

## 슬러리 반응기를 이용한 페놀류 화합물의 분해거동

이자명 · 정연규\* · 이태진\*\*

포항제철 환경안전부  
\*연세대학교 도시공학과  
\*\*서울산업대학교 환경공학과

(1999년 12월 16일 접수, 2000년 3월 8일 채택)

## Degradation of Phenolic Compounds in a Slurry Reactor

Jamyoung Lee · Yonkyu Jung\* · Taejin Lee\*\*

*Department of Environmental & Safety, POSCO*  
*\*Department of Urban Planning & Engineering, Yonsei University*  
*\*\*Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Technology*

### ABSTRACT

This study investigates the remediation of the phenol or PNP(p-Nitrophenol) contaminated soils in a slurry reactor by a pure culture, *P-99*. The application of a pure culture for the phenol decontamination make the degradation rate three times faster than that of the mixed activated sludge. The destruction of 300 mg/L phenol was completed in 26 hours. As 1 mg of phenol was added, 0.1457 mg of microorganism was grown in the medium. The pure culture could not utilizes PNP, one of the xenobiotics, as a growth substrate. When the bacteria was induced by phenol enrichment medium, PNP could be effectively transformed with cometabolic process. The induction of the bacteria requires 1 mg of phenol for the destruction of 0.027 mg PNP. When PNP concentration in the medium contained phenol and PNP increased, the degradation rate of phenol was decreased. The degradation rate of phenol and PNP in the slurry reactor was about two times faster than in the reactor without slurry because of higher dissolved oxygen supply in the aqueous phase and adsorption on the surface of the soil.

---

Key Words : Phenol, PNP, Slurry Reactor, Cometabolism

## 요 약 문

본 연구는 페놀 분해균주인 P-99를 이용하여 슬러리상 반응기에서 페놀 또는 PNP (p-Nitrophenol)에 오염된 토양을 생물학적으로 복원시키는 방안을 모색하기 위해 수행되었다. 순수미생물에 의한 페놀의 분해는 혼합 미생물간의 경쟁적 상호작용을 배제시켜 활성슬러지의 체시간보다 3배 정도 짧게 나타났다. 페놀 분해균주인 P-99는 300mg/L의 페놀을 26시간 안에 완전하게 분해하였으며, 페놀 1mg이 제거될 때 0.1457mg의 P-99 미생물이 생성되었다. PNP는 단일기질로 반응기내에 존재할 경우 페놀 분해균주인 P-99에 의한 분해는 일어나지 않았으나, 페놀에 유도된 경우 공대사 작용에 의해 효과적으로 분해할 수 있었으며, 이 때 PNP 분해에 있어서 성장기질인 페놀의 이용도는 0.027mg PNP/mg phenol이었다. 페놀과 PNP가 혼합기질로 반응기내에 존재할 경우 PNP의 농도가 증가할수록 미생물에 대한 저해작용이 증가되어 페놀의 분해속도가 감소하였으며, 슬러리상 반응기에서 미생물에 의한 페놀 및 PNP의 분해는 대상물질의 일부가 액상에서 토양의 표면으로 흡착되고 산소의 전달속도가 상승하여 액상에서 보다 2배 이상 가속화되었다.

주제어 : 페놀, PNP, 슬러리 반응기, 공대사

## 1. 서 론

산업의 발전과 생산시설의 확대 등으로 인한 자연환경의 오염이 가중되어 자연계로 배출된 오염물질들은 주변의 물, 대기 및 토양 등을 포함한 모든 환경매질들을 포괄적으로 오염시키고 있다. 이러한 환경오염, 즉 수질, 대기, 토양, 해양오염은 다양한 경로를 통하여 인간에게 영향을 미치는데, 수질오염과 대기오염은 국내에서도 많은 오염방지 정책과 기술들이 개발되어 있으나, 토양오염의 경우에는 노출속도가 느리고 전달경로가 복잡하여 그 연구가 많은 부분에서 제한적이었다. 그러나 산업사회가 더욱 발달하면서 각종 유해물질들이 대량 발생함에 따라 토양오염이 심화되어 이들을 처리하는 것이 심각한 문제로 대두되고 있어서 오염토양 정화기술의 개발은 매우 시급한 실정이다. 지금까지 대량으로 사용되어온 합성유기오염물질 성분이 토양 생태계 내에 잔류하여 독성을 야기하고 주위의 지하수를 오염시켜 인근지역 주민의 건강을 위협하고 있으며, 잔류해 있는 오염물질에 대한 직접적인 노출과 같은 심각한 문제점들을 놓고 있다. 유기오염물질은 주로 도시의 생활폐수나 쓰레기, 대규모 식품공장의 유기성 폐기물, 축산 농가의 가축분 폐기물 등이 토양에 유입되어 오염되며, 과다한 유기물은 토양내 화학성분의 불균형

을 초래하고 유독물질 생성의 원인이 되기도 한다. 또한 토양의 분해능력이 한계에 도달하고 천연이 아닌 합성수지류에 의한 토양오염은 심각한 수준에 도달하고 있는 까닭에 환경을 보존하고 국민의 건강보건을 위해 각종 유기오염물질을 토양으로부터 제거하기 위한 방법과 기술들이 요구되고 있다.

미국의 경우 누적된 화학폐기물에 의한 토양오염의 심각성을 보여주었던 1978년의 Love canal 사건을 교훈으로 삼아 1980년 Superfund법이 제정되었고 과거에 부적절하게 처분된 유해 폐기물 매립지와 용계류의 누출 사고 등에 따른 토양 및 지하수 오염문제의 해결에 막대한 투자가 이루어지고 있다.<sup>1)</sup>

우리 나라는 1996년 토양환경보전법의 제정된 후 토양오염에 대한 인식이 확대되어 그 방지대책 기술에 대하여 많은 관심을 갖게 되었으나, 토양오염의 처리를 위한 기술은 거의 전무한 상태라 해도 과언이 아닐 것이다. 따라서 토양오염의 복구를 위한 직접적인 처리기술을 확보하는 것은 시급한 과제이다. 특히 갑작스러운 사고로 인해 특정 지역이 유해 폐기물로 오염된 경우 그 대응 방안으로는 우선 확산을 막기 위한 차단벽 설치 및 재토 등의 물리적 처리와 특정 오염물질의 중화를 위한 화학적 방법 등이 필요하지만 최종적으로는 자연 생태계의 재평형을 이룰 수 있는 생물학적 처리가 행해져야 한다.

현재 미국의 경우 이러한 생물학적인 방법은 전체 처리기술 중 약 20%를 차지하고 있다.<sup>2)</sup> 생물학적 처리 방법은 오염 범위의 넓이와 주된 오염물질의 종류 등에 따라 다시 여러 가지로 세분화될 수 있는데, 특히 고농도의 오염물질을 포함하고 좁은 지역에서 발생한 환경오염의 경우는 오염된 토양을 적절한 생물반응기내로 유입하여 오염물질들을 제거해 준 후 배출하는 방법이 가장 효율적이고 안전한 것으로 알려져 있다.

본 연구는 미생물에 의한 토양 오염물질의 분해 특성과 분해 기작에 대한 연구로서 미생물을 이용하여 오염토양의 복원능력을 향상시키기 위해 수행되었다. 토양오염 대상물질로는 화학적 합성에 의하여 대량 생산되어 소독제, 목재 보존제, 살충제, 제초제, 세척제 및 유기용매로 이용되며, 그 폐기물이 대기, 수질, 토양 및 저지의 오염을 일으키고 있어서 환경오염이 가속될 것으로 여겨지는 물질인 페놀<sup>3)</sup>과 에틸 및 메틸 파라티온과 같은 살충제 합성시 중간체 및 실험실 지시약으로도 널리 사용되는 PNP로 선정하였다. 페놀은 생물학적 분해능과 관련된 연구의 기준물질이기 때문에 하수, 토양, 담수와 해수에서의 분해와 관련된 정보가 많이 있으며, 용해도가 높고 토양에 대한 낮은 흡착능으로 인해 토양에 배출되었을 경우 2~5일 내에 신속하게 분해가 일어나지만, 고농도로 배출되었을 경우 분해 미생물에게 독성으로 작용하여 분해력을 떨어뜨린다.<sup>4)</sup> 또한 PNP는 미생물에 의한 분해가 매우 어렵고 휘발성이 매우 적으며, 흡착이 적어 토양에 오염될 경우 그 확산이 광범위한 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 제초제 및 살충제로 처리된 토양에서 페놀 분해 미생물을 분리한 후 역상과 슬러리상에서 각각 페놀 분해균주에 의한 페놀 및 PNP의 분해 특성을 조사하였으며, 동시에 토양에 대한 페놀의 흡·탈착 실험을 통하여 흡·탈착 계수를 도출하고 페놀 분해균주를 이용하여 페놀과 PNP가 동시에 오염된 토양을 호기성 상태에서 페놀을 초기 에너지원으로 이용한 공대사에 의해 PNP를 분해함으로써 페놀과 PNP의 동시처리에 대한 가능성을 검증하였다. 따라서 본 연구를 통하여 국내에서는 초보적 단계인 오염된 토양 처리에 순수 배양한 토양 미생물의 적용과 슬러리 반응기를 이용한 생물학적 복원(Bioremediation) 기술의 적용 가능성을 검증하고

자 하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1. 시약 및 재료

본 실험에 사용된 페놀과 PNP 등의 시약은 모두 99.9%의 고순도급으로 사용하였으며 증류수 및 용매는 HPLC급으로 사용하였다. 실험에 사용된 토양은 연세대학교 운동장 토양 상층부를 제거한 후 깊이 10cm에서 채취되었다. 이 때 채취한 모든 토양 시료는 내경 150 $\mu$ m의 체를 사용하여 평균지름 150 $\mu$ m 이상의 토양 입자를 제거하였으며, 모든 토양 시료는 오븐에서 하루동안 건조시킨 후 데시케이터에서 보관하였다.

### 2.2. 분석방법

페놀과 PNP는 C-18 칼럼과 methane-water (40 : 60) eluent를 이용하여 HPLC(High Performance Liquid Chromatography-SAMSUNG SI-200 pump & ERMA CR. INC ERC-7215 UV Detector)에서 측정되었다. C-18 칼럼을 통과한 시료는 254nm의 파장을 가진 UV 검출기를 통과하면서 UV를 흡수한 정도에 따라 그 농도를 측정하였다. 모든 시료는 HPLC에 주입되기 전에 원심분리기를 이용하여 입자를 제거하였다.

### 2.3. 페놀 분해 미생물의 분리

페놀 분해능을 가진 순수 미생물은 토양에서 채취하여 페놀을 탄소원 및 에너지원으로 조성한 Modified Basal Medium에서 증식, 분리하였다. 배지의 조성<sup>5)</sup>은 Table 1과 같으며 배지는 사용 전 고압증기 멸균하였다. 분리를 위한 평판배지는 Modified Basal Medium에 1.5% Bacto agar를 넣어 고체배지로 조제하여 사용하였으며, 여기서 얻은 집락을 여러번 계대 배양하였으며 최종적으로 선별된 페놀 분해균주의 동정은 Biolog Test를 통해 수행하였다.

Table 1. The composition of modified basal medium

Compounds	Concentration (mg/L)
phenol	300
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> · 12H <sub>2</sub> O	2,550
NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	975
NH <sub>4</sub> Cl	1,600
Yeast Extract	100
MnSO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O	8.5
FeSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	10
ZnSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	5
H <sub>3</sub> BO <sub>4</sub>	1.5
NaMoO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	1.5
Na <sub>2</sub> EDTA · 2H <sub>2</sub> O	21.5
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	30
CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	80
CoCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	1
CuCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	1
NiCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	1

## 2.4. 토양의 흡·탈착 실험

### 2.4.1. 등은 흡착실험

회분식 흡착실험은 토양에 대한 Freundlich 등은 흡착계수( $K_d$ )와 지수( $1/n$ )를 결정하기 위해 토양 6g을 50mL 세럼병에 넣고 페놀의 농도를 변화시켜 가며 흡착량을 관찰하였다. 수두압은 교반하는 동안 교반의 정도에 영향을 미칠 뿐 아니라 휘발로 손실되는 용매 양을 제어하기 위해 중요하므로 수두압을 최소로 유지하기 위하여 각 병의 총 용액 부피를 50mL로 하였다. 또한 대상화합물만 함유한 blank로 휘발로 인한 손실 양을 측정하였으며 용액에서 대상물질의 생물학적 분해를 막기 위하여 HgCl<sub>2</sub> 포화용액 1mL씩을 각 병에 첨가하였다. 용액의 평형농도로부터 흡착되어진 대상화합물의 양을 구하고 휘발 손실 양으로 보정하였다. 흡착 온도를 30±1°C로 유지하기 위하여 모든 흡착실험은 수평 교반기 가능한 배양기 안에서 수행되어졌다. 흡착 평형이 이루어지기 위해서는 용액이 균일하게 유지되도록 격렬하게 교반되어야 하므로 세럼병을 수평 교반기에서 200rpm의 속도로 교반시켰으며 흡착실험 초기부터 24, 48, 72, 96hr에 시료를 취하여 13,000rpm, 10분간 원심 분리시킨 후 상등액을 HPLC를 이용하여 분석하였다.

### 2.4.2. 등은 탈착실험

등은 탈착계수( $K_d$ )와 지수( $1/n$ )를 결정하기 위해 수행되어진 회분식 탈착실험은 흡착평형이 이루어지고 난 후 50mL 세럼병 안의 용액을 120mL 세럼병에 넣고 70mL 증류수와 혼합하여 모든 조건을 흡착 실험과 동일한 조건으로 수행하였다.

## 2.5. 미생물의 기질 분해능 실험

본 실험을 위하여 고체배지에서 순수 분리한 균주를 액체배지에 접종하여 수평교반기에서 200rpm으로 배양하였으며 배양조의 온도는 30±1°C를 유지하였고 인산 완충액을 이용하여 배양액의 pH는 7로 유지하였다.

### 2.5.1. 비생물학적 실험

페놀의 휘발이나 미생물의 흡착 등에 의한 제거율을 알아보기 위하여 비생물학적 실험을 수행하였다. 120mL 용량의 세럼병에 미생물 혼합액으로 채운 병, 미생물 혼합액을 121°C에서 15분간 고압 증기 멸균기로 멸균시킨 후 채운 병, 미생물 혼합액에 1mL의 포화 HgCl<sub>2</sub>를 투여하여 미생물의 활성을 제거한 후 채운 병과 미생물을 제외하고 배지르만 채운 병 등 총 4개를 준비하였다. 각각의 세럼병에 용액 중의 페놀농도가 300mg/L 되도록 페놀 조제용액을 주입하였다. 실험 온도는 30±1°C를 유지하였으며 회전식 수평 교반기에서 200rpm의 속도로 교반하였다.

### 2.5.2. 생물학적 실험

페놀을 단일 탄소원으로 하는 미생물의 페놀 분해 특성을 알아보기 위해 배양조내의 페놀 농도를 달리 하여 순수 분리한 미생물의 일정량을 각 120mL 반응기에 접종한 후 시간에 따른 페놀의 농도와 생체량을 측정하였다. 페놀 분리균주의 PNP 분해 특성을 알아보기 위해 단일 탄소원으로 PNP의 농도를 달리 하여 실험을 수행하였으며, 페놀과 PNP의 동시 처리 가능성을 검증하기 위해 배양조 내에 탄소원으로 페놀과 PNP의 혼합액을 농도를 달리하여 주입한 후 실험을 수행하였다. 또한 순수 분리한 미생물, 페놀

에 순응된 미생물과 활성슬러지의 폐놀 분해 거동을 비교하기 위해 각 반응기에 폐놀을 300mg/L의 농도로 주입하고 각각의 미생물을 접종한 후 실험하였다. 모든 실험은  $30 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 200rpm의 수평교반기를 사용하였다.

## 2.6. 슬러리상 생물반응기의 운전

본 연구를 위해 사용된 희분식 슬러리상 생물반응기는 120mL 세럼병에 토양 샘플 6g, 다양한 농도의 폐놀을 포함한 배양액 50mL와 액체배지에서 배양한 폐놀 분해균주 1%를 접종시킨 후  $30 \pm 1^\circ\text{C}$ , 200rpm로 운전하였으며, 반응 시간에 따른 슬러리상 반응기내 액상의 폐놀 농도변화를 측정하였다. 또한 슬러리상 생물반응기에서 폐놀과 PNP의 동시제거 가능성을 검증하기 위해 동일한 조건에서 폐놀농도 300mg/L와 다양한 농도의 PNP를 동시에 주입한 후 반응시간에 따른 액상의 폐놀과 PNP의 농도 변화를 분석하였다.

## 3. 결과 및 분석

### 3.1. 폐놀 분해균주의 특성

본 실험은 폐놀에 오염된 토양의 미생물학적 최적 처리조건을 도출하기 위한 것으로 먼저 폐놀에 대한 분해능이 우수한 순수 균주의 분리를 시도하였다. Table 1에 제시된 미량원소와 인산 완충액을 함유한 배양액에 폐놀을 단일 탄소원으로 하여 한천배지와 액체배지에서 계대 배양하였으며 최종적으로 콜로니의 성장상태를 관찰하여 성장률이 뛰어난 하나의 폐놀 분해균주를 선별하여 미생물 동정법에 의해 분류하였다. 미색을 띠고 있으며 원형의 균집을 형성하는 이 분해균주를 P-99라고 명명하였으며, 이 균주의 전자현미경 사진을 Fig. 1에 나타내었다.

Biolog Test를 거쳐 동정한 결과 *Cryptococcus Terreus A*종으로 밝혀졌으며 SI(similarity index)가 0.453으로 나타났다. SI가 0.5보다 낮을 경우 종 분류의 신뢰도가 낮은 것임을 고려할 때, 현 동정법에 의한 이 균주의 동정이 상당히 불확실하다는 것을

Fig. 1. Transmission electron micrograph of P-99 isolated from soil.

의미한다. 참고로 미국 매사추세츠주만의 해변가에는 102~107 CFU/g의 건조 바닥 퇴적 슬러지의 다환방향족 탄화수소 분해미생물 중 효모가 존재하며, 이는 *Cryptococcus*으로 동정되었다. 또한 금속 가공유를 분해하는 진균류 중 *Cryptococcus*가 발견된 적이 있다.<sup>6)</sup>

### 3.2. 등온 흡·탈착 실험

폐놀에 대한 토양의 흡·탈착능 실험은 세럼병에 일정량의 토양과 폐놀을 함유한 용액을 넣은 후 교반하면서 시간에 따른 액상의 농도 변화를 관찰하였다. 희분식 흡·탈착 실험 결과, Fig. 2, 3과 같이 Freundlich 등온식에 일치하였다( $R^2 = 0.960, 0.913$ ). 따라서 본 희분식 흡·탈착 실험 결과는 Freundlich 등온식을 사용하여 최소 자승법에 의해 그 결과를 분석하였다.

Freundlich 등온식에서  $q_0$ 는 흡착제의 단위 중량당 흡착된 물질의 양(mg/g)이며  $C_0$ 는 흡착 후의 용질의 평형농도(mg/L)이고  $1/n$ 과  $1/n'$  값은 흡·탈착의 불균질을 나타내는 값이며  $K_a$ 와  $K_d$  값은 흡·탈착된 농도와 온도의 함수로서,<sup>7)</sup> 본 실험에서의 폐놀에 대한 토양의 흡·탈착특성을 Table 2에 나타내었다. Table 2에서  $n$ 과  $n'$  값이 1에 가까우므로 폐놀의 흡·탈착 특성은 시험된 구간의 폐놀 농도에서 폐놀의 흡착은 토양을 포화시키지 않으며 농도에 비례하여 흡·탈착이 일어난다는 것을 나타낸다.

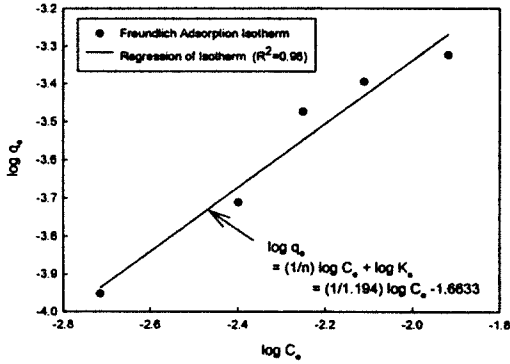


Fig. 2. Adsorption isotherm of phenol on the soil.

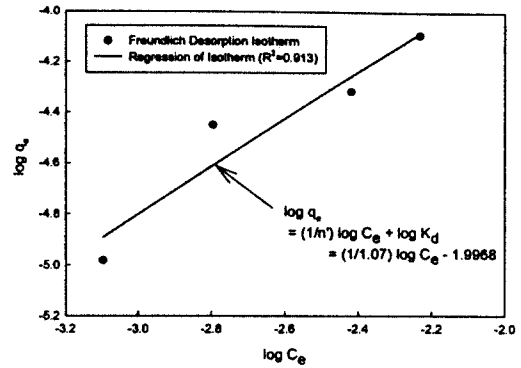


Fig. 3. Desorption isotherm of phenol on the soil.

Table 2. Adsorption and desorption coefficients of Freundlich isotherm

Adsorption			Desorption		
Coefficients	$K_a$	0.0217	Coefficients	$K_d$	0.01
	$n$	1.194		Coefficients	$n'$
Adsorption Isotherm		$q_e = 0.0217 C_e^{1/1.194}$	Desorption Isotherm		$q_d = 0.01 C_e^{1/1.07}$
$R^2$		0.960	$R^2$		0.913

### 3.3. 미생물에 의한 대상물질의 분해

#### 3.3.1. 폐놀의 비생물학적 제거

48시간 동안에 휘발에 의한 제거량과 고온 고압에서 멸균시킨 P-99 미생물과 mercuric chloride (HgCl<sub>2</sub>)를 투여하여 세포내의 단백질의 변형으로 활성이 제거된 P-99의 resting cell의 흡착에 의한 제거량은 활성이 있는 미생물에 의한 생물학적 분해량에 비해 극히 적은 양이었다. 따라서 본 실험에서는 폐놀의 생물학적 분해 실험이 48시간 이내에서 수행되었으므로 휘발이나 폐놀 분해미생물의 흡착에 의한 폐놀의 제거는 무시하였다.

#### 3.3.2. 폐놀의 생물학적 제거

순수 미생물에 의한 폐놀의 분해특성을 살펴보기 위해서 순수 미생물과 다른 두 종류의 미생물을 이용하여 그 분해능을 비교하여 보았다. Fig. 4는 활성슬러지에서 채취된 혼합미생물과 폐놀 배양액에서 순양시킨 폐놀 분해균, 그리고 순수 폐놀 분해균주인

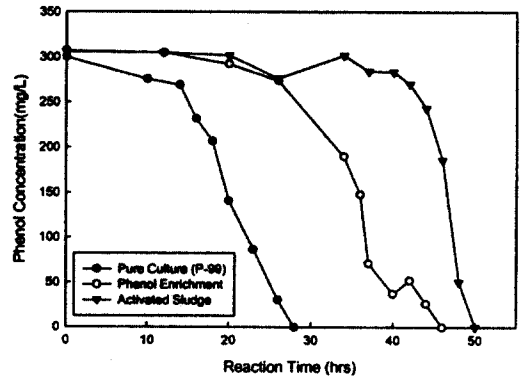


Fig. 4. Degradation of phenol according to the types of microorganism.

P-99 미생물을 300mg/L의 폐놀이 함유된 배양액에 각각 접종하여 시간에 따른 폐놀의 농도변화를 나타낸 것이다. 그 결과 활성슬러지에서 채취된 미생물에 의한 폐놀의 분해가 가장 더디게 나타났고 P-99 미생물의 분해능이 가장 빠르게 나타났다. 분해가 시작된 시점에서의 분해 속도는 크게 차이가 없었으나 순수 미생물에 의한 지체시간이 활성슬러지에 의한 지체시간보다 약 3배 정도 짧게 나타났다. 이는 혼합

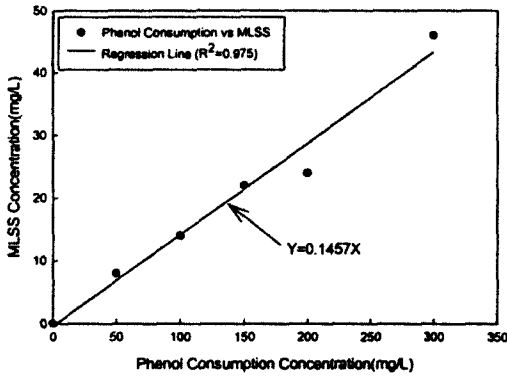


Fig. 5. The yield of P-99 with phenol consumption.

활성슬러지의 경우 폐놀에 노출된 적이 없었으므로 혼합 활성슬러지 안에 존재하는 폐놀 분해균류의 적응을 위한 시간이 더 많이 요구된 것으로 보이며 폐놀 분해균과 P-99 미생물은 폐놀에 순화되어 그 지체시간은 혼합 활성슬러지 보다 짧으나 폐놀 분해균 역시 혼합균이므로 서로의 비우호적 상호작용에 의해 순수 폐놀 분해균주인 p-99보다 지체시간이 길어진 것으로 보여진다. 따라서 폐놀에 오염된 지역의 미생물학적 복원에 있어서는 순수 균주의 적응이 가장 타당하다고 사료된다.

Fig. 5는 폐놀 제거에 따른 P-99 미생물의 성장률을 나타내는 것으로 0~300mg/L의 폐놀 농도가 함유된 액상에서 폐놀의 분해가 끝난 시점의 미생물 생체량을 부유물질로 조사하여 폐놀 농도대비 부유물질 양으로 환산한 것이다. 그 결과 1mg 폐놀에 제거될 때 0.1457mg의 P-99 미생물이 생성됨을 알 수 있었다.

### 3.3.3. 순수 미생물에 의한 PNP의 분해특성

P-99 미생물에 의한 PNP의 분해를 살펴보기 위해 다양한 농도의 PNP를 성장기질로 배양액을 조성하여 P-99 미생물과 함께 배양하였다. 배양기간 내에 PNP의 분해는 전혀 이루어지지 않았으며, 이는 PNP가 P-99 미생물의 성장기질로는 사용될 수 없는 것으로 판단된다. 즉 본 실험에서 나타난 결과는 한<sup>8)</sup>의 연구에서 보여준 결과와 유사한 것으로 PNP가 P-99 미생물의 성장기질로 사용되는데 제한적인 요소가 있다는 것을 보여준다.

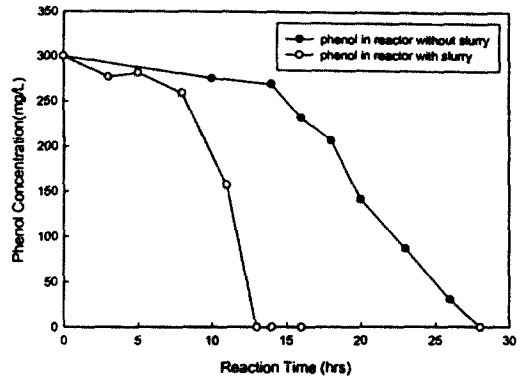


Fig. 6. Comparison of phenol degradation with and without slurry.

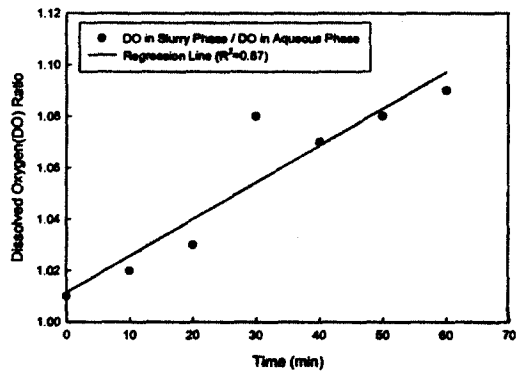


Fig. 7. Comparison of dissolved oxygen(DO) in slurry phase over aqueous phase.

Fig. 6은 동일한 조건에서 수행한 액상과 슬러리 상에서의 300mg/L 폐놀의 농도변화를 나타낸 것이다. 이때 슬러리상 반응기에서의 폐놀의 분해가 액상에서의 폐놀 분해보다 신속하게 진행되었는데 이는 슬러리상 반응기내의 폐놀의 일부가 액상에서 토양의 표면으로 흡착되어지고, 토양의 함유로 인하여 기포의 분산에 의한 표면적의 증가와 기포의 트랩효과로 인해 용존산소가 액상보다 높기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 7 참조). Fig. 8은 슬러리 반응기에 토양이 있을 때 미생물의 폐놀 분해가 가속되었듯이 PNP의 분해속도 역시 토양이 존재하는 경우 그 분해속도가 더 빠르게 나타나는 것을 보여준다. 또한 성장기질로 사용되는 데 제한적 요소를 가지는 난분해성 유기물질인 PNP는 폐놀에 유도(Induction)된 순수 미생물을 이용한 공대사 작용에 의해 효과적으로 분해될 수 있으며 액상에서 비성장기질인 PNP

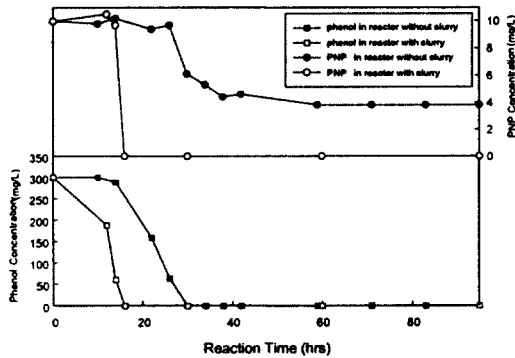


Fig. 8. Comparison of phenol and PNP degradation with and without slurry.

전환율은 0.027mg PNP/mg phenol이었다.

### 4. 결 론

본 연구는 슬러리상 반응기에서 토양에서 분리한 폐놀 분해균주인 P-99를 이용하여 폐놀에 오염된 토양의 생물학적인 복원과, 토양에서 일반적으로 많이 검출되는 PNP가 폐놀과 함께 오염되어 있는 경우 동시 처리방안을 모색하기 위한 기초자료를 제공하기 위해 수행되었으며, 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 폐놀에 대해 우수한 분해력을 갖는 순수 미생물의 분리 배양으로 혼합미생물의 미생물간의 경쟁적 상호작용을 배제함으로써 폐놀의 분해를 가속화시킬 수 있었다.
- 2) 폐놀 분해균주인 P-99를 이용한 폐놀의 분해는 실험에 사용된 농도에 따라 14시간에서 26시간 안에 완전한 분해를 이룰 수 있었으며, 1mg 폐놀에 제거될 때 0.1457mg의 P-99 미생물이 생성되었다.
- 3) 성장기질로 사용되는 데 제한적 요소를 가지는 난분해성 유기물질인 PNP는 폐놀에 유도(Induction)된 순수 미생물을 이용한 공대사 작용에 의해 효과적으로 분해할 수 있었다. 이때 성장기질인 폐놀의 비성장기질인 PNP 전환율은 0.027mg PNP/mg phenol이었다.
- 4) 슬러리상 반응기에서 미생물에 의한 폐놀 및 PNP의 분해는 액상에서 보다 2배 이상 가속화

되었으며, 이는 슬러리상 반응기내의 폐놀의 일부가 액상에서 토양의 표면으로 흡착되어지고, 토양의 함유로 인하여 기포의 분산에 의한 표면적의 증가와 기포의 트랩효과로 인해 용존 산소가 액상보다 높기 때문인 것으로 판단되며 이 결론은 Li 등<sup>9)</sup>에 의한 결과와 일치한다.

이상과 같은 결론으로 판단할 때, 오염토양의 생물학적인 복원 방법에 있어서 처리 대상 물질에 대한 순수 균주를 이용하여 슬러리상으로 처리하는 것이 토양과 액상의 분리 처리보다 시스템의 단순화와 처리효율의 증진을 위해 더 바람직하며, 단일 반응기 내에서 폐놀에 유도된 미생물을 이용한 공대사 작용으로 폐놀류 유기화합물의 동시 처리가 가능하리라고 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. Bradford, M. L. and Krishnamoorthy, R., "Consider Bioremediation for Waste Site Cleanup," *Chemical Engineering Progress*, **89**, 80~85(1991).
2. USEPA, Superfund Innovative Technology Evaluation Program : Technology Profiles Seventh Edition, EPA/540/R-94/526(1994).
3. Gordon, A. H. and Campbell, W. R., "Substrate Inhibition Kinetics : Phenol Degradation by *Pseudomonas putida*," *Biotechnology and Bioengineering*, **17**, 1599~1615(1975).
4. Philip, H. H., Handbook of Environmental Fate and Exposure Data for Organic Chemicals, Lewis Publishers(1990).
5. 이태진, 김상식, 장순용, "폐놀미생물에 의한 다고리 방향족 탄화수소의 분해특성", *대한환경공학회지*, **19**(11), 1396~1378(1997).
6. Rossmore, H. W. and Williams, B. W., "Survival of Coagulase-Positive *Staphylococci* in Soluble Cutting Oils," *Health Lab. Sci.*, **4**, 160~165(1967).
7. Reinhard, M. and Charles, J. W., "Effects



- of Temperature on Trichloroethylene Desorption from Silica-gel and Natural Sediments," *Environ. Sci. Technol.*, **31**, 689~696(1997).
8. 한기동, p-Nitrophenol 분해 세균의 분리 동정 및 특성, 한양대학교 석사학위논문(1994).
9. Li, K. Y., Annamalai, S. N. and Hoppe, J. R., "Rate controlling model for bioremediation of oil contaminated soil," *Environmental Progress*, **12**, 257~261(1993).