

## 동결온도가 상수도관의 거동에 미치는 영향

### Behavior Characteristics of Water Supply Pipeline Due to Freezing Temperature

신은철<sup>1</sup>, 류병현<sup>2\*</sup>, 강현희<sup>3</sup>, 황순갑<sup>4</sup>

Eun Chul Shin<sup>1</sup>, Byung Hyun Ryu<sup>2</sup>, Hyoun Hoi Kang<sup>3</sup>, Soon Gab Hwnag<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Member Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University, 119, Academyro, Yeonsu-gu, Incheon, 406-772, Republic of Korea

<sup>2</sup>Member Ph.D., Dept. of SOC Research Institute, Korea Institute of Construction Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsan Seo-gu, Gyeonggi-Do Go-yang, 411-712, Republic of Korea

<sup>3</sup>Member Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University, 119, Academyro, Yeonsu-gu, Incheon, 406-772, Republic of Korea

<sup>4</sup>Member Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University, 119, Academyro, Yeonsu-gu, Incheon, 406-772, Republic of Korea

#### ABSTRACT

This paper presents the results of a field pilot test about deformation of water supply pipelines due to freezing temperature. There is a difference between for frost heaving load to act on the water supply pipelines. If the Marston-Spangler theory is only considered for the frost heaving load to act on the water supply pipeline, it is likely to deviate from the safety of the water supply pipeline, strains of the water supply pipeline show a tendency of smaller value than the value of numerical analysis.

#### 요 지

Marston-Spangler

, Marston-Spangler

**Keywords** : Frost heaving susceptibility, Heave amount and pressure, Water supply line, Ground freezing

#### 1. 서론

우리나라는 위도상으로는 북위 33°00'35"부터 43°06'40"에 위치하여 계절 동토지대(seaonal frost area)에 속하며, 겨울철에는 시베리아기단의 영향으로 한랭 건조한 대륙성 고기압의 영향을 받아 0℃이하의 기온이 지속되어 동상

(frost heaving)에 의한 피해가 발생하고 있다.

기상청 60개 지점의 1971년~2000년까지의 통계자료에 따르면, 우리나라 연 평균 기온은 10℃ ~ 16℃이며, 가장 무더운 달인 8월은 23℃ ~ 27℃, 가장 추운 달인 1월에는 -6℃ ~ -7℃ 이다(Kim 1998). 또한 중위도 온대성 기후대에 위치하여 4계절이 뚜렷하고, 겨울이 지나 봄철의 융해 기에는 토립자 사이의 간극을 채우던 동결된 수분이 녹아 체적이 감소하여 융해에 의한 침하를 발생시킨다.

계절적 특성으로 인하여 발생하는 동결·융해 현상은 직접적으로 온도에 영향을 받는 지반의 표층부인 도로나 철

Received 29 May. 2014, Revised 21 Oct. 2014, Accepted 22 Oct. 2014

\*Corresponding author

Tel: +82-31-910-0233; Fax: +82-31-910-0211

E-mail address: tnt306@kict.re.kr (B. H. Ryu)

도의 용기 및 침하를 일으켜 안전사고를 유발하고 있을 뿐만 아니라, 특히 동결깊이 이하로 매설되어있는 상수도관로시설의 변형 및 파손을 일으켜 우리가 생활함에 있어서 불편함을 느낄 수 있는 요소로 작용하고 있다.

2011년 환경부에서 발간한 상수도 통계를 보면, 서울 인천 등 수도권 지역에서 상수도 관련 계량기 피해 건수가 1,000건을 넘어섰고, 비교적 동파 피해가 적었던 김해의 경우에도 동파에 의해 17만 가구가 불편을 겪는 사태가 벌어진 사례가 있다. 북부지역의 동파는 2006년대 400여 회, 2008년 404회 발생하였으며 2010년도에 동계 저온현상으로 인하여 2650여회 발생하였다. 최근 3년 사이에 6 배의 동파가 증가하여 타 지역에 비하여 현저하게 동파피해건수가 높은 것으로 보고되었다(Ryu, 2013).

이렇듯 상수도관로시설의 동결 용해에 의한 동파관련 피해가 매해년 발생하는 이유는 매설기준에 따라 동결깊이 이하로 상수도관이 매설되고 있음에도 24시간 이내 10℃ 이상의 온도하강을 뜻하는 이상한파의 영향이 크다고 할 수 있으며, 특히 해안가 인접지역은 해풍의 영향으로 짧은 기간에 발생하는 게릴라성 추위에 영향을 많이 받는다.

복합적으로 작용하는 기후적인 요인 및 기술적인 요인으로 인하여 상수도관에 직접적으로 작용하는 지반의 동결팽창에 의한 동상압이나, 동결용해에 따른 부동침하 등 동파를 일으킬 수 있는 물리적 요인에 대한 정확한 응력해커니즘의 대한 체계적인 연구가 부족한 실정이다.

따라서 이 연구에서는 지반이 동결하였을 때, 동결압이 관의 재질의 종류별 상수도관에 미치는 영향을 알아보기 위하여 실제 기후조건을 반영한 현장적용 모형실험과 수치해석을 통한 상수도관의 변형 특성을 비교분석 하였다. 또한 지중매설관 설계시 매설관의 벽면 마찰영향과 흙의 자중에 의한 연직하중을 고려하는 Marston-Spangler 이론을 적용하여 지반 온도조건에 대한 토압의 이론값과 실제 상수도관에 작용한 토압을 비교 분석하였다.

## 2. 지반 동상에 의한 상수도관의 변형

지반 동상(frost heave)은 동토지반에서 공통적으로 발현되는 대표적인 공학적 특성으로서, 지반구조물 설계에 있어 동착(adfreeze bond) 및 크리프 침하(creep deformation)와 함께 주요 설계정수로서 고려된다(Kim et al., 1999).

동상현상의 특성을 학문적으로 분석하기 위한 연구는 다각도로 이루어져 왔는데, 국외의 경우 1960년대부터 흙

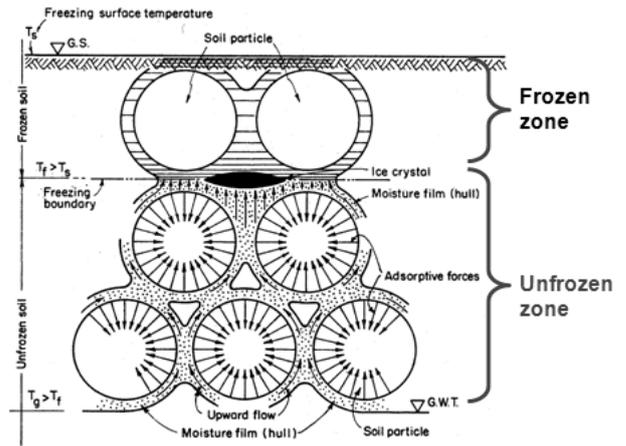


Fig. 1. Freezing of the soil by capillary action (Akagawa, 1985)

의 동상에 대한 민감성, 즉, 동상성을 평가하기 위한 실험적 연구가 수행되어 왔다(Yong and Warkentin, 1975; Argue and Denyes, 1974).

물을 포함한 다공성의 물질이 동상을 일으킬 때에 각각의 입자사이를 넓히려는 힘의 평균치를 동상압이라 하며, 흙 속의 물이 동결할 때 그 용적의 최대 9%까지 팽창한다. 지하수가 공급되는 상태의 경우에는 지속적인 팽창을 하여 동상압이 커진다. 동상압과 구속압은 작용과 반작용의 관계가 있으며, 구속압이 크면 동상압도 커지지만 동상량(팽창량)은 작아진다. 구속압이 어느 한계에 도달하여 더 이상 압력이 커지지 않으면 이때의 동상압을 최대동상압이라고 한다(Hoeksta, 1966).

지중의 온도가 0℃ 이하로 장기간 계속되면 흙 속의 간극수가 차츰 얼기 시작한다. 이때 모세관현상에 의해 얼지 않는 지중의 수분이 동결면으로 이동하면 빙정(ice lenses)이 생기고, 빙정이 수량도 증가하고 크기도 커지면서 지반을 들어 올린다. 이 현상을 동상(frost heaving)이라 한다(Konrad and Mogenstern, 1982).

일반적인 흙에서 0.074mm체 통과량이 10%이상이거나 0.02mm체 통과량이 3%이상일 경우 동상민감성 재료로 판정하며 이를 동상현상이 나타난다(Tice et al., 1978). Fig. 1은 지반의 동결구조를 나타낸 것이다.

### 2.1 흙의 동상 이론

동상(frost heave)은 흙 속에 존재하는 수분의 결정으로 인한 팽창의 결과로 지반을 융기하는 현상이다. 일반적으로 토사는 물을 함유하고 있는 다공성물질로 0℃이하의 온도에 노출되어서 표면의 일부분이 동결할 때 동결된 부

Table 1. Factors and items associated with damage to water supply pipeline (Park et al., 2008)

Factors	Items
Material of pipe	PCP, PVC, PE, Stainless steel
Internal decay	pH, density of Hydrogen sulfide, H <sub>2</sub> S decable bacteria
External decay	Type of soil, electric resistivity of soil, frost sensitivity of soil
Surcharged lead to the outer of pipe and internal load	Maximum water pressure Installation region, traffic load
Construction related factors	Bedding material for installation of pipe Diameter off pipe ( $D \leq 100$ mm, $D \geq 700$ mm)

분의 흙은 아직 동결되지 않은 부분으로부터 물을 흡입하게 되는데 동결의 진행과 물의 공급이 원활하게 이루어지면 체적 팽창이 일어나게 된다. 동결부분의 토립자 사이의 평균적인 간극은 동결 전에 비하여 확장되며, 확장된 토립자 사이의 간극의 물은 동결된 얼음으로 남아 있게 되는데, 이러한 현상을 동상이라고 한다(Taber, 1929).

## 2.2 국내 상수도관의 동파 현황

상수도관의 파손에 관련되는 인자는 매우 복잡하고 다양하다. 이러한 인자들은 서로 관련성을 가지고 있으며, 관의 재질, 관내·외부의 부식, 시공관련 인자 등 몇 개의 그룹으로 묶을 수 있다. 이러한 관련인자들을 요약하면 Table 1과 같다.

관의 외부부식은 매설환경과 직접적으로 관련이 있어 토양의 종류, 토양함수율, 토양저항률 등의 영향을 받으며, 실트 및 점토와 같은 세립토가 모래나 자갈과 같은 조립토보다 부식성이 크고, 함수율이 높을수록 부식성이 크다.

## 2.3 Marston-Spangler 토압이론

Spangler는 Marston이론을 확장하여 박스 압거, 상하수관, 가스관등의 매설 시공조건, 매설물의 강성 및 되메움 또는 성토지반의 침하 등의 조건에 따라 달라지는 응력의 상태를 정리 하였다. Spangler는 관의 매설형식을 도랑형 매설관, 정돌출형 매설관, 부돌출형 매설관, 불안전 도랑형 매설관 등의 형태로 분류하였으며, 이 중 가장 일반적인 도랑형 매설관의 경우에 관이 받는 토압을 관의 외경, 굴착폭과 매설 깊이, 흙의 단위체적중량, 토압계수 등에 따라 유도하였으며 식 (1)과 같다.

$$W_c = C_d r B_d^2 \quad (1)$$

여기서,  $W_c$ 는 매설관 단위길이 당 상부의 전체 사하중이고,  $C_d$ 는 흙의 마찰각, 고랑 폭에 대한 깊이의비, 고랑 측부 경사각, 베딩상태 등에 영향을 받는 하중 전달계수이다. 또한  $r$ 는 매설관 상부에 위치한 흙의 단위중량이며,  $B_d$ 는 매설관 상부에서의 고랑폭이 된다.

매설관에 작용하는 연직토압은 기본적으로는 마스톤스 팽글러이론(Marston Spangler theory)에 준거하여 계산된다. 이 이론에서는 매설관을 굴착도랑 저부에 설치하고 되메우기한 경우와 자연지반상에 설치하여 성토에 의해 덮은 경우의 2가지로 나누고 전자를 도랑형(ditch type), 후자를 돌출형(projecting type)이라 부른다.

실제는 큰 지름의 매설관 시공에서는 도랑을 굴착할 때에 가설 널밭목을 쓴다. 또한 되메우기 후에 가설널밭목을 인발할 때에 Marston Spangler이론에 의한 산정토압보다 큰 토압이 관에 작용하므로 이것에 대하여 실험공식이 제안되어 있으며, 더욱 연구가 진행되고 있다.

돌출형인 경우는 매설관 바로 위의 토괴와 그 주위의 토괴를 연직한 경계면으로 나누고 매설관 바로 위의 토괴 중량 외에 이 면에서의 마찰력을 고려한다. 강성 매설관에서는 주위의 침하가 크므로 하향마찰력이 유발되어 관에 작용하는 토압을 증대시킨다. 연성 매설관에서 그 역의 현상이 생긴다.

## 3. 상수도관 거동 모형실험

### 3.1 현장 모형실험 장소의 지리적 위치 및 기후조건

지반의 동결온도에 따른 상수도관의 변형 및 거동에 관한 모형실험은 인천광역시 연수구 송도동에 위치한 인천대학교 부지 내에 현장실험 조건을 구축하여 수행하였다. 실험 시스템이 위치한 지역은 지리적으로 경기서부 평지에 위치해 있고, 해안과 접하고 있다. 북쪽으로는 한강의

하류에 위치하여 지하수위가 높은 편이다.

인천은 대륙성 기후에 속하면서도 해안에 위치하여 다른 내륙지방보다는 해양성 기후의 영향을 받아 기온의 연교차가 적은 편이다. 2012년 연평균 기온은 12.8°C이며 최저기온은 -12°C로써 겨울철 0°C이하의 일수가 80일 정도 유지되는 지역이다.

현장 실험 위치의 동결지수는 인천지역의 기상청 기준으로 355°Cday이며 GPS 장비를 이용하여 위도와 경도를 측정한 결과 위도 37°22′23.1907″N, 경도 126°38′02.5623″E, 해발 50.24m에 위치하고 있다.

### 3.2 모형토조의 구성 및 조건

지반의 조건과 상수도관의 특성에 따라 겨울철 지반의 동상으로 인한 상수도관의 거동을 평가하기 위하여 Fig. 2와 같은 단면으로 현장 모형 실험 토조를 구성하였다. 현장 모형 실험용 토조의 크기는 3m(폭) x 6m(길이) x 3m(높이)이며 Section-1과 Section-2는 각각 한국산업규격

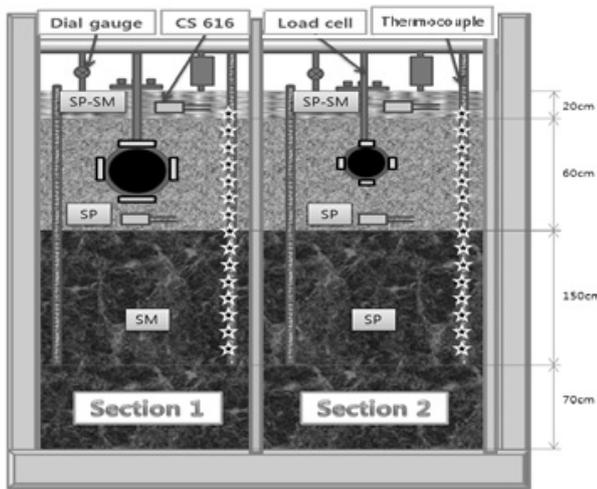


Fig. 2. Cross-sectional structure of field model experiment

Table 2. Physical properties of soil

	Sections1,2 1st Layer	Sections1,2 2nd Layer	Section1 3rd Layer	Section2 4th Layer
Specific gravity (Gs)	2,62	2,63	2,67	2,63
0.074mm passing (%)	11,7	1,9	19,6	1,9
$r_{dmax}$ ( $kN/m^3$ )	19,6	18,8	18,9	18,8
$w_{opt}$ (%)	10,5	11,5	12,4	11,5
Uniformity coefficient (Cu)	44,29	3,05	34,67	3,05
Coefficient of gradation (Cc)	2,30	1,69	4,63	1,69
USCS	SP-SM	SP	SM	SP

명시되어 있는 KS D 4317 덕타일 주철관(200mm)과 KS D 3576 스테인리스강관(50mm)의 상수도관을 매설하였다. 관재질에 따른 상수도관의 거동변형에 대해 분석하기 위해서는 같은 크기의 직경을 갖는 상수도관을 사용해야 한다. 하지만 직경이 각각 다른 상수도관을 사용한 이유는 덕타일 주철관은 직경이 크고 강성이 큰 특성이 있어 주로 간선 관로로써 사용하고, 스테인리스강관은 직경이 작고 덕타일 보다는 강성이 작아 지선관로로 사용하여 실제 현장에서의 관의 거동을 분석하기 위함이다.

Table 2는 매설된 상수관의 지층에 대한 분류와 기본 물성값 및 No. 200체 통과량을 나타낸 것으로, 총 4개의 지층으로 구성되어있다. 상부 20cm는 화강풍화토(SP-SM), 관 매설구간인 60cm는 배수에 용이한 채움재로써 모래(SP)를 사용하였고, 관 하부의 두 지층은 전동 다짐기에 의해 다짐하여 각각 SM, SP로 노체를 형성하였다.

실제 지반의 지하수위를 모사하기 위하여 상부로부터 100cm 깊이에 급·배수관 및 지하수 측정 장치를 설치하여 실제 지반조건의 지하수위를 모사하기 위한 장치를 설계하였다.

### 3.3 현장실험에 의한 상수도관의 거동 분석

#### 3.3.1 실험 현장의 온도 분포

대기온도는 2012년 12월 3일부터 2013년 2월 21일 까지 0°C이하의 온도였으며 81일간 0°C이하의 온도를 유지하였다. 동결지수(freezing index)는 지반의 동결깊이를 산정하기 위한 대표적 척도로서, 지반을 동결시키는 대기온도의 강도와 지속기간의 누가영향으로 표시된다. 현장조건의 실제 측정값에 의한 동결지수는 226°Cday로 산정되었다.

동결지수의 단위는 °Cday이며, Fig. 3과 같이 동결계절 동안의 누가 온도·일에 대한 시간곡선상의 최고점과 최저점의 차이로 나타낸다. Fig. 4는 지층의 깊이별 온도를 나

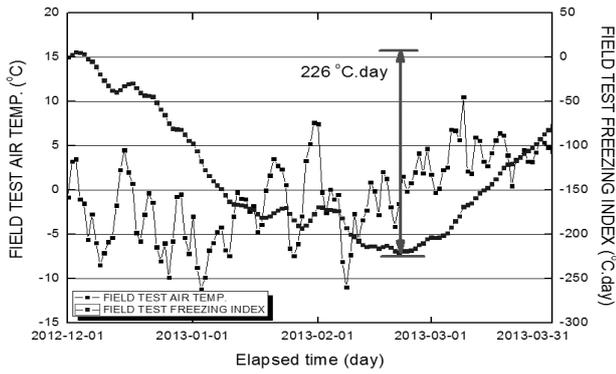


Fig. 3. Air temperature and freezing index in field

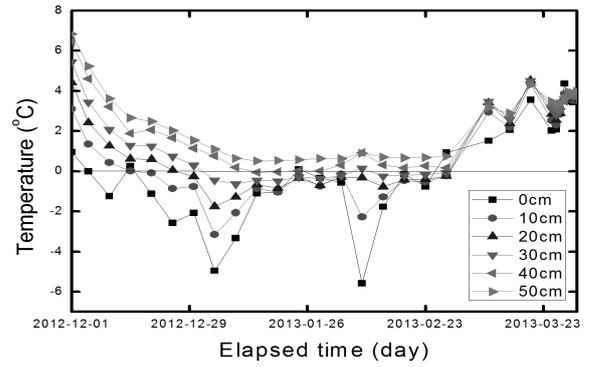
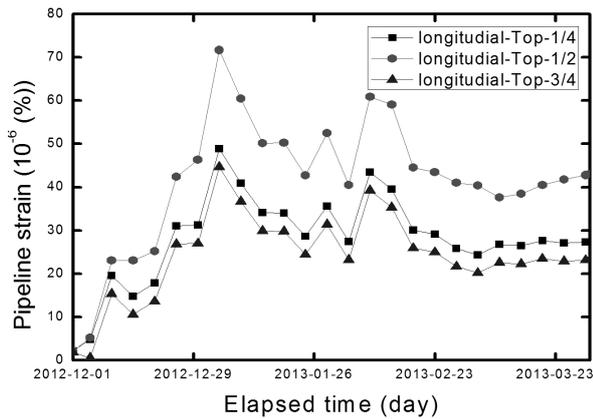
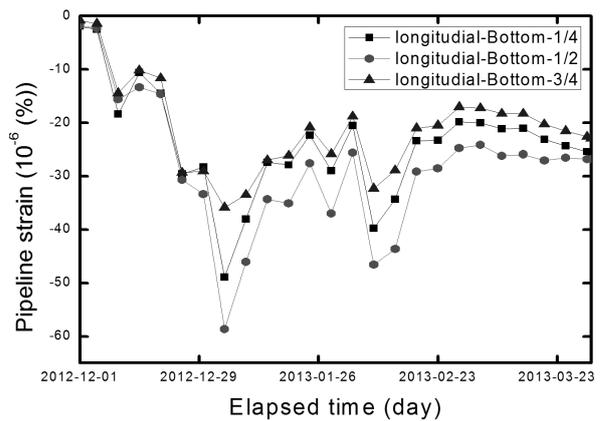


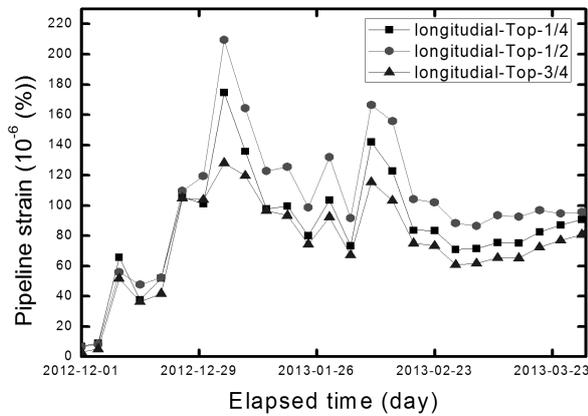
Fig. 4. Freezing depth in field



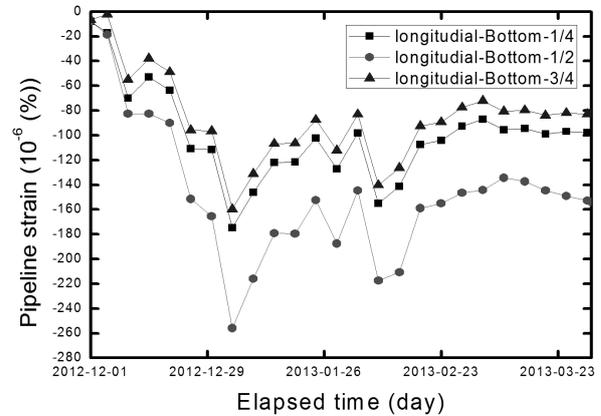
(a) Ductile cast iron pipe (upper)



(b) Ductile cast iron pipe (lower)



(c) Stainless still tube (upper)



(d) Stainless still tube (lower)

Fig. 5. Strain distribution for various types the type of pipelines

타낸 것으로 1월부터 2월까지 관의 상부의 일부를 포함하여 지표로부터 약 30cm까지 동결깊이를 유지하였다.

### 3.3.2 동결에 따른 상수도관의 변형률 분석

상수도관의 변형을 파악하기 위하여 상수도관 하나당 4개씩 총 8개의 스트레인 게이지를 부착하여 변형률을 측정하였다. 스트레인 게이지 부착시, 상수도관 매설 후 지반을 조성할 때 있을 수 있는 게이지의 손상을 방지하기

위하여 매설관 내측에 스트레인 게이지를 부착하였다.

스트레인 게이지 케이블이 손상되는 것을 방지하기 위하여 이중 코팅된 연장 케이블을 활용하였으며, 게이지 부착시 도포 처리 및 충진 테이프를 사용하여 설치에 따른 오차를 방지하고자 하였다. 상수도관의 동결하중이 작용하여 압축력을 받을 때 종방향 압축응력으로 인한 탄성좌굴의 여부를 확인하기 위하여 양단을 고정단으로 하였다.

Fig. 5는 관의 종류에 따른 축방향 변형률 거동을 나타

Table 3. Longitudinal strain of water supply pipelines

Temperature (°C)	Longitudinal Pipeline strain (10 <sup>-6</sup> %)			
	Section-1		Section-2	
	Top	Bottom	Top	Bottom
5	5,226	-2,364	8,44	-18,663
0	25,190	-14,637	52,27	-89,964
-5	46,286	-33,422	119,36	-165,307
-10	71,64	-58,649	125,50	-179,095

Table 4. Comparison with the earth pressure value of the field model experiment and Marston's theory

Temperature (°C)	Earth pressure (kPa)			
	Section-1		Section-2	
	Frost load	Marston	Frost load	Marston
5	8,665	7,82	9,234	7,82
0	11,893	7,82	11,425	7,82
-5	15,304	7,82	17,570	7,82
-10	19,404	7,82	22,127	7,82

낸 것으로 동결로 인해 상수도관의 상부는 압축력이 작용하고 하부는 인장력이 발생하였다. 또한 지반동결에 의한 상수도관의 변형은 흙이 동상에 민감하고 모세관현상에 의해 수분이 지속적으로 공급되며 지중의 온도가 0°C 이하의 온도가 지속될수록 상수도관의 변형이 더 많이 일어나는 것으로 확인되었다. 지반의 온도 변화에 대한 상수도관의 축방향 기온이 낮을수록 압축력 및 인장력에 대한 영향이 큰 것으로 나타났다. Table 3은 덕타일 주철관과 스테인리스 강관의 상부와 하부의 온도조건 별 변형률을 나타낸 것으로, 두 종류의 모두에서 관의 상부는 압축력을 받고, 하부는 인장력을 받는 것으로 분석되었다. 또한 section-1의 덕타일 주철관의 변형률이 section-2의 스테인리스 강관의 변형률보다 작게 나타난 것은 관경이나, 관의 재질에 의한 영향을 받았기 때문이라 예측 할 수 있다.

### 3.3.3 동결에 따른 지반의 토압 분석

동절기 영하의 온도가 지속됨에 따라 지표면 부근의 수분을 포함한 흙은 공극속의 수분이 얼음으로 변화하면서 부피가 팽창한다. 이와 같이 고정된 수분이 동결되면 조건에 따라 다르지만 고정되었던 수분이 얼음으로 상이 변하면 9% 결빙팽창을 일으키고, 동상압은 35Mpa까지 나타난다(Orlando et al., 1994).

동결면(freezing front)이 지하수와 접해있고 동결속도가 서서히 진행되는 비교적 미립자로 구성된 동상성 흙일 경우에는 지하수가 동결면 속으로 흡입되어 빙정이 형성

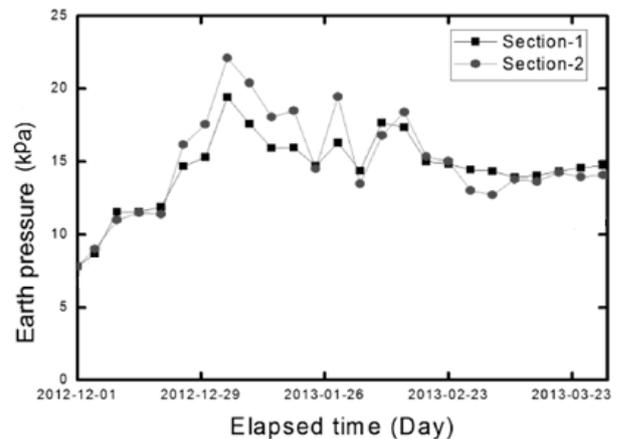


Fig. 6. Earth pressure around the water supply pipeline under freezing temperature

된다. 이와 같은 빙정은 시간이 경과함에 따라 동결면에서 수분의 유입으로 계속 성장하고, 이에 따른 흙의 부피 팽창으로 동상이 발생하며 토압이나 주변 구조물 등에 의해 구속을 받고 있는 경우 동상력이 발생한다. 일반적으로 기존 매설관 설계시 관에 작용하는 토압은 관위에 덮인 흙에 의한 연직하중이나 매설관 벽면의 마찰영향을 고려한 Marston 방법을 사용한다.

지반 동결로 인한 단면별 상수도관 작용 토압은 구성단면과 상관없이 비교적 기온이 낮은 12월~1월사이의 토압이 높은 것을 알 수 있다. Fig. 6은 지반 동결로 인한 상수도관에 작용한 토압을, Table 4는 지반의 동결온도에 따라 토압의 현장 실험값과 Marston 식의 값을 비교한 것이다

(Marston and Anderson, 1913).

Fig. 7을 보면 2012-2-29에서 2013-01-26의 기간 사이에 토압이 최고점에 도달 하는 것을 확인할 수 있다. 토압이 증가하고 최고점에 도달하는 이유는 Fig. 4에서 지표와 지중아래의 온도가 최저점에 도달하는 시기와 일치하는 것으로 설명할 수 있으며, 지중의 온도가 0℃로 지속됨에 따라 토양 간극내에 존재하는 수분이 동결하여 동상압이 발생하기 때문이다.

#### 4. 수치해석을 통한 동상지반 상수도관의 거동 분석

##### 4.1 수치해석 개요

동결 온도와 구성 재료의 열전도 특성에 따른 열전달과 변화 양상에 대해 추정하기 위하여 열해석 수치해석 프로그램인 Midas GTS FEA를 사용하였다. Midas GTS FEA 프로그램은 지반의 온도구배 경계조건과 정상 상태의 열전도 문제 뿐만 아니라 동결 융해문제를 분석할수있으며 토양의 상변화에 따른 응력의 변화를 모델링 할 수 있다.

유한요소법을 이용한 접근 방식의 장점은 이산화기법 (discretization) 으로서 다양한 조건의 변화에 따른 제약조건에 대하여 유연히 대처할 수 있다는 것이다. 실제 물리 현상을 고려하기 위해서는 결과값에 대한 비교분석이 필요하다. 이 연구에서는 덕타일 주철관과 스테인리스강관에 대하여 토양의 온도변화에 따른 상수도관의 변형 분석을 통해 현장모형실험을 통해 얻은 결과 값을 비교하여 유효성을 검증하였다.

#### 4.2 수치해석 조건

온도해석은 동결 구간에서 발생하는 모세관현상에 의한 잠열 효과를 고려하여 온도해석 지배방정식을 적용하였다. 덕타일 주철관과 스테인리스 강관이 지반 동결시 작용하는 동상압력의 증가에 따른 영향검토와 지반의 동결 범위 및 상수도관의 변형률 관계를 평가하고자 하였으며 수치해석에 적용된 상수도관의 강도 정수는 실내시험 결과를 이용하여 수행하였다.

수치해석은 현장모형실험의 조건과 같이 상부에 화강 풍화토가 포설된 덕타일 주철관과 스테인리스 주철관을 설치한 조건으로 수행하였고 5℃에서부터 -30℃ 까지 온도변화에 따른 해석을 수행하였다. Table 5는 각각의 지층과 상수도관에 대한 물성값 등 수치해석에 사용된 지반정수의 값을 나타낸 것이다.

#### 4.3 온도조건에 따른 상수도관의 변형

##### 4.3.1 스테인리스 강관

스테인리스 강관의 수직변형은 동결 전에 비하여 지반 동결 후 -21.5mm의 변화량을 보였고 강관에 작용한 연직 토압은 초기 9.25kPa, 0℃ 일 때 11.89kPa, -10℃ 일 때 22.40 kPa의 하중이 상수도관에 작용하여 관의 천단부에서 가장 많은 변위가 발생하였으며 저부로 내려갈수록 변위가 감소하는 것으로 나타났다. 스테인리스관의 길이에 대한 변형률 및 부등침하 결과를 살펴보면 지반동결로 인한 동상압이 발생하여 변형률이 증가하는 경향을 나타내었고 동결하중이 작용하지 않는 구간에서는 변형률이 작아지는 경향을 보이는 것을 확인하였다. 또한 부등침하의 상재 하

Table 5. Geotechnical properties used in numerical analysis

Soil type	Soil (surface)	Sand	Weathering soil	Ductile cast iron pipe	Stainless steel pipe
Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	19.6	15.6	19.3	72.5	0.08
Modulus of elasticity E (kPa)	30,000	49,000	35,400	16,170,000	147,200,000
Poisson's ration	0.34	0.3	0.33	0.28	0.28
Coefficient of expansion	0.00000273	0.00000176	0.00000325	0.00001	0.000018
Cohesion (kPa)	25	1,050	1,200	-	-
Angle of friction (°)	14	20	33	-	-
Thermal conductivity (W/mT)	1.907	1.610	1.577	115	120
Specific heat (J·g/N/T)	1.17	0.879	0.643	0.473	0.643

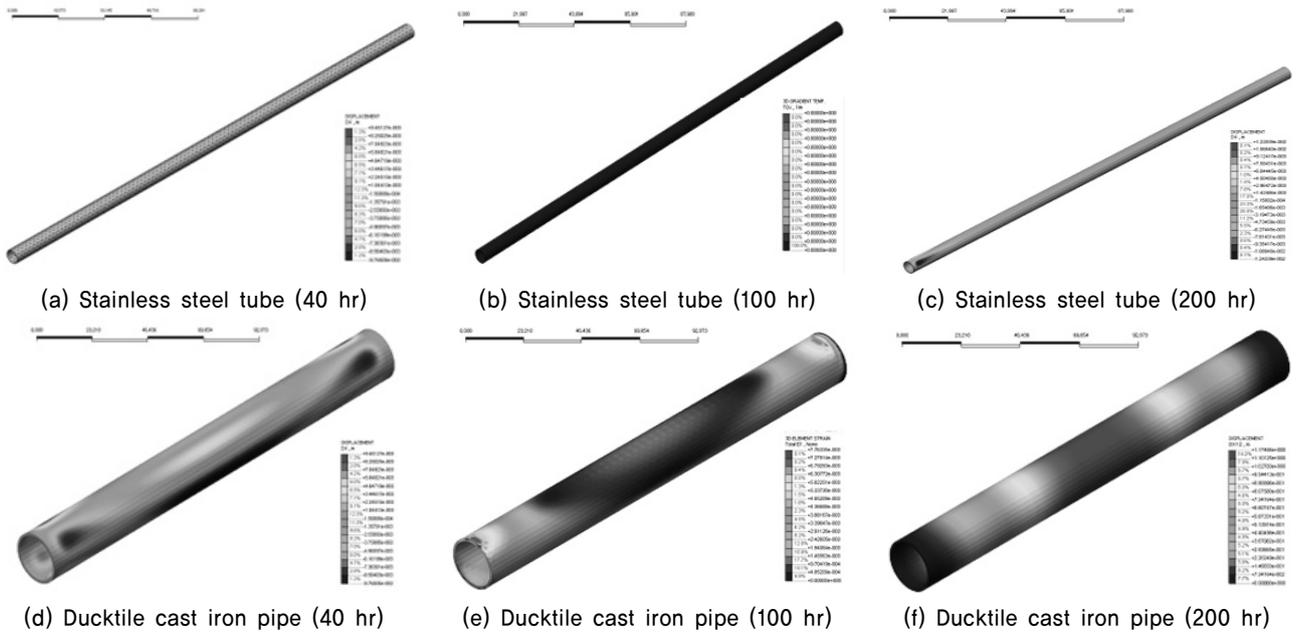


Fig. 7. Vertical displacement of pipelines by numerical analysis

Table 6. Earth pressure and displacement acting on the pipelines under freezing temperature

Ground temperature (°C)	Earth pressure(kPa)		Displacement(mm)
	Stainless	Ductile	
5	9,25	8,67	Stainless still tube : -21,5mm Ductile cast iron pipe :-18,2mm
0	11,89	12,43	
-10	22,40	20,13	

중이 작용하는 끝부분에서 최대가 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 7(a) ~ Fig. 7(c)는 스테인리스강관의 동결지속 시간에 따른 연직변형 해석 결과를 나타낸 것이다.

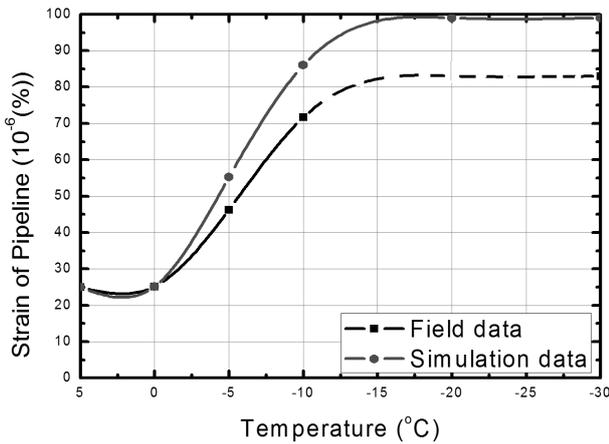
#### 4.3.2 덕타일 주철관

덕타일 주철관의 경우 관의 수직변형은 동결 전에 비하여 지반 동결 후 -18.2mm의 변화량으로 스테인리스강관의 변화량 보다 작은 값을 나타내었다. 주철관에 작용한 연직 토압은 초기 8.67kPa, 0°C 일 때 12.43kPa, -10°C 일 때 20.127kPa의 하중이 상수도관에 작용하였으며 스테인리스강관의 경우와 마찬가지로 관의 천단부에서 가장 많은 변위가 발생하였고 저부로 내려갈수록 변위가 감소하였다. Fig. 7(d)~Fig. 7(f)는 덕타일 주철관의 동결지속 시간에 따른 연직변형 해석 결과를 나타낸 것이고, Table 6은 스테인리스강관과 주철관에 발생하는 토압을 나타낸 것이다.

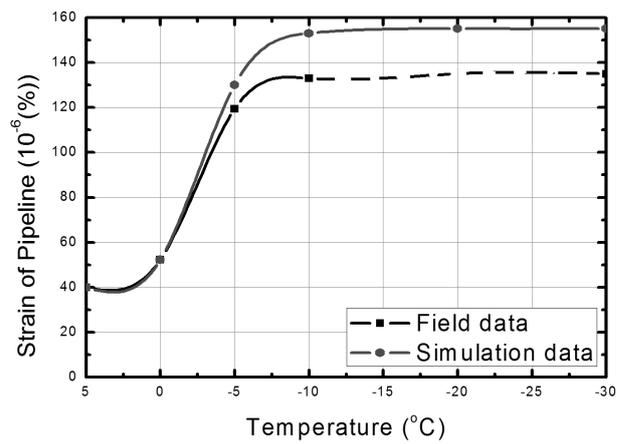
#### 4.3.3 상수도관의 연직변형을 비교분석

지반의 동상으로 인한 지반변형의 크기에 대한 관 변형률은 -15°C에서 상한선이 발생하고 유한요소의 해석과 현장실험을 비교하면 일정한 온도가 유지되는 조건에서 해석에 의한 상수도관의 변형이 더 큰 것으로 나타났다. 동상으로 인한 지반 변형의 형상에 따라 실제적으로 매설관로에 작용하는 동상하중이 변화하면서 나타나는 현상인 것으로 판단되며 특히 동상지반의 형상에 따른 응답특성의 차이가 있다고 볼 수 있다. 해석을 수행할 때는 일정하게 동결온도가 지속적으로 유지된 조건인 반면, 현장모형 실험은 그 현장조건의 특성상 동결지속시간이 일정하지 않고 동결유지시간이 일정하지 않기 때문에 파이프의 변형이 더 적게 일어났을 것으로 분석되었다.

Fig. 8은 상수도관의 종류에 따른 온도와 연직변형률을 현장모형실험을 통하여 얻은 결과 값과 비교하여 나타낸 것으로 (a)는 덕타일 주철관인 경우, (b)는 스테인리스강관의 경우를 나타낸 것이다.



(a) Ductile cast iron pipe



(b) Stainless steel tube

Fig. 8. Correlation between freezing temperature and vertical displacement

## 5. 결론

이 연구에서는 동결지반에서의 온도조건이 상수도관의 거동 특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 현장실험 및 수치해석을 수행하였다. 관의 재질별로 현장실험을 통한 모형실험과 수치해석을 이용하여 상수도관의 거동특성을 비교 분석한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 겨울철 지반이 동결하면서 상수도관에 발생하는 동상력은 모세관 현상에 의한 지하수의 공급이 계속되는 조건이며, 영하의 기온이 장기간 유지되면 상수도관에 미치는 토압 및 변형이 증가한다. 따라서 동결깊이 이내에 매설된 상수도관은 겨울철에 동상력에 의한 상재하중의 증가가 발생하는 것을 확인 하였다.
- (2) 동결지반 내에서 덕타일 주철관과 스테인리스관은 동상압에 의해 상부로부터는 압축력 하부로부터는 인장력을 받아 관의 변형이 생기며 덕타일 주철관의 변형량이 더 적으므로, 실제 도로의 하부에 관을 매설할 경우에는 비교적 강성이 큰 덕타일 주철관이 적합하다고 판단된다.
- (3) Marston-Spangler의 이론식에 의해 관에 작용하는 하중은 흙의 토압만을 고려하여 실제 겨울철 지반동결에 의한 동상압을 고려하지 않았으므로, 설계시 이론식만을 이용하여 상수도관을 설계한다면 하중에 대한 과소설계가 될 가능성이 있다.
- (4) 수치해석 결과는 상수도관의 변형이 현장실험의 값보다 크게 나타났으며, 이것은 동결지속시간의 특성과 관련이 있다. 수치해석과 현장실험 값에는 차이가

있지만 상수도관의 거동은 비슷한 경향을 보이는 것으로 확인하였다.

- (5) 현장실험결과 동상현상으로 인한 거동은 상부복토재의 함수비 및 동결지속시간과 관계가 있으며 영하의 온도가 지속될수록 동상이 크게 발생하며, 이로 인해 상수도관 변형을 크게 하게 된다. 따라서 상수도관 인근지반의 배수처리에 주의 하여야 한다.

## Acknowledgement

This research was supported by a Grant (11 Technology Innovation F01) from Construction Technology Innovation Program (CTIP) funded by The Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs (MLTM) of Korean Government

## Reference

1. Argue, G. and Denyes., (1974), Estimating the Depth of Pavement Frost and Thaw Penetrations, Transportation Research Record, Volume 497, pp.18-30.
2. Akagawa, S. (1985), "Frost Heave Characteristics and scale effect of Stationary Frost Heave", *Fourth International Symposium on Ground Freezing*, Sapporo, pp.137-143.
3. Orlando, B., Andersland, D. B., Ladanyi, B. (1994), An Introduction to Frozen Ground Engineering, *Chapman Hall*, pp.8-61.
4. Hoeksta, P. (1966), Moisture Movement in Soils Under Temperature Gradients with The Cold-side Temperature Blow Freezing, *Water Resource, Research*, Vol.2, pp.241-250.
5. Kim, Y. C., Yu, J., Kim, H. M. (1999), A Study on the Frost

- penetration Depth and Insulation methods in pavement, *Korea Institute of Construction Technology Reaserch Report*, pp.5-25.
6. Kim, Y. H. (1998), "Incorporating climate Change scenarios into Water Resources management", *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol 13, No.4, pp.407-413.
  7. Konrad, J., Mogenstern, N. (1982), "Prediction of Frost Heaving in the Laboratory during Transient Freezing", *Canadian Geotech. Journal*, Vol.19, pp.250-259.
  8. Marston A. and Anderson, A. (1913), "The Theory of Loads on Pipes in Ditches and Test of Cement and Clay Drain tile and Sewer Pipe", *Iowa Engineering*, Iowa, No.31, pp.181.
  9. Park, S. W., Do, J. N., Jung J. J., Chun, B. S. (2008), "Vertical Earth Pressure on Buried pipes in Ditches due to Fills", *Journal Korean Geo-Environmental society*, Vol.9 No.1, pp.11-16.
  10. Ryu, B. H. (2013), *Deformation Factors and Behavior Characteristics of the Water Supply Pipeline During Ground Freezing*, In Korean, Ph.D Thesis, Incheon National University, pp.24-25.
  11. Taber, S. (1929), Frost heaving, *J. Geol.* 37, pp.428-461.
  12. Tice, A., Burrous, C., and Anderson, D. (1978), "Phase Composition Measurement on Soil at Very High Water Contents by the Pulsed Nuclear Magnetic Resonance Technique", *Presented at Trans. Res. Board Meeting*, Washington, D. C., pp.16-20.
  13. Yong, R., Warkentin, B. (1975), *Soil Properties and Behaviour*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, pp.383-419.