

## 세라믹담체를 이용한 페놀계 산업폐수의 생물학적 처리

오희목\* · 구영환 · 안극현 · 장감용<sup>1</sup> · 고영희 · 권기석 · 윤병대  
한국과학기술연구원 생명공학연구소, <sup>1</sup>쌍용양회중양연구소

### Biological Treatment of Phenolic Industrial Wastewater by a Mixed Culture Immobilized on Ceramic Beads

Hee-Mock Oh\*, Young-Hwan Ku, Kuk-Hyun Ahn, Kam-Yong Jang<sup>1</sup>,  
Yung-Hee Kho, Gi-Seok Kwon and Byung-Dae Yoon

Korea Research Institute of Bioscience and Biotechnology, KIST,  
P.O. Box 115, Yusong, Taejeon 305-600, Korea

<sup>1</sup>Department of Environmental Technology Research, Ssangyong Research Center,  
P.O. Box 12, Yusong, Taejeon 305-345, Korea

**Abstract** — A phenolic resin industrial wastewater containing about 41,000 mg/l of phenol and 2,800 mg/l of formaldehyde was biologically treated by a mixed culture GE2 immobilized on ceramic beads. This study was carried out with three experimental groups : Control-only added the sludge of papermill wastewater ; GE2 treatment-added GE2 to Control ; Ceramic treatment-applied ceramic carrier to GE2 treatment. When the original wastewater was diluted 80 times with aerated tap-water, influent COD<sub>Mn</sub> was 1,140 mg/l and that of the effluent was in the range of 22~35 mg/l, which was not much different among the experimental groups. However, at 20-times dilution, influent COD<sub>Mn</sub> was 4,800 mg/l and the effluent COD<sub>Mn</sub> of Control, GE2 treatment and Ceramic treatment was 179, 128 and 94 mg/l, respectively. COD<sub>Mn</sub> removal efficiency by Ceramic treatment was the highest, at 98.0%. At this time, the effluent phenol concentration of Control, GE2 treatment and Ceramic treatment was 10.71, 7.93 and 5.60, respectively. As the dilution times decreased, the removal efficiency of COD<sub>Mn</sub> and phenol did not change much, but COD<sub>Mn</sub> and phenol concentration of the effluent increased. Consequently, it is likely that the phenolic industrial wastewater containing phenol and formaldehyde can be biologically treated using a GE2 and ceramic carrier and that at 40-times dilution, the effluent completely meets the effluent standards for industrial wastewater treatment plant.

Phenol은 정유공장, 석유화학공장, 석탄전환공장 등의 방류수에 광범위하게 분포하며, 200 mg/l 이하의 농도에서도 미생물 성장을 억제하여 폐수처리를 어렵게 하는 환경오염물질이다(1). 특히, phenol계 수지공장의 폐수는 고농도의 phenol과 formaldehyde를 포함하는 등 함유물질의 독성 및 복잡한 조성 때문에 생물학적 처리의 어려움으로 대부분 소각처리에 의존하고 있는 실정이다.

Phenol을 분해할 수 있는 미생물 균주로 *Alcaligenes eutrophus*, *Bacillus stearothermophilus*, *Pseudomonas* sp., *Rhodococcus* sp., *Trichosporon cutaneum* 등이 있으며(1), 저온성의 *Pseudomonas putida*에 의한

phenol 분해기작(2), *Pseudomonas* sp.에 의한 phenol을 포함한 폐수의 처리(3) 등에 관한 연구가 있다. 특히, *Pseudomonas* sp.는 meta-cleavage 경로로 phenol을 분해하고, 효모는 ortho-cleavage 경로로 방향족고리를 대사하므로 세균과 효모의 혼합배양에 의한 phenol의 효과적인 분해에 대하여 연구된 바 있다(4). 한편, *Pseudomonas putida* A2는 formaldehyde를 dismutase의 작용으로 formic acid와 methanol로 전환한 후 이들을 탄소원으로 이용하여 성장하는 것으로 알려져 있다(5). 이와 같이 phenol의 생물학적 분해에 대하여 많은 연구가 수행되었으나, 실제폐수를 대상으로 한 미생물학적 처리의 현장적용은 아직 미흡한 형편이다.

난분해성이고 저 농도로 존재하는 화합물의 생물막계를 이용한 처리에 대한 많은 연구결과가 있다(6, 7).

**Key words:** Biodegradation, phenolic wastewater, formaldehyde, ceramic carrier, mixed strains  
\*Corresponding author

특히, 방향족화합물의 분해와 관련하여 기존의 활성오니법 외에도 활성탄(2, 8), 다공성의 유리질(9) 등의 미생물 고정화 담체를 이용한 처리농도 및 처리효율의 증진에 대하여 꾸준히 연구되고 있으나, 각종 폐수에 적용할 수 있는 효율적인 담체의 개발이 필요한 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구는 방향족화합물이 포함된 폐수의 생물학적 처리기술 개발의 일환으로 phenol과 formaldehyde를 주성분으로 포함하는 산업폐수를 대상으로 방향족화합물에 대한 분해능이 우수한 혼합균주의 접종 및 세라믹담체를 미생물고정재로 사용하여 장기간 운전하면서 생물학적 처리의 가능성 및 처리효율에 대하여 조사하였다.

## 재료 및 방법

### 사용균주

전국 각지의 토양, 폐수, 하천수 등의 균원시료로부터 screening을 통해 방향족화합물이 포함된 폐수 처리에 이용할 목적으로 분리된 200여개의 균주중 benzene, toluene 및 phenol 등의 방향족화합물에 대한 분해능이 우수한 것으로 판정된 균주의 혼합체인 GE1(10)을 모체로 하였다. GE1은 *Flavobacterium* sp. BEN2, *Acinetobacter* sp. GEM63 그리고 *Acinetobacter* sp. GEM2 등을 포함하며, 이것에 formaldehyde의 자화능이 우수한 것으로 분리 선별되어 *Candida* sp.로 동정된 효모를 새로이 첨가하여 GE2로 명명하였다. GE2를 구성하는 각 균주는 최소배지에 방향족화합물을 탄소원으로 공급하면서 배양한 후 혼합하여 폐수처리용 종균으로 사용하였다.

### 폐수의 성상

원폐수는 합성수지를 생산하는 부산 D사의 폐수로서 phenol 농도는 41,000 mg/l이었다. 유입수는 원폐수를 80배, 40배 그리고 20배로 단계적으로 희석하여 phenol 농도를 약 500, 1,000 그리고 2,000 mg/l로 조절한 후 생물학적 처리에 사용하였다.

희석수는 수돗물을 받아서 2일간 포기하여 염소성분을 제거한 후 사용하였다. 영양원은  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 와  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  그리고  $\text{CaCl}_2$ 를 1:1:0.1의 비율로 조합하여 0.2 g/l씩 무기영양원으로, yeast extract를 0.2 g/l씩 유기영양원으로 유입수에 첨가하였다.

### 폐수처리공정의 설계 및 운전

폐수처리는 활성오니공정과 접촉산화식공정을 병행하여 운전할 수 있도록 설계하였다. 활성오니 반

응조는 투명 아크릴판을 이용하여, 유효용량 5l의 용기 2개를 하나의 반응조로 총 3조를 병렬로 연결하여 구성하였다(Fig. 1). 공기는 반응조의 바닥에 산기석을 설치하고 air blower에 연결하여 각 반응조별로 포기하도록 하였고, 휘발성 물질의 포집에 의한 별도 처리가 용이하도록 반응조 뚜껑을 설치하고 배가스를 수집관을 통하여 한곳으로 모을 수 있도록 하였다.

반응조내 DO 농도는 air blower를 조절하여 2~3 mg/l, 온도는 자동온도조절기를 이용하여  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  그리고 수리학적 체류시간(HRT)은 48 hrs로 유지하였다. 모든 반응조는 제지폐수 슬러지를 첨가하여 약 30일간 회분식으로 운전하여 phenol 폐수에 대한 적응기간을 갖도록 하였다. 실험구는 추가적으로 GE2를 접종하지 않은 대조구(Control), GE2를 접종한 GE2 처리구(GE2 treatment), GE2를 접종하고 세라믹담체를 첨가한 세라믹처리구(Ceramic treatment)로 구분하였다. 30일간의 적응후 연속실험에서 GE2 처리구와 세라믹처리구에는 GE2를 추가로 2%(v/v)로 초기 5일간 식중 첨가하였으며, 희석배율을 낮출 때마다 초기 2일간 GE2를 식중하였다. 세라믹처리구는 망상의 플라스틱재질로 만든 원통형 frame(Diameter: 3 cm, Length: 8 cm) 내에 세라믹담체와 입상의 스티로폼을 혼합하여 채운 후 20 g/l로 반응조내에 첨가하였다. 세라믹담체는 포기에 따라서 약간의 유동이 가능하였으며, 물리적 특성은 Table 1과 같다.

침전조에 쌓인 슬러지의 재이용에 의하여 MLSS 농도는 2,000~3,000 mg/l 수준으로 유지하였다. 이때 슬러지반송율은 25% 정도이며, SRT는 약 40일로 유지하였다.

### 시료분석

각 반응조의 유입수 및 유출수를 격일 간격으로 채취하여  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ , phenol, formaldehyde, MLSS, pH 등을 측정하고, 처리가 안정된 것으로 판단되었을 때  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ , 용존  $\text{COD}(\text{COD}_s)$ , BOD 등을 추가로 측정하였으며, 아울러 현미경 관찰을 통하여 생물상을 조사하였다.  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ , BOD, MLSS 등은 환경오염공정시험법(11)에 따라 측정하였으며,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  측정은 Standard Methods(12)에 준하였다.  $\text{COD}_s$ 는 시료를 원심분리한 후 상등액의  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 으로 나타내었다.

Phenol은 환경오염공정시험법(11)에 따라 시료에  $\text{NH}_4\text{Cl}-\text{NH}_3$  완충액을 넣어 pH 10으로 조절한 다음 4-aminoantipyrine과  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 을 넣어 생성된 적색의 antipyrine계 색소의 흡광도를 분광광도계(Shimadzu UV-160A)를 이용하여 510 nm에서 측정하였다.

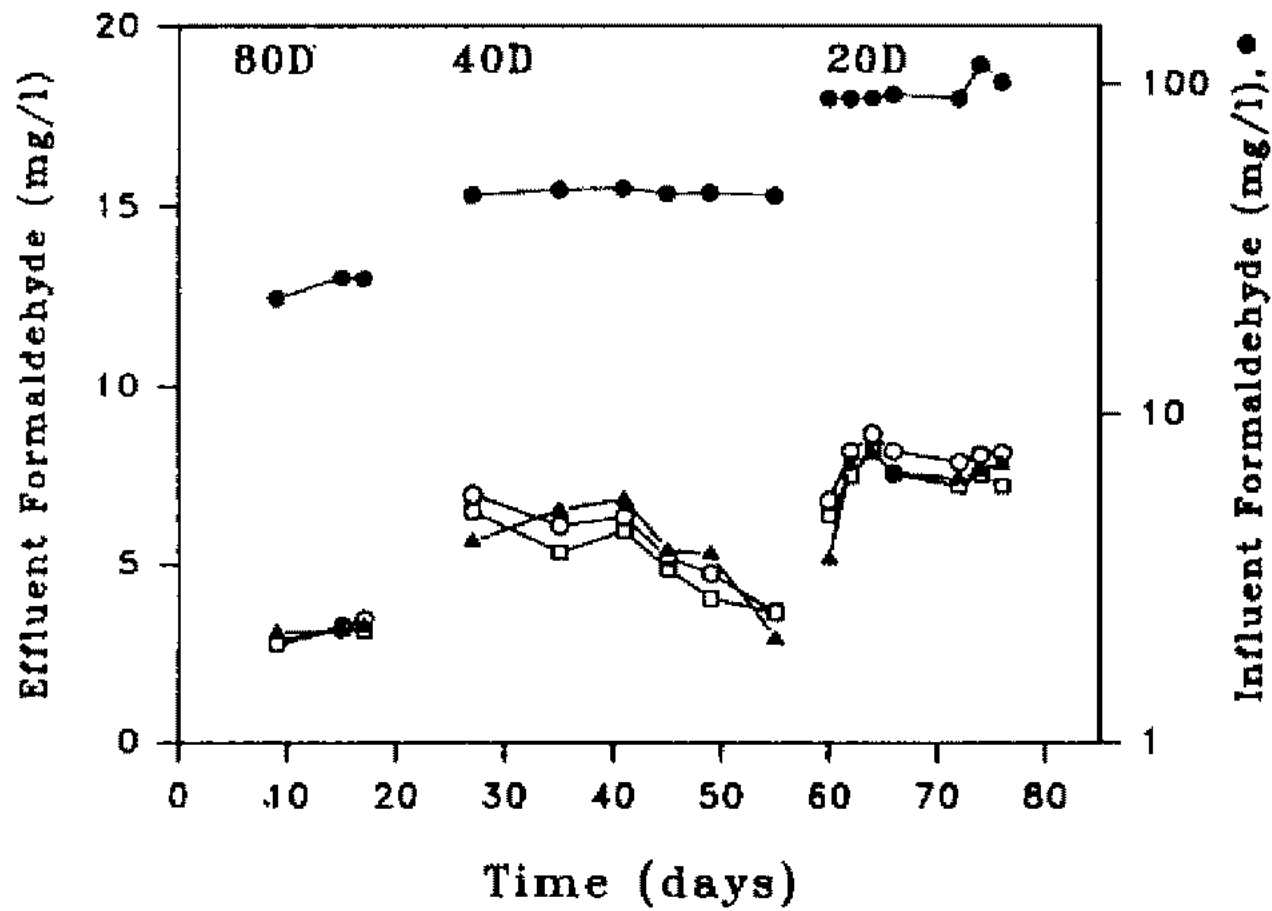


Fig. 4. Time course of formaldehyde concentrations in the influent and the effluent at the dilution times of 80, 40 and 20.

Symbols are: ●, Influent; ○, Control; □, GE2 treatment; ▲, Ceramic treatment.

Formaldehyde 농도의 변화

Phenol과 마찬가지로 원폐수에 높은 농도로 포함된 formaldehyde에 대한 희석단계별 유입수와 유출수의 농도는 Fig. 4와 같다. 원폐수에 대한 희석배율이 낮아짐에 따라 유입수의 formaldehyde 농도가 평균 25, 46, 97 mg/l로 점차 증가하였으며, 유출수의 formaldehyde 농도도 증가하여 대조구에서 2.91, 4.24, 7.50 mg/l를, 세라믹처리구에서 2.74, 3.28, 6.70 mg/l를 나타내었다. 이와 같이 모든 실험구에서 formadehyde 농도는 10 mg/l 이하로 처리되었으며, 처리가 안정화된 후 세라믹처리구의 유출수 formaldehyde 농도가 상대적으로 약간 낮았으나, 실험구간에 큰 차이는 없었다.

Formaldehyde는 화학공장에서 다양한 공정에 사용되며, 폐수로 방출되어 미생물이나 동물세포에 돌연변이를 일으키거나 DNA에 손상을 주는 환경오염 물질로 알려져 있다. 그러나, formaldehyde는 비교적 생분해가 용이한 물질로 methylotrophic 미생물에 의하여 탄소와 에너지원으로 동화될 수 있으며, methanol의 산화과정에서 핵심 중간대사물질로 알려져 있다(5). 한편, formaldehyde는 14 mg/l의 농도로 *Pseudomonas putida*의 증식을 억제하며, 생물학적 폐수처리시 최대허용농도는 약 800 mg/l로 보고된 바 있다(16). 따라서, 본 실험에서 유입수와 유출수의 formaldehyde 농도를 고려할 때 원폐수의 희석배율을 20배 이하로 낮추어도 formaldehyde에 대한 생물학적 처리가 가능할 것으로 추정된다.

기타 수질항목

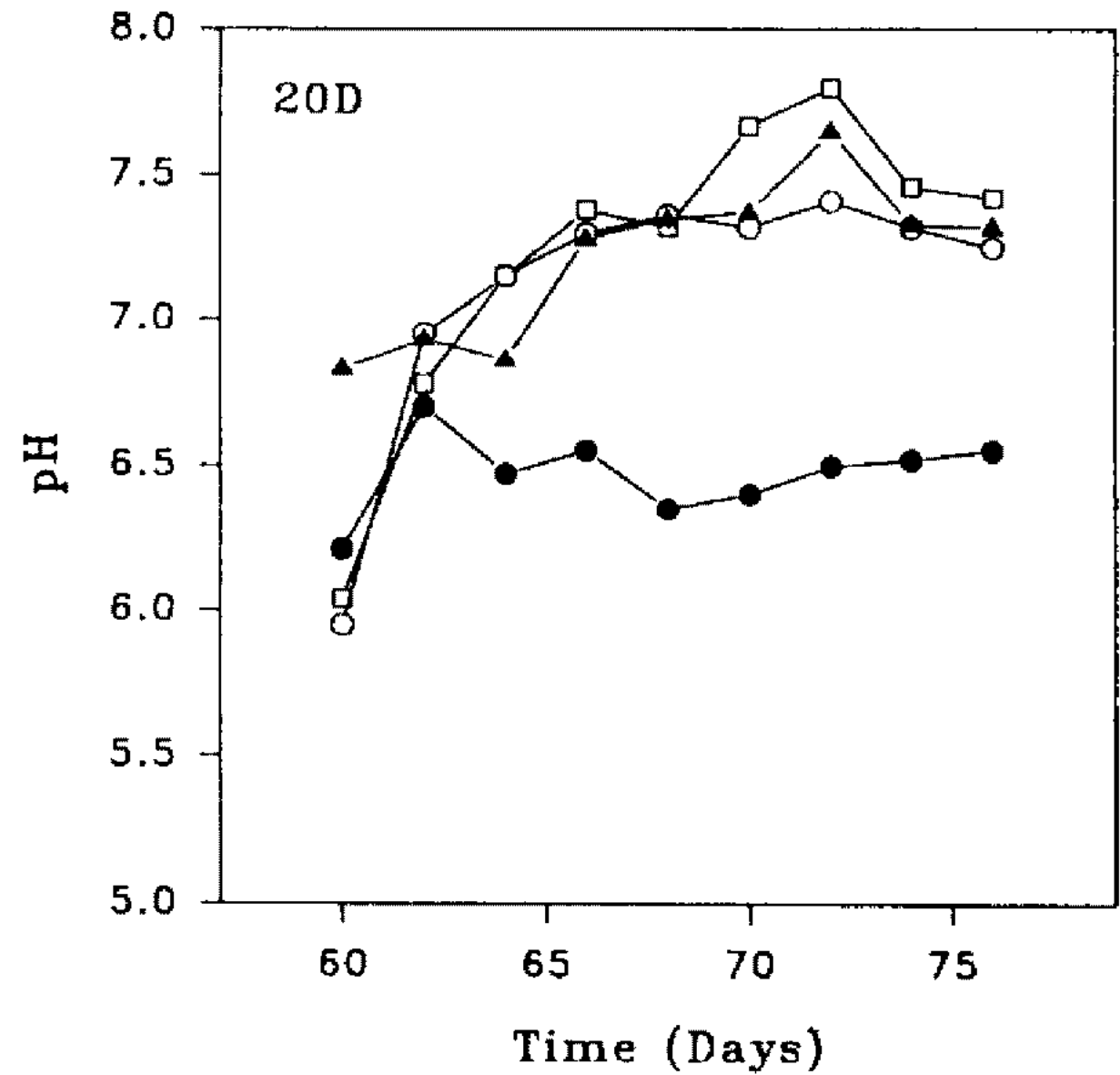


Fig. 5. Change of pH in the influent and the effluent at 20-times dilution.

Symbols are: ●, Influent; ○, Control; □, GE2 treatment; ▲, Ceramic treatment.

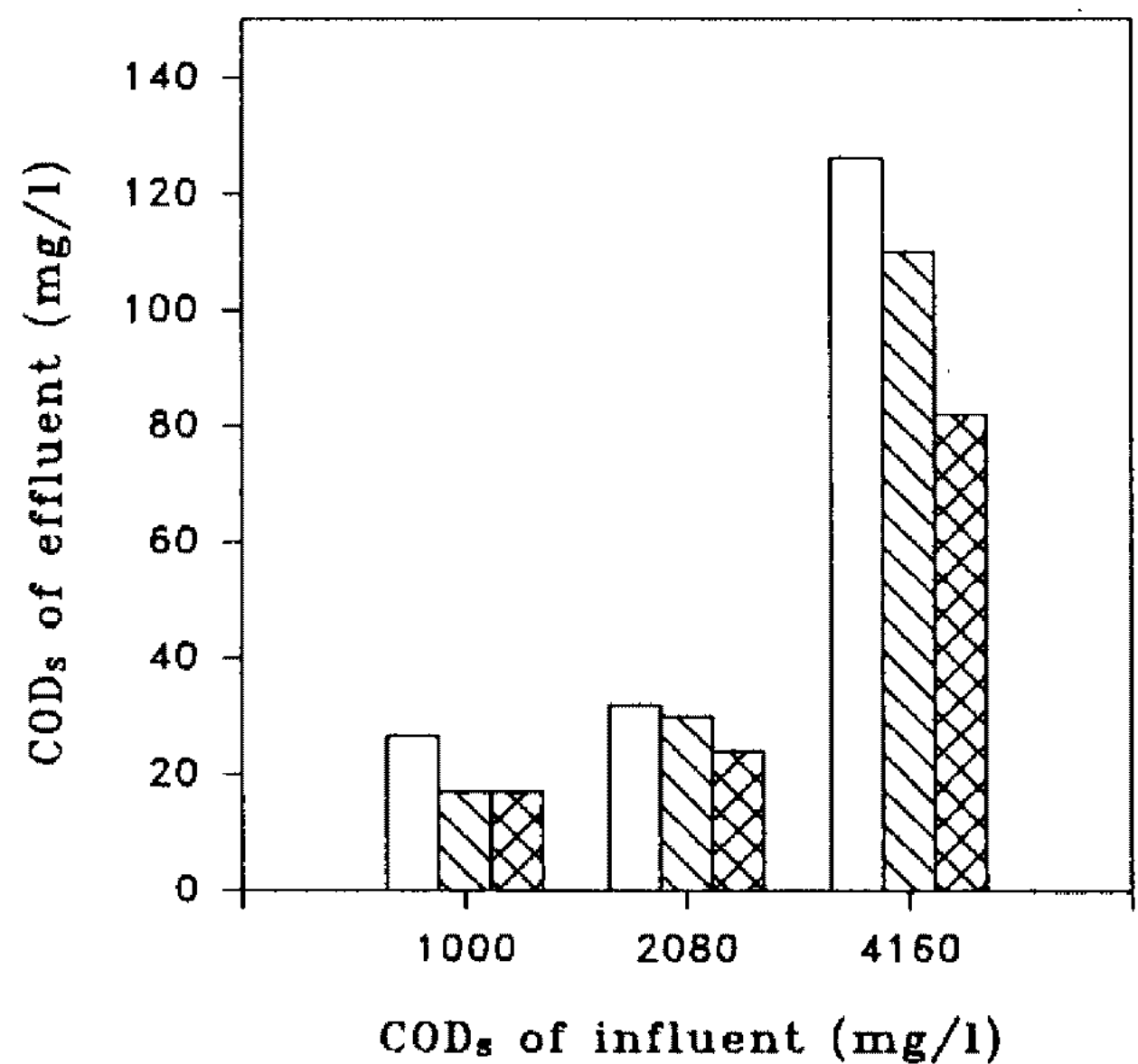


Fig. 6. Effluent COD, vs. influent COD, in Control (□), GE2 treatment (▨) and Ceramic treatment (■).

원폐수를 20배 희석한 경우 유입수와 유출수의 pH는 Fig. 5와 같다. 유입수의 pH는 평균 6.44였으며, 각 실험구의 유출수가 안정상태에 도달하였을 때 pH는 7.25~7.42 범위내의 일정한 값을 보였다. 각 실험구간에 pH는 유의한 차이를 보이지 않았다.

원폐수의 희석단계별로 폐수처리가 안정된 후에 COD<sub>s</sub>를 조사하여 Fig. 6에 나타내었다. 20배 희석시 각 실험구의 COD<sub>s</sub>는 대조구, GE2 처리구, 세라믹처리구에서 각기 126, 110, 82 mg/l로서, 동일조건에서

의  $COD_{Mn}$ 이 154, 138, 92 mg/l 임을 고려할 때, 각 실험구에서 18, 20, 11%의 감소율을 나타내었다. 즉, 세라믹처리구의 감소율이 가장 낮은 것은 미생물 군체를 포함하는 부유성 COD 물질의 함량이 적기 때문으로 사료된다. 실제로 세라믹담체의 미생물 부착 정도는 배지에 미생물을  $10^9$  CFU/ml로 접종하고 시간이 경과함에 따라 담체에 부착된 미생물의 양을 조사한 결과, 60분후 부착활성이 안정화 되었으며 세라믹담체의 미생물 부착 정도는  $5 \times 10^8$  CFU/mg으로 활성탄과 큰 차이가 없이 높았다. 그러나, 세라믹담체의 phenol에 대한 흡착력은 극히 약한 것으로 조사되었다.

### 처리구내 생물상

원생동물 및 미소 후생동물등 현미경으로 확인할 수 있는 생물은 활성슬러지의 상태 및 처리시설의 환경조건을 파악하기 위한 좋은 지표가 된다. 대조구, GE2 처리구 그리고 세라믹처리구의 활성슬러지를 현미경으로 관찰한 결과는 Table 2와 같다. 80배 희석시 각 처리구는 *Rotaria* sp., *Lecane* sp. 등 미소 후생동물과 *Vorticella* sp. 등 유병고착형 원생동물이 혼재한 다양한 생물상을 이루고, 특히 세라믹처리구에는 *Zoogloea* sp.가 다량 번식하고 있었다. 이러한 사실로부터 80배 희석시는 반응조내 미소 생물상에 큰 변화가 없는 것으로 판단된다.

40배 희석시 세라믹처리구를 제외하고 미소 후생동물이 거의 관찰되지 않았는데, 이것은 약 1,000 mg/l의 유입수 phenol 농도에서 독성물질에 민감한 미소 후생동물의 생육저해 때문으로 추정되나, *Epistylis* sp., *Opercularia* sp. 등 군체를 형성하는 유병고착형 생물들이 주 우점종으로 관찰되어 각 처리구의 슬러지 활성은 여전히 정상적임을 시사하고 있다.

**Table 2. Dominant genus of Protozoa and Metazoa found in each experimental group**

Dilution times	Control	GE2 treatment	Ceramic treatment
80	<i>Vorticella</i>	<i>Rotaria</i>	<i>Rotaria</i>
	<i>Lecane</i>	<i>Lecane</i>	<i>Vorticella</i>
	<i>Aspidisca</i>	<i>Vorticella</i>	
40	<i>Opercularia</i>	<i>Epistylis</i>	<i>Epistylis</i>
	<i>Vorticella</i>	<i>Vorticella</i>	<i>Vorticella</i>
	<i>Tokophrya</i>	<i>Peranema</i>	<i>Rotaria</i>
20	<i>Colpidium</i>	<i>Vorticella</i>	<i>Vorticella</i>
		<i>Colpidium</i>	

그러나, 20배 희석시 대조구에서 type 021N과 같은 사상세균이 다량 발생하였고, 고착성 생물은 거의 관찰되지 않았으며, *Colpidium* sp.와 같은 부유성 생물이 주 우점종으로 관찰되었다. GE2 처리구와 세라믹처리구는 *Vorticella* sp.와 같은 생물이 여전히 우점종으로 관찰됨으로서 고부하의 유입수에 적응된 GE2 균주의 신속한 phenol 자화능에 의하여 일부 원생동물의 충격부하를 완충시킬 수 있는 것으로 사료된다.

### COD, phenol 및 formaldehyde 제거효율

원폐수를 희석처리하여 정상상태에 도달한 후 각 수질항목의 평균값 및 제거효율은 Table 3에 종합하였다. 유입수의 pH가 6.55~7.08인데 비하여 유출수의 pH는 7.25~7.58로 미생물의 활동에 의하여 약 알칼리성으로 변화되었음을 볼 수 있다.

$COD_{Mn}$  제거효율은 세라믹처리구의 모든 희석단계에서 98% 이상의 높은 값을 보였다. GE2 균주의 첨가와 함께 세라믹담체의 적용에 의하여 phenol에 대한 단일 미생물의 분해한계로 알려진 약 1,000 mg/l를 상회하는 1,887 mg/l에서도 99.7%의 높은 처리효율을 보였으며, 이때 유출수의 phenol 농도는 5.60 mg/l에 그쳤다.

단계별 희석처리 중에서 40배 희석의 경우 유입수의  $COD_{Mn}$ 은 2,060 mg/l이지만 세라믹처리구의  $COD_{Mn}$  제거효율이 98.4%에 이르며, 유출수의  $COD_{Mn}$ 이 32 mg/l로 방류수 수질기준인 50 mg/l 이하로 실제 폐수배출현장에서 적용하기에 충분한 것으로 판단된다. 이때 유출수의 phenol 농도는 1.02 mg/l로 방류수 수질기준인 5 mg/l에 적합하였다. 또한, 유출수의 pH는 7.33이고 formaldehyde의 농도는 3.28 mg/l로 수계로 직접 방류하더라도 주변환경에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.

다만, phenol과 formaldehyde와 같은 휘발성 물질이 포함된 폐수처리시 생분해나 담체에 의한 흡착외에도 폭기에 의하여 휘발되는 것도 처리효율에 포함되었음을 고려하여야 한다. Phenol의 생분해에 관한 연구에서 미생물 무처리구에서 7.5 ml/l/min의 폭기에 의하여 배양 24시간에 phenol은 37%가 휘발되었다 (10). 따라서, 휘발성 물질의 폐수처리에는 배가스의 효과적 처리에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

산업폐수와 같은 여러 가지 화합물이 혼합되어 있는 경우 미생물의 다양한 생리적 특성을 고루 구비할 수 있는 혼합배양에 의한 난분해성 화합물의 분해나 무독화에 효과가 있다는 보고(17, 18)와 같이 혼합균주 GE2는 고농도의 phenol과 formaldehyde를 포함한



**Table 3. Change of pH, COD<sub>Mn</sub>, phenol and formaldehyde concentration in the influent and the effluent. The removal efficiencies were in parentheses.**

Item	Dilution times	Influent	Effluent		
			Control	GE2 treatment	Ceramic treatment
pH	80	7.08	7.52	7.53	7.56
	40	6.87	7.41	7.58	7.33
	20	6.55	7.25	7.42	7.32
COD <sub>Mn</sub> <sup>1)</sup> (mg/l)	80	1,140	30 (94.6)	35 (96.9)	22 (98.1)
	40	2,060	62 (97.0)	43 (98.0)	32 (98.4)
	20	4,800	179 (96.3)	128 (97.3)	94 (98.0)
Phenol <sup>1)</sup> (mg/l)	80	510	0.61 (99.9)	0.71 (99.9)	0.52 (99.9)
	40	935	1.36 (99.9)	1.69 (99.8)	1.02 (99.9)
	20	1,887	10.71 (99.4)	7.93 (99.6)	5.60 (99.7)
Form- aldehyde (mg/l)	80	26.0	2.91 (88.8)	2.87 (89.3)	2.74 (89.5)
	40	47.1	4.24 (91.0)	3.40 (82.8)	3.28 (93.0)
	20	114.5	7.50 (93.4)	6.50 (94.3)	6.70 (94.1)

<sup>1)</sup>mean value of the last 2 measurements

산업폐수의 생물학적 처리에 효과적으로 사용될 수 있음을 보였다. 더욱이 미생물고정재로서 세라믹담체의 사용에 의하여 첨가된 균주의 효과가 증가함을 볼 수 있다. 따라서, 합성수지 생산시 배출되는 phenol계 폐수를 적절히 희석한 후 균주의 혼합체인 GE2 및 세라믹담체를 사용한 공정을 적용하여 처리한다면 방류수 수질기준 이내로 생물학적 처리가 가능한 것으로 판단된다.

## 요 약

고농도의 phenol과 formaldehyde를 주성분으로 하는 phenol계 산업폐수를 단계적으로 희석하면서, 혼합균주인 GE2와 세라믹담체를 적용하여 80일간에 걸쳐 생물학적으로 처리하였다. 실험구는 제지폐수 슬러지로 30일간 회분식 운전에 의해 적응시킨 대조구, 이것에 GE2를 첨가한 GE2 처리구 그리고 세라믹담체를 적용한 세라믹처리구로 구분하였다. 원폐수의 80배 희석으로 유입수의 COD<sub>Mn</sub>이 1,140 mg/l 인 경우 각 실험구의 유출수 COD<sub>Mn</sub>은 22~35 mg/l로 큰 차이가 없었으나, 20배 희석의 경우 유입수의 COD<sub>Mn</sub>이 4,800 mg/l일 때, 대조구, GE2 처리구 그리고 세라믹처리구의 유출수 COD<sub>Mn</sub>은 179, 128 그리고 94mg/l로서 세라믹처리구의 처리효율이 98.0%로 가장 높았다. 이때 유출수의 phenol 농도는 각기 10.71, 7.93 그리고 5.60 mg/l으로 GE2 및 세라믹담

체의 적용에 의하여 처리효율이 향상되었다. 한편, 희석배율이 낮아짐에 따라 COD<sub>Mn</sub>과 phenol 처리효율에는 큰 변화가 없으나, 유출수의 COD<sub>Mn</sub>과 phenol 농도가 높아졌다. 따라서, 원폐수를 40배 희석하여 GE2와 세라믹담체를 첨가하여 처리할 경우 유출수의 COD<sub>Mn</sub>과 phenol 농도가 32와 1.02 mg/l로 수계의 방류수 수질기준에 충분히 적합한 생물학적 처리로 사료된다.

## 감사의 말

본 연구는 환경부가 주관한 G7 환경공학기술개발사업의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

## 참고문헌

- Hinteregger, C., R. Leitner, M. Loidl, A. Ferschl, and F. Streichsbier. 1992. Degradation of phenol and phenolic compounds by *Pseudomonas putida* EKII. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 37: 252-259.
- Kotturi, G., C.W. Robinson, and W.E. Inniss. 1991. Phenol degradation by a psychrotrophic strain of *Pseudomonas putida*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 34: 539-543.
- 박춘호, 김용기, 오평수. 1991. 방향족화합물이 함유된 폐수의 생물학적 처리. *산업미생물학회지* 19: 631-636.
- Mörsen, A. and H.J. Rehm. 1987. Degradation

- of phenol by a mixed culture of *Pseudomonas putida* and *Cryptococcus elinovii* adsorbed on activated carbon. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **26**: 283-288.
5. Adroer, N., C. Casas, C. de Mas, and C. Sola. 1990. Mechanism of formaldehyde biodegradation by *Pseudomonas putida*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **33**: 217-220.
  6. Arcangeli, J.P. and E. Arvin. 1992. Toluene biodegradation and biofilm growth in an aerobic fixed-film reactor. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **37**: 510-517.
  7. Van Loosdrecht, M.C.M. and S.J. Heijnen. 1993. Biofilm bioreactors for wastewater treatment. *Trends Biotechnol.* **11**: 117-121.
  8. Ehrhardt, H.M. and H.-J. Rehm. 1989. Semicontinuous and continuous degradation of phenol by *Pseudomonas putida* P8 adsorbed on activated carbon. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **30**: 312-317.
  9. Mörsen, A. and H.-J. Rehm. 1990. Degradation of phenol by a defined mixed culture immobilized by adsorption on activated carbon and sintered glass. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **33**: 206-212.
  10. 오희목, 김성빈, 이창호, 서현효, 이문호, 고영희, 윤병대. 1994. 반연속배양의 혼합균주에 의한 Benzene, Toluene 및 Phenol 혼합물 분해. *산업미생물학회지* **22**: 415-422.
  11. 동화기술편집위원회. 1987. 환경오염공정시험법. 동화기술.
  12. APHA, AWWA, and WEF. 1992. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th ed. APHA, Washington.
  13. Matsuda, Y., H. Moriya, C. Moriwaki, Y. Fujimoto, and M. Matsuda. 1976. Fluorometric method for assay of kallikrein-like arginine esterases. *J. Biochem.* **79**: 1197-1200.
  14. Ambujom, S. and V.B. Manilal. 1995. Phenol degradation by a stable aerobic consortium and its bacterial isolates. *Biotech. Letters* **17**: 443-448.
  15. Zache, G. and H.-J. Rehm. 1989. Degradation of phenol by a coimmobilized entrapped mixed culture. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **30**: 426-432.
  16. 국립환경연구원. 1990. 폐수의 공동처리시 효율화기법 개발에 관한 연구. 과학기술처.
  17. Bitzi, U., T. Egli, and G. Hamer. 1991. The biodegradation of mixtures of organic solvents by mixed and monocultures of bacteria. *Biotechnol. Bioeng.* **37**: 1037-1042.
  18. Wiesel, I., S.M. Wübker, and H.-J. Rehm. 1993. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by an immobilized mixed bacterial culture. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **39**: 110-116.

(Received 6 September 1995)