

# 폐기물 매립지 바닥층의 고화토 포설시 동결/융해 현상에 관한 연구

## The Effect of Freeze and Thaw for the Stabilized Soil Bottom Liners in the Landfill

이 송<sup>\*1</sup> Lee, Song  
이 재 영<sup>\*2</sup> Lee, Jai-Young  
김 흥 석<sup>\*3</sup> Kim, Heung-Suck

### Abstract

The purpose of this research is to complement the existing researches on landfill bottom liners behavior during the periods of freeze and thaw. Landfill-related researches have been typically focused on small-scale soil samples that are often compacted under conditions different from those used in the field. Although these tests have been invaluable in clarifying the problem of freeze and thaw, extending the results of such experimental studies to prototype landfills are questionable. In this investigation, the author utilized a large scale laboratory simulation allowing inclusion of the field depth of the cover systems, layered soil profiles, rainfall simulation, a cold climate and boundary conditions similar to those encountered in the landfill. The soil materials were stabilized soils (mixed clays, cements, and minerals) instead of clays. The bottom liners are made up of drainage layer (30 cm), stabilized layer (75 cm), and leach collection layer (60 cm). The stabilized layers are made up of supporting layer (45 cm) and low permeable layer (30 cm) - consisting of P<sub>A</sub> and P<sub>B</sub> layer.

As a results, depths of penetration increased by about 2~5 more centimeters at rainfall simulated designs than those at no rainfall simulated designs (that is- design 3, design 5 and design 7) - it increased by about 20mm/day in the bottom liners and frost heaves also increased it by a few millimeters. Also, a few cracks appeared partly. According to these results, we can surmise that the compacted stabilized soil is more reliable than the compacted clay liners for construction of the landfill liners.

### 요 지

본 연구에서는 바닥층을 점토포설의 대안으로 기존의 원지반 해상점토에 시멘트와 벤토나이트 및 고화재를 혼합한 새로운 고화처리토를 이용하여 안전하고 경제적이며 효율적인 매립지 바닥층을 조성하고자 한다. 그러나 매립지 바닥층의 시공에 있어서 고화처리토를 이용한 표층고화처리층을 바닥층의 재료로서 사용하는데 토목역학적인 안전성에 대한 기술적 자료가 전무한 실정이다. 특히 고화처리토를 포설한 후 겨울철 동상에 대한 연구문헌 및 사례는 국내, 외를 막론하고 쉽게 찾아볼 수 없었다. 따라서 본 조사연구를 통하여 기초적인 자료를 수집하고 겨울철 조건하에 고화처리층의 동결/융해 현상에 대한 바닥층의 안전성 및 동상현상을 검토하여 설계 및 시공에 반영될 수 있도록 하였다.<sup>4),6),21),25)</sup>

또한 본 연구에서는 폐기물매립지 바닥층의 포설에 가장 중요한 실패 원인중 하나인 동결기에 동상에 따른 고화처리층의 동결/융해 현상에 대한 연구를 실시하여 향후 해안폐기물매립지 건설에 기술적으로 이바지 하고자 한다. 고화처리층은 지지력을 목적으로하는 45 cm의 고화토층과 차수를 목적으로 하는 30 cm의 불투수층의 P<sub>A</sub>와 P<sub>B</sub> 층으로 구성되었으며 고화처리층 하부에는 30 cm의 지하수 배제층, 상부에는 60 cm의 침출수 집배수층으로 설계되었다. 결과적으로 동결깊이는 동일한 조건에서 인공강우를 고려한 실험에서 동결깊이가 증가하였으며 동상현상은 수 mm 정도 증가하였고 국부적으로 표면균열이 발생하였다. 이러한 결과로 볼 때 매립지 바닥층의 설계에서 고화처리토를 사용한 바닥층이 점토층으로 구성된 설계보다 더욱 신뢰할 수 있다고 생각할 수 있다.(이송 외 2인, 1999; 이송 외 3인, 1999)

**Keywords :** Lysimeter, Landfill, Freezing, Thawing, Thermo couple

\*1 정회원, 서울시립대학교 도시과학대학 토목공학과 교수  
\*2 정회원, 서울시립대학교 도시과학대학 환경공학부 교수  
\*3 정회원, 서울시립대학교 대학원 토목공학과 석사과정

## 1. 서론

최근 우리 나라는 산업화와 현대화 및 인구의 증가와 더불어 과학기술의 발전은 주목할만한 수준에 있지만 국토의 유용면적이 인구에 비해 작아 각종 건물들은 고층화 현상에 이르렀다. 특히 생활수준의 향상은 인간생활을 더욱 풍요롭게 만들었지만 토양과 대기의 오염은 심각한 수준에 이르러 인간의 복지수준에 반하여 환경오염과 각종 폐기물 처리에 대한 문제에 심각성을 드러내고 있는 실정이다. 또한 사회전반에 걸쳐 생활 및 산업쓰레기의 처리문제는 환경문제와 연결되어 심각한 사회문제로 대두되고 있다.

본 연구에서 사용한 표층고화처리 기법은 연약지반 해결을 위한 차선택으로서 고무적이라고 평가할 수 있으나, 현재 고화처리층의 포설에 의한 동결/융해에 대한 기술적인 검토는 미약한 수준이며 본 연구를 통하여 고화처리토를 이용한 표층고화처리공법에 의한 안전한 매립지를 설계하여 시공에 반영하고자 한다.

### 1.1 연구 목적

지금까지 매립지 현장에서 가장 널리 사용되고 있는 점토로 구성된 매립지 바닥층은 높은 흡착성과 저투수성 확보 및 50~100 cm에 이르는 풍부한 두께 그리고 수명이 길다는 장점이 있지만, 시공 시 공사관리 및 여름철의 건조수축과 겨울철의 동상 따른 균열과 국부적인 부등침하에 의한 균열이나 동상현상이 발생하여 강우나 침출수가 바닥층에 유입되면 심각한 사태를 초래할 수 있으므로 시공 후 다각적인 통제와 관리를 꾸준히 해야하는 단점이 있다.(Benson 외, 1993; Benson 외, 2000; Chamberlain 외, 1979; 김 외, 1992; Nandakumaran 외, 1990; Leroueil 외, 1990) 이에 본 연구에 사용된 고화처리토는 일종의 쏘일-시멘트와 고화제를 적절히 혼합하여, 하부 고화토층은 지지력을 개선시켜 폐기물 매립하중에 따른 국부적인 침하를 방지하고 균등침하를 유도하며 기반시설물을 조성하기 위한 시공장비의 주행성 및 작업성을 확보하여 지지층으로서의 역할을 수행하게 된다. 또한 상부 차수층에 대하여는 성질이 다른 P<sub>A</sub>, P<sub>B</sub> 층에 대하여 반응물질의 화학적 상호작용에 의한 자가차수기능을 발생시켜 2차 차수막층으로서의 차수기능을 한층 강화하였다. 또한 표층고화처리 공법의 겨울철 적용 시 발생하는 동결깊이에 따른 고화처리층의 변화, 동결/융해 현상에 따른 동상현상 및 균열의 발생정도, 양생일수와 동결/융해 반복횟수에 따른 일

축압축강도와 투수계수의 변화, 바닥층에 양생포 혹은 PVC를 피복하였을 경우 동결깊이에 미치는 영향, 침출수 집배수층을 기존의 쇠석이 아닌 모래로 포설하였을 때 동결깊이의 변화, 그리고 강우조건에 의한 동결깊이 및 함수비의 변화에 따른 얼음결정 형성의 원인 규명과 이를 보완하는 대책을 수립하고자 한다.(Benson 외, 1993; Craig 외, 1994; Daniel 외, 1994; Othman 외, 1994; Wong 외, 1991)

## 2. 바닥층의 표층고화처리 공법

기존의 매립지 바닥층의 점토포설층에 대한 차선택으로 사용된 표층고화처리토는 침출수 집배수 계획에 따라 정지된 원지반 위에 30 cm의 지하수 배제층을 포설하고 상부에 75 cm의 차단층을 고화토층 45 cm, 차수층 30 cm로 구분하여 시공한 균질한 저투수성의 차단층으로 침출수에 의한 지하수 및 원지반의 오염을 최소화하며 매립작업 및 기반시설물 조성시에 시공장비의 주행성 확보와 상재매립하중에 의한 국부적인 부등침하를 방지하는데 있다. 고화토층은 상재매립하중으로 인한 바닥층의 부등침하에 대한 안정성과 작업성을 확보하는 지지층 역할을 하며 차수층인 P<sub>A</sub>, P<sub>B</sub> 층은 상이한 두 개의 반응성분에 의해 생성차수층을 발생시키고 자가치유(self-sealing)되어 침출수가 유입되어도 안전한 저투수층을 확보하는데 있다.

### 2.1 자가형성(Self-sealing)

차수층에 대한 자가형성 및 자가치유 기능은 그림 2.1과 같이 두 개 이상의 상이한 물질을 포함하는 반응차수층을 서로 접촉시켜 이음매가 없는 불투수층인 생성차수층을 형성시키는 기능으로 상이한 물질을 포함한 두 개의 차수층 접촉면 사이에 불투수층의 생성막이 형성되어 침출수

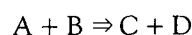
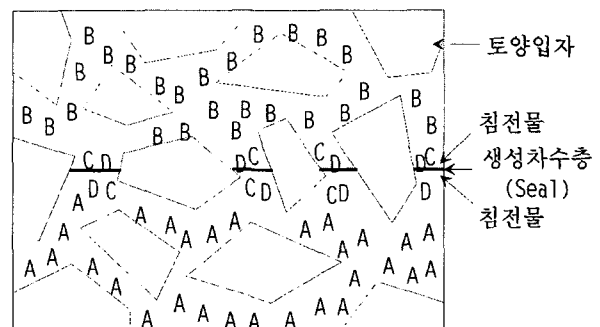


그림 1. 생성차수층의 반응원리

에 대한 차단효과를 갖게 되며 차수층이 국부적으로 파괴되더라도 두 층간의 접촉에 따른 새로운 화학반응에 의하여 자가적으로 새로운 차수층이 생성되는 장점을 갖는다. 자가형성 및 자가치유 과정에 가장 큰 역할을 하는 반응차수층의 화학물질은  $\text{SiO}_2$ 와 소량의 Mg성분을 포함한 실리카겔 무기물인  $\text{P}_A$  층과  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 주종을 이루는 칼슘계 무기물인  $\text{P}_B$  층으로 이루어진다.

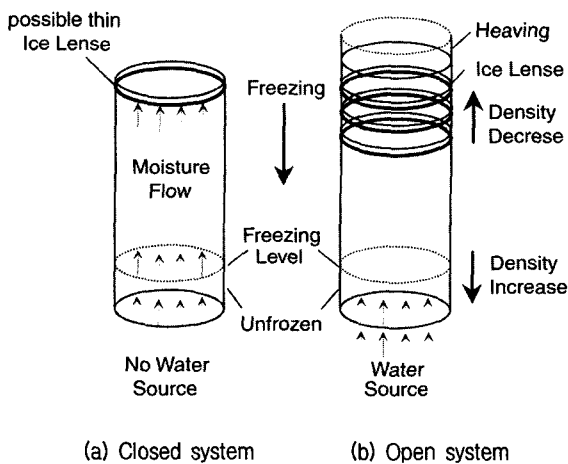
자가형성반응은 차수층을 구성하는  $\text{P}_A$  층과  $\text{P}_B$  층에 포함되어 있는 반응물질이 각각의 음이온( $\text{CO}_3^{2-}$ 와  $\text{OH}^-$ )과 양이온( $\text{Mg}^{+2}$ 와  $\text{Ca}^{+2}$ )으로 용해됨에 따라 진행되며 상, 하부층 경계면에서 비용해성 광물질인 브루사이트(Brucite:  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ )와 칼사이트(Calcite;  $\text{CaCO}_3$ )의 침전물을 형성하여 그 침전물로서 일종의 불용성의 불투수성 막을 형성시켜 토양의 간극을 완전히 채우는 생성차수층의 막을 형성시킨다는 것이 핵심적인 반응원리이다.

### 3. 동결이론(Benson 외, 1993; Wong 외, 1991)

일반적으로 바닥층이 동결될 때 그림 2와 같은 거동을 나타낸다. 물의 이동은 온도가 높은 하부에서 온도가 낮은 상부로 이동하게 되는데 동결전면부라고 불리는 동결된 지

표 1. Closed system과 Open system의 비교

구 분	형 태	
	Closed system	Open system
연속 수분공급	×	○
얼음렌즈	얇다	두껍다
동결방향	上部 → 下部	上部 → 下部
동결깊이	작다	크다



(a) Closed system (b) Open system

그림 2. Closed system과 Open system

(Berspm 외, 1993; Wong 외, 1991)

역의 가장자리에서는 얼음렌즈의 결정을 이루게 된다. 일반적으로 물의 공급이 계속되는 Open system이 Closed system보다 동결깊이가 큰 이유가 수분의 이동에 의한 얼음렌즈의 생성정도와 크기가 증가하기 때문이다. 생성된 얼음렌즈는 동결과 용해를 반복하면서 흙 입자의 공극을 증가시키고 바닥층 표면이나 내부의 균열을 발생시키는 중요한 영향인자로 작용하며 간극수가 집중되어 간극수압이 가장 크게 작용하게 된다. 동결깊이는 바닥층의 성분과 종류, 함수비, 대기온도, 다짐상태, 동결속도 그리고 동결/용해 반복횟수 등에 따라 차이를 나타내는데 일반적으로 동일한 지반과 실험조건하에서 바닥층의 함수비가 증가할 수록, 그리고 수분의 공급이 계속되는 Open system이 Closed system보다 동결깊이와 동상현상이 이론적으로 크게 나타나며 바닥층에서 얼음렌즈의 성장정도에 근거한다.

### 4. 동결/용해 실험장치 및 장비

#### 4.1 대형 Lysimeter

현장성에 부합되는 동결조건을 갖추기 위하여 대형 Lysimeter를 그림 3과 같이 제작하여 실험을 실시하였다. 대형 Lysimeter는 동결 시 대기온도를 영하 20℃까지 유지할 수 있도록 설계하였고 Lysimeter 벽체 사이에 50 mm의 단열재를 삽입하여 설정된 동결기온을 지속적으로 유지할 수 있도록 하였다. Lysimeter는 동결조건에 따른 원하는 온도를 영하 20℃까지 선택하여 설정할 수 있으며 타이머가 부착되어 동결시간을 자동으로 조절할 수 있고 동결이

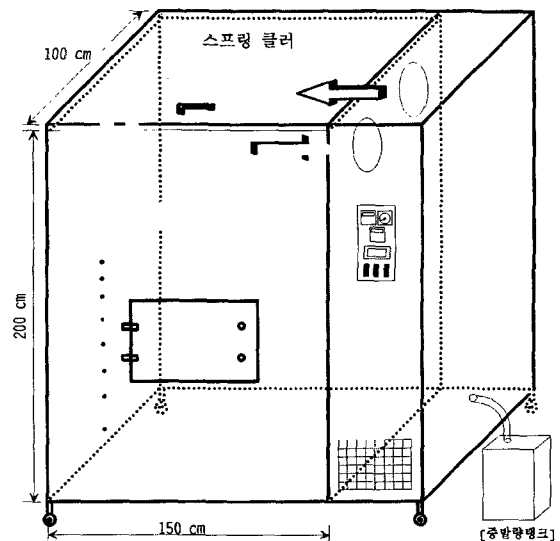


그림 3. 대형 Lysimeter(Miller 외, 1999; Lee, 1994)

완료되면 용해단계로 진행되어 Lysimeter는 자동으로 정지하도록 설계되었다. Lysimeter 외벽에는 Thermocouple를 외부에서 삽입할 수 있도록 직경 3 mm 정도의 구멍을 뚫었으며 Thermocouple을 삽입한 후에는 내부기온이 외부로 전이되지 않도록 실리콘으로 구멍을 밀봉하였다. Lysimeter 정면으로 밖에서 여닫을 수 있는 작업통로를 만들었고 동결과 용해 후 바닥층의 수평, 수직거동을 관찰하기 위하여 작업통로 내벽에 투명한 아크릴을 고정시켜 외부에서 동상현상 및 바닥층의 균열상태를 관찰할 수 있도록 설치하였다.

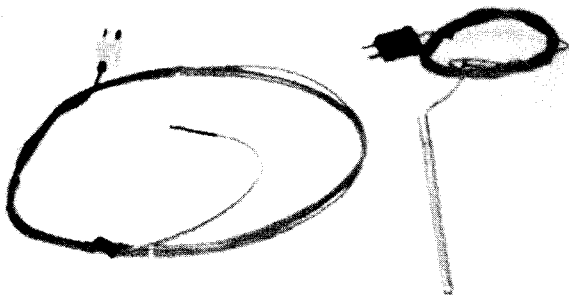
또한 동결/용해를 반복하는 동안 고화처리층 내부의 수분이 공기중으로 증발하는 증발량을 측정하기 위하여 밀봉한 플라스틱 통을 설치하여 1시간 간격으로 변화량을 측정하여 고화처리층의 함수비의 분포와 변화를 관찰하였다. Lysimeter 천장에는 인공강우에 의한 고화처리층의 거동을 비교하기 스프링클러를 설치하였고 동결시간은 우리 나라 기후조건인 3한4온을 고려하여 동결 3일, 용해 3일을 기준으로 실험을 실시하였다.

#### 4.2 Thermocouple

고화처리층의 바닥에 삽입한 Thermocouple은 미국의 Cole - Parmer 社에서 제작된 것으로 -250 ℃ ~1260 ℃ 까지 측정이 가능한 K - type을 사용하였다. Thermocouple은 그림 4와 같이 용도에 따라 바닥층의 온도를 감지하는 일반용과 대기용으로 구분된다.

##### (1) 일반용 Thermocouple

일반용 Thermocouple은 수분을 함유하는 토양에서 2년 이상 내구성을 갖도록 테프론으로 코팅되었으며 고화처리층 내부에 삽입하여 동결/용해를 반복하는 동안 바닥층



(a) 일반용 (b) 대기용  
그림 4. Thermocouple

의 온도변화 관찰하기 위하여 사용하며 여기서 얻어진 자료는 고화처리층의 동결깊이와 온도경사 및 온도변화를 산정하는 자료가 된다.

##### (2) 대기용 Thermocouple

대기용 Thermocouple은 일반용과는 달리 동결 시 Lysimeter 내부에서 강하게 부는 냉풍으로 인해 순간적으로 실제의 기온보다 낮게 읽어지는 감도를 방지하기 위하여 Thermocouple 센서 외부에 알루미늄 유공판을 입혀서 강풍의 세기에 의한 기온의 순간 저하를 방지하기 위하여 설계되었다.

#### 4.3 Thermometer

본 연구에 사용된 Thermometer는 미국의 Cole - Parmer Instrument 社에서 제작된 자동화장비로서 지하수 배제층과 고화처리층 및 침출수 집배수층에 삽입된 Thermocouple에서 감지된 온도를 설정된 계측시간에 따라 자동으로 저장되어 기록되는 장치이다. 각 Channel마다 현재온도가 화면을 통해 나타나며 설정된 시간마다 온도를 감지하게 된다. 자료의 저장능력은 설정시간에 관계없이 255개까지 저장할 수 있으며 사용 가능한 Channel은 총 12개이다.

자료를 저장하는 동안 매 순간의 평균온도를 화면을 통하여 확인할 수 있고 컴퓨터와 연결하면 모니터에 나타나는 자료를 바로 출력할 수 있다.

#### 5. 실험방법

##### 5.1 실내시험

##### 5.1.1 실내 토성시험

토성시험에 사용된 원지반토(母土)는 원지반 해성점도

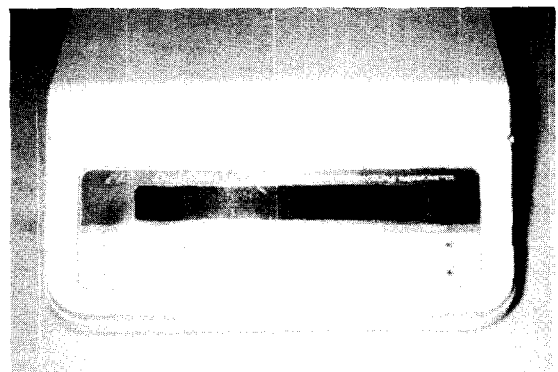


그림 5. 자동화 Thermometer

로서 점성이 약하고 유기물이 다소 포함된 점성토이다.

### (1) 원지반토의 토성치

원지반토는 액성한계 22.8%, 소성한계 13.5%, No. 200 체 통과량이 93.6%이며 소성지수가 9.3%인 CL 계열의 점성토로 분류되었다.(Das, 1984)

표 2. 원지반토의 토성치

분류	토성치
액성한계 (%)	22.8
소성한계 (%)	13.5
소성지수 (%)	9.3
No. 200 체 통과량 (%)	93.6
비중	2.69
통일분류법	CL

### (2) 고화토에 포함된 고화재의 성분

#### ① 고화재의 성분

고화재의 성분은 고화토층에서는 시멘트와 혼합되어 지지력을 증대시키고 차수층에 대해서는 SiO<sub>2</sub>와 소량의 Mg성분을 포함한 실리카겔 무기물인 P<sub>A</sub> 층과 Ca(OH)<sub>2</sub>가 주종을 이루는 칼슘계 무기물인 P<sub>B</sub> 층이 서로 화학반응을 일으켜 새로운 화학물질로 이루어진 불투수층의 생성차수층을 형성시킨다. 이것은 차수층이 부분적으로 파괴되더라도 생성차수층으로서 2차 차수막을 형성시켜 침출수의 유입을 최대한 차단하도록 한 것이다.

표 3. 고화재 성분

구분	고화처리층		
	고화토층	P <sub>A</sub> 층	P <sub>B</sub> 층
SiO <sub>2</sub>	34.00	69.00	2.36
CaO	38.30	11.40	74.00
SO <sub>3</sub>	2.21	2.21	0.75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.00	1.46	0.59
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.40	0.40	0.29
K <sub>2</sub> O	0.80	0.86	0.13
MgO	5.52	0.47	2.86
Na <sub>2</sub> O	0.72	12.60	0.07
강열감량	0.02	0.50	18.20

#### ② 고화처리층의 시료배합비

고화처리층에 사용된 시료는 원지반 해성점토와 시멘트 그리고 고화재를 표3과 같은 성분비로 적절히 6회 교반한 고화처리토로서, 고화토층에는 고화재와 시멘트를 혼

합하여 조기강도를 촉진시키고 바닥층의 국부적인 부등침하를 방지하며 수화열을 발산시켜 고화처리층 내의 동상현상이나 동결깊이를 부분적으로 막아주기 위해서 사용되었다. 특히 차수층에 사용된 고화재는 P<sub>A</sub> 층은 SiO<sub>2</sub> 성분과 P<sub>B</sub> 층에는 CaO 성분을 주성분으로 하여 화학반응에 의해 차수층 사이에 불용성의 불투수 막을 형성시켜 저투수층을 확보하는 것이다. 대형 Lysimeter을 이용한 동결/융해 반복실험에 사용된 고화처리층의 단위체적당 원지반 해성점토와의 시료배합비는 표 5.3과 같다.

표 4. 고화처리층의 시료배합비

구분		시멘트(kg)	고화재(kg)	
고화처리층	고화토층	90	30	
	차수층	P <sub>A</sub> 층	×	251
		P <sub>B</sub> 층	×	188

시료배합비는 원지반토 m<sup>2</sup> 당 중량비.

### 5.1.2 실내다짐시험

실내다짐은 ASTM D-698(Das, 1984; ASTM) 규정에 서 제시한 표준다짐시험을 실시하여 최대건조단위중량과 최적함수비를 구하였고 모래치환법에 의한 들밀도시험을 실시하여 대형 Lysimeter 실내실험에 대한 상대다짐도를 구하였다. 상대다짐도는 현장의 시공성을 반영하여 대형 Lysimeter를 이용한 실내모형실험의 건조단위중량과 비교하여 산정하였다.(Das, 1984)

표 5. 표준다짐시험 결과

구분	다짐시험		들밀도 시험 γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	상대 다짐도 (%)	
	γ <sub>d</sub> max (g/cm <sup>3</sup> )	최적 함수비 (%)			
고화처리층	1.673	23.0~26.1	1.567	93.4	
차수층	P <sub>A</sub> 층	1.687	16.4~17.6	1.452	86.1
	P <sub>B</sub> 층	1.435	24.3~28.3	1.273	88.7

### 5.2 동결/융해 실험

동결/융해 반복실험을 통하여 바닥층에 대한 영향을 관찰하기 위해서 영하 20℃까지 유지하고 현장성에 부합되는 대형 Lysimeter(1.0m×1.5m×2.0m)를 제작하여 실험을 수행하였다.(Miller 외, 1999; Lee, 1994)

먼저 직경이 25~40mm인 쇠석으로 지하수 배제층을 3

회에 걸쳐 포설하여 충분히 다진 후 상부의 고화토층과 재료를 분리하기 위하여 지하수 배제층 위에 중량이 700 g/cm<sup>2</sup>인 부직포 1장을 포설하고 고화처리층을 포설하여 인력으로 다짐을 실시하였다. 또한 본 연구에 사용된 시료는 실내다짐시험을 통해서 구한 최적함수비를 유지하여 질량이 26.2 kg, 30 cm×30 cm 인 정방형 철판으로 45 cm의 고화토층과 각각 15 cm의 차수층인 P<sub>A</sub>, P<sub>B</sub> 층, 그리고 60 cm의 침출수 집배수층을 인력으로 다짐하였으며 실내다짐시험의 95% 이상 다짐도를 유지하도록 노력하였다. 이러한 대형 Lysimeter를 이용한 실험은 실제 현장에서 설계된 전체 165 cm의 바닥층을 포설하고 그 위에 Carbon black으로 처리한 1000 g/m<sup>2</sup>의 부직포를 포설하여 동결/융해 실험을 반복해서 수행하였다.

### 5.2.1 Thermocouple 삽입

실제 폐기물매립지의 전체 바닥층을 동결/융해 반복 실험하는 동안 고화처리층의 동결거동과 동결깊이 및 온도 경사를 관찰하기 위하여 고화처리층에 그림 6과 같이 Thermocouple 깊이에 따라 삽입하였고 대기용 Thermocouple을 Lysimeter 천장에 설치하여 동결/융해 반복 실험을 하는 동안 대기의 온도를 측정하였다.

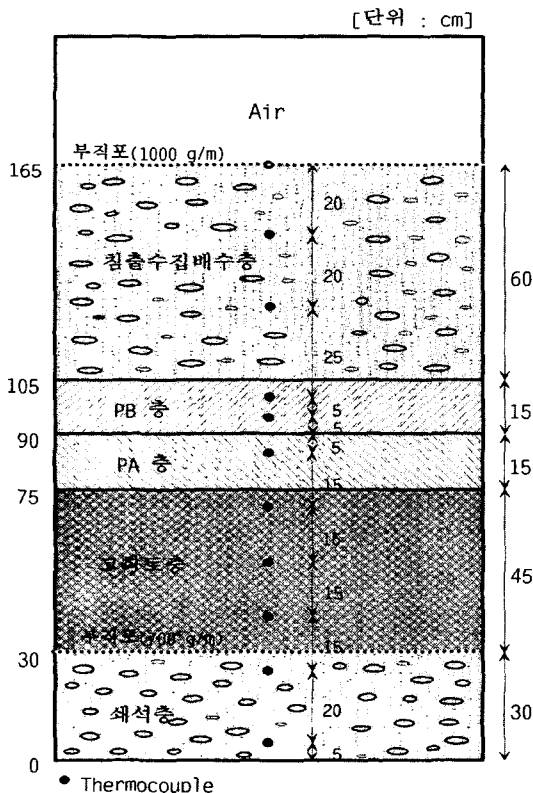


그림 6. 동결/융해 실험의 설계

### 5.2.2 인공강우

강우조건에 따른 고화처리층의 동결/융해 반복 실험에 대한 바닥층의 거동에 대한 영향인자를 서로 비교하기 위하여 Lysimeter 천장에 설치한 스프링클러를 통하여 인공 강우를 살수하게 된다.

인공강우는 연평균 강수량을 기준으로 1일 강우량을 20 mm로 산정하고 강우강도는 35~40 mm/hr 정도 유지할 수 있도록 조정하였다. 인공강우는 동결 전에 살수하여 바닥층에 완전히 스며든 후에 실험을 실시하게 된다. 일단 스프링클러를 통하여 인공강우가 분사되면 바닥층에 고이는 강우가 Lysimeter 벽면을 따라 유입되기 때문에 벤토나이트로 실링을 하여 유입량을 최대한 억제시켰다.

### 5.3 실험과정

지하수 배제층과 고화처리층 및 침출수 집배수층을 포설한 후 다음과 같이 강우조건, 양생포, PVC 그리고 고중량부직포를 포설하여 아래와 같이 구분하여 단계별 실험을 수행하였다. 즉,

- ① 지하수배제층+고화토층 (Design1, Design2<sup>\*</sup>)
- ② 지하수배제층+고화토층+양생포 피복 (Design3)
- ③ 지하수배제층+고화토층+양생포+PVC 피복 (Design 4<sup>\*</sup>)
- ④ 지하수배제층~침출수 집배수층 (Design5~Design7)

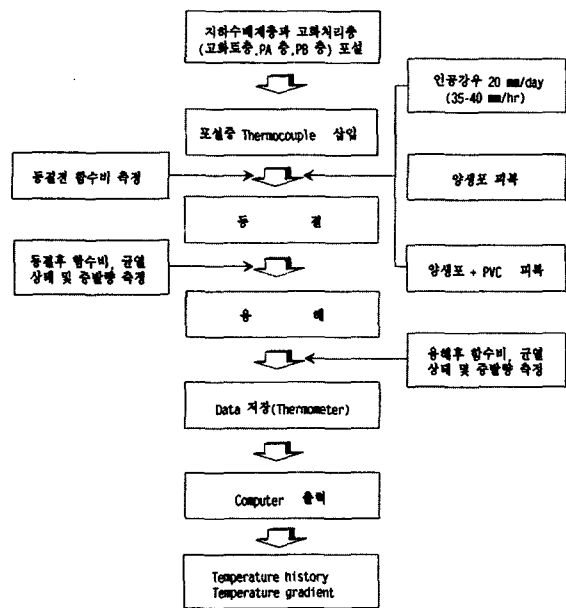


그림 7. 동결/융해 실험 흐름도

## 6. 실험결과

### 6.1 Design1과 Design2\*

강우를 투여한 Design2\*는 Design 1보다 동결깊이가 크게 나타났고 동상현상에 따른 균열이 관찰되었으며 증발량은 월등히 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이것은 고화토층 내의 함수비가 증가하고 얼음결정의 증가로 인한 동상과 균열이 국부적으로 나타났기 때문이다.

또한 Design1과 Design2\*의 온도변화는 점선으로 표시된 융해부분과 실선으로 표시된 동결부분이 선형으로 증감하는 것으로 나타났다.

이러한 사실은 지하수 배제층이나 고화토층의 온도변화는 일정한 간격으로 증감한다는 것을 나타낸다.

(1) Design

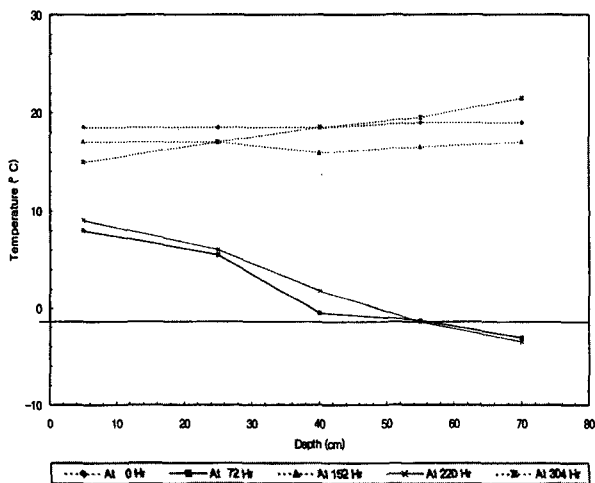


그림 8. Design1의 온도경사

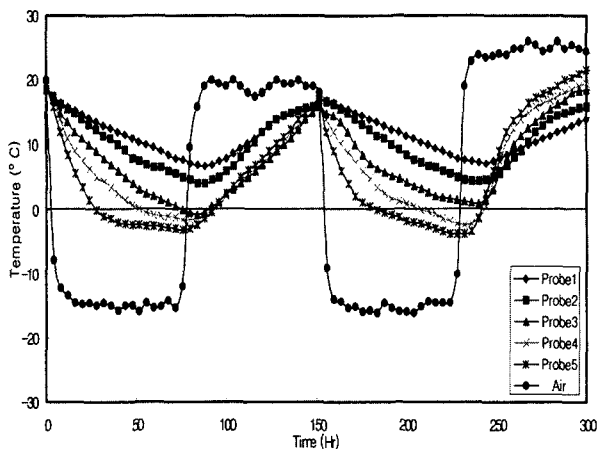


그림 9. Design1의 온도변화

(2) Design2\*

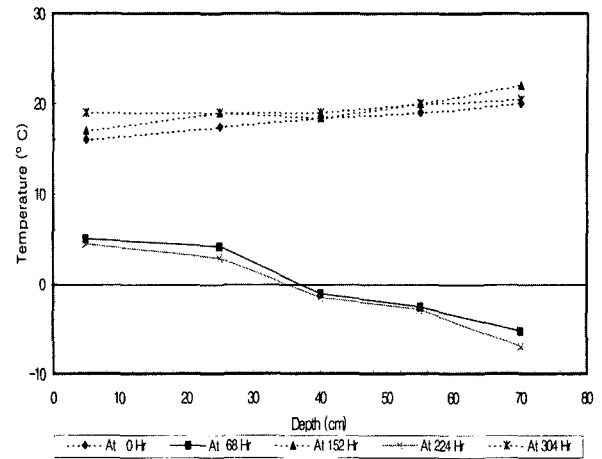


그림 10. Design2\*의 온도경사

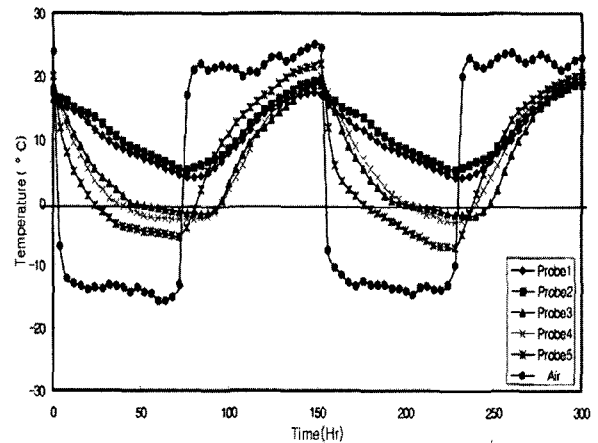


그림 11. Design2\*의 온도변화

### 6.2 Design3과 Design4\*

Design3과 Design4\*는 균열과 동상현상이 모두 나타났으며 동결깊이는 Design4\*가 Design3에 비해서 작은 것으로 나타났다.

그래서 Design4\*는 인공강우를 고려하더라도 Design3보다 동결에 대하여 안전하고 양생포와 PVC를 포설한 고화토층은 보온작용의 영향을 받아 동결깊이가 7 cm 정도 경감되는 효과를 나타냈다.

이것은 Design1과 Design2\*의 온도경사와 비교해 볼 때 Design3과 Design4\*의 온도변화가 증감하는 폭이 작은 것에 기인한다.

이러한 사실은 흑한기 매립지의 시공에서 기온의 급격한 하강으로 인하여 시공중지 상태에 이르면 적어도 바다

층에 양생포와 PVC를 포설한다면 동결에 의한 바닥층의 동상과 균열을 최소화하는데 필요한 조치라고 할 수 있다.

(1) Design3

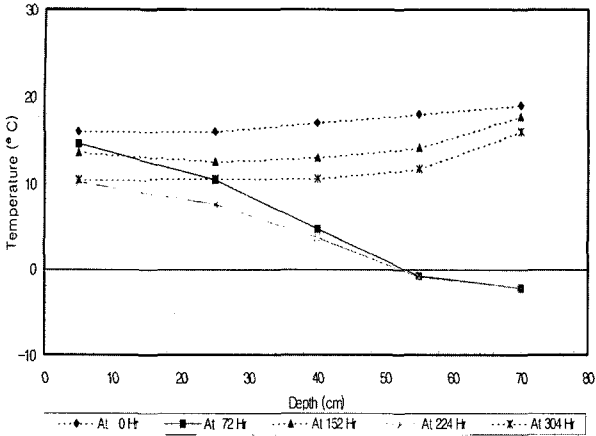


그림 12. Design3의 온도경사

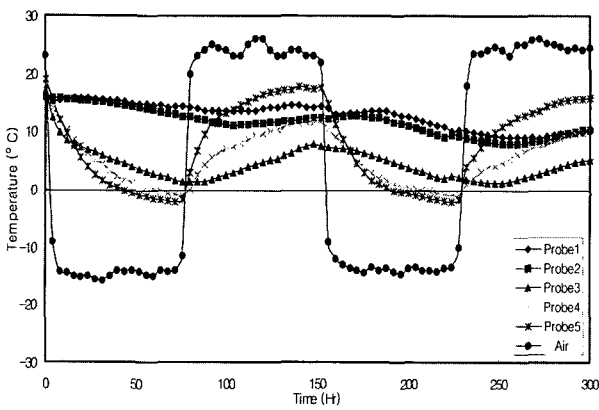


그림 13. Design3의 온도변화

(2) Design4\*

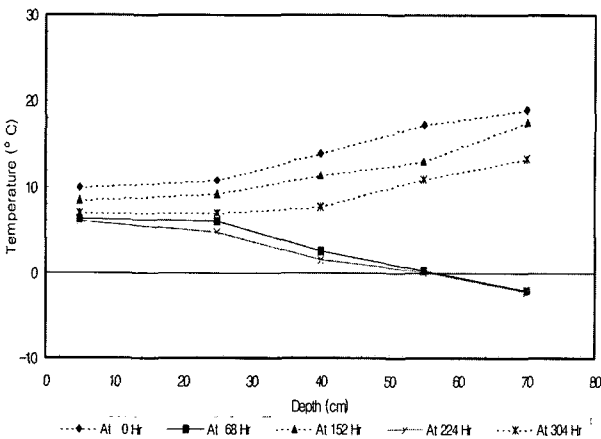


그림 14. Design4\*의 온도경사

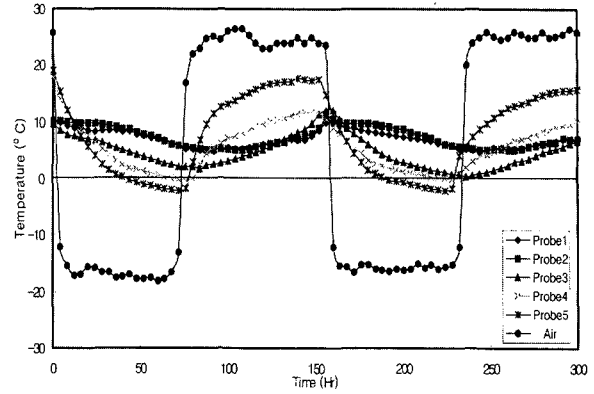


그림 15. Design4\*의 온도변화

### 6.3 Design5~Design7

P<sub>B</sub> 층 위에 쇠석을 사용하여 침출수 집배수층 60 cm를 포설한 Design5는 고화처리층 전체에 대해서 동결에 전혀 영향을 미치지 않았고 침출수 집배수층에 삽입된 Thermocouple의 온도는 그림 6.9와 같이 대기온도와 유사한 분포를 나타내고 있었다. 이것은 쇠석간의 공극이 커서 차가운 대기온도가 침투하는데 원활하여 온도변화와 온도경사가 대기온도의 경향과 거의 유사하게 나타났기 때문이다.

또한 cycle1과 cycle5의 온도변화와 온도경사는 뚜렷한 차이를 보이지 않았다.

그래서 바닥층 전체에 대하여 동결/융해 반복횟수를 증가하더라도 동결이나 융해 시 바닥층 전체의 동결깊이와 거동에 따른 영향인자의 변화가 거의 없었다.

침출수 집배수층 위에 Carbon black 처리된 고중량부직포를 포설한 Design6의 온도경사는 Design5와 유사한 분포를 나타내고 있으나 온도변화는 Design5와 비교하여 전반적으로 2~6 °C정도 상부층으로 갈수록 바닥층의 온도가 상승하는 보온효과를 얻을 수 있었다.

그래서 바닥층 포설이 완료된 후 상부 배제층 위에 Carbon black 처리된 고중량부직포를 포설한다면 부직포에 작용하는 보온성에 의해 동결에 의한 동상방지와 동상에 따른 바닥층의 균열을 최소화하는데 효과가 있는 것으로 나타났다.

한편, 침출수 집배수층에 대하여 쇠석을 사용하지 않고 모래를 사용한 Design7은 바닥층의 동결깊이와 동상현상이 전혀 나타나지 않았고 바닥층의 온도변화는 Design6과 뚜렷한 차이를 보이지 않았다.

주목할 것은 Design5와 Design6에 비해서 동결속도가



현저하게 지연되는 것으로 나타났다.

그래서 동결깊이와 동상현상의 측면에서 본다면 Design5와 Design6보다 상대적으로 매우 우수한 효과를 얻을 수 있었다.

(1) Design5

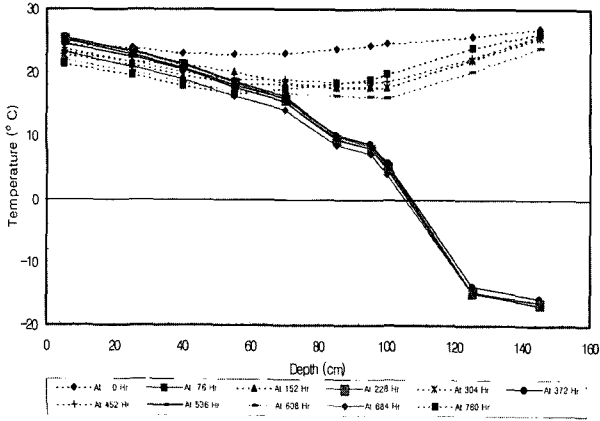


그림 16. Design5의 온도경사

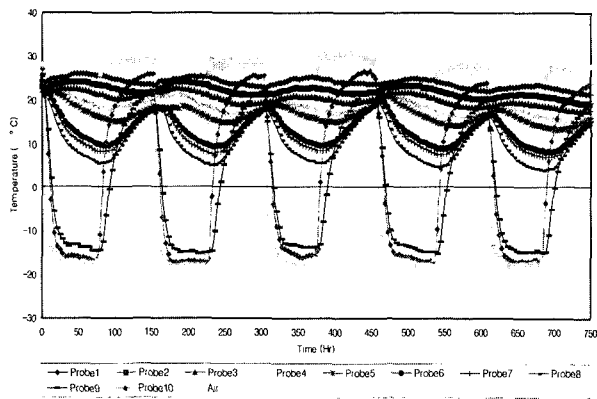


그림 17. Design5의 온도변화

(2) Design6

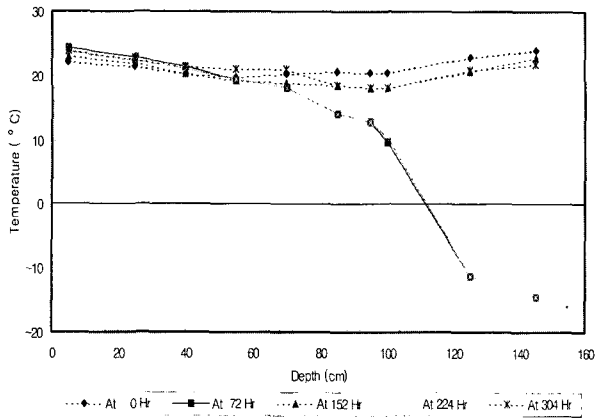


그림 18. Design6의 온도경사

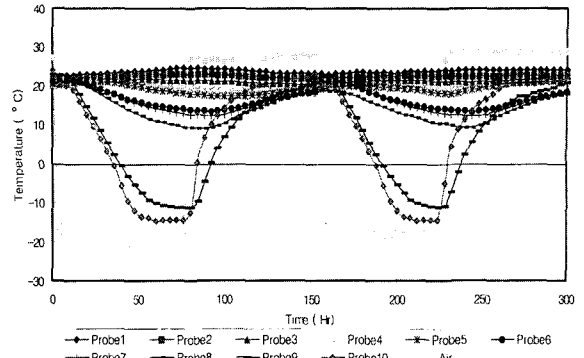


그림 19. Design6의 온도변화

(3) Design7

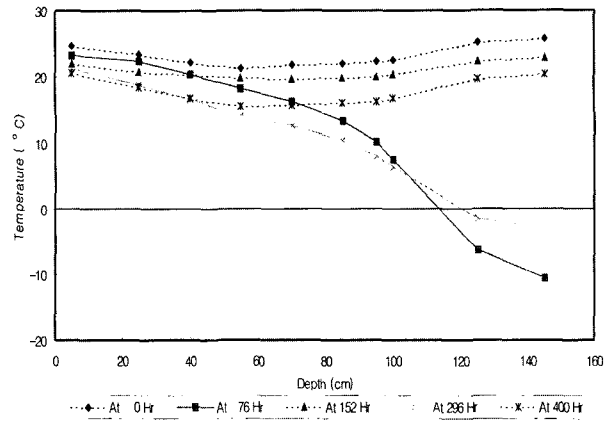


그림 20. Design7의 온도경사

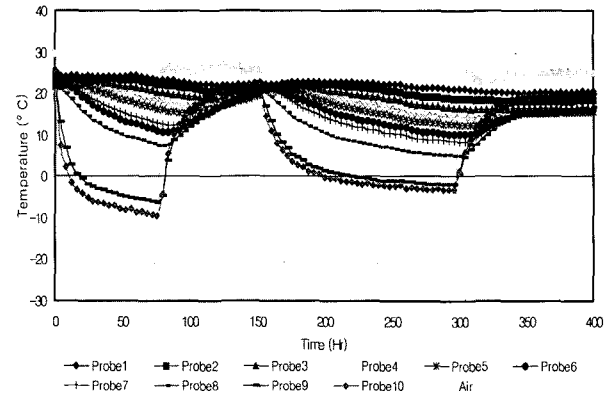


그림 21. Design7의 온도변화

7. 결론

7.1 동결깊이

본 연구는 동결깊이에 따른 동상방지를 위하여 동결깊이를 세밀하게 측정하기 위하여 실내에서 7 가지 설계 및

현장모형 실험을 통하여 동결깊이를 지배하는 인자로서 함수비, 바닥층의 다짐상태, 동결/융해 시간 등에 따른 바닥층의 동결깊이의 변화를 관찰하고 양생포, PVC, 부직포의 사용에 의한 동결깊이의 차이와 변화를 비교하였다.

1) 강우를 고려한 설계에서의 일반적으로 동결깊이가 큰 것으로 나타났다. 이것은 동일한 바닥층의 조건에서 바닥층의 함수비가 증가하면 동결깊이가 커진다는 동결이론에 부합되는 결과이다.

2) 바닥층에 양생포 또는 양생포+PVC를 포설한 경우에는 포설하지 않은 경우보다 약 60% 이상 동결깊이가 감소하였고 바닥층 전체에 대하여 고중량 부직포를 포설한 경우에는 침출수 집배수층을 쇄석만으로 포설한 설계보다 바닥층 전체에 걸쳐서 약 2~6℃ 정도 온도가 상승하는 결과를 나타내었다. 이것은 양생포와 PVC를 포설하면 바닥층을 보호하고 보온효과가 발생하여 동결방지에 큰 영향을 주며 완성된 바닥층 상부에 Carbon black 처리한 고중량 부직포를 포설한다면 동결에 보다 안전한 효과를 기대할 수 있다.

3) 침출수 집배수층을 모래로 대처한 설계는 쇄석을 사용한 설계보다 바닥층의 평균온도가 더욱 높고, 특히 동결속도가 현저하게 지연되는 효과를 나타내어 모래를 사용한다면 동결/융해에 대한 효과는 좋다고 할 수 있다.

바닥층의 온도변화는 전반적으로 선형적으로 증감하여 일정한 온도경사를 유지하는 것으로 나타나 바닥층의 동결거동을 예측할 수 있는 중요한 자료가 되었다.

앞에서 서술한 결론으로 보아 바닥층 시공 시 고화처리층만을 시공 후 겨울철을 보낸다면 겨울철 현장시공에서 동결에 의한 피해가 우려되며 바닥층의 보온을 위하여 바닥층에 양생포를 포설하거나 또는 강우나 강설에 대비하여 양생포와 PVC를 병행하여 포설한다면 동결깊이를 최대한 억제하는데 도움을 줄 것으로 판단된다.

그러나 근본적인 고화처리층의 동상방지 대책으로 60 cm의 침출수 집배수층과 Carbon black 처리한 부직포를 포설한 후 겨울철을 보내는 것이 바닥층 보호에 더욱 효과적이며 침출수 집배수층을 모래로 포설한다면 차수층의 동상방지에 좋은 효과를 기대할 수 있다.

## 7.2 동상현상과 균열

Design2\*에서는 동상현상에 의한 균열이 국부적으로 균열과 미소한 동상현상이 나타났으며 양생포와 PVC를

포설한 경우에도 강우조건에 관계없이 약간의 표면균열과 동상현상이 발생되었되. 동상에 의한 바닥층의 팽창은 지반내부와 바닥층의 표면에 균열을 일으키는 요인으로 작용하게 된다. 그렇지만 흡입자의 성분이나 상태 그리고 바닥층의 다짐상태에 따라 달라질 수도 있다.

따라서 고화처리층의 동결/융해에 따른 균열정도는 점토층에서 나타난 균열정도 보다 미약하다고 할 수 있다. 또한 이러한 균열이나 동상현상을 방지하기 위해서는 고화처리층의 재다짐 시공이 중요하다고 볼 수 있다.

만약 동결깊이가 고화처리층에 전달되어 동상현상 및 균열이 발생되었다면 최소한 동상현상이 발생된 만큼 고화처리층을 포설하여 재다짐 하는 것이 차수목적을 위해서 좋을 것이라고 본다.

## 참고문헌

1. 이승, 김홍석, 이재영 (1999). "폐기물 매립지 바닥층의 고화토 포설시 동결/융해 현상에 관한 연구" 한국폐기물학회, pp. 209-215
2. 이승, 김홍석, 정대석, 이재영 (1999). "동결/융해 현상이 고화토로 포설된 폐기물 매립지 바닥층에 미치는 영향" 대한토목학회 추계 학술발표회 논문집 II, pp. 465-468
3. 진성기, 하현중, 김두영 (1999). "포설형 표층 고화처리공법의 적용성 검토-경서동 신규매립장 조성사례 중심" 한국지반공학회, Vol. 15, No. 3, 1999.3, pp. 10-20
4. Benson. C. H, and Othman, Majdi A. (1993). "Hydraulic conductivity of compacted clay frozen and thawed in situ". J. of Geotech. Engrg. ASCE 119(2), pp. 276-294
5. Benson, C. H., Chamberlain, E. J., and Erickson, A. E., "Effects of Frost Action on Compacted Clay Barriers". Geoenvironment 2000, pp. 702-715
6. Braja M Das. (1984) "Principles of Foundation Engineering", Brooks / Cole Engineering Division, Monterey, California.
7. Carol J. Miller and Jai-Young Lee. (1999). "Response of Clay Liners to Extended Periods of Freezing" Engineering Geology. Vol. 51, pp. 291-302
8. Chamberlain, E. J., and Gow, A. (1979). "Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils". Engrg. Geol., Vol. 13. pp. 73-92
9. Craig H. Benson, Huaming Zhai and Xiaidong Wang. (1994). "Estimating Hydraulic Conductivity of Compacted Clay Liners" J. of Geotech. Engrg. ASCE, Vol. 120, No. 2, Feb 1994, pp. 366-387
10. Daniel. D. E. (1994). State-of-the-art: "Laboratory hydraulic conductivity tests for saturated soils. Hydraulic conductivity and waste contaminant transport in soils", ASTM STP, D. E. Daniel and S. J. Trautwein, eds., ASTM, Conshohocken, pp. 30-79.
11. James K. Michell, Don R. Hooer, and Richard G. Campanella. (1965). "Permeability of Compacted Clay", J. of Geotech. Engrg. ASCE. Vol. 91, No SM 4, July 1965. pp. 41-65
12. John E. Garlanger, Francis K. Cheung, Bishar S. Tannous "Quality Control Testing for a Sand-Bentonite Liner". ASCE, pp. 488-499
13. Geoservices. (1989). "Freeze-thaw effects on Claymax liner systems".

- Rep. By Geoservices, Inc. to James Clem Corp.
14. Kim, W.H. and Daniel, D. E.,(1992). "Effect of freezing on the hydraulic conductivity of compacted clay". J. of Geotech. Engrg. ASCE, 118(7). pp. 1083-1097
  15. Jai-Young Lee (1994). "Performance of Landfill Cover Systems in Cold Climates" Ph. D. Dissertation.
  16. Lionel C. Wong and Moir D. Haug (1991). "Cyclical Closed-system Free-Thaw Permeability Testing of Soil Liner and Cover Materials", Can. Geotech. J. 28, pp 784-793
  17. Nandakumar Paruvakat, Ph. D., P. E., Gerald W. Sevick, P. E., Lawrence J. Buechel. (1990). "Free-Thaw Effect on Land-fill Clay Liners" Proceeding 13th Annual Madison Waste Conference, Univ of Wisconsin Madison, Madison, Wisconsin. Sep. 19-20, pp 452-469
  18. Othman, M., Benson, C. H., Chamberlain, E. J., and Zimmie, T.(1994). "Laboratory testing to evaluate changes in hydraulic conductivity caused by freeze-thaw: state-of-the-art". ASTM STP 1142. D. E. Daniel and S. J Trautwein, eds., ASTM, Conshohocken, pp. 227-254
  19. S. Leroueil, R. Bouchard and J. P. Bihan. (1990)."Water Content-Density Criteria for Compacted Soil Liner" J. of Geotech. Engrg. ASCE, Vol. 116, No. 12, Dec 1990. pp. 963-968
  20. Sowers, G.(1993). "Effects of Freezing on Hydraulic Conductivity of Compacted Clay," Discussion of paper by Woon-Hyung Kim and Daniel, D. E., (July 1992, v.118. No7), J. of Geotech. Engrg. ASCE, Nov., 1993, pp.1862-1865.
  21. Wong, L., and Haug, M.(1991)."Cyclical closed-system freeze-thaw permeability testing of soil liner and cover material".Can. Geotech. J, Ottawa, Canada, 28(6), pp. 784-793
  22. "Test Method for Laboratory Compaction of Soil Using Standard Effort" ASTM D 698-91, pp. 166-173
  23. "Test Method for Laboratory Compaction of Soil Using Modified Effort" ASTM D 1557-91, pp. 228-235
  24. "Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter" ASTM D 5084-90, pp. 1161-1168
  25. "An Introduction to Geotechnical Engineering" Robert D. Holtz, William D. Kovacs, pp. 190-195
- (접수일자 1999. 11. 13)