

## 토양미생물을 이용한 Benzene, Toluene, Ethylbenzene 그리고 Xylene isomers(BTEX)의 분해시 기질반응

라현주 · 장순웅 · 이시진

경기대학교 건설공학부 환경공학전공

(1999년 8월 12일 접수, 1999년 11월 24일 채택)

## Substrate Interactions on Biodegradation of Benzene, Toluene, Ethylbenzene and Xylene Isomers(BTEX) by Indigenous Soil Microorganisms

Hyun-Joo La · Soon-Woong Chang · Si-Jin Lee

*Dept. of Environ. Eng., Kyonggi University*

### ABSTRACT

A mixed culture isolated from petroleum-contaminated soil was enriched on toluene as a sole carbon and energy source, and degradation characteristics of BTEX(Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylenes) was observed. In the single-substrate experiments, all the BTEX compounds were degraded, and it was degraded as following orders: toluene, benzene, ethylbenzene, and *p*-xylene. In the degradation experiments of BTEX mixtures, the degradation rate was decreased compared to that in the single-substrate experiment and ethylbenzene was degraded faster than benzene. In the experiments of binary-mixtures, various substrate interactions such as inhibition, stimulation, and non-interaction were observed, and ethylbenzene was shown to be most potent inhibitor of BTEX degradation. In the degradation characteristic studies of xylene isomers, *m*-xylene and *p*-xylene were degraded as carbon sources, and it was stimulated in the presence of either benzene or toluene. However, degradation of *o*-xylene was enhanced only in the presence of benzene.

---

Key Words : BTEX, Inhibition, Stimulation, Non-interaction

## 요 약 문

유류로 오염된 지역의 토양에서 toluene을 탄소원으로 이용하는 혼합미생물을 분리하여 toluene, benzene, ethylbenzene 및 xylene isomers(BTEX)의 분해특성을 관찰하였다. 단일 기질 실험에서 모든 BTEX의 분해가 이루어졌으며 toluene, benzene, ethylbenzene, *p*-xylene 순서로 분해되었다. BTEX 혼합기질 분해실험에서는 단일기질일 때보다 분해속도가 상대적으로 느려졌으며, ethylbenzene이 benzene보다 먼저 분해되는 것이 관찰되었다. 이중 혼합물질 반응 실험에서는 방해작용(inhibition), 촉진작용(stimulation), 그리고 비반응(non-interaction)과 같은 다양한 기질반응이 관찰되었으며, ethylbenzene은 benzene, toluene, xylene의 분해에 강한 방해영향을 주었다. Xylene 분해특성에서 *m*- 및 *p*-xylene은 혼합미생물에 탄소원으로 이용되었으며 benzene이나 toluene이 동시에 존재할 때는 xylene isome:의 분해가 촉진되었다. 그러나 *o*-xylene의 분해는 benzene에 의해서만 촉진되었다.

주제어 : BTEX, 촉진작용, 방해작용, 비반응

## 1. 서 론

산업의 고도화와 함께 유기성 유해폐기물의 발생 및 유기성 용매의 사용량이 늘어남에 따라 이의 부적절한 관리 또는 누출 등에 의한 지하수 및 토양의 오염이 중요한 환경문제로 제기되고 있다. 이러한 물질들은 자연에서 분해가 아주 느리게 진행되거나 전혀 분해되지 않아 대부분 난분해성 물질(recalcitrant)로 분류되고 있다. Petroleum의 80% 이상을 차지하고 있는 BTEX(benzene, toluene, ethylbenzene, *o*-, *m*-, *p*-xylene)화합물은 가솔린과 항공기 연료, 그리고 용매제로 폭넓게 이용되고 있어 사용량이 증가되고 있으며<sup>9,10)</sup>, 국내에서도 최근에 유류저장소, 석유관로, 사고로 인한 누출, 불법 폐기물처리, 침출수 누출 등으로 인한 토양이나 지하수 오염물질로써 관심이 모아지고 있다. 이러한 물질들은 발암 혹은 잠재적 발암물질로 분류되고 있으며 미국 환경청(EPA)에서는 우선적으로 처리되어야 할 주요 오염물질(priority pollutant)로 분류하고 있고<sup>8)</sup>, 물질 특성상 휘발성이 크긴 하지만 다른 탄화수소에 비해 용해도가 높기 때문에 자연계로 유출되었을 때에는 쉽게 토양과 수계를 오염시킬 수 있다.

유류오염지역을 정화하는 방안으로는 물리·화학적 공정, 생물학적 공정 등이 있다. 국내에서도 토양

환경보전법<sup>12)</sup> 및 지하수법<sup>13)</sup>이 제정되면서 우선적으로 유류오염지역 복원에 대한 연구가 시작되고 있고, 특히 물리·화학적 처리공정 연구가 주를 이루고 있다. 그러나 오염지역의 생물학적 복원(Bio-remediation)은 다소 시간은 걸리지만, 고가의 비용이 들지 않고 오염물질을 완전히 분해하여 무해한 물질로 분해시키므로 미국에서도 최근에는 실험실 연구와 더불어 현장 적용 연구가 한창 진행중에 있다.

BTEX는 호기성 및 혐기성 조건에서 생물학적으로 어렵지 않게 분해된다. 그러나 오염지역의 특성에 따라 BTEX의 분해특성, 분해경로 및 분해정도 등이 달라질 수 있다. 특히 유류오염지역에는 유류 성분이 복합적으로 존재함으로써 생물학적 공정의 적용시에는 유류분해균에 의한 이 물질들의 상호 분해 특성이 중요하다. 이러한 근거로 오염지역에서의 BTEX가 동시에 존재할 때 이들 물질간의 상호기질 반응에 대한 연구가 활발히 이루어졌다. BTEX를 동시 분해할 때에는 물질간의 방해영향(inhibitory effects), 촉진영향(stimulation) 등이 주요 기질반응으로 보고되었다<sup>1,5,6,7)</sup>. Chang 등<sup>2)</sup>과 Oh<sup>3)</sup> 등은 benzene과 toluene의 분해에서 서로간의 경쟁적인 방해관계(competitive inhibition)가 있음을 관찰한 반면, 다른 연구자들은 toluene이 존재시 benzene의 분해가 향상되는 결과를 보고하였다<sup>1,4)</sup>. 또한

BTEX의 분해에 탁월하다고 알려진 *Pseudomonas* strain으로 toluene이 존재할 때 benzene과 *p*-xylene의 분해가 향상되었음이 관찰되었다<sup>1-3)</sup>. Yadav 등<sup>10)</sup>은 곰팡이 종류인 *Phanerochaete chrysosporium*을 이용한 BTEX 분해에서 혼합기질일 때 ethylbenzene의 분해가 가장 빨리 일어났으며, ethylbenzene이 다른 기질과 동시에 존재할 때 방해자의 역할을 하는 것으로 나타났다.

본 논문에서는 국내 유류오염 토양으로부터 BTEX 중 toluene을 탄소원 및 에너지원으로 이용하는 미생물을 분리하여 혼합미생물에 의한 BTEX(Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene Isomers) 분해능 및 분해특성을 살펴보고, 특히 상호기질반응과 xylene isomers의 분해경향을 조사하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 시약

본 연구에 사용된 시약은 benzene(99.9+% HPLC grade, SIGMA-ALDRICH), toluene(99.8%, HPLC grade, SIGMA-ALDRICH), ethylbenzene(99.8% anhydrous, SIGMA-ALDRICH), *o*-xylene(98% HPLC, SIGMA-ALDRICH), *m*-xylene(99+% anhydrous, SIGMA-ALDRICH), *p*-xylene(99+% HPLC grade, SIGMA-ALDRICH) 등이 사용되었다. BTEX의 저장용액(stock solution)은 제조시 각 물질의 수중 용해도를 초과하지 않는 범위 내에서 만들었으며 120℃에서 살균된 serum bottle에 보관하였다.

### 2.2. 미생물 배양

유류로 오염된 지역에서 토양을 채취하여 toluene을 유일 탄소원과 에너지원으로 이용하는 혼합미생물을 분리하였다. 미생물 배양에 사용된 배지는 Alvarez 등<sup>11)</sup>이 이용한 배지로서 그 조성은(mg/L) NH<sub>4</sub>Cl(100), KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>(700), K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>(1,000), NaCl(10), CaCl<sub>2</sub>(5), MgCl<sub>2</sub>(10), CuCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O(0.039), ZnCl<sub>2</sub>(0.136), NiCl<sub>2</sub>(0.013), FeCl<sub>2</sub>·

4H<sub>2</sub>O(0.702), AlCl<sub>3</sub>(0.111), MnCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O(0.281), CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O(0.038), Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O(0.025), H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>(0.038), Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(0.142), biotin(0.02), pantothenic acid(0.05), thiamine(0.05), vitamin B<sub>12</sub>(0.001), *p*-aminobenzoic acid(0.05)를 포함하였으며, 배지의 pH는 7.3으로 맞추어 사용하였다. Amber serum bottle에 오염토양 10 g, 배양액 40 mL, toluene 2 mg(액상에서의 농도 50 mg/L), 그리고 나머지는 공기로 채운 후 25℃, 150 rpm으로 진탕기에서 배양을 하였다. Toluene이 완전히 분해됨을 관찰한 후 bottle에서 1 mL를 취해 새로운 bottle에서 2~3번 반복적으로 배양함으로써 본 실험에서 이용할 혼합미생물을 분리하였다. BTEX 분해실험에서는 일정량의 미생물을 공급하기 위해 실험전에 2 mg의 toluene과 미생물 1 mL를 넣어 주어 미생물을 성장시켰으며 toluene은 1일 이내에 완전히 분해되었다.

### 2.3. BTEX 분해 실험

BTEX 분해 실험에 이용된 토양은 경기대학교내의 지표면으로부터 15 cm깊이에 있는 토양을 채취하여 2일간 충분히 건조시켜 체(1.7 mm)로 걸러 이용하였다. 실험에 이용된 모든 초차류는 121℃, 15분동안 살균하였고 실험시 BTEX의 광분해를 방지하기 위해 amber serum bottle을 이용하였다.

BTEX 분해실험은 125 mL amber serum bottle(WHEATON)에 토양 9.2 g(bulk volume 10 mL), 배양액 40 mL 그리고 나머지 75 mL는 공기로 채워준 후 teflon-silicon septa(φ 20mm, WHEATON)와 aluminum crimp cap으로 닫았다. 그리고 필요한 양의 BTEX를 저장용액으로부터 주사기를 이용해 amber serum bottle에 주입하였다. 그리고 2 mg toluene으로 1일 동안 배양된 미생물 1 mL를 접종하고 25℃에서 150 rpm의 속도로 진탕기에서 배양을 함으로써 실험을 시작하였다. 이때 접종 미생물의 optical density(OD)는 UV 600nm에서 평균적으로 0.025~0.03 범위이내였다. BTEX의 미생물에 의한 정확한 분해를 측정하기 위해 위의 실험 조건과 동일한 bottle에 미생물의 활동을 저해하는 염화수은(HgCl<sub>2</sub>) 500 mg/L을 넣고 비교 실험을 진행하였다.

## 2.4. 분석방법

BTEX는 불꽃이온화검출기(FID)와 HP-5 capillary 칼럼이 장착된 기체크로마토그래피(Hewlett Packard 5890II)를 이용하여 분석하였다. 500  $\mu$ l gas-tight syringe(Hamilton)를 이용하여 serum bottle의 headspace에서 200~500  $\mu$ l의 시료를 채취한 즉시 기체크로마토그래피에 주입하였다. 오븐, 주입기, 그리고 검출기의 온도는 각각 80 $^{\circ}$ C, 200 $^{\circ}$ C, 200 $^{\circ}$ C 등온으로 운전되었다. 또한 일정한 미생물 접종을 위한 미생물성장측정은 UV Spectrophotometer(HP 8452A Diode Array Spectrophotometer)를 이용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 혼합미생물을 이용한 단일기질과 혼합기질의 분해특성

일차적으로 배양된 토양미생물의 BTEX의 분해능을 알아보기 위해 단일기질일 때와 혼합기질일 때의 분해능을 비교하여 살펴보았다. Fig. 1(a)는 serum bottle에서의 BTEX 초기 질량이 2 mg(액상에서의 농도 : 50 mg/L)일 때 단일기질로서의 분해 특성을 보여준다. Benzene과 toluene은 약 8시간의 지체기를 거쳐 12시간 이내에 모두 분해되었고, 그 다음으로 ethylbenzene, *p*-xylene 순으로 분해되었다. 이 결과는 BTEX 모두 toluene에 의해서 배양된 미생물에 탄소원으로 이용되고 있음을 보여주고 있으나 *p*-xylene인 경우 40시간 이상이 경과한 후에도 60% 미만의 분해율을 보이고 있어 상대적으로 탄소원으로서의 이용도가 낮음을 볼 수 있다.

반면 Fig. 1(b)에서 보여준 혼합기질에서의 분해는 단일기질의 분해와는 다소 다른 경향을 보여주고 있다. 단일기질에 비해, 전체적으로 모든 BTEX 분해속도가 상당히 느려짐을 볼 수 있다. 이는 각 물질간의 상호 방해작용에 의해 미생물에 의해 분해되는 시간이 지체된 것으로 보이며 또한 단일기질일 때와는 달리 초기에 공급된 유류물질의 증가로 인해 유류분해 미생물에 의한 기질 선호도가 달라질 수도

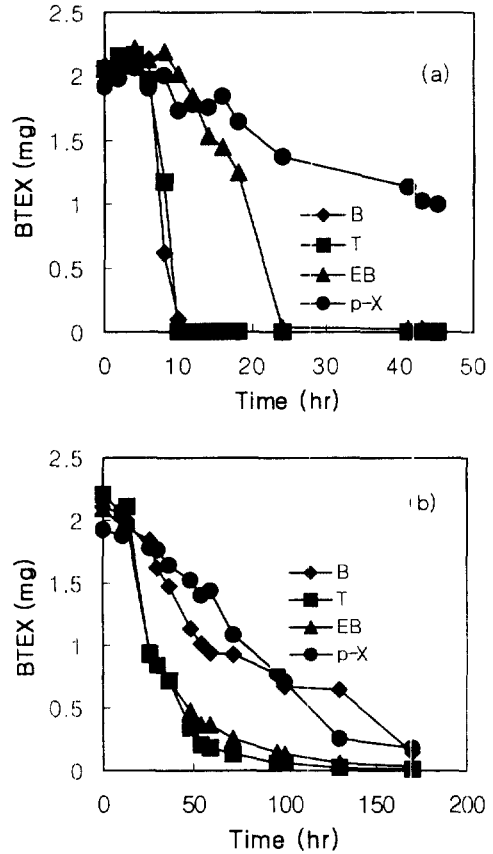


Fig. 1. Comparing the degradation rates of (a) single substrate and (b) mixed substrates(initial mass=2 mg) by toluene-enriched mixed cultures at 25 $^{\circ}$ C.

있다고 판단된다. 그리고 ethylbenzene의 경우 단일기질일 때와 달리 benzene보다 먼저 분해가 이루어짐을 볼 수 있다. Yadav 등<sup>10)</sup>의 연구에서는 혼합기질일 때 다른 기질보다 ethylbenzene이 가장 빠른 분해속도를 보였으며, Goudar 등<sup>11)</sup>의 연구에서는 ethylbenzene이 오히려 toluene과 *p*-xylene보다 늦게 분해됨을 관찰하였다. 즉, 유류분해균에 따라서 BTEX 분해특성이 달라질 수 있음을 설명해준다.

*p*-xylene의 경우 단일기질로 존재할 때와는 달리 benzene과 유사한 속도로 분해됨을 관찰할 수 있는데, benzene, toluene 등이 분해되면서 생성된 효소에 의해 *p*-xylene의 분해를 촉진시킴으로써 단일기질일 때와는 달리 분해속도가 향상되었다고 설명할 수 있다.

### 3.2. 기질 상호반응

Fig. 1에서의 설명된 단일 및 혼합기질의 분해실험에서는 기질이 복합적으로 존재할 때 분해 경향이 달라짐을 관찰하였다. 위의 실험결과를 바탕으로 각각의 BTEX를 이중 혼합하였을 때의 기질 상호반응을 관찰하였다. 실험은 위의 실험과 동일하게 25℃에서 총 질량 2 mg(액상에서의 농도 50 mg/L) toluene으로 1일 동안 성장시킨 혼합미생물을 이용하였으며, BTEX 각각의 초기질량은 2 mg이었다.

BTEX의 이중혼합 분해실험에서는 방해영향, 촉진영향, 비반응 등의 다양한 기질상호작용이 관찰되었다. Fig. 2(a)에서 보면 benzene의 경우, toluene 또는 ethylbenzene과 동시에 존재할 때 지체기 및 분해속도가 단일기질로 존재할 때와 별 차이가 없음을 볼 수 있다. 즉, toluene과 ethylbenzene은 benzene의 분해에 별다른 영향을 미치지 않아 비반응으

로 구분할 수 있다(Table 2). 이 결과는 Deeb 등<sup>5)</sup>이 관찰한 toluene의 존재가 benzene의 분해를 방해하는 결과와는 다소 상반적인 결과이다. 또한 *p*-xylene이 존재할 때는 benzene의 분해가 상대적으로 지체되고 있음을 볼 수 있는데, 이는 *p*-xylene이 benzene의 분해에 약간의 방해영향을 미치고 있음을 보여주는 결과이다.

Fig. 2(b)에서는 benzene, ethylbenzene, *p*-xylene이 존재함으로써 toluene의 분해를 다소 지연시키는 약한 방해영향을 미치고 있음을 볼 수 있는데 이 결과는 Table 2에 요약되어 있다. Toluene이 단일기질로 존재할 때는 4시간의 지체기를 거쳐 0.22 mg/hr의 속도로 12시간 이내에 완전하게 분해가 이루어진 반면 benzene, ethylbenzene, *p*-xylene이 존재함으로써 4~8시간의 지체기를 거쳐 0.088~0.096 mg/hr로 분해속도가 떨어짐을 볼 수 있다 즉, benzene, ethylbenzene, *p*-xylene

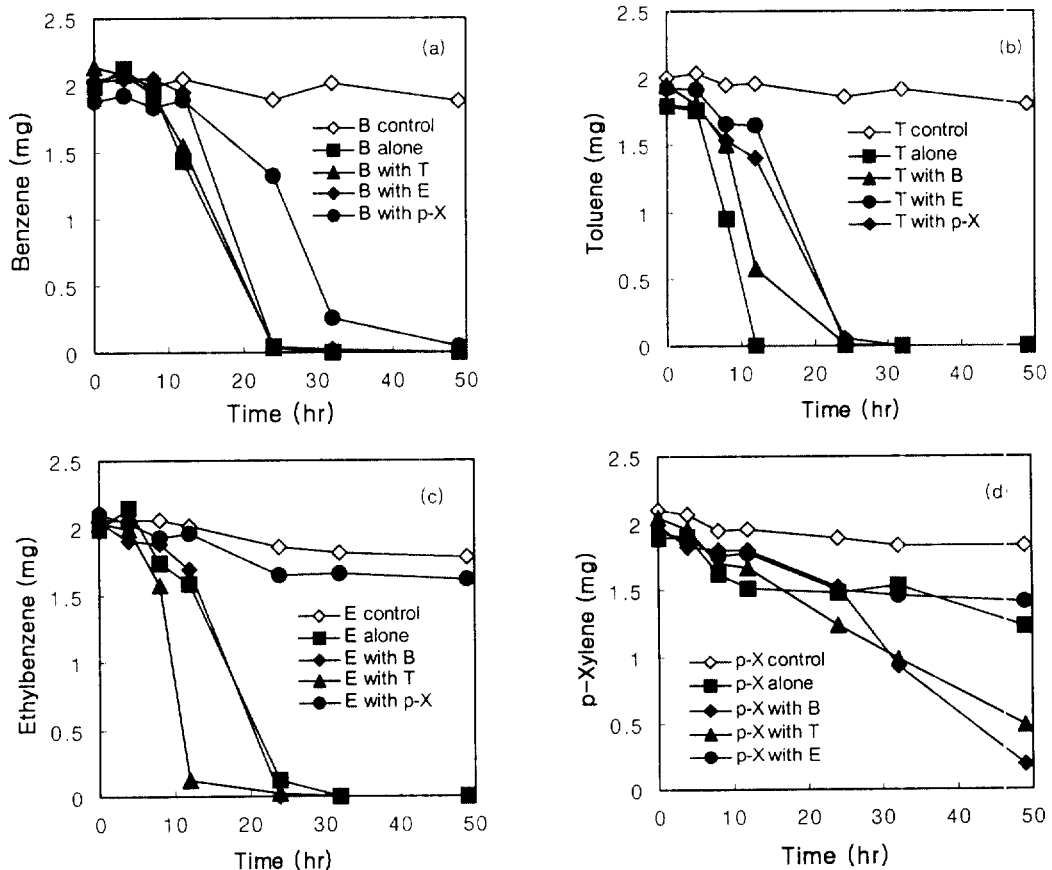


Fig. 2. Degradation of binary mixtures with B, T, E and *p*-X(initial mass=2 mg).

Table 1. Lag phase and degradation rate for single and binary-BTEX compounds

Compound	Lag phase (hr)	Degradation rate (mg/hr)
B(alone)	8	0.12
B with T	8	0.12
B with E	12	0.16
B with <i>p</i> -X	12	0.08
T(alone)	4	0.22
T with B	4	0.092
T with E	8	0.096
T with <i>p</i> -X	8	0.088
E(alone)	4	0.1
E with B	8	0.124
E with T	4	0.236
E with <i>p</i> -X	50	ND
<i>p</i> -X(alone)	32	0.022
<i>p</i> -X with B	12	0.052
<i>p</i> -X with T	2	0.032
<i>p</i> -X with E	4	0.02

모두 toluene 분해에 방해영향을 미치고 있음을 보여준다. Fig. 2(a) 및 Fig. 2(b)를 비교할 때 benzene은 toluene에 의한 영향을 받지 않는 반면 toluene의 분해는 benzene에 의해 방해영향이 관찰되었다. Table 1의 결과를 보면 benzene이 동시에 존재할 때 toluene의 분해속도는 약 4시간의 지체기를 거친 후 0.092 mg/hr로 toluene만 존재할 때의 분해속도 0.22 mg/hr 보다 2배 정도 느려짐을 볼 수 있다. 위의 결과와 유사하게 Alvarez 등<sup>1)</sup>에서 순수미생물 *Pseudomonas* sp. CFS215를 이용한 실험에서 benzene이 toluene 분해에 방해작용을 한다는 결과가 보고되었다. 그러나 Chang 등<sup>2)</sup>

은 benzene과 toluene의 동시 분해시 상호 분해속도가 지연되는 경쟁적인 방해영향(competitive inhibition)을 보고함으로써 다소 다른 결과를 나타내었다. 또한 Arvin<sup>4)</sup> 등은 toluene 및 *o*-xylene이 존재함으로써 benzene의 분해를 촉진시키는 결과도 관찰하였는데, 본 실험에서 *p*-xylene의 존재로 benzene의 분해가 지연되는 결과와는 상반적인 결과이다. 그리고 toluene 분해의 경우 Deeb<sup>5)</sup> 등은 ethylbenzene이 존재할 때 toluene의 분해를 지연시키는 결과를 관찰하여 본 실험의 결과와 유사하다.

Fig. 2(c)에서는 ethylbenzene의 분해경향을 보여주고 있다. Ethylbenzene이 단일기질로 존재할 때는 약 4시간의 지체기를 거쳐 0.1 mg/hr의 속도로 분해되었다. Benzene이 동시에 존재할 때는 ethylbenzene의 분해에 별다른 영향을 미치지 않으나 toluene이 동시에 존재할 때는 분해속도가 0.236 mg/hr로 ethylbenzene의 분해가 상대적으로 매우 촉진되는 것을 볼 수 있다. 이는 benzene의 분해에 있어 toluene의 존재가 benzene의 분해에 영향을 미치지 않는 결과를 볼 때 물질간의 상대적인 분해 특성을 보여준다고 할 수 있다. 반면에 *p*-xylene은 benzene과 toluene의 분해에 영향을 미치지 않거나 약간의 방해영향을 주는데 비해 ethylbenzene인 경우 완전하게 방해작용을 하고 있다.

Benzene, toluene과는 달리 ethylbenzene의 분해에서는 다른 물질들에 의한 촉진영향, 방해영향 등 다양한 기질반응이 관찰되었다(Table 2). 특히 가솔린 오염지역에는 ethylbenzene이 최소 10% 이상 포함되고 있음에도 불구하고 대부분의 호기성 생분해 실험이 ethylbenzene을 제외한 benzene, toluene, xylene의 분해특성에 대한 연구가 주로 이루어졌다. Fig. 2의 결과를 볼 때 ethylben-

Table 2. Degradation patterns for each combination

Substrate	Substrate combination			
	Benzene	Toluene	Ethylbenzene	<i>p</i> -Xylene
with Benzene		-	×	++
with Toluene	×		++	--
with Ethylbenzene	×	--		--
with <i>p</i> -Xylene	--	--	--	

\* + : Stimulation, ++ : Strong stimulation, - : Inhibition, -- : Strong inhibition, × : Non-interaction

zene의 존재는 benzene, toluene, *p*-xylene의 분해를 전반적으로 방해하고 있음을 볼 수 있는데, BTEX 중 가장 방해영향이 큰 물질로 판단되어 미생물에 의한 호기성 분해시 기질반응의 중요한 요인으로 고려해야 할 것으로 사료된다. 위의 결과는 Deeb<sup>5)</sup> 등이 관찰한 ethylbenzene이 다른 BTX분해에 가장 강한 방해인자라는 결과와 유사하다.

*p*-xylene의 경우 toluene으로 배양된 미생물의 탄소원으로 이용되는 가능성이 BTEX중 가장 낮다. Fig. 2(d)에서 보면, *p*-xylene 자체 분해속도는 느리지만 benzene이나 toluene이 동시에 존재할 때 분해가 촉진되고 있음을 볼 수 있는데 benzene이나 toluene이 분해되면서 생성된 효소에 의한 *p*-xylene의 분해를 유도하는 것으로 보인다. 그러나 ethylbenzene이 존재할 때는 benzene과 toluene과는 다르게 *p*-xylene의 분해를 완전 방해하고 있음을 볼 수 있다. 특히 Fig. 2(c)와 Fig. 2(d)에서 보면,

ethylbenzene과 *p*-xylene은 상호간에 강한 방해영향을 주고 있어 두 물질간의 경쟁적 방해영향이 관찰되고 있다. 그리고 control bottle에서는 약 50시간 후에도 BTEX의 총질량에는 별 변화가 없어 물리·화학적 손실로 인한 문제는 없는 것으로 판단된다.

### 3.3. Xylene Isomers의 분해특성

위의 결과로부터 BTEX중 xylene인 경우 다른 물질에 비해 상대적으로 분해도가 떨어짐을 관찰하였다. Fig. 3은 다른 물질이 동시에 존재할 때 xylene isomers(*o*-, *m*-, *p*-xylene)의 분해 경향을 조사하였다. Fig. 3(a)를 보면 *m*- 및 *p*-xylene은 toluene으로 배양된 미생물에 의해 탄소원으로 이용되어 분해가 이루어진 반면, *o*-xylene은 전혀 분해가 이루어지지 않고 있다. *m*-xylene의 경우, toluene이 존

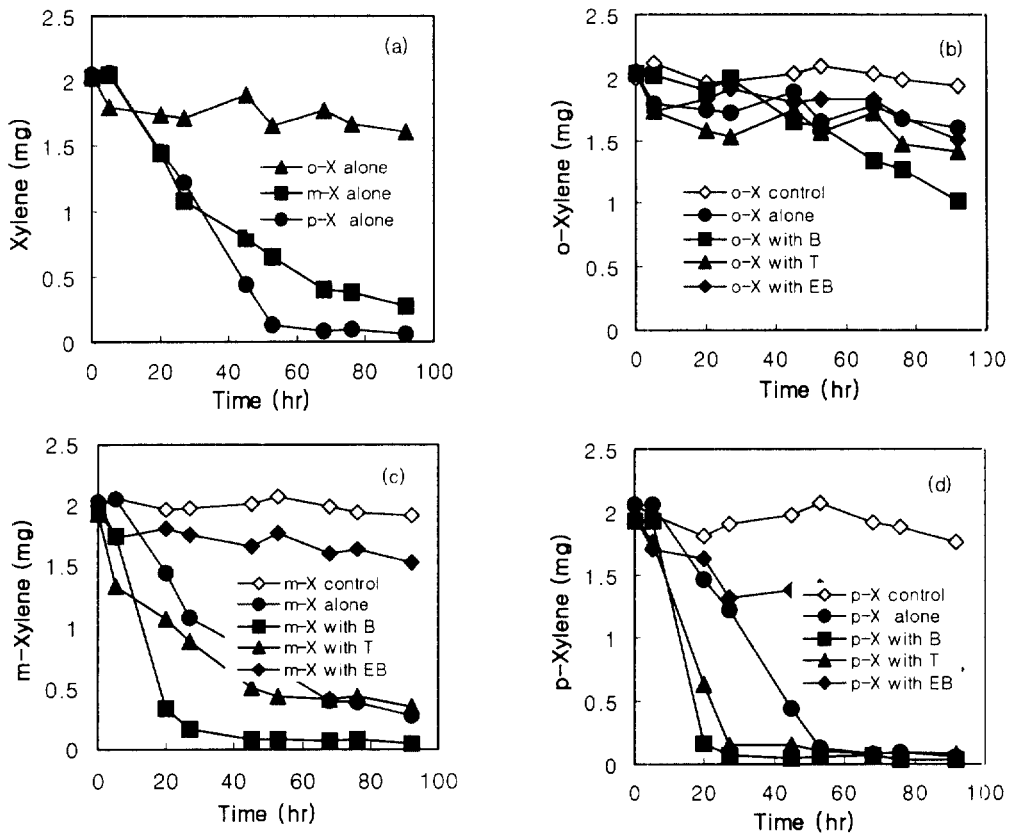


Fig. 3. Xylene isomers(*o*-, *m*- and *p*-) degradation in single and binary mixtures with B, T, and E(initial mass=2 mg).

재할 때는 *m*-xylene 자체 분해속도와 별다른 차이를 보이지 않으나 benzene이 존재할 때는 상대적으로 분해가 촉진됨을 볼 수 있다. 그러나 ethylbenzene이 존재할 때는 위에서도 관찰되었듯이 *m*-xylene의 분해를 완전하게 방해하고 있다.

*p*-xylene은 *m*-xylene과는 다소 다르게 benzene과 toluene이 존재함으로써 *p*-xylene의 분해를 촉진하고 있다. 특히 *o*-xylene인 경우 benzene이 존재할 때 분해가 다소 촉진되기는 하나 toluene이나 ethylbenzene이 존재할 때는 전혀 분해가 이루어지지 않음을 볼 수 있다. 다른 연구자들에 의해서도 보고되었지만 분해경향은 다소 다르나 benzene, toluene, ethylbenzene 등이 동시에 존재함으로써 *o*-, *m*- 및 *p*-xylene의 분해가 촉진됨을 보여주었다<sup>2,3)</sup>. 반면에 Deeb 등<sup>5)</sup>은 benzene, toluene, ethylbenzene 등이 xylene isomers의 분해에 방해영향을 미치는 것으로 관찰하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 유류로 오염된 지역의 토양에서 toluene을 탄소원으로 이용하는 혼합미생물을 분리하여 BTEX의 분해특성을 관찰하였고, 특히 둘 이상의 혼합물질이 존재할 때는 다양한 상호기질반응의 결과를 얻을 수 있었다. 관찰된 상호기질반응은 방해작용, 경쟁적 방해작용, 촉진작용, 그리고 비반응으로 정리할 수 있다.

BTEX는 단일기질일 때와 혼합기질일 때 다른 분해경향을 보였다. 단일기질일 때는 toluene, benzene, ethylbenzene, 그리고 *p*-xylene 순서로 분해되는 것을 볼 수 있었고 혼합기질일 때는 ethylbenzene의 분해가 촉진되어 toluene, ethylbenzene, benzene, *p*-xylene 순으로 분해됨을 관찰하였다.

이중 혼합 물질반응에 있어서는 위에서 언급된 다양한 상호기질반응이 관찰되었는데, 특히 ethylbenzene은 benzene, toluene, xylene의 분해에 강한 방해영향을 미쳤다. Xylene 분해특성에서는 *o*-xylene이 가장 난분해성 물질로 관찰되었고 *m*- 및 *p*-xylene은 단일기질로서도 분해가 이루어졌고

benzene이나 toluene과 동시에 존재할 때는 분해가 촉진되었다. 그러나 다른 물질과 유사하게 ethylbenzene에 의해서는 강한 방해영향을 받는 것으로 관찰되었다.

#### 참 고 문 헌

1. Alvarez, P. J. and Vogel, T. M., "Substrate interactions of benzene, toluene and *para*-xylene during microbial degradation by pure cultures and mixed culture aquifer slurries," *Appl. Environ. Microbiol.*, **57**, 2981~2985(1991).
2. Chang, M. K., Thomas, C. V. and Craig, S. C., "Kinetics of competitive inhibition and cometabolism in the biodegradation of benzene, toluene, and *p*-xylene by two *Pseudomonas* isolates," *Biotechnol. and Bioeng.*, **41**, 1057~1065(1993).
3. Oh, Y. S., Shareefdeen, Z., Basil, C. B. and Richard B., "Interactions between benzene, toluene, and *p*-Xylene(BTX) during their biodegradation" *Biotechnol. and Bioeng.*, **44**, 533~538(1994).
4. Arvin, E. A., Jensene, B. K. and Gundersen, A. T., "Substrate interaction during aerobic biodegradation of benzene," *Appl. Environ. Microbiol.*, **55**, 3221~3225 (1989).
5. Deeb, R. A. and Alvarez, P. L., "Temperature effects and substrate interactions during the aerobic biotransformation of BTEX mixtures by toluene-enriched consortia and *Rhodococcus rhodochrous*," *Biotechnol. and Bioeng.*, **62**, 526~536(1999).
6. Yeom, S. H., Lee J. H. and Yoo, Y. J., "Cometabolic removal of xylene isomers by *Alcaligenes xylosoxidans* Y234," *J. Microbial Biotechnol.*, **8**, 222~228(1998).
7. Yeom, S. H., Yoo, Y. J., "Substrate inter-



- action Analysis in the Degradations of benzene and toluene by *Alcaligenes xylosoxidans* Y234," *Environ. Eng. Res.*, **2**, 245~250(1997).
8. U. S. Environmental Protection Agency, Serial no. 95-12, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C.(1977).
  9. Smith, M. R., "The biodegradation of aromatic hydrocarbons by bacteria," *Biodegradation*, **1**, 191~206(1990).
  10. Yadav, J. S. and Reddy, A. C., "Degradation of benzene, toluene, ethylbenzene and xylene(BTEX) by the lignin-degrading basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium*," *Appl. Environ. Microbiol.*, **59**, 756~762(1993).
  11. Goudar, C. T. and Strevett, K. A., "Comparison of relative rates of BTEX biodegradation using respirometry," *J. of Industrial Microbiology and Biotechnology*, **21**, 11~18(1998).
  12. 토양 환경 보전법, 환경부(1996).
  13. 지하수법, 건설교통부(1994).