

포화 사질토 뒷채움재의 비배수 동결에 의한 매설 강관의 거동 - 실험 모형실험 연구 -

Effects of Freezing a Backfill Material under Undrained Condition on a Buried Pipe

강재모 ¹	Kang, Jae-Mo	이장근 ²	Lee, Jang-Guen
김학승 ³	Kim, Hak-Seung	이상윤 ⁴	Lee, Sang-Yoon
유병현 ⁵	Ryu, Byung-Hyun	조남준 ⁶	Cho, Nam-Jun

Abstract

Frost heaving and thawing settlement cause unexpected stress around buried pipelines, which results in deformation and permanent damage. A large scale laboratory test has been performed to observe deformation, stress, and temperature of a buried pipe during atmospheric temperature changes. From the experimental results, the stress concentrated around the buried pipe is inevitable and deformation is caused by the frost heaving. Even though backfill materials are sandy soils which are normally assumed to be non frost susceptible, it is revealed that frost damage can happen due to drainage condition, the level of ground water table, and water content.

요지

동절기에 지반에 매설된 상수도관은 지반의 동결 용해로 인해 과대한 지반 응력을 받게 되고, 이러한 현상이 겨울철 상수도관의 파괴 또는 변형에 많은 영향을 끼친다. 본 논문에서는 실험 모형을 통해 외부 온도 변화에 따른 매설관 주변 지반 내 온도거동과 매설관의 변위 및 응력거동을 확인하였으며, 지반이 동결됨에 따라 매설관 주변에 응력이 집중되고 동상이 발생하는 것을 확인하였다. 또한, 실험에 사용된 시료가 비동상성 시료인 사질토임에도 불구하고 함수비 조건과 배수조건에 따라 동상현상이 나타나는 것을 발견하였으며, 본 논문을 통해 매설관의 배딩 (bedding)과 뒷채움재를 비동상 시료로 치환하더라도, 주변 지반의 배수상태, 지하수위, 함수비 등에 따라 동상에 대한 별도의 대책을 세워야 함을 제시하고자 하였다.

Keywords : Frost heaving, Frost susceptibility, Buried pipe, Backfill, Drainage

1 정회원, 한국건설기술연구원 전임연구원 (Member, Researcher, Korea Institute of Construction Technology)

2 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology, Tel: +82-31-290-0094, Fax: +82-31-290-0211, jlee@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

3 정회원, 국민대학교 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kookmin Univ.)

4 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology)

5 정회원, 한국건설기술연구원 박사 후 연구과정 (Member, Post Doc, Korea Institute of Construction Technology)

6 정회원, 국민대학교 건설시스템공학과 교수 (Member, Prof., School of Civil and Environmental Engrg., Kookmin Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2014 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근 겨울철 한파의 강도와 지속시간이 증가하고 있다. 이에 따라 지반 동결깊이가 증가함에 따라 지하에 매설되는 상수도관의 경우 지반 동결에 따른 팽창현상으로 인한 파괴, 또는 봄철 동결 지반 융해에 따른 부동침하 발생으로 위험성이 증대되고 있다. 계절 변화에 따라 영하와 영상의 온도조건을 보이는 국내의 경우 겨울철에는 동결에 의해 지반이 팽창하는 현상을 유발하고 이러한 동결팽창은 지반의 불균등한 용기와 매설관의 특정 부위에 과대한 응력을 유발하여 구조물 파괴의 원인이 된다(Sellmann, 1989). 여러 연구에서 동결팽창에 따른 지반의 팽창율을 예측하는 기법들이 제안되었으나(Kim et al., 2010; Kang et al., 2013), 실 대형 실험을 통한 실제 매설관의 응력거동을 확인하기 위한 시도는 미미한 실정이다. 상수도관의 동결에 따른 파괴 위험성을 방지하기 위해 동상성인 흙을 비동상성 재료인 자갈이나 쇄석으로 치환하는 방법(Kang et al., 2009)과 페타이어나 페비닐, 혐수성 재료 등을 활용하는 연구(Gandahl, 1985)가 진행되어 있다. 미공병단에서는 지반의 동결팽창 피해를 방지하기 위해 흙 시료의 동상민감성을 판단하는 분류방식을 제안하고 있으며, 입경이 큰 사질토나 자갈이라 하더라도 세립분의 함유량이 높은 경우에는 별도의 실내 실험을 통해 지반의 동상성을 판정하도록 기준화 하고 있다(US Army TM 5-818-2-2, 1985). 그러나 국내의 상수도관 매설의 설계 및 시공방법을 규정하는 현행 기준(Waterworks Facilities Standard, 2004; Road Construction Standard Specification, 2009; Civil Engineering Works Standard Specification, 2005)을 살펴보면 아직까지도 국립건설시험소에서 제시된 1980년~1989년까지의 전국 동결깊이 측정 데이터를 바탕으로 도출된 전국 최대 동결깊이 분포도(Contour Map)를 기준으로 하여 동결 깊이보다 더 깊게 상수도관을 매설하도록 단순하게 규정하고 있으며, 흙의 세립분 함유량, 주변 지반의 배수상태, 지하수위, 함수량 등에 따른 다양한 지반의 동결 현상을 반영하지는 못하고 있는 실정이다.

Moser(1990)는 지반 동결 시 매설관의 강성에 따라 관로에 작용하는 최대 하중이 일반 하중의 2배까지 증가할 수 있음을 보여주며, 매설깊이를 동결면(frost line)보다 30~60cm 아래로 정하기를 권장하고 있다. 캐나다의 water pipe design Guidelines(2004)의 상수도 동파 관

련 기준에서는 동결깊이는 흙의 종류, 함수비, snow cover, snow pack, 동결지수 등 다양한 인자에 대해 결정되고, 상수도관의 매설 깊이는 wet areas의 영향을 크게 받므로 이론적인 동결깊이 계산에 의한 설계보다는 성공적으로 운영되고 있는 유사 구조물의 경우를 참고하도록 하고 있다.

본 논문에서 실시한 실 대형 모형실험에서는 직경 50mm, 두께 3mm의 내식성 스테인레스 강관(STKM500)을 사용하였고, 국내의 매설관 설치 기준을 참고하여 실제 매설관 설치 환경과 유사하게 비동상성 시료인 주문진 표준사를 뒷채움재로 사용하였다. 현행 기준에 따라 매설관을 설치하더라도 지반의 포화 정도와 배수상태에 따라 동결팽창이 발생하는 것을 확인하기 위해 대상 시료를 포화 시킨 후 비배수 상태로 영하의 온도 조건에서 매설관의 거동을 확인하였다. 모형실험은 대형 토조에서 수행되었고, 실험 목적에 따라 온도를 일정하게 유지하기 위해 별도의 냉동 챔버에 토조를 설치한 후 실험을 진행하였다.

2. 포화된 비동상성 시료의 동상 실험

2.1 사용 시료

일반적으로 상수도관을 지중에 매설할 경우, 지반이 동결되는 한계 조건인 최대 동결 깊이를 기준으로 매설 깊이를 결정하고, 상수도관 매설을 위한 뒷채움재는 비동상성 시료를 이용하고 있다. 국내의 경우 상수도관의 뒷채움재는 일반적으로 동결팽창에 안정한 것으로 여겨지는 사질토를 활용하고 있다. 사질토의 경우 입자간의 간격이 넓어 모세관 현상에 의한 동결팽창 영향이 작지만, 일정량 이상의 세립분을 포함하는 경우에는 동결팽창이 발생할 위험성이 있다. Table 1은 미국 공병단에서 규정하고 있는 동상민감성 판정을 위한 흙의 분류로 자갈이나 사질토라도 세립분 함유량(granular powder contents)에 따라 동결팽창이 발생 가능한 것으로 나타나 있으며, 세립분 함유량이 많은 지반의 경우는 동상성 판정을 위한 별도의 실내실험을 수행하도록 규정하고 있다. 미공병단의 동상민감성 판정기준에서 세립분은 0.02mm 이하의 입경을 가지는 흙을 말하며, 중량백분율을 기준으로 하여 그 함유량을 고려하도록 규정하고 있다.

본 논문에서는 매설관의 뒷채움재를 사질토로 시공

Table 1. Soil classification for frost heave susceptibility (US Army TM 5-818-2-2, 1985)

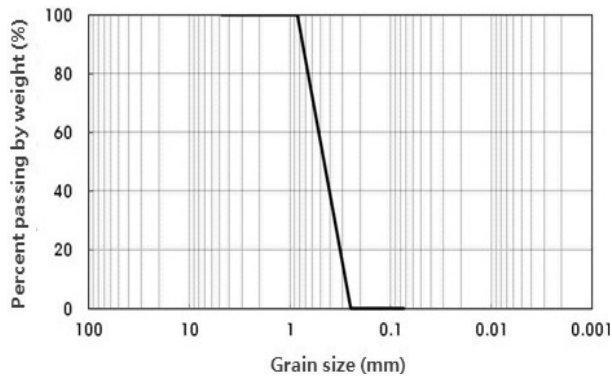
Frost heave susceptibility	Soil type	Granular powder content (%)	Unified soil classification
<i>NFS</i> *	(a) Gravels Crushed stone, rock	0~1.5	GW, GP
	(b) Sands	0~3	SW, SP
<i>PFS</i> **	(a) Gravels Crushed stone, rock	1.5~3	GW, GP
	(b) Sands	3~10	SW, SP

* *NFS* : Non Frost susceptible

** *PFS* : Possible frost susceptible, but requires laboratory test to determine frost design soils classification

Table 2. Material properties of Jumunjin sand

	Gs	emax	emin	D50	Cu	Cc	USPS
Jumunjin Sand	2.65	0.992	0.596	0.56	1.53	0.94	SP



방수처리 하였다. Fig. 2와 Fig. 3은 포화된 주문진 표준사를 대상으로 한 동상 실험 관측 결과이다. 최대 동결 팽창량은 3.84mm, 동상압은 839.1kPa로 측정되었다. 대상 시료가 비동상성으로 분류됨에도 불구하고 비배수 조건에서 포화되었을 경우에 동상이 발생함을 확인하였다.

이러한 현상은 매설관 뒷채움재의 입경에 관계없이 지하수 흐름이나 포화상태, 매설관 주변 지반의 배수 상태에 따라 영하의 온도에서 동결팽창이 발생할 가능성을 보여 주는 것으로 뒷채움재가 주문진 표준사와 비슷한 성질을 가지는 시료일 경우에 비동상성 시료로 분류

되더라도 매설관의 주변 지반이 비배수 상태이고 동결심도 이내일 경우, 동결에 대한 고려가 필요함을 확인하였다.

3. 실대형 모형 토조 실험

3.1 실험 방법

비배수 상태의 포화된 비동상성 지반의 동결에 따른 매설관의 실제 거동을 확인하기 위한 실 대형 모형실험을 실시하였다. 실 대형 모형실험은 2m × 2m × 1.5m

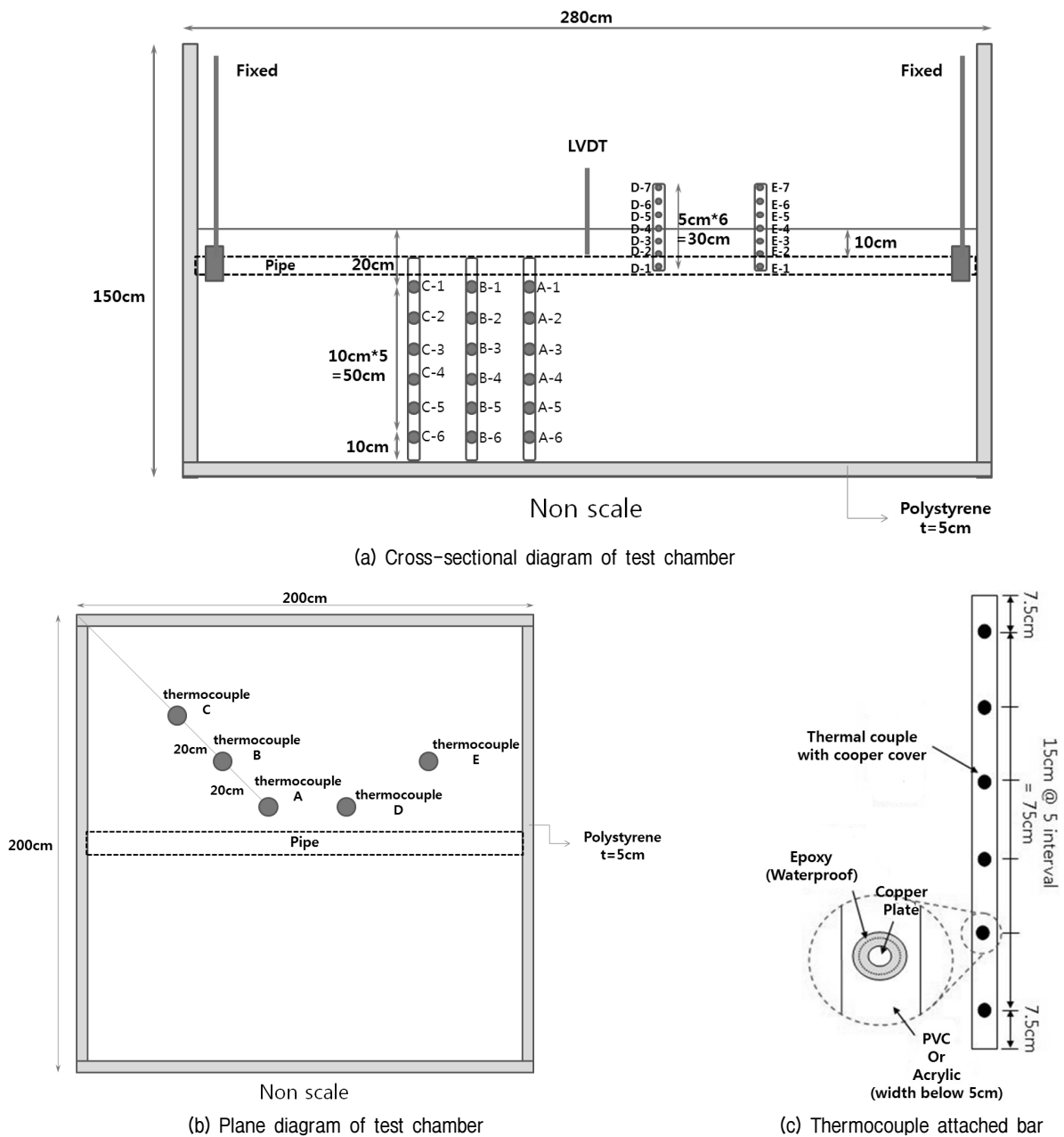


Fig. 4. Schematic diagrams of chamber test

크기의 대형 토조에서 진행되었으며, 해당 토조는 -40°C 이하에서 최대 10ton의 하중을 견딜 수 있는 강성구조로 설계되었다. 영하의 온도조건을 구현하기 위해 대형 토조를 온도조절이 가능한 냉동 챔버에 넣은 후 실험계획에 따라 영하의 온도를 구현하였다. 실험에 활용된 냉동 챔버의 주요 제원은 높이 5.1m, 길이 10m, 폭 5m로 ±30°C의 온도범위를 가지며 오차범위 ±0.5°C로 조절이 가능하다.

Fig. 4는 실험에 사용한 토조의 단면도와 평면도, 내부 온도센서 기둥의 모식도를 보여주고 있다. 현장조건을 반영한 일차원 열전도를 재현하기 위해 대형 토조의 주변부와 하부에 단열재로 5cm 스티로폼을 설치하였다. 단열재 설치 후 누수방지를 위한 플라스틱 비닐을 설치하고 65cm까지 모래를 채워 상부에서 물을 뿌려 포화를 진행하였다. 포화가 완료된 시점에서 함수비를 측정하고 모래 위에 직경 50mm, 두께 3mm의 내식성 스테인레스 강관(STKM500)을 양단 고정으로 설치 후 다시 상부에 15cm 두께로 모래를 포설하였다. 지표에서 15cm 깊이까지 함수비는 24.3%, 공극비 0.65, 상대밀도 80%로 측정되었고, 15cm 이하의 깊이에서는 함수비가 24.7%, 공극비 0.66, 상대밀도 77%로 측정되었다(Table 3 참조). 실험에 사용된 시료는 동상 실험과 동일한 주문진 표준사를 사용하였다.

냉동챔버 온도는 -15°C로 설정하였고, 시료 내부의 온도변화를 관측하기 위해 온도센서를 배치하고 매설관의 거동을 확인하기 위해 스트레인게이지를 부착하였다. 매설관 중앙부는 연결봉을 이용하여 상부의 LVDT와 채결하여 매설관의 변형을 직접적으로 관측하였다.

4. 결과 분석

4.1 매설관 주변 온도 분포

동결 챔버의 온도 변화에 따른 매설관 주변 지반의 온도 거동을 확인하기 위해 Fig. 4(c)와 같이 별도의 기

동에 15cm 간격으로 온도센서를 부착하여 깊이별 온도변화를 확인하고자 하였으며, Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)와 같은 배치로 매설관으로부터 거리에 따른 온도 분포의 차이도 확인하고자 하였다.

토조 주변의 온도 거동을 확인한 결과 매설관으로부터 이격거리에 따른 온도 거동의 차이는 없었고 지반 깊이별로 온도 분포가 달라지는 것을 확인 하였다. 따라서 매설관과 가장 가까운 A와 D지점(Fig. 4(a) 참조)의 동결시간에 따른 시료의 깊이별 온도분포를 Fig. 5에 나타내었다.

온도 조건은 초기 24시간동안 12°C에서 -15°C까지 서서히 온도를 강하시켰으며, 이후 -15°C를 유지하면서 토조 내부의 온도 변화를 확인하였다. 550시간이 경과한 이후 지반의 온도가 일정하게 수렴된 것을 확인 한 후 상온으로 온도를 높이면서 지반이 서서히 융해되도록 하여, 최대 1,000시간까지 매설관의 거동을 확인하였다.

시료의 동결 깊이는 0°C 이하의 온도와 그 지속시간에 영향을 받으며, 이것을 정량적으로 나타낸 동결지수(freezing index)를 설계 정수로 활용하고 있다. 여기서 동결 지수란 지반을 동결시키는 대기온도의 강도(영하 온도)와 지속기간(intensity and duration)의 누가 영향(cumulative effective)으로 정의되며, 단위는 °C·day이며

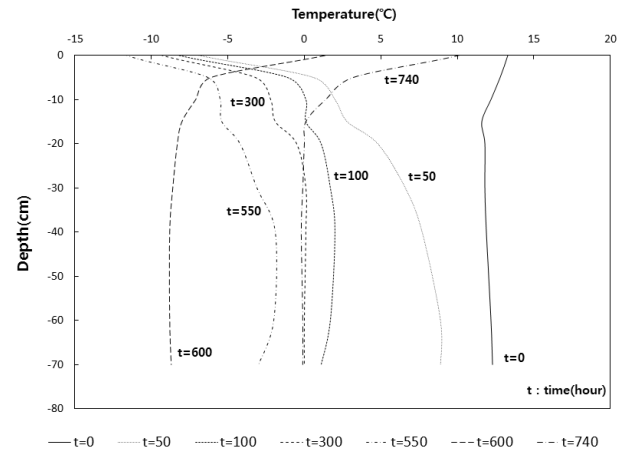


Fig. 5. Temperature distribution in the specimen

Table 3. Measured Initial condition of the specimen

Ground condition		Moisture content (%)	Void ratio	Unit weight (KN/m ³)	Relative density (%)
Upper layer (0-15cm)	Saturated sand	24.3	0.65	15.88	80
bottom Layer (15-80cm)	Saturated sand	24.7	0.66	15.78	77

어느 동결 계절 동안의 누가 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ 에 대한 시간 곡선상의 최고점과 최저점의 차이로 나타낸다(Fig. 6 참조). 실험에서 구현된 온도조건을 동결지수로 환산하면 약 $300^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ 의 값을 보이며, 이러한 동결 지수 값은 최근 10년 강도의 서울 및 경기도 지역 동결지수와 유사한 값으로(KICT, 2013), 국내 동결기 매설관의 온도에 따른 거동을 예측할 수 있는 적절한 온도 조건으로 판단된다.

Fig. 7은 매설관 중앙에서 온도와 변위의 변화를 보여주고 있다. 온도변화는 매설관의 위치와 유사한 온도센서(D-1, E-1)에서 관측한 값의 평균을 사용하였다(Fig. 4). 매설관 주변온도가 급격히 저하되어 0°C 에서 간극수의 상변화로 온도가 일정하게 유지되는 동안 매설관의 변위(용기)는 미미한 것으로 관측되었다. 간극수의 상변화가 완료된 시점인 0°C 이하로 시료온도가 강하됨에 따라 매설관 하부에서 동결팽창이 발생하고 급격히 용기가 발생하여 서서히 수렴하는 경향을 볼 수 있다.

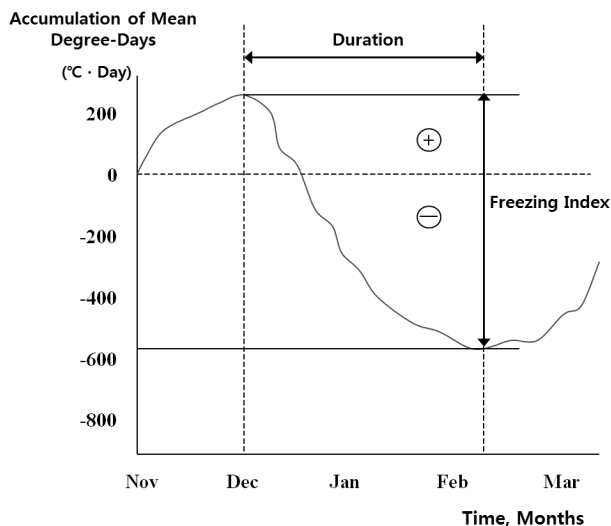


Fig. 6. Freezing index and freezing duration

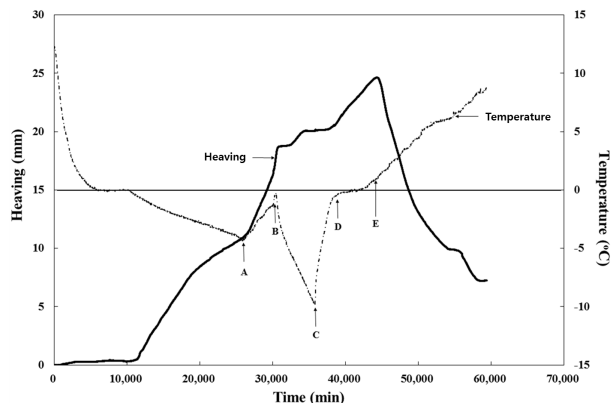


Fig. 7. Temperature and displacement at the middle of the buried pipe

매설관의 용기현상이 약해지는 A지점에서 1차 용해를 시작하였다. 냉동챔버를 15°C 로 설정하여 시료 상부에서 용해가 시작되어 매설관이 위치한 깊이의 주변온도가 서서히 증가하면서 용기가 증가하였으며(B 지점), 다시 냉동챔버를 -15°C 로 설정하여 시료 상부에서 동결이 시작됨에 따라 용기가 억제되었다(C 지점). 토조 내부의 시료가 깊이에 상관없이 전체적으로 동결됨을 확인하고 용기발생이 미미한 시점(C 지점)에 냉동챔버를 15°C 로 설정하여 2차 용해를 시작하였다. 매설관 주변의 온도가 0°C 까지 상승하는 동안 용기는 미미하게 발생하였으나, 매설관 주변온도가 0°C 로 간극수의 상변화가 시작되는 시점(D 지점)에서 용기가 급격히 발생하는 현상을 관측할 수 있었다. 또한 급격히 상승하던 용기는 매설관 주변의 간극수 상변화가 완료되는 시점(E 지점)에서 최대로 발생하였다. 이러한 현상은 동결에 따른 간극수의 이동에 기인한다. 상부 시료가 용해됨에 따라 간극수는 매설관의 하부에 위치한 동결된 시료로 이동하여 지속적인 얼음 생성에 따른 용기현상으로 판단된다.

결론적으로 매설관의 변형은 겨울철 지반이 동결되는 동안에도 발생하지만 대기온도가 상승하는 봄철에도 하부지반의 동결유지에 따른 상부지반의 간극수 이동에 따라 급격히 발생된다. 일반적으로 봄철에 발생하는 매설관의 파괴는 동결지반의 용해에 따른 침하로 변형이 발생하여 파괴된다고 여겨졌다. 본 연구에서는 봄철에 발생하는 매설관 파괴도 매설관 하부지반의 잠재적 용기력에 따른 것으로 판단되므로 관련된 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 다양한 현장조사가 필요하다고 판단된다.

4.2 매설관의 변형형상 추정

시료의 동상량과 매설관에 작용하는 응력 거동을 확인하기 위해 매설관 중앙부에 LVDT를 설치하여 변위를 확인하였고, 매설관에 스트레인게이지를 부착하여 그 변위를 확인하였다.

매설관의 스트레인 값을 이용하여 시료의 온도하강에 따른 용기에 의한 상향 변위의 값을 예측하는 식을 유도하였으며, 실제 계측된 LVDT값과 비교하였으며, 이때 매설관에 작용하는 휨 응력을 도출하여 매설관의 소성변형 여부를 확인하여 시료의 동결팽창에 따른 안정성 여부를 판단하였다.

마지막으로 스트레인 값을 통해 시료의 동결팽창에

다른 매설관에 작용하는 동상력을 도출하였으며, 동상 실험에서 측정된 동상압력과 비교하여 실 대형 모형 실험 결과 값의 신뢰성을 확인하였다.

4.2.1 매설관 변형 추정식 유도

먼저, 균등하지 않은 분포하중이 작용하는 보의 변위는 길이(x)에 대한 4차 함수의 형태로 발생하므로, 양단이 고정된 매설관의 변위(y)를 식 (1)과 같이 길이(x)에 대한 4차 다항식으로 가정할 수 있다.

$$y = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e \quad (1)$$

매설관 양단($x=0, L$)의 변위(y)와 처짐각(y')이 고정되어 있으므로 $y(0) = y(L) = y'(0) = y'(L) = 0$ 의 조건을 대입하면, $d=e=0$ 과 식 (2)와 식 (3)의 관계를 얻을 수 있다.

$$y(L) = aL^4 + bL^3 + cL^2 = 0 \quad (2)$$

$$y'(L) = 4aL^3 + 3bL^2 + 2cL = 0 \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)에 포함된 세 개의 계수(a, b, c)값을 추정하기 위해서는, 세 개 이상의 방정식이 필요하다. 본 연구에서는 단부의 변위와 처짐각으로부터 얻은 두 개의 방정식 외에, 지간 중앙부의 곡률로부터 두 개의 추가적인 방정식을 이용하여 계수값을 추정하였다.

탄성보의 길이방향의 변화를 무시할 경우, 보의 곡률(κ)은 수직 변위값의 2차 미분항으로 근사될 수 있다.

$$\kappa = \frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}} \approx y'' \quad (4)$$

또한, 탄성보의 지간 중앙부에서 순수힘에 의한 상단의 변형률(ϵ_t)과 하단의 변형률(ϵ_b)은 각각 식 (5)와 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_t = -\kappa(d/2) \quad (5)$$

$$\epsilon_b = \kappa(d/2) \quad (6)$$

여기서, d 는 강관의 지름이다. 따라서, 식 (1)에 대한 2차 미분방정식과 식 (4), (5), (6)의 관계로부터 상단과

하단에서의 스트레인 값으로부터 다음의 식을 유도할 수 있다.

$$y_t'' = 12ax^2 + 6bx + 2c = -\frac{2\epsilon_t}{d} \quad (7)$$

$$y_b'' = 12ax^2 + 6bx + 2c = \frac{2\epsilon_b}{d} \quad (8)$$

강관의 상단의 변형률(ϵ_t)과 하단의 변형률(ϵ_b)은 식 (9)와 같이 지간 중앙부에서 강관의 상단과 하단에서 계측된 값을 기준으로 게이지에 대한 온도의 영향과 중립축에서 계측된 축방향 변형률을 제거하여 계산되었다.

$$\epsilon_{t,b} = \epsilon_r - \epsilon_g - \epsilon_l \quad (9)$$

여기서, ϵ_t 또는 ϵ_b 은 게이지에 대한 온도의 영향과 축방향 변형이 제거된 강관의 상단과 하단의 변형률이고, ϵ_r 은 강관의 상단과 하단에 설치된 게이지에서 계측된 변형률이며, ϵ_g 는 게이지에 대한 온도 영향을 보정하기 위한 보정값이며, ϵ_l 는 강관의 축방향 변형률이다.

ϵ_g 는 온도에 따라 적게 읽혀지는 게이지값을 나타내므로 이에 대한 보정값은 게이지 매뉴얼에 함께 주어진 다음의 식을 사용하였다.

$$\epsilon_g = -2.68 \times 10^1 + 2.42 \times T^1 - 6.16 \times 10^{-2} \times T^2 + 3.93 \times 10^{-4} \times T^3 - 8.68 \times 10^{-7} \times T^4 \quad (\mu\text{m}/\text{m}) \quad (10)$$

강관의 축방향 변형률(ϵ_l)은 강관 지간 중앙부의 중립축에 위치한 변형률 게이지에서 계측된 변형률의 평균값을 적용하였다.

식 (2), (3), (7), (8)로부터 계수값을 계산하기 위한 식 (11)을 얻을 수 있으며, 최소자승법을 이용하여 식 (12)로부터 계수 a, b, c 를 구하였다. Table 4는 변위 형상 추정에 적용된 강관의 제원과 보정된 계측 데이터를 정리한 것이다.

$$\begin{bmatrix} L^4 & L^3 & L^2 \\ 4L^3 & 3L^2 & 2L \\ 12(L/2)^2 & 6(L/2) & 2 \\ 12(L/2)^2 & 6(L/2) & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{2\epsilon_t}{d} \\ \frac{2\epsilon_b}{d} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Table 4. Specification of steel pipe

External Diameter d (mm)	Thickness t (mm)	Elastic modulus E_s (GPa)	Length L (mm)
50	3	200	1440
Temperature, T (°C)	Central strain of pipe, ϵ (10^{-6})		
	Upper	Bottom	Neutral axis (mean)
20 (initial), -15 (final)	4283	-3785	2183

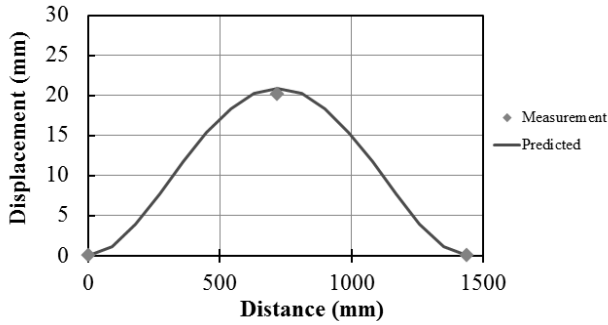


Fig. 8. Measured and predicted displacement of the buried pipe

계산된 계수값이 적용된 강관의 변위형상은 식 (12)와 같다. Fig. 8은 변위에 대한 추정식(식 (12))과 강관의 양단과 지간 중앙부에서 측정한 변위를 비교하여 나타낸 것이다. 실험체의 지간 중앙부 변위는 20.2mm이며 추정식에 의한 지간 중앙부 변위는 20.9mm로 약 3.3%를 오차를 보여 강관의 변위형상에 대한 추정이 비교적 정확히 이루어졌다고 할 수 있다.

매설관 중앙부의 최대 변위를 확인한 결과 값인 20.2 mm는 매설관의 관경인 50mm의 40.4%에 해당하는 값으로 이는 상수도 관로공사 설계 기준이나 매설관 설계 기준에서 규정하고 있는 허용 처짐율인 5%를 훨씬 상회하는 값으로, 매설관의 사용 성능이 저하되거나 안정성에 문제가 있는 것으로 판단할 수 있는 변형이다.

$$y = 7.77 \times 10^{-11}x^4 - 2.24 \times 10^{-7}x^3 + 1.61 \times 10^{-4}x^2 \quad (12)$$

예측식을 기준으로 계산된 강관 단면 상단의 휨인장응력은 805.2MPa이다. 이 값은 강관이 선형탄성거동을 한 것으로 가정된 값으로 항복인장응력(380MPa)을 넘어 강관에 소성변형이 발생한 것을 의미한다. 특히, 축변형률(2186 μ)을 고려하면 강관 상단의 휨응력은 1242.4 MPa로 변형의 초기에 소성변형이 발생했을 것으로 판단된다.

이러한 결과는 서울 및 경기도권의 동결지수 조건에서도 주변 지반의 동결팽창에 따른 매설관의 파괴가 발

생할 수 있다는 것을 의미하며, 매설관 주변 지반조건에 따라 동상 안정성을 확보하기 위한 별도의 조치가 있어야 할 것으로 판단된다.

4.2.2 매설관 동상압 추정

매설관에 작용하는 동상압(heaving pressure)은 강관에 걸쳐 동일한 크기의 압력이 작용하는 것으로 가정하여 산정하였다. 강관의 양단이 고정되어있는 지점조건을 고려하였을 경우에 강관에 작용하는 등분포하중에 의한 지간 중앙부의 최대 변위는 식 (13)과 같이 표현된다.

$$y(x = L/2) = \frac{wl^4}{384EI} \quad (13)$$

식 (13)의 관계로부터 동상압에 의해 강관의 지간 중앙부에 측정한 처짐(20.2mm)를 발생시키는 등분포하중은 44.3N/mm이며, 등분포하중을 강관의 폭으로 나누어 계산되는 압력 즉, 동상압은 0.886MPa(886kPa)이다. 동상 실험으로부터 구해진 동상압은 839.1kPa로, 강관의 변위를 바탕으로 등분포하중으로 가정하여 계산된 동상압과 동상 실험에 의한 동상압이 유사한 크기를 보여 실 대형 모형실험의 신뢰성을 확인 할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 동절기에 지반의 동결팽창에 따른 매설관에 작용하는 응력이 관의 파괴 또는 변형에 미치는 영향을 확인하고자 하였다. 동상 실험을 통해 포화된 사질토에서도 동결팽창이 발생함을 확인한 후에, 실제 매설관의 지반 내 거동을 확인하기 위해 실대형 모형실험을 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 동상성 판정기준에 따라 비동상성 시료인 사질토를 대상으로 동상 실험을 실시한 결과 비배수 포화조건에서 동결팽창이 발생하는 것을 확인하였다. 본

연구에서 사용된 포화된 사질토에서는 1.92%의 부피팽창과 839.1kPa 동상압이 발생한다.

- (2) 일반적으로 봄철에 발생하는 매설관의 파괴는 동결지반의 융해에 따른 침하로 변형이 발생하여 파괴된다고 여겨졌다. 본 연구에서는 실 대형 모형실험을 통해 봄철에 발생하는 매설관 파괴도 상부지반의 융해된 간극수가 하부지반의 동결에 따른 이동으로 잠재적 용기력이 발생한 것으로 판단되므로 관련된 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 다양한 현장조사가 필요하다.
- (3) 실 대형 모형실험 결과 동결지수 300°C·day 조건에서 매설관의 최대 변위는 20.2mm 정도로 확인되었으며, 이러한 변위는 매설관의 관경인 50mm의 40.4%에 해당하는 값이다. 이는 상수도 관로공사 설계 기준이나 매설관 설계 기준에서 규정하고 있는 허용처짐율인 5%를 훨씬 상회하는 값으로, 매설관의 사용 성능이 저하나 안정성에 문제가 있는 것으로 판단할 수 있는 변형이다.
- (4) 선형탄성거동으로 가정된 매설관 단면 상단의 휨인장응력은 강재의 항복인장응력(380MPa)을 상회하는 805.2MPa로 확인되었으며 이는 매설관의 소성변형을 가져올 수 있는 결과이다.
- (5) 비동상성 시료인 사질토를 매설관의 뒷채움재로 활용하더라도 지반의 함수 조건 및 배수 조건에 따라 동결팽창이 발생한다는 사실을 실험을 통해 확인하였으며, 동결 지반에서 매설관의 안정성을 확보하기 위해서는 뒷채움재의 동상성 확인과 함께 매설관 주변의 배수 조건을 검토할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국가 연구개발사업인 “상수도관 응력 메커

니즘 분석과 동파방지 기준 연구”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

1. Gandahl, R. (1985), Polystyrene Foam as a Frost Protection Measure on National Roads in Sweden, Transportation Research Record, 1146, pp.1-9.
2. Kang, J.M., Hong, S.S. and Kim, Y.S. (2009), A Study on Frost Heave Susceptibility of Soil Mixed with Waste Glass, *JSSI&JSSE Joint Conference*, Sapporo, pp.74.
3. Kang, J.M., Kim, Y.S. and Lee, J. (2013), Evaluation Method of Frost Heave for Unsaturated Soils, *Journal of the Korea Geosynthetics Society*, Vol.12, No.1, pp.93-100 (in Korean).
4. Kim, Y.S., Kang, J.M., Hong, S.S. and Kim, K.J. (2010), Heat Transfer Equation and Finite Element Analysis Considering Frozen Ground Condition the Cyclic Loading, *Journal of the Korea Geosynthetics Society*, Vol.9, No.3, pp.39-45 (in Korean).
5. Saskatchewan Environment (2004), *Water Pipeline Design Guidelines*, EPB 276, pp.9.
6. Sellmann, P.V. (1989), Strength of soils and rocks at low temperature, *Cold Region Science and Technology*, Vol.17, pp.189-190.
7. Shin, E.C., Ryu, B.H. and Park, J.J. (2010), The Frost Heaving Characteristics of Subgrade Soils Using Laboratory Freezing System, *Korean Society of Road Engineers*, Vol.12, No.2, pp.71-79.
8. U. S. Army Corps of Engineers (1985), *Pavement Design for Seasonal Frost Conditions*, TM 5-818-2, pp.2-5.
9. Moser, A.P. (1990), *Buried Pipe Design*, McGraw-Hill, USA, pp.34-35.
10. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2009), *Road Construction Standard Specification*, pp.710-712.
11. KICT (2013), *A Study on the Frost Penetration Depth in Pavements*, pp.64-67.
12. Korean Society of Civil Engineers (2005), *Civil Engineering Works Standard Specification*, pp.431-434.
13. Korea Water and Wastewater Works Association (2004), *Waterworks Facilities Standard*, pp.48-49.

Received : July 1st, 2014

Revised : August 14th, 2014

Accepted : August 25th, 2014