

매립지 바닥층의 고화토 포설시 동결/융해의 특성

A Characteristic of Freeze and Thaw on Use for Stabilized Soil in Landfill Bottom Liners

김흥석* · 이 송** · 이재영***

Kim, Heung-Seok · Lee, Song · Lee, Jai-Young

Abstract

Recently, Korea brings to remarkable levels about industrialization, modernization, population and development of technology. Especially, the rapidly growing from this technology has increased the burden on existing industrial waste landfills. The purpose of this research is to existing knowledge base of landfill cover liner behavior during periods freeze/thaw. Although these tests have been invaluable in clarifying the problem of freeze/thaw, extending the results of such experimental studies to prototype landfills are questionable. For 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. And the soil materials used stabilized soils (mixed clays, cements, and minerals) instead of clays. The bottom liners are made up of drainage layer (30cm), stabilized layer (75cm), and leach collection layer (60cm). The stabilized layers are made up of supporting layer (45cm) and impermeable layer (30cm) - consisted of P_A and P_B layer.

Keywords : Freeze/thaw, Closed system, Open system

요 지

최근 우리나라는 산업화와 현대화 및 인구의 증가와 더불어 과학기술의 발전은 주목할만한 수준에 이르렀다. 특히 과학기술에 의한 급속한 성장으로 인해 부가적으로 쓰레기 매립지의 설치에 대한 부담을 가중시키고 있다. 본 연구는 동결/융해하는 동안 매립층의 거동에 대한 기본적인 지식을 제공하고 문제점을 명백히 규명하는데 있다. 본 연구를 위하여 현장의 매립지와 유사한 기후조건 및 경계조건, 강우조건 등을 재현하는 대형 실내모형장비를 사용하였다. 점토와 시멘트, 무기물 광물을 혼합하여 제작된 고화처리층은 지지력을 목적으로 하는 45cm의 고화토층과 차수를 목적으로 하는 30cm의 불투수층의 P_A와 P_B 층으로 구성되었으며 고화처리층 하부에는 30cm의 지하수 배제층, 상부에는 60cm의 침출수 집배수층으로 설계하였다.

주요어 : 동결/융해, 폐합시스템, 개방시스템

* 정회원, (주)대우건설 토목사업본부, e-mail : kongmail@dwconst.co.kr

** 정회원, 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 교수

***정회원, 서울시립대학교 도시과학대학 환경공학과 교수

1. 서론

본 연구에서는 매립지 바닥층에 대한 점토포설의 대안으로 기존의 원지반 점토에 시멘트와 벤토나이트 및 고화재를 혼합한 새로운 고화처리토를 이용하여 안전하고 경제적이며 효율적인 바닥층을 조성하고자 한다. 그러나 매립지 바닥층의 시공에 있어서 고화처리토를 이용한 표층고화처리층을 바닥층의 재료로 사용하기 위한 역학적 안전성에 대한 기술적 자료가 전무한 실정이며 고화처리토를 바닥층으로 사용한 겨울철 동상에 대한 연구문헌 및 사례는 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. 매립지 현장에서 점성토에 의한 바닥층은 높은 흡착성과 저투수성 확보, 내구성이 길다는 장점이 있지만, 공사관리 및 여름철의 건조수축과 겨울철의 동상에 따른 균열 그리고 강우나 침출수가 유입되면 환경오염을 초래할 수 있으므로 다각적인 통제와 관리를 꾸준히 해야하는 단점이 있다.

본 연구에 사용된 고화처리토는 쏘일시멘트와 고화재를 적절히 혼합한 것으로 하부 고화토층은 지지력을 향상시켜 매립하중에 따른 국부적인 침하를 방지하여 균등침하를 유도하고 상부 차수층은 성질이 다른 P_A, P_B 층에 대하여 반응물질의 화학적인 상호작용에 의한 자가차수기능을 발생시켜 차수기능을 한층 강화하였다. 본 연구에서는 표층 고화처리층에 대하여 다양한 조건을 모사하여 매립지 바닥층의 재료로서 타당성을 규명하고자 한다.

2. 표층고화처리 공법

기존의 매립지 바닥층의 점토포설층에 대한 차선책으로 사용된 표층고화처리토는 침출수 집배수 계획에 따라 원지반 위에 30cm의 지하수 배제층을 포설하고 상부에 75cm의 차단층(고화토층 45cm, 차수층 30cm)으로 시공한 균질한 저투수성의 차단층으로 침출수에 의한 지하수 및 원지반의 오염을 최소화하며 매립작업 및 기반시설물 조성시 상재하중에 의한 국부적인 부등침하를 방지하는데 있다. 고화토층은 상재하중으로 바닥층의 부등침하에 대한 안정성과 작업성을 확보하는 지지층 역할을 하며 차수층인 P_A, P_B 층은 상이한 두 개의 반응성분에 의해 생

성차수층을 발생시키고 자가치유(self-sealing)되어 침출수가 유입되어도 안전한 저투수층을 확보하는데 있다.

2.1 자가형성(Self-sealing)

차수층은 그림 1과 같이 두 개 이상의 상이한 물질을 포함하는 반응차수층을 서로 접촉시켜 불투수층인 생성차수층을 형성시키는 기능으로 접촉면 사이에 불투수층의 생성막이 형성되어 침출수에 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 SiO₂와 소량의 Mg성분을 포함한 실리카겔 무기물인 P_A 층과 Ca(OH)₂가 주종을 이루는 칼슘계 무기물인 P_B 층으로 이루어진다.

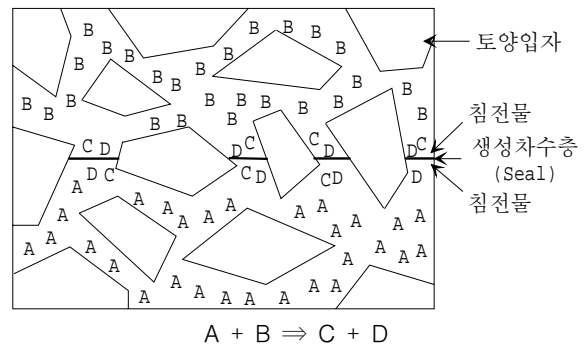


그림 1. 생성차수층의 반응원리

자가형성반응은 차수층을 구성하는 P_A 층과 P_B 층에 포함되어 있는 반응물질이 각각의 음이온(CO₃⁻²와 OH)과 양이온(Mg⁺²와 Ca⁺²)으로 용해됨에 따라 진행되며 상, 하부층 경계면에서 비용해성 광물질인 브루사이트(Brucite : Mg(OH)₂)와 칼사이트(Calcite ; CaCO₃)의 침전물을 형성하여 그 침전물로서 일종의 불용성의 불투수성 막을 형성시켜 토양의 간극을 완전히 채우는 생성차수층의 막을 형성시킨다는 것이 핵심적인 반응원리이다.

3. 동결이론

일반적으로 폐합시스템(Closed system)과 개방시스템(Open system)에서 바닥층이 동결될 때 그림 2와 같은 거동을 나타낸다. 물의 이동은 온도가 높은

하부에서 온도가 낮은 상부로 이동하게 되는데 동결 전면부라고 불리는 동결된 지역의 가장자리에서는 얼음렌즈의 결정을 이루게 된다. 일반적으로 물의 공급이 계속되는 Open system에서 Closed system 보다 동결깊이가 큰 이유가 수분의 이동에 의한 얼음렌즈의 생성정도와 크기가 증가하기 때문이다. 생성된 얼음렌즈는 동결과 융해를 반복하면서 흙 입자의 간극을 증가시키고 바닥층 표면이나 내부의 균열을 발생시키는 중요한 영향인자로 작용하며 간극수가 집중되어 간극수압이 가장 크게 작용하게 된다. 동결깊이는 바닥층의 성분과 종류, 함수비, 대기 온도, 다짐상태, 동결속도 그리고 동결/융해 반복횟수 등에 따라 차이를 나타내는데 일반적으로 동일한 지반과 실험조건하에서 바닥층의 함수비가 증가할수록, 그리고 수분의 공급이 계속되는 Open system보다 Closed system에서 동결깊이와 동상현상이 이론적으로 작게 나타나며 바닥층에서 얼음렌즈의 성장 정도에 근거한다.

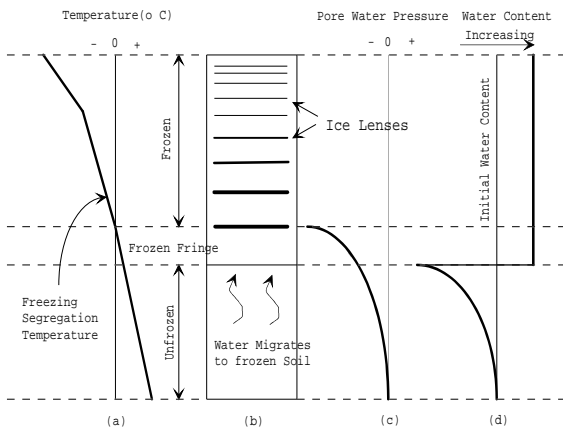


그림 2. 동결 시 바닥층의 거동 인자

3.1 폐합시스템과 개방시스템

동결시키는 과정에는 물의 공급에 따라 Closed system과 Open system으로 분류된다. 물의 공급이란 그림 2와 같이 수분이 이동하는 방향, 즉 바닥층 하부에서 상부로 인위적으로 공급하게 되는데 이러한 형태를 Open system이라고 한다. 일반적으로 자연상태의 강우나 인공강우와 같이 바닥층 상부에서 수분이 공급되어 중력에 의해 바닥층에 유입되는 형태는 Open system과 구별하여 Closed system으로 분류한다.

본 연구에서는 최적함수비상태의 바닥층 조건과

인위적으로 강우를 상부에서 투여하여 함수비 조건을 달리한 Closed system을 실시하였다.

3.1.1 폐합시스템(Closed system)

Closed system은 동결하는 동안 바닥층에 함유된 수분 외에는 더 이상의 물을 공급하지 않거나 인위적으로 공급하더라도 상부에서 인공강우를 투여하는 형태이며 동결지역에서 흙 속의 간극에 얼음렌즈를 형성시키는데 다짐상태나 함수비, 간극의 크기에 따라서 얼음렌즈가 생기지 않는 경우도 있다. 일단 얼음렌즈가 간극에 형성되면 동결전면부에서 함수의 재배열이 발생된다. 이로 인해 동결전면부 근처에서는 그림 2와 같이 함수비 증가와 더불어 건조밀도가 감소하게되며 얼음결정은 Open system보다 두께가 얇아서 동결깊이는 상대적으로 작게 나타난다.

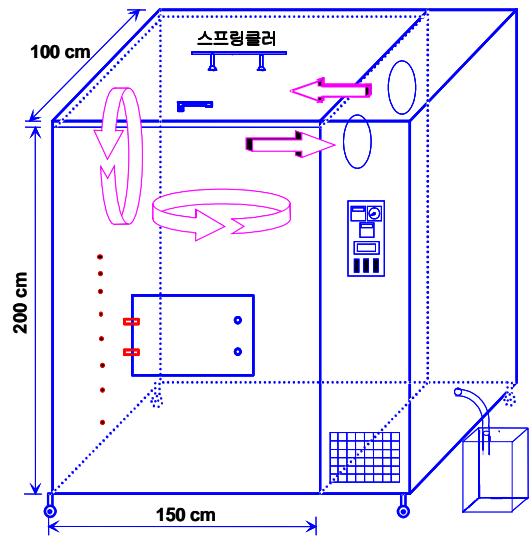
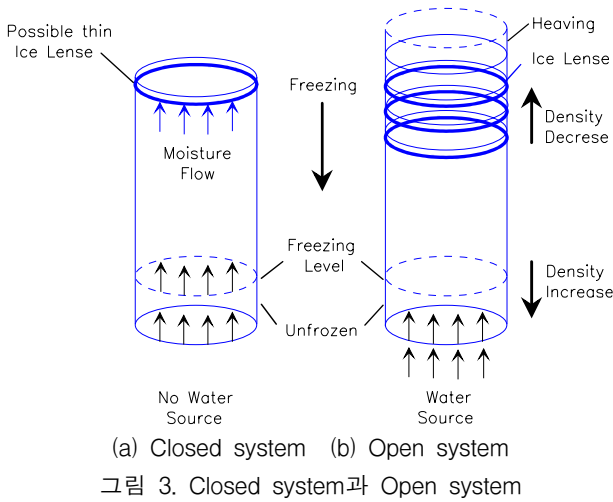
3.1.2 개방시스템(Open system)

Open system은 일반적으로 동결하는 동안 인위적으로 바닥층의 하부에서 상부로 압력을 통하여 지속적인 물의 공급을 받는다. 이러한 시스템은 일반적으로 자연상태의 강우조건에 의한 Closed system과 비교하여 동결 시 바닥층 하부에서 상부로 이동되는 수분이 계속되므로 얼음렌즈의 성장이 증가하고 동결깊이가 깊어지고 동상현상이 크게 발생된다.

1951년 De Groot는 주변에 열에너지, 일 뿐만 아니라 물질을 변화시킬 수 있는 형태라고 정의하였고 1987년 Jones는 흙 속에 간극수가 과잉 상태일 때라고 정의하였는데 이때 과잉 간극수는 결빙되기 쉬운 흙에서 동결된 표면으로 얼음렌즈를 형성한다. Open system에서 동결전면부를 아래로 이동함으로써 물은 흙 속의 간극을 통하여 표면에서부터 끌어올린다. 동결 시 동결위치나 동결전면부로 수분이 이동되어 흙 속에 얼음렌즈가 생기게 되어 동상현상이나 동결깊이가 발생하게 된다.

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



4. 동결/융해 실험장치 및 장비

4.1 대형 Lysimeter

현장성에 부합되는 동결조건을 갖추기 위하여 대형 Lysimeter(1.0m×1.5m×2.0m)를 제작하여 실험을 실시하였다. 대형 Lysimeter는 동결 시 대기온도를 영하 20℃까지 유지할 수 있도록 설계하였고 외부온도에 의한 내부기온의 상승을 최대한 억제하기 위하여 Lysimeter 벽체 사이에 50mm의 단열재를 삽입하였다. Lysimeter는 동결조건에 따른 원하는 온도를 영하 20℃까지 선택하여 설정할 수 있으며 타이머가 부착되어 동결시간을 자동으로 조절할 수 있고 동결이 완료되면 융해단계로 진행되어 Lysimeter는 자동으로 정지하도록 되어있다.

Lysimeter 외벽에는 Thermocouple를 외부에서 삽입할 수 있도록 직경 3mm 정도의 구멍을 뚫었으며 Lysimeter 천장에는 인공강우에 의한 고화처리층의 거동을 비교하기 위하여 35~40mm/hr의 강우강도를 유지하면서 살수할 수 있는 스프링클러를 설치하였다. 인공강우는 1일 평균 20mm의 강우를 살수하는 것을 기준으로 하였다. 또한 동결시간은 우리나라 기후조건 3한4온을 고려하여 동결 3일, 융해 3일을 기준으로 실험을 실시하였다.

4.2 Thermocouple과 Thermometer

고화처리층의 바닥에 삽입한 Thermocouple은 미국의 Cole-Parmer社에서 제작된 것으로 -250℃~

1260℃까지 측정이 가능한 전선모양의 K-type을 사용하였다. Thermocouple은 용도에 따라 바닥층의 온도를 감지하는 일반용과 대기용으로 구분된다.

표 2. Type 별 Thermocouple

Type	온도측정범위 (℃)
E	-250 ~ 871
J	0 ~ 760
K	-250 ~ 1260
T	-184 ~ 371

한편, 본 연구에 사용된 Thermometer는 미국의 Cole-Parmer Instrument社에서 제작된 자동화장비로서 바닥층에 삽입된 Thermocouple에서 감지된 온도를 설정된 계측시간에 따라 자동으로 저장되어 기록되는 장치이다. 각 채널마다 현재온도가 화면을 통해 나타나며 설정된 시간마다 온도를 감지하게 된다. 자료의 저장능력은 설정시간에 관계없이 255개까지 저장할 수 있다.

5. 실험방법

5.1 실내시험

5.1.1 실내 토성시험

(1) 원지반토의 토성치

토성시험에 사용된 원지반토는 원지반 해성점토로

서 점성이 약하고 유기물이 다소 포함된 점성토이다. 원지반토는 액성한계 22.8%, No. 200체 통과량이 93.6%이며 소성지수가 9.3%인 CL 계열의 점성토로 분류되었다.

표 3. 원지반토의 토성치

분 류	토 성 치
액성한계, %	22.8
소성지수, %	9.3
No. 200체 통과량, %	93.6
비 중	2.69
USCS	CL

(2) 고화토에 포함된 고화재의 성분

① 고화재의 성분

고화재의 성분은 고화토층에서는 시멘트와 혼합되어 지지력을 증대시키고 차수층에 대해서는 SiO₂와 소량의 Mg성분을 포함한 실리카겔 무기물인 P_A 층과 Ca(OH)₂가 주종을 이루는 칼슘계 무기물인 P_B 층이 서로 화학반응을 일으켜 새로운 화합물질로 이루어진 불투수층의 생성차수층을 형성시킨다. 이것은 차수층이 부분적으로 파괴되더라도 생성차수층으로서 2차 차수막을 형성시켜 침출수의 유입을 최대한 차단하도록 한 것이다.

표 4. 고화재 성분

성 분	구 분	고화처리층		
		고화토층	P _A 층	P _B 층
SiO ₂		34.00	69.00	2.36
CaO		38.30	11.40	74.00
SO ₃		2.21	2.21	0.75
Al ₂ O ₃		13.00	1.46	0.59
Fe ₂ O ₃		0.40	0.40	0.29
K ₂ O		0.80	0.86	0.13
MgO		5.52	0.47	2.86
Na ₂ 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 표 4와 같은 성분비로 교반하였다. 특히 차수층에 사용된 고화재는 P_A층은 SiO₂ 성분과 P_B층에는 CaO를 주성분으로 하여 화학반응에 의해 차수층 사이에 불용성의 불투수 막을 형성시켜 저투수층을 확보하는 것이다. 대형 Lysimeter을 이용한 동결/융해 반복실험에 사용된 고화처리층의 단위 체적당(m³) 시료배합비는 표 5와 같다.

표 5. 고화처리층의 시료배합비

구 분		시멘트(kg)	고화재(kg)	
고 화 처 리 층	고화토층	90	30	
	차수층	P _A 층	×	251
		P _B 층	×	188

5.1.2 실내다짐시험

실내다짐은 ASTM D-698 규정에서 제시한 표준 다짐시험을 실시하여 최대건조단위중량과 최적함수비를 구하였고 모래치환법에 의한 들밀도시험을 실시하여 Lysimeter 실내실험에 대한 상대다짐도를 구하였다. 상대다짐도는 현장의 시공성을 반영하여 대형 Lysimeter를 이용한 실내모형실험의 건조단위중량과 비교하여 산정하였다.

표 6. 표준다짐시험 결과

구 분	다짐시험		들밀도 시험 γ_d (g/cm ³)	상대 다짐도 (%)	
	γ_{dmax} (g/cm ³)	최적 함수비 (%)			
고화토층	1.673	23.0~26.1	1.567	93.4	
차수층	P _A 층	1.687	16.4~17.6	1.352	80.1
	P _B 층	1.435	24.3~28.3	1.173	81.7

5.2 동결/융해 실험

동결/융해 실험을 통하여 바닥층에 대한 영향을 관찰하기 위해서 영하 20℃까지 유지하고 현장성에 부합되는 대형 Lysimeter(1.0m×1.5m×2.0m)를 제작하였다. 먼저 직경이 25~40mm인 쇠석으로 지하수 배제층을 3회에 걸쳐 포설하여 충분히 다진 후 상부의 고화토층과 재료를 분리하기 위하여 지하수 배제층 위에 중량이 700g/cm²인 부직포 1장을 포설한후 고화처리층을 포설하여 인력다짐을 실시하였다. 사용된 시료는 최적함수비를 유지하여 질량이 26.2kg, 30cm×30cm 인 정방형 철판으로 45cm의 고화토층과 각각 15cm의 차수층인 P_A, P_B 층, 그리고 60cm의 침출수 집배수층을 인력으로 다짐하였다. 이러한 대형 Lysimeter를 이용한 실험은 실제 현장에서 설계된 전체 165cm의 바닥층을 포설하고 그 위에

Carbon black으로 처리한 1000g/m²의 부직포를 포설하여 동결/융해 실험을 반복적으로 수행하였다.

5.2.1 Thermocouple 삽입

동결/융해 반복 실험하는 동안 고화처리층의 동결 거동과 동결깊이를 관찰하기 위하여 고화처리층에 표 7과 같이 Lysimeter의 바닥을 기준으로 각각의 위치에 Thermocouple을 삽입하였다. 대기의 온도는 대기용 Thermocouple을 Lysimeter 천장에 설치하여 동결/융해 반복실험을 하는 동안 대기의 온도를 관찰하였다.

표 7. Thermocouple 삽입위치

구 분	번호	Desig1 ~ Design4*	번호	Design5 ~ Design7		
지하수 배제층	Probe1	5 cm	Probe1	5 cm		
	Probe2	25 cm	Probe2	25 cm		
고화처리층	고화토층	Probe3	40 cm	Probe3	40 cm	
		Probe4	55 cm	Probe4	55 cm	
		Probe5	70 cm	Probe5	70 cm	
	차수층	P _A 층	Probe6	85 cm	Probe6	85 cm
			Probe7	90 cm		
		P _B 층	Probe8	95 cm	Probe7	95 cm
			Probe9	100 cm	Probe8	100 cm
침출수 집배수층	-	-	Probe9	125 cm		
	-	-	Probe10	145 cm		

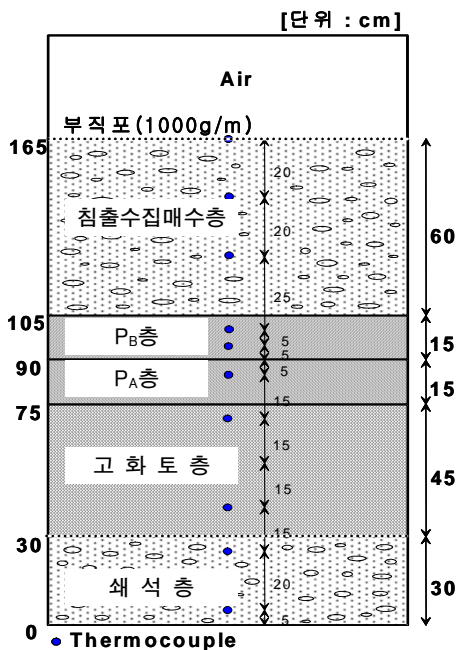


그림 5. 동결/융해 실험단면

5.2.2 인공강우

강우조건에 따른 고화처리층의 동결/융해 반복 실험에서 바닥층의 거동에 대한 영향인자를 비교하기 위하여 Lysimeter 천장에 설치한 스프링클러를 통하여 인공강우를 살수하였다.

인공강우는 연평균 강수량을 기준으로 1일 강수량을 20mm로 산정하고 강우강도는 35~40mm/hr 정도 유지할 수 있도록 조정하였고 동결 전에 살수하여 바닥층에 완전히 스며든 후에 실험을 실시하였다.

5.3 실험과정

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

- ① 지하수배제층+고화토층 (Design1, Design2*)
 - ② 지하수배제층+고화토층+양생포 피복 (Design3)
 - ③ 지하수배제층+고화토층+양생포+PVC 피복 (Design 4*)
 - ④ 지하수배제층~침출수 집배수층 (Design5~Design7)
- 여기서 첨자로 표시된 (*)는 인공강우를 적용한 단면을 의미한다.

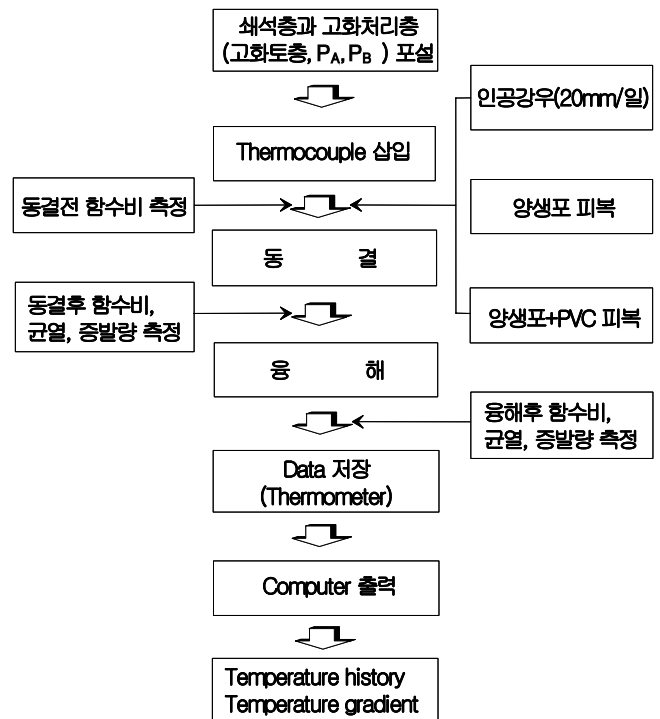


그림 6. 동결/융해 실험 흐름도

6. 실험결과

6.1 Design1과 Design2*

표 8. 동결/융해 후 Design1과 Design2*의 영향인자

구 분	고화토층			
	Design1		Design2*	
	Cycle1	Cycle2	Cycle1	Cycle2
동결 시 평균 대기온도 (°C)	-15	-15	-15	-15
Cycle 후 함수비 (%)	21.89	20.95	19.33	20.68
동결깊이 (cm)	38	36	40	40
동결/융해 후 Crack (cm)	×	×	길이 1~2	길이 1~2
동결/융해 후 Frost heave (mm)	×	×	3	3
동결 후 증발량 (Liters)	1.7	1.5	4.0	4.2

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 발생했기 때문이다.

또한 Design1과 Design2*의 온도변화는 점선으로 표시된 융해부분과 실선으로 표시된 동결부분이 선형으로 증감하는 것으로 나타났다. 이러한 사실은 온도변화의 증감이 일정하다는 것을 나타낸다.

(1) Design1

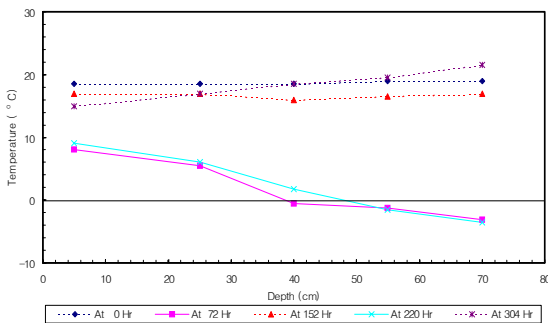


그림 7. Design1의 온도경사

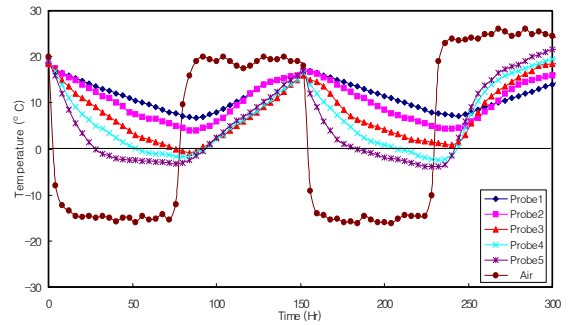


그림 8. Design1의 온도변화

(2) Design2*

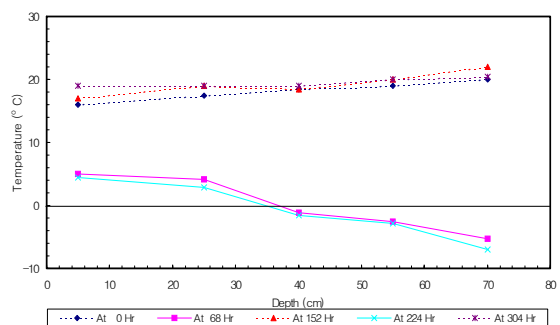


그림 9. Design2*의 온도경사

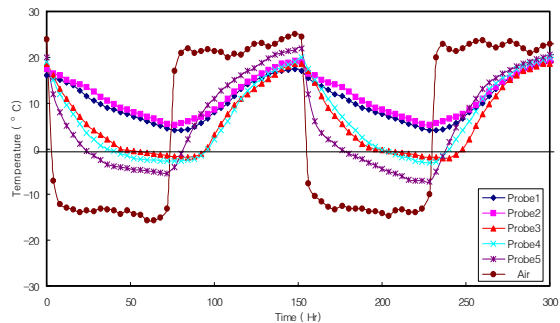


그림 10. Design2*의 온도변화

6.2 Design3과 Design4*

Design3과 Design4*는 균열과 동상현상이 모두 나타났으며 동결깊이는 Design4*가 Design3에 비해서 작은 것으로 나타났다. Design4*는 인공강우를 고려하더라도 Design3보다 동결에 대하여 안전하고 양생포와 PVC를 포설한 고화토층은 보온작용의 영향을 받아 동결깊이가 7cm 정도 감소되는 효과를 나타냈다.

표 9. 동결/융해 후 Design3과 Design4*의 영향인자

구 분	Design3		Design4*	
	Cycle1	Cycle2	Cycle1	Cycle2
동결 시 평균 대기온도 (°C)	-15	-15	-15	-15
Cycle 후 함수비 (%)	19.57	18.64	19.31	20.95
동결깊이 (cm)	22	22	15	15
동결/융해 후 Crack (cm)	길이	길이	길이	길이
동결/융해 후 Frost heave (mm)	3~4	3~4	4~5	4~5
동결 후 증발량 (Liters)	2.5	2.0	0.8	1.0

이것은 Design1과 Design2*의 온도경사와 비교해 볼 때 Design3과 Design4*의 온도변화가 증감하는 폭이 작은 것에 기인한다. 이러한 사실은 혹한기 매립지의 시공에서 기온의 급격한 하강으로 인하여 시공중지 상태에서 바닥층에 양생포와 PVC를 포설한다면 동결에 의한 바닥층의 동상과 균열을 최소화하는데 필요한 조치가 될 수 있다.

(1) Design3

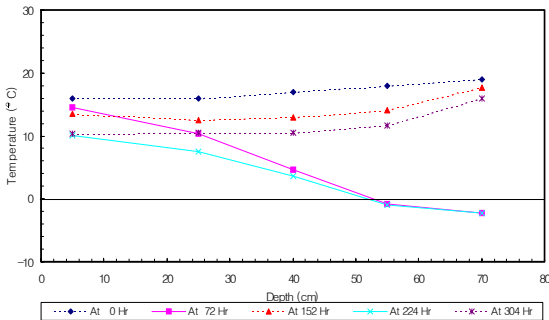


그림 11. Design3의 온도경사

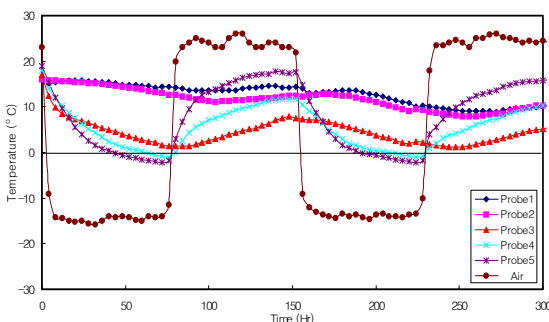


그림 12. Design3의 온도변화

(2) Design 4*

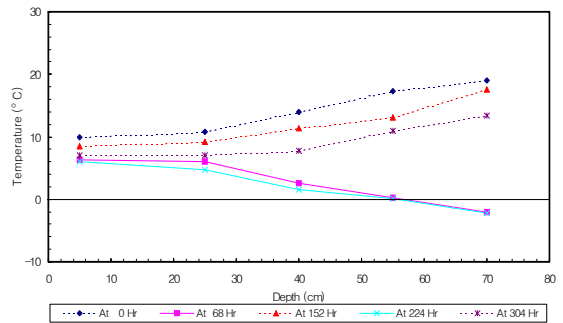


그림 13. Design4*의 온도경사

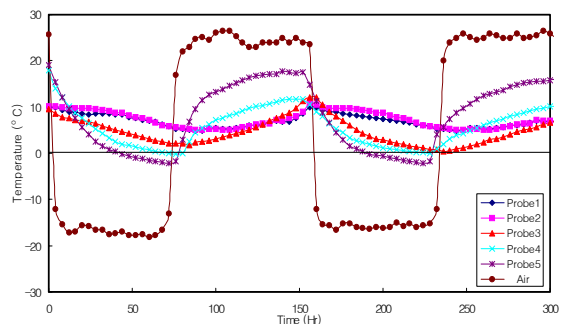


그림 14. Design4*의 온도변화

6.3 Design5~Design7

P_B층 위에 쇄석을 사용하여 침출수 집배수층 60 cm를 포설한 Design5는 고화처리층 전체에 대해서 동결에 전혀 영향을 미치지 않았고 그림 16과 같이 대기온도와 유사한 분포를 나타내고 있었다. 이것은 쇄석간의 공극이 커서 차가운 대기온도가 침투하는데 원활하여 온도변화와 온도경사가 대기온도의 경향과 거의 유사하게 나타났기 때문이다.

그래서 바닥층 전체에 대하여 동결/융해 반복횟수를 증가하더라도 동결이나 융해시 바닥층 전체의 동결깊이와 거동에 따른 영향인자의 변화가 거의 없었다. 침출수 집배수층 위에 Carbon black 처리한 직포를 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 부직포를 포설한다면 부직포에 작용하는 보온성에 의해 동결에 의한 동상

방지와 동상에 따른 바닥층의 균열을 최소화하는데 효과가 있는 것으로 나타났다.

표 10. 동결/융해 후 Design5~Design7의 영향인자

구 분	침출수 집배수층				
	Design5	Design6		Design7	
	Cycle1~5	Cycle1	Cycle2	Cycle1	Cycle2
동결 시 평균 대기온도(°C)	-17	-19	-19	-19	-19
동결깊이 (cm)	×	×	×	×	×

한편, 침출수 집배수층에 대하여 쇄석 대신 모래를 사용한 Design7은 바닥층의 동결깊이와 동상현상이 전혀 나타나지 않았다. 주목할 것은 Design5와 Design6에 비해서 동결속도가 현저하게 지연되는 것으로 나타났다.

(1) Design5

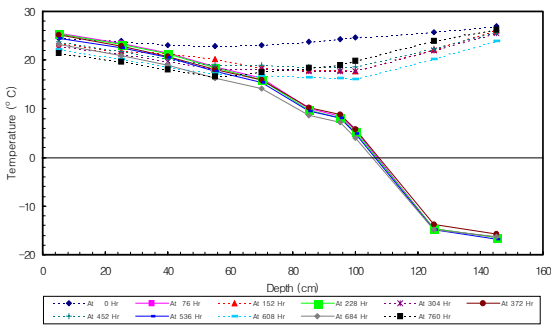


그림 15. Design5의 온도경사

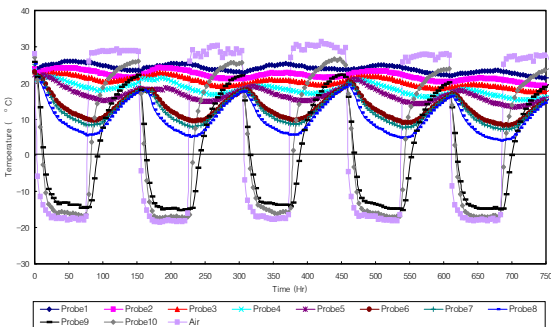


그림 16. Design5의 온도변화

(2) Design6

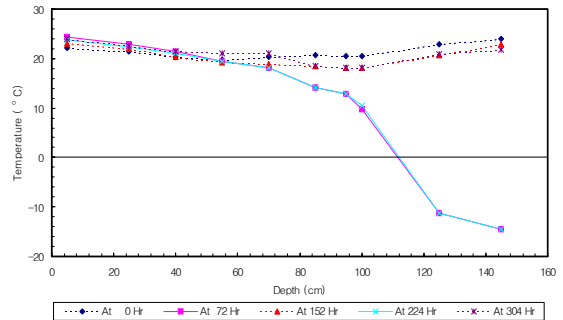


그림 17. Design6의 온도경사

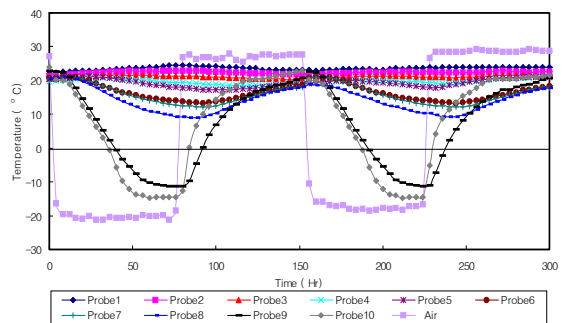


그림 18. Design6의 온도변화

(3) Design7

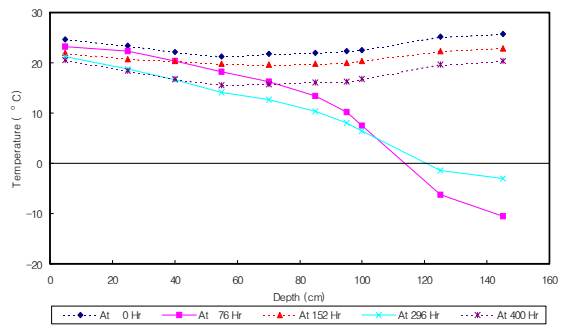


그림 19. Design7의 온도경사

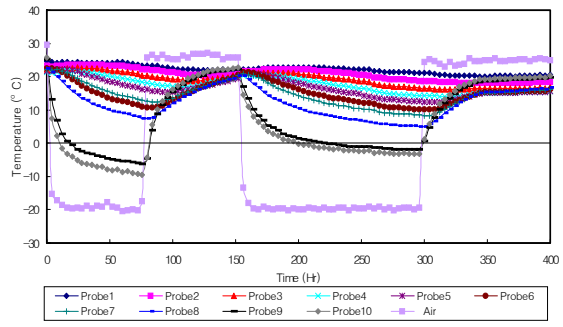


그림 20. Design7의 온도변화

7. 결론

본 연구는 동상방지를 위하여 실내에서 7가지 설계 및 현장모형 실험을 통한 동결깊이를 지배하는 인자로서 함수비, 다짐상태, 동결/융해 시간 등에 따른 바닥층의 동결깊이의 변화를 관찰하고 양생포, PVC, 부직포의 사용에 의한 동결깊이의 차이와 변화를 비교하였다.

- (1) 인공강우를 고려한 설계에서 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 부직포를 포설한 경우에는 침출수 집배수층을 쇠석만으로 포설한 설계 보다 바닥층 전체에 걸쳐서 약 2~6 °C 정도 온도가 상승하는 결과를 나타내었다. 이것은 양생포와 PVC를 포설하면 바닥층을 보호하고 보온효과가 발생하여 동결방지에 큰 영향을 주며 완성된 바닥층 상부에 Carbon black 처리한 부직포를 포설한다면 동결에 보다 안전한 효과를 기대할 수 있다.
- (3) 침출수 집배수층을 모래로 포설한 설계는 쇠석보다 바닥층의 평균온도가 더욱 높고 동결속도가 현저하게 지연되는 효과를 나타내고 있다.

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

Design2*에서는 동상현상에 의한 균열이 국부적으로 균열과 미소한 동상현상이 나타났으며 양생포와 PVC를 포설한 경우에도 강우조건에 관계없이 약간의 표면균열과 동상현상이 발생되었다. 동상에 의한 바닥층의 팽창은 지반내부와 바닥층의 표면에 균열을 일으키는 요인으로 작용하게 된다. 그렇지만 흙입자의 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 재다짐하는 것이 차수목적을 위해서 좋을 것이라고 본다.

(접수일자 : 2005년 8월 30일)

참 고 문 헌

1. 이 송, 김홍석, 이재영(1999), 폐기물 매립지 바닥층의 고화도 포설시 동결/융해 현상에 관한 연구. 한국폐기물학회, pp. 209~215.
2. 이 송, 김홍석, 정대석, 이재영(1999), 동결/융해 현상이 고화도로 포설된 폐기물 매립지 바닥층에 미치는 영향. 대한토목학회 추계 학술 발표회 논문집 II, pp. 465~468.
3. 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.
4. Carol J. Miller and Jai-Young Lee(1999), Response of Clay Liners to Extended Periods of Freezing. Engineering Geology, Vol. 51, pp. 291~302.
5. 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.
6. Jai-Young Lee(1994), Performance of Landfill Cover Systems in Cold Climates. Ph. D. Dissertation.

7. 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.
8. Nandakumaran Paruvakat, Ph. D., P. E., Gerald W. Sevick, P. E., Lawrence J.Buechel.(1990), Free-Thaw Effect on Landfill Clay Liners. Proceeding 13th Annual Madison Waste Conference, Univ of Wisconsin Madison, Madison, Wisconsin. Sep. 19-20, pp. 452~469.
9. 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.
10. Wong, L., and Haug, M.(1991), NCyclical closed-system freeze-thaw permeability testing of soil liner and cover material. Can. Geotech. J, Ottawa, Canada, 28(6), pp. 784~793.