

## 오염물질 이동 차단을 위한 동결차수벽 형성에 관한 실험적 연구

### Experimental Study on Freezing Soil Barrier Wall for Contaminant Transfer Interception

신 은 철<sup>1\*</sup> Shin, Eun-Chul  
김 진 수<sup>2</sup> Kim, Jin-Soo

#### ABSTRACT

The purpose of this study was to prevent spreading of contaminants from movement of underground water by creating a barrier using artificial freezing method on a soil contaminated by oils and various DNAPLs. Specimens with 80% and 90% degrees of saturation were prepared to form freezing barrier using artificial freezing method. As the results of freezing specimen within soil bin with artificial ground freezing system, artificial contaminated soil cut off wall formed the thinnest wall after 12 hours. It is judged that this cut off wall will control the second soil pollution by intercepting expansion and movement of pollutants and DNAPLs within artificial contaminated soil cut off wall by underground water, intercepting inflow or outflow of underground water. Cut off walls formed by artificial ground freezing system had each other freezing speed according to degree of saturation.

#### 요 지

본 연구에서는 유류나 각종 비수용성 오염물질(DNAPL)로 오염된 지반에 인공동결공법을 이용한 차수벽을 형성하고 지하수의 이동으로 인한 오염물질의 확산 방지 효과를 확인하기 위한 초기연구로 인공동결공법을 통한 동결차수벽을 형성하기 위하여 모형실험을 수행하였다. 동결차수벽 형성의 확인을 위하여 실험조건에 따른 동결범위와 동결토의 강도를 분석하였다. 동결범위를 확인하기 위한 실험조건은 포화도가 80%, 90%인 표현을 실투를 대상으로 하였다. 또한, 동결토의 강도특성은 다짐도와 포화도를 변경하여 동결을 실시하였고, 일축압축강도 실험을 통하여 확인하였다.

**Keywords** : Frozen barrier, Contaminated soil, Freezing influenced zone, Unconfined strength

#### 1. 서 론

토양은 인간이 살아가는 터전이고 개발사업이 수행되는 원천적 환경매체로서 매우 중요한 자원이다. 최근, 전 세계적으로 인구증가 및 산업 발달로 발생하는 폐기물과 유해화학물질로 인하여 토양 및 지하수 오염의 심각성이 고조되어 개발사업으로 영향 받게 되는 토양환경에 대한 중요성이 대두되고 있다. 특히 지속적인 경제발전과 소득수준이 향상되면서 산업활동과 더불어 자동차 보급으로 인한 유류사용량이 크게 증가하였다. 이에 따라 주유소의

유류저장탱크 및 화학물질을 저장하고 있는 산업시설에서의 지하저장탱크에서 비수용성액체(NAPLs)로 분류되는 유류 및 유해화학물질의 유출로 인한 토양 및 지하수 오염 문제가 부각되고 있다(고석오, 2002). 오염된 환경은 쉽게 치유되지 않을 뿐 아니라 상당한 시간과 비용이 수반된다. 더욱이 중요한 사실은 인간을 비롯한 모든 생태계는 오염된 환경에선 유지가 힘들다는 것이다. 지하저장탱크에서 유출된 오염물질은 토양과 강한 흡착을 이루어 오랜 시간 잔류하여 지하수와 함께 이동하면서 광범위한 지역에 오염원으로 작용하게 된다. 특히 주유소, 군부대 유류저장시

1\* 정회원, 인천대학교 건설환경공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil and Environ. Engrg., University of Incheon, E-mail: ecshin@incheon.ac.kr)

2 정회원, 인천대학교 건설환경공학과 박사과정 (Member, Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environ. Engrg., University of Incheon)

설 및 산업공단 저장시설 등의 유해오염물질로 인한 토양 오염은 생태계를 파괴하고, 지속적인 오염원으로 작용할 가능성이 높아 매우 심각한 환경문제로 대두되고 있어 오염지역 복원기술개발과 관련된 연구가 필요한 실정이다(정하익 등, 1995). 지하저장탱크는 지중에 위치하고 있어 탱크내의 오염물질이 유출되면 토양의 오염심도가 깊어지고 오염범위도 넓어지게 된다. 즉, 시가지, 산업지역, 공장 지대가 밀집된 고농도의 중금속 및 유해물질이 함유되어 있는 투수성이 낮은 매립 지반에서는 유체의 전송 및 오염물질 추출에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 세립지반으로 구성된 조건에서 토양오염의 원인 중 유류 오염이나 비수용성물질(non-aqueous phase liquid)의 확산방지에 맞춰 인공동결공법을 활용한 동결모형실험을 통해 동결차수벽의 형태와 최적 조건에 대한 기본 역학적 특성을 도출하였다.

## 2. 흙의 동결조건 및 인공동결공법

### 2.1 흙의 동결 메카니즘

동결기 온도가 영하로 떨어짐에 따라서 지표면 부근의 수분을 포함한 흙은 공극속의 수분이 얼음으로 변하면서 부피가 팽창한다. 이와 같이 고정된 수분이 얼음으로 상이 변하면, 그림 1에서 보는 바와 같이 9%의 팽창이 발생한다. 동결면(freezing front)이 지하수와 접해있고 동결속도가 서서히 진행되는 비교적 미립자로 구성된 동상성 흙(frost susceptible soil)일 경우에는 지하수가 동결면 속으로 흡입되어 그림 2에서 보는 바와 같은 빙정(ice lens)이 형성된다. 이와 같은 빙정은 시간이 경과됨에 따라 동결면

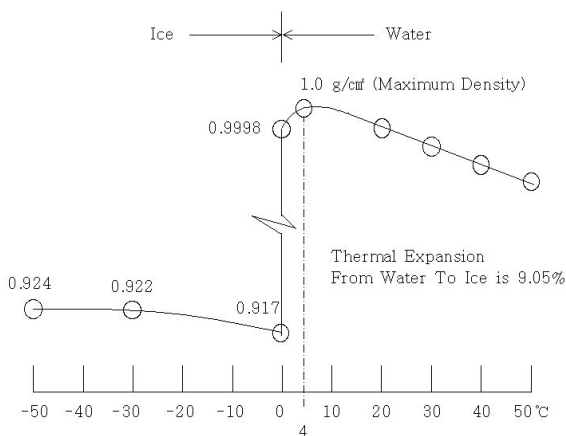


그림 1. 상변화에 의한 물의 밀도

을 따라 계속 발달되고, 이에 따른 흙의 부피 팽창을 동상(frost heave)이라 부른다. 지반의 동상이 토압이나 주변 구조물 등에 의해 구속을 받을 경우에 동상력(frost heaving force)이 발생하여, 도로 포장, 지하 매설관, 파이프라인, 컬버트(culvert), 교각 등 인접 지반 구조물의 안전에 위협을 주는 동결하중으로 작용된다.

### 2.2 인공동결공법의 특성

지반중에서 동결면이 성장하는 속도(동결속도)를 계산할 때 강관주변의 지반이 동심원 모양의 동결벽체로 성장하는 제 1단계일 때는 통칭 단관이론을 적용하고, 인접한 동결벽체가 결합되어 관장의 동결벽체를 이룬 후 그 두께가 점차 두꺼워지는 제 2단계에서는 평판이론을 적용하는데 이 이론은 복잡하므로 실용상으로는 원표를 이용하고 있다. 초기 지반온도가 낮거나, 냉각온도가 낮을수록 동일 기간내에 동토주의 반경이 커짐을 알 수 있다(김영진, 1994). 실제 시공을 할 때는 지반 중의 고정된 위치에서 온도를 측정하여 동토성장을 추정해야 하므로 동토 및 미동토의 온도분포를 미리 계산해야 할 필요가 있다. 또한 동토의 강도는 온도에 따라서 다르므로 동토벽을 내력벽으로 이용하고자 할 때는 온도변화에 따른 강도를 설계단계에서 미리 계산해 놓아야 한다. 이러한 경우도 단관이론 및 평판이론에 의해 필요한 시점의 온도분포를 계산할 수 있다. 또한, 동결관열에 의한 동토내 온도분포식도 제안되어 있으며, 이 이론식을 이용하여 동결관열의 평균냉각온도를 구한 후 동결속도를 계산할 때 평판이론에 도입함으로써 정확한 동결속도를 얻을 수 있다. 동결부하는 냉동기 용량 또는 액체질소 소비량을 결정하는데 필요하다. 어느

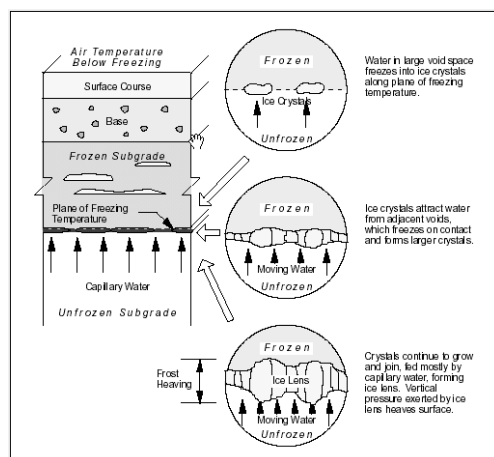


그림 2. 빙정(Ice Lens) 형성(WAPA, 2002)

시간에 있어 동결영역의 온도분포를 알면 그 시간의 열부하를 구할 수 있다. 열부하는 냉각개시 때에는 크고, 시간 경과와 함께 서서히 작게 된다. 이런 부하도 단관이론 및 평판이론에 의해 계산되며 동결관열 이론을 이용하면 더욱 정도가 좋은 결과를 얻을 수 있다.

### 3. 인공동결을 이용한 지반의 동결 특성실험

#### 3.1 인공동결 실험 시료의 특성

본 연구에서는 해안매립지반에 널리 분포되어 있고, 동상에 민감한 반응을 보이는 실트로서, 인천지역 매립현장에서 채취한 시료로 연안지반의 특성상 완전포화 조건으로 실시하였으며, 포화도를 조절하여 80%, 90%의 포화조건으로 하여 실험을 수행하였다. 실내 동결모형실험에 사용된 실트에 대하여 기본물성시험을 실시하였다. 시험 방법은 한국공업규격(KS F, 2001)에 명시된 표준시험방법에 의거하여 실시하였다. 입도분석은 KS F 2302, 비중시험은 KS F 2308, 액성한계시험은 KS F 2303, 소성한계시험은 KS F 2304, 변수두투수시험 KS F 2322를 적용하였다. 그림 3은 실트의 입도분포곡선을 나타낸 것이며, 액성한계(LL) 25.8%, 소성한계(PL) 15.4%, 소성지수(PI) 10.4로 통일분류법(USCS)의 분류기호로 ML로 저소성 실트이다. 그림 4의 다짐 곡선과 같이 최적함수비( $w_{opt}$ )는 17.2% 최대건조단위중량( $\gamma_{d,max}$ )은  $1.95 \text{ tf/m}^3$ 을 나타내었으며, 표 1은 실험에 사용한 흙의 물리적 특성을 종합한 것이다.

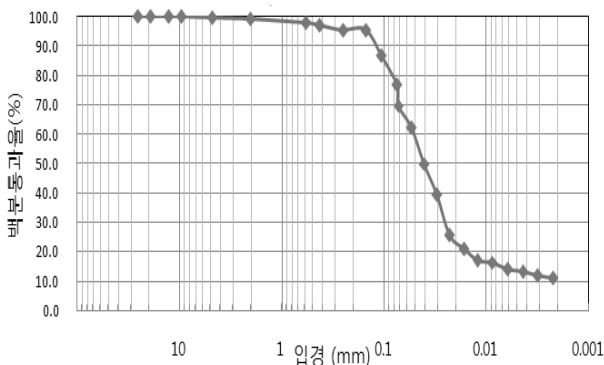


그림 3. 시험시료의 입도분포곡선

### 3.2 인공동결 실험장비를 통한 동결범위 측정실험

인공동결의 원리는 지반을 동결시키기 위해 미리 직경 10~20cm 되는 선단부분이 폐쇄된 강관(동결관)을 지중에 매설한 후, 강관 속으로 브라인(Brine) 부동액 또는 액체질소를 순환시켜 강관을 계속 빙점이하의 온도로 냉각시킨다. 시간이 경과하면 강관주변지반의 간극수가 얼기 시작하면서 강관을 중심으로 동심원 모양의 동토주가 형성된다. 강관을 필요한 간격으로 연속적으로 매설하면 인접한 동토주가 서로 합쳐져 연속적인 동토벽체를 이루게 된다. 이러한 동토벽체는 차수성이 높고, 역학적으로 큰 강도를 발휘하므로 이를 흙막이벽 또는 방호벽으로 사용하여 목적하는 공사를 수행하기도 한다. 본 연구에서 사용된 인공동결 실험 장비의 모식도는 그림 5에 나타내었으며, 부동액은 브라인용액을 사용하였다. 동결장치는 냉각기, 압축기, 응축기, 냉각탑 그리고 순환펌프로 구성되어 있으며 부동액이 냉각기에서  $-17.5^\circ\text{C}$ 로 냉각된 후, 순환펌프에 의해 지반에 매설된 동결관으로 이동함으로써 지반이 동결된다. 지반으로부터 열을 받아 온도가 높아진 부동액은 냉각기로 되돌려져 다시 냉각된 후, 동결관으로 보내지는 순환과정을 반복함으로써 동결 벽체가 차츰 성장하게 된다. 본 연구에서 사용한 동결관은 열의 전도율을 높이기 위해서 동관으로 하였고 관의 직경은 50mm를 사용하였다. 그림 6에 나타낸 바와 같이 동결관의 위치는 토중 중심으로부터 250mm 떨어진 곳에서 9개의 동결관을 원형 형태로 매설하였다. 이렇게 매설된 동결관은 동결관 중

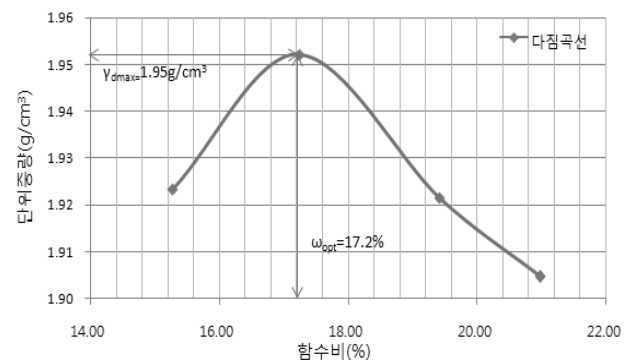


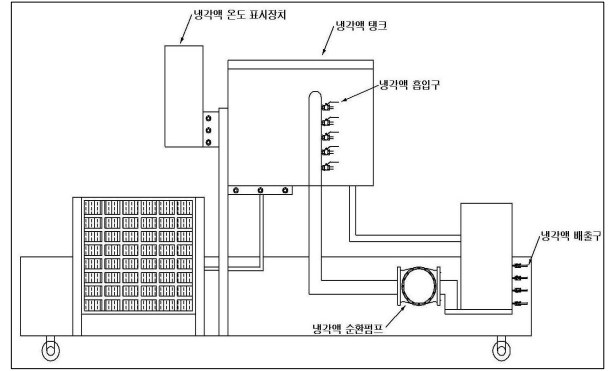
그림 4. 실트의 다짐곡선

표 1. 실험에 사용한 흙의 물리적 특성

자연함수비 $w_n$ (%)	비중 $G_s$	최대건조단위중량 $\gamma_{d,max}$ ( $\text{tf/m}^3$ )	최적함수비 $w_{opt}$ (%)	액성한계 $LL$ (%)	소성지수 $PI$	투수계수 $k$ (cm/sec)	No. 200체 통과량 (%)	통일분류법 (USCS)
27.8	2.67	1.95	17.2	25.8	10.4	$5.88 \times 10^{-7}$	76.8	ML



(a) 동결장비 전경



(b) 동결장비 모식도

그림 5. 인공동결장비

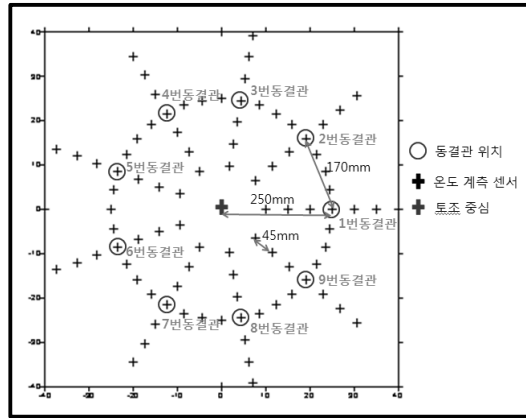


그림 6. 동결관 및 계측센서 매설위치

심과 동결관 중심의 사이 간격이 170mm로 매설이 되었다. 또한 사용된 토조내 지반에 매설되는 동관의 형식은 직렬형식으로 동결 유닛(unit)에서 순환시키는 브라인이 1번 동결관에서 시작하여 9번 동결관으로 순환시켜 모든 동결관을 한 개의 라인을 통해 순환한 후 다시 동결유닛에서 냉각되는 방식을 사용하였다. 동결범위 측정을 위한 실험 조건은 다짐도 80%, 90%일 때 각각 포화도 80%, 90%으로 수행하였다.

### 3.3 동결토의 강도시험

인공동결 장비를 통하여 형성된 동결벽체의 강도특성을 평가하기 위하여 시편 제작을 통한 일축압축강도 시험

표 2. 동결토의 일축압축강도 시험

CASE	다짐도(%)	포화도(%)	온도(°C)	시간
1	80	80	-17.5	6hr 12hr 24hr
2	80	90	-17.5	
3	90	80	-17.5	
4	90	90	-17.5	

을 수행하였다. 공시체 제작은 부피를 알고 있는 몰드를 이용하여 필요한 다짐도에 해당하는 공시체의 제작이 용이한 정적다짐 방법(KS F 2312, 2001)으로 제작하였다. 공시체는 직경 10cm 높이 20cm인 원형이며, 다짐도 80%, 90%일 때 각각 포화도 80%, 90%결정된 건조 시료 및 물의 소요 중량을 정확하게 계량하여 흙과 물이 골고루 섞이게 충분히 혼합하였다. 제작된 동결토의 강도시험은 지속 시간에 따른 동결벽체의 일축압축강도 변화에 대한 실험을 실시하였다. 동결온도는 -17.5°C로 유지시키며, 다짐도와 포화도를 변화하며 실험하였으며, 동결 지속시간은 6시간, 12시간, 24시간일 때 강도시험을 수행하였다. 표 2는 동결토의 일축압축강도 시험 내용을 나타낸 것이다.

## 4. 인공동결 실험결과

### 4.1 동결범위 실험결과

인공동결로 형성된 동결벽체의 범위를 확인하기 위해 서 다짐도와 동결관에 순환시키는 냉매의 온도, 온도 계측 센서의 위치를 동일하게 유지하였으며, 포화도 80%와 90%로 달리하여 실험하였다. 실험결과는 온도계측을 위하여 동결과 주변에 매설한 계측센서에서 0°C 이하가 측정되는 시점을 동결벽 형성시점으로 정하였다.

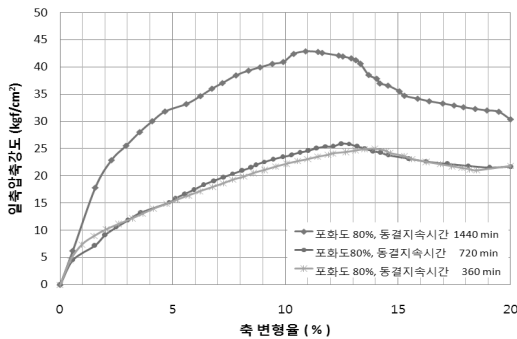
토조내의 온도분포는 동결 유닛에서 금방 냉각되어 순환되는 브라인이 제일 먼저 통과하는 1번 동결관 근처의 온도가 낮은 것을 볼 수 있으며 브라인의 온도가 높아져서 마지막의 동결관 근처는 동결벽체가 이전 번호의 동결관 근처의 동결벽보다 늦게 형성되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 포화도를 달리하여 동결을 수행한 결과 80%의 포화도인 경우보다 90%의 포화도인 경우가 1시간 정도 더 빨리 동결 차수벽체가 형성되는 것을 확인하였고, 80% 포화도와 90% 포화도인 경우 모두 12시간 이후로는 9개의 동결관이 폐합되어 동결차수벽이 형성되었으며, 형성된 동

결벽체가 최소 50mm 이상 형성되는 것을 확인하였다.

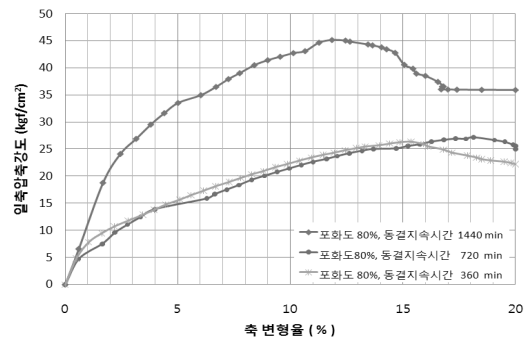
### 4.2 동결토의 강도시험결과

동결토의 강도는 공극 내의 얼음의 강도, 흙 입자간의 마찰, 점착성 얼음의 결합으로 인한 흙과 얼음의 부착력 증가로 인하여 강도가 증가한다. 동결토의 일축압축강도 시료내 온도는 시편의 상부를 통하여 냉열이 공급되기 때문에 상부로부터 하부로 동결이 진행되고 있는 양상의 온도변화를 가지고 있다. 동결 지속시간에 따른 일축압축강도에 시험결과는 다짐도80% , 포화도80%일 때는 동결지속시간이 24hr 일 때 42.88kgf/cm<sup>2</sup>, 12hr일 때 25.9kgf/cm<sup>2</sup>, 6hr일 때 25.05kgf/cm<sup>2</sup>의 강도를 나타냈다. 다짐도 90%, 포화도 80%일 때 일축압축강도는 동결지속시간 24hr, 12hr, 6hr일 때 각각 45.14kgf/cm<sup>2</sup>, 27.2kgf/cm<sup>2</sup>, 26.37kgf/cm<sup>2</sup>의 강도를 나타내었다.

동결지속시간이 길어질수록 흙속의 부동수분량의 감소와 얼음결합의 증가 및 얼음의 강도가 증가됨으로 인해 일축압축강도가 증가 되는 것으로 판단된다. 그림 7과 그림 8은 포화도와 다짐도에 따른 일축압축강도 시험결과를 나

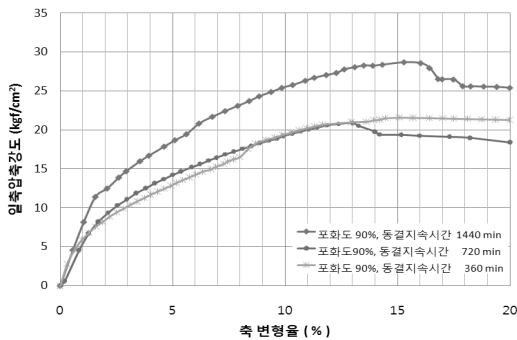


(a) 다짐도 80%일 때

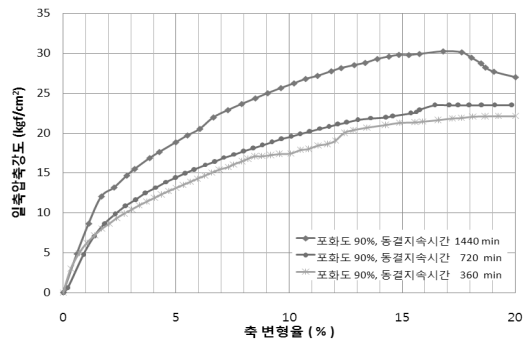


(b) 다짐도 90%일 때

그림 7. 포화도 80%일 때 경과시간에 따른 일축압축강도



(a) 다짐도 80%일 때



(b) 다짐도 90%일 때

그림 8. 포화도 90%일 때 경과시간에 따른 일축압축강도

표 3. 동결토의 일축압축강도 시험 결과

CASE	다짐도(%)	포화도(%)	일축압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
			6hr	12hr	24hr
1	80	80	25.05	25.9	42.88
2	80	90	21.58	20.87	28.69
3	90	80	26.37	27.20	45.14
4	90	90	22.13	22.14	30.21

타낸 것이다. CASE 1과 CASE 3의 경우를 비교해 보면 다짐도가 높을수록 일축압축강도는 증가하는 양상을 나타내고 있다. 또한, CASE 1과 CASE 2의 경우를 비교해 보면 포화도가 80%인 경우보다 90%인 경우에 오히려 일축압축강도가 더 낮은 값을 나타냈는데, 이는 동결지속시간이 충분치 못하여 상대적으로 포화도가 높은 흙의 부동수분량이 크기 때문으로 판단된다. 동결토의 일축압축강도 시험결과는 표 3에 나타난 바와 같다.

### 5. 결론

본 연구에서는 유류나 각종 비수용성 오염물질(DNAPL)로 오염된 지반에 인공동결공법을 이용한 차수벽을 형성하고 지하수의 이동으로 인한 오염물질의 확산 방지 효과를 확인하기 위하여 인공동결공법을 통한 동결차수벽을 형성하기 위하여 모형실험을 수행하였다. 모형실험 수행 결과는 다음과 같다.

- (1) 인공동결공법으로 동결시킨 결과, 동결차수벽은 12시간 경과하여 50mm 형성되었으며, 형성된 차수벽은 지하수의 유입이나 유출을 막아 동결차수벽내의 오염물질의 지하수로 인한 확산 및 이동을 차단하는 기능을 함으로써 2차적인 토양오염을 억제할 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 인공동결공법으로 형성된 차수벽은 포화도에 따라 각각 다른 동결속도를 가졌다. 80%의 포화도를 유지시킨 지반의 동결차수벽이 형성되는데 11시간이 소요되었으며, 90%의 포화도를 유지시킨 지반의 동결차수벽이 형성되기까지 10시간이 소요되어 90%의 포화도를 유지시킨 지반이 80%의 포화도를 유지시킨 지반보다 약 1시간 빨리 동결차수벽이 형성된 것을 확인하였다.
- (3) 동결영역의 분포는 각 동결관을 중심으로 고르게 분포되는 것으로 나타났으나 동결영역의 형성은 브라

인 용액의 주입이 빠른 순으로 동결관의 온도가 낮아지며, 브라인 용액의 주입 순서가 빠를수록 동결영역이 크게 나타났다.

- (4) 동결토의 일축압축강도시험에서는 동결 지속시간에 따른 일축압축강도에 실험결과는 동결지속시간이 길어질수록 증가함을 확인하였다. 이는 흙속의 부동수분량의 감소와 얼음결합의 증가 및 얼음의 강도가 증가됨으로 인해 일축압축강도가 증가 되는 것으로 판단된다.
- (5) 향후 동결에 의하여 형성된 차수벽의 오염물질 차단 효과를 확인하기 위한 실험이 진행되어야 하며, 기존 오염물질 차단벽과의 비교를 통하여 인공동결공법의 효율의 확인이 필요할 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 인천대학교 2009년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

### 참고문헌

1. 고석오 (2002), 토양 및 지하수 복원기술 동향 및 현장적용, 2002 지반환경, 한국건설기술연구원, pp.129-156.
2. 김영진 (1994), “인공동결공법의 특성과 적용”, 한국지반공학회지 제10권, 제2호 pp.141-160.
3. 정하익, 이용수, 우제윤 (1995), 오염지반 및 지하수 정화 기술에 관한 연구, 한국건설기술연구원, pp.99-122.
4. KS F 2302 (2001), 체분석 시험방법, 한국표준협회.
5. KS F 2303 (2001), 액성한계 시험방법, 한국표준협회.
6. KS F 2304 (2001), 소성한계 시험방법, 한국표준협회.
7. KS F 2308 (2001), 비중시험방법, 한국표준협회.
8. KS F 2312 (2001), 흙의 다짐 시험방법, 한국표준협회.
9. KS F 2322 (2001), 변수두투수시험 방법, 한국표준협회.
10. Washington Asphalt Pavement Association (2002), WAPA asphalt pavement guide, WAPA, Washington.

(논문접수일 2011. 5. 14, 심사완료일 2011. 6. 22)