

## 산업용 기름으로 오염된 지반의 강도 특성에 관한 연구

### A Study on the Strength Characteristics of the Ground Contaminated with the Industrial Oil

조 태 룡\*<sup>1</sup> Cho, Tae-Ryong

이 영 생\*<sup>2</sup> Lee, Yeong-Saeng

#### Abstract

To study the characteristics of the strength change when the ground is contaminated with the industrial oil, the compaction tests, the permeability tests and undrained triaxial tests were conducted with samples of sand, silty sand and kaolinite by changing the water content and the oil content.

The test results showed that the shear strength of the sand samples contaminated with oil was 7% less than that of non-contaminated sand sample, but the shear strengths of the silty sand samples and the kaolinite samples contaminated with oil were 5~15% more than those of non-contaminated samples due to the chemical and physical interaction of oil with the clay particles. Generally it is known that animals and plants are threatened by the soil and water contamination. But as a result of this study, in the viewpoint of the geotechnical behavior, the shear strength of the sand was reduced more or less due to the ground contamination with oil but that of the clay increased a little because of the cohesion and adhesion according to the interaction of oil and clay particles.

#### 요 지

지반이 산업용 기름으로 오염될 때 지반의 강도변화 특성을 연구하기 위하여 모래와 실트질 모래 및 카오리나이트를 대상으로 함수비와 함유비를 변화시키며 다짐실험, 투수실험, 비배수상태에서 삼축압축실험을 실시하였다. 실험 결과에 의하면 밀도가 같은 모래의 경우는 기름을 혼합하였을 경우가 물을 혼합하였을 경우에 비해 약 7% 정도 전단 강도가 떨어지고 실트질 모래와 카오리나이트 경우는 기름을 혼합하였을 경우가 물을 혼합하였을 경우에 비해 점토입자와 기름의 화학적, 물리화학적 상호 작용으로 5~15% 정도 강도가 증가하는 현상을 보였다.

일반적으로 산업용 기름 유출에 따라 토양오염 및 수질오염으로 동·식물에 큰 영향을 주고 있으나 토질역학적 거동은 초기상태 및 모래에서는 전단 강도가 감소하였으나 점성토의 경우는 기름 유출 또는 유입에 따라 응집성, 부착성이 생겨 강도증가 현상을 가져와 큰 문제점이 없는 것으로 판단된다.

**Keywords :** Oil contaminated ground, Triaxial tests, Mohr's failure envelope, Stress path

\*1 정회원, 안양과학대학 토목과 교수

\*2 정회원, 경기대학교 공과대학 토목공학과 교수

## 1. 서론

현대 사회는 산업의 고도화, 다양화로 수많은 종류의 화학 물질들이 생성, 소비, 배출됨으로써 각각의 오염물에 대한 종합적이고 체계적인 통제 및 관리가 요구되고 있다. 전국의 주유소에서 지하 저장 탱크의 누출로 인한 오염, 그리고 폐광산 지역 등 실로 오염원은 전국적으로 산재되어 있는 실정이다. 특히, 지반으로 유입된 산업용 기름은 흙의 공극을 통하여 이동하면서 물리, 화학적 변화를 유발시킴으로써 전국 주유소와 지하 기름 저장 탱크 주변 토양의 오염 상태가 심각한 것으로 드러났다(환경부, 1999).

산업용 기름의 주성분은 탄화수소( $C_nH_{2n+2}$ )로서 성분, 조성비율에 따라 변화하며 그밖에 약간의 질소(N), 황(S), 산소(O) 등의 화합물과 미량의 금속염 화합물을 함유하고 반응물질과 생성물질의 종류뿐만 아니라 그들의 몰수, 분자수, 질량 및 부피와 같은 양적 요소에 따라 화학적으로 극히 복잡한 구조를 가지며 고도의 점착성, 가요성, 내수성, 전기 전도성의 특성을 나타내고 세탄가가 높으며 점성의 영향에 의해 응집하면서 강도증가 현상을 나타내고 있다(Sawyer, 1996).

불법매립 쓰레기, 방치 폐기물 등으로 전국의 토양이 신음하고 있는 가운데 99년도 환경부 토양 오염도 실태조사 현황에서 전국 1만여 개 주유소 및 지하 기름 탱크 시설 중 133곳이 토양 오염 우려기준 80 ppm을 크게 초과해 시설 개선 명령을 받은 것으로 나타났고 98년 10월 현재 주유소는 76곳, 화학업 등에서 관리하는 지하 탱크는 57곳 중 시도별 오염기준 초과업소는 경기도가 46곳으로 가장 많고 부산, 울산, 대구, 서울 순으로 나타났다(한국건설기술연구원, 1998).

토양오염 중 탱크에서 누유(漏油)된 산업용 기름으로 오염된 경우의 입도 변화에 따른 토질 역학적 변화를 파악하여 강도에 미치는 영향을 알아보기로 한다.

## 2. 물리적 실험 및 결과 분석

### 2.1 산업용 기름 및 시료의 기본분석

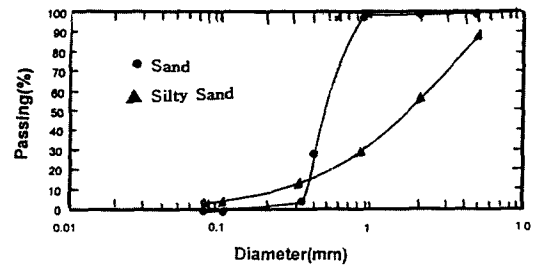
본 연구를 위하여 압축용 표준사, 실트질 모래(화강 풍화토) 및 카오리나이트를 사용하여 세립토가 증가하면서 함수비와 함유비에 따른 강도정수를 실내 실험중 가장 신뢰성이 있는 삼축 압축실험으로 비교하였는데 지반 오염원으로 사용된 산업용 기름의 특성은 품질기준에 따라 다

표 1. 원유의 품질기준 특성 (한국석유 자료중)

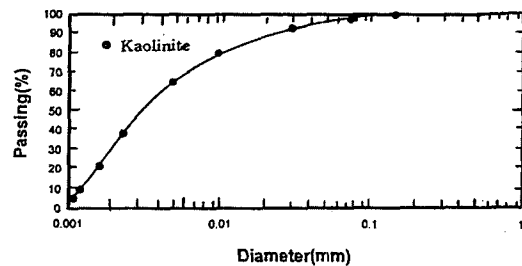
검 사 항 목	실 험 결 과
비중(Density), 15°C	0.848
수분 및 침전물, Vol%	0.050
염분(Salt), PBT	4.30
황분(Sulfur), Wt%	1.04
유동점(Pour point), °C	-3.5
등점도(Viscosity), 40°C, cSt	5.5

표 2. 시료의 토질특성

토질특성분류	압축표준사	실트질모래	카오리나이트
1. 비중 ( $G_s$ )	2.650	2.615	2.598
2. 유효 입경 ( $D_{10}$ )(mm)	0.315	0.510	0.0013
3. 균등 계수 ( $C_u$ )	1.746	3.920	3.077
4. 곡률 계수 ( $C_g$ )	1.067	0.980	0.931
5. 최대간극비 ( $e_{max}$ )	0.913	0.822	0.787
6. 최소간극비 ( $e_{min}$ )	0.470	0.418	0.399
7. 흙의분류	SP	SM	CH



(a) 표준사와 실트질 모래의 입경 가격 곡선



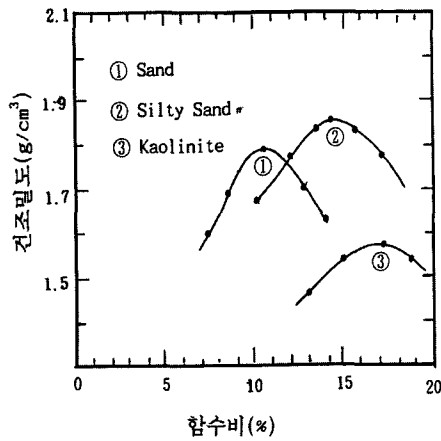
(b) 카오리나이트의 입경 가격 곡선

그림 1. 사용 시료의 입경 가격 곡선

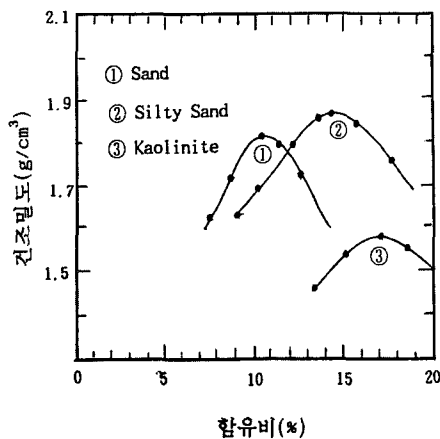
음 표 1과 같고 시료의 토질 특성은 표 2와 그림 1에 나타난 것과 같다.

### 2.2 밀도 시험 및 시료 밀도 특성

압축 표준사, 실트질 모래 및 카오리나이트의 밀도 변화 특성을 알아보기 위하여 공기 건조한 시료에다 점차적으로 함수비, 함유비를 같은 조건 상태로 증가시키면서 A다



(a) 함수비에 따른 다짐곡선



(b) 함유비에 따른 다짐곡선

그림 2. 함수비와 함유비에 따른 다짐곡선 비교

표 3. 최적 함수비(OMC)와 최대 건조밀도 ( $\gamma_{dmax}$ ) 비교

시료	혼합수	시험조건	OMC (%)	$\gamma_{dmax}$ (g/cm³)	$\gamma_{dmax}$ 증가율 (%)
①시료 (압축표준사)	물	함수비	10.54	1.798	+1.22
	기름	함유비	10.46	1.820	
②시료 (실트질모래)	물	함수비	14.48	1.861	+1.18
	기름	함유비	14.41	1.883	
③시료 (카오리나이트)	물	함수비	17.42	1.564	+1.28
	기름	함유비	17.32	1.584	

짐 실험을 실시하여 최적 함수비와 함유비 및 최대 건조 밀도를 구하여 비교하였다.

그림 2에 나타난 다짐실험 결과로부터 산업용 기름을 섞은 시료의 최적 함수비 및 최대 건조밀도와 함수비에 따른 시료의 최적 함수비 및 최대 건조밀도 결과를 표 3에 나타내었다.

### 2.3 투수 실험 및 분석

압축용 표준사, 실트질 모래 및 카오리나이트를 각각 2회 측정하여 함수비 경우와 함유비 경우를 비교하였다. 최적 함수비(OMC) 상태의 시료를 A방법에 의해 다짐한 후 진공 펌프를 이용하여 하루정도 시료내 입자 사이에 잔류하고있는 공기를 제거하고 완전 포화시켜 투수실험을 실시하였다.

산업용 기름 사용 경우도 진공 펌프를 사용하여 시료내 입자 사이에 잔류하고있는 공기를 제거한 후 산업용 기름으로 하루정도 완전하게 포화시켜 투수실험을 실시한 결과 밀도증가가 주 원인이며 그들의 몰수, 분자수, 질량 및 부피와 같은 양적 관계에 따라서 화학적 반응으로 점착성, 가요성, 내수성, 전기 전도성의 특성으로 인하여 함유비 경우가 화학 반응에 의한 응집력 발생으로 강도증가 및 공극이 감소하면서 투수계수는 약 1/10감소하는 현상을 보였다.

표 4. 함수비와 함유비에 따른 투수계수 비교

시료 종류	투수계수 (cm/sec)		평균투수계수 (cm/sec)		차
	함수비경우	함유비경우	함수비경우	함유비경우	
①압축 표준사	$3.62 \times 10^{-4}$	$3.17 \times 10^{-5}$	$3.745 \times 10^{-4}$	$3.09 \times 10^{-5}$	$3.436 \times 10^{-1}$
	$3.87 \times 10^{-4}$	$3.01 \times 10^{-5}$			
②실트질모래	$6.27 \times 10^{-5}$	$1.22 \times 10^{-6}$	$6.305 \times 10^{-5}$	$1.355 \times 10^{-6}$	$6.170 \times 10^{-1}$
	$6.34 \times 10^{-5}$	$1.49 \times 10^{-6}$			
③카오리나이트	$2.62 \times 10^{-7}$	$3.12 \times 10^{-8}$	$2.68 \times 10^{-7}$	$3.52 \times 10^{-8}$	$2.328 \times 10^{-1}$
	$2.74 \times 10^{-7}$	$3.92 \times 10^{-8}$			

### 3. 삼축 압축시험

#### 3.1 삼축 압축이론 및 결과 분석

흙의 강도는 보통 응력 - 변형률곡선의 최대주응력 값차를 직경으로 하는 원의 최대점을 기준으로 Mohr원에 접하는 선을 그려 얻는 Mohr응력 포락선은 다음과 같은 형태의 함수비로 나타난다.

$$\tau_{ff} = f(\sigma_{ff}) \quad (1)$$

지반의 안정을 계산하는 등의 경우에는 강도의 관계식이 필요하며, 이를 위해 직선으로 유사화 시킨 것이 Mohr

-coulomb 파괴 규준식이다.

$$\tau_{ff} = c + \sigma_{ff} \tan \phi \quad (2)$$

여기서,  $\tau_{ff}$ : 흙의 전단강도

$\sigma_{ff}$ : 흙의 연직응력

$c$ : 점착력 또는 점착절편

$\phi$ : 마찰각 또는 전단저항각

기본적인 이론식을 근거로 산업용 기름 유출에 따른 강도정수 ( $c$ ,  $\phi$ ) 변화관계를 검토하기 위하여 축차응력, 간극수압, Mohr 원 및  $p-q$  변화곡선을 이용하여 비교 검토하였다.

### 3.2 삼축 압축시험 방법

본 연구에서 사용한 삼축 압축 시험기는 영국 ELE사의 제품으로서 특징은 변형을 제어 방식이며 축하중, 축방향 변형량, 구속압, 배압(back pressure), 공극수압, 체적 변화량을 transducer를 통하여 측정하고 이 값은 ADU 장치로 전달되어 연결된 컴퓨터에 저장된다.

항압 장치는 유압식으로 레귤레이터(압력 조절기)가 부착되어있어 0에서 1700kPa까지 필요한 압력을 조절하여 가할 수 있다.

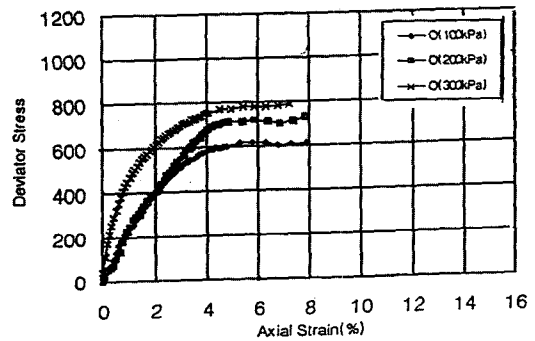
시료의 성형은 압축 표준사 경우는 성형용 특수 몰드(38mm two-way split former)를 사용하여 공시체 제작을 완료하고 재하시 정확한 공극수압을 측정하기 위하여 셀압과 배압의 차를 5kPa을 유지하면서 약 400kPa의 배압을 가한 물과 산업용 기름으로 각각 95%로 포화시켰다. 그리고 실트질 모래 및 카오리나이트는 균질한 시료를 확보하기 위하여 2개의 150mm CBR 몰드에 나누어 넣은 다음 교반기로 잘 혼합해서 각각 함수비와 함유비가 100%인 상태로 성형하였다. 초기조건을 맞추기 위하여 시료 초기 높이 160mm에서 압밀 재하 후 압밀 침하량을 80mm로 동일하게 맞추는 동안 물의 경우는 일주일 이 걸렸고 산업용 기름의 경우는 15일이 지나서야 침하량 80mm로 압밀 되었다. 이 성형된 시료에서 직경 50mm, 높이 100mm인 원통형 시료 채취기로 3개의 균질한 시료를 얻어서 트리머에서 직경 38mm의 원통형으로 깎은 다음 마이터 박스를 이용하여 높이 76mm의 공시체를 제작하였는데 손가락으로 산업용 기름 혼합시료 성형 정도를 확인해보면 물에 의한 성

형보다 단단하다는 것을 알 수 있으며 셀압과 배압차를 5kPa을 유지하면서 간극수압 계수가 0.95이상 되도록 포화시켜 셀압과 배압의 차를 각각 100kPa, 200kPa, 300kPa 만큼 차이가 나도록 조정하여 과잉 공극수압이 완전히 소산될 때까지 압력을 가하여 배수가 되지 않도록 밸브를 잠근 다음 전단속도가 0.7%/min이 되도록 조절 후 변형을 제어로 전단 시키면서 파괴 될 때까지의 실험을 진행하여 그 결과를 그림 3~그림 14에 나타내었고 그 결과를 표 5에 정리하였다.

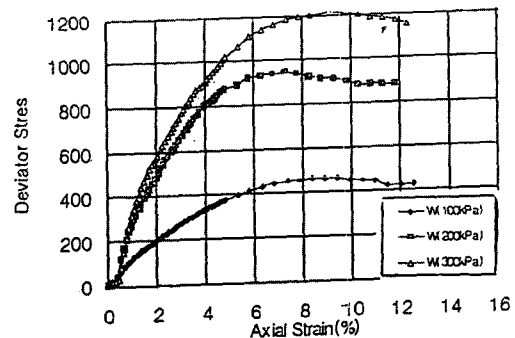
### 3.3 표준사 시료의 거동 분석

#### 3.3.1 축차응력 변화

압축 표준사 시료에 대한 삼축 압축 실험결과를 응력-변형률 곡선 형태로 표현하고 그 경로를 살펴보면 구속응력의 크기가 증가함에 따라 축차응력이 증가하는 경향을 보였으며 변형률 증가에 따라 축차응력이 증가하고 항복점을 지나 극한상태에 도달하는 경로로 보아 조밀한 모래의 거동을 보이고 있음을 알 수 있다. 기름 혼합인 경우 변형률이 약 4%를 지나면서 최대값을 보였으며 물 혼합 표준사인



(a) 산업용 기름을 혼합한 경우



(b) 물을 혼합한 경우

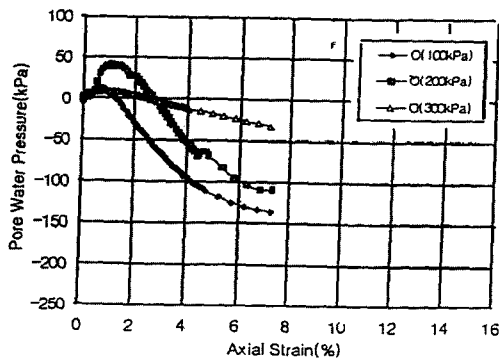
그림 3. 표준사의 축차응력 변화곡선

경우에는 약 6~9% 범위에서 항복되는 것을 알 수 있었다.

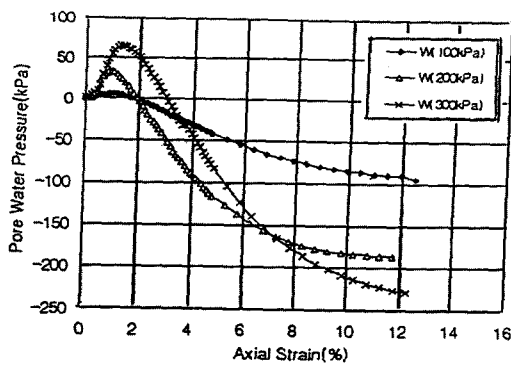
기름혼합 표준사인 경우 최대 축차응력은 약 600~800kPa 정도인 반면 물혼합 표준사인 경우 약 450~1200kPa 정도로 표준사에서는 기름을 혼합한 경우가 감소하는 경향을 보였다.

### 3.3.2 간극수압 변화

압축 표준사의 변형률에 따른 간극수압의 변화는 전단 초기에 양의 간극수압을 보이다가 전단이 진행되어감에 따라 시료의 팽창으로 인하여 부의 간극수압이 생김을 알 수 있다. 이는 전형적인 조밀한 모래시료의 거동으로 구속 응력이 증가될수록 간극수압의 크기가 증가하고 있음을 알 수 있다. 그리고 기름 혼합인 경우를 비교해 보면 물 혼합인 경우가 공극 수압이 더 크게 발생됨을 알 수 있다.



(a) 산업용 기름을 혼합한 경우

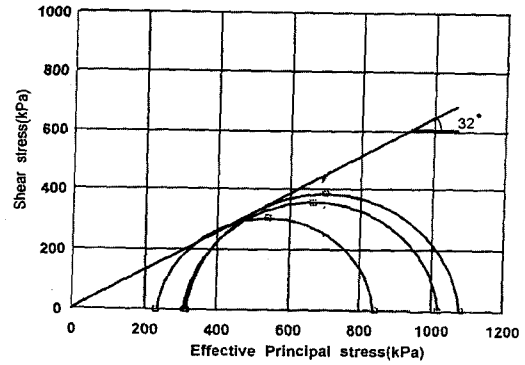


(b) 물을 혼합한 경우

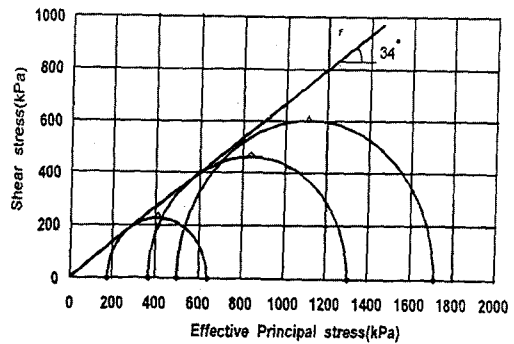
그림 4. 표준사의 간극수압 변화곡선

### 3.3.3 Mohr 원

압축 표준사에 대하여 기름 혼합인 경우와 물 혼합의 경우 전단강도 크기를 비교하기 위해 실험 결과를 Mohr의 원으로 도시하여 강도 정수를 산출하여 보았다. 그 결과 기름 혼합인 경우의 내부마찰각은 32°, 물 혼합인 경우의 내



(a) 산업용 기름을 혼합한 경우



(b) 물을 혼합한 경우

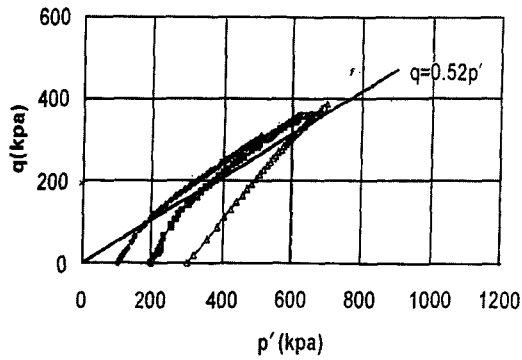
그림 5. 표준사의 Mohr 응력원

부마찰각은 34°로 나타났다. 이로써 표준사의 경우 기름을 혼합하면 물을 혼합한 경우에 비해 전단강도가 떨어짐을 알 수 있다.

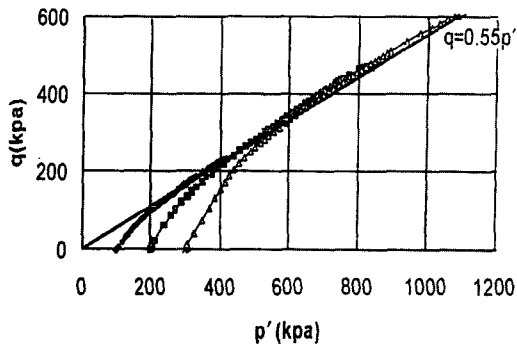
### 3.3.4 응력경로(유효주응력과 전단응력과의 관계)

그림 6은 비배수 삼축 압축실험의 결과를  $p' - q$ 평면에 도시한 응력경로이며, 여기서  $p'$ 는 유효 평균 압력 (effective mean pressure)으로  $(\sigma_1' + \sigma_3')/2$ 에 해당되고  $q$ 는 축차응력(deviatoric stress)으로  $\sigma_1' - \sigma_3'$ 을 나타낸다. 기름을 혼합한 경우와 물을 혼합한 경우 모두 응력 경로는 비슷한 양상을 보이는데 이는 실험 조건이 같다고 설명할 수 있다. 두 경우에 대한 응력경로를 살펴보면 전단 시 시료체적 팽창으로 인하여 부(-)의 간극수압이 나타나므로 파괴선( $K_f$  선)을 지나 다시 파괴선에 도달하는 경향을 보이는데 이는 조밀한 모래의 재하시 경로에 해당한다. 기름혼합인 경우  $K_f$ 의 기울기  $a$ 의 값은 27.5°이고, 물혼합인 경우  $a$ 의 값은 28.8°로 기름을 혼합했을 경우 약 9.5% 감소함을 보였다.

또한 기름혼합인 경우 간극수압계수  $A$ 를 산정한 결과 평균 -0.11, 물 혼합인 경우  $A$ 값은 -0.21의 값을 보였는데

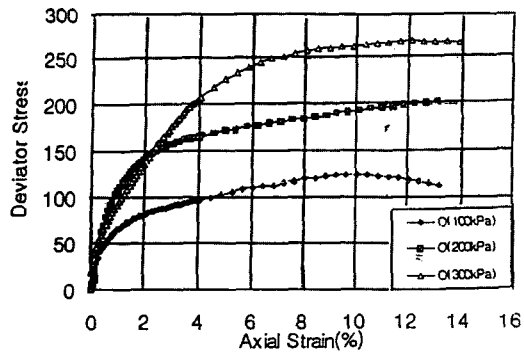


(a) 산업용 기름을 혼합한 경우

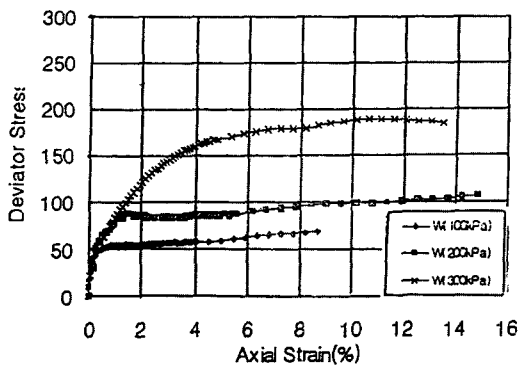


(b) 물을 혼합한 경우

그림 6. 표준사의  $p' - q$  변화곡선



(a) 산업용 기름을 혼합한 경우



(b) 물을 혼합한 경우

그림 7. 실트질 모래의 축차응력 변화곡선

간극수압계수가 음(-)의 값으로 증가할수록 시료가 더 조밀함을 의미하고 여기서 물을 혼합한 경우가 전단시 체적 팽창이 더 크게 발생됨을 알 수 있다. 그리고 간극수압계수에 따라 그 방향이 결정되는데 본 실험에서는 음(-)의 간극수압계수로서 우상향으로 응력경로가 진행된다.

### 3.4 실트질 모래시료의 거동 분석

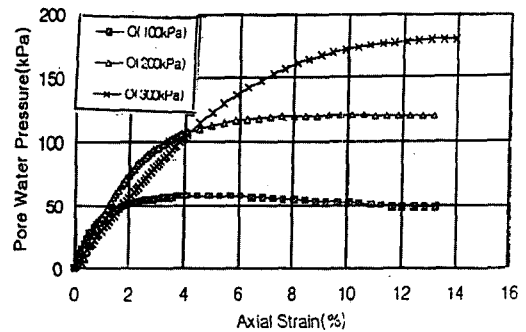
#### 3.4.1 축차응력 변화

실트질 모래에 대한 삼축 압축 실험 결과 구속응력의 크기가 증가함에 따라 축차응력이 증가하는 경향을 보였으며 항복점이 뚜렷히 나타나지 않는 곡선의 형태로 보아 느슨한 모래의 거동을 보이고 있음을 알 수 있다.

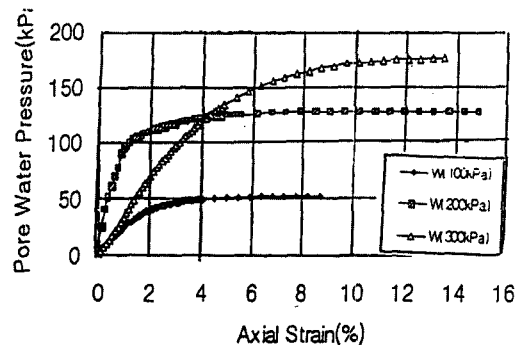
기름 혼합 실트질 모래시료인 경우 최대 축차응력은 약 125~270kPa 정도인 반면 물 혼합 실트질 모래시료인 경우 약 70~180kPa 정도로 실트질 모래시료에서는 기름을 혼합한 경우가 오히려 축차응력이 증가됨을 알 수 있고 물을 혼합한 경우가 극한 상태에 빨리 도달함을 알 수 있다.

#### 3.4.2 간극수압 변화

실트질 모래의 변형률에 따른 간극수압의 변화는 전단

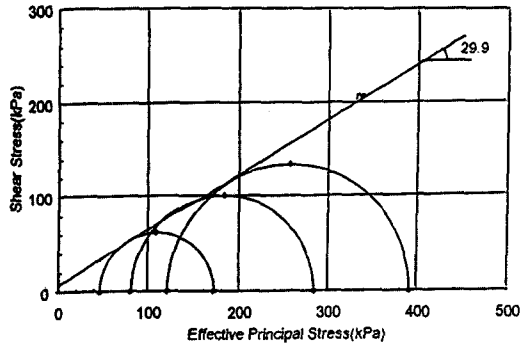


(a) 산업용 기름을 혼합한 경우

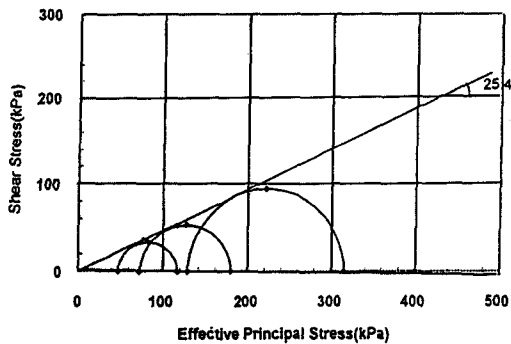


(b) 물을 혼합한 경우

그림 8. 실트질 모래의 간극수압 변화곡선

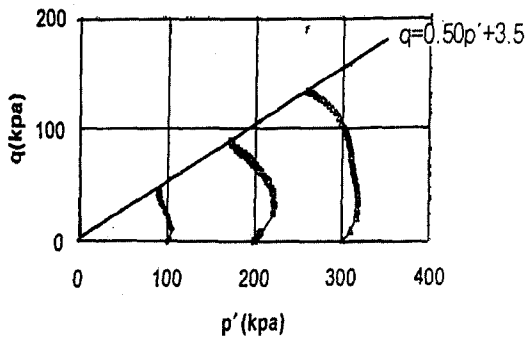


(a) 산업용 기름을 혼합한 경우

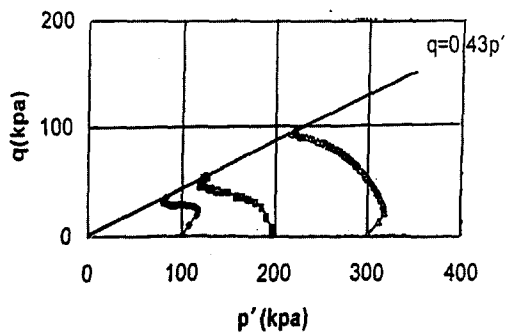


(b) 물을 혼합한 경우

그림 9. 실트질 모래의 Mohr 응력원



(a) 산업용 기름을 혼합한 경우



(b) 물을 혼합한 경우

그림 10. 실트질 모래의 p'-q 변화곡선

이 진행되어감에 따라 시료의 체적이 압축되어 간극수압이 증가되는 경향을 보였다. 이는 전형적인 느슨한 모래시료의 거동으로 구속응력이 증가될수록 간극수압의 크기가 증가하고 있음을 알 수 있다. 기름 혼합인 경우와 물 혼합인 경우를 비교해 보면 기름을 혼합한 경우가 전반적으로 간극수압의 크기가 크게 발생됨을 알 수 있다.

### 3.4.3 Mohr 원

실트질 모래에 대하여 기름을 혼합한 경우와 물 혼합한 경우의 실험 결과를 Mohr의 원으로 도시한 결과는 그림 9와 같다. 그 결과 기름 혼합인 경우의 점착력은 4kPa이고 내부마찰각은 29.9°, 물 혼합인 경우의 점착력은 0kPa, 내부마찰각은 25.4°로 나타났다. 이로써 실트질 모래는 기름을 혼합한 경우가 물을 혼합한 경우에 비해 오히려 전단강도가 증가됨을 알 수 있다.

### 3.4.4 응력경로(유효주응력과 전단응력과의 관계)

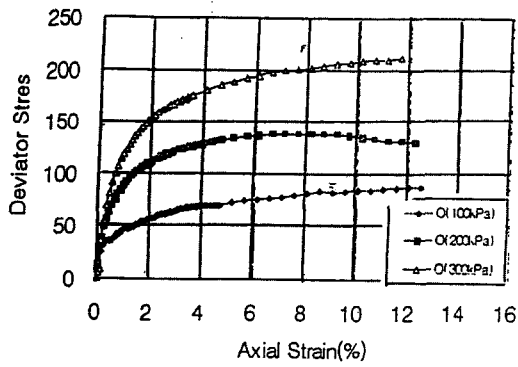
그림 10에서 p' - q평면상에 도시한 응력경로를 살펴보면 기름을 혼합한 경우와 물을 혼합한 경우 모두 응력경로는 비슷한 양상을 보이는데 전단시 축차응력이 증가함에 따라 시료의 체적압축으로 인한 간극수압의 증가로 인하여 평균유효응력이 감소하는 경로를 따라  $K_f$  선에 도달하는데 이는 느슨한 모래의 재하시 경로에 해당한다. 기름 혼합인 경우  $K_f$ 의 기울기  $a$ 의 값은 26.6°이고, 물혼합인 경우  $a$ 의 값은 23.3°로 기름을 혼합했을 경우 약 14.2% 증가함을 알 수 있었다.

또한 기름혼합인 경우 간극수압계수  $A$ 를 산정한 결과 평균 0.64, 물 혼합인 경우  $A$ 값은 1.02의 값을 보였고 간극수압계수가 양(+)의 값으로 증가할수록 시료가 더 느슨함을 의미하는데 여기서 기름을 혼합한 경우가 체적압축이 덜 발생됨을 알 수 있었고 이는 흡입자와 기름입자의 상호작용에 기인하는 것으로 추측된다. 그리고 간극수압계수가 0.5보다 크므로 p' 축의 수직에 대하여 좌측을 향하는 응력경로를 보인다.

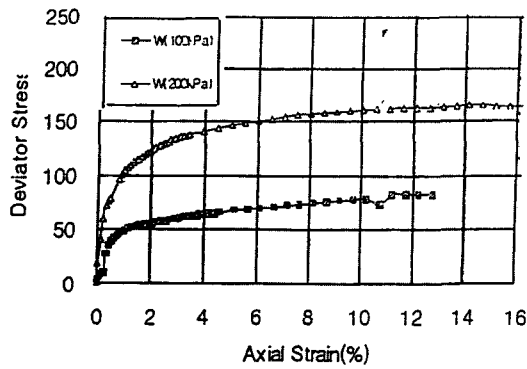
## 3.5 카오리나이트의 거동 분석

### 3.5.1 축차응력 변화

카오리나이트에 대한 응력-변형률 곡선을 살펴보면 항복점이 뚜렷하게 나타나지 않는 것으로 보아 시료가 정규압밀 상태임을 알 수 있다. 물을 혼합한 경우 실험 데이터

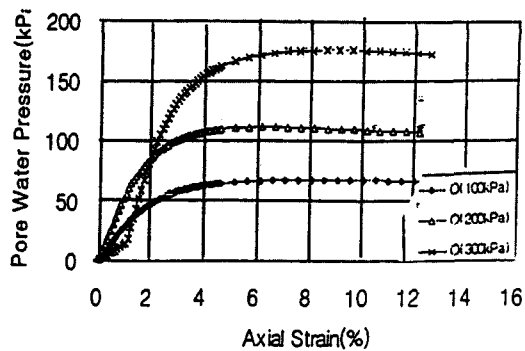


(a) 산업용 기름을 혼합한 경우

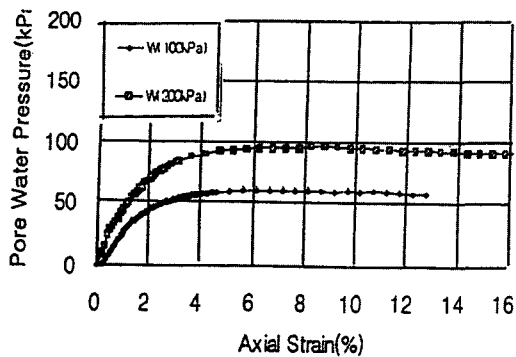


(b) 물을 혼합한 경우

그림 11. 카오리나이트의 축차응력 변화곡선



(a) 산업용 기름을 혼합한 경우



(b) 물을 혼합한 경우

그림 12. 카오리나이트의 간극수압 변화곡선

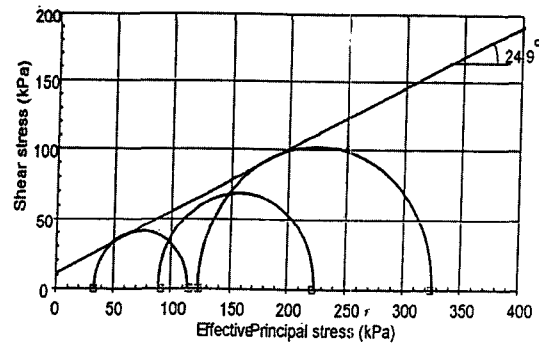
의 부족으로 인하여 기름과 물을 혼합한 경우에 대한 정량적인 비교는 본 그래프를 이용하여 분석하기는 어려운 것으로 판단된다.

### 3.5.2 간극수압 변화

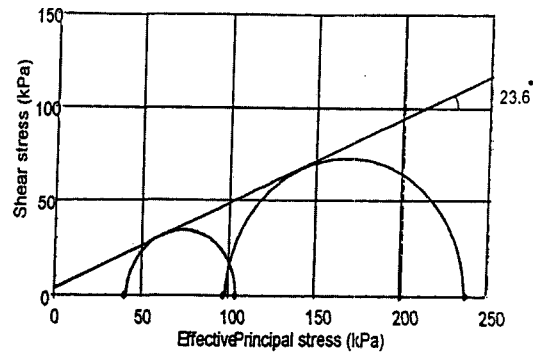
점토의 변형률에 따른 간극수압의 변화는 전단이 진행되어감에 따라 시료의 체적이 압축되어 간극수압이 증가되는 경향을 보였다. 이는 정규압밀 점토의 거동에 해당하며 또한 구속 응력이 증가될수록 간극수압의 크기가 증가하고 있음을 알 수 있다. 기름 혼합인 경우와 물 혼합인 경우를 비교해 보면 기름을 혼합한 경우가 전반적으로 간극수압의 크기가 크게 발생됨을 알 수 있다.

### 3.5.3 Mohr 원

카오리나이트에 대하여 기름을 혼합한 경우와 물 혼합한 경우의 실험 결과를 Mohr의 원으로 도시하면 그림 13과 같다. 그 결과 기름 혼합인 경우의 점착력은 5.5kPa이고 내부마찰각은 24.9°, 물 혼합인 경우의 점착력은 4kPa, 내부마찰각은 23.6°로 나타났다. 이로써 점토는 기름으로 혼합되었을 때가 물을 혼합한 경우보다 전단강도가 증가됨을 알 수 있다.



(a) 산업용 기름을 혼합한 경우



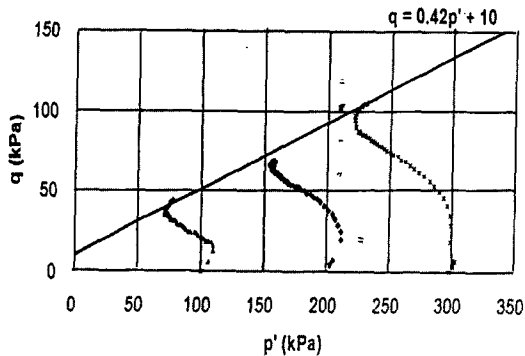
(b) 물을 혼합한 경우

그림 13. Kaolinite의 Mohr's 응력원 변화곡선

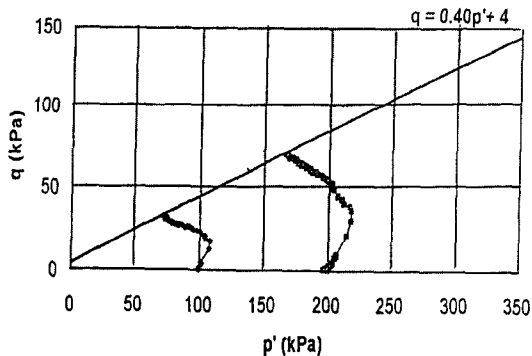


### 3.5.4 응력경로(유효주응력과 전단응력과의 관계)

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  $22.8^\circ$  이고, 물 혼합인 경우  $a$ 의 값은 4kPa,  $K_f$ 의 기울기  $a$ 의 값은  $21.8^\circ$  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 때문에 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	
입축 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( $C, \phi$ )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 측정한 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( $C, \phi$ )를 비교하기 위하여 동일한 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 밀도조건에서도 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 밀도조건에서는 기름유출, 유입에 따른 화학 반응 현상 수성 현상에 흡수성, 부착성에 따른 강도증

가 현상으로 큰 문제점이 없는 것으로 판단된다.

### 참고 문헌.

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. 이승희(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)