

반연속배양의 혼합균주에 의한 Benzene, Toluene 및 Phenol 혼합물 분해

오희목* · 김성빈 · 이창호 · 서현효 · 이문호¹ · 고영희 · 윤병대
한국과학기술연구원 유전공학연구소, ¹(주) 화랑환경

Biodegradation of Benzene, Toluene, and Phenol by a Mixed Culture in Semicontinuous Culture

Oh, Hee-Mock*, Seong-Bin Kim, Chang-Ho Lee, Hyun-Hyo Suh, Moon-Ho Lee¹, Yung-Hee Kho and Byung-Dae Yoon

Genetic Engineering Research Institute, KIST, P.O. Box 115, Yusong, Taejon 305-600, Korea

¹Hwarang Environment Co., Ltd., Seoksu-dong, Anyang, Kyunggi-do 430-040, Korea

Abstract— The biodegradation of aromatic compounds by a mixed culture GE1 was investigated in an artificial wastewater containing 250 mg/l of benzene, toluene, and phenol in semicontinuous culture. In the control group (no strains) with an aeration rate of 75 ml/l/min, 37% of phenol and 83% of benzene were volatilized during early 24 hrs and toluene was disappeared from the medium within 12 hrs. The biodegradation of benzene and toluene was effective in SB (strains+biofilm) treatment, while phenol was degraded more quickly in SG (strains+glucose) treatment including glucose as an additional carbon source. Aromatic compounds added at a concentration of 250 mg/l or 1000 mg/l were completely removed by SG treatment after 16 hrs or 32 hrs, respectively. The removal rate of COD was high as much as 80 mg/l/h in SG treatment during early period, but COD revealed a stable value of 116~140 mg/l after 12 hrs caused by increased biomass. Therefore, it is concluded that the mixed culture GE1 could be used for the wastewater treatment including aromatic compounds such as benzene, toluene, and phenol.

석유관련산업의 발달에 따라 산업폐수중 탄화수소의 발생량은 증가하고 있으며, benzene, phenol, toluene 등의 방향족 탄화수소는 인체 및 자연 생태계에 미치는 독성으로 인하여 주요 환경오염물질로 주목되고 있다(1). 현재 폐수처리에 많이 이용되는 활성오니법은 흡착, 폭기, 생분해, 화학적 분해의 다양한 경로를 통하여 이루어진다. 이때 benzene, toluene, xylene 등의 휘발성이 강한 방향족화합물은 폭기과정에서 상당량이 대기중으로 이동하여 대기오염문제를 일으키게 된다(2,3).

방향족화합물은 그 독성 및 난분해성으로 인하여 폐수중에 이들 화합물의 공존이나 다른 유기화합물의 존재에 의하여 생분해에 영향을 받게 된다. Arvin

등(4)은 특정 방향족화합물의 존재하에서 benzene의 생분해율이 감소하며, toluene과 o-xylene 중 한가지를 첨가함에 따라 benzene의 생분해능이 증가함을 보고하였다. 한편, 방향족화합물 이외의 탄소화합물이 포함되어 있는 경우에 유일한 탄소원으로 방향족화합물만을 포함한 폐수보다 생분해율이 증가하는 것으로 보고되었다(5,6).

난분해성이고 저농도로 존재하는 화합물의 생물막계를 이용한 처리에 관하여 활발히 연구되고 있다(7). 방향족화합물의 분해와 관련하여 기존의 활성오니법 이외에도 활성탄(8,9), 다공성의 유리질(10), 생물막 반응기(11) 등의 미생물 고정화 담체를 이용한 처리가 연구되고 있으나, 각종 폐수에 적용할 수 있는 효율적인 담체의 개발이 필요하다고 본다. 또한, 방향족 화합물의 분해와 관련하여 실험실수준의 분해기작에 관한 연구는 많으나 실제 현장적용을 위한 연구는

Key words: Biodegradation, benzene, toluene, phenol, air stripping, wastewater
*Corresponding author

미흡한 편이다.

따라서, 본 연구는 휘발성이 강한 방향족화합물이 포함된 폐수의 생물학적 처리기술을 개발하기 위한 목적의 일환으로 bench-scale의 반연속배양을 통하여 방향족화합물의 분해능이 우수한 균주의 혼합배양에 의한 benzene, toluene 및 phenol이 혼합된 합성폐수의 처리능을 조사하고, 처리효율의 증진을 위해 미생물을 고정화할 수 있는 섬모상 담체를 이용하거나, 탄수화물로서 glucose의 첨가 등에 의한 대상 화합물의 처리효율을 비교·분석하였다.

재료 및 방법

사용균주

균주는 전국 각지의 토양, 폐수, 하천수 등의 균원 시료로부터 screening을 통해 선발된 미생물중 benzene, toluene 및 phenol에 대하여 성장과 분해능이 우수한 것으로 판정된 4개씩의 균주에 대하여 각기 방향족화합물을 공급하면서 배양한 후 혼합하여 사용하였다. 이와 같은 혼합균주는 GE1으로 명명하였다.

합성폐수

합성폐수는 지하수에 고 등(12)이 사용한 최소배지의 성분을 1/2 농도로 녹이고 benzene, toluene 및 phenol을 500 mg/l의 농도로 첨가하였으며, 고농도 처리시는 2000 mg/l로 조절하였다. 즉, 최소배지는 지하수 1l에 NH_4Cl 0.5 g, K_2HPO_4 2.18 g, NaH_2PO_4 1.95 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.24 g, CaCl_2 0.015 g, FeSO_4 0.005 g, MnCl_2 0.005 g, CoCl_2 0.0005 g, 그리고 Na_2MoO_4 0.0005 g을 포함하였다. 유기물질을 포함한 폐수는 합성폐수에 glucose를 0.5 g/l 첨가하여 조제하였다.

반연속배양

반응기는 투명 아크릴판을 이용하여 주문제작하였고, 공기는 air pump를 이용하여 75 ml//min로 공급하였고, 수온 유지의 목적으로 반응기 외부에 설치한 항온조는 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였다.

반응기에 포함된 반응액은 2l이며, 희석율은 0.5/day로 매일 동시간에 일정량의 반응액을 제거하고 동량의 합성폐수를 첨가하였다. 반응기는 미생물을 접종하지 않은 대조구, 균주를 접종한 S(strains) 처리구와 이에 섬모상 고정화 담체를 설치한 SB(strains + biofilm) 처리구, 균주를 접종하고 glucose를 첨가한 SG(strains + glucose) 처리구와 이에 섬모상

고정화 담체를 설치한 SGB(strains + glucose + biofilm) 처리구 등 총 5개이다. 섬모상 고정화 담체는 polypropylene과 polyethylene 재질의 섬모(cilia) 모양의 수 많은 섬유로 구성되었으며, 반응기내에 수직으로 설치된 12×12 cm 크기의 아크릴판 양면에 부착되어 배양액 중에 잠기도록 설치하였다. GE1의 접종량은 2%(v/v)로 하였다.

반응기로부터 채취된 반응액의 흡광도를 매일 측정하였으며, 주기적으로 COD를 측정하여 미생물군집이 안정되었다고 판단되었을 때 합성폐수를 첨가하고, 잘 섞어준 후 30분이 경과하여 첫회의 시료를 채취하고, 매 4시간 또는 8시간 간격으로 반응기의 중간 수위로부터 시료를 채취하여 방향족화합물의 농도, COD, 흡광도, pH 등을 처리구별로 조사·분석하였다.

균체증식 및 COD 측정

균체증식은 분광광도계(Shimazu UV-160A)로 660 nm에서 흡광도를 측정하여 나타내었다. COD는 환경오염공정시험법(13)에 따라 0.025 N KMnO_4 일정량을 넣고 30분간 가열반응시킨 다음 소비된 KMnO_4 양으로부터 COD를 측정하였다.

방향족화합물 분석

시료 0.5 ml을 1-ml syringe로 취하여 membrane filter(Millipore; pore size, 0.45 μm)로 여과한 후 완전히 밀봉될 수 있는 1.0 ml 용량의 Effendorf tube에 담아 분석시 사용하였다. Benzene, toluene 및 phenol은 capillary column과 불꽃이온화검출기를 장착한 gas chromatograph(Varian 3300)로 분석하였다. 분석시 column, injector, detector의 온도는 각기 90°C , 200°C , 250°C 로 유지하였고, 운반기체는 질소를 이용하였다. 이때 benzene과 toluene의 검출한계는 0.2 mg/l이고, phenol은 2 mg/l이었다.

결 과

사용균주

방향족화합물이 포함된 폐수처리에 이용할 목적으로 분리된 200여개의 균주중 benzene, toluene, 또는 phenol 분해능이 우수한 것으로 최종 선별된 4개씩의 균주를 24~36시간 배양한 후 혼합하여 사용하였다. 각 균주의 특성은 Table 1에서 보는 바와 같다. Benzene 분해균주인 B3는 3000 mg/l의 농도에서도 왕성한 성장을 보여 배양 24시간에 흡광도가 1.148에 도달하였다. Toluene 분해균주인 T21의 최적 pH는

Table 1. Characteristics of each strain comprised in a mixed culture GE1

Strain ¹⁾	Compound	Optimum temp. (°C) ²⁾	Maximum conc. (mg/l) ³⁾	Optimum pH ⁴⁾	Cell growth (A ₆₆₀)	
					24 hrs	48 hrs
B2	Benzene	30	2000	7.0	1.296	1.342
B3	Benzene	30	3000	8.0	1.148	1.209
B13	Benzene	25	2000	8.0	1.231	1.231
B14	Benzene	25	1000	8.0	1.239	1.215
T3	Toluene	25	1000	6.5	1.019	1.165
T11	Toluene	30	1000	7.0	0.756	1.140
T21	Toluene	30	1000	6.0	1.192	1.334
T23	Toluene	30	1000	6.5	0.955	1.213
P2	Phenol	30	1000	7.0	0.902	1.404
P3	Phenol	25	1000	7.5	0.069	1.428
P4	Phenol	30	1000	6.5	1.418	1.412
A112	Phenol	30	1000	7.0	1.442	1.461

¹⁾B2, T3, and P2 were identified as *Flavobacterium* sp. BEN2, *Acinetobacter* sp. TOL3, and *Acinetobacter* sp. PHE2, respectively. ²⁾Examined temperatures were 10, 20, 25, 30, and 37°C. ³⁾Examined concentrations were 500, 1000, 2000, 3000, and 4000 mg/l. ⁴⁾Examined pHs were 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0, and 8.5.

6.0으로 조사된 균주중 가장 낮았으며, 1000 mg/l의 농도에서 배양 24시간에 흡광도가 1.192에 달하였다. 조사된 phenol 분해균주는 모두 1000 mg/l의 농도에서 최대 생장을 보였으며, P3 균주는 최적 온도가 25°C 이고, 생장의 유도기가 길어 배양 24시간에 흡광도가 0.069에 그쳤으나 배양 48시간에는 1.428의 높은 값을 보였다.

시간에 따른 분해능

반연속배양을 시작하여 10일이 경과하면서 미생물 군집이 안정된 것으로 판단되었으며, 배양 후 12일에 합성폐수를 교환한 다음 시간에 따른 benzene, toluene 및 phenol의 반응기내 농도변화는 Fig. 1과 같다. Benzene은 첨가 후 0.5시간에 대조구와 모든 처리구에서 반응액중에 약 14 mg/l의 농도로 존재하고, 배양 8시간에 SB 처리구와 SG 처리구에서는 검출되지 않았다. Toluene도 배양 4시간에 대조구에서는 2.8 mg/l 검출되었고, 처리구에서는 0.5~0.9 mg/l 검출되었다. 즉, benzene과 toluene의 비중은 각기 0.879, 0.866으로 물보다 낮으며, 물에 대한 용해도가 극히 낮아 배양액 중에 용해되어 균등히 분포하기 보다는 수표면에 부유하는 양이 많아, 결과적으로 채취된 시료중에 포함된 농도가 매우 낮은 것으로 판단되었다. 특히, toluene은 배양 30분에 처리구간의 검출농도에서 다소 차이를 보였다. 한편, 배양시간에 따른 phenol의 농도변화에서 배양초기에 대조구의 phenol 함량이 높은 것은 반연속배양의 결과로 분해

또는 휘발되지 않고 잔류하는 것에 의한다. 미생물을 접종하지 않은 대조구에서 배양 24시간에 benzene은 초기 검출농도의 83%, phenol은 37%가 휘발하고, toluene은 배양 12시간에 모두 휘발되었다. S와 SG 처리구의 phenol 농도는 배양 0.5시간에 229, 194 mg/l으로부터 배양 8시간에 약 30 mg/l로 감소되어 phenol 제거율이 26, 22 mg/l/h에 이르고, 배양 16시간이나 20시간에 모두 제거되었다.

합성폐수를 교환한 후 시간에 따른 대조구와 처리구의 COD 변화는 Fig. 2와 같다. 배양 30분에 대조구의 COD는 일부 잔류하는 phenol로 인하여 처리구의 COD보다 높았으며, SG와 SGB 처리구의 COD는 glucose의 첨가로 인하여 S와 SB 처리구의 COD보다 높았다. 대조구의 COD는 900 mg/l에서 820 mg/l로 일부 감소하는 경향을 보였다. SG 처리구는 초기의 COD 제거율이 80 mg/l/h로 직선적 감소를 보여 배양 8시간의 COD는 240 mg/l이었으며, 점차 COD 제거율이 둔화되어 배양 12시간 이후에는 116~140 mg/l의 일정한 값을 나타내었다. SGB 처리구의 초기 COD 제거율은 48 mg/l/h로 배양 16시간까지 지속되었으며, 배양 24시간의 COD는 40 mg/l로 최저값을 나타내었다.

배양시간에 따른 처리구의 흡광도 및 pH 변화는 Fig. 3과 같다. SG 처리구의 흡광도 증가가 뚜렷하였으며, S 처리구도 배양 12시간에 흡광도가 일부 증가하였다. 반면에 섬모상 고정화 담체를 설치한 SB와 SGB 처리구의 흡광도 변화는 극히 미약하였다. pH는

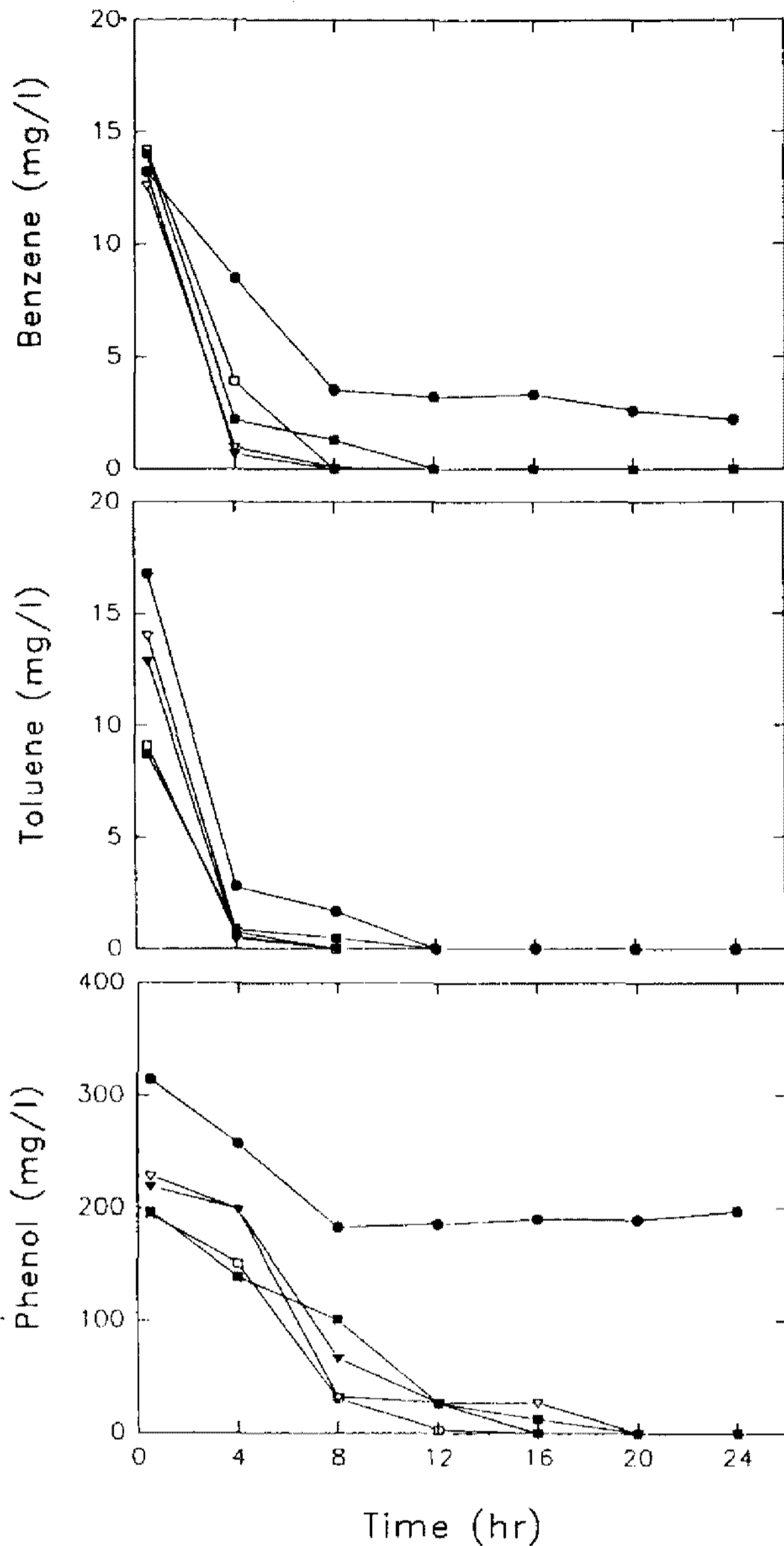


Fig. 1. Benzene, toluene, and phenol concentration as a function of time after medium exchange in semicontinuous culture.

Artificial wastewater including 500 mg/l of benzene, toluene, and phenol was exchanged with a dilution rate of 0.5/day. Each point is a mean value of duplicate. ●: control (no strains) group, ▽: S (strains) treatment, ▼: SB (strains + biofilm) treatment, □: SG (strains + glucose) treatment, ■: SGB (strains + glucose + biofilm) treatment

흡광도 증가에 따라 다소 감소하였으며, 시간이 경과함에 따라 원래의 수준으로 회복되는 경향을 보였다.

고농도의 방향족화합물 분해

첨가된 방향족화합물의 농도가 급격히 증가되었을 때 각 반응기에 형성된 미생물 군집의 처리능을 조

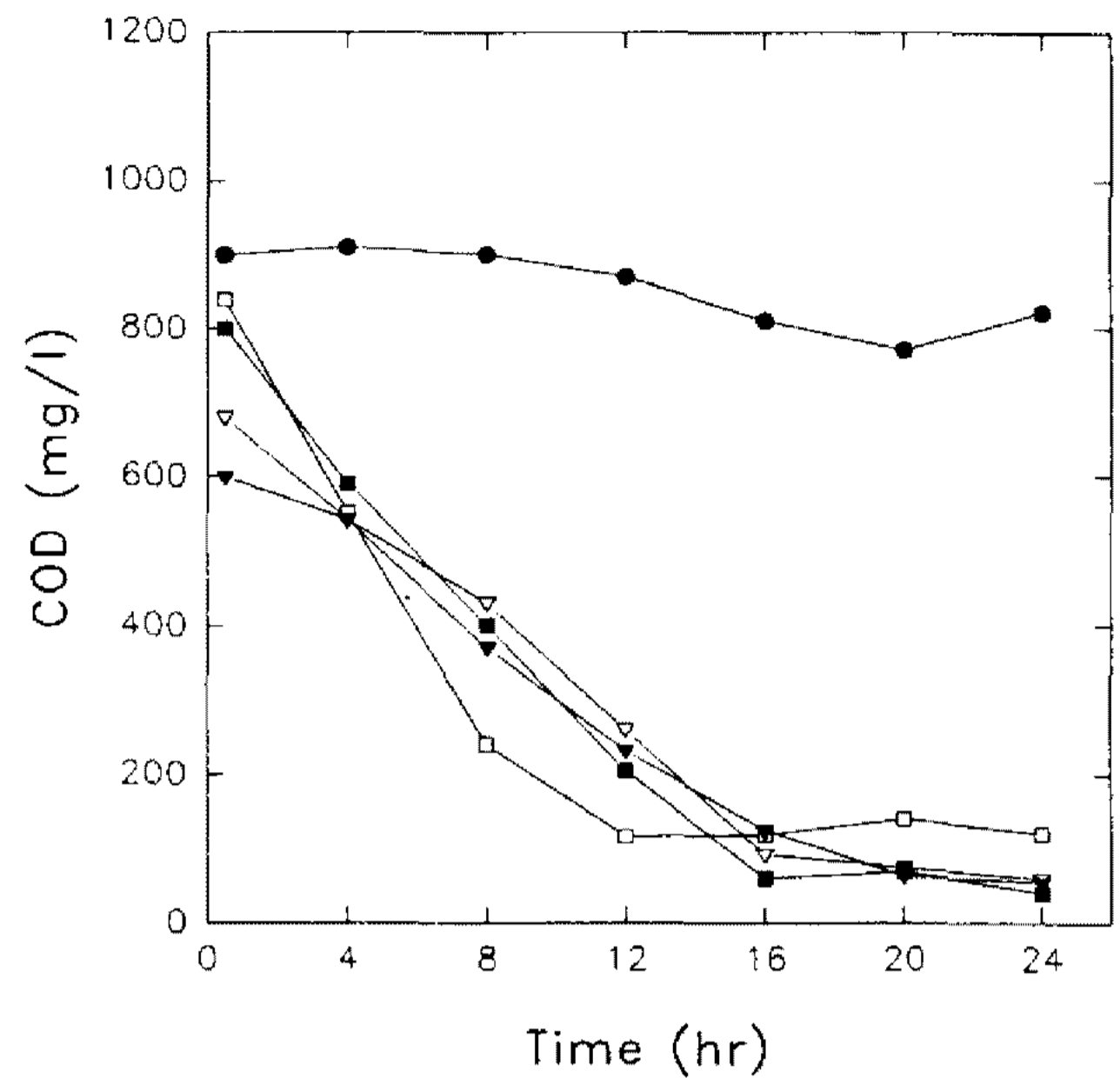


Fig. 2. COD change as a function of time after medium exchange.

Artificial wastewater including 500 mg/l of benzene, toluene, and phenol was exchanged with a dilution rate of 0.5/day. Each point is a mean value of duplicate. ●: control group, ▽: S treatment, ▼: SB treatment, □: SG treatment, ■: SGB treatment

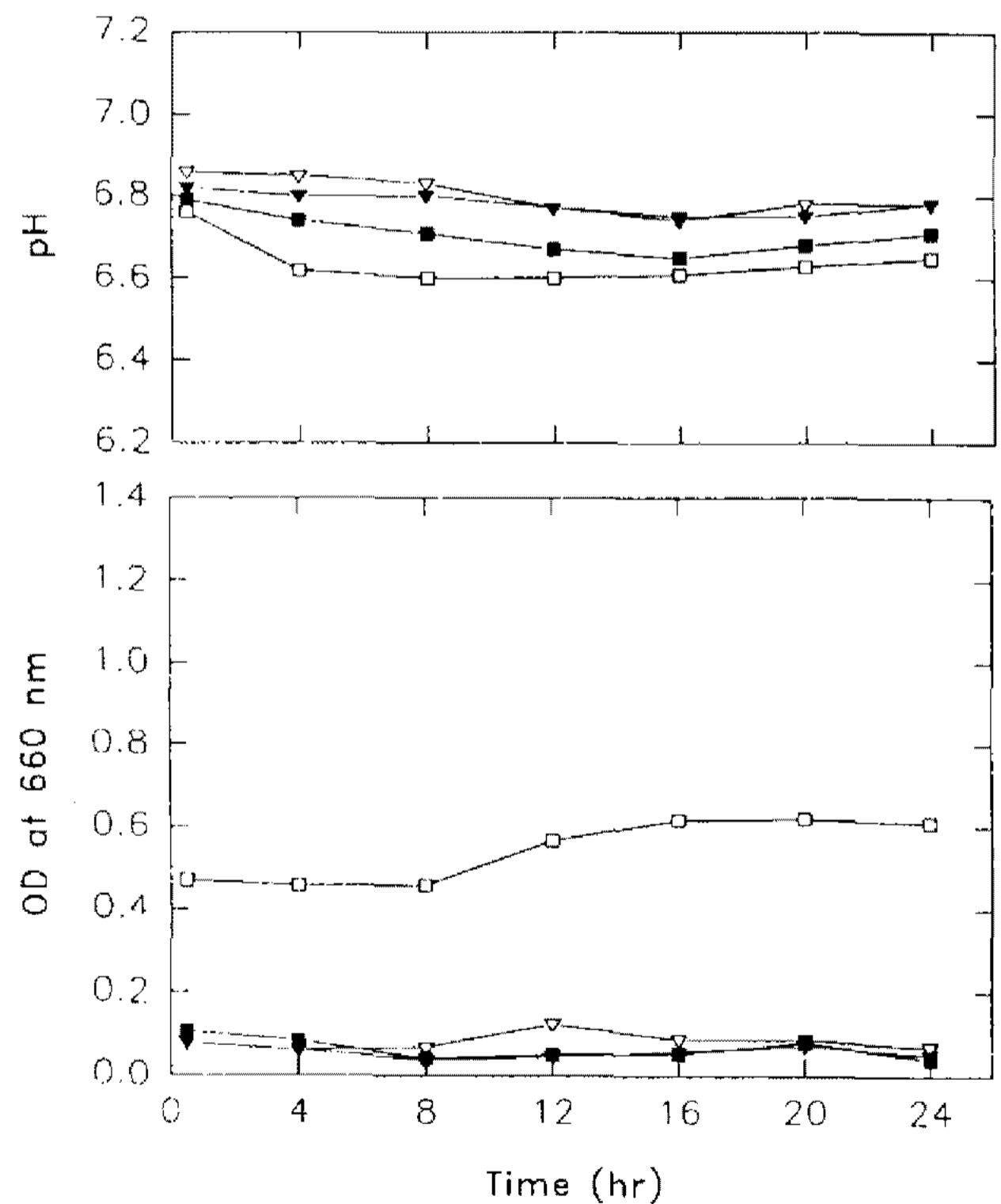


Fig. 3. pH and cell density changes as a function of time after medium exchange.

Artificial wastewater including 500 mg/l of benzene, toluene, and phenol was exchanged with a dilution rate of 0.5/day.

▽: S treatment, ▼: SB treatment, □: SG treatment, ■: SGB treatment

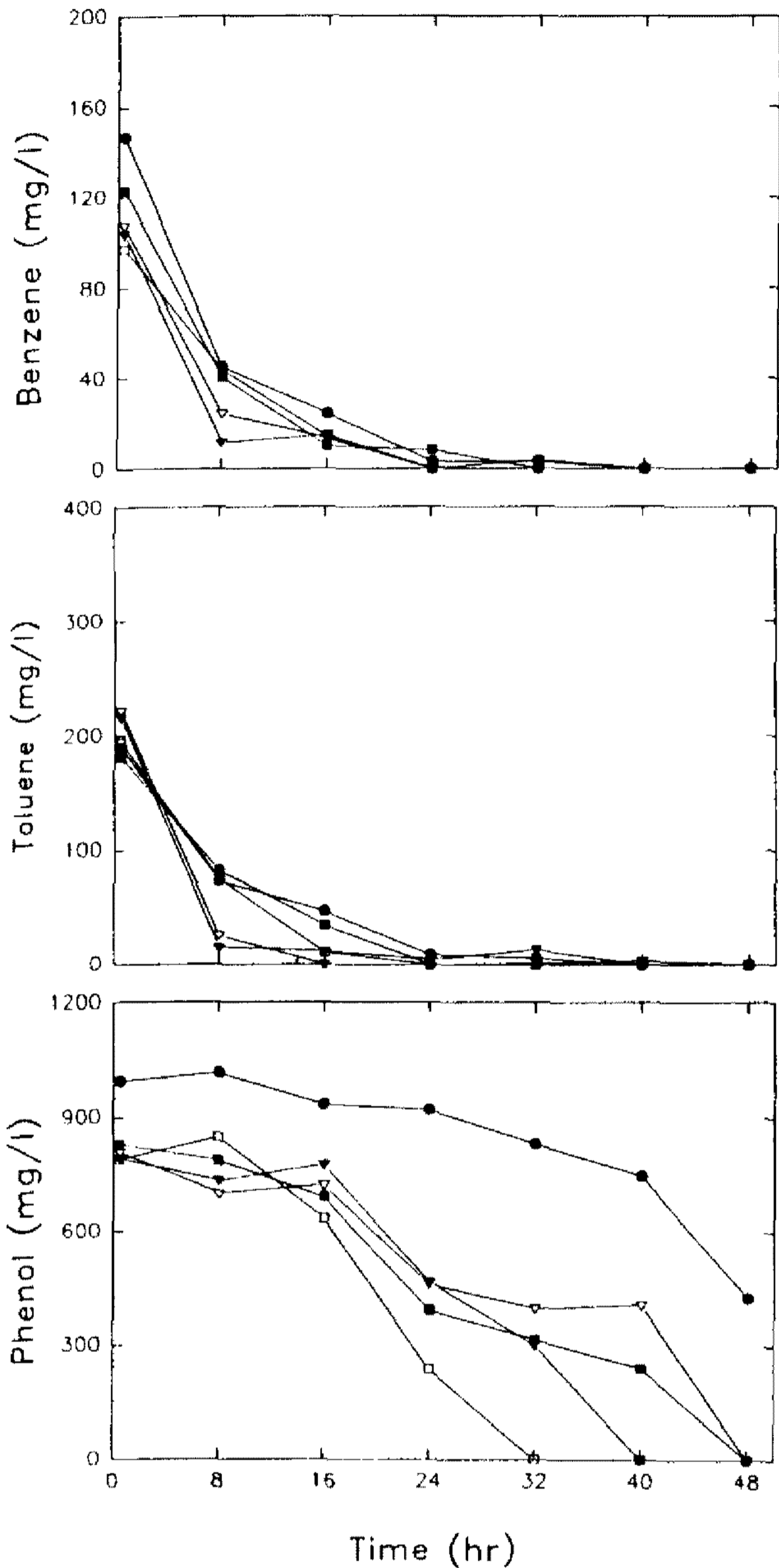


Fig. 4. Benzene, toluene, and phenol concentration as a function of time after medium exchange in semicontinuous culture.

Half of the medium was exchanged with a medium containing 2000 mg/l of each aromatic compound. Each point is a mean value of duplicate.

●: control group, ▽: S treatment, ▼: SB treatment, □: SG treatment, ■: SGB treatment

사하기 위하여, 반연속배양을 시작한 20일에 반응기에 benzene, toluene 및 phenol을 각기 1000 mg/l의 농도로 첨가하고, 시간의 경과에 따른 각 방향족화합물의 잔류농도를 조사하였다(Fig. 4). Benzene은 비중이 작고 물에 대한 용해도가 낮아 배양 0.5시간에 반응기내에서는 단지 150 mg/l 이하로 검출되었으며, 배양 8시간에 대조구와 SG 및 SGB 처리구는 41~45

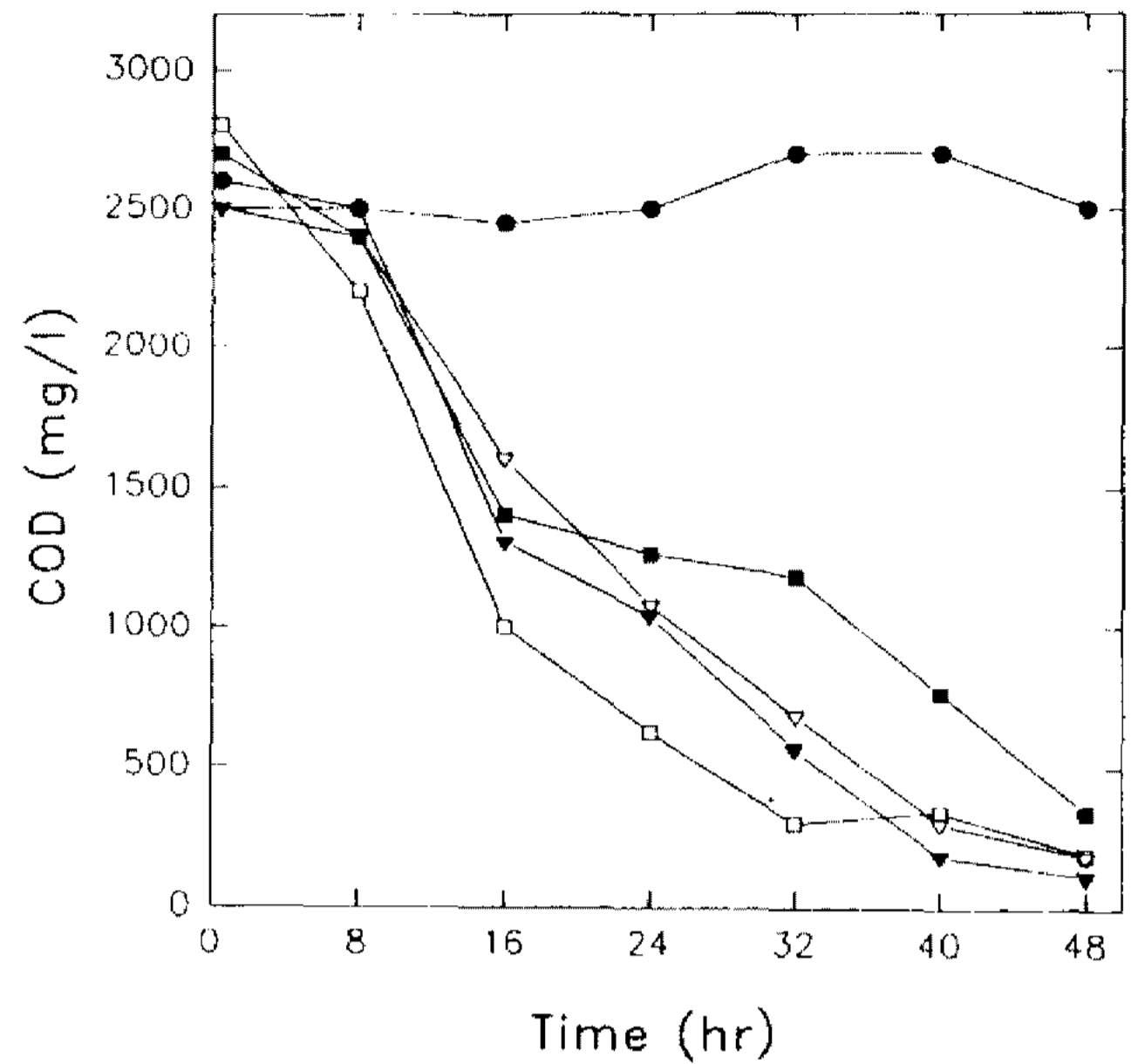


Fig. 5. COD change as a function of time after medium exchange.

Half of the medium was exchanged with a medium containing 2000 mg/l of each aromatic compound. Each point is a mean value of duplicate.

●: control group, ▽: S treatment, ▼: SB treatment, □: SG treatment, ■: SGB treatment

mg/l를 포함하는데 반하여, S와 SB 처리구는 각기 25, 12 mg/l의 낮은 농도를 나타내었다. Toluene은 배양 8시간에 대조구와 SG 및 SGB 처리구에서는 73~82 mg/l의 농도이지만, S와 SB 처리구는 각기 26, 15 mg/l의 낮은 농도를 나타내 이들 처리구의 분해가 효과적임을 알 수 있다. Toluene은 benzene과 마찬가지로 배양 48시간에는 모든 처리구에서 검출되지 않았다. 대조구의 phenol은 배양 48시간에 초기 검출농도의 43%가 잔류하고 있었다. Phenol은 SG 처리구에 의한 분해가 탁월한 것으로 배양 8시간까지는 변화가 없었으나, 배양 8시간부터는 phenol 농도가 직선적으로 감소하여 배양 32시간까지 지속하였으며, 이때 phenol 제거율은 35 mg/l/h이었다. 그 다음은 섬모상 고정화 담체를 설치한 SB 처리구의 phenol 제거율이 31 mg/l/h로 나타났다.

시간의 경과에 따른 대조구와 처리구의 COD 변화는 Fig. 5와 같다. 대조구의 COD는 2500~2700 mg/l로 시간에 따른 큰 변화가 없었다. SG 처리구의 COD는 배양 16시간까지 거의 직선적 감소를 보여 COD 제거율이 116 mg/l/h에 이르고 배양 32시간에는 약 300 mg/l의 수준으로 감소하였다. S와 SB 처리구의 COD 변화는 비슷한 유형을 보였으나, 섬모상 고정화 담체를 설치한 SB 처리구의 COD가 다소 낮았으며, 배양 48시간에는 110 mg/l로 조사된 처리구중

최소값을 보였다.

방향족화합물이 1000 mg/l의 농도로 첨가되었을 때 배양액의 흡광도는 모든 처리구에서 큰 폭의 증가를 보였다(Fig. 6). 특히, SG와 S 처리구의 흡광도가 현저히 증가하였으나, 배양 48시간에 원래 수준으로 회복되고 있음을 볼 수 있다. 특히, 현탁배양과는 달리 섬모상 고정화 담체를 설치한 SB와 SGB 처리구의 흡광도는 변화 폭이 크지 않았으며, 반응 초기에 흡광도의 일시적 감소현상이 관찰되었다.

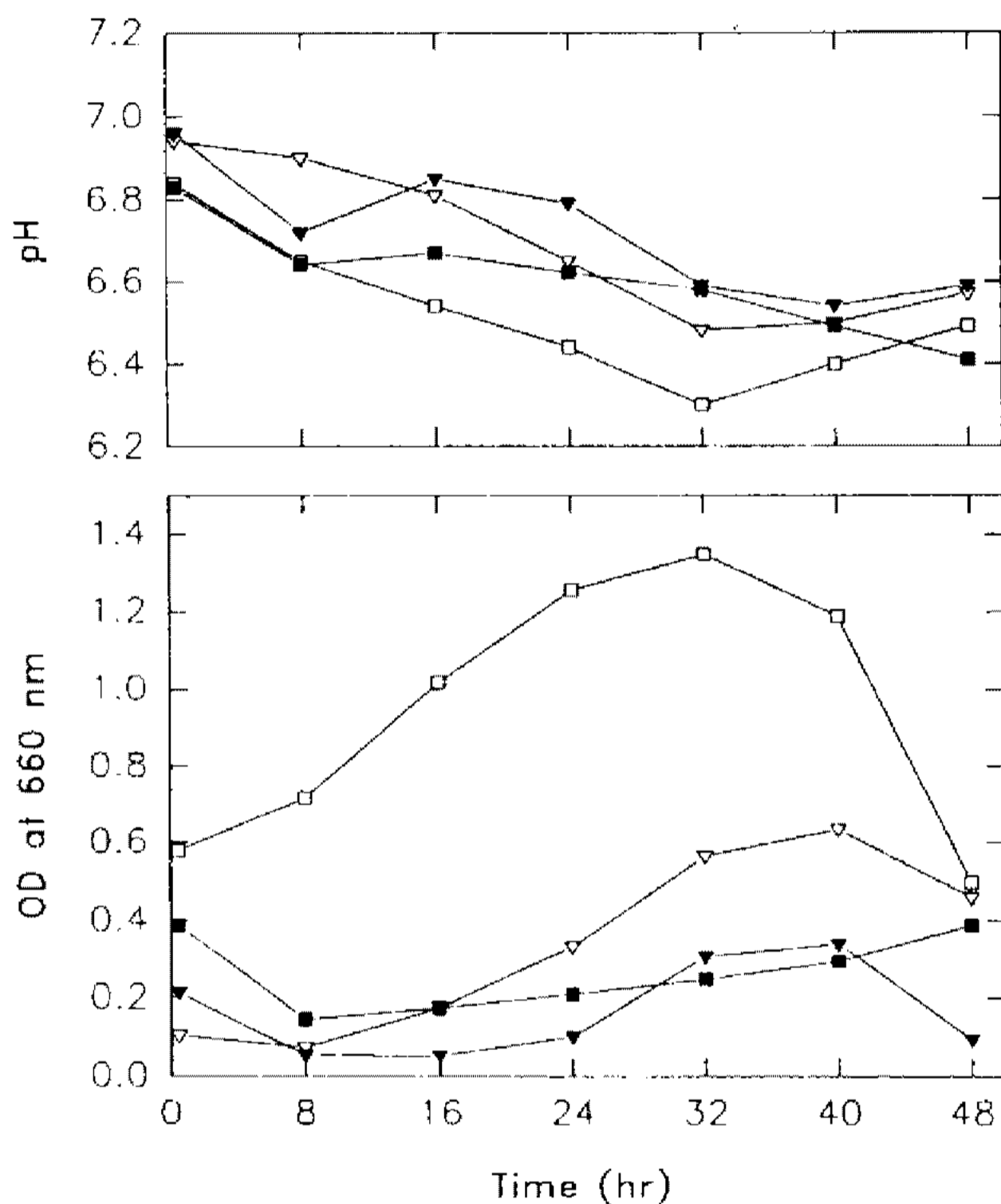


Fig. 6. pH and cell density changes as a function of time after medium exchange.

Half of the medium was exchanged with a medium containing 2000 mg/l of each aromatic compound.

▽: S treatment, ▼: SB treatment, □: SG treatment, ■: SGB treatment

반연속배양

반연속배양으로 미생물군집이 안정된 후 조사된 처리구별 COD 변화 및 제거를 Table 2에 요약하였다. 합성폐수를 교환한 직후 대조구의 COD는 평균 893 mg/l로 타처리구보다 높았는데 이는 반응기에 잔류하는 phenol 때문이며, 배양 24시간에 8.0%의 COD 제거를 보였는데 이는 합성폐수에 포함된 방향족화합물의 휘발에 의한 것으로 판단된다. S 처리구는 배양 24시간에 90.8%의 COD를 제거하여 조사된 처리구중 가장 효율적인 것으로 나타났다. SG 처리구는 83.6%의 COD 제거에 그쳤으나, 배양액을 원심분리하여 균체를 침전시킨 후 상정액을 조사하였을 때 COD 제거는 94.2%로서 S 및 SB 처리구와 유사한 값을 보였다. SGB 처리구는 설치된 섬모상 고정화 담체에 각종 미생물의 고정화에 의한 생물막의 형성이 뚜렷하였으며, SB 처리구에서도 생물막의 발달이 관찰되었다.

고찰

미생물 무처리구인 대조구에서 phenol과 benzene은 배양 24시간에 각기 63%, 17% 잔류하였으나, toluene은 배양 12시간에 모두 휘발되어 폭기에 의한 제거율이 매우 큰 화합물임을 알 수 있다. 휘발성 유기화합물의 손실은 화합물의 물리 화학적 특성과 폐수처리장의 설계 및 운영에 따라 변하는 것으로, Hill 등(2)은 폭기조내 공기의 흐름을 75 m³/l/min으로 한 경우에 폐수로부터 대기중으로 이동하는 휘발성 유기화합물의 양은 31~37% 정도라고 하였다. Parker 등(3)도 활성오니처리장에서 휘발성유기화합물중 비염소화화합물의 20% 정도는 폭기에 의하여 대기중으로 소멸된다고 하였다. 따라서, 휘발성이 강한 방향족화합물을 포함한 폐수는 용존량 이외의 휘발되는 것에 대한 처리를 절대적으로 필요로 하며, 생분해

Table 2. Change and removal of the COD of each treatment in semicontinuous culture

Treatment ¹⁾	0 hrs ²⁾		24 hrs		After centrifugation ³⁾	
	COD (mg/l)		COD (mg/l) Removal (%)		COD (mg/l) Removal (%)	
	n=3		n=6		n=6	
Control	893 (44)	822 (65)	8.0	778 (54)	12.8	
S	667 (20)	61 (8)	90.8	37 (5)	94.5	
SB	580 (16)	78 (7)	86.6	34 (4)	94.1	
SG	760 (34)	125 (9)	83.6	44 (9)	94.2	
SGB	693 (47)	71 (16)	89.8	50 (14)	92.8	

¹⁾S, strains; B, biofilm; G, glucose. ²⁾SE is in parentheses. ³⁾Centrifugation at 8000×g for 10 min.

속도를 증가시킴으로서 휘발량을 감소시키거나, 휘발되는 물질의 재순환 처리 등의 새로운 반응계가 필요한 것으로 사료된다.

Benzene과 toluene의 생분해는 탄소원으로 glucose를 첨가하지 않은 S와 SB 처리구에서 효과적이며, 섬모상 고정화 담체를 설치한 SB 처리구의 분해능이 좀 더 좋은 것으로 나타났다(Fig. 1, 4). Toluene은 독성이 강한 유기용매로 0.1%의 농도는 대부분의 미생물을 죽일 수 있는 농도로 알려져 있다(14). 혼합균주 GE1은 1000 mg/l의 toluene을 포함한 합성폐수에서 생분해 활성이 유지되고 있음을 보였다. 한편, 유 등(15)은 활성슬러지법에 의한 benzene 폐수처리실험에서 benzene 최대허용농도는 1600 mg/l에 이르는 바 있다.

Phenol의 생분해에 소요되는 시간은 250 mg/l 처리시 처리구별로 16~24시간에서, 1000 mg/l 처리시는 32~48시간으로 증가되었다. Phenol 농도가 250 mg/l에서 1000 mg/l로 증가함에 따라 SG 처리구의 phenol 제거율은 22 mg/l/h에서 35 mg/l/h로 증가하였다. 또한, 1000 mg/l의 방향족화합물을 처리한 경우 S와 SB 처리구를 비교해 볼 때 섬모상 고정화 담체의 설치에 의하여 phenol 분해가 촉진됨을 볼 수 있다(Fig. 4). 즉, 섬모상 고정화 담체의 설치는 glucose와 같은 유기탄소화합물이 포함되지 않은 고농도의 phenol 함유 폐수처리에 효과가 있음을 시사하고 있다.

방향족화합물의 공급으로 SG 처리구의 균체증식이 왕성하며, 이와 동시에 COD의 감소가 현저하였다. 그러나, 배양 후기에는 증가된 균체에 의한 COD 부하로 인하여 타처리구에 비하여 다소 높은 COD를 유지하였다. SG 처리구는 초기에 COD를 신속히 낮출 수 있으므로 폐수처리의 체류시간을 단축할 수 있는 효과가 있으며, 응집제의 첨가나 부착성이 강한 미생물의 공존에 의하여 증식된 균체를 침전시킬 수 있을 때 더욱 효과적인 것으로 판단되었다.

배양시간에 따른 균체량 증가는 섬모상 고정화 담체를 설치한 SB와 SGB 처리구에서 타처리구보다 뚜렷하지 않았다. 이것은 섬모상 고정화 담체의 균지지능에 의하여 가시적인 균체량의 큰 증가 없이도 방향족화합물을 처리할 수 있기 때문으로 사료된다. 균체의 증가에 비례적으로 나타나는 pH 감소와 관련하여 phenol과 같은 기질의 분해시 배지의 산성화는 종종 보고되고 있으며(8), 이는 NH_4^+ 의 동화나 분해산물로서 산의 생성에 따른 결과로 사료되나 정확한 이유는 완전히 설명되지 못하고 있는 실정이다.

자연계에서 흔히 화합물의 농도가 너무 낮아 분해할 수 있는 미생물의 개체군을 유지하기 힘든 경우가

종종 있다. 즉, 미생물이 증식할 수 있는 농도 이하에서는 기질은 대사되지 못하고, 미생물은 결국 죽게 된다(6). 이와 같이 처리대상물질의 농도가 매우 낮고 다량으로 방출되는 경우에 생물막을 이용한 처리는 적절한 것으로 알려져 있다(11). 본 실험에서도 glucose와 같은 유기탄소화합물이 포함되지 않은 합성폐수의 방향족화합물 분해 처리에서 섬모상 고정화 담체의 효과를 볼 수 있었다.

산업폐수와 같은 여러가지 화합물이 혼합되어 있는 경우 미생물의 다양한 생리적 특성을 고루 구비할 수 있는 혼합배양에 의한 난분해성 화합물의 분해나 무독화에 대한 연구가 주목되고 있으며(8, 16, 17), 혼합균주 GE1은 benzene, toluene 및 phenol이 포함된 폐수처리에 효과적으로 사용될 수 있음을 보였다.

요 약

Benzene, toluene 및 phenol을 각기 250 mg/l 포함한 합성폐수에 혼합균주인 GE1을 접종하고 반연속배양에 의하여 균집의 안정을 이룬 후 방향족화합물의 생분해에 대하여 조사하였다. 미생물 무처리구인 대조구에서 75 ml/l/min의 폭기에 의해 배양 24시간에 phenol은 37%, benzene은 83%가 휘발되고, toluene은 배양 12시간에 모두 휘발되었다. Benzene과 toluene의 생분해는 섬모상 고정화 담체를 설치한 SB (strains + biofilm) 처리구에서 효과적이며, phenol은 glucose를 첨가한 SG(strains + glucose) 처리구에서 보다 신속히 분해되었다. Benzene, toluene 및 phenol을 250 mg/l 또는 1000 mg/l 첨가하였을 때 SG 처리구는 16시간이나 32시간에 이들 화합물을 완전히 제거하였다. COD 제거율은 SG 처리구에서 초기에 80 mg/l/h로 가장 높았으나, 증식된 균체량에 의하여 배양 12시간 이후에는 116~140 mg/l의 일정한 값을 보였다. 결론적으로 혼합균주 GE1은 benzene, toluene 그리고 phenol 등의 방향족화합물이 혼합된 산업폐수의 처리에 폭 넓게 사용될 수 있는 가능성을 보였다.

참고문헌

1. Keith, L.H. and W.A. Telliard. 1979. Priority pollutants. I-a perspective view. *Environ. Sci. Technol.* 13: 416-423.
2. Hill, G.A., M.E. Tomusiak, B. Quail, and K.M. Van Cleave. 1991. Bioreactor design effects on biodegradation capabilities of VOCs in wastewater. *Environ. Prog.* 10: 147-153.

3. Parker, W.J., D.J. Thompson, J.P. Bell, and H. Melcer. 1993. Fate of volatile organic compounds in municipal activated sludge plants. *Water Environ. Res.* **65**: 58-65.
4. Arvin, E., B.K. Jensen, and A.T. Gundersen. 1989. Substrate interactions during aerobic biodegradation of benzene. *Appl. Environ. Microbiol.* **55**: 3221-3225.
5. Shimp, R.J. and F.K. Pfaender. 1985. Influence of easily degradable naturally occurring carbon substrates on biodegradation of monosubstituted phenols by aquatic bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* **49**: 394-401.
6. Zaidi, B.R., Y. Murakami, and M. Alexander. 1988. Factors limiting success of inoculation to enhance biodegradation of low concentrations of organic chemicals. *Environ. Sci. Technol.* **22**: 1419-1425.
7. Arcangeli, J.P. and E. Arvin. 1992. Toluene biodegradation and biofilm growth in an aerobic fixed-film reactor. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **37**: 510-517.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Van Loosdrecht, M.C.M. and S.J. Heijnen. 1993. Biofilm bioreactors for wastewater treatment. *Trends in Biotechnol.* **11**: 117-121.
12. 고영희, 하일호, 배경숙. 1988. Naphthalene을 분해하는 *Pseudomonas putida* N3의 분리 및 특성. *산업미생물학회지* **16**: 199-204.
13. 동화기술편집위원회. 1987. 환경오염공정시험법. 동화기술.
14. Inoue, A., M. Yamamoto, and K. Horikoshi. 1991. *Pseudomonas putida* which can grow in the presence of toluene. *Appl. Environ. Microbiol.* **57**: 1560-1562.
15. 유재근, 김정현, 이형환. 1988. 활성 sludge에 의한 benzene의 생물학적 처리. *산업미생물학회지* **16**: 374-378.
16. 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.
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.

(Received May 23, 1994)