건설기술혁신사업 11 F01

동파방지를 위한 설계 및 시공기준 개선안 수립연구 최종보고서

2014. 6. 19.

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관 / 인천대학교
공동연구기관 / (주)쏘일테크엔지니어링
위탁연구기관 / 한국건설기술연구원

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

이 보고서를 "상수도관 동파방지를 위한 설계 및 시공기준 개선안 수립 연구"과제의 보고서로 제출합니다.

2014 . 06. 19

주관연구기관명 : 인천대학교

주관연구책임자 : 신은철

공동연구기관명 : (주)쏘일테크엔지니어링

공동연구책임자 : 윤상묵

위탁연구기관명 : 한국건설기술연구원

위탁연구책임자 : 이장근

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>11기술혁신
F01</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2011.07.20~
2012.05.19</td><td>단 계 구 분</td><td>(1차년도)/
(3차년도)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 사 업 명</td><td>중 사 업 명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">건설기술 혁신 사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>대 과 제 명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">상수도관 동파방지를 위한 설계 및 시공기준 개선안 수립 연구</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">신 은 철</td><td>해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 : 20명
내부 : 6명
외부 : 14명</td><td>해당단계
연 구 비</td><td>정부 :
268,000 천원
기업 :
129,000 천원
계 :
397,000 천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 20명
내부 : 6명
외부 : 14명</td><td>총연구비</td><td>정부 :
470,000 천원
기업 :
216,000 천원
계 :
686,000 천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">인천대학교 산학협력단</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">(주)한일네트워크엔지니어링</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명 :</td><td colspan="2">상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td>위 탁 연 구</td><td colspan="5">연구기관명 :한국건설기술연구원 연구책임자 : 이장근</td></tr>
<tr><td colspan="4"></td><td>보고서면수</td><td>p</td></tr>
<tr><td colspan="6"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">상수도관, 동파, 동상압, 동결융해, 채움재료</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Water supply line, Frozen rupture, Frost heaving pressure, Freezing and thawing, Backfill material</td></tr>
</table>

요약문

Ⅰ. 제목

상수도관 동파방지를 위한 설계 및 시공기준 개선안 수립 연구

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

우리나라는 겨울철 시베리아기단의 영향으로 한랭한 북서풍이 불기 때문에 지역별 기온차가 매우 크며, 봄철에는 그 영향이 약해져 기온이 상승 한다. 계절동토지역의 기후 조건 특성으로 국내 상수도분야에서는 동결융해(freezing and thawing)로 인한 피해를 줄이기 위하여 상수도 등 매설관을 설계시 노상의 동결 방지를 위하여 동결깊이 이하로 관을 매설하고 있다. 그러나, 해마다 겨울철이면 상수도관의 동파사고가 발생하고 있으며, 특히, 최근 지구온난화에 따른 이상기후로 인하여 시베리아 북부지역을 감싸고 있는 제트기류가 감소하여 오히려 겨울철 한파의 강도가 점점 더 심해지고 있는 실정이다. 이러한 현상은 앞으로도 지속될 것으로 판단되어 이로 인한 상수도관의 동파사고는 증가할 것으로 우려된다.

2011년도의 경우 서울, 인천 등 수도권에서 상수도관련 계량기 피해 건수가 1,000건을 넘어섰고, 비교적 겨울철 동파 피해가 적었던 김해의 경우에도 상수도관이 동파되어 17만 가구가 불편을 겪는 사태가 벌어진 사례가 있다.

이렇듯 우리나라 전 지역이 겨울철 한파가 장기화되고 기록적인 한파의 빈도가 증가되어 강원도 지역 뿐만 아니라 오히려 이에 대한 대책이 미흡한 경상, 전라권의 큰 피해도 우려되는 상황에서 기존의 상수도관 설계 및 시공 기준을 검토하고 이에 대한 방지 대책 및 개선안을 제시하기 위한 연구가 필요한 시점이다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

1. 동파 상수도관의 현황분석
   - 기존 상수도관의 동파원인 분석 및 기존 사례 연구
   - 지반동결 시 토압과 동상압(상향, 하향)이 상수도관에 미치는 영향 인자 조사
   - 상수도관과 지반과의 응력 메커니즘 사례연구(관직경에 따른 이음부 등)
   - 현행 상수도관 매설깊이 산정 현황과 외국사례조사
   - 적용 가능한 상수도관 채움재료 조사 및 현황분석(되메우기, 베딩 구분)
   - 현행 상수도관 동파방지와 관련한 설계 및 시공기준 조사
   - 국내 지역별 동결지수분석 및 유관 데이터 정리 분석

2. 지반 동결 시 상수도관에 작용하는 응력의 메커니즘 연구
   - 채움재료의 동상 민감도 분석을 위한 실내동결실험(국내외 시험법 조건)
   - 실내 및 실대형실험을 통한 상수도관에 미치는 동상압, 동상비 관계 분석
   - 실대형 모형실험을 통한 채움 재료별 성능평가
   - 지반 동결 시 상수도관의 응력 거동 수치해석 기법 조사
   - 채움 재료의 현장 적용성 평가(현장 테스트 배드 이용)
   - 대형 챔버내 실대형 모형토조를 이용한 상수도관의 내적/외적 온도변화 조건에 따른 응력-변위 거동 분석
   - 동결융해와 하중조건에 따른 매설관의 부등침하 거동 연구

3. 상수도관 설계 및 시공 기준 개선안 수립
   - 국내 지역별 동결지수를 고려한 상수도 매입깊이 산정 Contour 작성
   - 시공성을 고려한 친환경 동파방지 채움재료 개발
   - 상수도관 매설 설계 및 시공지침 개선안 제시
   - 수치해석을 통한 매설관 응력분포 시뮬레이션
   - 수치해석과 실대형 모형실험결과의 비교분석

Ⅳ. 연구개발결과

1. 기술적 측면

○ 국내 지역별 토질에 대한 동상에 대한 거동특성을 파악하여 향후 동상 특성연구 및 기술 개발사업 수행 시 기초자료로 활용.

○ 동상 저감상 채움재료의 특성 평가 및 적용 기술의 개발을 통하여 향후 극지 및 북방지역의 진출시의 기초지반 구성에 대한 기술 노하우(know-how)가 축척.

○ 지역에 따라 양지와 음지의 동결심도 특성을 각각 판단하고 제안함으로써 상하수도관거 및 기타 지하구조물 부설시 구조물의 파괴 예측 기초자료 확보

○ 국내 상수도관거의 동파방지를 위한 설계·시공기준안 제시를 통한 안정성 있는 상수도 매입 기준 제시

○ 동토지역 관거 및 지하 구조물 설계 및 시공 능력의 축적

2. 경제 산업적 측면

기술적 기대성과	- 국내 지역별 토질에 대한 동상에 대한 거동특성을 파악하여 향후 동상 특성연구 및 기술 개발사업 수행 시 기초자료로 활용. - 동상 저감상 채움재료의 특성 평가 및 적용 기술의 개발을 통하여 향후 극지 및 북방지역의 진출시의 기초지반 구성에 대한 기술 노하우(know-how)가 축척 - 지역별 동결심도 Contour 맵을 작성함으로 상하수도 관거 및 기타 지하 구조물의 효율적인 설계 시공 - 국내 상수도관거의 동파방지를 위한 설계·시공기준안 제시를 통한 안정성 있는 상수도 매입 기준 제시 - 동토지역 관거 및 지하 구조물 설계 및 시공 능력의 축적 - 동결심도 이상 매설 시공이 곤란할 시 새로운 뒤채움재에 의한 동파현상 감소효과
사회·경제적 파급효과	- 동파상수관의 비율을 저감함으로 매년 발생하는 동파 관거의 교체를 위한 유지 보수 비용의 축소 및 최적 상수관거의 매입 깊이를 지역별로 산정하므로 관거 매설 공사의 굴착비용의 절감 - 겨울철 동파를 저감함으로 관파열부의 누수량 감소 - 동상 저감 채움재료의 적용성 분석을 통한 매입공사의 굴착비용 절감 - 동토구간의 매설관의 토압 및 동상압에 의한 관거의 응력거동을 파악함으로 동아시아 및 극지방등의 영구동토 건설 공사 선점할 수 있는 기초 기술 확보 - 미래에너지 확보를 위해 국내 자원개발업체들이 동토지역 에너지 파이프라인 건설공사 진출 시 참고 자료로 활용 - 이상한파의 지속으로 야기되는 상수도관의 동파로 인한 민원 빈도 축소 - 전문인력의 연구 인프라 구축과 다학제간 영역의 융합학문 발전 기대 - 동파 상수관 발생 빈도 축소로 인한 동계 국민 생활 불편 발생 빈도축소 - 국제 학술 교류 증진 및 질적 연구능력 향상

3. 사회문화적 측면

○ 이상한파의 지속으로 야기되는 상수도관의 동파로 인한 민원 빈도 축소
○ 전문인력의 연구 인프라 구축과 다학제간 영역의 융합학문 발전 기대
○ 동파 상수관 발생 빈도 축소로 인한 동계 국민 생활 불편 발생 빈도축소
○ 국제 학술 교류 증진 및 질적 연구능력 향상

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

- 상수도관 설계기준 및 시방서에 반영
- 상수도관 매설시 동상 피해를 저감시키는 단열성 채움재료의 개발
- 동상 적용 구조물의 거동평가에 대한 실험 기술력 증대
- 동계 상수관 동파로 발생하는 유지 보수 비용의 절감과 유지 보수 기간에 발생하는 민생 불편 완화
- 동상 선진국의 핵심기술에 대한 국내 기술력 확보
- 지역적 기후적 조건을 고려한 동결 깊이 산정
- 단열성 채움재료를 활용한 상수도관 매설 신공법 확보
- 미래에너지 확보를 위해 국내 자원개발업체들이 동토지역 에너지 파이프라인 건설공사 진출 시 참고 자료로 활용

SUMMARY

Ⅰ. Research Title

The Design Standard and Specifications Evaluation for Frozen Rupture Protection of Water Supply Line

Ⅱ. Research Summary

Korea is considered to be a seasonal frozen soil area that is thawed in the Spring, and most of the area is frozen in Winter. During the winter season, the climate is heavily influenced by the cold and dry continental high pressure. Because of Siberian air mass, the temperature of January is range of from -6 to -7℃ on average. This chilly weather generates the frost heaving by freezing the moisture of soil and damage potential of the road structure.

Since, Water Supply Line are comprised of various pipe's materials and layers, it is very important to know seasonal and pipe's material character, climate character of area as well as structural appropriateness and capacities.

According to water supply line Design Standard, laying depth is uniformly decided by freezing depth based on the temperature condition, regardless of character of area(climate, soil condition, pipe , pipe's material character).

The objective of this research team is design standard for frozen rupture protection of water supply line. In order to accomplish the research goal, many studies should be performed, including thermal conductivity test for back fill soils, analysis of present condition(frozen rupture, distribution of water supply line, studies of internal and external, design standard about internal and external), investigation of frozen rupture mechanism and forst simulation in the field and laboratory. This study will contribute to suited water supply line laying depth.

key words : *frozen soil, water supply line, design standard, frozen rupture*

제 1 장 Overview of Research and Development ····· 1
- Object of Research and Development ····· 1
- Importance of Research and Development ····· 1

제 2 장 Current State of Internal and External Technical Development ····· 5
- Research Result until now ····· 5
- Related Technology and Industry Trends ····· 10

제 3 장 Research Project Contents and Results ····· 22
- Design and Construction Standard about Freeze Rupture Protection on Water Supply Pipeline ····· 22
- Current State of Freezing rupture and Freezing Index in Korea ····· 47
- Frost Heave and Stress Mechanism from Interact with Ground and Pipeline ····· 142
- Frost Susceptibility classification and Investigation ····· 171
- Scale Test for Freezing Characteristic of Pipeline ····· 193
- Behavior of Pipeline in Frozen Ground ····· 211
- Freezing Characteristic and Performance Evaluation of filling Material ····· 276

제 4 장 Final Research Project and Application Results ····· 317
- Pipeline Laying Design and Improvement Proposal for Guideline ····· 317
- Filling Material for Freeze Protection Consider Construct ability ····· 324
- Soil Compaction and Apply Material Standard about filling Material · 329

제 5 장 Application Plan of Research Results ····· 342
- Application Plan of Research Results ····· 342
- Expectational Results and Ripple Effect ····· 343

제 6 장 the Collected Data of Foreign Scientific Technique ····· 344
- Investigation of Foreign Standard about Pipeline Freeze (USA, Canada, Europe) ····· 344
- International Research Trends of Freezing Depth ····· 350

Reference ····· 358

제 1 장 연구개발과제의 개요 ····· 1
- 연구개발 개요 ····· 1
- 연구개발의 중요성 ····· 1

제 2 장 국내외 기술개발 현황 ····· 5
- 지금까지의 연구개발 실적 ····· 5
- 국내외 관련 기술 및 산업 동향 ····· 10

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 22
- 상수도관 동파방지 관련 설계 및 시공 기준 ····· 22
- 상수도관 동파현황 및 국내 지역별 동결지수 분석 ····· 47
- 지반의 동결 및 상수관과 지반의 상호작용에 의한 응력 매커니즘 ····· 142
- 동상민감성 지반 조사 및 분류연구 ····· 171
- 상수도 매설관 동결 특성 분석을 위한 실대형 토조 실험 ····· 192
- 동결지반 상수관의 거동 ····· 211
- 채움재료의 동결특성 및 성능평가 분석 ····· 276

제 4 장 최종 연구성과 및 적용실적 ····· 317
- 상수도관 매설 설계 및 시공지침 개선안 ····· 317
- 시공성을 고려한 동파방지 채움재 ····· 324
- 채움재료의 시공에 대한 다짐 기준 및 적용재료 기준 ····· 329

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 ····· 342
- 연구결과의 활용방안 ····· 342
- 기대 성과 및 파급효과 ····· 343

제 6 장 연구개발 과정에서 수집한 해외과학기술 정보 ····· 344
- 국외 상수도관 동파 관련 기준 조사 (미국, 캐나다, 유럽) ····· 344
- 국외의 동결 깊이 관련 연구 현황 ····· 350

참고 문헌 ····· 358

제 1 장 연구개발과제의 개요

1 절 연구개발 개요

우리나라는 겨울철 시베리아기단의 영향으로 한랭한 북서풍이 불기 때문에 지역별 기온차가 매우 크며, 봄철에는 그 영향이 약해져 기온이 상승 한다. 계절동토 지역의 기후 조건 특성으로 국내 상수도분야에서는 동결융해(freezing and thawing)로 인한 피해를 줄이고, 상수도 등 매설관을 설계 시 노상의 동결 방지를 위하여 동결깊이 이하로 관을 매설하고 있다. 그러나, 해마다 겨울철이면 상수도관의 동파사고가 발생하고 있으며, 특히, 최근 지구온난화에 따른 이상기후로 인하여 시베리아 북부지역을 감싸고 있는 제트기류가 감소함에 따라 오히려 겨울철 한파의 강도가 점점 더 심해지고 있는 실정이다. 이러한 현상은 앞으로도 지속될 것으로 판단되어 이로 인한 상수도관의 동파사고는 증가할 것으로 우려된다.

2011년도의 경우 서울, 인천 등 수도권에서 상수도관련 계량기 피해 건수가 1,000건을 넘어섰고, 비교적 겨울철 동파 피해가 적었던 김해의 경우에도 상수도관이 동파되어 17만 가구가 불편을 겪는 사태가 벌어진 사례가 있다.

이렇듯 우리나라 전 지역이 겨울철 한파가 장기화되고 기록적인 한파의 빈도가 증가되어 강원도 지역 뿐 만 아니라 상대적으로 이에 대한 대책이 미흡한 경상, 전라권의 큰 피해도 우려되는 상황에서 기존의 상수도관 설계 및 시공 기준을 검토하고 이에 대한 방지 대책 및 개선안을 제시하기 위한 연구가 필요한 시점이다.

본 연구는 '도로 동상방지층의 효용성 검증 및 설치기준 연구'의 연계과제로써, (ⅰ) 기존 상수도관의 동파원인을 조사하고 국내외 사례조사를 통해 기존 문제점과 필요한 핵심기술을 도출하고, (ⅱ) 지반 동결 시 발생하는 토압, 동상압, 동결융해로 인한 부등 침하가 상수도관에 미치는 영향과 이때의 지반 거동을 파악하기 위해 실대형 냉동챔버를 활용한 실증적 연구와, (ⅲ) 상수도관에 작용하는 동결 토압을 감소시킬 수 있는 채움재를 개발하는 일련의 연구를 수행하여, (ⅳ) 국내 상수도관의 설계와 시공기준 개선 그리고 유지관리에 필요한 효율적인 해결 방안을 마련하고자 한다.

2 절 연구개발의 중요성

1. 기술적 측면

우리나라는에서 해마다 발생하는 상수도관 동파사고로 인해 교통소통에 지장을 주거나 대형 교통사고를 일으켜 인명피해를 입히기도 하고, 단수로 인해 시민생활에 불편을 초래하기도 한다. 이에 따라 매년 상수도관의 보수를 위해 추가 정부 예

산이 소요되고 있는 실정이다.
이렇게 매년 겨울철에 상수도관의 동파사고가 발생하고 있는 기술적인 이유는 (ⅰ) 겨울철 대상 지반의 동결깊이를 정확히 예측하여, 상수도관의 적합한 매설 깊이를 결정하는 기술이 부족하고, (ⅱ) 지반의 동결토압, 동상압, 동결융해에 따른 부등 침하 등으로 인해 상수도관에 미치는 다양한 응력의 메커니즘에 대한 체계적인 연구가 부족하며, (ⅲ) 특수한 상황에서 상수도관에 작용하는 토압을 경감하기 위한 채움재의 개발 등과 같은 기술적인 해결방안이 없기 때문이다.

계절동토 지역에서 상수도관의 매설 깊이는 주로 지반의 동결깊이에 근거하여 결정하는데, 온도에 따른 거동에 영향을 받지 않는 동결깊이 아래에 상수도관을 설치하는 것이 일반적이다. 이와 같은 방식으로 상수도관의 매설 깊이를 결정하기 위해서는 매설 대상지역의 정확한 동결깊이를 확인하고 지반이 동상에 안정한지 여부를 판단하여 그 깊이를 가감하는 시방지침의 제시가 필수적이다.

그밖에 동토지역인 알레스카나 시베리아 지역에 설치된 파이프라인의 경우에는 파이프라인을 고상식 기초를 이용하여 지표 밖으로 설치하는 것이 일반적이다. 도심을 통과하거나 중요 구조물을 지나야 해서 부득이하게 지중에 매설하는 경우, 주변 지반의 열적 거동으로 인해 파이프라인에 과도한 토압이 걸리는 것을 방지하기 위해, 인공적으로 열적 영향을 방지하는 열 순환 장치를 설치하거나 동상에 안정한 흙이나 다른 채움재료로 치환하는 기술을 적용하기도 한다.

본 연구에서는 상수도관의 매설 깊이를 결정하기 위한 가장 중요한 요소인 국내 지역별 동결깊이에 대한 신뢰성 있는 데이터를 확보하고 동결지수와 동결깊이, 상수도관의 매설 깊이에 따른 상관관계를 도출하고자 하며, 지반의 동결 민감성에 따라 상수도관에 작용하는 응력의 거동을 이해하기 위하여 현장 상황에 맞는 적합한 설계 및 시공 방법을 제시하고자 한다. 또한 특수한 상황에서 적용할 수 있는 상수도관 채움재료에 대해 검토하여 효율적으로 적용 가능한 채움재를 제안하고자 한다. 이러한 연구를 바탕으로 향후 상수도관의 동파 피해를 저감 시킬 수 있는 시공 표준을 제시하고, 현장에서 활용이 가능하도록 상수도관의 설계 및 시공 관련 기준의 개선책을 제안하고자 한다.

2. 경제 · 산업적 측면

우리나라 상수도관 총 연장은 154,435km이며, 이 중에서 도수관(취수시설 → 정수장)이 3,122km로 2.0%, 송수관(정수시설 → 배수구역)이 10,146km로 6.6%, 배수관(배수지 → 급수지역)이 80,034km로 51.8%, 급수관(배수관 → 가정 등 일반수용가)이 61,133km로 39.6%를 차지한다.

<표 1-2-1> 연도별 상수도관 연장 현황

구 분	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
총계(km)	127,967	130,588	133,437	138,478	143,883	151,293	154,435

상수도관의 총 연장은 해마다 신도시 건설 등 대규모 사업으로 인한 신규 상수도관 설치와 농어촌 상수도 보급사업의 추진으로 증가하고 있는 추세이며, 이와 병행하여 23% 정도가 설치 후 21년 이상 경과된 노후화 된 관으로 보수가 필요한 실정이다.

동파 및 기타 피해로 인한 보수비용과 노후화 된 관의 교체 비용으로 매년 전체 예산의 약 30%가 유지관리를 위한 비용으로 지출되고 있으며, 그 추이는 다음과 같다.

<표 1-2-2> 연도별 상수도 세출 추이 (단위 : 억원)

구 분	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
전체 예산	41,615	43,278	47,542	48,755	51,405	53,718	53,672	54,798	57,736	61,481	65,166
유지 관리비	12,323	13,206	14,774	16,272	18,634	20,770	22,299	21,649	22,803	23,413	25,389

상기 표에 나타낸 바와 같이 해마다 유지관리에 필요한 비용은 증가하고 있으며, 이 중 상수도관의 동파로 인한 복구비용은 지역에 따라 편차를 보이나 약 25%~30% 정도인 것으로 추정된다(인천 : 25%, 춘천 : 40%, 원주 25% 등).

따라서, 본 연구를 통해 겨울철 상수도관의 동파사고를 감소시키는 시공표준을 연구하여 설계 및 시공 기준에 개선된 내용이 반영된다면 약 6,000억(2009년 기준)의 동파로 인한 유지보수 비용을 상당부분 절감 할 수 있을 것으로 기대되며, 안정적인 설계 및 시공으로 인한 상수도관의 장기수명 연장으로 신규 매설에 소요되는 비용도 상당부분 절감 할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 사회문화적 측면

상수도와 관련한 민원은 2009년을 기준으로 총 1,044,066건이 발생하였으며, 이 중 요금관련 민원이 730,861건으로 약 70%를 차지한다. 다음으로 누수 및 단수로

인한 민원이 155,404건으로 약 15%를 차지하였다.

<표 1-2-3> 상수도 관련 민원 추이 (건)

연도	총 민원건수	민원의 유형							
		수질	출수불량	과수압	단수	누수	요금	불친절	기타
2009	1,044,066	11,442	48,154	1,124	21,626	133,778	730,861	59	97,022
2008	593,852	11,042	50,889	539	21,763	113,489	318,000	64	78,066
2007	549,432	7,774	51,578	1,376	28,090	105,684	300,625	81	54,224
2006	412,723	7,024	48,994	1,168	23,709	131,350	158,320	555	41,603

상수도관의 동파 피해가 실제로 사용가의 단수나 누수를 초래하는 직접적인 원인으로 작용한다고 보기는 어렵지만 동파 피해가 국민 생활의 질적 저하를 초래하는 요인 중 하나인 것은 분명하며, 특히 올해 있었던 상수도 관련사고 중 김해 지역 상수도관 동파로 인해 약 17만 명의 주민들이 단수로 인해 어려움을 겪었던 사례와 같이, 지역적으로 큰 규모의 사회적 피해를 초래할 수 있으므로, 상수도관의 동파 방지에 필요한 기술 개발의 필요성은 더욱 크다고 할 수 있다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

1절 지금까지의 연구개발 실적

<표 2-1-1> 타 연구진에 의한 연구개발 실적

연 도	제 목	연구기관	연구책임자	비 고
1996년	유전자 알고리즘을 이용한 광역상수도 관로노선 선정기법 개발	충북대학교	하성룡	★★★
2002년	상수도 및 배수시설 최적화 기술개발	서울시립대	유명진	★★★
2004년	상수도 Lifeline의 통합설계 시스템 개발	연세대학교	김문겸	★★★
2004년	폐비닐 골재를 활용한 도로포장 동상방지에 관한 실용화 연구	한국건설기술연구원	김영진	★
2007년	멀티센서를 이용한 지하매설관로 상태평가 및 관리시스템 개발	한국건설기술연구원	황한국	★★
2008년	포장도로 개착과 매설관 설치에 따른 재포장 하부기초 평가기술 개발	배재대학교	임유진	★★

지금까지 상수도관이나 지반의 동결과 관련한 타 연구진의 연구개발 실적을 조사해 보면 폐비닐을 활용한 동상방지에 관한 연구(★ 참조)가 1건 있으며, 상기 연구는 도로포장을 대상으로 한 연구로 상수도관 채움재료로 활용할 수 있을 것으로 판단되나, 경제성 측면과 현재까지 실용화 사례가 없는 것으로 미루어 향 후 적용성 연구가 이루어 져야 할 것으로 판단된다. 상수도 설계와 관련한 및 시공과 관련한 연구(★★★ 참조)는 3건이 있으며 이들 선행 연구는 상수도관의 전체적인 설계방안을 고려하였으나, 동파에 대한 보다 체계적이고 기술적인 접근을 위해서는 앞으로의 연구가 더 필요한 것으로 판단된다.

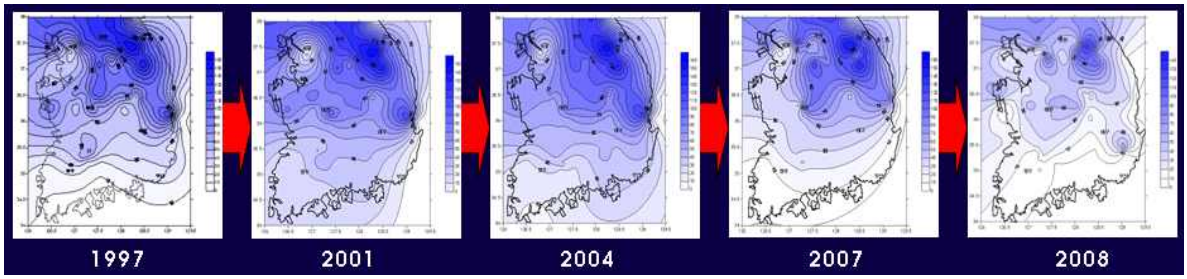
지하 매설관과 관련한 연구 실적(★★ 참조)은 2건으로 조사 되었으며, 이들 또한 지반 동결 및 융해로 인한 매설관의 피해와 관련한 내용 보다는 매설관 설치를 위한 포장도로 개착방안이나 매설관 관리 시스템과 같은 분야에 대한 연구로 본 연구와는 차별화 되는 것으로 판단된다.

본 과제와 관련하여 본 연구에 참여한 연구기관이 수행한 연구 실적들과 특허취득 현황은 다음과 같다.

<표 2-1-2> 본 연구에 참여한 연구기관이 수행한 연구 실적들과 특허취득현황

연 도	제 목	연구기관	연구책임자 (발명자)	비 고
2011년	현장계측을 통한 도로동상 평가 및 실내 모사 시험 연구	인천대학교	신은철	진행중
2007년	지반동결을 통한 오염지반 차폐 및 흐름제어시스템 개발	인천대학교	신은철	완료
2007년	인천 LNG 저장탱크의 지반침하 및 지반동결에 따른 안정성 검토	인천대학교	신은철	완료
2009년	친환경 지반동결시스템을 이용한 보강 및 차수기술개발	인천대학교	신은철	완료
2009년	시베리아 동토지역 진출을 위한 미래건설 기술 개발	한국건설기술연구원	김영석	완료
2011년	극한지 하부구조 급속 시공 플랫폼 기술 연구	한국건설기술연구원	김영석	진행중
2011년	국내 포장 국도의 동결상태 조사 및 유지관리	한국건설기술연구원	김영석	진행중
2011년	환경 친화적 남극 제2기지 건설을 위한 성능평가 및 운용프로그램 구축	한국건설기술연구원	김영석	진행중
2010년	남극 제2기지 건설을 위한 지반조사	쏘일테크엔지니어링	윤상묵	완료
2006년	유수율 제고를 위한 상수도관망 블록최적관리시스템 기술	한일네트워크엔지니어링	김학용	완료
2009년	지반 동결 시험장치	인천대학교	신은철	특허 등록
2011년	지반동결을 이용한 오염지반 차폐시스템 및 정화방법	인천대학교	신은철	특허 등록

이 중 “현장계측을 통한 도로동상 평가 및 실내 모사 시험 연구”와 “국내 포장 국도의 동결상태 조사 및 유지관리”의 연구 실적은 본 연구와 직접적인 관계가 있는 연구로 국내 지역별 동결지수와 동결깊이 분포를 실제 조사하여 동상방지층의 효용성을 검증하고, 국내 여건에 적합한 동결깊이 산정식을 개발하는 연구이다.



<그림 2-1-1>국내 동결깊이 분포 contour map

현재는 두 개 연구과제가 별도로 진행되고 있으나, 상기 연구의 연구 책임자와 핵심 연구진이 본 연구에 참여함으로써 국내 동결깊이 분포 조사의 신뢰성을 높이고, 기존 연구에서 도출된 연구결과를 적극적으로 본 연구에 활용함으로써 보다 신뢰성 있는 상수도관 매설 깊이를 도출하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

“현장계측을 통한 도로동상 평가 및 실내 모사 시험 연구”는 인천대학교의 신은철 교수를 연구 책임자로 하여 남한지역도로를 현장계측자료를 계측시스템을 통하여 수집하고 분석하며, 현장채취 시료에 대한 실내시험을 통하여 동상 메커니즘과 동상 특성을 규명하고, 동결 및 융해에 의한 도로노상의 공용성 저하에 관한 합리적인 대처방안을 연구하여 동상방지층 설치 시 지하수위와 온도에 따른 동상압력과 부압의 상관관계 규명을 통한 합리적인 설계 동결 깊이의 산정방법 과 동상 저감 기술 개발을 목표로 연구를 진행하고 있다.



<그림 2-1-2> 북부지역 도로 현장계측 시스템 구성

또한 인천대학교에서 수행한 “지반동결을 통한 오염지반 차폐 및 흐름제어시스템 개발” 연구는 지반 내에 소정간격으로 냉각액을 순환하는 파이프를 매설하고 여기에 냉각액을 흘려보내 흙속의 간극수를 동결하여 지반을 고화시키는 공법의 개발 및 적용성을 판단하는 연구로 지반의 밀도와 동결로 인한 강도증가, 팽창압력에 대

한 분석을 진행하여 동상 시 토체의 거동 특성을 파악한 것으로 상수도관 내부 동결 시 거동 메커니즘 및 지반-상수도구조물의 상호작용 연구에 기초자료로 활용할 것이다.

“인천 LNG 저장탱크의 지반침하 및 지반동결에 따른 안정성 검토” 역시 지반동결 시의 하부지반의 거동특성에 대한 연구로 인천광역시 LNG(-162℃) 생산 지하저장 탱크에서 가스누설이 검지됨에 따라 시공 시 계획했던 구조물의 안정성과 유지기능에 문제가 없는지를 파악하기 위하여 LNG 탱크의 시설현황 및 현장지반 평가, 수치해석에 의한 침하분석 및 한국가스안전공사로부터 제시된 각종 설계자료와 계측자료의 실측치를 비교·평가하며, 지반동결 시 LNG 탱크의 거동현황을 파악하여 안정성을 검토하였다. 이러한 연구들의 결과와 관련된 동상토에 대한 거동특성 파악 및 수치 해석 노하우등의 세부지식과 과업 수행경험은 계절 동토지역에 매설된 상수도관의 지반동결에 따른 응력변화 및 지반거동에 따른 안정성 확보방안 수립에 대한 연구에 강점으로 작용 할 수 있을 것으로 기대된다.

2009년에 연구가 종료된 “시베리아 동토지역 진출을 위한 미래건설 기술 개발”연구는 본 연구에 참여하는 한국건설기술연구원의 김영석 연구위원이 연구책임자로 수행하였으며, 향후 수요가 기대되는 시베리아 동토지역에 천연가스 파이프라인을 설치하기 위해 필요한 제반 연구를 진행하였다.

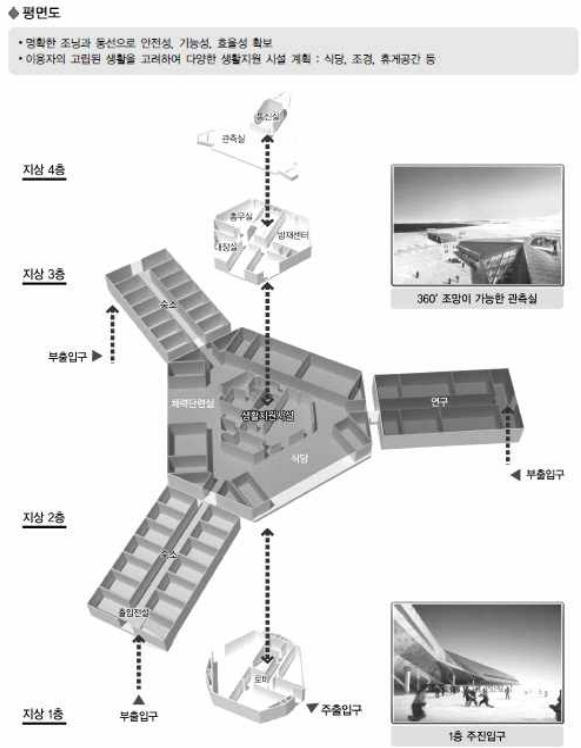


<그림 2-1-3> 러시아 하바로프스크 현장 매설관 응력 거동 시험

2009년 연구를 통해 항상 지반이 얼어있는 동토지역에 매설관에 작용하는 토압과 동상압에 대한 연구가 진행되었으며, 이 과제의 연구 결과와 관련 기술 Know-how는 본 과제에서 수행하고자 하는 계절동토 지역에서 상수도관의 응력 메커니즘을

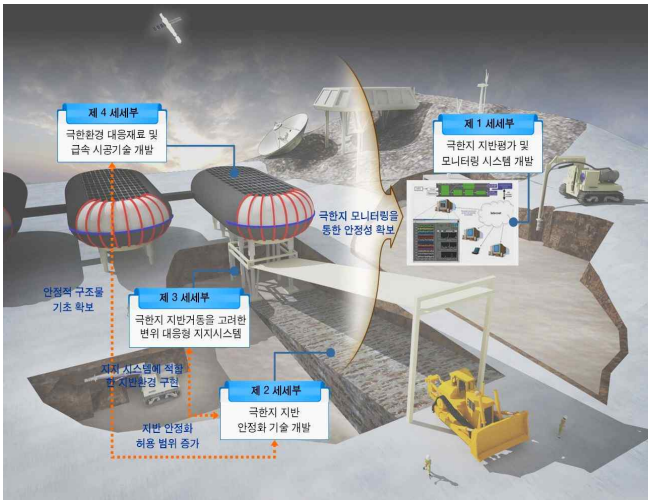
이해하는데 좋은 참고자료로 활용할 수 있으며, 이 과제의 주요 연구진이 본 과제에도 참여함으로써 연구의 질적 향상을 도모할 수 있을 것으로 기대된다.

본 과제에 위탁연구기관으로 참여하는 한국건설기술연구원의 연구 참여진은 현재 “극한지 하부구조 급속 시공 플랫폼 기술연구”와 “환경 친화적 남극 제2기지 건설을 위한 성능평가 및 운용프로그램 구축”에도 연구책임자 및 연구원으로써 주도적으로 참여하였으며, 이 중 “환경 친화적 남극 제2기지 건설을 위한 성능평가 및 운용프로그램 구축”는 남극 장보고 기지를 극한지 최고 수준의 구조물로 건설하는 것을 비전으로 기지 건설을 위한 성능평가 및 운용프로그램을 마련하기 위해 극한지 지반의 안정화를 위한 효율적인 기술을 개발하기 위한 연구를 수행하였다.



<그림 2-1-4> 남극 장보고 기지 평면도(안)

한국건설기술연구원의 주요사업인 “극한지 하부구조 급속 시공 플랫폼 기술연구”는 동토지역에서 기후 변화에 안정하면서 효율적이고 경제성을 확보할 수 있는 기술을 개발하는 것을 목표로 하였으며, 연구 수행의 결과로 얻어진 저온에서 활용가능한 계측 및 구조물 모니터링 기술과 동결 및 동상에 안정한 지반 안정화 기술에 관련한 Know-How들은 본 연구를 수행하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.



<그림 2-1-5> 극한지 하부구조 급속 시공 플랫폼 기술연구 개요

2 절 국내외 관련 기술 및 산업 동향

1. 국내 기술 및 산업 동향

가. 국내 시장규모

<표 2-2-1> 상수도 국내 시장 규모

연도별 상수도 세출 추이 (단위 : 억원)											
구 분	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
전체예산	41,615	43,278	47,542	48,755	51,405	53,718	53,672	54,798	57,736	61,481	65,166
공사비	13,647	13,675	15,329	13,824	13,606	15,631	16,133	13,705	14,861	17,937	22,260
유지관리비	12,323	13,206	14,774	16,272	18,634	20,770	22,299	21,649	22,803	23,413	25,389

참조 : 상하수도협회(2011)

나. 기업규모별 현황 (최근 3년간 해당산업분야의 기업규모)

<표 2-2-2> 기업 규모별 현황 (단위 : 업체수)

구 분	2007	2008	2009
해당산업	7,106	7,306	7,395

참조: 상하수도 공사업 협의회(2011)

다. 국내 주요 관련업체

<표 2-2-3> 국내 주요 관련 업체

업체명	업체별 능력	비 고
현대엔지니어링(주)	설계 및 감리	세종기지 건설 참여
현대건설	시공 경험 유	LNG탱크 건설시 지반동결공법 적용
계룡건설	시공 경험 유	러시아 하바로프스크 시공
풍림산업	시공 경험 유	러시아 캄차카 지역 pipe line 공사 참여
삼성건설	약간의 시공 경험	LNG탱크 보수시 지반동결공법적용
대우건설	약간의 시공 경험	LNG탱크 보수시 지반동결공법적용

참조: 건설협회(2005)

라. 국내전문가 및 연구기관 현황

<표 2-2-4> 국내 전문가 및 연구기관 현황

항목	전문가	소속기관	기술개발현황
동결 지역 지반 조사 기술 개발	한욱	한국산업기술이사회	남/북극 온도 변화 및 열전달 메카니즘 연구
	남승일	한국지질자원연구원	북극 시추 관련 기술 다수
	이영남	현대건설	시베리아 산림개발시 참여 경험
상수도관 및 매설관 건설 관련	하성룡	충북대학교	상수관로 노선 선정 기법 개발
	유명진	서울시립대	상수도 및 배수시설 최적화 기술개발
	김문겸	연세대학교	상수도 통합설계 시스템 개발
	황한국	한국건설기술연구원	지하 매설관 상태 평가 및 관리시스템 개발
	임유진	배재대학교	매설관 설치를 위한 재포장 하부기초 평가 기술 개발
동결지역 토목공사 설계·시공 관련	김영석	한국건설기술연구원	온도변화에 따른 지반의 역학 특성
	홍성완	한국건설기술연구원	동토지역 기초구조물의 최적 설계, 시공
	홍승서	한국건설기술연구원	사업장부산물의 건설재료 재활용 연구
	조천환	삼성건설	동토지역 구조물 안정성에 관한 연구
	신은철	인천대	도로동상 및 인공동결관련 동상압, 동상량 등 지반동결특성 연구
	이석근	경희대	도로의 동결특성 및 동상방지층 연구
	김학삼	영남이공대	지반의 동결 메커니즘 규명 및 동상성

2. 국외 기술 및 산업 동향

가. 주요국가의 시장규모

<표 2-2-5> 주요국가의 시장규모

(단위 : 억원)

구분	2004년			2005년			2006년			2007년			2008년		
			소계			소계			소계			소계			소계
품목 1			503			531			550			600			600
- 일본			703			712			754			750			800
- 미국			404			450			452			500			500
- 유럽															
품목 2			500			504			510			520			552
- 일본			611			602			650			653			656
- 미국			531			522			550			550			553
- 유럽															
- 품목 1 : 동결지역 지반조사 기술 개발 - 품목 2 : 동결지역 토목공사 설계 및 시공 관련															

참조: Engineering News Record, 일본건설공업조사회 등

나. 세계시장을 선도하는 주요 업체

<표 2-2-6> 세계 시장을 선도하는 주요 업체

업체명(국적)	업체별 능력	비 고
CRREL(미국)	극한지 대상 미육군공병단 연구기관	
극지연구소(미국)	극한지 대상 전문 연구기관	
NASA(미국)	우주개발 관련 전문 기관	
Mueser Rutledge Consulting Engineers (미국)	인공 동결공법 전문 시공 업체	
저온과학연구소(일본)	극한지 대상 전문 연구기관	
극지연구소(일본)	극한지 대상 전문 연구기관	
淸水건설(일본)	LNG 저온 탱크 건설 업체(극한지용 자재, 소재 포함)	
항만연구소(일본)	지반전문가 연구기관 (극한지 지반조사 기술 보유)	
토목연구소 (일본)	지반전문가 연구기관총	
精硏(일본)	인공동결공법 전문 시공 업체	
극동과학건설연구소 (러시아)	시베리아 동토 관련 연구 전문기관	

다. 해외 시장예측 및 발전전망

- 정부는 2015년부터 30년간 러시아로부터 750만톤의 천연가스를 공급받기로 합의된 상황이며, 총 사업비는 가스도입 비용 900억 달러, 가스화학 플랜트 단지 건설비용 90억 달러, 파이프라인 건설비용 30억 달러로 총 1,020달러에 이른다.
- 최근 들어 건설기술의 발전과 자원개발을 목적으로 시베리아나 남북극과 같은 열악한 자연환경에서의 건설 수요가 증가하고 있으며, 앞으로도 송유관, 천연가스관과 같은 자원을 수송하기 위한 설비와 더불어 극한 지역에 새롭게 건설되는 인프라에 용수 공급을 위한 상하수도관의 건설 수요도 증가할 것으로 예측된다.
- 중국의 고산지대와 북쪽 지역, 몽골, 카자흐스탄을 비롯한 중앙아시아국가 등과 같이 도시 인프라 건설이 필요한 동토지역에서의 건설 시장에도 상수도관의 동파 방지 기술이 진출 할 수 있을 것으로 기대된다.
- 국내 건설기술의 해외 진출을 위해서는 국내와는 차별되는 다양한 환경에서의 건설에 대한 기술 노하우가 필요하며, 특히 최근의 이상 기후로 인해 북반구 지역의 겨울철 한파의 강도가 점차 증가하는 추세로 봤을 때 이러한 기후조건에 적용 가능한 기술 개발이 시급한 상황이다.

라. 해외 업체· 연구기관과의 공동연구 필요성 및 추진 방안

- 본 연구에서는 국제공동연구개발 추진계획은 없으나 본 연구 과제는 국내 기후환경과 상수도관 매설지반 조건을 고려한 상수도공사설계기준 및 시공기준을 제시 적용함을 최종 목표로 한다. 그러므로 이번 연구에서 국내의 제반 조건을 고려 할 때 국제공동연구의 추진보다 열악한 기후조건에서 이 분야 최고 수준의 러시아 및 북방유럽 전문인력을 활용하여 핵심 기술교류(세미나, 국제학술회의, 자문 등)을 통한 연구 추진 역량을 강화할 것이다.
- 전문 인력으로는 러시아에서 본 연구와 관련 많은 실적을 보유하고 있는 Sergei A.Kudryavtsev, Arkady Ya. Gayev, V. B Ivanishchev 교수와 카자흐스탄 지반공학회 회장인 유라시아 국립대학의 Askar Zhusupbekov 교수로서 본 연구의 전반적인 자문과 특히 실내외 동결 실험과 이에 관련된 연구 추진에 있어 이론과 실무를 접목시켜 동결 분야 국제 경쟁력을 제고하여 국내 건설업체들의 해외 시장 진출을 활성화 시킬 수 있을 것이다.

마. 개발된 기술의 해외 시장 진출 방안

- 2010년 G20 정상회의에서 한·러 양국 정상회담을 통한 러시아 유·가스전 및 광물

자원 개발 협력 강화와 천연가스 한국공급 및 러시아 전력망 현대화 분야 협력강화와 같은 국가적 차원의 동토지역을 대상으로 에너지라인 건설사업 활성화가 예상된다.

- 이러한 시점에서 본 연구를 통해 도출된 상수도관 동파방지 기술은 우리나라 기업의 시베리아 등과 같은 북방지역 진출 시 효과적으로 활용 가능할 것으로 기대된다.
- 또한 국토해양부와 협조하여 국내 건설업체의 해외공사 수주 시(카자흐스탄: 알마티-아스타나 고속도로시공 계획 중) 활용하는 방안을 마련할 계획이다.

3. 특허 동향

가. 개 요

- 본 과제와 관련한 국내외 극지연구 선행 특허를 조사하여 세계적인 기술현황을 파악하고, 향후 필요한 기술 및 수요를 예측하는데 활용하였다.
- 이번 특허 분석에서는 상수도관 동파를 방지하기 위한 지반의 열적 안정화 기술들이 상수도라는 목적에만 국한되지 않고 동결이 발생하는 지역에서 설치되는 상하수도관, 송유관, 천연가스관 등 다양한 시설물에 적용될 수 있는 기술이라는 관점에서 분석의 범위를 넓혀서 극한지 에너지라인에 대한 동향을 파악 하였다.

나. 분석 범위

- 본 분석에서는 연구 성과의 파급효과 및 연구의 필요성을 고려하여 선택된 4개의 기술 분야를 특허분석대상으로 하였으며, 2010. 7월까지 출원 공개된 한국, 일본, 유럽공개특허와 2010. 7월까지 출원 등록된 미국 등록 / 공개특허를 분석 대상으로 함
- 분석대상 특허[1)]

<표 2-2-7> 분석대상 특허

자료 구분	국 가	전체분석구간	정량분석 대상특허	전체분석 대상특허
공개/등록특허 (출원일 기준)	한국	~ 2010. 7	87	90
	일본	~ 2010. 7	98	98
	유럽	~ 2010. 7	31	31
	미국 (등록/공개)	~ 2010. 7	167	167
합계			**383**	**386**

※ 정량분석구간: 한국, 미국, 일본, 유럽 - ~2008(출원년도)

1) ※ 한국, 미국, 일본 및 유럽특허: 출원일 기준으로 분석하며, 일반적으로 특허출원 후 18개월이 경과된 때에 출원 관련정보 를 대중에게 공개하고 있음. 따라서 아직 미공개 상태의 데이터가 존재하는 2년 자료는 유 효하지 않으므로 **~2008년까지 한정**함

다. 분석 기준

▪ 분석 대상 핵심 기술

<표 2-2-8> 분석대상 핵심 기술

사업명	핵심과제명		세부과제명(안)	
극한지 에너지 기술	에너지 라인	A	건설시공	AA
			건설재료	AB
			유지관리	AC
	해저 에너지 라인	B	설치장치	BA
			설치방법	BB
			유지관리	BC
	에너지라인 플랜트	C	LNG, 석유, 가스 플랜트	CA
			에너지라인/파이프	CB
			설계/시공	CC
			자동용접	CD
			모듈화	CE
			단열	CF
			바닥판/지지판	CG
			FRP(섬유강화플라스틱)	CH
			유지관리/모니터링/센서기반/무선 네트워크	CI
	극한지 파이프라인	D	기초형식	DA
			설치방법	DB
			성능평가	DC

라. 분석 방법

▪ 본 분석에서는 양적인 통계를 의미하는 정량분석을 기준으로 분석함.

▪ 정량분석 방법

- 특허를 출원연도별, 국가별, 기술별 및 출원인별로 분류하여 각 부문별 특허건수, 점유율 및 증가율 등으로 구분하여 분석을 수행함
- 이를 통해 극한지 관련 세계 기술 환경과 우리의 수준을 살펴보고, 극한지에서의 상수도관, 에너지파이프라인, 건설재료 및 구조물 기초, 매립기술 개발 관련기술의 분야별 연구개발 현황과 주요리더를 살펴봄으로써 국가차원의 연구개발의 필요성 및 국제협력의 필요성 등에 대한 기초자료를 제시함.

마. 분석 지표

▪ 특허 분석 지표

<표 2-2-9> 특허 분석 지표

구분	지표	의미	정의
양적 측면	특허건수	특허활동	-
	특허활동지수 (Activity Index)	상대적 특허활동	$A.I = \frac{\text{특정기술분야의특정출원인 건수}}{\text{특정기술분야전체출원건}} - \frac{\text{특정출원인총건수}}{\text{전체총건수}}$
질적 측면	인용도지수 (Cites Per Patent)	인용도지수 ∝ 영향력	인용도지수 = 피인용수 / 특허건수
	영향력지수 (Patent Impact Index)	상대적 영향력	PII = 해당국가의피인용비 / 전체피인용비
	기술력지수 (Technology strength)	기술력	TS = 특허건수*영향력지수
	시장확보지수 (Patent Family Size)	시장확보지수 ∝ Market size	PFS = 해당출원인 평균 특허Family수 / 전체평균 특허Family수
	과학적 연계성 (Science Linkage)	기초과학과의 연계성	SL(NPR) = 인용비특허문헌수 / 특허건수

▪ 특허활동지수(Activity Index) : 상대적 집중도를 살펴보기 위한 지표로서, 그 값이 1보다 큰 경우에는 상대적 특허활동이 활발함을 나타내며 구하는 방법은 아래와 같음

$$A.I. = \frac{\frac{\text{특정기술 분야의 특정출원인 건수}}{\text{특정기술분야 전체 건수}}}{\frac{\text{특정 출원인 총건수}}{\text{전체 총건수}}}$$

▪ 인용도 지수(CPP, Cites Per Patent) : 특정 특허권자의 특허들이 이후 등록되는 특허들에 의해 인용되는 회수의 평균값으로, 이 값이 클수록 주요특허 또는 원천특허를 많이 가지고 있다는 것을 의미하며 많이 인용되는 특허를 가진 특허권자는 경쟁에서 유리한 위치를 점할 수 있음.

▪ 영향력지수(Patent Impact Index) : 한 시점을 기준으로 삼아 과거의 기술적 활동

을 반영하는 지표로서, 특정 출원인(특허권자)이 소유한 기술의 질적수준을 측정하는 지수임. PII가 1이면 평균 인용 빈도임을 나타내고, 2이면 평균보다 2배 많은 빈도로 인용됨을 나타냄

PII = 특정기술 분야의 특정출원인의 피인용비/전체 피인용비

- 기술력지수(Technology Strength) : 기술력지수가 클수록 해당 국가(또는 연구주체)의 기술력이 높음을 의미함

TS = 특허건수 × 영향력지수

- 시장확보지수(Patent Family Size) : 한 발명에 대해 각 국가마다 출원된 특허를 Family patent라 지칭함. 해당국가에서 상업적인 이익 또는 기술경쟁 관계에 있을 때에만 해외에 특허를 출원하므로 Family Patent 수가 많을 때에는 특허를 통한 시장성이 크다고 판단되어 이를 시장확보력의 지표로 사용함

$$FS \quad \frac{\text{해당출원인(소유권자)평균 Patent Family수}}{\text{체평균 Patent Family수}}$$

- 연구개발방향(비특허문헌, Non-patent Reference) : 과학과 기술과의 연계성을 알아보는 지표로 미국특허에서 인용된 문헌 중에 비특허문헌이 많은 경우 기초과학(basic science)과의 연계성이 깊은 것으로 해석되며, 특허문헌이 많은 경우 응용기술(applied technology)과의 연계성이 깊은 것으로 해석됨.
- 기하평균과 산술평균(세부기술별 포트폴리오) : (상대)성장률은 연평균 성장률의 평균값으로 산정하며, 이때 산술평균을 이용하면 아래 표와 같은 오차가 발생할 수 있음. 따라서, (상대)성장률을 산출시에는 반드시 기하평균을 이용함.

<기하평균 계산식>

$$G(\%) = [\{(1+g_1)(1+g_2)\cdots(1+g_n)\}^{1/n} - 1] \times 100$$

구간 : n, 각 구간의 증가율: g, 연평균 증가율: G

<표 2-2-10> 기하평균과 산술평균의 오차 사례

구분		1996년	1997년	1998년	1999년
특허출원건수		8,885건	3,865건	195건	2,720건
증가율			-56.5%	-95.0%	1,294.9%
연평균 증가율	산술평균	(-56.5-95.0+1294.9)/3 = 381.1%			
	기하평균	$\{((1-0.565)(1-0.95)(1+12.9))^{1/3} - 1\} \times 100 = -32.9\%$			

바. 특허 분석 주요 결과

- 극한지 에너지라인 건설기술 개발 분야에서 한국은 최근 급격한 성장, 일본은 지속적 성장, 최근 다소 주춤, 미국은 상대적으로 활발한 특허활동 : 극한지 에너지라인 건설기술 분야에서 한국은 2004년부터 급격하게 증가하는 추세이며, 일본은 활발하지는 않지만 꾸준한 출원활동을 보이다가 2000년대 중반이후 다소 감소하는 추세를 보이고 있으며, 미국에서는 2001년 이전에는 1970년 중반에 활발한 출원활동을 보이가 다소 주춤하고 있으나 2001년 이후에는 미국내에서 뿐 만 아니라, 상대적으로 타 국가와 비교해서도 가장 활발한 특허활동을 하고 있으며, 유럽에서는 저조하지만 꾸준한 출원활동을 보이고 있는 것으로 나타남.
- 극한지 에너지라인 건설기술 개발 분야의 특허점유율은 미국이 주도 : 주요국 전체특허에서 미국이 43%, 일본이 26%로 상대적으로 높은 누적점유율을 나타내고 있으며, 극한지 에너지라인 건설기술 분야에서 선도국 임을 알 수 있음.
- 극한지 에너지라인 건설기술 분야의 포트폴리오, 한국은 성장, 일본은 재도약, 미국은 다소 주춤 : 특허건수와 출원인수 변화의 상관관계를 통해 기술의 위치를 살펴보는 포트폴리오 기본 모델에서, 한국특허와 유럽특허는 전형적인 성장기 단계에 있는 것으로 나타났으며, 미국특허는 성숙기와 퇴조기 단계를 거치는 양상을 보이는 것으로 나타났으며, 일본특허는 발전기에서 갑자기 퇴조하는 모습을 보이고 있는 것으로 보여지나, 2004-2008년도 구간에서 그 이전 구간과 비교해서 미비하지만 출원인수가 다소 증가한 것으로 보아 부활기의 단계를 거칠 것으로 예상됨.
- 주요국별 기술역점분야는, 해저 에너지 라인과 극한지 파이프라인 분야 : 한국과 일본은 극한지 파이프라인(D) 분야가 상대적으로 활동이 활발한 역점분야이며, 미국과 유럽은 해저 에너지 라인(B) 분야가 상대적으로 활발한 특허활동을 하는 등 역점분야인 것으로 나타남, 즉 각국의 역점분야에 대해서 기초연구에 대한 특허기술을 충분히 활용할 수 있는 분야라고 판단할 수 있음.
- 전 세계적으로 지속적인 관심을 받고 있으며 꾸준히 연구개발에 힘쓰는 분야는 해저 에너지라인(B) 분야와 극한지 파이프라인(D) 분야로 나타났으며, 에너지라인(A) 분야와 에너지라인 플랜트(C) 분야는 기술 도입기의 기술로서 꾸준한 연구개발이 예상될 것으로 보여짐.
- 각국 주요출원인의 관심 세부기술 분야는, 미국과 유럽은 해저 에너지 라인(B), 일본과 한국은 극한지 파이프라인(D).
- 한국은, 기초연구 활성화와 해외 시장 진입이 필요 : 미국과 이탈리아가 비특허(논문) 문헌과 특허문헌 인용이 평균이상으로 이루어지고 있어 기초과학과 응용기술을 연계하여 연구 개발하는 가장 이상적인 개발방향을 가지고 연구개발을 통한 특허활동을 하고 있는 것으로 나타났으며, 극한지 에너지라인 건설기술 분야 개발을 위해 관련 정책과 기술에 대한 벤치마킹은 미국과 이탈리아를 모델로 하기에 적당한 것으로 보여짐.

- 기술력지수(TS)에서는 1구간(1995년~1991년)에서는 미국이 가장 높은 것으로 나타났으며, 그 뒤를 이어 영국, 네덜란드 순이며, 2구간(2000년~2004년)에서도 역시 미국이 가장 높고, 그 뒤를 영국, 일본, 이탈리아 등이 차지하고 있으며, 3구간(2005년~2009년)에서는 미국, 이탈리아, 독일, 네덜란드 순으로 기술영향력이 높은 것으로 보여 지며, 한국은 해외시장에서의 권리확보를 위한 노력이 미흡한 것으로 나타남.
- 한국의 전략적인 연구개발방향은, 특허점유율이 낮은 기술분야 : 특허점유율 관점에서 전략적인 연구개발방향을 보면, 한국에서 지속적으로 관심을 보이고 있는 관심을 보이고 있는 극한지 파이프라인(D) 분야에서는 기초연구와 더불어 응용기술 개발을 추진하고, 타 국가에서는 상대적으로 특허점유율이 낮은 분야인 에너지 라인(A) 분야와 에너지라인 플랜트(C) 분야 등이 미국, 일본 및 유럽에서도 상대적으로 활발한 분야가 아니기 때문에 진입장벽이 높지 않을 것으로 예상됨.
- 미국 내 등록된 특허기술을 기준으로 보면, 극한지 에너지라인 건설기술 분야에서의 기술 영향력과 자립도는 미국과 독일 등 유럽 국가들이 우수 : 전 세계적으로 특허출원 전에 미국특허를 많이 인용하고 있으며, 등록 후 피 인용되는 즉, 자국의 기술을 기술혁신활동에 높게 이용하는 국가는 미국을 제외하면 독일 인 것으로 나타나는 등 미국을 제외한 타 국가와 비교하면 독일이 상대적으로 자립도가 높은 국가로 분석됨.
- 극한지 에너지라인 건설기술 분야에서, 전 세계 출원국가는 특허 출원 시 상대적으로 미국, 영국 및 프랑스 특허를 주로 모니터링 하여 자국 내 기술혁신을 수행하고 있으며, 등록 후 미국, 이탈리아, 영국 및 프랑스 특허의 영향을 많이 받고 있는 것으로 조사됨.

4. 정부지원정책 현황

가. 관련법령, 정부 정책 및 담당기관

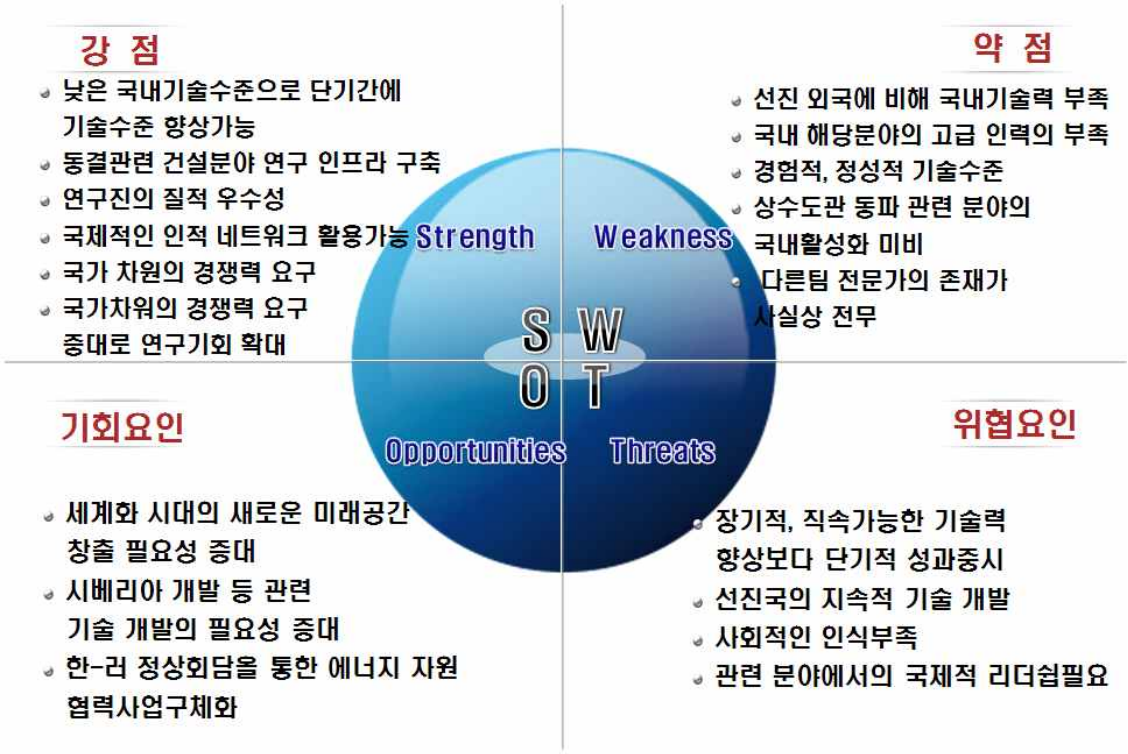
- 관련법령
  - 수도법 (법률 제 10331호, 2010.5.31, 타법개정)
  - 수도법 시행령 (대통령령 제 22506호, 2010.11.26, 일부개정)
  - 수도법 시행규칙 (환경부령 제 386호, 2010.11.29, 일부개정)
  - **상수도 설계기준 (한국수자원공사, 2009)**
  - **상수도 시설기준 (한국 상하수도 협회, 2010)**
  - **상수도 공사 표준 시방서 (환경부, 2007)**

- 정부 정책 및 담당기관
  - 국토해양부 건설수자원 정책실
  - 환경부 상하수도국

나. 정부지원 정책사업 종류와 현황

5. 종합 결론

- 아래 그림은 상수도관의 동파방지를 위한 건설 기술 개발과 관련하여 장/단기 외부 환경요소와 내부 환경요소의 강점 및 약점을 자문을 통해 확인된 사실을 정리한 SWOT 분석의 결과를 보여 주고 있음.



<그림 2-2-1> SWOT 분석

- 상수도관 동파방지 기술과 관련한 강점은 인천대학교와 한국건설기술연구원을 중심으로 동결지반과 관련한 건설 분야의 연구 인프라가 국제적인 수준으로 구축되어 있으며, 다년간 극한지 연구에 참여한 연구진을 보유하고 있는 것임. 현재 동결지반의 건설과 관련한 국내 기술수준은 낮지만 단기간에 기술수준 향상이 가능할 것으로 판단됨.
- 반면에 상수도관 동파방지와 관련해서 국내 기술은 선진 외국에 비해 낙후되어 있으며, 고급 인력도 부족한 상황임. 부족한 연구 인력과 낙후된 기술 수준은 핵심기술을 선정하고 선택과 집중을 통해 중장기적으로 극복해야 할 것으로 판단됨.

- 상수도관 동파방지와 관련해 주변 여건은 국내를 벗어난 새로운 미래 공간 창출에 대한 필요성이 증대되고, 러시아 천연가스 국내 도입 등 대형 사업이 구체화 되고 있는 현 상황이 국내의 상수도관 및 에너지라인 관련 건설기술을 향상시킬 수 있는 좋은 기회를 제공할 수 있을 것으로 기대됨.
- 상수도관 동파방지와 관련하여 국제적으로 경쟁이 더욱 심화될 것에 대비하고 단기적 성과보다는 장기적이고 지속 가능한 기술력 향상에 집중해야 할 것으로 판단됨. 아울러 지속적인 기술개발과 관련 분야 전문가 양성을 위한 국가적 차원의 장기적 투자도 요구되는 상황임.

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

1절 상수도관 동파방지 관련 설계 및 시공 기준

1. 서론

우리나라는 지리적 특성상 겨울철에는 한랭한 시베리아기단의 영향을 받아 지역별로 기온차가 매우 크며, 봄이 되면 그 영향이 약해져 기온이 상승한다. 이렇듯 계절이 변함에 따라 기온 차에 의한 동결융해(freezing and thawing)현상으로 상수관과 같은 지하 매립시설 등이 큰 영향을 받고 있는 실정이다.

상수도 관로공사 설계 기준에 따르면 900mm이하의 관경을 가지는 관은 최소토피기준 120cm, 관경 1000mm이상은 최소 150cm이상을 기준으로 하며, 동결깊이가 최소토피기준보다 깊을 경우 동결깊이보다 20cm 이상 깊게 매설하도록 되어있다. 하지만 동결깊이선도를 이용한 최대 동결심도자료를 통해 설계를 하고 있음에도 불구하고 해마다 상수관 동파에 의한 피해가 계속 발생하는 것은 이상 한파에 의한 영향뿐만 아니라 설계기준에서 제시하고 있는 최대동결심도선도(1980~1989)가 현재의 이상기후현상을 적절하게 반영하지 못하는 것 또한 큰 이유가 될 수 있다.

따라서 이 절에서는 국내 상수도 설계 및 시공에 활용되는 기준들의 현황을 파악하고, 설계 및 시공기준과 관련한 국내외 연구 현황을 파악하여 최근 증가하고 있는 동파 피해 방지를 위한 대책 및 개선안을 제시하는데 활용하고자 하였다. 또한 미국, 캐나다, 유럽, 일본, 러시아 등 국외의 설계기준을 조사 및 비교분석함으로 국내의 설계기준에 대한 문제점을 분석하였다.

최근 상수도관과 관련한 세출 추이를 보면 매년 상수도에 소요되는 전체 예산의 30% 이상이 유지관리에 활용되고 있고, 동파로 인한 복구비용이 차지하는 비용이 해마다 증가하고 있으며, 지역에 따라 편차를 보이긴 하지만 전체 유지관리 예산의 25~40% 정도가 소요되는 것으로 추정할 수 있다.

이는 최근의 기후변화에 의해 상수도관 동파피해가 증가하는 추세이며, 국가예산의 많은 부분이 상수도 시설 복구를 위해 소요되고 있다는 것을 보여주며, 국가예산의 절감, 국민 삶의 질적 향상, 상수도관 유지관리의 효율성 확보 등을 위해 기존에 진행되어온 상수도관 설계 및 시공 방안에 대한 검토 및 개선이 필요하다고 판단된다.

<표 3-1-1> 연도별 상수도 세출 추이 (단위 : 억원)

구 분	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
전체예산	41,615	43,278	47,542	48,755	51,405	53,718	53,672	54,798	57,736	61,481	65,166
유지관리비	12,323	13,206	14,774	16,272	18,634	20,770	22,299	21,649	22,803	23,413	25,389

2009년 상수도 통계 - 환경부

본 연구에서는 국내 상수도 설계 및 시공에 활용되는 기준들의 현황을 파악하고, 설계 및 시공기준과 관련한 국내외 연구 현황을 파악하여 최근 증가하고 있는 동파 피해 방지를 위한 대책 및 개선안을 제시하는데 활용하고자 하였다.

2. 국내외 상수도관 동파 관련 기준 조사

가. 국내 상수도관 동파 관련 기준 조사

본 연구에서는 현재 상수도관의 설계 및 시공에 활용되는 국내 관련 기준들을 조사하여 기존의 기준들이 상수도관 동파를 방지하기 위해 적절한 설계 및 시공방안을 제시하고 있는지 확인하였으며, 기존 기준이 개선되어야 할 방향성을 제시하고자 하였다.

현황 조사를 위해 검토된 기준들은 <표 3-1-2>에 나타내었으며, 상수도 관련 기준 이외에 도로, 공동구, 일반 토목공사 등 지하 매설관의 설계 및 시공과 연관한 기준들을 모두 망라하여 현황 조사에 활용하였다.

<표 3-1-2> 연도별 상수도 세출 추이 (단위 : 억원)

연번	기준	발행년도	발행처
1	상수도관로공사설계기준	2003	환경관리공단
2	상수도공사 표준 시방서	2007	환경부
3	상수도 시설기준	201	한국상하수도협회
4	댐 및 상수도공사 전문 시방서	2008	한국수자원공사
5	토목공사 표준일반 시방서	2005	국토해양부
6	도로설계기준	2005	국토해양부
7	도로공사 표준 시방서	2009	국토해양부
8	토목공사 설계지침	2010	LH공사
9	공동구 표준 시방서	2010	국토해양부

지중 매설관의 동파방지를 위한 국내 설계 및 시공 기준 현황 조사 결과 한국 상하수도협회에서 발행한 “상수도 시설기준(2010)”에 동파와 관련한 기준이 가장 상세하게 정의되어 있음을 확인하였으며, 이는 동파 관련 피해사례가 많은 상수도관의 특성상 동파와 관련된 설계 및 시공 방안에 대해 자세하게 가이드라인(Guide line)을 제시해줄 필요가 있었기 때문으로 판단된다. 이중 관의 매설깊이를 결정하기 위한 기준은 “상수도 시설기준(2010)”, “도로공사 표준시방서(2009)”, “토목공사 표준일반시방서(2005)” 등에서 거의 유사하게 전국의 동결깊이를 참고하여 관의 매설깊이를 결정하도록 하였다. 그러나, 상기 기준에서 기준이 되는 동결깊이 결정 방법이 예전 국립건설시험소에서 제시된 1980년~1989년까지의 전국 동결깊이 측정데이터를 바탕으로 도출된 전국 최대 동결깊이 분포도(Contour Map)를 기준으로하도록 명기하고 있어, 최근 기후변화 및 동결깊이 변화에 대해 적극적으로 반영하지 못하고 있음을 확인하였다.

이외에 국토해양부에서 발행된 “도로설계기준(2005)”와 LH공사에서 발행된 “토목공사 설계지침(2010)”에서는 동결깊이를 결정하기 위해 미공병단에서 제정한 TM 5-852-6에서 작성된 동결깊이와 설계 동결지수 상관도표, 국립건설시험소에서 제안된 상관식 또는 현장관측 자료를 참고하여 동상대책을 세우도록 기준을 제시하고 있다. 이러한 규정은 기존 전국 최대 동결깊이 분포도(Contour Map)만을 기준으로 하였을 때보다 동결깊이를 결정하는데 있어 보다 다각적인 검토를 할 수 있는 장점은 있으나, 1) 기준에서 제시한 방식들이 시일이 지난 과거의 데이터를 참고해야 하거나, 2) 국내 실정과는 맞지 않는 외국의 경험값을 기준으로 도출된 상관식을 이용해야 하는 문제들이 있어 이 또한 개선이 필요할 것으로 판단된다.

<표 3-1-3> 는 한국 상하수도협회에서 발간한 상수도 시설기준(2010)에 수록된 상수도 시설의 동파방지와 관련한 기준들을 정리한 내용이다.

<표 3-1-3> 상수도 시설기준의 동파방지 관련 내용

연번	제목	내용	비고
1.4,2	설계하중 및 외력	8. 구조물 설계에는 일반적으로 온도변화의 영향을 고려한다.	온도변화에 따라 부재에 작용하는 온도응력을 설계에 반영하는 방안에 대해 정의함.
1.4.3	지반 및 기초	한랭지에서 지중구조물을 설계하는 경우에는 지하 동결 및 동상을 고려한다.	0℃ 이하에서 발생하는 지반동결을 고려하여 관거를 매설하도록 정의함. 동결깊이 이하에 관거매설 또는 비동상성 토양으로 기초 치환방법을 제시함.

1.4.4	콘크리트 구조물	한랭지에서는 콘크리트 표면의 동결융해가 반복되는 것에 대한 적절한 대책을 강구해야 한다.	한랭지 콘크리트의 동결융해를 방지하기 위해 부배합 또는 철근 피복량 조절 등을 제시함.
4.2.6	매설위치 및 깊이	한랭지에서 관의 매설깊이는 동결깊이보다 깊게 한다.	한랭지에서는 동결깊이보다 20cm 이상 깊게 매설하고, 구경 500mm이상의 관에서는 관경의 0.5배 이상 깊게 매설. 국립건설시험소의 1980년~1989년 데이터를 참조하도록 명시.
7.4.5	매설위치와 깊이	한랭지에서 관의 매설깊이는 동결깊이보다도 깊게 한다.	한랭지에서 토지의 동결깊이가 표준매설깊이보다 깊을 경우 동결깊이 이하에 매설, 매설깊이 확보가 어려운 경우 단열매트 등 적당한 조치를 강구.
9.4.4	수도계량기 설치와 보호통	공동주택 등의 건물 내에 계량기를 설치하는 경우에는 방한대책 및 교체작업을 위한 공간을 확보해야 한다.	계량기가 온도의 영향을 받는 외부에 설치된 경우 방한대책에 대해 제시.
9.5.6	배관설비	건축물 배관설비에서 관의 손상을 방지할 수 있는 조치가 되어 있어야 한다.	관의 동결, 결로, 부식 및 전식에 대한 방호조치를 강구.
9.7	한랭지 대책	9.7장 전체에서 급수장치내에서의 한랭지 대책에 대한 기준을 다루고 있음.	동결의 우려가 있는 장소에서 내한성을 가지는 급수장치 설비 정의. 급수관의 부설은 동결깊이 이하로 규정. 동결방지용 보온재 및 동결사고 처리 관련 기준 제시.

<표 3-1-3>의 상수도 시설기준의 동파방지 관련 내용을 검토한 결과 도수시설, 배수시설, 급수장치별로 동파피해를 방지하기 위한 기준을 제시하고 있음을 확인하였으며, 상수도 시설의 특성에 맞게 배관설비 및 수도계량기 등에 대한 방한 대책도 제시하고 있음을 알 수 있었다. 그러나 지중에 매설된 이후에는 유지관리 및 보수가 어려운 관거의 매설 기준은 1980년부터 1989년 사이에 국립건설시험소에서 계측한 동결깊이 데이터를 참조하도록 하고 있어, 최근 기후변화 및 동결깊이 변화를 반영하지 못하고 있음을 확인하였다.

상수도 시설기준 이외의 기준들에 대한 동파방지 관련 내용도 정리하였으며, <표 3-1-4> 에 나타내었다.

<표 3-1-4> 매설관 동파방지 관련 기준 조사 내용

<table>
<tr><th>관련기준</th><th>제목</th><th>내용</th></tr>
<tr><td>댐 및 상수도공사 전문시방서</td><td>제11편 도로 및 포장공사 C11110 동상방지층공</td><td>※시방서 제 8 편 상수도공사에는 상수도시설의 동파방지와 관련한 내용이 수록되어 있지 않으며, 정의되지 않는 시방내용은 “상수도공사 표준 시방서”를 참조하도록 되어 있음
※도로 및 포장공사에 동상방지층공에 대한 내용이 있으며, 동결깊이를 기준으로 포설깊이를 결정하는 방법과 비동결재료에 대한 기준을 제시하고 있음.</td></tr>
<tr><td>상수도공사 표준시방서</td><td>관련 내용 없음</td><td>※상수도공사 표준 시방서에는 동상피해를 방지하기 위한 관거 매설에 대한 기준이 제시되어 있지 않으며, 기타 시공에 관련한 내용은 “토목공사 표준일반시방서”, “도로공사 표준시방서”를 참조하도록 되어있음.</td></tr>
<tr><td>도로공사 표준시방서</td><td>제8장 동상방지층, 보조기층 및 기층 공사</td><td>※표준시방서 8장에 동상방지층과 관련한 내용을 다루고 있으며, 동결깊이, 비동결재료에 대한 기준이 “댐 및 상수도공사 전문시방서”의 내용과 동일함.</td></tr>
<tr><td>토목공사 표준 일반시방서</td><td>제7장 부지시설공사 07110 동상방지층공</td><td>※도로공사 표준시방서의 내용을 간략히 정리하여 수록하였으며, 자세한 내용은 도로공사 표준시방서를 참조하도록 되어있음.</td></tr>
<tr><td>상수도관로공사 설계기준</td><td>5. 토피의 기준</td><td>※일반적인 상수도관 최소토피기준은 다음과 같음
<table>
<tr><th>구 분</th><th>최소토피</th></tr>
<tr><td>관경 900㎜ 이하</td><td>120㎝</td></tr>
<tr><td>관경 1,000㎜ 이상</td><td>관경 이상(단, 최소 150㎝)</td></tr>
</table>
※동결깊이가 최소토피기준보다 깊을 경우 동결깊이보다 20cm 이상 깊게 매설하도록 하였음
※국립건설시험소의 1980년~1989년 데이터를 제시함</td></tr>
<tr><td>토목공사 설계지침</td><td>5. 우수·오수공사 5.3.6 관거의 부설 및 접합</td><td>※관거의 최소 흙두께는 원칙적으로 1m로 하나 연결관, 노면하중, 동결깊이, 도로점용조건 등을 고려하여 적절하게 시공한다.
※얕은층 매설기준
<table>
<tr><th colspan="2">하수관종</th><th>관거 윗부분과 노면과의 거리</th></tr>
<tr><td colspan="2">하수관 본선</td><td>해당도로의 포장두께에 0.3m를 더한값(해당값이 1m에 이르지 않는 경우에는 1m) 이하로 하지 않을 것</td></tr>
<tr><td rowspan="2">하수관 본선 이외의 선</td><td>차도</td><td>해당도로의 포장두께에 0.3m를 더한값(해당값이 0.6m에 이르지 않는 경우에는 0.6m) 이하로 하지 않을 것</td></tr>
<tr><td>보도</td><td>0.5m 이하로 하지 않을 것</td></tr>
</table></td></tr>
</table>

<table>
<tr>
<td>토목공사
설계지침</td>
<td>참고 가.
단지내도로
포장단면
산정</td>
<td>※아파트단지내 도로의 지역별 표준단면을 제시함, 동결깊이를 반영하여 자세하게 지역별로 표준단면을 제시하고 있음.
<table>
<tr><th rowspan="2">구 분</th><th rowspan="2">표층</th><th colspan="2">기층</th><th rowspan="2">보조
기층</th><th rowspan="2">동 상
방지층</th><th rowspan="2">계</th></tr>
<tr><th>역청안정
기층</th><th>입도조정
쇄석</th></tr>
<tr><td>A 구 역
(동결지수 570이상)</td><td>5</td><td>5</td><td>20</td><td>10</td><td>45</td><td>85</td></tr>
<tr><td>B 구 역
(동결지수460~570)</td><td>5</td><td>5</td><td>20</td><td>10</td><td>40</td><td>80</td></tr>
<tr><td>C 구 역
(동결지수360~460)</td><td>5</td><td>5</td><td>20</td><td>10</td><td>30</td><td>70</td></tr>
<tr><td>D 구 역
(동결지수280~360)</td><td>5</td><td>5</td><td>20</td><td>10</td><td>25</td><td>65</td></tr>
<tr><td>E 구 역
(동결지수190~280)</td><td>5</td><td>5</td><td>20</td><td>10</td><td>20</td><td>60</td></tr>
<tr><td>F 구 역
(동결지수 190이하)</td><td>5</td><td>5</td><td>20</td><td>10</td><td>10</td><td>50</td></tr>
</table>
· A구역 : 제천, 홍천, 원주, 양평
· B구역 : 수원, 춘천, 이천, 충주
· C구역 : 서울, 안성, 청주, 영주, 천안
· D구역 : 대전, 부여, 서산, 안동, 논산, 인천
· E구역 : 전주, 정읍, 남원, 익산, 나주, 군산, 상주, 김천, 영천, 문경, 합천, 구미
· F구역 : 부산, 광주, 제주, 여수, 순천, 목포, 경주, 포항, 울산, 진주, 통영, 거제, 김해, 대구, 속초, 삼척, 강릉, 밀양</td>
</tr>
<tr>
<td>공동구
표준
시방서</td>
<td>관련내용
없음</td>
<td>※내부 수용물에 관로를 포함하고 있으나, 동파와 관련된 내용은 없음, 관로가 공동구 내부에 있어 온도의 영향을 받지 않으며 대부분의 관로설비가 난방관 때문으로 판단됨.</td>
</tr>
<tr>
<td>도로
설계기준</td>
<td>제4장
토공
4.4.8</td>
<td>※동절기 한랭지역의 도로나 그 부대시설인 옹벽, 암거 등 구조물 기초와 뒷채움 등에서 흙의 동상작용에 대한 대책 수립 방안을 제시</td>
</tr>
</table>

	동상대책	※미 공병단의 TM-5-852에서 작성된 동결깊이와 설계동결지수 상관도표, 국립건설시험소의 상관식 또는 계측데이터를 참조하도록 함 ※동상에 대한 대책으로 비동상성 재료의 치환, 단열, 안정처리공법, 차수공법 및 기타 보조공법을 적용하도록 함
	제7장 포장공 7.2 포장의 구조	※자갈과 모래와 같은 비동결재료를 사용하여 동결에 대한 피해를 방지하도록 함

상수도관의 경우 도로와 병행하여 매설되는 것이 일반적이므로 기존 설계 및 시공 관련 기준을 조사할 때 매설관 및 도로의 동파방지 관련 기준들을 표 3과 같이 검토하였다.

대부분의 기준들이 매설관을 동결깊이 이하로 매설하도록 기준을 제시하고 있으며, 환경관리공단의 “상수관로 공사 설계기준(2003)”에서는 일반적인 상수도관 최소토피기준과 비교하여 동결깊이 보다 20cm이상 깊게 매설하도록 자세한 매설규정을 제시하고 있으며, 설계기준에 수록된 내용을 첨부하였다.

위와 같이 “상수관로 공사 설계기준(2003)”에서는 상수도관의 매설깊이를 결정할 때는 국립건설시험소의 전국 최대동결깊이 곡선(1980년~1989년, 10년) 자료를 참조하도록 기준에 수록해 두었으며, 20cm 이상의 여유를 두도록 규정하고 있다.

특이하게, LH 공사에서 발행한 “토목공사 설계 지침(2010”에서 아파트 단지 내 도로 포장단면을 결정할 때 동상방지층 기준을 지역별 동결지수에 따라 제시하고 있는 것을 제외하면 대부분의 동결깊이를 결정하기 위한 기준은 국립건설시험소의 1980년부터 1989년까지 10년간의 계측 결과를 참고하도록 하고 있으며, 일부 상관식과 동결지수를 참조하도록 기준을 제시하는 경우도 국내 현황과 맞지 않는 국외 계측데이터를 기반으로한 경험식이나 실제 현장에 적용하기 힘든 상관식들을 참조하게 되어 있어 실효성이 없는 것으로 나타났다.

나. 국외 상수도관 동파 관련 기준 조사 : 미국, 캐나다, 유럽

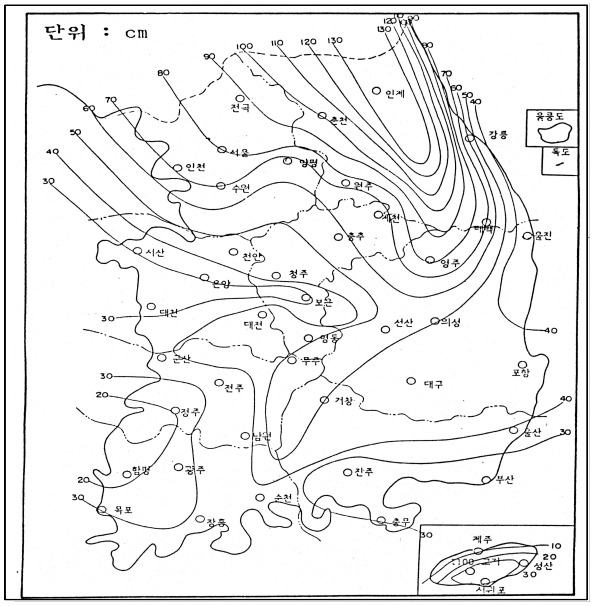
국외에서 상수도관의 동파방지를 위한 기준 현황을 조사하여 국내 상수도관 동파방지 관련 기준과 비교하였다. 국내외 현황 조사를 토대로 상수도관 동파를 방지 관련 설계 및 시공방안의 방향을 결정하고자 하였다.

국외 현황조사를 위해 검토된 조사 자료 중 미국, 캐나다, 유럽을 조사한 자료는 <표 3-1-6>와 같다. 상하수도, 구조물, 지반재료 등 상수도관과 연관이 있는 다양한 분야에 대해 다각적인 조사를 진행하였다.

5. 토피의 기준

(1) 도로에 위치할 경우 도로법 등 관계법에 따르며 도로관리자와 협의하여야 한다.

(2) 도로관리자와 별도 협정이 없거나, 공공도로 이외에 관을 매설하는 경우로써 노면하중을 고려하여야 할 경우, 매설깊이는 <표 5-1>의 최소토피 이상이어야 하고 노면하중을 고려하지 않을 경우에는 그러하지 아니하며, 두 경우 모두 관두께 결정시 고려한 값에 만족하여야 한다.



<그림 3-1-1> 전국 최대동결깊이 곡선(1980 ~1989년 자료)

<표 3-1-5> 노면하중 고려시 최소토피기준

구 분	최소토피
관경 900㎜ 이하	120㎝
관경 1,000㎜ 이상	관경 이상(단, 최소 150㎝)

(3) 상기 (2)에서 결정된 토피는 동결깊이를 고려한 토피 이상이어야 하며, 동결깊이는 <그림 3-1-1> 국립건설시험소의 전국 최대동결깊이 곡선도를 이용하여 구하되 20㎝ 이상의 여유를 가져야 한다.

(4) 상기 (2)에서 결정된 토피는 관부상 검토결과에 따라 깊이를 증가시킬 수 있다.

<표 3-1-6>국외 상수도관 동파 관련 기준 List : 미국, 캐나다, 유럽

대상	자료명	발행기관, 저자
상하수도	AWWA(American Water Works Association) Specifications	미국 AWWA
	Water Pipeline Design Guidelines	캐나다 Saskatchewan 주
	Buried Pipe Design 2nd Ed.	A.P.Moser
구조물	ASCE 32-01 Design and Construction of Frost-Protected Shallow Foundation	ASCE
	Minnesota State Building Code	미국 Minnesota 주
	AASHTO LRFD Bridge Design Specification	AASHTO
	Eurocode 7 Geotechnical Design Part 1: General Rules (EU)	EU
지반재료	ISSMFE	ISSMFE Conference

(1) 상수도 관로 설계

국외 동파관련 기준을 확인하기 위하여 미국 AWWA(American Water Works Association)의 시방서 총 163개를 조사하였다. AWWA에서 출판한 모든 시방서는 상하수도 관로 자체의 설계 및 제작과 관련한 자료지만 지중 내 설치 기준 및 지반의 동결깊이에 관련한 규정은 찾을 수 없었다.

캐나다 중부에 위치한 사스케치원(Saskachewan) 주의 상수도 설계 시방서(Water Pipeline Design Guidelines)에서는 13장 Depth of Cover에서 상수도 매설 시 고려해야 할 지반동결특성을 비교적 자세하게 다루고 있으며, 관련 내용은 <표 3-1-7>에 정리하였다.

<표 3-1-7> 캐나다 Water Pipeline Design Guidelines의 상수도 동파관련 기준

13. Depth of Cover	Water pipeline과 Service connection 상부 토층 두께는 최소한 지반의 동결깊이 이상이 되어야 한다 (예외: shallow-bury winter-drained systems).
	현재 사스케치원 주의 상수도관 상부 토층 두께는 지역에 따라 다르게 되어있다. 2.5 m: Swift Current, Moose Jaw, Regina and

	Weybern 2.7 m: Saskatoon, Biggar, Humboldt and Yorkton 3.0 m: Prince Albert and Nipawin 그러나 이건 예시일 뿐, 실제 피복깊이는 지반의 동결깊이를 산정하거나 유사한 상수도관의 설치 사례를 참고해서 결정해야한다.
	동결깊이는 흙의 종류, 함수비, snow cover, snow pack, 동결지수에 따라 결정된다. depth of cover는 wet areas와 sandier soils에서 증가한다. 이론적인 동결깊이 계산에 의한 설계보다는 성공적으로 운영되고 있는 유사한 구조물의 경우를 참고하는 것이 바람직하다.

현재 캐나다 사스케치원의 상수도관 상부 토층 두께는 지역별로 기준을 제시하고 있으며, 실제 상수도관 매설 시 상기 기준을 바탕으로 기존 설치 사례를 참고하여 해당 지역에 적합한 토피 두께를 결정하도록 하였다. 또한 흙의 종류, 함수비, 적설, 기후변화에 따른 동결지수 등에 따라 동결깊이가 어떻게 변화하는지에 대한 이론적 고찰이 가이드라인에 수록되어 있으나, 실제 현장 적용 시에는 기존 설계 및 시공 사례를 검토하여 적절한 동결깊이를 산정하도록 안내하고 있었다.

매설관의 설계에 관해 집대성한 도서인 “Buried Pipe Design(A.P.Moser, 2008)”에 대해서도 검토를 하였으며, AWWA 시방서들과 마찬가지로 관로 자체 설계에 대한 내용이 대부분인 것으로 확인되었다. 수록 내용 중 지중 매설관에 작용하는 외부하중 중 동결하중(frost loading)에 대한 설명이 간략하게 소개되고 있으며, 매설관 설계 시 지반의 동결특성을 확인하여 매설깊이를 결정하도록 하였다. 또한 동상압의 원리에 대한 설명과 함께 파이프의 강성(rigidity)에 따라 지반동결 시 관로에 작용하는 최대 하중이 일반 하중의 2배까지 증가할 수 있음을 보여주며, 매설깊이를 동결면(frost line)보다 1~2ft(30~60cm) 아래로 정하기를 권장하고 있다.

(2) 구조물 관련 기준

토목 및 건축 구조물 시방서에는 상수도 관로에 대한 기준은 제시되지 않으나 얕은 기초 등 일부 구조물에 대해 지반의 동결특성을 어떻게 고려하는지에 대한 방법론이 다수 수록되어 있으며, 이는 매설관 표토의 동결거동과 연관이 있어 별도로 조사를 하였다.

ASCE 기준(32-01 Design and Construction of Frost-Protected Shallow Foundation)에서는 동상 방지를 위한 얕은 기초의 설계 방안들을 자세하게 기술하고 있으며, 특별한 기준 제시는 없었다<표 3-1-8>.

<표 3-1-8> Minnesota State Building Code

1303.1600 FOOTING DEPTH FOR FROST PROTECTION	최소기초깊이: 토질역학에 능통한 엔지니어가 없는 경우, 최소허용기초깊이는 Zone I은 5 ft, Zone II는 3.5 ft이다. (참고: Zone I이 더 북쪽에 있음)
1305.1805. FOOTINS AND FOUNDATIONS	벽체기초, 교각 및 다른 영구 기초는 반드시 아래 3가지 중 하나의 방법으로 동상 방지가 되어야 한다. 1. 최소기초깊이가 1303.1600을 만족해야 한다. 2. ASCE 32를 따른다. 3. 암반까지 근입

AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials) 기준에서는 얕은 기초가 동결깊이 아래에 위치해야 함을 규정하고 있으며, 동결깊이 결정을 위해서는 지역별로 제시된 최대 동결깊이 분포도(Contour Map)를 참조하도록 하고 있다. 교대, 교각, 벽체의 경우 하부 지반 흙의 동상성(frost susceptible)을 확인하여 동결깊이 아래로 설치를 하거나 비동상성(nonfrost susceptible) 흙으로 치환할 것을 제시하고 있다(<표 3-1-9>참조).

<표 3-1-9> AASHTO 기준

SECTION 10: 기초 (FOUNDATIONS)	얕은 기초는 반드시 동결깊이 아래에 위치하여야 하며, 동결깊이는 지역적 자료에 근거해야 한다.
SECTION 11: 교대, 교각, 벽체 (ABUTMENTS, PIERS, and WALLS)	벽체 하부 지반이 동상이 발생 가능한(frost susceptible) 흙인 경우, 벽체의 최소 근입깊이는 동결깊이 이상이 되어야 한다. 혹은 벽체 근입 부분을 동상이 발생 가능하지 않은 흙(nonfrost susceptible)로 치환해야 한다. 심각한 동결이 예상되는 경우, 교각 기초는 반드시 3.0 ft (90 cm)의 다짐된 굵은 골재에 위치해야 한다.

유럽의 동결피해 방지와 관련한 기준은 Eurocode를 참조하였으며, 채움재료에 대한 동상 가능성 판정, 기초의 동상 피해 방지를 위한 기준, 흙 댐의 동결피해 방지를 위한 방안들을 확인 할 수 있었다(<표 3-1-10> 참조)

<표 3-1-10> Eurocode 7 Geotechnical

5.3.2 Fill, dewatering, ground improvement and reinforcement	채움재 결정 시에는 저온 환경과 동상 가능성을 고려해야 하며,동상 및 팽창 가능성이 있는 흙은 채움재로 사용할 수 없다.
6. Spread Foundations	다음과 같은 경우 동상피해가 발생하지 않는다 - 동상 발생 가능성이 없는 흙인 경우 - 기초 깊이가 동결깊이 아래인 경우 - 단열로 인해 동상이 제거된 경우
12. Embankments	흙 댐 표층의 동결피해는 반드시 일정 수준으로 제한되어야 한다. 제방 관리 시에는 표층의 동상깊이를 계측해야 한다.

(3) 지반재료 관련 기준

지중 구조물의 동결에 대한 피해를 방지하기 위한 접근법은 크게 1) 동결깊이 이하에 매설하는 방법과 2) 동결에 영향을 받지 않는 비 동상성 재료로 치환하는 방법으로 나뉜다.

동결에 영향을 받지 않는 비 동상성 재료를 판정하기 위해서는 동결에 따른 흙의 거동에 대한 이해가 선행되어야 하며, 미공병단(US Army TM 5-818-2-2, 1985)에서는 동상성 판단에 대한 기준을 아래와 같이 제시하고 있다. <표 3-1-11>는 동상민감성 판정을 위해 세립분 함유량에 따른 흙의 동상성 판정 기준을 제시하고 있으며, 일반적인 통일 분류법과도 비교를 하였다.

<표 3-1-11> 동상민감성 판정 위한 흙의 분류(US Army TM 5-818-2-2, 1985)

동상민감성	Soil type	세립분 함유량	일반적인 통일분류법
NFS *	(a)Gravels Crushed stone, rock	0~1.5	GW, GP
	(b)Sands	0~3	SW, SP
PFS **	(a)Gravels Crushed stone, rock	1.5~3	GW, GP
	(b)Sands	3~10	SW, SP
S1	Gravelly soils	3~6	GW,GP, GW-GM, GP-GW
	Sandy soils	3~6	SW, SP, SW-SM, SP-SM
S2	Gravelly soils	6~10	GW, GW-GM, GP-GW
	(a)Gravelly soils	10~20	GW, GW-GM, GP-GM
F1	(b)sands	6~15	SM, SW-SM, SP-SM
	(a)Gravelly soils	> 20	GW, GC
F2	(b)Sands, except very fine silty sands	> 15	SM, SC
	(c)Clays. PI>12	-	CL, CH
F3	(a)All silts	-	ML, MH
	(b)Very fine silty sands	> 15	SM
F4	(c)Clays, PI>12	-	CL, CL-ML
	(d)clays and other fine-grained	-	CL, CL-MLCL and ML; CL, ML, and SM; CL, CH and ML; CL, CH, ML and SM

※ *NFS* : 비동상성 흙
PFS : 동상이 발생 가능한 흙(동상성 판정을 위한 실내실험 필요)
S1 : 세립분 함량이 3~6%인 자갈질 흙
S2 : 세립분 함량이 3~6%인 모래질 흙
F1 : 세립분 함량이 6~10%인 자갈질 흙
F2 : 세립분 함량이 10~20%의 자갈질 흙(실트질 제외)
F3 : 자갈질의 흙이 0.02 mm보다 가는 입자를 20 %이하 가지고 있거나 모래인 경우 이것을 15%이하, 소성지수가 12%이하
F4 : 입경이 0.02 mm이하의 함량 15% 이상, 소성지수가 12% 이상

다. 국외 상수도관 동파 관련 기준 조사 : 일본

국외의 상수도관의 동파방지를 위한 기준 현황 조사를 위하여 일본의 기준들을 조사하였으며, 일본 수도협회에서 발간한 “수도설계지침”과 일본 하수도협회에서 발간한 “하수도설계지침”을 검토하였으며, “동북지방 다설(다설) · 한랭지 설비 설계 요령”도 검토하였다.

<표 3-1-12> 국외 상수도관 동파 관련 기준 List : 일본

대상	자료명	발행기관, 저자
상하수도	수도설계 지침	일본 수도협회
	하수도 설계 지침	일본 하수도협회
구조물	동북지방 다설(다설) · 한랭지 설비 설계 요령	동북지방청

“수도설계지침”과 “하수도설계지침”은 모두 매설관에 대해서 동결깊이 이하로 매설하는 것을 기준으로 하고 있으며, 그 외에 기준은 따로 제시하고 있지 않고 있다. “동북지방 다설(다설) · 한랭지 설비 설계 요령”에서는 동북지방 지역별 기상 데이터를 기준으로 최저기온이 -10℃ 이하인 "한랭지 A"지역과 최저기온이 -5℃ 이하인 "한랭지 B" 지역을 구분하여 별도의 동결피해 방지 기준을 마련하고 있으며, 동결피해 방지를 위해 지중매설 깊이를 동결깊이 이하로 결정하도록 하였다.
일본 기준의 경우 지반 동결에 의한 지중 매설물의 피해를 방지하기 위해서 주로 동결깊이 이하에 매설하도록 기준을 제시하고 있으며, 정확하고 신뢰성 있는 동결깊이 예측을 위해 많은 연구와 오랜 기간의 데이터 수집 작업을 수행해 왔다.

현재 일본에서 지중 매설물 설치를 위해 동결깊이를 결정할 경우 지역별로 정리된 “동결치환깊이 분포도”나 장기간의 데이터 수집을 통해 얻어진 경험식인 데라다의 동결깊이 산정식을 활용하고 있다. 이 외에도 꾸준한 데이터 수집을 바탕으로 지역별로 특화된 동결지수 데이터를 제시함으로써 동결깊이 결정에 대한 신뢰성을 높이고 동결깊이 아래에 매설된 구조물에 대한 동파 피해에 대한 안정성을 확보하고 있다(<표 3-1-13> 참조).

<표 3-1-13> 동북지역 10년 확률 동결지수 일람표

아오모리현

地名	凍結指数	標高(m)	地名	凍結指数	標高(m)
大間	79	14	鰺ヶ沢	78	40
むつ	148	3	深浦	66	66
小田野沢	147	6	弘前	155	30
今別	99	30	黒石	165	40
脇野沢	105	15	酸ヶ湯	805	920
市浦	106	20	三沢	127	39
蟹田	165	3	十和田	152	42
五所川原	118	9	八戸	104	27
青森	113	4	碇ヶ関	218	145
野辺地	129	43	休屋	138	408
六ヶ所	154	85	三戸	100	38

니기타현

地名	凍結指数	標高(m)	地名	凍結指数	標高(m)
種市	119	70	宮古	53	43
軽米	255	153	紫波	173	170
二戸	194	120	川井	143	206
山形	234	290	沢内	261	327
久慈	91	25	大迫	194	140
荒屋	273	310	山田	64	4
奥中山	392	430	湯田	222	250
葛巻	302	390	遠野	209	273
普代	110	7	釜石	23	15
岩泉	114	112	若柳	153	100
小本	101	10	江刺	146	42
藪川	634	680	大船渡	24	37
雫石	224	208	一関	72	32
盛岡	154	115	千厩	91	77

아키타현

地名	凍結指数	標高(m)	地名	凍結指数	標高(m)
秋田	77	−	岩見山内	119	55
能代	52	6	角館	136	56
鷹巣	124	29	田沢湖	245	228
大館	186	59	大正寺	92	20
毛馬内	45	126	大曲	143	30
湯瀬	192	236	東由利	94	117
八幡平	452	620	横手	133	59
男鹿	69	20	矢島	60	72
大潟	69	−3	湯沢	142	96
五城目	78	6	湯の岱	192	320
阿仁合	192	120	八森	49	31

야마카타현

地名	凍結指数	標高(m)	地名	凍結指数	標高(m)
差首鍋	192	90	楯岡	83	100
金山	164	170	左沢	113	133
鶴岡	−	16	山形	59	152
狩川	−	17	小国	65	140
向町	154	212	高畠	122	220
肘折	194	365	高峰	127	250
尾花沢	110	110			

미야자키현

地名	凍結指数	標高(m)	地名	凍結指数	標高(m)
駒ノ湯	239	525	石巻	47	43
気仙沼	82	62	新川	144	264
築館	77	25	塩釜	62	105
米山	89	5	仙台	13	39
志津川	62	38	川崎	116	200
大衡	94	55	白石	42	86
鹿島台	55	3			

후쿠시마현

地名	凍結指数	標高(m)	地名	凍結指数	標高(m)
茂庭	66	250	船引	90	460
桧原	386	839	只見	133	377
福島	9	67	郡山	16	230
喜多方	172	212	川内	161	410
鷲倉	658	1210	南郷	213	540
飯館	127	452	小野新町	160	433
猪苗代	221	521	田島	243	570
金山	100	324	白河	38	354
若松	75	212	石川	73	290

라. 국외 상수도관 동파 관련 기준 조사 : 러시아

러시아에서는 러시아 표준 시방서(SNip)에서 모든 토목구조물과 관련한 기준과 시방을 제시하고 있으며, 특히 동토지역에 대한 기준들이 다른 나라에 비해 매우 자세하게 규정되어 있다.

Snip 2.04.12.86 Steel pipeline strength calculation에서는 관에 작용하는 하중에 대해 간략히 정의해 두었으며, 하중에 대한 상세한 내용은 SNip 2.01.07-85를 참조하도록 하였다. SNip 2.01.07-85에는 매설관에 작용하는 Ice load와 thermal load에 대한 설명과 결정 방법을 제시하고 있으며, SNip 2.01.07-85의 4장에서는 하중에 대한 지지력 계수(load-bearing capacity), 신뢰계수(reliability) 등을 이용하여 매설관 피복깊이를 결정하는 방법을 제시하고 있다.

SNip에서는 동결깊이 산정을 위한 방법을 제시하고 있는데, 연평균기온, 지역에 따른 보정계수, 흙의 특성에 따른 보정계수 등을 참고하여 복잡한 과정을 거쳐 동결깊이를 도출하도록 되어 있으며, 관의 매설 깊이를 결정하기 위해 동결깊이를 활용하기 보다는 매설관에 작용하는 하중조건에 맞게 매설 깊이를 결정하도록 하는 복잡한 방법을 제시하고 있다.

3. 동결깊이 결정을 위한 국내외 연구 현황

가. 국내의 동결 깊이 관련 연구 현황

현재 상수도관의 동파방지를 위해 동결깊이를 결정할 때 가장 많이 쓰이는 국립건설시험소의 동결깊이 산정 보고서 이전과 이후에도 전국의 동결깊이를 지역별로 조사하고, 동결깊이를 예측하기 위한 산정식 개발 연구는 꾸준히 진행되어 왔다.

가장 최근의 연구로는 한국건설기술연구원에서 진행하고 있는 전국 89개소의 현장계측 데이터를 바탕으로한 동결지수와 동결깊이의 관계를 규명하는 연구와 국토해양부 주도로 진행된 도로 동상방지층 설계 기준 개선 방안 마련을 위한 연구가 있다.

<표 3-1-14>은 국내에서 진행된 동결깊이 결정과 관련한 연구들로 선행 연구에서 획득한 동결깊이 데이터들과 관련 노하우를 활용하여 상수도관 동파방지를 위한 기준에 반영한다면 좀 더 신뢰성 있는 동결깊이 결정이 가능할 것으로 판단된다.

<표 3-1-14>국내의 동결깊이 관련 연구 현황

연도	연구자	동결지수	동결깊이	동결깊이 산정식
1967	국립건설연구소	13개 측후소의 1년 자료로 동결지수 산정	-	-

1971	안상진, 백영식	1967~1970년(3년간) 수원측후소의 자료로 동결지수산정	회귀분석에 의한 동결깊이 상관식 제시	- 모래 : $Z=0.14F+3.96$ ($F\geq 28.3$) - 모래질 흙 : $Z=0.14F+5.79$ ($F\geq 41.36$) - 점토 : $Z=0.15F+1.24$ ($F\geq 8.27$) - 점토질 흙 : $Z=0.11F+4.36$ ($F\geq 39.64$) - 일반 흙 : $Z=0.12F+0.71$ ($F\geq 5.85$)
1974	건설부 도로조사단 (외국기술자)	동결지수선도 발표	-	-
1980	건설부	1949~1978년(30년)까지의 기상자료를 기준으로 가장 추운 3년동안의 평균동결지수산정 (30년동안의 자료부족시에 10년간의 자료사용)	1979.2~1980.3까지 육안관찰 및 지중온도계 활용	$Z=-6+5.2\sqrt{F}$
1988	홍원표, 김명환	-	-	$Z=50\cdot \log_{10}(\frac{F}{10\gamma_d\cdot\omega})$
1989	건설부 국립건설시험소	1980~1989년(10년)중에 가장추운 1년으로 동결지수산정	육안관찰 및 지중온도계 활용	$Z=CF^{0.33}$ (C : 10~14)
1999	한국건설기술연구원 (김영진)	포장국도 89개 현장계측에 의한 동결지수와 동결깊이 관계식 제시	포장국도에 동결심도계를 설치하여 동결심도 측정	$Z=C\sqrt{F}$ (C:5.3~6.1)
2003	국토해양부 (한국건설기술연구원, 한국도로공사)	최근 30년간의 자료로 추위가 심한 3년의 평균치 사용(30년동안의 자료부족시에 10년간의 자료사용) 동결지수도 발표, 위도 및 고도에 의한 현장보정	미공병단교범에 의한 동결심도 산정 (도표이용)하며, 노상동결관입 허용법사용	-
2005	국토해양부 (한국건설교통기술평가원)	[도로 동상방지층 설계 기준 개선을 통한 예산 절감 및 환경훼손 저감 방안(국토해양부 2006.12)]이 마련되어 2007.01.01.부터 시행.		
1999~2007	한국건설기술연구원 (김영진)	포장 국도 현장계측에 의한 최대동결심도분포도 작성 (1999~2007) 함수비, 열전도특성을 감안한 동결심도 추정모델 개발 중		

나. 국외의 동결 깊이 관련 연구 현황

(1) 동결깊이 실측치에 의한 산정방법 비교

데라다, Cohem & Fielding, Argue & Denyes 등은 동결심도 산정을 위해 표 13과 같이 경험식을 제시하였다. 이들 경험식은 대부분 동결심도, 동결지수 F(℃・day)의 평방근에 비례하는 간편식 형태인 $z = C\sqrt{F}$로 나타냈으며 <표 3-1-15>에서 실측 자료를 토대로 조건에 따른 상수 C값을 제시하였다.

<표 3-1-15>조건에 따른 동결심도 추정 C값

동결심도산정식	동결심도 추정계수(C)	비 고	
데라다 식	2.94	온난 지역	
	4.0 3.7	F>300 300≤F<100	한랭지역
Argue & Denyes 식	4.3	제설하지 않은 지역	
Cohen & Fielding 식	7.4	지표면이 노출된 지역	
	4.6	30cm 눈이 덮힌 지역	

일본 데라다는 온난한 지역과 한랭한 지역으로 구분하여 제안하였으며 또한, 한랭한 지역에 대하여는 동결지수를 300℃・day를 기준으로 하여 구분하였다.
Argue & Danyes는 도로의 포장상태 및 지표면 상태 등으로 구분하여 경험식을 제안하였다. 그 밖에 Cohen & Fielding은 동결의 피해를 받지 않고 pipe line을 설치하기 위한 설계깊이를 결정하기 위하여 경험식을 제안하였다.

(2) 러시아 동결깊이 산정식

러시아에서 동결심도의 산정은 SNip(러시아 표준시방서)에서 규정하는 산정식을 이용하고 있다. 이 식은 장기계측 자료를 바탕으로 한 경험식으로 기본적으로는 핀란드 SSR모델과 일본 寺田식과 유사하나, 흙의 종류, 적설량, 측정 지역 등의 여러 가지 조건을 고려하여 동결심도를 산정하도록 설계되어 있다. 러시아의 동결심도 산정식은 다음과 같다.

$$h = K_1\sqrt{\sum t} - K_2 S \qquad (3\text{-}1\text{-}1)$$

여기서, h : 동결심도(cm) K1, K2 : 지역상수

$\sum t$: 연평균 영하온도의 합(℃)
S : 12월에서 2월 사이에 쌓인 눈의 평균깊이

식 (3-1-1)에서 지역상수 K1, K2는 경험에 의해 구해진 상수로 각 지역에 SNip에서 규정하고 있는 값을 사용하도록 하였다(캄차카, 사할린 : K1,=4, K2=1, 아무르 : K1,=5.6, K2=3.5, 하바로프스크 : K1,=4.1, K2=5.6).
러시아 동결심도 산정식은 지역특성과 쌓인 눈의 깊이, 기후조건 외에도, 지반의 경사, 적설기간, 흙의 종류, 대상지반의 표고 등을 고려하였다. 이에 대한 보정값은 <표 3-1-16>과 같다.

<표 3-1-16> 지반경사에 따른 동결심도 보정

지반경사 방향	개활지(cm)	도심지(cm)
평평한 지반, 5° 미만의 남서방향 경사	0	0
남쪽 또는 남서방향 경사	-20	0
동쪽 방향 경사	+20	0
북동 또는 북서방향 경사	+40	+20
북쪽방향 경사	+60	+40

흙의 입도와 함수비에 따른 동결심도의 보정값은 <표 3-1-17>과 같으며 해당하는 보정값을 구해진 동결심도에 곱하여 최종 동결심도를 산출한다.

<표 3-1-17>흙의 함수비와 입도에 따른 동결심도 보정

구 분	보정값
함수비 25% 정도의 점성토 또는 세립 사질토	1.00
함수비 25% 이하의 점성토 또는 실트	0.75
자연함수비의 조립토, 자갈	1.33

(3) 핀란드 SSR 모델

핀란드 기술연구센터(VTT, Technical Research Centre of Finland) 산하 토질연구소(GEO, Geotechnical Laboratory)에서는 1982년부터 1984년까지 핀란드 내의 6개 지역에 대한 동상량과 동결심도를 계측하였다. 또한 현장의 비교란 시료를 채취하여 실내 동상시험과 동결침투시험을 수행하여 동상 및 동결깊이를 예측할 수 있는

SSR 모델을 개발하였다(Seppo Saarelainen, 1992).

6개 관측지점 중 핀란드 동부지역인 Joensuu에 대한 동결지수와 관련한 동상량 추정식과 동결심도 추정식을 산정하였다. Joensuu지역은 해발 +79~81m이고, 포장도로는 +80.4m에 이른다. 지반은 대부분 실트질이고 포장면에서 4.7m 정도까지 분포한다. 또한 지하수위는 약 1.8m이다. 측정지점에서의 동상량 추정식과 동결심도 추정식은 다음과 같다.

$$h = 2.25\sqrt{F} - 125 \quad (3\text{-}1\text{-}2)$$

$$z_f = 9.8\sqrt{F} + 126 \quad (3\text{-}1\text{-}3)$$

여기서, h : 동상량(mm)

z_f : 동결깊이(mm)

F : 동결지수(50년 빈도 동결지수, Kh(℃・hour)

(4) 미 육군공병단 경험식

미 육군공병단은 경험적인 방법으로 동결심도 산정식을 다음과 같이 제안하였다.

$$z = 4.69F^{0.53} \quad (3\text{-}1\text{-}4)$$

여기서, z : 동결깊이 (cm)

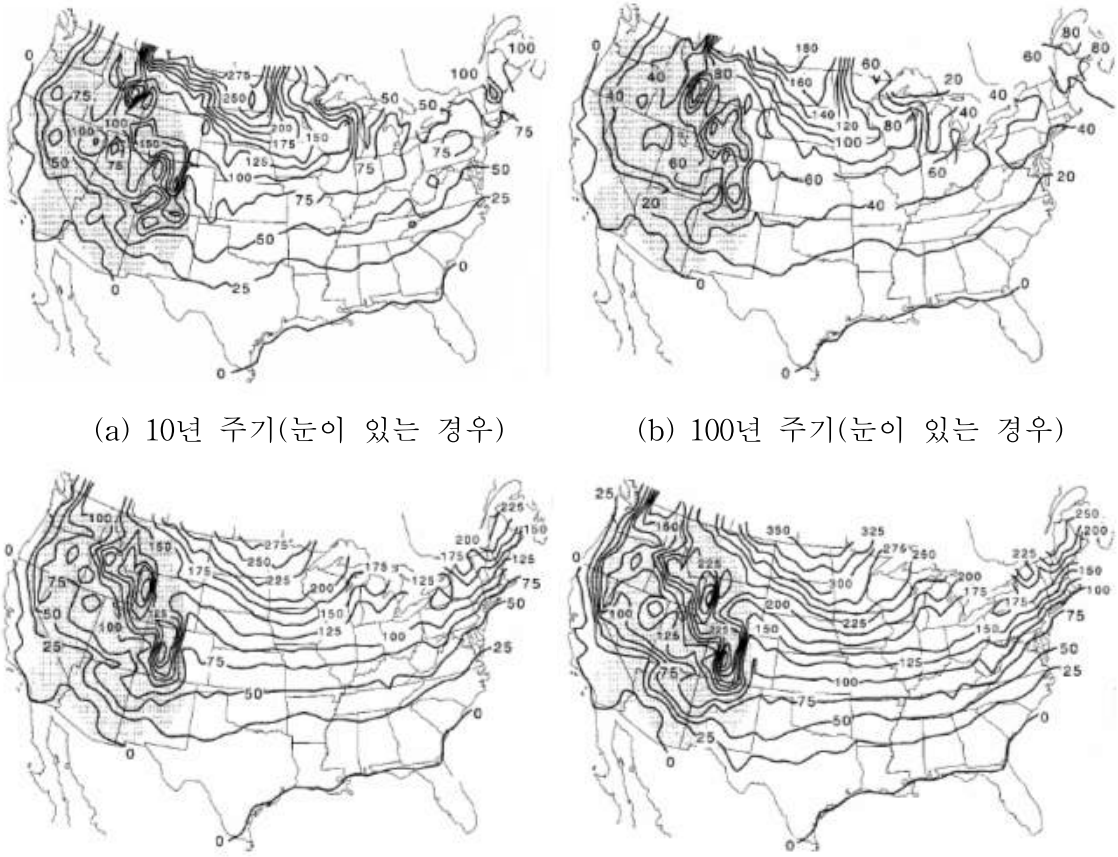
F : 동결지수(℃・day)

(5) 미국 동결깊이 분포도

Degaetano(2001)는 일차원적 열적흐름과 물 흐름을 감안한 NRCC(Northeast Regional Climate Center) 동결심도 추정모델을 발표하였다.

Degaetano는 <그림 3-1-2> 같이 미국 전역 3,562개 기상측후소의 동결심도 자료를 활용하여 눈이 있을 경우와 눈이 없을 경우의 최대 동결심도선도(Contour Map)를 10년 빈도와 100년 빈도로 구분하여 작성하였다.

<그림 3-1-2>과 같이 최대 동결심도선도를 살펴보면 서부내륙 산지지형(로키산맥 등)은 고저차가 심해 동결심도의 분포형태가 불규칙한 형태를 보였고 남부 해안지역(걸프만)과 서부해안지역의 동결심도는 0cm으로 나타났다. 또한 중북부 지역의 최대동결심도는 눈이 없을 때는 350cm로 나타났고 눈이 있을 경우에는 275cm로 나타났다.



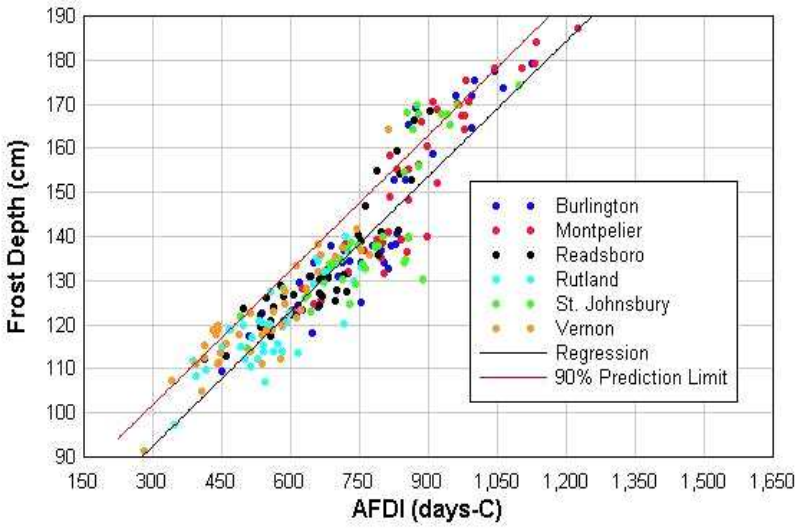
(a) 10년 주기(눈이 있는 경우)　　(b) 100년 주기(눈이 있는 경우)

(c) 10년 주기(눈이 없는 경우)　　(d) 100년 주기(눈이 없는 경우)

<그림 3-1-2> 미국의 최대 동결심도선도(NRCC, 2002)

(6) 버몬트 주 동결깊이 예측

미국 버몬트 주교통국(VAOT)에서는 6개 기상관측소로부터 얻은 기상자료를 통해 도출한 동결지수와 동결심도 측정값의 관계에서 <그림 3-1-3>와 같은 동결심도-동결지수 상관관계를 도시하였다.



<그림 3-1-3> 동결심도-동결지수 상관관계(미 버몬트)

<그림 3-1-3> 의 관계로부터 산정된 동결심도 추정식은 다음과 같다.

$$D = 62.2 + 0.1024F \tag{3-1-5}$$

여기서, D : 동결심도(cm),

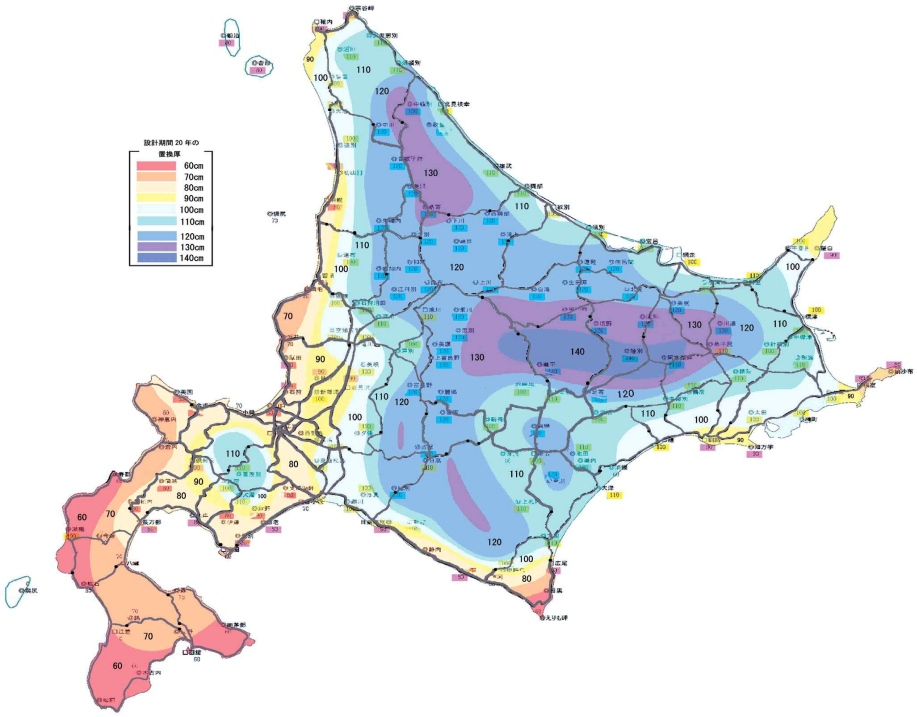
F : 동결지수(℃ · day)

식 (3-1-5)를 바탕으로 버몬트 주의 동결심도 분포도를 작성하였는데 버몬트 주의 동결심도는 최소 120cm에서 최대 230cm 정도에 이르는 것으로 나타났다.

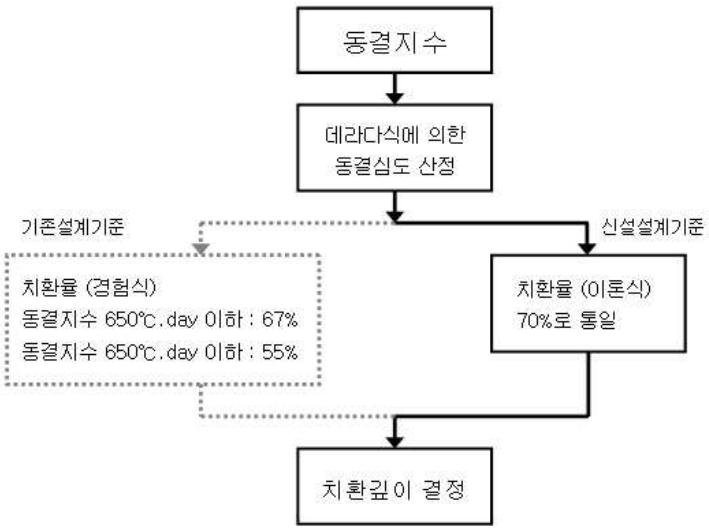
(7) 일본 북해도 지방 동결치환깊이 분포도

일본 도로협회(2001)에서는 최대동결깊이의 70%의 치환율을 적용한 동결치환깊이를 결정하여 <그림 3-1-4>와 같은 동결깊이 설계 치환깊이 분포도를 제시하였다.

기존의 동결치환깊이의 결정은 경험식을 근거로 동결지수 650℃ · day을 기준으로 그 미만에서는 동결심도의 67%의 치환율을, 그 이상에서는 55%의 치환율을 적용하여 설계깊이를 결정하였다. 그러나 실제 북해도 전역 도로에 대한 피해조사를 실시한 결과, 94개소에서 동상으로 인한 파손이 발생되어 치환깊이 결정에 대한 문제점이 지적되었다. 따라서 2001년 12월 포장설계지침 개정을 통해 동결치환기준을 새롭게 개정하였다(일본 도로협회, 2001). 개정된 동결치환깊이 결정은 이론식을 근거로 산정된 동결깊이의 70%를 치환하도록 하였다. 또한 도심지에서는 열섬효과를 고려하여 동결심도의 65%까지 치환깊이를 적용하기도 한다(일본 도로협회, 2001).



<그림 3-1-4> 일본 북해도 20년 주기(1980~2000년) 동결치환깊이 분포도
(일본 도로협회, 2001)

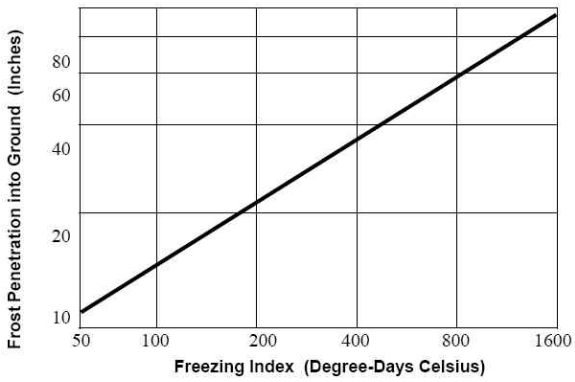


<그림 3-1-5> 치환깊이 결정 순서(일본 도로협회, 2001)

(8) 캐나다 매설관 설계를 위한 동결심도 예측

캐나다 British Columbia주에서는 매설관 설계에 필요한 동결심도 예측을 위해 주

내의 82곳에 대하여 1971년부터 2000년까지 측정한 동결지수 중 최대값을 선택한 동결지수를 이용하여 다음과 같은 동결깊이와 동결지수 상관곡선을 제시하였다.



<그림 3-1-6> 동결심도-동결지수 상관곡선(캐나다 British Columbia주, 2006)

(9) 미국 각주의 동결치환깊이 결정

미국에서의 동결깊이 치환깊이는 각 주마다 적용하는 기준이 다르다. 일반적으로 알래스카 주, 메인 주, 오리건 주, 워싱턴 주에서는 도로 구조체가 동결깊이의 50%를 넘도록 규정하고 있다. 한편, 오하이오 주나 유타 주는 동결깊이 전체를 치환하도록 하며 아이다호 주 경우에는 입자가 큰 돌(rock cap) 등을 치환하도록 규정하고 있다. 반면 몬태나 주와 북 다코타 주 경우에는 도로설계에 동상방지층 설치를 포함하고 있지 않는 곳도 있다.

<표 3-1-18> 미국 동상방지 치환깊이 기준(Pavement Interactive, 2007)

Agency	Use of Frost Protection in Thickness Design
Alaska DOT	Pavement structure > 50% of freeze depth
Maine DOT	Pavement structure > 50% of freeze depth
Oregon DOT	Pavement structure > 50% of freeze depth
Washington DOT	Depth>50% of maximum frost depth expected
Ohio DOT	Remove and replace frost susceptible materials
Utah DOT	Remove and replace frost susceptible materials
Idaho DOT	Capillary break / rock cap
Montana DOT	Frost protection not included in design
North Dakota DOT	Frost protection not included in design

4. 소결론

이 절에서는 상수도관의 동파방지를 위한 국내외 관련 규정들을 조사하여 향 후 안전하고 신뢰성 있는 상수도관의 설계 및 시공을 위한 기준 마련의 방향성을 제시하고자 하였으며, 관련 규정들에 대한 상세하고 다각적인 조사 분석을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 대부분의 국내 기준에서는 상수도관의 동파 피해를 방지하기 위해 관을 동결깊이 이 이하로 매설할 것을 규정하고 있으며, 동결깊이를 결정하기 위해 국립건설시험소의 1980년부터 1989년 사이의 동결깊이 측정 데이터를 참고하도록 하고 있다.

2) 기타 미공병단식, 국립건설시험소 산정식을 참조하도록 되어 있는 기준도 있으며, 비동상성 재료를 이용한 치환공법이나 단열공법을 소개한 기준도 찾을 수 있었다.

3) 미국, 일본, 유럽 등 해외 기준을 조사한 결과 동결깊이를 기준으로 상수도관의 매설깊이를 결정하는 방법을 권장하고 있으며, 불가피한 경우 지반의 동결 민감성을 판정하여 비동상성 재료를 활용하여 동결의 피해를 감소시키는 방법도 소개되고 있었다.

4) 현재 국내 기준에서 규정하고 있는 동결깊이를 기준으로한 상수도관의 매설깊이 결정방법과 비동상성 재료를 활용한 치환공법은 국외에서도 일반적으로 규정하고 있는 동결 피해를 방지하기 위한 안정적인 방법이지만 국내의 경우 국내 환경에 적합한 동결깊이 산정에 대한 신뢰도가 떨어지며, 비동상성 재료를 활용한 방법에 대한 명확한 기준도 제시하고 있지 못한 실정이다.

5) 따라서, 동결깊이 결정에 대한 신뢰성을 높일 수 있는 방안으로 좀 더 많은 양의 동결깊이 관련 데이터를 수집하고 해당 데이터를 바탕으로 신뢰성 있는 동결깊이 결정 방법을 제시할 필요가 있을 것으로 판단되며, 국내 환경에 맞는 비동상성 재료의 판정 기준을 제시할 필요가 있다고 판단된다.

2절 상수도관 동파현황 및 국내 지역별 동결지수 분석

1. 서론

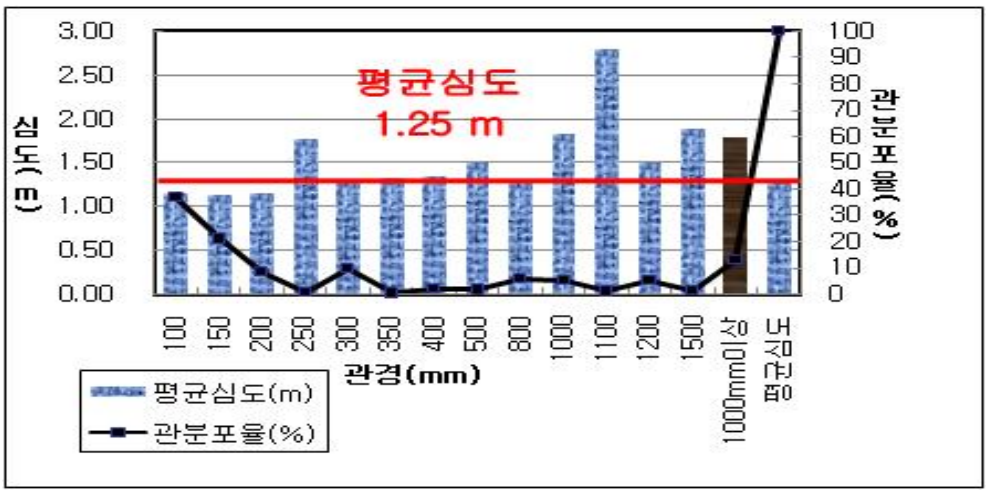
국내의 각 지역마다 매설되어 있는 상수관의 종류 및 관경, 매설심도는 다양하며 기후적인 온도조건뿐만 아니라 관의 재질 및 노후도 또한 관의 동파를 일으키는데 영향을 미친다. 따라서 이 연구에서는 9개도에 대하여 각 지역에 매설되어 있는 상수관의 관경과 관 종류에 따른 매설심도, 상수관의 재질, 상수관의 노후도에 대한 현황분석을 하였고, 지역별, 연도별, 관종별 상수관 동파현황에 대한 조사를 실시하였다. 또한 각 지역별 상부 토질특성을 조사하여 지반공학적 측면으로 동파현상이 일어나는 원인 및 되메우기 재료의 적합성에 대해 분석하였다.

2. 국내 상수관 현황 연구

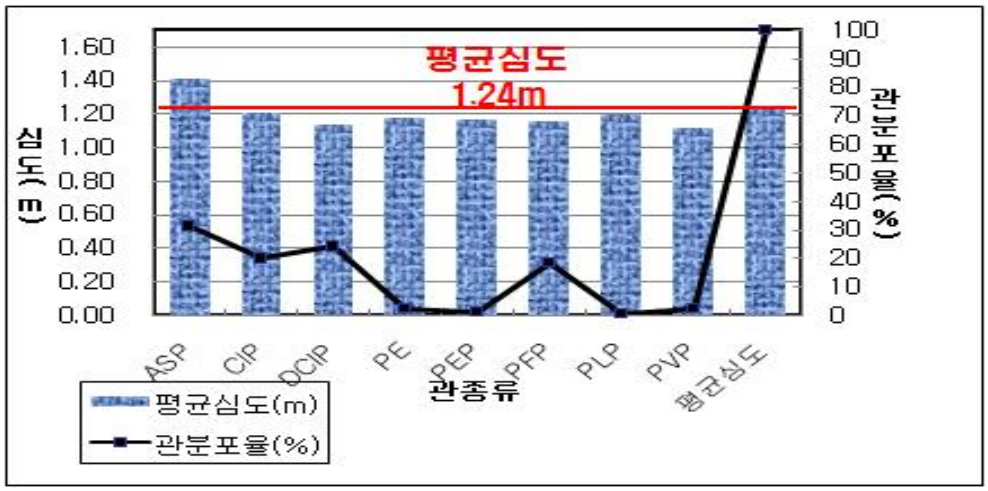
가. 상수관 매설 심도 분석

상수관이 매립심도는 동결깊이 이하로 하여 동파의 위험성을 최소화 하여야 한다. 상수도 시설기준에 의하면 “관로의 매설깊이는 일반적으로 관경 900mm이하는 1200mm이상, 관경 1,000mm이상은 1500mm이상으로 하고, 도로하중을 고려할 필요가 없을 경우에는 그렇게 하지 않아도 된다”고 하였고, “한랭지에서는 동결 심도보다 200mm이상 깊게 매설해야 하며 구경 500mm이상의 관에서는 관경의 0.5배 이상 깊게 매설해야한다”고 하였다. 하지만 관종, 토질조건, 기후조건에 대한 구체적인 규정이 없으므로 실제 매설깊이는 대부분의 지역에서 규정보다 깊게 매설되지 않은 것으로 나타났다.

일반적으로 현재 상수관 매설공사에서는 급배수관 본선의 경우 위치별 특이성(기존 구조물의 간섭, 지하구조물 건설에 의한 이설)이 없는 경우 1.2m로 대동소이하게 매설하고 있다. 이러한 상수도 관의 매설 심도를 <그림 3-2-1>, <그림 3-2-2>에 관경별 분류, 관재질별 분류로 비교하여 나타내었다.



<그림 3-2-1> 관경별 상수도관 매설심도



<그림 3-2-2> 관종별 상수도관 매설심도

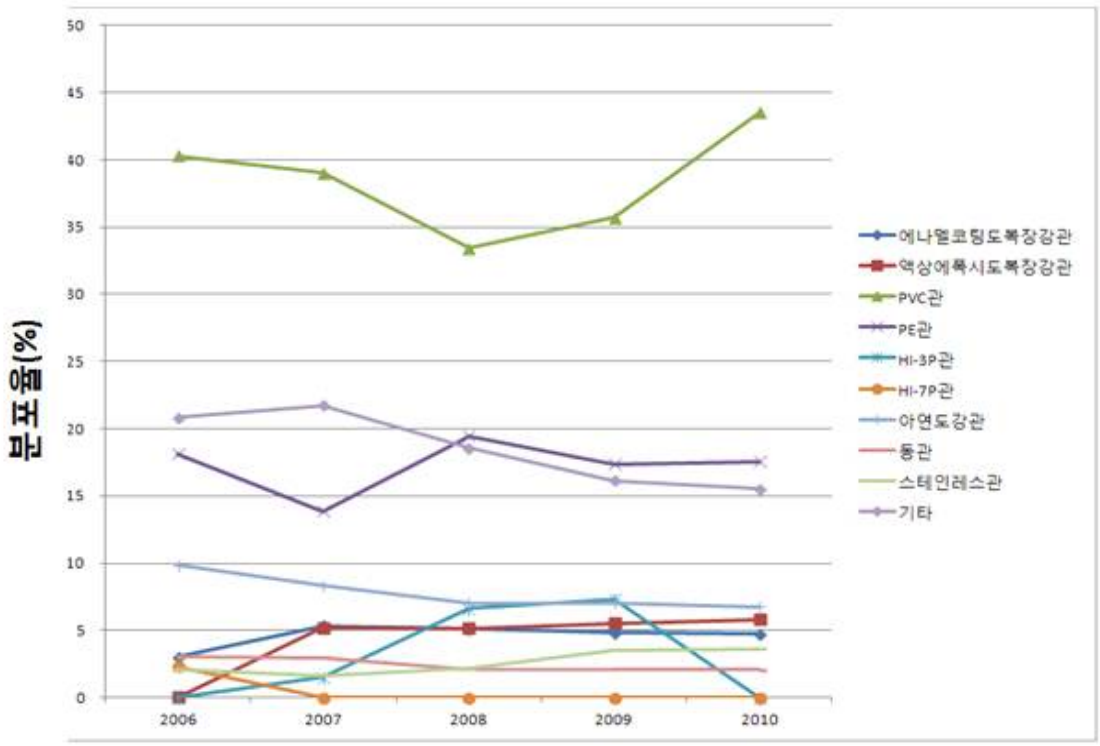
나. 상수관 재질현황 분석

상수관의 재질은 지역 연도에 따라 그 분포가 변화한다. 상수도 관으로는 덕타일 주철관, 강관, 스테인리스강관, 수도용경질폴리염화비닐관 및 수도용폴리에틸렌관등의 관종을 사용한다. 이 관들을 위생성, 호환성, 내구성, 유지관리의 용이성 등을 고려하여 최적의 관종을 선택해야한다(상수도 시설기준, 2010).
대도시의 경우 자재비가 비싸지만 해빙에 용이하고 충격에 강하며 부식성이 없는 스테인리스관의 사용비율이 높지만 지방도시의 경우 노후된 PVC관 또는 PE관을 사용하는 비율이 높았다.
현재의 상수관종은 지역별로 다양하게 사용되고 있으나 지역의 기후, 동결심도, 지반조건등에 따른 기준이 정해져 있지 않아 이에 대한 보완이 필요한 실정이다.
본 연구에서는 상수관의 재질의 변화와 동파와의 상관성을 파악하기 위하여 각 지역별 상수관의 현황을 조사 분석하였다.

(1) 강원도
강원도 지역의 관종 분포 현황이다. 표는 관재질에 대한 관연장과 지역의 분포율을 나타낸 것이다. 분포율은 조사관의 총연장에 대한 해당 관종의 연장이다.

<표 3-2-1> 관재질별 분포율(강원도)

		에나멜코팅도복장강관	액상에폭시도복장강관	주철관	덕타일주철관	PVC관	PE관	HI-3P관	아연도강관	동관	스테인레스관	기타
2006	관연장(m)	109,697	890	17,232	298	1,465,531	658,934	-	83,614	357,410	109,896	75,087
	비율(%)	3	0	0	0	40	18	-	2	10	3	2
2007	관연장(m)	198,761	192,623	17,105	1,335	1,453,312	515,664	55,727	-	309,177	109,896	60,355
	비율(%)	5	5	0	0	39	14	1	-	8	3	2
2008	관연장(m)	199,207	200,936	14,313	1,411	1,305,266	759,355	259,161	-	274,595	82,318	84,143
	비율(%)	5	5	0	0	33	19	7	-	7	2	2
2009	관연장(m)	189,207	215,414	10,320	5,636	1,396,809	679,940	286,734	-	275,393	82,318	137,775
	비율(%)	5	6	0	0	36	17	7	-	7	2	4
2010	관연장(m)	189,207	233,114	10,320	6,211	1,739,689	702,131	-	-	270,810	82,150	144,409
	비율(%)	5	6	0	0	44	18	-	-	7	2	4



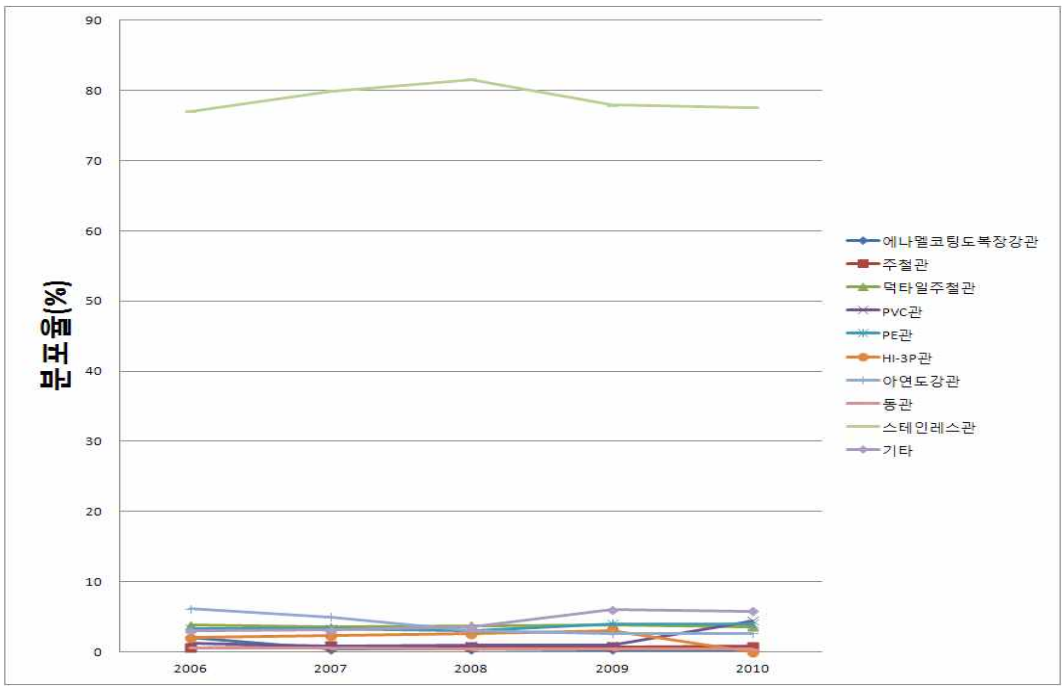
<그림 3-2-3> 관재질별 분포율(강원도)

(2) 경기도

경기도 지역의 관종 분포 현황이다. 표는 관재질에 대한 관연장과 지역의 분포율을 나타낸 것이다. 분포율은 조사관의 총연장에 대한 해당 관종의 연장이다.

<표 3-2-2> 관재질별 분포율(경기도)

		에나멜코팅도복장강관	액상에폭시도복장강관	주철관	덕타일주철관	PVC관	PE관	HI-3P관	아연도강관	동관	스테인레스관	기타
2006	관연장(m)	17,2020	124	50,736	31,2125	105,137	268,987	162,316	498,219	45,685	6,240,180	241,416
	비율(%)	2	0	1	4	1	3	2	6	1	77	3
2007	관연장(m)	32,362	19	74,580	298,262	73,947	277,255	190,232	418,686	45,685	6,671,016	264,266
	비율(%)	0	0	1	4	1	3	2	5	1	80	3
2008	관연장(m)	32,362	1,422	71,558	329,818	79,874	266,152	225,170	263,004	34,512	7,143,236	310,749
	비율(%)	0	0	1	4	1	3	3	3	0	82	4
2009	관연장(m)	32,362	2,536	70,859	354,874	85,724	376,474	284,142	247,762	34,512	7,226,783	557,377
	비율(%)	0	0	1	4	1	4	3	3	0	78	6
2010	관연장(m)	32,362	43,531	72,922	33,8797	415,952	378,856	0	247,829	34,512	7,309,819	550,835
	비율(%)	0	0	1	4	4	4	0	3	0	78	6



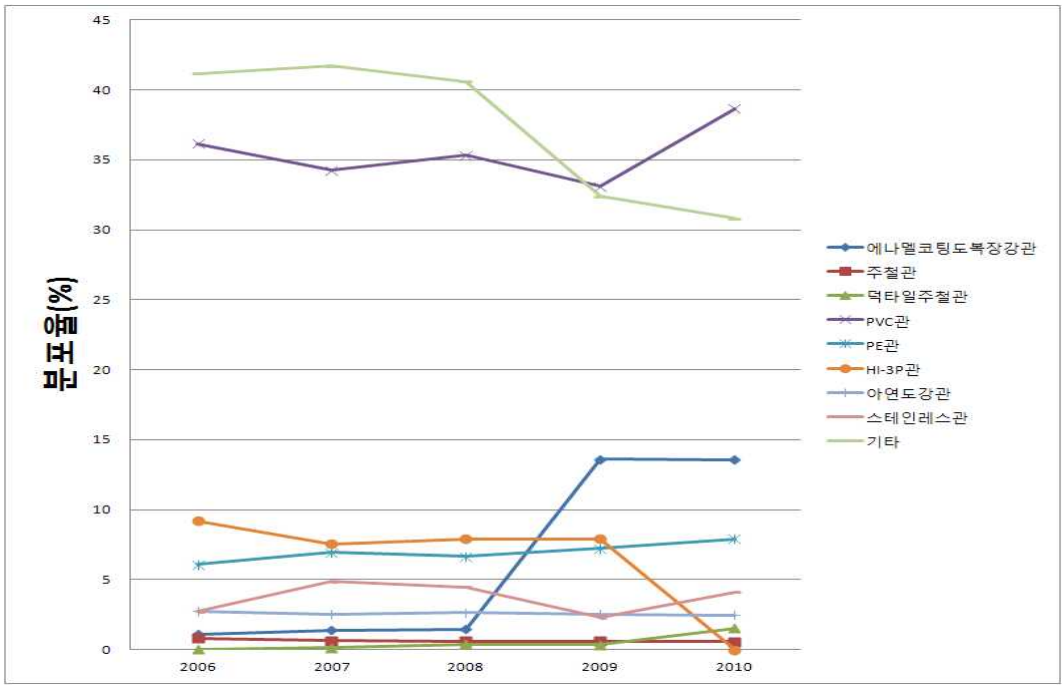
<그림 3-2-4> 관재질별 분포율(경기도)

(3) 충청북도

충청북도 지역의 관종 분포 현황이다. 표는 관재질에 대한 관연장과 지역의 분포율을 나타낸 것이다. 분포율은 조사관의 총연장에 대한 해당 관종의 연장이다.

<표 3-2-3> 관재질별 분포율(충청북도)

		에나멜코팅도복장강관	액상에폭시도복장강관	주철관	덕타일주철관	PVC관	PE관	HI-3P관	아연도강관	동관	스테인레스관	기타
2006	관연장(m)	22,865	0	16,468	823	745,083	125,227	189,999	56,367	0	55,792	84,89 06
	비율(%)	1	0	1	0	36	6	9	3	0	3	41
2007	관연장(m)	30,911	0	14,100	3,191	760,435	154,049	167,562	56,367	0	107,746	926,118
	비율(%)	1	0	1	0	34	7	8	3	0	5	42
2008	관연장(m)	34,510	0	14,529	8,992	844,274	159,192	188,912	63,270	0	106,778	970,169
	비율(%)	1	0	1	0	35	7	8	3	0	4	41
2009	관연장(m)	344,341	0	14,777	8,992	837,546	183,178	200,374	64,014	0	57,934	819,931
	비율(%)	14	0	1	0	33	7	8	3	0	2	32
2010	관연장(m)	354,359	9,862	14,777	39,777	1,008,437	206,430	0	64,014	0	106,767	803,388
	비율(%)	14	0	1	2	39	8	0	2	0	4	31



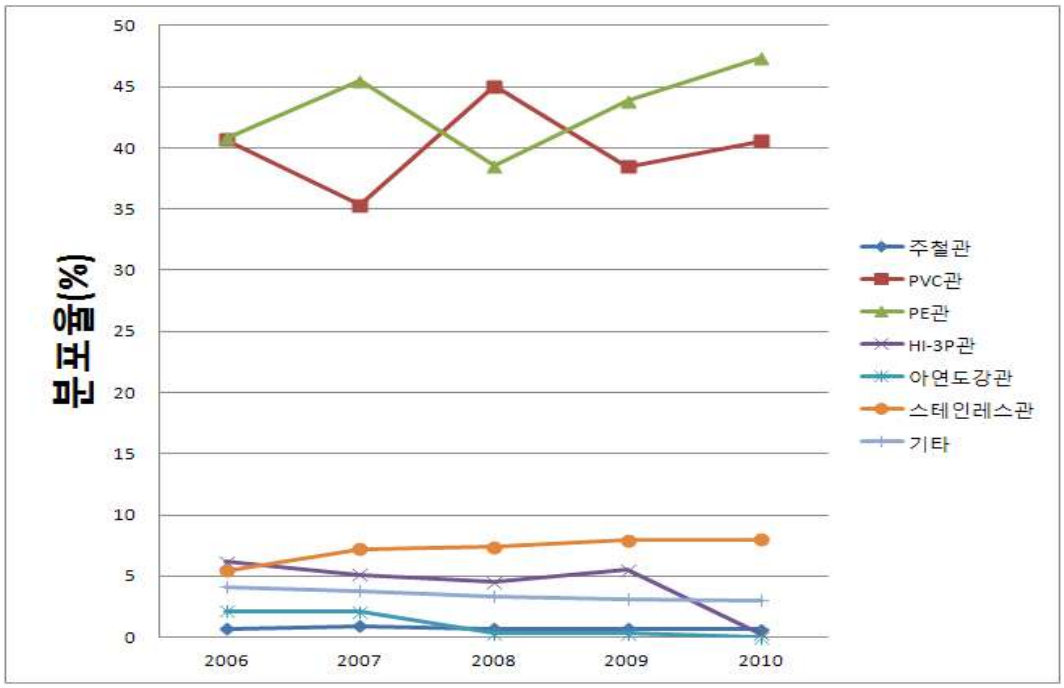
<그림 3-2-5> 관재질별 분포율(충청북도)

(4) 충청남도

충청남도 지역의 관종 분포 현황이다. 표는 관재질에 대한 관연장과 지역의 분포율을 나타낸 것이다. 분포율은 조사관의 총연장에 대한 해당 관종의 연장이다.

<표 3-2-4> 관재질별 분포율(충청남도)

		에나멜코팅도복장강관	액상에폭시도복장강관	주철관	덕타일주철관	PVC관	PE관	HI-3P관	아연도강관	동관	스테인레스관	기타
2006	관연장(m)	17,2020	124	50,736	31,2125	105,137	268,987	162,316	498,219	45,685	6,240,180	241,416
	비율(%)	2	0	1	4	1	3	2	6	1	77	3
2007	관연장(m)	32,362	19	74,580	298,262	73,947	277,255	190,232	418,686	45,685	6,671,016	264,266
	비율(%)	0	0	1	4	1	3	2	5	1	80	3
2008	관연장(m)	32,362	1,422	71,558	329,818	79,874	266,152	225,170	263,004	34,512	7,143,236	310,749
	비율(%)	0	0	1	4	1	3	3	3	0	82	4
2009	관연장(m)	32,362	2,536	70,859	354,874	85,724	376,474	284,142	247,762	34,512	7,226,783	557,377
	비율(%)	0	0	1	4	1	4	3	3	0	78	6
2010	관연장(m)	32,362	43,531	72,922	33,8797	415,952	378,856	0	247,829	34,512	7,309,819	550,835
	비율(%)	0	0	1	4	4	4	0	3	0	78	6



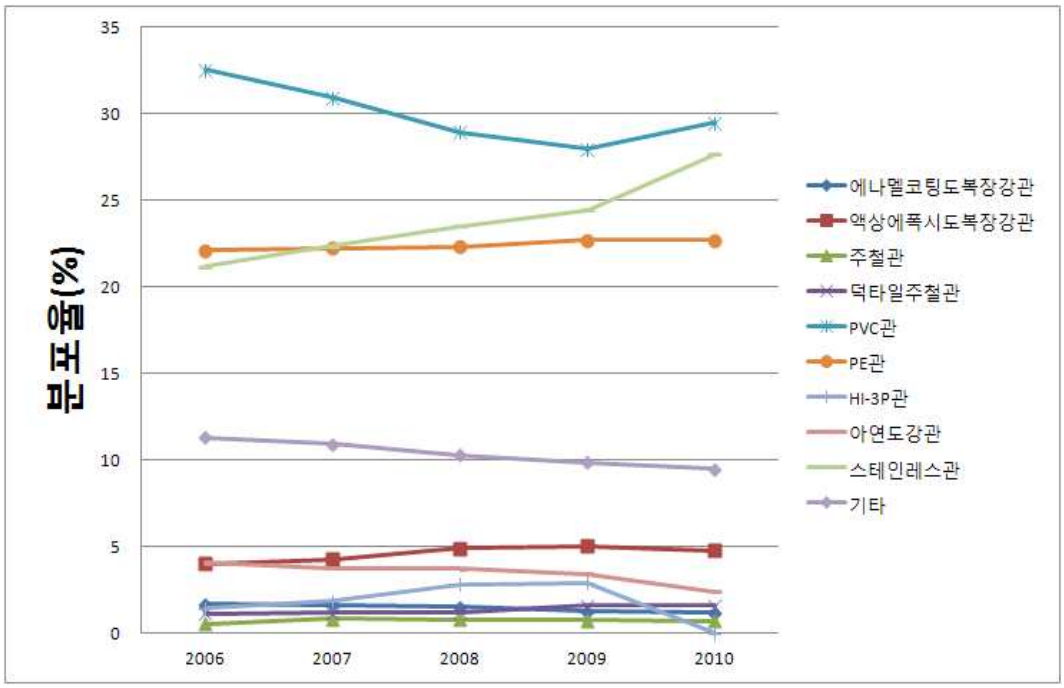
<그림 3-2-6> 관재질별 분포율(충청남도)

(5) 경상북도

경상북도 지역의 관종 분포 현황이다. 표는 관재질에 대한 관연장과 지역의 분포율을 나타낸 것이다. 분포율은 조사관의 총연장에 대한 해당 관종의 연장이다.

<표 3-2-5> 관재질별 분포율(경상북도)

		에나멜코팅도복장강관	액상에폭시도복장강관	주철관	덕타일주철관	PVC관	PE관	HI-3P관	아연도강관	동관	스테인레스관	기타
2006	관연장(m)	113,778	270,617	34,691	75,905	2,183,605	1,484,555	94,662	271,389	59	1,420,872	759,480
	비율(%)	2	4	1	1	33	22	1	4	0	21	11
2007	관연장(m)	113,062	297,215	58,684	80,654	2,143,762	154,1692	127,806	261,276	59	1,551,380	756,044
	비율(%)	2	4	1	1	31	22	2	4	0	22	11
2008	관연장(m)	109,900	357,284	58,684	88,495	2,116,503	1,631,389	205,276	270,904	59	1,719,742	752,610
	비율(%)	2	5	1	1	29	22	3	4	0	24	10
2009	관연장(m)	96,879	385,245	58,684	122,276	2,141,569	1,740,567	223,488	261,821	59	1,871,673	757,136
	비율(%)	1	5	1	2	28	23	3	3	0	24	10
2010	관연장(m)	97,094	398,992	58,699	132,100	2,464,177	1,898,525	0	201,721	59	2,310,215	790,864
	비율(%)	1	5	1	2	30	23	0	2	0	28	9



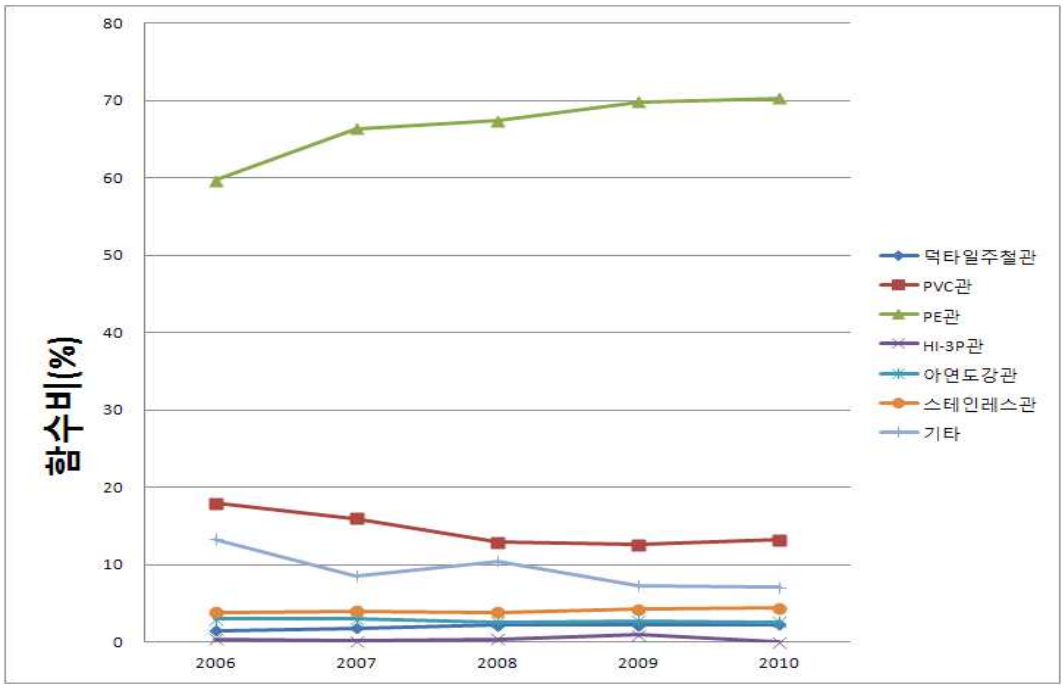
<그림 3-2-7> 관재질별 분포율(경상북도)

(6) 경상남도

경상남도 지역의 관종 분포 현황이다. 표는 관재질에 대한 관연장과 지역의 분포율을 나타낸 것이다. 분포율은 조사관의 총연장에 대한 해당 관종의 연장이다.

<표 3-2-6> 관재질별 분포율(경상남도)

		에나멜코팅도복장강관	액상에폭시도복장강관	주철관	덕타일주철관	PVC관	PE관	HI-3P관	아연도강관	동관	스테인레스관	기타
2006	관연장(m)	0	0	15,002	90,603	1,080,531	3,594,486	24,571	181,029	5,240	230,209	797,520
	비율(%)	0	0	0	2	18	60	0	3	0	4	13
2007	관연장(m)	0	0	10,195	111,642	981,980	4,079,810	8,049	180,808	0	247,412	528,462
	비율(%)	0	0	0	2	16	66	0	3	0	4	9
2008	관연장(m)	0	0	1,5536	150,257	902,625	4,706,481	24,350	181,918	0	269,885	730,104
	비율(%)	0	0	0	2	13	67	0	3	0	4	10
2009	관연장(m)	0	0	10,269	149,022	847,390	4,700,902	60,757	181,918	0	283,753	493,899
	비율(%)	0	0	0	2	13	70	1	3	0	4	7
2010	관연장(m)	0	0	11,159	154,856	918,621	4,898,360	0	181,918	0	303,302	494,134
	비율(%)	0	0	0	2	13	70	0	3	0	4	7



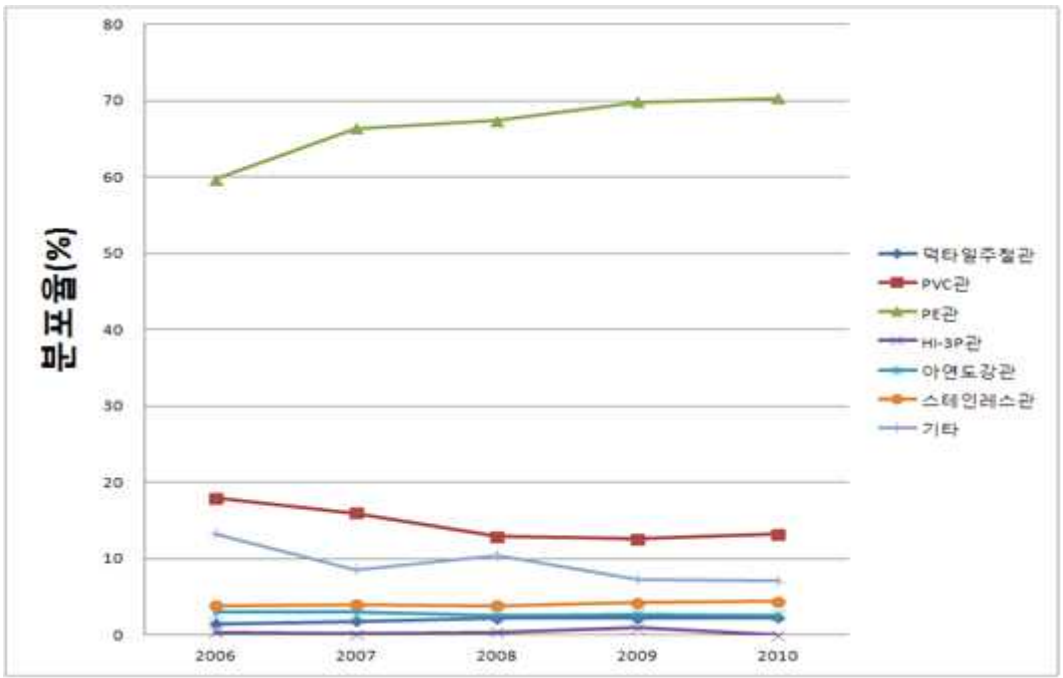
<그림 3-2-8> 관재질별 분포율(경상남도)

(7) 전라북도

전라북도 지역의 관종의 분포 현황이다. 표는 해당년도의 관재질에 대한 관연장과 지역의 분포율을 나타낸 것이다. 분포율은 조사관의 총연장에 대한 해당 관종의 연장이다.

<표 3-2-7> 관재질별 분포율(전라북도)

		에나멜코팅도복장강관	액상에폭시도복장강관	주철관	덕타일주철관	PVC관	PE관	HI-3P관	아연도강관	동관	스테인레스관	기타
2006	관연장(m)	0	0	168,856	6,336	1,133,054	2,887,694	274,369	146,302	2,502	210,694	436,371
	비율(%)	0	0	3	0	22	55	5	3	0	4	8
2007	관연장(m)	0	0	151,577	29,219	1,396,028	2,059,834	1,092,498	146,302	2,500	211,944	438,346
	비율(%)	0	0	3	1	25	37	20	3	0	4	8
2008	관연장(m)	5437	0	145,276	46,277	1,397,373	2,664,570	657,306	139,357	2,500	211,944	297,623
	비율(%)	0	0	3	1	25	48	12	3	0	4	5
2009	관연장(m)	88,361	385,245	58,473	117,022	1,715,729	1,849,722	125,568	149,446	-	1,402,837	703,346
	비율(%)	1	6	1	2	26	28	2	2	0	21	11
2010	관연장(m)	0	0	154,618	47,816	2,318,081	3,572,353	0	144,794	2,500	211,994	337,715
	비율(%)	0	0	2	1	34	53	0	2	0	3	5



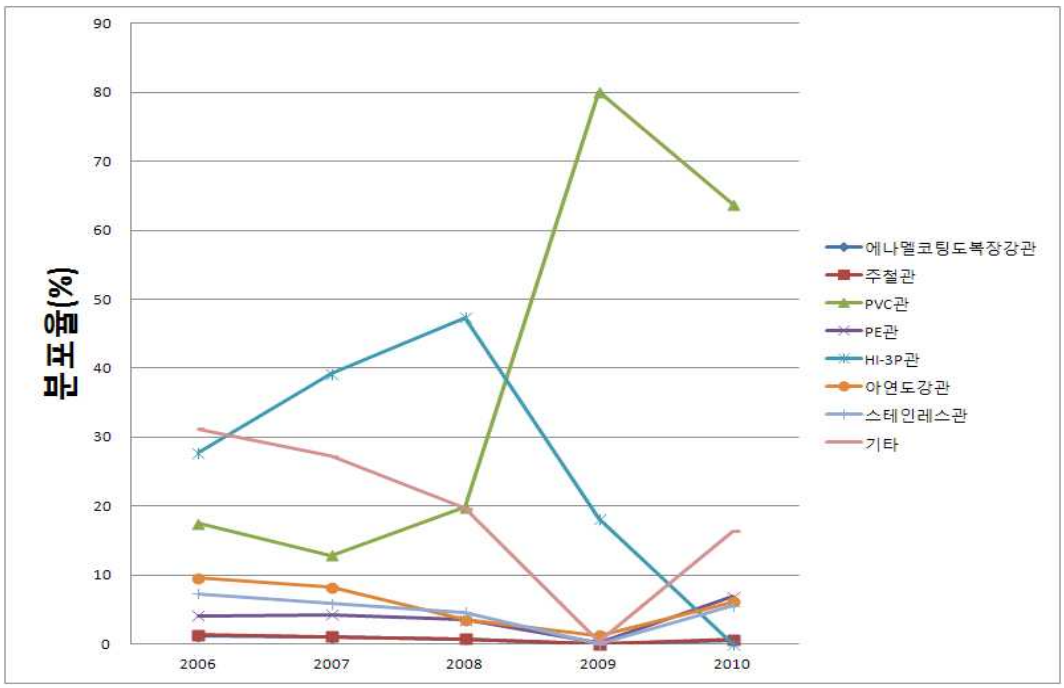
<그림 3-2-9> 관재질별 분포율(전라북도)

(8) 전라남도

전라남도 지역의 관종의 분포 현황이다. 표는 해당년도의 관재질에 대한 관연장과 지역의 분포율을 나타낸 것이다. 분포율은 조사관의 총연장에 대한 해당 관종의 연장이다.

<표 3-2-8> 관재질별 분포율(전라남도)

		에나멜코팅도복장강관	액상에폭시도복장강관	주철관	덕타일주철관	PVC관	PE관	HI-3P관	아연도강관	동관	스테인레스관	기타
2006	관연장(m)	44,255	0	49,776	0	675,317	158,103	1,072,041	369,901	11,171	281,297	1,206,548
	비율(%)	1	0	1	0	17	4	28	10	0	7	31
2007	관연장(m)	41,555	0	44,177	440	533,246	176,151	1,628,419	342,974	11,171	243,006	1,131,176
	비율(%)	1	0	1	0	13	4	39	8	0	6	27
2008	관연장(m)	32,345	0	32,533	0	837,063	149,001	2,001,276	149,880	0	193,263	829,025
	비율(%)	1	0	1	0	20	4	47	4	0	5	20
2009	관연장(m)	0	0	0	0	225,964	500	51,280	3,478	0	0	857
	비율(%)	0	0	0	0	80	0	18	1	0	0	0
2010	관연장(m)	30,188	0	34,067	6,958	3,348,098	359,280	0	321,904	0	289,266	859,431
	비율(%)	1	0	1	0	64	7	0	6	0	6	16



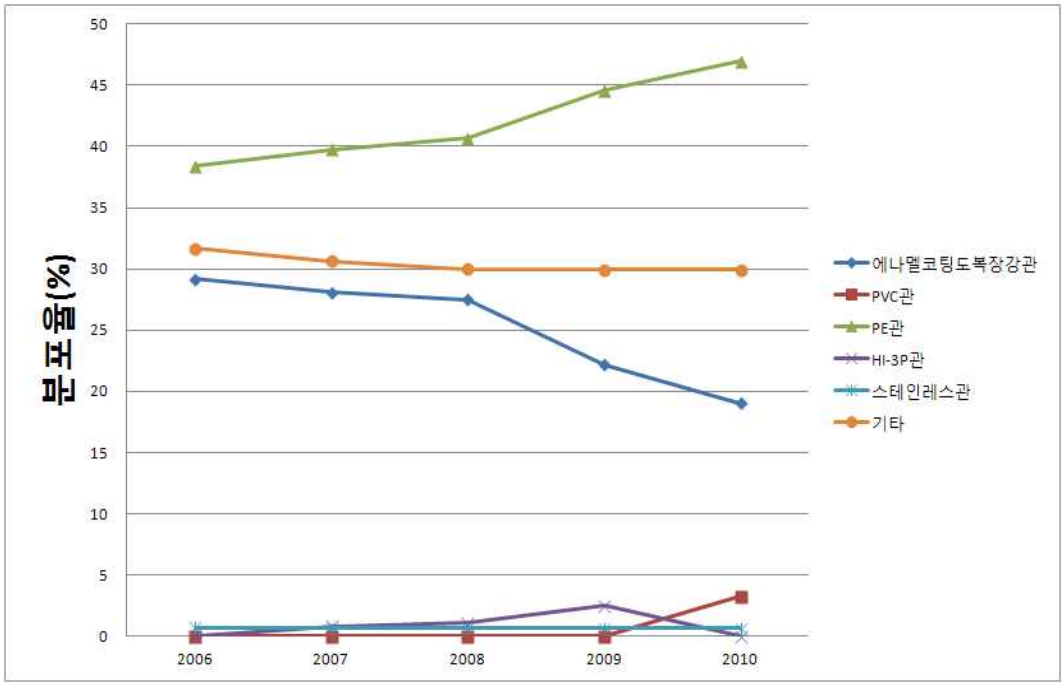
<그림 3-2-10> 관재질별 분포율(전라남도)

(9) 제주도

제주도 지역의 관종 분포 현황이다. 표는 관재질에 대한 관연장과 지역의 분포율을 나타낸 것이다. 분포율은 조사관의 총연장에 대한 해당 관종의 연장이다.

<표 3-2-9> 관재질별 분포율(제주도)

		에나멜코팅도복장강관	액상에폭시도복장강관	주철관	덕타일주철관	PVC관	PE관	HI-3P관	아연도강관	동관	스테인레스관	기타
2006	관연장(m)	828,837	0	1,958	882	0	1,090,981	0	0	0	18,828	899,675
	비율(%)	29	0	0	0	0	38	0	0	0	1	32
2007	관연장(m)	828,837	0	1,958	882	0	1,173,986	23,266	0	0	18,828	903,585
	비율(%)	28	0	0	0	0	40	1	0	0	1	31
2008	관연장(m)	828,837	0	1,958	3,522	0	1,225,745	31,545	0	0	18,828	903,585
	비율(%)	27	0	0	0	0	41	1	0	0	1	30
2009	관연장(m)	669,487	0	1,958	5,760	0	1,345,066	74,279	0	0	18,828	903,585
	비율(%)	22	0	0	0	0	45	2	0	0	1	30
2010	관연장(m)	574,154	0	1,958	5,760	97,481	1,417,934	0	0	0	18,828	903,585
	비율(%)	19	0	0	0	3	47	0	0	0	1	30



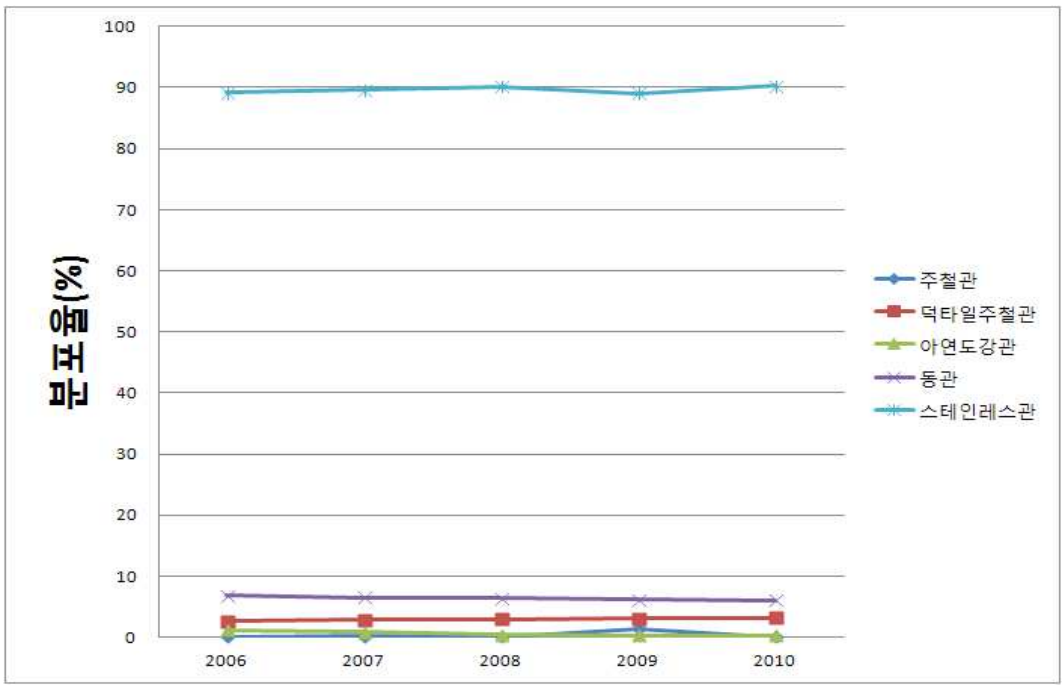
<그림 3-2-11> 관재질별 분포율(제주도)

(10) 서울특별시

서울특별시의 관종 분포 현황이다. 표는 관재질에 대한 관연장과 지역의 분포율을 나타낸 것이다. 분포율은 조사관의 총연장에 대한 해당 관종의 연장이다.

<표 3-2-10> 관재질별 분포율(서울특별시)

		에나멜코팅도복장강관	액상에폭시도복장강관	주철관	덕타일주철관	PVC관	PE관	HI-3P관	아연도강관	동관	스테인레스관	기타
2006	관연장(m)	427	0	3,359	93,593	1,641	38	43	43,832	243,865	3,177,313	11
	비율(%)	0	0	0	3	0	0	0	1	7	89	0
2007	관연장(m)	523	0	4,785	99,977	1,562	31	0	29,090	229,264	3,156,605	0
	비율(%)	0	0	0	3	0	0	0	1	7	90	0
2008	관연장(m)	597	0	3,437	103,423	910	37	0	13,262	220,869	3,142,444	0
	비율(%)	0	0	0	3	0	0	0	0	6	90	0
2009	관연장(m)	589	0	48,345	106,274	850	47	2	11,714	214,115	3,107,292	0
	비율(%)	0	0	1	3	0	0	0	0	6	89	0
2010	관연장(m)	510	0	2,888	109,849	592	37	0	10,885	207,088	3,084,655	0
	비율(%)	0	0	0	3	0	0	0	0	6	90	0



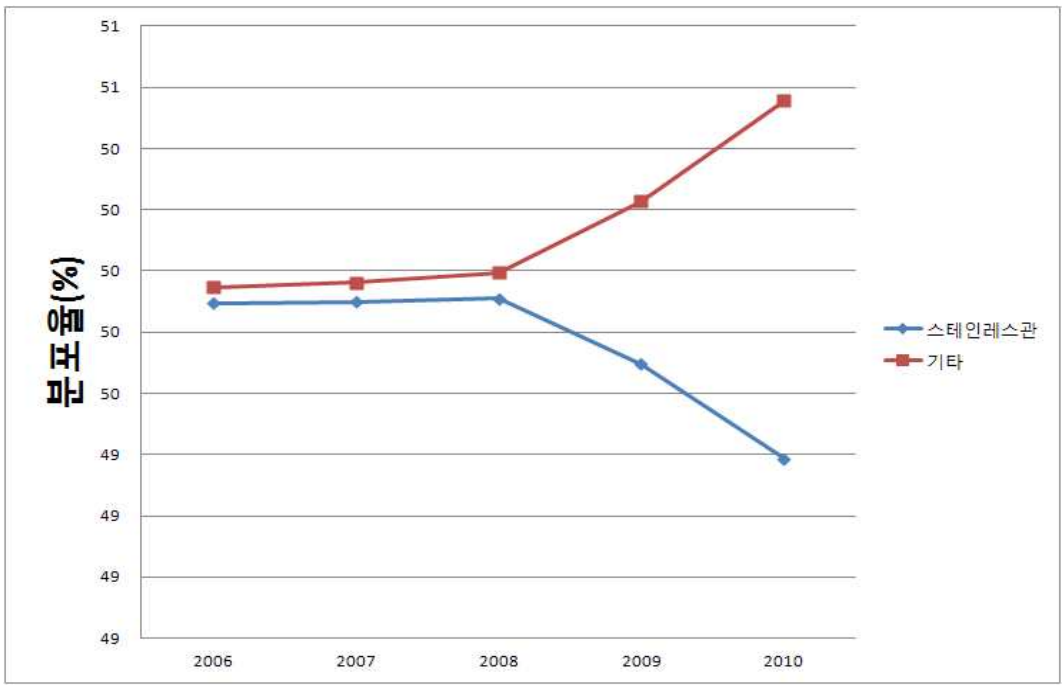
<그림 3-2-12> 관재질별 분포율(서울특별시)

(11) 부산광역시

부산광역시의 관종 분포 현황이다. 표는 관재질에 대한 관연장과 지역의 분포율을 나타낸 것이다. 분포율은 조사관의 총연장에 대한 해당 관종의 연장이다.

<표 3-2-11> 관재질별 분포율(부산광역시)

		에나멜코팅도복장강관	액상에폭시도복장강관	주철관	덕타일주철관	PVC관	PE관	HI-3P관	아연도강관	동관	스테인레스관	기타
2006	관연장(m)	0	0	0	0	1,471	0	2,120	3,349	0	2,174,677	2,176,881
	비율(%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	50
2007	관연장(m)	0	0	0	0	1,261	0	2,103	2,682	0	2,165,109	2,167,813
	비율(%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	50
2008	관연장(m)	0	0	0	0	155	0	2,043	1,933	0	2,166,893	2,170,615
	비율(%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	50
2009	관연장(m)	0	0	0	0	78	0	1,980	1,347	0	2,170,804	2,194,026
	비율(%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	50
2010	관연장(m)	0	0	0	0	1,946	0	0	581	0	2,162,937	2,214,095
	비율(%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49	51



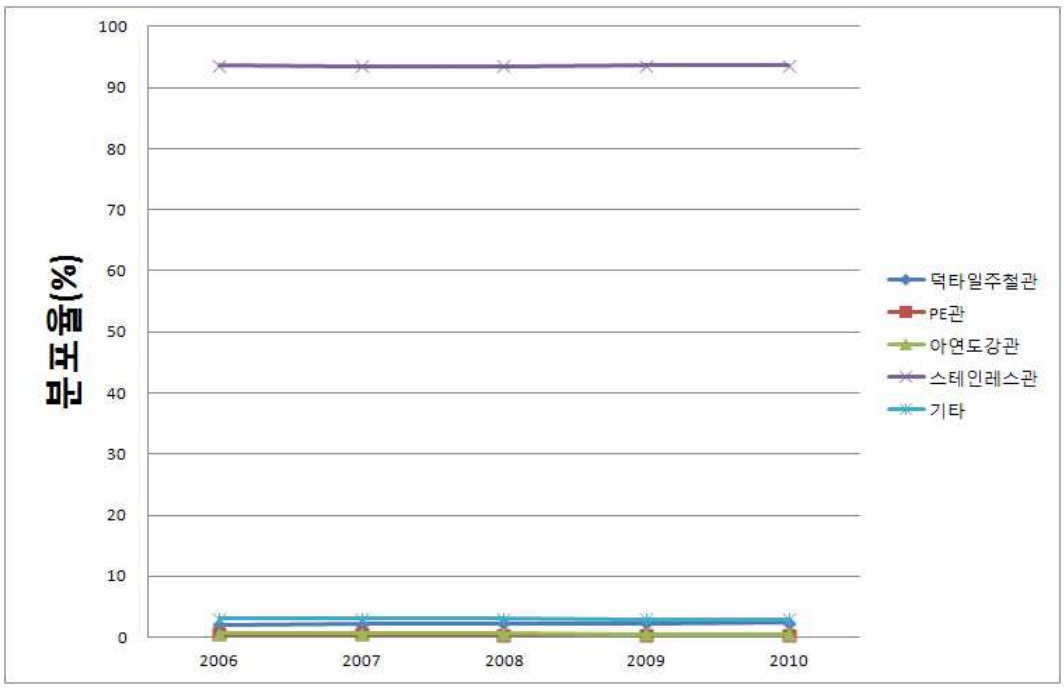
<그림 3-2-13> 관재질별 분포율(부산광역시)

(12) 대구광역시

대구광역시의 관종 분포 현황이다. 표는 관재질에 대한 관연장과 지역의 분포율을 나타낸 것이다. 분포율은 조사관의 총연장에 대한 해당 관종의 연장이다.

<표 3-2-12> 관재질별 분포율(대구광역시)

		에나멜코팅도복장강관	액상에폭시도복장강관	주철관	덕타일주철관	PVC관	PE관	HI-3P관	아연도강관	동관	스테인레스관	기타
2006	관연장(m)	0	0	1,623	39,311	0	10,668	0	12,741	0	1,771,880	57,549
	비율(%)	0	0	0	2	0	1	0	1	0	94	3
2007	관연장(m)	0	0	1,457	41,903	0	9,125	0	11,887	0	1,771,860	58,965
	비율(%)	0	0	0	2	0	0	0	1	0	93	3
2008	관연장(m)	0	0	942	43,281	0	8,237	802	10,835	0	1,761,018	58,128
	비율(%)	0	0	0	2	0	0	0	1	0	94	3
2009	관연장(m)	0	0	876	44,117	0	7,472	1,152	9,989	0	1,766,978	56,673
	비율(%)	0	0	0	2	0	0	0	1	0	94	3
2010	관연장(m)	0	0	876	45,398	1,600	6,963	0	9,513	0	1,769,238	56,080
	비율(%)	0	0	0	2	0	0	0	1	0	94	3



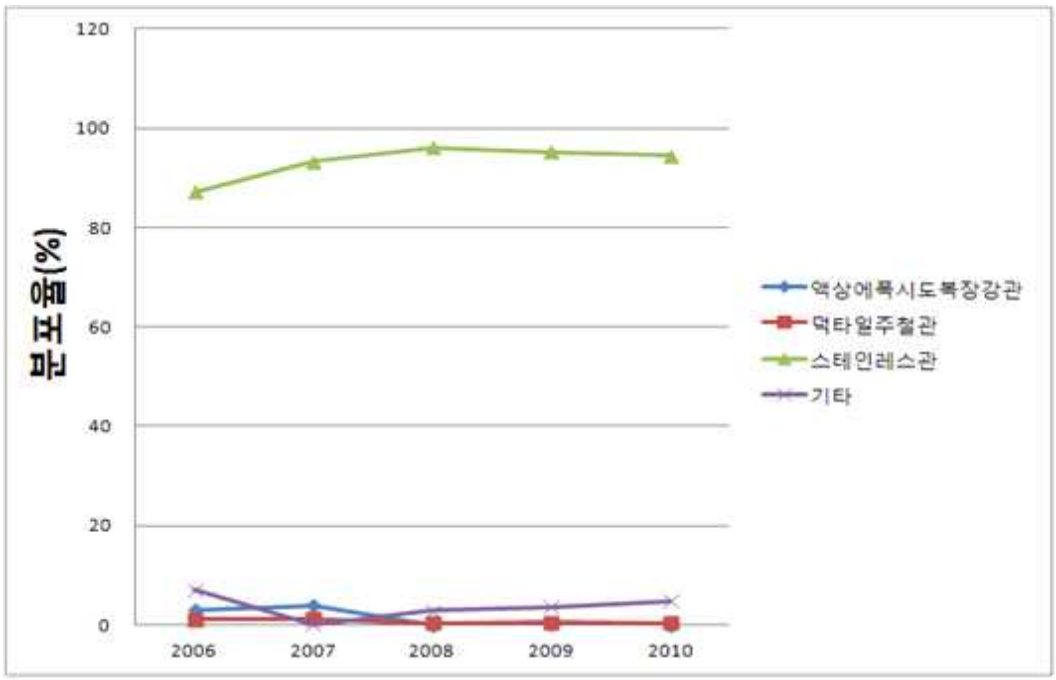
<그림 3-2-14> 관재질별 분포율(대구광역시)

(13) 인천광역시

인천광역시의 관종 분포 현황이다. 표는 관재질에 대한 관연장과 지역의 분포율을 나타낸 것이다. 분포율은 조사관의 총연장에 대한 해당 관종의 연장이다.

<표 3-2-13> 관재질별 분포율(인천광역시)

		에나멜코팅도복장강관	액상에폭시도복장강관	주철관	덕타일주철관	PVC관	PE관	HI-3P관	아연도강관	동관	스테인레스관	기타
2006	관연장(m)	4,234	59,910	8,222	23,283	6,780	2,878	599	8,487	0	1,720,327	138,454
	비율(%)	0	3	0	1	0	0	0	0	0	87	7
2007	관연장(m)	4,676	75,893	6,003	25,015	5,507	3,579	1,643	7,515	0	1,802,336	1,532
	비율(%)	0	4	0	1	0	0	0	0	0	93	0
2008	관연장(m)	1,487	496	965	6,832	3,788	2,298	359	0	0	1,813,756	56,419
	비율(%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	96	3
2009	관연장(m)	2,195	643	1,280	8,737	2,858	1,786	304	3,324	0	1,733,788	66,106
	비율(%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	95	4
2010	관연장(m)	1,278	485	965	6,767	2,193	1,679	0	4	0	1,711,644	87,757
	비율(%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	94	5



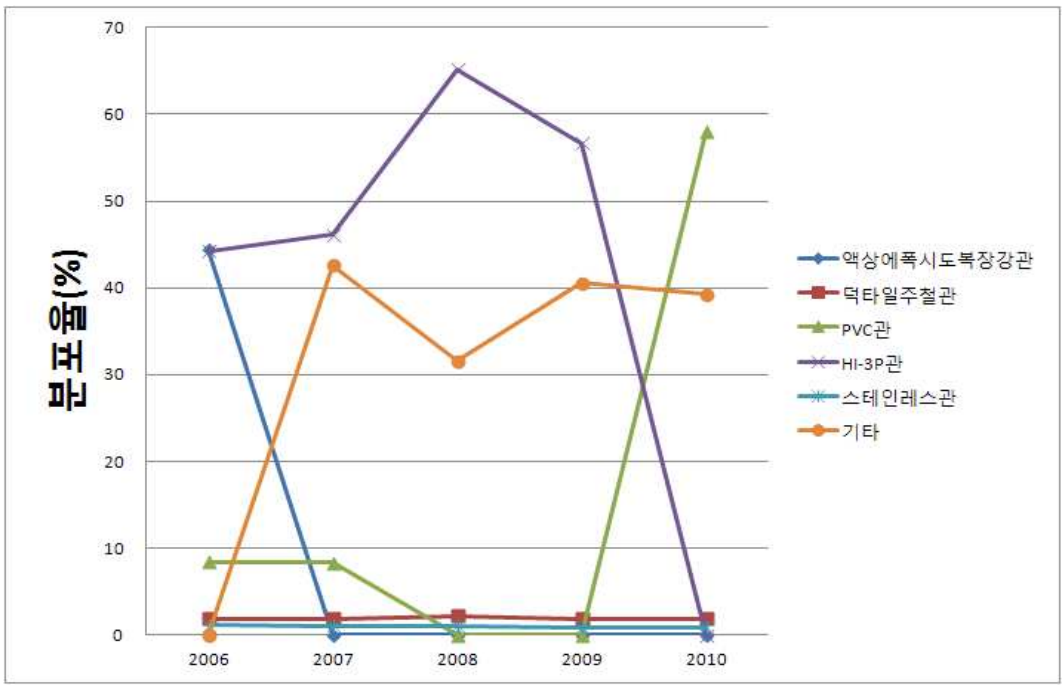
<그림 3-2-15> 관재질별 분포율(인천광역시)

(14) 광주광역시

광주광역시의 관종 분포 현황이다. 표는 관재질에 대한 관연장과 지역의 분포율을 나타낸 것이다. 분포율은 조사관의 총연장에 대한 해당 관종의 연장이다.

<표 3-2-14> 관재질별 분포율(광주광역시)

		에나멜코팅도복장강관	액상에폭시도복장강관	주철관	덕타일주철관	PVC관	PE관	HI-3P관	아연도강관	동관	스테인레스관	기타
2006	관연장(m)	0	1,339,740	0	54,893	253,320	0	1,335,572	2,611	0	33,198	0
	비율(%)	0	44	0	2	8	0	44	0	0	1	0
2007	관연장(m)	0	0	0	55,420	252,058	0	1,392,376	1,200	0	31,980	1,284,414
	비율(%)	0	0	0	2	8	0	46	0	0	1	43
2008	관연장(m)	0	0	0	55,999	0	0	1,668,079	0	0	26,459	807,744
	비율(%)	0	0	0	2	0	0	65	0	0	1	32
2009	관연장(m)	0	0	0	56,009	0	0	1,712,977	0	0	27,479	1,224,582
	비율(%)	0	0	0	2	0	0	57	0	0	1	41
2010	관연장(m)	0	0	0	55,803	1,741,088	0	0	0	0	26,536	1,178,645
	비율(%)	0	0	0	2	58	0	0	0	0	1	39



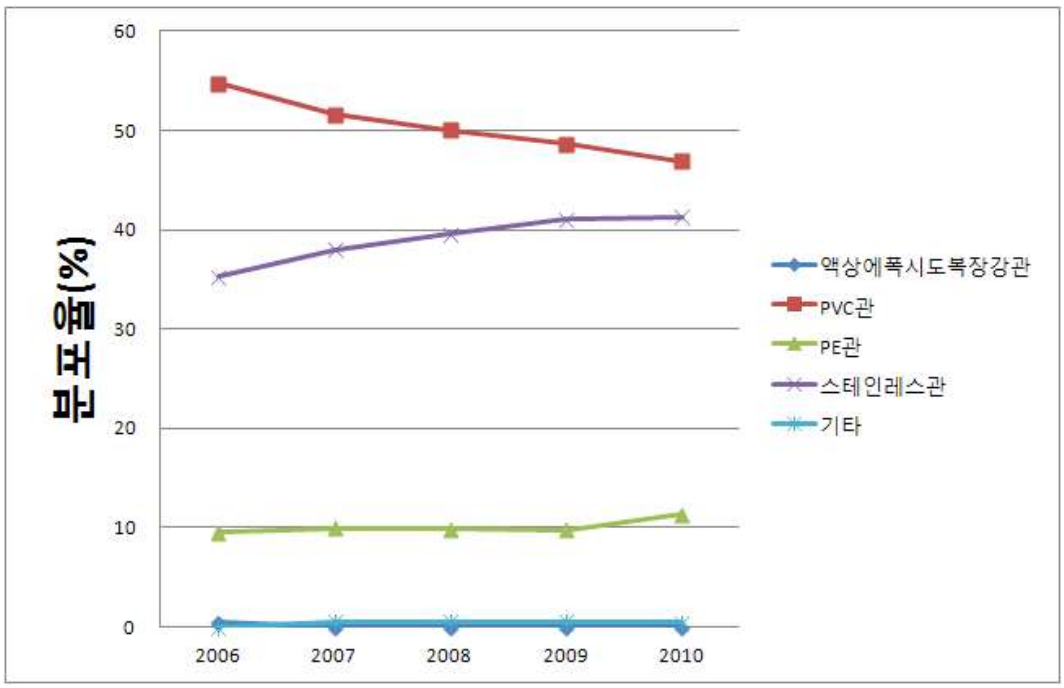
<그림 3-2-16> 관재질별 분포율(광주광역시)

(15) 대전광역시

대전광역시의 관종 분포 현황이다. 표는 관재질에 대한 관연장과 지역의 분포율을 나타낸 것이다. 분포율은 조사관의 총연장에 대한 해당 관종의 연장이다.

<표 3-2-15> 관재질별 분포율(대전광역시)

		에나멜코팅도복장강관	액상에폭시도복장강관	주철관	덕타일주철관	PVC관	PE관	HI-3P관	아연도강관	동관	스테인레스관	기타
2006	관연장(m)	0	10,459	0	0	1,135,168	198,112	0	0	0	731,084	0
	비율(%)	0	1	0	0	55	10	0	0	0	35	0
2007	관연장(m)	0	0	0	0	1,050,587	202,157	0	0	0	773,033	10,459
	비율(%)	0	0	0	0	52	10	0	0	0	38	1
2008	관연장(m)	0	0	0	0	1,016,327	200,928	0	0	0	803,582	10,459
	비율(%)	0	0	0	0	50	10	0	0	0	40	1
2009	관연장(m)	0	0	0	0	988,613	199,425	0	0	0	834,500	10,456
	비율(%)	0	0	0	0	49	10	0	0	0	41	1
2010	관연장(m)	0	0	0	0	945,722	229,323	0	0	0	833,960	8,908
	비율(%)	0	0	0	0	47	11	0	0	0	41	0



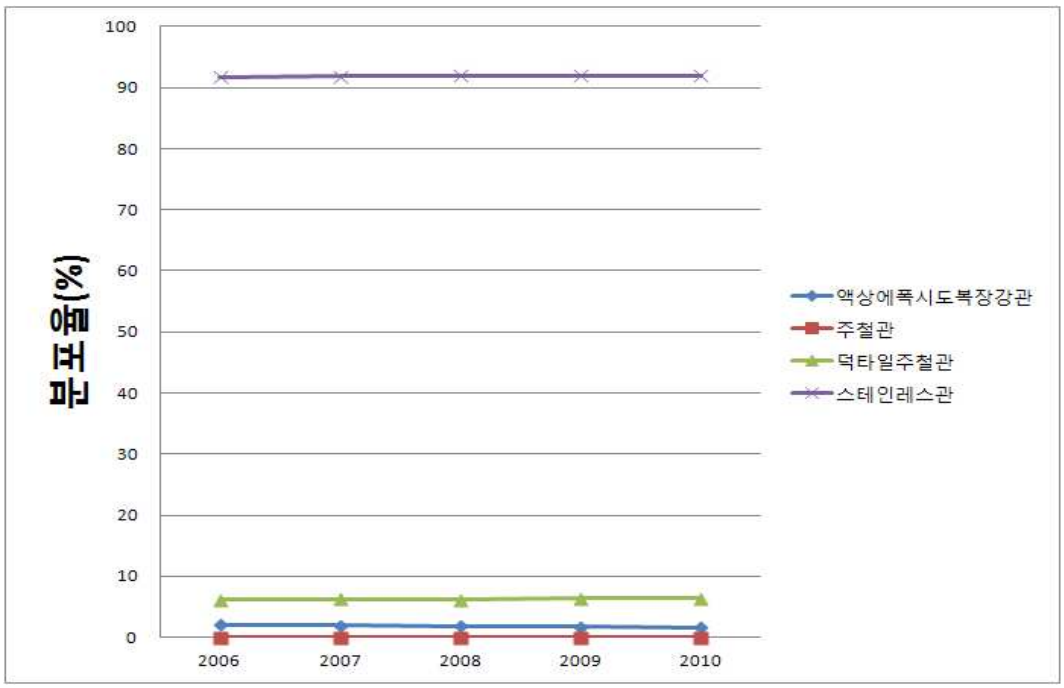
<그림 3-2-17> 관재질별 분포율(대전광역시)

(16) 울산광역시

울산광역시의 관종 분포 현황이다. 표는 관재질에 대한 관연장과 지역의 분포율을 나타낸 것이다. 분포율은 조사관의 총연장에 대한 해당 관종의 연장이다.

<표 3-2-16> 관재질별 분포율(울산광역시)

		에나멜코팅도복장강관	액상에폭시도복장강관	주철관	덕타일주철관	PVC관	PE관	HI-3P관	아연도강관	동관	스테인레스관	기타
2006	관연장(m)	0	20,456	0	60,349	154	0	0	808	0	904,602	0
	비율(%)	0	2	0	6	0	0	0	0	0	92	0
2007	관연장(m)	0	19,097	0	62,153	154	0	0	0	0	915,353	0
	비율(%)	0	2	0	6	0	0	0	0	0	92	0
2008	관연장(m)	0	19,097	0	62,932	154	0	0	0	0	943,003	0
	비율(%)	0	2	0	6	0	0	0	0	0	92	0
2009	관연장(m)	0	17,951	0	67,398	154	0	0	0	0	975,369	0
	비율(%)	0	2	0	6	0	0	0	0	0	92	0
2010	관연장(m)	0	17,606	0	68,793	154	0	0	0	0	995,117	0
	비율(%)	0	2	0	6	0	0	0	0	0	92	0



<그림 3-2-18> 관재질별 분포율(울산광역시)

다. 상수관 노후도 분석

일반적으로 매설관중에서 20년 이상 사용된 관로를 노후관로로 분리한다. 관로의 노후 인해 발생되는 누수는 전체 누수건수의 약30%를 차지하고 연간 8억톤의 물이 누수되는 것으로 조사되었다. 노후된 관로에서 발생되는 누수는 지반 동결, 융해에 따른 부등침하에도 큰 영향을 끼친다. 상수관로의 각 지역별 파손위험성 및 동파영향도를 분석하기 위하여 본 절에서는 9개도의 상수관로의 설치 연도 및 사용 기한을 조사 분석하였다.

서울을 비롯한 광역시에서는 주로 스테인레스관을 사용하고 있었고, 노후도 역시 높은 편이 아니었다. 하지만 나머지 9개도의 경우 PVC관, PE관등을 주로 사용하고 있고 노후도가 높아 교체가 시급한 것으로 나타났으며, 노후도 100%가 넘는 상수도관도있었다. 대도시 위주의 상수도관 교체를 지방으로도 확대해야할 필요성이 있는 것으로 판단된다.

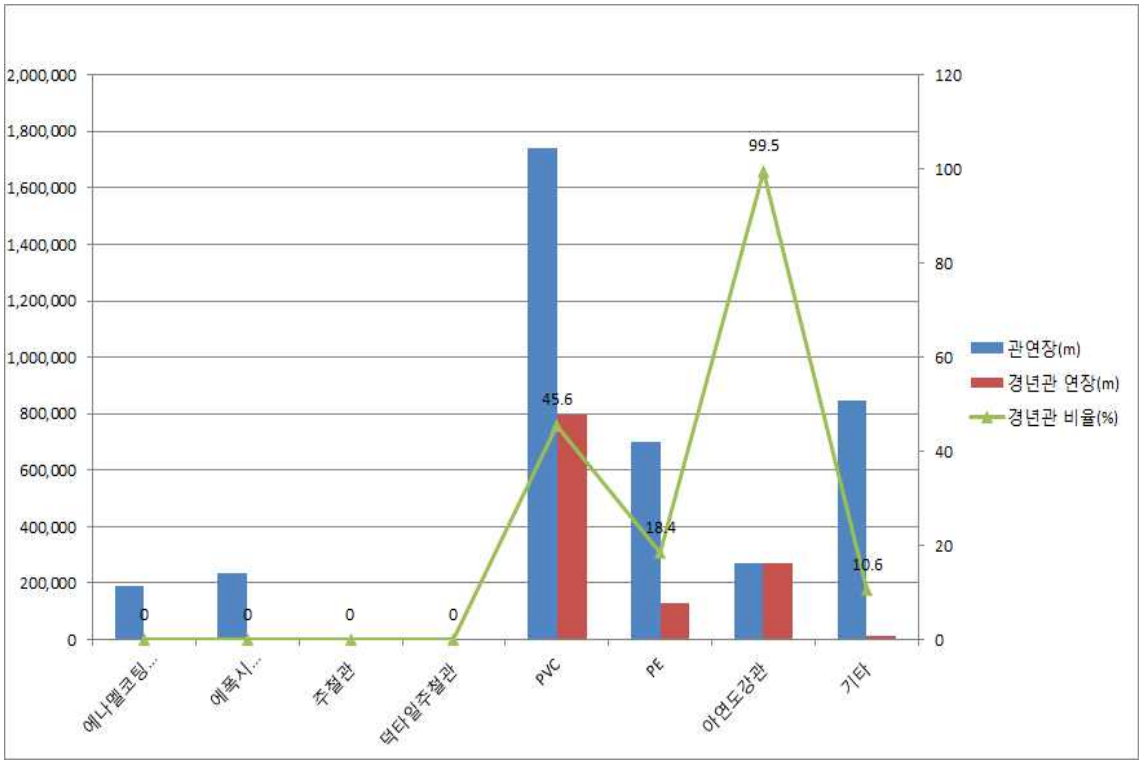
(1) 강원도

강원도지역의 각 관재질별 관의 연장 및 분포, 사용연한이 초과한 경년관의 연장 및 비율 등을 조사하였다. 표는 재질에 따른 관연장과 경년관의 비율, 평균사용 기한을 나타낸 것이다.

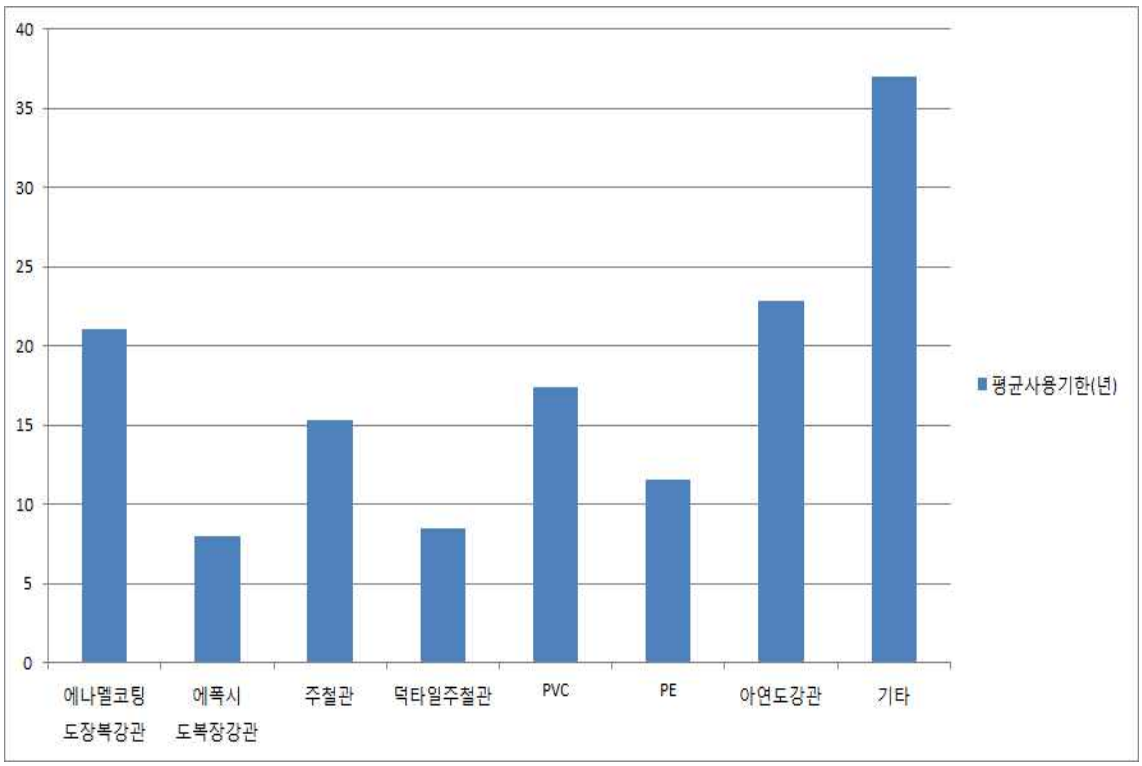
강원도 지역의 경우 가장 많이 사용되고 있는 PVC관의 경우 45.6%로 절반에 PVC관이 노후관으로 나타났고 아연도 강관의 경우 99.5%의 관이 노후관으로 나타나 교체가 시급한 것으로 나타났다.

<표 3-2-17> 관재질별 분포율(강원도, 현재)

관종	에나멜코팅 도장복강관	에폭시도 복장강관	주철관	덕타일 주철관관	PVC	PE	아연 도강관	기타
관연장(m)	189,207	233,114	10,320	6,211	1,739,689	702,131	270,810	846,629
경년관 연장(m)	0	0	0	0	793,684	129,525	269,570	13,597
경년관 비율(%)	0	0	0	0	45.6	18.4	99.5	10.6
평균사용기한(년)	21.1	8.0	15.3	8.5	17.4	11.5	22.8	37



<그림 3-2-19> 경년관 분포율(강원도)



<그림 3-2-20> 평균사용 기한(강원도)

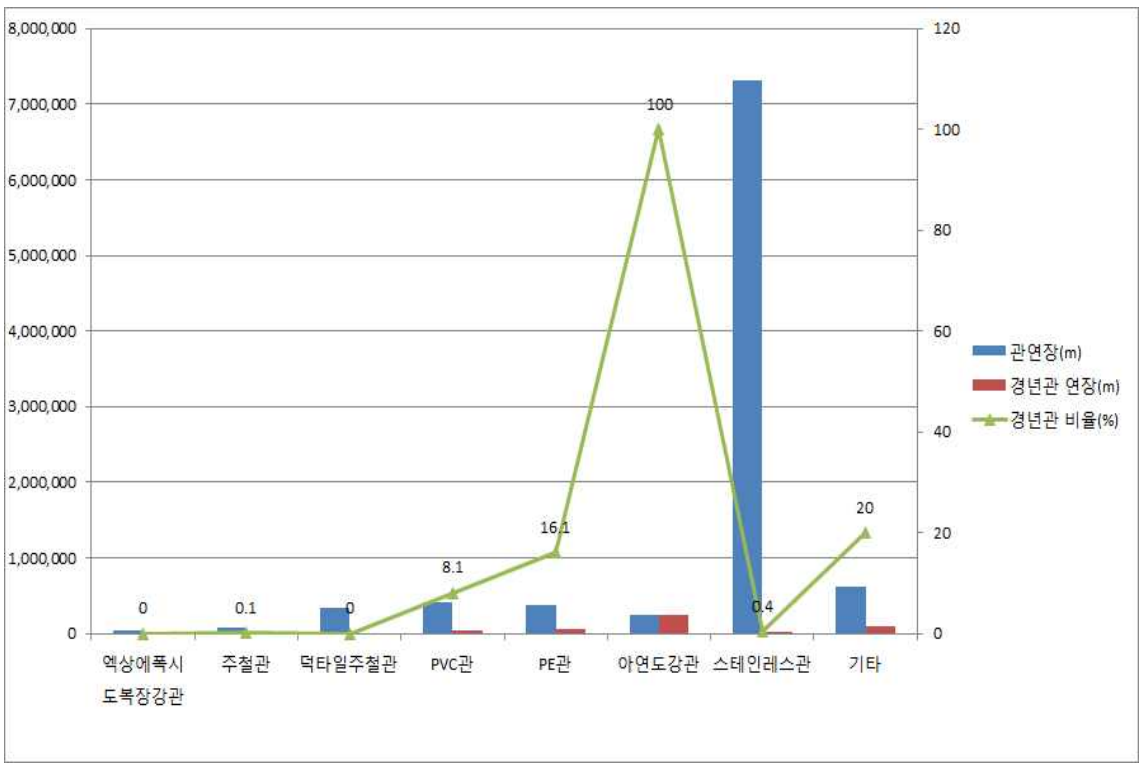
(2) 경기도

경기도지역의 각 관재질별 관의 연장 및 분포, 사용연한이 초과한 경년관의 연장 및 비율 등을 조사하였다. 표는 재질에 따른 관연장과 경년관의 비율, 평균사용 기한을 나타낸 것이다.

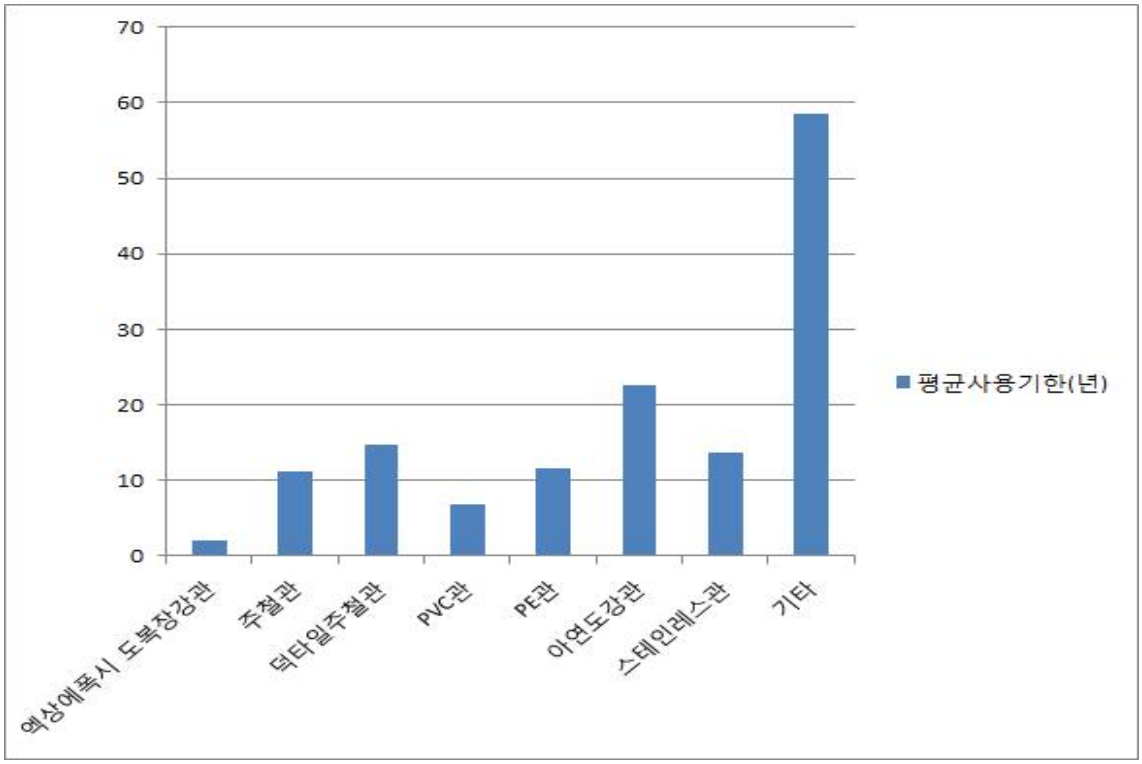
강원도 지역의 경우 가장 많이 사용되고 있는 스테인레스관이 가장 많은 비율을 차지하고 있지만 경년관의 비율이 0.4%정도로 매우 낮아 누수 및 동파의 위험성이 낮지만 아연도 강관은 100%노후관으로 교체가 필요한 것으로 나타났다.

<표 3-2-18> 관재질별 분포율(경기도, 현재)

관종	엑상에폭시 도복장강관	주철관	덕타일 주철관	PVC관	PE관	아연 도강관	스테인레스관	기타
관연장(m)	43,531	72,922	338,797	415,952	378,856	247,829	7,309,820	618,609
경년관 연장(m)	0	85	0	33,630	61,103	247,829	32,321	103,093
경년관 비율(%)	0	0.1	0	8.1	16.1	100.0	0.4	20
평균사용기한(년)	2.1	11.1	14.8	6.8	11.6	22.7	13.7	58.5



<그림 3-2-21> 경년관 분포율(경기도)



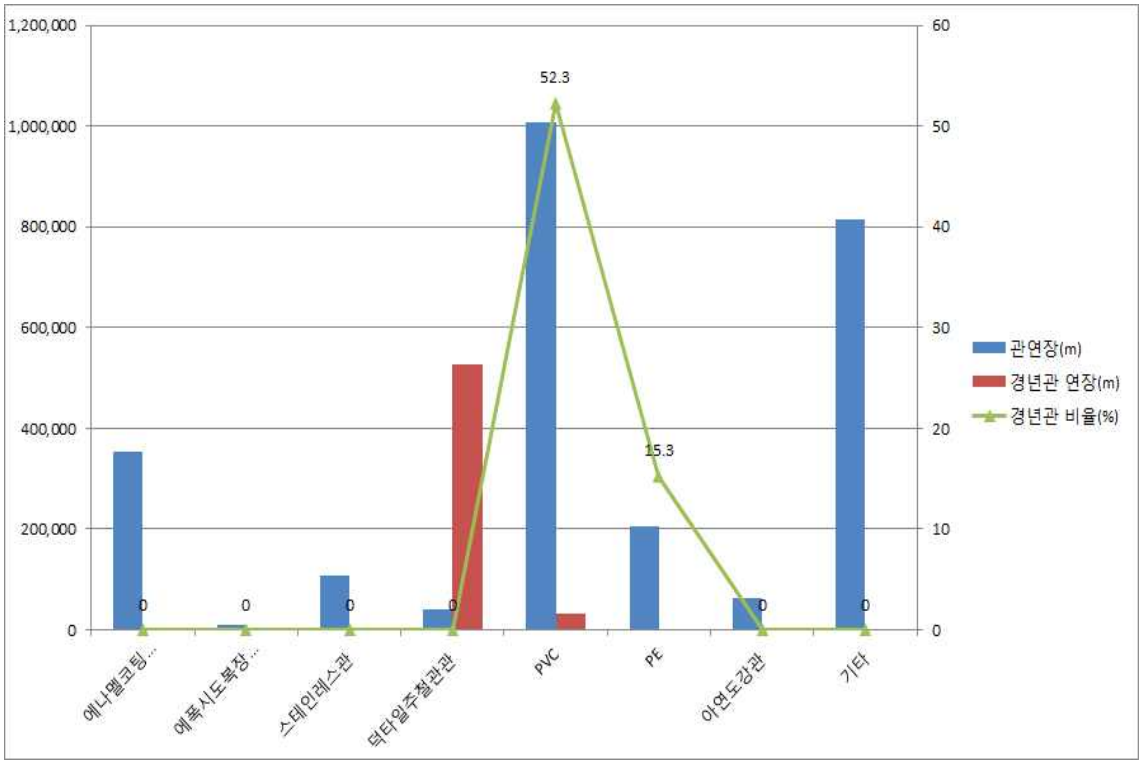
<그림 3-2-22> 평균사용 기한(경기도)

(3) 충청북도

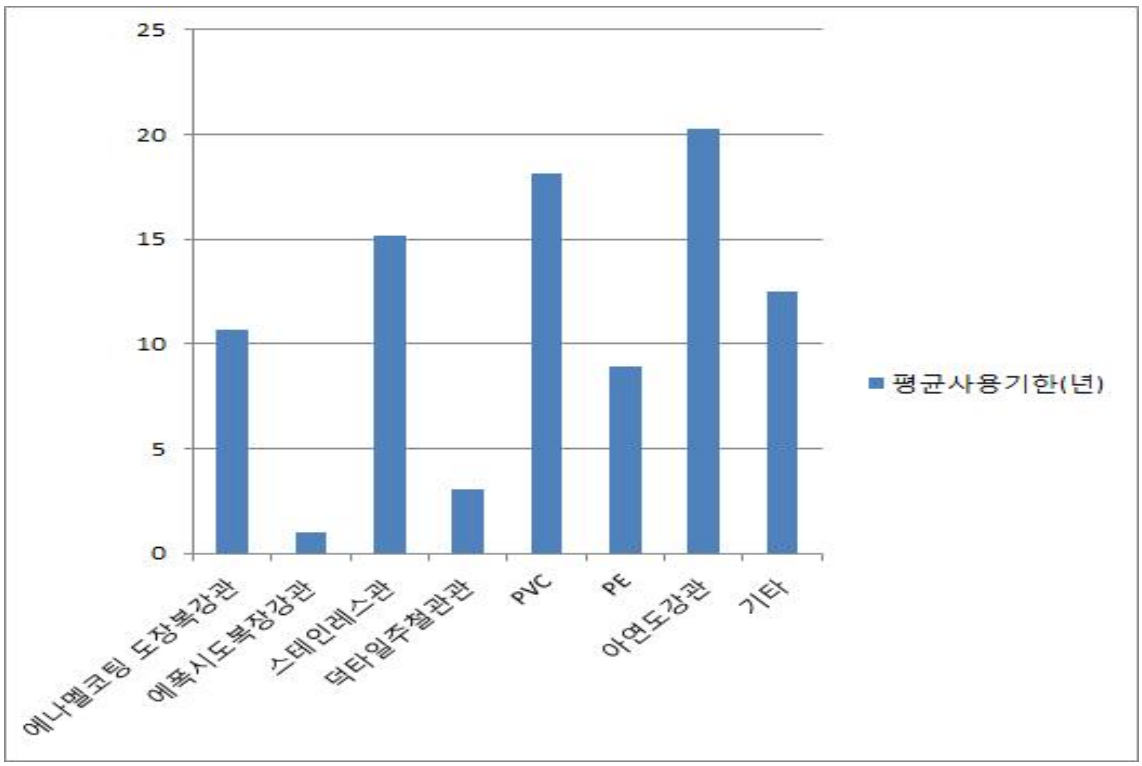
충청북도지역의 각 관재질별 관의 연장 및 분포, 사용연한이 초과한 경년관의 연장 및 비율 등을 조사하였다. 표는 재질에 따른 관연장과 경년관의 비율, 평균사용기한을 나타낸 것이다.
충청북도 지역의 경우 PVC관이 가장 많이 사용되고 있는데, 절반이 넘는 PVC관이 노후관으로 나타났다.

<표 3-2-19> 관재질별 분포율(충청북도, 현재)

관종	에나멜코팅 도장복강관	에폭시도 복장강관	주철관	덕타일 주철관관	PVC	PE	아연 도강관	기타
관연장(m)	354,359	9,862	106,767	39,777	1,008,437	206,430	64,014	813,250
경년관 연장(m)	0	0	0	527,729	31,538	0	0	0
경년관 비율(%)	0	0	0	0	52.3	15.3	0	0
평균사용기한(년)	10.7	1.0	15.2	3.1	18.1	8.9	20.3	12.5



<그림 3-2-23> 경년관 분포율(충청북도)



<그림 3-2-24> 평균사용 기한(충청북도)

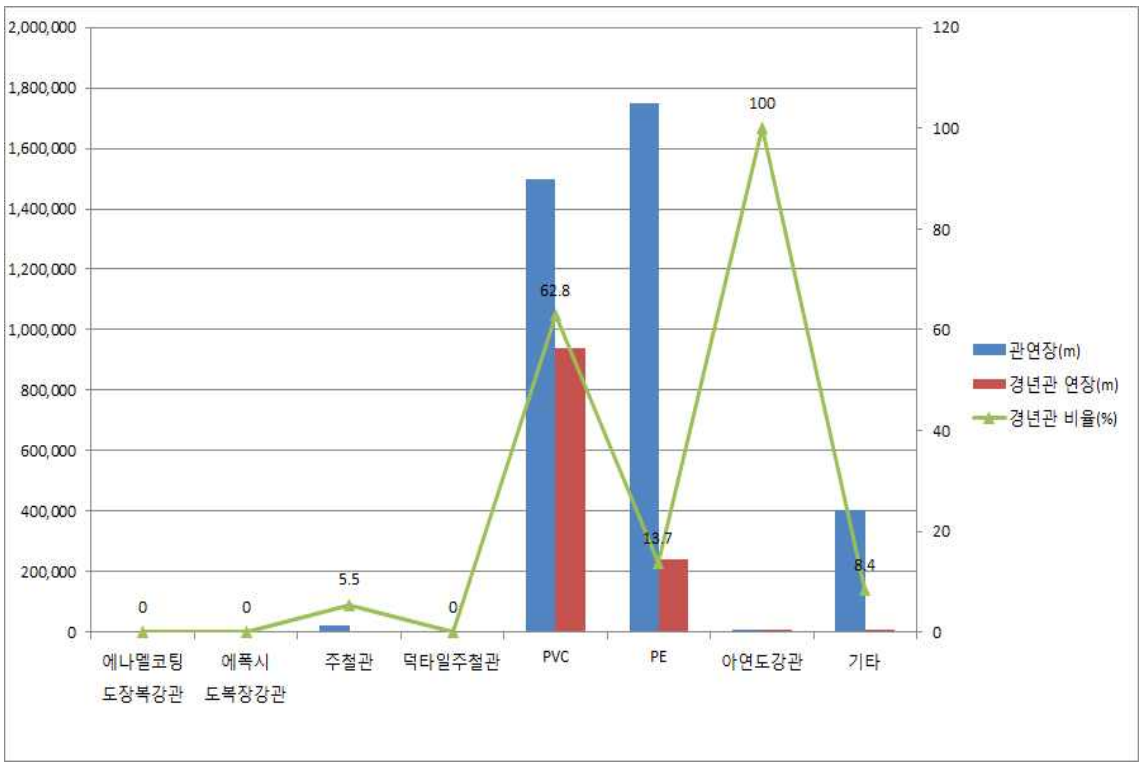
(4) 충청남도

충청남도지역의 각 관재질별 관의 연장 및 분포, 사용연한이 초과한 경년관의 연장 및 비율 등을 조사하였다. 표는 재질에 따른 관연장과 경년관의 비율, 평균사용기한을 나타낸 것이다.

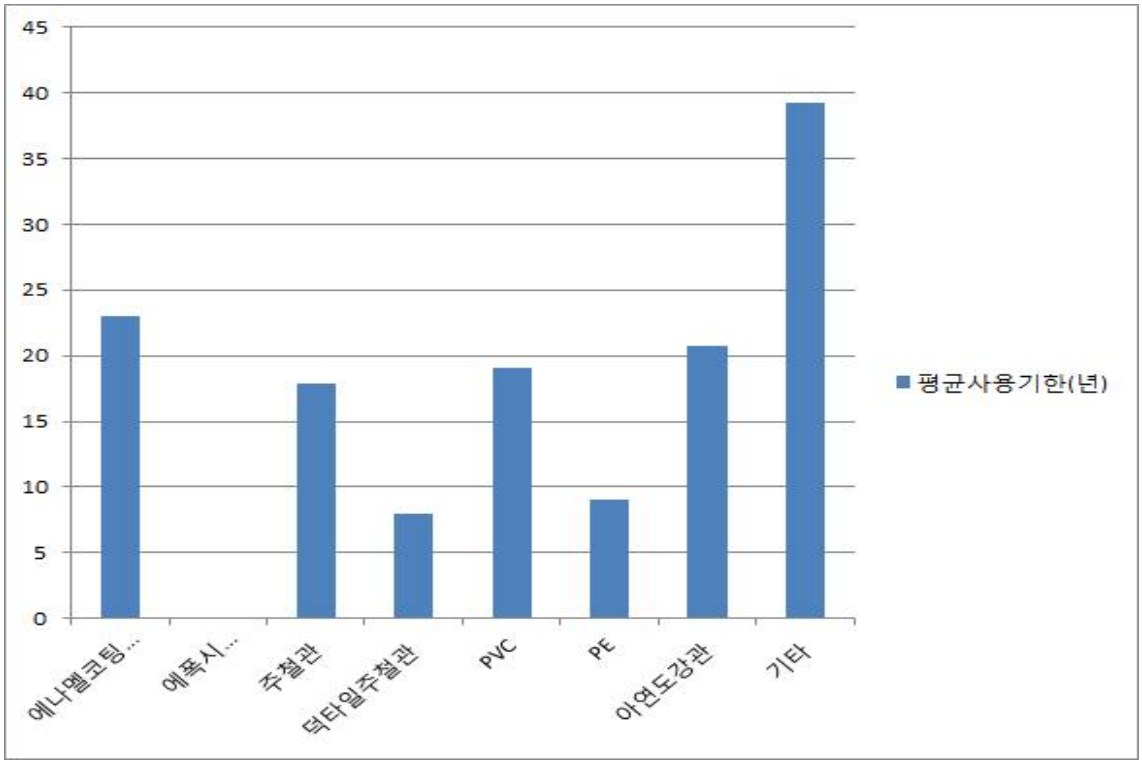
충청남도 지역은 PVC관과 PE관이 가장 많이 사용되고 있고 다른지역과 마찬가지로 PVC관이 노후된것으로 나타났다. 아연도 강관 역시 100%노후관으로 나타났다.

<표 3-2-20> 관재질별 분포율(충청남도, 현재)

관종	에나멜코팅 도장복강관	에폭시도 복장강관	주철관	덕타일 주철관관	PVC	PE	아연 도강관	기타
관연장(m)	1,564	0	24,717	2,250	1,497,343	1,747,934	9,969	406,524
경년관 연장(m)	0	0	1,350	0	941,040	239,783	9,969	9,438
경년관 비율(%)	0	0	5.5	0	62.8	13.7	100.0	8.4
평균사용기한(년)	23.0	0	17.9	8.0	19.1	9.0	20.8	39.3



<그림 3-2-25> 경년관 분포율(충청남도)



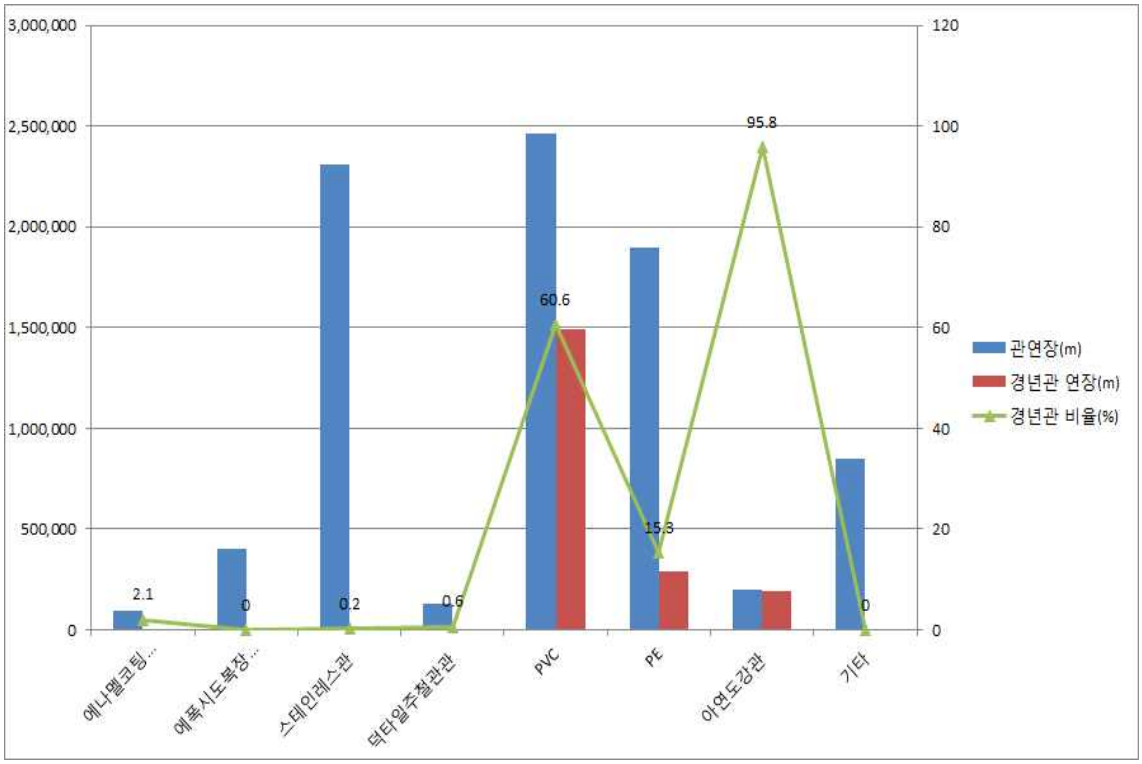
<그림 3-2-26> 평균사용 기한(충청남도)

(5) 경상북도

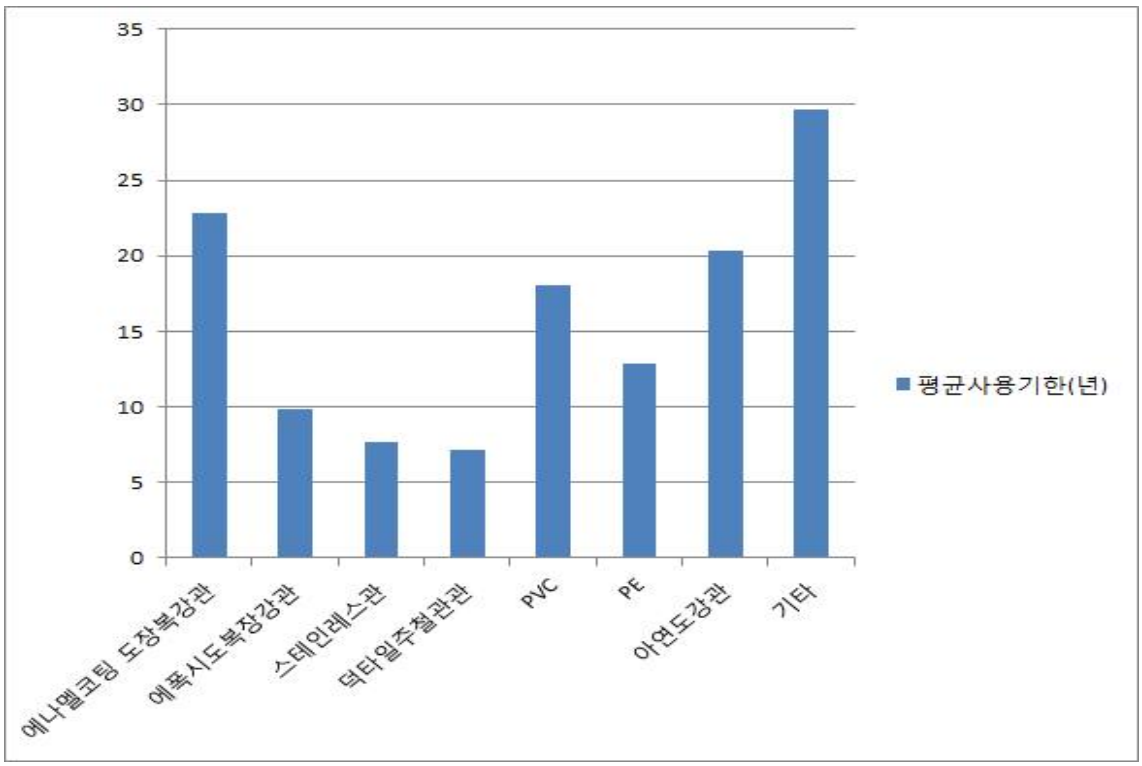
경상북도지역의 각 관재질별 관의 연장 및 분포, 사용연한이 초과한 경년관의 연장 및 비율 등을 조사하였다. 표는 재질에 따른 관연장과 경년관의 비율, 평균사용기한을 나타낸 것이다.
경상북도 지역의 경우 PVC관관 PE관이 가장 많이 사용되고 있고 PVC관과 아연도강관이 노후되어 있었다.

<표 3-2-21> 관재질별 분포율(경상북도, 현재)

관종	에나멜코팅 도장복강관	에폭시도 복장강관	주철관	덕타일 주철관관	PVC	PE	아연 도강관	기타
관연장(m)	97,094	398,992	2,310,215	132,100	2,464,177	1,898,525	201,721	849622
경년관 연장(m)	2,066	0	4,814	769	1,493,258	289,697	193,202	220
경년관 비율(%)	2.1	0	0.2	0.6	60.6	15.3	95.8	0
평균사용기한(년)	22.8	9.9	7.7	7.2	18.1	12.9	20.3	29.7



<그림 3-2-27> 경년관 분포율(경상북도)



<그림 3-2-28> 평균사용 기한(경상북도)

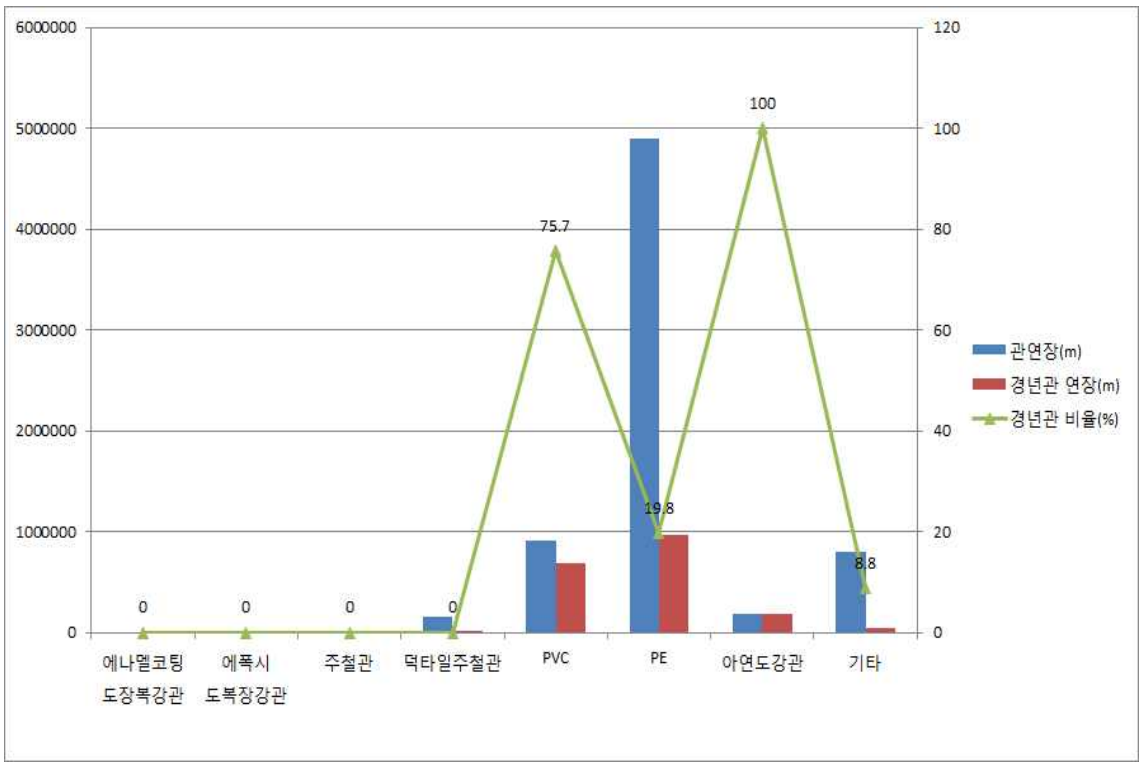
(6) 경상남도

경상남도지역의 각 관재질별 관의 연장 및 분포, 사용연한이 초과한 경년관의 연장 및 비율 등을 조사하였다. 표는 재질에 따른 관연장과 경년관의 비율, 평균사용기한을 나타낸 것이다.

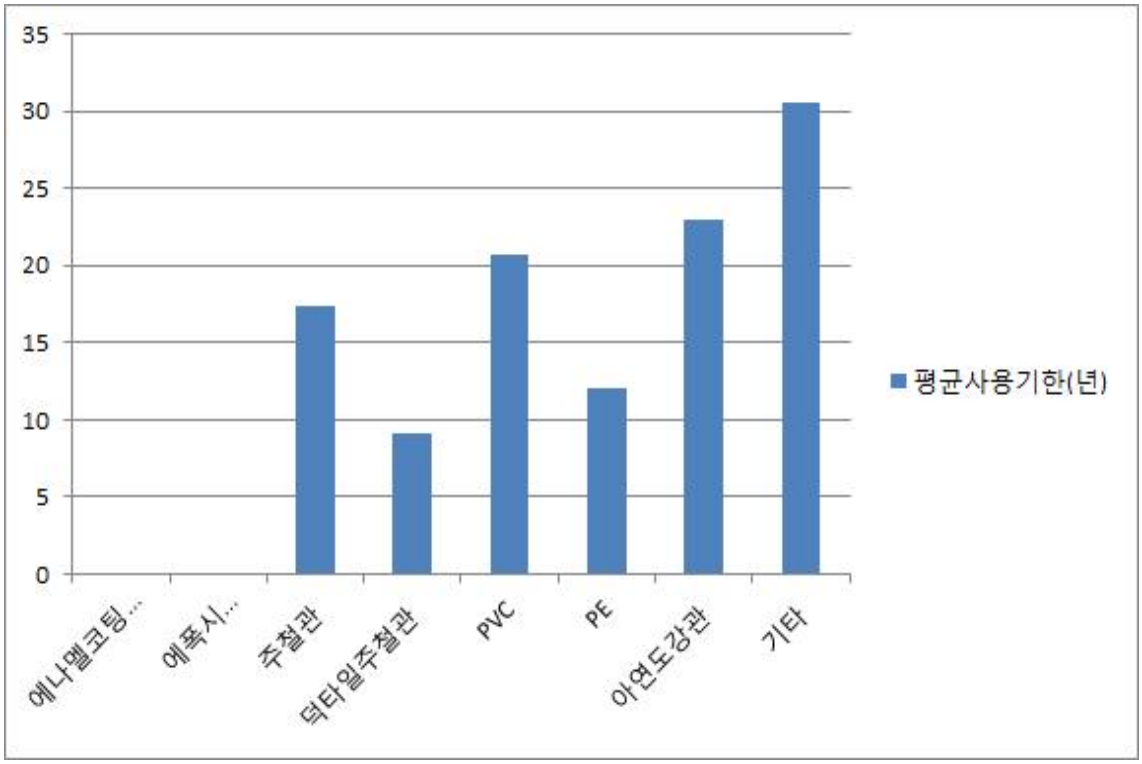
경상남도 지역 강원도 지역의 경우 다른 지방에 비해 PE관의 사용비율이 높았으며 PVC관과 아연도 강관이 노후되었지만 PE관의 경우는 양호한 것으로 나타났다.

<표 3-2-22> 관재질별 분포율(경상남도, 현재)

관종	에나멜코팅 도장복강관	에폭시도 복장강관	주철관	덕타일 주철관관	PVC	PE	아연 도강관	기타
관연장(m)	0	0	11,159	154,856	918,621	4,898,360	181,918	797,436
경년관 연장(m)	0	0	0	49	695,064	968,307	181,857	43,239
경년관 비율(%)	0	0	0	0	75.7	19.8	100.0	8.8
평균사용기한(년)	0	0	17.4	9.1	20.7	12.1	23	30.6



<그림 3-2-29> 경년관 분포율(경상남도)



<그림 3-2-30> 평균사용 기한(경상남도)

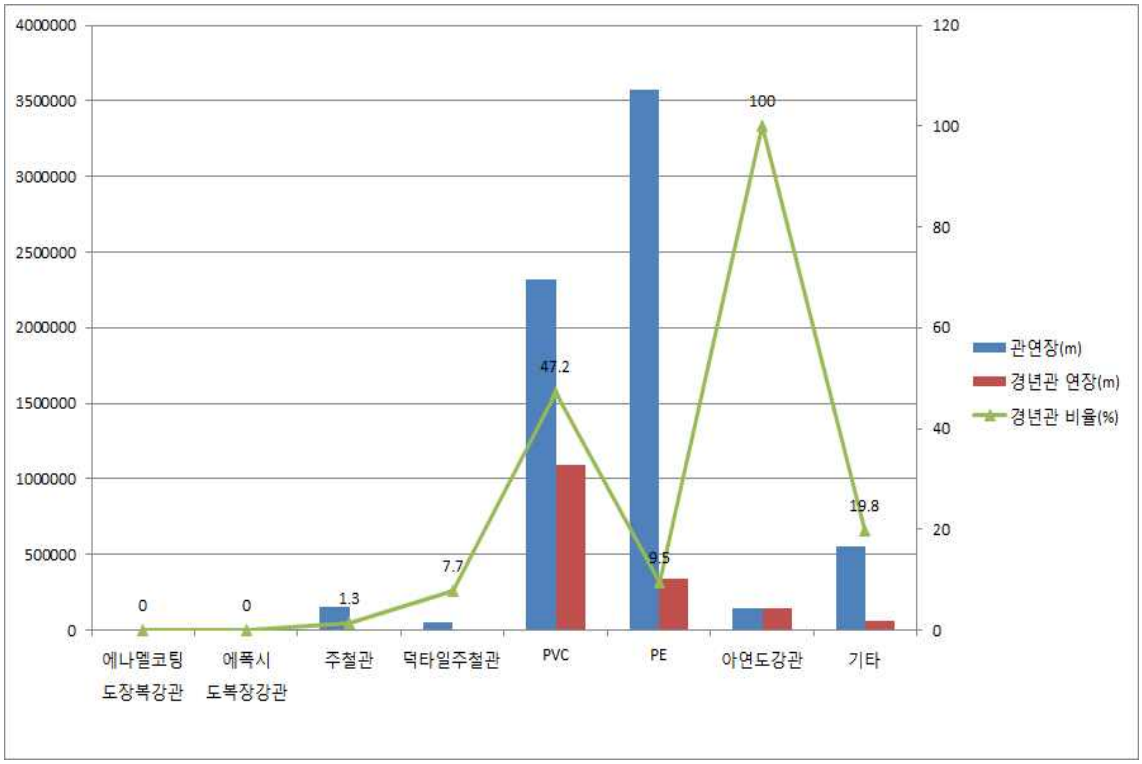
(7) 전라북도

전라북도지역의 각 관재질별 관의 연장 및 분포, 사용연한이 초과한 경년관의 연장 및 비율 등을 조사하였다. 표는 재질에 따른 관연장과 경년관의 비율, 평균사용기한을 나타낸 것이다.

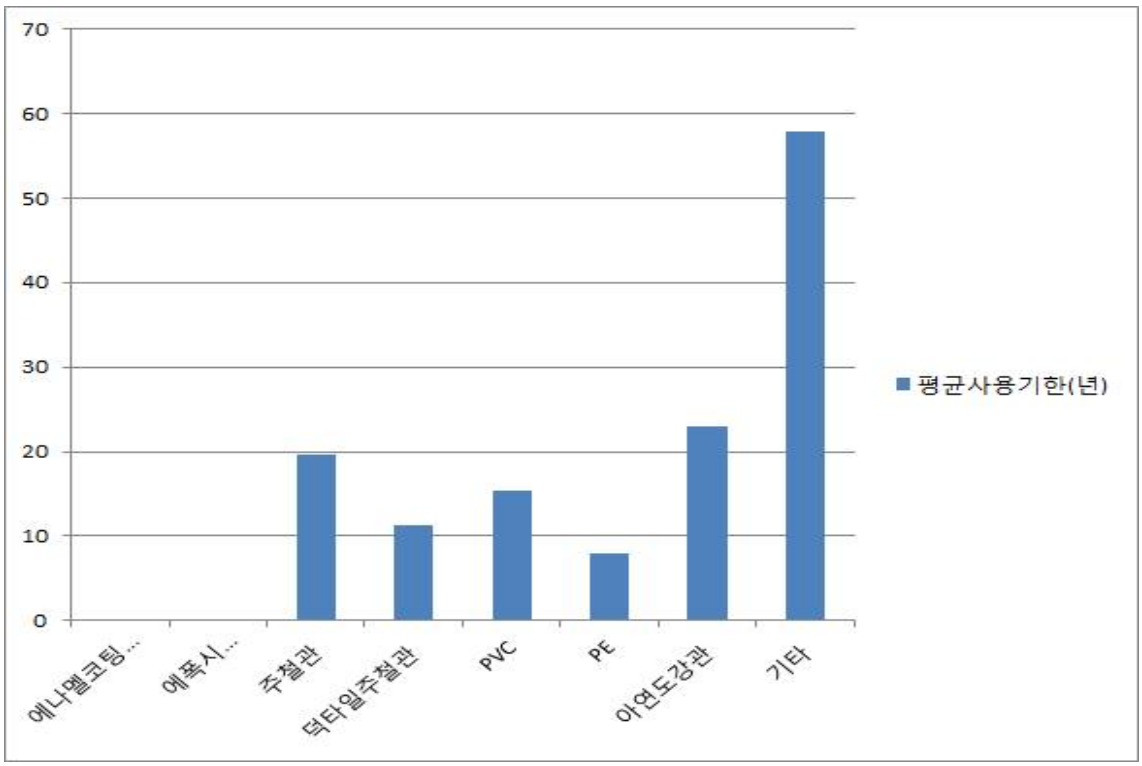
전라북도의 경우 PE관의 비율이 PVC관보다 약 20%정도 높았으며 PVC관의 노후도가 높았고 아연도 강관은 100%경년관으로 나타났다.

<표 3-2-23> 관재질별 분포율(전라북도, 현재)

관종	에나멜코팅 도장복강관	에폭시도 복장강관	주철관	덕타일 주철관관	PVC	PE	아연 도강관	기타
관연장(m)	0	0	154,618	47,816	2,318,081	3,572,354	144,794	552,209
경년관 연장(m)	0	0	2,042	3,674	1,095,145	337,790	144,794	64,288
경년관 비율(%)	0	0	1.3	7.7	47.2	9.5	100	19.8
평균사용기한(년)	0	0	19.7	11.2	15.4	8.0	23.0	57.9



<그림 3-2-31> 경년관 분포율(전라북도)



<그림 3-2-32> 평균사용 기한(전라북도)

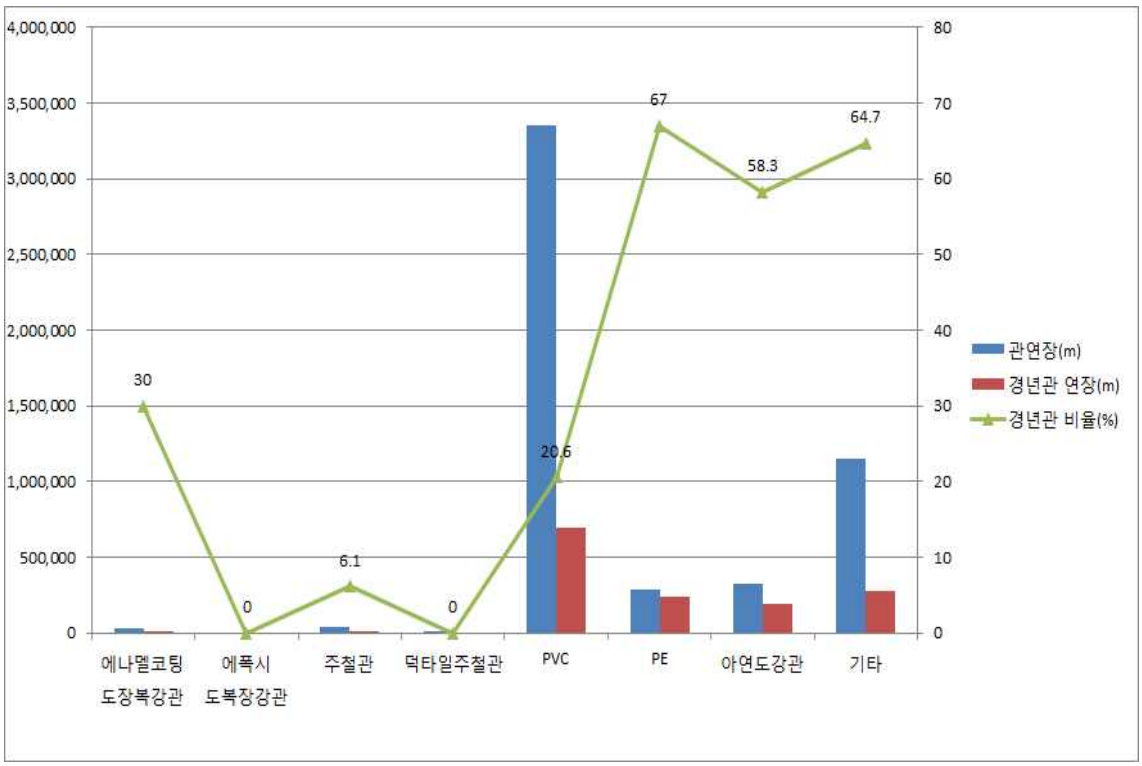
(8) 전라남도

전라남도지역의 각 관재질별 관의 연장 및 분포, 사용연한이 초과한 경년관의 연장 및 비율 등을 조사하였다. 표는 재질에 따른 관연장과 경년관의 비율, 평균사용기한을 나타낸 것이다.

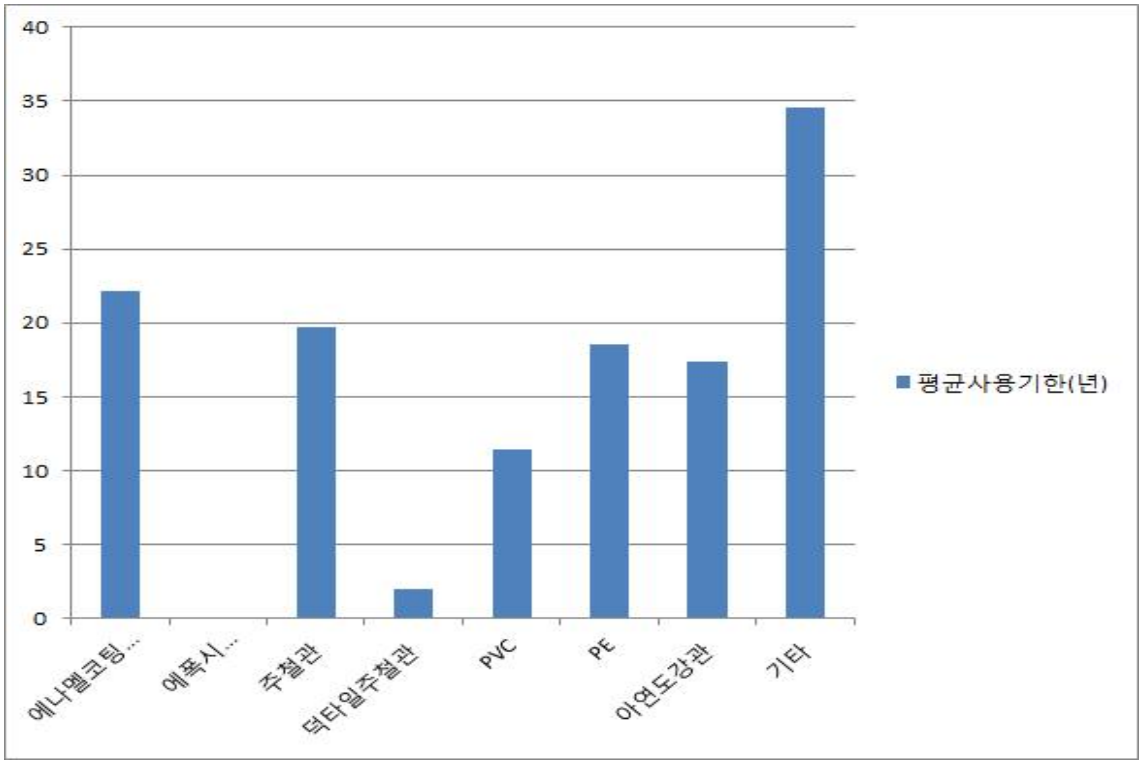
전라남도의 경우 PVC관이 다른관종보다 많이 사용되고 있으며 경년관의 비율은 20.6%로 나타나 비교적 양호한 상태를 나타내었다.

<표 3-2-24> 관재질별 분포율(전라남도, 현재)

관종	에나멜코팅 도장복강관	에폭시도 복장강관	주철관	덕타일 주철관관	PVC	PE	아연 도강관	기타
관연장(m)	30,188	0	34,067	6,958	3,348,098	289,266	321,904	1,148,697
경년관 연장(m)	9,070	0	2,082	0	691,189	240,614	187,568	275,266
경년관 비율(%)	30.0	0	6.1	0	20.6	67.0	58.3	64.7
평균사용기한(년)	22.2	0	19.7	2.0	11.4	18.5	17.4	34.6



<그림 3-2-33> 경년관 분포율(전라남도)



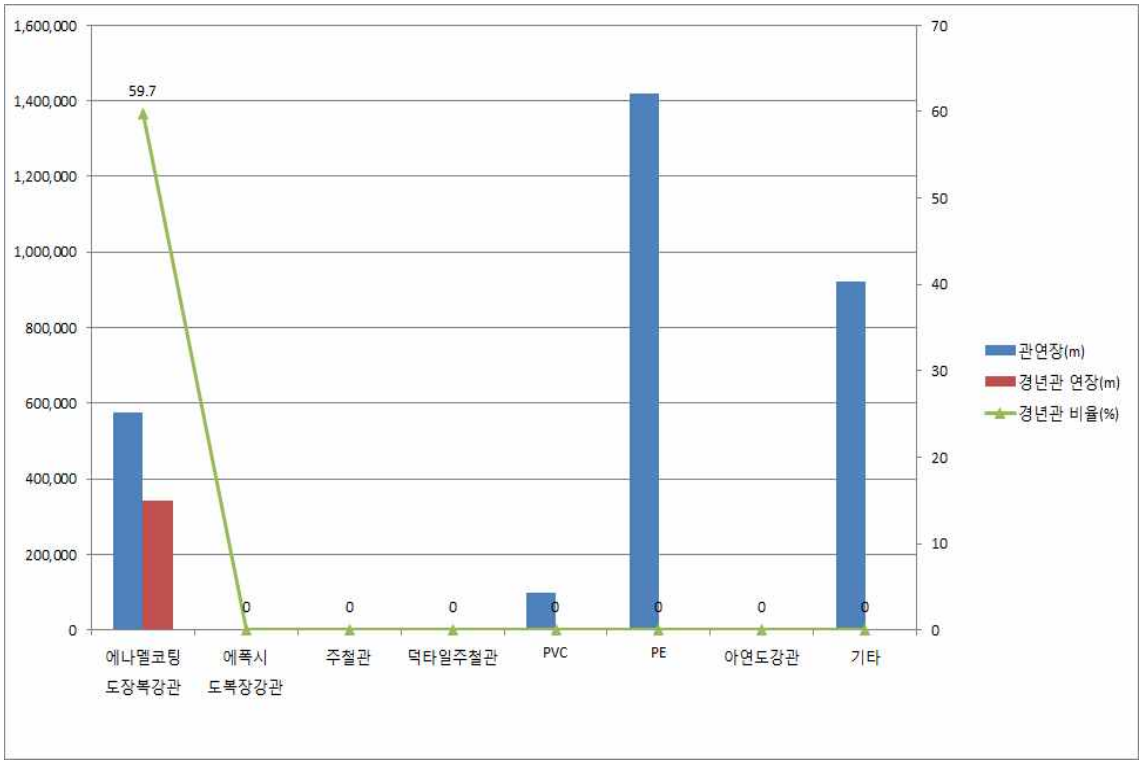
<그림 3-2-34> 평균사용 기한(전라남도)

(9) 제주도

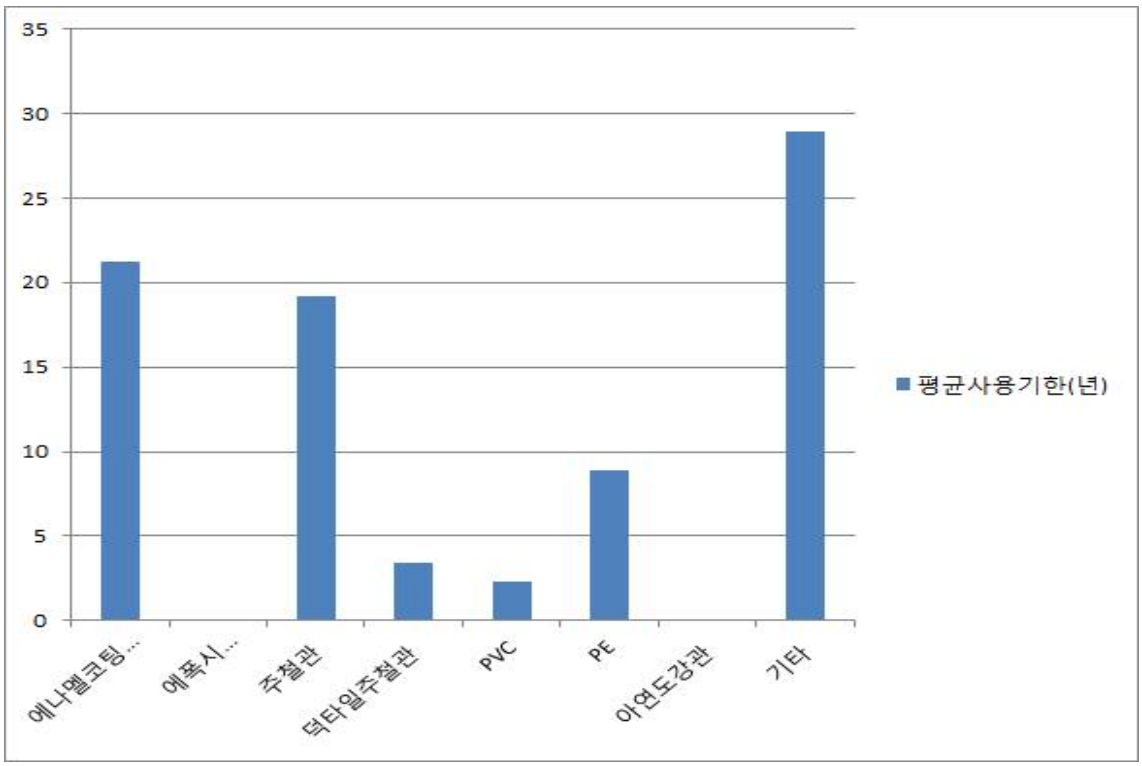
제주도지역의 각 관재질별 관의 연장 및 분포, 사용연한이 초과한 경년관의 연장 및 비율 등을 조사하였다. 표는 재질에 따른 관연장과 경년관의 비율, 평균사용 기한을 나타낸 것이다.
제주도 지역은 PE관이 가장 많이 사용되고 있고 경년관 비율은 대부분의 관이 0%로 나타나 비교적 최근에 상수도관을 매설했다는 것을 알 수 있었다.

<표 3-2-25> 관재질별 분포율(제주도, 현재)

관종	에나멜코팅 도장복강관	에폭시도 복장강관	주철관	덕타일 주철관관	PVC	PE	아연 도강관	기타
관연장(m)	574,154	0	1,958	5,760	97,481	1,417,934	0	922,413
경년관 연장(m)	342,688	0	0	0	0	0	0	0
경년관 비율(%)	59.7	0	0	0	0	0	0	0
평균사용기한(년)	21.2	0	19.2	3.4	2.3	8.9	0	28.9



<그림 3-2-35> 경년관 분포율(제주도)



<그림 3-2-36> 평균사용 기한(제주도)

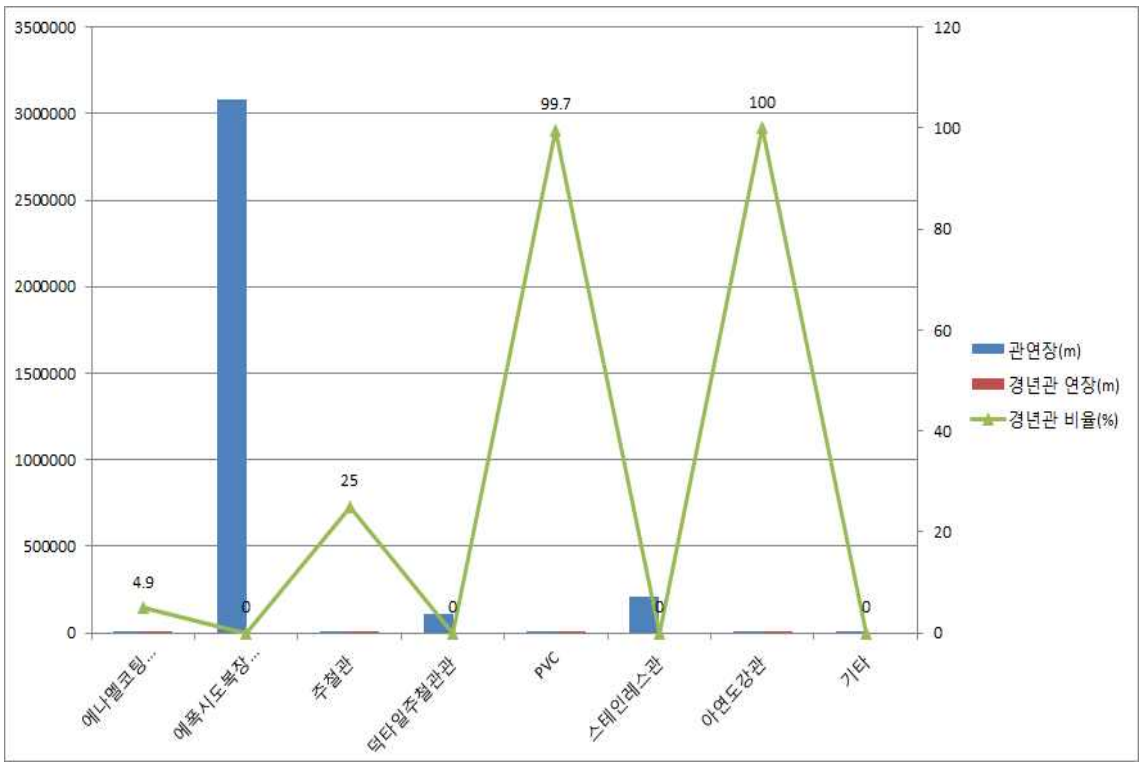
(10) 서울특별시

서울특별시의 각 관재질별 관의 연장 및 분포, 사용연한이 초과한 경년관의 연장 및 비율 등을 조사하였다. 표는 재질에 따른 관연장과 경년관의 비율, 평균사용 기한을 나타낸 것이다.

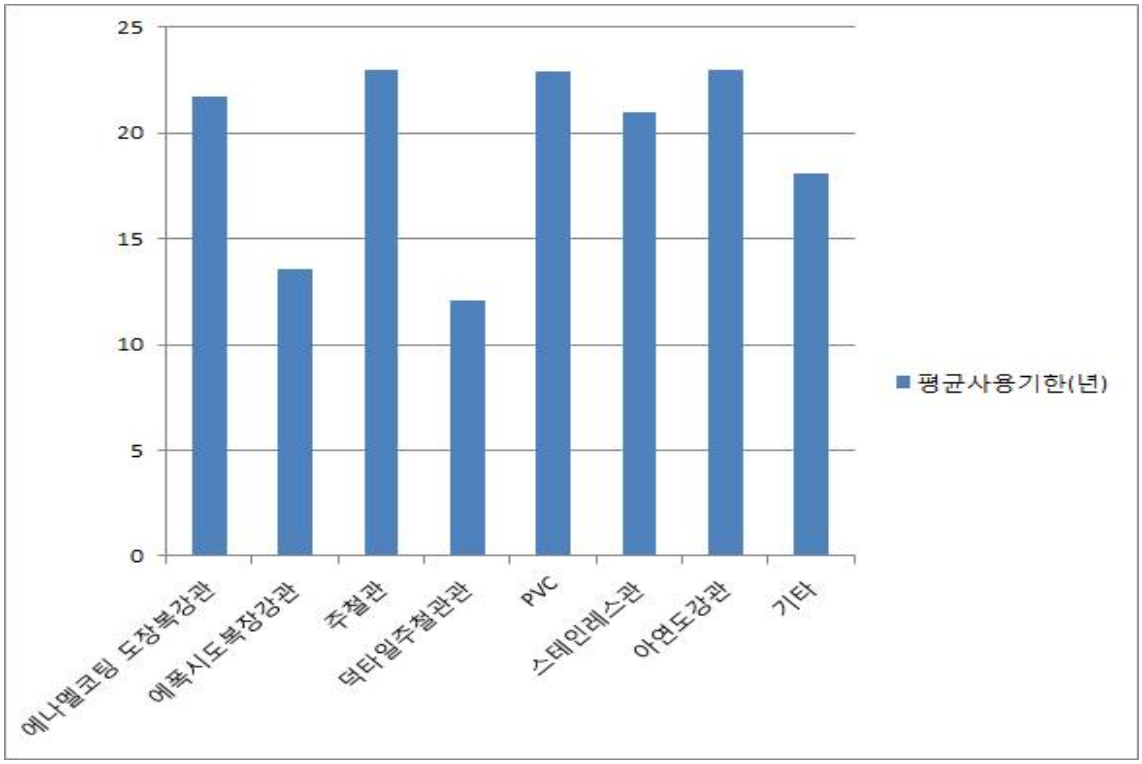
서울의 경우 스테인레스관의 사용이 압도적으로 많았고 노후되지 않은 관을 사용하고 있는 것으로 나타났지만 PVC관과 아연도 강관은 노후도가 매우 높아 교체가 시급한 것으로 나타났다.

<표 3-2-26> 관재질별 분포율(서울특별시, 현재)

관종	에나멜코팅 도장복강관	에폭시도 복장강관	주철관	덕타일 주철관관	PVC	PE	아연 도강관	기타
관연장(m)	510	3,084,655	2,888	109,849	592	207,088	10,885	37
경년관 연장(m)	25	0	722	0	590	0	10,885	0
경년관 비율(%)	4.9	0	25.0	0	99.7	0	100.0	0
평균사용기한(년)	21.7	13.6	23.0	12.1	22.9	21	23.0	18.1



<그림 3-2-37> 경년관 분포율(서울특별시)



<그림 3-2-38> 평균사용 기한(서울특별시)

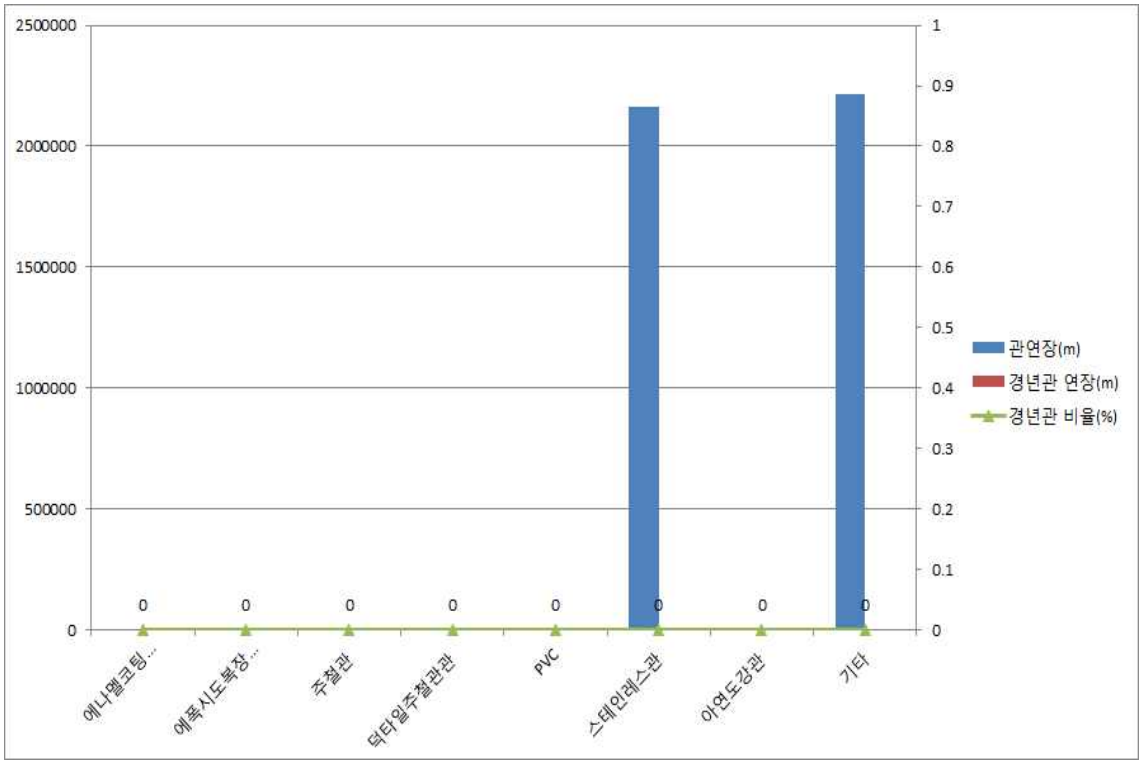
(11) 부산광역시

부산광역시의 각 관재질별 관의 연장 및 분포, 사용연한이 초과한 경년관의 연장 및 비율 등을 조사하였다. 표는 재질에 따른 관연장과 경년관의 비율, 평균사용 기한을 나타낸 것이다.

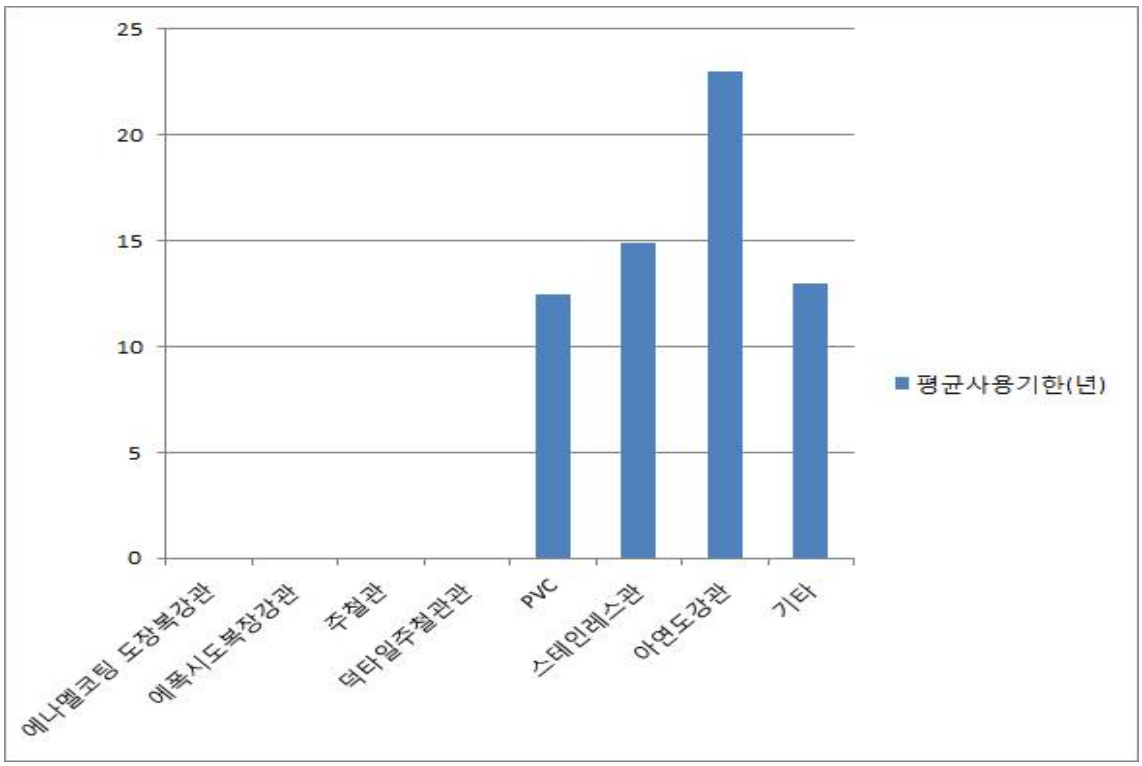
부산광역시의 경우 가장 많이 사용되고 있는 스테인레스 상수도관의 경년관 비율이 0%이다.

<표 3-2-27> 관재질별 분포율(부산광역시, 현재)

관종	에나멜코팅 도장복강관	에폭시도 복장강관	주철관	덕타일 주철관관	PVC	PE	아연 도강관	기타
관연장(m)	0	0	0	0	1,946	2,162,937	581	2,214,095
경년관 연장(m)	0	0	0	0	0	0	0	0
경년관 비율(%)	0	0	0	0	0	0	0	0
평균사용기한(년)	0	0	0	0	12.5	14.9	23.0	13



<그림 3-2-39> 경년관 분포율(부산광역시)



<그림 3-2-40> 평균사용 기한(부산광역시)

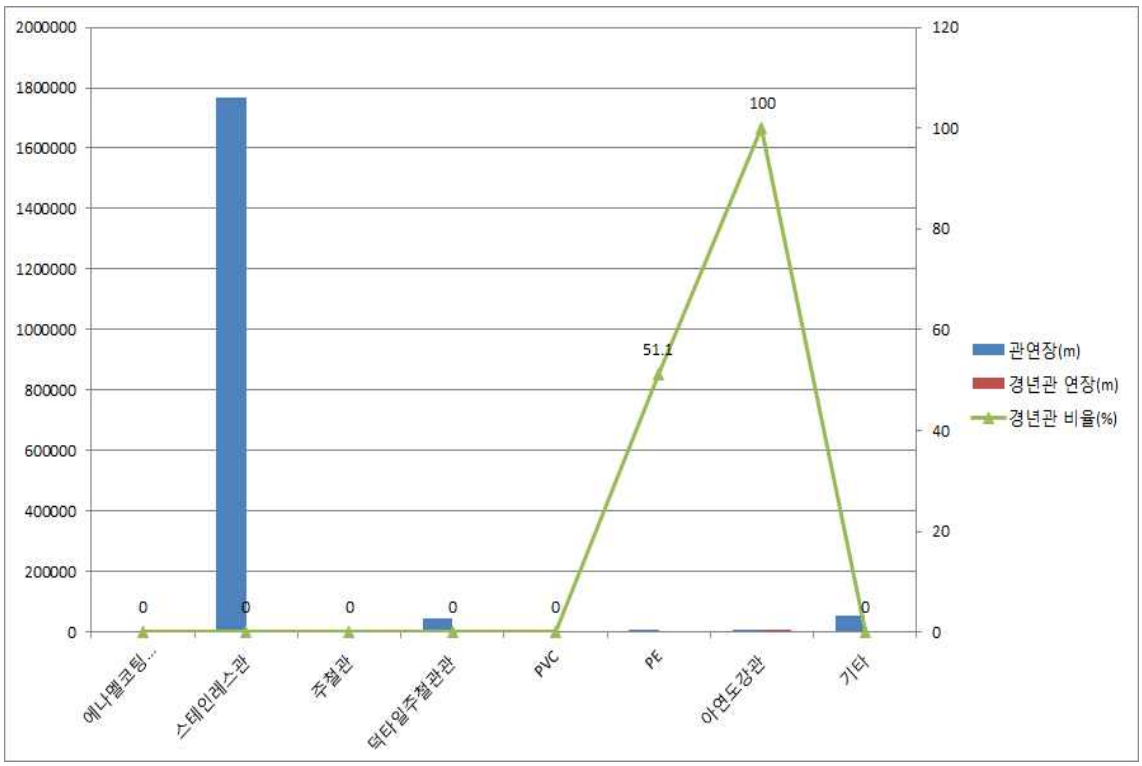
(12) 대구광역시

대구광역시의 각 관재질별 관의 연장 및 분포, 사용연한이 초과한 경년관의 연장 및 비율 등을 조사하였다. 표는 재질에 따른 관연장과 경년관의 비율, 평균사용 기한을 나타낸 것이다.

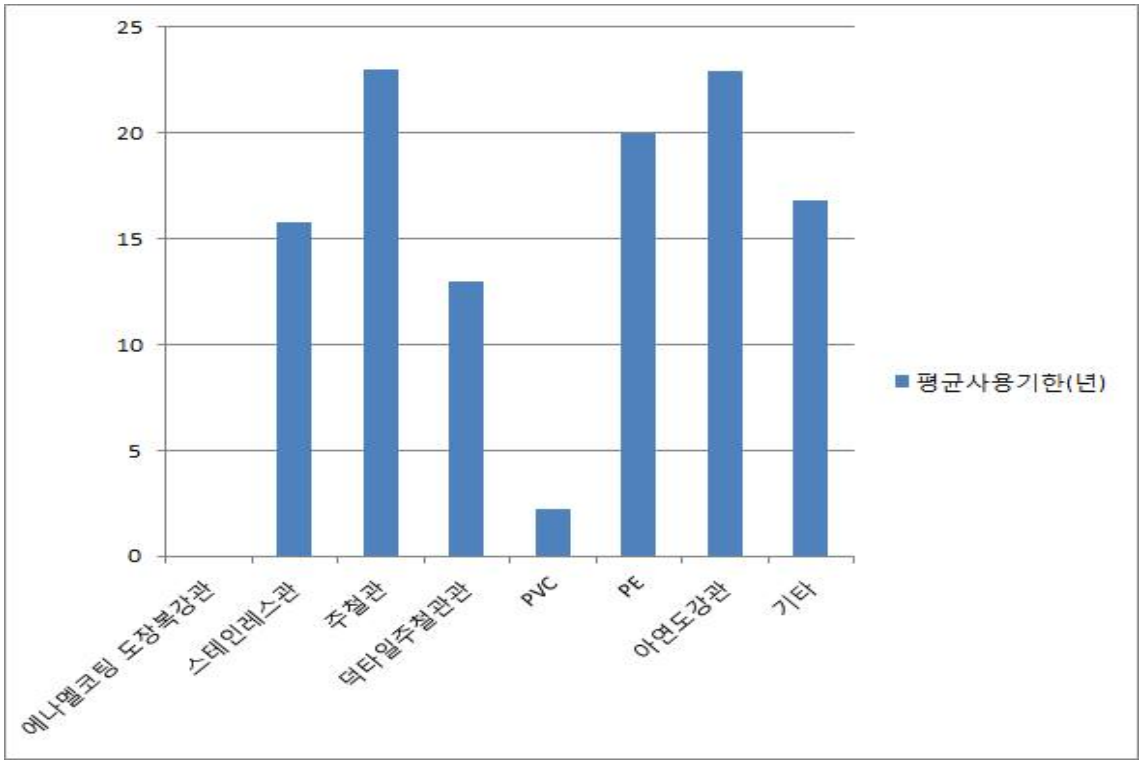
대구 광역시에서는 스테인레스 관이 주로 사용되고 이고 노후관은 없는 것으로 나타났으나 100%노후된 아연도 강관은 교체가 필요한 것으로 나타났다.

<표 3-2-28> 관재질별 분포율(대구광역시, 현재)

관종	에나멜코팅 도장복강관	에폭시도 복장강관	주철관	덕타일 주철관관	PVC	PE	아연 도강관	기타
관연장(m)	0	1,769,238	876	45,398	1,600	6,963	9,513	56,080
경년관 연장(m)	0	0	0	0	0	3,561	9,513	0
경년관 비율(%)	0	0	0	0	0	51.1	100.0	0
평균사용기한(년)	0	15.8	23.0	13.0	2.2	20.0	22.9	16.8



<그림 3-2-41> 경년관 분포율(대구광역시)



<그림 3-2-42> 평균사용 기한(대구광역시)

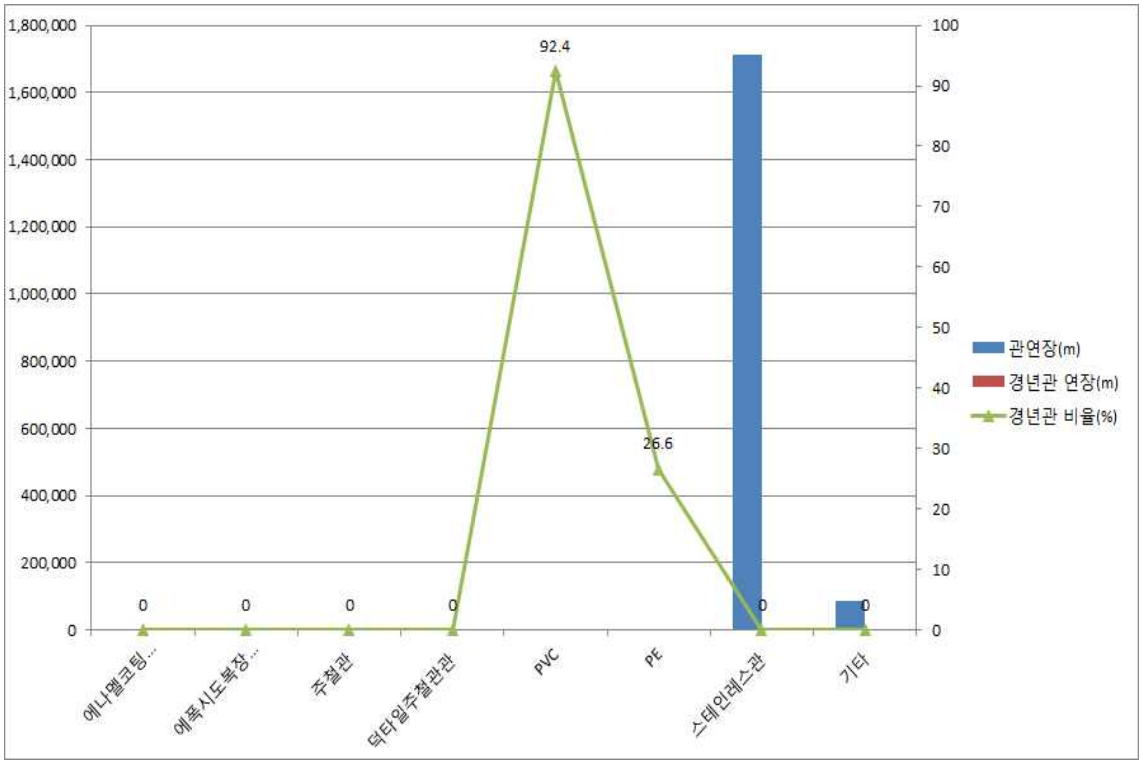
(13) 인천광역시

인천광역시의 각 관재질별 관의 연장 및 분포, 사용연한이 초과한 경년관의 연장 및 비율 등을 조사하였다. 표는 재질에 따른 관연장과 경년관의 비율, 평균사용 기한을 나타낸 것이다.

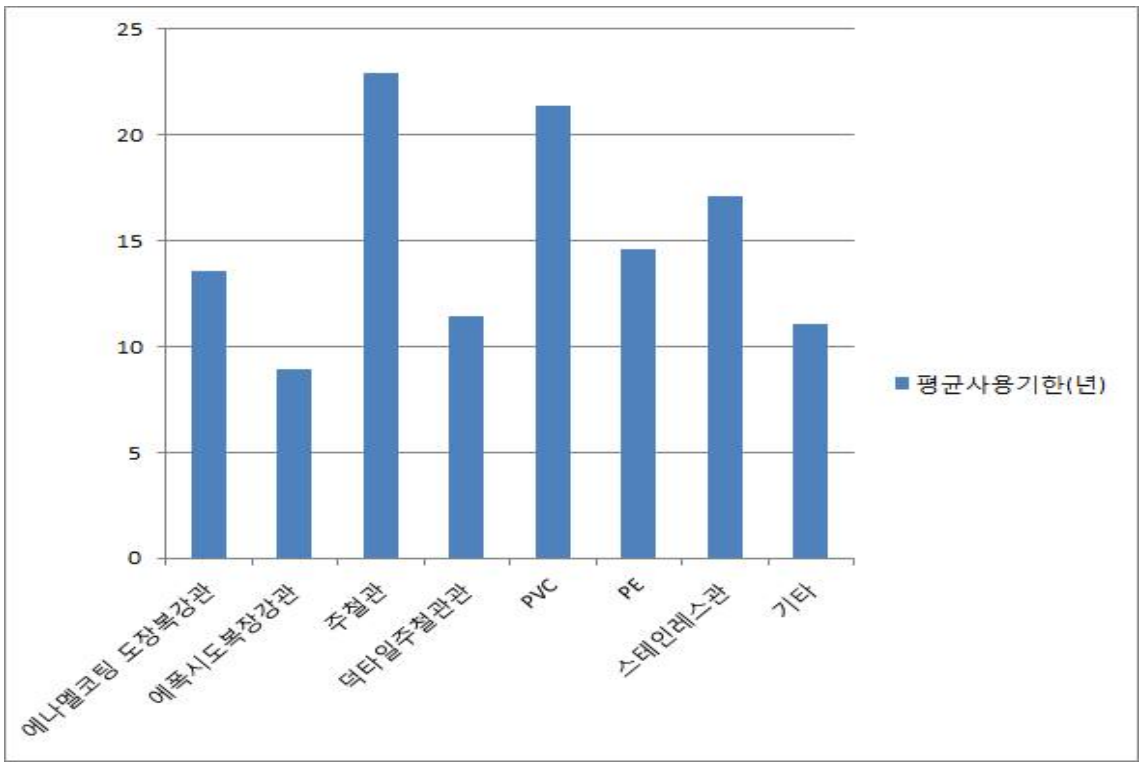
인천광역시 역시 다른 대도시들과 마찬가지로 스테인레스 관의 사용 비율이 가장 높았으며 약92.4%노후된 PVC관 이외에는 양호한 시설을 유지하고 있는 것으로 나타났다.

<표 3-2-29> 관재질별 분포율(인천광역시, 현재)

관종	에나멜코팅 도장복강관	에폭시도 복장강관	주철관	덕타일 주철관관	PVC	PE	아연 도강관	기타
관연장(m)	1,278	485	965	6,767	2,193	1,679	1,711,644	87,761
경년관 연장(m)	0	0	0	0	2,026	447	0	0
경년관 비율(%)	0	0	0	0	92.4	26.6	0	0
평균사용기한(년)	13.6	8.9	22.9	11.4	21.4	14.6	17.1	11.1



<그림 3-2-43> 경년관 분포율(인천광역시)



<그림 3-2-44> 평균사용 기한(인천광역시)

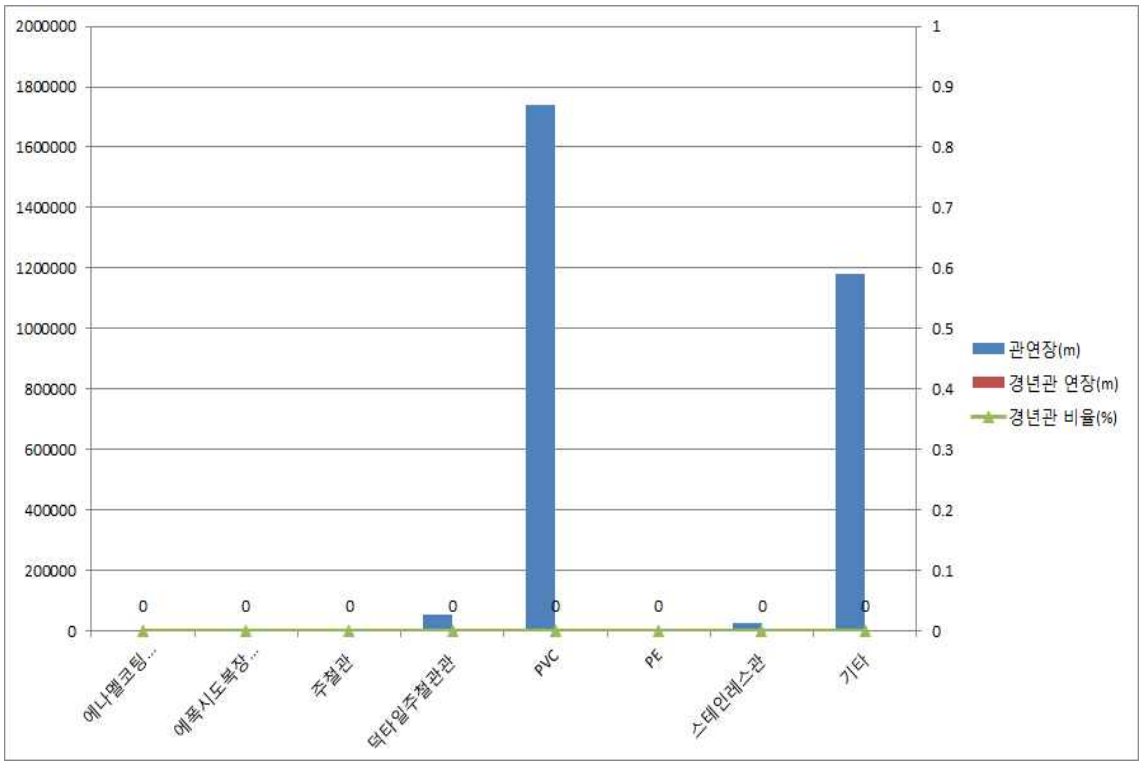
(14) 광주광역시

광주광역시의 각 관재질별 관의 연장 및 분포, 사용연한이 초과한 경년관의 연장 및 비율 등을 조사하였다. 표는 재질에 따른 관연장과 경년관의 비율, 평균사용 기한을 나타낸 것이다.

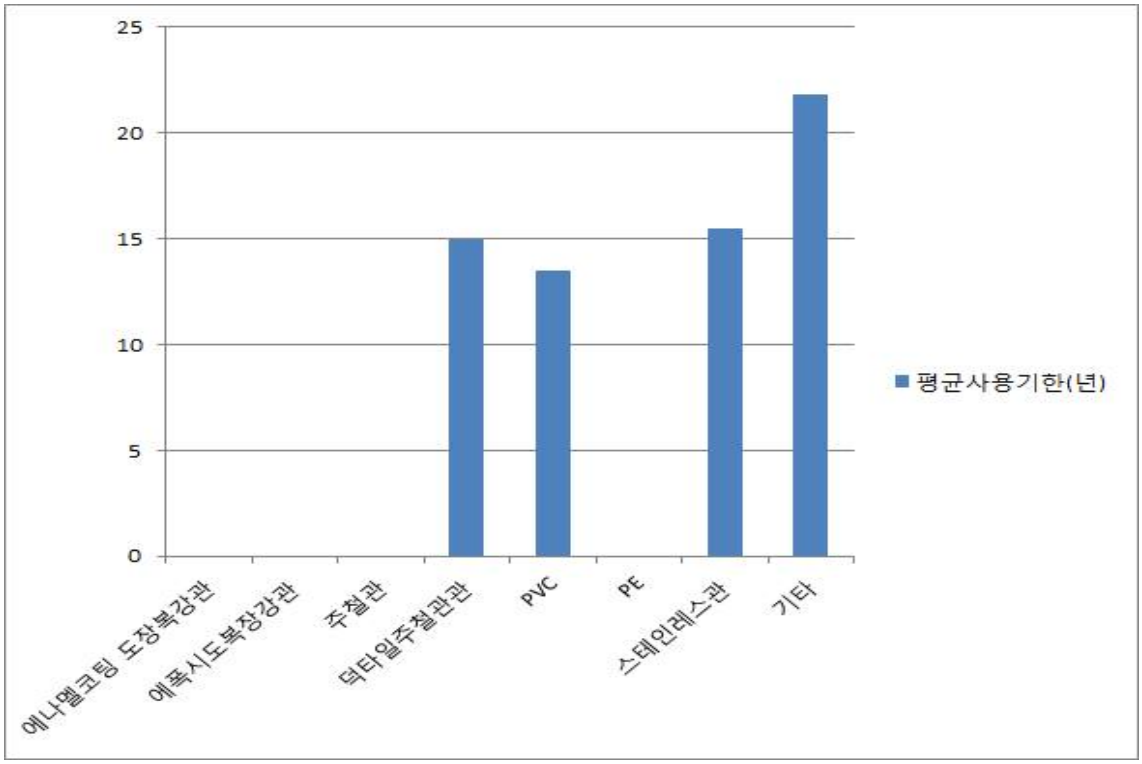
광주광역시는 대도시임에도 불구하고 PVC관의 사용 비율과 높았으며 기타관들의 사용 비율도 높았다. 하지만 경년관 없이 양호한 상태로 유지관리되고 있다.

<표 3-2-30> 관재질별 분포율(광주광역시, 현재)

관종	에나멜코팅 도장복강관	에폭시도 복장강관	주철관	덕타일 주철관관	PVC	PE	아연 도강관	기타
관연장(m)	0	0	0	55,803	1,741,088	0	26,536	1,178,645
경년관 연장(m)	0	0	0	0	0	0	0	0
경년관 비율(%)	0	0	0	0	0	0	0	0
평균사용기한(년)	0	0	0	15.0	13.5	0	15.5	21.8



<그림 3-2-45> 경년관 분포율(광주광역시)



<그림 3-2-46> 평균사용 기한(광주광역시)

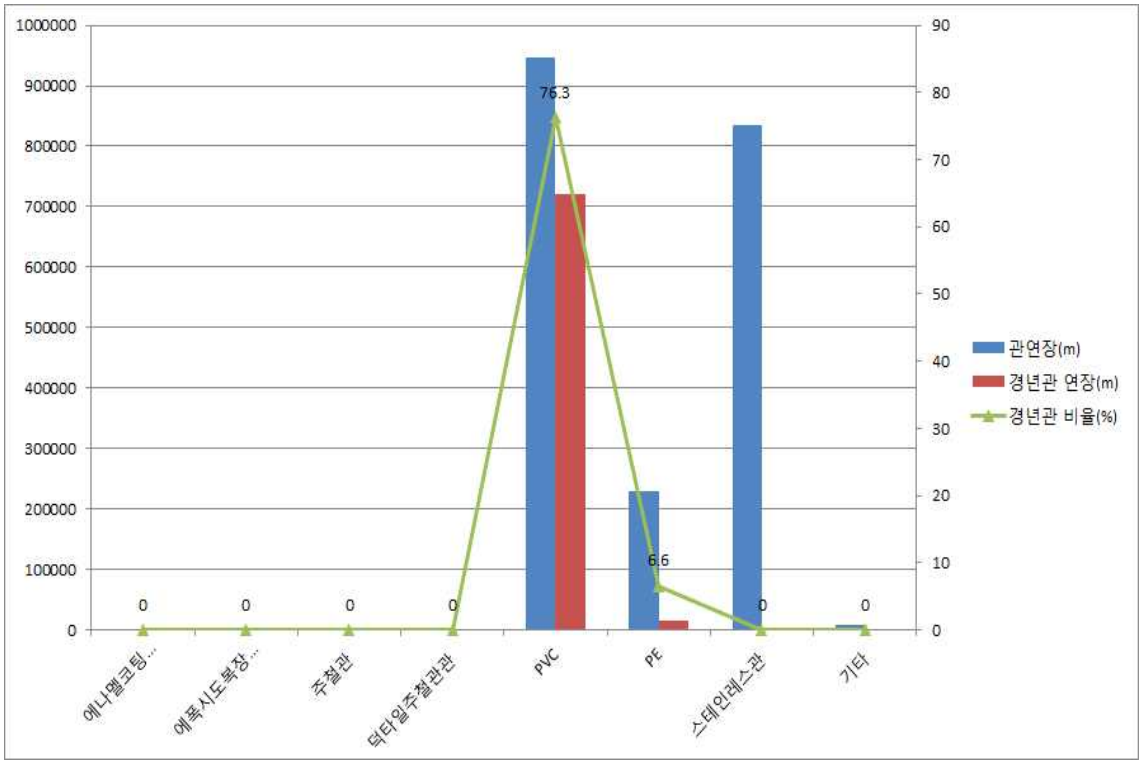
(15) 대전광역시

대전광역시의 각 관재질별 관의 연장 및 분포, 사용연한이 초과한 경년관의 연장 및 비율 등을 조사하였다. 표는 재질에 따른 관연장과 경년관의 비율, 평균사용 기한을 나타낸 것이다.

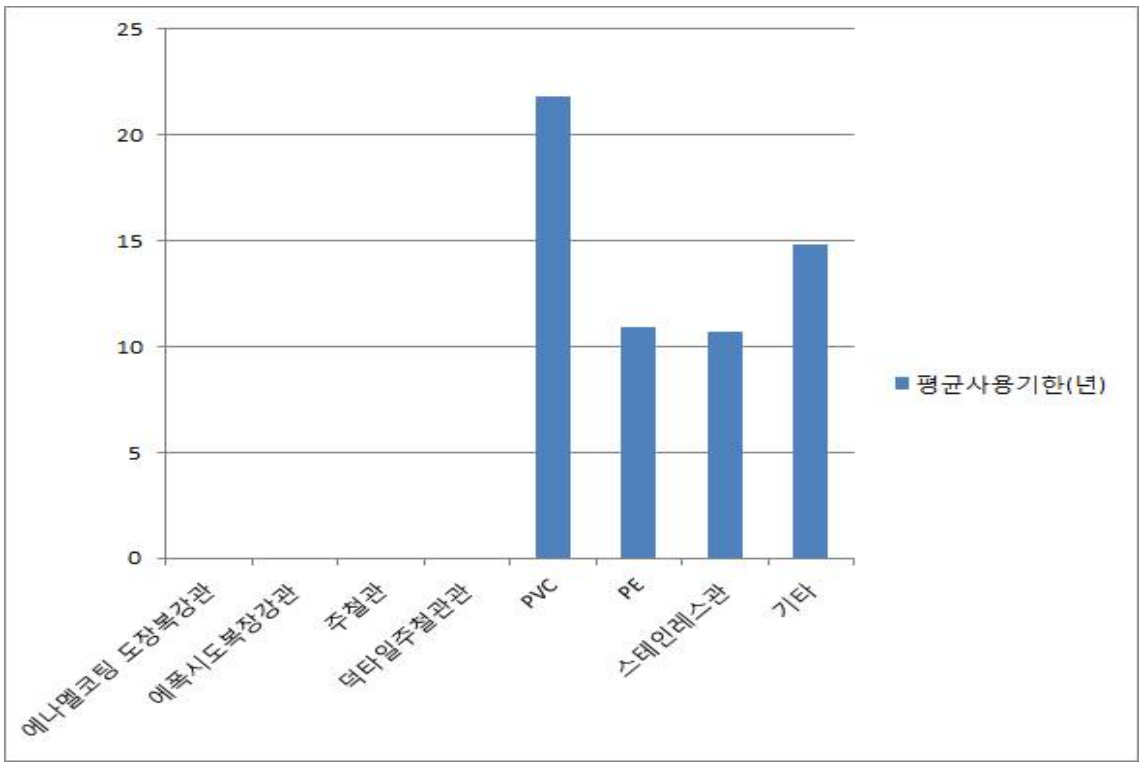
대전광역시는 PVC관과 스테인레스 관의 사용비율이 높고, 또한 PVC관의 경우 경년관의 비율이 7%로 높게 나타나, 교체가 시급하다.

<표 3-2-31> 관재질별 분포율(대전광역시, 현재)

관종	에나멜코팅 도장복강관	에폭시도 복장강관	주철관	덕타일 주철관관	PVC	PE	아연 도강관	기타
관연장(m)	0	0	0	0	945,722	229,323	833,960	8,908
경년관 연장(m)	0	0	0	0	721,580	15,236	0	0
경년관 비율(%)	0	0	0	0	76.3	6.6	0	0
평균사용기한(년)	0	0	0	0	21.8	10.9	10.7	14.8



<그림 3-2-47> 경년관 분포율(대전광역시)



<그림 3-2-48> 평균사용 기한(대전광역시)

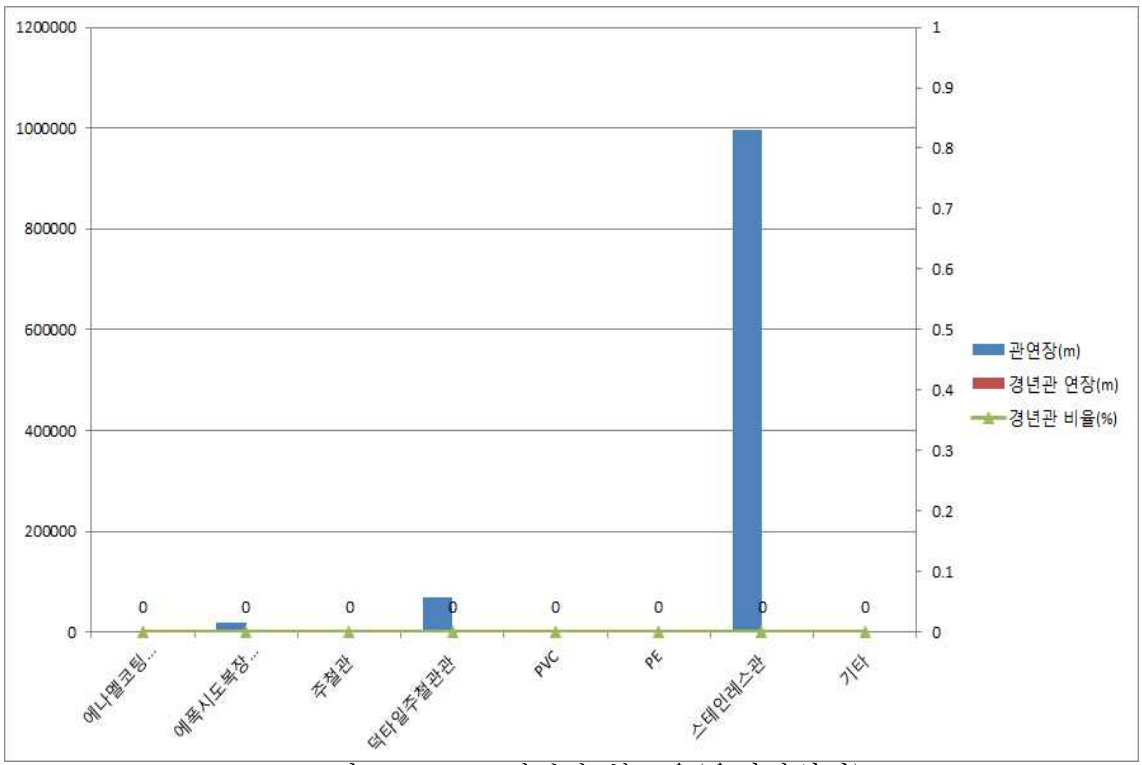
(16) 울산광역시

울산광역시의 각 관재질별 관의 연장 및 분포, 사용연한이 초과한 경년관의 연장 및 비율 등을 조사하였다. 표는 재질에 따른 관연장과 경년관의 비율, 평균사용 기한을 나타낸 것이다.

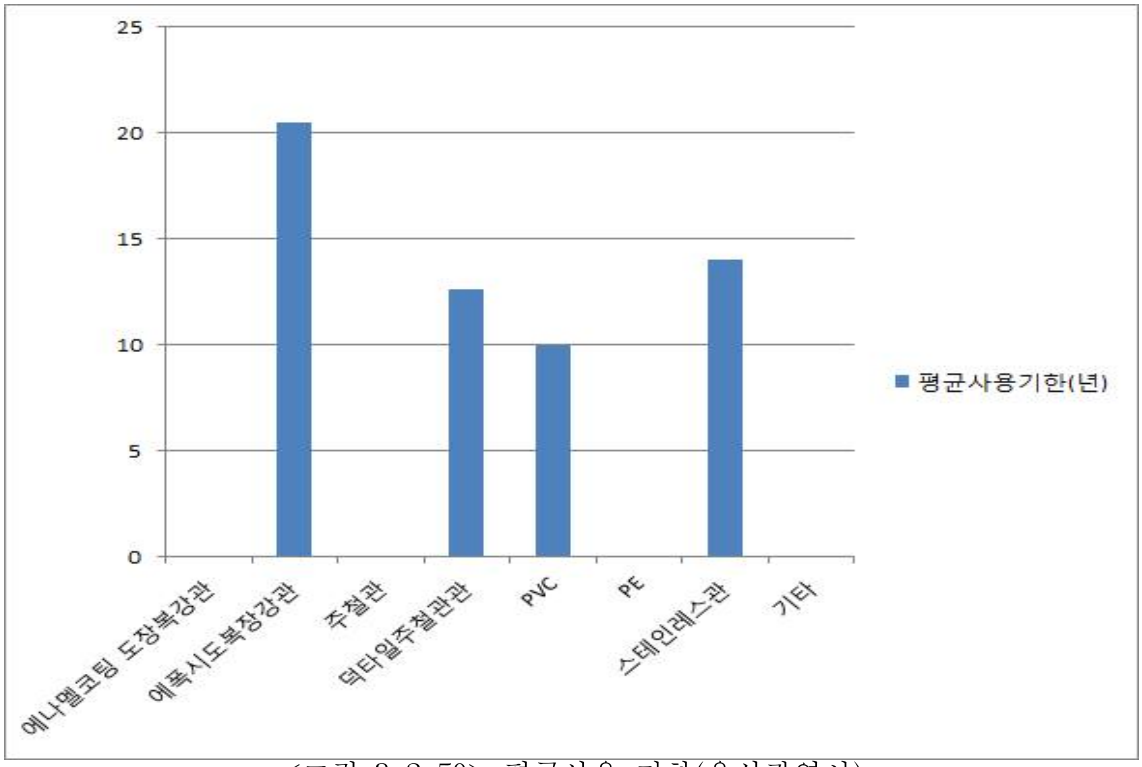
울산광역시는 스테인레스 관을 주로 사용하고 있으며 상수도관 전체에서 노후관은 없는 것으로 나타났다.

<표 3-2-32> 관재질별 분포율(울산광역시, 현재)

관종	에나멜코팅 도장복강관	에폭시도 복장강관	주철관	덕타일 주철관관	PVC	PE	아연 도강관	기타
관연장(m)	0	17,606	0	68,793	154	0	995,117	0
경년관 연장(m)	0	0	0	0	0	0	0	0
경년관 비율(%)	0	0	0	0	0	0	0	0
평균사용기한(년)	0	20.5	0	12.6	10.0	0	14	0



<그림 3-2-49> 경년관 분포율(울산광역시)



<그림 3-2-50> 평균사용 기한(울산광역시)

3. 동계 상수관 파열 현황 조사

동계의 상수관의 파열은 관내부의 수분의 동결에 의한 파손, 관표면의 흡착수의 동결, 인접지반의 동결융해에 따른 부등침하등의 이유로 인하여 발생하거나 이러한 원인의 복합적 거동에 의하여 발생한다. 따라서 본 연구는 기존 상수도관의 이러한 원인을 조사하고 국내외 사례조사를 통해 기존 문제점을 파악하는 것으로 이를 위하여 본절에서는 동파의 원인을 동계의 상수관 파열현황을 평균기온을 통하여 분류하여 진행하였다.

상수관의 동파는 지역의 특성과 해당 기간의 기후특성에 따라 그 차이가 존재한다. 본 절에서는 각 지역을 9개도로 분류하고 기후특성을 해당기간의 기온으로 하여 상수관의 동계 파열 특성을 비교 분석하였다. 분석 자료는 상수도 통계기준 및 각 지역별 통계 현황 자료를 활용하여 각 지역의 동파 민원 건수를 분석하였다. 대상 자료를 최근 5개년도의 1월에서 3월의 동계의 상수관의 파열 민원으로 하여 신뢰성이 있는 최근의 통계자료를 획득, 이를 기간 특성별로 분류하고 기온과의 비교를 분석하였다.

1월 평균기온은 전국적으로 통상 영하권에 머물러 지표면의 경우 수분이 동결되고 이 기간의 하부 상수관의 경우 관 내부 수분이 동결되어 파열될 가능성이 존재한다. 2월의 경우 각 지역에 따라 평균기온이 영하권과 영상권의 차이가 발생한다. 강원권과 같은 북부지역의 영하권의 지역의 경우 1월의 경우와 같은 관내부 수분의 동결에 의한 상수관의 파열발생 할 가능성이 존재 하고 부산과 같은 남부지방의 경우 2월 하순에 평균기온이 상승하여 하부지반의 해빙으로 인하여 부등침하로 인한 관의 파손이 발생할 가능성이 존재한다. 3월의 경우 대부분의 지역이 기온이 영상권으로 상승하는 해빙 기간으로 이때의 동파의 특성은 관내부의 수분동결과 관외부 지반의 해빙으로 인한 부분적 지지력 상실로 인한 관변형으로 파괴가 진행될 것으로 판단된다.

따라서, 동절기의 상수관 파열 특성을 통하여 지역의 동파 경향을 판단하기 위하여 최근 5개년도의 동계 관파열을 현상 분류하고 이를 기온과 비교평가를 실시하였다. 아래의 각 소절은 이러한 결과를 국내 지역구분에 따라 9개로 분류하여 나타내었다.

가. 지역별 동계 상수관 파열 현황

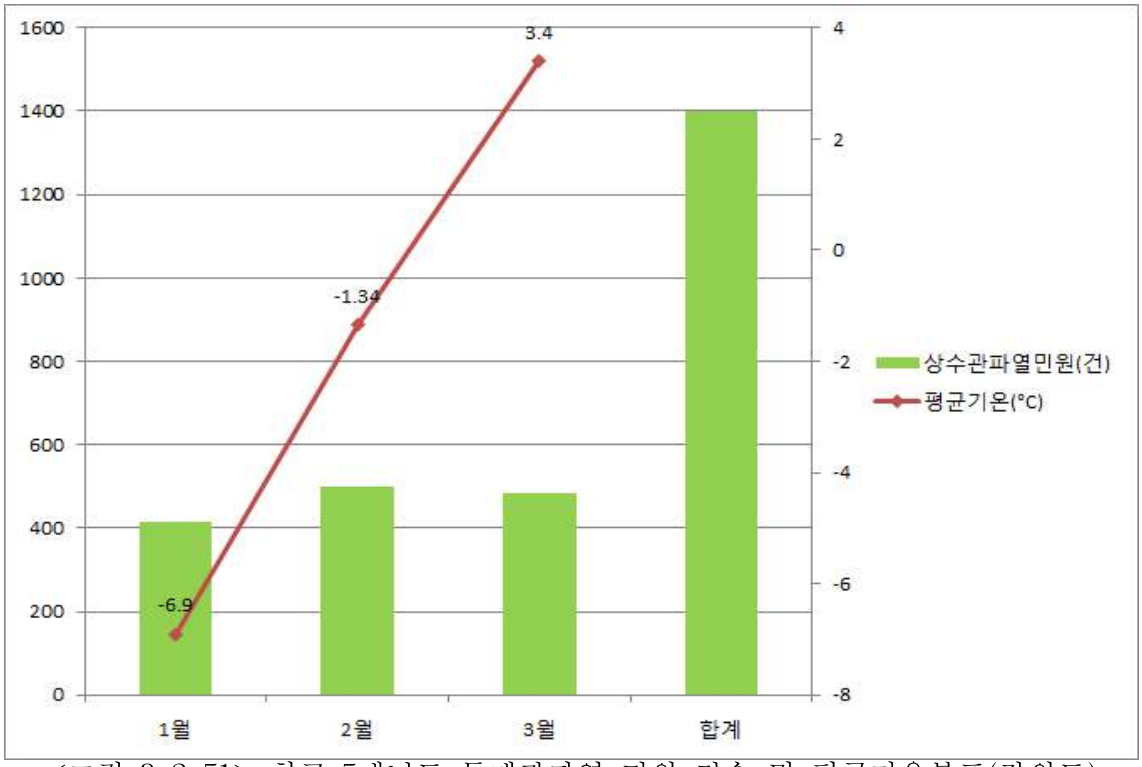
(1) 강원도

강원도 지역은 국내 북단에 위치한 지역으로 평균기온은 1월뿐만 아니라, 2월에도 0℃이하에 존재하여 동파의 위험성이 가장 큰 지역이다. 이 지역의 동계의 상수관의 파열은 총 5년 동안 1399회 발생하였다. 이 기간의 평균기온은 1월과 2월은 영

하, 3월은 영상권을 유지한다. 따라서 여타지역에 비하여 2월의 동결건수가 증가하는 경향을 보인다. 따라서 관내수분의 동결에 의해 관파열이 1월과 2월의 걸쳐 발생을 하고 영상으로 기온이 상승하는 2월 하순부터 3월에 걸쳐 해빙에 의한 영향을 일정부분 받을 것으로 사료된다.

<표 3-2-33> 최근 5개년 동파 건수 및 평균기온(강원도)

월	1월	2월	3월	합계
동계 관파열 민원	414	501	484	1,399
동계 평균기온(℃)	-6.9	-1.34	3.4	-



<그림 3-2-51> 최근 5개년도 동계관파열 민원 건수 및 평균기온분포(강원도)

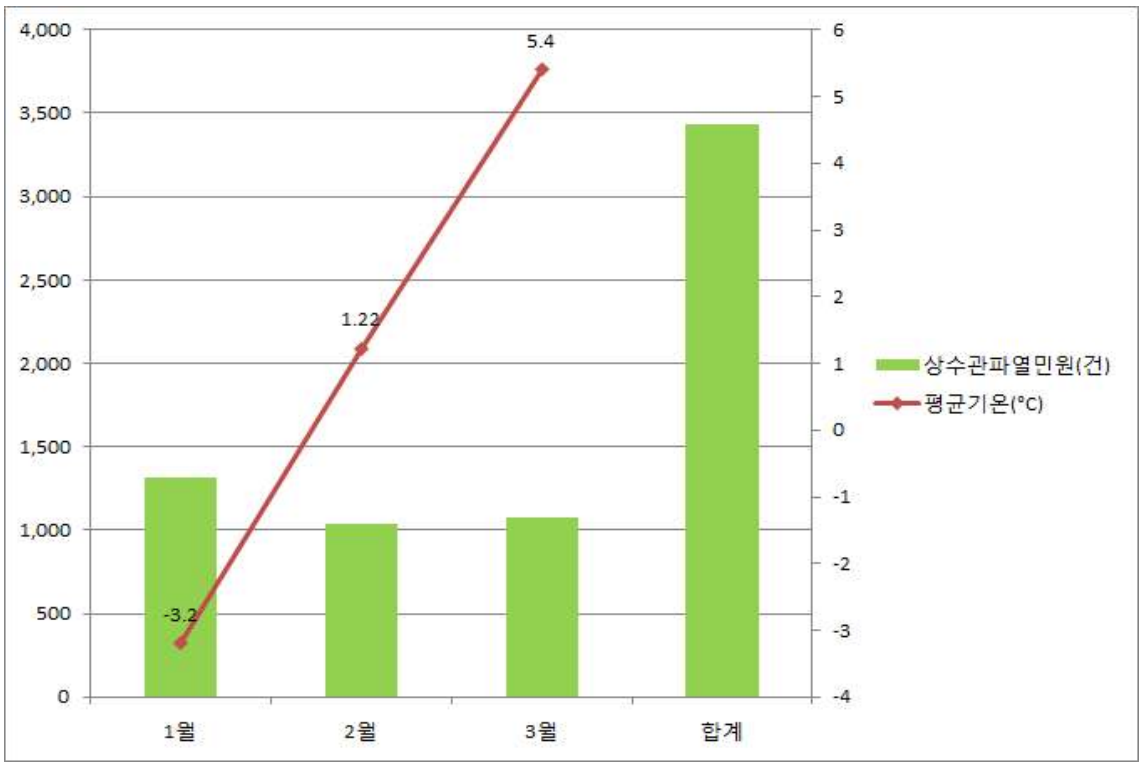
(2) 경기도

경기도 지역은 강원도 남서부에 위치한 지역으로 평균기온은 1월에 -3.2℃이고 2월부터 영상권으로 기온이 분포한다. 동계 관파열의 최근 5개년 민원 현황은 총 3430회이며 이는 경기도 지역의 면적과 인구에 의해 상수도시설이 강원도에 비하여 응집되어 나타난 것으로 사료된다. 평균기온은 1월은 영하의 기온을 2월은 영하에서 영상으로 변화를 하고 3월은 영상권을 유지한다. 따라서 강원지역에 비하여 2월

에 민원건수가 감소하고 3월과 유사하게 나타나는 경향을 보인다. 따라서 관내수분의 동결에 의한 관파손이 1월과 2월초순에 걸쳐 발생을 하고 영상으로 기온이 상승하는 2월 중순부터 3월에 걸쳐 해빙에 의한 영향을 일정부분 받을 것으로 사료된다.

<표 3-2-34> 최근 5개년 동파 건수 및 평균기온(경기도)

월	1월	2월	3월	합계
동계 관파열 민원	1,319	1,033	1,078	3,430
동계 평균기온	-3.2	1.22	5.4	-



<그림 3-2-52> 최근 5개년도 동계관파열 민원 건수 및 평균기온분포(경기도)

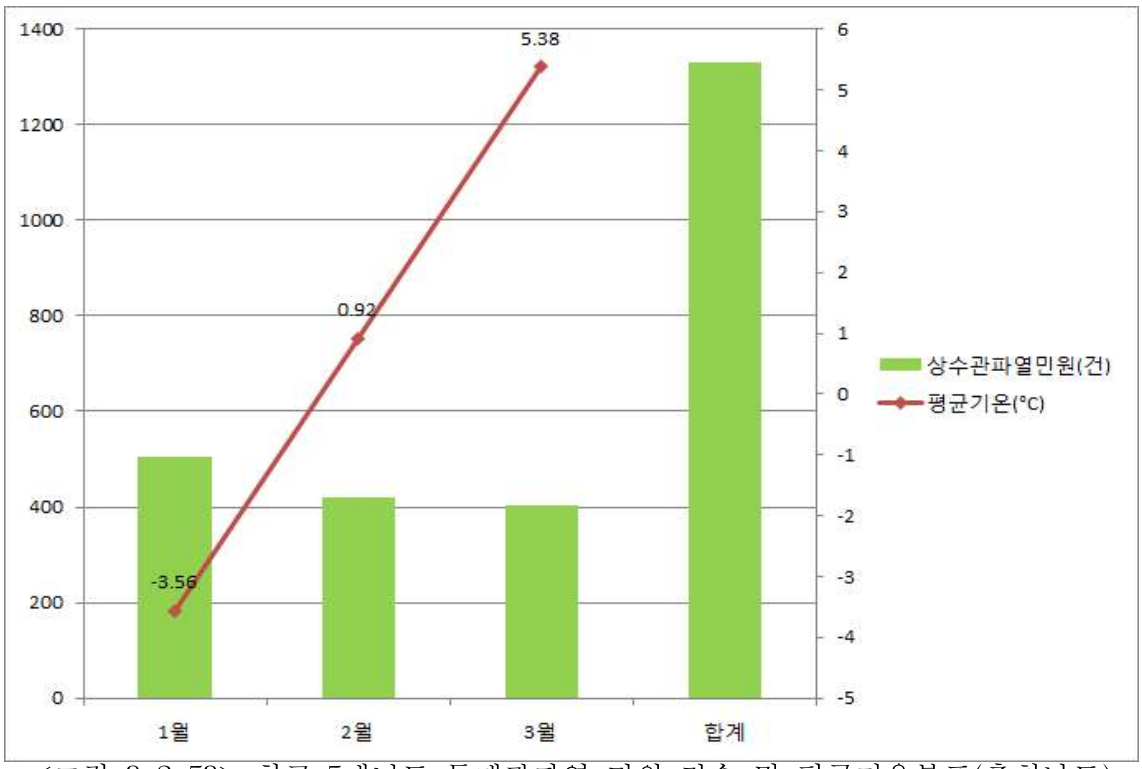
(3) 충청남도

충청남도 지역은 서해안에 인접한 중부지역으로 평균기온은 1월에 -3.6℃이고 2월부터 영상권으로 기온이 분포한다. 기온의 분포는 경기권에 비하여 남부임에도 동계기온은 더 낮은 것을 확인할 수 있다. 동계 관파열의 최근 5개년 민원 현황은 총 1329회이며 1월에서 3월로 갈수로 수치가 감소한다. 월 평균기온은 1월은 여하, 2~3

월은 영상권으로 유지한다. 따라서 민원수치 감소 추세는 경기지역과 유사하게 2월에 수치가 감소하고 3월과 유사하게 나타나는 경향을 보인다. 따라서 관내수분의 동결에 의해 동파가 1월과 2월초순에 걸쳐 발생을 하고 영상으로 기온이 상승하는 2월 중순부터 3월에 걸쳐 해빙에 의한 영향을 일정부분 받을 것으로 사료된다.

<표 3-2-35> 최근 5개년 동파 건수 및 평균기온(충청남도)

월	1월	2월	3월	합계
동계 관파열 민원	505	420	404	1,329
동계 평균기온	-3.56	0.92	5.38	-



<그림 3-2-53> 최근 5개년도 동계관파열 민원 건수 및 평균기온분포(충청남도)

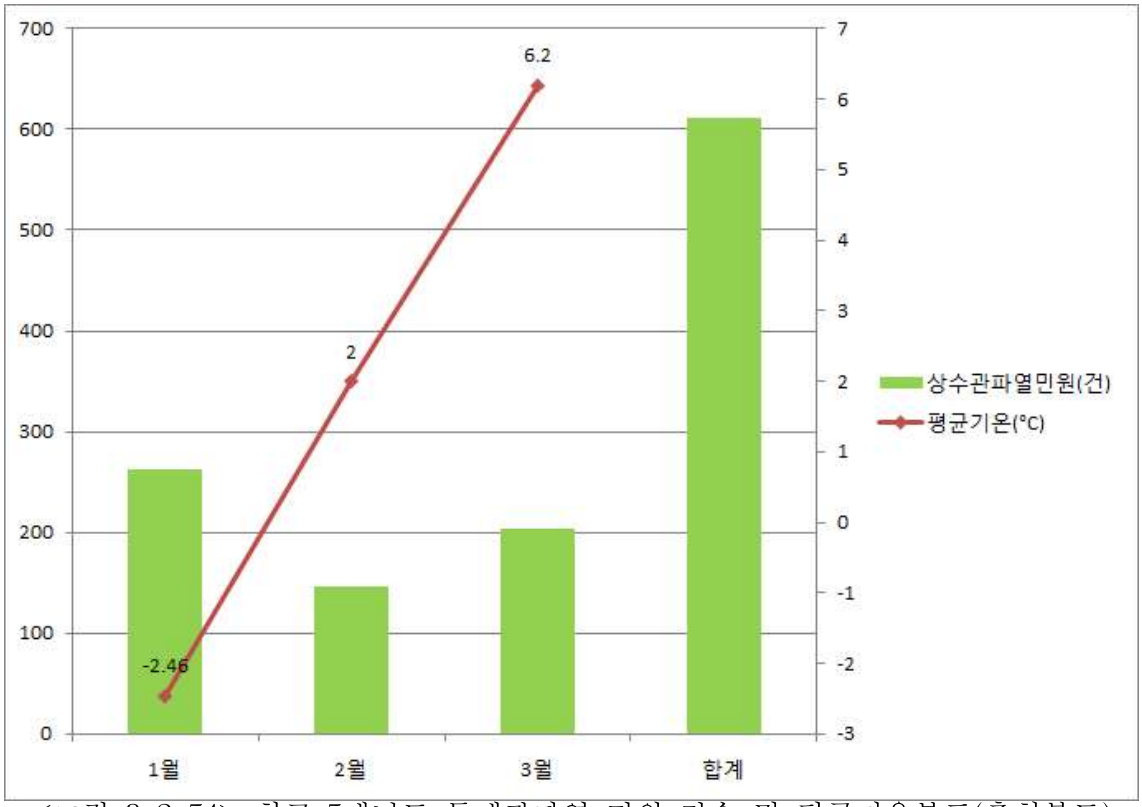
(4) 충청북도

충청북도 지역은 9개도중 유일하게 해안과 접하지 않은 내륙지역으로 평균기온은 1월에 -2.5℃이고 2월부터 영상권으로 3월은 6.2℃로 높은 기온분포가 나타난다. 기온의 특성은 경기권 3월의 기온이 2월에 나타남을 알 수 있다. 최근 5개년 민원 현황은 총612회이며 1월에서 2월로 갈수로 수치가 감소하고 3월에 증가함을 알 수 있다. 수치 감소는 경기지역에 비하여 한달 빠르게 나타나며 3월에 증가한다. 이는 관

내수분의 동결에 의해 동파가 1월에 걸쳐 발생을 하고 영상으로 기온이 상승하는 2월은 걸쳐 해빙에 의한 영향을 일정부분 받고 3월의 동파는 해빙으로 인한 지반의 지지력 부족으로 인한 관의 파열이 의심된다.

<표 3-2-36> 최근 5개년 동파 건수 및 평균기온(충청북도)

월	1월	2월	3월	합계
동계 관파열 민원	262	146	204	612
동계 평균기온	-2.46	2	6.2	-



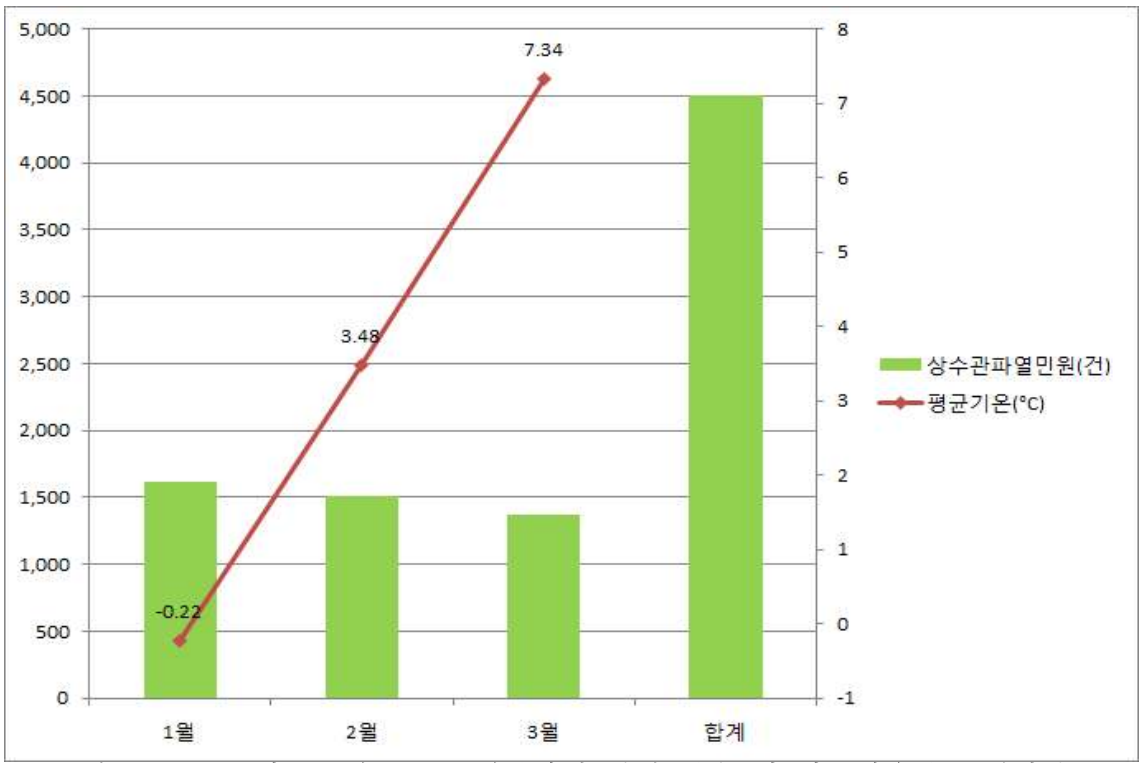
<그림 3-2-54> 최근 5개년도 동계관파열 민원 건수 및 평균기온분포(충청북도)

(5) 경상북도

경상북도 지역은 동해와 남해가 접하는 해안지역으로 평균기온은 1월에 -0.22℃이고3월은 7.3℃로 높은 기온분포가 나타난다. 이는 남부의 위치특성과 해안가의 지리적 특성에 의한 것으로 기온이 동계기간 내내 0℃이상으로 나타난다. 최근 5개년 민원 현황은 총4508회로 이는 여타지역과 비교하여 넓고 면적과 많은 인구로 상수도시설의 응집으로 인하여 발생한 것으로 판단된다. 이 지역의 동파는 하부지반의 지속적인 동결 온도조건이 확보 되지 않음으로 해빙으로 인한 지반의 지지력 부족으로 인한 관의 파열이 의심된다.

<표 3-2-37> 최근 5개년 동파 건수 및 평균기온(경상북도)

월	1월	2월	3월	합계
동파 건수	1,621	1,511	1,376	4,508
동계 평균기온	-0.22	3.48	7.34	-



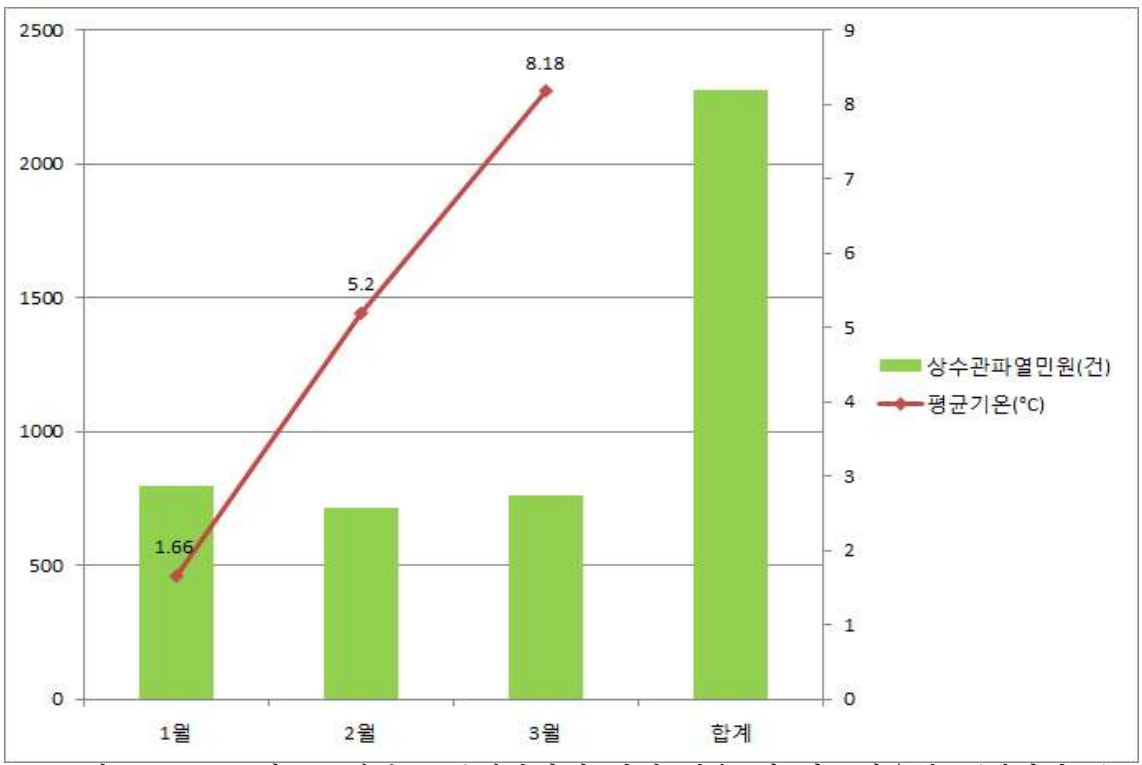
<그림 3-2-55> 최근 5개년도 동계관파열 민원 건수 및 평균기온분포(경상남도)

(6) 경상남도

경상남도 지역은 동해 접하는 해안지역으로 평균기온은 동계기간의 평균온도는 영상권에 위치한다. 이는 남부의 위치특성과 해안가의 지리적 특성에 의한 것으로 판단된다. 최근 5개년 민원 현황은 총 2274회로 기온에 비하여 비교적 높은 발생빈도를 보였으며, 이는 여타지역과 비교하여 넓은 면적과 많은 인구로 상수도시설이 응집되어 발생한 것으로 판단된다. 이 지역의 기후는 하부지반의 지속적인 동결 온도 조건이 확보 되지 않는다. 따라서, 경상남도는 해빙으로 인한 지반의 지지력 부족으로 인한 관의 파열에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

<표 3-2-38> 최근 5개년 동파 건수 및 평균기온(경상남도)

월	1월	2월	3월	합계
동계 관파열 민원	799	713	762	2,274
동계 평균기온	1.66	5.2	8.18	-



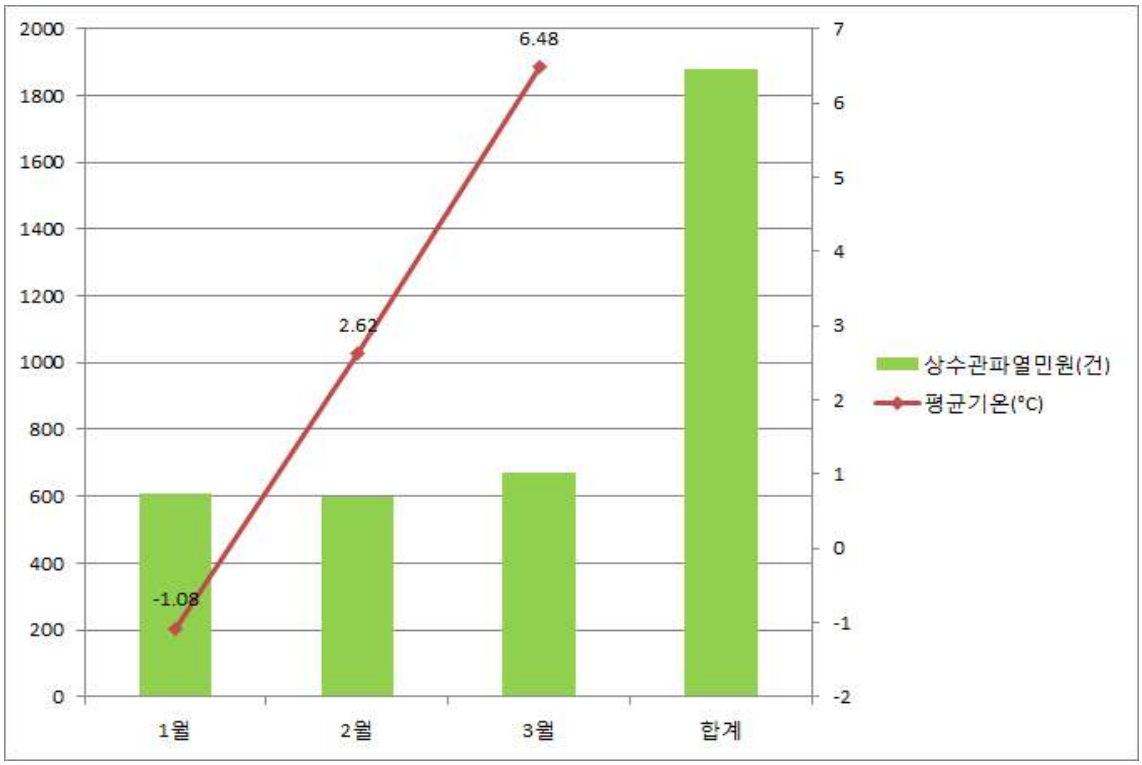
<그림 3-2-56> 최근 5개년도 동계관파열 민원 건수 및 평균기온분포(경상남도)

(7) 전라북도

전라북도 지역은 서해안 남부의 해안지역으로 평균기온은 동계기간의 평균온도는 영상권으로 충청북도와 유사한 경향을 보인다. 기온의 분포는 경기권에 비하여 남부임에도 동계기온은 더 낮은 것을 확인할 수 있다. 최근 5개년 민원 현황은 총 1878회이며 1월과 3월이 소폭의 증가 현상이 있다. 평균기온은 1월은 영하권에 형성되고 2월과 3월은 영상권을 유지한다. 이 지역의 기후는 2월부터 하부지반의 지속적인 동결 온도조건이 나타나지 않는다. 따라서, 전라북도는 해빙으로 인한 지반의 지지력 부족으로 관의 파열이 나타날 것으로 판단된다.

<표 3-2-39> 최근 5개년 동파 건수 및 평균기온(전라북도)

월	1월	2월	3월	합계
동계 관파열 민원	608	598	672	1,878
동계 평균기온	-1.08	2.62	6.48	-



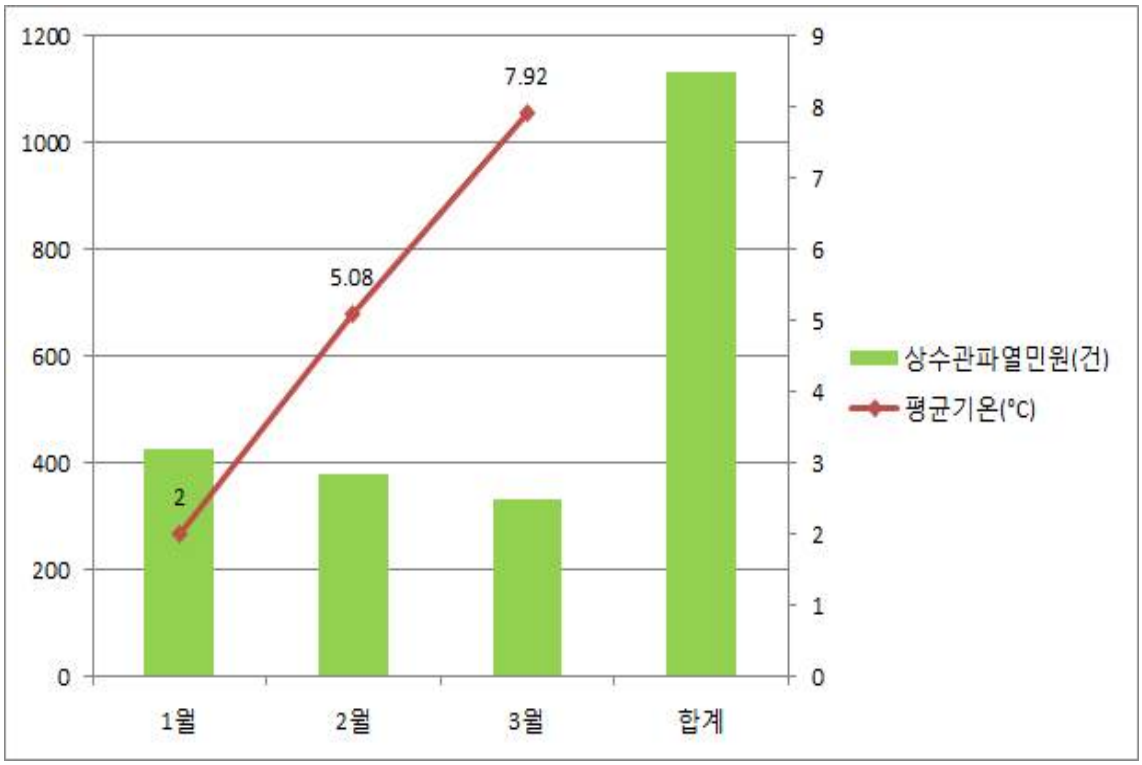
<그림3-2-57> 최근 5개년도 동계관파열 민원 건수 및 평균기온분포(전라북도)

(8) 전라남도

전라남도 지역은 서해와 남해가 접하는 해안지역으로 평균기온은 동계기간의 평균온도는 영상권에 위치한다. 이는 남부의 위치특성과 해안가의 지리적 특성에 의한 것으로 판단된다. 최근 5개년 민원 현황은 총 1133회로 기온에 의하여 여타지역가 비교하여 낮은 발생빈도를 나타낸다. 월별경향은 3월로 진행 될수록 수치가 낮아짐을 알 수 있다.이 지역의 기후는 하부지반의 지속적인 동결 온도조건이 확보 되지 않는다. 따라서, 경상북도와 같이 해빙으로 인한 지반의 지지력 부족으로 인한 관의 파열이 나타날 것으로 판단된다. 그러나 이 지역의 토질의 경우 #200체 통과율이 경상남도에 비하여 25%이상 높고 평균입경이 0.3mm크게 나타난다. 또한 표층 상부 토질의 점토비율이 경상남도에 비하여 낮게 분포하는 등의 동결융해에 저항성이 높은 지반조건이 나타난다.

<표 3-2-40> 최근 5개년 동파 건수 및 평균기온(전라남도)

월	1월	2월	3월	합계
동계 관파열 민원	424	377	332	1,133
동계 평균기온	2	5.08	7.92	-



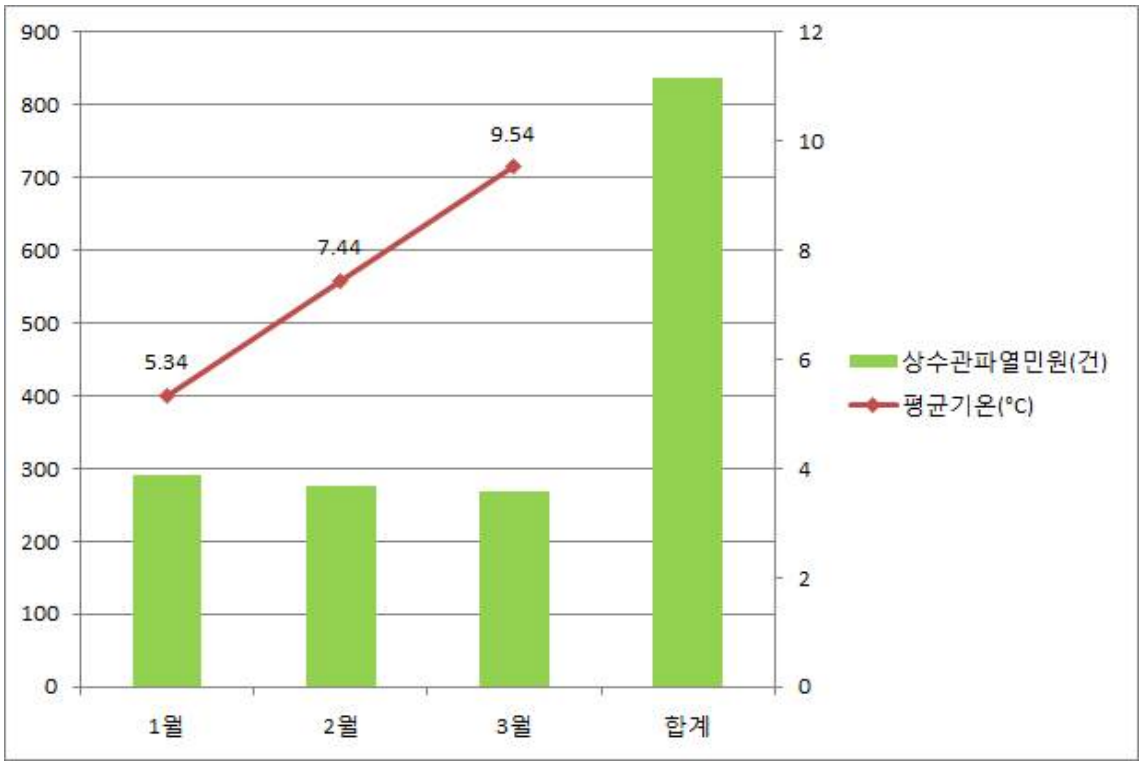
<그림 3-2-58> 최근 5개년도 동계관파열 민원 건수 및 평균기온분포(전라남도)

(9) 제주도

제주도 지역은 남해의 섬지역으로 동계기간의 평균온도는 영상권에 위치한다. 최근 5개년 민원 현황은 총 836회로 기온에 의하여 여타지역가 비교하여 낮은 발생빈도를 나타낸다. 월별경향은 3월로 진행 될수록 수치가 낮아짐을 알 수 있다. 이 지역의 기후는 하부지반의 지속적인 동결 온도조건이 확보 되지 않는다. 따라서, 경상북도와 같이 해빙으로 인한 지반의 지지력 부족이 관의 파열에 영향을 줄 것으로 판단된다. 그러나 이 지역의 토질의 경우 평균입경이 3mm이상으로 여타 지역에 비하여 크고 주요 상부토질이 자갈계열의 비율이 높게 나타난다. 따라서, 동결융해에 저항성이 높은 지반조건으로 의하여 3월에 동파 빈도가 감소한 것으로 사료된다.

<표 3-2-41> 최근 5개년 동파 건수 및 평균기온(제주도)

월	1월	2월	3월	합계
동계 관파열 민원	292	275	269	836
동계 평균기온	5.34	7.44	9.54	-



<그림 3-2-59> 최근 5개년도 동계관파열 민원 건수 및 평균기온분포(제주도)

나. 연도별 동계 상수관 파열 현황

국내의 기후는 한반도는 중위도 온대성 기후대에 위치(북위33°-43°)하고 있어서 사계절이 뚜렷한 특성을 가지고 있다. 겨울철에는 한랭 건조한 대륙성 고기압의 영향을 받아 춥고 건조하며, 여름에는 고온 다습하고 강수량이 여름철에 집중되며, 봄과 가을에는 맑고 건조한 날이 많다. 연 평균기온은 남한의 경우 중부 산간지방을 제외하고, 대체적으로 연평균 기온이 10~16℃ 이며, 가장 무더운 달인 8월에는 23~27℃, 5월은 16~19℃, 10월은 11~19℃, 가장추운 달인 1월에는 -6~7℃ 이다. 그러나 최근 국내는 지구온난화에 따른 이상기후로 인하여 시베리아 북부지역을 감싸고 있는 제트기류가 감소하여 오히려 겨울철 한파의 강도가 점점 더 심해지고 있는 실정이다. 이러한 현상은 앞으로도 지속될 것으로 판단되며 이로 인한 상수도관의 동파사고는 증가할 것으로 우려된다.

지하에 매설되는 상수도관의 경우 동결융해에 의한 내·외부 압력 및 하중의 변화, 배관 재료의 노후 속도 증가 등의 간접 피해에 대한 가능성이 있으며, 이에 따른 내부 수용물의 누출 사고에 대한 우려가 크다. 특히 지하에 매설되는 상수도관의 특성에 의해 파손 감지가 어렵고 보수작업에도 많은 어려움이 있어, 설계 및 시공 단계에서부터 안정적인 상수도관 구축을 위한 종합적이고 체계적인 가이드라인을 제시할 필요가 있다.

또한, 국내의 경우 최근 동계의 이상저온 현상과 폭설등으로 인하여 최근 2년동안 동파피해사례가 급증하고 있다. 이는 해당연도 이전에 비하여 현격이 증가된 것으로 이로 인하여 유지 관리를 위한 추가 예산의 소요뿐만 아니라 단수로 인한 지역주민의 불편을 초래하고 있다. 또한 동파의 지역도 강원 북부 지역의 한랭지대 뿐만 아니라 전라도와 경상도와 같은 남부 지역에서도 일시적 이상 저온현상에 의하여 게릴라성 동파가 진행 됨에 따라서 연도에 따른 각지역의 동파 경향을 분석하고 향후를 예측하여 대책을 수립하여야 할 필요가 있다.

따라서 이 절에서는 2006년도부터 2010년도의 각 지역의 동파 현황을 조사하여 수치화하고 이를 해당년도의 평균기온 및 동계 평균과 비교하여 제시하였다. 이를 통하여 평균기온의 특성에 따른 해당 지역의 동파 특성을 파악하고, 동계평균기온과의 비교를 통하여 동파와 기온관의 상관성 분석, 이상동계저온 현상 발생시의 동파 민원의 수치 변화를 파악하였다. 또한, 각 지역의 해당 연도의 민원 현황을 비교하여 나타냄으로써 동파에 대한 지역적 특성을 제시 하였다.

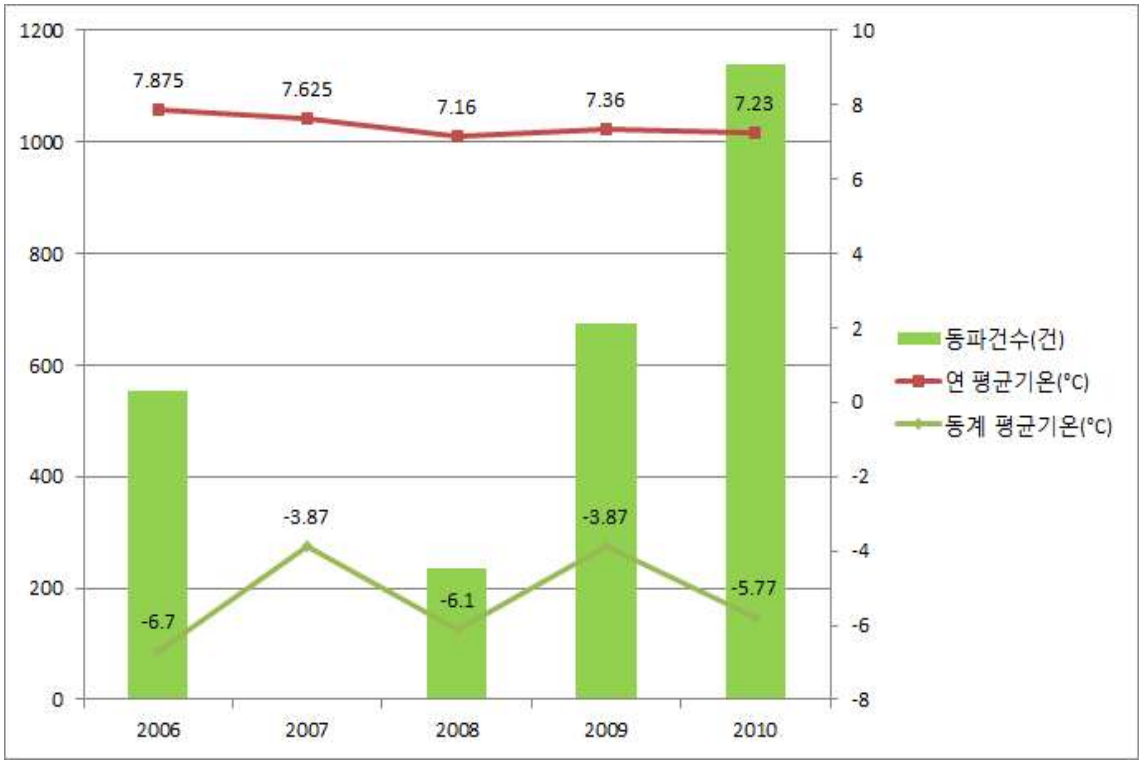
(1) 강원도

강원도 지역은 국내 북단에 위치한 지역으로 동계의 평균기온이 국내에서 가장 낮은 지역이다. 이에 따라 상수관의 동파의 위험성이 가장 큰 지역분류 된다. 이 지역의 동파는 2006년도에 500여회, 2008년도에 230회 발생하였으며 2010년도에 동계

저온현상으로 인하여 급증하여 1100여회 발생하였다. 동파의 경향은 최근 3년사이에 5배의 증가가 나타났다. 이러한 현상은 동계의 저온현상과 짧은 기간에 발생하는 게릴라성 추위에 의한 것으로 판단된다. 따라서 뚜렷한 동파의 증가 경향이 나타나므로 지역의 동파대책이 필요 할 것이다.

<표 3-2-42> 연도별 동파 건수 및 평균기온(강원도)

연도	2006	2007	2008	2009	2010
동파 건수	554	0	236	674	1140
연 평균기온	7.875	7.625	7.16	7.36	7.23
동계 평균기온	-6.70	-3.87	-6.10	-3.87	-5.77



<그림 3-2-60> 연도별 동파 건수 및 평균기온분포(강원도)

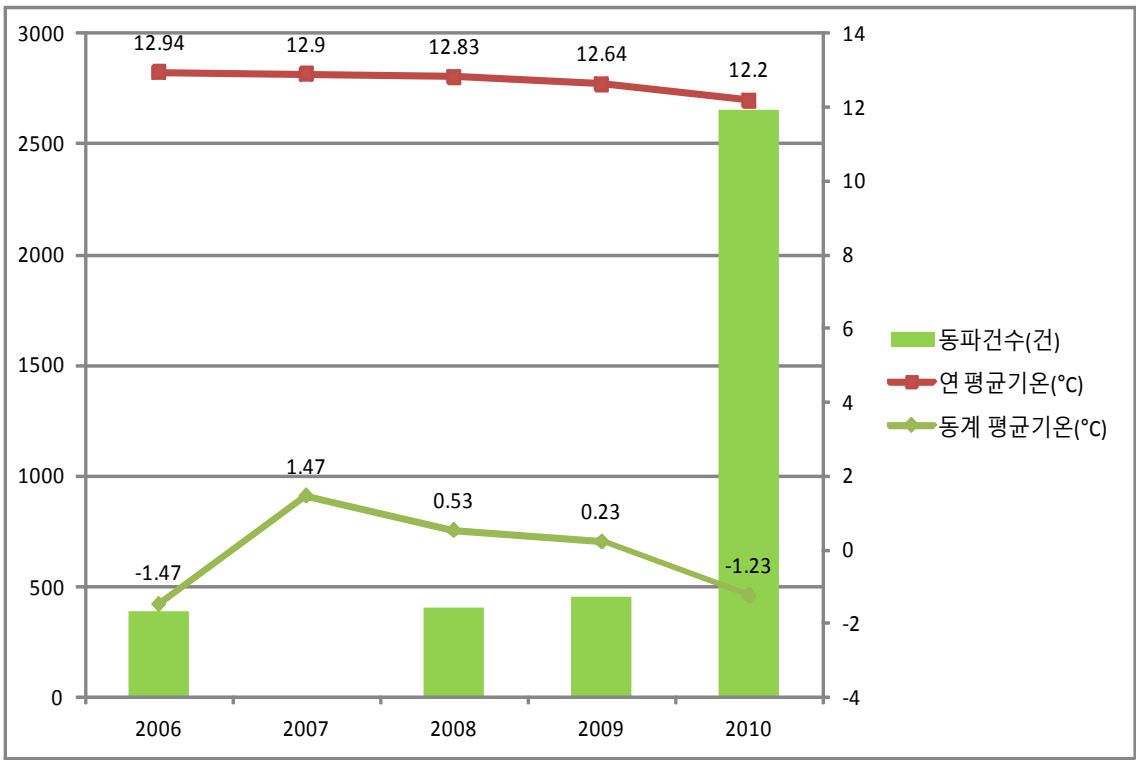
(2) 경기도

경기도 지역은 서해안과 접한 지역중 최북단에 위치한다. 이 지역의 최근 온도 경향은 지속적으로 낮아짐을 알 수있다. 이에 따라 상수관의 동파의 위험성이 연도가 진행 됨에 따라 커진다. 이 지역의 동파는 2006년도에 400여회, 2008년도에 404회 발생하였으며 2010년도에 동계 저온현상으로 인하여 급증하여 2650여회 발생하였

다. 동파의 경향은 최근 3년사이에 6배의 증가하여 타지역에 비하여 현격한 증가가 나타났다. 이러한 현상은 동계의 저온현상과 해안가의 인접영향에 따른 해풍의 영향 ,짧은 기간에 발생하는 게릴라성 추위에 의한 것으로 판단된다. 따라서 뚜렷한 동파의 증가 추세로 인하여 피해가 우려되는 바 이 지역의 동파대책이 필요 할 것이다.

<표 3-2-43> 연도별 동파 건수 및 평균기온(경기도)

연도	2006	2007	2008	2009	2010
동파 건수	391	2	404	451	2652
연 평균기온	12.94	12.90	12.83	12.64	12.20
동계 평균기온	-1.47	1.47	0.53	0.23	-1.23



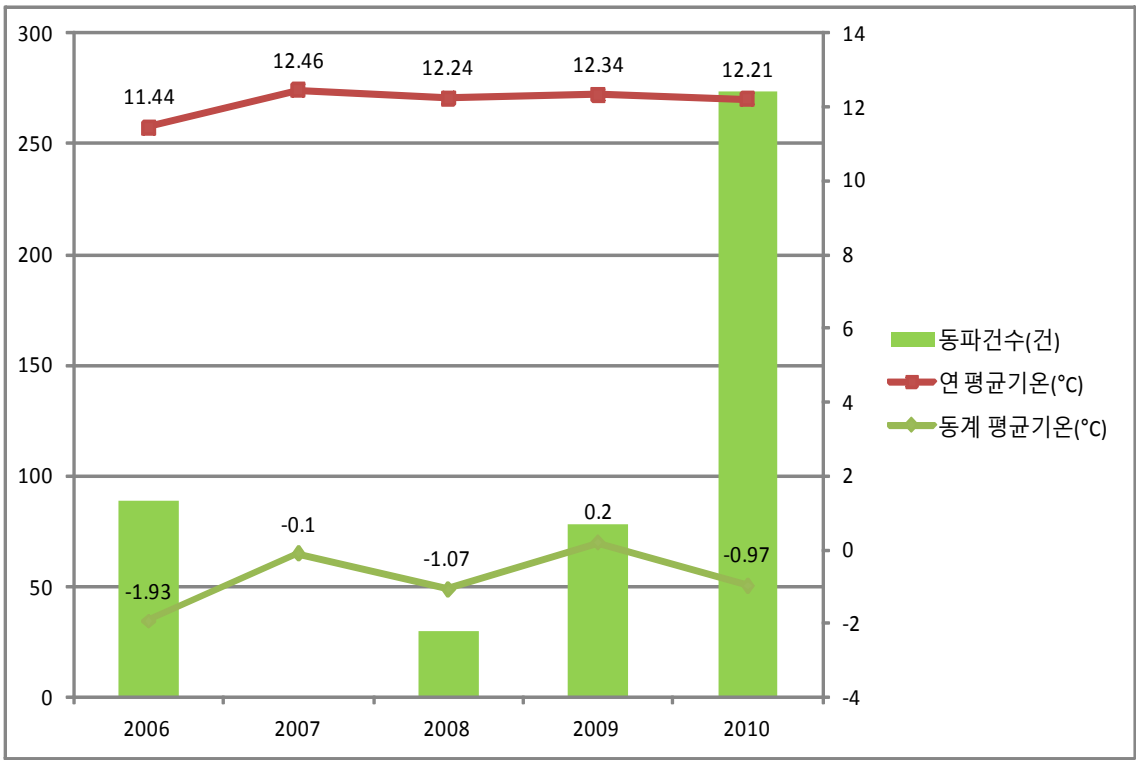
<그림 3-2-61> 연도별 동파 건수 및 평균기온분포(경기도)

(3) 충청남도

충청남도 지역은 서해안에 인접한 중부지역으로 경기도 남부에 위치한다. 이 지역의 최근 평균온도 경향은 매년 지속적으로 유사함을 알 수 있다. 그러나 이러한 평균기온 경향과는 반대로 이 지역의 동파는 2006년도에 89여회, 2008년도에 30회 발생하였으며 2010년도에 동계 저온현상으로 인하여 급증하여 274회 발생하였다. 동파의 경향은 최근 3년 사이에 9배의 증가하여 증가의 비율은 현격하나 그 빈도수가 타 지역에 비하여 낮아 동결 위험성은 떨어진다. 그러나 해안가의 인접영향에 따른 해풍의 영향 ,짧은 기간에 발생하는 게릴라성 추위에 의해 지속적으로 동파의 위험성은 증가 한다. 따라서 충청남도 지역은 동파의 위험성은 적으나, 증가율의 추세를 감안하여 향후 위험가능지역으로 관리가 필요하다.

<표 3-2-44> 연도별 동파 건수 및 평균기온(충청남도)

연도	2006	2007	2008	2009	2010
동파 건수	89	0	30	78	274
연 평균기온	11.44	12.46	12.24	12.34	12.21
동계 평균기온	-1.93	-0.10	-1.07	0.20	-0.97



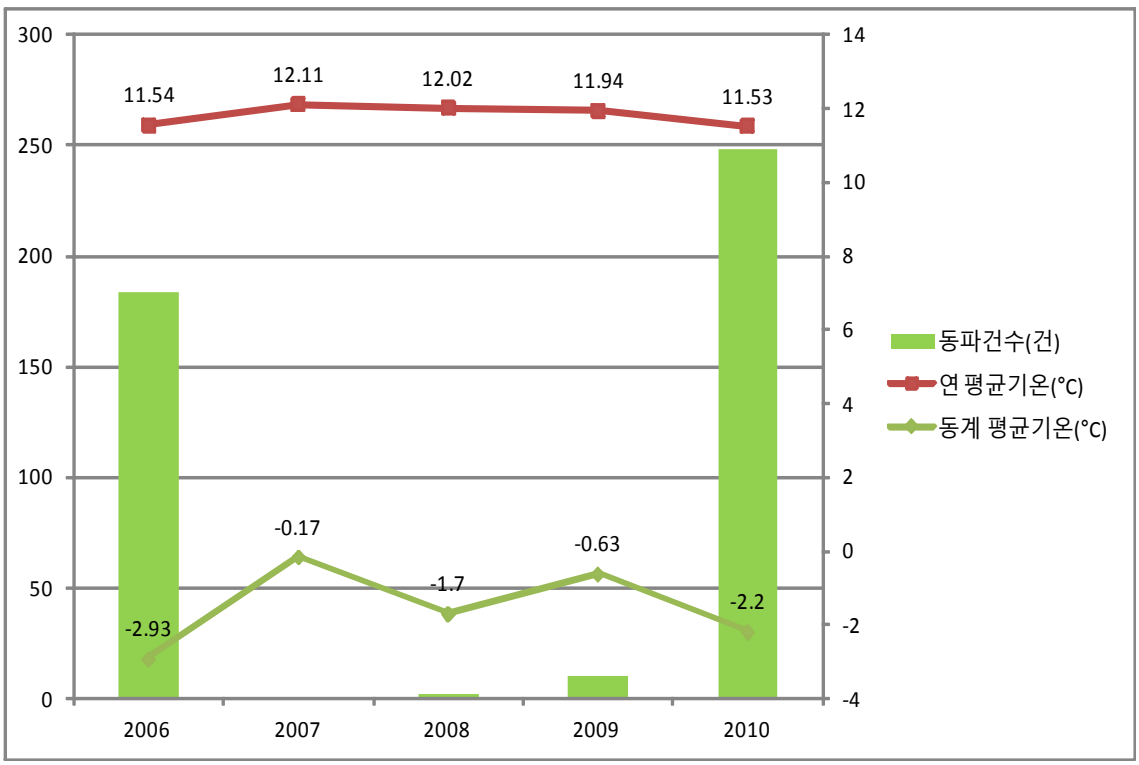
<그림 3-2-62> 연도별 동파 건수 및 평균기온분포(충청남도)

(4) 충청북도

충청북도 지역은 9개도 중 유일하게 해안과 접하지 않은 내륙지역으로 이 지역의 최근 평균온도 경향은 매년 지속적으로 유사하고, 동계평균기온은 2009년을 제외하고 감소추세에 있다. 이러한 동절기 평균기온 경향으로 인하여 최근 가장 추웠던 2006년 과 비교하여 2010년도에 동파 건수가 유사해짐을 알 수 있다. 동파는 2006년도에 184여회, 2008년도에 2회 발생하였으며 2010년도에 동계 저온현상으로 인하여 급증하여 248회 발생하였다. 증가의 비율은 현격하나 그 빈도수가 내륙 지방의 특성상 타지역에 비하여 낮아 동결 위험성은 떨어진다. 그러나 최근 발생하는 동계 이상 저온현상으로 인하여 지속적으로 동파의 위험성은 증가 한다. 따라서 동파의 위험성은 적으나, 증가율의 추세를 감안하여 향후 위험가능지역으로 관리가 필요하다.

<표 3-2-45> 연도별 동파 건수 및 평균기온(충청북도)

연도	2006	2007	2008	2009	2010
동파 건수	184	0	2	10	248
연 평균기온	11.54	12.11	12.02	11.94	11.53
동계 평균기온	-2.93	-0.17	-1.70	-0.63	-2.20



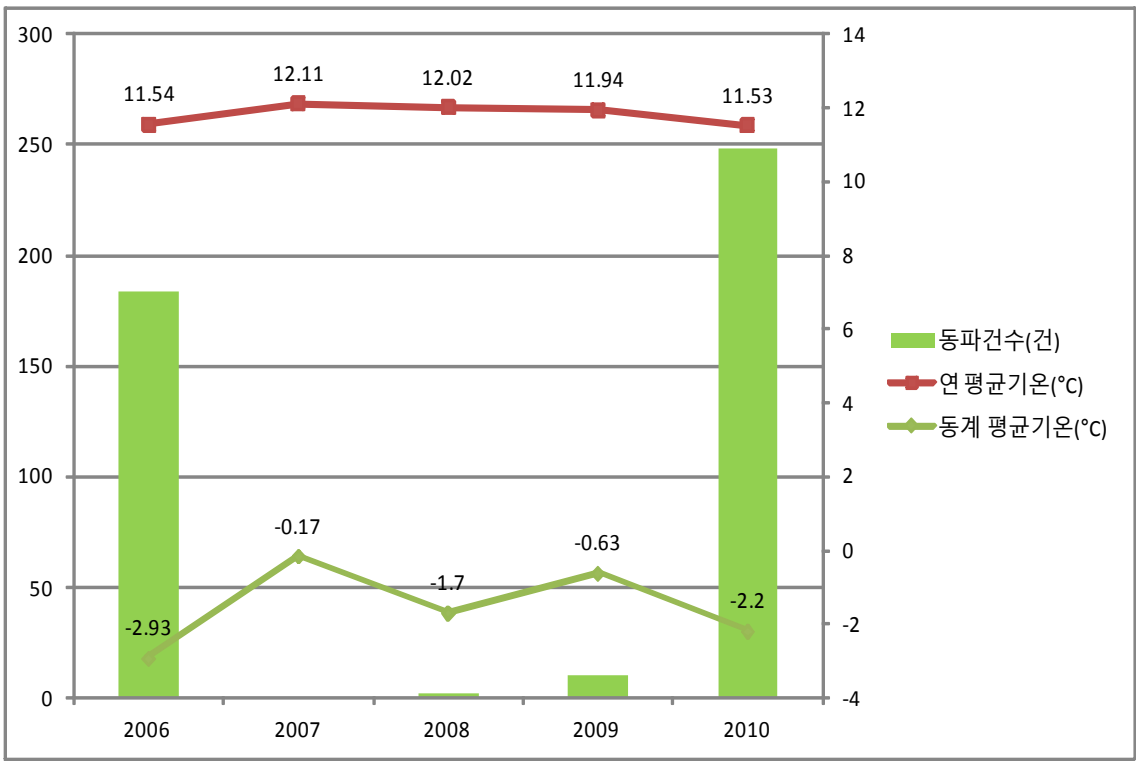
<그림 3-2-63> 연도별 동파 건수 및 평균기온분포(충청북도)

(5) 경상남도

경상남도 지역은 동해 접하는 해안지역으로 평균기온은 동계기간의 평균온도는 영상권이다. 동파는 2006년도에 218여회, 2008년도에 23회 발생하였으며 2010년도에 동계 저온현상으로 인하여 급증하여 341회 발생하였다. 이는 지역 상부 토질의 특성이 지역은 남부 지역이라는 지역적 특성을 갖고 있음에도 그러나 최근 발생하는 동계이상 저온현상으로 인하여 지속적으로 동파의 위험성은 증가 한다. 따라서 동파의 위험성은 적으나, 증가율의 추세를 감안하여 향후 위험가능지역으로 관리가 필요하다. 또한 이 지역의 상부 토층의 경우 동상피해에 위험한 미립분의 함량이 높은 점토시료의 분포가 61%이상 형성되어 있어 향후 이상저온발생시 동파 현상이 급격히 증가 할 것으로 사료된다.

<표 3-2-46> 연도별 동파 건수 및 평균기온(경상남도)

연도	2006	2007	2008	2009	2010
동파 건수	184	0	2	10	248
연 평균기온	11.54	12.11	12.02	11.94	11.53
동계 평균기온	-2.93	-0.17	-1.70	-0.63	-2.20



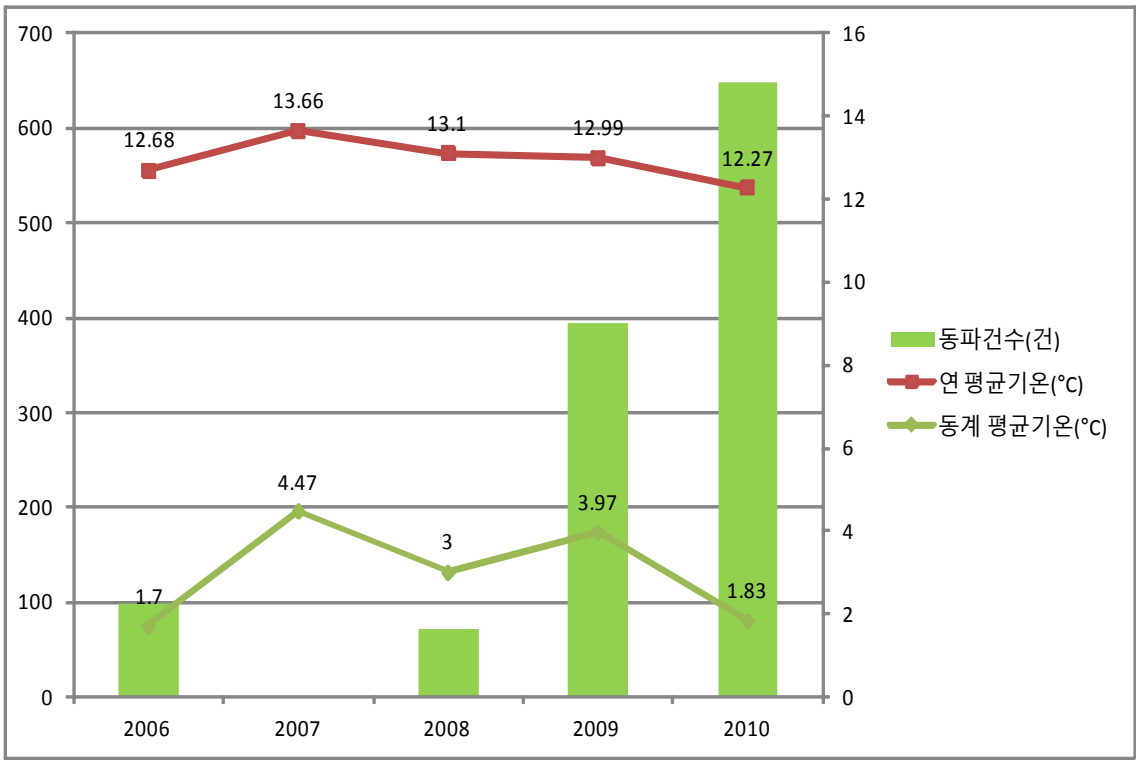
<그림 3-2-64> 연도별 동파 건수 및 평균기온분포(경상남도)

(6) 경상북도

이 지역은 동해에 위치한 해안 지역으로 기온의 변화가 일정하게 나타난다. 이 지역의 동파 경향은 2006년도부터 일정하게 증가하여 2010년도에 648건으로 최대치 나타난다. 이 지역은 타 지역에 비하여 동파의 증가 현상이 일정하고 뚜렷하여 향후 동파에 대한 대책마련이 필요 할 것으로 사료된다. 또한 경상남도와 인접한 경상북도의 남부 지역의 경우 동상취약토질이 상부 토층에 분포할 것으로 판단되어 이상기온으로 인한 동파가 현저히 증가할 것으로 판단된다.

<표 3-2-47> 연도별 동파 건수 및 평균기온(경상북도)

연도	2006	2007	2008	2009	2010
동파 건수	99	0	71	395	648
연 평균기온	12.68	13.66	13.10	12.99	12.27
동계 평균기온	1.70	4.47	3.00	3.97	1.83



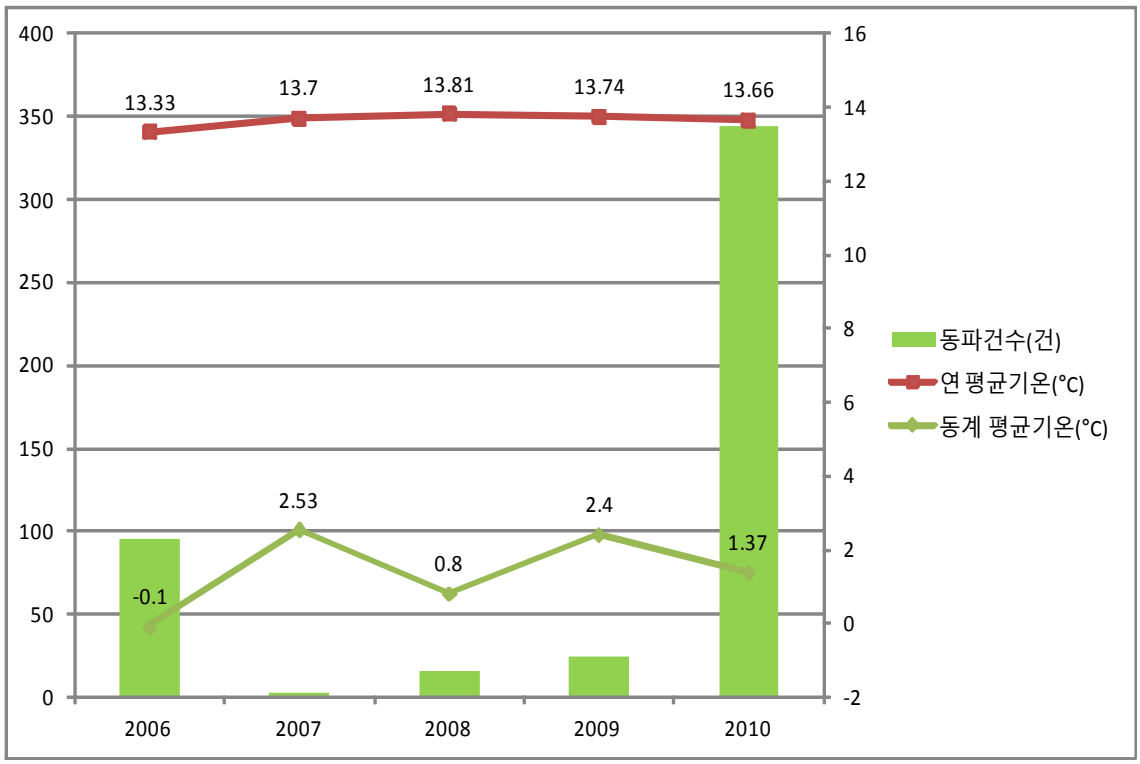
<그림 3-2-65> 연도별 동파 건수 및 평균기온분포(경상북도)

(7) 전라북도

전라북도 지역은 서해와 접하는 해안지역으로 최근 5년간 동계기간의 평균온도는 영상권이다. 동파는 2006년도에 95여회, 2008년도에 16회 발생하였으며 2010년도에 급증하여 344회 발생하였다. 이 지역은 기온의 특성에 대한 동파의 위험성이 적고, 또한 상부 토층의 경우 입경의 크기가 크고 점토의 비율이 적어 동결민감성이 작을 것으로 판단되어 동파에 대하여 비교적 안전지역일 것으로 판단된다. 그러나 미립분의 함량이 늘어나는 전라남도 인접지역으로 갈수록 대책이 필요할 것으로 사료된다.

<표 3-2-48> 연도별 동파 건수 및 평균기온(전라북도)

연도	2006	2007	2008	2009	2010
동파 건수	95	3	16	25	344
연 평균기온	13.33	13.7	13.81	13.74	13.66
동계 평균기온	-0.10	2.53	0.80	2.40	1.37



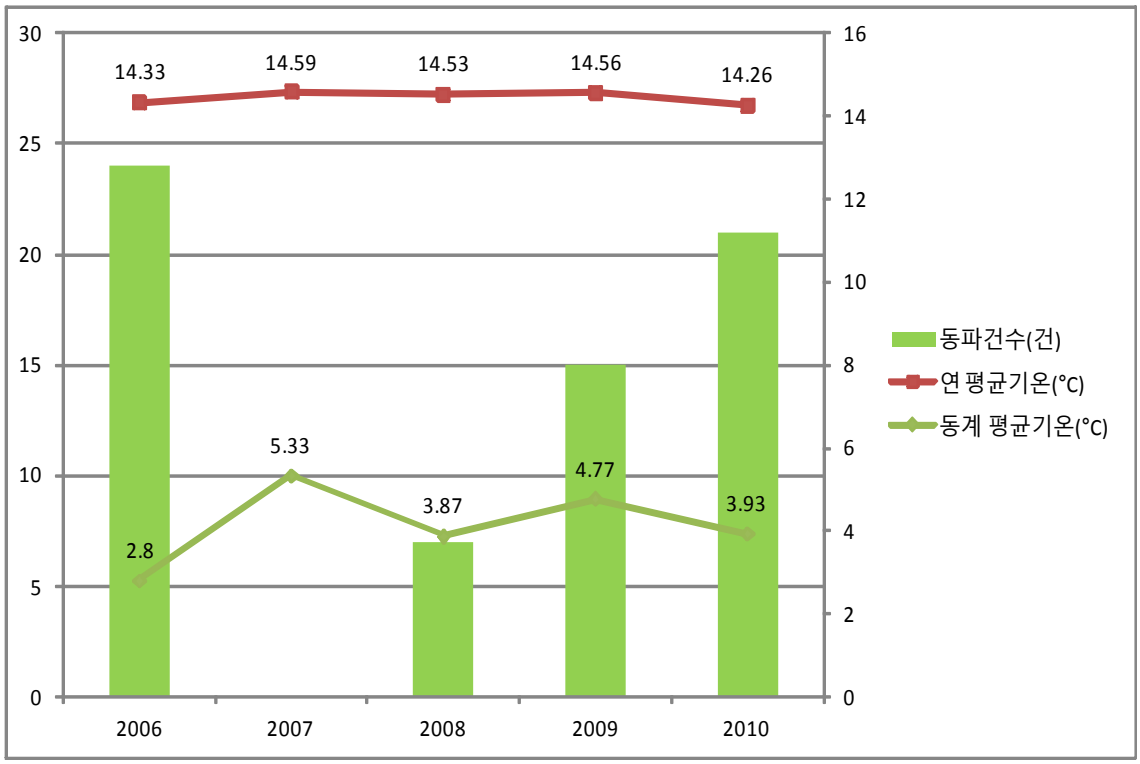
<그림 3-2-66> 연도별 동파 건수 및 평균기온분포(전라북도)

(8) 전라남도

전라북도 지역은 동해와 서해가 접하는 해안지역으로 최근 5년간 동계기간의 평균 온도는 영상권이다. 동파는 2006년도에 24여회, 2008년도에 7회 발생하였으며 2010년도에 급증하여 21회 발생하였다. 이 지역의 상부 토층의 경우 입경의 크기가 크고 점토의 비율이 적어 동결민감성이 작을 것으로 판단되고,도별 동파의 분포가 현저히 적어 동파에 대하여 비교적 안전지역일 것으로 판단된다.

<표 3-2-49> 연도별 동파 건수 및 평균기온(전라남도)

연도	2006	2007	2008	2009	2010
동파 건수	24	0	7	15	21
연 평균기온	14.33	14.59	14.53	14.56	14.26
동계 평균기온	2.8	5.33	3.87	4.77	3.93

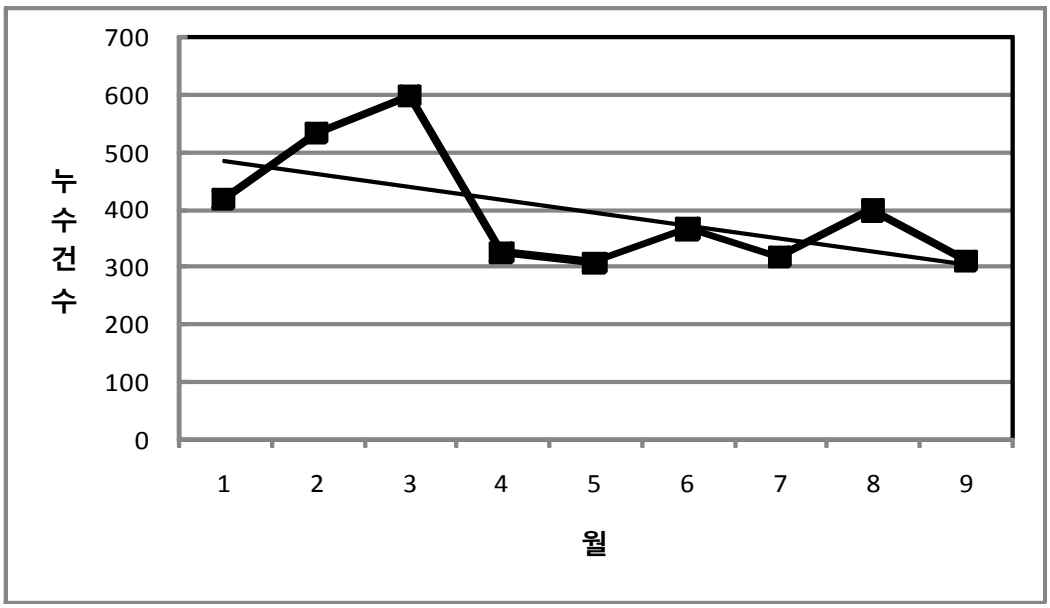


<그림 3-2-67> 연도별 동파 건수 및 평균기온분포(전라남도)

다. 관종별 동계 누수현황

상수도관의 동파는 하부지반의 재료의 특성, 관의 재질, 기온, 물의 조건 등의 복합적인 요소에 의해서 이루어진다. 토질의 종류의 동파영향인자로는 소성지수, #200번체 통과량, 입도(균등계수, 곡률계수)등이 있다. 또한 관의 특성인 관의 두께, 관의 재질, 관경, 관의 연결부위의 특성에 따라 동파확률이 달라지고, 지하수위, 지하수 유입여부, 부동수분량과 같은 수분조건도 그 영향성이 있다. 그리고, 동결지수나 동결융해의 반복의 정도에 따라서도 그 확률이 상이해진다.

또한, 누수의 원인은 관의 노후, 충격하중, 고수압, 부등침하, 손괴원인자, 시공불량, 동결로 인한 응력증가, 동파 등으로 분류할 수 있다. 일반적으로 시공이 완료된 상수도관의 경우 관주변에서 별도의 파괴를 야기 할 수 있는 행위(인접지반 굴착공사, 과하중차량 이동)를 하지 않을 경우 관의 노후에 의한 경우가 대부분이다. 그러나 경년이 지나지 않은 관의 경우 고수압이나 부등침하 동결등의 복합적 원인에 의해서 발생할 수 있다. 이중 부등침하나 고수압의 경우 지반 및 관내부의 동결에 의해서 야기 할 수 있는 것으로 동절기의 파괴행위가 없는 비노후 상수관의 누수의 경우 일정부분 인접지반의 동결로 인한 토압증가가 그 영향성을 미친 것으로 판단할 수 있다. 따라서 본 절에서는 동절기의 누수가 동결에 의한 영향을 받는 것으로 판단하여 본 절에서는 이들 영향인자 중 동파에 취약한 관의 재질을 파악하기 위하여 동계누수통계를 조사하여 지역별로 분류하였다.



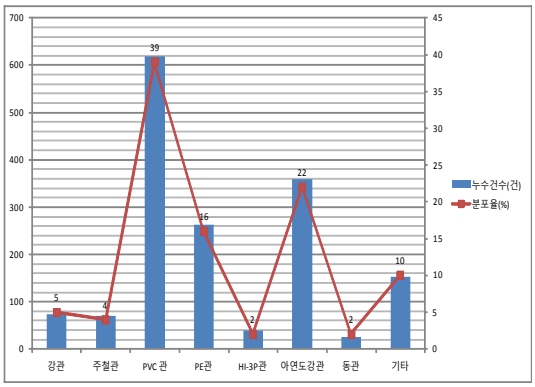
<그림 3-2-68> 비 노후관의 월별 누수 건수(인천시, 2011년도)

(1) 강원도

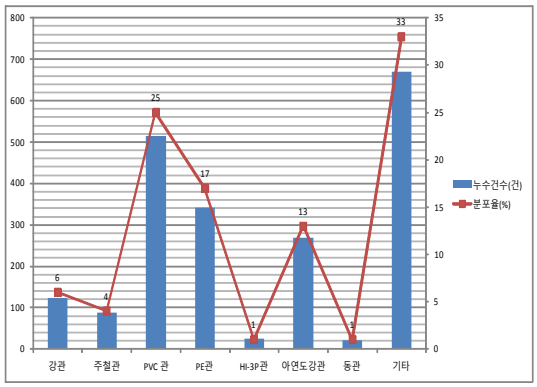
<표 3-2-50>은 강원도의 동계 누수현황을 관재질별로 분류한 현황이다. 강원도의 주요 분포 관종은 PVC관과 PE관로 나타났으며, 이들 관종은 경년관의 비율이 상대적으로 높은 노후관으로 이루어져 있다. 동계누수확률을 나타내는 누수분포(누수건수/총관의 길이)는 주철관에서 25.6건으로 가장 높았으며, 아연도강관, PE관순으로 조사되었다. 아연도강관의 경우, 경년관의 비율이 높고, 관연령 또한 22년으로 누수의 원인은 관의 노후로 판단할 수 있다. 그러나 PE관과 주철관의 경우 경년관의 비율이 적고 관의 연령이 20년 이하로 낮아 동계의 동결로 인한 하부지반의 응력증가 및 관내부 및 외부의 수분의 동결이 관파손에 일정부분 영향 미친 것으로 판단된다.

<표 3-2-50> 관재질별 동계누수분포율(강원도)

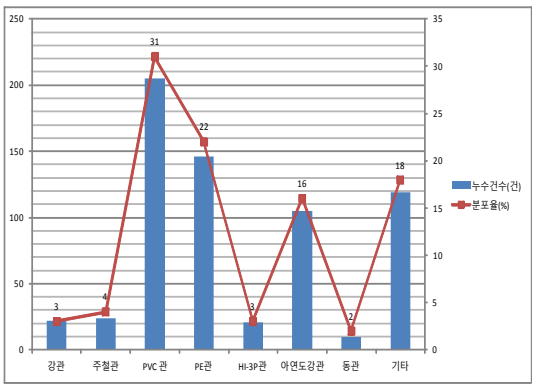
관종		강관	주철관	PVC 관	PE관	아연도강관	동관	기타
동계 누수 건수	2006	74	70	619	262	359	25	152
	2007	124	88	515	342	269	21	669
	2008	22	24	205	146	105	10	119
	2009	103	49	447	570	189	4	294
	2010	118	33	984	496	144	17	185
	합계	441	264	2770	1816	1066	77	1419
총관길이(km)		422.321	10.32	1739.689	702.131	270.81	82.15	620.07
누수분포 (누수건수/총관의 길이)		1.044229	25.5814	1.592239	2.586412	3.936339	0.93731	2.288451
경년관 비율		0	0	45.6	18.4	99.5	9.3	0.8
관연령		21	15.3	17.4	11.5	22.8	14.6	14.3



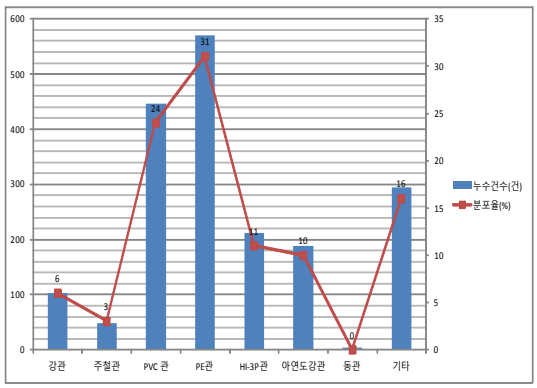
a) 2006년도



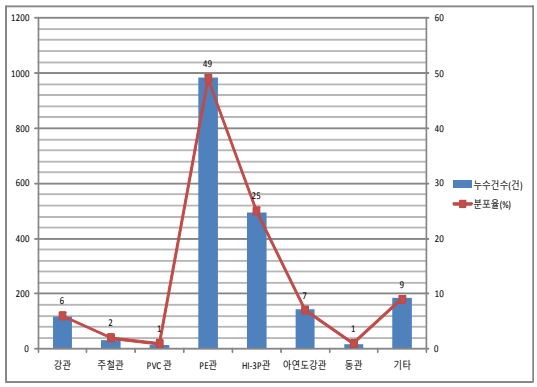
b) 2007년도



c) 2008년도



d) 2009년도



e) 2010년도

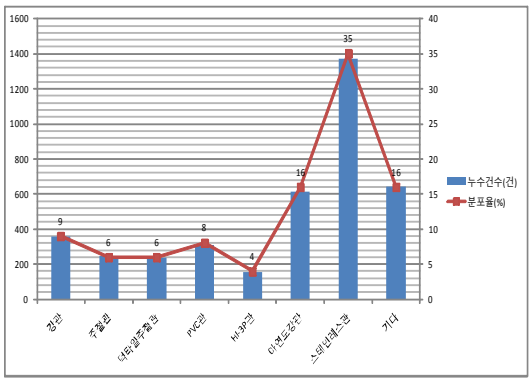
<그림 3-2-69> 관재질별 누수분포율(강원도)

(2) 경기도

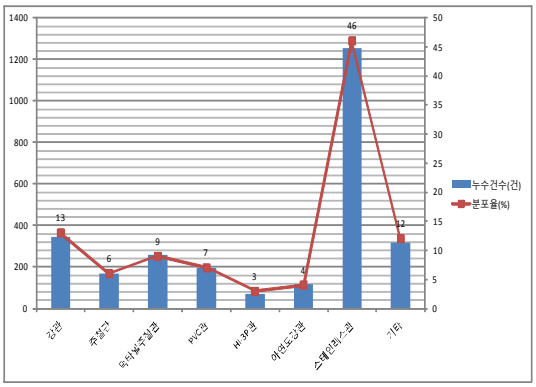
<표 3-2-51>는 경기도의 동계 누수현황을 관재질별로 분류한 현황이다. 경기도의 주요 분포 관종은 스텐레스관과 PVC관으로 나타났으며, 이들 관종은 경년관의 비율이 상대적으로 적은 비노후관으로 이루어져 있다. 동계누수확률을 나타내는 누수분포(누수건수/총관의 길이)는 강관에서 21.9건으로 가장 높았으며, 주철강관, 아연도강관순으로 조사되었다. 아연도강관은 경년관의 비율이 높고, 관연령 20년으로 누수의 원인은 관의 노후로 판단할 수 있다. 그러나 강관과 주철관, 덕타일 주철관의 경우 경년관의 비율이 적고, 관의 연령이 20년 이하로 낮아 동계의 동결로 인한 하부지반의 응력증가 및 관내부 및 외부의 수분의 동결이 관파손에 일정부분 영향 미친 것으로 판단된다.

<표 3-2-51> 관재질별 동계누수분포율(경기도)

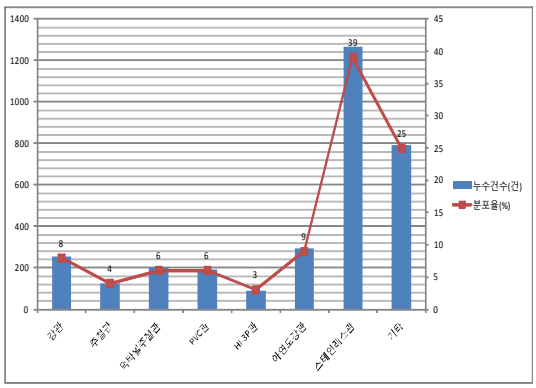
관종		강관	주철관	덕타일 주철관	PVC 관	아연도강관	스텐레스관	기타
동계 누수 건수	2006	356	246	238	308	612	1,370	642
	2007	346	170	257	196	118	1,255	317
	2008	256	125	204	194	295	1,266	790
	2009	356	149	442	198	79	1,283	5,248
	2010	326	213	271	465	92	1,604	933
	합계	1640	903	1412	1361	1196	6778	7930
총관길이(km)		75	73	339	415	248	7309	551
누수분포 (누수건수/총관의 길이)		21.86667	12.36986	4.165192	3.279518	4.822581	0.92735	14.39201
경년관 비율		0	0.1	0	8.1	100	0.4	18.6
관연령		20.2	11.1	14.8	6.8	22.7	13.7	15.8



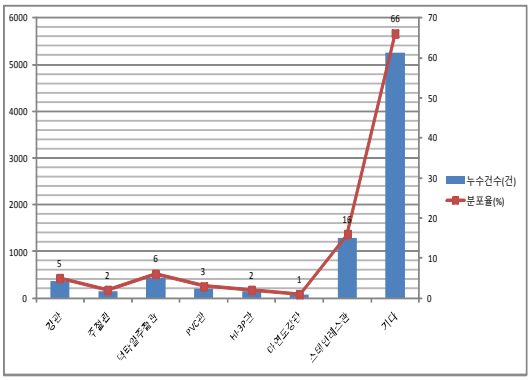
a) 2006년도



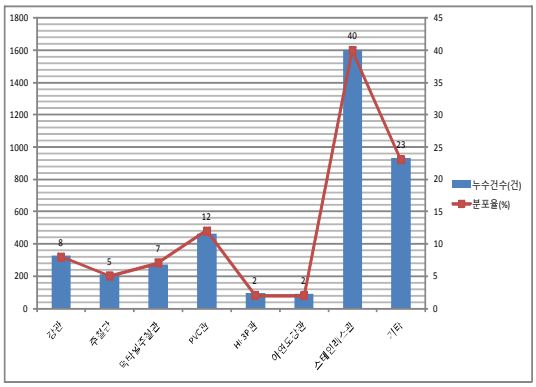
b) 2007년도



c) 2008년도



d) 2009년도



e) 2010년도

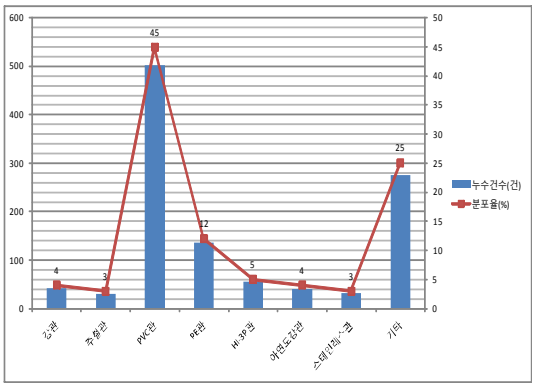
<그림 3-2-70> 관재질별 누수분포율(경기도)

(3) 충청북도

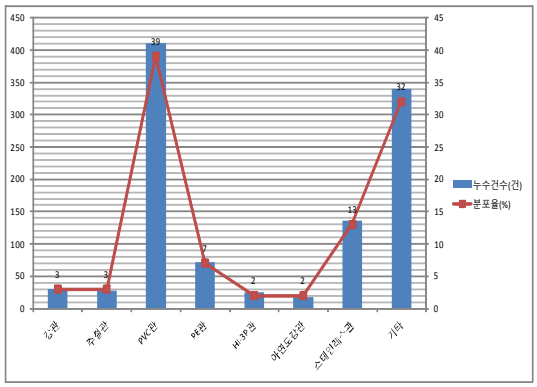
<표 3-2-52>은 충청북도의 동계 누수현황을 관재질별로 분류한 현황이다. 충청북도의 주요 분포 관종은 덕타일주철관과 강관으로 나타났으며, 이들 강관의 경우 경년관의 비율이 상대적으로 적은 비노후관으로 이루어져 있고 덕타일 주철관은 경년비율이 52%인 노후관으로 나타났다. 동계누수확률을 나타내는 누수분포(누수건수/총관의 길이)는 PE관에서 5.3건으로 가장 높았으며, 스텐레스관, 덕타일주철관순으로 조사되었다. 덕타일주철관은 경년관의 비율이 높고, 관연령 18년으로 누수의 원인은 관의 노후로 판단할 수 있다. 그러나 주철관, 스텐레스관 경우 경년관의 비율이 적고, 관의 연령이 20년 이하로 낮아 동계의 동결로 인한 하부지반의 응력증가 및 관내부 및 외부의 수분의 동결이 관파손에 일정부분 영향 미친 것으로 판단된다.

<표 3-2-52> 관재질별 동계누수분포율(충청북도)

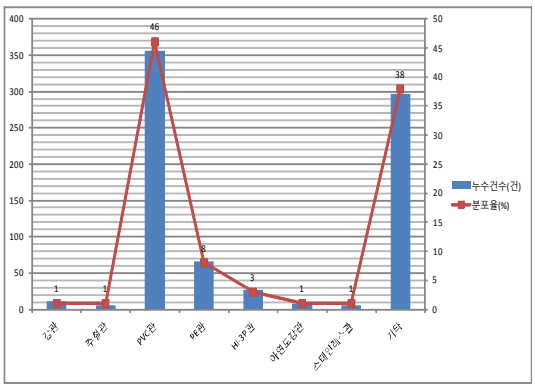
관종		강관	주철관	PVC관	PE관	아연도강관	스텐레스관	기타
동계 누수 건수	2006	42	31	502	136	41	32	276
	2007	30	28	411	72	18	136	340
	2008	11	6	356	66	8	6	297
	2009	26	2	411	124	0	22	330
	2010	3	14	39	693	4	43	129
	합계	112	81	1719	1091	71	239	1372
총관길이(km)		363	15	1008	206	64	107	803
누수분포 (누수건수/총관의 길이)		0.30854	5.4	1.705357	5.296117	1.109375	2.233645	1.708593
경년관 비율		0	0	52.3	15.3	0	0	0
관연령		10.7	17.4	18.1	8.9	20.3	15.2	11.5



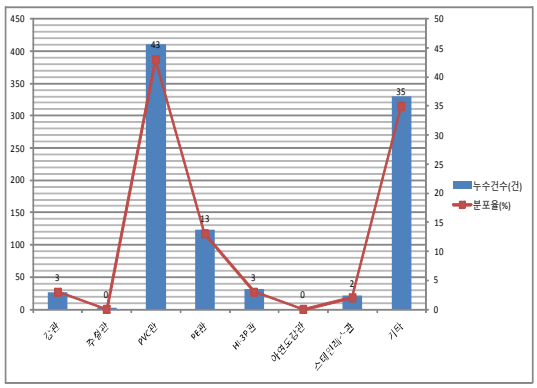
a) 2006년도



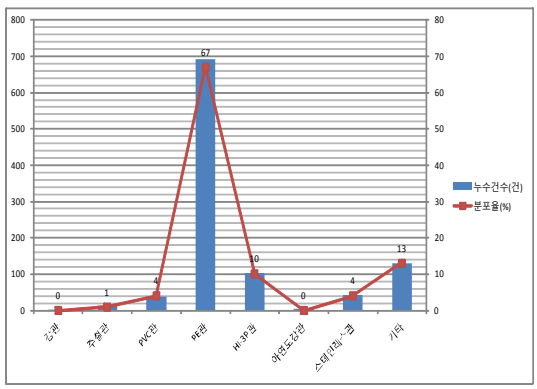
b) 2007년도



c) 2008년도



d) 2009년도



e) 2010년도

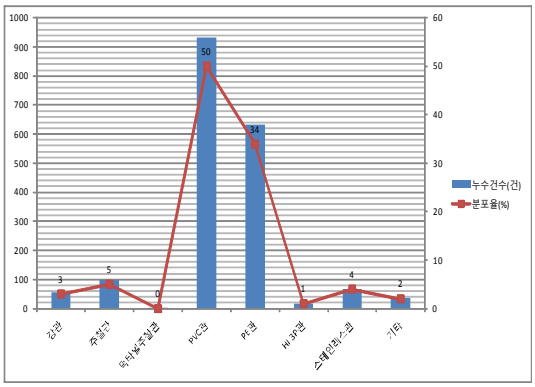
<그림 3-2-71> 관재질별 누수분포율(충청북도)

(4) 충청남도

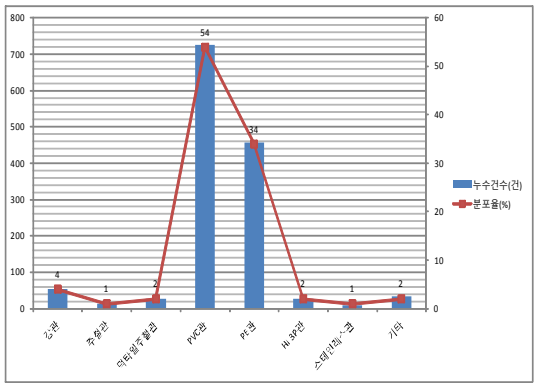
<표 3-2-53>는 충청남도의 동계 누수현황을 관재질별로 분류한 현황이다. 충청남도의 주요 분포 관종은 PE관과 PVC관으로 나타났으며, 이들 PE관의 경우 경년관의 비율이 상대적으로 적은 비노후관으로 이루어져 있고 PVC관은 경년비율이 63%인 노후관으로 나타났다. 동계누수확률을 나타내는 누수분포(누수건수/총관의 길이)는 강관에서 111건으로 가장 높았으며, 아연도강관, PE관순으로 조사되었다. 아연도강관은 경년관의 비율이 높고, 관연령 21년으로 누수의 원인은 관의 노후로 판단할 수 있다. 그러나 강관, PE관 경우 경년관의 비율이 적거나, 관의 연령이 20년 이하로 낮아 동계의 동결로 인한 하부지반의 응력증가 및 관내부 및 외부의 수분의 동결이 관파손에 일정부분 영향 미친 것으로 판단된다.

<표 3-2-53> 관재질별 동계누수분포율(충청남도)

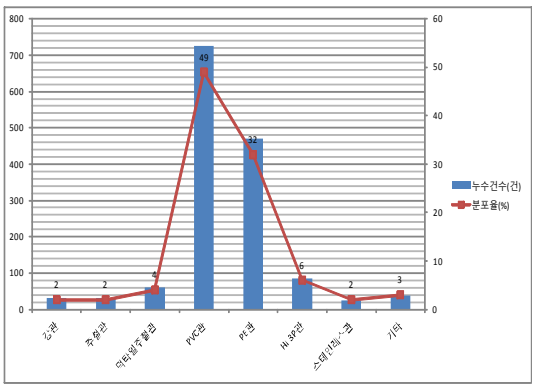
관종		강관	주철관	PVC관	PE관	아연도강관	스텐레스관	기타
동계 누수 건수	2006	57	98	3	932	18	68	36
	2007	54	13	27	726	27	9	33
	2008	32	31	60	725	86	24	39
	2009	45	24	42	718	36	18	63
	2010	35	16	48	851	0	22	166
	합계	223	182	180	3952	167	141	337
총관길이(km)		2	247	1497	1747	10	294	112
누수분포 (누수건수/총관의 길이)		111.5	0.736842	0.12024	2.262164	16.7	0.479592	3.008929
경년관 비율		0	5.5	62.8	13.7	100	0	8.4
관연령		23	17.9	19.1	9	20.8	7.8	9.5



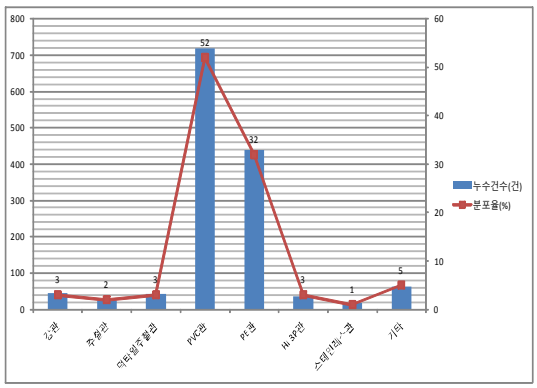
a) 2006년도



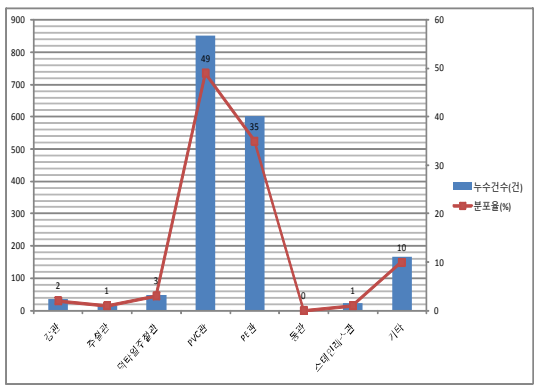
b) 2007년도



c) 2008년도



d) 2009년도



e) 2010년도

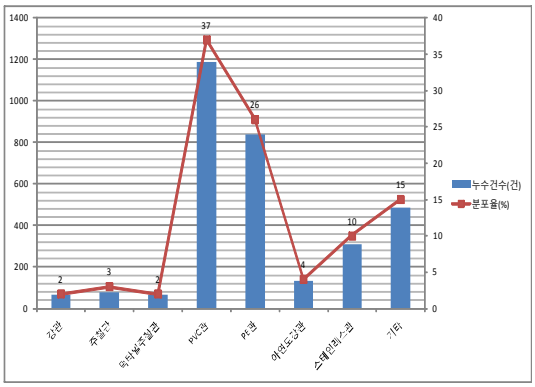
<그림 3-2-72> 관재질별 누수분포율(충청남도)

(5) 경상북도

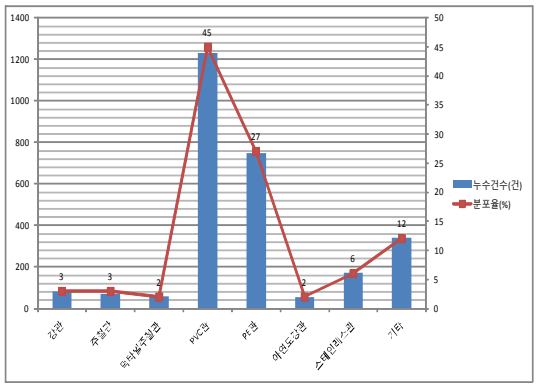
<표 3-2-54>는 경상북도의 동계 누수현황을 관재질별로 분류한 현황이다. 경상북도의 주요 분포 관종은 아연도강관과 PVC관으로 나타났으며, 이들 아연도관의 경우 경년관의 비율이 상대적으로 적은 비노후관으로 이루어져 있고 PVC관은 경년비율이 61%인 노후관으로 나타났다. 동계누수확률을 나타내는 누수분포(누수건수/총관의 길이)는 주철관에서 6건으로 가장 높았으며, 덕타일주철관, 스텐레스관순으로 조사되었다. 스텐레스관은 경년관의 비율이 높고, 관연령 20년으로 누수의 원인은 관의 노후로 판단할 수 있다. 그러나 덕타일주철관, 주철관 경우 경년관의 비율이 적고, 관의 연령이 20년 이하로 낮아 동계의 동결로 인한 하부지반의 응력증가 및 관내부 및 외부의 수분의 동결이 관파손에 일정부분 영향 미친 것으로 판단된다.

<표 3-2-54> 관재질별 동계누수분포율(충청남도)

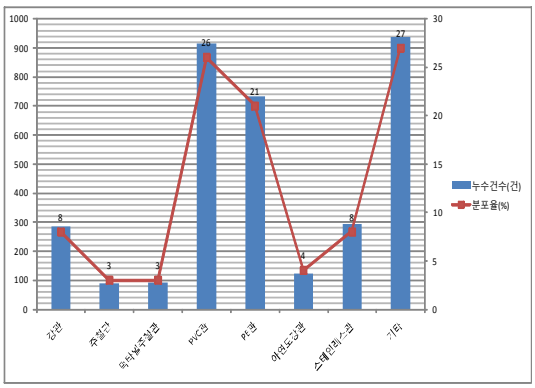
관종		강관	주철관	덕타일 주철관	PVC 관	아연도강관	스텐레스관	기타
동계 누수 건수	2006	68	80	67	1,187	840	134	309
	2007	81	71	60	1,231	749	55	172
	2008	286	89	92	916	734	122	294
	2009	298	63	179	609	1,392	62	318
	2010	168	70	139	859	956	154	363
	합계	901	373	537	4802	4671	527	1456
총관길이(km)		498	59	132	2464	1898	201	2310
누수분포 (누수건수/총관의 길이)		1.809237	6.322034	4.068182	1.948864	2.461012	2.621891	0.630303
경년관 비율		2.1	0	0.6	60.6	15.3	95.8	0.2
관연령		22.8	11.7	7.2	18.1	12.9	20.3	7.7



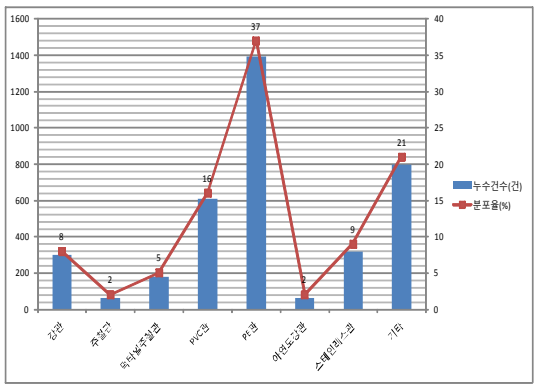
a) 2006년도



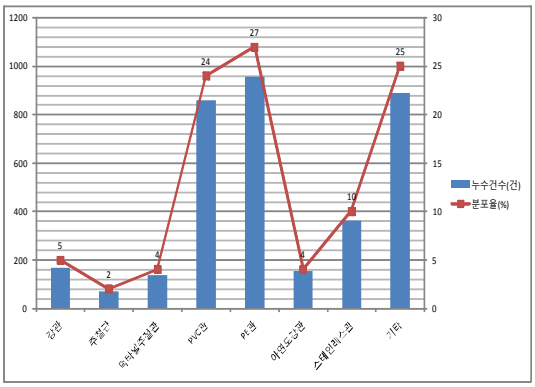
b) 2007년도



c) 2008년도



d) 2009년도



e) 2010년도

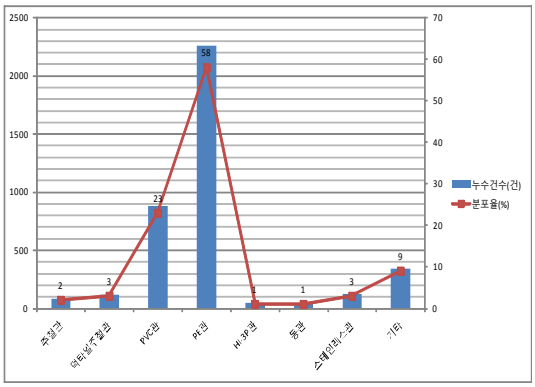
<그림 3-2-73> 관재질별 누수 분포율(경상북도)

(6) 경상남도

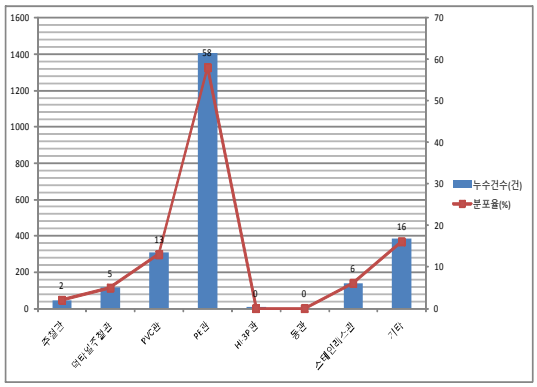
<표 3-2-55>은 경상남도의 동계 누수현황을 관재질별로 분류한 현황이다. 경상남도의 주요 분포 관종은 PE관과 PVC관으로 나타났으며, 이들 PE관의 경우 경년관의 비율이 상대적으로 적은 비노후관으로 이루어져 있고 PVC관은 경년비율이 75%인 노후관으로 나타났다. 동계누수확률을 나타내는 누수분포(누수건수/총관의 길이)는 주철관에서 22건으로 가장 높았으며, PVC관, 덕타일주철관순으로 조사되었다. PVC관은 경년관의 비율이 높고, 관연령 20년으로 누수의 원인은 관의 노후로 판단할 수 있다. 그러나 덕타일주철관, 주철관 경우 경년관의 비율이 적고, 관의 연령이 20년 이하로 낮아 동계의 동결로 인한 하부지반의 응력증가 및 관내부 및 외부의 수분의 동결이 관파손에 일정부분 영향 미친 것으로 판단된다.

<표 3-2-55> 관재질별 동계누수분포율(충청남도)

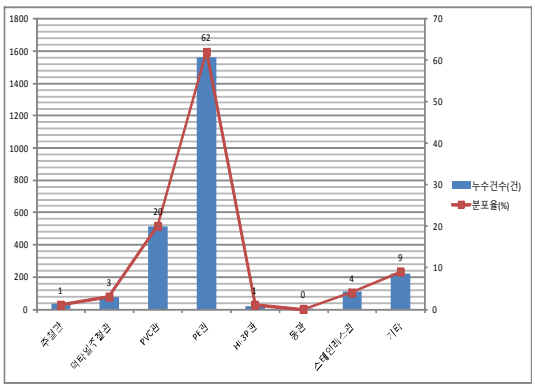
관종		주철관	덕타일 주철관	PVC 관	PE관	스테인레스관
동계 누수 건수	2006	82	119	881	2,263	125
	2007	46	116	307	1,407	141
	2008	33	77	513	1,563	112
	2009	38	170	706	2,671	74
	2010	51	211	539	2,340	47
	합계	250	693	2946	10244	499
총관길이(km)		11	154	918	4898	303
누수분포 (누수건수/총관의 길이)		22.72727	4.5	3.20915	2.091466	1.646865
경년관 비율		0	0	75.7	19.8	0
관연령		17.4	9.1	20.7	12.1	12.8



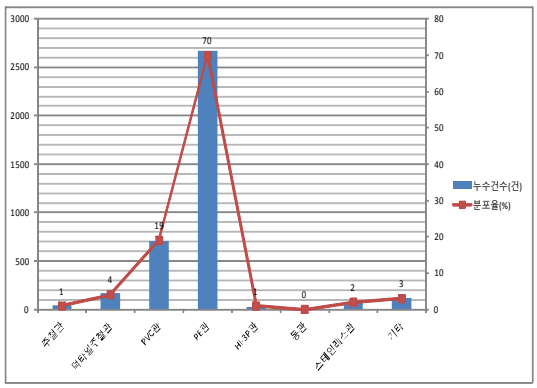
a) 2006년도



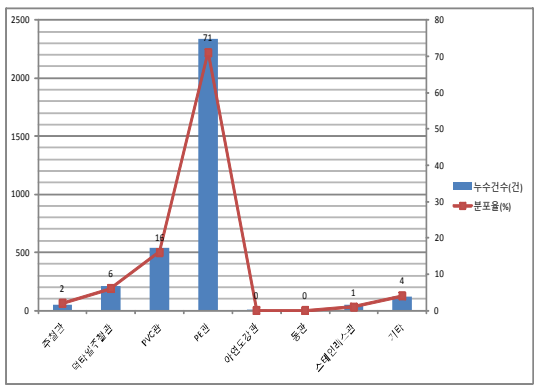
b) 2007년도



c) 2008년도



d) 2009년도



e) 2010년도

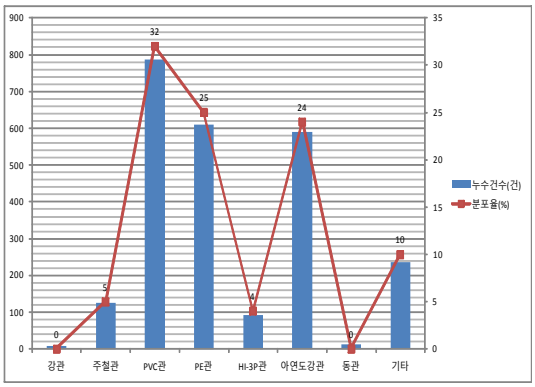
<그림 3-2-74> 관재질별 누수 분포율(경상남도)

(7) 전라북도

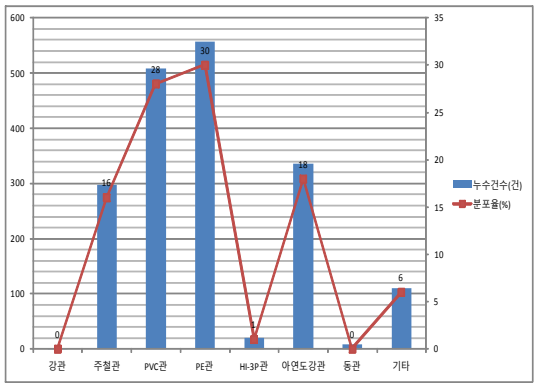
<표 3-2-56>는 전라북도의 동계 누수현황을 관재질별로 분류한 현황이다. 전라북도의 주요 분포 관종은 PE관과 PVC관으로 나타났으며, 이들 PE관의 경우 경년관의 비율이 상대적으로 적은 비노후관으로 이루어져 있고 PVC관은 경년비율이 47%인 노후관으로 나타났다. 동계누수확률을 나타내는 누수분포(누수건수/총관의 길이)는 주철관에서 10건으로 가장 높았으며, 아연도강관, 스텐레스관순으로 조사되었다. 아연도강관은 경년관의 비율이 높고, 관연령 20년으로 누수의 원인은 관의 노후로 판단할 수 있다. 그러나 스텐레스관, 주철관 경우 경년관의 비율이 적거나, 관의 연령이 20년 이하로 낮아 동계의 동결로 인한 하부지반의 응력증가 및 관내부 및 외부의 수분의 동결이 관파손에 일정부분 영향 미친 것으로 판단된다.

<표 3-2-56> 관재질별 동계누수분포율(전라북도)

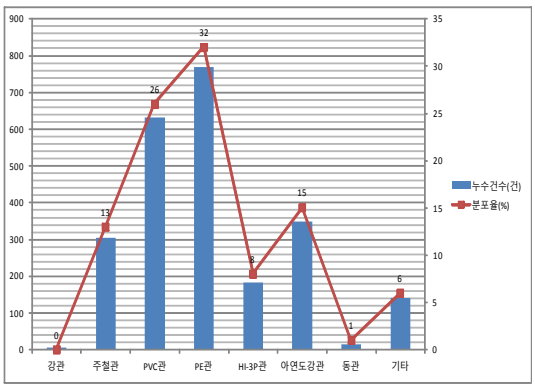
관종		주철관	PVC 관	PE관	아연도강관	스텐레스관
동계 누수 건수	2006	787	611	92	12	236
	2007	297	508	557	336	9
	2008	305	631	770	349	16
	2009	104	323	887	3	0
	2010	111	41	527	10	0
	합계	1604	2114	2833	710	261
총관길이(km)		155	2318	3572	145	212
누수분포 (누수건수/총관의 길이)		10.34839	0.911993	0.793113	4.896552	1.231132
경년관 비율		1.3	47.2	9.5	100	2
관연령		19.7	15.4	8	23	20.8



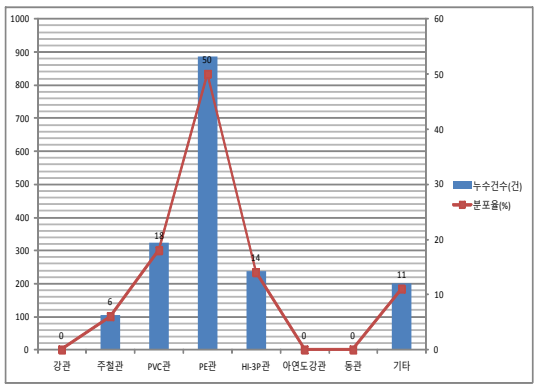
a) 2006년도



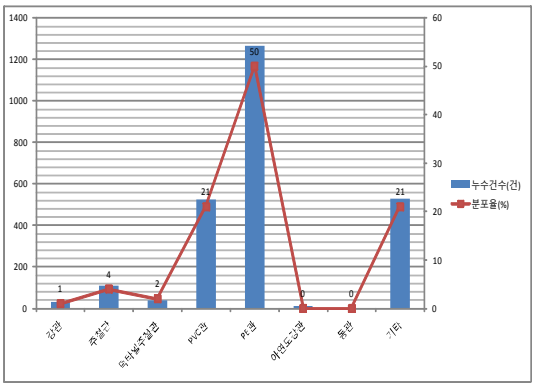
b) 2007년도



c) 2008년도



d) 2009년도



e) 2010년도

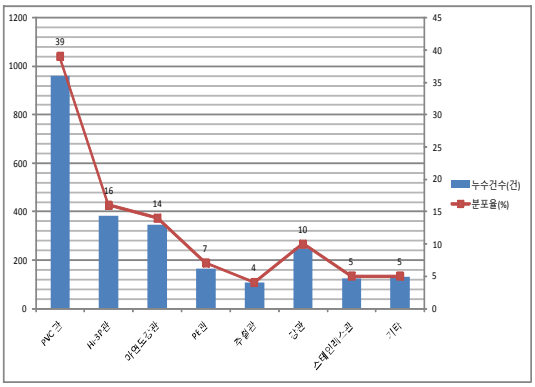
<그림 3-2-75> 관재질별 누수 분포율(전라북도)

(8) 전라남도

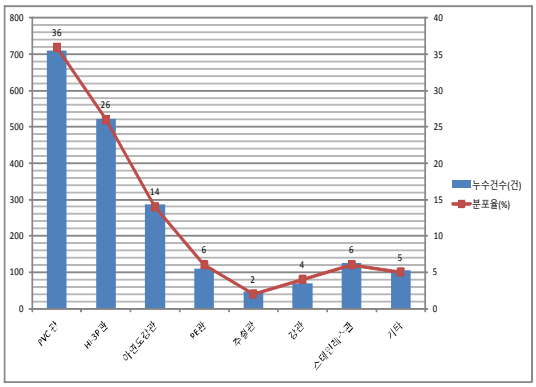
<표 3-2-57>은 전라남도의 동계 누수현황을 관재질별로 분류한 현황이다. 전라남도의 주요 분포 관종은 아연도강관과 PVC관으로 나타났으며, 이들 PVC관의 경우 경년관의 비율이 상대적으로 적은 비노후관으로 이루어져 있고 아연도강관은 경년비율이 58%인 노후관으로 나타났다. 동계누수확률을 나타내는 누수분포(누수건수/총관의 길이)는 강관에서 20건으로 가장 높았으며, 주철강관, 아연도강관순으로 조사되었다. 아연도강관은 경년관의 비율이 높고, 관연령 20년으로 누수의 원인은 관의 노후로 판단할 수 있다. 그러나 강관, 주철관 경우 경년관의 비율이 적거나, 관의 연령이 20년 이하로 낮아 동계의 동결로 인한 하부지반의 응력증가 및 관내부 및 외부의 수분의 동결이 관파손에 일정부분 영향 미친 것으로 판단된다.

<표 3-2-57> 관재질별 동계누수분포율(전라남도)

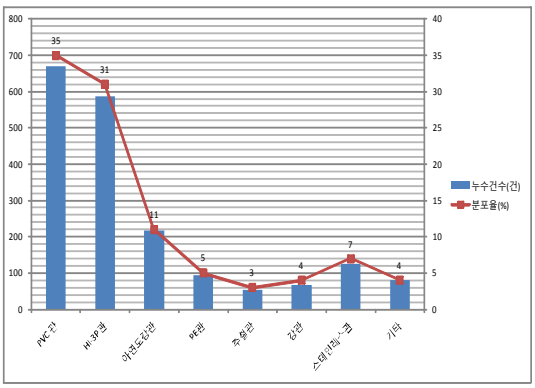
관종		PVC 관	아연도강관	PE관	주철관	강관	스텐레스관
동계 누수 건수	2006	960	345	165	106	250	125
	2007	709	286	110	48	70	125
	2008	670	217	94	53	67	125
	2009	705	226	147	104	77	54
	2010	71	27	737	193	140	45
	합계	3115	1101	1253	504	604	474
총관길이(km)		3348	321	289	34	30	289
누수분포 (누수건수/총관의 길이)		0.930406	3.429907	4.33564	14.82353	20.13333	1.640138
경년관 비율		20.6	58.3	67	6.1	30	49.3
관연령		11.4	17.4	18.5	19.7	22	21.3



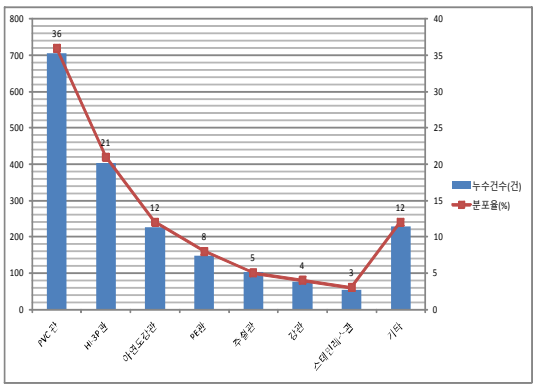
a) 2006년도



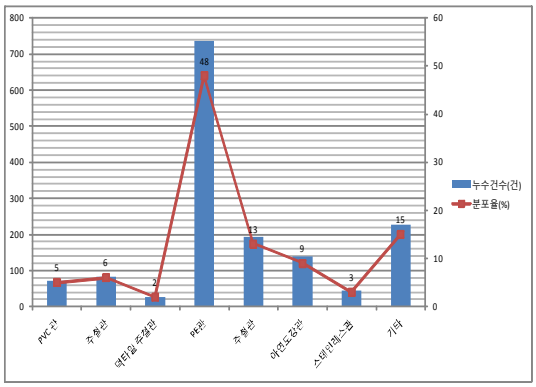
b) 2007년도



c) 2008년도



d) 2009년도



e) 2010년도

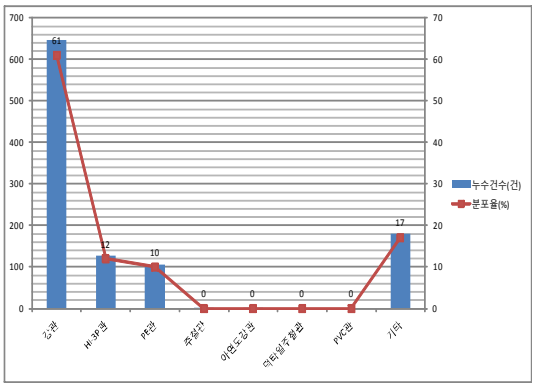
<그림 3-2-76> 관재질별 누수 분포율(전라남도)

(9) 제주도

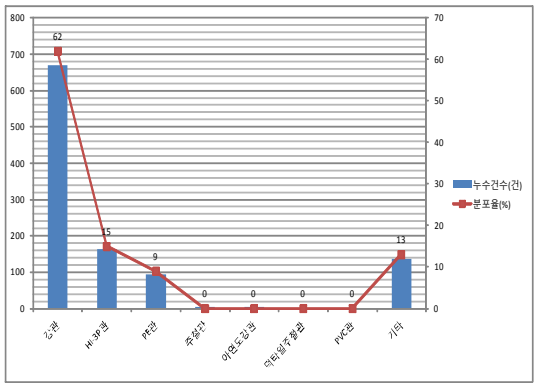
<표 3-2-58>은 제주도의 동계 누수현황을 관재질별로 분류한 현황이다. 제주도의 주요 분포 관종은 강관과 PE관으로 나타났으며, 이들 PE관의 경우 경년관의 비율이 상대적으로 적은 비노후관으로 이루어져 있고 강관은 경년비율이 60%인 노후관으로 나타났다. 동계누수확률을 나타내는 누수분포(누수건수/총관의 길이)는 주철관에서 35건으로 가장 높았으며, 강관순으로 조사되었다. 강관은 경년관의 비율이 높고, 관연령 20년으로 누수의 원인은 관의 노후로 판단할 수 있다. 그러나 주철관 경우 경년관의 비율이 없고, 관의 연령이 20년 이하로 낮아 동계의 동결로 인한 하부지반의 응력증가 및 관내부 및 외부의 수분의 동결이 관파손에 일정부분 영향 미친 것으로 판단된다.

<표 3-2-58> 관재질별 동계누수분포율(제주도)

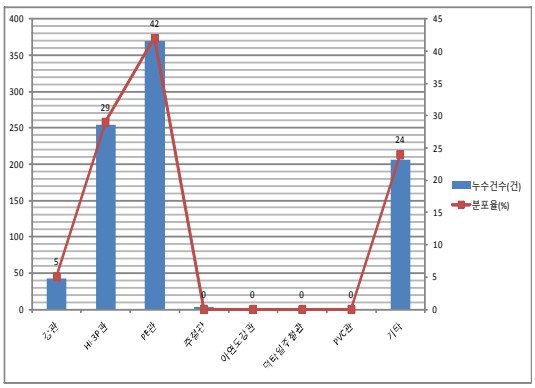
관종		강관	PE관	주철관	PVC 관
동계 누수 건수	2006	646	105	2	0
	2007	669	95	4	0
	2008	42	369	3	0
	2009	30	366	0	0
	2010	144	0	61	0
	합계	1531	935	70	0
총관길이(km)		574	1417	2	97
누수분포 (누수건수/총관의 길이)		2.667247	0.659845	35	0
경년관 비율		59.7	0	0	0
관연령		21.2	8.9	19.2	2.3



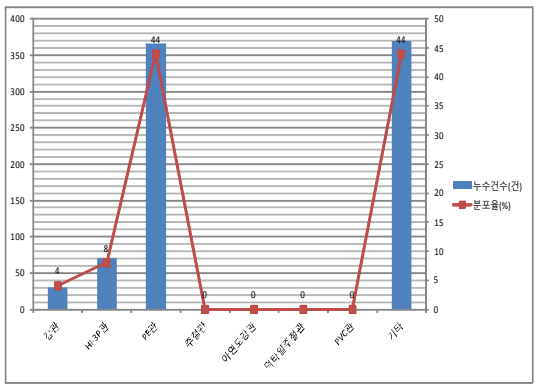
a) 2006년도



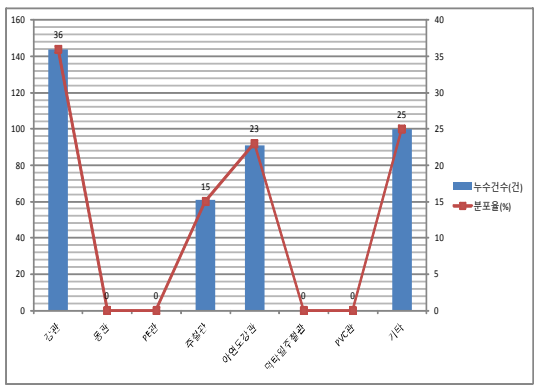
b) 2007년도



c) 2008년도



d) 2009년도



e) 2010년도

<그림 3-2-77> 관재질별 누수 분포율(제주도)

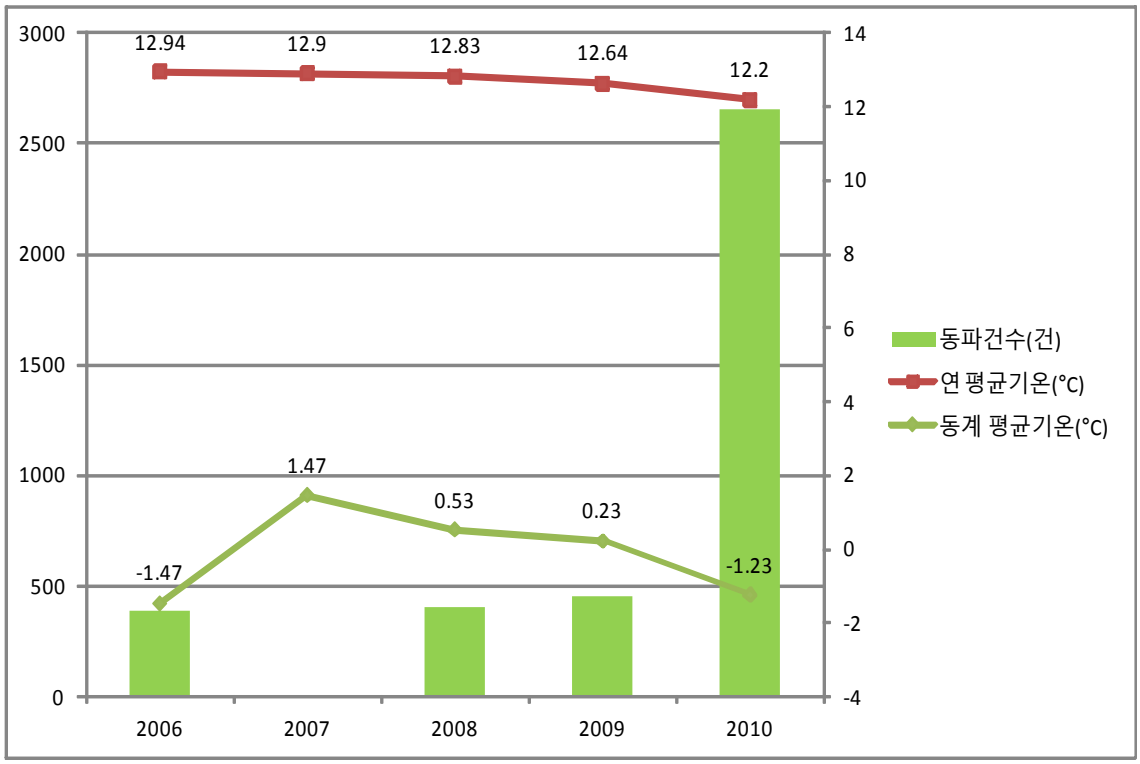
라. 동결지수별 동파현황

(1) 북부지역 (600 ° *C*· *days*이상지역)

동결지수별 동파 현황을 분석하기 위하여 북부 지역은 서해안과 접한 지역중 최북단에 위치한 경기지역을 선정하였다. 이 지역의 최근 온도 경향은 지속적으로 낮아짐을 알 수 있다. 이에 따라 상수관의 동파의 위험성이 연도가 진행 됨에 따라 커진다. 이 지역의 동파는 2006년도에 400여회, 2008년도에 404회 발생하였으며 2010년도에 동계 저온현상으로 인하여 급증하여 2650여회 발생하였다. 동파의 경향은 최근 3년사이에 6배의 증가하여 타 지역에 비하여 현격한 증가가 나타났다. 이러한 현상은 동계의 저온현상과 해안가의 인접영향에 따른 해풍의 영향 ,짧은 기간에 발생하는 게릴라성 추위에 의한 것으로 판단된다. 따라서 뚜렷한 동파의 증가 추세로 인하여 피해가 우려되는 바 이 지역의 동파대책이 필요 할 것이다.

<표 3-2-59> 연도별 동파 건수 및 평균기온(남부지역)

연도	2006	2007	2008	2009	2010
동파 건수	391	2	404	451	2652
연 평균기온	12.94	12.90	12.83	12.64	12.20
동계 평균기온	-1.47	1.47	0.53	0.23	-1.23



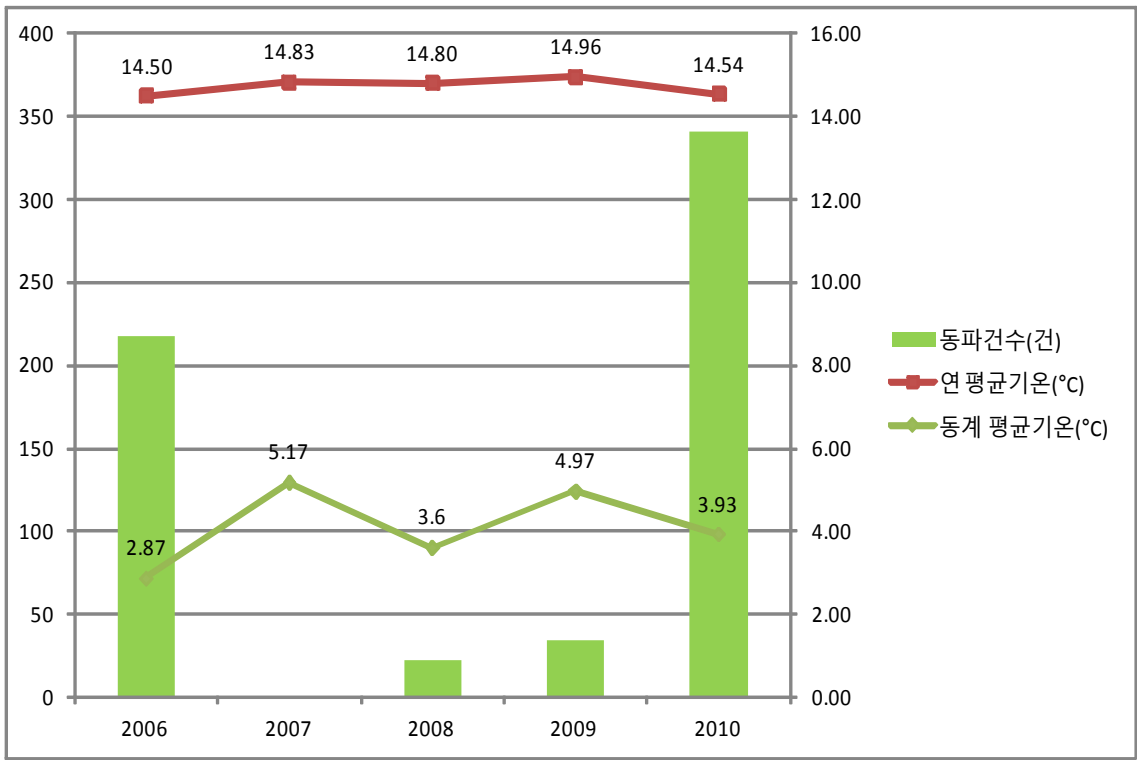
<그림 3-2-78> 연도별 동파 건수 및 평균기온분포(북부지역)

(2) 남부지역 (300 ° *C*• *days*이하지역)

동결지수별 동파 현황을 분석하기 위하여 남부지역은 동해 접하는 해안지역인 경상남도로 선정하였다. 이 지역은 평균기온이 동계기간의 평균온도는 영상권이다. 동파는 2006년도에 218여회, 2008년도에 23회 발생하였으며 2010년도에 동계 저온현상으로 인하여 급증하여 341회 발생하였다. 이는 지역 상부 토질의 특성이 지역은 남부 지역이라는 지역적 특성을 갖고 있음에도 그러나 최근 발생하는 동계이상 저온현상으로 인하여 지속적으로 동파의 위험성은 증가 한다. 따라서 동파의 위험성은 적으나, 증가율의 추세를 감안하여 향후 위험가능지역으로 관리가 필요하다. 또한 이 지역의 상부 토층의 경우 동상피해에 위험한 미립분의 함량이 높은 점토시료의 분포가 61%이상 형성되어 있어 향후 이상저온발생시 동파 현상이 급격히 증가할 것으로 사료된다.

<표 3-2-60> 연도별 동파 건수 및 평균기온(남부지역)

연도	2006	2007	2008	2009	2010
동파 건수	218	0	23	34	341
연 평균기온	14.50	14.83	14.80	14.96	14.54
동계 평균기온	2.87	5.17	3.60	4.97	3.93



<그림 3-2-79> 연도별 동파 건수 및 평균기온분포(남부지역)

4. 국내 상수관로의 동파 현황 특성

지구온난화 현상에 의해서 많은 기후적인 변화가 발생하여 상수관을 설계할 때 최근의 환경적인 요소로 반영하기에는 많은 변수를 최소화 하여야한다. 특히, 국내에서는 해마다 겨울철이면 상수도관의 동파사고가 발생하고 있으며, 이러한 현상은 앞으로도 지속될 것으로 판단되어 최근 국내 상수도 동파의 현황을 분석하여 그 특성을 향후 예측을 하여야 한다.
따라서 본 연구에서는 이러한 상수도관의 동파현황을 예측하기 위하여 최근의 상수관 통계자료를 분석하여 그 경향성을 판단하였다.

가. 지역별 동계 상수관 파열

동계(1월, 2월, 3월)의 상수관의 파열건수를 분석한 결과 경기도와 경상북도의 현황이 3400건과 4500건으로 가장 많았다.
대부분의 지역은 3월중 평균기온이 영상에 머물러 직접적인 관의 파열은 없을 것으로 사료된다. 따라서 이시기의 파열은 해빙에 의한 지지력의 상실로 발생한 것으로 판단할 수 있다. 이러한 경향은 상부토층의 미립분의 함량이 많은 지역,그리고 평균기온이 높은 남부지방 에서 두드러짐을 알 수 있다.
2011년도의 경우 서울, 인천 등 수도권에서 상수도관련 계량기 피해 건수가 1,000건을 넘어섰고, 비교적 겨울철 동파 피해가 적었던 김해의 경우에도 상수도관이 동파되어 17만 가구가 불편을 겪는 사태가 벌어진 사례가 있다. 그래서 본장에서는 지역별 동파 현황을 연도별로 분류하여 동파추세를 객관적으로 분석하여 각 지역의 동파의 연도별 추의를 파악하였다. 이를 통하여 각 지역의 동파의 위험성을 고찰하고 동결심도의 적절성을 파악하는 참고자료로 활용하였다.

나. 연도별 동파 현황

본 장에서는 9개도로 분류하여 상수도 통계를 활용하여 상수도 관의 동파경향을 분석하였다. 그 결과 동파 현황은 경기도가 3900회로 가장 많았으며 강원도, 경상북도가 다음으로 가장 많았다. 관로의 구축현황은 경기도가 강원도 순으로 나타났다. 관로의 동파의 위험도를 파악하기 위한 관로 길이당 동파건수는 경기도가 단위길이(m)당 0.017건으로 가장 높게 나타났고, 평균기온이 가장 낮은 강원도가 0.013건으로 나타났다. 그러나 국내 지역중 평균기온이 가장 높고 투수성이 높은 사질토와 현무암질로 이루어진 제주도의 경우 지역의 특성으로 인하여 통계기준상에 동파현황이 최근 5개년도에 존재하지 않음을 파악할 수 있었다.
전체적인 동파건수는 인구와 각 지역면적과 비교적 유사한 경향으로 나타났으나 인천지역은 인구 대비 동파 비율은 낮게 나타났다. 그러나 동결관의 길이에 대비하여

동파의 경향이 강원도에 비하여 높게 나타나 해안매립지반으로 형성되어 지지력이 여타지역에 비하여 낮고, 해안에 위치하고 있는 지리적 특성으로 인한 기후 변동의 폭이 크고, 최근 이상기후로 인한 게릴라성 극한기후로 인하여 동파민원의 증가가 그 원인으로 해석된다. 또한 경상남도의 경우 최근 동파의 경향성이 증가하고 있으며, 상부 지반의 구성 분류가 점토계열의 비율이 60%가 초과 하게 되고 평균입경이 여타 지역에 비하여 작다. 이러할 경우 지반의 동상 민감성이 여타지역에 비하여 높아 동결융해에 따른 강도 감소 및 부등침하가 발생할 우려가 높다.

관로길이당 동파건수가 0.007로 높게 나타난 전라 북도의 경우 경상남도를 제외하고 가장 높은 점토비율이 나타났다. 또한 평균입경의 경우 경상남도와 유사한 경향으로 동상 민감성이 높을 것으로 사료된다. 이러한 지반특성과 최근 동파 확률이 여타지역에 비하여 높은 경향성으로 인하여 동파에 대한 대책을 마련할 필요가 있다. 또한 각 위험지역과 인접하여 있는 충청남도 북부, 경상북도 남부, 전라남도 북부의 경우 위험도가 각 지역의 중심보다 높을 것으로 판단된다.

다. 관종별 동파 민감성 및 상수관 현황

본 장에서는 관재질의 동파 영향성을 분석하기 위하여 동계누수현황을 조사하여 분석하였다. 그 결과 표 와 같이 금속형 재질의 관종이 동파에 민감함을 알 수 있었다. 주철관이 모든 지역에서 동파 민감성을 나타냈고, 강관이 강원도 지역과 경기도등 6개 지역에서 동결에 의하여 파손되는 경향 나타났다.

또한, 각 통계분석을 통하여 각 지역의 흙의 분포 관의 종류, 동결지수, 노후도등을 종합하여 나타내었다. 각 지역의 비 노후관의 비율이 높은 관종을 대상으로 동계누수 현황과 주요파손 관재질을 분석하여 동파민감성 재질과 지역별 동파 위험성을 판단하였다.

<표 3-2-61> 지역별 상수관현황 및 동파민감성

지역	분류	강관	주철관	PVC 관	PE관	아연도강관	동관	덕타일주철관	스텐레스관
강원도	동계 누수분포	1.04422	25.5814	1.592239	2.586412	3.936339	0.93731	-	-
	관재질분포	11	0	44	18	7	2	0	4
	경년관비율	0	0	45.6	18.4	99.5	9.3	-	-
	동파민감성	☆	☆		☆				
	토질분포	-							
	동결지수	-458.2 ° C · day							

경기도	동계 누수분포	21.86667	12.36986	3.279518	-	4.822581	-	4.165192	0.92735
	관재질분포	2	1	1	3	6	1	4	77
	경년관비율	0	0.1	8.1	-	100	-	4.165192	0.4
	동파민감성	☆	☆					☆	
	토질분포	SM 45%, SC, CL 11%							
	동결지수	-319.5 ° C · day							
충청 남도	동계 누수분포	111.5	0.736842	0.12024	2.262164	16.7		-	0.479592
	관재질분포	0	1	41	47	0	0	0	8
	경년관비율	0	5.5	62.8	13.7	100	-	-	0
	동파민감성	☆	☆		☆				
	토질분포	SM 33%, CL 30%,							
	동결지수	-239.8 ° C · day							
충청 북도	동계 누수분포	0.30854	5.4	1.70537	5.296117	1.109375	-	-	2.23364
	관재질분포	14	1	39	8	2	0	0	4
	경년관비율	0	0	52.3	15.3	0	-	-	0
	동파민감성		☆		☆				☆
	토질분포	SM 71%, SC 19%							
	동결지수	-252.6 ° C · day							
경상 남도	동계 누수분포	-	22.72727	3.20915	2.091466	-	-	4.5	1.646865
	관재질분포	0	0	13	70	3	0	2	4
	경년관비율	-	0	75.7	19.8	-	-	0	0
	동파민감성	☆	☆						☆
	토질분포	CL 61%, SM 23%,							
	동결지수	-45.4 ° C · day							
경상 북도	동계 누수분포	1.809237	6.32203	1.948864	-	2.46101	-	4.06818	2.62189
	관재질분포	6	1	30	23	2	0	2	28
	경년관비율	2.1	0	60.6	-	15.3	-	0.6	95.8
	동파민감성	☆	☆					☆	

	토질분포	SM 31%, CL 17%							
	동결지수	-96.5 ° C · day							
전라북도	동계 누수분포	-	10.34839	0.911993	0.793113	4.896552	-	-	1.231132
	관재질분포	0	2	34	53	2	0	1	3
	경년관비율	-	1.3	47.2	9.5	100	-	-	2
	동파민감성		☆						☆
	토질분포	CL 38%, SM 35%,							
	동결지수	-201.4 ° C · day							
전라남도	동계 누수분포	20.13333	14.82353	0.930406	4.33564	3.429907	-	-	1.640138
	관재질분포	1	1	64	7	6	0	0	6
	경년관비율	30	6.1	20.6	67	58.3	-	-	49.3
	동파민감성	☆	☆						
	토질분포	SM 34%, CL 20%							
	동결지수	-133.3 ° C · day							
제주도	동계 누수분포	2.667247	35	0	0.659845	-	-	-	-
	관재질분포	19	1	3	47	0	0	0	1
	경년관비율	59.7	0	0	0	-	-	-	-
	동파민감성		☆						
	토질분포	GM 30%, CL, ML 20%,							
	동결지수	-0.8 ° C · day							

5. 지역별 상부토질분석

가. 목적

우리나라는 계절동토지역에 속한다. 따라서 거의 매년 겨울철이면 지반이 동결하면서 도로, 철도, 상수도관 등의 시설물이 동상에 의한 피해를 입고, 해빙기가 되면 얼었던 지반이 녹으면서 융해침하에 의한 피해를 입는다.

이렇듯 겨울철과 해빙기가 되면 발생하는 시설물의 피해를 다소라도 줄일 수 있는 방안을 모색하기 위해 지반의 동결과 융해침하 현상을 지반공학적 측면에서 살펴보

고, 각 지역별 토질특성 및 되메우기 재료의 적합성을 알아보는데 그 목적이 있다.

나. 수행 방향

<표 3-2-62> 상부토질분석의 수행방향

계 획 단 계	- 기존자료에 대한 합리적인 계획 수립 - 최적의 연구 및 검토를 위한 자료확보
자 료 수 집	- 해당 조사지역에 대한 자료획득 - 조사 지역에 대한 위치 파악 - 각 지역별 전반적인 토질특성 파악
분 석 단 계	- 지역별 토질특성에 대한 기초자료의 상대적 정밀분석 - 각 토질에 대한 입도분포 특성분석 - 되메우기 재료로서의 적합성 분석
활 용 단 계	- 상수도관 매설시 효율적 측면을 감안한 적합한 분석

다. 지역별 자료수집 현황

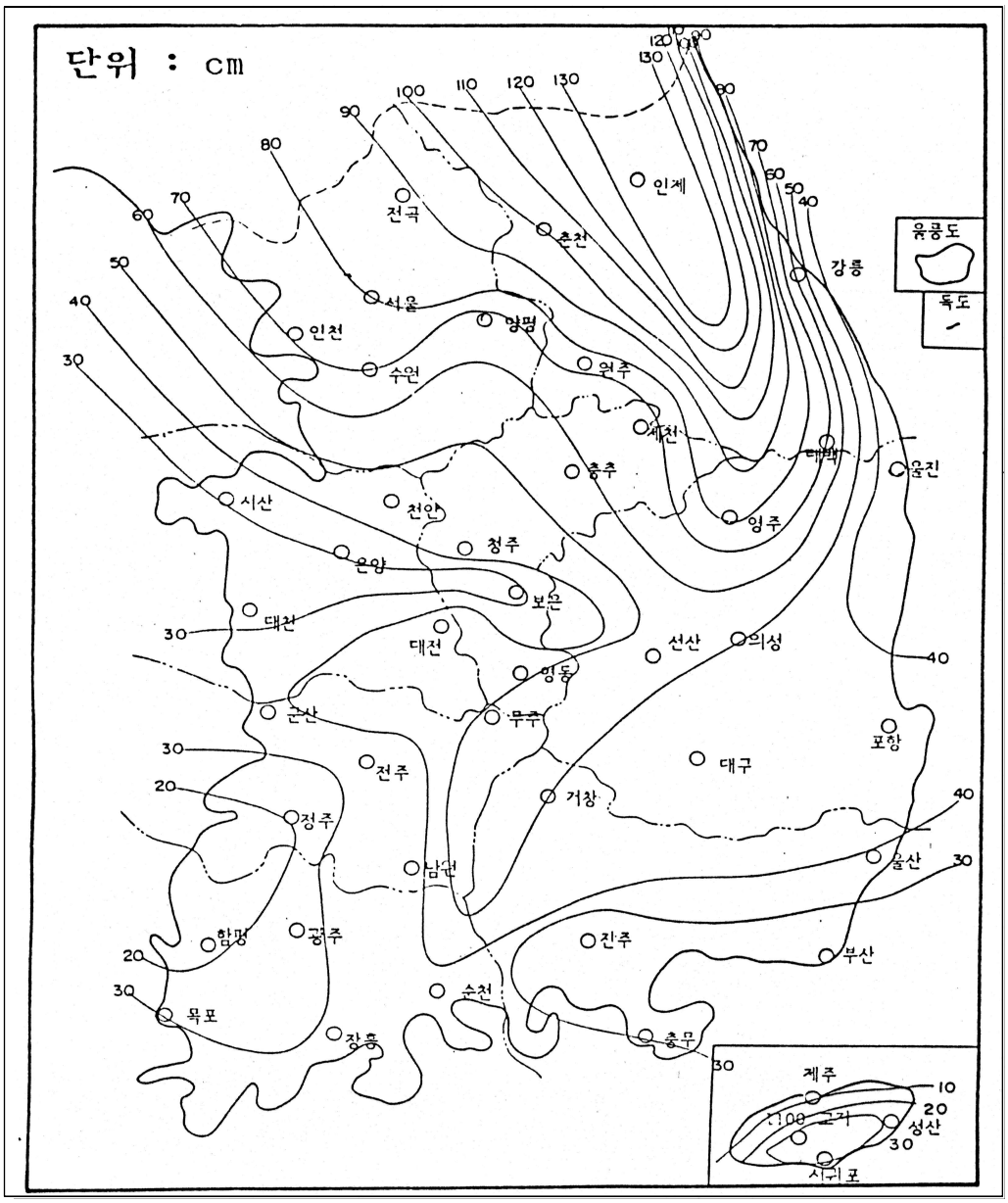
<표 3-2-63> 지역별 분석갯수 현황

지 역	해당갯수	비고
경기도	9	
충청북도	3	
충청남도	7	
전라북도	3	
전라남도	4	
경상북도	6	
경상남도	1	
제주도	1	

<표 3-2-64> 지역별 시료 갯수 현황

순번	지역	사업명	시료수			
			SPT	UD	TP	계
1	경기도	대치 배수분구 하수관거 종합정비	4			4
2		면목동 612일원 하수관거 개선공사	2			2
3		서울대공원 오수처리장 개선공사	2			2
4		석수하수처리장 총인처리시설	5			5

5		여의도 배수분구 하수관거 종합정비	6			6
6		이천 봉덕지구 오수관로 설치공사	4			4
7		이천 장호원 공공하수처리시설	2			2
8		중동 신도시지역 하수관거정비공사	15			15
9		한강수계 하수관거 정비공사	33			33
10	충청북도	대청호 상수원보호구역내 하수관거	8			8
11		청산 일반산업단지 폐수종말처리시설	2		2	4
12		충주기업도시 폐수종말처리시설	5			5
13	충청남도	대명천 일원 하수관거 정비공사	3			3
14		동서지구 공공 하수처리시설	1			1
15		송악,신평,증흥 하수관거정비공사	12			12
16		신두리,장댕이 공공하수처리시설	5			5
17		예산 사업단지 폐수처리장	3			3
18		예산 공공하수처리시설	15			15
19		충남도청 이전신도시 하수처리시설	8			8
20	전라북도	부안 공공하수처리시설 증설공사	2	1		3
21		부안 제2농공단지 폐수처리시설	8			8
22		줄포 공공하수처리시설 건설공사	12	3		15
23	전라남도	극락천유역 하수관거정비사업	5	1		6
24		여수 원도심지역 하수관거 정비사업	18	2		20
25		장흥해당 일반산업단지 폐수처리시설	5			5
26		해남군 화원면 공공하수처리시설	13	1		14
27	경상북도	고령군 농어촌 마을하수도	7			7
28		영주시 하수관거 정비 임대형민자사업	25	1		26
29		예천군 하수관거정비 BTL사업	20		2	22
30		포항 장량 하수처리시설		2		2
31		포항권 광역상수도 송수관로 이설공사	3			3
32		포항시 흥해읍 하수관거정비공사	10			10
33	경상남도	판문동외 5개지구 하수관거 정비사업	11	2		13
34	제주도	제주도 읍면지역 하수관거 민간투자	10			10
합 계						301



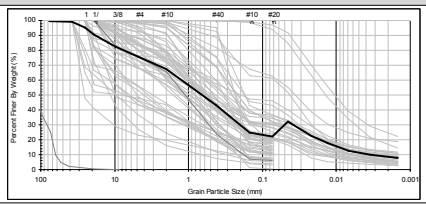
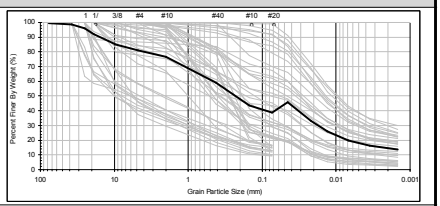
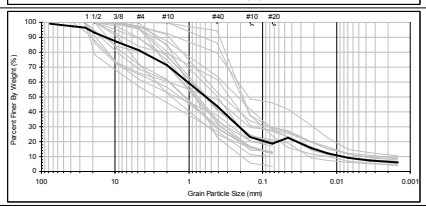
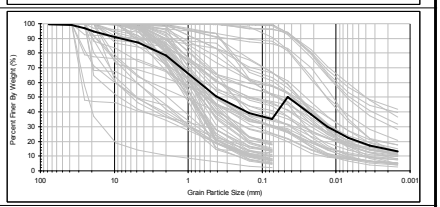
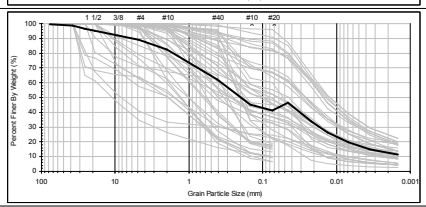
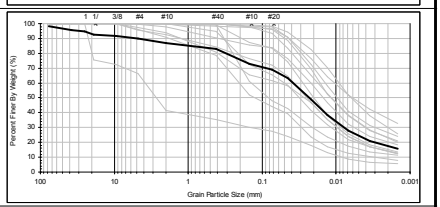
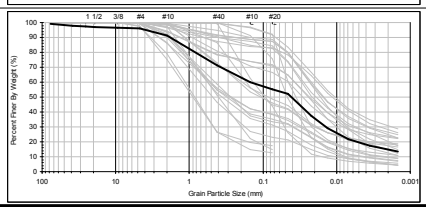
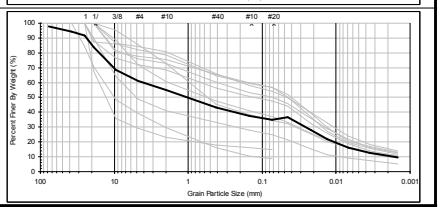
<그림 3-2-80> 지역별 동결깊이 곡선

<표 3-2-65> 지역별 토질특성 분석

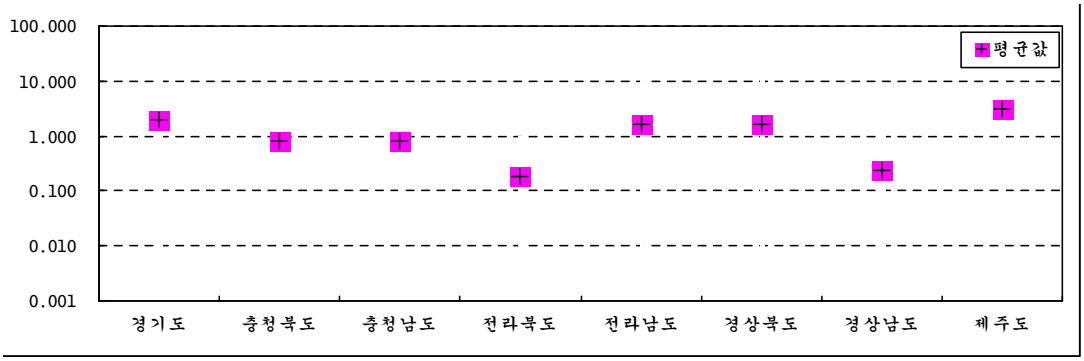
구 분	평균입도 (D_{50}, mm)	#4번체 통과량 (%)	최대치수 (mm)	소성지수	통일분류 (USCS)
경기도	0.008~23.891 (2.004)	23.07~100.0 (80.16)	2.00~38.10 (17.81)	9.5~23.1 (17.4)	CL, SP, SM, SW-SM, SP-SM, GM, GW-GM, GP-GM,
충청북도	0.118~2.723 (0.819)	57.15~100.0 (84.8)	2.00~38.10 (17.27)	8.7~15.2 (10.5)	SM, SC, SP-SM, SP
충청남도	0.013~11.721 (0.823)	34.43~100.0 (90.83)	2.00~38.10 (12.16)	6.6~29.4 (17.4)	CL, SM, SC, SW-SM
전라북도	0.009~0.892 (0.188)	97.36~100.0 (99.7)	2.00~9.52 (6.17)	12.2~27.9 (18.1)	CL, CH, ML, SM, SC, GW-GM
전라남도	0.009~9.910 (1.663)	37.45~100.0 (83.02)	2.00~38.1 (15.56)	6.5~39.1 (18.9)	CL, CH, ML, SM, SC, GM,
경상북도	0.004~26.319 (1.587)	14.22~100.0 (88.22)	2.00~38.1 (13.84)	7.2~68.6 (23.2)	CL, CH, MH, SM SC, SW-SM, SP-SM
경상남도	0.004~2.695 (0.237)	66.21~100.0 (96.5)	2.00~25.4 (6.75)	6.5~29.1 (17.5)	CL, CH, MH, SM
제주도	0.043~14.129 (3.056)	29.27~85.48 (66.75)	19.1~38.1 (23.52)	13.1~19.1 (16.1)	CL, ML, SM, SC, GM, GW-GM

( )안의 값은 평균값임.

<표 3-2-66> 평균입도분포 분석

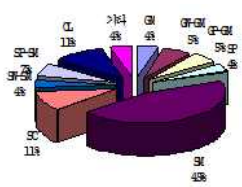
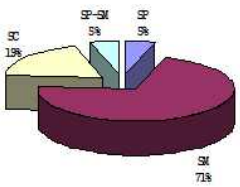
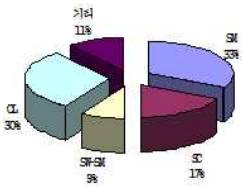
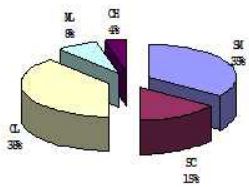
구 분	평균입도 분포 범위	구 분	평균입도 분포 범위
경기도		전라남도	
충청북도		경상북도	
충청남도		경상남도	
전라북도		제주도	

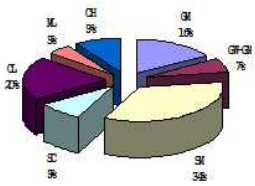
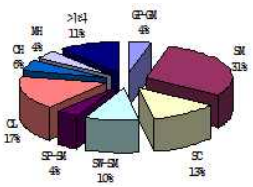
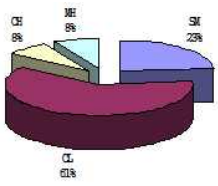
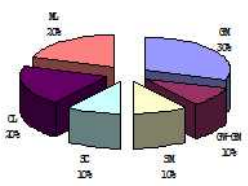
<표 3-2-67> 평균입도 분석



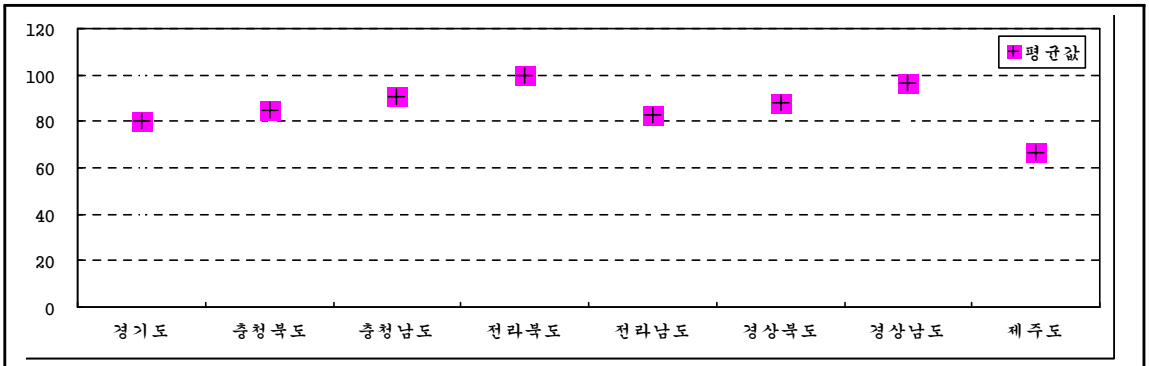
· 지역별 평균입도 분석결과 경기도 2.004mm, 충청북도 0.819mm, 충청남도 0.823mm, 전라북도 0.188mm 전라남도 1.663mm, 경상북도 1.587mm, 경상남도 0.237mm, 제주도 3.056mm로 나타났다.

<표 3-2-68> 통일분류

경기도	충청북도	충청남도	전라북도
			
· SM 45%, SC, CL 11%, SP-SM 7%, GW-GM, GP-GM 5%, SP, SW-SM, 기타, GM, SP 4%의 분포를 보임	· SM 71%, SC 19%, SP, SP-SM 5%의 분포를 보임	· SM 33%, CL 30%, SC 17%, 기타 11%, SW-SM 9%의 분포를 보임	· CL 38%, SM 35%, SC 15%, ML 8%, CH 4%의 분포를 보임

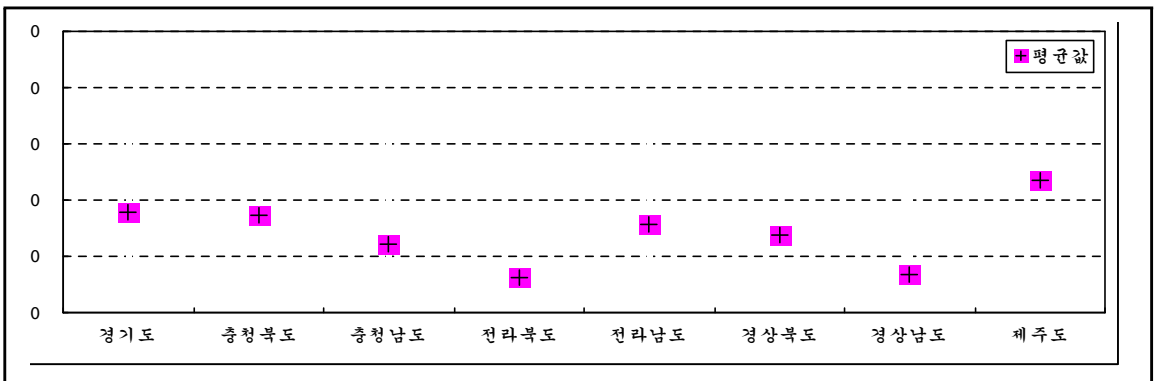
전라남도	경상북도	경상남도	제주도
			
· SM 34%, CL 20%, GM 16%, SC, CH 9%, GW-GM 7%, ML 5%의 분포를 보임	· SM 31%, CL 17%, SM 13% 기타 11%, SW-SM 10%, CH 6%, SP-SM, ML 4%의 분포를 보임	· CL 61%, SM 23%, CH, MH 8%의 분포를 보임	· GM 30%, CL, ML 20%, SC, SM, GW-GM 10%의 분포를 보임

<표 3-2-69> NO. 4번체 통과량



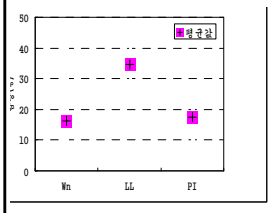
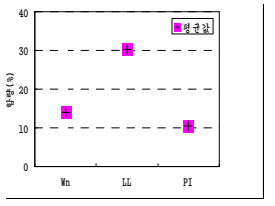
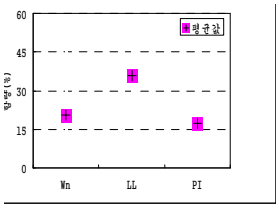
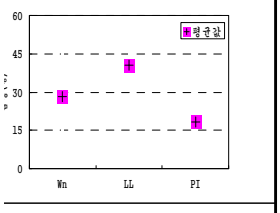
· 지역별 평균 #4번체 통과량(%) 분석결과 경기도 80.16%, 충청북도 84.80%, 충청남도 90.83%, 전라북도 99.70%, 전라남도 83.02%, 경상북도 88.22%, 경상남도 96.50%, 제주도 66.75%로 나타났다.

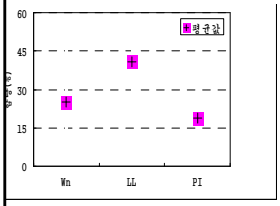
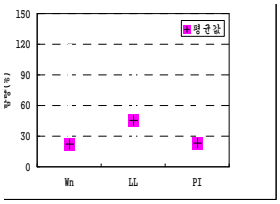
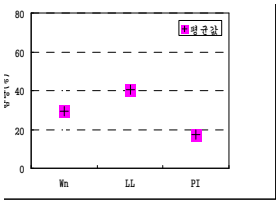
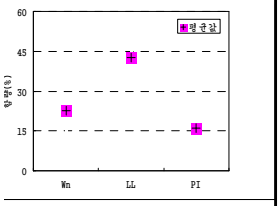
<표 3-2-70> 최대치수(Dmax)



· 지역별 평균 최대치수(D_{max}, mm) 분석결과 경기도 17.81mm, 충청북도 17.27mm, 충청남도 12.16mm, 전라북도 6.17mm, 전라남도 15.56mm, 경상북도 13.84mm, 경상남도 6.75mm, 제주도 23.52mm.로 나타났다.

<표 3-2-71> 함수비, 액성한계 및 소성지수

	충청북도	충청남도	전라북도
			
· 함수비 16.2%, 액성한계 34.8, 소성지수 17.4의 분포를 보임	· 함수비 14.0%, 액성한계 30.2, 소성지수 10.5의 분포를 보임	· 함수비 20.6%, 액성한계 35.9, 소성지수 17.4의 분포를 보임	· 함수비 28.3%, 액성한계 40.6, 소성지수 18.1의 분포를 보임

	경상북도	경상남도	제주도
			
· 함수비 25.2%, 액성한계 40.6, 소성지수 18.9의 분포를 보임	· 함수비 22.1%, 액성한계 45.9, 소성지수 23.2의 분포를 보임	· 함수비 29.2%, 액성한계 40.6, 소성지수 17.5의 분포를 보임	· 함수비 22.5%, 액성한계 42.7, 소성지수 16.1의 분포를 보임

6. 소결론

본 절에서는 9개도로 분류하여 상수도 통계를 활용하여 상수관의 동파경향의 분석과 각 지역별 상부토질의 대한 분포를 조사하였다. 이에대한 결론은 다음과 같다.

1)지역별 동파 경향(최근 5개년)

□ 동파현상은 경기도가 3900회로 가장 많고 강원도, 경상북도 순으로 동파 민감지역으로 분류할 수 있음.
□ 관로 길이당 동파건수는 경기도가 단위길이(m)당 0.017건으로 가장 높고, 평균기온이 가장 낮은 강원도는 0.013건으로 나타남.
□ 국내 지역중 평균기온이 가장 높고 투수성이 높은 사질토와 현무암질로 이루어진 제주도는 지역특성상 최근 5개년동안 동파가 일어나지 않음.
□ 경기도가 동파비율이 가장 높고 경상남도 및 경상북도 지역은 기온특성에 비하여 동파위험이 높은 것으로 나타남.
□ 전국적으로 2006년도에 대비 2010년 동파건수는 3배 이상의 증가폭을 나타냄.

2) 관종별 동계누수경향(최근 5개년)

□ 경년관 비율은 사용년한 경과 상수관 비율을 나타낸 것으로 주로 강관과 주철관에서 경년관 비율이 낮음에도 동계누수가 발생하는 것으로 분석.

□ 노후관의 누수는 관노후에 의한 관파손 확률이 높은 것으로 판단.

□ 강관, 주철관 등 금속재질의 관로가 동결에 대한 영향을 크게 받는 것으로 나타남.

3) 동계 월별 관 파손 현황

□ 경기도와 경상북도에서 월별 관 파손 현황이 크게 나타남.

□ 3월은 평균기온이 영상이므로 관내수 동결에 의한 동파현상이 작게 일어나는 것으로 분석되며, 해빙에 의한 지지력 상실에 대한 영향성이 크게 나타나는 것으로 분석됨.

4)지역별 상부 토질 특성

□ 전라북도와 경상남도 점토질 시료가 다수 분포하며 특히 동계누수의 빈도가 큰 경상남도의 경우 점토질 시료를 가장 많이 함유하고 있는 것으로 분석.

□ 타 지역보다 입경의 크기가 현저히 작으며 자연함수비가 높아 동결에 대한 민감성이 클것으로 분석.

동파 현황분석을 통하여 경기도를 중심으로 강원도, 경상남도, 전라북도지역과 각 인근 지역은 동계의 기온하강이나 게릴라성 저온현상, 해빙기시의 융해현상으로 인하여 지반의 과대 토압의 발생, 지지력 감소가 타 지역에 비하여 민감하게 나타날 우려가 존재함에 따라 동결깊이산정이나 동상저감대책의 적용이 더 상세하게 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3절 지반의 동결 및 상수관과 지반의 상호작용에 의한 응력 매커니즘

1. 서론

이 절에서는 현장시험(test bed) 및 실내동상시험에 앞서 동상현상에 의해 발생되는 여러 가지 응력 매커니즘에 대하여 기존의 이론을 고찰하였다. 상수관과 지반의 상호작용에 대한 분석을 위해 흙의 동상이론 및 동상에 미치는 영향인자에 대하여 기술하였으며. Marston과 Spangler의 토압이론 및 상수관의 변형이론은 현장실험결과와 비교하기 위한 이론식이다.

2. 흙의 동상이론

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

물을 포함한 다공성의 물질이 동상을 일으킬 때에 각각의 입자사이를 넓히려는 힘의 평균치를 동상압이라 한다. 일반적으로 수분의 공급이 없는 흙 속의 물이 동결할 때 그 용적의 최대 9%까지 팽창하는 힘을 동상압이라 하며, 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.

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.

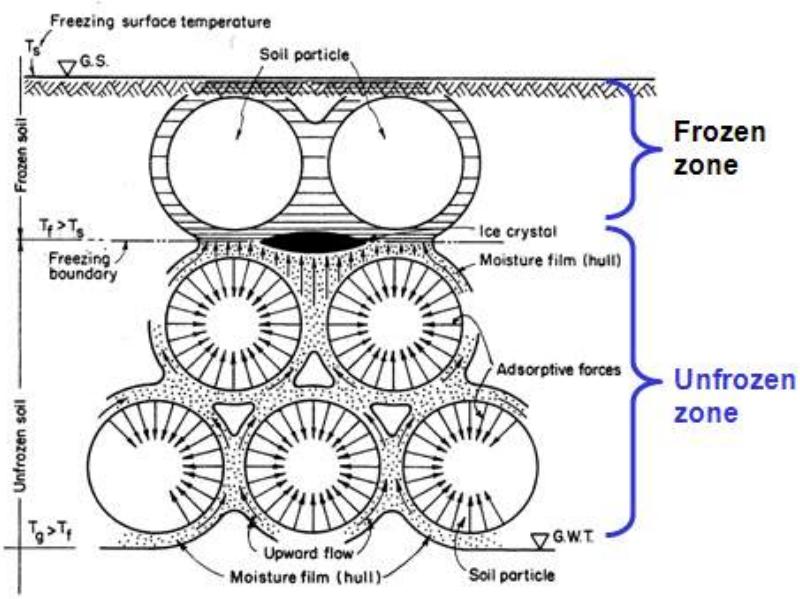
<그림 3-3-1>은 지반의 동결구조를 나타낸다. 일반적인 흙에서 0.074 mm체 통과량이 10%이상이거나 0.02 mm체 통과량이 3%이상일 경우 동상민감성 재료로 판정하며이를 동상현상이 나타난다.

물은 얼면 단지 9%의 체적팽창을 일으키지만 지중의 간극수가 얼면 하부로부터 모관수가 계속 공급되면 그 체적이 50%이상 팽창하기도 한다.

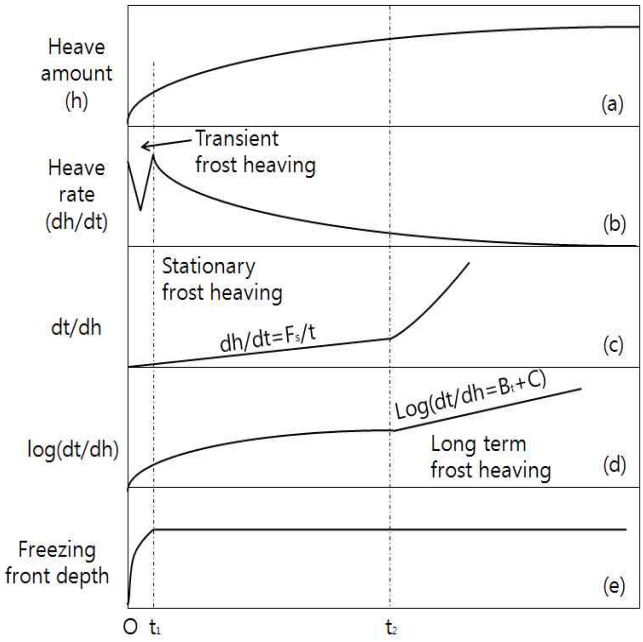
흙이 아이스렌즈을 형성하는 과정을 미시적으로 보면 대단히 복잡하다. 동결토의 물의 흡입은 지반내의 온도, 지반의 열전도율, 융해잠열, 흙입자의 피막수층 등 열역학적인 인자들에 의해 결정되기 때문이다. 이러한 모든 인자들을 망라하여 동결

이론을 정립하려는 시도는 오래 전부터 행해졌고, 이러한 이론을 바탕으로 하여 동결깊이를 추정하는 공식들도 여러 학자들에 의해 발표되었다(Neumaun식, Stefan식, Berggren식 등).

<그림 3-3-2>에 나타낸 바와 같이 여러 동상특성 중 하나인 정상상태에서의 동상(stationary frost heave)에 관한 내용으로서 시간에 따른 열흐름, 동상량, 동상속도를 개발한 동결-융해 시험장치를 통하여 제시된 이론식과 함께 단계별 온도변화에 따른 동상 특성이다. 동상특성은 크게 3가지 상태의 그룹으로 구분하며, 그 중 동상속도가 주된 특성이 된다.



<그림 3-3-1> 모세관 현상에의한 지반의 동결 구조



<그림 3-3-2> 영하온도 지속시간경과에 따른 동상특성

<그림 3-3-2>는 Akagawa가 제시한 것으로서 t_0에서 t_1사이에 나타낸 첫번째 동상양상은 흙이 동결되면서 얼음결정체와 얼음 띠를 형성하는 일시적 동상영역(transient frost heaving phase)이며, Takashi 와 Konrad and Mogenstern은 일시적 동상영역에서의 동상 변화를 결정할 수 있는 방정식을 제안하였다. t_1에서 t_2사이에 나타낸 두 번째 동상영역은 동결시 아이스렌즈가 점점 성장하고 그 층이 두꺼워지는 최종 아이스렌즈 영역을 나타낸 것이다. 이 영역은 정상상태의 동상발현 구간(stationary frost heaving)이라고도 하며, Akagawa은 증가비와 증가량을 계산할 수 있는 방정식을 제안하였으며, 이 과정에서 발현된 동상량은 전체 동상량의 약 70%에서 80%가 발생하는 것으로 제시하였다. t_2 이후에 나타낸 세 번째 동상영역(long term frost heaving)은 두 번째 동상영역에서 분리된 아이스렌즈가 성장하면서 나타나는 구간으로 이는 동결토의 온도경사 때문에 성장하는 것으로 가정할 수 있다. 비록 일시적으로 나타나는 동상양이 정상상태에서의 동상발현 양상 보다는 동상비가 매우 낮을 지라도 전체 동상과정 중 한 부분으로서 장기적인 동상 영역으로 표현하였다. Goto and Takahashi는 이 과정에서의 증가비를 방정식으로 나타내었으나, Akagawa은 장기동상영역에서 발생된 동상팽창량은 공학적 관점에서 매우 작으므로 무시할 수 있다고 제시하였다.

정상적으로 발현되는 동상구간에서의 동상팽창량 산정방법을 결정하기 위해서는 아이스렌즈형성 가정조건이 필요하다. 아이스렌즈형성의 조건은 동결선 상태에서 열흐름이 결정되어야 하며, 동결토의 순수 열흐름(Q_f)는 비동결토의 열흐름(Q_u)보다 커야한다.

최종 생성된 아이스렌즈는 비동결토의 두께 감소와는 관계가 없다. 즉, 비동결토의 두께와 열적조건은 얼음 분정작용 시에는 일정하다. 따라서, 동결선에서의 열흐름은 식 (3-3-1)에 나타낸 바와 같이 아이스렌즈형성으로 방출되는 잠열(latent heat)과 같다고 볼 수 있다.

$$, \quad \frac{dh}{dt} \times \frac{L}{V} \tag{3-3-1}$$

여기서, V_i는 얼음의 비체적(cm3/g), L는 잠열(cal/g), $Q'(= Q_f - Q_u)$은 동결선에서의 순수 열흐름(cal/cm2hr)이다. 식 (3-3-1)에 의하면, Q'은 동결선에서 아이스렌즈 형성하면 양의 값으로서 식 (3-3-2)와 같다.

$$Q' = Q_f - Q_u > 0 \tag{3-3-2}$$

여기서, Q_f는 동결토의 열흐름(cal/cm2hr)이고, Q_u는 비동결토에서의 열흐름이다. 그러므로 식 (3-3-2)는 정상적인 동상발생을 표현하는데 있어 주요한 가정조건이 된다.

정상적으로 발생되는 동상발생 구간 안에서의 동상비(frost heave rate)는 그림 2.2(b)에 나타낸 바와 같이 완만한 감소 추세를 보이고 있고, 동결선에서의 순 열흐름 또한 서서히 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 식 (2-3)에서의 동결선에서 동상비와 순열흐름 사이의 상관관계를 통해 알 수 있다. 정상상태에서 동상이 발현되는 동안, 얼음 분정의 잠열에 의하여 순 열흐름이 방출되면서 아이스렌즈는 증가하게 된다. 즉, 식 (3-3-1)을 식 (3-3-2)에 대입하면 상호 필요조건이 만족되어 식 (3-3-3)과 같이 정상적인 동상발현구간에서의 동상비를 구할 수 있다.

$$\frac{dh}{dt} = \frac{V_i}{L}(Q_f - Q_u) \tag{3-3-3}$$

그러므로, 정상적인 동상 발생구간에서 동상이 발현되지 않도록 하기 위해서는 아이스렌즈가 형성될 에너지를 감소시키면 순 열흐름이 감소되고, 이는 동상비 감소로 이어져 최종적으로 순 열흐름이 0이 되거나 (-)값이 된다. 이러한 조건들은 비동결토에서의 온도경사가 감소한다. 동결토에서 온도가 상승하면서 온도경사 감소에 의한 것으로 알 수 있다.

즉, 정상상태의 동상 발생을 정지시키기 위해 필요한 온도 상승은 다음과 같이 계산 할 수 있다. 정상적인 동상발현은 열적 안정조건 안에서 발생하는 현상으로서 식 (3-3-3)으로부터 동결선 상태에서 경계조건으로 열흐름의 연속방정식 식 (3-3-4로 표현할 수 있다.

$$_{i} - \frac{T_c}{l_f} - k_u \frac{T_w - T_i}{l_u} = \frac{L}{V_i} \times \frac{dh}{dt} > 0 \qquad (3\text{-}3\text{-}4)$$

여기서, T_i는 흙의 동결온도(0℃), T_c는 차가운면의 온도(℃), T_w는 따뜻한면의 온도(℃)이고, l_f는 동결토의 길이(cm), l_u는 비동결토의 길이(cm), 는 얼어있는 흙의 열전도계수, k_u는 얼지 않은 흙의 열전도계수이다. $dh/dt = 0$ 일 때, 따뜻한 면에서 온도가 상승하면 정상적인 발생되는 동상은 정지하게 되며, 식 (3-3-5)를 얻을 수 있다.

$$dT_w = -\frac{l_u}{k_u}\left(k_f \frac{T_c}{l_f} + k_u \frac{T_w}{l_u}\right) \qquad (3\text{-}3\text{-}5)$$

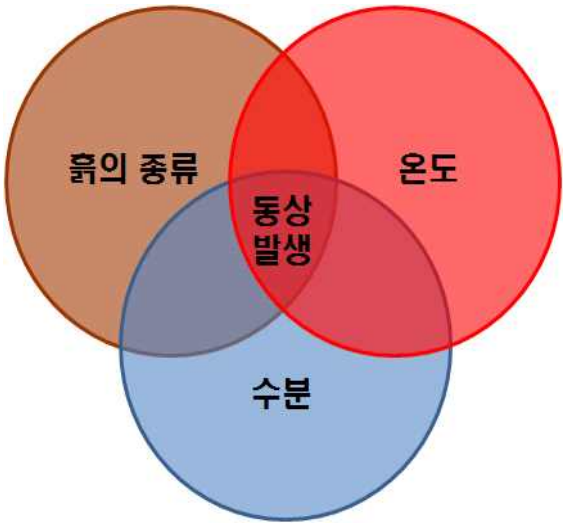
식 (3-3-5)로부터, dT_w의 온기 측면에 의하여 온도가 상승하면 동결선에 순 열흐름으로 t_1에서 t_2 구간은 0이 되고, 정상적으로 발생되는 동상발현은 정지하게 된다.

가. 동상의 필요조건

지반의 동상에 영향을 미치는 주된 요소는 토질조건, 수분조건, 온도조건의 3가지이며, 이 3가지 요인이 동시에 만족될 때 동상현상이 일어나게 된다(<그림 3-3-3> 동상의 조건). 지반에 동상현상이 일어날 때 지하로부터 모세관 현상에 의해 올라온 간극수는 흙 속의 부동수의 막을 통하여 이동하는 것으로 알려져 있다.

따라서 동결 시 부동수분을 많이 포함하고 있는 흙에서는 동상이 활발하고 적게 포함하고 있는 흙에서는 상대적으로 동상이 작게 일어난다. 또한, 부동수분이 많고 적음에 따라 동결토를 구성하는 흙입자와 얼음의 밀착관계가 달라지므로 동결토의 강도가 달라진다. 그러므로 이와 같이 동결토의 특성을 파악하기 위해서는 부동수분을 측정하는 시험이 매우 중요하다.

1929년 Taber에 의하여 동상에 관한 연구가 본격적으로 시작 되었다. 1930년대 부터 Taber 및 Beskow는 일련의 동상에 관한 실험적 연구를 수행하여 동상이 일어난 흙에는 빙정(ice lenses)이 형성되어 있는 특징을 보이며, 토립자는 모관력에 의해 지하수를 흡입하는데 이 흡수력은 토립자의 크기에 영향을 받는다.



<그림 3-3-3> 흙의 동상 현상 발생 조건

즉, 모래는 점토에 비해 지하수를 흡수하는 힘이 적음으로 모래지반은 동결하여도 빙정이 형성되지는 않는다는 사실을 규명하였다. 이를 토립자의 입경에 의해 구분하면, 입경이 0.1 mm이상의 사질토에서는 동상이 거의 발생하지 않으며 입경이 0.005 mm에서 0.1 mm사이의 흙에서부터 동상이 발생하기 시작한다. 입경이 작아질수록 동상성이 크게 증가 되다가 입경이 0.002 mm에서 0.005 mm 사이의 흙에서 가장 큰 동상성을 띈다. 그러나 그 이하의 입경에서는 토립자의 간극이 좁아 투수성이 나빠지고 동결면으로 모세관 현상을 통한 수분공급이 어려워 오히려 동상성이 작아진다.

표면력은 토립자의 구조단위 주변에 수분의 양과 특성에 의해 지배된다. 토립자 표면에 가까워질수록 표면력은 점점 더 증가되어 토립자 표면의 수분은 높은 표면력에 의해 물 분자가 이동하게 되거나 벗어나게 된다. 온도가 감소하여 수분이 동결됨으로써 토립자와 조직단위는 상호작용으로 변화하거나, 토립자와 물의 위치에너지로 변화하게 된다. 이 때문에 전체 동결수분이 변화하게 되는 것이다.

수분 공급원이 동결면과 가까이 있으면 지반의 동상은 증가한다. 수분 공급원은 지하수위 뿐만 아니라 동결면 이하의 수분이 모세관작용으로 이동하기 때문에 흙입자의 크기와 밀접한 관계가 있다.

사질토의 경우 동결선 이하 1.5 m의 깊이에서 모세관작용으로 물을 끌어 올릴 수 있고 실트, 점토, 실트질의 대단히 미세한 모래는 동결선 아래 지하수의 영향을 받을 수 있다.

압축성이 큰 포화점토는 지하수가 깊은 곳에 위치하여도 점토의 압축성에 의해 간극에서 배수된 물로 인하여 얼음층을 형성할 수 있을 만큼 충분한 물이 공급될 수 있다.

McGaw는 지하수위의 깊이와 동상량과의 관계를 규명하기 위해 자갈질 모래부터 모래질 점토에 이르는 4가지 시료에 대하여 실내실험을 수행하였다. 그의 실험결과

에 의하면 원시료 두께에 대한 동상량은 모든 흙에 있어서 수위와 동상속도에 의존한다고 발표하였다. 즉, 지하수위를 일정하게 유지하였을 때, 동상비는 동상속도가 빠를수록 증가하였고 동결속도가 일정하게 유지된 조건에서는 수위를 낮출수록 그 크기가 감소하였다.

동결면에 가까운 미동결 흙 속에 함유되어 있는 물에 의한 동상을 폐합형동상(close frost heave)이라 하고, 미동결 흙속에 지하수가 유입 되어 수분 공급원이 되는 경우 개방형 동상(open frost heave)이라한다.

비동결토의 동결면까지 이동하는 물은 흙 입자 사이 모관을 통하여 이동하는 거리와 그 흙속에 있어서 물의 모관상승 높이와 같다. 미동결흙의 모관상승높이 보다 지하수위가 깊으면 그 지하수는 수분 공극원이 되지 못한다.

흙속의 수분이 흙입자 표면에 흡착하려는 물의 양이 중요하며 특히 동결 흙입자 주변면(frozen fringe)의 부동수의 거동이 중요하다. 즉, 간극수의 점성이 클수록 동결면으로 흡수되는 모관수의 이동이 느려지게 된다. 결국, 흡수량이 감소되어 동상비가 감소한다는 사실을 점토에 (carboxyl methyl cellulose: CMC)을 섞은 동상실험을 통해 입증하였다.

Hoekstra는 동토층에서도 수분이동이 생기며, 부동수가 존재하는 것을 감마선 수분계를 사용하여 입증하였다. Olhoeft는 동토에 대한 유전율의 측정을 통해 토립자 표면에 흡착된 물이 -70℃까지 존재함을 밝혔다.

Willis은 흙의 액성한계(w_l), 소성한계(w_p), 수축한계(w_s), 자연함수비(w_c)에 의한 동상발생기준을 제안 하였다. 즉 흙이 다음 조건에 해당될 경우 동상은 발생하지 않는다고 밝혔다.

① 사질토: $w_c < 12\%$

② 점성토: $w_l > 50\%$

$$w_l - w_p > (w_l - 14)/1.6$$

$$w_s < 21-1.1$$

0℃이하의 온도가 장기간 지속되면 모든 물질은 강성이 커지고 수축한다. 포장도로재료도 역시 예외는 아니다. 도로 노상토가 최적함수비 상태에서 동결된다고 해서 지지력 손상이나 체적이 팽창하는 것은 아니다. 다만 수분이 계속 공급되는 경우 온도가 0℃이하로 계속 지속되면 지반은 체적이 팽창하며 동상현상이 나타난다. Penner와 Freden은 실험을 통해 동결속도 즉, 동상 초기 간극수가 얼어서 형성된 빙정(ice lenses)이 아직 얼지 않은 하부의 비동결토 쪽으로 점차 하강하는 속도가 빠르면 동상속도도 크다고 밝혔다.

흙의 동결깊이는 0℃이하의 온도와 그 지속시간에 영향을 받는다. 이것을 정량적으로 표시하기 위하여 동결지수(freezing index)를 사용한다. 여기서 동결지수란 지

반을 동결시키는 대기온도의 강도(영하온도)와 지속기간(intensity and duration)의 누적 영향(cumulative effective)으로 정의되며, 동결심도를 산정하기 위한 대표적인 척도로 사용된다. 동결지수의 단위는 ℃·day이며 어느 동결 계절 동안의 누적 ℃ day에 대한 시간 곡선상의 최고점과 최저점의 차이로 나타낸다.

강수, 강우, 바람 그리고 일사조건 등 기상에 따라 동결깊이는 달라진다. 동일한 공기동결지수(기상대에서 기온측정은 지표면 1.5 m에서 측정하며 이로부터 구한 동결지수를 공기동결지수라 함)에 대하여 양지와 음지에서의 동결깊이는 상당한 차이를 나타낸다. 양지에서는 일사 시간이 길어 지표면 동결지수가 음지에 비해 낮아지기 때문이다. 바람은 습도를 감소시키며 이로 인해 지표면의 함수비를 변화시킨다. 또한 지표면에 눈이 쌓여 있거나 잔디, 수목이 있을 경우에도 동결깊이와 동결 팽창압이 감소한다.

나. 함수비에 따른 동상 거동특성

부동수분(unfrozen water)이란 흙이 얼어도 그 속에서 일정한 온도까지 얼지 않는 상태로 존재하는 수분을 말한다. 지반에 동상현상이 일어날 때 지하수로부터 모세관현상에 의해 상승된 부(-)의 간극수는 흙 속의 부동수 막을 통하여 이동하는 것으로 알려져 있다. 따라서 동결시 부동수분을 많이 포함하고 있는 흙에서는 동상이 활발하고, 적게 포함하고 있는 흙에서는 상대적으로 작게 발생된다. 또한 부동수분이 많고 적음에 따라 동결토를 구성하는 흙 입자와 얼음의 밀착관계가 달라지므로 동결토의 강도와 열전도율 그리고 전기비저항 등이 변한다.

이와 같은 동결토의 특성을 파악하기 위하서 부동수분에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 부동수분 측정을 통해 동결토의 물리적 성질을 규명한 연구로는 Williams and Wood가 점토와 실트질 흙에 대하여 부동수분이 온도변화에 따른 측정한 사례가 있다.

Koopmans and Miller는 New Hampshire 실트의 부동수분과 온도사이에는 $Wu=\alpha\Theta\beta$의 공식이 성립함을 증명하였다. 여기서, W_u는 부동수분, α 및 β는 흙의 특성을 나타내는 상수, Θ는 온도(℃)의 관계가 있음을 밝혔다. 얼음과 토립자의 경계면에는 비동결 피막수층이 존재하고 있어 토립자가 상승하는 동안 주위로부터 물 분자가 피막수층으로 유입된다. 피막수층을 구성하는 물 분자는 항상 새로운 물 분자로 교체되며 토립자와 얼음사이에 작용하는 흡착력이 피막수층의 두께를 일정하게 유지한다. 피막수가 얼면, 흡수력을 유발하여 주위의 물을 끌어들이게 되며 흡수력을 일으키는 물의 빙결을 석출빙결이라고 부른다. 이 경우는 보통의 물과는 성질이 다른 토립자와 얼음의 경계면에 흡착되어 있는 피막수가 빙결한다. 간극수의 동결은 단순동결이며 흡수력을 일으키지 않는다. 단순빙결은 얼음과 흙을 섞어 동토를 만들고, 동결지반에서 얼음은 그림 2.4의 아이스렌즈를 만들게 된다.

Anderson과 Morgenstern은 칼로리메타(calarimetry), X-ray 회절기 등 다양한 장치

를 사용하여 흙의 종류에 따른 부동수분을 측정하였다. Tice and Baumeister은 핵자기 공명장치(nuclear magnetic resonance technique: NMR)를 이용한 연구를 통하여 흙의 부동수분이 함수비에 따라서 약간 변화한다는 주장을 제기하기도 하였다.

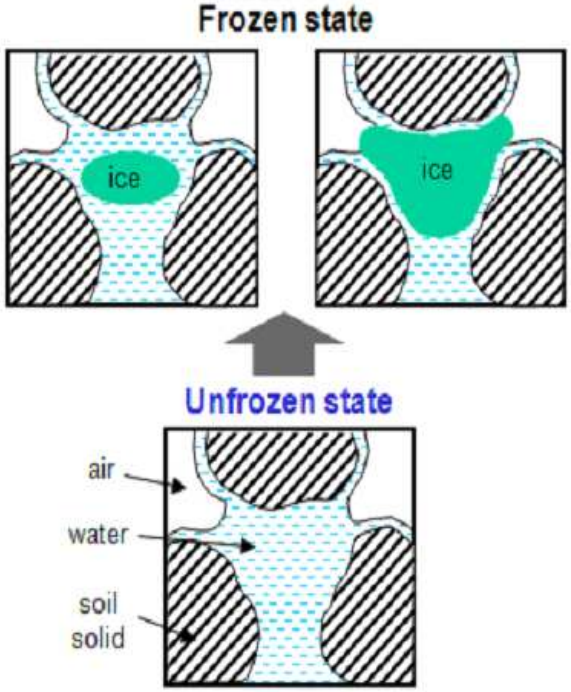
국내에서는 김영진이 동토중의 부동수분을 TDR 측정 장비를 사용하여 부동수이 동결토의 성질에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

흙은 토립자, 공기, 물로 구분되어 3상으로 구성되어 있다. 그러나 0℃이하의 흙은 토립자, 공기(불포화된 흙일 경우), 빙정(ice lenses) 그리고 부동수분의 4상으로 구성된다. 공극에서 얼음은 고체상태의 한 가지 형태뿐이지만 부동수분은 강한 흡착수(strongly bound water)와 약한 자유수(weakly bound water)의 두 가지 형태로 존재한다. 전자의 경우 토립자를 얇은 수막으로 싸고 있으며, 분자들 간에 당기는 높은 힘으로 매우 낮은 온도에서 조차 얼지 않도록 억제하지만, 후자는 확산 이중층의 공극에 남아있는 물이며 보다 쉽게 동결된다. 국내에서는 서상열이 부동수분의 존재 이유에 대하여 용질의 응고점 강하, 모관의 영향에 의한 응고점 강하, 흙입자 표면의 흡착력장의 영향으로 설명하였다. Uhlmann는 동결토 내에 부동수분이 존재하는 이유를 계면화학적 측면에서 설명하고 있다. 즉, 얼음과 흙 입자가 직접 접촉하였을 때의 계면자유에너지 보다 얼음과 흙 입자가 부동수를 사이에 지니고 접촉했을 때의 계면자유에너지의 합이 작기 때문에 부동수가 흙 입자 표면에서 안정적으로 존재한다고 가정하고 식(3-3-6)을 제시하였다.

$$\sigma_{is} - (\sigma_{iw} + \sigma_{ws}) > 0 \qquad (3\text{-}3\text{-}6)$$

여기서, $_s$는 얼음과 흙 입자간의 계면자유에너지, σ_{iw}는 얼음과 부동수분간의 계면에너지, σ_{ws}는 부동수분과 흙 입자간의 계면자유에너지이다.

동결토에서 부동수분이 존재하는 이유는 부동수의 수막두께가 충분히 두꺼운 표면력을 무시할 수 있는 일반적인 물보다 낮은 화학능(chemical potential)을 갖고 있기 때문으로 볼 수 있는데, 흙 속의 물의 화학능을 저하시키는 원인으로는 다음의 3가지가 있다. 용질에 의한 응고점 강하, 모세관의 영향에 의한 응고점 강하, 흙 입자 표면의 흡착력장의 영향 이다.



<그림 3-3-4> 동결에 의한 아이스렌즈 형성

다. 용질에 의한 응고점 강하

흙속의 물은 각종 용질을 함유하고 있으므로 응고점 강하가 일어난다. 용질의 농도가 낮을 경우, 응고점 강하량 (ΔT_f)은 중량 mole 농도(C)를 이용하여 식(3-3-7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta T_f = K_f C \tag{3-3-7}$$

여기서, K_f는 단위농도(mol/kg)당의 응고점 강하량(℃)이며, 흙속의 물의 경우 1.86 ℃kg/mol의 값을 갖는다.

라. 모세관의 영향에 의한 응고점 강하

흙의 간극은 연속되어 있는 구조로서 모세관의 다발로 고려할 수 있다. 이 모관수는 모세관의 벽면과 상호작용을 하여 아래로 볼록한 형태의 곡면을 이루고 있으며, 일반적으로 물보다 화학능이 낮다. 이 모관수의 동결시 응고점 강하량 (ΔT_f)은 모관의 반경(r)을 이용하여 식(3-3-8)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta T_f = \frac{2 V_w T_m \sigma_{iw}}{Lr} \quad (3\text{-}3\text{-}8)$$

여기서, V_w는 물의 비용적 (m /g), T_m은 일반적인 물의 동결온도(K), $_w$는 동결잠열(cal/g)이다. 얼음과 부동수간의 계면자유에너지로서 35 erg/㎠로 가정하면 식(3-3-8)의 ΔT_f(℃)와 r(m)과의 사이에는 식(3-3-9)와 같은 관계가 성립 한다.

$$\Delta T_f = 5.7 \times 10 - 8(1/r) \quad (3\text{-}3\text{-}9)$$

식(3-3-9)의 의미는 모관의 영향에 의한 응고점 강하는 모관반경에 반비례한다. 만약 모관반경(r)이 0.1 ㎛일 경우 응고점 강하량은 0.57℃가 된다.

마. 흙 입자 표면의 흡착력장의 영향

점토입자 표면이 물에 닿으면 표면 이온이 부분적으로 분리되어 점토입자 표면이 음의 전기를 띠게 된다. 전정의 영향으로 점토입자 표면 부근의 액상에 식(3-3-10)과 같이 표시되는 양이온의 분포가 발생된다. 이것을 전기확산 2중층(electrical diffused double layer)이라고 한다.

$$C = C_0 \exp\left(\frac{-ze\Psi}{kT}\right) \quad (3\text{-}3\text{-}10)$$

여기서, C는 중량 mole농도, e는 음이온의 전하, ψ는 물에 대한 상대 전위, C_0는 일반적인 물의 농도, k는 Boltzmann상수, T는 절대온도, z는 이온의 원자가(ionic valence)이다. 점토입자의 표면전하가 음(-)이므로 ψ도 음(-)의 값을 갖게 되어 식(3-3-10)에서 우변 전체의 값은 C_0보다 큰 값이 된다. 양이온의 농도는 식(3-3-10)에서 표시한 바와 같이 흙 입자 표면 근처에 흡착되어 있는 물의 응고점 강하량은 크게 된다. 용질에 의한 응고점 강하 및 모세관 영향에 의한 응고점 강하와 흙 입자 표면의 흡착력장의 요인들이 영향을 미쳐 주어진 온도조건에서 동결토의 부동수분이 결정된다. 부동수분량이 많은 흙은 비표면적이 큰 점토성분을 많이 함유하고 있는 흙이므로 이중 흙입자 표면의 흡착력장의 영향 요인이 가장 중요하다.

얼고 있는 흙 속에서는 0℃이하의 온도에서 아이스렌즈가 발생한다는 사실이 확인되었다. 아이스렌즈의 발생장소는 0℃의 동결선(자유수가 얼음으로 변하는 곳)으로부터 동토 쪽으로 약간 들어간 곳이다. 따라서 0℃의 동결선과 아이스렌즈 발생장소 사이의 동토 중에서 부동수가 이동한다. 부동수의 양은 점토(모래질 7%, 실트질 43%, 점토 50%)에서는 0℃일 때 24.5%, -1℃에서는 3.3%이다. 입경이 커지면 부동수분양은 줄어든다. 실트질 흙에서는 0℃에서 10%~15%이고, 사질토에서는 0%에

가깝다. 부동수분이 이동하는 것은 정전압에 의한 방법, 압력경사에 의한 방법, 온도경사에 의한 방법 등이 실험에서 확인되고 있다.

동결할 때 흙 중에서 물이 얼음으로 변하면서 동결선으로 물을 흡입하는데, 이때 물체를 들어 올릴 수가 있다. 즉, 물이 얼음으로 변할 때 자유에너지가 해방되는 것인데, 0℃의 물이 0℃의 얼음으로 변할 때는 이 자유에너지가 발생하지 않으며, 0℃ 이하의 임의의 온도에서 물이 얼음으로 변할 때만 나타난다.

3. 동결토의 물리적 특성

동결토는 흙 입자, 얼음, 공기, 흙 입자 표면에 흡착된 물로 구성된다. 물론 이러한 구성요소가 일정하게 분포되어 있는 것은 아니다. 동상의 경우 얼음은 렌즈모양의 덩어리로 형성된다. 부동수(unfrozen water)에 대해서는 입경이 큰 흙에서는 부동수는 감소하고 실트질 흙에서는 0℃에서 10%~15%, 모래질 흙에서는 거의 0%에 가깝다. 부동수는 동상의 기본 구조를 설명할 때 중요한 요소이다.

흙이나 지반의 동상현상이 발생된 경우 비동결층에서 부터 수분의 이동, 체적 증가로 동상과 동상 팽창압(frost heaving pressure)이 발생한다. 동상현상은 동결된 가장자리에서 수분이동과 열의 이동에 따라 나타나며, 0℃ 동결 면에서 저온의 아이스렌즈(ice lens)와 사이 영역이 존재하게 된다.

이 영역에서 수분은 비동결토로 부터 아이스렌즈 부동수막을 통하여 이동한다. 아이스렌즈 발달로 과냉각상태의 수분은 동결하여 얼음으로 변한다. 이때 동상 팽창압이 발생하여 상재압력에 저항하면서 아이스렌즈가 위로 올라가고, 그와 동시에 새로운 수분 이동이 발생된다. 흙은 상부로부터 냉각하여 아이스렌즈의 성장이나 동결면의 진행과 함께 발생하는 동결잠열을 흡수한다. 이와 같이 동상현상은 열이동, 수분이동, 동상압의 발생, 부동수막의 존재, 과냉각수의 동결로부터 구성되는 현상을 말한다. 얼음은 점탄성물질이다. 동결된 흙은 얼음을 함유하고 있으므로 이와 같은 점탄성 거동을 하며, 크리프(creep)나 응력완화 현상이 뚜렷하다. 또한 온도나 변위속도에 크게 의존하며, 동결된 흙의 압축강도는 얼음의 압축강도 1000 kPa에서 3000 kPa에 비하여 10배 이상 크다. 이러한 이유는 동결된 흙입자 사이 부착강도가 증가하기 때문이다. 동결토의 강도특성은 파괴기준과 과다변형기준의 두 가지 관점에서 고려되어야 한다. 따라서 동결토의 강도는 동결토 시료가 일정시간이 경과한 후에 붕괴되거나 과다한 변형에 도달하게 되면 그 시점의 전단응력 크기로 정의한다. 세립 동결토가 0℃부근의 온도 조건에 있을 경우 파괴가 발생되기 전에 매우 큰 변형이 발생하게 된다. 이러한 흙의 강도는 최대 허용변형률로써 20%의 축방향 변형률을 고려하고 있으며, 이 변형률에 해당되는 응력을 크리프 강도로 정의한다.

동결토의 크리프 및 강도특성은 온도조건에 의하여 크게 좌우된다. 이는 흙 입자 사이에 존재하는 간극결빙수의 시간 종속적 성질과 온도변화에 따른 비동결 함수비

의 차이에 기인하기 때문이다. 동결토나 영구동토에는 얼음성분이 포함되어 있기 때문에 소정의 하중이 작용하게 되면 흙 입자와 얼음사이의 응력은 접촉면에서 얼음의 융해 압력을 발생시키며, 이로 인한 표면수의 장력의 차이는 부동수를 응력이 작은 부분으로 이동시키게 된다. 이러한 과정에 의해 동결토에서의 소성변형, 결정의 재배치가 일어나 동결토에서는 시간 의존적 변형, 즉 크리프가 발생되며 모든 시료에 있어 하중의 재하속도가 작을수록 동결토의 강도는 작게 나타난다.

동결토의 비열, 열전도율, 열팽창 등의 열적성질은 역학적 성질과는 다르며, 흙 입자, 부동수, 얼음, 공기의 각 구성요소의 열적성질 조합으로 결정된다. 0℃를 포함한 온도범위를 측정할 경우에는 물이 얼음으로 변할 때 잠열(heat of latent fusion) 발생을 고려해야 하며, 0℃이하로 온도가 감소하는 경우에도 부동수가 점차 결빙되기 때문에 잠열발생을 고려해야 한다. 흙의 열전도율(thermal conductivity, k)은 열류 방향의 단위온도 경사에서 단위 단면적을 통과하는 단위시간당 통과열량으로 정의된다. 열전도율의 단위는 W/mk 또는 cal/cms℃로 나타낸다. 흙 전체의 열전도율은 수분이나 공기의 체적율, 광물성분 및 유기물의 체적에 의해 영향을 받는다. 열전도율에 미치는 영향인자는 충진율 또는 간극율 등의 밀도와 입경 또는 입자, 접촉 및 결합 효과 그리고 구성성분의 종류 등이다.

열전도율은 0℃ 이하에서는 동결된 흙이 동결되지 않은 흙보다 크다. 그 이유는 얼음의 열전도율이 물의 열전도율보다 상당히 크기 때문이다. 동결된 흙의 열전도율은 흙속에 포함된 부동수분량에 의해서도 크게 좌우되는데 상대적으로 많은 부동수분량을 포함하는 점토나 실트 등의 열전도율이 작다. 흙이 포화되면 동결되지 않은 흙의 열전도율은 물의 열전도율 값에 접근하고 동결된 흙의 열전도율은 얼음의 열전도율 값에 접근한다. 함수비가 0%에 접근하면 흙의 열전도율 값은 흙입자의 평균 열전도율에 가까워진다.

2. 상수도관-지반의 상호작용에 의한 응력 매커니즘

가. 상수도관의 동파현황 및 파손인자

(1) 국내외 각국의 상수도관 파손원인

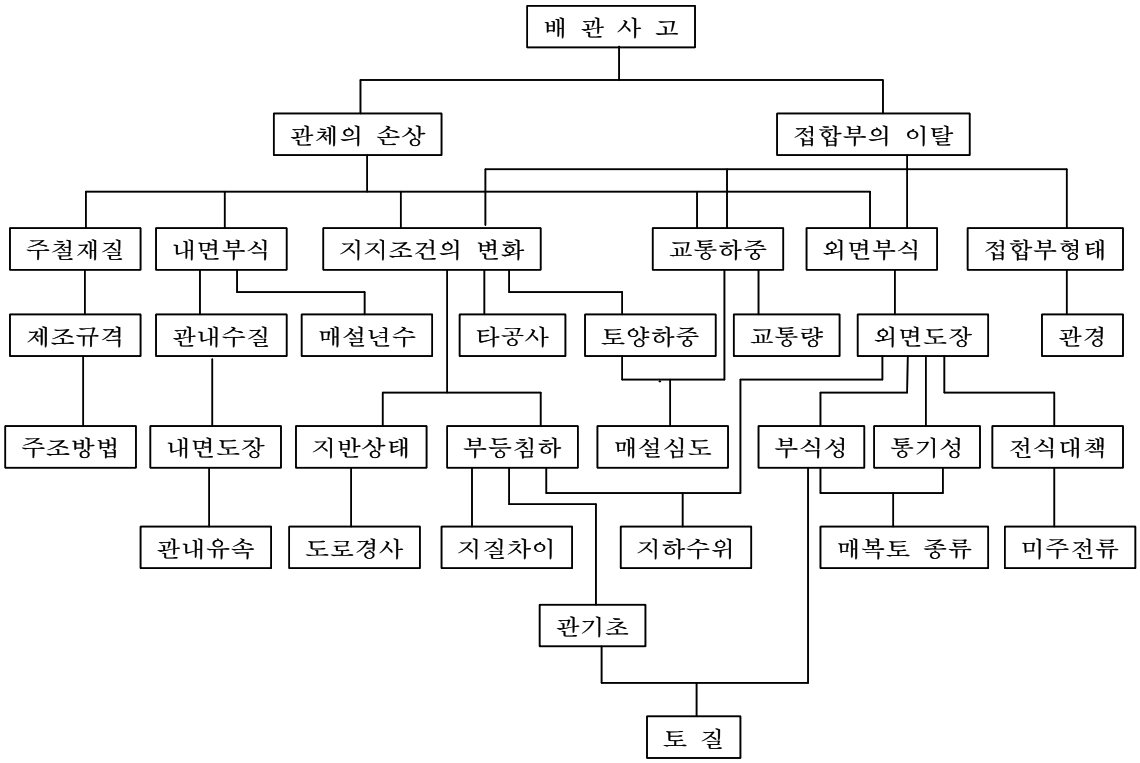
각국마다 매설 수도관의 주된 파손원이 서로 다르다. 이는 파손원인이 지역적 매설 환경에 큰 영향을 받는다는 것을 단적으로 드러내 보이는 것이라 할 수 있다. 먼저 일본의 수도관리기술센터에서는 사고원인을 관의 재질, 시공기술, 급수 상태, 매설환경 그리고 타공사의 항목으로 분류하고 있다.

재질에 관련된 파손인자로는 관 및 부대시설 재질의 불량, 부식에 의한 강도저하를

들고 있으며 관로매설 시공기술에서는 시공기술, 부적절한 매설, 다른 구조물과의 접촉과 같은 시공당시 기술자들의 숙련도와 관련된 항목들이 대부분이다. 배관에 작용하는 수압, 수격압, 수질, 온도변화 및 누수의 방치로 인한 관로주변의 공동화 등은 급수의 상태에 따른 파손인자로 규정하였다. 관로매설장소의 환경과 관련된 파손인자로는 교통하중의 증가, 동결 또는 갈수에 의한 함수율의 저하로 인한 관로주변 토양의 움직임, 지진에 의한 응력변화, 설계시공시의 제반여건과 현재여건의 차이 등이 있다. 마지막으로 타공사에 의한 파손 및 환경의 변화에 요인은 도시가 발전함에 따라 공사건수가 증가하게 되고 이로인해 타공사에 상수도관 파손의 원인에 관한 연구가 부각되고 있다. 또한 일본의 수도관리센터에서는 이러한 사고원인 사이의 관련성을 계층화하고 상층원인에 미치는 영향을 추정할 수 있는 계층구조모델 그림 2.5을 구축하여 관리하고 있다.

미국 펜실바니아주 필라델피아시 수도국에서는 수도관의 노후도 인자로서 외부하중, 내부하중, 기초공, 외부부식, 내부부식, 전식 그리고 관특성을 언급하고 있다. 이중 일본의 경우에서 보다 상세히 다루고 있는 외부 및 내부부식과 관련된 인자를 살펴보면 외부부식인자로는 토양저항도, 토양함수율, 배수성 이며 내부부식과 관련된 인자로는 수질, 관의 도장상태 등이다. 미국의 경우 일본의 경우에서와는 달리 부식인자를 상세히 분리하였다. 이는 매설배관에 작용하는 부식성은 그 지역의 토양특성에 가장 큰 영향을 받는 다는 것을 생각해 볼 때 펜실바니아주의 토양은 대체로 부식성이 강한 토양층이 많은 것으로 판단된다.

참고로 미국 각지역의 토양에서 조사된 상수도관재의 부식도에 의하면, 부식성이 가장 큰 토양과 가장 작은 토양의 차이가 전면부식도에서 20배를 상회하고 있다. 이외에도 미국환경청과 미국수도협회연구기금이 공동으로 작성한 관로개량을 위한 상수도관 시방지침서 에서는 관로파손의 구조적 원인을 다음과 같이 규정하고 있다.



<그림 3-3-5> 상수도관의 사고원인

열수축, 휨상태에 기인한 길이방향응력과 내부부식에 따른 배관두께의 감소로 인한 원주응력과 외부하중에 의한 링 스트레스에 의한 원주방향응력이다. 미국에서는 상수도관의 설계 및 시공이라는 매뉴얼을 출판하고 있는데 여기서도 관파손의 원인은 앞에서 거론한 원인과 거의 동일하다. 한국수자원공사가 데이터베이스화하여 관리하고 있는 관파손원인의 범주는 10가지로 다음과 같다. 시설의 노후, 전식 및 토양에 의한 핀홀 등과 같은 국부 부식, 수격압에 의한 원인, 재질불량, 외적 요인에 의한 원인, 타공사 등 외적 요인에 의한 관파손, 부실시공에 의한 관파손, 태풍 또는 홍수 등에 의한 재해 그리고 기타 원인에 의한 사고 및 단수 등이다.

한국수자원공사의 분류에서는 일본 및 미국 등에서와는 달리 태풍 및 홍수 등에 의한 자연재해 항목이 추가된 것이 특이하다. 국내 3개의 대도시인 서울, 대구, 부산에서의 관로관리는 파손원인이 되는 인자는 거의 언급되어 있지않 고 파손결과만 단순하게 분류되어 있다. 서울의 경우 파손원인은 관의 노후, 진동, 부등침하, 전식, 시공불량으로 조사되었으며, 대구의 경우 관의 노후, 중차량 통과 등으로 매우 단순하게 분류되어있는 실정이다. 건설기술 정보에서 발간된 수도관 파손인자의 관련항목별 분석 보고서에 따르면 사고 건수로 살펴본 우리나라 배관의 파손원인은 2008년을 기준으로 수년간 조사대상이 된 총 1025건의 보수건수중 자연적인 파손 668건에 대한 파손원인은 수격압에 의한 원인 (297건), 시설의 노후 (215건), 중차량통과, 온도변화 및 연약지반 침반과 같은 외적요인에 의한 원인 (141건), 건식 및 토양에

의한 핀홀등 국부적 부식 (12건), 자연재해 (3건)의 순으로 나타났다.

(2) 한반도 상수도관의 동파 현황

한반도는 중위도 온대성 기후대에 위치(북위33°~43°)하고 있어서 사계절이 뚜렷한 특성을 가지고 있다. 겨울철에는 한랭 건조한 대륙성 고기압의 영향을 받아 춥고 건조하며, 여름에는 고온 다습하고 강수량이 여름철에 집중되며, 봄과 가을에는 맑고 건조한 날이 많다. 연 평균기온은 남한의 경우 중부 산간지방을 제외하고, 대체적으로 연평균 기온이 10%~16℃ 이며, 가장 무더운 달인 8월에는 23℃~27℃, 5월은 16℃~19℃, 10월은 11℃~19℃, 가장추운 달인 1월에는 -6℃~7℃ 이다. 이 자료는 20년 이상 연속적으로 관측한 60개 지점의 1971년~2000년까지의 평균값 기준의 기상청 자료이다. 또한, 이 자료 기준으로 연강수량은 중부지방이 1,100 mm~1,400 mm, 남부지방은 1,000 mm~1,800 mm, 경북지방은 1,000 mm~1,200 mm, 경남해안의 일부지역은 1,800 mm, 제주도는 1,450 mm~1,850 mm 이다. 계절적으로 연강수량의 50%~60%가 여름에 집중되어 있다. 그러나, 최근 한반도 기후변화의 연구 보고서에 의하면, 지구온난화 현상에 의해서 온대지역의 중부이남 지역이 아열대로 바뀌고 있으며, 중부산간 지역의 아한대 지역은 온대지역으로 바뀌고 있으며, 멀지 않은 미래에는 산간지역을 제외한 전국이 아열대 지역으로 서서히 바뀌어 간다고 전망하고 있다. 이러한 기후적인 변화는 상수관을 설계할 때 중요한 환경적인 요소로 작용하지만 아직까지 이를 반영하기에는 많은 변수들이 있다.
이상한파로 국내에서는 해마다 겨울철이면 상수도관의 동파사고가 발생하고 있으며, 특히, 최근 지구온난화에 따른 이상기후로 인하여 시베리아 북부지역을 감싸고 있는 제트기류가 감소하여 오히려 겨울철 한파의 강도가 점점 더 심해지고 있는 실정이다. 이러한 현상은 앞으로도 지속될 것으로 판단되어 이로 인한 상수도관의 동파사고는 증가할 것으로 우려된다.
2011년도 환경부에서 발간한 상수도통계를 보면 경우 서울, 인천 등 수도권에서 상수도관련 계량기 피해 건수가 1,000건을 넘어섰고, 비교적 겨울철 동파 피해가 적었던 김해의 경우에도 상수도관이 동파되어 17만 가구가 불편을 겪는 사태가 벌어진 사례가 있다. 그래서 본장에서는 지역별 동파 현황을 연도별로 분류하여 동파추세를 객관적으로 분석하여 각 지역의 동파의 연도별 추의를 파악하였다.
동결지수별 동파 현황을 분석하기 위하여 동결지수 600℃day 이상의 북부 지역은 서해안과 접한 지역중 최북단에 위치한 경기지역을 선정하였다. 이 지역의 최근 온도 경향은 지속적으로 낮아짐을 알 수 있다. 이에 따라 상수관의 동파의 위험성이 연도가 진행 됨에 따라 커진다.
<표 3-3-1>의 북부 지역의 동파는 2006년도에 400여회, 2008년도에 404회 발생하였으며 2010년도에 동계 저온현상으로 인하여 급증하여 2,650여회 발생하였다. 동파의 경향은 최근 3년 사이에 6배의 증가하여 타 지역에 비하여 현격한 증가가 나타

났다. 이러한 현상은 동계의 저온현상과 해안가의 인접영향에 따른 해풍의 영향 짧은 기간에 발생하는 게릴라성 추위에 의한 것이다.

<표 3-3-1> 연도별 동파 건수 및 평균기온(북부지역)

Year	2006	2007	2008	2009	2010
Number of breakage	391	220	404	451	2652
Average temperature for the year(℃)	12.94	12.90	12.83	12.64	12.20
Average winter temperature(℃)	-1.47	1.47	0.53	0.23	-1.23

동결지수별 동파 현황을 분석하기 위하여 남부지역은 동해 접하는 해안지역인 경상남도로 선정하였다. <표 3-2-2>의 남부지역은 평균기온이 동계기간의 평균온도는 영상권이다. 동파는 2006년도에 218여회, 2008년도에 23회 발생하였으며 2010년도에 동계 저온현상으로 인하여 급증하여 341회 발생하였다.

이는 지역 상부 토질의 특성이 지역은 남부 지역이라는 지역적 특성을 갖고 있음에도 최근 발생하는 동계이상 저온현상으로 인하여 지속적으로 동파의 위험성은 증가 한다. 따라서 동파의 위험성은 적으나, 증가율의 추세를 감안하여 향후 위험가능지역으로 관리가 필요하다. 또한 이 지역의 상부 토층의 경우 동상피해에 위험한 미립분의 함량이 높은 점토시료의 분포가 61%이상 형성되어 있어 향후 이상저온발생시 동파 현상이 급격히 증가 할 것이다.

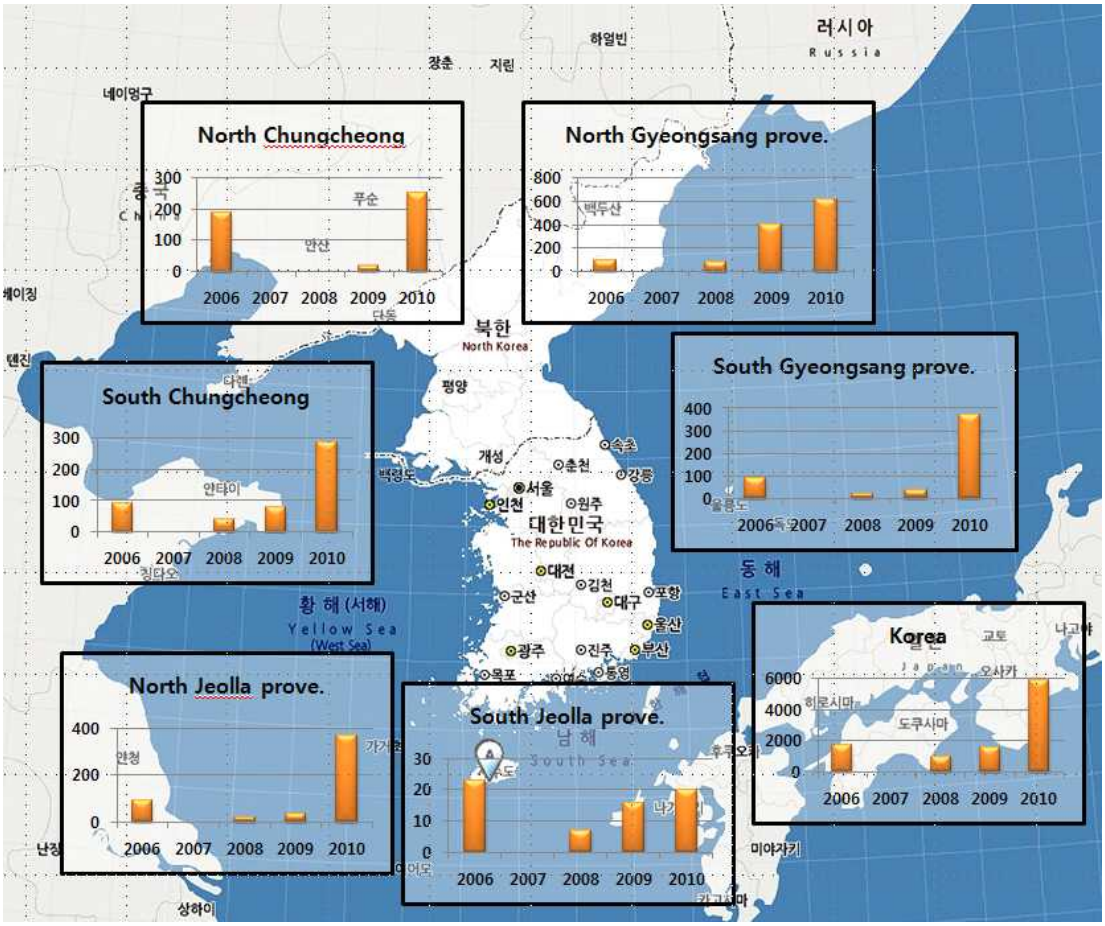
<표 3-3-2> 연도별 동파 건수 및 평균기온(남부지역)

Year	2006	2007	2008	2009	2010
Number of breakage	218	32	23	34	341
Average temperature for the year(℃)	14.50	14.83	14.80	14.96	14.54
Average winter temperature(℃)	2.87	5.17	3.60	4.97	3.93

지구온난화 현상에 의해서 많은 기후적인 변화가 발생하여 상수관을 설계할 때 최근의 환경적인 요소로 반영하기에는 많은 변수를 최소화 하여야한다. 특히, 그림 <그림 3-3-6>의 국내 상수관 동파는 해마다 겨울철이면 상수도관의 동파사고가 발생하고 있으며, 이러한 현상은 앞으로도 지속될 것으로 판단되어 최근 국내 상수도

동파의 현황을 분석하여 그 특성을 향후 예측을 하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 이러한 상수도관의 동파현황을 예측하기 위하여 최근의 상수관 통계자료를 분석하여 경향성을 판단하였다.



<그림 3-3-6> 겨울철 전국 상수관의 동파현황

동계(1월, 2월, 3월)의 상수관의 파열건수를 분석한 결과 경기도와 경상북도의 현황이 3,400건과 4,500건으로 가장 많았다.

대부분의 지역은 3월 평균기온이 영상에 머물러 직접적인 관의 파열은 없을 것으로 사료된다. 따라서 이 시기의 파열은 해빙에 의한 지지력의 상실로 발생한 것으로 판단할 수 있다. 이러한 경향은 상부토층의 미립분의 함량이 많은 지역, 그리고 평균기온이 높은 남부지방 에서 두드러짐을 알 수 있다.

2011년도의 경우 서울, 인천 등 수도권에서 상수도관련 계량기 피해 건수가 1,000건을 넘어섰고, 비교적 겨울철 동파 피해가 적었던 김해의 경우에도 상수도관이 동파되어 17만 가구가 불편을 겪는 사태가 벌어진 사례가 있다. 그래서 본장에서는 지역별 동파 현황을 연도별로 분류하여 동파추세를 객관적으로 분석하여 각 지역의 동파의 연도별 추의를 파악하였다. 이를 통하여 각 지역의 동파의 위험성을 고찰하

고 동결심도의 적절성을 파악하는 참고자료로 활용하였다.

9개도로 분류하여 상수도 통계를 활용하여 상수도관의 동파경향을 분석하였다. 그 결과 동파 현황은 경기도가 3,900회로 가장 많았으며 강원도, 경상북도가 다음으로 가장 많았다. 관로의 구축현황은 경기도가 강원도 순으로 나타났다. 관로의 동파의 위험도를 파악하기 위한 관로 길이당 동파건수는 경기도가 단위길이(m)당 0.017건으로 가장 높게 나타났고, 평균기온이 가장 낮은 강원도가 0.013건으로 나타났다. 그러나 국내 지역 중 평균기온이 가장 높고 투수성이 높은 사질토와 현무암질로 이루어진 제주도의 경우 지역의 특성으로 인하여 통계기준상에 동파현황이 최근 5개년도에 존재하지 않음을 파악할 수 있었다.

전체적인 동파건수는 인구와 각 지역면적과 비교적 유사한 경향으로 나타났으나 인천지역은 인구 대비 동파 비율은 낮게 나타났다. 그러나 동결관의 길이에 대비하여 동파의 경향이 강원도에 비하여 높게 나타나 해안매립지반으로 형성되어 지지력이 여타지역에 비하여 낮고, 해안에 위치하고 있는 지리적 특성으로 인한 기후 변동의 폭이 크고, 최근 이상기후로 인한 게릴라성 극한기후로 인하여 동파민원의 증가가 그 원인으로 해석된다.

또한, 경상남도의 경우 최근 동파의 경향성이 증가하고 있으며, 상부 지반의 구성분류가 점토계열의 비율이 60%가 초과 하게 되고 평균입경이 여타 지역에 비하여 작다. 이러할 경우 지반의 동상 민감성이 여타지역에 비하여 높아 동결융해에 따른 강도 감소 및 부등침하가 발생할 우려가 높다.

상수도관로 길이당 동파건수가 0.007로 높게 나타난 전라북도의 경우 경상남도를 제외하고 가장 높은 점토비율이 나타났다. 또한 평균입경의 경우 경상남도와 유사한 경향으로 동상 민감성이 높을 것으로 사료된다. 이러한 지반특성과 최근 동파확률이 여타지역에 비하여 높은 경향성으로 인하여 동파에 대한 대책을 마련할 필요가 있다. 또한, 각 위험지역과 인접하여 있는 충청남도 북부, 경상북도 남부, 전라남도 북부의 경우 위험도가 각 지역의 중심보다 높을 것으로 판단된다.

(3) 상수도관의 파손인자

상수도관의 파손에 관련되는 인자는 매우 복잡하고 다양하다. 그러나 자세히 살펴보면 이러한 인자들은 서로 관련성을 가지고 있는 몇 개의 그룹으로 묶을 수 있다. 이러한 관련인자들을 요약하면 <표 3-3-3>과 같다.

<표 3-3-3> 상수도관의 파손에 관련된 인자 및 항목

Factors	Items
Material of pipe	PCP, PVC, PE, Stainless steel
Internal decay	pH. density of Hydrogen sulfide, H_2S 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 ≤ 100mm, D ≥ 700mm)

미국 덴버시의 (east bay municipal utility district: EBMUD) 관종별 보수자료를 살펴보면 연성일주철관이 가장 내구성이 좋은 반면 주철관은 석면시멘트관과 유사한 누수건수를 보이고 있으며 주철관이 도복장강관보다 약 3배에 달하는 누수건수를 나타내고 있다. 이러한 추세는 일본의 경우와도 매우 잘 일치하고 있다. 한편 한국수자원공사의 자료는 연성주철관과 도복장 강관의 파손율이 거의 유사하지만 매설환경과 같은 여러 요인이 함께 작용하므로 일괄적으로 언급하는 것은 무리가 있다.

외부부식은 관의 매설환경과 직접적인 관련이 있는데 토양의 종류, 토양함수율, 토양저항률 등의 영향을 받는다. 토양의 종류에 대해서는 실트 및 점토와 같은 세립토가 모래나 자갈과 같은 조립토 보다 부식성이 크며, 토양의 함수율이 높을수록 부식성이 크다. 또한 토양의 비저항이 높을수록 배관의 부식성은 증가하는데 이는 비저항이 클수록 전기가 그만큼 통하지 않으므로 부식이 덜되는 반면 비저항이 낮은 곳은 전기가 잘 통하기 때문이다.

내·외부하중은 관의 파손에 미치는 영향이 크다. 내부하중의 가장 큰 인자는 수격압에 의한 것이다. 수격압은 최대수압과 관련이 있다. 외부하중은 매설환경에 밀접한 관계가 있다. 예를 들어 매설된 지역의 토지이용 현황이나 도로폭에 따라 교통하중은 크게 달라지게 된다.

매설년수가 고려된 이유는 관의 노후도가 진행됨에 따라 자연적으로 관의 재질이 약해지기 때문이다. 미국의 한 최종보고서에 의하면 부식만이라면 100년을 버틸 관의 평균 파손수명이 40년이라는 점에서 기초의 부실을 파손의 큰 원인의 하나로 결론짓고 있다. 공사시공에 관한 인자는 기초공의 종류, 뒤채움토양, 관경으로 표현하고 있는데, 그 이유는 우선 기초가 잘 되어있는 관로인 경우는 설혹 누수가 생긴다고 하더라도 기초가 유실되지 않으므로 관의 지지조건이 양단지지 빔이 되어 파손을 일으키는 경우가 일어나지 않기 때문이며, 뒤채움 토양이 배수가 양호한 토질로 되어 있다는 것은 배수가 양호하면 관의 외부부식방지에 도움이 되기 때문이다. 또한 관경이 평가인자로 고려된 이유는 관의 기초가 유실되어 양단지지 빔이 될 경우 관벽이 얇은 소구경관이 더욱 쉽게 파손되기 때문이다.

나. 상수도관에 작용하는 토압 및 변형이론

상수도관에 작용하는 외력은 토압에 의한 정하중, 지면상의 하중, 운반중 또는 지

면상의 동하중에 의한 충격, 수압에 의한 내압력이다. 일반적으로 토압이 주된 외력으로 되는 설계에 있어서는 각종의 외력을 모두 토압으로 환산하여 취급하면 편리하다. 토압은 매립토의 성질, 매립의 방법, 매립후의 상태 등에 의하여 매우 다르게 된다.

매설관에 작용하는 토압의 산출방법은 매설유형 및 상재하중의 전단방식에 따라 여러 가지 식이 제안되고 있으며 그 크기는 상당한 차이가 있다. 즉, Jannsen, Spangler, Marston, Anson, Lame 등의 제안식이 있으나, 이 중에 Marston-Spangler 식이 가장 많이 쓰이고 있다.

현재 매설관 설계에 많이 사용되고 있는 Marston-Spangler의 연직토압은 흙채움으로 인한 침하와 트렌치 양벽면에 마찰저항이 매설관에 전달되는 가정하에 미소요소에 작용하는 수직응력의 평형(상향으로 연직력 + 측면전단력 = 하향으로의 연직응력 + 요소중량)을 이용하여 계산하고 있다. 하지만, Marston-Spangler의 연직토압은 연직토압을 단순히 등분포 상재하중으로만 고려하여 흙의 점착력은 고려하지 않고 있으며 마찰계수를 깊이 방향으로 동일하게 가정하는 등, 오늘날의 적용성이나 설계 계산시에도 많은 재론의 여지를 포함하고 있다.

또한, 좁은 공간에 되메움되는 강성매설관은 되메움재보다 강성이 크기 때문에, 일반적으로 되메움 과정에 있어서 구조물 주변부에서의 침하가 구조물 상부에서는 토피 하중보다 큰 연직 하중이 작용하는 역학적 특성을 가지게 된다.

이러한 현상을 지반의 아칭현상(arch action)이라 하며 모래와 같은 점착력이 없는 흙에서도 아치 모양으로 형성된 상부가 안정을 유지하는 경우가 있다. 이와 같이 입상체의 자중에 의한 응력은 주위에 전달되는 성질이 있으며 이것을 아치현상이라 한다. 수평방향의 토압에 있어서도 같은 경우가 있으며, 벽의 일부가 후퇴 하면 토압은 아치작용에 의해 주위로 분산되어 토압재분배(redistribution of earth pressure)이 일어난다.

아칭현상은 지반변위가 발생되려는 또는 변위가 발생된 영역과 변위가 발생되지 않은 안정한 영역사이의 경계면에서 발생되는 전단응력에 의한 응력의 전이로 정의하고 있으며, 이러한 아칭현상에 대하여 Terzaghi는 “아칭효과는 전단응력에 의해 발생하며 주변보다 과도한 변위를 받은 토체가 항복상태에 도달하여 주변지반에 응력을 전달함으로써 전체적으로 응력이 재분배되고 항복상태에 도달한 토체의 응력이 작아지는 현상”이라고 정의하였다. 이러한 아칭현상은 토류구조물 등의 구조물과 배면 되메움토 경계면의 상대적변위에 따른 벽마찰의 발생으로 인한 전단저항이 나타나는 조건에서 뚜렷한 현상을 보인다.

그러나 개착으로 굴착한 후 구조물과 잔여공간 사이의 되메움이 완료된 후 구조물의 변위가 발생되지 않거나 또는 무시할 만한 경우 되메움 흙의 자중은 흙과 구조물의 마찰 특성 및 되메움 공간의 크기에 따라서 달라지며, 또한 시간이 경과함에 따라 점차 안정화 되려는 시간의존적인 요인과 아울러 하중이력 역시 영향을 미친다. 이와 같이 좁은 공간에서의 되메움에 의한 토압의 크기 및 형태는 되메움 흙의

내부마찰각과 벽면의 거친 정도 및 원지반면과 벽체간의 이격거리, 원지반 또는 구조물의 경사 등에 따라 달라진다. 따라서, 이에 대한 연구하였으며 Janssen은 사일로(silo)에 저장된 곡물에 작용하는 연직응력과 수평응력의 비를 가정함과 동시에 사일로에 저장된 곡물이 미소두께의 수평요소들로 구성되어 있다는 가정 하에 각 미소수평요소에 대한 힘의 평형을 이용하여 사일로에 작용하는 압력을 미분방정식을 이용하여 이론적으로 계산하였다. 그리고 Marston과 Anderson은 지중암거에 작용하는 토압을 규명하였다.

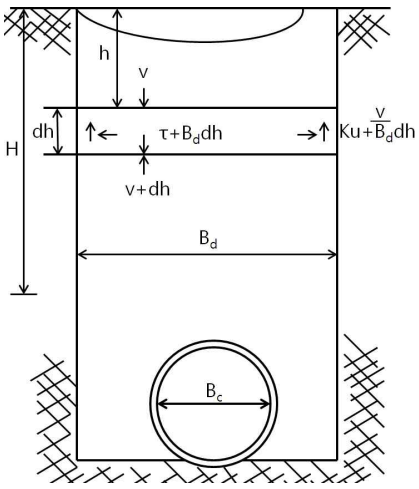
되메움 지반에서 매설관에 작용하는 토압산정의 이론은 Janseen(1895)의 사일로 이론, 사일로 이론을 확장하여 각종 매설관 및 박스형 구조물의 토압산정에 널리 사용되어 지는 Marston(1913)이론, 되메움 및 구조물 매설조건에 따라 세분한 Spangler(1948)이론 최소 주응력 아치의 연결고리를 연결하는 평면아치를 사용한 Handy(1985)의 아칭 이론과 대칭의 경사진 되메움 공간에서의 토압을 추정하기 위한 연구가 있다.

(1) Marston이론

Marston and Anderson은 박스 컬버트, 상하수관 및 가스파이프 등의 설치에 있어 원지반상에 설치된 구조물의 상부에 성토할 경우와 원지반을 좁게 굴착한 후 되메움 하는 경우의 토압 산정식을 고려개상 단면의 폄면요소에 대한 힘의 평형을 위하여 제안하였다. <그림 3-3-7>과 같이 폭 B_d의 도랑을 파고 외경 B_c의 관을 매설하는 경우에는 사일로의 경우와 마찬가지로 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$V+dV+2k\mu\frac{V}{B_d}dh=V+rB_d dh \tag{3-3-11}$$

$$\frac{dV}{dh}+2\mu k\frac{q}{B_d}=rB_d \tag{3-3-12}$$



<그림 3-3-7> 되메움 지반의 미소요소에 대한 힘의 평형

식 (3-3-12) 1계 선형방정식을 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$V = \exp^{-2k\mu\frac{h}{B_d}} \int e^{-2k\mu\frac{h}{B_d}} rB_d dh + C \tag{3-3-13}$$

$$\frac{rB}{2k\mu} + Ce^{-2k\mu h} \tag{3-3-14}$$

초기 경계치 h=0일 때 $V = 0$이므로 식 (3-3-14)의 적분상수 C는 식 (3-3-15)과 같이 정리할 수 있다.

$$C = -\frac{rB_d}{2k\mu} \tag{3-3-15}$$

이를 식 (3-3-14)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$V = \frac{rB_d^2}{2k\mu}\left(1 - e^{-2\mu k\frac{h}{B_d}}\right) \tag{3-3-16}$$

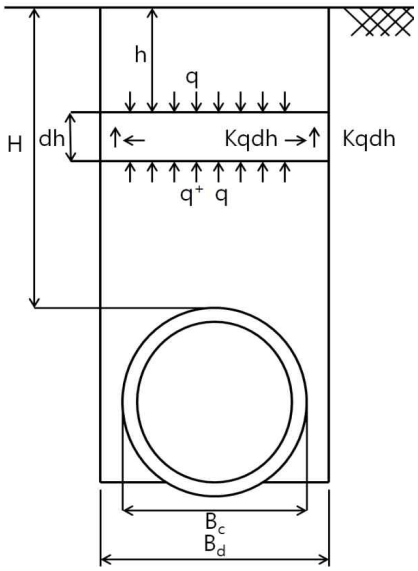
$$\therefore W_c = \frac{rB_d^2}{2k\mu}\left(1 - e^{-2\mu k\frac{h}{B_d}}\right) \tag{3-3-17}$$

여기서, W_c는 매설관의 단위길이당 작용하는 연직 토압(t/m), r_t는 흙의 단위체적중량(t/m3), B_d는 관 상단에서의 굴착폭 (m), K는 토압계수, μ는 흙의 마찰계수(tan ∅), ∅는 흙의 내부마찰각, H는 지표에서 관 상단까지의 거리이다.

(2) Marston-Spangler 토압이론

Spangler는 Marston이론을 확장하여 박스 암거, 상하수관, 가스관등의 매설 시공조건, 매설물의 강성 및 되메운 또는 성토지반의 침하 등의 조건에 따라 달라지는 응력의 상태를 정리 하였다. Spangler는 관의 매설형식을 도랑형 매설관, 정돌출형 매설관, 부돌출형 매설관, 불완전 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 유도하였다.
<그림 3-3-8>과 같은 단위길이의 도랑형 매설관에서 깊이 h에 위치한 두께 외의 되메움재 수평요소의 상하 방향 힘의 평형을 고려하면 다음과 같은 관계식을 구할 수 있다.

$$qB_d + dqB_d + 2\mu Kqdh = qB_d + rB_d dh \qquad (3\text{-}3\text{-}18)$$



<그림 3-3-8> 지중 매설관에 작용하는 토압분포

여기서, qB_d는 요소의 상부에 작용하는 하향 연직력, $qB_d + dqB_d$는 요소의 저면에 작용하는 상향 연직력, $rB_d dh$는 요소의 중량(하향), $Kqdh$는 요소의 각 측면에 작용하는 수평력, $\mu Kqdh$는 요소의 각 측면에 작용하는 마찰력(상향)이다.

$$dqB_d + 2\mu Kqdh = rB_d dh \qquad (3\text{-}3\text{-}19)$$

양변을 B_d와 dh로 나누면 다음과 같은 선형미분방정식을 구한다.

$$\frac{dq}{dh} + \frac{2K\mu}{B_d} q = r \qquad (3\text{-}3\text{-}20)$$

한편, $y' = f(x)y = r(x)$의 해는 $y = e^{-k}\left[\int e^{k} r dx + c\right]$이고, $k = \int f(x)dx$ 이므로,

$$k = \int \frac{2K\mu}{B_d} dh = \frac{2K\mu}{B_d} h \qquad (3\text{-}3\text{-}21)$$

$$\therefore q = e^{-\frac{2K\mu}{B_d}h}\left[\int e^{\frac{2K\mu}{B_d}h} r dh + C\right] = e^{-\frac{2K\mu}{B_d}h}\left[\frac{B_d}{2K\mu} e^{\frac{2K\mu}{B_d}h} r + C\right] \quad (3\text{-}3\text{-}22)$$

경계 조건에 의해 $h=0$일 때, $q=0$ 이므로

$$0 = \frac{B_d}{2K\mu} r + C \Rightarrow C = -\frac{rB_d}{2K\mu} \quad (3\text{-}3\text{-}23)$$

$$\begin{aligned} \therefore q &= e^{-\frac{2K\mu}{B_d}h}\left[\frac{rB_d}{2K\mu} e^{\frac{2K\mu}{B_d}h} - \frac{rB_d}{2K\mu}\right] = \frac{rB_d}{2K\mu} e^{0} - \frac{rB_d}{2K\mu} e^{-\frac{2K\mu}{B_d}h} \\ &= \frac{rB_d}{2K\mu}\left[1 - e^{-\frac{2K\mu}{B_d}h}\right] \end{aligned} \quad (3\text{-}3\text{-}24)$$

이때, 매설관 위의 연직응력은 식(3-3-24)의 h를 H로 대체하면 된다.

$$q = C_d r B_d \quad (3\text{-}3\text{-}25)$$

이때, C_d는 $\frac{1 - e^{\frac{2K\mu}{B_d}H}}{2K\mu}$ 이다.

따라서, 강성관의 연직력은 식 (3-3-26)와 같다.

$$W_c = C_d r B_d^2 \quad (3\text{-}3\text{-}26)$$

여기서, W_c는 매설관 단위길이강 상부의 전체 사하중이고, C_d는 흙의 마찰각, 고랑폭에 대한 깊이의비, 고랑 측부 경사각, 베딩상태 등에 영향을 받는 하중 전달 계수이다. 또한 r는 매설관 상부에 위치한 흙의 단위중량이며, B_d는 매설관 상부에서의 고랑폭이 된다.

매설관에 작용하는 연직토압은 기본적으로는 마스톤스팽글러이론(Marston Spanglar 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 가설널말뚝을 쓴다. 또한 되메우기 후에 가설널말뚝을 인발할 때에 Marston Spangler이론에 의한 산정토압보다 큰 토압이관에 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 토괴중량 외에 이 면에서의 마찰력을 고려한다. 강성 매

설관에서는 주위의 침하가 크므로 하향마찰력이 유발되어 관에 작용하는 토압을 증대시킨다. 연성 매설관에서 그 역의 현상이 생긴다.

(3) 토압에 의한 관의 변형에 관한이론(Spangler의 방법)

Spangler는 토압이 가해졌을 때 관의 변형거동을 분석하여 연성관이 강성관에 비해 관 상단에 작용하는 연직토압이 약 40%저감 한다. 강성관의 경우는 작용된 토압이 전부 관의 강도에 의해서 지지가 되지만, 연성관에 있어서는 작용된 토압으로 인해 연직 및 수평 방향의 변형이 발생되고, 수평 변형의 발생에 따라 관 주변 토체에 수동 저항을 유발시키고 작용 토압을 아칭효과에 의해 주변 흙으로 전가시킴으로써 토압을 저감한다. 따라서, 연성관이 강성관에 비해 강도가 작으나 연성관을 매설했을 때 관의 수평변형에 따라 관의 양 옆에서 발생되는 수동토압 및 아칭효과에 영향으로 수직방향으로 큰 압력을 받는다.

매설관의 변형은 관 상부의 하중과 관의 탄성계수와의 비로서 구할수 있으나 관의 탐성계수는 관과 흙에 상호 복합적으로 하중이 작용하므로 흙의 강성과 관의 강성을 같이 고려해야 한다.

토압에 의한 연성관의 수평변형은 식 (3-3-27)나타나있는 Spangler의 변형공식에 의해서 구한다.

$$= D \frac{K W_c r^3}{EI + 0.061 E' r^3} \qquad (3\text{-}3\text{-}27)$$

여기서, ΔX는 관의변형량, D_1는 변형지체계수, K는 기초 지지각에 따른 계수, W_c는 단위길이당 관의 하중, r은 관의 반경, E는 관 재료의 탄성계수, I는 관의 단면2차 모멘트, t는 관의 두께, E'은 흙의 탄성계수이다.

<표 3-3-4> 기초 지지각에 따른 수동저항계수(K)

Bedding angle (α)	0°	30°	45°	60°	90°	120°	180°
Bedding constant (K)	0.110	0.108	0.105	0.102	0.096	0.090	0.083

<표 3-3-5> Lowa 공식에 적용되는 흙의 탄성계수(E′)

Soil type-pipe bedding material (USCS)	E′ for degree of compaction of bedding (kPa)			
	Dumped	Slight <85% Proctor <40% relative density	Slight <85% Proctor <40% relative density	Slight <85% Proctor <40% relative density
Fine-grained soil (LL>50), Soils with medium to high plasticity CH, MH, CH-MH	No data available; consult a competent soils engineer; otherwise use E′=0			

Fine-grained soils (LL<50), Soils with medium to no plasticity CL, ML, ML-CL, with less than 25 % coarse-grained particles	350	1380	2800	6800
Fine-grained soils (LL<50), Soils with medium to plasticity CL, ML, ML-CL, with more than 25% coarse-grained particles Coarse-grained soils with fines GM, GC, SM, SC contains more than 12% fines	680	2700	6800	13800
Coarse-grained soils with little or no fines GW, GP, SW, SP contains less than 12% fines	1300	6800	13800	20600
Crushed rock	6800	20600		
Accuracy in terms of percent deflection	± 2%	± 2%	± 1%	± 0.5%

또한 토질의 온도 변화에 의한 응력은 축방향으로의 변형률 $\varepsilon_{at} = \alpha \Delta T$인 사실을 알고 Hooke's law를 적용하면 구속을 받는 배관의 온도가 변화할 때 발생하는 축방향 응력(σ_{at})은 식 (3-3-28)과 같다.

$$\sigma_{at} = E_p \alpha \Delta T \tag{3-3-28}$$

여기서, E_p는 배관의 탄성계수, α는 열팽창계수(coefficient of thermal expansion), ΔT는 토질의 온도 변화이다. 동결하중(frost load)은 매설관 설계에 있어 중요한 하중 조건이지만 실제 설계에 있어 고려하지 않고 있는 실정이다. 이러한 동결하중은 토압보다 훨씬 더 크게 작용하지만 현재 경험적인 방법을 제외하고는 동결하중을 추정하는 것은 쉽지 않다. 동결하중은 종래의 토질 역학에서 다루지 않았던 저온에서 흙의 거동이라는 새로운 문제를 야기하고 있다. 동결하중이란 흙이 0℃이하로 냉각되는 데 따르는 토양동결로 발생되는 하중의 증가를 말하며 동결토압이라고도 부른다. 이때 발생되는 지반의 동결팽창은 수평방향뿐만 아니라 수직방향으로도 발생한다. 흙의 동상 또는 동결현상에 관해서 지금까지 많이 규명되어 왔으나, 동결하중에 대해서는 아직도 정확한 성질이 확립되어 있지는 않다.

일반적으로 동결하중에 가장 크게 영향을 미치는 인자는 토질인데 특히 입도분포가 동결팽창과 관계가 있다. 자갈이나 사질토와 같은 조립질 흙에서는 모관작용이나 토립자 주위의 흡착수가 적기 때문에 동상이나 동결팽창이 거의 일어나지 않으므로 동결토압의 발생은 매우 작다. 이에 반하여 실트질 흙에서는 모관작용이 크고 흡착수도 많고, 흡착수막 내의 이동이 비교적 용이하며, 이이스 렌즈(ice lenses)가

형성되기 때문에 동결팽창이 비교적 크게 일어난다. 그러나 점성토에서는 간극이 미세하여 오히려 동결팽창이 발생하기 어렵다. 동결팽창과 동결토압은 반드시 비례하는 것은 아니고 지반의 구속조건에 크게 관계된다. 자연구속상태에서는 실트질과 같은 경우에 동결팽창량은 커지지만 동결토압은 적고, 반고결 점토층과 같은 경질지반에서는 역현상이 나타난다.

4절 동상민감성 지반 조사 및 분류연구

1.서론

온도와 수분조건 이외에도 동상에 많은 영향을 주는 영향인자는 흙의 종류이다. 자갈과 같이 비교적 입자가 크고 간극이 큰 흙 입자에서는 모세관현상에 의한 모관수의 이동이 자유롭지 못하며 입자가 작은 실트나 점토의 경우 모관수의 이동이 원활하다. 간극 내에 있는 수분이 영하의 기온에서 빙정(ice lense)을 형성하게 되고, 입자가 작은 흙에서 모세관현상에 의해 빙정의 크기가 점점 커지면서 지반을 융기시키는 동상현상이 발생하게 된다. 제 3장 2절에서 동계 누수현황이 가장 많은 경상남도 지역은 입자가 작은 점토성분을 많이 포함하고 동상에 의한 피해를 많이 입는 지역으로 분류되기도 하였다.

이 절에서는 흙의 종류에 따른 동상민감성 분석을 위해 영국, 미국, 일본 등 여러 가지 국외의 동상민감성 시험방법에 대하여 고찰하였고, 뒤채움 흙의 종류에 따른 동상민감성 분석을 하였으며 동상민감성 분석을 대상으로 한 시료는 GW, GM, OH, SC, SM, SP, ML, SP-ML 이다.

2. 동상민감성 판정을 위한 실내동결시험

0℃이하의 기온에 장시간 노출된 흙의 간극수가 동결되어 토사 내에 아이스렌즈(ice lens)이 형성되고, 계속적으로 수분을 흡수하여 체적이 팽창되는 형상을 의미하는 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.

동상현상의 특성을 학문적으로 분석하기 위한 연구는 다각도로 이루어져 왔는데, 국외의 경우 1960년대부터 흙의 동상에 대한 민감성, 즉, 동상성을 평가하기 위한 실험적 연구가 수행되어 왔다. 흙의 동상특성을 분석하기 위한 기준화된 실내시험은 미국(american society for testing ad material: ASTM)이나 일본 (janpanese geotechnical society: JGS)등에서 제안하고 있으며, 1960년 이후부터 현재까지도 활용되고 있는 영국의 (transport and road research laboratory: TRRL) 동상시험기는 시료 준비가 용이하고 온도와 수분공급 등 실험 관리가 간편한 특징이 있으나, 실제 지반의 동상 거동으로 인한 처짐량 및 동결 특성 변화 예측이 불가능하고, 동결 시 몰드 표면과 동결토 사이의 점촉면에서 동착력이 발생하는 단점이 있어, 최근 이를 최소화한 흙의 동상특성을 분석할 수 있는 요소 실험 방법이 제시 되었다. 그러나 국내에서는 미국, 일본, 영국과 같은 흙의 동상민감성에 대한 정량적 판단기준은 아직 제시되지 않는 실정이다.

<표 3-4-1>은 각 기준별 실내동상시험의 특성이며, <표 3-4-2~4>는 흙의 동상민감성 판정기준이다. 각 실험방법 기준들은 한번에 실험할 수 있는 시료 개수, 동결방향, 몰드크기, 지하수 유입조건, 포화조건 등 많은 부분에서 차이점이 있다.

이처럼 국내에서는 강재모, 신은철, 박정준, 등이 동결 시 배수조건에 따른 동상예측, 동결토의 물리적 역학적 특성변화와 부동수분 특성, 도로동상방지층의 효용성 등 실내실험과 현장 실험을 통하여 동결토의 지반공학적 특성에 대한 연구를 수행하였다.

그러나, 현재 동상민감성 판정은 국외의 ASTM, JGS, TRRL방법을 시도하고 있으나, 각 실험방법에 따라 나타나는 동상민감성 판정기준이 달라져 국내환경 조건에 적합한 실험방법과 동상민감성 판정기준의 수립이 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 제작된 실내동상실험장치를 활용하여 현재 적용되고 있는 동상민감성 실험방법으로 흙시료에 대한 동결토의 온도변화와 동상량, 부동수분, 아이스렌즈를 측정한후 동상민감성 분석을 통해 판정기준을 고찰하였다.

국내에서는 신은철 등, 김영진 등, 최창호 등이 흙의 동상특성에 대하여 연구하였다. 그러나 국내에서는 미국, 일본, 영국과 같은 흙의 동상민감성에 대한 정량적 판단기준은 아직 제시되지 않는 실정이다. 표 <표 3-3-1>는 각 기준별 실내동상시험의 특성이며, <표 3-4-2 ~ 3-4-4>는 흙의 동상민감성 판정기준이다. 각 실험방법 기준들은 한번에 실험할 수 있는 시료 개수, 동결방향, 몰드 크기, 지하수 유입조건, 포화조건 등 많은 부분에서 차이점이 있다.

<표 3-4-1> ASTM, JGS, TRRL 기준별 실내동상시험 특성

<table>
<tr><td>Type</td><td>ASTM(D5918-06)</td><td colspan="2">JGS(0171, 0172)</td><td>TRRL</td></tr>
<tr><td>Freezing type</td><td>One side temperature falling type</td><td colspan="2">One side temperature falling type</td><td>One side temperature falling type</td></tr>
<tr><td>Direction of freezing</td><td>Top→Bottom</td><td colspan="2">Bottom→Top</td><td>Top→Bottom</td></tr>
<tr><td>Material of mold</td><td>Acrylic</td><td colspan="2">Acrylic</td><td>Brass</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Size of specimen</td><td rowspan="2">D=146 mm,
H=150 mm</td><td>0171</td><td>D=60 mm
H=20~40 mm</td><td rowspan="2">D=100 mm,
H=150 mm</td></tr>
<tr><td>0172</td><td>D=100 mm
H=50 mm</td></tr>
<tr><td>Condition of influent water</td><td>Closed system</td><td colspan="2">Open system</td><td>Open system</td></tr>
</table>

<표 3-4-2>ASTM 방법의 동상민감성 판정 기준

ASTM(U.S.A) Method		
Frost-susceptibility classification	Symbol	8-h Heave rate, mm/day
Negligible	NFS	< 1
Very Low	VL	1 to 2
Low	L	2 to 4
Medium	M	4 to 8
High	H	8 to 16
Very high	VH	> 16

<표 3-4-3> JGS 방법의 동상민감성 판정 기준

JGS(Japan) Method	
Judgment	Frost heave rate(mm/hr)
Low	less than 0.1
Medium	0.1~0.3
High	over 0.3

<표 3-4-4> TRRL 방법의 동상민감성 판정 기준

TRRL(U.K) Method		
Judgment	Frost heave ratio(%)	Frost heave rate(mm/hr)
Negligible frost susceptibility(NFS)	less than 12	less than 0.375
Possibly frost susceptibility(PFS)	over 12	over 0.375

3. 실내동상시험 방법 및 내용

가. 실내동상실험 장비

실내동상실험은 그림 <그림 3-4-1>과 같은 동상실험기를 이용하여 토질별 동상특

성을 관찰하였다. 동상실험기는 시료적재부, 물을 공급하는 수조부, 팽창량과 동상압을 측정하는 계측기를 설치하는 측정부로 구성되어 있다. 시료를 적재하는 적재부에는 총 4개의 공시체가 들어갈 수 있으며, 적재부의 바닥에는 두께 0.6 cm, 직경 10 cm의 다공판(porous stone)을 놓는다. 측정부는 동상팽창압 측정을 위한 로드셀(load cell)을 장착할 수 있는 거치대와 동상팽창량 측정을 위한 (linear variable differential transformers: LVDT)를 장착할 수 있는 거치대로 구성되었으며 부동수분을 측정할 수 있는 독일 IMKO 사의 (time domain reflectrometry: TDR) 함수량 측정기 모델인 TRIME-FM을 사용하였다.

본 연구에 사용된 실내동결시험 시스템은 온도센서에 의해 온도를 제어하며 전기히터에 의하여 일정한 온도를 유지할 수 있게 제작되었다. 몰드는 일축 방향으로 동상이 진행되도록 외벽에 보온재로 표면을 처리하였다. -20℃에서도 몰드 외벽의 온도가 영상 1℃~3℃를 유지할 수 있다. LVDT를 장착한 시료에는 직경 10 cm의 원형 아크릴판으로 LVDT 측정판을 만들어 시료 위에 올려놓아 최대한 적은 하중으로 시료 팽창량의 구속을 줄였으며 시료가 팽창했을 때 가장 많은 팽창이 일어난 부위를 효과적으로 측정할 수 있게 하였다.

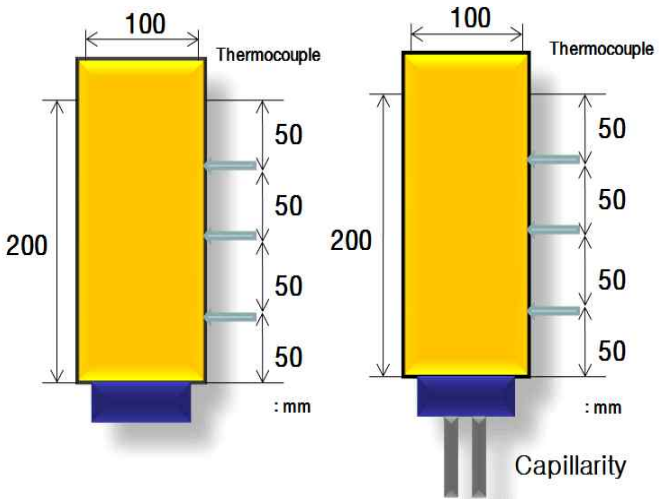
시료의 동결 온도는 1 cm 간격으로 설치한 써머커플로 측정할 수 있다. 시료에 일정한 수두상태에서 물을 공급하는데, 이때의 압력은 시료의 높이와 같다. 동결되는 동안 물은 시험 시료의 안으로 혹은 밖으로 자유로이 이동한다.

실내동결시험의 수분공급 시스템으로는 폐합시스템과 개방형시스템이 있다. 폐합시스템(close system)은 동결하는 동안 바닥층에 함유된 수분 외에는 더 이상의 물을 공급하지 않거나 인위적으로 공급하더라도 상부에서 인공강우를 투여하는 형태이다. 동결지역에서 흙 속의 간극에 아이스렌즈를 형성시키는데 다짐상태나 함수비, 간극의 크기에 따라서 아이스렌즈가 생기지 않는 경우도 있다. 일단 아이스렌즈가 간극에 형성되면 동결전면부에서 함수비의 재배열이 발생된다. 이로 인해 동결전면부 근처에서 함수비 증가와 더불어 건조밀도가 감소하게 되며 얼음결정은 개방형 시스템보다 두께가 얇아서 동결깊이는 상대적으로 작게 나타난다.

개방형시스템(open system)은 일반적으로 동결하는 동안 인위적으로 바닥층의 하부에서 상부로 압력을 통하여 지속적인 물의 공급을 받는다. 이러한 시스템은 일반적으로 자연 상태의 강우조건에 의한 폐합형 시스템과 비교하여 동결 시 바닥층 하부에서 상부로 이동되는 수분이 계속되므로 아이스렌즈의 성장이 증가하고 동결깊이가 깊어지고 동상현상이 크게 발생된다. 개방형 시스템에서 동결전면부를 아래로 이동함으로서 물은 흙 속의 간극을 통하여 표면에서부터 끌어올린다. 동결 시 동결위치나 동결전면부로 수분이 이동 되어 흙 속에 아이스렌즈가 생기게 되어 동상현상이나 동결깊이가 발생하게 된다. 그림 3.3는 실내동결실험 공시체의 폐합시스템과 개방형시스템의 모식도 이다.

본 시험기는 ASTM에서 제작한 동상시험기와 동일한 원리에 의하여 제작하였다. 원형 공시체 아크릴 셀의 윗부분과 측벽에 시험기 벽체로부터 찬공기가 계속 공급

되어 시료를 동결시킨다. 원형 아크릴 셀 밑부분의 구멍과 몰드 바닥에 뚫린 구멍을 통해 수조와 연결된 연결관을 통하여 물이 계속 공급된다.



<그림 3-4-1> 실내동상시험 공시체 구성 모식도



(a) 실내동결실험시스템 (b) 변위량 측정 (c) 팽창압 측정 (d) 부동수분량 측정 (e) 온도 측정

<그림 3-4-2> 실내동결시스템의 계측기

수조의 물은 시험기 외부에 설치된 물탱크로부터 계속 공급되며, 물탱크 내부에 냉각선이 설치되어 있어 물의 온도를 항상 4℃로 일정하게 유지할 수 있다. 또한, 수조의 수면과 공시체 바닥면과의 높이를 임으로 조절할 수 있다. <그림 3-4-2>은 동결융해 실험 장치의 전체 현황을 나타낸 것으로서 최저 -70℃에서 최고 100℃까지 임의로 온도의 크기, 지속시간 등을 조정할 수 있다. 또한 <그림 3-4-2>의 (b),(c),(e)의 센서들은 <그림 3-4-2>의 자동계측장비에 연결되었다. 또한 <그림 3-4-2>4의 (d) 부동수분은 노트북에 연결하여 측정 프로그램을 통하여 측정하였으

며, 모든 데이터는 1시간 간격으로 측정하였다.

공시체에 1 cm 간격으로 삽입한 온도계측 장비(thermocouple)는 -50℃~1300℃범위까지 측정이 가능한 K형식이 본 연구에 가장 적절하다고 판단되어 사용하였다. 대기온도는 바람의 영향에 의한 기온의 순간저하를 방지할 수 있는 대기용 온도센서를 실내동상실험기 안에 부착하였다. 온도센서에서 감지한 온도를 설정된 계측시간에 따라 측정하는 장비이다.

측정범위는 0.1℃까지 측정할 수 있으며 설정된 시간마다 연결된 온도센서의 온도를 감지할 수 있고 매순간의 평균온도를 확인할 수 있다.

측정범위는 0.1℃까지 측정할 수 있으며 설정된 시간마다 연결된 온도센서의 온도를 감지할 수 있고 매순간의 평균온도를 확인할 수 있다. 온도센서를 통해 측정되는 공시체 내부의 온도를 1시간별로 관찰하였다. 이 연구에서 사용된 온도센서는 얇은 전선형으로 유연성이 있어 공시체 내부에 설치하여 다짐을 할 수 있다.

시료의 동상팽창량은 LVDT를 이용하여 측정하였다. LVDT는 0.005 mm의 변화도 감지할 수 있으며 총 변화량 5 mm 까지 측정 가능하다. <그림 3-4-3>는 실험에 사용된 LVDT의 사진이다.



<그림 3-4-3> 동상팽창량 측정장비(LVDT)

Taber는 실험실에서 동결이 진행 될 수 있는 충분한 온도로 동결을 시키고, 아이스렌즈가 성장할 수 있도록 수분을 계속 공급함과 동시에 하중을 계속적으로 증가시켜 상부에서 하부의 단일방향으로 동결 시켜가며 동결을 진행하였다. 또한 Taber는 압력의 증가는 얼음결정의 성장에 관계되고, 과도한 동상은 동결될 때 물의 응결에 의해 설명될 수 있으며, 특히 물의 공급이 제한되었거나 흙 입자가 매우 불투성이라면 물이 응결로 인하여 동결될 때 지표면 아래에서는 수축균열이 발생하며 융해에 의한 얼음의 분리를 통하여 지표면에 집중된다.

이번 연구에서 동상팽창압은 <그림 3-4-4>의 로드셀을 이용하여 동상팽창압을 자동 측정하였으며 이 장비는 -30℃이하의 온도에서 계측값의 정확성을 가질 수 있도

록 특수 제작되었으며, 1 kPa단위까지 정밀 측정이 가능하다. 최대 용량은 200 kPa의 압력까지 측정이 가능하다.



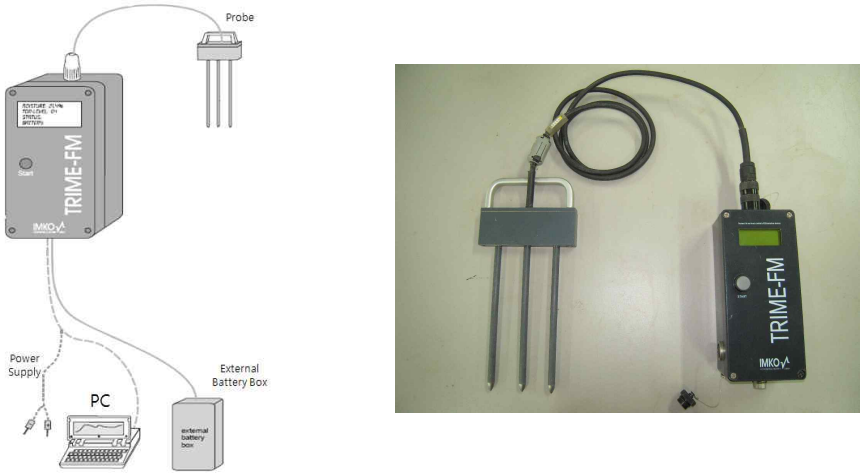
<그림 3-4-4> 동상팽창압 측정장비(load cell)

TDR 장비의 기술은 Topp et al.(1980), Patterson and Smith(1980) 등이 제시한 원리를 인용하였다. 유전상수는 TDR 장비를 이용하여 다공매체를 통한 전자기파의 전달속도로부터 결정된다. TDR을 이용하여 습윤토의 유전상수의 측정은 Davis and Chudobiak(1975)에 의해 처음으로 제안되었다. TDR 장비는 빠른 전압을 제공하는 파형발생기가 높은 빈도의 신호를 낮은 빈도로 전달하는 샘플러를 통하여 오실로시코프나 자동기록장치로 보내어지는 장비이다. 이 TDR 장비는 이 신호를 단계적으로 보내어 전달선 길이와 전송시간을 측정하는 장비이다.

Patterson and Smith(1980)에 의하면 전송시간은 평행선 사이의 재료에 의해 주된 영향을 받는다고 제시하였다. 단 평행선으로부터의 거리가 2S가 되면 이는 무시해도 무관하고, 프로브의 강성은 로드 직경(d)의 함수이다. 예를 들면, 평행선의 간격(S) 2, 2.5, 5 cm이고, 로드 직경(d) 0.3, 1 cm가 사용되지만, 위 연구자들은 S=5 cm, d=1.3 cm를 사용하였다.

TDR은 크게 파형발생기와 오실로스코프로 구성되어 있다. 파형발생기에서 발생된 구형 전기신호가 전송선을 통하여 흐르게 되는데 이 신호가 전송선을 통하여 흐르는 중, 전송선의 단면이 변화하면 그 지점의 임피던스가 변하게 되고 그 구간에서 전기신호가 반향되어 오르게 된다. 이 때의 파형을 시간영역으로 측정하는 장치이다. <그림3-4-5>에서 나타낸 TDR 장비는 독일의 IMKO사 제품(Trime FM-version P3)이고, 측정용 probe를 동토 속에 넣고, 시험기 내에서 전자파를 발생시키면 전자파는 probe의 길이를 따라 왕복하면서 전자파의 속도를 계산함으로써 흙의 유전율 상수를 측정하게 된다. 동토를 구성하는 요소인 토립자, 얼음, 간극수, 공기 등의 유전율이 서로 다른 원리를 이용하여 동토의 체적함수비(부동수분량)를 환산해 낸다. TDR장치를 이용하여 동토의 부동수분을 측정하는 방법은 간단하다.

즉, 흙 시료 속에 TDR probe와 온도측정용 센서를 삽입한 후 흙 시료를 온도변화가 가능한 냉동상자 속에 넣는다. 냉동상자의 온도변화에 따라 흙 시료의 온도가 변화하며, 해당 온도에서 24시간 경과하였을 때 TDR의 스위치를 누르면 3분 이내에 자동적으로 부동 수분이 계산되어 TDR장비의 화면상에 숫자로 표시된다.



<그림 3-4-5>동결토의 부동수분 측정장비(TDR)

즉, TDR장비는 자체적으로 전자파를 발생시키고, 프로브의 끝단까지 왕복하는 시간을 측정하여 유전율을 계산하며, 유전율을 이용하여 해당시료의 부동수분을 계산한다. 부동수분의 값은 동일온도에서 10회 측정하여 평균값을 취한다. TDR장비에는 부동수분이 체적함수비로 나타나는데, 학자들에 따라서는 이를 중량 함수비로 환산하여 표시하는 사람도 있다. 체적함수비와 중량함수비는 각각 식 (3-4-1) 및 식 (3-4-2)로 나타낼 수 있다.

$$\text{체적함수비 (w)} \quad V \times 100\% \qquad (3\text{-}4\text{-}1)$$

여기서 V_w: 시료가 포함하고 있는 수분의 체적

V: 시료 전체의 체적

$$\text{중량함수비 (w)} = \frac{W_w}{W_s} \times 100\% \qquad (3\text{-}4\text{-}2)$$

여기서 W_w : 시료가 포함하고 있는 수분의 중량

W_s : 건조된 흙시료의 중량

체적함수비와 중량함수비의 관계는 식 (3-3)과 같다

$$wv=w^{r_d} \qquad (3\text{-}4\text{-}3)$$

여기서 r_w : 물의 단위중량

r_d : 흙 시료의 건조단위 중량 $(=\frac{W_s}{V})$

나. 실내동상시험 순서

본 실험에서는 KS F2312 시험법에 의거한 흙의 다짐 시험 방법에서 도로 노상토의 다짐시험 시 사용하는 D다짐 방법을 사용하여 구한 최대건조단위중량과 최적함수비를 이용하여 다짐도 100%로 시료를 계량하여 공시체를 구성하였으며 수분공급시스템으로는 개방형 시스템을 이용하여 유입수가 계속되도록 하여 동상발생이 원활하도록 하였다. 일반적으로 수분공급시스템은 현장 시료로 실험 할 때에는 그 지역의 지하수 조건에 따라 개방형과 폐쇄형의 방법을 결정하지만 이번 실험에서는 토질에 대한 동상 특성을 확인하는 것이기 때문에 도로 절토부나 하천 유역 등 지하수위가 높아 동상에 취약한 지역의 상태를 재현하기 위하여 개방형 방법으로 실험을 진행하였다. 시료는 5층으로 다짐하였으며 다짐 후 공시체를 4일동안 수침시켜 시료가 최대한 포화되도록 하였다. 시료 수침 후 적재부에 모두 4개의 시료를 적재하여 각각 온도, 동상팽창량, 동상팽창압, 부동수분을 측정하였다. 실내동상실험의 경계온도 조건은 실내동상실험 시작 후 공시체의 시료상부 1 cm의 온도가 0℃가 될 때 까지 실험기 내부온도를 -12℃로 유지하다가 시료상부 1 cm의 온도가 0℃가 된 후 실험기 내부온도를 -3℃로 변화시켜 유지시킨다. 또한 유입수의 온도는 4℃를 항상 유지할 수 있도록 하였다. <표 3-4-5>는 실내동상실험의 경계온도 조건이다.

<표 3-4-5> 실내동상실험의 온도경계 조건

Condition	Temperature of in the testing equipment (℃)	Temperature of influent water (℃)
Befor freezing of below 1 cm the top soil	-12℃	4℃
After freezing of below 1 cm the top soil	-3℃	4℃



(a) 실리콘 패드 (b) 실리콘 패드 삽입

<그림 3-4-6>몰드 측벽에 동착력 감소를 위한 실리콘 패드

또한, 실내동상실험의 동결방식은 각 기준별 특성에서와 같이 편면온도강하식으로 하였으며, 시료의 동결방향은 ASTM과 TRRL법에서와 같이 상부에서 하부로 동결시켰다<표 3-4-6>. 그 이유로는 지반의 자연적 동결메커니즘을 재현하는 것이다. 그러나 상부에서 하부로 동결시킬 때에는 상부가 동결되며 몰드와 시료 사이에 동착력이 생겨 동상력에 저항하게 된다. 이 단점을 보완하기 위하여 본 실험에서는 몰드와 시료 사이에 신축성이 있는 실리콘 패드를 삽입하여 몰드와 시료 사이의 동착력을 최소화 시켰다. <그림 3-4-6>은 실리콘 패드의 사진이다. 이번 실내동상실험의 특성은 <표 3-4-6>과 같다.

<표 3-4-6> 실내동상실험의 특성

Type of freezing	One side temperature falling type
Direction of freezing	Top→Bottom
Material of mold	Acrylic
Size of specimen	D=100mm, H=200mm
Condition of influent water	Open system

본 시험의 계측결과로 동결시 시료의 온도변화, 동상팽창압, 동상팽창량, 부동수분량 등의 계측값과 계측값을 이용하여 구한 동상비를 통하여 동결 융해 전후의 지반공학적 시료의 특성을 평가하였다. 그림 3.9는 실내동상실험 순서도이다.

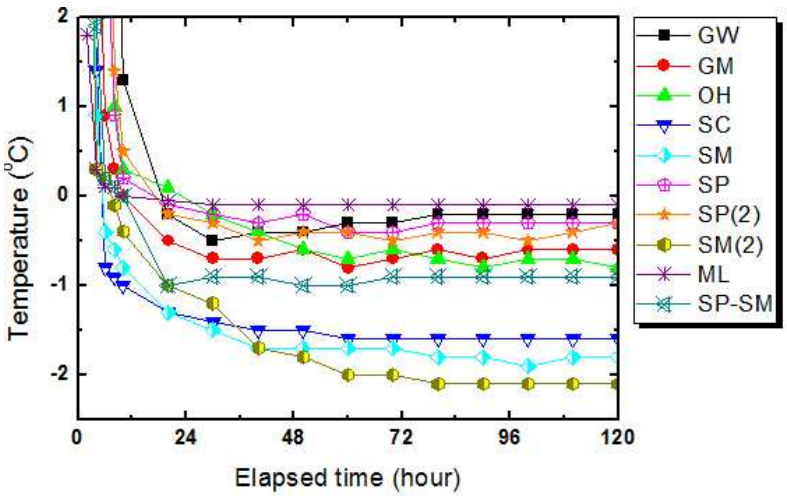


<그림 3-4-7> 실내동상실험 순서도

4. 상수도관 되메움 흙의 동상특성 분석

가. 흙의 온도변화 특성 분석

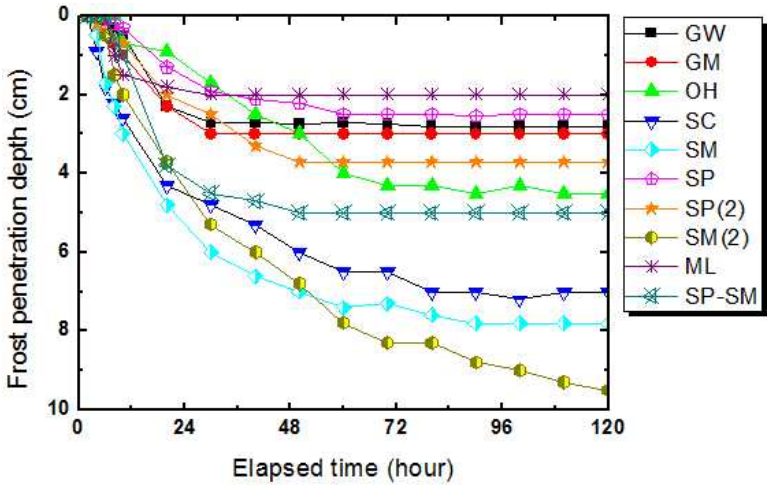
본 연구에서는 공학적 특성에 의해 분류된 각각의 흙시료에 대하여 온도 변화를 관측하고, 몰드내에 써머커플을 위치시켜 경계온도조건에 따른 변경시간을 확인 후 자동계측장치를 통하여 시료의 온도를 확인하였다. 1시간마다 측정된 시료 상부 1 cm의 온도변화 특성은 <그림 3-4-8>과 같다.



<그림 3-4-8> 토질종류에 따른 시료 상부 1 cm의 온도변화

시료 상부 1 cm의 온도가 0℃가 되어 경계조건에 따라 실험기 내 온도를 -3℃로 설정한 이후의 시료 상부 1cm 의 최저온도는 SM(2)는 -2.2℃, SM은 -1.9℃, SC는 -1.6℃로 나타났으며, SP-SM은 -1.0℃, OH는 -0.8℃, GM은 -0.8℃, SP(2)는 -0.6℃, SP는 -0.3℃, ML은 -0.1℃로 나타났고, GW의 경우 -1.5℃까지 내려갔지만 시간이 지남에 따라 점점 온도가 상승하여 -0.2℃정도에서 정체되다가 마지막에는 0.2℃정도까지 상승하였다. 즉, 같은 실험기 온도에서도 시료상부표면에서 깊이 1 cm의 온도는 시료에 따라 최대 2.1℃의 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있었다. 실험 결과 0.074 mm체를 통과한 실트 및 점토 함유량이 많은 사질토인 SM(2), SM, SC의 최저온도가 낮음을 알수 있었다. 자갈질인 GM은 모래질인 SM(2), SM, SC시료보다 최저온도가 더 높게 나타났으며, 같은 자갈질의 경우에서는 GW보다 0.074 mm체를 통과한 실트 및 점토 함유량이 많은 GM 시료의 최저온도가 더 낮게 나타났고, 모래질인 SM(2), SM, SC, SP, SP(2) 시료에서도 0.074 mm체를 통과한 세립분 함유량이 많을 때, 시료의 최저온도가 더 내려감을 확인하였다. SP와 SP(2) 시료는 모래질이지만 실트질 함량이 GM과 GW 보다 더 적기 때문에 시료의 최저온도가 GM보다 더 높고 GW와 비슷한 경향을 나타내는 것으로 판단된다. 그리고 OH와

ML 시료의 경우에는 0.074 mm 통과량이 50%가 넘었지만, 0.002 mm이하인 점토 크기 입자량 또한 다른 모래질 흙보다 많아 투수성의 저하로 인하여 SM(2), SM, SC 시료보다 최저온도가 더 높게 나타났으며, 특히 ML의 경우는 0.002 mm이하의 점토 함유량이 10% 정도로서 다른 모래질, 자갈질 흙은 0.08%에서 2.0%까지, OH는 2.5%정도인 것과 비교하면 점토함유량이 많음으로서 투수성이 매우 저하되어 시료의 온도 강하에 영향으로 판단된다.



<그림 3-4-9> 상수도관 뒤채움 토질종류에 따른 동결깊이

<그림 3-4-9>는 각 시험시료의 동결깊이를 나타낸 것으로, SM은 9 cm, SC는 7.5 cm, OH는 4.5 cm, GM은 4 cm, SP(2)는 3.7 cm, GW와 SP는 2.5 cm, SM(2)는 9.5 cm, ML는 2 cm, SP-SM은 5 cm의 최대동결깊이를 보였다. 이는 상기에서 제시한 시료 상부표면에서 깊이 1 cm의 최저온도와 비교 시 비슷한 양상을 나타내었다. 시료의 온도와 동결깊이를 고려하였을 때, 시험 시료 중에서 SM(2), SM, SM, SC시료의 동상성이 높고 SP-SM, OH, GM시료의 동상성이 중간정도이며 SP, SP(2), GW, ML시료는 동상성이 작음을 확인할 수 있었다.

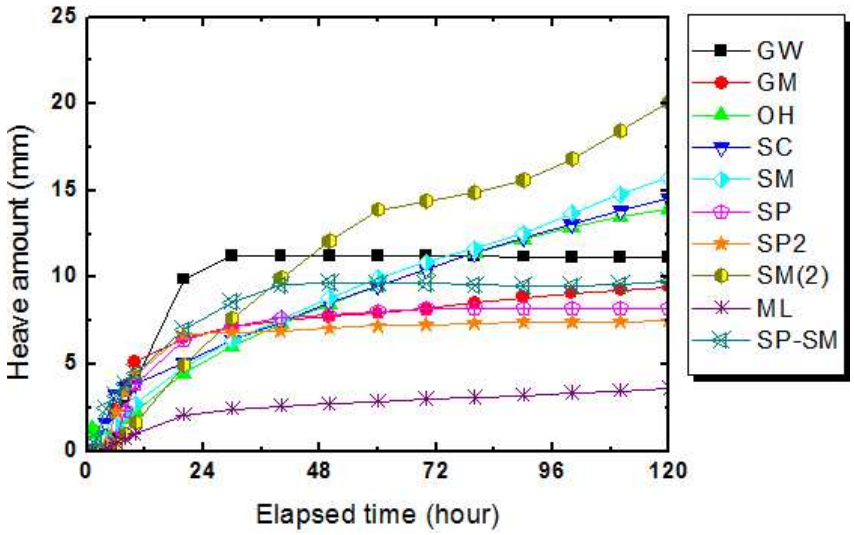
나. 토질의 종류에 따른 동상팽창량 분석

동상팽창량은 흙의 동상 특성을 파악하기 위한 대표적인 지표로서 동상민감성 판정에 이용하는 동상비(frostheave rate)의 산정에 이용되는 중요한 변수이다. 일반적인 흙의 성질은 일정한 영하의 온도에서 충분한 수분의 공급이 지속되면 동상팽창량은 점차 증가한다. 이러한 동상특성은 시료의 종류에 따라 단위시간 동안의 동상 팽창량을 의미하는 동상비에 의존하게 되며 이는 동상 민감성을 판단하는 지표로 사용된다.

<그림 3-4-10>은 흙의 종류에 따른 동상팽창량을 나타낸 것으로서, 지속시간 120시간 동안 각 시료의 최대 동상팽창량은 SM(2)가 20.10 mm, SM이 15.73 mm, SC

는 14.56 mm, OH는 13.96 mm, GW는 11.18 mm, SP-SM은 9.77 mm, GM은 9.44 mm, SP는 7.59 mm, SP(2)는 7.48 mm, ML은 3.61 mm로 나타났다. 최대 동상팽창량에서 SM(2), SM, SC의 경우에는 시료 상부표면에서 깊이 1 cm 위치에서의 최저온도, 그리고 동결깊이와 비슷한 양상을 나타내었다.

GW의 경우는 상부 1 cm 최저온도와 동결깊이에서의 경우 가장 동상성이 낮다는 결과가 도출되었음에도 불구하고 최대 동상팽창량에서는 동상성이 중간정도의 판정기준 결과가 나타났으나, 경계온도조건이 -12℃에서 -3℃로 바뀐 이후의 최대 동상팽창량은 2.35 mm로 나타나 시료내의 간극수가 빠르게 동결되어 일정시간이 지난 후에는 동상거동이 소멸됨을 알 수 있었다.



<그림 3-4-10> 토질종류에 따른 동상팽창량

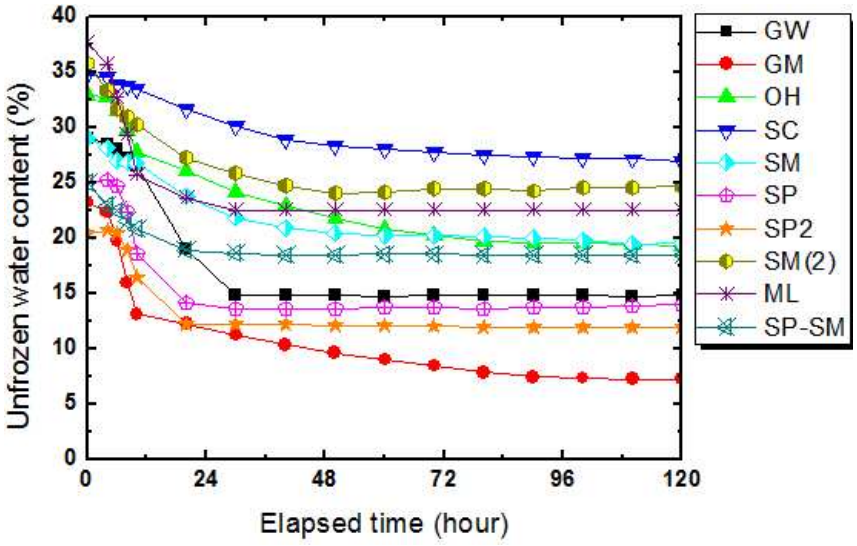
실험기 내의 경계온도 조건이 -3℃로 바뀐 이후의 최대동상팽창량을 살펴보면, SM은 14.26 mm, SC는 12.01 mm, OH는 9.31 mm, GM은 4.30 mm, SP는 1.33 mm, SP(2)는 1.64 mm, SM(2)은 19.49 mm, ML은 2.64 mm, SP-SM은 5.93 mm로서 상기 시료 상부에서 깊이 1 cm까지의 최저온도를 보이는 온도변화 특성과 동결깊이 측정값의 결과와 거의 비슷한 양상을 나타내었다.

그러나 OH의 동결깊이 및 상부 1 cm 온도의 경우 SP-SM, GM와 비슷하였으나 팽창량은 이들 시료보다 더 높게 나타났다. 이것으로 GW의 경우 경계온도 조건이 바뀐 후의 동상팽창량으로 비교하였을 때 SP, SP(2)와 같이 동상성이 낮음을 확인할 수 있었다.

다. 토질의 종류에 따른 부동수분 특성

<그림 3-4-11>는 동상 발생조건 중 하나인 온도, 수분, 흙의 상관관계 중 수분의 영향을 규명하기 위한 부동수분의 특성을 나타낸 것이며, 여기서 부동수분은 체적

함수비로 표현된다. 초기 부동수분은 시료에 따라 각각 다르게 나타났으며, 동상발현이 끝난 후의 부동수분도 초기 부동수분과 마찬가지로 그 감소폭이 다양한 결과를 나타낸 후 일정한 값으로 수렴하였다.



<그림 3-4-11> 토질 종류에 따른 부동수분

그러나 실험결과를 살펴보면 동상특성이 높은 시료인 SM, SC, OH, SM(2), SP-SM의 경우 동상발현 초기인 일시적 동상영역과 정상상태 동상발현구간 모두 부동수분이 완만하게 감소하다가 장기적인 동상 영역에 다다르면 일정한 값에 이르게 되었다. 동상특성이 중간정도인 GM의 경우는 일시적 동상영역에서 급격한 부동수분의 감소를 보이며, 정상상태 동상발현구간에서 완만한 감소를 보이다가 장기적인 동상영역에서 일정한 값에 도달하였다.

또한, 동상특성이 낮은 시료인 GW, SP, SP2, ML의 경우 일시적 동상영역에서 급격하게 부동수분이 감소하였으며 정상상태 동상발현구간과 장기적인 동상영역의 구분 없이 부동수분이 일정한 값에 도달 후 변하지 않는 현상이 나타났다. 이는 10개의 시료 중에서 동상특성이 높은 SM, SM(2),SC, OH, SP-SM의 경우, 실험이 개방형 시스템으로 이루어졌기 때문에 모세관 현상에 의하여 수분이 계속 공급됨으로써 부동수분의 감소가 완만하게 이루어진 것으로 판단된다.

GM의 경우, 초기 일시적 동상영역에서는 모세관현상에 의하여 공급되는 수분량보다 매우 많은 양의 수분이 동결되어 부동수분량이 급격히 감소하였지만 정상상태동상발현구간에 도달하면 동상속도가 감소하고 부동수분감소율이 줄어든 것이다. 동상특성이 낮은 GW, SP, SP2,ML의 경우 모세관 현상이 거의 일어나지 않아 초기 시료가 포함하고 있던 수분이 동결된 후에는 동상이 거의 일어나지 않은 것으로 판단된다.

라. 토질의 종류에 따른 동상팽창압 특성

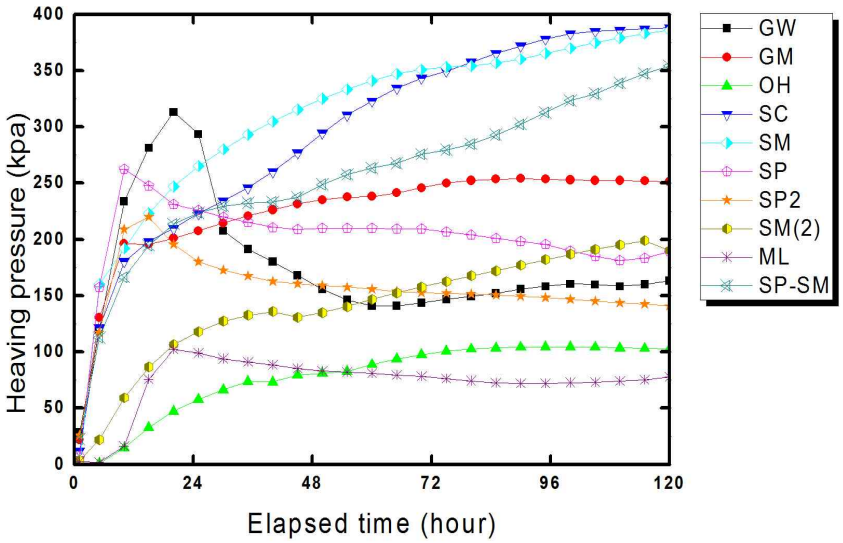
동결토압(frost heaving pressure)이란 흙이 0℃이하로 냉각되는데 따른 토양동결로 발생되는 토압의 증가를 말하며, “동토압”, “동결압” 또는 “동결팽창압”이라고 부른다.지반의 동결팽창은 수평방향뿐만 아니라 수직방향으로도 발생하며, 지표면으로의 동결팽창에 의한 동결토압을 동상력이라고 한다.

동상팽창압의 측정 결과 동결온도 지속시간에 따른 동상팽창압 변화는 <그림 3-4-12)와 같다. 최대 동상팽창압의 크기는 SM시료 394.25 kPa, SC시료 387.14 kPa, OH시료 111.79 kPa, GM시료 253.09 kPa, GW시료 324.60 kPa, SP시료 270.66 kPa, SP2시료 227.52 kPa 로 나타났다.

동상팽창압 특성의 경우에서 위에 기술된 다른 특성들과 상반되는 결과가 나온 시료는 OH시료와 GW, SP, SP2시료이다. 이러한 결과가 나온 이유로는 동상팽창압의 크기는 시료의 동결깊이 및 동상팽창량과도 상관관계가 있지만 시료 자체 강도의 영향을 받는 것이라 판단된다.

OH시료의 경우 유기질의 영향으로 최대건조단위중량이 다른 시료의 경우 1.8~2.1 사이에 있는 것과 달리 매우 낮은 1.27에 불과하다. 이것으로 인해 시료 자체의 강도가 매우 낮아서 시료의 동상팽창압이 매우 작게 나타난 것이라 판단된다.

GW, SP, SP2 시료의 경우 중간 정도의 동상팽창압이 발생하였으나, 동상팽창량과 같이 실험기 내부온도가 -3℃로 바뀐 이후에는 동상팽창압이 불규칙하게 감소하는 경향을 보인다. 이것은 처음의 온도조건인 -12℃에서 시료 내의 부동수분이 급속 동결되며 동상이 발생하였지만 -3℃로 온도조건이 바뀐 이후에는 동결된 간극수 이외에 모세관 현상에 의한 동결이 일어나지 않아 동상팽창압이 불규칙하게 감소하는 현상을 보이는 것이라 판단된다.

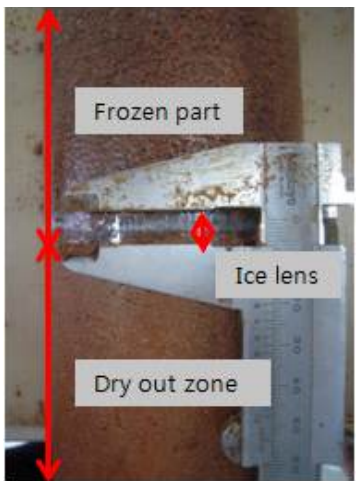


<그림 3-4-12> 토질 종류에 따른 동상 팽창압

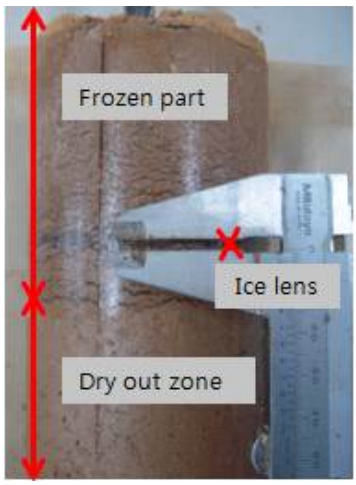
0℃이하의 온도에서 저면의 흙속에 부동한 상태의 수분이 존재하면 물은 모세관 현상에 의해 일정하게 흙의 표면을 따라 상승하여 상부로 유입되면서 동상을 일으킨다.

정상적인 동상발현영역(stationary frost heaving)에서는 간극수의 결빙이 점차 증가하고 시료 내부에 아이스렌즈가 증가하면서 동상 팽창량이 증가하게 된다.
즉, 시료 내의 아이스렌즈 형성과 그 부분의 영역 확대로 인하여 동상 특성이 변화하는 것이다. <그림 3-4-13>은 동상성 시료와 비동상성 시료의 아이스렌즈 형성 전경을 나타낸 것으로 SM은 아이스렌즈 형성이 6.1 mm로 뚜렷하게 나타났고, SM(2) 역시 3.7 mm의 아이스렌즈가 나타났다.

즉, 동상에 민감한 시료는 아이렌즈의 형성이 뚜렷하고 아이스렌즈 부분의 영역확대가 확연히 육안으로 확인할 수 있었다. 그러나 동상에 민감하지 않은 시료인 ML과 SP-SM은 아이스렌즈의 형성이 매우 작아 육안으로 확인할 수가 없었다.



(SM) Ice lens 6.1 mm

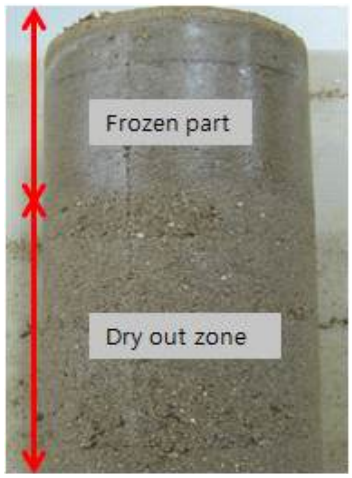


(SM2) Ice lense 3.7 mm

(a) Frost-susceptible soils



(ML) Non-freezing soil



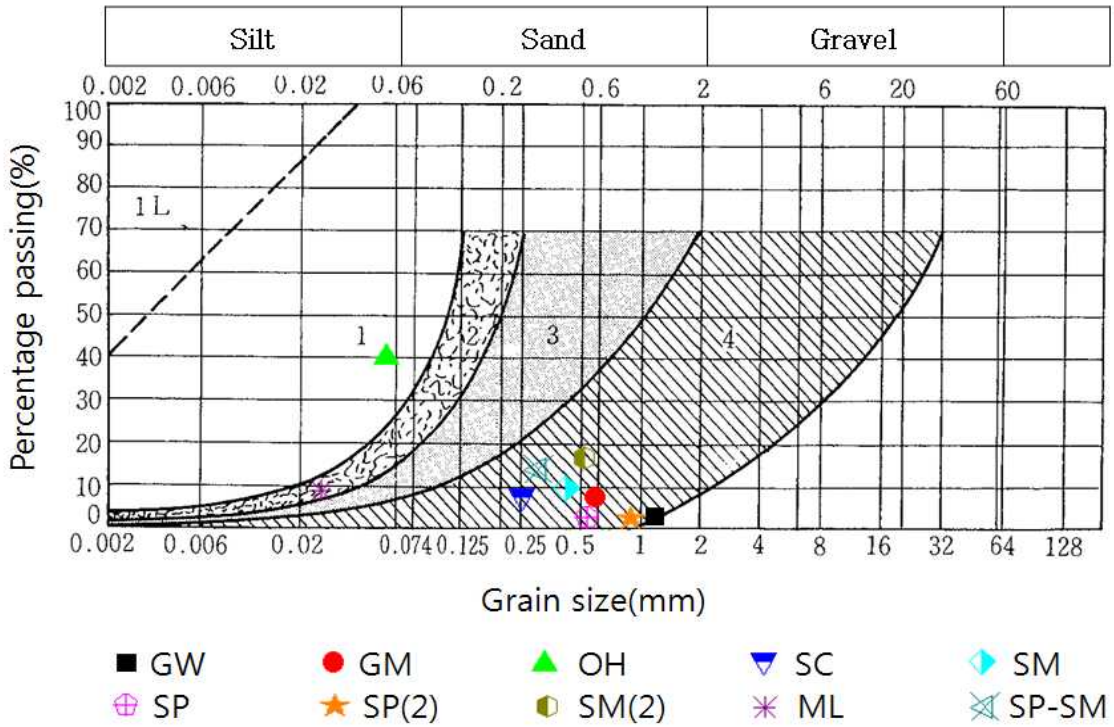
(SP-SM) Non-freezing soil

(b) Non frost-susceptible soil

<그림 3-4-13>동결시료의 아이스렌즈 형성

라. 동상민감성 판정

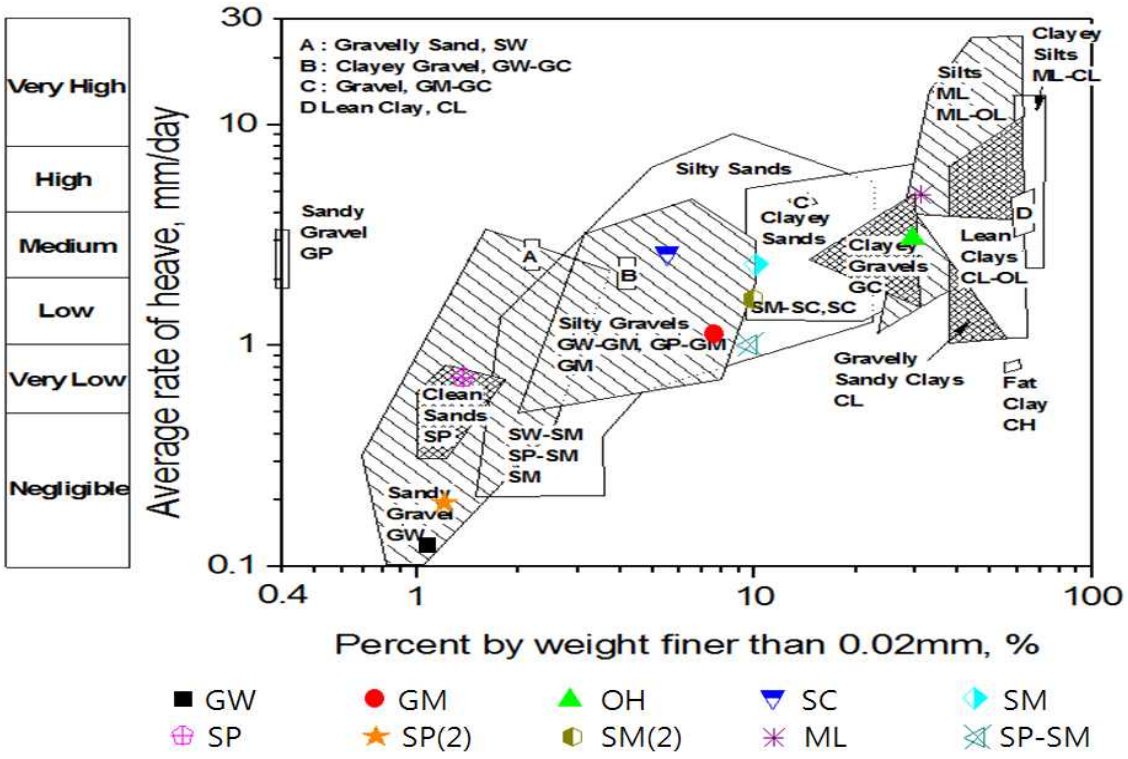
흙의 동상민감성을 판정하는 방법에는 여러 가지 방법들이 제안되었지만 실험 결과의 동상민감성 판정에는 핀란드 도로국의 세립분의 함유량, 균등계수, 그리고 평균입경에 의한 동상민감성 판정법을 이용하여 판정하였다.



<그림 3-4-14> 핀란드 도로국의 방법에 의한 동상민감성 판정

<표 3-4-7> ASTM, JGS, TRRL 방법에 의한 동상민감성 판정 결과

		GW	GM	OH	ML	SC	SM	SM (2)	SP	SP (2)	SP-SM
Frost heave rate mm/day		0.002	0.045	0.117	0.102	0.105	0.119	0.104	0.033	0.010	0.025
Frost susceptibility classification	ASTM	NFS	VL	L	NFS	L	L	L	NFS	NFS	L
	JGS	low	low	medium	medium	medium	medium	medium	low	low	low
	TRRL	NFS	NFS	NFS	NFS	NFS	NFS	NFS	NFS	NFS	NFS



<그림 3-4-15> 미 공병단 실내 동상시험 결과와의 비교

동상판정 결과, <그림 3-4-14>에 나타낸 바와 같이 OH만이 1번 영역 범위 안에 들어 동상에 민감한 흙으로 나타났고, 다른 흙 시료는 모두 동상에 민감하지 않은 흙으로 분류되었다. <그림 3-4-15>에 나타낸 미공병단 실내동상실험 결과 도표내에 본 연구에서 수행한 실내동상실험 결과를 표시하여 토질을 확인해 본 결과, 대체적으로 그 범위 안에 속하였으나, 미공병단에서의 동상비 산정 방법과 본 연구에서 수행한 실험결과를 JGS(2003) 방법을 통하여 결정한 방법과는 다소 다른 결과를 도출하였다.

<표 3-4-7>에 제시된 ASTM, JGS, TRRL법의 흙의 동상민감성 판정 기준은 모두 단위시간 동안의 동상팽창량을 의미하는 동상비(frost heave rate)를 동상민감성을 판단하는지표로 사용한다. ASTM 방법의 경우 -12℃로 동결시키는 8시간 동안의 동상량으로 동상비를 산출하지만, 본 실험의 경우는 온도조건이 일정한 사이클을 가지고 변화하는것이 아니라, 시료표면 1 cm 동결시에 단 한번 바뀌기 때문에 JGS 방법으로 동상비를 산정하였다. 산정된 동상비를 ASTM, JGS, TRRL의 동상민감성 판정기준을 사용하여 각 시료의 동상민감성을 판정한 결과는 <표 3-4-7>과 같다. GW, SP, SP(2)는 ASTM방법으로 동상민감성을 판정한 결과 NFS(비동상성), JGS 방법으로 판정한 결과는 Low(낮음)이 나왔으며, GM의 경우 ASTM방법에서는 VL(매우낮음), JGS방법에서는 Low(낮음)이 도출되었다. OH, SC, SM은 ASTM 방법에서는 L(낮음), JGS방법에서는 Medium(중간)의 결과가 나타났으며, TRRL법으로 동상민감성을 판정한 결과는 모든 시료가 NFS(비동상성) 흙으로 분류되었다.

미국의 ASTM, 일본의 JGS, 영국의 TRRL 방법에 의한 동상민감성 판정을 하였으나, 각 실험방법 뿐아니라 동상민감성 판정기준 결과도 상이하게 도출되어 국내에 적합한 실험법과 동상민감성 판정기준의 수립은 반드시 필요한 실정이다. ASTM 시험법의 단점은 실내동상시험의 경계온도 조건에서 동결시간이 매우 짧다는 것이다.

즉, 한 사이클에서 2번의 동결과 융해가 반복되는데 동결시 시간이 -3℃에서 24시간 후, -12℃에서 8시간으로 총 32시간밖에 안되어 최대동상량이 발생하기 전에 동결이 종료되고 융해되어버리는 현상이 발생한다. JGS 방법의 단점은 동결방향이 하부에서 상부로 동결이 진행시켜 동착력에 의한 실험오차는 감소하였지만 자연상태 지반의 동결방식과는 반대가 되어 결과의 효용성 문제를 판단할 수 있다. TRRL 방법은 동결온도가 우리나라의 겨울철 평균 기온에 비하여 매우 낮은 -17℃라는 것이다. 온도조건에 따라 같은 흙이라도 동상발생량이 매우 차이가 생기기 때문에 국내 온도조건에서는 다른 양상을 보일 수 있다.

따라서 상기 제시된 단점을 보완하기 위하여 본 실험에서는 동결시간을 동상팽창량과 동상팽창압, 부동수분이 일정한 값으로 수렴하거나 감소될 때까지 계속 유지하였으며, 동착력의 영향을 최소화하기 위하여 신축성 있는 실리콘 패드를 삽입하였다. 또한 TRRL법의 -17℃의 온도조건은 국내의 일반적인 겨울철 기온에 비하여 낮은 온도임을 판단하여 -12℃와 -3℃의 경계온도조건으로 실험을 실시하였다.

5. 소결론

본 절에서는 동결지반에서의 상수도관 거동특성 파악에 앞서, 토질별 동상민감성 시험을 수행하였다. 실내동상실험을 통하여 동결토의 온도변화와 동상팽창량, 동상팽창압, 부동수분을 측정 및 분석하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 실내동상시험 결과 시험에 사용된 시료 중에서 동상민감성이 높다고 판단되는 시료는 SM, SC, OH 이며, 동상민감성이 중간정도라고 판단되는 시료는 GM시료, 동상민감성이 낮다고 판단되는 시료는 GW, SP, SP2이다.

2) 실내동상실험에서 동결흙의 온도특성, 동상팽창량, 부동수분 특성을 분석 하였을 때, 동일한 온도에서 동상민감성에 영향을 미치는 가장 큰 요인은 흙의 모세관상승임을 알수 있다.

흙의 0.074 mm 통과량과 입도분포, 투수계수 등이 상호 복합적으로 작용하여 동상 특성에 영향을 미친다. 즉, 실트질 함유량이 많은 자갈질 흙과 모래질흙, 그러나 점토함유량이 적을수록 동상민감성이 크게 나타나는 경향이 있다. 자갈질과 모래질의 경우 입자가 너무 커서 모관상승이 거의 발생하지 않았으며, 점토함량이 많은 경우는 입자가 너무 작아서 투수성의 문제로 모관상승에 영향을 미치는 것으로 판

단된다.

3) 시료의 최저온도, 동결심도, 동상팽창량, 부동수분은 판단된 동상민감성에 따라 모든 시료에서 거의 동일한 경향을 보였지만 동상팽창압은 시료 자체의 강도와 같은 다른 인자로 인하여 큰 차이가 생길 수 있음을 확인하였다. 따라서 동상실험 결과로 보았을 때 동상팽창압을 동상민감성의 판정에 이용하는 것은 부적절하다고 판단된다.

5절 상수도 매설관 동결 특성 분석을 위한 실대형 토조 실험

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 부등침하 발생으로 위험성이 증대되고 있다. 계절 변화에 따라 영하와 영상의 온도조건을 보이는 국내의 경우 겨울철에는 동결에 의해 지반이 팽창하는 현상을 유발하고 이러한 동결팽창은 지반의 불균등한 융기와 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 폐타이어나 폐비닐, 혐수성 재료 등을 활용하는 연구(Gandahl, 1985)가 진행된바 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(상수도 시설기준, 2010, 도로공사 표준시방서, 2009, 토목공사 표준 일반시방서, 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 관련 기준에서는 동결깊이는 흙의 종류, 함수비, snow cover, snow pack, 동결지수 등 다양한 인자에 대해 결정되고, 상수도관의 매설 깊이는 wet areas의 영향을 크게 받으므로 이론적인 동결깊이 계산에 의한 설계보다는 성공적으로 운영되고 있는 유사 구조물의 경우를 참고하도록 하고 있다

이 연구에서 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 뒤 채움재로 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

가. 사용 시료

일반적으로 상수도관을 지중에 매설할 경우, 지반이 동결되는 한계 조건인 최대 동결 깊이를 기준으로 매설깊이를 결정하고, 상수도관 매설을 위한 뒤 채움재는 비동상성 시료를 이용하고 있다. 국내의 경우 상수도관의 뒤 채움재는 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. <표 3-5-1>은 미국 공병단에서 규정하고 있는 동상민감성 판정을 위한 흙의 분류로 자갈이나 사질토라도 세립분 함유량에 따라 동결팽창이 발생 가능한 것으로 나타나 있으며, 세립분 함유량이 많은 지반의 경우는 동상성 판정을 위한 별도의 실내실험을 수행하도록 규정하고 있다.

<표 3-5-1> 미공병단의 동상민감성 흙 분류 기준

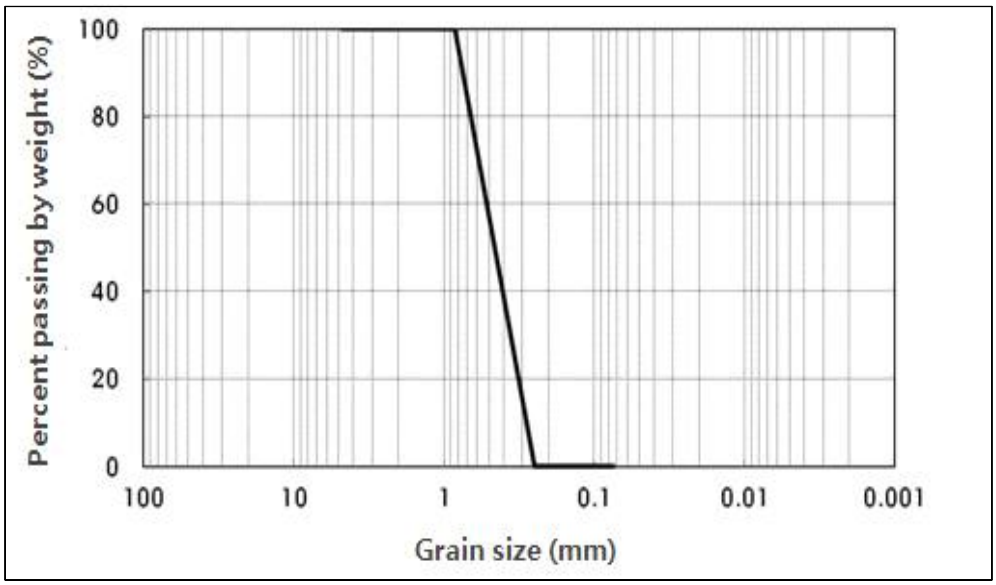
frost heave susceptibility	Soil type	Granular powder content	Unified soil classification
FS	(a) Gravels Crushed stone, rock	0～1.5	GW, GP
	(b) Sands	0～3	SW, SP
*PFS***	(a) Gravels Crushed stone, rock	1.5～3	GW, GP
	(b) Sands	3～10	SW, SP

* *NFS* : Non Frost susceptible

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

이 연구에서는 매설관의 뒤 채움재를 사질토로 시공하더라도 원 지반의 배수가 원활하지 않은 지반이거나 지하수위가 높을 경우에 매설관에 작용하는 동결팽창의 영향을 확인하기 위해 동상 실험을 실시하였다.

실험에 사용된 시료는 비동상성 시료인 주문진 표준사를 사용하였으며, <그림 3-5-1>에 나타난 바와 같이 입도 분포가 0.3~0.8mm 사이에 집중되어 있는 빈 입도임을 확인할 수 있다. 시료의 기이 물성 값은 <표 3-5-2>에 나타내었으며, 통일 분류법에 따라 SP로 확인 되었다.



<그림 3-5-1> 주문진 표준사의 입도분포시험 결과

<표 3-5-2> 주문진 표준사의 공학적 특성

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

나. 실험 방법 및 결과 분석

동상 실험은 신은철 등(2010)이 제시한 실험방법을 적용하였다. <그림 3-5-2>와 같은 동상실험기를 이용하여 토질별 동상특성을 관찰하였다. 동상실험기는 시료적재부, 팽창량과 동상압을 측정하는 계측기를 설치하는 측정부로 구성되어 있다. 시료를 적재하는 적재부에는 총 4개의 공시체가 들어갈 수 있으며, 측정부는 동상팽창압 측정을 위한 로드셀(Load cell)을 장착할 수 있는 거치대와 동상팽창량 측정을 위한 LVDT(Linear Variable Differential Transformers)를 장착할 수 있는 거치대로 구성되었으며, 깊이별 온도는 Thermocouple을 이용하여 측정하였으며 자동계측장비(Data logger)에 연결하여, 1시간 간격으로 데이터를 수집하였다.

이 실험에서는 KS F 2312 시험법에 의거한 흙의 다짐 시험 방법에서 도로 노상

토의 다짐시험 시 사용하는 D 다짐 방법을 사용하여 구한 최대건조단위중량과 최적함수비를 이용하여 상대밀도 70%로 시료를 계량하여 공시체를 구성하였다. 실험 중 수분의 유출을 막기 위해 몰드의 하부와 측면부는 방수처리 하였으며계속되도록 하여 동상발생이 원활하도록 하였다.
실내동상실험의 경계온도 조건은 실내동상실험 실험기 내부온도를 -15℃로 유지하였다.



(a) 실내동상시험장치



(b) 변위측정계



(c) 로드셀



(d) 온도계측장치 (T type)

<그림 3-5-2> 실내동상시험 장치 및 장비

또한, 동결방식은 편면온도강하식으로 하였으며, 시료의 동결방향은 ASTM 방법과 TRRL 방법에서와 같이 상부에서 하부로 동결시켰다. 그 이유로는 지반의 자연적 동결메커니즘을 재현하는 것이다. 그러나 상부에서 하부로 동결시킬 때에는 상부가 동결되며 몰드와 시료 사이에 동착력이 생겨 동상력에 저항하게 된다. 이 단점을 보완하기 위하여 이 실험에서는 몰드와 시료 사이에 신축성이 있는 실리콘 패드를 삽입하여 몰드와 시료 사이의 동착력을 최소화 시켰다. <그림 3-5-3>은 실리콘 패드의 사진이

다. 이번 실내동상실험의 특성은 <표 3-5-3>과 같다.



(a) 실리콘 패드



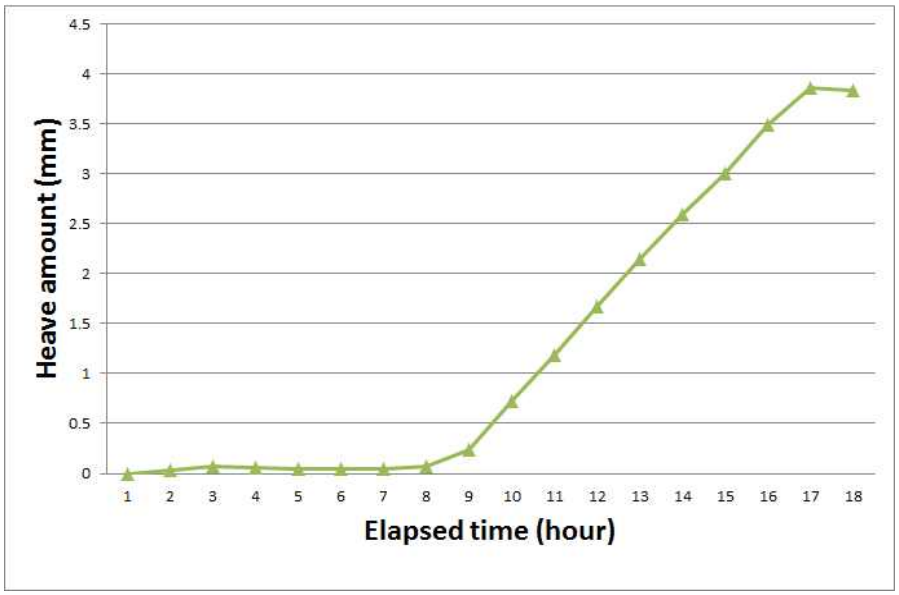
(b) 몰드와 실리콘 패드의 결합

실내동상실험 몰드의 구성

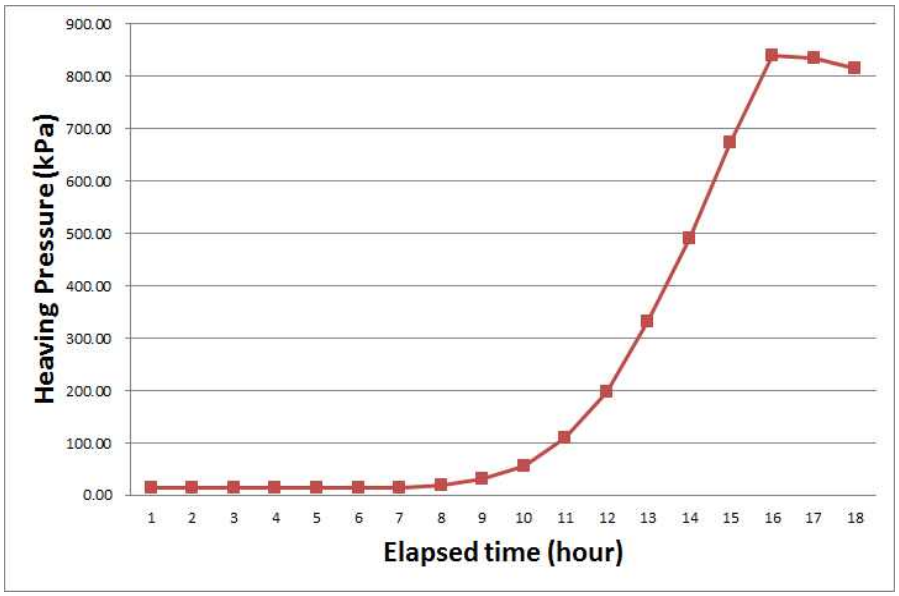
<표 3-5-3> 실내동상실험기의 냉동방식

Type of freezing	One side temperature falling type
Direction of freezing	Top→Bottom
Material of mold	Acrylic
Size of specimen	Diameter : 100mm, Height :200mm
Condition of influent water	Closed system

<그림 3-5-4>와 <그림 3-5-5>는 포화된 주문진 표준사를 대상으로 한 실내 동상 시험 결과 값으로 대상 시료가 비동상성으로 분류됨에도 불구하고 비배수 조건에서 포화되었을 경우에 동상이 발생함을 확인하였다.



<그림 3-5-4> 동결지속시간에 따른 동상팽창량



<그림 3-5-5> 동결지속시간에 따른 동상팽창압

이러한 현상은 매설관 뒤 채움재의 입경에 관계없이 지하수 흐름이나 포화상태, 매설관 주변 지반의 배수 상태에 따라 영하의 온도에서 동상이 발생할 가능성을 보여주는 것으로 실제 매설관 설치 시 동결 깊이 이하로 매설관을 설치하고 배딩(beding)과 뒤 채움재를 비 동상성 시료로 치환하더라도 주변 지반의 배수상태와 함수비를 확인 할 필요가 있음을 확인하였다.

3. 실대형 모형 토조 실험

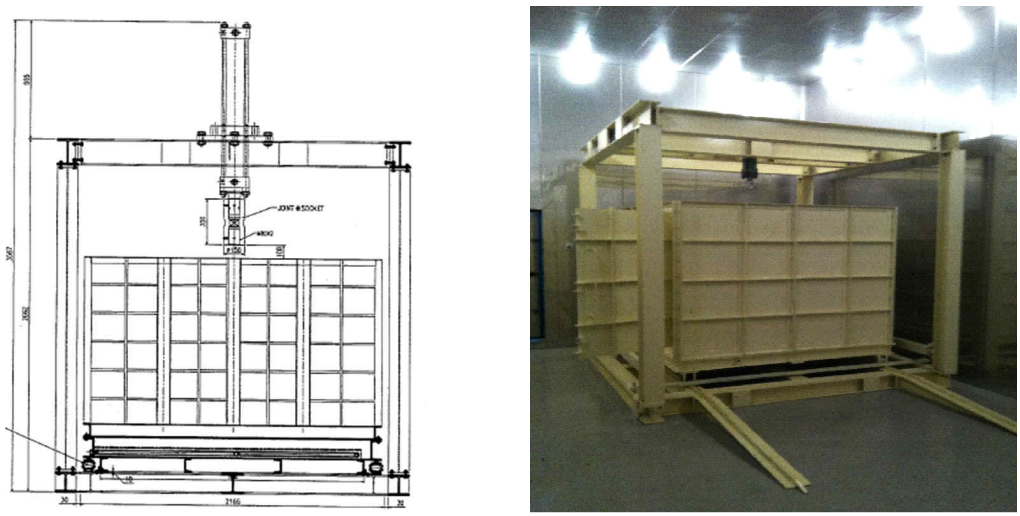
가. 실험 방법

실대형 모형실험은 한국건설기술연구원에서 보유하고 있는 대형냉동챔버에서 수행되었다. <표 3-5-4>는 대형냉동챔버의 주요 제원을 나타낸 것으로 높이 5.1 m, 길이 10 m, 폭 5 m로 온도범위는 ±30℃ 오차범위 ±0.5℃로 조절 가능하다.

<표 3-5-4> 대형냉동챔버 주요 제원

극지환경 실대형 실험실	실험실 크기	W 10,000 mm × D 5,000 mm × H 5,100 mm
	온도 제어범위	-30℃～+30℃ (온도분포 : ± 0.5℃)
	온도 상승시간	-30℃ ～+25℃ : 37min 이내(1.5℃/min) : 온도 가변시간 임의 조정
	온도 하강시간	+25℃～-30℃ : 55 min 이내 (1.0℃/min) : 온도 가변시간 임의 조정

실대형 모형 실험은 대형냉동챔버 내부에 대형 토조를 설치하고 대형 토조내에 지반 조건을 모사하여 매설관을 설치한 후 실험을 하였으며, -40℃이하에서 작용 가능하고 최대 10ton의 하중을 견딜 수 있는 강성구조로 설계되었으며, 크기는 2,000mm(가로) × 2,000mm(세로) × 1,500mm(높이)이다(<그림 3-5-6>참조).



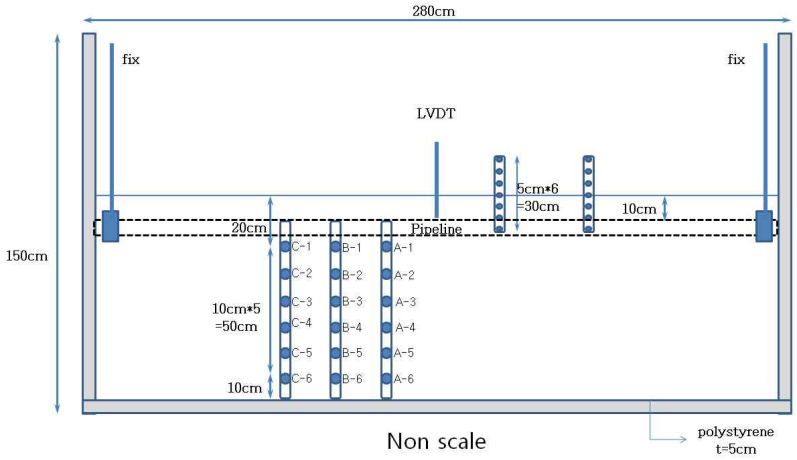
<그림 3-5-6> 저온용 대형 모형 토조

<그림 3-5-7>은 실험에 사용한 토조의 단면도와 평면도, 내부 온도센서 기둥의 모식도를 보여주고 있다. 현장조건을 반영한 일차원 열전도를 재현하기 위해 대형 토조의 주변부와 하부에 단열재로 5 cm 스티로폼을 설치하였다. 단열재 설치 후 누수방지를 위한 플라스틱 비닐을 설치하고 65 cm까지 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 15 cm 두께로 모래를 포설하였다. 지표에서 15 cm 깊이까지 함수비는 24.3%, 공극비 0.65, 상대밀도 80%로 측정되었고, 15 cm 이하의 깊이에서는 함수비가 24.7%, 공극비 0.66, 상대밀도 77%로 측정되었다(<표 3-5-5>참조). 실험에 사용된 시료는 동상 실험과 동일한 주문진 표준사를 사용하였다.

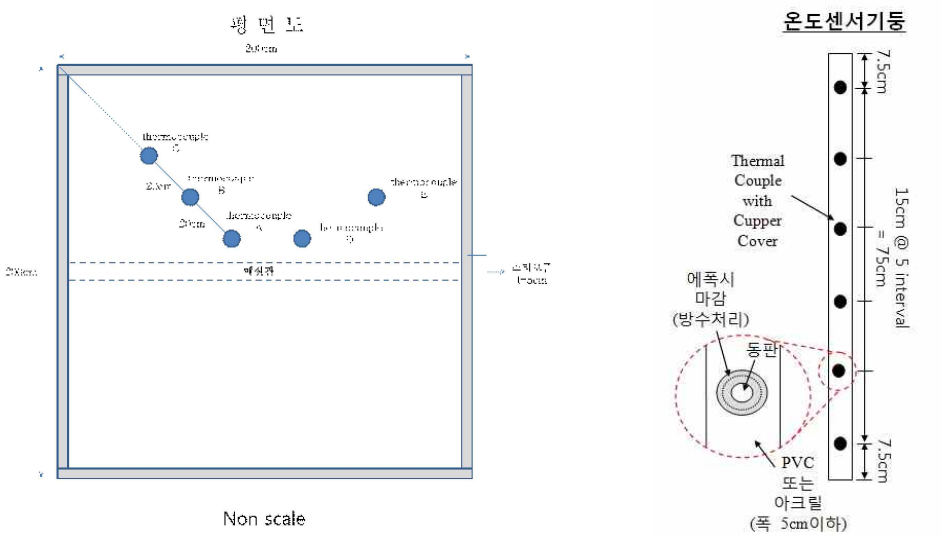
<표 3-5-5> 공시체의 측정 초기 조건

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

냉동챔버 온도는 -15℃로 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.



(a) 동상챔버의 측면도



(b) 동상챔버의 평면도 (c) 온도계측장치

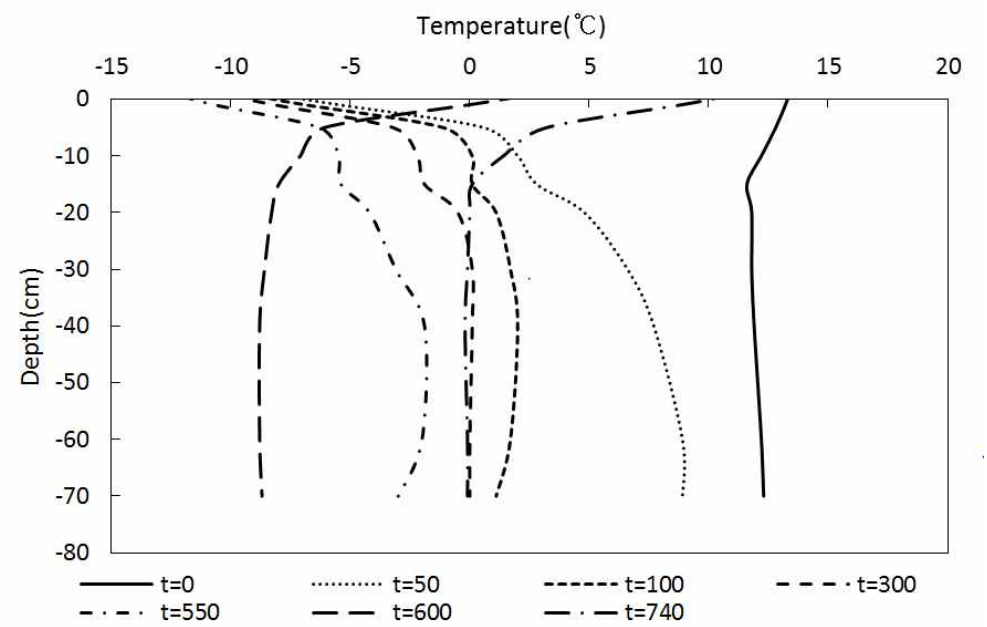
<그림 3-5-7> 동상챔버의 평면도

4. 결과 분석

가. 매설관 주변 온도 분포

동결 챔버의 온도 변화에 따른 매설관 주변 지반의 온도 거동을 확인하기 위해 <그림 3-5-7> c와 같이 별도의 기둥에 15cm 간격으로 온도센서를 부착하여 깊이별 온도변화를 확인하고자 하였으며, <그림 3-5-7> (a)와 <그림 3-5-7> (b)와 같은 배치로 매설관으로부터 거리에 따른 온도 분포의 차이도 확인하고자 하였다.

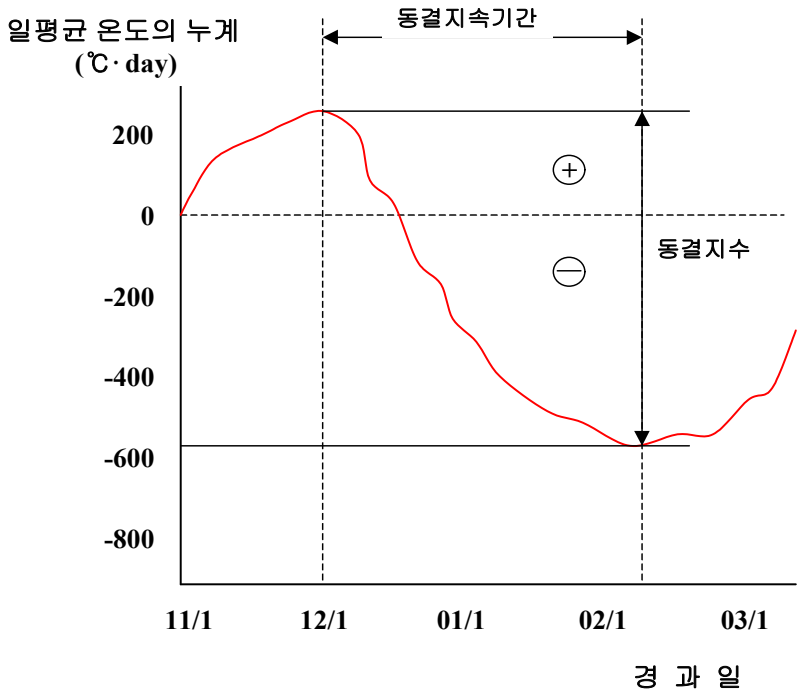
토조 주변의 온도 거동을 확인한 결과 매설관으로부터 이격거리에 따른 온도 거동의 차이는 없었고 지반 깊이별로 온도 분포가 달라지는 것을 확인 하였다. 따라서 매설관과 가장 가까운 A와 D지점(<그림 3-5-7> (a) 참조)의 동결시간에 따른 시료의 깊이별 온도분포를 <그림 3-5-8>에 나타내었다.



<그림 3-5-8> 동결시간에 따른 시료의 깊이별 온도분포

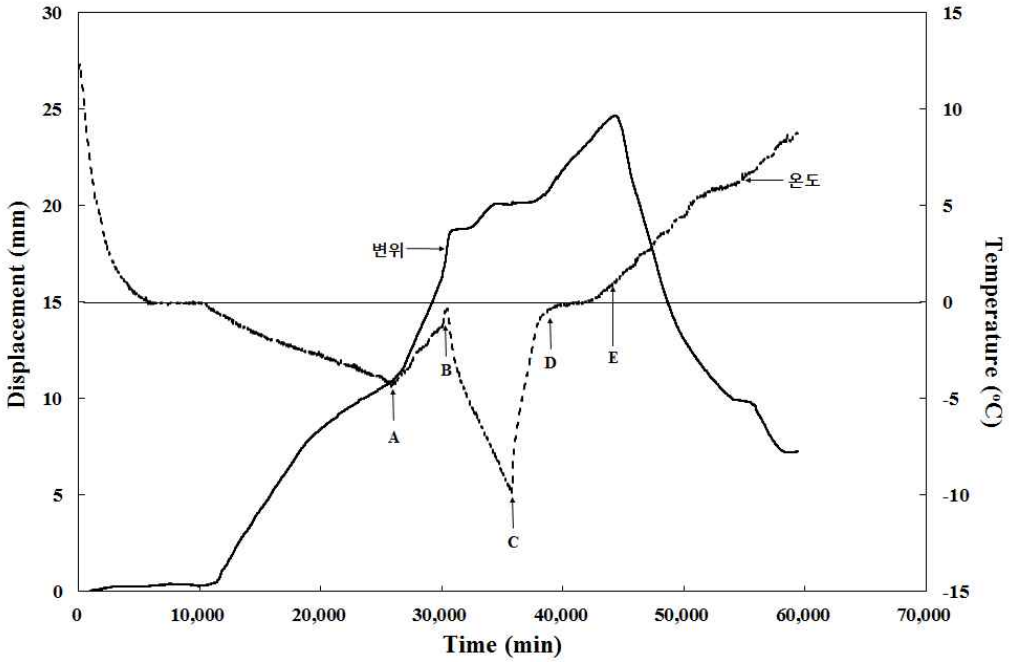
온도 조건은 초기 24시간동안 12℃에서 -15℃까지 서서히 온도를 강하시켰으며, 이후 -15℃를 유지하면서 토조 내부의 온도 변화를 확인하였다. 550시간이 경과한 이후 지반의 온도가 일정하게 수렴된 것을 확인 한 후 상온으로 온도를 높이면서 지반이 서서히 융해되도록 하여, 최대 1,000시간까지 매설관의 거동을 확인하였다.
시료의 동결 깊이는 0℃ 이하의 온도와 그 지속기간에 영향을 받으며, 이것을 정량적으로 나타낸 동결지수(freezing index)를 설계 정수로 활용하고 있다. 여기서 동결지수란 지반을 동결시키는 대기온도의 강도(영하온도)와 지속기간(intensity and duration)의 누가 영향(cumulative effective)으로 정의되며, 단위는 ℃·day이며 어느 동결 계절 동안의 누가 ℃·day에 대한 시간 곡선상의 최고점과 최저점의 차이

로 나타내며 <그림 3-5-9>와 같다. 실험에서 구현된 온도조건을 동결지수로 환산하면 약 300 ℃·day의 값을 보이며, 이러한 동결 지수 값은 최근 10년 강도의 서울 및 경기도 지역 동결지수와 유사한 값으로(한국건설기술연구원, 2013), 국내 동절기 매설관의 온도에 따른 거동을 예측할 수 있는 적절한 온도 조건으로 판단된다.



<그림 3-5-9> 동결지수와 동결지속시간의 관계

<그림 3-5-10>은 매설관 중앙에서 온도와 변위의 변화를 보여주고 있다. 매설관 주변온도가 급격히 저하되어 0 ℃에서 간극수의 상변화로 온도가 일정하게 유지되는 동안 매설관의 변위(융기)는 미미한 것으로 관측되었다. 간극수의 상변화가 완료된 시점인 0 ℃이하로 시료온도가 강하됨에 따라 매설관 하부에서 동결팽창이 발생하고 급격히 융기가 발생하여 서서히 수렴하는 경향을 볼 수 있다. 이러한 현상은 매설관 상부지반이 동결됨에 따라 하부에서 발생하는 동결에 따른 융기를 억제하는 지지판으로 작용하기 때문이다.



<그림 3-5-10> 매설관 중간의 온도와 침하량

매설관 상부 동결지반의 동결억제 효과를 확인하기 위해 1차 융해(그림 7, A 지점)를 시작하였다. 매설관 주변온도가 서서히 증가하면서 융기가 증가하였으며(B 지점), 다시 동결이 시작됨에 따라 융기가 억제되었다(C 지점). 토조 내부의 시료가 동결됨을 확인하고 융기발생이 미미한 시점(C 지점)에 2차 융해를 시작하였으며, 매설관 주변의 온도가 0 ℃까지 상승하는 동안 융기는 미미하게 발생하였다. 그러나 매설관 주변온도가 0 ℃로 간극수의 상변화가 시작되는 시점(D 지점)에서 융기가 급격히 발생하는 현상을 관측할 수 있었다. 또한 급격히 상승하던 융기는 매설관 주변의 간극수 상변화가 완료되는 시점(E 지점)에서 최대로 발생하였다.
결론적으로 매설관의 변형은 겨울철 지반이 동결되는 동안에도 발생하지만 대기온도가 상승하는 봄철에도 상부지반의 동결억제 효과가 감소함에 따라 급격히 발생된다. 일반적으로 봄철에 발생하는 매설관의 파괴는 동결지반의 융해에 따른 침하로 변형이 발생하여 파괴된다고 여겨졌다. 이 연구에서는 봄철에 발생하는 매설관 파괴도 매설관 하부지반의 잠재적 융기력에 따른 것으로 판단되므로 관련된 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 다양한 현장조사가 필요하다고 판단된다.

나. 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 융기에 의한 상향 변

위의 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 따른 매설관에 작용하는 동상력을 도출하였으며, 동상 실험에서 측정된 동상압력과 비교하여 실 대형 모형실험 결과 값의 신뢰성을 확인하였다.

1) 매설관 변형 추정식 유도

먼저, 균등하지 않은 분포하중이 작용하는 보의 변위는 길이( )에 대한 4차 함수의 형태로 발생하므로, 양단이 고정된 매설관의 변위(y)를 식(3-5-1)과 같이 길이(x)에 대한 4차 다항식으로 가정할 수 있다.

$$y = ax \ + bx^3 + cx^2 + dx + e \tag{3-5-1}$$

매설관 양단($x = 0,$)의 변위(y)와 처짐각(y')이 고정되어 있으므로 $y(o) = y(L) = y'(o) = y'(L) = 0$의 조건을 대입하면, $d = e = 0$과 식(3-5-2)와 식(3-5-3)의 관계를 얻을 수 있다.

$$y(L) = aL^4 + bL^3 + cL^2 = 0 \tag{3-5-2}$$

$$y'(L) = 4aL^3 + 3bL^2 + 2cL = 0 \tag{3-5-3}$$

식(3-5-2)와 식(3-5-3)에 포함된 세 개의 계수(a, b, c)값을 추정하기 위해서는, 세 개 이상의 방정식이 필요하다. 이 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.

$$\kappa = \frac{y''}{(1 + y'^2)^{3/2}} \quad y'' \tag{3-5-4}$$

또한, 탄성보의 지간 중앙부에서 순수휨에 의한 상단의 변형률(ϵ_t)과 하단의 변형률(ϵ_b)은 각각 식 (3-5-5)과 식 (3-5-6)와 같이 나타낸 수 있다.

$$\epsilon_t = -\kappa(d/2) \tag{3-5-5}$$

$$= \kappa(d/2) \tag{3-5-6}$$

여기서, d는 강관의 지름이다. 따라서, 식 (1)에 대한 2차 미분방정식과 식 (3-5-4), (3-5-5), (3-5-6)의 관계로부터 상단과 하단에서의 스트레인 값으로부터 다음의 식을 유도할 수 있다.

$$y_t'' = 12ax^2 + 6bx + 2c = -\frac{2\epsilon_t}{d} \tag{3-5-7}$$

$$y_b'' = 12ax^2 + 6bx + 2c = \frac{2\epsilon_b}{d} \tag{3-5-8}$$

강관의 상단의 변형률(ϵ_t)과 하단의 변형률(ϵ_b)은 식 (3-5-9)와 같이 지간 중앙부에서 강관의 상단과 하단에서 계측된 값을 기준으로 게이지에 대한 온도의 영향과 중립축에서 계측된 축방향 변형률을 제거하여 계산되었다.

$$\epsilon_{t,b} = \epsilon_r - \epsilon_g - \epsilon_l \tag{3-5-9}$$

여기서, ϵ_t 또는 ϵ_b은 게이지에 대한 온도의 영향과 축방향 변형이 제거된 강관의 상단과 하단의 변형률이고, ϵ_r은 강관의 상단과 하단에 설치된 게이지에서 계측된 변형률이며, ϵ_g는 게이지에 대한 온도 영향을 보정하기 위한 보정값이며, ϵ_l는 강관의 축방향 변형률이다.

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

$$\epsilon_g = -2.68\times10^{1} + 2.42\times\ {}^{1} - 6.16\times10^{-2}\times T^2 + 3.93\times10^{-4}\times T^3 - 8.68\times10^{-7}\times T^4\ (\mu m/m) \tag{3-5-10}$$

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

식 (3-5-2), (3-5-3), (3-5-7), (3-5-8)로부터 계수값을 계산하기 위한 식 (3-5-11)를 얻을 수 있으며, 최소자승법을 이용하여 식 (3-5-12)로부터 계수 a, b, c를 구하였다. 표 4는 변위 형상 추정에 적용된 강관의 제원과 보정된 계측 데이터를 정리한 것이다.

$$\begin{bmatrix} L^3 & L^2 \\ 4L^3 & 3L^2 & 2L \\ 12(L/2)^2 & 6(L/2) & 2 \\ \lfloor 12(L/2)^2 & 6(L/2) & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ \lfloor c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -2\epsilon_t \\ d \\ \frac{2\epsilon_b}{d} \end{bmatrix} \quad (3\text{-}5\text{-}11)$$

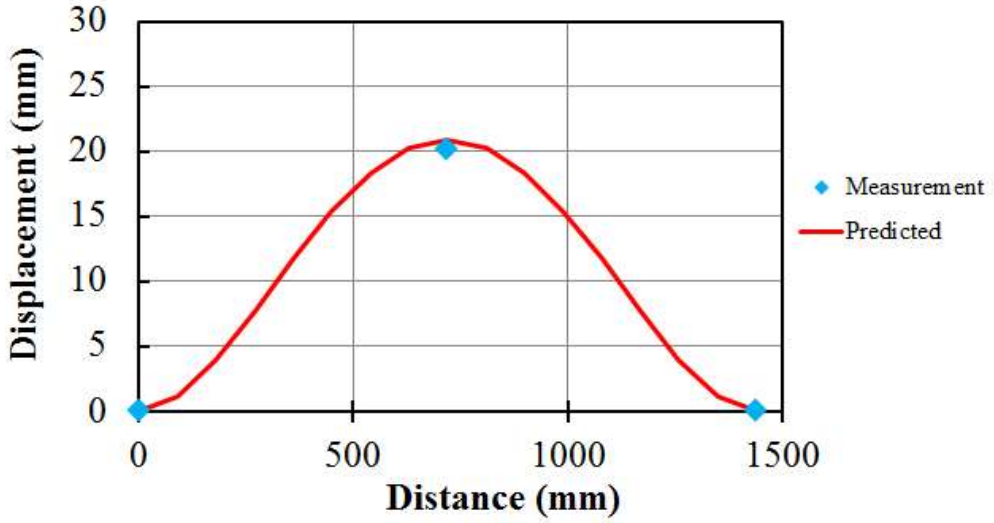
$$y = 7.77 \times 10^{-11} x^4 - 2.24 \times 10^{-7} x^3 + 1.61 \times 10^{-4} x^2 \quad (3\text{-}5\text{-}12)$$

<표 3-5-6> 강관의 분류

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

계산된 계수값이 적용된 강관의 변위형상은 식 (3-5-12)과 같다. <그림 3-5-11>은 변위에 대한 추정식(식 (3-5-12))과 강관의 양단과 지간 중앙부에서 계측된 변위를 비교하여 나타낸 것이다. 실험체의 지간 중앙부 변위는 20.2 mm이며 추정식에 의한 지간 중앙부 변위는 20.9 mm로 약 3.3%를 오차를 보여 강관의 변위형상에 대한 추정이 비교적 정확히 이루졌다고 할 수 있다.

매설관 중앙부의 최대 변위를 확인한 결과 값인 20.2mm는 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.



<그림 3-5-11> 매설관의 침하 측정과 예측식 비교

예측식을 기준으로 계산된 강관 단면 상단의 휨인장응력은 805.2 MPa이다. 이 값은 강관이 선형탄성거동을 한 것으로 가정된 값으로 항복인장응력(380 MPa)을 넘어 강관에 소성변형이 발생한 것을 의미한다. 특히, 축변형률(2186)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 발생할 수 있다는 것을 의미하며, 매설관 주변 지반조건에 따라 동상 안정성을 확보하기 위한 별도의 조치가 있어야 할 것으로 판단된다.

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.

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

식 (13)의 관계로부터 동상압에 의해 강관의 지간 중앙부에 계측된 처짐(20.2 mm)

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

5. 소결론

이 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.

- 동상성 판정기준에 따라 비동상성 시료인 사질토를 대상으로 동상 실험을 실시한 결과 비배수 포화조건에서 동결팽창이 발생하는 것을 확인하였다. 이 연구에서 사용된 포화된 사질토에서는 1.92 %의 부피팽창과 839.1 kPa 동상압이 발생한다.
- 실 대형 모형실험을 통해 매설관 상부지반이 동결을 억제하는 지지판으로 작용하는 현상을 관측하였다. 일반적으로 봄철에 발생하는 매설관의 파괴는 동결지반의 융해에 따른 침하로 변형이 발생하여 파괴된다고 여겨졌다. 이 연구에서는 봄철에 발생하는 매설관 파괴도 상부지반의 동결억제 효과가 감소하여 하부지반의 잠재적 융기력에 따른 것으로 판단되므로 관련된 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 다양한 현장조사가 필요하다고 판단된다.

- 실 대형 모형실험 결과 동결지수 300 ℃·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 허용 처짐율인 5%를 훨씬 상회하는 값으로, 매설관의 사용 성능이 저하나 안정성에 문제가 있는 것으로 판단할 수 있는 변형이다.

□ 선형탄성거동으로 가정된 매설관 단면 상단의 휨인장응력은 강재의 항복인장응력(380 MPa)을 상회하는 805.2 MPa로 확인되었으며 이는 매설관의 소성변형을 가져올 수 있는 결과이다.

□ 비동상성 시료인 사질토를 매설관의 뒤 채움재로 활용하더라도 지반의 함수 조건 및 배수 조건에 따라 동결팽창이 발생한다는 사실을 실험을 통해 확인하였으며, 동결 지반에서 매설관의 안정성을 확보하기 위해서는 뒤 채움재의 동상성 확인과 함께 매설관 주변의 배수 조건을 검토할 필요가 있다.

6절 동결지반 상수관의 거동

1. 서론

이 절에서는 동절기 상수도관의 파손원인을 명확히 규명하기 위하여 토양의 동결에 따른 동결하중의 분포와 우리나라 지반의 대표적인 토양시료의 동토공학적 특성을 실험적 방법으로 규명하였다. 이 실험에서는 제 3장 2절에서의 분석한 결과로 동계누수현황이 뚜렷한 지역인 경상남도 지역의 토질특성을 고려하여 ML 시료를 선정하였고 관재질별로 누수현황이 현저했던 덕타일 주철관과 스테인레스 강관을 매설하여 현장실험을 하였다.

상수도 관로에 작용하는 외부하중을 산정하고 우리나라가 계절적 동토지역에 속하는 만큼 동상력을 포함한 외부하중의 영향을 분석하여 응력집중현상으로 인한 상수도관의 거동을 분석하기 위하여 현장 모형을 실험을 실시하여 현장과 동일한 조건으로 구성하여 동절기 하부 지반의 특성변화 및 상수도관의 변형을 분석 하였다. 현장모형 실험은 본 연구기관에서 직접 개발한 자동계측형 지중온도분석 장치로 매설지역 뿐만 아니라 상부토질의 동상에 의한 변형 또한 측정할 수 있어 실제 현장에서 일어나는 일괄적인 현상을 분석하기에 용이하다.

그리고 앞 절에서 제시한 Marston이론식과 실제 상수도관에 작용하는 토압에 대한 비교 및 수치해석결과와 비교분석을 통해 현장모형실험의 결과에 대하여 좀 더 신뢰성 있는 연구 자료가 될 것으로 판단된다.

2. 상수도관 현장 모형실험(test bed) 구축방법 및 계측장비

지중 매설관의 지반 동상 현상에 따른 변형 메커니즘을 규명하기 위해 모형 토조 실험은 매설관의 응력 저감율 실험을 통한 매설관 구성 재료들의 동상 특성을 파악하는 것은 필수적이다. 따라서 모형 실험은 현장과 동일한 조건을 구성하여 제한된 조건 하에서 겨울철 지중 매설관의 뒤채움재료의 동상 메커니즘 및 매설관의 응력분포를 분석 하였다.

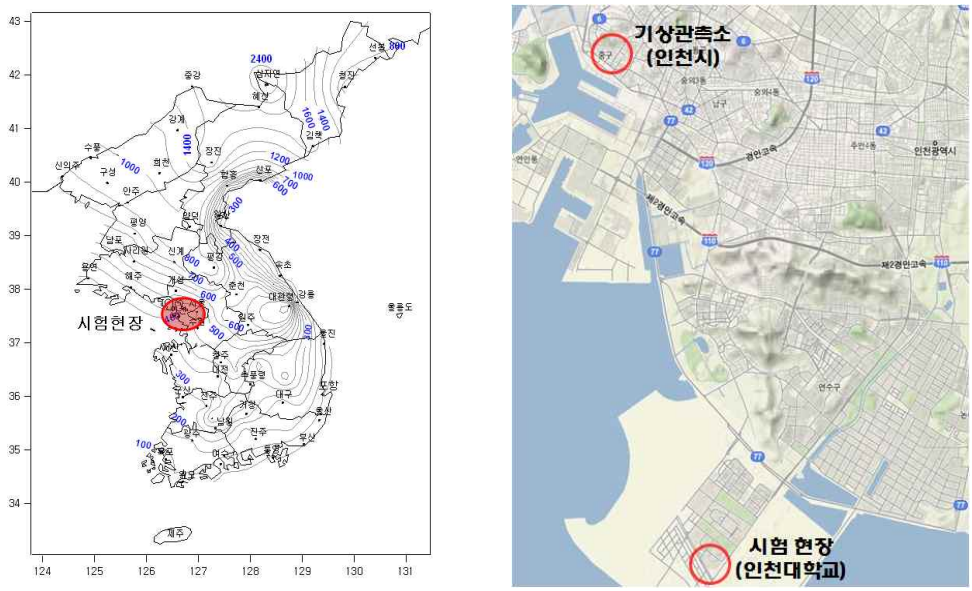
동결 발생을 위하여 다양한 현장의 조건 중 지하수위를 일정하게 유지하였다. 또한 일정하게 유지된 지하수위 조건 하에서 상부층의 강우와 강설에 의한 수분 공급의 조건을 차단함으로써 보다 동상이 활발히 진행될 수 있는 실험 조건을 구성하였다. 지중 매설관 모형 토조 실험을 수행하기 위하여 인천광역시 연수구 송도동 인천대학교 부지 내에 구축하여 실험을 수행하였다. 실험 현장이 위치한 인천 지역의 기온은 한반도의 가운데 위치하나 지형, 해류, 바람 등의 여러 여건으로 중부의 다른 지역과는 상당한 차이가 있으며 대체로 보아서 인천 지역의 기온은 전국 평균에 비해서 다소 냉온에 속한다.

겨울철 지반 동결로 인하여 상수도관의 응력분포 및 동결지반의 특성을 분석하기 위하여 토질별 관종별 동상 거동성 평가와 지하수위 유지 및 함수 상태를 유지한

조건에서의 부동수분 변화량과 대기온도에 따른 지중의 깊이별 온도 변화 그리고 침하량을 계측하기 위하여 단면-1은 강관을 매립하고 상부에 화강풍화토, 단면-2는 스트레인관을 매립하고 상부에 화강풍화토, 단면-3는 스트레인관을 매립하고 상부에 점토층으로 지중 매설관 모형 토조 실험을 구성하였다.
실험용 토조의 크기는 3 m(폭) x 6 m(길이) x 3 m(높이)이며, 지하수위를 구현하기 위하여 지중에 급수 설비를 구축하였다. 매설관의 변형을 계측하기 위하여 스트레인게이지를 부착하고 지중의 온도를 측정하기 위하여 온도측정기를 지중에 10 cm간격의 150 cm 까지 지중의 온도를 계측 하였다. 실험현장의 동결지수는 226℃ day이며 대기온도는 2012년 12월 3일부터 2013년 2월 21일 까지 0℃이하의 온도였으며 81일간 0℃이하의 온도를 유지하였다.

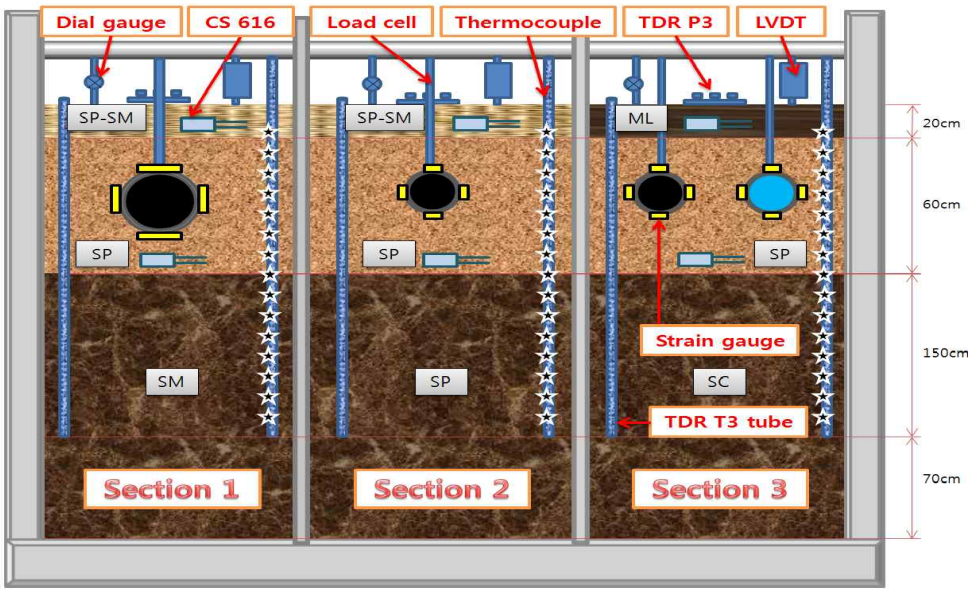
가. 모형 토조 실험 구축방법

현장 모형 실험은 상수관 응력 저감율 실험을 수행하기 위하여 인천광역시 연수구 송도동 인천대학교 부지 내에 토조를 구축하여 실험을 수행하였다. 실험 시스템이 위치한 인천광역시는 지리적으로 경기서해안지방에 위치해 있고, 서쪽으로는 서해에 접하여 있으며, 북쪽으로는 한강의 하류에 위치하여 있다. 산지는 마식령 산맥과 광주산맥에서 이어져 오고 있고, 마니산, 계양산, 삼각산을 제외하면 해발 300 m 이내의 구릉성 산지이며, 큰 하천의 발달이 없다. 인천의 해안은 노년기 산지가 침강하여 된 리아스식 해안이다. 완만한 경사를 지녔던 지표면이 침수되었기 때문에 해안선이 길고 복잡하며 섬이 많다.
한반도는 천체적으로 대륙성 기후이나 인천은 대륙성 기후에 속하면서도 해안에 위치하여 다른 내륙지방보다는 해양성 기후의 특성도 일부 가지고 있어서, 기온의 연교차가 적은 편이다. 2012년평균 기온은 12.8℃이며 최저기온은 -12℃로써 겨울철 0℃이하의 일수가 80일 정도 유지되는 지역이다.
인천은 시베리아 고기압으로부터 부는 북서계절풍을 직접 맞는 위치에있어 겨울철 한파 및 높은 파고에 특히 유의해야 한다. 겨울에는 북풍 계열의 바람이 지배적이며, 여름에는 남풍계열의 바람이 우세한데, 그것은 고기압과 저기압의 배치가 여름과 겨울에 상반되는 모양으로 자리잡는 것에 기인한다.
현장 실험 위치의 동결지수는 355℃일 이며 그림 3.10은 실험 현장의 동결지수 선도와 위치도 이다. 위도 37°22‘23.1907 ″N, 경도 126°38’02.5623 ″E, 해발 50.24 m에 위치하고 있으며 GPS 장비를 이용하여 측정하였다.
지반의 조건과 상수관의 특성에 따른 겨울철 지반의 동상으로 인한 상수관의 거동성 평가와 지하수위 유지 및 지반의 함수 상태를 유지한 조건에서의 부동수분 변화량과 대기온도에 따른 지중의 깊이별 온도 변화 그리고 침하량을 계측하기 위하여 <그림 3-6-2>와 같이 단면으로 현장 모형 실험 토조를 구성하였다. 실험용 토조 크기는 3 m(폭) x 6 m(길이) x 3 m(높이)이다.



(a)전국 동결지수 선도　　(b)현장 실험 위치

<그림 3-6-1> 현장모형실험 위치



<그림 3-6-2>상수도관 현장 모형 실험 토조 단면 구성 현황

단면-1은 Ø200 mm의 닥타일 주철관을 매설하고, 상부에 화강풍화토를 포설하였다. 하부 70 cm의 노체를 형성하고 150 cm의 현장토를 포설하였다. 현장토의 포화조건을 유지하기 위하여 상부로부터 100 cm 깊이에 급배수관을 설치하였다. 이 급배수관은 외부로부터 수분의 주입 및 배출을 할 수 있도록 설계되었다. 현장토 위에 60 cm의 모래를 채우고 닥타일 주철관을 매설하였으며, 마지막으로 상부에 20

cm의 화강풍화토를 포설하였다.

베딩작업에 사용된 모래는 입도가 고르고 깨끗하며 유해성분이 포함되지 않은 모래이어야 하며, 모래의 입도는 5 mm보다 가늘고 잔골재에 대한 요건에 맞게 하였다. 상수관의 도복장이 손상되거나 관체가 이동되지 않도록 조심스럽게 부설한 후 층별로 최적다짐 함수비 이상으로 물다짐을 시행 하였다. 모래에 물을 뿌려 겉보기 점착력의 손실 또는 투과하는 물에 의한 침투수압을 이용하여 다짐한다. 모래와 물의 혼합물을 연속적으로 보내 흙의 입경에 의한 침강속도의 차이를 이용하여 모래의 하중과 자연배수를 이용하는 물다짐 공법을 적용하였다.

또한, 외부 온도로 인한 동상의 영향을 판별하기 위하여 부동수분을 측정하는 CS616 및 TDR관, 지중의 동결깊이를 계측하기 위한 메틸렌 블루 동결심도계와, 지중의 온도변화 계측 센서 써머커플를 설치 그리고 변위계를 설치하였다. 하지만 동결 과정에서 지반의 자체 침하량이 발생 할 수 있어 이에 대한 영향을 검토하기 위하여 각 층별 지중 침하계를 설치하여 그 변화 값을 측정하였다.

닥타일 주철관에는 종방향 및 횡방향의 변위를 계측하기 위하여 스트레인게이지를 부착하고 동결로 인한 관에 작용하는 응력을 계측하기 위하여 로드셀을 설치 하였다.

단면-2는 단면-1과 동일한 흙으로 층을 구성하였으며 상수관은 Ø50 mm의 배관용 스테인리스 강관을 매설하였다. 본 구성에서도 위와 동일하게 각 깊이별 온도측정 센서를 설치하여 외부 온도에 의한 단면 내부의 온도 변화를 측정하였다. 이러한 단면 구성을 통하여 동결온도 조건하에서의 상수관의 응력 분포와 동상 거동성 분석이 수행 될 수 있을 것이라 판단된다.

단면-3의 구성은 단면-2와 동일하게 구성 하였으며 상부 20 cm의 점토층으로 포설하였다. 상수관은 Ø50 mm의 배관용 스테인리스 강관에 물을 넣고 매설하였다.

단면-2와 단면-3는 배관용 스테인리스 강관이 상부에 다른 흙으로 구성되었을 때 상수관의 변형 특성을 분석 할 수 있도록 구성하였다.

이는 실제 현장의 단면의 구성을 모사함으로써 보다 실제의 조건에 유사한 실험조건을 구현할 수 있는 것이라 판단된다, 하지만 실제 현장에서는 상부로 부터의 수분의 유입가능성이 적다. 실험에서 극한의 조건의 구현하여 동상이 발생할 수 있는 영향인자를 고려하여 토조의 상부에 강설과 강우를 차단하기 위하여 지붕을 설치하여 지중에서 동상 현상이 활발히 거동 할 수 있도록 설계하였다. <표 3-6-1>은 각 구간별 단면 구성 시료의 물리적 특성이다.

단면-1.2의 상부층은 인천 송도의 현장 시료 SP-SW로 구성하고, 단면-3의 상부는 인천 송도의 ML시료, 단면-1,2,3는 경기도 이천 현장의 SP, SM, SW로 구성 하였다.

<표 3-6-1> 각 실험 구간별 시료의 물리적 특성

	Sections1,2 -1Layer	Section3 -1Layer	Sections1,2 -2Layer	Section3 -2Layer	Section1 -3Layer	Section2 -3Layer	Section3 -3Layer
Specific gravity (G_s)	2.62	2.73	2.63	2.66	2.67	2.63	2.66
0.074mm passing(%)	11.7	58.9	1.9	2.3	19.6	1.9	22.7
max (kN/m^3)	19.6	14.0	18.8	19.5	18.9	18.8	17.8
w_{opt}(%)	10.5	27.4	11.5	10.5	12.4	11.5	16.5
Uniformity coefficient (Cu)	44.29	32.61	3.05	9.25	34.67	3.05	10.0
Coefficient of gradation (Cc)	2.30	1.68	1.69	0.61	4.63	1.69	1.23
USCS	SP-SW	ML	SP	SP(2)	SM	SP	SC



(a) 지반굴착



(b) 지반정리



(c) 토조운반



(d) 토조매립

<그림 3-6-3>상수도관 현장 모형 실험 부지조성 과정

<그림 3-6-3>는 상수도관 모형 실험의 구성을 위한 부지 조성 과정을 보여 준다. 실험 부지인 인천은 대륙성 기후에 속하면서도 해안에 위치하여 다른 내륙지방보다는 해양성 기후의 특성도 일부 가지고 있어서, 기온의 연교차가 적은 편이다. 위도 37°22′23′′N, 경도 126°38′02′′E 해발 50.24m에 위치하고 있다(국토교통부, 2011).

2012년평균 기온은 12.8℃이며 최저기온은 -12℃로써 겨울철 0℃이하의 일수가 80일 정도 유지되는 지역이다. 모형토조를 구축하기 위하여 계획한 시공 위치를 중장비를 이용하여 굴착하였다. 실험 구성이 후에 지붕을 만들어 강우와 강설을 피해를 최소화 하였으며 해가 들지 않는 음지로 만들어 동상현상이 활발히 구현 할 수 있도록 하였다.

시험용 토조의 크기가 3 m(폭) x 6 m(길이) x 3 m(높이)인 것과 토조 매립 후 급수시스템 및 부속설비 구축을 위한 작업 공간 확보 등을 고려하여 굴착 너비를 여유있게 계산하여 수행하였다.

지반 굴착 후 지반 정리 및 다짐을 통하여 시험용 토조가 예정 위치에 설치 될 수 있도록 조정하였다.



(a) 지하수 유입관



(b) 지하수 유입관 설치



(c) 지하수 유입설비



(d) 지하수 유입설비 완료

<그림 3-6-4>지하수 유입설비 구축 과정

<그림 3-6-4>는 지하수 유입설비 구축 과정으로 지반의 포화를 위하여 수도용 Ø15 mm은 엑셀파이프 호스를 10 cm 간격에 Ø2 mm의 구멍을 만들었으며 파이프의 표면을 거즈로 마무리하여 지반이 포화될 수 있도록 하였다.

유입 및 배수구에 보온제로 마무리하여 겨울철 기간 동안 지하수의 유입으로 인하여 동상의 최적조건을 구현해주는 상황을 모사하고자 배수 설비와 외부급수설비를 설치하여 정기적으로 수분을 공급하였다. 수분 공급은 외부로부터 수분의 주입 및 배출을 할 수 있도록 설계 되었다. 지하수의 온도는 겨울철 지하수의 평균 온도인 4℃로 유지 하였다.

지하수는 지반에 동상현상이 일어날 때 지하로부터 모세관 현상에 의해 올라온 간극수는 흙 속의 부동수의 막을 통하여 이동하는 것으로 알려져 있다. 동결 시 부동수분을 많이 포함하고 있는 흙에서는 동상이 활발하고 적게 포함하고 있는 흙에서는 상대적으로 동상이 작게 일어난다. 또한, 부동수분이 많고 적음에 따라 동결토를 구성하는 흙입자와 얼음의 밀착관계가 달라지므로 동결토로인한 지반의 강도 변화를 구현할 수 있었다.



(a) 진동 햄머 다짐



(b) 컴펙터 다짐



(c) 템핑렘머 다짐



(d) 다짐도 측정

<그림 3-6-5>토조 다짐 작업 및 다짐도 검토

<그림 3-6-5>는 토조 다짐 작업 및 다짐도 검토 시험 이다. (a) 진동 햄머 다짐기는 힐티 브레이커를에 다짐판을 가로 10 cm 세로 10 cm로 된 강판을 부착하였다. 다짐기의 무게는 6.5kg 이며 다짐기의 타격횟수는 2,670회/min이다. 다짐기의 단일 충격에너지는 85kg으로 다짐이 부족한 토조의 측벽부와 계측기 주위의 다짐에 효과적이다. 다짐기의 무게는 69kg이며 판의 크기는 516 mm × 375 mm이다. 95Hz의 진동횟수로 다짐응력은 1130 kgf로 흙을 강력한 컴팩팅 수행능력이 우수하며 다짐면을 고르게 할수 있다. 탬핑렘머는 사질지반 다짐용으로 주로 사용하며 크기는 10.25 cm(폭) x 4.15 cm(길이) x 7.4 cm(높이)이다. 무게는 72 kg, 다짐판의 크기는 285 mm x 340 mm이고, 다짐 응력은 1200 kgf로 다짐할 수 있다. 다짐도 측정을 위하여 모래 치환의 현장밀도 시험 KS F2311 실험을 하여 실험 시공중에 다짐도를 평가하기위하여 각층별 수시로 비교해 가면서 성토 작업을 수행하였으며 다짐도는 95%로 유지 하였다.



(a) PVC파이프 하단부 홈파기



(b) 부직포 박음질



(b) 지하수의 측정관



(b) 지하수위 측정관 설치

<그림 3-6-6>지하수위 측정 시스템 구축

<그림 3-6-6>는 토조의 지하수위를 동결전에 유지하며 지반동결 후 지하수위 변

화를 계측하기 위하여 설치하였다.

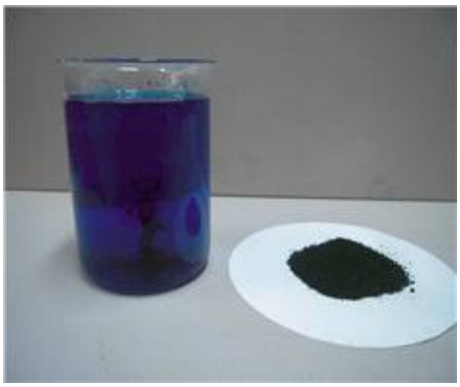
미동결 흙속에 지하수가 유입되어 수분 공급원이 되는 경우 개방형동상(open frost heave)실험을 실시하였다. 지하수가 강우 강설로 인해 상승하면 지반의 지지력이 약하게 되어 지반이 파손되는 원인이 된다. 지하수의 상승으로 지반에 침입한 수분이 겨울기간 동안 동상의 영향으로 상수관의 파손을 일으킬 수 있다.

지하수위의 변화를 주기적으로 계측하여 지반의 거동 분석이 필요하여 지하수위 측정관을 제작하였다.

PVC 파이프 VG2(배수용) 규격 Ø50 mm 길이 150 cm 파이프 하단부에 2 mm의 홈을 만들어 지하수가 유입 할 수 있도록 하였다. 그리고 부직포를 박음질하여 필터 역활을 하게 했다. 지하수위관을 시험 토조에 매설 후 캡을 만들어 외부의 우수를 방지하였다. 주기적으로 지하수위의 변화를 계측하여 겨울철 외기온도 변화에 따른 지반이 동결하면서 지하수위의 거동을 분석 하였다.



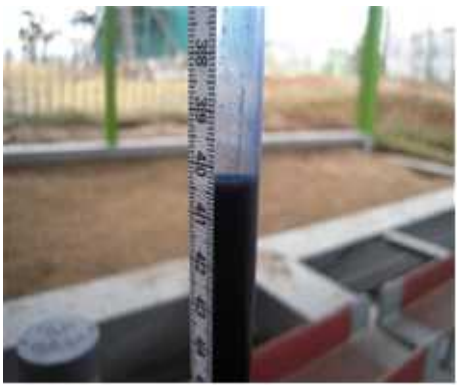
(a) Methylene blue



(b) Methylene blue 수용액



(c) 동결심도관



(d) 동결심도 계측

<그림 3-6-7>메틸렌 블루 동결심도계

<그림 3-6-7>은 겨울철 지중의 동결 깊이를 측정하기 위하여 메틸렌 블루 동결심

도계를 설치 하였다.

메틸렌 블루는 염기성 물감의 하나이다. 짙푸른 녹색의 결정이나 가루로 구성된다. 산화되면 푸른색, 환원되면 무색으로 변하는 성질이 있고, 물에 잘 녹으며 수용액은 살균력이 있다. 타닌을 매염제로 하여 무명을 청색으로 물들이거나 산화 환원 반응의 지시약, 세포나 조직 따위의 염색체로 쓴다. 메틸렌 블루 동결깊이계는 Argue와 Denyes에 의해서 고안되었으며, 투명한 아크릴 내관 및 내관을 보호하는 외관으로 구성되어 있다. 외관 속에 설치하는 아크릴 내관은 청색의 메틸렌 블루 수용액이 채워져 있다. 동결심도계는 직경이 25.4 mm의 아크릴 외관, 직경 15 mm의 아크릴 내관, 직경 10 mm의 고무튜브로 구성된다.

이 용액은 상온에서 청색을 유지하지만 기온이 0℃이하가 되면 무색으로 변한다. 따라서 동절기 지표가 얼기 시작하면 아크릴 내관을 외부로 꺼내어 용액이 얼어 무색으로 변한 곳까지의 깊이를 측정하여 동결깊이를 측정 하였다.



(a) 10cm 간격 온도계 설치



(b) 상부 고정단 부착



(c) Thermocouple T-Type



(d) Thermocouple 설치

<그림 3-6-8>지중 온도변화 계측 시스템

<그림 3-6-8>은 지중 온도 계측 시스템으로 지반 내부온도를 측정하기 위하여 구축 하였다. 동결토의 특성을 고려하여 온도측정 범위가 넓고 일반적으로 많이 사용

되는 써머커플 선정하였다.

온도계측기 써머커플을 1번에서부터 16번 까지 총 15개의 온도측정센서를 10 cm 간격으로 설치하였다. 단면-1, 단면-2, 단면-3의 상부시료, 중간시료, 하부시료의 각 층의 경계 지점에 설치하여 3시간씩 토조 내의 깊이별 온도변화를 측정했다. 온도센서는 -187℃~371℃ 범위까지 측정이 가능한 T타입 뚜께 3 mm가 이 연구에 가장 적합하다고 판단되어 사용하였다. 본 연구에 가장 적절하다고 판단되어 사용하였다. PVC파이프의 규격은 Ø25 mm PVC 이고 길이는 150 cm 이다. 지반의 동결융해의 거동으로 인한 온도 센서의 움직임을 방지하기 위해 고정단을 설치하였다.



(b) CS616 함수량계 (b) CS616 계측

<그림 3-6-9>동결지반 상부의 부동수분 측정기

<그림 3-6-9>는 미국 캠벨사의 CS616 TDR 함수량계의 형상을 보여주고 있다. 그림에서 나타낸 것과 같이 CS616 TDR 함수량계는 회로기판(circuit board)과 여기에 연결되어 있는 두 개의 스테인네스 강 재질의 로드(rod)로 구성되어 있다. 회로기판의 고속 전자기 구성요소들은 쌍안정 다조파발진기로 배열되어 있다. 다조파발전기의 출력신호는 도파관(wave guide)으로 이용되는 로드에 연결되어 있다. 로드를 따라 움직이는 신호의 이동시간 (travel time)은 로드 주위를 둘러 싸고 있는 재료의 유전율(dielectric constant)에 좌우되며, 유전율은 재료의 함수비에 좌우된다. CS616 TDR 함수량계의 출력신호는 ±0.7 volts의 진폭인 직사각형파(square wave)로 발생하며, 출력값은 주기(period)로 나오는데, 대기중에서 주기값 15×10-3 sec, 물에서 주기값은 41×10-3 sec로 나타난다. 이와 같이 차이를 이용하여, 주기값과 함수비의 경험적 관계식을 수립하게 되며, 이를 통해 흙의 함수비를 추정하게 된다. CS616 TDR함수량계의 매뉴얼에서는 일반적인 흙의 보정방정식(calibration equation)을 제안하고 있지만, 실제 현장에 적용시 반드시 보정실험 (calibration test)을 수행하도록 권고하고 있다. 이는 CS616 TDR 함수량계가 재료적 특성에 의해 크게 영향을 받기 때문이다. CS616의 사양은 정확도에서 측정 범위 0%의 50% VWC에 대한 VWC를 사용하고 있는 2.5%기준이 된 캘리브레이션(calibration)을

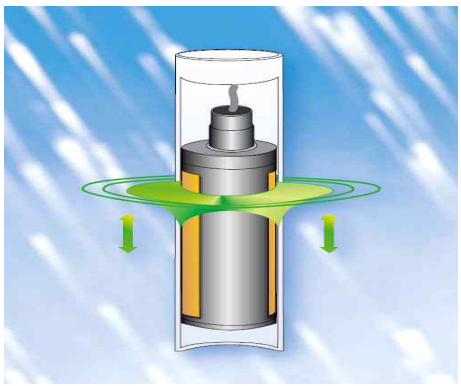
사용하여 정확한 계측이 이루어 지고 있다. 로드의 길이는 300 mm이고 직경은 3.2 mm 프로브의 헤더는 85 mm(폭) × 63 mm(길이) ×18 mm(높이) 이다. 노이즈의 영향이 적고 TDR 방식 장비계측에 적합하다



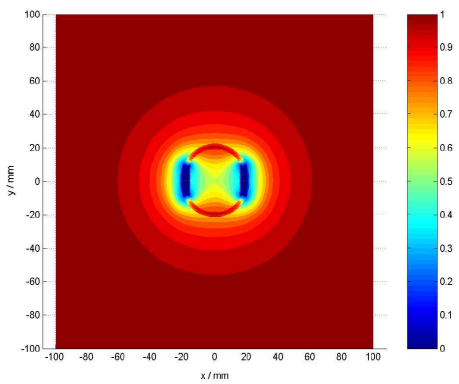
(a) TRIME-T3 Probe



(b) TRIME-T3 Probe 지중관입



(c) 부동수분 측정 방향



(d) 부동수분 측정 범위

<그림 3-6-10>동결지반의 깊이에 따른 부동수분 측정기

<그림 3-6-10>은 함수량계 TRIME-T3 Probe이다. (time domain reflectometry: TDR)함수량 측정시스템은 여러 종류의 토양 수분함량을 비파괴적으로 측정하는 계측기이다. 측정 매질의 토성, 유기물함량, 하전특성에 의해 영향 받지 않고 측정할 수 있는 시스템이다. 작동이 간편하고, 10초 이내 수분함량을 측정한다. 계측기는 알루미늄하우징으로 되어 있어서 내구성이 좋다.

다양한 구성(configuration)의 탐침봉(probe)을 이용하여 수분함량을 측정할 수 있다. T3 탐침봉은 토양에 기 매설한 가는 관을 이용해서 깊이 2 m까지의 수분함량을 층위별로 측정할 수 있으며, 범위는 0%~60% 이다. 따라서 T3 탐침봉을 이용하여 특정 깊이의 수분함량을 쉽게 측정할 수 있다.


(a) Augers Ø34 mm


(b) Augers 관입


(d) TECANAT Access Tube

<그림 3-6-11>깊이별 부동수분 측정 관 (TRIME-T3)

<그림 3-6-11>은 TRIME-T3 튜브의 설치 과정이다. 튜명 아크릴 튜브는 Ø34 mm의 오거를 이용하여 지반에 홀을 만들어 아크릴 제질의 부동수분 측정관을 지중에 삽입하였다.

튜브는 외경이 44.3 mm이고 내경은 42 mm이다. 부동수분 측정관은 2 m/Ø44 mm - 내충격성이 대단히 우수하다. 투명하며 용접이 가능하다. 오거는 Ø34 mm 길이 3 m 로 자체 제작 하여 사용하였다.


(a) Trime FM-version P3MR Probe



(b) Trime FM-version

<그림 3-6-12>지표면의 부동수분 측정 (P3MR)

<그림 3-6-12>는 Trime FM-version P3MR이다. 용적 수분함량 측정 범위는 0%부터 70%까지 이며 프로브길이는 160 mm, 케이블 길이는 2.5 m이다.

TDR 장비의 기술은 Topp(1980), Patterson and Smith(1980) 등이 제시한 원리를 인용하였다. 유전상수는 TDR 장비를 이용하여 다공매체를 통한 전자기파의 전달속도로부터 결정된다.

TDR을 이용하여 습윤토의 유전상수의 측정은 Davis and Chudobiak에 의해 처음으로 제안되었다. TDR 장비는 빠른 전압을 제공하는 파형발생기가 높은 빈도의 신호를 낮은 빈도로 전달하는 샘플러를 통하여 오실로시코프나 자동 기록 장치로 보내어지는 장비이다. 이 TDR 장비는 이 신호를 단계적으로 보내어 전달선 길이와 전송시간을 측정하는 장비이다.

<그림 3-6-13>은 지반의 동상량 측정기은 흙의 동상 특성을 파악하기 위하여 지표침하판 및 지중 침하판을 설치하여 지표의 팽창량 및 처짐량을 측정하였다. 동상특성을 파악하는 기준은 시간과 0℃이하의 지속온도에서 동상팽창량의 발생 특성이 중요하다. 본 실험에서는 자동 변위 측정기와 수동변위측정기를 이용하여 계측 하였다.



(a) 지표침하판



(b) LVDT



(c) 지중 20cm 침하판



(d) 다이얼게이지

<그림 3-6-13>지반의 동상 변형량 측정기

계측기들은 취급이 용이한 변위계이다. 출력이 크고 안정성이 뛰어나며 고정도의 측정을 할 수 있다. 지표 침하판은 10 cm × 10 cm의 아크릴 판으로 제작하여 무게를 최소화 하였다.

침하판은 원지반에 설치함으로써 지반의 침하량과 침하속도부터 지반의 동결깊이 및 동결현상을 평가 하였다.

지중침하판은 지중 20 cm 깊이에 매설하여 0℃이하의 지속온도에서 지중의 변화를 계측하였다. 지중침하판은 이중관을 적용하여 흙이 동결하면서 발생하는 동착강도로 인한 침하판의 거동이 자유롭게 하기위하여 이중관 사이에 구리스를 주입하였다. 침하판은 10 cm × 10 cm의 알루미늄 판으로 제작하였으며 상부에 다이얼게이

지를 장착하여 유관으로 지중의 변화를 계측하였다.



(a) 닥타일 주철관



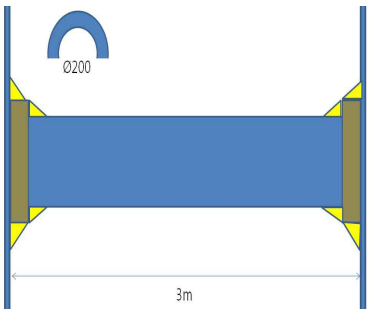
(b) 배관용 스테인리스 강관



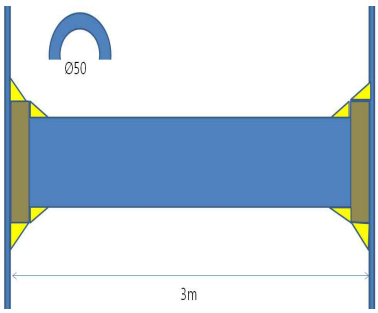
(c) 닥타일 주철관 Ø200



(d) 배관용 스테인리스 강관 Ø50



(e) 닥타일 주철관 설치도



(f) 배관용 스테인리스 강관 설치도

<그림 3-6-14>현장 모형 토조에 상수도관 설치

실험에 사용한 상수도관은 닥타일 주철관 Ø200과 배관용 스테인리스 강관 Ø 50를 <그림 3-6-14>에서와 같이 설치하였다. 상수관 설치시 수평을 유지하기 위하여 수평계를 이용하였으며 양끝단을 무한대의 관으로 보기위하여 선단을 만들어 용접하였다.

상수도관은 장주(long column)으로 압축력을 받을 때, 압축응력과 함께 탄성좌굴(buckling)을 일으켜 파괴되는 기둥으로 보기위하여 세장비( )를 닥타일주철관은 60, 스테인리스 강관은 120이다. 이는 양단고정으로 좌굴에 의한 파괴를 볼 수 있다.

<표 3-6-2> 현장 모형 실험에 사용한 상수관의 비교

Class	Ductile cast iron pipe	Stainless steel pipe
Korea standard	KS D 4317	KS D 3576
Characteristics of pipe	This type of pipe is a direct development of earlier cast iron pipe, which it has superseded	This type of pipe outstanding corrosion resistance, fire resistance, heat resistance, and wear resistance.
Water Supply Pipe		
Property	Rigid pipe	Rigid pipe
Material of pipe	The standard internal lining is cement mortar and standard external coatings include bonded zinc, asphalt or water-based paint	Other types of stainless steel often possess additives (such as nickel or molybdenum) which strengthen traits that are desirable in particular applications
Constituent of pipe	Typically, the pipe is manufactured using centrifugal casting in metal or resin lined molds	Stainless steel is a versatile material comprised of a steel alloy and a small percentage of chromium the addition of chromium adds to the material's corrosion resistance, a trait that earned stainless steel its name.
Unit weight (kN/㎥)	72.5	0.08
Water pressure(kPa)	0.25~0.75	0.25
Tensile strength (kPa)	42	52
Compression strength (kPa)	30~60	30~50
Elongation percentage (%)	7	25
Coefficient of expansion (mm/m℃)	1.02X10-5(100%)	1.73X10-5(170%)



(a) 지그 부착지점 손질



(b) 닥타일 주철관 부착지점

<그림 3-6-15>상수도관에 스트레인게이지 계측지점 정리

<그림 3-6-15>는 상수도관의 변형 특성을 파악하기 위하여 계측지점을 정리하였다. 토조에 상수도관을 설치하고 상수도관에 계측지점 부를 정리하였다. 상수도관에서 계측장비를 부착할 지점을 대상으로 그라인더로 이물질을 제거하고, 샌드페이퍼를 이용하여 계측장비 부착면을 정리해 준다. 계측지점을 정리후에 스트레인게이지를 부착하였다. 스트레인게이지 FLA-5-11-5L를 부착하였으며 지하수에 의한 계측기를 보호하기위하여 방수 작업을 시행 하였다.스트레인은 변형도 또는 변형률을 나타내며, 어느 물체가 인장 또는 압축을 받을 때 원래의 길이에 대하여 늘어나거나 줄어든 길이를 비율로 표시한 값을 일컫는다. <그림 3-6-16>는 닥타일 주철관과 배관용 스테인리스 강관에 스트레인게이지를 부착한 것이다.



(a) 스트레인게이지 FLA-5-11-5L



(b) 스트레인게이지 FLA-5-11-5L

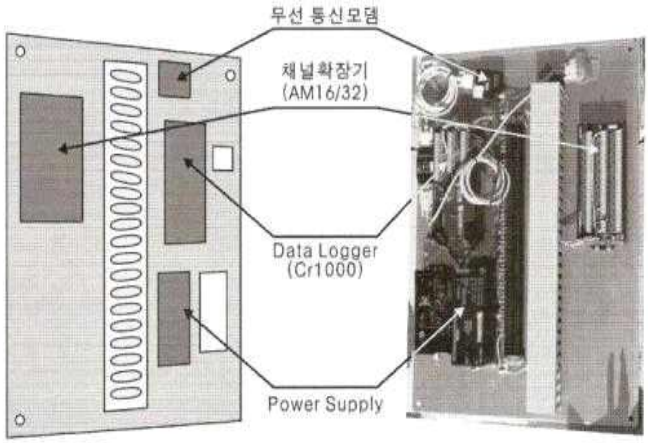
<그림 3-6-16>상수도관에 스트레인게이지 부착

나. 현장 모형 실험의 데이터 수집 장치

수집 장치는 채널 확장기와 데이터 로거로 구성된다. 함수센서와 온도센서는 포장체의 온도와 함수비를 측정하게 되는데, 이때 함수비와 온도는 아날로그신호로 계측 되며, 데이터로거는 아날로그신호 형태의 계측 결과를 디지털 신호로 전환하는 역할을 한다. 또한 디지털 신호로 전환된 계측결과를 온도와 함수비(volumetric moisture content: VMC)로 연산하고, 내부메모리에 통계 처리된 결과를 저장하는

역할을 하게 된다. 본 연구에서 함수센서와 온도 센서로부터 계측 데이터를 수집하기 위하여 현장 계측시스템에 적용된 컨트롤 박스내 CR1000 데이터 로거를 배치한 내부 구조를 나타낸 것이다.

CR1000 데이터 로거는 14개 채널을 갖고 있기 때문에 CR1000에 연결할 수 있는 계측센서는 최대 14개 이지만, 본 연구에서 구축하는 현장 계측시스템에서 설치된 자동 계측 센서는 대기온도센서, 지중 온도센서 및 지중 하부구조 함수센서로 총 34개(함수센서 15개, 하부 온도센서 10개, 포장층 온도센서 8개, 대기온도센서 1개)의 채널이 필요하기 때문에 채널 확장기를 통하여 데이터 로거에 연결할 수 있는 계측 센서 숫자를 확장하기 위하여 적용하였다. <그림 3-6-17>은 컨트롤 박스 내부 구조이다.



<그림 3-6-17>현장모형실험 컨트롤박스 내부 구조

본 연구에 사용한 데이터 로거는 CR1000으로 컴퓨터와 주기적으로 동기화 되어 있으므로 윈도우 프로그램을 통하여 계측 시간을 수정할 수 있다<그림 3-6-18>.



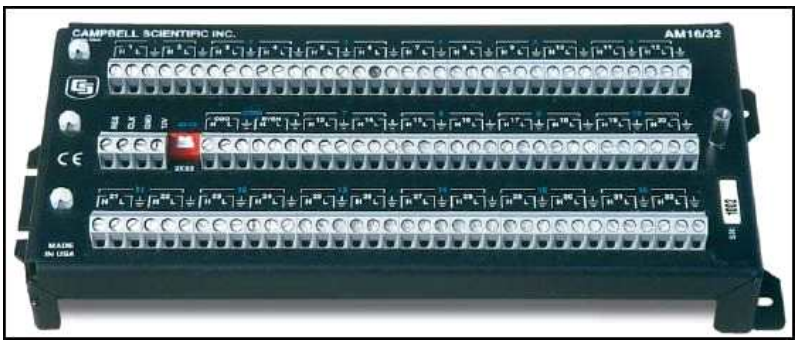
(a) 데이터로거



(b) CR1000

<그림 3-6-18>자동 계측데이터 수집기

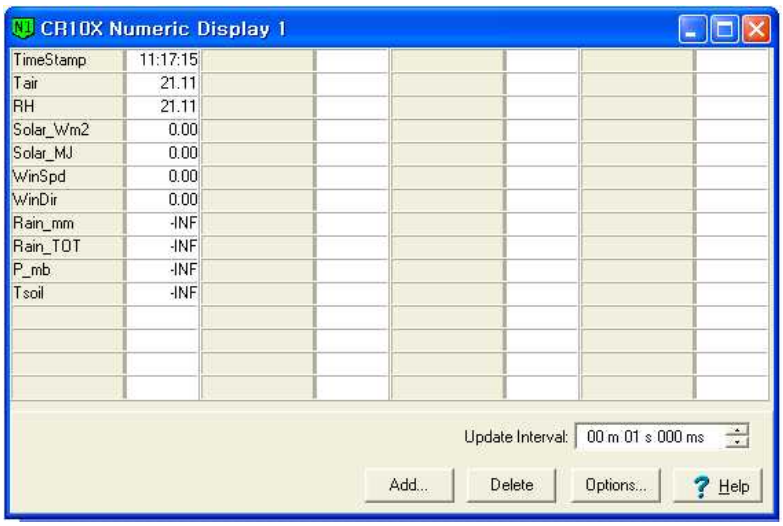
CR1000 데이터 로거는 14개 채널을 갖고 있기 때문에 CR1000에 연결할 수 있는 계측센서는 최대 14개 이지만 본 연구에서 구축하는 현장 계측시스템에서 설치된 자동 계측 센서는 대기온도센서, 지중 온도센서 및 포장 하부구조 함수센서로 총 34개(함수센서 15개, 하부 온도센서 10개, 포장층 온도센서 8개, 대기온도센서 1개)의 채널이 필요하기 때문에 <그림 3-6-19>은 멀티플렉서(AM16/32B) 채널 확장기를 통하여 데이터 로거에 연결할 수 있는 계측 센서 숫자를 확장하기 위하여 적용하였다.



<그림 3-6-19>계측기 채널 확장기(AM16/32B)

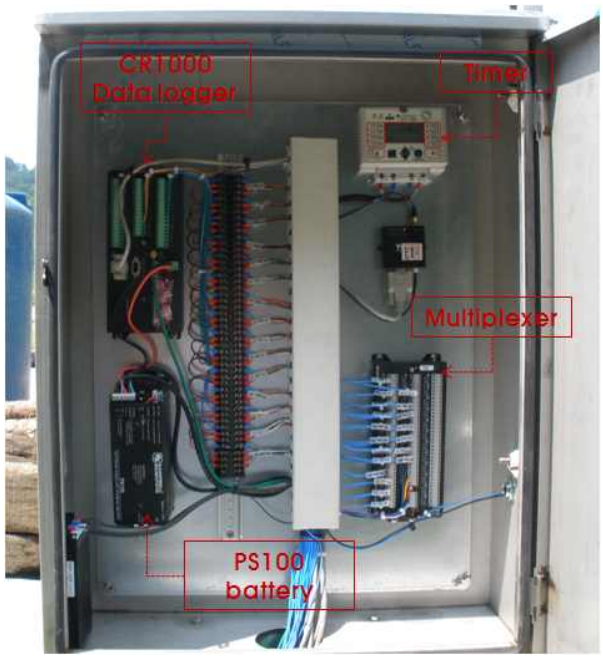
저장 장치는 저장용 데스크탑 컴퓨터로 서버급 컴퓨터를 운용중이다. CR1000 데이터 로거를 컨트롤할 수 있는 소프트웨어는 로거넷 프로그램으로 제일 먼저 원격지 컴퓨터에서에서 로거넷 프로그램을 설치 한후에 통신이 연결된 상태에서 CR1000과 연결을 하면 되고, 현장에서는 노트북을 이용하여 연결하면 된다. <그림 3-6-20>은 로거넷 프로그램을 나타낸 것이다.

로거넷 프로그램과 무선 통신 장치를 통하여 현장 계측시스템에 설치된 데이터 로거에 접속하여 아래 그림과 같이 프로그램 전송, 데이터 수집 및 실시간 모니터링 등을 수행할 수 있다.



<그림 3-6-20>로거넷(loggernet)을 이용한 현장 데이터 수집

접속(connect) 후 실시간으로 측정값을 보기 위해서는 중간 하단의 숫자(numeric) 버튼을 클릭하면, 창이 아래 <그림 3-6-21>과 같이 뜨면서 현재 측정되는 값들을 볼 수 있다.

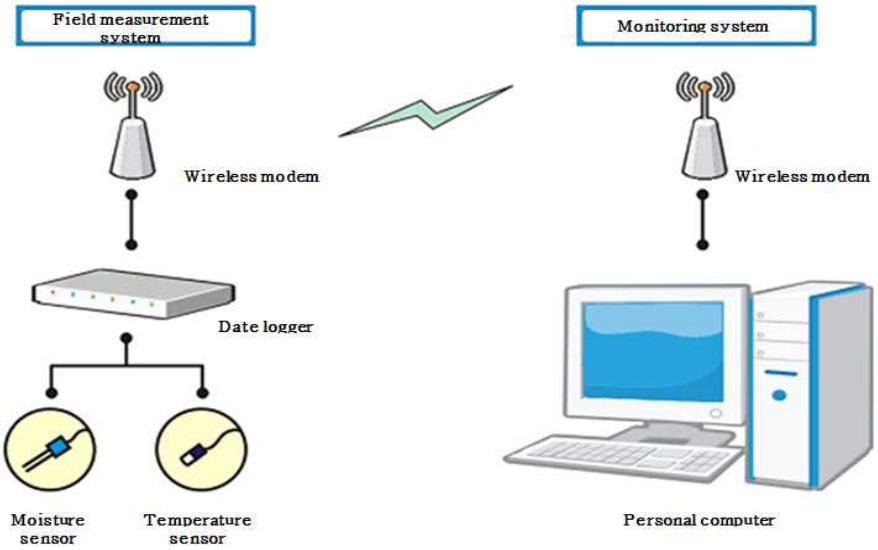


<그림 3-6-21>현장모형실험 자동 계측 시스템

지중 온도변화 계측시스템을 이용한 계측 데이터는 무선통신을 통하여 연속적인 계측 데이터를 수집하게 되며, 동상계측시스템의 무선통신망 구축 개요도는 <그림 3-6-22>와 같다. 이때 무선 통신 (code division multiple access: CDMA) 방식으로 기존에 운영하고 있는 이동통신사의 통신망을 이용하였다.

전원장치는 태양열 전지판을 통하여 컨트롤 박스 안에 설치된 축전지를 충전하여 외부 전력이 필요하지 않은 독립 전원 형태로 구성되어 있다. 이때 데이터 로거의 경우 10V 이상의 전원이 필요하며, 태양열 전지판으로 충전 할 경우 1회 충전으로 1주일간 충전이 필요하지 않을 정도의 용량을 가지고 있다.

저장 장치는 저장용 데스크탑 컴퓨터로 서버급 컴퓨터를 운용중이다. CR1000 데이터 로거를 컨트롤할 수 있는 소프트웨어는 로거넷 프로그램(loggernet program)으로 제일 먼저 원격지 PC에서 로거넷 프로그램을 설치 한 후에 통신이 연결된 상태에서 CR1000과 연결을 하면 데이터를 수집할 수 있고, 현장에서는 노트북을 이용하여 연결하면 데이터를 수집할 수 있다.



<그림 3-6-22>무선 네트워크를 이용한 계측 자료 수집 방법

또한, 중요한 기능중 하나로 CR1000 데이터로거의 메모리 여유분을 확인하는 기능이 있다. 이것은 현재 프로그램에 의해서 관측을 하고 저장을 수행 했을때, 로거 메모리가 가득차는데 걸리는 시간을 알려주는 중요한 기능이다. 만약 사용자가 이 시간 이내에 데이터를 수집해 가지 않으면, 오래된 데이터부터 지워지게 된다.

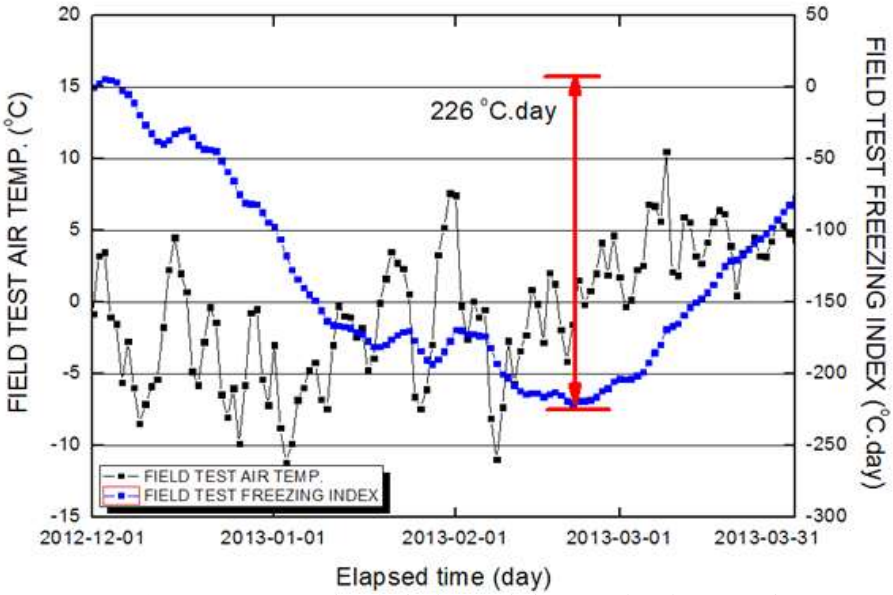
이러한 기능을 통해서 현재 프로그램에 의해서 관측하고 저장을 수행할 때, 데이터 로거의 메모리가 가득 차는데 걸리는 시간을 파악할 수 있다. 탭에서 각 테이블별로 가득차는데 걸리는 시간을 나타내고 있다.

3. 현장실험을 통한 상수도관의 거동 분석

가. 실험 현장의 온도 분포 분석

겨울에 온도가 0℃이하가 지속도면 모든 물질은 강성이 커지고 수축한다. 흙도 역시 예외는 아니다. 흙의 최적함수비 상태에 동결한다고 해서 지지력이 손상이나 체적이 팽창하는 것은 아니다. 다만 수분이 계속 공급되었을 때 0℃이하로 계속 지속되면 동상흙은 체적이 팽창하며 동상현상이 나타난다.

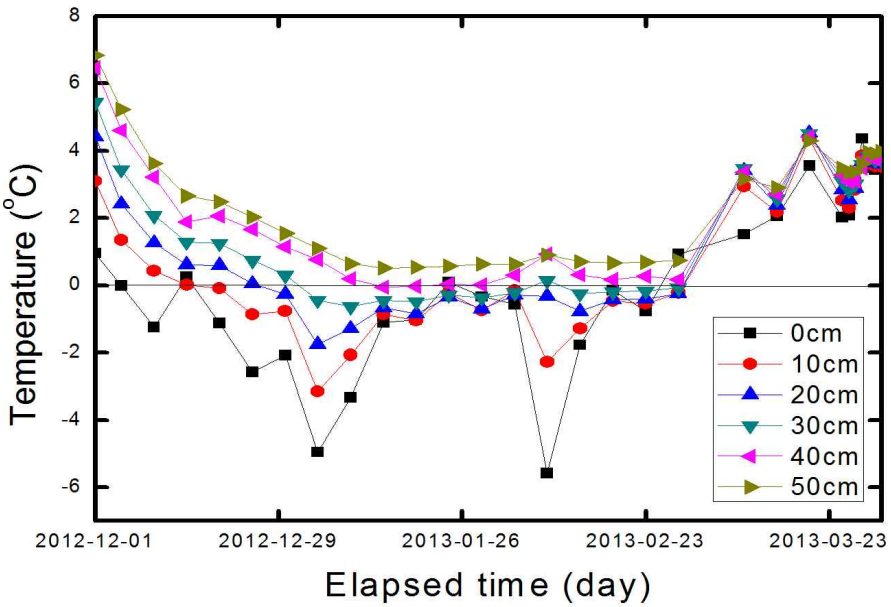
이러한 온도 특성을 파악하기 위하여 현장에 설치된 대기온도 측정기로부터 대기온도를 획득하였다. 대기온도는 2012년 12월 3일부터 2013년 2월 21일 까지 0℃이하의 온도였으며 81일간 0℃이하의 온도를 유지하였다. 또한, 대기온도를 동결지수를 산정하였다. 동결지수(freezing index)는 지반의 동결깊이를 산정하기 위한 대표적 척도로서, 지반을 동결시키는 대기온도의 강도와 지속기간의 누가영향으로 표시된다.



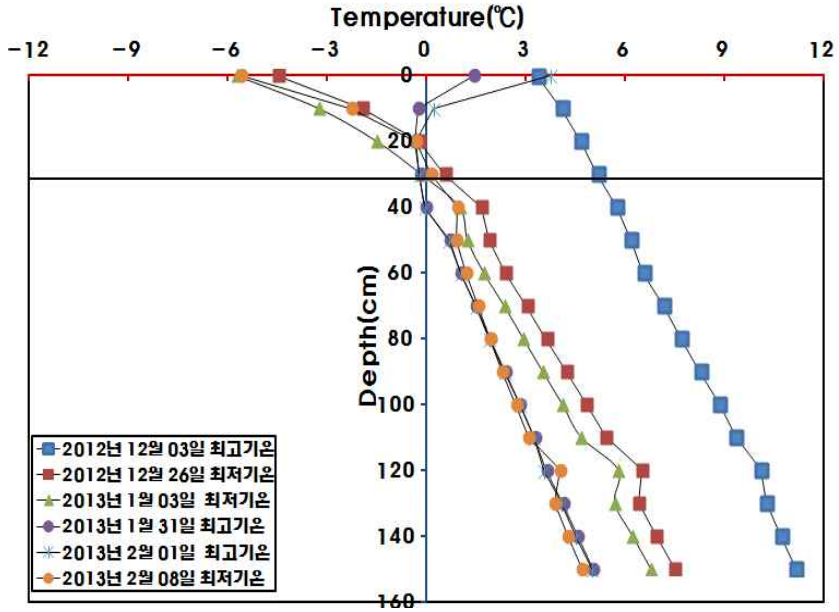
<그림 3-6-23>실험 현장의 대기온도변화 및 동결지수

동결지수의 단위는 ℃day이며, <그림 3-6-23>과 같이 동결계절 동안의 누가 온도·일에 대한 시간곡선상의 최고점과 최저점의 차이로 나타난다. 실험 현장의 동결지수는 226℃day이다.

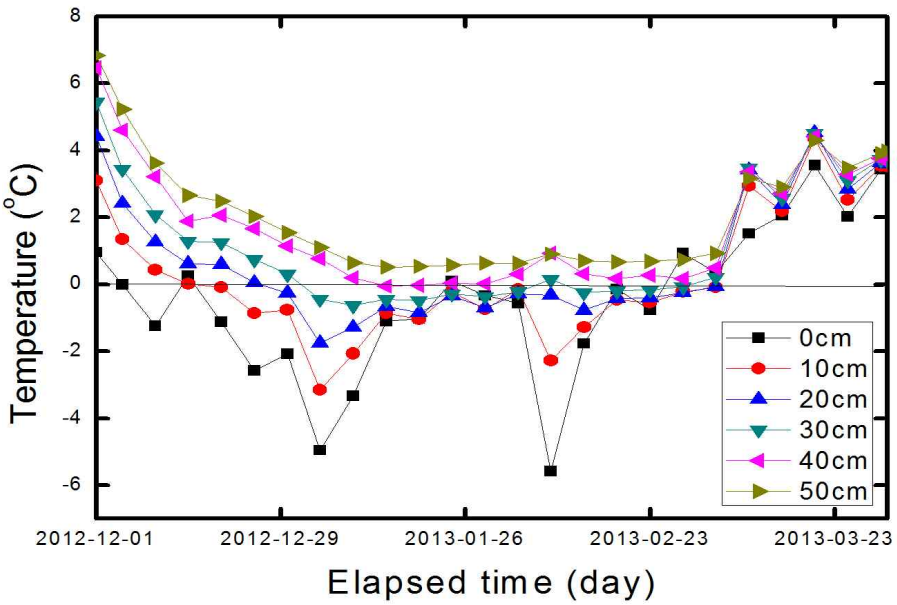
상수관 매립 지반의 온도분포를 확인하기 위하여 지중에 10 cm 간격으로 150 cm의 온도센서를 설치하였다. 온도센서에서 획득된 대상 지반의 온도분포를 살펴보면 다음과 같다. <그림 3-6-24>는 단면-1 단면 지반의 온도 분포이며 2012년 대기온도는 2012년 12월 3일부터 2013년 2월 21일 까지 0℃이하의 온도였으며 81일간 0℃이하의 온도를 유지하였다. 2013년 1월 12일 43.13 cm까지 최대의 동결 깊이가 측정 되었다. <그림 3-6-24>는 영하온도 지속 일별 지반 온도 분포 이다.



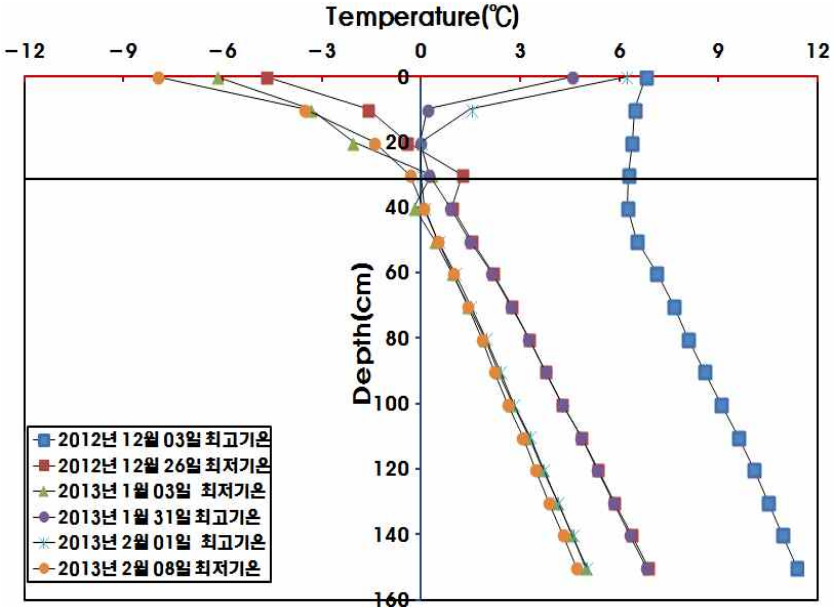
<그림 3-6-24>단면-1 겨울철 지반의 깊이별 지중 온도 분포



<그림 3-6-25>단면-1 지반의 동결 깊이 변화



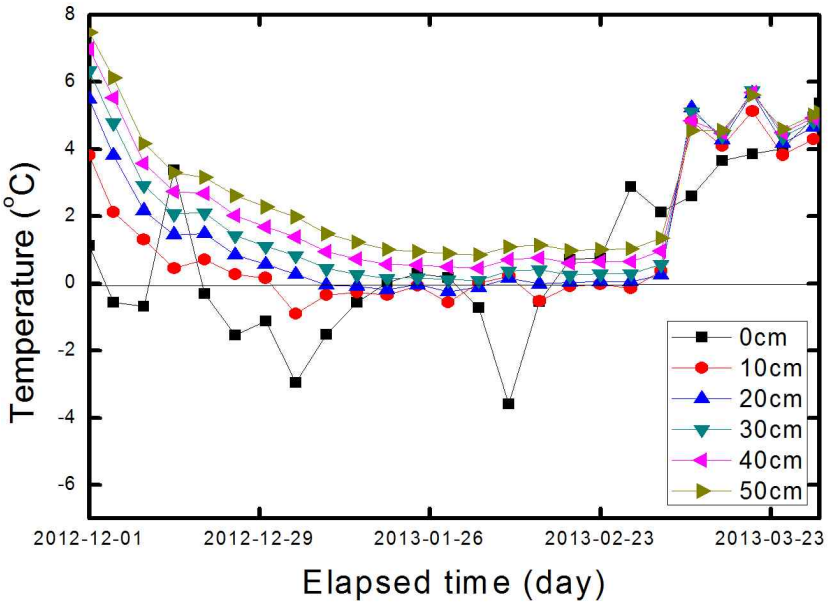
<그림 3-6-26>단면-2 지반의 깊이별 지중 온도 분포



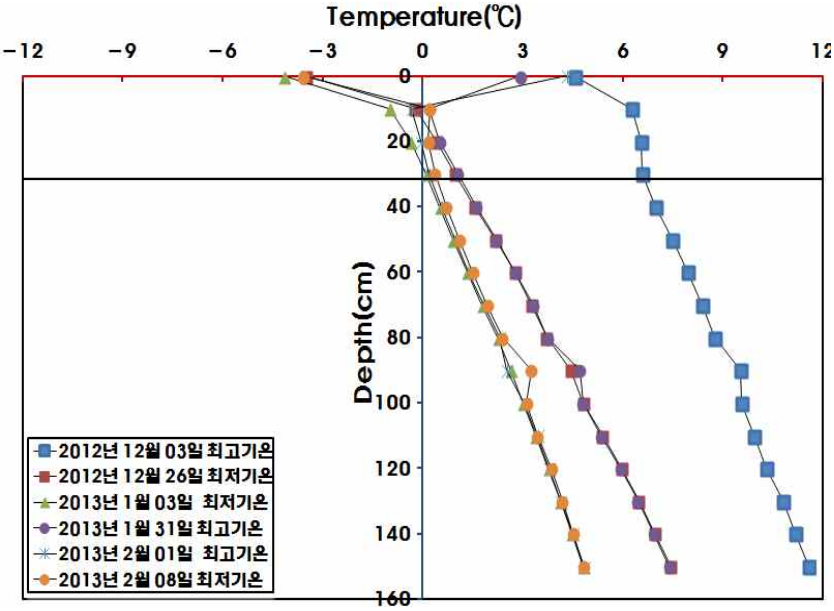
<그림 3-6-27>단면-2 지반의 최대 동결 깊이

<그림 3-6-26>은 단면-2 지반의 온도 분포이며 2012년 대기온도는 2012년 12월 3일부터 2013년 2월 21일 까지 0℃이하의 온도였으며 81일간 0℃이하의 온도를 유지하였다. 2013년 1월 25일 38.08 cm까지 최대의 동결 깊이가 측정 되었다. <그림 3-6-27> 단면-2 지반의 최대 동결 깊이이다.

<그림 3-6-28>은 단면-3 지반의 온도 분포이며 2012년 대기온도는 2012년 12월 3일부터 2013년 2월 21일 까지 0℃이하의 온도였으며 81일간 0℃이하의 온도를 유지하였다. 2013년 1월 25일 38.08 cm까지 최대의 동결 깊이가 측정 되었다. <그림 3-6-29> 단면-3 지반의 최대 동결 깊이 이다.



<그림 3-6-28>단면-3 지반의 깊이별 지중 온도 분포



<그림 3-6-29>단면-3 지반의 최대 동결 깊이

단면-1은 상부 20 cm가 화강풍화토이며 화강풍화토 밑에 60 cm의 모래로 이루어진 지반이다. 상부에서 10 cm부위에서는 대기온도의 변화를 직접적으로 지반에 미치는 것을 확일 할수 있으며 상부 20 cm이하에서는 온도 감소율이 점진적으로 감소 함을 보인다. 단면-2에서는 단면-1의 지반 구성과 동일 하여 거의 비슷한 양상의 온도 분포를 나타낸다. 단면-3에서는 상부 20 cm가 점토로 이루어져 있으며 하부는 다른 단면과 동일하게 구성 되어 있다. 점토의 경우 공극이 작고 투수성이 작아 화강풍화토에 비하여 동결 깊이가 작게 측정 되었다.

나. 온도변화에 따른 지반의 동상 팽창량 분석

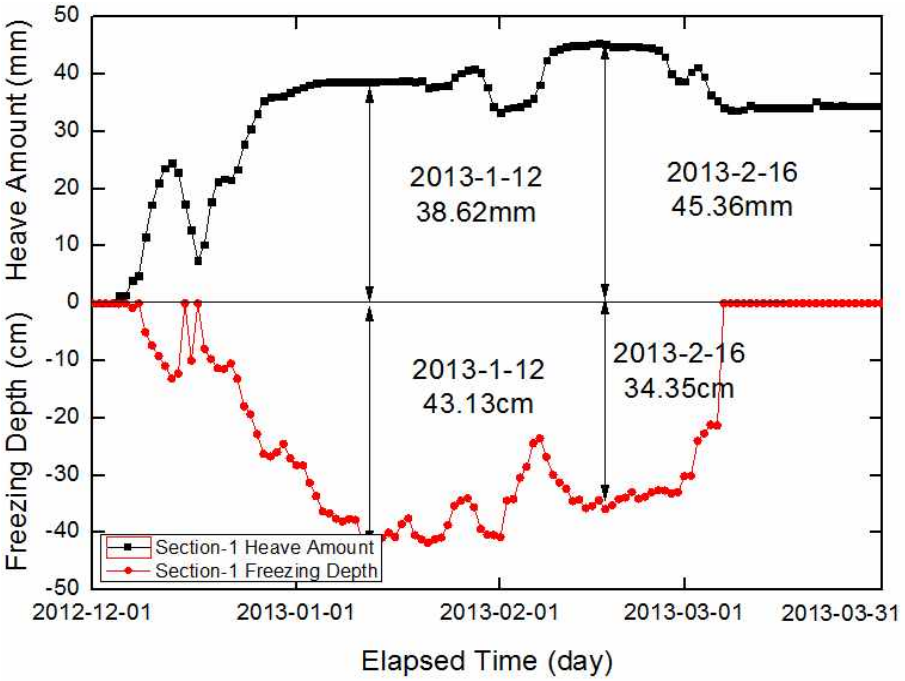
단면-1의 경우 상부에 화강풍화토 하부에 모래로 구성되어 있으며 일반적인 흙의 경우 모세관 현상에 의한 자연환경의 지하수 유입으로 계속적인 물의 유입으로 부동수분을 제외한 일정한 수분의 동결로 동상이 더 크게 일어난 것으로 보인다.

<그림 3-6-30>에서 2013년 2월 16일 45.36 mm의 팽창량을 보였으며 이날의 동결깊이는 34.35 cm이며 최대 동결깊이가 발생한 2013년 1월 12일은 43.13 cm까지 동결 하였으며 이날의 동상량은 38.62 mm의 팽창량을 보였다. 2013년 3월 7일 이후에는 동결층이 모두 융해 되었다.

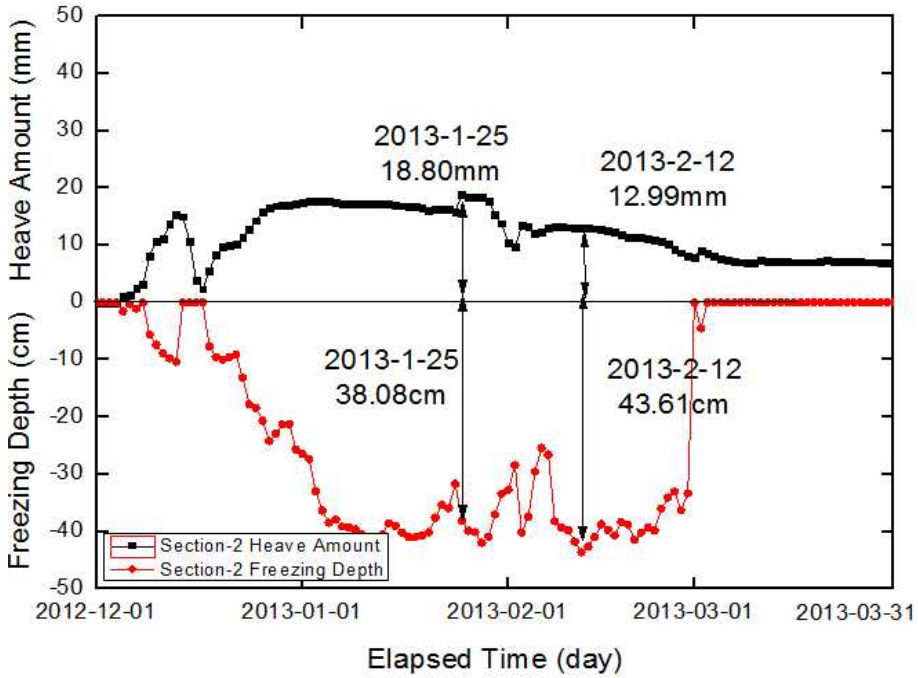
단면-2는 단면-1과 같은 지반 구성을 가지고 있음에도 불구하고 <그림 3-6-31>에서와 같이 동상팽창량이 단면-1에 비하여 20 mm 정도 차이를 보인다. 이는 지하수의 유입이 충분하지 못한 것으로 판단다. 지하수의 유입에 따른 동상팽창량의 거동이 확연하게 다르다는 것을 나타낸다.

단면-3는 <그림 3-6-32>에서와 같이 2013년 1월 29일에 최대 동상팽창량 25.53

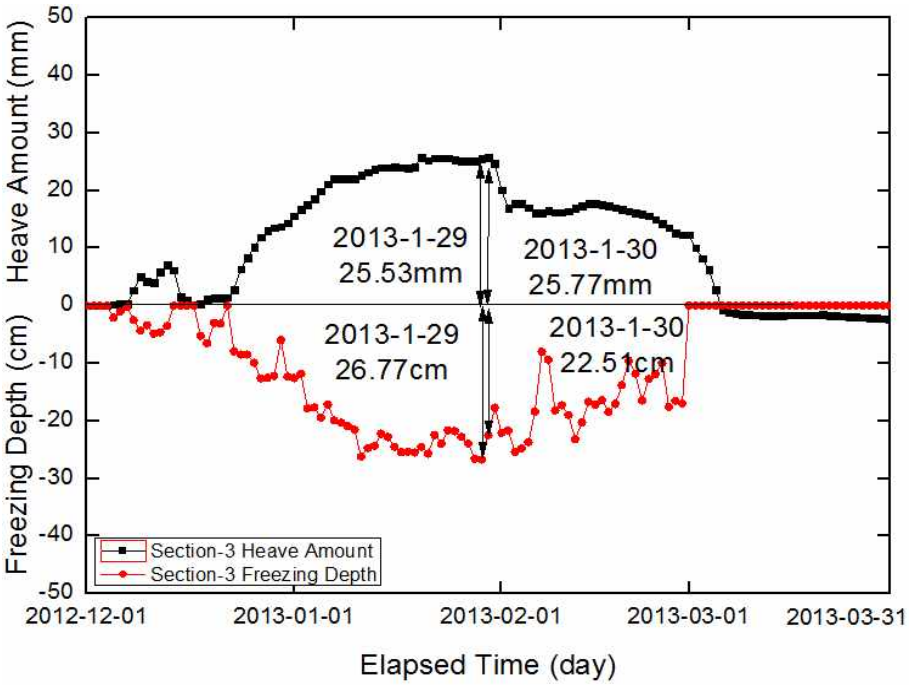
mm이며 최대 동결 깊이는 26.77 cm이다. 점토의 경우 다른 흙에 비하여 자체 함수비가 크며 그 이유로 인하여 수분을 많이 포함하여 동상 팽창량이 발생한 것으로 판단된다.



<그림 3-6-30>2012-2013년 단면-1 겨울철 지반의 변형



<그림 3-6-31>2012-2013년 단면-2 겨울철 지반의 변형



<그림 3-6-32>2012-2013년 단면-3 겨울철 지반의 변형

일반적인 흙의 성질은 일정한 영하의 온도에서 충분한 수분의 공급이 지속되면 동상량이 점점 커진다. 특히 영하의 온도에서도 저면의 흙속에 부등한 상태의 물로 지하수위가 존재하면 물은 모세관 현상에 따라 일정하게 흙의 표면을 따라 상승하여 영하의 온도에 영향을 받는 상부로 유입되면 동결을 일으킨다.

흙의 공극 내 수분이 어는 동상이 발생되면 공극의 부피 팽창으로 인하여 흙의 팽창 되며 그 양은 영하의 온도 지속 조건하에서 점차 증가하게 된다. 흙이 동상 피해를 입는 경우 자체의 부피가 팽창하며 하부 매설관 및 지반상부에 균열을 발생한다.

지반의 동상 메커니즘으로 인하여 상수관 및 하부 매설관의 수명이 단축 되고 이러한 문제들이 야기 된다.

단면-1의 경우 상부에 화강풍화토로 구성되어 있으며 일반적으로 모세관 현상에 의한 자연환경의 지하수 유입으로 계속적인 물의 유입으로 부동수를 제외한 일정한 수분의 동결로 동상현상이 발현 되었다. 단면-1의 경우 지중 20 cm의 침하판을 계측한 결과 -10 mm까지 변형하여 지반이 동상현상을 발현할 때 상부로 거동하기도 하지만 하부로도 거동하여 모든 방향으로 동상 거동이 일어나는 것을 확인하였다.

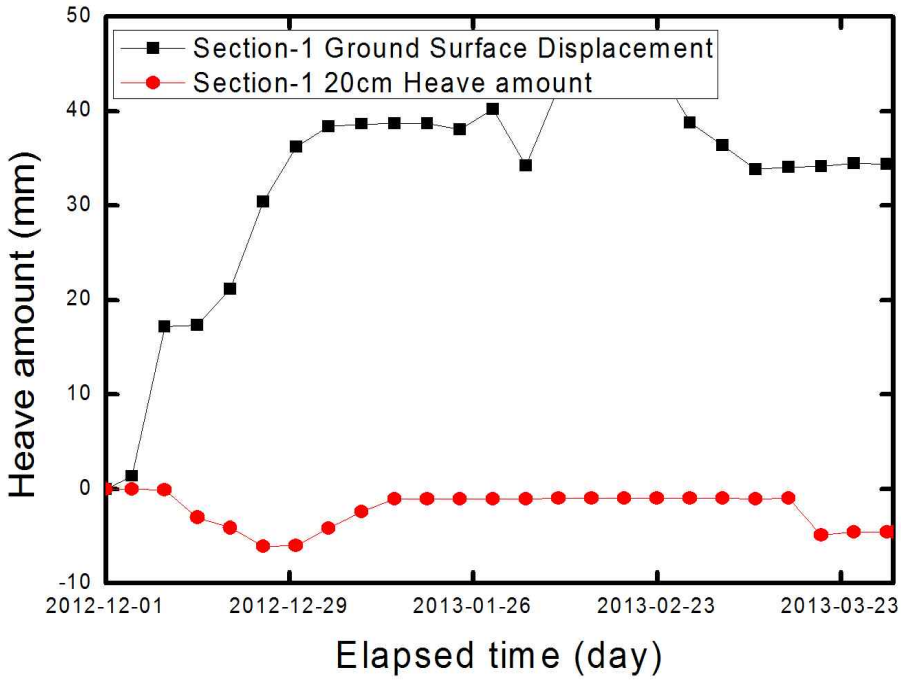
일반적인 흙의 성질은 일정한 영하의 온도에서 충분한 수분의 공급이 지속되면 동상량이 증가한다. 특히 영하의 온도에서도 저면의 흙속에 부동한 상태의 물로 지하수가 존재하면 물의 모세관 현상에 다라 일정한 흙의 표면을 따라 상승하여 영하의 온도에 영향을 받는 상부로 유입되면 동결을 일으킨다.

흙의 공극 안의 수분이 어는 동상이 발생되면 공극의 부피 팽창으로 인하여 흙은

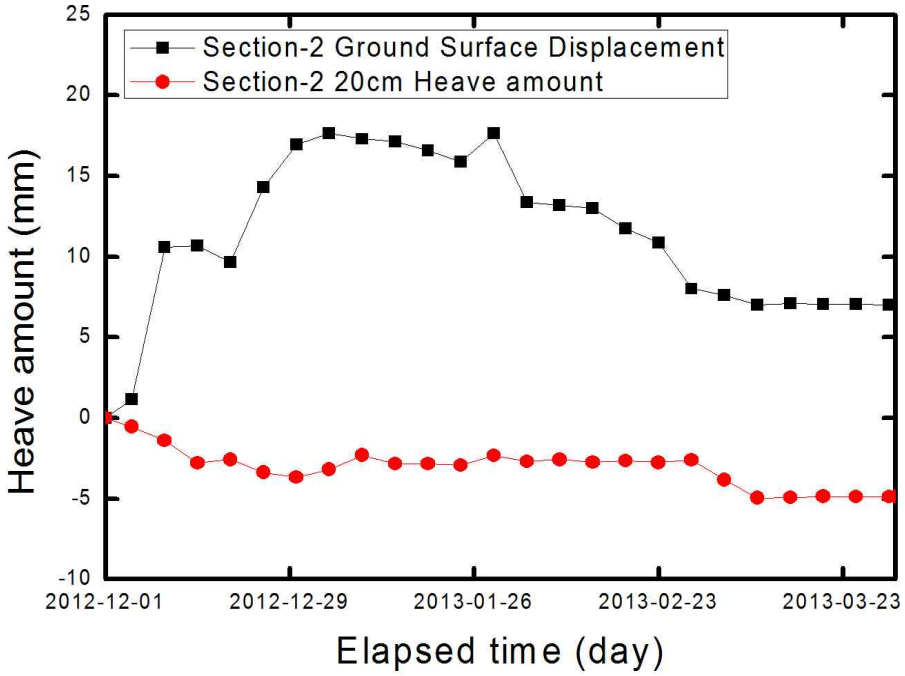
팽창하게 되며 그 양은 영하의 온도 지속 조건하에서 점차 증가하게 된다. 지중에 매설된 상수도관의 동상의 피해를 입는 경우, 흙의 자체 부피가 팽창하여 상부 구조물 및 상수도관의 파괴를 일으킨다. 이러한 지반의 동상 메커니즘으로 인하여 상수도관의 수명이 단축되고 있다.

<표 3-6-3> 동결지반의 변화량

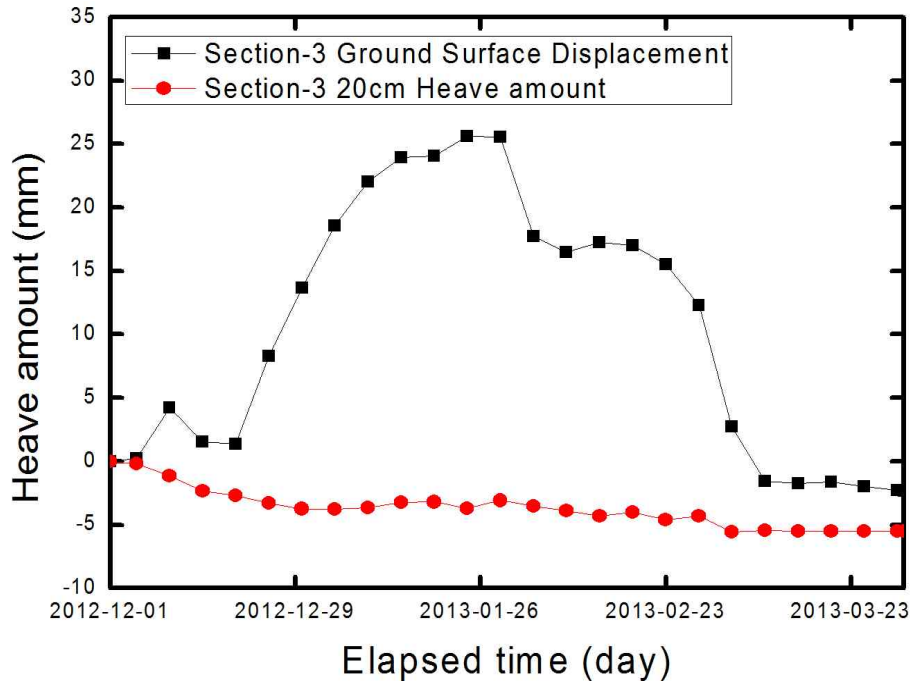
Classification	Section-1	Section-2	Section-3
Ground surface displacement (mm)	44.96	17.67	25.62
20 cm Heave amount (mm)	-6.09	-4.94	-5.54



<그림 3-6-33>단면-1의 지반 동결에 따른 동상 팽창



<그림 3-6-34>단면-2 지반 동결에 따른 동상 팽창



<그림 3-6-35>단면-3 지반 동결에 따른 동상 팽창

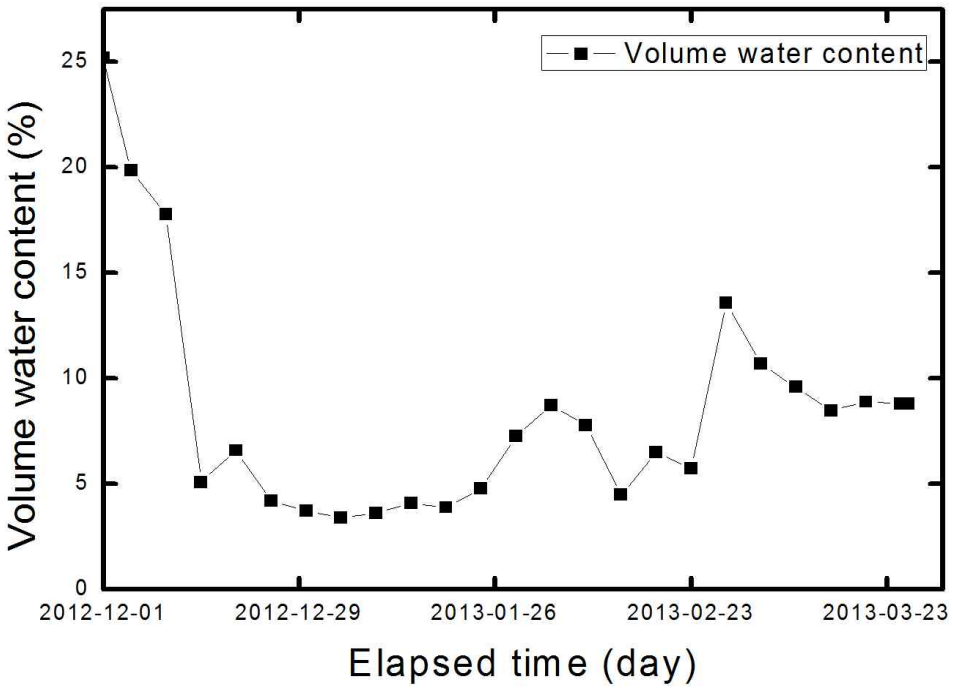
다. 모형실험 현장 지반의 부동수분 분석

동결된 흙의 부동수분량을 결정하기 위해서는 (time domain reflectrometry: TDR)

장비를 아용하여 실험을 수행하였다.

TDR 장비는 독일의 IMKO사 제품의(Trime FM-version P3)이고, 측정용 프로프를 흙속에 넣고, 측정기 내에서 전파를 발생시키면 전자파는 프로브의 길이를 따라 왕복하면서 전자파의 속도를 계산함으로써 흙의 유전율 상수를 측정하게 된다. 동결토를 구성하는 요소인 토립자, 얼음, 간극수, 공기 등의 유전율이 서로 다른 원리를 이용하여 동토의 체적함수비를 환산해 낸다.

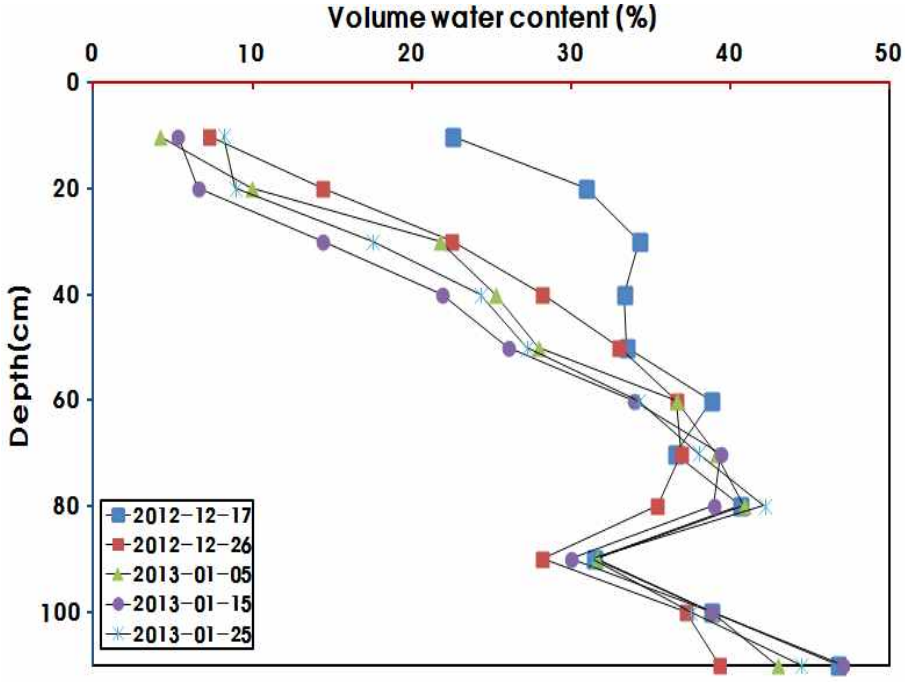
TDR장비는 자체적으로 전자파를 발생시키고, 프로브의 끝단가지 왕복하는 시간을 측정하여 유전율을 계산하며, 유전율을 이용하여 흙속의 부동수분을 계산한다.



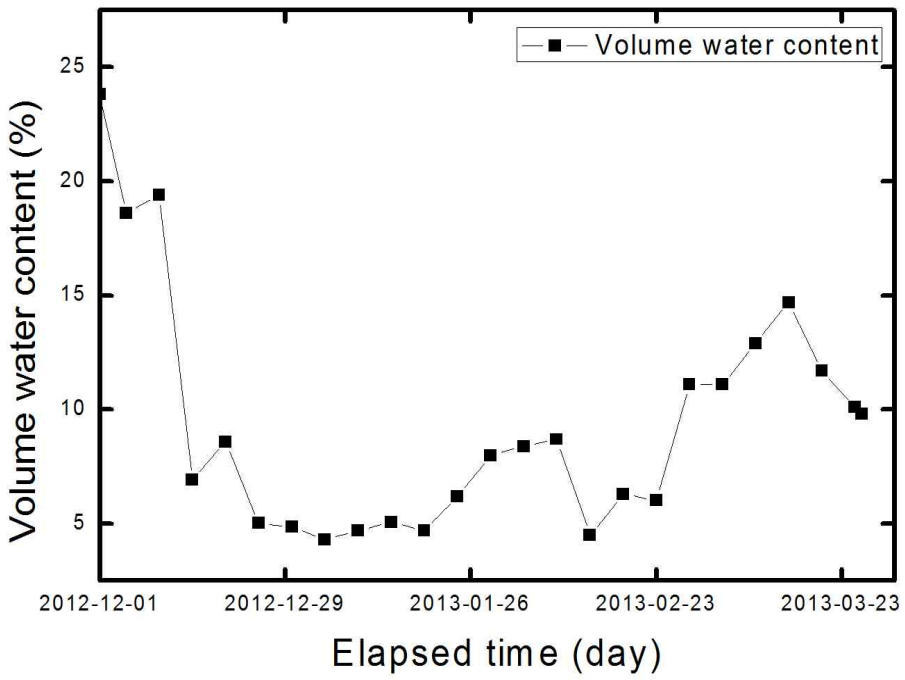
<그림 3-6-36>단면-1 겨울철 지표의 부동수분 변화

<그림 3-6-36>는 단면-1의 부동수분 변화이다. 지반이 동결 하면서 부동수분은 감소하며 동결기간에서는 5%의 부동수분을 함유하며 해빙기에 이르러서는 약 9.4%의 체적 함수비를 나타낸다. 이는 흙이 대기온도의 영향으로 흙이 포함하고 있는 물이 얼음으로 상변화 하는 것을 의미한다. <그림 3-6-38>은 단면-1의 동결 지속시간에 따른 깊이별 부동수분의 변화이다. 깊이가 증가 할수록 부동수분의 변화 오차는 줄어들며 상부로 갈수록 지반이 대기온도의 영향으로 점차 부동수분이 감소함을 보이고 있다.

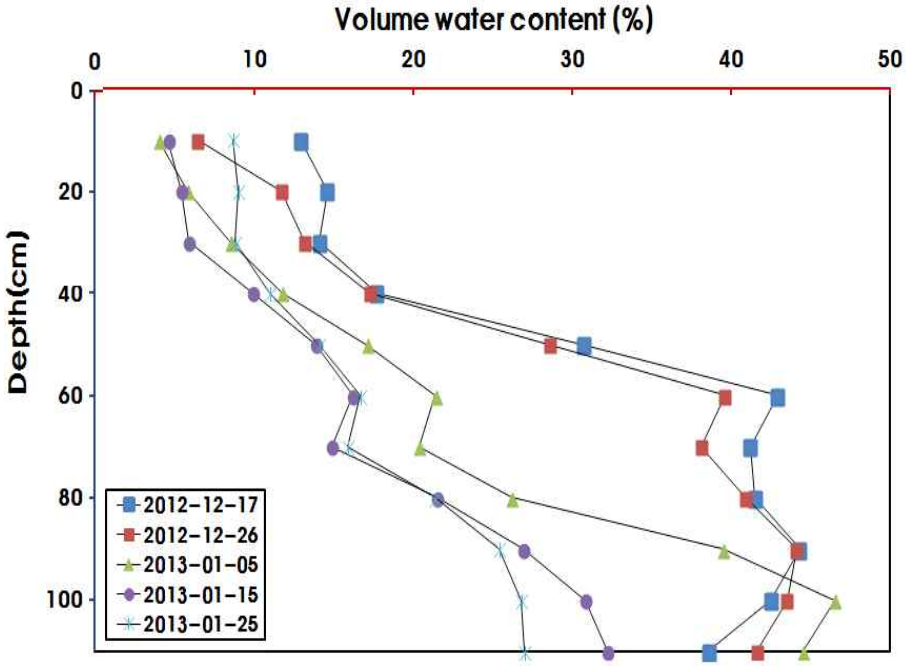
흙의 동결과정에서 토립자를 둘러싼 부동수막은 수분이 동결점까지 이동하는 통로 역확을 하며 동결함으로서 체적 팽창을 야기하므로 부동수분량이 많은 흙일수록 동상압도 커지게 되는 것이다. 따라서, 동토에서의 부동수분은 매우 신중하게 취급되어야 한다.



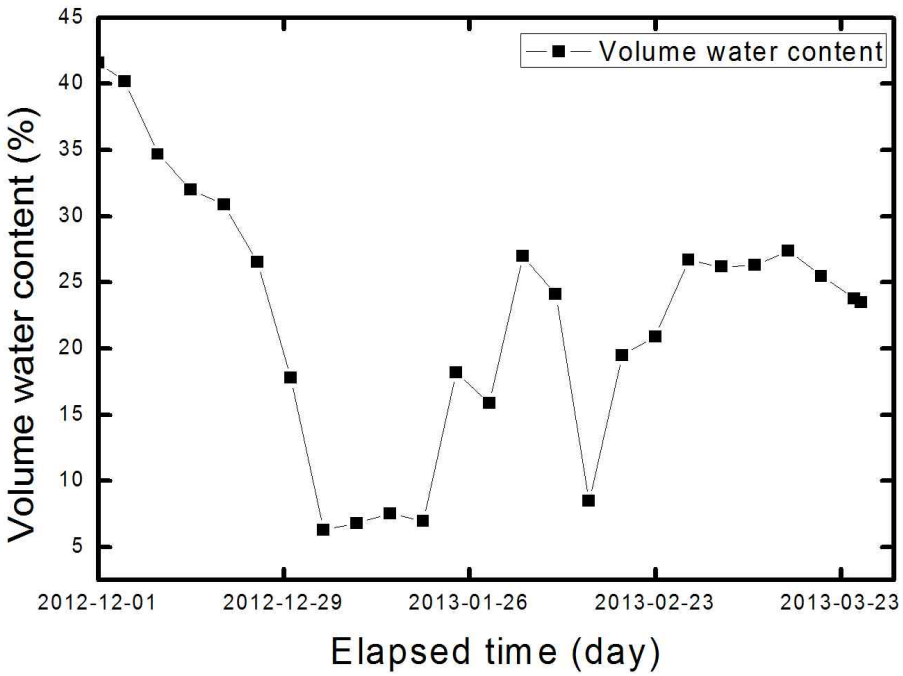
<그림 3-6-37>단면-1 겨울철 지반 깊이별 부동수분



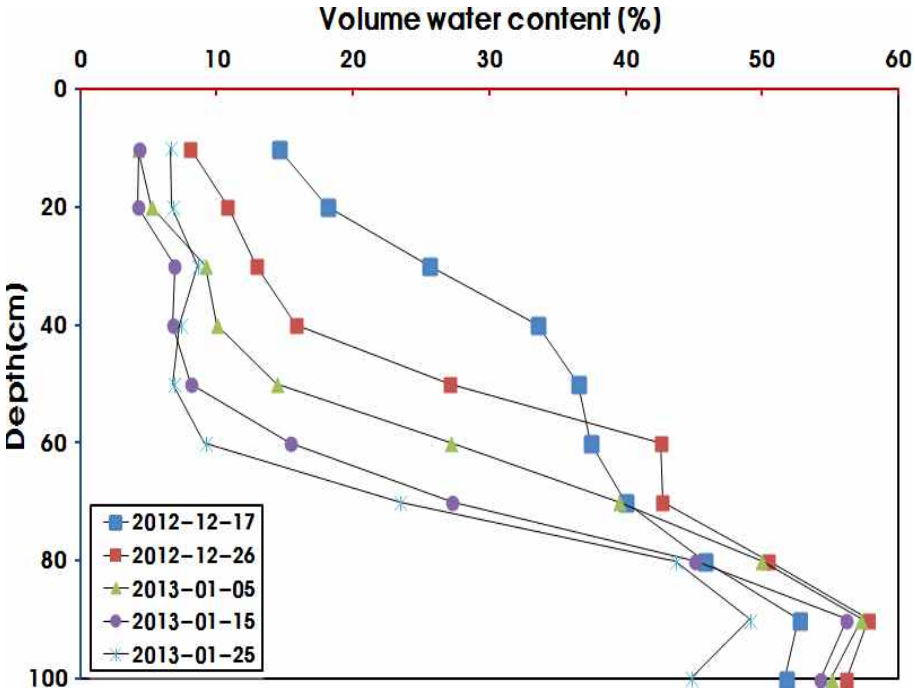
<그림 3-6-38>단면-2 겨울철 지표의 부동수분 변화



<그림 3-6-39>단면-2 겨울철 지표의 부동수분 변화



<그림 3-6-40>단면-3 겨울철 지표의 부동수분 변화



<그림 3-6-41>단면-3 겨울철 지반 깊이별 부동수분

동결토의 수분의 표면력은 토립자의 구조단위 주변에 수분의 양과 특성에 의해 지배된다. 토립자 표면에 가까워 질수록 표면은 점점 더 증가되어 토립자 표면의 수분은 높은 표면력에 의해 물 분자가 이동하게 되거나 벗어나게 된다.

온도가 감소하여 수분이 동결됨으로써 토립자와 조직단위는 상호작용으로 변화하거나, 토립자와 물의 위치에너지로 변화하게 된다. 이 때문에 동결 수분이 변화하게 되는 것이다.

사질토의 경우 동결선 아래 1.5 m의 깊이에서 모세관 작용으로 물을 끌어 올릴 수 있고 실트, 점토, 실트질의 대단히 미세한 모래는 동결선 아래 지하수의 영향을 받을 수 있다.

압축성이 큰 포화점토는 지하수가 깊은 곳에 위치하여도 점토의 압축성에 의해 간극에서 배수된 물로 인하여 얼음층을 형성할 수 있을 만큼 충분한 물이 공급될 수 있다.

지하수위를 일정하게 하였을 때, 동상비는 동상속도가 빠를수록 증가하고 동결속도가 일정하게 되었을 때에는 수위를 낮출수록 감소한다.

미동결토의 동결면까지 이동하는 물은 흙 입자 사이 모세관을 통하여 이동하는 거리와 그 흙속에 있어서 물의 모세관 상승 높이와 같다. 미동결흙의 모세관 상승높이 보다 지하수위가 깊으면 그 지하수는 수분 공급원이 되지 못한다.

라. 지반에 작용하는 동결에 의한 상수관의 변위분석

(1) 동결에 따른 상수도관의 스트레인 분석

상수관의 변형을 파악하기 위하여 상수관 하나당 4개씩 총 8개의 스트레인 게이지를 부착하여 변위를 측정하고자 하였다. 스트레인 게이지의 부착시 지반 되메움으로 인한 피해를 방지하기 위하여 매설관 내측에 스트레인 게이지를 부착 하였다. 장기간 계측임을 감안하여 스트레인 게이지 케이블이 손상되는 것을 방지 하기 위하여 실드 처리된 연장 케이블을 활용하였으며, 게이지 부착시 도포 처리 및 실링 테이프를 이용한 긁힘을 방지하고자 하였다. 상수도관의 동결하중이 작용하여 압축력을 받을 때 압축응력과 함께 탄성좌굴을 일으켜 파괴되는 현상을 보기위하여 양단을 고정하여 실험 하였다.

동결로 인한 매설관에 작용하는 스트레인 분포는 <그림 3-6-42~7>에 정리하였다. 전체적으로 상수관에 작용하는 동결토압에 비하여 상수도관 자체의 강성이 커서 변위는 거의 발생하지 않은 것으로 나타났다. <그림 3-6-42, 4, 6>은 상수도관 상부의 스트레인 분포이며 단면-1의 경우 닥타일 주철관으로 강성 커서 변형이 적으며 단면-2의 경우 상부에 화강풍화토로 구성되어 동결 깊이가 커서 변형이 있었으며 단면-3의 경우 상부에 점토로 구성되어 변형이 작으며 물이 있는 관과의 차이는 거의 없는 것을 나타나며, <그림 3-6-43, 5, 7>은 상수관 하부의 스트레인 분포며 이는 상부는 압축되고 하부는 인장력이 작용하는 것으로 판단된다.

<표 3-6-4> 지반온도 변화에 상수도관의 축방향 스트레인

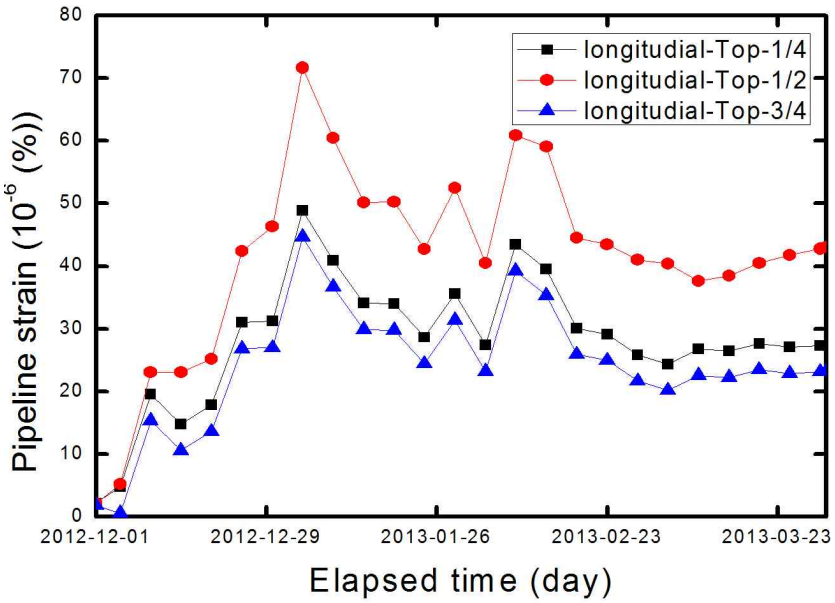
Temperature (℃)	Longitudinal Pipeline strain (10^{-6}(%))					
	Section-1		Section-2		Section-3	
	Top	Bottom	Top	Bottom	Top	Bottom
5	5.226	-2.364	8.44	-18.663	5.65	-11.41
0	25.190	-14.637	52.27	-89.964	9.82	-13.52
-5	46.286	-33.422	119.36	-165.307	29.25	-36.75
-10	71.64	-58.649	125.50	-179.095	63.82	-69.38

<표 3-6-5> 지반온도 변화에 상수도관의 원주방향 스트레인

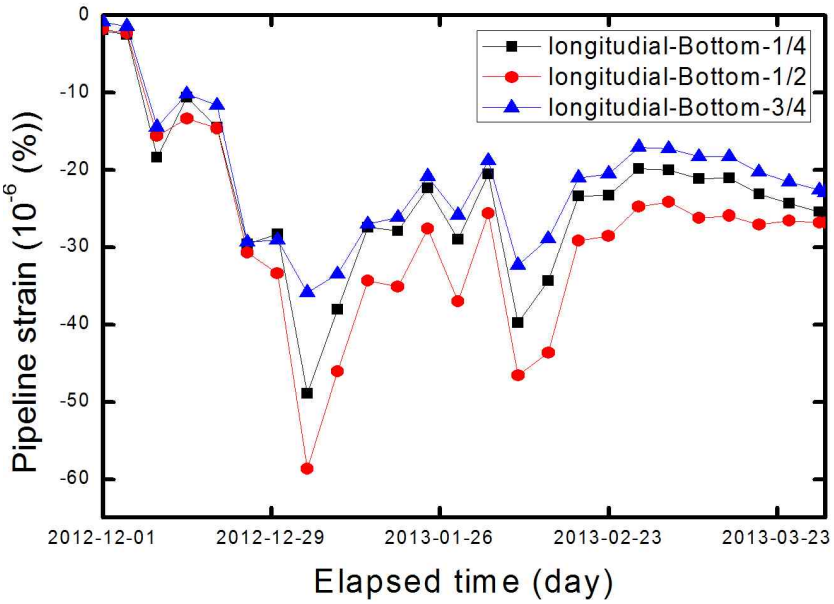
Temperature (℃)	Circumferential Pipeline strain (10^{-6}(%))					
	Section-1		Section-2		Section-3	
	Top	Bottom	Top	Bottom	Top	Bottom
5	1.463	-0.662	2.194	-4.852	1.469	-2.967
0	7.053	-4.098	13.590	-23.391	2.553	-3.515
-5	12.961	-9.358	31.033	-42.977	7.605	-9.55
-10	20.059	-16.421	32.63	-46.564	16.593	-18.018

상수도관에 작용한 스트레인 분포는 관의 상부와 하부에서 축방향변형과 원주방향의 변형을 측정하였다. 관의 상부가 지반의 동결로 인하여 압축을 받고 하부는 인장을 받는 것을 알 수 있다. 단면-1의 경우 닥타일 주철관이다 축방향변형률과 원주방향의 변형률의 차이는 관의 프아송비 0.28의 차이를 보인다. 스테인리스 강관의 경우 프아송비 0.26의 차이로 관의 변형이 나타난다.

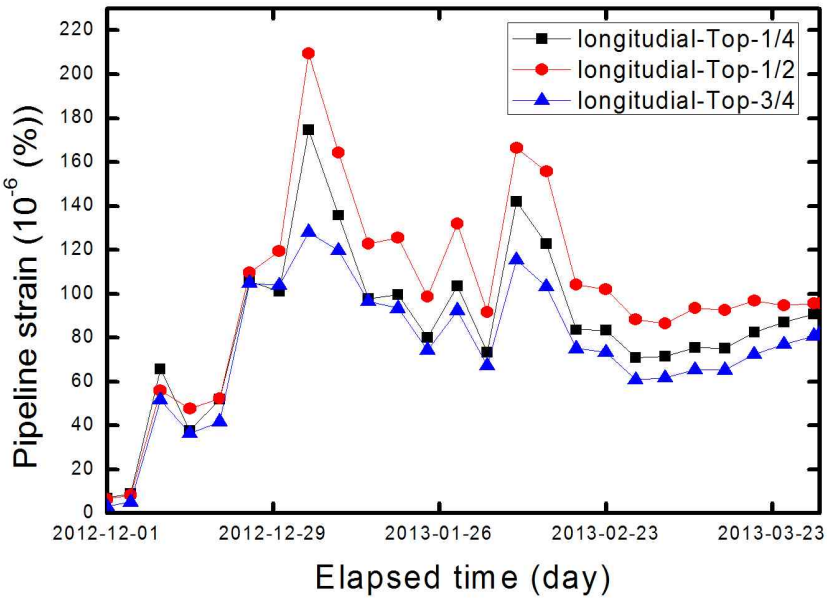
지반이 동결하면서 상수도관에 발생하는 변형은 흙이 동상에 민감하고 모세관현상에 의한 지하수의 공급이 계속조건이며, 추위가 오랜 기간 동안 지속되면 더 많은 변형이 발생한다.



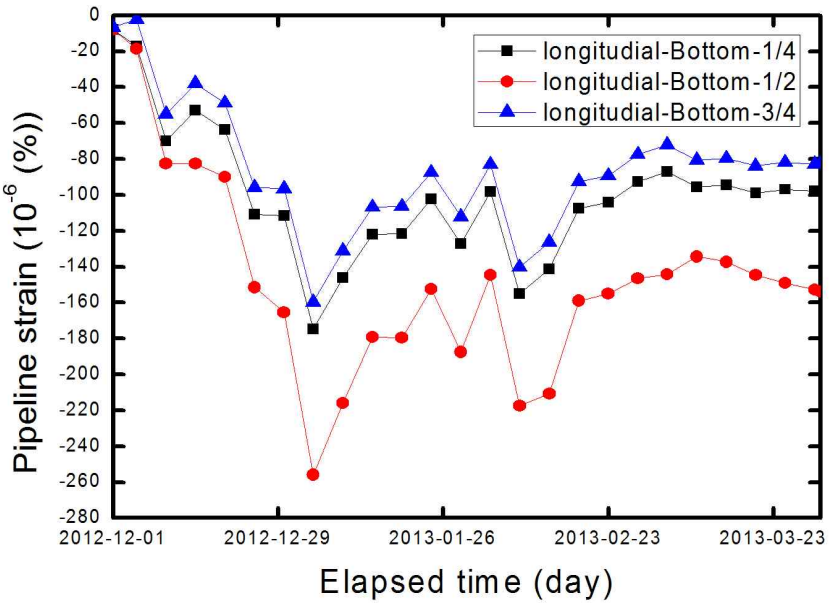
<그림 3-6-42>단면-1 닥타일주철관 상부의 스트레인 분포



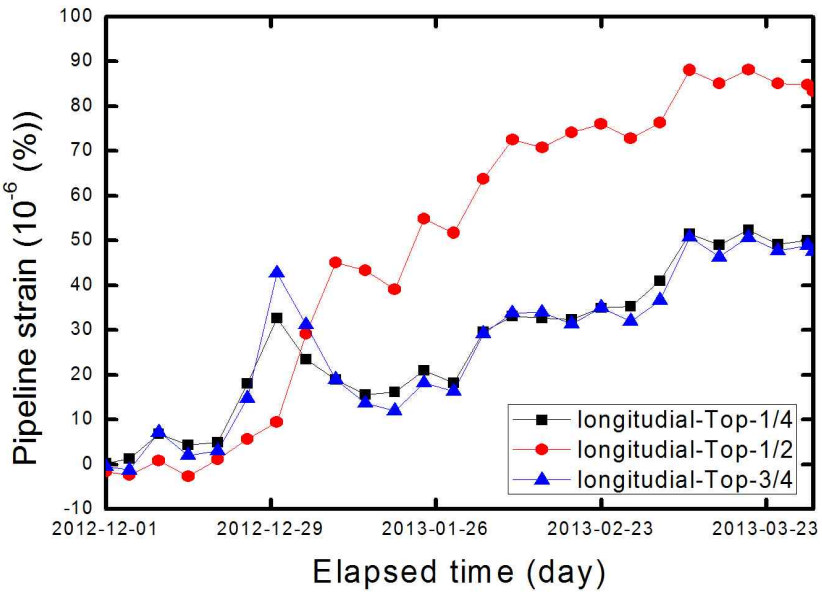
<그림 3-6-43>단면-1 닥타일주철관 하부의 스트레인 분포



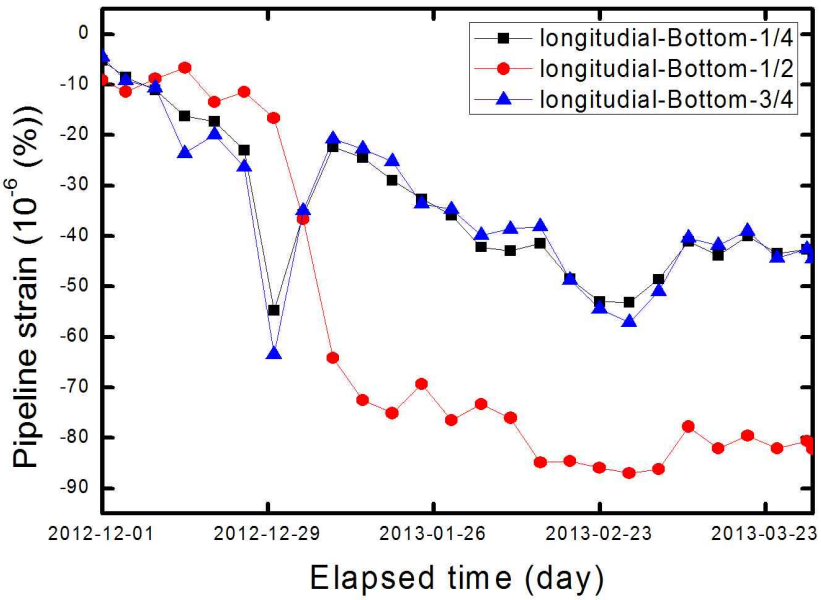
<그림 3-6-44>단면-2 스테인리스관 상부의 스트레인 분포



<그림 3-6-45>단면-2 스테인리스관 하부의 스트레인 분포



<그림 3-6-46>단면-3 스테인리스관 상부의 스트레인 분포



<그림 3-6-47>단면-3 스테인리스관 하부의 스트레인 분포

(2) 동결에 따른 지반의 토압 분석

동결하중(frost load)은 상수도관 설계에 있어 중요한 하중조건이지만 실제 설계에 있어 고려하지 않고 있는 실정이다. 이러한 동결하중은 토압보다 훨씬 더 크게 작용하지만 현재 경험적인 방법을 제외하고는 동결하중을 추정하는 것은 쉽지 않다. 동결하중은 종래의 토질 역학에서 다루지 않았던 저온에 있어서의 흙의 거동이라는 새로운 문제점을 야기하고 있다. 동결하중이란 흙이 0℃이하로 냉각되는 데 따르는 토양 동결로 발생되는 하중의 증가를 말하며 동결팽창압(동결토압)이라고 부른다. 이때 발생되는 지반의 동결팽창은 수평뿐만 아니라 수직방향으로도 발생한다.

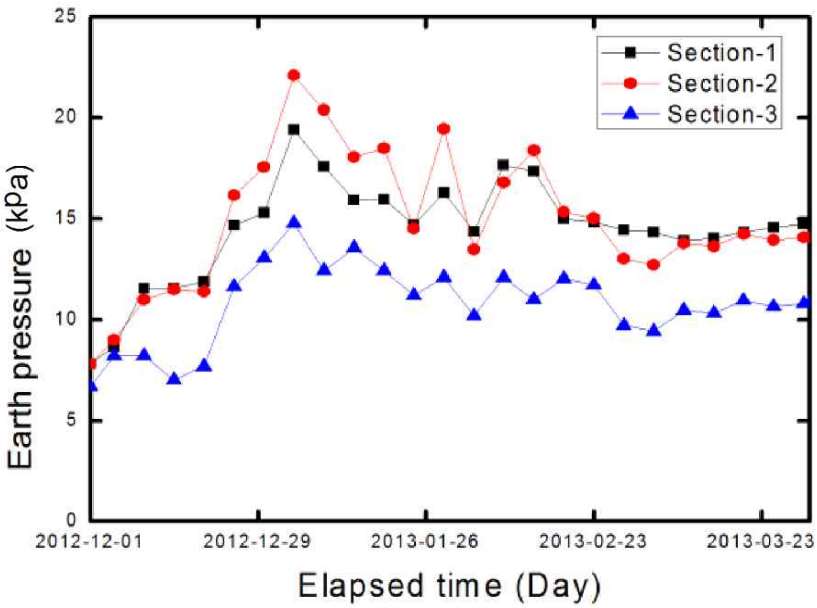
동결하중에 가장 크게 영향을 미치는 인자는 토질인데 특히 입도분포가 동결팽창에 관계가 있다. 일반적으로 자갈이나 사질토와 같은 조립질 흙에서는 모세관 작용이나 토립자 주위의 흡착수가 적기 때문에 동상이나 동결팽창이 거의 일어나지 않으므로 동결토압의 발생은 매우 작다. 이에 반하여 실트질 흙에서는 모세관작용이 크고 흡착수도 많다. 흡착수막 내의 이동이 비교적 용이하며, 아이스렌즈가 형성되기 때문에 동결팽창이 비교적 크게 일어난다. 그러나 점성토에서는 간극이 미세하여 오히려 동결팽창이 발생하기 어렵다.

<표 3-6-6> 지반동결에 따른 토압변화

Temperature (℃)	Earth pressure (kPa)		
	Section-1	Section-2	Section-3
5	8.665	9.234	8.214
0	11.893	11.425	7.695
-5	15.304	17.570	13.072
-10	19.404	22.127	14.785

지반의 온도 변화에 따른 토압의 변화는 <표 3-6-6>과 같다. 지표에 40 cm깊이에 위치한 토압을 살펴보면 <그림 3-6-48>의 토압 변화와 같다. 상부에 화강풍화토를 포설한 단면-1의 경우 온도가 하강함에 따라 토압은 19.404 kPa 이다. 단면-2의 경우 22.217 kPa이다. 상부의 온도저하로 인한 동상압력의 증가로 토압이 증가된다.

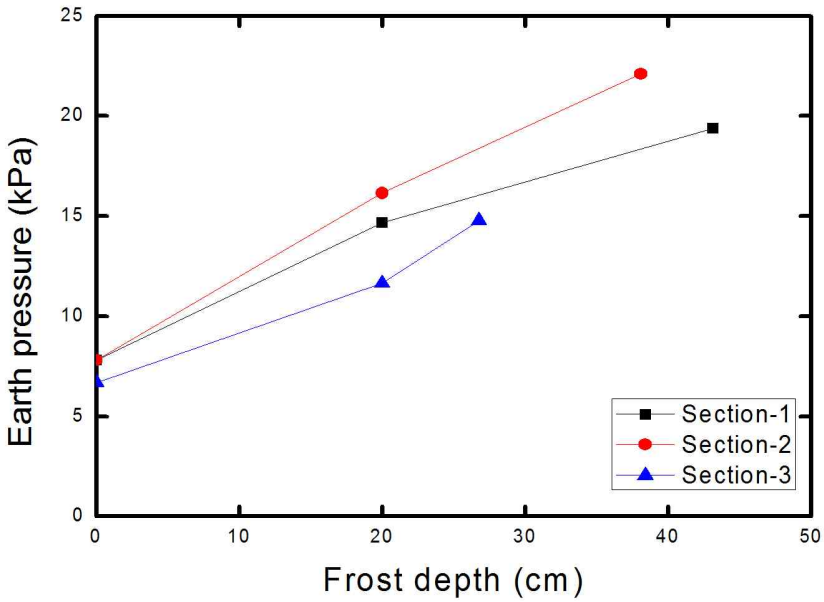
단면-3는 상부에 점성토를 포성하여 14.785 kPa이다. 상부에 점성토가 포설되어있어 간극이 미세하여 함수비가 낮아 동상압력이 화강풍화토를 포설한 경우보다 작다. 이러한 결과로부터 지반 내 온도가 하강할수록 흙속에 포함된 물이 얼음으로 상변화 하면서 팽창하여 기존의 토압보다 더 큰 동결 토압을 받는다는 사실과 이동결토압은 함수비가 높을수록 더 증가 한다는 사실을 알 수 있다.



<그림 3-6-48>지반 동결로 인한 상수도관에 작용한 토압

동결 깊이에 따른 토압은 단면-1의 경우 최대동결깊이 43.13 cm일 때 19.4 kPa 이다. 단면-2의 경우 최대 동결깊이 38.08 cm일 때 38.08 kPa 이다. 단면-3는 최대 동

결깊이 26.77 cm일 때 14.78 kPa 이다. <그림 3-6-49>는 동결깊이가 증가 할수록 상수관에 작용하는 토압이 증가 한다.



<그림 3-6-49>동결 깊이에 따른 상수도관에 작용한 토압

<표 3-6-7> 동결 깊이에 따른 상수도관에 작용한 토압

Frost depth(cm)	Earth pressure (kPa)		
	Section-1	Section-2	Section-3
0	7.82	7.82	6.74
20	14.677	16.15	11.65
Maximum	43.13 cm	38.08 cm	26.77 cm
	19.4	22.1	14.78

(3) 상수도관에 작용한 변위 특성 분석

동결지반에 매설된 상수도관의 스트레인 값을 이용하여 지반의 온도하강에 따른 동상현상에 의한 관의 하향 변위의 값을 예측하는 식을 Spangler방법을 사용하여 유도 하였다. 양단 고정된 길이 L인 보의 형상과 변위의 형상을 4차 다항식으로 가정하면, x만큼 떨어진 곳의 수직 변위(y)값은 식(3-6-1) 같이 나타낼 수 있다.

$$y = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e \qquad (3\text{-}6\text{-}1)$$

그리고, 양단 고정이므로 조건으로부터 $y(0) = y(L) = y'(0) = y'(L) = 0$의 조건

을 얻을 수 있다. $y(0)=y'(0)=0$의 조건을 식(3-6-1)에 대입하면 d=e=o로 계수의 값을 결정할 수 있다. $y(L)=y'(L)=0$의 조건으로 부터 식(3-6-2)와 식(3-6-3)을 얻을 수 있다.

$$y(L)=aL^4+bL^3+cL^2=0 \tag{3-6-2}$$

$$y'(L)=4aL^3+3bL^2+2cL=0 \tag{3-6-3}$$

한편, 계측된 스트레인 값을 이용하기 위해서는 게이지값에 대한 온도보정, 매설된 상수도관의 온도변화에 대한 변형의 온도보정, 강관의 길이방향의 변형에 대한 보정이 필요하다. 보정된 스트레인 값은 식(3-6-4)와 같다.

$$\varepsilon_{t,b}=\varepsilon_r-\varepsilon_g-\varepsilon_p-\varepsilon_l \tag{3-6-4}$$

여기서, ε_t또는 ε_b은 상수관 상단과 하단에서 측정된 스트레인값을 보정한 스트레인 값이고, ε_r은 게이지에서 읽은 스트레인 값이며, ε_g는 게이지의 온도에 대한 보정 스트레인 변화 값이며, ε_p는 상수도관의 온도변화에 대한 길이방향의 스트레인 변화 값이며, ε_l는 굽힘(bending)에 의한 강관의 길이방향의 스트레인 변화를 나타낸다.
ε_g는 온도에 따라 적게 읽혀지는 게이지값을 나타내므로 이에 대한 온도보정은 게이지 매뉴얼에 함께 주어진 식(3-6-4)를 사용하였다.

$$=-124+7.92\ ^{1}-0.0949T^2+0.0041\times T^3\ (\mu m/m) \tag{3-6-5}$$

매설된 상수도관의 온도하강에 의한 변형률을 살펴보면 닥타일 주철관의 선팽창계수는 $\alpha=1.0\times10^{-5}$ mm/mm/℃, 스테인리스 강관은 $\alpha=1.15\times10^{-5}$ mm/mm/℃,이므로 온도변화 ($\triangle T$)에 대한 강관의 스트레인의 변화값은 식(3-6-6)으로 계산 하였다.

$$\varepsilon_p=\alpha(\triangle T) \tag{3-6-6}$$

굽힘에 의한 강관의 길이방향 스트레인 변화 (ε_l)는 중립축의 강관의 중간지점의 좌, 우에서 강관 길이 방향으로 계측된 스트레인값을 활용하여 이를 길이방향의 스트레인 변화값으로 보고 두 값의 평균값을 사용하였다.

탄상보의 길이방향의 변화를 무시할 경우, 보의 곡률 (k)은 수직 변위값의 2차 미분항으로 식(3-6-7)로 나타난다.

$$k = \frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}} \approx y'' \tag{3-6-7}$$

또한, 탄성보에서 순수굽힘에 대한 상단과 하단에서의 변형률은 식(3-6-8)과 식(3-6-9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_t = -k(d/2) \tag{3-6-8}$$

$$\varepsilon_b = -k(d/2) \tag{3-6-9}$$

여기서, d는 상수관의 지름이다, 따라서 식(3-6-4), (3-6-7), (3-6-8), (3-6-9)로부터 상단과 하단에서의 스트레인 값으로부터 식(3-6-10), (3-6-11)을 유도 할 수 있다.

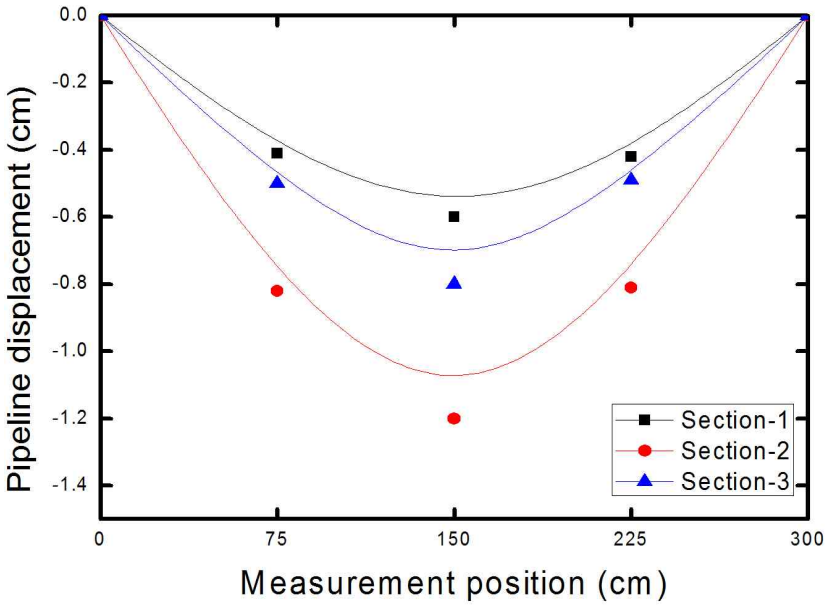
$$y_t'' = 12ax^2 + 6bx + 2c = -\frac{2\varepsilon t}{d} \tag{3-6-10}$$

$$y_b'' = 12ax^2 + 6bx + 2c = -\frac{2\varepsilon t}{d} \tag{3-6-11}$$

여기서, 와 ϵ_t는 각각 상단과 하단의 변형률을 나타낸다. 식(3-6-2), (3-6-3), (3-6-10), (3-6-11)을 사용하여 최소자승법을 사용하여 계수 a, b, c를 구하기 위한 식(3-6-12)이다.

$$\begin{bmatrix} L^4 & L^3 & L^2 \\ 4L^3 & 3L^3 & 2L \\ 12(L/2)^2 & 6(L/2) & 2 \\ 12(L/2)^2 & 6(L/2) & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{2\varepsilon_t}{d} \\ -\frac{2\varepsilon b}{d} \end{bmatrix} \tag{3-6-12}$$

계측기간이 길어 식(3-6-2), (3-6-3)은 모든 경우 일정하며, 데이터의 양에 따라 식(4-12)의 좌측 3행 이후, 우측 3행이후로 나열하면 된다.

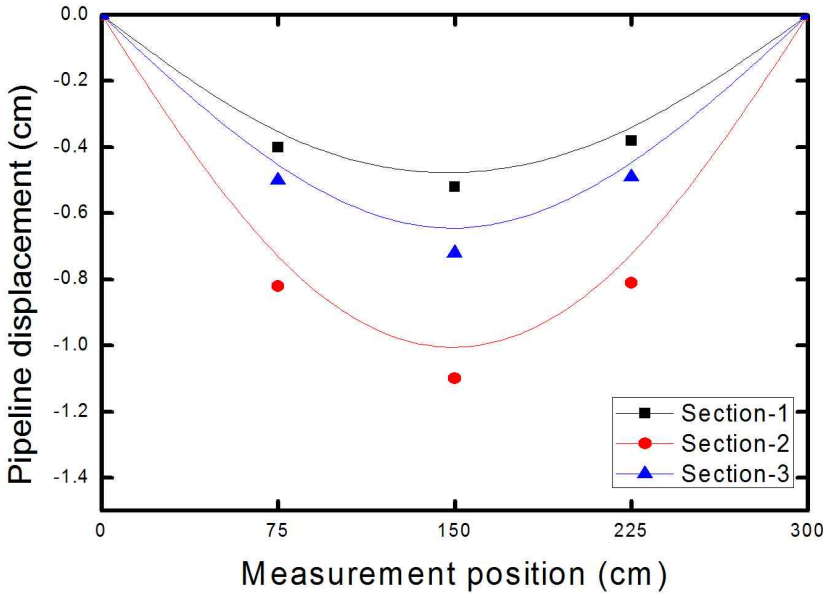


<그림 3-6-50>동상 현상으로 발생한 상수도관의 수직 변형

<표 3-6-8> 지반동결에 의한 상수도관의 수직 변형

Measurement position (cm)	Pipeline displacement (cm)		
	Section-1	Section-2	Section-3
0	0	0	0
75	-0.41	-0.82	-0.5
150	-0.6	-1.2	-0.8
225	-0.42	-0.81	-0.49
300	0	0	0

<그림 3-6-50>은 최대 동결깊이에 따른 상수도관의 수직변형률이다. 상수도관의 변형은 동결하중으로 인하여 관의 상부에는 압축을 받으며 관의 하부에는 인장을 받는 것을 확인할 수 있다. 관의 축방향으로 휘어지는 경향을 나타낸다. <표 3-6-8>는 지반 동결에 의한 상수도관의 수직 변형이며 이는 관의 중앙부에서 동상압의 증가로 인하여 상수도관이 처짐을 보인다.



<그림 3-6-51>지반 동상에 의한 상수도관의 수직 변형 예측

상수도관의 변형을 예측하기 위하여 식 (3-6-12)를 이용하여 구한 식은 <표 3-6-9>과 같다. 상수도관의 수직변형의 예측은 실측값에 비하여 거의 같은 변형특성을 알 수 있다. 상수도관에서 지반의 온도 변화는 상수관의 길이방향의 변화를 예측할 수 있다. 따라서 지하수의 공급이 원활하고 동결깊이 이내에 매설관이 설치되면 동결지반은 융기하고 상수도관은 하향 거동한다.

<표 3-6-9> 온도변화에 따른 상수도관의 변형 예측

	Prediction equation
Section-1	$y = -0.0117x^4 + 0.1417x^3 - 0.4483x^2 + 0.1183x$
Section-2	$y=-0.0283x^4 + 0.3383x^3 - 1.1017x^2 + 0.5417x$
Section-3	$y = -0.035x^4 + 0.4183x^3 - 1.535x^2 + 1.7017x$

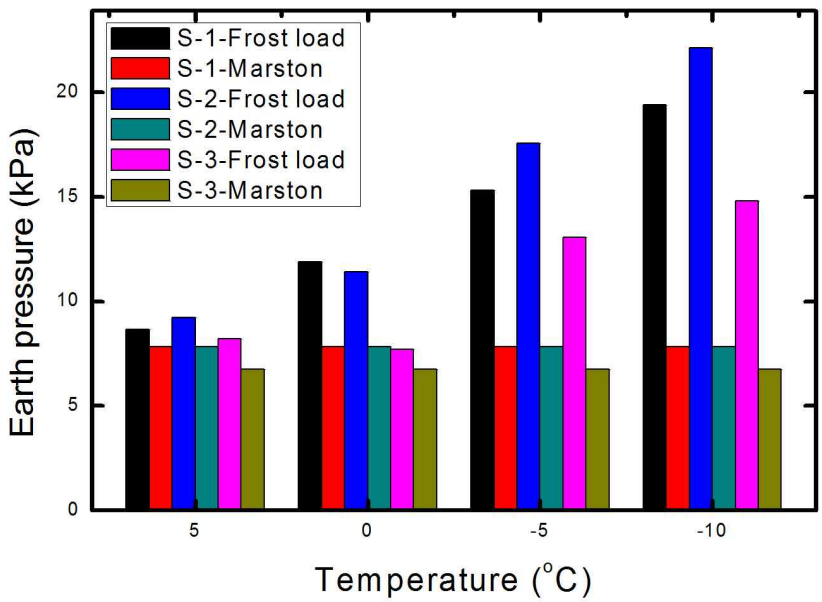
마. Marstonr에 의한 방법과 현장모형실험의 토압비교

동절기 온도가 영하로 떨어짐에 따라서 지표면 부근의 수분을 포함한 흙은 공극속의 수분이 얼음으로 변화하면서 부피가 팽창한다. 이와 같이 고정된 수분이 얼음으로 상이 변하면, 9%의 결빙팽창을 초래한다. 동결면(freezing front)이 지하수와 접해있고 동결속도가 서서히 진행되는 비교적 미립자로 구성된 동상성 흙일 경우에는

지하수가 동결면 속으로 흡입되어 빙정이 형성된다. 이와 같은 빙정은 시간이 경과됨에 따라서 동결면에 계속 발달되고, 이에 따른 흙의 부피 팽창으로 동상이 발생하며 이 동상이 토압이나 주변 구조물 등에 의해 구속을 받을 경우에 동상력이발생한다. 일반적으로 기존 매설관 설계시 관에 작용하는 토압은 관위에 덮인 흙에 의한 연직하중이나 매설관 벽면의 마찰영향을 고려한 Marston하중으로 구할 수 있다. <그림 3-6-52>은 Marstonr방법과 동결토압을 비교하였다.

<표 3-6-10> 지반동결에 따른 토압변화

Temperature (℃)	Earth pressure (kPa)					
	Section-1		Section-2		Section-3	
	Frost load	Marston	Frost load	Marston	Frost load	Marston
5	8.665	7.82	9.234	7.82	8.214	6.74
0	11.893	7.82	11.425	7.82	7.695	6.74
-5	15.304	7.82	17.570	7.82	13.072	6.74
-10	19.404	7.82	22.127	7.82	14.785	6.74



<그림 3-6-52>Marston의 토압과 온도변화에 따른 토압 비교

4. 수치해석을 활용한 동상 지반과 상수도관의 변형특성 분석

가. 수치해석 개요

동상피해로 인한 문제들 특히, 동상으로 인한 융기 현상, 동결 시 간극수의 움직임, 동결토의 물리적 역학적 특성에 대해서는 선진외국의 경우에는 이미 많은 연구가 수행되었다.

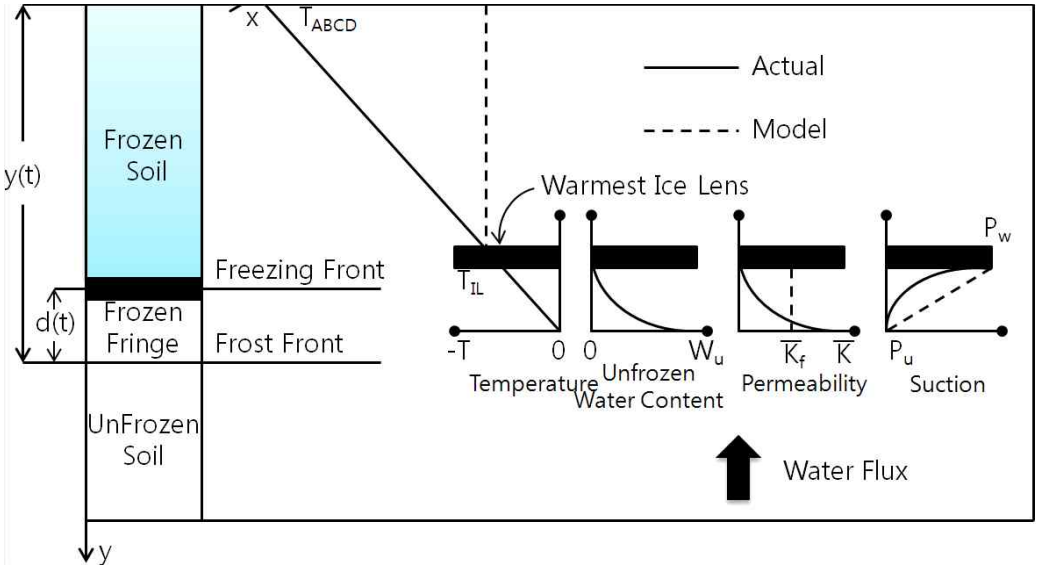
흙의 동결 팽창에 따른 동상압력의 요인은 흙의 입도분포, 조성구조, 비표면적, 토립자 간극수의 화학적 성질 및 흙의 응력 등과 같은 내적 요인과 동결중의 구속력, 간극수압 및 동결속도 등의 외적요인이 있다.

일반 범용 프로그램의 열전도 해석의 정확성을 비교하기 위하여 열 해석 수치해석 프로그램인 Midas GTS FEA를 통하여 동결 온도와 구성 재료의 열전도 특성에 따른 열전달과 변화 양상에 대해 추정하였다. Midas GTS FEA 프로그램은 지반의 온도구배 경계조건과 정상 상태의 열전도 문제뿐만 아니라 동결 융해문제를 분석할 수 있으며 토양의 상변화에 따른 응력의 변화를 모델링 할 수 있다.

유한요소법을 이용한 접근 방식의 장점은 주지하는 바와 같이 다양한 조건의 변화에 대하여 제약조건이 적으며 유연히 대처할 수 있다는 것이다. 반면 전산모사이므로 실제 물리현상을 고려하지 않았을 경우 범할 수 있는 오류의 위험도 그만큼 크다. 따라서 유한요소법의 유효성 검증단계가 필요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 유한 요소법으로 수행한 동상해석의 유효성을 통해 검증하였다. 토양의 온도 변화에 다른 토압의 변화와 상수도관의 변형을 분석하였다.

수치해석 예제는 세 가지 경우이다. 우선 상부에 화강풍화토가 포설된 닥타일 주철관, 상부에 화강풍화토가 포설된 스테인리스 주철관, 상부에 점토가 포설된 스테인리스 주철관 조건으로 주었고 해석은 5℃에서부터 -30℃ 까지 실행하였다.

토질의 온도해석은 매우 복잡하지만 정량화하여 그림 4.39와 같이 나타낼 수 있다. <그림 3-6-53>에 대한 온도해석의 지배 방정식은 다음과 같다. 열전도율과 단위부피당 비열 값을 평균 상수값을 사용하면 $\frac{\partial k}{\partial k_p} = \frac{\partial k_p}{\partial T} = 0$ 이므로, 3차원 비정상 열전도 에너지 지배 방정식은 식 (3-6-13)과 같이 정의할 수 있다.



<그림 3-6-53>겨울철 동결 토양의 특성

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}{}^{s} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} + \partial^2 \frac{T_s}{\partial z^2}\Bigg) + \left(\frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_p}{\partial z^2}\right) + q = C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} + \overline{C_p}\frac{\partial T_p}{\partial t} \quad (3\text{-}6\text{-}13)$$

비 동결 지역에는 부동수분이 다량 존재하며 이는 0℃ 온도를 나타내는 동결면의 위치와 진전 속도를 결정하게 된다. 따라서 온도분포 해석 및 동상량을 계산하기 위해서는 물질전달(mass transfer) 현상의 정확한 모델링이 필요하다. 동상 메커니즘의 물리적 현상을 정확히 반영하기 위해서는 동결 지역에서 발생하는 모세관 현상에 의한 잠열효과 식 (3-6-14)와 동결면의 간극수의 동결에 의한 잠열효과 식 (3-6-15)를 고려해주어야만 한다.

$$k_{s,f}\frac{\partial^2}{\partial x}{}^{T_L} + \frac{\partial^2 T_{IL}}{\partial y} + \frac{\partial T_{IL}}{\partial z}\Bigg) - k_{s,ffe}\left(\frac{\partial T_{IL}}{\partial x} + \frac{\partial T_{IL}}{\partial y} + \frac{\partial T_{IL}}{\partial z}\right) = V_w L_u \quad (3\text{-}6\text{-}14)$$

$$\overline{k_{s,ffe}}\left(\frac{\partial^2 T_{ff}}{\partial x} + \frac{\partial^2 T_{ff}}{\partial y} + \frac{\partial T_{ff}}{\partial z}\right) - \overline{k_{s,ffe}}\left(\frac{\partial T_{ff}}{\partial x} + \frac{\partial T_{ff}}{\partial y} + \frac{\partial T_{ff}}{\partial z}\right) = \frac{W_u}{100} n \frac{dy}{dt} \quad (3\text{-}6\text{-}15)$$

흙 내부 수분의 이동속도와 아이스렌즈의 두께는 각각 식 (3-6-16)와 식 (3-6-17)으로 나타낼 수 있다.

$$V_w(t) = SP\frac{dT}{dy}\Bigg)_f \quad (3\text{-}6\text{-}16)$$

$$(t) = \begin{matrix} T_L \\ d \\ dy \end{matrix} \Big) \qquad (3\text{-}6\text{-}17)$$

여기서, SP(segregation potential)는 식(3-6-18)과 같이 정의 된다.

$$SP = SP_0 e^{-aP} \qquad (3\text{-}6\text{-}18)$$

나. 수치해석 지반정수 및 조건

본 연구에서 온도해석은 동결 구간에서에서 발생하는 모세관현상에 의한 잠열효과를 고려하여 지배방정식을 따랐다. 수치해석은 닥타일 주철관과 스테인리스강관이 지반 동결시 작용하는 동상압력의 증가에 다른 영향검토와 지반의 동결 범위 및 상수관의 변형률 관계를 평가하고자 하였으며, 수치해석에 적용된 상수도관의 강도정수는 실내시험 결과를 이용하여 수행하였다. 또한 닥타일 주철관의 적용성을 비교분석하기 위해 동일한 조건에서 스테인리스관을 적용했을 경우와 비교하였다. 수치해석은 3차원 유한 요소 해석 프로그램임 Midas GTS FEA를 이용하였다. 우선 지중에 상수도관 매설시 상재하중을 작용시켜 하중에 대한 상수도관의 변형률과 지반의 온도변화를 -10℃에서 10℃까지 변화하여 상수도관의 변형 관계를 평가 하였다.

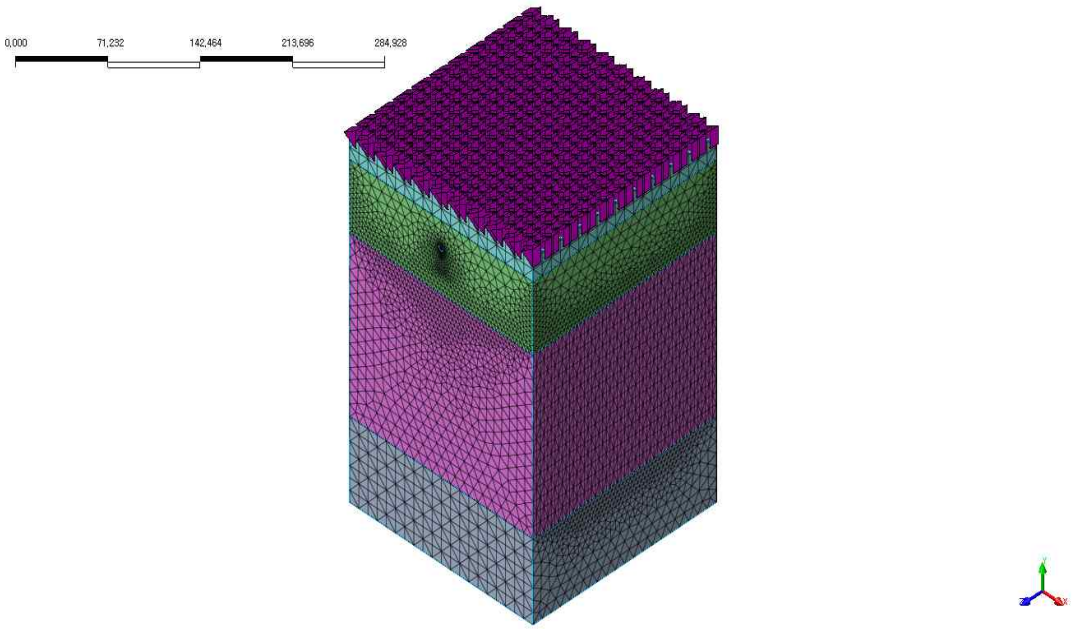
수치해석시 지반강도 정수는 문헌 자료를 참고하였으며, 상수도관의 경우 실내시험에서 얻은 결과를 토대로 적용하여 수행하였다. 닥타일 주철관 및 스테인리스 강관의 수치해석 수행시 지중매설관은 기초받침각을 180°의 모래기초로 적용하였으며, 지하수위가 2 m인 조건으로 수행하였다. 또한 온도조건별 동상압의 증가에 따른 상수도관의 변형률 관계를 평가 하였다. 지반강도 및 상수도관의 온도상수는 <표 3-6-11>와 같다.

본 연구에서 적용한 수치해석 모델링은 닥타일 주철관, 스테인리스강관 및 지반은 탄성재료로 가정하였다. 수치해석에서 지반의 경계조건은 좌우경계면은 x방향의 변위를 구속하였으며, 전후면 역시 y방향의 변위를 구속하였다. 또한 하부경계와 좌우계면이 접하는 곳은 힌지를 두어 x, y방향 변위를 모두 구속하였으며, 3차원 경계조건인 z방향의 경계조건은 모델링 바닥면만을 z방향으로 구속하였다. 온도에 따른 지반의 동상압은 상수도관 상부 전 구간에 작용하중과 온도지속시간별로 나누어 수치해석을 수행하였다. <그림 3-6-54>은 스테인리스강관의 수치해석 단면이며 상부 20 cm는 일반 토사로 구성하고 20 cm 에서 80 cm는 모래층으로 구성하였다. 스테인리스강관 은 지표면에서 40 cm에 위치하고 온도조건은 -10℃까지 지속 하였다.

<표 3-6-11>수치해석에 사용된 지반 정수

	Soil	Sand	Weathering soil	Ductile cast iron pipe	Stainless steel pipe
Unit weight (kN/㎥)	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
Coeffcient 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

다. 스테인레스 강관



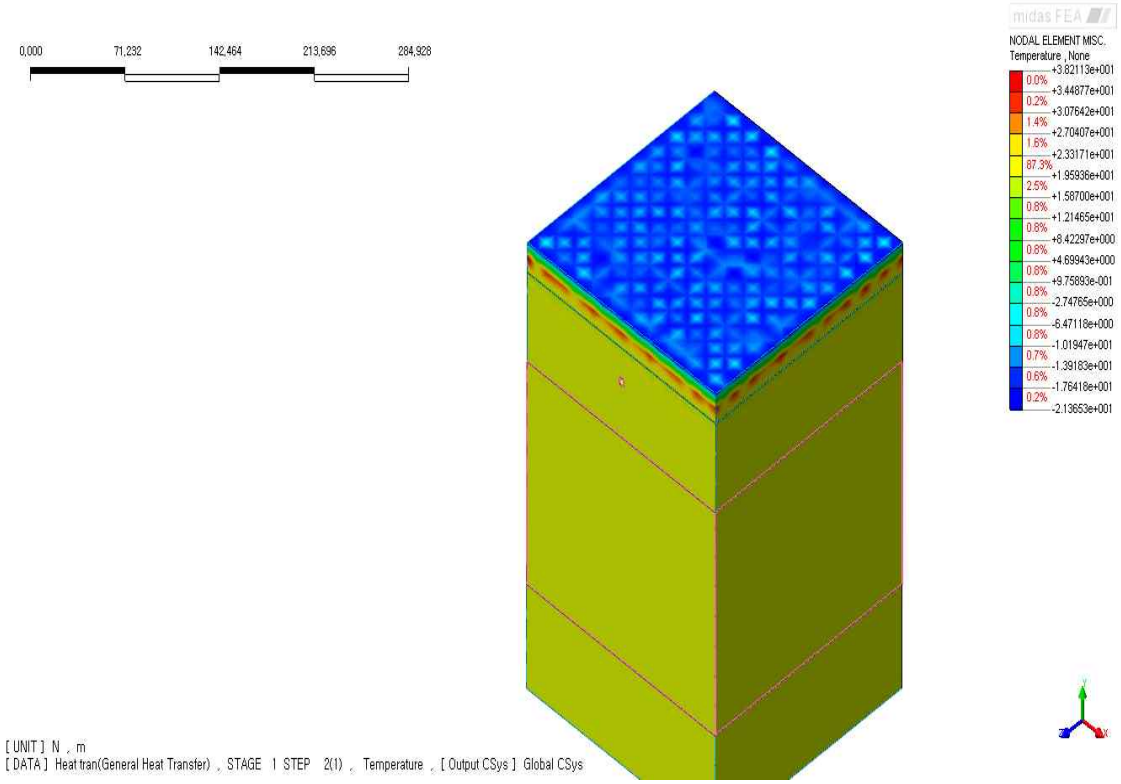
<그림 3-6-54>지반동상에 다른 스테인리스강관의 수치해석 단면

지반이 0℃이하로 지속하면서 발생하는 동상팽창압의 증가에 다른 수치해석을 수행하였으며, <그림 3-6-55>에서 <그림 3-6-58>은 지속시간에 따른 지반의 변형거동이다.

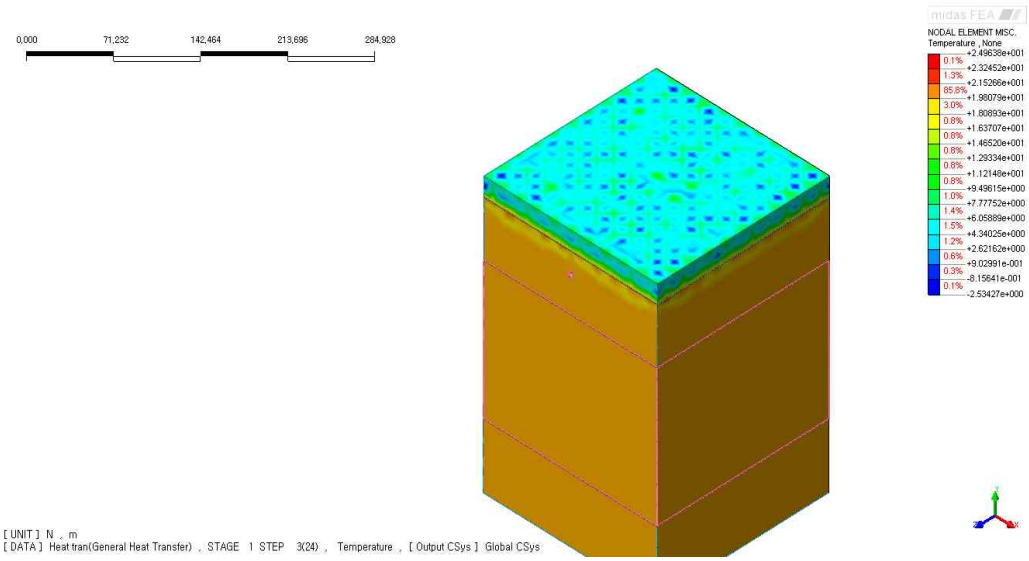
<그림 3-6-55>에 나타난 것처럼 표층으로부터 동결이 일어나고 점점 동결과정은 아래층으로 전이되게 된다. 특히, 표층의 바로 아래 부분에서 초기에는 증가 후 지속적으로 감소하여 동결되는 것을 볼 수 있다. 이는 초기에 표층의 동결로 인해 발열반응을 하여 아로 아래층에 그 열이 전달됨으로 인해 온도가 상승한 것으로 보인다.

이 그래프에서 나타낸 온도는 절대온도로 표현한 것이고 시간은 로그 스케일로 표현하였다. 시간에 따른 각 층의 부피변화를 알 수 있는 것인데 표층에는 동결과 동시에 급격한 팽창이 일어나 동상 팽창 현상을 볼 수가 있고 더 아래의 지층에서는 약간의 팽창 후 수축이 일어나는 것을 확인 할 수 있다.

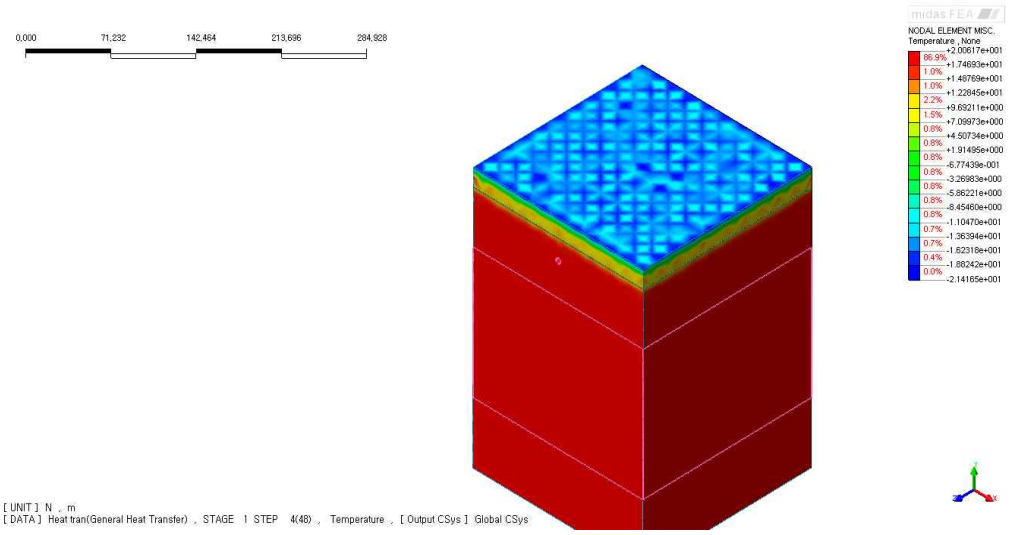
스테인리스관의 경우 상부 지반이 동결하면서 시간의 변화에 따라 동상압의 변화로 인하여 상수도관의 변형이 발생한다.



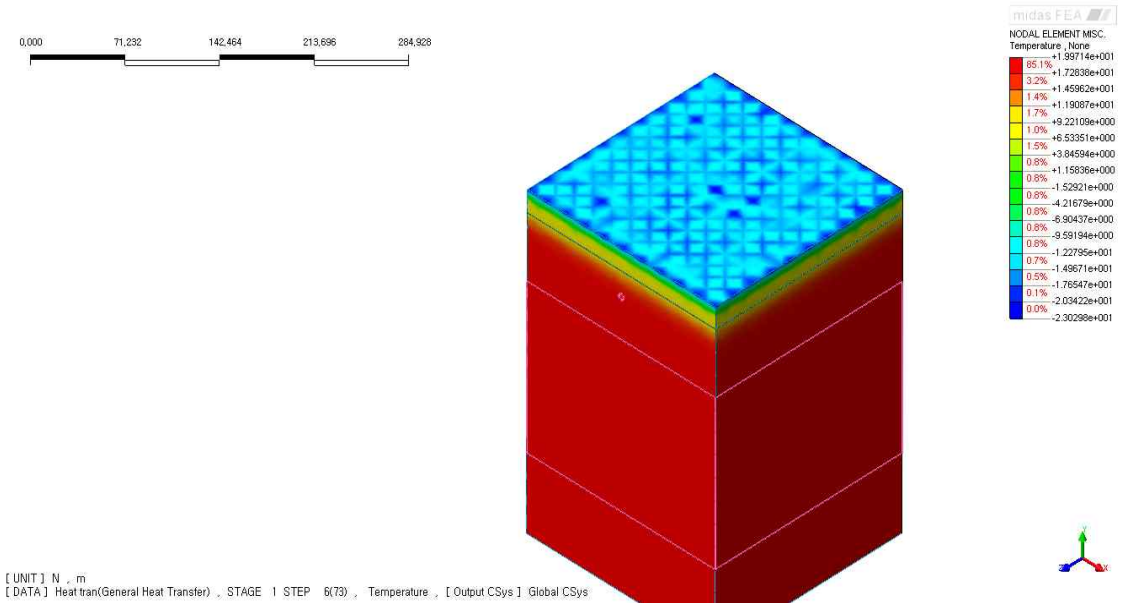
<그림 3-6-55>스테인리스강관 매설 지반의 20시간후 지반의 온도변화



<그림 3-6-56>스테인리스강관 매설 지반의 40시간후 지반의 온도변화



<그림 3-6-57>스테인리스강관 매설 지반의 100시간후 지반의 온도변화



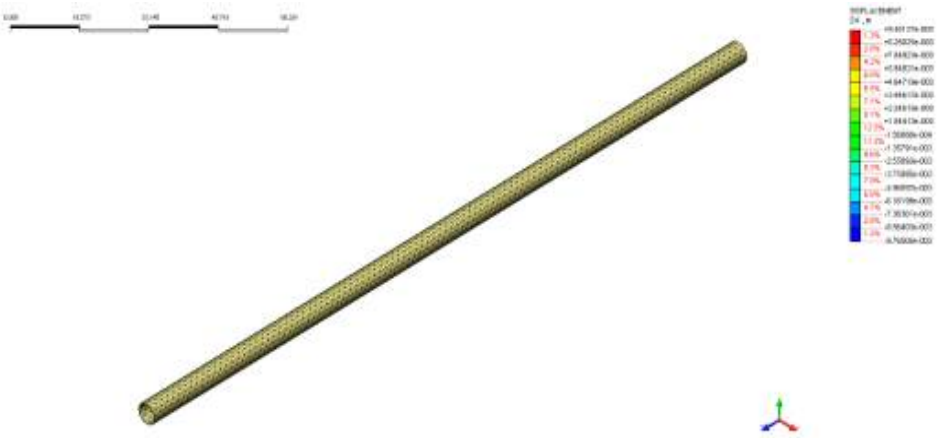
<그림 3-6-58>스테인리스강관 매설 지반의 200시간후 지반의 온도변화

상수도관 중 스테인리스 강관에 대하여 동결하중 증가에 따른 수치해석을 수행하였다. 동결온도 -10℃작용 시 지중에 매설된 스테인리스 강관 좌우 끝단 및 중심부의 관하부 침하량을 측정하였으며, 상수도관의 변형은 <그림 3-6-59>에서 <그림 3-6-61>과 같다. 수치 해석 결과를 살펴보면 관의 수직변형은 동결전에 비하여 지반 동결 후 -21.5 mm의 변화량을 보인다. 관 주요부의 대한 변위를 비교 검토해본

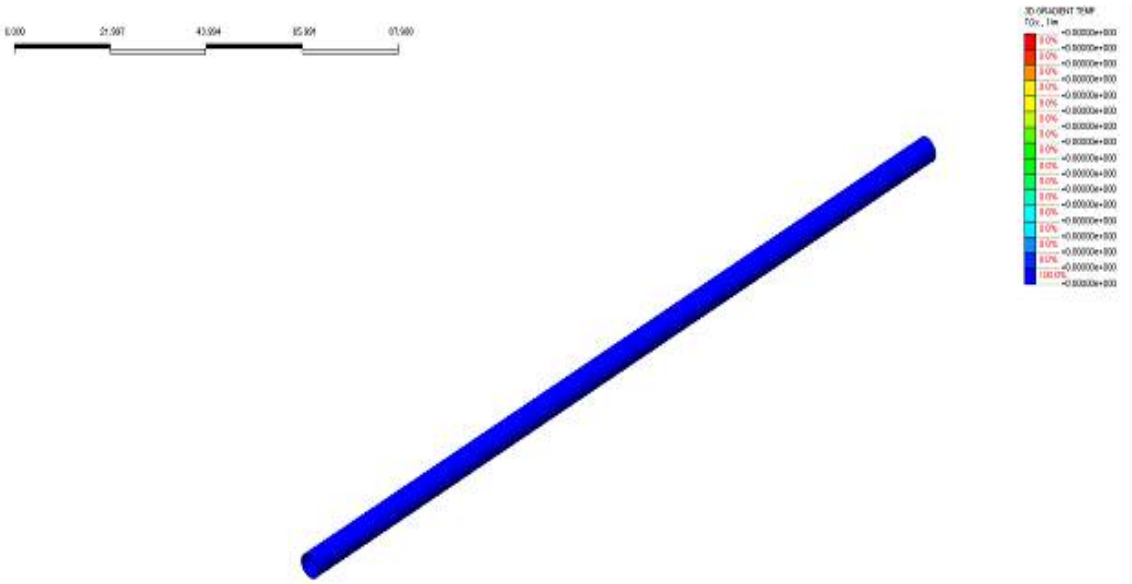
결과 관의 천단부에서 가장 많은 변위가 발생하였고, 스테인리스관의 저부로 내려갈수록 변위가 작아짐을 알 수 있었다.

유한요소해석결과 지반이 동결전 스테인리스강관에 작용한 연직토압이 9.25 kPa이고, 0℃로 하강하면서 11.893 kPa, 지반이 -10℃의 온도로 하강하면서 연직토압에 동상압력이 증가하여 22.404 kPa의 하중이 상수도관에 작용 하 였다.

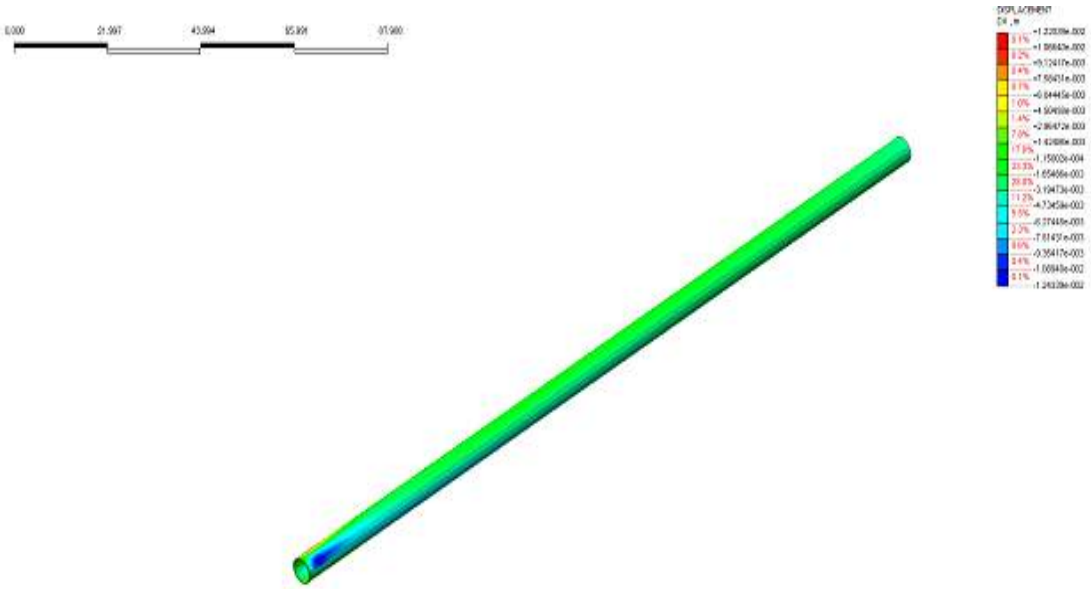
지반동결로 인한 동상압이 발생하여 스테인리스관의 길이에 대한 변형률 및 부등침하 결과를 살펴보면 하중이 작용하는 구간에서 변형률이 증가하는 경향을 나타내었다. 동결하중이 작용하지 않는 구간에서는 영향을 받지 않는 구간에서는 변형률이 작아지는 경향을 보이는 것을 확인하였다. 또한 부등침하의 상재 하중이 작용하는 끝부분에서 최대가 발생하는 것으로 확인 하였다.



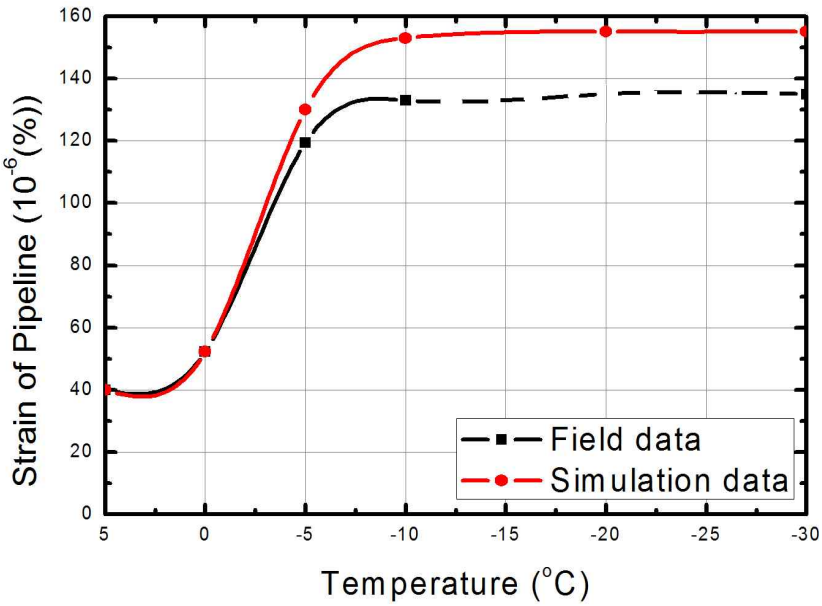
<그림 3-6-59> 40시간후 스테인리스 강관의 연직변형



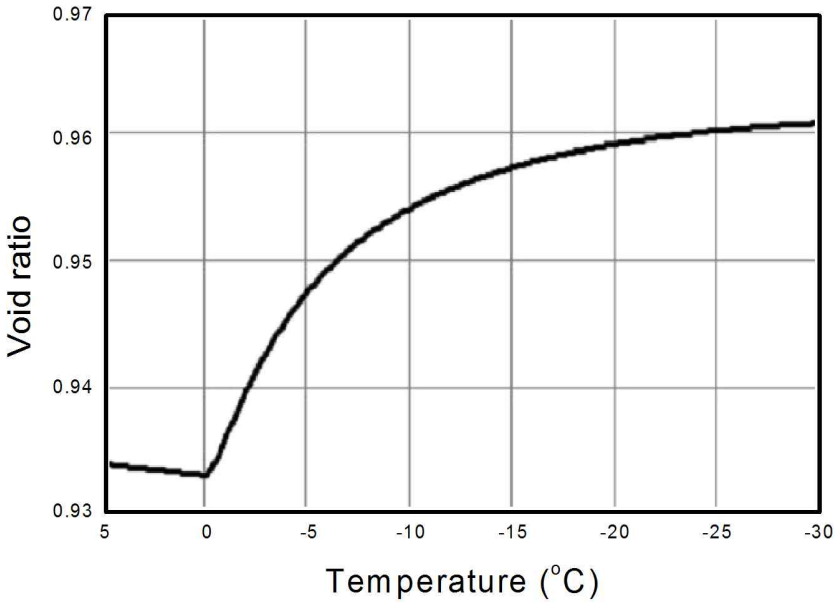
<그림 3-6-60>100시간후 스테인리스 강관의 연직변형



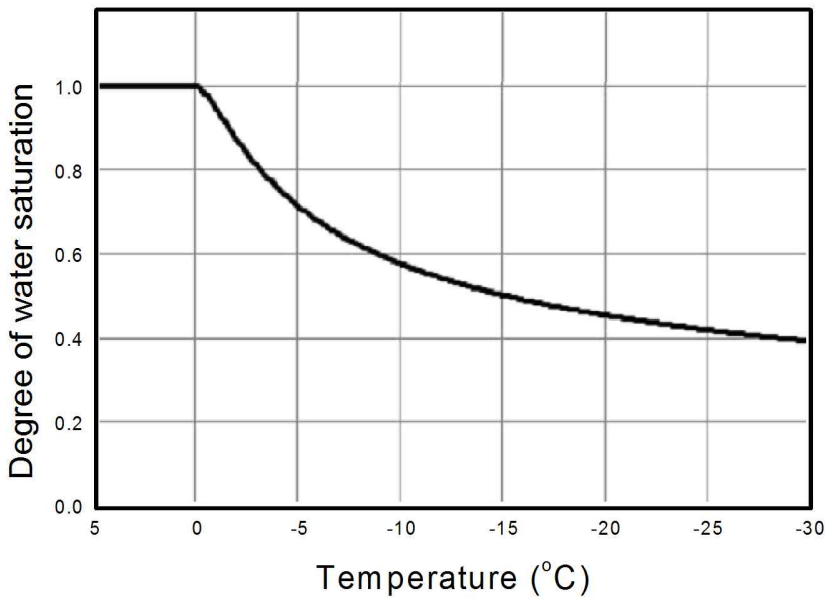
<그림 3-6-61>200시간후 스테인리스 강관의 연직변형



<그림 3-6-62>스테인리스강관의 온도와 연직변형률 상관관계



<그림 3-6-63>화강풍화토의 온도변화와 간극비의 상관관계



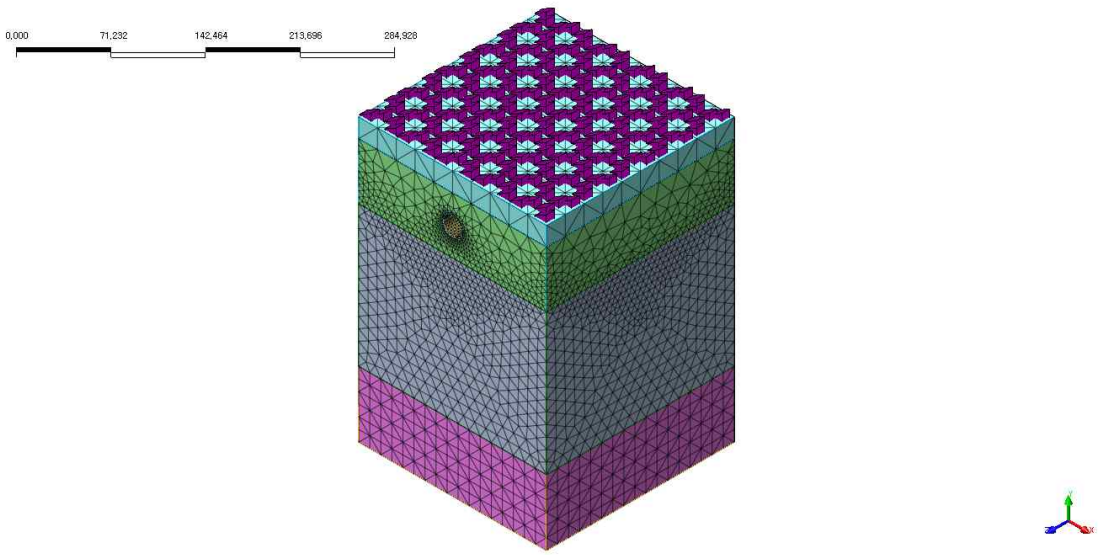
<그림 3-6-64>동결에 따른 온도와 물의 포화도 상관관계

그러므로 체적의 변화는 일어나지 않을 것이다. 그렇지만 모든 방향이 구속이 되어있으므로 내부의 부피팽창이 불가피 하다면 내부의 압력이 커질 것이다. 이 같은 사실은 <그림 3-6-62>에서 확인할 수 있다. <그림 3-6-63>에서는 온도의 감소에 의해 지반이 동결되었을 때 압력이 크게 증가함을 알 수 있다. <그림 3-6-59~61>는 지반의 동결에 따른 흙속 스테인리스관의 변화이다 지반의 동상으로 인한 지반 변형의 크기에 대해서 관 변형률은 -15℃에서 상한선을 발생하고 유한 요소의 해석은 현장실험과 비교하면 일정한 온도가 유지되는 조건에서 상수관의 변형이 커짐을

보인다. <그림 3-6-64>는 간극수가 얼면서 포화도의 감소를 야기하는 것을 나타내는 그림이다.

라. 닥타일주철관

화강풍화토가 포설된 닥타일 주철관같은 경우에는 상부의 구속 없이 자유단으로 이루어져 있다. <그림 3-6-63>를 보면 영하의 온도 까지는 흙이 압축하는 것을 볼 수 있다. 하지만 0℃가 넘어 가면서부터 흙속에 있는 물이 동결됨에 따라 흙이 팽창하여 연직 변형률이 증가 양상을 보임을 볼 수 있다. 이 양상은 <그림 3-6-63>에서처럼 간극비의 변화에서도 볼 수 있다. <그림 3-6-64>에서는 동결됨에 따라 간극속에 있는 물이 얼면서 물의 포화도가 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

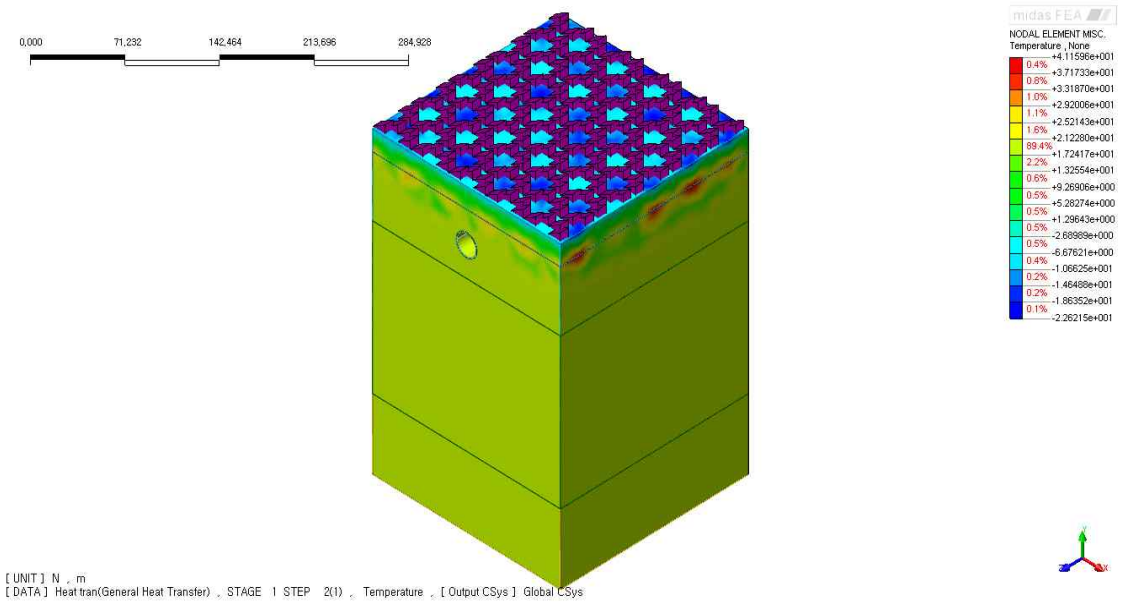


<그림 3-6-65>닥타일주철관의 수치해석 단면

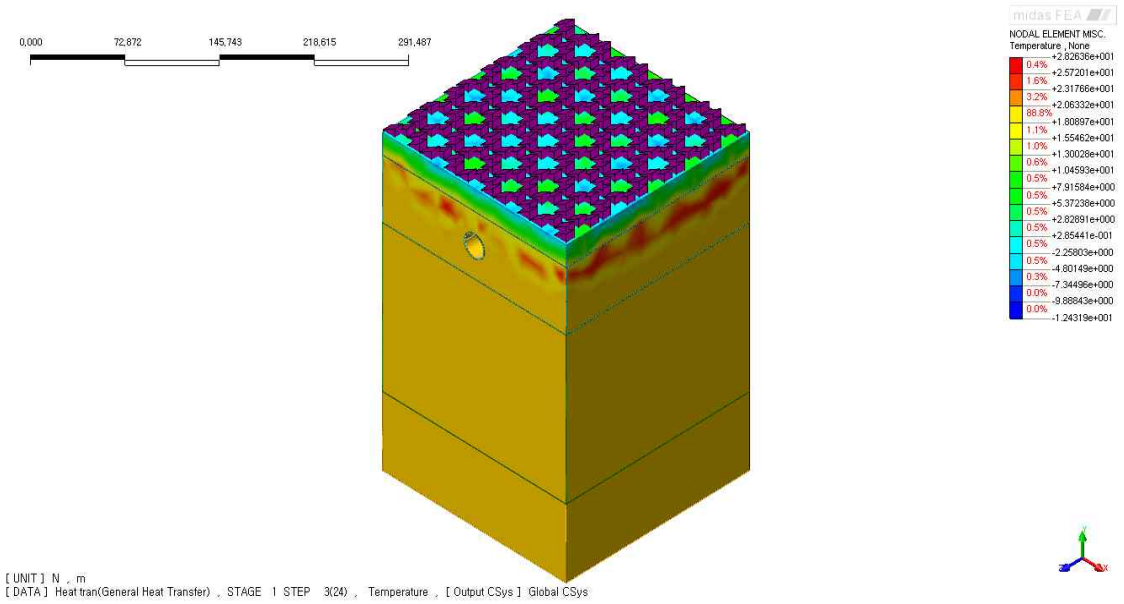
닥타일 주철관은 지반동결에 따른 각 층별 온도의 변화 및 침하량에 대한 예제해석이다. 대략적인 모식도는 <그림 3-6-65>와 같으며 해석결과를 정리하였다. 전체적인 지반 구성은 1 m로 되어있고 표층으로부터 0.1 m 아래인 점, 표층으로부터 0.5 m 아래인 점, 층으로부터 1 m아래인 점이다. 지층 전체의 초기 온도는 5℃이며, d점은 5℃가 유지하면서 지표면의 온도를 -5℃로 낮추었다.

<그림 3-6-66>에 나타난 것처럼 표층으로부터 동결이 일어나고 점점 동결과정은 아래층으로 전이되게 된다. 특히, 표층의 바로 아래 부분인 점에는 초기에는 증가 후 지속적으로 감소하여 동결되는 것을 볼 수 있다. 이는 초기에 표층의 동결로 인해 발열반응을 하여 아로 아래층인 점에 그 열이 전달됨으로 인해 온도가 상승한 것으로 보인다. 이 그래프에서 나타낸 온도는 절대온도로 표현한 것이고 시간은 로그 스케일 표현하였다. <그림 3-6-67>는 시간에 따른 각 층의 부피변화를 알 수

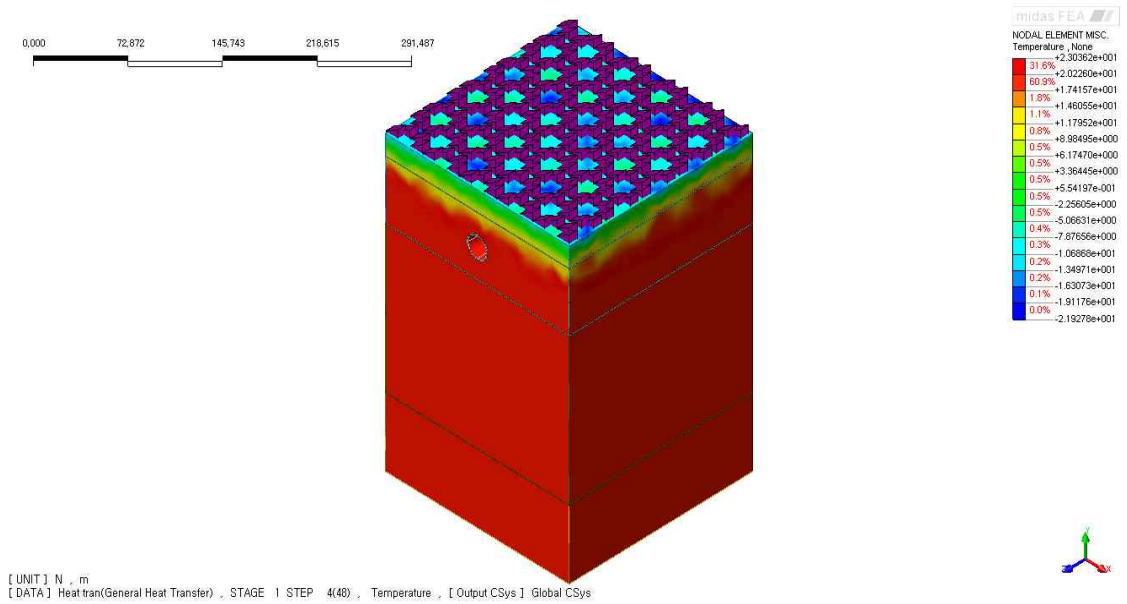
있는 것인데 표층에는 동결과 동시에 급격한 팽창이 일어나 동상 팽창 현상을 볼 수가 있고 더 아래의 지층에서는 약간의 팽창 후 수축이 일어나는 것을 확인 할 수 있다.



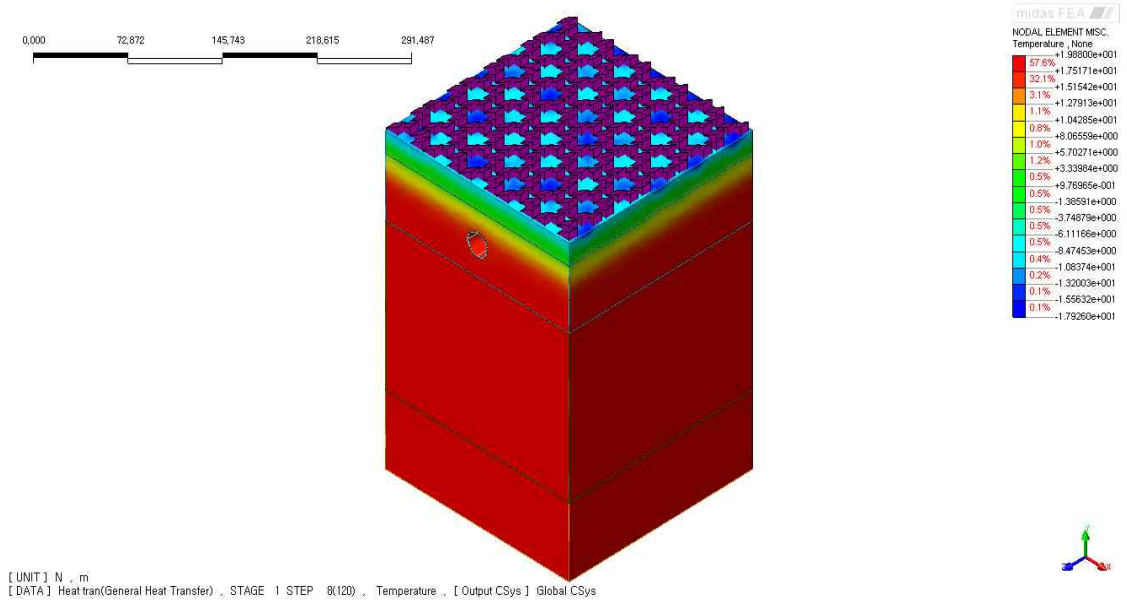
<그림 3-6-66>닥타일 주철관 매설 지반의 20시간후 지반의 온도변화



<그림 3-6-67>닥타일 주철관 매설 지반의 40시간후 지반의 온도변화



<그림 3-6-68>닥타일 주철관매설 지반의 100시간후 지반의 온도변화



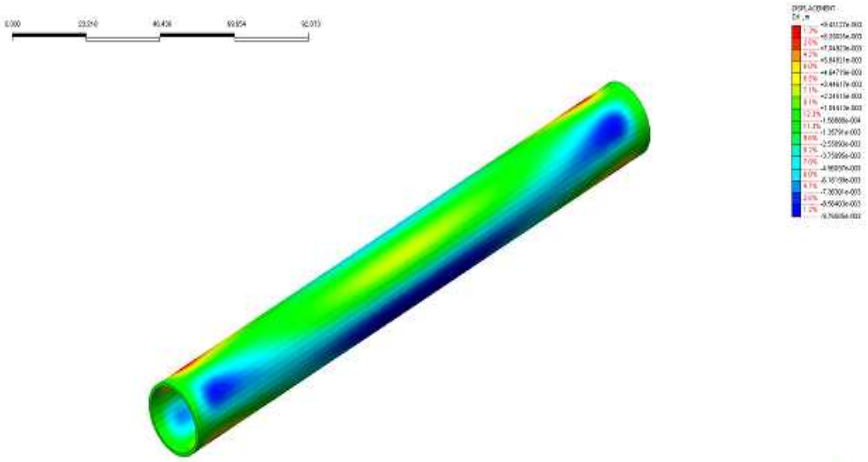
<그림 3-6-69>닥타일 주철관 매설 지반의 200시간후 지반의 온도변화

상수도관중 닥타일 주철관에 대하여 동결하중 증가에 따른 수치해석을 수행하였다. 동결온도 -10℃작용 시 지중에 매설된 닥타일 주철관 좌우 끝단 및 중심부의 관하부 침하량을 측정하였으며, 상수도관의 변형은 <그림 3-6-70>과 같다. 수치 해석 결과를 살펴보면 관의 수직변형은 동결전에 비하여 지반 동결 후 -18.2 mm의 변화량을 보인다. 관 주요부의 대한 변위를 비교 검토해본 결과 관의 천단부에서

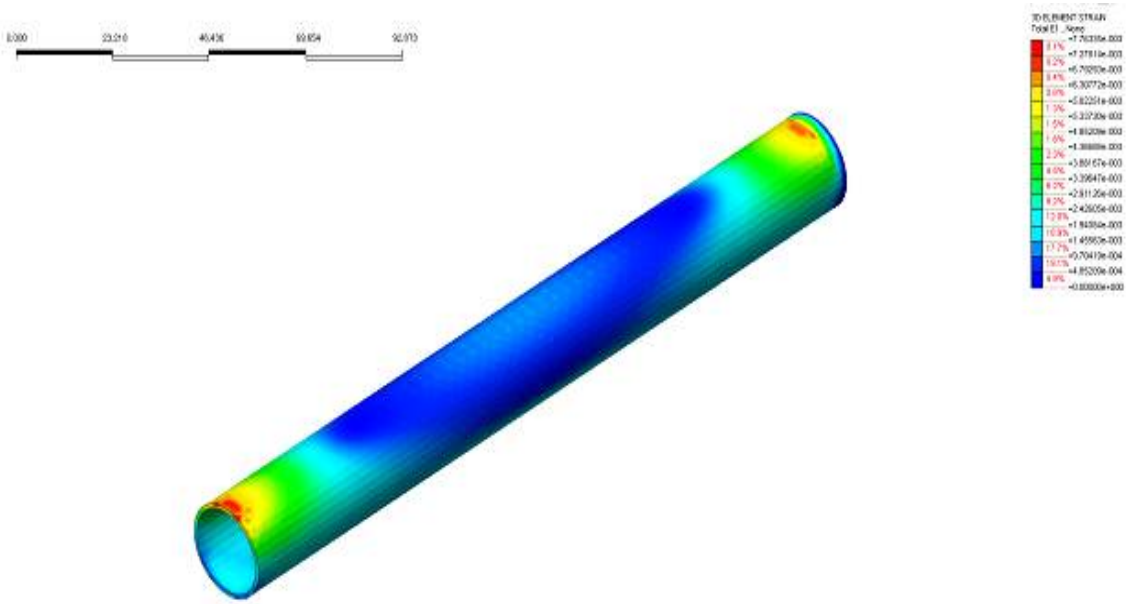
가장 많은 변위가 발생하였고, 닥타일 주철관의 저부로 내려갈수록 변위가 작아짐을 알 수 있었다.

유한요소해석결과 지반이 동결전 닥타일 주철관에 작용한 연직토압이 8.665 kPa이고, 0℃로 하강하면서 12.425 kPa, 지반이 -10℃의 온도로 하강하면서 연직토압에 동상압력이 증가하여 20.127 kPa의 하중이 상수도관에 작용 하 였다.

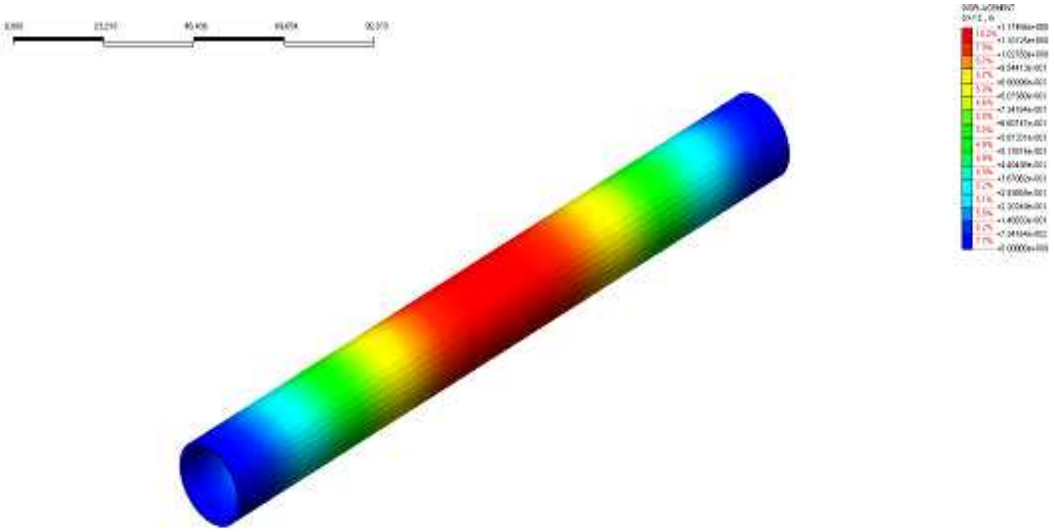
지반동결로 인한 동상압이 발생하여 닥타일 주철관의 길이에 대한 변형률 및 부등침하 결과를 살펴보면 하중이 작용하는 구간에서 변형률이 증가하는 경향을 나타내었다. 동결하중이 작용하지 않는 구간에서는 영향을 받지 않는 구간에서는 변형률이 작아지는 경향을 보이는 것을 확인하였다. 또한 부등침하의 상재 하중이 작용하는 끝부분에서 최대가 발생하는 것으로 확인하였다



<그림 3-6-70>40시간후 닥타일 주철관의 연직 변형



<그림 3-6-71>100시간후 닥타일 주철관의 연직 변형

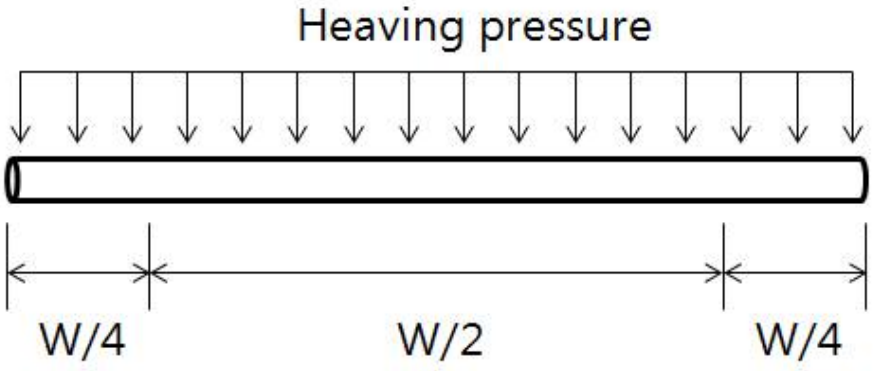


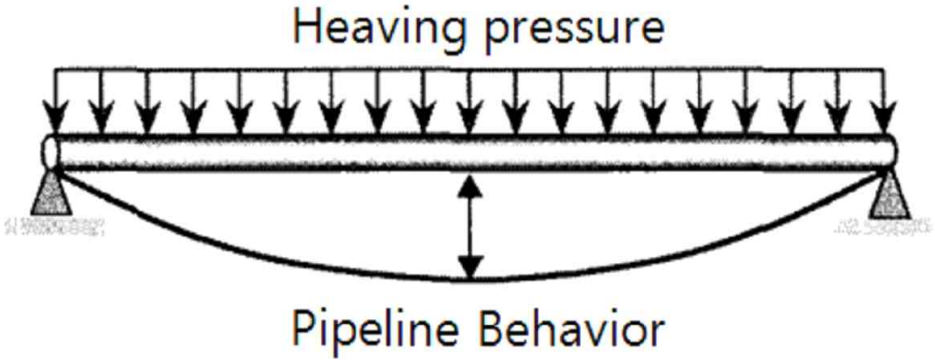
<그림 3-6-72>200시간후 닥타일 주철관의 연직 변형

기존의 지중매설관의 해석식이 가지고 있는 적용적 한계성 지반변형의 폭에 따른 해석식의 이원화를 효율적으로 극복하기 위해서 본 연구에서는 다음과 같은 방식으로 해석적 관계를 제안하였다. 좁은 폭의 지반변형에 대해서는 동결지반의 거동이 매설관로의 거동을 지배하는 것으로, 넓은 폭의 지반변형에 대해서는 상부의 토압 및 동결 토압의 거동이 상수도관의 거동을 지배하는 것으로 각각 분리해서 생각하되 전체 변형률을 산정하는데 있어서는 두 가지 거동 조합을 고려 하였다.

먼저 <그림 3-6-73>와 같이 양단이 힌지로 지지되는 상수도관 경동의 경우 전체적으로 내적 인장 변형이 발생하며, 중간부분(W/2)에 축방향 인장력에 의한 변형률이 추가적으로 발생하는 것으로 고려함으로써 다음과 같은 식(3-6-19)을 구성하였다.

$$_{otal} = \varepsilon_{axial} + \varepsilon_{inward} = \begin{matrix} F & W^2 \\ \delta & 16EA \end{matrix} + \mu\delta \quad \frac{W}{10} \tag{3-6-19}$$



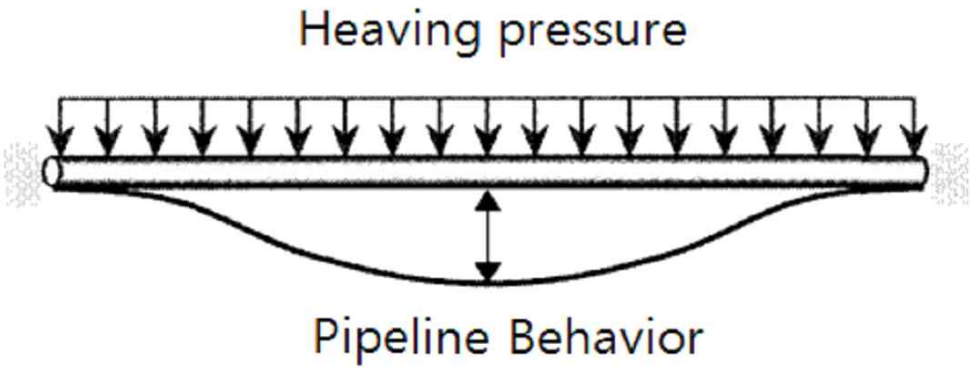


<그림 3-6-73>양단이 힌지로 고정된 파이프라인의 거동

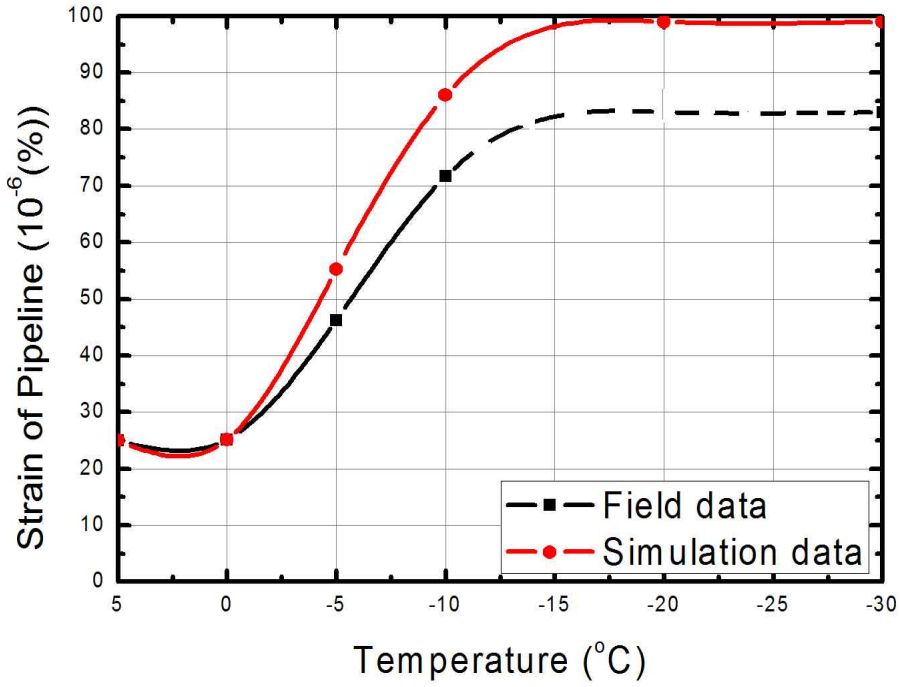
여기서, $_{xial}$은 축방향 변형률을, ε_{inward}는 내적인장변형률을 각각 의미하며, F는 상수도관과 지반 상호작용으로서 ASCE(1984)에서 제안한 상호작용력, W는 지반병형의 폭, EA는 관의 축방향 강성을 나타내며, μ는 탄성계수와 내적 인장 변형률과의 관계를 나타내는 계수이다.

반면, 동결지반변형의 폭에 따라 어느 한 가지의 변형률 산정방법만을 적용하는 것도 다른 쪽의 영향을 무시하게 되어 전체 변형률을 과소평가할 수 있는 내포하고 있다. <그림 3-6-74>과 같은 상수도관의 거동의 경우 양단이 고정된 상수도관이 상호작용력 IF로 표현되는 등분포하중을 받는 것으로 고려하였으며 탄성론에 의거하여 다음과 같이 식(3-6-20)을 구성하였다. 여기서 D는 상수도관의 관경을 의미한다.

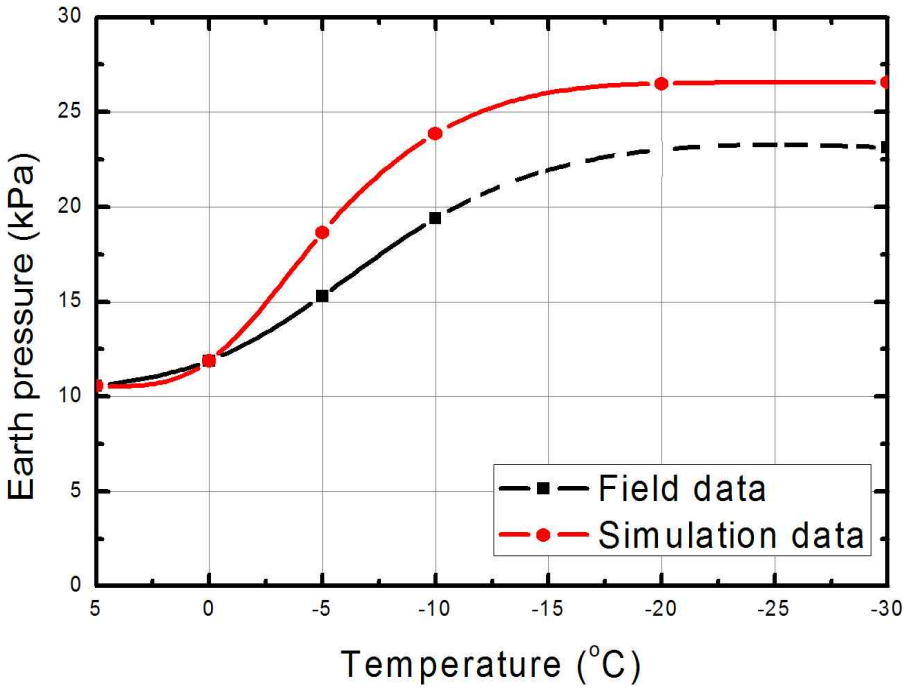
$$\varepsilon_{totil} = \frac{M_{\max}}{EI} C = \frac{8\delta D}{EW^2} \qquad (3\text{-}6\text{-}20)$$



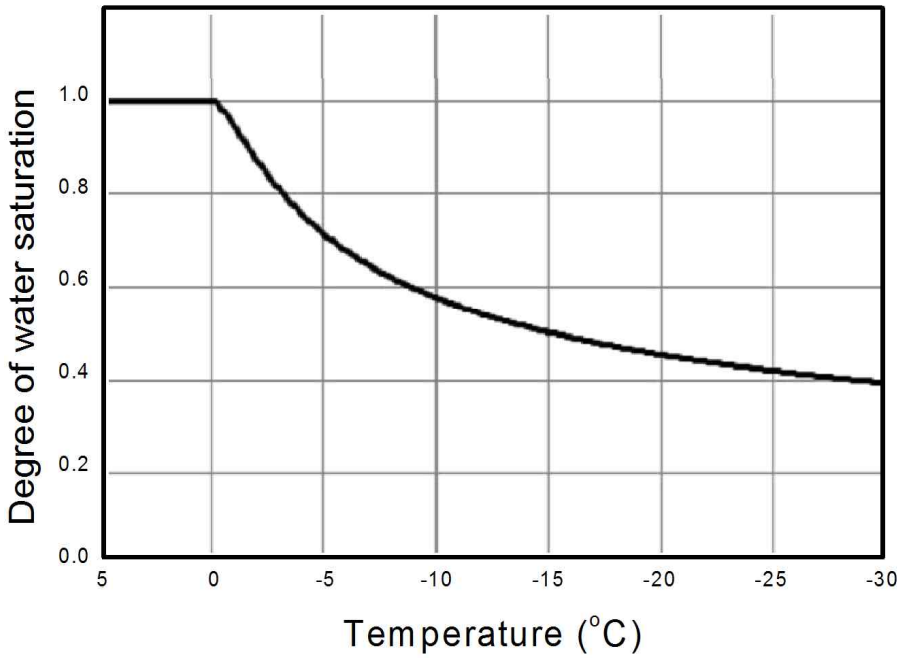
<그림 3-6-74>양단이 고정된 파이프라인의 거동



<그림 3-6-75>닥타일 주철관의 온도와 연직변형률 상관 관계



<그림 3-6-76>지반 온도에 따른 토압의 변화



<그림 3-6-77>온도와 물의 포화도 상관관계

기본적인 가정은 같지만 동결되는 곳이 지표면 상부가 아닌 매설된 관주변이라는 것이다.

온도변화를 보면 파이프 상단에서 시작과 동시에 동결이 되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 시간이 지난 후에 상향으로 0.5 m 떨어진 온도가 하락하여 동결이 되는 것을 확인할 수 있다.

<그림 3-6-76>에서 보는 것처럼 표층부에는 수치해석이 끝나는 시점까지 동결이 되지 않은 것을 확인할 수 있고, 전체적인 팽창량의 양은 감소하였으나, 파이프 수직상단부에 위치하는 표층에 국부적인 동상 팽창이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

지중에 매설된 관 내부 온도 감소와 지표면의 온도감소에 따른 각각의 거동 비교이다. 표현되어있는 것처럼 지중에 관이 매설되어 있고 표층에 기온이 감소하여 동결이 발생하였을 때 시간에 따른 온도 변화와 연직 변위량의 발생을 수치해석을 통해 알아보았다. 온도변화를 살펴보면 표층이 동결이 되고 1 m아래층인 온도를 보면 소량 증가 후 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 표층이 동결됨에 따라 발열반응을 함으로 일시적으로 온도가 상승하기 때문이다.

<그림 3-6-75>는 닥타일 주철관의 온도와 연직변형률 이다. 이는 동상으로 인한 지반변형의 형상에 따라 실제적으로 매설관로에 작용하는 동상하중이 변화하면서 나타나는 현상인 것으로 판단되며 특히 동상지반의 형상에 따른 응답특성의 차이가 있다고 볼 수 있다. 수치해석에서 양단이 자유단 실험에서는 양단고정으로 분석하였다. 양단이 고정인 경우보다 자유단의 경우 변위의 발생이 더 크게 나타난다.

유한요소법을 이용한 전체적인 지반변형과 지반의 온도의 분포를 나타내고 있다.

파이프는 비팽창성으로 간주하여 파이프 자체의 변형은 일어나지 않도록 하였다. 붉은 색일수록 지반속의 얼음이 0에 가깝고, 파란색일수록 100에 가깝다. 전체적인 지반의 팽창이 발생했음을 알 수 있고, 국부적인 동상 팽창은 일어나지 않는 것을 알 수 있다.

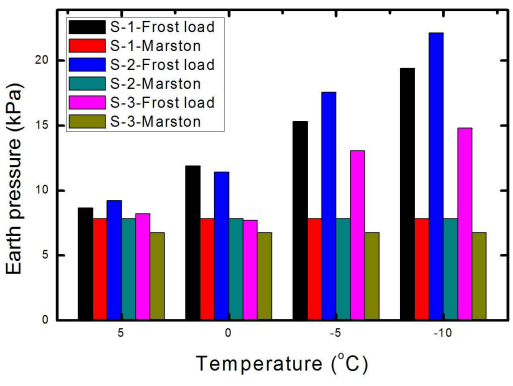
5. 소결론

본 절에서는 동결지반에서 상수도관의 거동 특성을 파악하기 위하여 Test bed를 구성한 옥외동상실험을 수행하였으며, 수치해석을 통해 동결지반에서 실제 상수관의 거동 특성을 비교분석하였다. 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 겨울철 지반이 동결하면서 상수도관에 발생하는 동상력은 흙이 동상에 민감한 점성토이고, 모세관 현상에 의한 지하수의 공급이 계속되는 조건이며, 추위가 오랜 기간 동안 발생한다. 흙이 0℃이하로 냉각되면서 수분이 얼음으로 상변화 하여 동결하중이 발생한다. 동결깊이 이내에 매설된 상수도관은 겨울철에 동상력을 받고 있음을 판단 할 수 있다.

2) 상수도관을 동결깊이보다 낮게 매설하더라도 지반이 최적함수비를 초과하여 포화도 100%에 달할 경우 겨울철 지반의 온도가 0℃로 낮아지면 최대 2.4배 만큼 더 큰 토압이 작용하며, 지반의 온도가 -10℃까지 낮아지면 최대 3.7배 만큼 더 큰 토압이 작용하는 것을 실험 결과 나타났다. 따라서 상수도관을 매설한 지역에서는 초겨울 강우나 주변 강물의 침투로 지반의 함수비가 커지는 곳을 철저히 경계해야하며, 상수도관 매설 인근 지반의 배수처리에 주의해야 할 것으로 판단 된다. 아울러 이러한 조건의 지반에서는 기존의 Marston이론만으로 관에 작용하는 하중을 고려하는 것은 안전측을 벗어날 수도 있다는 것을 염두 해야 한다.

Temperature (℃)	Earth pressure (kPa)					
	Section-1		Section-2		Section-3	
	Frost load	Marston	Frost load	Marston	Frost load	Marston
5	8.665	7.82	9.234	7.82	8.214	6.74
0	11.893	7.82	11.425	7.82	7.695	6.74
-5	15.304	7.82	17.570	7.82	13.072	6.74
-10	19.404	7.82	22.127	7.82	14.785	6.74

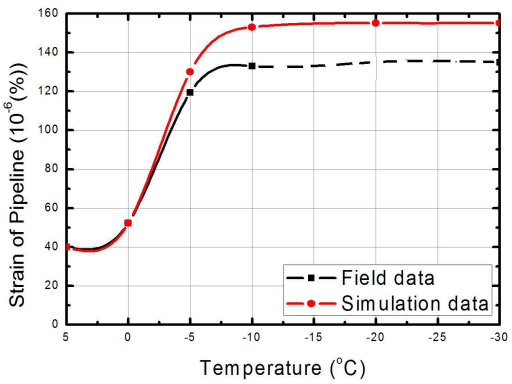


3) 온도가 0℃이하가 지속되면 모든 물질은 강성이 커지고 수축한다. 흙의 경우 예외는 아니다. 흙의 최적 함수비 상태에 동결한다고 해서 지지력 손상이나 체적이 팽창하는 것은 아니다. 다만 수분이 계속 공급되었을 때 0℃이하로 계속 지속되면 동상흙은 체적이 팽창하며 동상이 나타난다. 동상현상으로 인한 거동은 상부 복토제의 영향과 함수비 영하온도 지속시간과 관계가 있으며 영하온도의 지속시간이 길수록 동상현상이 크게 발생되며 이로 인한 상수관의 변형을 가져오며 복토제의 종류에 따라 상수도관에 작용하는 응력을 약 10%이상 저감시킬 수 있는 것으로 판단된다.

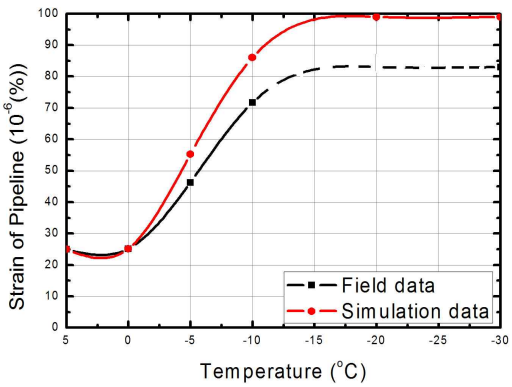
4) 동상으로 인한 지반변형을 받는 상수도관의 거동이 일정한 동상지반변형의 폭을 기준으로 확연하게 변화한다는 것을 확인하였다. 또한, 지반동상형상에 따라 실제적으로 상수도관에 작용하는 동상하중이 변화하면서 상수관에 작용하는 변형 특성을 규명 하였다. 동결지반은 현상학적으로 복잡성에도 불구하고 각 부지조건에 따라 발생가능한 지반 변형의 형상과 크기 및 동결하중을 가능한 정확하게 추정함으로써 상수관의 변형을 억제하는 작업이 요구된다.

5) 상수도관을 매설할 때는 해당지역의 동결깊이와 함께 해당 지반의 동상 민감성 시험을 실시하는 것이 필요하다고 판단된다. 뒤채움재료는 배수가 용이하고 동상에 민감하지 않은 재료를 사용하며, 상수도관은 동결토압으로 인한 변형을 억제할 수 있는 재료를 사용해야 한다.

6)동상오차율 분석



(a)스테인리스 강관



(b)덕타일 주철관

□ 스테인레스강관의 수치해석 결과를 토대로 현장 실측데이터와의 차이는 거의 오차가 없이 진행되고, -20℃이하일 때 약 12%로 나타난다.

□ 주철관의 수치해석 결과를 토대로 현장 실측데이터와의 차이는 거의 오차가 없이 진행되고, -5℃에서 10%, -20℃이하일 때 약 20%로 나타난다.

7절 채움재료의 동결특성 및 성능평가 분석

1. 서론

일반적으로 국내 도로에는 노상토의 동상현상을 방지하기 위하여 해당지역의 동결깊이에서 도로포장체(표층+기층+보조기층)를 합한 깊이를 제외한 깊이만큼 자갈이나 쇄석을 포설하는 동상방지층을 설치한다.

동상방지층은 동절기 동안 외부의 찬 공기가 노상까지 침투하는 것을 차단하는 한편, 모세관으로 인한 지하수가 상승하는 것을 막아 흙의 동결팽창을 방지하는 역할을 한다. 동상방지층의 두께는 추운지방에서는 깊고, 덜 추운 지방에서는 얕은데 강원도 일부지역에서는 최대 60cm까지 포설하기도 한다.

이 연구에서는 기존에 연구개발 되었던 여러 가지 채움재로 가능한 재료의 조사를 수행하였고, 적용 가능한 채움재료의 동상특성분석을 위하여 일반 채움재로 사용하는 모래와 혐수성모래에 대한 동상민감성 분석을 하였다. 또한 본 연구기관에서 새롭게 개발한 동상저감 채움재료에 대한 동상특성시험 분석을 수행하였으며 실제 상수관에 채움재를 적용하였을 때의 상수관의 거동을 분석하기 위하여 대형 냉동 챔버를 이용한 실대형 모형실험을 수행하였다.

2. 적용가능한 상수도관 채움재료 조사 및 현황 분석

가. 동상방지재 기존 연구 성과

(1) 폐유리

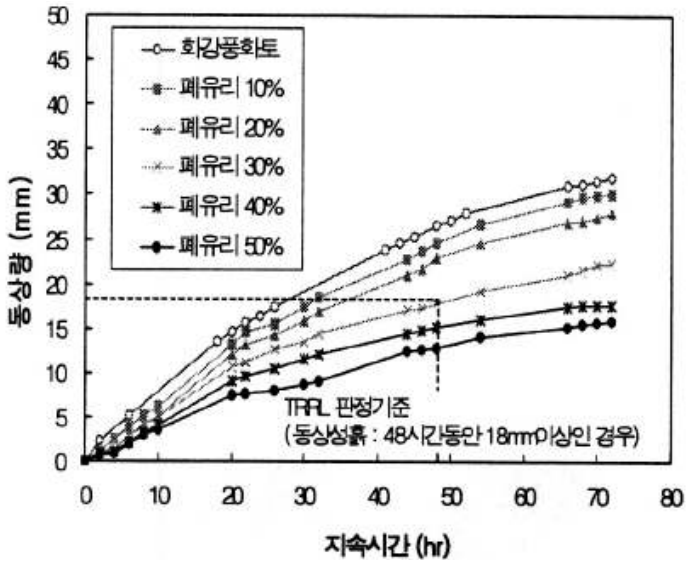
김영진, 홍승서(2008) 등은 폐유리를 도로의 동상방지층 재료로 활용하기 위해 투수실험, 부동수분실험, 동상팽창량 실험을 통하여 폐유리의 동상방지효과에 대하여 규명하였다.

이 연구에 사용된 혼합 대상 흙은 화강풍화토이고, 영국 TRRL 규격으로 제작된 동상시험장비를 이용하여 동상팽창량시험을 수행하였다. 폐유리는 자원재생공사에서 재활용을 위해 규격에 맞게 파쇄시킨 폐유리를 사용하여 혼합비율 0%, 10%, 20%, 30%, 40% 50%의 조건으로 시험을 수행하였다. <그림 3-7-1>는 실내동상실험을 통한 동상팽창량을 결과 값을 나타낸 것이다.

영국 TRRL 기준의 동상민감성 흙의 판단 기준은 17 , 물의 온도 4 상태에서 48시간동안 지속하여 동결된 공시체의 팽창량이 18mm가 넘어가면 동상성 흙으로 규정하고 18mm가 넘지 않으면 비동상성 흙으로 판정하는 정량적인 방법을 제시하고 있다.

영국 TRRL 기준에 의해 폐유리를 섞지 않은 화강풍화토, 혼합비 10%, 20%의 흙

에서는 48시간 이내에 18mm이상의 동상팽창량이 발생하여 동상에 민감한 흙으로 분류되었고, 폐유리 혼합비 30%이상에서는 48시간 이내에 18mm 이하의 동상팽창량이 발생하여 흙의 성질이 동상에 민감하지 않은 흙으로 개선되는 것으로 보고되었다.



<그림 3-7-1> 폐유리 혼합비에 따른 동상팽창량

(2) 폐비닐

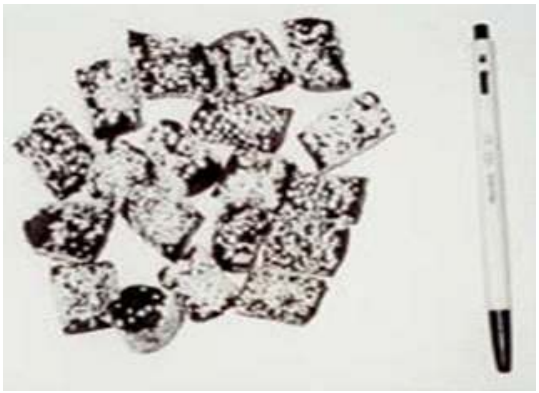
김영진, 홍승서(2006) 등은 도로동상방지 기술을 개발하기 위해 폐비닐 골재의 공학적 특성, 환경특성, 동토공학적 특성에 대한 실험을 통하여 폐비닐 골재의 효과를 규명하였다.

이 연구에서는 농촌에서 발생하는 폐비닐을 흙이 묻은 채 그대로 녹여 자갈이나 모래 크기로 절단 한 후 만든 것으로 일일이 폐비닐에 묻은 흙이나 이물질을 제거하고 세척하는 과정을 생략하여 제품생산 절차가 간단하다고 한다. <그림 3-7-2> (a)는 폐비닐 과 흙을, <그림 3-7-2> (b)는 폐비닐과 흙, 그리고 EPS불럭조각을 넣어 만든 폐비닐 골재의 모습을 나타낸 것이다.

이 연구에서 사용된 일반 흙은 화강풍화토이며, 중량대비 폐비닐 10%, 20%, 30%, 폐비닐 30% + EPS 1%를 첨가하여 만든 폐비닐 골재를 화강풍화토에 4%, 7%, 10%, 15%의 비율로 혼합하여 동상팽창량 분석을 하였다.

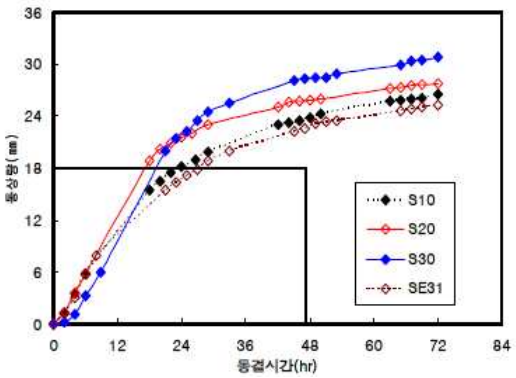


(a) 폐비닐 + 흙

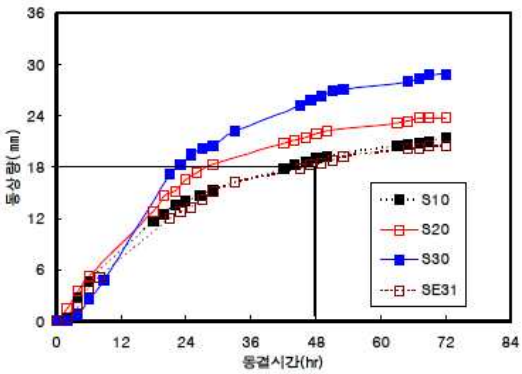


(b) 폐비닐 + 흙 + EPS

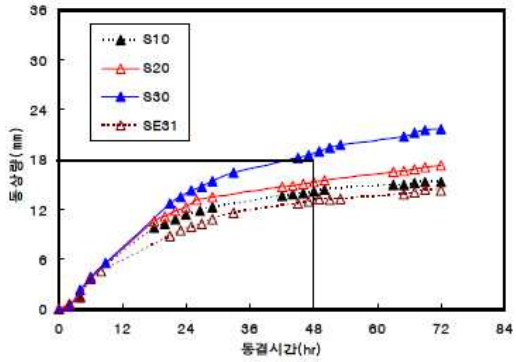
<그림 3-7-2> 폐비닐 골재



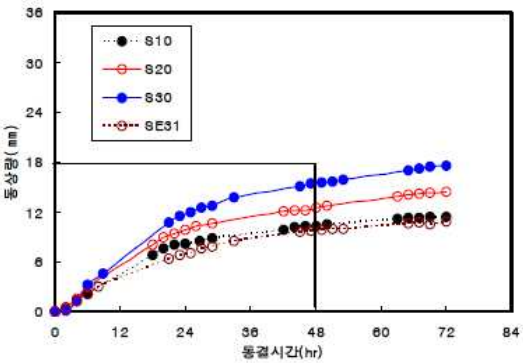
(a) 폐비닐 골재 4% + 일반토 96%



(b) 폐비닐 골재 7% + 일반토 93%



(a) 폐비닐 골재 10% + 일반토 90%



(a) 폐비닐 골재 15% + 일반토 85%

<그림 3-7-3> 폐비닐 골재를 이용한 동상팽창량 시험 결과

이 연구결과에 의하면 영국 TRRL 기준 동상민감성 판정법에 의해 10%, 20%의 폐비닐을 섞은 골재에서는 <그림 3-7-3> (c)의 폐비닐 10%, 일반토 90% 조건에서 처음으로 48시간 이내에 18mm 이하의 동상팽창량을 보였고, 30%의 폐비닐을 섞은 골재에서는 <그림 3-7-3> (d)의 폐비닐 15%, 흙 85% 조건에서 48시간 이내에 18mm 이하의 동상팽창량을 보였으며, 30%의 폐비닐과 1%의 EPS 조각을 섞은 골재에서는 <그림 3-7-3> (b)의 폐비닐 7%, 흙 93% 조건에서 TRRL 기준을 만족하

는 것으로 보고되었다.

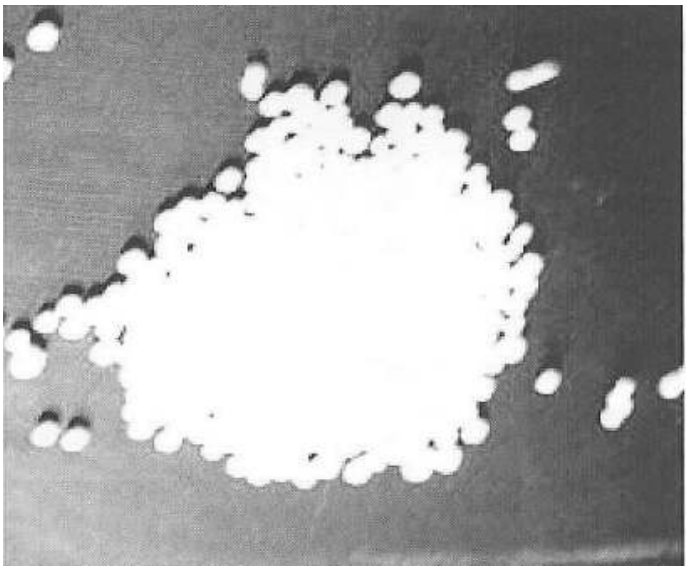
(3) EPS (Expanded PolyStyrene)

일본, 노르웨이, 스웨덴 등 동토국가에서는 ESP판의 단열성이 우수한 점에 착안, EPS판을 기존의 자갈 대신 도로 동상방지층에 포설할 경우 겨울철 동결깊이를 차단하는 효과가 뛰어날 것으로 판단하였으며, 실제 도로의 동상방지재로서 사용한 적이 있다. 그러나 실제 도로 현장에 적용한 결과, EPS판과 판의 연결부 틈새로 외부의 찬공기가 침투하고, 지하수가 스며들어 도로하부의 기초지반에 동상의 원인이 되는 아이스렌즈가 형성되는 바람에 기대했던 것 만큼 동상방지효과를 얻지 못하였다. 또한 EPS 판은 지하수위가 높은 곳에서는 부력을 받으므로 사용에 제한이 있다는 단점도 지니고 있다.

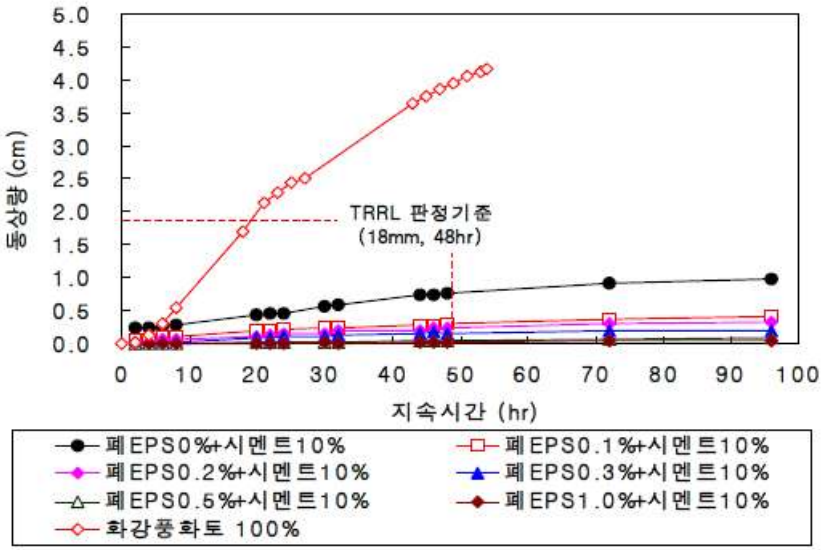
김영진 홍승서(2002) 등은 EPS 중에서도 폐 EPS 조각을 시멘트, 흙과 혼합하여 동상방지층 재료로 재활용하는 방법에 대한 연구를 수행하였다. <그림 3-7-4>은 폐 EPS 조각의 모습을 나타낸 것이다.

이 연구에서 사용한 흙은 화강풍화토이며 실험조건은 시멘트 10%일 때, 풍화토 90~89%, 폐 EPS조각 0~1.0% 이며, 시멘트 20%일 때, 풍화토 79%~80% 폐 EPS 조각 0%~1.0%의 조건으로 골재를 제작하여 동상팽창량 분석을 하였다.

이 연구에서는 아무것도 섞지 않는 화강풍화토를 제외한 모든 경우에서 영국 TRRL 기준으로 48시간 이내 18mm이하의 침하가 발생하여 동상에 대하여 민감하지 않은 것으로 보고되었다. <그림 3-7-5>는 EPS 조각 혼합토의 동상팽창량 시험결과를 나타낸 것이다.



<그림 3-7-4> 폐 EPS 조각



<그림 3-7-5> 폐 EPS 조각 혼합토의 동상시험 결과

3. 대표 채움재의 동결특성 시험

가. 모래와 혐수성 모래의 동상특성분석

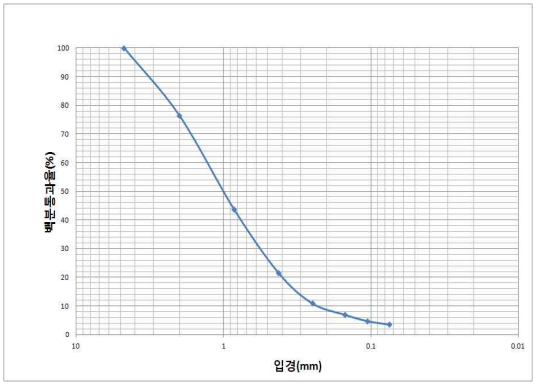
(1) 뒷채움 재료의 특성 분석

상수관로 매설시 채움재료의 경우 동파의 가능성을 배제하기 위하여 모래계열의 재료를 사용한다. 본 과업에서는 대표적으로 사용되는 채움재료와 극한의 환경을 가정하여 사용될 수 있는 비동상성 시료인 혐수성시료의 물리적·역학적 특성을 분석하고 또한 동상특성실험을 실시하여 재료의 동상시 거동특성을 나타내었다. 모래와 혐수성 시료의 투수특성, 동상특성을 비교하기 위한 비교군으로는 풍화토, 실트질 모래를 사용하였다.

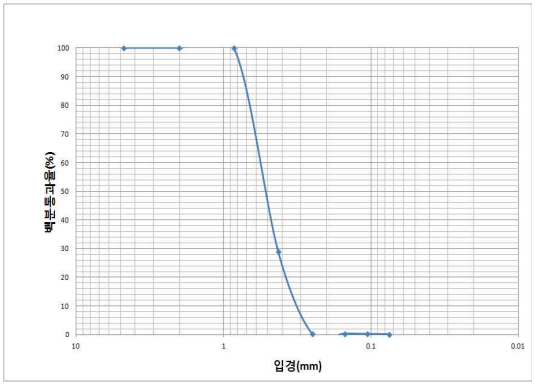
(2) 투수특성실험

(가) 재료의 물리·역학적 특성

본 실험은 배관 설치 후 되메우기 용으로 사용되고 있는 양질의 모래와 혐수성 모래, 일반 풍화토를 대상으로 하였다. 양질의 모래와 혐수성 시료를 KS F2302의 규정에 의거 체분석을 시행하였다. 입도분포곡선은 <그림 3-7-6>, <그림 3-7-7>와 같고 유효입경, 균등계수 곡률계수는 <표 3-7-1>와 같다.



<그림 3-7-6> 일반 모래의 입도분포곡선



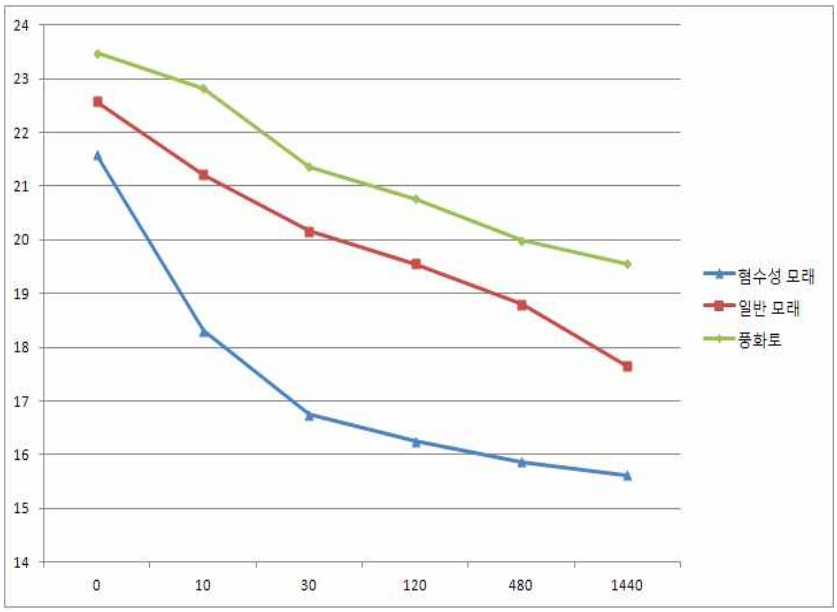
<그림 3-7-7>혐수성 모래의 입도분포 곡선

<표 3-7-1> 일반 모래와 혐수성 모래의 물리적 특성

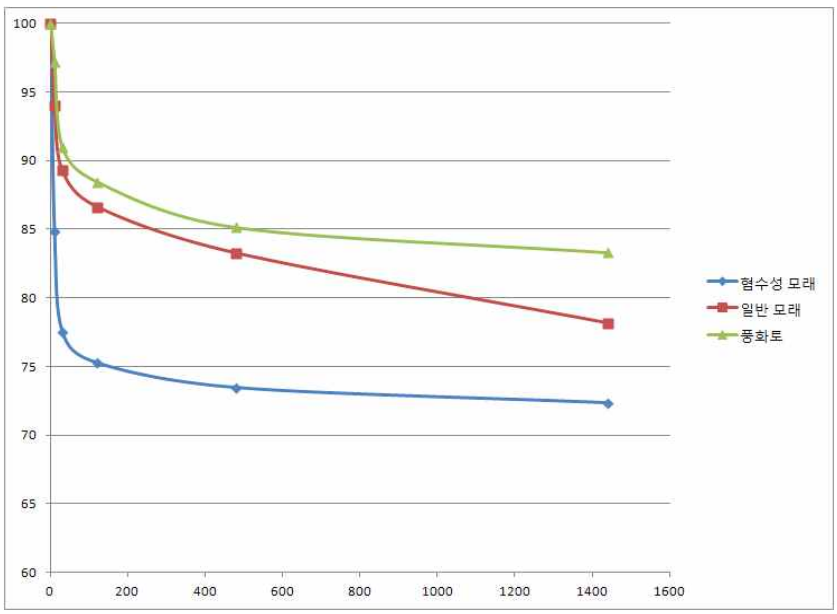
시료	비중 (G_s)	유효입경 (D_{10})	균등계수 (C_u)	곡률계수 (C_c)	USCS
일반모래	2.59	0.13	5.6	0.86	SP
혐수성모래	2.63	0.32	1.78	0.97	SP

(나) 시료의 투수특성 실험

양질의 모래와 혐수성 모래의 투수계수를 측정하는 실험과 자연 배수를 시켰을때 시간에 따른 함수비를 측정하는 실험을 통해 두 시료의 투수 특성을 분석하였다. 투수실험은 KS F2322에 의거하여 사질토에 적합한 정수두 투수실험으로 실시하였다. 함수비 측정은 KS F2306에 의거하여 실시하되 풍화토와 일반 모래, 혐수성 모래를 비교하였고, 정확한 실험을 위해 원형 몰드의 상, 중, 하에서 함수비를 측정해 평균을 구하는 방식으로 진행하였다.



<그림 3-7-8> 세가지 시료의 시간에 따른 함수비



<그림 3-7-9> 세가지 시료의 함수비 감소율

(다) 투수특성 실험 결과 분석

정수두 투수실험 결과 일반 모래의 투수계수는 1.54×10^{-2}로 나타났고, 혐수성 모래의 투수계수는 2.14×10^{-2}으로 일반 모래에 비해 혐수성 모래에서 투수계수가 약 29%더 큰 것으로 나타났다. 원형 몰드를 이용한 함수비 측정 결과 24시간 경과시 혐수성 모래는 풍화토에 비해 함수비가 약 20%작았고 일반 모래에 비해서는 약 12%작은 값을 보였다. 시간에 따른 함수비의 감소율은 일반모래에 비하여 혐수성시료가 시간이 흐름에 따라 두드러지는 경향을 나타내었다. 이는 입자 표면처리를 통

하여 물과 흙입자의 흡착력의 배제되어 나타나는 현상으로 사료된다. 관거의 매설지역의 동상피해의 가장 중요한 인자중 하나는 지반내의 간극수의 비율이다. 일반적으로 모래에 의해 뒷채움이 되는 관거 매설지역의 경우 강우나 누수에 의해서 채움부위의 함수비가 증가 하게 되는데 이러한 경우의 물의 배제는 동상의 피해를 제거하기 위한 중요한 조건이 된다. 그러나 일반적인 모래의 경우 흡착에 의한 배수율의 감소나 잔류 수분이 존재하여 피해위험성을 내포하고 있다. 그러나 본 연구를 통하여 실험된 혐수성 시료의 경우 표면처리를 통하여 흡착을 최소화 하여 배수율의 유지와 잔류수분감소를 확인하였다. 동상위험지역이나 동결깊이 이하로 관로 매설이 어려운 지역의 경우 본 연구에서 사용된 혐수성시료를 뒷채움재료로 사용할 경우 일반적인 모래의 뒷채움에 비해 신속한 배수가 진행되어 동상위험도를 감소시킬 것으로 사료된다.

(2) 동상특성 실험

(가) 재료의 물리·역학적 특성

본 실험에서는 동상에 큰 영향을 받지 않는 혐수성 모래와 동상에 민감한 반응을 보이는 실트질 모래에 대하여 동상팽창압과 함수비 특성에 대한 실험을 실시하였다. 다음에 제시된 <표 3-7-2>은 두 시료에 대한 공학적 특성을 나타낸 것으로서 시험방법은 한국공업규격에 명시된 표준시험방법에 의거하여 실시하였다.

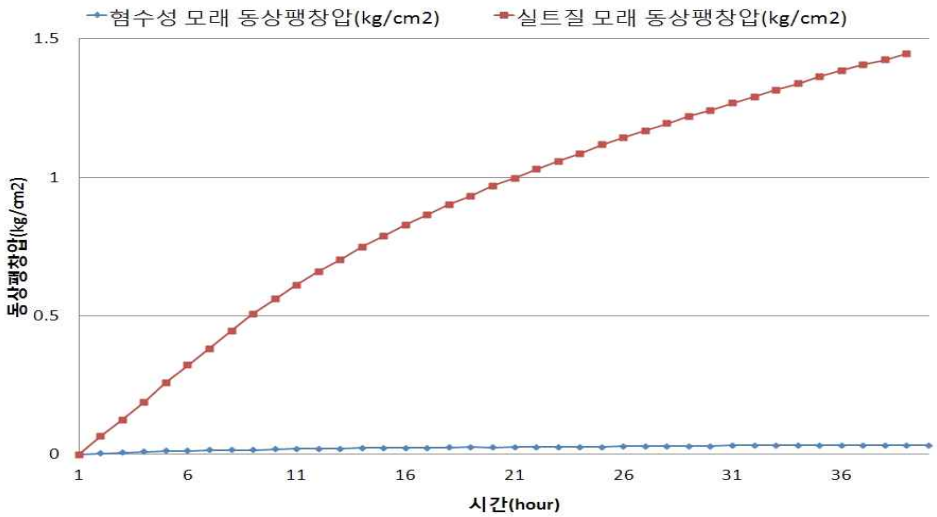
<표 3-7-2> 실험 시료의 지반 공학적 특성

시료 종류	비중 (G_s)	U.S.C.S	#200 통과율 (%)	액소성시험		직접전단시험 결과	
				LL	PI	점착력 (c, kPa)	내부마찰각 (ϕ, °)
혐수성모래	2.63	SP	0.1	NP		0	30
실트질모래	2.59	SP	0.1	NP		0	35

(나) 동상팽창압

혐수성 시료가 동결되면서 <그림 3-7-10>의 혐수성, 실트질 모래 시료의 동상팽창압 변화에서 확인 할 수 있듯이 혐수성 모래의 최대동상압은 0.031kg/㎠이다. 동상압의 경향이 거의 나타나지 않으므로 시료 내부의 수분이 거의 없음을 알 수 있다. 반면에 실트질 시료의 개방형시험결과 시료 내부의 온도가 0℃이하로 떨어지면서 한동안 동상압의 변화가 고르게 나타나며, <그림3-7-10>에서 나타난 동상팽창압의 모양과 같이 일정한 동상압이 증가하는 특성을 가진다. 최대동상압은 1.8kg/㎠

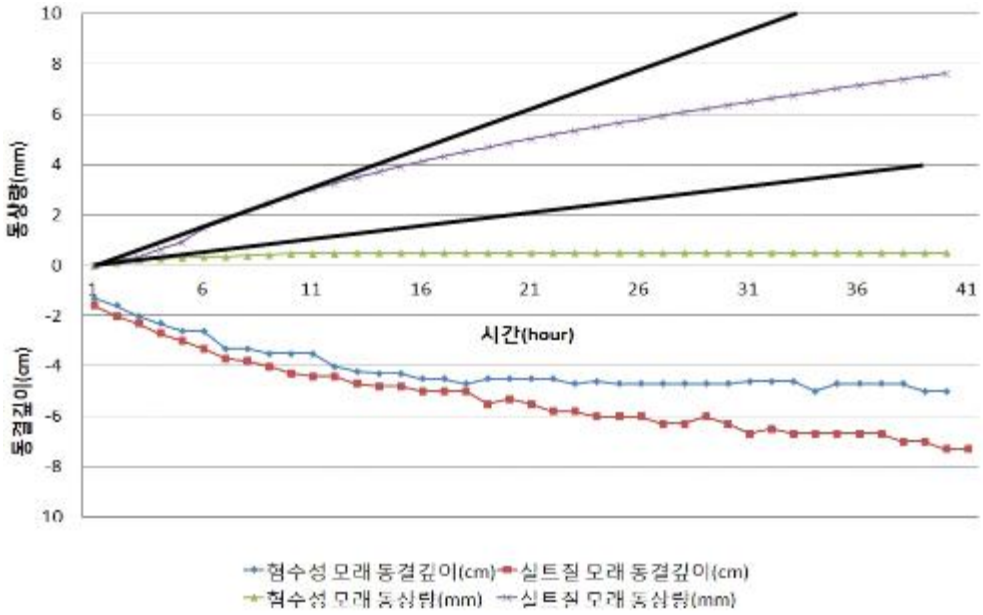
이다. 0℃온도 이하에서 흙의 동상압은 초기에는 작은 상승을 보이다가 꾸준하게 상승하게 된다. 실트질 시료 내부의 잠열로 인한 부동수분의 동결에 대한 일정한 잠복기에 따라 동상압의 상승곡선이 나타난다. 실트질 시료의 동상압의 크기는 그 위에 위치하는 구조물에 크랙이나 파괴를 일으키어 안정성에 문제를 일으킨다.



<그림 3-7-10> 혐수성, 실트질 모래 시료의 동상팽창압 변화

(다) 동상팽창량, 동결깊이

<그림 3-7-11>의 혐수성, 실트질 모래 시료의 동상팽창량과 동결깊이 변화를 보면 알 수 있듯이 8시간에서의 혐수성 시료는 0.4mm의 팽창량을 보여주고 실트질 모래의 팽창량은 2.15mm의 값을 가진 것을 볼 수 있다. 동상민감도 평가 기준에서 볼 수 있듯이 혐수성 모래의 기호는 NFS이고 실트질 모래는 L임을 확인 할 수 있다. 혐수성 시료의 경우 모세관 현상에 의한 지하수 유입에도 포화되지 않았기에 동결이 일어나지 않았다. 실트질 시료의 성질은 일정한 영하의 온도에서 충분한 수분의 공급이 지속되면서 동상량은 점점 커지는 것을 볼 수 있다. 특히 영하의 온도에서도 저면의 흙속에 부동한 상태의 물로 지하수가 존재하면 물은 모세관 현상에 따라 일정하게 흙의 표면을 따라 상승하여 영하의 온도에 영향을 받는 상부로 유입되면 동결을 일으킨다. 동결로 흙의 팽창은 커지게 되며 노상토는 흙의 팽창에 따라 상부로 팽창하여 솟아 올라 크랙을 일으키거나 파괴를 일으킨다. 이러한 상부와 측면의 팽창량과 함께 동상압이 발달하여 실트질 시료는 상부로 체적변화와 동상압을 발생하여 상부 도로 및 구조물의 파괴를 야기한다.



<그림 3-7-11> 혐수성, 실트질 모래 시료의 동결깊이 동상량 변화

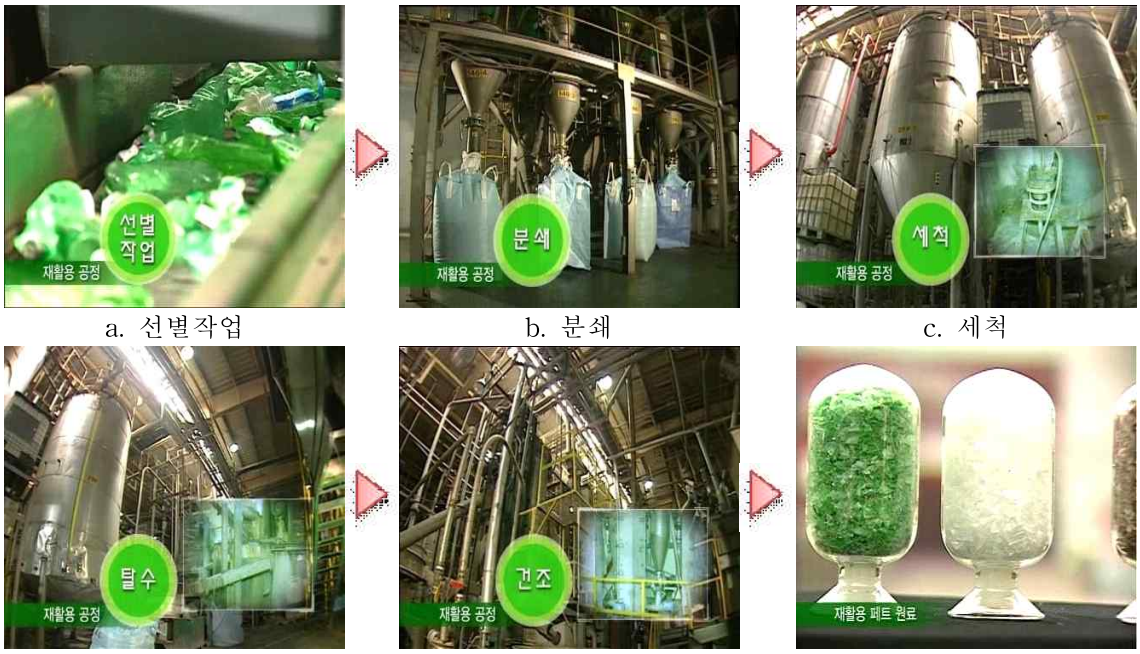
(라) 동상특성 실험 결과 분석

실내 동결 시스템을 이용하여 대기 온도를 -3℃로 제어하고, 지하수의 충분한 수분을 공급하며, SP 계열의 혐수성, 실트질 모래 시료를 사용하여 동결 조건인 온도와 수분 그리고 토질의 조건에 따라 실험을 진행하였다. 실트질 모래의 경우 동상이 발생하였고 혐수성 시료는 동상이 거의 발생 하지 않았다. 시간에 따른 최대 동상팽창압 실험결과, 혐수성 모래는 0.031kg/㎠, 실트질 모래는 1.8kg/㎠ 으로 나타났다. 세립분이 많이 함유되어있는 실트질 모래가 혐수성 모래보다 동상팽창압이 더 우세하게 나타났다. 세립분을 많이 함유할수록 동상이 발현되기까지의 시간과 동상 지속시간이 더 크게 나타났다. 즉, 실트질 모래, 혐수성 모래 순으로 지속시간이 크게 도출되었다. 또한, 실트질 모래는 혐수성 모래에 비해 초기 지속시간이 크게 나타나고 있다. 동상실험을 완료한 후, 실트질 모래는 상부 표면에 균일하지 않은 상태로 14mm의 동상팽창량이 발생하였다. TDR 장비를 이용한 부동수분 측정 결과, 실트질 모래 시료는 온도가 감소할수록 부동수분량이 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 하지만 곧 일정한 값을 보이며 유지 되었다. 혐수성 모래 시료의 경우 수분이 거의 존재하지 않으므로 부동수분의 거동은 거의 나타나지 않는 형태를 보였다.

4. 개발 채움재의 동상특성분석

가. 재활용 PET 조각 제조 방법

우리의 일상 속에서 청량음료나 간장등 기타의 조미료 용기로서 널리 사용하는 페트병(poly ethlene terephthalate: PET)은 가열, 가압 또는 이 두 가지에 의해서 성형이 가능한 가소성 물질이다. 플라스틱은 가벼움과 쉬운 가공성이 특징이고 저렴한 가격 등의 여러 가지 장점 때문에 열적재활용(Thermal recyling) 시스템을 통한 재활용이 가능하다.



a. 선별작업 b. 분쇄 c. 세척

d. 탈수 e. 건조 f. 재활용 PET 원료

<그림 3-7-12> 페트병의 1차 재활용 공정

수거된 페트병을 재활용하기 위해서는 소정의 가공 과정이 필요하다. 그림 3.1의 (a)는 수거된 페트병을 무색, 유색, 그리고 복합재질로 선별하는 과정을 나타낸 것이다. <그림 3-7-12>의 (b)는 수거한 페트병을 한 변의 크기가 30 mm 이하인 사각형 형태의 조각으로 분쇄하는 단계이고, (c) ~ (e)는 플라스틱에 붙어있는 라벨 밑 오염물질을 제거하기 위한 세척 과정과 탈수 건조 단계를 나타낸 것이다. (f)는 재활용 페트 원료의 완성된 모습이다.



a. 재활용 PET 원료 b. 주문진 표준사 가열 c. 재활용 PET 섞기



d. 모래와 PET 코팅 e. 상온에서 굳히기 f. 재활용 PET 골재 완성

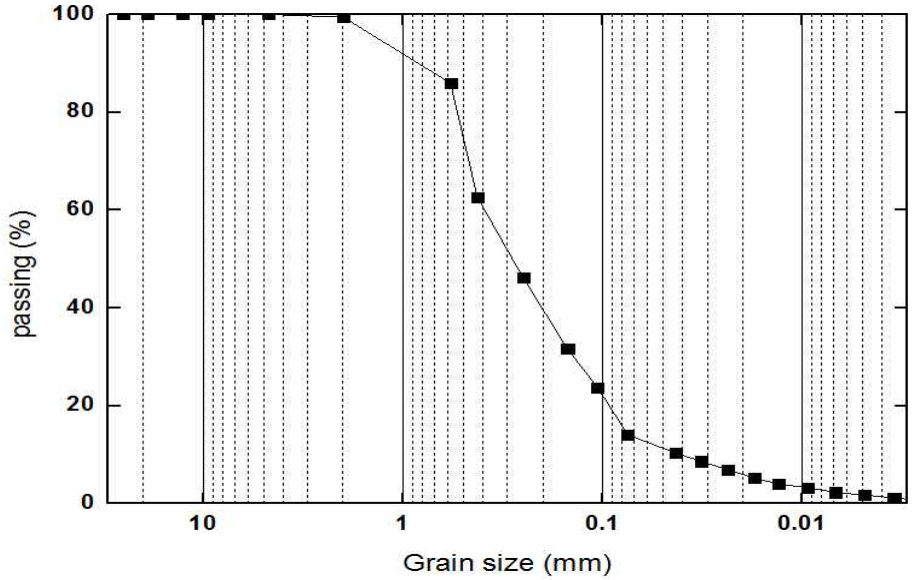
<그림 3-7-13> 뒤채움재의 제조 방법

<그림 3-7-13>는 1차 가공 처리한 폐 페트병 조각들이 뒤채움 재료로서 제작되는 과정을 나타낸 것이다. 먼저 (a)에 재활용 페트 원료를 준비한다. (b)에서와 같이 가열도구를 이용하여 페트병을 코팅하기 위한 주문진 표준사를 준비한 후 모래위에 1차 가공 처리된 폐 페트병 조각을 올려놓고 성형이 가능한 상태가 될 때(약 270) 까지 가열한다. 그 후 <그림 3-7-13>의 (d) ~ (f)처럼 모래가 플라스틱 표면에 골고루 코팅이 되도록 저어준 후, 상온에서 굳히는 과정을 거치면 타원형 모양의 뒤채움 재료가 완성된다.

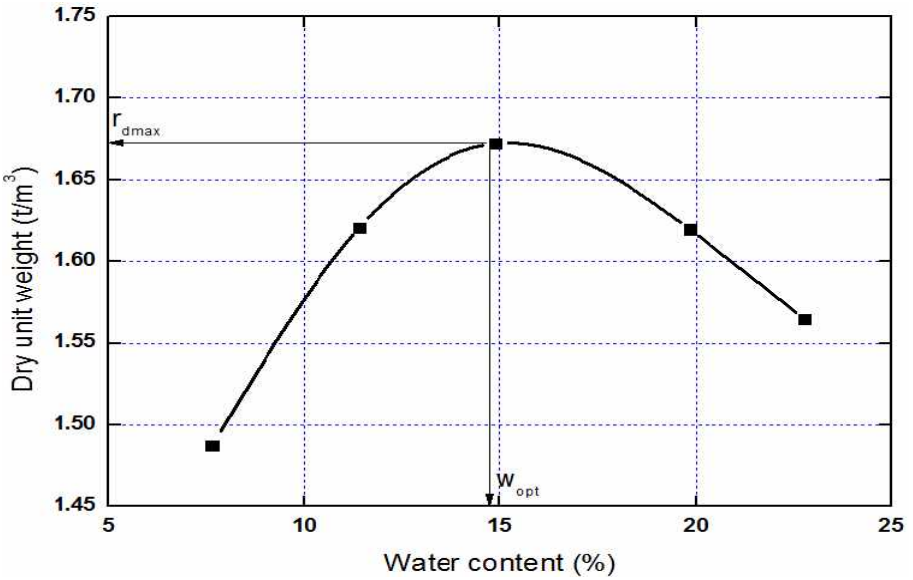
(1) 시료의 공학적 특성

본 실험에서 사용된 노상토용 화강풍화토는 4.75 mm 체를 모두 통과한 시료를 노건조 시킨 후 수분으로 인해서 뭉쳐진 흙덩이들을 고무망치로 부수고, 표준체를 사용하여 입자 크기별로 각각 분류하였다. 각각의 물리적 성질을 파악하기 위한 실내실험은 한국공업규격 KS F에 명시된 표준시험방법에 의거하여 실시하였다. 노상토용 재료로 사용한 화강풍화토의 자연함수비는 16.47%이고, 비중은 2.66으로 판명되었다. 사용된 시료의 입도분포 곡선은 그림 3.3과 같으며, 시험 결과, 균등계수(C_u)는 10.0, 곡률계수(C_g)는 1.23으로 입도분포가 불량한 것으로 나타났다. 따라서, 통일분류법(USCS)에 의하여 이 흙은 SC으로 나타났다. 다짐시험결과, 최적함수비(ω_{opt})가 14.7%, 최대건조단위중량(γ_{dmax})은 1.67 t/m3을 나타내었다. <표 3-7-3>은 화강풍화토의 공학적 특성을 종합적으로 나타낸 것이며, <그림 3-7-15>는 다짐시

험 결과에 의한 표준다짐곡선을 나타낸 것이다.



<그림 3-7-14> 화강풍화토의 입도분포곡선

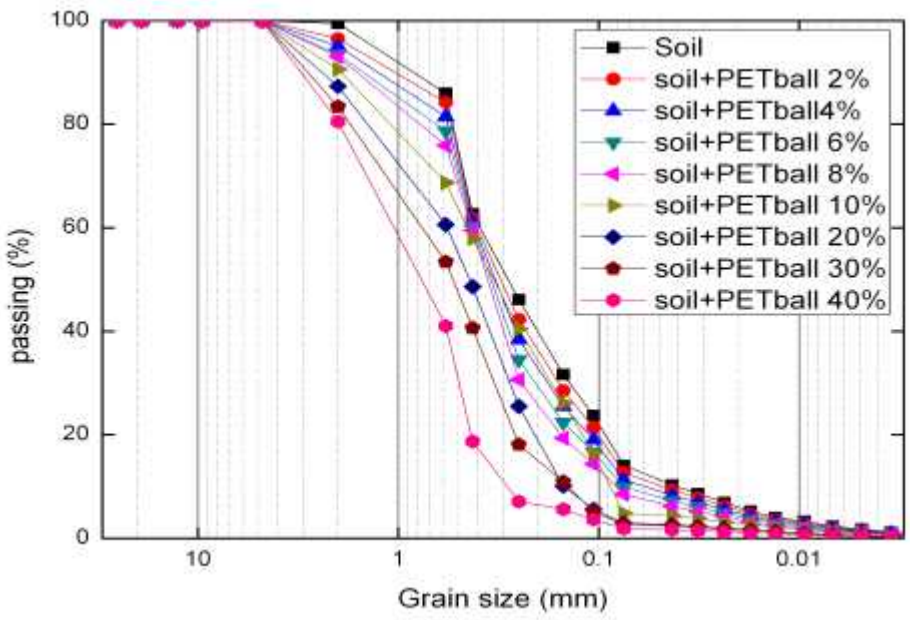


<그림 3-7-15> 화강풍화토의 다짐곡선

<표 3-7-3>화강풍화토의 공학적 특성

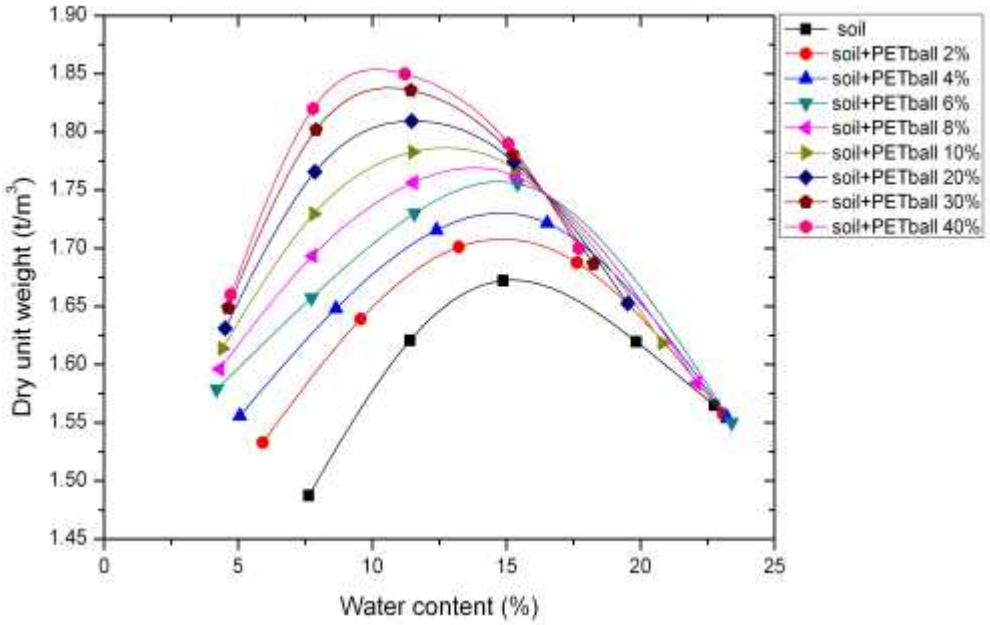
공학적 특성	시험 결과
자연 함수비, $_n$ (%)	16.47
비중, G_s	2.66
자갈(> #4) 모래(#4~#200) 실트(#200~0.002) 점토(< 0.002) 균등 계수, C_u 곡률 계수, C_g	0.81 53.34 33.72 12.13 10.0 1.23
액성한계, LL(%) 소성지수, PI	NP NP
최대건조단위중량, γ_{dmax} (t/m3) 최적 함수비, ω_{opt} (%)	1.67 14.7
투수계수, k (cm/sec)	2.0×10^{6}
No. 200체 통과량(%)	22.7
통일분류법에 의한 분류 (USCS)	SC

화강 풍화토에 재활용 PET 골재를 중량비로 각각 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 20%, 30%, 40%가 되도록 혼합하여 물리적 성질을 파악하기 위한 실내실험은 한국공업규격 KS F에 명시된 표준시험방법에 의거하여 입도분포 및 다짐 시험을 실시하였다. 혼합된 시료의 입도분포 곡선은 <그림 3-7-16>과 같다.



<그림 3-7-16> 재활용 PET 혼합토의 입도 분석

혼합토에 대한 다짐시험을 수행한 결과는 <표 3-7-4>와 <그림 3-7-17>에 나타냈다. 그 결과, 재활용 PET의 혼합율이 증가할수록 최대건조단위중량값이 증가하였다. 그러나 최적함수비는 감소하였다. 혼합율이 증가할수록 최대건조단위중량이 증가하는 것은 비중이 큰 재활용 PET골재로 치환되기 때문이며, 최적함수비가 감소하는 것은 재활용 PET 골재의 증가량으로 인하여 함수비가 감소한다.



<그림 3-7-17> 재활용 PET 골재 혼합토의 다짐곡선

<표 3-7-4> 재활용 PET 골재 혼합토의 다짐시험 결과

혼합율 (%)	최적함수비 (%)	최대건조단위중량 (t/m3)
0	14.457	1.672
2	14.934	1.708
4	14.801	1.729
6	14.866	1.757
8	13.946	1.769
10	12.635	1.786
20	11.487	1.809
30	10.436	1.837
40	10.106	1.853

(2) 실내 동상 실험장치 및 장비

실내동상실험은 <그림 3-7-18>과 같은 동상실험기를 이용하여 토질별 동상특성을 관찰하였다. 동상실험기는 시료적재부, 물을 공급하는 수조부, 동상압을 측정하는 계측기를 설치하는 측정부로 구성되어 있다. 시료를 적재하는 적재부에는 총 4개의 공시체가 들어갈 수 있으며, 적재부의 바닥에는 두께 0.6cm, 직경 10cm의 다공판(porous stone)을 놓는다. 측정부는 동상팽창압 측정을 위한 로드셀(load cell)을 장착할 수 있는 거치대로 구성되었으며 부동수분을 측정할 수 있는 독일 IMKO 사의 (time domain reflectrometry: TDR) 함수량 측정기 모델인 TRIME-FM을 사용하였다.

시료의 동결 온도는 1cm 간격으로 설치한 Thermocouple로 측정할 수 있다. 시료에 일정한 수두상태에서 물을 공급하는데, 이때의 압력은 시료의 높이와 같다. 동결되는 동안 물은 시험 시료의 안으로 혹은 밖으로 자유로이 이동 한다. 실내동결시험의 수분공급 시스템으로 개방형시스템이 있다. 개방형 시스템에서 동결전면부를 아래로 이동함으로서 물은 흙 속의 간극을 통하여 표면에서부터 끌어올린다. 동결시 동결위치나 동결전면부로 수분이 이동 되어 흙 속에 아이스렌즈가 생기게 되어 동상현상이나 동결깊이가 발생하게 된다.

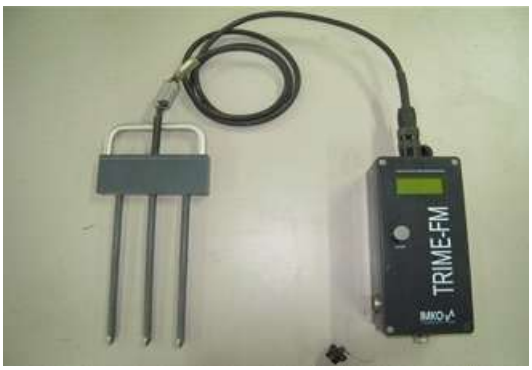
본 시험기는 영국 (transport and road research laboratory: TRRL)에서 제작한 동상시험기와 동일한 원리에 의하여 제작하였다. 원형 공시체 아크릴 셀의 윗부분과 측벽에 시험기 벽체로부터 찬공기가 계속 공급되어 시료를 동결시킨다. 원형 아크릴 셀 밑부분의 구멍과 몰드 바닥에 뚫린 구멍을 통해 수조와 연결된 연결관을 통하여 물이 계속 공급된다. 수조의 물은 시험기 외부에 설치된 물탱크로부터 계속 공급되며, 물탱크내에는 냉각선이 설치되어 있어 물의 온도를 항상 4℃로 일정하게 유지할 수 있다. 또한, 수조의 수면과 공시체 바닥면과의 높이를 임으로 조절할 수 있다. 그림 3.8은 동결융해 실험 장치의 전체 현황을 나타낸 것으로서 최저 -70℃에서 최고 100℃까지 임의로 온도의 크기, 지속시간 등을 조정할 수 있다. 또한 <그림 3-7-18>의 (b),(d)의 센서들은 <그림 3-7-19>의 자동계측장비에 연결되었다. 또한 (c)부동수분은 노트북에 연결하여 측정 프로그램을 통하여 1시간 간격으로 데이터를 측정하였다.



(a) 실내 동상 실험기



(b) LVDT



(c) TDR probe



(d) Thermocouple (T type)

<그림 3-7-18> 공시체 구성 모식도



<그림 3-7-19> 자동계측장비

본 실험에서는 KS F 2312 시험법에 의거한 흙의 다짐 시험 방법에서 도로 노상토의 다짐시험 시 사용하는 D 다짐 방법을 사용하여 구한 최대건조단위중량과 최적함수비를 이용하여 다짐도 100%로 시료를 계량하여 공시체를 구성하였으며 수분공급시스템으로는 개방형 시스템을 이용하여 유입수가 계속되도록 하여 동상발생이 원활하도록 하였다. 일반적으로 수분공급시스템은 현장 시료로 실험 할 때에는 그 지역의 지하수 조건에 따라 개방형과 폐쇄형의 방법을 결정하지만 이번 실험에서는

토질에 대한 동상 특성을 확인하는 것이기 때문에 도로 절토부나 하천 유역 등 지하수위가 높아 동상에 취약한 지역의 상태를 재연하기 위하여 개방형 방법으로 실험을 진행하였다. 시료는 5층으로 다짐하였으며 다짐 후 공시체를 4일 동안 수침시켜 시료가 최대한 포화되도록 하였다. 시료 수침 후 적재부에 모두 4개의 시료를 적재하여 각각 온도, 부동수분을 측정하였다. 실내동상실험의 경계온도 조건은 실내동상실험 시작 후 공시체의 시료상부 1 cm의 온도가 0℃가 될 때 까지 실험기 내부온도를 -12℃로 유지하다가 시료상부 1 cm의 온도가 0℃가 된 후 실험기 내부온도를 -3℃로 변화시켜 유지시킨다. 또한 유입수의 온도는 4℃를 항상 유지할 수 있도록 하였다. 표 3.3은 실내동상실험의 경계온도 조건이다.

<표 3-7-5> 실내동상실험 경계온도 조건

조건	실험기 내부온도(℃)	유입수 온도(℃)
시료 1cm 동결 전	-12℃	4℃
시료 1cm 동결 후	-3℃	4℃

또한, 동결방식은 실내동상실험의 각 기준별 특성에서와 같이 편면온도강하식으로 하였으며, 시료의 동결방향은 ASTM과 TRRL법에서와 같이 상부에서 하부로 동결시켰다.

그 이유로는 지반의 자연적 동결메커니즘을 재현하는 것이다. 그러나 상부에서 하부로 동결시킬 때에는 상부가 동결되며 몰드와 시료 사이에 동착력이 생겨 동상력에 저항하게 된다. 이 단점을 보완하기 위하여 본 실험에서는 몰드와 시료 사이에 신축성이 있는 실리콘 패드를 삽입하여 몰드와 시료 사이의 동착력을 최소화 시켰다. 이번 실내동상실험의 특성은 <표 3-7-6>과 같다.

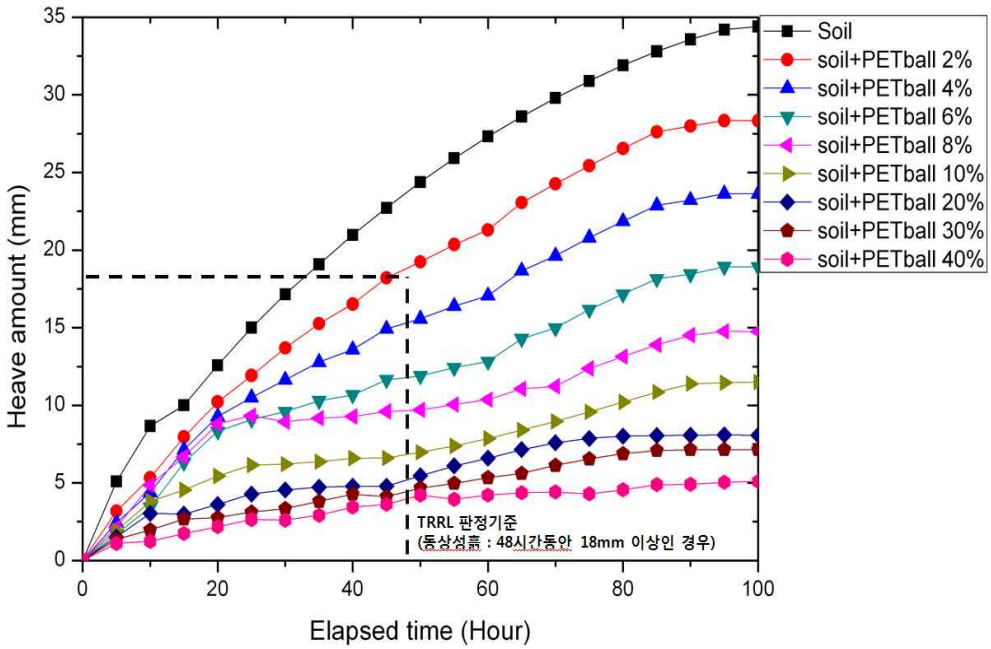
<표 3-7-6> 실내동상실험 특성

동결방식	편면온도강하식
동결방향	상부→하부
몰드재료	아크릴
시료크기	직경 100 mm, 높이 200 mm
지하수 유입조건	개방형

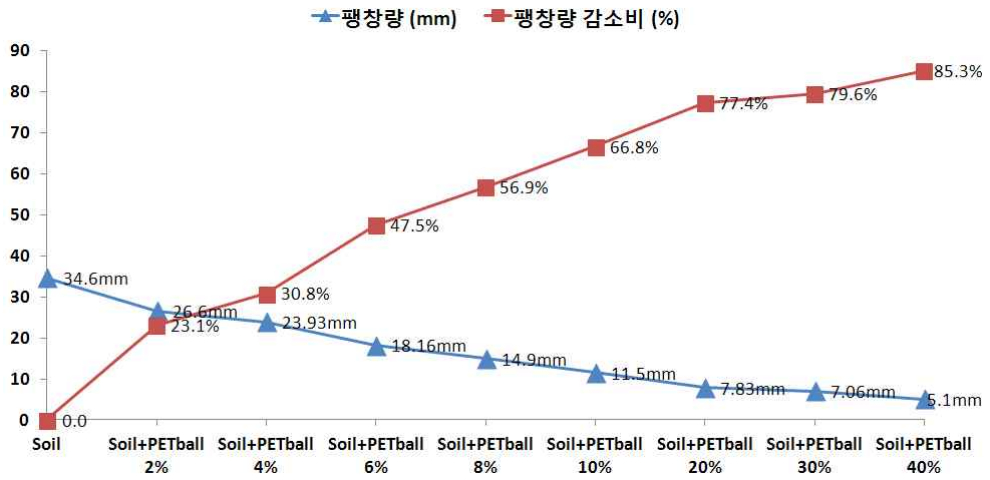
본 시험의 계측결과로 동결시 시료의 온도변화, 동상팽창량, 부동수분량 등의 계측값과 계측값을 이용하여 구한 동상비를 통하여 동결 융해 전후의 지반공학적 시료의 특성을 평가하였다.

(3) 혼합토의 동상 팽창량 특성 분석

동상 팽창량은 흙의 동상 특성을 파악하기 위한 대표적인 지표로서 동상민감성 판정에 이용하는 동상비(frost heave rate)의 산정에 이용되는 중요한 정수이다. 일반적인 흙의 성질은 일정한 영하의 온도에서 충분한 수분의 공급이 지속되면 동상 팽창량은 점차 증가한다. 이러한 동상 특성은 시료의 종류에 따라 단위시간 동안의 동상 팽창량을 의미하는 동상비에 의존하게 되며 이는 동상 민감성을 판단하는 지표로 사용된다. 그림 <그림 3-7-20>은 재활용 PET 골재의 증가로 동상 민강성이 낮아진다.



<그림 3-7-20> 재활용 PET 골재 혼합토의 동상팽창량



<그림 3-7-21> 재활용 PET 골재 혼합토의 팽창량 감소비

<표 3-7-7>재활용 PET 골재 혼합토의 팽창량 감소비

재활용 PET의 혼합비 (%)	팽창량 (mm)	팽창량 감소비 (%)
Soil	34.6	0.0
Soil+PETball 2%	26.6	23.1
Soil+PETball 4%	23.93	30.8
Soil+PETball 6%	18.16	47.5
Soil+PETball 8%	14.9	56.9
Soil+PETball 10%	11.5	66.8
Soil+PETball 20%	7.83	77.4
Soil+PETball 30%	7.06	79.6
Soil+PETball 40%	5.1	85.3

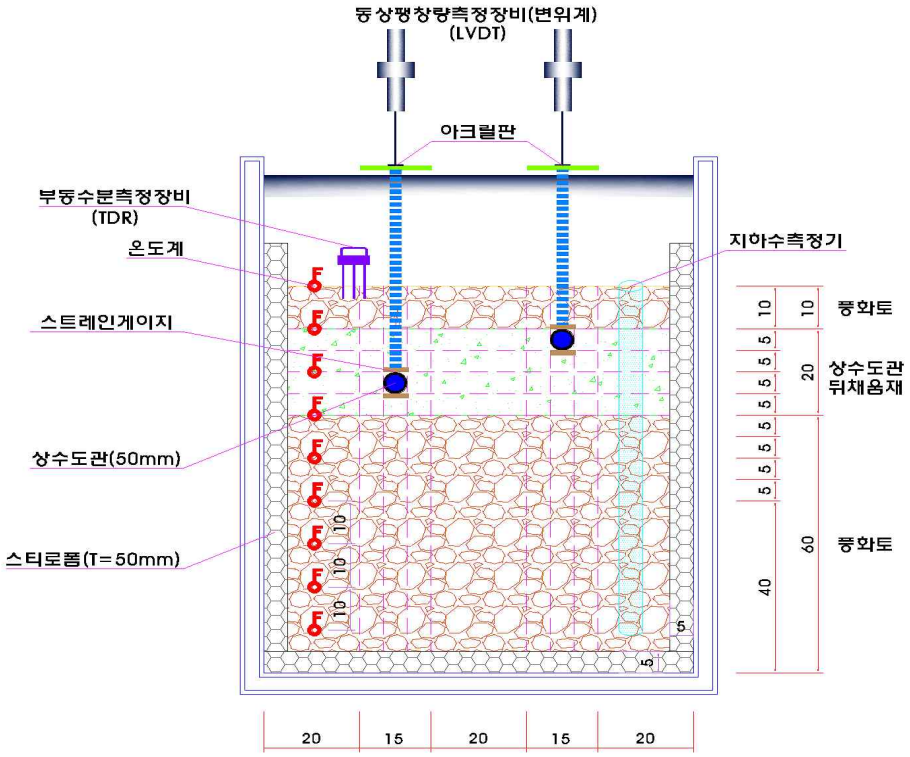
동상실험결과, 화강풍화토의 경우 혼합하기 전 팽창량이 34.6 mm로 높게 나타지만 혼합비가 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 20%, 30%, 40%를 혼합하였을 때 2%의 경우 23.1% 감소하지만 6%의 경우 47.5% 감소하였다. 화강풍화토는 TRRL 기준 동상성 흙으로 분류되지만 4% ~ 20% 재활용 PET 골재를 혼합할 경우 팽창량 감소비가 현저하게 감소하는 것을 <그림 3-7-21>을 통하여 확인 할 수 있다.

5. 실대형 모형실험을 통한 채움재료별 성능평가

가. 상수도관 실대형 모형토조의 구성

동결 지반에서 매설관의 실제 거동을 확인하기 위한 방안으로 실대형 모형실험을 실시하였다. 실대형 모형실험은 대형 냉동챔버에서 수행되었다. 이와 같은 동결 온

도를 유지하기 위하여 -20℃ ~ +10℃의 온도 유지가 가능한 길이 3.2 m, 폭 3.2 m 높이 2.4 m의 대형 냉동고를 활용하여 -15℃에서 실험을 수행하였다. 이러한 실험 조건과 함께 다음의 그림 3.10과 같은 길이 0.9 m, 폭 0.9 m, 높이 0.9 m의 실험용 토조를 실제 상수도관의 형상과 유사하게 구성하여 실험 조건에 따른 온도변화, 부동수분 및 동상 팽창량 발생 등과 같은 동상 특성 분석, 동결 전 지반과 융해 후 지반의 지지력변화 특성을 분석하였다. 현장조건을 반영한 일차원 열전도를 재현하기 위해 토조의 주변부와 하부에 단열재로 5 cm 스티로폼을 설치하였고, 단열재 설치 후 누수방지를 위한 플라스틱 비닐을 설치하고 상부에서 물을 뿌려 완전포화를 진행하였다.



<그림 3-7-22> 상수도관 모형실험 토조 단면구성 모식도

Section-1, Section-2, Section-3은 동일하게 하부에서부터 60 cm를 화강풍화토로 포설하고 Ø50 mm의 스테인리스관을 지중에서 10 cm, 20 cm 두 곳에 매설하였다. Section-1은 관 주변에 화강풍화토를 포설하였고 Section-2는 모래 Section-3는 화강풍화토에 재활용 PET 골재 6%를 혼합한 혼합토를 포설하였다.

또한, 외부 온도로 인한 동상의 영향을 판별하기 위하여 지표에 부동수분측정기와 지중에 지하수위계를 설치하고 지중의 온도변화 계측센서를 설치하였다. 하지만 동결 과정에서 지반의 자체 침하량이 발생 할 수 있어 이에 대한 영향을 검토하기 위하여 각 층별 지중에 변위계(LVDT)를 설치하여 그 변화 값을 측정하였다. 매설관의 변형을 관측하기 위하여 스테인리스관을 종방향 및 횡방향의 변위를 계측하기

위하여 스트레인게이지를 부착하고 <그림 3-7-23>의 (b) 에서와 같이 콘솔을 이용하여 냉동챔버 온도를 -15℃로 설정하였다. 매설관의 거동을 확인하기 위해 스트레인게이지를 부착하였다. 매설 관 중앙부는 연결봉을 이용하여 상부의 LVDT와 채결하여 매설관의 변형을 직접적으로 관측하였다.



(a) 실대형 냉동 챔버 (b) 냉동고 콘솔

<그림 3-7-23> 대형 냉동 챔버

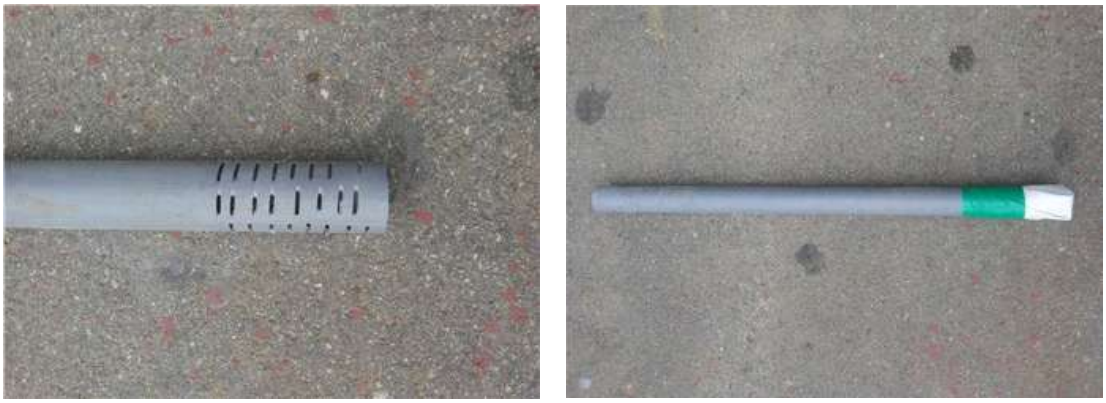
<그림 3-7-24>의 (a)는 현장조건을 반영한 일차원 열전도를 재현하기 위해 토조의 주변부와 하부에 단열재로 5 cm 스티로폼을 설치하였고, 단열재 설치 후 누수방지를 위한 플라스틱 비닐을 설치하였다. <그림 3-7-24>의 (b)는 진동 햄머 다짐기는 가로 10 cm 세로10 cm로 된 다짐강판을 부착하였다. 다짐기의 타격횟수는 2670회/min이다. 다짐기의 단일 충격에너지는 85 kg으로 다짐이 부족한 토조의 측벽부와 계측기 주위의 다짐에 효과적이다. 다짐도 측정을 위하여 모래 치환의 현장밀도 시험 KS F 2311 실험을 하여 다짐도는 95%로 유지 하였다.



(a) 단열작업 (b) 진동 햄머 다짐

<그림 3-7-24> 토조 단열 방수 작업 및 다짐

<그림 3-7-25>은 토조의 지하수위를 동결전에 유지하며 지반동결 후 지하수위 변화를 계측하기 위하여 설치하였다. 미동결 흙속에 지하수가 유입되어 수분 공급원이 되는 경우 개방형동상(open frost heave)실험을 실시하였다. 지하수위의 변화를 주기적으로 계측하여 지반의 거동 분석에 필요하여 지하수위 측정관을 제작하였다. PVC 파이프(배수용) 규격 Ø50 mm 길이 80 cm 파이프 하단부에 2 mm의 홈을 만들어 지하수가 유입 할 수 있도록 하였다. 그리고 부직포를 박음질하여 필터 역활을 하게 했다. 지하수위관을 시험 토조에 매설 후 캡을 만들어 외부의 우수를 방지하였다. 주기적으로 지하수위의 변화를 계측하여 겨울철 외기온도변화에 따른 지반동결하면서 지하수위의 거동을 분석 하였다.



<그림 3-7-25> 지하수위 측정 시스템 구축

<그림 3-7-26> 는 지중 온도 계측 시스템으로 지반 내부온도를 측정하기 위하여 구축 하였다. 동결토의 특성을 고려하여 온도측정 범위가 넓고 일반적으로 많이 사용되는 Thermocouple 선정하였다. 온도계측기 Thermocouple을 1번에서부터 9번 까지 온도측정센서를 10 cm 간격으로 설치하였다. Section-1, Section-2, Section-3의 각 층의 경계 지점에 설치하여 1시간씩 토조 내의 깊이별 온도변화를 측정했다. 온도센서는 -187℃~371℃ 범위까지 측정이 가능한 T타입으로 두께 3 mm가 이 연구에 가장 적합하다고 판단되어 사용하였다. PVC파이프의 규격은 Ø 25 mm PVC 이고 길이는 90 cm 이다.



<그림 3-7-26> 지중 온도 계측 시스템

<그림 3-7-27>는 Trime FM-version P3MR이다. 용적 수분함량 측정 범위는 0~70% 이며 Probe 길이는 160 mm, 케이블 길이는 2.5 m이다. TDR 장비의 기술은 Topp et al.(1980), Patterson and Smith(1980) 등이 제시한 원리를 인용하였다. 유전상수는 TDR 장비를 이용하여 다공매체를 통한 전자기파의 전달속도로부터 결정된다.

TDR을 이용하여 습윤토의 유전상수의 측정은 Davis and Chudobiak에 의해 처음으로 제안되었다. TDR 장비는 빠른 전압을 제공하는 파형발생기가 높은 빈도의 신호를 낮은 빈도로 전달하는 샘플러를 통하여 오실로시코프나 자동 기록 장치로 보내어지는 장비이다. 이 TDR 장비는 이 신호를 단계적으로 보내어 전달선 길이와 전송시간을 측정하는 장비이다. 동상특성을 파악하는 기준은 시간과 0℃이하의 지속온도에서 동상팽창량의 발생 특성이 중요하다. 본 실험에서는 자동 변위 측정기를 이용하여 계측 하였다.



<그림 3-7-27> Trime FM-version P3MR

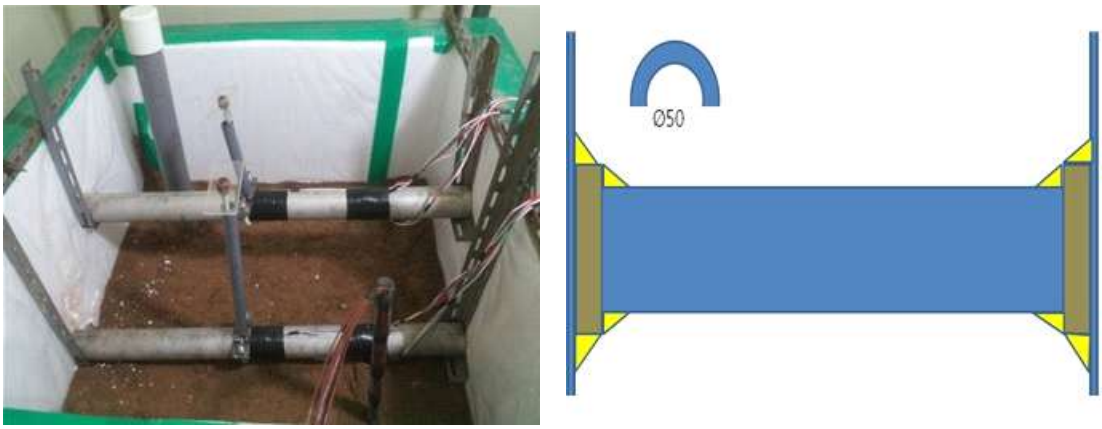
지표에 지중의 변화를 계측하였다. <그림 3-7-28>의 (a)는 동상팽창량 측정을 위한 LVDT를 장착한 시료에는 직경 10 cm의 아크릴판으로 (linear variable differential transformers: LVDT) 측정판을 만들어 시료 위에 올려놓아 최대한 적은 하중으로 시료 팽창량의 구속을 줄였으며 시료가 팽창했을 때 가장 많은 팽창이 일어난 부위를 효과적으로 측정할 수 있게 하였다. <그림 3-7-28>의 (b)는 매설관 중앙부는 연결봉을 이용하여 상부의 LVDT와 채결하여 매설관의 변형을 직접적으로 관측하였다.



(a) 지표 팽창 (b) 관의 변형

<그림 3-7-28> LVDT를 이용한 지표와 관의 변위 관찰

실험에 사용한 상수도관은 배관용 스테인리스 강관 Ø50를 80 cm 그림 3.17에서와 같이 설치하였다. 상수관 설치시 수평을 유지하기 위하여 수평계를 이용하였으며 양끝 단을 무한대의 관으로 보기위하여 선단을 만들어 용접하였다.



(a) 스레인리스 관 매설 (b) 스테인리스 관 모식도

<그림 3-7-29> 스테인레스관

나. 상수도관의 재료특성 및 계측장치

<표 3-7-8> 스테인리스 관의 특성

구분	배관용스테인리스관
관련규격	KS D 3576
개요	스테인레스 강관에 유동성을 갖게하여 가동부를 이용하여 자유로운 배관 형태를 만들 수 있어 이음부 없음

제품형상		
제품성질		강성관
제품제질		내・외부: 철+니켈+크롬합성금속
구조		고무패킹으로 수밀을 유지하고 외력에의한 관의 축방향과 횡방향을 흡수하는 2중구조의 연결방식 관
공학적특성	중 량	중량이 가볍다
	수압 (Kgf/㎠)	25
	인장강도 (Kgf/㎠)	5,300이상
	압축강도 (Kgf/㎠)	3,000~5,000
	연신율 (%)	25이상
	열팽창계수 (mm/m℃)	1.73X10-5(170%)

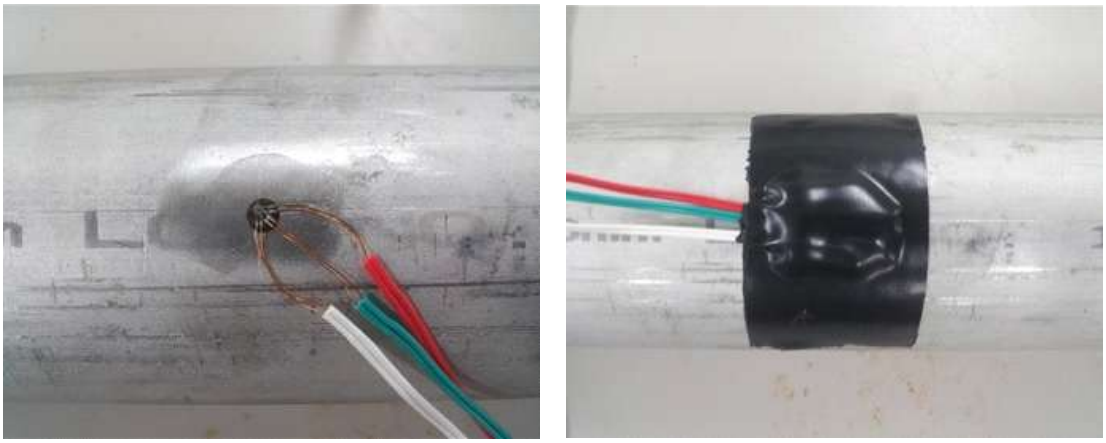
<표 3-7-8>은 스테인리스 관의 특성에 대해 나타낸 것이다. <그림 3-7-30>은 상수도관의 변형 특성을 파악하기 위하여 스트레인게이지의 계측지점을 정리 및 부착하는 모습이다. 토조에 상수도관을 설치하고 상수도관에 계측지점을 정리하였다. 상수도관에서 계측장비를 부착할 지점을 대상으로 그라인더로 이물질을 제거하고, Sand paper를 이용하여 계측장비 부착면을 정리해 준다. <그림 3-7-30>의 (c)에서 같이 스트레인게이지를 부착하고 지하수에 의한 계측기를 보호하기 위하여 방수 작업을 시행 하였다.



(a) 지그 부착지점 손질



(b) 스테인리스 관 부착지점



(c) 스트레인게이지 부착 (d) 스트레인게이지 방수작업

<그림 3-7-30> 상수도관 스트레인게이지 정리 및 부착

수집 장치는 채널 확장기와 데이터 로거로 구성된다. 함수센서와 온도센서는 포장체의 온도와 함수비를 측정하게 되는데, 이때 함수비와 온도는 아날로그신호로 계측 되며, 데이터로거는 아날로그신호 형태의 계측 결과를 디지털 신호로 전환하는 역할을 한다. 또한 디지털 신호로 전환된 계측결과를 온도와 함수비(volumetric moisture content: VMC)로 연산하고, 내부메모리에 통계 처리된 결과를 저장하는 역할을 하게 된다. 본 연구에서 함수센서와 온도 센서로부터 계측 데이터를 수집하기 위하여 현장 계측시스템에 적용된 <그림 3-7-31>의 컨트롤 박스 내 CR1000 데이터 로거를 배치한 내부 구조를 나타낸 것이다.



<그림 3-7-31> 컨트롤 박스

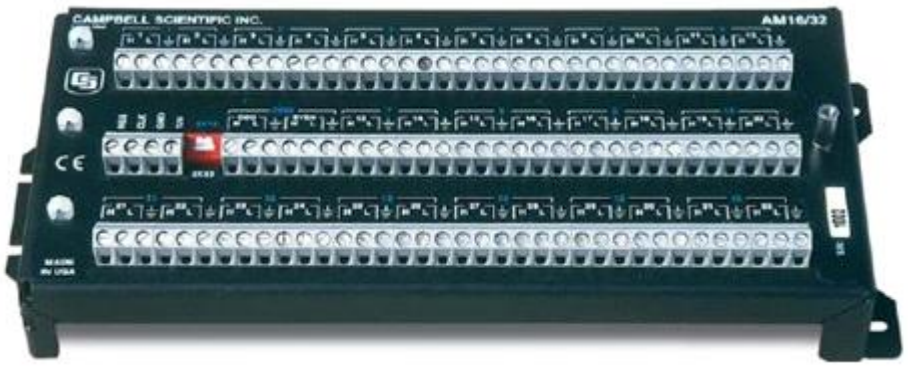
본 연구에 사용한 데이터 로거는 <그림 3-7-32> CR1000으로 컴퓨터와 주기적으로 동기화 되어 있으므로 윈도우 프로그램을 통하여 계측 시간을 수정할 수 있다.

CR1000 데이터 로거는 14개 채널을 갖고 있기 때문에 CR1000에 연결할 수 있는 계측센서는 최대 14개 이지만 본 연구에서 구축하는 현장 계측시스템에서 설치된 자동 계측 센서는 대기온도센서, 지중 온도센서로 많은 채널이 필요하기 때문에 <그림 3-7-33>의 Multiplexer(AM16/32B) 채널 확장기를 통하여 데이터 로거에 연결할 수 있는 계측 센서 숫자를 확장하기 위하여 적용하였다.



(a) 데이터로거 (b) CR1000

<그림 3-7-32>자동 계측데이터 수집기

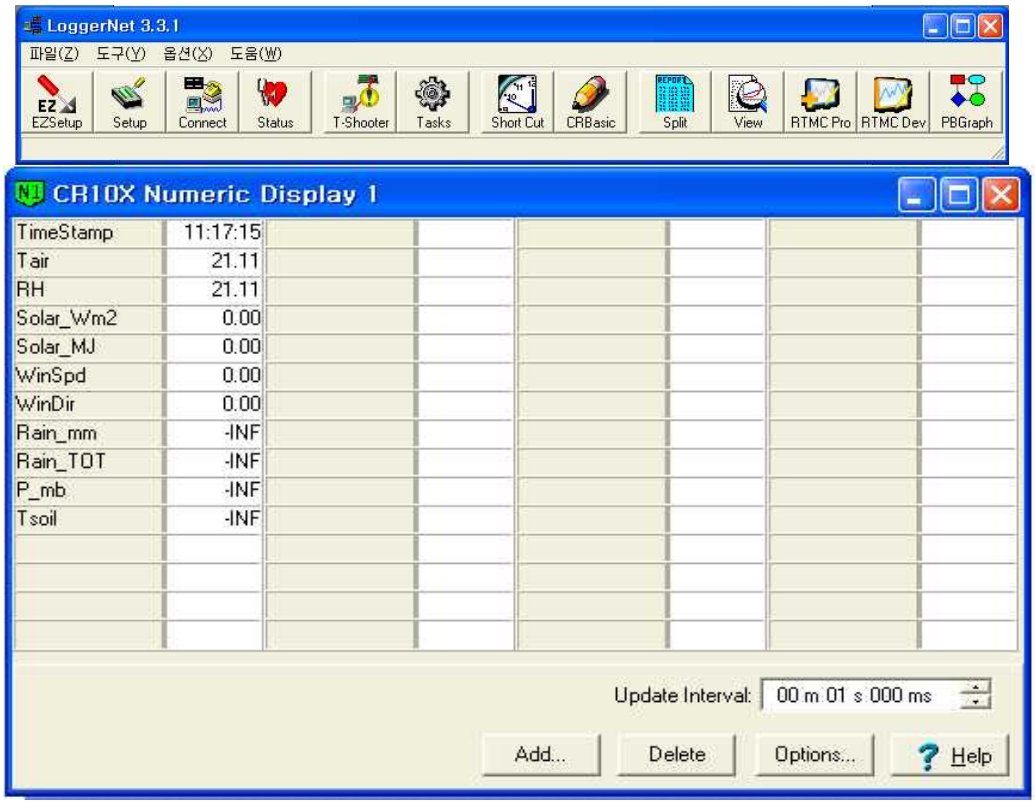


<그림 3-7-33> Multiplexer(AM16/32B)

저장 장치는 저장용 데스크탑 컴퓨터로 서버급 컴퓨터를 운용중이다. CR1000 데이터 로거를 컨트롤할 수 있는 소프트웨어는 로거넷 프로그램으로 제일 먼저 원격지 컴퓨터에서에서 로거넷 프로그램을 설치 한후에 통신이 연결된 상태에서 CR1000과 연결을 하면 되고, 현장에서는 노트북을 이용하여 연결하면 된다. <그림 3-7-34>은 로거넷 프로그램을 나타낸 것이다.

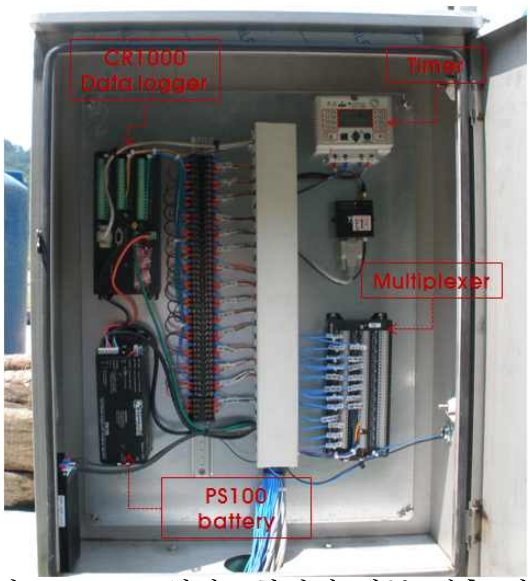
로거넷 프로그램과 무선 통신 장치를 통하여 현장 계측시스템에 설치된 데이터 로

거에 접속하여 아래 그림과 같이 프로그램 전송, 데이터 수집 및 실시간 모니터링 등을 수행할 수 있다.



<그림 3-7-34> 로거넷(loggernet)을 이용한 현장 데이터 수집

접속(connect) 후 실시간으로 측정값을 보기 위해서는 중간 하단의 숫자(numeric) 버튼을 클릭하면, 창이 아래 <그림 3-7-34>과 같이 뜨면서 현재 측정되는 값들을 볼 수 있다.

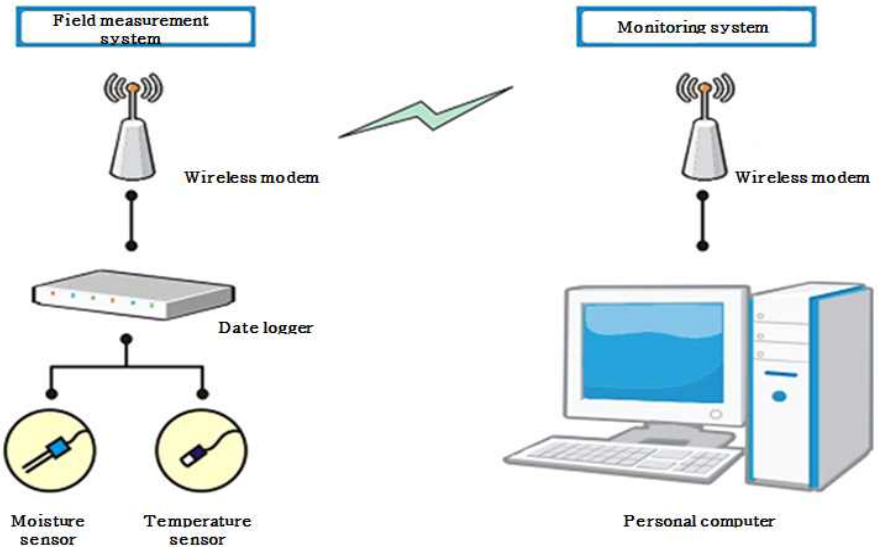


<그림 3-7-35> 현장모형실험 자동 계측 시스템

지중 온도변화 계측시스템을 이용한 계측 데이터는 무선통신을 통하여 연속적인 계측 데이터를 수집하게 되며, 동상계측시스템의 무선통신망 구축 개요도는 <그림 3-7-36>와 같다. 이때 무선 통신 (code division multiple access: CDMA) 방식으로 기존에 운영하고 있는 이동통신사의 통신망을 이용하였다.

전원장치는 태양열 전지판을 통하여 컨트롤 박스 안에 설치된 축전지를 충전하여 외부 전력이 필요하지 않은 독립 전원 형태로 구성되어 있다. 이때 데이터 로거의 경우 10V 이상의 전원이 필요하며, 태양열 전지판으로 충전 할 경우 1회 충전으로 1주일간 충전이 필요하지 않을 정도의 용량을 가지고 있다.

저장 장치는 저장용 데스크탑 컴퓨터로 서버급 컴퓨터를 운용중이다. CR1000 데이터 로거를 컨트롤할 수 있는 소프트웨어는 로거넷 프로그램(loggernet program)으로 제일 먼저 원격지 PC에서 로거넷 프로그램을 설치 한 후에 통신이 연결된 상태에서 CR1000과 연결을 하면 데이터를 수집할 수 있고, 현장에서는 노트북을 이용하여 연결하면 데이터를 수집할 수 있다.



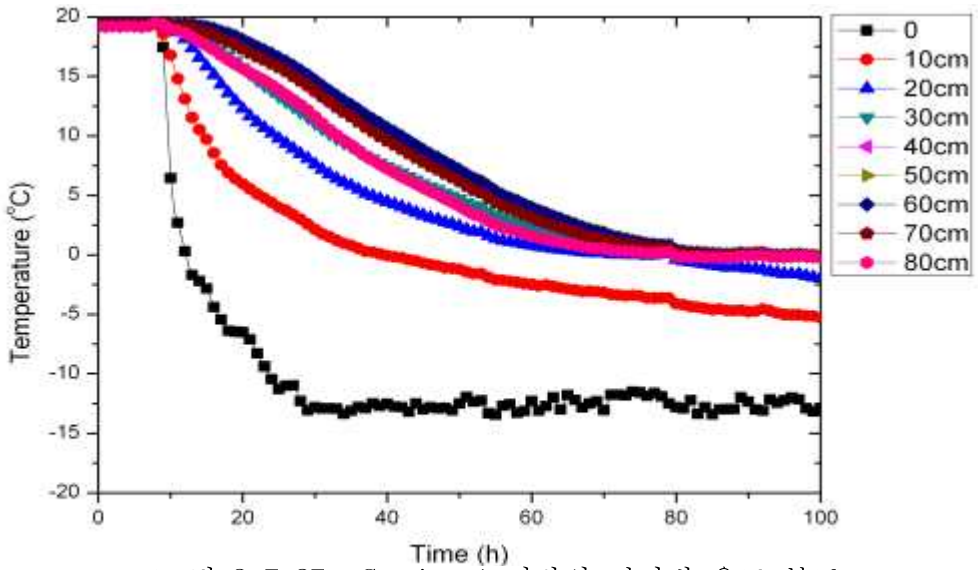
<그림 3-7-36> 무선 네트워크를 이용한 계측 자료 수집 방법

또한, 중요한 기능중 하나로 CR1000 데이터로거의 메모리 여유분을 확인하는 기능이 있다. 이것은 현재 프로그램에 의해서 관측을 하고 저장을 수행 했을 때, 로거 메모리가 가득 차는데 걸리는 시간을 알려주는 중요한 기능이다. 만약 사용자가 이 시간 이내에 데이터를 수집해 가지 않으면, 오래된 데이터부터 지워지게 된다.
이러한 기능을 통해서 현재 프로그램에 의해서 관측하고 저장을 수행할 때, 데이터 로거의 메모리가 가득 차는데 걸리는 시간을 파악할 수 있다. 탭에서 각 테이블 별로 가득 차는데 걸리는 시간을 나타내고 있다.

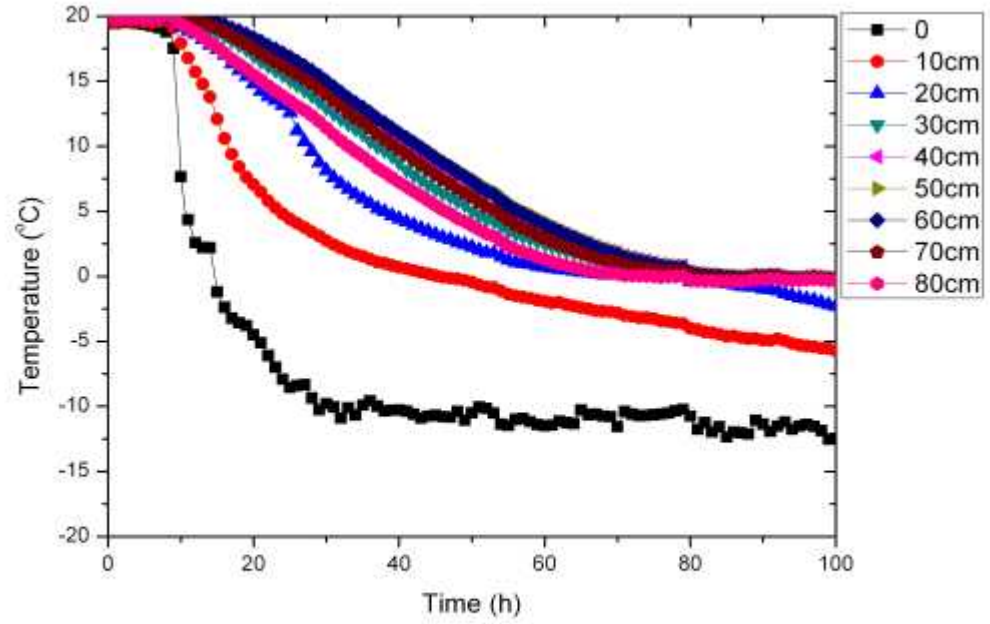
다. 채움재의 종류에 따른 동상특성분석

(1) 상수관 모형 토조의 위치별 온도변화

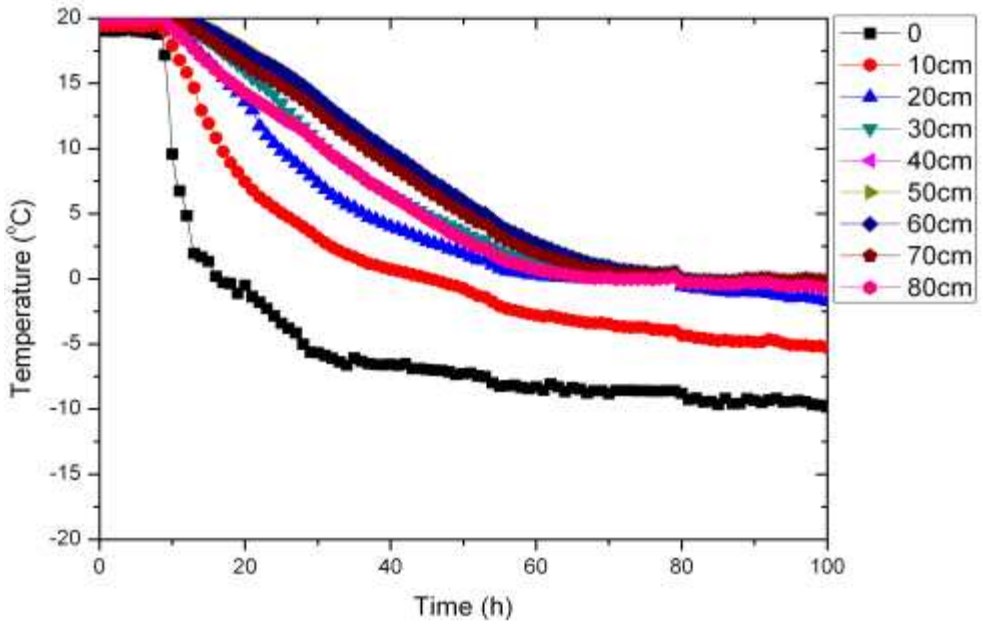
토조를 냉동챔버에 넣은 후 온도를 15 로 세팅하였다. 냉동챔버 내의 온도는 −14 C −15 C 사이를 유지하였다. 상수관 매립 지반의 온도분포를 확인하기 위하여 지중에 10 cm 간격으로 90 cm의 온도센서를 설치하였다. 온도센서에서 획득된 대상 지반의 온도분포를 살펴보면 다음과 같다. 시간이 지나면서 차가운 공기가 하단으로 침투하면서 동결면이 하단으로 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 동결면은 67시간 후에 파이프에 도달하였으며, 94시간이 경과한 후 토조 하단까지 진행되었다. 실험결과 지중에서 20 cm 까지는 온도의 변화를 확연히 알 수 있지만, 30 cm ~ 80 cm 사이의 온도는 크게 차이가 나지 않는 것을 알 수 있다. <그림 3-7-37~9>는 Section 별 온도의 변화이다.



<그림 3-7-37> Section-1 지반의 깊이별 온도 분포



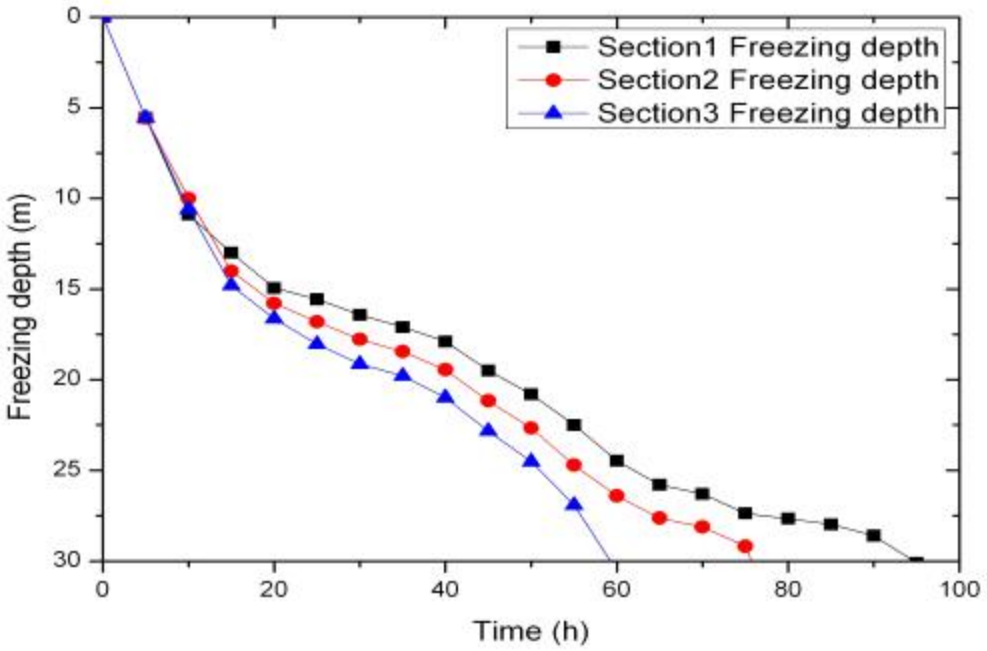
<그림 3-7-38> Section-2 지반의 깊이별 온도 분포



<그림 3-7-39> Section-3 지반의 깊이별 온도 분포

(2) 상수관 모형 토조의 동결깊이 분석

상수관 매립 지반의 온도분포를 확인하기 위하여 지중에 10 cm 간격으로 90 cm의 온도센서를 설치하였다. 온도센서에서 획득된 대상 지반의 온도분포를 살펴보면 다음과 같다. <그림 3-7-40>은 Section 별 동결 깊이를 나타낸 것이다. Section-1 단면은 화강풍화토로 구성되었고 동결 깊이는 지속적으로 깊어지는 것을 볼 수 있었다. Section-2에서는 관 주변 20 cm가 모래로 구성되어있다. 동결 깊이는 화강풍화토에 비해 적게 나타났지만 77시간 까지 나타나는 것을 확인할 수 있었다. Section-3 단면에서는 관 주변 20 cm가 재활용 PET 골재로 이루어져 있으며 하부는 다른 단면과 동일하게 화강풍화토로 구성 되어 있다. 재활용 PET의 경우 공극이 크고 투수성이 높아 화강풍화토에 비하여 동결 깊이가 작게 측정 되었다.

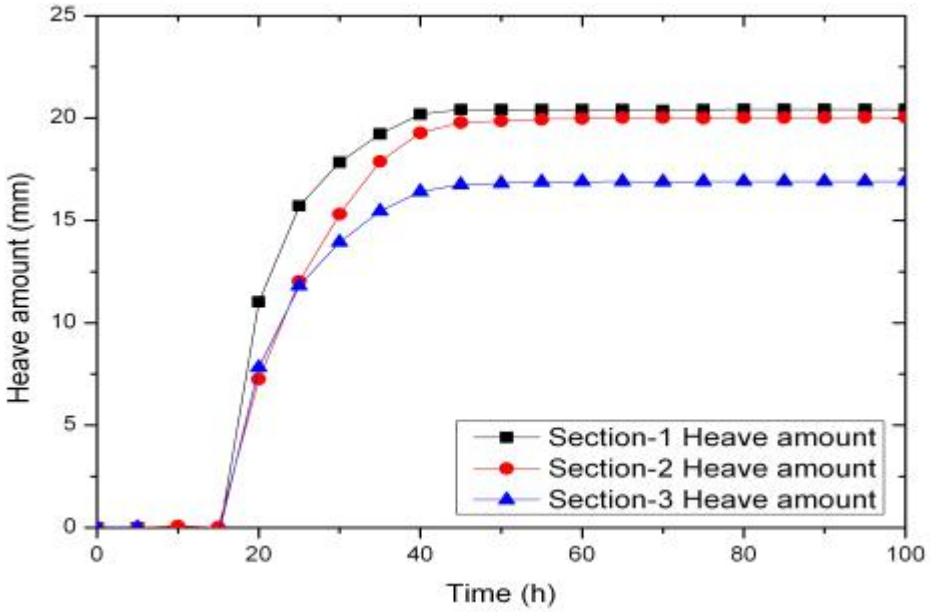


<그림 3-7-40> Section 별 동결 깊이

(3) 상수관 모형 토조의 동상 팽창량 분석

Section-1 경우 화강풍화토와 Section-2는 모래로 구성되어 있으며 일반적인 화강풍화토와 모래의 경우 모세관 현상에 의한 지하수의 유입으로 부동수분을 제외한 일정한 수분의 동결로 동상이 더 크게 일어난 것으로 보인다. <그림 3-7-41>에서 Section-1은 40시간 이후 최대 22.16 mm의 팽창량을 보였으며 동결 깊이는 38.35 cm이고 Section-2의 48시간 이후 최대 19.86 mm의 팽창량을 보였으며 동결 깊이는 35.35 cm이다. Section-3는 44시간 이후 최대 17 mm이며 최대 동경 깊이는 30.77 cm이다. 재활용 PET의 경우 다른 흙에 비하여 자체 함수비가 적고 그 이유

로 인하여 수분을 많이 포함하지 않으므로 동상 팽창량이 적게 발생한 것으로 판단된다. 일반적인 흙의 성질은 일정한 영하의 온도에서 충분한 수분의 공급이 지속되면 동상량이 점점 커진다. 특히 영하의 온도에서도 저면의 흙속에 부등한 상태의 물로 지하수위가 존재하면 물은 모세관 현상에 따라 일정하게 흙의 표면을 따라 상승하여 영하의 온도에 영향을 받는 상부로 유입되면 동결을 일으킨다.



<그림 3-7-41> Section 별 지표의 동상 팽창

(4) 상수관 모형 토조의 부동수분 분석

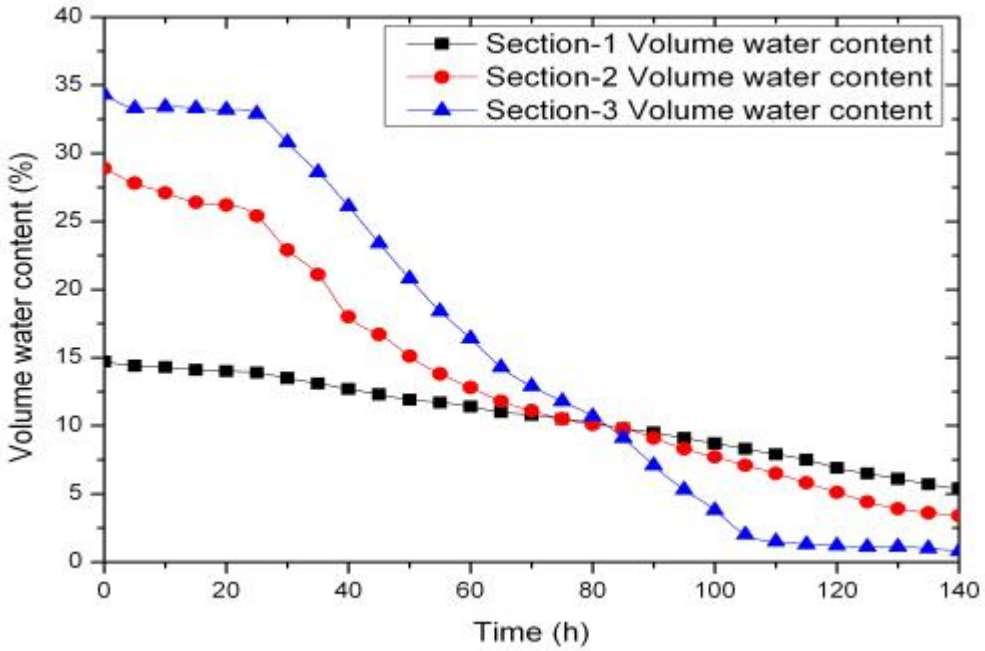
동결된 흙의 부동수분량을 결정하기 위해서는 (time domain reflectrometry: TDR) 장비를 이용하여 실험을 수행하였다. TDR 장비는 독일의 IMKO사 제품의(Trime FM-version P3)이고, 측정용 probe를 흙속에 넣고, 측정기 내에서 전파를 발생시키면 전자파는 끝단까지 왕복하는 시간을 측정하여 유전율을 계산하며, 유전율을 이용하여 흙속의 부동수분을 계산한다. 동결토를 구성하는 요소인 토립자, 얼음, 간극수, 공기 등의 유전율이 서로 다른 원리를 이용하여 동토의 체적함수비를 환산해 낸다.

부동수분은 감소하며 동결기간에서는 5% 미만의 부동수분을 함유하며 해빙기에 이르러서는 약 9.4%의 체적 함수비를 나타낸다. 이는 흙이 대기온도의 영향으로 흙이 포함하고 있는 물이 얼음으로 상변화 하는 것을 의미한다.

<그림 3-7-42>는 토조별 동결 지속 시간에 따른 부동수분의 변화이다. 지속 시간이 증가 할수록 부동수분의 변화 오차는 줄어들며 갈수록 지반이 대기온도의 영향으로 점차 부동수분이 감소함을 보이고 있다. 동결토의 수분의 표면력은 토립자의

구조단위 주변에 수분의 양과 특성에 의해 지배된다. 토립자 표면에 가까워 질수록 표면은 점점 더 증가되어 토립자 표면의 수분은 높은 표면력에 의해 물 분자가 이동하게 되거나 벗어나게 된다.

온도가 감소하여 수분이 동결됨으로써 토립자와 조직단위는 상호작용으로 변화하거나, 토립자와 물의 위치에너지로 변화하게 된다. 이 때문에 동결 수분이 변화하게 되는 것이다. 사질토의 경우 동결선 아래 1.5 m의 깊이에서 모세관 작용으로 물을 끌어 올릴 수 있고 실트, 점토, 실트질의 대단히 미세한 모래는 동결선 아래 지하수의 영향을 받을 수 있다. 압축성이 큰 포화점토는 지하수가 깊은 곳에 위치하여도 점토의 압축성에 의해 간극에서 배수된 물로 인하여 얼음층을 형성할 수 있을 만큼 충분한 물이 공급될 수 있다. 지하수위를 일정하게 하였을 때, 동상비는 동상속도가 빠를수록 증가하고 동결속도가 일정하게 되었을 때에는 수위를 낮출수록 감소한다. 미동결토의 동결면까지 이동하는 물은 흙 입자 사이 모관을 통하여 이동하는 거리와 그 흙속에 있어서 물의 모관상승 높이와 같다. 미동결 흙의 모관상승높이 보다 지하수위가 깊으면 그 지하수는 수분 공급원이 되지 못한다.

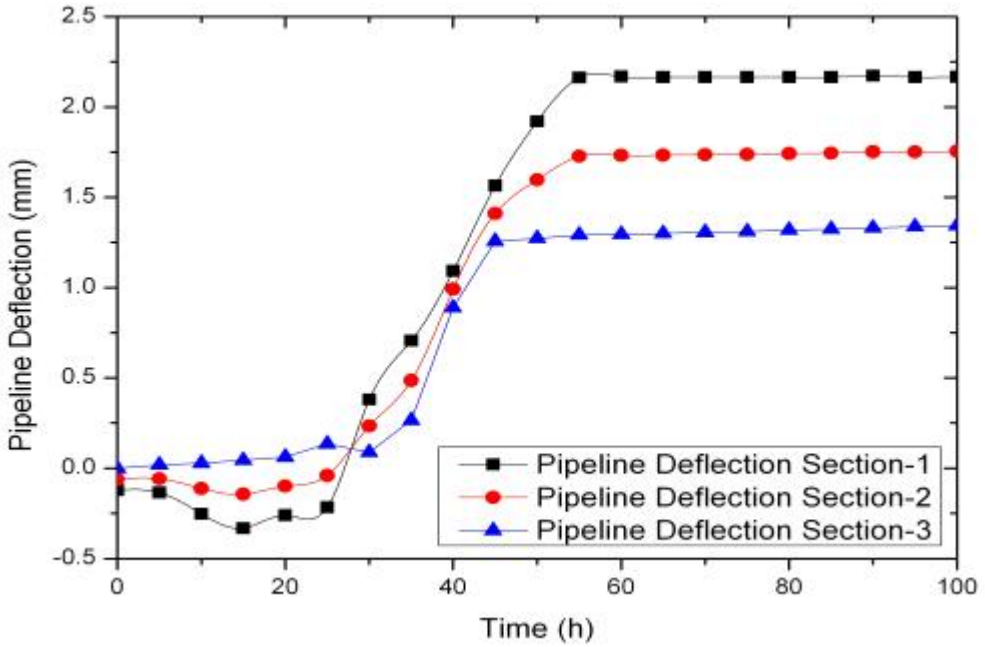


<그림 3-7-42> Section 별 부동수분 변화

(5) 상수관 모형 토조에 작용하는 동결 변위

온도를 측정한 데이터를 확인하면 깊이 5 cm에서 약간의 상변화가 발생하였으며 깊이가 깊어질수록 뚜렷한 상변화가 관측되었다. 포화 지반에서는 물의 상변화를 동반하고 있어 온도강하가 0℃에서부터 느려지지만 포화토의 열전도계수가 높아 매

설관이 묻혀있는 깊이 10 cm, 20 cm에서도 온도강하가 깊이 10 cm 에서와 유사하게 나타난다. <그림 3-7-43>는 실험이 진행되는 동안 매설관 중앙에서의 동상융기를 보여주고 있다. 선행연구에 의하면 물은 얼음이 되면서 최대 9%정도의 체적 팽창이 이루어진다는 것을 알 수 있다. 매설관 주변 포화지반이 상변화를 시작하는 시점에서 동상융기가 서서히 발생하고 상변화가 완료되는 시점에서 급격히 동상융기가 발생됨을 확인할 수 있다. 이는 물이 얼음으로 상변화가 완료되면서 부피팽창이 약 9% 발생하며 동상융기를 동반한 것으로 판단된다.



<그림 3-7-43> LVDT로 측정한 매설관 변위

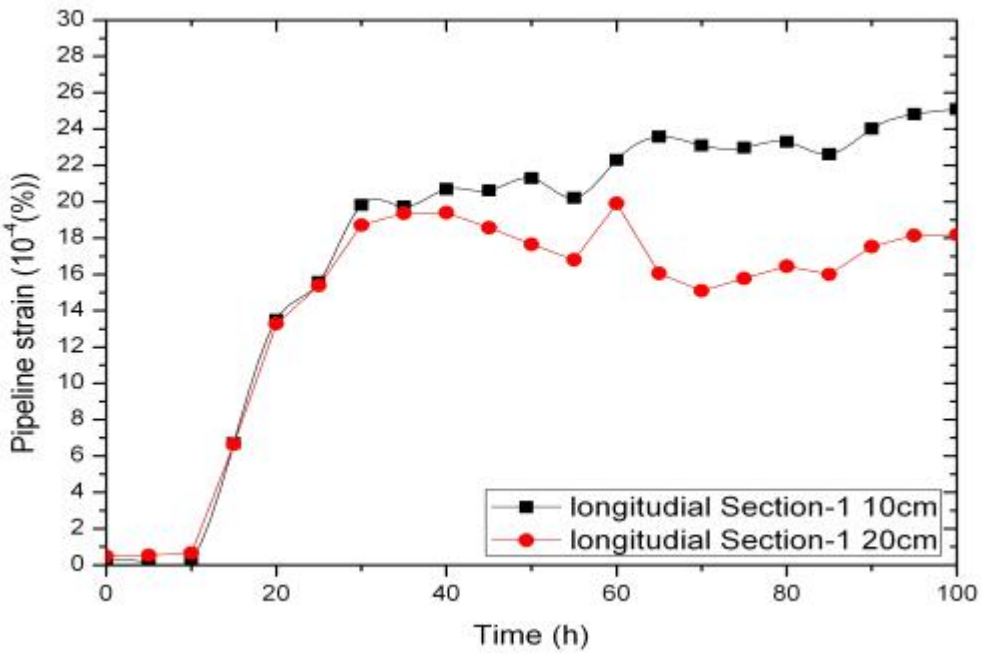
실험결과 매설관 상부의 지반이 동결될 경우에는 매설관의 변형이 미미하였지만 매설관 하부 지반이 동결되면서 변형이 급격히 증가하여 Section-1은 최대 22.46 cm의 변위가 발생하였고 Section-2은 최대 17.46 cm, Section-3은 최대 13.96 cm의 변위가 발생하였다. 따라서 화강풍화토와 모래 지반에서 지하수 공급이 원활하고 동결깊이 이내에 매설관이 설치되면 동결지반 융기에 따른 파괴가 예상되지만 재활용 PET 골재의 경우 모세관 현상에 의한 지하수의 공급이 원활하게 일어나지 않으므로 동결에 의한 매설관의 변위가 적은 것을 확인 할 수 있었다.

(6) 상수도관의 스트레인 분포

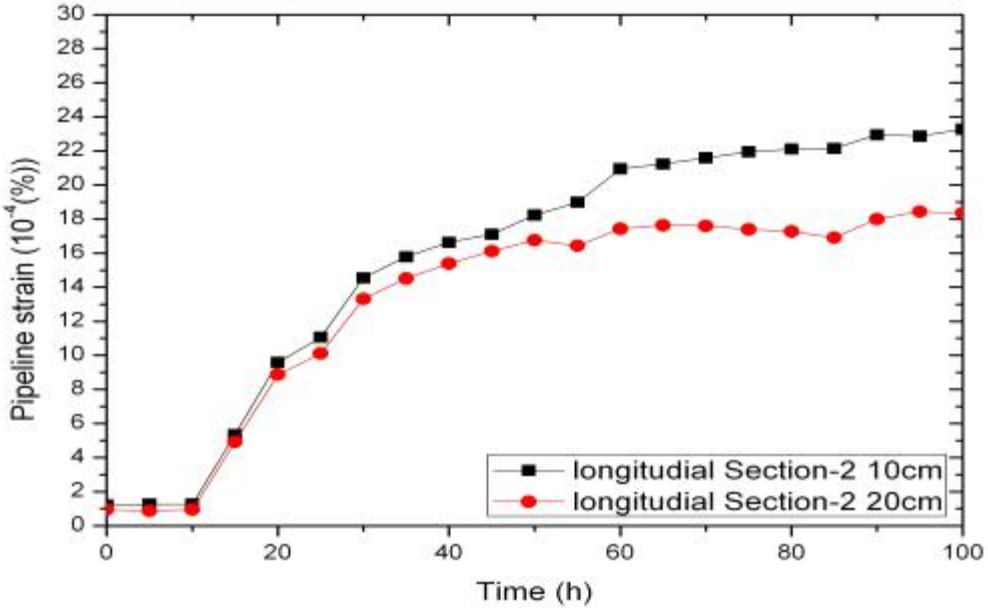
상수관의 변형을 파악하기 위하여 상수관 하나당 2개씩 총 12개의 스트레인 게이지를 부착하여 변위를 측정하고자 하였다. 스트레인 게이지의 장기간 계측임을 감

안하여 스트레인 게이지 케이블이 손상되는 것을 방지하기 위하여 실드 처리된 연장 케이블을 활용하였으며, 게이지 부착시 도포 처리 및 실링 테이프를 이용한 긁힘을 방지하고자 하였다. 동결로 인한 매설관에 작용하는 스트레인 분포는 관의 상부인 <그림 3-7-44~6>과 관의 하부 <그림 3-7-47~9>에 정리하였다.

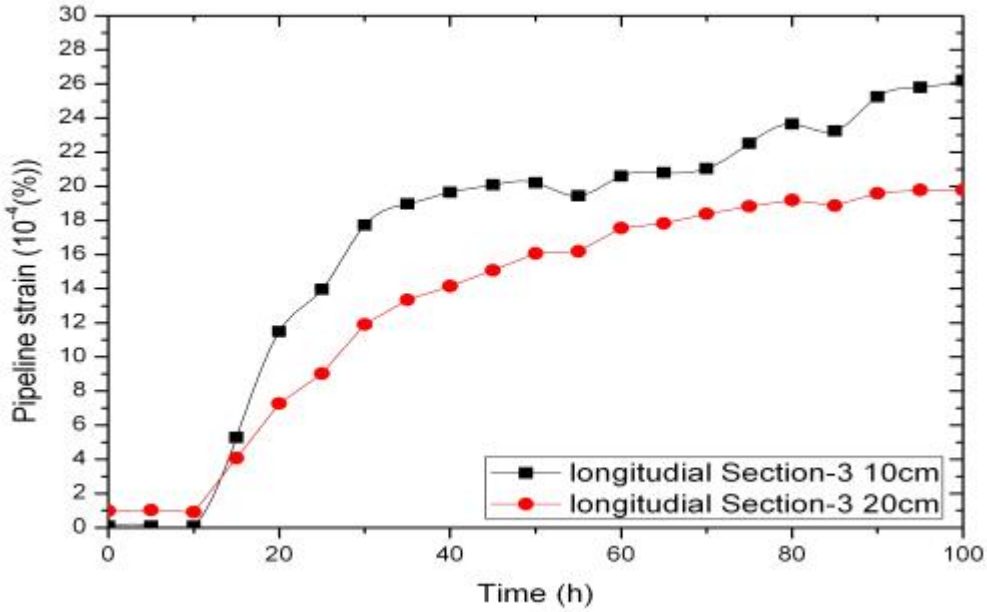
전체적으로 상수관 자체의 강성이 커서 변위는 거의 발생하지 않은 것으로 나타났지만 뒤채움 재료별 관 변형의 차이는 조금씩 나타났다. Section-1의 경우 화강풍화토로 구성이 되어있고 10 cm, 20 cm 위치의 스테인리스 관으로 동결 깊이가 크므로 변형이 있었다. Section-2의 경우도 모래로 구성되어 동결 깊이에 의한 변형이 있었으며 Section-3의 경우 재활용 PET골재로 구성되어 변형이 작은 것으로 나타났다. 상수관 하부의 스트레인 분포며 이는 상부는 인장되고 하부는 압축력이 작용하는 것으로 판단된다.



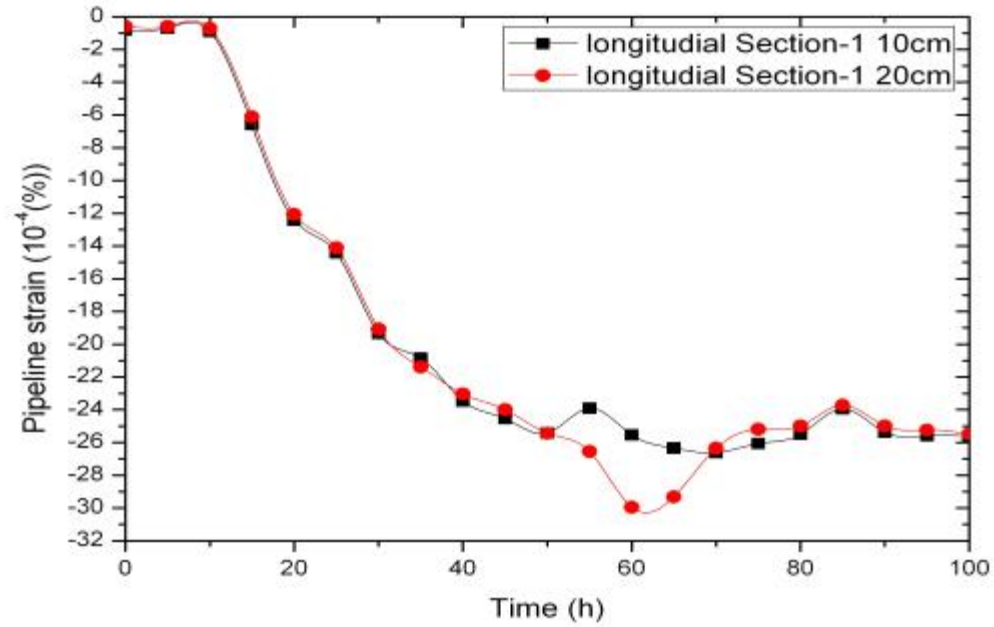
<그림 3-7-44> Section-1 스테인리스 관 상부의 스트레인 분포



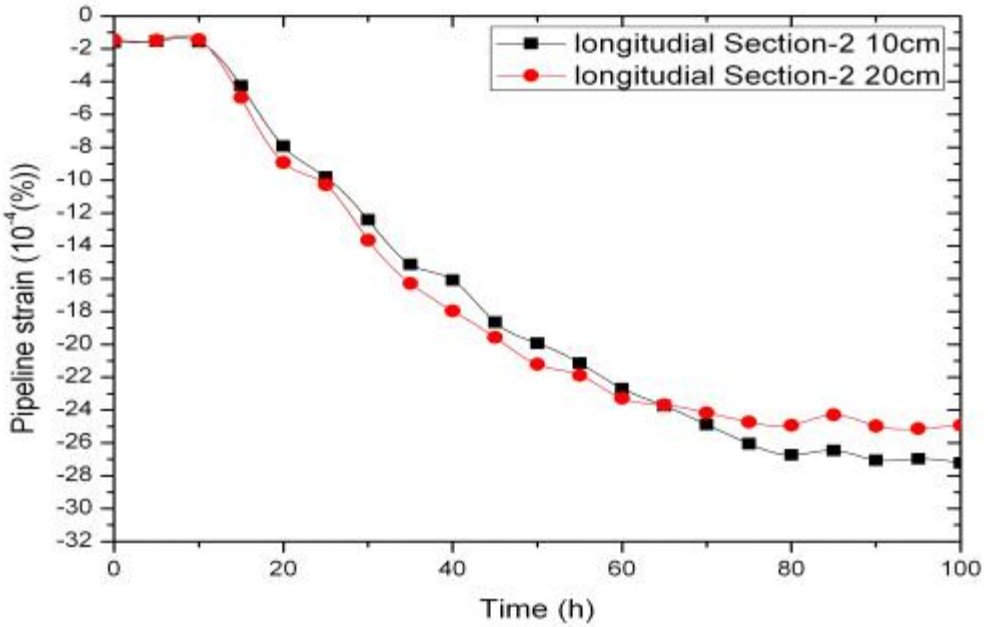
<그림 3-7-45> Section-2 스테인리스 관 상부의 스트레인 분포



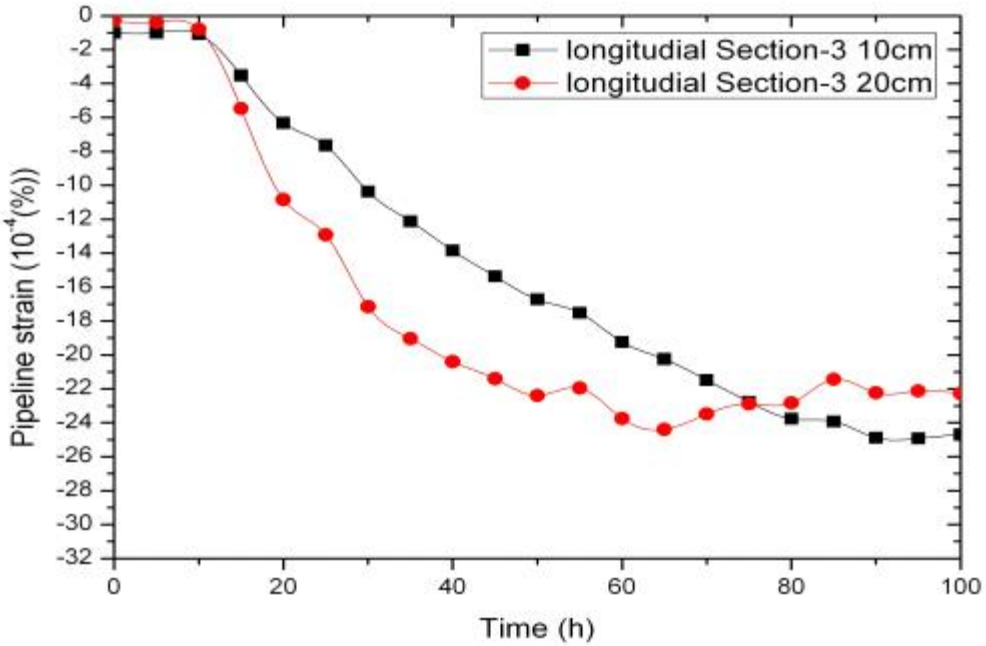
<그림 3-7-46> Section-3 스테인리스 관 상부의 스트레인 분포



<그림 3-7-47> Section-1 스테인리스 관 하부의 스트레인 분포



<그림 3-7-48> Section-2 스테인리스 관 하부의 스트레인 분포

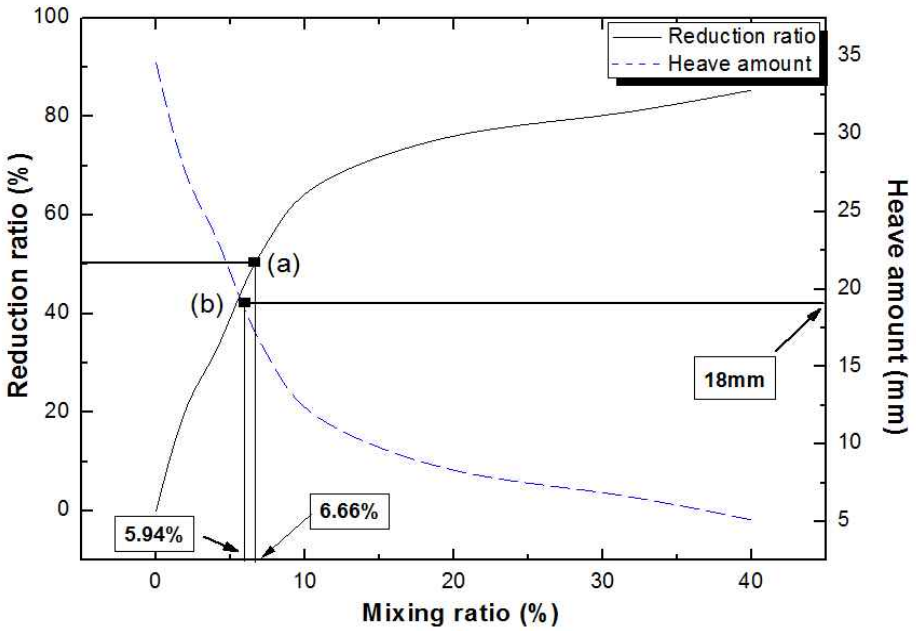


<그림 3-7-49> Section-3 스테인리스 관 하부의 스트레인 분포

6. 소결론

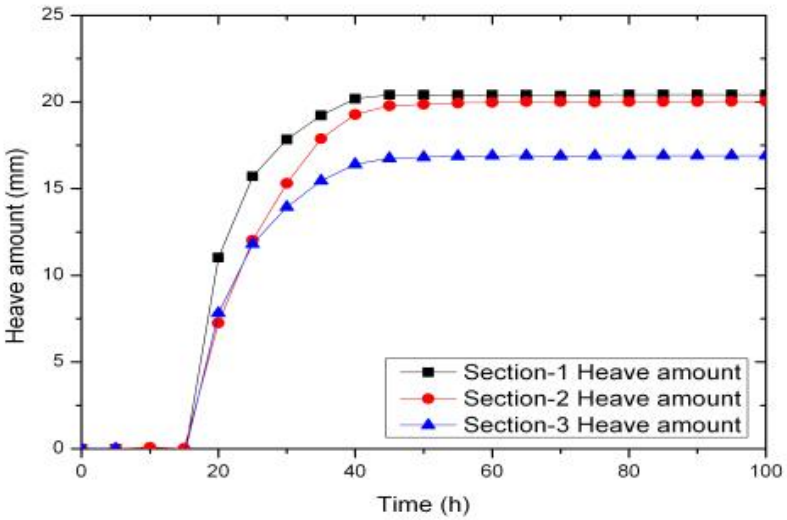
이 절에서는 본 기관에서 개발한 동상팽창 저감재의 실내동상실험을 통해 동상저감효과를 분석하였으며, 대형냉동챔버를 이용한 실대형 모형실험을 통해 실제 상수관에 거동에 대한 분석을 하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 개발채움재의 동상팽창량 특성



□ 본 기관에서 개발된 PET 골재(PET Ball)의 영국 TRRL 동상민감성 기준 적용 결과 일반 화강풍화토에 약 6%를 첨가하였을 때 동상이 민감하지 않은 흙으로 분류되는 것으로 분석되었으며 동상팽창량 감소율 50%에 도달하는 혼합비는 6.66%인 것으로 분석되었음.

2)실대형 실험을 통한 채움재의 종류에 따른 지표의 동상팽창량



□ Section-1은 일반 화강풍화토를 되메움재로 이용하였고, Section-2는 모래, Section-3은 일반 화강풍화토에 PET 골재를 혼합한 뒤채움재로 전체적으로 동결시간 지속에 따른 동상팽창량은 일정한 값에 수렴한 형태를 보임.

□ 상부의 동상팽창량이 가장 적게 일어난 PET 혼합 화강풍화토의 경우, PET 골재 자체에 포함되어 있는 수분의 양이 적기 때문에 모세관현상에 의한 지표팽창이 다른 조건에 비하여 상대적으로 적게 일어났으며 약 17%의 동상팽창량 저감효과를 나타내는 것으로 분석됨.

제 4 장 최종 연구성과 및 적용실적

1절 상수도관 매설 설계 및 시공지침 개선안

1. 상수도 시설기준 개선안

가. 상수관로 공사 관련 기존 기준 현황(환경부, 상수도시설기준(2010))

(1) 환경부 '상수도시설기준(2010)' 개요

환경부 "상수도시설기준(2010)"에서는 상수도관의 매설깊이를 결정할 때는 4.2.6의 매설 위치 및 깊이에서 한랭지의 경우 매설깊이는 동결심도 보다 깊도록 기술하였다. 또한 해설에서는 동결심도는 한국건설기술연구원의 '동결심도 및 포장내부 온도 조사' 보고서를 참조하도록 제시하였다.

(2) 상수도 시설기준 내용(매설관련)

4.2.6 매설 위치 및 깊이

관로의 매설위치 및 깊이는 다음 각 항에 따른다
1. 공공도로에 관을 매설할 경우에는 「도로법」 및 관계법령에 따라야 하며 도로관리기관과 협의하여야 한다.
관로의 매설깊이는 관종 등에 따라 다르지만 일반적으로 관경 900mm 이하는 120cm이상, 관경 1,000mm이상은 150cm 이상으로 하고, 도로하중을 고려할 필요가 없을 경우에는 그렇게 하지 않아도 된다. 도로하중을 고려해야 할 위치에 대구경의 관을 부설할 경우에는 매설깊이를 관경보다 크게 해야한다. 도로하중을 고려할 필요가 있으나 지반이 암반인 경우 등으로 부득이하게 매우 얕게 매설해야 할 경우에는 별도로 관을 보호하는 조치를 강구한다.
한랭지에서 관의 매설깊이는 동결심도보다 깊게 한다.
매설위치는 태풍이나 지진, 홍수 등 비상시에도 관로의 구조에 영향이 최소화 될 수 있는 곳으로 한다.

[해 설]

1. 에 대하여; 공공도로에 관을 매설할 때에는 「도로법」에 의하여 도로관리기관에 도로점용 허가를 받아야 한다. 매설물의 위치와 깊이에 대해서는 도로관리가관과 상수도, 하수도, 지하철, 가스, 전력, 전신, 전화 등 지하 매설물의 위치와 깊이

를 고려하여 도로의 종별에 따라 협의하고, 특별한 경우를 제외하고는 그 협의에 따라야하는 것이 바람직하다. 하천부지, 철도부지 또는 사유지에 관을 매설하는 경우에는 해당 관리기관 또는 토지소유자와 협의한 다음에 사용승인을 얻어야 한다. 「도로법시행령」에서는 토피의 표준은 120cm(부득이한 경우 60cm)로 규정하고 있지만, 수관교 부착부의 재방 횡단개소나 다른 매설물과의 교차관계 등으로 토피를 표준 또는 규정치까지 확보하지 못하는 경우에는 도로관리기관 또는 하천관리기관과 협의한 다음에 토피를 60cm까지 축소할 수 있다.

2.에 대하여; 매설관의 깊이는 토압과 노면의 동하중에 대하여 관이 안전하여야 하므로, 그에 필요한 깊이는 토질, 노면상태, 도로등급과 종별에 따라 다르고 또 관의 재질, 구조, 관경에 따라 정해지는 것이나 관경이 클수록 흙덮기를 많이 한다. 그러나 보도나 중차량의 교통을 불허하는 수도용지 내에 매설할 경우에는 표준보다 얕게 해도 된다.

3.에 대하여; 수관교 연결부의 제방 횡단장소나 다른 매설물과의 교차관계 또는 기초지반이 견고한 암반일 경우 등으로 매설깊이를 표준 또는 규정치까지 깊게 매설하지 못할 경우에는 흙덮기를 60cm까지 축소할 수 있으며 이 때에는 관이 바로 윗부분의 노면에 콘크리트 또는 철근콘크리트의 슬래브(slab)를 설치하거나 라멘(rahmen)으로 관을 싸서 보호한다.

4.에 대하여; 한랭지에서는 동결심도보다 20cm이상 깊게 매설해야 하며 구경 500mm이상의 관에서는 관경의 0.5배 이상 깊게 매설하여야 한다.
참고로 동결심도는 한국건설기술연구원의 '동결심도 및 포장내부 온도 조사' 보고서를 참조한다. (7.4.5 매설위치 및 깊이 참조)

5. 에 대하여; 일반적으로 취수시설은 정수장으로부터 원거리에 위치하여 산지나 하천의 둔치 또는 하천을 횡단하여 매설되기 때문에 안정적인 도수량을 공급하기 위하여는 관로의 매설 위치가 태풍이나 지진, 홍수 등 비상시에도 관로의 구조에 영향이 최소되는 위치를 선정하여야 한다.

나. 상수도 시설기준 관련 개선안

(1) 상수도 시설기준 개선안 개요

"상수도 시설기준(2010)"은 2010년에 발간된 기준안으로 최신 동결심도 데이터의 적용이 필요하다. 따라서 해설 4의 참고의 문구를 별첨의 보고서상의 10년 누적동결심도분포도로 수정을 제안한다.

(2) 상수도 시설기준 개선안 내용

4.2.6 매설 위치 및 깊이

관로의 매설위치 및 깊이는 다음 각 항에 따른다

1. 공공도로에 관을 매설할 경우에는 「도로법」 및 관계법령에 따라야 하며 도로관리기관과 협의하여야 한다.
2. 관로의 매설깊이는 관종 등에 따라 다르지만 일반적으로 관경 900mm 이하는 120cm이상, 관경 1,000mm이상은 150cm 이상으로 하고, 도로하중을 고려할 필요가 없을 경우에는 그렇게 하지 않아도 된다. 도로하중을 고려해야 할 위치에 대구경의 관을 부설할 경우에는 매설깊이를 관경보다 크게 해야한다.
3. 도로하중을 고려할 필요가 있으나 지반이 암반인 경우 등으로 부득이하게 매우 얕게 매설해야 할 경우에는 별도로 관을 보호하는 조치를 강구한다.
4. 한랭지에서 관의 매설깊이는 동결심도보다 깊게 한다.
5. 매설위치는 태풍이나 지진, 홍수 등 비상시에도 관로의 구조에 영향이 최소화 될 수 있는 곳으로 한다.

[해 설]

1.에 대하여; 공공도로에 관을 매설할 때에는 「도로법」에 의하여 도로관리기관에 도로점용 허가를 받아야 한다. 매설물의 위치와 깊이에 대해서는 도로관리가관과 상수도, 하수도, 지하철, 가스, 전력, 전신, 전화 등 지하 매설물의 위치와 깊이를 고려하여 도로의 종별에 따라 협의하고, 특별한 경우를 제외하고는 그 협의에 따라야하는 것이 바람직하다. 하천부지, 철도부지 또는 사유지에 관을 매설하는 경우에는 해당 관리기관 또는 토지소유자와 협의한 다음에 사용승인을 얻어야 한다. 「도로법시행령」에서는 토피의 표준은 120cm(부득이한 경우 60cm)로 규정하고 있지만, 수관교 부착부의 재방 횡단개소나 다른 매설물과의 교차관계 등으로 토피를 표준 또는 규정치까지 확보하지 못하는 경우에는 도로관리기관 또는 하천관리기관과 협의한 다음에 토피를 60cm까지 축소할 수 있다.

2.에 대하여; 매설관의 깊이는 토압과 노면의 동하중에 대하여 관이 안전하여야 하므로, 그에 필요한 깊이는 토질, 노면상태, 도로등급과 종별에 따라 다르고 또 관의 재질, 구조, 관경에 따라 정해지는 것이나 관경이 클수록 흙덮기를 많이 한다. 그러나 보도나 중차량의 교통을 불허하는 수도용지 내에 매설할 경우에는 표준보다 얕게 해도 된다.

3.에 대하여; 수관교 연결부의 제방 횡단장소나 다른 매설물과의 교차관계 또는 기초지반이 견고한 암반일 경우 등으로 매설깊이를 표준 또는 규정치까지 깊게 매설하지 못할 경우에는 흙덮기를 60cm까지 축소할 수 있으며 이 때에는 관이 바로 윗부분의 노면에 콘크리트 또는 철근콘크리트의 슬래브(slab)를 설치하거나 라멘(rahmen)으로 관을 싸서 보호한다.

4.에 대하여; 한랭지에서는 동결심도보다 20cm이상 깊게 매설해야 하며 구경 500mm이상의 관에서는 관경의 0.5배 이상 깊게 매설하여야 한다.
참고로 동결심도는 이하 별첨의 최신 동결심도 보고서의 10년 누적 최대동결깊이 곡선(2005~2014년)을 활용한다.

5. 에 대하여; 일반적으로 취수시설은 정수장으로부터 원거리에 위치하여 산지나 하천의 둔치 또는 하천을 횡단하여 매설되기 때문에 안정적인 도수량을 공급하기 위하여는 관로의 매설 위치가 태풍이나 지진, 홍수 등 비상시에도 관로의 구조에 영향이 최소되는 위치를 선정하여야 한다.

2. 상수도 관로시설기준 개선안

가. 상수도 공사 관련 기존 기준 현황

(1)상수도 관로시설 기준 개요

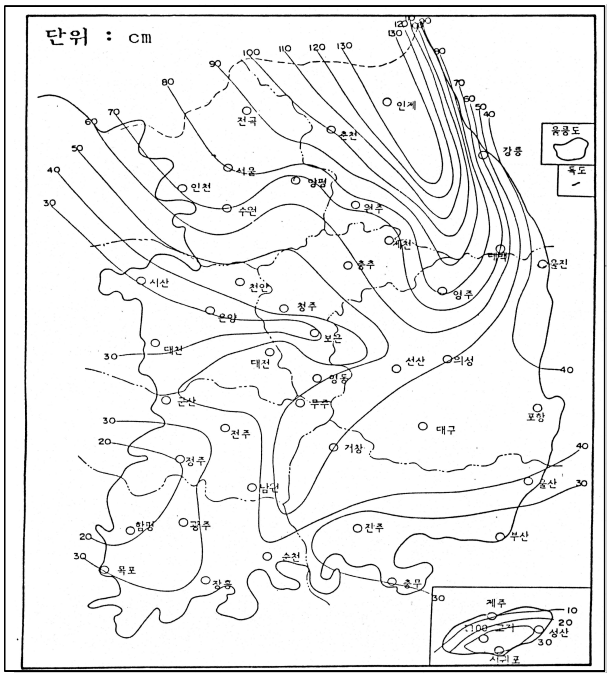
“상수관로 공사 설계기준(2003)”에서는 상수도관의 매설깊이를 결정할 때는 국립건설시험소의 전국 최대동결깊이 곡선(1980~1989, 10년) 자료를 참조하도록 기준에 수록해 두었으며, 20cm이상의 여유를 두도록 규정하고 있다.

(2)상수도 관로시설 기준 내용

5. 토피의 기준

(1) 도로에 위치할 경우 도로법 등 관계법에 따르며 도로관리자와 협의하여야 한다.

(2) 도로관리자와 별도 협정이 없거나, 공공도로 이외에 관을 매설하는 경우로써 노면하중을 고려하여야 할 경우, 매설깊이는 <표 4-1-1>의 최소토피 이상이어야 하고 노면하중을 고려하지 않을 경우에는 그러하지 아니하며, 두 경우 모두 관두께 결정시 고려한 값에 만족하여야 한다.



<그림 4-1-1> 전국 최대동결깊이 곡선(1980 ~1989년 자료)

<표 4-1-1> 노면하중 고려시 최소토피기준

구 분	최소토피
관경 900㎜ 이하	120㎝
관경 1,000㎜ 이상	관경 이상(단, 최소 150㎝)

(3) 상기 (2)에서 결정된 토피는 동결깊이를 고려한 토피 이상이어야 하며, 동결깊이는 <그림 4-1-1> 국립건설시험소의 전국 최대동결깊이 곡선도를 이용하여 구하되 20㎝ 이상의 여유를 가져야 한다.

(4) 상기 (2)에서 결정된 토피는 관부상 검토결과에 따라 깊이를 증가시킬 수 있다.

나. 상수도 공사 관련 기준 개선안

(1) 상수도 관로시설 기준 개선안 개요

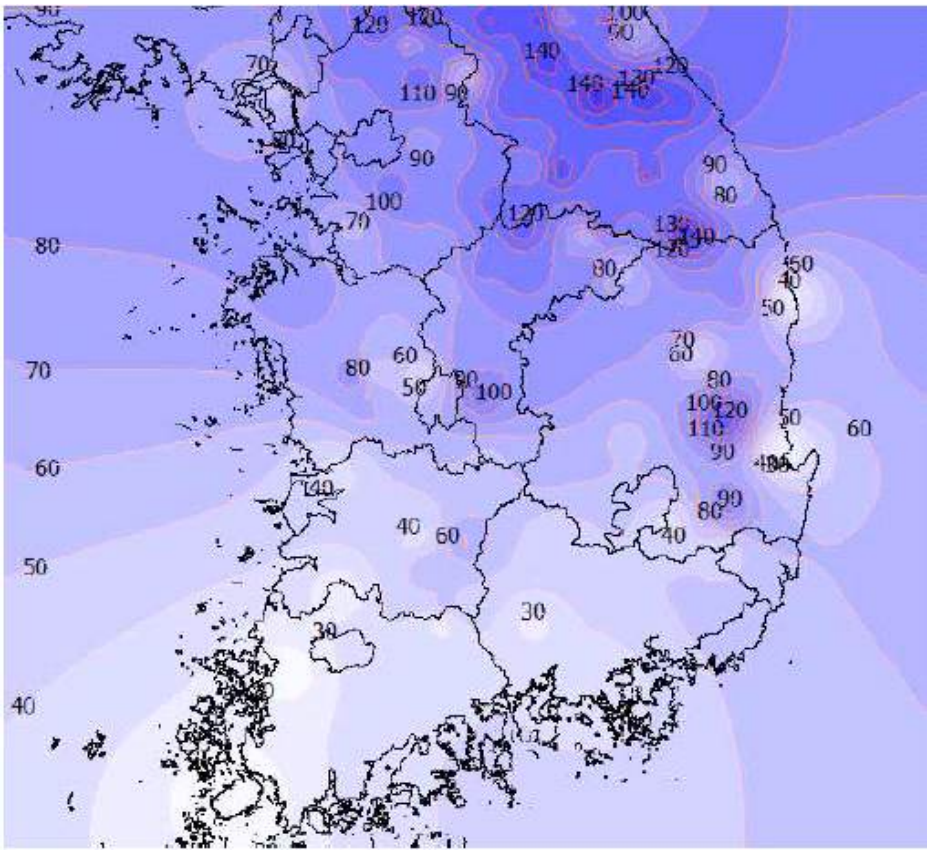
"상수관로 공사 설계기준(2003)"에서는 상수도관의 매설깊이를 결정할 때는 국립건설시험소의 전국 최대동결깊이 곡선(1980년~1989년, 10년) 자료를 참조하도록 기준에 수록되었다. 설계기준상에 나타난 최대 동결깊이 선도는 현재의 기후사항을 반영하지 못한 것으로 현재의 계측 자료를 토대로 한 동결깊이 선도를 제안한다.

(2) 상수도 관로시설 기준 개선안 내용

5. 토피의 기준

(1) 도로에 위치할 경우 도로법 등 관계법에 따르며 도로관리자와 협의하여야 한다.

(2) 도로관리자와 별도 협정이 없거나, 공공도로 이외에 관을 매설하는 경우로써 노면하중을 고려하여야 할 경우, 매설깊이는 <표 4-1-2>의 최소토피 이상이어야 하고 노면하중을 고려하지 않을 경우에는 그러하지 아니하며, 두 경우 모두 관두께 결정시 고려한 값에 만족하여야 한다.



<그림 4-1-2> 전국 최대동결깊이 곡선(2005 ~2014년 자료)

<표 4-1-2> 노면하중 고려시 최소토피기준

구 분	최소토피
관경 900㎜ 이하	120㎝
관경 1,000㎜ 이상	관경 이상(단, 최소 150㎝)

(3) 상기 (2)에서 결정된 토피는 동결깊이를 고려한 토피 이상이어야 하며, 동결깊이는 <그림 4-1-2> 국립건설시험소의 전국 최대동결깊이 곡선도를 이용하여 구하되 20㎝ 이상의 여유를 가져야 한다.

(4) 상기 (2)에서 결정된 토피는 관부상 검토결과에 따라 깊이를 증가시킬 수 있다.

3. 지역별 최대동결심도 (2005년 ~ 2014년)

<표 4-1-3>은 연차·지역별 최대 동결심도를 나타낸 것이다. 2005~2014년도의 동결깊이를 살펴보면, 2014년 강원도지역은 동결깊이가 23~153cm이상 범위로 나타났으며, 또한 경기지역은 철원에서 최대 116cm, 경북지역 포항에서 최대 129cm, 충청지방은 47~131cm, 전북지방은 57cm로 나타났다. 반면, 남부지역은 40cm이하로 나타났다.

<표 4-1-3> 연차·지역별 최대 동결심도(빈도)

설치지역	측후소	도로명	동결심도		측정년도(빈도)	비고(토질분포)
강원도	대관령	강릉	최대	153.000	2013	-
			최소	115.000	2008	
	속초	홍천	최대	127.000	2010	
			최소	74.000	2012	
		정선	최대	46.000	2006	
			최소	11.000	2008	
	영월	정선	최대	131.000	2010	
			최소	68.000	2012	
		강릉	최대	141.000	2012	
			최소	49.000	2008	
	원주	홍천	최대	141.000	2009	
			최소	32.000	2007	
	철원	홍천	최대	125.000	2006	
			최소	89.000	2012	
	춘천	홍천	최대	145.000	2014	
			최소	58.000	2006	
	태백	정선	최대	144.000	2006	
			최소	94.000	2008	
	홍천	홍천	최대	155.000	2012	
			최소	72.000	2014	
		강릉	최대	80.000	2010	
			최소	23.000	2006	
경기	강화	의정부	최대	86.000	2006	SM 45%, SC, CL 11%, SP-SM 7%, GW-GM, GP-GM 5%, SP, SW-SM, 기타, GM, SP 4%의 분포를 보임
			최소	0.000	2012	
		수원	최대	74.000	2012	
			최소	12.000	2007	
	수원	수원	최대	38.000	2006	
			최소	15.000	2007	
	양평	의정부	최대	81.000	2013	
			최소	22.000	2008	
	이천	수원	최대	115.000	2012	
			최소	16.000	2014	
	철원	의정부	최대	116.00	2013	
			최소	57.000	2014	
	춘천	의정부	최대	120.000	2006	
			최소	55.000	2014	

설치지역	측후소	도로명	동결심도		측정년도(빈도)	비고(토질분포)
경북	구미	대구	최대	40.000	2010	SM 31%, CL 17%, SM 13% 기타 11%, SW-SM 10%, CH 6%, SP-SM, ML 4%의 분포를 보임
			최소	0.000	2012	
	대구	포항	최대	95.000	2011	
			최소	5.000	2005	
		대구	최대	31.000	2010	
			최소	0.000	2008	
	안동	포항	최대	129.000	2013	
			최소	96.000	2014	
		영주	최대	95.000	2011	
			최소	21.000	2013	
	영주	영주	최대	60.000	2011	
			최소	13.000	2008	
		대구	최대	55.000	2008	
			최소	16.000	2014	
	울진	포항	최대	12.000	2006	
			최소	0.000	2008	
	포항	포항	최대	15.000	2006	
			최소	0.000	2008	
남부	광주	순천	최대	34.000	2012	· SM 33%, CL 30%, SC 17%, 기타 11%, SW-SM 9%의 분포를 보임
			최소	0.000	2004	
		광주	최대	20.000	2005	
			최소	0.000	2007	
	밀양	진영	최대	30.000	2005	
			최소	0.000	2012	
	산청	진주	최대	38.000	2012	
			최소	0.000	2012	
전북	군산	전주	최대	33.000	2005	CL 61%, SM 23%, CH, MH 8%의 분포를 보임
			최소	0.000	2012	
	남원	전주	최대	37.000	2005	
			최소	12.000	2014	
		남원	최대	50.000	2010	
			최소	21.000	2014	
	장수	남원	최대	57.000	2010	
			최소	25.000	2007	
충북	충주	충주	최대	70.000	2012	SM 71%, SC 19%, SP, SP-SM 5%의 분포를 보임
			최소	15.000	2014	
충청	보은	보은	최대	109.000	2013	SM 33%, CL 30%, SC 17%, 기타 11%, SW-SM 9%의 분포를 보임
			최소	27.000	2008	
	부여	논산	최대	79.000	2013	
			최소	0.000	2008	
	서산	포항	최대	87.000	2011	
			최소	16.000	2007	
	천안	예산	최대	63.000	2005	
			최소	28.000	2008	
		논산	최대	47.000	2013	

			최소	21.000	2014	
	충주	포항	최대	131.000	2012	
			최소	11.000	2007	

2절 시공성을 고려한 동파방지 채움재

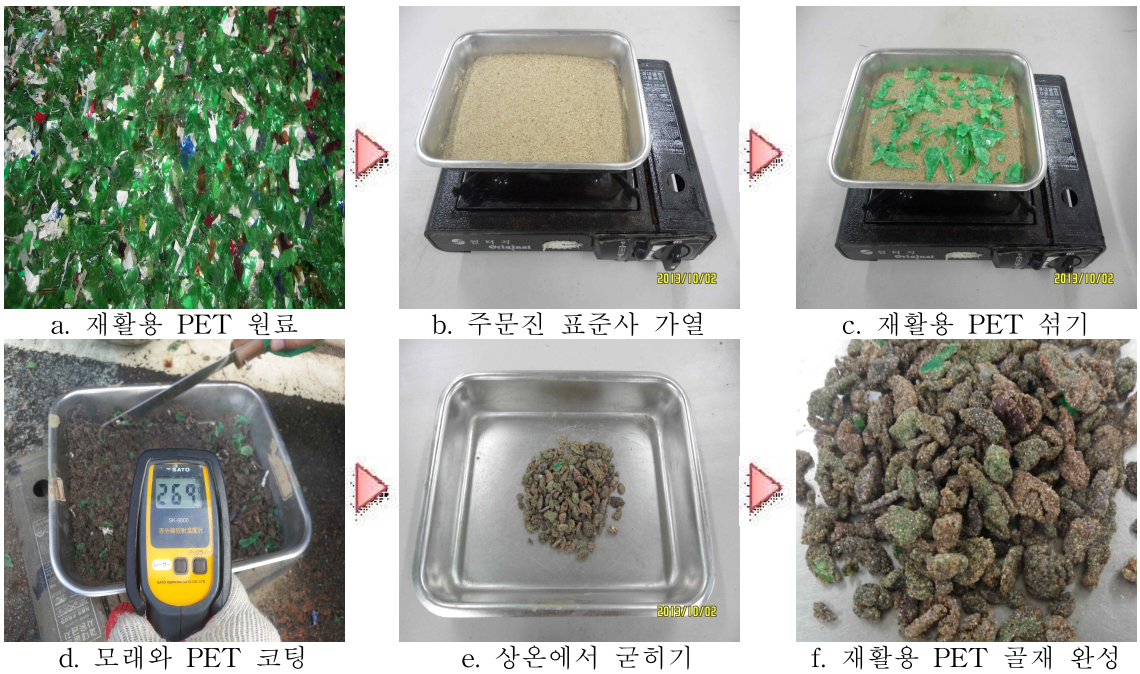
우리의 일상 속에서 청량음료나 간장 등 같이 조미료 용기로 널리 사용하고 있는 페트병(poly ethlene terephthalate)은 가열 가압 또는 이 두 가지에 의해서 성형이 가능한 가소성 물질이다. 플라스틱은 가볍고 가공성이 쉬운 특징이 있으며 저렴한 가격 등의 이유로 열적재활용 시스템을 통한 재활용이 가능하다.

따라서 본 절에서는 열적재활용 시스템을 통해 제작한 페트 골재를 이용하여 동상민감성 판단 및 경제성 효과 분석을 수행하였으며 모형실험을 통해 채움재를 적용함으로써 그 효과에 대한 분석을 수행하였다.

1. 재활용 페트를 이용한 채움재의 제작 방법

가. 소량의 페트 골재 제조방법

수거된 페트병을 재활용하기 위해서는 소정의 가공 과정이 필요하다. <그림 4-2-1>의 (a)는 수거된 페트병을 무색, 유색, 그리고 복합재질로 선별하는 과정을 나타낸 것이다. <그림 4-2-1>의 (b)는 수거한 페트병을 한 변의 크기가 30 mm 이하인 사각형 형태의 조각으로 분쇄하는 단계이고, (c) ~ (e)는 플라스틱에 붙어있는 라벨 밑 오염물질을 제거하기 위한 세척 과정과 탈수 건조 단계를 나타낸 것이다. (f)는 재활용 페트 원료의 완성된 모습이다.



a. 재활용 PET 원료 b. 주문진 표준사 가열 c. 재활용 PET 섞기

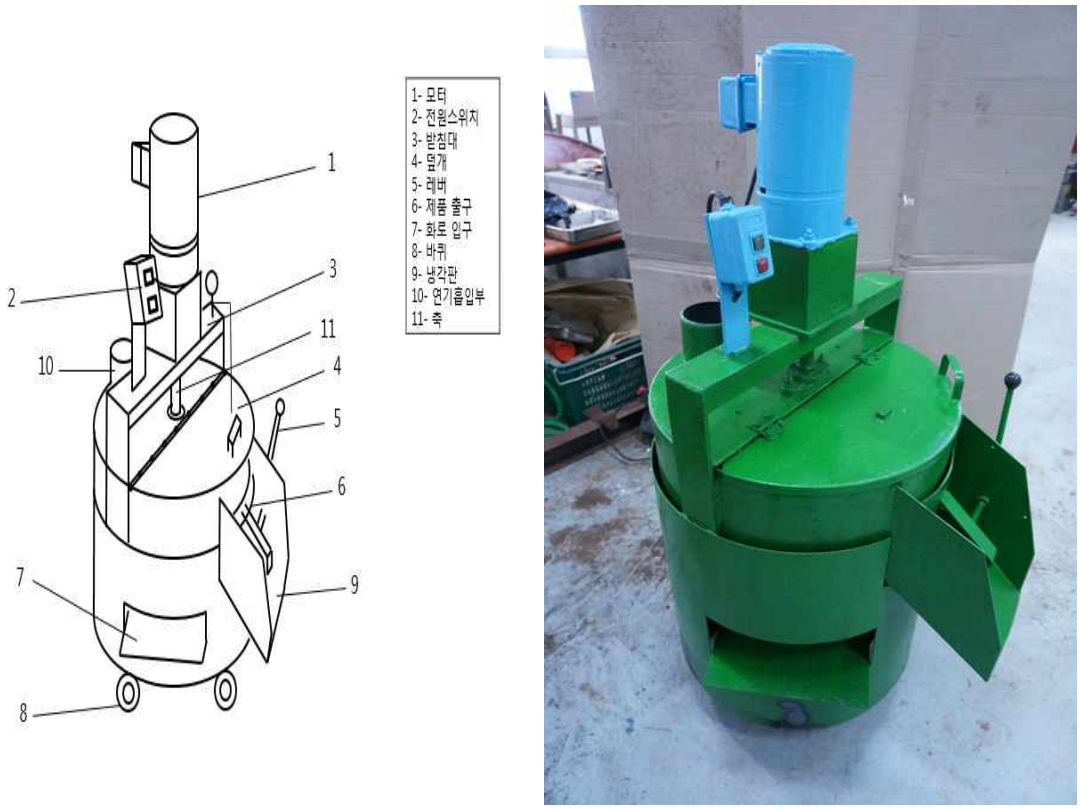
d. 모래와 PET 코팅 e. 상온에서 굳히기 f. 재활용 PET 골재 완성

<그림 4-2-1> 뒤채움재의 제조 방법 [23]

<그림 4-2-1>은 1차 가공 처리한 폐 페트병 조각들이 뒤채움 재료로서 제작되는 과정을 나타낸 것이다. 먼저 (a)에 재활용 페트 원료를 준비한다. (b)에서와 같이 가열도구를 이용하여 페트병을 코팅하기 위한 주문진 표준사를 준비한 후 모래위에 1차 가공 처리된 폐 페트병 조각을 올려놓고 성형이 가능한 상태가 될 때(약 270) 까지 가열한다. 그 후 <그림 4-2-1>의 (d) ~ (f)처럼 모래가 플라스틱 표면에 골고루 코팅이 되도록 저어준 후, 상온에서 굳히는 과정을 거치면 타원형 모양의 뒤채움 재료가 완성된다[23].

나. 대량의 PET 골재 제조

대용량의 페트 골재를 제작하는 방법은 소량의 페트 골재를 제작하는 원리와 같으며, 교반방식에 있어서 차이가 있다. 다음 그림은 PET골재의 제조기의 모식도 및 실제모습을 나타낸 것이다.



(a) PET골재 제조기의 모식도 (b) PET골재 제조기의 실제 모습

<그림 4-2-2> PET 골재 제조기

코팅 혼합재와의 되메움토와의 혼합은 중량비에 따라 96:4(되메움토:혼합재)로 현장혼합한다.

2. 경제성 효과 분석

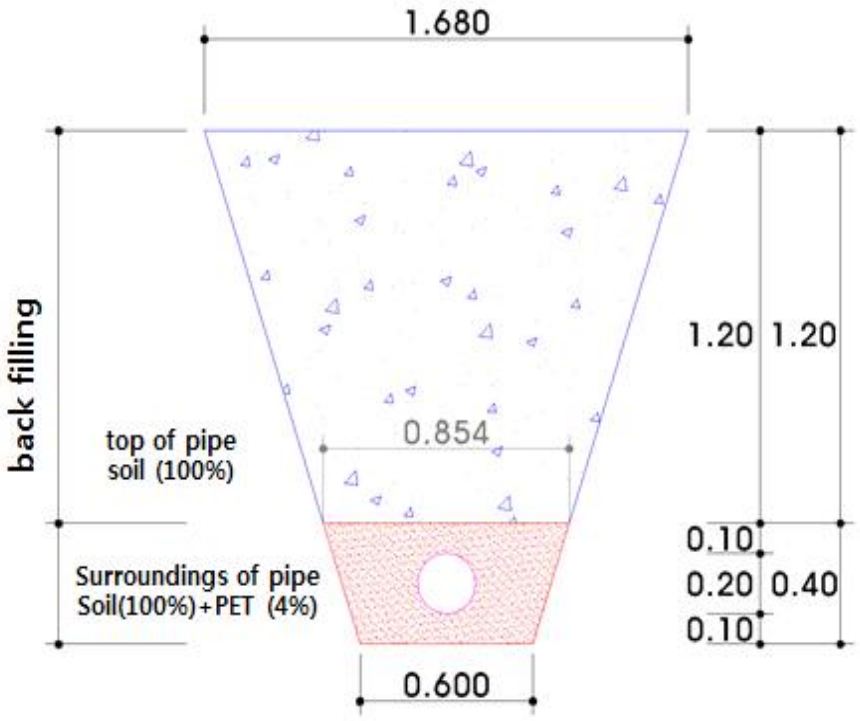
가. 상수관 공사시의 단면 구성

옹벽의 뒤채움재나, 상수도 뒤채움, 그리고 도로의 동상방지층 등 동상방지재를 사용하여 설계·시공함에 있어서 재료의 성능 및 효과뿐만 아니라 경제적인 문제 또한 고려해야 할 사항이다.

본 장에서는 상수도관 공사시의 단면을 계획하여 공사구간 1m당 소요되는 재료비에 대한 경비 산출을 통해 경제성 효과 분석을 하였다. 경제성 평가에 사용된 재료는 상수관의 동파방지를 위해 포설되는 모래와, 이 연구에서 효과가 가장 좋았던 PET Fiber이다.

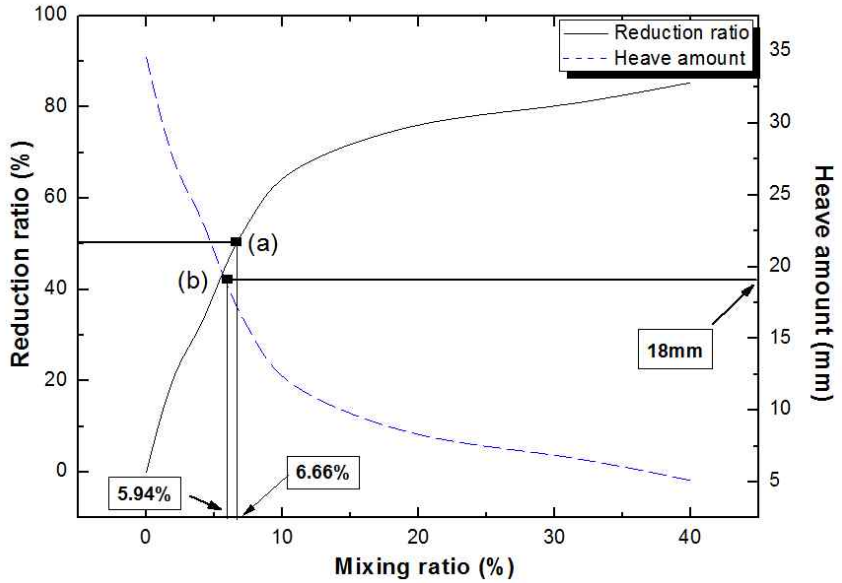
<그림 4-2-3>은 200mm 상수도관 매설 공사시의 단면도를 나타낸 것이다. 단면의 구성을 살펴보면 장폭이 1680mm, 단폭이 600mm, 높이가 1600mm로써 사다리꼴 형태로 구성되어있으며, 노무비 및 기계장비에 대한 비용을 제외하고 재료비에 대해서만 단가산출을 하였다.

뒤채움재는 <그림 4-2-3>의 빗금쳐진 하단부에 포설이 되며, 관이 차지하고 있는 부분을 제외한 상수관 1m당 공사당 단위 부피는 0.26 이다.



<그림 4-2-3> 상수도관 공사시의 단면 구성도

나. 페트 골재의 동상팽창량 저감률 산정



<그림 4-2-4> PET Fiber의 혼합비에 따른 동상팽창량 및 감소율

다. 채움재의 종류에 따른 경제성 효과 분석

<표 4-2-1> PET Fiber와 모래의 시공비 비교

항목		내용	
		모래	PET ball
비용	터파기량	$.26m \times 7000 \quad RW/m^3 = 1,820KRW$	$0.26m^3 \times 7000KRW/m^3 = 1,820KRW$
	재료비	$0.26m^3 \times 20000KRW/m^3 = 5,200KRW$	$0.26m^3 \times 1.3 \times 10^3 kg/m^3 \times 0.04 \times 823KRW/kg = 11127KRW$
	다짐비	$0.26m^3 \times 1000KRW/m^3 = 260KRW$	$0.26m^3 \times 1000KRW/m^3 = 260KRW$
	총계	$7,200KRW + \alpha$	$11,127KRW$
장점		• 구매용이 • 다짐효과 • 편리한 시공성	• 동상팽창량 감소효과(50%) • PET Fiber에 의한 다짐효과 증대 • 현장 유용토의 재사용
단점		• 동상팽창발생 • 보수비 발생	• 기준 부족 • 사전조사 필요
비고			• 재료 생산단가가 고려되지 않음

표 <4-2-1>은 상수관의 채움재로 쓰이는 모래와 이 연구에서 개발한 채움재를 상수관 공사 시 적용했을 때의 재료비에 대한 경제성 평가 분석을 나타낸 것으로 모래의 경우 7200원, PET ball의 경우 11,127원으로 분석 되었다. 하지만, PET ball은 재료적인 측면에 한하여 경제성 평가가 된 것으로 실제 골재 적용시 재료생산단가를 고려하면 비용적인 측면에서 상당한 부담이 될 것으로 사료된다. 따라서 PET ball은 해가 들지 않는 음지 지역의 건물로 연결된 지선이나 지하수 유입지역, 동결깊이 하강지역 등등 동파가 우려되는 지역에 비용을 고려하지 않고 한정적으로 사용시에 효과를 나타낼 것으로 사료된다.

3절 채움재료의 시공에 대한 다짐 기준 및 적용재료 기준

1. 연구개요

우리나라는 계절적 동토지역에 속하는데 거의 매년 겨울철이면 지반이 동결하면서 도로, 철도, 수도관 등의 시설물이 동상에 의한 피해를 입고, 해빙기가 되면 얼었던 지반이 녹으면서 융해침하에 의한 피해를 입고 있다.

이러한 피해로 공공시설물의 수명이 단축되거나 기능을 제대로 발휘하지 못하게 되고, 심지어는 교통사고를 일으키는 원인도 되며, 나아가서는 시민생활에 많은 불편을 초래할 뿐 아니라 이러한 피해를 복구하기 위하여 별도의 국가 예산을 투자해야 하기 때문에 겨울철 및 해빙기의 재해 방지 대책에 관해서 결코 소홀히 대처할 수 없는 실정이다.

기온이 이하로 장기간 계속되면 지표면 부근의 흙의 간극수가 차츰 얼기 시작한다. 이때 모세관 현상에 의해 얼지 않는 지중으로부터 수분이 동결면으로 이동하면서 빙정이 생기고, 이 빙편이 점점 커지면서 수량도 증가하여, 지반이 팽창하게 되는데 이러한 현상을 동상 이라고 한다. 물이 얼면서 체적은 9%만 팽창하지만 간극수가 얼면 하부로부터 모관수가 계속 공급되면서 체적이 250% 이상 팽창되기도 한다. 이로 인해 도로포장이 파손되기도 하고 수도관 파열 철도, 매설관 주택 등이 융기하기도 하는 피해가 일어난다.

따라서, 본 연구에서는 TRRL 판정기준을 이용하여 채움재료의 종류와 다짐도에 따른 동상 메커니즘을 규명하기 위해 실내실험을 통하여 각 재료의 동상 민감성 실험 후에 상수도관 모형토조 실험을 현장과 동일한 조건을 구성하여 제한된 조건 하에서 동상팽창량에 대한 분석을 실시하였다.

2. 실내실험을 통한 동상팽창량(Heave amount)특성분석 방법

가. 실대형 모형토조의 구성

(1) 모형토조 및 대형 냉동챔버

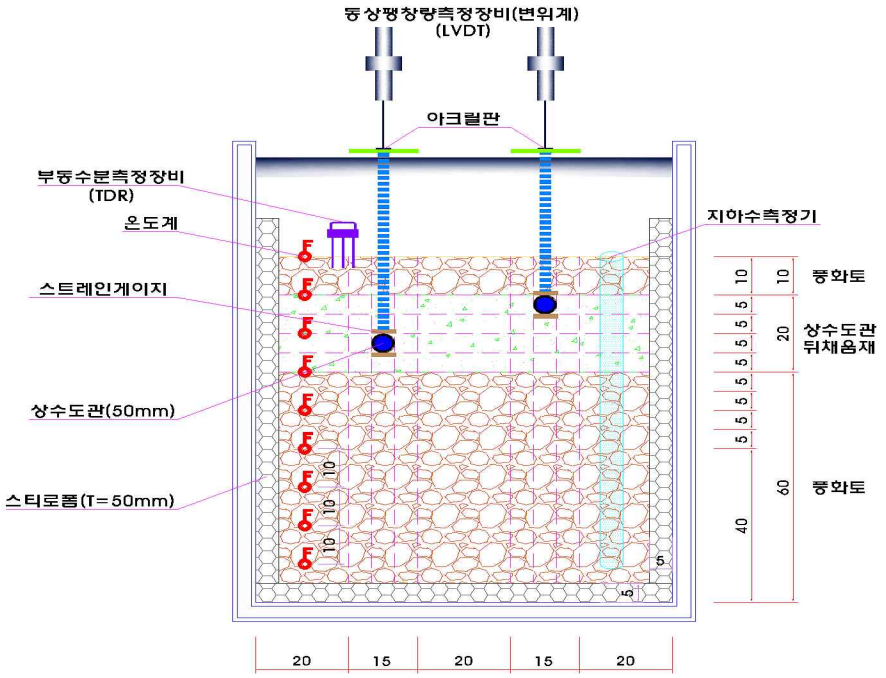
동결 지반에서 다짐도에 따른 매설관주위의 실제 거동을 확인하기 위한 방안으로 실대형 모형실험을 실시하였다. 실대형 모형실험은 <그림 4-3-1>과 같은 대형 냉동챔버에서 수행되었으며 동결 온도를 유지하기 위하여 -20℃ ~ +10℃의 온도 유지가 가능한 길이 3.2 m, 폭 3.2 m 높이 2.4 m의 대형 냉동고를 활용하여 -15℃에서 실험을 수행하였다. 그림 2.2와 같은 길이 0.9 m, 폭 0.9 m, 높이 0.9 m의 실험용 토조를 실제 상수도관의 형상과 유사하게 구성하여 채움재료별 다짐조건에 따른 동상팽창량 등과 같은 동상 특성 분석을 실시하였다. 현장조건을 반영한 일차원 열

전도를 재현하기 위해 토조의 주변부와 하부에 단열재로 5 cm 스티로폼을 설치하였고, 단열재 설치 후 간극내의 침투수의 조건을 적용하기 위하여 누수방지를 위한 플라스틱 비닐을 사용하였다.



(a) 실대형 냉동 챔버 (b) 냉동고 콘솔

<그림 4-3-1> 대형 냉동 챔버



<그림 4-3-2> 상수도관 모형실험 토조 단면구성 모식도

매설관 주위의 동상 팽창량을 관측하기 위하여 스테인레스관 근처의 지중에 LVDT를 설치하여 매설관 주위의 변형을 직접적으로 관측하였다.

(2) 다짐조건 및 다짐도확인

<그림 4-3-3>의 (a)는 현장조건을 반영한 일차원 열전도를 재현하기 위해 토조의 주변부와 하부에 단열재로 5 cm 스티로폼을 설치하였고, 단열재 설치 후 누수방지를 위한 플라스틱 비닐을 설치하였다. <그림 4-3-3>의 (b)는 진동 햄머 다짐기는 가로 10 cm 세로10 cm로 된 다짐강판을 부착하여 타격횟수는 2670회/min로 다짐을 하였으며 각 층마다 눈금을 설치하여 다짐상태를 조절하였다. 다짐도를 확인하기 위하여 모래 치환의 현장밀도 시험 KS F 2311 실험을 하여 다짐도는 90%, 80%로 유지 하여 각 재료별로 실험을 진행하였다.



(a) 단열작업 (b) 진동 햄머 다짐

<그림 4-3-3> 토조 단열 방수 작업 및 다짐

(3) 동상 팽창량 측정 방법

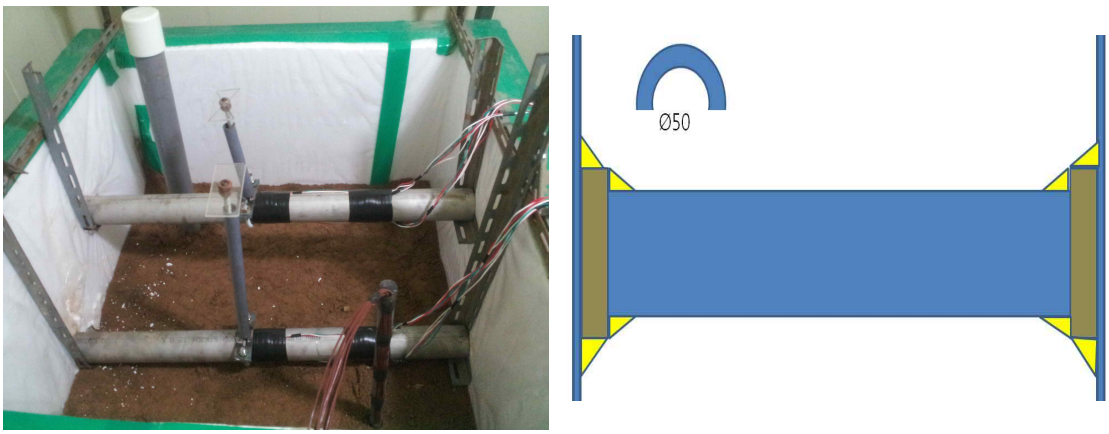
<그림 4-3-4>는 동상팽창량 측정을 위한 LVDT를 장착한 시료에는 직경 10 cm의 아크릴판으로 (linear variable differential transformers: LVDT) 측정판을 만들어 시료 위에 올려놓아 최대한 적은 하중으로 시료 팽창량의 구속을 줄였으며 시료가 팽창했을 때 가장 많은 팽창이 일어난 부위를 효과적으로 측정할 수 있게 하였다.



<그림 4-3-4> LVDT를 이용한 지표의 변위 관찰

(4)상수관의 종류 및 매설방법

실험에 사용한 상수도관은 배관용 스테인리스 강관 Ø50를 80 cm <그림 4-3-5>에서와 같이 설치하였다. 상수관 설치 시 수평을 유지하기 위하여 수평계를 이용하였으며 양끝 단을 무한대의 관으로 보기위하여 선단을 만들어 용접하였다.



(a) 스테인리스 관 매설 (b) 스테인리스 관 모식도

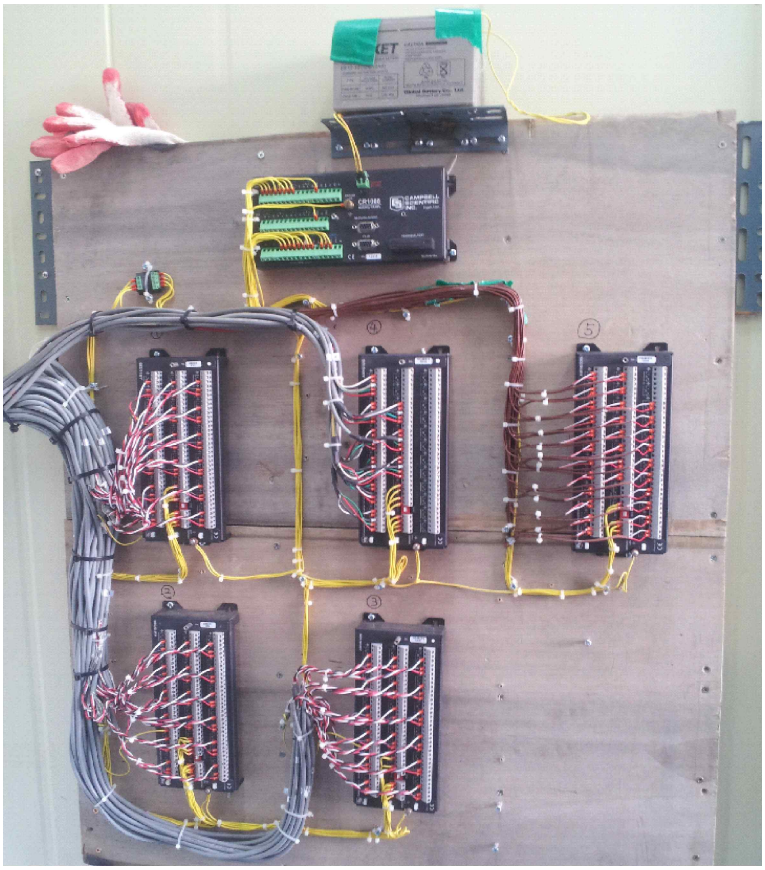
<그림 4-3-5> 스테인레스관의 매설 방법 및 모식도

<표 4-3-1> 스테인리스 관의 특성

구분		배관용스테인리스관
관련규격		KS D 3576
개요		스테인레스 강관에 유동성을 갖게하여 가동부를 이용하여 자유로운 배관 형태를 만들 수 있어 이음부 없음
제품형상		
제품성질		강성관
제품제질		내・외부: 철+니켈+크롬합성금속
구조		고무패킹으로 수밀을 유지하고 외력에의한 관의 축방향과 횡방향을 흡수하는 2중구조의 연결방식 관
공학적특성	중 량	중량이 가볍다
	수압 (Kgf/㎠)	25
	인장강도 (Kgf/㎠)	5,300이상
	압축강도 (Kgf/㎠)	3,000~5,000
	연신율 (%)	25이상
	열팽창계수 (mm/m℃)	1.73X10-5(170%)

(5) 데이타 수집장치

수집 장치는 채널 확장기와 데이터 로거로 구성된다. 함수센서와 온도센서는 포장체의 온도와 함수비를 측정하게 되는데, 이때 함수비와 온도는 아날로그신호로 계측 되며, 데이터로거는 아날로그신호 형태의 계측 결과를 디지털 신호로 전환하는 역할을 한다. 또한 디지털 신호로 전환된 계측결과를 온도와 함수비(volumetric moisture content: VMC)로 연산하고, 내부메모리에 통계 처리된 결과를 저장하는 역할을 하게 된다. <그림 4-3-6>은 컨트롤 박스 내 CR1000 데이터 로거를 배치한 내부 구조를 나타낸 것이다.



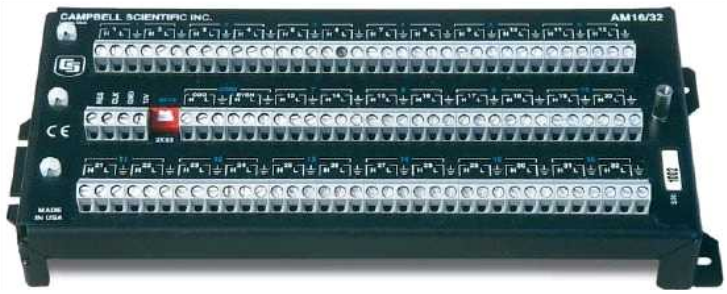
<그림 4-3-6> **컨트롤 박스**

본 연구에 사용한 데이터 로거는 <그림 4-3-7> CR1000으로 컴퓨터와 주기적으로 동기화 되어 있으므로 윈도우 프로그램을 통하여 계측 시간을 수정할 수 있다. CR1000 데이터 로거는 14개 채널을 갖고 있기 때문에 CR1000에 연결할 수 있는 계측센서는 최대 14개 이지만 본 연구에서 구축하는 현장 계측시스템에서 설치된 자동 계측 센서는 대기온도센서, 지중 온도센서로 많은 채널이 필요하기 때문에 <그림 4-3-8>의 Multiplexer(AM16/32B) 채널 확장기를 통하여 데이터 로거에 연결할 수 있는 계측 센서 숫자를 확장하기 위하여 적용하였다.



(a) 데이터로거 (b) CR1000

<그림 4-3-7>자동 계측데이터 수집기



<그림 4-3-8> Multiplexer(AM16/32B)

나. 흙 시료의 공학적 특성 및 실험 조건

(1) 흙 시료의 공학적 특성

본 실험에서 사용된 노상토용 화강풍화토는 4.75 mm 체를 모두 통과한 시료를 노건조 시킨 후 수분으로 인해서 뭉쳐진 흙덩이들을 고무망치로 부수고, 표준체를 사용하여 입자 크기별로 각각 분류하였다. 각각의 물리적 성질을 파악하기 위한 실내실험은 한국공업규격 KS F에 명시된 표준시험방법에 의거하여 실시하였다. 노상토용 재료로 사용한 화강풍화토의 자연함수비는 16.47%이고, 비중은 2.66으로 판명되었다. 사용된 시료의 시험 결과, 균등계수(C_u)는 10.0, 곡률계수(C_g)는 1.23으로 입도분포가 불량한 것으로 나타났다. 따라서, 통일분류법(USCS)에 의하여 이 흙은 SC으로 나타났다. 다짐시험결과, 최적함수비($_{opt}$)가 14.7%, 최대건조단위중량(γ_{dmax})은 1.67 t/m3을 나타내었다. 같은 방법으로 모래와 PET골재에 대한 공학적 특성 분석을 실시하였으며 <표 4-3-2>는 풍화토 및 모래, 그리고 PET 골재를 첨가한 풍화토에 대한 실험 결과를 나타낸 것이다. PET 골재는 기존의 실험 결과에 의해 최적의 효과를 낼 수 있도록 무게대비로 6%를 사용하였다.

<표 4-3-2> 각 채움재별 공학적 특성

시료의 종류	비중	최적함수비	최대건조단위중량	통일분류법 (USCS)
모래	2.67	8.26	1.56	SP
화강풍화토	2.66	14.7	1.67	SC
풍화토 + PET 코팅 채움재	2.68	14.866	1.757	-

(2) 실내실험 조건

실내실험은 4장 3.2절에서 언급하였던 것처럼 모형토조를 이용한 동상팽창량 실험을 수행하였으며, 각각의 모형토조별 채움재의 종류 및 다짐도의 조건은 다음 <표 4-3-3>과 같다.

<표 4-3-3> 동상팽창량 실험 조건

모형토조 No.	채움재의 종류	수분조건	비고
Section-1	풍화토	최적함수비	다짐도 80%, 다짐도 90%
Section-2	모래	최적함수비	
Section-3	모래	노건조된 흙 (함수비 미 고려)	
Section-4	풍화토 + PET 코팅 골재	최적함수비	

Section-1, Section-2, Section-3, Section-4는 동일하게 하부에서부터 60 cm를 화

강풍화토로 포설하고 Ø50 mm의 스테인리스관을 지중에서 20 cm인 곳에 매설하였다. 각각의 Section에 대하여 다짐도는 80%와 90%를 적용하여 실험을 수행하였고, Section-1의 관 주변은 화강풍화토를, Section-2과 Section-3은 모래를, Section-4는 화강풍화토에 재활용 PET 골재 6%를 혼합한 혼합토를 포설하였다. Section-2와 Section-3은 간극수가 동상팽창량에 영향을 주는지에 대한 실험으로 Section-2는 최적함수비를 적용하여 포설하였고, Section-3은 노건조 상태의 시료를 이용하여 포설하였다.

3. 실내실험을 통한 동상팽창량 실험 결과

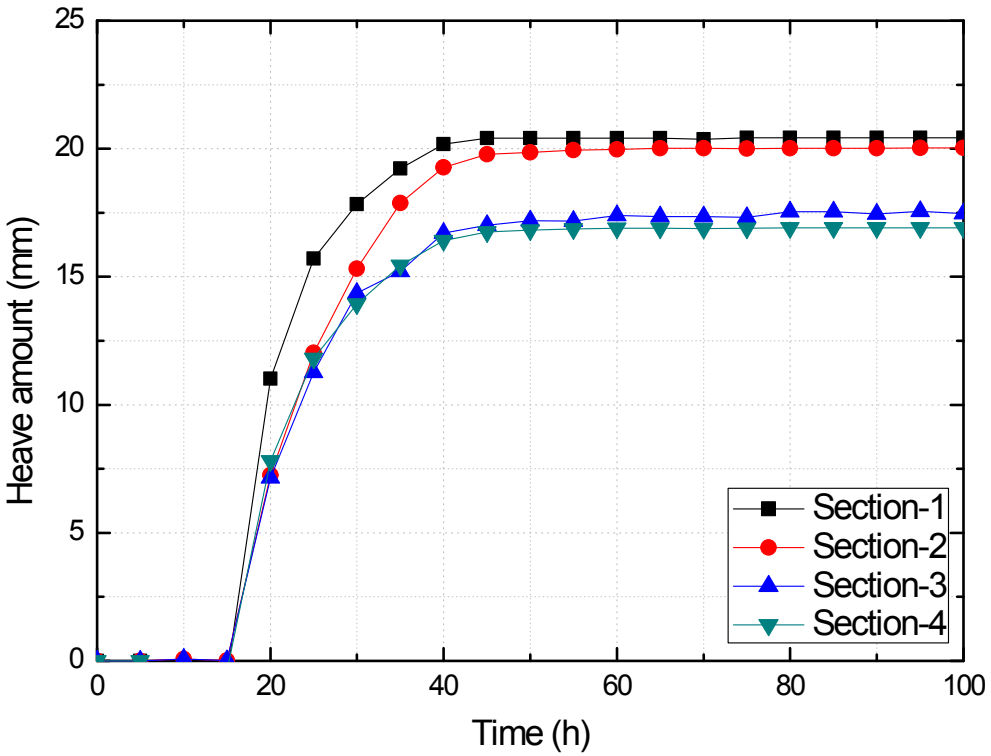
가. 다짐도 90%일 때, 각 채움재별 동상 팽창량 분석

<그림 4-3-9>은 90%의 다짐조건일 때, 채움재의 종류별로 동상팽창량을 나타낸 것이다.

Section-1 경우 화강풍화토와 Section-2는 모래로 구성되어 있으며 일반적인 화강풍화토와 모래의 경우 모세관 현상에 의한 지하수의 유입으로 부동수분을 제외한 일정한 수분의 동결로 동상이 더 크게 일어난 것으로 보인다. <그림 4-3-9>에서 Section-1은 40시간 이후 최대 20.46 mm의 팽창량을 보였으며 Section-2의 48시간 이후 최대 19.86 mm의 팽창량을 보였다.

Section-3은 지하수가 유입하지만 배수가 가능한 상태를 모사한 것으로, 48시간 이후 최대 17.41mm의 팽창량으로 Section-1과 Section-2의 동상팽창량보다 적게 나온 것을 확인하였다. Section-3의 동상팽창량이 작은 이유는 동상팽창량은 모세관 현상에 의한 지하수의 지속적인 수분공급이 큰 영향을 미치는데, 실험조건에 의해 모세관현상에 의한 지하수의 지속적인 수분공급이 이루어지지 않았기 때문이라는 것을 알 수 있다.

Section-4는 44시간 이후 최대 16.87 mm의 팽창량을 보였다. 재활용 PET의 경우 다른 흙에 비하여 자체 함수비가 적고 그 이유로 인하여 수분을 많이 포함하지 않으므로 동상 팽창량이 적게 발생한 것으로 판단된다. 일반적인 흙의 성질은 일정한 영하의 온도에서 충분한 수분의 공급이 지속되면 동상량이 점점 커진다. 특히 영하의 온도에서도 저면의 흙속에 부등한 상태의 물로 지하수위가 존재하면 물은 모세관 현상에 따라 일정하게 흙의 표면을 따라 상승하여 영하의 온도에 영향을 받는 상부로 유입되면 동결을 일으킨다.



<그림 4-3-9> 다짐도 90%일 때, 각 채움재료별 동상팽창량

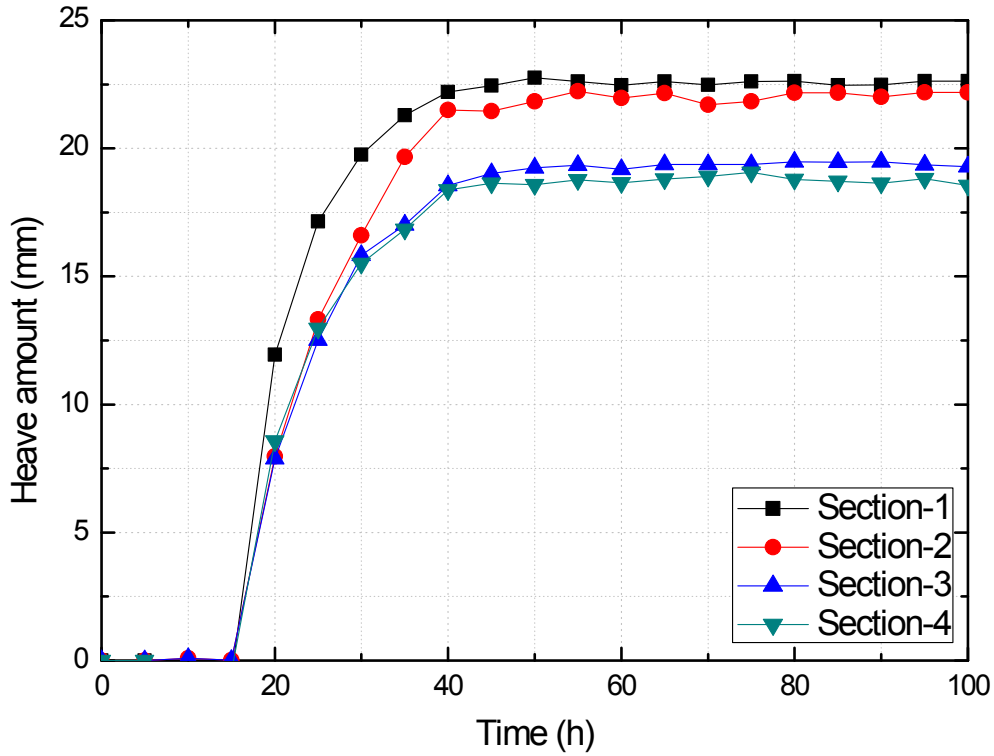
나. 다짐도 80%일 때, 각 채움재별 동상 팽창량 분석

<그림 4-3-10>은 80%의 다짐조건일 때, 채움재의 종류별로 동상팽창량을 나타낸 것이다.

다짐도 90%의 조건과 마찬가지로 화강풍화토와 모래로 구성되어 있는 Section-1과 Section-2는 지하수의 유입으로 부동수분을 제외한 일정한 수분의 동결로 동상이 더 크게 일어난 것으로 보인다.

Section-1은 최대, 22.71mm, 지하수의 유입이 있는 모래조건인 Section-2는 최대 22.12mm, 지하수의 유입이 없는 모래조건인 Section-3은 19.42mm, 풍화토에 PET 코팅 골재를 첨가한 Section-4는 18.86mm의 동상팽창량을 보였다.

전체적으로 재움재료의 종류별 동상팽창량을 확인하면 다짐도 90%일 때보다 80%일 때의 동상팽창량이 높은 것으로 확인되었다.



<그림 4-3-10> 다짐도 80%일 때, 각 채움재료별 동상팽창량

다. 채움재료의 종류에 대한 다짐도별 동상팽창량 특성 분석

<표 4-3-4>은 다짐도에 대한 채움재료별 동상팽창량을 나타낸 것이고, <그림 4-3-11>은 다짐도에 대한 채움재료별 동상팽창량에 대하여 TRRL기준을 나타낸 것이다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

○ Section-1

화강풍화토 조건인 Section-1은 90%상대다짐도 대비 80%상대다짐도의 동상팽창률은 11.0%가 증가하였다고 TRRL 기준(48시간동안 18mm이상인 경우)으로 상대다짐도 90%와 80%의 두 조건 모두에서 동상에 대하여 민감한 것으로 판단된다.

○ Section-2

지하수유입이 있는 경우의 조건인 Section-2는 90%상대다짐도 대비 80%상대다짐도의 동상팽창률은 11.4%가 증가하였다고 TRRL 기준(48시간동안 18mm이상인 경우)으로 상대다짐도 90%와 80%의 두 조건 모두에서 동상에 대하여 민감한 것으로 판단된다.

○ Section-3

지하수유입이 없는 경우의 조건인 Section-3은 90%상대다짐도 대비 80%상대다짐

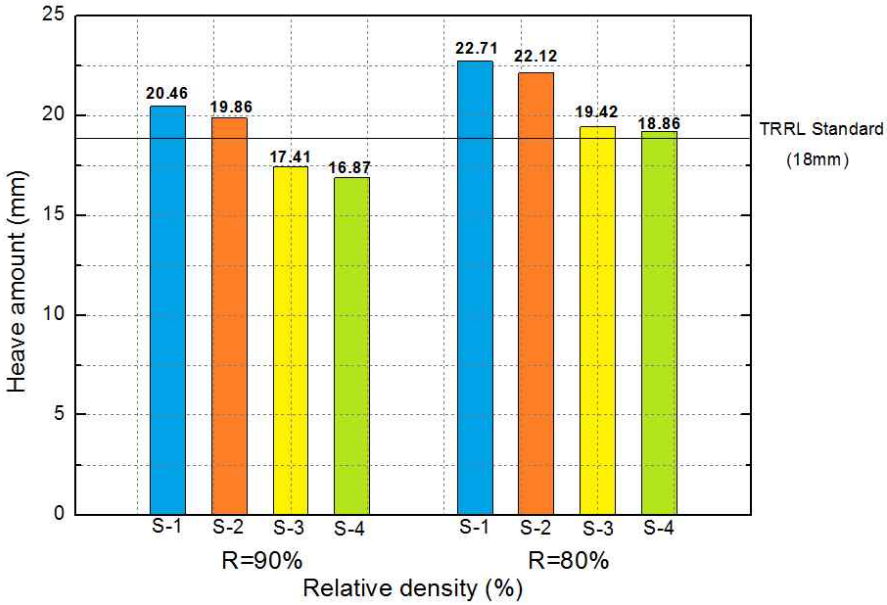
도의 동상팽창률은 11.6가 증가하였다고 TRRL 기준(48시간동안 18mm이상인 경우)으로 상대다짐도 90%일 때는 TRRL 기준을 만족하였으나 80%의 조건일 때는 동상에 대하여 민감한 것으로 판단된다.

○ Section-4

화강풍화토에 PET 코팅 골재를 사용한 Section-4는 90%상대다짐도 대비 80%상대다짐도의 동상팽창률은 11.8가 증가하였다고 TRRL 기준(48시간동안 18mm이상인 경우)으로 상대다짐도 90%일 때는 TRRL 기준을 만족하였으나 80%의 조건일 때는 동상에 대하여 민감한 것으로 판단된다.

<표 4-3-4> 동상팽창량 실험 결과

상대다짐도 (R) (%)	동상 팽창량			
	Section-1	Section-2	Section-3	Section-4
80	22.71	22.12	19.42	18.86
90	20.46	19.86	17.41	16.87
00%− (80%)/R(90%)	11.0%	11.4%	11.6%	11.8%



<그림 4-3-11> 다짐도에 따른 각 채움재료별 동상팽창량

4. 결론

동상팽창량 실험을 통하여 채움재료별 다짐조건에 대한 실험을 실시한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 화강풍화토를 채움재로 사용할 경우 TRRL기준에 따라 48시간동안 18mm이상의 팽창량이 발생하므로 동결깊이 이하로 상수관 매립시, 90%의 상대다짐도와 80%의 상대다짐도 두 조건에서 모두에서 동상에 대한 민감성이 높아 동상에 대한 피해가 우려되므로 동결깊이 이상에 상수관을 매립해야한다.

- 수분을 함유한 모래를 채움재로 사용할 경우 TRRL기준에 따라 48시간동안 18mm이상의 팽창량이 발생하므로 동결깊이 이하로 상수관 매립시, 90%의 상대다짐도와 80%의 상대다짐도 두 조건에서 모두에서 동상에 대한 민감성이 높아 동상에 대한 피해가 우려되므로 동결깊이 이상에 상수관을 매립해야한다.

- 수분을 함유하지 않은 모래를 채움재로 사용할 경우 TRRL기준에 따라 80% 다짐도에서는 48시간동안 18mm이상의 팽창량이 발생하고, 90%의 다짐도에서는 18mm이하의 팽창량이 발생하므로, 동결깊이 이하로 매립된 경우에도 90%이상으로 다짐도를 유지한다면 동상에 의한 피해가 감소될것으로 판단된다.

- 화강풍화토와 PET 코팅 골재를 혼합한 채움재를 사용할 경우 TRRL기준에 따라 80% 다짐도에서는 48시간동안 18mm이상의 팽창량이 발생하고, 90%의 다짐도에서는 18mm이하의 팽창량이 발생하므로, 동결깊이 이하로 매립된 경우에도 90%이상으로 다짐도를 유지한다면 동상에 의한 피해가 감소될 것으로 판단된다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

1절 연구결과의 활용방안

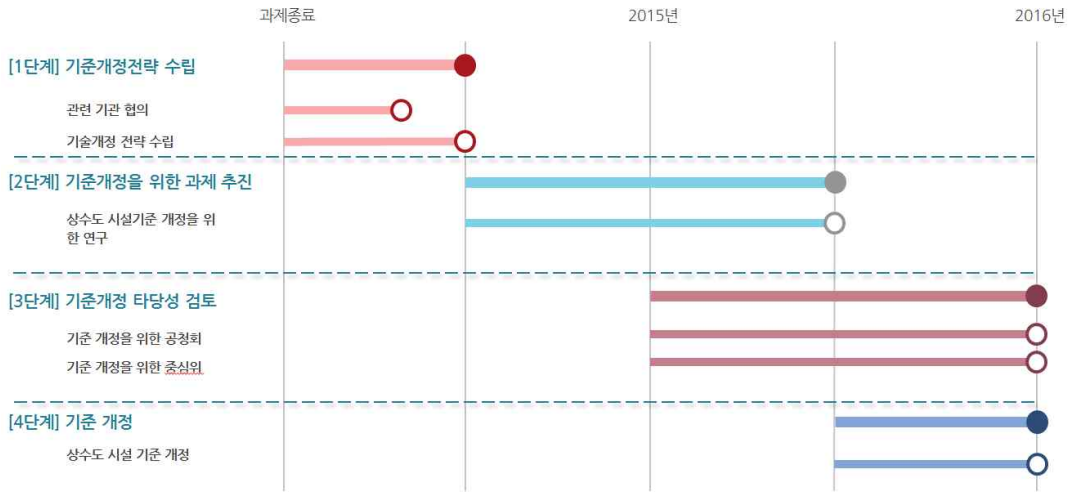
1. 연구결과의 활용방안

- 상수도관 설계기준 및 시방서에 반영
- 상수도관 매설시 동상 피해를 저감시키는 단열성 채움재료개발
- 동상 적용 구조물의 거동평가에 대한 실험 기술력 증대
- 동계 상수관 동파로 발생하는 유지 보수 비용의 절감과 유지 보수 기간에 발생하는 민생 불편 완화
- 동상 선진국의 핵심기술에 대한 국내 기술력 확보
- 지역적 기후적 조건을 고려한 동결 깊이 산정
- 단열성 채움재료를 활용한 상수도관 매설 신공법 확보
- 미래에너지 확보를 위해 국내 자원개발업체들이 동토지역 에너지 파이프라인 건설 공사 진출 시 참고 자료로 활용



<그림 5-1-1> 연구결과의 활용방안 및 기대효과

- 상수도관 매설 설계 및 시공지침 개선안에 따른 상수도 시설기준 개정
- 국가건설기준센터와 연계 및 유관기관(환경부, 한국상수도협회)과의 협의를 통한 상수도 시설기준 개정 추진



<그림 5-1-2> 상수도 시설기준 개정을 위한 추진 계획(안)

2절 기대 성과 및 파급효과

1. 기술적 측면

- 국내 지역별 토질에 대한 동상에 대한 거동특성을 파악하여 향후 동상 특성연구 및 기술 개발사업 수행 시 기초자료로 활용.
- 동상 저감상 채움재료의 특성 평가 및 적용 기술의 개발을 통하여 향후 극지 및 북방지역의 진출시의 기초지반 구성에 대한 기술 노하우(know-how)가 축척.
- 지역에 따라 양지와 음지의 동결심도 특성을 각각 판단하고 제안함으로써 상하수도관거 및 기타 지하구조물 부설시 구조물의 파괴 예측 기초자료 확보
- 국내 상수도관거의 동파방지를 위한 설계·시공기준안 제시를 통한 안정성 있는 상수도 매입 기준 제시
- 동토지역 관거 및 지하 구조물 설계 및 시공 능력의 축적

2. 경제 산업적 측면

- 동파상수관의 비율을 저감함으로 써 매년 발생하는 동파 관거의 교체를 위한 유지 보수 비용의 축소 및 최적 상수관거의 매입 깊이를 지역별로 산정함으로 써 관거 매설 공사의 굴착비용의 절감
- 겨울철 동파를 저감함으로써 관파열부의 누수량 감소
- 동상 저감 채움재료의 적용성 분석을 통한 매입공사의 굴착비용 절감
- 동토구간의 매설관의 토압 및 동상압에 의한 관거의 응력거동을 파악함으로써 동아시아 및 극지방등의 영구동토 건설 공사선점할 수 있는 기초 기술 확보
- 미래에너지 확보를 위해 국내 자원개발업체들이 동토지역 에너지 파이프라인 건설 공사 진출 시 참고 자료로 활용

3. 사회문화적 측면

- 이상한파의 지속으로 야기되는 상수도관의 동파로 인한 민원 빈도 축소
- 전문인력의 연구 인프라 구축과 다학제간 영역의 융합학문 발전 기대
- 동파 상수관 발생 빈도 축소로 인한 동계 국민 생활 불편 발생 빈도축소
- 국제 학술 교류 증진 및 질적 연구능력 향상

제 6 장 연구개발 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

1절 국외 상수도관 동파 관련 기준 조사 (미국, 캐나다, 유럽)

국외에서 상수도관의 동파방지를 위한 기준 현황을 조사하여 국내 상수도관 동파방지 관련 기준과 비교하였다. 국내외 현황 조사를 토대로 상수도관 동파를 방지 관련 설계 및 시공방안의 방향을 결정하고자 하였다.
국외 현황조사를 위해 검토된 조사 자료 중 미국, 캐나다, 유럽을 조사한 자료는 <표 6-1-1>과 같다. 상하수도, 구조물, 지반재료 등 상수도관과 연관이 있는 다양한 분야에 대해 다각적인 조사를 진행하였다.

<표 6-1-1> 국외 상수도관 동파 관련 기준 List : 미국, 캐나다, 유럽

대상	자료명	발행기관, 저자
상하수도	AWWA(American Water Works Association) Specifications	미국 AWWA
	Water Pipeline Design Guidelines	캐나다 Saskatchewan 주
	Buried Pipe Design 2nd Ed.	A.P.Moser
구조물	ASCE 32-01 Design and Construction of Frost-Protected Shallow Foundation	ASCE
	Minnesota State Building Code	미국 Minnesota 주
	AASHTO LRFD Bridge Design Specification	AASHTO
	Eurocode 7 Geotechnical Design Part 1: General Rules (EU)	EU
지반 재료	ISSMFE	ISSMFE Conference

1. 상수도 관로 설계

국외 동파관련 기준을 확인하기 위하여 미국 AWWA(American Water Works Association)의 시방서 총 163개를 조사하였다. AWWA에서 출판한 모든 시방서는 상하수도 관로 자체의 설계 및 제작과 관련한 자료지만 지중 내 설치 기준 및 지반

의 동결깊이에 관련한 규정은 찾을 수 없었다.

캐나다 중부에 위치한 사스케치원(Saskachewan) 주의 상수도 설계 시방서(Water Pipeline Design Guidelines)에서는 13장 Depth of Cover에서 상수도 매설 시 고려해야 할 지반동결특성을 비교적 자세하게 다루고 있으며, 관련 내용은 <표 6-1-2>에 정리하였다.

<표 6-1-2> 캐나다 Water Pipeline Design Guidelines의 상수도 동파관련 기준

13. Depth of Cover	Water pipeline과 Service connection 상부 토층 두께는 최소한 지반의 동결깊이 이상이 되어야 한다 (예외: shallow-bury winter-drained systems).
	현재 사스케치원 주의 상수도관 상부 토층 두께는 지역에 따라 다르게 되어있다. 2.5 m: Swift Current, Moose Jaw, Regina and Weybern 2.7 m: Saskatoon, Biggar, Humboldt and Yorkton 3.0 m: Prince Albert and Nipawin 그러나 이건 예시일 뿐, 실제 피복깊이는 지반의 동결깊이를 산정하거나 유사한 상수도관의 설치 사례를 참고해서 결정해야한다.
	동결깊이는 흙의 종류, 함수비, snow cover, snow pack, 동결지수에 따라 결정된다. depth of cover는 wet areas와 sandier soils에서 증가한다. 이론적인 동결깊이 계산에 의한 설계보다는 성공적으로 운영되고 있는 유사한 구조물의 경우를 참고하는 것이 바람직하다.

현재 캐나다 사스케치원의 상수도관 상부 토층 두께는 지역별로 기준을 제시하고 있으며, 실제 상수도관 매설 시 상기 기준을 바탕으로 기존 설치 사례를 참고하여 해당 지역에 적합한 토피 두께를 결정하도록 하였다. 또한 흙의 종류, 함수비, 적설, 기후변화에 따른 동결지수 등에 따라 동결깊이가 어떻게 변화하는지에 대한 이론적 고찰이 가이드라인에 수록되어 있으나, 실제 현장 적용 시에는 기존 설계 및 시공 사례를 검토하여 적절한 동결깊이를 산정하도록 안내하고 있었다.

매설관의 설계에 관해 집대성한 도서인 “Buried Pipe Design(A.P.Moser, 2008)”에 대해서도 검토를 하였으며, AWWA 시방서들과 마찬가지로 관로 자체 설계에 대한 내용이 대부분인 것으로 확인되었다. 수록 내용 중 지중 매설관에 작용하는 외부하중 중 동결하중(frost loading)에 대한 설명이 간략하게 소개되고 있으며, 매설관 설계 시 지반의 동결특성을 확인하여 매설깊이를 결정하도록 하였다. 또한 동상압의 원리에 대한 설명과 함께 파이프의 강성(rigidity)에 따라 지반동결 시 관로에 작

용하는 최대 하중이 일반 하중의 2배까지 증가할 수 있음을 보여주며, 매설깊이를 동결면(frost line)보다 1~2ft(30~60cm) 아래로 정하기를 권장하고 있다.

2. 구조물 관련 기준

토목 및 건축 구조물 시방서에는 상수도 관로에 대한 기준은 제시되지 않으나 얕은 기초 등 일부 구조물에 대해 지반의 동결특성을 어떻게 고려하는지에 대한 방법론이 다수 수록되어 있으며, 이는 매설관 표토의 동결거동과 연관이 있어 별도로 조사를 하였다.

ASCE 기준(32-01 Design and Construction of Frost-Protected Shallow Foundation)에서는 동상 방지를 위한 얕은 기초의 설계 방안들을 자세하게 기술하고 있으며, 특별한 기준 제시는 없었다<표 6-1-3>.

<표 6-1-3> Minnesota State Building Code

1303.1600 FOOTING DEPTH FOR FROST PROTECTION	최소기초깊이: 토질역학에 능통한 엔지니어가 없는 경우, 최소 허용기초깊이는 Zone I은 5 ft, Zone II는 3.5 ft이다. (참고: Zone I이 더 북쪽에 있음)
1305.1805. FOOTINS AND FOUNDATIONS	벽체기초, 교각 및 다른 영구 기초는 반드시 아래 3가지 중 하나의 방법으로 동상 방지가 되어야 한다. 1. 최소기초깊이가 1303.1600을 만족해야 한다. 2. ASCE 32를 따른다. 3. 암반까지 근입

AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials) 기준에서는 얕은 기초가 동결깊이 아래에 위치해야 함을 규정하고 있으며, 동결깊이 결정을 위해서는 지역별로 제시된 최대 동결깊이 분포도(Contour Map)를 참조하도록 하고 있다. 교대, 교각, 벽체의 경우 하부 지반 흙의 동상성(frost susceptible)을 확인하여 동결깊이 아래로 설치를 하거나 비동상성(nonfrost susceptible) 흙으로 치환할 것을 제시하고 있다(<표 6-1-4>참조).

<표 6-1-4> AASHTO 기준

SECTION 10: 기초 (FOUNDATIONS)	얕은 기초는 반드시 동결깊이 아래에 위치하여야 하며, 동결깊이는 지역적 자료에 근거해야 한다.
SECTION 11: 교대, 교각, 벽체 (ABUTMENTS, PIERS, and WALLS)	벽체 하부 지반이 동상이 발생 가능한(frost susceptible) 흙인 경우, 벽체의 최소 근입깊이는 동결깊이 이상이 되어야 한다. 혹은 벽체 근입 부분을 동상이 발생 가능하지 않은 흙(nonfrost susceptible)로 치환해야 한다. 심각한 동결이 예상되는 경우, 교각 기초는 반드시 3.0 ft (90 cm)의 다짐된 굵은 골재에 위치해야 한다.

유럽의 동결피해 방지와 관련한 기준은 Eurocode를 참조하였으며, 채움재료에 대한 동상 가능성 판정, 기초의 동상 피해 방지를 위한 기준, 흙 댐의 동결피해 방지를 위한 방안들을 확인 할 수 있었다(<표 6.1.5> 참조)

<표 6.1.5> Eurocode 7 Geotechnical

5.3.2 Fill, dewatering, ground improvement and reinforcement	채움재 결정 시에는 저온 환경과 동상 가능성을 고려해야 하며,동상 및 팽창 가능성이 있는 흙은 채움재로 사용할 수 없다.
6. Spread Foundations	다음과 같은 경우 동상피해가 발생하지 않는다 - 동상 발생 가능성이 없는 흙인 경우 - 기초 깊이가 동결깊이 아래인 경우 - 단열로 인해 동상이 제거된 경우
12. Embankments	흙 댐 표층의 동결피해는 반드시 일정 수준으로 제한되어야 한다. 제방 관리 시에는 표층의 동상깊이를 계측해야 한다.

3. 지반재료 관련 기준

지중 구조물의 동결에 대한 피해를 방지하기 위한 접근법은 크게 1) 동결깊이 이하에 매설하는 방법과 2) 동결에 영향을 받지 않는 비 동상성 재료로 치환하는 방법으로 나뉜다.

동결에 영향을 받지 않는 비 동상성 재료를 판정하기 위해서는 동결에 따른 흙의 거동에 대한 이해가 선행되어야 하며, 미공병단(US Army TM 5-818-2-2, 1985)에서는 동상성 판단에 대한 기준을 아래와 같이 제시하고 있다. <표 6-1-6>은 동상 민감성 판정을 위해 세립분 함유량에 따른 흙의 동상성 판정 기준을 제시하고 있으며, 일반적인 통일 분류법과도 비교를 하였다.

<표 6-1-6> 동상민감성 판정 위한 흙의 분류(US Army TM 5-818-2-2, 1985)

동상 민감성	Soil type	세립분 함유량	일반적인 통일분류법
NFS *	(a)Gravels Crushed stone, rock	0~1.5	GW, GP
	(b)Sands	0~3	SW, SP
PFS **	(a)Gravels Crushed stone, rock	1.5~3	GW, GP
	(b)Sands	3~10	SW, SP
S1	Gravelly soils	3~6	GW,GP, GW-GM, GP-GW
	Sandy soils	3~6	SW, SP, SW-SM, SP-SM

S2	Gravelly soils	6～10	GW, GW-GM, GP-GW
	(a)Gravelly soils	10～20	GW, GW-GM, GP-GM
F1	(b)sands	6～15	SM, SW-SM, SP-SM
	(a)Gravelly soils	＞ 20	GW, GC
F2	(b)Sands, except very fine silty sands	＞ 15	SM, SC
	(c)Clays. PI>12	-	CL, CH
F3	(a)All silts	-	ML, MH
	(b)Very fine silty sands	＞ 15	SM
F4	(c)Clays, PI>12	-	CL, CL-ML
	(d)clays and other fine-grained	-	CL, CL-MLCL and ML; CL, ML, and SM; CL, CH and ML; CL, CH, ML and SM

※ *NFS* : 비동상성 흙
PFS : 동상이 발생 가능한 흙(동상성 판정을 위한 실내실험 필요)
S1 : 세립분 함량이 3～6%인 자갈질 흙
S2 : 세립분 함량이 3～6%인 모래질 흙
F1 : 세립분 함량이 6～10%인 자갈질 흙
F2 : 세립분 함량이 10～20%의 자갈질 흙(실트질 제외)
F3 : 자갈질의 흙이 0.02 mm보다 가는 입자를 20 %이하 가지고 있거나 모래인 경우 이것을 15%이하, 소성지수가 12%이하
F4 : 입경이 0.02 mm이하의 함량 15% 이상, 소성지수가 12% 이상

4. 국외 상수도관 동파 관련 기준 조사 : 일본

국외의 상수도관의 동파방지를 위한 기준 현황 조사를 위하여 일본의 기준들을 조사하였으며, 일본 수도협회에서 발간한 “수도설계지침”과 일본 하수도협회에서 발간한 “하수도설계지침”을 검토하였으며, “동북지방 다설(다설) · 한랭지 설비 설계 요령”도 검토하였다.

<표 6-1-7> 국외 상수도관 동파 관련 기준 List : 일본

대상	자료명	발행기관, 저자
상하수도	수도설계 지침	일본 수도협회
	하수도 설계 지침	일본 하수도협회
구조물	동북지방 다설(다설) · 한랭지 설비 설계 요령	동북지방청

“수도설계지침”과 “하수도설계지침”은 모두 매설관에 대해서 동결깊이 이하로 매설하는 것을 기준으로 하고 있으며, 그 외에 기준은 따로 제시하고 있지 않고 있다. “동북지방 다설(다설) · 한랭지 설비 설계 요령”에서는 동북지방 지역별 기상 데이터를 기준으로 최저기온이 -10℃ 이하인 ″한랭지 A″지역과 최저기온이 -5℃ 이하인 ″한랭지 B″ 지역을 구분하여 별도의 동결피해 방지 기준을 마련하고 있으며, 동결피해 방지를 위해 지중매설깊이를 동결깊이 이하로 결정하도록 하였다.

일본 기준의 경우 지반 동결에 의한 지중 매설물의 피해를 방지하기 위해서 주로 동결깊이 이하에 매설하도록 기준을 제시하고 있으며, 정확하고 신뢰성 있는 동결깊이 예측을 위해 많은 연구와 오랜 기간의 데이터 수집 작업을 수행해 왔다.

현재 일본에서 지중 매설물 설치를 위해 동결깊이를 결정할 경우 지역별로 정리된 “동결치환깊이 분포도”나 장기간의 데이터 수집을 통해 얻어진 경험식인 데라다의 동결깊이 산정식을 활용하고 있다. 이 외에도 꾸준한 데이터 수집을 바탕으로 지역별로 특화된 동결지수 데이터를 제시함으로써 동결깊이 결정에 대한 신뢰성을 높이고 동결깊이 아래에 매설된 구조물에 대한 동파 피해에 대한 안정성을 확보하고 있다(<표 6-1-8> 참조).

<표 6-1-8>동북지역 10년 확률 동결지수 일람표

아오모리현

地　名	凍結指数	標高(m)	地　名	凍結指数	標高(m)
大　間	79	14	鰺ヶ沢	78	40
むつ	148	3	深　浦	66	66
小田野沢	147	6	弘　前	155	30
今　別	99	30	黒　石	165	40
脇野沢	105	15	酸ヶ湯	805	920
市　浦	106	20	三　沢	127	39
蟹　田	165	3	十和田	152	42
五所川原	118	9	八　戸	104	27
青　森	113	4	碇ヶ関	218	145
野辺地	129	43	休　屋	138	408
六ヶ所	154	85	三　戸	100	38

니기타현

地　名	凍結指数	標高(m)	地　名	凍結指数	標高(m)
種　市	119	70	宮　古	53	43
軽　米	255	153	紫　波	173	170
二　戸	194	120	川　井	143	206
山　形	234	290	沢　内	261	327
久　慈	91	25	大　迫	194	140
荒　屋	273	310	山　田	64	4
奥中山	392	430	湯　田	222	250
葛　巻	302	390	遠　野	209	273
普　代	110	7	釜　石	23	15
岩　泉	114	112	若　柳	153	100
小　本	101	10	江　刺	146	42
藪　川	634	680	大船渡	24	37
雫　石	224	208	一　関	72	32
盛　岡	154	115	千　厩	91	77

아키타현

地　名	凍結指数	標高(m)	地　名	凍結指数	標高(m)
秋　田	77	－	岩見山内	119	55
能　代	52	6	角　館	136	56
鷹　巣	124	29	田沢湖	245	228
大　館	186	59	大正寺	92	20
毛馬内	45	126	大　曲	143	30
湯　瀬	192	236	東由利	94	117
八幡平	452	620	横　手	133	59
男　鹿	69	20	矢　島	60	72
大　潟	69	－3	湯　沢	142	96
五城目	78	6	湯の岱	192	320
阿仁合	192	120	八　森	49	31

야마카타현

地　名	凍結指数	標高(m)	地　名	凍結指数	標高(m)
差首鍋	192	90	楯　岡	83	100
金　山	164	170	左　沢	113	133
鶴　岡	－	16	山　形	59	152
狩　川	－	17	小　国	65	140
向　町	154	212	高　畠	122	220
肘　折	194	365	高　峰	127	250
尾花沢	110	110			

미야자키현

地　名	凍結指数	標高(m)	地　名	凍結指数	標高(m)
駒ノ湯	239	525	石　巻	47	43
気仙沼	82	62	新　川	144	264
築　館	77	25	塩　釜	62	105
米　山	89	5	仙　台	13	39
志津川	62	38	川　崎	116	200
大　衡	94	55	白　石	42	86
鹿島台	55	3			

후쿠시마현

地　名	凍結指数	標高(m)	地　名	凍結指数	標高(m)
茂　庭	66	250	船　引	90	460
桧　原	386	839	只　見	133	377
福　島	9	67	郡　山	16	230
喜多方	172	212	川　内	161	410
鷲　倉	658	1210	南　郷	213	540
飯　館	127	452	小野新町	160	433
猪苗代	221	521	田　島	243	570
金　山	100	324	白　河	38	354
若　松	75	212	石　川	73	290

5. 국외 상수도관 동파 관련 기준 조사 : 러시아

러시아에서는 러시아 표준 시방서(SNip)에서 모든 토목구조물과 관련한 기준과 시방을 제시하고 있으며, 특히 동토지역에 대한 기준들이 다른 나라에 비해 매우 자세하게 규정되어 있다.

Snip 2.04.12.86 Steel pipeline strength calculation에서는 관에 작용하는 하중에 대해 간략히 정의해 두었으며, 하중에 대한 상세한 내용은 SNip 2.01.07-85를 참조하도록 하였다. SNip 2.01.07-85에는 매설관에 작용하는 Ice load와 thermal load에 대한 설명과 결정 방법을 제시하고 있으며, SNip 2.01.07-85의 4장에서는 하중에 대한 지지력 계수(load-bearing capacity), 신뢰계수(reliability) 등을 이용하여 매설관 피복깊이를 결정하는 방법을 제시하고 있다.

SNip에서는 동결깊이 산정을 위한 방법을 제시하고 있는데, 연평균기온, 지역에 따른 보정계수, 흙의 특성에 따른 보정계수 등을 참고하여 복잡한 과정을 거쳐 동결깊이를 도출하도록 되어 있으며, 관의 매설 깊이를 결정하기 위해 동결깊이를 활용하기 보다는 매설관에 작용하는 하중조건에 맞게 매설 깊이를 결정하도록 하는 복잡한 방법을 제시하고 있다.

2절 국외의 동결 깊이 관련 연구 현황

1. 동결깊이 실측치에 의한 산정방법 비교

데라다, Cohem & Fielding, Argue & Denyes 등은 동결심도 산정을 위해 표 13과 같이 경험식을 제시하였다. 이들 경험식은 대부분 동결심도, 동결지수 F(℃・day)의 평방근에 비례하는 간편식 형태인 $z = C\sqrt{F}$로 나타냈으며 <표 6-2-1>에서 실측자료를 토대로 조건에 따른 상수 C값을 제시하였다.

<표 6-2-1> 조건에 따른 동결심도 추정 C값

동결심도산정식	동결심도 추정계수(C)	비 고	
데라다 식	2.94	온난 지역	
	4.0 3.7	F>300 300≤F<100	한랭지역
Argue & Denyes 식	4.3	제설하지 않은 지역	
Cohen & Fielding 식	7.4	지표면이 노출된 지역	
	4.6	30cm 눈이 덮힌 지역	

일본 데라다는 온난한 지역과 한랭한 지역으로 구분하여 제안하였으며 또한, 한랭한 지역에 대하여는 동결지수를 300℃・day를 기준으로 하여 구분하였다.
Argue & Danyes는 도로의 포장상태 및 지표면 상태 등으로 구분하여 경험식을 제안하였다. 그 밖에 Cohen & Fielding은 동결의 피해를 받지 않고 pipe line을 설치하기 위한 설계깊이를 결정하기 위하여 경험식을 제안하였다.

2. 러시아 동결깊이 산정식

러시아에서 동결심도의 산정은 SNip(러시아 표준시방서)에서 규정하는 산정식을 이용하고 있다. 이 식은 장기계측 자료를 바탕으로 한 경험식으로 기본적으로는 핀란드 SSR모델과 일본 寺田식과 유사하나, 흙의 종류, 적설량, 측정 지역 등의 여러 가지 조건을 고려하여 동결심도를 산정하도록 설계되어 있다. 러시아의 동결심도 산정식은 다음과 같다.

$$h = K_1\sqrt{\sum t - K_2 S} \qquad (6\text{-}2\text{-}1)$$

여기서, h : 동결심도(cm) K1, K2 : 지역상수
$\sum t$: 연평균 영하온도의 합(℃)
S : 12월에서 2월 사이에 쌓인 눈의 평균깊이

식 (6-2-1)에서 지역상수 K1, K2는 경험에 의해 구해진 상수로 각 지역에 SNip에서 규정하고 있는 값을 사용하도록 하였다(캄차카, 사할린 : K1,=4, K2=1, 아무르 : K1,=5.6, K2=3.5, 하바로프스크 : K1,=4.1, K2=5.6).
러시아 동결심도 산정식은 지역특성과 쌓인 눈의 깊이, 기후조건 외에도, 지반의 경사, 적설기간, 흙의 종류, 대상지반의 표고 등을 고려하였다. 이에 대한 보정값은

<표 6-2-2>와 같다.

<표 6-2-2> 지반경사에 따른 동결심도 보정

지반경사 방향	개활지(cm)	도심지(cm)
평평한 지반, 5° 미만의 남서방향 경사	0	0
남쪽 또는 남서방향 경사	-20	0
동쪽 방향 경사	+20	0
북동 또는 북서방향 경사	+40	+20
북쪽방향 경사	+60	+40

흙의 입도와 함수비에 따른 동결심도의 보정값은 <표 6-2-3>과 같으며 해당하는 보정값을 구해진 동결심도에 곱하여 최종 동결심도를 산출한다.

<표 6-2-3> 흙의 함수비와 입도에 따른 동결심도 보정

구 분	보정값
함수비 25% 정도의 점성토 또는 세립 사질토	1.00
함수비 25% 이하의 점성토 또는 실트	0.75
자연함수비의 조립토, 자갈	1.33

3. 핀란드 SSR 모델

핀란드 기술연구센터(VTT, Technical Research Centre of Finland) 산하 토질연구소(GEO, Geotechnical Laboratory)에서는 1982년부터 1984년까지 핀란드 내의 6개 지역에 대한 동상량과 동결심도를 계측하였다. 또한 현장의 비교란 시료를 채취하여 실내 동상시험과 동결침투시험을 수행하여 동상 및 동결깊이를 예측할 수 있는 SSR 모델을 개발하였다(Seppo Saarelainen, 1992).

6개 관측지점 중 핀란드 동부지역인 Joensuu에 대한 동결지수와 관련한 동상량 추정식과 동결심도 추정식을 산정하였다. Joensuu지역은 해발 +79~81m이고, 포장도로는 +80.4m에 이른다. 지반은 대부분 실트질이고 포장면에서 4.7m 정도까지 분포한다. 또한 지하수위는 약 1.8m이다. 측정지점에서의 동상량 추정식과 동결심도 추정식은 다음과 같다.

$$h = 2.25\sqrt{F} - 125 \quad (6\text{-}2\text{-}2)$$

$$z_f = 9.8\sqrt{F} + 126 \quad (6\text{-}2\text{-}3)$$

여기서, h : 동상량(mm)

z_f : 동결깊이(mm)

F : 동결지수(50년 빈도 동결지수, Kh(℃ · hour)

4. 미 육군공병단 경험식

미 육군공병단은 경험적인 방법으로 동결심도 산정식을 다음과 같이 제안하였다.

$$z = 4.69F^{0.53} \quad (6\text{-}2\text{-}4)$$

여기서, z : 동결깊이 (cm)

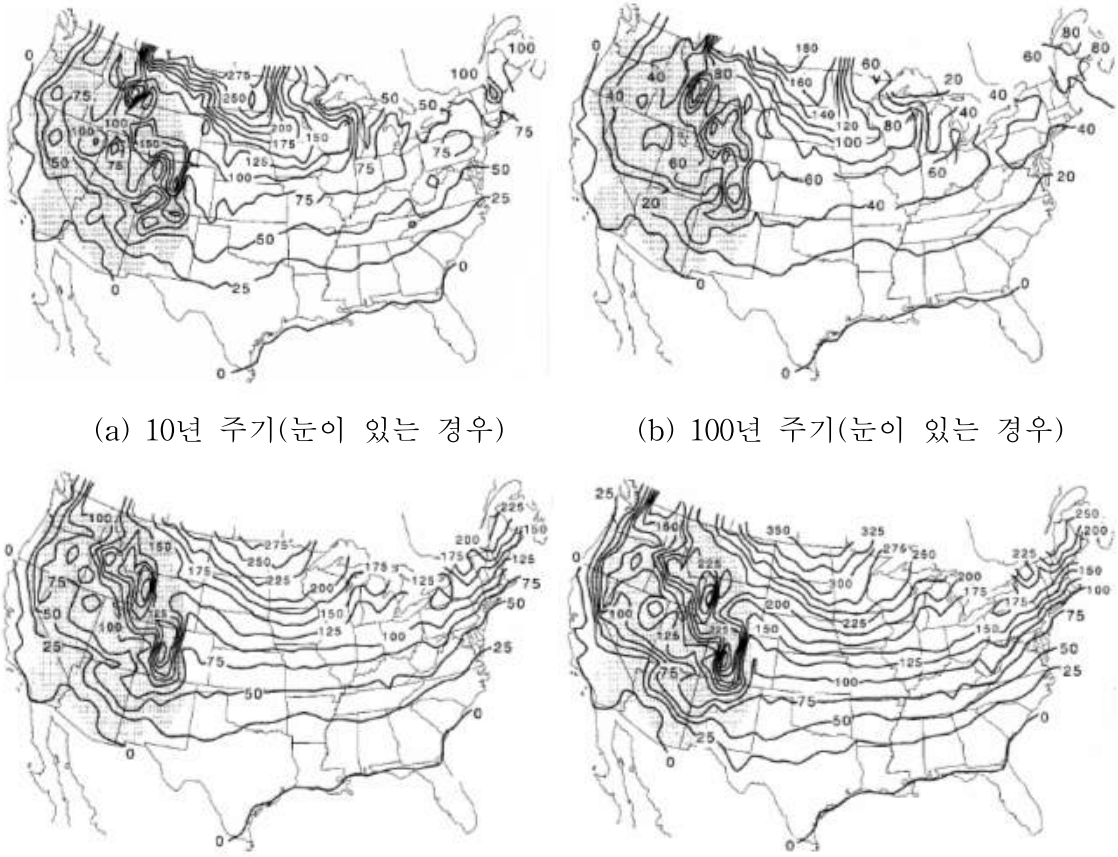
F : 동결지수(℃ · day)

5. 미국 동결깊이 분포도

Degaetano(2001)는 일차원적 열적흐름과 물 흐름을 감안한 NRCC(Northeast Regional Climate Center) 동결심도 추정모델을 발표하였다.

Degaetano는 <그림 6-2-1> 같이 미국 전역 3,562개 기상측후소의 동결심도 자료를 활용하여 눈이 있을 경우와 눈이 없을 경우의 최대 동결심도선도(Contour Map)를 10년 빈도와 100년 빈도로 구분하여 작성하였다.

<그림 6-2-1>과 같이 최대 동결심도선도를 살펴보면 서부내륙 산지지형(로키산맥 등)은 고저차가 심해 동결심도의 분포형태가 불규칙한 형태를 보였고 남부 해안지역(걸프만)과 서부해안지역의 동결심도는 0cm으로 나타났다. 또한 중북부 지역의 최대동결심도는 눈이 없을 때는 350cm로 나타났고 눈이 있을 경우에는 275cm로 나타났다.



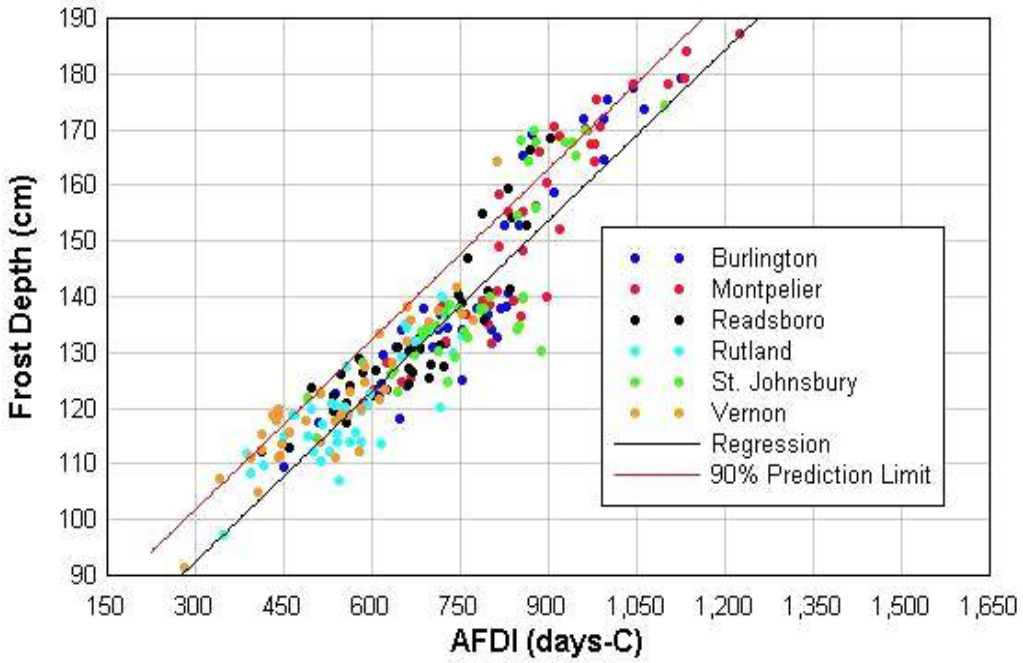
(a) 10년 주기(눈이 있는 경우)　　(b) 100년 주기(눈이 있는 경우)

(c) 10년 주기(눈이 없는 경우)　　(d) 100년 주기(눈이 없는 경우)

<그림 6-2-1> 미국의 최대 동결심도선도(NRCC, 2002)

6. 버몬트 주 동결깊이 예측

미국 버몬트 주교통국(VAOT)에서는 6개 기상관측소로부터 얻은 기상자료를 통해 도출한 동결지수와 동결심도 측정값의 관계에서 <그림 6.2.2>와 같은 동결심도-동결지수 상관관계를 도시하였다.



<그림 6-2-2> 동결심도-동결지수 상관관계(미 버몬트)

<그림 6-2-2> 의 관계로부터 산정된 동결심도 추정식은 다음과 같다.

$$D = 62.2 + 0.1024F \qquad (6\text{-}2\text{-}5)$$

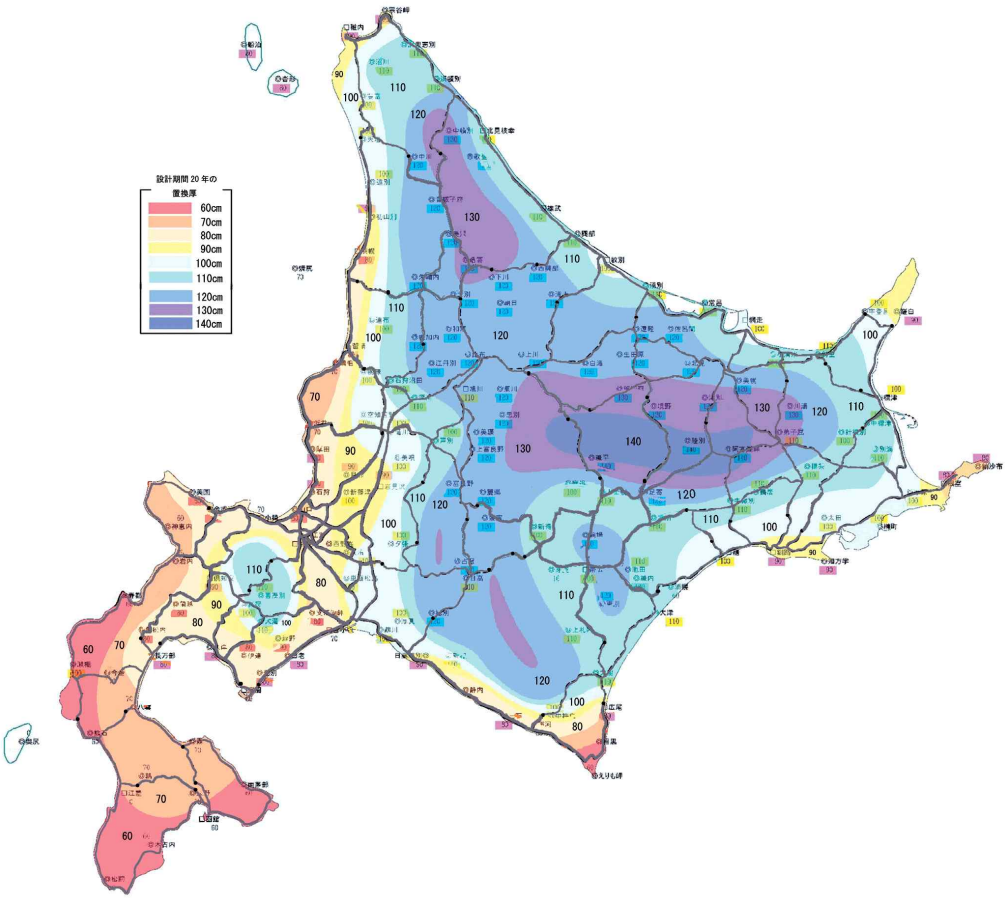
여기서, D : 동결심도(cm),
F : 동결지수(℃・day)

식 (6-2-5)를 바탕으로 버몬트 주의 동결심도 분포도를 작성하였는데 버몬트 주의 동결심도는 최소 120cm에서 최대 230cm 정도에 이르는 것으로 나타났다.

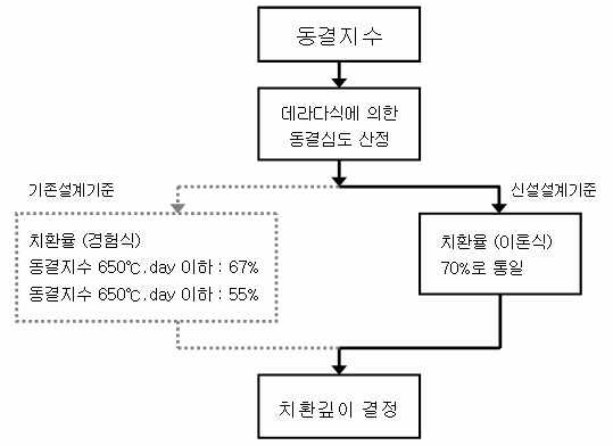
7. 일본 북해도 지방 동결치환깊이 분포도

일본 도로협회(2001)에서는 최대동결깊이의 70%의 치환율을 적용한 동결치환깊이를 결정하여 <그림 6-2-3>과 같은 동결깊이 설계 치환깊이 분포도를 제시하였다.
기존의 동결치환깊이의 결정은 경험식을 근거로 동결지수 650℃・day을 기준으로 그 미만에서는 동결심도의 67%의 치환율을, 그 이상에서는 55%의 치환율을 적용하여 설계깊이를 결정하였다. 그러나 실제 북해도 전역 도로에 대한 피해조사를 실시한 결과, 94개소에서 동상으로 인한 파손이 발생되어 치환깊이 결정에 대한 문제점이 지적되었다. 따라서 2001년 12월 포장설계지침 개정을 통해 동결치환기준을 새

롭게 개정하였다(일본 도로협회, 2001). 개정된 동결치환깊이 결정은 이론식을 근거로 산정된 동결깊이의 70%를 치환하도록 하였다. 또한 도심지에서는 열섬효과를 고려하여 동결심도의 65%까지 치환깊이를 적용하기도 한다(일본 도로협회, 2001).



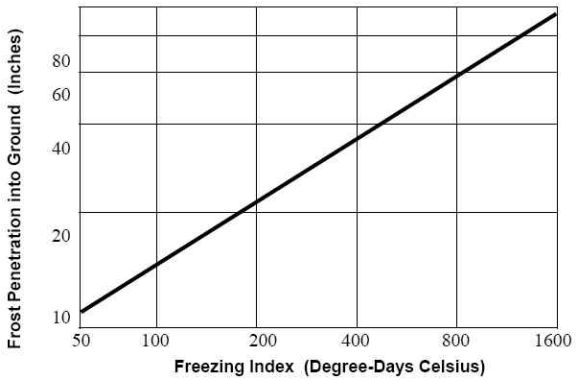
<그림 6-2-3> 일본 북해도 20년 주기(1980~2000년) 동결치환깊이 분포도
(일본 도로협회, 2001)



<그림 6-2-4> 치환깊이 결정 순서(일본 도로협회, 2001)

8. 캐나다 매설관 설계를 위한 동결심도 예측

캐나다 British Columbia주에서는 매설관 설계에 필요한 동결심도 예측을 위해 주내의 82곳에 대하여 1971년부터 2000년까지 측정한 동결지수 중 최대값을 선택한 동결지수를 이용하여 다음과 같은 동결깊이와 동결지수 상관곡선을 제시하였다.



<그림 6-2-5> 동결심도-동결지수 상관곡선(캐나다 British Columbia주, 2006)

9. 미국 각주의 동결치환깊이 결정

미국에서의 동결깊이 치환깊이는 각 주마다 적용하는 기준이 다르다. 일반적으로 알래스카 주, 메인 주, 오리건 주, 워싱턴 주에서는 도로 구조체가 동결깊이의 50%를 넘도록 규정하고 있다. 한편, 오하이오 주나 유타 주는 동결깊이 전체를 치환하도록 하며 아이다호 주 경우에는 입자가 큰 돌(rock cap) 등을 치환하도록 규정하고 있다. 반면 몬태나 주와 북 다코타 주 경우에는 도로설계에 동상방지층 설치를 포함하고 있지 않는 곳도 있다.

<표 6-2-4> 미국 동상방지 치환깊이 기준(Pavement Interactive, 2007)

Agency	Use of Frost Protection in Thickness Design
Alaska DOT	Pavement structure > 50% of freeze depth
Maine DOT	Pavement structure > 50% of freeze depth
Oregon DOT	Pavement structure > 50% of freeze depth
Washington DOT	Depth>50% of maximum frost depth expected
Ohio DOT	Remove and replace frost susceptible materials
Utah DOT	Remove and replace frost susceptible materials
Idaho DOT	Capillary break / rock cap
Montana DOT	Frost protection not included in design
North Dakota DOT	Frost protection not included in design

참고 문헌

1. 국토교통부, 2011, “도로 동상방지층의 효용성 검증 및 설치기준 연구” pp.327

2. 강재모, 김영석, 이장근., 2013, “불포화 지반의 동결 팽창율 예측을 위한 기법 연구”, 한국토목섬유학회 논문집, 제 12권, 제 1호, pp. 93-100.

3. 권기철., 2002, “노상토의 종류에 따른 동결·융해 특성”, 한국도로포장공학회 논문집, 제 4권, 제 1호, pp. 33~39.

4. 김영석, 강재모, 홍승서, 김광진., 2010, “지반의 동결조건을 고려한 열전도 구성방정식과 유한요소해석”, 한국토목섬유학회 논문집, 제 9권, 제 3호, pp. 39-45.

5. 김영진, 배정호(2000), "차량하중 등에 의해 동결지반 매설관에 작용하는 응력분포에 관한 연구", 한국건설기술연구원.

6. 김영진, 유준, 김현민(1999), "동결심도 및 포장체 온도분포조사", 한국건설기술연구원 연구보고서, 30-32.

7. 김영진, 유 준, 김현민., 1999, 동결심도 및 포장체 온도분포조사, 한국건설기술연구원, pp. 5~25.

8. 김영진., 2003, “동결토의 일축압축강도와 부동수분 초음파 속도와의 관계”, 대한토목학회 논문집, Vol. 23, No. 5C. pp. 309-317.

9. 김영진, 배정호, 송원근., 2002, “동결토의 온도변화에 따른 부동수분과 초음파 속도의 변화에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회 논문집, Vol. 22, No.3-C, pp. 207-217.

10. 김영호., 1998, “기후변화를 고려한 수자원 관리 기법”, 한국수자원학회 논문집, 제 31권, 제 4호, pp. 407-413.

11. 나종태 (1993), 우리나라 동결심도와 정수C에 관한 연구, 동국대 석사학위 논문.

12. 남영국., 2004, 도로포장공학, 구미서관, pp. 79-90.

13. 남영국, 박찬범, 조규태, 진정훈., 2002, “동상방지층의 거동특성에 대한 현장계측”, 한국도로학회 논문집, 제 4권 1호, pp. 19-23.

14. 서상열., 2003, “동결토의 동적 특성에 관한 연구”, 한국지반공학회 논문집, Vol. 19, No.1, pp. 229-236.

15. 송원근, 김문겸., 2004, “지반의 동상 및 부식을 고려한 지중 매설 파이프라인의 피로 수명 평가”, 한국토목학회 논문집, 제 24권 , 2호, pp. 277-283.

16. 신은철, 박정준., 2003, “동결토의 동상팽창압 특성에 관한 실험적 연구”, 한국지반공학회 논문집, 제 19권, 2호, pp. 65-74.

17. 신은철, 김성환, 박정준(2009), 인공지반동결시스템을 이용한 동결차수벽의 실험적 연구, 한국토목섬유학회논문집, 제 8권, 2호.

18. 신은철, 류병현, 박정준(2009), 변형된 동결융해 시험장치를 이용한 동상민감성흙의 지반공학적 특성, 한국토목섬유학회논문집, 제8권, 제1호.

19. 신은철, 류병현, 박정준(2010), 실내동결시스템을 이용한 노상토의 동상특성, 한국도로학회논문집, 제12권, 제6호

20. 신은철, 류병현, 박정준(2010), 현장도로 모형실험을 이용한 포장구성층의동결 특성 분석, 한국지반공학회 논문집, 제26권, 제7호.

21. 신은철, 이재식, 조규태(2011), 도로포장 현장계측 온도데이터를 이용한 도로포장체의 동결깊이 연구, 한국도로학회논문집 제13권, 제1호.

22. 신은철, 류병현, 박정준., 2009, “변형된 동결-융해 시험장치를 이용한 동상민감성 흙의 지반공학적 특성” 한국토목섬유 학회논문집, 제8권, 제1호, pp.53-59.

23. 신은철, 박정준, 류병현., 2010, “현장도로 모형실험을 이용한 포장구성층의 동결 특성 분석”, 한국지반공학회 논문집, 제 26권, 7호, pp. 71-80.

24. 신은철, 류병현, 박정준., 2010, “실내동결시스템을 이용한 노상토의 동상 특성”, 한국도로학회 논문집, 제 12권, 2호, pp. 71-79.

25. 이형일., 2002, 응력부식균열을 동반하는 수도강관의 동절기 파손원인 및 대책, 한국시설안전기술공단 2002년도 기술개발성과 발표회, pp. 239-267.

26. 전환돈, 박무종, 김중훈, 이환구., 2008, “상수관 파괴에 의한 피해 경감기법의 개발”, 한국방재학회 논문집, 제 8권, 6호, pp. 31-36.

27. 전환돈., 2006, “상수관 파괴 관망의 부분적 격리를 고려한 피해범위 산정”, 한국수자원학회논문집, 제 39권, 2호, pp. 89-98.

28. 천병식, 박상원, 도종남, 정종주., 2008, “강성매설관에 작용하는 되메움토 연직토압”,

한국지반환경공학회 논문집, Vol. 9 No.1, pp 11-16.

29. 최창호., 2011, “고효율 실내 동결실험장비의 개발 및 성능검증”, 한국토목섬유학회 논문집, 제 10권 제 4호, pp. 93-103.

30. 홍원표, 한중근, 배태수., 2002, “측방유동 지반 속 지중 매설관에 작용하는 토압식 산정”, 한국지반공학회 논문집, 제 8권, pp. 55-65.

31. 한국가스공사 (1999), 극한지역에서의 세계 주요 PNG 배관 설계 및 유지보수 사례연구, 한국가스공사 연구 개발원 보고서.

32. 한국 상하수도 협회, “2009 상수도 통계 요약”, 2011.

33. 한국 상하수도 협회, “상수도 시설 기준”, 2010

34. 한국 상하수도 협회,“ 상수도 시설 유지관리 매뉴얼”, 2007

35. 홍승서, 김영석, 김학승., 2010, “포장도로 실측값을 활용한 한국형 동결깊이 예측모델 개발”, 한국토목섬유학회 논문집, 제 9권 제 3호, pp. 47-56.

36. 환경부., 2011, 2011 상수도통계-상, pp, 1209-1272

37. 환경부., 2007, 상수도공사 표준시방서, pp, 17-32

38. 환경부, “2010 상수도 통계”, 2011.

39. 환경부, “2009 상수도 통계”, 2010.

40. 환경부, “2008 상수도 통계”, 2009.

41. 환경부, “2007 상수도 통계”, 2008.

42. 환경부, “2006 상수도 통계”, 2007.

43. 환경부, “상수도 공사 표준 시방서”, 2007

44. 황철성(1987), 극지 해양구조물의 동적해석 및 최적화에 관한 연구, 서울대 박사학위논문.

45. Akagawa, S (2000). "A Method for Controlling Stationary Frost Heaving,"

ProcInt Symp on Ground Freezing and Frost Action in Soils, Louvain, Belgium, pp 63-68.

46. Akagawa, S., 1985, "Frost Heave Characteristics and scale effect of Stationary Frost Heave", Proceedings, Fourth International Symposium on Ground Freezing, p.p 137-143.

47. Akagawa, S., 1983, "Relation between Frost Heave and Specimen Length", Shimizu Tech Res. Bull., 4, pp. 1-7

48. Aldrich, H., 1959, "Forst Penetration Below Highway and Airfield Pavements", Highway Research Board Bulletin 135, pp. 124-149.

49. Alonso, E.E., Gens, A., and Josa, A. (1990). “A constitutive model for partially saturated soils”, Geotechnique, Vol. 40, pp. 405-430.

50. American Society for Testing and Materials., 2007, Standard Test Methods for Frost Heave and Thaw Weakening Susceptibility of Soils, Annual Book of ASTM Standard Designation : D 5918-06, pp. 401-412.

51. Argue, G. and Denyes., 1974, “Estimating the Depth of Pavement Frost and Thaw Penetrations”, Transportation Research Record, Volume 497, p 18-30.

52. ASCE., 1984, Committee on Gas and Liquid Fuel Lifelines, Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline System, ASCE, New York, pp.480-490

53. Anderson, D. and Morgenstern N., 1973, "Physics, Chemistry, and Mechanics of Frozen Ground" North American Contribution to the Second International Conference, National Academy of Sciences, Washington, D.C, pp. 257-288.

54. ASTM D5918-06., 2006, Standard Test Methods for Frost Heave and Thaw Weakening Susceptibility of Soils, American Society for Testing Materials, pp. 401-412

55. Beskow, G., 1935, "Soil Freezing and Frost Heaving with Special Application to Roads and Railroads". Technological Institute, Northwestern University. Reprinted in: Historical Perspectives in Frost Heave Research (ed. P. B. Black & M. J. Hardenberg). CRREL Special Report 91-23, pp. 37-.157.

56. Bolzon, G., Schrefler, B.A., and Zienkiewicz, O.C. (1996), “Elastoplastic soil constitutive laws generalized to partially saturated states”, Geotechnique, Vol.

46, pp.279-289.

57. Broks, R. and Corey, A., 1966, "Properties of Porous Media Affecting Fluid Flow", Journal of Irrigation and Drainage, ASCE, Vol.92 pp. 61-88.

58. Cekerevac, C., and Laloui, L. (2004), “Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay”, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 28, pp.209-228.

59. Coussy, O. (1995). “Mechanics of porous continua”, Chichester, Wiley.

60. Crawford, R., 1996, "Municipal Sewage and Water Systems are in a State of Crisis". Environmental Science and Engineering, September, Vol. 9 pp. 30-37.

61. Croney, D. and Jacobs, J., 1967, The Frost Susceptibility of Soils and Road Materials, TRRL Report, LR 90, Crowthorne, pp.68-72.

62. Crory, F.E. (1991), Construction Guidelines for Oil and Gas Exploration in Northern Alaska. U.S. Army Corps of Engineers Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire.

63. Davis J. and Chudobiak W., 1975. "In Situ Meter for Measuring Relative Permittivity of soils". Geological Survey of Canada, paper 75-1, part A. 75-79.

64. Dillon, H. and Andersland, O., 1967. "Deformation Rates of Polycrystalline Ice". In Oura, H., ed. Physics of Snow and ice : international conference on low temperature science 1966 Proceedings, Vol. 1 , Pt. I . [Sapporo], Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, p. 313-327.

65. Departments of the Army and the Air Force., 1988, Arctic And Subarctic Construction Calculation Methods for Determination of Depths of Freeze And Thaw in Soils, Army TM 5-852-6, Air Force AFR 88-19.

66. E. J. Yoder., 1975, Principles of Pavement Design, pp. 177-194.

67. Farouki O., 1981, "The Thermal Properties of Soils in Cold Regions", Cold Regions Science. pp.67-75

68. Freden, S. and L. Stenberg., 1980, "Frost Heave Tests on Tills withan Apparatus for Constant Heat Flow". In Proceedings, Second International Symposium on Ground Freezing, Norwegian Institute of Technology, June 24-26, Trondheim, pp.

760-771.

69. Gilpin, R., 1980, "A Model for the Prediction of Ice Lensing and Frost Heave in Soils", Water Resour. Res., Vol. 16, No. 5, pp. 918-930.

70. Goto, S, and Ryokai, K (1980). "Frost Action of the Soil Surrounding a LNG Inground Storage Tank," Proc 2nd Int Symp on Ground Freezing, Trondheim, Norway, pp 1049-1059.

71. Goto, S. and Takahashi, Y., 1982, "Frost Heave Characteristics of Soil under Extremely Low Frost Penetration Rate", Proc. of 3rd Inter. Symp. On Ground Freezing, pp. 261-268.

72. Handy, R., 1985, "The Arahing in Soil Arching", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 111, No. GT3, pp. 302-318.

73. Hoekstra, P., Chamberlain, E. and Frate, A.,1965, "Frost Heaving Pressures", Cold Region Research Engineering Laboratory, Report 176-185.

74. Hoekstra, P, Chamberlain, E, and Frate, A (1965). Freezing Pressures, Cold Region Research Engineering Laboratory, Report 176.

75. 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

76. Janssen, H., 1895, Versucheuber Getreidruck in Silozeuen, Z.Ver. Deut Ingr. Vol.39, pp.1045 (partial English Translation in Proceeding of the Institute of Vivil Engineers, London, England, pp.553)

77. JGS 0171., 2003, 凍上量予#ｲ測のための土の凍上試験方法, 地盤工学会基準, 日本地盤工学会.

78. JGS 0172., 2003, 凍上性判定のための土の凍上試験方法, 地盤工学会基準, 日本地盤工学会.

79. Jumikis, A.R. (1979), Some aspects of artificial thawing of frozen soils. Engineering Geology, 13, 287-297.

80. Konard, JM, and Mogenstern, NR (1982). "Effects of Applied Pressure on Freezing Soils," Canadian Geotechnical J, Vol 19, pp 494-505.

81. Koopmamas, R. and Miller, R., 1966, Soil Freezing and Soil Water Characteristic Curve, Soil Science Society Am. Proc, Vol.30, pp. 680-685

82. Khalili, N., Geiser, F., and Blight, G.E. (2004), “Effective stress in unsaturated soils: Review with new evidence”, International Journal of Geomechanics, Vol. 4, pp.115-126.

83. Konrad, J. and Mogenstern, N., 1982, "Prediction of Frost Heaving in the Laboratory during Transient Freezing", Canadian Geotech. J., Vol. 19, pp.250-259.

84. Ladanyi, E. and Arteau, J., 1978, "Effect of Specimen Shape on Creep Response of a Frozen Sand", Intern, Symp. on Ground Freezing Soil, pp. 141-153.

85. Laloui, L., and Francois, B. (2009), “ACMEG-T: Soil Thermoplasticity Model”, Journal of Engineering Mechanics-ASCE, Vol. 135, pp.932-944.

86. Laloui, L., and Cekerevac, C. (2003), “Thermo-plasticity of clays: An isotropic yield mechanism”, Computers and Geotechnics, Vol. 30, pp.649-660.

87. Lewis, R.W., and Schrefler, B.A. (1998). “The finite element method in the static and dynamic deformation and consolidation of porous media”, New York, John Wiley.

88. Linell, K.A., Lobacz, E.F. (1980), Design and Construction of Foundations in Areas of Deep Seasonal Frost and Permafrost. U.S. Army Corps of Engineers Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire.

89. Loret, B. and Khalili, N. (2002), “An effective stress elastic-plastic model for unsaturated porous media”, Mechanics of Materials, Vol. 34, pp.97-116.

90. Loch, J., 1981, "State of the Art Report-Frost action in soils", Engineering Geology, No.18, pp, 213-224

91. 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. Experiment Styation Bull., Iowa State College Ames. Iowa, No.31, pp.181

92. McGaw, R. and Outcalt, S., 1978, "Thermal Properties and Regime of Wet

Tundra Soils at Barrow", Alaska. Third International Conference on Permafrost, Proceedings, Vol. 1. July 10-13, 1978, Edmonton, Alberta,

93. Miller, R., 1978. "Frost Heaving in Non-colloidal Soils". In Proc. Third. Int. Conf. Permafrost, pp. 708-713.

94. Miller, RD (1972). Freezing and Heaving of Saturated and Unsaturated Soils, Highway Research Record 393, pp 1-11.

95. Natural Gas-The Alaska Gas Pipeline, Austin, Texas.

96. Newman, GP, and Wilson, GW (1997). "Heat and Mass Transfer in a Freezing Unsaturated Porous Medium," Water Resources Res, Vol 16, No 4, pp 811-819.

97. Nordal, R. and Refsdal, G., 1989, "Frost Protection in Design and Construction", Frost in Geotechnical Engineering, Int. Symp., Saariselka, Finland, March 13-15, 1989, Technical Research Centre of Finland, Vol. 1, pp. 127- 163.

98. Osterkamp, T.E., Payne, M.W. (1981), Estimates of permafrost thickness from well logs in northern Alaska. Cold Regions Science and Technology, 5(1), 13-27.

99. Olivella, S., Gens, A., Carrera, J., and Alonso, E.E. (1996). “Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media”, Engineering Computations, Vol. 13, pp. 87-&.

100. Olhoeft, F., 1977. Electric Prosperities of Clay Permafrost, Canadian Journal, Earth Science Vol. 14. PP. 16-21.

101. Ohrai. T. and H. Yamamto., 1985, "Growth and Migration of Ice Lenses in Partially Frozen Soil", Proceedings, Fourth International Symposium on Ground Freezing, Sapporo. Japan, Volume 1. pp. 79-84.

102. Penner, E., 1960, The Importance of Freezing Rate in Frost action in Soil, proc. of the Amer. Soc. for Testing Materials, Vol. 60, 1960, pp. 1151-1165.

103. Penner, E, and Goodrich, LE (1980). "Location of Segregated Ice in Frost Susceptible Soil," Proc of the 2nd Int Symp on Ground Freezing, Trondheim, Norway, pp 626-639.

104. Patterson, D.and Smith, M., 1980, The Measurement of Unfrozen Water Content by Time Domain Reflectometry, Can. Geotech. J., Vol.18, pp. 131-144.

105. Patterson, D.and Smith, M., 1980, "The use of Time Domain Reflectometery for the Measurement of Unfrozen Water Content in Frozen Soils". Cold Regions Science and Technology, Vol. 3, pp. 205-210.

106. Rutqvist, J., Barr, D., Birkholzer, J.T., Fujisaki, K., Kolditz, O., Liu, Q.S., Fujita, T., Wang, W.Q., and Zhang, C.Y. (2009). "A comparative simulation study of coupled THM processes and their effect on fractured rock permeability around nuclear waste repositories", Environmental Geology, Vol. 57, pp. 1347-1360.

107. Rutqvist, J., Borgesson, L., Chijimatsu, M., Kobayashi, A., Jing, L., Nguyen, T.S., Noorishad, J., and Tsang, C.F. (2001). "Thermo-hydro-mechanics of partially saturated geological media: Governing equations and formulation of four finite element models", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 38, pp. 105-127.

108. Saetersdal, R., 1981, "Heaving Conditions by Freezing of Soils", Engineering Geology, No. 18, pp. 291-305

109. Shamir, U. and Howard, C., 1979, "An Analytic Approach to Scheduling Pipe Replacement", Journal of the American Water Works Association, Vol.710, No.5, May, pp. 248-258.

110. Shin, E.C. and Park, J.J.(2011), Soil Freezing Characteristics and Temperature Distribution in In-ground Storage Tank, International Journal of Offshore Polar Engineering, Vo.21, No.2.

111. Sheng, D., Sloan, S.W., and Gens, A. (2004), "A constitutive model for unsaturated soils: thermomechanical and computational aspects", Computational Mechanics, Vol. 33, pp.453-465.

112. Sheng, D.C., Sloan, S.W., Gens, A., and Smith, D.W. (2003), "Finite element formulation and algorithms for unsaturated soils. Part I: Theory", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 27, pp.745-765.

113. Sheng, D.C., Pedroso, D.M., and Abbo, A.J. (2008c), "Non-convexity and stress-path dependency of unsaturated soil models", Computational Mechanics, Vol. 42, pp.685-694.

114. Sheng, D., Gens, A., Fredlund, D.G., and Sloan, S.W. (2008b), “Unsaturated soils: From constitutive modelling to numerical algorithms”, Computers and Geotechnics, Vol. 35, pp.810-824.

115. Sellman, P.V. (1989). Strength of soils and rocks at low temperatures. Cold Regions Science and Technology, 17, 189-190.

116. Smith. M. and Tice. A., 1988. Measurement of the Dozen Water Content of Soils. Comparison of NMR and TDR methods. CRREL Report 88, pp. 18-41.

117. Spangler, M., 1941, The Structural Design of Flexible Pipe Culverts, Bulletin 135 Iowa Engineerting Experiment Station, Ames, Iowa, pp. 1-85.

118. Spangler. M., 1948, "Underground conduits - An Appraisal of modern Research", Transactions of ASCE. Paper No. 2337, Vol. 113, pp. 316-345.

119. Spangler, M. and Handy, R., 1982, Soil Engineering, 4th Ed., Harper and Row, Publishers, pp. 727-740

120. Taber, S., 1930, The Mechanics of Frost Heaving. J. Geol. 38, pp. 303-.317.

121. Takagi, S., 1963, "Fundamentals of the theory of Frost-Heaving". Permafrost, 1st International Conference, National Academyof Sciences-National Research Council, Washington, D.C., pp. 203-212.

122. Takagi, S., 1965, Principles of Frost Heaving. CRREL Research Report 140. AD 626174.

123. Takagi, S., 1970, "An Analysis of Ice Lens Formation". Water Resources Research, vol. 6, no. 3, pp. 736-749.

124. Takashi, H., Yamamoto, Y., Ohrai, T., and Masuda, M., 1978, "Effect of Penetration Rate of Freezing and Confining Stress on the Frost Heave Ratio of Soil", Proc. of 3rd Inter. Conf. On Permafrost, pp. 737-742.

125. Topp, GC, Davis, JL, and Annan, AP (1980). "Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines," Water Resourc Res , Vol 16, No 3, pp 574-582.

126. Topp, G., Davis, J., and Annan, A., 1980, "Electromagnetic Determination of

Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines", Water Resources Research, Vol. 16, No, 3, pp. 574-582.

127. Terzaghi, K. (1936), “The shear resistance of saturated soils”, Proceedings for the 1st. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, MA, pp.54 - 56.

128. Terzaghi, K., 1943, Theoretical Soil Mechanics, John Wiler and Sons, pp. 66-76.

129. Taber, S., 1929, Frost heaving. J. Geol. 37, pp. 428-.461.

130. Tic, 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., Jan., pp. 16-20

131. Tic, D. and Baumeister, R., 1977. Longitudinal Study of Procrastination, performance, stress, and health: The costs and benefits of dawding. Psychological Science, 8, pp. 454-458

132. Uhlmann D., 1978, "The upper Limit of Phytoplankton Production as a Function of Nutrient Load, Temperature, Retention time of the water, and euphotic zone depth". Int Rev Ges Hydrobiol. 63: pp. 353-363.

133. Willams, P. and Wood, J., 1985. "Internal Stresses in Frozen Ground". Canadian Geotechnical Journal. 22(3): pp. 413-416.

134. Willams, P., 1988, "Thermodynamic and Mechanical Conditions within Frozen Soils and their effects". Fifth International Conference on Permafrost, Trondheim. Norway, Volume 1. pp. 493-498.

135. Willis, W. and Amemiya., 1973, Tillage Management Principles: Soil Temperature Effects. In Proc., Nat. Conserv. Tillage Conf., Soil Conserv. Soc. Amer., Ankeny, Iowa. pp. 22-42

136. Yong, RN, and Osler, JC (1971). "Heave and Heaving Pressures in Frozen Soils," Canad Geotechnical J, Vol 8, pp 272-282.

137. Yong, R. and Warkentin, B., 1975, Soil Properties and Behaviour, Elsevier Scientific Publishing Company, Chapter 11. Soil freezing and permafrost, pp.

383-419.

〔별첨1〕

조사 및 분석 보고서

(건설기술연구원)

동결깊이 조사 및 분석

1. 개요

2014년 12월 현재 전국 포장국도상에 설치된 동결깊이 측정장치는 총 90개 지점으로 연도별로 동절기마다 전국 국도상의 동결깊이를 측정하여 왔다.

국도에 매설된 동결깊이계는 도로포장체 단면을 수직으로 관입하여 설치한 것으로 과거(국립건설시험소, 1980~1989년)에 조사원이 직접 굴착하여 육안으로 동결깊이를 조사하던 방식보다 정확한 도로포장체의 동결깊이를 측정할 수 있다. 동결깊이 측정장치의 설치는 매설지역의 지반 특성과 지형적 특성, 고도, 음양조건 등을 고려하였다.

본 연구에서는 2014년 12월 현재까지 전국 국도상에 매설된 동결깊이 측정장치로부터 수집한 동결깊이 측정값과 전국 기상청 30개소의 측후소에서 수집한 연도별 일평균 온도값으로 도출한 동결지수를 이용하여 동결깊이 추정식을 도출하였다. 또한 이러한 상관관계를 지역, 음양(陰陽)조건 등에 따라 분석하였으며 기존 동결깊이 산정식과도 비교하였다.

이와 같이 우리나라의 포장도로에서 장기간에 걸친 실측자료(1991~2014년)를 이용한 동결깊이 산정식의 개발은 국내 최초이며, 지금까지 외국 산정식을 사용하여 발생하는 부정확한 동상방지층 설계 등의 문제점을 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 동결깊이 측정결과(2014년)

2.1 2014년도 동결깊이 측정결과

전국 동결깊이 측정장치에 대하여 최대 동결깊이와 GPS 좌표를 측정하였으며, 측정된 결과는 향후 전국 동결깊이 분포도나 동결치환도 등에 적용하여 유지관리시스템 구축에 활용될 예정이다. 2014년 동결깊이 측정결과를 표 2.1에 나타내었다. 또한 매설지점에 대한 각 도로의 포장층 두께(2008 도로포장관리시스템, 도로대장)는 표 5.2와 같다.

표 2.1 2014년도 동결깊이 측정 결과 및 좌표

번호	국도	매설지점	매설 년도	동결 깊이(cm)	좌표		비 고
					동경	북위	
1	수원(7)	용인군 수지면 죽전리	1991	**23**	127.07.50	37.19.35	용액보충요망
2		김포군 고촌면 신곡리	1993		126.45.21	37.36.17	포장 덧씌우기로 매몰
3		여주군 강천면 간매리	1995	**16**	127.43.30	37.15.53	
4		화성군 팔탄면 지월리	1996		126.53.59	37.08.29	공사로 인한 완전파손
5		안성군 죽산면 장계리	1997		127.25.15	37.02.18	
6		강화군 하점면 부림(도로)	2000	**35**	126.47.25	37.38.10	
7		강화군 하점면 부림(맨땅)	2000		126.47.25	37.38.10	
8	의정부(8)	남양주시 조안면 진중리	1991		127.18.33	37.32.46	포장 덧씌우기로 매몰
9		가평군 상면 봉수리	1993	**67**	127.17.06	37.50.53	
10		파주시 문산읍 선유리	1995	**48**	126.47.28	37.52.13	
11		연천군 연천읍 상리	1996	**57**	127.04.41	38.07.22	
12		양평군 옥천면 신복리	1997	**47**	127.28.22	37.31.39	
13		파주시 탄현면 법흥리	2000	**35**	126.42.11	37.47.29	
14		포천시 영중면 양문리	2002		127.14.52	38.00.41	포장 덧씌우기로 매롤
15		포천시 화현면 지현리(콘)	2005	**55**	127.18.10	37.54.13	
16	홍천(15)	원주시 소초면 의관리	1990	**56**	127.57.59	37.25.19	
17		춘천시 동산면 조양리	1994	**105**	127.49.45	37.44.33	
18		홍천군 두촌면 장남리	1994	**73**	128.03.12	37.54.33	
19		화천군 화천읍 상리	1996	**132**	127.42.16	38.06.32	포장 덧씌우기로 매롤
20		양구군 양구읍 상리	1997	**145**	127.59.45	38.07.06	내관교체요망
21		양구군 남면 구암리	1997	**110**	128.01.16	38.04.34	
22		횡성군 우천면 오원리	1997	**116**	128.07.17	37.24.59	포장부파손
23		철원군 갈말읍 강포리(콘)	2005	**93**	127.17.48	38.07.07	
24		인제군 인제읍 가아리	2009	**72**	128.09.31	38.07.51	몸통고정작업필요

25		고성군 간성읍 흘리(진부령)	2009	**85**	128.21.51	38.15.17	
26		인제군 북면 한계리(한계령)	2009	**97**	128.24.09	38.05.16	
27		홍천군 내면 명개리	2009		128.30.58	37.52.37	
28		철원군 서면 자등리	2009		127.24.05	38.06.41	
29		화천군 상서면 다목리	2009		127.31.19	38.11.48	
30		춘천시 남산면 서천리(콘)	2005		127.33.34	37.50.39	
31	강릉(6)	평창군 대관령면 병내리	1991	**134**	128.37.00	37.44.34	
32		강릉시 왕산면 고단리	1994	**79**	128.51.01	37.30.41	내관 교체 요망
33		양양군 서면 논화리(반음지)	1994		128.33.08	38.03.41	
34		양양군 서면 논화리(음지)	2009	**78**	128.33.07	38.03.42	철재몸통 교체 뚜껑유실
35		홍천군 내면 율전리	1996	**145**	128.20.48	37.44.24	
36		강릉시 왕산면 도마리	2003	**116**	128.48.52	37.41.14	
37	정선(5)	정선군 정선읍 북실리	1991	**103**	128.37.28	37.22.14	재매설 요망
38		정선군 정선읍 광하리(콘)	2011		128.36.08	37.21.43	
39		영월군 상동읍 천평리	1994	**101**	128.50.47	37.06.43	내관 교체 요망
40		삼척시 신기면 신기리	1994	**25**	129.04.57	37.20.19	
41		영월군 남면 창원리	1996		128.22.12	37.10.20	
42	충주(5)	충주시 소태면 구룡리	1992		127.53.19	37.08.24	
43		괴산군 장연면 방곡리	1994		127.54.41	36.55.31	
44		단양군 단성면 장회리	1995	**13**	128.15.46	36.55.39	포장부 파손
45		단양군 매포읍 평동리(콘)	2011	**15**	128.15.49	37.05.23	
46		음성군 음성읍 감우리	1996		127.38.55	36.56.51	
47	보은(4)	옥천군 안내면 인포리	1992		127.38.39	36.21.56	
48		진천군 진천읍 사석리	1995		127.50.09	36.50.45	
49		청원군 가덕면 계산리	1996		127.33.53	36.31.57	
50		보은군 속리산면 갈목리	1997		127.47.28	36.29.56	
51	논산(5)	부여군 부여읍 능산리	1993		126.57.27	36.16.26	몸통 고정 작업 필요
52		청양군 대치면 대치리	1995		**126.53.16**	**36.26.08**	**재매설 요망**
53		천안시 광덕면 원덕리	1996		**127.07.31**	**36.39.10**	몸통 고정 작업 필요
54		공주시 우성면 방흥리	1997		**127.02.16**	**36.27.16**	**도로확장공사로 유실**
55		연기군 금남면 도암리	2003		127.17.08	36.26.47	공사로 인한 유실
56	예산(2)	아산군 음봉면 원남리	1992		127.01.11	36.51.18	포장 덧씌우기로 매몰
57		당진군 당진읍 구룡리	1996	**32**	126.36.18	36.48.47	
58	전주(4)	완주군 상관면 용암리(신규)	2006	**12**	**127.15.04**	**35.41.36**	**내관 교체 요망/내부물 제거 요망**
59		완주군 상관면 용암리(기존)	1993		**127.14.18**	**35.42.40**	**포장 덧씌우기로 매몰**
60		군산시 성산면 창오리(신규)	2006	**17**	**126.48.56**	**35.58.47**	
61		군산시 성산면 창오리(기존)	1996		126.48.48	35.58.51	포장 덧씌우기로 매몰

62	남원(3)	장수군 장수읍 선창리	1993	**33**	**127.32.20**	**35.39.52**	
63		임실군 오수면 금암리	1995	**21**	**127.20.32**	**35.31.54**	
64		무주군 무주읍 오산리	1996	**28**	**127.40.23**	**36.01.38**	
65	광주(3)	장성군 북하면 약수리	1993		126.49.20	35.25.04	
66		함평군 함평읍 내교리	1996		126.31.11	35.03.18	도로확장공사로 매몰
67		진도군 임회면 백동리	1997		126.14	34.27	포장 덧씌우기로 매몰
68	순천(3)	구례군 산동면 계천리	1993	**8**	127.26.14	35.21.18	
69		구례군 용방면 죽정리	1996	**5**	127.24.56	35.16.27	
70		순천시 서면 대구리	1996	**5**	127.24.48	35.01.54	
71	대구(4)	구미시 장천면 하장리	1992	**11**	128.29.30	36.08.15	
72		김천시 구성면 송죽리	1995		128.03.06	36.02.06	
73		경산시 남천면 하도리	1996	**10**	128.43.34	35.43.04	
74		상주시 화서면 상곡리	1997	**16**	127.58.25	36.26.34	
75	포항(4)	포항시 흥해읍 달전리	1992		129.23	36.04	도로공사로 인한 유실
76		청송군 현동면 눌인리	1995	**96**	129.03.28	36.13.27	
77		경주시 건천읍 송선리	1996	**53**	129.03.49	35.47.42	
78		울진군 기성면 사동리	1997		129.27.18	36.46.41	
79	영주(5)	영주시 풍기읍 수철리	1991	**21**	**128.28.02**	**36.54.00**	
80		안동시 도산면 서부리	1996	**24**	128.48.33	36.41.51	
81		안동시 임하면 천전리(콘)	2011		128.59.24	36.32.50	
82		영주시 안정면 안심리	1997		128.32.58	36.51.04	포장 덧씌우기로 매몰
83		영양군 일월면 용화리	1998	**36**	**129.08.50**	**36.47.33**	
84	진주(4)	합천군 합천읍 외곡리	1993		128.07.36	35.38.02	포장 덧씌우기로 매몰
85		산청군 단성면 남사리	1996		127.55.42	35.16.11	내관 교체
86		합천군 묘산면 반포리	1997		128.04.31	35.38.31	
87		고성군 고성읍 이당리	1997		128.17	34.59	도로확장공사 완전파손
88	진영(1)	울산군 상북면 덕현리	1993		129.01.33	35.36.28	
89	제주(2)	북제주군 애월읍 애월리	1996		126.24	33.28	
90		북제주군 조천읍 조래리	1996		126.44	33.30	
91	서울(9)	일산구 대화동 KICT	1997		126.43	37.41	폐쇄
92		일산구 대화동(폐비닐)	2001		126.43	37.41	폐비닐 동상방지층(폐쇄)
93		일산구 대화동(폐스티로폼)	2001		126.43	37.41	폐스티로폼 동상방지층(폐쇄)
94		동대문구 용두동	1996		127.00	37.38	기타(서울시 관리)
95		서초구 우면동	1999		127.05	37.34	기타(서울시 관리)
96		성동구 용담동	1996		127.00	37.36	기타(서울시 관리)
97		서대문구 홍은동	1996		126.90	37.35	기타(서울시 관리)
98		영등포구 대림동	1997		126.80	37.33	기타(서울시 관리)
99		강북구 번동	1996		127.00	37.42	기타(서울시 관리)

표 2.2 동결깊이 측정장치 매설지점의 포장층 두께

번호	국도	매설지점	매설 년도	포장층두께				
				아스콘표층	아스콘기층	쇄석기층	보조기층	동상방지층
1	수원(7)	용인시 수지구 죽전동	1991	5	15		30	30
2		김포군 고촌면 신곡리	1993	11	19		30	25
3		여주군 강천면 간매리	1995	10	15		25	40
4		화성군 팔탄면 지월리	1996	5	10		40	15
5		안성군 죽산면 장계리	1997	10	10		20	45
6		강화군 하점면 부림(도로)	2000	5	7		30	30
7		강화군 하점면 부림(맨땅)	2000	10	20		45	-
8	의정부(8)	남양주 조안면 진중리	1991	7	-	15	25	-
9		가평군 상면 봉수리	1993	5	10		30	-
10		파주시 문산읍 선유리	1995	7	-	15	40	-
11		연천군 연천읍 상리	1996	10	20		20	45
12		양평군 옥천면 신복리	1997	5	10		30	-
13		파주시 탄현면 법흥리	2000					
14		포천시 영중면 양문리	2002	10	15		25	40
15		가평군 화현면 지현리(콘)	2005	5	10		30	-
16	홍천(15)	원주시 소초면 의관리	1990	5	10		30	-
17		춘천시 동산면 조양리	1994	5	10		40	-
18		홍천군 두촌면 장남리	1994	5	10		30	-
19		화천군 화천읍 상리(재매설)	1996	5	15		30	35
20		양구군 양구읍 상리	1997	5	10		30	20
21		양구군 남면 구암리	1997	5	10		23	30
22		횡성군 우천면 오원리	1997	5	10		30	30
23		철원군 갈말읍 감포리(콘)	2005	5	10		30	40
24		인제군 인제읍 가아리	2009	5	10		30	40
25		고성군 간성읍 홀리(진부령)	2009	5	15		30	40
26		인제군 북면 한계리(한계령)	2009	5	10		30	30
27		홍천군 내면 명개리	2009	5	19	6	15	-
28		철원군 서면 자등리	2009					
29		화천군 상서면 다목리	2009	5	15		30	40
30		춘천시 남산면 서천리(콘)	2005					
31	강릉(6)	평창군 도암면 병내리	1991	5	10		30	-
32		강릉시 왕산면 고단리	1994	5	15		30	60
33		양양군 서면 논화리(반음지)	1994	5	10		30	30
34		양양군 서면 논화리(음지)	2009	5	7		30	20

35		홍천군 내면 율전리	1996	5	7		30	20
36		강릉시 왕산면 도마리	2003	5	10		30	30
37	정선(5)	정선군 정선읍 북실리	1991	5	7		30	20
38		정선군 정선읍 광하리(콘)	2011	5	10		30	40
39		영월군 상동읍 천평리	1994	5	7		30	20
40		삼척시 신기면 신기리	1994	5	15		30	40
41		영월군 남면 창원리	1996	5	15		30	40
42	충주(5)	충주시 소태면 구룡리	1992	6	-	20	50	10
43		괴산군 장연면 방곡리	1994	5	7		30	25
44		단양군 단성면 장회리	1995	7	15		20	35
45		단양군 매포읍 평동리(콘)	2011	5	10		30	40
46		음성군 음성읍 감우리	1996	5	15		20	40
47	보은(4)	옥천군 안내면 인포리	1992	5	15		20	40
48		진천군 진천읍 사석리	1995	5	10		40	-
49		청원군 가덕면 계산리	1996	5	10		20	-
50		보은군 속리산면 갈목리	1997	5	15		20	30
51	논산(5)	부여군 부여읍 능산리	1993	6	-	10	30	-
52		청양군 대치면 대치리	1995	5	10		30	-
53		천안시 광덕면 원덕리	1996	10	20		35	15
54		공주시 우성면 방흥리	1997	10	20		30	20
55		연기군 금남면 도암리	2003	10	20		40	-
56	예산(2)	아산군 음봉면 원남리	1992	5	-	20	30	-
57		당진군 당진읍 구룡리	1996	5	16	9	20	30
58	전주(4)	완주군 상관면 용암리(신규)	2006	5	10		40	-
59		완주군 상관면 용암리(기존)	1993					
60		군산시 성산면 창오리(신규)	2006	5	6	19	45	-
61		군산시 성산면 창오리(기존)	1996					
62	남원(3)	장수군 장계면 선창리	1993	5	7		40	-
63		임실군 오수면 금암리	1995	28	50		15	20
64		무주군 무주읍 오산리	1996	5	7		40	-
65	광주(3)	장성군 북하면 약수리	1993	7	16		47	-
66		함평군 함평읍 내교리	1996	5	15		20	15
67		진도군 임회면 백동리	1997					
68	순천(3)	구례군 산동면 계천리	1993	5	7		40	-
69		구례군 용방면 죽정리	1996					
70		순천시 서면 대구리	1996	5	20		40	-
71	대구(4)	구미시 장천면 하장리	1992	10	-	15	30	15

72		김천시 구성면 송죽리	1995	5	10		25	-
73		경산시 남천면 하도리	1996	5	10		40	-
74		상주시 회서면 상곡리	1997	5	-	15	30	-
75	포항(4)	영일군 흥해읍 성곡리	1992	10	22		30	-
76		청송군 현동면 눌인리	1995	5	10		20	-
77		경주시 건천읍 송선리	1996	5	15		40	-
78		울진군 기성면 사동리	1997	4	10		20	35
79	영주(5)	영주시 풍기읍 수철리	1991	5	10		30	20
80		안동시 도산면 서부리	1996	5	-	15	25	-
81		안동시 임하면 천전리(콘)	2011					
82		영주시 안정면 안심리	1997	5	10		30	20
83		영양군 일월면 용화리	1998	5	10		20	40
84	진주(4)	합천군 합천읍 외곡리	1993	5	10		30	-
85		산청군 단성면 남사리	1996	6	15		34	-
86		합천군 묘산면 반포리	1997	5	10		30	-
87		고성군 고성읍 이당리	1997	5	-	20	35	-
88	진영(1)	울산군 상북면 덕현리	1993	10	20		35	-
89	제주(2)	북제주군 애월읍 애월리	1996	5	10		30	-
90		북제주군 조철읍 조래리	1996	6	-	15	30	-
91	서울(9)	일산구 대화동 KICT	1997					
92		일산구 대화동(폐비닐)	2001					
93		일산구 대화동(폐스티로폼)	2001					
94		동대문구 용두동	1996					
95		서초구 우면동	1999					
96		성동구 용담동	1996					
97		서대문구 홍은동	1996					
98		영등포구 대림동	1997					
99		강북구 번동	1996					

2.2 동결깊이 분포도(2014년, 1991 2014년 누적)

전국 각 지점에서 측정한 최대동결깊이를 나타내는 지역을 연결하여 그림 2.1과 같은 동결깊이분포도를 작성하였다.

2014년도의 동결깊이 분포를 살펴보면, 강원도지역은 동결깊이가 72 145cm이상 범위로 나타났으며, 또한 경기 북부지역과 충북 제천, 강원 영월, 경북 청송 등은 동결깊이가 70 90cm 정도로 나타났다. 반면 전라남도와 경남지역은 30cm 이하로 나타났다.

1991부터 2014년까지의 자료를 사용한 동결깊이분포도를 살펴보면 강원도 홍천, 평창, 인제, 횡성지역은 동결깊이가 150cm 이상으로 나타났으며, 강원도 철원, 화천, 양구, 영월은 130cm 이상으로 나타났다. 또한 경기도 북부지역과 충북 내륙, 경북내륙지역 등은 동결깊이가 120cm 이상 나타났고, 경기중남부, 충청, 전북지역은 40 70cm의 범위를 보였다. 반면 남부지역인 전라남도와 경남지역은 40cm 이하로 나타났다.

이상과 같이 동결깊이분포도로부터 우리나라 동결깊이의 개략적인 분포상황을 알 수 있으며 작성한 동결깊이분포도를 통해 건물의 기초지반 깊이, 상하수도관, 지하매설물의 최소 매설깊이를 결정하는데 활용할 수 있을 것이다.

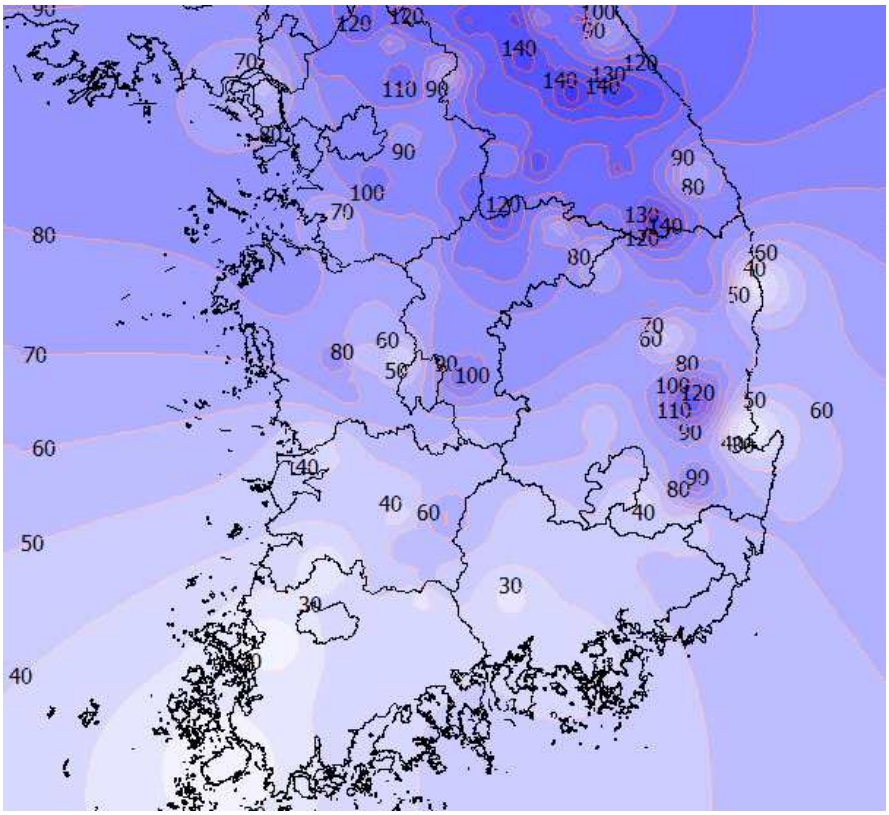


그림 2.1 2014년 동결깊이 분포도

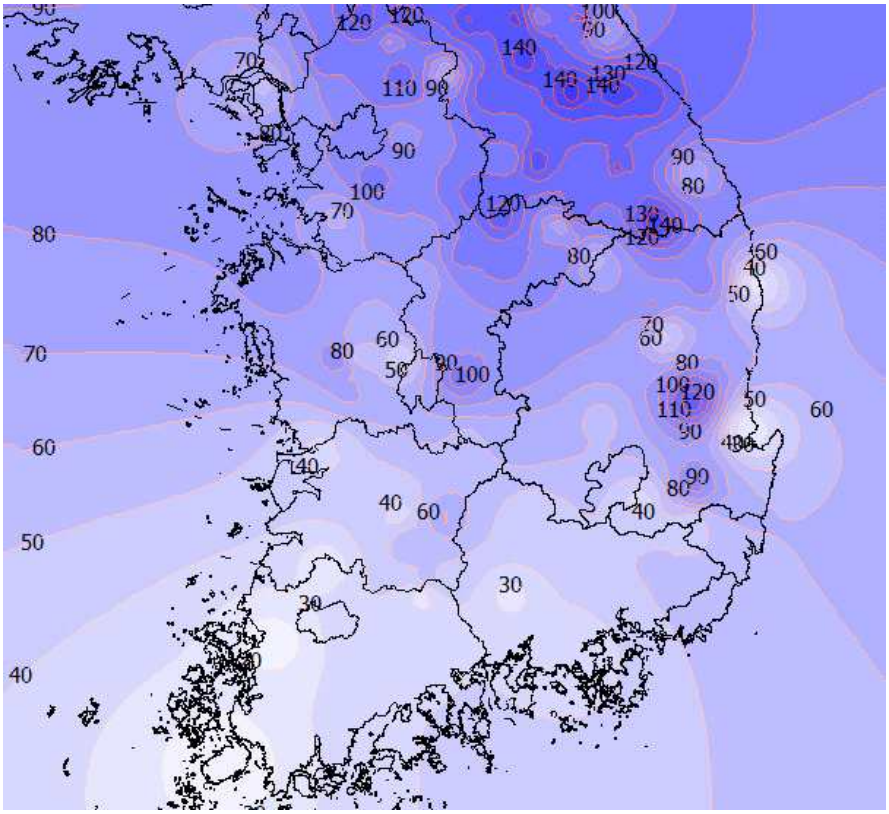


그림 2.2 1991년 2014년 최대동결깊이 분포도

3. 동결지수와 동결깊이의 상관관계

3.1 동결지수

동결지수(frost index)는 도로설계에 관련되는 주요 환경인자로 온도와 강우의 영향을 반영한다. 이들은 노상토의 동결 융해 및 배수효과에 영향을 주는 기상 요소이므로 포장구조의 수축팽창과 동상현상 등의 메커니즘을 면밀히 분석하여 포장에 대하여 결함을 일으키는 요인을 미리 제거하거나, 포장구조 설계요소로 주의 깊게 고려해야 한다.

동결지수는 포장 내의 동결관입 깊이를 산정하기 위한 대표적 척도로서, 포장구조와 노상토를 동결시키는 대기온도의 강도와 지속기간의 누가영향(cumulative effect)으로 표시된다. 동결지수의 단위는 온도·일(℃·일, °F·일)이며, 어느 동결계절 동안의 누가 온도·일에 대한 시간 곡선상의 최고점과 최저점의 차이로 나타낸다.

설계노선의 설계 동결지수의 산정은 대상 지역의 인근 측후소에서 관측한 월 평균 대기온도의 크기와 지속기간에 대한 30년간의 기상자료에서 추위가 가장 심하였던 3년간(즉 동결지수의 최대 3년치)의 평균동결지수로 정한다. 만일 30년간의 기상자료가 없으면 최근 10년간의 최대동결지수를 설계동결지수로 산정하고 이를 토대로 미공병단 TM 5-818-2 Air Force AFM 88-6 Chap.4(Pavement Design For Seasonal Frost Conditions, January 1985)에서 제시되는 절차에 의해서 작성되는 누가 온도·일 곡선에 의해서 결정한다. 그림 3.1에서 얻어지는 동결지수 값은 측후소 위치에서 관측한 값을 토대로 한 것이므로, 설계 노선의 표고에 대한 보정은 다음 식을 이용하여 계산한다.

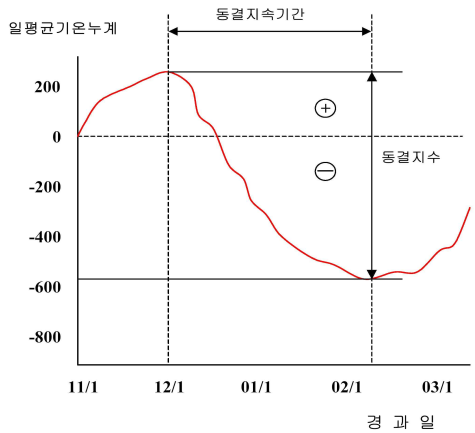


그림 3.1 동결지수 산정(예)

$$\text{정동결지수}\quad \cdot\text{일}) = \text{동결지수} + 0.9 \times \text{동결기간} \times \frac{\text{표고차}(m)}{100} \qquad (3.1)$$

여기서, 표고차(m) = 설계노선최고표고(m) - 측후소지반고(m)

그림 3.2와 그림 3.3은 각각 우리나라의 2014년 수정동결지수선도와 10년 빈도(2005 2014) 수정동결지수선도를 작성한 것이다.

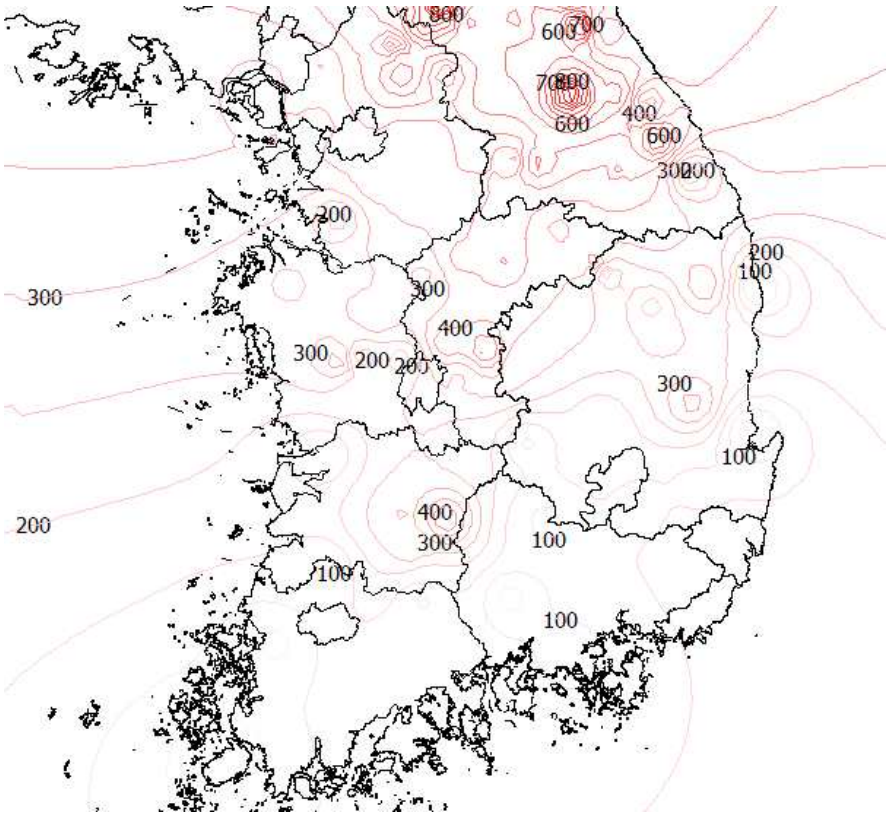


그림 3.2 2014년 수정동결지수선도

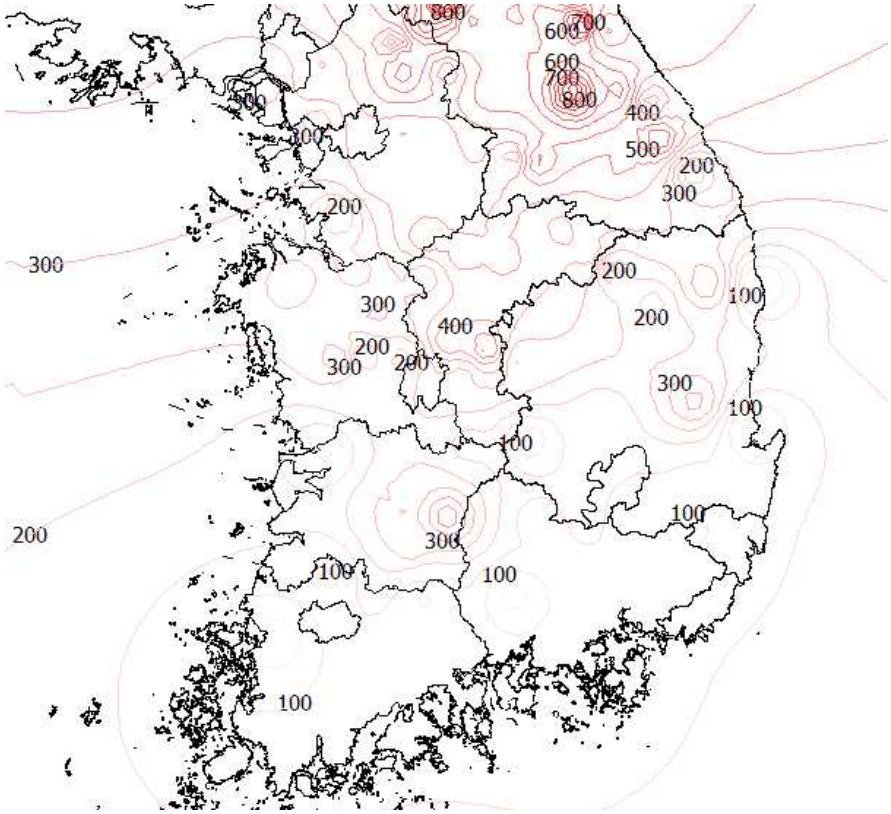


그림 3.3 10년 빈도(2005년-2014년) 수정동결지수선도

3.2 분석방법

우리나라의 동결깊이는 지역에 따라 0cm에서 159cm로 다양하게 나타났다. 일반적으로 동결지수가 높으면 동결깊이는 크게 되나 토질조건, 도로 포장두께, 음양(陰陽)조건, 지하수 등에 따라 동결깊이는 달라진다.

본 연구에서는 수정 Berggren식을 상수 C로 나타낸 간편식(식 3.2 참조)을 바탕으로 동결지수-동결깊이의 상관관계를 분석하였다. 이 관계로부터 지반의 제반성질을 포함하는 상수 C를 도출하였다.

동결지수는 측정지점의 인근 측후소에서 관측한 일평균온도자료를 사용하며 표고차를 수정한 수정동결지수(Fm)를 사용하였다.

$$z = C\sqrt{F_m} \tag{3.2}$$

여기서, z : 실측한 지역별 최대동결깊이(cm)

: 수정동결지수(℃・day)

$$\cdot F_m \quad \text{후소동결지수} + \frac{0.9 \times \text{동결기간} \times \text{표고차(m)}}{100}$$

· 표고차(m) = 동결깊이계 매설지점 표고(m) - 측후소 지반고(m)

C : 지반의 제반성질을 포함하고 있는 상수(열전도율, 함수비, 건조단위중량 등)

측정지점의 기온특성을 대표할 수 있는 측후소의 결정은 상관성 분석에 있어서 매우 중요한 요건이다. 기본적으로 설치된 동결깊이계 인근지역의 기상측후소에서 측정한 일평균 온도값을 이용하여 동결지수를 산정하였으나 인근 지역이라고 해도 설치지점의 기상조건과 상이한 측후소의 온도자료는 배제하고 그 특성을 대표하는 다른 측후소의 온도자료를 사용하여 동결지수를 산정하였다. 예를 들어 동해안 산간지역에 위치한 동결깊이계의 가장 인접한 측후소의 위치가 해안지역이라면 해안지역에서 산출한 동결지수가 산악지역에 설치된 지점의 기상조건을 대변할 수 없을 것이다. 따라서 이런 경우를 감안하여 해안지역보다는 조금 먼 위치라도 내륙지역의 측후소에서 산출한 동결지수가 동결깊이계의 설치지역과 비슷한 경향을 나타낼 것이다.

이와 같이 본 연구에서는 측정한 연도별 최대 동결깊이와 해당되는 동결지수와의 상관관계를 통해 전국별, 지역별, 음양(陰陽)조건별로 상수 C값을 도출하였다.

3.3 2014년도 동결지수-동결깊이 분석결과

3.3.1 전국별 동결지수-동결깊이 상관성

당해연도(2014) 최대동결깊이 측정치와 해당되는 수정동결지수와의 관계를 통해 그림 3.4과 같이 전국 수정동결지수-동결깊이 상관곡선을 도시하였다.

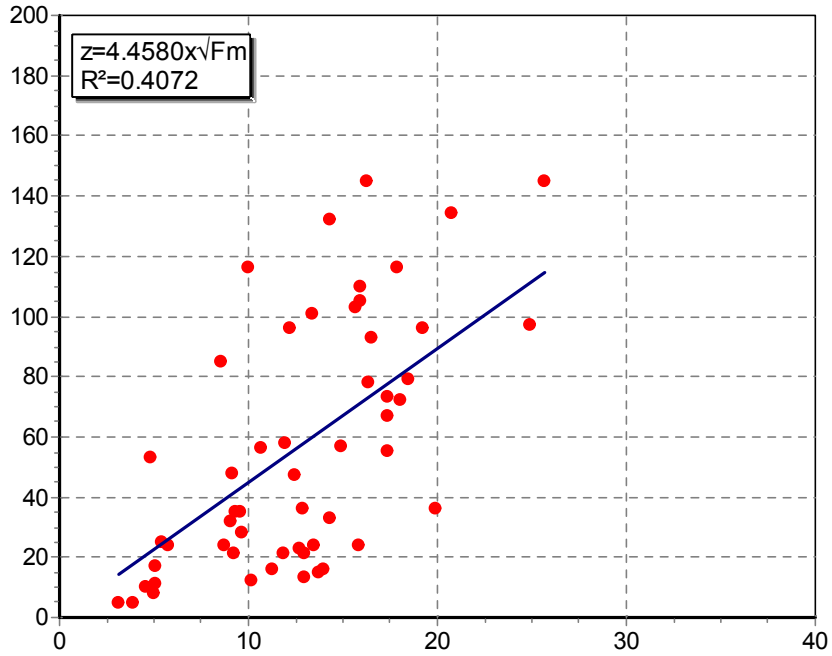


그림 3.4 전국 수정동결지수-동결깊이 상관곡선(2014년)

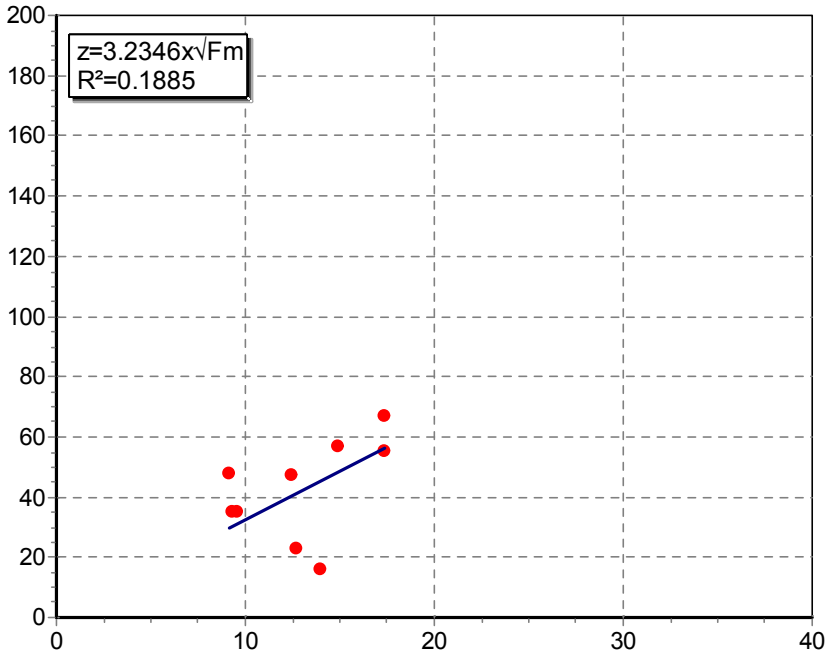
이 결과로부터 얻어지는 수정동결지수-동결깊이 상관관계식은 다음과 같으며, C값은 4.46이다.

$$= 4.46 \tag{5.3}$$

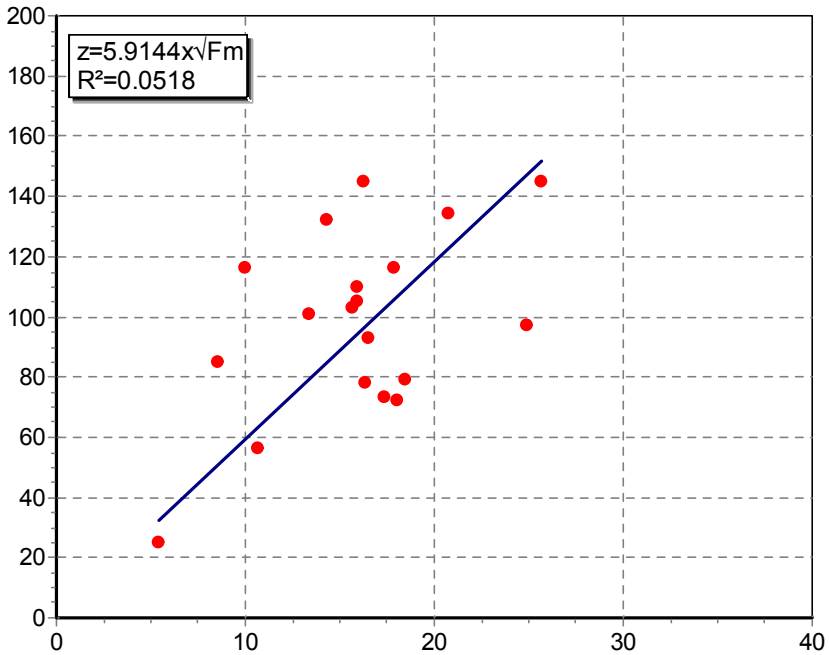
3.3.2 지역별 동결지수-동결깊이 상관성

2014년도 지역별 최대동결깊이 측정치와 해당되는 수정동결지수와의 관계를 통해 그림 3.5에 지역별 수정동결지수-동결깊이 상관곡선을 도시하였다.

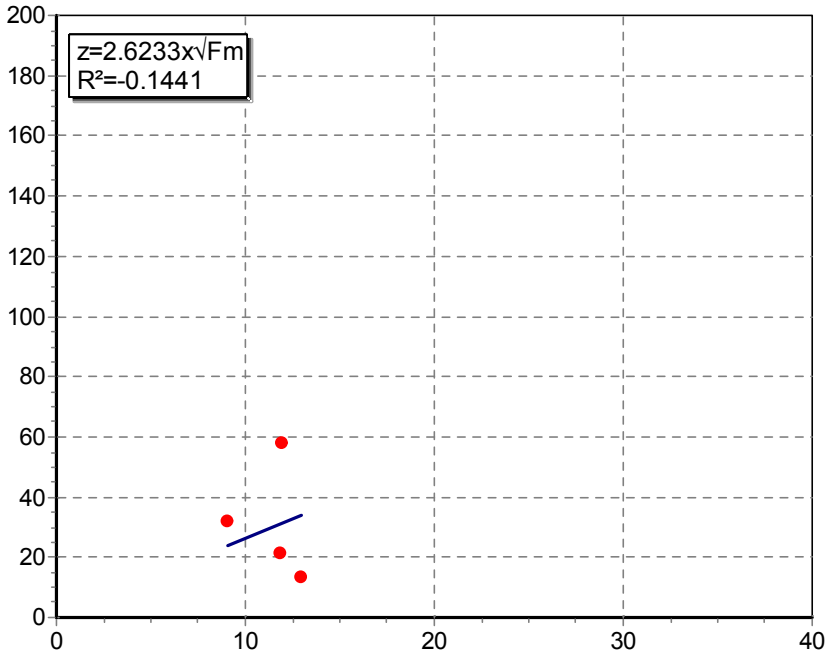
또한 그래프에 나타난 상관관계식을 표 3.1에 정리하였다.


z=3.2346x√Fm
R²=0.1885
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
10
20
30
40

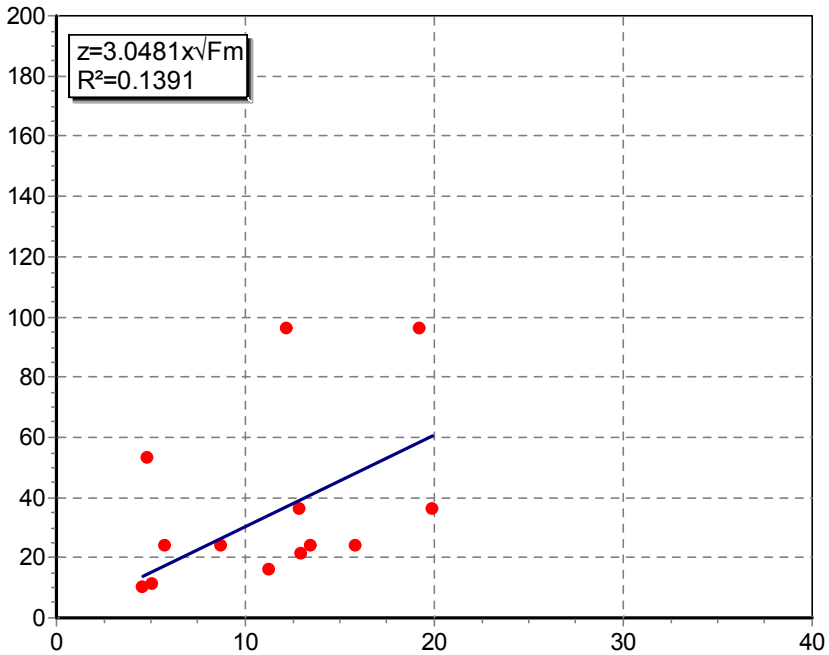
(a) 경기지역


z=5.9144x√Fm
R²=0.0518
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
10
20
30
40

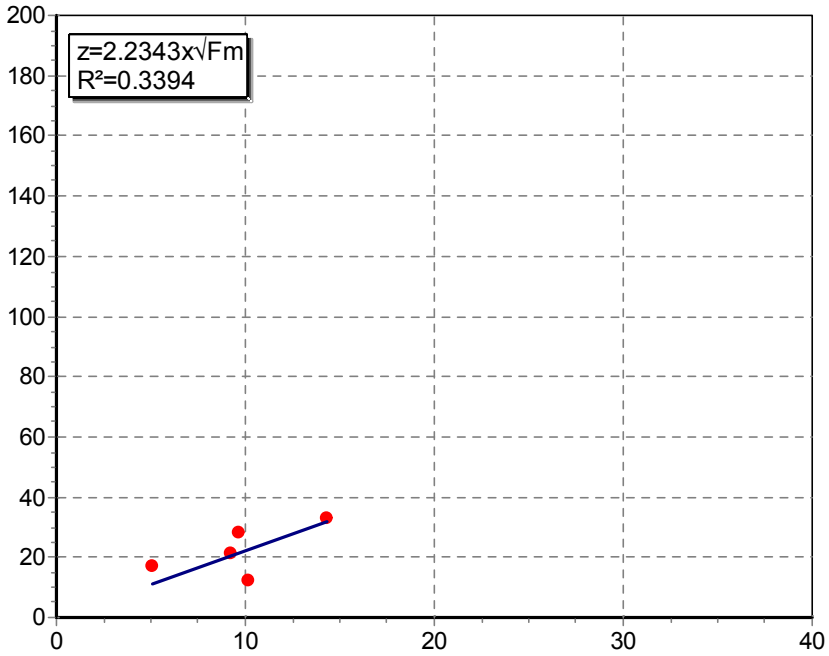
(b) 강원지역


z=2.6233x√Fm
R²=-0.1441
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
10
20
30
40

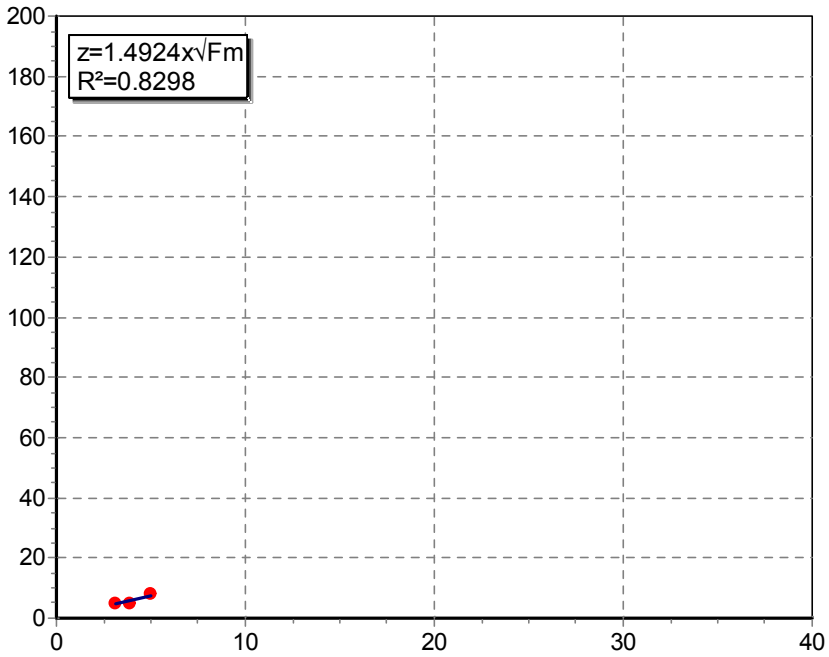
(c) 충청지역


z=3.0481x√Fm
R²=0.1391
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
10
20
30
40

(d) 경북지역



(e) 전북지역



(f) 남부지역

그림 3.5 지역별 수정동결지수-동결깊이 상관곡선(2014년)

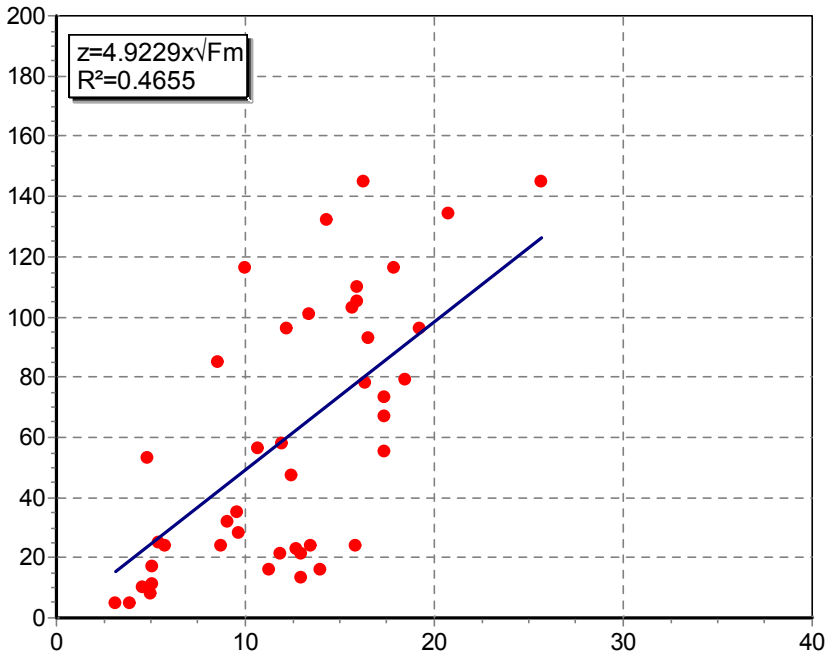
표 3.1 지역별 수정동결지수-동결깊이 상관관계식(2014년)

- 경기지역 :	- 경북지역 :
- 강원지역 :	- 전북지역 :
- 충청지역 :	- 남부지역 :

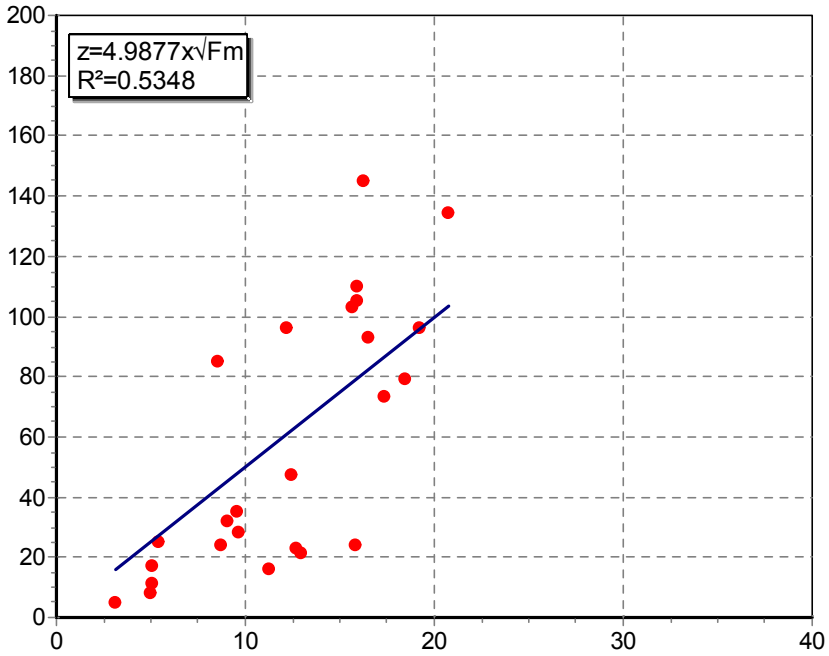
3.3.3 음양조건에 따른 동결지수-동결깊이 상관성

음양(陰陽)조건에 따른 동결깊이의 변화를 분석하기 위해 당해연도(2014년) 측정자료 중에서 음지지역, 반음지 지역(일사량이 조금만 비추어도 통상적으로 반음지라 일컬음), 양지지역으로 구분하여 동결지수-동결깊이 상관관계를 분석하였다.

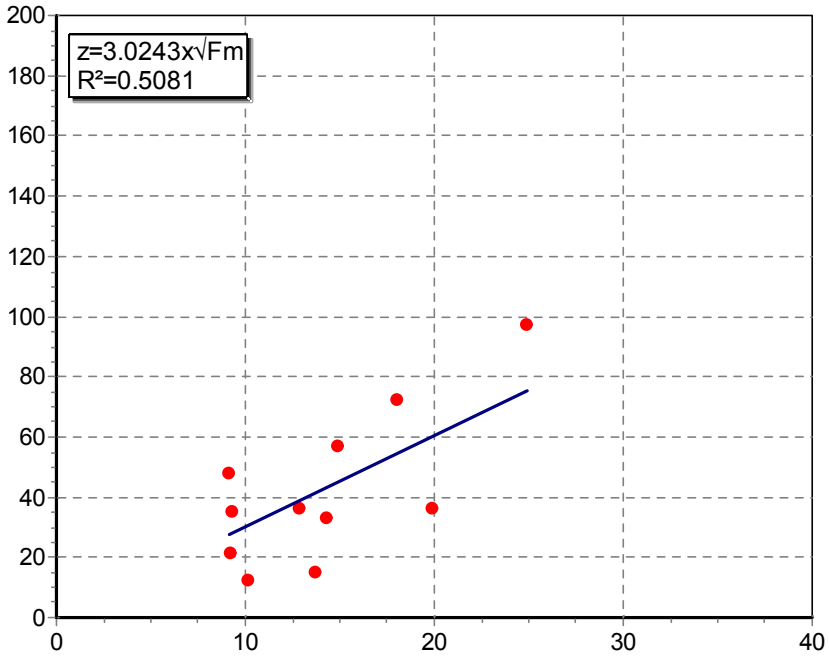
음양조건에 따른 수정동결지수-동결깊이 상관곡선은 그림 3.6과 같다. 각각의 음양조건에 도출한 상수 C값은 음지지역 : 4.92, 반음지지역 : 4.99, 양지지역 : 3.02으로 나타났다.



(a) 음지지역



(b) 반음지지역



(c) 양지지역

그림 3.6 음양조건에 따른 수정동결지수-동결깊이 상관곡선(2014년)

3.4 1991~2014년도 누적데이터 분석결과

3.4.1 전국 동결지수-동결깊이 상관성

전국 90개 지점 988개의 동결깊이 측정값(서울 도심부 및 제주지역 제외)과 전국 30개 기상측후소의 온도자료로부터 도출한 동결지수를 이용하여 동결깊이와 수정동결지수와의 상관곡선을 그림 3.7에 나타내었다.

이 결과로부터 얻어지는 수정동결지수-동결깊이 상관관계식은 다음과 같으며, C값은 4.62이다.

$$= 4.62 \tag{5.4}$$

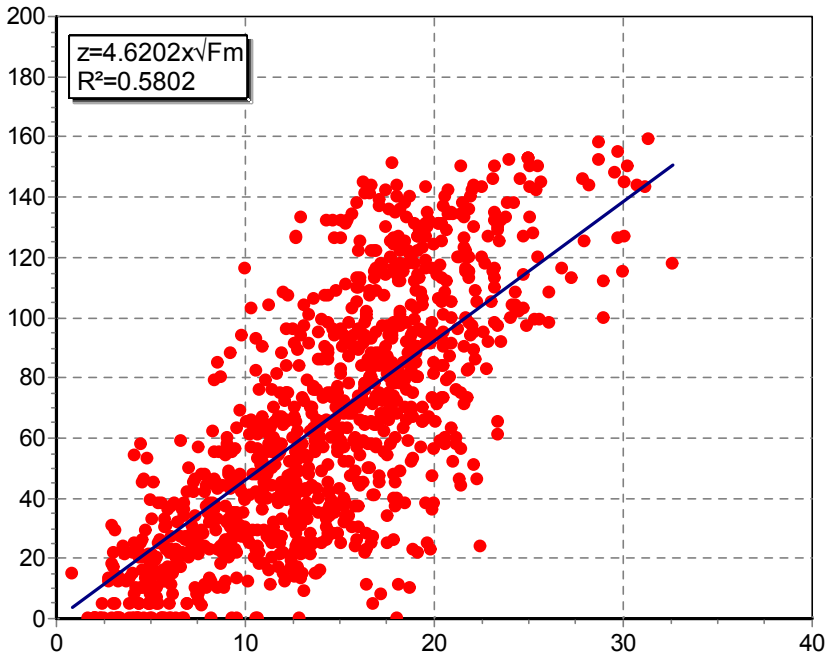
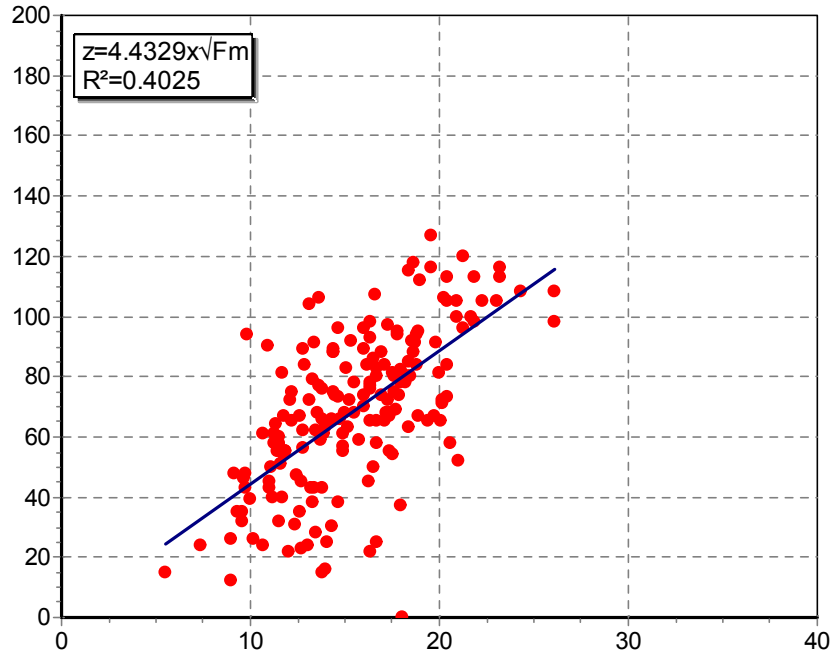


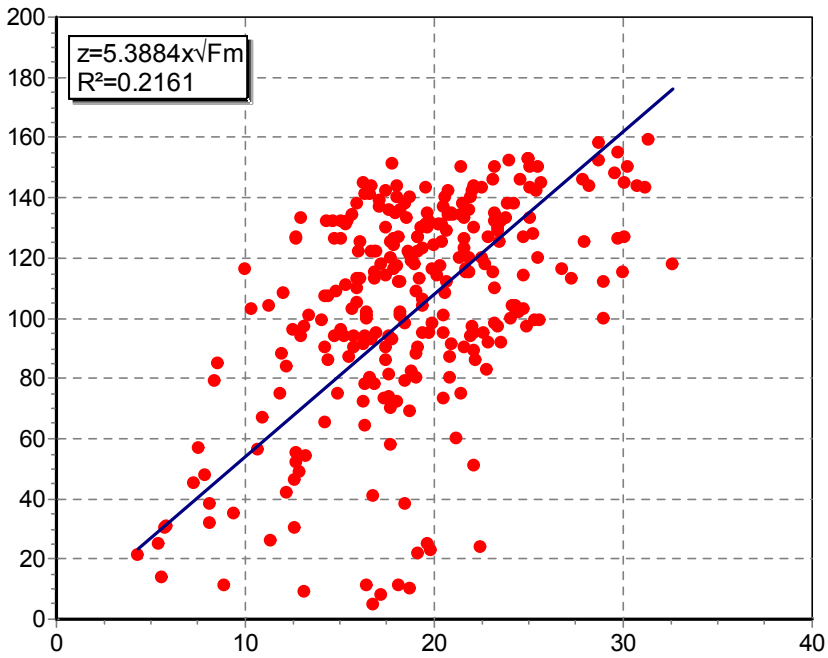
그림 3.7 전국 수정동결지수-동결깊이 상관관계 곡선(1991년 2014년)

3.4.2 지역별 수정상수(a) 산정

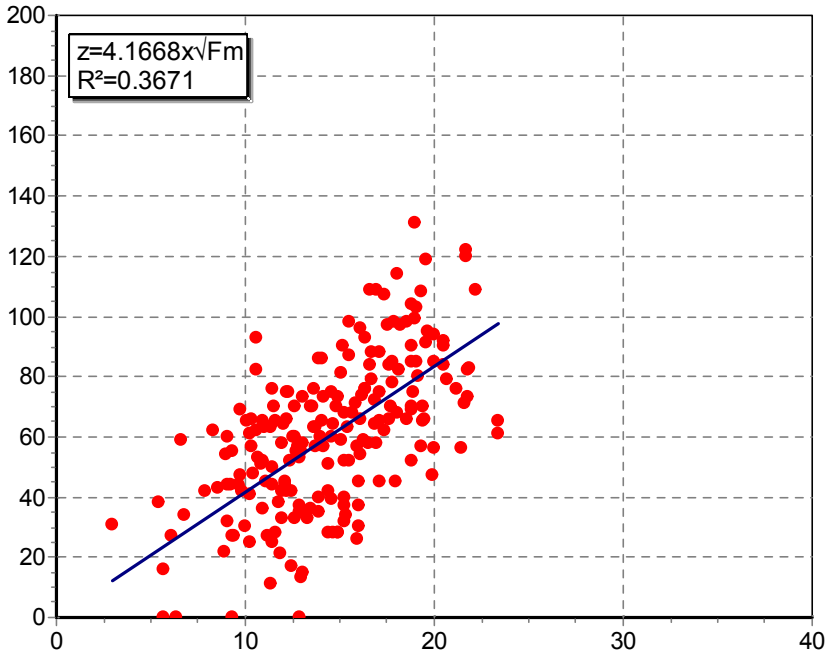
그림 3.8의 결과로부터 지역에 따른 동결깊이와 수정동결지수와의 상관곡선을 도시하여 상수 C값을 표 3.2와 같이 산출하였다.


z=4.4329x√Fm
R²=0.4025
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
10
20
30
40

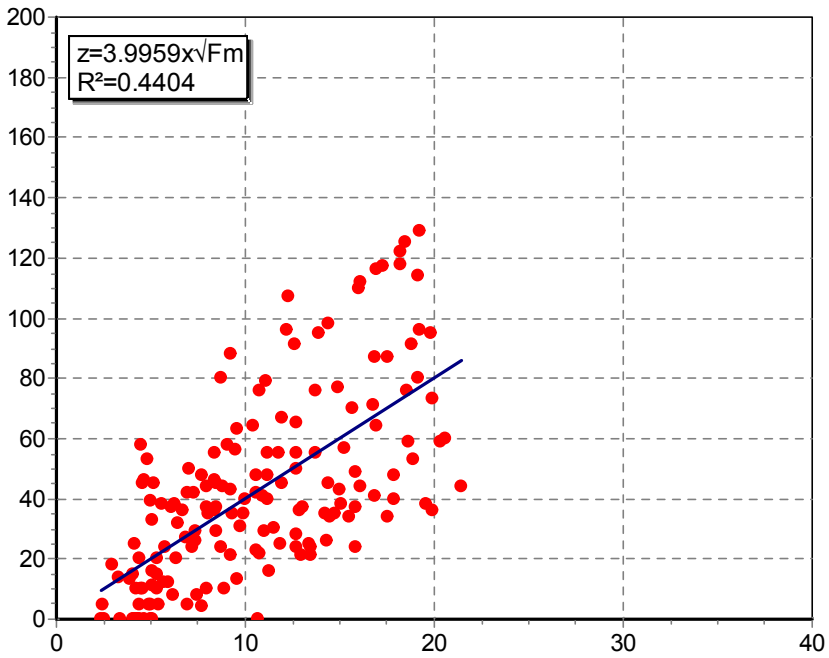
(a) 경기지역


z=5.3884x√Fm
R²=0.2161
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
10
20
30
40

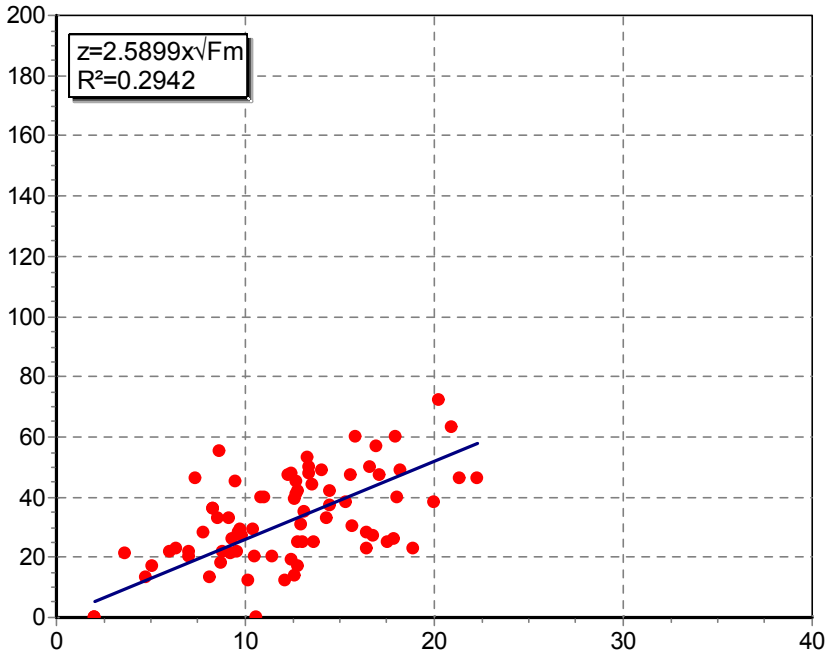
(b) 강원지역


z=4.1668x√Fm
R²=0.3671
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
10
20
30
40

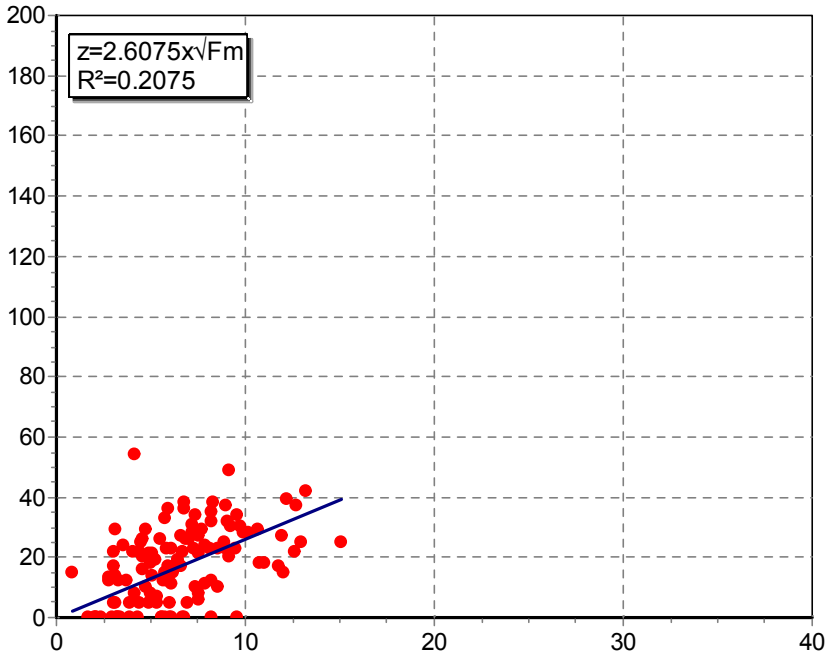
(c) 충청지역


z=3.9959x√Fm
R²=0.4404
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
10
20
30
40

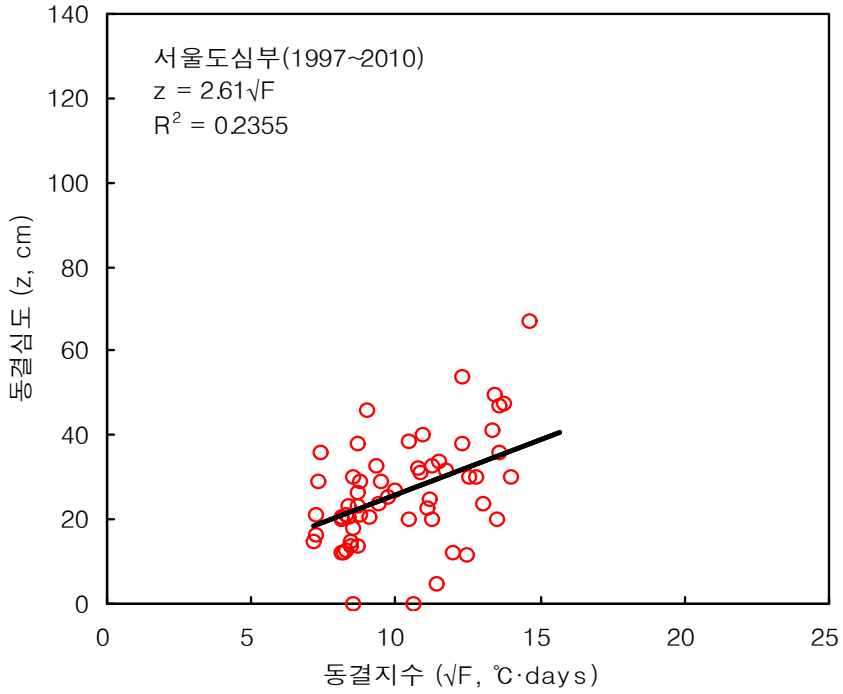
(d) 경북지역


z=2.5899x√Fm
R²=0.2942
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
10
20
30
40

(e) 전북지역


z=2.6075x√Fm
R²=0.2075
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
10
20
30
40

(f) 남부지역



(g) 서울도심부

그림 3.8 지역별 수정동결지수-동결깊이 상관관계 곡선(1991년 2014년)

표 3.2 지역 보정상수(a)

지역구분	상수C	보정상수
경기지역	4.43	0.96
강원지역	5.39	1.17
충청지역	4.17	0.91
경북지역	3.99	0.85
전북지역	2.59	0.56
남부지역	2.61	0.56
서울도심부	2.61	0.56

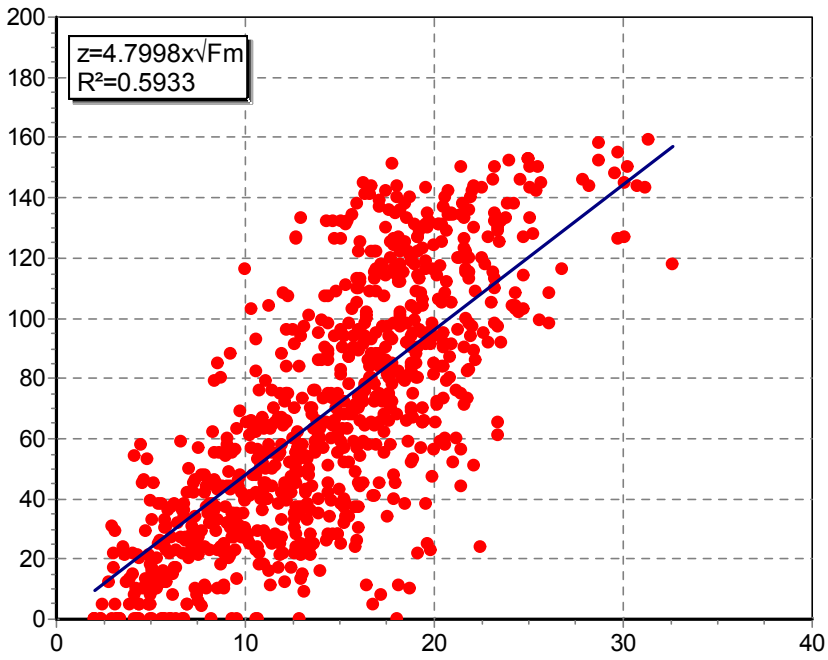
지역별 음양 조건을 살펴보면 경기, 강원, 충북, 경북 등 산간내륙 지역은 대부분 음지 또는 반음지지역이다. 남부지역, 해안지역은 대부분 평지지역이며 대부분이 양지 지역으로 파악되었다(음지지역 : 설치된 지점이 일사량의 영향을 전혀 받지 않는 지역, 반음지지역 :

일부 일사량에 영향을 받는 지역, 양지지역 : 설치된 지점이 일사량의 영향을 지속적으로 받는 지역).

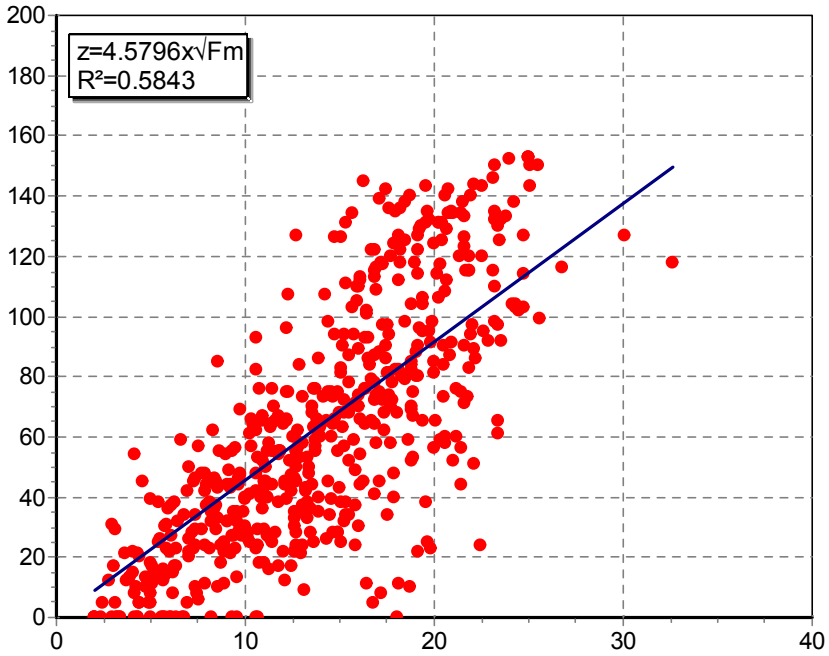
서울도심부의 6개 지점(서울시 관리)의 동결깊이 측정장치는 전부 양지에 매설되어 있다. 서울도심부는 외곽의 국도와는 달리 건물로 둘러싸여 있어 어느 정도의 보온현상이 있는 것으로 판단된다. 도심지 도로의 경우 일반 국도나 고속국도보다 인구가 집중되고 아파트 및 시설물 등의 밀도가 상대적으로 높아지게 되어 열흡수율 등의 상승으로 인한 도시 열섬효과가 있는 것으로 판단된다.

3.4.3 일사(日射) 조건에 따른 보정상수(s)

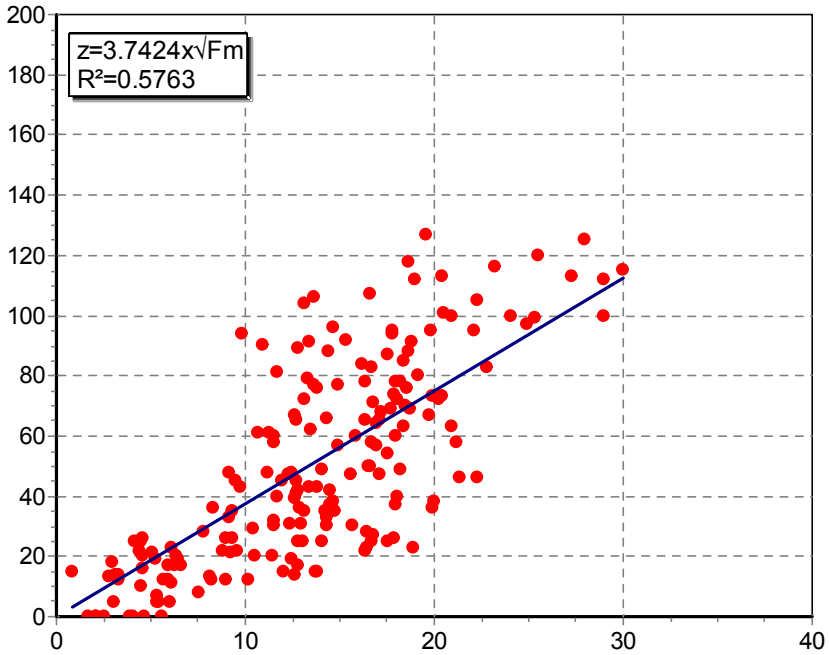
그림 3.9에 일사조건에 따른 음양지역의 수정동결지수-동결깊이 상관곡선을 도시하였다. 서울지역을 제외한 분석지역 90개 동결깊이계 매설지점 중에서 음지지역 23개소, 반음지지역 47개소, 양지지역 20개소로 분류하였다.



(a) 음지지역



(b) 반음지지역



(c) 양지지역

그림 3.9 음양조건에 따른 수정동결지수-동결깊이 상관 곡선(1991～2014)

음양조건에 의해 도출한 상수 C는 음지지역은 4.79, 반음지지역은 4.55, 양지지역은 3.80로 나타났다.

음양조건을 감안하기 위한 보정상수를 산출하기 위해 식 (4.4)의 전국평균 산정식을 음양조건에 따른 상수 C로 환산하기 위한 비교보정상수를 결정하였다. 보정상수는 음지조건( ), 반음지조건(S_2), 양지조건(S_3)으로 구하였다. 각각의 보정상수는 S_1=1.02, S_2=0.97, S_3=0.81로 나타낼 수 있다.

표 3.3 일사조건에 따른 동결깊이 보정상수(s)

일사조건	상수C	보정상수
음지지역, S_1	4.80	1.04
반음지지역, S_2	4.58	0.99
양지지역, S_3	3.74	0.81

3.5 기존식과의 비교

3.5.1 전국평균과 기존식과의 비교

3.10은 전국 동결지수-동결깊이 상관곡선과 기존의 미공병단식, 데라다식, Cohen식, 국립건설시험소식에 대한 상관곡선을 함께 도시한 것이다.

3.5.2 지역별 평균과 기존식과의 비교

그림 3.10은 지역별 동결지수-동결깊이 상관곡선과 기존의 미공병단식, 데라다식, Brown식, Cohen식, 국립건설시험소식에 대한 상관곡선을 함께 도시한 것이다.

그림 3.11에서 미공병단식은 강원지역의 산정곡선과 비슷한 경향을 보였다. 데라다식은 충남지역과 전북지역 사이에 분포하였다. 또한 건설시험소식은 경기, 충북, 경북지역과 비슷한 경향을 보이나, 동결지수 400℃·day을 기준으로 그 이하에서는 곡선이 크게 나타나며, 400℃·day이상에서는 작게 나타났다. 반면 남부지역, 서울도심, 제주지역은 기존식보다 낮게 나타났다.

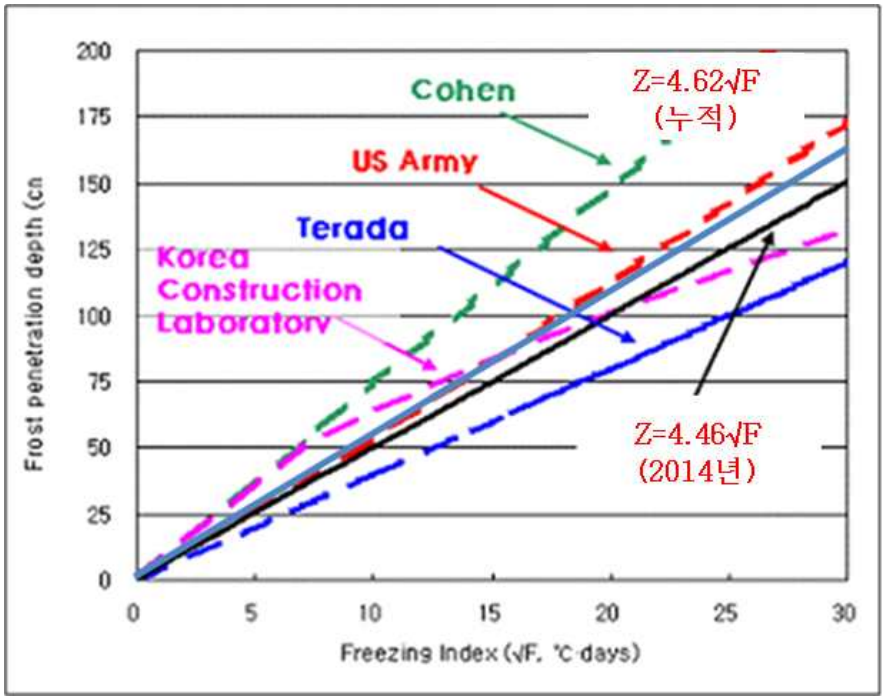


그림 3.10 전국 평균식과 기존식과의 비교

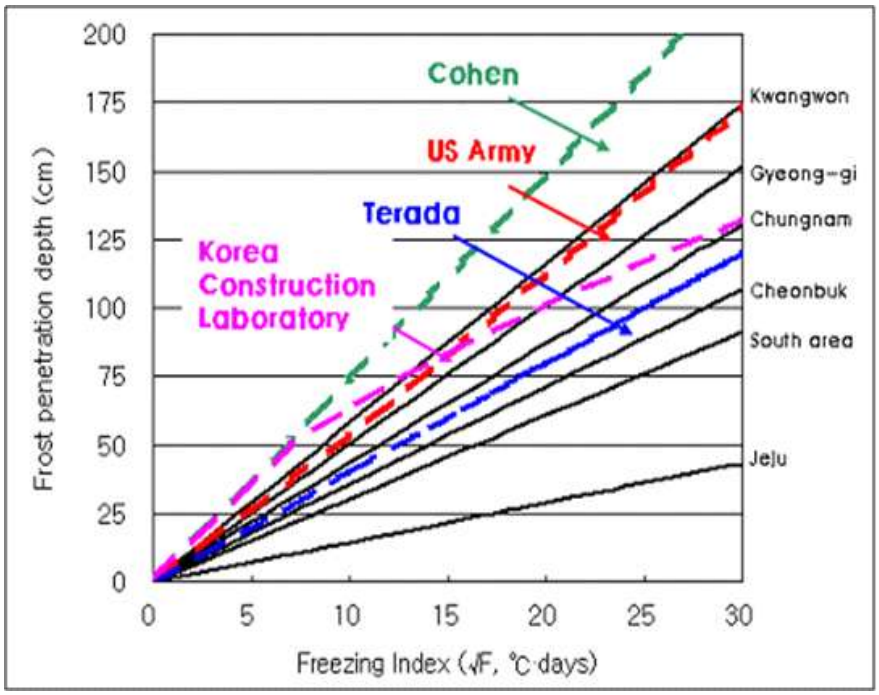
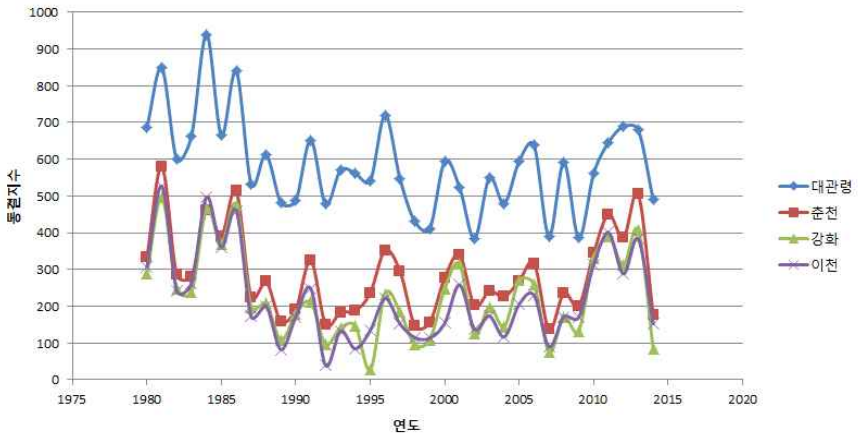


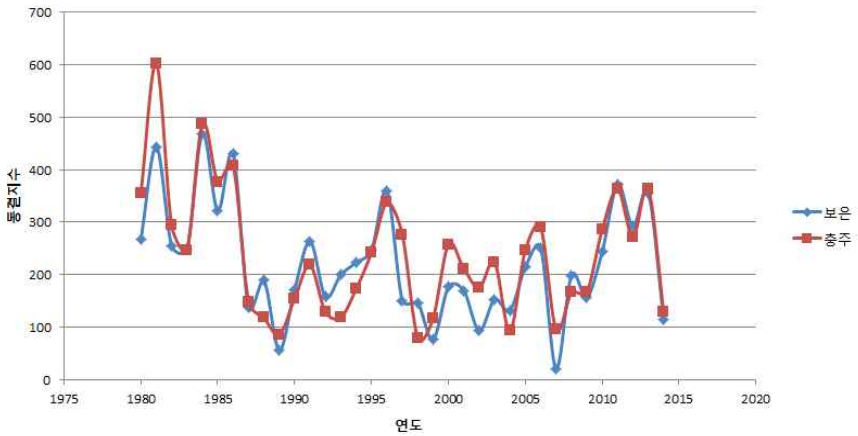
그림 3.11 지역별 평균식과 기존식과의 비교

3.6 동결지수 변화(30년)

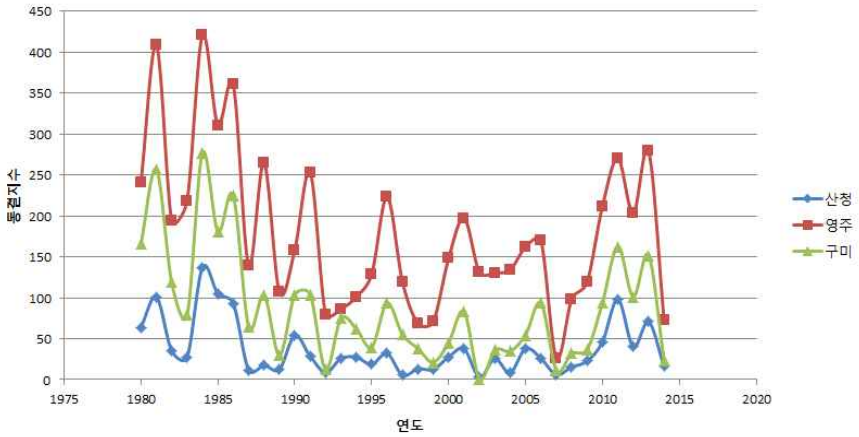
설계노선의 설계 동결지수의 산정은 대상 지역의 인근 측후소에서 관측한 월 평균 대기온도의 크기와 지속기간에 대한 30년간의 기상자료에서 추위가 가장 심하였던 3년간(즉 동결지수의 최대 3년치)의 평균동결지수로 정한다. 만일 30년간의 기상자료가 없으면 최근 10년간의 최대동결지수를 설계동결지수로 산정한다. 그림 3.12에 30년간 동결지수 변화를 나타내었다. 동결지수의 변화를 분석해 보면, 대관령 지역은 30년 설계동결지수가 749.8℃·일, 10년 설계동결지수가 689.5℃·일로 나타난다. 충주 지역은 30년 설계동결지수가 382.8℃·일, 10년 설계동결지수가 363.3℃·일로 나타나며, 영주 지역은 30년 설계동결지수가 316.8℃·일, 10년 설계동결지수는 279.2℃·일로 나타난다. 최근 10년간 동결지수가 꾸준하게 상승하고 있는 것으로 관찰되었다.



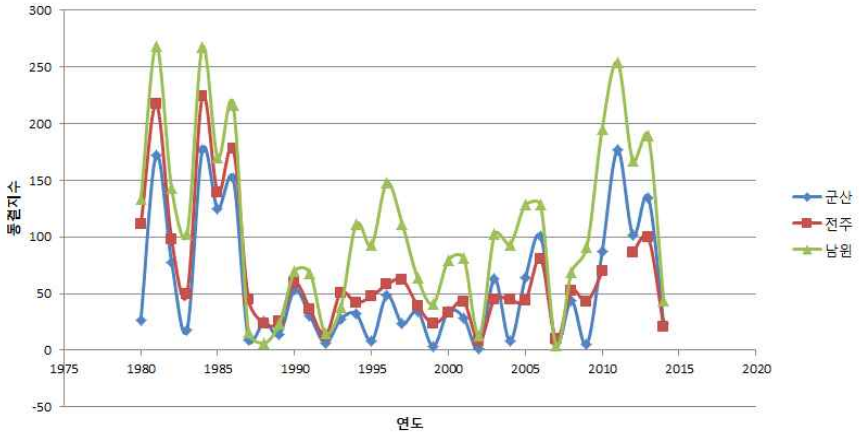
(a) , 강원지역 동결지수 변화



(b) 충청지역 동결지수 변화



(c) 동결지수 변화



(d) 전라지역 동결지수 변화

그림 3. 12 지역별 동결지수 변화 그래프(1981년 2014년)

표 3.4 동결지수 비교표

지점	30년	20년	10년	지점	30년	20년	10년
대관령	749.8	704.5	689.5	산청	98.8	84.5	98.3
춘천	489.5	477.5	504.6	영주	316.8	274.8	279.2
강화	424.2	398.0	406.3	구미	189.6	157.3	162.7
이천	414.0	391.5	400.3	군산	154.4	155.7	176.4
보은	387.3	366.0	371.7	전주	138.8	92.9	99.6
충주	382.8	363.1	363.3	남원	221.9	224.7	254.1

표 3.5 연도별 한파주의보 발표 일수

년도	발표 일수	서울	경기	강원	충청	경상	전라	울릉	제주
2001	1	0	1	1	1	1	1	0	0
2002	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2003	3	3	3	2	3	2	3	1	0
2004	4	4	4	4	1	0	1	0	1
2005	6	3	6	6	6	3	0	0	0
2006	2	2	2	2	2	0	0	0	0
2007	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2008	14	4	7	14	4	4	3	0	0
2009	20	4	14	9	5	12	9	0	2
합계	50	20	37	38	22	22	17	1	3

대관령 지역의 30년 및 10년 설계동결지수의 차이는 21%, 충주지역은 17%, 영주지역은 30%로 나타났다. 2014년의 경우 대관령지역을 제외하고 2012년에 비해 동결지수가 높아진 것으로 관측되었다. 최근 북극의 이상고온, 해빙면적 감소 등의 영향으로 북극의 찬 공기를 차단시켜 주는 역할을 하는 강풍대가 약화되어 북극의 찬 공기기 중위도까지 내려오면서, 우리나라에 한파와 대설이 자주 발생했다(기상청, 2014). 표 5.7은 2001년부터 2009년까지 우리나라 전역에서 발표된 지역별 한파주의보 발령 일수를 나타내고 있다(소방방재청, 2009). 2001년부터 2009년까지 총 50회의 한파주의보가 발표되었으며, 경기도와 강원도에서 9년 동안 각각 37회와 38회가 발표되었다. 한파주의보 발표 일수가 점진적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 최적의 동상방지층 및 매설관 설계를 위해서는 지속적인 동결깊이 측정, D/B 구축 및 동결지수 변화의 관찰이 중요한 것으로 판단된다.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 건설기술혁신사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토해양부에서 시행한 건설기술혁신사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.