

## 점도 변화에 따른 유류오염 모래의 역학적 특성

홍승서 · 배규진 · 김영석\*  
한국건설기술연구원 지반연구소

### Mechanical Properties of Oil Pollution Sand Due to Changes in the Viscosity of Oil

Seung Seo Hong, Gu-Jin Bae, and YoungSeok Kim\*

<sup>1</sup>Geotechnical Engineering Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 1190  
Simindae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 10223, Korea

Received 24 November 2015; received in revised form 21 December 2015; accepted 23 December 2015

---

본 연구에서는 유류로 오염된 모래의 지반공학적 특성에 대하여 분석하였다. 오염물로 사용한 유류는 점도특성을 고려하여 등유, 원유, 자동차 엔진오일을 선정하였고, 모형지반은 주문진 표준사를 사용하였다. 실내시험은 다짐시험, 투수시험, 직접전단시험을 유류의 오염비율에 따라 수행하였다. 투수시험에서 유류의 함유비가 증가할수록 오염되지 않은 지반에 비해 투수계수가 점진적으로 저하되었다. 내부마찰각은 오염되지 않은 지반보다 상대적으로 감소하였다.

**주요어:** 유류오염, 점도, 다짐시험, 투수시험, 내부마찰각

Contamination of soil due to an oil spill influences its subsequent behavior. An investigation was conducted to study the effect of oil viscosity on compaction characteristics, coefficient of permeability, and shear strength. Water permeability was also determined by using Kerosene, Engine oil, and Crude-oil as contaminants. The test results indicate that the compaction characteristics are influenced by oil contamination. Direct shear test was conducted to investigate the effect of oil in the pore space in sandy ground. angle of internal friction of sand (based on total stress condition) decreases due to presence of oil within the pore spaces in sand.

**Key words:** oil contamination, viscosity, compaction, permeability, internal friction

---

---

\*Corresponding author: kimys@kict.re.kr

© 2015, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 서 론

지반에서의 유류오염은 여러 가지 경로에 의해 발생되고 있으며 특히, 지하 저장시설의 파손에 의한 오염이 가장 심하다(Evgin et al., 1995). 국내의 경우, 유류저장 시설 중에서 약 30% 정도가 파손 또는 부식 등으로 기름이 누출되고 있으며, 비교적 관리체계가 잘되어 있는 미국에서도 전체 지하유류탱크의 약 25% 정도가 누출되는 것으로 조사되었다(Seoul Newspaper, 2009). Evgin (1989)은 유류오염 모래에서의 응력-변형에 관한 실험적 결과를 제시하였다. 그의 연구에 의하면 모래가 유류로 포화되었을 때, 전단강도는 현저하게 감소하고 체적변형은 크게 증가하였다. 또한 축차응력과 축변형으로부터 도출된 초기 접선탄성계수(Initial Tangent Modulus)는 유류가 모래 속에 함유되어 있을 때 현저하게 감소하였다. Hjeltnes et al. (1995)은 모래 속 유류가 역학적특성을 크게 변화시킴을 실험을 통해 입증하였다. 국내에서는 Shin and Lee (1997)가 모래에 원유를 오염시켜 축조된 모형 사질토 지반의 공학적 특성을 연구한 바 있다.

본 연구에서는 유류오염 모래에 대한 역학적 특성을 다양한 실험을 통해 분석하였다. 사용한 모래는 주문진 표준사이고 유류는 점도가 상이한 원유, 등유, 자동차 엔진오일을 사용하였다. 각각의 실험에서는 유류의 함유비와 지반의 상대밀도를 달리하였다.

## 실험재료

### 유류특성

시험에 사용한 유류는 오만산 원유(이하 원유), 등유, 자동차 엔진오일(이하 엔진오일)을 선택하였다. 유류의 점도 및 비중특성을 도출하기 위하여 동점도시험과 비중시험을 실시하였다. 이에 대한 결과는 Table 1과 같다. 동점도시험은 온도의 영향을 감안하여 0, 10, 30, 40°C로 구분하여 수행하였다. Table 1에서 등유는 원유와 엔진오일의 동점도 값보다 작게 나타났다. 온도 증가에 따

른 점도영향을 살펴보면 등유는 온도가 증가할수록 동점도 값이 완만히 감소하였으나, 점도가 높은 원유와 엔진오일의 동점도 값은 등유의 동점도 값보다 상대적으로 크게 감소하였다. 3종류의 유류가 온도가 증가함에 따라 동점도값은 감소하였으며 점도가 높은 유류일수록 온도증가에 따라 동점도 값의 저하가 크게 나타났다.

### 흙시료

실험에 사용한 모래는 주문진 표준사이며 기본물성결과는 Table 2에 나타내었다. Table 2에 의하면 주문진 표준사의 비중( $G_s$ )은 2.65, 유효입경( $D_{10}$ )은 0.375 mm, 균등계수( $C_u$ ) 및 곡률계수( $C_c$ )는 각각 1.53과 1.10이며 최대간극비( $e_{max}$ )와 최소간극비( $e_{min}$ )는 0.91과 0.48로 나타났다. 이를 바탕으로 통일분류법(USCS)에 의한 흙의 분류는 입도가 불량한 모래(SP)로 나타났다.

## 지반공학적 특성

### 다짐특성

유류오염 모래의 다짐특성을 파악하기 위하여 다짐시험을 물로 다진 경우와 등유, 원유, 엔진오일로 다진 경우로 수행하였고 그 결과를 Fig. 1에 도시하였다. Fig. 1에서 y축은 최대건조단위중량( $\gamma_{dmax}$ )이고 x축은 모래에 함유된 물과 유류의 함유량을 나타내고 있다. Fig. 1의 다짐분포곡선을 살펴보면, 물로 다진 경우와 유류로 다진 경우에 차이가 나타났으며, 이것은 물과 유류의 점도 특성의 차이로 판단된다. 또한, 점도가 큰 유류일수

**Table 2.** Basic physical properties of Jumoonjin sand.

$D_{10}$ (mm)	0.375
$G_s$	2.65
$C_u$	1.53
$C_c$	1.10
$e_{max}$	0.91
$e_{min}$	0.48
USCS	SP

**Table 1.** Kinematic viscosity test results (unit : cSt).

Measurement		Engine oil	Kerosene	Crude oil
Viscosity (cP, centi-poise)	4°C	498.58	2.02	250.87
	10°C	261.13	1.66	112.12
	30°C	83.77	1.2	32.53
	40°C	53.47	1.04	20.13
Specific gravity (at 4°C)		0.8552	0.7979	0.8787

\*cSt : centistoke, cP : centi-poise = 1/100 g/cm-s

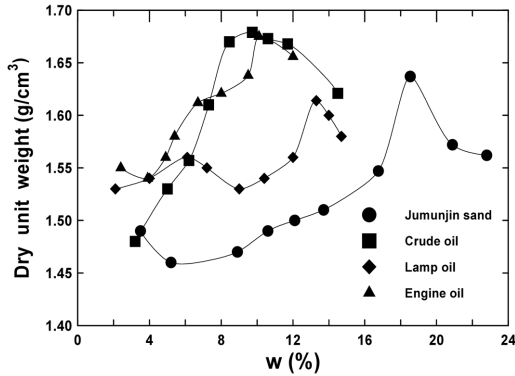


Fig. 1. Compaction test results.

록 다짐곡선은 좌측상부로 이동하는 경향을 보였다. 동일한 다짐에너지와 함수비의 조건에서 모래의 최대건조 밀도는 엔진오일로 다진 모래가 크게 나타났다. 동일 다짐에너지와 함수비에서 최대건조밀도가 크게 나타났다는 것은 이때의 침하량이 더 크게 발생할 수 있으며 지지력도 작게 나타날 수도 있다는 것을 예측할 수 있다. 그리고 최적함유비는 유류로 오염된 시료가 물을 함유하고 있는 모래보다 작게 나왔다.

**투수특성**

모래 함유비를 각각 1, 2, 4, 6%의 중량비로 혼합한 후, KSF 2322의 방법에 따라 투수시험을 실시하였다. 다짐도에 따른 투수특성을 비교하기 위하여 상대밀도 ( $D_r$ )를 각각 느슨한 상태( $D_r=45\%$ )와 조밀한 상태( $D_r=75\%$ )로 나누어 수행하였다. Fig. 2와 Fig. 3의 결과에 의하면, 등유는 상대밀도 45%와 75%에서 오염되지 않은 모래의 투수계수( $k$ )보다 각각 43.2%와 28.1%로 감소하였다. 또한, 원유는 53.4%와 51.2%, 엔진오일은 55.7%와 68.1%로 감소하였다. 동일한 상대밀도와 함유비 조건에서 점도가 낮은 등유는 상대적으로 점도가 높은 유류보다 투수계수가 작게 감소하나, 점도가 높은 원유나 엔진오일은 상대적으로 크게 감소하였다. 등유는 함유비가 증가할수록 투수계수의 감소는 완만하였고, 원유는 지반이 느슨한 상태( $D_r=45\%$ )일 때, 등유와 같은 완만한 감소경향을 나타냈지만, 지반이 조밀한 상태( $D_r=75\%$ )에서는 초기 오염상태( $w_o=1\%$ )부터 투수계수가 급격히 감소하다 이후부터는 완만하게 수렴되었다.

유류오염 모래는 오염도가 증가할수록 토립자 사이로 일반수가 통과할 때, 유류로 인해 점차 투수계수가 작아지며 점도가 큰 유류일수록 투수계수는 크게 감소되었다.

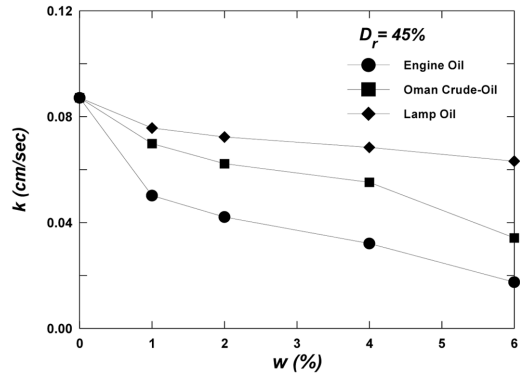


Fig. 2. Permeability test results ( $D_r=45\%$ ).

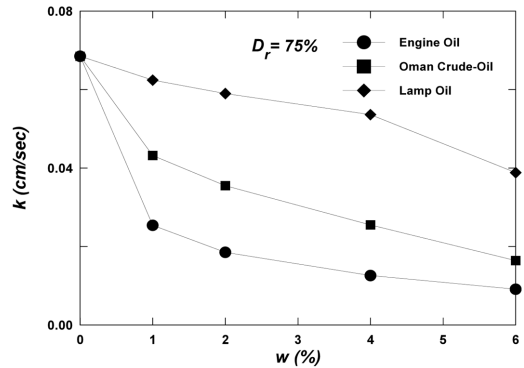


Fig. 3. Permeability test results ( $D_r=75\%$ ).

엔진오일의 경우 지반의 다짐상태와는 관계없이 투수계수가 초기 오염상태부터 크게 감소하다가 이후부터는 완만하게 감소하였다. 유류오염 모래는 오염도가 증가할수록 토립자 사이로 일반수가 통과할 때, 유류로 인해 점차 투수계수가 작아지며 점도가 큰 유류일수록 투수계수는 크게 감소되었다. 상기와 같이 유류로 오염된 지반의 투수계수는 유류의 점도에 의해 투수계수가 감소하였으며 점성이 클수록 유속이 저하되는 것을 실험을 통해 확인하였다. 동점도시험에서 알 수 있듯이 유류의 점성은 온도에 따라 매우 민감하게 변한다. 특히, 점성이 높은 유류일수록 온도에 의해 점성의 차가 아주 심하다.  $k_{(S_r)}/k_{(S_r=0)}$ 와  $e^2 S_r$ 의 관계곡선으로부터 유류로 오염된 지반의 점도상수( $m$ )를 도출하였으며, 다음과 같은 관계로 나타내었다.

$$k_{(S_r)}/k_{(S_r=0)} = 1 - m S_r^2 \tag{1}$$

여기서,  $S_r$ : 포화도,  $e$ : 간극비,  $m$ : 유류오염지반의 점도상수

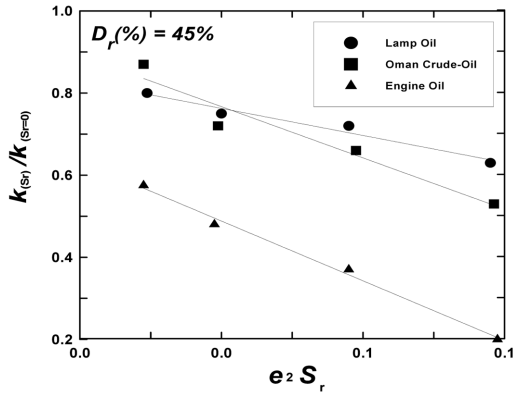


Fig. 4. Constant viscosity results ( $D_r=45\%$ ).

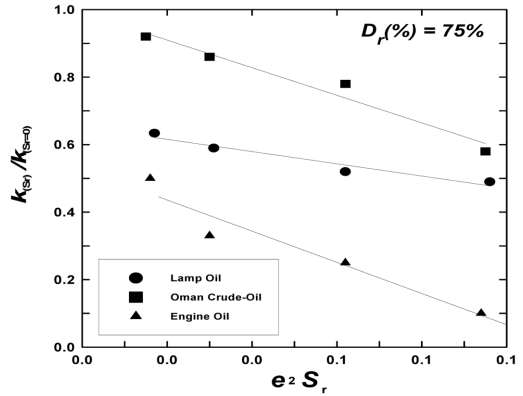


Fig. 5. Constant viscosity results ( $D_r=75\%$ ).

Table 3. Results of direct shear tests.

$D_r$ (%)	$w_o$ (%)	0.32 kg/cm <sup>2</sup>			0.62 kg/cm <sup>2</sup>			0.83 kg/cm <sup>2</sup>			
		Maximum shear stress (kg/cm <sup>2</sup> )	Shear displacement (mm)	Residual stress (kg/cm <sup>2</sup> )	Maximum shear stress (kg/cm <sup>2</sup> )	Shear displacement (mm)	Residual stress (kg/cm <sup>2</sup> )	Maximum shear stress (kg/cm <sup>2</sup> )	Shear displacement (mm)	Residual stress (kg/cm <sup>2</sup> )	
Kerosene	$D_r=45$	0	0.427	2.5	0.296	0.539	3	0.412	0.632	3	0.355
		1	0.342	2	0.247	0.448	3.5	0.382	0.537	4	0.337
		2	0.295	3.5	0.211	0.398	3	0.361	0.484	4	0.322
		4	0.270	3	0.202	0.368	5	0.339	0.449	3.5	0.344
		6	0.228	3.5	0.175	0.321	4	0.290	0.399	3.5	0.309
	$D_r=75$	0	0.490	2.5	0.321	0.619	2.5	0.451	0.728	3	0.44
		1	0.418	2.5	0.275	0.538	3	0.394	0.638	3	0.4
		2	0.367	3.5	0.299	0.486	3	0.405	0.583	2.5	0.367
		4	0.303	3.5	0.233	0.412	3.5	0.358	0.503	3.5	0.376
		6	0.275	3	0.211	0.381	3.5	0.304	0.469	3.5	0.362
Crude oil	$D_r=45$	1	0.222	4	0.211	0.325	3	0.288	0.411	3.5	0.349
		2	0.208	5	0.185	0.305	3	0.281	0.387	3	0.341
		4	0.202	3	0.179	0.294	4	0.262	0.371	5.5	0.339
		6	0.201	3.5	0.175	0.290	5	0.260	0.364	4	0.329
	$D_r=75$	1	0.323	2.5	0.236	0.438	4	0.394	0.535	3	0.335
		2	0.283	4	0.236	0.392	4	0.405	0.483	2.5	0.304
		4	0.275	4	0.239	0.377	5	0.358	0.463	3.5	0.349
		6	0.271	4	0.226	0.369	4.5	0.304	0.450	3	0.331
Engine oil	$D_r=45$	1	0.222	4	0.211	0.331	5	0.300	0.422	2.5	0.288
		2	0.209	5	0.184	0.303	5	0.268	0.382	3	0.246
		4	0.198	4	0.179	0.288	3	0.255	0.363	4	0.223
		6	0.196	3	0.176	0.284	3	0.248	0.357	3.5	0.206
	$D_r=75$	1	0.287	3	0.210	0.398	4	0.341	0.491	3.5	0.395
		2	0.272	4	0.227	0.374	4	0.322	0.459	2.5	0.362
		4	0.273	3.5	0.210	0.370	5	0.318	0.450	3.5	0.352
		6	0.270	4	0.220	0.360	5	0.306	0.435	3	0.327

Fig. 4에서 상대밀도 45%에서 등유의 점도상수는 1.7 이고 원유는 3.2, 엔진오일은 3.8로 나타났다. 또한, Fig. 5와 같이 상대밀도 75%에서는 등유가 1.8, 원유는 4.2, 엔진오일은 4.6으로 나타났다. 지반의 다짐도가 높고, 유류의 점도가 높을수록 점도상수는 크게 나타났다.

**전단특성**

직접전단시험 시료의 크기는 직경이 60 mm, 높이가 20 mm이며 요구되는 소정의 상대밀도에 따라 시료를 준비하였다. 모래지반의 간극사이를 원유로 채워졌을 때 모래의 내부마찰각과 전단강도변형에 어떠한 영향을 미치는가를 연구하기 위하여 유류의 함유비는 투수시험과 동일한 조건으로 하였고, 수직응력은 0.32, 0.63, 0.83 kg/cm<sup>2</sup>으로 나누어 수행하였다. 시험결과는 Table 3에 정리하였다. Table 3의 결과를 살펴보면 유류 오염 모래는 오염되지 않은 모래에 비해 전단강도가 감소하였다.

유류의 특성에 따라 모래의 전단강도는 다르게 감소하였으며 대체적으로 점성이 작은 등유의 최대전단응력이 작게 감소하였고, 점성이 큰 원유와 엔진오일의 최대전단응력은 크게 감소하였다. 또한 유류의 함유량이 증가할수록 전단강도는 점진적으로 감소하였다. Fig. 6은 수직응력 0.32 kg/cm<sup>2</sup>일 때의 유류오염 모래의 전단응력-전단변위 관계를 도시한 곡선이다.

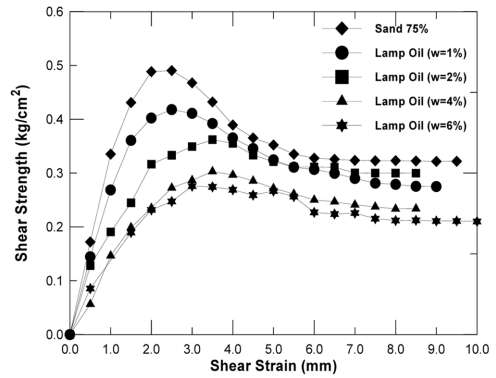
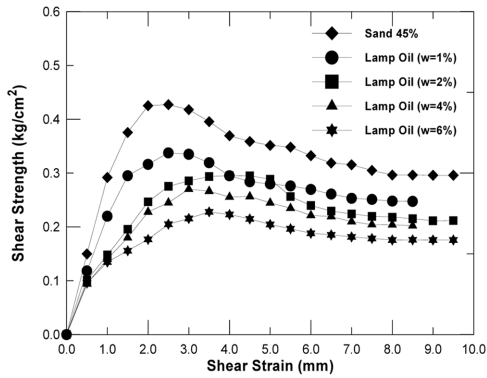
Table 4에서 체적변화-전단변위의 결과에서 등유의 경우, 전체적으로 체적변화가 팽창(+)상태를 나타내었다. 또한, 상대밀도가 높을수록 체적변위도 비례하여 팽창하고 있음을 알 수 있었다. 원유와 엔진오일은 상대밀도가 작고 수직응력이 작을수록 체적이 압축(-)상태로 나타났으며 수직응력이 증가할수록 팽창(+)상태를 보이고 있었다. 함유비가 증가할수록 체적변위는 대체적으로 팽창(+)상태에서 압축(-)상태로 변화하였다. Fig. 7은 수직응력 0.32 kg/cm<sup>2</sup>일 때의 유류오염 모래의 체적변화-전단

**Table 4.** Changes in the volume of the oil content and relative density.

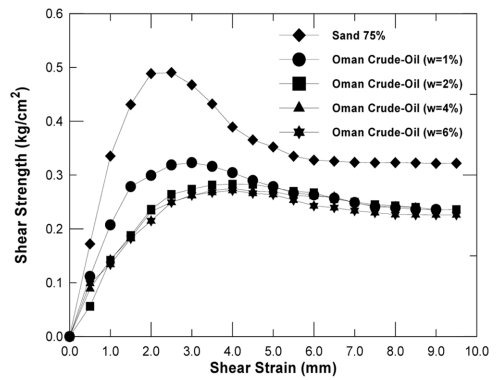
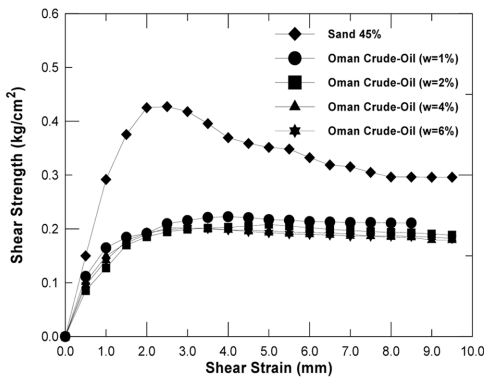
Measurement	w <sub>o</sub> (%)	0.32 kg/cm <sup>2</sup>		0.62 kg/cm <sup>2</sup>		0.83 kg/cm <sup>2</sup>	
		D <sub>r</sub> =45	D <sub>r</sub> =75	D <sub>r</sub> =45	D <sub>r</sub> =75	D <sub>r</sub> =45	D <sub>r</sub> =75
Kerosene	0	0.47	0.736	0.741	0.921	0.564	0.733
	1	0.45	0.632	0.574	0.782	0.315	0.556
	2	0.364	0.52	0.472	0.521	0.255	0.573
	4	0.336	0.48	0.33	0.483	0.269	0.480
	6	0.328	0.344	0.220	0.40	0.155	0.275
Crude oil	1	0.065	0.336	0.331	0.550	0.381	0.437
	2	-0.102	0.22	0.18	0.442	0.259	0.336
	4	-0.197	-0.167	-0.15	0.42	0.110	0.143
	6	-0.294	-0.257	-0.211	0.34	-0.219	-0.128
Engine oil	1	-0.127	0.33	0.212	0.471	0.344	0.349
	2	-0.222	0.214	0.09	0.36	0.315	0.346
	4	-0.295	0.179	-0.211	0.321	0.254	0.302
	6	-0.418	0.118	-0.30	0.301	0.200	0.267

**Table 5.** Changes in the volume of the oil content and relative density.

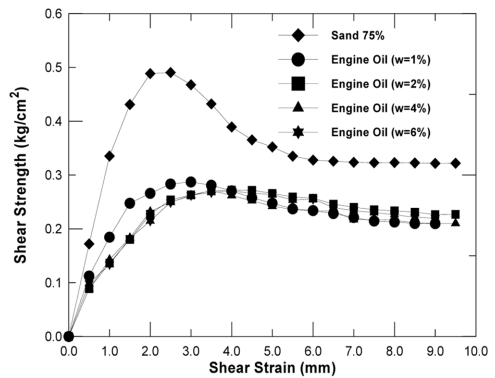
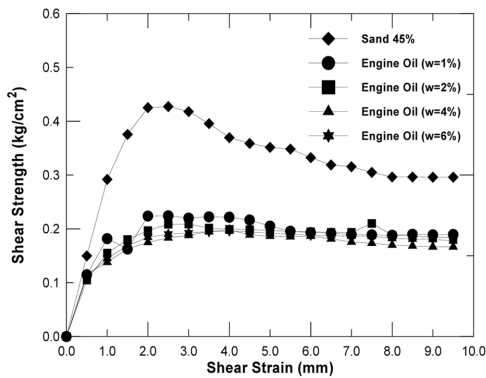
w <sub>o</sub> (%)	D <sub>r</sub> =45%			D <sub>r</sub> =75%		
	Kerosene	Crude oil	Engine oil	Kerosene	Crude oil	Engine oil
0	35.8°	35.8°	35.8°	41.8°	41.8°	41.8°
1	34.3°	33.2°	35.2°	38.5°	37.2°	35.8°
2	33.2°	31.5°	30.2°	37.7°	35.1°	32.8°
4	31.4°	29.5°	28.9°	35.1°	32.9°	31.2°
6	30.2°	28.5°	28.2°	34.1°	31.4°	28.9°
Maximum decrease	5.6°	7.3°	7.6°	7.7°	10.4°	12.9°



(a) Shear stress vs. shear strain for Kerosene contaminated sand



(b) Shear stress vs. shear strain for crude oil contaminated sand



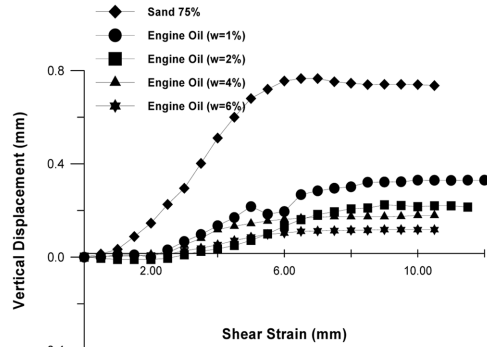
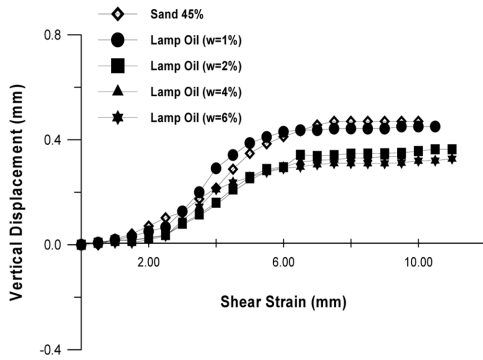
(c) Shear stress vs. shear strain for engine oil contaminated sand

Fig. 6. Shear stress - the horizontal displacement relationship (vertical stress=0.32 kg/cm<sup>2</sup>, Dr=45%, 75%).

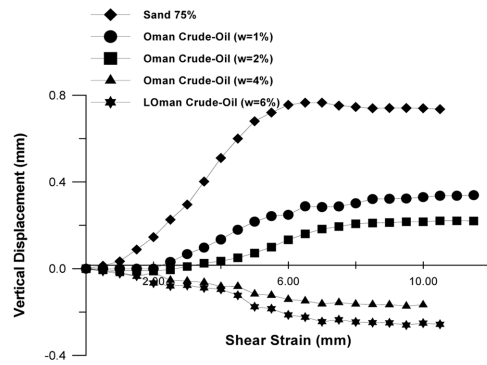
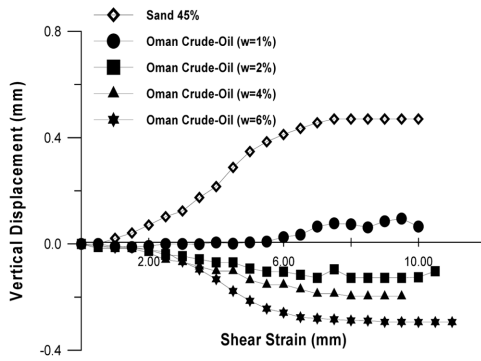
변위 관계를 도시한 곡선이다.

Fig. 8과 Table 5는 상대밀도 45%와 75%에서 함유

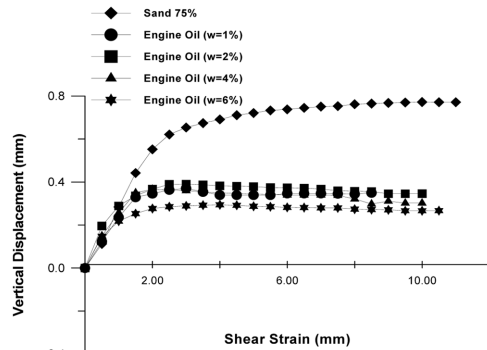
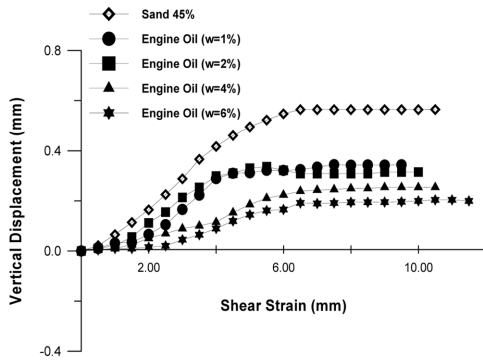
비의 변화에 의한 오염된 모래의 내부마찰각 변화를 나타낸 것이다. Fig. 8(a)에서 지반이 느슨한 상태(D<sub>r</sub>=45%)



(a) Volume change for Kerosene contaminated sand



(b) Volume change for crude oil contaminated sand



(c) Volume change for engine oil contaminated sand

Fig. 7. Volume displacement curve of the engine oil (vertical stress=0.32 kg/cm<sup>2</sup>, Dr=45%, 75%).

일 때, 등유는 함유비 증가에 따라 내부마찰각이 35.8°~30.2°으로 감소하였고, 오염되지 않은 모래보다 최대

15.6% 감소하였다. 원유는 35.8°~28.5°로 나타났고, 내부마찰각의 감소가 최대 19.3%로 나타났다. 엔진오일은

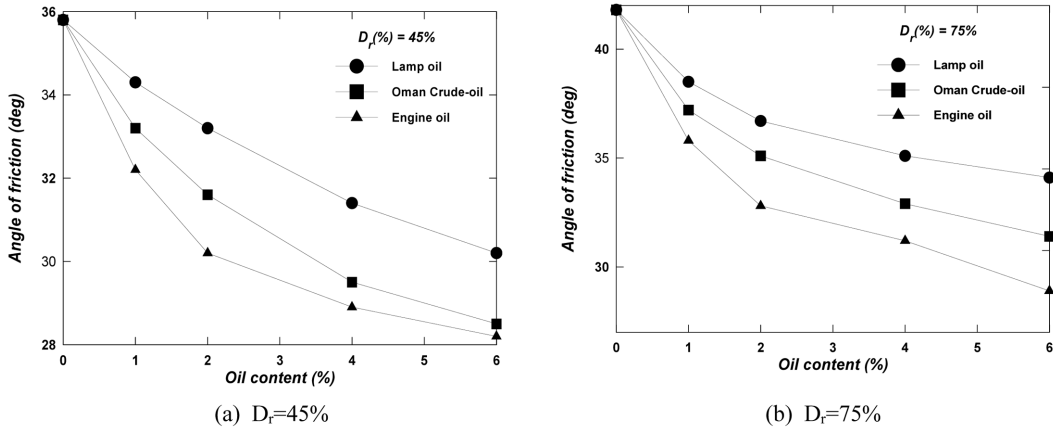


Fig. 8. Internal friction angle change curve.

35.8°~28.9°로 최대 21.2%가 감소하였다. Fig. 8(b)에서 지반이 조밀한 상태( $D_r=75\%$ )에서 내부마찰각의 감소경향은 3종류의 유류가 지반이 느슨한 상태와 비슷한 경향을 나타냈으나 내부마찰각의 감소는 더 크게 발생하였다(2.1°~5.3°). 특히, 엔진오일은 41.8°에서 28.9°로 상대적으로 가장 크게 감소되었다. 동일한 상대밀도에서 내부마찰각은 유류의 함유비가 증가하고 점도가 높을수록 내부마찰각은 크게 감소되었다. 실제 현장에서 점도가 높은 유류가 토양에 유입되면 흙의 내부마찰각은 크게 감소하여 지반의 역학적 성질을 저하시키며, 궁극적으로 구조물의 안정에도 문제가 될 것으로 판단된다.

## 결론

본 연구에서는 유류로 오염된 모래의 지반공학적인 특성을 규명하고자 다짐시험, 투수시험, 직접전단시험을 유류의 오염비율에 따라 수행하였다. 이를 바탕으로 도출된 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 오염물로 사용한 유류의 점도특성에서 등유는 원유와 엔진오일에 비해 작게 나타났다. 등유는 온도가 증가할수록 동점도가 작게 감소하였으나 원유와 엔진오일은 크게 감소하였다. 점도가 높은 유류일수록 온도에 따라 점도값이 크게 변화하였다.

(2) 다짐시험에서 물로 다진 경우와 유류를 이용하여 다짐시험을 한 경우에 차이가 나타났으며 이것은 물과 유류의 특성차이에 의한 것으로 보인다. 실험결과, 점도가 큰 유류로 다진 모래가 상대적으로 점도가 낮은 등유로 다진 모래에 비하여 침하가 더 크게 발생하였으며

이것은 점도가 큰 원유와 엔진오일이 물과 점도가 낮은 등유에 비해 구조물의 안정에 나쁜 영향을 미칠 것으로 판단된다.

(3) 투수시험에서 등유의 투수계수는 상대밀도( $D_r$ ) 45%와 75%에서 오염되지 않은 모래의 투수계수보다 각각 43.2%와 28.1%로 감소하였다. 또한, 원유는 53.4%와 51.2%로 줄어들었고, 엔진오일은 55.7%와 68.1%로 가장 크게 감소하였다. 동일한 상대밀도와 함유비 조건에서 점도가 낮은 등유는 상대적으로 점도가 높은 유류보다 투수계수가 작게 감소하나, 점도가 높은 원유나 엔진오일은 투수계수가 크게 감소하였다.

(4)  $k_{(sr)}/k_{(sr=0)}$ 와  $e_{sr}^2$ 의 관계곡선으로부터 유류로 오염된 지반의 점도상수( $m$ )를 도출하였으며, 상대밀도 45%에서의 등유는 1.7이고, 원유는 3.2로, 엔진오일은 3.8로 나타났다. 또한, 상대밀도 75%에서의 점도상수는 등유가 1.8이고 원유와 엔진오일은 각각 4.2와 4.6으로 나타났다. 지반상태가 단단하고 유류의 점도가 높을수록 점도상수는 크게 나타났으며 유류의 점도값과 같은 경향을 나타내고 있었다.

(5) 직접전단시험결과, 내부마찰각의 변화는 최소 5.6°에서 최대 12.9°로 감소하였다. 점도가 낮은 등유의 경우, 내부마찰각은 5.5°와 7.7°로 감소하였으나, 점도가 큰 엔진오일의 감소는 7.6°와 12.9°로 크게 발생하였다. 유류로 인한 영향은 상대밀도가 높을수록 내부마찰각과 맞물림(Interlocking)현상의 감소폭이 크게 나타났으나 오염도가 증가함에 따라 체적팽창(Dilatancy)현상은 상대밀도가 낮고 함유비가 증가함에 따라 점차 압축현상으로 변화한다. 이러한 현상은 상대밀도가 감소하는 효과



와 같다. 만약 현장에서 점도가 높은 유류가 유입되면 흙의 내부마찰각은 크게 감소되어 지지력을 저하시키는 결과를 야기하여 구조물의 안정에도 나쁜 영향을 미칠 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 플랜트연구사업(오일샌드 모듈 플랜트 지반평가 및 급속시공기술 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 또한, 다양한 기술검토 의견 등을 해 주신 인천대학교 신은철 교수님에게 감사를 드립니다.

### References

Shin, E. C. and Lee, J. B., 1995, The characteristics of sandy soil contaminated with crude oil, 1995 Spring Conference, Korea Geotechnical Society, 129-134.  
 Seoul Newspaper, 2009, Retrieved form <http://www.seoul.co.kr/news/newsView.php?id=20090223011003>.  
 Evgin, E., Boulon, M., and Das, B. M., 1995, Finite Element Analysis of a Model Scale Footing on Clean and Oil Contaminated Sands, The Proceedings of the Second International Offshore and Polar Engineering Conference, The Netherlands, 11-16 June, 517-521.  
 Evgin, E., 1989, Effect of an oil spill on soil properties, Proceeding 8th International Conference, Offshore

Mechanics and Arctic Engineering, American Society of Mechanical Engineering, Hague, March 1989, 715-720.

Hjeldnes, E. I., Bretvik, S. K., and Skoglund, K. A., 1995, An Experimental Study of Oil Contamination Spreading in SandGeoenvironment 2000, Geotechnical Special Publication, ASCE, 46(1), 373-387.

### 홍승서

한국건설기술연구원 지반연구소  
 10223 경기도 고양시 일산서구 시민대로 1190  
 Tel: 031-910-0403  
 E-mail: sshong@kict.re.kr

### 배규진

한국건설기술연구원 지반연구소  
 10223 경기도 고양시 일산서구 시민대로 1190  
 Tel: 031-910-0212  
 E-mail: gjbae@kict.re.kr

### 김영석

한국건설기술연구원 지반연구소  
 10223 경기도 고양시 일산서구 시민대로 1190  
 Tel: 031-910-0371  
 E-mail: kimys@kict.re.kr