한국지반환경공학회 논문집
제11권 제5호 2010년 5월 pp. 5~13

현장 미생물을 이용한 생물학적 복합토양정화공정에 관한 연구

A Biological Complex Soil Treatment Process Using Selected Soil Bacterial Strains

차 민 환[1] · 이 한 욱[2] · 박 재 우†
Cha, Minwhan · Lee, Hanuk · Park, Jaewoo

ABSTRACT : The research is intended to develop and verify a biological complex soil treatment process to treat and restore soil and groundwater which is contaminated with oil, heavy metals, and nutrients through experiments with the series of treatment process such as bioreactor, rolled pipe type of contact oxidation system(RPS), and chemical processing system. 5 microbial strains were separated and selected through experiment, whose soil purification efficiency was excellent, and it was noted that anion- and nonion-series of complex agent was most excellent as a surfactant for effectively separating oils from soils. Method to mix and apply selected microbes after treating the surfactant in the contaminated soil was most effective. The removal efficiencies of total petroleum hydrocarbon (TPH)-contaminated soil about 5,000mg/L and above 10,000mg/L were approximatly 90.0% for 28 days and 90.7% for 81 days by soil remediation system and the average removal efficiencies of BOD, COD_{Mn}, SS, T-N, and T-P in leachate were 90.6, 73.0, 91.9, 73.8, 65.7% by the bioreactor and RPS. The removal efficiency was above 99.0% by chemical processing system into cohesive agents.

Keywords : Remediation, Bioreactor, TPH, Contaminated-soil, Heavy metal

요 지 : 본 연구는 생물학적 지상처리 토양정화공정을 기본으로 생물반응기, 롤형 접촉산화장치(rolled pipe type of contact oxidation system, RPS), 화학처리장치의 처리과정을 통해 유류, 중금속, 영양염류로 오염된 토양 및 지하수를 동시에 정화·복원할 수 있는 생물학적 복합토양정화공정을 개발·검증하고자 실시하였다. 실험을 통해 현장 토양 중에 있는 토양정화효율이 우수한 5종의 미생물을 분리·선발하였고, 토양으로부터 유류를 효과적으로 분리하기 위한 계면활성제로는 Anion과 Nonion계 복합제가 가장 우수한 것으로 확인되었는데, 오염된 토양에 계면활성제를 처리한 후 선발된 미생물을 혼합해 적용하는 것이 가장 효율적인 것으로 나타났다. 토양정화조를 이용해 석유계총탄화수소(Total Petroleum hydrocarbon, TPH)로 오염된 토양을 처리한 결과, 5,000mg/L 내외의 저농도 오염시 28일간 90.0%, 10,000mg/L 이상의 고농도 오염시 81일간 90.7%의 처리효율을 나타냈으며, 토양정화조에서 배출된 침출수를 생물반응기로 1차 처리하고 롤형 접촉산화장치로 2차 처리한 결과, BOD 90.6%, COD_{Mn} 73.0%, SS 91.9%, T-N 73.8%, T-P 65.7%의 평균 처리효율을 얻을 수 있었다. 이후 응집제를 통한 화학처리장치를 적용하여 중금속을 99.0% 이상 제거하였다.

주요어 : 정화, 생물반응기, 총탄화수소, 오염토양, 중금속

1. 서 론

산업기술이 발달함에 따라 석유화학 생산공정 및 저장탱크에서의 석유화학물질 유출, 산업 현장에서의 특정 유해화학물질(PCP, PCB 등) 유출, 폐광산 등에서의 중금속 및 광물질 유출, 매립지 등에서의 침출수·폐기물 유출이 심화되고 있고, 이로 인한 토양오염문제 또한 심각해지고 있다(선용호, 2009; 조장환 등, 1999; 환경부, 2006). 토양오염원의 유출은 토양의 생태복원력을 현저히 감소시켜 토착미생물의 생장을 방해하고, 식물 등 생물체의 생장을 억제하며, 토양의 산성화를 촉진시킨다(이은주 등, 2008; Brown et al, 1990). 또한, 주변 하천·호소·지하수 등으로 유입되어 수질을 악화시키는 주요 오염원으로 작용하고 있다.

이에 따라 오염된 토양을 복원하기 위해 여러 가지 토양정화 기술이 적용되고 있다. 처리 기술별로 분류해 보면 열적 처리기술, 고형화 및 안정화 기술, 토양 증기 추출기술, 물리화학적 기술, 생물학적 처리기술 등이 있는데(환경부, 2002), 열적 처리기술은 고온에 노출시키는 고온소각의 경우 유기성 오염물질 분해에 탁월한 효과가 있다는 점과 저온 열탈착의 경우 휘발성 및 비휘발성 폐기물의 처리에 효과가 있다는 장점이 있으나 고온 소각시 토양에 비가역적 변화가 발생하여 토양 본래의 기능이 상실된다는 점과 타 기술에 비해 처리비용이 높다는 단점이 있다(배우근 등, 1999).

안정화 및 고형화 처리기술은 방사능물질을 포함한 무기

1) 비회원, 한양대학교 건설환경공학과
2) 비회원, 한양대학교 건설환경공학과
† 정회원, 한양대학교 건설환경공학과(E-mail : jaewoopark@hanyang.ac.kr)

물질을 처리하는데 효과가 크며, 비휘발성 유기물질이나 살충제에 대해서는 효과가 적다. 처리비용에 관한 정보는 많지 않으며, 처리방법에 따라 비용도 상이하다. 또한, 중금속 등 무기물질을 고정시키는데 효과가 좋은 장점이 있으나 보조제의 사용으로 부피가 크게 증가하고 장기간의 효용성이 입증되지 않았다는 단점이 있다(환경부, 2002).

물리화학적 처리기술은 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs), 석유계총탄화수소(Total Petroleum Hydrocarbon, TPH), 방향족 탄화수소(Aromatic Hydrocarbons), 다이옥신(dioxin), 폴리염화바이페닐(Polychlorinated Biphenyl, PCB) 등에는 효과가 좋고, 다환성 방향족 탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)나 시안화합물(cyanide), 중금속 등에는 부분적인 효과가 있다. 토양입경별로는 자갈이나 미사에는 처리효과가 크고, 양질토나 점토에는 부분적인 효과가 있으며, 슬러지나 재 등에는 효과가 없다. 물리화학적 처리기술은 일반적으로 잘 알려진 기술로 처리비용이 상대적으로 낮은 장점이 있으나, 오염물질이 함유된 미세입자의 경우 2차 처리가 필요하고, 전기교정 처리기술의 경우 추가 기술보완이 필요하다는 단점이 있다(배우근 등, 1999).

생물학적 처리기술은 Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene (BTEX), VOCs, TPH, PAHs 등의 제거에 효과가 탁월하나 살충제나 중금속 등의 제거에는 효과가 떨어진다(Luis 등, 2005). 생물학적 처리기술은 처리비용이 적게 소요되고, 대규모 지하오염토양도 처리가 가능한 장점이 있으나, 처리효과의 정량화가 어렵고, 유해한 2차 생성물이 생성될 우려가 있으며, 토양의 온도, 습도, pH 등 적합한 환경조건이 구비되어야 한다는 단점이 있다(Prenafeta et al, 2002).

본 토양정화공정은 토양과 지하수 등 유효자원을 지속적으로 활용할 수 있도록 일련의 처리프로세스를 구성한 지상처리 토양정화공정인데, 유용미생물, 생물반응기, 롤형 접촉산화장치, 화학처리장치 등을 이용하여 오염된 토양과 지하수를 정화·복원하는 기술이다(그림 1). 유용미생물, 생물반응기, 롤형 접촉산화장치, 화학처리장치 등을 적용해 지하수 중의 유기물, 영양염류, 중금속, 대장균 등을 제거하고, 생물반응기, 유용미생물 등을 이용해 토양 중의 유기오염원, 탄화수소계 오염원 등을 제거하며 토양정화공정에서 발생하는 폐수를 동시에 제거할 수 있다(Choi et al, 2005). 토양정화과정에서 발생하는 침출수 등을 처리한 후 이 처리수에 직접 영양성분을 공급함으로써 미생물의 생장과 분해작용에 직접적으로 작용하는 영양성분을 오염된 토양에 고르게 분포시킬 수 있고, 영양성분의 변화에 즉각적으로 대처할 수 있는 장점을 나타낸다. 또한, 침출수를 정화한 후 반복적으로 순환·사용함으로써 외부로부터의 수분공급이 필요 없는 장점이 있다. 토양정화에 가장 중요한 요소인 미생물은 오염원의 종류에 따라 선택적으로 적용할 수 있고, 온도의 변화가 심한 국내 특성을 감안하여 각 환경조건에서 최적의 효율을 나타낼 수 있도록 순화하여 단계별로 적용함으로써 오염물질 분해속도를 증가시키고 토양 정화시간을 크게 단축시킬 수 있다. 따라서 본 토양정화공정은 위에서 살펴본 여러 공정들의 장점들을 모아 각각의 단점들을 상호 보완한 복합처리공정으로 실제현장에 적용하여 그 효과를 조사하였다.

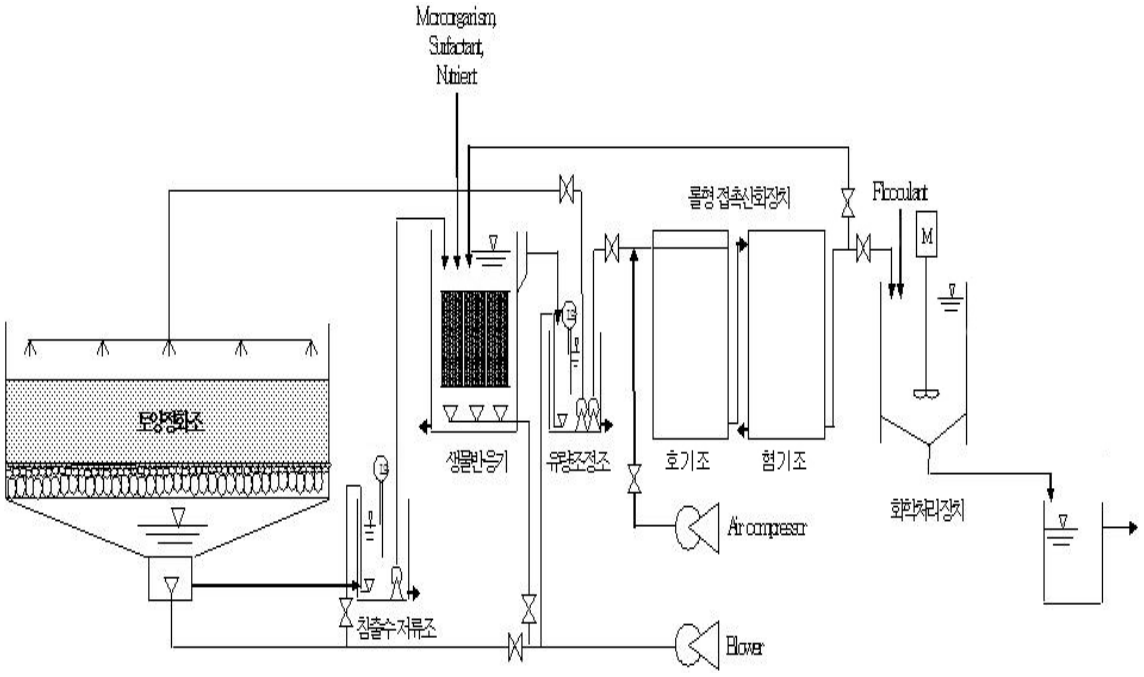


그림 1. 생물반응기를 이용한 생물학적 복합토양정화공정 개요도

2. 실험방법

2.1 토양정화미생물 분리 및 계면활성제 비교

경기도 안양 소재 유류저장소 및 벙커C유 저장고 주변에서 각각 토양을 채취하였다. 호기성 균주 채취를 위하여 채토기를 이용 표토 3cm의 토양을 채취하였고, 채취토양 조건은 pH 5.69, 15℃였으며, 채취한 토양을 항온밀폐용기에 보관하여 운반하였다. 유류저장소 및 벙커C유 저장고에서 채취한 토양에 Diesel를 10,000mg/L을 첨가하여 1개월간 적응시킨 후, 미생물을 순수 분리하였다(Shimura et al, 1999; Oh et al, 2001; Mishra et al, 2001). 순수 분리한 미생물 중 우수한 미생물을 선정·분리하기 위하여 액상 최소배지에 Diesel과 Gasoline을 1～3%(w/w) 단계적으로 오염농도를 높여 적응조건을 조성하면서 유류분해효율이 우수한 균주를 선발하였다. 계면활성제는 여러 종류의 계면활성제를 이용하여 토양입자와 유류입자의 분리실험을 통해 비교분석하였다(Park et al, 1993).

2.2 토양정화공정 및 생물반응기 적용

인천광역시 청라택지개발지구 내에서 사질토를 채취하여 1, 2차로 나누어 토양을 인공오염시킨 후(표 1), 각각 70cm, 100cm 깊이로 복토하였다. 선발된 균주의 배양액과 영양성분을 생물반응기에 1일 3회 공급(8시간 주기)하고 계면활성제는 20L(1%(v/v)) 투입하였으며, 수분은 1회당 400L(200L/토양 m^3) 공급하면서 수분율을 10～20%로 유지하였다(Lee et al, 2001). 반응기 체류시간은 12시간 이상 유지하여 침출수 처리와 미생물 배양이 동시에 진행되도록 하고 배양이 완료된 후 토양처리조로 다시 분사하며 순환시켰다. 유기오염원, 영양염류 등이 함유된 침출수를 대상으로 산소공급방법, 체류시간, 유입부하 등을 조절하며 생물반응기를 거친 처리수의 수질과 미생물농도 등을 비교하였다.

2.3 롤형 접촉산화장치(RPS) 적용실험

RPS는 polyethylene 재질로 제작한 Plug-flow type 관로형 생물학적 고도처리장치로 로프형 미생물접촉재가 내장된 요철모양의 롤형 접촉산화장치 2set(호기성 1set, 무산소 1set)를 적용하였다. 연속적으로 호기성 및 혐기성 조건을 병행하여 토양정화조 침출수 처리 후 수질을 분석하였다.

표 1. 오염된 토양의 성분요소

contaminant	1차 실험	2차 실험
Gasoline	20L, 15.0kg	40L, 30.0kg
Diesel	20L, 16.4kg	40L, 32.8kg
Benzene	27L, 23.5kg	27L, 23.5kg
Toluene	27L, 23.2kg	27L, 23.2kg
Xylene	27L, 23.5kg	27L, 23.5kg
n-Hexane	-	10L, 6.5kg

2.4 화학처리장치 적용실험

화학처리장치에서는 bentonite, zeolite, poly acrylic acid (PAA) 등이 혼합된 분말응집제를 사용하였다(유지영 등, 2001; 이현주 등, 2004; 조현희 등, 2004; Yoo et al, 2004). 화학반응조에 전 공정을 마친 유출수를 넣고 교반기를 가동하여 5분간 응집제와 유출수를 충분히 반응시킨 후 1분간 침전시켜 상등수 수질을 분석하였다.

2.5 분석방법

본 연구에서 행한 각 물질의 분석방법은 다음과 같다. 유류물질은 EPA 8015B method에 의해 GC/FID를 사용하여 분석하였다. 수질분석 항목은 BOD_5, COD_{Cr}, SS, T-N, T-P였다. 시료분석 시 분석항목은 이온성물질인 NH_4^+-N, NO_3^--N, PO_4^{-3}-P를 분석하였으며, 0.45um menbrane filter(D=47mm)로 여과하여 측정하였다. 모든 수질분석항목은 Standard Methods에 준하여 분석을 실시하였다. 양이온은 Atomic Absorption Spectrometry(AAS)를 이용하여 음이온은 Ion chromatography (IC)를 이용하여 각각 측정하였다(APHA et al, 1985).

3. 결과 및 고찰

3.1 토양정화미생물 분리 및 계면활성제 비교결과

유류저장소 채취 토양에서 5종의 미생물을 분리하여 DNB-1～DNB-5로 구분하였고, 벙커C유 저장고 채취 토양에서 4종의 미생물을 분리하여 DNB-a1～DNB-a4로 구분하였다. 유류저장소 채취 토양에서 분리한 5종의 미생물(DNB-1～DNB-5)과 벙커C유 저장고 채취 토양에서 분리한 4종의 미생물(DNB-a1～DNB-a4)의 Diesel 분해효과를 비교한 결과 1% Diesel 농도에서는 DNB-a2, DNB-a4, DNB-1, DNB-3의 분해효율이 우수하였고, 3% diesel 농도에서는 DNB-a2, DNB-3, DNB-5의 분해효율이 우수하게 나타났다(그림 2).

토양에서 분리된 5개 strains을 16S rRNA를 통한 동정 결과, DNB-1은 *Bacillus* sp, DNB-3은 *Pseudomonas* sp, DNB-5는 *Acinetobacter* sp, DNB-a2는 *Pseudomonas* sp, DNB-a4는 *Acinetobacter* sp 속(屬, genus)으로 모두 통성미생물로 확인되었다.

균주선발실험에서 효율이 우수한 것으로 나타난 5개 균

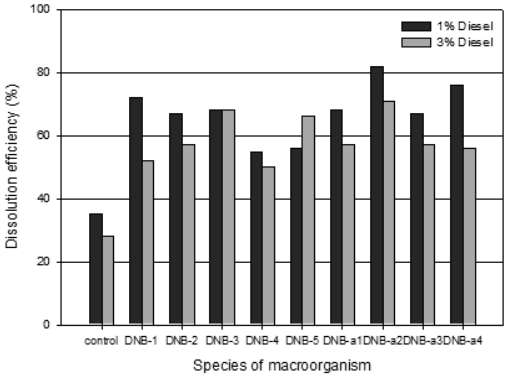
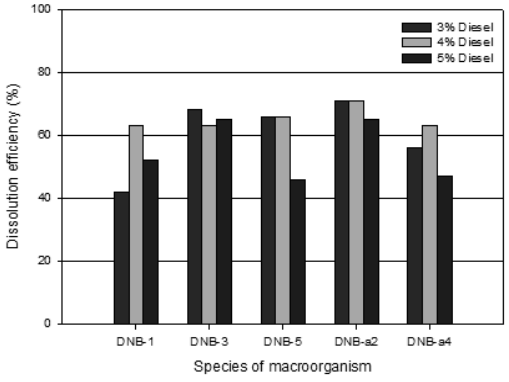
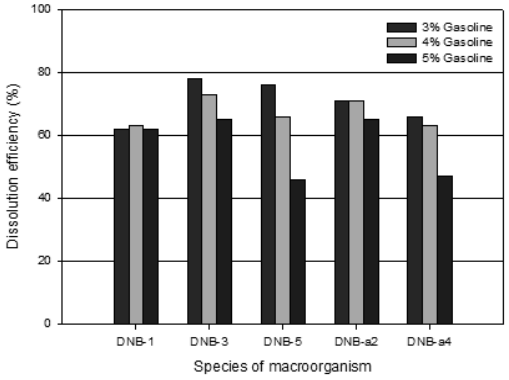


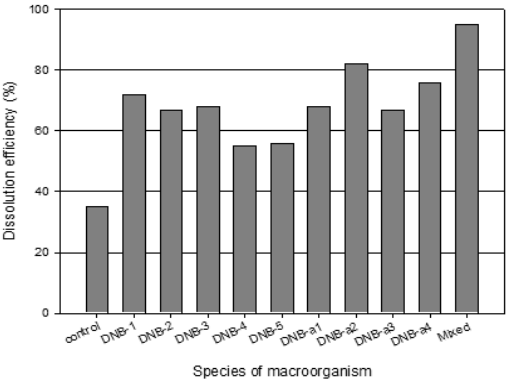
그림 2. Diesel 1%와 3% 오염배지에서의 각 균주별 분해효과



(a) Diesel

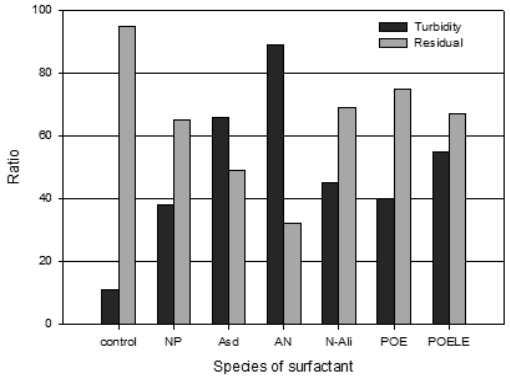


(b) Gasoline

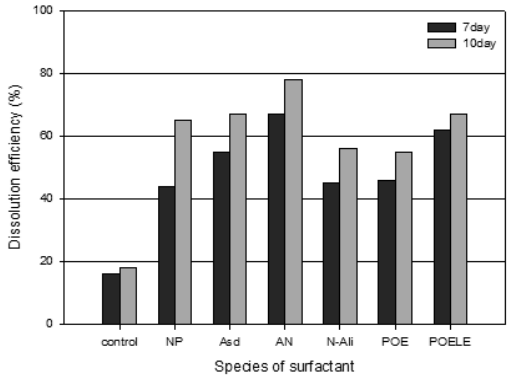


(c) 군주의 상호보완효과

그림 3. 적응 효과



(a) 탁도 및 잔존율



(b) 분해율

- Control : Water
- NP : Nonionic Phosphate
- ASD : Anion Sodium Diocyl
- AN : Anionic & Nonionic Blend
- N-Ali : Nonionic Aliphatic
- POE : Polyoxyehylene
- POELE : Polyoxyehylene Laurylether

그림 4. 계면활성제별 토양에서의 유류분리

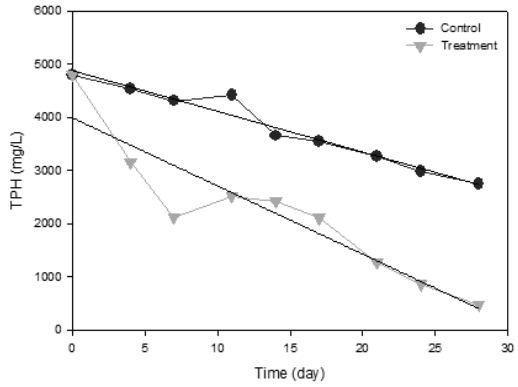
주를 대상으로 Diesel과 Gasoline의 오염배지 농도를 올리면서 분해효율 향상효과를 실험한 결과, 디젤 오염 배지에서는 DNB-3, DNB-a2, DNB-5의 순으로 분해효율이 우수하였고, 원유 오염 배지에서는 저농도에서는 DNB-3, DNB-5가 고농도에서는 DNB-a2가 우수한 것으로 나타났다(그림 3(a), (b)). DNB-1, DNB-3, DNB-5, DNB-a2, DNB-a4 등 5개 균주를 대상으로 단독투입시와 혼합투입시의 분해효과를 비교한 결과 단독 균주보다는 혼합균주의 분해효율이 우수하게 나타났는데, 혼합균주의 상호보완효과가 나타나는 것을 확인할 수 있었다(그림 3(c)).

계면활성제의 경우 AN계 계면활성제(CMC : 0.05mM)의 토양 내의 유류분리효율이 가장 우수하였고(그림 4(b)), 이는 유출된 유분의 탁도(Turbidity)와 잔존율에서도 유사한 경향을 나타냈다(Alfonso et al, 1996).

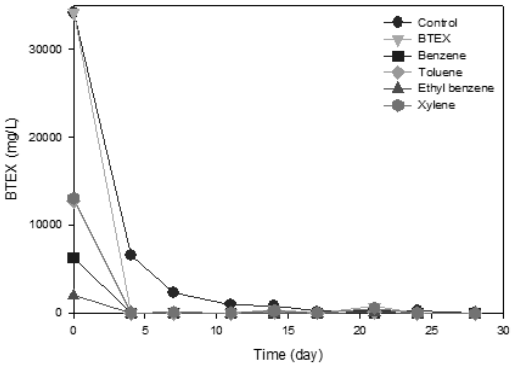
3.2 토양정화실험

3.2.1 1차 실험

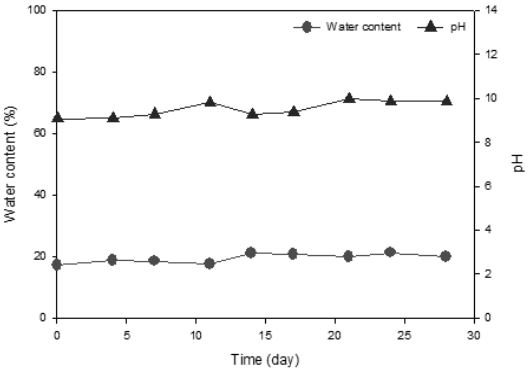
표 1에서 인공오염시켰던 1차 오염토양 샘플을 바탕으로



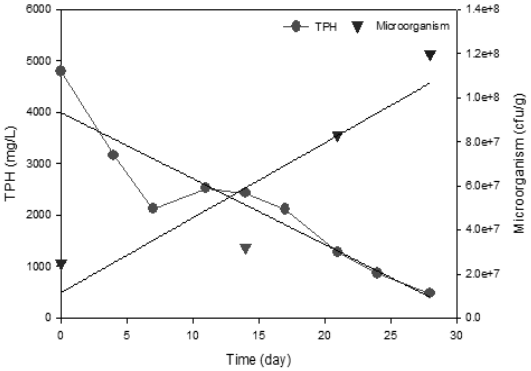
(a) TPH 처리 효과



(b) BTEX 처리 효과



(c) pH와 함수율 변화



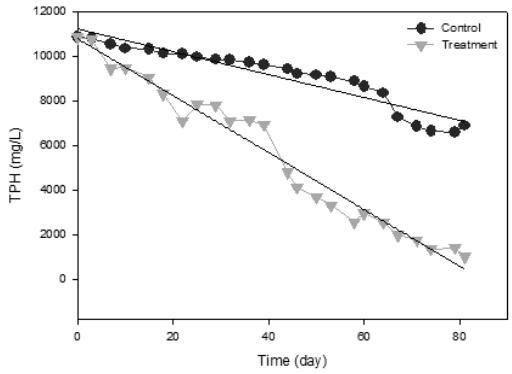
(d) TPH와 균수의 상관관계

그림 5. 1차 토양 정화 실험

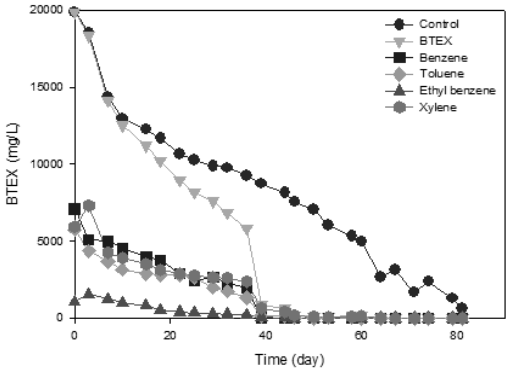
정화실험을 실시한 결과, TPH는 28일간 90.0%, 1일 평균 8.6%의 처리효율을 나타냈으며(그림 5(a)), BTEX는 28일간 100%, 1일 평균 32.8%의 처리효율을 나타냈다. BTEX의 경우 휘발성이 강한 물질적인 특성으로 인해 초기 휘발과정에서 제거되는 부분이 많아 초기 농도에 상관없이 TPH에 비해 처리 효율이 좋고 처리기간이 짧았다(그림 5(b)). TPH, BTEX 등의 처리에 있어 토양의 함수율과 pH는 직접적 상관관계를 나타내지 않았으나, 일반적으로 알려진 수준(30～60%)과 달리 적정 함수율은 20±5% 수준인 것으로 나타났고, 중성이 아닌 약알칼리성에서의 처리효율도 비교적 우수한 것으로 나타났다(그림 5(c)). 토양 미생물수는 TPH분해에 따른 활성증가와 더불어 생장을 통해 지속적으로 상승하는 것을 확인할 수 있었다(그림 5(d)). 이는 미생물을 이용한 생물학적 처리효율과 직접적인 상관관계를 나타내는 것으로 해석할 수 있다.

3.2.2 2차 실험

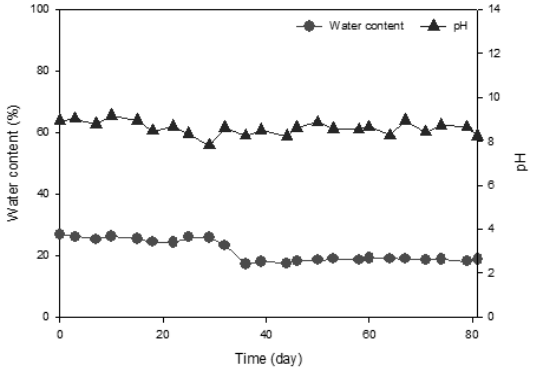
표 1에서 인공오염시켰던 2차 오염토양 샘플을 바탕으로 정화실험을 실시한 결과, TPH는 81일간 90.7%의 처리효율을 나타냈으며(그림 6(a)), BTEX는 81일간 100%의 처리효율을 나타냈다. BTEX의 성분별 처리 효율을 보면 1차 실험과 마찬가지로 초기농도는 다르지만 거의 비슷한 시점에 대부분의 성분이 제거되었음을 볼 수 있다(그림 6(b)). 1차 실험에 비해 토양의 깊이를 높이고 Diesel 및 Gasoline 오염농도를 2배로 상승시킨 후 실험을 진행한 결과 토양 높이 상승으로 인한 내부 산소공급량 저하와 오염도 상승으로 인한 미생물의 충격부하 현상, 그리고 겨울철 온도저하로 인한 미생물 활성 감소 등의 영향으로 처리기간이 길어졌다. 처리효율에 영향을 미치는 주요 변수인 수분함량, 토양 복토높이, 온도, 오염농도 등이 복합적으로 영향을 미치지만 수분함량의 변화로 인해 분해효율이 급격히 향상되는 것으로 보아 수분함량의 영향이 다른 요소보다 크다고 판단된다. 처리기간이 길어졌지만 처리하는 토양의 부피가 43% 증가하였고, 대부분의 생물학적 처리공정이 겨울철에 운영하지 않는 것에 비해 본 공정은 겨울철 운영이 가능하며 3개월의 기간 동안 TPH 1,000mg/L, BTEX 0mg/L 이하 처리가 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. TPH, BTEX 등의 처리에 있어 토양의 함수율은 직접적 상관관계를 나타냈는데, 함수율이 25% 이상일 경우 과다한 수분함유량에 따라 미생물의 활성이 오히려 저해되고, 토양 공극이 수분으로 채워지면서 휘발성 물질인 BTEX의 자연 휘발량 또한 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 토양 함수율을 낮춘 36일차 이후 TPH와



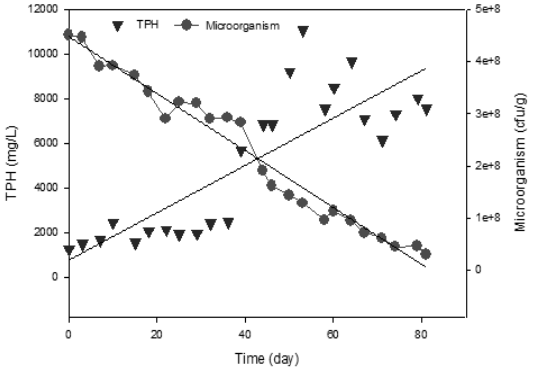
(a) TPH 처리 효과



(b) BTEX 처리 효과



(c) pH와 함수율 변화



(d) TPH와 균수의 상관관계

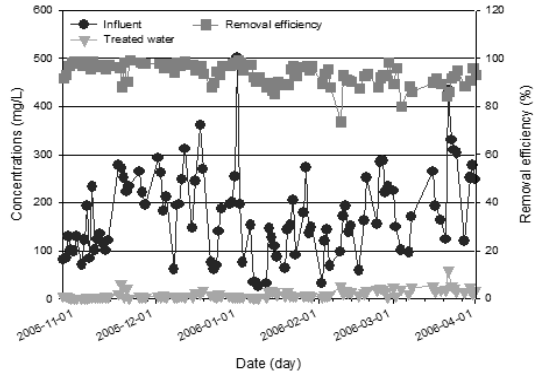
그림 6. 2차 토양 정화 실험

BTEX 처리효율이 상승한 것을 통해 적정 수분량은 최대 25% 이내임을 알 수 있고, 이 수준을 유지하기 위한 수분공급량 조절이 반드시 수반되어야 한다(그림 6(c)). TPH, BTEX 등의 처리에 있어 pH는 직접적 상관관계를 나타내지 않는 것으로 확인되었다. 토양의 인위적 오염시 토양과의 균일한 혼합을 위해 n-Hexane에 Gasoline과 Diesel을 섞어 토양과 혼합하였는데, 1차 실험보다 비교적 균일하게 오염원과 토양이 혼합된 것을 확인할 수 있다. 토양 미생물수는 완만히 증가하다가 39일차 이후 10배 이상 급격히 증가한 양상을 나타냈는데, 이는 1차 실험과 달리 고농도 오염원에 대한 적응기간이 필요하기 때문에 나타난 현상이다(그림 6(d)). 토양 함수율, 온도 등을 적절히 유지해 줄 경우 적응기간은 상당 부분 단축될 수 있다.

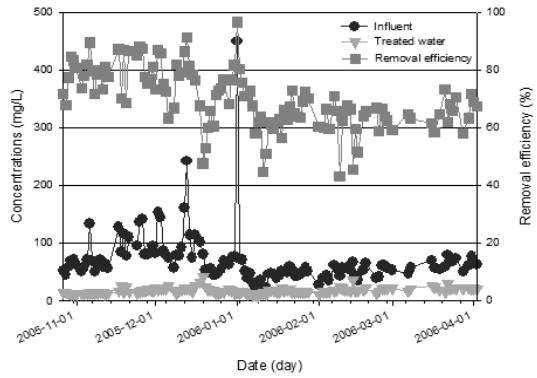
3.3 생물반응기 적용실험

BOD 처리효율을 비교하기 위해 유입농도 및 체류시간을 다양화하여 실험한 결과 부하변동에 대한 대처능력이 매우 우수하게 나타났고, 처리수질 변동 폭이 작아 안정적으로 폐수를 처리 할 수 있을 것으로 판단되었다(그림 7(a)).

유류를 포함한 COD_{Cr} 성분의 분해효과를 확인한 결과 대부분의 COD_{Cr} 성분이 제거되었는데, 이는 토양에서 분리·



(a) BOD



(b) COD_{Cr}

그림 7. 생물반응기의 처리효율

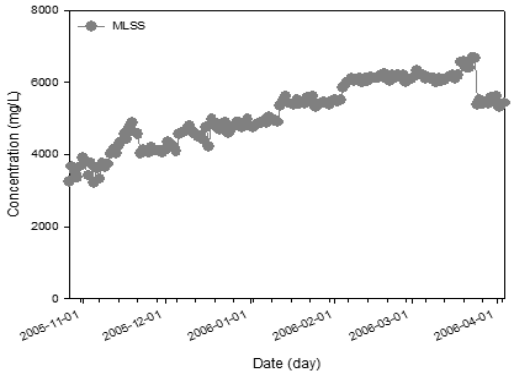


그림 8. 생물반응기의 MLSS 변화

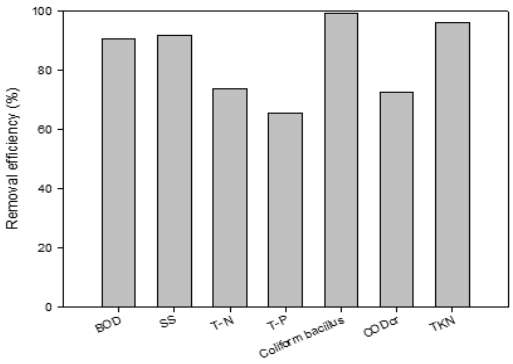


그림 9. 롤형 접촉산화장치의 수질 처리 효과

배출된 다양한 오염원이 생물반응기를 거치며 안정적으로 제거된 뒤 토양처리공정을 재순환할 수 있다는 것을 보여준다고 판단할 수 있다(그림 7(b)).

유입부하에 따라 적당한 MLSS를 유지하였는데, 부하가 높을수록 형성되는 MLSS는 증가하였고, 이를 토양정화공정에 투입할 경우 토양정화기간을 단축시킴은 물론 토양에서 분리·배출된 오염원을 빠른 시간 동안 추가적으로 제거할 수 있다(그림 8).

3.4 롤형 접촉산화장치 적용실험

토양정화조에서 배출된 침출수를 생물반응기로 1차 처리하고 롤형 접촉산화장치로 2차 처리한 결과(표 2), BOD 90.6%, COD_{Cr} 73.0%, SS 91.9%, T-N 73.8%, T-P 65.7%의 평균 처리효율을 얻었다(그림 9).

호기성 RPS에서 유기물과 질소의 산화가 진행된 후 무산소 RPS에서 탈질과 잔여 유기물 제거가 이루어지며 유기물과 영양염류 모두 고도처리 기준(BOD 10mg/L, COD_{Cr} 50mg/L, SS 10mg/L, T-N 20mg/L, T-P 2mg/L) 이내로 처리가 가능했다. 유기물과 영양염류를 처리하면서 미생물이 증가해 5,000mg/L 이상의 농도를 형성하였고, 이를 토양정화조로 유입하여 토양 중의 잔여 오염원을 제거하며 내부 순환 할 수 있었다.

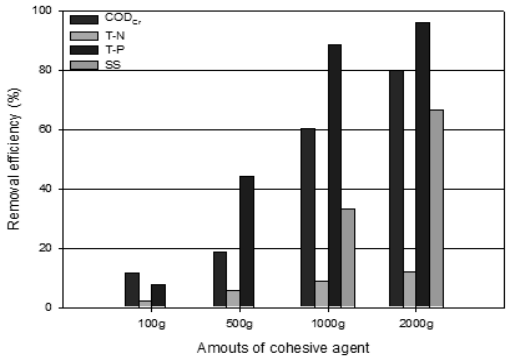
3.5 화학처리장치 적용실험

3.5.1 저농도 유입수의 응집 효율

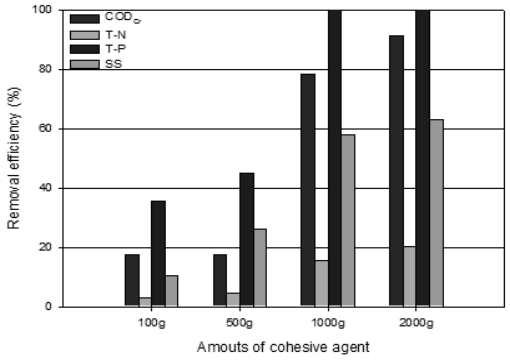
응집제 사용량에 비례하여 처리효율이 향상되는 것을 확인할 수 있었고, COD_{Cr}, T-P, SS의 처리효율이 특히 우수한 것으로 확인되었다(그림 10). 이는 용존 또는 부유 오염원이 응집제와 함께 결합한 후 커다란 덩어리(floc)를 형성함으로써 쉽게 용출·침전되기 때문이다. 용존성 질소가 수중에 상당부분 존재할 경우 화학적 응집·침전보다는 미생물에 의한 질산화 및 탈질효율이 보다 우수하여 화학적 응집처리효과가 타 항목에 비해 상대적으로 낮게 나타난 것으로 판단된다.

표 2. 롤형 접촉산화장치의 운전조건

	Aerobic RPS			Anaerobic RPS		
	suspened	attached	total	suspened	attached	total
DO (mg/L)	influent 기준 O_2 < 2.0mg/L			influent 기준 O_2 < 0.5mg/L		
MLSS (mg/L)	300.0～1,223.0 (876.3)	3,920.0～4,560.0 (4,240.0)	5,116.3	327.6～1,244.0 (873.1)	3,760.0～5,840.0 (4,800.0)	5,673.1
MLVSS (mg/L)	182.8～1,116.0 (675.9)	2,760.0～3,040.0 (2,900.0)	3,575.9	232.8～1,054.0 (677.0)	1,840.0～4,680.0 (3260.0)	3,937
VSS/SS (%)	60.9～91.3 (75.7)	66.6～70.4 (68.3)	69.9	56.8～89.6 (76.5)	49～80.1 (67.9)	69.3
BOD부하 (kgBOD/m^3·day)	0.036～0.089 (0.057)		0.057	0.040～0.086 (0.057)		0.057
F/M비 (kgBOD/kgSS·day)	0.037～0.198 (0.077)	0.013～0.031 (0.024)	0.02	0.038～0.178 (0.073)	0.012～0.026 (0.017)	0.014
SRT(day)	15.9～56.2 (34.5)		34.5	15.9～56.2 (34.5)		34.5
HRT(hr)	1.57		1.57	1.57		1.57



(a) 1차 실험



(b) 2차 실험

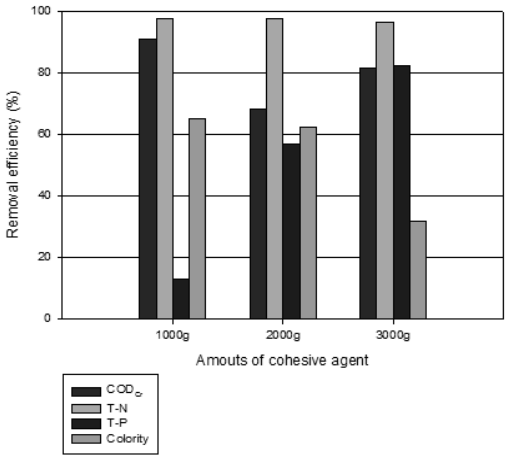
그림 10. 저농도 유입수의 응집 효율

3.5.2 고농도 유입수의 응집 효율

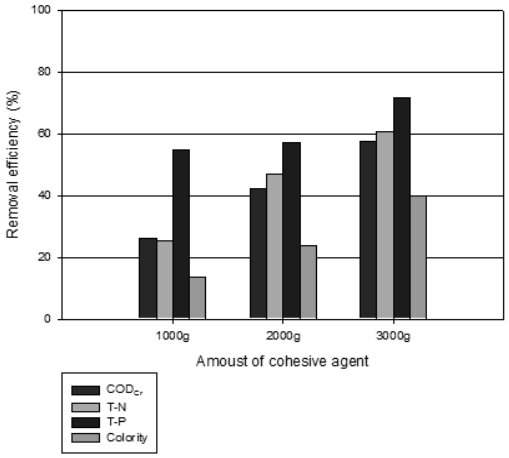
T-P는 응집제 사용량이 증가함에 따라 처리효율이 상승하는 것으로 나타났으나, 나머지 항목은 응집제 사용량과 처리효율간의 비례관계가 성립되지 않았다(그림 11). T-P는 화학적 응집처리를 통해 킬레이트를 형성·침전되며 대부분 제거가 가능하지만, COD_{Cr}, T-N, 색도 등은 화학적 처리와 생물학적 처리가 상호보완적으로 결합되어야 고효율 처리가 가능한 물질적 특징이 있기 때문이다. 유기성 질소의 농도가 높은 경우 저농도일 때보다 응집처리효율이 상승하는 것을 확인할 수 있는데, 고농도 폐수일수록 부유성·콜로이드성 오염원의 비중이 높아 이를 화학적으로 응집시키면서 상당량의 질소를 제거할 수 있기 때문으로 판단된다. COD_{Cr}, 색도가 높을수록 응집제 투입이 COD_{Cr}, 색도 상승효과로 이어져 투입량과 처리효율이 비례하지 않는 경우가 발생한다.

3.5.3 중금속 처리

응집제를 2,000mg/L 동일하게 사용하여 중금속 처리효율을 관찰한 결과 중금속 제거효율은 99.0% 이상으로 나타났다(그림 12). 이는 응집제 성분이 중금속을 흡착하여 흡착화합물을 형성하고, 이러한 흡착화합물이 연쇄적인 결합작용을 통해 거대한 플록을 형성한 후 침전·분리되기 때문이다. 토양처리 후 잔여 중금속 제거에 활용할 경우 우수한



(a) 1차 실험



(b) 2차 실험

그림 11. 고농도 유입수의 응집 효율

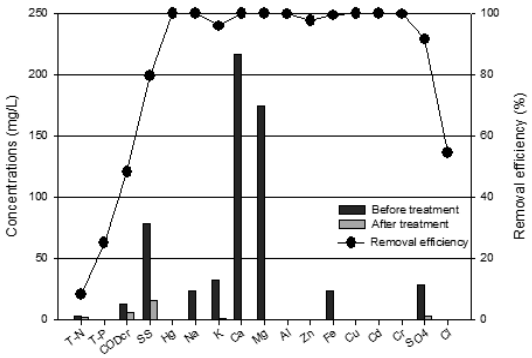


그림 12. 중금속 화학처리효율

효율을 얻을 수 있었다.

4. 결 론

본 연구를 통해 토양정화공정을 실제 현장에 적용할 수 있는 기본 인자를 산출할 수 있었고, 상용화시 많은 장점을 얻을 수 있을 것으로 기대할 수 있는데 첫째로, 미생물과 침

출수의 재활용 및 순환과정을 통해 일반적 생물학적 토양정화공정(30cm 복토 후 2～8개월 처리)보다 처리량은 2배 이상 증가시키되 처리기간은 1/2～1/8 수준으로 감소시켜 토양정화공정 중 유지관리비가 가장 적고 경제성이 우수하다. 둘째로, 현장 외 처리(Off-site) 중심의 적용방식에서 벗어나 원위치 처리(On-site) 적용이 가능하고 처리장치의 이동이 가능하여 초기투자비를 반복적으로 투자할 필요가 없다. 셋째로, 토양을 정화하는 과정이 생물학적 처리공정으로써 토양 물성 및 토질변화 가능성이 가장 적고 토양뿐 아니라 지하수, 침출수 등을 동시에 처리할 수 있는 복합처리공정이고, 2차 오염 발생 가능성이 거의 없는 친환경 공정이다. 또한 이후 응집제를 이용하여 잔여 중금속 제거에 활용함으로써 복합적인처리가 가능하다. 마지막으로, 특수미생물 등을 활용하여 이를 고농도로 배양·공급함으로써 처리효율 상승은 물론 겨울철 처리효율 저하를 최소화할 수 있다. 이와 같이 본 공정은 경제성이 우수한 친환경 공정으로써 산업적 활용성이 클 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. 배우근, 이창수(1999), 토양 및 지하수오염 대책기술, *첨단환경기술*, Vol. 7, pp. 2～12.
2. 선용호(2009), 유류오염토양의 정화에서 미생물, 영양제 및 계면활성제의 영향, *한국생물공학회*, Vol. 24, No. 1, pp. 53～58.
3. 유지영, 최재영, 박재우(2001), 유기 벤토나이트에 의한 카드뮴과 납의 흡착 특성, *한국지하수토양환경학회지*, Vol. 6, No. 3, pp. 21～29.
4. 이은주, 이상모, 이군택, 김인성, 김용학(2008), 태안 유출 원유의 생물정화를 위한 유용미생물 적용, *한국환경과학회지*, Vol. 17, No. 7, pp. 795～799.
5. 이현주, 박재우(2004), 벤토나이트와 영가 철에 의한 침출수 내의 Trichloroethylene, Cr(VI), 질산성 질소의 제거, *한국지반환경공학회 논문집*, Vol. 5, No. 2, pp. 23～31.
6. 조장환, 장윤영, 최상일(1999), 미세기포를 이용한 토양세척 기법의 디젤 오염토양 정화에 관한 연구, *한국토양환경학회지*, Vol. 4, pp. 49～55.
7. 조현희, 박재우(2004), 복합오염물질 제거를 위한 철과 개량 벤토나이트의 복합층에 관한연구, *한국물환경학회지*, Vol. 20, No. 5, pp. 512～519.
8. 환경부(2002), *토양복원 기술 및 사례집*, pp. 1～113.
9. 환경부(2002), *토양환경보전법*.
10. 환경부(2006), *환경통계연감*, pp. 343～410.
11. Alfonso, M. and Jose, L. P.(1996), Interaction of Equimolecular Mixtures of Nonionic/Anionic Surfactants with Liposomes, *Langmuir*, Vol. 12, No. 14, pp. 3393～3398.
12. APHA, AWWA and WPCF(1985), *Standard Methods for the Examination of Water and Wastwater*, 16th ed., Washington D. C., USA.
13. Brown, R. A. and Cartwright, R. T.(1990), Biotreat Sludge and Soils, *Hydrocarbon Processing*, Vol. 68, No. 10, pp. 93～97.
14. Cho, M., Chung, H., Choi, W. and Yoon, J.(2004), Linear Correlation between Inactivation of E.coli and OH Radical Concentration in TiO2 Photocatalytic Disinfection, *Water Research*, Vol. 38, No. 4, pp. 1069～1077.
15. Choi, J. Y. and Park, J. W.(2005), Competitive Adsorption of Heavy Metals and Uranium on Soil Constituents and Microorganism, *Geosciences Journal*, Vol. 9, No. 1, pp. 53～61.
16. Lee, D. H. and Robert, D. C.(2001), Optimization of DOSL Surfactant Solution Parameters on Surfactant-enhanced Remediation of Soil Columns Contaminated by 1,2,4-trichlorobenzene, *Geosciences Journal*, Vol. 5, No. 4, pp. 281～286.
17. Luis G. Torres, Neftalí Rojasa, Guadalupe Bautistaa and Rosario Iturbe(2005), Effect of Temperature, and surfactant's HLB and Dose over the TPH-diesel Biodegradation Process in Aged Aoils, *Process Biochemistry*, Vol. 40, No. 10, pp. 3296～3302.
18. Mishra, S., Jyot, J., Kuhad, R. C. and Lal, B.(2001), Evaluation of Inoculum Addition to Stimulate in Situ Bioremediation of Oily-sludge-contaminated Soil, *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 67, No. 4, pp. 1675～1681.
19. Oh, Y. S, Sim, D. S. and Kim, S. J.(2001), Effects of Nutrients on Crude Oil Biodegradation in the Upper Intertidal Zone, *Marine Polluetin*, Vol. 42, No. 12, pp. 1367～1372.
20. Park, J. W. and Jaffe P. R.(1993), Partitioning of Three Nonionic Organic Compounds between Adsorbed Surfactants, Micelles, and Water, *Environmental Science & Technology*, Vol. 27, No. 12, pp. 2559～2565.
21. Prenafeta-Boldú, F. X., Vervoort, J., Grotenhuis, J. T. C. and van Groenestijn, J. W.(2002), Substrate Interactions during the Biodegradation of Bbenzene, Toluene, Ethylbenzene, and Xylene (BTEX) Hydrocarbons by the Fungus Cladophialophora sp. Strain T1, *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 68, No. 6, pp. 2660～2665.
22. Shimura, M., Dhar, G. M., Kimbara, K., Nagato, H., Kiyohara, H. and Hatta, T.(1999), Isolation and Characterization of a Thermophilic Bacillus sp. JF8 Capable of Degrading Polychlorinated Biphenyls and Naphthalene, *FEMS Microbiology Letters*, Vol. 178, pp. 87～93.
23. Sökmen, M., Candan, F. and Sümer, Z.(2001), Disinfection of E.coli by the Ag-TiO2/UV System: Lipidperoxidation, *Journal of Photochemistry & Photobiology, A: Chemistry*, Vol. 143, No. 2-3, pp. 241～244.
24. Yoo, J. Y., Choi, J., Lee, T. and Park, J. W.(2004), Organobentonite for Sorption and Degradation of Phenol in the Presence of Heavy Metals, *Water, Air and Soil Pollution*, Vol. 154, No. 1-4, pp. 225～237.

(접수일: 2009. 10. 8 심사일: 2009. 10. 26 심사완료일: 2010. 3. 11)