중간대사산물이 생성되어 최종산물인 메탄과 이산화탄소로의 전환이 되지 않고 축적되어 있기 때문인 것으로 사료된다. pH 충격부하에 의한 회복은 페놀의 분해와 비슷한 경향을 나타내었으며 약 2100 mg/L의 SCOD농도에 대해 약 93% 정도의 제거효율을 나타내었다. 단위미생물당 SCOD이용율은 0.351 g SCOD/g VSS · d로 나타났다.

### 3.2.3. 가스발생량 및 메탄가스 조성비

가스발생량은 Fig. 5와 같이 페놀의 고부하 유입에 의한 영향은 거의 받지 않고 오히려 유입수의 pH

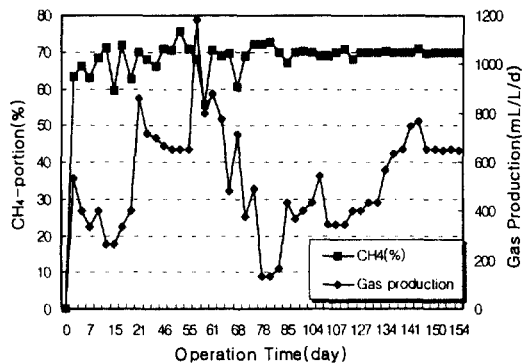
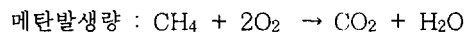


Fig. 5. Gas production and CH<sub>4</sub> content.

저하에 의한 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 메탄가스의 조성은 고부하 조건이나 pH 저하에 의한 영향을 거의 받지 않고 일정하게 65~70% 범위를 나타내었다. 충격부하이후 가스발생량이 서서히 증가함에 따라 미생물의 활성은 회복되었고 가스중 메탄의 함유율도 70%를 유지하였다. 약 3주간 안정적인 제거효율을 나타내던 기간동안 가스발생량은 0.115 L/g VSS · d, 0.224 L<sub>CH4</sub>/g SCOD로 나타났다.



위 식을 토대로 양론적으로 계산하면 0.35 L<sub>CH4</sub>/g BOD<sub>L</sub>로 나타난다.

## 3.3. Glucose와 페놀을 공동기질로 이용한 UASB

### 3.3.1. 페놀 분해특성

페놀분해경향은 다음 Fig. 6과 같이 심한 변동을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 원인은 일정기간의 페놀에 대한 순응기간이 없이 100 mg/L에서부터 점차적으로 증가시키면서 실험을 실시하였기 때문이다. Glucose를 공동기질로 하여 페놀의 순응 및 페놀의 미생물에 의한 분해특성을 실험한 결과 약 90일 후 600 mg/L의 페놀을 95% 이상의 효율로 제거할 수 있게 되었다.

Glucose를 공동기질로 이용한 결과 페놀의 분해특성이 향상되어 약 760 mg/L의 주입농도에 대해서도 안정적으로 98% 이상의 제거효율을 나타내었다.

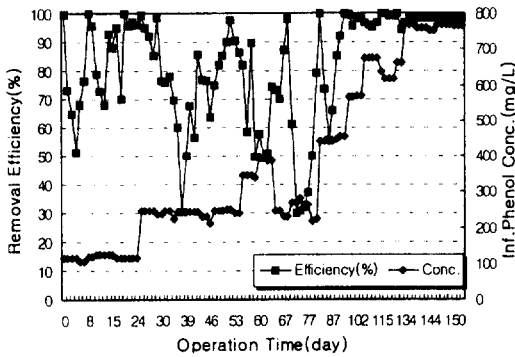


Fig. 6. Removal efficiency by influent phenol concentration.

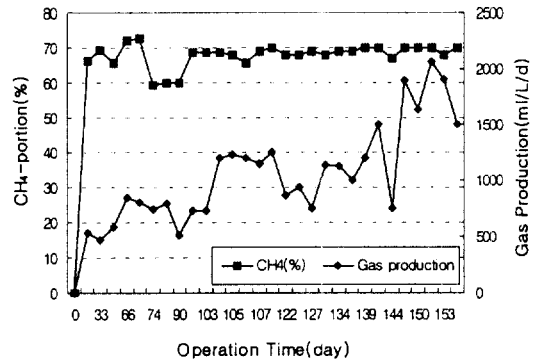


Fig. 8. Gas production and CH<sub>4</sub> content.

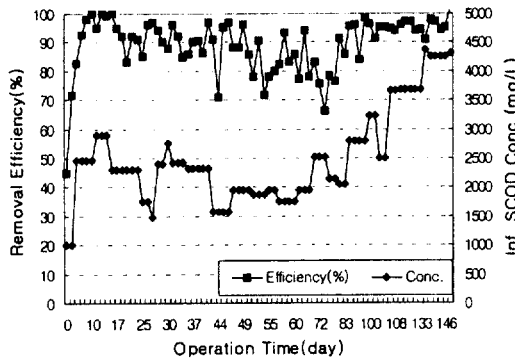


Fig. 7. Removal efficiency by influent SCOD concentration.

이 때 조내의 보유 MLVSS는 20 g VSS로서 미생물의 활성은 0.135 g phenol/g VSS · d값으로 나타나서 폐놀을 유일한 탄소원으로 주입한 경우에 비해 폐놀의 제거농도도 증가하였으며 또한 단위 미생물당 제거농도 증가함을 알 수 있었다. 이러한 결과를 토대로 phenol의 분해시 glucose를 공동기질로 주입하는 경우 폐놀의 제거효율뿐 아니라 단위 미생물당 phenol분해농도 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

### 3.3.2. SCOD 제거효율

Fig. 7의 SCOD는 폐놀의 경우와는 달리 안정적인 처리효율을 나타내고 있다. 이는 아직 폐놀에 대해 완전히 순용되지 않았지만 초기 폐놀의 주입농도가 낮고 glucose에 순용된 미생물이 우세하게 존재하기 때문에 폐놀에 의한 저해를 크게 받지 않은 이유로 폐놀과는 약간 다른 경향을 나타내는 것으로

사료된다.

Glucose를 2000 mg/L에서 1000 mg/L로 줄이고(46일째) 이후 일정하게 glucose농도를 유지하고 폐놀의 농도를 증가시켜가며 실험을 실시하였고 HRT 24 hrs로 운전하였다. 유기물의 제거효율은 약 90% 정도를 꾸준히 유지하였으며 폐놀의 주입농도의 증가에 따라 유입 SCOD의 농도도 증가하여 운전 135일째에는 4300 mg/L까지 증가하였으나 이미 순용이 된 미생물에 의한 제거효율은 일정하게 90% 이상으로 유지되었다. 이때 미생물의 활성도는 0.696 g SCOD/ g VSS · d로 나타났다.

### 3.3.3. 가스발생량 및 메탄가스 조성비

가스발생량은 Fig. 8과 같이 초기에는 약 87 mL/hr이었으며 이후 glucose의 농도를 일정하게 유지한 상태에서 폐놀의 농도를 400 mg/L에서부터 증가시켜가며 유기물의 부하를 늘린 결과 가스발생량이 증가하는 경향을 나타내었는데 이는 phenol에 순용된 미생물에 의해 증가된 유입 폐놀의 부하가 가스로 전환되었기 때문으로 사료된다. 발생가스 중 메탄의 비율도 70%를 유지하였다. 약 3주간 안정적인 제거효율을 나타내던 기간동안 가스발생량은 0.257 L/g VSS · d, 0.259 L<sub>CH<sub>4</sub></sub>/g removed SCOD로 나타났다.

## 3.4. 호기성질산화 실험

공동기질 주입 UASB 반응조의 유출수를 유입수로 했을 경우 Fig. 9, 10과 같이 폐놀유입농도 10~12 mg/L, 잔존 SCOD농도 약 200~500 mg/L, 암

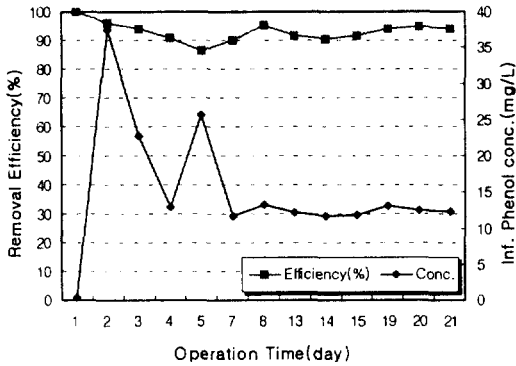


Fig. 9. Removal efficiency by influent phenol concentration.

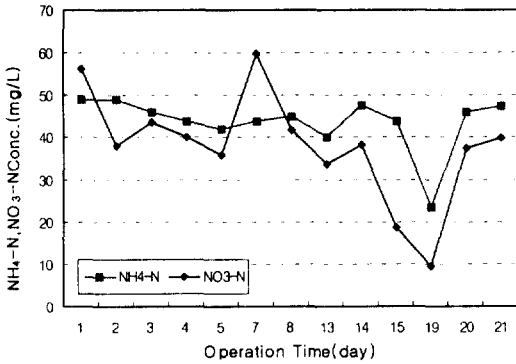


Fig. 10. Influent NH<sub>4</sub>-N and effluent NO<sub>3</sub>-N concentration.

모니아농도 35 mg/L로 SCOD/NH<sub>4</sub>-N비가 약 2~5 : 1의 조건하에서 암모니아는 90%, 페놀은 98% 이상의 제거효율을 나타내었다.

### 3.5. 회분식 실험

Glucose를 공동기질로 이용하여 페놀을 순용시킨 입상슬러지를 이용하여 페놀의 독성한계농도 실험을 실시하였다. 회분식 SMA 방법을 이용하여 입상슬러지의 VSS를 각각 136, 171, 216, 236 mg VSS/L로 주입하였으며 페놀의 주입농도를 각각 800, 1200, 1600, 2000 mg/L로 하여 실험을 실시하였다.

Fig. 11, 12의 가스발생경향 및 축적량을 통해 분해특성을 알아보면 초기 가스발생 양상은 모두 비슷한 경향을 나타낸다. 즉 단위미생물당 단위시간당 가

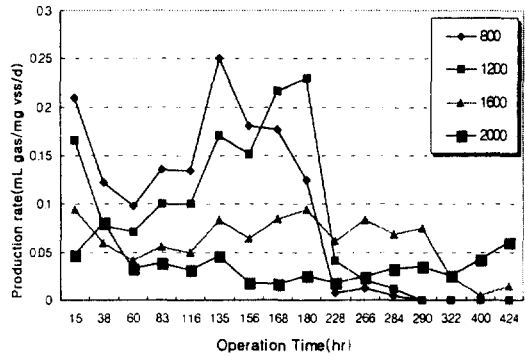


Fig. 11. Gas production rate.

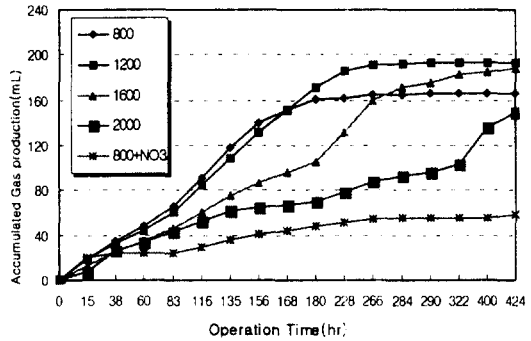


Fig. 12. Accumulated gas production.

스발생량을 보면 초기의 정점을 시작으로 서서히 감소하는 경향을 보이다가 60시간을 기점으로 다시 증가 또는 평형하는 경향을 통해 미생물이 glucose를 먼저 기질로 이용함을 알 수 있다. 이후 가스발생추세를 보면 페놀농도 800, 1200 mg/L인 경우 83시간 때에 가스의 발생량이 급격히 증가하는 경향을 보였으며 최대 가스발생율은 각각 0.251, 0.23 mL gas/mg VSS · d로 나타났으며 1600 mg/L, 2000 mg/L의 농도인 경우 최대 가스발생율은 각각 0.094 mL gas/mg VSS · d, 0.081 mL gas/mg VSS · d로 나타났다. 800 mg/L인 경우 228시간만에 1200 mg/L인 경우 290시간만에 반응을 완료하였다. 그러나 2000 mg/L의 농도인 경우 420시간이 지나도 완전히 분해를 하지 못하였다. 이를 통해 1200 mg/L의 페놀농도에 대해서 저해를 일으키지 않음을 알 수 있었다.



## 4. 결 론

UASB반용조 입상슬러지는 약 50일간 탄소원의 유입과 온도조절을 하지 않은 상태에서 후속운전을 실시한 결과 활성을 바로 회복하였으며 이를 이용한 실험결과는 다음과 같다.

- 1) 페놀을 유일한 탄소원으로 주입한 경우 600 mg/L의 농도까지 99% 이상의 제거효율을 나타낼 수 있었으나 1000 mg/L 고부하에 의한 충격부하에 대해서는 약 10일 만에 회복하였고 pH 5의 유입수에 의한 영향은 약 40여일이 소요되었다. 미생물의 활성도는 0.112 g phenol/g VSS · d, 0.351 g SCOD/g VSS · d, 그리고 gas 발생량은 0.115 L/g VSS · d, CH<sub>4</sub> 함유율은 70%였다.
- 2) 페놀과 glucose를 공동기질로 주입한 경우 순응기간이 약 90일이 소요되었으며 약 760 mg/L의 페놀주입농도에 대해 98% 이상의 제거효율을 보였고 미생물의 활성도는 0.135 g phenol/g VSS · d, 0.696 g SCOD/g VSS · d, 그리고 gas 발생량은 0.257L/g VSS · d로 페놀 단독주입의 경우보다 우위를 보였으며 CH<sub>4</sub> 함유율은 70%였다.
- 3) Glucose와 공동기질로 페놀에 순응된 미생물의 회복실험 결과 F/M비 2.5인 경우 페놀농도 1200 mg/L까지는 생물학적 분해에 거의 저해를 일으키지 않았으며 1600~2000 mg/L의 농도하에서 저해를 일으키는 것으로 나타났다.
- 4) 생물막 담체를 이용한 질산화 반응실험 결과 페놀에 의한 질산화 미생물의 활성저해정도가 미미하여 유입수 페놀농도 10~12 mg/L 하에서도 질산화 반응은 0.038 g/m<sup>3</sup>-media · d의 부하조건에서 90% 이상의 효율을 나타내었고 페놀은 98% 이상의 높은 제거효율을 나타내었다.

## 사 사

본 연구는 '98년 한국학술진흥재단의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 박철휘, 상향류식 입상슬러지 공법의 유기폐수 처리효율에 미치는 영향인자, 서울대학교 박사 학위 논문, pp. 29~34(1995).
2. 고재중, UASB-호기성 PBR공정에 의한 고농도 유기물 및 질소 동시제거, 서울시립대학교 석사 학위 논문(1999).
3. Kobayashi, T., Hashinaga, T., Mikami, E. and Suzuki, T., "Methanogenic degradation of phenol and benzoate in acclimated sludges," *Wat. Sci. Technol.*, **21**, 55~65 (1989).
4. Herbert H. P. Fang, Tong Chen, Yu-You Li, and Ho-Kwong Chui, "Degradation of phenol in wastewater in an upflow anaerobic sludge blanket reactor," *Wat. Res.*, **30**, 1353~1360(1996).
5. Herbert H. P. Fang and On-Chim Chan, "Toxicity of phenol toward an anaerobic biogranules," *Wat. Res.*, **31**, 2229~2242(1997).
6. Herbert H. P. Fang et al., "Interactions of Methanogens and Denitrifiers in Degradation of Phenols," *J. Environmental Engineering*, **125**(1), 57~63(1999).
7. Hulshoff Pol, L. W. W. J. de Zeeuw, C. T. M. Velzeboer, and G. Lettinga, "Granulation in UASB-Reactors," *Wat. Sci. Tech.*, **15**, 291~304(1983).
8. Young, L. Y. and Rivera, M. D. "Methanogenic degradation of four phenolic compounds," *Wat. Res.*, **19**, 1325~1332(1985).
9. Martin H. van Agteren, Sytze Keuning, and Dick B. Janssen, *Handbook on Biodegradation and Biological Treatment of Hazardous Organic Compounds*, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, pp. 219~227, Netherland(1998).
10. Hanne Vang Hendriksen and Birgitte Kier Ahring, "Intergrated Removal of Nitrate and Carbon in an Upflow Anaerobic Sludge

- Blanket(UASB) Reactor: Operating Performance." *Wat. Res.* **30**(6), 1451~1458(1996).
11. Owen, W. F., Stuckey, D. D., Healy, J. B., Jr., Young, L. Y., and McCarty, P. L., "Bioassay for Monitoring Biochemical Methane Potential and Anaerobic Toxicity", *Wat. Res.* **13**, 485~492(1979).
12. Andrew D. Eaton, Lenore S. Clesceri, and Arnold E. Greenberg, *Standard Methods* 19th Edition, (1995).