

*In-Situ* Flushing기법이 Endosulfan으로 오염된 토양의  
생물학적 처리에 미치는 영향

전민하·최상일

광운대학교 환경공학과

**Effects of *In-Situ* Flushing on the Bioremediation  
of Soil Contaminated with Endosulfan**

**Min-Ha Jeon · Sang-il Choi**

*Dept. of Environmental Eng., Kwangwoon University*

**ABSTRACT**

According to a series of batch-scale washing tests, SDS+POE<sub>5</sub> and POE<sub>5</sub>+POE<sub>14</sub> were determined for the applicable mixed surfactants. Because SDS+POE<sub>5</sub> showed slightly negative effects on the microbes in the toxicity tests, POE<sub>5</sub>+POE<sub>14</sub>((1:1) 1%) was chosen for this study. In the *in-situ* flushing experiments, the removal rate of endosulfan was 67% for the injection rate of 1.5L/min/m<sup>2</sup>. And when methanol and ethanol were added as cosolvent, 75% and 81% removal efficiencies were achieved, respectively. In the tests of bioremediation after the application of *in-situ* flushing, the removal rates of contaminated soils having 13mg/kg dry soil and 3mg/kg dry soil as initial concentrations were 86% and 81%, respectively. There were no significant degradation after 24 hours. The major rate-limiting factor for the biodegradation of endosulfan might be the mass transfer from soil phase to liquid phase after 24 hours. With the addition of surfactant, 89% removal was achieved after 120 hours. Because the surfactant improved the mass transfer rate, the biodegradation of endosulfan was enhanced. When surfactant and cosolvent were added together, the adaptation period of microorganisms to the surfactant became longer and the removal rates were 84% and 83% for methanol and ethanol, respectively.

**Key words :** *In-Situ* Flushing, Endosulfan, Surfactant, Cosolvent, Desorption, Biodegradation

## 요약문

회분식 세척실험에서 적용된 혼합계면활성제 중 POE<sub>5</sub>+POE<sub>14</sub>, SDS+POE<sub>5</sub>가 endosulfan의 탈착에 효율이 우수한 것으로 나타났으며, 독성실험 결과 SDS+POE<sub>5</sub>는 미생물의 활성을 다소 저해시키는 경향이 있어 POE<sub>5</sub>+POE<sub>14</sub> (1:1) 1%를 세척제로 선정하였다. *In-Situ* flushing 실험에서는 세척용액의 주입 flux가 1.5L/min/m<sup>2</sup>일 때 67%의 제거효율을 얻을 수 있었으며, 보조용매로서 메탄올과 에탄올을 첨가한 경우에는 각각 75%와 81%의 제거효율을 보였다. *In-situ* flushing기법의 적용에 따른 농도 저감이 생물학적 분해에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 초기 농도 13mg/kg dry soil과 3mg/kg dry soil인 토양을 생물학적으로 처리한 결과 제거효율은 각각 86% 및 81%였으며, 2가지 토양 모두 24시간 이후에는 미생물에 의한 작용이 크지 않은 것으로 나타났다. 이것은 토양상에서 용액상으로의 물질전이 속도가 윽속 단계로 작용하고 있기 때문이라 판단된다. 토양에 잔류하는 계면활성제가 생물학적 분해에 미치는 영향에 대하여 검토한 결과, 잔류하는 계면활성제에 의해 물질전이 속도가 향상되어 생분해가 지속적으로 일어났으며 초기 농도 3mg/kg dry soil인 경우 120시간이 경과한 후 89%의 제거효율을 나타내었다. 계면활성제와 보조용매가 동시에 잔류하는 경우에는 계면활성제에 대한 순용기간이 보다 길어지는 것을 알 수 있었으며, 메탄올과 에탄올의 경우 각각 84% 및 83%의 제거효율을 나타내었다.

**주제어 :** *In-Situ* Flushing, 엔도설판(endosulfan), 계면활성제, 보조용매, 탈착, 생분해도

## 1. 서론

우리나라를 비롯하여 전세계적으로 농업 생산성을 높이기 위하여 많은 농약들이 사용되고 있는데 그 중 유기염소계 농약은 주요 환경오염 물질 group의 하나로<sup>1)</sup> 밭, 과수원 등에서 살충제의 용도로 다량 사용되고 있으며, 대다수 유기염소계 농약은 높은 독성 때문에 생태계와 인간에 큰 위협을 주고 있다. 이러한 이유로 DDT, BHC, Heptachlor 등과 같은 농약은 현재 사용이 금지되어 있다. 1954년 개발된 화학 구조상 cyclodiene 계열의 농약인 endosulfan (6, 7, 8, 9, 10, 10-hexachloro-1, 5, 5a, 6, 9, 9a-hexahydro-6, 9-methano-2, 4, 3benzo(e)dioxathiepine-3-oxide)은 낮은 농도에서도 효과가 크며<sup>2)</sup> pyrethroid계 농약에 대한 저항성이 있는 해충에 대해서도 살충력이 뛰어난<sup>3)</sup> 비침투성 광범위 살충제로서 오늘날까지 여러 국가에서 사용되고 있으며<sup>2)</sup> 국내에서도 밭과 과수원 등지에서 많은 양이 사용되고 있다(연

간 국내 사용량 91년도:148 톤, 94년도:156 톤)<sup>4)</sup>.

농약에 의한 토양오염은 지표수 및 지하수의 수질에도 악영향을 미치게 되는 등 주변 환경에 2차 오염을 유발하게 된다. 따라서 오염된 토양은 신속하게 정화되어야 하며, 미국을 비롯한 선진국에서는 오래 전부터 오염토양의 정화에 막대한 노력을 기울여 다양한 기술들이 개발되어 일부는 실용화되고 있으나, 국내의 경우 이 분야에 대한 기술개발은 극히 초보적인 단계에 지나지 않고 있어 국내 실정에 맞는 기술의 개발이 절실히 요구되고 있다<sup>5)</sup>.

본 연구에서는 난분해성 유기염소계 농약인 endosulfan으로 오염된 토양을 효율적으로 정화 복원하기 위하여 *in-situ* flushing을 적용함으로써 오염물질의 농도를 저감시킴과 동시에 미생물에 대한 오염부하를 감소시켜 주고, 잔류하게 되는 계면활성제와 보조용매가 endosulfan의 생물학적 처리에 미치는 영향을 검토하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

**Table 1. The characteristics of the soil and analysis methods**

Property		Method	Measurement
pH		토양화학분석법	6.9
Water Content [%]		"	12.2
Organic Content [%]		"	5.16
Effective Size [mm]		Methods of Soil Analysis I	0.1
Uniformity		"	4.27
Particle Density [g/cm <sup>3</sup> ]	#4 ~ #20 ~ 200	Methods of Soil Analysis I	2.71
Bulk Density [g/cm <sup>3</sup> ]	#4 ~ #20 ~ 200		1.27
			1.31
			0.53
			0.47

2.1 실험 재료

2.1.1 사용토양

토양은 서울시 태릉에 위치한 과수원에서 채취하여 #4체(4.7mm)보다 굵은 입径의 토양을 제거한 후 110℃에서 하루 이상 건조시킨 후 사용하였다. 토양의 기초 특성은 Table 1에 나타내었다. 오염시킨 후 냉암소에 보관하면서 최소 일주일 이상 토양을 실험에 사용하였다.

2.1.2 세척제 및 사용배지

본 실험에서는 토양과 결합될 우려가 낮은 비이온계 계면활성제중 독성이 거의 없으며 국내에서 대량 생산되어 수급이 원활한 poly oxyethylene oleyl ester 계열의 POE<sub>5</sub>와 POE<sub>14</sub>를 사용하여 실험하였다. 일반적으로 비이온계 계면활성제에 음이온계 계면활성제를 혼합하는 경우 비이온계 계면활성제를 단독으로 적용하는 것보다 세척효율이 향상 되는 것으로 알려져 있으므로<sup>6</sup> 음이온 계면활성제인 SDS(sodium dodecyl sulfate)를 혼합하여 세척실험을 수행하였고 보조용매(cosolvent)로는 2종류의 알코올을 선정하여 실험하였다(Table 2).

**Table 2. Surfactants and cosolvents used in this study**

Commercial Name	Molecular Formular	Avg. MW [g/gmol]	*HLB
POE <sub>5</sub>	C <sub>17</sub> H <sub>33</sub> COO(C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O) <sub>5</sub> H	502	8.6
POE <sub>14</sub>	C <sub>17</sub> H <sub>33</sub> COO(C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O) <sub>14</sub> H	898	13.6
SDS	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>11</sub> OSO <sub>3</sub> Na <sup>+</sup>	288	-
Ethanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	46	-
Methanol	CH <sub>3</sub> OH	32	-

\*HLB:hydrophile-liphophile balance

Endosulfan 분해균의 분리에는 NB배지 (NaCl 10g/L, Peptone 5g/L, Yeast 5g/L)와 N9 배지 (salt mixture(Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 70g/L, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 30g/L, NaCl 5g/L, NH<sub>4</sub>Cl 10g/L) 100mL, 0.01M CaPO<sub>4</sub> 10mL, 0.1M MgSO<sub>4</sub> 10mL에 증류수로 1L를 맞춤)를 사용하였고 분해실험에는 CI 무첨가 최소 배지(Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O 0.024g/L, Mg SO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.246g/L, NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O 7g/L, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 3g/L, NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 2.52g/L)를 사용하였다.

사용된 모든 시약은 특급 또는 1급품이었고, endosulfan standard는 Dr. Ehrenstorfer GmbH 제품을 사용하였다.

2.2 Endosulfan 분석방법

Endosulfan의 농도를 측정하기 위한 가스 크로마토그래피의 분석 조건을 Table 3에 나타내었다.

2.3 세척제 선정실험

2.3.1 회분식 세척실험

본 실험은 연속식 세척을 실시하기 위한 기초 실험으로 세척제의 종류, 혼합비, 농도에 따른 세척효율을 비교함으로써 고효율의 세척제를 선정하고자 하였다. 비이온 계면활성제인 POE<sub>5</sub>, POE<sub>14</sub> 그리고 음이온 계면활성제인 SDS를 이용하여 POE<sub>5</sub>+POE<sub>14</sub>, POE<sub>5</sub>+SDS, POE<sub>14</sub>+SDS 등의 3가지 혼합 계면활성제를 제

**Table 3. The analytical conditions of gas chromatography for the measurement of endosulfan concentration**

GC model	HP 5890 II
Column	HP-1
Injection Volume [ $\mu$ l]	3
Injection Mode	split
Split Ratio	40
Injection Temperature [ $^{\circ}$ C]	280
Detector	ECD
Detector Temperature [ $^{\circ}$ C]	290
Carrier Gas	N <sub>2</sub>
Flow Rate [mL/min]	2.2

조하여 적용하였다.

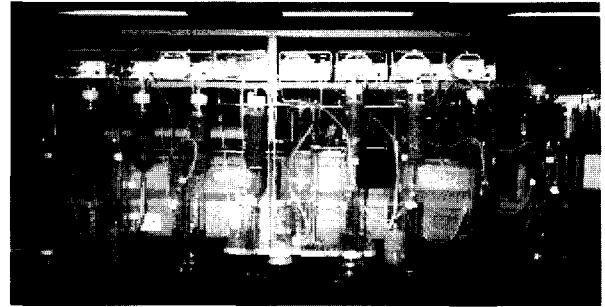
혼합 계면활성제의 농도는 0.1, 0.5, 1%로 하였으며 혼합비는 1:2, 1:1, 2:1로 적용하여 실험하였다. #20~200의 토양을 사용하였으며 초기 오염농도는 13mg/kg dry soil 이었다. 회분식 실험은 250mL 삼각플라스크에 오염 토양을 25g씩 정량 주입하였으며 진탕 비는 1:5, 진탕 시간은 3시간, 진탕 속도는 150rpm으로 하여 실험하였다.

### 2.3.2 선정 세척제의 독성 실험

계면활성제가 토양 내에 잔류하게 되면 미생물 군집에 영향을 줄 우려가 있으므로 endosulfan 분해균을 대상으로 독성실험을 수행하였다. 계면활성제 1%가 포함된 NB 액상배지 300mL을 시료 채취 시각의 수만큼 준비하여 30 $^{\circ}$ C에서 배양하면서 시료 채취 시각별로 1개의 배지에서 균 배양액을 100 mL 취하여 105 $^{\circ}$ C에서 18시간 건조시켜 건조 균체량을 측정하였으며, 사용된 배지는 폐기하였다.

## 2.4 In-situ flushing 효율에 영향을 미치는 인자

내경 4.5cm, 유효깊이 17cm인 유리 컬럼을 이용하여 in-situ flushing 실험을 실시하였다(Fig. 1). 이때 컬럼의 하부에는 유리필터를 설치하여 토양의 유실을 방지하였다. 초기 농도 13mg/kg dry soil인 토양



**Fig. 1. Experimental apparatus for the flushing tests**

300g을 공극률이 0.47이 되도록 컬럼에 충전하였으며, 공극의 체적(pore volume)은 약 120mL이었고, 세척용액은 Masterflex 펌프를 이용하여 상향류(upflow) 방식으로 주입하였다.

### 2.4.1 세척용액 주입 flux에 의한 영향

세척용액의 주입 flux 변화에 의한 영향을 살펴보기 위하여 1.5L/min/m<sup>2</sup>(1.1mL/min), 2.0L/min/m<sup>2</sup>(1.5mL/min), 2.7L/min/m<sup>2</sup>(2.0mL/min)를 적용하여 실험하였다.

Endosulfan의 초기 농도는 13mg/kg dry soil 이었고, 세척제는 POE<sub>5</sub>+POE<sub>14</sub>(1:1) 1% 이었다.

### 2.4.2 보조용매의 적용에 의한 영향

보조용매로 알코올을 사용함으로써 기대할 수 있는 효과는 이동성의 향상과 표면장력의 감소 및 소수성 유기오염물질의 용해도 향상이다.

이러한 이동성과 용해도 향상으로 인해서 처리시간의 단축과 오염물질의 효율적인 처리를 기대할 수 있다<sup>7</sup>.

보조용매로 메탄올과 에탄올을 첨가하여 그에 따른 세척 효율의 증감을 검토하였다. 주입 flux는 1.5L/min/m<sup>2</sup>, 보조용매의 농도는 세척용액에 대하여 1, 5, 10%가 되도록 적용하였다. 초기 오염 토양 농도는 13mg/kg dry soil, 세척제는 POE<sub>5</sub>+POE<sub>14</sub>(1:1) 1%를 적용하였다.

2.5 생물학적 분해실험

2.5.1 Endosulfan 분해균의 분리 및 순응

Endosulfan 분해균을 분리하기 위하여 경기도에 위치한 S골프장에서 채취한 토양을 이용하였으며, 직접 배양법을 적용하였다.

토양 50g을 NB배지 200mL에 넣고 30°C 에서 48 시간 동안 배양한 후 endosulfan이 150mg/L 함유된 N9 배지에 희석 도달하여 30°C에서 집락이 형성될 때까지 배양하였으며 이 집락을 이용하여 실험을 수행하였다.

분리된 균은 endosulfan 농도가 30mg/L가 되도록 조절된 CI 무첨가 최소배지에 접종한 후 48시간 동안 30°C에서 진탕 배양하며 순응시켰다.

2.5.2 Microcosm 실험

미생물에 의한 endosulfan의 분해양상을 살펴보기 위하여 microcosm 실험을 실시하였다. 실험은 50mL serum bottle을 사용하였고 초기 오염토양의 농도는 3mg/kg dry soil, 13mg/kg dry soil으로 하였다.

Table 4. Experimental conditions for microcosm.

	Conditions
I	· Initial Concentration 13mg/kg dry soil · Seeding
II	· Initial Concentration 3mg/kg dry soil · Seeding · Surfactant Added
III	· Initial Concentration 3mg/kg dry soil · Seeding
IV	· Initial Concentration 3mg/kg dry soil · Seeding · Surfactant Added · Cosolvent Added(Ethanol)
V	· Initial Concentration 3mg/kg dry soil · Seeding · Surfactant Added · Cosolvent Added(Methanol)
VI	· Initial Concentration 3mg/kg dry soil · Sterile

Serum bottle에는 오염토양을 6g씩 동일하게 넣고, 순응된 미생물은 1mL, 영양분은 CI 무첨가 최소배지 2mL로 하여 주입하였다.

실험조건은 Table 4와 같으며 시료 채취 시각은 6, 12, 24, 48, 72, 96, 120시간으로 하였다. 실험은 정확도를 기하기 위하여 triplicate로 하였다.

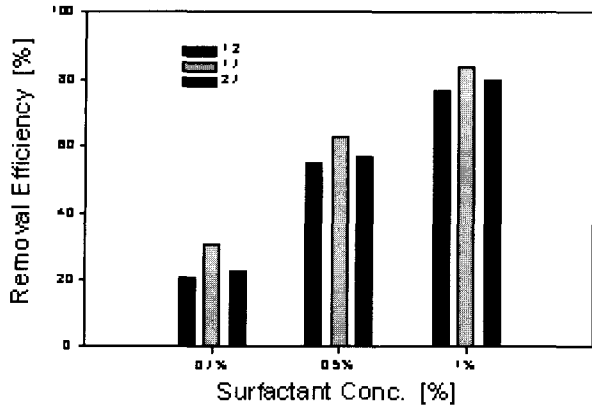
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 세척제 선정실험

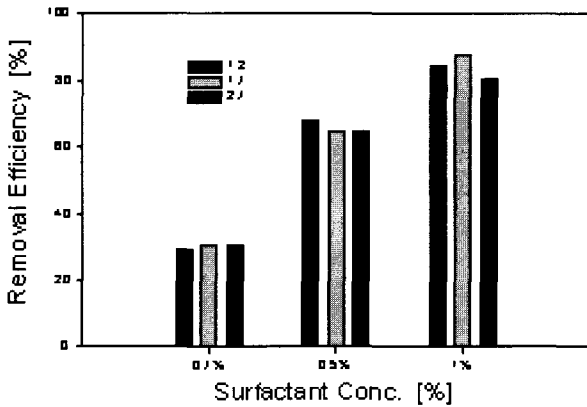
3.1.1 회분식 실험

Fig. 2는 비이온 계면활성제인 POE<sub>5</sub>, POE<sub>14</sub> 그리고 음이온 계면활성제인 SDS를 이용하여 제조한 POE<sub>5</sub>+POE<sub>14</sub>, POE<sub>5</sub>+SDS, POE<sub>14</sub>+SDS 등의 3가지 혼합 계면활성제를 0.1, 0.5, 1%의 농도로 적용하고 혼합비는 1:2, 1:1, 2:1로 변화시키면서 실험한 경우의 세척효율 변화를 나타낸다. POE<sub>5</sub>는 같은 비이온 계면활성제인 POE<sub>14</sub>와 혼합되는 경우보다 SDS와 혼합될 때 보다 양호한 세척효율을 보였으며, 계면활성제 농도 1%, 혼합비 1:1에서 88%의 제거효율을 얻을 수 있었다. POE<sub>5</sub>+POE<sub>14</sub>와 SDS+POE<sub>14</sub> 모두 적용 농도 1%, 혼합비 1:1에서 각각 84%, 79%의 세척 효율을 보였다. 이렇듯 음이온계 계면활성제와 비이온계 계면활성제의 결합에 의해 소수성 유기오염물질의 용해력이 상승하는 현상을 “remarkable synergistic effect”라고 한다. 이는 비이온계 계면활성제의 단량체 사이에 음이온계 계면활성제의 단량체가 끼게 되면 반발력이 작용하게 되어 동적으로 안정한 미셀을 형성하게 되기 때문에 소수성 유기오염 물질에 대한 용해도가 증가하는 것이다<sup>8</sup>.

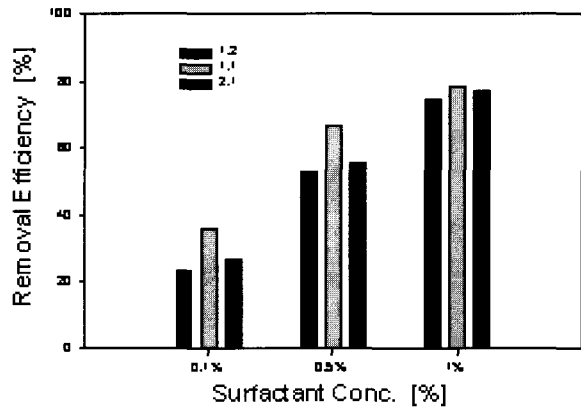
또한 혼합비 1:1에서 세척효율이 가장 높은 것은 음이온계 계면활성제에 혼합되는 비이온계 계면활성제의 혼합비가 증가 될수록 POE chain length가 길어져 미셀의 크기는 증가하지만 응집수는 적어지게 되어 안정도가 떨어지고<sup>9</sup>, 혼합비가 감소될수록 미셀의 안정도는 증가하지만 미셀의 크기가 감소하게 되어 효율이 떨어졌다고 판단된다.



a) POE<sub>5</sub>+POE<sub>14</sub>



b) POE<sub>5</sub>+SDS



c) POE<sub>14</sub>+SDS

**Fig. 2. Removal efficiencies of endosulfan vs. concentrations of surfactant (endosulfan 13mg/kg dry soil, dilution ratio= 1:5, shaking time = 3hr)**

3.1.2 선정 세척제의 독성실험

앞선 실험에서 선정된 혼합 계면활성제 용액을 이용하여 endosulfan 분해균에 대한 독성 실험을 실시하였다. POE<sub>5</sub>+SDS의 경우 미생물의 성장이 다소 저해되고 있음을 알 수 있었으며, 이는 음이온 계면활성제인 SDS의 영향으로 보여진다. 비이온계 혼합 계면활성제인 POE<sub>5</sub>+POE<sub>14</sub>의 경우는 미생물의 성장에 거의 영향을 미치지 않았다.

3.2 In-situ flushing 효율에 영향을 미치는 인자 검토

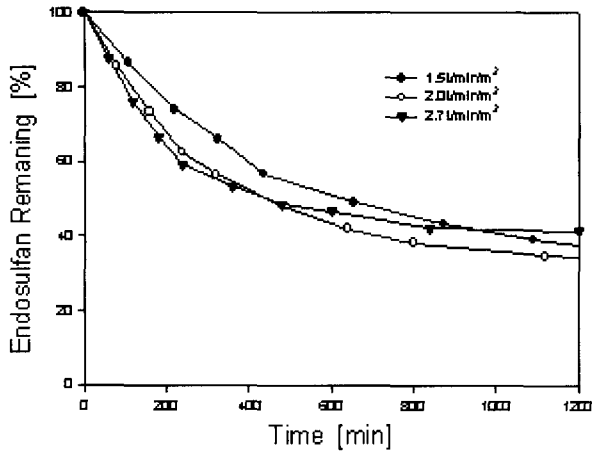
3.2.1 세척용액 주입 flux에 의한 영향

세척용액의 주입 flux를 1.5, 2.0, 2.7L/min /m<sup>2</sup>으로 변화하여 실험한 결과를 세척액 주입 시간과 주입 pore volume에 대해 각각 표현하여 Fig. 3에 나타내었다. 초기에는 주입 flux가 클수록 단위시간당 세척효율이 높은 반면, 최종 세척효율에 도달하기까지의 소요 시간이 짧고 최종 세척효율은 낮았다(Fig. 3(a), (b)). 이는 토양층 통과속도가 클수록 물리적인 탈착 강도가 높아질 뿐만 아니라 농도 차에 의한 확산 현상이 강하게 작용하기 때문에 초기에는 세척효율이 높으나 체류 시간이 충분치 못하여 더 이상의 탈착이 이루어지지 않는 것으로 판단된다.

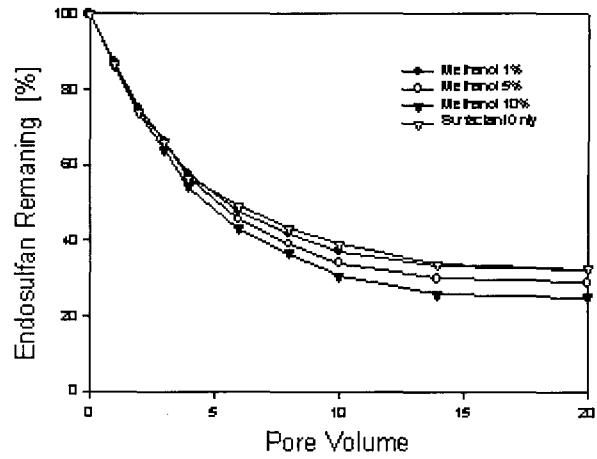
본 실험에서는 적용 주입 flux 범위내에서 세척효율이 가장 높은 (67%) 1.5L/min/m<sup>2</sup>을 운전 조건으로 선정하였다.

3.2.2 보조용매의 적용에 의한 영향

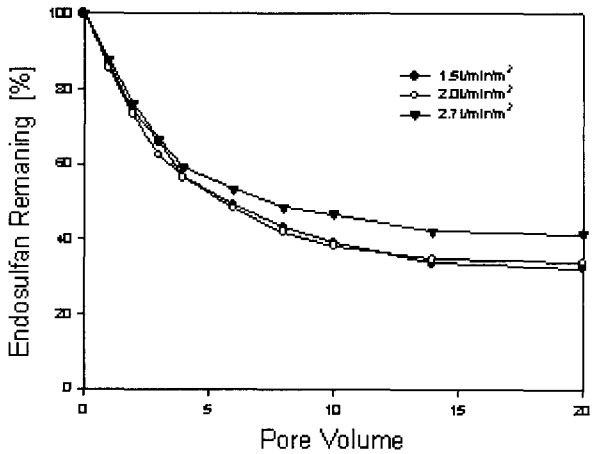
첨가제로 메탄올과 에탄올을 사용한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 농도는 1~10%의 범위에서 변화를 주었고, 첨가량이 증가할수록 세척효율은 향상되었다. 각각 10%로 적용하였을 때 메탄올 75%, 에탄올은 81%의 제거율을 보였다. 메탄올보다 에탄올의 제거효율이 더 높은 이유는 일반적으로 직쇄형 탄화수소 chain을 갖는 알코올의 용해도는 탄화수소 chain의 길이의 영향을 받는다고 하는데<sup>10</sup> 에탄올은 메탄올에 비해 2배의 탄화수소 chain을 가지고 있기 때문이라



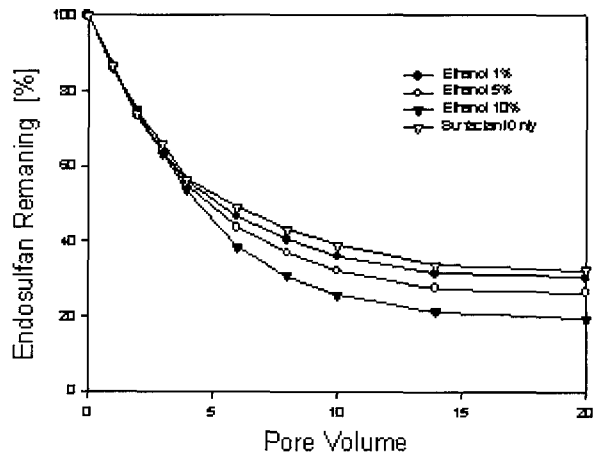
a) injection time



a) Methanol



b) total volume injected (as pore volume)



b) Ethanol

**Fig. 3.** Effects of the flow rate of the surfactant solution on the removal of endosulfan (endosulfan 13mg/kg dry soil, POE<sub>5</sub>+POE<sub>14</sub> (1:1) 1%)

**Fig. 4.** Effects of the cosolvent concentrations on the removal of endosulfan (endosulfan 13mg/kg dry soil, 1.5L/min/m<sup>2</sup>, POE<sub>5</sub>+POE<sub>14</sub> (1:1) 1%)

생각된다.

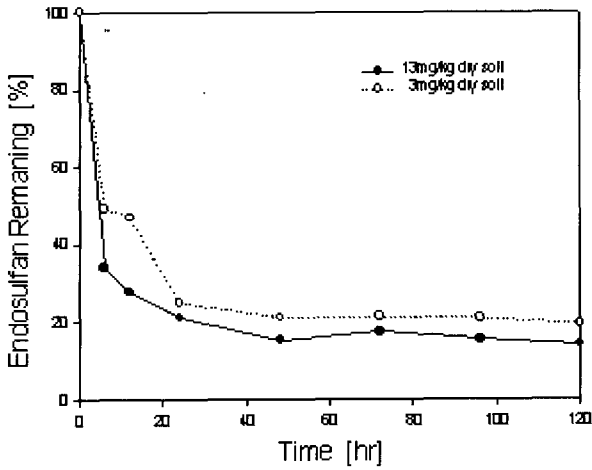
### 3.3 생물학적 분해 실험

#### 3.3.1 오염농도 저감에 의한 영향

In-Situ flushing이 생물학적 분해에 미치는 영향중

오염농도 저감에 따른 영향을 Fig. 5에 나타내었다. 초기 농도 13mg/kg dry soil과 3mg/kg dry soil 모두 24시간 이후에는 분해가 거의 일어나지 않는 것을 볼 수 있다.

이는 소수성 물질의 경우 토양에의 흡착 강도가 매우 높은 특성이 있으므로 이런 경우 해당물질의 탈착



**Fig. 5. Effects of the initial endosulfan concentration on the biodegradation of endosulfan**

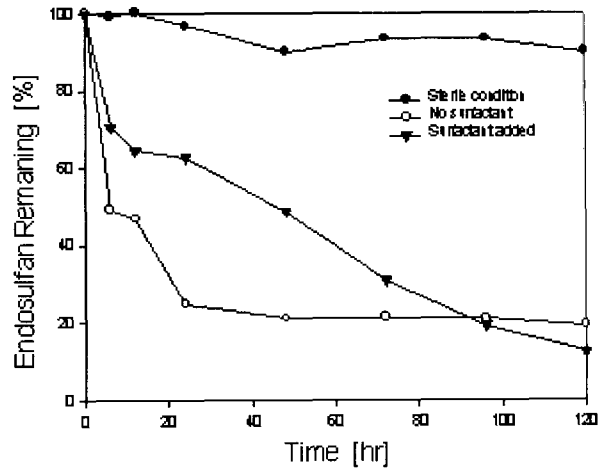
속도, 즉 미생물에 의해 직접 섭취될 수 없는 토양상에서 직접 섭취할 수 있는 용액상으로의 물질전이 속도가 율속단계로 작용하고 있는 것으로 판단된다<sup>11,12</sup>.

3.3.2 계면활성제 잔류에 의한 영향

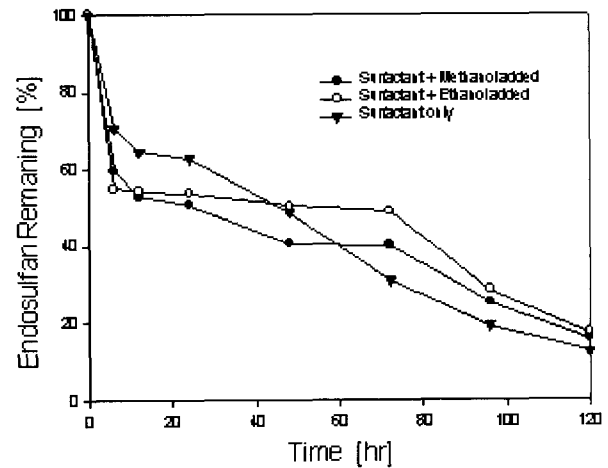
초기 농도 3mg/kg dry soil에서 계면활성제 잔류에 의한 영향을 Fig. 6에 나타내었다. 6시간 이후부터 미생물이 계면활성제에 대한 순응 양상을 보였고, 24시간이 지나면서 순응된 미생물에 의해 점차적으로 분해도가 향상되는 것을 볼 수 있었으며, 잔류하는 계면활성제에 의해 물질전이 속도가 향상 되어 생분해가 지속적으로 일어나는 것으로 판단된다. 120시간 후의 제거율은 89%였다.

3.3.3 보조용매 잔류에 의한 영향

초기 농도 3mg/kg dry soil일 때 보조용매의 잔류가 endosulfan의 생물학적 분해에 미치는 영향을 Fig. 7에 나타내었다. 미생물의 계면활성제에 대한 순응기간이 보다 길어진 것을 볼 수 있다. 이는 계면활성제와 보조용매를 함께 적용하는 경우 계면활성제의 탄화수소 chain과 보조용매인 알코올 단량체의 탄화수소 chain이 서로 얽혀 동적 안정도가 증가되면서 단



**Fig. 6. Effects of the remaining surfactant on the biodegradation of endosulfan (initial endosulfan concentration = 3mg/kg dry soil)**



**Fig. 7. Effects of the remaining cosolvent on the biodegradation of endosulfan (initial endosulfan concentration = 3mg/kg dry soil)**

단하고 안정된 미셀이 형성되기 때문에<sup>6</sup> 미생물이 미셀을 깨는데 악영향을 미친 것으로 판단된다. 최종 제거 효율은 메탄올과 에탄올이 각각 84% 및 83%였다.



## 4. 결 론

1. 회분식 세척실험에서 POE<sub>5</sub>+POE<sub>14</sub>, SDS+POE<sub>5</sub> 모두 적용 농도 1% 혼합비 1:1일때 가장 좋은 효율을 보였으며, 이때의 제거효율은 각각 84%, 88%였다. 본 실험에는 상대적으로 미생물에 대한 독성이 낮은 POE<sub>5</sub>+POE<sub>14</sub>를 적용하였다.
2. In-situ flushing 실험 결과, 초기에는 주입 flux 가 클수록 단위시간당 세척효율이 높은 반면 최종 세척효율에 도달하기까지의 소요 시간이 짧고 최종 세척효율은 낮았다. 1.5L/min/m<sup>2</sup>일 때 67%의 제거효율을 얻을 수 있었다.
3. 보조용매의 첨가에 의한 flushing 효율 향상 효과를 검토한 결과, 적용농도 10%에서 메탄올과 에탄올이 각각 75% 및 81%였다. 따라서 세척액에 보조용매로서 알코올류를 첨가하는 경우 세척효율이 향상됨을 알 수 있었다.
4. In-situ flushing이 생물학적 분해에 미치는 영향중 오염농도 저감에 따른 영향을 검토한 결과, 초기 농도 13mg/kg dry soil과 3mg/kg dry soil 모두 24시간 이후에는 분해가 거의 일어나지 않는 것을 알 수 있었다. 제거효율은 각각 86%, 81%였다.
5. 계면활성제 잔류에 의한 영향은 6시간 이후부터 미생물이 계면활성제에 대한 순응양상을 보였고, 잔류하는 계면활성제에 의해 물질전이 속도가 향상되어 생분해가 지속적으로 일어나는 것으로 판단된다. 120시간이 경과한 후의 제거효율은 89%였다.
6. 보조용매를 적용하는 경우 잔류에 의해 계면활성제와 알코올의 단량체가 서로 얽히어 단단하고 안정된 미셀이 형성됨에 따라 순응기간이 길어지는 것을 알 수 있었다. 이때의 제거효율은 메탄올과 에탄올이 각각 84% 및 83%였다.

## 감사의 글

본 연구는 1998년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었으며 이에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Kullman, S. W. and F. Matsujura, "Metabolic Pathways Utilized by *Phanerochate chrysosporium* for Degradation of the Cyclodine Pesticide Endosulfan", *Applied and Environmental Microbiology*, 62 (2), pp. 593-600, 1996.
2. Sutherland, T. D. et al, "Enrichment of Endosulfan-Degrading Mixed Bacterial Culture", *Applied and Environmental Microbiology*, 66 (7), pp. 2822-2828, 2000.
3. 강종국, 토양 중 살충제 Endosulfan의 흡탈착 특성에 관한 연구, 전남대학교 박사학위 논문, 1996.
4. 한국의 농약 사용현황과 안전성, 한국농학과학기술원 1994.
5. 환경백서, 환경부, 1997.
6. 장 민, 오염토양 정화를 위한 세척제의 특성에 관한 연구, 광운대학교 석사학위 논문, 1997.
7. Jafvert, C. T., "Surfactants/Cosolvents", *Technology Evaluation Report TE-96-02, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center(GWRTAC)*, pp. 45, 1996.
8. Nishikido, N., "Solubilization in Mixed Micelles", *Surfactant Science Series*, vol. 55, pp. 143-155, 1990.
9. Abe, M. and K. Ogino, "Solution Properties of Anionic-Nonionic Mixed Surfactant Systems", *Surfactant Science Series*, vol. 46, pp. 1-21, 1992.
10. Marszell, L., "HLB of Nonionic Surfactants: PIT and EIP Method", *Surfactant Science Series*, vol. 1, pp. 528, 1987.
11. 염익태, 이상현, 안규홍, "Biotreatability of Diesel Compounds in a Contaminated Soil", *대한환경공학회*, 21 (8), pp. 1519-1527, 1999.
12. Andrew, R. A. and G. M. Ellis, "Bioremediation: An effective remedial alternative for petroleum hydrocarbon- contaminated soil", *Environmental Progress*, 11 (4), pp. 318-322. 1992.