

원심모형실험을 통한 폐기물 매립장의 사면안정성 평가

Slope Stability Analysis of Waste Landfill by Centrifuge Model Test

신 은 철*¹ Shin, Eun-Chul

오 영 인*² Oh, Young-In

허 열*³ Heo, Yol

Abstract

The slope stability of waste landfill has been a problem in domestic and foreign countries. Waste landfills are being constructed in a reclaimed land or mountainous area. But, most of these places consisted of steep slope and hence it is necessary to use the geosynthetic liners in there. Centrifuge model tests were performed to investigate the slope stability by considering various geosynthetic liner conditions and degree of slope. Based on test results, the degree of swelling for GCLs was measured in the range of 22~25% when it was submerged in distilled water or leachate. The permeability of GCLs is 8.75×10^{-11} cm/sec for the case of distilled water while 1.47×10^{-10} cm/sec for the case of leachate. This means that leachate gives higher permeability than that of distilled water. The results of centrifuge model test indicate that the degree of saturation of GCL, roughness of geomembrane, and slope of landfill have greatly influenced on the slope stability of solid waste landfill. The slope stability analysis for the given slope of geosynthetic liners system was also carried out by using the STABL5M program. The input parameters were determined by the various laboratory tests. The highest factor of safety for the given slope was obtained with the rough surface of HDPE and dry condition of GCL.

요 지

오늘날 폐기물 매립장의 구조적 안정성문제는 국내·외적으로 중요한 문제로 대두되고 있으며, 특히, 사면의 차수체계에서의 안정성에 대한 논란이 사회적 문제로 대두되고 있다. 또한, 우리 나라는 주민들의 NIMBY현상과 국토의 효율적 활용을 위하여, 폐기물 매립장을 해안매립지나 산간지방에 많이 건설하고 있다. 그러나, 이러한 경우 사면구배가 급해지고 토목섬유의 활용이 불가피해져 안정성에 많은 문제점을 내포하게 된다. 이 연구는 폐기물 매립장 사면의 안정성을 해석하기 위하여, 원심모형실험을 실시하였다. 또한, 이론식 및 사면안정 해석프로그램을 이용하여 안전율을 산정하였다. 이 연구에 사용한 토목섬유 점토차수재(GCLs)의 팽윤도는 침출수와 증류수의 투과수에 대하여 22~25%의 팽윤도를 보였으며, 투수계수는 투과수가 침출수일 경우, 1.47×10^{-10} cm/sec, 증류수일 경우, 8.75×10^{-11} cm/sec의 값을 나타내었다. 원심모형실험 결과, 토목섬유 점토차수재의 포화여부와 지오멤브레인(HDPE)의 표면거칠기에 따라 사면 안전율이 각각 변화함을 알 수 있었으며, 표면이 거친 지오멤브레인과 건조한 토목섬유 점토차수재를 사용하였을 때, 파괴가 발생되지 않아 사면안정성이 높은 것으로 평가되었다. 또한, 이론에 의해 도출된 사면의 안전율과 사면안정 해석프로그램에 의한 안전율계산 시, 전자의 경우가 후자의 경우보다 작게 평가됨을 알 수 있다.

Keywords : Waste landfill, Slope stability, Centrifuge model test, Roughness, STABL5M

*1 정희원, 인천대학교 공과대학 토목환경시스템공학과 조교수
*2 정희원, 인천대학교 공과대학 토목환경시스템공학과 대학원 박사과정
*3 정희원, 충북대학교 공과대학 토목공학과 교수

1. 서론

쓰레기 매립장의 구조적 안정성문제는 국내·외적으로 중요한 과제로 부각되고 있다. 특히, 미국 캘리포니아 Kettleman 매립지의 구조적 파괴문제, 지진이 발생하였을 때의 매립지 안정문제, 쓰레기 매립장 내부구조의 설계 및 시공의 부실로 인해 유발되는 환경오염문제는 매우 심각한 사회문제로 대두되고 있다(Seed와 Mitchell, 1990).

매립장 설계시 구조적 안정성 측면에서 가장 문제시되는 것은 차수체계이다. 1982년 미국환경청(US EPA)이 폐기물 매립장에서 침출수의 누수로 인한 지하수 또는 지표수오염을 방지할 목적으로 지오�멤브레인을 활용한 하부 차수재를 설치하도록 규정한 이후, 최근 우리 나라에서도 지오�멤브레인과 토목섬유 점토차수재를 폐기물 매립장 차수재로 사용하도록 법으로 규정하고 있다. 폐기물 매립장의 설계 및 사면안정성에 관한 연구를 살펴보면, O'Rourke와 2인(1990)은 대형크기의 직접전단시험기를 이용하여, 토목섬유와 토사와의 마찰각에 대한 연구를 수행하였으며, Bressi와 3인(1995)은 토목섬유 점토차수재를 사용한 매립장 사면의 안정성에 대한 연구를 수행하였다. 또한, Koerner(1996)는 한계평형이론을 이용하여 지반내에 불연속면인 토목섬유를 고려한 사면해석이론을 제시하였다.

이 연구에서는 폐기물 매립장의 붕괴원인이 되는 사면 차수체계의 안정성에 관하여 원심모형실험 기법을 도입하였다. 원심모형시험은 원형구조물의 거동을 축소된 크기의 모형으로 대체하고, 실험기의 회전수에 의한 원심력으로 토립자의 자중을 인위적으로 증가시켜, 임의의 경계 조건에서 응력이 가하여져도 기본적인 힘의 평형관계식을 만족시킬 수 있는 실험기법이다. 실내실험으로는 차수재로 사용되는 토목섬유 점토차수재(GCLs)의 물리적, 역학적 특성실험을 실시하였으며, 원심모형시험기를 이용하여 일반적인 매립장 사면을 축소하여 조성한 후, 토목섬유를 포설하여 사면의 안정성실험을 실시하였다. 또한 실내실험 결과를 이용하여, 사면안정 해석프로그램인 PC STABL5M과 폐기물 매립장 사면안정성 평가이론에 따른 안전율을 도출하여 원심모형실험 결과와 비교·분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 폐기물 매립장 파괴메카니즘

매립장의 사면차수층 형태변화를 살펴보면, 매립의 형태가 단순투기에서 위생매립으로 변화하면서 차수시설 역시 효율적이고 위생적인 형태로 변화하였다. 초창기에는 단일 점토차수재, 1982년에는 단일 지오�멤브레인, 1983년에는 이중 지오�멤브레인, 1984년과 1985년에는 단일 지오�멤브레인과 단일 지오킴포지트, 1987년 이후에는 이중 지오킴포지트 차수시설로 점차 단일 차수체계에서 이중 복합 차수체계로 변천되어 가고 있다(Daniel과 Koerner, 1995). 그림 1은 미국 환경청(US EPA, 1992)에서 제시한 10개 층으로 구성된 폐기물 매립장 이중 복합 차수체계의 단면도를 나타낸다.

한편, 국내 폐기물관리법의 매립시설 기준에서 바닥차수층은 점토 또는 점토류 차수층을 설치하도록 규정하고 있으며, 사면부에는 원칙적으로 점토차수층을 설치하도록 규정하고 있다(정하익, 1999). 그러나, 사면의 각도가 급하여 차수층의 설치가 어려운 경우, 토목섬유 점토차수

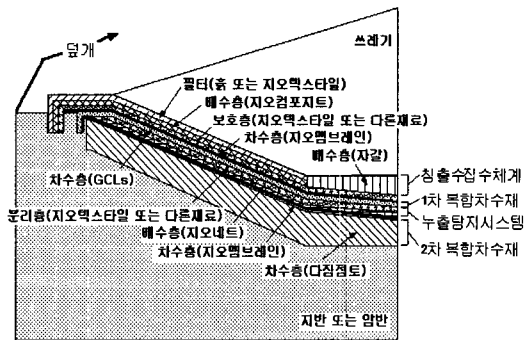


그림 1. 폐기물 매립장 이중 복합 차수체계

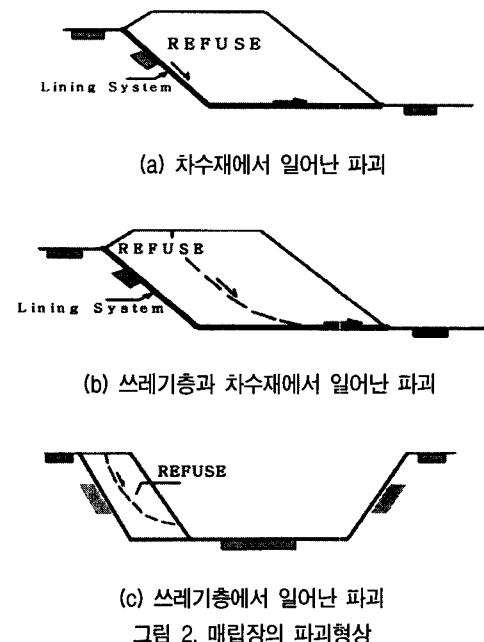


그림 2. 매립장의 파괴형상

층(GCLs)등을 설치할 수 있다. 국내의 폐기물매립장은 국토의 협소로 인하여 매립장을 건설할 수 있는 가용공간의 제한으로 대부분 산지 및 해안지역에 위치하는데 전체 매립장 가운데 약 60~70% 이상이 산지 및 계곡부에 위치한다. 산지매립장의 경우, 바닥면 경사가 급하여 사면의 안정성에 위험이 있으며, 집중 강우 및 침출수위가 급증할 경우 토목섬유 차수재의 인장파열, 상부 고정단 이탈, 매립 쓰레기층 붕괴 등의 문제가 발생하는 특성을 가지고 있다. 그림 2는 폐기물 매립장에서 발생할 수 있는 일반적인 파괴양상을 나타낸 것이다(Sharma와 Lewis, 1994).

2.2 폐기물 매립장의 사면안정 해석 이론

이 연구에서 매립장의 사면안정에 대한 이론적 안전율 계산은 Koerner(1996)가 제시한 사면해석이론을 적용하였다. 그림 3은 폐기물 매립장에 차수재를 포설하여 놓은 모식도이다.

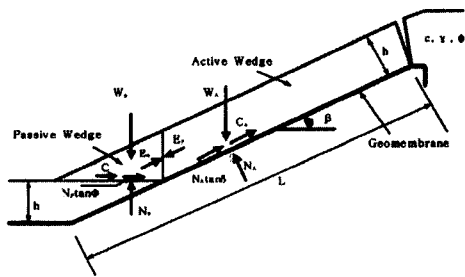


그림 3. 매립장 사면 단면도

그림 3과 같이 토목섬유로 인하여 불연속면이 발생된 폐기물 매립장 사면의 안전율은 다음과 같은 방법을 통하여 유도할 수 있다. 주동썰기(active wedge)에서 발생하는 힘들은 각각 다음과 같다.

$$W_A = \gamma h^2 \left(\frac{L}{h} - \frac{1}{\sin \beta} - \frac{\tan \beta}{2} \right) \quad (1)$$

여기서, $W_A(t/m)$ = 주동썰기의 총 무게, $\gamma(t/m^3)$ = 복토(cover soil)의 단위중량, $h(m)$ = 복토의 두께, $\beta(^{\circ})$ = 지오멤브레인 아래의 사면의 경사각을 의미한다.

$$N_A = W_A \cos \beta \quad (2)$$

여기서, $N_A(t/m)$ = 주동썰기의 파괴면에 수직인 유효

힘을 의미한다.

$$C_a = c_a \left(L - \frac{h}{\sin \beta} \right) \quad (3)$$

여기서, $C_a(t/m)$ = 주동썰기에서 복토와 지오멤브레인의 부착력, $c_a(t/m^2)$ = 주동썰기에서 복토와 지오멤브레인사이의 부착력, $L(m)$ = 지오멤브레인(geomembrane)의 경사길이를 의미한다. 주동썰기에 의하여 사면에 발생된 힘은 다음 식과 같이 평형을 이룬다.

$$E_A \sin \beta = W_A - N_A \cos \beta - \frac{N_A \tan \delta + C_a}{FS} \sin \beta \quad (4)$$

여기서, $E_A(t/m)$ = 수동 썰기에서 주동썰기로 활동하는 내부 썰기(interwedge)의 힘, $\delta(^{\circ})$ = 복토와 지오멤브레인의 접촉마찰각, FS = 안전율을 나타낸다. 주동썰기에서 활동하는 내부썰기의 힘은 식 (5)와 같다.

$$E_A = \frac{(FS)W_A - N_A \cos \beta - (N_A \tan \delta + C_a) \sin \beta}{(FS) \sin \beta} \quad (5)$$

또한, 수동썰기(passive wedge)에서도 식 (1)~식 (4)와 같은 유형으로 수동방향의 힘을 산정 한다.

$$W_P = \frac{\gamma h^2}{\sin 2\beta} \quad (6)$$

여기서, $W_P(t/m)$ = 수동썰기의 총 무게를 의미한다.

$$N_P = W_P + E_P \sin \beta \quad (7)$$

여기서, $N_P(t/m)$ = 수동썰기의 파괴면에 수직인 유효 힘, $E_P(t/m)$ = 주동썰기에서 수동썰기로 활동하는 내부 썰기의 힘을 나타낸다.

$$C = \frac{c(h)}{\sin \beta} \quad (8)$$

여기서, $C(t/m)$ = 수동썰기에서 파괴면에 따른 점착

력, $c(t/m^2) =$ 복토층의 점착력을 의미한다. 주동썰기에 의하여 발생된 힘과 마찬가지로, 수동썰기에 의하여 사면에 발생된 힘은 다음 식과 같이 평형을 이룬다.

$$E_P \cos \beta = \frac{C + N_p \tan \phi}{FS} \quad (9)$$

여기서, $\phi(^{\circ}) =$ 복토층의 내부마찰각을 의미한다. 수동썰기에서 활동하는 내부썰기의 힘은 식 (10)과 같다.

$$E_P = \frac{C + W_p \tan \phi}{\cos \beta (FS) - \sin \beta \tan \phi} \quad (10)$$

$E_A = E_P$ 라 한다면, 식 (10)은 FS 값을 변수로 하는 식 (11)과 같은 이차방정식으로 나타낼 수 있다.

$$a(FS)^2 + b(FS) + c = 0 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } a &= (W_A - N_A \cos \beta) \cos \beta, \\ b &= -[(W_A - N_A \cos \beta) \sin \beta \tan \phi \\ &\quad + (N_A \tan \delta + C_a) \sin \beta \cos \beta \\ &\quad + \sin \beta (C + W_p \tan \phi)], \\ c &= (N_A \tan \delta + C_a) \sin^2 \beta \tan \phi. \end{aligned} \quad (12)$$

따라서, 안전율 (FS)는 다음 식에 의해서 구할 수 있다.

$$FS = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (13)$$

3. 실내시험 및 원심모형시험

3.1 토목섬유 점토차수재의 팽윤도시험

토목섬유 점토차수재의 특성 중 팽윤도는 차수능력을 평가하는 중요한 특성이다. 이 논문에서 팽윤도시험은 ASTM D2435-90에 명시된 "Oedometer Consolidation Test"방법에 의거하여 시험을 실시하였다. 시험기기는 표준압밀시험기를 응용하였으며, 샘플의 직경은 6cm이고 0.1kg/cm^2 의 수직응력을 재하하였다. 또한 투과수로는 증류수와 침출수를 사용하였으며 측정시간은 48시간으로 단기 팽창량을 측정하였다. 팽윤도 산정공식은 식 (14)에

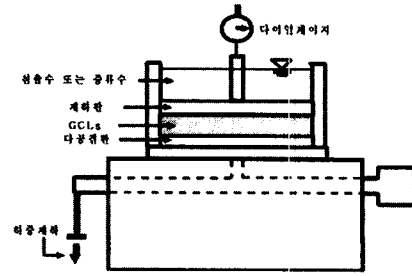


그림 4. 팽창시험(Swell Test)모식도

나타낸 바와 같다(Daniel의 2인, 1997).

$$\varepsilon (\%) = (\text{전체 팽창변위}) / (\text{재하후의두께}) \times 100 \quad (14)$$

그림 4는 상기의 시험방법에 따른 팽윤도 시험장치의 모식도를 나타낸 것이다.

3.2 토목섬유 점토차수재의 투수시험

토목섬유 점토차수재의 중량 및 투과수에 따른 투수시험은 GRI Method GCL-2(Daniel의 2인, 1997)에 의하여 시험을 실시하였다. 시료의 직경은 14cm이고 투수시험기 cell은 직경 14cm, 높이 18cm의 원통형 실린더이며 유압에 의하여 하중(35kPa)을 재하한 상태에서, 24시간 증류수와 침출수에 포화시켰다. 토목섬유 점토차수재의 투수계수를 구하는 공식은 우선 토목섬유 점토차수재의 통수성(ψ)을 구하여야 한다. 통수성(ψ) 산정 공식은 식 (15)에 나타낸 바와 같다.

$$\psi = \frac{q}{\Delta h \cdot A} \cdot \frac{\eta_t}{\eta_{15}} \quad (15)$$

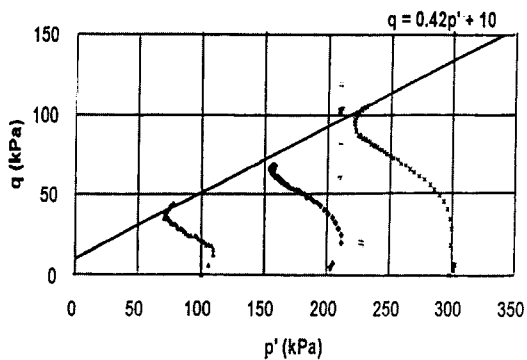
여기서, $q(\text{cm}^3/\text{sec}) =$ 유량, $\Delta h =$ 손실수두(cm), $A(\text{cm}^2) =$ GCLs의 단면적, $\eta_t/\eta_{15} =$ 표준온도에 대한 점성계수비를 나타낸다. 투수계수, K_g 는 식 (15)에서 도출한 통수성을 사용하여 식 (16)을 이용하여 투수계수를 산정한다. 식 (16)에서 H_g 는 토목섬유 점토차수재의 두께를 나타낸다(Didier, 1997).

$$K_g = H_g \cdot \psi \quad (16)$$

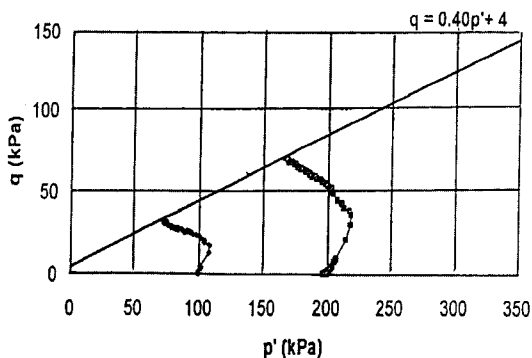
상기 시험방법에 의한 투수시험 장치의 모식도는 그림 5에 나타낸 것과 같다.

3.5.4 응력경로(유효주응력과 전단응력과의 관계)

점토시료의 유효응력 경로를 살펴보면 전단시 축차응력이 증가함에 따라 시료의 체적압축으로 인한 간극수압의 증가로 인하여 평균유효응력이 감소하는 경로를 따라 K_f 선에 도달하는데 이는 정규압밀 점토 재하시 경로에 해당한다. 기름혼합인 경우 축차응력의 절편값 a 의 값은 10kPa, K_f 의 기울기 a 의 값은 22.8° 이고, 물 혼합인 경우 a 의 값은 4kPa, K_f 의 기울기 a 의 값은 21.8° 로 기름을 혼합했을 경우 a 값이 증가함을 알 수 있었다. 또한 기름혼합인 경우 간극수압계수 A 를 산정한 결과 평균 0.90를, 물 혼합인 경우 A 값은 0.76을 나타내었다. 그리고 간극수압계수가 0.5보다 크므로 응력경로는 p' 축의 수직에 대하여 좌측으로 향하다가 파괴선에 도달하게 된다.



(a) 산업용 기름을 혼합한 경우



(b) 물을 혼합한 경우

그림 14. 카오리나이트의 $p' - q$ 변화곡선

3.6 강도특성 비교분석

본 실험은 기름 혼합시와 물 혼합시 강도 변화를 알아보기 위하여 각 시료에 대한 기름 혼합 시와 물 혼합시의 시료조건은 동일하게 하였으나 모래, 실트질 모래, 점토의 세가지 시료에 대한 시료조건의 일관성은 없으므로 세가지 시료의 강도정수를 직접적으로 비교하는 것은 의미가

없기 때문에 각 시료의 강도 정수 변화를 파악하는 것이 바람직하다고 판단된다.

- 1) 모래의 경우 기름을 혼합하였을 경우가 물을 혼합하였을 경우에 비해 강도는 마찰력에 주로 의존하는 바 기름이 마찰력을 크게 감소시키기 때문에 떨어진다.
- 2) 실트질 모래와 점토의 경우 기름을 혼합하였을 경우가 물을 혼합하였을 경우에 비해 강도는 점착력에 주로 의존하는바 기름의 점도가 점착력을 증가시켜 주었기 때문으로 보여진다(Upham,1998).

본 실험결과에 의하면 실트질 모래와 점토의 경우 기름을 혼합하였을 경우 오히려 강도가 증가됨을 알 수 있는데 이는 입자의 크기와 입자와 기름과의 물리적, 화학적인 작용과 관련이 있는 것으로 판단된다.

표 5. 흙 시료의 종류에 따른 전단특성 비교

실험 시료	시료+기름 혼합		시료+물 혼합		강도정수 비교
	점착력	내부 마찰각	점착력	내부 마찰각	
압축 표준사	0	32	0	34	기름 혼합시 감소 (-6.25%)
실트질 모래	4	29.9	0	25.4	기름혼합시 증가 (+15.05%)
카오리 나이트	5.5	24.9	4	23.6	기름혼합시 증가 (+5.22%)

4. 결론

본 연구에서는 함수비 변화 경우와 산업용 기름 유출에 의한 지반의 토질 역학적 거동을 분석하기 위하여 표준사, 실트질 모래, 카오리나이트를 대상으로 함수비와 함유비를 동일하게 변화시키면서 투수실험, 비중실험 및 다짐실험에 따른 건조밀도 변화 관계를 알아보았고 삼축 압축 실험에서 강도정수(C, ϕ)를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 함수비와 함유비 변화에 따른 최대 건조밀도를 비교한 결과 함유비가 1.18~1.28%(평균 1.23%) 증가하는 현상을 보였다.
- 2) 최대 건조밀도에서 측정된 산업용기름 혼합 및 물 혼합 시료의 투수계수(k)는 산업용기름 혼합 시료의 경우 점토함량 증가에 따라 화학적 반응으로 기름이 물에 흡수

성(hydrophobic)을 갖기 때문에 흡입자 사이의 유로형상을 방해하여 증가하게 되므로 물 혼합시료의 경우보다 약 1/10정도 감소하였다.

- 3) 삼축 압축시험에서 Mohr 응력원과 $p' - q$ 곡선으로 강도정수(C, ϕ)를 비교하기 위하여 동일 밀도로 압밀 성형하는 동안 함유비 경우가 점착성, 시간증가에 따라 물리, 화학반응에 따라 증가 현상으로 실트질 모래는 15.05%, 카오 리나이트는 5.22% 강도정수가 증가하였다.
- 4) 즉시 성형한 점착력이 있는 실트질 모래, 카오 리나이트 시료에서는 함유비 일 때 강도정수가 감소 현상을 나타냈으며 표준사에서는 동일 밀도 조건에서도 마찰력을 크게 감소시키기 때문에 함유비쪽이 6.25% 감소하였다.
- 5) 일반적으로 산업용 기름유출에 따라 토양 오염 및 수질 오염으로 동·식물에 큰 영향을 주고 있으나, 토질 역학적 거동은 초기 및 사질토에서는 문제가 있으나 점성토일수록 동일 밀도 조건에서는 기름유출, 유입에 따른 화학 반응 혐수성 현상에 흡수성, 부착성에 따른 강도증

가 현상으로 큰 문제점이 없는 것으로 판단된다.

참고문헌.

1. 신은철, 이재범(1995), "원유로 오염된 사질토의 특성", 95봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 129~134.
2. 신은철, 이재범(1997), "원유로 오염된 지반의 역학적 특성", 한국지반공학회, pp. 33~43.
3. 이승화(1996), 주유소가 땅을 썩힌다. 과학동아, pp. 166~169.
4. 한국건설기술연구원(1998), 유류 오염 토양 현장 복원 기술 개발, pp. 1~88.
5. 환경부(1999), 산업화된 국가들의 오염토양 관리정책, pp. 1~178.
6. Sawyer, G. M.(1996), "Determination of gasoline range, diesel range, and mineral oil range organics in soil and water by flame ionization gas chromatography." J. of soil Contamination, Vol. 5, No. 3, pp. 261~300.
7. Upham, B L., J. J. Yao, J. E. Trosko, and S. J. Masten(1998), "Determination of the efficacy of ozone treatment systems using a gapjunction intercellular communication bioassay, Environ." Sci. Technol, Vol. 29, No. 12, pp.2923~2928.

(접수일자 2000. 1. 22)