

## Cold Mix Asphalt로 처리한 디젤 오염 토양의 흡착 및 용출특성

서진권<sup>1</sup> · 황인성<sup>2</sup> · 박주양<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 토목공학과, <sup>2</sup>부산대학교 환경공학과

## Sorption and Leaching Characteristics of Diesel-Contaminated Soils Treated by Cold Mix Asphalt

Jin-Kwon Seo<sup>1</sup> · Inseong Hwang<sup>2</sup> · Joo-Yang Park<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Hanyang University

<sup>2</sup>Department of Environmental Engineering, Pusan National University

### ABSTRACT

A cold mix asphalt (CMA) treatment process was proposed as a tool to recycle soils contaminated with petroleum hydrocarbons. Experimental studies were conducted to characterize performances of the CMA process in treating soils contaminated with diesel or diesel compounds. From the screening experiments, it was found that performances of five types of asphalt emulsions that contained a cationic or an anionic or a nonionic surfactant were not substantially different. In consideration of higher affinity for soils and higher sorption coefficients obtained, an emulsion containing Lauryl Dimethyl Benzyl Ammonium Chloride (LDBAC) was selected as a promising asphalt emulsion for treating diesel-contaminated soils. When the asphalt emulsion LDBAC was applied to treat three compounds that originated from diesel, the removal efficiencies obtained in the order of decreasing efficiencies were as follows: docosane > pentadecane > undecane. Leaching experiments on the specimen formulated by the emulsion LDBAC found that the selected treatment method could treat soils with diesel concentrations as high as 10,000 mg/kg. Leaching of the diesel from the specimen was controlled by diffusion for the first four days and then leaching rate diminished substantially. The latter behavior was characterized as depletion, which represents that the contaminant released amounts to more than 50% of the total amount of the contaminant that can be leached. The amounts of three diesel compounds leached from the specimen in the order of decreasing amount were undecane, pentadecane, and docosane. The curing of the soil contaminated with pentadecane was relatively slow.

**Key words :** Cold Mix Asphalt, asphalt emulsion, diesel, undecane, pentadecane, docosane, surfactant, linear sorption, leaching

### 요 약 문

유류오염토양을 건설재료로 재활용할 수 있는 방안으로써 Cold Mix Asphalt(CMA) 처리를 제시하였고 디젤 및 디젤화합물로 오염된 토양의 CMA 처리특성을 고찰하였다. 양이온성 또는 음이온성 또는 비이온성 계면활성제를 함유하고 있는 5가지 아스팔트 이멀전을 이용해서 디젤 오염토양의 처리능을 고찰한 결과 첨가된 계면활성제의 차이에 의한 성능의 차이는 확연하게 드러나지 않았으나, 토양과의 친밀성 및 흡착계수를 고려하여 Lauryl Dimethyl Benzyl Ammonium Chloride (LDBAC)를 포함한 이멀전을 오염토양 처리에 적합한 아스팔트 이멀전으로 선정하였다. 아스팔트 이멀전 LDBAC에 의한 세가지 디젤화합물의 처리능은 docosane, pentadecane, undecane의 순으로 높은 것으로 나타났다. 아스팔트 이멀전 LDBAC를 이용하여 CMA처리된 토양에 대한 용출실험결과 비교적 고농도인 10,000 mg/kg의 디젤로 오염된 토양도 CMA처리 가능함을 확인하였다. 공시체로부터 디젤의 용출은 초기 4일까지는 확산에 의한

\*Corresponding author : jooyark@hanyang.ac.kr

원고접수일 : 2004. 2. 15 게재승인일 : 2004. 11. 12

질의 및 토의 : 2005. 2. 28 까지

거동을 보여 주었고 그 이후로는 용출속도가 감소하여 총 용출가능량의 50% 이상이 용출되었다고 판단되는 depletion의 거동을 보여 주었다. CMA처리된 오염토양으로부터 3가지 디젤화합물의 총용출량은 undecane > pentadecane > docosane의 순서로 높은 것으로 나타났으며, pentadecane의 경우 CMA 처리시 양생속도가 상대적으로 더딘 것으로 밝혀졌다.

**주제어** : Cold Mix Asphalt, 아스팔트 이멀전, 디젤, undecane, pentadecane, docosane, 계면활성제, 선형수착, 용출

## 1. 서 론

미국 환경청(EPA) 자료에 따르면 지하저장탱크(Underground Storage Tanks)의 약 30% 이상에서 누출이 발생되고 있는 것으로 나타나 국내에서도 지하저장탱크 누출에 기인한 토양오염문제가 심각할 것으로 짐작할 수 있다<sup>1)</sup>.

각종 유류 중에서 디젤은 토양에 흡착되거나 NAPL(Non-Aqueous Phase Liquids)상태로 존재하여 토양을 오염시키고 지하수의 지속적인 오염원으로 작용한다. 현재 이러한 유류오염토양의 일반적인 처리/처분 기술은 토양증기추출법(soil vapor extraction), hot mix asphalt 공정, 열탈착(thermal desorption), *in situ* bioremediation 등이 있으나 대기오염 유발, 오염물질 제거능, 처리비용 등에서 한계를 보이고 있다<sup>1)</sup>.

이러한 처리기술에 비하여 Cold Mix Asphalt(CMA) 공정은 유류오염토양을 환경적으로 안정화시키며 건설 및 도로재료로써 재활용이 가능한 생산품으로 만들어 낼 수 있는 대안으로 제시된 바 있다<sup>2)</sup>. 시멘트에 비하여 아스팔트는 고형화에 따른 부피증가가 거의 없으며 고화체내에 매우 낮은 투수계수(permeability)와 확산계수(diffusivity)를 유발하여 오염원의 누출을 억제하고 오염물의 이동을 억제하는데 탁월한 성능을 발휘한다<sup>3-5)</sup>. CMA의 핵심은 계면활성제, 아스팔트, 물로 구성된 아스팔트 이멀전과 대체골재로 유류오염토양을 사용하는 것인데 기존의 유류오염토양 정화기술에 비하여 처리효율 및 비용면에서 장점을 가지고 있으며 특히, 기존에 널리 사용되었던 hot mix asphalt 공정이 가지고 있는 대기오염유발의 단점을 극복할 수 있다.

종래 CMA에 관한 연구는 도로포장을 위한 구조적 평가와 오염원의 환경안정성평가를 위한 TCLP(Toxicity Characteristic Leaching Procedure)등의 용출실험의 분야에서 수행된 바 있다<sup>6-8)</sup>. Murray<sup>7)</sup>(1998)는 CMA에 의한 유류오염원의 잠재적 용출가능성을 평가하기 위하여 수행한 TCLP 실험을 통해 BTEX(benzene, toluene, ethylbenzene, xylene)가 검출한계 이하로 처리될 수 있음을 보였고, Meegoda<sup>1)</sup>(1999)는 유류오염토양을 골재로 사용한 monolithic waste를 제조하여 CMA의 환경적 안정성, 내구성을 증명하였다. Schoenberger<sup>8)</sup>(1999)는 디젤오염토양을 함유한 재생 CMA의 용출실험을 수행하여 BTEX의

용출이 발생하지 않음을 보였으며 구조적으로 안정한 도로포장 적용이 가능함도 입증하였다.

이와 같이 CMA는 오염원의 단기용출가능성과 구조적인 관점에서 우수한 기술로 평가되었으나 장기적인 용출에 관한 고찰과 복합물질로 이루어진 유류오염원의 성분별 안정화 및 용출특성에 관한 연구는 미흡하다. 본 연구는 CMA의 핵심인 아스팔트 이멀전을 이용하여 국내 오염 토양의 주요 오염원중의 하나인 디젤 및 디젤의 주요 구성화합물의 제거 및 용출 특성을 고찰하였다. 먼저 국내에서 쉽게 획득할 수 있는 5가지 종류의 아스팔트 이멀전에 의한 디젤 제거특성을 고찰하여 디젤오염토양 처리에 적합한 아스팔트 이멀전을 선별하였다. 다음으로 선별된 아스팔트 이멀전을 이용하여 디젤을 대표할 수 있는 물질로 선정된 undecane, pentadecane, docosane에 대한 제거특성을 고찰하였다. 마지막으로 디젤 및 전술한 3가지 디젤화합물로 각각 오염된 토양을 CMA 처리한 후 그 공시체의 장기용출특성을 고찰하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 실험재료

토양은 규사제조 전문업체에서 구입한 주문진 표준사를 사용하였다. 주문진 표준사는 아스팔트와 배합시 미세한 입자와 굵은 입자들과의 분리가 발생하지 않고 반응기내에 균등한 부착이 가능하며, 유기물에 의한 디젤의 흡착을 최소화하여 아스팔트 이멀전에 의한 유류처리능을 고찰하는데 적합하다. 본 주문진규사는 통일분류법에 의하면 깨끗한 모래이고 비중은 2.61이고 균등계수는 1.66이다. 실험에 사용

**Table 1.** Properties of Diesel

Property	Value
Density (g/ml)	0.84
Vapor Pressure (mm Hg)	0.2
Aqueous Solubility (mg/l)	0.03
Diffusion coefficient in air (cm <sup>2</sup> /sec)	4.63×10 <sup>2</sup>
Henry's law constant ( atm·m <sup>3</sup> /mol )	4.2×10 <sup>2</sup>
Log organic carbon-water partition coefficient (l/kg)	3.04

**Table 2.** Properties of Three Diesel Compounds

Compounds	Undecane	Pentadecane	Docosane
Phase	Liquid	Liquid	Solid
No. of Carbon	C11	C15	C22
Molecular Weight	156.31	212.42	310.61
$K_{oc}$	714,000	17,400,000	110,000,000
Log Kow	6.054	7.441	8.242
Water Solubility (mg/l)	0.044	0.00008	-
Dair (cm <sup>2</sup> /s)	0.047	0.039	-
Dwater (cm <sup>2</sup> /s)	5.31E-06	4.43E-06	-
Henry's law Constant (atm·m <sup>3</sup> /mol)	1.9×10	0.0046	>E-04
Vapour Pressure (mm Hg)	0.3914	0.011628	-

**Table 3.** Five Types of Asphalt Emulsion

Type	Surfactant Used	HLB of Surfactant	CMC of Surfactant (%)
Emulsion STAC	Stearyl Trimethyl Ammonium Chloride	-	0.0489
Emulsion LDBAC	Lauryl Dimethyl Benzyl Ammonium Chloride	-	
Emulsion SPAAS	Sodium Polyoxyethylene Alkyl Aryl Sulfate		0.0448
Emulsion SAEO	Stearyl Amine Ethylene Oxide	15.3	0.0476
Emulsion LAEO	Lauryl Amine Ethylene Oxide	15.6	0.0423

\*HLB(Hydrophilic Lipophilic Balance)

된 유류는 끓는점이 비교적 높은(보통 C10-C28, b.p. 200-370°C) 경유이며 일반적으로 디젤이라고 칭한다. 디젤의 자세한 성질에 대해서는 Table 1에 나타내었다.

디젤과 함께 디젤을 구성하는 성분 중 저, 중, 고 분자량 별로 3가지 화합물을 선택하여 아스팔트 이멀전에 의한 디젤의 제거경향과의 연관성을 보고자 하였다. Table 2는 3가지 화합물의 특성이다.

아스팔트 이멀전은 아스팔트와 유화수(계면활성제+물)를 colloid mill 내에서 혼합하여 제조하였다. Colloid mill 내의 회전자는 최고 6,000 rpm의 회전으로 고전단력을 제공하여 아스팔트를 파쇄함과 동시에 입자를 유화시켜 아스팔트 이멀전을 제조하도록 한다<sup>9),10)</sup>. 아스팔트, 물, 계면활성

제의 질량비는 60:39:1로 하였다. 양이온, 음이온, 비이온계 계면활성제를 이용하여 제조한 5가지 아스팔트 이멀전의 특성은 Table 3에 나타난 바와 같다.

**2.2. 디젤 제거능 실험**

20 ml vial을 반응조로 이용하여 아스팔트 이멀전에 의한 토양내 디젤 및 3가지 디젤화합물의 처리능을 고찰하였다. Vial에 다양한 농도(5,500-76,000 mg/kg)로 오염된 토양 1.5 g을 주입한 후 0.12 ml의 아스팔트 이멀전을 첨가하여 1시간 교반을 실시한 후 24시간동안 양생하였다. 다음으로 약 24 ml의 탈이온수를 vial에 주입한 후 30 rpm의 속도로 18±2시간 동안 tumbler를 이용하여 교반을 실시하여 1차추출을 실시하였고 추출액을 옮겨 담은 후 다시 5 ml의 탈이온수를 주입하여 수동으로 교반하여 2차 추출을 실시하였다. 추출법의 효율성을 검증하기 위해서 토양과 아스팔트 이멀전 없이 디젤 또는 디젤화합물만을 포함한 대조군(control 1)과 아스팔트 이멀전 없이 디젤 또는 디젤화합물 오염 토양만 포함한 대조군(control 2)에 대한 시험도 실시하였다. 추출액 내의 오염물질은 다시 hexane을 이용하여 추출해 낸 후, GC/FID (HP 6890)를 이용하여 분석하였다. 내부표준물질로는 ortho-terphenyl을 이용하였다.

**2.3. 용출실험**

먼저 다양한 농도(5,000-20,000 mg/kg)의 디젤 및 디젤 화합물로 오염된 토양 130 g에 7.5 ml의 아스팔트 이멀전을 주입 · 혼합 · 압축하고 500 ml 부피의 glass bottle 하부에 부착시킨 후 7일 동안 양생을 실시하였다. 다음으로 장기간의 용출거동을 관찰하기 위하여 dynamic leaching test를 수행하였는데 탈이온수를 추출액으로 주입하였으며 추출액의 부피와 고형폐기물 표면적의 비는 10±0.2 cm로서 이는 ANS16.1<sup>11)</sup>의 실험조건을 모사한 것이다. 휘발에 의한 오염물질의 손실을 최소화하기 위하여 zero headspace를 유지하였고 aluminum foil이 부착된 polypropylene cap으로 외부공기와의 접촉을 차단하였다. 30min, 1hr, 12hr, 24hr, 2day, 4day, 7day, 11day, 17day, 24day의 순으로 100 ml 부피의 추출액을 취하였으며, 각 추출액 채취시 잔여 추출액은 버리고 새로운 탈이온수를 주입하였다. 추출액내의 디젤 또는 디젤화합물 농도는 전술한 방법으로 측정하였다.

**2.4. 실험결과 분석**

**2.4.1. 디젤 제거 실험결과 해석**

아스팔트 이멀전에 의한 디젤 및 디젤화합물의 제거는 흡착현상과 유사한 거동을 보여 주었다. 제거된 오염물질의 양과 잔존하는 오염물질의 농도(수용액 기준)가 선형 관계를 보여 아래의 식 (1)을 이용하여 선형흡착으로 제거능을 고찰하였다.

$$q = K C \tag{1}$$

여기서,  $q$  = 이멀전 단위질량당 제거된 오염물질의 농도 (mg/kg)

$K$  = 선형흡착계수(l/kg)

$C$  = 흡착되고 남은 오염물질의 농도(mg/l)

2.4.2. 용출모델

CMA 처리된 토양내에서의 디젤 및 디젤화합물의 거동을 용출모델을 이용하여 해석하였다. 1차원 Fickian 확산과 선형흡착을 가정할 때 고화체내에서의 용출현상은 아래의 식 (2)와 같이 표현할 수 있다<sup>12)</sup>. 식 (2)는 초기에는 고체 폐기물 표면에 오염물질이 존재하지 않고 오염물질은 고체 내에 균등하게 분포되어 있으며, 고체 중심의 농도는 용출이 발생하는 시간동안 고정되어 있다고 가정한다.

$$\frac{M_t}{M_0} = \left( \frac{4D_{obs}}{\pi L^2} \right)^{0.5} t^{0.5} \tag{2}$$

여기서,  $M_t$  = 시간  $t$ 에서 용출된 오염물질의 양(mg)

$M_0$  = 고형폐기물에서 용출가능한 오염물질의 총량 (mg)

$t$  = 시간(s)

$L$  = 고형폐기물의 부피와 접촉표면적의 비(cm)

$D_{obs}$  = 겉보기 확산계수( $cm^2/s$ )

겉보기 확산계수( $D_{obs}$ )는 식 (3)과 같이 유효확산계수( $D_e$ )를 흡착에 의한 지연계수로 나눈 값이 된다.

$$D_{obs} = \frac{D_e}{1 + K_p} \tag{3}$$

식 (3)에서  $K_p$ 는 무차원의 흡착계수로 식 (1)로부터 구해진  $K$ 값에 아스팔트 이멀전 주입량을 곱해서 구할 수 있다.

$$K_p = K D \tag{4}$$

여기서,  $K$  = 선형흡착계수(l/kg)

$K_p$  = 무차원 흡착계수

$D$  = 1.5 kg/l(아스팔트 이멀전 주입량)

3. 결과 및 고찰

3.1. 아스팔트 이멀전에 의한 디젤화합물의 제거

첫 번째 실험의 목적은 5가지 종류의 아스팔트 이멀전의 디젤 제거능을 비교하여 최적의 이멀전을 선별하는 것이었다. Fig. 1은 고정된 양(0.12 ml) 으로 주입된 5가지 이멀전에 의한 디젤의 제거능을 초기오염 농도별로 나타낸 것이다. 대조군 시료의 경우보다 월등하게 높은 처리효율은 아스팔트 이멀전이 토양내 디젤의 제거 또는 고정화에 효과적임을 보여준다. 5,500 mg/kg으로 오염된 토양의 경우 아스팔트 이멀전의 첨가에 의해 초기농도의 99% 이상을 제거하는 것을 볼 수 있었고, 디젤농도를 32,000 mg/kg으로 증가시켜도 대부분 95% 이상의 제거율을 나타내는 것을 볼 수 있다. 디젤농도가 32,000 mg/kg을 초과하면서 이멀전 첨가에 의한 제거능은 현저히 감소하여 80,000 mg/kg 실험의 경우 제거능은 53-68%로 감소하는 것을 볼 수 있다. 5가지 이멀전에 따른 제거능의 차이는 그다지 크지 않으나 고농도 오염토양의 경우 이멀전 LAEO에 의한 처리효율이 다른 이멀전의 경우보다 약간 높은 것을 볼 수 있다. 이는 Table 3에 나타난 바와 같이 이멀전 LAEO에 사용된 계면활성제(Lauryl Amine Ethylene Oxide)의 critical micelle concentration (CMC) 이 상대적으로 낮아 더 많은 양의 micelle을 형성한 것에 기인한 것으로도 보인다.

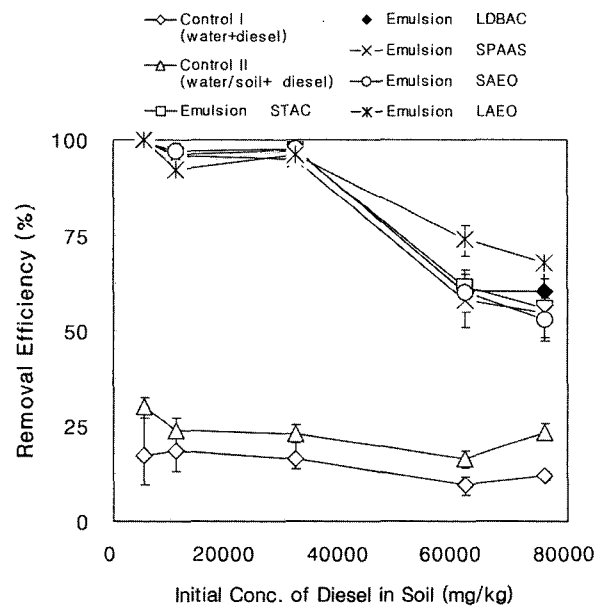


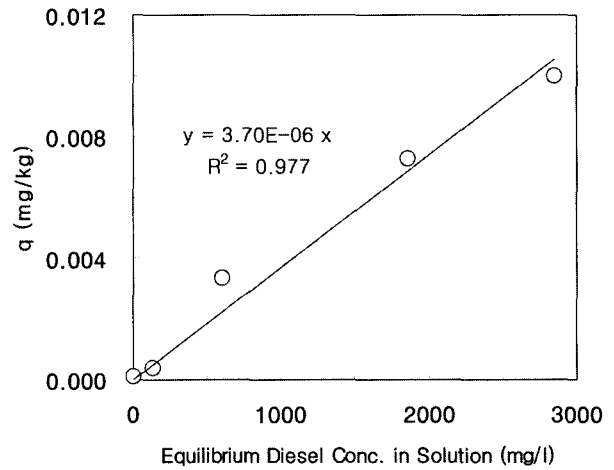
Fig. 1. Removal of Diesel in Soils by Five Types of Asphalt Emulsion

Fig. 2는 이멀전 LAEO에 의한 디젤의 제거를 흡착현상으로 해석하여 그래프로 나타낸 것이다. 이멀전 단위질량당 제거된 디젤의 양과 디젤의 평형농도가 선형관계를 보이는 것으로 보아 이멀전에 의한 디젤의 제거를 선형흡착과 유사하게 해석할 수 있음을 알 수 있다. 다른 이멀전의 경우도 비슷한 경향을 보여 주었으며 이에 근거하여 얻어진 흡착계수( $K_p$ )는 Table 4에 나타난 바와 같다. 예상대로 이멀전 LAEO에 의한 흡착계수가 상대적으로 큰 값을 나타내었으나, 3가지 디젤 화합물에 대한 처리능 고찰 및 용출시험에서 사용될 이멀전으로는 이멀전 LDBAC를 선택하였다. 이는 5가지 이멀전의 디젤 제거능이 큰 차이를 보이지 않았고 상업용 적용의 많은 경우에 있어서 대부분의 골재가 표면에 약한 음전하를 띠고 있어 골재와의 친화성을 고려하여 주로 양이온 이멀전이 사용된다는 사실, 그리고 양이온 계열의 계면활성제가 사용된 이멀전 중에서 이멀전 LDBAC가 상대적으로 큰  $K_p$ 를 보여주었다는 사실에 기인한다.

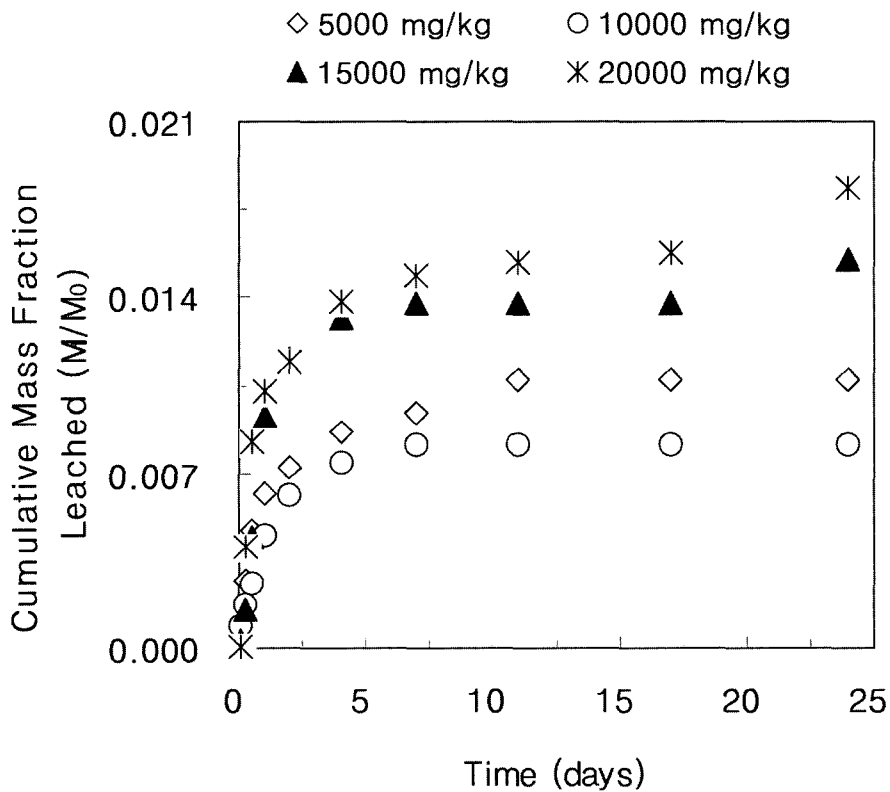
Table 5는 이멀전 LDBAC에 의한 3가지 디젤 화합물의 제거실험에서 산출한 흡착계수( $K_p$ )를 나타낸 것이다. 실험결과 분자량이 제일 큰 docosane이 월등히 큰 흡착계수를 나타내었으며, 이멀전에 의한 3가지 화합물의 제거

**Table 4.** Partition Coefficients( $K_p$ ) for Different Asphalt Emulsions

Asphalt Emulsion	$K_p$
Emulsion STAC	2.41
Emulsion LDBAC	2.63
Emulsion SPAAS	2.22
Emulsion SAE0	2.96
Emulsion LAEO	3.70



**Fig. 2.** Partitioning of Diesel into Asphalt Emulsion LAEO.



**Fig. 3.** Release of Diesel from the Soil Treated with a CMA Emulsion LDBAC.

능은 분자량이 큰 순서인 docosane > pentadecane > undecane의 순서로 나타나는 것을 알 수 있다. 전술한 디젤 제거실험에서 산출된 디젤의 흡착계수(2.63)가 pentadecane의 흡착계수(2.10)를 조금 초과하는 수치를 나타내는 것으로 보아 디젤의 제거거동은 탄소체인이 pentadecane(C15)보다 조금 많은 화합물과 비슷할 것으로도 예측된다.

**3.2. Cold Mix Asphalt로 처리된 디젤화합물 오염 토양의 용출특성**

현장에서 흔히 사용되고 있는 아스팔트 이멀전과 오염 토양의 배합비에 근거하여 제조된 공시체로부터의 디젤 및 디젤화합물의 용출거동을 고찰하였다. 먼저 5,000 mg/kg에서 20,000 mg/kg의 디젤로 오염된 토양에 대한 실험 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 5,000과 10,000 mg/kg으로 오염된 공시체의 경우 각각 초기단계에서 10일까지 디젤이 용출되었으며 10일 이후부터는 평형상태에 도달하여 더 이상 디젤이 용출되지 않는 것을 볼 수 있다. 총 용출

량도 초기농도의 1% 정도로 이멀전 LDBAC의 처리성능이 상당히 우수함을 알 수 있다. 그러므로, 이멀전 LDBAC에 의한 오염 토양의 처리는 적어도 10,000 mg/kg의 농도까지는 가능하다고 판단된다. 한편, 15,000과 20,000 mg/kg으로 오염된 공시체의 경우 17일 이후부터 공시체와 추출액과의 접촉면에서 파괴가 발생하여 용출되는 디젤의 농도가 급격히 증가하였다.

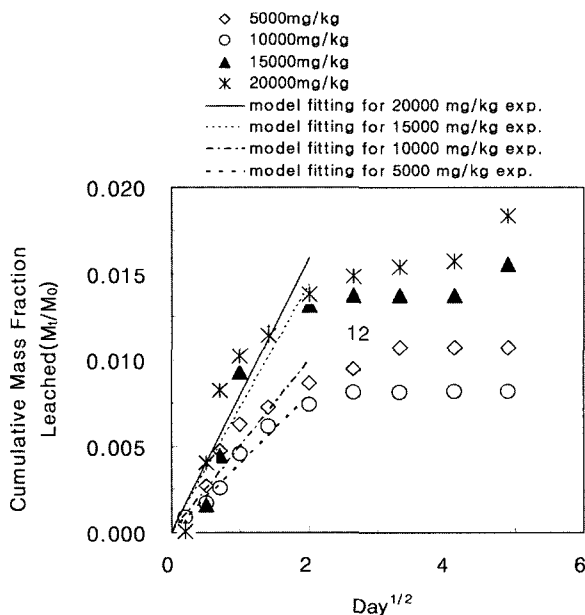
공시체로부터 디젤의 용출 거동을 용출모델(식 (2))로 해석하기 위해서 누적용출량과 시간의 제곱근과의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4의 선형모델 fitting이 보여주는 바와 같이 약 4일 부근까지는 확산(diffusion)에 의한 용출로 해석가능하며, 특히 오염농도가 낮은 공시체(5,000 mg/kg, 10,000 mg/kg)의 경우 선형관계가 더 명확함을 알 수 있다. 4일 이후부터는 depletion에 의한 용출 특성을 나타내는데 이는 공시체 중심의 디젤농도가 감소하기 시작하여 용출모델의 가정과 부합하지 않으며, 또한 공시체내 총 용출 가능량의 50% 이상이 방출되었음을 의미한다<sup>13)</sup>. 식 (2), (3)을 이용하여 각 공시체내에서의 디젤의 겉보기 확산계수( $D_{obs}$ )를 구하여 Table 6에 나타내었다.

**Table 5.** Partition Coefficient ( $K_p$ ) Obtained for Three Diesel Compounds

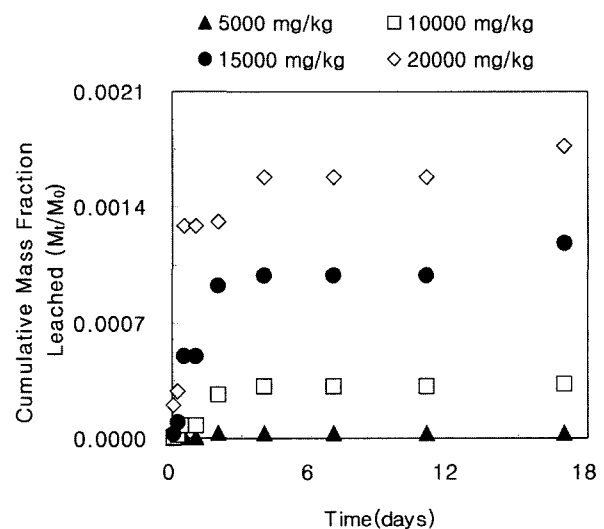
Compounds	$K_p$
Undecane	1.70
Pentadecane	2.10
Docosane	7.95

**Table 6.** Observed Diffusivities of Diesel in Soils Treated by Asphalt Emulsion LDBAC

Initial Conc. ( mg/kg )	$D_{obs}$ (cm <sup>2</sup> /s)
5,000	$5.03 \times 10^{-10}$
10,000	$3.23 \times 10^{-10}$
15,000	$1.06 \times 10^{-9}$
20,000	$1.29 \times 10^{-9}$



**Fig. 4.** Fraction of Diesel leached from CMA Specimen versus Square Root of Time.



**Fig. 5.** Release of Undecane from the Soil Treated with a CMA Emulsion LDBAC.

3가지 디젤 화합물에 대한 용출실험결과는 Fig. 5, 6, 7에 나타내었다. Undecane의 5,000 mg/kg과 10,000 mg/kg 실험의 경우는 초기 4일 동안 용출이 발생하였고 그 이후부터는 평형상태에 도달하였다(Fig. 5). 이 두가지 실험에서의 총 용출량도 0.03% 이내로 CMA에 의한 처리성능이 상당히 좋은 것을 볼 수 있다. 고농도 실험(15,000 mg/kg, 20,000 mg/kg)의 경우 11일 이후에 공시체의 파괴가 발생하여 용출량이 증가하는 것을 볼 수 있었다. Pentadecane을 포함한 공시체의 양생속도는 나머지 두가지 실험에서 보다 현저히 느렸으며 11일 이후 전시료에서 파괴가 발생하는 것을 볼 수 있었다(Fig. 6). Docosane을

포함한 공시체의 경우 처음 2일동안 용출이 발생하였고 그 이후로는 평형에 도달한 것을 볼 수 있었다(Fig. 7). 총 용출량은 초기농도의 0.013% 이내로 3가지 디젤화합물 중 가장 좋은 처리효율을 보여 주었다. 이는 docosane이 상온에서 고체상태로 존재하기 때문에 유동성이 낮고 분자량 또한 가장 커서 공시체내에서의 접촉면적도 상대적으로 큰 것에 기인할 것으로 사료된다.

용출실험중 발생한 공시체의 파괴는 공시체 제작과정의 불완전성에 기인한다고 추측된다. 공시체의 제작은 혼합물이 슬러리와 비슷한 상태로 배합되며 압축에 의한 경화작업이 필요하다. 그러나 현장에서의 압축이 기계적 작업으로 진행되는데 반하여 본 실험에서 공시체 제작은 수동으로 실시되었다. 따라서 연속적인 교반이 진행되는 실험 조건에서 추출액과의 접촉면에서 초기강도를 유지하기 힘들었고 공극이 존재할 가능성을 내포하였다. 실제 실험이 진행되는 동안 상당수의 공시체로부터 표면을 뚫고 올라오는 공기방울을 확인할 수 있었다. 이러한 실험적인 한계에도 불구하고 주어진 시간내의 총 용출량은 일반적으로 분자량이 클수록 작은 경향을 발견할 수 있었다. 디젤의 용출실험에서 얻어진 GC chromatogram을 관찰하여 시간에 따른 용출특성이 분자량에 따라 차이를 보이는지를 고찰하였으나 별다른 경향을 파악할 수는 없었다.

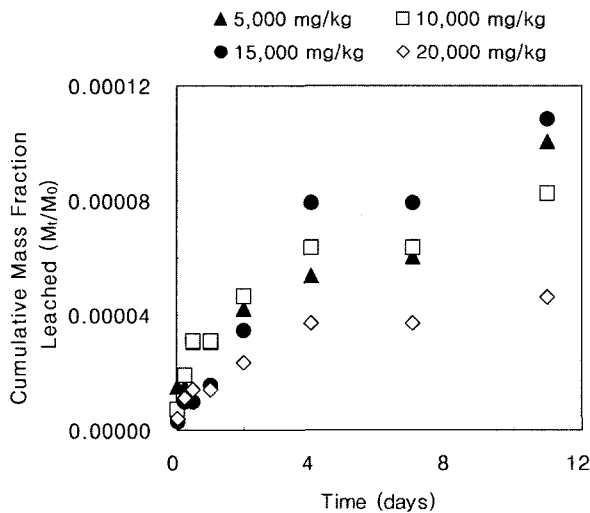


Fig. 6. Release of Pentadecane from the Soil Treated with a CMA Emulsion LDBAC.

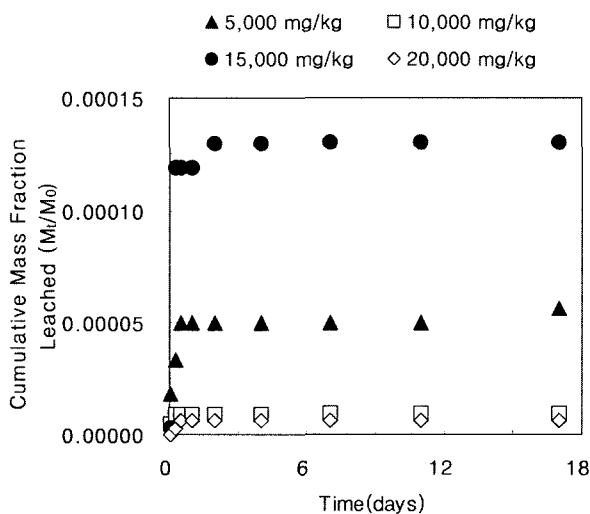


Fig. 7. Release of Docosane from the Soil Treated with a CMA Emulsion LDBAC.

#### 4. 결 론

국내주요토양오염원인 디젤과 디젤내 3가지 화합물로 오염된 토양을 cold mix asphalt로 처리할 때의 오염물질 제거 및 용출특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 양이온성, 음이온성, 비이온성 계면활성제를 포함한 5가지 아스팔트 이멀전에 의한 디젤의 제거성능에서 확인한 차이를 발견할 수 없었다. 5가지 아스팔트 이멀전에 의한 디젤의 제거거동은 선형흡착과 유사하게 기술할 수 있었고 무차원 흡착계수( $K_p$ )는 2.22~3.70으로 산출되었다.
- 2) 토양과의 상대적 친밀성과 흡착계수를 고려하여 Lauryl Dimethyl Benzyl Ammonium Chloride (LDBAC)를 계면활성제로 사용한 아스팔트 이멀전 LDBAC를 디젤 오염 토양처리에 적합한 아스팔트 이멀전으로 선정하였다.
- 3) 아스팔트 이멀전 LDBAC에 대한 3가지 디젤화합물, 즉 docosane, pentadecane, undecane의 흡착계수( $K_p$ )는 각각 7.95, 2.10, 1.70으로 분자량이 클수록 높은 것으로 나타났다.
- 4) 아스팔트 이멀전 LDBAC를 이용한 Cold Mix

Asphalt(CMA) 처리토양에 대해서 용출실험을 실시한 결과 비교적 고농도인 10,000 mg/kg의 디젤로 오염된 토양도 CMA 처리 가능함을 알 수 있었다. 공시체로부터 디젤의 용출은 전반적으로 초기 4일까지는 확산에 의한 거동을 보여 주었고 그 이후로는 용출속도가 감소하여 총 용출 가능량의 50% 이상이 유출되었다고 판단되는 depletion의 거동을 보여 주었다.

5) CMA처리된 오염토양으로부터의 3가지 디젤화합물의 총용출량은 undecane > pentadecane > docosane의 순서로 분자량이 작을수록 많은 것으로 나타났으며 pentadecane의 경우 CMA 처리시 양생속도가 상대적으로 낮은 것으로 나타났다.

### 참 고 문 헌

1. Meegoda, J.N., "Stabilization/Solidification of Petroleum-Contaminated Soils with Asphalt Emulsions, Practice Periodical of Hazardous", *Pract. Period. Hazard., Toxic, Radioact, Waste Manage.*, **3**(1), pp. 46-55 (1999).
2. Testa, S.M., *The Reuse and Recycling of Contaminated Soil*, chapter 1, Testa Environmental Corporation, Mokelumne Hill, California, (1997).
3. Eklund, K., *Incorporation of Contaminated Soils into Bituminous Concrete. Principles and Practices for Petroleum Contaminated Soils*, E. J. Calabrese and P. T. Kostecki, Eds. Lewis Publishers, Inc., Chelsea, Michigan, pp. 359-367 (1993).
4. Testa, S.M., "Chemical Aspects of Cold Mix Asphalt Incorporating Contaminated Soil", *J. Soils Cont.* **4**(2), pp. 191-207 (1995).
5. Testa, S.M., and Conca, J., "When Contaminated Soil Meets the Road", *Soils*, December, pp. 32-38 (1992).
6. US Environmental Protection Agency, *Toxicity characteristic leaching procedure (TCLP)*, 40 CFR Part 268, Appendix. I, Washington, D.C. (1988).
7. Murry, J. S., et al., "An Evaluation of Cold Mix Asphalt Incorporation of Petroleum Contaminated Soils", *12th Contaminated Soils Annual Conference*, Amherst Scientific Publishers, **3**, pp. 303-314 (1998).
8. Schoeberger, J. E., et al., "Use of Diesel-Contaminated Soil in Recycled Cold-Mix Pavement", *Pract. Period. Hazard., Toxic, Radioact, Waste Manage.*, **3**(3), pp. 118-123 (1999).
9. Asphalt Institute, *A Basic Asphalt Emulsion Manual*, Manual Series, No.19, 2nd Edition, pp 5-16. (1987).
10. Calderon, F. L., Biais, J., and Bibette, J., "Asphalt Emulsions, Flocculation induced by a Cationic Surfactant and Application to Size Partitioning", *Colloids and Surfaces A.*, **74**, pp. 303-309 (1993).
11. American Nuclear Society (ANS), *Measurement of the Leachability of Solidified Low-level Radioactive Wastes by a Short-term Test Procedure*, Standard ANSI/ANS-16.1-1986, American Nuclear Society Standards Committee Working III. (1986).
12. Batchelor, B., "Leach Models: Theory and Application", *J. Hazard. Mater.*, **24**, pp. 255-266 (1990).
13. Chandler, J., et al., *Municipal Solid Waste Incinerator Residues In: Studies in Environmental Science 67*, chapter 21, Elsevier, Amsterdam, (1997).