

# 동결챔버내의 열 흐름에 관한 실험 및 수치해석적 연구

## A Experimental and Numerical Studies of Thermal Flow Motion in a Geothermal Chamber

송 원 근† 김 영 진\* 이 형 일\*\*  
Song, Weon Keun Kim, Young Chin Lee, Hyung Yil  
(논문접수일 : 2002년 9월 5일 ; 심사종료일 : 2003년 7월 25일)

### 요 지

강관이 매설되어 있는 폐쇄형 시스템에서 동결된 화강토의 온도분포에 관한 수치해석 및 실험적 연구가 수행되었다. 실험을 통해 측정된 부동수분량의 온도상관식을 제시하였으며, Lachenbruch의 열전도율 식을 사용하여 열전도율 측정값을 비교·분석하였다. 원형 단면 강관이 매설된 모형토조의 동결챔버를 제작하여 동결토의 온도를 측정하고 유한요소 수치해석을 수행하여 실험 결과와 비교하였다. 수치해석시 동결된 화강토의 잠열효과가 고려되었다.

**핵심용어** : 동결토, 폐쇄형 시스템, 유한요소법, 잠열효과

### Abstract

Numerical and experimental studies were conducted on the temperature distribution of a buried steel pipe and surrounding granite frozen soils in the closed system. The relationship between unfrozen water content and temperatures was analysed by laboratory test. The thermal conductivity measurements were made to compare the results with a formula presented by Lachenbruch. A steel container model that consists of a freezing chamber and a buried circular steel pipe was built for the laboratory temperature measurements. The time temperature records were measured experimentally, and those records were compared with numerical results obtained from FEM analysis in order to verify the feasibility. The latent heat effect on the granite frozen soils in the numerical study was considered.

**Keywords** : frozen soil, closed system, finite element approach, latent heat effect

### 1. 서 론

우리나라는 계절 동토지역으로서 겨울철의 온도저하로 인해 지표면의 낮은 온도가 지하로 침투해 흙에 포함된 수분을 동결시킴으로써 체적 팽창을 가져오고 결과적으로는 동상현상을 발생시킨다. 동상 원인을 구체적으로 살펴보면, 토립자 사이에 존재하는 간극수의 동결로 인한 부피 팽창이며 수분이동은 온도구배로 인해서 발생한다. 지금까지 동상에 관한 수많은 연구가 진행되었으나 흙의 종류, 재하 하중, 경계조건에 따른 온도, 동상량 및 동상력의 일반적인

함수는 밝혀진바 없다.

국내에는 상수도관, 가스관, 송유관 등 다양한 종류의 배관이 매설되어 있으며, 21세기 새로운 에너지 공급원으로 부상되고 있는 천연가스(LNG)배관의 경우 겨울철이 아니더라도 냉각된 파이프라인으로인해 지반 팽창이 유발된다. 이와 같은 현상이 매설배관의 수명에 미치는 영향을 예측하기 위해서는 지반의 동결특성(그림 1참조) 및 지반과 매설배관의 상호작용에 대한 연구가 절실히 필요하다.

여기서 동결토의 동상량과 동상력을 수치해석적으로 계

† 책임저자, 정회원 · 한국시설안전기술공단, 기술개발실, 과장  
전화: 031 910 4128; Fax: 031 910-4181  
E mail: song98@kistec.or.kr

\* 비회원 · 한국건설기술연구원, 토질 및 기초연구그룹, 수석연구원

\*\* 정회원 · 서강대학교, 기계공학과, 부교수

\* 이 논문에 대한 토문을 2003년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2004년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

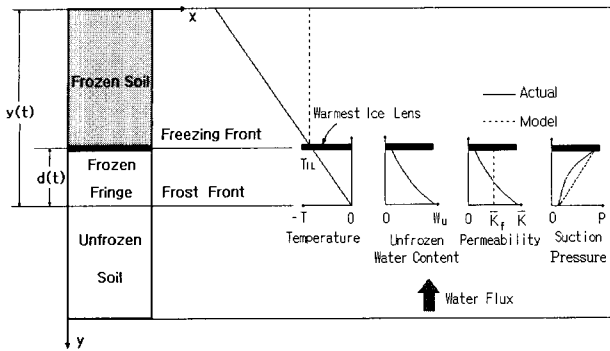


그림 1 지반의 동결특성 (Konrad와 Morgenstern<sup>1)</sup>)

산하기 위하여 온도분포 해석이 선행되어야 한다. 이를 위해 지금까지 다음의 3가지 개념의 모델이 제시되었다.

첫째, 지반의 동상현상은 SP(Segregation Potential) 모델이 정립되면서 이론적으로 발전하였다. Anderson과 Morgenstern<sup>2)</sup> Tsytoich<sup>3)</sup>에 의해서 동결토의 부동수분 특성이 규명되었으며 Dirksen과 Miller<sup>4)</sup> 그리고 Hoekstra<sup>5)</sup>에 의해서 얼음띠(Ice Lens) 밑 부분에서 발생하는 수분이동 현상이 규명되었다. 이와 같은 연구결과를 토대로 Miller<sup>6)</sup>는 동결전진층(Frost Front)보다 조금 위쪽에 위치하는 얼음띠(Ice Lens)의 간극수가 동결하여 팽창함으로써 동상이 발생한다는 사실을 밝혔다. 잠열효과는 온도구배의 함수인 수분의 빨아올림(Suction)현상에 의한 수분이동과 동결수반층(Frozen Fringe)의 간극수 동결로 인해 발생한다고 정의할 수 있다. 이때 얼음띠(Ice Lens)의 온도는 간극 크기, 재하되는 압력, 함수비 등과 관련이 있다. Loch와 Kay<sup>7)</sup>에 의해서 동결전진층(Frost Front)과 동결안정층(Freezing Front) 사이에 동결수반층(Frozen Fringe)가 존재한다는 사실이 밝혀졌고, 이와 같은 연구결과를 토대로 Hoekstra<sup>8)</sup> 그리고 Mageau와 Morgenstern<sup>9)</sup>는 수분의 빨아올림(Suction) 현상으로 얼음띠(Ice Lens)쪽으로 수분이 이동하나, 결과적으로는 투수계수가 급격히 작아져서 얼음띠(Ice Lens)가 수분의 이동을 더 이상 허용하지 않는다는 실험결과를 발표하였다. 둘째, Coupled Heat and Moisture Transfer 모델은 Harlan,<sup>10)</sup> Guymon과 Luthin,<sup>11)</sup> Kinoshita,<sup>12)</sup> Outcalt<sup>13)</sup> 등에 의해서 발전되어왔다. 시간  $t$  단계에서 비정상 에너지 지배방정식으로부터 간극수의 동결에 의한 잠열효과를 고려하여 온도분포를 정의한 후, 흙의 수분확산계수를 포함하는 수분확산 지배방정식으로부터 시간의 변화에 따라 수분으로부터 얼음으로 상변화를 반영하여 함수비의 재분포를 결정한다. 마지막으로, Zhang과 Osterkamp<sup>14)</sup>는 유효 열용량 모델을 통해 유한차분법을 사용하여 열확산계

수를 결정하기 위한 수치해석을 수행하였다.

열전도의 3차원 비선형의 문제로 SP 모델을 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS<sup>15)</sup>에 적용하기 위해서는 다음의 두 가지 점에 유의해야 한다.

- (1) 열전도해석시 시간  $t$  단계에서 수분이동속도는 온도구배에 비례하고 동결수반층(Frozen Fringe)의 두께는 온도구배에 반비례하는 특성을 갖는다. 따라서 잠열효과를 고려하기 위해서는 각각의 시간증분 단계마다 온도구배 변화에 따라 변화되는 동결수반층(Frozen Fringe)의 두께를 수치해석에 반영해야 한다. 이를 위해서 변화구간인 동결수반층(Frozen Fringe)에 Moving Boundary 조건을 적용해야 한다. 이는 동결수반층(Frozen Fringe)의 두께가 잠열 발생구간의 의미를 갖기 때문이다. 이때 유한요소망의 각 절점에서 온도를 얻을 수 있도록 동결수반층(Frozen Fringe)의 경계면을 요소의 절점과 일치시키면서 동결수반층(Frozen Fringe) 내부에서 계산된 단위체적당 발생하는 내부열량을 3차원 비정상 에너지 지배방정식에 반영해야 한다.
- (2) 각 시간증분 단계마다 간극수 동결과 수분이동에 의한 영향을 단위체적당 발생하는 내부열량의 개념으로 계산하여 3차원 비정상 에너지 지배방정식에 반영한다. 이를 위해서는 ABAQUS<sup>15)</sup> User Subroutine을 작성해야 한다.

폐쇄형 시스템의 화강토의 경우 점성토와는 달리 상대적으로 모세관 현상에 의한 수분이동효과는 매우 작으며 개방형 시스템에 비하면 모세관 효과는 더욱 작아진다. 따라서 본 연구는 폐쇄형 시스템의 특성을 반영하여, 흙의 함수비가 일정하게 주어진 상태에서 유효열용량 모델을 사용한 비선형 3차원 비정상 열전도해석 문제로 가정하였다. 이때 Allen과 Maxwell<sup>16)</sup>에 의해 제안된 잠열효과가 동결수반층(Frozen Fringe)에 유효열용량의 개념으로 고려되었다.

본 연구는 전국토의 70%를 차지하는 화강 풍화토(이하 화강토 : 파주시 통일동산 채취)에 대해서 흙 시료의 기본특성, 다짐특성, 동결토의 부동수분량, 열전도율 및 온도 측정 실험을 실시하였다. 실험 결과를 토대로 동결토와 매설배관을 3차원유한요소 모델링한 후, ABAQUS<sup>15)</sup> 상용 유한요소 프로그램을 사용하여 동결챔버 내부의 모형토조에 대해 온도분포해석을 수행하고 이를 실험결과와 비교·분석하였다.

## 2. 실험

### 2.1 흙 시료의 기본특성

흙 시료의 입도분석 실험과 소성한계 실험을 각각 KS F 2302, KS F 2304에 준해 수행하였으며 비중시험은 KS F 2308에 의해서 이루어졌다. 실험결과는 그림 2 및 표 1에 요약되어 있다.

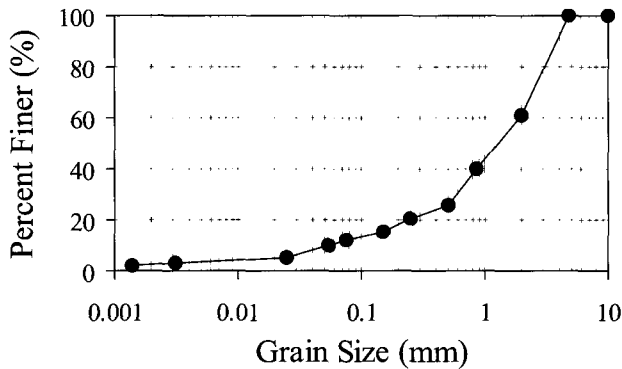


그림 2 화강토 흙 시료의 입도분포 곡선

표 1 화강토 흙 시료의 물리적 성질

종 류	소성지수	균등계수	곡률계수	비 중	USCS
화강토	N.P.	34.55	3.44	2.67	SM

여기서, N.P.는 비소성, USCS는 통일분류법 그리고 SM은 실트질 모래를 의미한다.

다짐시험은 KS F 2312의 A 다짐방법을 선정하여 실시하였다. 실험결과 화강토의 최대건조 단위중량은 1,920 (kg/m<sup>3</sup>)이고 최적함수비는 13.2%이다.

### 2.2 부동수분량

흙이 0°C 이하에서 동결하여도 얼지 않고 남아있는 수분이 존재하며 이를 부동수분이라고 한다. 부동수분량에 따라 동토의 투수계수, 강도, 열전도율 등이 달라지므로 부동수분량을 정확히 측정하는 것은 동토의 특성을 파악하는데 매우 중요한 의미를 갖는다.

측정원리는 부동수분량 측정장비인 TDR을 이용하여 Probe를 동결토 내에 삽입하고 시험기에서 전자파를 발생시켜 Probe의 길이를 따라 왕복하는 전자파의 속도를 계산함으로써 흙의 유전율을 측정하고 동결토를 구성하는 토립자, 얼음, 간극수, 공기 등의 유전율이 다른 특성을 이용하여 체적함수비 즉 부동수분량을 계산한다. 본 연구에서는 온도 변화에 따른 부동수분량을 측정하기 위해 직경

0.1(m), 높이 0.15(m)되는 몰드에 흙 시료를 넣고 최대 건조단위중량과 최적함수비 상태에서 공시체를 제작한 후 포화장비를 사용하여 인위적으로 완전 포화시킨다. 실험 결과를 토대로 Feldman<sup>17)</sup> 등은 온도와 부동수분량과의 상관식(1)을 제시하였다.

$$W_u = 100 \times \left\{ A_1 + \frac{A_2}{(A_3 - T)} \right\} \quad (1)$$

윗식의 A1, A2, A3는 아래식과 같이 정의된다.

$$A_1 = \frac{(W_{u,2} - W_{u,1})(W_{u,3}T_{u,3} - W_{u,1}T_{u,1}) - (W_{u,3} - W_{u,1})(W_{u,2}T_{u,2} - W_{u,1}T_{u,1})}{(W_{u,2} - W_{u,1})(T_{u,3} - T_{u,1}) - (W_{u,3} - W_{u,1})(T_{u,2} - T_{u,1})}$$

$$A_3 = \frac{(W_{u,2}T_{u,2} - W_{u,1}T_{u,1})(T_{u,3} - T_{u,1}) - (W_{u,3}T_{u,3} - W_{u,1}T_{u,1})(T_{u,2} - T_{u,1})}{(W_{u,2} - W_{u,1})(T_{u,3} - T_{u,1}) - (W_{u,3} - W_{u,1})(T_{u,2} - T_{u,1})}$$

$$A_2 = A_3 W_{u,1} - T_1 W_{u,1} + A_1 T_{u,1} - A_1 A_3$$

여기서, 아래첨자 1, 2, 3은 흙의 온도변화 범위내에서 3번의 온도측정과 이에 상응하는 부동수분량의 측정이 있었음을 의미한다. 본문 중 사용된 모든 기호는 부록 A. 기호설명을 참조한다.

### 2.3 열전도율

Kemtherm QTM-D3 측정장비를 사용하여 Probe 방법으로 동결토의 열전도 실험을 수행하였다. 흙 시료를 24시간 노건조 시킨 후 직경 0.1(m), 높이 0.15(m)되는 몰드에 넣어 최대건조단위중량과 최적함수비 상태에서 공시체를 제작하고 내부에 온도센서를 삽입하여 동상 실험기에 설치하였다. 공시체 내부 온도가 일정 온도에 도달하면 QTM Probe를 공시체 표면에 올려놓고 열전도율을 5회 반복 측정하여, 그 평균값을 사용하였다. Lachenbruch<sup>18)</sup>가 제시한 열전도율 식(2)으로부터 얻은 해와 비교하여 실험값들의 신뢰성을 검증하였다.

$$k_{s,f} = k_s^{(1-n)} k_{ice}^n (k_w/k_{ice})^{W_u/100} \quad (2)$$

표 2 재료의 열전도율(De Vrice<sup>19)</sup>)

물 질	열전도율 (W/m°C)	측정온도 (°C)
화강토	3.38	0 <
점성토	3.07	0 <
물	0.6	10
얼음	2.4	0
강(강관 재료)	64	0 <

### 2.4 열용량

흙에 있어서 열용량의 크기는 토립자, 물, 공기 및 그 밖의 미소 광물의 양과 밀접한 관련이 있다. 여기서 공기 및 미소 광물의 영향은 매우 작다는 가정하에 토립자 및 물 또는 얼음으로 상변화를 일으킨 동결수분의 영향을 고려하여 흙의 평균 유효열용량을 미동결토 및 동결토에 대해서 다음과 같이 정의하였다.

$$C_{s,u}^* = \frac{\gamma_{s,d}}{\gamma_w} (0.16 + 1.0w) C_w \quad (3a)$$

$$C_{s,f}^* = \frac{\gamma_{s,d}}{\gamma_w} (0.16 + 0.5w) C_w \quad (3b)$$

### 2.5 동결챔버 내 온도분포 측정

동결토의 온도분포 실험을 수행하기 위해서는 동결챔버 제작이 필수적이다. 동결실험 모형은 크게 폐쇄형과 개방형 시스템으로 나눌 수 있다. 폐쇄형 시스템은 흙 시료의 함수비를 일정하게 유지하고 물의 공급을 차단하는 방식이며 개방형 시스템은 모세관 현상으로 물이 지속적으로 공급되는 방식이다. 본 연구는 폐쇄형 시스템에서 온도분포 측정 실험과 수치해석을 수행하였다. 폐쇄형 동결챔버의

크기는 1.8×2.4×1.8(m)로 1.4×1.1×1.5(m) 크기의 모형토조와 상재하중 가압부를 내부에 갖추고 있으며 4개의 냉각모터와 5개의 온도센서로 구성되었다. 실내온도가 -30~30℃까지 유지되도록 제작된 동결챔버는 실내온도가 외부로 전해져 기록된다. 모형토조는 동결토의 팽창력을 지탱하기 위해서 뼈대에 얇은 강판을 연결하여 제작되었고 내부 벽면과 바닥면은 스티로폼으로 단열하여 화강토로 채워지고 직경 0.16(m), 두께 0.005(m)인 원형단면에 길이 1.0(m)인 강관이 모형토조 벽체에 고정되어 매설되었다. 온도분포 측정을 위한 화강토 시료의 함수비는 10, 20% 이다.

## 3. 수치해석

### 3.1 기본가정

수치해석을 수행하기 위해서 다음의 몇 가지 가정을 도입하였다. 첫째, 화강토와 강관의 재질은 등방성 재료이다. 둘째, 실험에 의해 측정된 열전달은 대류, 복사, 전도 및 수분의 이동, 잠열 등에 의한 것이다. 그러나 동결챔버와 모형토조 사이의 대류 및 복사와, 흙 속에 매설된 강관 내부에 존재하는 공기의 양이 흙의 양보다 상대적으로 매우 적으므로 흙 내부에서의 대류 및 복사에 의한 열전달 효과는 고려하지 않는다. 셋째, 화강토의 수분이동에 의한 잠열

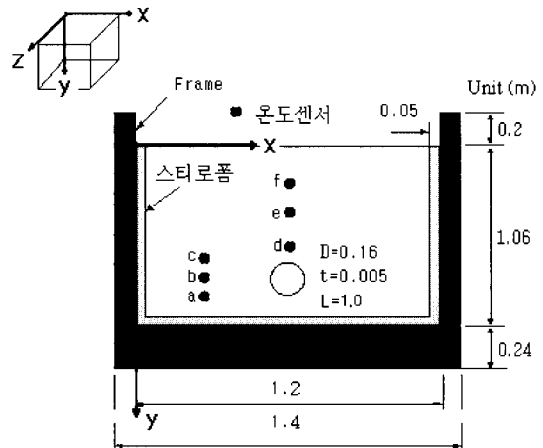
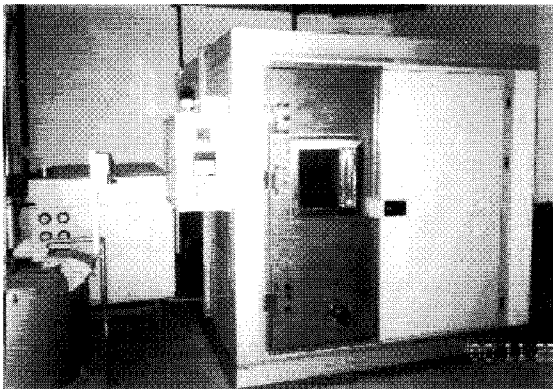


그림 3 폐쇄형 동결챔버 및 내부 모형토조의 온도센서 배치도

표 3 모형토조 온도센서의 매설위치 좌표값

온도 센서	매 설 위 치 (m)			온도 센서	매 설 위 치 (m)		
	x축	y축	z축		x축	y축	z축
a	0.300	0.900	0.500	c	0.550	0.400	0.500
b	0.300	0.800	0.500	f	0.550	0.200	0.500
c	0.300	0.700	0.500	강관	0.550	0.780	0.0~1.0
d	0.550	0.600	0.500				

효과는 간극수의 동결에 의한 잠열효과에 비해 매우 작으므로 고려하지 않는다. 넷째, 화강토의 부동수분량은 0~ -0.1℃에서 급격히 감소하고 -0.1℃ 이하에서는 그 변화가 상대적으로 매우 적어 흙의 동결 이후에 간극수 동결에 의한 잠열 효과는 고려하지 않는다. 마지막으로, 흙 동결시 단일한 얼음띠(Ice Lens)가 발생되어 동결수반층(Frozen Fringe)이 형성되고 그 면은  $x-z$  단면과 평행하게 발생하여  $y$ 축 방향으로 동결침투속도를 갖으며  $x$ 와  $z$ 축 방향으로의 동결침투속도는 0이다. 이와 같은 가정을 바탕으로 수학적 모델을 완성하고 모형토조내 열흐름에 대해 수치해석적 연구를 수행하였다.

### 3.2 수학적 모델링

$x, y, z$  방향으로 각각  $dx, dy, dz$ 를 세변의 크기로 갖는 정육면체 미분요소에 대해 비정상 3차원 에너지 지배방정식을 구성하면 다음과 같다. 식(4)~(7)에서  $i$ 는  $s$  또는  $p$ 이다.

$$\frac{\partial Q_{i,x}}{\partial x} dx dy dz + \frac{\partial Q_{i,y}}{\partial y} dx dy dz + \frac{\partial Q_{i,z}}{\partial z} dx dy dz + \frac{dU_i}{dt} = q_s \cdot dx dy dz \quad (4)$$

3.1절의 첫 번째 기본가정에 따라 흙과 강관 재료의 열전도율은 삼축 방향으로 동일하다고 가정하며 식(5)에서 (-) 부호는 열량의 소모를 의미한다.

$$Q_{i,x} = -\frac{\partial T_i}{\partial x}; \quad Q_{i,y} = -\frac{\partial T_i}{\partial y};$$

$$Q_{i,z} = -\frac{\partial T_i}{\partial z} \quad (5)$$

$$\frac{dU_i}{dt} = C_i^* \frac{dT_i}{dt} dx dy dz \quad (6)$$

식(4)에 식들 (3)-(6)을 대입, 정리하고 열전도율과 열용량에 평균값을 사용하면  $\partial k_i / \partial T = 0$  이므로 등방성 재료에 대해 3차원 비정상 에너지 지배방정식은 최종적으로 식(7)과 같이 정의할 수 있다.

$$k_i^* \left( \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} \right) + q_s = C_i^* \frac{\partial T_i}{\partial t} \quad (7)$$

얼음띠의 일부(Warmest Ice Lens)에는 부동수분이 존

재하며, 이는 0℃ 온도를 나타내는 동결진전층(Frost Front)의 위치와 진전 속도를 결정하게 된다. 동결수반층(Frozen Fringe)에서 동상 메카니즘의 물리적 현상을 정확히 반영하기 위해 평균 유효열용량에 동결수반층(Frozen Fringe) 간극수의 동결에 의한 잠열효과를 식(8)과 같이 반영할 수 있다.

$$C_{s,ff}^* = C_{s,f}^* + L_u \frac{\rho_{ice}}{\rho_w} \frac{\partial W_u}{\partial T} \quad (8)$$

식(7)의 양변에 변분  $\delta T$ 를 곱하고 요소 영역에 대해 적분하여 정리하면 식(9)와 같이 전체 구조에 대한 평형방정식을 구할 수 있다. 여기서  $T$ 는 모든 절점에서의 온도벡터이다.

$$C \frac{\partial T}{\partial t} + K T = R_q \quad (9)$$

여기서 전체좌표계에 대해서 열용량 행렬, 열전도 행렬, 열생성 행렬은 각각 식(10), (11) 그리고 (12)와 같다. 이 때,  $N$ 은 유한요소내 온도와 절점온도를 관련짓는 형상함수이며  $n$ 은 유한요소모델에서의 요소 갯수이다. 식(10)~(13)에서  $i$ 는  $s$  그리고  $p$ 이다.

$$C(t) = \sum_{k=1}^n \int_{V(e)} N_i^T C_i^* N_i dV(e) \quad (10)$$

$$K(t) = \sum_{k=1}^n \int_{V(e)} B_i^T k_i B_i dV(e) \quad (11)$$

$$R_q(t) = \sum_{k=1}^n \int_{V(e)} N_s^T q_s dV(e) \quad (12)$$

$$B_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_i}{\partial x} \\ \frac{\partial T_i}{\partial y} \\ \frac{\partial T_i}{\partial z} \end{bmatrix}; \quad x_i = \begin{bmatrix} k_i^* & 0 & 0 \\ 0 & k_i^* & 0 \\ 0 & 0 & k_i^* \end{bmatrix} \quad (13)$$

### 3.3 유한요소 모델링

ABAQUS<sup>15)</sup>를 이용하여 유한요소모델링을 하였으며 절점수 약 26,400개, 3차원 8절점 감차적분요소(C3D8R; ABAQUS Library, 2001<sup>15)</sup>) 약 22,900개가 사용되었다. 스티로폼을 포함한 전체 모델의 치수는 AB×AD×

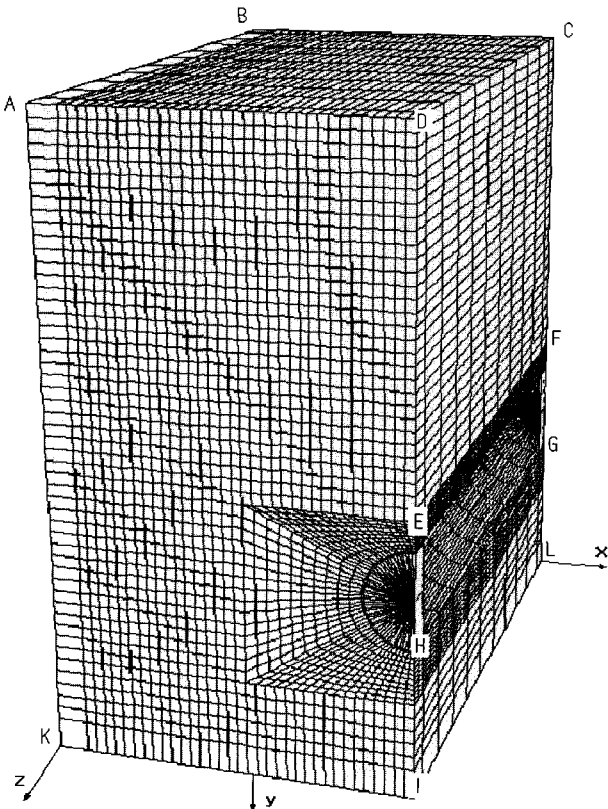


그림 4 홈 및 매설배관의 유한요소모델

$AI=1.0 \times 0.55 \times 1.06(m^3)$ 이며 경계조건은 ABCD, CDEF, GHIL 단면을 제외한 모든 단면을 완전 단열조건으로 가정하고 ABCD 단면에서는 일정 온도 경계조건으로 갖는다. 본 수치해석 모델은 기하학적 형태와 경계조건이  $y-z$  중앙 단면에 대해 좌우대칭 형태를 지니므로 그림 4같이 반만 모델링하였다.

### 3.4 해석 알고리즘

시간  $t$  단계에서 수치해석을 위한 알고리즘은 다음과 같다.

First Step : TIL을 일정한 온도로 가정한 후 동결수반층(Frozen Fringe)이 발생할 때까지 잠열의 효과를 배제하고 온도분포 해석을 수행한다.

Second Step : 동결수반층(Frozen Fringe)이 발생하면 이에 대해 식(8)의 간극수 동결에 의한 잠열효과를 식(7)에 반영하여 얻어진 열평형방정식(9)에 의해서 열전도 해석을 수행함으로써 연속적으로 온도분포를 얻는다. 이때 동결전진층(Frost Front)의 위치가 2차로 결정된다. 미동결토의 경우 잠열이 발생하지 않으며 동결토로 전이된 경우 3.1절의 가정(4)에 의해 잠열의 효과는 고려되지 않는

다. 강관이 매설되지 않은 지점의 열전도 해석시에는 이와 관련된 항이 식(7)에서 제외된다. 시간이  $\Delta t$  만큼 증가하여  $t+\Delta t$  단계일 때 Second Step을 반복함으로써 온도 침투방향으로 전진하는 동결수반층(Frozen Fringe)을 갖는 동결토에 대해 최종 온도분포를 얻을 수 있다.

### 4. 실험결과 및 해석 예의 고찰

그림 5는 측정된 온도 변화별 부동수분량과 이를 근거로 한 Feldman의 상관식으로부터 얻은 결과치를 비교하였으며 그림 6에는 열전도를 실험결과와 Lachenbruch의 제안식으로부터 얻은 값들이 비교되어 있다. Probe 저면에 알고 있는 열전도를 값을 갖는 재료를 부착한 후, 표면에 가열선과 열전대를 배치하여 Probe를 공시체 표면에 올려 놓고 열전도율을 측정할 결과 최대 오차율은  $-10^\circ C$ 에서 약

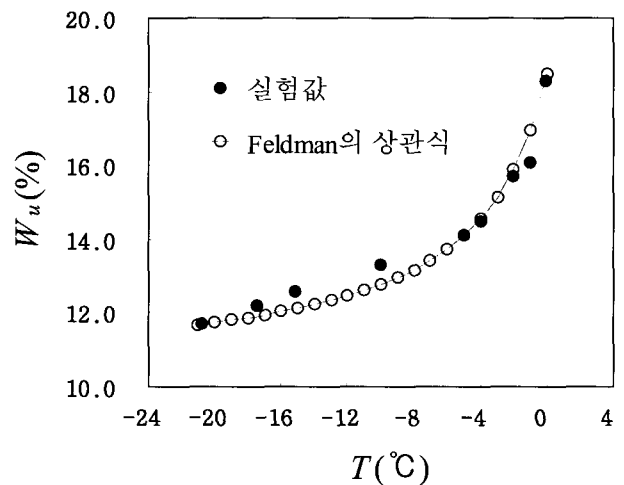


그림 5 화강토의 온도변화별 부동수분량

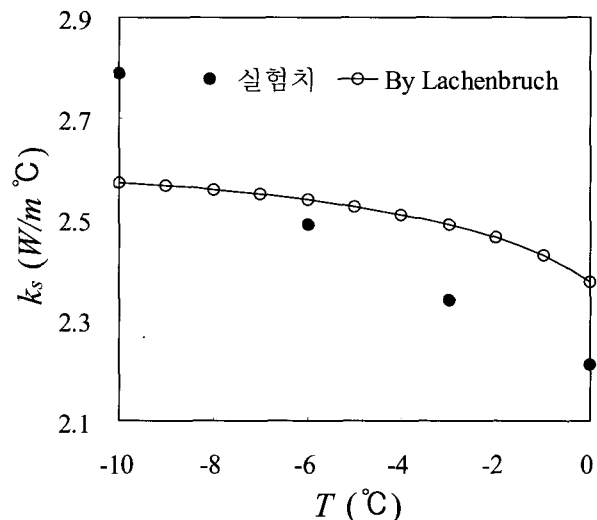
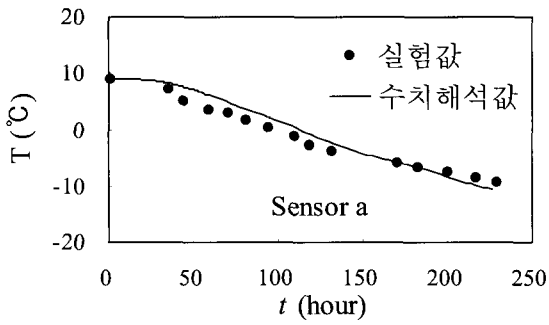
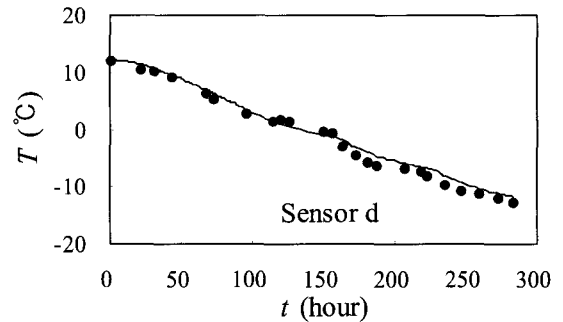
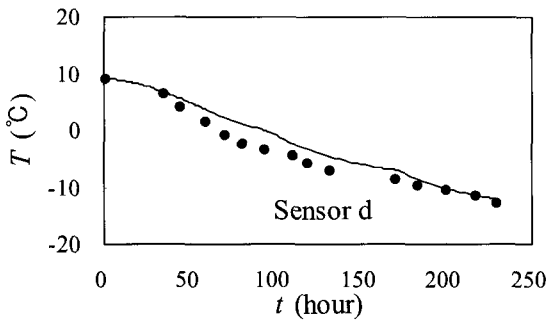
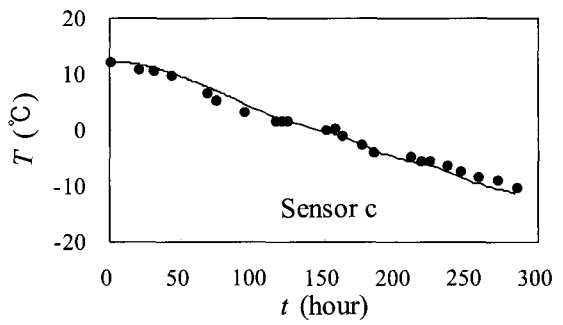
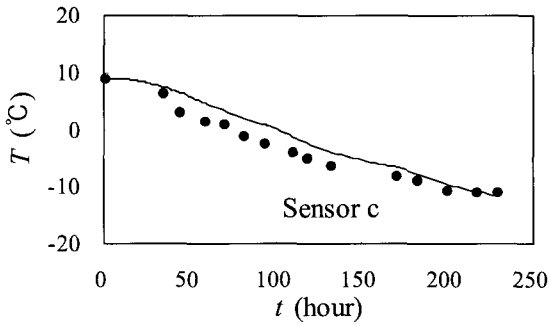
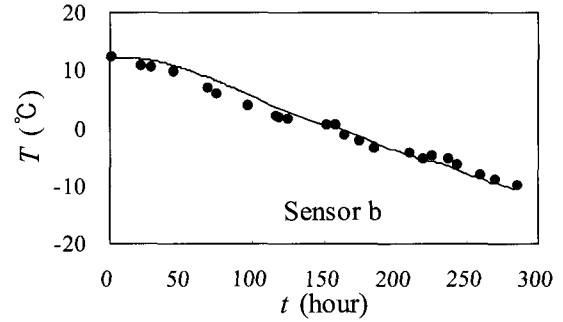
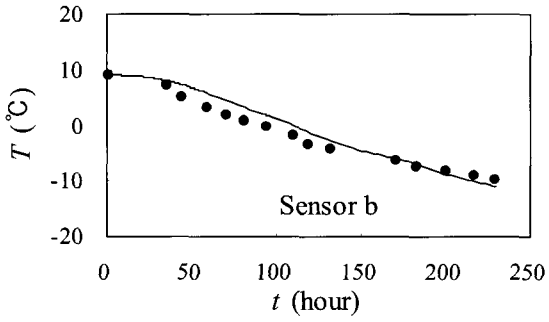
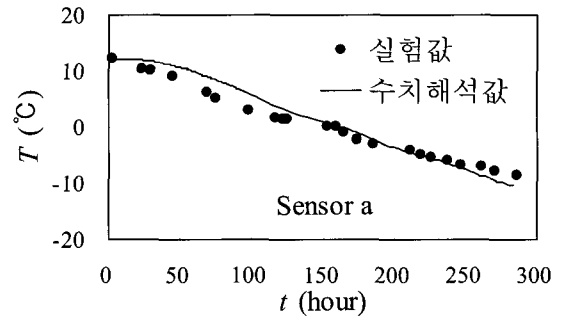
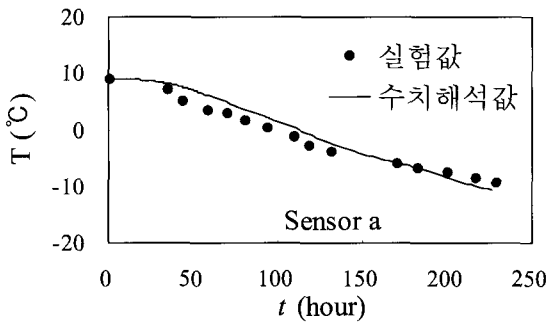
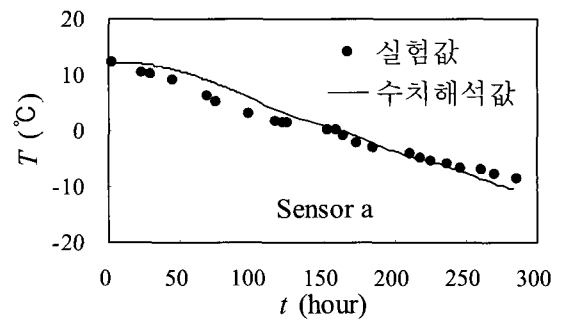


그림 6 화강토의 열전도율 실험값과 계산값의 비교

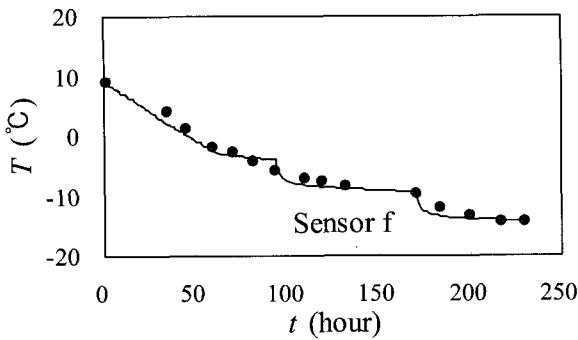


함수비 10 %

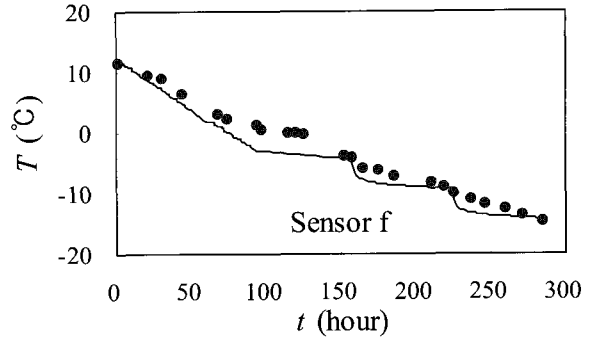


함수비 20 %

그림 7 폐쇄형 시스템에서 동결된 화강토의 온도분포



함수비 10 %



함수비 20 %

그림 7 폐쇄형 시스템에서 동결된 화강토의 온도분포 (계속)

7.8%로 나타났다. 본 과제와 같이 흙으로 만들어진 공시체의 경우 표면이 비교적 거칠어 가열선이 공시체 표면에 완전 밀착되지 않는다. 이 경우, 열손실이 발생하며 가열선과 토립자 사이의 공기 영향으로 고체내 열전도와 고체 및 유체사이의 열전달 현상이 동시에 발생하여 이론적 예측값과 차이가 발생한 것으로 판단된다.

화강토의 함수비가 각각 10과 20%일 때 온도측정 및 열평형방정식(9)을 통해 수행한 수치해석 결과는 그림 7과 같으며 화강토의 함수비가 10%일 때 얻은 실험치중 온도 센서 c의 측정값은 온도센서의 오작동으로 신뢰할 수 없는 값을 나타내고 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 폐쇄형 시스템에서 강관이 매설되어있는 동결 화강토의 온도분포에 관한 수치해석 및 실험적 연구를 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 실험을 통해 동결된 화강토의 부동수분량을 측정하고 이를 온도와의 상관식으로 제시하였다.
- (2) 실험을 통해 동결된 화강토의 열전도율을 측정하고 그 결과를 Lachenbruch에 의해 제안된 부동수분량의 함수인 열전도율 식을 사용하여 검증하였다.
- (3) 동결모형을 폐쇄형 시스템으로 가정할 수 있을 경우 화강토에 대해 일정한 함수비를 사용하고 열전도율과 열용량 값을 평균값으로 취하여 동결도, 동결수반층(Frozen Fringe), 미동결도 부분으로 세분화한 후 유효 열용량 개념을 통해 수치해석을 수행하였다. 이때 동결수반층(Frozen Fringe)의 간극수 동결에 의한 잠열 효과를 고려하였다.
- (4) 수치해석 결과, 폐쇄형 시스템 동결챔버내에서 주어진 온도는  $-5^{\circ}\text{C} : 94\text{시간}$ ,  $-10^{\circ}\text{C} : 76\text{시간}$ ,  $-15^{\circ}\text{C} : 60\text{시}$

간이며 동결안정층(Freezing Front)의 온도를  $-0.1^{\circ}\text{C}$ 로 가정하면 얻어진 온도분포의 수치해석값과 실험값이 일치하는 경향을 보였다.

- (5) 현장에서 지중에 매설된 파이프라인의 사용성 및 수명 평가시 필요한 지반의 동상력을 계산하기 위한 선행연구로써 향후 다음과 같은 연구가 진행되어야 한다. 첫째, 동결지반의 물리적인 현상을 보다 정확히 파악하여 수치해석에 반영하기 위해서는 점성토의 경우 모세관 현상에 의한 수분의 빨아올림(Suction) 현상이 영향이 충분히 고려되어야 하며 점성토 보다 토립자가 비교적 큰 경우 크리프(Creep)의 영향이 큰 것으로 연구결과가 보고된 바 국내 풍화 화강토의 경우 크리프(Creep)에 의한 지반의 변형을 추가적으로 고려해야 할 것으로 판단된다. 둘째, 본 논문의 경우 지하수위의 위치가 지중에 동결심도보다 매우 낮아 지하수위의 영향을 받지 않는다는 가정하에 지반을 폐쇄형 시스템으로 설정하여 연구를 진행하였다. 그러나 지하수위의 위치가 동결심도에 매우 근접하여 수분의 빨아올림(Suction) 현상의 효과에 의한 수분이동 현상이 지속적으로 발생하면 시간의 흐름에 따라 초기 함수비의 적용이 불가능하다. 따라서 Coupled Heat and Moisture Transfer 모델과 Segregation Potential 모델의 적절한 적용이 요구된다. 셋째, 지반의 동상력을 실험을 통해 측정된 후 그 결과를 토대로 수치해석을 수행하여 지반의 열팽창계수를 온도 및 흙의 함수비의 함수로 정의하고자 한다. 끝으로, 현장에서 지표면의 온도변화에 따라 이에 상응하는 열팽창계수에 의해 발생하는 동상력을 저주기 피로하중으로 재하하고 그 밖의 하중조건을 사용하여 매설 파이프라인의 피로수명을 평가함으로써 사용성 평가를 수행하고자 한다.



부록 A. 기호설명

기호(단위)	설 명	기호(단위)	설 명
$C(J/m\ ^\circ C)$	열용량	$r(kg/m^3)$	단위중량
$C^*(J/m\ ^\circ C)$	평균 유효열용량		
$\frac{dU}{dt}(J/s)$	내부에너지 변화율	아래첨자 및 윗첨자	
$k(W/m\ ^\circ C)$	열전도율	$d$	건조
$k^*(W/m\ ^\circ C)$	평균 열전도율	$f$	동결(토)
$L(J/m)$	잠열	$ff$	동결수반층(Frozen Fringe)
$Q(W)$	전체 열유동	$ice$	얼음
$q(W/m)$	단위 체적당 발생하는 내부열량	$IL$	얼음띠 (Ice Lens)
$t(hour)$	시간	$s$	흙
$T(^\circ C)$	온도	$p$	매설강관
$W(\%)$	수분량	$u$	미동결 (토) 또는 부동수분
$w(\%)$	함수비	$w$	수분 (물)
$x, y, z$	$x, y, z$ 축	$n$	흙의 간극률

참 고 문 헌

- Konrad, J. M., and Morgenstern, N. R., "Frost Heave Prediction of Chilled Pipelines Buried in Unfrozen Soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.21, 1984, pp.100~115
- Anderson, D. H., and Morgenstern, N. R., "Physics, Chemistry and Mechanics of Frozen Ground", *Proceedings, 2nd International Conference on Permafrost*, Yakutsk, U.S.S.R., 1973, pp.257~288
- Tsytoovich, N. A., *The Mechanics of Frozen Ground*, McGraw-Hill Book Company, New York, NY, 1975
- Dirksen, C., and Miller, R. D. "Closed-System Freezing of Unsaturated Soil", *Soil Science Society of America Proceedings*, Vol.30, 1966, pp.168~173
- Hoekstra, P., "Moisture Movement in Soils under Temperature Gradients with the Cold Side Temperature below Freezing", *Water Resources Research*, Vol.2, 1966, pp.241~250
- Miller, R. D., "Freezing and Heaving of Saturated and Unsaturated Soils", *Highway Research Record*, No.393, 1972, pp.1~11
- Loch, J. P. G., and Kay, B. D., "Water Redistribution in Partially Frozen, Saturated Silt under Several Temperature Gradients and Overburden Loads", *Soil Science Society of American Journal*, Vol.42, No.3, 1978, pp.400~406.
- Hoekstra, P., "Water Movement and Freezing Pressures", *Soil Science Society of America Proceedings*, Vol.33, 1969, pp.512~518
- Mageau, D., and Morgenstern, N. R., "Observations on Moisture Migration in Frozen Soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.17, 1979, pp.54~60
- Harlan, R. L., "Analysis of Coupled Heat-Fluid Transport in Partially Frozen Soil", *Water Resources Research*, Vol.9, No.5, 1973, pp.1314~1323
- Guymon, G., and Luthin, J. N., "A Coupled Heat and Moisture Transport Model for Arctic Soils", *Water Resources Research*, Vol.10, No.5, 1974, pp.995~1003
- Kinosita, S., "Soil-Water Movement and Heat Flux in Freezing Ground", *Proceedings of Conference on Soil Water Problems in Cold Regions*, Calgary, Alta., May, 1975, pp.6~7
- Outcalt, S., "A Numerical Model of Ice Lensing in Freezing Soils", *Proceedings, 2nd Conference on Soil Water Problems in Cold Regions*, Edmonton, Alta., Sept., 1976, pp.1~2

14. Zhang, T. and Osterkamp, T. E., "Considerations in Determining Thermal Diffusivity from Temperature Time Series using Finite Difference Methods", *Cold Regions Science and Technology*, Vol.23, 1995, pp.333~341
15. ABAQUS *User's Manual*, 2001, Version 6.1, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, RI
16. Allen, H. S., and Maxwell, R. S., *A Textbook of Heat*, The MacMillan Co., London, U. K. 1959, p.123
17. Feldman, G. M., *The Calculation Method of the Temperature Regime for the Permafrost Ground*, Isdatelstvo (Nauka), 1973, p.254
18. Lachenbruch, A. H., Sass, J. H., Marshall. B. V., and Moses, T. H. Jr., "Permafrost, Heat Flow, and the Geothermal Regime at Prudhoe Bay, Alaska", *J. Geophys. Res.*, Vol.87(B11), 1982, pp.9301~9316
19. 서상열, "다공질 암반토의 동상특성에 관한 실험적 연구", 국민대학교 토목공학과 박사학위논문, 2000