과제번호 12PRTD-C060001-02

철도구조물의 동해방지공법 및 설계·시공·유지관리지침 개발

국토교통과학기술진흥원

국토교통부

Ministry of Land Infrastructure and Transport R&D Report

미래철도기술개발사업 최종보고서

12PRTD-C060001-02

# 철도 구조물의 동해방지공법 및 설계·시공·유지관리지침 개발

## -철도용 동결깊이 산정 연구 중심-

2013. 7.


주관연구기관 / 한국건설기술연구원
협동연구기관 / 선구엔지니어링(주)
위탁연구기관 / 인하대학교



국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

# 제 출 문

국토교통부 장관 귀하

이 보고서를 "철도구조물의 동해방지공법 및 설계, 시공, 유지관리지침 개발에 관한 연구(철도용 동결깊이 산정 연구 중심)"과제의 보고서로 제출합니다.

2013. 7. 30.


주관연구기관명 : 한국건설기술연구원

주관연구책임자 : 김 영 진

연 구 원 : 이 대 영
이 민 우
성 기 태
강 재 규
김 현 석
김 은 영
황 세 연

협동연구기관명 : 선구엔지니어링(주)

협동연구책임자 : 장 두 식

연 구 원 : 김 현 수
송 명 호

위탁연구기관 : 인하대학교

연구책임자 : 윤 여 원

연 구 원 : 안 대 하
김 동 관
김 태 우
도 진 웅
황 정 근

위탁연구기관 : 컴택리서치

연구책임자 : 김 광 진

연 구 원 : 이 하 영

최종보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>12PRTD-C060001-02</td><td>해 당 단 계<br>연 구 기 간</td><td>2011.9.30-<br>2013.7.30</td><td>단 계 구 분</td><td>(해당단계)/<br>(총 단 계 )</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 사 업 명</td><td>중 사 업 명</td><td colspan="4">미래철도기술개발사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">미래철도기술개발사업</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">철도구조물의 동해방지공법 및 설계, 시공, 유지관리지침 개발<br>- 철도용 동결깊이 산정 연구 중심-</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">김 영 진</td><td>해당단계<br>참 여<br>연구원수</td><td>총 : 19명<br>내부: 7 명<br>외부: 12 명</td><td>해당단계<br>연 구 비</td><td>정부 :250,000천원<br>기업 : 83,400천원<br>계 : 333,400천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간<br>참 여<br>연구원수</td><td>총 : 19명<br>내부 :7명<br>외부 :12명</td><td>총연구비</td><td>정부 : 550,000천원<br>기업 : 183,400천원<br>계 : 733,400천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및<br>소 속 부 서 명</td><td colspan="2">한국건설기술연구원<br>Geo- 인프라연구실</td><td>참여기업명</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="5">상대국명 : 상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td>위 탁 연 구</td><td colspan="5">연구기관명 :인하대학교 연구책임자 : 윤여원</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td>491</td></tr>
<tr><td colspan="6">국내외 철도시설물의 동상피해 실태를 분석하였다. 국내 동상발생 철도현장의 흙을 채취한 후 온도변화별 열전도율과 부동수분량을 시험하였다. 콘크리트에 대한 온도 변화별 열전도율 변화를 분석하였다.<br>대형 냉동챔버에 모형 철도도상을 축조한 후 XPS, EPS, PE골재 등의 단열재층과 자갈층을 설치한 후 시간경과별 동결깊이 변화 시험을 실시, 단열재 설치 시 찬 외기 차단 효과를 분석하였다.<br>실제 철도현장에 자갈 및 콘크리트도상을 축조한 후 2년간 동결지수 변화에 따른 동결깊이 및 동상량을 실측하였고, 동결지수와 동결깊이 상관식을 제안하였다.<br>자갈도상의 동결깊이 차단용으로 PE골재 혼합 아스팔트층을 설치하는 방안을 강구하였고, PE골재혼합 아스팔트에 대한 마살안정도시험, 동결융해 후의 인장강도시험, 초음파시험과 wheel tracking을 통한 동적안정도시험을 수행하였다.<br>철도용 자갈 속의 분니 함유율별 동상량시험과 강화노반재에 대한 동상력시험 및 지지력 평가를 실시하였다.<br>철도 현장용 동결깊이 해석 프로그램과 융해압밀 평가 프로그램을 구축하였다.<br>철도 Box 구조물 결로 방지 대책을 분석하였다.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어<br>(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">콘크리트도상, 자갈도상, 동결심도, 단열재, 융해압밀</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">concrete track, ballast track, frost depth, insulation material, thawing settlement</td></tr>
</table>

# 요 약 문

## Ⅰ. 제 목

철도 구조물의 동해방지공법 및 설계, 시공, 유지 관리 지침 개발

## Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

2018년 평창 동계올림픽에 대비한 원주-강릉간 고속철도가 착공되어 동토지역 철도시설물의 동상대책을 강구해야 한다. 아울러 타 지역 기존 재래식 철도에서도 동상 피해가 자주 발생하고 있어 철도의 안전운행과 내구성 확보 차원에서 동상에 대한 종합적 연구가 필요하다.

본 연구에서는 재래식 철도의 자갈도상과 KTX용 콘크리트도상에 대한 동결깊이 산정식(안)을 제안하였고, 자갈도상 하부에 PE골재 혼합 아스팔트 사용 시 동결깊이 감소 효과를 시험하는 한편 자갈궤도의 분니 함유량별 동상량 변화와 강화노반재의 함수비 변화에 따른 동상력을 실험분석하였다. 또한 철도용 동결깊이 산정 프로그램과 도상 하부 노반의 융해 침하 발생 시 거동 해석 프로그램을 구축하였다. 아울러 콘크리트도상 하부 노반의 안정성 평가를 통해  철도 시설물의 내구성 향상방안을 마련하였다.

## Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

○ 국내외 철도 시설물의 동상 피해 사례 조사 분석

○ 국내 철도 동상 발생 지역 흙에 대한 열전도 및 부동수분 시험 분석

○ XPS, PE골재 등 단열재 사용 시 도상 하부로의 동결깊이 침투 감소 효과 실내실험

○ 철도용 자갈 속 분니 함유량별 동상량 실험 분석

○ KTX용 강화 노반재의 함수비 변화별 동상력 실험 분석

○ 자갈도상에서의 동결깊이 산정식(안) 제안

○ 콘크리트도상에서의 동결깊이 산정식(안) 제안

○ 철도 동결깊이 산정용 프로그램 및 융해 압밀 해석 프로그램 구축

○ 콘크리트도상 하부 노반의 안정성 평가

○ 철도용 Box 구조물 결로 원인 및 방지 대책 제시

## Ⅳ. 연구개발 결과

○동일한 동결지수에서도 콘크리트도상의 동결깊이가 자갈도상의 동결깊이 보다 깊게 나타났다.

○ XPS, PE골재 등 단열재 사용 시 동결깊이가 상당량 감소되었다.

○ 철도용 자갈 속 분니 함유량이 자갈 무게의 5% 이상일 경우 동상 발생 가능성이 높아지므로 분니 제거대책을 수립할 필요성이 커지는 것을 알 수 있었다.

○ 가을철 강우 등으로 콘크리트도상 하부 강화노반의 함수량이 21% 이상 증가할 경우 동상에 의한 콘크리트도상의 융기 발생 가능성이 커지므로 배수대책을 철저히 세워야 할 것으로 판단되었다.

○ 콘크리트도상 및 자갈도상의 동결깊이 예측을 위한 동결깊이 산정식(안)을 제안하였다.

○ 철도 도상의 동결깊이 해석 및 노반의 융해 압밀 해석에 이용할 수 있는 프로그램을 구축하였다.

○철도용 Box구조물의 결로 원인 분석과 결로 방지대책을 제시하여 철도 구조물의 내구성 향상에 일조하도록 하였다.

## Ⅴ. 연구개발 결과의 활용계획

○ 재래선 철도의 동상 방지에 활용

○ 원주- 강릉간 고속철도 등 북부지방 고속철도 계획, 설계, 시공 시 활용

○ 기존 철도 구조물의 결로 방지에 활용

○ 장래 북한 내 철도 건설이나 시베리아 횡단 철도의 계획 · 설계, 시공 시 활용

# Summary

## Ⅰ. Title

Development of anti-freeze method, design, construction and maintenance manual for railway structure

## Ⅱ. Objective and need of the study

In line with commencement of Wonju-Gangreung high speed rail in preparation for 2018 Pyeongchang Winter Olympic, need of developing anti-freeze measure is emphasized, and given the increasing frost damage to traditional railway, comprehensive study on safe operation and enhancing durability are required as well.

This study is intended to come up with the equation to calculate the frost penetration depth in ballast track of traditional railway and concrete track for KTX, frost penetration depth reduction effect when using PE aggregate-mixed asphalt under ballast track and frost heaving in ballast track depending on content of mud and frost heaving in frozen reinforced trackbed. Moreover, the program for estimating frost penetration depth in railway and the behavior analysis program when thawing settlement occurred under the track were developed, and trackbed stability evaluation to enhance the durability of railway facilities was also conducted

## Ⅲ. Contents and scope of the study

- ○ Analysis of the domestic cases of damages by freezing and thawing
- ○ Analysis of thermal conductivity of soil at frost heaving site and test of unfrozen water and basic properties
- ○ Lab. test of the effect on frost penetration depth when using insulation material such as XPS or PE aggregate
- ○ Analysis of the frost heaving test by content of mud in ballast.
- ○ Test & analysis of frost heaving of reinforced trackbed material
- ○ Development of equation to calculate frost penetration depth in ballast track

○ Development of equation to calculate frost penetration depth in concrete track

○ Development of program to calculate railway frost penetration depth and thawing consolidation analysis program

○ Evaluation of frost heaving resistance of concrete trackbed

## Ⅳ. Outcome of the study

○ Under same freezing index, frost penetration depth of concrete track was deeper than ballast track.

○ Frost penetration depth was significantly reduced when using insulation material such as XPS or PE aggregate.

○ When mud was 5% or more in weight of ballast, possibility of frost heaving was increased and the measure to remove mud is required.

○ When moisture content in reinforced roadbed material was 21% or more, it may cause frost heaving and it's necessary to provide drainage system.

○ The equation to estimate frost penetration depth in concrete track and ballast track was proposed

○ The program to be used for estimating railway frost penetration depth and thawing consolidation analysis was developed.

## Ⅴ. Plan to use the outcome of the study

○ Use for preventing traditional railway from frost heaving

○ Use for designing railway at northern region such as Wonju-Gangreung high speed railway

○ Use for planning or designing potential projects including railway projects in North Korea or trans-siberian railway.

# 목 차

제 1 장 서 론 ····· 1

제 2 장 국내외 기술개발 현황 ····· 6

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 13
제 1절 국내외 철도시설물 동해 실태 조사 분석 ····· 13
1. 국내 철도 시설물의 동해실태 ····· 13
2. 국외철도 시설물의 동해실태 ····· 18
제 2절 철도 동상 발생지 흙에 대한 동토공학적 기본성질 실내 실험 ····· 20
1. 흙 및 콘크리트 열전도율 시험 ····· 20
2. 단열재 혼합토에 대한 열전도율 ····· 24
3. 철도 자갈도상 축소 모형 실험 ····· 35
4. 동상발생지 흙에 대한 부동수분 시험 ····· 41
제 3절 철도 자갈도상과 콘크리트도상에서의 동결깊이 및 동상량 실측 ····· 49
1. 동결깊이 측정의 의의 ····· 49
2. 자갈도상에 대한 동결깊이 및 동상량 측정 결과 ····· 58
3. 콘크리트도상에 대한 동결깊이 및 동상량 측정 결과 ····· 61
4. 자갈도상과 콘크리트도상에서의 동결깊이 차이 ····· 64
제 4절 국내 철도현장 동결깊이 해석 프로그램 개발 ····· 66
1. 동결깊이 해석프로그램의 특성 ····· 66
2. 동결깊이 현장 계측값과 프로그램 해석결과 비교 ····· 122
3. 소 결론 ····· 135
제 5절 PE골재 혼합 아스콘을 활용한 철도 도상의 동상방지 효과 실내외 실험 ····· 136
1. PE골재 혼합 아스콘의 열전도, 초음파시험 ····· 136
2. PE골재 혼합 아스콘에 대한 마샬안정도시험 ····· 145
3. PE골재 혼합 아스콘에 대한 동적 안정도시험 ····· 155
4. 자갈도상에 PE골재 혼합아스콘 포설 시 동결깊이 감소효과 현장실험 ····· 158
제 6절 자갈의 분니 함유율별 동상력 실험 ····· 161

1. 철도 자갈도상용 Ballast에 대한 동상 실험 ····· 161
제 7절 콘크리트도상 하부 강화노반 재료에 대한 동상압 실험 ····· 163
1. 강화노반 재료에 대한 동상력 실험의 의의 ····· 163
2. 강화노반 재료에 대한 동상력 실험 ····· 163
제 8절 콘크리트도상 하부 노반재료의 동상 안정성 평가 ····· 167
1. 흙의 동상과 콘크리트도상 ····· 167
2. 노반재료의 동상안정성 평가 ····· 186
제 9절 콘크리트도상 하부 노반의 융해 압밀 프로그램 해석 ····· 251
1. 서론 ····· 251
2. 콘크리트도상 동결심도 FEM 수치해석 ····· 251
3. 자갈·아스콘 도상 동결심도 FEM 수치해석 ····· 287
4. 융해침하 해석 ····· 291
5. 융해압밀 해석 ····· 309
6. 소결론 ····· 351
제 10절 철도도상 동상방지대책 ····· 352
1. 철도 시설물 동결깊이 산정식 적용 ····· 352
2. 철도 도상의 동상방지기술 적용 ····· 355
제 11절 철도 Box구조물 결로 방지 대책 ····· 359
1. 결로의 정의 ····· 359
2. 결로 발생 메커니즘 ····· 359
3. 결로가 발생하기 쉬운 조건 ····· 359
4. 결로 방지 대책 ····· 359
제 12절 종합 결론 ····· 361

제 4 장 목표달성도 및 관련 분야에의 기여도 ····· 363

제 5 장 연구개발결과의 활용 계획 ····· 365

제 6 장 연구개발 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 366
제 7 장 참고문헌 ····· 367
부 록 ····· 373

# 표 목차


표 3.1.1 선로 동상개소 발생 및 조치현황 (강원본부) ····· 13
표 3.2.1 흙의 종류에 따른 열전도율 가이드라인 ····· 20
표 3.2.2 열전도율 측정법의 종류 ····· 21
표 3.2.3 EPS의 특성 ····· 24
표 3.2.4 XPS의 특성 ····· 25
표 3.2.5 EPS Board와 XPS Board의 열전도율 실측값 ····· 28
표 3.2.6 폐 EPS 골재의 마모율 ····· 29
표 3.2.7 폐 EPS 골재 마모율과 자갈의 마모율 기준 비교 ····· 30
표 3.2.8 PE골재의 역학적 특성 ····· 33
표 3.2.9 일반적인 건설재료의 비중 비교 ····· 33
표 3.2.10 철도 도상 단열재 종류 및 치 형태별 온도 변화 ····· 39
표 3.2.11 철도 모형 도상에서 메틸렌블루로 측정한 동결 깊이 ····· 40
표 3.2.12 동토의 부동수분량 측정법 ····· 44
표 3.3.1 자갈도상의 타입별 동상량 측정 결과 ····· 61
표 3.3.2 콘크리트 도상 하부층의 보강 두께별 동상량 측정 결과 ····· 64
표 3.3.3 동결지수 변화에 따른 콘크리트도상과 자갈도상에서의
동결깊이 비교 ····· 65
표 3.4.1 WorldIndex Version 99.1에서 제공된 기상 Data ····· 77
표 3.4.2 n Factor for freeze and thaw ····· 80
표 3.4.3 검증예제 참고문헌 ····· 86
표 3.4.4 검증예제 재료 물성치 ····· 87
표 3.4.5. 검증예제 1 해석결과 동결깊이 ····· 88
표 3.4.6. 검증예제 2 해석결과 동결깊이 ····· 94
표 3.4.7. 검증예제 3 해석결과 동결깊이 ····· 96
표 3.4.8. 검증예제 4 해석결과 동결깊이 ····· 97
표 3.4.9. 검증예제 5 해석결과 융해깊이 ····· 102
표 3.4.10. 검증예제 6 해석결과 동결깊이 ····· 104
표 3.4.11 포화된 토사 및 다공성 암반의 열특성 ····· 113
표 3.4.12 검증예제 1 해석결과 동결깊이 ····· 118

표 3.4.13 검증예제 2 해석결과 동결깊이 ····· 119
표 3.4.14 검증예제 3 해석결과 동결깊이 ····· 120
표 3.4.15 검증예제 4 해석결과 동결깊이 ····· 120
표 3.4.16 검증예제 5 해석결과 융해깊이 ····· 121
표 3.4.17 검증예제 6 해석결과 동결깊이 ····· 121
표 3.4.18 Material properties used for numerical analysis of concrete slab and gravel ballast ····· 126
표 3.4.19 Summary of computed frost depths compared to measured values ····· 134
표 3.5.1 PE골재를 혼합하지 않은 쇄석 아스콘 제조 시 골재 입도분포 ····· 138
표 3.5.2 PE골재를 2.5% 혼합한 쇄석 아스콘 제조 시 골재 입도분포 ····· 138
표 3.5.3 PE골재 5%를 혼합한 아스콘의 제조 시 골재 입도분포 ····· 139
표 3.5.4 PE골재 10%를 혼합한 아스콘의 제조 시 골재 입도분포 ····· 139
표 3.5.5 PE골재 15%를 혼합한 아스콘 제조 시 골재 입도분포 ····· 140
표 3.5.6 PE골재 혼합 아스콘에 대한 초음파시험 수행 결과표 ····· 144
표 3.5.7 PE골재 0% 치환 ····· 151
표 3.5.8 PE골재 2.5% 치환 ····· 152
표 3.5.9 PE골재 5% 치환 ····· 153
표 3.5.10 PE골재 10% 치환 ····· 154
표 3.5.11 일반 아스콘 공시체와 PE골재를 2.5% 추가한 아스콘 공시체의 휠 트래킹 시험 결과값 ····· 158
표 3.8.1 동상설계를 위한 흙의 분류 ····· 169
표 3.8.2 연도별 동상 발생현황 ····· 173
표 3.8.3 2011년도 동상발생개소의 자체 원인 분석 ····· 172
표 3.8.4 동상방지층 재료의 품질기준 ····· 174
표 3.8.5 보조기층 재료의 품질기준 ····· 174
표 3.8.6 궤도 노반 재료의 품질기준 ····· 175
표 3.8.7 강화노반 재료의 품질기준 ····· 175
표 3.8.8 암반상의 강화노반 재료의 품질기준 ····· 176
표 3.8.9 고속철도 재료표 ····· 177
표 3.8.10 CBR 표준단위하중값 ····· 181
표 3.8.11 단열재의 공학적 특성 ····· 186

표 3.8.12 흙 시료의 공학적 특성 ····· 187
표 3.8.13 열전도율 측정을 위한 각 시료의 혼합비율 ····· 187
표 3.8.14 단열재별 0℃ 도달시간 ····· 192
표 3.8.15 고속철도 강화노반 재료의 품질기준 ····· 195
표 3.8.16 고속철도 강화노반 재료의 공학적 특성 ····· 197
표 3.8.17 고속철도 강화노반 재료의 품질기준 ····· 197
표 3.8.18 노반 시료의 공학적 특성 ····· 198
표 3.8.19 혼입율에 따른 실험 조건 ····· 199
표 3.8.20 고속철도 강화노반 재료의 공학적 특성 ····· 204
표 3.8.21 고속철도 강화노반 재료의 품질기준 ····· 205
표 3.8.22 노반 시료의 공학적 특성 ····· 205
표 3.8.23 혼입률에 따른 실험 조건 ····· 206
표 3.8.24 Tsutomu Takashi에 의한 결과치(25%혼입율) ····· 210
표 3.8.25 Tsutomu Takashi에 의한 결과치 (15% 혼입율) ····· 211
표 3.8.26 흙 시료의 공학적 특성 ····· 213
표 3.8.27 현장 반복평판재하시험 결과치 ····· 216
표 3.8.28 직경에 따른 결과값 ····· 219
표 3.8.29 함수비에 따른 결과값 ····· 225
표 3.8.30 다짐도에 따른 결과값 ····· 228
표 3.8.31 모델링에 사용된 화강풍화토의 물성치 ····· 234
표 3.8.32 구속 조건을 준 경우의 침하량 ····· 237
표 3.8.33 구속 조건을 주지 않은 경우의 침하량 ····· 238
표 3.8.34 재하판 직경에 따른 수치해석에서의 침하량 변화 ····· 239
표 3.8.35 수정 CBR 시험 순서 ····· 242
표 3.8.36 다짐 횟수에 따른 팽창비 ····· 243
표 3.8.37 노상의 상태와 팽창비 ····· 244
표 3.8.38 팽창비와 CBR ····· 244
표 3.8.39 CBR 결과값 ····· 245
표 3.8.40 수정 CBR 결과값 ····· 246
표 3.9.1 Numerical analyses performed for concrete slab railway ····· 254
표 3.9.2 Material properties used for numerical analysis of concrete slab railway ····· 257

표 3.9.3 Material properties used for numerical analysis of gravel railway reinforced by PE asphalt concrete ····· 288
표 3.9.4 Computed frost depth of 1D Gravel-Ascon Section using step approximation surface temperature ····· 289
표 3.9.5 Thaw settlement user's manual ····· 399
표 3.9.6 TSAP input file for verification problem ····· 305
표 3.9.7 TSAP output file for verification problem ····· 306
표 3.9.8 TSAP input file for concrete railway analysis ····· 307
표 3.9.9 TSAP output file for concrete railway analysis ····· 309
표 3.9.10 Thaw consolidation verification problems ····· 316
표 3.9.11 Pore fluid pressure profile for natural thawing rate ····· 319
표 3.9.12 Pore fluid pressure profile for fast thawing rate ····· 323
표 3.9.13 Pore fluid pressure profile for fast thawing rate with applied load ····· 327
표 3.9.14 Pore fluid pressure profile for fast thawing rate with top gravel layer ····· 331
표 3.9.15 Thaw consolidation user's manual ····· 334
표 3.9.16 FTCAP_1D input file for concrete railway thaw consolidation analysis ····· 338
표 3.10.1 측후소 일평균 기온으로부터 동결지수를 구하는 방법(예) ····· 354
표 3.10.2 고속철도와 일반철도의 강화노반두께(mm) ····· 356
표 3.10.3 고속철도와 일반철도의 강화노반두께 조정기준(안) ····· 357

# 그림 목차

그림 3.1.1 충북 ○○ 시설사업소 관내 철도 도상의 동상피해 및 보수작업 ····· 14
그림 3.1.2 동상이 발생한 노반의 흙을 제거한 후 자갈을 채워 넣는 모습 ····· 15
그림 3.1.3 강원도 ○○ 시설사업소 관내 철도 도상의 동상피해 및 보수작업 ····· 15
그림 3.1.4 경기도 ○○지점 (75km+250m) 자갈 도상 동상 발생: 홍수 시 진흙
유입 및 토피 두께 낮은 구간 ····· 16
그림 3.1.5 경기도 ○○지점 (76km+950m) 자갈도상의 동상 발생 모습 ····· 16
그림 3.1.6 강원도 ○○터널부근 철도구조물 동해발생 현황 ····· 16
그림 3.1.7 ○○터널 노반의 동상피해를 줄이려고 노반으로부터 물이
빠지도록 주변 배수로를 파괴, 새로운 물길을 튼 모습 ····· 17
그림 3.1.8 ○○터널 철로 노반 밑을 관통하는 암거 ····· 17
그림 3.1.9 철도 자갈도상 동상발생 지점에 XPS를 넣어 보강하는 모습 ····· 18
그림 3.1.10 옹벽 뒷채움흙의 동상으로 파손된 전면판 ····· 18
그림 3.1.11 동결융해의 반복으로 사면이 붕괴된 모습 ····· 18
그림 3.1.12 사면 보강철물이 사면의동상으로 파손된 모습 ····· 18
그림 3.1.13 노반의 동상으로 구불구불해진 철도 ····· 19
그림 3.1.14 철도 제방의 동상으로 암거가 파손된 현장 ····· 19
그림 3.1.15 노상의 동상으로 심한 변위가 발생한 철도 현장 ····· 19
그림 3.2.1 주요 광물의 열전도율 ····· 21
그림 3.2.2 함수비에 따른 동토의 열전도율( 초기온도 -10℃ ) ····· 21
그림 3.2.3 열전도율시험기(QTM-500)의 실제 모습과 프로브(Probe)의 구조 ····· 22
그림 3.2.4 흙의 열전도율 측정 결과 ····· 23
그림 3.2.5 콘크리트의 온도변화별 열전도율 ····· 24
그림 3.2.6 XPS Board와 XPS Board 생산라인 ····· 26
그림 3.2.7 EPS와 XPS의 압축응력과 변형 ····· 26
그림 3.2.8 압축응력(탄성한계변형)과 탄성체적중량 ····· 27
그림 3.2.9 휴대용 탐침식 열전도 측정기(K-D2-P) ····· 27
그림 3.2.10 폐EPS 재활용 과정 ····· 29
그림 3.2.11 LA마모 시험기와 분석중인 폐 EPS골재 ····· 29
그림 3.2.12 태백선(T1) 시료와 EPS의 질량비 ····· 30

그림 3.2.13 Ingot 혼합비에 따른 열전도율 변화 ····· 31
그림 3.2.14 폐 EPS 골재와 잘게 조각낸 XPS의 열전도율 측정 ····· 31
그림 3.2.15 질량 혼합비에 따른 시료별 열전도율 ····· 32
그림 3.2.16 폐비닐 골재 생산장치 개요 ····· 33
그림 3.2.17 폐비닐 골재의 형태와 단면 ····· 34
그림 3.2.18 폐비닐 골재 열전도율 측정기 ····· 34
그림 3.2.19 폐비닐 골재의 열전도율 ····· 34
그림 3.2.20 폐비닐 골재의 단열효과 측정시 사용한 장비 ····· 35
그림 3.2.21 철도 도상 모형 실험 과정 ····· 36
그림 3.2.22 철도 도상 모형실험 단면도 ····· 37
그림 3.2.23 단열재 혼합과 순서에 따른 깊이별 온도 변화 ····· 38
그림 3.2.24 철도 도상 단열재 종류 및 설치 형태별 온도 변화 ····· 39
그림 3.2.25 Calorimeter의 모습 및 구성도 ····· 45
그림 3.2.26 전자기공명장치의 모습 ····· 46
그림 3.2.27 전자기공명장치의 구성도 ····· 47
그림 3.2.28 TDR 시험기의 모습 ····· 48
그림 3.2.29 국내 철도 동상발생현장 흙 시료의 온도 변화별 부동수분량 변화 ····· 48
그림 3.3.1 토피두께 낮은 암거 위를 통과하는 자갈도상에서의 동상발생 모습 ····· 50
그림 3.3.2 KICT 타입 Methylene Blue 동결심도계의 구성 ····· 51
그림 3.3.3 동결심도계의 설치 단면 ····· 51
그림 3.3.4 태백,영월, 제천, 연천에 설치한 동결심도계 치수 및 개요도 ····· 52
그림 3.3.5 철도용 동결심도계의 설치 위치 ····· 53
그림 3.3.6 동결심도계의 설치 과정(연천) ····· 54
그림 3.3.7 철원 백마고지역 콘크리트도상, 자갈도상의 계측센서 설치 위치 ····· 55
그림 3.3.8 철원 백마고지역에서의 콘크리트도상, 자갈도상 설치 모습 ····· 56
그림 3.3.9 동결깊이 측정 모습 ····· 58
그림 3.3.10 자갈도상에서의 동결지수와 동결깊이 상관관계식 ····· 60
그림 3.3.11 콘크리트도상의 동결지수 변화별 동결깊이 변화(철원) ····· 62
그림 3.3.12 콘크리트도상에서의 동결지수와 동결깊이 상관관계 ····· 63
그림 3.3.13 Level로 동상량을 측정하는 모습(철원백마고지역) ····· 64

그림 3.4.1 동결깊이 설계 및 해석 프로그램 통합시스템 흐름도 ····· 66
그림 3.4.2 동결깊이 산정 일차원 열전도 개략도 ····· 73
그림 3.4.3 동결깊이 설계 프로그램 (FDDP) 계산 흐름도 ····· 74
그림 3.4.4 프로젝트 창 ····· 75
그림 3.4.5 Working Directory 창 ····· 76
그림 3.4.6 기존 File 열기 창 ····· 76
그림 3.4.7 지역선택 콤보박스 ····· 77
그림 3.4.8 입력 창 ····· 79
그림 3.4.9 입력 : 제목 ····· 79
그림 3.4.10 입력 : 기상 Data ····· 79
그림 3.4.11 입력 : 자동계산 ····· 80
그림 3.4.12 입력 : 해석 방법 ····· 82
그림 3.4.13 입력 : 지반 물성치 ····· 82
그림 3.4.14 입력 : 지반물성치 → 지층구분 ····· 82
그림 3.4.15 입력 : 지반 물성치 → 지층 추가 / 삭제 ····· 83
그림 3.4.16 지층 삭제 시 확인 창 ····· 83
그림 3.4.17 지층 삭제 후 지층 Table ····· 83
그림 3.4.18 지층 추가 시 확인 창 ····· 83
그림 3.4.19 지층 추가 후 지층 Table ····· 83
그림 3.4.20 Default 물성치로 치환된 후 지층 Table ····· 84
그림 3.4.21 지층 그래프 ····· 84
그림 3.4.22 계산 후 동결깊이 창 ····· 85
그림 3.4.23 동결심도 그래프 ····· 85
그림 3.4.24 검증예제 1, Case A 입력 Data ····· 89
그림 3.4.25 검증예제 1, Case A 동결심도 그래프 ····· 89
그림 3.4.26 검증예제 1, Case B 입력 Data ····· 90
그림 3.4.27 검증예제 1, Case B 동결심도 그래프 ····· 90
그림 3.4.28 검증예제 1, Case C 입력 Data ····· 91
그림 3.4.29 검증예제 1, Case C 동결심도 그래프 ····· 91
그림 3.4.30 검증예제 1, Case D 입력 Data ····· 92
그림 3.4.31 검증예제 1, Case D 동결심도 그래프 ····· 92

그림 3.4.32 검증예제 1, Case E 입력 Data ····· 96
그림 3.4.33 검증예제 1, Case E 동결심도 그래프 ····· 96
그림 3.4.34 검증예제 2 입력 Data ····· 95
그림 3.4.35 검증예제 2 동결심도 그래프 ····· 95
그림 3.4.36 검증예제 3 입력 Data ····· 96
그림 3.4.37 검증예제 3 동결심도 그래프 ····· 97
그림 3.4.38 검증예제 4, Case A 입력 Data ····· 98
그림 3.4.39 검증예제 4, Case A 동결심도 그래프 ····· 99
그림 3.4.40 검증예제 4, Case B 입력 Data ····· 100
그림 3.4.41 검증예제 4, Case B 동결심도 그래프 ····· 100
그림 3.4.42 검증예제 4, Case C 입력 Data ····· 101
그림 3.4.43 검증예제 4, Case C 동결심도 그래프 ····· 101
그림 3.4.44 검증예제 5 입력 Data ····· 103
그림 3.4.45 검증예제 5 동결심도 그래프 ····· 105
그림 3.4.46 검증예제 6, Case A 입력 Data ····· 105
그림 3.4.47 검증예제 6, Case A 동결심도 그래프 ····· 105
그림 3.4.48 검증예제 6, Case B 입력 Data ····· 106
그림 3.4.49 검증예제 6, Case B 동결심도 그래프 ····· 106
그림 3.4.50 검증예제 6, Case C 입력 Data ····· 107
그림 3.4.51 검증예제 6, Case C 동결심도 그래프 ····· 107
그림 3.4.52 검증예제 6, Case D 입력 Data ····· 108
그림 3.4.53 검증예제 6, Case D 동결심도 그래프 ····· 108
그림 3.4.54 동결깊이 해석 프로그램 입력 창 ····· 114
그림 3.4.55 온도 시간 이력 지정 창 ····· 114
그림 3.4.56 지표면 온도 시간 이력 지정 File ····· 115
그림 3.4.57 지표면과 바닥면 온도 시간 이력 지정 File ····· 115
그림 3.4.58 FEM 해석 수행중 창 ····· 115
그림 3.4.59 계산 후 동결깊이 창 ····· 116
그림 3.4.60 PLTXY Plotting List 창 ····· 116
그림 3.4.61 온도 분포 Profile ····· 116
그림 3.4.62 동결심도 그래프 ····· 117

그림 3.4.63 온도 분포 Profile ····· 119
그림 3.4.64 Atmospheric temperature at test site
(2011.11.1 ~ 2012.3.31) from KMA ····· 124
그림 3.4.65 Accumulated ℃ · Day (2011.12.1 ~ 2012.2.29) from KMA ····· 125
그림 3.4.66 Input data for concrete slab at Jecheon ····· 127
그림 3.4.67 Computed frost depth for concrete slab at Jecheon ····· 127
그림 3.4.68 Input data for gravel ballast at Jecheon ····· 128
그림 3.4.69 Computed frost depth for gravel ballast at Jecheon ····· 128
그림 3.4.70 Input data for concrete slab at Taeback ····· 129
그림 3.4.71 Computed frost depth for concrete slab at Taeback ····· 129
그림 3.4.72 Input data for gravel ballast at Taeback ····· 130
그림 3.4.73 Computed frost depth for gravel ballast at Taeback ····· 130
그림 3.4.74 Input data for concrete slab at Yeoncheon ····· 131
그림 3.4.75 Computed frost depth for concrete slab at Yeoncheon ····· 131
그림 3.4.76 Input data for gravel ballast at Yeoncheon ····· 132
그림 3.4.77 Computed frost depth for gravel ballast at Yeoncheon ····· 132
그림 3.5.1 철도 자갈도상 하부의 아스팔트 콘크리트 보조도상 ····· 136
그림 3.5.2 골재 입도분포곡선 ····· 140
그림 3.5.3 PE골재 혼합 아스콘 제조 ····· 141
그림 3.5.4 아스콘에 대한 열전도율 측정 모습 ····· 141
그림 3.5.5 PE골재 함유율별 열전도율 시험 결과 ····· 142
그림 3.5.6 PE골재 혼합율별 초음파 시험 모습 ····· 143
그림 3.5.7 PE골재 혼합 아스콘에 대한 초음파시험 결과 ····· 145
그림 3.5.8 PE골재 혼합 아스콘에 대한 마샬안정도 시험 모습 ····· 146
그림 3.5.9 바인더 함량 및 PE골재 치환율에 따른 마샬 안정도 결과 ····· 149
그림 3.5.10 바인더 함량 및 PE골재 치환율에 따른 Flow치 ····· 149
그림 3.5.11 바인더 함량 및 PE골재 치환율에 따른 공극률 ····· 149
그림 3.5.12 Marshal 강성지수 ····· 150
그림 3.5.13 PE골재와 아스팔트 바인더 혼합 ····· 157
그림 3.5.14. 몰드에 PE골재 아스콘을 채우는 모습 ····· 157
그림 3.5.15 롤러콤팩터에 의한 다짐 ····· 157

그림 3.5.16 KICT의 휠 트래킹 시험기 ····· 157
그림 3.5.17 백호우로 지반굴착 ····· 159
그림 3.5.18 PE골재와 아스콘 혼합 ····· 159
그림 3.5.19 3.8톤 타이어 로울러로 다지기 ····· 159
그림 3.5.20 자갈 도상의 설치 ····· 159
그림 3.6.1 자갈도상의 분니 혼합율 별 동상 시험 과정 ····· 161
그림 3.6.2 시간 경과별 자갈의 동상량 ····· 162
그림 3.7.1 강화노반 시료의 입도분포곡선 ····· 164
그림 3.7.2. 강화노반 재료의 함수비 변화에 따른 동상압 변화 ····· 166
그림 3.8.1 Ice lens 형성과정 ····· 167
그림 3.8.2 동결토에서의 함수비 분포 변화 ····· 170
그림 3.8.3 흙의 종류에 따른 부동수분과 온도와의 관계 ····· 171
그림 3.8.4 동결지수와 동결지속기간 ····· 172
그림 3.8.5 강화노반 구간의 모식도 ····· 176
그림 3.8.6 경부고속철도 표준단면(쌓기) ····· 176
그림 3.8.7 함수비와 CBR과의 관계 ····· 178
그림 3.8.8 CBR과 지반반력계수와의 경험적 관계 ····· 178
그림 3.8.9 재하판 직경과 지반반력계수와의 관계 ····· 179
그림 3.8.10 CBR과 변형계수와의 관계 ····· 180
그림 3.8.11 CBR 그래프 ····· 182
그림 3.8.12 300mm 재하판 ····· 183
그림 3.8.13 600mm 또는 762mm 재하판 ····· 183
그림 3.8.14 침하측정장치 ····· 184
그림 3.8.15 각 단열재와 건조한 흙에서의 열전도율 건조밀도에 따른 열전도율 변화 ····· 189
그림 3.8.16 습윤한 시료의 열전도율 ····· 189
그림 3.8.17 함수비에 따른 열전도율 변화 ····· 190
그림 3.8.18 온도에 따른 열전도율 변화 ····· 191
그림 3.8.19 각 단열재의 두께에 따른 0℃ 도달시간 변화 ····· 194
그림 3.8.20 단열재 두께변화에 따른 0℃ 도달시간 ····· 194
그림 3.8.21 입도별 분류 모습 ····· 196
그림 3.8.22 다이얼 게이지가 설치된 몰드 ····· 196

그림 3.8.23 선행하중을 준 공시체 ····· 196
그림 3.8.24 냉동 챔버 ····· 197
그림 3.8.25 냉동 챔버 안의 공시체 ····· 197
그림 3.8.26 시료의 준비 ····· 198
그림 3.8.27 몰드와 LVDT 설치 ····· 198
그림 3.8.28 혼입율 25% 동상량 ····· 200
그림 3.8.29 혼입율 20% 동상량 ····· 200
그림 3.8.30 혼입율 15% 동상량 ····· 201
그림 3.8.31 혼입율 10% 동상량 ····· 201
그림 3.8.32 혼입율 5% 동상량 ····· 202
그림 3.8.33 혼입율 0% 동상량 ····· 202
그림 3.8.34 포화도 70% 동상량 ····· 203
그림 3.8.35 포화도 90% 동상량 ····· 203
그림 3.8.36 동상압 측정 ····· 205
그림 3.8.37 시료 배합 ····· 205
그림 3.8.38 다이얼게이지 ····· 205
그림 3.8.39 LVDT ····· 205
그림 3.8.40 혼입율 25% 동상압 ····· 207
그림 3.8.41 혼입율 15% 동상압 ····· 207
그림 3.8.42 혼입율 5% 동상압 ····· 208
그림 3.8.43 혼입율 0% 동상압 ····· 208
그림 3.8.44 포화도 70% 동상압 ····· 209
그림 3.8.45 포화도 90% 동상압 ····· 209
그림 3.8.46 상재압에 따른 동상율 변화 ····· 210
그림 3.8.47 토사 혼입율 25%시 상재압에 대한 동상율 ····· 211
그림 3.8.48 토사 혼입율 15%일 시 상재압에 대한 동상율 ····· 212
그림 3.8.49 시료준비 ····· 213
그림 3.8.50 흙 시료의 입도 분포 곡선 ····· 213
그림 3.8.51 흙 시료의 다짐 시험 ····· 213
그림 3.8.52 현장 들밀도 시험 ····· 214
그림 3.8.53 원지반 반복평판재하시험 ····· 215

그림 3.8.54 현장 반복평판재하시험 결과 ····· 215
그림 3.8.55 실내 반복평판재하시험 ····· 216
그림 3.8.56 몰드의 종류 ····· 217
그림 3.8.57 직경 10cm의 실내 반복평판재하시험 결과 ····· 218
그림 3.8.58 직경 15cm의 실내 반복평판재하시험 결과 ····· 218
그림 3.8.59 직경 28cm의 실내 반복평판재하시험 결과 ····· 219
그림 3.8.60 몰드 직경에 따른 침하량 추이 ····· 220
그림 3.8.61 몰드 직경에 따른 변형계수 추이 ····· 220
그림 3.8.62 직경에 따른 실내 반복평판재하시험에서의 감소계수 ····· 221
그림 3.8.63 함수비 3%의 실내 반복평판재하시험 ····· 222
그림 3.8.64 함수비 6%의 실내 반복평판재하시험 ····· 223
그림 3.8.65 함수비 9%의 실내 반복평판재하실험 ····· 223
그림 3.8.66 함수비 12%의 실내 반복평판재하시험 ····· 224
그림 3.8.67 함수비 15%의 실내 반복평판재하시험 ····· 224
그림 3.8.68 함수비에 따른 침하량 추이 ····· 225
그림 3.8.69 함수비에 따른 변형계수 추이 ····· 226
그림 3.8.70 함수비에 따른 실내 반복평판재하시험에 의한 변형계수 변화 ····· 227
그림 3.8.71 다짐도 90%의 실내 반복평판재하시험 ····· 227
그림 3.8.72 다짐도 95%의 실내 반복평판재하시험 ····· 228
그림 3.8.73 다짐도에 따른 침하량 추이 ····· 229
그림 3.8.74 다짐도에 따른 변형계수 추이 ····· 229
그림 3.8.75 다짐도에 따른 실내 반복평판재하시험에 의한 증가계수와 감소계수 ····· 230
그림 3.8.76 현장시험에 의한 재하판 직경에 따른 지반반력계수 변화 ····· 231
그림 3.8.77 재하판 직경에 따른 실내 반복평판재하시험에 의한 감소계수 ····· 232
그림 3.8.78 혼합물의 간극률 변화 ····· 233
그림 3.8.79 굵은 골재 함유에 따른 전단강도 변화 ····· 233
그림 3.8.80 실내 실험 ····· 234
그림 3.8.81 몰드 직경 15cm(B/D=1)의 모델링 ····· 235
그림 3.8.82 여러 가지 재하판 ····· 235
그림 3.8.83 재하판 직경에 따른 영향 검토 모델링 ····· 235
그림 3.8.84 수직 구속조건을 준 경우 ····· 236

그림 3.8.85 수직 구속조건을 주지 않은 경우 ····· 237
그림 3.8.86 구속 조건을 준 경우의 몰드 직경 변화에 따른 1차 침하량의 변화 ····· 238
그림 3.8.87 구속 조건을 주지 않은 경우의 몰드 직경에 따른 1차 침하량 변화 ····· 238
그림 3.8.88 몰드 직경 변화에 따른 실제 1차 침하량의 변화 ····· 239
그림 3.8.89 재하판 직경에 따른 침하량 변화 추이 ····· 240
그림 3.8.90 k / (k for 700mm plate) ····· 240
그림 3.8.91 기존 문헌에서의 지반반력계수 변화 ····· 24 1
그림 3.8.92 시간에 따른 시료의 팽창량 ····· 243
그림 3.8.93 관입 시험 결과 그래프 ····· 245
그림 3.8.94 다짐도에 대응하는 수정 CBR 값 ····· 246
그림 3.9.1 Typical cross section of straight line for Korea high speed railway ····· 253
그림 3.9.2 Location of thermometer sensor ····· 255
그림 3.9.3 Atmospheric temperature at Cholwon test site ····· 256
그림 3.9.4 Schematic Test Section for numerical analysis of concrete slab railway ····· 258
그림 3.9.5 Finite element meshes for Test Section analysis, Case T300 ····· 259
그림 3.9.6 Temperature distribution at 33 days, Case T300 ····· 259
그림 3.9.7 Temperature distribution at 66 days, Case T300 ····· 260
그림 3.9.8 Temperature distribution at 93 days, Case T300 ····· 260
그림 3.9.9 Temperature profile along the center line at 33 days, Case T300 ····· 261
그림 3.9.10 Temperature profile along the center line at 66 days, Case T300 ····· 261
그림 3.9.11 Temperature profile along the center line at 93 days, Case T300 ····· 262
그림 3.9.12 Temperature time history at location a2 ····· 262
그림 3.9.13 Temperature time history at location a3 ····· 263
그림 3.9.14 Temperature time history at location a4 ····· 263
그림 3.9.15 Schematic Test Section for numerical analysis of concrete slab railway ····· 264
그림 3.9.16 Temperature profile along the center line at 33 days, Case T400 ····· 265
그림 3.9.17 Temperature profile along the center line at 66 days, Case T400 ····· 265
그림 3.9.18 Temperature profile along the center line at 93 days, Case T400 ····· 266
그림 3.9.19 Temperature time history at location a5 ····· 266
그림 3.9.20 Temperature time history at location a6 ····· 267
그림 3.9.21 Schematic Test Section for numerical analysis of concrete slab railway ····· 269

그림 3.9.22 Temperature profile along the center line at 33 days, Case T500 ····· 268
그림 3.9.23 Temperature profile along the center line at 66 days, Case T500 ····· 269
그림 3.9.24 Temperature profile along the center line at 93 days, Case T500 ····· 269
그림 3.9.25 Temperature time history at location a7 ····· 270
그림 3.9.26 Temperature time history at location a8 ····· 270
그림 3.9.27 Schematic Test Section for numerical analysis of concrete slab railway ····· 271
그림 3.9.28 Temperature profile along the center line at 33, 66 and 93 days ····· 272
그림 3.9.29 Temperature time history at location a9 ····· 272
그림 3.9.30 Schematic Full Section for numerical analysis of concrete slab railway, Case F300 ····· 274
그림 3.9.31 Finite element meshes for Full Section analysis, Case F300 ····· 275
그림 3.9.32 Temperature distribution at 33 days, Case F300 ····· 276
그림 3.9.33 Temperature distribution at 66 days, Case F300 ····· 277
그림 3.9.34 Temperature distribution at 93 days, Case F300 ····· 278
그림 3.9.35 Temperature profile along the center line at 33 days, Case F300 vs T300 279
그림 3.9.36 Temperature profile along the center line at 66 days, Case F300 vs T300 ····· 279
그림 3.9.37 Temperature profile along the center line at 93 days, Case F300 vs T300 280
그림 3.9.38 Temperature time history at location a2 (52.4 Cm below TCL surface), Case F300 vs T300 ····· 280
그림 3.9.39 Temperature time history at location a3 (82.4 Cm below TCL surface), Case F300 vs T300 ····· 281
그림 3.9.40 Temperature time history at location a4 (112.4 Cm below TCL surface), Case F300 vs T300 ····· 281
그림 3.9.41 Schematic 1D Section for numerical analysis of concrete slab railway, Case A300 ····· 283
그림 3.9.42 Finite element meshes for 1D Section analysis, Case A300 ····· 283
그림 3.9.43 Temperature profile along the center line at 33 days, Case A300 vs F300 284
그림 3.9.44 Temperature profile along the center line at 66 days, Case A300 vs F300 ····· 284
그림 3.9.45 Temperature profile along the center line at 93 days,

Case A300 vs F300 ····· 285
그림 3.9.46 Temperature time history at location a2
(52.4 Cm below TCL surface), Case A300 vs F300 ····· 285
그림 3.9.47 Temperature time history at location a3
(82.4 Cm below TCL surface), Case A300 vs F300 ····· 286
그림 3.9.48 Temperature time history at location a4
(112.4 Cm below TCL surface), Case A300 vs F300 ····· 286
그림 3.9.49 Schematic sections used for numerical analysis of gravel
railway reinforced by PE asphalt concrete ····· 287
그림 3.9.50 Computed frost depth of 1D Gravel-Ascon Section using
step approximation surface temperature ····· 290
그림 3.9.51 Schematic stress path in closed-system freeze-thaw cycle ····· 292
그림 3.9.52 Thaw settlement curve ····· 293
그림 3.9.53 Nonlinear thaw settlement curve ····· 294
그림 3.9.54a Block diagram for frozen soil components ····· 296
그림 3.9.54b Block diagram for fully consolidated thawed soil components ····· 297
그림 3.9.55 Execution of program TSAP ····· 298
그림 3.9.56 One dimensional thaw consolidation ····· 311
그림 3.9.57 Excess pore pressure isochrones after completion of thawing ····· 313
그림 3.9.58 Schematic section for natural thawing rate (VP-1) ····· 318
그림 3.9.59 Pore fluid pressure profile for natural thawing rate (VP-1) ····· 320
그림 3.9.60 Settlement time history for natural thawing rate (VP-1) ····· 320
그림 3.9.61 Schematic section for fast thawing rate (VP-2) ····· 322
그림 3.9.62 Pore fluid pressure profile for fast thawing rate (VP-2) ····· 324
그림 3.9.63 Settlement time history for fast thawing rate (VP-2) ····· 324
그림 3.9.64 Schematic section for fast thawing rate with applied load (VP-3) ····· 326
그림 3.9.65 Pore fluid pressure profile for fast thawing rate with applied load ····· 328
그림 3.9.66 Settlement time history for fast thawing rate with applied load (VP-3) ····· 328
그림 3.9.67 Schematic section for fast thawing rate with top gravel layer (VP-4) ····· 330
그림 3.9.68 Pore fluid pressure profile for fast thawing rate with top gravel load ····· 332
그림 3.9.69 Settlement time history for fast thawing rate with top gravel layer ····· 332

그림 3.9.70 Execution of program FTCAP_1D ····· 335
그림 3.9.71 Schematic section used for concrete railway thaw consolidation analysis ····· 337
그림 3.9.72 Opening freeze-thaw heat conduction input file ····· 341
그림 3.9.73 Input GUI window for FTCAP_1D ····· 342
그림 3.9.74 Soil layer graph ····· 343
그림 3.9.75 Temperature time history specification window ····· 345
그림 3.9.76 Running FTCAP_1D program message ····· 345
그림 3.9.77 Freeze-thaw consolidation window ····· 345
그림 3.9.78 Frost depth graph ····· 346
그림 3.9.79 PLTXY Plotting List window ····· 347
그림 3.9.80 Settlement time history ····· 347
그림 3.9.81 Settlement time history ····· 348
그림 3.9.82 Pore pressure and effective vertical stress time history at depth 119cm ····· 349
그림 3.9.83 Pore pressure and effective vertical stress time history at depth 121cm ····· 349
그림 3.9.84 Pore pressure and effective vertical stress time history at depth 123cm ····· 350
그림 3.9.85 Pore pressure and effective vertical stress time history at depth 125cm ····· 350

# 제 1장 서론

## 1. 연구의 배경

2018년의 평창 동계올림픽에 대비하여 현재 정부는 원주-강릉간 철도건설에 박차를 가하고 있다. 즉, 2011년 3개 공구의 공사를 발주하였고, 현재 113.7km의 원주-강릉간 고속철도를 건설중에 있으며, 2017년까지 3조 9천 4백억원을 투자할 예정이다. 춘천-속초간 고속철도(90.7km)도 2012년 10억원을 투자하여 타당성 조사를 실시하는 등 영동지방 한랭지의 철도건설이 계속 추진될 전망이다.

현재 운용중인 재래선 철도에서도 동절기나 해빙기에 시설물이 동상 또는 융해 피해를 입어 KORAIL 보수담당 직원들이 피해 복구를 위해 동원되고 있으며, 시설물 보수를 위해 많은 국가 예산이 지출되고 있다. 아울러 강원도나 충북·경기 북부지역 철도용 옹벽도 뒷채움재의 동상에 의해 동절기나 해빙기에 콘크리트에 균열이 생기는 현상이 발생하고 있다.

한편 외국의 실정으로서 일본에서는 1996년 1월 북해도 Yoichi터널 내부의 암반이 동결융해의 반복으로 붕괴, 통과 중이던 버스의 승객들이 사망한 사고를 계기로 도상이나 철도변 사면, 옹벽 등 철도 시설물의 동상 및 융해 피해 예방 방지 그리고 기존의 동결깊이 산정식 개정을 위한 연구를 수행하고 있다.

핀란드에서는 자갈도상의 동상방지를 위하여 XPS(Extruded Polyethylene Styrofoam)를 노반에 설치하는 방법과 자갈에 함유된 분니의 양이 동상에 미치는 영향에 대하여 장기간 실험연구를 수행하고 있고, 러시아에서는 동결지수와 도상의 동상량 및 융해 침하량의 관계를 평가하는 프로그램을 개발하고 잇다.

본 연구에서는 재래선이나 신설선 철도 시설물이 동절기 및 해빙기에 동상 또는 융해 피해를 가능한한 적게 받고 운행할 수 있도록 콘크리트도상 및 자갈도상의 동결깊이 산정식을 제안하여 철도 안전 운행에 기여하고자 한다.

또한 자갈보다 단단하고(표 1.1 참조) 열전도율이 자갈의 1/20 이하인, KICT가 개발한 PE(polyethylene)골재(그림1.1, 그림1.2 참조)를 자갈이나 쇄석 대신 아스팔트 혼합물에 섞어 자갈도상 하부 노반의 동상방지에 활용할 수 있는지 실험하는 한편, XPS를 토피 두께가 낮은 철도 노반 하부 암거나 culvert의 보호재료로 사용할 수 있는 지 그 가능성을 실험함으로써 철도 시설물의 동해(凍害)방지에 도움을 주고, 수명연장을 도모하며, 유지보수예산을 절감하고자 한다.



그림 1.1 KICT가 개발한 PE(Polyethylene) 골재의 모습

표 1.1 PE(비닐)골재와 자갈의 마모율 비율(김영진, 2005)

| 구 분 | 마모율(%) |
|---|---|
| PE골재 | 2.36 |
| 도로포장용 자갈 기준 | 35 이하 |
| 댐콘크리트용 자갈 기준 | 40 이하 |

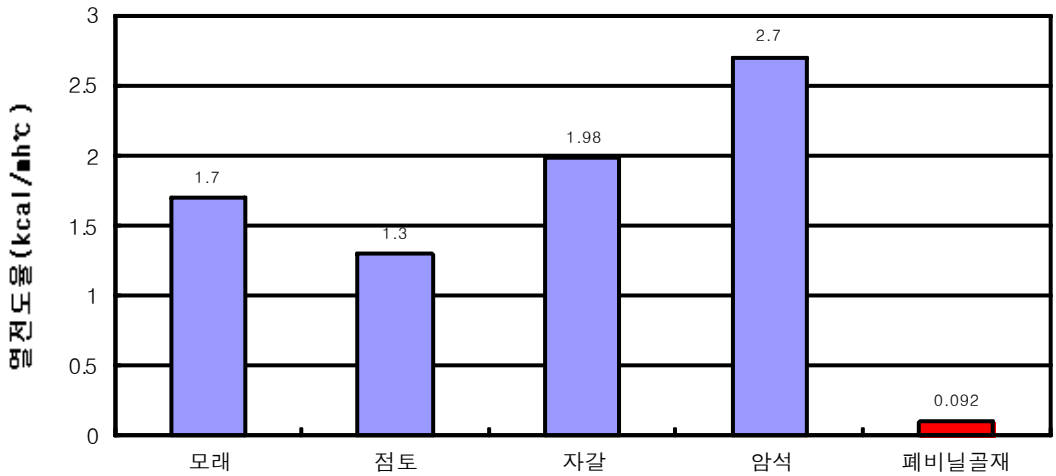



그림 1.2 PE골재와 자갈 및 흙의 열전도율 비교 (김영진, 2005)

## 2. 연구개발 필요성

- 기존 재래선 철도의 경우 자갈도상 및 보조도상이나 노반이 동상, 융해침하하거나 궤도가 융기 또는 침하하여 열차의 서행 운행 및 구조물의 수명을 단축시키는 사례가 있으며, 이를 보수하기 위한 막대한 예산이 매년 집행되고 있다.
- 토피 두께가 낮은 암거나 box culvert의 콘크리트가 동해를 입거나, 반대로 암거나 box culvert 내부를 통한 한기가 토피 두께가 낮은 철도 노반에 동상을 일으키기도 하며, KORAIL직원들이 매년 10,000명 이상 동원되어  철도 터널 내 고드름 제거를 하고 있는 실정이다. 또한 강원도나 충북 북부지방 철도용 옹벽도 뒷채움재의 동상에 취약한 실정이다.
- 철도구간 사면의 경우 흙, 암석의 종류별 동상 · 융해 특성에 대한 연구가 충분하지 못해 매년 동절기·해빙기에  안정성이 저하되는 경우도 있어 열차의 안전운행 및 철도구조물의 내구성 확보에 지장을 주고 있다.
- 일본의 북해도나 스웨덴, 핀란드 등에는 자국의 기후조건 및 지반조건에 맞는 철도  시설물 하부 지반의 동결깊이 산정식이 개발되어 있고, 단열 재료의 최적 두께나 설치 방법 등을 연구하여 토피 두께가 낮은 철도용 암거 등 콘크리트 구조물의 동해를 방지하고 있다.
- 본 연구개발을 통해 기존 자갈도상의 동상방지대책 및 새로 건설되는 콘크리트도상의 동결깊이 실측 및 동상 안정 대책을 연구함으로써 철도 시설물의 안정성 확보와 유지 보수 예산을 줄이는데 다소나마 기여하고자 한다.

## 3. 연구목표 및 내용

본 연구과제의 목표는 강원도나 경기도, 충북 등 북부지역 철도시설물의 동상피해를 줄이기 위해 자갈 및 콘크리트도상에서의 동결깊이를 측정하고, 콘크리트도상 하부 보조도상이나 입도조정층 재료의 동상량, 동상력 실험을 통해 현재 설계, 시공되고 있는 KTX 콘크리트도상 하부가 동상에 취약한지를 분석함으로써 철도운행의 안정성 확보와 철도 시설물의 수명연장을 도모하고는데 있다.

본 연구에서 수행한  주요 연구내용은 다음과 같다.

- 2018년 평창 동계올림픽 개최에 즈음하여 새로 건설되는 원주-강릉간 철도를 비롯한 강원도, 충북·경기 북부지역의 기존 자갈도상과 신설될 콘크리트도상에 대한 동결깊이 실측 및 동결깊이 산정식 제안
- 경기 북부지방 자갈도상 하부에 PE골재를 활용한 아스팔트층 설치 시 동결깊이 차단 효과 실험
- 토피두께가 낮은 암거 등의 동상피해 감소를 위한 단열재 사용 시 동상량 감소 효과 실내 실험
- 자갈도상이나 콘크리트도상 하부 노반의 동결 융해 특성 프로그램 구축

| 주요 연구목표 | | 연구내용 |
|---|---|---|
| 1차년도 | 국내외 철도 구조물의 동상 실태 조사 분석 | ▪ 국내외 철도 시설물의 동상 피해 실태 조사<br>▪ 외국 콘크리트 슬라브도상 하부 노반의 동상 감소 공법 조사<br>▪ 국내 암거의 토피두께 부족 시 동상피해 조사: 철도공사 강원 본부, 제천, 태백 시설사업소<br>▪ 외국 옹벽 배면 지반의 동상에 의한 균열 등 변형 사례 조사 |
| | 자갈 및 콘크리트도상 하부지반의 동결깊이 산정식 개발 (ⅰ) | ▪ 도상의 재질, 두께 및 동결지수를 고려한 동결깊이 실측<br>-태백선 사무소, 제천 시설사업소 구내 자갈 및 콘크리트의 모형 도상 설치, 두께와 그 하부 노반의 특성을 고려한 동결깊이 측정(Methylene Blue 튜브 사용)<br>▪ 열전도율 해석 프로그램 분석 및 실험결과와 비교<br>- 해석 횡단면의 기하학적 형상은 국내 철도의 대표적인 절토 및 성토 노반으로 구분하고 성토 노반의 경우 상부 노반에 강화노반을 포함하는 경우와 포함하지 않는 경우 고려.<br>-노반 재료의 열전달 입력변수로 건조밀도, 함수비, 열전도율, 열용량, 잠열 등을 고려.<br>-자갈도상의 입력변수로 자갈도상의 폭, 두께, 공극율 고려.<br>-수치해석에 사용될 지표면 온도 Time History 입력 데이터는 국내 한냉지에 적용되는 동결지수를 고려하여 정한다.<br>-동결깊이 수치해석은 지반구조물 전용 비선형 열전달 유한요소 프로그램 SMAP-T2 사용. |
| | 자갈 및 콘크리트도상 설치 시 하부 노반의 동상 방지공법 개발 (ⅰ) | ▪ 자갈도상의 동상성 평가 실내 실험<br>-자갈 속 분니 함유율별 동상량 비교 분석<br>▪ KICT 실내 대형냉동 챔버내 토조에 자갈도상 및 단열재 설치 후 센서로 온도변화별 동상량 측정 |

| | | |
|---|---|---|
| | 토피 두께가 낮은 암거 위 노반의 동해 방지 공법 개발 ( i ) | ▪ 토피 두께가 낮은 노반 흙의 종류별 동상성 평가<br><br>▪ 온도변화에 의한 콘크리트의 열전도율 측정:<br>< 사용장비> 열전도 시험기/ TDR |
| 2차년도 | 자갈 및 콘크리트도상 하부 노반의 동결깊이 산정식 개발 ( ii ) | ▪ 자갈도상과 콘크리트도상의 현장 동결깊이 측정<br>-태백·제천 시설사업소, 철원 백마고지역에 자갈도상, 콘크리트도상 설치 후 동결깊이 측정<br>▪ 콘크리트도상을 이용한 동결깊이 프로그램 해석<br>-해석 횡단면의 기하학적 형상은 국내 철도의 대표적인 절토 및 성토 노반으로 구분하고 성토 노반의 경우 상부 노반에 강화노반을 포함하는 경우와 포함하지 않는 경우를 고려.<br>-노반재료의 열전달 입력변수로 건조밀도, 함수비, 열전도율, 열용량, 잠열 등을 고려<br>-콘크리트도상의 입력변수로 도상의 폭과 두께 고려<br>-수치해석에 사용될 지표면 온도 Time History 입력 데이터는 국내 한랭지에 적용되는 동결지수를 고려하여 결정.<br>-동결깊이 수치해석은 지반구조물 전용 비선형 열전달 유한요소 프로그램 SMAP-T2를 사용하여 수행.<br>**실측 결과와 비교 분석 및 산정식 도출에 반영**<br>▪ 자갈도상 및 콘크리트도상에서의 실측결과와 비교분석하여 합리적인 동결깊이 산정식 도출에 반영. |
| | 자갈 및 콘크리트도상 설치시 하부노반의 동상방지공법 개발( ii ) | ▪ 자갈도상 하부에 PE골재혼합 아스콘 및 XPS 설치시 동상량, 동결깊이 감소효과 현장 실험<br>▪ 콘크리트도상 하부 쇄석보조기층 두께 변화 시 동결깊이, 동상량 감소효과 현장 실험<br>(철원 백마고지역에서의 현장 실험) |
| | 보고서 작성 | 실험 결과 보고서 작성 |

# 제 2장 국내외 기술개발 현황

겨울철 동상으로 철도시설물의 안정성에 문제가 발생함에 따라 동상 방지를 통해 철도운행시 안정성을 확보하고, 유지보수예산을 절감하기 위한 많은 연구가 외국에서 수행되고 있다. 특히 북유럽 및 일본, 러시아 등 동토지역 국가에서 연구가 활발히 진행되고 있다.

국내에서도 경기북부, 강원도, 충북 지역 등에서 동상 피해가 발생하고 있으며 동상피해 예방에 대한 연구가 진행되고 있다.

일본 철도총합기술연구소에서는 자갈도상 하부에 아스팔트 콘크리트(아스콘)를 포설, 모세관 현상에 의한 지하수 상승 차단 및 자갈 도상으로부터의 빗물 차단을 통하여 노반 및 보조 도상의 동상·융해 침하를 방지하는 한편, 열차 주행 시 승차감 향상을 위한 연구를 수행한 바 있다.

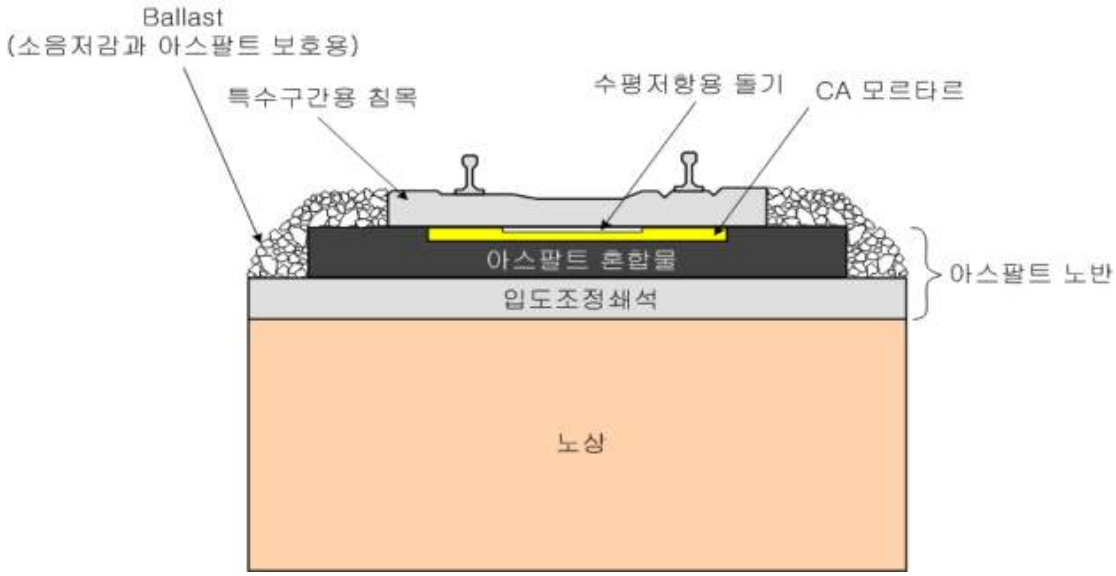



그림 2.1 일본 철도총합연구소의 아스팔트 콘크리트 보강 노반

일본 지반공학회 북해도지부에서는 토피 두께가 얕은 철도 box culvert 위 노반의 동상방지 재료와 설계기준에 관한 연구를 수행하고 있으며, 이를 현재 추진 중인 신아오모리(新青森) - 삿뽀로간의 북해도 신간센 건설시 활용하려고 계획하고 있다.

중국 난주의 동토연구소에서는 난주 - 티베트간 동토지대 철도 건설 시 노반에 쇄석을 섞어 포설하는 공법(쇄석의 크기, 모암의 종류, 쇄석을 넣는 포대 등)을 연구한 바 있다. 네덜란드의 Hartmark(1979)는 동절기 철도 노반의 동상방지를 위해 geotextile을 설치하는 공법

에 대해 연구한 바 있다.

국내에서는 한국철도기술연구소의 신민호박사가 철도 노반의 분니 대책에 관해 연구한 바 있고, 한국건설기술연구원의 홍성완, 김영진(1992)박사는 러시아 동토지역 철도구조물 건설기술 현황에 대한 문헌연구를 수행한 바 있다. 한국건설기술연구원의 김영진박사는 자체 제작한 Methylene Blue식 동결심도계를 이용하여 전국 89개 지점의 동결깊이를 10년 이상 측정한 바 있다. 그러나 국내에서는 아직 철도 노반 및 도상의 동상방지 대책에 대해 종합적, 체계적인 연구를 수행한 바 없다.

국내에서 수행한 철도 시설물 이외의 토목구조물 동해방지 관련 주요 연구 실적은 표2.1과 같다.

표 2.1 철도 시설물 이외의 국내 구조물 동해방지 관련 주요 연구

| 번호 | 연구 과제명 | 수행 연도 | 비고 |
|---|---|---|---|
| 1 | 동토지역 기초구조물의 최적 설계시공 | 1992-1994 | 한국건설기술연구원/홍성완,김영진 |
| 2 | 극지용 해양구조물의 동적 해석 및 최적화에 관한 연구 | 1995 | 서울대 박사학위 논문 /황철성 |
| 3 | 폐기물 매립층의 지반동상 방지 효과에 관한 연구 | 1995 | 인하대 박사학위 논문 /김 영 진 |
| 4 | 동상의 메카니즘 분석과 동결토의 강도 및 열적, 물리적 특성 | 1996 | 북해도대학 저온과학연구소 박사후 연수보고서/한국건설기술연구원 김영진 |
| 5 | 동결심도 및 포장체 온도분포 조사 | 1998-2009 | 한국건설기술연구원 /김 영 진 |
| 6 | 한랭지 토목구조물의 설계, 시공 | 1998 | 한국건설기술연구원 /김 영 진 |
| 7 | 폐비닐골재 활용 도로포장 동상방지에 관한 연구 | 2002-2005 | 한국건설기술연구원 /김 영 진 |
| 8 | 극지 지반특성분석과 시설물 설계기술 | 2004-2007 | 한국건설기술연구원 /김 영 진 |
| 9 | 극한환경 건설기술개발연구 기획 보고서 | 2006 | 한국건설기술연구원/홍성완,김영진 |
| 10 | 시베리아 동토지역 진출을 위한 미래 건설기술 개발(1,2,3) | 2006-2009 | 한국건설기술연구원/ 김 영 진 |
| 11 | 도로 동상방지층의 효용성 검증 연구 | 2008-2012 | 경희대학교 / 이 석 근 |

■ 국내외 관련 기술 동향

한국철도시설공단에서는 2018년 평창 동계올림픽 대비, 원주-강릉간(113.7km) 철도건설을 위해 2017년까지 3조 9천억원을 투자할 예정이다. 아울러 원주-제천간(41km)의 철도개량사

업에 총 1조 1천 400억원을 투자할 계획이다

일본 독립행정법인 철도・운수기구(鐵道・運輸機構)는 신간센 확장사업으로 약 20조원을 투자하여 신아오모리(新青森)-삿뽀로(札幌) 간 길이 360km의 신간센(新幹線) 건설 계획을 확정, 신아오모리-신하코다테(新函館)의 216km 구간을 건설 중이다.




그림 2.2 일본 북부지방의 신간센 건설 계획(일본 철도 ・ 운수 기구)

이 구간은 일본의 북방 동토지대로서, 철도시설물의 동해 방지를 위해 각종 신공법 즉, 자갈도상 대신 콘크리트 슬라브도상 채택, 노반의 동상대책으로서 강화 단열재(XPS) 포설과 콘크리트 구조물의 동상방지(한중콘크리트)기술이 적용될 전망이다.

1996년 1월, 북해도 Yoichi터널 천정부 암반이 누수 및 동결 융해의 반복으로 붕괴, 복공콘크리트를 뚫고 마침 지나가던 버스를 덥친 사고로 10여 명의 등굣길 학생들이 사망하였다.

일본 철도・운수기구는 북해도의 철도 시설물에 대해서도 동결융해 피해가 일어날 수 있다고 판단, 동해방지에 많은 노력을 쏟고 있다.

2011년 2월, 미 연방정부는 330억 파운드를 국가 고속 및 도시간 철도 네트워크 건설에 책정한다고 밝혔다. 이 계획에 의하면 열차의 속도를 200km/hr.로 향상시키고, 25년 이내에 미국 철도의 80%를 고속화하는 것으로 되어 있다.

이 계획 노선 중에는 시카고-디트로이트 구간, 뉴욕-몬트리얼 구간 등 동토지역을 통과하는 노선도 포함되어 있어 다양한 철도 구조물 동상대책 기술이 적용될 것으로 전망된다.




그림 2.3 미국의 고속철도 네트워크 계획(New Civil Engineer, 2011년 2월 17일호)

스위스 정부는 약 250km의 속도로 열차가 알프스산맥을 관통하는 신 알프스 종단터널계획(NEAT)을 수립하였으며, 스위스 연방철도의 자회사인 Alptransit Gotthard는 세계 최장 터널인 길이 57km의 Gotthard Base 철도용 터널공사를 1997년 착공하여 2010년 10월 15일 관통하였다. 이 터널 공사비로 1조 1580억원이 투자되었다. 이렇듯 세계 각국은 효율적인 교통수단으로서 철도 건설에 박차를 가하고 있다. 특히 동토 국가에서도 철도건설이 활발히 이루어지거나 추진되고 있다.

■ 국내외 관련 특허 동향

지반의 동상과 관련된 전 분야의 국내외 선행특허를 조사하여 세계의 기술현황을 파악하고, 향후 필요한 기술 수요를 예측하는데 활용하고자 한다. 본 연구제안서의 작성과 관련하여 고려해야 할 세계의 동토관련 기술 지적 재산권 실태를 분석하였다.

분석의 범위는 분석기간을 1970년부터 2005년까지 35년간으로 하였다. 분석에 사용된 특허정보 분야는 영구동토지역의 기후, 지형, 지반특성 조사 및  토목 시공기술과 특수재료 관련 기술을 대상으로 하였으며, 이중 “지반조사”, “계측”, “토목재료”, “시공기술”, “시추”, “에너지 수송 관련 기술”, “인공동결공법”, “기타”의 총 9개 세부기술로 나누어 분석을 실시하였다.

그림 2.4는 국가별 및 연도별 특허 등록을 보여주고 있는데 분석에 사용된 총 159건의 특허 가운데, 미국과 일본에서 출원/등록된 특허가 122건으로 약 77%를 차지하며 1970년부터 2005년까지 국내에서 출원/등록된 특허는 18건으로 전체의 11%로 나타났다. 미국의 경우 약

40여 건의 특허가 70년대에 편중되어 있으며, 대부분이 영구동토지역의 에너지 수송 관련 특허이고, 일본은 90년대 이후 특허출원이 급증하고 있다.

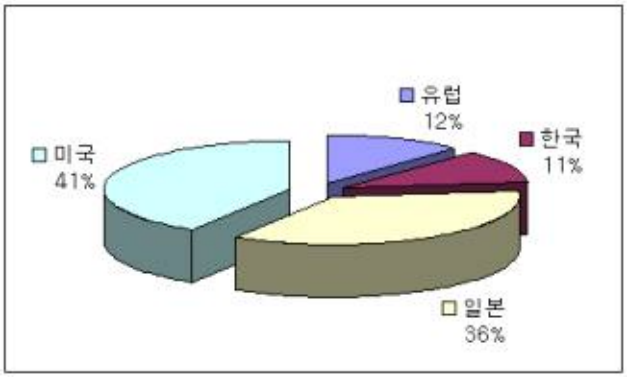



그림 2.4 국가별 특허 등록 현황

국내 특허는 동절기 토목시공 분야와 극저온용 재료분야가 많다. 국내의 특허는 주로 1990년도 중반 이후에 편중되어 있으며, 시추기술 및 지반조사에 관한 특허는 없고 동절기 시공기술과 극지용 철강 소재에 관한 특허가 주를 이루고 있는 것으로 나타났다. 2004년에 최초로 인공동결공법을 활용한 시공방법이 등록되었다. 2000년 이후로 천연가스 수송과 관련한 특허가 2건이 있으며, 이는 최근 새로운 에너지로서 천연가스가 대두되고 있는 현실과 연관성이 높다.




그림 2.5 한국의 세부 기술별 특허 비중

미국내 특허는 극한환경에서의 시공기술과 시추기술 및 에너지 수송과 관련한 기술들이 주를 이룬다. 알래스카 Pipeline 공사와 극지 시추 및 지반조사와 관련한 특허들이 많으며, 시기적으로 1970년대에서 1980년대에 편중되어 있다. 최근에 등록된 특허로는 천연가스 수송과

관련한 특허와 영구동토지역의 건설공사와 관련된 특허가 있다.

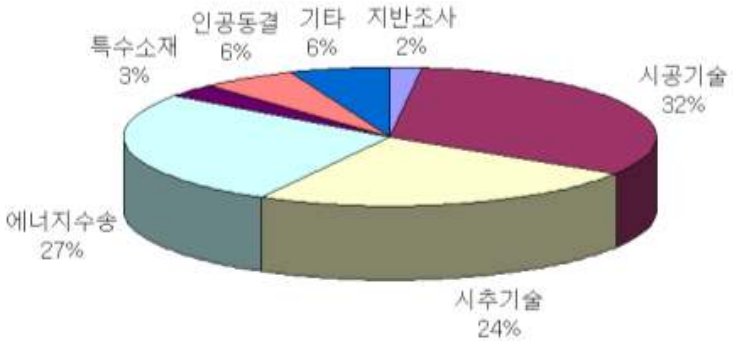



그림 2.6 미국의 세부 기술별 특허 비중

유럽의 지반동결 관련 특허는 시공관련 기술이 42%를 차지한다. 전체 특허 건수는 20건이다. 대부분의 특허가 1990년대 이후에 편중되어 있으며, 주로 영구동토지역 시공과 시추 기술이다.

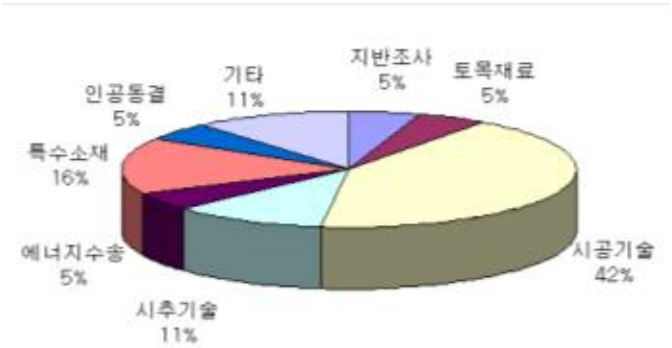



그림 2.7 유럽의 세부 기술별 특허 비중

일본은 동토 관련 기술개발이 타 국가와 비교해 활발히 이루어지고 있는 편으로서 특허등록 건수가 1970년부터 2005년까지 고루 분포되어 있으며, 다양한 종류의 특허가 등록되어 있음을 알 수 있다. 세부 기술별 특허를 살펴보면 그림 2.8에서 나타난바와 같이 인공공동결공법에 대한 다양한 특허기술과 구조물의 동상방지를 위한 기초시공 기술이 특허로 등록되어 있다.

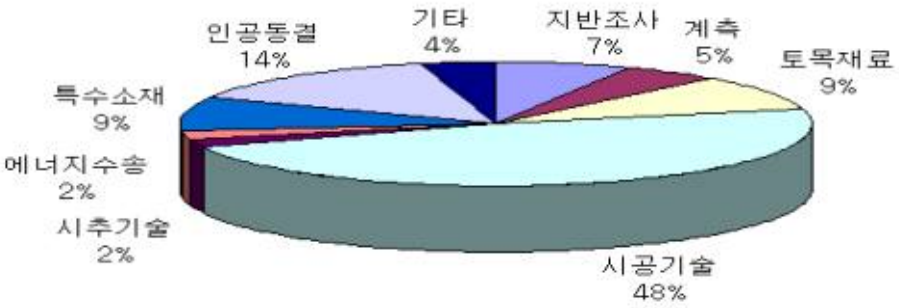



그림 2.8 일본의 세부 기술별 특허 비중

분석에 사용된 특허정보는 영구동토 지역의 지반특성 조사 및 토목시공기술 및 재료, 특수재료 관련 기술을 대상으로 하였으며, 이중 “지반조사”, “계측”, “토목재료”, “시공기술”, “시추”, “에너지 수송 관련 기술”, “특수소재”, “인공동결공법”, “기타”의 총 9개 영구동토 건설분야의 기술은 그 분야가 다양하지 않으며, 국가별로 특정 분야에 한정되어 있는 실정이다.

국내에서는 1990년 중반 이후부터 특허/출원건수가 증가하고 있으며, 동절기 시공기술과 극지용 철강소재에 관한 특허 기술이 대부분을 차지하고 있다.

# 제 3장 연구개발 수행내용 및 결과

## 제 1절 국내외 철도시설물 동해 실태 조사 분석

### 1. 국내철도 시설물의 동해 실태

국내 철도시설물의 동상실태 조사를 위해 철도현장 방문조사를 수행하였다.

표 3.1.1은 선로 동상 발생 사례를 나타내고 있으며, 그림 3.1.1~3.1.3에서는 철도도상 · 철도시설물의 동상피해 및 보수작업 모습을 보여 주고 있다.

표 3.1.1 선로 동상 발생 및 조치현황 예(강원본부)

| 본부별 | 선별 | 구간 | 상하 | 위치 | 연장 | 작업등 조치 내역 | 향후계획 | 비고 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 강원 | 태백선 | 고한-추전 | 단 | 83.600-84.000 | 400 | -○○터널내 간헐적 약 25mm 동상발생<br>- 팩킹 조절작업(7명) | -변동시 재작업 시행<br>-동상개소 특별관리 | △△시설반 |
| 강원 | 태백선 | 고한-추전 | 단 | 88.100-88.400 | 300 | - ○○터널 종점부 및 88.400 깍기구간 동상 약 20mm 발생<br>- 팩킹 조절작업(6명) | -변동시 재작업 시행<br>-동상개소 특별관리 | △△시설반 |
| 강원 | 태백선 | 고한-추전 | 단 | 93.600-93.800 | 500 | - 동상 약 15mm 간헐적 발생<br>- 팩킹 작업(7명) | -변동시 재작업 시행<br>-동 상 개 소 특별관리 | △△시설반 |
| 강원 | 태백선 | 태백-문곡 | 단 | 95.950-96.000 | 50 | - 동상 약 15mm 발생<br>- 팩킹 조절작업(7명) | -변동시 재작업 시행<br>-동 상 개 소 특별관리 | △△시설반 |
| 강원 | 영동선 | 석포-동점 | 단 | 82.505-82.515 | 10 | - 동상 약 20m 발생<br>- 팩킹 조절작업(4명) | -변동시 재작업 시행<br>-동 상 개 소 특별관리 | △△시설반 |
| 강원 | 영동선 | 동점-철암 | 단 | 84.007-84.013 | 6 | -○○터널 시점부 동상 약 15mm발생<br>- 팩킹 조절작업(5명) | -변동시 재작업 시행<br>-동 상 개 소 특별관리 | △△시설반 |

| 본부별 | 선별 | 구간 | 상하 | 위치 | 연장 | 작업등 조치 내역 | 향후계획 | 비고 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 강원 | 영동선 | 동 점 - 철암 | 단 | 84.966-84.974 | 8 | - 확인결과 동상 약 20mm발생<br>- 팩킹 조절작업(4명) | -변동시 재작업 시행<br>-동상개소 특별관리 | △△ 시설반 |
| 강원 | 영동선 | 동 점 - 철암 | 단 | 85.005-85.015 | 10 | - 확인 결과 동상 약 20mm발생<br>- 팩킹 조절작업(4명) | -변동시 재작업 시행<br>-동상개소 특별관리 | △△시설반 |
| 강원 | 태백선 | 문 곡 - 백산 | 단 | 101.480-101.530 | 50 | - 확인 결과 동상 약 15mm발생<br>- 팩킹보수 삽입 보수(10명) | -변동시 재작업 시행<br>-동상개소 특별관리 | △△시설반 |



(a) ○○ 터널 동상 발생장소(터널 입구)



(b) 자갈도상 동상 발생 구간(흰색페인트 칠한 곳. 동상발생 구간 길이 8m )



(c) 동상 발생 위치(흰색 페인트 칠한 부분)



(d) ○○ 터널 앞 동상발생 지점

그림 3.1.1 충북 ○○ 시설사업소 관내 철도 도상의 동상피해 사례



그림 3.1.2 동상이 발생한 노반의 흙을 제거한 후 자갈을 채워 넣는 모습
(2012년 겨울 ○○시설사업소 관내)



(a) 자갈도상의 동상을 야기한 분니를 제거, 철길 옆에 쌓아놓은 모습(태백선)

(b) ballast 두께가 30cm 임에도 한기 침투로 동상 발생

그림 3.1.3 강원도 ○○ 시설사업소 관내 철도 도상의 동상피해 및 보수 작업



그림 3.1.4 경기도 ○○지점 (75km+250m) 자갈도상 동상 발생: 홍수시 진흙 유입 및 토피 두께 낮은 것이 동상발생의 주 요인으로 작용



그림 3.1.5 경기도 ○○지점 (76km+950m) 자갈도상의 동상 발생 모습



(a)자갈도상 동상발생 지점의 저토피 암거가 동상력으로 파손된 모습

(b) 토피 두께가 낮은 암거 밑으로 고드름이 생긴 모습

그림 3.1.6 강원도 ○○터널부근 철도구조물 동해발생 현황



그림 3.1.7 ○○터널 노반의 동상피해를 줄이려고 노반으로부터 물이 빠지도록 주변 배수로를 파괴, 새로운 물길을 튼 모습




그림 3.1.8 ○○터널 철도 노반 밑을 관통하는 암거(이 암거에 찬 공기가 통과하여 우측 자갈도상에 동상 발생)

## 2. 국외 철도 시설물의 동해실태

### 가. 일본 철도 시설물의 동해 실태

그림 3.1.9~3.1.12에서는 연구 책임자가 2012년 일본 지반공학회 북해도지부 기술발표회에 참석하여 수집한 자료와 KICT에서 일본 북해학원대학 Ono교수 초청 강연을 실시, 수집한 일본 철도 시설물의 동상피해 사례를 보여 주고 있다.



그림 3.1.9 철도 자갈도상 동상발생 지점에 XPS를 넣어 보강하는 모습(북해도)



그림 3.1.10 옹벽 뒷채움 흙의 동상으로 파손된 전면판



그림 3.1.11 동결융해의 반복으로 사면이 붕괴된 모습




그림 3.1.12 사면보강철물이 사면의 동상으로 파손된 모습

### 나. 중국 철도시설물의 동해 실태

◦ 북경교통대학 Liu교수 초청 세미나를 통해 중국 철도 시설물 동해 실태를 조사 분석하였다.(그림3.1.13 및 그림 3.1.14참조)



그림 3.1.13 노반의 동상으로 구불구불해진 철도 (Chara-China 구간 2003년)



그림 3.1.14 철도 제방의 동상으로 암거가 파손된 현장(Qinghuangdao-Shenyang구간)

다. 러시아 철도시설물의 동해 실태

◦ 북경 교통 대학 Liu교수 초청 세미나를 통해 러시아 철도 구조물의 동해 실태를 조사 분석하였다. (그림3.1.15참조)



그림 3.1.15 하부 노반의 동상으로 심한 변위가 발생한 궤도의 모습(Baikal- Amur 철도)

# 제 2절 철도 동상 발생지 흙에 대한 동토공학적 기본성질 실내실험

## 1. 흙 및 콘크리트 열전도율 시험

### 가. 흙의 열전도율 분석

#### (1) 일반적인 흙의 열전도율

일반적으로 흙의 열전도율은 밀도, 함수비, 입자의 형태, 온도, 간극수의 상태와 고체·액체 및 기체 성분에 의존하며 동상 시에는 함수비와 얼음-물의 위상(phase)관계에 크게 좌우된다.

일정한 함수비에서 건조밀도의 증가는 열전도율의 증가를 가져오며 그 증가율은 다른 일정한 함수비에서도 거의 동일하다. 건조밀도를 고정시키고 함수비만을 증가시켜도 열전도율은 증가하며 동토 여부와 상관없이 동일하다. 또한 0℃ 이하의 온도에서도 흙의 열전도율은 증가하는 경향을 보인다(한대석 1991).

표 3.2.1 흙의 종류에 따른 열전도율 가이드라인

| | 열전도율 ($W/m.K$) | |
|---|---|---|
| | 비동결시 | 동결시 |
| 점토 | 0.81-1.1 | 2.0-2.2 |
| 실트질 점토 | 1.1-1.5 | 2.3-2.8 |
| 실트 | 1.2-2.4 | 2.3-3.2 |
| 모래(포화시료) | 1.5-2.6 | 2.7-3.3 |
| 모래(불포화시료) | 0.4-1.1 | 0.4-1.0 |
| 자갈(포화시료) | 1.6-2.1 | 2.8-3.0 |
| 자갈(불포화시료) | 0.7-0.9 | 0.8-0.9 |

무기질토(inorganic soils)는 열전도율이 다른 여러 종류의 광물로 구성되어 있다. 일반적으로 흙의 굵은 입자들은 석영(quartz), 장석(feldspar), 휘석(pyroxene) 등으로 이루어져 있으며 잔 입자들은 카올리나이트(kaolinite), 일라이트(illite), 몬모릴로나이트(montmorillonite)와 같은 점토광물, 석영, 장석, 운모(mica) 등으로 구성되어 있다. 이들 광물 중 석영이 가장 높은 열전도율을 가지므로 석영의 함유량을 아는 것이 중요하다(한대석 1991).

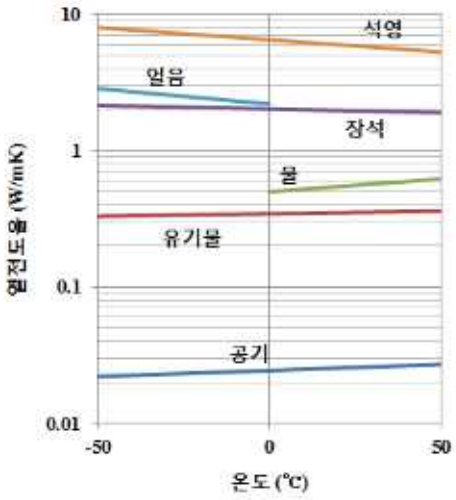



그림 3.2.1 주요 광물의 열전도율 (일본토질공학회 1982)

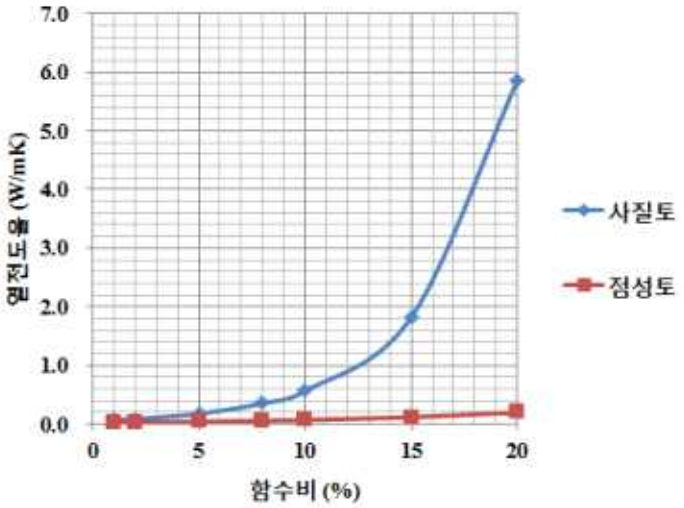



그림 3.2.2 함수비에 따른 동토의 열전도율, 초기온도 -10℃ (일본토질공학회 1982)

(2) 열전도율 측정

열전도율을 측정하는 방법은 크게 정상법과 비정상법으로 나눌 수 있다. 정상법은 원리에 충실하나 오랜 시간과 숙련된 기술을 요한다. 반면 비정상법은 실용화를 위해 상품화되는 경우가 늘고 있지만 그 중 저항법과 후랏슈법에서는 열전도율을 구하기 위해서 다른 측정치를 필요로 한다. 열선법은 열전도율을 신속하게 측정할 수 있는 방법인데 이를 개량 발전시킨 방법이 QTM식 프로브(probe)법이다. 이 QTM식 프로브(probe)법은 이미 알고 있는 열전도율을 가진 물질의 표면에 가열선(heater)과 열전대가 배치된 상태로서, 이 물질은 단열성이 좋으며 탄성이 있고 시료면과 잘 밀착도록 제작되었다.

이 프로브를 사용해서 측정할 때에는 시료면 위에 프로브의 저면(5× 10 $cm^2$)과 비슷한 면적의 평면부분이 있으면 되며, 시료면을 잘라 내거나 표면을 정밀히 다듬을 필요는 없다(김영진 등, 2005).

표 3.2.2 열전도율 측정법의 종류(김영진 등, 2005)

| 종류 | 구분 | 비고 |
|---|---|---|
| 정상법 | 절대측정법<br>비교측정법 | JIS A-143 R-2616<br>ASTM C-177 C-518 |
| 비정상법 | 저항법, 후랏슈법<br>열선법, QTM 법 | ASTM D 2326<br>JIS R-2618 |

본 연구에 사용한 열전도율시험기(QTM-500)는 프로브를 시료면 위에 얹고 가열선에 일정한 저항을 가진 전기를 흐르게 하여 프로브 표면에 있는 열전대의 기전력을 자기 기록계로 기록하여 열전도율을 산출한다. 저항값과 온도에 따라 측정시간이 다르나 10℃ 부근에서 $I^2 = 3.000$일 때 3분 내외가 소요된다.

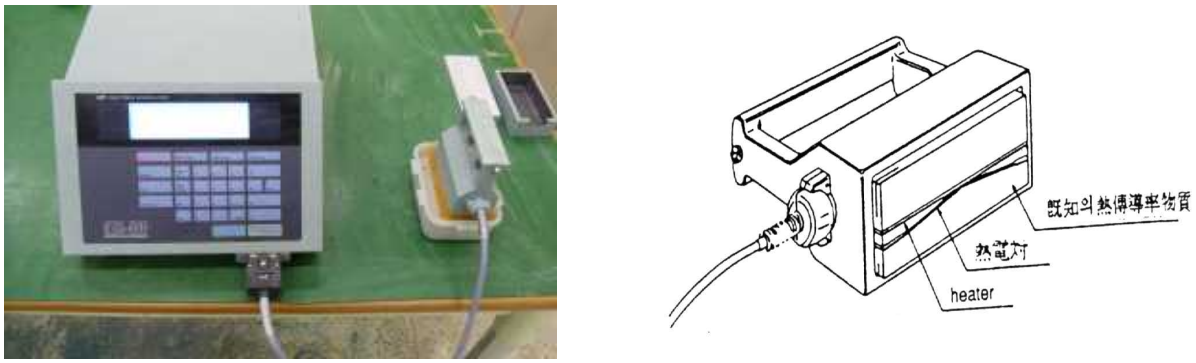



그림 3.2.3 열전도율시험기(QTM-500)의 실제 모습과 프로브(Probe)의 구조

(3) 시험 결과

열전도율은 No.10체를 통과한 네 곳의 흙 시료를 프로브(probe)와 비슷한 면적을 가진 플라스틱 용기($V = 460cm^3$)에 담아 측정하였다. 시료는 모두 24시간 이상 노건조한 것을 사용하였으며, 실험은 각각 3번 실시한 후 평균값으로 나타내었다.

건조밀도에 따른 열전도율 변화를 알기 위해 용기에 느슨하게 넣은 건조시료를 다짐봉으로 조금씩 다져 넣으며 건조밀도를 점차 늘려가며 열전도율을 측정하였다. 함수비를 조절할 때는 건조 시료에 증류수의 양만을 조절하여 섞은 후, 질량을 측정하여 함수비를 계산하고 그 때의 열전도율을 측정하였다.

시험 결과, 네 시료 모두 건조밀도에 따른 열전도율은 거의 유사한 값을 보이며, 건조밀도가 증가할수록 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 최대건조밀도의 크기가 달라 각 시료의 최대 열전도율에서는 차이가 있겠으나 같은 건조밀도일 때는 거의 비슷한 열전도율을 나타낼 것으로 판단된다. 함수비에 따른 열전도율은 일정 함수비까지는 천천히 증가하다 갑자기 큰 폭으로 상승하였다. 그 상승비율은 큰 것부터 T1, J1, Y1, T2 순이며 이는 최적함수비가 작은 순서와 같다. 따라서 시료들보다 큰 0.58W/mK의 열전도율을 갖는 물이 간극을 채울수록 열전도율도 같이 증가하는 것으로 판단된다. 또한 온도가 영하 이하로 낮아져 물보다 열전도율이 약 3.7배 큰 얼음이 되면 더욱 빠르게 냉각될 것으

로 사료된다.

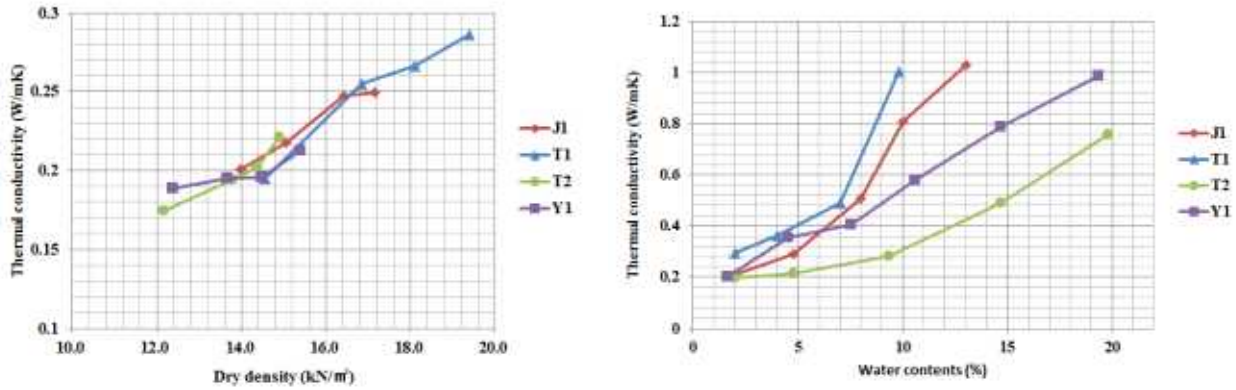



그림 3.2.4 흙의 열전도율 측정 결과

나. 콘크리트의 열전도율 분석

최근 KTX 열차용 도상은 자갈도상에서 콘크리트도상으로 바뀌고 있다. 따라서 콘크리트 도상을 설치했을 때의 동결깊이를 알기 위해서 또는 콘크리트도상에 대한 동결심도 해석용 프로그램을 구축하기 위해서는 온도 변화에 따른 콘크리트의 열전도율을 알 필요가 있다.

본 연구에서는 그림 3.2.3의 열전도율 측정기를 이용하여 압축강도 시험용 콘크리트공시체 (직경 10cm* 높이 20cm)에 대한 열전도율을 상온과 영하의 온도에서 측정하였다. 측정은 3회 실시하여 평균치를 취하였다. 그 결과를 그림 3.2.5에 나타내었다.

그림 3.2.5에서 보는 바와 마찬가지로 콘크리트의 열전도율은 영하의 온도에서보다 상온에서 더 크게 나타나서 흙과는 반대의 현상을 보이고 있다. 흙의 경우는 흙 속에 수분을 포함하고 있어 영하의 온도로 떨어지면 수분이 얼어 얼음으로 되는데 얼음의 열전도율이 토립자보다 더 커서 영하의 온도에서는 상온보다 더 큰 열전도율을 보인다.

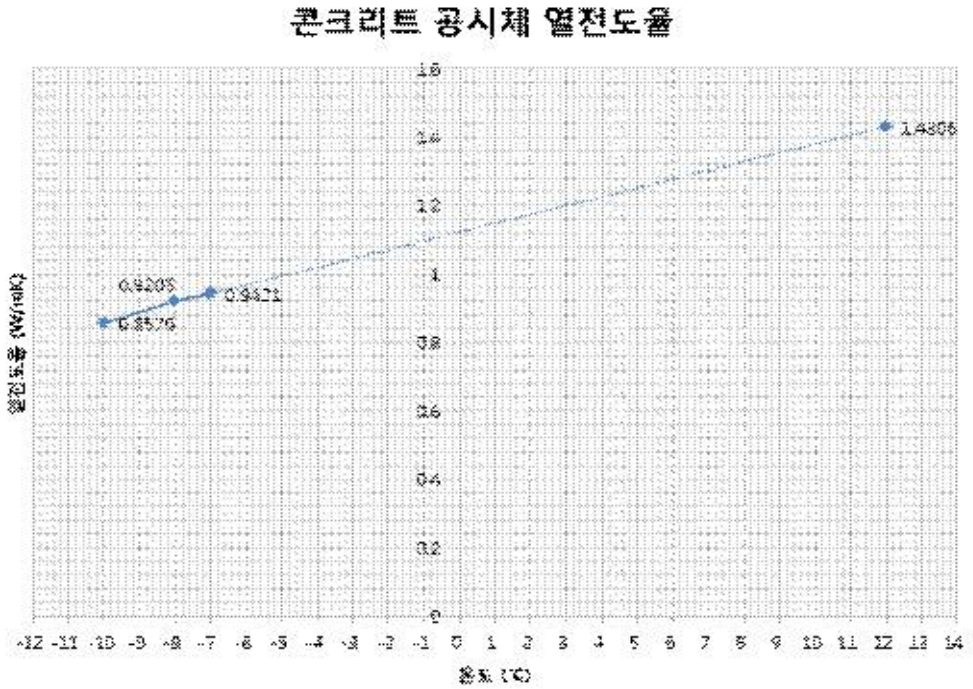



그림 3.2.5 콘크리트의 온도변화별 열전도율

## 2. 단열재 혼합토에 대한 열전도율

### 가. EPS와 XPS

단열재로 사용되는 EPS는 Expanded Polystyrene의 약자로서 폴리스틸렌 수지에 펜탄 또는 부탄 등 탄화수소가스를 주입시킨 후 이를 증기로 부풀린 발포 제품으로 체적의 98%가 공기이고 나머지 2%가 PS수지인 자원절약형 소재이다. 발포 폴리스티렌은 발포제를 함유하고 있는 스티렌 중합체 또는 공중합체로서 희고 가벼우며, 내수성, 단열성, 방음성, 완충성이 우수하기 때문에 포장재, 건축재료, 부자, 구명조끼, 장식품, 절연재 및 일용품 등으로 널리 사용된다. 토목 분야에서는 EPS를 성토, 기초지반재료로 사용하고 있다.

표 3.2.3 EPS의 특성(KS M 3808)

| 항목 | 변위 | 제조법 | | | | 비고 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | EPS (형내발포법) | | | | |
| 종별 | | 1호(D-30) | 2호(D-25) | 3호(D-20) | 4호(D-16) | |
| 단위체적중량(밀도) | $kgf/m^3$ | 30 | 25 | 20 | 16 | |
| 허용압축응력 | $tf/m^2$ | 9.0 | 7.0 | 5.0 | 3.5 | 압축탄성한계 이내 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 품질관리 시의 압축응력 | $N/cm^2$ | | 16이상 | 12이상 | 8이상 | 5이상 | 5% 변형시 |
| 초기 열전도율 | $W/m \cdot K$ | 비드법 1종 | 0.036이하 | 0.037이하 | 0.040이하 | 0.043이하 | 평균온도 23±2℃ |
| | | 비드법 2종 | 0.031이하 | 0.032이하 | 0.033이하 | 0.034이하 | |
| 흡수량 | $g/100cm^2$ | | 1.0이하 | | | 1.5이하 | |
| 연소성 | | | 연소시간 120초 이내이며, 연소길이 60mm이하 일 것 | | | | |
| 투습계수 | $ng/m^2 \cdot s \cdot Pa$ | | 146이하 | 208이하 | 250이하 | 292이하 | 두께 25mm당 |

표 3.2.4 XPS의 특성 (KS M 3808)

| 항목 | 변위 | 제조법 | | | | 비고 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | XPS (압출법) | | | | |
| 종별 | | 특호 | 1호 | 2호 | 3호 | |
| 품질관리시의 압축응력 | $N/cm^2$ | 25이상 | 18이상 | 14이상 | 10이상 | 5% 변형시 |
| 초기 열전도율 | $W/m \cdot K$ | 0.027이하 | 0.028이하 | 0.029이하 | 0.031이하 | 평균온도 23±2℃ |
| 장기 열전도율 | | 0.029이하 | 0.030이하 | 0.031이하 | 0.033이하 | |
| 흡수량 | $g/100cm^2$ | | | | | |
| 연소성 | | 연소시간 120초 이내이며, 연소길이가 60mm이하일 것 | | | | |
| 투습계수 | $ng/m^2 \cdot s \cdot Pa$ | 146이하 | | | | 두께 25mm당 |

압축발포 폴리스틸렌판(Extruded Foam Polystyrene Board), 압출 폴리스티렌, 압축 스티로폼, 고밀도 발포폴리스티렌 보드 등으로 불리는 XPS는 스티롤수지 원료에 난연재, 발포제 등을 가하여 압출기에서 용해혼합 후 발포시킨 판상단열재이다. 물리적 성질은 EPS와 유사하나 EPS에 비해 단열성과 강도가 우수하며 어느 정도의 투습 저항을 갖고 있다. 다른 단열재에 비해 장기간 보온하고 고강도의 압축강도를 가지며 부식, 내구성이 매우 우수하다.

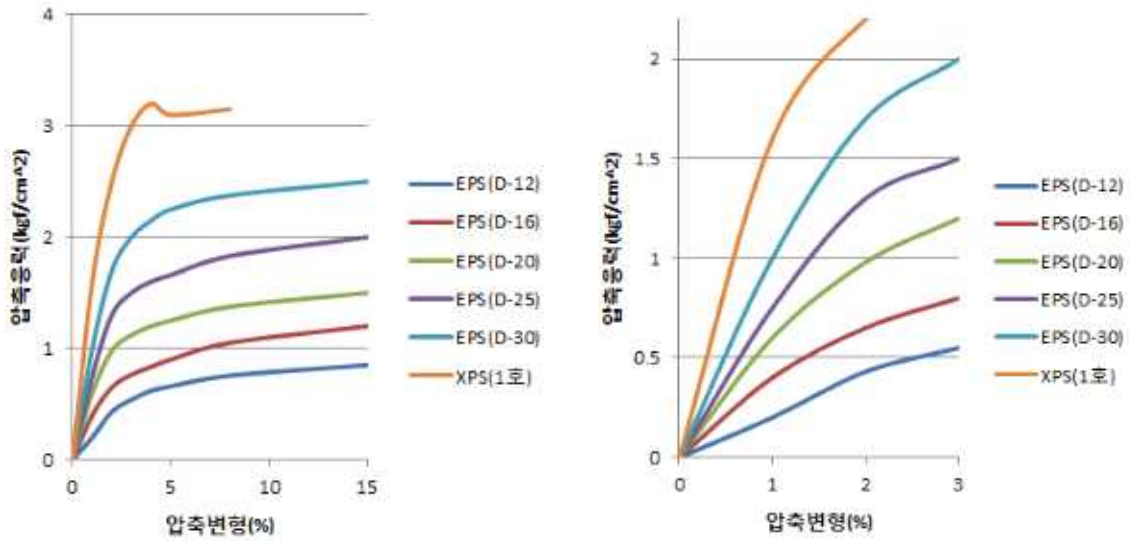
(1) EPS와 XPS의 강도특성

EPS의 압축강도는 KS M ISO 844에 준용하며, EPS의 1축압축시험에서 응력-변형 관계



그림 3.2.6 XPS Board와 XPS Board 생산라인

는 탄소성적이다. EPS의 경우 밀도가 커짐에 따라 곡선의 상태는 급하게 되어 압축응력도 커지게 되나 명확히 피크는 볼 수 없으며, 압축변형의 증가에 따라 압축응력은 점증한다. 반면, XPS의 경우는 EPS에 비해 곡선의 상태는 급하며, 피크시에 변형도 작다.




(a) 압축응력과 변형(대표치) (b) 압축응력과 변형(변형량 < 3%)

그림 3.2.7 EPS와 XPS의 압축응력과 변형(과학기술 출판사 발행 'EPS공법')

일축압축시험에서 항복변형은 그림 3.2.7 (a)로부터 EPS의 종별에 따라 2~4%정도이며, 다른 시험 결과도 같은 경향을 나타내고 있다. 그림 3.2.7 (b)는 그림 3.2.7 (a)의 변형량 3% 이내 값을 확대한 것으로 EPS는 5% 변형 시에는 이미 소성변형이 발생되며 탄성변형은 1% 이하임을 알 수 있다. 또한 그림 3.2.8로부터 압축응력(탄성한계변형)과 단위체적중량의 관계는 비례관계에 있으며, 단위체적중량의 증가에 따라 압축력도 증가함을 알 수 있다.

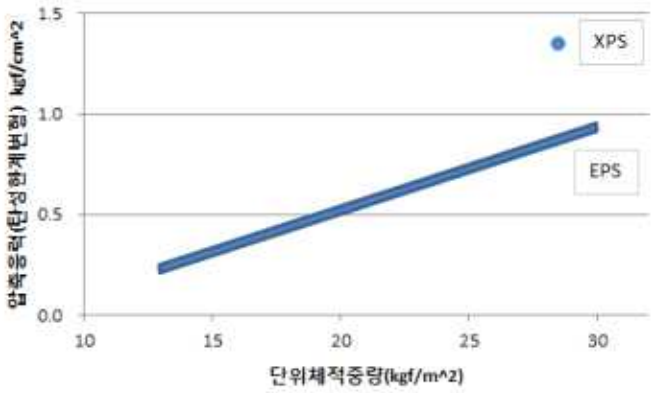



그림 3.2.8 압축응력(탄성한계변형)과 탄성체적중량(과학기술 출판사 발행 'EPS공법')

정하중에 대한 Creep특성에 있어서도 압축비례한계 이하의 하중에 대한 Creep변형은 작으며, 거의 안정한 상태에 있다. 안정상태를 나타내는 재하압은 EPS와 XPS의 종별에 따라 다르나 각각 EPS의 5% 변형시 압축강도의 절반 이하이다.

(2) EPS Board와 XPS Board의 열전도율 특성



그림 3.2.9 휴대용 탐침식 열전도 측정기(K-D2-P)

EPS, XPS Board의 열전도율 측정에는 휴대용 탐침식 열전도 측정기(K-D2-P)를 사용하였다. K-D2-P는 열전도율을 0.02 $W/m \cdot K$ 부터 4 $W/m \cdot K$까지 측정 가능하며 신속한 측정이 가능한 장점이 있다. 실제 측정한 EPS Board와 XPS Board의 열전도율은 KS 기

준과는 약간의 차이를 보였다. 매우 작은 차이이지만 그 원인이 제조상의 오차, 측정온도의 차이와 열전도율을 측정한 기기의 차이로 인한 오차 때문으로 판단된다.

표 3.2.5 EPS Board와 XPS Board의 열전도율 실측값

| | 종별 | 밀도 | 열전도율 (26.6℃) |
|---|---|---|---|
| EPS보드 | 비드법 1종 단열판 3호 | $20kg/m^3$ | $0.037\,W/m \cdot K$ |
| XPS보드 | 1호 | $30kg/m^3$ | $0.035\,W/m \cdot K$ |

나. 폐 EPS 골재

급속한 산업화에 따른 폐기물은 국내·외에서 많은 문제를 야기하고 있으며, 각국에서는 이를 해결하기 위하여 폐기물 감량화와 동시에 발생하는 폐기물을 재활용하여 가용자원화하는 정책을 병행하여 실시하고 있다. 여러 건설 폐기물 중 폐EPS는 무게는 가볍지만 부피가 크기 때문에 수송의 어려움으로 수거를 기피하는 현상이 발생하고 있으며, 매립할 경우 매립지의 부족, 소각할 경우 공해 문제를 야기할 수 있어 근본적인 재활용 방안이 요구된다(최주섭, 1997).

본 연구에서는 폐EPS를 재활용하는 과정에서 나오는 잉고트(Ingot)를 가지고 경량골재로서의 활용가치를 알아보기 위해 LA 마모시험 및 열전도율 시험을 실시하였다.

(1) Ingot 생산 과정

Ingot는 폐EPS를 용융할 때 나오는 것으로 시험에 사용된 폐EPS 입자는 ○○시 EPS 재생업체에서 생산된 것이다. Ingot는 수거된 각종 스티로폴 제품을 그림 3.2.10과 같은 공정을 거쳐서 만든다. 입경 범위는 0.8~25$mm$의 입자로 되어 있으며, 단위중량은 0.44~0.53$g/cm^3$의 범위에서 분포하는 것으로 나타났다.





(a) 폐EPS를 잘게 파쇄하는 과정



(b) 감용기에서 Ingot를 생산하는 과정



(c) Ingot를 잘게 파쇄하는 과정

(d) 잘게 파쇄된 Ingot(폐EPS 골재)

그림 3.2.10 폐EPS 재활용 과정

(2) 폐EPS 골재의 내구성

폐EPS 골재의 내구성을 평가하기 위하여 한국공업규격에 따라 로스앤젤레스 마모시험(KS F 2508)을 수행하였다. 시험을 통하여 구한 EPS의 마모감량은 표 8과 같다.





그림 3.2.11 LA마모 시험기와 분석중인 폐EPS골재

표 3.2.6 폐EPS 골재의 마모율

| 체의 호칭 | | 각 무더기의 질량(g) | 각 무더기의 질량비(%) | 입도 구분 | 철구의 수 (개) | 회전수 (회) | 시험 전의 시료의 질량(g) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 남는체(mm) | 통과체(mm) | | | | | | |
| 5 | 10 | 2501 | 50 | C | 8 | 500 | 2501 |
| 10 | 15 | 2501 | 50 | | | | 2501 |
| 합 계 | | 5002 | 100 | | | | 5002 |
| 시험 후 1.7$mm$체에 남는 시료의 질량(g) | | | | | | | 4778 |
| 마모감량의 질량(g) | | | | | | | 224 |
| 마모율(%) | | | | | | | 4.5% |

표 3.2.7 폐EPS 골재 마모율과 자갈의 마모율 기준 비교

| 구 분 | 마모율(%) |
|---|---|
| EPS | 4.5 |
| 도로포장용 자갈 기준 | 35 이하 |
| 댐콘크리트용 자갈 기준 | 40 이하 |

EPS의 마모율은 4.5%로 표 3.2.7에 보이는 자갈 기준보다 현저히 낮은 값으로 경량골재로서의 내구성은 충분하다고 할 수 있다.

(3) EPS의 열전도 특성

본 연구에서 사용된 열전도율 측정장비는 흙의 열전도율 측정 시 사용한 그림 3.2.3의 장비(QTM-500)이다. 열전도율시험은 EPS(#10체 통과)를 그림 3.2.12와 같이 질량비로 0%, 5%, 10%, 15%로 흙(시료1, 2, 3, #10체 통과)과 혼합하여 측정하였다. 폐EPS 골재와 흙을 혼합비에 따라 아크릴 재질의 시료상자(9×13×5cm)에 넣고 시험을 실시하였다. 시험에 쓰인 시료는 중앙선(J1), 태백선(T1), 태백선(T2)의 시료를 이용하였다.



(a) 혼합비 5% (b) 혼합비 10% (c) 혼합비 15%

사진 3.2.12 태백선(T1) 시료와 EPS의 질량비

(4) 열전도율시험 결과

EPS의 혼합비에 따른 열전도율의 변화를 그림 3.2.13에 나타내었다. 시료1은 태백선(T1), 시료2는 태백선(T2), 시료3은 중앙선(1) 시료로서 그림에 나타난 바와 같이 시험결과 폐EPS 골재의 혼합비가 증가할수록 열전도율은 더 감소하는 것으로 나타났다. 혼합비 15%일 경우 0%에 비해 시료1은 열전도율이 $0.1998\,W/m \cdot K$에서 $0.1690\,W/m \cdot K$으로 약 15% 감소하였으며, 시료2는 $0.1884\,W/m \cdot K$에서 $0.1325\,W/m \cdot K$로 약 30% 감소하였다.

이로부터 폐EPS 골재의 함유량이 많을수록 열전도율이 크게 감소하는 것을 알 수 있고, 이는 김영진, 김학승(2009)에 의한 폐EPS의 시험결과와 유사한 경향을 나타내고 있다. 또한 EPS나 XPS와 비교하여도 비슷한 열전도율을 나타낸 것을 알 수 있다.

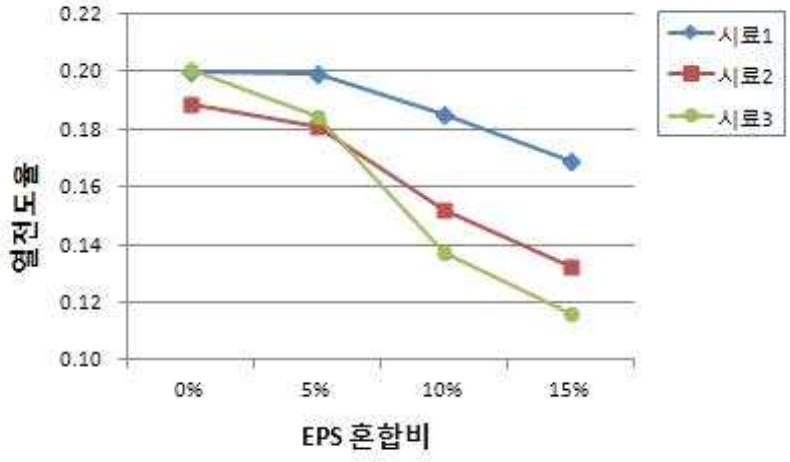



그림 3.2.13 Ingot 혼합비에 따른 열전도율 변화

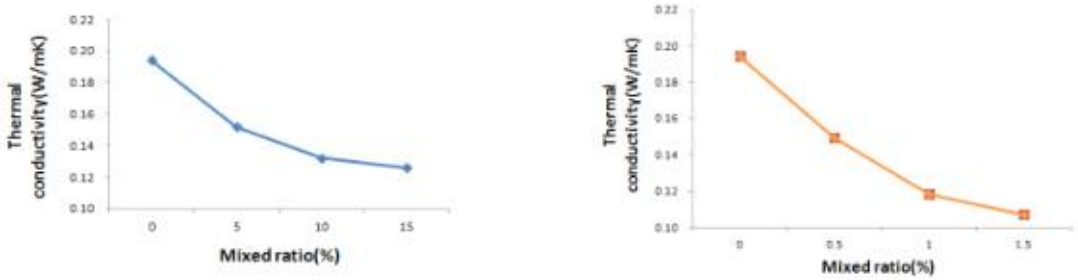
또한 폐EPS 골재와 잘게 조각낸 XPS를 혼합 비율을 달리해 열전도율을 측정하였다. 이 시험에서는 휴대용 탐침식 열전도 측정기(K-D2-P)를 사용하였으며, $D45 \times H85mm$ 크기의 아크릴 상자 속에 시료를 넣고 열전도율을 5회 측정하여 평균값을 사용하였다.



그림 3.2.14 폐EPS 골재와 잘게 조각낸 XPS의 열전도율 측정

태백선(T1)시료에 각 단열재를 중량비로 섞고 열전도율을 측정한 결과, 혼합비가 증가할수록 열전도율이 비선형적으로 감소한다는 점을 알 수 있었다. 그림 3.2.15 (a)와 (b)를 보

면 혼합비가 증가함에 따라 일정하게 수렴하는 것을 볼 수 있다. 폐EPS골재를 15% 혼합했을 경우 열전도율이 $0.194\,W/m \cdot K$에서 $0.126\,W/m \cdot K$으로 약 35% 감소하는 반면, XPS조각은 불과 1.5%만 혼합하여도 열전도율이 $0.194\,W/m \cdot K$에서 $0.107\,W/m \cdot K$로 약 45% 감소했다. 이를 통해서 폐EPS골재에 비해 XPS조각이 더 큰 단열효과를 나타낸다고 볼 수 있다.




(a) EPS 조각 (b) XPS 조각

그림 3.2.15 질량 혼합비에 따른 시료별 열전도율

다. 폐비닐(PE)골재

(1) PE골재 생산과정

본 연구에서는 PE골재를 생산하기 위해 한국환경자원공사에서 수집한 하우스용 폐비닐(LDPE:Low Dencity Polyethylene)을 이용하였다.

PE골재는 용융, 냉각, 절단의 과정으로 생산되며, 일반적으로 기존의 폐비닐 재활용업체에서 폐비닐을 용융하는 온도는 170℃~200℃ 사이다. 용융된 폐비닐은 용융기 스크류의 끝에 설치된 30mm 직경의 스크린을 통하여 일정한 직경의 가래떡 모양으로 녹아 나오는데 이것을 수조를 통과시켜 냉각시키면 가래떡 모양의 폐비닐 용융물질 내부에 공극이 생기게 된다. 폐비닐의 냉각은 10~30초 사이에서 이루어지며, 단시간에 이루어지는 냉각으로 폐비닐의 외부가 빨리 응고되고 내부에는 잔 공극이 수없이 많이 생기게 된다. 냉각된 가래떡 모양의 폐비닐 용융물질을 회전 칼날, 작두 등을 이용하여 19mm의 크기로 절단하여 골재를 만들었다.

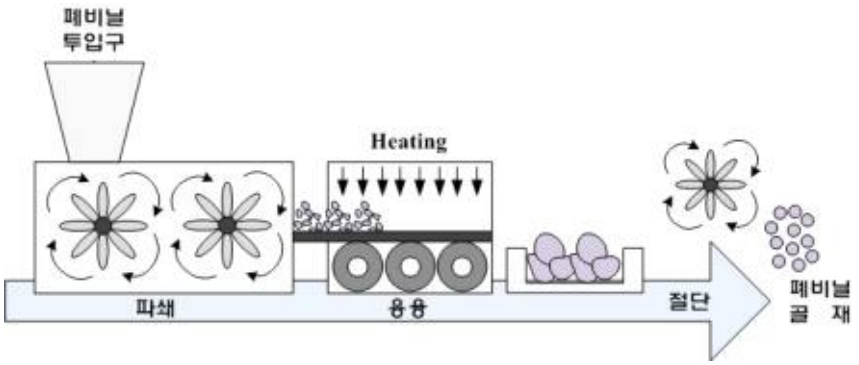



그림 3.2.16 PE골재 생산장치 개요

(2) PE골재의 역학적 특성

제작한 PE골재에 대하여 입도분포시험(KS F 2302), 비중시험(KS F 2308), 단위중량시험(KS F 2505), 로스앤젤레스 마모시험(KS F 2508), 전단시험(KS F 2343)을 실시하였다. 단위중량시험은 봉다짐 방법으로 수행하였으며, 일반적인 골재의 단위중량인 $1.73t/m^3$의 65% 정도로 나타났다. 이와 같은 경량 특성을 이용하여 토공 구조물의 무게를 줄이거나 옹벽의 뒷채움재로 활용하면 효과적일 것으로 판단된다.

표 3.2.8 PE골재의 역학적 특성

| USCS | 마모율 (%) | c ($kg/cm^2$) | $\phi$ ($^\circ$) | 비중 | $\gamma_d$ ($t/m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|
| GP | 2.3 | 0 | 51.3 | 1.089 | 1.13 |

표 3.2.9 일반적인 건설재료의 비중 비교(Das, 1985)

| 재 료 | 아스팔트 | 콘크리트 | 자갈 | 모래 | 실트 | 점토 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 비 중 | 1.04~1.40 | 2.2~2.3 | 2.5~2.7 | 2.64~2.66 | 2.67~2.73 | 2.7~2.9 |

(3) PE골재의 열전도 특성

측정한 PE골재의 열전도율은 평균 0.092kcal/mh℃(0.107W/mK)이며, 이것은 그림 3.2.19에 나타낸 일반재료의 측정값과 비교하면 일반자갈에 비해 약 1/21, 모래의 열전도율의 약 1/18, 점토의 열전도율의 1/14.1 로 나타났으며, 암석에 비해서는 무려 1/29 정도로 작은 열전도율을 나타났다.

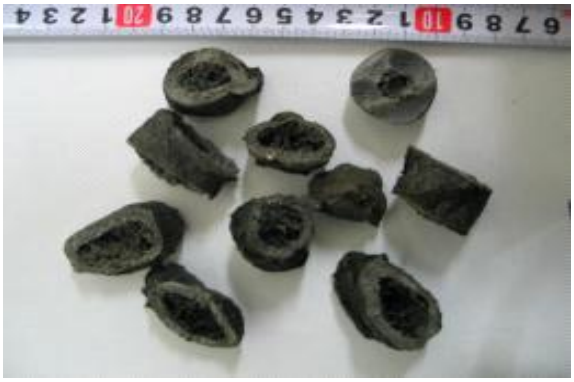


그림 3.2.17 PE골재의 형태와 단면




그림 3.2.18 PE골재 열전도율 측정기

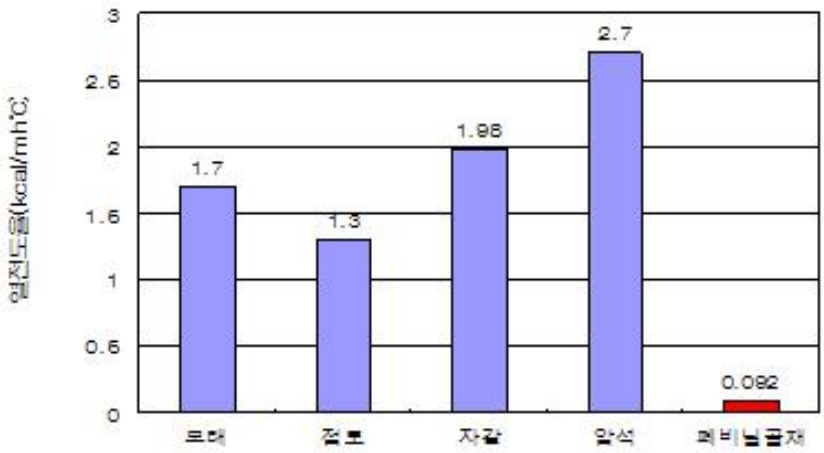



그림 3.2.19 PE골재의 열전도율

## 3. 철도 자갈도상 축소 모형 실험

### 가. 철도 자갈 도상 축소 모형 실험

#### (1) 철도 자갈 도상 축소 모형 제조

중앙선 동상발생 현장 흙 시료(Y1)와 XPS 및 PE골재, 자갈을 적정한 두께로 설치하여 철도 자갈도상 축소 모형을 만들고(그림 3.2.21 참조), 찬 공기 유입에 따른 단열재의 단열효과(노반의 동결깊이 변화)를 측정하였다. 공시체는 직경 30cm, 길이 1m의 PE이중벽관을 사용하여 만들었고, 그 안에 현장에서 채취한 흙을 다짐봉을 사용하여 다짐도 90%로 다져 넣었다. 동결깊이 변화 측정시 1차원적인 열이동을 위하여 PE 이중벽관에 열반사단열재를 5cm 두께로 감쌌다. 또한 시료의 밑부분에서 열이동을 차단하기 위하여 밑 부분에 XPS를 10cm 두께로 PE관과의 가장자리 틈이 발생하지 않도록 단단히 설치하였다.




(a) 냉동챔버 (b) Grant 2040

사진 3.2.20 PE골재의 단열효과 측정시 사용한 장비

#### (2) 노반내 온도변화 및 동결 깊이 측정

시간 경과에 따른 자갈도상 및 노반의 수직방향 온도변화를 측정하기 위하여 이중벽관 내부 지반의 center 부분에 thermocouple을 10cm 간격으로 설치한 후 Grant 온도 기록장치에 연결하였다. 이때 이중벽관을 둘러싼 열반사단열재가 단열 효과를 잘 발휘하는지 확인하기 위해 단열재 속에도 지반 center와 같은 높이를 택하여 5cm 간격으로 thermocouple을 설치하였다. 아울러 온도 변화에 따른 동결깊이를 확인하는 다른 방법으로서, 0℃ 이하의 온도에서는 흰색으로 변하는 메틸렌 용액이 든 아크릴관(Methylene Blue 동결깊이 측정기)를 설치하였다. 실험이 끝난 후 Methylene Blue 측정기의 흰색으로 변한 깊이를 측정하였다.



a) 공시체 준비



b) 현장 시료의 다짐



c) 단열재 설치



d) 자갈도상 설치



e) 냉동챔버에 공시체 설치



f) Grant 설치

그림 3.2.21 철도 도상 모형 실험 과정

쇄석 및 단열재 등을 설치한 후, 동결시험 중 챔버 내의 찬 공기가 지반을 통하여 전달되어 지반이 0℃로 바뀌기 보다는, 오히려 Methylene Blue 외관인 아크릴관을 따라서 찬 열이 전달되어 노반의 온도가 0℃로 변하는 것을 방지하기 위하여 메틸렌블루가 담긴 파이프 바깥을 적절한 깊이까지 열반사 단열재로 감쌌다.

단열재의 종류 및 설치 두께는 (ⅰ)XPS 5cm, (ⅱ)PE골재 5cm + XPS 2.5cm, (ⅲ)PE골재 5cm + XPS 5cm, (Ⅳ)XPS 5cm + PE골재 5cm 등 4가지 경우로 변경하면서 시험용 공시체

를 만들었다. 각각의 경우, 단열재 위로 철도의 자갈도상과 같은 환경을 조성하기 위해 크기 5cm 이상 되는 자갈을 30cm 두께로 다져넣었다. 그 후 냉동챔버의 온도를 영하 10℃로 이틀 동안 유지하면서 (ⅰ) ~(Ⅳ) 각각의 경우에 대한 깊이별 온도변화를 측정하였다.

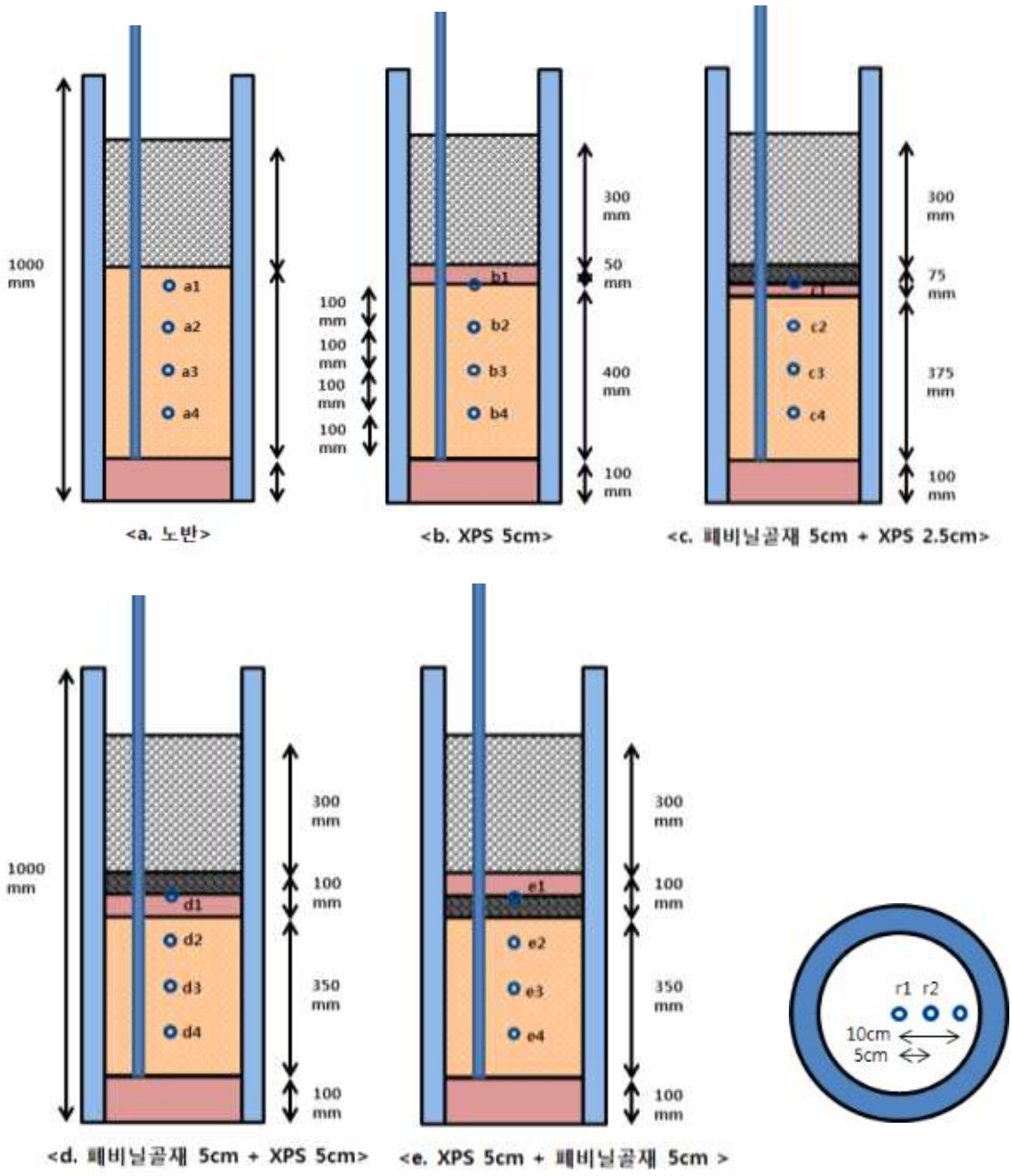
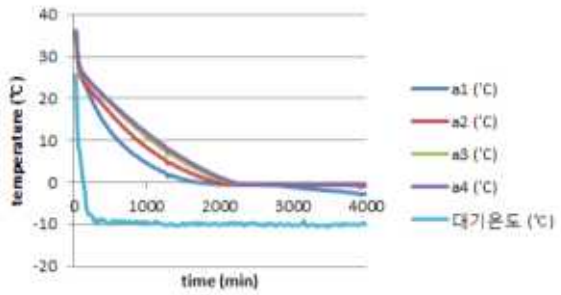



그림 3.2.22 철도 도상 모형실험 단면도

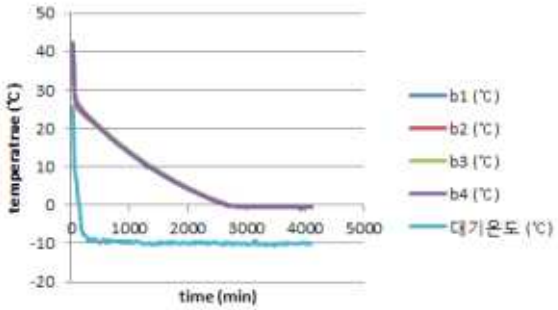
나. 철도 자갈 도상 모형실험 결과

(1) 깊이별 온도분포

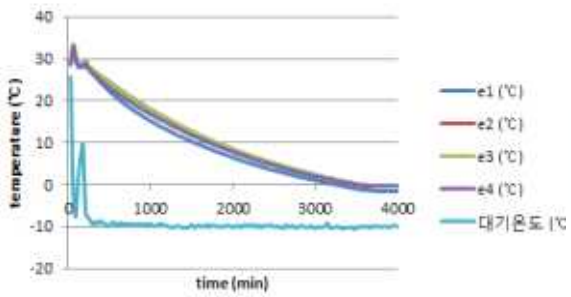
그림 3.2.23은 시간에 따른 층별 온도변화를 나타낸 것이다. 실험 결과 노반은 2,000분 경과 후 모든 층에서 영하에 가까운 온도를 보였으나 노반을 제외한, 단열재를 설치한 공시체는 최소 2,500분에서 최대 3,500분에 영하에 가까운 온도분포를 보였다. 특히 다른 단열재의 조합에 비해 XPS 5cm+ PE골재 5cm가 가장 뚜렷한 단열효과를 보였다.



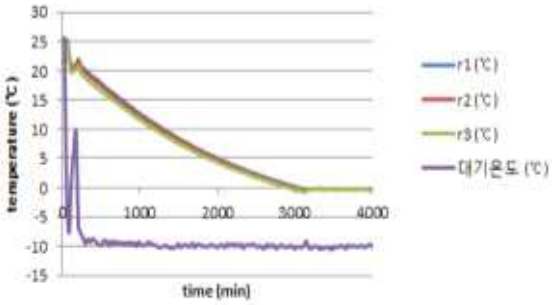

(a) 노반



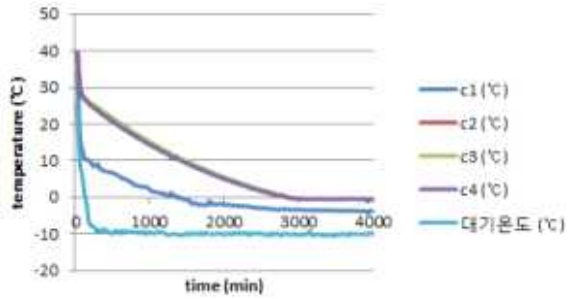

(b) XPS 5cm



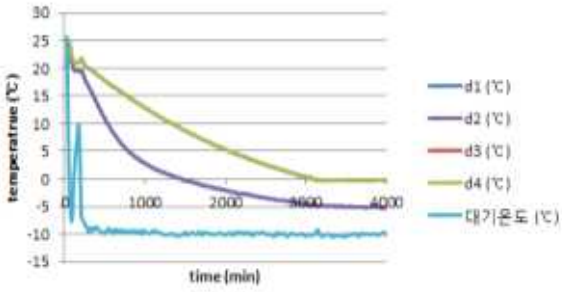

(e) XPS 5cm + PE골재 5cm




(f) 반지름별 온도분포




(c) PE골재 5cm + XPS 2.5cm




(d) PE골재 5cm + XPS 5cm

그림 3.2.23 단열재 혼합과 순서에 따른 깊이별 온도 변화

(2)철도 도상 단열재 종류 및 설치 형태별 온도 변화

표 3.2.10 철도 도상 단열재 종류 및 설치 형태별 온도 변화

| Time(hr) | 0.5 | 1 | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 | 24 | 28 | 32 | 36 | 40 | 44 | 48 | 52 | 56 | 60 | 64 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 노반 | 26.1 | 25.3 | 22 | 17.8 | 13.8 | 10.3 | 6.6 | 4.7 | 2.6 | 0.8 | -0.3 | -0.4 | -0.5 | -0.5 | -0.5 | -0.5 | -0.4 | -0.9 |
| PE 5cm +XPS 2.5cm | 25.3 | 24.9 | 22.4 | 19.1 | 16 | 13.3 | 10.7 | 8.5 | 6.4 | 4.6 | 2.9 | 1.6 | 0.3 | -0.4 | -0.4 | -0.4 | -0.4 | -0.4 |
| XPS 5cm | 25.4 | 24.9 | 22.3 | 19.1 | 16 | 13.2 | 10.7 | 8.3 | 6.2 | 4.3 | 2.6 | 1.1 | -0.1 | -0.4 | -0.5 | -0.4 | -0.4 | -0.5 |
| XPS 5cm +PE 5cm | 26.9 | 26.5 | 23.9 | 20.7 | 17.8 | 15.1 | 12.8 | 10.6 | 8.7 | 6.9 | 5.4 | 4 | 2.7 | 1.6 | 0.6 | -0.2 | -0.2 | -0.3 |
| PE 5cm +XPS 5cm | 24.7 | 22.3 | 19.3 | 16.7 | 14.4 | 12.1 | 10.2 | 8.3 | 6.7 | 5.1 | 3.8 | 2.5 | 1.4 | 0.5 | -0.3 | -0.3 | -0.3 | -0.3 |
| 대기온도 | 25.7 | 9.5 | -7.8 | -9.8 | -9.5 | -10 | -9.8 | -10 | -9.5 | -9.7 | -9.9 | -9.8 | -9.7 | -10 | -9.9 | -10 | -9.9 | -10 |

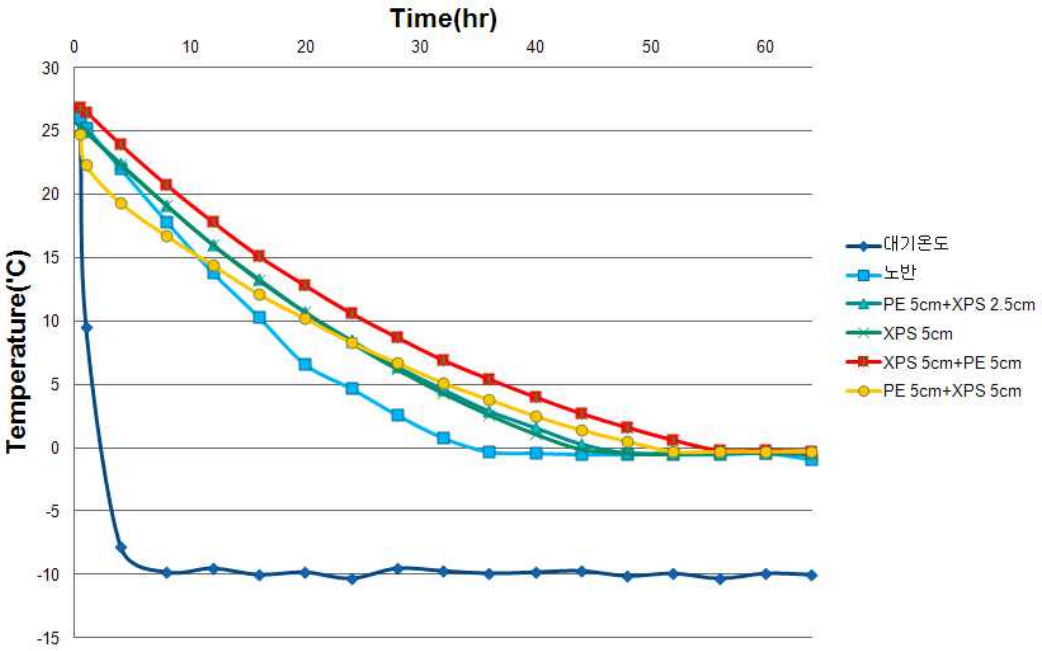



그림 3.2.24 철도 도상 단열재 종류 및 설치 형태별 온도 변화

실험결과에 따르면 PE골재를 XPS 상부에 설치한 경우보다 하부에 설치하는 것이 단열효과가 월등히 좋았는데 이는 PE골재를 XPS 상부에 설치할 경우 PE골재가 입경이 큰 자갈의 공극 사이에 침투하여 자갈 내부의 공극이 지니고 있는 단열효과를 감소시켰기 때문으로 풀

이된다. 그 예로 그림 3.2.23의 (b)나 (e)와 같이 XPS 바로 아래 thermocouple에서 얻은 온도는 그 하부의 온도 변화와 비슷한 경향을 보이는데 비해, PE골재와 XPS의 경계면에 설치한 (c)와 (d)는 대기온도와 비슷한 경향을 보였으며, XPS 아래의 온도와도 영하 5℃ 정도의 차이를 보였다. 따라서 실제 철도 도로상에 단열재를 설치할 때는 XPS와 같은 판상 단열재를 윗쪽에 설치하고, 그 아래쪽으로 PE골재와 같은 입상 단열재를 설치하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

(3) 메틸렌블루에 의한 동결 깊이 측정값

철도 모형 도상에 설치한 메틸렌블루 동결 시험기를 사용하여 동결깊이를 측정한 결과를 표 3.2.11에 나타내었다. 단열재 설치 방법에 다른 동결 깊이 변화는 Grant로 측정한 단열재 설치 방법별 층별 온도변화와 같은 경향을 나타내었다. 즉, 흙으로만 구성된 노반에 비해 단열재를 설치한 노반에서의 동결깊이가 월등히 적게 나타났다.

또한 단열재를 (b), (c), (d)와 같은 방법으로 설치하는 경우에 비해, (e)와 같은 방법으로 설치하였을 때는 동결깊이가 5cm 정도 작게 나타나 단열재의 설치 효과가 특별히 컸다.

메틸렌 블루에 의한 동결깊이 측정을 통해서도 XPS나 PE골재를 설치함으로써 철도 도상이나 노반에 단열효과를 발휘, 동결깊이를 줄일 수 있음을 알았으며, 결국 동상발생도 감소시킬 수 있음을 예상할 수 있었다.

표 3.2.11 철도 모형 도상에서 메틸렌블루로 측정한 동결 깊이

| 철도 모형 도상의 종류 | 단열재의 설치 형태 및 두께 | Methylene Blue로 측정한 동결깊이(cm) |
|---|---|---|
| (a) | 흙 노반만으로 구성된 경우 | 49.8 |
| (b) | 노반 위에 (XPS 5cm) 단열재 설치 시 | 44.3 |
| (c) | 노반 위에 (PE골재5cm+XPS2.5cm)단열재 설치 시 | 43.5 |
| (d) | 노반 위에 (PE골재5cm + XPS 5cm)단열재 설치 시 | 42.7 |
| (e) | 노반 위에 (XPS 5cm + PE골재 5cm)단열재 설치 시 | 38.5 |

## 4. 동상발생지 흙에 대한 부동수분 시험

### 가. 서론

동토중에 0(℃) 이하에서도 얼지 않는 수분이 존재 하는데 이를 흔히 부동수(unfrozen water)라고 부른다. 따라서 동토(frozen soils)는 흙입자, 빙정(ice lenses), 부동수, 공기(불포화된 흙일 경우)로 구성되어 있다. 겨울철 도로나 철도의 노반에 외부의 찬공기가 침투하면서 발생하는 자연 동상현상(frost heaving)에서 부동수는 중요한 역할을 한다. 동상발생 과정을 미시적모델로 살펴 보면 동결면(freezing front)과 빙정이 생성하는 면(ice lenses segregation front) 사이에 지극히 좁은 한 영역이 존재하는데 이를 동결영역(freezing frings)이라고 한다. 이 영역은 흙입자와 그 주위를 둘러싸고 있는 얇은 부동수막 및 간극빙으로 구성되어 있는데, 이곳의 부동수막을 통하여 미동결 지하로부터 모세관 현상에 의해 흡수된 물이 빙정까지 이동하는 것이다. 그리고 빙정이 점점 성장하여 지표면이 팽창하여 오르게 된다. 또한 인공동결공법을 적용할 때도 부동수의 양에 따라서 동토의 강도가 달라지므로 부동수를 고려하여야 한다. 동토중의 부동수의 양은 흙의 비표면적 및 입자배열 상태, 그리고 온도 등에 따라서 달라지는 것으로 알려져 있다.

본 절에서는 동토를 구성하고 있는 한 요소인 부동수가 동토내에 존재 하는 까닭, 부동수의 측정법, 그리고 부동수기 동토의 제반 성질에 미치는 영향 등에 대하여 살펴 보고 실제 철도의 동상이 발생한 지점에서 채취한 흙 시료에 대한 부동수분 측정 결과를 소개하고자 한다.

### 나. 동토중에 부동수가 존재하는 까닭

Uhlmann과 Kuroda는 동토중에 부동수가 존재하는 까닭을 계면화학적 견지에서 설명하고 있다. 즉, 얼음과 흙입자가 직접 접촉하였을 때의 계면자유에너지보다 얼음과 흙입자가 부동수를 사이에 지니고 접촉했을 때의 계면자유에너지의 합이 작기 때문에 부동수가 흙 입자 표면에서 안정적으로 존재한다고 보고 식(3.2.1)과 같은 식을 제시하였다.

$$\sigma_{is} - ( \sigma_{iw} + \sigma_{ws} ) > 0 \qquad (3.2.1)$$

여기서, $\sigma_{is}$ : 얼음과 흙입자간의 계면자유에너지

$\sigma_{iw}$ : 얼음과 부동수간 계면자유에너지

$\sigma_{ws}$ : 부동수와 흙입자간 계면자유에너지

동토중에서 부동수가 존재하는 이유를 부동수 수막의 두께가 충분히 두꺼워 표면력을 무시할 수 있는 일반적인 물(bulky water) 보다 낮은 화학능(chemical potential)을 갖고 있기 때문으로도 볼 수 있는데, 흙 속의 물의 화학능을 저하시키는 원인으로는 3가지가 있다.

(1) 용질에 의한 응고점 강하

흙 속의 물은 각종 용질을 함유하고 있으므로 응고점 강하가 일어난다. 용질의 농도가 낮을 경우, 응고점 강하량($\Delta T_f$)은 중량 mole 농도(C)를 이용하여 식(3.2.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta T_f = K_f C \tag{3.2.2}$$

여기서 $K_f$는 단위농도(1mol/kg)당의 응고점 강하량(℃)이며, 흙 속의 물의 경우 1.86℃ kg/mol의 값을 갖는다

(2) 모관의 영향에 의한 응고점 강하

흙 간극은 연속되어 있는 구조로서 모관의 다발로 고려할 수 있는데, 이 모관내의 물은 모관의 벽면과 상호작용을 하여 밑으로 볼록한 형태의 곡면을 이루고 있으며, 일반적인 물보다 화학능이 낮다. 이 모관내의 물이 동결했을 때 응고점 강하량($\Delta T_f$)은 모관의 반경(r)을 이용하여 식(3.2.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta T_f = \frac{2 V_W T_M \sigma_{iw}}{L_r} \tag{3.2.3}$$

여기서, $V_w$ : 물의 비용적($cm^3/g$), 0℃에서 1.000597

$T_M$ : 일반적인 물의 동결온도($^oK$), $273^oK$

L : 동결잠열(cal/g), 물의 경우 80cal/g

$\sigma_{iw}$ : 얼음과 부동수간의 계면자유에너지로서 $35erg/cm^2$로 보면

식 (3.2.3)의 $\Delta T_f$(℃)와 r(m)와의 사이에서는 식(3.2.4)와 같은 관계가 얻어진다.

$$\Delta T_f = 5.7 \times 10^{-8} (1/r) \tag{3.2.4}$$

식(3.2.4)는 모관의 영향에 의한 응고점 강하는 모관반경에 반비례하며, 예로서 모관반경(r)이 0.1μm일 때 응고점 강하량은 0.57℃가 된다는 뜻이다.

(3) 흙입자 표면의 흡착력장의 영향

점토입자 표면이 물에 닿으면 표면 이온이 부분적으로 분리되어 점토입자 표면이 음의 전기를 띠게 된다. 전장의 영향으로 점토입자 표면 부근의 액상에 식(3.2.5)와 같이 표시되는 양이온 분포가 생긴다. 이것을 전기확산 2중층(electrical diffuse double layer)이라고 부른다.

$$C = C_0 \exp\left(\frac{-ze\psi}{kT}\right) \qquad (3.2.5)$$

여기서, C : 중량 mole 농도

e : 음이온의 전하

$\psi$ : 물에 대한 상대 전위

$C_0$ : 일반적인 물의 농도

k : Boltzmann 정수

T : 절대온도

z : 이온의 원자가(ionic valence)

점토입자의 표면 전하가 마이너스이므로 $\psi$도 마이너스 값을 갖게 되어 식(3.2.5)에서 우변 전체의 값은 $C_0$보다 큰 값이 된다. 양이온의 농도는 식(3.2.5)에서 표시한 바와 같이 흙입자 표면 근처에서 크게 되기 때문에 흙입자 표면 근처에 흡착되어 있는 물의 응고점 강하량은 크게 된다.

식(3.2.1) 식(3.2.2) 식(3.2.3)의 요인들이 영향을 미쳐 주어진 온도조건에서 동토중의 부동수분량이 결정된다. 부동수분량이 많은 흙은 비표면적이 큰 점토분을 많이 함유하고 있으므로 이들 중 식(3.2.3)의 요인이 가장 중요하다.

다. 부동수분량 측정법

부동수분량 측정방법으로서는 부동수의 얼음의 물성치의 차에 착안한 다양한 방법들이 이용되고 있는데, 현재 이용되고 있는 방법들을 표3.2.12에 소개하였다.

표3.2.12에서 소개하는 방법 중 현재 가장 널리 이용되고 있는 Calorimeter법과 전자기공명장치법에 대하여 별도로 설명한다.

(1) Calorimeter법

우선 공시체에 일정한 열량을 공급하고, 공시체의 온도상승을 측정한 후, 공시체의 겉보기 비열을 측정한다. 온도를 T로부터 ΔT만큼 상승시켰을 때의 겉보기 비열($C_T$)은 동토의 비열과 온도변화에 의한 얼음의 융해잠열을 고려하여 식(3.2.6)에 의해 구할 수 있다.

표 3.2.12 동토의 부동수분량 측정법

| 측정방법 | 측정원리 | 특징 |
|---|---|---|
| Calorimeter법 | 물과 얼음의 비열의 차이 및 얼음의 융해 잠열을 이용함 | 측정시료에 제한이 없으며 널리 이용되고 있음. 얼음의 융해에 의한 발열량의 측정이 곤란한 단점이 있음 |
| 전자기공명장치법 (Nuclear Magnetic Resonance) | 자장중의 얼음과 부동수 양자의 완화시간의 차이를 이용함 | 측정은 신속하나, 고가임, 화산재 등 자성체를 포함한 흙시료에서는 측정이 곤란함 |
| TDR (Time Domain Reflectometry) | 얼음과 부동수의 적외선 흡수계수의 차이를 이용함 | 측정은 신속하나 미동토의 겉보기 유전률과 검량선이 필요함 |
| Fourier 환적외분광법 | 얼음과 부동수의 적외선 흡수계수의 차이를 이용함 | 측정이 신속하나 고가임. 측정시료의 두께는 0.1mm 정도임 |
| 빙점강하법 | 토중수의 동결온도가 흙의 함수율에 의존하는 원리를 이용하는 방법임 | 측정이 간단하며, 장비의 가격도 저렴함. 온가 낮은 영역에서도 정도가 떨어지는 단점이 있음. |
| 빙접해법 | 건조된 시료를 빙판 사이에 끼워 넣은 후 소정의 온도에서 함수량의 증가량을 측정 | 측정법은 간단하나 하나의 시료측정에 수일이 걸리는 단점이 있음 |

$$C_T = X_S C_S + X_W C_W + X_i C_i + \frac{1}{\Delta T}\int_T^{T+\Delta T} L\frac{\partial W_u}{\partial T} dT \qquad (3.2.6)$$

여기서, $C_S$ :토립자의 비열　　$X_S$ : 토립자의 질량

$C_W$ : 물의 비열　　$X_W$ : 물의 질량

$C_i$ : 얼음의 비열　　$X_i$ : 얼음의 질량

L : 잠열(334KJ/kg)　　$W_u$ : 부동수분량(%)

식(3.2.6)을 변형하여 온도 T에서부터 T+ΔT까지 부동수분량의 증가량($\Delta W_u$)을 식(3.2.7)로부터 구할 수 있다.

$$\Delta W_u = \frac{\Delta T}{L} C_t - (X_s C_s + X_W C_W + X_i C_i) \tag{3.2.7}$$

Calorimeter로 측정할 때는 통상 부동수분량을 무시할 수 있는 온도인 -80℃부터 측정을 개시한다.

온도 상승속도를 0.2~0.3℃/min로 하여 각 온도에서의 부동수분량을 측정한다. -80℃부터 0℃까지 전 측정에 소요되는 시간은 약 6시간이다. 그림 3.2.25에서는 Calorimeter의 모습 및 구성도를 보여 주고 있다

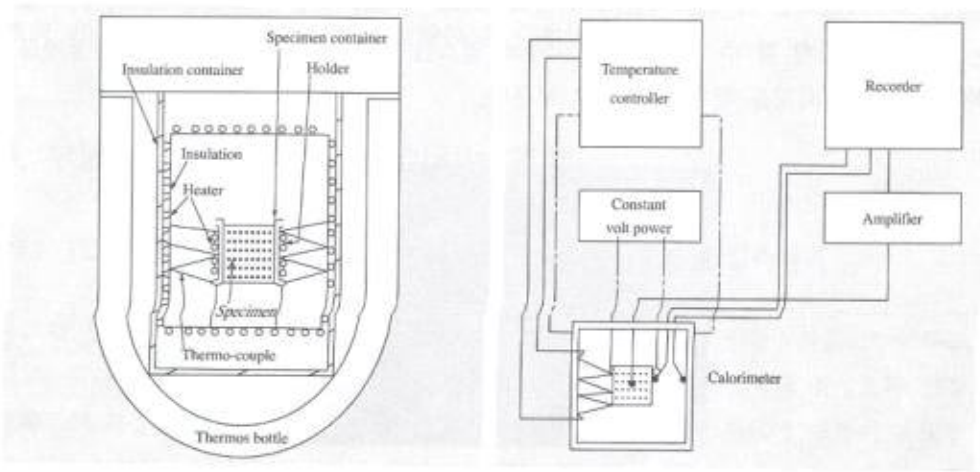



그림 3.2.25 Calorimeter의 모습 및 구성도

(2)전기자기공명(NMR)법

동토시료에 일정한 시간 동안 자장을 가하고 난 후 고주파 펄스를 중단할 때 일어나는 양자의 수화 과정이 고체인 얼음과 부동수에서 서로 다른 점을 이용하여 부동수분량을 측정하는 방법이다.

그림 3.2.26에서는 북해도대학 저온과학연구소가 보유하고 있는 핵자기공명장치의 사진을 보여 주고 있고, 그림 3.2.27에서는 측정과정의 흐름도를 보여 주고 있다. 그림 3.2.26에서 보는 바와 같이 이 장치는 시료를 담는 용기와 용기를 넣는 접속상자, 그리고 측정과정 전체를

조절하는 한편 측정 결과를 읽는 컴퓨터로 구성되어 있다.

시료를 담은 용기를 항온조에서 일정 온도로 동결시킨 후 접속상자에 넣고 측정을 하는데 시료용기와 접속상자가 닿는 부분에는 NMR 신호를 검출하기 위한 코일과 정자장을 주기 위한 영구 자석이 내재되어 있다. 접속상자 중심부에는 고주파 펄스를 가하는 가동판과 검출된 NMR 신호를 증폭시키기 위한 증폭기가 있다.

측정원리를 알아 본다. 흙시료 중의 물분자의 양자의 핵은 회전에 의한 자기모멘트를 지니고 있다. 흙입자가 정자장중에 놓이면 양자의 핵이 팽이 모양으로 시차운동을 하는데 시차운동과 같은 주파수의 진도자장을 주면 양자의 자기모멘트가 축방향으로부터 야간씩 경사지게 된다. 자기모멘트축의 정자장으로부터의 경사각(α)은 고주파펄스를 가하는 시간(t)에 비례하므로 시간을 적당히 조절함으로써 90° 또는 180° 경사지게 할 수 있다. 이때 고주파 펄스를 중단하면 다시 원래의 평형상태로 회복되는데 이 과정을 완화(緩和)라고 부른다.

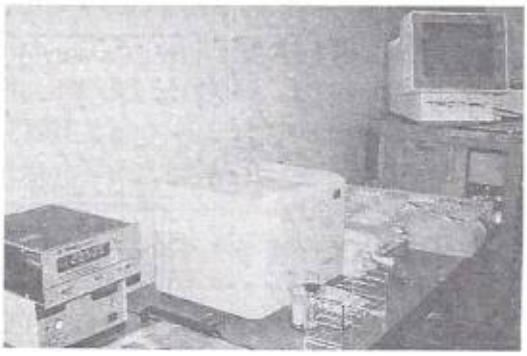


그림 3.2.26 전자기공명장치의 모습

( 미국 PRAXIS사 제품)

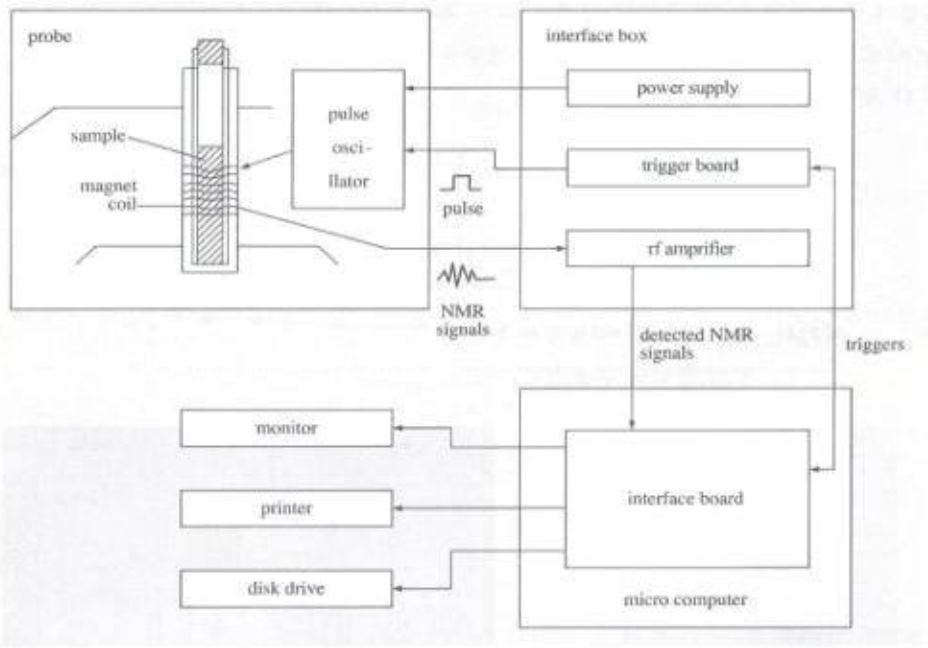



그림 3.2.27 전자기공명장치의 구성도

이 때 생기는 자화(磁化)의 변화를 검출 코일로 측정한다. 핵자기공명의 자유유도감쇄 신호의 강도는 얼음과 부동수중의 양자의 양에 의해 결정되므로, 자유유도 감쇄신호의 최대(peak)값으로부터 부동수분량(%)을 구한다.

라. 철도 동상 발생 현장에서 채취한 흙시료에 대한 부동수분 측정

2011년 11월부터 2012년 3월 사이에 동상이 발생한 국내 철도 현장에서 채취한 흙 시료에 대하여 부동수분을 측정하였다. 먼저 흙 시료를 포화시킨 후 용기에 담고, 그림 3.2.28에서 보는 것 같은 TDR(Time Domain Reflectometry)의 probe와 온도변화를 측정하기 위한 정밀 온도계의 센서를 흙 시료를 담은 모울드에 설치한 후 이 모울드 자체를 냉동챔버 속에 넣었다. 그리고 냉동챔버의 온도를 상온에서 -15℃까지 변화시키면서 흙 시료 내부의 부동수분(체적수분) 변화를 측정하였다.

그림 3.2.29는 연천, 제천, 태백지역에서 채취한 흙 시료의 온도변화에 따른 부동수분 변화 시험 결과를 보여 주고 있는데, 연천 및 제천의 흙은 태백의 철도 현장에서 채취한 동상발생 후 제거한 분니에 비해 상대적으로 입자가 커서 비표면적이 작고, 따라서 온도 감소에 따른 부동수분량이 갑자기 줄어 드는 현상을 보이고 있다. 즉 3개 지역 중 상대적으로 부동수분이 적게 나타나고 있다.

온도가 저하하여도 부동수분이 많이 나타나는 흙에서는 부동수막을 통하여 지하수의 이동이 활발하므로 동상이 크게 발생하는데, 그림 3.2.29에서 보는 바와 같이 태백 지역의 흙에서는 부동수분이 다른 곳 보다 상대적으로 많아 겨울철 동상이 쉽게 발생할 것으로 판단된다.




그림 3.2.28 TDR 시험기의 모습

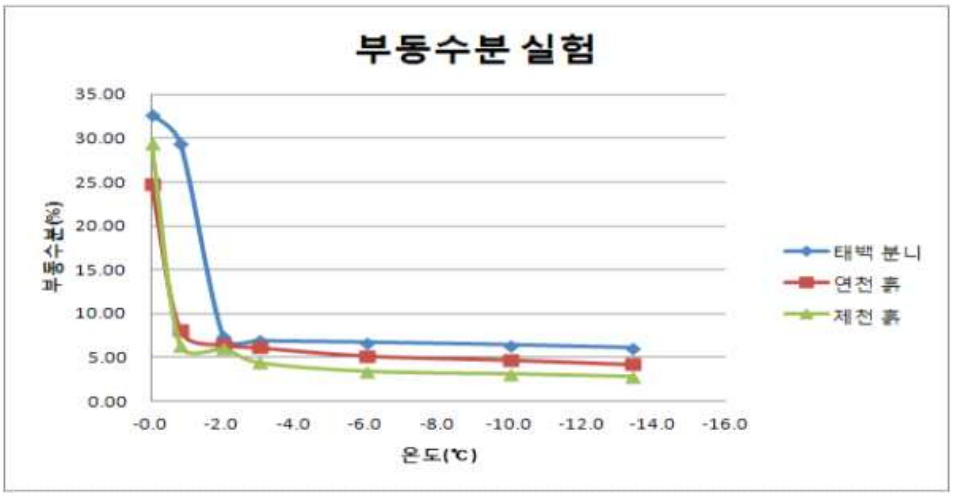



그림 3.2.29 국내 철도 동상발생 현장 흙 시료의 온도 변화별 부동수분량 변화

# 제 3절 철도 자갈도상과 콘크리트도상에서의 동결깊이 및 동상량 실측

## 1. 동결깊이 측정의 의의

### 가. 철도 도상에서의 동결깊이 측정의 필요성

최근 이상 기후로 겨울철에 한파가 장기간 지속되면서 강원, 경기 북부 및 충북, 경북 북부 지방 등 한랭지 기존 철도의 자갈도상이나 보조도상 또는 노반에 동상(frost heave)이 발생하여 레일이 15mm 이상 융기하는 사례가 많이 발생하고 있다. 철도 도상에 동상이 발생할 경우 열차가 서행해야 하고 속칭 '자갈치기'라고 해서 도상 하부노반의 흙을 자갈로 치환하는 작업 등 보수작업에 많은 인력이 동원되며 이로 인해 많은 유지보수 예산이 집행되고 있다.

철도 궤도의 동상량을 정확히 평가하기 위한 전 단계로서 도상의 특성을 고려한 동결깊이 산정식이 필요한데 우리 나라에서는 일본의 '철도구조물 등 설계표준'에 나와 있는 동결깊이 산정식 ($Z=C\sqrt{F}$)을 이용하고 있다. 이 식에서 Z는 동결깊이(cm)이고, F는 해당지역의 동결지수(℃ · day)이며, C는 정수로서 양지 음지 등의 조건에 따라 3~5의 값을 적용하는데 통상 중간치인 4를 사용하고 있다.

일본 '철도구조물 설계표준'에서 제시하고 있는 동결깊이 산정식은 다층지반의 열전도율이나 함수비, 잠열 등을 제대로 반영하지 못하고 있다. 따라서 일본의 철도·운수기구(鐵道·運輸機構)나 신간선 건설 북해도본부에서는 철도도상의 동결깊이 산정식으로서 수정 Berggren식을 적용하려는 연구가 진행 중이며, 핀란드, 러시아, 독일 등 동토국가에서는 자국의 기후조건을 고려한 실측 철도시설물용 동결깊이 산정식이 개발되어 있다.

본 절에서는 국내 자갈도상의 동상 피해 사례를 살펴 보고, 본 연구팀이 철원, 태백, 영월, 제천 , 연천의 기존 철도 옆에 '실험용 자갈도상 및 콘크리트도상'을 축조한 후 Methylene Blue 동결심도계와 온도 측정용 센서(thermocouple)를 각 층에 설치하여 동결지수 변화에 따른 동결깊이와 지중 온도 변화를 실측한 결과를 분석하였다. 또한 XPS나 PE골재 혼합 아스콘 단열층을 자갈도상 밑에 포설했을 때의 동결깊이 차단효과도 분석하였다.

### 나. 강원지역 철도의 자갈도상에서 동상 피해 사례

강원도 지역 재래식 철도 자갈도상에서의 동상 피해 사례는 제 3장 제 1절의 표 3.1.1에서 보는 바와 같이 수 없이 많다.

다. 경기도지역 철도의 자갈도상에서 동상 피해 사례

그림 3.3.1은 경기도 연천군을 통과하는 경원선 구간에서 토피 두께가 낮은 암거 위에 부설된 철도의 자갈도상에 동상이 발생한 모습을 보여 주고 있다. 이러한 위치에 설치된 철도의 자갈도상에는 암거 밑을 통과하는 찬 바람과 자갈도상 상부의 찬 공기가 이중으로 영향을 미쳐 자갈도상 하부 노반에 동상이 자주 발생하고 있다.



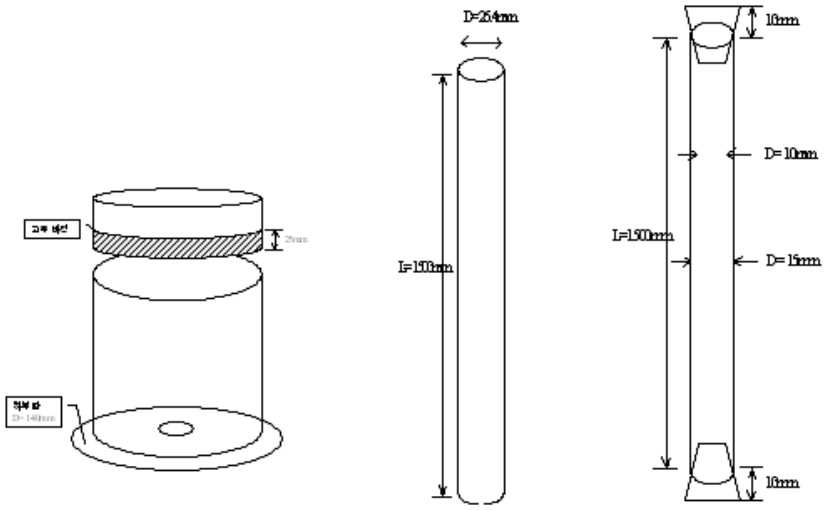
그림 3.3.1 토피두께 낮은 암거 위를 통과하는 자갈도상에서의 동상발생 모습

본 연구에서는 철도 도상의 재질(자갈 및 콘크리트)에 따른 동결지수와 동결깊이 관계를 평가하기 위해 철도 동상 발생지역(연천 2개 현장, 태백 1개 현장, 영월 1개 현장, 제천 1개 현장, 철원 1개 현장에 총 9개의 메틸렌 불루 동결심도계 설치)에 동결심도계를 매설하였으며, 계측결과를 분석하여 동결심도 산정식(안)을 제안하였다.

라. KICT타입 Methylene Blue 동결심도계

동결깊이를 측정하는 방법에는 몇 가지 종류가 있지만, 본 연구에서 사용한 동결깊이 측정계는 methylene blue 용액의 동결특성을 이용하여 한국건설기술연구원에서 자체 제작한 것이다. 장치는 그림 3.3.2와 같이 직경 25.4mm의 아크릴 외관, 직경 15mm의 아크릴 내관, 직경 10mm의 고무튜브, 보호용 철 몸통 및 덮개로 구성되어 있다. 아크릴 파이프는 예상되는 동결깊이를 초과하는 깊이(150cm로 제작)까지 연직으로 천공한 구멍 속에 삽입한다. 아크릴 내관에는 청색의 methylene blue 용액이 채워져 있는데, 이 용액은 상온에서는 청색을 유지하지만 기온이 0℃ 이하가 되면 무색으로 변한다. 따라서 이 동결깊이 측정계를 철도 도상에 매설한 후, 겨울철에 해당 지역을 방문하여 내부의 아크릴관(methylene blue 용액이 들어있는 관)을 외부로 꺼내어 용액이 얼어서 무색으로 변한 곳까지의 최대 깊이를 측정하면 이

값이 당해년도 해당지역의 최대동결깊이가 된다.




(a) 스테인레스 몸통 및 뚜껑 (b) 아크릴 케이싱 (c) 아크릴 내관

그림 3.3.2 KICT 타입 Methylene Blue 동결심도계의 구성

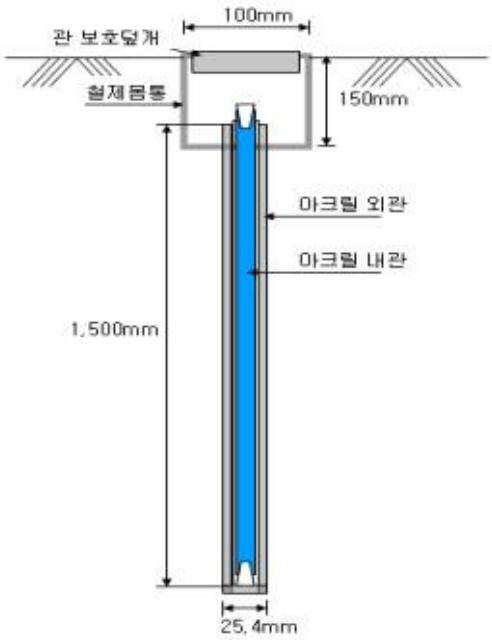
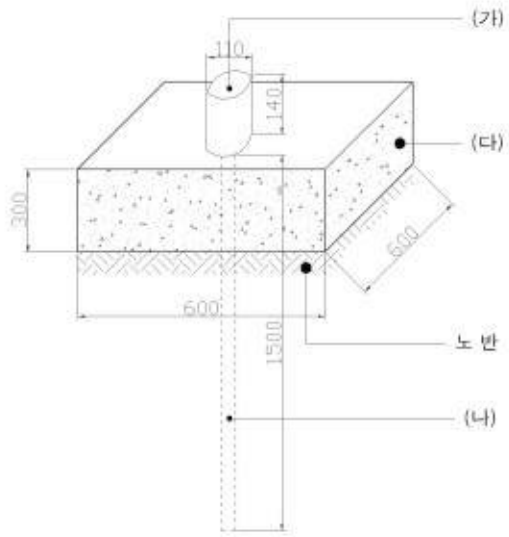



그림 3.3.3 동결심도계의 설치단면

마. 철도 자갈도상과 콘크리트도상에서의 동결심도계 설치 개요도

그림 3.3.4에서는 2011년 태백, 영월, 제천, 연천 지역에 설치한 철도 도상의 치수와 동결심도계 설치 개요도를 보여 주고 있다.

| ① 자갈도상과 동결깊이 측정 장치 | |
|---|---|
|  | (가) : 철제 뚜껑 (직경 110㎜, 높이 140㎜)<br><br>(나) : 플라스틱 파이프 (직경 25㎜, 높이 1500㎜)<br><br>(다) : 자갈 도상<br>- 가로 600㎜ * 세로 600㎜ * 높이 300㎜ |

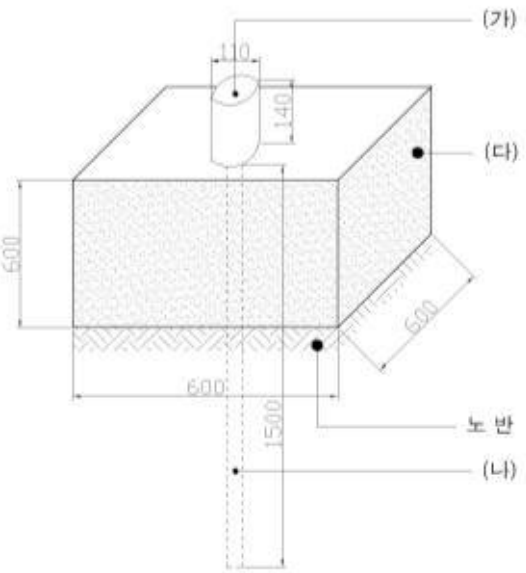
| ② 콘크리트도상과 동결깊이 측정 장치 | |
|---|---|
|  | (가) : 철제 뚜껑 (직경 110㎜, 높이 140㎜)<br><br>(나) : 플라스틱 파이프 (직경 25㎜, 높이 1500㎜)<br><br>(다) : 콘크리트 도상<br>- 가로 600㎜ * 세로 600㎜ * 높이 300㎜ |

그림 3.3.4 태백, 영월, 제천, 연천에 설치한 동결심도계 치수 및 개요도

바. 전체 동결심도계 설치 위치

동결심도계는 일반적으로 해당 지역의 동결깊이를 대표할 수 있는 곳으로 동결깊이가 가장 크게 나올 수 있는 곳에 설치한다. 본 연구에서는 실제 동상이 발생한 철도현장에 인접하여 설치한 모형 자갈도상과 콘크리트도상 내에 각각 설치하였다.

그림 3.3.5에서는 동결심도계 설치 위치를 보여 주고 있다.




그림 3.3.5 철도용 동결심도계의 설치 위치

사. 동결심도계 설치 작업

동결심도계는 동상이 발생한 철도노반에 인접하여 철도운행에 영향을 미치지 않으며 안전을 고려하여 계측이 용이한 지점에 매설하였다. 또한 매설이 끝난 후 동결깊이 측정 시 위치 파악이 용이하도록 하였다.

(1) 태백, 제천, 영월, 연천의 동결심도계

그림 3.3.6에서는 한 예로서 연천지역에서 동결심도계를 매설하는 작업 과정을 보여 주고 있다. 태백, 제천, 영월에서도 그림 3.3.6과 같은 방법으로 철도 도상용 동결심도계를 설치하였다.




(a)위치선정



(b) 굴착



(c) 동결심도계 매설



(d) 동결심도계 매설모습




(e) 자갈도상 동결심도계




(f) 콘크리트도상 동결심도계

그림 3.3.6 동결심도계의 설치 과정(연천)

(2) 철원 백마고지역의 동결심도계

그림 3.3.8에서는 2012년 11월 철원 백마고지역에서 콘크리트도상 및 자갈도상을 시공하는 모습과 이들 도상에 동결심도계를 설치하는 모습을 보여 주고 있다. 콘크리트도상은 실제 호

남고속철도 콘크리트도상과 동일한 재료, 동일한 두께로 설치하였다. 또한 콘크리트도상은 보조도상의 두께를 각각 달리하여 3개 type으로 만들었다. 즉, 각 콘크리트도상의 TCL(Track Concrete Layer)부분은 가로×세로×두께를 3.2m×3.2m×24cm로 만들었고, 각 HSB(Hydraulic Subbase)부분은 가로×세로×두께를 3.8m×3.8m×28.4cm 되게 제작하였으며, HSB 아래에 (ⅰ)가로×세로×두께가 5.88m×5.88m×30cm인 보조도상 타입 (ⅱ)가로×세로×두께가 5.88m×5.88m×40cm인 보조도상 타입 (ⅲ)가로×세로×두께 5.88m×5.88m× 50cm 되는 보조도상 타입을 각각 설치하였다. 보조도상 밑에는 가로×세로×두께가 5.88m×5.88m×30cm 되는 입도조정층을 각각 3개 만들었다. 보조도상과 입도조정층의 골재는 KTX 호남고속철도 건설현장에서 사용한 것과 동일한 입도와 재질의 골재를 사용하였다.

한편, 철원 백마고지역 자갈도상은 3개 타입으로 만들었다. 각각의 규격은 가로 60cm × 세로 60cm × 높이 30cm이며, (ⅰ)자갈도상만 설치한 일반 타입 1개, (ⅱ)자갈도상 밑에 두께 10cm의 XPS를 설치한 타입 1개, (ⅲ)자갈도상 밑에 두께 15cm의 PE골재 혼합 아스콘층을 설치한 타입 1개 등 총 3개 타입을 설치하였다. 실험용 자갈도상의 자갈은 철도에 실제로 포설한 자갈을 사용하였다.철원 백마고지역에 설치한 실험용 콘크리트도상, 자갈도상에는 그림 3.3.7에서 보는 바와 같이 소정의 깊이별로 온도센서(thermocouple)를 설치하였고 이 온도센서를 data logger에 연결하여 겨우내 각 층에서의 온도 변화를 측정하는 한편 Methylene Blue로 동결깊이를 측정하였다.

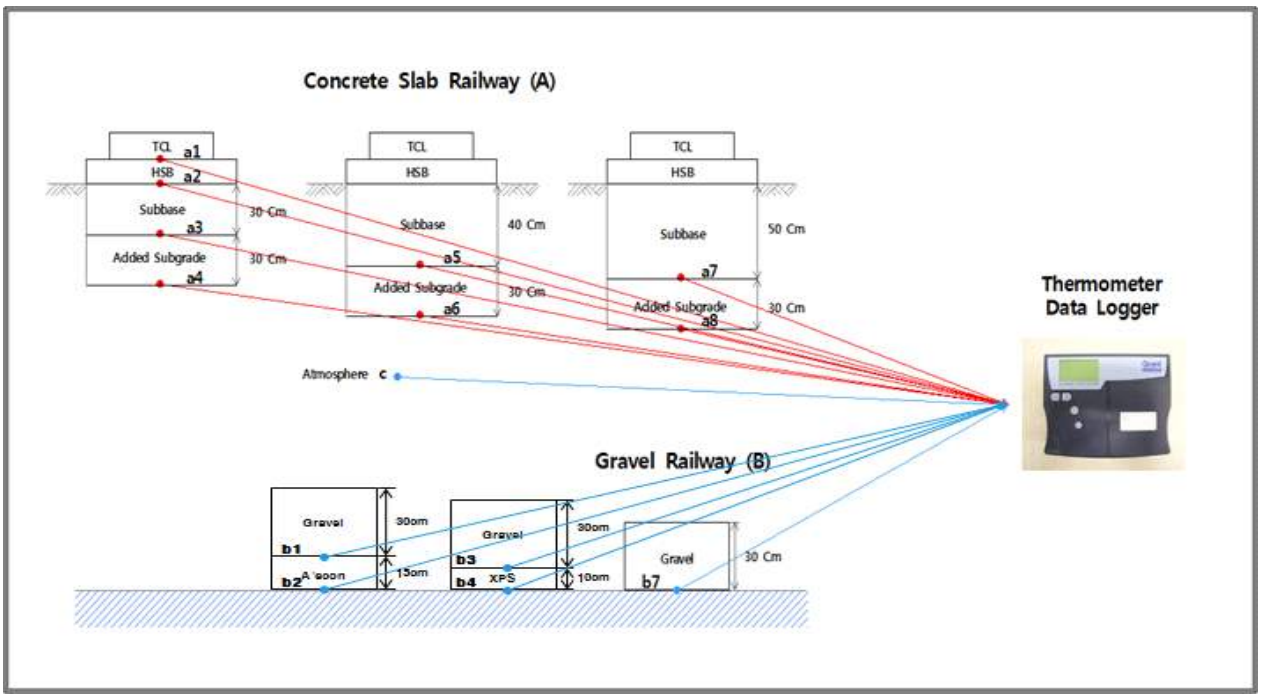



그림 3. 3. 7 철원 백마고지역 콘크리트도상, 자갈도상의 계측 센서 설치 위치




(a)백마고지역 철도도상 시험장 굴착 모습



(b)입도조정층 골재 포설 및 다짐 모습




(c)자갈·콘크리트도상의 거푸집 설치 모습



(d)자갈· 콘크리트도상에 동결심도계와 온도센서를 설치하는 모습

그림 3. 3. 8 철원 백마고지역에서의 콘크리트도상, 자갈도상 설치 모습

아. 동결깊이 측정

메틸렌 용액이 상온에서는 청색을 유지하지만 기온이 0 ℃ 이하가 되면 색이 무색으로 변하는 원리를 이용하여 동결깊이를 측정하였다. 즉, 기온이 매우 낮은 날들이면 KICT 연구요원들이 현장을 방문하여 메틸렌용액이 채워진 아크릴관의 색깔이 변한 깊이를 자로 측정하여 해당 지역의 동결깊이를 구하였다. 그림 3.3.9에서는 2011년 11월~2013. 3월 기간에 수행한 동결깊이 측정 모습을 보여 주고 있다.



(a) 콘크리트도상(제천)



(b) 자갈도상(제천)



(c) 콘크리트도상 (영월)



(d) 자갈도상(영월)



(e) 콘크리트도상(태백)



(f) 자갈도상(태백)



(g) 콘크리트도상(연천)



(h) 자갈도상(연천)




(i) 콘크리트도상(철원)




(j) 자갈도상(철원)

그림 3.3.9 동결깊이 측정 모습

## 2. 자갈도상에 대한 동결깊이 및 동상량 측정 결과

### 가. 자갈도상에서의 동결 깊이 측정 결과

(1) 자갈도상만으로 구성되어 있을 때의 동결깊이

2012년 겨울(2011년 11월 1일-2012년 02월 28일)과 2013년 겨울(2012년 11월 1일-2013년

02월 19일)에 걸쳐서 측정한 자갈도상의 동결지수와 최대동결깊이와의 관계를 알아 보았다. 2012년 겨울 제천의 동결지수는 344.9℃·day였고, 최대동결깊이는 88cm로 나타났다. 2012년 태백의 동결지수는 401.4℃·day였고, 최대동결깊이는 101cm였다. 연천의 동결심도계는 2012년 1월에 설치하였다. 설치 후부터 계산한 2012년 연천의 동결지수는 258.5℃·day였는데, 동결지수가 작았음에도 불구하고 연천 자갈도상의 최대동결깊이는 117cm로 나타났다.

2013년 겨울(2012년 11월 1일-2013년 2월 19일) 제천의 동결지수는 498.2℃·day였는데, 최대동결깊이는 52.5cm로서 2012년 겨울보다 동결지수가 컸음에도 불구하고 동결깊이는 얕은 값을 보였다. 태백에서도 2013년 2월 19일 최종적인 동결깊이를 측정할 때까지의 동결지수가 431.3℃·day로서 2012년 겨울보다 동결지수가 컸음에도 불구하고, 최대동결깊이는 98.5cm를 보여 역시 2012년 겨울보다 동결깊이는 얕았다. 그 까닭으로서 2013년 겨울에는 눈 오는 날이 많아서 눈이 자갈도상을 덮고 있었기 때문으로 풀이된다. 동결깊이를 측정하러 현장에 갈 때마다 눈을 제거하였으나, 눈이 덮여 있었던 기간 동안 눈이 단열재 역할을 하였기 때문에 동결깊이가 얕게 나타난 것으로 판단되었다.

(2) 단열층 설치 시 동결깊이 감소효과

철원에서는 2012년 11월 23일 자갈도상에 동결심도계를 설치하였는데, 2013년 2월 19일 최종적으로 동결깊이를 측정할 때까지의 동결지수는 581.4℃·day였고, 최대동결깊이는 97cm로 나타났다.

철원의 자갈도상에서 2013년 겨울 측정한 바에 의하면 자갈도상 밑에 두께 10cm인 XPS를 설치한 결과 최대동결깊이가 20cm 감소하였고, 두께 15cm의 PE골재 혼합 아스콘을 설치한 결과 초기의 동결깊이가 최대 12. 5cm 감소하는 효과가 나타났다. 따라서 이 재료들을 실제 자갈도상에 설치할 경우 도상의 동상 감소효과가 나타나 동상피해를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

나. 자갈도상에서의 동결지수와 동결깊이 관계식(안)

2011년 11월 1일부터 2013년 2월 19일까지 태백, 제천, 영월, 연천, 철원의 현장 시험용 자갈도상(단열재를 설치하지 않은 자갈도상)에서 실측한 동결지수와 동결깊이 관계를 보면 그림 3.3.10에서 보여 주는 식과 같다. 비록 짧은 기간(2개년 겨울)에 실측한 것이고, 측정 데이터가 많다고는 볼 수 없지만 주어진 여건과 기간 내에 철도 자갈도상에서의 동결지수와 동결깊이의 관계식(안)을 국내에서 처음으로 제시하였다는데 의미가 있을 것으로 사료된다.

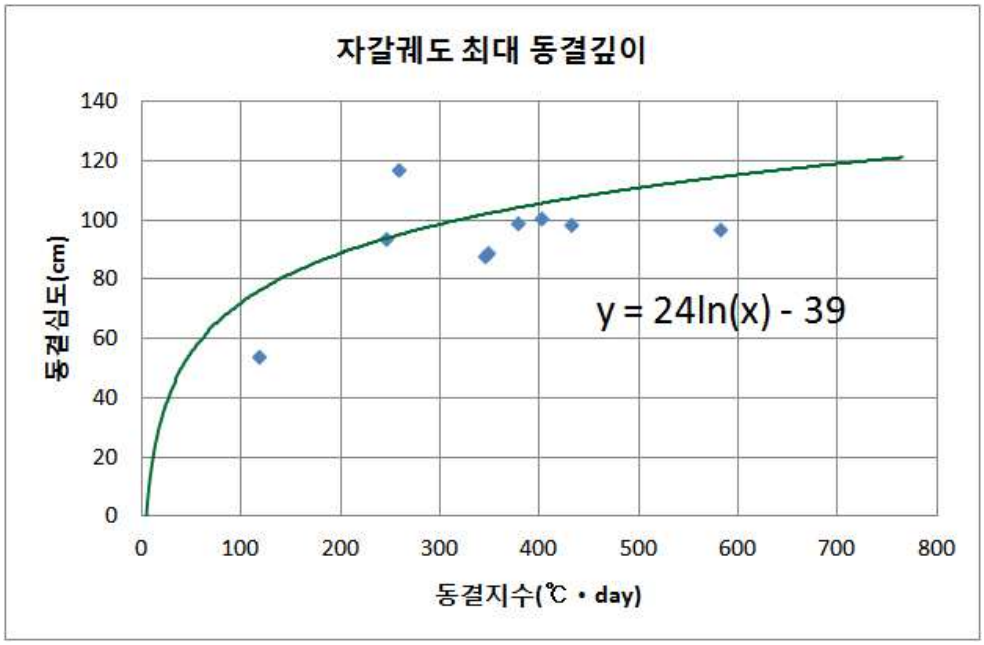



그림 3.3.10 자갈도상에서의 동결지수와 동결깊이 상관관계식

다. 자갈도상에서의 동상량 실측

철원 백마고지역 시험 부지내 자갈도상 하부의 보강 타입별로 동상 발생에 따른 동상량을 Level로 측정하였다(그림 3.3.13 참조). 참고로 철원 백마고지역 도상 하부 노반의 흙을 채취하여 토질시험을 실시한 결과 자연함수비는 14.47%였고, 건조단위중량은 1.59g/cm$^3$이었다.

자갈도상에서 동상에 의한 수준고 변화는 다음과 같은 방법으로 측정하였다. 우선 자갈도상 시공 완료 후(2012년 12월 17일) Level로 각 자갈도상에 설치한 동결심도계 철제 두껑 윗면의 높이(수준고 a)와 겨울철 동상이 발생하지 않아 고유 높이(elevation)가 변하지 않는 대형 구조물인 백마고지역 플렛폼의 특정한 지점의 높이(수준고 b)를 측정하여 높이차(수준고 a- 수준고 b)를 읽었다.

그리고 2013년 2월 19일 동결지수가 581. 4℃·day 되는 시점에 다시 현장을 방문하여 각 자갈도상에 매설된 동결심도계 철제 뚜껑 윗면의 변화된 높이(변화된 수준고 a′)와 백마고지역 플렛폼의 특정한 지점의 높이(수준고 b)를 측정하여 표고차(수준고 a′ - 수준고 b)를 읽어 동상량을 계산하였다. 그 결과는 표 3.3.1과 같다.

표 3.3.1 자갈도상의 타입별 동상량 측정 결과

| 자갈도상 타입 | 동결지수 (581.4℃ · day)경과 시 동상량 측정 결과 |
|---|---|
| 자갈도상 밑에 PE 골재 혼합 아스콘(두께 15cm) 설치한 경우 | 2mm |
| 자갈도상 밑에 XPS (두께 10cm) 설치한 경우 | 5mm |
| 자갈도상 (두께 30cm) 만 설치한 경우 | 10mm |

표 3.3.1에서 보는 바와 같이 자갈도상 자체만 설치했을 때는 동결지수 581.4℃ · day 경과 시 동상량 10mm를 보였으며, 자갈도상 밑에 PE골재 혼합 아스콘층을 15cm 설치한 타입의 경우에는 동상량이 2mm, 자갈도상 밑에 XPS(두께 10cm)를 설치한 타입의 경우는 동상량이 5mm로 각각 나타났다. 즉, 자갈도상 밑에 단열재를 설치할 경우 동결깊이를 감소시켜 결국 동상량도 줄이는 경향을 보였다.

## 3. 콘크리트도상에 대한 동결깊이 및 동상량 측정 결과

### 가. 동결깊이 측정 결과

2011년 11월부터 2013년 2월까지의 2개년 겨울 동안 태백, 영월, 제천, 연천, 철원의 콘크리트도상에서 측정한 최대 동결깊이 분포를 살펴 보면 태백의 경우 최대 동결깊이가 121cm로 나타났으며, 연천은 최대 동결깊이가 110cm, 제천은 최대 107cm, 철원에서는 124.5cm를 보였다.

한편 그림 3.3.11에서는 2012년 11월 23일부터 2013년 2월 19일까지 철원에서의 동결지수 변화에 따른 콘크리트도상의 동결깊이 상관관계를 보여 주고 있다. 2012년 11월부터 2013년 2월 19일까지의 동결지수는 581.4℃ · day였다.

동결지수 변화에 따른 동결깊이 변화를 살펴 보면, 동결지수가 348℃ · day가 될 경우 콘크리트도상 하부에 보조도상 30cm와 입도조정층 30cm를 설치한 타입에서는 동결깊이가 120cm로 나타났다. 즉, 동결지수가 348℃ · day가 되면 콘크리트도상(TCL+HSB) 두께 52.4cm와 보조도상 두께 30cm 그리고 입도조정층 두께 30cm를 설치하더라도 동결깊이는 이미 이것들 모두를 합한 두께를 뚫고 강화노반층에 도달하였다.

또한 동결지수가 581.4℃ · day 되었을 때는 동결깊이가 124.5cm로 나타나 콘크리트 TCL+HSB(52.4cm) + 보조도상(40cm) + 입도조정층(30cm)를 설치하더라도 동결깊이가 이들

층을 모두 합한 깊이 보다 더 깊게 뚫고 강화노반층에 도달한다는 점이다.

즉, 현재 적용되고 있는 KTX 콘크리트도상 설치기준을 그대로 적용할 경우 강원도 등 한랭지의 강화노반에서 동상이 발생할 수도 있으므로 주의해야 한다는 점이다.

아울러 태백이나 영월, 철원 등 강원도 북부지방에서는 동결지수가 650℃· day~750℃· day로 커지는 겨울도 많다는 점을 감안하면 현행 KTX 콘크리트도상의 설치기준을 보강해야 동상피해를 입지 않을 것으로 판단된다.

이번 실측 결과를 통해 동결지수가 큰 우리 나라 한랭지역에 KTX용 콘크리트도상을 시공할 때는 보조도상이나 입도조정층의 두께를 현행 기준보다 증가시켜야만 강화노반층의 동상피해를 방지할 수 있음을 알 수 있었다.

단, 입도조정층이나 보조도상의 두께를 현행 기준보다 증가시킬 경우 공사비에 큰 영향을 미치게 되므로 KTX 철도 계획 노선 중에서 깎기구간이면서 물이 상시 나오는 곳이나, 하루 중 반나절 이상 그늘진 곳, 또는 터널 출입구 전후방 20~50m 구간 등 동상에 취약한 지대에서는 입도조정층이나 보조기층의 두께를 증가시키는 방안을 고려하여야 할 것으로 판단된다.

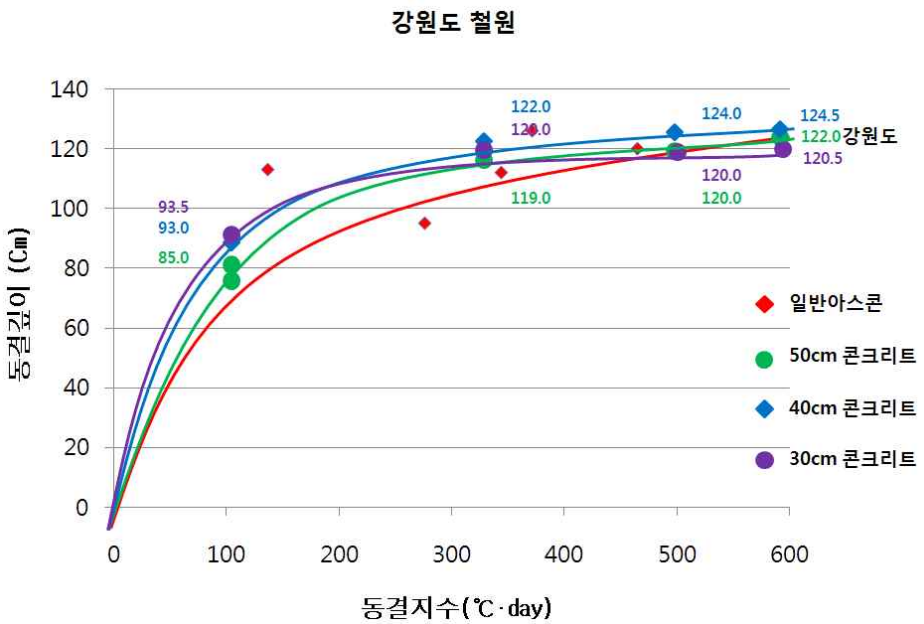



그림 3.3.11 콘크리트도상의 동결지수변화별 동결깊이 변화(철원)

나. 콘크리트도상에서의 동결지수와 동결깊이 관계식(안)

2011년 11월 1일부터 2013년 2월 19일까지 제천, 영월, 태백, 연천, 철원의 현장 실험용 콘크리트도상에서 실측한 동결지수와 동결깊이의 관계식(안)을 도출하면 그림 3.3.12와 같다. 비록 짧은 기간(2개년 겨울)에 측정한 것이고, 실측 데이터가 많지 않은 상태에서 분석했지만 원주- 강릉간 KTX 콘크리트도상을 비롯하여 한랭지 철도의 설계, 시공 시 다소라도 도움이 될 것으로 판단된다.

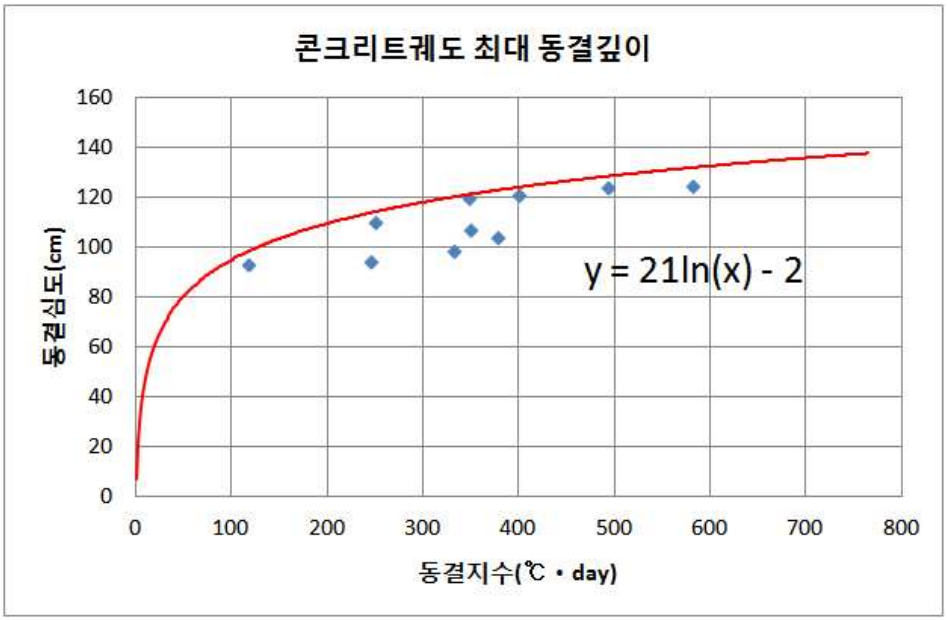



그림 3.3.12 콘크리트도상에서 동결지수와 동결깊이 상관 관계

다. 콘크리트도상에서의 동상량 실측치

콘크리트도상 하부 보조도상의 두께별로 동상에 의한 동상량이 어떻게 달라지는지 알아보기 위해 철원 백마고지역 시험 현장 콘크리트도상의 높이 변화를 Level로 측정하였다(그림 3.3.13 참조). 즉, 콘크리트도상의 동상량 변화를 측정하기 위해 콘크리트도상 시공 완료직 후(2012년 12월 17일) 측량기(Level)로 각 콘크리트도상에 매설된 동결심도계 철제 두껑 윗면의 초기 높이(수준고 a)와 겨울철 동상이 발생하지 않아 높이가 변하지 않는 대형 구조물인 백마고지역 플렛폼의 특정한 지점의 높이(수준고 b)를 측정하여 높이차(a-b)를 읽었으며, 2013년 2월 19일 동결지수가 581. 4℃·day 되는 시점에 다시 현장을 방문하여 각 콘크리트도상에 매설된 동결심도계 철제 뚜껑 윗면의 변화된 높이(수준고 a′)와 백마고지역 플렛폼

의 특정한 지점의 높이(수준고 b)를 측정하여 표고차(a′-b)를 읽어 동상량을 계산하였다. (표 3.3.2 참조)

그 결과, 콘크리트도상 하부 보조도상의 두께를 증가시킴으로써 전체 동결깊이를 줄일 수 있고, 나아가 콘크리트도상에 발생하는 동상량도 줄일 수 있다는 사실을 알았다.



그림 3.3.13 Level로 동상량을 측정하는 모습(철원 백마고지역)

표 3.3.2 콘크리트도상 하부층의 보강 두께별 동상량 측정 결과

| 콘크리트도상 하부 보강 두께별 | 동결지수(581.4℃ · day) 경과시 동상량 |
|---|---|
| 콘크리트도상(524mm)+보조도상(500mm)+입도조정층(300mm) | 5mm |
| 콘크리트도상(524mm)+보조도상(400mm)+입도조정층(300mm) | 10mm |
| 콘크리트도상(524mm)+보조도상(300mm)+입도조정층(300mm) | 10mm |

## 4. 자갈도상과 콘크리트도상에서의 동결깊이 차이

표 3.3.3에서는 2012년 11월 23일부터 2013년 2월 19일까지 철원 백마고지역에서 동결지수 변화에 따른 콘크리트도상에서 실측한 동결깊이(3개의 평균치)와 자갈도상에서 실측한 동결깊이의 차이를 보여 주고 있다. 동결지수가 118℃·day인 시점에서 콘크리트도상의 동결깊이가 평균 91cm인데 비해 자갈도상의 동결깊이는 54cm였고, 동결지수가 348℃·day인 시점에

서 콘크리트도상의 동결깊이가 120cm인데 비해 자갈도상의 동결깊이는 89cm로서 역시 큰 차이가 나고 있다. 동결지수가 581.4℃·day인 시점에서는 콘크리트도상의 동결깊이는 124.5cm인데 자갈도상의 동결깊이는 97cm로 나타나 역시 콘크리트도상의 동결깊이가 훨씬 깊게 나타나고 있다. 이렇게 콘크리트도상에서의 동결깊이가 더 깊은 이유는 콘크리트도상의 열전도율이 간극을 다량 포함한 자갈도상의 열전도율 보다 훨씬 크기 때문으로 판단된다. 즉, 콘크리트도상은 외부의 찬 바람은 잘 차단할 수 있지만, 전도에 의한 열 차단은 별개의 문제다. 수정 Berggren의 동결깊이 산정식(식 3.3.1참조)에서 보는 바와 같이 도로나 철도의 도상 또는 노반 하부로 침투하는 동결깊이는 어떤 물질의 열전도율에 큰 영향을 받는다. 다시 말해 자갈도상은 자갈과 자갈 사이에 틈(간극)을 다량 포함하고 있으므로 콘크리트도상에서 보다 열전도율이 작으며, 그 결과 겨울철에 찬 외기를 상대적으로 잘 차단하는 것으로 풀이된다.

표 3.3.3 동결지수 변화에 따른 콘크리트도상과 자갈도상에서의 동결깊이 비교

| 동결지수 / 도상의 종류 | 118℃·day | 348℃·day | 493℃·day | 581.4℃·day |
|---|---|---|---|---|
| 콘크리트도상 | 91cm | 120cm | 121cm | 124.5cm |
| 자갈도상 | 54cm | 89cm | 90cm | 97cm |

$$Z = \lambda\sqrt{\frac{172800F}{(L/K)_{eff}}} \tag{3.3.1}$$

Z : 동결깊이 (cm)

λ : f(μ,τ) : 보정계수

F : 동결지수(℃·day)

$$(L/K)_{eff} = \frac{2}{X^2}\ \{L_1d_1(d_1/2K_1)+L_2d_2(d_1/K_1+d_2/2K_2)\}$$

dn : $d_1+d_2$ 층의 예상동결깊이(cm)

Ln : 각 층의 융해잠열(cal/cm·s·℃)

Kn : 각 층의 열전도율(cal/$cm^3$·℃)

# 제 4절 국내 철도현장 동결깊이 해석 프로그램 개발

## 1. 동결깊이 해석프로그램의 특성

### 가. 서론

본 연구에서는 국내 철도현장에 적용할 수 있는 동결깊이 설계 및 해석 프로그램을 개발하였다. 동결깊이 설계 프로그램 (Frost Depth Design Program)과 동결깊이 해석 프로그램 (Frost Depth Analysis Program)은 그림 3.4.1과 같이 통합시스템의 GUI를 통해서 동일한 포맷의 공통 입력자료와 출력사항을 포함한다.

동결깊이 해석 프로그램 FDAP는 FEM 수치해석에 기반을 두고 있지만 FEM 전처리 모듈을 통해 FEM 수치해석에 필요한 제반 Input Data가 자동 생성되며 SMAP-T2 Solver에 의해 계산된 동결심도는 통합시스템에 자동으로 연결되어 주요 해석결과 Summary와 동결심도 및 지층 Profile 그래프를 쉽게 출력할 수 있다.

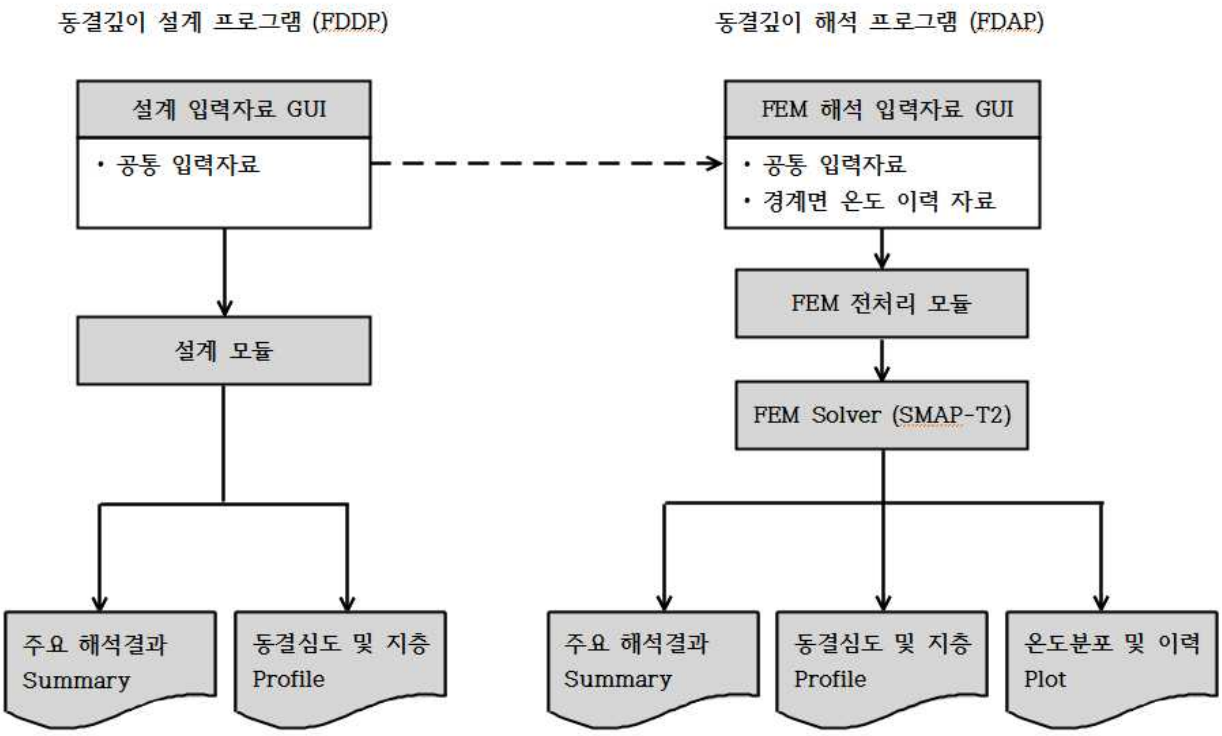



그림 3.4.1 동결깊이 설계 및 해석 프로그램 통합시스템 흐름도

(1) 동결깊이 설계 프로그램 (Frost Depth Design Program) 주요기능

◦ Exact Neumann Solution을 바탕으로 하는 일차원 열전도 설계 프로그램으로 다층 지반에 적용가능.

◦ Modified Berggren식이 지원하지 못하는 동결토와 미동결토의 열용량과 열전도율을 별도로 고려함.

◦ 재료의 종류, 건조밀도, 함수비를 입력 Data로 하여 열용량, 잠열, 열전도율을 프로그램내에서 자동 계산함.

◦ WorldIndex Version 99.1 프로그램이 제출한 국내 기상자료 Database 내장.

◦ 사용자가 쉽게 프로그램을 사용하여 동결깊이를 산정할 수 있도록 편리하고 간편한 GUI (Graphic User Interface).

(2) 동결깊이 해석 프로그램 (Frost Depth Analysis Program) 주요기능

◦ 비선형 열전도 FEM 수치해석을 바탕으로 하는 1차원 열전도 해석 프로그램으로 지반의 비선형 열특성 모델이 가능. 프로그램 FDAP는 컴택리서치에서 개발한 SMAP-T2를 단순화하여 1차원 열전도 해석을 수행하도록 FEM 전처리 모듈을 사용함.

◦ 지표면에 Degree - Day Time History 입력이 가능하며 동결시간에 따른 동결심도와 Temperature Profile을 알 수 있음.

◦ 동결면에서 발생하는 잠열에 의한 급격한 열에너지 변화를 Enthalpy 이력에 기초를 둔 평균 열용량법을 사용하여 효율적으로 계산함.

◦ 토피 두께가 낮은 암거 위 노반의 동해를 해석할 수 있도록 상부 지표면 Boundary와 유사하게 노반 하부에 있는 암거 Slab 표면에 별도로 Degree - Day Time History를 지정할 수 있음.

나. 동결깊이 설계 프로그램

(1) 이론

Josef Stefan (1889)은 일차원 열전도식을 적용하여 최초로 가장 간편한 동결깊이 산정식을 제안하였다. Stefan은 동결시 제거되는 열에너지로 간극수의 잠열만 고려하였고 온도 저

하시 Soil의 열용량과 관련하여 방출되는 열에너지는 무시하였다. 따라서 Stefan식을 온화한 지역에 적용할 경우 동결깊이는 과대하게 산정된다.

Stefan 이후 Soil의 열용량이 고려된 일차원 열전도식에 대하여 Neumann (1860)에 의한 수학적 해가 이미 존재하고 있음을 Ingersoll (1954)이 발표하였고 Carslaw and Jaeger (1959)에 의해 일반화된 식이 나왔다. 따라서 Stefan의 동결깊이 산정문제에 대한 일반적인 해를 Neumann Solution이라 부른다.

Neumann Solution을 동결깊이 산정에 최초로 적용한 사람은 Berggren (1943)이다. 한편 미육군공병단 프로젝트를 통하여 Aldrich and Paynter (1953a)는 Neumann Solution을 초기 IBM Card Programmed Calculator를 사용하여 보다 실용적으로 사용하도록 동결깊이 산정식을 개발하였고 후에 Aldrich and Paynter에 의해 개발된 식을 "Modified Berggren 식"이라 부르고 현재 북미에서 동결깊이 산정에 널리 사용되고 있다.

그림 3..4.2는 동결깊이 산정과 관련된 일차원 열전도 개략도로 Stefan Problem이라 부른다. 우선 Soil은 균질하며 동결이 시작되기 전 초기 조건으로 미동결 상태인 온도 $T_o$로 균일하게 분포되어 있고 동결 시작과 동시에 지표면 온도는 $T_o$에서 $T_s$로 갑자기 떨어지고 지표면 온도는 동결이 진행되는 동안 $T_s$로 일정하게 유지 된다고 가정한다. 동결이 진행됨에 따라 동결면 (Freezing Front)은 지중으로 내려간다. 따라서 지표면부터 동결면까지의 Frozen Zone에서의 열전도식은 다음과 같다.

$$k_f \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = C_f \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \qquad (3.4.1)$$

동결면에서는 Soil 내의 간극수의 액체에서 고체로 상변화 (Phase Change)에 필요한 에너지인 잠열 (Latent Heat)이 추가되어 열전도식은 다음과 같다.

$$k_f \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = L \cdot \frac{dx}{dt} + k_u \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \qquad (3.4.2)$$

그리고 동결면 아래의 Unfrozen Zone에서의 열전도식은 다음과 같다.

$$k_u \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = C_u \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \qquad (3.4.3)$$

여기서

k : Thermal Conductivity (W / m · K)

C : Volumetric Heat Capacity (J / $m^3$ · K)

L : Volumetric Latent Heat (J / $m^3$)

Note : $k_f$ and $C_f$ refer to frozen material

$k_u$ and $C_u$ refer to unfrozen material

상기 가정에 대한 열전도식의 Exact Neumann Solution은 다음과 같다.

$$\boxed{X(t) = 2 \cdot Z \sqrt{\alpha_f \cdot t}} \tag{3.4.4}$$

$$\boxed{\frac{\exp(-Z^2)}{erf(Z)} - \alpha' \frac{\exp(-\eta^2 \cdot Z^2)}{erfc(\eta \cdot Z)} = \frac{\sqrt{\pi}}{\mu} Z} \tag{3.4.5}$$

여기서

$$\alpha' = \eta \cdot \left(\frac{k_u}{k_f}\right) \cdot \left(\frac{T_o - T_f}{T_f - T_s}\right) \tag{3.4.6}$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\alpha_f}{\alpha_u}} \tag{3.4.7}$$

$$\alpha_f = \frac{k_f}{C_f} \tag{3.4.8}$$

$$\alpha_u = \frac{k_u}{C_u} \tag{3.4.9}$$

$$\boxed{\mu = \frac{C_f \cdot (T_f - T_s)}{L}} \tag{3.4.10}$$

$$erf(Z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^Z \exp(-z^2) dz \tag{3.4.11}$$

$$erfc(\eta \cdot Z) = 1 - erf(\eta \cdot Z) \tag{3.4.12}$$

동결깊이 X는 식 3.4.4에서 보는 바와 같이 시간 t의 제곱승에 비례하여 지중으로 침투하고 Parameter Z는 Transcendental 식 3.4.5를 반복법이나 Newton 법으로 풀어서 구할 수 있다.

동결깊이 산정식 3.4.4는 다음과 같은 Stefan Form으로 나타낼 수 있다.

$$X(t) = \lambda \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot n \cdot F}{(L / k_f)}} \qquad (3.4.13)$$

여기서 λ는 온도변화시 주로 Soil의 열용량이 동결깊이에 영향을 주는 보정계수로 다음과 같이 Neumann 식의 Parameter와 연관시킬 수 있다.

우선 식 3.4.4의 동결시간 t는 지표면 동결지수 ($n \cdot F$)와 지표면 동결온도 ($T_f - T_s$)로 나타내면

$$t \simeq \frac{n \cdot F}{(T_f - T_s)} \qquad (3.4.14)$$

여기서

n : (지표면 동결지수 / 대기 동결지수)로 n Factor라 함.

F : 대기 동결지수

식 3.4.10과 식 3.4.14로부터

$$t \simeq \frac{C_f \cdot n \cdot F}{\mu \cdot L} \qquad (3.4.15)$$

식 3.4.8과 식 3.4.15를 식 3.4.4에 대입하면

$$X(t) = 2 \cdot Z \cdot \sqrt{\left(\frac{k_f}{C_f}\right) \cdot \left(\frac{C_f \cdot n \cdot F}{\mu \cdot L}\right)}$$

$$= Z \cdot \sqrt{\frac{2}{\mu}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot n \cdot F}{(L / k_f)}} \qquad (3.4.16)$$

식 3.4.4와 식 3.4.16으로부터 보정계수 λ는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\boxed{\lambda = Z \cdot \sqrt{\frac{2}{\mu}}} \qquad (3.4.17)$$

식 3.4.13에서 λ = 1과 $k_f = k$를 대입하면 Stefan이 제안한 다음과 같은 가장 보수적인 동결깊이 산정식을 구할 수 있다.

$$\boxed{X(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot n \cdot F}{L}}} \qquad (3.4.18)$$

다층지반의 동결깊이 산정

지금까지 Neumann Solution은 지층이 균일한 단일층으로 구성되어 있을 경우이다. 다층 지반의 Neumann Solution 식 3.4.13은 다음과 같이 수정하여 사용할 수 있다.

$$\boxed{X(t) = \lambda \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot n \cdot F}{(L / k)_{eff}}}} \qquad (3.4.19)$$

식 3.4.19의 Effective (L / k)는 Aldrich and Paynter (1966)에 의해서 다음과 같이 주어진다.

$$\boxed{\left(\frac{L}{k}\right)_{eff} = \frac{2}{X^2}\left(\sum_{i=1}^{n} \frac{L_i d_i^2}{2 k_i} + \sum_{i=2}^{n} \sum_{j=1}^{i-1} \frac{L_i d_i d_j}{k_j}\right)} \qquad (3.4.20)$$

여기서

n : 지층수

$d_i$ : 지층 i 두께

$k_i$ : 지층 i 열전도계수

$L_i$ : 지층 i 융해잠열

다음으로 Transcendental 식 3.4.5와 관련된 Parameter $C_f$, L, $k_f$는 다음과 같이 각 지층의 두께를 가중하여 평균한 값 $\overline{C}_f$, $\overline{L}$, $\overline{k}_f$를 사용한다.

$$\overline{C}_f = \frac{1}{X} \sum_{i=1}^{n} C_{fi} \cdot d_i \tag{3.4.21}$$

$$\overline{L} = \frac{1}{X} \sum_{i=1}^{n} L_i \cdot d_i \tag{3.4.22}$$

$$\overline{k}_f = \frac{X}{\left( \sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{k_{fi}} \right)} \tag{3.4.23}$$

$$\overline{\alpha}_f = \frac{\overline{k}_f}{\overline{C}_f} \tag{3.4.24}$$

$$\overline{\mu} = \frac{\overline{C}_f \cdot (T_f - T_s)}{\overline{L}} \tag{3.4.25}$$

$$\overline{\eta} = \sqrt{\frac{\overline{\alpha}_f}{\alpha_u}} \tag{3.4.26}$$

Aldrich and Paynter (1966)의 수정 Berggren법은 Neumann Solution의 일반화된 Trascendental 식 3.4.5를 다음과 같이 근사화하여 사용하였다.

$$\alpha_u \simeq \alpha_f \tag{3.4.27}$$

$$k_u \simeq k_f \tag{3.4.28}$$

$$\alpha' \simeq \frac{(T_o - T_f)}{(T_f - T_s)} \tag{3.4.29}$$

이와 같이 근사화로 산정된 동결깊이는 Neumann의 Exact Solution 값에 비교할 때 ± 10%의 오차를 수반할 수 있다 (V.J. Lunardini, 1980).

그림 3.4.3은 Aldrich and Paynter (1966)의 수정 Berggren법을 다층 지반에 적용한 것으로 동결깊이 설계 프로그램 (FDDP) 계산 흐름도이다.

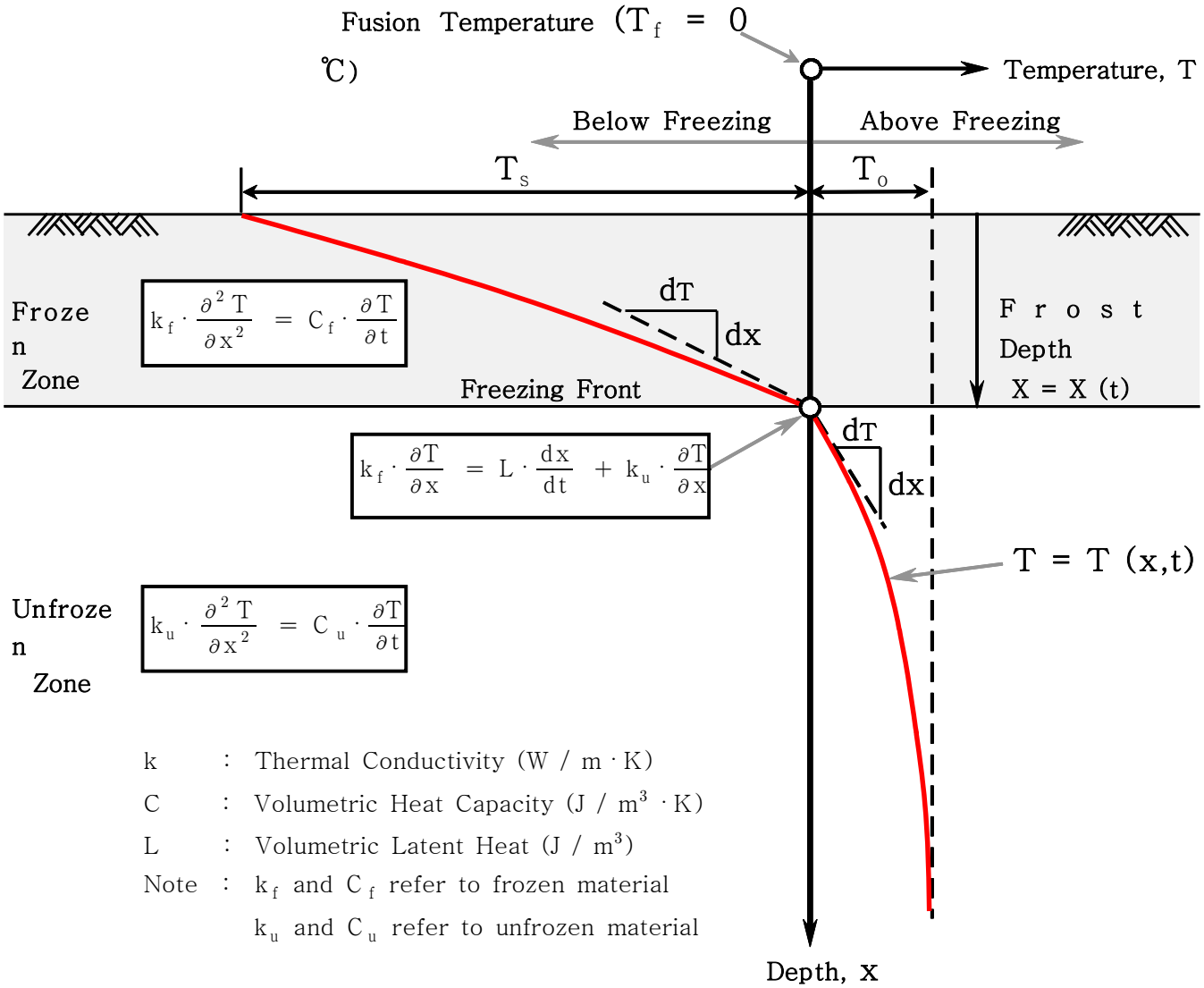



그림 3.4.2 동결깊이 산정 일차원 열전도 개략도 (Stefan Problem)

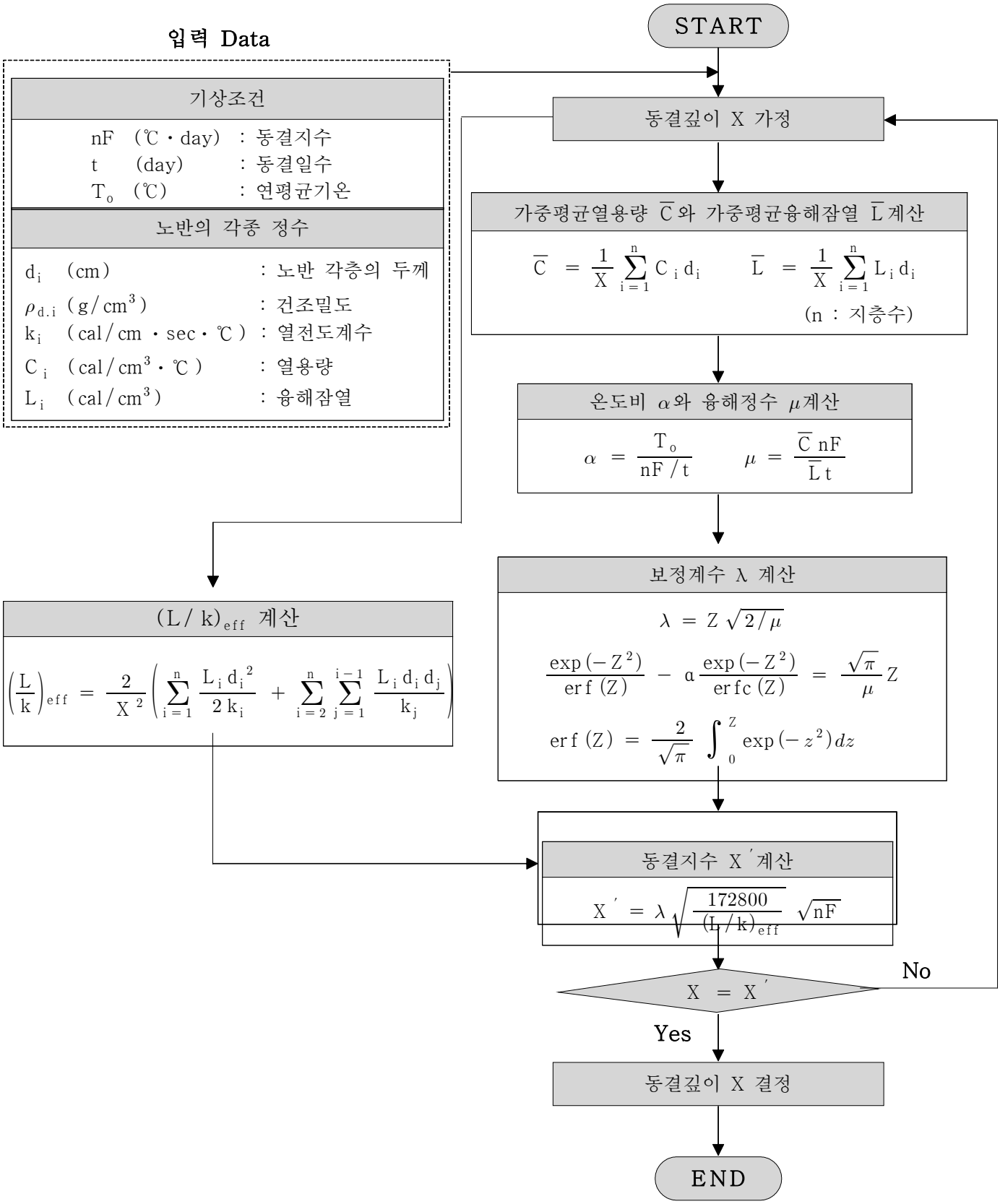



그림 3.4.3 동결깊이 설계 프로그램 (FDDP) 계산 흐름도

(2) 입력

동결깊이 설계 프로그램 GUI는 그림 3.4.4와 같이 프로젝트, 입력 그리고 동결깊이 Tab으로 구분된다.

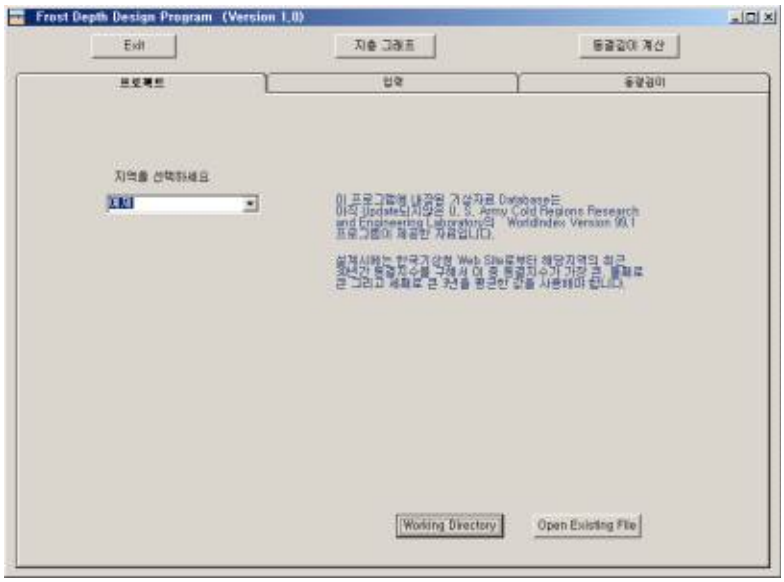



그림 3.4.4 프로젝트 창

※ 프로젝트

프로젝트 화면은 'Working Directory' 및 'Open Existing File' 버튼과 지역선택 콤보박스를 포함한다.

Working Directory

화면 하단 중앙에 위치한 'Working Directory' 버튼을 클릭하면 그림 3.4.5와 같이 Working Directory 창이 나타나며, 해석 결과물은 여기서 지정한 Folder에 저장된다.

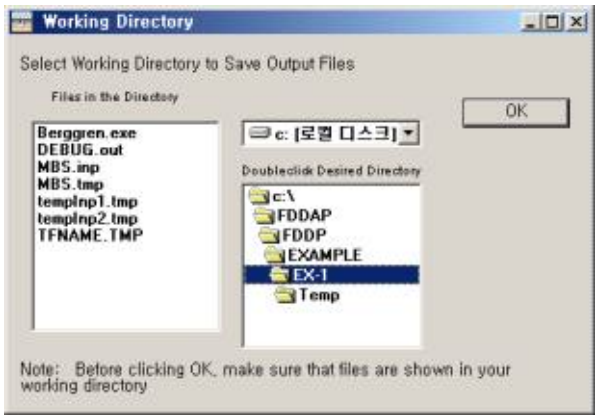



그림 3.4.5 Working Directory 창

## Open Existing File

화면 하단 우측에 위치한 'Open Existing File' 버튼을 클릭하면 그림 3.4.6과 같이 열기 창이 나타나며 기존에 사용한 Input File을 불러올 수 있다.




그림 3.4.6 기존 File 열기 창

## 지역선택

화면 좌측에 위치한 지역선택 콤보박스를 클릭하면 그림 3.4.7과 같이 우리나라 주요 지역 List가 나오며 선택된 지역의 기상 Data를 사용할 수 있다.

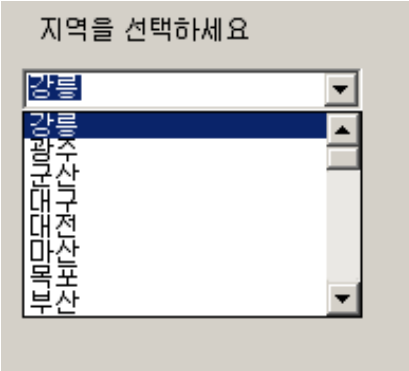



그림 3.4.7 지역선택 콤보박스

본 프로그램에 내장된 기상자료 Database는 아직 Update 되지 않은 U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory의 WorldIndex Version 99.1 프로그램이 제출한 자료이다 (표 3.4.1 참조).

표 3.4.1 WorldIndex Version 99.1에서 제공된 기상 Data (South Korea)

| No | 지역 | 영문표기 | 연평균기온 | 대기 동결지수 | 동결일 수 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 강릉 | Kangnung | 13.1 | 112 | 57 |
| 2 | 광주 | Kwangju | 13.8 | 96 | 49 |
| 3 | 군산 | Kunsan | 13.3 | 122 | 57 |
| 4 | 대구 | Taegu | 13.9 | 109 | 54 |
| 5 | 대전 | Taejon | 12.7 | 252 | 83 |
| 6 | 마산 | Masan | 15.7 | 24 | 6 |
| 7 | 목포 | Mokpo | 14.8 | 31 | 15 |
| 8 | 부산 | Pusan | 15.1 | 25 | 15 |
| 9 | 서귀포 | Seogipo | 16.7 | 2 | 2 |
| 10 | 서산 | Seosan | 12.5 | 218 | 76 |
| 11 | 서울 | Seoul | 11.2 | 463 | 92 |
| 12 | 속초 | Sogcho | 12.5 | 112 | 56 |
| 13 | 수원 | Suwon | 12.1 | 362 | 92 |
| 14 | 안동 | Andong | 12.4 | 232 | 83 |
| 15 | 오산 | Osan | 11.9 | 414 | 98 |
| 16 | 완도 | Wando | 14.8 | 11 | 4 |
| 17 | 울릉도 | Ullungdo | 12.9 | 46 | 26 |
| 18 | 울산 | Ulsan | 14.1 | 50 | 30 |
| 19 | 울진 | Uljin | 12.8 | 60 | 39 |
| 20 | 원주 | Wonju | 12.1 | 284 | 90 |
| 21 | 인천 | Inchon | 12 | 309 | 85 |
| 22 | 전주 | Chunju | 13.7 | 144 | 58 |
| 23 | 제주 | Cheju | 15.4 | 6 | 5 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 24 | 진주 | Jinju | 13.7 | 82 | 46 |
| 25 | 철원 | Cholwon | 10.8 | 470 | 87 |
| 26 | 추풍령 | Chupungyong | 12.2 | 226 | 82 |
| 27 | 춘천 | Chuncheon | 11.6 | 439 | 92 |
| 28 | 충주 | Chungju | 12.7 | 307 | 88 |
| 29 | 통영 | Chungmu | 14.9 | 17 | 11 |
| 30 | 포항 | Pohang | 14.5 | 45 | 22 |

(North Korea)

| No | 지역 | 영문표기 | 연평균기온 | 대기 동결지수 | 동결일 수 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 강계 | Kanggye | 7.9 | 1075 | 130 |
| 2 | 개성 | Kaesong | 11.4 | 425 | 91 |
| 3 | 구성 | Kusong | 9.8 | 698 | 114 |
| 4 | 사리원 | Sariwon | 11.1 | 510 | 100 |
| 5 | 삼지연 | Samjiyon | 0.6 | 2118 | 190 |
| 6 | 송진 | Songjin | 9.4 | 388 | 100 |
| 7 | 수풍 | Supung | 9.5 | 762 | 118 |
| 8 | 신계 | Singye | 10.6 | 591 | 94 |
| 9 | 신포 | Sinpo | 10 | 342 | 93 |
| 10 | 양덕 | Yangdok | 8.6 | 847 | 120 |
| 11 | 용연 | Ryongyon | 10.9 | 356 | 102 |
| 12 | 장전 | Changjon | 12.3 | 142 | 64 |
| 13 | 중강진 | Chunggangjin | 6.2 | 1456 | 138 |
| 14 | 평강 | Pyonggang | 9.1 | 726 | 110 |
| 15 | 풍산 | Pungsan | 2.9 | 1636 | 162 |
| 16 | 혜산 | Hesan | 4.6 | 1604 | 150 |
| 17 | 회천 | Huichon | 9.1 | 832 | 118 |

설계시에는 한국기상청 Web Site로부터 해당지역의 최근 30년간 동결지수를 구해서 이중 동결지수가 가장 큰, 둘째로 큰 그리고 세째로 큰 3년을 평균한 값을 사용해야 한다.

※ 입력

입력 화면은 그림 3.4.8과 같이 제목, 기상 Data, 자동계산, 해석방법 그리고 지반 물성치로 구분된다.

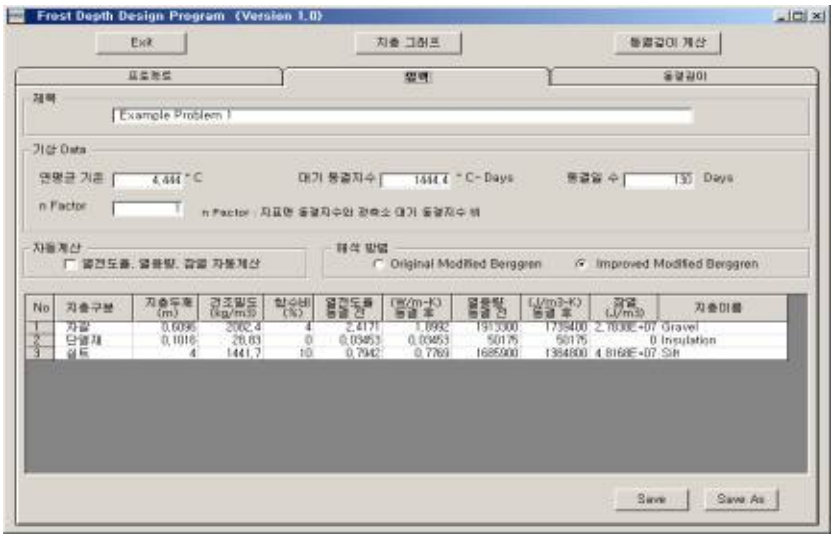



그림 3.4..8 입력 창

## 제목

해당 프로젝트와 관련된 제목을 입력한다 (그림 3.4.9 참조).




그림 3.4.9 입력 : 제목

## 기상 Data

동결깊이 계산에 사용되는 기상 Data로 연평균기온, 대기 동결지수, 동결일수 그리고 n Factor를 포함한다 (그림 3.4.10 참조).

프로젝트 화면에서 선택된 해당 지역의 기상 Data가 Default 값으로 나타나며, 수정하여 사용할 수 있다.

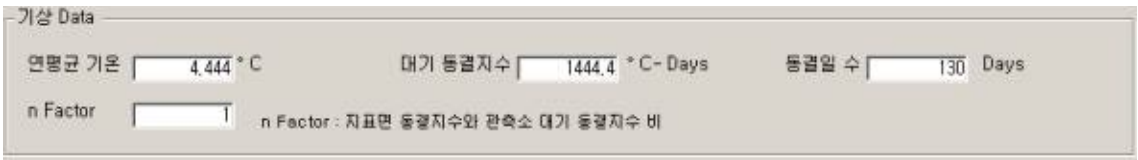



그림 3.4.10 입력 : 기상 Data

동결깊이 계산시 지표면 동결지수는 대기 동결지수에 n Factor를 곱한 값이 사용된다. 측정된 n Factor 값이 없을 경우 표 3.4.2를 참조한다.

표 3.4.2 n Factor for freeze and thaw (ratio of surface index to air index)
(U.S. Army Corps of Engineers, Reference 7)

| Type of surface* | For freezing conditions | For thawing conditions |
|---|---|---|
| Snow surface | 1.0 | -- |
| Portland-cement concrete | 0.75 | 1.5 |
| Bituminous pavement | 0.7 | 1.6 to 2† |
| Bare soil | 0.7 | 1.4 to 2† |
| Shaded surface | 0.9 | 1.0 |
| Turf | 0.5 | 0.8 |
| Tree-covered | 0.3** | 0.4 |

* : Surface exposed directly to sun or air without any overlying dust, soil, snow or ice, except as noted otherwise, and with no building heat Involved.

† : Use lowest value except in extremely high latitudes or at high elevations where a major portion of summer heating is from solar radiation.

**: Data from Fairbanks, Alaska, for single season with snow cover permitted to accumulate naturally

**자동계산**

자동계산 체크박스가 체크되어 있으면 지층 구분에 따라 열전도율, 열용량, 그리고 잠열이 자동계산 된다 (그림 3.4.11 참조).

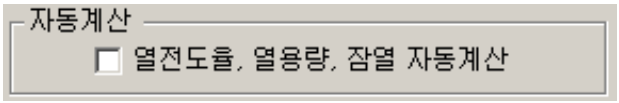



그림 3.4.11 입력 : 자동계산

열전도율 (k)는 지층의 종류에 따라 Kersten (1949)이 제안한 다음 식을 사용하여 자동계산된다.

자갈 및 모래

$$\text{동결 전} \quad k_f = 0.0833 \cdot [0.7 \log \omega + 0.4] \cdot 10^{0.01\gamma_d} \tag{3.4.30}$$

$$\text{동결 후} \quad k_u = 0.0833 \cdot \left[0.076 \cdot 10^{0.013\gamma_d} + 0.032 \cdot 10^{0.0146\gamma_d}\,\omega\right] \tag{3.4.31}$$

실트 및 점토

$$\text{동결 전} \quad k_u = 0.0833 \cdot [0.9 \log \omega - 0.2] \cdot 10^{0.01\gamma_d} \tag{3.4.32}$$

$$\text{동결 후} \quad k_f = 0.0833 \cdot \left[0.01 \cdot 10^{0.022\,\gamma_d} + 0.085 \cdot 10^{0.008\,\gamma_d\,\omega}\right] \tag{3.4.33}$$

체적열용량 (C)은 다음 식을 사용하여 자동 계산된다.

$$\text{동결 전} \quad C_u = \gamma_d \cdot \left[0.17 + \frac{\omega}{100}\right] \tag{3.4.34}$$

$$\text{동결 후} \quad C_f = \gamma_d \cdot \left[0.17 + \frac{0.5 \cdot \omega}{100}\right] \tag{3.4.35}$$

체적잠열 (L)은 다음식을 사용하여 자동 계산된다.

$$L = 144 \cdot \gamma_d \cdot \left(\frac{\omega}{100}\right) \tag{3.4.36}$$

여기서

$\gamma_d$ : 건조단위중량 [lb/ft$^3$]

ω : 함수비 [%]

k : 열전도율 [Btu/hr · ft · °F]

C : 체적열용량 [Btu/ft$^3$ · °F]

L : 체적잠열 [Btu/ft$^3$]

English 단위로 표현된 식 3.4.30 ~ 식 3.4.36은 다음 식을 사용하여 SI단위로 환산된다.

건조단위중량 : 1lb/ft$^3$ = 16.0185 kg/m$^3$

열전도율 : 1Btu/hr · ft · °F = 1.7265 W/m · K

체적열용량 : 1Btu/ft$^3$ · °F = 66,900 J/m$^3$ · K

체적잠열 : 1Btu/ft$^3$ = 37,167 J/m$^3$

**해석 방법**

해석 방법으로 Original Modified Berggren 식 또는 Improved Modified Berggren 식을 선택할 수 있다 (그림 3.4.12 참조). Original Modified Berggren 식은 동결 전과 동결 후의 열전도율과 체적열용량의 평균 값을 사용하여 동결깊이를 계산하며, Improved Modified Berggren 식은 동결 전·후의 열전도율과 체적열용량을 구분하여 동결깊이를 계산한다. 따라서 보다 정확한 Improved Modified Berggren 식을 권장한다.




그림 3.4.12 입력 : 해석 방법

## 지반 물성치

지반 물성치 입력사항으로 각 지층에 대하여 지층구분, 지층두께, 건조밀도, 함수비, 동결전 열전도율, 동결후 열전도율, 동결전 체적열용량, 동결후 체적열용량, 체적잠열 그리고 지층이름이 포함된다 (그림 3.4.13 참조).

| No | 지층구분 | 지층두께 (m) | 건조밀도 (kg/m3) | 함수비 (%) | 열전도율 동결 전 | (W/m-K) 동결 후 | 열용량 동결 전 | (J/m3-K) 동결 후 | 잠열 (J/m3) | 지층이름 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 자갈 | 0.6096 | 2082.4 | 4 | 2.4171 | 1.8992 | 1913300 | 1739400 | 2.7838E+07 | Gravel |
| 2 | 단열재 | 0.1016 | 28.83 | 0 | 0.03453 | 0.03453 | 50175 | 50175 | 0 | Insulation |
| 3 | 실트 | 4 | 1441.7 | 10 | 0.7942 | 0.7769 | 1685900 | 1384800 | 4.61bbE+07 | Silt |

그림 3.4.13 입력 : 지반 물성치

지층 구분은 콘크리트, 아스팔트, 자갈, 모래, 실트, 점토, 단열재 그리고 사용자 재료를 포함한다 (그림 3.4.14 참조).




그림 3.4.14 입력 : 지반물성치 → 지층구분

자동계산의 체크박스가 체크되어 있으면 지층구분의 자갈, 모래, 실트 그리고 점토의 Soil 종류의 경우 건조밀도와 함수비를 Input으로 식 3.4.30 ~ 식 3.4.36을 사용하여 열전도율, 체적열용량 그리고 체적잠열이 자동 계산된다.

마직막 Column의 지층이름은 지층 및 동결심도 그래프에 사용된다.

지층을 추가 또는 삭제 하고자 할 때는, 추가 또는 삭제하고자 하는 지층의 행에서 오른쪽 마우스 버튼을 클릭한다 (그림 3.4.15 참조).




그림 3.4.15 입력 : 지반 물성치 → 지층 추가 / 삭제

지층 3을 삭제할 경우 확인 창이 나오며 예/아니오를 선택한다.




그림 3.4.16 지층 삭제 시 확인 창

지층 3이 삭제된 후 지층 Table은 아래와 같다.




그림 3.4.17 지층 삭제 후 지층 Table

새로운 지층을 기존 지층 그 다음에 추가할 경우 확인 창이 나오며 예/아니오를 선택한다.

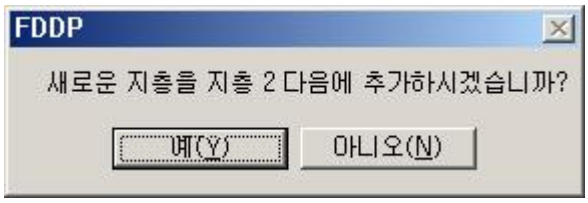



그림 3.4.18 지층 추가 시 확인 창

지층 2 다음에 새로운 지층이 추가된 후 지층 Table은 아래와 같다.




그림 3.4.19 지층 추가 후 지층 Table

새로운 지층으로 지층 2 다음에 있는 기존 지층 3의 값들이 복사되며, 이들 값을 수정하고자 할 때는 지층 3의 지층구분 콤보박스를 열어 지층 종류를 선택하면, 지층 종류별로 프로그램에 내장되어 있는 Default 물성치로 치환된다.

주의사항 : Default 물성치는 현장지반 상태를 나타낼 수 없으므로 현장조사로부터 구한 물성치를 입력하는 것이 바람직하다.

| No | 지층구분 | 지층두께 (m) | 건조밀도 (kg/m3) | 함수비 (%) | 열전도율 동결 전 | (W/m-K) 동결 후 | 열용량 동결 전 | (J/m3-K) 동결 후 | 잠열 (J/m3) | 지층이름 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 자갈 | 0.6096 | 2082.4 | 4 | 2.4171 | 1.8952 | 1913300 | 1739400 | 2.7838E+07 | Gravel |
| 2 | 단열재 | 0.1016 | 28.83 | 0 | 0.03453 | 0.03453 | 50175 | 50175 | 0 | Insulation |
| 3 | 모래 | 4 | 2082 | 6.5 | 2.85 | 2.85 | 1873200 | 1873200 | 534374E+07 | Sand |
| 4 | 실트 | 4 | 1441.7 | 10 | 0.7942 | 0.7769 | 1685900 | 1384800 | 4.8168E+07 | Silt |

그림 3.4.20 Default 물성치로 치환된 후 지층 Table

**지층 그래프**

입력 창 Tab의 바로 위에 위치한 '지층 그래프' 버튼을 클릭하면, 입력된 기상 Data와 Scale된 지층 Profile이 화면에 출력되어 입력된 Data를 확인할 수 있다 (그림 3.4.21 참조).

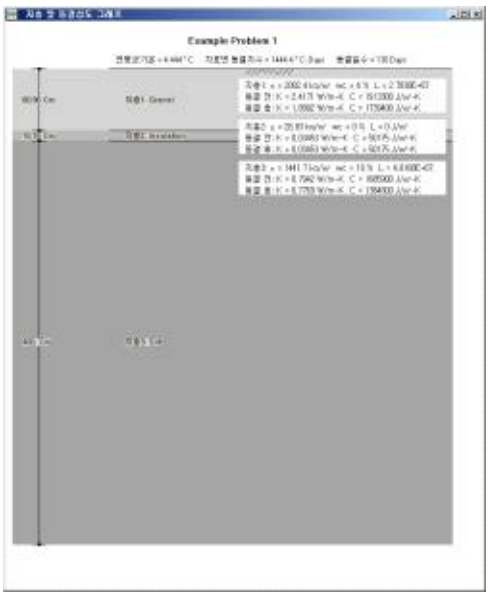


그림 3.4.21 지층 그래프

(3) 출력

**※ 동결깊이**

입력사항이 완료된 후 '지층 그래프' 버튼의 오른쪽에 위치한 '동결깊이 계산' 버튼을 클릭하면, 동결깊이 계산이 실행되며 계산이 완료되면 자동으로 동결깊이 창이 화면에 출력된다 (그림 3.4.22 참조).

동결깊이 화면은 동결깊이 검토 요약으로 사용한 해석방법, 대지 동결지수, n Factor, 동결일수, 연평균기온 그리고 계산된 동결깊이를 포함한다.

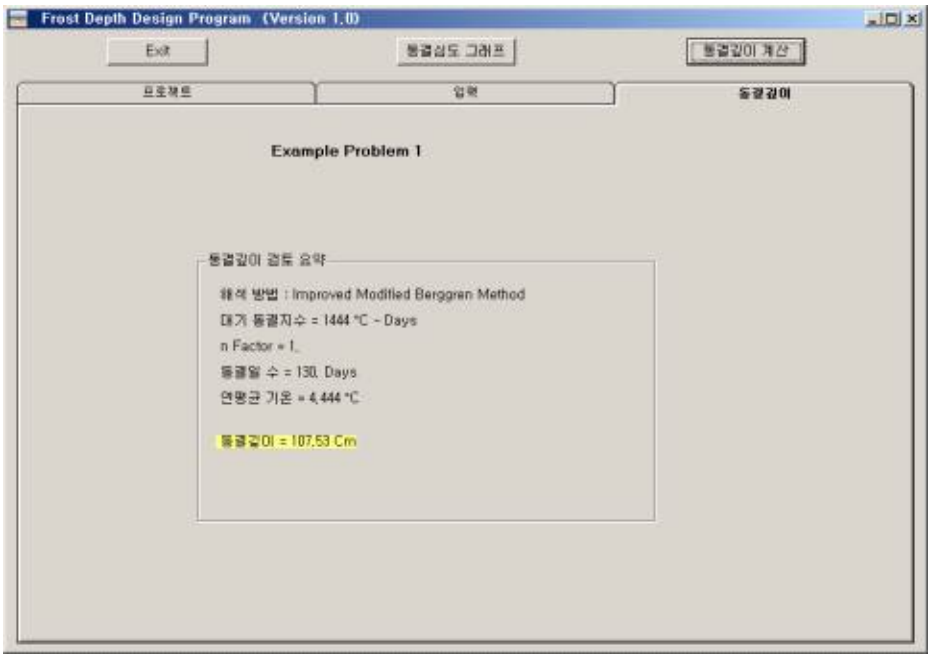



그림 3.4.22 계산 후 동결깊이 창

## 동결심도 그래프

동결깊이 계산이 완료되면 입력 Tab 바로 위에 '동결심도 그래프' 버튼이 생성되며 이 버튼을 클릭하면 그림 3.4.23과 같이 지층 Profile 상에 동결심도가 출력된다.

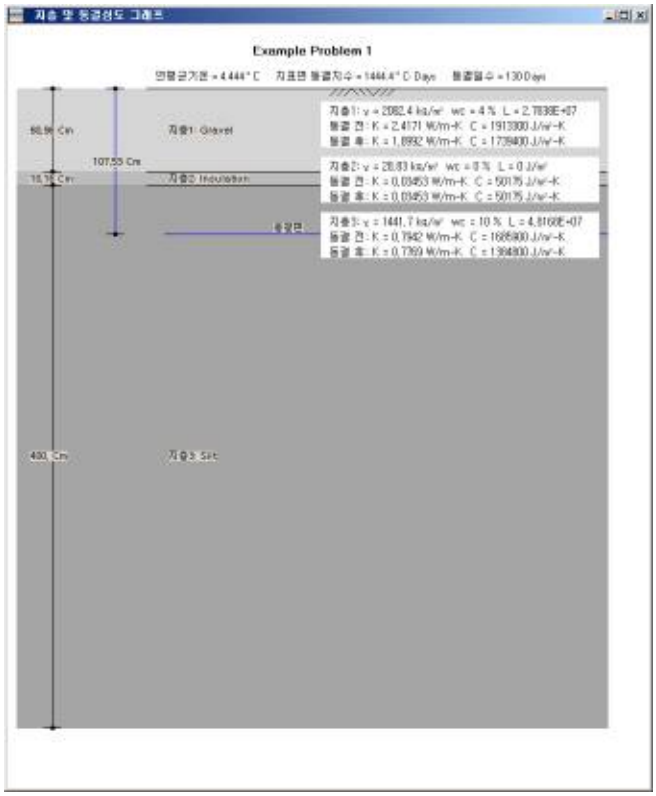



그림 3.4.23 동결심도 그래프

다. 동결깊이 설계 프로그램 분석결과

(1) 검증예제

동결깊이 설계 프로그램 (Frost Depth Design Program)을 검증하기 위하여 표 3.4.3에 열거한 참고 문헌의 예제를 수행하여 비교하였다. 표 3.4.4는 관련 참고문헌의 예제에 사용된 포장, 단열재 그리고 지반의 재료 물성치이다. 예제의 English 단위는 SI 단위로 환산하여 사용하였다.

검증 예제는 사용된 각 문헌별로 구분하였다.

Homogeneous한 단층 지반은 Neumann의 Exact Solution이 존재하지만 다층 지반에는 Exact Solution이 존재하지 않는다.

표 3.4.3 검증예제 참고문헌

| Verification | References |
|---|---|
| VP-1 | W. Alan Braley John P. Zarling, Dec. 1990, "MUT1D Multilayer User-Friendly Thermal Model in 1 Dimension, Univ. of Alaska Fairbanks, Alaska 99775_0660. |
| VP-2 | Johanna Sipola, July 19, 2011, "Tjälinträngning i fyllningsdammars tätkärna i anslutning till betongkonstruktioner", Lulea Tekniska University, Sweden. |
| VP-3 | Frank Kreith & Mark S. Bohn, 2001, "Principles of Heat Transfer", 6th Edition. |
| VP-4 | Takaki Matsumaru, etal, Dec. 2006, "Calculation Method of Frost Penetration Depth for Railway Subgrade Considering Thermal Characteristics of Multilayer Materials", RTRI Report, v20, No 12. |
| VP-5 | George W. Aitken & Richard L. Berg, Oct 1968, "Digital Solution of Modified Berggren Equation to Calculate Depths of Freeze or Thaw In Multilayered Systems, CRREL Special Report 122. |
| VP-6 | Edel Corteez, etal, 2006, Modberg Version 99.2.0, Software from US CRREL. |

표 3.4.4 검증예제 재료 물성치

| Verification | No. | Material | $\gamma_d$ | | $\omega$ | Btu/hr · ft · °F | | W/m · K | | Btu/ft³ · °F | | J/m³ · K | | L | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | lb/ft³ | kg/m³ | (%) | $k_u$ | $k_f$ | $k_u$ | $k_f$ | $C_u$ | $C_f$ | $C_u$ | $C_f$ | Btu/ft³ | J/m³ |
| VP-1 | 1 | Gravel | 130 | 2082.4 | 4 | 1.4 | 1.1 | 2.4171 | 1.8992 | 28.6 | 26 | $1.9133\times10^6$ | $1.7394\times10^6$ | 749 | $2.7838\times10^7$ |
| | 2 | Insulation | 1.8 | 28.83 | 0 | 0.02 | 0.02 | 0.03453 | 0.03453 | 0.75 | 0.75 | 50175 | 5.175 | 0 | 0 |
| | 3 | Silt | 90 | 1441.7 | 10 | 0.46 | 0.45 | 0.7942 | 0.7769 | 25.2 | 20.7 | $1.6859\times10^6$ | $1.3848\times10^6$ | 1296 | $4.8168\times10^7$ |
| VP-2 | 4 | Sand | | 1748 | 16.66 | | | 2.2588 | 3.6892 | | | $2.5895\times10^6$ | $1.9606\times10^6$ | | $9.725\times10^7$ |
| VP-3 | 5 | Soil | | 2050 | 0 | | | 0.52 | 0.52 | | | $3.772\times10^6$ | $3.772\times10^6$ | | 0 |
| VP-4 | 6 | Concrete | | 2350 | 0 | | | 2.556 | 2.556 | | | $2.51\times10^6$ | $2.51\times10^6$ | | 0 |
| | 7 | 입조쇄석 | | 1980 | 6.2 | | | 0.5146 | 0.5146 | | | $1.8\times10^6$ | $1.8\times10^6$ | | $4.109\times10^7$ |
| | 8 | Loam | | 1090 | 52 | | | 0.456 | 0.456 | | | $2.531\times10^6$ | $2.531\times10^6$ | | $1.9\times10^8$ |
| | 9 | 점토 1 | | 820 | 82 | | | 0.6694 | 0.6694 | | | $2.69\times10^6$ | $2.69\times10^6$ | | $2.25\times10^8$ |
| | 10 | 점토 2 | | 1400 | 50 | | | 2.276 | 2.276 | | | $3.192\times10^6$ | $3.192\times10^6$ | | $2.34\times10^8$ |
| | 11 | 쇄석 2 | | 1500 | 2 | | | 0.548 | 0.548 | | | $1.163\times10^6$ | $1.163\times10^6$ | | $1.004\times10^7$ |
| | 12 | 모래 | | 1600 | 15 | | | 2.0585 | 2.0585 | | | $1.891\times10^6$ | $1.891\times10^6$ | | $8.03\times10^7$ |
| | 13 | 단열재 A | | 40 | 0 | | | 0.03485 | 0.03485 | | | 21000 | 21000 | | 0 |
| | 14 | 단열재 B | | 36 | 0 | | | 0.02674 | 0.02674 | | | 25300 | 25300 | | 0 |
| VP-5 | 15 | 아스팔트 | 138 | 2210 | 0 | 0.86 | 0.86 | 1.4848 | 1.4848 | 28 | 28 | $1.873\times10^6$ | $1.873\times10^6$ | 0 | 0 |
| | 16 | 자갈 | 156 | 2499 | 2.1 | 1.85 | 1.85 | 3.194 | 3.194 | 29 | 29 | $1.940\times10^6$ | $1.940\times10^6$ | 470 | $1.478\times10^7$ |
| | 17 | 자갈 | 151 | 2419 | 2.8 | 2.0 | 2.0 | 3.453 | 3.453 | 29 | 29 | $1.940\times10^6$ | $1.940\times10^6$ | 610 | $2.267\times10^7$ |
| | 18 | 모래 | 130 | 2082 | 6.5 | 1.65 | 1.65 | 2.849 | 2.849 | 28 | 28 | $1.873\times10^6$ | $1.873\times10^6$ | 1220 | $4.534\times10^7$ |
| | 19 | 점토 | 122 | 1954 | 4.6 | 0.64 | 0.64 | 1.105 | 1.105 | 25 | 25 | $1.673\times10^6$ | $1.673\times10^6$ | 808 | $3.00\times10^7$ |
| VP-6 | 20 | 콘크리트 | 140 | 2243 | 0 | 1.0 | 1.0 | 1.7265 | 1.7265 | 30 | 30 | $2.007\times10^6$ | $2.007\times10^6$ | 0 | 0 |
| | 21 | 자갈 | 140 | 2243 | 10 | 2.3 | 3.4 | 3.971 | 5.870 | 38 | 31 | $2.542\times10^6$ | $2.074\times10^6$ | 2016 | 7.493 |

※ $1\,lb/ft^3 = 16.0185\,kg/m^3$ $1\,Btu/hr \cdot ft \cdot °F = 1.7265\,W/m \cdot K$ $1\,Btu/ft^3 \cdot °F = 66{,}900\,J/m^3 \cdot K$

$1\,Btu/ft^3 = 37{,}167\,J/m^3$

(a) 검증예제 1 (VP-1)

본 예제는 표 3.4.3의 참고문헌 VP-1 예제로 표 3.4.5는 해석에 사용된 기상 Data와 5가지 지층 구성 Case에 대하여 관련문헌의 해석결과와 비교한 것이다.

표 3.4.5. 검증예제 1 해석결과 동결깊이 (Cm)

| Case | 지층구성 | 해석 프로그램 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | FDDP | BERG2 | Neumann |
| A | Homogeneous Gravel | 302.57 | 302.36 | 302.36 |
| B | Homogeneous Silt | 166.68 | 166.42 | 167.33 |
| C | 61 Cm Gravel<br>10 Cm Insulation<br>Gravel Subgrade | 114.99 | 117.65 | |
| D | 61 Cm Gravel<br>10 Cm Insulation<br>Silt Subgrade | 107.73 | 109.12 | |
| E | 61 Cm Silt<br>10 Cm Insulation<br>Silt Subgrade | 104.14 | 104.53 | |

FDDP : Frost Depth Design Program (Improved Modified Berggren 식 사용).

BERG2 : Computer Program from VP-1 Reference.

Neumann : Neumann Exact Solution.

**기상 Data**

연평균 기온 = 4.444 ℃

대기 동결지수 = 1444.4 ℃・Days

동결일 수 = 130 Days

n Factor = 1.0

**Case A**

지층이 Homogeneous Gravel로 구성된 경우로 본 FDDP 프로그램 해석결과는 Neumann의 Exact Solution과 거의 동일한 값을 보여준다. 그림 3.4.24는 본 해석에 사용

한 입력 Data이고 그림 3.4.25는 해석결과 동결심도 그래프이다.

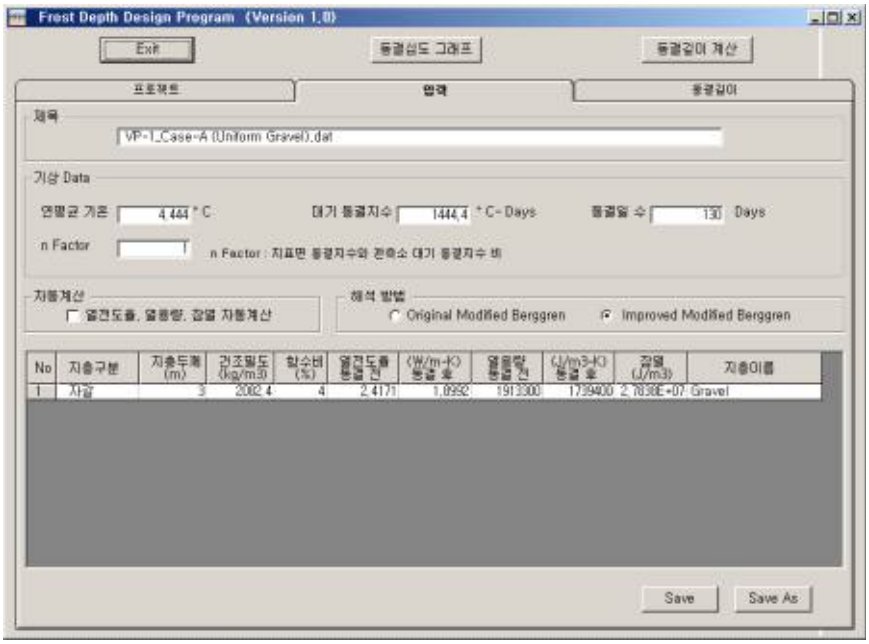



그림 3.4.24 검증예제 1, Case A 입력 Data

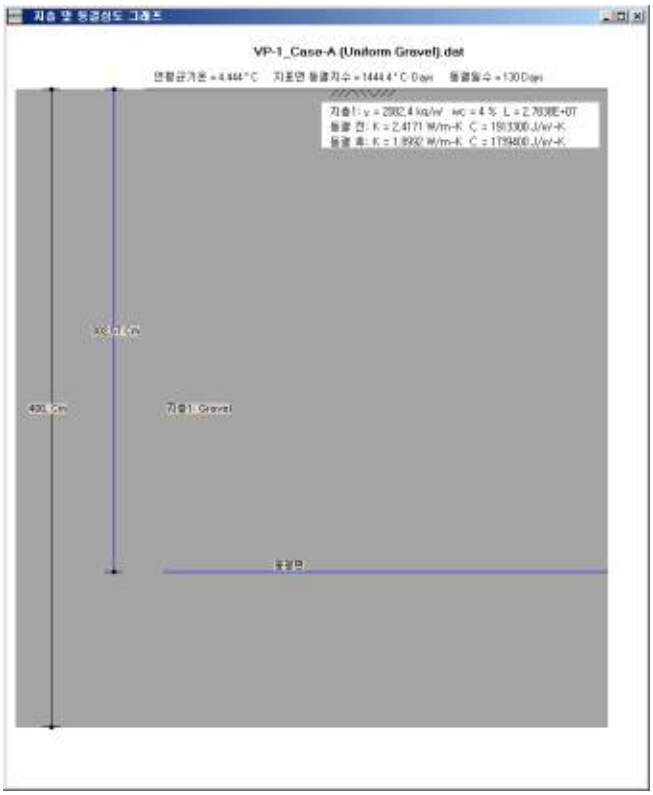



그림 3.4.25 검증예제 1, Case A 동결심도 그래프

## Case B

지층이 Homogeneous Silt로 구성된 경우로 본 FDDP 프로그램 해석결과는 Neumann의 Exact Solution에 근사한 값을 보여준다. 그림 3.4.26는 본 해석에 사용한 입력 Data이고 그림 3.4.27은 해석결과 동결심도 그래프이다.

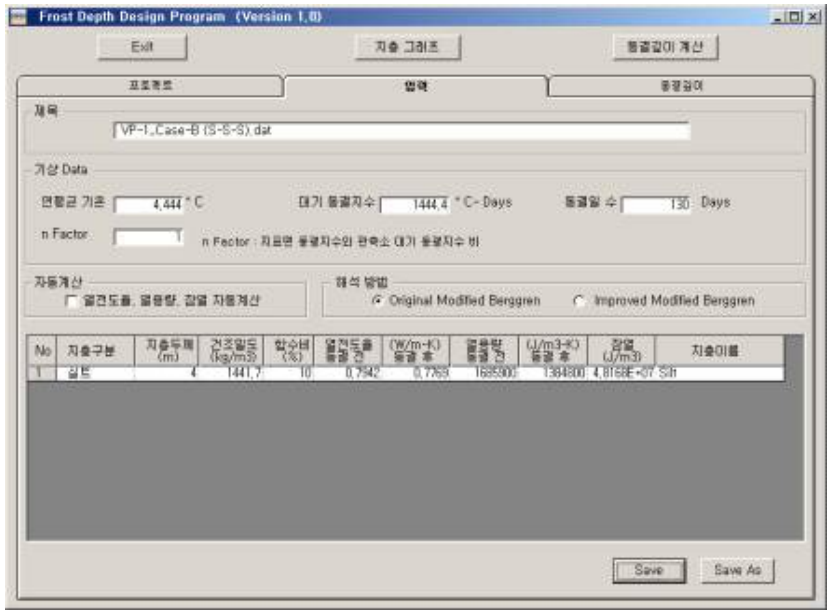



그림 3.4.26 검증예제 1, Case B 입력 Data

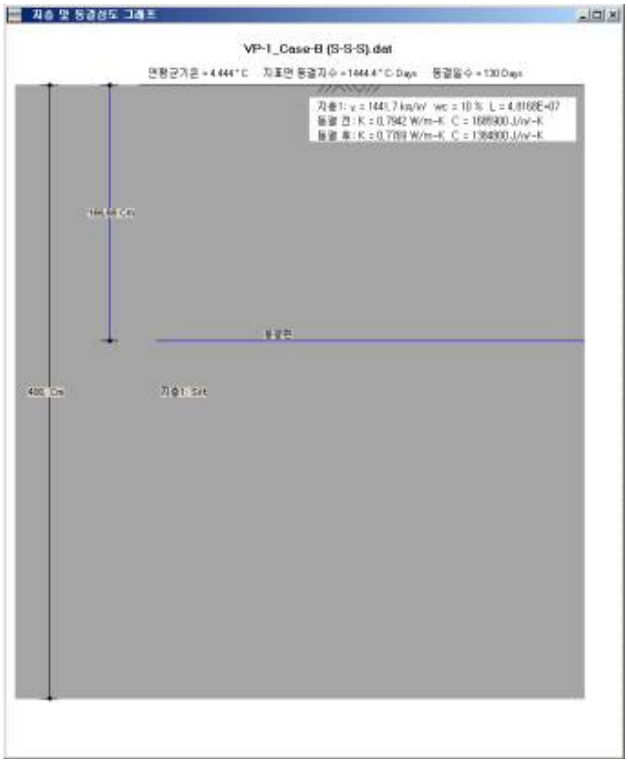



그림 3.4.27 검증예제 1, Case B 동결심도 그래프

Case C

다층 지반으로 상부로부터 61 Cm Gravel, 10 Cm Insulation 그리고 Gravel Subgrade로 구성된 경우로 참고문헌의 BERG2 결과와 근사한 값을 보여준다. 그림 3.4.28은 본 해석에 사용한 입력 Data이고 그림 3.4.29는 해석결과 동결심도 그래프이다.

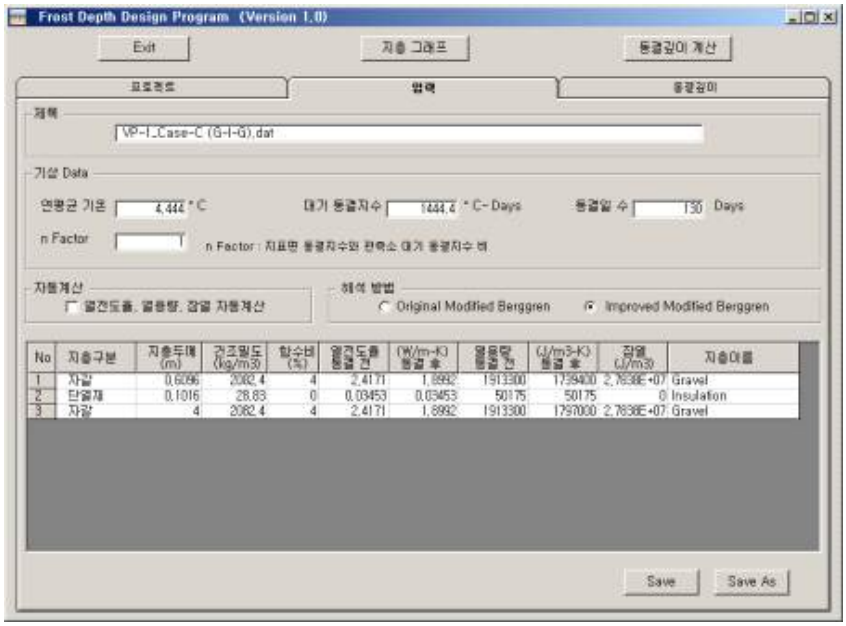



그림 3.4.28 검증예제 1, Case C 입력 Data

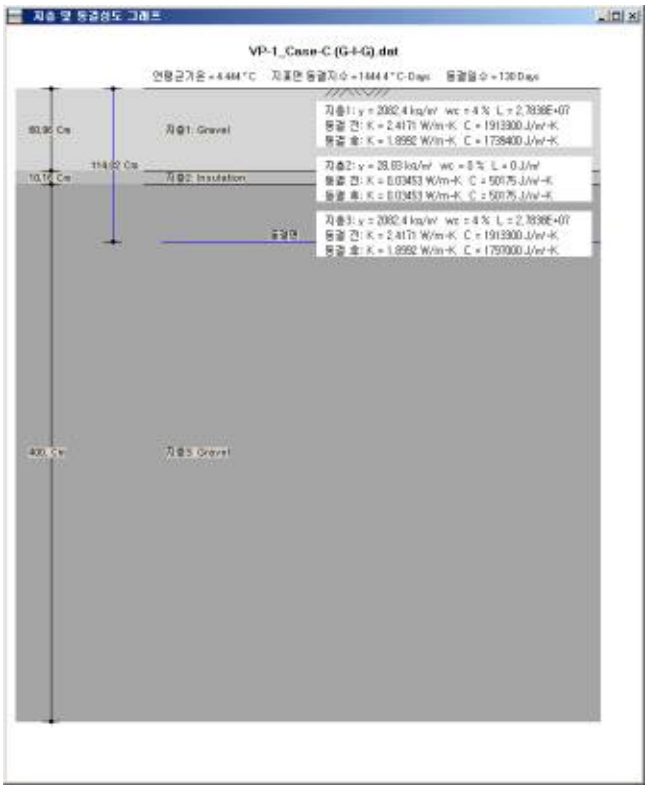



그림 3.4.29 검증예제 1, Case C 동결심도 그래프

## Case D

다층 지반으로 상부로부터 51 Cm Gravel, 10 Cm Insulation 그리고 Silt Subgrade로 구성된 경우로 참고문헌의 BERG2 결과와 근사한 값을 보여준다. 그림 3.4.30은 본 해석에 사용한 입력 Data이고 그림 3.4.31은 해석결과 동결심도 그래프이다.

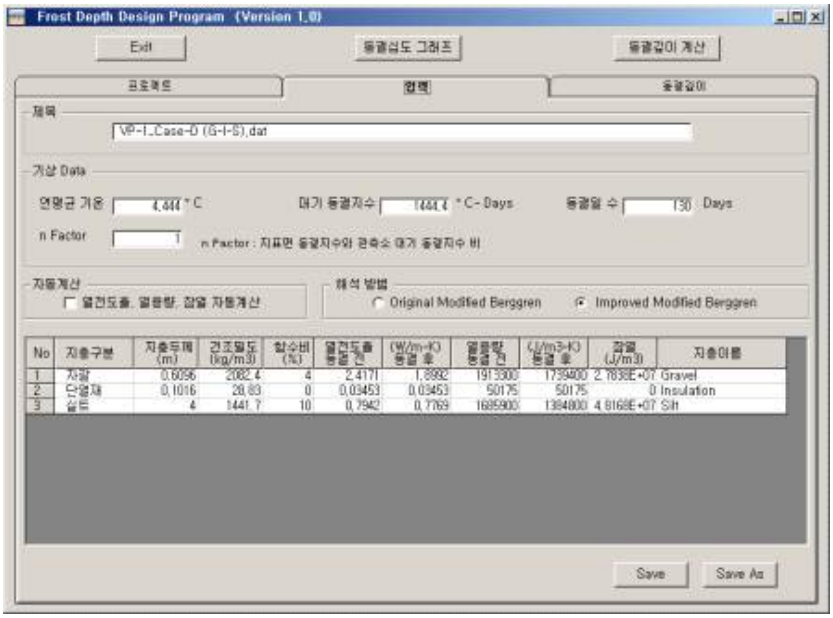



그림 3.4.30 검증예제 1, Case D 입력 Data

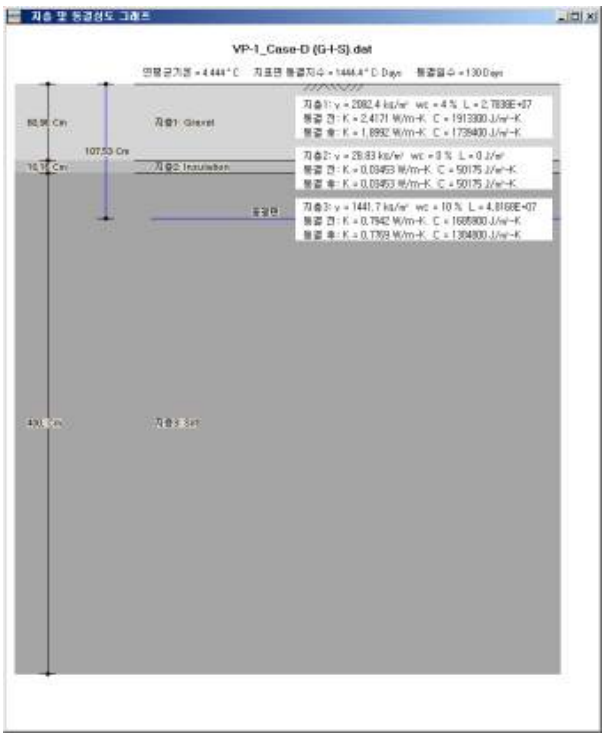



그림 3.4.31 검증예제 1, Case D 동결심도 그래프

## Case E

다층 지반으로 상부로부터 61 Cm Silt, 10 Cm Insulation 그리고 Silt Subgrade로 구성된 경우로 참고문헌의 BERG2 결과와 근사한 값을 보여준다. 그림 3.4.32는 본 해석에 사용한 입력 Data이고 그림 3.4.33은 해석결과 동결심도 그래프이다.

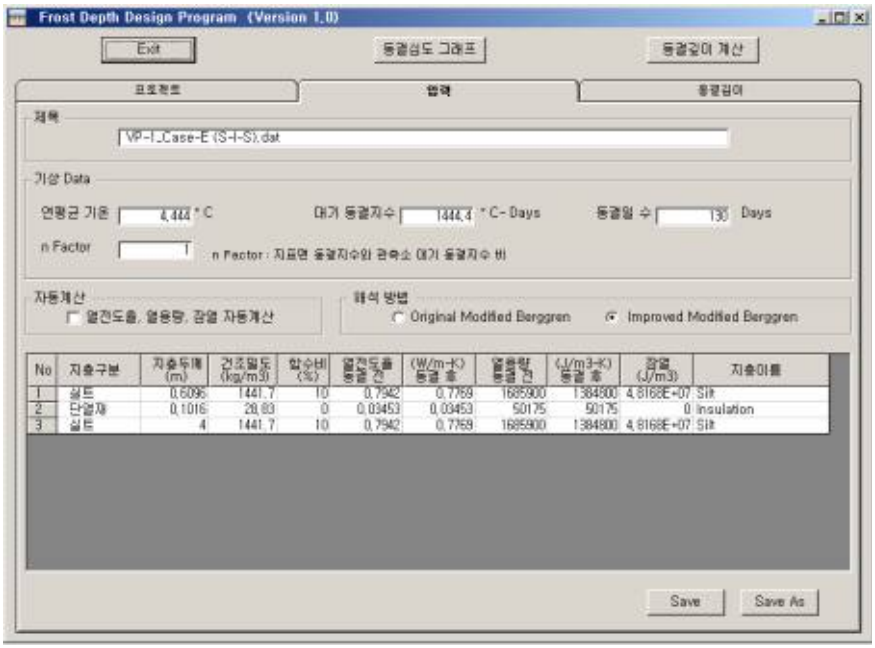



그림 3.4.32 검증예제 1, Case E 입력 Data

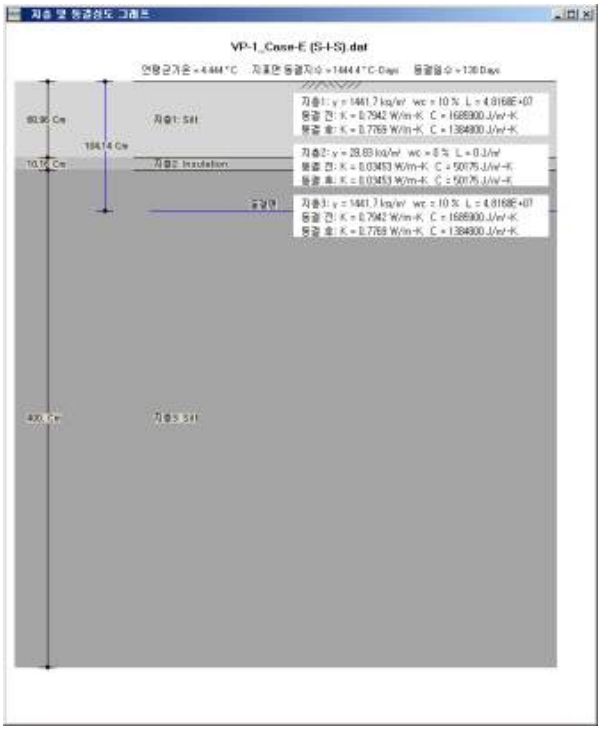



그림 3.4.33 검증예제 1, Case E 동결심도 그래프

(b) 검증예제 2 (VP-2)

본 예제는 표 3.4.3의 참고문헌 VP-2 예제로 단층의 Homogeneous Saturated Sand로 구성되어 있고 표 3.4.6은 해석에 사용된 기상 Data와 관련문헌의 해석결과와 비교한 것이다.

표 3.4.6 검증예제 2 해석결과 동결깊이 (Cm)

| 지층구성 | 해석 프로그램 | |
|---|---|---|
| | FDDP | Neumann |
| Homogeneous Saturated Sand | 3.329 | 3.4 |

FDDP : Frost Depth Design Program (Improved Modified Berggren 식 사용).

Neumann : Neumann Exact Solution from VP-2 Reference.

**기상 Data**

연평균 기온 = 10 ℃

대기 동결지수 = 2,730 ℃・Days

동결일 수 = 182 Days

n Factor = 1.0

FDDP 해석결과는 VP-2 Reference의 Neumann Exact Solution과 근사한 값을 보여준다. 그림 3.4.34는 본 해석에 사용한 입력 Data이고 그림 3.4.35는 해석결과 동결심도 그래프이다.

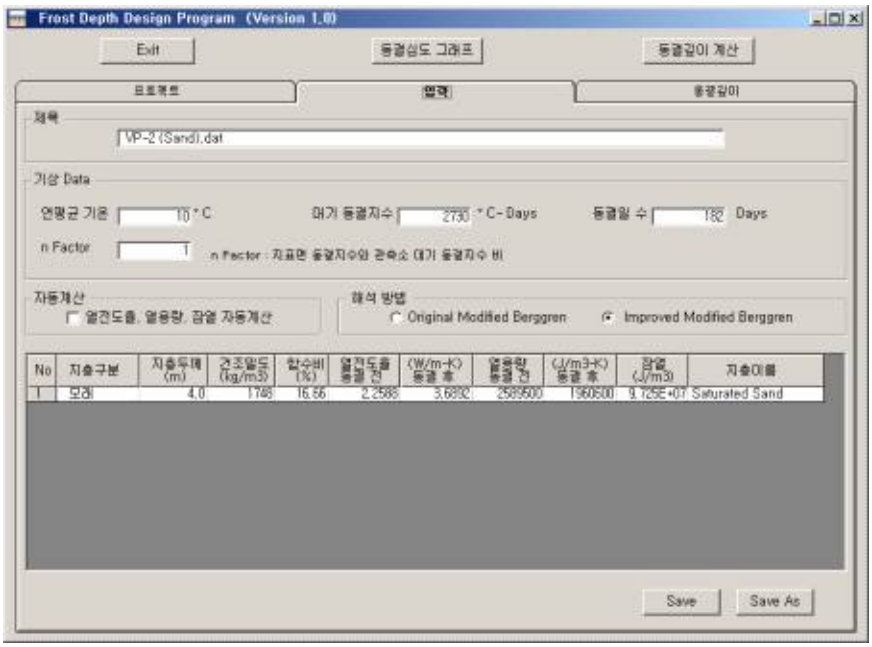



그림 3.4.34 검증예제 2 입력 Data

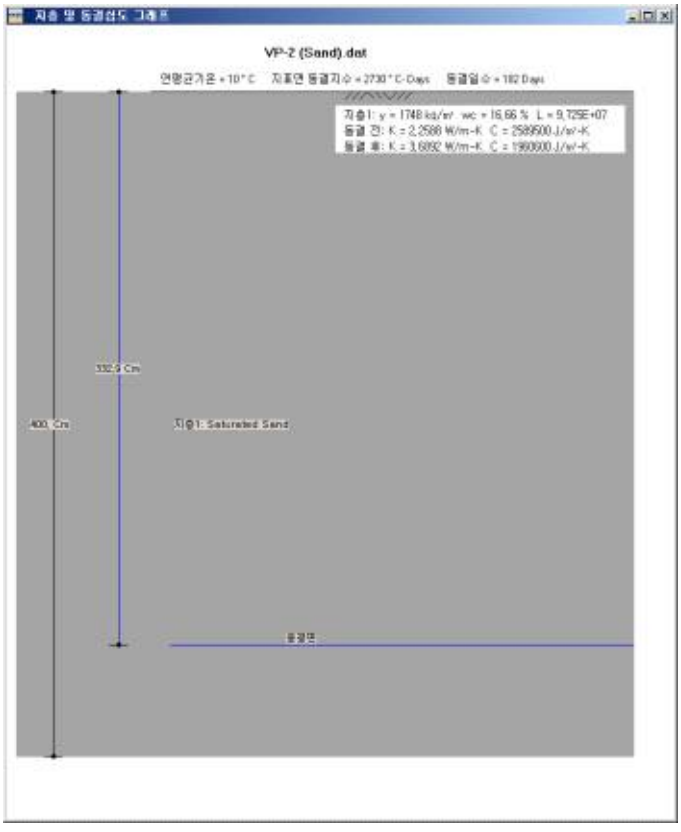



그림 3.4.35 검증예제 2 동결심도 그래프

(c) 검증예제 3 (VP-3)

본 예제는 표 3.4.3 참고문헌 VP-3 예제로 단층의 Homogeneous Dry Soil로 구성되어 있고 표 3.4.7은 해석에 사용된 기상 Data와 관련문헌의 해석결과와 비교한 것이다.

표 3.4.7 검증예제 3 해석결과 동결깊이 (Cm)

| 지층구성 | 해석 프로그램 | |
|---|---|---|
| | FDDP | VP-3 Reference |
| Homogeneous Dry Soil | 67.798 | 68 |

FDDP : Frost Depth Design Program (Improved Modified Berggren 식 사용).

<u>기상 Data</u>

연평균 기온 = 20 ℃

대기 동결지수 = 900 ℃ · Days

동결일 수 = 60 Days

n Factor = 1.0

FDDP 해석결과는 VP-3 Reference Solution에 근사한 값을 보여준다. 그림 3.4.36은 본 해석에 사용한 입력 Data이고 그림 3.4.37은 해석결과 동결심도 그래프이다.

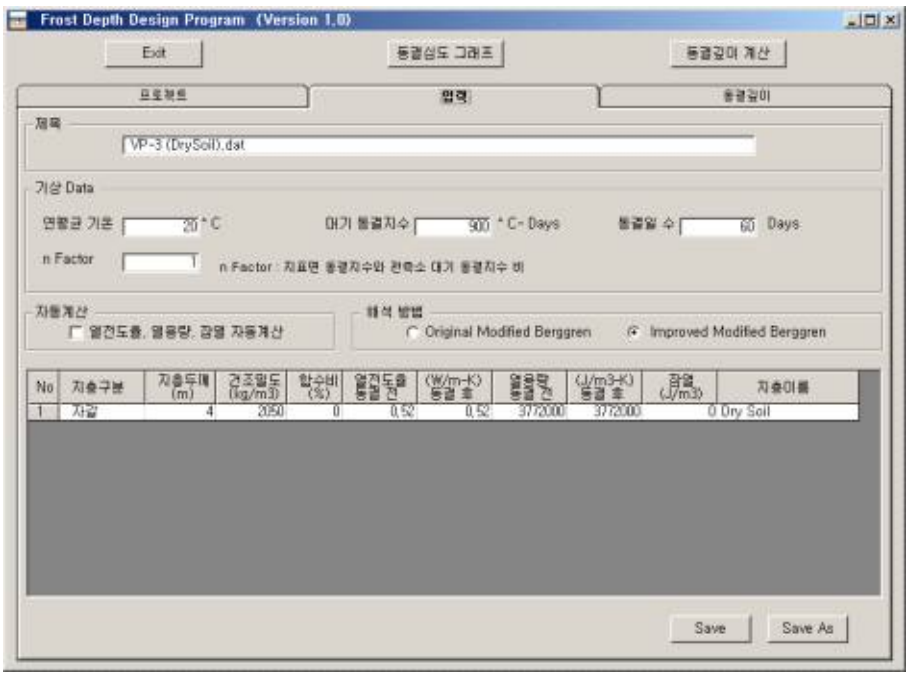



그림 3.4.36 검증예제 3 입력 Data

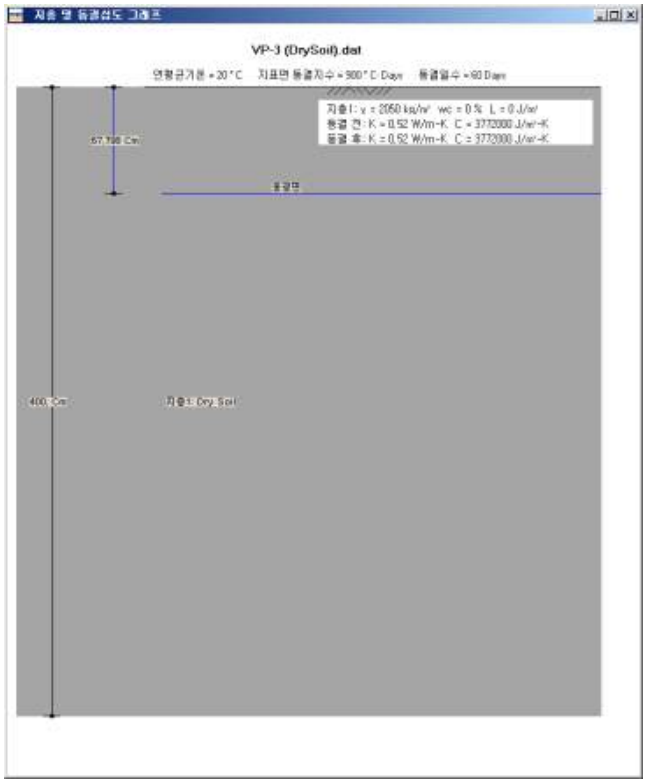



그림 3.4.37 검증예제 3 동결심도 그래프

(d) 검증예제 4 (VP-4)

본 예제는 표 3.4.3 참고문헌 VP-4 예제로 표 3.4.8은 해석에 사용된 기상 Data와 3가지 지층 구성 Case에 대하여 관련문헌의 해석결과와 비교한 것이다.

표 3.4.8 검증예제 4 해석결과 동결깊이 (Cm)

| Case | 지층구성 | 해석 프로그램 | |
|---|---|---|---|
| | | FDDP | VP-4 Reference |
| A | 25 Cm 콘크리트 도상<br>10 Cm 모래<br>2.5 Cm 단열재 B<br>5 Cm 모래<br>점토 노상 | 46.175 | 48 |
| B | 25 Cm 콘크리트 도상<br>60 Cm 모래<br>점토 노상 | 99.289 | 83 (*) |
| C | 25 Cm 콘크리트 도상<br>2.5 Cm 단열재 B<br>15 Cm 모래<br>점토 노상 | 35.978 | 60 (**) |

FDDP : Frost Depth Design Program (Improved Modified Berggren 식 사용).

(*) : VP-4 Reference에 도상 재료 물성치가 명시되지 않아 콘크리트 도상으로 가정하였음.

(**) : VP-4 Reference에 도상 및 도상 바로 아래 재료의 물성치가 명시되지 않아 콘크리트 도상과 단열재 B로 가정하였음.

## 기상 Data

연평균 기온 = 6.7 ℃

대기 동결지수 = 563.4 ℃・Days

동결일 수 = 114 Days

n Factor = 1.0

## Case A

다층으로 상부로부터 25 Cm 콘크리트 도상, 10 Cm 모래, 2.5 Cm 단열재 B, 5 Cm 모래 그리고 점토 노상으로 구성된 경우로 참고문헌 결과와 근사한 값을 보여준다. 그림 3.4.38은 본 해석에 사용한 입력 Data이고 그림 3.4.39는 해석결과 동결심도 그래프이다.

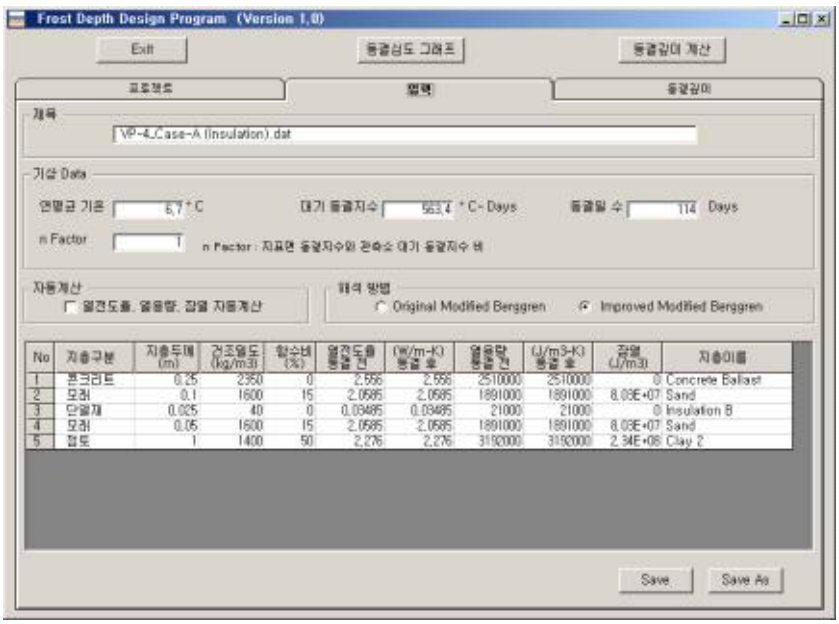



그림 3.4.38 검증예제 4, Case A 입력 Data

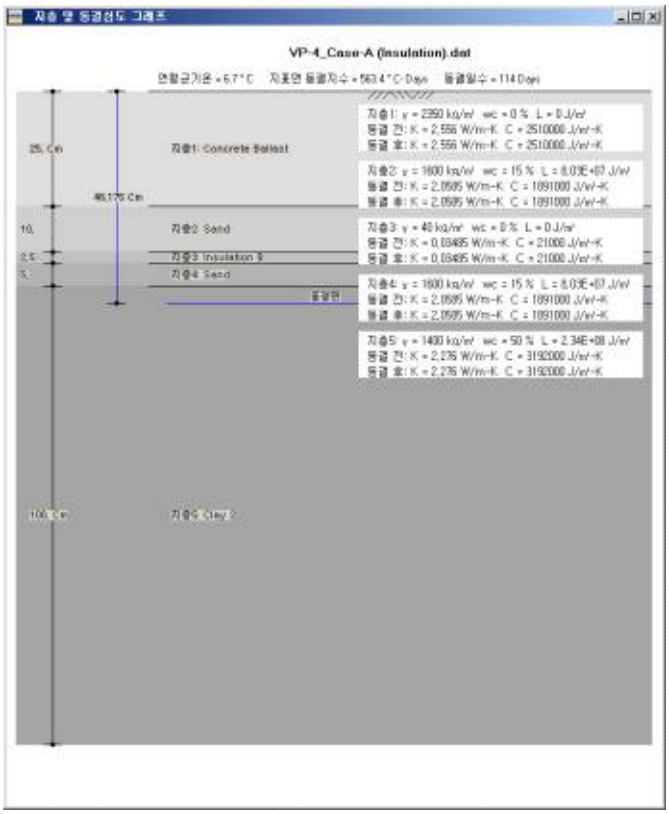



그림 3.4.39 검증예제 4, Case A 동결심도 그래프

## Case B

다층으로 상부로부터 25 Cm 콘크리트 도상, 60 Cm 모래 그리고 점토 노상으로 구성된 경우로 참고문헌 결과와 많은 차이를 보여준다. 본 해석은 도상의 재료 물성치가 문헌에 명시되어 있지 않아 콘크리트 도상으로 가정하였다. 그림 3.4.40은 본 해석에 사용한 입력 Data이고 그림 3.4.41은 해석결과 동결심도 그래프이다.

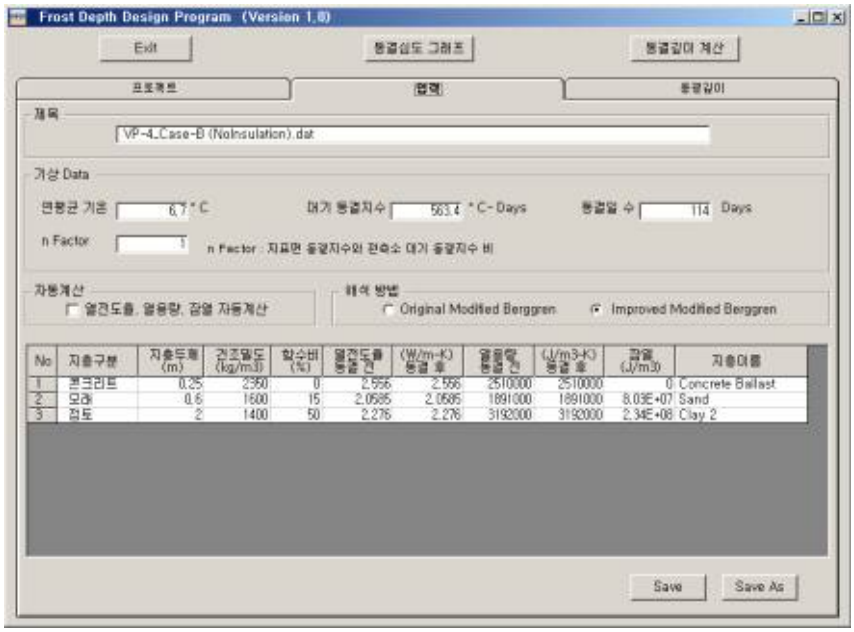



그림 3.4.40 검증예제 4, Case B 입력 Data

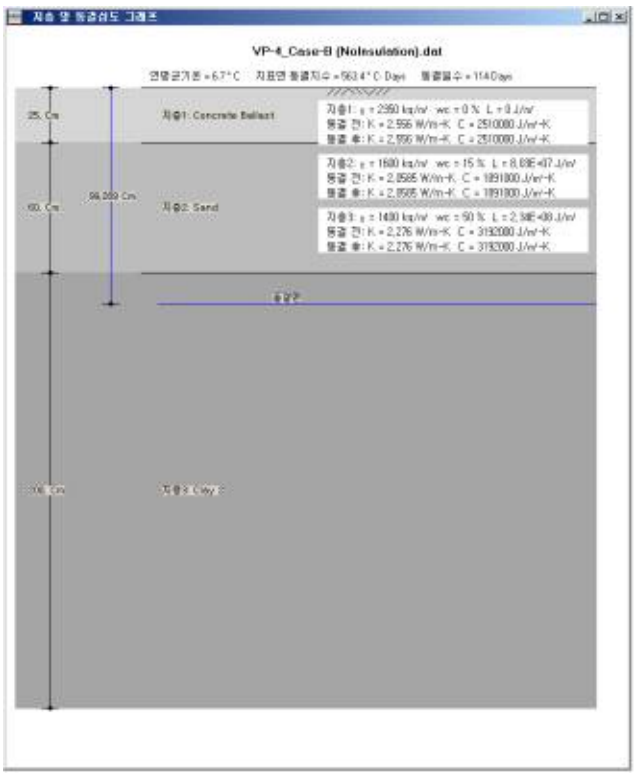



그림 3.4.41 검증예제 4, Case B 동결심도 그래프

## Case C

다층으로 상부로부터 25 Cm 콘크리트 도상, 2.5 Cm 단열재, 15 Cm 모래 그리고 점토 노상으로 구성된 경우로 참고문헌 결과와 많은 차이를 보여준다. 본 해석은 도상 및 도

상 바로 아래의 재료 물성치가 문헌에 명시되어 있지 않아 콘크리트 도상과 단열재 B로 가정하였다. 그림 3.4.42는 본 해석에 사용한 입력 Data이고 그림 3.4.43은 해석결과 동결심도 그래프이다.

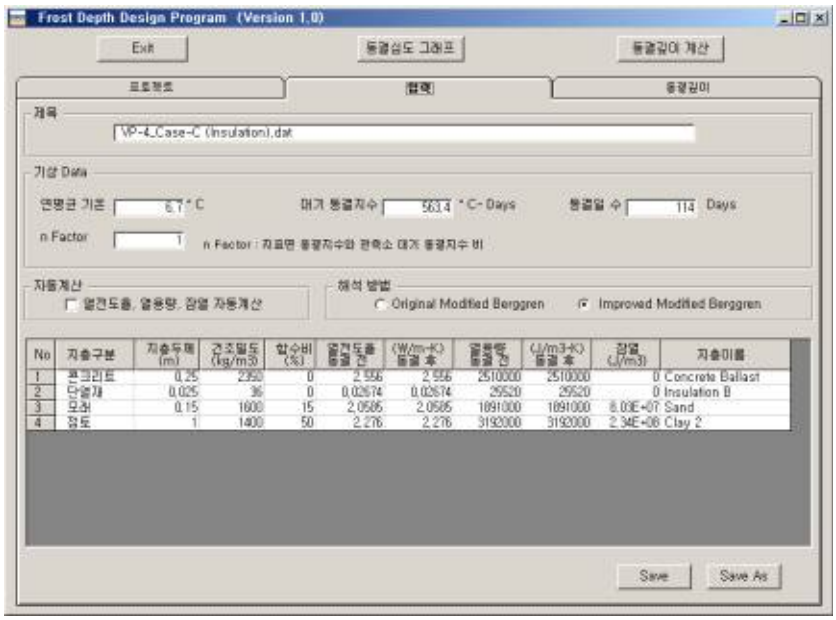



그림 3.4.42 검증예제 4, Case C 입력 Data

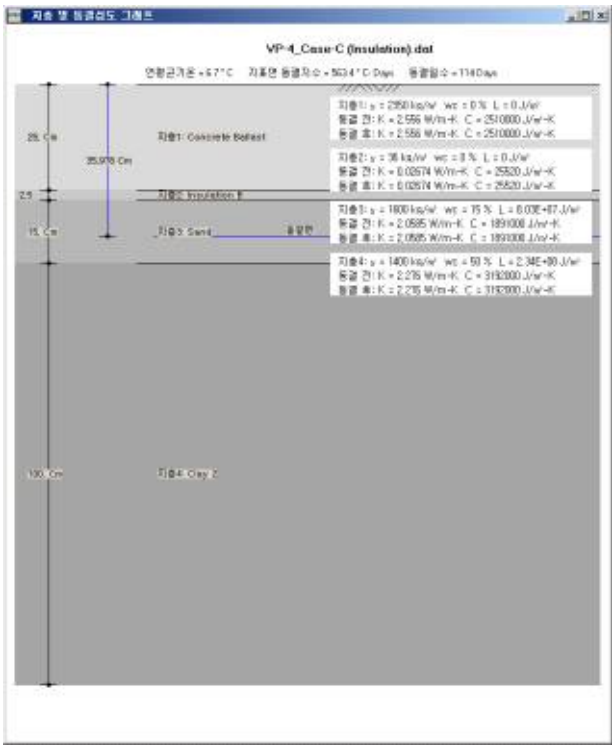



그림 3.4.43 검증예제 4, Case C 동결심도 그래프

(e) 검증예제 5 (VP-5)

본 예제는 영구동토에서 융해깊이를 구하는 문제로 FDAP 해석결과는 FDDP 해석결과에 비교하여 대략 25% 정도 큰 값을 보여준다 (표 3.4.9 참조).

표 3.4.9 검증예제 5 해석결과 융해깊이 (Cm)

| 지층구성 | 해석 프로그램 | | |
|---|---|---|---|
| | FDDP | VP-5 Reference | FDAP |
| 12 Cm 콘크리트 포장<br>49 Cm 자갈<br>91 Cm 자갈<br>30 Cm 모래<br>점토 노상 | 190.97 | 195.07 | 239.06 |

FDDP : Frost Depth Design Program (Original Modified Berggren 식 사용).

FDAP : Frost Depth Analysis Program (SMAP-T2 Solver 사용).

<u>기상 Data</u>

연평균 기온 = -11.11 ℃

대기 융해지수 = 433.33 ℃・Days

융해일 수 = 105 Days

n Factor = 2.0

FDDP 해석결과는 VP-5 Reference Solution에 근사한 값을 보여준다. 그림 그림 3.4.44는 본 해석에 사용한 입력 Data이고 그림 3.4.45는 해석결과 동결심도 그래프이다.

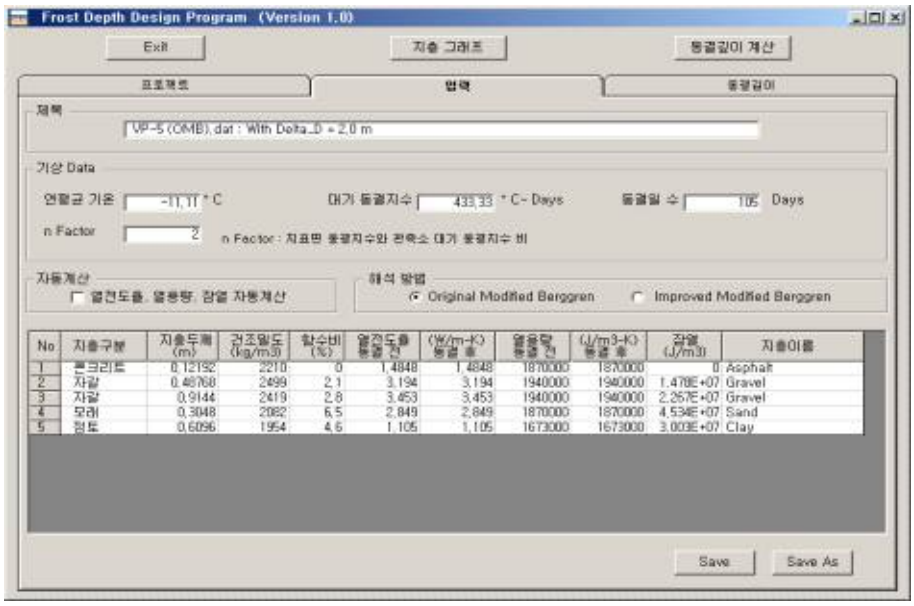



그림 3.4.44 검증예제 5 입력 Data

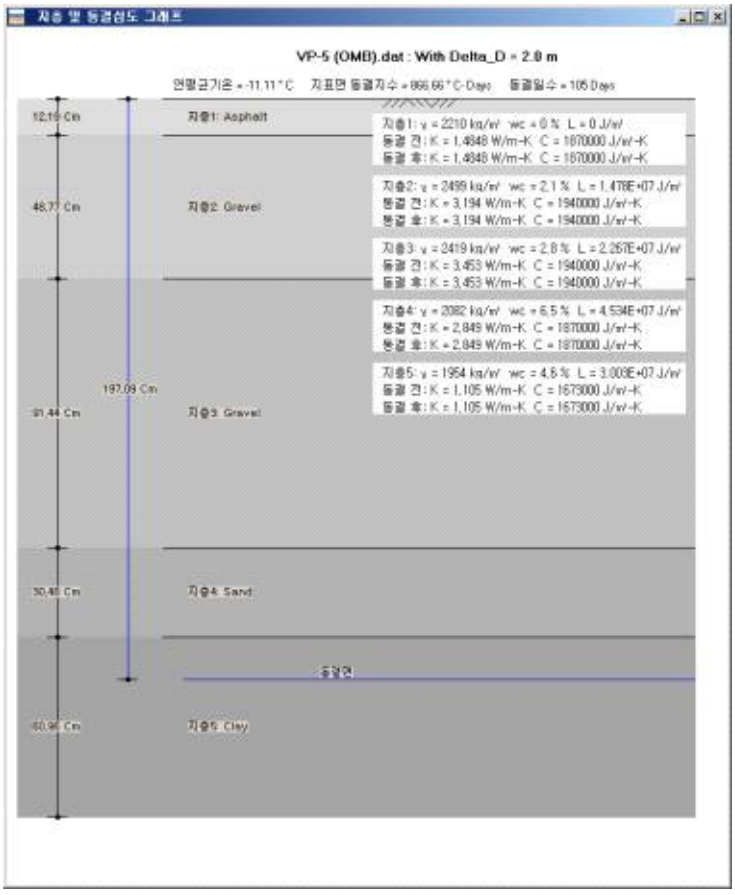



그림 3.4.45 검증예제 5 동결심도 그래프

### (f) 검증예제 6 (VP-6)

FDAP 해석결과는 FDDP 해석결과에 비교하여

Case A (Homogeneous Gravel)의 경우 3% 작은 값,

Case B (15 Cm 콘크리트 포장 자갈 노상)의 경우 47% 큰 값,

Case C (10 Cm 콘크리트 포장 자갈 노상)의 경우 28% 큰 값,

Case D (Homogeneous Concrete)의 경우 0.2% 정도 큰 값을 보여준다 (표 24 참조).

표 3.4.10 검증예제 6 해석결과 동결깊이 (Cm)

| Case | 지층구성 | 해석 프로그램 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | FDDP | ModBerg | FDAP |
| A | Homogeneous Gravel | 56.75 | 56.64 | 55.30 |
| B | 15 Cm 콘크리트 포장 자갈 노상 | 17.176 | 26.67 | 25.33 |
| C | 10 Cm 콘크리트 포장 자갈 노상 | 26.294 | 34.04 | 33.59 |
| D | Homogeneous Concrete | 39.12 | (*) | 39.21 |

FDDP : Frost Depth Design Program (Improved Modified Berggren 식 사용).

ModBerg : 동결깊이 해석 프로그램 (VP-6 Reference 참조).

(*) : Homogeneous Concrete 사용시 해석이 수행 안됨.

FDAP : Frost Depth Analysis Program (SMAP-T2 Solver 사용).

<u>기상 Data</u>

연평균 기온 = 13.1 ℃

대기 동결지수 = 112 ℃ · Days

동결일 수 = 57 Days

n Factor = 0.8

<u>Case A</u>

지층이 Homogeneous Gravel로 구성된 경우로 본 FDDP 프로그램 해석결과는 Modberg 해석결과와 거의 동일한 값을 보여준다. 그림 3.4.46은 본 해석에 사용한 입력 Data이고 그림 3.4.47은 해석결과 동결심도 그래프이다.

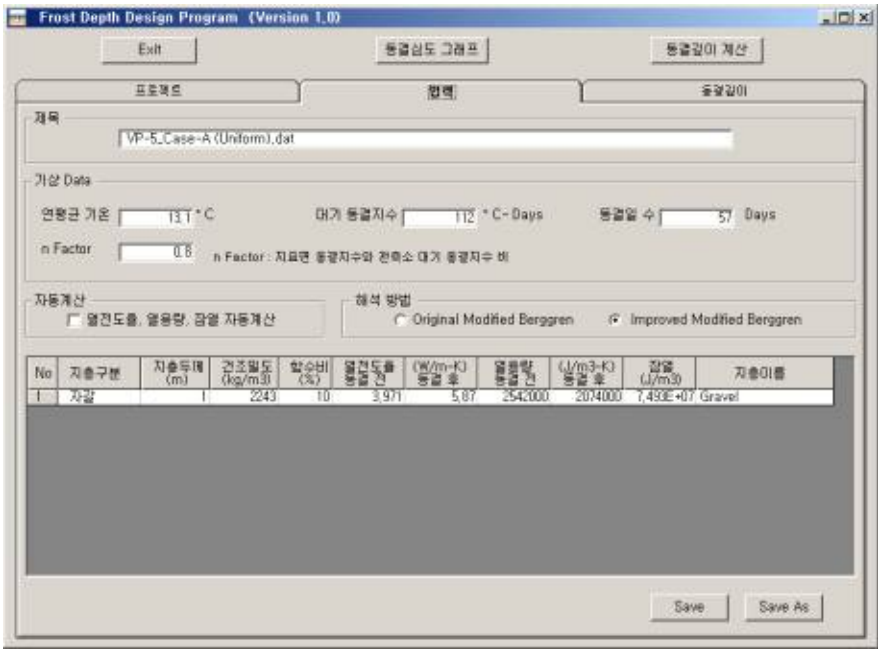



그림 3.4.46 검증예제 6, Case A 입력 Data

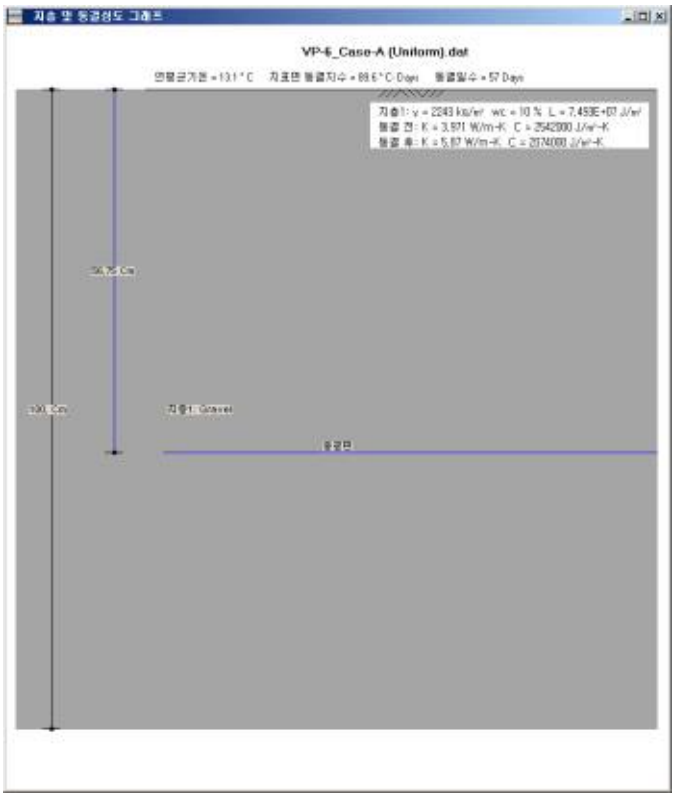



그림 3.4.47 검증예제 6, Case A 동결심도 그래프

## Case B

복층 지반으로 상부 15 Cm 콘크리트 포장과 자갈 노상으로 구성된 경우로 해석결과는

약 36% 차이를 보여준다. 그림 3.4.48은 본 해석에 사용한 입력 Data이고 그림 3.4.49는 해석결과 동결심도 그래프이다.

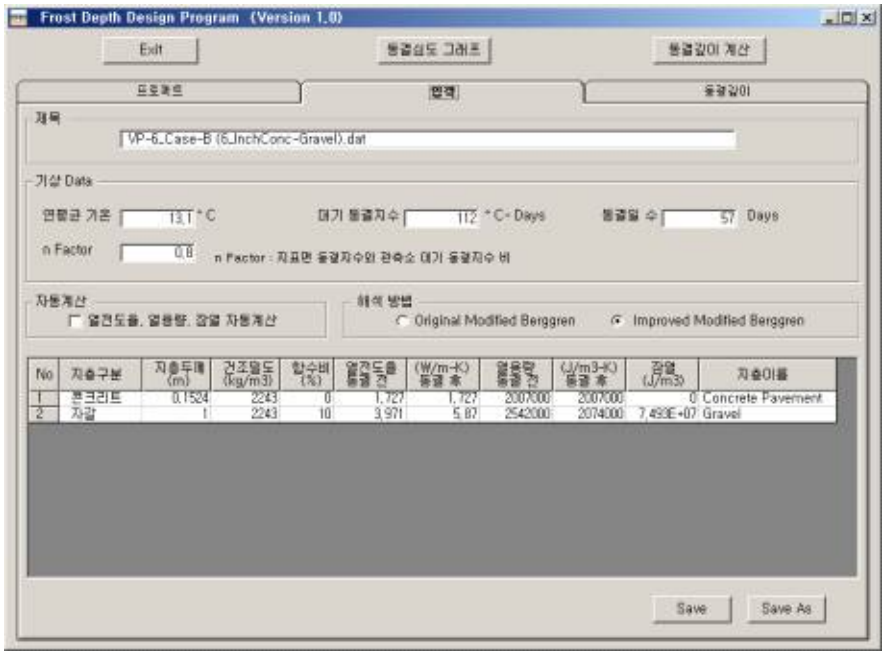



그림 3.4.48 검증예제 6, Case B 입력 Data

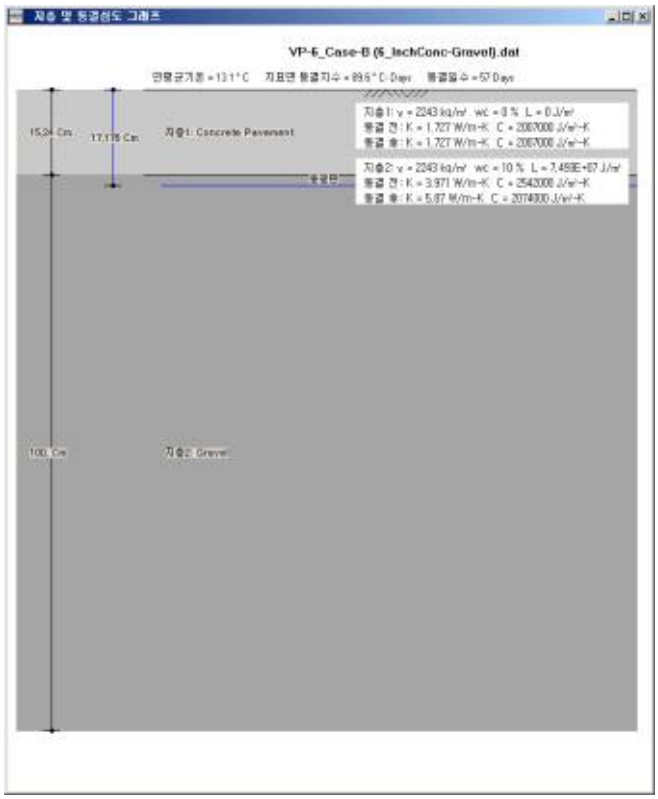



그림 3.4.49 검증예제 6, Case B 동결심도 그래프

Case C

복층 지반으로 상부 10 Cm 콘크리트 포장과 자갈 노상으로 구성된 경우로 해석결과는 약 23% 차이를 보여준다. 그림 3.4.50은 본 해석에 사용한 입력 Data이고 그림 3.4.51은 해석결과 동결심도 그래프이다.

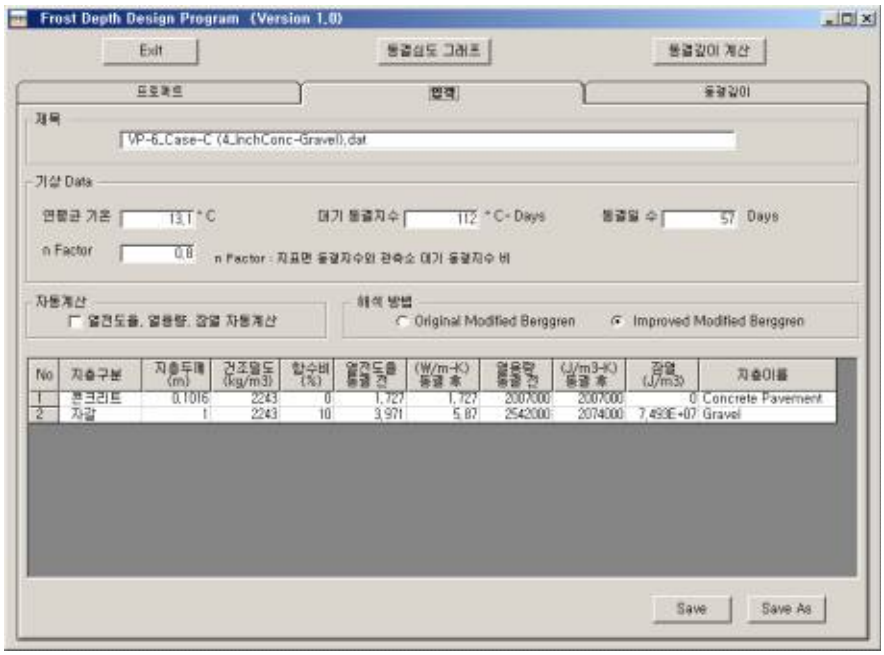



그림 3.4.50 검증예제 6, Case C 입력 Data

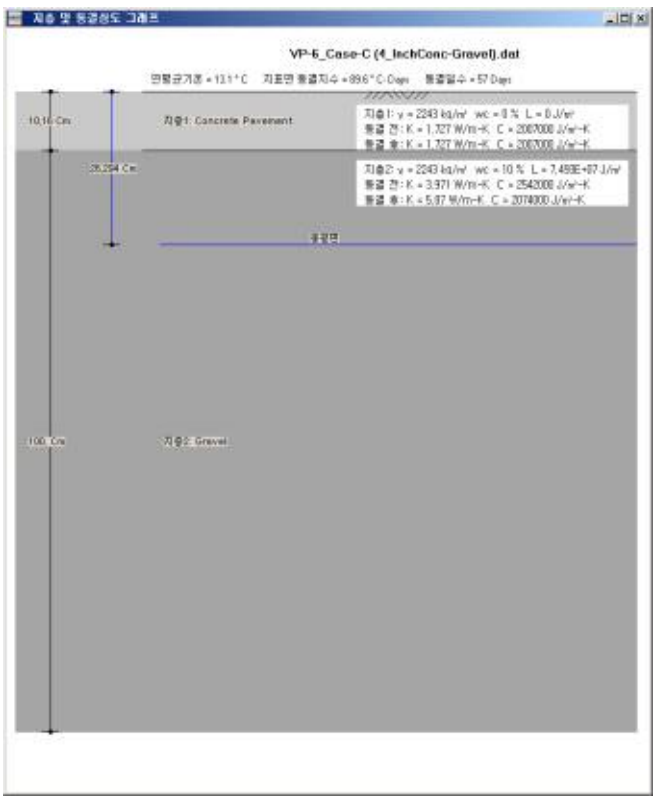



그림 3.4.51 검증예제 6, Case C 동결심도 그래프

## Case D

지층이 Homogeneous Concrete로 구성된 경우로 ModBerg 해석은 수행되지 않아 FDDP 해석만 수행하였다. 그림 3.4.52는 본 해석에 사용한 입력 Data이고 그림 3.4.53은 해석결과 동결심도 그래프이다.

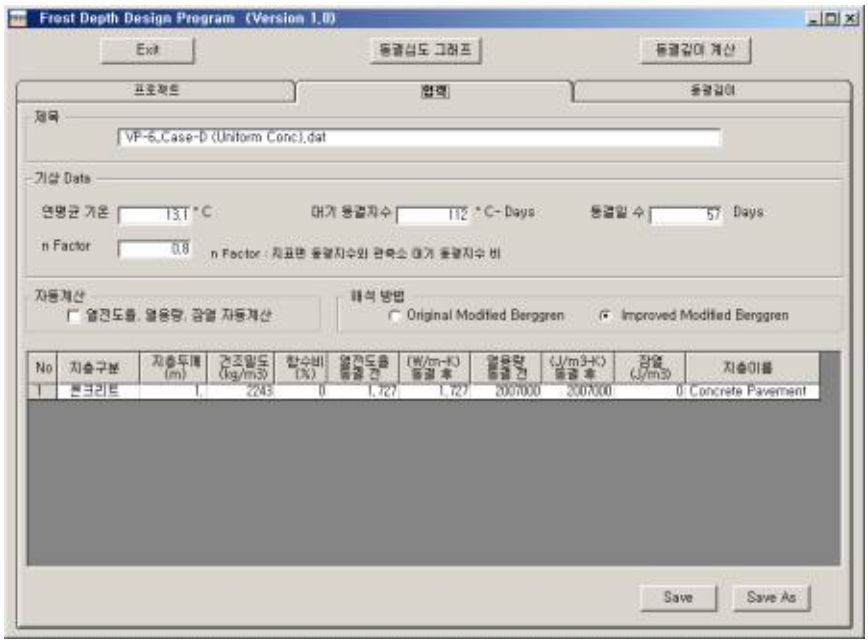



그림 3.4.52 검증예제 6, Case D 입력 Data

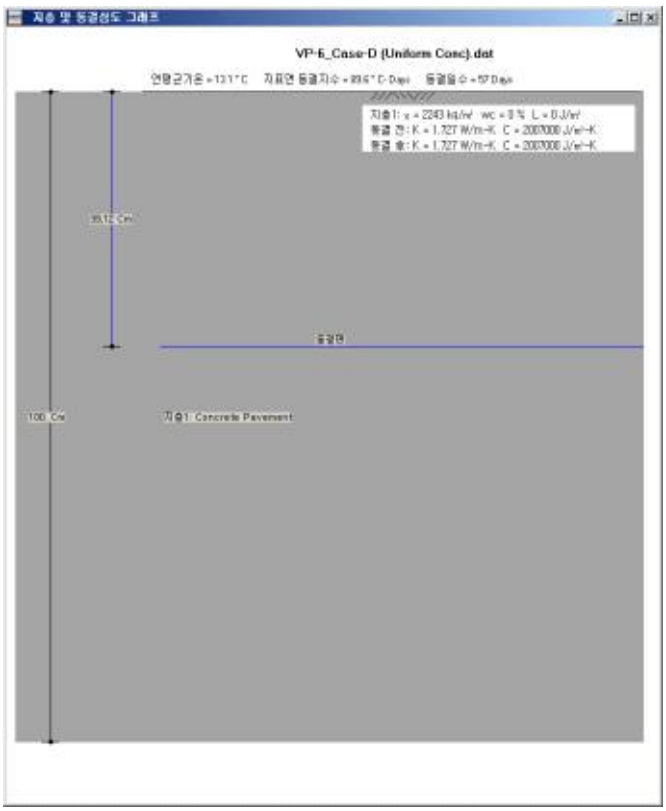



그림 3.4.53 검증예제 6, Case D 동결심도 그래프

라. 동결깊이 해석 프로그램

(1)이론

본 Section에서는 철도구조물의 동결깊이 해석시 Solver로 사용된 비선형 열전달 프로그램 SMAP -T2에 대한 이론적 배경을 설명한다. SMAP-T2는 주로 지반동결, 고준위 핵폐기물로부터 열전달, 영구동토, Heat Sink 등과 관련된 문제에서 공학적인 해를 구하는데 사용하여 왔다. SMAP-T2는 특히 동결과 관련된 상전이 (Phase Change) 문제에서 잠열에 의한 급격한 열에너지 변화를 Enthalpy 이력에 기초를 둔 평균 열용량법을 사용하여 효율적으로 계산한다.

(a) 열전도 유한요소식

Transient 열전도는 유한요소의 형상함수를 이용하여 다음과 같이 선형 미분방정식으로 표현할 수 있다. (Zienkiewicz, 1971)

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\} \tag{3.4.37}$$

여기서

$[C]$ : Heat capacity matrix

$[K]$ : Conductivity matrix

$\{Q\}$ : Heat flux input vector

$\{T\}$ : Temperature vector

$\{\dot{T}\}$ : Temperature rate vector

온도와 열흐름 (Heat flux)이 시간 t 와 $t+\Delta t$ 사이에서 선형으로 변화한다고 가정하고, 시간 $t+\Delta t$ 에서 에너지 평형방정식을 세우면 다음과 같은 Two-time level recurrence 식을 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{1}{\Delta t}[C] + \theta[K]\right)\{T_{t+\Delta t}\} = \left(\frac{1}{\Delta t}[C] - (1-\theta)[K]\right)\{T_t\} + (1-\theta)\{Q_t\} + \theta\{Q_{t+\Delta t}\} \tag{3.4.38}$$

여기서

$\theta$ = 0 Euler scheme

= 1/2 Crank-Nicolson scheme

= 2/3 Galerkin scheme

= 1 Backward difference scheme

$\theta$ 값에 따른 각 방법의 안정 및 정확성은 Zienkiewicz (1971)와 Donea (1974)의 연구논문을 참조하기 바란다.

Lees (1966)는 식 3.4.39와 같이 Three-time level recurrence 식을 제안하였고, Comini, et al. (1974)와 Hsu, et al. (1981)는 이 방법을 상전이 (Phase change) 열전도 유한요소식에 적용하여 만족스런 해를 구하였다.

$$\left(\frac{1}{2\Delta t}[C]+\frac{1}{3}[K]\right)\{T_{t+\Delta t}\} = -\frac{1}{3}[K]\{T_t\} + \left(\frac{1}{2\Delta t}[C]-\frac{1}{3}[K]\right)\{T_{t-\Delta t}\}+\{Q_t\} \tag{3.4.39}$$

Three-time level recurrence 식 3.4.39의 장점은 시간 $t-\Delta t$ 와 $t+\Delta t$의 중간인 t에서 평형방정식을 세우므로 비선형 열전도 문제에서 Iteration을 할 필요가 없으며, 처음 계산이 시작할 때 추가로 필요한 온도벡타 $\{T_t\}$는 식 3.4.38의 Two-time level recurrence 식을 사용하여 구할 수 있다.

(b) 상전이 모델링

물 또는 포화된 토사가 동결할 때 상전이 (Phase change)에 필요한 잠열 (Latent heat)은 동결온도에서 열용량 (Heat capacity)의 갑작스런 증가로 나타낼 수 있다. 이와 같은 상전이에 따른 수치해석 모델의 갑작스런 열용량 증가를 극복하기 위하여 Comini et al. (1974)는 식 3.4.40과 같이 온도구배 변화에 대한 Enthalpy 구배변화를 바탕으로한 열용량 평균화 방법을 제안하였다. 2차원 문제에서 상전이 시 평균 열용량은 다음과 같이 구해진다.

$$\langle \rho C \rangle_{x,y} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial H}{\partial x} / \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial y} / \frac{\partial T}{\partial y}\right) \tag{3.4.40}$$

여기서, Enthalpy H는 열용량을 온도에 관해 적분한 것이다.

식 3.4.40의 열용량 평균화 방법은 해석시 Time step이 클 경우에는 만족할만한 해석결과를 구하기 어렵다. Kim (1994)은 온도 변화에 대한 Enthalpy 변화의 이력을 바탕으로 한 식 3.4.41과 같은 보다 단순하고 효율적인 열용량 평균화 방법을 제안하였다.

$$\langle \rho C \rangle = \frac{H_t - H_{t-\Delta t}}{T_t - T_{t-\Delta t}} \tag{3.4.41}$$

여기서, $H_t$와 $T_t$는 시간 t 에서 Enthalpy와 온도이고 $H_{t-\Delta t}$와 $T_{t-\Delta t}$는 시간 $t-\Delta t$에서 Enthalpy와 온도를 나타낸다.

(c) 흙의 열특성

흙의 열전도 계산식으로 Johansen (1975), Kersten (1949), 그리고 DeVries (1952) 등이 제안한 준경험식이 있으며 Farouki (1981)에 의하면, 이 들 공식 중에서 Johansen이 제안한 기하평균식 (Geometric mean equation)이 동결 및 미동결 포화토 모두에서 계측값과 잘 일치한다. 따라서 여기서는 Johansen의 열전도 식을 설명한다.

미동결 포화토의 열전도계수 $k_{sat}$는 다음과 같다.

$$k_{sat} = k_s^{(1-n)} k_w^n \tag{3.4.42}$$

여기서

$k_s$ = Effecitive solid thermal conductivity

$k_w$ = Thermal conductivity of water

$n$ = Soil porosity

동결 포화토의 열전도계수 $k_{sat}$는 다음과 같다.

$$k_{sat} = k_s^{(1-n)} k_i^{(n-w_u)} k_w^{w_u} \tag{3.4.43}$$

여기서

$k_i$ = Thermal conductivity of ice

$w_u$ = Unfrozen water content as a fraction of unit soil volume.

$$k_s = k_q^q k_o^{1-q} \tag{3.4.44}$$

여기서

$k_q$ = Thermal conductivity of quartz.

$k_o$ = Thermal conductivity of solids other than quartz.

$q$ = Quartz content as a fraction of the total solids content

열전도계수 (Thermal conductivity)는 간략히 말하자면 열에너지가 주어진 물질을 얼마나 쉽게 통과하는지를 측정하는 값으로 단위는 W/m-℃가 주로 사용된다. 예를 들면 공극비 50%의 실트와 공극비 35%의 모래 그리고 공극비 15%의 Sandstone의 열전도계수 값이 표 3.4.11에 나타나 있다. 석영 (Quartz)의 함유량은 50%로 가정하였다. 이들 값은 Johansen의 경험식을 사용하여 계산하였고 Johansen (1975), Kersten (1949), 등이 실험에서 측정한 값과 잘 일치한다.

표 3.4.11에 계산된 체적열용량 (Volumetric heat capacity)과 체적잠열 (Volumetric latent heat)은 아래 공식으로 계산한다.

미동결 포화토의 체적열용량 $C_u$는 다음과 같다.

$$C_u = \frac{\gamma_d}{\gamma_w}\left(\frac{c_{sg}}{c_{uw}} + w\right)C_w \tag{3.4.45}$$

동결 포화토의 체적열용량 $C_f$는 다음과 같다.

$$C_f = \frac{\gamma_d}{\gamma_w}\left(\frac{c_{sg}}{c_{uw}} + w \cdot G_{wf}\frac{c_{fw}}{c_{uw}}\right)C_w \tag{3.4.46}$$

상전이 시 포화토의 체적잠열 $\lambda$는 다음과 같다.

$$\lambda = \gamma_d L w \tag{3.4.47}$$

여기서

$\gamma_d$ = Dry bulk density (g/㎤)

$\gamma_w$ = Density of water (g/㎤)

$c_{sg}$ = Specific heat of solid grains (cal/g-℃)

$c_{uw}$ = Specific heat of water (cal/g-℃)

$c_{fw}$ = Specific heat of ice (cal/g-℃)

$G_{fw}$ = Specific gravity of ice

w = Water content

$C_w$ = Volumetric heat capacity of water (cal/㎤-℃)

L = Latent heat of water (cal/g)

표 3.4.11의 Dry sandstone 열특성 값은 Somerton (1958)으로부터 구하였다.

표 3.4.11 포화된 토사 및 다공성 암반의 열특성

| Material | Frozen | | Unfrozen | | Latent Heat ($\lambda$) |
|---|---|---|---|---|---|
| | k | C | k | C | |
| Ice-Water | 2.40 | $1.81\times10^6$ | 0.606 | $4.19\times10^6$ | $3.34\times10^8$ |
| Silt (n = 50%) | 3.08 | $1.88\times10^6$ | 1.54 | $3.07\times10^6$ | $1.67\times10^8$ |
| Sand (n = 35%) | 3.30 | $1.90\times10^6$ | 2.04 | $2.73\times10^6$ | $1.17\times10^8$ |
| Saturated Sandstone (n = 15%) | 3.65 | $1.93\times10^6$ | 2.98 | $2.28\times10^6$ | $5.02\times10^7$ |
| Dry Sandstone (n = 20%) | 0.88 | $1.60\times10^6$ | 0.88 | $1.60\times10^6$ | 0 |

Note : n = Porosity

k = Thermal conductivity (W/m - ℃)

C = Volumetric heat capacity ($J/m^3$ - ℃)

$\lambda$ = Volumetric latent heat ($J/m^3$)

(2) 입력

동결깊이 해석 프로그램 GUI는 앞에서 설명한 동결깊이 설계 프로그램 GUI와 동일하며 해석시에는 그림 3.4.54와 같이 입력 창의 해석 방법으로 'Finite Element Analysis'를 선택한다.




그림 3.4.54 동결깊이 해석 프로그램 입력 창

(3) 출력

입력 사항이 완료된 후 '지층 그래프' 버튼의 오른쪽에 위치한 '동결깊이 계산' 버튼을 클릭하면 그림 3.4.55와 같이 '온도 시간 이력 지정' 창에서 하나를 선택할 수 있다.

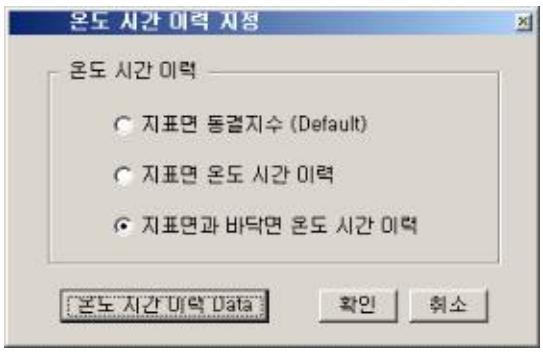



그림 3.4.55 온도 시간 이력 지정 창

'지표면 동결지수 (Dafault)' 선택시

Modified Berggren 법에서와 같이 입력에서 지정한 대기 동결지수, 동결일수 그리고 n Factor로부터 계산된 지표면 온도가 사용된다.

'지표면 온도 시간 이력' 선택시

'온도 시간 이력 지정' 창의 좌측 하단의 '온도 시간 이력 Data' 버튼을 클릭하면, 그림 3.4.56과 같이 텍스트 편집기 메모장에 'Top_Temperature.dat' File이 출력되며, 여기에 있는 Default 값을 수정한 후 저장하여 사용한다.




그림 3.4.56 지표면 온도 시간 이력 지정 File

'지표면과 바닥면 온도 시간 이력' 선택시

'온도 시간 이력 지정' 창의 좌측 하단의 '온도 시간 이력 Data' 버튼을 클릭하면, 그림 3.4.57과 같이 텍스트 편집기 메모장에 'TopBottom_Temperature.dat' File이 출력되며, 여기에 있는 Default 값을 수정한 후 저장하여 사용한다.




그림 3.4.57 지표면과 바닥면 온도 시간 이력 지정 File

다음으로 '온도 시간 이력 지정' 창의 하단 중앙에 있는 '확인' 버튼을 클릭하면 계산 수행 중 창 (그림 3.4.58 참조)이 화면에 나타난다.




그림 3.4.58 FEM 해석 수행중 창

SMAP-T2 FEM Solver를 사용하여 동결깊이가 계산되므로 해석에 소요되는 시간은 지층의 두께와 컴퓨터 사양에 따라 다르며 대부분 문제는 1~6분 정도이다.

동결깊이 화면은 동결깊이 검토 요약으로 사용한 해석방법, 지표면 / 바닥면 온도 시간 이력 File, 동결일수, 연평균기온 그리고 계산된 동결깊이를 포함한다.

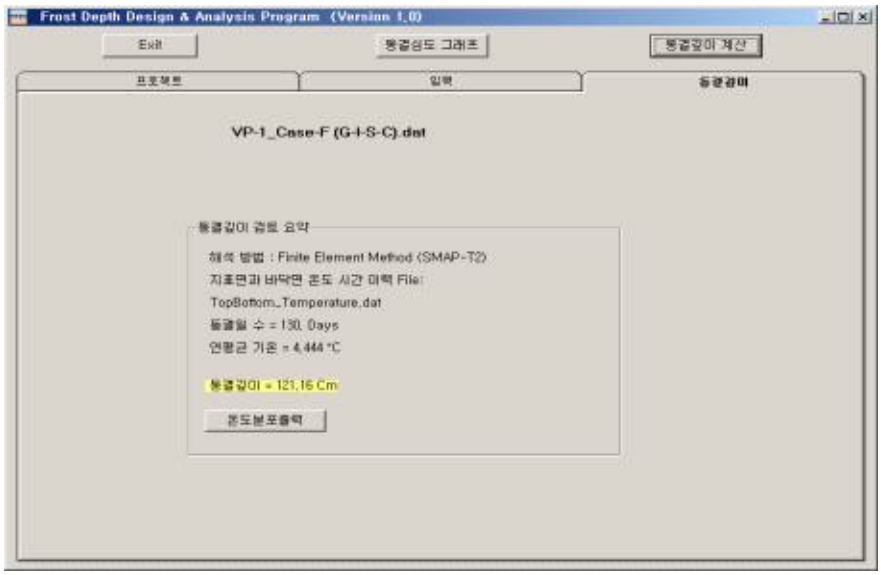



그림 3.4.59 계산 후 동결깊이 창

동결깊이 검토 요약의 하단에 있는 '온도분포출력' 버튼을 클릭하면 그림 3.4.60과 같이 'PLTXY Plotting List' 창이 나오며, Item을 선택한 후 'OK' 버튼을 클릭하면, 그림 3.4.61과 같은 온도 분포 Profile이 출력된다.




그림 3.4.60 PLTXY Plotting List 창

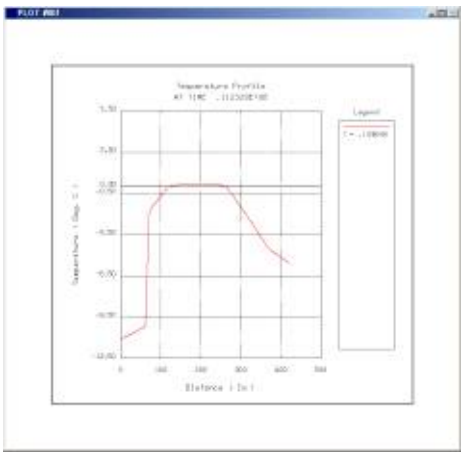


그림 3.4.61 온도 분포 Profile

동결심도 그래프

동결깊이 계산이 완료되면 입력 Tab 바로 위에 '동결심도 그래프' 버튼이 생성되며 이 버튼을 클릭하면 그림 3.4.62와 같이 지층 Profile 상에 동결심도가 출력된다.

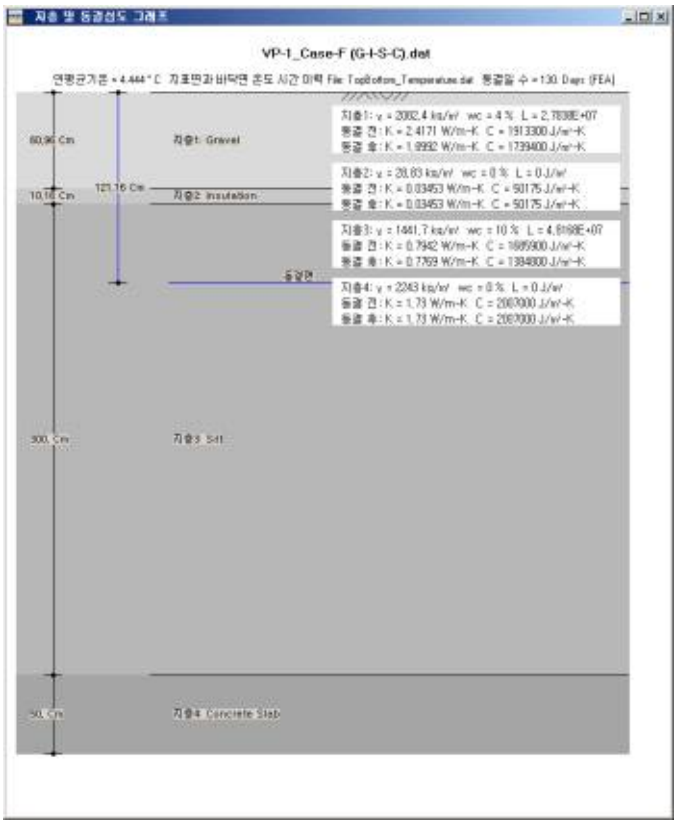



그림 3.4.62 동결심도 그래프

(4) 검증예제

동결깊이 해석 프로그램 (**F**rost **D**epth **A**nalysis **P**rogram)을 검증하기 위하여 제 2장의 표 3.4.3에 열거한 참고문헌의 예제를 수행하여 비교하였다.

(a) 검증예제 1 (VP-1)

FDAP 해석결과는 모든 Case에서 유한 차분법을 사용한 MUT1D 해석결과에 근사한 값을 보여준다 (표 3.4.12참조).

Modified Berggren 식을 기반으로 하는 FDDP, BERG2 해석결과와 비교해 보면, 단층의 Homogeneous한 지반의 경우 거의 근사한 값을 보이지만, 단열재를 포함한 다층 지반의 경우 유한요소법 (FDAP)과 유한차분법 (MUT1D) 수치해석 결과가 Modified Berggren 식을 기반으로 하는 해석결과보다 3~25% 정도 작은 값을 보여준다.

표 3.4.12 검증예제 1 해석결과 동결깊이 (Cm)

| Case | 지층구성 | 해석 프로그램 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | FDDP | BERG2 | Neumann | FDAP | MUT1D |
| A | Homogeneous Gravel | 302.57 | 302.36 | 302.36 | 302.48 | 301.14 |
| B | Homogeneous Silt | 166.68 | 166.42 | 167.33 | 165.65 | 167.34 |
| C | 61 Cm Gravel 10 Cm Insulation Gravel Subgrade | 114.99 | 117.65 | | 91.58 | 90.22 |
| D | 61 Cm Gravel 10 Cm Insulation Silt Subgrade | 107.73 | 109.12 | | 103.78 | 102.72 |
| E | 61 Cm Silt 10 Cm Insulation Silt Subgrade | 104.14 | 104.53 | | 94.05 | 94.14 |
| F | 61 Cm Gravel 10 Cm Insulation 300 Cm Silt Subgrade 50 Cm Concrete Slab | | | | 121.16 | |

FDDP : Frost Depth Design Program (Improved Modified Berggren식 사용).

BERG2 : Computer Program from VP-1 Reference.

Neumann : Neumann Exact Solution.

FDAP : Frost Depth Analysis Program (SMAP-T2 Solver 사용).

MUT1D : Finite Difference Program from VP-1 Reference.

Case F는 Case D의 노반이 50Cm 두께의 콘크리트 암거 Slab 위에 성토된 경우로 콘크리트 Slab 표면에 n Factor = 0.5를 가정하여 계산을 수행하였음. 그림 3.4.63은 온도 Profile을 비교한 것으로 Case D에 비교하여 동결심도는 약 14% 정도 큰 값을 보여준다.

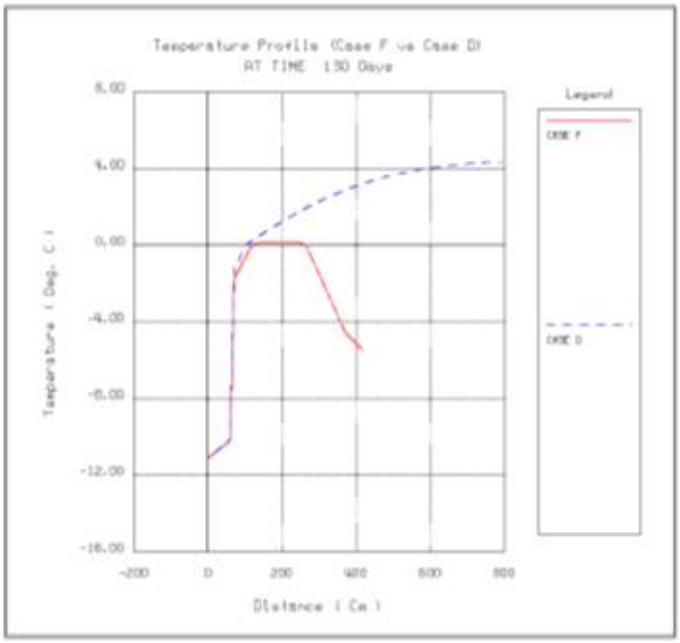



그림 3.4.63 온도 분포 Profile (Case F vs Case D)

(b) 검증예제 2 (VP-2)

본 예제는 단층의 Homogeneous Saturated Sand로 구성된 경우로 FDAP 해석결과는 FDDP 결과와 거의 일치한다 (표 3.4.13 참조).

표 3.4.13 검증예제 2 해석결과 동결깊이 (Cm)

| 지층구성 | 해석 프로그램 | | |
|---|---|---|---|
| | FDDP | Neumann | FDAP |
| Homogeneous Saturated Sand | 3.329 | 3.4 | 3.335 |

FDDP : Frost Depth Design Program (Improved Modified Berggren식 사용).

Neumann : Neumann Exact Solution from VP-2 Reference.

FDAP : Frost Depth Analysis Program (SMAP-T2 Solver 사용).

(c) 검증예제 3 (VP-3)

본 예제는 단층의 Homogeneous Dry Soil로 구성된 경우로 FDAP 해석결과는 FDDP 결과와 거의 일치한다 (표 3.4.14 참조).

표 3.4.14 검증예제 3 해석결과 동결깊이 (Cm)

| 지층구성 | 해석 프로그램 | | |
|---|---|---|---|
| | FDDP | VP-3 Reference | FDAP |
| Homogeneous Dry Soil | 67.798 | 68 | 67.664 |

FDDP : Frost Depth Design Program (Improved Modified Berggren식 사용).

FDAP : Frost Depth Analysis Program (SMAP-T2 Solver 사용).

(d) 검증예제 4 (VP-4)

FDAP 해석결과는 단열재를 사용하지 않는 Case B의 경우 FDDP 결과와 거의 일치하지만 단열재를 사용한 Case A와 Case C의 경우 FDDP 결과에 비교하여 각각 10%와 24%정도 작은 값을 보여준다 (표 3.4.15 참조).

표 3.4.15 검증예제 4 해석결과 동결깊이 (Cm)

| Case | 지층구성 | 해석 프로그램 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | FDDP | VP-4 Reference | FDAP |
| A | 25 Cm 콘크리트 도상<br>10 Cm 모래<br>2.5 Cm 단열재 B<br>5 Cm 모래<br>점토 노상 | 46.175 | 48 | 42.25 |
| B | 25 Cm 콘크리트 도상<br>60 Cm 모래<br>점토 노상 | 99.289 | 83 (*) | 100.44 |
| C | 25 Cm 콘크리트 도상<br>2.5 Cm 단열재 B<br>15 Cm 모래<br>점토 노상 | 35.978 | 60 (**) | 28.84 |

FDDP : Frost Depth Design Program (Improved Modified Berggren 식 사용).

(*) : VP-4 Reference에 도상 재료 물성치가 명시되지 않아 콘크리트 도상으로 가정하였음.

(**) : VP-4 Reference에 도상 및 도상 바로 아래 재료의 물성치가 명시되지 않아 콘크리트 도상과 단열재 B로 가정하였음.

FDAP : Frost Depth Analysis Program (SMAP-T2 Solver 사용).

(e) 검증예제 5 (VP-5)

본 예제는 영구동토에서 융해깊이를 구하는 문제로 FDAP 해석결과는 FDDP 해석결과에 비교하여 대략 8% 정도 작은 값을 보여준다 (표 3.4.16 참조).

표 3.4.16 검증예제 5 해석결과 융해깊이 (Cm)

| 지층구성 | 해석 프로그램 | | |
|---|---|---|---|
| | FDDP | VP-5 Reference | FDAP |
| 12 Cm 콘크리트 포장<br>49 Cm 자갈<br>91 Cm 자갈<br>30 Cm 모래<br>점토 노상 | 190.97 | 195.07 | 176.15 |

FDDP : Frost Depth Design Program (Original Modified Berggren식 사용).

FDAP : Frost Depth Analysis Program (SMAP-T2 Solver 사용).

(f) 검증예제 6 (VP-6)

FDAP 해석결과는 FDDP 해석결과에 비교하여

Case A (Homogeneous Gravel)의 경우 12%,

Case B (15 Cm 콘크리트 포장 자갈 노상)의 경우 5%,

Case C (10 Cm 콘크리트 포장 자갈 노상)의 경우 41%,

Case D (Homogeneous Concrete)의 경우 19% 정도 큰 값을 보여준다(표 3.4.17 참조).

표 3.4.17 검증예제 6 해석결과 동결깊이 (Cm)

| Case | 지층구성 | 해석 프로그램 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | FDDP | ModBerg | FDAP |
| A | Homogeneous Gravel | 56.75 | 56.64 | 64.92 |
| B | 15 Cm 콘크리트 포장 자갈 노상 | 17.176 | 26.67 | 34.38 |
| C | 10 Cm 콘크리트 포장 자갈 노상 | 26.294 | 34.04 | 43.56 |
| D | Homogeneous Concrete | 39.12 | (*) | 47.80 |

FDDP : Frost Depth Design Program (Improved Modified Berggren식 사용).

ModBerg : 동결깊이 해석 프로그램 (VP-6 Reference 참조).

(*) : Homogeneous Concrete 사용시 해석이 수행 안됨.

FDAP : Frost Depth Analysis Program (SMAP-T2 Solver 사용).

## 2. 동결깊이 현장 계측값과 프로그램 해석결과 비교

### 가. 서론

본 장에서는 본 연구를 통하여 개발한 국내 철도현장에 적용할 수 있는 Modified Berggren식을 기반으로 하는 동결깊이 설계 프로그램 (FDDP)과 FEM 수치해석에 기반을 둔 동결깊이 해석 프로그램 (FDAP)을 검증하기 위하여 2011년 11월에 한국건설기술연구원에서 제천, 태백, 연천 지역에 설치한 실험용 콘크리트 및 자갈도상에 대하여 Methylene Blue 동결심도계의 측정값과 비교 분석하였다.

보다 정밀한 동결깊이 해석 프로그램 검증은 제 9절 2에서 각 지층에 온도 센서를 설치하여 2012년 11월에 철원 백마고지역에서 수행한 현장 실험과 비교 분석하였다.

### 나. 현장실험 해석

본 장에서는 2011년 11월에 한국건설기술연구원에서 제천, 태백, 연천 지역에 설치한 실험용 콘크리트 및 자갈도상에 대하여 Methylene Blue 동결심도계의 측정값과 동결깊이 프로그램에 의한 해석결과를 비교분석하였다.

그림 3.4.64는 동결심도 계측이 수행된 지역의 기상 Data로 2011년 11월 1일부터 2013년 3월 31일까지 대기 온도 이력 그래프이고 그림 3.4.65는 2011년 12월 1일부터 2012년 2월 29일까지 누적된 ℃ · Day 그래프로 동결기간은 약 84일로 추정되며 동결지수는 제천에서 420, 태백에서 427, 그리고 연천에서 336 ℃ · Day를 보여준다.

표 3.4.18은 콘크리트 및 자갈도상을 포함한 현장 실험 노반의 열특성 관련 물성치이다. 동결 전·후의 열전도율과 열용량 그리고 잠열은 실내 실험으로부터 추정한 기본 물성치(건조밀도, 함수비, 흙의 종류)를 사용하여 해석 프로그램에 내장된 경험식으로 계산된 값이다.

#### (1) 제천 동결심도 해석

제천 지역의 실험용 동결심도계 설치 현장의 노반은 건조밀도가 1400 $kg/m^3$, 함수비가 10% 정도인 SW 흙으로 추정된다.

콘크리트도상의 동결심도 해석은 그림 3.4.66에 보이는 입력 Data를 사용하여 수행하였고 그림 3.4.67은 해석결과 동결심도 그래프이다.

자갈도상의 동결심도 해석은 그림 3.4.68에 보이는 입력 Data를 사용하여 수행하였고 그림 3.4.69는 해석결과 동결심도 그래프이다.

FDAP 프로그램을 사용한 동결심도는 콘크리트도상에서 95.3 Cm, 자갈도상에서 70.9 Cm로 동결심도는 자갈도상에서 24 Cm 정도 작게 계산되었다.

(2) 태백 동결심도 해석

태백 지역의 실험용 동결심도계 설치 현장의 노반은 건조밀도가 1400 kg/m$^3$, 함수비가 12% 정도인 CL-ML 흙으로 추정된다.

콘크리트도상의 동결심도 해석은 그림 3.4.70에 보이는 입력 Data를 사용하여 수행하였고 그림 3.4.71은 해석결과 동결심도 그래프이다.

자갈도상의 동결심도 해석은 그림 3.4.72에 보이는 입력 Data를 사용하여 수행하였고 그림 3.4.73은 해석결과 동결심도 그래프이다.

FDAP 프로그램을 사용한 동결심도는 콘크리트도상에서 91.4 Cm, 자갈도상에서 70.6 Cm로 동결심도는 자갈도상에서 21 Cm 정도 작게 계산되었다.

(3) 연천 동결심도 해석

연천 지역의 실험용 동결심도계 설치 현장의 노반은 건조밀도가 1250 kg/m$^3$, 함수비가 12% 정도인 CL-ML 흙으로 추정된다.

콘크리트도상의 동결심도 해석은 그림 3.4.74에 보이는 입력 Data를 사용하여 수행하였고 그림 3.4.75는 해석결과 동결심도 그래프이다.

자갈도상의 동결심도 해석은 그림 3.4.76에 보이는 입력 Data를 사용하여 수행하였고 그림 3.4.77은 해석결과 동결심도 그래프이다.

FDAP 프로그램을 사용한 동결심도는 콘크리트도상에서 76.2 Cm, 자갈도상에서 73.5 Cm로 동결심도는 자갈도상에서 3 Cm 정도 작게 계산되었다. 본 실험에 사용한 자갈은 현장에서 채취한 분니가 다수 혼재된 자갈로 건조밀도가 1900 kg/m$^3$ 정도의 큰 값으로 콘크리트에 근사한 열전도율을 가지고 있어 계산된 동결심도의 차이도 작은 것으로 사료된다.

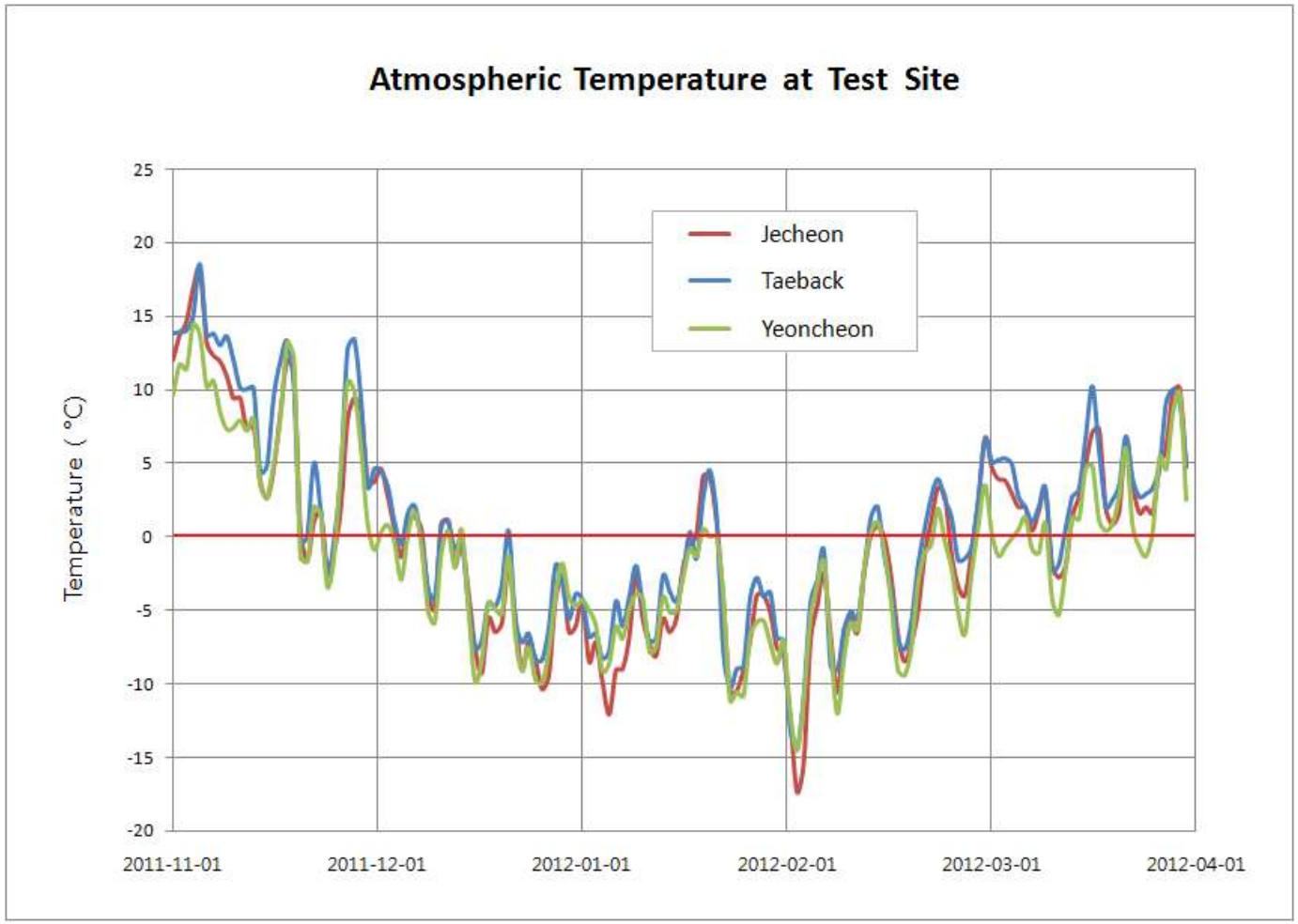



그림 3.4.64 Atmospheric temperature at test site (2011.11.1 ~ 2012.3.31) from KMA

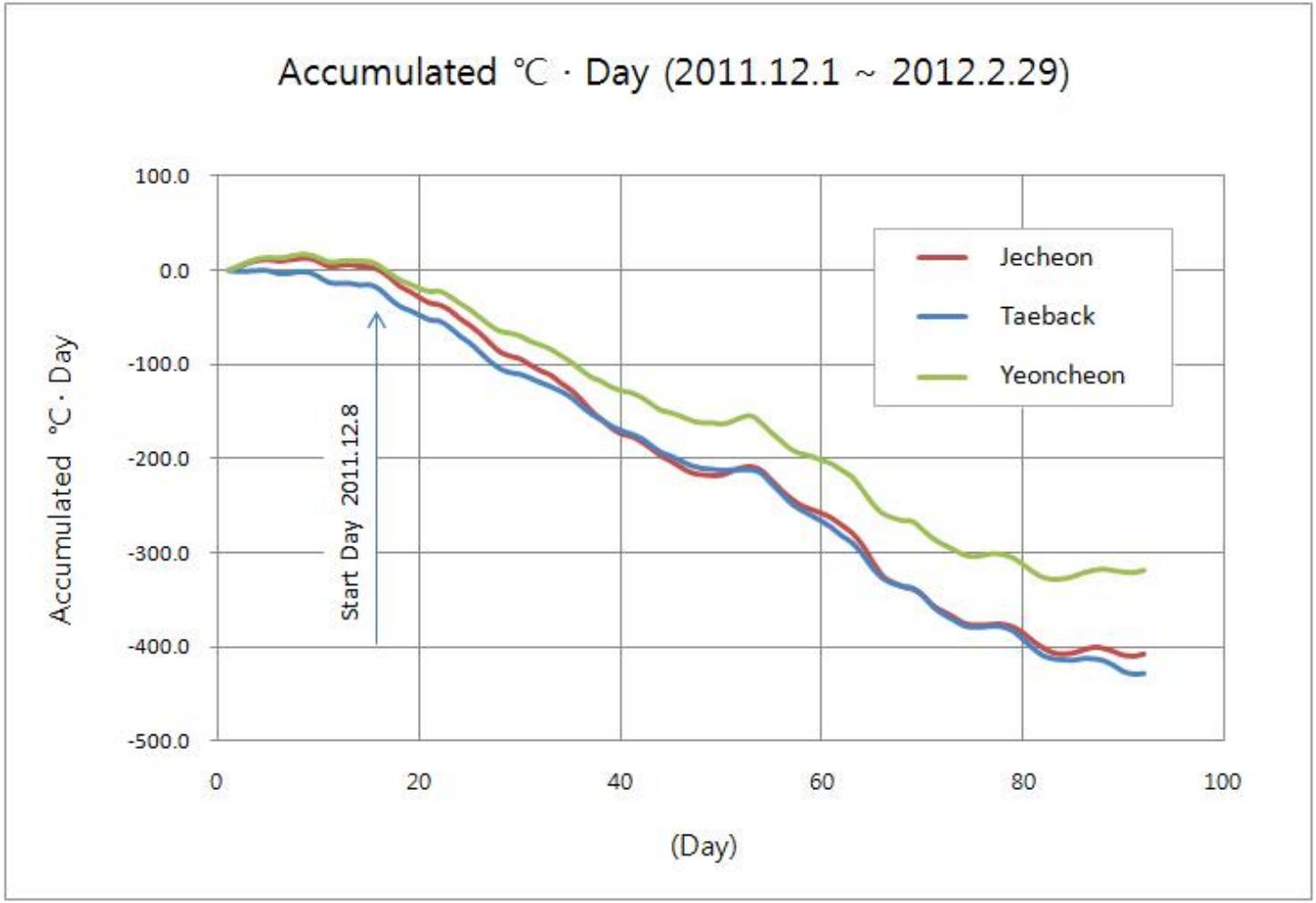



그림 3.4.65 Accumulated ℃ · Day (2011.12.1 ~ 2012.2.29) from KMA

표 3.4.18 Material properties used for numerical analysis of concrete slab and gravel ballast.

| No | Material | $\gamma_d$ | $\omega$ | W/m·K | | J/m³·K | | L | Remark |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | kg/m³ | (%) | $K_u$ | $K_f$ | $C_u$ | $C_f$ | J/m³ | |
| 1 | Concrete | 2243 | 0 | 1.7264 | 1.7264 | 2.007E+06 | 2.007E+06 | 0 | |
| 2 | Gravel | 1500 | 5 | 1.1051 | 0.7165 | 1.378E+06 | 1.222E+06 | 2.506E+07 | |
| 3 | Gravel (*) | 1900 | 5 | 1.9639 | 1.622 | 1.746E+06 | 1.547E+06 | 3.174E+07 | 자갈 (다수 분리 포함) 연천 |
| 4 | Sand (SW) | 1400 | 10 | 1.184 | 1.0188 | 1.579E+06 | 1.286E+06 | 4.678E+07 | Jecheon |
| 5 | Silty Clay (CL-ML) | 1400 | 12 | 0.8301 | 0.8545 | 1.696E+06 | 1.345E+06 | 5.613E+07 | Taeback |
| 6 | Silty Clay (CL-ML) | 1250 | 12 | 0.6691 | 0.6927 | 1.514E+06 | 1.201E+06 | 5.012E+07 | Yeoncheon |

$\gamma_d$ : Dry Density $\omega$ : Water Content K : Thermal Conductivity C : Volumetric Heat Capacity L : Volumetric Latent Heat

$K_u$ and $C_u$ refer to Unfrozen Material $K_f$ and $C_f$ refer to Frozen Material

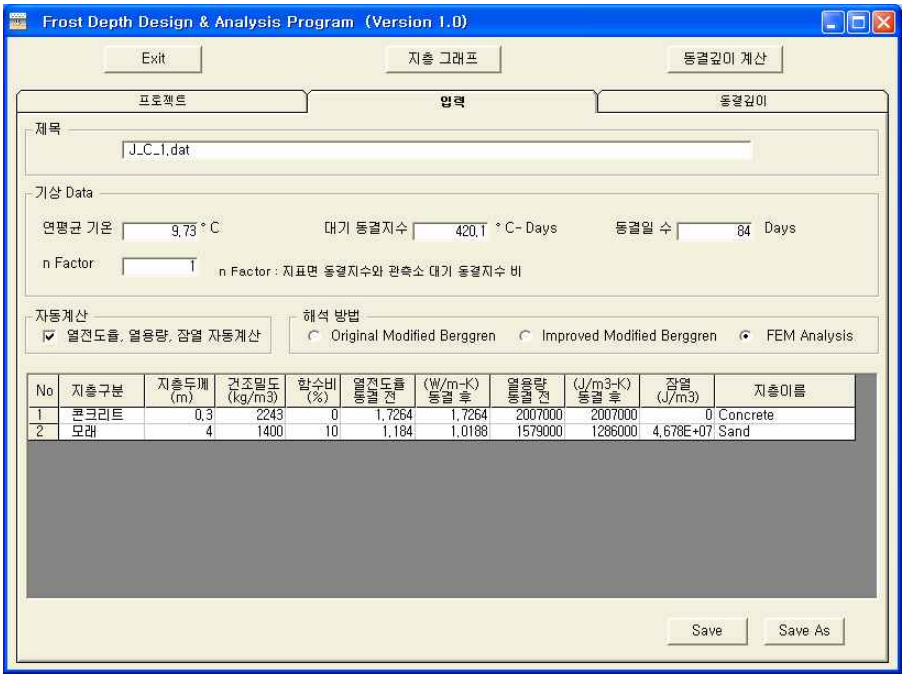



그림 3.4.66 Input data for concrete slab at Jecheon

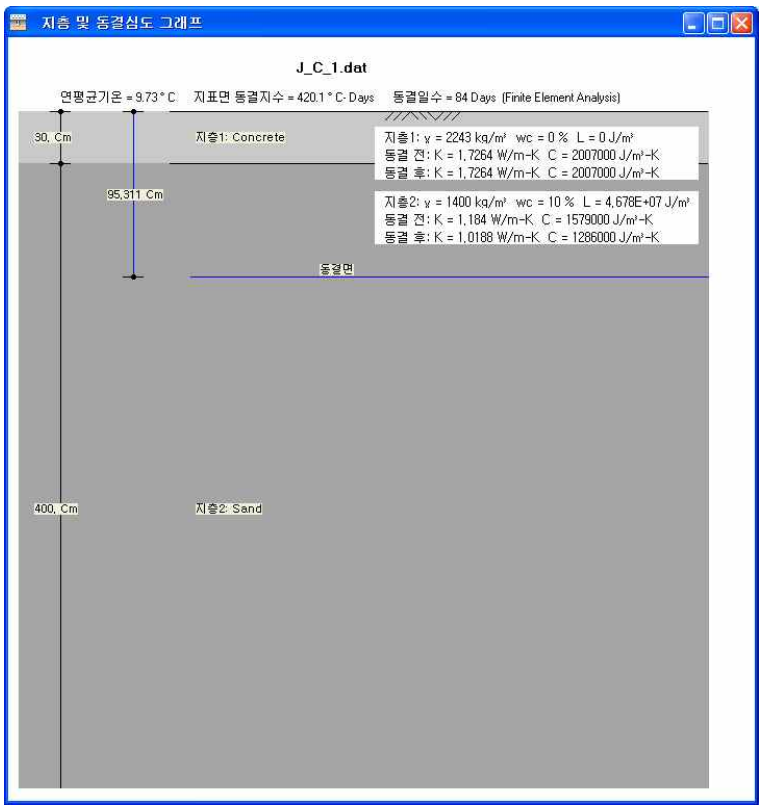



그림 3.4.67 Computed frost depth for concrete slab at Jecheon

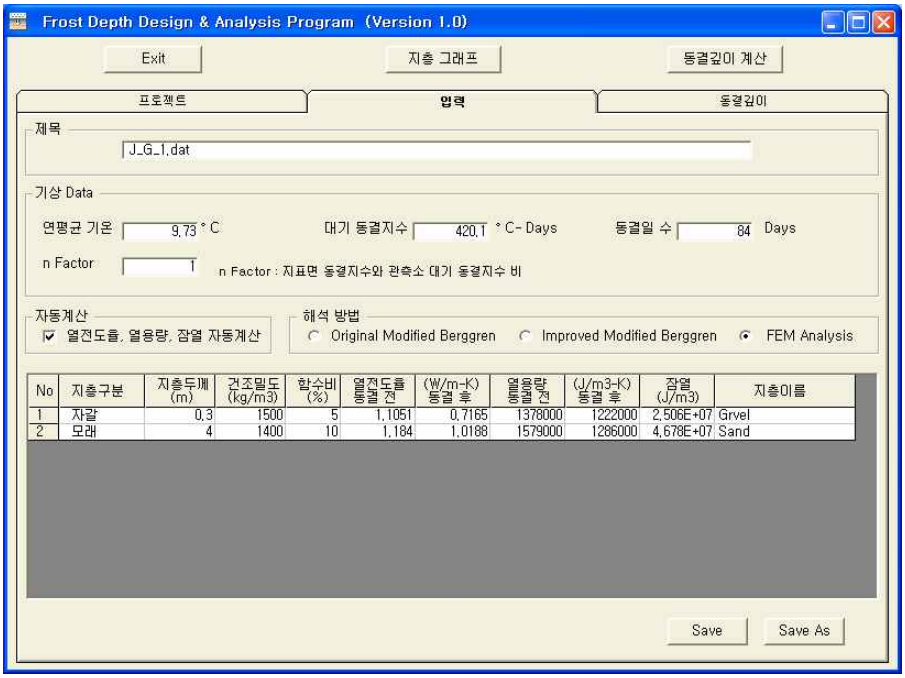



그림 3.4.68 Input data for gravel ballast at Jecheon

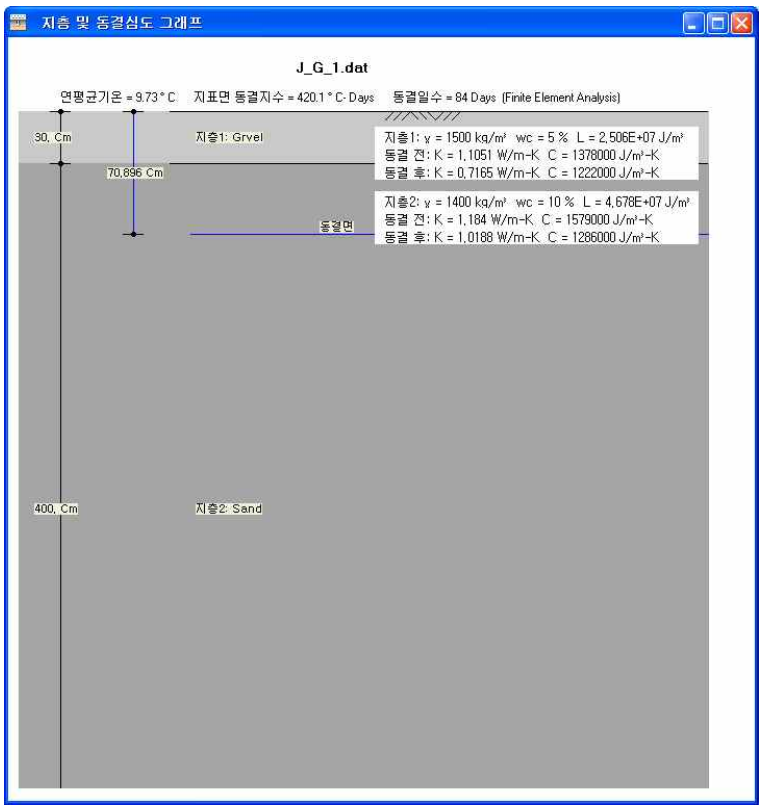



그림 3.4.69 Computed frost depth for gravel ballast at Jecheon

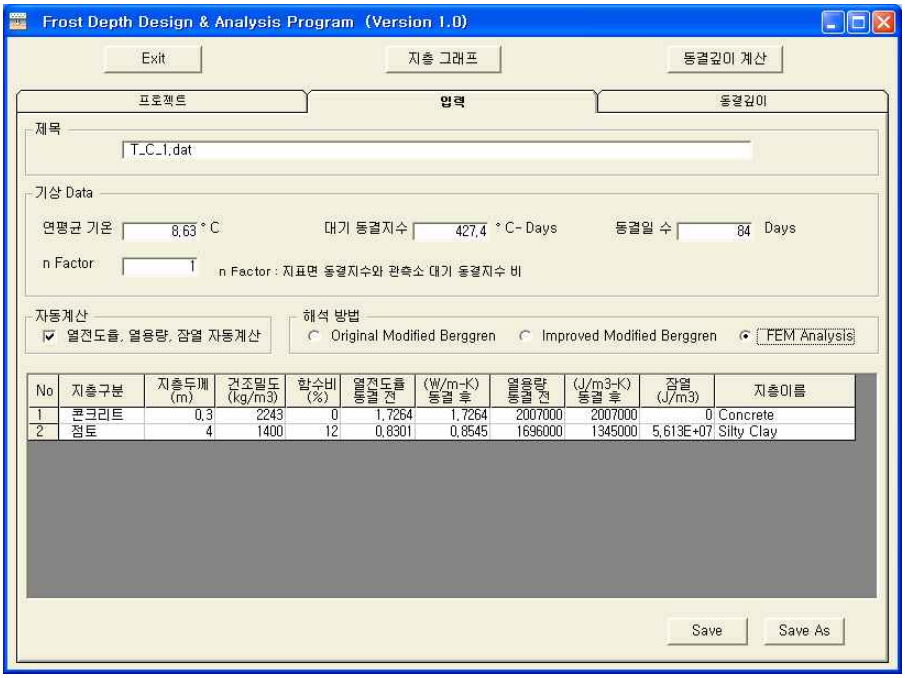



그림 3.4.70 Input data for concrete slab at Taeback

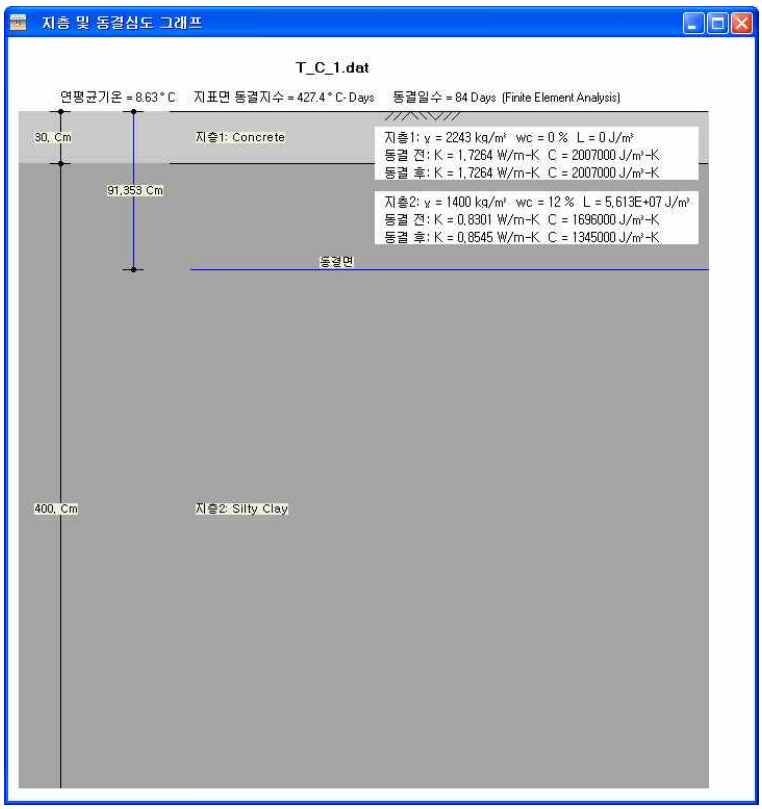



그림 3.4.71 Computed frost depth for concrete slab at Taeback

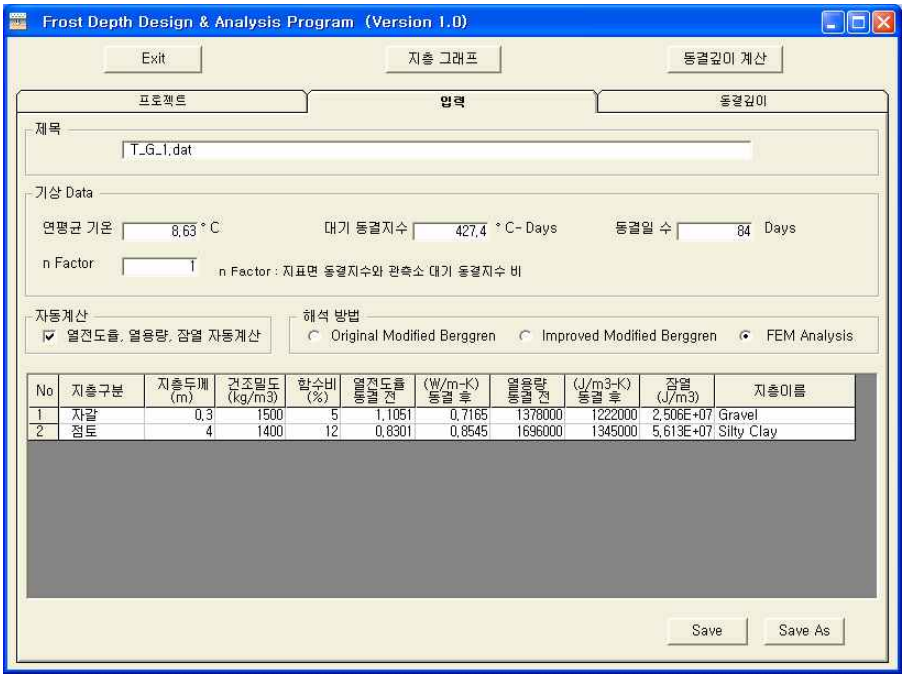



그림 3.4.72 Input data for gravel ballast at Taeback

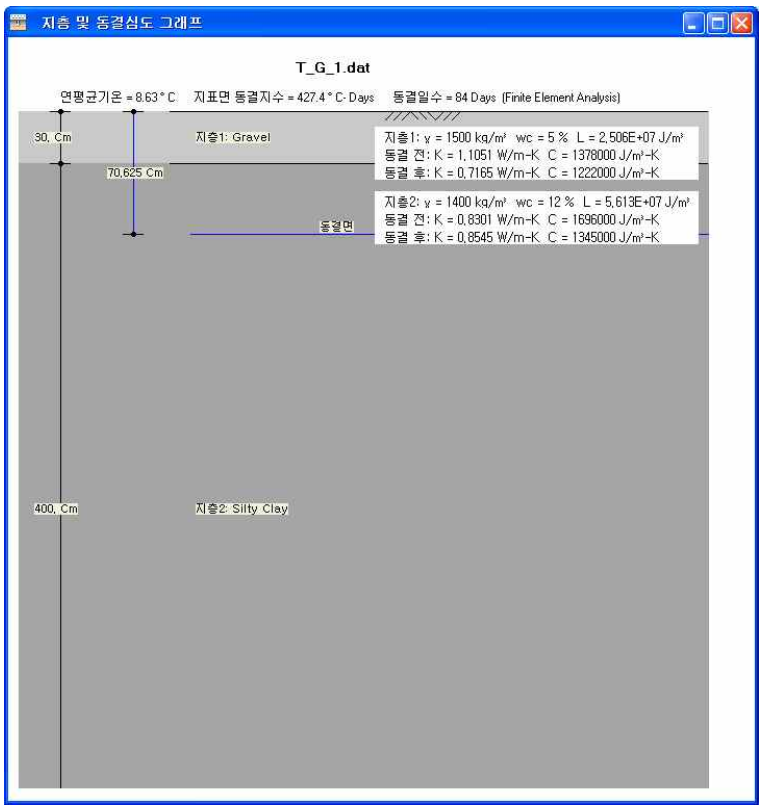



그림 3.4.73 Computed frost depth for gravel ballast at Taeback

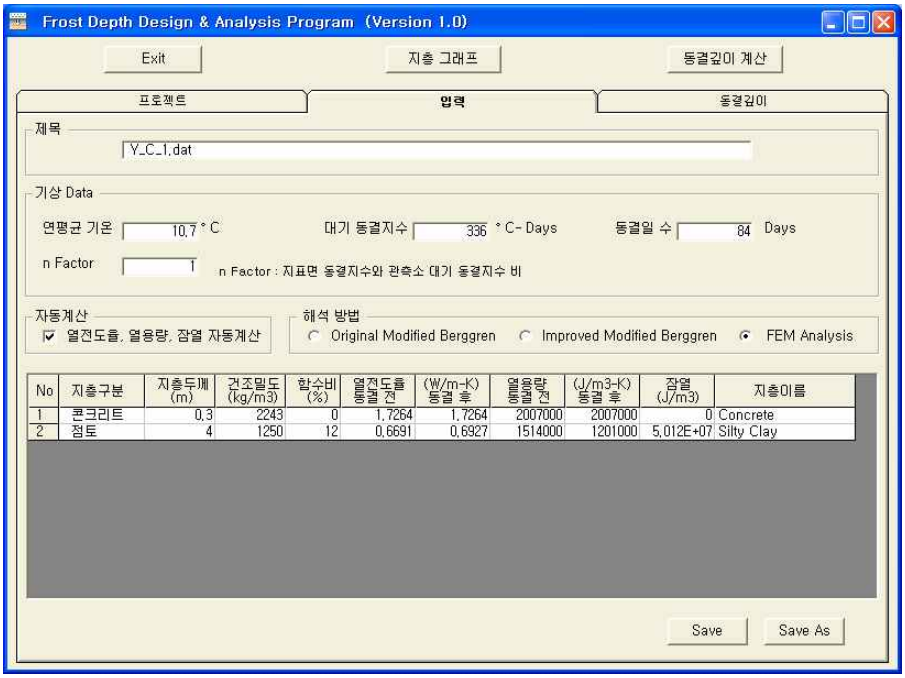



그림 3.4.74 Input data for concrete slab at Yeoncheon

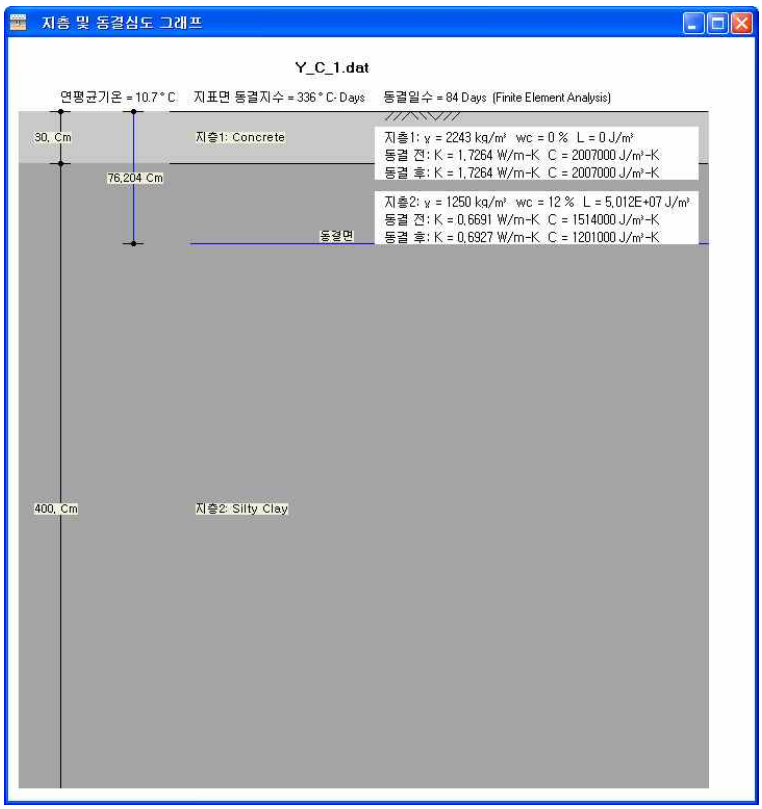



그림 3.4.75 Computed frost depth for concrete slab at Yeoncheon

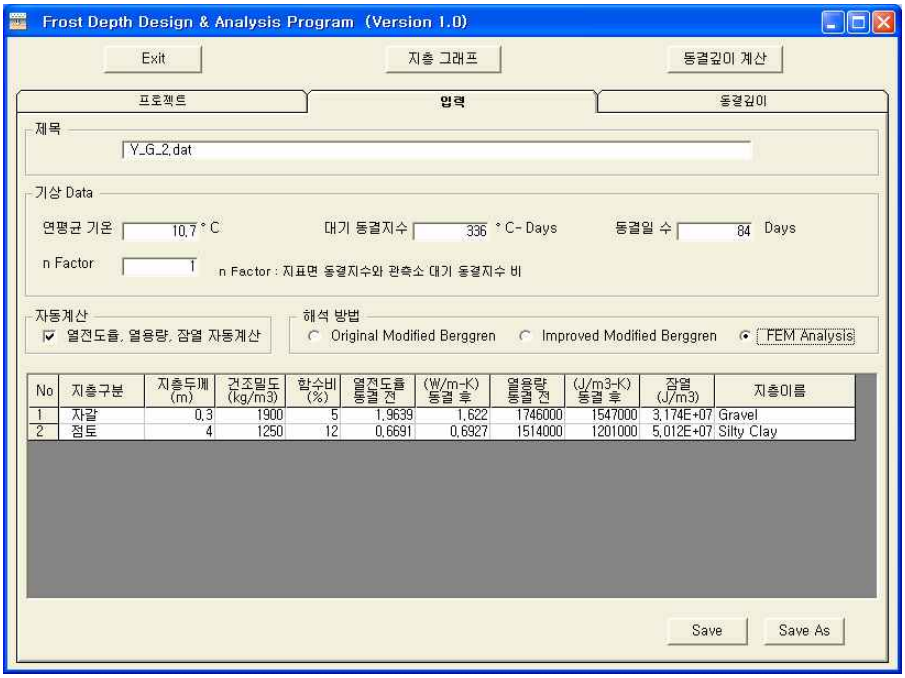



그림 3.4.76 Input data for gravel ballast at Yeoncheon

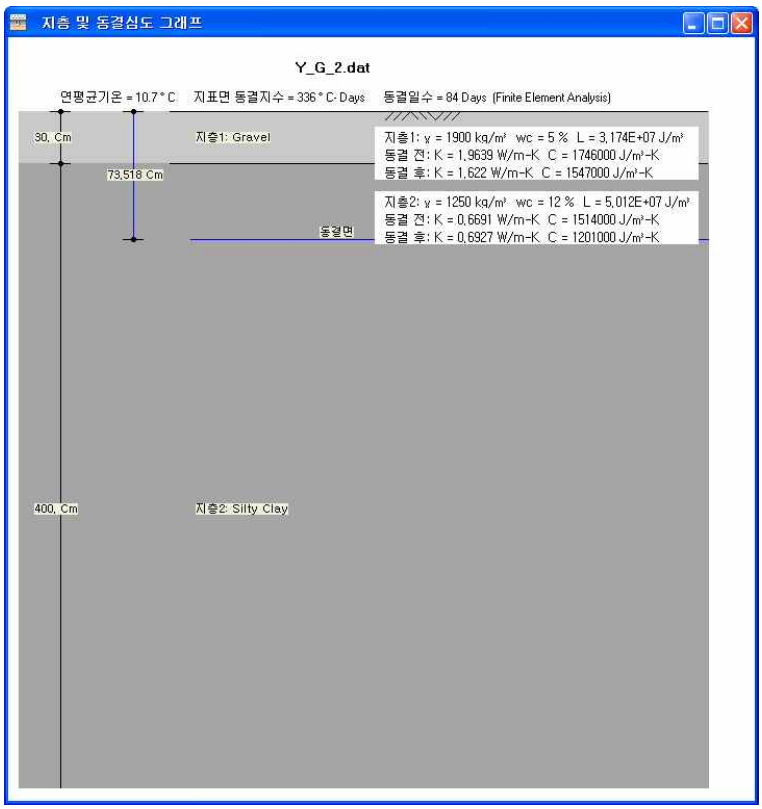



그림 3.4.77 Computed frost depth for gravel ballast at Yeoncheon

다. 해석결과 vs 계측값 비교

동결깊이 프로그램 해석결과와 Methylene Blue 동결심도계에 의한 측정값을 표 3.4.19에 요약하였고, 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

○ 현재 세계적으로 널리 사용되고 있는 Modified Berggren 식을 기반으로 하는 동결깊이 설계 프로그램 FDDP 해석결과는 보다 정확한 FEM 이론을 기반으로 하는 동결깊이 해석 프로그램 FDAP 해석결과에 비교하여 콘크리트 도상에서는 4% 정도 작은 값을, 자갈도상에서는 1% 정도 큰 값을 보여준다.

○ 프로그램 해석결과 자갈도상 (연천지역 제외) 동결깊이는 콘크리트도상에 비교하여 21 ~ 24 Cm 정도 작은 값을 보여 주고 Methylene Blue 측정결과 자갈도상 (연천지역 제외) 동결깊이는 콘크리트도상보다 19 ~ 20 Cm 작은 값을 보여 준다. 이와 같이 자갈도상에서 동결깊이가 콘크리트도상보다 작게 나타난 이유는 자갈의 열전도율이 콘크리트 보다 작기 때문이다.

○ 동결깊이 프로그램 해석결과는 측정값에 비하여 10 ~ 37% 작은 동결심도를 보여 준다. 이와 같이 프로그램 해석결과가 측정값보다 작게 계산된 이유는 실험용 콘크리트 및 자갈도상층은 횡단면 60 Cm × 60 Cm, 높이 30 Cm로 지표면 위에 설치되어 있어 동결심도 측정은 돌출된 도상표면을 기준으로 측정된 반면에 동결깊이 프로그램은 연직방향으로 1차원 해석에 기반을 두고 있어 도상 표면이 무한한 횡단면을 가진 것으로 가정하여 계산되기 때문인 것으로 사료된다.

표 3.4.19 Summary of computed frost depths compared to measured values.

| Location | Profile | Frost Depth (Cm) | | | Remark |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Computed | | Measured | |
| | | FDDP | FDAP | | |
| Jecheon | Concrete Slab (30Cm)<br>Sand (SW) | 91.4 | 95.3 (10.9%) | 107 | |
| | Gravel Ballast (30Cm)<br>Sand (SW) | 71.4 | 70.9 (19.4%) | 88 | |
| Taeback | Concrete Slab (30Cm)<br>Silty Clay (CL-ML) | 88.4 | 91.4 (24.5%) | 121 | |
| | Gravel Ballast (30Cm)<br>Silty Clay (CL-ML) | 71.4 | 70.6 (30.1%) | 101 | |
| Yeoncheon | Concrete Slab (30Cm)<br>Silty Clay (CL-ML) | 72.9 | 76.2 (30.7%) | 110 | |
| | Gravel Ballast (30Cm)<br>Silty Clay (CL-ML) | 59.5 | 59.2 | | |
| | Gravel Ballast* (30Cm)<br>Silty Clay (CL-ML) | 75.4 | 73.5 (37.2%) | 117 | 자갈<br>(다수 분리 포함) |

FDDP : Frost Depth Design Program (Improved Modified Berggren)

FDAP : Frost Depth Analysis Program (FEM Solver)

( ) : Percent error compared to measured values

## 3. 소결론

본 연구를 통하여 국내 철도현장에 적용할 수 있는 Modified Berggren식과 Neumann식을 기반으로 하는 동결깊이 설계 프로그램 (FDDP)과 FEM 수치해석에 기반을 둔 동결깊이 해석 프로그램 (FDAP)을 개발하여 관련문헌의 해석결과와 비교 및 분석하였다.

그리고 2011년 11월에 한국건설기술연구원에서 제천, 태백, 연천 지역에 설치한 실험용 콘크리트 및 자갈도상에 대하여 Methylene Blue 동결심도계의 측정값과 동결깊이 프로그램에 의한 해석결과를 비교 분석하였다.

보다 정확한 동결깊이 해석 프로그램 검증은 제 9절 2의 “콘크리트도상 동결심도 FEM 수치해석”에서 강원도 철원 백마고지역에서 수행한 현장실험과 비교 분석하였다.

# 제 5절 PE골재 혼합 아스콘을 활용한 철도도상의 동상방지 효과 실내외 실험

일본이나 독일에서는 그림 3.5.1과 같이 철도 자갈도상의 하부에 아스팔트 콘크리트 보조도상을 설치하는 기술을 연구하고 있다. 이 아스팔트 보조도상은 열차통과시 소음 저감, 하부 노반 강화 기능 및 도상의 빗물이 하부 노반으로 침투하는 것을 차단하는 역할을 할 수 있다.

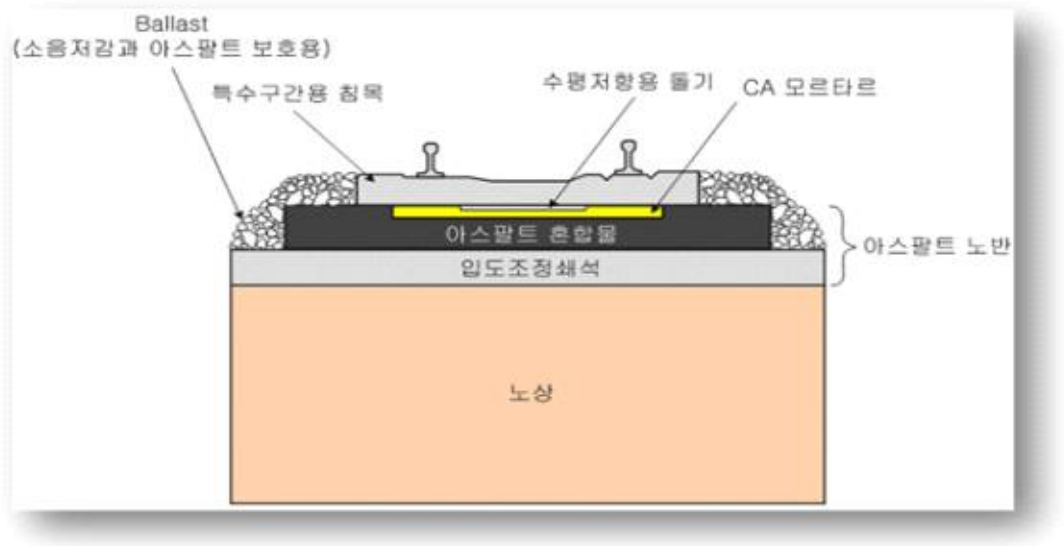



그림 3.5.1 철도 자갈도상 하부의 아스팔트 콘크리트 보조도상

이러한 경우 아스팔트 혼합물의 강도와 단열성이 중요한 요소이므로 본 연구에서는 폐비닐골재(PE골재: polyethylene aggregate)를 자갈에 섞어 아스팔트콘크리트(아스콘)를 만든 후 이를 자갈 보조도상으로 활용하는 기술에 대해 여러 가지 실험을 하였다.

## 1. PE골재 혼합 아스콘의 열전도, 초음파 시험

### 가. PE골재 혼합 아스콘용 골재의 입도분포

앞의 2절에서 살펴 본 바와 같이 PE골재는 자갈보다 가볍고, 마모감량이 적으며, 열전도율이 우수하여 한랭지 구조물에 활용할 수 있는 골재라고 판단된다. 또한 PE골재에 대한 용출실험결과 중금속이 검출되지 않았고, 단지 0.92%의 기름 성분만

나타났는데 그 양도 환경기준치(5%) 이하였다.(김영진,2005) 따라서 환경적으로도 안전하다고 판단된다.

본 연구에서는 PE골재를 혼합한 아스콘을 자갈 보조도상으로 이용함으로써 도상 하부의 강도 증대와, 노반으로의 빗물 침투를 방지하는 역할을 기대하며, 단열효과에 의해 겨울철 찬 기온이 철도 노반으로 침투하는 것을 감소시켜 노반에 발생하는 동상 피해를 다소라도 줄이고자 하였다.

본 연구에서는 직경 19mm 크기로 PE골재를 제작하였으며, 이것을 일반 자갈과 혼합하여 일반 밀입도 분포를 가지는 혼합 골재를 만든 후, 여기에 아스팔트바인더(AP-5)를 섞어 가칭 PE골재 혼합 아스콘을 제작하였다. PE골재 혼합비율은 실내 열전도시험, 실내 동결융해시험, 마샬안정도시험 시는 2.5%, 5%, 10%, 15%(중량비)로 해당 크기의 자갈과 치환하였으나, 마살안정도시험 결과 안정도가 증가하였으나 흐름치도 기준범위를 벗어났으므로 , 동적안정도를 알아 보기 위한 wheel tracking 시험과 동결심도 감소 효과를 알아 보기 위한 현장실험 시는 아스콘 혼합물 전체 양에 2.5%를 추가하는 방법을 택하였다.

아스콘에 PE골재를 혼합할 때의 혼합율과 쇄석의 입도분포는 표 3.5.1 ~ 표 3.5.5 및 그림 3.5.2에 나타나 있다.

그림 3.5.3은 PE골재를 혼합한 아스콘의 모습을 나타낸 것이다.

표 3.5.1 PE골재를 혼합하지 않은 쇄석 아스콘 제조시 골재 입도분포

| Control(A)<br>골재 사이즈(mm) | 통과율(%) | 잔류량(g) | 잔류율(%) |
|---|---|---|---|
| 26.5 | 97.5 | 30 | 2.5 |
| 19 | 82.5 | 180 | 15 |
| 13.2 | 55 | 330 | 27.5 |
| 4.75 | 42.5 | 150 | 12.5 |
| 2.36 | 24 | 222 | 18.5 |
| 0.6 | 15.5 | 102 | 8.5 |
| 0.3 | 11 | 54 | 4.5 |
| 0.15 | 6 | 60 | 5 |
| 0.075 | 0 | 72 | 6 |
| PE 골재(19mm) | | 0 | |

표 3.5.2 PE골재를 2.5% 혼합한 쇄석 아스콘 제조시 골재 입도분포

| Control(A)<br>골재 사이즈(mm) | 통과율(%) | 잔류량(g) | 잔류율(%) |
|---|---|---|---|
| 26.5 | 97.5 | 30 | 2.5 |
| 19 | 82.5 | 150 | 15 |
| 13.2 | 55 | 330 | 27.5 |
| 4.75 | 42.5 | 150 | 12.5 |
| 2.36 | 24 | 222 | 18.5 |
| 0.6 | 15.5 | 102 | 8.5 |
| 0.3 | 11 | 54 | 4.5 |
| 0.15 | 6 | 60 | 5 |
| 0.075 | 0 | 72 | 6 |
| PE골재(19mm) | | 30 | |

표 3.5.3 PE골재 5%를 혼합한 아스콘의 제조시 골재 입도분포

| PE골재 5%(B)<br>골재 사이즈(mm) | 통과율(%) | 잔류량(g) | 잔류율(%) |
|---|---|---|---|
| 26.5 | 97.5 | 30 | 2.5 |
| 19 | 82.5 | 120 | 10 |
| 13.2 | 55 | 330 | 27.5 |
| 4.75 | 42.5 | 150 | 12.5 |
| 2.36 | 24 | 222 | 18.5 |
| 0.6 | 15.5 | 102 | 8.5 |
| 0.3 | 11 | 54 | 4.5 |
| 0.15 | 6 | 60 | 5 |
| 0.075 | 0 | 72 | 6 |
| PE골재(19mm) | | 60 | 5 |

표 3.5.4 PE골재 10%를 혼합한 아스콘의 제조시 골재 입도분포

| PE골재10%(C)<br>골재 사이즈(mm) | 통과율(%) | 잔류량(g) | 잔류율(%) |
|---|---|---|---|
| 26.5 | 97.5 | 30 | 2.5 |
| 19 | 82.5 | 60 | 5 |
| 13.2 | 55 | 330 | 27.5 |
| 4.75 | 42.5 | 150 | 12.5 |
| 2.36 | 24 | 222 | 18.5 |
| 0.6 | 15.5 | 102 | 8.5 |
| 0.3 | 11 | 54 | 4.5 |
| 0.15 | 6 | 60 | 5 |
| 0.075 | 0 | 72 | 6 |
| PE 골재(19mm) | | 120 | 10 |

표 3.5.5 PE골재 15%를 혼합한 아스콘 제조시 골재 입도분포

| PE골재15%(D)<br>골재 사이즈(mm) | 통과율(%) | 잔류량(g) | 잔류율(%) |
|---|---|---|---|
| 26.5 | 97.5 | 30 | 2.5 |
| 19 | 82.5 | 0 | 0 |
| 13.2 | 55 | 330 | 27.5 |
| 4.75 | 42.5 | 150 | 12.5 |
| 2.36 | 24 | 222 | 18.5 |
| 0.6 | 15.5 | 102 | 8.5 |
| 0.3 | 11 | 54 | 4.5 |
| 0.15 | 6 | 60 | 5 |
| 0.075 | 0 | 72 | 6 |
| PE골재(19mm) | | 180 | 15 |

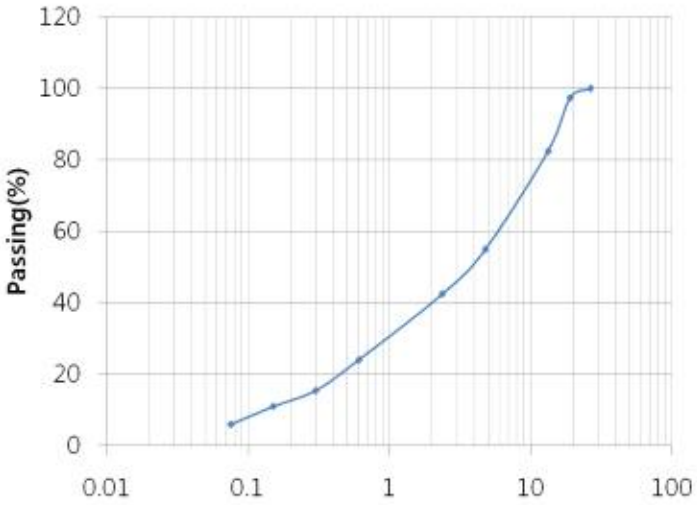



그림 3.5.2 골재 입도분포곡선



(a) 쇄석 + PE 골재



(b) PE골재를 혼합한 아스콘

그림 3.5.3 PE골재 혼합 아스콘 제조

나. PE골재 혼합 아스콘의 열전도율시험

(1)열전도율 시험 방법

PE골재를 혼합한 아스콘에 대해 열전도율 측정 시험을 하였다. 시험에 사용한 장비는 QTM probe 열전도율시험기로서 probe를 공시체 윗면에 놓으면 시험기가 스스로 가열선에 일정한 전류를 흐르게 하고 probe에 함께 부착된 열전대가 기전력을 자기 기록계로 기록, 열전도율을 산출한다.(그림 3.5.4 참조)

PE골재 혼합 아스콘 공시체는 직경 10cm, 높이 6.7cm의 원주형이었다. 이 아스콘의 표면에 probe를 올려 놓고 실내 상온에서 열전도율을 측정하였다. 이 때 probe의 heater의 작용으로 변화하는 아스팔트 표면의 온도를 동시에 측정였고, 각 단계별로 열전도율을 3회 측정하여 평균값을 취하였다.(그림 3.5.5)



그림 3.5.4 아스콘에 대한 열전도율 측정 모습

(2) 열전도율시험 결과

그림 3.5.5는 PE골재 혼합 아스콘의 PE골재 혼합률별 열전도율 변화를 나타낸 것이다.

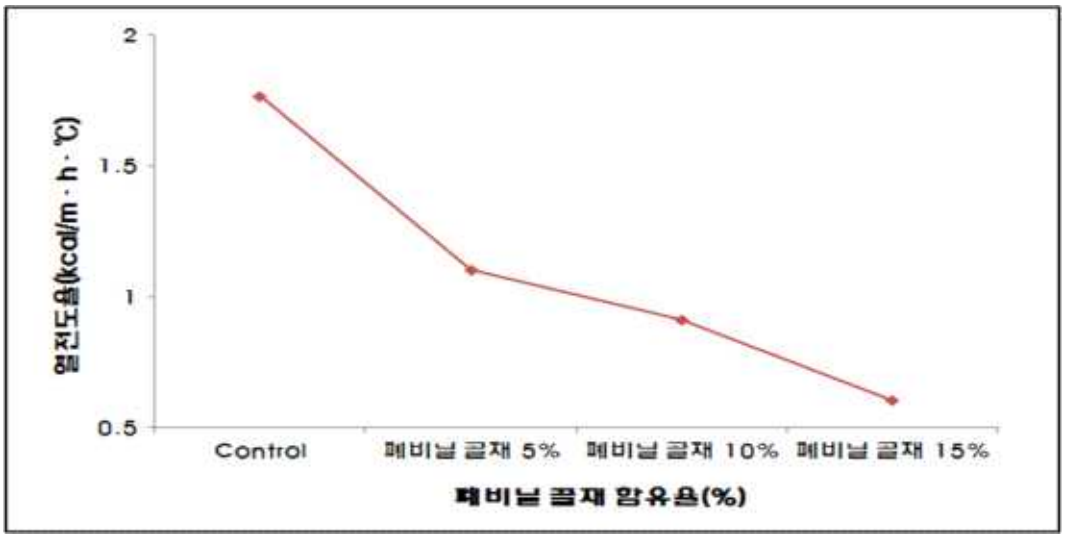



그림 3.5.5 PE골재 함유율별 열전도율 시험 결과

그림 3.5.5에서 보여 주는 바와 같이 아스콘에 섞는 PE골재의 혼합량이 증가할수록 열전도율이 감소하였다. 즉, 아스콘에 PE골재를 혼합할 경우 쇄석 아스콘에 비해 철도 노반의 지중 열이 서서히 방출(외부의 찬 기온이 지중으로 서서히 침투)할 수 있다는 것을 의미한다.

다. PE골재 혼합 아스콘에 대한 초음파 시험

(1) 초음파시험의 목적

본 시험에 사용된 PE골재는 (ⅰ)농촌에서 수거한 폐비닐을 흙이 묻은 채로 용융한 후, (ⅱ)용융된 폐비닐 반죽을 제조 장비 내부를 통과시켜 가래떡 모양으로 만들며, (ⅲ)이것을 냉각수가 담긴 탱크로 통과시키면서 냉각시킨 후 적당한 크기로 절단하여 만든 것이다. 냉각수 탱크를 통과할 때 가래떡 모양의 폐비닐 반죽 바깥쪽은 직접 물에 접촉되어 바로 식지만, 반죽 내부는 더 오랫동안 따뜻한 온기를 지니고 있다. 반죽 외부와 내부의 온도 차이에 의해 반죽 내부에 작은 공극이 수 없이 많이 생기고, 이 공극들에 의해 단열효과가 발휘된다. 따라서 골재 자체의 열전도율이 쇄석이나 자갈에 비해 낮다.

PE골재에 대한 초음파시험은 PE골재를 아스팔트 바인더에 섞어 아스콘을 만들 때 다짐작업과 열을 가하는 과정에서 PE골재 내부의 공극이 혹시 파손되지 않았는지 알아보기 위하여 수행하였다.

(2) 초음파 시험 결과

그림 3.5.6에서는 PE골재를 혼합한 아스콘 공시체에 대한 초음파시험 수행 모습을 보여 주고 있다.



그림 3.5.6 PE골재 혼합율별 초음파시험 모습

표 3.5.6은 PE골재 혼합 아스콘에 대한 초음파시험 수행 결과를 나타낸 것이고, 그림 3.5.7은 초음파시험 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

표 3.5.5나 그림 3.5.7에서 보는 바와 같이 PE골재의 혼합률이 증가할수록 초음파 속도가 감소하는 경향을 보이고 있다. PE골재 혼합비가 동일한 경우에는 아스팔트 바인더의 혼합 비율이 증가할수록 대체적으로 초음파 속도가 감소하는 경향을 보이고 있다.

이 시험을 통해서 PE골재를 아스팔트에 섞어 아스콘을 만들더라도 PE골재 내부에 포함된 공극은 크게 감소하지 않음을 알 수 있었다. 즉, PE골재와 다른 쇄석 그리고 아스팔트 바인더를 섞어 아스콘을 만들더라도 PE골재 혼합물의 열전도율이 감소하지 않는다는 것을 의미한다.

표 3.5.6 PE골재 혼합 아스콘에 대한 초음파시험 수행 결과표

| 혼합비 | 아스팔트 바인더 혼합비 | 공시체-1 | | | 공시체-2 | | | 공시체-3 | | | 평균 속도(m/sec) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 두께 (mm) | 시간 (μ) | 속도 (m/sec) | 두께 (mm) | 시간 (μ) | 속도 (m/sec) | 두께 (mm) | 시간 (μ) | 속도 (m/sec) | |
| 쇄석 100% | 아스팔트 (4.5%) | 66.56 | 17.10 | 3892.40 | 65.76 | 17.30 | 3801.16 | 66.18 | 17.70 | 3738.98 | 3810.85 |
| | 아스팔트 (5%) | 65.57 | 17.00 | 3857.06 | 64.50 | 16.80 | 3839.29 | 65.96 | 17.80 | 3705.62 | 3800.65 |
| | 아스팔트 (5.5%) | 64.99 | 16.70 | 3891.62 | 65.71 | 17.60 | 3733.52 | 65.72 | 17.30 | 3798.84 | 3807.99 |
| 쇄석 95%+ PE 골재 5% | 아스팔트 (4.5%) | 69.03 | 19.60 | 3521.94 | 69.16 | 21.00 | 3293.33 | 68.84 | 18.80 | 3661.70 | 3492.32 |
| | 아스팔트 (5%) | 68.67 | 19.80 | 3468.18 | 69.58 | 20.40 | 3410.78 | 68.30 | 20.10 | 3398.01 | 3425.66 |
| | 아스팔트 (5.5%) | 68.15 | 21.00 | 3245.24 | 67.72 | 19.80 | 3420.20 | 67.81 | 20.20 | 3356.93 | 3340.79 |
| 쇄석 90%+ PE 골재 10% | 아스팔트 (4.5%) | 71.90 | 22.70 | 3167.40 | 68.29 | 19.80 | 3448.99 | 68.24 | 20.00 | 3412.00 | 3342.80 |
| | 아스팔트 (5%) | 68.58 | 19.60 | 3498.98 | 68.68 | 20.40 | 3366.67 | 67.93 | 18.50 | 3671.89 | 3366.67 |
| | 아스팔트 (5.5%) | 66.98 | 18.80 | 3562.77 | 68.95 | 28.80 | 2394.10 | 67.55 | 19.10 | 3536.65 | 3164.50 |
| 쇄석 85%+ PE 골재 15% | 아스팔트 (4.5%) | 77.83 | 26.00 | 2993.46 | 78.08 | 26.70 | 2924.34 | 78.00 | 27.40 | 2846.72 | 2921.51 |
| | 아스팔트 (5%) | 79.30 | 28.00 | 2832.14 | 78.71 | 27.70 | 2841.52 | 77.95 | 26.30 | 2963.88 | 2879.18 |
| | 아스팔트 (5.5%) | 79.34 | 26.40 | 3005.30 | 79.32 | 25.50 | 3110.59 | 78.16 | 24.40 | 3203.28 | 3106.39 |

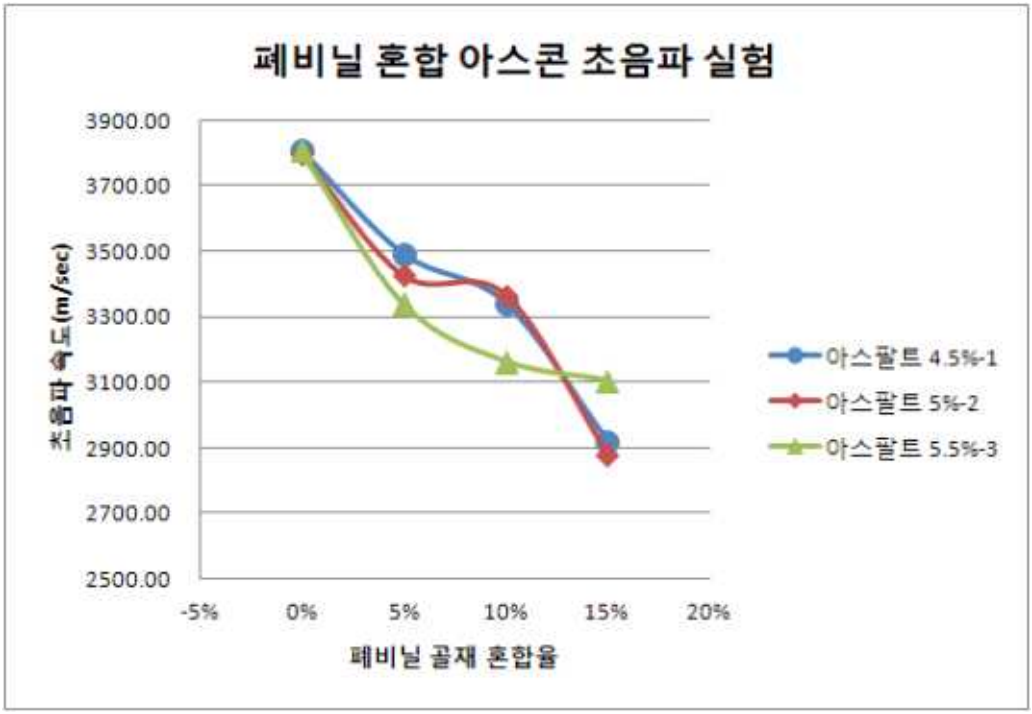



그림 3.5.7 PE골재 혼합 아스콘에 대한 초음파시험 결과

## 2. PE골재 혼합 아스콘에 대한 마샬안정도시험

### 가. 개요

마샬안정도시험은 표준 실험실의 다짐으로 아스팔트 혼합물의 강도를 측정하기 위한 시험이며, 일반적으로 아스팔트의 배합설계 및 아스팔트 바인더 함량을 결정하기 위해 수행된다. 또한 마샬안정도값은 아스팔트의 품질관리에도 이용되고 있다. 이 시험은 반원형의 재하 헤드(head)를 통해 직경 101.6mm, 높이 63.5mm인 원통형 공시체에 분당 50mm 속도로 하중을 재하하면서 공시체가 파괴될 때까지 수직변위와 재하 하중을 측정하는 시험인데, 파괴 시의 최대하중을 안정도로 표시하고, 공시체가 파괴될 때의 변형량은 흐름치로 표시한다.

일반적으로 흐름치가 크면 그 아스콘은 소성변형에 대한 저항성이 낮다는 것을 의미한다. 반대로 흐름치가 작으면 내구성을 확보하는데 필요한 아스팔트량이 부족하여 조기 균열이 발생할 가능성이 높다고 알려져 있다.

본 연구에서는 KS F2337 기준에 따라서 마샬안정도시험을 수행하였다. 이때 PE골재 혼합률 및 아스팔트 바인더 함량별로 마샬안정도와 흐름치를 측정하였다.

나. 마샬안정도시험 방법

표 3.5.7~표3.5.10과 같은 배합비로 아스콘을 제조하였으며, 각 골재를 크기별로 24시간 물에 담근 후의 수중중량과 노 건조시킨 후의 중량을 측정하여 골재의 겉보기 비중을 구하였고, 이론최대밀도도 구하였다.

또한 PE골재 혼합률별 아스콘 공시체에 대한 두께, 수중 중량, 공기중 중량을 측정하여 실측 밀도치와 이론치를 구하였다. (표 3.5.6 참조) 아스콘 공시체는 60℃ 되는 항온수조에 30분간 넣었다가 시험을 하였다.

마샬안정도시험은 한국건설기술연구원 도로연구실 보유, INSTRON 5821S장비를 사용하여 수행하였고, 해석프로그램은 Instron SAX V 7.1을 이용하였다. 재하속도는 분당 50mm를 유지하였다. flow값은 1/100cm 단위로 표시하였다.

그림 3.5.8은 INSTRON 5821S장비로 PE골재 혼합 아스콘 공시체에 대한 마샬안정도 시험을 실시하는 모습이다.

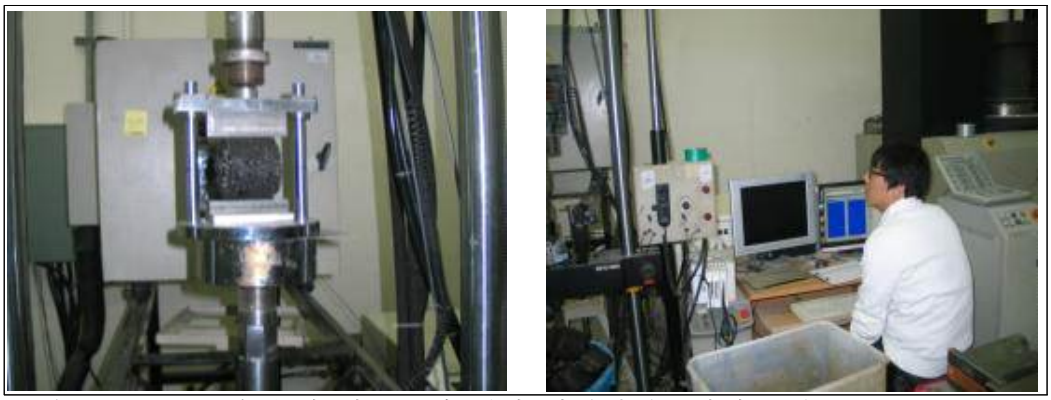


그림 3.5.8 PE골재 혼합 아스콘에 대한 마샬안정도시험 모습

(2) 마샬안정도시험 결과

표 3.5.7 ~ 3.5.10 및 그림 3.5.9 ~ 3.5.12는 본 연구에서 수행한 마샬안정도시험 결과를 나타낸 것이다.

(1) 공극률

아스팔트 혼합물의 공극은 교통하중에 대한 포장의 소성변형 저항성에 영향을 미칠 뿐만 아니라 아스팔트 바인더의 산화와 노화를 촉진시켜 균열과 박리를 유발한다. 마샬 배합설계와 국토해양부 아스팔트 포장 현장다짐관리 매뉴얼(국토해양부,

2006)에서는 일반 아스팔트 포장의 실내 배합설계의 경우, 공극률 4%에 가장 근접하였을 때의 아스팔트 바인더량을 최적의 바인더량으로 규정하고 있다.

본 연구에서는 PE골재 혼합률 및 바인더량에 따른 아스팔트 콘크리트 시편의 공극률을 그림 3.5.11과 같이 측정하였다. PE골재를 사용하지 않은 혼합률 0% 시편의 경우, 바인더량이 4.5%, 5.0%, 5.5%로 증가함에 따라 공극률은 각각 5.2%, 4.7%, 3.1%로 감소하는 경향을 보여 전반적으로 공극률이 4% 내외로 측정되었다. 특히, 바인더량이 5%인 아스팔트 콘크리트의 공극률 4%에 가장 가깝게 나타나 5%가 최적 바인더량으로 판단되었다.

골재와 바인더 사이의 빈 공극, 즉 air void를 측정한 결과, 공시체의 공극률은 PE골재 혼합률과는 무관하게 유사한 값을 보였다. 이는 일반쇄석골재를 치환한 PE골재가 고온의 혼합과정에서 변형되지 않고 일반 골재와 동일한 역할을 하였기 때문으로 판단된다.

(2) 안정도

아스팔트 콘크리트의 경우 골재 간의 마찰력 및 골재와 아스팔트 바인더 간의 결합력으로 하중에 저항하면서 원래의 모양을 유지하다가 하중이 어느 정도 이상으로 커지면 변형이 급격하게 증가하는데, 이때의 하중을 안정도라고 부른다. 일반적으로 마샬안정도는 아스팔트 콘크리트의 점도를 나타내는 수단으로 사용되며, 골재의 내부 마찰각과 60℃ 아스팔트 바인더의 점도에 크게 영향을 받는다(Freddy et al, 1996). 국내 아스팔트 콘크리트의 마샬안정도 기준은 중차량의 통행이 많은 경우 8kN 이상으로 한다. PE골재를 혼합한 아스팔트 콘크리트 시편의 안정도시험 결과, 그림 3.5.9와 같이 모두 위 기준을 만족하였다. PE골재 혼합률이 증가함에 따라 안정도가 증가하는 경향을 보였는데, 이는 PE골재 혼합률이 증가할수록 아스팔트 콘크리트가 더 큰 하중을 지지할 수 있다는 것을 의미한다. 이와 같이 PE골재 혼합률이 증가할수록 안정도가 급격히 커진 것은 고온에서 혼합될 때 골재표면이 녹으면서 바인더와 강력하게 결합되어 골재와 바인더의 취약한 경계를 따라 전파되는 균열이 잘 발생하지 않았기 때문으로 판단되었다.

(3) 흐름치

아스팔트 콘크리트의 흐름치는 마샬안정도시험에서 하중이 재하될 때부터 안정도

가 감소하기 시작할 때까지의 변위이다. 일반적으로 흐름치가 크면 상대적으로 소성변형을 일으키기 쉬운 연성의 배합에 해당되고, 흐름치가 작으면 균열 발생 가능성이 높은 취성의 배합에 해당된다. 본 지침에서는 도로용 아스팔트 콘크리트 표층에 대하여 입도 유형에 따라 BB-3인 경우 10~40(1/10mm)을 흐름치의 기준으로 하고 있다. 본 연구에서 PE골재 혼합률 0%일 때는 아래의 그림 3.5.10과 같이 흐름치가 기준 범위를 만족하여 적절한 배합설계가 이루어진 것을 확인할 수 있었으나, 혼합률이 증가함에 따라 흐름치가 증가하면서 기준 범위를 벗어났다. 흐름치가 크게 증가한 이유는 PE골재가 연성인데다가 고온에서 혼합되면서 표면이 녹아 바인더와 강력하게 결합되면서 골재 맞물림이 없어져 앞 절에서 설명한 것과 같이, 균열에 대한 저항성이 커지면서 파괴가 일어날 때까지 변형이 크게 증가했기 때문으로 판단되었다. 단순히 흐름치만 고려할 때에는 소성변형이 우려되는 곳에 PE골재를 사용하기 어려울 것처럼 보이나 그림 3.5.9와 같이 PE골재를 사용하면 흐름치와 함께 안정도도 함께 커지므로 실제로는 소성변형에 불리하지 않고 오히려 균열에 대한 저항성이 커지는 효과를 얻을 수 있을 것으로 예상되었다.

(4) 마샬 강성지수

마샬 강성지수(Marshall Stiffness Index)는 마샬안정도시험에서 측정된 안정도를 흐름치로 나눈 값으로서 아스팔트 콘크리트의 강성도를 나타내기 위한 경험적 지수이다. 주로 유럽에서 사용되고 있으나 적정 값에 대하여 제시된 바가 없고, 값이 클수록 강성이 증가하고 소성변형에 대한 저항성이 커지는 것으로 알려져 있다 (Zhang et al., 2004). 계산 결과, 그림 3.5.12와 같이 PE골재를 혼합한 시편이 PE골재를 사용하지 않은 시편에 비해 마샬 강성지수가 작은 것을 알 수 있었다. 하지만, PE골재 혼합률에 따른 차이는 거의 없었다.

(5) 요약

PE골재 혼합률별 마샬안정도시험 결과 모든 시편이 마샬안정도 최소기준을 만족하였고, PE골재 혼합률이 높을수록 안정도가 급격히 커졌다. 하지만 흐름치는 PE골재를 혼합한 모든 시편이 허용기준을 벗어났고 혼합률이 높을수록 증가하여 소성변형에 취약한 것으로 나타났다. 그러나 안정도와 흐름치를 동시에 고려했을 경우, PE골재를 혼합한 시편의 안정도가 매우 큰 것을 감안한다면 안정도 허용기준에 해당하는 소성변형은 크지 않을 것으로 예상된다.

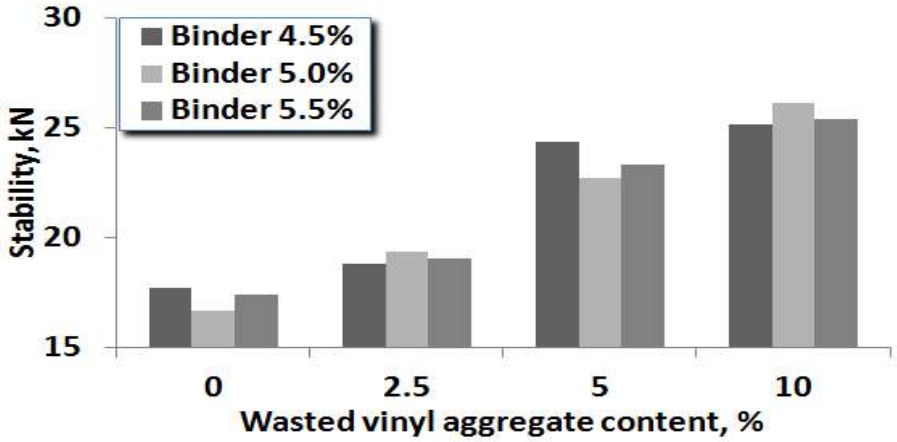



그림 3.5.9 바인더 함량 및 PE골재 치환율에 따른 마샬 안정도 결과

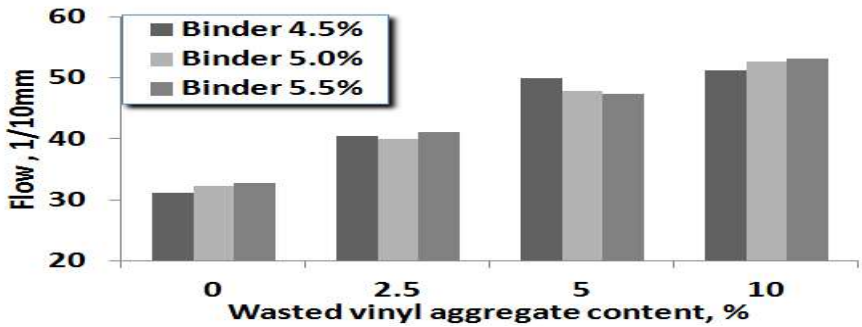



그림 3.5.10 바인더 함량 및 PE골재 치환율에 따른 Flow치

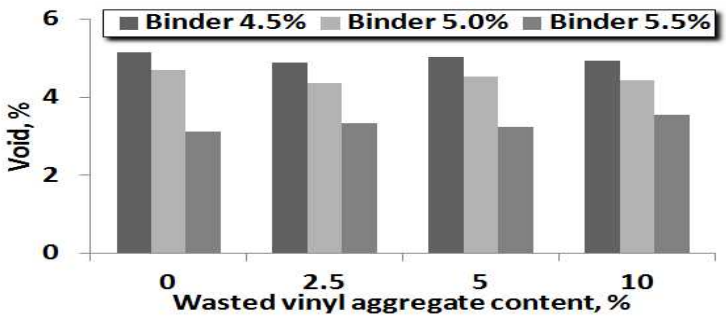



그림 3.5.11 바인더 함량 및 PE골재 치환율에 따른 공극률

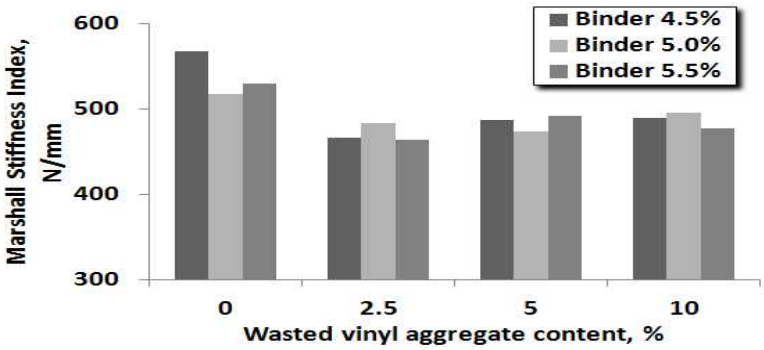



그림 3.5.12 Marshal 강성지수

표 3.5.7 PE골재 0% 치환

| 공시체 No. | 아스팔트 혼합률 (%) | 밀도(g/㎤) | | 아스팔트 용적률 (%) | 공극률 (%) | 포화도 (%) | 안정도 (kg) | flow값 (1/100cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 실측 | 이론 | | | | | |
| A | B | G | H | I | J | K | L | M |
| | | | | $\frac{B\times G}{\text{아스팔트비중}}$ | $100-100\frac{G}{H}$ | $\frac{I}{I+J}$ | | |
| 01-01 | 아스팔트 | 2.397 | 2.527 | 10.58 | 5.13 | 67.321 | 18455.2 | 33.1 |
| 01-02 | 4.5 | 2.394 | 2.527 | 10.56 | 5.27 | 66.731 | 19474.3 | 31.2 |
| 01-03 | (54g) | 2.395 | 2.527 | 10.57 | 5.21 | 66.969 | 17585.6 | 32.0 |
| 02-01 | 아스팔트 | 2.390 | 2.512 | 11.72 | 4.85 | 70.706 | 18241.2 | 32.7 |
| 02-02 | 5 | 2.393 | 2.512 | 11.73 | 4.73 | 71.281 | 18024.2 | 32.2 |
| 02-03 | (60g) | 2.396 | 2.512 | 11.75 | 4.62 | 71.763 | 17235.4 | 34.4 |
| 03-01 | 아스팔트 | 2.407 | 2.485 | 12.98 | 3.14 | 80.533 | 18135.5 | 34.6 |
| 03-02 | 5.5 | 2.404 | 2.485 | 12.96 | 3.25 | 79.949 | 17621.5 | 35.4 |
| 03-03 | (66g) | 2.410 | 2.485 | 12.99 | 3.03 | 81.114 | 17176.5 | 31.7 |

표 3.5.8 PE골재 2.5% 치환

| 공시체 No. | 아스팔트 혼합률 (%) | 밀도(g/㎤) | | 아스팔트 용적률 (%) | 공극률 (%) | 포화도 (%) | 안정도 (kg) | flow값 (1/100cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 실측 | 이론 | | | | | |
| A | B | G | H | I | J | K | L | M |
| | | | | $\frac{B \times G}{\text{아스팔트비중}}$ | $100 - 100\frac{G}{H}$ | $\frac{I}{I+J}$ | | |
| 01-01 | 아스팔트 | 2.316 | 2.426 | 10.22 | 4.52 | 69.316 | 19371.1 | 43.5 |
| 01-02 | 4.5 | 2.299 | 2.426 | 10.14 | 5.25 | 65.903 | 19105.5 | 42.8 |
| 01-03 | (54g) | 2.305 | 2.426 | 10.17 | 5.00 | 67.029 | 19453.2 | 40.4 |
| 02-01 | 아스팔트 | 2.298 | 2.407 | 11.27 | 4.52 | 71.353 | 19341.9 | 41.3 |
| 02-02 | 5 | 2.294 | 2.407 | 11.25 | 4.69 | 70.577 | 19193.1 | 42.4 |
| 02-03 | (60g) | 2.308 | 2.407 | 11.31 | 4.13 | 73.239 | 19121.7 | 40.9 |
| 03-01 | 아스팔트 | 2.309 | 2.384 | 12.45 | 3.14 | 79.848 | 19144.5 | 41.6 |
| 03-02 | 5.5 | 2.303 | 2.384 | 12.42 | 3.39 | 78.569 | 18628.1 | 41.3 |
| 03-03 | (66g) | 2.301 | 2.384 | 12.41 | 3.50 | 77.996 | 18485.3 | 40.1 |

표 3.5.9 PE골재 5% 치환

| 공시체 No. | 아스팔트 혼합률 (%) | 밀도(g/㎤) | | 아스팔트 용적률 (%) | 공극률 (%) | 포화도 (%) | 안정도 (kg) | flow값 (1/100cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 실측 | 이론 | | | | | |
| A | B | G | H | I | J | K | L | M |
| | | | | $\frac{B\times G}{\text{아스팔트비중}}$ | $100-100\frac{G}{H}$ | $\frac{I}{I+J}$ | | |
| 01-01 | 아스팔트 | 2.226 | 2.339 | 9.82 | 4.81 | 67.118 | 23547.2 | 52.2 |
| 01-02 | 4.5 | 2.225 | 2.339 | 9.82 | 4.88 | 66.812 | 21544.6 | 48.9 |
| 01-03 | (54g) | 2.217 | 2.339 | 9.78 | 5.23 | 65.146 | 22361.3 | 49.7 |
| 02-01 | 아스팔트 | 2.229 | 2.324 | 10.92 | 4.10 | 72.711 | 22285.6 | 44.6 |
| 02-02 | 5 | 2.221 | 2.324 | 10.89 | 4.43 | 71.098 | 23752.7 | 51.0 |
| 02-03 | (60g) | 2.210 | 2.324 | 10.83 | 4.89 | 68.907 | 22865.9 | 49.8 |
| 03-01 | 아스팔트 | 2.231 | 2.299 | 12.03 | 2.94 | 80.341 | 24025.6 | 50.6 |
| 03-02 | 5.5 | 2.214 | 2.299 | 11.94 | 3.71 | 76.273 | 24057.1 | 49.2 |
| 03-03 | (66g) | 2.228 | 2.299 | 12.01 | 3.10 | 79.499 | 23120.4 | 48.4 |

표 3.5.10 PE골재 10% 치환

| 공시체 No. | 아스팔트 혼합률 (%) | 밀도(g/㎤) | | 아스팔트 용적률 (%) | 공극률 (%) | 포화도 (%) | 안정도 (kg) | flow값 (1/100cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 실측 | 이론 | | | | | |
| A | B | G | H | I | J | K | L | M |
| | | | | $\frac{B\times G}{\text{아스팔트비중}}$ | $100-100\frac{G}{H}$ | $\frac{I}{I+J}$ | | |
| 01-01 | 아스팔트 4.5 (54g) | 2.115 | 2.219 | 9.33 | 4.68 | 66.603 | 24532.2 | 53.3 |
| 01-02 | | 2.110 | 2.219 | 9.31 | 4.93 | 65.362 | 24061.3 | 52.2 |
| 01-03 | | 2.105 | 2.219 | 9.29 | 5.14 | 64.366 | 23717.7 | 54.1 |
| 02-01 | 아스팔트 5 (60g) | 2.108 | 2.201 | 10.33 | 4.24 | 70.897 | 26751.3 | 54.9 |
| 02-02 | | 2.098 | 2.201 | 10.28 | 4.68 | 68.737 | 25145.3 | 55.5 |
| 02-03 | | 2.106 | 2.201 | 10.32 | 4.32 | 70.522 | 25256.8 | 53.4 |
| 03-01 | 아스팔트 5.5 (66g) | 2.106 | 2.187 | 11.36 | 3.69 | 75.479 | 25932.2 | 54.8 |
| 03-02 | | 2.108 | 2.187 | 11.37 | 3.61 | 75.875 | 24786.4 | 56.1 |
| 03-03 | | 2.117 | 2.187 | 11.41 | 3.22 | 77.979 | 24085.7 | 54.7 |

## 3. PE골재 혼합 아스콘에 대한 동적 안정도 시험

### 가. 시험의 목적

휠 트래킹 시험기를 사용하여 (ⅰ)일반 아스팔트혼합물 공시체와 (ⅱ)일반 아스팔트 혼합물 전체량에 19mm PE골재를 중량비로 2.5% 만큼 추가한 아스팔트 공시체에 시험차륜 하중을 반복적으로 가하여 동적 안정도 값이 어떻게 달라지는지 알아보고자 하였다. PE골재를 2.5%만큼 추가한 아스콘에 대한 시험을 수행한 것은 PE골재를 자갈의 치환재 대신첨가재로 넣을 경우 흐름치 감소도 적고 더 안정적일 것으로 판단했기 때문이다. 시험기는 한국건설기술연구원 도로연구실 보유 로울러 콤팩터 및 휠 트래킹 시험기를 사용하였다.

### 나. 시험장비

#### (1) 공시체 제작용 기구

##### (가) 공시체 몰드 및 다짐 롤러

1변의 길이가 (300±5)mm인 정사각형에 두께 50mm의 공시체를 제조할 수 있는 몰드로서, 밑판과 칼라로 되어 있다(그림 3.5.14참조). 로울러는 현장 다짐장비와 유사한 방법으로 다짐할 수 있도록, 다짐면이 원호의 일부 또는 이와 유사한 모형으로 되어 있으며, 마샬시험용 공시체와 동일한 밀도로 다짐이 가능한 로울러 콤팩터를 사용하였다 (그림 3.5.15 참조).

##### (나) 건조기

골재, 아스팔트, 공시체, 몰드 등 혼합물 제조 및 다짐시 필요한 기구들을 소요 온도의 ±2℃ 범위 내로 유지할 수 있는 건조기를 사용하였다.

##### (다) 혼합기

용량 10~15kg의 혼합물을 충분히 혼합 가능한 혼합기로, 가열 보온 장치를 사용하였다.

#### (2)휠 트래킹 시험기

##### (가)시험 차륜

크기는 그림 3.5.16에서 보는 것 같은 지름 200mm, 폭 50mm, 고무 두께 15mm의 솔리드 타이어로 되어 있다.

##### (나)시험 차륜 하중 및 시험 온도

그림 3.5.16의 휠 트래킹 시험장비는 차륜 하중을 유압으로 조정할 수 있다. 시험은 온도 60℃ 상태에서 실시하였다.

(다) 시험 차륜의 주행 속도 및 주행거리

시험 차륜은 공시체 중앙부를 (42±1)회/분의 속도로 수평 왕복 운동한다. 시험 차륜의 주행거리는 (230±10)mm이다.

(라) 변형량 기록

컴퓨터에 연결된 계측 장치로 시험 시간과 변형량을 자동으로 기록하였다. 변위는 주행 위치의 중심에서 측정한다.

(마) 온도계

시험기에는 공시체 표면 및 항온실 내의 온도를 자동기록하는 온도계가 부착되어 있다.

(3). 아스콘 공시체

(가) 골재 준비

PE골재를 비롯한 일반 골재는 105~110℃로 항량이 될 때까지 건조하였다. 골재는 건식으로 체가름하였고, 석분은 체가름하지 않고 그대로 사용하였다.

(나) 혼합 및 다짐 온도 결정

아스팔트의 135℃ 동점도가 (180±20)cST [Saybolt Furol도 : (85±10)초]때의 온도를 혼합 온도, (300±30)cST [Saybolt Furol도 : (145±5)초] 때의 온도를 다짐 온도로 하였다.

(다) 혼합물 준비

혼합물의 소요량은 공시체의 용적(300mm x 300mm x 50mm =4500 $cm^3$)과 다짐 시 손실을 고려한 할증률을 곱하여 준비하였다. 혼합 골재를 투입하여 10초 정도 건비빔한 후 아스팔트를 투입하였다. 골재가 아스팔트에 의해 충분히 피복될 때까지 가능한한 빠른 시간 내에 혼합하였다.

(라) 공시체 다짐

롤러 콤팩터로 다짐하였다. 조립된 공시체 몰드는 오븐에서 130℃로 가열하였다. PE골재 혼합 아스팔트 혼합물을 다짐 몰드에 넣고 몰드 주위를 흙손으로 한 바퀴 다지고, 중앙이 솟아오르도록 소형 삽으로 가볍게 정형한 후 롤러 콤팩터로 다졌다. 최대다짐하중은 8820N으로 하였다.

(마) 공시체의 양생 및 다짐 밀도 시험

다짐을 끝낸 후 몰드와 함께 편편한 바닥에 놓고 실온에서 12시간 이상 방치하였다.



그림 3.5.13 PE골재와 아스팔트 바인더 혼합



그림 3.5.14. 몰드에 PE골재 아스콘을 채우는 모습



그림 3.5.15 롤러콤팩터에 의한 다짐



그림 3.5.16 KICT의 휠 트래킹 시험기

다. 시험 결과

동적 안정도(DS : Dynamic Stability)는 공시체의 표면으로부터 1mm 변형하는데 소요되는 시험차륜의 통과 횟수로서 컴퓨터가 자동으로 (3.5.1)식으로 구한다.

$$DS = 42 \times \frac{t_2 - t_1}{d_2 - d_1} \times C \quad \text{.....(3.5..1)}$$

DS : 동적 안정도(회/mm)

$d_1$ : $t_1$(일반적으로 45분)에서의 변형량(mm)

$d_2$ : $t_2$(일반적으로 60분)에서의 변형량(mm)

C : 크랭크에 의한 변속 구동형 시험기를 사용한 경우의 보정계수 = 1.0

일반 아스콘 공시체와 일반 아스팔트 혼합물 전체량에 19mm PE골재를 중량비로 2.5% 만큼 추가한 아스콘공시체에 대한 동적 안정도시험은 각각 3회 실시하여 평균값을 취하였다.

두 종류의 공시체에 대한 동적 안정도는 모두 KS 기준치인 1,000을 초과하였으며, 표 3.5.11에서 보는 바와 같이 일반 아스콘 혼합물에 19mm PE골재를 중량비로 2.5% 만큼 추가한 아스콘 공시체의 동적 안정도는 일반 아스콘 공시체에 대한 동적 안정도 값보다 약 77% 더 큰 값을 보였다.

표 3.5.11 일반 아스콘 공시체와 PE골재를 2.5% 추가한 아스콘 공시체의 휠 트래킹 시험 결과값

| 동적안정도 | 일반 아스콘 | PE골재 2.5% 추가한 아스콘 |
|---|---|---|
| DS(회/mm) : 평균치 | 1,426 | 2,521 |

## 4. 자갈도상에 PE골재 혼합 아스콘 포설시 동결깊이 감소 효과 현장실험

### 가. 실험 목적

철도 백마고지역 구내에 철도 자갈도상 실험장을 건설하고, (ⅰ)자갈도상만 30cm 두께로 포설했을 때와 (ⅱ)두께 30cm 자갈도상의 하부에 PE골재 혼합 아스팔트층을 포설하였을 때 PE골재의 단열효과에 의해 동결깊이가 감소하는지 알아 보고자 현장 실험을 하였다.

나. 실험 방법

2012년 11월 23일 강원도 철원의 경의선 백마고지역 구내에 동결깊이 측정을 위한 자갈도상을 시공하였다. 우선 백 호우로 지반을 굴착한 후(그림3.3.8 및 그림 3.5.17참조), 그 위에 (ⅰ)한 구간은 자갈 30cm를 포설하여 일반 자갈도상을 축조하였다. (ⅱ)한 구간은 굴착한 지반에 PE골재 혼합 아스콘층을 15cm 깔고 그 위에 자갈 30cm를 포설하여 자갈도상을 만들었다.

그리고 포천시 화염면 소재 경기아스콘산업(주)로부터 아스팔트 혼합물을 덤프트럭으로 현장에 운반하여 와서 미리 계량해 두었던 19mm PE골재를 현장에서 혼합하였다. 혼합작업은 인력에 의한 삽으로 하였다(그림 3.5.18참조). 19mm PE골재 혼합량은 아스팔트 혼합물 전체 양의 2.5%(중량비)에 해당되는 양으로서 이를 추가로 섞었다. 그 후 3.8톤 타이어 로울러로 다졌다(그림 7.13 참조). 끝으로 포장체에 methylene blue 동결심도계와 온도센서를 설치한 후 2012년 12월부터 2013년 1월까지 동결깊이및 온도를 측정하였다.



그림 3.5.17 백호우로 지반 굴착



그림 3.5.18 PE골재와 아스콘 혼합



그림 3.5.19 3.8톤 타이어 로울러로 다지기



그림 3.5.20 자갈 도상의 설치

다. 실험 결과

철원 백마고지역 실험장에 2012년 12월 17일 1차로 출장을 가서 동결깊이를 측정하였고, 2013년 1월 8일 2차로 동결깊이를 측정하였으며, 2013년 1월 29일 3차 출장을 통해 동결깊이를 측정하였다.

표 3.5.12에서는 철원 백마고지역에 설치한 일반 자갈도상, PE골재 혼합 아스콘 포장층 두께 15cm 위에 자갈을 30cm 포설한 자갈도상에서 각각 실측한 동결지수 변화에 따른 동결깊이의 변화를 보여 주고 있다.

표 3.5.12 자갈 도상의 종류별 동결지수 변화에 따른 동결깊이 변화

| 자갈 도상의 종류 | 동결지수<br>118.2℃·day | 동결지수<br>348.4℃·day | 동결지수<br>493.7℃·day |
|---|---|---|---|
| 자갈 도상 30cm | 54cm | 89cm | 90cm |
| PE골재 15cm +<br>자갈도상 30cm | 41.5cm | 83.5cm | 88cm |

표3.5.12에서 보는 바와 같이 자갈도상 하부에 PE골재 혼합 아스콘포장을 포설할 경우 초기에는 동결깊이 차단 효과가 매우 우수하였다. 그러나 추위가 장기간 계속되어 외부의 찬 공기가 PE골재 혼합 아스콘층을 일단 뚫고 지반 속에 침투하고 나면 그 후부터는 동결깊이 차단효과가 상대적으로 감소하는 것을 알 수 있었다.

아울러 제 3절 그림 3.3.7에 나타낸 온도센서로 2012년 11월 23일 17시 온도를 계측하기 시작한 이후, 일반 자갈도상과 자갈 도상 아래에 PE골재 15cm를 포설한 타입의 자갈도상 하부 노반 지중의 온도가 영하 0℃ 이하로 되기까지 걸리는 시간은 일반 자갈도상에서 139시간, 자갈 도상 밑에 PE골재 혼합 아스콘을 15cm 포설한 타입의 자갈도상에서 164시간이 각각 걸렸다. 따라서 온도 센서를 통한 실험에서도 PE골재 혼합 아스콘층을 자갈도상 아래에 설치할 경우 외부의 찬 기온이 서서히 침투하며, 결국 동결심도를 감소시킨다는 사실을 알 수 있었다.

본 현장실험을 통해 PE골재를 아스콘에 섞을 때 (ⅰ)아스팔트 플랜트에서 혼합한다면 아스팔트 혼합물 혼합시 필요한 온도를 잘 유지할 수 있어, 더 균질하게 혼합할 수 있으며 따라서 단열효과가 더 우수하지 않을까 사료되며 (ⅱ)PE골재 혼합율을 아스팔트혼합물 전체 양의 2.5% 보다 더 크게 할 경우 역시 동결깊이 감소효과가 더 크지 않을까 사료되었다. (ⅲ) 또한 추위의 지속 기간(동결지수)에 대응하는 최적의 PE골재 혼합 아스팔트층의 두께 도출에 대해서도 추후 보완연구를 통해 해결하여야 할 것으로 판단된다.

## 제6절 자갈의 분니 함유율별 동상력 실험

### 1. 철도 자갈도상용 Ballast에 대한 동상 실험

철도 자갈도상에 동상이 발생하는 과정을 모사하기 위하여 직경 30cm에 높이 20cm의 자갈용 동상시험기를 제작한 후, 철도 동상 발생 현장에서 채취한 자갈에 동상 발생 현장에서 채취한 분니를 중량비 5%, 10%, 15%가 되게 혼합한 후 동상시험기를 냉동 챔버 속에 넣고 대기온도를 영하 10℃로 유지하면서 동상시험을 실시하였다.(그림 3.6.1 참조)



그림 3.6.1 자갈 도상의 분니 혼합율 별 동상 시험 과정

이때 동상 시험기 하단으로 물을 공급하여 개방형 동상 시스템을 모사하였다. 물은 두꺼운 단열재로 둘러 쌓인 호스를 통하여 공급함으로써 동상시험 기간 동안 얼지 않도록 하였다. 시간 경과별 동상량은 그림 3.6.2에 나타내었다.

그림 3.6.2에서 보는 바와 같이 자갈의 분니의 함유량이 늘어날수록 짧은 기간이지만 동상량이 크게 증가하였다.

핀란드 Tampere대학에서 철도 도상용 자갈에 분니를 혼합하여 수백차례 동상시험을 실시한 결과에 따르면, 최대 동상량이 3mm 이내일 경우 실제 철도 현장에서 영향이 없는 것으로 나타났다. 따라서 그림 3.6.2에서 보는 것처럼 철도 도상용 자갈에 분니 함유량이 5% 미만일 경우에만 핀란드 Tampere 대학의 기준치를 만족하는 것으로 나타났다.
앞으로 철도 도상용 자갈에 분니를 혼합한 실험을 더 많이 실시하여 국내 철도용 자갈 도상의 기준을 만들 예정이다.

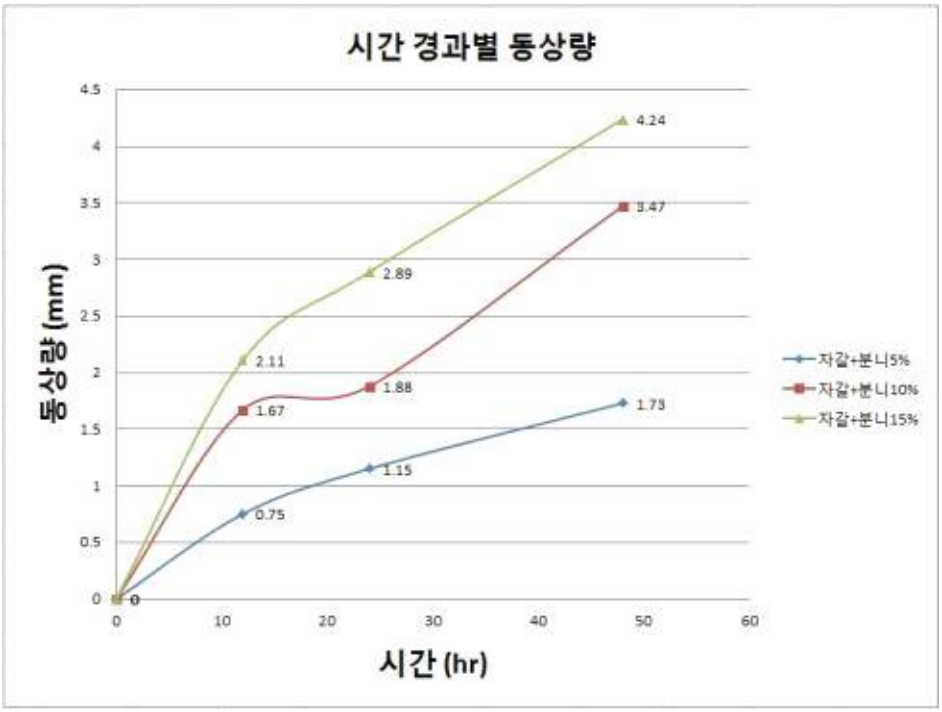



그림 3.6.2 시간 경과별 자갈의 동상량

# 제 7절 콘크리트도상 하부 강화노반 재료에 대한 동상압 실험

1. 강화노반 재료에 대한 동상력 실험의 의의

철원 백마고지역에서 실제 KTX 콘크리트도상과 동일한 재료, 동일한 치수로 TCL 및 HSB(두께 52.4cm), 보조도상(두께 30cm) 그리고 입도조정층(두께 30cm)을 설치한 후 겨울철 동결지수 변화에 따른 동결깊이를 측정한 결과, 동결지수가 581.4℃·day 이상이 되면 동결깊이가 TCL 및 HSB(두께 52.4cm)+보조도상(두께 30cm)+ 입도조정층(두께 30cm)를 합한 두께를 초과하는 것을 확인하였다.

실제로 국내 강원도 북부 및 경기도 북부, 충북 북부지방에서는 동결지수가 650~750℃·day에 이르는 겨울이 종종 있다. 따라서 이러한 한파가 닥칠 경우 KTX 강화노반이 동결되면서 콘크리트도상에 얼마만한 동상력(동상압)이 작용하는지 알아 보고자 하였다.

2. 강화노반 재료에 대한 동상력 실험

(1) 시료

본 실험에 사용한 강화노반 시료는 호남고속철도 제 ○○공구 노반신설공사 현장에서 채취한 시료로서 그 입도분포는 그림 3.7.1과 같다.

# 입도시험(체분석) - 강화노반

공 사 명 : 호남고속철도
시 험 번 호 :
시 험 일 자 : 2013. 04. 01.
시 료 종 류 :
시료채취일자 : 2013. 03. 30
시료채취장소 : 토공 7 구간

체가름 시험

| 체(mm) | 남은 무게1 | 남은 무게2 | 평균 | 남은율 | 가적 남은율 | 가적 통과율 | 기준 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 40 | 0 | 0 | 0 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 100 | 100 |
| 31.5 | 2144 | 2337 | 2240.5 | 8.9 | 8.9 | 91.1 | 85 | 95 |
| 16 | 3928 | 4152 | 4040 | 16.0 | 24.8 | 75.2 | 56 | 82 |
| 5 | 5705 | 5926 | 5815.5 | 23.0 | 47.8 | 52.2 | 27 | 53 |
| 2.5 | 3124 | 3354 | 3239 | 12.8 | 60.6 | 39.4 | 21 | 43 |
| 1.2 | 2591 | 2784 | 2687.5 | 10.6 | 71.2 | 28.8 | 16 | 35 |
| 0.6 | 2108 | 2278 | 2193 | 8.7 | 79.9 | 20.1 | 10 | 25 |
| 0.3 | 1665 | 1822 | 1743.5 | 6.9 | 86.8 | 13.2 | 8 | 18 |
| 0.15 | 1352 | 1404 | 1378 | 5.4 | 92.26 | 7.7 | 5 | 12 |
| 0.08 | 819 | 855 | 837 | 3.3 | 95.57 | 4.4 | 4 | 8 |
| PAN | 1026 | 1217 | 1121.5 | 4.4 | 100.0 | 0.0 | | |
| 합 계 | 24462.0 | 26129.0 | 25295.5 | 100.0 | | | | |

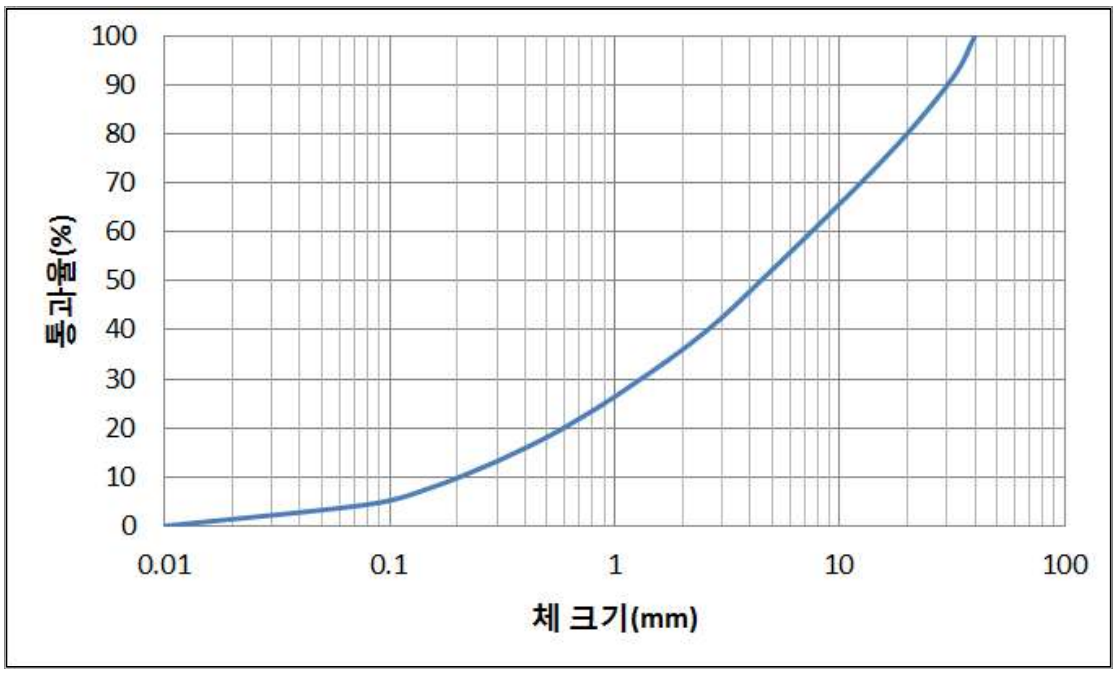



그림 3.7.1 강화노반 시료의 입도분포곡선

(2)실험 방법

① 제 3장 6절 그림 3.6.1에서 보여 주는 내경 30cm, 높이 20cm인 동상시험기에 강화노반의 시료를 함수비를 변화시켜 가면서 채웠다. 이 동상시험기에 load cell을 설치하고, load cell을 다시 data logger에 연결한 후 이 동상시험기를 냉동챔버 속에 넣었다. 그리고 동상시험을 실시하였다. 동상시험 수행 시 동상시험기 외부로부터 물을 공급하지 않는 close system(폐쇄형)을 채택하였으며, 냉동챔버의 온도를 -25℃로 48시간 동안 가동시켰을 때 data logger에 나타나는 동상력을 측정한 후 동상시험기 단면적으로 나누어 동상압을 계산하였다.

자연현상의 동상은 지하로부터 지하수가 공급되면서 흙이 얼어 팽창하는 개방형 동상(open system)인데 비해, 이 실험에서 채택한 폐쇄형(close system) 동상실험은 콘크리트도상 하부 강화노반층에 늦가을에 내린 비가 침투하여 함수비가 증가되었을 때 동상이 일어나면 과연 콘크리트도상에 얼마만한 동상압이 작용할 것인가를 모사하기 위한 실험이었다. 즉, 강화노반 하부로부터 지하수가 공급되지 않더라도 가울철에 내린 빗물이 강화노반층에 침투할 경우 강화노반 흙 자체의 함수비 만으로 동결할 경우 콘크리트도상에 얼마만한 동상압이 작용할 것인지 알아 보기 위한 실험이었다.

②한 번의 동상압 측정이 끝나면 냉동챔버를 +25℃로 12시간 동안 가동하여 동상시험기 내의 언 시료를 녹인 후 제거하였다. 그리고 다시 새로운 강화노반 재료를 함수비를 조절한 후 동상시험기에 넣고 -25℃ 상태로 48시간 동안 냉동시켜가면서 동상력을 측정하는 방법을 되풀이하였다.

(3) 실험 결과

강화노반 재료의 함수비 변화에 따른 동상압 변화를 그림 3.7.2에 표시하였다. 그림3.7.2에서 보는 바와 같이 강화노반 재료의 함수비가 21%가 되면 동상압은 약 0.9t/$m^2$의 동상압이 발생하여 콘크리트도상을 충분히 변형시킬 수 있게 된다.

그런데 이 실험은 냉동챔버의 온도를 - 25℃로 맞추고 48시간(2일)이라고 하는 매우 짧은 기간에 동상압을 측정한 것이다. 일평균온도 - 25℃ × 48시간(2일)은 사실상 동결지수로 환산하면 50℃·day에 불과하다. 그러나 강원도 북부지역이나 경기도 북부지역의 동결지수가 겨울철 한파의 강도 및 지속기간에 따라서 650~750 ℃ ·day에 이르는 겨울도 자주 있다. 이런 겨울철에 콘크리트도상에 작용하는 동상압은 훨씬 더 클 것이라는 사실을 충분히 예상할 수 있다. 이러한 겨울에는 KTX 콘크리트도상은 강화노반재료의 동상에 의해 융기하거나 변형이 생길 가능성이 매우 크므로 특별한 대책이 요구된다.

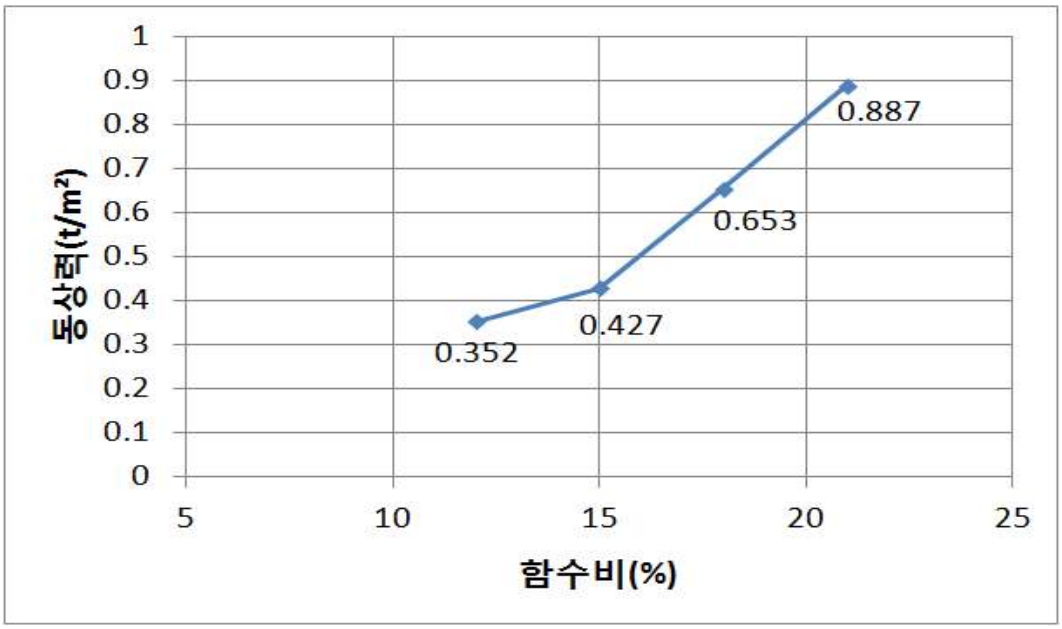



그림 3.7.2. 강화노반 재료의 함수비 변화에 따른 동상압 변화

# 제 8절 콘크리트도상 하부 노반재료의 동상 안정성 평가

## 1. 흙의 동상과 콘크리트도상

### 가. 흙의 동상

(1) 동상의 메커니즘

흙의 온도가 0℃ 이하로 저하되면 토중의 수분이 얼고 흙은 동결상태가 된다. 이것을 동상이라 하며 겨울철 동결상태가 되어 봄에 융해되는 것을 계절적 동토, 1년 내내 동결상태를 유지하는 것을 영구동토라 부르고 구별한다.

우리나라는 남해안 일부지역과 제주도를 제외한 전역(전면적의 약 95%)이 매년 동결과 융해를 반복하는 계절적 동토 지역(seasonal frost area)에 속한다. 사계절이 뚜렷한 국내의 기후조건으로 인해, 겨울에는 한랭 건조한 대륙성 고기압(시베리아 기단)의 영향을 받아 찬 기운이 땅속의 모세관 현상에 의해 상승된 지하수를 얼려 아이스 렌즈(ice lens)를 형성하게 된다. 이 아이스 렌즈가 성장하며 동상(frost heaving)을 유발하여 지표면이나 지반구조물을 융기시킨다. 반대로 봄철에는 기온이 올라가면서 동결된 지반이 녹으면서 융해(thawing)가 발생하고 이로 인해 지반이 포화되고 침하된다. 특히 겨울과 봄 사이에 동상과 융해가 반복되어 지표면 위의 구조물의 내구성을 감소시킨다.

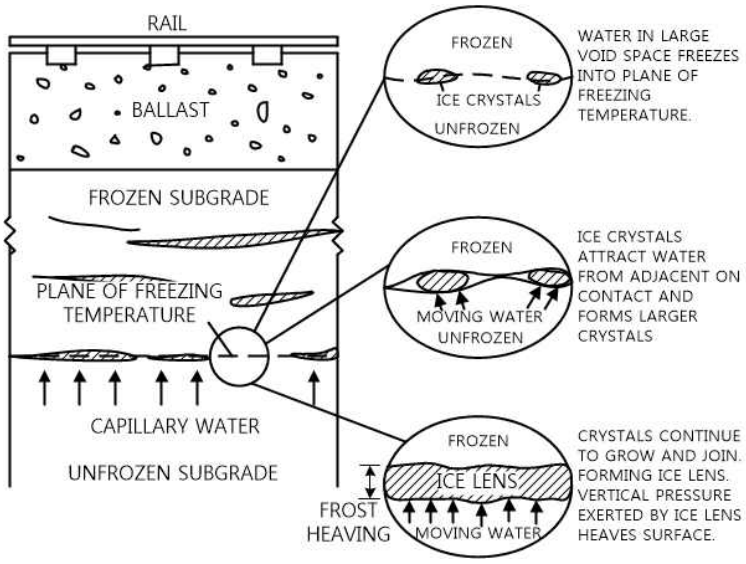



그림 3.8.1 Ice lens 형성과정(Modified from TRB, 1974)

(2) 동상의 발생 요인

(가) 흙입자의 크기

동상에 관한 연구가 본격적으로 시작된 것은 1929년 Taber에 의해서이며, Casagrande(1932)와 Beskow(1935) 같은 연구자들은 아이스 렌즈는 입자크기와 분포에 영향을 받는다는 것을 발견하였다. Beskow는 입경이 0.1mm 이상의 흙에서는 아이스 렌즈가 거의 발생하지 않는다고 하였으며, 입경이 작아질수록 동상성이 크게 되다가 0.05~0.002mm사이의 흙에서 가장 동상성이 커진다고 하였다. 실트나 점토와 같이 입도가 작은 세립토일수록 지하수를 흡수하는 모관인력이 커 다량의 수분공급이 이루어지기 때문이다. 그러나 그 이하의 입경에서는 흙입자의 간극이 좁아 투수성이 나빠지고 동결면으로 수분공급이 어려워 오히려 동상성이 작아지게 된다. 또한 입도분포에 관해 Casagrande는 0.02mm이하 입경의 세립분을 중량비로 3%이상 포함한 양입도의 흙도 동상이 발생할 수 있으며, 입경이 균일한 흙에서도 최소 10%를 포함하고 있으면 위험할 수 있다고 하였다.

Casagrande의 연구내용을 바탕으로 미공병단의 “Pavement Design for Seasonal Frost Conditions" (Army TM 5-818-2, 1985)에서는 여러 흙에 대한 실내동상시험을 실시하여 0.02mm 통과량과 소성지수(PI)를 이용하여 동상민감도 판정기준을 제시하고, 이에 따른 분류를 하였다. 이 기준에 해당될 경우 동상에 민감하기 때문에 노반을 동결심도만큼 비동상성 재료로 치환하거나, 동상방지층을 사용하여야 한다. 미공병단이 흙을 동결가능정도를 구분하여 NFS, PFS, S1, S2, F1, F2, F3, F4의 8군으로 분류한 것을 나타낸 것이다. 이러한 분류는 융해에 따른 강도감소를 개략적으로 고려한 것이며, NFS, PFS, S1, S2는 동상을 크게 우려할 필요가 없는 재료에 해당된다. F1군은 동결가능성이 있는 자갈질 흙으로 0.02mm보다 가는 입경을 6~10% 포함한 것이다. 자갈질 흙이 0.02mm보다 가는 입경을 10~20% 포함하고 있거나, 모래인 경우 6~15% 함유하고 있으면 이 흙은 F2군으로 분류한다. F1, F2군의 흙이 동일조건하에서 동상을 받더라도 융해시에는 세립분이 적은 F1군이 F2군보다 더 큰 지지력을 갖는다. 자갈질의 흙이 0.02mm보다 가는 입자를 20%이상 가지고 있거나 모래인 경우 이것을 15%이상 가지고 있으면 이 흙은 F3군으로 분류한다. 또한 소성지수가 12%이하인 흙도 F3군에 속한다. 동상을 가장 많이 받는 흙은 F4군으로 여기에 속하는 흙은 실트, 소성지수가 12%이상인 점토, 입경이 0.02mm이하의 함량 15%이상인 대단히 가는 실트질 모래 등이다.

표 3.8.1 동상설계를 위한 흙의 분류(TM 5-818-2, 1985)

| Frost group | Soil type | Percentage finer than 0.02mm by weight | Typical soil types under Unified Soil Classification System |
|---|---|---|---|
| NFS* | (a) Gravels<br>Crushed stone<br>Crushed rock<br>(b) Sands | 0-1.5<br><br><br>0-3 | GW, GP<br><br><br>SW, SP |
| PFS** | (a) Gravels<br>Crushed stone<br>Crushed rock<br>(b) Sands | 1.5-3<br><br><br>3-10 | GW, GP<br><br><br>SW, SP |
| S1 | Gravelly soils | 3-6 | GW, GP, GW-GM, GP-GM |
| S2 | Sandy Soils | 3-6 | SW, SP, SW-SM, SP-SM |
| F1 | Gravelly soils | 6 to 10 | GM, GW-GM, GP-GM |
| F2 | (a) Gravelly soils<br>(b) Sands | 10 to 20<br>6 to 15 | GM, GW-GM, GP-GM<br>SM, SW-SM, SP-SM |
| F3 | (a) Gravelly soils<br>(b) Sands, except very fine silty sands<br>(c) Clays, PI less than 12 | Over 20<br>Over 15<br><br>- | GM, GC<br>SM, SC<br><br>CL, CH |
| F4 | (a) All silts<br>(b) Very fine silty sands<br>(c) Clays, PI greater than 12<br>(d) Varved clays and other fine-grained, banded sediments | -<br>Over 15<br>-<br>- | ML, MH<br>SM<br>CL, CL-ML<br>CL and ML ;<br>CL, ML, and SM ;<br>CL, CH, ML and SM |

* Non-frost-susceptible.
** Possibly frost-susceptible, but requires laboratory test to determine frost design soil classification

(나) 간극수 및 물의 공급

물의 공급원이 동결면과 가까이 있으면 아이스 렌즈는 지속적인 물의 공급으로 인해 팽창한다. 특히 지하수위 뿐만 아니라 동결면 아래의 물이 모세관작용으로 이동하기 때문에, 흙 입자 입경에 따라 다른 모관 상승고와 물의 공급원이 동상에 영향을 미칠 수 있는 거리가 중요하다.

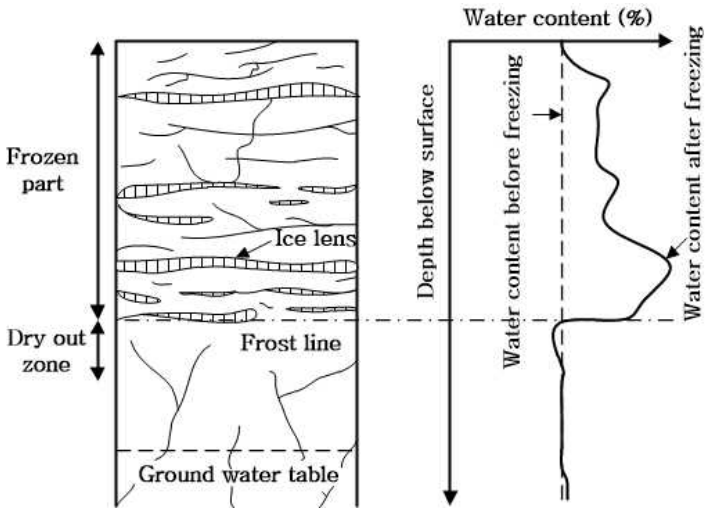



그림 3.8.2 동결토에서의 함수비 분포 변화(Beskow, 1935)

균열이 발생한 점토가 동결하기 전과 동결하여 아이스 렌즈를 형성한 후의 함수비 분포를 비교한 것이다. 보통 동결이 진행됨에 따라 아이스 렌즈가 주변의 물을 끌어당겨 동결층의 함수비는 증가하고 동결면 아래의 흙은 함수비가 감소한다. 그로 인해 동결면 아래 흙의 함수비가 저하되면 저위 포텐셜 영역이 되어 물을 외부로부터 흡입하게 된다. 일반적으로 수분 공급이 없는 간극에 물이 동결할 때(closed system) 체적은 최대 9%까지 팽창하게 되고, 지하수가 공급되는 상태(open system)에서는 지속적인 동결영역 확장으로 체적이 50% 이상 팽창하기도 한다(김영진 등, 1999).

Schofield(1935)는 지반 내 부동수분의 양이 적을수록 동결온도가 0℃ 이하로 쉽게 내려감을 확인하였고, 中村 등(1979)은 일반적으로 흙입자의 비표면적이 큰 흙에서는 부동수분의 양이 많아 동상이 쉽게 발생한다고 하였다. 또한 Bouyoucos(1920)는 점토지반에서의 동결 시 -78℃ 이하의 온도에서도 부동수분이 존재하는 것을 확인하였으며, 매우 낮은 온도에서도 얼지 않는 부동수분이 동결지반의 역학적인 특성을 결정하는 중요한 인자라고 하였다.

일반적으로 깨끗한 상태로 준비된 흙 시료가 아닌 자연 상태의 지반에서는 간극수에

다양한 화학적인 성분들이 용해되어 있으며 그 중에서도 염분의 농도 변화가 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 알려졌다.

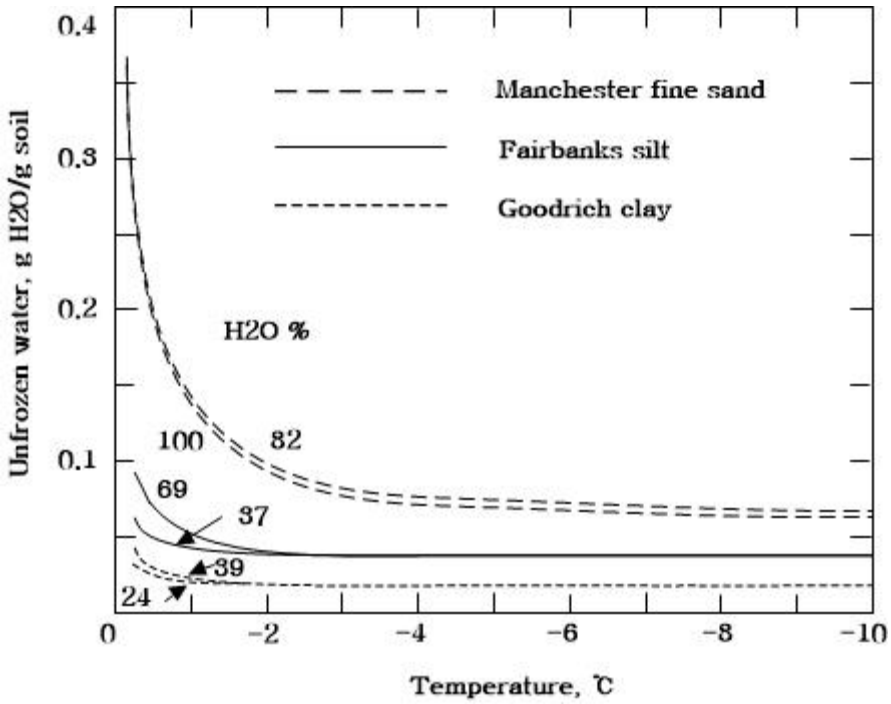



그림 3.8.3 흙의 종류에 따른 부동수분과 온도와의 관계(Tice, 1977)

즉, 지반 간극수의 동결이 진행되면서 부동수분의 염분농도는 증가하게 되고 부동수분의 빙점은 더 낮아지게 된다(Ayers 등, 1951).

高志(1980)는 흙의 간극수의 점성이 동상성에 큰 영향을 미친다고 밝혔다. 즉, 간극수의 점성이 클수록 동결면으로 흡수되는 모관수의 이동이 느려지고, 결국 흡수량이 감소되어 동상율이 감소한다는 사실을 점토에 CMC(Corboxyl Methyl Cellulose)을 섞은 동상시험을 통해 입증하였다.

(다) 온도

동결지수의 단위는 온도·일(℃ · days)이며, 아래 그림과 같이 어느 동결계절 동안의 누가온도·일 에 대한 시간 곡선상의 최고점과 최저점의 차이로 나타낸다. 그러나 이 동결지수 값은 측후소 위치에서 관측한 값을 토대로 한 것이므로 아래 식을 이용하여 설계노선의 표고에 대한 보정을 한 후, 수정된 동결지수를 동결심도 산정모델에 적용하여 해당지역의 설계 동결깊이를 결정하게 된다.

수정동결지수(℃ · days)

$$= \text{동결지수} + 0.5 \times \text{동결기간} \times \frac{\text{표고차}}{100}$$

여기서, 표고차(m) :

설계노선 최고표고 - 측후소 지반고

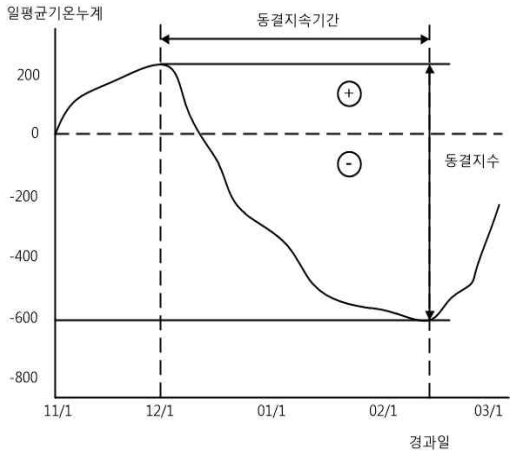



그림 3.8.4 동결지수와 동결지속기간

나. 콘크리트도상의 동해 대책

(1) 국내 철도동상

동절기에 일부 한랭지역에서는 기온의 하강으로 인해 노반 및 자갈도상에서의 동결발생으로 궤도가 부분적으로 융기되고 있으며 해빙기에 융해되어 침하되는 현상이 반복되고 있다. 이런 동결·융해의 반복은 차량의 안전운행에 차질을 빚게 하고, 궤도보수와 재공사로 인해 많은 경제적 손실이 생기게 한다. 또한 기차가 대규모 인원 운송수단이라는 점에서 대규모의 인명피해가 발생할 수 있는 잠재적 사고요인이기도 하다.

국내에서 철도노반에 동상이 발생하는 개소는 강원, 충북북부, 경북북부, 경기동부 지역으로 나타났다. 2011년도에 동상이 발생됐던 전체개소는 190개소이며 총연장은 약 8km에 이른다(한찬용 등, 2011). 동상 발생의 주요원인은 배수불량이며, 대부분의 동상발생개소에서 하절기에 지반의 연약화로 분니가 발생하고 있는 것으로 나타났다(이승열, 2010). 이 분니로 인해 간극이 막혀 배수가 지연되고 동상이 발생하기 쉬운 흙으로 변한다고 판단된다.

철도에서의 동결융해 대책으로 현재 국내에서는 매년 동절기 이전에 도상자갈을 치환하거나 침목과 침목 사이 일정한 깊이에 염화칼슘을 살포하여 동결융해에 대한 피해를 예방하고 있으며, 원천적인 해결방안인 배수시설의 개선에도 노력을 기울이고 있다. 또한 사후대책안으로 동상발생개소 연결구간에 레일패드(packing)를 삽입하여 그 높이차를 유연하게 연결하고 있는 실정이다.

표 3.8.2 연도별 동상 발생현황(한창용 등, 2011)

| | | 경부 | 경의 | 경원 | 충북 | 경춘 | 중앙 | 영동 | 태백 | 기타 | 계 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2009 | 개소 | - | - | - | 3 | - | 33 | 55 | 23 | 15 | 129 |
| | 연장(m) | - | - | - | 120 | - | 1,668 | 1,420 | 508 | 194 | 3,910 |
| 2011 | 개소 | 14 | 10 | 7 | 20 | 53 | 54 | 9 | 13 | 10 | 190 |
| | 연장(m) | 955 | 377 | 140 | 775 | 1,105 | 2,069 | 134 | 1,514 | 790 | 7,859 |

사전예방안인 도상자갈치기는 분니 제거(토질상태변화)가 주목적이지만 상습적으로 분니가 발생하는 개소에서는 1년 이내에 분니가 재발하는 문제가 있다고 보고되고 있다(이진욱 등, 2005).

표 3.8.3 2011년도 동상발생개소의 자체 원인 분석(한창용 등, 2011)

| | 배수불량 | 횡단구조물 | 지형(음지) | 분니개소 | 기타 |
|---|---|---|---|---|---|
| 동상발생개소 | 111 | 25 | 32 | 22 | 0 |

염화칼슘 살포는 침목과 침목사이를 소정의 깊이까지 굴착한 후 염화칼슘을 살포하고 다시 도상자갈로 덮는 방법으로 시행하고 있으나, 우천 시 염화칼슘이 융해되어 동상방지효과는 저하되고 지하수 오염을 유발할 수 있다는 단점이 있다. 또한, 염화칼슘은 강재를 부식시키고(전재철, 2001) 콘크리트의 박리를 유발시켜 수명을 단축시키는 것으로 알려져 있다(이경배 등, 2007). 배수불량의 경우, 배수시설 개선으로 동결융해의 문제를 해소할 수 있는 개소가 있는 반면, 주변구조물이나 기타 시설물에 의해 원천적으로 배수개선의 여지가 없는 곳도 있다. 때문에 시공이 완료된 철도에서 기존의 동상방지 대책 뿐만 아니라 다양한 재료를 사용하여 동상을 예방하는 연구가 이루어지고 있다.

현재 국·내외에서 동상 방지를 위해 연구되어지고 있는 재료는 폐타이어 조각, EPS, 토목섬유 등이 있다. 이러한 재료들은 철도뿐만 아니라 도로에서의 동상 방지에도 효과적으로 사용될 수 있다.

국내에서는 김영진 등(1998)이 도로에서 폐타이어 조각을 이용한 동결깊이의 감소효과를 실험적으로 규명하였고, 이승열 등(2010)은 폐타이어 조각을 동상이 발생하는 개소에 다양한 방법으로 설치하여 동상량을 감소시키는 방법에 대해 연구하였다. 또한 한창용 등(2011)은 폐타이어 조각을 활용하여 동상팽창압을 흡수하는 방안을 모색하였다. 그러나

폐타이어 조각의 혼합 이용은 아직도 폐기물 관리법(2005)에서 허용하지 않고 있어 사용에 제약이 따르고 있다.

Gandahl(1985)은 스웨덴 북부지역의 도로 포장체에 10cm두께의 스티로폼 판(EPS board)을 동상방지층으로 포설하였다. 현장 계측결과, 동결깊이는 일반 도로에 비해 현저히 감소하였다. 핀란드 등 북부유럽의 도로 및 철도에서는 스티로폼 판을 동상방지층 재료로 상당량 활용되고 있다.

Bell(1983), Holtz(2001) 등은 모관상승 억제를 통한 동상 방지를 위하여 토목섬유인 geotextile 활용을 연구한 바 있다. 또한 이진욱 등(2005)은 노반을 geotextile과 geocomposite로 보강하여 분니를 억제하는 연구를 하였다.

(2) 국내 철도 기준

동상방지층 재료는 부순돌, 자갈, 모래, 스크리닝스(screenings), 슬래그(slag), 저회(bottom ash) 또는 감독원이 확인한 재료 또는 혼합물로서, 점토, 실트(silt), 유기불순물 등을 포함하지 않은 비동결 재료이어야 하며, 다음 표 품질기준에 맞는 것이어야 한다.

표 3.8.4 동상방지층 재료의 품질기준

| 구분 | 시험방법 | 기준 |
|---|---|---|
| 소성지수 % | KS F 2303 | 10 이하 |
| 모래당량 % | KS F 2340 | 20 이하 |
| 수정 CBR % | KS F 2320 | 10 이상 |

보조기층 재료는 견고하고 내구적인 부순 돌, 자갈, 모래, 스크리닝스, 슬래그, 저회, 기타 감독원이 확인한 재료 또는 혼합물로서 점토, 실트, 유기불순물, 기타 유해물을 함유하여서는 안 되며, 다음 표의 품질기준에 적합하여야 한다.

표 3.8.5 보조기층 재료의 품질기준

| 구분 | 시험방법 | 기준 |
|---|---|---|
| 액성한계 % | KS F 2303 | 25이하 |
| 마모감량 % | KS F 2503 | 50이하 |
| 소성지수 % | KS F 2303 | 6이하 |
| 수정 CBR % | KS F 2320 | 아스팔트 콘크리트 포장 30이상<br>시멘트 콘크리트 포장 50이상 |
| 모래당량 % | KS F 2340 | 25이상 |

자갈도상과 콘크리트도상에 대한 흙쌓기 상부노반과 하부노반의 재료 요건은 다음과 같다.

표 3.8.6 궤도 노반 재료의 품질기준

| 구분 | 자갈도상 | | 콘크리트도상 | |
|---|---|---|---|---|
| | 상부노반 | 하부노반 | 상부노반 | 하부노반 |
| 최대입경 | 100mm 이하 | 300mm 이하 | 100mm 이하 | 300mm 이하 |
| 수정 CBR | 10이상 | 2.5이상 | 10이상 | 2.5이상 |
| 5mm체(4번체) 통과율 | 25~100% | - | 25~100% | 25~100% |
| 0.08mm체(200번체) 통과율 | 0~25% | - | 0~25% | 0~25% |
| 소성지수 | 10 이하 | - | 10 이하 | 10 이하 |

강화노반의 두께는 궤도구조, 열차속도, 상부노반 또는 원지반의 지반 특성 및 동결심도에 대해 안정하도록 설계하여야 한다. 아래 표와 같이 열차설계속도, 도상조건 등을 고려하여 일반철도, 고속철도로 구분하여 설계하여야 한다.

표 3.8.7 강화노반 재료의 품질기준(mm)

| 노반형상 \ 궤도조건 | | | 자갈도상 | | | | 콘크리트도상 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 일반철도 | | 고속철도 | | 보조 도상층 | 입도 조정층 |
| | | | 보조 도상층 | 입도 조정층 | 보조 도상층 | 입도 조정층 | | |
| 쌓기 | 일반 철도 | $k_{30} \geq 110\ MN/m^3$ | 200 | - | 200 | 200~300 | 200 | 200~300 |
| | 고속 철도 | $E_{v2} \geq$ 80MPa | | | | | | |
| 깎기 및 평지 | 일반 철도 | $k_{30} \geq 110\ MN/m^3$ | 200 | - | 200 | 200~450 | 200 | 200~450 |
| | 고속 철도 | $E_{v2} \geq$ 80MPa | | | | | | |

암반상의 강화노반은 아래의 표와 같이 일반철도와 고속철도로 구분하여 설계하여야 한다. 깎기 구간 중 암반이 100m이상 나타날 경우 강화노반은 원칙적으로 설치하지 않는 것으로 하되, 균열 상태, 풍화 및 암반의 특성에 따라 아래의 표를 적용할 수 있다. 또한, 변화구간을 두어 강성차이에 따른 침하량을 최소화하여야 한다. 특수한 노반조건인 경우

는 역학적 및 경험적 설계를 통해 별도의 두께로 설계하여야 한다.

표 3.8.8 암반상의 강화노반 재료의 품질기준(mm)

| 구분 | 자갈도상 | | | | 콘크리트도상 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 일반철도 | | 고속철도 | | | |
| | 보조 도상층 | 입도 조정층 | 보조 도상층 | 입도 조정층 | 보조도상층 | 입도조정층 |
| 암반구간 (중경암 및 경암) | 200 | - | 200 | 150~250 | 200 | 150~200 |

그리고 고속철도에서의 모식도는 그림 3.8.5 및 그림 3.8.6과 같다.

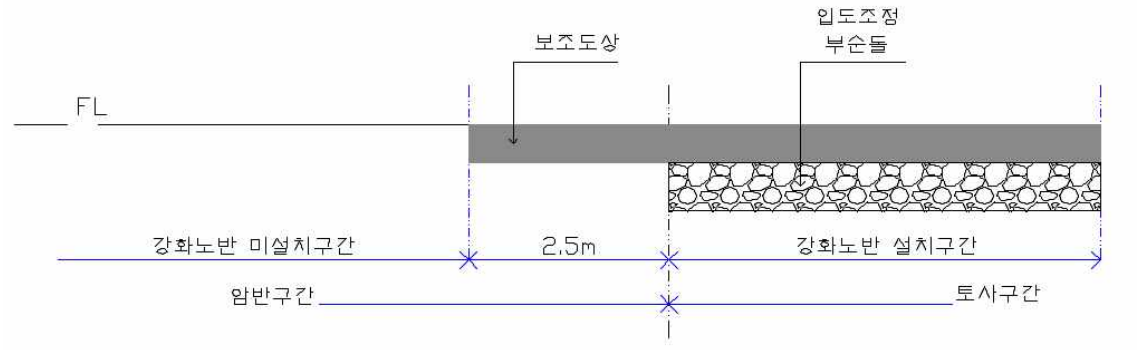



그림 3.8.5 강화노반 구간의 모식도

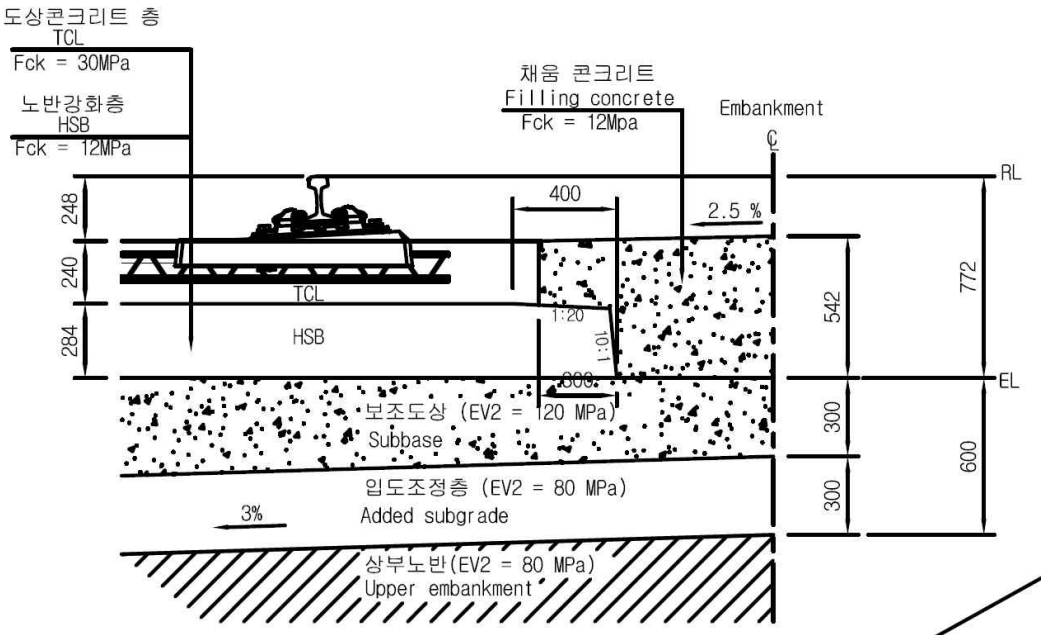



그림 3.8.6 경부고속철도 표준단면(쌓기)

표 3.8.9 고속철도 재료표

| 구분 | 규격 | |
|---|---|---|
| 도상 콘크리트 층(TCL) | $F_{ck}$ = 30MPa | 25-30-12 |
| 노반 강화층(HSB) | $F_{ck}$ = 12MPa | 25-12-05 |
| 중앙 채움콘크리트 | $F_{ck}$ = 12MPa | 25-12-12 |
| 채움 자갈 | 치수 : 22.4 ~ 63mm | |

(다) 철도 노반의 지지력

현재 한국철도시설공단 철도설계기준(노반편)에 의하면 철도 노반의 지지력은 독일의 DIN 18134에 의하여 평가하고 있다. 그러나 이 기준은 현장재하시험에 의한 것으로서 재하판과 반력 시스템을 갖춰 평가하는 것이며 기준의 만족 여부를 사전에 토취장에서 채취한 소량의 시료만으로 평가할 수 있는 방법은 아직 연구되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 실내에서 도로용 지지력 평가 목적으로 자주 사용되고 있는 CBR 시험기의 관입봉과 토조에서 토조의 폭과 관입봉의 직경비(B/D)를 달리하여 소규모의 재하시험을 DIN 기준에 준하여 수행하고, 이의 결과를 현장에서의 지지력과 연관시키고자 다양한 실내 시험을 수행하였다. 참고로 CBR시험은 지지력과 관련된 다양한 선행 연구가 있다.

(1) CBR의 선행 연구

“The design and performance of road pavements(David Croney and Paul Croney, 1991) - The Soil Foundation”에 의하면 노반의 지지력에 대해 많은 결과값을 제시해 주고 있다.

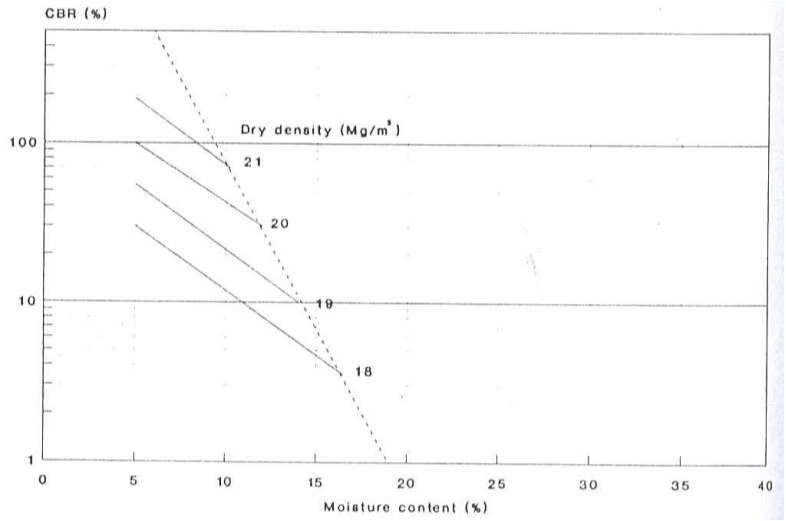



그림 3.8.7 함수비와 CBR과의 관계

그림3.8.7에서 알 수 있듯이 함수비가 윤활유 역할을 하면서 함수비가 증가함에 따라 지지력이 낮아지는 것을 볼 수 있다. 또한 지지력과 관련된 지반반력계수와의 관계 또한 제시하였다.

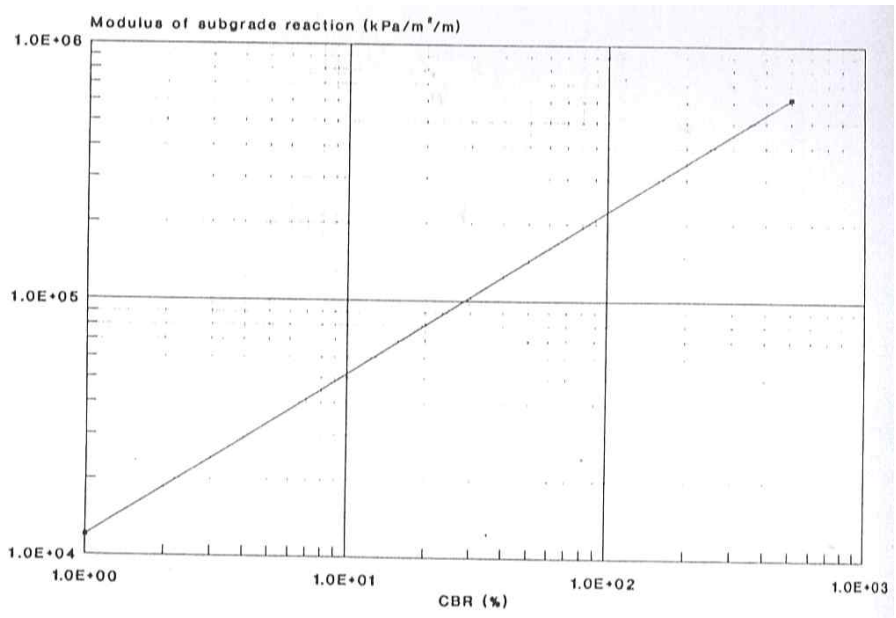



그림 3.8.8 CBR과 지반반력계수와의 경험적 관계

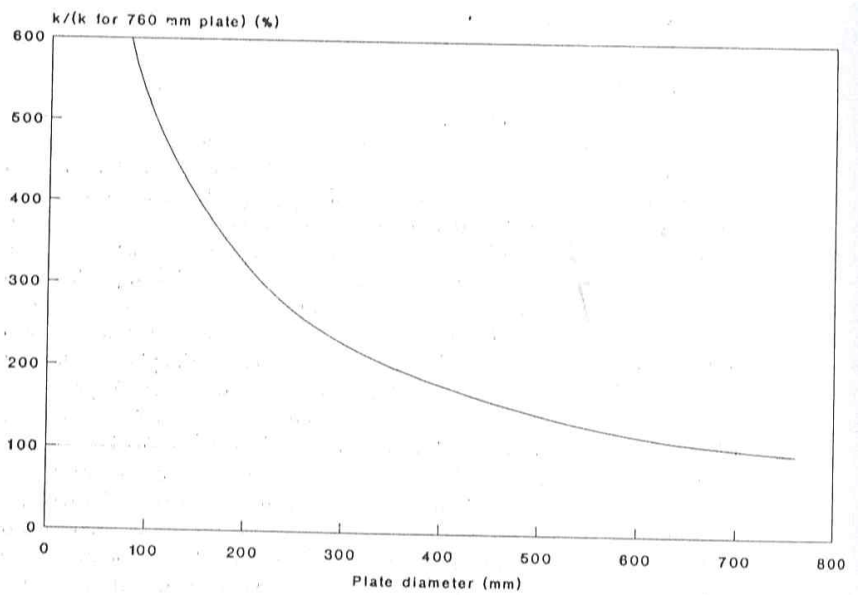



그림 3.8.9 재하판 직경과 지반반력계수와의 관계

그림 3.8.8에서 알 수 있듯이 CBR이 증가함에 따라 지반반력계수 또한 증가하였고, 그림 3.8.9에서 알 수 있는 바와 같이 재하판의 직경이 작을수록 지반반력계수가 크고, 직경이 커짐에 따라 지반반력계수가 작아짐을 알 수 있다. 이는 재하판이 커짐에 따라 영향범위가 커지고 침하가 커짐에 따라 지반반력계수가 작아졌음을 의미한다.

“The design and performance of road pavements”에서는 변형계수와 CBR의 관계를 아래 그림 3.8.10과 같이 나타내었다. 이 그림으로부터 변형계수와 CBR은 반대수지상에서 선형관계로 나타남을 알 수 있다.

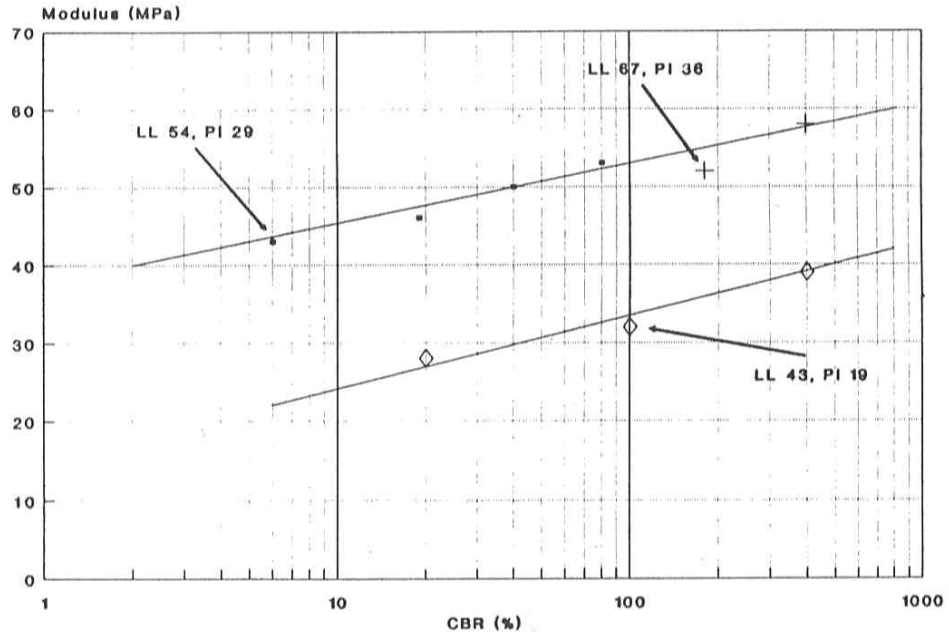



그림 3.8.10 CBR과 변형계수와의 관계

(1) 노상토 지지력 시험(CBR)

(가) 정의

노상토(路床土)의 지지력을 비교하기 위해 생각해 낸 관입 시험의 일종, 노상토 지지력 시험이라고도 한다. 도로의 기층을 만들 때 사용하는 가장 우수하다고 여겨지는 크러셔 · 런(crusher-run)을 사용하여 지름 5㎝의 피스톤을 관입했을 때의 관입 깊이와 단위 하중에 대해 시험한 흙의 동일한 깊이에 대한 단위 하중이 몇 %인가를 구하는 시험이다. 이때의 %를 CBR 값이라 하며 노상토 및 포장용 입상 재료의 강도 지표로서 사용된다.

(나) 목적

도로나 비행장 같은 가요성 포장을 지지하는 포장하부의 노상 또는 노반의 강도, 압축성, 팽창성, 수축성 등을 결정하는 시험으로 포장 하부의 지지력을 측정함으로써 포장두께를 결정하기 위해서 하는 실험이다.

(다) 노상토 지지력 시험 종류 및 특징

① 실내 시험

다져진 흙 또는 불교란 시료에 대하여 직경 5cm의 강봉을 관입하여 침하량 - 하중 관계를 구하여 표준하중에 대한 비로 나타낸 것이다.

$$CBR\ (\%) = \frac{\text{시험 단위 하중}}{\text{표준 단위 하중}} \times 100$$

표준 단위하중 및 시험 단위하중은 보통 관입량 5.0mm 에 있어서의 값을 취한다.

표 3.8.10 CBR 표준단위하중값

| 관입량 | 표준단위하중(kg/cm²) | 전하중(kg) |
|---|---|---|
| 2.5mm | 70 | 1370 |
| 5.0mm | 105 | 2030 |

* CBR 2.5 > CBR 5.0 ⇒ CBR 2.5
* 관입량 5.0 mm 일때의 CBR이 2.5 mm 일 때보다 클 경우
  CBR 2.5 < CBR 5.0 ⇒ 재시험해서 같은 결과이면 CBR 5.0 선택

본 시험에 필요한 시험장치 및 기구는 다음과 같다.

- Mold : 내경 150mm, 높이 175mm
- Rammer : 직경 50mm, 무게 4.5kg, 자유낙하고 45cm
- 관입 피스톤 : 직경 50mm, 길이 200mm
- 재하장치 : 용량 약 5t, 관입속도 1mm/min
- 다이얼게이지, 하중판, 팽창 측정장치
- 축이 붙은 유공판 (흡수 팽창 측정용)

② 시료준비

자연건조 후 잘게 빻아서 19mm 체에 남은 것은 같은 중량만큼 19mm 체를 통과하고 No.4번체 (4.76mm)에 남는 치수의 것과 치환한다. 그리고 약 50kg을 준비하여 밀폐된 시료상자에 넣어 함수비 변화를 방지한다.

③ 공시체 제작

공시체 제작에 앞서 시료의 최적함수비를 구하기 위해 다짐시험을 행한다. (내경 150mm의 몰드에 5층으로 나누어 넣고 4.5kg 의 Rammer 로 45cm 높이에서 55회 다진다. 예상되는 최적함수비의 전후에서 함수비를 2% 이내씩 변화시켜 다짐을 행한 4~6개의 공시체로 부터 최적함수비를 구한다.

함수비차가 1% 이내가 되도록 각각 다짐회수를 55, 25, 10 회로 하여 공시체 3개를 만

든다.

④ 관입시험

공시체에 대해 1분에 1mm 속도로 피스톤이 관입하도록 하중을 가하고 하중-관입량을 측정한다. 하중 - 관입곡선을 그려 현장에서 기대할 수 있는 노반재료의 강도를 나타내는 수정CBR 결과를 도출한다.

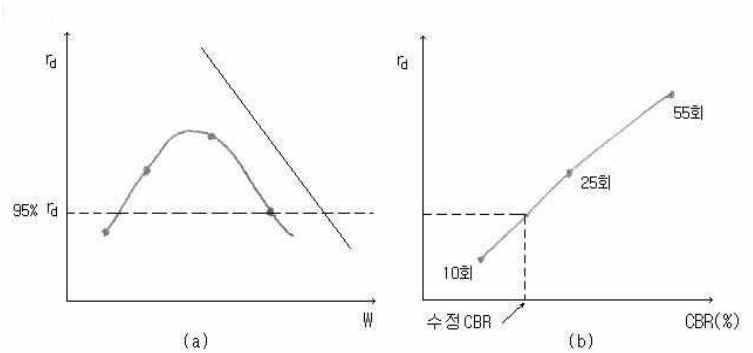



그림 3.8.11 CBR 그래프

⑤ 함수비- 건조밀도 곡선을 그린다.

⑥ 55, 25, 10회 다진 3개의 공시체(수침후)의 CBR로부터 건조밀도 - CBR 곡선을 그린다.

⑦ 소정의 밀도(예, 95%)의 수평선을 긋고 건조밀도- CBR 곡선의 교점에서 수직선을 내린 CBR값이 수정 CBR이 된다.

다음의 시험 결과를 이용하여 설계 CBR에 대하여 아스팔트 포장의 두께와 구성을 결정할 수 있고 수정 CBR에 대해 현장에서 기대할 수 있는 노반재료의 강도를 알 수 있다.

(2) 반복평판재하시험(DIN 18134)

(가) 정의

이 기준은 토공사 및 기초 공학에 사용뿐만 아니라 도로 공사를 위한 것이다. 이것은 변형계수와 노상반응계수를 결정하고, 흙의 변형과 힘 특성에 대한 평가를 구체화하기 위해 하중과 침하사이의 관계를 제시한다.

(나) 시험 장비

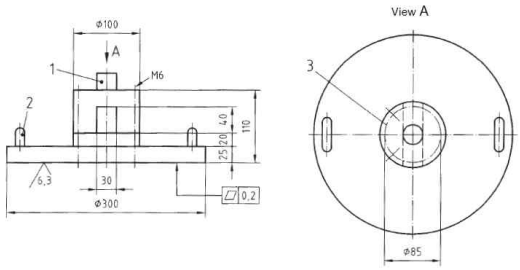



그림 3.8.12 300mm 재하판

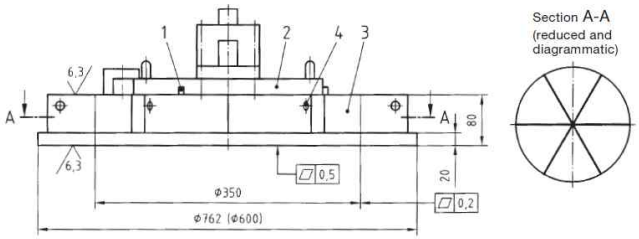
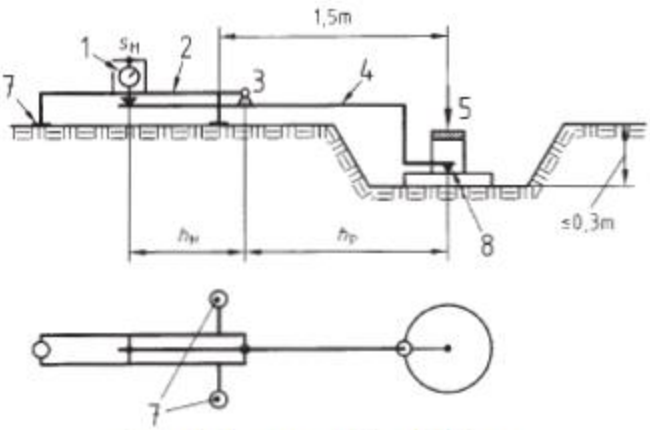
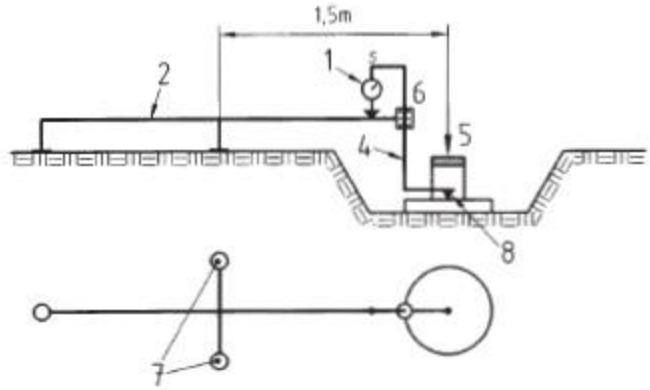



그림 3.8.13 600mm 또는 762mm 재하판




a) Contact arm assembly with fulcrum




b) Contact arm assembly with slide bearing

그림 3.8.14 침하측정장치

(다) 변형계수 산정

변형률계수 산정은 탄성이론에 의한 아래 식으로부터 구할 수 있다.

$$s = \sigma \times B \times \frac{1-\nu^2}{E} \times I_s$$

이때 s : 침하량

$\sigma$ : 작용하중

B : 재하판의 지름

$\nu$ : 포아송 비

E : 변형계수(탄성계수)

$I_s$ : 형상계수

여기서 B를 2r (r : 재하판의 반지름)으로, $\nu$를 0.5로, $I_s$를 1(원형기초의 중심)로 놓고 정리하면 다음 식과 같다.

$$E = 1.5 \times r \times \frac{\sigma}{s}$$

여기서 침하량을 하중강도와 2차 곡선식으로 나타낸 식 $s = a_0 + a_1\sigma + a_2\sigma^2$에서 초기 변형량 $a_0$를 무시하여 정리하면 최종적으로 다음 식과 같다.

$$E_v = \frac{1.5 \times r}{a_1 + a_2\sigma}$$

이때 반지름 r의 단위는 mm, 하중강도 $\sigma$의 단위는 $MN/m^2$이다.

## 2. 노반재료의 동상 안정성 평가 및 결과

### 가. 단열재의 종류에 따른 동결깊이

#### (1) 열전도율

노건조한 흙에 대해 건조밀도의 변화에 따른 열전도율을 측정한 후, PE골재와 건조 흙 시료의 중량비에 따른 열전도율을 측정하였다. 이와 비교하여 습윤상태 흙에서의 건조밀도에 따른 열전도율의 변화를 확인하기 위해 동일한 함수비 조건(13.8%, OMC)에서 다짐도를 각각 85%, 90%, 95%, 100%로 다르게 하여 열전도율을 측정하였다. PE골재 사이의 공극에 열전도율이 매우 낮은 공기 대신 흙이 메워짐으로써 열전도율이 변할 수 있다. 이를 위해 PE골재와 흙의 혼합비에 따른 열전도율의 변화 양상을 측정하고자 흙과 PE골재를 6:94, 13:87, 21:79, 28:72의 중량비로 혼합하여 다짐도 90%로 다진 공시체를 만들어 열전도율을 측정하였다. 또한 이들 시료에 3.6%, 8.6%, 13.6%(OMC), 18.6%의 각기 다른 함수비를 주고 이에 따른 열전도율을 측정하여 PE골재의 혼합이 함수비에 따른 열전도율에 영향을 주는지에 대해 분석하였다.

표 3.8.11 단열재의 공학적 특성

| Insulator | USCS/Type | $G_s$ | $\gamma_d$ $(kN/m^3)$ | $\lambda$ $(W/mK)$ |
|---|---|---|---|---|
| PE aggregates | GP | 1.08 | 6.62 | 0.113 |
| XPS board | No. 1 | - | 0.27 | 0.036 |

표 3.8.12 흙 시료의 공학적 특성

| USCS | CL-ML |
|---|---|
| Passing No. 200 (%) | 14.92 |
| LL (%) | 23.45 |
| PI | 4.65 |
| Gs | 2.62 |
| $\gamma_{dmax}$ $(kN/m^3)$ | 18.0 |
| $w_{opt}$ (%) | 13.5 |
| $k_{15℃}$(cm/sec) | $1.48x10^{-5}$ |
| Frost group | F4 |

표 3.8.13 열전도율 측정을 위한 각 시료의 혼합비율

| 항목 | 재료 | 상세사항 |
|---|---|---|
| 건조밀도 | 건조 흙 | |
| | PE골재+건조 흙 | PE골재 0, 6, 16, 25, 36%(질량비) |
| | PE골재+건조 흙+OMC | PE골재 6, 12, 17, 23% (질량비) |
| | 습윤 흙(OMC) | 다짐도 85, 90, 85, 100% |
| 함수비 (3.6~18.6%) | PE골재+습윤 흙 | PE골재 6, 12, 17, 23% (질량비) |
| 온도 (-10~10℃) | PE골재 6%+습윤 흙 | 함수비 0, 8.6, 18.6% |
| | PE골재 28%+습윤 흙 | 함수비 0, 8.6, 18.6% |

(2) 열전도율 측정시험

(가) 건조밀도 및 중량비에 따른 열전도율

건조밀도에 따른 열전도율 측정결과, 모든 공시체에서 건조밀도가 증가할수록 열전도율이 상승하는 결과를 보였다.

먼저 건조 흙에서 PE골재의 유·무에 따른 열전도율의 차이를 보면 '건조 흙+PE골재'

공시체에서 밀도가 증가함에 따라 0.158~0.221 W/mK로 0.063 W/mK, '건조 흙' 공시체에서 0.113~0.220 W/mK로 0.107 W/mK의 매우 작은 열전도율 상승을 보였다. 또한 건조한 흙에서는 PE골재의 비율이 증가함에도 '건조 흙'공시체의 열전도율 결과와 거의 비슷하였는데, 이러한 결과는 PE골재의 열전도율이 0.107 W/mK으로 건조 흙 시료의 열전도율과 거의 비슷하기 때문으로 판단된다.

같은 흙에서 물을 넣어 함수비 13.8%에서 다졌을 때 건조밀도 차이는 '건조 흙'공시체와 유사하나 열전도율은 0.589 W/mK의 차이를 보였다. 이는 건조시의 열전도율차이 0.107 W/mK에 비하여 큰 값이며 이러한 차이는 수분이 열전도율에 미치는 영향 때문으로 판단된다. Kersten의 열전도율 공식 중 포화된 비동결 실트-점토질토의 식에 함수비와 건조밀도를 대입하여 얻은 값에서도 거의 비슷한 결과를 보여 측정결과의 신뢰성을 높였다.

건조 상태에서는 PE골재 유·무에 관계없이 거의 비슷한 건조밀도를 보이나, 최적함수비의 흙과 최적함수비의 PE골재 혼합공시체를 비교한 결과 혼합 공시체에서 건조밀도와 열전도율이 더 작게 나타났다. 그림 3.8.16을 보면 '습윤 흙'공시체와 '습윤 흙+PE골재' 공시체의 열전도율이 건조밀도 15.01~15.58 $kN/m^3$ 범위에서 비슷한데, 이 범위는 '습윤 흙'의 다짐도 90%미만, '습윤 흙+PE골재'의 PE골재 혼합율 12% 미만일 때를 나타낸다. 이러한 결과는 낮은 다짐도로 다졌을 때 흙 간극 중 공기로 인한 단열효과를 PE골재가 대신하는 것으로 판단되며, 흙에 비해 단위중량과 열전도율이 낮은 PE골재의 비율이 12% 이상일 때부터 노반에 혼입된 PE골재로 인한 단열효과를 기대할 수 있는 것으로 사료된다. 그러나 이러한 결과도 PE골재로만 된 공시체의 열전도율 0.113 W/mK에 비해 1.000 W/mK에 가까운 큰 차이를 보이므로 노반으로의 혼입을 막기 위한 조치가 필요할 것으로 판단된다.

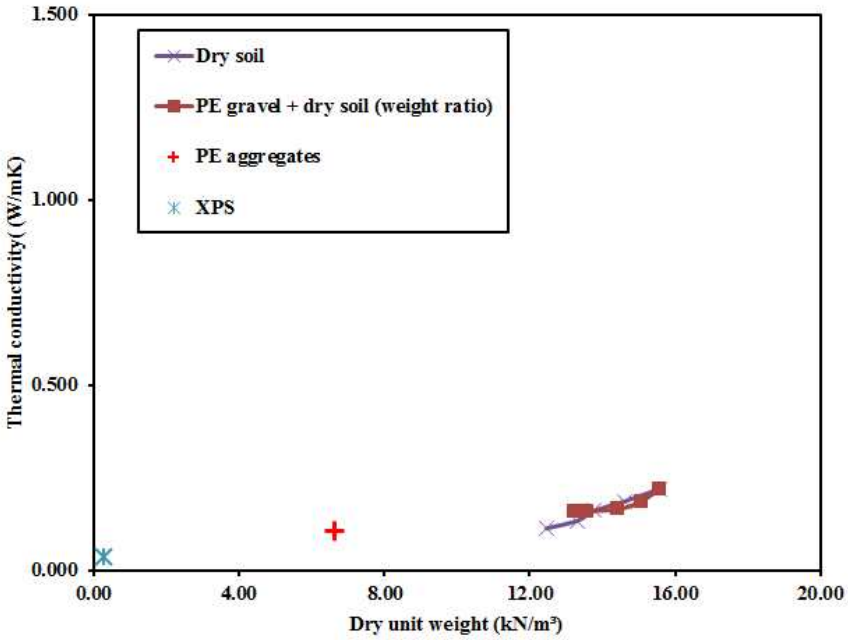



그림 3.8.15 각 단열재와 건조한 흙에서의 열전도율 건조밀도에 따른 열전도율 변화

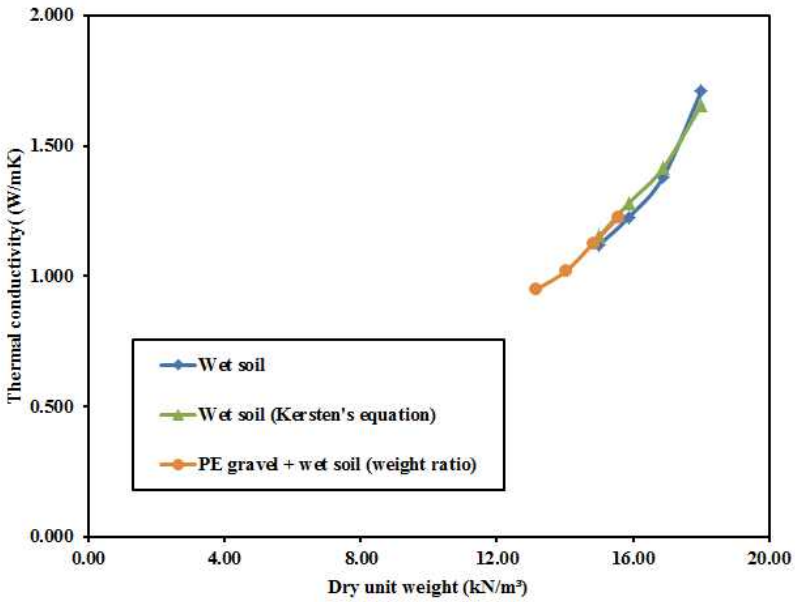



그림 3.8.16 습윤한 시료의 열전도율

(나) 함수비에 따른 열전도율

함수비에 따른 열전도율 측정결과, 수분의 유·무에 따라 같은 건조밀도에서도 큰 열전도율 차이를 보였다. '건조 흙' 공시체의 최대 건조밀도 값과 다짐도 90%로 제작된 '습윤 흙' 공시체의 최소 건조밀도 값은 각각 1.557 $kN/m^3$, 1.586 $kN/m^3$으로 거의 비슷하지

만, 열전도율에서는 0.220 W/mK, 1.224 W/mK으로 1.004 W/mK의 차이를 보인다. 또한 '건조 흙+PE골재'와 '습윤 흙+PE골재'도 같은 건조밀도 범위에서 최대 1.006 W/mK의 차이를 보였다. 이러한 차이는 건조한 흙에서 건조밀도 증가에 따른 열전도율 차이 0.107 W/mK의 약 9배, 최적함수비로 혼합된 습윤한 흙에서의 열전도율 차이인 0.589 W/mK의 약 1.7배에 해당한다. 따라서 같은 조건일 때 공극에 공기 대신 물이 얼마나 차지하는지, 즉 함수비가 얼마나 큰지에 매우 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 마찬가지로 건조한 흙에서 노반으로 혼입되는 PE골재의 비율이 증가할수록 열전도율 증가는 작고 건조밀도의 증가만이 있었을 뿐이었지만, 습윤한 흙에 혼입됐을 때의 열전도율은 건조 흙에 혼입됐을 때의 열전도율에 비해 대략 0.726~1.069 W/mK 크게 나타난 것에서도 함수비로 인한 열전도율의 급격한 상승을 알 수 있다.

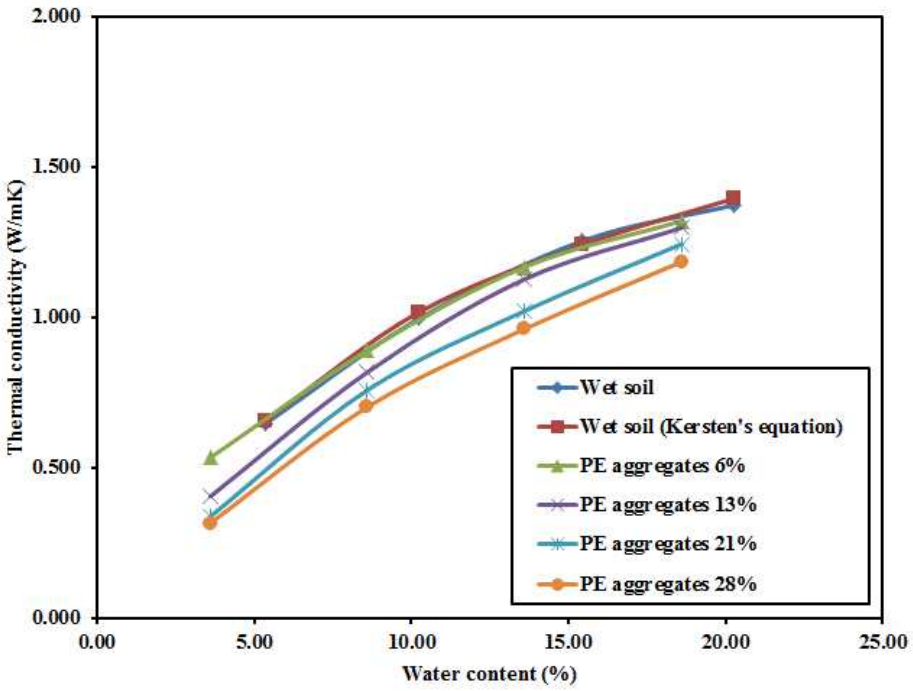



그림 3.8.17 함수비에 따른 열전도율 변화

위의 그림은 PE골재와 흙 시료의 중량비와 함수비의 비율에 따른 열전도율의 측정결과를 나타낸 것이다. 시험 결과에 따르면 중량비에 관계없이 열전도율은 함수비가 커짐에 따라 열전도율이 증가하다 최적함수비 부근에서 증가율이 둔화되는 경향을 보였다. 또한 모든 중량비에서 최대·최소 함수비의 열전도율 차이가 평균 0.861 W/mK으로 PE골재 배합비율에 의한 차이인 0.217 W/mK에 비해 약 4배 크게 나타났다. 이 차이는 함수비 3.6~18.6%의 범위 내에서의 차이이므로 물의 유입으로 함수비가 18.6%보다 커지면

0.861 W/mK보다 더 커질 수 있다.

(다) 온도에 따른 열전도율

시험결과에 따르면 건조 흙에서 온도에 따른 열전도율 변화는 없었지만, 물이 포함된 공시체에서는 영상(零上)의 열전도율보다 영하(零下)에서의 열전도율이 컸는데, 이는 물보다 얼음의 열전도율이 크기 때문으로 사료된다. 또한 물이 함유된 공시체들은 물이 동결하는 온도인 0℃에 가까워질수록 열전도율이 증가하는 경향을 보였다. 이는 열전도율이 0.6 W/mK인 물이 2.24 W/mK의 얼음으로 상변화된 결과임을 보여 준다(粕渕, 1973).

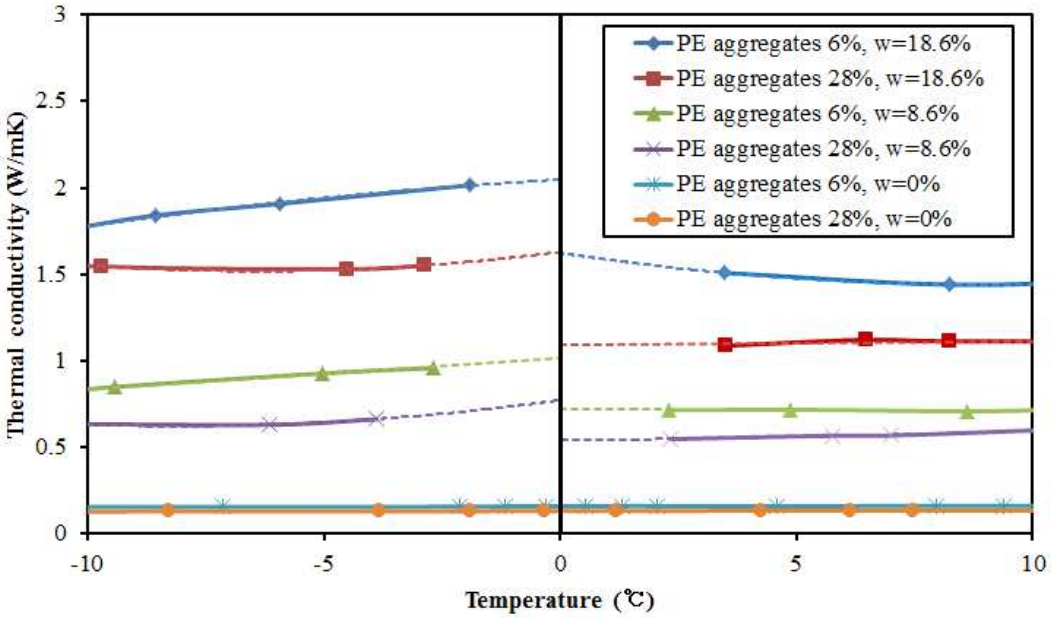



그림 3.8.18 온도에 따른 열전도율 변화

그림3.8.18을 보면 PE골재의 비율이 같을 때 함수비가 커짐에 따라 영상과 영하의 열전도율 차는 크게 나타났는데, 이는 영하의 온도에서 열전도율이 큰 얼음으로 변화되는 물의 양에 영향을 받기 때문으로 판단된다. 또한 PE골재의 비율이 증가함에 따라 물의 양이 줄어들어 열전도율이 감소하는 것도 볼 수 있으나 그 차이가 함수비 감소로 인한 열전도율 감소보다 비교적 작다. 따라서 PE골재를 사용하여 열전도율 감소를 얻음과 동시에 외부에서 노반으로의 물 공급이 되지 않도록 하는 차수대책이 필요할 것으로 판단되며 이는 XPS 판자를 혼용하면 일부 가능할 것으로 사료된다.

(3) 모형시험 결과

(가) 각 층의 시간에 따른 온도변화

아래의 표는 T-type Thermocouple을 설치한 모든 층이 0℃가 되는데 소요된 시간을 단열재별로 정리한 것이다. 시험 결과, 노반은 2,100분 이후 모든 층에서 영하에 가까운 온도에 도달하였으며, 단열재를 설치한 공시체에서는 최소 2,280분에서 최대 3,330분에 영하의 온도에 도달하였다. 특히 다른 단열재의 조합에 비해 'XPS 10cm'가 0℃가 되는데 3,330분이 소요되어 가장 뚜렷한 단열효과를 보였다.

'XPS 5cm+PE골재 5cm'와 'PE골재 5cm+XPS 5cm'는 설치 순서만이 다를 뿐이었지만 각각 3,270분, 2,970분으로 큰 차이를 보였다. 이는 폐비닐골재를 XPS 상부에 설치할 경우 PE골재가 입경이 큰 자갈의 간극 사이에 침투하여 밀도가 높아지고, 자갈 내부의 간극사이의 공기가 지니고 있는 단열효과를 감소시키기 때문으로 판단된다. 또한 XPS 판자 아래 PE골재가 설치된 경우, XPS 판자가 대기와 PE골재 사이의 공기를 차단하여 대류와 전도로 인한 온도변화를 감소시켜 'XPS 5cm+PE골재 5cm'의 0℃ 도달시간이 더 오래 소요되는 것으로 사료된다.

표 3.8.14 단열재별 0℃ 도달시간

| No. | 구분 (상부+하부) | | 0℃ 도달시간 (min) |
|---|---|---|---|
| 1 | 노반10cm | 노반10cm | 2,100 |
| 2 | 단열재 5cm +노반 5cm | XPS 5cm + 노반 5cm | 2,550 |
| 3 | | PE골재 5cm + 노반 5cm | 2,280 |
| 4 | 단열재 7.5cm +노반 2.5cm | PE골재 5cm + XPS 2.5cm | 2,670 |
| 5 | | PE골재 2.5cm + XPS 5cm | 2,740 |
| 6 | 단열재 10cm | XPS 5cm + PE골재 5cm | 3,270 |
| 7 | | PE골재 5cm + XPS 5cm | 2,970 |
| 8 | | XPS 10cm | 3,330 |
| 9 | | PE골재 10cm | 2,700 |

(나) 단열재별 단열효과 비교

아래의 결과는 단열재와 두께별로 구분하여 나타낸 것이다. 결과를 보면 XPS 판자와

PE골재 모두 두께가 증가함에 따라 0℃ 도달시간이 급격히 증가하는 경향을 보였다. 같은 두께일 때 XPS 판자가 PE골재에 비해 0℃ 도달시간이 훨씬 오래 걸렸고 두께가 두꺼워짐에 따라 그 차이가 더욱 커졌는데 이는 XPS 판자의 열전도율이 PE골재에 비해 낮기 때문이다. 이러한 단열재의 두께 변화에 따른 0℃ 도달시간의 변화는 아래그림에서도 볼 수 있다. PE골재가 상부에 설치되어 있고 하부에 XPS 판자가 설치되었을 때 각 단열재의 두께 변화에 따른 0℃ 도달시간을 그래프로 나타낸 것이다. PE골재가 5cm이고 XPS 판자가 각각 0, 2.5, 5cm일 때의 0℃ 도달시간을 이은 그래프가 XPS 판자가 5cm이고 PE골재가 0, 2.5, 5cm일 때에 비해 그래프의 기울기가 급한 것을 볼 수 있는데, 이 역시 XPS 판자의 열전도율이 PE골재에 비해 낮아 열전도가 늦게 일어나기 때문이다.

단열재의 종류와 두께는 다르지만 거의 비슷한 0℃ 도달시간을 보인 결과들이 있다. 첫 번째로 'PE골재 2.5cm+XPS 5cm'와 'PE골재 10cm'는 0℃ 도달시간이 각각 2,740분, 2,700분이 소요되었는데 PE골재 7.5cm가 XPS 판자 5cm와 비슷한 단열효과를 나타낸다는 것을 알 수 있다. 그림 3.8.19에 각 단열재를 대입하면 PE골재의 0℃ 도달시간이 약 2,520분, XPS 5cm가 2,550분으로 거의 비슷한 것을 알 수 있다.

또한 'PE골재 5cm+XPS 2.5cm'이 2,670분, 'PE골재 2.5cm+XPS 5cm'이 2,740분으로 70분의 차이를 보였다. 두 모형은 단열재 'PE골재 2.5cm+XPS 2.5cm'에서 PE골재 또는 XPS 판자가 각각 2.5cm씩 증가한 것이다. 이를 통하여 PE골재 2.5cm와 XPS 2.5cm의 0℃ 도달시간이 약 70분 정도 차이가 날 것을 예상할 수 있으며, 그림 3.8.20의 단열재 두께 2.5cm에서 근사한 차이를 볼 수 있다.

마지막으로 'XPS 5cm+PE골재 5cm'와 'XPS 10cm'도 0℃ 도달시간이 각각 3,270분, 3,330분으로 40분의 근소한 차이를 보였다. 따라서 XPS 판자가 상부에 위치함으로 인한 PE골재 5cm의 공기 보온효과가 XPS 판자 5cm와 비슷할 것으로 사료된다.

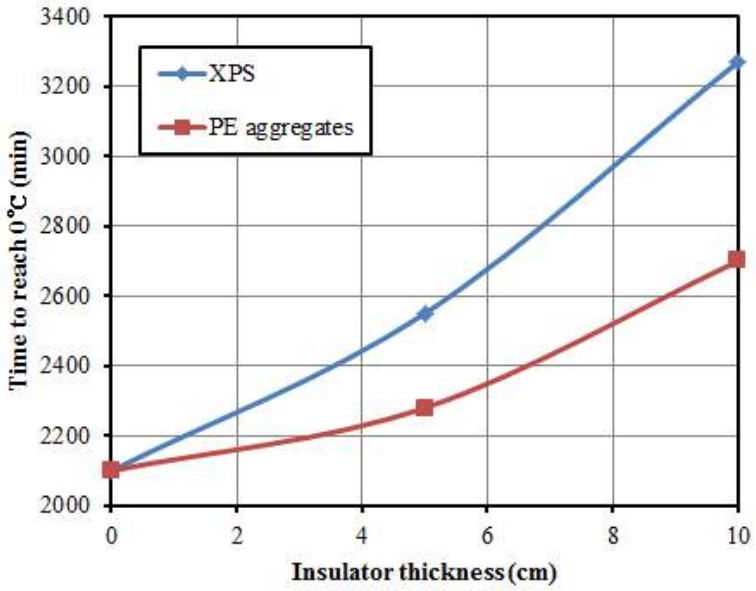



그림 3.8.19 각 단열재의 두께에 따른 0℃ 도달시간 변화

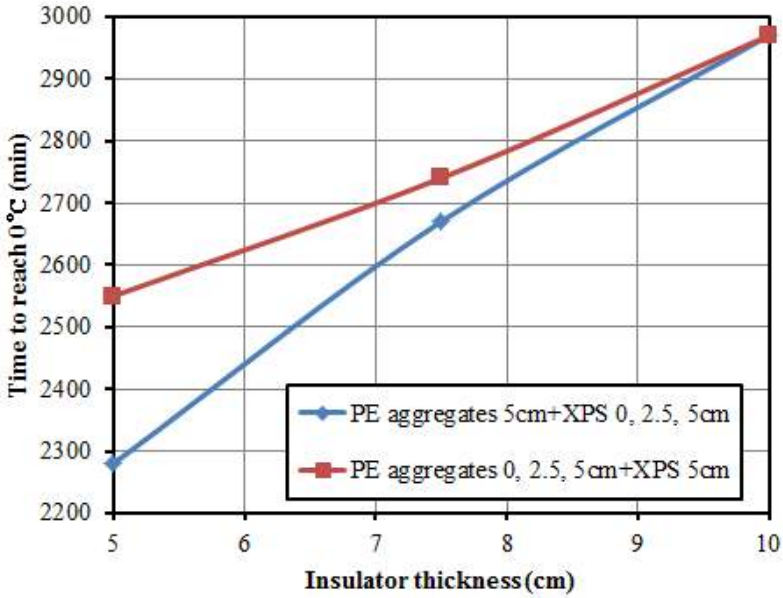



그림 3.8.20 단열재 두께변화에 따른 0℃ 도달시간

나. 입도조정층의 동상량

콘크리트는 큰 강성에도 불구하고 장기간 사용 및 환경변화에 따라 균열이 발생할 수 있다. 이러한 균열의 발생은 우수의 유입을 유발하며 이는 동절기 동결을 유발할 수 있다. 본 연구에서는 입도조정층에 우수 유입시 포화도에 변화에 따른 동상량 및 동상압을 고찰하였다.

(1) 입도조정층의 포화도 변화에 따른 동상량 시험

입도조정층 시료의 조성은 고속철도 강화노반 재료의 품질기준을 따랐으며, 강화노반 재료의 품질기준은은 표 3.8.15와 같다.

표 3.8.15 고속철도 강화노반 재료의 품질기준

| 구분 | 보조도상층 | | 입도조정층 | |
|---|---|---|---|---|
| 마모율 | 35 이하 | | 50 이하 | |
| 편평 세장편 함유량 | 25 이하 | | 30 이하 | |
| 모래당량 | 25 이하 | | 25 이하 | |
| 최대입경(mm) | 31.5 이하 | | 125 이하 | |
| 입도 | 40mm | 100 | 125mm | 100 |
| | 31.5mm | 99 ~ 85 | 106mm | 95 ~ 76 |
| | 16mm | 82 ~ 56 | 63.5mm | 84 ~ 56 |
| | | | 25.4mm | 61 ~ 32 |
| | | | 9.52mm | 46 ~ 21 |
| | 5mm | 53 ~ 27 | 5mm | 37 ~ 15 |
| | 2.5mm | 43 ~ 21 | 2.5mm | 28 ~ 10 |
| | 1.2mm | 35 ~ 16 | 1.2mm | 21 ~ 7 |
| | 0.6mm | 25 ~ 10 | 0.6mm | 15 ~ 5 |
| | 0.3mm | 18 ~ 8 | 0.3mm | 10 ~ 3 |
| | 0.15mm | 12 ~ 5 | 0.15mm | 7 ~ 2 |
| | - | | | |
| | - | | | |
| | 0.08mm | 8 ~ 4 | | |

이에 따라 실내 동상량 시험을 위해 OO철도현장의 자갈을 입수하여 크기별 분류를 하였다.



그림 3.8.21 입도별 분류 모습

이를 바탕으로 입도조정층의 입도분포에 따른 동상량을 판별하기 위하여 먼저 19mm체 통과, 2.5mm체에 남는 시료에 대해 선행시험을 수행하였다.



그림 3.8.22 다이얼게이지가 설치된 몰드



그림 3.8.23 선행하중을 준 공시체(좌), 하중을 주지 않은 공시체(우)



그림 3.8.24 냉동 챔버



그림 3.8.25 냉동 챔버 안의 공시체

실험 결과 동상량이 일어나는 한계포화도가 45%정도임을 확인하였다. 이에 따라 50%부터 10%씩 포화도를 늘려 동상량을 측정할 예정이다.

(2) 입도조정 혼합층과 노반층의 포화도 변화에 따른 동상량 시험

(가) 동상량 측정

본 연구에서 사용된 입도조정층 시료는 철도설계기준에 따라 정의된 강화노반의 기준을 따랐다. 아래의 표 3.8.16과 표 3.8.17에 따라 체분석을 통하여 시료를 분류하였다.

표 3.8.16 고속철도 강화노반 재료의 공학적 특성

| 구분 | 비중(Gs) | 마모율 | 편평 세장편 함유량 | 모래당량 | 최대입경(mm) |
|---|---|---|---|---|---|
| 입도조정층 | 2.667 | 50이하 | 30이하 | 25이하 | 125이하 |

표 3.8.17 고속철도 강화노반 재료의 품질기준

| 입도 | 125~63.5mm | 63.5~25.4mm | 25.4~9.52mm | 9.52~2.5mm | 2.5~0.15mm |
|---|---|---|---|---|---|
| 비율 | 30% | 23% | 13% | 14% | 20% |

(나) 노반 시료의 공학적 특성

본 연구에서 사용된 노반시료는 인천 ○○지구의 ○○도로현장에서의 시료를 사용하였

다. 건조된 상태에서 KSF(2301)기준에 따라 8번체(2.36mm)를 통과한 시료를 사용하였다. 표 3.8.18는 체분석, A-다짐, 비중시험을 통해 얻은 노반시료의 공학적 특성이다.

표 3.8.18 노반 시료의 공학적 특성

| 구분 | 비중 (Gs) | 최대건조단위중량 ($g/cm^3$) | 최적함수비 (%) | 균등계수 | 곡률계수 | USCS |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 노반층 | 2.697 | 2.02 | 10.3 | 11.76 | 0.245 | SP |



그림 3.8.26 시료의 준비



그림 3.8.27 몰드와 LVDT 설치

(3) 동상량

지중의 온도가 0℃ 이하로 장기간 계속되면 노상재료의 간극수가 얼기 시작한다. 이때, 모세관 현상에 의해 얼지 않은 수분이 동결면으로 이동하면 아이스렌즈가 발생하고 아이스렌즈가 확장되면서 지반이 융기된다. 일반적으로 수분 공급이 없는 간극에 물이 동결할 때 그 체적은 최대 9%까지 팽창하게 되고, 지하수가 공급되는 상태에는 지속적인 팽창을 하여 체적이 50% 이상 팽창하기도 한다.

동결부분에 있어 토립자 사이의 간극은 동결 전에 비하여 확장되며, 확장된 토립자 사이의 간극수는 동결되어 얼음이 된다. 물을 포함한 다공성의 물질이 동상을 일으킬 때에 각각의 입자 사이에 넓히려는 힘의 평균치를 동상 팽창압이라 한다(김영진 등, 1998).

동상팽창량 변화는 초기 동결시 상부시료의 수축으로 동상팽창량이 감소하면서 원할한 수분공급과 함께 다시 일정한 비율로 동상팽창량이 증가한다. 또한 정상적인 동상발현

구간 이후에는 동상이 증가하지 않고 일정한 값을 나타낸다(신은철 등, 2010).

(4) 공시체 제작 및 실험

인천 ○○지구에서 채취한 시료와 고속철도 강화노반의 입도조정층의 혼입 및 포화도 변화에 따른 동상량을 측정하였다. 공시체는 직경 28cm, 높이 23cm의 90% 부피에 해당하는 것을 사용하였다. 몰드 내 혼입율 25%, 20%, 15%, 10%, 5%에 대해 포화도 70%, 80%, 90%를 적용하여 동상량을 관찰하였다. 제작된 각각의 공시체는 냉동챔버에 넣어 내부온도를 영하 25℃까지 내리고 65시간동안 그 변화량을 관찰하였다.

1차원적인 동상량을 관찰하기 위해 몰드 위에 플라스틱판을 놓고 LVDT를 설치하였으며, 시간에 따른 층별 온도를 측정하기 위해 Thermocouple을 높이 30%지점과 70%지점에 설치하였다. 설치한 Thermocouple은 Grant를 통해 30분 간격으로 온도데이터를 얻었다. 표 3.8.19는 각 실험에 대한 세부 조건이다.

표 3.8.19 혼입율에 따른 실험 조건

| 혼입율(%) | 건조단위중량($g/cm^3$) | 간극($cm^3$) | 간극비 | 간극률(%) | 챔버 온도(℃) |
|---|---|---|---|---|---|
| 25 | 2.016 | 3136.572 | 0.33 | 24.59 | -25 |
| 20 | 2.079 | 2831.917 | 0.29 | 22.22 | -25 |
| 15 | 2.039 | 3013.554 | 0.31 | 23.64 | -25 |
| 10 | 2.079 | 2820.864 | 0.28 | 22.13 | -25 |
| 5 | 2.118 | 2627.966 | 0.26 | 20.62 | -25 |
| 0 | 1.961 | 3372.241 | 0.36 | 26.46 | -25 |

(5) 입도조정층 내 노반의 토사 혼입에 따른 동상량

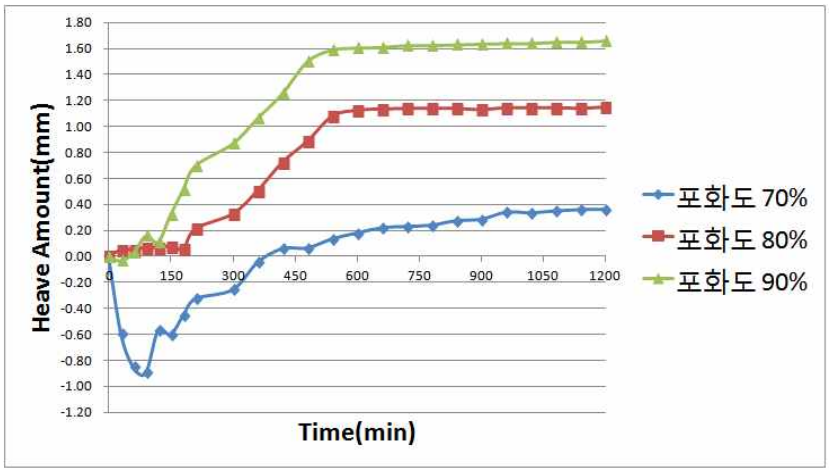



그림 3.8.28 혼입율 25% 동상량

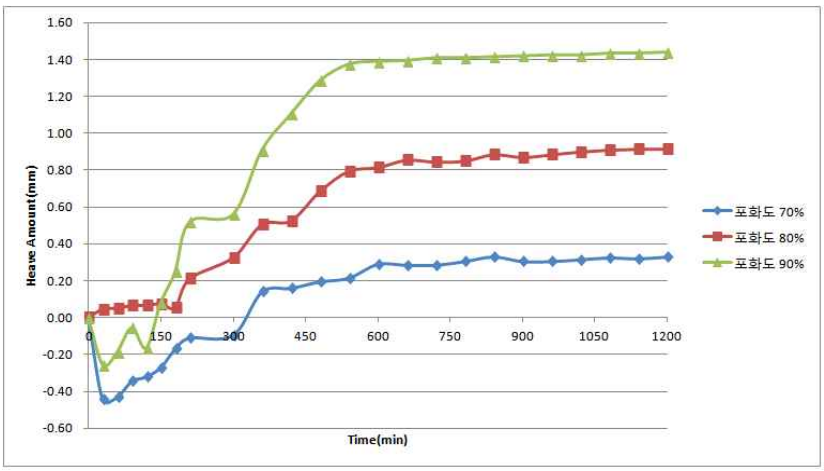



그림 3.8.29 혼입율 20% 동상량

그림 3.8.28과 그림 3.8.29는 토사 혼입율 25%와 20%에 대한 동상량을 나타낸 것이다. 실험 결과, 혼입율 25%와 20%시료는 4℃ 부근까지 수축하고 10시간 뒤인 영하 15℃부근까지 동상량이 꾸준히 증가하는 분포를 보였다. 혼입율 25% 시료는 포화도 70%일 때 0.04mm의 동상량이 발생했고 90%일 때는 1.66mm까지 증가하였다. 반면 혼입율 20%시료는 포화도 70%일 때 0.29mm의 동상량이 발생하였고 90%일 때는 1.41mm까지 증가하였다.

실험 결과에 따르면, 포화도가 커질수록 간극에 존재하는 물이 양이 상대적으로 더 많기 때문에 그만큼 동상도 더 크게 일어나는 것으로 판단된다. 이러한 경향은 혼입율이 작아짐에 따라 더욱 두드러지게 나타남을 확인할 수 있었다.

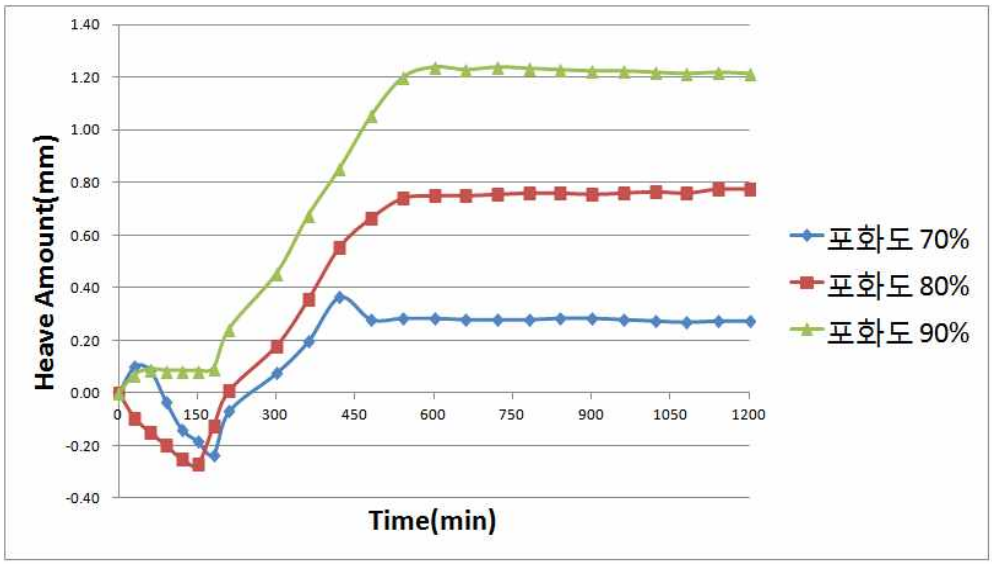



그림 3.8.30 혼입율 15% 동상량

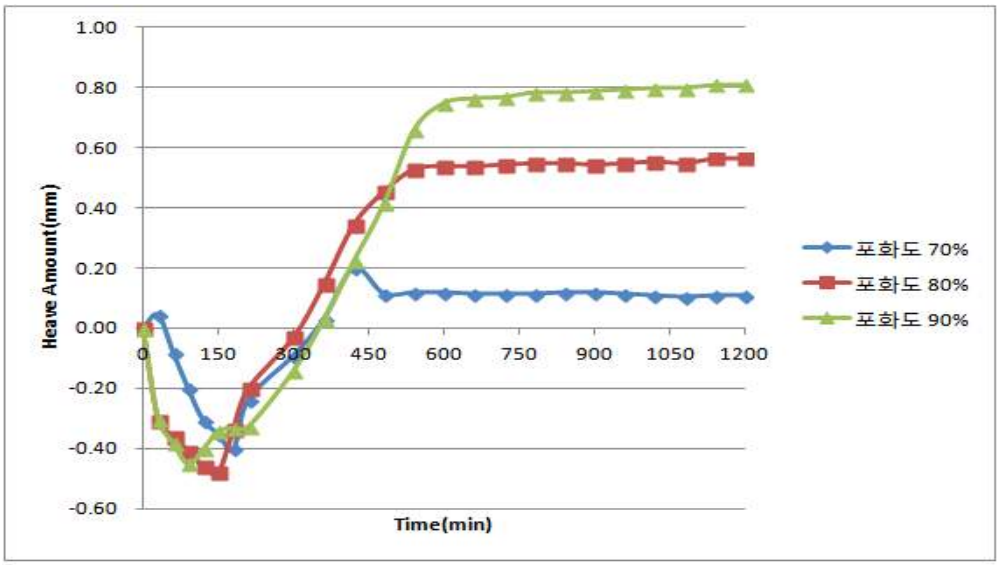



그림 3.8.31 혼입율 10% 동상량

그림 3.8.30과 그림 3.8.31은 혼입율 15%와 10%에 대한 동상량을 나타낸 것이다. 실험 결과, 혼입율 15%와 10%시료도 4℃ 부근까지 수축하고 10시간 뒤인 영하 15℃부근까지 동상량이 꾸준히 증가하는 분포를 보였다. 토사 혼입율 15% 시료는 포화도 70%일 때 0.28mm의 동상량이 발생했고 90%일 때는 1.24mm까지 증가하였다. 반면 토사 혼입율 10% 시료는 포화도 70%일 때 0.12mm의 동상량이 발생하였고 90% 일 때 0.80mm으로 측정되었다. 25%~10%로 혼입율이 변화됨에 따라 동상량도 꾸준하게 감소됨을 확인할 수 있다.

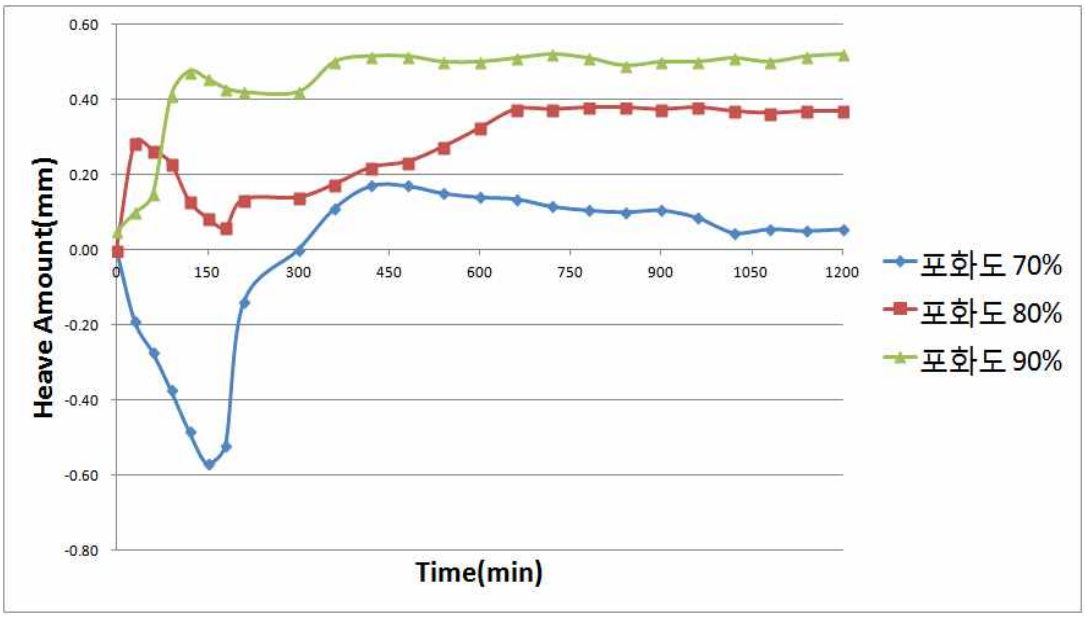



그림 3.8.32 혼입율 5% 동상량

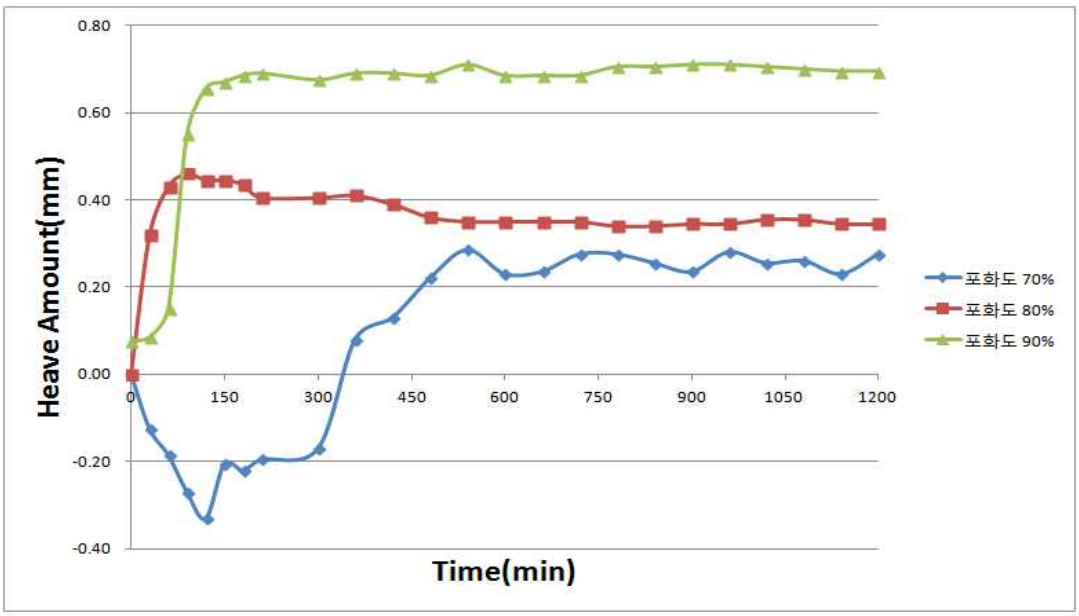



그림 3.8.33 혼입율 0% 동상량

그림 3.8.32와 그림 3.8.33은 혼입율 5%와 0%에 대한 동상량을 나타낸 것이다. 실험 결과, 혼입율 5%와 0%시료도 4℃ 부근까지 수축하고 10시간 뒤인 영하 15℃부근까지 동상량이 꾸준히 증가하는 분포를 보였다. 혼입율 5% 시료는 포화도 70%일 때 0.11mm의 동상량이 발생했고 90%일 때는 0.52mm까지 증가하였다. 반면 혼입율 0%시료는 포화도 70%일 때 0.26mm의 동상량이 발생하였고 90% 일 때 0.71mm으로 측정되었다. 0% 혼입

율에서는 노반흙이 포함되지 않았기 때문에 혼입이 있었을 때와 다소 다른 경향을 보였다.

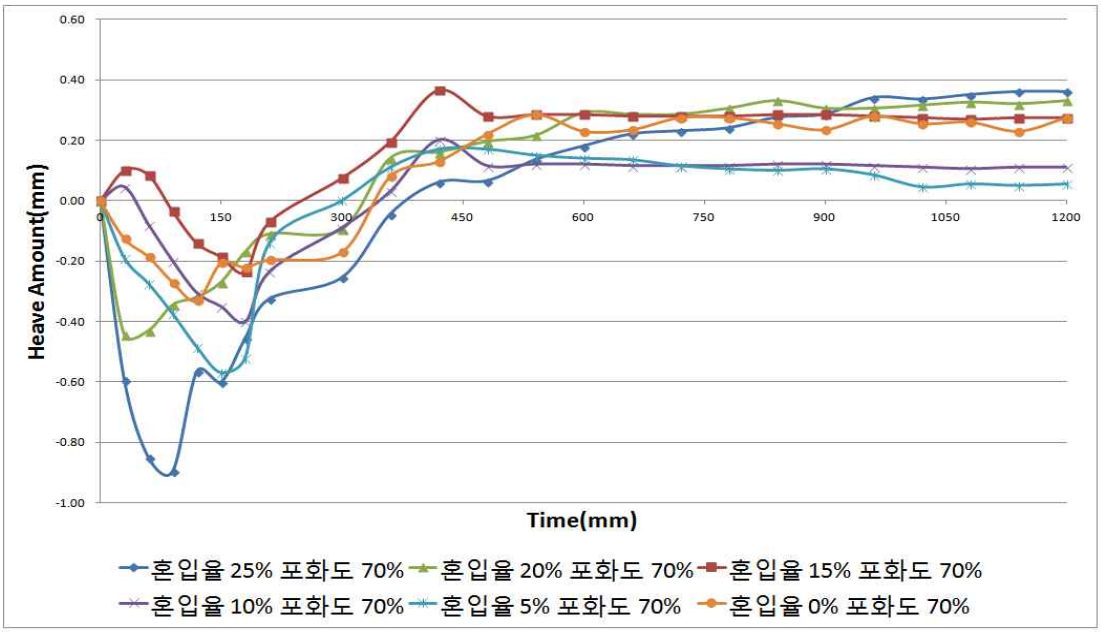



그림 3.8.34 포화도 70% 동상량

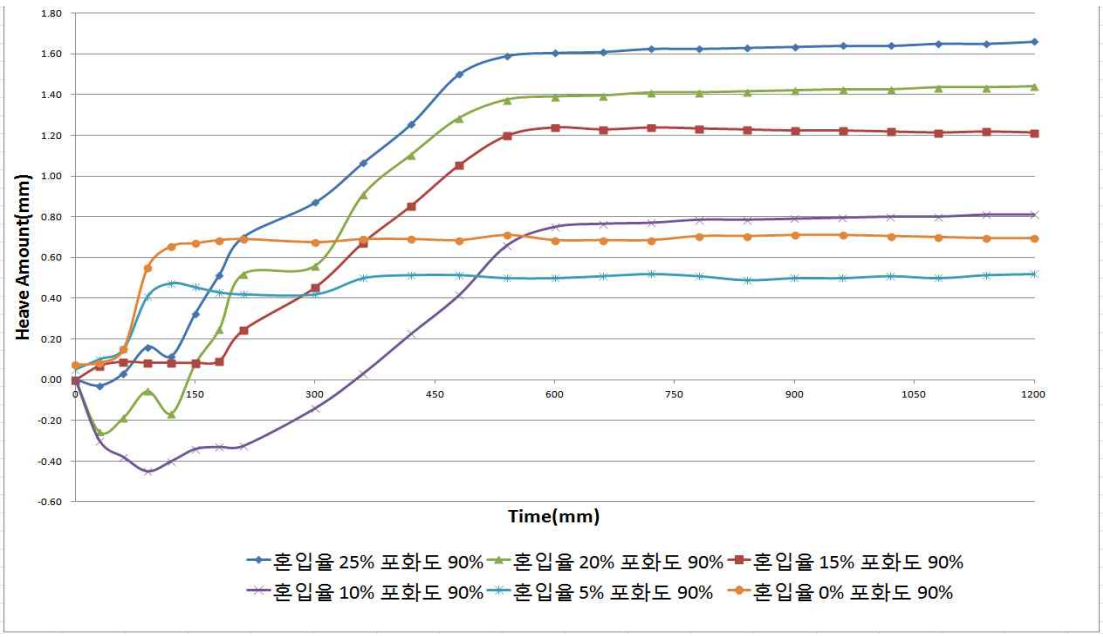



그림 3.8.35 포화도 90% 동상량

동상량이 증가하는 경향을 보면 그 패턴이 4℃부터 영하 15℃까지는 일정하고 일정한 상태를 유지하는 것으로 확인되었다. 이는 같은 포화도에서 혼입율이 클수록 모세관 현상이 더 활발하게 일어나고 이에 따라 동상량도 증가하는 것으로 판단된다.

이상에서 살펴본 바와 같이 포화도가 90%미만인 상태에서는 이론적으로 9% 체적팽창

을 감안하면 상재하중이 없는 상태에서는 동상이 토사내부의 간극에서는 일어나야 하나 실제적으로는 토립자를 상부로 밀어올려 동상이 일부 발생함을 알 수 있다.

다. 입도조정층의 동상압

(1) 입도조정층과 노반층의 동상압

동상량과 더불어 같은 조건으로 동상압을 측정하였다. Tsutomu Takashi(1971)는 비교란 시료 샘플에 대해 10cm 지름과 높이(h)를 갖는 아크릴 수지 공시체에 대해 상재압(load pressure) 증가에 따른 동상량(ho) 변화를 측정하였다. 이로부터 상재압(load pressure)과 동상율(ho/h) 변화를 다음의 수식으로 나타내었다.

$$h = h_0 + \frac{c}{p} \qquad (3.8.1)$$

여기서, $h_0$, c : 상수(constant)

$p$ : 상재압(load pressure)

이에 따르면 동상량은 상재하중에 따라 다르게 되며 상재하중이 대단히 큰 상태에서는 동상량도 그에 따라 줄어들게 된다. 본 연구에서는 낮은 상재하중하에서도 Takashi(971)가 제시한 동상압 및 동상량의 관계를 나타내는지를 확인하기 위하여 시험을 수행하였다. 또한, 앞서 실험한 동상량과의 경향을 비교하여 어떤 상관관계가 있는지 파악한다. 온도에 따른 동상압의 측정을 위해 몰드의 2/5지점과 4/5지점에 온도계를 설치하여 냉동챔버 내부의 온도와 비교하였다.

실험의 일관성과 경향 파악을 위해 동상량을 측정했을 때와 다음의 동일한 조건에서 실험을 실시하였다(표 3.8.20 ~ 표 3.8.22, 그림 3.8.36 ~ 그림 3.8.39)

표 3.8.20 고속철도 강화노반 재료의 공학적 특성

| 구분 | 비중(Gs) | 마모율 | 편평 세장편 함유량 | 모래당량 | 최대입경(mm) |
|---|---|---|---|---|---|
| 입도조정층 | 2.667 | 50이하 | 30이하 | 25이하 | 125이하 |

표 3.8.21 고속철도 강화노반 재료의 품질기준

| 입도 | 125~63.5mm | 63.5~25.4mm | 25.4~9.52mm | 9.52~2.5mm | 2.5~0.15mm |
|---|---|---|---|---|---|
| 비율 | 30% | 23% | 13% | 14% | 20% |

표 3.8.22 노반 시료의 공학적 특성

| 구분 | 비중 (Gs) | 최대건조단위중량 ($g/cm^3$) | 최적함수비 (%) | 균등계수 | 곡률계수 | USCS |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 노반층 | 2.697 | 2.02 | 10.3 | 11.76 | 0.245 | SP |

이와 같은 조건에서 실험하되 추가적으로 동상압을 측정하기 위해 다음 그림 3.8.36의 로드셀과 영하에서도 측정이 가능한 LVDT를 이용한다.



그림 3.8.36 동상압 측정



그림 3.8.37 시료 배합



그림 3.8.38 다이얼게이지



그림 3.8.39 LVDT

(2) 동상압

Taber(1929)는 점토에 대해 최대 동상압이 $7.38kg/cm^2$에 이른다고 발표하였다. 동상팽창압은 세립분을 많이 함유한 흙일수록 발휘되는 동상팽창압이 크며 동결된 간극수의 체적증가로 ice lense가 생성되고 부동수분이 많을수록 동상팽창압도 증가한다(신은철 등, 2003). 또한 토립자는 상재압과 토립자에 주어진 초기압력을 합한 것보다 얼음이 주는 압력이 더 클 때 팽창하게 되며, 얼음의 압력은 토립자를 분리시켜 새로운 얼음렌즈를 형성시킨다(Konard, 1982).

(3) 공시체 제작 및 실험

인천 ○○지구에서 채취한 시료와 고속철도 강화노반의 입도조정층의 혼입 및 포화도 변화에 따른 동상압을 측정하였다. 공시체는 직경 28cm, 높이 23cm의 90% 부피에 해당하는 것을 사용하였다. 몰드 내 혼입율 25%, 20%, 15%, 5%, 0%에 대해 포화도 70%, 80%, 90%를 적용하여 동상압을 관찰하였다. 제작된 각각의 공시체는 냉동챔버에 넣어 내부온도를 영하 25℃까지 내리고 65시간동안 그 변화량을 관찰하였다.

1차원적인 동상압을 관찰하기 위해 몰드 위에 플라스틱판을 놓고 LVDT를 설치하였으며, 시간에 따른 층별 온도를 측정하기 위해 Thermocouple을 높이 30%지점과 70%지점에 설치하였다. 설치한 Thermocouple은 Grant를 통해 30분 간격으로 온도데이터를 얻었다. 표 3.8.23는 각 실험에 대한 세부 조건이다.

표 3.8.23 혼입률에 따른 실험 조건

| 혼입율(%) | 건조단위중량($g/cm^3$) | 간극($cm^3$) | 간극비 | 간극률(%) | 챔버 온도(℃) |
|---|---|---|---|---|---|
| 25 | 2.016 | 3136.572 | 0.33 | 24.59 | -25 |
| 20 | 2.079 | 2831.917 | 0.29 | 22.22 | -25 |
| 15 | 2.039 | 3013.554 | 0.31 | 23.64 | -25 |
| 10 | 2.079 | 2820.864 | 0.28 | 22.13 | -25 |
| 5 | 2.118 | 2627.966 | 0.26 | 20.62 | -25 |
| 0 | 1.961 | 3372.241 | 0.36 | 26.46 | -25 |

(4) 입도조정층 내 노반 혼입에 따른 동상압

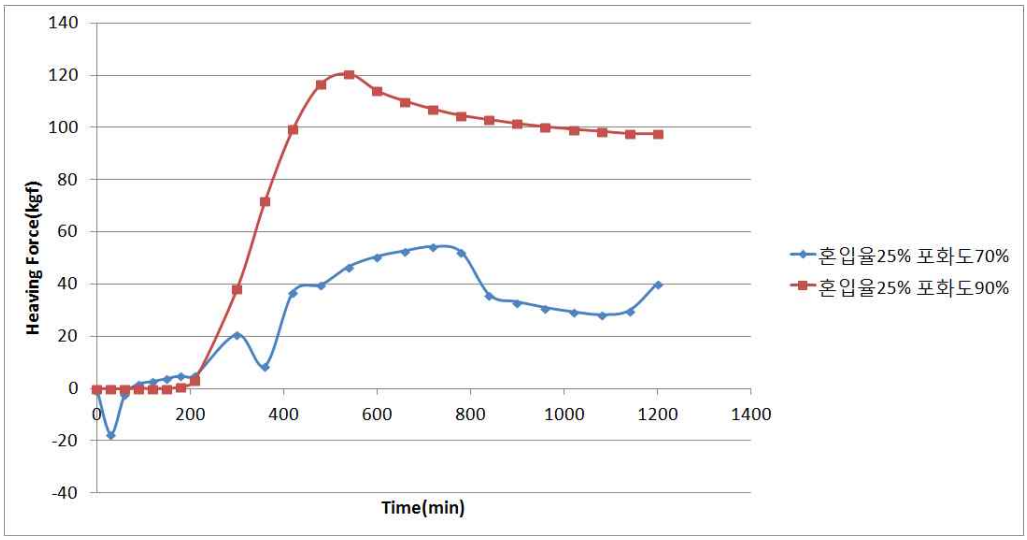



그림 3.8.40 혼입율 25% 동상압

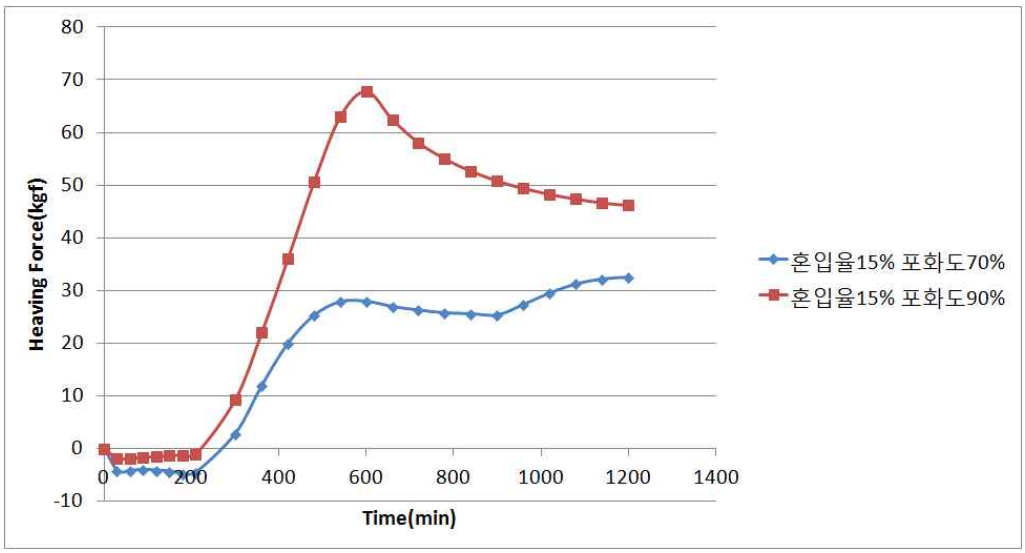



그림 3.8.41 혼입율 15% 동상압

혼입율 25%, 15%에 대한 동상압시험 결과가 그림 3.8.40과 그림 3.8.41에 나타나 있다. 실험 결과, 각 시료는 4℃ 부근까지는 동상압에 큰 변화가 없었다. 혼입율에 관계없이 일정하게 유지되다가 10시간 뒤인 영하 15℃부근까지 동상압이 급격히 증가함을 확인할 수 있었다. 혼입율 25% 시료는 포화도 70%일 때 $0.0568kg_f/cm^2$, 포화도 90%일때는 0.169 $kg_f/cm^2$까지 동상압이 증가하였다. 혼입율 15%때는 포화도 70%에 대하여 $0.046kg_f/cm^2$, 포화도 90%에 대해 $0.096kg_f/cm^2$ 증가하였다. 혼입율에 따라 동상압의 크기는 달랐으나

동상압이 변하는 패턴은 노반토 혼입율 보다는 포화도에 더 크게 영향을 받음을 알 수 있었다.

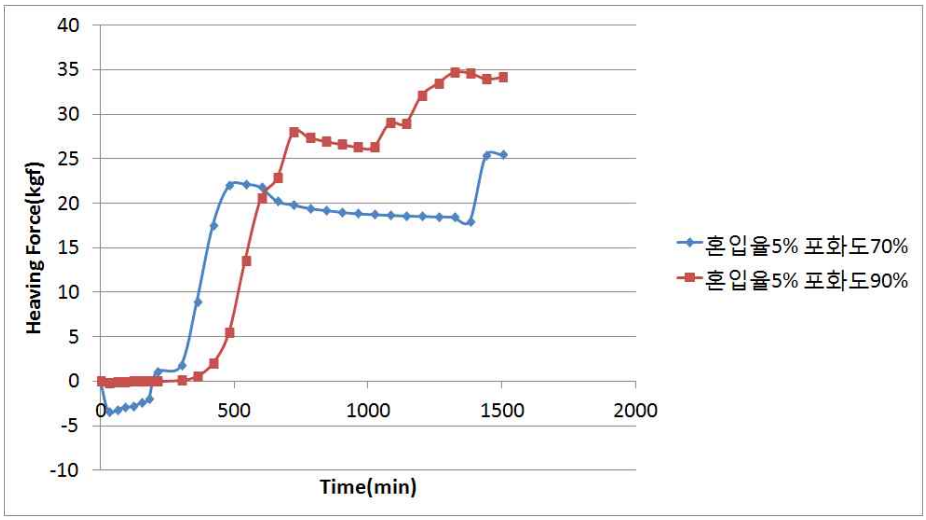



그림 3.8.42 혼입율 5% 동상압

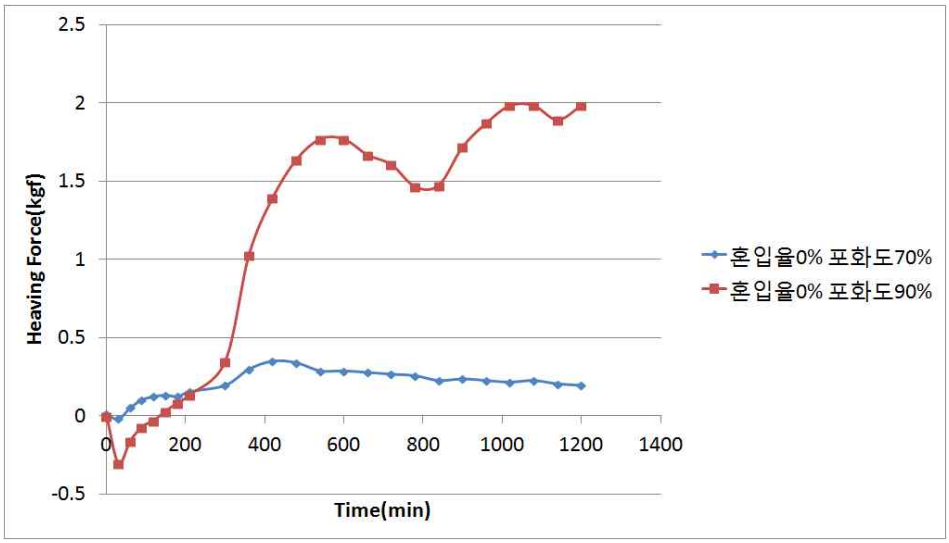



그림 3.8.43 혼입율 0% 동상압

그림 3.8.42와 그림 3.8.43에 따르면 혼입율 5%와 0%에 대해서도 각각 포화도 70%에 대하여 동성압은 $0.0359kg_f/cm^2$, $0.00056kg_f/cm^2$로 측정되었고 포화도 90%에 대해서는 $0.0491kg_f/cm^2$, $0.0322kg_f/cm^2$까지 증가하였다. 혼입율에 따라 동상압의 크기는 달랐으나 그 패턴은 혼입율 보다는 포화도에 더 큰 영향을 받는다는 사실을 확인할 수 있었다.

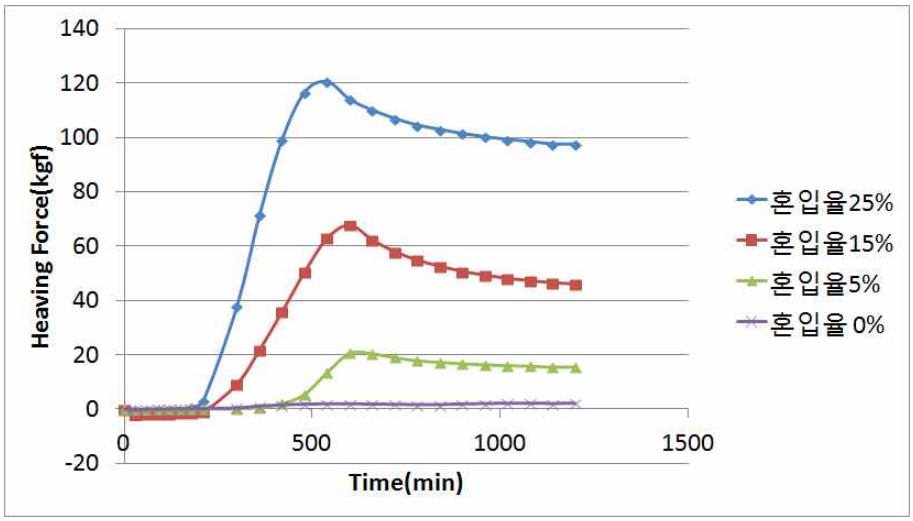



그림 3.8.44 포화도 70% 동상압

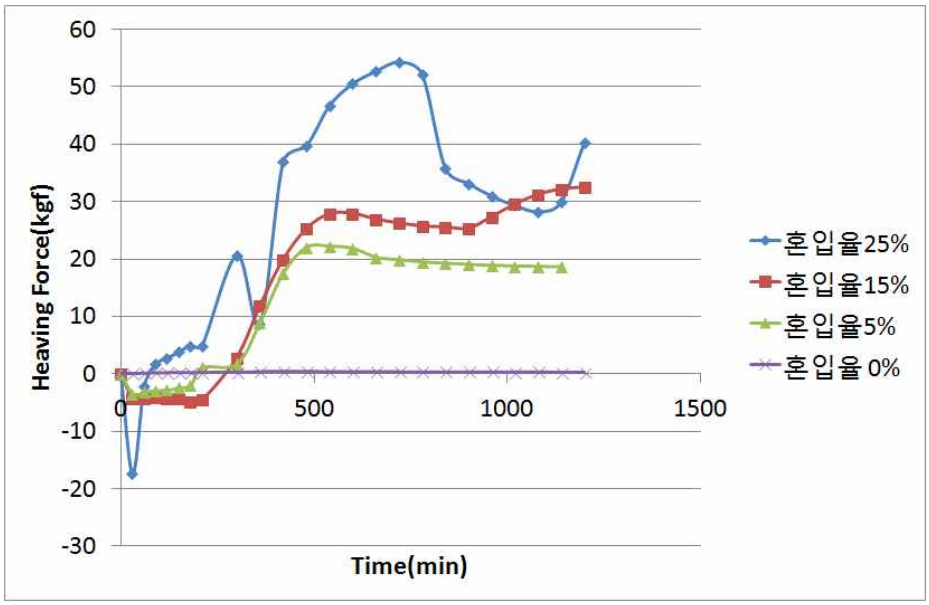



그림 3.8.45 포화도 90% 동상압

그림 3.8.44, 3.8.45는 각각 포화도 70%와 포화도 90%에 대한 동상압을 표현하고 있다. 위에서 보이는 경향은 그림 3.8.40 ~ 그림 3.8.41과 크게 다르지 않음을 확인할 수 있다. 혼합율이 높고 포화도가 클수록 동상압과 동상량이 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 기존의 Taber가 제시한 실험결과와 비교할 때 낮은 포화도에 대해서는 동상량의 증가폭이 크지 않고 오히려 동상시험 초기에는 토립자의 수축으로 인해 체적이 감소함을 확인할 수 있었다.

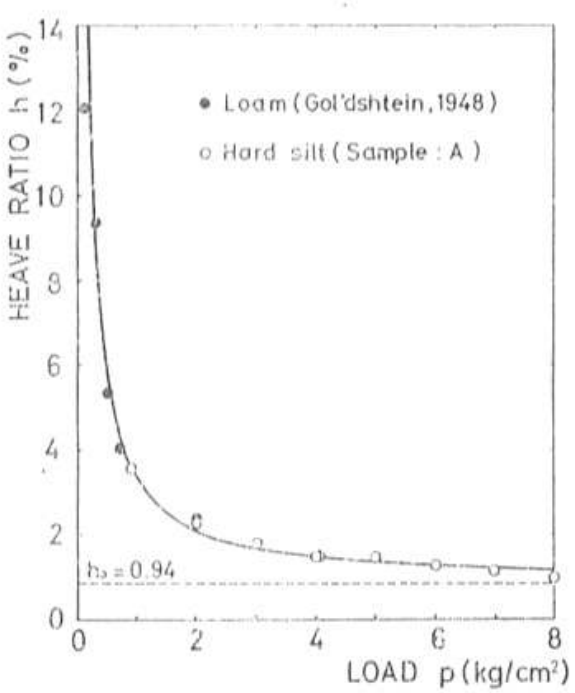



그림 3.8.46 Load pressure에 따른 동상율 변화(Takashi, 1971)

그림 3.8.46은 상재압(Load pressure) 증가에 따른 동상율의 감소를 나타내고 있다. (Tsutomu Takashi, 1971) 여기서 동상율은 최초 샘플 높이(h)에 대한 최대 동상량(ho) 비율을 의미한다. 또한 동상율과 상재압(Load pressure)는 2.3.1의 공식을 따른다.

Tsutomu Takashi가 제시한 공식에 본 실험에서 나타난 노반토 혼입율 및 포화도별 동상량, 동상압 실험 결과치를 대입해 분석하면 식 (3.8.2)와 같이 나타낼 수 있다.

표 3.8.24 Tsutomu Takashi에 의한 결과치(25% 혼입율)

| 혼입율 / 포화도 | | 동상량(mm) | 동상압($kg/cm^2$) |
|---|---|---|---|
| 25%혼입율 | 90% 포화도 | 1.66 | 0.169 |
| | 70% 포화도 | 0.04 | 0.0568 |

토사 혼입율 25%에 대하여 Takashi(1971)가 제시함 식에 상수를 포함하면 관계식은

다음과 같이 표시할 수 있다.

$$h = h_0 + \frac{c}{p} = 0.1219 + \frac{0.00682}{0.169} \quad \text{.....(3.8.2)}$$

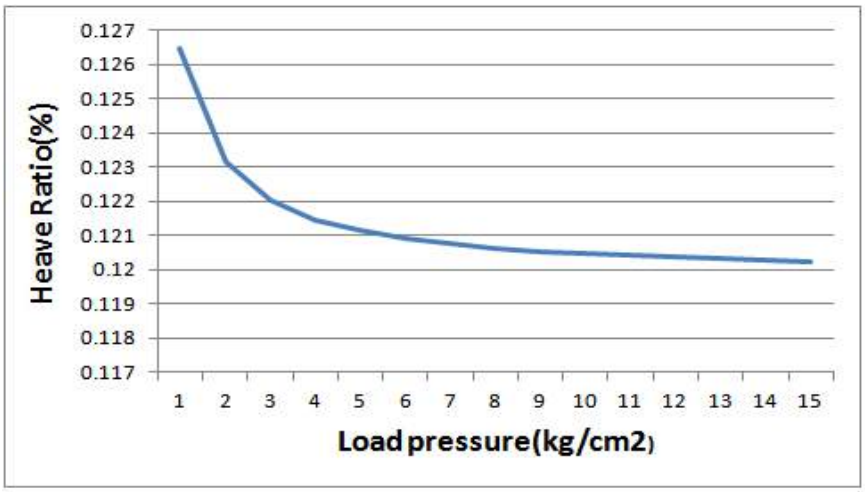



그림 3.8.47 토사 혼입율 25%시 상재압(Load pressure)에 대한 동상율

표 3.8.25 Tsutomu Takashi에 의한 결과치(15% 혼입율)

| 혼입율 / 포화도 | | 동상량(mm) | 동상압($kg/cm^2$) |
|---|---|---|---|
| 15%혼입율 | 90% 포화도 | 1.24 | 0.096 |
| | 70% 포화도 | 0.28 | 0.046 |

토사 혼입율 15%에 대하여는 다른 상수를 나타내어 앞의 혼입율 25% 때와 달리 관계식은 (3.8.3식)과 같았다.

$$h = h_0 + \frac{c}{p} = 0.102 + \frac{0.0041}{0.096} \quad \text{.....(3.8.3)}$$

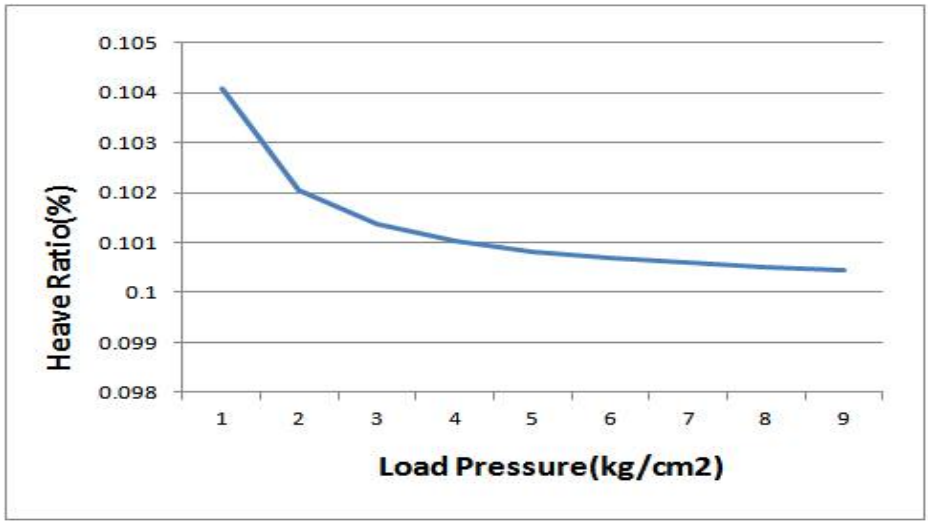



그림 3.8.48 토사 혼입율 15%일 때의 상재압(Load pressure)에 대한 동상율

라. 실내 반복평판재하시험을 통한 지지력 산정

현장에서의 철도 노반의 지지력 평가는 독일의 DIN 18134 시험에 준하여 평가되고 있다. 그러나 현장시험이전에 시료를 채취하여 일정 다짐도를 만족하였을 때의 DIN 기준 만족 여부를 알 수 있는 방법은 없기 때문에 실내시험에 의한 선행 평가를 필요로 한다. 따라서 기초연구로서 반복재하시험에 의한 기준 만족여부를 평가하기 위한 시험을 수행하였다.

(1) 현장 시험

하부 노반의 현장 지지력 평가 기준과 실내 지지력 시험의 비교를 위하여 ○○건설 인천 ○○지구의 건설 현장에서 채취한 시료를 바탕으로 시험을 진행하였다. 이 시료는 입도분포시험(KS F 2302), 다짐시험(KS F 2312), 상대밀도시험(KS F 2345)을 실시하였고 특성은 표 3.8.26와 같다.



그림 3.8.49 시료준비




그림 3.8.50 흙 시료의 입도 분포 곡선

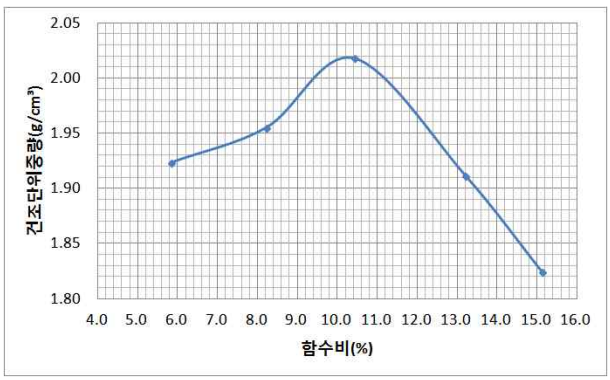



그림 3.8.51 흙 시료의 다짐 시험

표 3.8.26 흙 시료의 공학적 특성

| USCS | Passing #200(%) | $\gamma_{d\max}(g/cm^3)$ | $w_{opt}(\%)$ | $\gamma_{d\min}(g/cm^3)$ |
|---|---|---|---|---|
| SP | 2.09 | 2.02 | 10.3 | 1.269 |

현장의 지지력을 알아보기 위하여 아래 그림 3.8.52와 같이 들밀도 시험을 실시하고 반복평판재하시험을 실시하였다.



그림 3.8.52 현장 들밀도 시험



그림 3.8.53 원지반 반복평판재하시험

위 실험에서 나타난 결과는 아래 그림 3.8.54, 표 3.8.27와 같다.

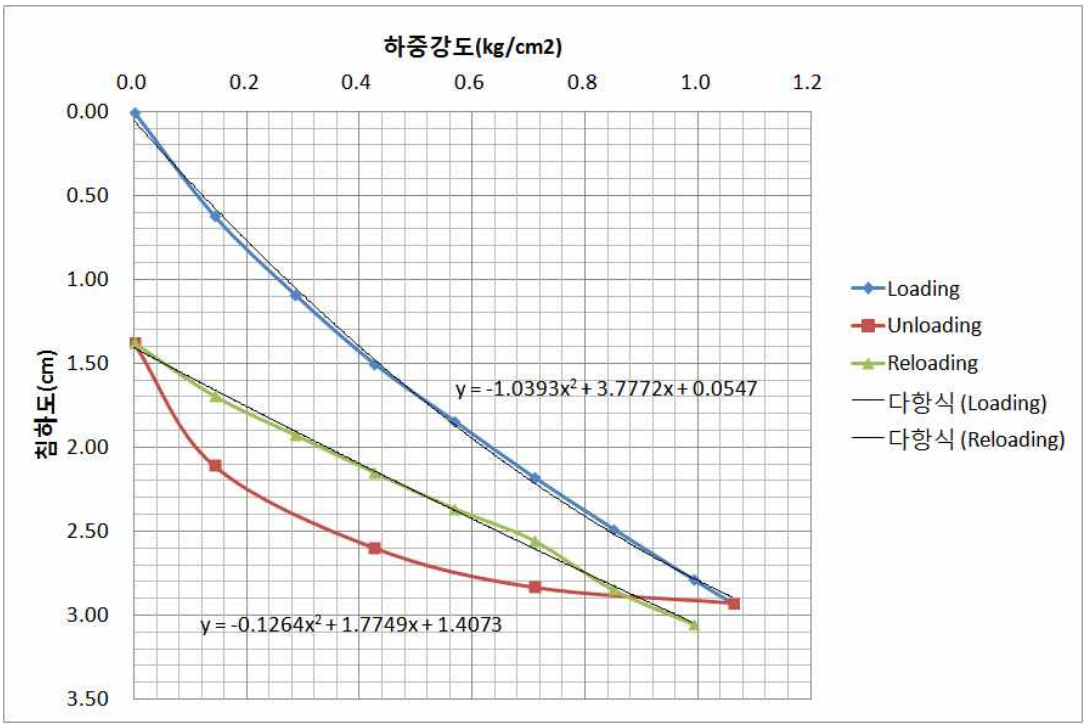



그림 3.8.54 현장 반복평판재하시험 결과

표 3.8.27 현장 반복평판재하시험 결과치

| $E_{v1}$(MPa) | $E_{v2}$(MPa) | $\frac{E_{v2}}{E_{v1}}$ |
|---|---|---|
| 84.13 | 136.39 | 1.62 |

(2) 실내 시험

현장과 실내 시험간의 관계를 알아보기 위하여 DIN 18134 시험에 기준하여 다음 그림 3.8.55와 같은 순으로 진행하였다.

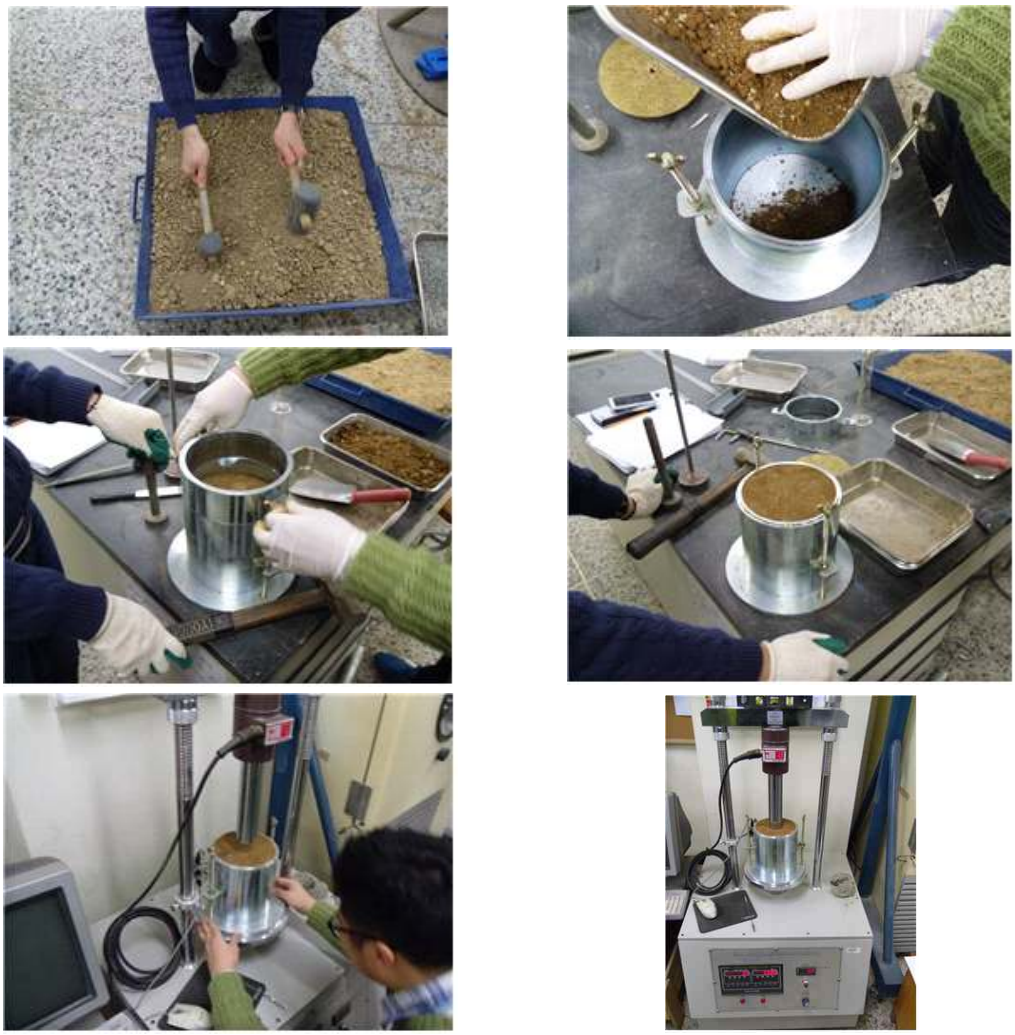


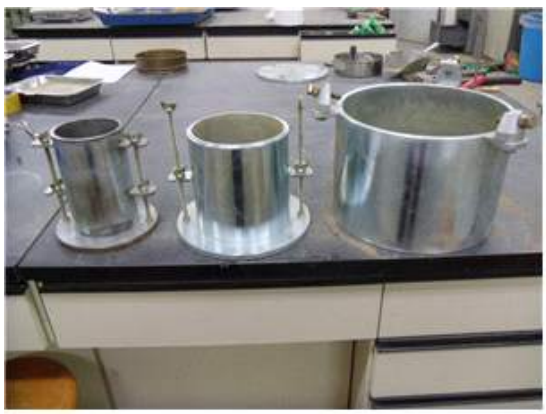
그림 3.8.55 실내 반복평판재하시험

준비가 완료되었으면 이론에서 설명한 하중 단계별로 LVDT 측정값을 읽음으로써 기록을 실시한다.

(3) 실내 반복평판 재하 시험 결과

(가) 실험 몰드 직경에 따른 변형계수의 영향

본 시험의 몰드 크기에 대한 영향을 판별하기 위해 그림 59에 보여진 바와 같이 재하판직경(D) 5cm, 기본 몰드직경 15cm(B:재하판의 반지름을 제외한 몰드의 반경; B/D=1) 뿐만 아니라 직경 10cm(B/D=0.5), 28cm(B/D=2.3)에 대해 동일 시험을 실시하였다. 문헌에 의하면 경계조건의 영향이 없어지는 범위는 재하판 직경의 5배이다. 몰드 직경에 따른 변형계수의 영향을 판별하기위해 상대다짐도는 90%, 함수비는 9%, 높이는 15cm 몰드의 높이인 17.6cm로 고정하여 진행하였다.



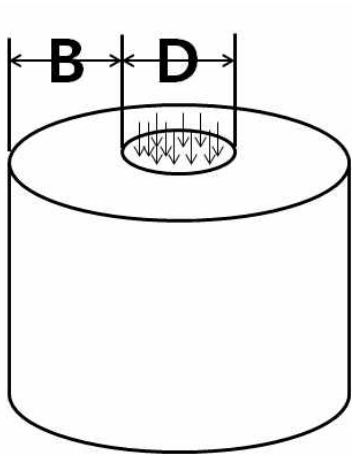



그림 3.8.56 몰드의 종류(정면도) ; 왼쪽부 터 10cm, 15cm, 28cm

시험결과의 그래프는 아래 그림 3.8.57 ~ 59에 나타냈으며 계산된 중요값 및 계수는 표 3.8.28에 제시하였다.

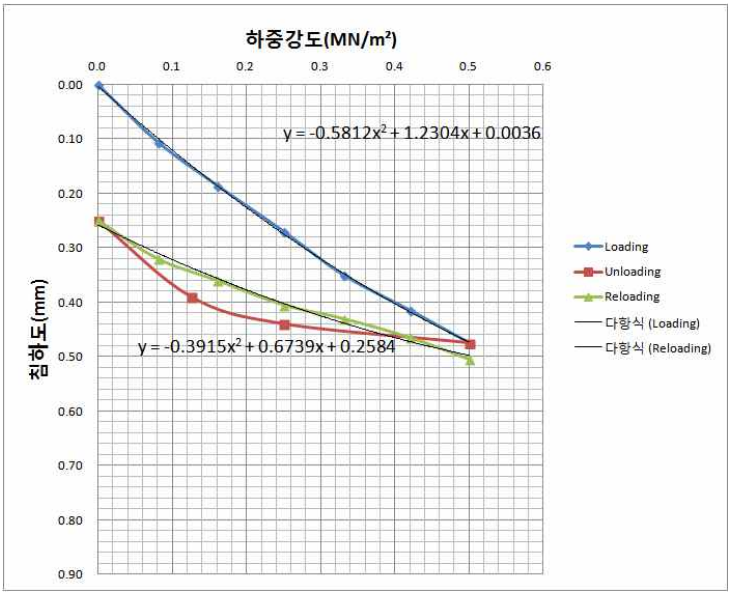



그림 3.8.57 직경 10cm의 실내 반복평판재하시험 결과

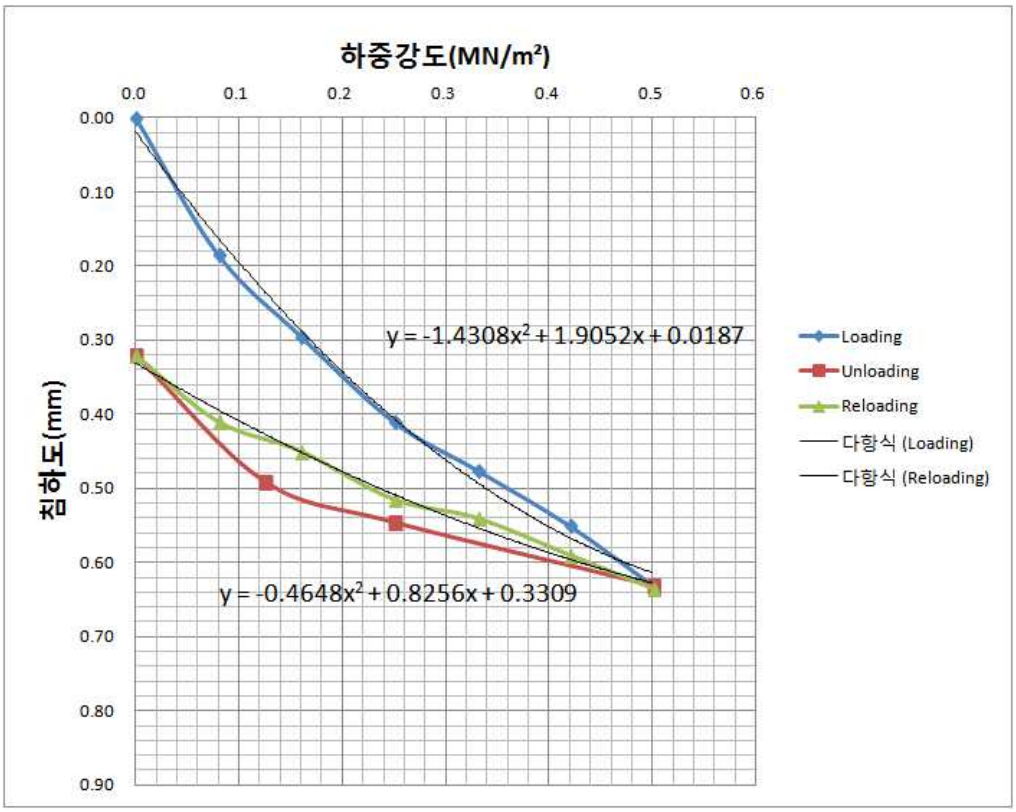



그림 3.8.58 직경 15cm의 실내 반복평판재하시험 결과

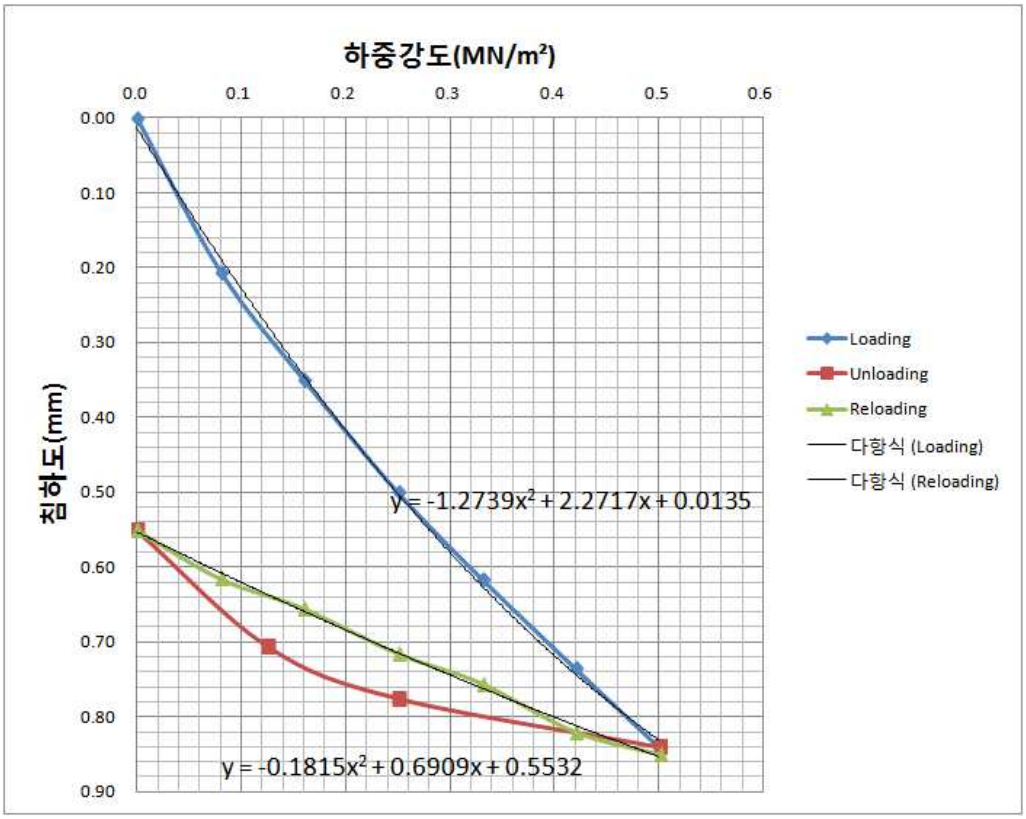



그림 3.8.59 직경 28cm의 실내 반복평판재하시험 결과

그래프를 통해 나온 결과값은 표 3.8.28과 그림 3.8.60, 3.8.61과 같다.

표 3.8.28 직경에 따른 결과값

| | 1차 침하량 (mm) | 회복량 (mm) | 2차 침하량 (mm) | 최종 침하량 (mm) | $E_{v1}$ (MPa) | $E_{v2}$ (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| D10cm | 0.475 | 0.225 | 0.255 | 0.505 | 39.90 | 78.43 |
| D15cm | 0.63 | 0.31 | 0.315 | 0.635 | 31.52 | 63.22 |
| D28cm | 0.84 | 0.29 | 0.3 | 0.850 | 22.94 | 62.48 |

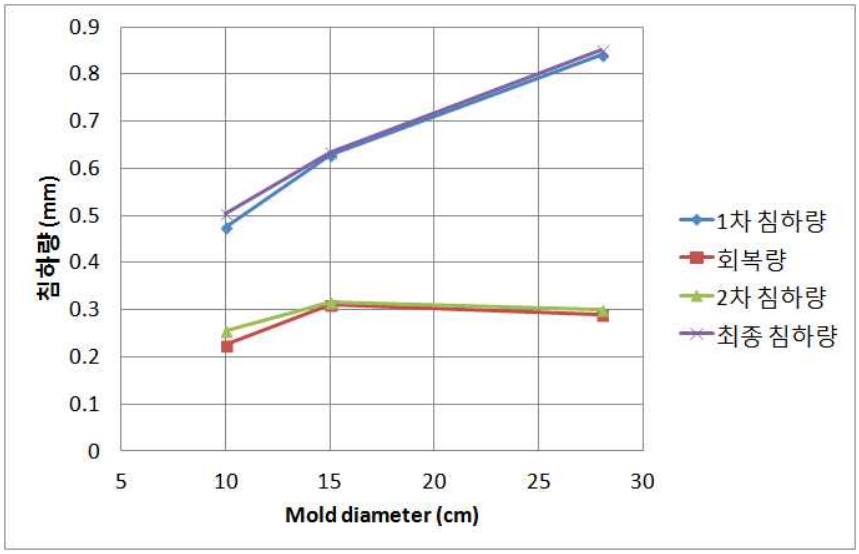



그림 3.8.60 몰드 직경에 따른 침하량 추이

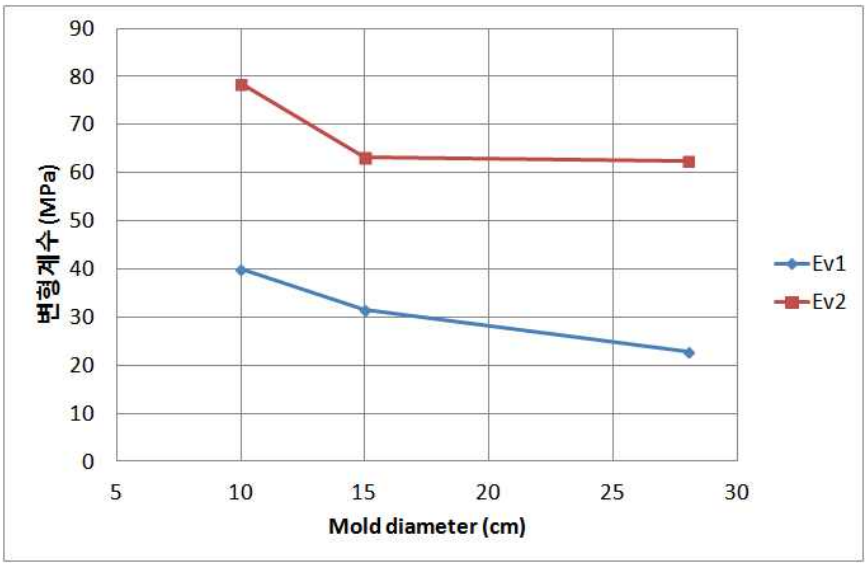



그림 3.8.61 몰드 직경에 따른 변형계수 추이

변형계수는 결국 침하량에 따라서 결정된다고 볼 수 있다. 그림 3.8.60에서 알 수 있듯이 1차 loading에 의한 침하량의 경우, 직경이 작을수록 침하량이 적고 직경이 커질수록 침하량이 커지는 것을 알 수 있다. 이는 관입봉의 크기는 일정한 반면에 몰드 직경이 작으면 관입봉에 의해 양측으로 밀리는 흙이 몰드의 벽에 저항을 받게 되는 경계조건의 영향이다. 그러나 2차 loading에 의한 침하량의 경우, 직경 15cm(B/D=1)와 직경 28cm(B/D=2.3)의 시험과 크게 차이가 없었다. 이것은 1차 loading에 의해 과압밀 되었기 때문이다.

또한 unloading에 의한 회복량과 2차침하량이 거의 차이가 나지 않는 것으로 미루어,

1차 침하량이 제거된 뒤의 실험은 탄성영역에서 이루어 졌음을 알 수 있었다.

따라서, $E_{v1}$의 경우, 직경이 커질수록 값이 작아지는 경향을 보이나, $E_{v2}$의 경우, 직경 15cm 이후로는 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 $E_{v1}$는 Scale에 따른 영향 뿐만 아니라, 초기 표면 다짐도의 영향이 큰 것으로 보인다. 그러나 $E_{v2}$는 1차 loading에 의해 초반 변형을 제거해주면 일정 직경 이후로는 같은 값을 갖는 다는 것을 알 수 있다.

또한 평가의 지표가 되는 $E_{v2}/E_{v1}$에서 몰드 직경 10cm와 15cm에서는 각각 1.97, 2.01로 큰 차이를 보이지 않았지만 몰드 직경 28cm에서는 2.72로 다소 차이를 보였다. 이는 몰드 직경 10cm와 15cm에서는 변형의 정도가 구속으로 인해 비슷한 비율로 일어나지만 구속의 정도가 약한 28cm에서는 그 변화의 폭이 다소 크게 나타남을 알 수 있다.

이를 바탕으로 몰드의 반경(B)과 재하판(D)의 비(B/D) 3D 몰드를 기준으로 실내 반복평판재하시험에서의 증가계수와 감소계수를 제시하면 그림 3.8.62와 같다. 기존 문헌을 바탕으로 3D 이후의 경계 영향은 없다고 가정하여 나타내었다. 이러한 가정은 아래 2.4.4의 수치해석적 검증에서 추가적으로 증빙한다.

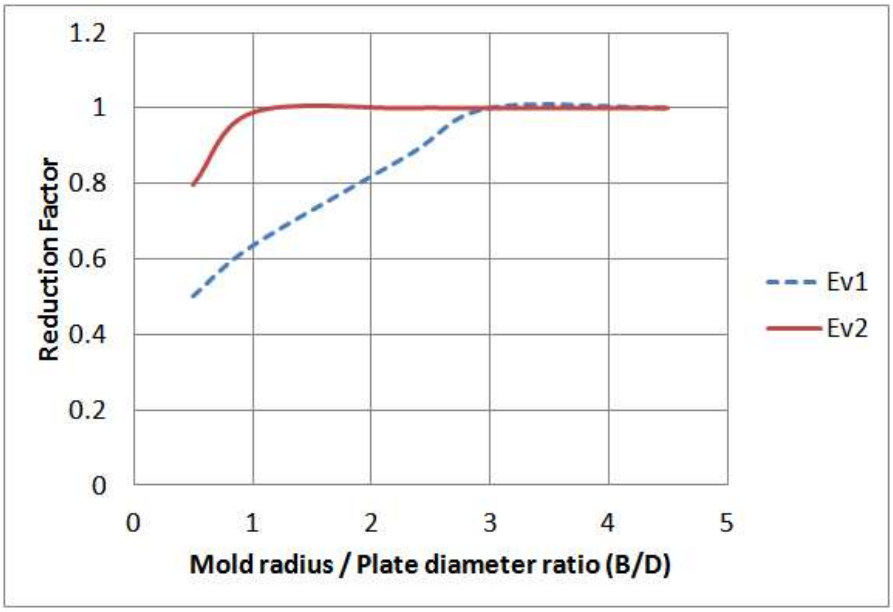



그림 3.8.62 직경에 따른 실내 반복평판재하시험에서의 감소계수

(나) 함수비에 따른 변형계수의 영향

몰드 크기에 대한 영향과 마찬가지로 함수비에 대한 반복평판재하시험의 변형계수 영향을 알아보았다. 몰드 15cm(B/D=0.5)에 다짐도 90%로 함수비만 바꿔가며 측정하였다. 최적함수비와 가까운 9%를 기준으로 좌우로 3%, 6%, 9%, 12%, 15%에 대해 시험을 실

시하였다.

함수비 3% 일 때는 지지력이 크게 나오지 않을 것 같다는 예상과는 다르게 아래 결과 값 그림 처럼 $E_{v1}$, $E_{v2}$ 모두 크게 나왔다. 그러나 preloading에 의해 값으로는 제거 되었지만 표면상의 제대로 다져지지 않은 분진이 매우 심하여 현장 요건에 적합하지 않음을 알 수 있었다.

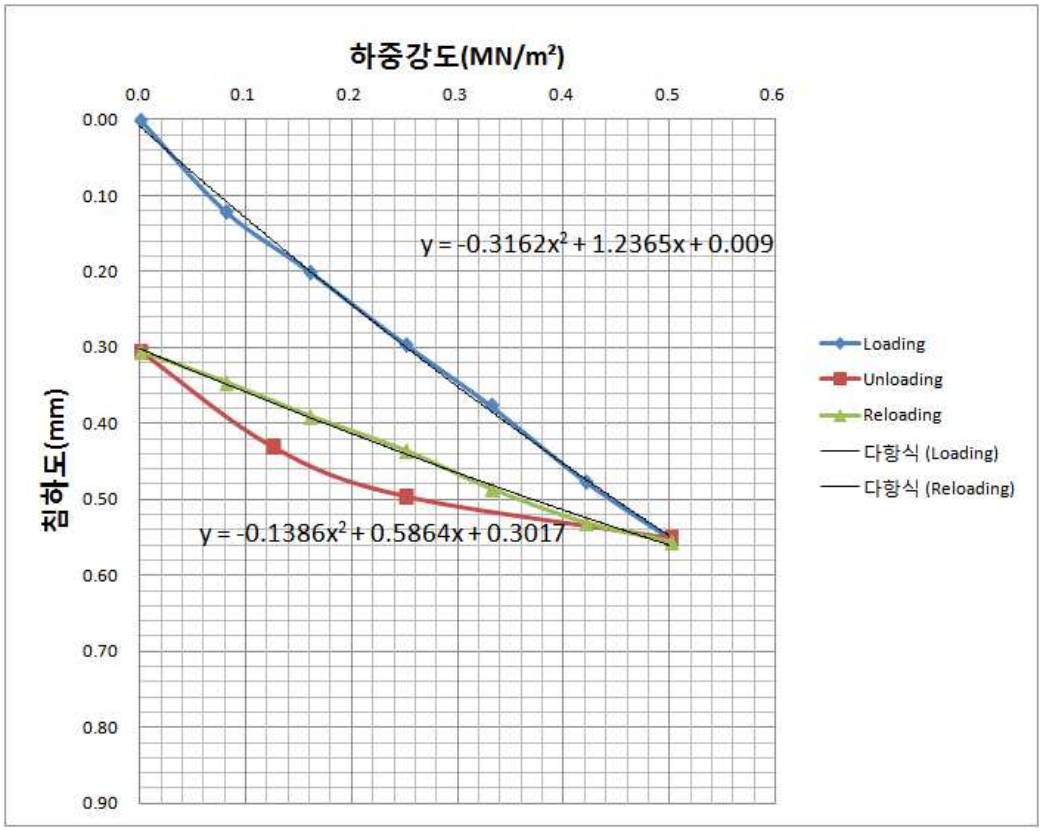



그림 3.8.63 함수비 3%의 실내 반복평판재하시험

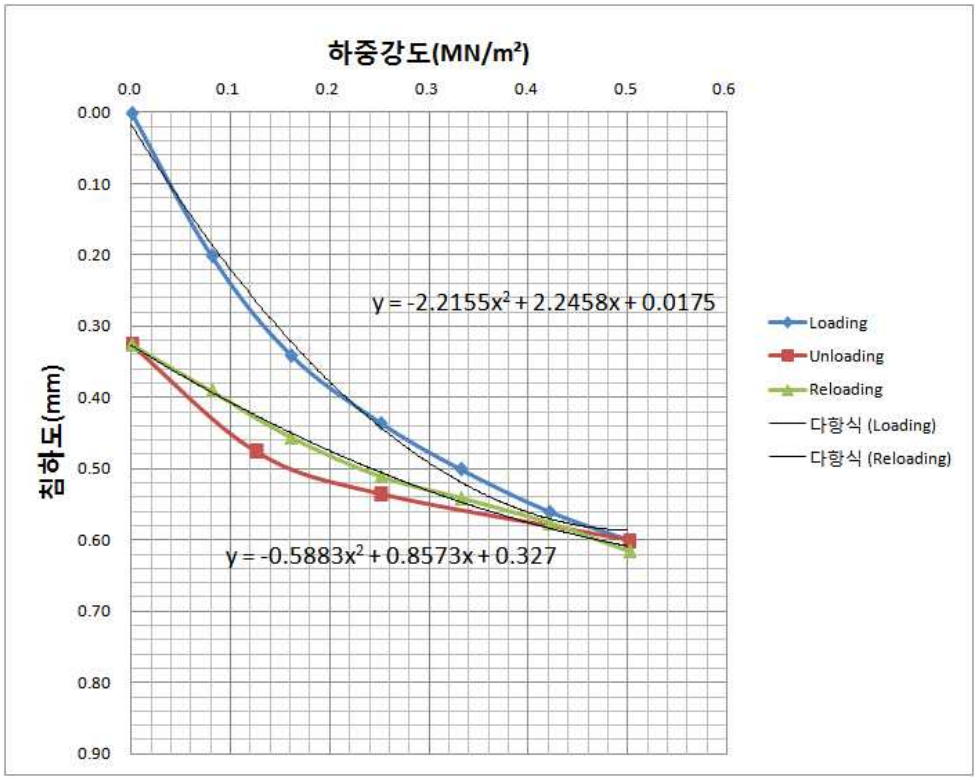



그림 3.8.64 함수비 6%의 실내 반복평판재하시험

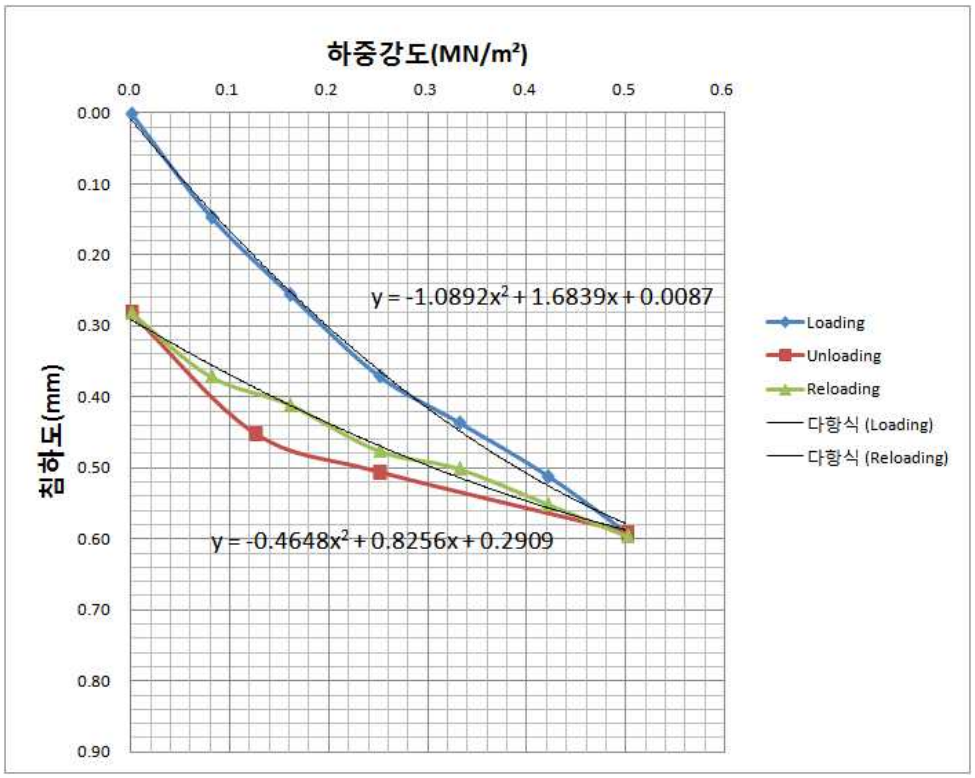



그림 3.8.65 함수비 9%의 실내 반복평판재하실험

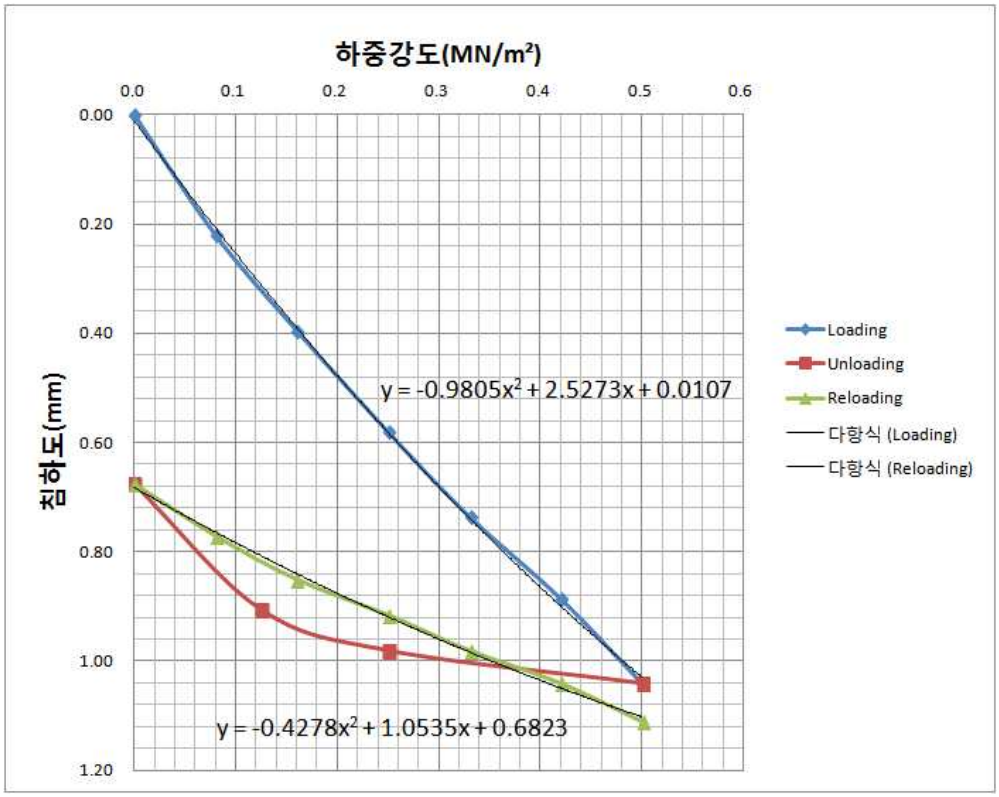



그림 3.8.66 함수비 12%의 실내 반복평판재하시험

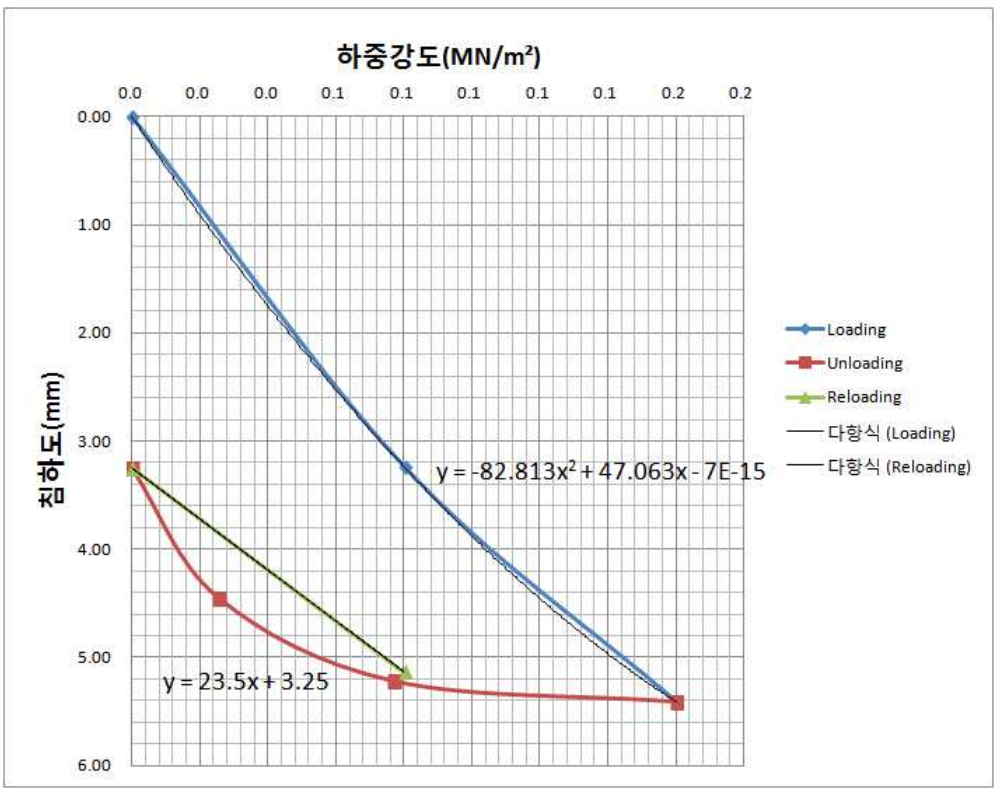



그림 3.8.67 함수비 15%의 실내 반복평판재하시험

함수비 15% 일 때는 변형이 심하게 일어나 DIN 18134 기준을 따라 위 그림 3.8.67처럼 5mm 침하가 일어나 날 때 까지만 실시하였다.

전체적인 결과값은 아래 표 3.8.29, 그림 3.8.68과 같다.

표 3.8.29 함수비에 따른 결과값

| | 1차 침하량 (mm) | 회복량 (mm) | 2차 침하량 (mm) | 최종 침하량 (mm) | $E_{v1}$ (MPa) | $E_{v2}$ (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 3% | 0.55 | 0.245 | 0.25 | 0.555 | 34.77 | 72.52 |
| 6% | 0.6 | 0.275 | 0.29 | 0.615 | 32.95 | 66.59 |
| 9% | 0.59 | 0.31 | 0.315 | 0.595 | 32.91 | 63.22 |
| 12% | 1.04 | 0.365 | 0.435 | 1.11 | 18.41 | 44.66 |
| 15% | 5.41 | 2.16 | 1.88 | 5.13 | 1.11 | 1.60 |

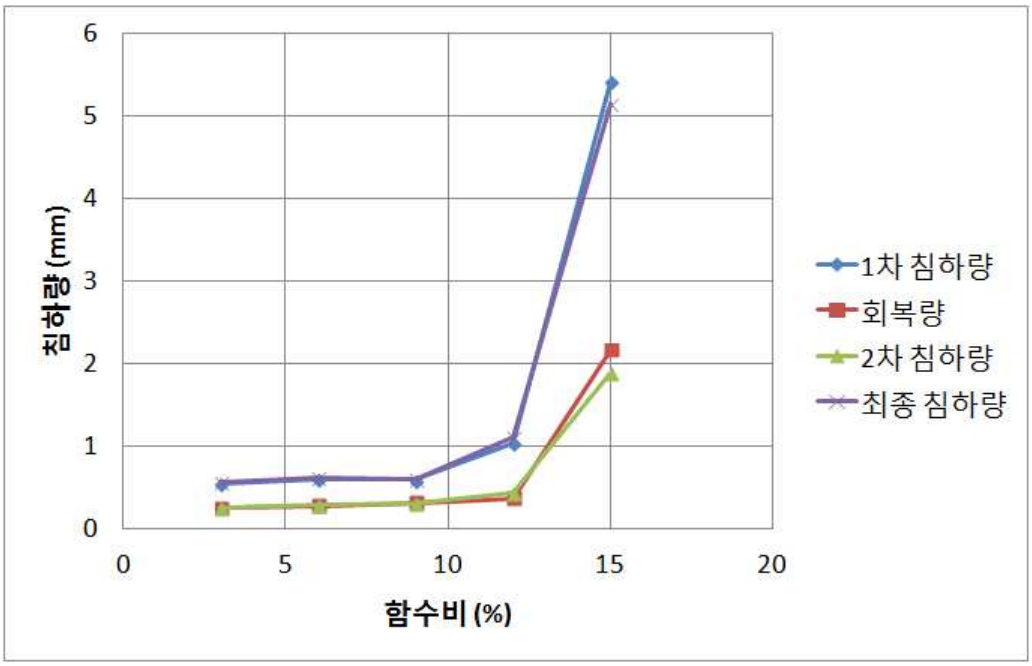



그림 3.8.68 함수비에 따른 침하량 추이

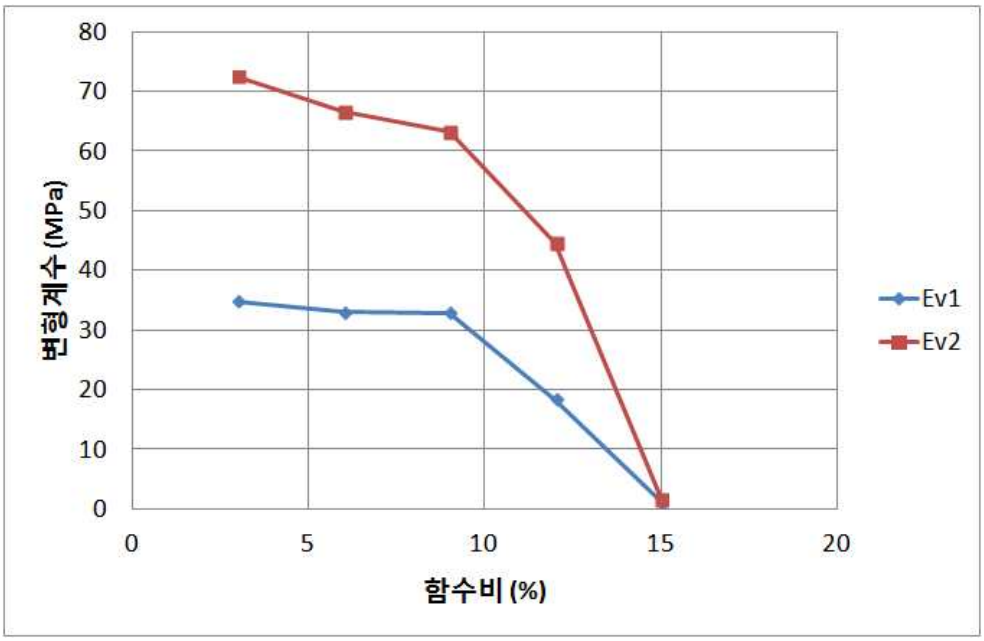



그림 3.8.69 함수비에 따른 변형계수 추이

결과는 전반적으로 최적함수비인 9%를 기준으로 값이 심하게 변하는 것을 알 수 있었다. 함수비 15%에서는 9% 함수비 시료의 약 97%의 변형계수의 감소가 발생하였다. 앞서 말했듯이 함수비가 적더라도 높은 변형계수 값을 가짐을 알 수 있지만 높은 함수비에선 매우 높은 변형으로 인해 낮은 변형계수 값을 가짐을 알 수 있다.

그리고 3%, 6%, 9%에서는 초기 1차 침하량이 제거된 다음의 변형계수 즉, $E_{v2}$ 값은 대체로 일정하다는 것을 알 수 있었다.

$E_{v2}/E_{v1}$의 변화에 있어 함수비 3%, 6%, 9%에서는 2.09, 2.02, 1.92로 $E_{v2}$, $E_{v1}$의 증가 혹은 감소가 비슷한 비율로 나타났지만 최적함수비 이상의 12%, 15%에서는 2.43, 1.44로 변화의 폭이 커졌음을 알 수 있다. 이 결과를 바탕으로 현장에서 함수비를 확인하였을 때에 개략적인 값의 변화를 유추할 수 있을 것이다.

이를 바탕으로 함수비 9%를 기준으로 실내 반복평판재하시험에서의 증가계수와 감소계수를 제시하면 아래 그림 3.8.70과 같다. 따라서 그림 3.8.70을 통해 함수비가 높은 상태에서 실험을 하더라도 위의 Scale factor를 이용하여 원래의 변형계수를 간접적으로 추정할 수 있을 것이다.

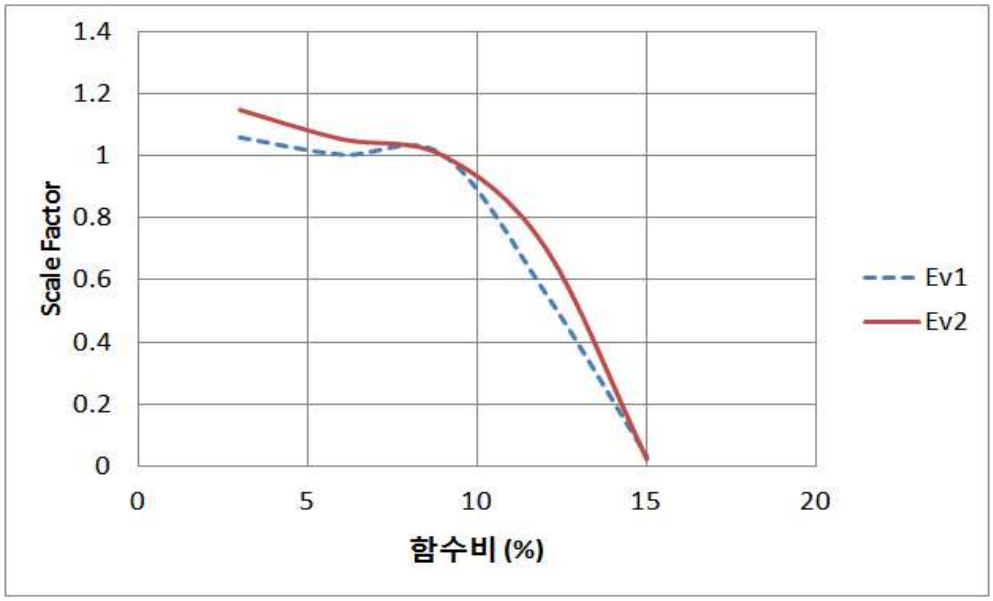



그림 3.8.70 함수비에 따른 실내 반복평판재하시험에 의한 변형계수 변화

(다) 다짐도에 따른 변형계수의 영향

실내 반복평판재하시험의 현장 여건 반영을 위하여 다짐도에 따른 영향을 알아보기 위해 시공상에 가장 많이 쓰이는 90%와 95% 다짐도에 9%의 동일한 함수비로 시험을 실시하였다. 시험은 재하판 직경 D=50mm, 몰드 직경 150mm(B=50mm)에서 수행하였으며, B/D=1의 조건이다.

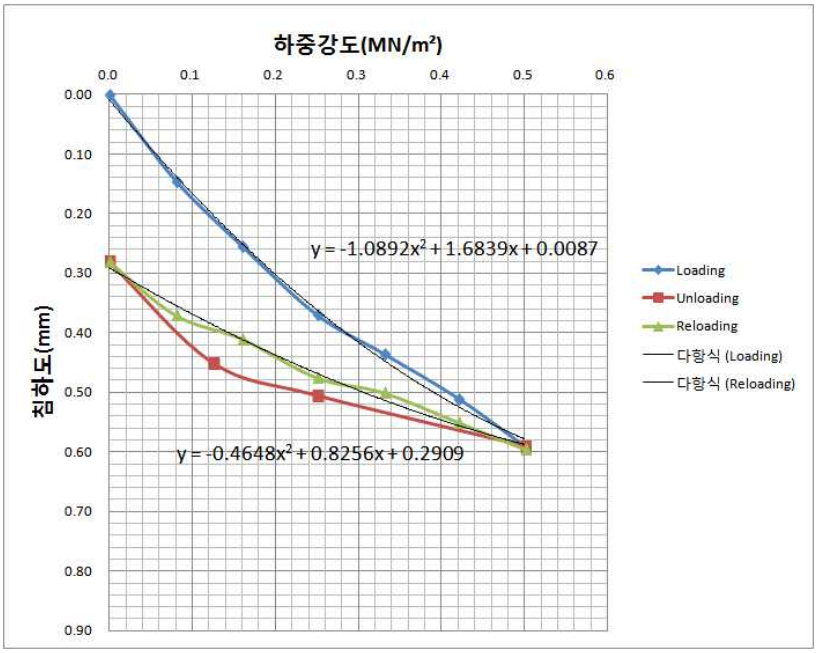



그림 3.8.71 다짐도 90%의 실내 반복평판재하시험

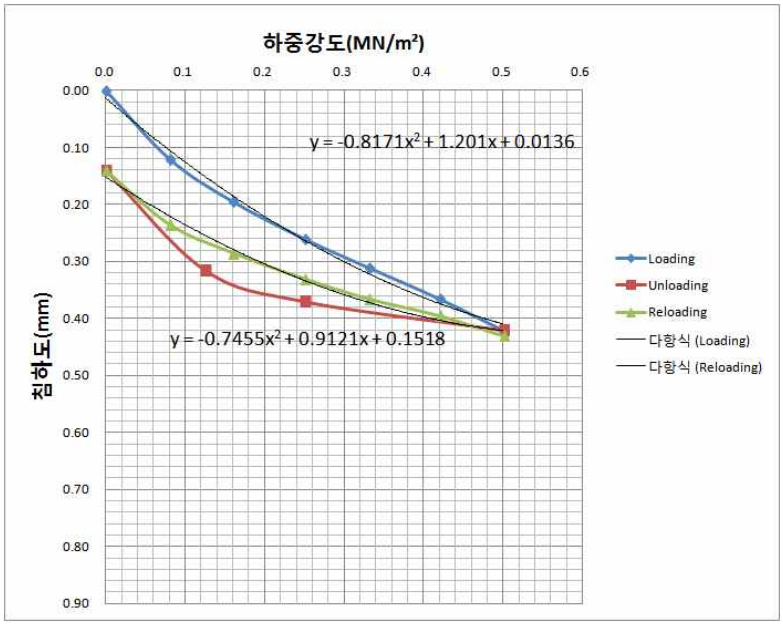



그림 3.8.72 다짐도 95%의 실내 반복평판재하시험

결과값은 아래 표 3.8.30과 그림 3.8.73, 3.8.74와 같다.

표 3.8.30 다짐도에 따른 결과값

| | 1차 침하량 (mm) | 회복량 (mm) | 2차 침하량 (mm) | 최종 침하량 (mm) | $E_{v1}$ (MPa) | $E_{v2}$ (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 90% | 0.59 | 0.31 | 0.315 | 0.595 | 32.91 | 63.22 |
| 95% | 0.42 | 0.28 | 0.29 | 0.43 | 47.32 | 69.53 |

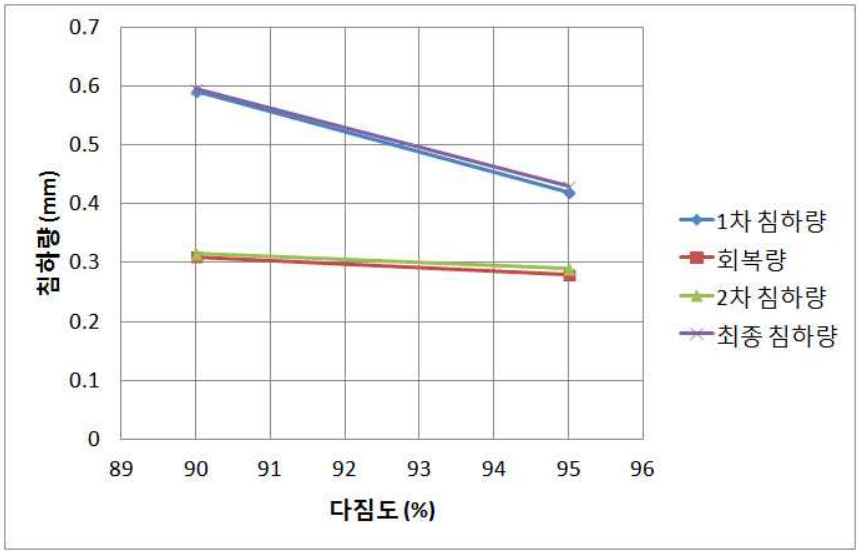



그림 3.8.73 다짐도에 따른 침하량 추이

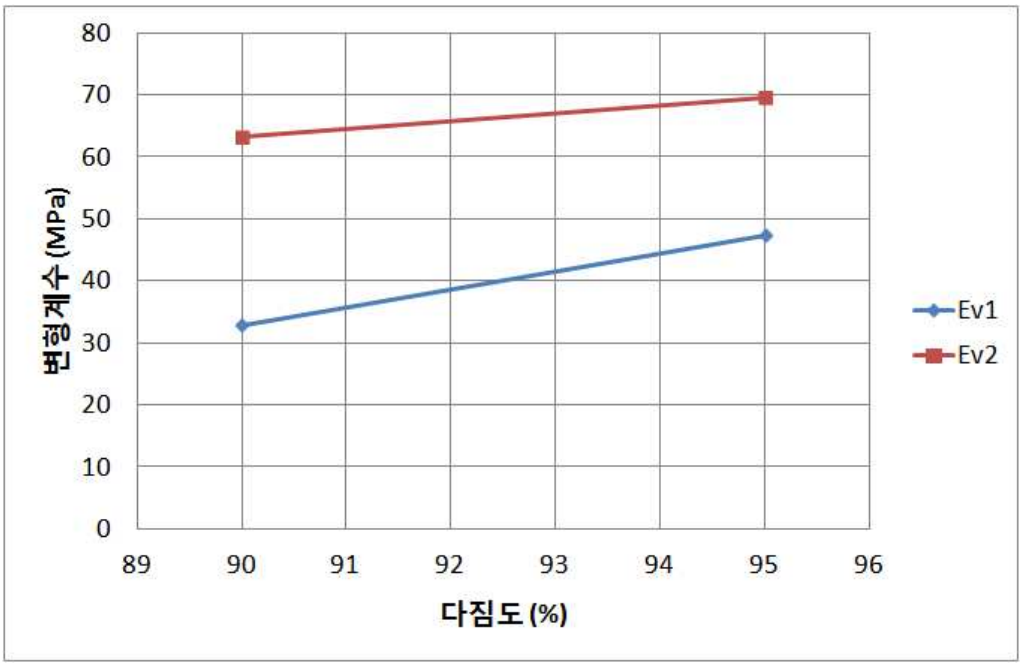



그림 3.8.74 다짐도에 따른 변형계수 추이

결과에서 보듯이 다짐도가 높아짐에 따라 침하량은 줄어들고 변형계수는 커지는 것을 알 수 있다. 또한 다른 시험들과 마찬가지로 값으로 미루어 보아 탄성영역에서 제대로 시험이 이루어 졌음을 알 수 있다.

몰드 크기나 함수비에 따른 시험들과 마찬가지로 $E_{v1}$은 다소 차이를 보였지만 $E_{v2}$에서는 큰 차이를 보이진 않았다. 이는 90% 다짐도 일지라도 초기 변형으로 인해 어느 정도 95% 다짐도에 근접해짐을 알 수 있다.

다짐도에 따른 $E_{v2}/E_{v1}$의 변화는 90%와 95%일 때 각각 1.92, 1.47로 다짐도가 높아질수록 값의 변화차이가 낮아짐을 알 수 있다.

이를 바탕으로 다짐도 90%를 기준으로 실내 반복평판재하시험에서의 증가계수와 감소계수를 제시하면 그림 3.8.75와 같다.

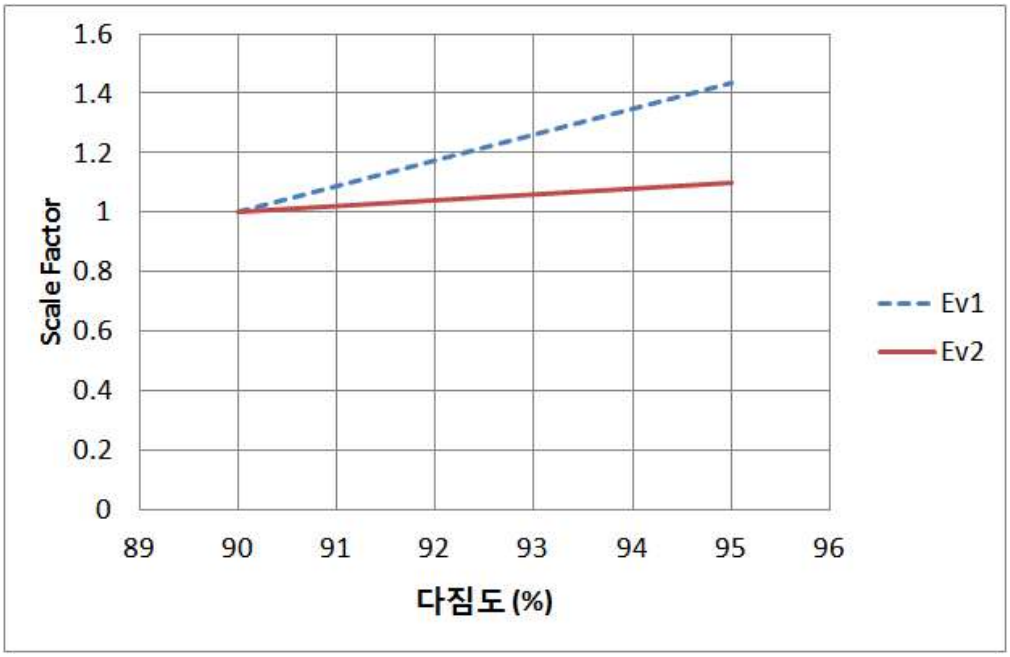



그림 3.8.75 다짐도에 따른 실내 반복평판재하시험에 의한 증가계수와 감소계수

(라) 재하판 직경에 따른 지반반력계수의 영향

재하판 직경에 따른 현장과 실내의 차이점을 묘사하기 위하여 그림 의 그래프를 기반으로 하였다. 실내에서 행해지는 50mm의 재하판 크기에 대한 값을 산출하기 위하여 신뢰도가 높은 추세선을 구하고 그에 해당하는 그래프를 아래 그림 3.8.76과 같이 나타내었다.

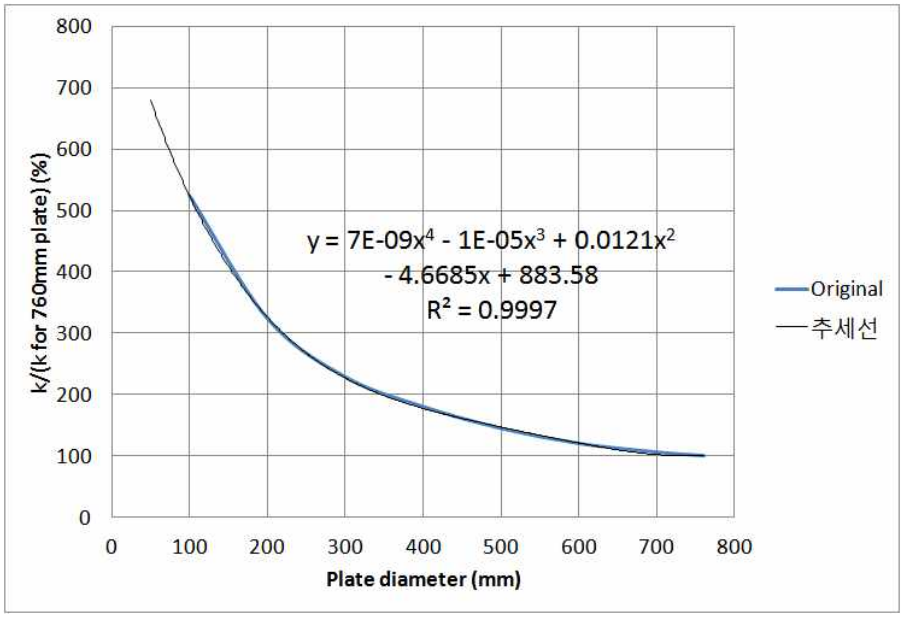



그림 3.8.76 현장시험에 의한 재하판 직경에 따른 지반반력계수 변화(David C, 1991)

이론에서 설명하였듯이 실내에서의 50mm 재하판에 의한 k-value 즉, $\frac{\sigma}{s}$는 현장에서 주로 사용되는 300mm 재하판에 비해 약 3배 정도 크게 나옴을 알 수 있다.

이때의 값을 바탕으로 실내의 50mm 재하판에 대한 직경 크기 증가에 따른 감소계수를 그림 3.8.77과 같이 제시하였다.

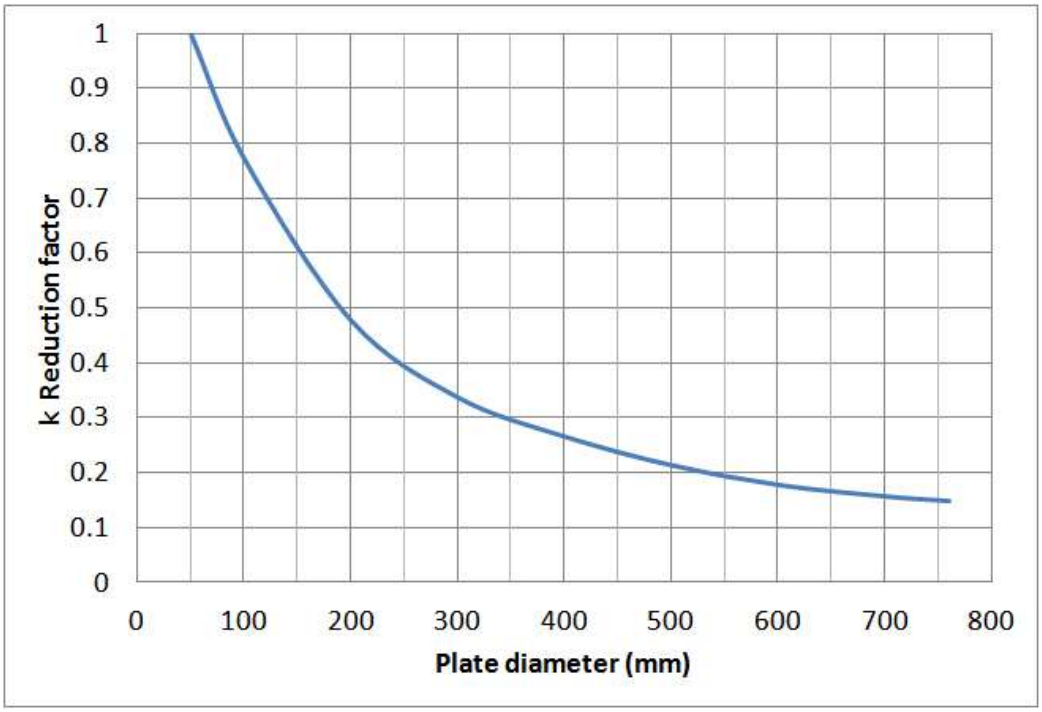



그림 3.8.77 재하판 직경에 따른 실내 반복평판재하시험에 의한 감소계수

(마) 자갈 혼입에 따른 강도 영향

'Interpretation of the limits in shear strength in binary granular mixture(Luis E, 2001)'는 입경이 다른 2가지의 자갈과 모래를 혼합하여 한계 전단강도에 대해 연구하였다. 직경 5mm와 0.4mm 혼합물의 간극률 변화를 알아보기 위해 300g의 혼합물을 플라스틱 백에 넣고 육안으로 보았을 때 균질해 질 때까지 흔들었다. 원통형 유리 용기에 혼합물을 넣고 13.8, 56, 84.3kpa에 대한 정적수직응력(normal static stress)을 가하여 혼합물의 간극률 변화를 연구하였다. 그림 3.8.78에 의하면 수직응력에 따라 약간의 변화가 있지만 세립분 함유율이 20 ~ 30% 이상 되면 강도는 점차 감소함을 알 수 있다. 이는 선로정비지침에서 규정하고 있는 토사 함유율 상한선 25%와 거의 일치되는 관계이다.

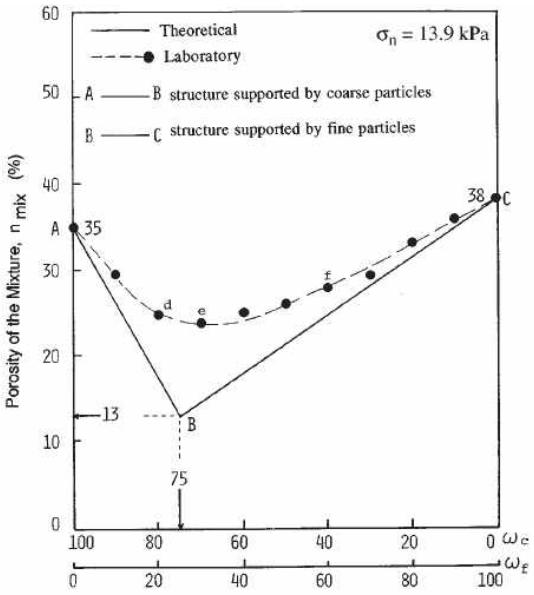



그림 3.8.78 혼합물의 간극률 변화(Luis E, 2001)

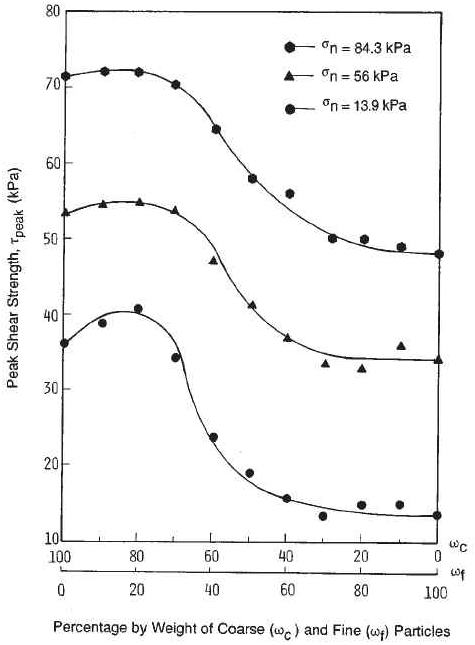



그림 3.8.79 굵은 골재 함유에 따른 전단강도 변화(Luis E, 2001)

이에 따르면 굵은 골재의 비율이 70%이상 되었을 때는 조립토만으로 그 구조가 유지되며, 40~70%일 때는 굵은 골재와 잔골재가 혼합물의 구조를 분담하여 유지한다고 발표하였다. 또한 40%이하에서는 잔골재만으로 그 구조가 유지된다. 더불어 혼합물의 전단강도는 마찰응력에 영향을 받기 때문에 혼합물의 전단강도도 일반적인 분류법(coarse grain, corase-fine grain, fine grain)을 따른다고 발표하였다.

따라서 그림과 같이 굵은 골재의 함유량이 높아짐에 따라 전단강도가 증가하는 양상을 보였다. 또한 이러한 모래-자갈 혼합토의 연구는 “모래-자갈 혼합토의 강도 특성에 관한 연구(박성식, 2011)”에서도 찾아 볼 수 있는데 시멘트로 고결된 모래에 일정한 비율로 굵은 자갈을 섞긴 했지만 이 논문에서도 위 논문과 유사한 결과를 나타냄을 알 수 있다. 따라서 자갈 혼입에 따른 노반의 지지력 변화 역시 이와 동일한 결과를 보일 것이다.

(4) 수치해석적 검증

(가) 모델링

시중의 상용 프로그램인 MIDAS GTS를 이용해 실내 반복평판재하시험의 수치적 해석을 시도하였다. 시료의 물성치는 표 31과 같이 화강풍화토의 전형적인 값을 이용하였으며, 실제 거동의 패턴을 비교해 보는데 목적을 두었다. 해석에 사용된 것은 몰드 사이즈

변화에 따른 침하량과 재하판 직경에 따른 침하량의 변화 두 가지 이다.

표 3.8.31 모델링에 사용된 화강풍화토의 물성치

| 명칭 | Soil |
|---|---|
| 종류 | Mohr Coulomb |
| 탄성계수($E$)[$ton_f/m^2$] | 5,000 |
| 프아송비($\nu$) | 0.3 |
| 단위중량($\gamma$)[$ton_f/m^3$] | 1.8 |
| 포화단위중량($\gamma_{sat}$)[$ton_f/m^3$] | 1.8 |
| $k_o$ | 0.5 |
| 점착력($C$)[$ton_f/m^2$] | 2 |
| 마찰각(°) | 30 |



그림 3.8.80 실내 실험

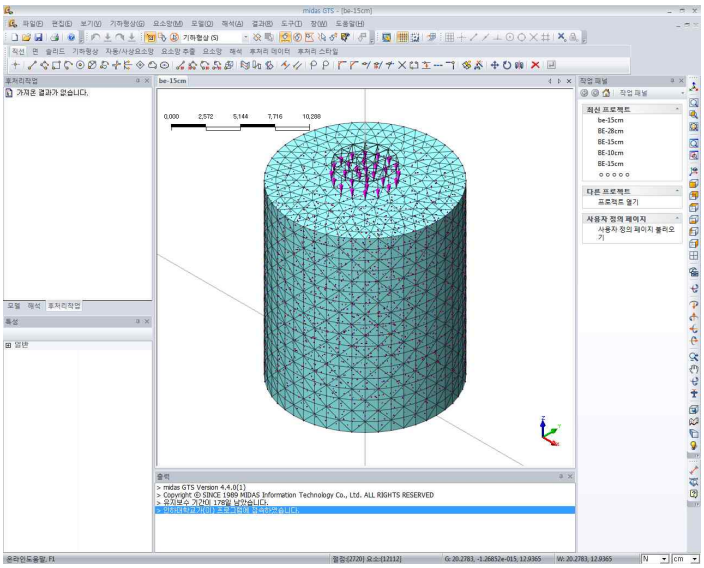


그림 3.8.81 몰드 직경 15cm(B/D=1)의 모델링

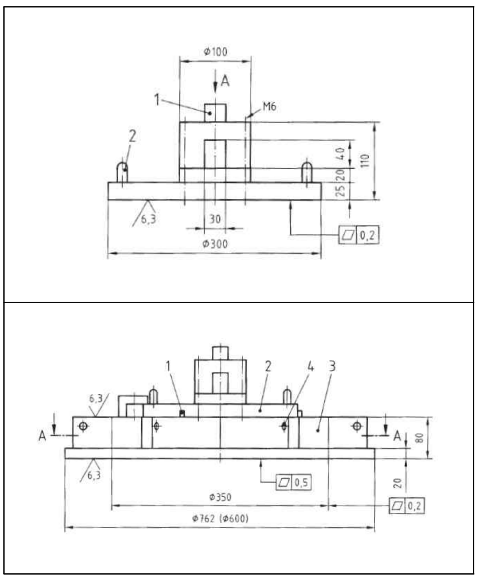



그림 3.8.82 여러 가지 재하판

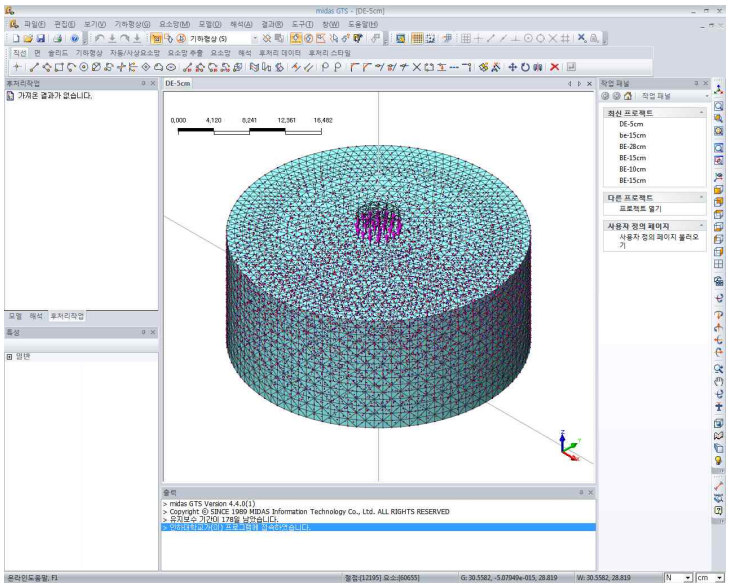


그림 3.8.83 재하판 직경에 따른 영향 검토 모델링

(나) 수치해석 결과

① 몰드 사이즈 변화에 따른 1차 침하량의 영향

해석에는 측면부의 수직 구속조건(dz)을 준 경우와 주지 않은 경우 두 경우 다 해석하였다. 두 경우 모두 바닥부는 구속하였다.

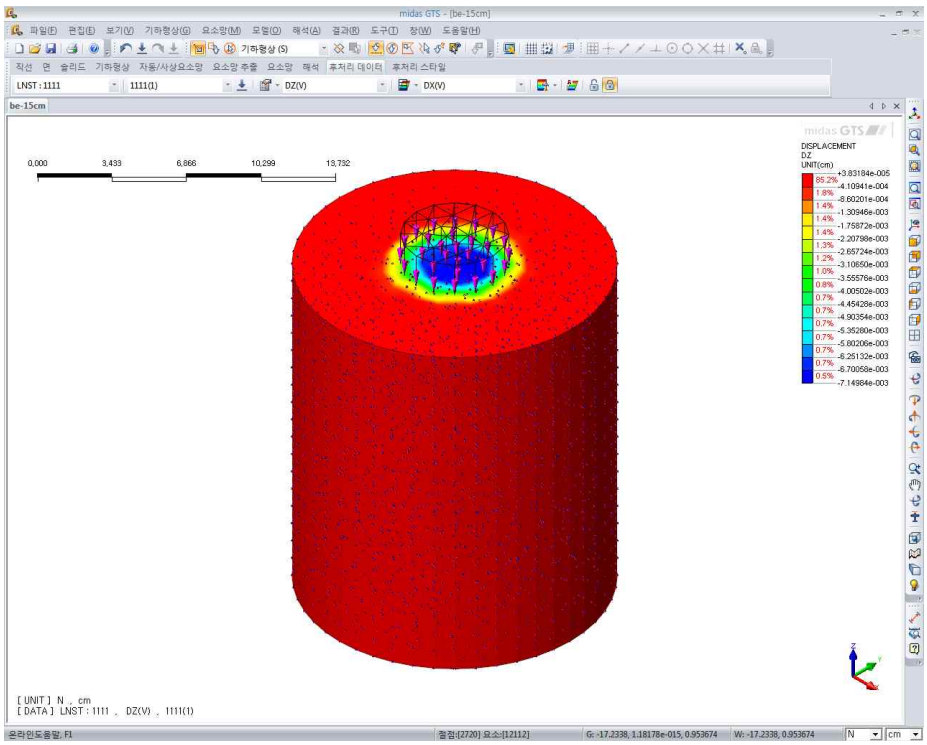


그림 3.8.84 수직 구속조건을 준 경우

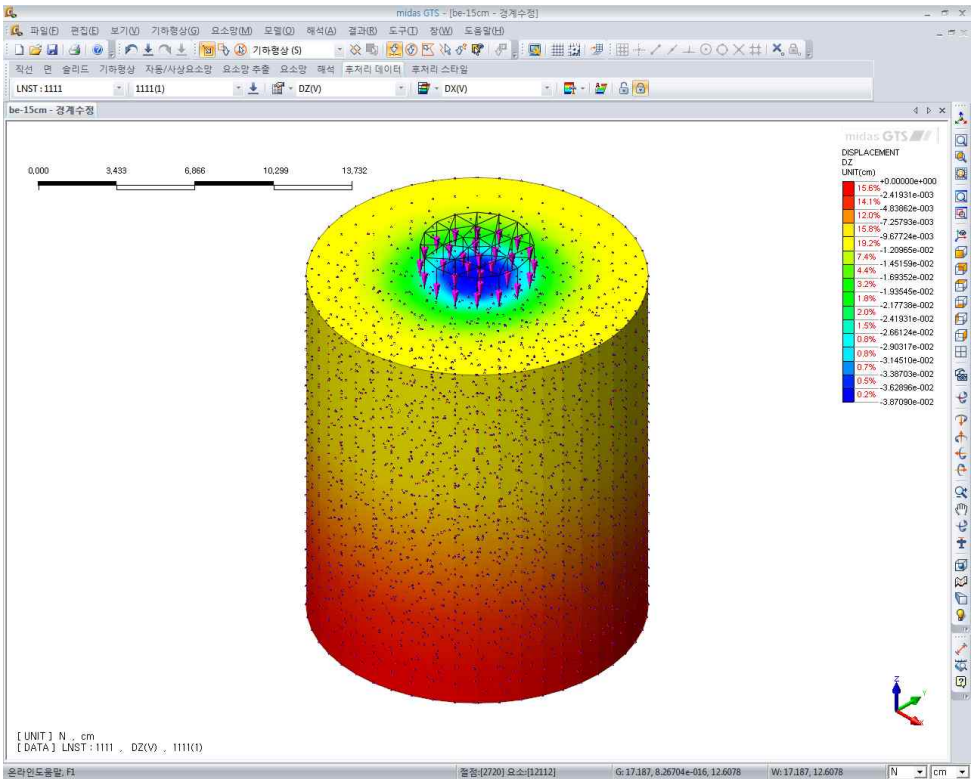



그림 3.8.85 수직 구속조건을 주지 않은 경우

위의 그림에서 붉은색은 거의 변위가 발생하지 않은 부분, 푸른색은 가장 큰 변위가 발생한 부분을 말한다. 결과는 아래 표 3.8.32, 3.8.33, 그림 3.8.86, 3.8.87과 같다.

표 3.8.32 구속 조건을 준 경우의 침하량

| B/D | 0.2 | 0.5 | 1 | 2.3 | 3.5 | 4.5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 침하량 ($10^{-3}$cm) | 7.064 | 7.05 | 7.150 | 7.806 | 7.692 | 7.683 |

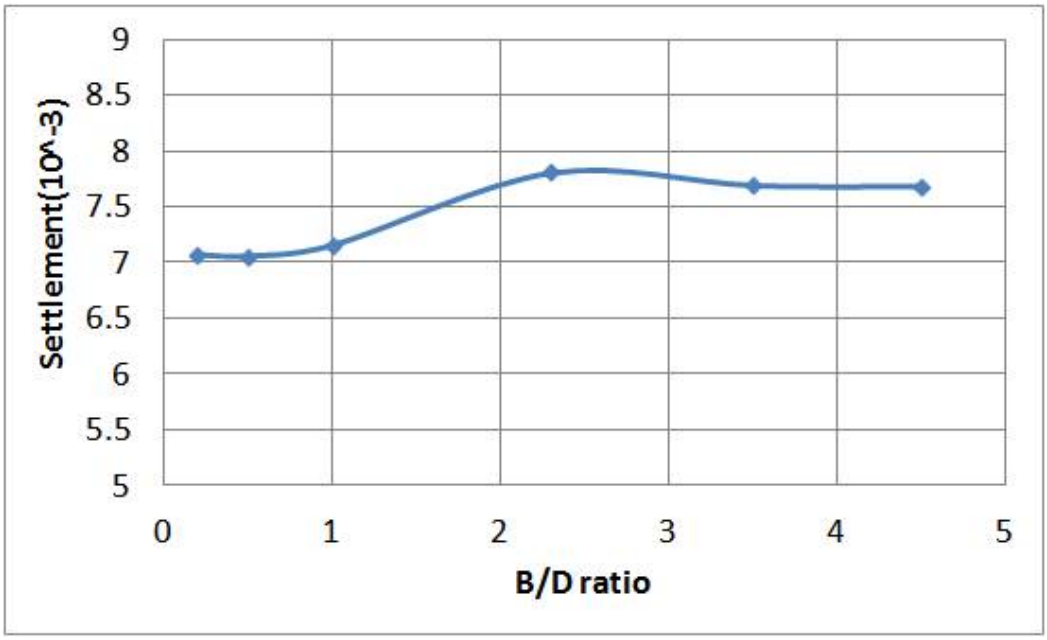



그림 3.8.86 구속 조건을 준 경우의 몰드 직경 변화에 따른 1차 침하량의 변화

표 3.8.33 구속 조건을 주지 않은 경우의 침하량

| B/D | 0.2 | 0.5 | 1 | 2.3 | 3.5 | 4.5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 침하량 ($10^{-3}$cm) | 77.178 | 50.171 | 38.709 | 34.409 | 34.211 | 34.172 |

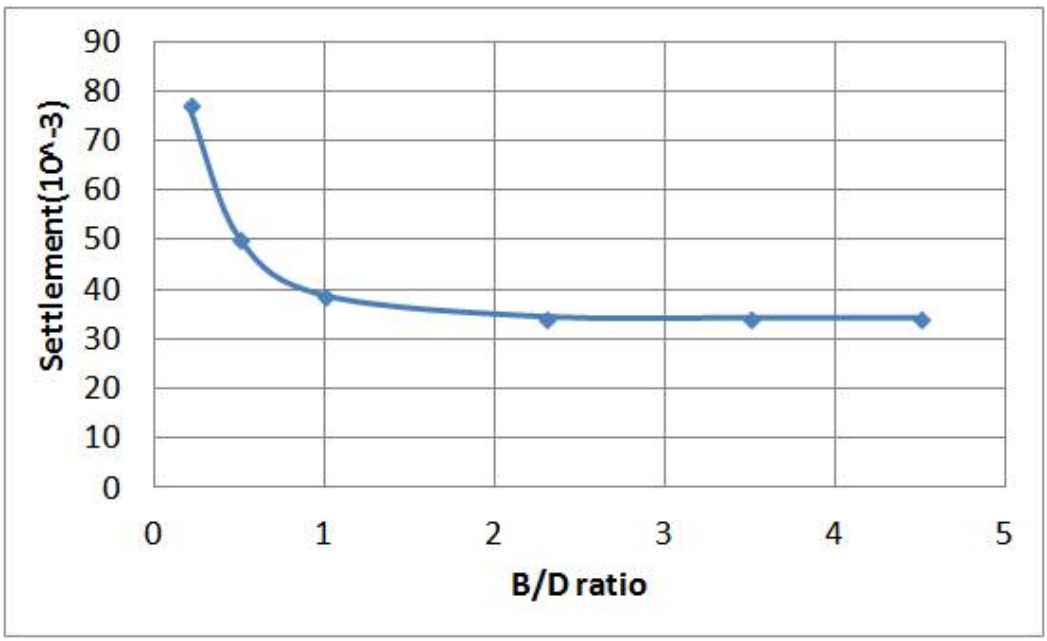



그림 3.8.87 구속 조건을 주지 않은 경우의 몰드 직경에 따른 1차 침하량 변화

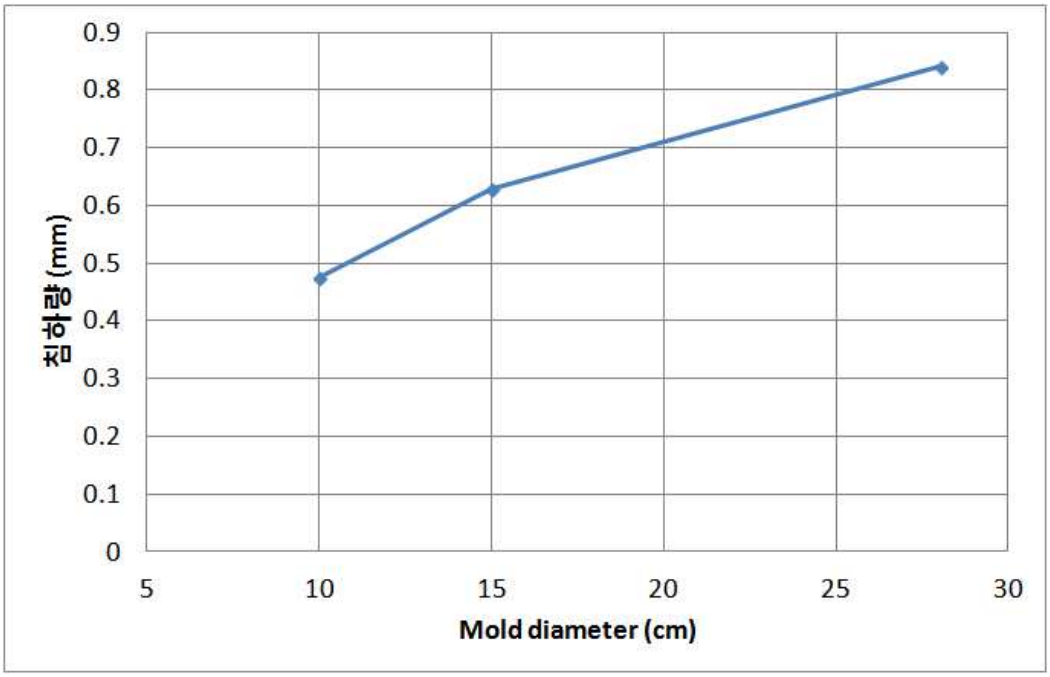



그림 3.8.88 몰드 직경 변화에 따른 실제 1차 침하량의 변화

구속 조건을 주느냐 주지 않느냐에 따라 현저히 다른 결과가 나왔으며, z 방향 구속 조건을 주지 않은 경우는 실험에 의한 침하량 변화와 반대의 경향이 나오기도 했다. 이는 몰드 구속의 영향이 전체 거동에 상당히 많은 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

여기서 주목할 점은 수치해석의 결과로서 구속을 주었든 주지 않았든 몰드 직경의 약 3배 이상에서는 전체적인 침하량이 일정해 짐을 알 수 있었다. 이는 기존의 문헌에서 확인할 수 있듯이, 직경 D의 약 3D 이상에서는 경계조건의 영향이 미미함을 알아 볼 수 있다.

② 재하판의 직경 변화에 따른 1차 침하량의 영향

위 ①의 결과를 바탕으로 재하판 직경의 3배가 되도록 경계 지오메트리를 형성하고 각 경우에 대해 해석을 수행하였다. 결과는 아래 표 3.8.34과 그림 3.8.89와 같다.

표 3.8.34 재하판 직경에 따른 수치해석에서의 침하량 변화

| 재하판 직경 (cm) | 5 | 15 | 30 | 50 | 70 |
|---|---|---|---|---|---|
| 침하량 ($10^{-3}$cm) | 7.708 | 23.856 | 46.629 | 78.120 | 116.121 |

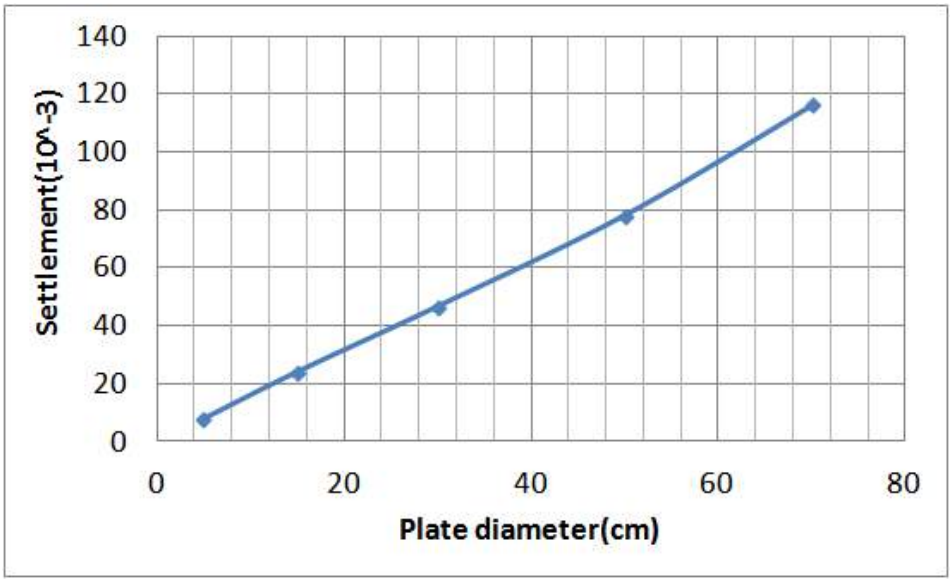



그림 3.8.89 재하판 직경에 따른 침하량 변화 추이

그러나 이때 기존 문헌과의 지반반력계수 k와의 비교를 위해 $k=\frac{\sigma}{s}$에 따라 침하량에 역수에 따른 760mm 재하판을 기준으로 정규화를 시켜 값을 변형하였다. 결과는 아래 그림 3.8.90과 같다.

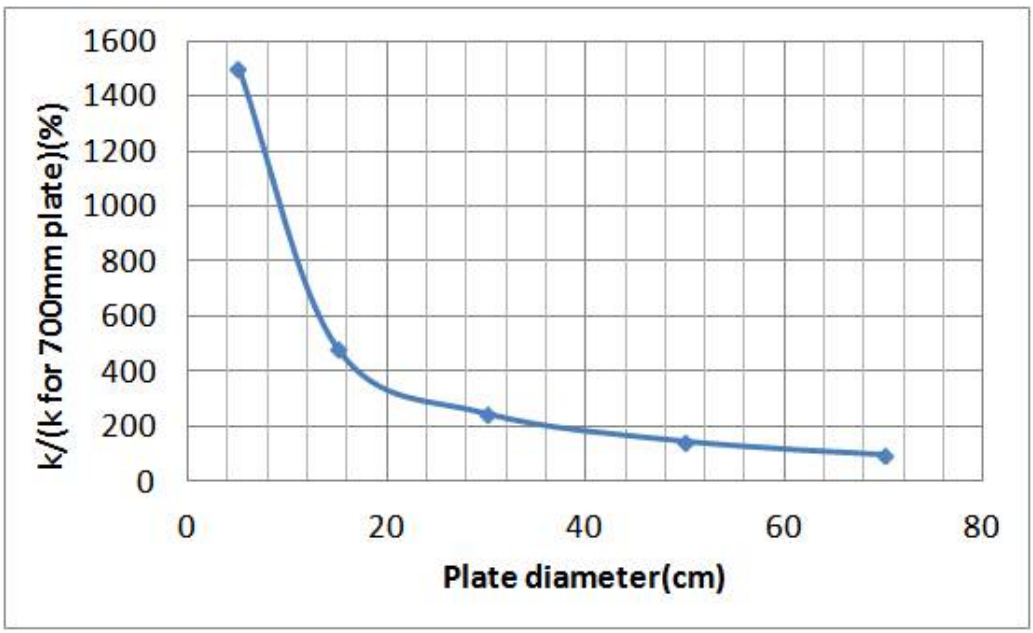



그림 3.8.90 k / (k for 700mm plate)

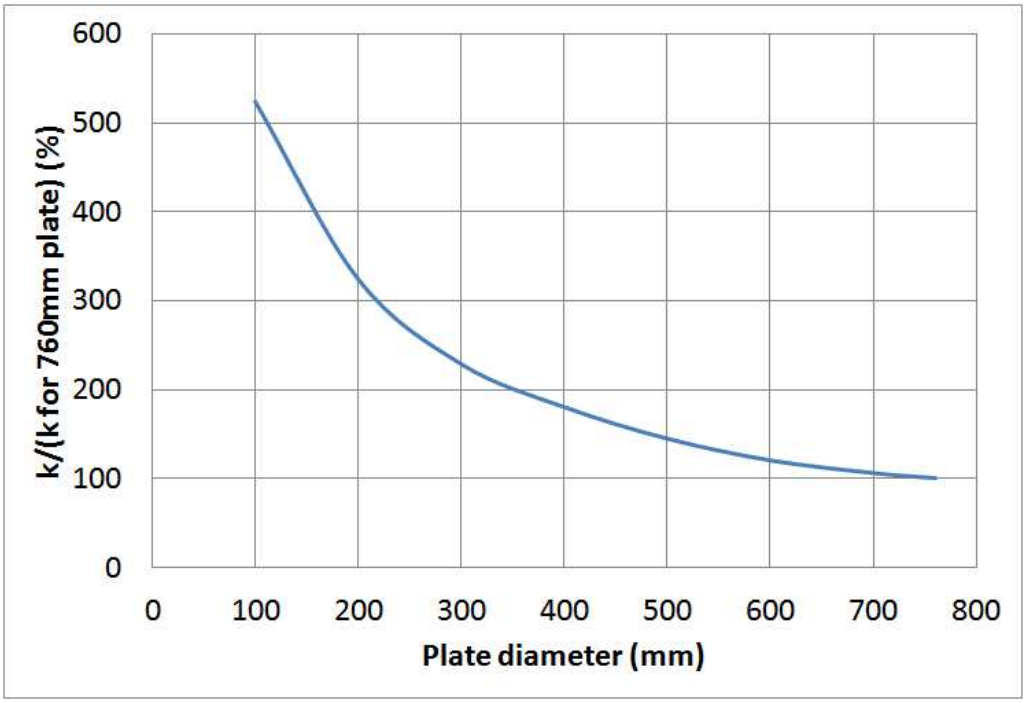



그림 3.8.91 기존 문헌에서의 지반반력계수 변화

이는 기존 문헌에서 제시하고 있는 지반반력계수의 변화와 값은 정확하게 맞진 않으나 그 변화의 추이를 보았을 때 상당히 부합하는 결과를 나타내었다.

(5) 수정 CBR과의 비교

기존 실내 시험용 지지력 평가 방법은 KS F 2320에서 규준하는 수정 CBR 방법이 거의 유일한 실정이다. 그렇다면 본 연구에서 제시하고 있는 실내용 반복평판재하시험과 관련하여 수정 CBR 시험과는 어떠한 관계를 나타내고 있는지를 확인하기 위하여 시험을 수행하였다.

(가) 실험

KS F 2320 시험에 기준하여 다음 표 3.8.35와 같은 순으로 진행하였다.

표 3.8.35 수정 CBR 시험 순서



1. 19mm체 통과 시료



2. CBR 몰드에 스페이서 디스크 삽입



3. 5층 다짐 실시(55회, 25회, 10회)



4. 표면 마무리





5. 추, 다이얼게이지 설치 후 4일간 수침, 팽창량 측정





6. 관입시험

관입시험 결과로부터 얻은 하중을 관입봉의 단면적으로 나누어 하중강도를 구한다. 이때 곡선이 2차 곡선이면 수정할 필요가 없고, 3차 곡선이면 변곡점에서 공통접선을 그어 이 접선이 관입량 축과 만난 점을 수정원점으로 하여 수정한 관입량 2.5 및 5.0mm 때의 하중강도를 각각 70, 105$kg_f/cm^2$로 나누어 100을 곱하여 CBR 값을 구한다.

55회, 25회, 10회의 다짐횟수별로 CBR 값을 구한 뒤 세로축이 건조단위중량, 가로축이 CBR으로 곡선을 그린다. 그 뒤 해당 건조단위중량에 대한 CBR 값을 찾는다. 이 값이 수정 CBR 값이다.

(나) 결과 비교

① 팽창비와의 비교

층당 다짐 횟수 55회, 25회, 10회에 대해 관입 시험을 하기 전 팽창량에 따른 팽창비를 측정하였다. 결과는 아래와 그림 3.8.92와 표 3.8.36과 같다. 팽창비는 시료의 높이 124.4mm에 팽창량을 %로 나타낸 것과 같다.

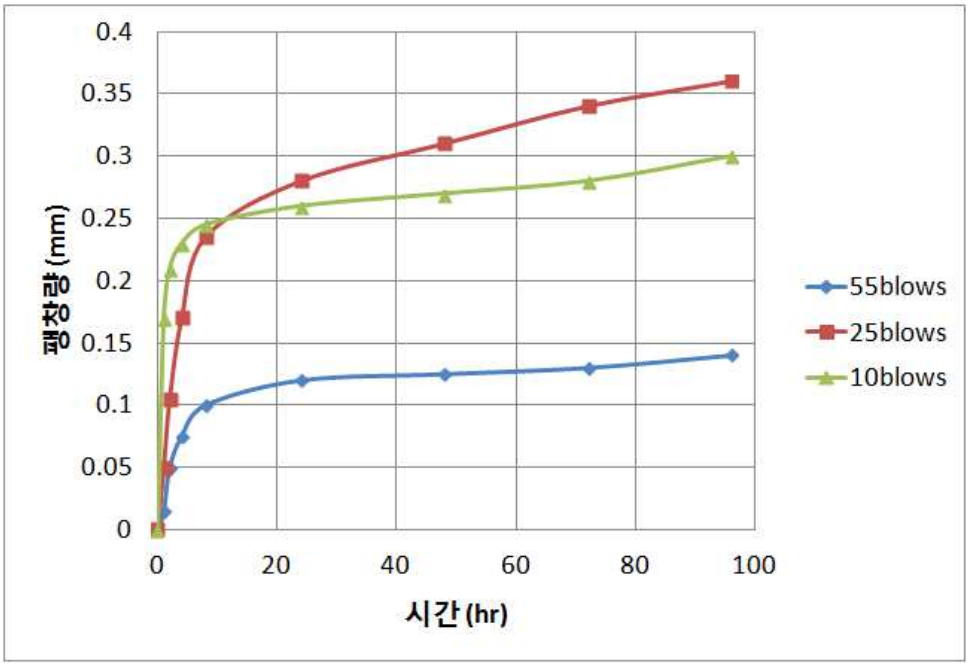



그림 3.8.92 시간에 따른 시료의 팽창량

표 3.8.36 다짐 횟수에 따른 팽창비

| 구분(blows) | 55 | 25 | 10 |
|---|---|---|---|
| 팽창비(%) | 0.11 | 0.29 | 0.24 |

반복된 실험에도 불구하고 층당 25회 다짐의 시료에서 팽창비가 가장 크게 나왔다. 이는 무조건 건조단위중량이 높거나 낮은 것보다는 적당한 건조단위중량에서 팽창비가 크게 나타남을 알 수 있다. 노상의 상태와 팽창비에 따른 관계를 아래 표 3.8.37와 3.8.38에 나타내었다(박홍규, 2011).

표 3.8.37 노상의 상태와 팽창비

| 노상의 상태 | 팽창비(%) |
|---|---|
| 양호한 노상 | 1 이하 |
| 보통 노상 | 3 이하 |
| 불량한 노상 | 3 이상 |
| 부식토 | 7 ~ 20 |

표 3.8.38 팽창비와 CBR

| 팽창비(%) | CBR(%) |
|---|---|
| 1 | 20 |
| 2 | 15 |
| 3 | 9 |

따라서 해당 시료는 양호한 노상에 해당할 것으로 추정된다. 그러나 기존에 문헌에 의한 팽창비와 CBR과의 비교로 보았을 때 이 시료는 CBR값이 20%를 훨씬 웃도는 값으로 연계가 되어야 한다. 그러나 밑의 수정 CBR값과 비교하였을 때 제대로 호환되지 않는 모습을 볼 수 있다.

② 수정 CBR과의 비교

층당 다짐 횟수 55회, 25회, 10회로 관입 시험을 해본 결과는 아래와 같다. 그래프는 KS F 2320에서 요구하는 것처럼 보정된 모습이다.

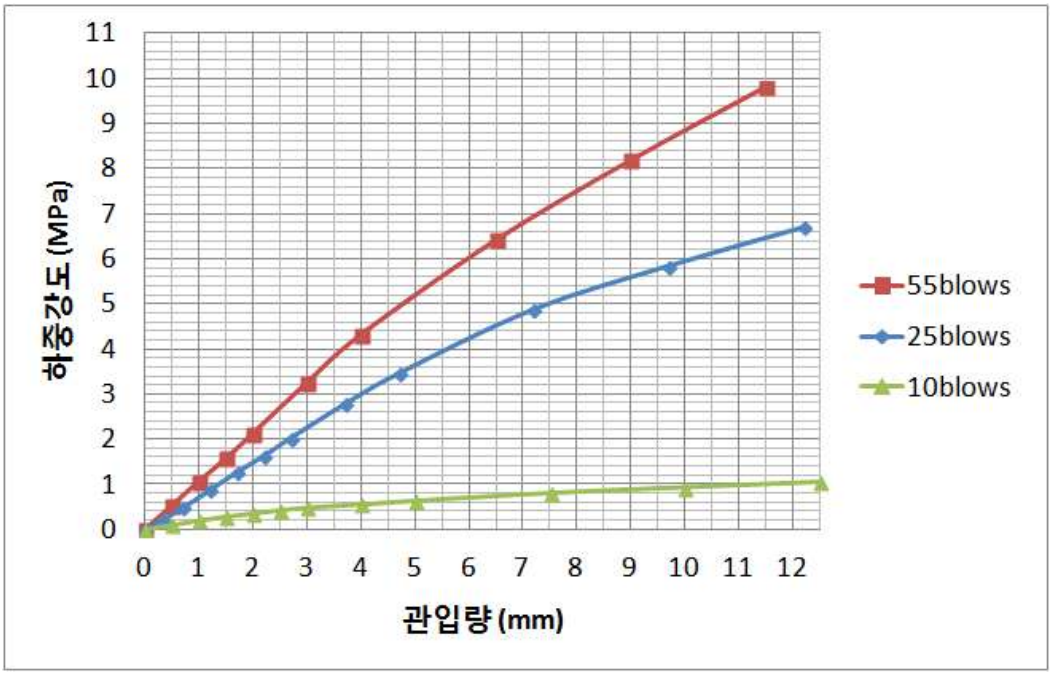



그림 3.8.93 관입 시험 결과 그래프

이에 따라 CBR 값을 구해보면 아래 표 3.8.39와 같다. 2.5mm, 5.0mm 관입량에 따른 표준하중강도는 각각 6.9MPa, 10.3MPa 이다. 관입량 2.5mm, 5.0mm의 CBR 중에서 큰 값을 CBR 값으로 선택한다.

표 3.8.39 CBR 결과값

| 구분 | 단위중량 ($g/cm^3$) | 2.5mm 관입시 (MPa) | 2.5mm CBR(%) | 5.0mm 관입시 (MPa) | 5.0mm CBR(%) | CBR(%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 55회 | 2.04 | 2.7 | 39.13 | 5.18 | 50.29 | 50.29 |
| 25회 | 1.94 | 1.85 | 26.81 | 3.6 | 34.95 | 34.95 |
| 10회 | 1.77 | 0.42 | 6.08 | 0.63 | 6.10 | 6.10 |

이 값을 토대로 CBR 값과 건조단위중량의 그래프를 그리고 다짐도 90%와 95%에 해당하는 CBR 값을 찾으면 이때의 값이 수정 CBR 방법이 된다. 결과는 아래 그림 3.8.94와 같다.

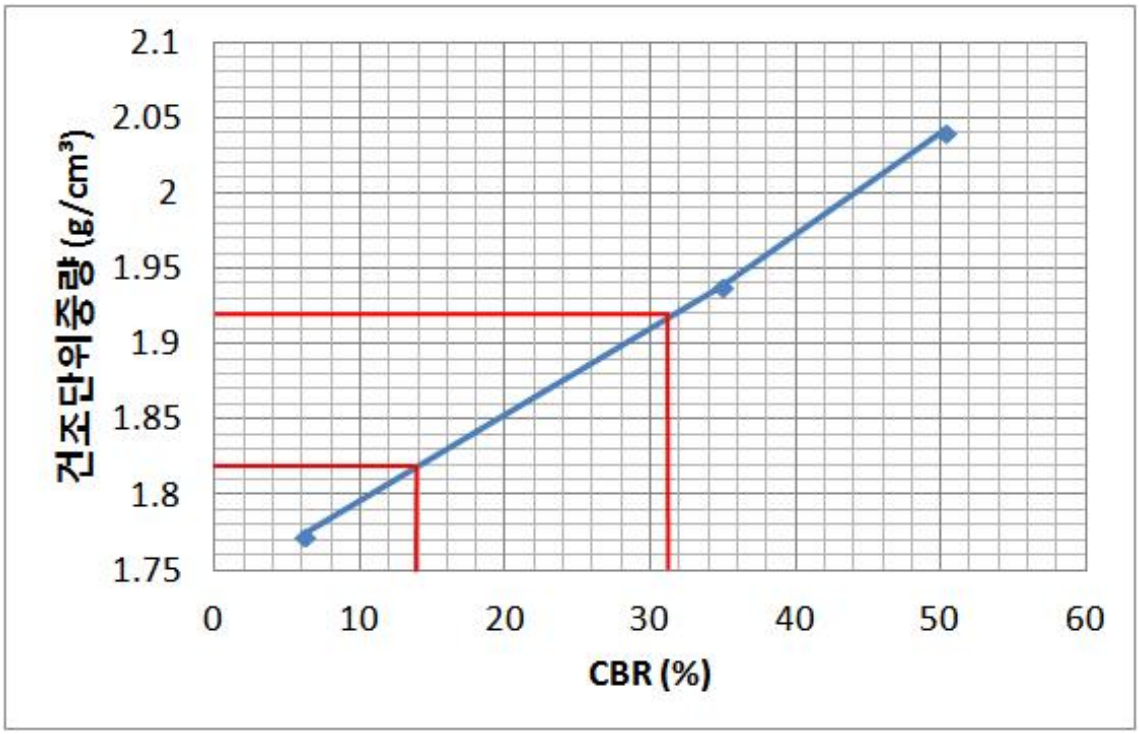



그림 3.8.94 다짐도에 대응하는 수정 CBR 값

이 때 결과 값은 표 3.8.40과 같다.

표 3.8.40 수정 CBR 결과값

| 다짐도(%) | 수정 CBR(%) |
|---|---|
| 90 | 14 |
| 95 | 31.2 |

이 값은 철도 노반의 흙쌓기 재료 요건에서 나타내듯이 상부노반 수정 CBR 10%와 하부노반 수정 CBR 2.5%를 모두 만족하는 값이다. 여기서 고찰해 보아야 할 사항은 다짐도 90%의 수정 CBR값 14%와 95% 다짐도의 수정 CBR값 31.2%에 대한 증가비 즉, $\frac{31.2}{14} \times 100 = 222.86\%$, 약 2.2배에 해당하는 증가는 3.3.3 - (3) 다짐도에 대한 변형계수의 영향에서의 추이와 맞아떨어지지 않고 있다. 예를 들어 1차 변형계수의 다짐도 90%에서 95%로의 증가는 1.45배에 해당하고 2차 변형계수의 증가는 1.1배에 지나지 않는다. 이는 다짐도가 낮은 상태의 시료가 수침 CBR을 한다고 해서 팽창비가 크게 나오진 않지만 수정 CBR값을 계산하였을 때는 결과값에 많은 영향을 준다고 할 수 있다. 이러한 다짐

도에 따른 수정 CBR의 값은 반복평판재하시험과 같은 비 수침 시험에 대해서는 올바른 호환이 이루어지지 않음을 알 수 있다.

마. 콘크리트궤도의 동상안정성 연구 수행에 따른 소결론

(1) 단열재에 따른 동결깊이

(가) 열전도율 시험결과 PE골재의 혼입양에 따라 건조밀도, 함수비, 온도에 따른 열전도율차이가 크게 발생하였다. PE 골재가 흙에 혼입되는 양이 많아짐에 따라 열전도율이 낮아졌으나 PE골재만으로 된 공시체에 비해 열전도율이 비교적 크게 나타났다. 따라서 PE골재를 단열재로 사용하기 위해서는 노반으로의 혼입을 막기 위해 토목섬유로 분리하여 설치하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

(나) 같은 단열재 두께를 사용하더라도 설치순서에 따라 0℃ 도달시간이 큰 차이를 보였는데 XPS 판자가 상부, PE골재가 하부에 설치된 경우 더 0℃에 도달하는데 오랜 시간이 소요되었다. 이는 XPS 판자가 PE골재의 자갈도상으로의 혼입을 막아 자갈도상의 간극상의 공기로 인한 단열효과를 유지하고, 대기의 대류와 전도로 인한 온도변화를 감소시키기 때문으로 사료된다.

(다) 두 단열재의 두께가 같을 때 XPS 판자를 사용한 경우의 0℃ 도달시간이 길게 나타나 단열효과가 우수한 것으로 나타났다. 0℃에 동일시간에 도달하기 위한 PE골재의 두께는 XPS에 비해 1.5 ~ 3배 크게 나타났다. 또한 XPS 판자가 상부에 위차할 경우가 그 반대의 경우보다 단열효과가 우수한 것으로 나타났다.

(2) 입도 조정층의 동상량

(가) 각 혼입율에 대한 동상량을 측정해 본 결과 이론과 달리 상재하중이 없는 경우에는 포화도 90%에 대해 혼입율 25%인 경우에도 1.66mm 동상량이 발생했으며 0% 혼입율일 때는 0.71mm의 동상량이 발생했다. 혼합율이 점점 작아지고 포화도가 작을수록 그 동상량은 점차 작아짐을 확인할 수 있었다. 또한, 그 경향이 비슷하여 4℃까지는 수축하게 되지만 그 이후로는 점차 동상량이 증가하며 일정수준이상이 되면 일정하게 된다.

(나) 동상량 실험 결과, 이론상 수분 공급이 없는 간극에 물이 동결할 때의 최대 팽창량을 고려한 간극이 충분히 확보되어 있는 상태임에도 불구하고 동상이 발생됨을 확인

할 수 있었다. 따라서 철도 콘크리트도상 하부 입도조정층의 동결 예방을 위한 대책시 이러한 사항이 감안되어야 함을 알 수 있다.

(3) 입도 조정층의 동상압

(가) 각 토사 혼입율에 대한 동상압을 측정해 본 결과 포화도 90%에 대해 혼입율 25%인 경우 0.169$kg_f/cm^2$의 동상압이 발생했으며 70%포화도에 대해 0.0568$kg_f/cm^2$의 동상압이 발생했다. 혼입율 5%와 0%에 대해서도 각각 포화도 70%에 대하여 0.0359 $kg_f/cm^2$, 0.00056$kg_f/cm^2$가 측정되었고 포화도 90%에 대해 0.0491$kg_f/cm^2$, 0.0322$kg_f/cm^2$까지 증가하였다. 즉, 같은 포화도에 대해 혼입율이 커질수록 물이 더 많이 들어가 동상량도 더 크게 나타났다.

(나) 동상압 실험 결과, 포화도 70%에서는 물이 동결해도 물 부피 팽창량 9%가 몰드 내 빈 간극을 채우는 것으로 귀결되었으나 포화도 80, 90%에서는 Ice Lens의 형성과 이에 따른 Ice segregation 현상이 발생하여 동상압이 증가하는 것으로 확인되었다.

(다) 고속철도 및 일반철도의 상부노반에서 발생하는 수직응력이 0.196 MPa범위에 있고 이는 토사혼입율 25%(포화도 90%)시 측정되었던 0.0126$kg_f/cm^2$ 보다 높다. 그렇기 때문에 동상시 상부는 상부하중으로 인해 히빙이 억제되고 압력이 양측면으로 전달되어 궤도의 측면부가 손상 될 가능성이 있다.

(4) 실내 반복평판재하시험을 통한 지지력 산정

(가) 몰드 크기에 대한 변형계수의 영향에서는 기존 문헌에서도 알 수 있듯이 재하판 직경의 약 3배 반경 이후로는 값의 변화에 영향이 미미해 지는 것을 알 수 있었다. 그러나 2차 재하 이후에는 재하판 직경의 1배나 3배가 되는 몰드 반경 크기에도 큰 차이가 없었다.

(나) 몰드 크기에 따른 $E_{v2}/E_{v1}$의 변화는 재하판 직경의 0.5배나 1배에서 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 재하판 직경의 3배에서는 $E_{v2}/E_{v1}$의 변화가 상대적으로 크게 나타났다. 이러한 경향은 몰드 크기 즉, 경계조건에 따른 값의 변화에 유의해야 함을 알 수 있다.

(다) 함수비에 대한 영향에서는 최적함수비를 기준으로 함수비가 적으면 변형계수가 크고 그 변화폭이 크지 않으나, 함수비가 높으면 변형계수가 낮고 그 변화폭이 매우 크게 나왔다. 이러한 경향을 바탕으로 현장에서 최적함수비에 따른 변화로 인한 변형계수의 변동을 충분히 인지하고 지지력 측정을 해야 할 것으로 보인다.

(라) 다짐도에 대한 영향에서는 다짐도가 높을수록 변형계수가 크게 나왔으나 2차 재하 이후에는 변형계수가 일정해짐을 알 수 있었다. 다짐도가 높을수록 $E_{v1}$과 $E_{v2}$의 변화폭은 크지 않음을 알 수 있다. 그러나 이러한 경향은 기존 시험인 수정 CBR 시험값의 변동폭과 상이함을 알 수 있었다.

(마) 재하판에 의한 침하량의 영향에서는 재하판의 직경이 커질수록 선형적으로 침하량이 증가함을 알 수 있고, 이는 변형계수 개념에서 실내 시험 재하판 50mm에 비해 현장 시험 재하판 300mm으로 평판재하시험을 하는 경우가 2.86배 침하량이 많이 발생함을 알 수 있다. 결과적으로 해당 시험에서는 1차 변형계수의 경우 현장에 비해 1/4배, 2차 변형계수의 경우 현장에 비해 1/2배의 경향을 보였다.

(바) 쇄석 함유량에 따라 초반에는 굵은 골재의 일종의 floating 현상으로 인해 전단강도가 오히려 떨어지는 경향을 보이다가 함유량이 점점 높아지면서 전단강도가 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다.

(사) 해당 시험에 대해 수치해석을 실시할 경우 구속에 대한 경계조건을 확실하게 설정해주는 것이 중요했다. 수치해석의 결과를 토대로 재하 직경의 약 3배 이상의 경계에서는 값의 변화가 미미해짐을 알 수 있었다. 또한 재하판 직경에 따른 영향에서는 기존 문헌과 같은 경향을 보이긴 했으나 그 값에 있어서는 올바른 일치를 보이진 않았다. 또한 수치해석에서 최적함수비의 영향(최적함수비를 기준으로 값이 매우 바뀌는 경향)이나 자갈혼입율의 영향을 확인하기는 매우 힘들었다.

(아) 수침 CBR시험을 실시해 봤을 경우 팽창비에서는 다짐도에 따라 큰 차이를 보이지 않았다. 팽창비의 결과로 보았을 때는 완벽히 양호한 시료에 해당되었지만 그 뒤로 이어지는 수정 CBR값과는 올바른 호환이 되지 않았다. 따라서 팽창비로 시료의 상태를 판단하기에는 굉장히 거친 판단 기준이라는 것을 알 수 있었다.

(자) 수정 CBR에 의한 값의 변화, 즉 다짐도 90%에서 95%로의 수정 CBR값 증가 2.2배는 실내에서 수행한 반복평판재하시험에서의 변형계수의 추이와 같지 않았다. 이러한 다짐도에 따른 수정 CBR의 값은 반복평판재하시험과 같은 비 수침 시험에 대해 올바른 호환이 이루어지지 않음을 알 수 있다.

(차) 따라서 기존의 거친 값을 제안하는 실내 지지력 평가 시험에 비해 1차 변형과 2차 변형을 측정함으로써 정확도를 높이고 보다 세밀한 값의 기준을 제시할 수 있는 실내 반복평판재하시험이 더욱 효율적이라고 말할 수 있다. 그러나 현장과 실내 시험간의 확실한 관계 구명을 위해서는 추가적인 다수의 현장시험이 필요하다.

# 제 9절 콘크리트도상 하부 노반의 융해 압밀 프로그램 해석

## 1. 서론

계절성 한랭지에서 동절기에 동결된 지반이 해빙기를 맞으면 상부 지표면과 하부 동결면에 따뜻한 열이 침투되어 양면에서 융해가 시작된다. 특히 지표면으로부터 진행되는 융해속도에 비해 압밀이 천천히 진행되는 지반에서는 융해로 인해 지반내에 과잉 간극수압이 발생하고 지반의 강도가 낮아져서 무거운 열차하중을 받을 경우에 궤도의 침하와 노반의 파괴는 물론 열차운행의 안전상 문제를 초래할 수 있다. 따라서 이와 같이 융해압밀이 서서히 진행되는 지반에서는 시간에 따른 침하와 잉여 간극수압을 예측하여 사전에 융해로 인한 피해에 대하여 방지대책을 수립하여야 한다.

본 9절 2에서는 콘크리트도상 철도에 대하여 실제 현장실험을 통해 계측한 동결심도 측정값과 FEM 수치해석 결과를 비교하여 제 1차년도에 개발한 동결깊이 해석 프로그램 FDAP를 검증하였다.

본 9절 3에서는 자갈 · 아스콘 도상의 동결심도에 대한 FEM 수치해석을 수행하였다.

본 9절 4에서는 실내 융해압밀시험 Data에 바탕을 두고 있고 현재 실무에서 실용적으로 적용되고 있는 융해침하 산정식을 기반으로 하여 개발한 융해침하 해석 프로그램 TSAP에 대하여 설명하였다.

본 9절 5에서는 동결-융해-압밀침하를 일관성 있게 해석할 수 있는 새로 개발된 프로그램 FTCAP_1D의 검증과 실제 예제를 수행하였다.

## 2. 콘크리트도상 동결심도 FEM 수치해석

### 가. 서론

본 장에서는 본 연구와 관련하여 1차년도에 개발한 동결심도 해석 프로그램 FDAP (**F**rost **De**pth **A**nalysis **P**rogram)을 현장실측 Data와 비교 분석하여 해석 프로그램 FDAP를 검증하기 위하여 수행하였다.

Figure 3.9.1은 본 해석과 관련된 고속 철도 직선구간의 대표적인 횡단면 개략도로서 도상은 도상콘크리트층(TCL)+(HSB), 강화노반층으로 상부의 보조도상 (Subbase)과 하부의 입도조정층 (Added Subgrade) 그리고 상부 및 하부 노반 (Upper and Lower Embankment)로 구성되어 있다.

Table 3.9.1은 콘크리트 Slab도상에 대하여 수행한 Case를 요약한 표로 크게 3가지 단면에 대하

여 수행하였다. 첫째로 Test Section 단면은 한국건설기술연구원의 현장실험 상태에 맞게 모델링한 것으로 보조도상 (Subbase) 두께에 따라 4가지 경우를 수행하였다. 둘째로 Full Section 단면은 현장실험에서 반영하지 못한 Figure 3.9.1의 전단면을 모델링하였고 마지막으로 1D Section 단면은 Full Section 단면의 Center Line에 따라서 1차원으로 모델링한 경우이다.

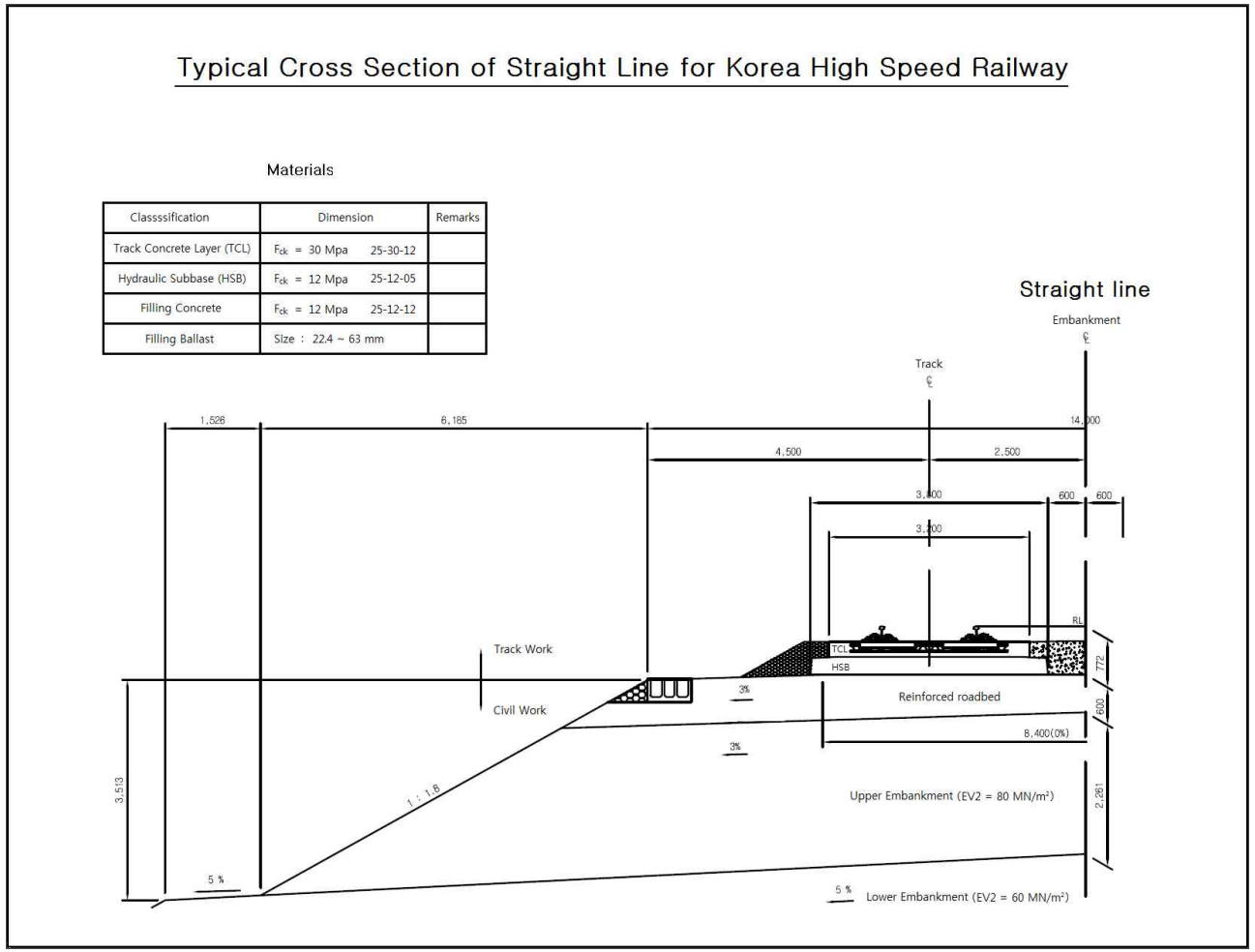



Figure 3.9.1 Typical cross section of straight line for Korea high speed railway.

Table 3.9.1 Numerical analyses performed for concrete slab railway.

| Subbase Thickness | Numerical Analysis | | |
|---|---|---|---|
| | Test Section | Full Section | 1D Section |
| 300 mm | T300 (●) | F300 (○) | A300 (○) |
| 400 mm | T400 (●) | | |
| 500 mm | T500 (●) | | |
| 600 mm | T600 (○) | | |

● Numerical analyses are compared with measured data.

○ Numerical analyses are performed to verify Test Section model.

Thicknesses of TCL, HSB and Added Subgrade are assumed to be 240 mm, 284 mm and 300 mm respectively.

나. Test Section 수치해석

Figure 3.9.2는 한국건설기술연구원에서 콘크리트 Slab도상의 하부 지반의 동절기 온도 변화를 측정하기 위하여 설치한 온도 측정기 (Thermometer) Sensor의 위치를 보여 주는 개략도로, 보조도상 두께가 30 Cm인 경우 Sensor의 위치는 TCL 바닥면 a1, HSB 바닥면 a2, Subbase 바닥면 a3 그리고 Added Subgrade 바닥면 a4로 총 4곳이 설치되었고, 보조도상 두께가 40 Cm인 경우 Sensor의 위치는 Subbase 바닥면 a5와 Added Subgrade 바닥면 a6의 2곳이 설치되었고, 보조도상 두께가 50 Cm인 경우 Sensor의 위치는 Subbase 바닥면 a7과 Added Subgrade 바닥면 a8의 2곳이 설치되었다.

Figure 3.9.3은 현장실험이 수행되었던 2012년 11월 초부터 2013년 3월 초순까지 강원도 철원의 대기 온도를 나타낸 그래프로 본 과제와 관련하여 Test Site에서 계측한 온도와 한국기상청에서 측정한 온도는 거의 일치함을 보여 주고 있다.

Table 3.9.2는 본 FEM 수치해석에 사용한 재료의 물성치로 상부 및 하부 노반의 건조단위중량과 함수비는 현장시료를 Sampling하여 인하대 실험실에서 구한 값이다.

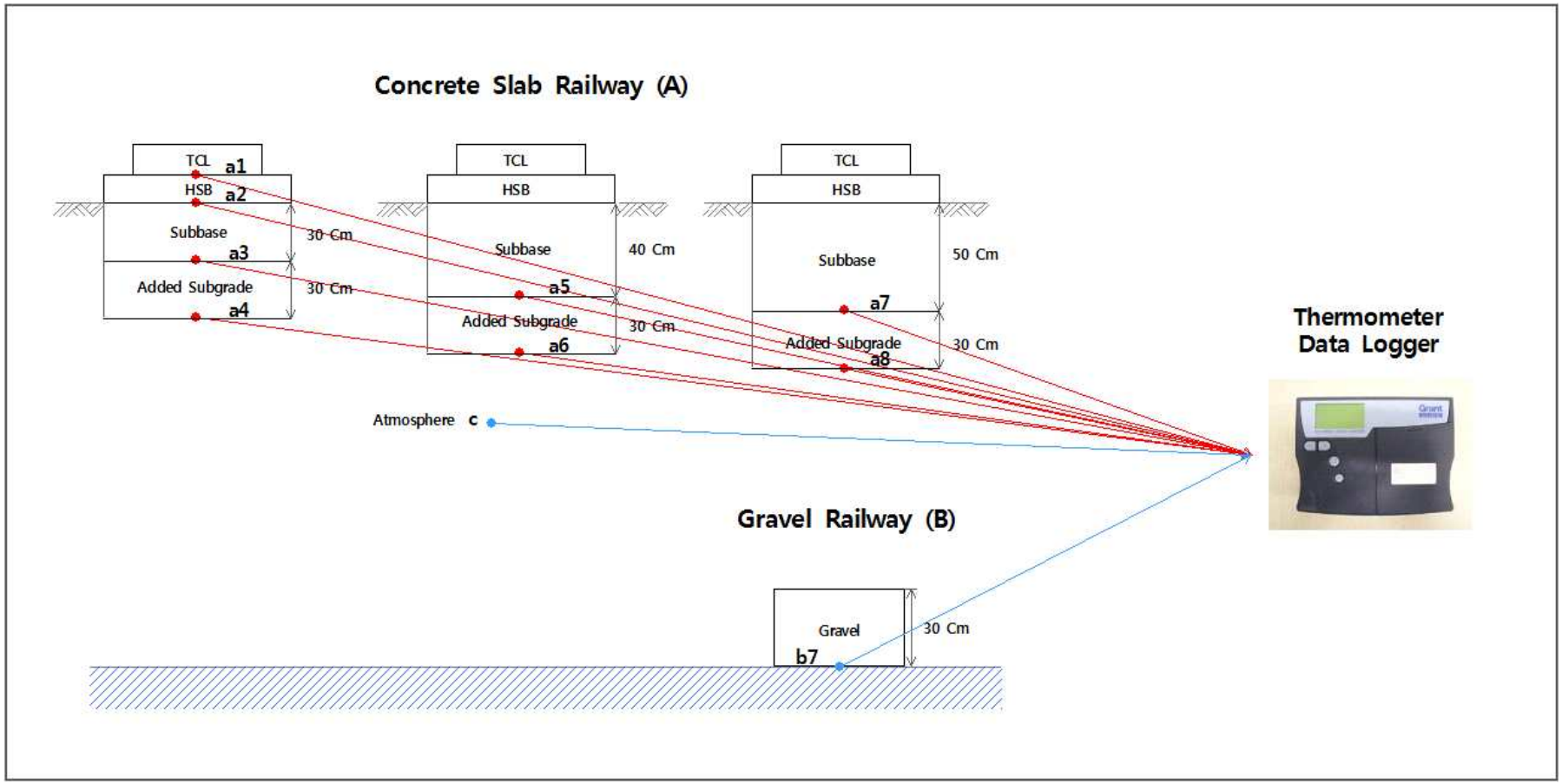



Figure 3.9.2 Location of thermometer sensor.

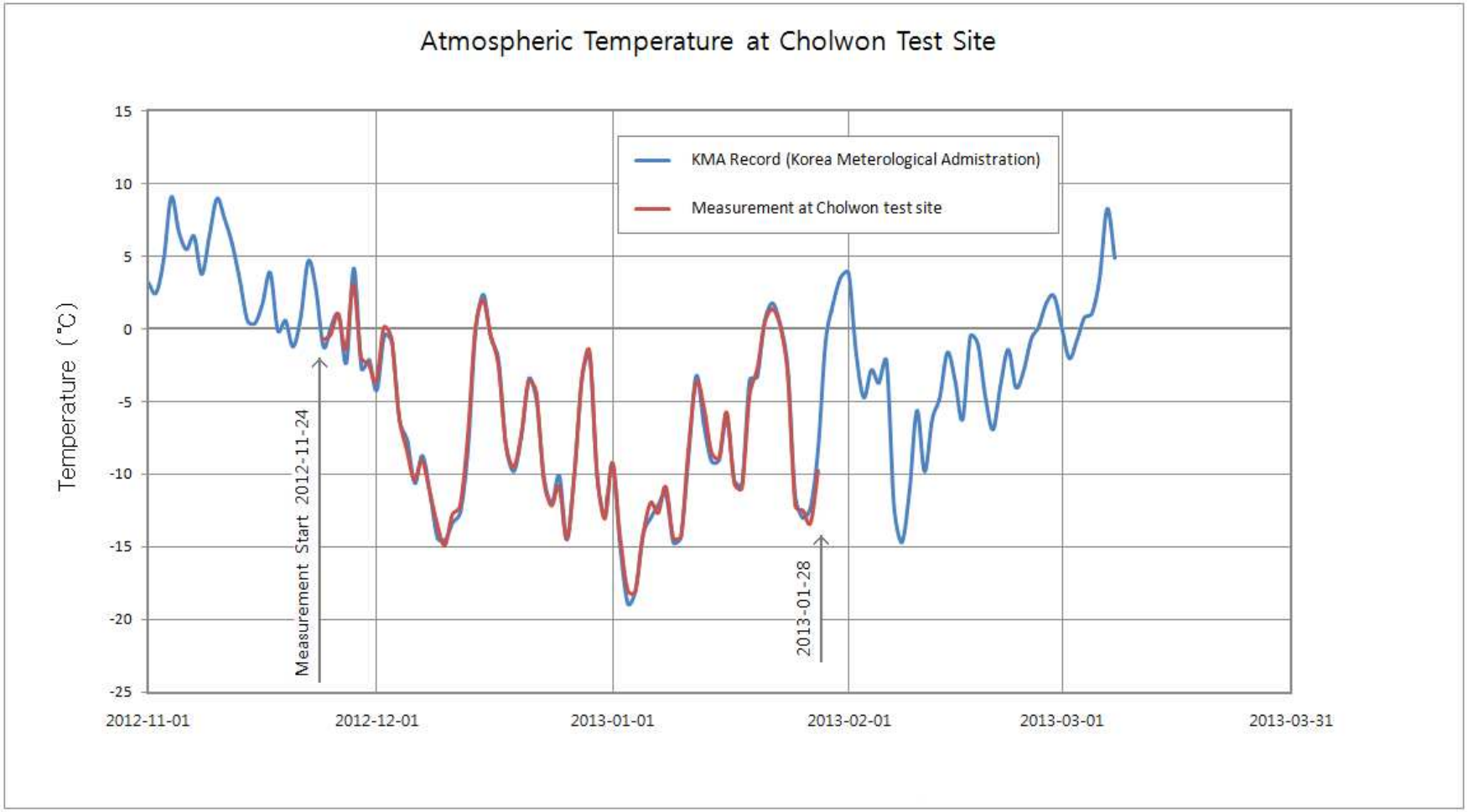



Figure 3.9.3 Atmospheric temperature at Cholwon test site.

Table 3.9.2 Material properties used for numerical analysis of concrete slab railway.

| No | Material | | $\gamma_d$ | $\omega$ | W/m·K | | J/m³·K | | L | Thickness | Remark |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | kg/m³ | (%) | $K_u$ | $K_f$ | $C_u$ | $C_f$ | J/m³ | mm | |
| 1 | TCL (Track Concrete Layer)<br>도상콘크리트층 | | 2243 | 0 | 1.7264 | 1.7264 | 2.007E+06 | 2.007E+06 | 0 | 240 | |
| 2 | HSB (Hydraulic Subbase)<br>노반강화층 | | 2243 | 0 | 1.7264 | 1.7264 | 2.007E+06 | 2.007E+06 | 0 | 284 | |
| 3 | Reinforced Roadbed<br>강화노반 | Subbase<br>보조도상 | 1600 | 5 | 1.276 | 0.8787 | 1.47E+06 | 1.303E+06 | 2.673E+07 | 300~500 | $d_{max}$ = 31.5 mm |
| 4 | | Added Subgrade<br>입도조정층 | 1700 | 5 | 1.4732 | 1.0778 | 1.562E+06 | 1.384E+06 | 2.84E+07 | 300 | $d_{max}$ = 125 mm |
| 5 | Upper Embankment<br>상부노반 | | 1590 | 14.47 | 1.7147 | 2.0874 | 2.09E+06 | 1.609E+06 | 7.687E+07 | 2260~2060 | SW |
| 6 | Lower Embankment<br>하부노반 | | 1590 | 14.47 | 1.7147 | 2.0874 | 2.09E+06 | 1.609E+06 | 7.687E+07 | 2616 | SW |
| 7 | Filling Ballast (Crushed Gravel)<br>도상자갈 (깬자갈) | | 1400 | 5 | 0.9572 | 0.5842 | 1.286E+06 | 1.14E+06 | 2.339E+07 | 524 | 22.4 ~ 63 mm |
| 8 | Filling Concrete<br>채움콘크리트 | | 2243 | 0 | 1.7264 | 1.7264 | 2.007E+06 | 2.007E+06 | 0 | 524 | |

$\gamma_d$ : Dry Density  $\omega$ : Water Content  K : Thermal Conductivity  C : Volumetric Heat Capacity  L : Volumetric Latent Heat

$K_u$ and $C_u$ refer to Unfrozen Material  $K_f$ and $C_f$ refer to Frozen Material

(1) 보조도상 두께 300 mm : Case T300

Case T300은 Figure 3.9.2의 현장실험 보조도상 두께 300 mm를 모델링한 경우로 본 FEM 수치해석에서는 Figure 3.9.4에서 보는 바와 같이 축대칭으로 가정하여 현장실험에서 수행된 정사각형 단면을 면적이 동일한 원으로 환산하여 등가의 직경 (Equivalent Diameter)을 구하여 해석 모델에 적용하였다. Figure 3.9.5는 Case T300 FEM 수치해석의 유한요소망으로 총 2,886개의 유한요소가 사용되었다.

Figure 3.9.6, 3.9.7 그리고 3.9.8은 동결이 시작된 후 각각 33일, 66일 그리고 93일에 계산된 온도 분포도로 TCL과 HSB 부근을 제외하고는 대체로 1차원적으로 열전도가 진행되고 있음을 알 수 있다. Figure 3.9.9, 3.9.10 그리고 3.9.11은 단면의 Center Line에 따라 동결이 시작된 후 각각 33일, 66일 그리고 93일에 계산된 온도 Profile로 계측 위치에서의 계산값은 측정값과 약간의 차이를 보이고 있으나 온도 분포 양상은 유사한 경향을 보여 주고 있다.

Figure 3.9.12, 3.9.13 그리고 3.9.14는 각각 계측기가 설치된 위치 a2, a3 그리고 a4에서의 온도 이력 그래프로 계산 결과는 측정치와 거의 유사한 값을 보여 주고 있다.

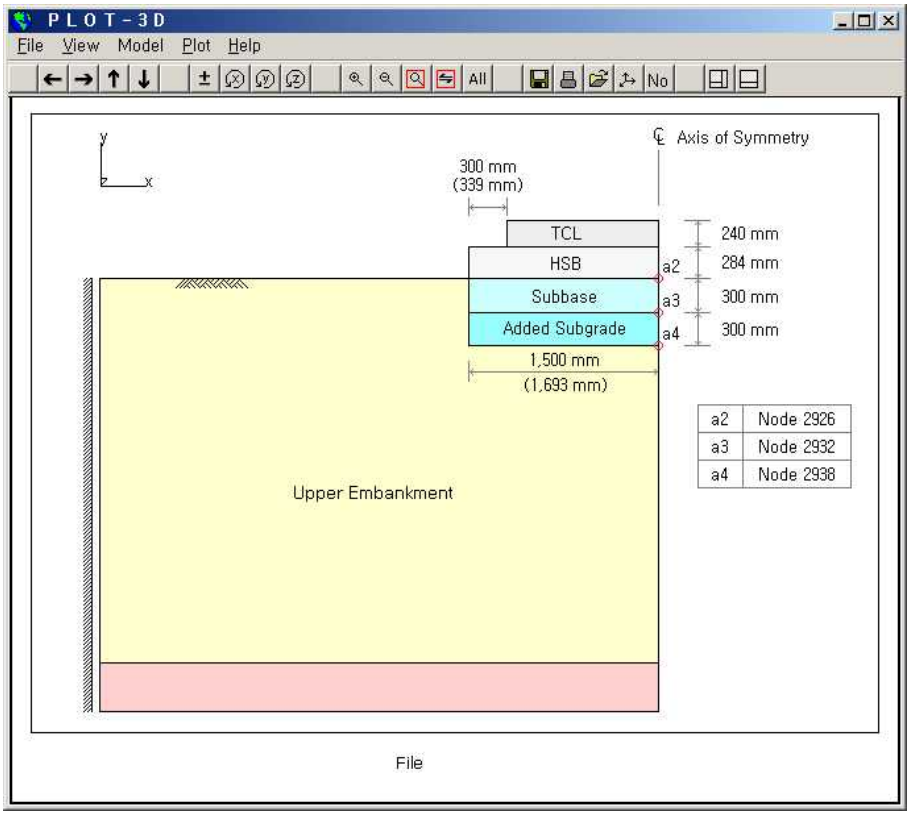



Figure 3.9.4 Schematic Test Section for numerical analysis of concrete slab railway, Case T300

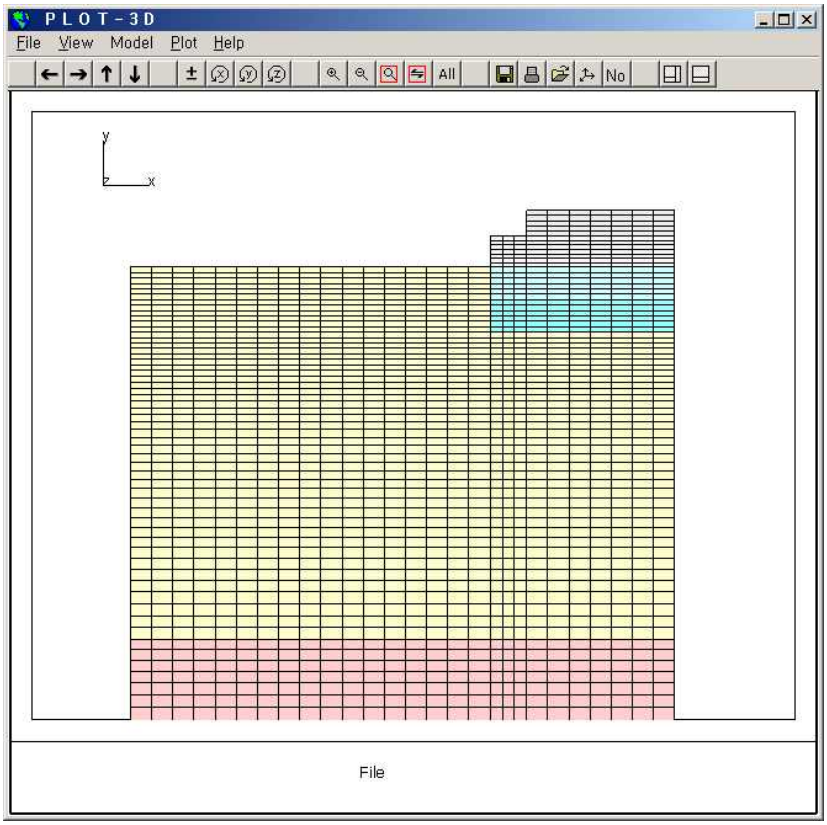



Figure 3.9.5 Finite element meshes for Test Section analysis, Case T300.

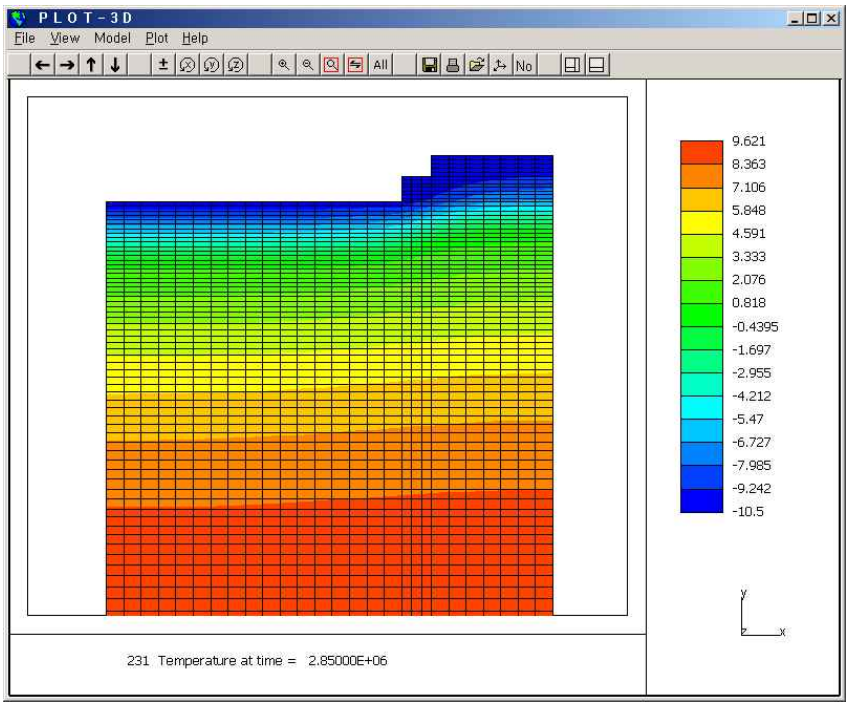



Figure 3.9.6 Temperature distribution at 33 days, Case T300.

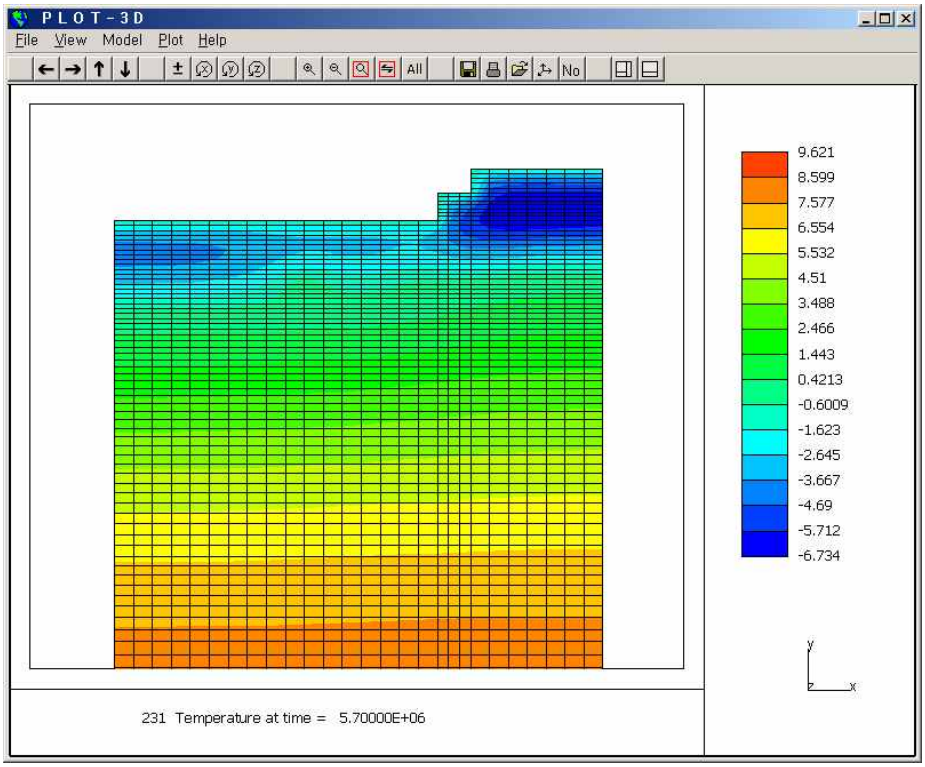



Figure 3.9.7 Temperature distribution at 66 days, Case T300.

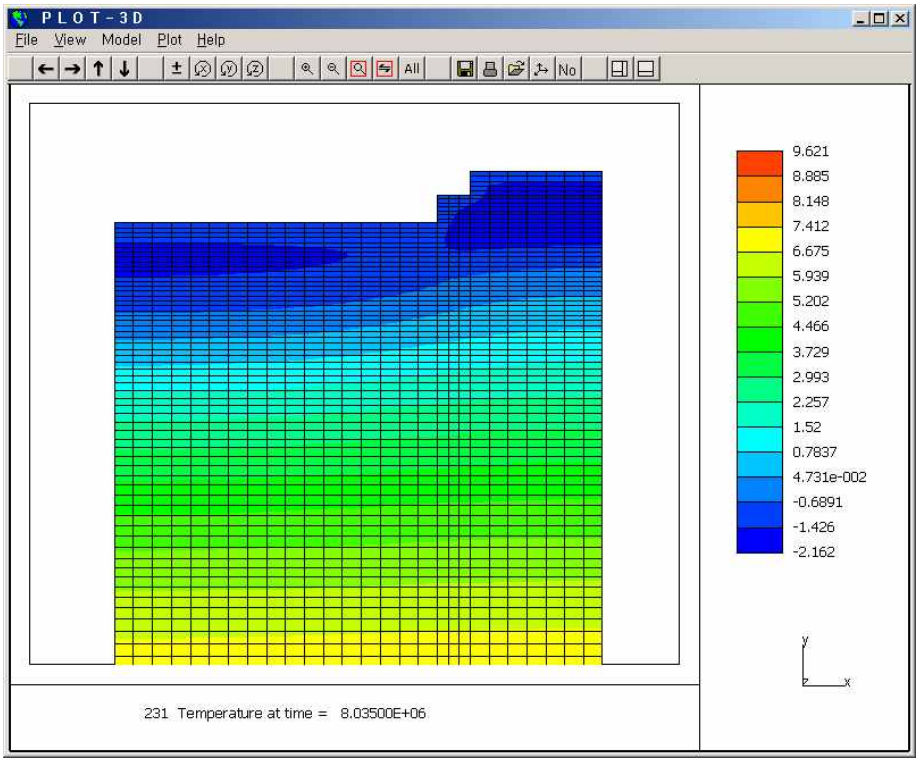



Figure 3.9.8 Temperature distribution at 93 days, Case T300.

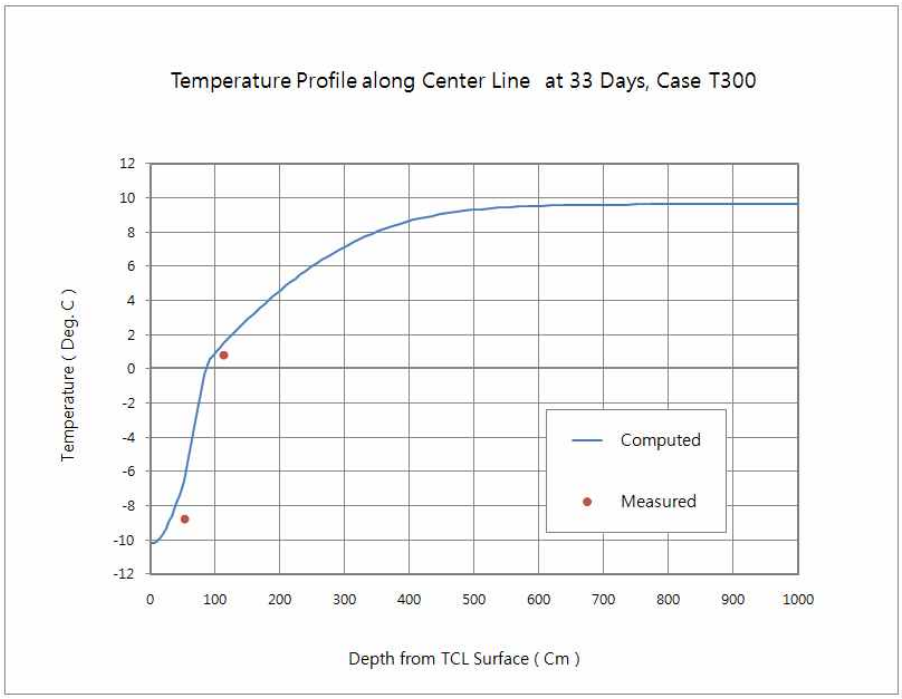



Figure 3.9.9 Temperature profile along the center line at 33 days, Case T300.

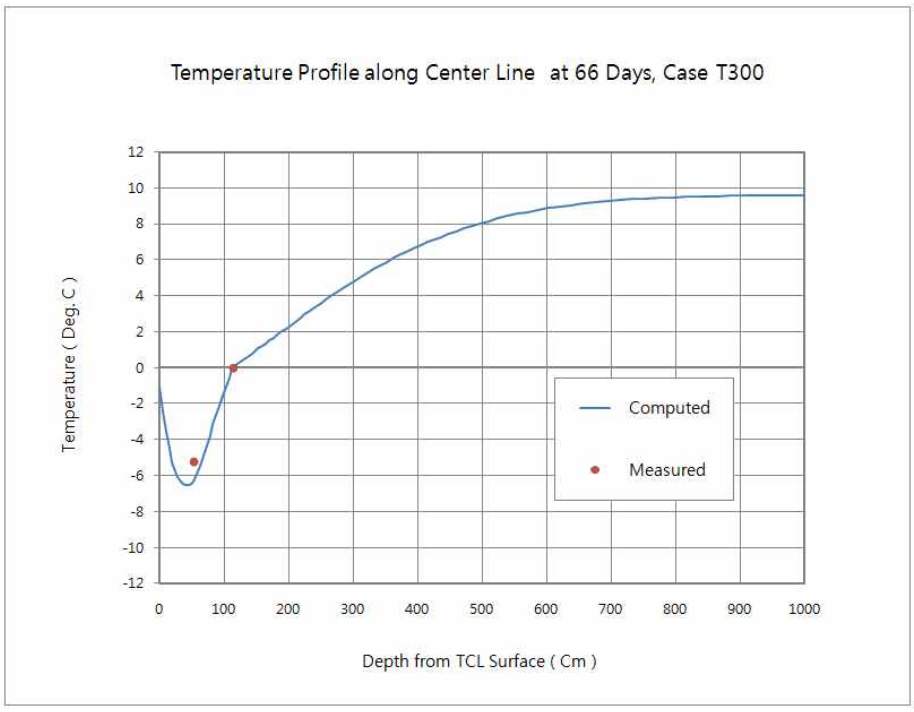



Figure 3.9.10 Temperature profile along the center line at 66 days, Case T300.

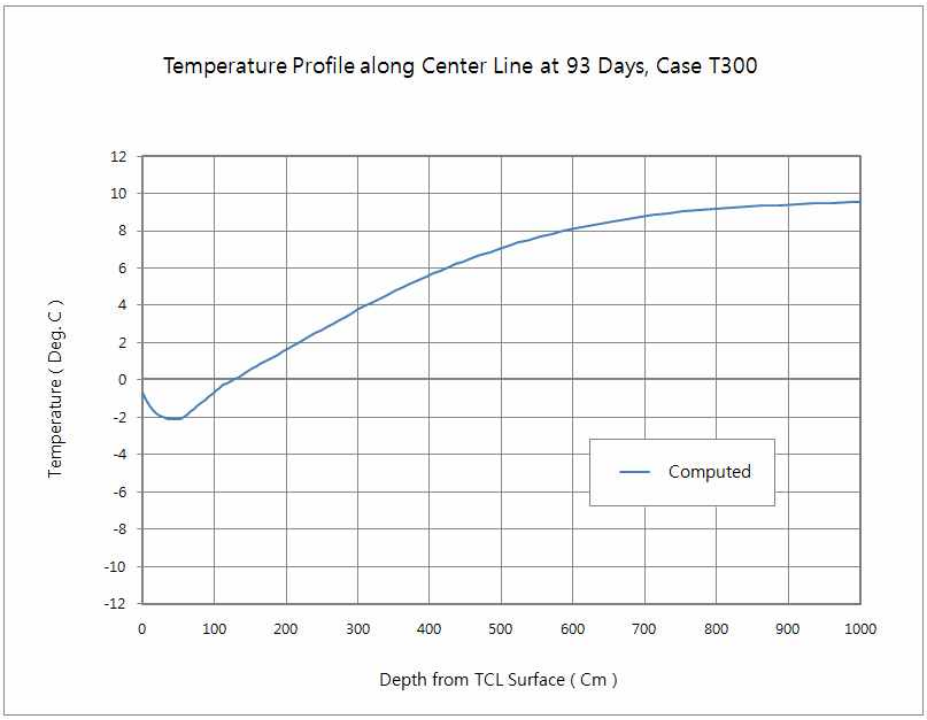



Figure 3.9.11 Temperature profile along the center line at 93 days, Case T300.

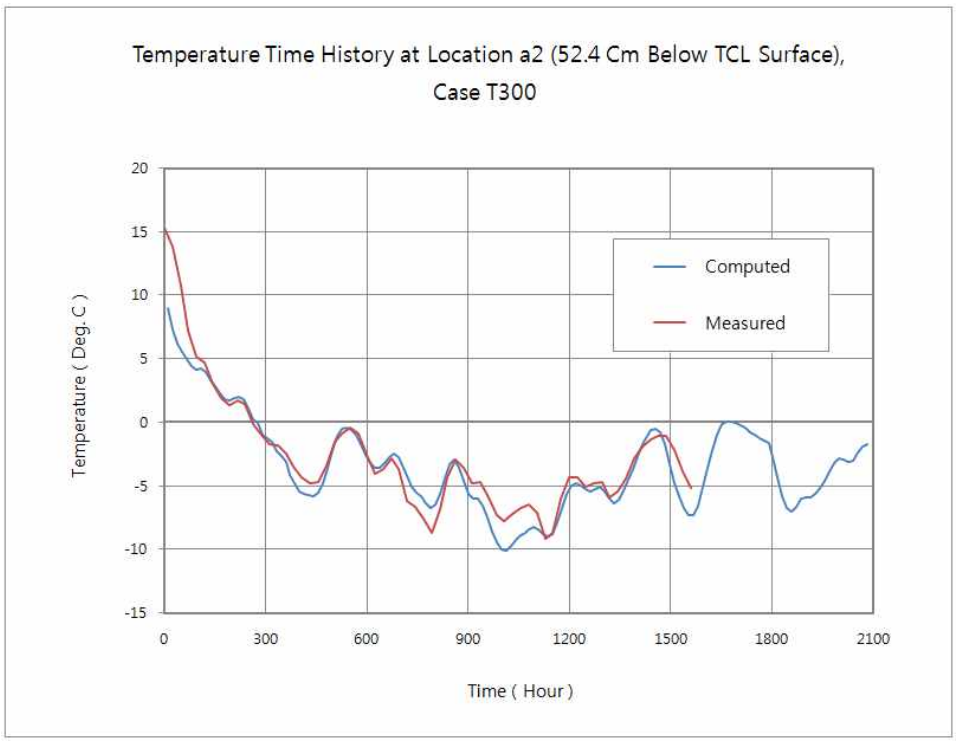



Figure 3.9.12 Temperature time history at location a2 (52.4 Cm below TCL surface), Case T300.

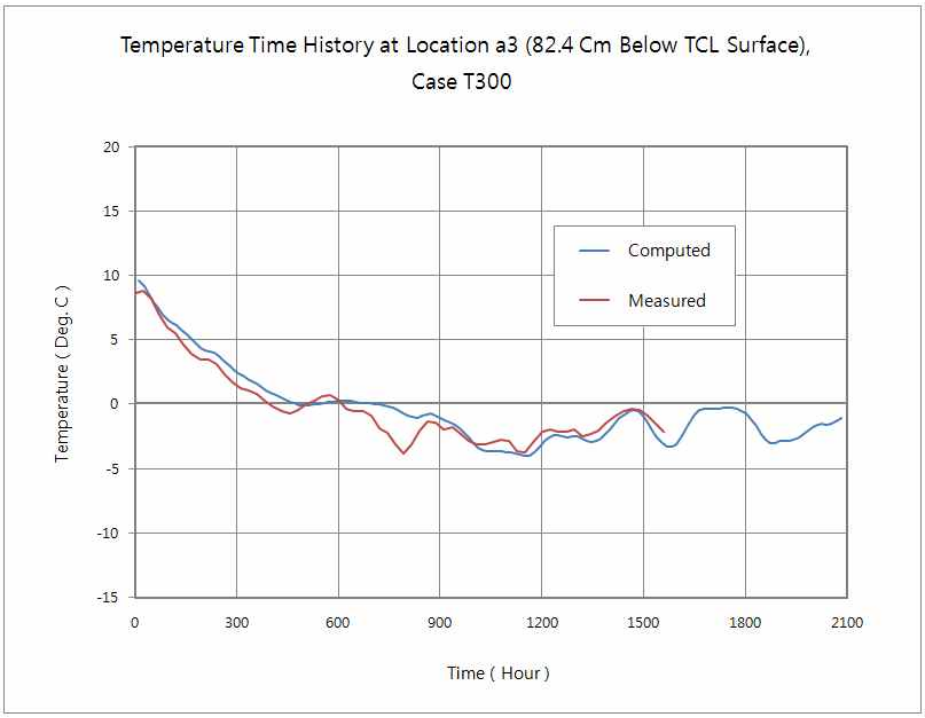



Figure 3.9.13 Temperature time history at location a3 (82.4 Cm below TCL surface), Case T300.

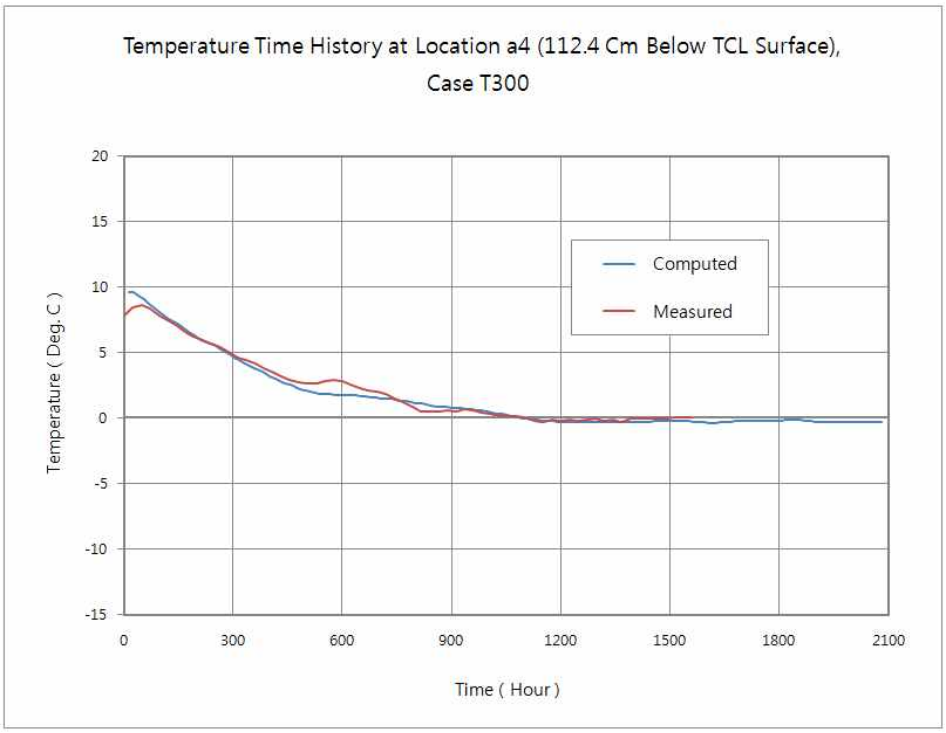



Figure 3.9.14 Temperature time history at location a4 (112.4 Cm below TCL surface), Case T300.

(2) 보조도상 두께 400 mm : Case T400

Case T400은 Figure 3.9.2의 현장실험 보조도상 두께 400 mm를 모델링한 경우로 본 FEM 수치해석에서는 Figure 3.9.15에서 보는 바와 같이 축대칭으로 가정하여 현장실험에서 수행된 정사각형 단면을 면적이 동일한 원으로 환산하여 등가의 직경 (Equivalent Diameter)을 구하여 해석 모델에 적용하였다.

Figure 3.9.16, 3.9.17 그리고 3.9.18은 단면의 Center Line에 따라 동결이 시작된 후 각각 33일, 66일 그리고 93일에 계산된 온도 Profile로 계측 위치에서의 계산값은 측정값과 약간의 차이를 보이고 있으나 온도 분포 양상은 유사한 경향을 보여 주고 있다.

Figure 3.9.19와 3.9.20은 각각 계측기가 설치된 위치 a5와 a6에서의 온도 이력 그래프로 계산 결과는 측정치와 거의 유사한 값을 보여 주고 있다.

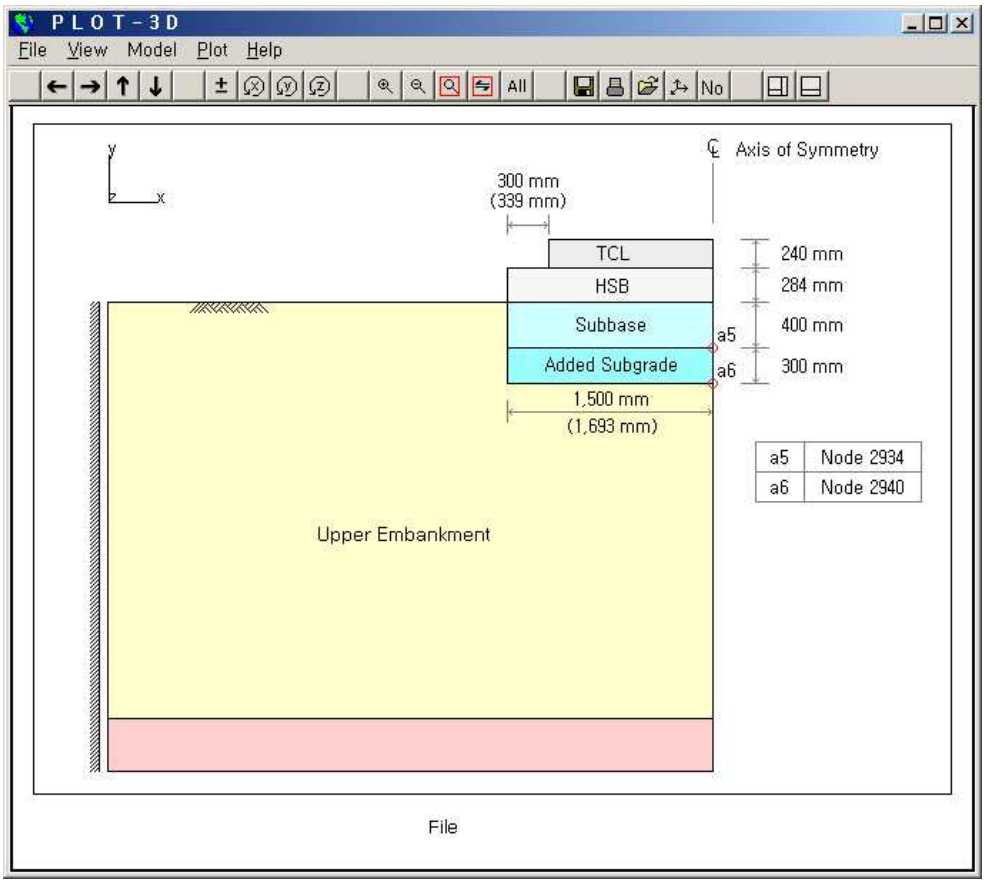



Figure 3.9.15 Schematic Test Section for numerical analysis of concrete slab railway, Case T400.

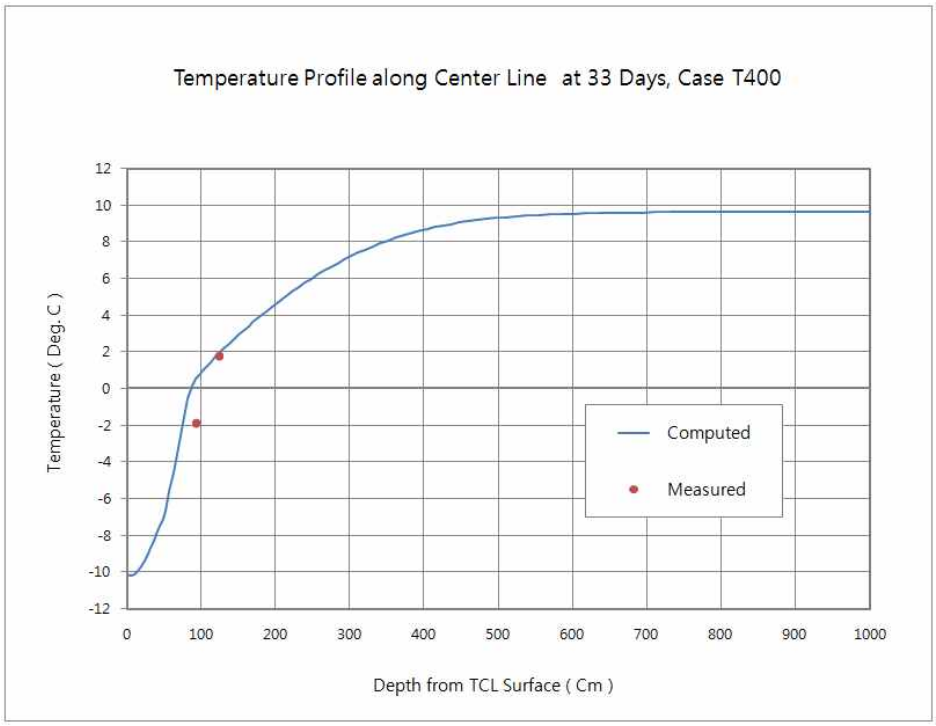



Figure 3.9.16 Temperature profile along the center line at 33 days, Case T400.

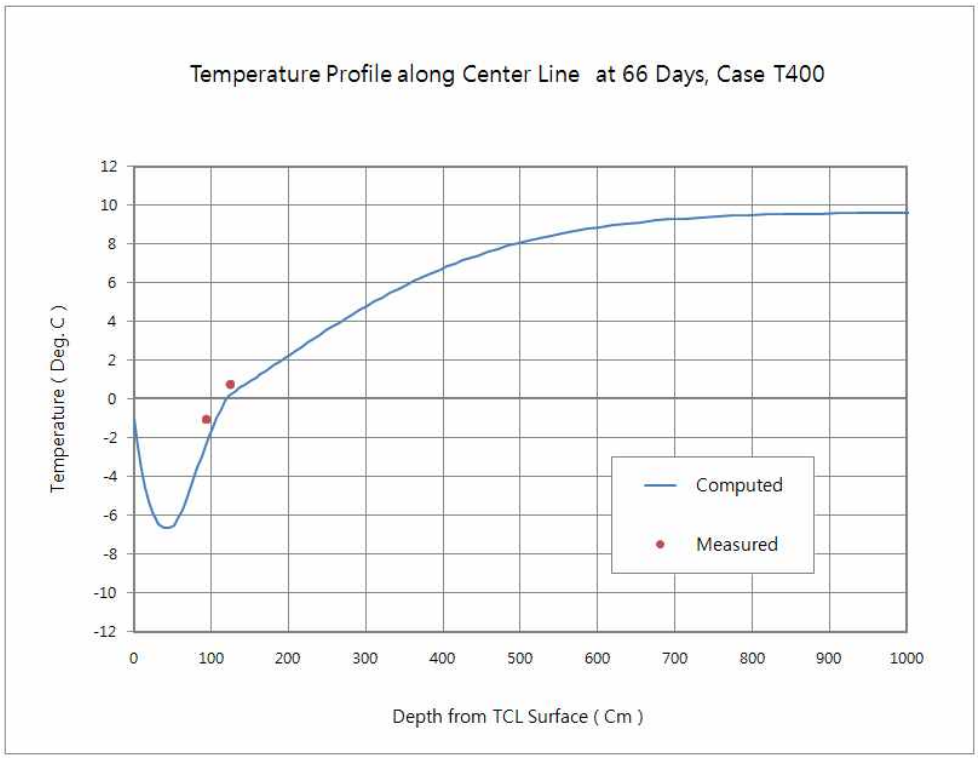



Figure 3.9.17 Temperature profile along the center line at 66 days, Case T400.

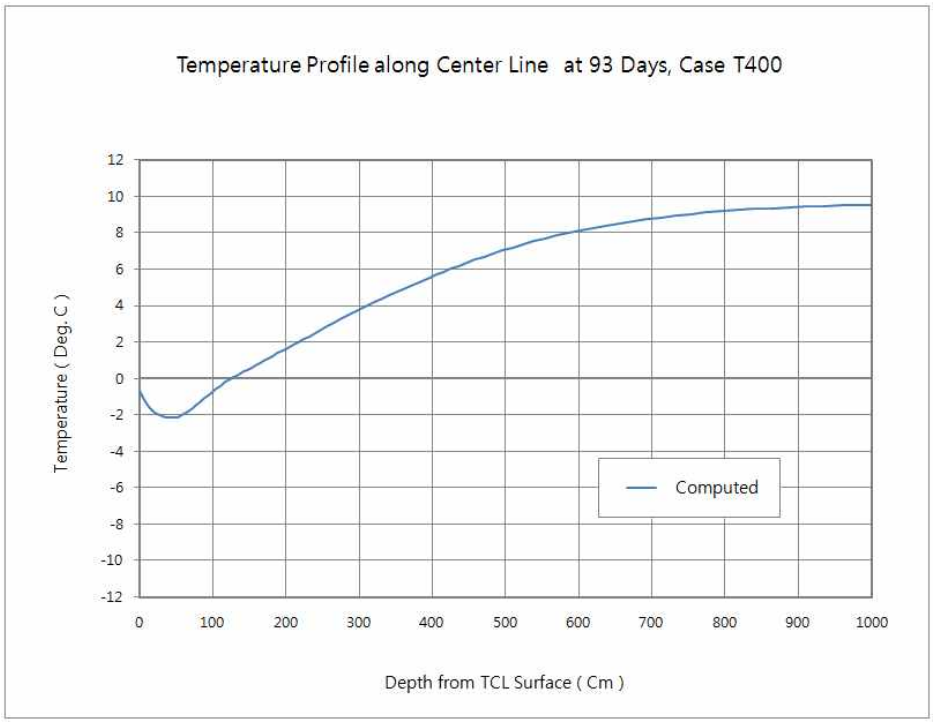



Figure 3.9.18 Temperature profile along the center line at 93 days, Case T400.

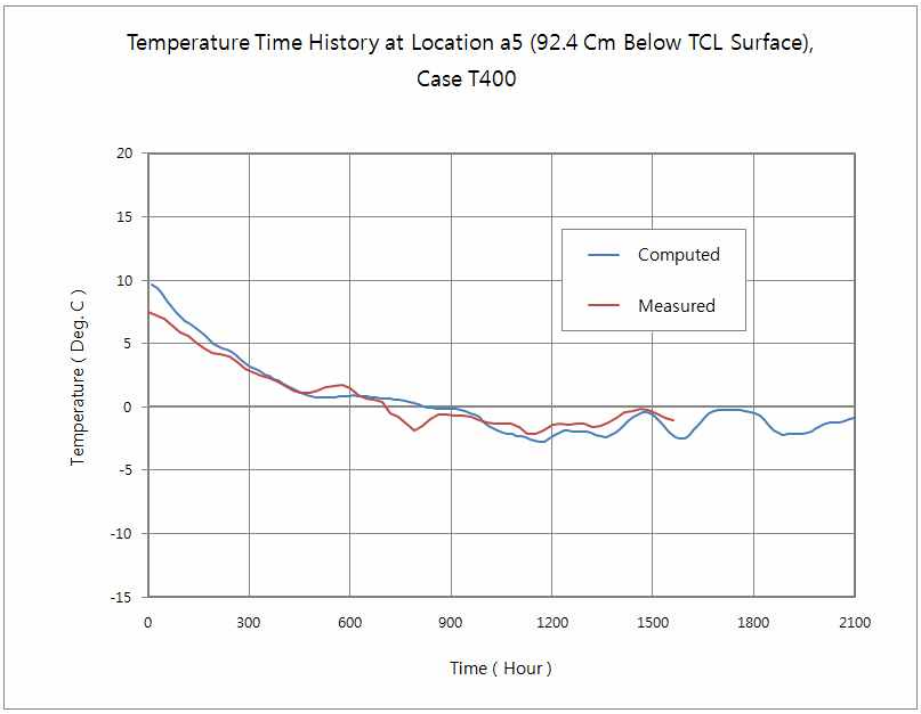



Figure 3.9.19 Temperature time history at location a5 (92.4 Cm below TCL surface), Case T400.

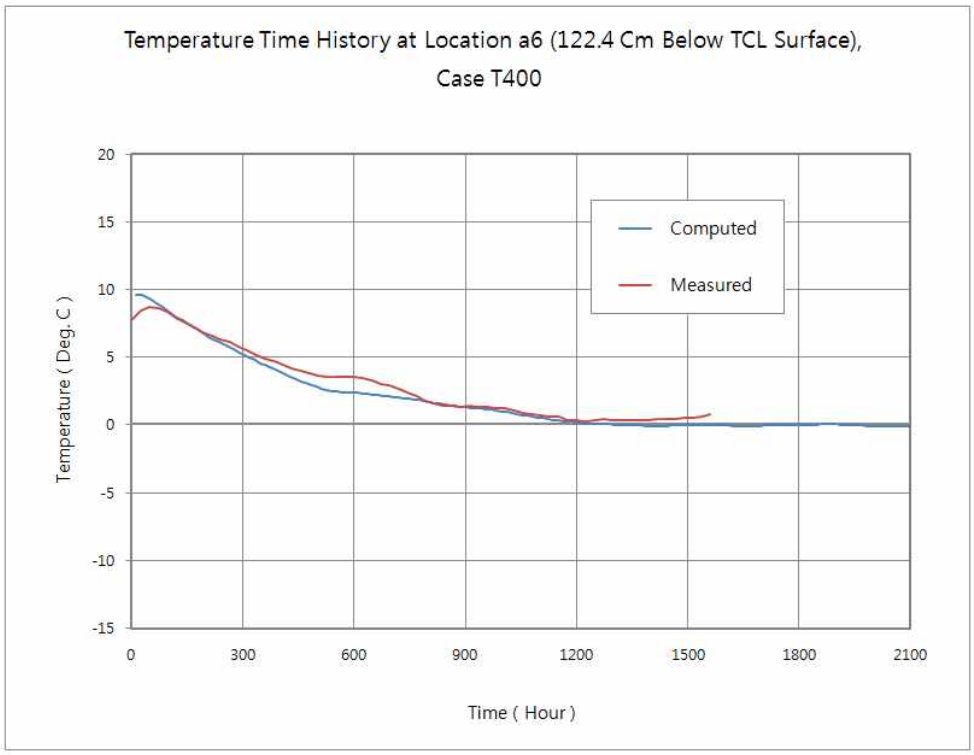



Figure 3.9.20 Temperature time history at location a6 (122.4 Cm below TCL surface), Case T400.

(3) 보조도상 두께 500 mm : Case T500

Case T500은 Figure 3.9.2의 현장실험 보조도상 두께 500 mm를 모델링한 경우로 본 FEM 수치해석에서는 Figure 3.9.21에서 보는 바와 같이 축대칭으로 가정하여 현장실험에서 수행된 정사각형 단면을 면적이 동일한 원으로 환산하여 등가의 직경 (Equivalent Diameter)을 구하여 해석 모델에 적용하였다.

Figure 3.9.22, 3.9.23 그리고 3.9.24는 단면의 Center Line에 따라 동결이 시작된 후 각각 33일, 66일 그리고 93일에 계산된 온도 Profile로 계측 위치에서의 계산값은 측정값과 약간의 차이를 보이고 있으나 온도 분포 양상은 유사한 경향을 보여 주고 있다.

Figure 3.9.25와 3.9.26은 각각 계측기가 설치된 위치 a7과 a8에서의 온도 이력 그래프로 계산결과는 측정치와 거의 유사한 값을 보여 주고 있다.

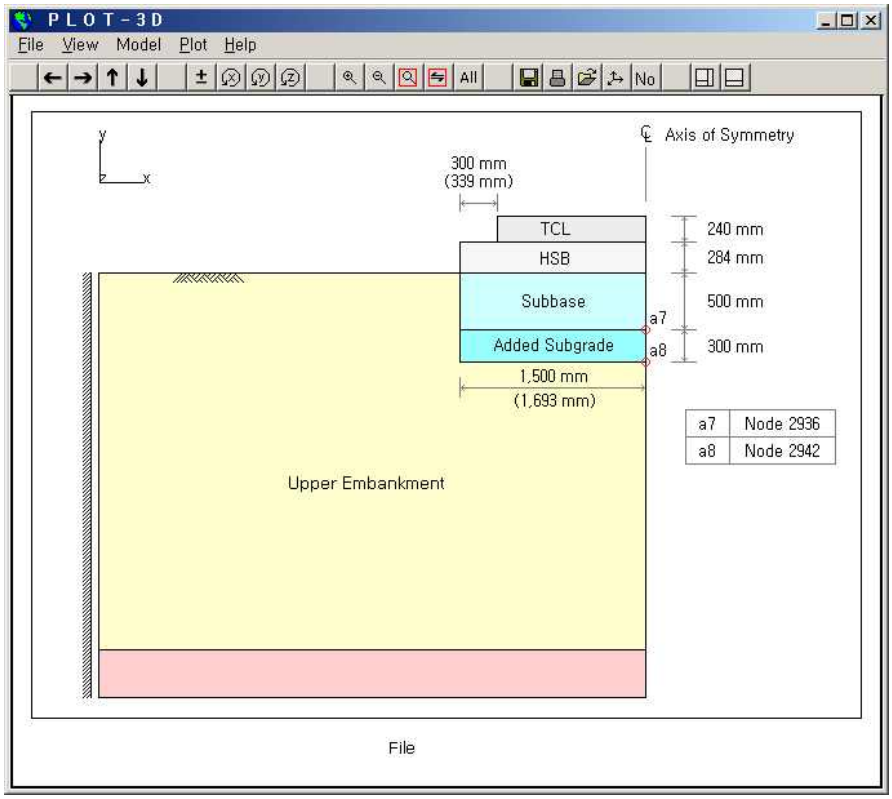



Figure 3.9.21 Schematic Test Section for numerical analysis of concrete slab railway, Case T500.

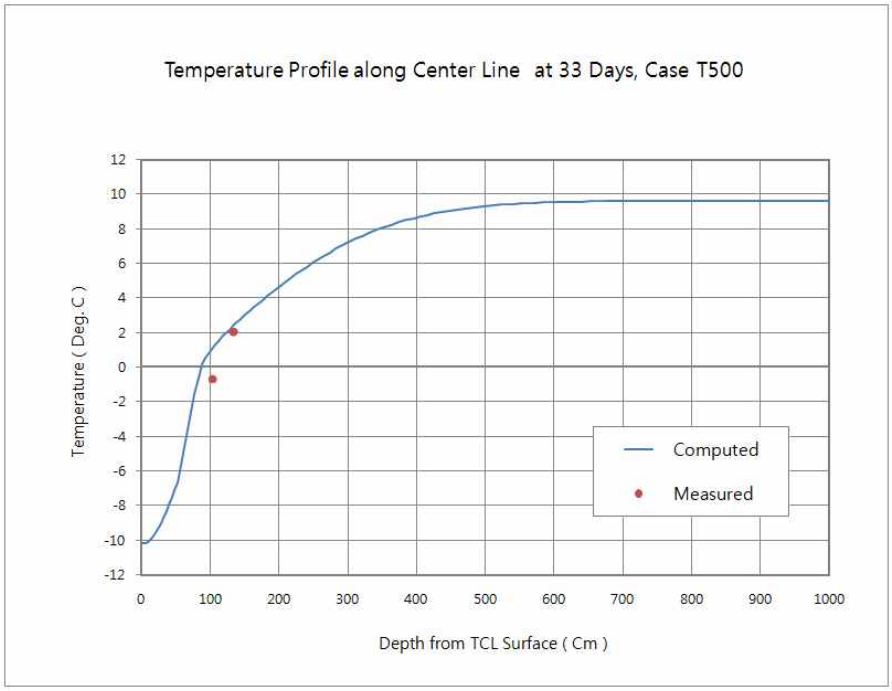



Figure 3.9.22 Temperature profile along the center line at 33 days, Case T500.

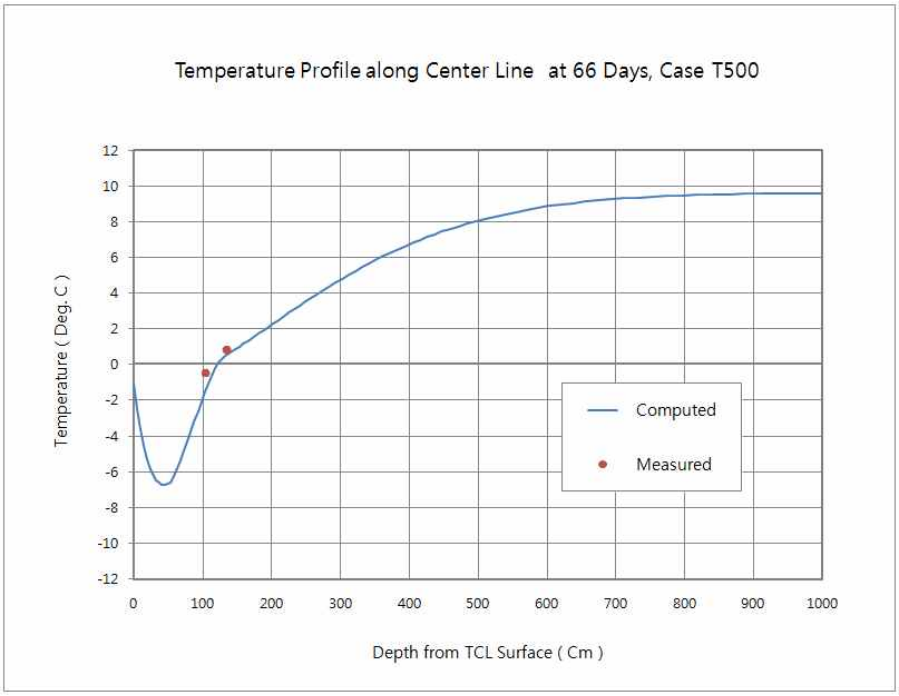



Figure 3.9.23 Temperature profile along the center line at 66 days, Case T500.

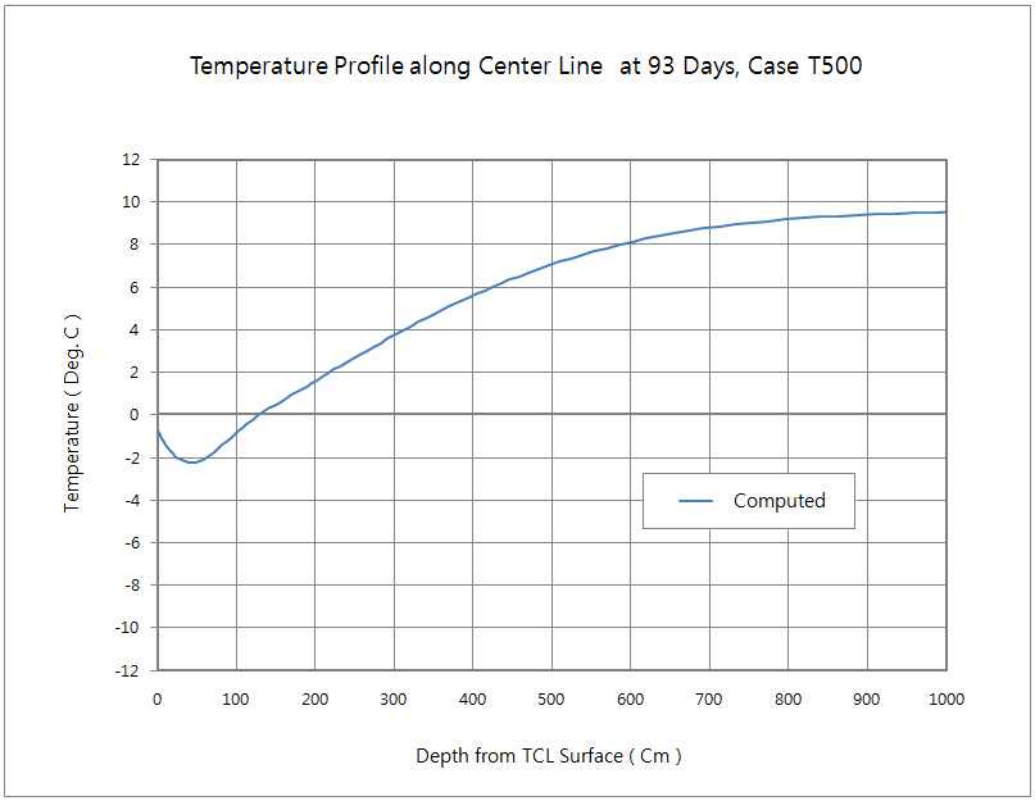



Figure 3.9.24 Temperature profile along the center line at 93 days, Case T500.

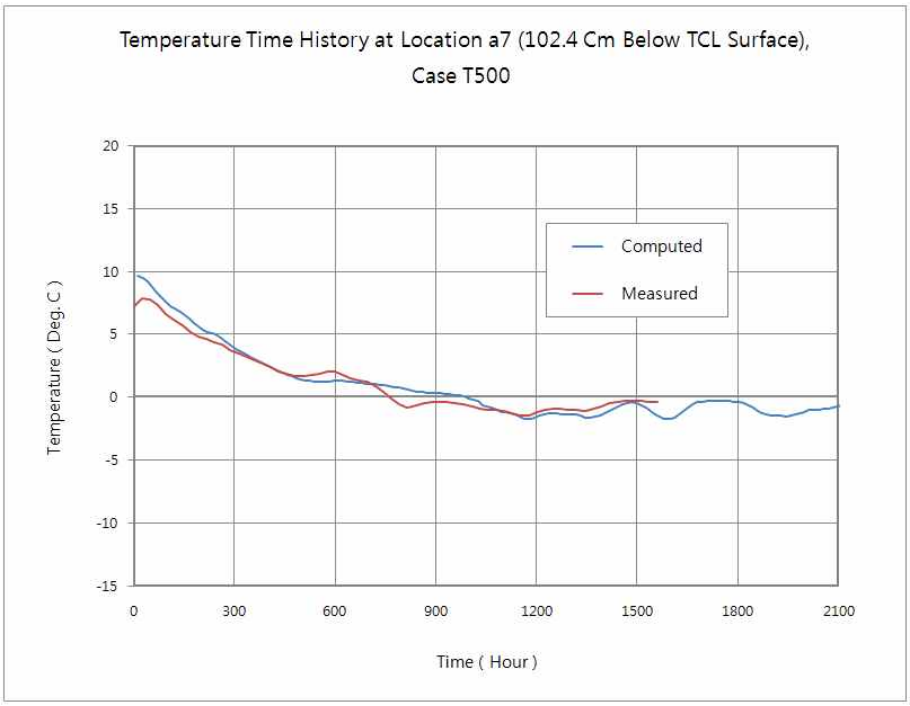



Figure 3.9.25 Temperature time history at location a7 (102.4 Cm below TCL surface), Case T500.

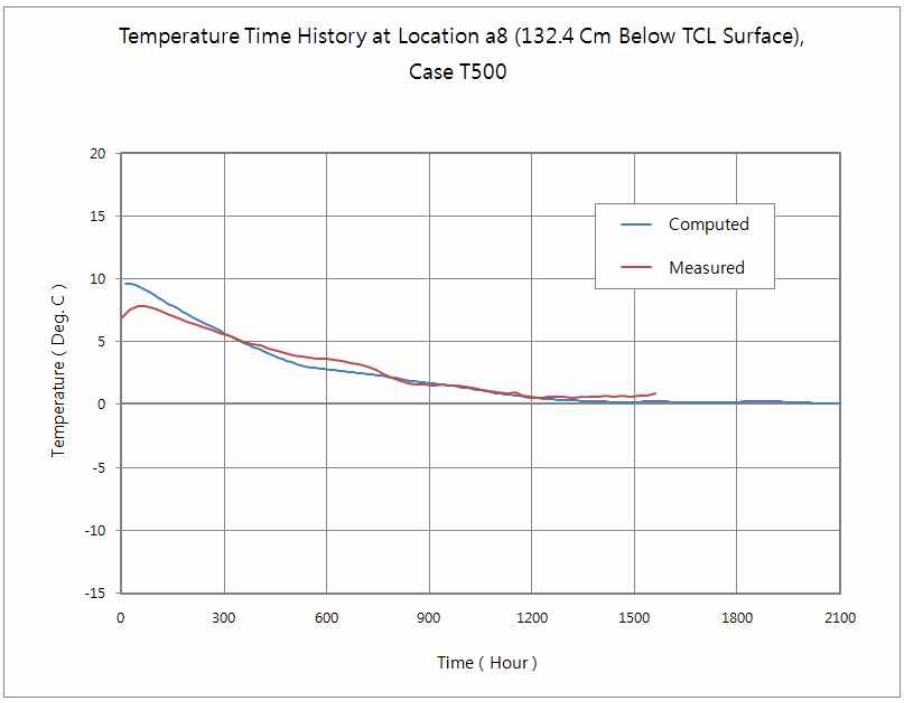



Figure 3.9.26 Temperature time history at location a8 (132.4 Cm below TCL surface), Case T500.

(4) 보조도상 두께 600 mm : Case T600

Case T600은 실제로 현장실험은 수행되지 않은 경우로 보조도상 두께를 600 mm로 가정하여 모델링하였고 Figure 3.9.27에서 보는 바와 같이 축대칭으로 가정하여 현장실험의 정사각형 단면을 면적이 동일한 원으로 환산하여 등가의 직경 (Equivalent Diameter)을 구하여 해 석 모델에 적용하였다.

Figure 3.9.28은 단면의 Center Line에 따라 동결이 시작된 후 각각 33일, 66일 그리고 93일에 계산된 온도 Profile을 상호 비교한 그래프이다. 온도 분포는 지표면 부근에서 큰 차이를 보여 주고 있다.

Figure 3.9.29는 가상 계측 위치인 a9과 a10에서의 온도 이력을 상호 비교한 그래프이다. 가상 계측위치 a10 (지표면으로부터 깊이 142.4 Cm) 에서는 동결이 안된 상태를 유지하고 있음을 알 수 있다.

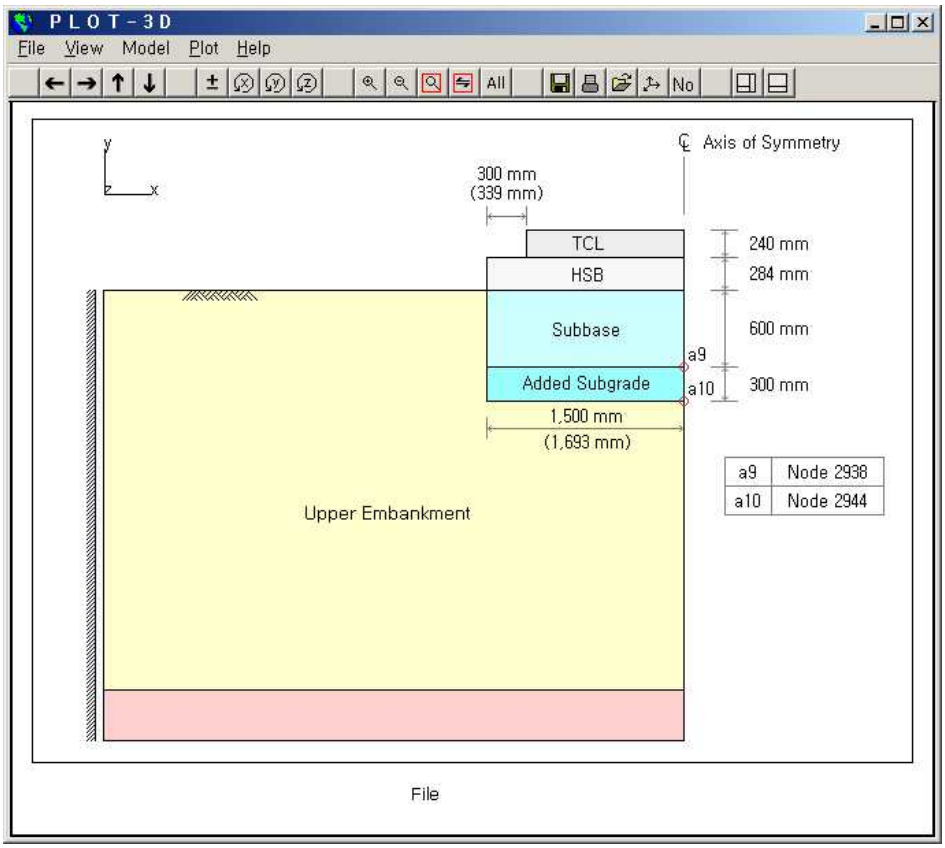



Figure 3.9.27 Schematic Test Section for numerical analysis of concrete slab railway, Case T600.

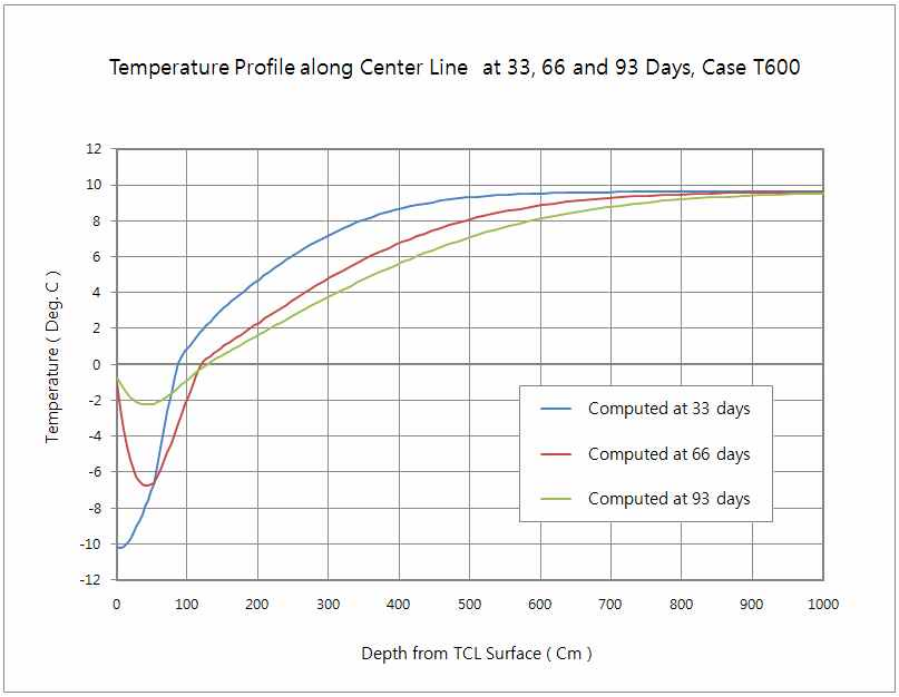



Figure 3.9.28 Temperature profile along the center line at 33, 66 and 93 days, Case T600.

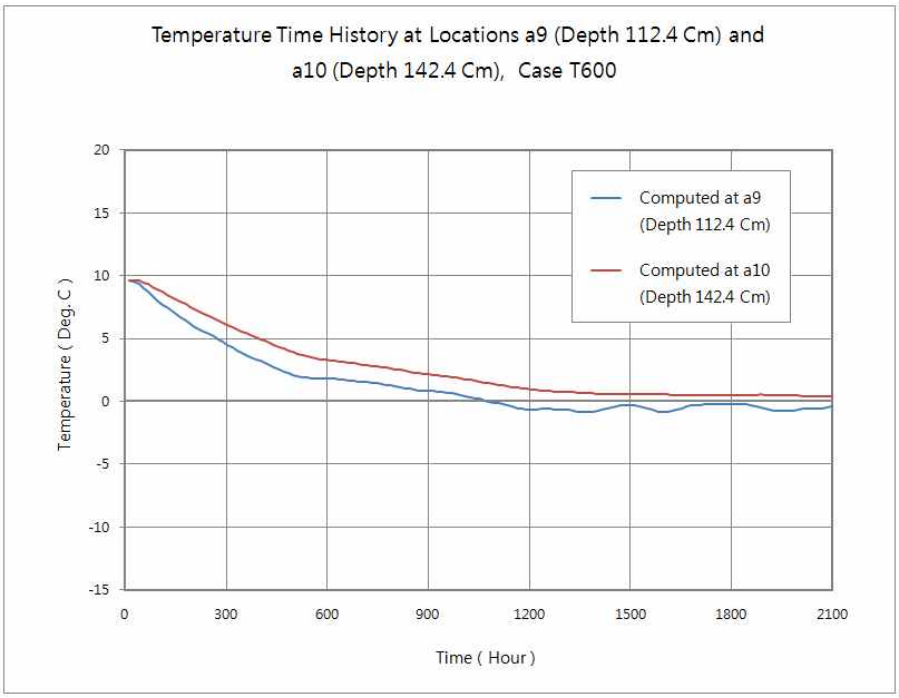



Figure 3.9.29 Temperature time history at location a9 (depth 112.4 Cm) and a10 (depth 142.4 Cm), Case T600.

다. Full Section 수치해석

Case F300은 보조도상 두께 300 mm에 대하여 실제 콘크리트 Slab 궤도 단면 (Figure 3.9.1)을 모델링한 경우로 Figure 3.9.30은 본 Case F300의 개략도이고 Figure 3.9.31은 FEM 수치해석의 유한요소망으로 총 6035개의 유한요소가 사용되었다.

Figure 3.9.32, 3.9.33 그리고 3.9.34는 동결이 시작된 후 각각 33일, 66일 그리고 93일에 계산된 온도 분포도로 단면의 Center Line 부근에서는 거의 1차원 온도 분포를 보여 주고 있다.

Figure 3.9.35, 3.9.36 그리고 3.9.37은 단면의 Center Line에 따라 동결이 시작된 후 각각 33일, 66일 그리고 93일에 계산된 온도 Profile로 계측 위치에서의 계산값은 측정값과 약간의 차이를 보이고 있으나 온도 분포 양상은 유사한 경향을 보여 주고 있다. 그리고 Case F300을 Case T300과 비교할 때 Full Section 단면이 Test Section 단면의 온도보다 조금 높은 것으로 보인다.

Figure 3.9.38, 3.9.39 그리고 3.9.40은 각각 계측기가 설치된 위치 a2, a3 그리고 a4에서의 온도 이력 그래프로 계산결과는 측정치와 거의 유사한 값을 보여 주고 있다. 그리고 전체적으로 Full Section 단면의 온도가 Test Section 단면의 온도보다 조금 높은 것으로 보인다.

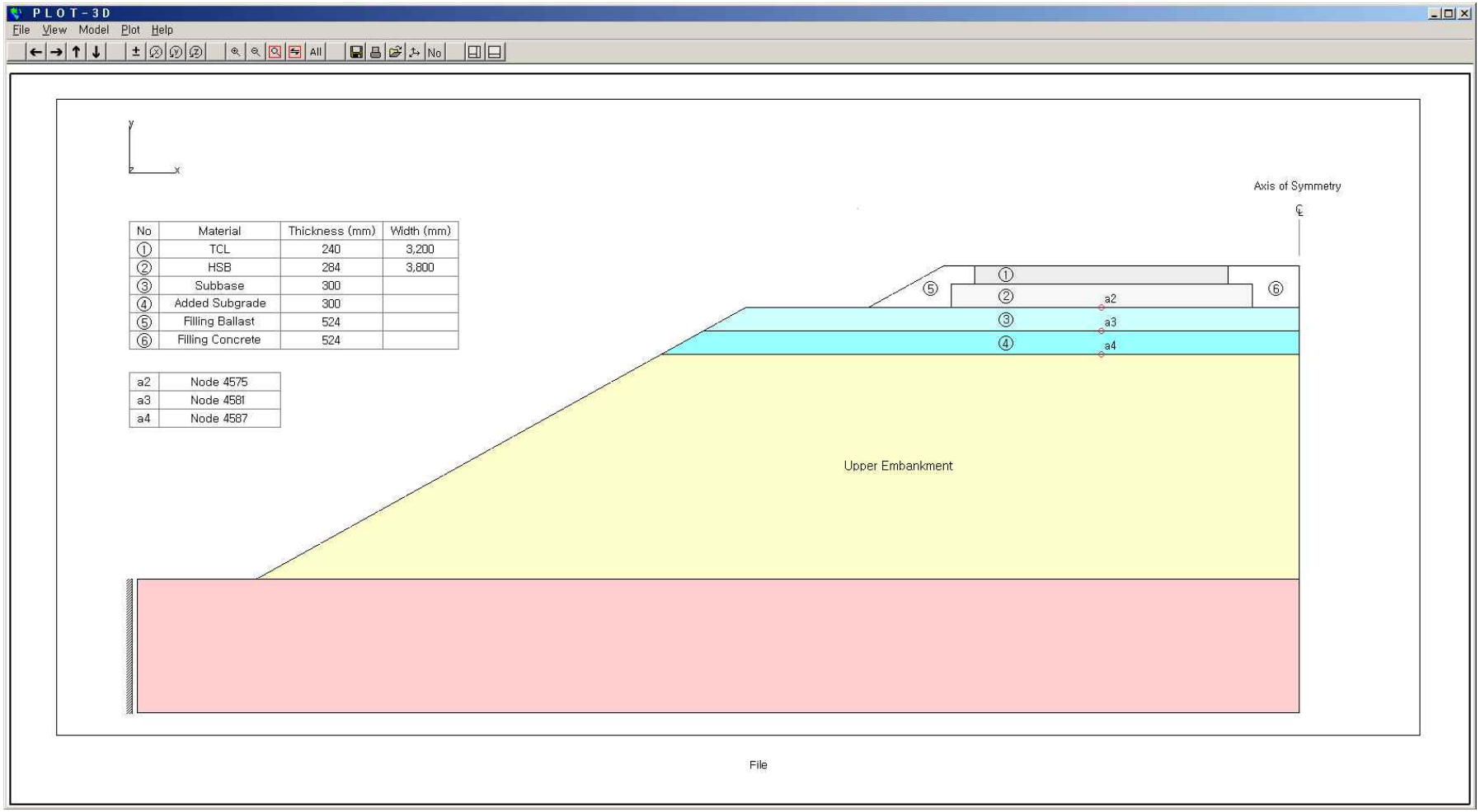



Figure 3.9.30 Schematic Full Section for numerical analysis of concrete slab railway, Case F300.

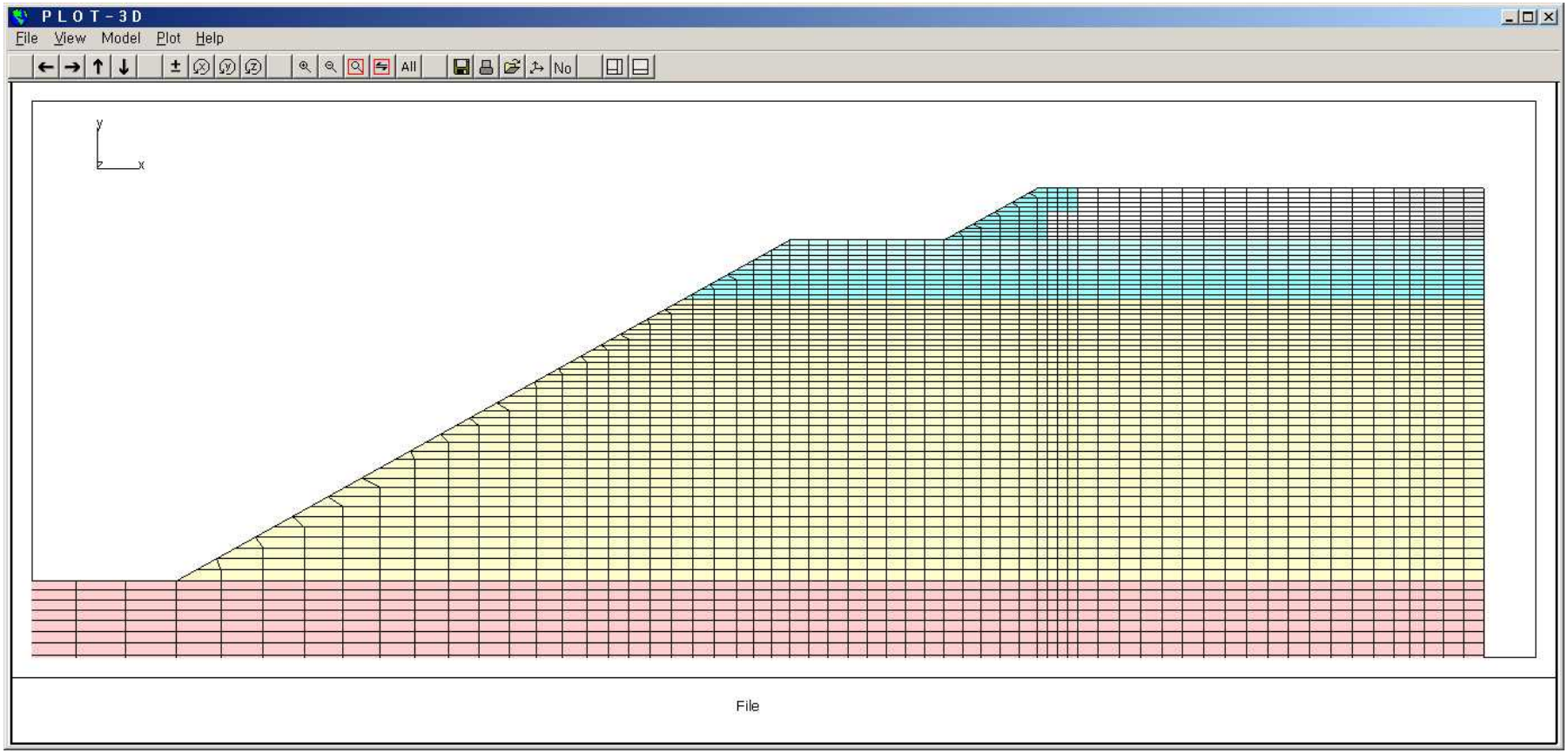



Figure 3.9.31 Finite element meshes for Full Section analysis, Case F300.

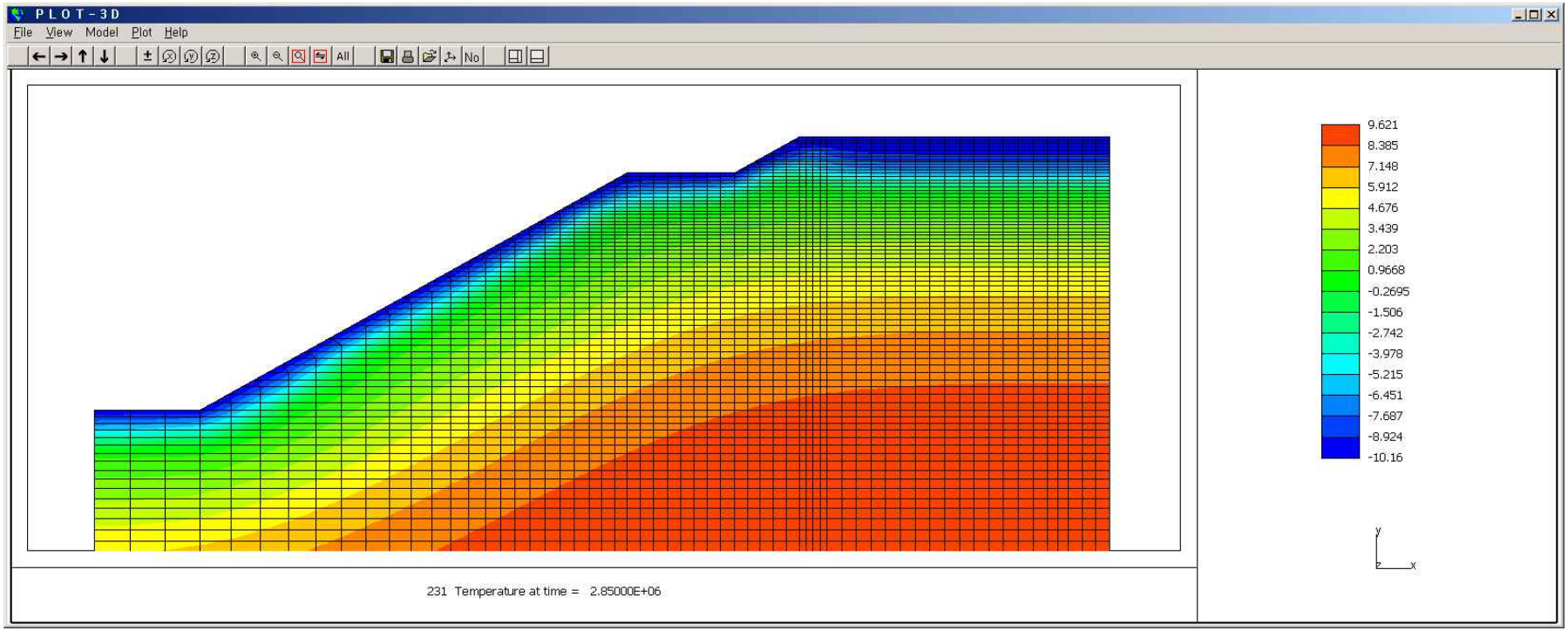



Figure 3.9.32 Temperature distribution at 33 days, Case F300.

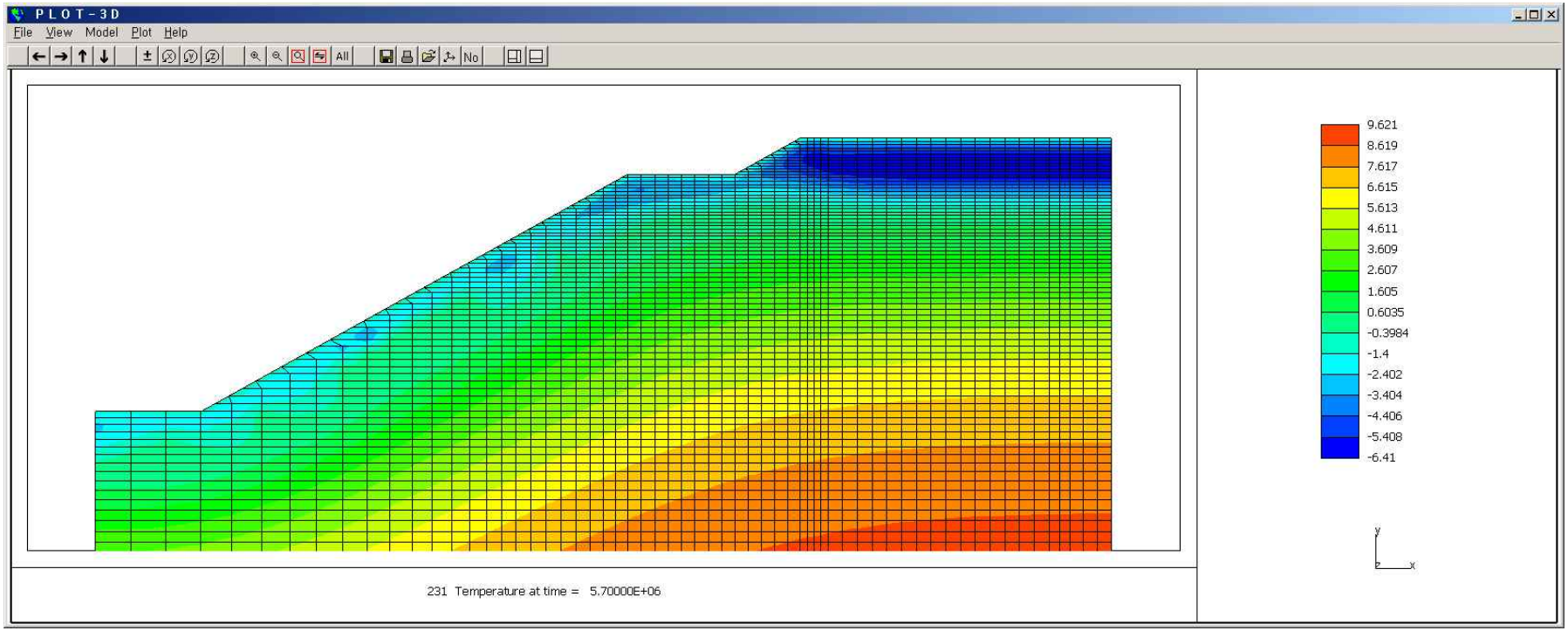



Figure 3.9.33 Temperature distribution at 66 days, Case F300.

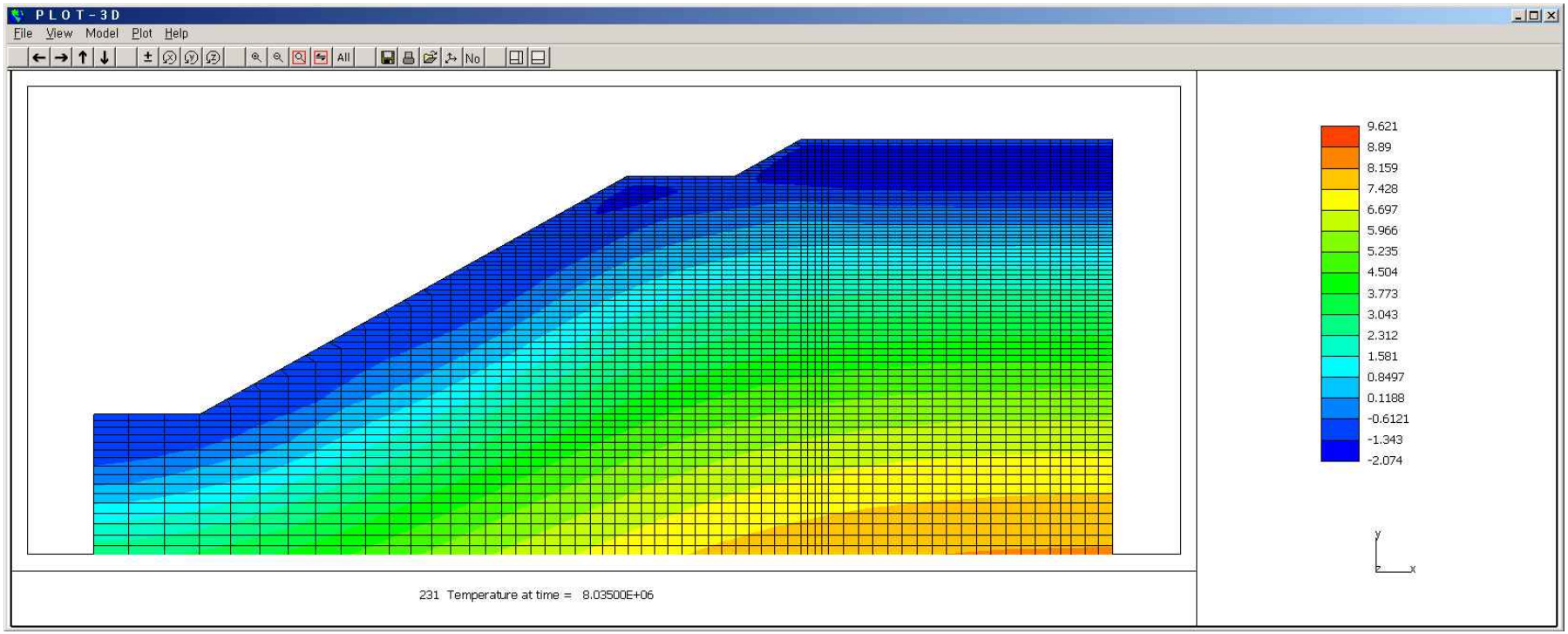



Figure 3.9.34 Temperature distribution at 93 days, Case F300.

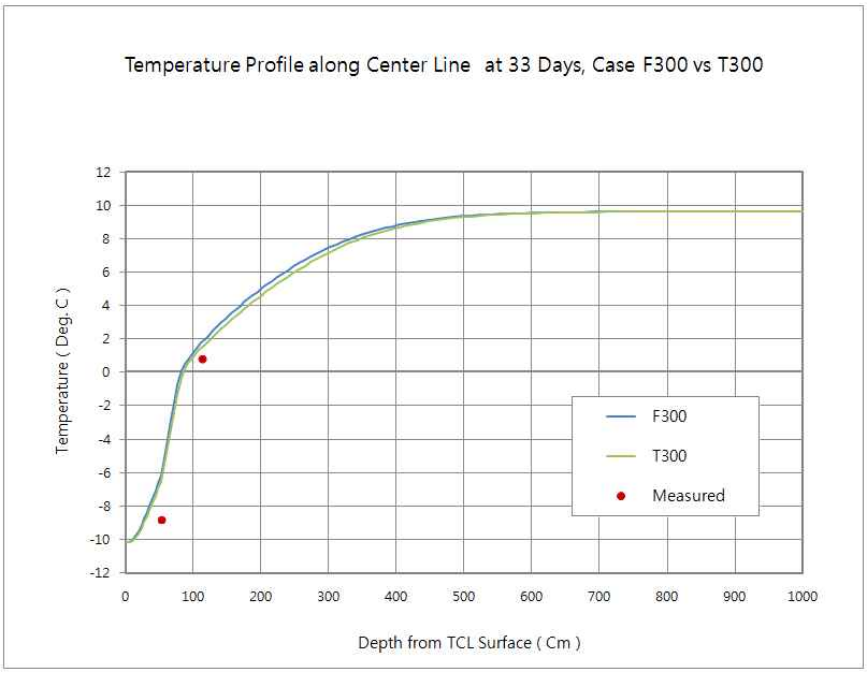



Figure 3.9.35 Temperature profile along the center line at 33 days, Case F300 vs T300.

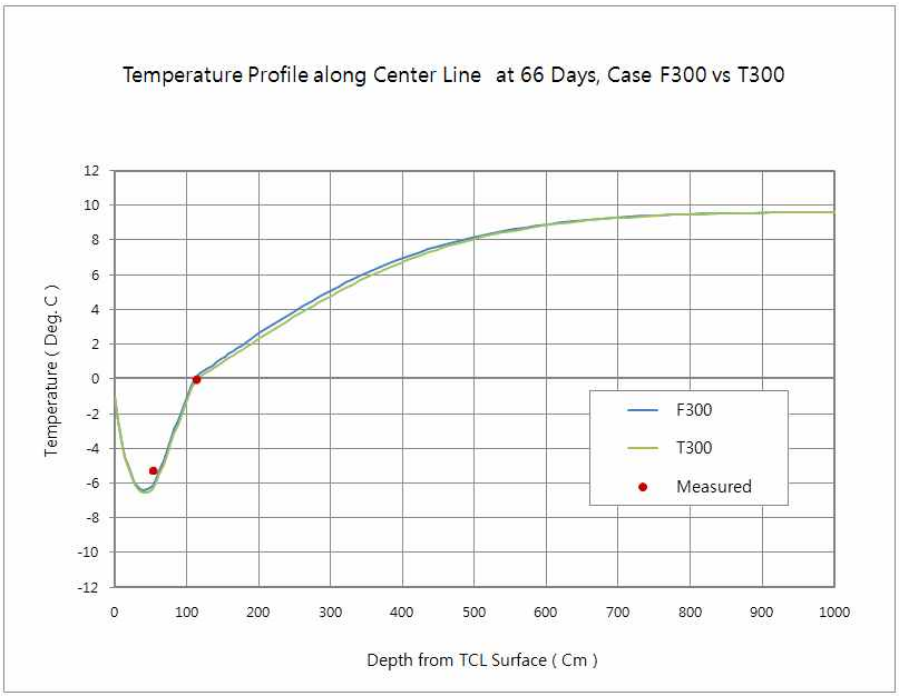



Figure 3.9.36 Temperature profile along the center line at 66 days, Case F300 vs T300.

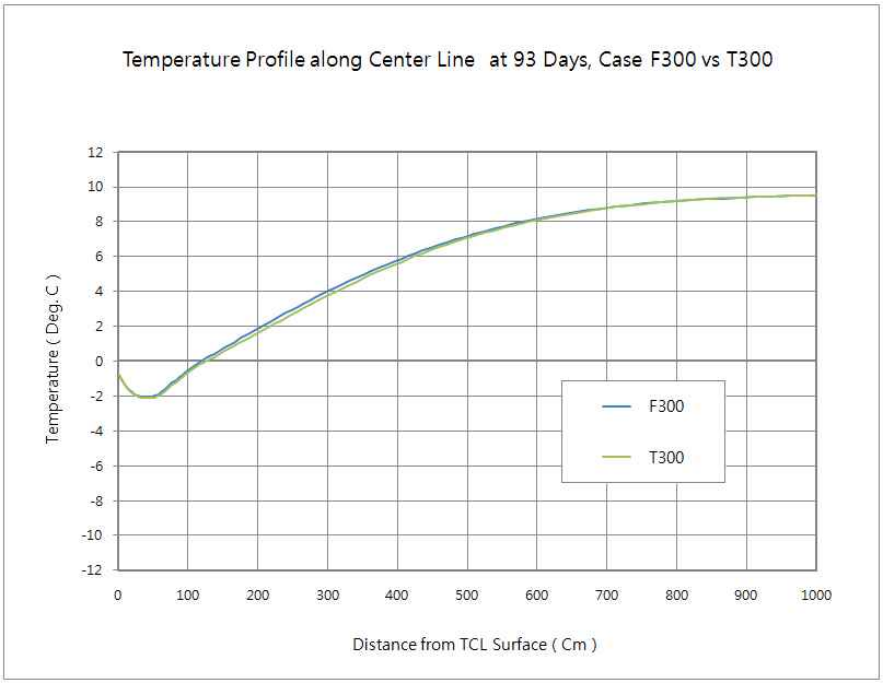



Figure 3.9.37 Temperature profile along the center line at 93 days, Case F300 vs T300.

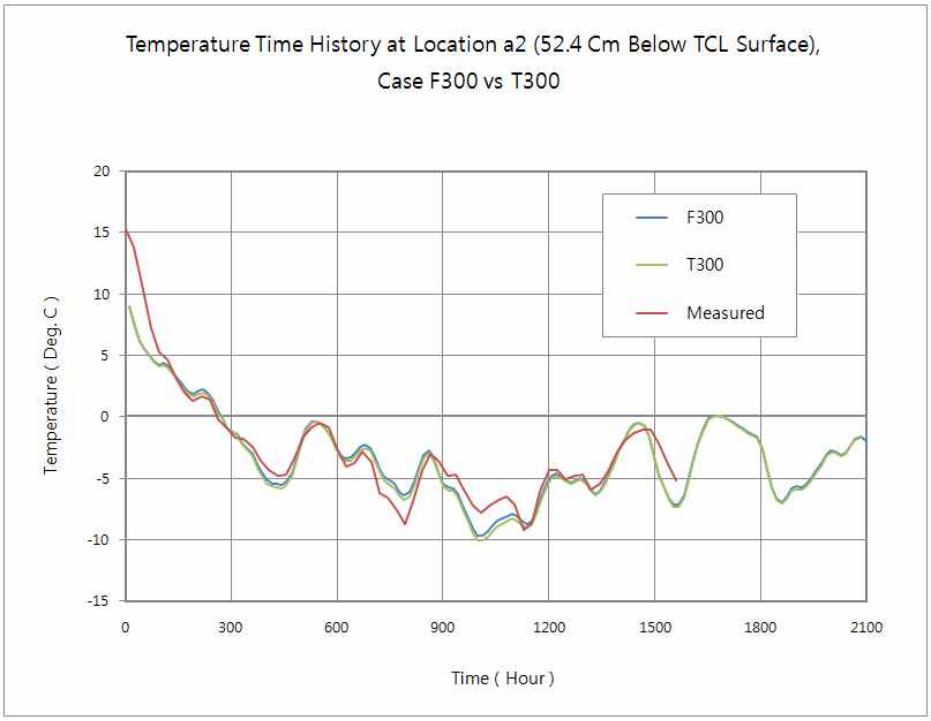



Figure 3.9.38 Temperature time history at location a2 (52.4 Cm below TCL surface), Case F300 vs T300.

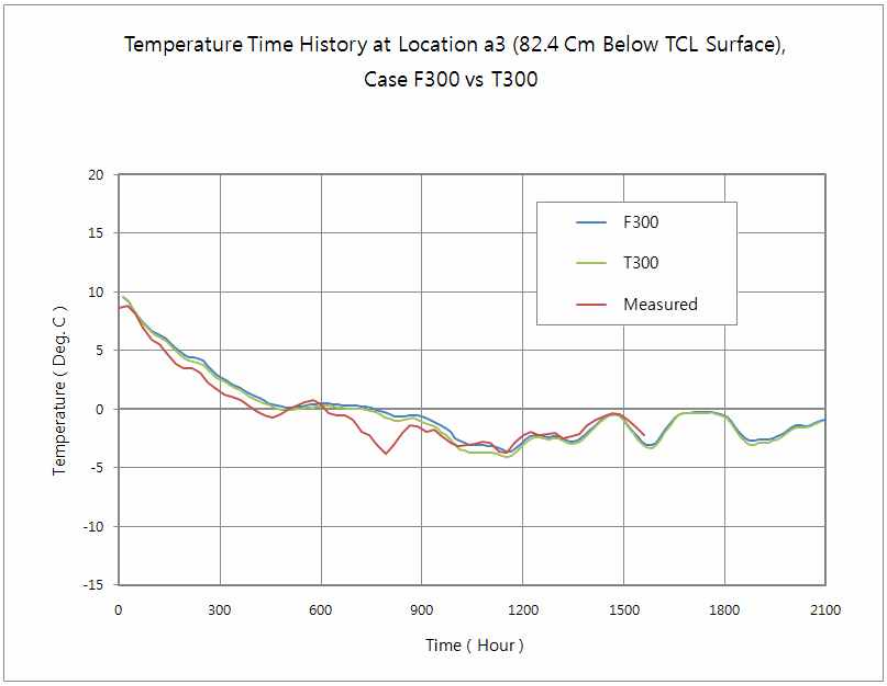



Figure 3.9.39 Temperature time history at location a3 (82.4 Cm below TCL surface), Case F300 vs T300.

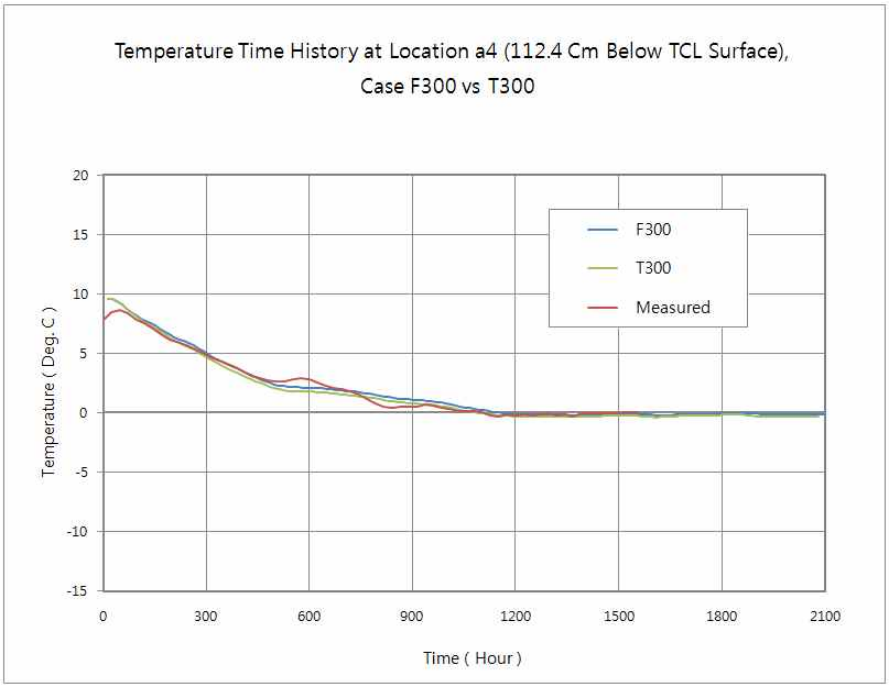



Figure 3.9.40 Temperature time history at location a4 (112.4 Cm below TCL surface), Case F300 vs T300.

라. 1D Section 수치해석

Case A300은 보조도상 두께 300 mm에 대하여 단면의 Center Line에 따라서 1차원으로 모델링한 경우로 Figure 3.9.41은 본 Case A300의 개략도이고 Figure 3.9.42는 FEM 수치해석의 유한요소망으로 총 115개의 유한요소가 사용되었다.

Figure 3.9.43, 3.9.44 그리고 3.9.45는 단면의 Center Line에 따라 동결이 시작된 후 각각 33일, 66일 그리고 93일에 계산된 온도 Profile로 본 Case A300 해석결과는 Full Section의 Center Line 온도 Profile과 거의 일치함을 알 수 있다.

Figure 3.9.46, 3.9.47 그리고 3.9.48은 각각 계측기가 설치된 위치 a2, a3 그리고 a4에서의 온도 이력 그래프로 본 Case A300 해석결과는 Full Section의 Center Line 온도 이력과 거의 일치함을 알 수 있다.

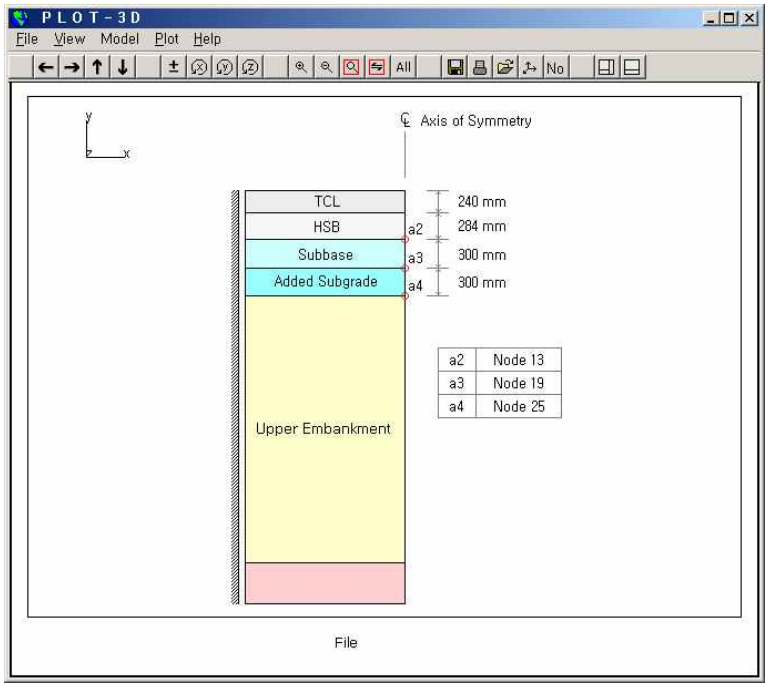



Figure 3.9.41 Schematic 1D Section for numerical analysis of concrete slab railway, Case A300.

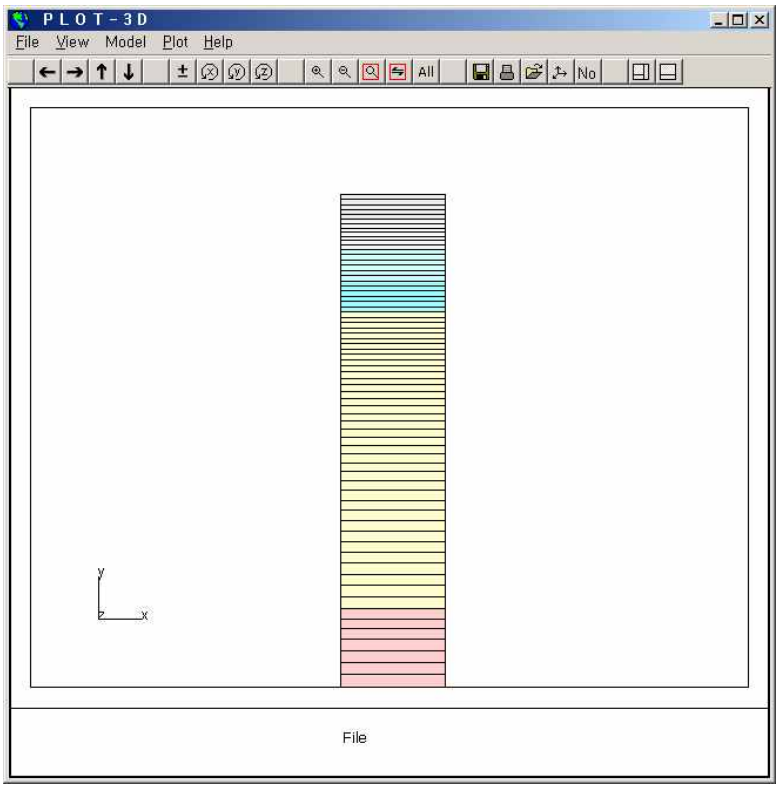



Figure 3.9.42 Finite element meshes for 1D Section analysis, Case A300.

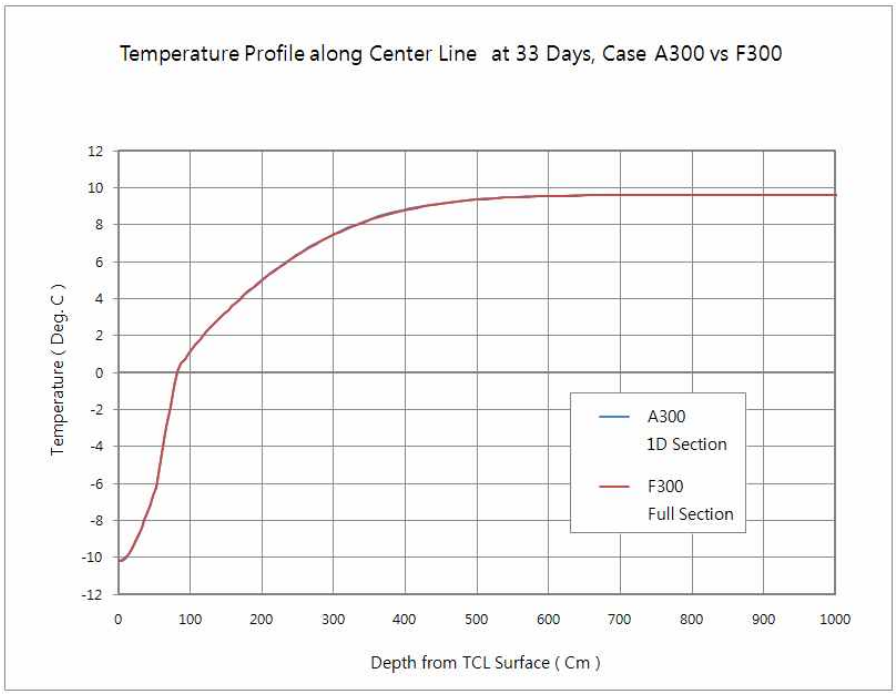



Figure 3.9.43 Temperature profile along the center line at 33 days, Case A300 vs F300.

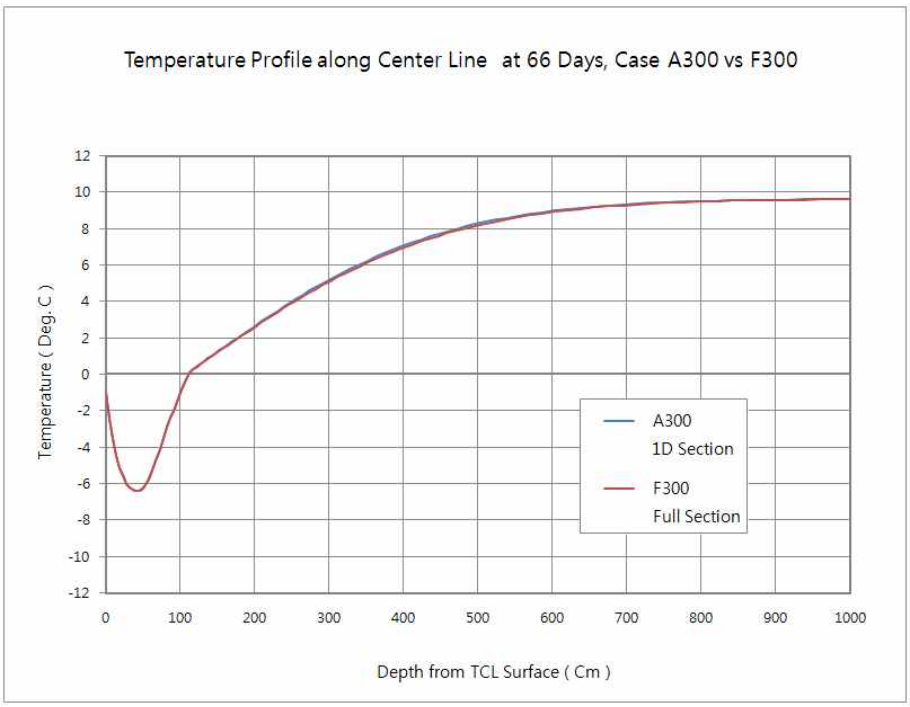



Figure 3.9.44 Temperature profile along the center line at 66 days, Case A300 vs F300.

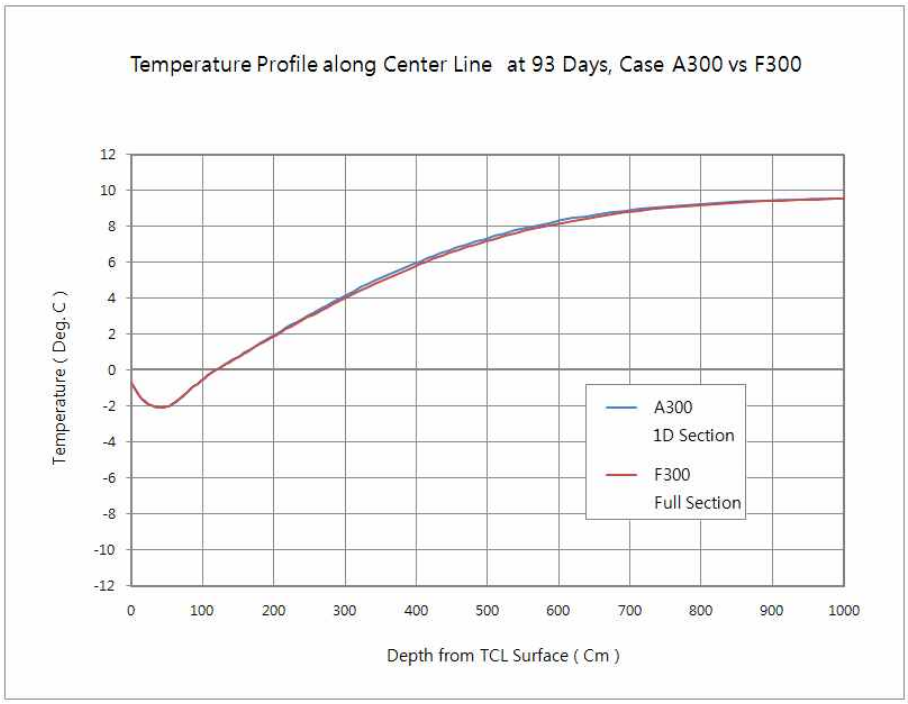



Figure 3.9.45 Temperature profile along the center line at 93 days, Case A300 vs F300.

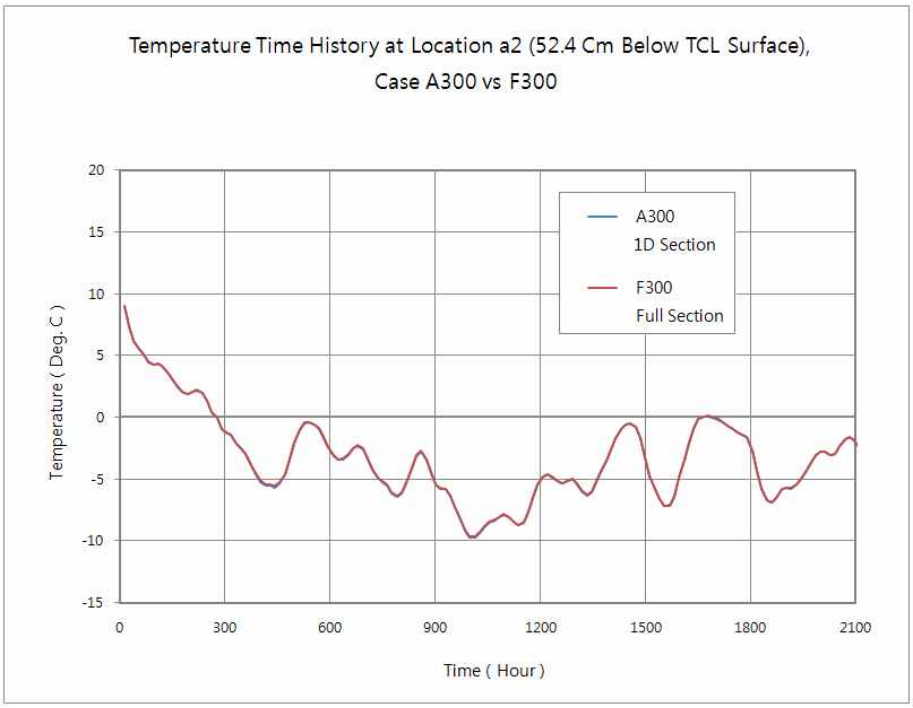



Figure 3.9.46 Temperature time history at location a2 (52.4 Cm below TCL surface), Case A300 vs F300.

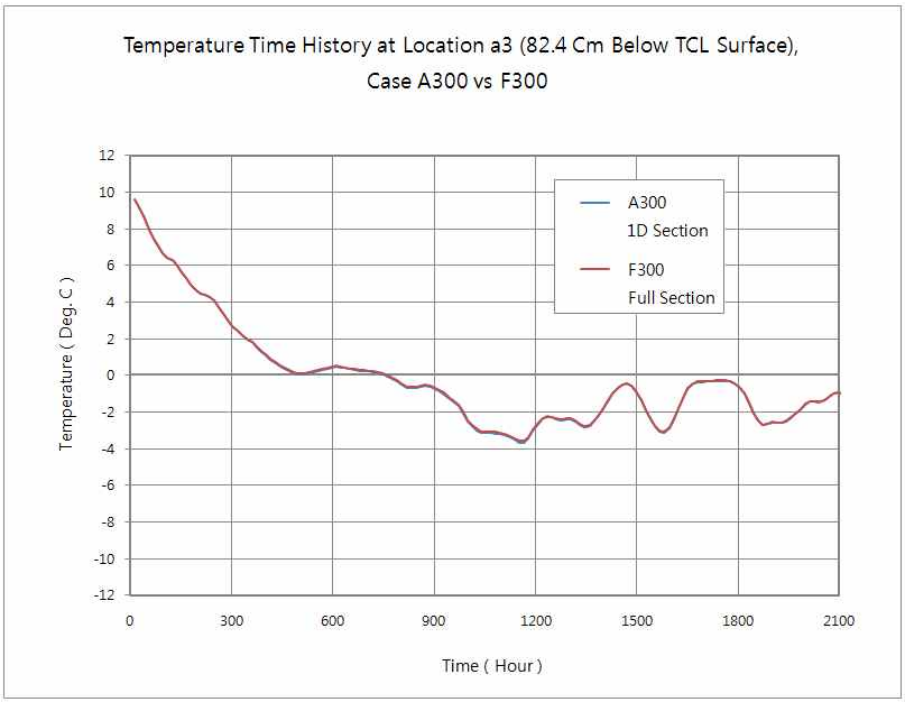



Figure 3.9.47 Temperature time history at location a3 (82.4 Cm below TCL surface), Case A300 vs F300.

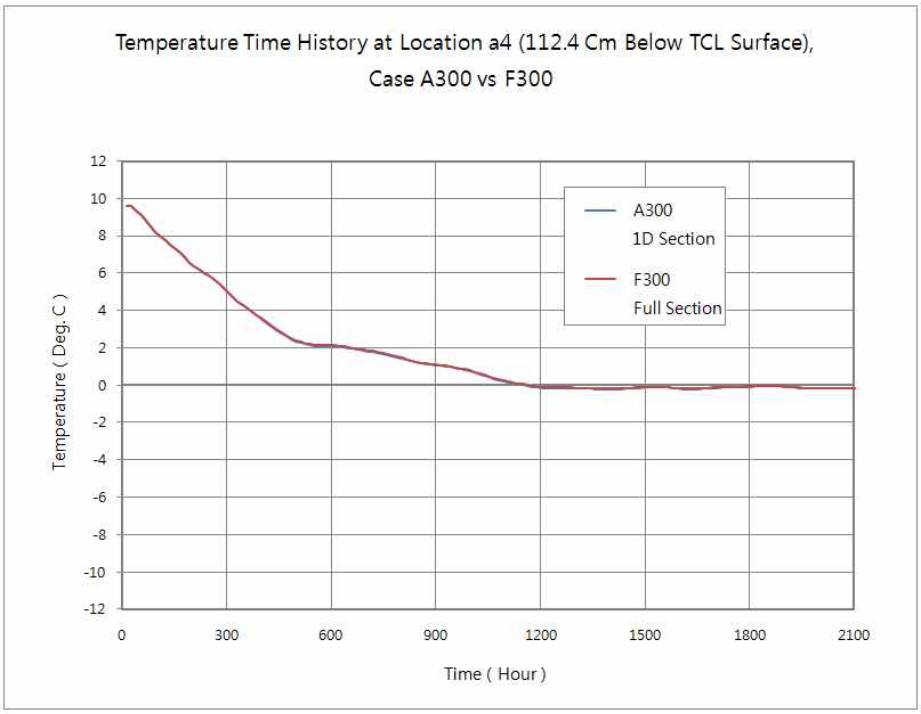



Figure 3.9.48 Temperature time history at location a4 (112.4 Cm below TCL surface), Case A300 vs F300.

3. 자갈·아스콘 도상 동결심도 FEM 수치해석

가. 서론

본 장에서는 자갈층과 아스콘층을 그림 3.9.49에서와 같이 4가지 경우로 조합하였을 경우 동결심도를 계산하여 상호 비교하여 보았다. 처음 두 경우는 상부에 자갈층이 있고 하부에 아스콘층이 있는 경우이고 나머지 두 경우는 상부에 아스콘층이 하부에 자갈층이 있는 경우이다. Table 3.9.3은에 사용된 재료 물성치이고 기타 기상 Data는 제 2장 콘크리트 궤도 동결심도 해석에 사용한 값을 적용하였다.

나. 1D Section 수치해석

Table 3.9.4는 자갈·아스콘 도상의 4가지 경우에 대하여 동결심도를 계산한 값을 요약한 표이고 Figure 3.9.50은 Table 3.9.4의 값을 그래프로 비교한 것이다. 해석결과 Case G300_A100은 Case A100_G300과 유사한 동결심도를 보여 주며 동결이 완료된 직후 최대 동결심도는 93 Cm이다. 그리고 Case G300_A200은 Case A200_G300과 유사한 동결심도를 보여 주며 동결이 완료된 직후 최대 동결심도는 90 Cm로 Case G300_A100과 CaseA100_G300의 경우 보다 3 Cm 정도 동결심도가 작게 계산되었다.

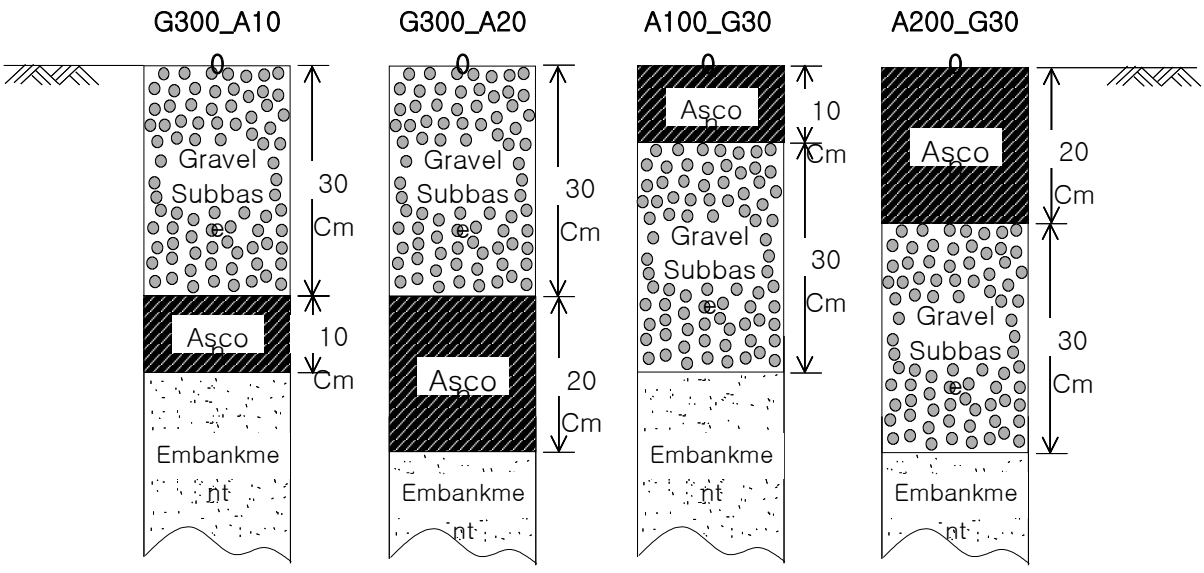



Figure 3.9.49 Schematic sections used for numerical analysis of gravel railway reinforced by PE asphalt concrete.

Table 3.9.3 Material properties used for numerical analysis of gravel railway reinforced by PE asphalt concrete.

| No | Material | $\gamma_d$ | $\omega$ | W/m·K | | J/m³·K | | L | Thickness | Remark |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | kg/m³ | (%) | $K_u$ | $K_f$ | $C_u$ | $C_f$ | J/m³ | mm | |
| 1 | PE Asphalt Concrete<br>폐비닐 아스콘 | 2210 | 0.0 | 1.057 | 1.057 | 1.873E+06 | 1.873E+06 | 0 | 100~200 | 10 % PE Asphalt |
| 2 | Gravel Subbase<br>자갈 보조도상 | 1600 | 5.0 | 1.276 | 0.8787 | 1.47E+06 | 1.303E+06 | 2.673E+07 | 300 | $d_{max}$ = 31.5 mm |
| 3 | Embankment<br>노반 | 1590 | 14.47 | 1.7147 | 2.0874 | 2.09E+06 | 1.609E+06 | 7.687E+07 | | SW |
| 4 | Generic Asphalt Concrete<br>일반 아스콘 | 2210 | 0.0 | 1.4848 | 1.4848 | 1.873E+06 | 1.873E+06 | 0 | 100~200 | Generic Asphalt |

$\gamma_d$ : Dry Density  $\omega$ : Water Content  K : Thermal Conductivity  C : Volumetric Heat Capacity  L : Volumetric Latent Heat

$K_u$ and $C_u$ refer to Unfrozen Material  $K_f$ and $C_f$ refer to Frozen Material

Table 3.9.4 Computed frost depth of 1D Gravel-Ascon Section using step approximation surface temperature.

| Freezing Period (Days) | Frost Depth (Cm) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | G300_A100 | G300_A200 | A100_G300 | A200_G300 |
| 33 | 47.6 | 52.9 | 47.0 | 51.7 |
| 44 | 54.7 | 58.2 | 54.1 | 57.4 |
| 55 | 61.7 | 64.1 | 61.2 | 62.9 |
| 66 | 68.8 | 70.0 | 68.2 | 68.8 |
| 76 | 74.7 | 75.0 | 74.1 | 74.1 |
| 86 | 80.9 | 80.9 | 80.0 | 80.0 |
| 93 | 92.8 | 90.0 | 92.9 | 89.8 |
| 104 | 95.0 (*) | 91.2 (*) | 95.0 (*) | 91.0 (*) |
| 113 | 93.4 (*) | 89.1 (*) | 93.5 (*) | 89.0 (*) |
| 121 | 91.2 (*) | 86.5 (*) | 91.5 (*) | 86.7 (*) |

Note : "G300_A100" stands for 300 mm gravel layer overlying 100 mm asphalt concrete layer.

(*) : Partially frozen profile.

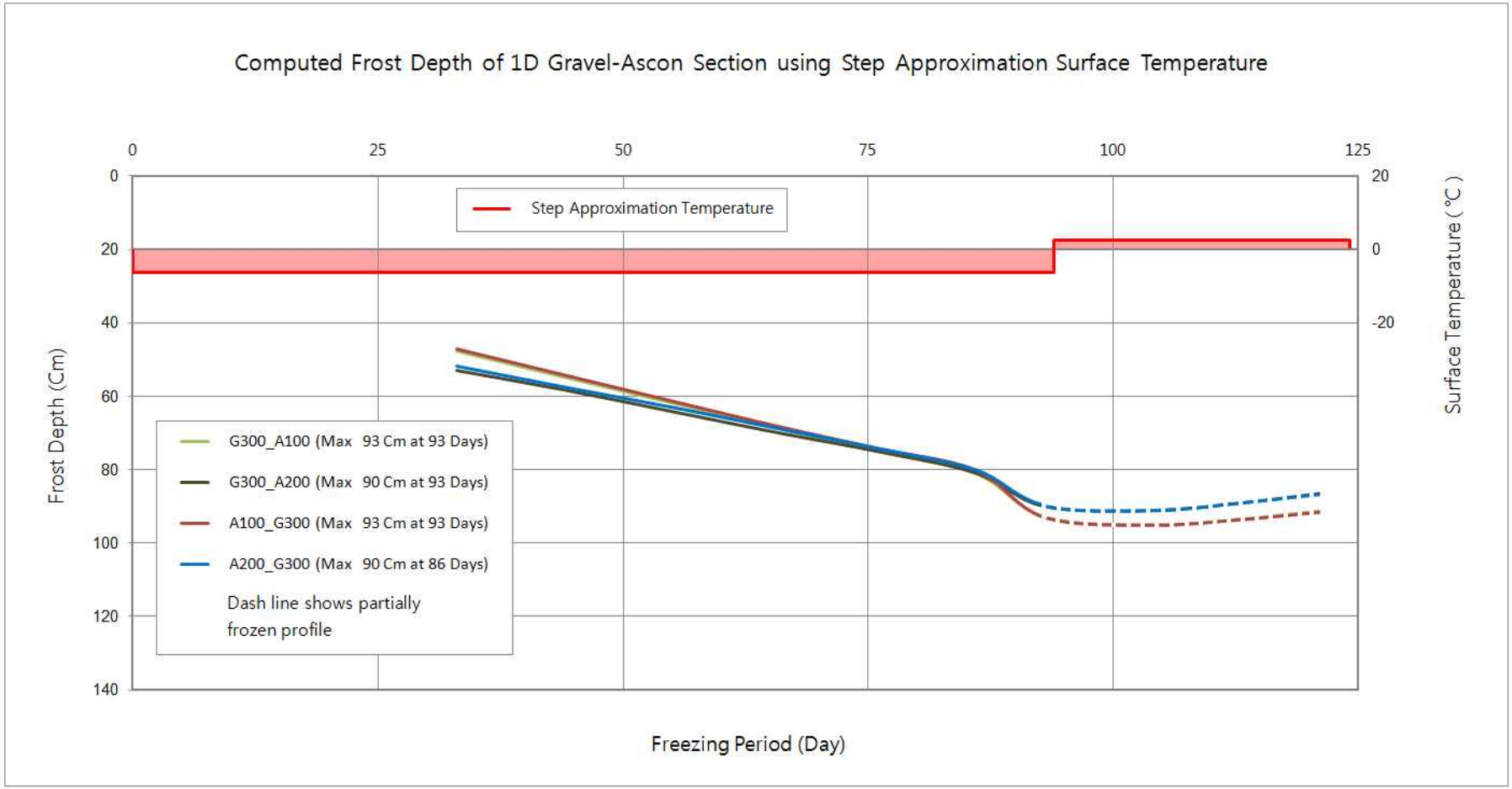



Figure 3.9.50 Computed frost depth of 1D Gravel-Ascon Section using step approximation surface temperature.

4. 융해침하 해석

가. 서론

본 장에서는 실내 융해압밀 실험 Data에 바탕을 두고 있고 현재 실무에서 실용적으로 적용되고 있는 융해침하 산정의 이론식에 대한 설명, 이 이론식들을 사용하여 개발한 융해침하 해석 프로그램 (Thaw Settlement Analysis Program) 사용법, 검증예제 그리고 콘크리트 도상 융해침하 해석예제를 포함한다.

나. 융해침하 이론식

Figure 3.9.51은 Closed-System에서 동결-융해-압밀시 전응력과 유효응력의 응력 경로를 개략적으로 보여 주고 있다. 우선 A점은 정규압밀 (Normally Consolidated) 상태로 유효응력이 외부압력 $P_0$ 과 평행상태를 이루고 있다고 가정하자. 다음으로 수분의 유출이 방지된 Closed-System에서 동결이 완료되면, 공극속의 수분의 결빙팽창으로 간극비는 증가한다 (전응력 경로 A→B).

이상 설명한 동결토가 비배수 상태에서 융해가 완료되면, 결빙팽창했던 수분은 수축되어 간극비는 다시 원상태로 돌아오고 전응력 경로는 B→A이며, 연화현상으로 유효응력 경로는 B→A→C→D로 융해토는 잔류응력 $\sigma_0'$ 을 가진 과압밀 상태로 변화된다.

다음으로 융해토를 배수상태로 하면, 압밀이 진행되고 압밀이 완료되면 간극비는 동결전보다 작은 값을 보여준다 (유효응력 경로 D→E). 이와 같이 동결-융해-압밀에 의하여 발생하는 침하를 융해침하 (Thaw Settlement)라 한다.

다음에 설명하는 이론식은 주어진 외력하에 압밀이 완료된 상태에서의 융해침하 산정식이다.

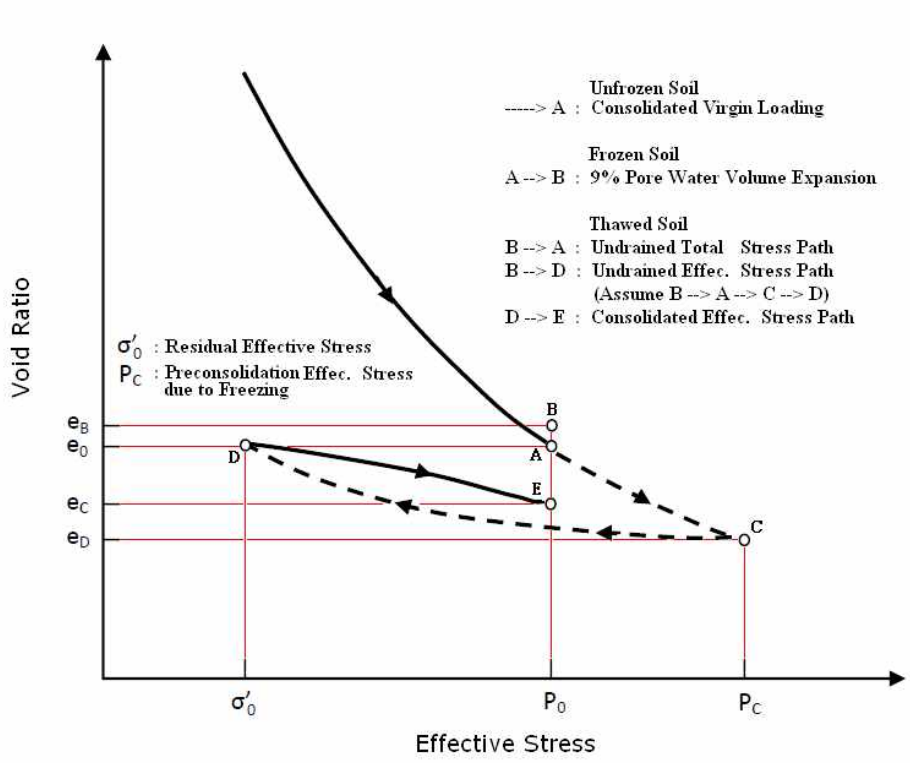



Figure 3.9.51 Schematic stress path in closed-system freeze-thaw cycle (After Nixon and Morgenstern, 1973)

(1) Tsytovich (1958) 식

지표면에서 융해침하량 (s)는 다음과 같다.

$$s = \sum_{i=1}^{n} (A_{oi} \cdot H_i + m_{vi} \cdot H_i \cdot \sigma_i') \qquad (3.9.1)$$

여기서

$n$ : 융해된 지층 수

$H_i$ : 지층 두께

$A_{oi}$ : $\sigma' = 0$에서 단위 침하량 (Figure 3.9.52 참조)

$m_{vi}$ : 체적압축계수 (Figure 3.9.52 참조)

$\sigma_i'$ : 지층 중간에 작용하는 유효응력

$\sigma_i'$은 자중과 지표면에 작용하는 하중을 포함한다.

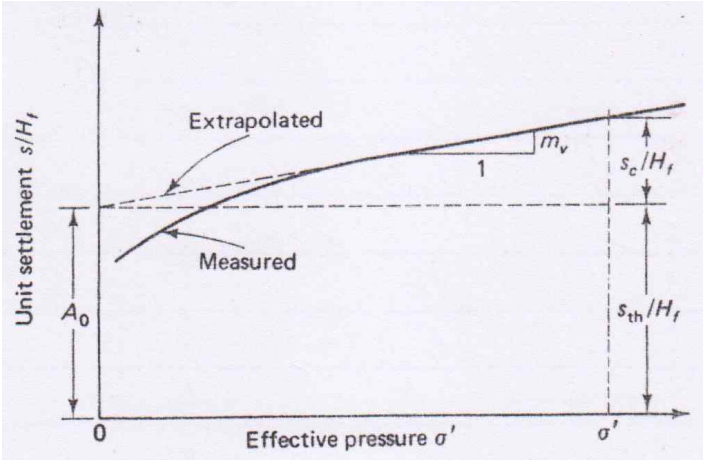



Figure 3.9.52 Thaw settlement curve (After Watson et al., 1973)

(2) Nixon & Morgenstern (1974) 식

간극비가 큰 동결토가 융해하였을 경우 압축지수 ($C_c$)를 사용하여 비선형 융해침하량을 구한 식이다.

$$s = \sum_{i=1}^{n} H_i \cdot \frac{C_{ci}}{1 + e_{fi}} \cdot \log \frac{\sigma_i'}{\sigma_o'} \qquad (3.9.2)$$

여기서

n : 융해된 지층 수

$H_i$ : 지층 두께

$C_{ci}$ : 압축지수

$e_{fi}$ : 동결토의 간극비

$\sigma_o'$ : 계산에 사용된 초기 유효응력 (Figure 3.9.53 참조)

$\sigma_i'$ : 지층 중간에 작용하는 유효응력

압축지수 ($C_c$)는 Figure 3.9.53로부터 다음과 같이 구한다.

$$C_c = \frac{e_f - e_1}{\log(\sigma_1' / \sigma_o')} \tag{3.9.3}$$

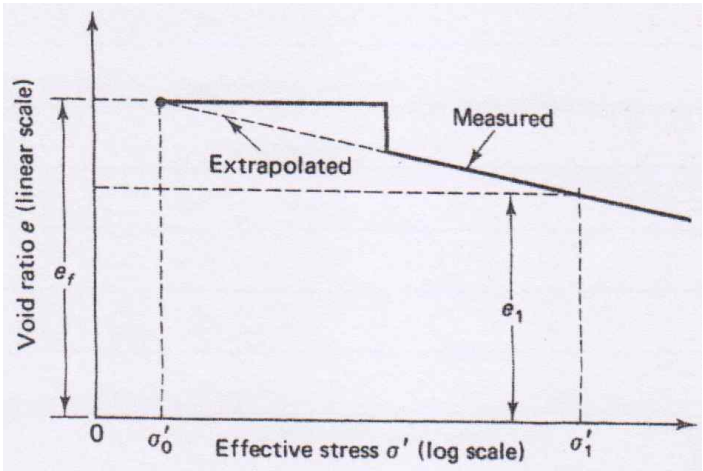



Figure 3.9.53 Nonlinear thaw settlement curve (After Nixon and Morgenstern, 1974)

(3) USSR Building Code (1960)

Figure 3.9.54a는 동결토의 구성상태를 Figure 3.9.54b는 융해토로 주어진 유효응력 ($\sigma'$)에서 압밀이 완료된 구성상태를 보여준다.

따라서 각 지층별 단위 침하량은 다음과 같다.

$$\frac{s}{H_f} = \frac{V_f - V_{th}}{V_f} = \frac{V_{vf} - V_{vth}}{V_f} \tag{3.9.4}$$

여기서

s : 지층 침하량

$H_f$ : 지층 두께

식 3.9.4는 동결토 간극비 ($e_f$)와 융해토 간극비 ($e_{th}$)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{s}{H_f} = \frac{(V_{vf} / V_s) - (V_{vth} / V_s)}{(V_s + V_{vf}) / V_s} = \frac{e_f - e_{th}}{1 + e_f} \qquad (3.9.5)$$

식 3.9.4는 동결토 건조밀도 ($\gamma_{df}$)와 융해토 건조밀도 ($\gamma_{dth}$)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{s}{H_f} = \frac{(V_s + V_{vf}) - (V_s + V_{vth})}{(V_s + V_{vf})}$$

$$= 1 - \frac{w_s / (V_s + V_{vf})}{w_s / (V_s + V_{vth})} \qquad (3.9.6)$$

$$\boxed{\frac{s}{H_f} = 1 - \frac{\gamma_{df}}{\gamma_{dth}}} \qquad (3.9.7)$$

(4) Crory (1973) 식

수평변형이 없는 1-D 융해 침하의 경우 Crory (1973)는 단위 침하량을 동결토의 기본 물성치로 다음과 같이 나타내었다.

$$\boxed{\frac{s}{H_f} = \frac{w_f (1 + 0.09 i_r) - w_{th}}{S_r / G_s + w_f (1 + 0.09 i_r)}} \qquad (3.9.8)$$

여기서

$w_f$ : 동결토 함수비 ($w_f = W_{wf} / W_s$)

$w_{th}$ : 융해토 함수비 ($w_{th} = W_{wth} / W_s$)

$G_s$ : Soil 입자 비중

Iceness ratio ($i_r$)은 다음과 같다.

$$i_r = \frac{w_f - w_u}{w_f} \tag{3.9.9}$$

여기서

$w_u$ : 부동수 함수비 ($w_u = W_{uw} / W_s$)

포화도 ($S_r$)은 다음과 같다.

$$S_r = \frac{G_s (1.09\, w_f - 0.09\, w_u)}{e_f} \tag{3.9.10}$$

여기서

$e_f$ : 간극비 ($e_f = V_{vf} / V_s$)

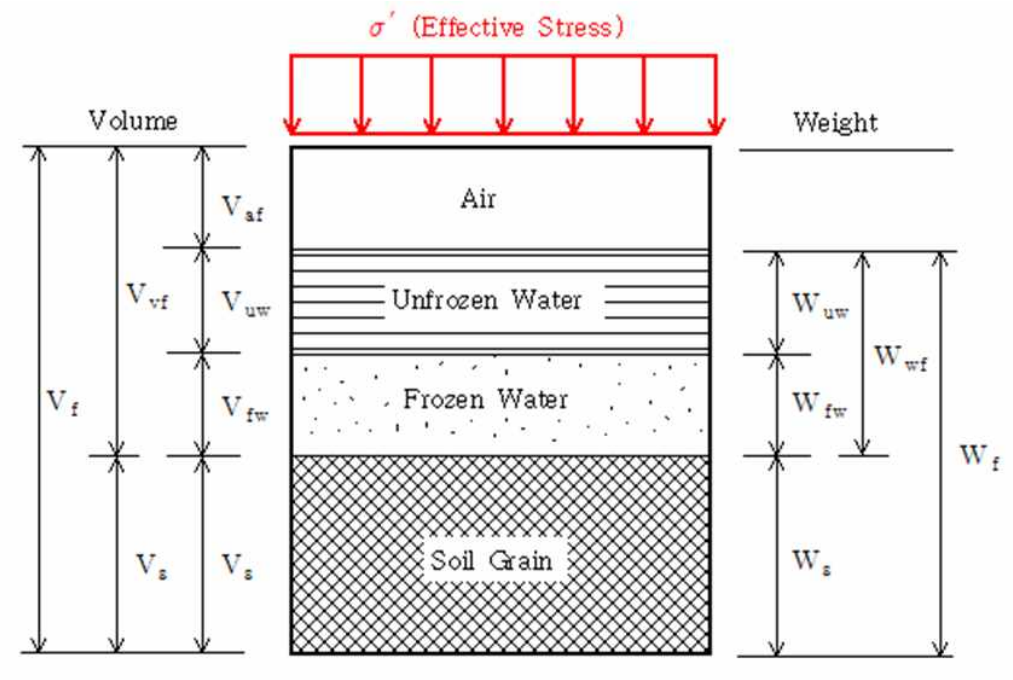



Figure 3.9.54a Block diagram for frozen soil components.

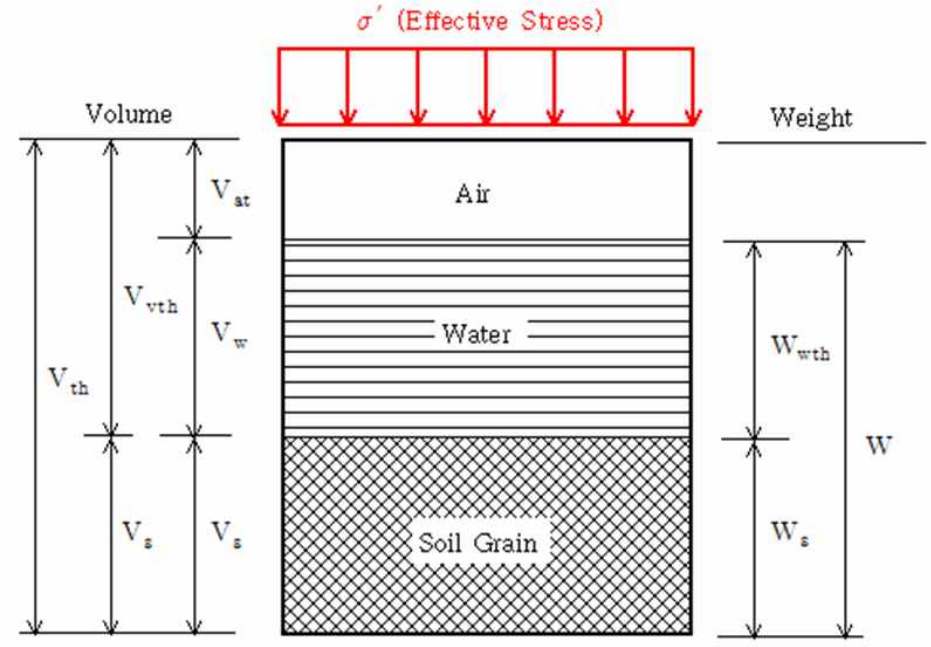



Figure 3.9.54b Block diagram for fully consolidated thawed soil components.

(5) 비배수 융해침하

비배수 상태에서 Ice에서 Water로 상전이에 의한 단위 침하량은 다음과 같다.

$$\frac{s_u}{H_f} = \frac{0.09 \cdot w_f \cdot i_r \cdot \gamma_{df}}{\gamma_w} \qquad (3.9.11)$$

여기서

$s_u$ : 비배수시 지층 침하량

$H_f$ : 지층 두께

$w_f$ : 동결토 함수비

$i_r$ : Iceness ratio

$\gamma_{df}$ : 동결토 건조밀도 (건조 단위중량)

$\gamma_w$ : 물의 단위중량

다. 융해침하 해석 프로그램 (TSAP)

융해침하 해석 프로그램 TSAP (Thaw Settlement Analysis Program)은 융해침하 이론식을 사용하여 개발하였다. 프로그램 TSAP을 사용하여 융해침하량을 구하기 위해서는 먼저 Table 3.9.5의 Thaw settlement user's manual에 따라 준비한 입력 Data 텍스트 File "ThawSettlement.dat"를 프로그램 TSAP 실행 File (TSAP.exe)이 있는 Folder에 저장하여야 한다. Input File "ThawSettlement.dat"이 준비되면 TSAP 실행 File "TSAP.exe"를 더블클릭하여 실행시킨다 (Figure 3.9.55 참조). 해석이 완료되면 계산된 융해침하량은 Output File "ThawSettlement.out"에 저장된다.

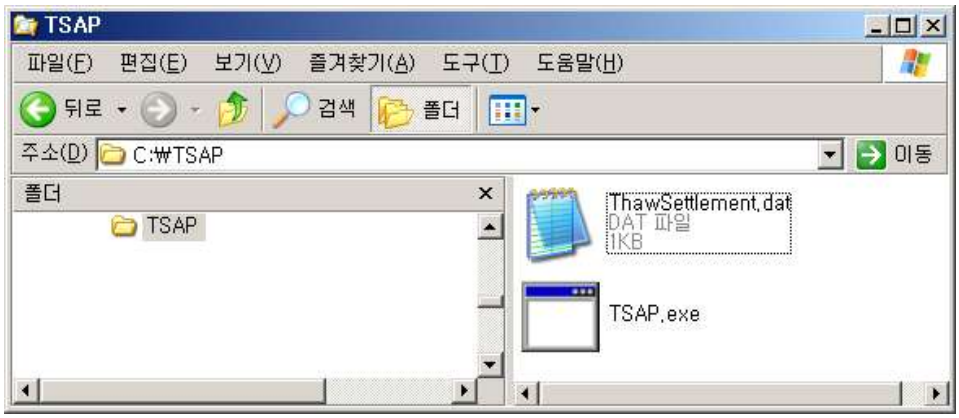



Figure 3.9.55 Execution of program TSAP.

Table 3.9.5 Thaw settlement user's manual

TSAP Input File : ThawSettlement.dat 1

| Card Group | Input Data and Definitions |
|---|---|
| 1 Titles | 1.1<br>**Title**<br>**SubTitle**<br>Title : Project title , SubTitle : Project Subtitle |
| 2 Loads | 2.1<br>**Pload**<br>Pload : Dead load (t/m$^2$) on ground surface |
| 3 Soil / Material Layers | 3.1<br>**Num_Layer**<br>Num_Layer : Total number of layers |
| For Each Layer | 3.2<br>**LayerNo, ModelNo, H, γ**<br>LayerNo : Layer number<br>ModelNo = 0 : No Settlement but weight on underlying layers<br>= 1 : Settlement due to ice-water phase change<br>= 2 : Settlement by Tsytovich (1958)<br>= 3 : Settlement by Nixon & Morgenstern (1974)<br>= 4 : Settlement by USSR Building Code (1960)<br>= 5 : Settlement by Crory (1973)<br>H : Layer thickness (m)<br>γ : Unit weight of soil (t/m$^3$)<br>Above water table, γ is total (bulk) unit weight<br>Below water table, γ is submerged unit weight |
| | 3.2.1<br>[ModelNo = 1 : Settlement due to ice-water phase change]<br>**$\gamma_w$, $\gamma_{df}$, $\omega_f$, $i_r$**<br>$\gamma_w$ : Unit weight of water (t/m$^3$)<br>$\gamma_{df}$ : Frozen dry density of soil (t/m$^3$)<br>$\omega_f$ : Frozen water content<br>$i_r$ : Iceness ratio |

| Card Group | | Input Data and Definitions |
|---|---|---|
| 3 | 3.2 | 3.2.2<br>[ModelNo = 2 : Settlement by Tsytovich (1958)]<br>**$A_o$, $m_v$**<br>$A_o$ : Unit thaw settlement defined by Figure 1<br>$m_v$ : Coefficient of volume change ($m^2/t$) |
| | | 3.2.3<br>[ModelNo = 3 : Settlement by Nixon & Morgenstern (1974)]<br>**$\sigma_o'$, $e_f$, $C_c$**<br>$\sigma_o'$ : Initial effective stress ($t/m^2$)<br>$e_f$ : Frozen void ratio of soil<br>$C_c$ : Compression index |
| | | 3.2.4<br>[ModelNo = 4 : Settlement by USSR Building Code (1960)]<br>**$\gamma_{df}$, $\gamma_{dth}$**<br>$\gamma_{df}$ : Frozen dry density of soil ($t/m^3$)<br>$\gamma_{dth}$ : Thawed dry density of soil ($t/m^3$) |
| | | 3.2.5<br>[ModelNo = 5 : Settlement by Crory (1973)]<br>**$G_s$, $\omega_f$, $\omega_{th}$, $i_r$, $S_r$**<br>$G_s$ : Specific gravity of soil particle<br>$\omega_f$ : Frozen water content of soil<br>$\omega_{th}$ : Thawed water content of soil<br>$i_r$ : Iceness ratio<br>$S_r$ : Total degree of saturation |
| | For Each Layer | |
| Soil / Material Layers | | |

| Card Group | Input Data and Definitions |
|---|---|

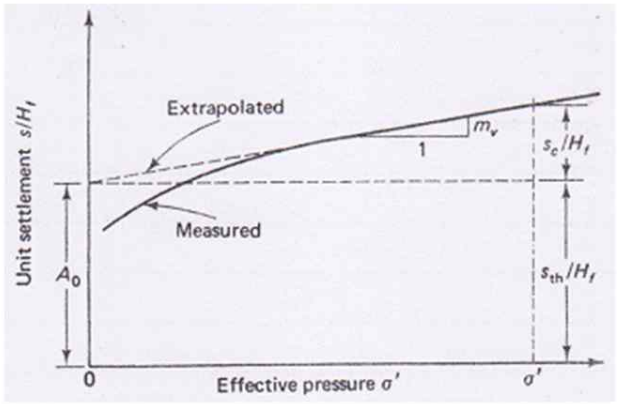



Figure 1. Thaw settlement curve (After Watson et al., 1973)

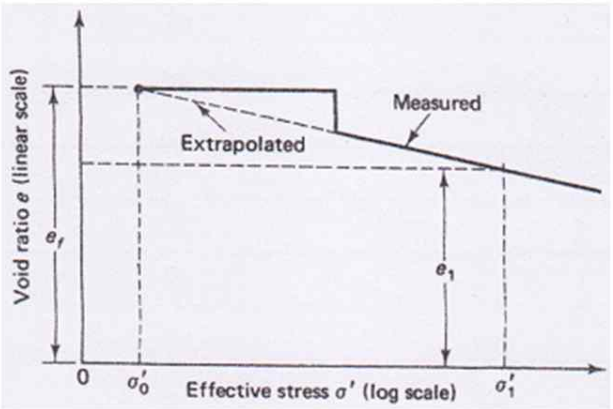



Figure 2. Nonlinear settlement curve (After Nixon and Morgenstern, 1974)

| Card Group | Input Data and Definitions |
|---|---|

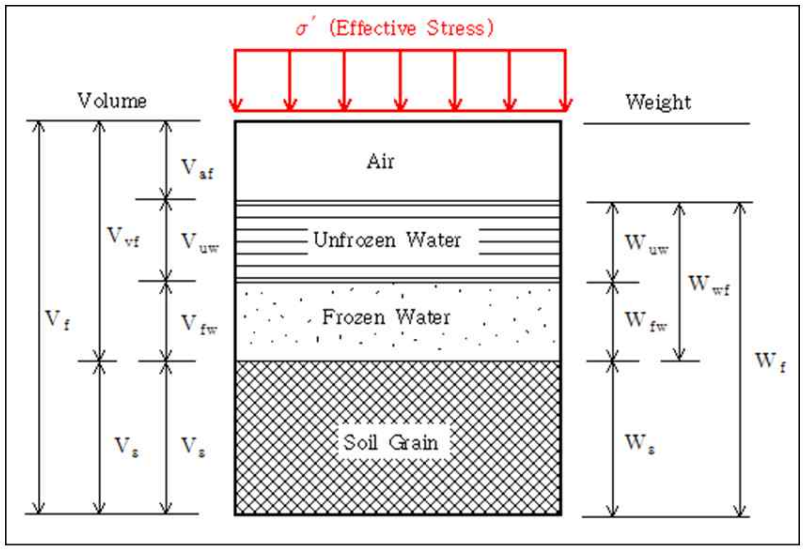



Figure 3a. Block diagram for frozen soil components.

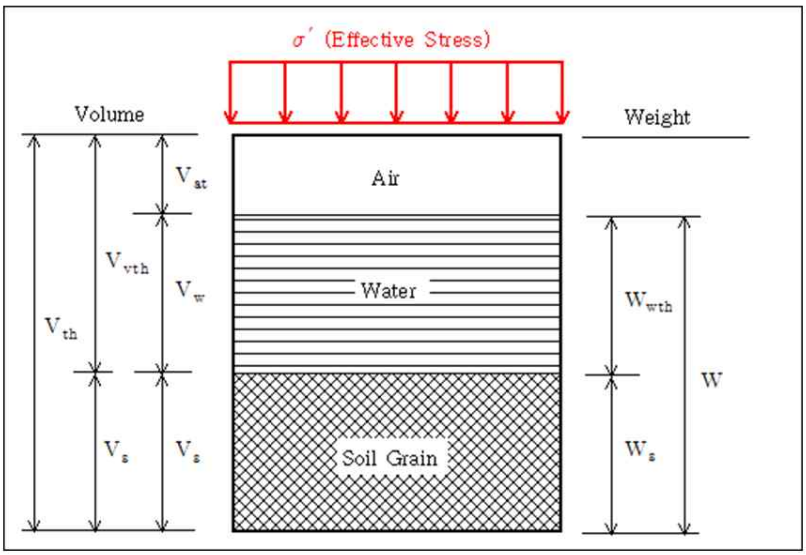



Figure 3b. Block diagram for fully consolidated thawed soil components

| Card Group | Input Data and Definitions |
|---|---|

Void ratio of frozen soil

$$e_f = \frac{V_{vf}}{V_s}$$

Void ratio of thawed soil

$$e_{th} = \frac{V_{vth}}{V_s}$$

Water content of frozen soil

$$w_f = \frac{W_{wf}}{W_s}$$

Water content of thawed soil

$$w_{th} = \frac{W_{wth}}{W_s}$$

Water content of unfrozen water

$$w_u = \frac{W_{uw}}{W_s}$$

Dry density of frozen soil

$$\gamma_{df} = \frac{W_s}{V_f}$$

Dry density of thawed soil

$$\gamma_{dth} = \frac{W_s}{V_{th}}$$

Total degree of saturation

$$S_r = \frac{G_s\,(1.09\,w_f - 0.09\,w_u)}{e_f}$$

Iceness ratio

$$i_r = \frac{w_f - w_u}{w_f}$$

(1) 검증예제

본 검증예제는 Dore and Zubeck (2009)의 Chapter 5에 있는 예제로 Section 4.2.4의 Crory (1973)에 의하여 융해 침하량을 산정한다.

Soil type : Silty clay

| | | | |
|---|---|---|---|
| Thaw depth | H | = | 5.0 m |
| Grain specific gravity | G | = | 2.7 |
| Frozen water content | $w_f$ | = | 58 % |
| Thawed water contect | $w_{th}$ | = | 30 % |
| Unfrozen water content | $w_u$ | = | 15 % |
| Total degree of saturation | $S_r$ | = | 100 % |
| Iceness ratio | $i_r$ | = | $(w_f - w_u) / w_f$ = 0.74138 |

Table 3.9.6은 TSAP input file "ThawSettlement.dat"이고

Table 3.9.7은 TSAP output file "ThawSettlement.out"이다.

TSAP 계산결과 융해침하량은 1.61 m로 Dore and Zubeck (2009)의 융해 침하량 1.6 m와 거의 동일하다.

Table 3.9.6 TSAP input file for verification problem (Thaw Settlement.dat)

```
*
* Sample Input File : ThawSettlement
* Card 1.1
* Title
  Thaw Settlement Analysis
*
* Card 1.2
* SubTitle
  Verification Problem (Frozen Silty Clay)
*
* Card 2.1
* PLoad
  0.0
*
*
* Card 3.1
* Num_Layer
  1
*
* ================================================
*
* Frozen Silty Clay
*
* Card 3.2
* LayerNo     ModelNo   H        Gamma_p(tf/m2)
  1           5         5        1.0
*
* Card 3.2.5
* [ For ModelNo = 5 : Settlement by Crory (1973) ]
* ------------------------------------------------
* G_s         w_f       w_th     i_r       S_r
  2.7         0.58      0.30     0.74138   1.0
*
* ================================================
*
```

Table 3.9.7 TSAP output file for verification problem (ThawSettlement.out)

```
Thaw Settlement Analysis
Verification Problem (Frozen Silty Clay)
Computed Thaw Settlement (mm) = 1611.1
```

(2) 콘크리트 도상 융해침하 해석예제

본 콘크리트 도상 융해침하 예제는 보조도상 두께 300 mm (Case A300)의 1D Section 수치해석에 사용된 단면으로 콘크리트 도상 융해압밀 예제에 사용된 기상 및 물성치와 동일한 값을 사용하여 압밀이 완료된 상태에서의 최종 융해침하량을 구하였다.

주요 입력 Data는 다음과 같다.

해석단면 : Section 2.4의 Case A300

연평균기온 : 10.8℃

동결지수 : 800℃-Days

동결기간 : 93 Days

융해기간 지표면 평균기온 : 2.63℃

융해일 수 : 60 Days

융해 심도 : 126.4 Cm

노반 체적압축계수 $m_v = \frac{(1+\upsilon)(1-2\upsilon)}{(1-\upsilon)\cdot E} = 0.00743\,m^2/t$

노반 수중단위중량 $\gamma_{Sub} = \gamma_{sat} - \gamma_w = 0.82\,t/m^3$

Table 3.9.8은 TSAP input file "ThawSettlement.dat"이고

Table 3.9.9는 TSAP output file "ThawSettlement.out"이다.

TSAP 계산결과 콘크리트 도상 최종 융해 침하량은 2.5 mm이다.

Table 3.9.8 TSAP input file for concrete railway analysis (ThawSettlement.dat)

```
*
* Sample Input File : ThawSettlement
* Card 1.1
* Title
  Concrete Railway Thaw Settlement Analysis
*
* Card 1.2
* SubTitle
  Frozen Silty Clay
*
* Card 2.1
* PLoad
  0.0
*
* Card 3.1
* Num_Layer
  5
*
* ================================================
*
* TCL
*
* Card 3.2
* LayerNo     ModelNo   H (m)      Gamma_p(tf/m2)
  1           0         0.240      2.243
*
* Card 3.2.0
* [ For ModelNo = 0 : No Settlement but Weight ]
* ------------------------------------------
* No input data
*
* ================================================
*
* HSB
*
* Card 3.2
* LayerNo     ModelNo   H (m)      Gamma_p(tf/m2)
  2           0         0.284      2.243
*
```

```
* Card 3.2.0
* [ For ModelNo = 0 : No Settlement but Weight ]
* ------------------------------------------------
* No input data
*
* ================================================
*
* Subbase
*
* Card 3.2
* LayerNo     ModelNo   H       Gamma_p(tf/m2)
  5           2         0.300   1.68
*
* Card 3.2.2
* [ For ModelNo = 2 : Settlement by Tsytovich (1958)]
* ------------------------------------------------
* A_o         m_v
  0.0         0.000119
* ================================================
*
* Added Subgrade
*
* Card 3.2
* LayerNo     ModelNo   H       Gamma_p(tf/m2)
  5           2         0.300   1.785
*
* Card 3.2.2
* [ For ModelNo = 2 : Settlement by Tsytovich (1958)]
* ------------------------------------------------
* A_o         m_v
  0.0         0.000119
* ================================================
*
* Upper Embankment
*
* Card 3.2
* LayerNo     ModelNo   H       Gamma_p(tf/m2)
  5           2         0.140   0.82
*
* Card 3.2.2
* [ For ModelNo = 2 : Settlement by Tsytovich (1958)]
* ------------------------------------------------
* A_o         m_v
  0.0         0.0074286
* ================================================
*
```

Table 3.9.9 TSAP output file for concrete railway analysis (ThawSettlement.out)

```
Concrete Railway Thaw Settlement Analysis
Frozen Silty Clay
Computed Thaw Settlement (mm) =     2.5
```

5. 융해압밀 해석

가. 서론

계절성 한랭지에서 동절기에 동결된 지반이 해빙기를 맞으면 지표면과 동결면에 따뜻한 열이 침투되어 양면에서 융해가 시작된다. 특히 지표면으로부터 진행되는 융해속도에 비해 압밀이 천천히 진행되는 지반에서는 융해로 인해 지반 내에 과잉 간극수압이 발생하고 지반의 강도가 낮아져서 무거운 열차 하중을 받을 경우에 궤도의 침하와 노반의 파괴는 물론 열차 운행의 안전상 문제를 초래할 수 있다. 따라서 이와 같이 융해압밀이 서서히 진행되는 지반에서는 시간에 따른 침하와 잉여 간극수압을 예측하여 사전에 융해로 인한 피해에 대하여 방지대책을 수립하여야 한다.

본 장에서는 1차원 융해압밀에 대하여 이미 게재된 논문의 이론식, 새로 개발한 융해압밀 해석 프로그램 (Freeze-Thaw Consolidation Analysis Program - 1D) FEM 수치해석법, 검증예제, FTCAP-1D 사용법 그리고 콘크리트 도상 융해압밀 해석 예제를 포함한다.

나. 선형 융해압밀 이론해

Morgenstern and Nixon (1971)는 다음과 같은 가정하에 선형 융해압밀 이론식을 유도하였다.

- One dimensional Semi-infinite homogeneous mass of frozen soil (Figure 3.9.56 참조)

- 융해면 (Thaw Plane)은 Neumann의 열전도식으로부터 구하며 시간의 제곱근에 비례한다.

$$X(t) = \alpha \cdot t^{\frac{1}{2}} \tag{3.9.12}$$

여기서

X : 지표면으로부터 융해면까지 깊이

$\alpha$ : 열전도식으로부터 구해지는 상수

t : 시간

- 융해된 지반은 탄성으로 Terzaghi 압밀이론을 따른다.

$$c_v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \qquad (3.9.13)$$

여기서

$u(x, t)$ : 잉여 간극수압

x : 지표면으로부터 깊이

$c_v$ : 압밀계수

- 지표면 경계조건은 Free-draining으로 잉여 간극수압은 Zero이다.

$$\text{At} \quad x = 0, \qquad u = 0 \qquad (3.9.14)$$

- 융해면 (Thaw Plane) 경계조건은 Rigid한 비배수 상태로 융해면에서 상부로 방출되는 잉여 간극수는 Soil Skeleton의 압축에 따르며 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$\text{At} \quad x = X(t), \qquad P_o + \gamma' X - u(X, t) = \frac{c_v \, (\partial u(X, t) / \partial x)}{dX / dt} \qquad (3.9.15)$$

여기서

$P_o$ : 지표면에 작용하는 하중 (압력)

$\gamma'$ : 지반의 수중 단위중량

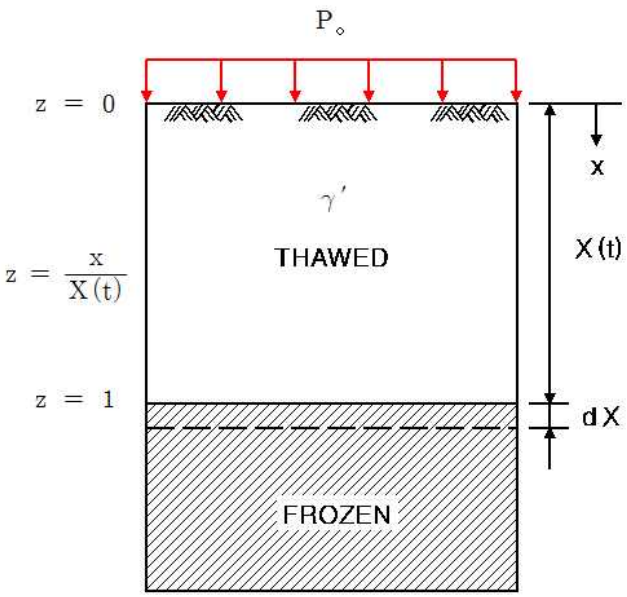



Figure 3.9.56 One dimensional thaw consolidation (After Morgenstern and Nixon, 1971)

상기 가정들을 적용하여 구한 이론 해는 다음과 같다.

$$u(x,t) = \frac{P_o}{erf(R) + \frac{e^{-R^2}}{\sqrt{\pi}\cdot R}} \cdot erf\left(\frac{x}{2\sqrt{c_v \cdot t}}\right) + \frac{\gamma' \cdot x}{1 + \frac{1}{2R^2}} \qquad (3.9.16)$$

여기서 융해압밀비 (Thaw Consolidation Ratio) R은 다음과 같이 주어진다.

$$R = \frac{\alpha}{2\sqrt{c_v}} \qquad (3.9.17)$$

융해가 완료된 후 융해면은 다음과 같다.

$$X_f = L \qquad (3.9.18)$$

Figure 3.9.57은 융해 완료 후 Time Factor에 따른 과잉 간극수압 분포도를 보여 준다.
융해 완료 후 이론해는 다음과 같다.

$$\frac{u(x,t)}{u_f} = 1 - \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)^2}\cdot\cos\frac{(Mx)}{L}\cdot e^{-M^2\cdot T} \tag{3.9.19}$$

여기서

$$u_f = \frac{\gamma'\cdot X_f}{1+\frac{1}{2R^2}} \tag{3.9.20}$$

$$M = (2\cdot n+1)\cdot\frac{\pi}{2} \tag{3.9.21}$$

$$T = \frac{c_v\cdot t}{L^2} \tag{3.9.22}$$

지표면 하중 ($P_o$)에 의한 압밀도 (Degree of Consolidation)은 다음과 같다.

$$\frac{S_t}{S_{max}} = 1 - \frac{erf(R)+(e^{-R^2}-1)\sqrt{\pi}\cdot R}{erf(R)+\frac{e^{-R^2}}{\sqrt{\pi}\cdot R}} \tag{3.9.23}$$

자중에 의한 ($P_o = 0$) 압밀도는 다음과 같다.

$$\frac{S_t}{S_{max}} = \frac{1}{1+2R^2} \tag{3.9.24}$$

여기서 $S_t$는 시간 t 에서 침하이고 최대 침하 $S_{max}$는 융해가 시간 t 에서 완료되었을 경우 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S_{max} = m_v \cdot \left( (P_o \cdot X) + \frac{\gamma' X^2}{2} \right) \qquad (3.9.25)$$

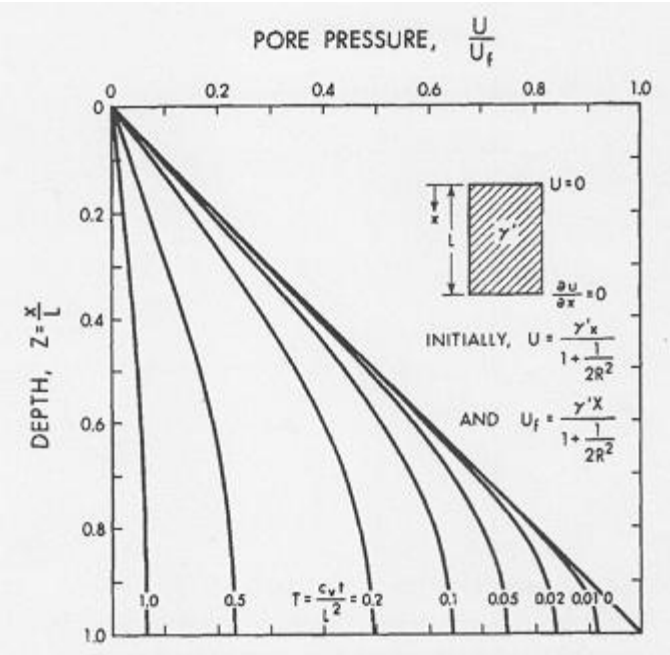



Figure 3.9.57 Excess pore pressure isochrones after completion of thawing (After Morgenstern and Nixon, 1971).

다. FEM 융해압밀 수치해석

지금까지 설명한 융해압밀 이론식은 비선형 응력-변형률 관계를 가지고 있는 일반적인 다층지반에 적용하는데 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 Finite Element Method에 기반을 둔 새로운 융해압밀 수치해석 기법을 사용하여 1차원 동결-융해 압밀 해석프로그램 (FTCAP-1D)을 개발하였다.

(1) FEM 해석기법

본 1차원 융해압밀 해석프로그램과 관련한 가정사항은 다음과 같다.

- 1차원 다층지반으로 열전도 이론에 의한 융해면 이동과 압밀 이론에 의한 압밀은 분리하여 해석한다 (Decoupled heat conduction and consolidation analysis).

- 동결토 융해면 이동은 비선형 열전달 FEM 프로그램 SMAP-T2를 사용하여 구한다.

- 융해압밀은 Multi-Phase (Saturated 또는 Partially Saturated) 지반의 Static, Consolidation, 또는 Dynamic 해석을 수행할 수 있는 범용 2차원 FEM 프로그램 SMAP-2D를 사용하여 구한다.

- 융해압밀 해석시 융해면 이동 (Moving Boundary)은 유한요소의 추가 및 삭제 (Element Activity and Deactivity) 기능을 사용하여 모델링한다. 본 해석기법은 Construction Pore Pressure 문제에 성공적으로 적용되었다 (Kim, 1982).

- 융해토의 Effective Stress-Strain 관계식은 Modified Cam Clay 재료모델을 사용한다.

- 융해면에서 Ice에서 Water로 상전이에 의한 침하는 제 4장에서 설명한 비배수 융해침하식 3.9.11을 사용하는 TSAP 프로그램으로 구한다.

- 융해면에서 융해 즉시 (비배수 상태) 작용하는 Initial Residual Effective Stress ($\sigma_0'$)는 지반의 특성에 따라 관련 논문을 참고하여 구한다.

본 1차원 융해압밀 해석 흐름은 다음과 같다.

Step 1

비선형 열전도 프로그램 SMAP-T2를 사용하여 1차원 동결해석을 수행하여 최종 동결심도를 구하고 그 다음으로 연속하여 융해해석을 수행하여 융해심도 시간이력을 구한다.

Step 2

Step 1에서 구한 최종 동결심도(동결완료 상태)를 유한요소로 분할하여 압밀해석 프로그램

SMAP-2D에 사용한다.

Step 3

융해압밀 해석의 초기 조건으로 최종 동결심도까지 불투수 강체요소 (Impermeable Rigid Element)를 작용시킨다.

Step 4

융해면 이동 (Moving Boundary)을 모델링하기 위하여 융해가 시작된 시간 t = 0에서 지표면에 있는 첫째 불투수 강체요소를 제거하고 투수성 비강체요소 (Permeable and Deformable Element)를 작용시킨다.

Step 5

다음으로 시간 t = $t_1$에서 지표면으로부터 둘째 불투수 강체요소를 제거하고 투수성 비강체요소를 작용시킨다. 여기서 $t_1$은 Step 1 융해심도 시간이력에서 계산된 상부 첫째 요소를 융해하는데 소요되는 시간이다.

Step 6

다음으로 시간 t = $t_2$에서 지표면으로부터 셋째 불투수 강체요소를 제거하고 투수성 비강체요소를 작용시킨다. 여기서 $t_2$는 Step 1 융해심도 시간이력에서 계산된 상부 둘째요소까지 융해하는데 소요되는 시간이다.

Step 7

이상 설명한 바와 같은 방법으로 Top - Down으로 최종 동결심도까지 불투수 강체요소 제거와 투수성 비강체요소를 작용시켜 융해압밀 해석을 수행한다.

Step 8

최종 동결심도까지 융해가 완료된 후 (Post-Thawing)에는 요소 삭제와 추가 없이 침하가 더 이상 진행되지 않을 때까지 (잉여 간극수압이 다 소산될 때까지) 압밀해석을 수행한다.

Step 9

전체 침하량은 이상에서 설명한 압밀 침하량에 Ice-Water 상전이에 의한 침하량 식을 더하여 구한다.

(2) 검증예제

본 검증예제는 새로 개발한 1D 동결-융해 압밀 해석 프로그램 FTCAP_1D (Freeze-Thaw Consolidation Analysis Program-1D)를 검증하기 위하여 앞의 5.(나)에서 설명한 선형 융해 압밀의 Exact Solution과, 다음과 같은 4가지 경우에 대하여 비교하였다 (Table 3.9.10 참조).

Table 3.9.10 Thaw consolidation verification problems.

| Verification | R | $P_o$ ($t/m^2$) | Description |
|---|---|---|---|
| VP-1 | 0.181 | 0.00 | Natural rate |
| VP-2 | 0.700 | 0.00 | Fast rate |
| VP-3 | 0.700 | 0.82 | Fast rate with surface load |
| VP-4 | 0.700 | 0.82 (*) | Fast rate with top gravel layer |

R : Thaw consolidation ratio $R = \alpha / 2\sqrt{C_v}$

$\alpha$ : Thaw rate $\alpha = X / t^{\frac{1}{2}}$ where X is thaw depth

$C_v$ : Consolidation coefficient, $C_v = 0.09504\ m^2/day$ is used

$P_o$ : Applied surface load

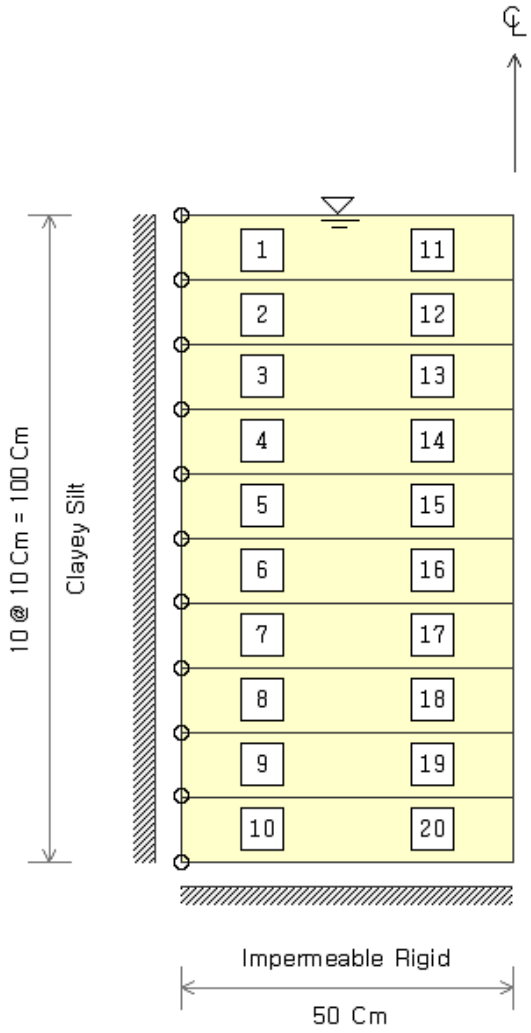
(*) : Top gravel layer which is equivalent to $P_o = 0.82\ t/m^2$

(가) 검증예제 1 (VP-1)

Figure 3.9.58은 검증예제 1에 사용된 개략적인 단면과 융해 진행을 모델링하기 위하여 앞의 5.(다)에서 설명한 Element Activity Data를 보여 주고 있다.

Table 3.9.11은 융해가 완료된 시간 (T = 0.0)과 융해가 완료된 후 Time Factor T = 0.2에서의 간극수압 분포를 Exact Solution과 비교한 표이고 Figure 3.9.59는 Table 3.9.11의 값을 그래프로 비교한 것이다. Figure 3.9.59에서 보는 바와 같이 본 검증예제는 융해압밀비 (Thaw Consolidation Ratio)가 R = 0.181로 작은 값이어서 융해로 인하여 발생한 과잉 간극수압은 작은 값을 보여준다.

Figure 3.9.60은 지표면에서의 침하이력 그래프로 본 예제는 융해속도가 느리고 상대적으로 압밀이 빠르게 이루어져서 지표면 침하는 융해속도에 비례하여 증가하며 융해가 완료된 시간 t = 80.15 Day에서 FEM 계산값은 Exact Solution 침하량 87.5 mm에 근사한 값을 보여준다.




Thawing rate $X\,(m) = 0.1117\sqrt{t\,(day)}$

Thawing simulated by element activity.

| Elastic Element Activity | |
|---|---|
| Element Number | Active Time (Day) |
| 1 | 0.200 |
| 2 | 1.800 |
| 3 | 5.010 |
| 4 | 9.820 |
| 5 | 16.230 |
| 6 | 24.240 |
| 7 | 33.860 |
| 8 | 45.080 |
| 9 | 57.910 |
| 10 | 72.300 |

Elements 1~10 : Permeable elastic

Elements 11~20 : Impermeable rigid

Rigid elements are initially active and deactive at time when corresponding elastic elements are active.

Example : Rigid element 11 is initially active and deactive when the elastic element 1 is active.

Figure 3.9.58 Schematic section for natural thawing rate (VP-1).

Table 3.9.11 Pore fluid pressure profile for natural thawing rate (VP-1).

| Depth (Cm) | Pore Fluid Pressure ($t/m^2$) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | T = 0.0 | | T = 0.2 | | $\gamma_w \cdot d$ |
| | FEM | Exact | FEM | Exact | |
| 0 | | 0.0 | | 0.0 | 0.00 |
| 5 | 0.0520 | 0.0525 | 0.0512 | | 0.05 |
| 10 | | 0.1051 | | 0.1038 | 0.10 |
| 15 | 0.1588 | 0.1576 | 0.1535 | | 0.15 |
| 20 | | 0.2101 | | 0.2077 | 0.20 |
| 25 | 0.2595 | 0.2626 | 0.2558 | | 0.25 |
| 30 | | 0.3152 | | 0.3111 | 0.30 |
| 35 | 0.3630 | 0.3677 | 0.3579 | | 0.35 |
| 40 | | 0.4202 | | 0.4147 | 0.40 |
| 45 | 0.4662 | 0.4727 | 0.4599 | | 0.45 |
| 50 | | 0.5253 | | 0.5177 | 0.50 |
| 55 | 0.5690 | 0.5778 | 0.5616 | | 0.55 |
| 60 | | 0.6303 | | 0.6202 | 0.60 |
| 65 | 0.6713 | 0.6828 | 0.6630 | | 0.65 |
| 70 | | 0.7354 | | 0.7222 | 0.70 |
| 75 | 0.7731 | 0.7879 | 0.7641 | | 0.75 |
| 80 | | 0.8404 | | 0.8238 | 0.80 |
| 85 | 0.8743 | 0.8929 | 0.8648 | | 0.85 |
| 90 | | 0.9455 | | 0.9246 | 0.90 |
| 95 | 0.9749 | 0.9980 | 0.9652 | | 0.95 |
| 100 | | 1.0505 | | 1.0251 | 1.00 |

T : Time Factor $T = C_v \cdot t / L^2$, T = 0 represents completion of thawing.

$\gamma_w \cdot d$ : Hydrostatic pressure at depth d.

FEM : FTCAP_1D solution using SMAP-2D as solver.

Exact : Exact closed form solution (Morgenstern and Nixton, 1971).

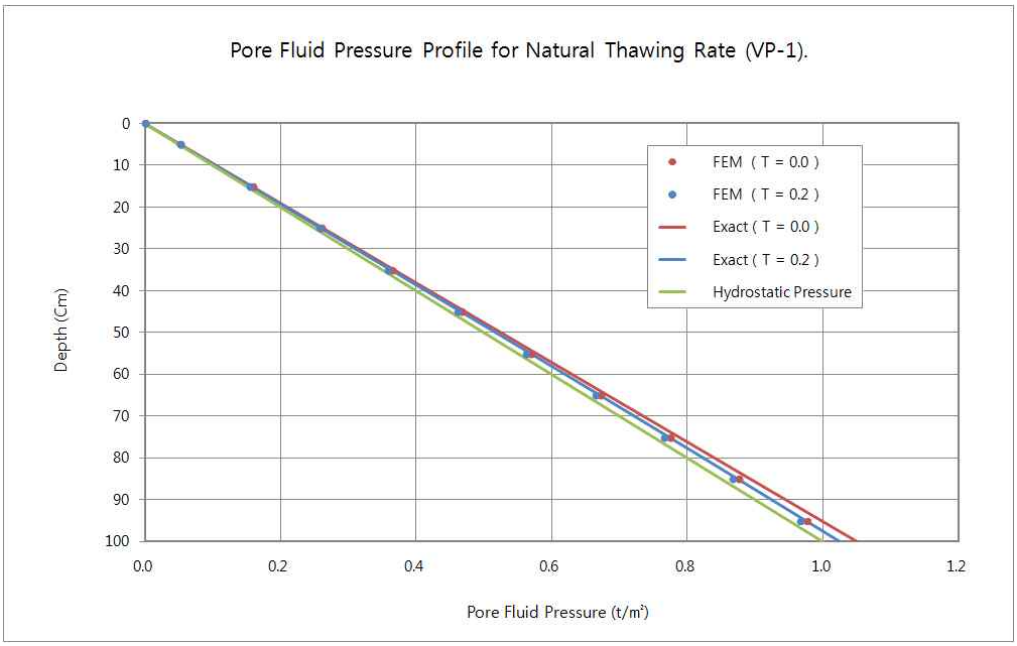



Figure 3.9.59 Pore fluid pressure profile for natural thawing rate (VP-1).

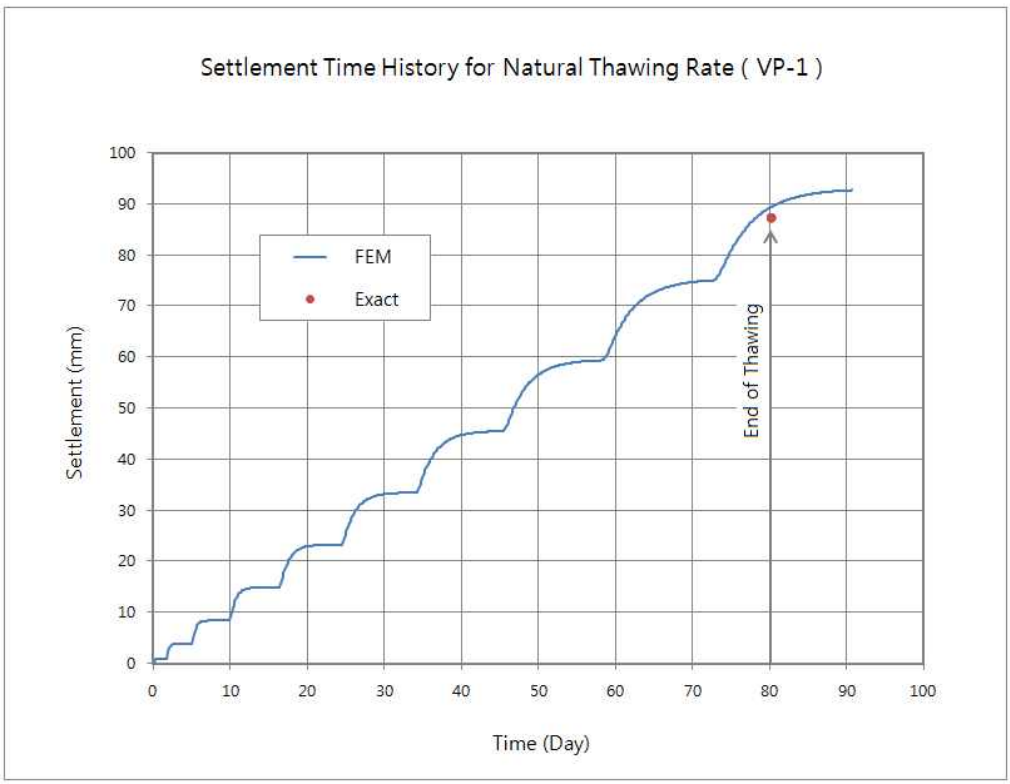


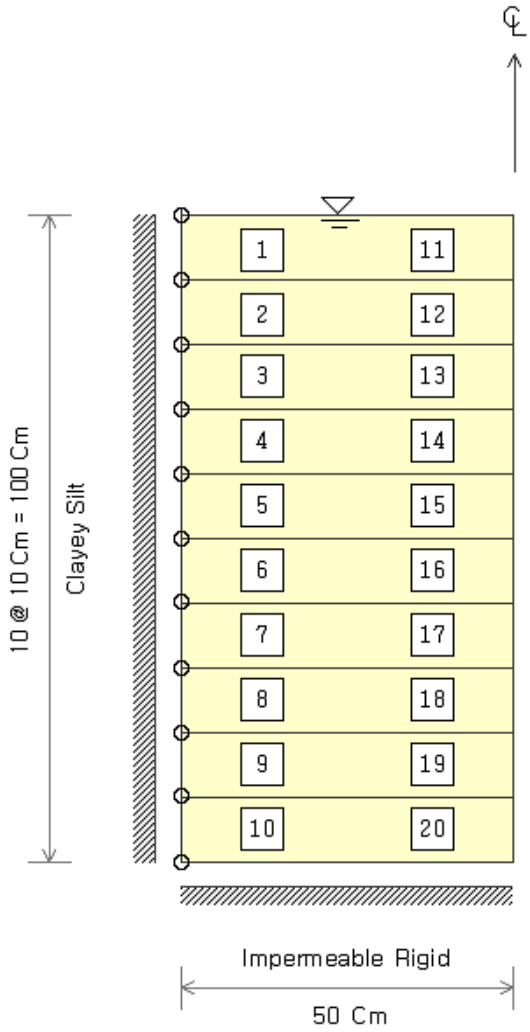

Figure 3.9.60 Settlement time history for natural thawing rate (VP-1).

(나) 검증예제 2 (VP-2)

Figure 3.9.61은 검증예제 2에 사용된 개략적인 단면과 융해 진행을 모델링하기 위하여 앞의 5.(다)에서 설명한 Element Activity Data를 보여 주고 있다.

Table 3.9.12는 융해가 완료된 시간 (T = 0.0)과 융해가 완료된 후 Time Factor T = 0.2에서의 간극수압 분포를 Exact Solution과 비교한 표이고 Figure 3.9.62는 Table 3.9.12의 값을 그래프로 비교한 것이다. Figure 3.9.62에서 보는 바와 같이 본 검증예제는 융해압밀비 (Thaw Consolidation Ratio)가 R = 0.7로 큰 값이어서 융해로 인하여 발생한 과잉 간극수압은 비교적 큰 값으로 융해가 완료된 직후 과잉 간극수압은 정수압 (Hydrostatic Pressure)보다 40% 정도 큰 값을 보여 준다. 본 FEM 해석 결과는 Exact Solution에 근사한 값을 보여 준다.

Figure 3.9.63은 지표면에서의 침하이력 그래프로 본 예제는 융해속도가 빠르고 상대적으로 압밀이 느리게 이루어져서 융해가 완료된 직후 지표면 침하는 최종 침하량의 50% 정도를 보여 주고 있으며 FEM 해석 결과는 Exact Solution 값과 거의 동일한 값을 보여준다.




Thawing rate $X\ (m) = 0.4316\sqrt{t\ (day)}$

Thawing simulated by element activity.

| Elastic Element Activity | |
|---|---|
| Element Number | Active Time (Day) |
| 1 | 0.013 |
| 2 | 0.125 |
| 3 | 0.333 |
| 4 | 0.667 |
| 5 | 1.083 |
| 6 | 1.625 |
| 7 | 2.250 |
| 8 | 3.000 |
| 9 | 3.875 |
| 10 | 4.833 |

Elements 1~10 : Permeable elastic

Elements 11~20 : Impermeable rigid

Rigid elements are initially active and deactive at time when corresponding elastic elements are active.

Example : Rigid element 11 is initially active and deactive when the elastic element 1 is active.

Figure 3.9.61 Schematic section for fast thawing rate (VP-2).

Table 3.9.12 Pore fluid pressure profile for fast thawing rate (VP-2).

| Depth (Cm) | Pore Fluid Pressure ($t/m^2$) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | T = 0.0 | | T = 0.2 | | $\gamma_w \cdot d$ |
| | FEM | Exact | FEM | Exact | |
| 0 | | 0.0 | | 0.0 | 0.00 |
| 5 | 0.0699 | 0.0703 | 0.0657 | | 0.05 |
| 10 | | 0.1406 | | 0.1308 | 0.10 |
| 15 | 0.2100 | 0.2109 | 0.1966 | | 0.15 |
| 20 | | 0.2812 | | 0.2617 | 0.20 |
| 25 | 0.3509 | 0.3515 | 0.3264 | | 0.25 |
| 30 | | 0.4218 | | 0.3893 | 0.30 |
| 35 | 0.4932 | 0.4921 | 0.4544 | | 0.35 |
| 40 | | 0.5623 | | 0.5185 | 0.40 |
| 45 | 0.6370 | 0.6326 | 0.5799 | | 0.45 |
| 50 | | 0.7029 | | 0.6421 | 0.50 |
| 55 | 0.7818 | 0.7732 | 0.7023 | | 0.55 |
| 60 | | 0.8435 | | 0.7624 | 0.60 |
| 65 | 0.9254 | 0.9138 | 0.8210 | | 0.65 |
| 70 | | 0.9841 | | 0.8786 | 0.70 |
| 75 | 1.0640 | 1.0544 | 0.9355 | | 0.75 |
| 80 | | 1.1247 | | 0.9912 | 0.80 |
| 85 | 1.1940 | 1.1950 | 1.0450 | | 0.85 |
| 90 | | 1.2653 | | 1.0981 | 0.90 |
| 95 | 1.3100 | 1.3356 | 1.1500 | | 0.95 |
| 100 | | 1.4059 | | 1.2013 | 1.00 |

T : Time Factor $T = C_v \cdot t / L^2$, T = 0 represents completion of thawing.

$\gamma_w \cdot d$ : Hydrostatic pressure at depth d.

FEM : FTCAP_1D solution using SMAP-2D as solver.

Exact : Exact closed form solution (Morgenstern and Nixton, 1971).

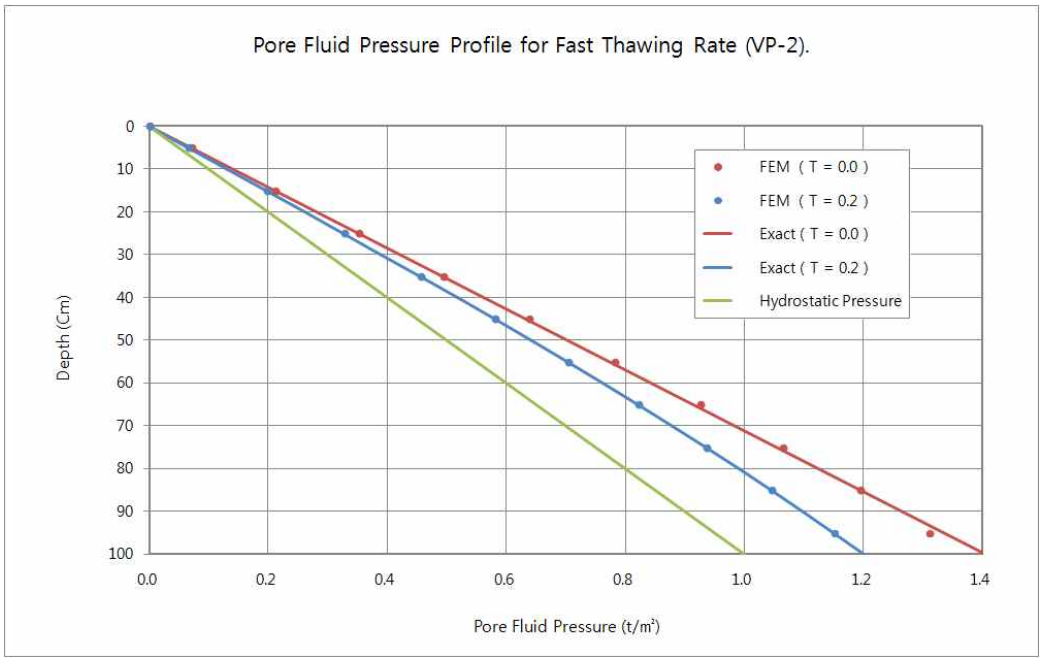



Figure 3.9.62 Pore fluid pressure profile for fast thawing rate (VP-2).

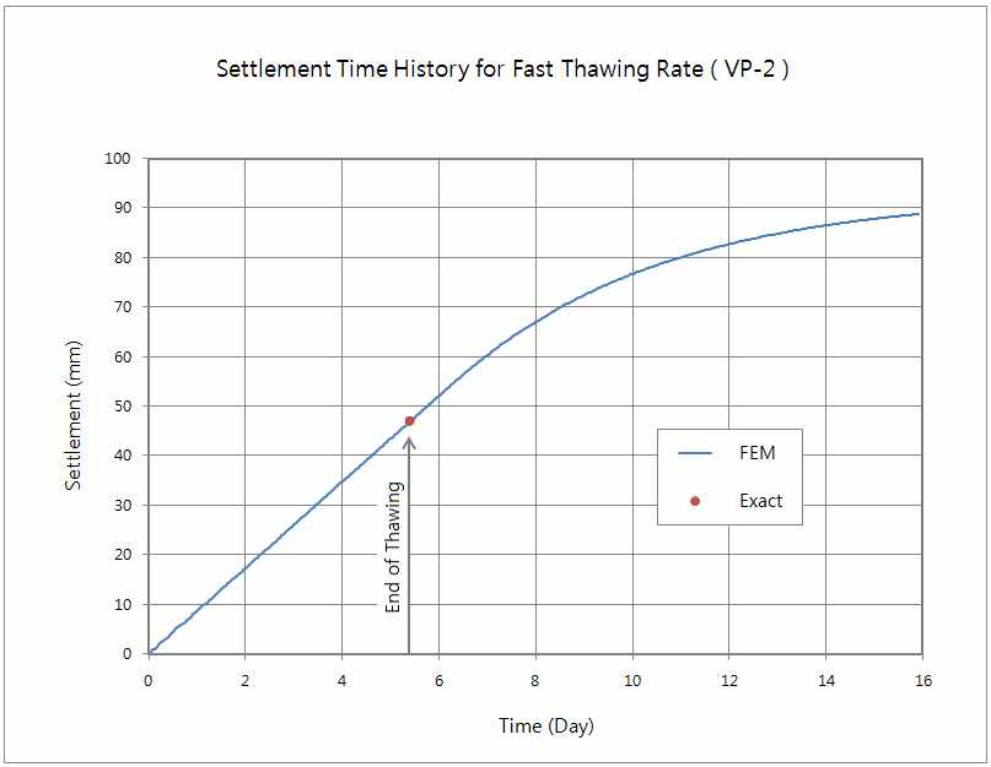


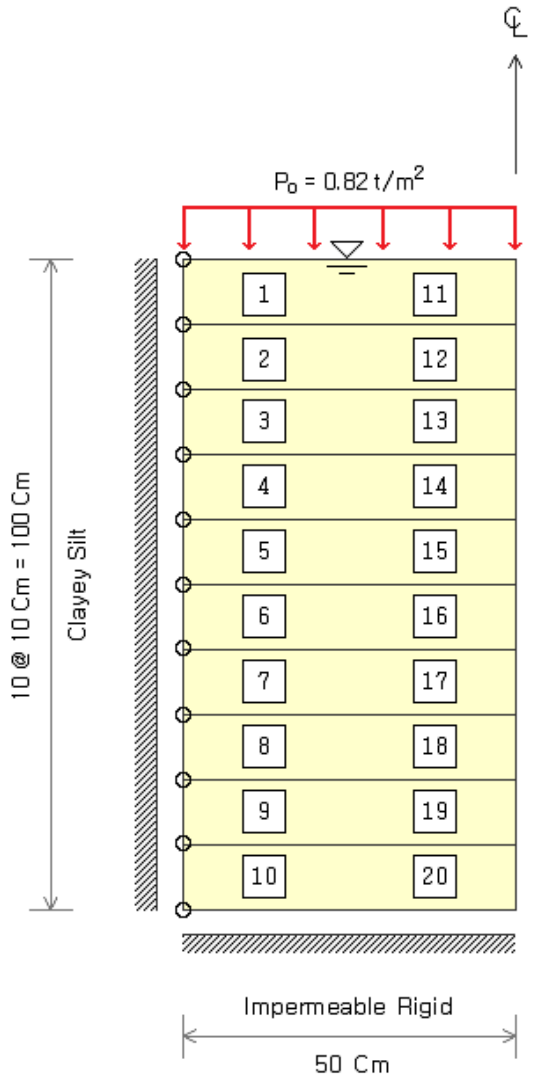

Figure 3.9.63 Settlement time history for fast thawing rate (VP-2).

(다) 검증예제 3 (VP-3)

Figure 3.9.64는 검증예제 3에 사용된 개략적인 단면과 융해 진행을 모델링하기 위하여 앞의 5.(다)에서 설명한 Element Activity Data를 보여 준고 있다. 본 검증예제는 검증예제 VP-2에 지표면 하중 $P_0$ = 0.82 $t/m^2$ 이 작용하는 경우이다.

Table 3.9.13은 융해가 완료된 시간 (T = 0.0)과 융해가 완료된 후 Time Factor T = 0.2에서의 간극수압 분포를 Exact Solution과 비교한 표이고 Figure 3.9.65는 Table 3.9.13의 값을 그래프로 비교한 것이다. Figure 3.9.65에서 보는 바와 같이 본 검증예제는 융해압밀비 (Thaw Consolidation Ratio)가 R = 0.7로 크고 더욱이 지표면에서 하중이 작용하여 융해로 인하여 발생한 과잉 간극수압은 지표면 하중이 없는 검증예제 VP-2 보다도 큰 값으로 융해가 완료된 직후 과잉 간극수압은 정수압 (Hydrostatic Pressure) 보다 90% 큰 값을 보여 준다. 본 FEM 해석 결과는 Exact Solution에 근사한 값을 보여 준다.

Figure 3.9.66은 지표면에서의 침하이력 그래프로 융해가 진행되는 중에는 포물선 모양으로 초기에는 침하가 빨리 진행되는 양상을 보여 주고 있고 융해가 완료된 직후 지표면 침하는 최종 침하량의 62% 정도를 보여 주고 있으며 FEM 해석 결과는 Exact Solution 값과 거의 동일한 값을 보여 준다.




Thawing rate $X\ (m) = 0.4316\sqrt{t\ (day)}$

Thawing simulated by element activity.

| Elastic Element Activity | |
|---|---|
| Element Number | Active Time (Day) |
| 1 | 0.013 |
| 2 | 0.125 |
| 3 | 0.333 |
| 4 | 0.667 |
| 5 | 1.083 |
| 6 | 1.625 |
| 7 | 2.250 |
| 8 | 3.000 |
| 9 | 3.875 |
| 10 | 4.833 |

Elements 1~10 : Permeable elastic

Elements 11~20 : Impermeable rigid

Rigid elements are initially active and deactive at time when corresponding elastic elements are active.

Example : Rigid element 11 is initially active and deactive when the elastic element 1 is active.

Figure 3.9.64 Schematic section for fast thawing rate with applied load (VP-3).

Table 3.9.13 Pore fluid pressure profile for fast thawing rate with applied load (VP-3).

| Depth (Cm) | Pore Fluid Pressure ($t/m^2$) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | T = 0.0 | | T = 0.2 | | $\gamma_w \cdot d$ |
| | FEM | Exact | FEM | Exact | |
| 0 | | 0.0 | | 0.0 | 0.00 |
| 5 | 0.0971 | 0.0980 | 0.0853 | | 0.05 |
| 10 | | 0.1960 | | 0.1671 | 0.10 |
| 15 | 0.2920 | 0.2938 | 0.2550 | | 0.15 |
| 20 | | 0.3914 | | 0.3341 | 0.20 |
| 25 | 0.4875 | 0.4888 | 0.4223 | | 0.25 |
| 30 | | 0.5858 | | 0.4941 | 0.30 |
| 35 | 0.6842 | 0.6825 | 0.5853 | | 0.35 |
| 40 | | 0.7787 | | 0.6576 | 0.40 |
| 45 | 0.8818 | 0.8744 | 0.7427 | | 0.45 |
| 50 | | 0.9695 | | 0.8088 | 0.50 |
| 55 | 1.0790 | 1.0640 | 0.8930 | | 0.55 |
| 60 | | 1.1579 | | 0.9529 | 0.60 |
| 65 | 1.2720 | 1.2512 | 1.0350 | | 0.65 |
| 70 | | 1.3437 | | 1.0882 | 0.70 |
| 75 | 1.4540 | 1.4354 | 1.1680 | | 0.75 |
| 80 | | 1.5264 | | 1.2156 | 0.80 |
| 85 | 1.6150 | 1.6166 | 1.2900 | | 0.85 |
| 90 | | 1.7060 | | 1.3306 | 0.90 |
| 95 | 1.7480 | 1.7946 | 1.4010 | | 0.95 |
| 100 | | 1.8823 | | 1.4376 | 1.00 |

T : Time Factor $T = C_v \cdot t / L^2$, T = 0 represents completion of thawing.

$\gamma_w \cdot d$ : Hydrostatic pressure at depth d.

FEM : FTCAP_1D solution using SMAP-2D as solver.

Exact : Exact closed form solution (Morgenstern and Nixton, 1971).

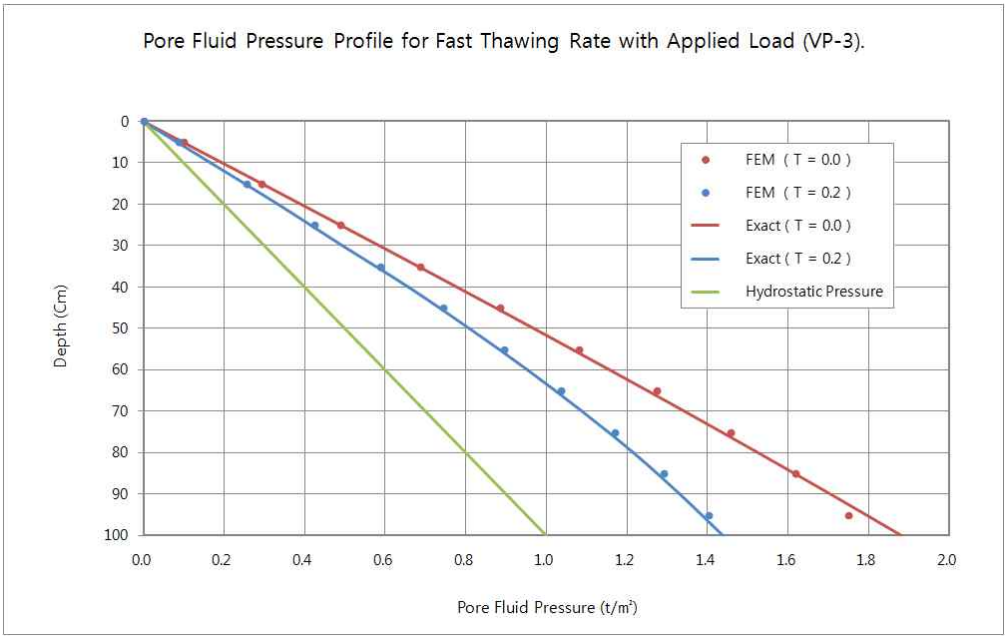



Figure 3.9.65 Pore fluid pressure profile for fast thawing rate with applied load (VP-3).

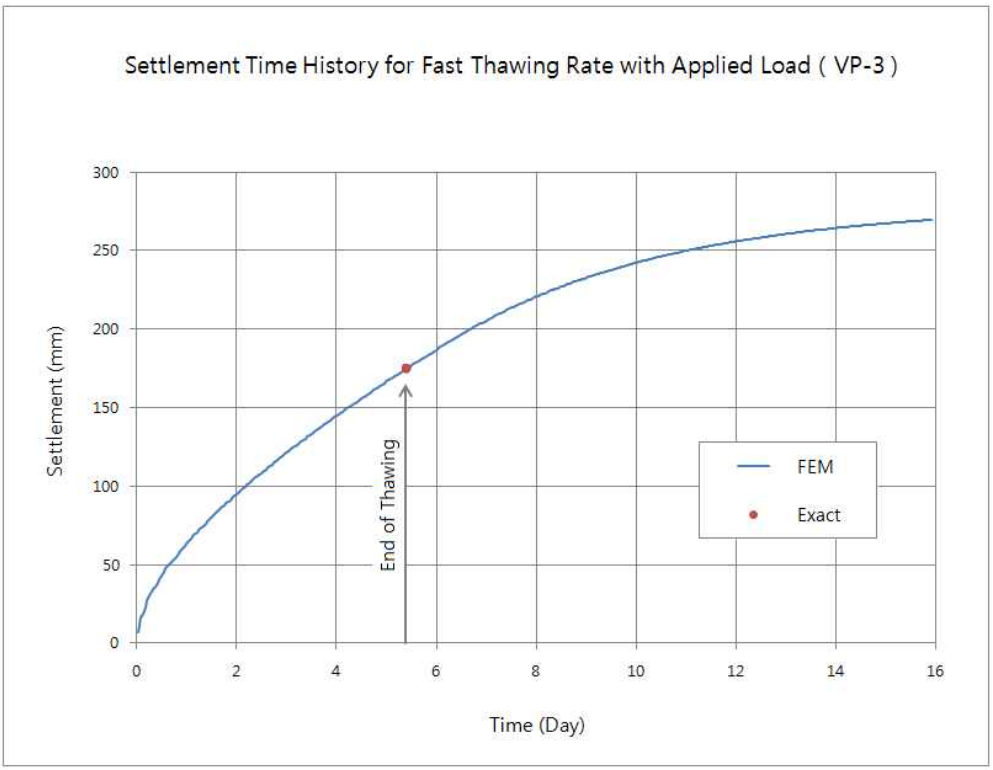



Figure 3.9.66 Settlement time history for fast thawing rate with applied load (VP-3).

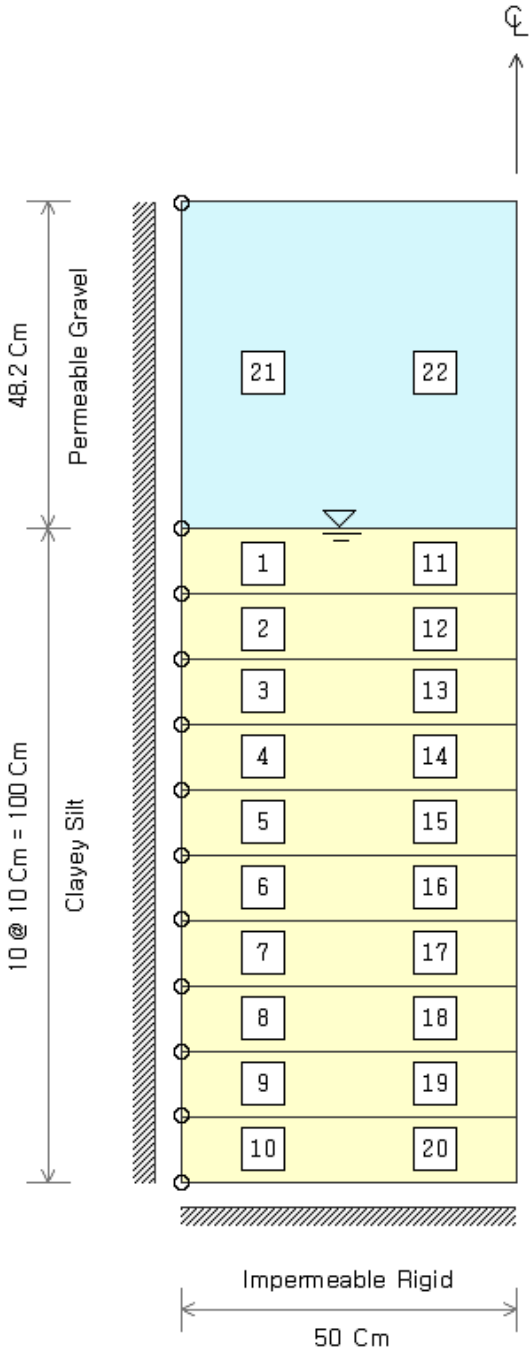
(라) 검증예제 4 (VP-4)

Figure 3.9.67은 검증예제 4에 사용한 개략적인 단면과 융해 진행을 모델링하기 위하여 앞의 5.(다)에서 설명한 Element Activity Data를 보여 주고 있다.

본 검증예제는 검증예제 VP-2에 상부 자갈층이 있는 경우로 자갈층 두께 48.2 Cm는 지표면 하중 $P_0 = 0.82\ t/m^2$ 에 해당하므로 본 검증예제는 실제로는 검증예제 VP-3과 동일한 경우이다.

Table 3.9.14는 융해가 완료된 시간 (T = 0.0)과 융해가 완료된 후 Time Factor T = 0.2에서의 간극수압 분포를 Exact Solution과 비교한 표이고 Figure 3.9.68은 Table 3.9.14의 값을 그래프로 비교한 것이다. Figure 3.9.68은 검증예제 VP-3의 Figure 3.9.65와 거의 동일한 값을 보여 주고 있다. 따라서 본 예제의 자갈층은 융해압밀 침하 해석에서 하중으로 작용됨을 알 수 있다.

Figure 3.9.69는 지표면에서의 침하이력 그래프로 검증예제 VP-3의 Figure 3.9.66과 거의 동일하며 융해가 완료된 직후 FEM 해석 결과는 Exact Solution과 거의 동일한 값을 보여준다.




Thawing rate $X\ (m) = 0.4316\sqrt{t\ (day)}$
Thawing starts from clayey silt.
Thawing simulated by element activity.

| Elastic Element Activity | |
|---|---|
| Element Number | Active Time (Day) |
| 1 | 0.013 |
| 2 | 0.125 |
| 3 | 0.333 |
| 4 | 0.667 |
| 5 | 1.083 |
| 6 | 1.625 |
| 7 | 2.250 |
| 8 | 3.000 |
| 9 | 3.875 |
| 10 | 4.833 |
| 21 | 0.000 |

Elements 1~10 & 21 : Permeable elastic
Elements 11~20 & 22 : Impermeable rigid
Rigid elements are initially active and deactive at time when corresponding elastic elements are active.
Example : Rigid element 11 is initially active and deactive when the elastic element 1 is active.

Figure 3.9.67 Schematic section for fast thawing rate with top gravel layer (VP-4).

Table 3.9.14 Pore fluid pressure profile for fast thawing rate with top gravel layer (VP-4).

| Depth (Cm) | Pore Fluid Pressure ($t/m^2$) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | T = 0.0 | | T = 0.2 | | $\gamma_w \cdot d$ |
| | FEM | Exact | FEM | Exact | |
| 0 | | 0.0 | | 0.0 | 0.00 |
| 5 | 0.0970 | 0.0980 | 0.0850 | | 0.05 |
| 10 | | 0.1960 | | 0.1671 | 0.10 |
| 15 | 0.2922 | 0.2938 | 0.2551 | | 0.15 |
| 20 | | 0.3914 | | 0.3341 | 0.20 |
| 25 | 0.4875 | 0.4888 | 0.4222 | | 0.25 |
| 30 | | 0.5858 | | 0.4941 | 0.30 |
| 35 | 0.6843 | 0.6825 | 0.5853 | | 0.35 |
| 40 | | 0.7787 | | 0.6576 | 0.40 |
| 45 | 0.8821 | 0.8744 | 0.7427 | | 0.45 |
| 50 | | 0.9695 | | 0.8088 | 0.50 |
| 55 | 1.0800 | 1.0640 | 0.8931 | | 0.55 |
| 60 | | 1.1579 | | 0.9529 | 0.60 |
| 65 | 1.2720 | 1.2512 | 1.0350 | | 0.65 |
| 70 | | 1.3437 | | 1.0882 | 0.70 |
| 75 | 1.4540 | 1.4354 | 1.1670 | | 0.75 |
| 80 | | 1.5264 | | 1.2156 | 0.80 |
| 85 | 1.6140 | 1.6166 | 1.2900 | | 0.85 |
| 90 | | 1.7060 | | 1.3306 | 0.90 |
| 95 | 1.7470 | 1.7946 | 1.4010 | | 0.95 |
| 100 | | 1.8823 | | 1.4376 | 1.00 |

T : Time Factor $T = C_v \cdot t / L^2$, T = 0 represents completion of thawing.

$\gamma_w \cdot d$ : Hydrostatic pressure at depth d.

FEM : FTCAP_1D solution using SMAP-2D as solver.

Exact : Exact closed form solution (Morgenstern and Nixton, 1971).

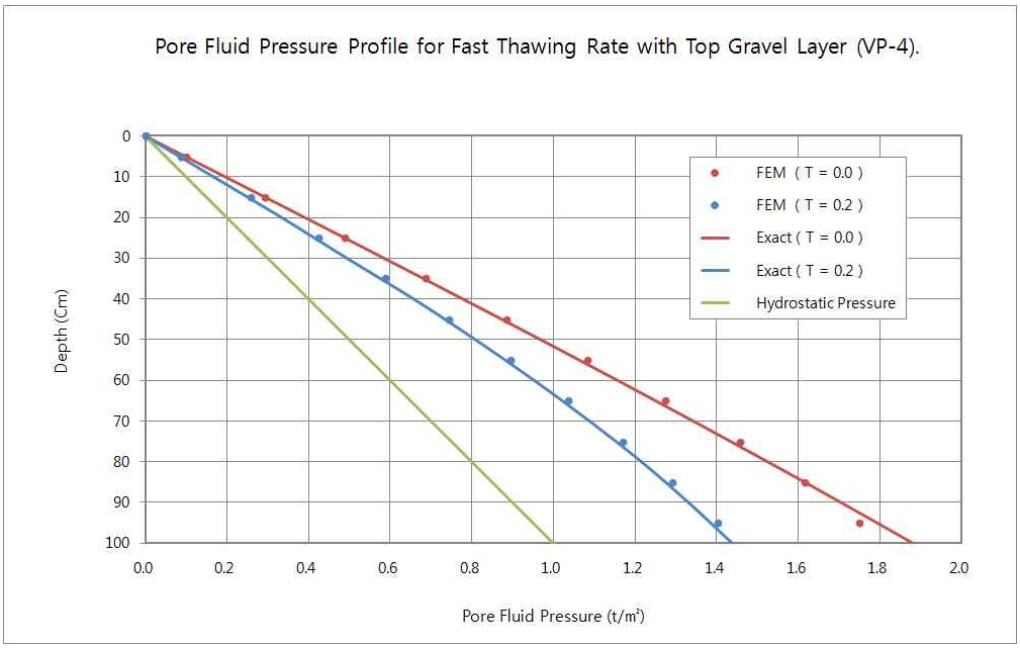



Figure 3.9.68 Pore fluid pressure profile for fast thawing rate with top gravel load (VP-4).

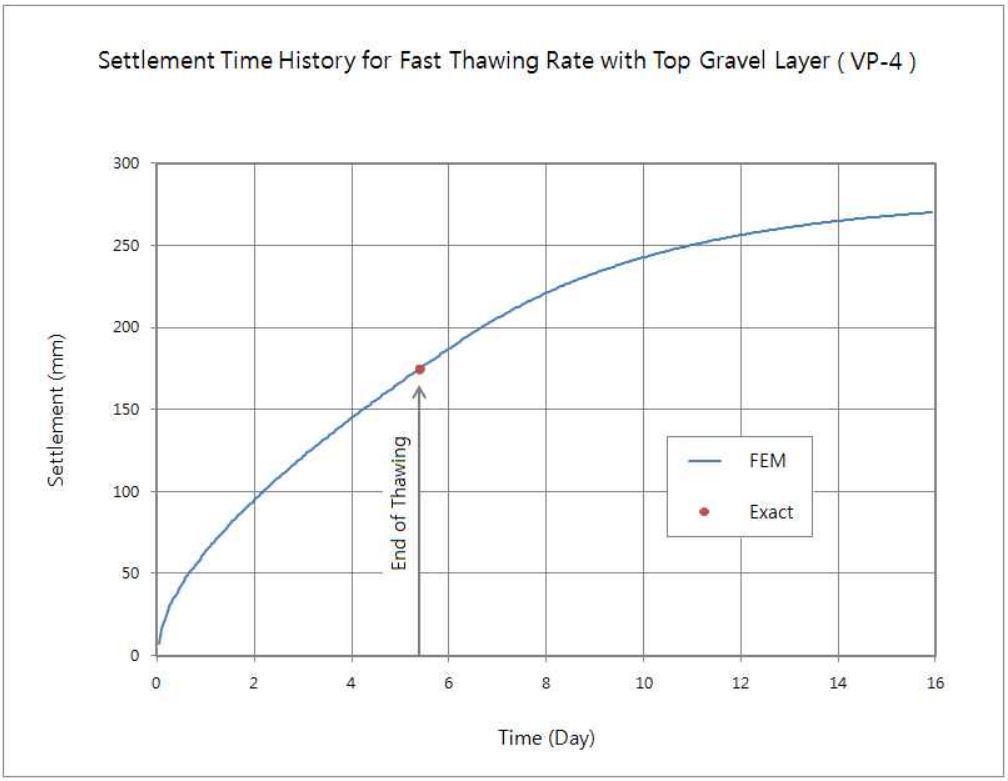



Figure 3.9.69 Settlement time history for fast thawing rate with top gravel layer (VP-4).

라. 1D 동결-융해 압밀 해석 프로그램 (FTCAP_1D)

(1) FTCAP_1D 사용법

1D 동결-융해 압밀 해석 프로그램 FTCAP_1D (Freeze-Thaw Consolidation Analysis Program - 1D)은 본 연구과제의 1차년도에 개발한 동결깊이 해석 프로그램 (FDAP)에 동결 후 융해 과정과 융해로 인한 압밀침하 해석이 추가 되었다. 따라서 동결-융해와 관련된 열전도 입력 사항은 동결깊이 해석 프로그램 FDAP 입력 사항에 융해와 관련된 융해일 수와 융해기간 지표면 평균기온이 추가되었다. 동결-융해와 관련된 열전도 입력사항은 다음 Section에서 자세히 설명한다.

융해로 인한 압밀침하 해석에 대한 FEM 해석기법에 대한 검증은 앞의 5.의 (다)의 (2)예제에서 선형 융해압밀의 Exact Solution과 비교하여 검증하였다. Table 3.9.15은 본 FTCAP_1D 프로그램의 융해압밀과 관련된 입력 Data로 지표면 하중과 각 지층의 물성치를 포함한다.

프로그램 FTCAP_1D를 실행하기 위해서는 Figure 3.9.70에서 보이는 C:\FTCAP_1D\CT\CTMENU Folder에 있는 실행 File FTCAP_1D.exe를 더블 클릭한 다음에 Working directory를 설정한다.

Table 3.9.15 Thaw consolidation user's manual.

FTCAP_1D Input File : ThawConsolidation.dat

| Card Group | Input Data and Definitions |
|---|---|
| 1 Titles | 1.1<br>**Title**<br>**SubTitle**<br>Title : Project title , SubTitle : Project Subtitle |
| 2 Loads | 2.1<br>**Pload, StartDay, EndDay**<br>Pload : Live load ($t/m^2$) on ground surface<br>StartDay : Start day when load is applied<br>EndDay : End Day when load is removed |
| 3 Soil / Material Layers | 3.1<br>**Num_Layer**<br>Num_Layer : Total number of layers |
| 3 Soil / Material Layers — For Each Layer | 3.2<br>**LayerNo, ModelNo, KF, k, $K_o$, $\gamma_d$, ω**<br>LayerNo : Layer number<br>ModelNo = 1 : Elastic model<br>ModelNo = 9 : Modified Cam Clay model<br>KF = 0 : Saturated two-phase material<br>KF = 1 : Unsaturated material<br>k : Coefficient of Permeability (m/day)<br>$K_o$ : Coefficient of earth pressure at rest<br>$\gamma_d$ : Dry unit weight ($tf/m^3$)<br>ω : Water content (%) |
| 3 Soil / Material Layers — For Each Layer | 3.2.1 [For ModelNo = 1 : Elastic Model]<br>**E, ν**<br>E : Young's modulus ($tf/m^2$)<br>ν : Poisson's ratio |
| 3 Soil / Material Layers — For Each Layer | 3.2.9 [For ModelNo = 9 : Modified Cam Clay Model]<br>**$P_c$, $e_o$, ν, $C_c$, $C_r$, M**<br>$P_c$ : Preconsolidation pressure ($tf/m^2$)<br>$e_o$ : Initial void ratio<br>ν : Poisson's ratio<br>$C_c$ : Virgin compression index<br>$C_r$ : Swelling / recompression index<br>M : Strength parameter |

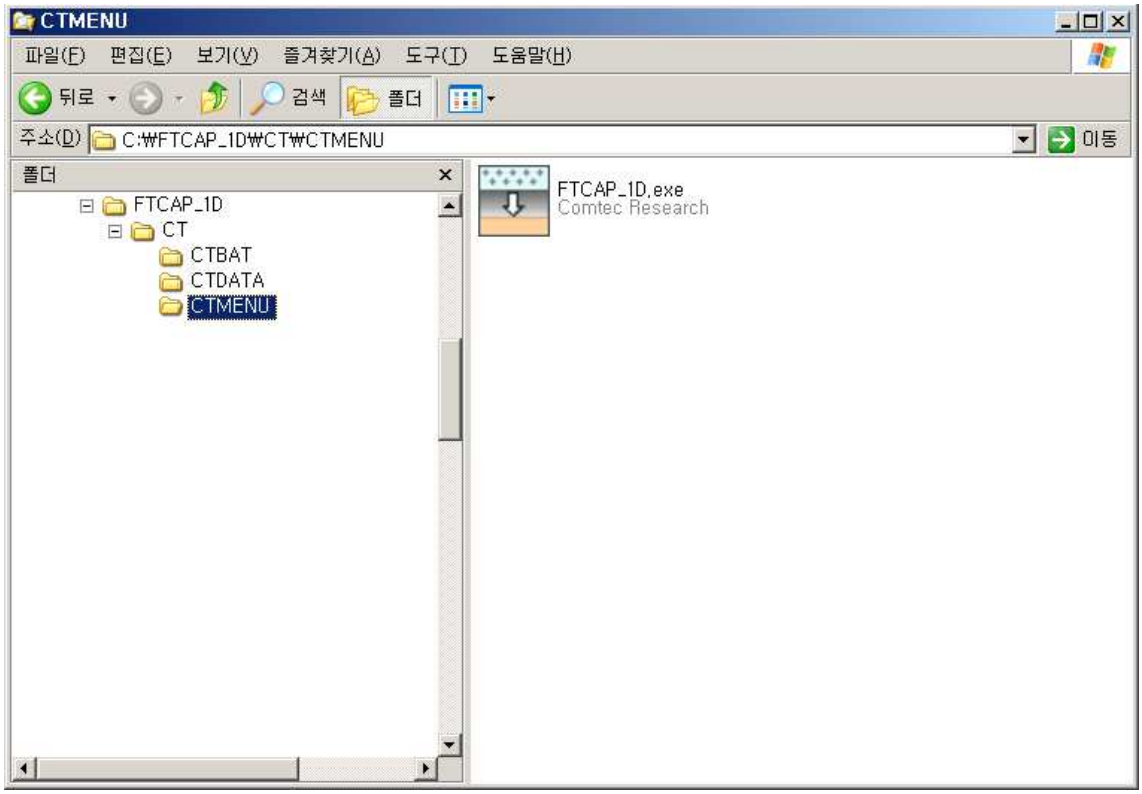



Figure 3.9.70 Execution of program FTCAP_1D.

(.2) 콘크리트도상 융해압밀 해석예제

본 콘크리트도상 융해압밀 해석예제는 Figure 3.9.71에서 보는 바와 같이 본 9절 2.의 보조도상 두께 300 mm인 Case T300의 경우이다.

기상조건은 다음과 같이 가정하였다.

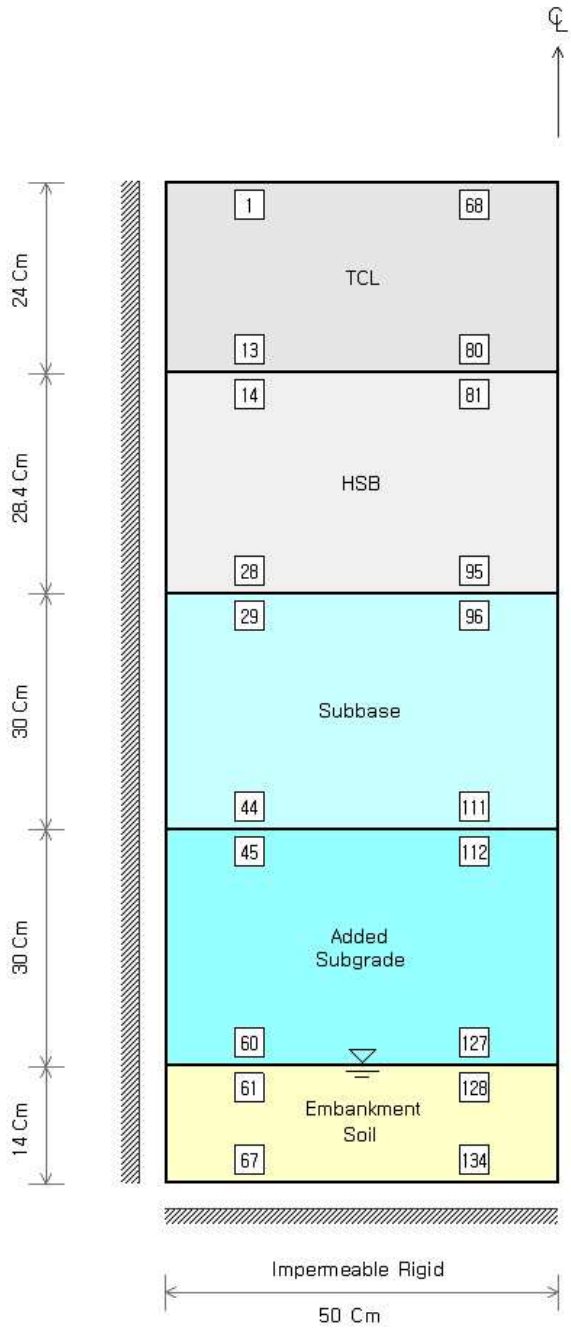
| | |
|---|---|
| 연평균기온 | : 10.8 ℃ |
| 대기 동결지수 | : 800 ℃-Days |
| 동결일 수 | : 93 Days |
| n Factor | : 1.0 |
| 융해기간 지표면 평균온도 | : 2.63 ℃ |
| 융해일 수 | : 60 Days |

여기서 "융해일 수"는 융해가 완료된 시간이 아니라 융해 압밀 해석에 사용된 시간이며 실제로 융해가 완료된 시간은 프로그램 FTCAP_1D 내에서 자동으로 계산된다.

융해압밀과 관련된 입력 Data는 Table 3.9.15의 사용자 설명서에 따라서 Table 3.9.16과 같이 작성하였다.

융해압밀 침하에 지배적인 영향을 주는 노반의 물성치는 다음과 같이 가정하였다.

| | | |
|---|---|---|
| 투수계수 | k | $= 1 \times 10^{-5}\ \mathrm{m/day}$ |
| 함수비 | $\omega$ | $= 14.47\ \%$ |
| 탄성계수 | $E$ | $= 100\ \mathrm{t/m^2}$ |
| 포아송비 | $\nu$ | $= 0.3$ |
| 압밀계수 | $C_v$ | $= 0.001346\ \mathrm{m^2/day}$ |




| Permeable Element Activity | |
|---|---|
| Element Number | Active Time (Day) |
| 1 | 0.000 |
| 13 | 1.333 |
| 14 | 1.458 |
| 28 | 2.875 |
| 29 | 3.417 |
| 44 | 18.917 |
| 45 | 20.208 |
| 60 | 29.250 |
| 61 | 27.291 |
| 66 | 9.042 |
| 67 | 0.000 |

Elements 1~ 67 : Permeable element
Elements 68~134 : Impermeable rigid
Rigid elements are initially active and deactive at time when corresponding permeable elements are active.

Figure 3.9.71 Schematic section used for concrete railway thaw consolidation analysis.

Table 3.9.16 FTCAP_1D input file for concrete railway thaw consolidation analysis (ThawConsolidation.dat)

```
*
* Sample Input File : ThawConsolidation.dat
*
* Card 1.1
* Title
  Thaw Consolidation Analysis
*
* Card 1.2
* SubTitle
  FI 800 Deg.C-Days (A300)
*
* Card 2.1
* PLoad      StartDay    EndDay
  0.0        0.0         0.0
*
*
* Card 3.1
* Num_Layer
  6
*
* ================================================================
* TCL
*
* Card 3.2
* LayerNo     ModelNo   KF       k(m/day)  Ko       Gamma_d(tf/m3)  w(%)
  1           1         1        0.0001    0        2.243           0.0
*
* Card 3.2.1
* [ For ModelNo = 1 : Elastic Model ]
* ----------------------------------
* E(tf/m2)    V
  2.1e+06     0.20
*
* ================================================================
* HSB
```

```
*
* Card 3.2
* LayerNo     ModelNo   KF       k(m/day)  Ko       Gamma_d(tf/m3)  w(%)
  2           1         1        0.0001    0        2.243           0.0
*
* Card 3.2.1
* [ For ModelNo = 1 : Elastic Model ]
* ---------------------------------
* E(tf/m2)    V
  2.1e+06     0.20
*
* ================================================================
* Subbase
*
* Card 3.2
* LayerNo     ModelNo   KF       k(m/day)  Ko       Gamma_d(tf/m3)  w(%)
  3           1         1        10.       0        1.6             5.0
*
* Card 3.2.1
* [ For ModelNo = 1 : Elastic Model ]
* ---------------------------------
* E(tf/m2)    V
  7.00e+03    0.25
*
* ================================================================
* Added Subgrade
*
* Card 3.2
* LayerNo     ModelNo   KF       k(m/day)  Ko       Gamma_d(tf/m3)  w(%)
  4           1         1        10.       0        1.7             5.0
*
* Card 3.2.1
* [ For ModelNo = 1 : Elastic Model ]
* ---------------------------------
* E(tf/m2)    V
  7.00e+03    0.25
*
```

```
*
=====================================================================
* Upper Embankment
*
* Card 3.2
* LayerNo     ModelNo   KF       k(m/day)  Ko       Gamma_d(tf/m3)  w(%)
  5           1         0        0.00001   0        1.59            14.47
*
* Card 3.2.1
* [ For ModelNo = 1 : Elastic Model ]
* ----------------------------------
* E(tf/m2)    V
  1.00e+02    0.30
*
* =====================================================================
* Lower Embankment
*
* Card 3.2
* LayerNo     ModelNo   KF       k(m/day)  Ko       Gamma_d(tf/m3)  w(%)
  6           1         0        0.00001   0        1.59            14.47
*
* Card 3.2.1
* [ For ModelNo = 1 : Elastic Model ]
* ----------------------------------
* E(tf/m2)    V
  1.00e+02    0.30
*
* =====================================================================
*
```

프로그램 FTCAP_1D를 사용하여 본 콘크리트 도상 융해압밀 해석을 수행하려면 FTCAP_1D 사용법에서 설명한 바와 같이 Figure 3.9.70의 실행 File FTCAP_1D.exe를 더블 클릭한다.

다음으로 본 해석예제가 준비되어 있는 작업 Folder C:\FTCAP_1D\Example을 Working Directory로 설정하고 이 작업 Folder 내에 있는 Input File "Clay.dat"을 Open 한다 (Figure 3.9.72 참조).

Figure 3.9.73은 본 해석에 사용한 기상 Data를 비롯하여 동결-융해 열전도 해석에 사용된 입력사항이다. 해석에 사용된 지층 Profile을 확인하기 위해서 GUI Window 상단 중앙에 위치한 "지층 그래프" 버튼을 클릭하면 Figure 3.9.74와 같이 각 지층의 치수와 열전도 물성치가 화면에 출력되어 입력사항을 확인할 수 있다.

다음으로 Figure 3.9.73의 융해 압밀 입력 Data 사항의 "Edit 융해 압밀 입력 Data" 버튼을 클릭하면 텍스트 편집기 메모장에 Table 3.9.15의 Input File "ThawConsolidation.dat"이 열리며 필요시 입력 Data를 수정한 후 저장하여 사용할 수 있다.

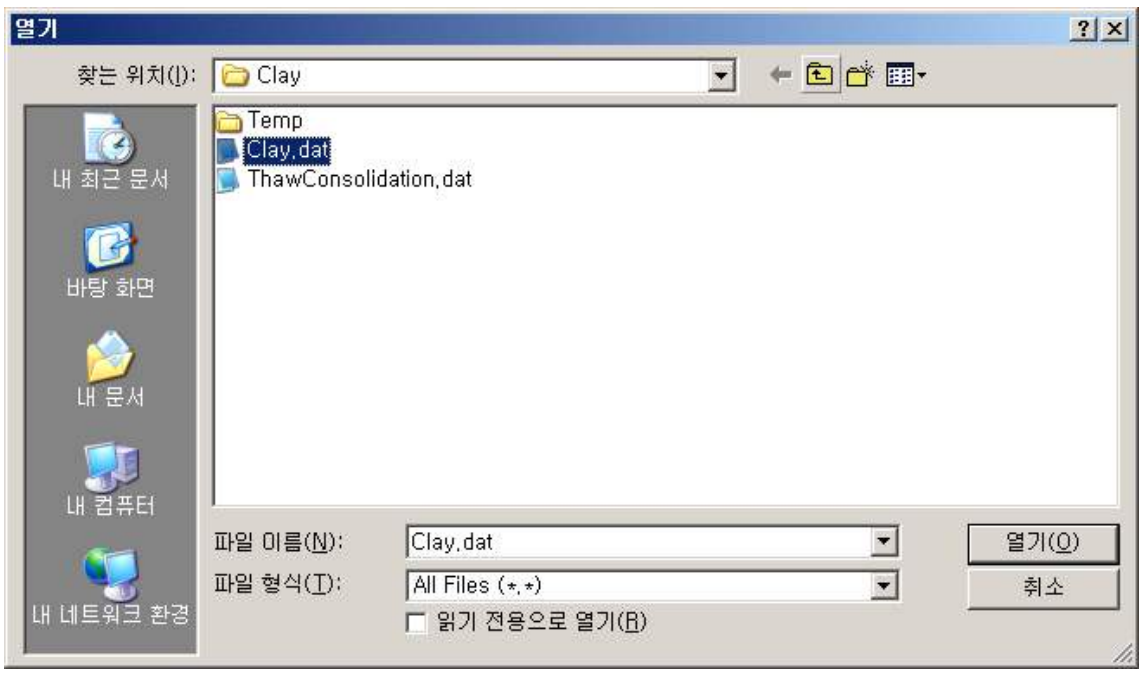



Figure 3.9.72 Opening freeze-thaw heat conduction input file : C:\FTCAP_1D\Example\Clay.dat

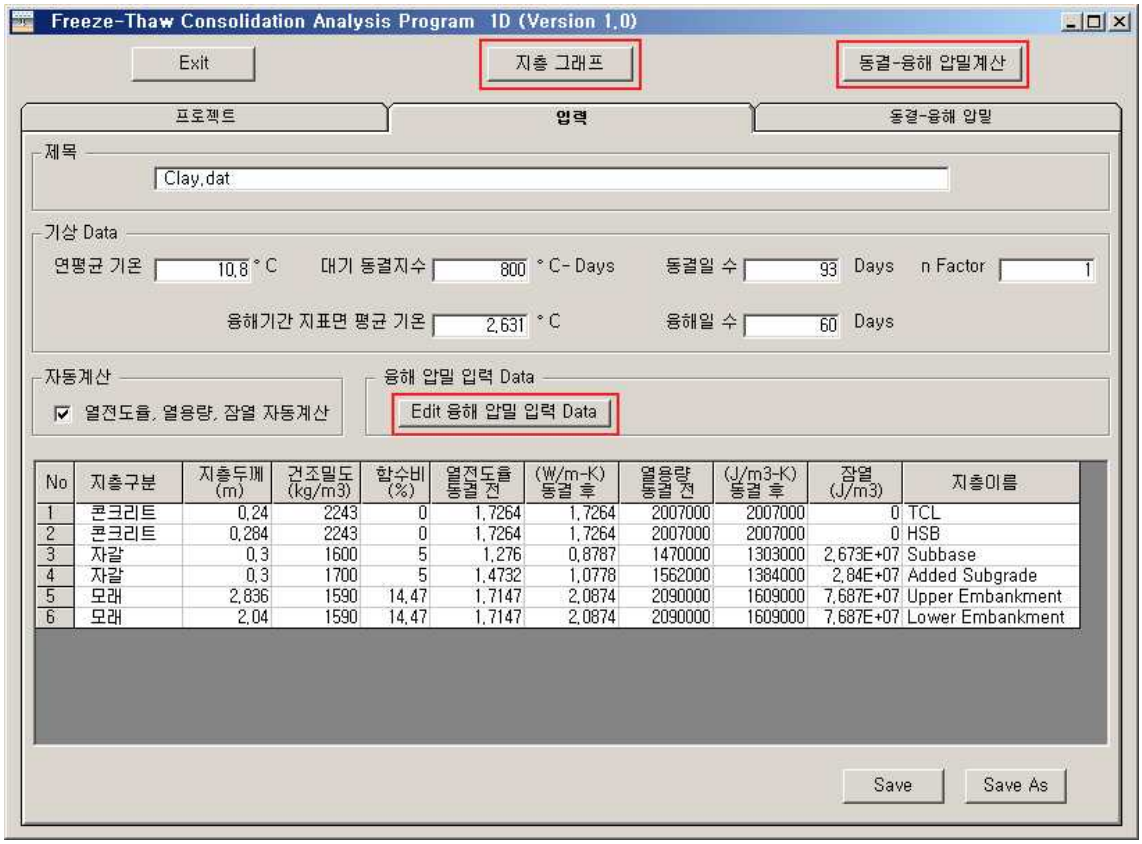



Figure 3.9.73 Input GUI window for FTCAP_1D.

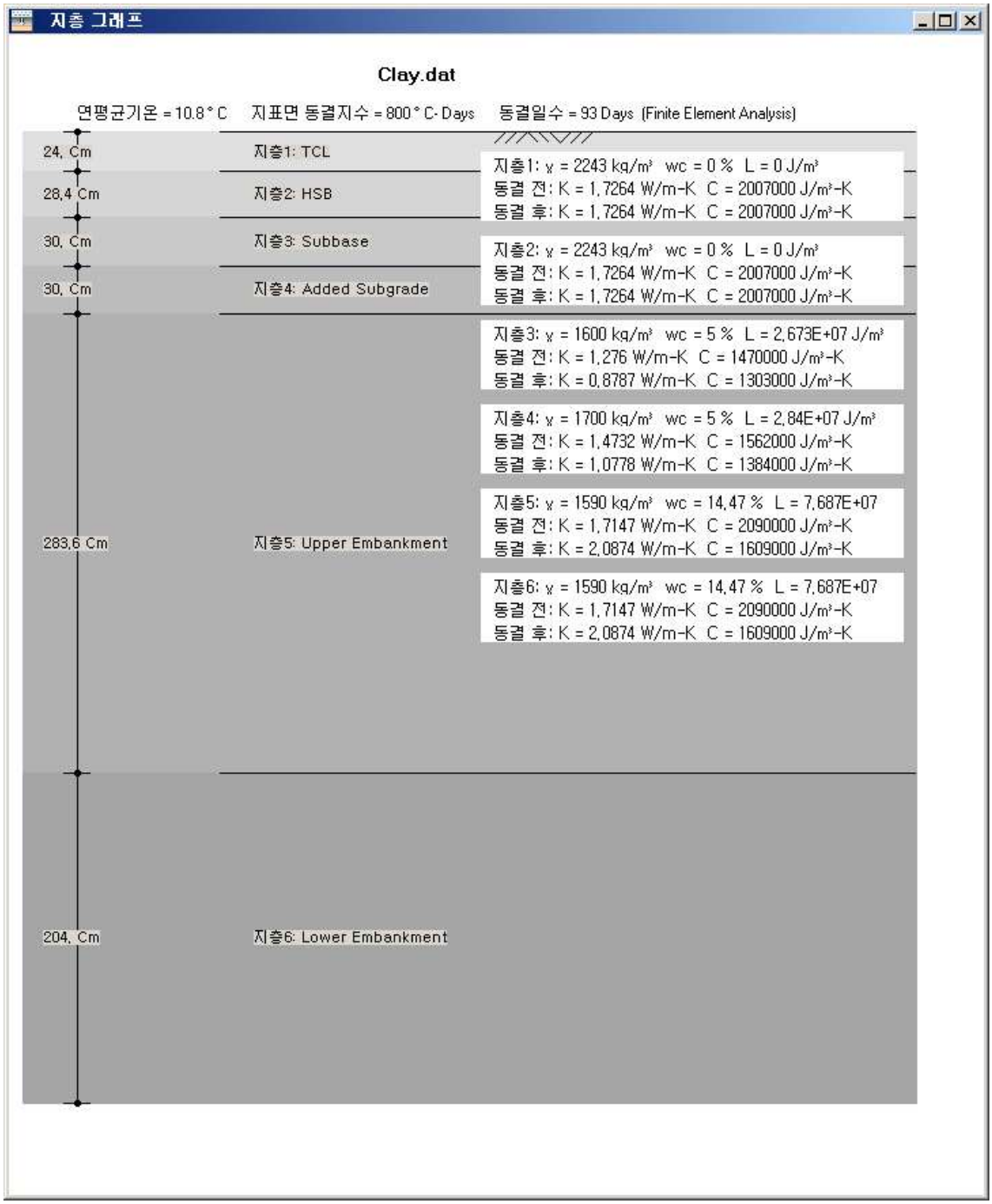



Figure 3.9.74 Soil layer graph.

다음으로 Figure 3.9.73의 상단 우측에 위치한 "동결-융해 압밀계산" 버튼을 클릭하면 Figure 3.9.75의 "온도 시간 이력 지정" Window가 화면에 출력되며 본 해석예제의 경우는 Default 옵션인 "지표면 동결지수/융해온도"를 사용하였다. 선택사항을 선택한 후에 "확인" 버튼을 클릭한다.

동결-융해 압밀해석 계산이 수행되는 동안에는 Figure 3.9.76의 "동결-융해 압밀 FEM 해석 프로그램 계산 수행중...." Message가 화면에 출력된다.

계산이 완료되면 Figure 3.9.77과 같이 "동결-융해 압밀" 탭으로 자동 이동되고 "동결-융해 압밀 검토 요약"이 화면에 출력된다. 본 해석예제의 동결깊이는 126.38 Cm로 입도조정층 아래에 있는 상부 노반 14 Cm 정도가 동결과 융해를 받은 것으로 보인다. Figure 3.9.77의 상단 중앙에 위치한 "동결심도 그래프" 버튼을 클릭하면 동결면이 포함된 Profile이 화면에 출력된다 (Figure 3.9.78 참조).

다음으로 융해 압밀 침하와 관련된 해석결과를 알아 보기 위해서 Figure 3.9.77의 하단에 위치한 "침하 응력 Time History Plot" 버튼을 클릭하면 Figure 3.9.79와 같이 침하와 응력 관련 Plotting List가 화면에 출력된다.

Figure 3.9.80과 3.9.81은 지표면 침하 이력 그래프로 상부노반의 융해가 시작되는 시간인 27일 이후부터 압밀침하가 일어나서 약 3일 후에는 압밀이 거의 완료된 것으로 해석된다. 압밀이 완료된 후 최종 침하량은 2.5 mm로 제 9절 4 (다) (2)에서 프로그램 TSAP을 사용한 최종 침하량과 동일한 값을 보여준다.

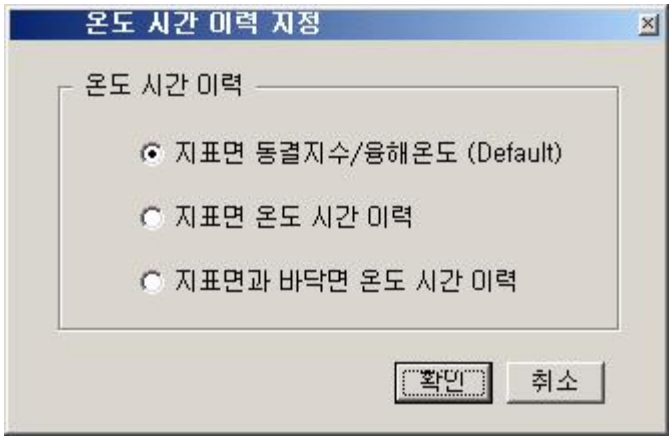



Figure 3.9.75 Temperature time history specification window.




Figure 3.9.76 Running FTCAP_1D program message.

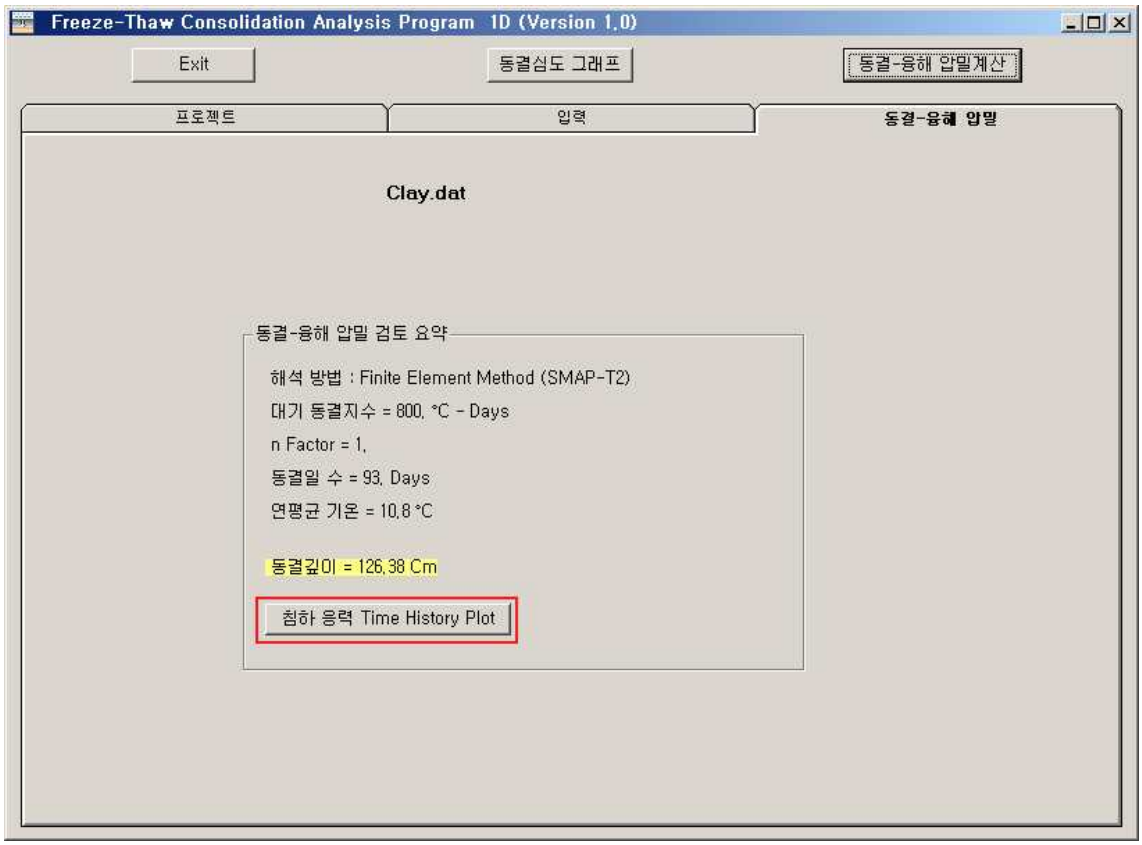



Figure 3.9.77 Freeze-thaw consolidation window.

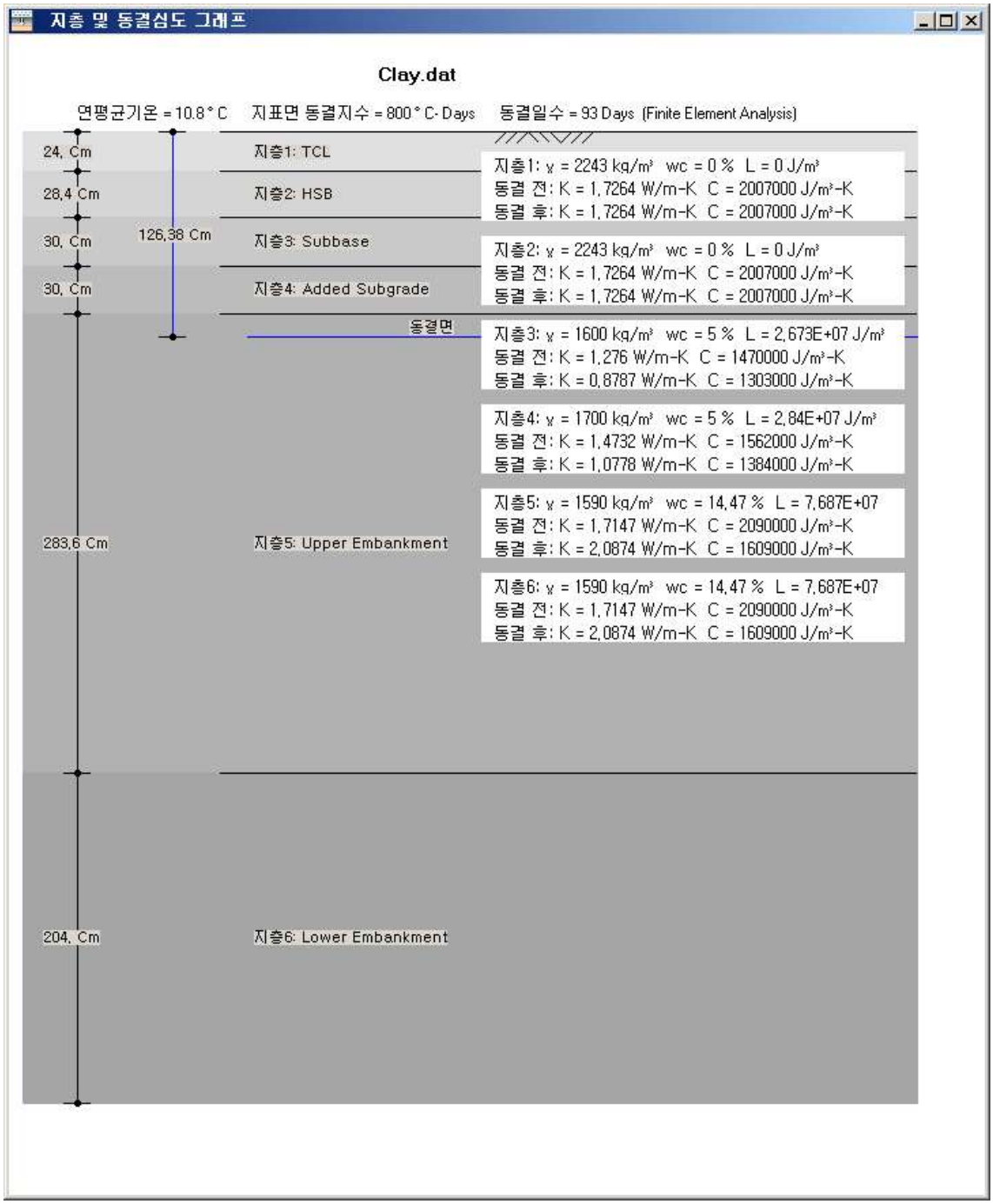



Figure 3.9.78 Frost depth graph.

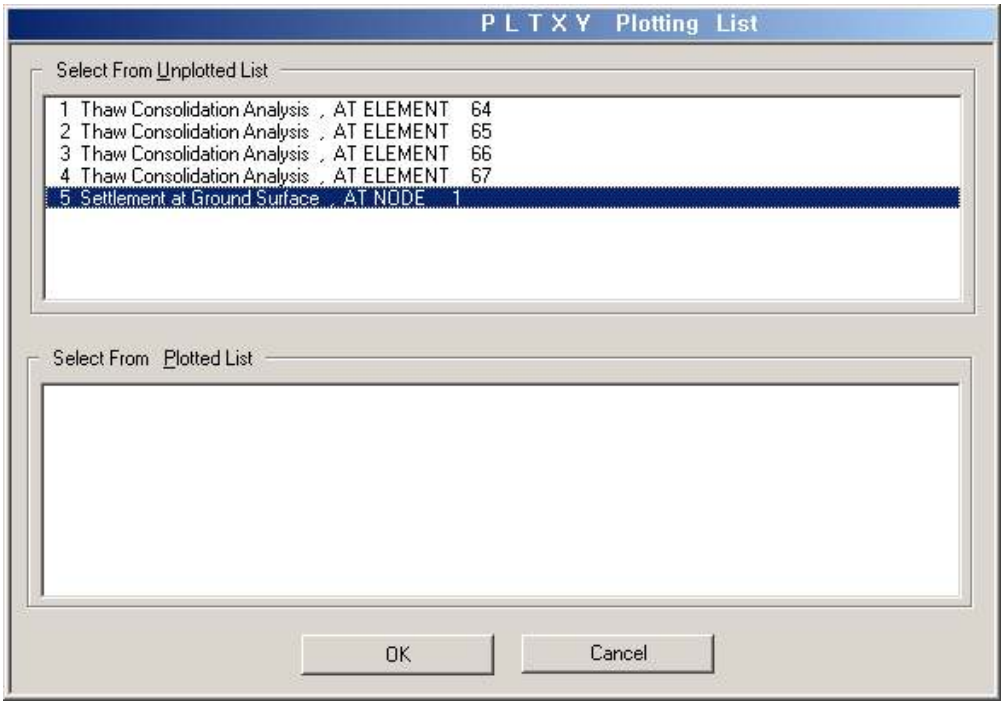



Figure 3.9.79 PLTXY Plotting List window.

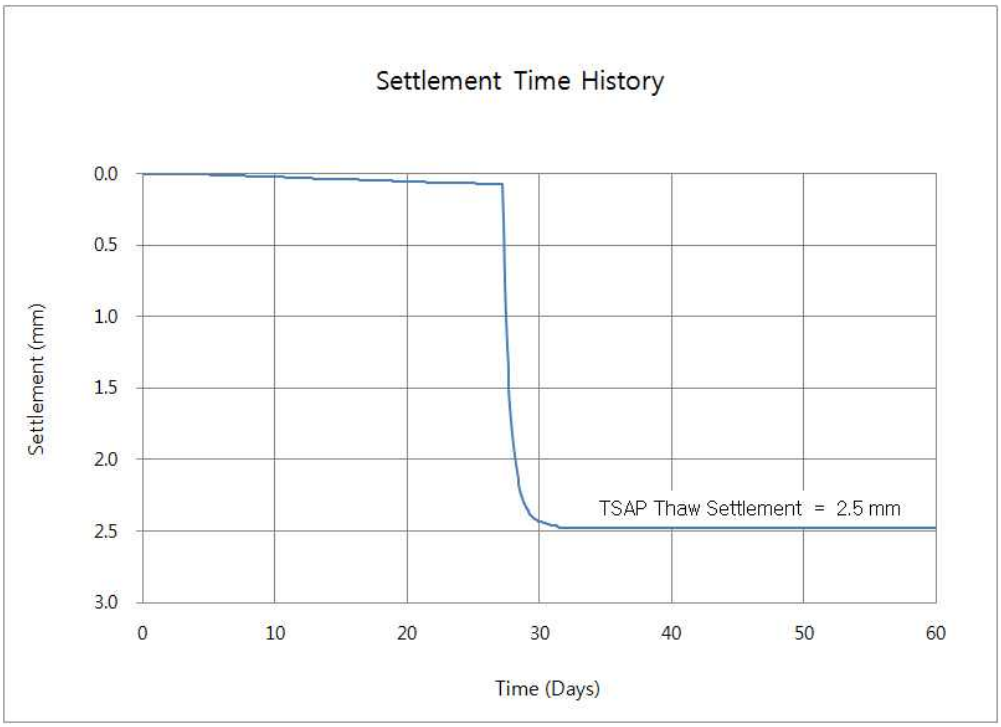



Figure 3.9.80 Settlement time history.

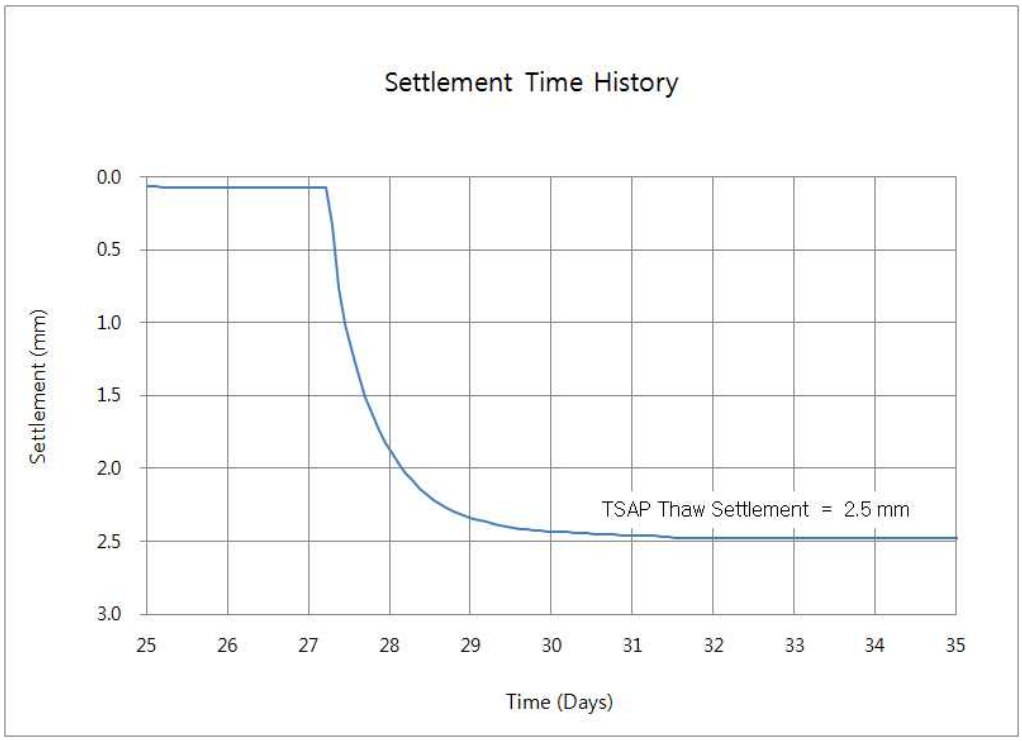



Figure 3.9.81 Settlement time history (detailed).

다음으로 Figure 3.9.82, 3.9.83, 3.9.84 그리고 3.9.85는 각각 지표면으로부터 119 Cm, 121 Cm, 123 Cm 그리고 125 Cm 깊이의 노반 Element에 작용하는 간극수압과 유효 수직응력 시간이력 그래프이다. 깊이가 깊을수록 자중으로 인해 응력이 조금씩 증가함을 알 수 있다.

Figure 3.9.71의 Element Activity 표에서 보는 바와 같이 계절성 동토에서는 융해가 상부 지표면과 최종으로 동결이 완료된 하부 동결면에서 동시에 양면에서 진행되므로 하부 동결면 부근에 위치한 노반은 융해초기에는 Overburden Load의 대부분이 간극수에 전달되어 과잉 간극수압으로 작용하고 유효응력은 거의 Zero인 불안정한 상태에 있는것으로 해석된다.

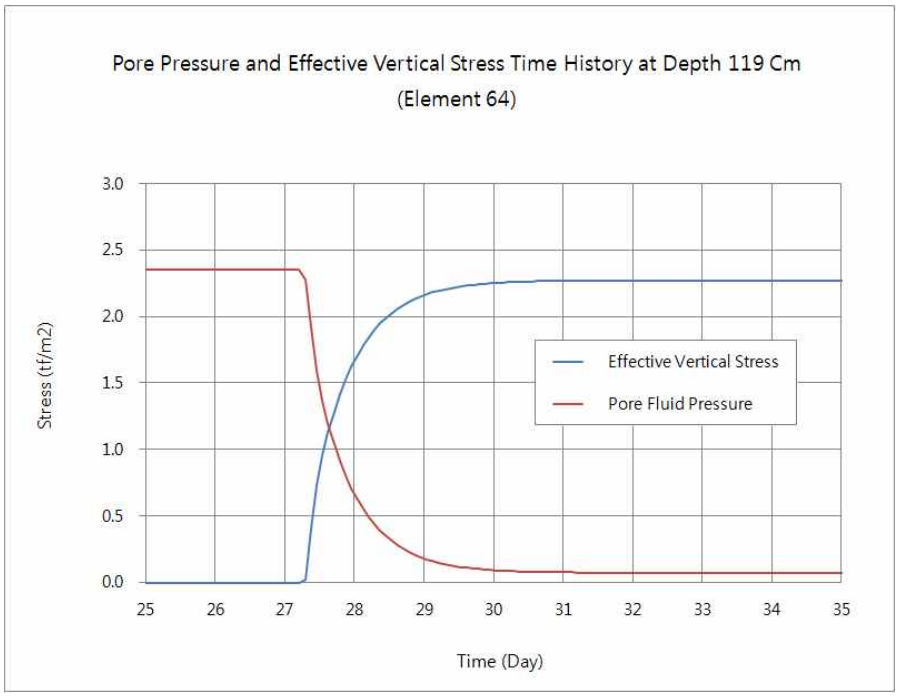



Figure 3.9.82 Pore pressure and effective vertical stress time history at depth 119 Cm (Element 64).

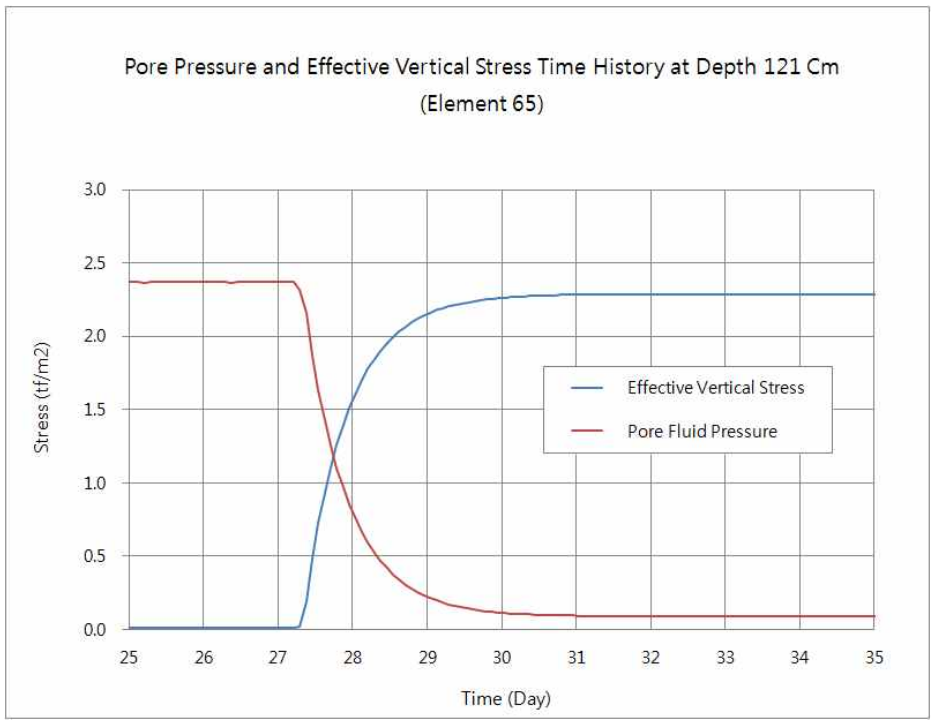



Figure 3.9.83 Pore pressure and effective vertical stress time history at depth 121 Cm (Element 65).

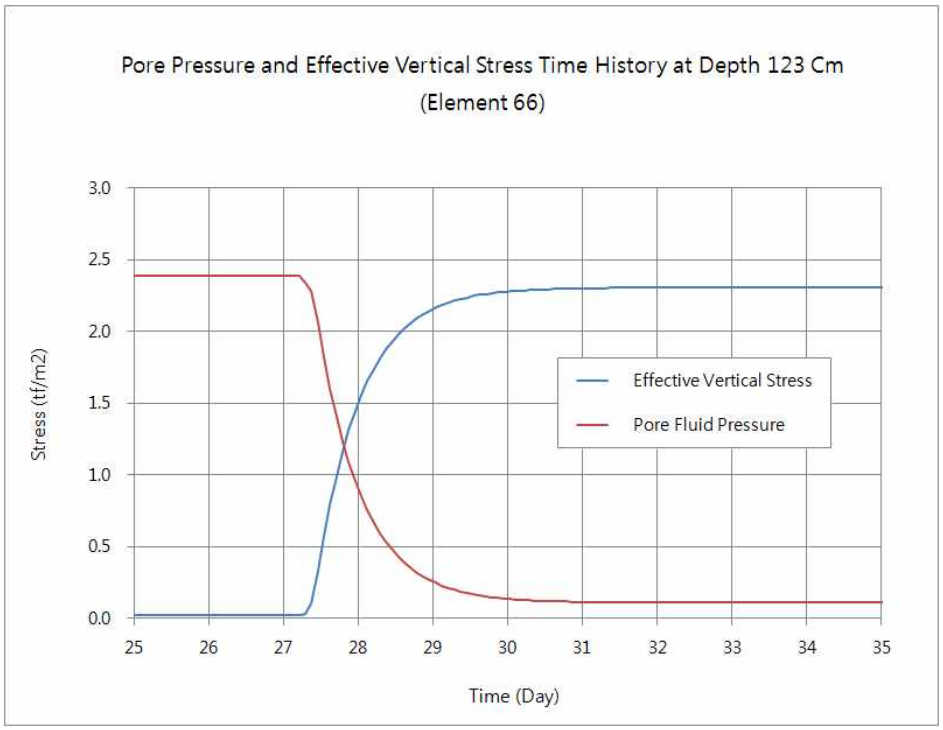



Figure 3.9.84 Pore pressure and effective vertical stress time history at depth 123 Cm (Element 66).




Figure 3.9.85 Pore pressure and effective vertical stress time history at depth 125 Cm (Element 67).

6. 소결론

본 절의 콘크리트도상 하부 노반의 융해 압밀 프로그램 해석연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 콘크리트도상의 동결심도 FEM 수치해석 결과는 실제 현장실험을 통해 계측한 측정치에 거의 근사한 값을 보여 준다. 따라서 FEM에 기반을 둔 동결깊이 해석 프로그램 **FDAP** (**F**rost **D**epth **A**nalysis **P**rogram)을 사용하여 고속철도 노반의 동결심도를 설계할 것을 권장한다.

- 자갈·아스콘 도상 동결심도 FEM 수치해석 결과는 자갈과 아스콘의 상대적인 위치 보다는 아스콘의 두께에 따라 동결심도를 감소시킬 수 있다.

- 본 과제를 통해 개발한 융해침하 해석 프로그램 **TSAP** (**T**haw **S**ettlement **A**nalysis **P**rogram)은 실내 융해압밀시험 Data에 바탕을 두고 있어 융해 지반에서 발생할 수 있는 최종 침하량을 예측하는데 유용하게 사용할 수 있다.

- 본 과제를 통해 개발한 1차원 동결-융해 압밀침하 해석 프로그램 **FTCAP_1D** (**F**reeze-**T**haw **C**onsolidation **A**nalysis **P**rogram-**1D**)은 한 프로그램 안에서 사용하기 쉬운 GUI를 통하여 계절성 동토에 대한 동결-융해-압밀 침하 해석이 일관성 있게 수행되어 특히 상부 노반이 연약지반인 경우 융해 압밀침하 검토에 유용하게 사용할 수 있다.

# 제 10절 철도 도상 동상방지 대책

## 1. 철도 시설물 동결깊이 산정식 적용

### 가. 종래의 철도 시설물 동결깊이 추정식

신설하는 철도 도상의 동상 피해를 방지하기 위한 설계를 할 때, 또는 기존 철도의 자갈도상에 동상 피해가 발생하였을 때 이를 얼마만한 깊이까지 치환(자갈 치기)하는 것이 타당한지 검토하기 위하여는 해당 지역의 동결깊이를 파악할 필요가 있다. 지금까지 국내에서는 일본의 [철도구조물 등 설계 표준 · 동 해설 "동상대책"]에서 제시하고 있는 식(3.10.1)을 이용하여 동결깊이를 추정하여 왔다.

$$Z = C\ \sqrt{F} \qquad (3.10.1)$$

여기서

Z : 동결 깊이(cm)

C : 상수로서 3~5 (동결지수의 범위 및 노반에서 물이 솟는지 여부, 또는 온종일 그늘이 지는 현장인지 여부 또는 실트 성분이 많이 포함된 노반 조건인지 등에 따라 다르나 보통의 경우 4를 적용하고 있음)

F : 동결지수(凍結指數)(℃·days)

### 나. 현장 실측 자료에 의한 철도 시설물 동결깊이 산정식(안)

본 연구를 통하여 국내 철도 현장에서 2년 동안 실측한 철도용 동결깊이 산정식(자갈 도상용 및 콘크리트 도상용)을 각각 식(3.10.2) 및 식(3.10.3)과 같이 제시한다.

(1) 자갈도상의 동결깊이 산정식

$$\textbf{동결깊이(Z)} = 24\ ln\textbf{(C)}-39 \qquad (3.10.2)$$

여기서

Z : 철도용 동결깊이(cm)

C : (보정)동결지수 (℃·days)

(2) 콘크리트도상의 동결깊이 산정식

$$\text{동결깊이}(Z) = 21\ ln(C) - 2 \qquad (3.10.3)$$

여기서

Z : 철도용 동결깊이(cm)

C : (보정)동결지수 (℃·days)

식 (3.10.2)와 식 (3.10.3)에 이용되는 동결지수는 일 평균 기온이 영하로 떨어지는 날이 속한 겨울 시작 달의 초하루부터 일평균 기온을 누적하기 시작하여, 그 다음 해 일 평균 기온이 영상으로 바뀌기 시작하는 겨울 마지막 달의 마지막 날까지의 일평균기온을 누적한 값이다. 일 평균 기온으로부터 동결지수를 구하는 방법을 표 3.10.1에서 예로서 소개하였다.

다. 자갈도상 및 콘크리드도상의 동결깊이 산정식에 동결지수 적용방법

(1) 기상대(측후소) 자료를 이용한 동결지수 산정

어느 철도 현장에서 동결깊이를 산정하기 위해 동결지수를 취하고자 할 때는 가장 가까운 기상대나 측후소에서 측정한 매년 겨울의 일 평균 기온으로부터 표 3.10.1과 같은 방법으로 동결지수를 계산한다.

이렇게 계산한 최근 30년 동안의 동결지수들 중에서 큰 순서로 3개년의 동결지수를 취하고 그것들의 평균값을 구해 최대동결지수를 산정한다.

(2) 현장에 맞게 수정한 보정동결지수 계산

최대동결지수는 인근 기상대나 측후소에서 구한 값이며, 기상대나 측후소의 지반고와 해당 현장의 지반고가 다르므로 이를 식(3.10.4)와 같이 보정한다.

$$\text{보정동결지수}(℃\cdot\text{days}) = \text{측후소 최대동결지수} + 0.5\times\text{동결기간} \times \frac{(\text{측후소 지반고와 해당 현장 지반고의 차})}{100} \qquad (3.10.4)$$

식(3.10.4)에서 동결기간은 표 3.10.1에서 일 평균 기온 누계치가 플러스 최대값을 보인 날로부터 일 평균 기온의 누계치가 마이너스 최대값을 보인 날까지의 기간을

의미한다.

(3) 현장 동결깊이 산정

식(3.10.4)에서 구한 보정 동결지수를 식(3.10.2)나 식(3.10.3)에 대입하여 해당 현장의 자갈도상에 대한 동결깊이 또는 콘크리트도상에 대한 동결깊이를 산정한다.

표 3.10.1 측후소 일 평균 기온으로부터 동결지수를 구하는 방법(예)

| 월 | 일 | 1 | 2 | 3 | . | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 비고 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 11 | 일평균기온 | 8.7 | 4.1 | 3.7 | | 8.8 | -0.7 | -0.5 | 0 | 1.2 | 7.3 | | |
| | 누계 | 8.7 | 12.8 | 16.5 | | 105.1 | 104.4 | 103.9 | 103.9 | 105.1 | 112.4 | | **+최대값 112.4** |
| 12 | 일평균기온 | -4.5 | -5.8 | -5.7 | | -11 | -11.9 | -12.8 | -7.0 | -9.1 | -8.5 | -6.9 | |
| | 누계 | 107.9 | 102.1 | 96.4 | | -26.7 | -38.6 | -51.4 | -58.4 | -67.5 | -76 | -82.9 | |
| 1 | 일평균기온 | -5.7 | -6.7 | -9.2 | | -8.1 | -4.2 | 0.4 | -5.2 | -6.2 | -11.2 | -11.9 | |
| | 누계 | -88.6 | -95.3 | -104.5 | | -302.2 | -306.4 | -306.0 | -311.2 | -317.4 | -328.6 | -340.5 | |
| 2 | 일평균기온 | -11.4 | -10.7 | -1.3 | | -3.0 | -4.7 | -6.0 | -7.1 | | | | |
| | 누계 | -351.9 | -362.6 | -363.9 | | -502.8 | -507.5 | -513.5 | -520.5 | | | | |
| 3 | 일평균기온 | -4.2 | -1.2 | 2.7 | | -0.3 | -3.9 | 5.7 | 2.6 | 1.4 | 5.0 | 5.0 | |
| | 누계 | -524.7 | -525.9 | -523.2 | | -551.1 | -555 | -549.3 | -546.7 | -545.3 | -540.3 | -535.3 | **-최대값 555** |

※동결지수는 표 3.10.1의 비고란의 (-) (+) 최대치를 부호를 모두 생략하고 그 절대값을 더하여 구한다. 즉, 동결지수는 112.4+555 =667.4℃·days이다.

※만약 10월 어느 날부터 일 평균 기온이 마이너스로 나타났다면 동결지수는 10월 1일부터 계산하기 시작하여 누계치를 구한다.

## 2. 철도 도상이나 노반의 동상방지 기술 적용

### (1)기존선 자갈 도상의 동상방지기술 적용

(ⅰ)자갈 치환 깊이 : 기존선 자갈도상에 동상이 발생할 경우 노반을 치환하는(자갈치기)방법을 많이 사용한다. 이 때 치환하는 깊이는 자갈도상 동결깊이 산정식(3.10.2)에 의하여 해당 지역의 최대동결깊이 이하까지 치환하는 것이 좋다.

(ⅱ)단열재(XPS 설치) : 자갈 치환작업을 수행할 경우에 비하여 노반의 굴착량을 줄이고, 사토량을 줄이기 위해서 단열공법으로서 XPS(Extruded Foam Polystyrene Board)를 노반 중간층에 설치하면 단열효과에 의하여 동결깊이를 줄이고, 자갈도상의 동상량을 줄일 수 있다.

XPS는 KS M 3808에서 규정하고 있는 열전도율이나 압축강도 등 제반 기준을 만족하는 품질의 것을 사용해야 한다. XPS 설치 두께는, 해당지역에서 자갈로 치환해야 하는 두께의 1/2 이상의 두께를 사용하는 것이 바람직하다. 즉, 현장실험 결과에 의하면 KS M 3808에서 규정한 품질 기준을 만족하는 XPS의 경우 동일한 두께의 쇄석이나 자갈보다 2배 만큼의 단열효과(동결깊이 침투 차단효과)를 보였다.

그리고 XPS를 설치할 때 XPS층 윗면에는 모래를 10cm 두께로 포설하고, XPS층 아랫면으로는 모래를 5cm 두께로 포설한다. XPS층 윗면에 모래를 포설하는 이유는 열차의 반복 통과 하중으로 자갈도상의 자갈이 XPS에 파고 들어가 XPS를 파손하는 것을 방지하기 위해서다. 또한 XPS층 아랫면에 모래를 포설하는 이유는 XPS를 설치하기 위하여 노반을 백 호우나 삽으로 굴착할 때 생긴 굴착면의 요철을 평탄하게 하고 배수를 원활히 하기 위해서다. 아울러 자갈도상이나 노반의 배수를 원활하게 하기 위하여 XPS층과 상·하 모래층은 3%의 종단경사를 갖도록 설치한다.

(ⅲ) 맹암거 설치 : 철도 주변 사면의 배수를 위해 설치한 배수로가 철도 도상 옆을 통과하는 배수로에 연결되는 경우가 있다. 도상 옆 배수로의 경사가 충분하지 않으면 여름철에는 물이 범람하고, 겨울철에는 배수로에 고인 물이 얼어 버린다. 여름철이나 늦가을에 범람한 물이 자갈도상이나 노반까지 침투하여 겨울철에 도상이나 노반에 동상을 일으키는 경우가 있다. 이런 경우 맹암거를 설치하여 철도 도상이나 노반의 물을 충분히 배수시켜야 동상을 방지할 수 있다.

(ⅳ) 배수로 시설의 보수 : 건설한지 오래 된 재래선 철도에서는 쌓기구간임에도 불구하고 자갈도상에서 동상이 발생하는 일이 종종 있다. 이러한 현장에서는 철도 옆으로 설치한 배수로가 파손되어 여름철에 배수로의 물이 범람하여 도상이나 노반

에 스며들고, 겨울철에 도상이나 노반에 동상이 발생하는 것이다. 따라서 기존 재래선 철도 자갈도상의 동상을 방지하기 위하여 오래된 배수로 시설을 보수하는 것이 필요하다.

(2) 신설할 고속철도 및 일반철도 자갈도상과 콘크리트 도상에 대한 동상방지 기술 적용

(ⅰ)입도조정층의 신설 또는 보조기층의 두께 증대

본 연구를 통해 철도 자갈도상 현장에서 2년 동안 실측한 바에 의하면, 2012년 겨울 태백에서는 동결지수가 401.4℃·days였는데도 불구하고 동결깊이가 101cm로 나타났고, 동년 제천에서는 동결지수가 344.9℃·days였는데 동결깊이는 88cm로 나타났으며, 동년 연천에서는 동결지수가 258.5℃·days였는데 동결깊이는 117cm로 나타났다.

한국철도시설공단 KR C-04020 (2012.12.5) 시방서 “쌓기”편에 의하면 일반철도와 고속철도의 강화노반 두께를 표 3.10.2와 같이 규정하고 있다.

표 3.10.2 고속철도와 일반철도의 강화노반 두께 (mm)

| 노면형상 | 궤도 조건 | | 자갈궤도 | | | | 콘크리트궤도 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 일반철도 | | 고속철도 | | | |
| | | | 보조 도상층 | 입도 조정층 | 보조 도상층 | 입도 조정층 | 보조 도상층 | 입도 조정층 |
| 쌓기 | 일반 철도 | $k_{30} \geq 110MN/m^3$ | 200 | | 200 | 200~ 300 | 200 | 200~ 300 |
| | 고속 철도 | $E_{v2} \geq 80MN/m^3$ | | | | | | |
| 깎기 및 평지 | 일반 철도 | $k_{30} \geq 110MN/m^3$ | 200 | | 200 | 200~ 450 | 200 | 200~ 450 |
| | 고속 철도 | $E_{v2} \geq 80MN/m^3$ | | | | | | |

그러나 태백이나 제천에서 측정한 동결깊이는, 자갈도상의 두께 300mm + 보조도상층 200mm인 일반철도나 자갈도상의 두께 300mm + 보조도상층 200~300mm인 고속철도(쌓기부) 및 자갈도상의 두께 300mm + 보조도상층 200~450mm인 고속철도(깎기 및 평지부) 등 모든 경우보다 더 크게(깊게)나타난다. 따라서 구조적으로

현 기준을 적용할 경우 고속철도든 일반철도든 자갈도상에서는 동상이 발생하도록 되어 있다.

따라서 본 현장 실측결과를 토대로 고속철도와 일반철도의 강화노반 설치 기준(안)을 표 3.10.3과 같이 제시한다.

표 3.10.3 고속철도와 일반철도 강화노반 두께 조정 기준(안)

| 노면형상 | 궤도 조건 | | 자갈궤도 | | | | 콘크리트궤도 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 일반철도 | | 고속철도 | | | |
| | | | 보조 도상층 | 입도 조정층 | 보조 도상층 | 입도 조정층 | 보조 도상층 | 입도 조정층 |
| 쌓기 | 일반 철도 | $k_{30} \geq 110MN/m^3$ | 200 | 200 | 200 | 200~ 300 | 200 | 200~ 300 |
| | 고속 철도 | $E_{v2} \geq 80MN/m^3$ | | | | | | |
| 깎기 및 평지 | 일반 철도 | $k_{30} \geq 110MN/m^3$ | 200 | 300 | 200 | 200~ 500※※ | 200 | 200~ 550※ |
| | 고속 철도 | $E_{v2} \geq 80MN/m^3$ | | | | | | |

*※콘크리트궤도 입도조정층 기준(안) 중에서 현장여건이 깎기부 및 평지이고*

*①동결지수가 550℃·days 이상인 지역에서, 물이 솟거나, 하루 중 반나절 이상이 음지인 구간이 50m 이상 계속되는 구간에서는 고속철도 콘크리트궤도를 설계, 시공할 때 입도조정층의 두께로서 550mm를 적용한다.*

*②동결지수가 550℃·days 이상인 지역에서, 물이 솟지도 않고, 하루 중 반나절 이상이 양지인 구간이 50m 이상 계속되는 구간에서는 고속철도 콘크리트궤도를 설계, 시공할 때 입도조정층의 두께로서 450mm를 적용한다.*

*③동결지수가 550℃·days 미만인 지역이고, 하루 종일 양지든 음지든 물이 솟지 않는 구간이 50m 이상 계속되는 곳에서는 고속철도 콘크리트궤도를 설계, 시공할 때 입도조정층의 두께로서 450mm를 적용한다.*

*④동결지수가 400~ 550℃·days 미만인 지역에서도, 하루 중 반나절 이상이 양지든 음지든 물이 솟는 구간이 50m 이상 계속되는 구간에서는 고속철도 콘크리트궤도를 설계, 시공할 때 입도조정층의 두께로서 550mm를 적용한다.*

*※※자갈궤도 입도조정층 기준(안) 중에서 현장여건이 깎기부 및 평지이고*

*①동결지수가 550℃·days 이상인 지역에서, 물이 솟거나, 하루 중 반나절 이상이 음지인 구간이 50m 이상 계속되는 구간에서는 고속철도 자갈궤도를 설계, 시공할 때 입도조정층의 두께로서 500mm를 적용한다.*

*②동결지수가 550℃·days 이상인 지역에서, 물이 솟지도 않고, 하루 중 반나절 이상이 양지인 구간이 50m 이상 계속되는 구간에서는 고속철도 자갈궤도를 설계, 시공할 때 입도조정층의 두께로서 450mm를 적용한다.*

*③동결지수가 550℃·days 미만인 지역이고, 하루 종일 양지든 음지든 물이 솟지 않는 구간이 50m 이상 계속되는 곳에서는 고속철도 자갈궤도를 설계, 시공할 때 입도조정층의 두께로서 450mm를 적용한다.*

*④동결지수가 400~ 550℃·days 미만인 지역에서도, 하루 중 반나절 이상이 양지든 음지든 물이 솟는 구간이 50m 이상 계속되는 구간에서는 고속철도 자갈궤도를 설계, 시공할 때 입도조정층의 두께로서 500mm를 적용한다.*

# 제 11절 철도 Box 구조물 결로 방지 대책

## 1. 결로의 정의

찬 액체를 컵에 담을 때 컵 바깥쪽에 물방울이 맺히는 현상이나 석양 무렵 창 유리가 뿌옇게 되는 현상을 결로(結露)라고 한다. 결로는 주위에서 자주 접할 수 있는 현상이다. 결로의 종류에는 찬 물질을 담은 컵의 외부나 유리창, 벽의 표면에 생기는 표면결로와 건물의 벽이나 바닥의 내부에서 생겨 눈에 잘 보이지 않는 내부결로가 있다.

## 2. 결로의 발생 메커니즘

우리 주변의 공기는 수증기라고 하는 눈에 보이지 않는 형태의 수분을 포함하고 있다. 공기가 기체로서 포함할 수 있는 수증기의 양은 온도에 따라 다른 한계가 있는데, 온도가 낮을수록 포함할 수 있는 양이 줄어든다.(한계량에 대한 실제의 수분량을 %로 표시한 것이 습도다.)

즉, 공기가 온도가 낮은 물체와 접촉하여 차거워질 때 그 차거워진 상태에서 공기 중에 수증기를 포함할 수 있는 양이 줄어들어 결국 한계치를 초월한 양이 액체인 물로 변하는 현상이 결로다.

## 3. 결로가 발생하기 쉬운 조건

결로는 습도가 높은 곳이나, 표면온도가 낮은 장소, 환기가 잘 되지 않는 곳에서 쉽게 발생한다.

## 4. 철도 Box구조물의 결로 방지 대책

가. 표면결로를 방지하는 방법

(1) 결로가 생기기 쉬운 곳의 습도를 낮춘다. 따라서 Box 구조물과 같은 곳에서는 환기 fan이나 환기구를 설치하여 환기를 자주 시킨다.

(2) 결로가 생기는 장소의 온도를 높인다. 외기에 접하는 곳의 단열성능을 높이기 위하여 EPS나 XPS 같은 단열재를 설치한다.

(3)결로 방지 페인트를 칠한다.

일본 독립행정법인 우주항공연구개발기구(宇宙航空研究開發機構)는 우주선이 발사되어 우주에 진입할 때 발생하는 열로부터 로켓 선단부(fairing)를 보호하기 위한 특수 페인트를 개발하였다. 이 페인트는 중공(中空) 세라믹 bead와 아크릴 실리콘 수지를 사용하여 제조한 제품으로서 열의 이동을 최소화한다. 따라서 결로가 발생하는 철도 Box 구조물 내부나 공동구 내부, 기타 토목구조물 및 주택(방)의 내부에 이 페인트를 칠할 경우 결로 발생을 최소화할 수 있다.

일본에서는 동경에 있는 일진산업 또는 시마네현(島根縣) 마쯔에(松江) 페인트사에서 GAINA라는 상표로서 제조, 판매하고 있다.

이와 비슷한 기능을 하는 페인트로서 외벽에 칠하는 Tough Coat라는 페인트도 (주) ADVANCE라는 곳에서 제조하여 판매하고 있다.

(4) 결로 차단 sheet 사용

부직포에 고흡수성수지(super absorbent polymer)를 칠한 두루마리 형태의 sheet로서 흡방습(吸放濕) 속도가 빠른 특징이 있다. 구조물의 모양, 크기에 맞게 잘라서 사용할 수 있다. 철도 Box 구조물, 공동구 내부, 기타 토목구조물 및 건축구조물의 결로 방지에 사용한 실적이 있다. 동경의 특종지(特種紙)상사(주)에서 판매하고 있다.

나. 내부 결로 대책

내부 결로는 수증기가 벽 등을 통과하여 일어나므로 찾기도 어렵고 대책도 어렵지만 방습 sheet를 Box 구조물 내부(합판과 단열재의 사이)에 부착하는 방법이 있다. 주택일 경우 지붕의 함석과 단열재의 사이로 공기가 흐르는 공간을 만들어서 습기가 벽체 밖으로 빠져나가도록 하는 방법이 이용되고 있다.

## 제 12절 종합 결론

1. 국내 재래선 자갈도상에서의 동상 피해가 전국적으로 매우 심하였다. 자갈도상의 동상피해는 태백선, 영동선, 경원선, 충북선, 경부선, 전라선 등 전 철도 노선에서 발생하고 있었으며, 동상을 방지하기 위해 현장에서는 주로 자갈치기라고 하는 치환방법과 염화칼슘 살포법을 적용하고 있었다. 그러나 자갈치기는 효과적인 작업시기 예측의 어려움과 최적의 자갈치기 두께를 어떻게 결정할 것인가 하는 문제점이 있다. 즉 해당지역 철도노선의 자갈도상에 대한 최대 동결깊이를 먼저 알아야 한다. 이를 위해서는 추가적으로 3년 이상 자갈도상 동결깊이 실측 연구를 통해 자료를 축적하고, 최적의 "철도 자갈도상용 동결깊이 산정식"을 필히 개발해야 할 것으로 판단된다.
2. 자갈도상의 동상방지를 위해 자갈에 염화칼슘을 살포할 경우 다음 해 여름 강우시 모두 씻겨 나가므로 그 효과가 장기적이지 못하다는 단점이 있었다.
3. 일본, 독일, 핀란드, 러시아 등의 동토국가에서는 자갈도상 밑에 XPS를 설치하는 방법이 적용되고 있었으며, 그 효과도 컸다. 따라서 국내에서도 철도도상의 종류(자갈도상, 콘크리트도상) 및 노반 위치별(성토부, 깎기부, 암반부, 물이 솟는 곳과 솟지 않는 곳 등)로 동결깊이를 좀더 장기간 실측하고, 노반 흙의 종류별 열전도율시험 및 동상량, 동상력시험을 실시한 후 최적 XPS 설치 두께와 설치 방법을 제시하는 연구를 추가로 실시하여 재래선 철도 자갈도상의 동상피해를 대폭 줄여야 할 것으로 사료된다.
4. 철도 현장에서의 계측 결과, 콘크리트도상에서의 동결깊이가 자갈도상에서의 동결깊이 보다 깊게 나타났다. 특히 강원도지역 콘크리트도상에서는 동결지수 581.4℃·day일 때 동결깊이가 124.5cm로 나타나 현행 KTX 콘크리트도상 설계기준(KR C-04020; 2012년 12월 5일 개정)의 강화노반 최대두께(117cm)를 초과하였다. 사실 국내 강원, 경기 북부, 충북 북부, 경북 북부 등 한랭지 동결지수는 650℃·day 내지 750℃·day에 이르는 겨울이 많으므로 현재 진행중인 원주-강릉간 고속철도 등 한랭지 고속철도공사의 안정성을 확보하기 위하여 필히 추가 "철도 도상 동상방지 연구"를 통해 보조도상층이나 입도조정층의 최적 깊이(두께)를 현장 여건(성토부, 깎기부, 암반부, 하루 종일 양지인 곳과 음지인 곳, 물이 솟는 곳과 그렇지 않은 곳, 터널 출입구 50m 부분 등)에 맞게 증대시켜야 할 것으로 판단된다.

5. 고속철도 강화노반 재료에 대해 -25℃에서 48시간 동안 (동결지수로 환산하면 50℃·day) 동상력을 측정한 결과 함수비가 21% 이상일 경우에는 콘크리트도상에 영향을 줄 수 있는 동상압(0.887 t/$m^2$)이 작용하였다. 강원도지방의 동결지수가 650~750℃·day인 점을 감안하면 가을철 강우에 의한 빗물이 강화노반에 침투할 경우 콘크리트도상에서 동상에 의해 피해를 입을 가능성이 있으므로 이에 대한 대책 마련에 대해서도 장기적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.
6. 현장 실측 결과를 토대로 자갈도상, 콘크리트도상에 대한 동결깊이 산정 간편식은 동결지수에 따른 국내 철도노반의 동결심도 변화 경향을 파악할 수 있는 참고용으로 사용할 수 있다. 단열재를 포함하지 않는 비교적 균일한 지반에서는 본 연구를 통해 개발한 FDDP 프로그램을 사용하고 단열재가 포함된 다층 지반에서는 FDAP 프로그램을 사용하여 동결심도를 산정할 것을 제시한다.
7. 호남고속철도 현장에서 채취한 콘크리트도상 입도조정층 재료에 대해 -25℃에서 65시간 동안 동상력을 측정한 결과 입도조정층재료에 강화노반토가 25% 혼입되고, 포화도가 90%일 경우는 동결 시 동상압 0.169kg/$cm^2$가 작용해 실제 콘크리트도상을 들어올릴 가능성이 충분히 있었으므로 이에 대한 대책연구가 필요하다.
8. 동상이나 다른 영향에 의한 강화노반토의 지지력 평가 및 쇄석 혼합에 의한 지지력 보강효과를 평판재하시험을 통해 밝혔다.
9. 단열재 사용 시 자갈도상의 동결깊이 차단 효과를 알아 보기 위하여 대형 냉동챔버에서 자갈도상 모형실험을 실시하여 XPS, PE골재 등 단열재를 자갈도상 상부에 보호층으로 설치했을 경우의 동결깊이 차단효과를 규명하였다.
10. PE골재 혼합 아스팔트층을 자갈도상 하부에 포설했을 때의 동결깊이 차단 효과를 알아 보기 위해 PE골재 혼합 아스팔트의 열전도 특성, Marshal안정도시험, 동결융해 반복 후의 강도 특성, 동결융해 반복 후의 초음파속도 그리고 Wheel Tracking시험을 통한 동적 안정도 시험을 실시하였다.
11. 철도 현장에서의 동결깊이 측정 결과를 토대로 철도도상용 동결심도 해석 프로그램을 구축하였다. 또한 도상 하부 노반이 동결 융해를 받았을 때 발생하는 침하량을 해석하는 프로그램을 구축하였다. 본 연구를 통하여 개발한 동결-융해 압밀침하 해석 프로그램은 이론해와 비교하여 검증을 하였으나 보다 실용적으로 사용하기 위해서는 앞으로 철도노반 흙에 대한 실내 융해압밀시험을 통한 Data 구축과 현장실측 Data와 비교분석이 필요하다.

# 제 4 장 목표달성도 및 관련 분야에의 기여도

## 1절. 목표 달성도

| 목 표 | 달성도 | 내용 |
|---|---|---|
| 자갈 및 콘크리트도상 하부 노반의 동결깊이 산정식 개발 | 100% | ▫ 실제 태백, 영월, 제천, 연천, 철원의 철도 옆에 철도용 자갈로 자갈도상을 만들고, KTX현장에 사용한 것과 동일한 품질, 동일한 규격으로 콘크리트도상을 만든 후 온도센서와 methylene blue로 동결깊이를 실측한 다음 동결지수와 동결깊이 상관식을 작성하였음.<br>▫ 동결심도 측정결과를 바탕으로 FDAP(Frost Depth Analysis Program)을 구축함. |
| 자갈 및 콘크리트 도상 설치시 하부 노반의 동상방지공법 개발 | 120% | ▫ 자갈도상의 동상방지를 위해 XPS, PE골재에 대한 열전도율시험을 통해 단열효과 분석<br>▫ 자갈도상 밑에 PE골재 혼합 아스팔트층을 설치, 동결깊이를 줄이기 위한 방안으로서 PE골재 혼합 아스팔트 공시체의 동결융해 반복 후 강도, 초음파속도, 열전도율시험을 실시하는 한편 Marshal안정도시험, Wheel Tracking시험, 현장 포설 시 동결깊이 차단효과실험 실시<br>▫ 강화노반재료에 대한 함수비별 동상력실험을 통해 콘크리트도상의 안정성 평가<br>▫ 강화노반 재료에 쇄석 혼입시 평판재하실험을 통한 지지력 평가 실시<br>▫ 콘크리트도상 하부 보조도상의 두께별 동결깊이 침투 현장 실험을 통해 보조도상이나 입도조정층의 유효 두께 산출<br>▫ 도상 하부 노반의 융해침하 해석 프로그램 구축<br>▫ 철도용 Box 구조물의 결로 방지대책 분석 |

## 2절. 관련 분야에의 기여도

1. 재래식 자갈도상의 동결깊이 예측식 제안을 통해 동결지수 변화에 따른 노반의 강화 깊이(비동상성 재료로 치환하는 깊이)를 정확히 산출할 수 있게 되어 노반의 동상에 대한 보강법의 효율적 시공 가능(공사비 절감), 기후 변화 시 동상 발생 깊이 예측을 통해 사전에 피해 방지 대책 수립 가능

2. 신설 콘크리트도상 공사 시 보조기층이나 입도조정층의 두께를 탄력적으로 운용할 수 있게 함으로써 동상 피해 사전 방지: 열차 운행 시 안정성 확보

3. 철도용 Box 구조물 결로 방지를 통한 내구성 향상

# 제 5 장 연구개발 결과의 활용 계획

## 1절. 연구 결과의 활용 방안

□재래식 자갈도상의 동상방지 대책 수립 시 활용

- 자갈 도상의 동상 가능성 평가를 위한 동결깊이 예측식(안) 제시
- 19mm PE골재 2.5% 추가한 아스팔트층 설치에 따른 자갈 도상 동상 감소 방안 제시
- 자갈 도상 하부에 XPS 설치에 따른 자갈 도상 동상 감소 방안 제시

□ KTX 콘크리트도상 하부 노반의 동상 및 융해 방지 대책 수립 시 활용(현행 고속철도 콘크리트도상 하부 강화노반 보완 자료 근거 제공 (KR C- 04020 기준)

- 보조도상 두께 증가 (최소 500mm)에 따른 동상 감소 방안 근거 자료 제시
- KTX 콘크리트도상에서의 동결깊이 평가를 위한 동결깊이 산정식(안) 제시

□ 한국 철도의 시베리아 횡단철도 진출을 위한 사전 러시아 기술 수준 분석 시 필요한 기술자료 제공

-러시아 철도 도상 크리프 및 융해 침하 해결 기술지침서 번역 제시

□ 철도용 Box 구조물 결로 방지 대책 제시를 통한 철도 구조물의 내구성 향상

## 2절. 기대성과 및 파급 효과

▫ 재래식 철도 운행 시 안정성 확보

▫ KTX 고속철도 건설 공사의 안정적 설계 (현행 기준 KR C- 04020 고속철도 강화노반 두께 개정할 수 있는 현장 실험 자료 (근거) 제시)

▫ 장래 북한 철도나 시베리아 횡단 철도 등 장래 해외 철도 진출 시 활용

▫ 철도 운행시 안정성 증대

▫ 철도 시설물 유지 보수 예산 절감

# 제 6 장 연구개발 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

1. 연구 과정에서 수집한 독일의 도로 포장체(동상관련) 가이드라인 :연구 보고서 부록에 게재
2. 러시아 철도 궤도 동상관련 기술적 가이드 라인 : 연구 보고서 부록에 게재

# 제 7 장 참고 문헌


1. 건설교통부 (2007), 남북한지역 전국 동결지수선도, p 3.
2. 국립건설연구소 (1980), 우리나라 각 지방의 동결깊이 조사보고서, pp. 3-36.
3. 김도열 (2000), “평판재하시험을 이용한 지지력 및 침하량 산정시 문제점과 개선방안 연구”, 경복대학 경복논총 No. 4, pp. 601-617
4. 김영진, 강병희 (1998), “폐타이어를 이용한 지반동상 방지”, 한국지반공학회 논문집 제 14권 제 1호, pp. 49-58.
5. 김영진, 유준, 김현민 (1999), 동결심도 및 포장체 온도분포조사, 한국건설기술연구원, pp. 5-25.
6. 김영진 (2000), “폐비닐을 건설골재로 재활용하기 위한 기본 연구”, 대한토목학회지 제 48권 제 6호, pp. 81-87.
7. 김영진 (2005), “폐비닐 골재를 활용한 도로포장 동상방지에 관한 실용화 연구”, 한국건설기술연구원, pp.15-35.
8. 김영진 (2006), “동결심도 및 포장 내부 온도 조사” 한국건설기술연구원
9. 김영진, 홍승서 (2006), “폐비닐 골재를 활용한 도로동상방지 기술”, 한국지반환경공학회 2006 학술발표회 논문집, pp. 339-348.
10. 김영진, 홍승서 (2008), “노상토의 동결-융해 반복 후의 투수계수 및 동상특성 변화”, 한국지반환경공학회 2008 학술발표회 논문집, pp.347-350.
11. 김영진, 성기태, 김현석, 김은영 (2013) , 폭설시 도로의 융설능력 및 동결제어능력 향상 포장공법 개발, 자연재해저감기술개발사업단, 소방방재청, PP.56-70, pp.86-90.
12. 김영진, 김학승 (2009), “EPS조각 혼합토의 열전도 특성에 관한 연구”, 한국지반환경공학회 2009년 봄학술발표회논문집, pp. 400-405.
13. 김영진, 임진선, 정진훈 (2012), “폐비닐 골재를 사용하는 아스팔트 혼합물의 열특성 실험”, 한국도로학회 2012년도 봄 학술대회 논문집, pp.203-208.
14. 박태권, 이영휘, 김연복, 노관섭, 이정도, 유인균, 김영국 (1988), “1986 AASHTO 도로포장구조설계지침서”, 한국건설기술연구원, pp. 43-48.
15. 박홍규, 김경록 (2003), 한국지반환경공학회 논문집 제4권 제1호, pp. 41-48

16. 박홍규 (2011), 최신토질시험법, pp. 135-146
17. 신은철, 김성환, 박정준 (2012), 온도조건에 의한 도로하부 지반의 동결 및 지지력 특성, 한국지반공학회논문집, 제28권 3호, pp. 5-14.
18. 신은철, 박정준 (2003), 동결토의 동상팽창압 특성에 관한 실험적 연구, 한국지반공학회논문집, 제19권 2호, pp65-74.
19. 이경배, 이승우 (2007), “제설제가 콘크리트 포장 파손에 미치는 영향”, 대한토목학회논문집 제 27권 제 1 D호, pp. 73-80.
20. 이기복 (1998), EPS 공법, 과학기술, pp.25-59.
21. 이 송, 김태훈, 이재현 (2011), 토질시험법, pp. 170-180
22. 이승열, 김영철, 김남홍, 김명수 (2010), “폐타이어 칩을 활용한 철도노반 동상저감에 대한 실험적 고찰”, 한국철도학회 2010년 춘계학술대회논문집, pp.633-639.
23. 이진욱, 최찬용, 이성혁, 이성욱 (2005), “국내 철도노반의 분니실태 조사 및 분석”, 2005년도 대한토목학회 정기 학술대회, pp. 5080-5083
24. 전재철 (2001), 구조용 강재의 부식피로 강도에 미치는 산성안개 및 염화칼슘의 영향, 강원대학교
25. 정두영, 오병현 (1993), “化崗風化土의 土質定數에 의한 設計CBR의 推定”, 全北大學校 論文輯 第25輯 自然科學篇, pp. 59 ~ 65
26. 최주섭, 송준상, 민달기, 유희찬 (1997), “음식물쓰레기 퇴비화정책의 미래”, 유기성자원학회 학술발표대회 논문집, PP. 1-7.
27. 최찬용, 이성혁, 배재훈, 박무희 (2011), “소형 FWD와 반복평판재하시험에서의 변형계수($E_{v2}$)와의 상관관계 평가”, 한국토목섬유학회논문집 제10권 3호 2011년 9월, pp. 33 ~ 41
28. 한국철도시설공단, 철도설계기준(노반편) (2011), pp. 4-18 - 4-25.
29. 한국기술표준원, 한국산업표준(KS : Korean Industrial Standards), KS 규격집
30. 홍성완, 김영진(1992) “동토지역 기초구조물의 최적 설계, 시공 기법개발 연구”, 한국건설기술연구원 보고서
31. 한대석 (1991), “흙의 열전도율 산정법에 관하여”, 한국지반공학회지, 7(3), pp. 65-72.
32. 한창용, 이준석, 조국환 (2011), “철도 소형구조물에서의 동상저감방안 연구”, 한국철도학회 2011년도 정기총회 및 추계학술대회, pp. 1129-1135.

33. 환경부 (2005), 폐기물 관리법
34. 高志 勸, 生頼孝博, 山本英夫 (1980), “土の間隙水の粘性增加による凍上抑制に關する實驗的研究”, 土木學會論文報告集, 第 298號, pp. 77-85.
35. 高志 勸, 益田 捻, 山本 英夫 (1974), “土の凍結膨脹に及ほす凍結速度, 有效應力の影響に關する研究”, 雪氷36卷, 2號, pp. 135-154.
36. 國土交通省 北海道 運輸局 鐵道部(2011) “北海道 新幹線って”
37. 了戒公利 (1981), “一定拘束應力下におげる飽和しだ凍上特性”, 清水建設研究所報 33號.
38. 了戒公利 (1981), “一定拘束應力下におげる飽和しだ正規壓密粘土の凍上特性”, 第 36回 土木學會年次學術講演會.
39. 粕渕辰招 (1973), “土壤の熱伝導機構に關する諸問題”, 農業氣象, 第 29卷, 第 3號, pp.201-208.
40. 日本土質工學會 (1982), 土の凍結, 日本土質工學會, p 35.
41. 中村公道, 高橋行茂 (1979), “土の凍結膨脹と粒度·比表面的との相關についっで”, 第14回 土質工學研究發表會.
42. (社)地盤工學會北海道支部(2009),寒冷地地盤工學-凍上被害とその對策-, pp.126-129.
43. Ayers E.S., Campbell R.B. (1951), "Freezing point of water in soil as resulted to salt and moisture contents of soil", Soil Sci. 72, pp.201-206.
44. Alptransit Gotthard (2013) " Gotthard Base Tunnel"
45. Bouyoucos, G. J. (1920), "Degree of temperature to which soils can be cooled without freezing", Journal of Agricultural Research, pp.267-269
46. Beskow, G. (1935), "Soil freezing and frost heaving with special application to road and railroads, with special supplement for the english translation of progress form 1935 to 1946. translated by J. O. Osterberg", The Technical Institute, Northwestern University, Evanston, Ⅲ, U.S.A., pp.130-145.
47. Casagrande, A. (1932), Discussion of "A new theory of frost heaving" by A.C. Benkelman and F.R. Ohlmstead, proceeding of the highway research board, Vol. 11, pp.168-172.
48. Chamberlain, E. J., Gow, A.J. (1979), "Effect of freezing and thawing on the

permeability and structure of soils", Engineering Geology, Vol. 13, pp. 73-92.
49. Comtec Research, SMAP-2D User's Manual, www.ComtecResearch.com
50. Comtec Research, SMAP-T2 User's Manual, www.ComtecResearch.com
51. Crory, F. E. (1973). "Settlement Associated with the Thawing of Permafrost", North Am. Contrib. 2d Int. Conf. Permafrost, Yakutsk, U.S.S.R., National Academy of Sciences, Washington, pp. 599-607.
52. David C, Paul C (1991), "The design and performance of road pavements", pp. 157-187
53. Dore, G. and Zubeck, H. K. (2009). "Cold Regions Pavement Engineering", ASCE Press, McGraw Hill
54. Dysli, M. (1991), Le gel et son action sur les sols et les fondations, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
55. Farouki, O. T. (1981), "Thermal properties of soils", US Army Cold Regions Res. and Eng. Lab. Technical Rept. 178, p 6.
56. Freden, S. (1966), "Mechanism of frost heave and its relation to heat flow", Proceeding of 6th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, No. 1, pp. 41-45.
57. Gandahl, R. (1985), "Polystyrene foam as a frost protection measure on national roads in Sweden", Transportation Research Record. 1146, pp.1-9.
58. Hartmak, H(1979), "Frost Protection of Railway Lines", Engineering Geology, Vol.13
59. Hill, D., Morgenstern, N. R., (1976), "Influence of load and heat extractionon moisture transfer in freezing soils", International Symposium, University of Lulea, Sweden, Feb., pp. 16-18.
60. Hoekstra,P., Chamberlain,E and Frate, A.Frost Heaving pressure, Cold Region Research Engineering Laboratory, Report 176.(1965)
61. Liu, Jiankun(2012), "Freezing Thawing -Behavior of Soils: State of the Art", Manuscript of Seminar at KICT
62. Johnston, G. H. (1981), Permafrost. engineering design and construction, Associate committee for Geotechnical Research National Research council of

Canada, Wiley, Toronto.

63. Kersten, M. S., (1949), "Thermal properties of soils", University of Minnesota, Institute of Technology, Engeering Experiment Station, Bulletin No. 28, p 227.
64. Kim, K. J. (1982). "Finite Element Analysis of Nonlinear Consolidation", Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign.
65. Konard, J.F., "Discrete Ice Lens Theory for Frost Heave in Soils", Can Geotech J., Vol.28, pp.843-859.(1982)
66. Konrad, J. M., Seto, J.T.C. (1994), "Frost heave characteristics of undistributed sensitive Champlain sea clay, Canadian Geotechnical Journal, pp. 285-298.
67. Kuroda, T.(1980), "Theoretical Study of Frost Heaving", Proc. of the 4th International Symposium on Ground Freezing, Vol.1 pp.39~46.
68. Luis E (2001), "Interpretation of the limits in shear strength in binary granular mixture"
69. Morgenstern, N. R. and Nixon, J. F. (1971). "One Dimensional Consolidation of Thawing Soils", Can. Geotech. J. 8, (4), pp. 558-565.
70. Neumann, F. (1860). Lectures Given in the 1860's, Cl. Riemann-Weber, Die Partiellen Differentiagleichungen der mathematischen Physik, 5th Edition, Vol. 2, P. 121.
71. New Civil Engineer(2011), "High Speed Intercity Passanger Rail Programme"
72. Nixon, J. F. and Morgenstern, N. R. (1973). "Practical Extension to a Theory of Consolidation for Thawing Soils", North Am. Contrib. 2d Int. Conf. Permafrost,
73. Nixon, J. E., and Morgenstern, N. R. (1974). "Thaw-Consolidation Tests on Undisturbed Fine-Grained Permafrost", Can. Geotech. J., 11(1) : 202-214.
74. Penner, F. (1960), "The importance of freezing rate in frost action in soils", Proceeding of American Society of Test Materials, Vol. 60, pp. 1151-1165.
75. Schofield R. K. (1935), "The pF of the water in soil", 3rd Int Cong Soil Sci, pp. 37-48, 182-186
76. Taber, S. (1929), "Frost heaving", Journal of Geology, Vol. 37, pp. 428-461.

77. Terzaghi, K. (1943). "Theoretical Soil Mechanics", John Wiley, New York
78. Tice, A. R., C. M. Burrous, D. M. Anderson (1977), "Phase composition measurements on soils 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.
79. Tsytovich, N. A. (1958). "Bases and Foundations on Frozen Soils", NAS NRS Publ. 804, Highw. Res. Board Spec. Rep. 58.
80. Transportation Research Board (1974), "Factors fundamental to frost action" Roadway Design on Frost Areas, National Cooperative Highway Program No. 26, p 7.
81. Uhlman, D. R. and Jackson, K, A.(1966), " Frost Heave in Soils", Physics of Snow and Ice Vol. 1, Part 2, pp. 1361~1373
82. U.S. Army Corps of Engieers (1985), TM 5-818-2 "Pavement design for seasonal frost conditions", Departments of the Army and the Air Force, Washington D.C., Chapter 2, pp. 2-5.
83. U.S.S.R. Building Code. (1960). "Technical Considerations in Designing Foundations in Permafrost (SN 91-60)", State Construction Publishing House Moscow, Res. Counc. Can. Tech. Trans. 1033.
84. Watson, G. H., Rowley, R. K. and Slusarchuk, W. A. (1973). "Performance of a Warm-Oil Pipeline Buried in Permafrost", North Am. Contrib. Proc. 2d Int. Conf. Permafrost, Yakutsk, U.S.S.R., National Academy of Sciences, Washington, pp. 759-766.
85. Yakutsk, U.S.S.R., National Academy of Sciences, Washington, pp. 369-377.

# 부록 - I

# 도로 포장체 표준화 가이드 라인

RStO 01

2001년판

**독일 도로 교통 연구소**

자동차 및 차도 연구 그룹

# 목차


1. 일반 사항.....1
2. 근거.....1
2.1 기술 규칙.....1
2.2 개념.....3
2.2.1 구조.....3
2.2.2 복구.....6
2.2.3 교통량.....6
2.2.4 교통 하중.....6
2.3 도로 구조의 두께 결정 기준.....6
2.4 배수.....7
2.5 공법 평가 및 선택.....7
2.5.1 신축.....7
2.5.2 복구.....8
2.6 공사 등급 및 교통 하중.....9
2.6.1 차도.....9
2.6.2 버스 차도.....10
2.6.3 부대 시설 및 휴게 시설.....11
2.6.4 주차 구역.....11
2.6.5 기타 도로.....11
2.7 특별 하중.....12

3. 차도 신축 및 차도 절삭 복구.....12

3.1 노상/노반.....12
3.1.1 F2 및 F3 흙.....12
3.1.2 F1 흙.....13
3.2 내동해성 포장체의 최소 두께.....14
3.2.1 일반 사항.....14
3.2.2 최소 두께 결정을 위한 기본값.....15
3.3 포장체.....17
3.3.1 공법 및 층 두께.....17

3.3.2 기층.....18
3.3.3 아스팔트 표층.....20
3.3.4 콘크리트 표층.....20
3.3.5 블록 표층.....20
3.3.6 특수성.....21
3.4 시가지 내 도로에 대한 보충 지침.....21

4. 차도 덧씌우기 복구.....29
4.1 기존 포장의 가치 평가.....29
4.1.1 표면 상태.....29
4.1.2 지지력.....29
4.1.3 현재 포장의 유형 및 상태.....30
4.1.4 배수 장치.....37
4.2 동상 방지 포장체 두께.....30
4.3 복구 공법.....30
4.4 복구 등급.....31
4.4.1 아스팔트 공법 복구.....31
4.4.2 콘크리트 공법 및 블록 공법 복구.....32
4.5 구성 및 설계.....32
4.5.1 일반 사항.....32
4.5.2 아스팔트 공법.....32
4.5.3 콘크리트 공법.....32
4.5.4 블록 공법.....32
4.6 기존 포장 부분 교체 시 덧씌우기 복구.....33

5. 기타 차도의 신축 및 복구.....35
5.1. 버스 차도.....35
5.1.1 공법 및 층 두께.....35
5.1.2 구성 및 설계.....35
5.2 자전거 도로 및 인도.....35
5.2.1 공법 및 층 두께.....35
5.2.2 구성 및 설계.....35
5.3 주차 구역.....36

5.3.1 공법 및 층 두께.....36
5.3.2 구성 및 설계.....36
5.4 부대 시설 및 휴게 시설.....36
5.4.1 공법 및 층 두께.....36
5.4.2 구성 및 설계.....36
5.5 소방 도로.....36
5.6 도로 내 선로 구역.....36

부록 1: 등가 10톤 축하중 누가 통과량 B 산출.....38
부록 2: 예시.....44

1. 일반 사항

“도로 포장체 표준화 가이드라인” 2001년판(RStO 01)은 시가지 안팎에 위치하는 도로의 표준적인 포장체 신축 및 복구를 규정한다. 단락 3.4의 규정은 예외로 하고 단계별 공사는 다루지 않는다.

지방 도로에 대해서는 별도의 기술 규칙이 적용된다.

RStO는 경제적이며 기술적으로 적합한 공법을 적용함으로써 차도 및 기타 도로에 대한 포장 기준을 만들고 고수하는 데 기여한다. RStO는 무엇보다도 차도의 기능, 교통 하중, 지역 내 차도의 위치, 흙의 조건, 복구할 차도의 공법 및 상태 그리고 탁 트인 구간과 시가지에 의해 생겨나는 조건들을 고려한다.

RStO는 도로 포장의 건축 및 이용 시의 경험, 각기 다른 공법의 특성을 평가하기 위한 경제적 조사 및 계산으로부터 얻은 지식을 고려하여 결정된다.

2. 근거

2.1 기술 규칙

- 건축업 고용 규정 part C: 건축업에 대한 일반적인 기술적 계약 조건(ATV),

-DIN 18299 모든 유형의 건설 노동에 관한 일반적인 규정

-DIN 18300 토목 공사

-DIN 18315 도로 건설 공사 - 바인더를 사용하지 않는 포장층

-DIN 18316 도로 건설 공사 - 수경성 바인더를 사용하는 포장층

-DIN 18317 도로 건설 공사 - 아스팔트 포장층

-DIN 18318 도로 건설 공사 - 블록 표층, 슬래브 표층, 연석

-DIN 18196 토목 공사 및 기초 공사; 토목 공사 목적을 위한 토질 분류

- 아스팔트 표층 건설에 대한 추가의 기술적 계약 조건 및 가이드라인(ZTV Asphalt StB), FGSV 799

- 콘크리트 표층 건설에 대한 추가의 기술적 계약 조건 및 가이드라인(ZTV Beton StB), FGSV 899

- 도로의 줄눈에 대한 추가의 기술적 계약 조건 및 가이드라인(ZTV Fug-StB), FGSV 889[1)]

1) RStO 발행 시점에 편찬 중.

- 블록 표층 및 슬래브 표층의 건설에 관한 추가의 기술적 계약 조건 및 가이드라인(ZTV P-StB), FGSV 699
- 도로 공사 중 기층에 대한 추가의 기술적 계약 조건 및 가이드라인(ZTV T-StB), FGSV 999
- 도로 공사 중 토목 공사에 대한 추가의 기술적 계약 조건 및 가이드라인(ZTV E-StB), FGSV 599
- 아스팔트 공법의 도로 유지에 대한 추가의 기술적 계약 조건 및 가이드라인(ZTV BEA-StB), FGSV 798
- 콘크리트 공법의 차도 유지에 대한 추가의 기술적 계약 조건 및 가이드라인(ZTV BEB-StB), FGSV 898
- 지방 도로 포장에 대한 추가의 기술 규정 및 가이드라인(ZTV LW)(바인더를 사용하지 않는 표층의 경우), FGSV 975
- 도로 공사 중 배수 장치의 건설에 대한 추가의 기술적 계약 조건 및 가이드라인(ZTV Ew-StB), FGSV 598
- 도로 포장의 유지 조치 계획에 대한 가이드라인, FGSV 9881
- 도로 시스템 가이드라인(RAS), part: 배수(RAS-Ew), FGSV 539
- 취수 구역 내 도로에 대한 건축학적 조치 가이드라인(RiStWag), FGSV 514
- 도로 공사와 관련한 산업적 부산물 및 재활용 건축 자재의 친환경적 활용에 대한 가이드라인(RuA-StB), FGSV6421
- 수질 보호 구역 내 기존 도로에 대한 조치 지침, FGSV 548
- 배수 콘크리트 기층에 대한 규정(DBT), FGSV 827
- 버스 도로 건축에 대한 규정, FGSV 949
- 도로의 동해 손상 예방에 대한 규정, FGSV 545
- 도로 노면의 상태 파악 및 평가에 대한 연구서, FGSV AP 9
- FLL(독일 조경 및 조경 발전 연구 협회)의 쇄석 도로 건설 및 관리에 대한 권장안.

2.2 개념

2.2.1 구조

도로의 구조는 다음과 같이 나뉜다:

- 포장체,
- 노반(경우에 따라),
- 노상.

각 층들의 위치, 경계 및 명칭은 그림 1~3에서 볼 수 있다. 또한 해당 그림들은 표 7의 4.1~4.3에 제시된 장소적 조건을 보여준다.

| | |
|---|---|
| 포장체 | 표층과 하나 또는 다수의 기층으로 구성됨. |
| 풀바운드 (full-bound) 포장체 | 아스팔트 포장체의 경우: 시공기면 바로 위에 아스팔트 표층과 아스팔트 기층이 위치함.<br>콘크리트 포장체의 경우: 시공기면 바로 위에 콘크리트 표층, 토목 섬유 그리고 수경성 바인더를 사용하는 기층이 위치함. |
| 아스팔트 표층 | 아스팔트 중간층과 그 위에 놓이는 아스팔트 표층 또는 아스팔트 표층만으로 구성됨. |
| 콘크리트 표층 | 한 개 또는 두 개 층의 콘크리트 층 |
| 블록 표층 | 보도 블록, 블록 베딩, 줄눈 채움재 |
| 슬래브 표층 | 슬래브, 슬래브 베딩, 줄눈 채움재 |
| 통합 표층-기층 | 기층과 표층의 기능을 동시에 충족하는 1개 층의 아스팔트층 |
| 기층 | 표층의 받침, 조성에 따라 다음과 같이 구분됨: |

- 바인더를 사용하지 않는 기층
  - 동상방지층
  - 쇄석 기층
  - 자갈 기층
- 바인더를 사용하는 기층
  - 수경성 바인더를 사용하는 기층
  - 빈배합 콘크리트 기층
  - 콘크리트 기층
  - 배수 콘크리트 기층

아스팔스 기층

노반　　노상과 포장 사이에 인위적으로 만들어진 토양체

노상　　포장체 또는 노반 아래에서 직접적으로 맞닿는 흙 또는 바위

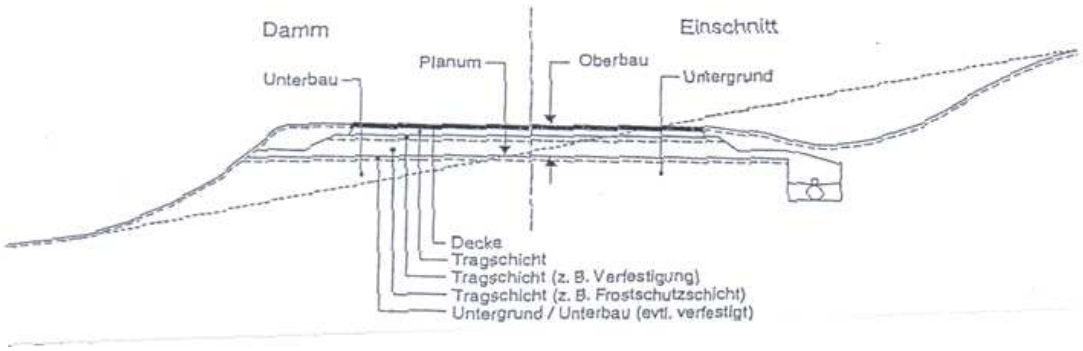



그림 1. 투수성 경계 영역을 가지는, 시가지 외부 및 시가지 내 포장 구조의 예시 - 둑/절단면

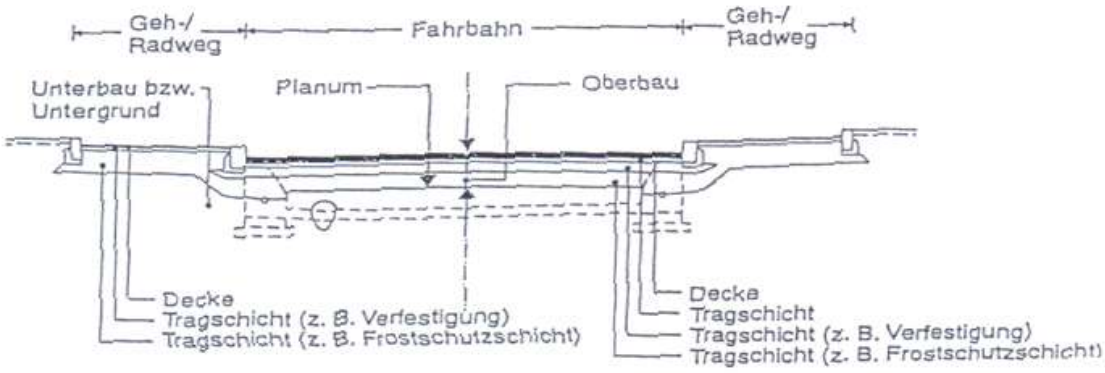



그림 2. 부분적으로 투수성 경계 영역을 지니고 배수 장치를 갖춘 시가지 내 포장 구조의 예시

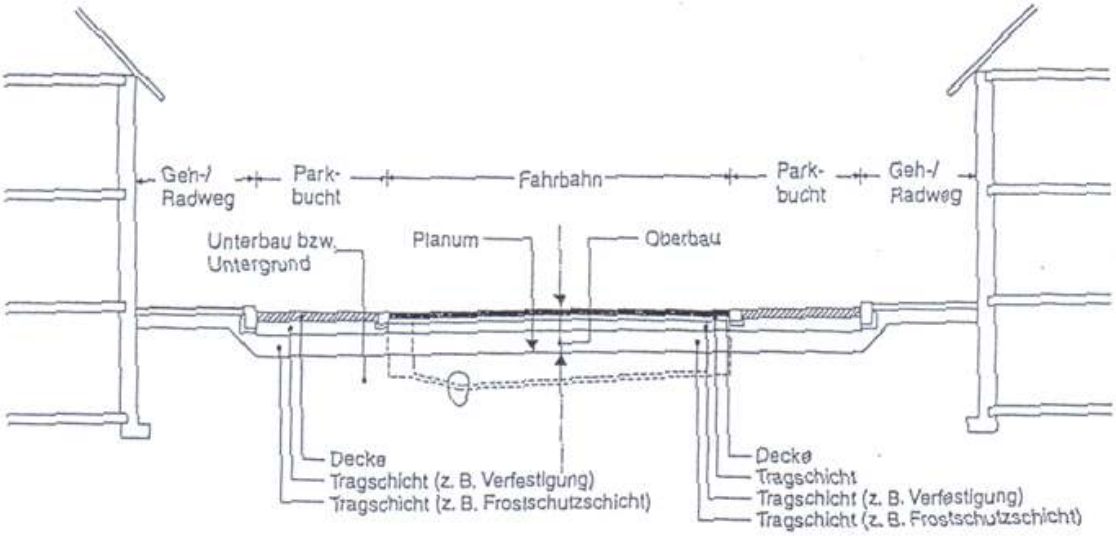



그림 3. 투수성 경계 구역을 지닌 시가지 및 측면에 건물이 밀집된 시가지 내 포장과 배수 시설을 갖춘 시가지 내 포장 구조의 예시

2.2.2 복구

차도 복구와 관련하여 다음의 개념이 추가로 적용된다:

복구 기존 차도 포장의 이용 가치 및 자산 가치를 완전히 복구하기 위한 조치, 경우에 따라 바뀐 부하 조건에 대한 조정 병행, 아스팔트 구조 복구 시에는 표층 이상, 시멘트 구조 복구 시에는 적어도 표층에 적용되는 경우에 한함.

절삭 복구 기존 포장을 완전히 교체

덧씌우기 기존 차도 포장의 하나 또는 여러 층을

복구 조성 - 경우에 따라 부적합한 층을 부분적으로 제거 후- 원래 포장의 총 두께의 융기가 4cm 이상인 경우에 한함.

2.2.3 교통량

대형트럭/버스(SV) 대형트럭/버스 교통의 유형은 허용 총 무게가 3.5톤 이상으로 트레일러, 견인 짐차를 포함하거나 포함하지 않는 트럭과 운전석 포함 9인승 이상의 버스이다.

DTV(SV)[차량 대수/24h]

대형트럭/버스의 1일 평균 교통량

DTV(SV)[차축통과수/24h]

대형트럭/버스의 1일 평균 차축 통과 횟수

2.2.4 교통 하중

등가 10t 실제적인 축하중 통과에 의한 하중, 10t

축하중 통과량 축하중 통과에 의한 하중을 바탕으로 결정됨.

등가 10t 공용 기간이 끝날 때까지 교통 하중이

축하중 누가 가장 높은 차로에서 예상해야 할,

통과량 등가 10톤 축하중 통과의 총합. 평균치 결정은 차로, 차로 넓이 및 경사 계수를 고려하여 이루어진다.

2.3 도로 구조의 두께 결정 기준

도로 구조의 두께는 다음이 보장되도록 결정해야 한다.

1. 충분한 지지력
2. 충분한 동상 방지

이때 중요한 것은 결과적으로 형성되는 보다 두꺼운 두께이다. 자전거 도로 및 인도에 대해서는 5.2.1이 적용된다.

2.4 배수

이하에 지정된 도로 구조 두께는 지속적으로 작용하는 배수 조치, 특히 시공기면에 대한 배수 조치를 전제로 한다.

지표수 배수를 위한 배수 장치 및 비탈, 노상, 노반, 동상 방지층 및 내동해성 골재층의 배수를 위한 배수 장치는 RAS-Ew에 설명되어 있다. 배수 조치에 대한 추가의 규정은 ZTV Ew-StB를 참조한다. 수질 보호 구역에서는 추가로 RiStWag에 유의해야 한다.

웅덩이, 풀바운드 포장체 영역 그리고 복구 및 확장 조치를 위한 영역에서는 또 다른 배수 조치가 필요할 수도 있다.
복구 조치 시 배수 기능 및 효율을 검사해야 한다.

2.5 공법 평가 및 선택

2.5.1 신축

아스팔트 표층 또는 콘크리트 표층을 지닌 공법은 기능유지력이라는 기본 원칙을 기준으로 결정된다. 즉 공사 등급에 따른 공법은 목표로 하는 공용 기간 동안 도로 포장의 구조적 손상이 발생하지 않도록 교통 하중을 수용할 수 있어야 한다. 몇몇 공법에서는 역학적으로 지지 력을 위해 필요한 것보다 더 두꺼운 두께가 필요한 것으로 결정되었다.

블록 표층을 이용하는 공법은 동일한 공사 등급에 속하는 아스팔트 표층 또는 콘크리트 표층 공법에 비해 그 지지력 및 공용 기간과 관련하여 특성이 동일하지 않을 수 있다. 이러한 공법은 특히 시가지 내 거리의 요건을 고려하여 결정한다.

자전거 도로 및 인도에 대한 공법들은 지지력 측면에서 상호 동등하지 않다.

위에 언급된 방식을 지닌 공법 선택 시에는 다음과 같은 장소적 여건, 지역적 경험, 기술 및 경제적 관점 그리고 환경 조건 등을 고려해야 한다:

- 지역의 건축 자재 이용
- 단계별 공사
- 산업 부산물 및 재활용 건축 자재 이용
- 이용 관련 특이 사항
- 유지 보수 전략

2.5.2 복구

기존 도로의 재산 가치 평가 결과

- 복구가 필요하거나 그리고/또는
- 교통량 증가에 맞추어 포장 두께를 조정해야 하는 경우, 이용 목적, 장소적 여건 및 공사 시 차량 통행에 적합하고 경제적인 복구 유형과 공법을 선택해야 한다. 이를 위해 기본적으로 3가지 복구 유형이 있다:
- 절삭 복구( 단락 3 참조)
- 덧씌우기 복구(단락 4 참조)
- 기존 포장을 부분적으로 교체하는 덧씌우기 복구( 단락 4.6 참조)

선택 기준은 경제적 관점 외에 다음을 고려해야 한다:

- 기울기 및/또는 횡방향 경사 개선
- 높이 제한
- 계획된 횡단면 확대
- 제한적인 높이를 가진 고가교가 조밀하게 연속됨.
- 차량 통행 안내(경우에 따라 우회로가 적합)
- 차선 별 복구(상태에 맞추어 횡단면 조치 차별화)
- 단계별 복구(아스팔트 공법의 경우)
- 건축물 및 파이프 라인 위로 공사 가능성(부하 지지 능력)
- 동해가 방지되지 않는 도로면
- 추후에 계획된 공사 및 철거 단계의 유형 및 형태 고려
- 앞으로의 기능에 대한 기존 층들의 적합성
- 해체한 재료의 재활용 가능성.

2.6 공사 등급 및 교통량

차도 및 자전거 도로와 인도를 제외한 기타 도로는 교통량에 따라 공사 등급 SV와 I~VI로 분류된다.

2.6.1 차도

차도의 경우 대체로 공사 등급 지정을 위한 등가 10t 축하중 누가 통과량 B는 표 1을 근거로 한다.

표 1. 등가 10톤 축하중 누가 통과량 및 관련 공사 등급(부록 1도 참조)

| 번호 | 등가 10톤 축하중 통과(단위 100만) | 공사 등급 |
|---|---|---|
| 1 | 32 ~ | SV |
| 2 | 10 ~ 32 | I |
| 3 | 3 ~10 | II |
| 4 | 0.8 ~ 3 | III |
| 5 | 0.3 ~ 0.8 | IV |
| 6 | 0.1 ~ 0.3 | V |
| 7 | ~ 0.1 | VI |

등가 10톤 축하중 누가 통과량 B는 도로 등급별 하중 집합 지수의 도움을 받아 또는 세분화된 축하중 데이터를 이용해 DTV(SV)를 근거로 산출할 수 있다(부록 1 참조). 등가 10톤 축하중 누가 통과량은 대형트럭/버스에 의한 통행량이 가장 높은 차로에 대해 다음을 고려하여 계산한다:

- 횡단면으로 차로 개수
- 차로 넓이
- 종방향 기울기.

부록 2에는 등가 10톤 축하중 누가 통과량 B 계산 예시가 포함되어 있다.

본 계산은 지금까지의 교통량을 산출하기에도 적합하다.

공용 기간은 대체로 30년으로 예상해야 한다.

예컨대 시가지 내 차도에 대해 등가 10톤 축하중 누가 통과량을 산출할 수 없다면,

표 2에 따른 공사 등급을 도로 유형에 배정할 수 있다.

교차로 및 합류 지역에서는 연결 구간 가운데 하중이 가장 심한 차로의 등가 10톤 축하중 누가 통과량 B이 중요하다.

표 2. 도로 유형 및 관련 공사 등급

| 번호 | 도로 유형 | 공사 등급 |
|---|---|---|
| 1 | 고속 교통로, 산업 시설 밀집 도로 | SV/I/II |
| 2 | 주요 통행로, 산업 도로, 상업 구역 내 도로 | II/III |
| 3 | 주거 밀집로, 화물 통행을 포함하는 보행자 구역 | III/IV |
| 4 | 측도, 통행 가능한 골목, 보행자 구역(버스 통행 없음) | V/VI |

순환 도로의 경우 하중이 심한 차로에 비해 그 다음 높은 공사 등급이 적용된다.

2.6.2 버스 차도

개별 버스 차도에 대해서는 표 3의 공사 등급 배정을 참조한다.

표 3. 버스 차도 및 관련 공사 등급

| 번호 | 버스 차도 | 등가 10톤 축하중 누가 통과량 B 적용 대상 | 공사 등급 적어도 |
|---|---|---|---|
| 1 | 버스가 이용하는 차로 | 차로 | 1) |
| 2 | 차도의 차로 및 버스 차로 | 차로 | III[2) 3)] |
| 3 | 버스 차로 | 버스 차로 | III[2)] |
| 4 | 버스 주차 구역 | 버스 주차 구역 | III[2) 3) 4)] |
| 5 | 버스 정류장 | 지선 도로<br>정지 차선 | III[2)]<br>III |
| 6 | 버스 주차장 | 지선 도로<br>주차 구역 | III[2)]<br>III |

1) 이 차도에 특수한 하중이 부가되는지 검사해야 한다.

2) 하중이 버스 150대/1일이면 보다 높은 공사 등급을 선택해야 한다.

3) 여기서 벗어나는 경우 인접 차도의 경우와 동일한 공사 등급을 선택하는 것이 적합할 수 있다.

4) 교통 하중이 버스 15대/1일 이하이면 보다 낮은 공사 등급을 선택할 수 있다.

2.6.3 부대 시설 및 휴게 시설

단락 2.6.1에 따라 공사 등급이 산출되지 않으면, -주차구역 외- 부대 시설 및 휴게 시설 내 차도의 공사 등급은 표 4에 따라 지정된다.

표 4. 부대 시설 및 휴게 시설 내 통행로 및 관련 공사 등급

| | 교통 유형 | 공사 등급 |
|---|---|---|
| 1 | 대형트럭/버스 통행 | III[1)] |
| 2 | 근소한 비율의 대형트럭/버스 통행을 포함하는 승용차 통행 | IV/V |
| 3 | 승용차 통행[2)] | VI |

1) 이 차도에 특수한 하중이 부가되는지 검사해야 한다.

2) 레저용 탈것이 간혹 통행하는 것이 가능하다.

2.6.4 주차 구역

주차 구역은 표 5에 따라 공사 등급이 지정된다

표 5. 주차 구역 및 관련 공사 등급

| 번호 | 교통 유형 | | 공사 등급 |
|---|---|---|---|
| 1.1 | 상시 사용 주차 구역 | 대형트럭/버스 | III/IV[1)] |
| 1.2 | | 근소한 대형트럭/버스 통행 비율을 포함하는 근소한 승용차 통행 | V |
| 1.3 | | 승용차 통행 | VI |
| 2.1 | 간헐적 사용 주차 구역 | 대형트럭/버스 | IV/V |
| 2.2 | | 근소한 대형트럭/버스 통행 비율을 포함하는 근소한 승용차 통행 | V/VI |
| 2.3 | | 승용차 통행 | [2)] |

1) 단락 2. 7에 따른 특수한 하중이 도로에 부가되지 않는 경우.

2) 필요한 경우 단락 5.3도 참조

2.6.5 기타 도로

가속 차선과 감속 차선 그리고 갓길은 대체로 통행 도로의 차로와 같은 공법 및

두께로 설계해야 한다. 입체 교차로와 연결 지점 내 차로는 보다 심한 등가 10톤 축하중 누가 통과량이 입증되지 않는 한 공사 등급 III에 따른 공법을 선택한다. 중앙 분리 구역은 하중을 고려하여 설계되지 않는 한 공사 등급 III에 따른 공법을 선택한다.

2.7 특별 하중

도로는 예컨대 다음의 경우에 대형트럭/버스에 의한 특별한 하중을 겪을 수 있다:

- 궤도 차량 및 급한 곡선 주행 시
- 서행 시
- 잦은 제동 및 가속 절차 시
- 교차로 및 진입 구역에서
- 정차하거나 또는 “교통 체증” 구역에서

궤도 차량 및 경사 구간의 교통이 포장체의 두께에 미치는 영향은 계수 F2 및 F3으로 고려한다(부록 1 참조)

또한 공법 선택 시, 공사 자재 선택 시, 공법과 공사 자재의 조합 시, 포장체 각 층의 제조 시에 특별 하중을 고려해야 하는지, 경우에 따라 아스팔트 중간층을 강화하거나 아스팔트 중간층을 배치해야 하는지를 검사해야 한다.

3. 차도 신축 및 차도 절삭 복구

3.1 노상/노반

노상 또는 노반에 대한 요건은 ZTV E-StB에 포함되어 있다.

3.1.1 F2 및 F3 흙

표 1 ~ 표 4에 지정된 층 두께는 시공기면 상에서 최소 Ev2 = 45 MN/m2의 변형 계수를 전제로 한다. 시공기면 상에서 지속적으로 이 값에 도달하지 못할 것으로 예상되면 특별한 조치를 취해야 한다.

풀바운드 포장체를 사용하는 공법의 경우, 동상 민감 등급 F3인 흙과 배수 상태가 좋지 않거나 동상 민감 등급 F2인 흙의 경우 노상 또는 노반의 흙 안정 처리를 최소 15cm 두께로 해야 하며, 이는 줄일 수 없다. 추가의 배수 장치가 필요한지 검

사해야 한다.

3.1.2 F1 흙

노상 또는 노반이 바로 포장체 아래에서 동상 민감 등급 F2 또는 F3의 흙 위에 놓인 동상 민감 등급 F1의 흙으로 이루어진다면, 다음의 경우에 동상방지층을 생략할 수 있다.

- F1 흙이 동상방지층 요건을 충족하거나(그림 4) 또는 ZTV T-StB에 따라 안정처리된 경우(그림 5) 그리고
- F1 흙이 적어도 동상 민감 등급 F2 또는F3의 흙 위에 있는 동상방지층에 대해 단락 3.2에 따라 요구되는 두께를 지닌 경우.

F1 흙이 포장체와 합하여 필요한 내동해성에 도달하지 못하는 근소한 두께를 지닌 경우 그 아래 놓이는 F2 또는 F3 흙이 동상 방지 구조의 최소 두께를 위한 기본값을 결정한다. 내동해성은 흙 교체 또는 (단락 3.3.2에 따라) 내동해성 재료로 구성된 추가의 층을 배치하거나 또는 동상 방지층을 배치하여 달성할 수 있다.

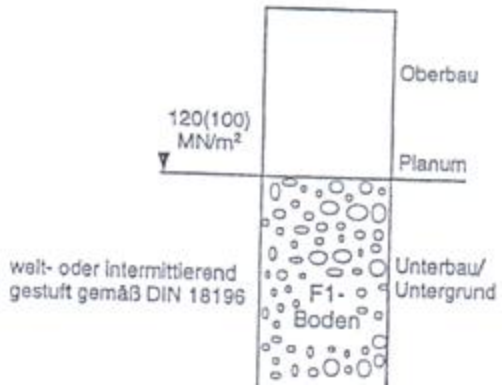



그림 4. 최소 Ev2 = 45 MN/$m^2$의 변형 계수를 지닌 F1 흙 위의 공법(최소 100MN/$m^2$ 시 공사 등급 V 및 VI)

동상방지층 위쪽 가장자리부터 다음과 같이 포장체 선택:

도표 1. 1, 2.1, 3 및 4행

도표 2. 1.1, 2 및 4행

도표 3. 1, 2 및 4~7행




그림 5. ZTB T-StB에 따른 안정 처리층이 있는 F1 흙 위의 공법

1) 도표 1 및 에 따른 두께

안정 처리층 위쪽 가장자리부터 다음과 같이 포장체 선택

도표 1의 2.2 및 2.3행

도표 2의 1.2 및 1.3행

F1 흙이 최소 45MN/m2의 Ev2 값을 가지면, 도표 1의 5, 도표 2의 3, 도표 3의 3에 따른 쇄석 기층 또는 자갈 기층을 바로 F1 흙 위에 배치할 수 있다.

수경성 바인더를 이용하는 안정 처리 전에 골재 입도가 서로 균일한 F1 흙이 입도가 상호 현격히 다르거나 중간 정도로 다른 골재를 개선하려면, 이는 지정된 안정 처리층 아래에서 최소 15cm 깊이까지 이루어져야 한다.

3.2 내동해성 포장체의 최소 두께

3.2.1 일반 사항

내동해성 도로 포장의 최소 두께는 하중 분배 외에 동상 및 해동 기간 중에 유해한 변형이 발생하지 않도록 보장해야 한다.

내동해성 포장체의 최소 두께는 다음과 같이 결정된다:

- 내동해성 도로 포장의 최소 두께로부터.
- 경우에 따라 ZTV E-StB에 따라 안정 처리되고, 최대20cm 두께를 지니고 동상에 민감한 노상 또는 노반의 상부 구역을 빼고.

내동해성 도로 포장의 최소 두께를 결정하는 데 있어서 장소적 경험 또는 특수한 조사가 없다면 다음을 고려하는 조건에서 단락 3.2.2에 따라 각 공사 등급에 대한 두께를 산출할 수 있다:

- 노상/노반의 동상 민감도
- 단락 3.2.3에 따라 산출해야 할 보다 두꺼운 또는 보다 얇은 두께.

장소적 여건이 자주 바뀌는 경우 기술적 이유로 내동해성 포장체의 두께는 다소 넓은 영역에 걸쳐 일정하게 유지되어야 한다.

내동해성 포장체의 최소 두께를 결정하는 방법은 다음 포장체에는 적용되지 않는다.

- 풀바운드 포장체
- 해동 중에 차량의 특정 허용 총 무게가 제한되는 도로

3.2.2 최소 두께 결정을 위한 기본값

흙의 동상 민감도는 ZTV E-StB에 따른 분류로 결정된다.

ZTV E-StB에 따른 동상 민감도 F2와 F3의 경우 공사 등급에 따라 내동해성 도로 포장의 최소 두께 결정을 위한 기본값이 표 6에 따라 적용된다.

3.2.3 보다 두꺼운 또는 보다 얇은 두께

동상의 영향, 경사 및 경로의 위치, 물 조건, 가장자리 영역의 실현 및 공용 기간이 내동해성 도로 포장의 최소 두께 결정 시 고려되어야 한다. 각각의 기준에 대한 개별값으로부터 최소 두께 결정을 위해 보다 두꺼운 또는 보다 얇은 두께는 표 7에 따라 다음과 같이 결정된다:

보다 두꺼운 또는 보다 얇은 두께 = A+B+C+D.

표 6. 내동해성 도로 포장의 최소 두께 결정을 위한 기본값

| | 동상 민감도 | 공사 등급 관련 두께(cm) | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | F2 | 55 | 50 | 40 |
| 2 | F3 | 65 | 60 | 50 |

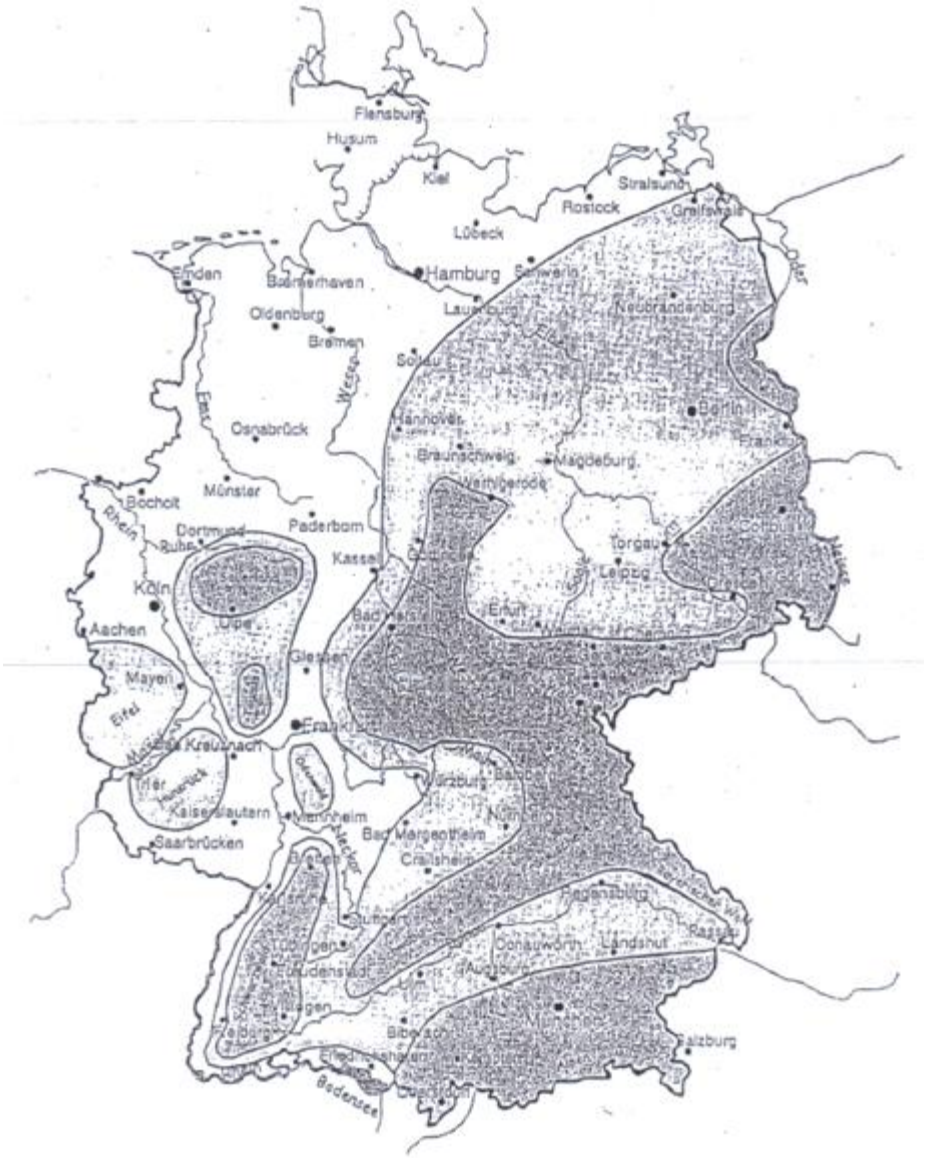
그림 6에는 동상 영향 구역 I, II 및 III이 제시되어 있다. 구역들간의 경계는 대체적인 기준일 뿐이다. 등록된 지리적 특성(강, 산맥, 도시)를 통해 각각의 동상 영향 구역이 포함된 지역에 대한 공사 조치를 지정하는 것이 쉬워진다. 장소적 특성 - 예컨대 깊은 계곡, 좁은 산맥-은 지도를 통해 알 수 없다. 그러한 지형적 여건은 내동해성 포장체의 두께 설계 시 도로의 위치에 따라 개별적으로 고려해야 한다.

결빙이 흙 속으로 침투하는 깊이는 지역의 고도뿐만 아니라 특히 노상/노반 내 열 전도성, 흙 속 및 포장체 내의 습도 조건 그리고 예컨대 건물이 건축된 지역의 열 복사 조건에도 좌우된다. 그러한 영향 변수를 측정하는 것은 매우 복잡하고 따라서 특별한 경우에만 유의미한 것으로 간주되므로, 도로 포장체 설계 시 각각의 개별 사례마다 오랜 기간의 경험과 기타 장소적 지식이 동상 영향 평가 시 고려되어야 한다.

표 7. 장소적 조건에 따른 보다 두꺼운 또는 보다 얇은 두께

| | 장소적 조건[1] | | A | B | C | D |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.1 | 동상 영향 | Zone 1 | ±0cm | | | |
| 1.2 | | Zone 2 | +5cm | | | |
| 1.3 | | Zone 3 | +15cm | | | |
| 2.1 | 경사 위치 | 절개지,<br>둑 ≤2.0m(2.2번 제외) | | +5cm | | |
| 2.2 | | 시가지 내<br>특정 지상 고도 | | ±0cm | | |
| 2.3 | | 둑 >2.0m | | −5cm | | |
| 3.1 | 물 조건 | 유리 | | | ±0cm | |
| 3.2 | | ZTV E-StB에 따라 불리 | | | +5cm | |
| 4.1 | 가장자리 영역<br>(예, 갓길,<br>자전거로도,<br>인도) | 투수성 가장자리 영역을 가진 시가지 외부 및 내부 | | | | ±0cm |
| 4.2 | | 부분적으로 투수성 가장자리 영역 및 배수 장치를 지닌 시가지 내 | | | | −5cm |
| 4.3 | | 투수성 가장자리 영역과 측면으로 건축물이 있고 배수 시설이 있는 시가지 내 | | | | −10cm |

1) 도로가 내동해성에 끼치는 불리한 영향을 기치는 경우(예컨대 북쪽 사면 또는 그늘 위치) 보다 두꺼운 두께를 5cm로 정할 수 있다.




동상 영향 구역 1

동상 영향 구역 2

동상 영향 구역 2

그림 6. 동상 영향 구역

3.3 포장체

3.3.1 공법 및 층 두께

도표 1 ~ 도표 3은 각 공사 등급에 대해 F2 및 F3 흙 위에 아스팔트 표층, 콘크리트 표층, 블록 표층을 갖는 표준화된 공법을 제시한다. F1 흙에 대해서는 단락 3.1.2이 적용된다.

도표 4는 풀바운드 아스팔트 포장체 및 콘크리트 포장체에 대한 표준화된 공법을 제시한다.

도표 1 ~ 도표 3에는 F2 및 F3 흙 위의 동상 방지 포장체의 두께가 10cm 단계로 제시되어 있다. 단락 3.2에 따르면 도표들에 제시된 것과 다른 동상 방지 포장체의 두께가 나오며, 이 두께가 중요하다.

도표들에 제시된 변경 계수에 대한 최소값은 표 8을 고려하면서 바인더를 사용하지 않는 기층의 두께를 근거로 한다. 동상 방지 포장체의 보다 얇은 두께가 나오면 선택한 공법으로 변형 계수에 대한 ZTV T-StB의 요건을 충족할 수 있는지 검사해야 한다.

시공기면 상에서 Ev2 값이 최소 80MN/m2에 도달하면 바인더를 사용하지 않는 기층의 두께를 도표 8에 따라 결정할 수 있다. 이는 표 1의 5, 표 3의 3에 따른 쇄석 기층 또는 자갈 기층이나 표 2의 3에 따른 쇄석 기층, 그리고 내동해성 골재로 이루어진 층들에는 적용되지 않는다.

표 8: 지지력을 위해 필요한, ZTV T-StB에 따른 무바인더 기층의 층 두께 기준값. 하부층의 Ev2 값과 기층 유형에 좌우됨(두께 단위는 cm)

| 하부층 | | 시공기면 상의 $E_{v2}$ ≥45MN/m² | | ≥80MN/m² | | 동상 방지층 상의 $E_{v2}$ ≥100MN/m² | | ≥120MN/m² | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 건설해야 할 무바인더 기층 | | 굵은 골재-쇄석-모래-혼합물 | 자갈-모래-혼합물 | 굵은 골재-쇄석-모래-혼합물 | 자갈-모래-혼합물 | 굵은 골재-쇄석-모래-혼합물 | 자갈-모래-혼합물 | 굵은 골재-쇄석-모래-혼합물 | 자갈-모래-혼합물 |
| 다음 $E_{v2}$을 지닌 동상 방지층 위 | ≥100MN/m² | 20 | 25 | 15 | 20 | | | | |
| | ≥120MN/m² | 30 | 35 | 20 | 25 | | | | |
| 다음 $E_{v2}$을 지닌 쇄석 또는 자갈 기층 위 | ≥120MN/m² | 25 | 30 | – | – | 15 | 20 | – | – |
| | ≥150MN/m² | 30 | 40 | – | – | 20 | 30 | 15 | 20 |
| | ≥180MN/m² | – | – | – | – | 30 | – | 20 | – |

3.3.2 기층

기층에 대한 요건은 ZTV T-StB에 수록되어 있다. 블록 표층의 기층에 대해서는 추가로 ZTV P-StB의 요건이 적용된다.

도표 1의 2.2, 2.3 및 5, 도표 2의 1.2, 1.3 및 3 그리고 도표 3의 3에 따른 공법에서 언급된, 내동해성 골재[2]로 구성되며, 그 재료의 최대 입도는 공사 두께에 좌우되고

TL Min-StB의 요건을 충족해야 하는 그러한 층은 다짐 정도 및 충분한 투수성과 관련하여 동상 방지층의 경우와 같이 ZTV T-StB의 요건을 충족해야 한다.

무바인더 기층

동상방지층은 적어도 도표 1 ~ 도표 3의 “동상방지층 두께”에 제시된 두께를 지녀야 한다(단락 3.1.2도 참조). 만일 동상방지층의 두께가 제시되어 있지 않다면 이는 동상 방지층 상에서 필요한 변형 계수가 아마도 달성되지 않는다는 의미이다. 그렇다면 동상방지 포장체에 대해 보다 두꺼운 두께를 선택하거나 또는 또다른 공법을 선택해야 한다.

내동해성 재료로 구성되는 층은 기술상의 이유로 최소 12cm가 되어야 한다.

쇄석 기층이 콘크리트 표층 바로 아래에 배치되면, 이 기층은 강화된 요건을 충족해야 한다.[3)]

도표 1의 3에 따른 쇄석 기층의 경우 공사 등급 SV 및 I ~ IV에서 장소적 경험을 바탕으로 쇄석 기층 상에서 변형 계수 Ev2 ≥150MN/m2 대신 Ev2 ≥ 180MN/m2에 도달하면 아스팔트 기층의 두께를 2cm 줄일 수 있다. 이는 쇄석 기층이 건설된다면 도표 1의 5에도 적용된다. 2cm 두께 감소는 쇄석 기층의 층 두께 증대로 또는 내동해성 재료로 구성되는 층의 증대로 보상되어야 한다.

수경성 바인더를 사용하는 기층

수경성 바인더를 사용하는 기층은 안정 처리층, 빈배합 콘크리트 기층, 투수 콘크리트 기층 또는 콘크리트 기층으로 형성될 수 있다. 이들은 아스팔트 또는 콘크리트로 이루어진 포장체의 유형에 따라 ZTV T-StB에 의거한 여러 강도 요건을 충족해야 한다.

콘크리트 표층 아래에 토목 섬유를 배치하지 않는 경우 ZTV T-StB에 따라 균열 형성에 대한 조치에 유의해야 한다.

아스팔트 기층

아스팔트 중간층의 두께가 2cm 두꺼워지면 아스팔트 기층의 두께는 그만큼 축소

2) ZTV T-StB, 단락 2.1.1 참조

3) 1997년 10월 6일자 BMV의 ARS 37/1997 참조.

할 수 있다. 이때 아스팔트 기층의 최소 두께에 미달되면 안된다.

3.3.3 아스팔트 표층

아스팔트 표층에 대한 요건은 ZTV Asphalt-StB에 포함되어 있다.

도표 1 및 도표 4의 층두께와 차이가 나는 경우 ZTV-Asphalt-StB의 규정에 유의해야 한다. 보다 두꺼운 또는 보다 얇은 두께는 대체로 바로 그 아래 놓이는 아스팔트층에서 보상되어야 한다. 최소 설치 두께 미달 또는 기타 기술상의 이유로 이러한 보상이 가능하지 않다면, 아래 놓이는 기층의 두께를 적절하게 줄여서 보상해야 한다.

장소적 경험이 있고 단락 2.7에 따른 특수 하중이 예상되지 않는 경우 공사 등급 III에서는 다음의 조치가 있을 때 아스팔트 중간층을 생략할 수 있다:

- 아스팔트 기층의 두께가 아스팔트 중간층의 높이만큼 두꺼워질 때
- 혼합물 유형 CS를 사용할 때
- 아스팔트 기층 위에서 아스팔트 중간층에 대한 평탄도 요건이 충족될 때

복합 표층-기층 대신 ZTV Asphalt-StB에 따른 아스팔트 표층이나, ZTV BEA-StB에 따른 표면 처리 또는 얇은 표층을 지닌 최소 8cm 두께의 아스팔트 기층을 선택할 수 있다.

3.3.4 콘크리트 표층

콘크리트 표층 및 토목 섬유에 대한 요건은 ZTV Beton-StB에 포함되어 있다. 장소적 여건을 잘 알고 있는 경우 도표 2, 4, 6에서 벗어나 토목 섬유없이 도표 2의 1.1 ~1.3, 도표 4의 2, 도표 6의 1.1에 따른 공법을 적용할 수 있다. 이런 경우 콘크리트 표층의 두께를 1cm 줄일 수 있다. 이런 방법은 ZTV T-StB 단락 3.2.3에 따른 공사 원칙 및 단락 3.2.5에 따른 규정을 준수하는 것을 전제로 한다.

3.3.5 블록 표층

블록 표층에 대한 요건은 ZTV P-StB에 포함되어 있다. 도표 3에는 블록 재료(콘크리트 벽돌, 포장 벽돌 또는 자연석 벽돌)에 상관없이 규정 두께를 사용하여 블록 공법을 제시한다. 보다 두꺼운 블록도 사용할 수 있다. 6cm 미만의 보다 얇은 두께

의 블록은 해당 공법을 해당 지역에 사용하는 것에 대해 충분한 경험이 있다는 전제 하에 사용할 수 있다. 베딩 두께가 차이나는 경우에도 보다 두꺼운 또는 보다 얇은 두께는 동상 방지층 또는 내동해성 자재로 이루어진 층에서 보상해야 한다.

3.3.6 특수성

예컨대 상수도관 또는 하수도관 지역 내 또는 기술-경제적 이유 등의 특이한 여건이 있는 경우 단락 3.1 ~ 3.3.5의 규정에서 벗어나야 할 수도 있다.

3.4 시가지 내 도로에 대한 보충 지침

단락 3.1 ~ 3.3 및 4의 규정은 지방 도로 공사의 특수성이 위의 규정에서 벗어나는 것을 허가하고 따른 요건을 고려하지 않아도 되는 경우 위의 규정에서 벗어날 수 있다. 예컨대 공사 중

- 충분하지 않은 도로 넓이
- 특히 교차로 구역에서 차량 통행 중에 공사
- 상수도관, 하수도관, 덕트, 배수로 등이 있고

또한 궤도 주행으로 인한 특수한 하중과 교통 통제 지역에서 시각적으로 제한된 도로로 인해 어려움이 발생한다.

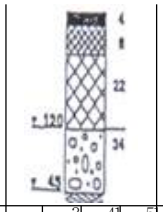
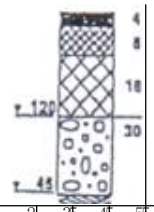
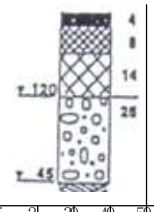
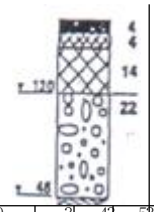
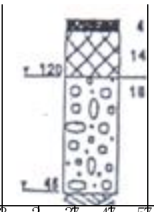
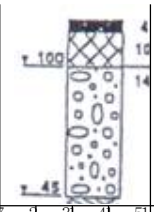
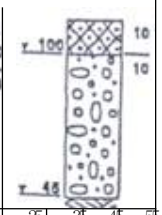
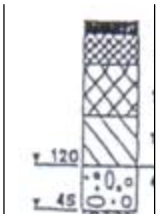
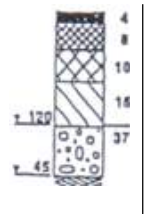
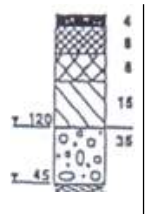
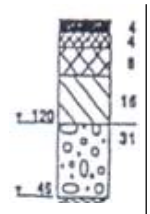
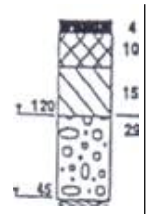
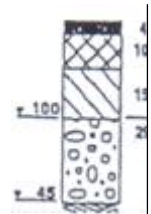
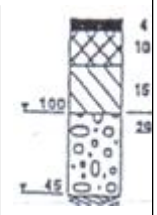
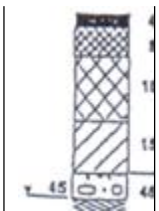
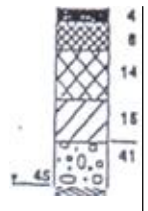
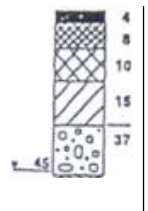
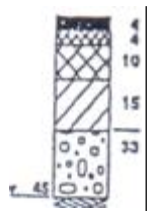
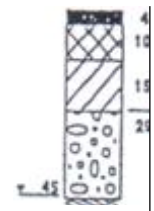
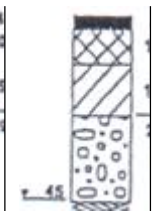
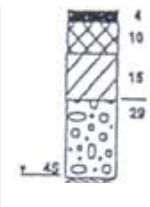
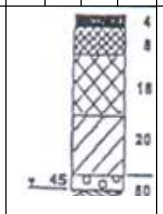
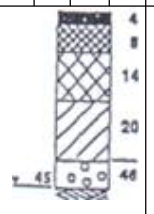
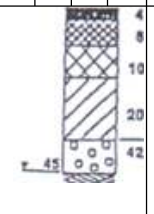
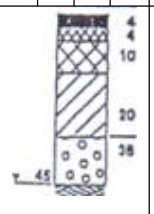
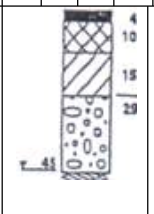
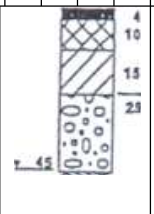
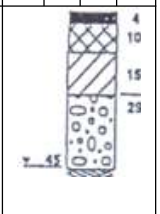
장소적 여건에 따라 안정적인 아스팔트층 외에 혼합재 유형 AO의 또다른 아스팔트 기층 또는 동상 방지층 두께를 고려하는 조건에서 빈배합 기층인 안정 처리층을 배치하는 등의 추가 조치가 필요하다.

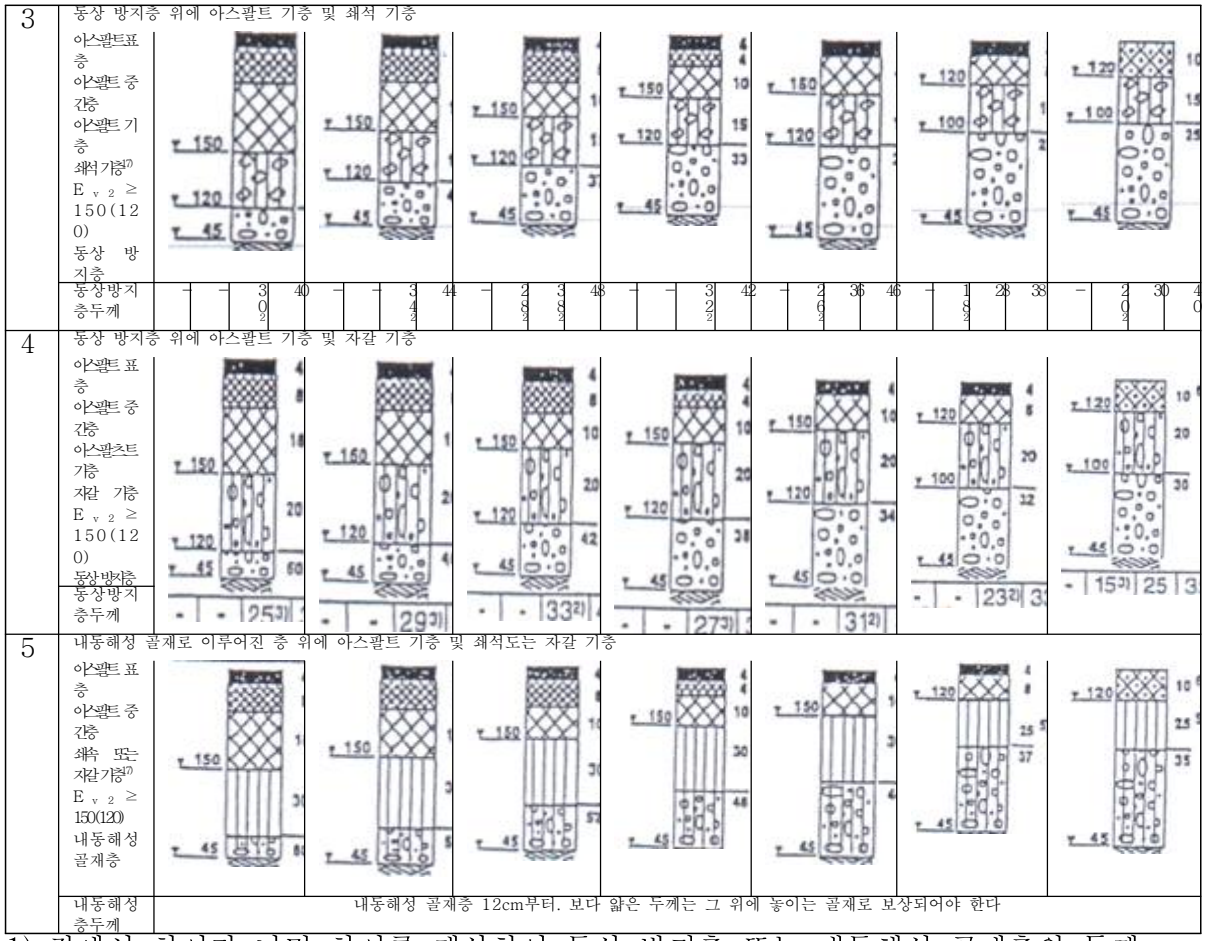
공사 지역을 개방할 시에는 대체로 도로 포장을 단계적으로 건설하여, 첫 번째 단계의 공사 현장이 공사 현장 을 지나는 차량 통행을 수용해야 한다. 이를 위해 대체로 빈배합 콘크리트 기층 공법을 선택해야 한다. 인접한 현장을 포괄적으로 끝낸 후에 완전한 구조를 형성하려면 남아 있는 부분 포장의 상태를 단락 4에 따라 고려해야 한다(예시 8, 부록 2 참조). 도로 포장을 단계적 구조로 하지 않으려면 공사 등급 산출 시 공사 현장 차량 통행을 고려해야 한다.

도표 1: F2 및 F3 노상/노반 위의 차도에 대한 아스팔트 표층 공법

(F1 흙 위의 공법은 단락 3.1.2 참조)

(두께 단위 cm;, ▼ Ev2 최소값 단위 $MN/m^2$)

| 번호 | 공사등급 | SV | I | II | III | IV | V | VI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 등가 10t 축하중 통과량 (단위: 백만) B | >32 | >10~32 | >3~10 | >0.8~3 | >0.3~0.8 | >0.1~0.3 | ≤0.1 |
| | 내동해성 포장체 두께 | 55 65 75 85 | 55 65 75 85 | 55 65 75 85 | 45 55 65 75 | 45 55 65 75 | 35 45 55 65 | 35 45 55 65 |
| 1 | 동상 방지층 위 아스팔트 기층 | | | | | | | |
| | 아스팔트 표층<br>아스팔트 중간층<br>아스팔트 기층<br>동상방지층 |  |  |  |  |  |  |  |
| | 동상방지층 두께 | – 31 41 51 | 25 35 45 55 | 25 30 40 50 | – 32 42 52 | 25 35 45 55 | 21 31 41 51 | 25 35 45 55 |
| 2.1 | 동상 방지층 또는 내동해성 골재로 이루어진 층 위에 아스팔트 기층 및 수경성 바인더를 이용한 기층 | | | | | | | |
| | 아스팔트 표층<br>아스팔트 중간층<br>아스팔트 기층<br>수경성 빈배합기층<br>동상방지층 |  |  |  |  |  |  |  |
| | 동상방지층 두께 | – – 34 44 | – 28 38 48 | – 30 40 50 | – – 34 44 | – 26 36 46 | – 16 26 36 | – 16 26 36 |
| 2.2<br>2.3 | | | | | | | | |
| | 아스팔트 표층<br>아스팔트 중간층<br>아스팔트 기층<br>안정처리층<br>내동해성 골재 – DIN 18196 의거 weit– oder intermittier end gestuft |  |  |  |  |  |  |  |
| | 동상방지층 두께 | 10 20 30 40 | 14 24 34 44 | 18 28 38 48 | 12 22 32 42 | 16 26 36 46 | 6 16 26 36 | 6 16 26 36 |
| | 아스팔트표층<br>아스팔트 중간층<br>아스팔트 기층<br>안정처리층<br>내동해성 골재층 – DIN18198 에 따라 다짐 |  |  |  |  |  |  |  |
| | 동상방지층 두께 | 5 15 25 35 | 9 19 29 39 | 13 23 33 43 | 7 17 27 37 | 16 26 36 46 | 6 16 26 36 | 6 16 26 36 |




1) 값에서 차이가 나면 차이를 계산하여 동상 방지층 또는 내동해성 골재층의 두께를 결정해야 한다.

2) 둥근 쇄석은 입증된 경우에만 사용한다.

3) 장소적으로 입증된 경우에 한해 쇄석 사용

4) 동해성 골재와 안정 처리되어야 할 골재가 한 층으로 설치될 때만 실행

5) 공사 등급 SV 및 I ~ IV에서 자갈 기층 시 40cm 두께로. 공사 등급 V 및 VI에서 30cm두께로.

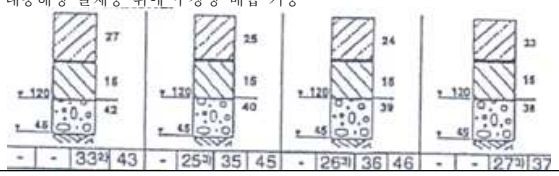
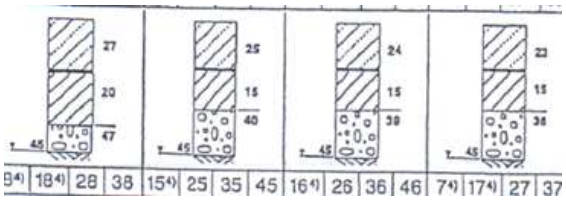
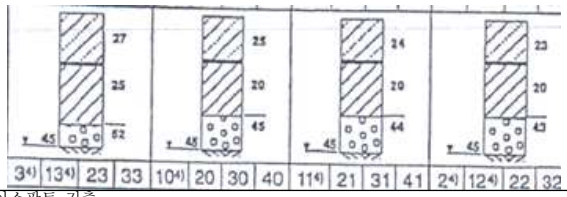
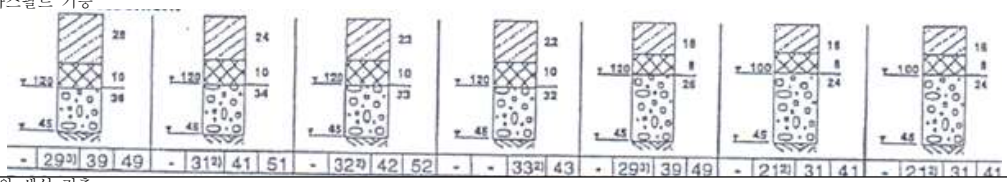
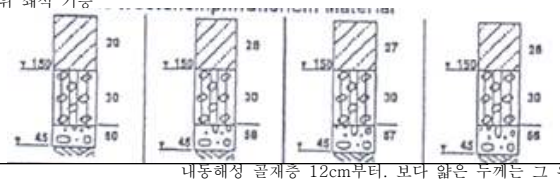
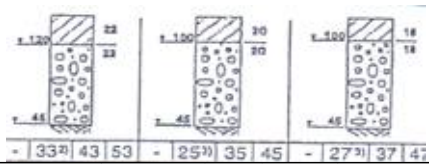
6) 복합 표층-기층, 단락 3.3.3 참조

7) 단락 3.3.2 참조

도표 2: F2 및 F3 노상/노반 위의 차도에 대한 콘크리트 표층 공법

(F1 흙 위의 공법은 단락 3.1.2 참조)

(두께 단위 cm;, ▼ Ev2 최소값 단위 $MN/m^2$)

| 번호 | 공사 등급 | SV | I | II | III | IV | V | VI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 등가 10t 축하중 통과량 (단위: 백만) B | >32 | >10~32 | >3~10 | >0.8~3 | >0.3~0.8 | >0.1~0.3 | ≤0.1 |
| | 내동해성 포장체 두께 | 55 65 75 85 | 55 65 75 85 | 55 65 75 85 | 45 55 65 75 | 45 55 65 75 | 35 45 55 65 | 35 45 55 65 |
| 1.1 | 동상 방지층 또는 내동해성 골재층 위에 수경성 배합 기층<br>콘크리트 표층<br>토목 섬유<br>수경성 빈배합층(HGT)<br>동상 방지층<br>동상방지층두께 |  | | | | | | |
| 1.2 | 콘크리트 표층<br>토목 섬유<br>안정처리층<br>내동해성 골재 - DIN 18198 의거 weit-o d e r intermittierend gestuft<br>동상방지층두께 |  | | | | | | |
| 1.3 | 콘크리트 표층<br>토목 섬유<br>안정처리층<br>내동해성 골재층DIN 18198 의거 조밀다짐<br>동상방지층두께 |  | | | | | | |
| 2 | 동상 방지층 위 아스팔트 기층<br>콘크리트 표층<br>아스팔트 기층<br>동상 방지층<br>동상방지층 두께 |  | | | | | | |
| 3 | 내동해성 골재층 위 쇄석 기층<br>콘크리트 표층<br>쇄석 기층[7]<br>내동해성 골재층 |  | | | | | | |
| | 동상방지층 두께 | 내동해성 골재층 12cm부터. 보다 얇은 두께는 그 위에 놓이는 골재로 보상되어야 한다 | | | | | | |
| 4 | 동상 방지층<br>콘크리트 표층<br>동상방지층<br>동상방지층 두께 | | | | |  | | |

1) 값에서 차이가 나면 차이를 계산하여 동상 방지층 또는 내동해성 골재층의 두께를 결정해야 한다.

2) 둥근 쇄석은 입증된 경우에만 사용한다.

3) 장소적으로 입증된 경우에 한해 쇄석 사용

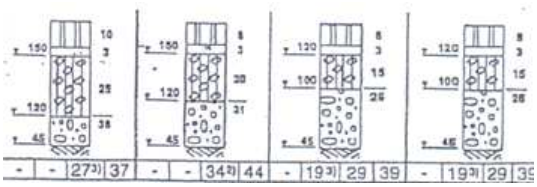
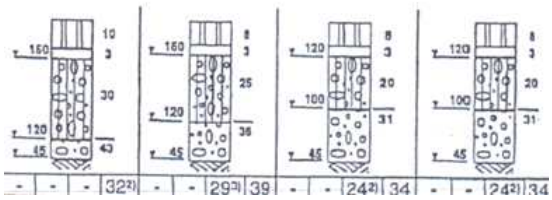
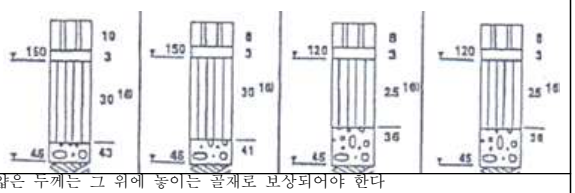
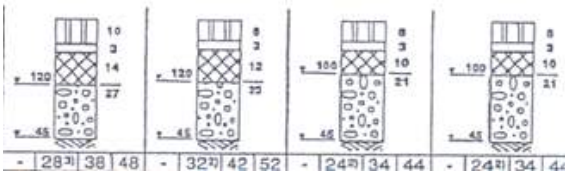
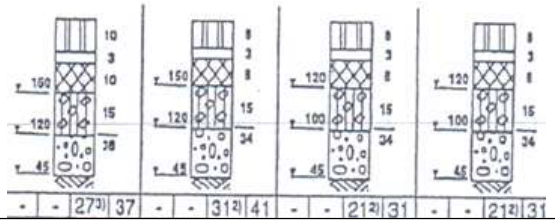
4) 동해성 골재와 안정 처리되어야 할 골재가 한 층으로 설치될 때만 실행

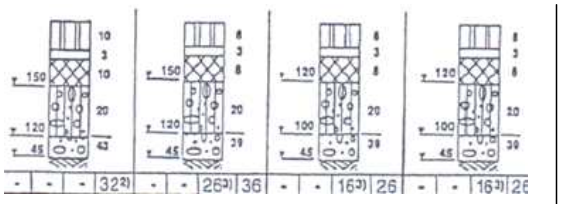
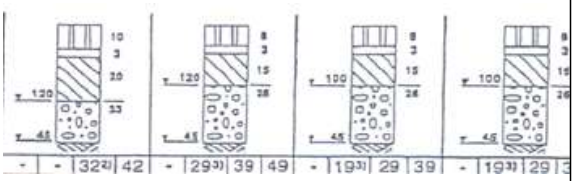
7) 1997년 10월부 BMV ARS 37/1997에 따른 요건

도표 3: F2 및 F3 노상/노반 위의 차도에 대한 블록 표층 공법

(F1 흙 위의 공법은 단락 3.1.2 참조)

(두께 단위 cm;, ▼ Ev2 최소값 단위 $MN/m^2$)

| 번호 | 공사등급 | SV | I | II | III | IV | V | VI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | B 등가 10t 축하중 통과량 (단위 백만) | >32 | >10~32 | >3~10 | >0.8~3 | >0.3~0.8 | >0.1~0.3 | ≤0.1 |
| | 내동해성 포장체 두께[1] | 55 65 75 85 | 55 65 75 85 | 55 65 75 85 | 45 55 65 75 | 45 55 65 75 | 35 45 55 65 | 35 45 55 6 |
| 1 | 동상 방지층 위 쇄석 기층 블록 표층 8) 쇄석 기층 동상 방지층 | | | |  | | | |
| | 동상 방지층두께 | | | | - - 27 37 | - - 34 44 | - 19 29 39 | - 19 29 3 |
| 2 | 동상 방지층 위 자갈 기층 블록 표층 8) 자갈 기층 동상 방지층 | | | |  | | | |
| | 동상 방지층두께 | | | | - - - 32 | - - 29 39 | - - 24 34 | - - 24 34 |
| 3 | 내동해성 골재층 위 쇄석 또는 자갈 기층 블록 표층 8) 쇄석 또는 자갈 기층 내동해성 골재층 | | | |  | | | |
| | 동상 방지층두께 | 내동해성 골재층 12cm부터. 보다 얇은 두께는 그 위에 놓이는 골재로 보상되어야 한다 | | | | | | |
| 4 | 동상 방지층 위 아스팔트 기층 블록 표층 8) 아스팔트 기층15) 동상 방지층 | | | |  | | | |
| | 동상 방지층두께 | | | | - 28 38 48 | - 32 42 52 | - 24 34 44 | - 24 34 4 |
| 5 | 동상 방지층 위 아스팔트 기층 및 쇄석 기층 블록 표층 8) 아스팔트 기층15) 쇄석 기층 동상 방지층 | | | |  | | | |
| | 동상방지층두께 | | | | - - 27 37 | - - 31 41 | - - 21 31 | - - 21 31 |
| 6 | 동상 방지층 위 아스팔트 기층과 자갈 기층 | | | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 블록 표층 8)<br>아스팔트 기층15)<br>자갈 기층<br>동상방지층 | | | |  |
| | 동상방지층두께 | | | | |
| 7 | 동상 방지층 위 배수 콘크리트 기층 | | | | |
| | 블록 표층 8)<br>배수 콘크리트 기층(DBT)15)<br>동상방지층 | | | |  |
| | 동상방지층두께 | | | | |

1) 값에서 차이가 나면 차이를 계산하여 동상 방지층 또는 내동해성 골재층의 두께를 결정해야 한다.

2) 둥근 쇄석은 입증된 경우에만 사용한다.

3) 장소적으로 입증된 경우에 한해 쇄석 사용

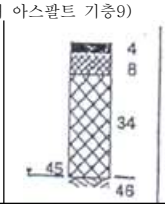
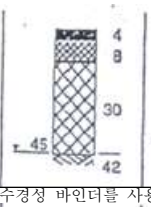
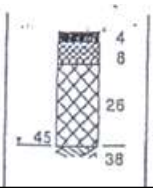
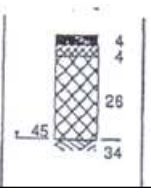
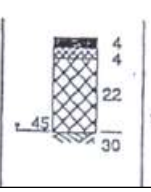
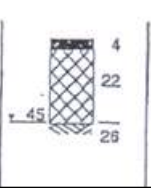
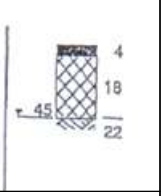
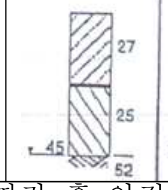
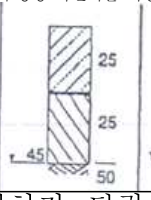
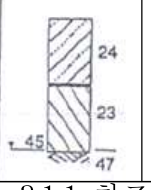
4) 동해성 골재와 안정 처리되어야 할 골재가 한 층으로 설치될 때만 실행

15) ZTV P-StB 참조

18) 공사 등급 III 및 IV에서 자갈 기층인 경우 40cm 두께로, 공사 등급 V 및 VI인 경우 30cm 두께로.

도표 4: F2 및 F3 노상/노반 위의 차도에 대한 풀바운드 포장체 공법

(두께 단위 cm;, ▼ Ev2 최소값 단위 $MN/m^2$)

| 번호 | 공사등급 | SV | I | II | III | IV | V | VI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | B 등가 10t 축하중 통과량 (단위: 백만) | >32 | >10~32 | >3~10 | >0.8~3 | >0.3~0.8 | >0.1~0.3 | ≤0.1 |
| | 내동해성 포장체 두께[8] | 55 65 75 85 | 55 65 75 85 | 55 65 75 85 | 45 55 65 75 | 45 55 65 75 | 35 45 55 65 | 35 45 55 65 |
| 1 | 아스팔트 포장체<br>시공기면 위 아스팔트 기층9)<br>아스팔트 표층<br>아스팔트 중간층<br>아스팔트 기층 |  |  |  |  |  |  |  |
| 2 | 시공기면 위 콘크리트 포장체와 수경성 바인더를 사용하는 기층9)<br>콘크리트 표층<br>토목섬유<br>수경성 바인더 사용 기층 |  |  |  | | | | |

8) 경우에 따라 흙 안정처리, 단락 3.1.1 참조

4. 차도 덧씌우기 복구

4.1 기존 포장의 가치 평가

기존 포장의 남아있는 가치를 평가하고 기술적 및 경제적으로 합당한 복구 방법을 결정하기 위해서는 다음을 고려해야 한다:

- 표면 상태
- 지지력(산출가능한 경우)
- 노상/노반 포함하여 현재 포장의 유형 및 상태, 목표 기능에 대한 적합성
- 배수 장치 상태

4.1.1 표면 상태

지지력과 관련하여 표면 상태를 평가하는 것은 다음 특성을 이용하여 이루어진다:

- 망상 균열, 균열 파열(바퀴 자국 옆의 종방향 균열, 아스팔트 공법에서 열에 의한 횡방향 균열은 해당 안됨)
- 종방향 주름(노상/노반 또는 건물의 메움 영역이 아닌 곳에서)
- 바퀴 자국(아스팔트층의 안정성 결여로 인한 것이 아님)
- 골재 손실, 쇄석 손실, 패칭 지점(아스팔트 공법에서)
- 종방향 크랙, 횡방향 크랙, 모서리 파손, 가장자리 손상, 슬래브 파손, 슬래브 이동(콘크리트 공법에서).

이런 특성들은 개별적으로 또는 복합적으로 나타날 수 있다.

아스팔트 공법으로 복구 시 상태 특징은 복구 등급을 결정하는 데 있어서도 결정적이다. 또한 상태 파악 및 평가의 범위에서 파악된 기타 특징들, 손상, 원인을 합당한 복구 공법을 결정할 시에 고려해야 한다(단락 3 참조).

4.1.2 지지력

기존 아스팔트 포장의 지지력을 결정하는 것은 포장 상태를 평가하는 것에 보완하여 다음을 위해서도 고려해야 한다:

- 육안으로 알 수 없는 취약 지점 확인을 위해
- 동일한 지지력의 복구 구간을 결정하기 위해.

경험이 있는 경우 지지력 측정값은 복구를 위해 필요한 층 두께를 산출하는 데에도 적용할 수 있다.

4.1.3 현재 포장의 유형 및 상태

복구 등급 결정에 기준이 되는 상태를 정하고 합리적인 복구 유형 및 공법을 결정하기 위해서 현재 표면 상태의 원인과 포장, 개별 층들 및 경우에 따라 노반/노상의 기능 적합성을 반드시 검사해야 한다. 특히 다음을 확인해야 한다:

- 개별 층들의 유형, 두께 및 특성
- 노반/노상의 유형(특히 동상 민감 등급, 물 조건)
- 층 결합.

4.1.4 배수 장치

현재 배수 기능 및 효율을 산출하기 위해 예컨대 비디오 카메라 판독 등으로 사전 검사를 실시해야 한다. 배수로로 물이 유입되는 기능도 검사해야 한다. 결과는 배수 장치의 개량 범위를 결정하는 데 근거가 된다.

4.2 동상 방지 포장체 두께

포장 복구를 위해 필요한 동상 방지 포장체 두께는 단락 3.2의 규정에 따라 산출해야 한다.

복구가 이루어진 후 포장에 의해 동상방지 포장체의 두께가 더 두꺼워지면 기존 포장의 동상방지층들을 고려하면서 설치해야 할 층들의 두께를 적절하게 증가시켜야 한다.

복구 후 결합된 층들의 전체 두께가 도표 4에서 지정된 풀바운드 포장체의 두께에 일치하면 동상방지 조치를 생략해도 된다.

약 10년간 동해가 관찰되지 않았고, 교통량이 공사 등급에 해당하는 교통량보다 아래인 경우에도 동상 방지 조치가 필요하지 않다.

4.3 복구 공법

현재 보장은 다음의 방법으로 복구할 수 있다:

- 아스팔트 공법(단락 4.5.2)
- 콘크리트 공법(단락 4.5.3)
- 블록 공법(단락 4.5.4)

어떤 공법이 기술적으로 합리적이고 예정된 공용 기간에 대해 경제적인지 정할 때에는, 자재의 재활용 외에, 공사 기간 중 통행 방법과 관련한 장소적 여건, 공사 기한 및 복구 구간의 길이 등도 고려해야 한다.

조건이 자주 바뀌는 경우 최대한 긴 구간을 동일한 두께로 복구하는 것이 기술적으로 적합하다.

경제적인 이유로 지지력이 부족하거나 평탄도가 부족한 영역은 별도로 준비해야 한다.

## 4.4 복구 등급

### 4.4.1 아스팔트 공법 복구

아스팔트 덧씌우기로 포장을 복구하는 경우 개별적으로 또는 복합적으로 기존 포장의 구조적 손상 원인을 말해주는 특징을 근거로 도표 9에 의거하여 복구 등급을 결정해야 한다. 기본적으로 구조적 손상의 원인을 분석하고 그에 따라 조치를 세워야 한다.

덧씌우기에 부적합한 층을 제거하고 복구를 위해 필요한 포장 두께를 결정해야 할 수도 있다.

“상태 파악 및 평가”에 의거하여 표면 상태를 파악 및 평가하는 것은 계획 자료를 작성할 시에 도움이 된다. 조치 시기에 상태 값 4.5(문턱값)에 도달하거나 이미 초과했으면 평가에 포함시키고 2가지 복구 등급 중에서 지정해야 한다. 상태값 3.5(경고값)에 이미 도달한 경우는 각 표면 특징의 원인을 분석해야 한다.

표 9. 아스팔트 덧씌우기 공법으로 복구 시 기존 포장 상태 특성에 따른 복구 등급

| 복구 등급 | 상태 특징 | |
|---|---|---|
| | 기존 아스팔트 포장 | 기존 콘크리트 포장 |
| 1 | -망상 균열<br>-균열 파열(바퀴 자국 옆의 종방향 균열 포함) | -횡방향 및 종방향 균열의 파열<br>-슬래브 밀림 |
| 2 | -종방향으로 울퉁불퉁함<br>-바퀴 자국1) | - 모서리 파손<br>가장자리 손상 |

1) 지지력 부족 결과, 아스팔트 표층의 안정성 부족은 제외

4.4.2 콘크리트 공법 및 블록 공법 복구

콘크리트 및 블록 덧씌우기 공법으로 포장을 복구하는 경우 차도 표층 두께와 관련하여 복구 등급을 개별적으로 선택하면 안 된다.

4.5 구성 및 설계

4.5.1 일반 사항

차도 신축(단락 3) 및 절삭 공법 복구에 대한 설계는 차도 덧씌우기 복구를 위해서도 중요하다.

고려해야 할 주변 조건이 많아 횡단면 확대는 생략하므로 여기서는 취급하지 않는다.

시가지 내 도로에 특수한 여건이 있으면 규정에서 벗어나는 것도 적합할 수 있다.

4.5.2 아스팔트 공법

아스팔트 공법으로 복구 시 각각의 복구 등급 및 공사 등급에 대한 복구층의 두께는 도표 5에 제시되어 있다. 또한 ZTV BEA-StB와 기존 콘크리트 표층에서는 ZTV BEB-StB도 유의해야 한다.

재사용 가능한 자연석 벽돌 위에 덧씌우는 것은 피해야 한다.

4.5.3 콘크리트 공법

콘크리트 공법으로 복구 시 각 공사 등급에 대한 복구 층의 두께는 도표 6에 제시되어 있다. 또한 ZTV BEB-StB도 유의해야 한다. 높이 제한으로 필요한 표층 두께를 실현할 수 없다면(예컨대 한 개 차로만 복구), 예컨대 무근 콘크리트가 적합하게 강화된 인장 강도 또는 휨 인장 강도를 지닌 경우에 표층 두께를 줄일 수 있다.

아스팔트 포장을 덧씌울 시에 먼저 손상된 부분(홈 또는 큰 바퀴 자국)을 패치해야 한다.

4.5.4 블록 공법

블록 공법으로 복구하는 것은 현재 하부층이 충분히 지지력이 있고 평탄하며 투수성이 충분히 보장되는 경우에만 이루어질 수 있다. 하부층이 무바인더 기층으로

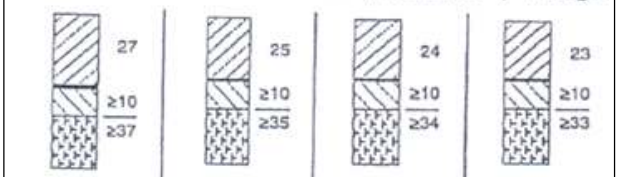
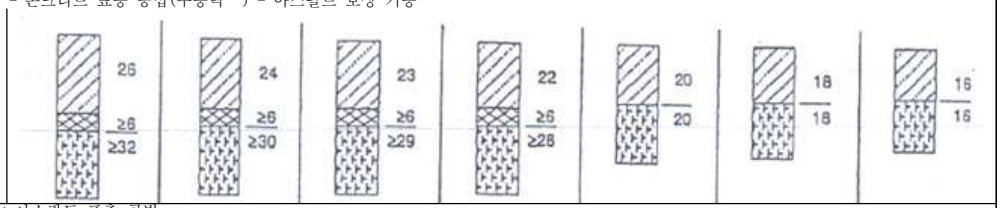
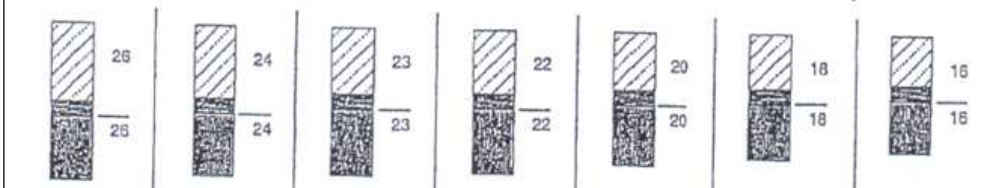
이루어진다면, 베딩 재료 및 기층 재료의 필터 안정성을 증명해야 한다.

이에 대해서는 ZTV P=StB에 유의한다.

4.6 기존 포장 부분 교체 시 덧씌우기 복구

기존 포장의 부분 제거가 필요한 깊은 결함의 경우 설치해야 할 층의 두께는 기존 층의 유형 및 상태에 따라 도표 1 ~ 4를 참조하여 결정해야 한다(예시 8, 부록 2 참조).

도표 6: 아스팔트 또는 콘크리트 표층을 지닌 기존 포장을 콘크리트 덧씌우기로 복구 (두께 단위:cm)

| 번호 | 공 사 등급 | SV | I | II | III | IV | V | VI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 등가 10 축하중통과량 (단위: 백만) B t | >32 | >10~32 | >3~10 | >0.8~3 | >0.3~0.8 | >0.1~0.3 | ≤0.1 |
| 1.1 | 기존 포장: 콘크리트 표층 공법(무응력 12) ) - 콘크리트 자재 보상층<br>콘크리트 표층<br>토목 섬유<br>콘크리트 보상층<br>기존 포장 |  | | | | | | |
| 1.2 | 기존 포장 - 콘크리트 표층 공법(무응력12)) - 아스팔트 보상 기층<br>콘크리트 표층<br>아스팔트 보상층<br>기존 포장 |  | | | | | | |
| 2 | 기존 포장: 아스팔트 표층 공법<br>콘크리트 표층<br>평면 절삭 11)<br>기존 포장 |  | | | | | | |

11) 평면 절삭 대신 최소 두께 6cm의 보상층을 배치할 수도 있다.

12) ZTV BEB-StB에 따름

5. 기타 차도의 신축 및 복구

5.1. 버스 차도

5.1.1 공법 및 층 두께

버스 차도에 대한 공사 등급 분류는 표 3에 따라 이루어진다. 공법 및 층두께에 대해서는 도표 1 ~6 및 단락 3.1이 적합한 것으로 간주된다.

동상 방지 포장체에 필요한 두께는 단락 3.2에 따라 산출해야 한다.

5.1.2 구성 및 설계

구성 및 설계를 위해서는 관련 기술 계약 조건 및 가이드라인이 추가로 적용된다.

5.2 자전거 도로 및 인도

5.2.1 공법 및 층 두께

자전거 도로 및 인도에 대한 표준화된 공법은 도표 7에 제시되어 있다. 공법 및 층 두께는 해당 도로에서 레저용 탈 것이 다닐 수 있도록 선택해야 한다. 그 외 차량이 간혹 이용하는 것은 고려하지 않는다. 공법 선택 시 특히 표면의 평탄도와 배수도 고려해야 한다.

동상 민감 등급 F1의 흙은 동상 방지 조치가 필요하지 않다. 동상 민감 등급 F2 및 F3의 흙의 경우 동상 방지 포장체의 최소 두께가 30cm면 충분하고 시가지의 경우 20cm면 충분하다. 기후 조건이나 물 조건이 나쁜 경우 해당 지역의 경험을 고려해야 한다.

차량의 교차 영역에서는 포장 두께를 교통량에 맞추어 선택해야 한다. 교차하는 차량이 조밀하게 이어지는 경우 그에 맞추어 선택한 공법과 두께를 중간 구역에서도 점검해야 한다. 슬래브 표층 공법은 이 경우에 일반적으로 선택하지 않는다.

도표 7에 제시된 공법 외에 보다 얇은 포장 및 간단 공법(예컨대 무바인더 표층)을 선택하는 것으로도 충분할 수 있다.

자전거 도로 및 인도가 도로의 깊게 패인 가장자리에 배치되는 경우 특별히 배수상의 이유로 차도의 시공기면 및 동상 방지층을 자전거 도로와 인도 포장 아래에 배치하는 것이 합리적이다.

5.2.2 구성 및 설계

구성 및 설계를 위해서는 관련 기술 계약 조건 및 가이드라인이 추가로 적용된다.

5.3 주차 구역

5.3.1 공법 및 층 두께

주차 구역에 대한 공사 등급 분류는 표 3에 따라 이루어진다. 공법 및 층두께에 대해서는 도표 1 ~6 및 단락 3.1이 적합한 것으로 간주된다. 동상 방지 포장체에 필요한 두께는 단락 3,2에 따라 산출한다.

주차 구역 및 진출입로 간의 이동로는 주차 구역보다 두껍게 포장할 수 있다.

간혹 이용하는 주차 구역의 경우 각 이용 유형에 따라 간단 공법(예컨대 FLL의 쇄석 도로 또는 무바인더 표층의 건설 및 유지에 대한 권장안에 따른 쇄석 도로)을 사용할 수도 있다. 또한 심미학적 및 디자인적 관점도 적합한 포장 유형 선택을 통해 고려할 수 있다.

5.3.2 구성 및 설계

구성 및 설계를 위해서는 관련 기술 계약 조건 및 가이드라인이 추가로 적용된다.

5.4 부대 시설 및 휴게 시설

5.4.1 공법 및 층 두께

부대 시설 및 휴게 시설에 대한 공법 분류는 표 4 또는5에 따른다. 공법 및 층 두께는 도표 1 ~ 6 및 단락 3.1에 따른다. 동상 방지 포장체에 필요한 두께는 단락 3.2에 따라 산출한다.

주유 시설 범위 내에서는 연료가 침투하지 못하는 포장을 선택해야 한다.

5.4.2 구성 및 설계

구성 및 설계를 위해서는 관련 기술 계약 조건 및 가이드라인이 추가로 적용된다.

5.5 소방 도로

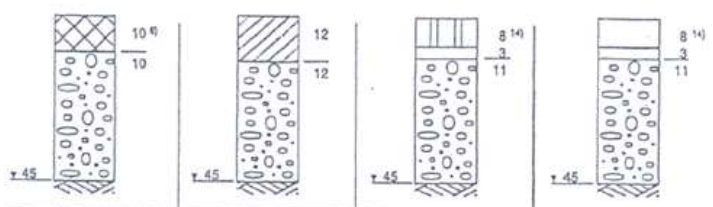
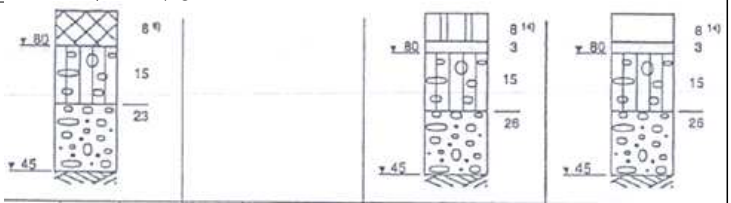
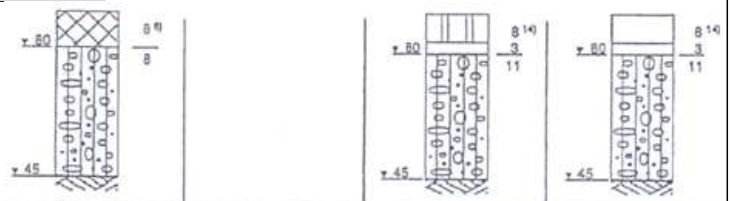
소방 도로는 공사 등급 IV, 블록 표층 및 잔디 그리드 표층 또는 적합한 지지력을 지닌 간단 공법으로 포장할 수 있다.

5.6 도로 내 선로 구역

자동차가 다니는 도로 내 선로 구역의 포장체에 대해서는 적어도 인접 도로와 동일한 총 두께를 선택해야 한다.

도표 7: F2 및 F3 노상/노반 위의 자전거 도로 및 인도에 대한 공법

(두께 단위 cm;, ▼ Ev2 최소값 단위 $MN/m^2$)

| 번호 | 공법 | 아스팔트 표층 | | | 콘크리트 표층 | | | 블록 표층 | | | 슬래브 표층 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 동상 방지 포장체 두께 | 20 | 30 | 40 | 20 | 30 | 40 | 20 | 30 | 40 | 20 | 30 | 40 |
| 1 | 내동해성 자재층 위 표층<br>내동해성 자재층 |  | | | | | | | | | | | |
| | 내동해성 자재층 두께 | 10 | 20 | 30 | - | 18 | 28 | - | 19 | 29 | - | 19 | 29 |
| 2 | 내동해성 자재층 위 쇄석 또는 자갈 기층 표층<br>쇄석 또는 자갈 기층<br>내동해성 자재층 |  | | | | | | | | | | | |
| | 내동해성 자재층 두께 | - | - | 17 | | | | - | - | 14 | - | - | 14 |
| 3 | 시공기면 위 쇄석 또는 자갈 기층 표층<br>쇄석 또는 자갈 기층 |  | | | | | | | | | | | |
| | 쇄석 또는 자갈 기층 두께 | - | 22 | 32 | | | | - | 19 | 29 | - | 19 | 29 |

6) 복합 표층-기층, 단락 3.3.3도 참조

14) 보다 얇은 두께도 가능

등가 10톤 축하중 누가 통과량 B 산출

등가 10톤 축하중 누가 통과량 B 산출 시 두 가지 방법이 있다:

-방법 1은 DTV(SV) 데이터가 있는 경우에만 사용된다.

-방법 2는 상세한 축하중 데이터를 아는 것을 전제로 한다.4)

위 두 방법은 계수가 일정한 경우 단순화할 수 있다(방법 1.2 및 2.2)

장기간 및 다양한 조건에 대해서는 B에 대해 동일한 값이 나와야 한다. 따라서 예시들은 소수점 이하 여러 자리까지 계산했다.

방법 1 - DTV(SV) 값으로부터 등가 10톤 축하중 누가 통과량 B 결정

방법 1.1 - 계수가 가변적일 때 B 결정

각각의 공용 연도에 대해 설계 관련 지형적 도로 데이터와 교통 데이터를 사용한다면 등가 10톤 축하중 누가 통과량 B는 다음과 같이 산출된다:

$$B = 365 \cdot q_{Bm} \cdot f_3 \cdot \sum_{i=1}^{N} [DTA_{i-1}^{(SV)} \cdot f_{1i} \cdot f_{2i} \cdot (1+p_i)]$$

단, $$DTA_{i-1}^{(SV)} = DTV_{i-1}^{(SV)} \cdot f_{A_{i-1}}$$

B 토대가 되는 공용 기간 내 등가 10톤 축하중 누가 통과량 B

N 토대가 되는 공용 기간의 햇수; 대체로 30년

qBm 특정 도로 등급에 할당되는 평균 하중 집합 지수(표 A 1.2 참조), 실제 축하중 통과량의 도로별 평균 하중을 나타냄(등가 10t 축하중 누가 통과량과 한 차로에서 제한된 시기 동안 실제 대형트럭/버스(SV) 축하중 통과량 총합의 지수).

f3 기울기 계수(표A 1.5 참조)

$DTV_{i-1}^{(SV)}$ 공용 기간 i-1내 실제 대형트럭/버스 평균교통 밀도[차량/24h]

$DTA_{i-1}^{(SV)}$ 공용 기간 i-1내 실제 대형트럭/버스 축 통과 횟수[차축통과/24h]

fAi-1 공용 기간 i-1내 대형트럭/버스 차량 당 차축 수 평균(차축 수 계수)[차축/차량](표 A 1.1 참조)

4) 축하중 데이터는 독일 연방 고속도로 연구 기간이 파악 및 보관한다.

f1i 공용 기간 i 내 차로 계수(표 A 1.3 참조)

f2i 공용 기간 i 내 차로 너비 계수(표 A 1.4 참조)

pi 공용 기간 i 내 대형트럭/버스 연평균 증가량(표 A 1.6 참조)

차축 수 계수 fAi와 평균 하중 집합 지수 qBm은 축하중 계량과 연결하여 실루엣 조사(silhouette census)로부터 산출된다. 별도로 도출된 차축 수 계수도 역시 사용할 수 있다.

방법 1.2 - 계수가 일정할 때 B 결정

총 시간은 f1, f2, f3, f4, qBm 및 fz에 대해 일정한 값을 갖는 부분 관찰 시간으로 나눌 수 있다. 각 부분 관찰 시간(N>1)에 대해 계산은 다음과 같이 단순화된다:

$$B = N \cdot DTA^{(SV)} \cdot q_{Bm} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_z \cdot 365$$

단,

$$DTA^{(SV)} = DTV^{(SV)} \cdot f_A$$

1년의 관찰 기간 내에 대형트럭/버스가 증가되지 않으면(p1=0), 후속하는 기간에 p>0으로 적용한다:

$$f_z = \frac{(1+p)^N - 1}{p \cdot N}$$

1년의 관찰 기간 내에 대형트럭/버스 증가를 고려해야 하면 다음을 적용한다:

$$f_z = \frac{(1+p)^N - 1}{p \cdot N} \cdot (1+p)$$

p 대형트럭/버스 연평균 증가(표 A 1.6 참조)

fz 대형트럭/버스 연평균 증가(표 A 1.7 참조)

방법 2 - 축하중 데이터를 이용하여 등가 10t 축하중 누가 통과량 결정

방법 2.1 - 계수가 가변적일 때 B 결정

축하중 계측으로부터 축하중 데이터를 사용할 수 있으면 등가 10t 축하중 누가 통과량 B는 다음과 같이 산출할 수 있다:

$$B = 365 \cdot f_3 \cdot \sum_{i=1}^{N} [EDTA_{i-1}^{(SV)} \cdot f_{1i} \cdot f_{2i} \cdot (1 + p_i)]$$

$$EDTA_{i-1}^{(SV)} = \sum_{k} \left[ DTA_{(i-1)k}^{(SV)} \cdot \left( \frac{L_k}{L_0} \right)^4 \right]$$

B 토대가 되는 공용 기간 내 등가 10톤 축하중 누가 통과량 B

N 토대가 되는 공용 기간의 햇수; 대체로 30년

f3 기울기 계수(표A 1.5 참조)

$EDTA_{i-1}^{(SV)}$ 공용 기간 i-1내 1일 평균 대형트럭/버스 등가 축하중 통과

$DTA_{i-1}^{(SV)}$ 공용 기간 i-1내 실제 대형트럭/버스 축 통과 횟수[축통과/24h]

k 하중 등급, 개별 축 하중 그룹으로 정의됨

Lk 하중 등급 k 내 평균 축 하중

L0 기준 축하중: 10t

f1i 공용 기간 i 내 차로 계수(표 A 1.3 참조)

f2i 공용 기간 i 내 차로 너비 계수(표 A 1.4 참조)

pi 공용 기간 i 내 대형트럭/버스 연평균 증가(표 A 1.6 참조). 첫 해의 pi =0.

방법 2.2 - 계수가 일정할 때 B 결정

총 시간은 f1, f2, f3 및 fz에 대해 일정한 값을 갖는 부분 관찰 시간으로 나눌 수 있다. 각 부분 관찰 시간(N>1)에 대해 계산은 다음과 같이 단순화된다:

$$B = N \cdot EDTA^{(SV)} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_z \cdot 365$$

1년의 관찰 기간 내에 대형트럭/버스가 증가되지 않으면(p1=0), 후속하는 기간에 p>0으로 적용한다:

$$f_z = \frac{(1+p)^N - 1}{p \cdot N}$$

1년의 관찰 기간 내에 대형트럭/버스 증가를 고려해야 하면 다음을 적용한다:

$$f_z = \frac{(1+p)^N - 1}{p \cdot N}(1+p)$$

p 대형트럭/버스 연평균 증가 계수(표 A 1.6 참조)

fz 대형트럭/버스 연평균 증가 계수(표 A 1.7 참조)

표 A 1.1. 차축 수 계수 fA

| 번호 | 도로 등급 | 계수 $f_A$ |
|---|---|---|
| 1 | 연방 고속 도로 | 4.2 |
| 2 | 연방 도로 | 3.7 |
| 3 | 주 도로 및 지방 도로 | 3.1 |

표 A 1.2. 하중 집합 지수 qBm

| 번호 | 도로 등급 | 지수 $q_{Bm}$ |
|---|---|---|
| 1 | 연방 고속 도로 | 0.26 |
| 2 | 연방 도로 | 0.20 |
| 3 | 주 도로 및 지방 도로 | 0.18 |

표 A 1.3. 차로 계수 f1

| 번호 | $DTV^{(SV)}$에 의해 파악된 차로 개수 | $DTV^{(SV)}$ 파악 시 계수 $f_1$ | |
|---|---|---|---|
| | | 양쪽 차로에서 | 각 주행 방향에 대해 별도로 |
| 1 | 1 | – | 1.00 |
| 2 | 2 | 0.50 | 0.90 |
| 3 | 3 | 0.50 | 0.80 |
| 4 | 4 | 0.45 | 0.80 |
| 5 | 5 | 0.45 | 0.80 |
| 6 | 6 및 그 이상 | 0.40 | 0.80 |

표 A 1.4. 차로 너비 계수 f2

| 번호 | 차로 너비 [m] | 계수 $f_2$ |
|---|---|---|
| 1 | ~ 2.50 | 2.00 |
| 2 | 2.50 ~ 2.75 | 1.80 |
| 3 | 2.75 ~ 3.25 | 1.40 |
| 4 | 3.25 ~ 3.75 | 1.10 |
| 5 | 3.75 ~ | 1.00 |

표 A 1.5. 기울기 계수 f3

| 번호 | 최대 종방향 기울기[%] | 계수 $f_3$ |
|---|---|---|
| 1 | ~ 2 | 1.00 |
| 2 | 2 ~ 4 | 1.02 |
| 3 | 4 ~ 5 | 1.05 |
| 4 | 5 ~ 6 | 1.09 |
| 5 | 6 ~ 7 | 1.14 |
| 6 | 7 ~ 8 | 1.20 |
| 7 | 8 ~ 9 | 1.27 |
| 8 | 9 ~ 10 | 1.35 |
| 9 | 10 ~ | 1.45 |

표 A 1.6. 대형트럭/버스 연평균 증가 계수 p

| 번호 | 도로 등급 | p |
|---|---|---|
| 1 | 연방 고속 도로 | 0.03 |
| 2 | 연방 도로 | 0.02 |
| 3 | 주 도로 및 지방 도로 | 0.01 |

표 A 1.7. 대형트럭/버스 연평균 증가 계수 fz

관찰 기간 첫 해에 p1=0인 경우

| N | 대형트럭/버스 연평균 증가 p | | |
|---|---|---|---|
| | 0.03 | 0.02 | 0.03 |
| 5 | 1.020 | 1.041 | 1.062 |
| 10 | 1.046 | 1.095 | 1.146 |
| 15 | 1.073 | 1.153 | 1.240 |
| 20 | 1.101 | 1.215 | 1.344 |
| 25 | 1.130 | 1.281 | 1.458 |
| 30 | 1.159 | 1.352 | 1.586 |

관찰 기간 첫 해에 p1>0인 경우:

| N | 대형트럭/버스 연평균 증가 p | | |
|---|---|---|---|
| | 0.01 | 0.02 | 0.03 |
| 5 | 1.030 | 1.062 | 1.094 |
| 10 | 1.057 | 1.117 | 1.181 |
| 15 | 1.084 | 1.176 | 1.277 |
| 20 | 1.112 | 1.239 | 1.384 |
| 25 | 1.141 | 1.307 | 1.502 |
| 30 | 1.171 | 1.379 | 1.633 |

등가 10t 축하중 누가 통과량 계산에 대한 예시 1 ~ 7

복구 조치에 대한 예시 8 및 9

계산 예시는 대체로 긴 관찰 기간을 포함하며 따라서 각 방법을 적용할 시에 반올림을 하면 현저하게 차이가 날 수 있다. 따라서 소수점 이하 여러 자리까지 계산해야 한다. 비교를 위해 여기서는 2가지 방법으로 계산한다.

예시 1

고속도로 건설을 위한 등가 10t 축하중 누가 통과량 및 관련 공사 등급 산출

1. 기본 데이터

1.1 일반적인 예상 데이터

- 공용 기간: N= 30년
- 차로 개수(상수): 6 => f1= 0.4(표 A 1.3)
- 교통 하중이

가장 심한

차로 너비(상수): 3.75m => f2= 1.0(표 A 1.4)

- 최대 종방향 기울기: 4% => f3= 1.05(표 A 1.5)

1.2 교통 데이터

- 공용 기간 첫 해 DTV(SV): 1900대/24h => p1=0
- 공용 기간 2~4번째 해

대형트럭/버스 연평균 증가: => p2...4=0.02

- 신설 구간은 통행 승인 후

5번째 해에 이르러서야

비로소 계획했던 의의를

갖게 됨: => p5...30=0.03

(표 A 1.6)

- 대형트럭/버스 차량 당 평균 차축 수 fA 및 평균 하중 집합 지수 qBm는 계획 시점에 실루엣 조사(silhouette census)와 축하중 산출을 통해 알 수 있다:

=> fA=4.2 A/차량 및 qBm= 0.26.

2. 계산

방법 1.1

$$B = 365 \cdot q_{Bm} \cdot f_1 \cdot \sum_{i=1}^{N} [DTA_{i-1}^{(SV)} \cdot f_{1i} \cdot f_{2i} \cdot (1+p_i)]$$

계산은 표 A 2.1.1에 설명되어 있다.

방법 1.2

공용 기간 30년은 각각의 상수를 지닌 2개의 관찰 기간(1~4 번째 해, 5~30번째 해)으로 나뉜다.

$$B = N \cdot DTA^{(SV)} \cdot q_{Bm} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_Z \cdot 365$$

1~4번째 해의 경우(첫 해에 증가 없음):

$$f_Z = \frac{(1+p)^N - 1}{p \cdot N}$$

fz1...4= 1.030 => B1...4= 1억 3100만

5 ~ 30번째 해의 경우(5번째 해에 증가있음):

$$f_Z = \frac{(1+p)^N - 1}{p \cdot N}$$

fz5...30= 1.527 => B5...30= 13억 4000만

B 총합 = B1...4 + B5...30 = 1억 3100만 + 13억 4000만 = 14억 7100만

3. 결과

등가 10t 축하중 누가 통과량은 두 가지 방법에 따라 계산한 결과 14억 7100만이다. 이 하중은 공사 등급 I로 분류된다(표 1 참조).

표 A 2.1.1. 예시 1의 방법 1.1에 따른 등가 10t 축하중 누가 통과량 계산

| Jahr | $p_i$ | $DTV_{i-1}^{(SV)}$ | $f_A$ | $DTA_{i-1}^{(SV)}$ | $q_{Bm}$ | $f_1$ | $f_2$ | $f_3$ | Tage/Jahr | $1+p_i$ | $B_i$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | – | 1900,00 | 4,2 | 7980,00 | 0,26 | 0,4 | 1 | 1,05 | 365 | – | 318066,84 |
| 2 | 0,02 | 1900,00 | | 7980,00 | | | | | | 1,02 | 324428,18 |
| 3 | 0,02 | 1938,00 | | 8139,60 | | | | | | 1,02 | 330916,74 |
| 4 | 0,02 | 1976,76 | | 8302,39 | | | | | | 1,02 | 337535,08 |
| 5 | 0,03 | 2016,30 | | 8468,44 | | | | | | 1,03 | 347661,13 |
| 6 | 0,03 | 2076,78 | | 8722,49 | | | | | | 1,03 | 358090,96 |
| 7 | 0,03 | 2139,09 | | 8984,17 | | | | | | 1,03 | 368833,69 |
| 8 | 0,03 | 2203,26 | | 9253,69 | | | | | | 1,03 | 379898,70 |
| 9 | 0,03 | 2269,36 | | 9531,30 | | | | | | 1,03 | 391295,66 |
| 10 | 0,03 | 2337,44 | | 9817,24 | | | | | | 1,03 | 403034,53 |
| 11 | 0,03 | 2407,56 | | 10111,76 | | | | | | 1,03 | 415125,57 |
| 12 | 0,03 | 2479,79 | | 10415,11 | | | | | | 1,03 | 427579,33 |
| 13 | 0,03 | 2554,18 | | 10727,57 | | | | | | 1,03 | 440406,71 |
| 14 | 0,03 | 2630,81 | | 11049,39 | | | | | | 1,03 | 453618,92 |
| 15 | 0,03 | 2709,73 | | 11380,88 | | | | | | 1,03 | 467227,48 |
| 16 | 0,03 | 2791,02 | | 11722,30 | | | | | | 1,03 | 481244,31 |
| 17 | 0,03 | 2874,75 | | 12073,97 | | | | | | 1,03 | 495681,64 |
| 18 | 0,03 | 2961,00 | | 12436,19 | | | | | | 1,03 | 510552,09 |
| 19 | 0,03 | 3049,83 | | 12809,28 | | | | | | 1,03 | 525868,65 |
| 20 | 0,03 | 3141,32 | | 13193,55 | | | | | | 1,03 | 541644,71 |
| 21 | 0,03 | 3235,56 | | 13589,36 | | | | | | 1,03 | 557894,05 |
| 22 | 0,03 | 3332,63 | | 13997,04 | | | | | | 1,03 | 574630,87 |
| 23 | 0,03 | 3432,61 | | 14416,95 | | | | | | 1,03 | 591869,80 |
| 24 | 0,03 | 3535,59 | | 14849,46 | | | | | | 1,03 | 609625,89 |
| 25 | 0,03 | 3641,65 | | 15294,94 | | | | | | 1,03 | 627914,67 |
| 26 | 0,03 | 3750,90 | | 15753,79 | | | | | | 1,03 | 646752,11 |
| 27 | 0,03 | 3863,43 | | 16226,41 | | | | | | 1,03 | 666154,67 |
| 28 | 0,03 | 3979,33 | | 16713,20 | | | | | | 1,03 | 686139,31 |
| 29 | 0,03 | 4098,71 | | 17214,59 | | | | | | 1,03 | 706723,49 |
| 30 | 0,03 | 4221,67 | | 17731,03 | | | | | | 1,03 | 727925,20 |

$B_{1\ bis\ 30}$ =14 714 340,97

$B_{1\ bis\ 30}$ [Mio.] = 14,71

예시 2

공사 등급 II에 따라 건설된 고속도로 포장의 관찰 시점 이전 20년을 기준으로 보아 향후 10년간(보수 계획됨)의 교통 하중을 감당하기에 충분한지 점검.

1. 기본 데이터

1.1 일반적인 예상 데이터

- 차로 개수(상수): 4 => f1= 0.45 (표 A 1.3)
- 교통 하중이

가장 심한

차로 너비(상수): 3.50m => f2= 1.1 (표 A 1.4)

- 최대 종방향 기울기: 2% => f3= 1.0 (표 A 1.5)

1.2 교통 데이터

- 고속도로 구간에 대해서는 교통량 조사 결과, 특히 지난 20년의 DTV(SV)값이 존재한다.

관찰 시점까지 고속도로 상에서 대형트럭/버스는 주로 2축 및 3축 개별 차량과 2+2 화물 트레일러로 구성되므로, 대형트럭/버스 차량당 평균 차축수, 즉 계수 fA는 차량당 3.1개 차축으로 설정되고 지난 20년에 대한 상수로 채택된다. 향후 10년간 계수 fA는 평균 4.2 차축수/차량으로 높아진다(표 A 1.1).

- 평균 하중 집합 지수는 과거 20년 및 향후 10년에 대해 qBm=0.26으로 채택한다.
- 대형트럭/버스 연평균 증가 계수는 과거 기간에 대해서는 측정되어 있는 DTV(SV)값에서 도출한다. 향후 10년의 대형트럭/버스에 대해서는 연평균 증가 계수 p=0으로 설정한다.

2. 계산

과거 20년에 대한 등가 10t 축하중 누가 통과량 계산을 위해서는 방법 1.1을 선택한다. 왜냐하면 각 연도에 대해 대형트럭/버스 1일 평균 교통 밀도에 의한 하중이 제시되어 있기 때문이다.

향후 10년에 대해서는 방법 1.1 및 방법 1.2를 이용하여 등가 10t 축하중 누가 통과량을 계산한다.

방법 1.1

$$B = 365 \cdot q_{Bm} \cdot f_3 \cdot \sum_{i=1}^{N} [DTA_{i-1}^{(SV)} \cdot f_{1i} \cdot f_{2i} \cdot (1 + p_i)]$$

과거 20년에 대한 계산은 표 A 2.2.1에 제시되어 있다.

B1...20=9억 4800만

향후 10년에 대한 계산은 표 A 2.2.2에 제시되어 있다. 이때 20번째 해의 DTV(SV)를 21번째 해 계산을 위한 기본값으로 사용한다.

B21...30=14억 9100만

총 하중:

B1...30= B1...20 + B21...30 = 9억 4800만 + 14억 9100만 = 24억 3900만

방법 1.2

관찰 시점 이전 20년간에 대한 DTV(SV) 값은 존재한다.

$$B = N \cdot DTA^{(SV)} \cdot q_{Bm} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_z \cdot 365$$

단, $DTA^{(SV)} = DTV^{(SV)} \cdot f_A$

21 ~ 30번째 해의 경우(21번째 해에 증가 있음):

$$f_z = \frac{(1+p)^N - 1}{p \cdot N} \cdot (1+p)$$

fz21...30= 1.1808 => B21...30= 14억 9100만

3. 결과

총 하중은 24억 3900만 등가 10t 축하중 통과량이다. 이러한 하중은 공사 등급 I에 따른 차도 건설을 요구한다(표 1 참조). 따라서 기존 포장, 공사 등급 II는 보강되어야 한다.

표 A 2.2.1. 예시 2의 방법 1.1에 따른 과거 20년 간 등가 10t 축하중 누가 통과량 B 계산

| Jahr | $p_i$ | $DTV_{i-1}^{(SV)}$ | $f_A$ | $DTA_{i-1}^{(SV)}$ | $q_{Bm}$ | $f_1$ | $f_2$ | $f_3$ | Tage/Jahr | $B_i$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | – | 1100,00 | 3,1 | 3410 | 0,26 | 0,45 | 1,1 | 1 | 365 | 160186,46 |
| 2 | | 1400,00 | | 4340 | | | | | | 203873,67 |
| 3 | | 1700,00 | | 5270 | | | | | | 247560,89 |
| 4 | | 1900,00 | | 5890 | | | | | | 276685,70 |
| 5 | | 2100,00 | | 6510 | | | | | | 305810,51 |
| 6 | | 2300,00 | | 7130 | | | | | | 334935,32 |
| 7 | | 2400,00 | | 7440 | | | | | | 349497,72 |
| 8 | | 2500,00 | | 7750 | | | | | | 364060,13 |
| 9 | | 2700,00 | | 8370 | | | | | | 393184,94 |
| 10 | | 2900,00 | | 8990 | | | | | | 422309,75 |
| 11 | | 3100,00 | | 9610 | | | | | | 451434,56 |
| 12 | | 3400,00 | | 10540 | | | | | | 495121,77 |
| 13 | | 3600,00 | | 11160 | | | | | | 524246,58 |
| 14 | | 3800,00 | | 11780 | | | | | | 553371,39 |
| 15 | | 4100,00 | | 12710 | | | | | | 597058,61 |
| 16 | | 4300,00 | | 13330 | | | | | | 626183,42 |
| 17 | | 4600,00 | | 14260 | | | | | | 669870,63 |
| 18 | | 5100,00 | | 15810 | | | | | | 742682,66 |
| 19 | | 5700,00 | | 17670 | | | | | | 830057,09 |
| 20 | | 6400,00 | | 19840 | | | | | | 931993,92 |
| | | | | | | | | | | $B_{1\text{ bis }20}$ = 9480125,66 |
| | | | | | | | | | | $B_{1\text{ bis }20}$ [Mio.] = 9,48 |

표 A 2.2.2. 예시 2의 방법 1.1에 따른 향후 10년에 대한 등가 10t 축하중 누가 통과량 계산

| Jahr | $p_i$ | $DTV_{i-1}^{(SV)}$ | $f_A$ | $DTA_{i-1}^{(SV)}$ | $q_{Bm}$ | $f_1$ | $f_2$ | $f_3$ | Tage/Jahr | $1+p_i$ | $B_i$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 21 | 0,03 | 6400,00 | 4,2 | 26880,00 | 0,26 | 0,45 | 1,1 | 1 | 365 | 1,03 | 1300582,48 |
| 22 | 0,03 | 6592,00 | | 27686,40 | | | | | | 1,03 | 1339599,96 |
| 23 | 0,03 | 6789,76 | | 28516,99 | | | | | | 1,03 | 1379787,96 |
| 24 | 0,03 | 6993,45 | | 29372,50 | | | | | | 1,03 | 1421181,60 |
| 25 | 0,03 | 7203,26 | | 30253,68 | | | | | | 1,03 | 1463817,04 |
| 26 | 0,03 | 7419,35 | | 31161,29 | | | | | | 1,03 | 1507731,55 |
| 27 | 0,03 | 7641,93 | | 32096,13 | | | | | | 1,03 | 1552963,50 |
| 28 | 0,03 | 7871,19 | | 33059,01 | | | | | | 1,03 | 1599552,41 |
| 29 | 0,03 | 8107,33 | | 34050,78 | | | | | | 1,03 | 1647538,98 |
| 30 | 0,03 | 8350,55 | | 35072,30 | | | | | | 1,03 | 1696965,15 |
| | | | | | | | | | | | $B_{21\text{ bis }30}$ =14 909720,62 |
| | | | | | | | | | | | $B_{21\text{ bis }30}$ [Mio.] = 14,91 |

예시 3

공사 등급 IV에 따라 건설된 지방 도로의 기존 포장체가 우회로로 적합한지 점검.

1. 기본 데이터

1.1 일반적인 예상 데이터

- 공용 기간:

- 통행 승인 시 계획: 20년
- 통행 승인과 우회 조치 시작 사이: 12년
- 우회 조치 기간: 4년

- 차로 개수(상수): 2 => f1= 0.5(표 A 1.3)

- 교통 하중이

가장 심한

차로 너비(상수): 3.50m => f2= 1.1(표 A 1.4)

- 최대 종방향 기울기: 2% 이하 => f3= 1.0(표 A 1.5)

1.2 교통 데이터

- 통행 승인 해 DTV(SV): 200대/24h => p1=0

- 우회 첫해 DTV(SV): 240대/24h => p13=0

- 우회 교통량이 없는 그리고 있는 기간에 대해 fA=3.1 차축/차량 및 qBm= 0.18이 상수로 채택된다. 대형트럭/버스 연평균 증가 p=0.01이다(표 A 1.6).

2. 계산

각각 상수를 갖는 관찰 기간 구분과 관련하여 등가 10t 축하중 누가 통과량 B 계산은 방법 1.1 및 방법 1.2로 할 수 있다.

-우회 전

방법 1.1

$$B = 365 \cdot q_{Bm} \cdot f_3 \cdot \sum_{i=1}^{N} [DTA_{i-1}^{(SV)} \cdot f_{1i} \cdot f_{2i} \cdot (1+p_i)]$$

B1...12= 2800만

계산은 표 A 2.3.1에 제시되어 있다.

방법 1.2

$$B = N \cdot DTA^{(SV)} \cdot q_{Bm} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_z \cdot 365$$

1 ~ 12번째 해에 대해(첫 해에 증가 없음):

$$f_z = \frac{(1+p)^N - 1}{p \cdot N}$$

fz1...12= 1.057 => B1...12= 2800만

-우회 동안

방법 1.1

$$B = 365 \cdot f_3 \cdot \sum_{i=1}^{N} [DTA_{i-1}^{(SV)} \cdot f_{1i} \cdot f_{2i} \cdot (1+p_i)]$$

DTV(SV) 13 = 240 (우회 직전 DTV(SV) )

B13...16= 1100만

계산은 표 A 2.3.2에 제시된다.

방법 1.2

$$B = N \cdot DTA^{(SV)} \cdot q_{Bm} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_z \cdot 365$$

13 ~ 16번째 해에 대해(13번째 해에 증가 없음):

$$f_z = \frac{(1+p)^N - 1}{p \cdot N}$$

fz13...16= 1.015 => B13...16= 1100만

- 우회 후

방법 1.1

$$B = 365 \cdot q_{Bm} \cdot f_3 \cdot \sum_{i=1}^{N} [DTA_{i-1}^{(SV)} \cdot f_{1i} \cdot f_{2i} \cdot (1+p_i)]$$

B17...20= 1100만

계산은 표 A 2.3.3에 제시된다.

방법 1.2

$$B = N \cdot DTA^{(SV)} \cdot q_{Rm} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_z \cdot 365$$

17 ~ 20번째 해에 대해(17번째 해에 증가 있음):

$$f_z = \frac{(1+p)^N - 1}{p \cdot N} \cdot (1+p)$$

fz17...20= 1.025 => B17...20= 1100만

-총 하중 B

총하중 B = B1...12 + B13...16 + B17...20 = 2800만 +1100만 + 1100만 = 5100만 (5000만이 맞음)

3. 결과

도로 설계를 위해 적어도 공사 등급 IV의 요건을 충족하도록 공법을 선택해야 한다. 따라서 현재 공법이 우회하는 대형트럭/버스에 적합하다.

표 A 2.3.1. 예시 3의 방법 1.1에 따른 우회 전 시간에 대한 예시 3의 등가 10t 축하중 누가 통과량 계산

| Jahr | $p_i$ | $DTV_{i-1}^{(SV)}$ | $f_A$ | $DTA_{i-1}^{(SV)}$ | $q_{Bm}$ | $f_1$ | $f_2$ | $f_3$ | Tage/Jahr | $1+p_i$ | $B_i$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | - | 200,00 | 3,1 | 620,00 | 0,18 | 0,5 | 1,1 | 1 | 365 | - | 22 403,70 |
| 2 | 0,01 | 200,00 | | 620,00 | | | | | | 1,01 | 22 627,74 |
| 3 | 0,01 | 202,00 | | 626,20 | | | | | | 1,01 | 22 854,01 |
| 4 | 0,01 | 204,02 | | 632,46 | | | | | | 1,01 | 23 082,55 |
| 5 | 0,01 | 206,06 | | 638,79 | | | | | | 1,01 | 23 313,38 |
| 6 | 0,01 | 208,12 | | 645,17 | | | | | | 1,01 | 23 546,51 |
| 7 | 0,01 | 210,20 | | 651,63 | | | | | | 1,01 | 23 781,98 |
| 8 | 0,01 | 212,30 | | 658,14 | | | | | | 1,01 | 24 019,80 |
| 9 | 0,01 | 214,43 | | 664,72 | | | | | | 1,01 | 24 260,00 |
| 10 | 0,01 | 216,57 | | 671,37 | | | | | | 1,01 | 24 502,60 |
| 11 | 0,01 | 218,74 | | 678,08 | | | | | | 1,01 | 24 747,62 |
| 12 | 0,01 | 220,92 | | 684,87 | | | | | | 1,01 | 24 995,10 |
| | | | | | | | | | | $B_{1\text{ bis }12}$ = | 284 134,99 |
| | | | | | | | | | | $B_{1\text{ bis }12}$ [Mio.] = | 0,28 |

표 A 2.3.2. 예시 3의 방법 1.1에 따른 우회 동안 시간에 대한 등가 10t 축하중 누가 통과량 계산

| Jahr | $p_i$ | $DTV_{i-1}^{(SV)}$ | $f_A$ | $DTA_{i-1}^{(SV)}$ | $q_{Bm}$ | $f_1$ | $f_2$ | $f_3$ | Tage/Jahr | $1+p_i$ | $B_i$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 13 | - | 240,00 | 3,1 | 744,00 | 0,18 | 0,5 | 1,1 | 1 | 365 | - | 26 884,44 |
| 14 | 0,01 | 240,00 | | 744,00 | | | | | | 1,01 | 27 153,28 |
| 15 | 0,01 | 242,40 | | 751,44 | | | | | | 1,01 | 27 424,82 |
| 16 | 0,01 | 244,82 | | 758,95 | | | | | | 1,01 | 27 699,07 |
| | | | | | | | | | | $B_{13\text{ bis }16}$ = | 109 161,61 |
| | | | | | | | | | | $B_{13\text{ bis }16}$ [Mio.] = | 0,11 |

표 A 2.3.3. 예시 3의 방법 1.1에 따른 우회 후 시간에 대한 등가 10t 축하중 누가 통과량 계산

| Jahr | $p_i$ | $DTV_{i-1}^{(SV)}$ | $f_A$ | $DTA_{i-1}^{(SV)}$ | $q_{Bm}$ | $f_1$ | $f_2$ | $f_3$ | Tage/Jahr | $1+p_i$ | $B_i$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 17 | 0,01 | 247,27 | 3,1 | 766,54 | 0,18 | 0,5 | 1,1 | 1 | 365 | 1,01 | 27 976,06 |
| 18 | 0,01 | 249,74 | | 774,21 | | | | | | 1,01 | 28 255,82 |
| 19 | 0,01 | 252,24 | | 781,95 | | | | | | 1,01 | 28 538,37 |
| 20 | 0,01 | 254,76 | | 789,77 | | | | | | 1,01 | 28 823,76 |
| | | | | | | | | | | $B_{17\text{ bis }10}$ = | 113 594,01 |
| | | | | | | | | | | $B_{17\text{ bis }20}$ [Mio.] = | 0,11 |

예시 4

시가지 내 공사 구역 개방의 범위에서 차도 포장을 단계적으로 건설해야 한다면, 공사 조치 완료 후 측도의 기능을 충족해야 한다. 첫 번째 건설 단계에서는 5년의 공사 기간 동안 예상되는 공사장 통행 차량을 수용할 수 있을 만큼의 지지력을 형성해야 한다.

1. 기본 데이터

1.1 일반적인 예상 데이터

- 측도의 전체 구조는 공사 등급 V로 한다.
- 도표 1의 5에 따라 25cm 쇄석 기층 위에 8cm 두께의 아스팔트 기층을 지닌 구조를 선택한다(건설 1단계).
- 노상의 동상 민감 등급은 F2로 분류한다.
- 동상 방지 도로 포장체의 최소 두께는 표 5에 따라 40cm이다.
- 보다 두꺼운 또는 보다 얇은 두께 산출 시 장소적 조건을 고려하기 위한 계수는 표 7에 따라 다음과 같이 형성된다:

- A = + 15cm(동상 영향 구역 III)
- B = ± 0cm(같은 지대에 위치)
- C = ± 0cm(물 조건 유리)
- D = -5cm(배수 장치를 갖춘 부분으로 투수성인 가장자리 영역)

- 따라서 동상 방지 포장체 두께는 40 + 10 = 50cm이다.
- 차로 개수(상수): 2 => f1= 0.5(표 A 1.3)
- 교통 하중이

가장 심한

차로 너비(상수): 2.60m => f2= 1.8(표 A 1.4)

- 최대 종방향 기울기: 1% => f3= 1.0(표 A 1.5)

1.2 공사장 통행 중 교통 데이터

- 3년의 전체 공사 기간에 대한 DTV(SV) 값은 일정하게 30대/24h로 채택한다 => pi =0. fz = 1.

- 공사장 차량 당 평균 차축 수는 fA=3.5 차축/차량(프로젝트와 관련하여 결정)로 채택하고 평균 하중 집합 지수는 qBm= 0.26으로 채택한다.

2. 계산

방법 1.1

$$B = 365 \cdot q_{Bm} \cdot f_3 \cdot \sum_{i=1}^{N} [DTA_{i-1}^{(SV)} \cdot f_{Ui} \cdot f_{2i} \cdot (1 + p_i)]$$

B1...3= 300만

계산은 표 A 2.4.1에 제시되어 있다.

방법 1.2

$$B = N \cdot DTA^{(SV)} \cdot q_{Bm} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_z \cdot 365$$

fz = 1 => B1...3= 300만

3. 1단계 건설 설계가 하중에 적합한지 점검

- 1단계 건설은 8cm 두께의 아스팔트 기층과 25cm 두께의 쇄석 기층으로 구성된다. 공사 등급은 VI로 정한다(예, 도표 1의 5).

- 공사 등급 VI은 RStO 표 1에 따라 30년의 공용 기간 동안 100 000회의 등가 10t 축하중 통과를 수용할 수 있다. 따라서 전체 포장의 한 부분인 첫 번째 건설 단계 동안 73 096회의 등가 10t 축하중 통과의 “잔여 하중”을 사용한다.

4. 차도 포장 전체 구조 설계가 교통에 적합한지 평가

2단계 공사(아스팔트 기층 위에 4cm 아스팔트 표층) 전에 제거할 수 있는 표면 근처의 손상을 제외하면, 전체 차도 포장의 공용 기간을 감소시키는 것은 두려워하지 않아도 된다.

표 A 2.4.1. 예시 4의 방법 1.1에 따른 예시 4의 등가 10t 축하중 누가 통과량 계산

| Jahr | $p_i$ | $DTV^{(SV)}$ | $f_A$ | $DTA^{(SV)}$ | $q_{Sm}$ | $f_1$ | $f_2$ | $f_3$ | Tage/Jahr | $1+p_i$ | $B_i$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,00 | 30,00 | 3,5 | 105 | 0,26 | 0,5 | 1,8 | 1 | 365 | 1,00 | 8968,05 |
| 2 | 0,00 | 30,00 | | 105 | | | | | | 1,00 | 8968,05 |
| 3 | 0,00 | 30,00 | | 105 | | | | | | 1,00 | 8968,05 |
| | | | | | | | | | | $B_{1\text{ bis }3}$ = | 26904,15 |
| | | | | | | | | | | $B_{1\text{ bis }3}$ [Mio.] = | 0,03 |

예시 5

지자체 버스 차도에 대한 등가 10t 축하중 누가 통과량 B와 관련 공사 등급 산출

1. 기본 데이터

1.1 일반적인 예상 데이터

- 공용 기간: N= 30년
- 차로 개수(상수): 1 => f1= 1.0(표 A 1.3)
- 교통 하중이

가장 심한

차로 너비(상수): 3.0m => f2= 1.4(표 A 1.4)

- 최대 종방향 기울기: 4% => f3= 1.02(표 A 1.5)

1.2 교통 데이터

- 버스 통행 횟수(DTV(SV)와 일치)

  150대/24h => p1...6=0

- 대형트럭/버스 편성, 차량 종류 2가지:

  3축 차량 100대, 차축 하중 앞차축: 6.6t

  후방 트윈 액슬 제1 차축: 10.0t

  제2 차축: 11.0t

  2축 차량 50대, 차축 하중 앞차축: 6.6t

  뒤차축: 11.0t

- 6년 후 동일한 차축 하중의 2차축 버스를 사용하는 버스 노선이 추가되면, 그로 인해 DTV(SV)가 20대/24h로 증가한다(p7...30=0).

2. 계산

방법 2.1

부분 관찰 시간 동안(1~6번째 해 및 7~30번째 해) 각각의 교통량(버스 통과량)은 일정하다.

$$B = 365 \cdot f_3 \cdot \sum_{i=1}^{N} [EDTA^{(STV)} \cdot f_{1i} \cdot f_{2i}]$$

단, $$EDTA^{(STV)} = \sum_{k} \left[ DTA_k^{(STV)} \cdot \left( \frac{L_k}{L_0} \right)^4 \right]$$

대형트럭/버스 1일 평균 등가 축 통과량 계산 및 등가 10t 축하중 누가 통과량 B 계산은 표 A 2.5.1 및 A 2.5.3에 제시되어 있다.

$$EDTA_{1\_6}^{(STV)} = \left[ \left( \frac{6,6}{10} \right)^4 + \left( \frac{10}{10} \right)^4 + \left( \frac{11}{10} \right)^4 \right] \cdot 100 + \left[ \left( \frac{6,6}{10} \right)^4 + \left( \frac{11}{10} \right)^4 \right] \cdot 50 = 348,08$$

B1...6= 1억 900만

$$EDTA_{7\_30}^{(STV)} = \left[ \left( \frac{6,6}{10} \right)^4 + \left( \frac{10}{10} \right)^4 + \left( \frac{11}{10} \right)^4 \right] \cdot 100 + \left[ \left( \frac{6,6}{10} \right)^4 + \left( \frac{11}{10} \right)^4 \right] \cdot 70 = 381,07$$

B7...30= 4억 7700만

B 총합 = B1...6 + B7...30 = 1억 900만 + 4억 7700만 = 5억 8600만

방법 2.2

대형트럭/버스 1일 평균 등가 축통과 계산은 표 A 2.5.2 및 표 A 2.5.4에 제시되어 있다.

$$B = N \cdot EDTA^{(STV)} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_Z \cdot 365$$

B 총합 = B1...6 + B7...30 = 1억 900만 + 4억 7700만 = 5억 8600만

3. 결과

등가 10t 축하중 누가 통과량 B는 5억 8600만회의 등가 10t 축하중 통과이다. 이러한 하중에 대해서는 공사 등급 II를 지정해야 한다.

표 A 2.5.1. 예시 5의 1~6년간 대형트럭/버스 1일 평균 등가 축하중 통과 계산

| SV | $L_K$ | $L_0$ | $L_K/L_0$ | $(L_K/L_0)^4$ | $DTA^{(SV)}$ | $(L_K/L_0)^4 \cdot DTA^{(SV)}$ | $EDTA^{(SV)}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3-Achser | 6,60 | 10 | 0,66 | 0,19 | 100 | 18,97 | |
| | 10,00 | | 1,00 | 1,00 | 100 | 100,00 | |
| | 11,00 | | 1,10 | 1,46 | 100 | 146,41 | 265,38 |
| 2-Achser | 6,60 | 10 | 0,66 | 0,19 | 50 | 9,49 | |
| | 11,00 | | 1,10 | 1,46 | 50 | 73,21 | 82,69 |
| | | | | | | $EDTA^{(SV)}_{1\ bis\ 6}$ = | 348,08 |

표 A 2.5.2. 예시 5의 방법 2.1에 따른 1~6년간 등가 10t 축하중 누가 통과량 B계산

| Jahr | $EDTA_i^{(SV)}$ | $f_1$ | $f_2$ | $f_3$ | Tage/Jahr | $f_z$ | $B_i$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 348,08 | 1,0 | 1,4 | 1,02 | 365 | 1,0 | 181 426,26 |
| 2 | 348,08 | | | | | | 181 426,26 |
| 3 | 348,08 | | | | | | 181 426,26 |
| 4 | 348,08 | | | | | | 181 426,26 |
| 5 | 348,08 | | | | | | 181 426,26 |
| 6 | 348,08 | | | | | | 181 426,26 |
| | | | | | | $B_{1\ bis\ 6}$ = | 1 088 557,55 |
| | | | | | | $B_{1\ bis\ 6}$ [Mio.] = | 1,09 |

표 A 2.5.3. 예시 5의 7~30번째 해에 대한 대형트럭/버스 1일 평균 등가 축하중 통과 계산

| SV | $L_K$ | $L_0$ | $L_K/L_0$ | $(L_K/L_0)^4$ | $DTA^{(SV)}$ | $(L_K/L_0)^4 \cdot DTA^{(SV)}$ | $EDTA^{(SV)}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3-Achser | 6,60 | 10 | 0,66 | 0,19 | 100 | 18,97 | |
| | 10,00 | | 1,00 | 1,00 | 100 | 100,00 | |
| | 11,00 | | 1,10 | 1,46 | 100 | 146,41 | 265,38 |
| 2-Achser | 6,60 | 10 | 0,66 | 0,19 | 70 | 13,28 | |
| | 11,00 | | 1,10 | 1,46 | 70 | 102,49 | 115,77 |
| | | | | | | $EDTA^{(SV)}_{7\ bis\ 30}$ = | 381,15 |

부록 - II

# 철도 도상 크리프 및 융해침하를 해결하기 위한 기술적 지침서

모스크바 Transport 출판사 1998

UDK {625/122+525/123}(033/13)

BBK 39.211-08

T38

러시아 연방 철도의 천연 배수 소재와 중합체(polymeric) 소재로 되어 있는 반변형적 구조물 설치 시 작업준비, 기술, 설계, 계산에 대한 요구사항 및 권고 사항을 언급하였다. 기술 지시서는 VNIIJT로 작성되었다.

# 목차

서 론.....1

1. 일반 규칙.....4

2.설계를 위한 기초 데이터.....6

3. 반변형적 조치 지시에 대한 조건.....11

4. 반변형적 구조에 대한 계산 및 설계.....15

4.1 일반 요구사항.....15

4.2 Roadbed의 융해나 동결깊이 계산..... ..... 16

4.3 roadbed의 점토질 노반의 하중능력을 확보하는 조건 하에 반변형적 구조 계산.....19

4.4 폼 플락스틱재로 단열.....23

4.5 중합체 재료 필름으로 되어 있는 방수커버.....30

4.6 부직포 커버.....33

4.7 Roadbed 기본 대지의 설계.....36

4.8 허용된 크리프 치수에 의하여 반변형적 천연자재 구조 계산..... .....37

4.9 반 크리프 패드구조.....42

5. 동토 조건 하의 배수설계.....51

6. 작업의 조직 및 기본 규칙.....53

서론

러시아 철도에서 수분이 많은 점토질 흙이 동결될 경우 노반 표면의 위치가 다양한 높이로 변형된다. 측면적으로 볼 때 허용기준치 범위 내에서 궤도가 융기하면 그런 지반의 크리프(soil creep)는 균일하다고 한다. 어떤 경우에는 땅이 얼고 지반의 크리프 값이 허용기준치를 넘어 궤도에 변형이 발생한다. 크리프 현상은 외형상 크리프 언덕, 구멍, 스윙, 비뚤어진 크리프와 한쪽으로 기울어진 크리프로 나뉜다. (그림1참조)

동결된 지반이 봄에 녹으면 지반의 지지력이 약해진다. 일부 지역에서는 지반에 크리프현상이 나타나거나 일정한 크리프 현상(50mm 이상일 경우를 의미함)이 대규모로 발생하는 경우에는 철도가 침하하는 경우가 있다. 이런 현상은 우천시에도 나타날 수 있다. 이 때 침하된 부분은 빗물침투로 인해 가라앉은 부분을 말하는데, 점토질 지반이 물컹물컹해지면서 침목 밖으로 삐져나와 레일, 궤도 가장자리, 궤도 사이에 언덕을 이루고, 배수로의 경사를 바꾸기도 한다.

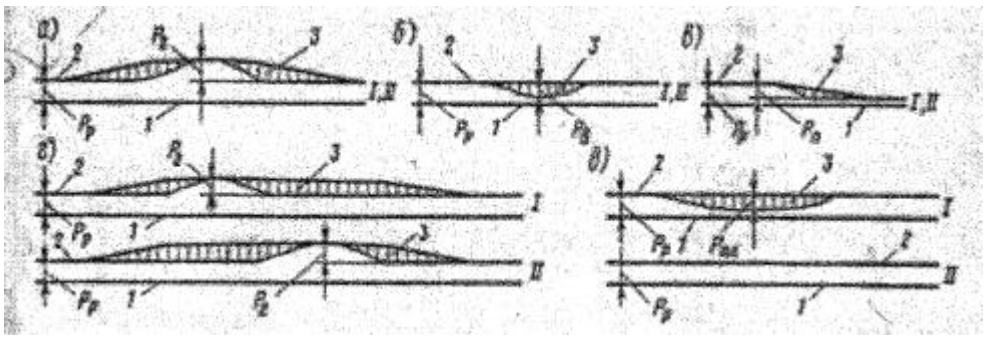


그림1. 노반 크리프 현상의 종류

a)크리프 언덕 b) 크리프 구멍 c) 크리프 스윙 d) 한쪽으로 기울어진 크리프 e) I, II- 철도의 좌우면, f) 1, 2 - 하, 동절기의 철도 위치
g) 크리프용 패드 - 일정한 크리프의 치수 - 크리프 언덕, 구멍, 스윙, 한쪽으로 기울어진 크리프의 크기

노반에 앞에서 서술한 변위가 발생하면 높낮이가 다른 깊이의 자갈층이 생긴다. 깊숙히 침투한 습기가 미쳐 빠져 나오지 못해 결국 점토질 지반을 습하게 만들어

표면을 울퉁불퉁하게 한다.

궤도에 변형이 일어나고 움푹 들어간 곳이 생기는 것은 동절기 지반의 크리프와 관련이 있다. 지반이 팽창하는 것은 땅 속 깊숙히 들어가 있던 물이 (이동하면서) 층 사이에서 얼면서 지반의 부피를 더 확장시킨다. 지반이 점차 층층이 얼면서 땅 속의 아이스렌즈, 토립자와 토립자의 층 및 간극 등은 궤도를 들어올리는 역할을 한다. 지반에서 아이스렌즈를 제거하는 과정은 동결된 경계선뿐만 아니라 동결된 부분과 근접한 일정한 층에서도 아이스렌즈를 제거하는 것이다. 지반의 동결층이 융기하는 원인은 그 층 밑에서 크리프현상이 일어나기 때문이다. 크리프현상이 일어난 층은 습기가 많이 들어가 땅이 녹기 시작할 때 그 지반의 지지력이 급속히 낮아지게 마련이다.  동결 현상의 크리프 크기와 상대 변형으로 판단한다.

크리프의 크기는 동절기 전 상태와 비교했을 때 자갈표면(궤도와 침목 사이의 표면을 의미함)이 올라가 있는 높이를 말한다. 지반의 종류와 자갈 표면의 특성에 따라 크리프의 치수는 계절성 동결로 인하여 생긴 모든 크리프의 크기를 포함한 토탈 크기를 말한다. 각 층에 해당되는 크리프의 상대변형은 해당 층 폭에 대한 크리프의 크기를 말한다.

크리프의 상대변형과 크기는 토질의 입자 분포, 토질의 광물조성, 습도, 밀도, 지하수위, 동결 깊이와 속도 등의 영향을 받는다.

지반의 열·습도 기준은 기후적 조건과 현장 여건에 따른다. 기후적 조건에는 동절기의 강수량, 외부 온도, 동절기의 기간 등이 있다. 마지막 두 요소는 영하 온도의 크기와 지속 일수의 합계(동결지수 ℃ ·day)로 정해진다.

노반의 크리프에 영향 미치는 현장 조건은 토질의 구성 요소, 자갈층의 넓이, 기본 노반의 평평함(자갈층의 배수토질과 점토질 토질층의 경계선), 지상수와 지하수 배수에 대한 조건이 될 수 있다.

철도가 통과하는 다음 조건의 노반 표면에는 크리프 현상이 일어난다.

- 점토질 흙 (점토, 실트, 사질토)
- 점토질 요소가 있는 복잡한 지반 (토립자 크기 0.1mm 미만, 함유량은 중량의 20% 이상)
- 풍화가 잘 일어나는 구역에서 증발이 쉬운 암석토질(셰일, 실트암, 점토암, 이회암)
- 물로 포화된 먼지모래 지반

- 토탄 및 토탄질 지반

먼지모래가 많이 들어 있을수록 지반 크리프의 크기와 상대변형이 더 증가한다. 오염으로부터 보호된 배수토양(암설, 조약돌, 자갈, 모래자갈이 혼합된 암석, 입자가 크거나 중간 사이즈의 모래, 슬래그), 물을 포함하지 않은 모래, ballast재로 이용되는 석면 폐기물 등에는 크리프현상이 일어나지 않는다.

노반에 수분이 공급되는 원천은 ballast재를 통해서 들어가는 빗물과 지하수이다. 이 원천의 역할은 지하수 위치와 퇴적물에 침투된 지반 내 물줄기의 확보 여부에 따라 달라진다. 지하수위가 깊은 위치에 있고 ballast층이 있을 경우에는 지반의 크리프와 수분이 생기는 현상에 영향을 주는 것은 강수량이다.

다음과 같은 지반의 노반(철도가 지나가는 노반면을 의미함)에 크리프현상과 침하 현상이 자주 일어난다.

- 하·동절기에 지반이 녹거나 얼 때 크리프현상이 일어나는 지반 경계 구역에 팜, zero level, 높이 2m까지 쌓은 둑이 있는 곳; 특히 서로 다른 성질을 가지고 있는 지반(크리프 현상이 일어나는 토질과 안 일어나는 토질)이 있는 곳이 제일 위험하고 울퉁불퉁한 지형의 낮은 둑도 여기에 포함됨
- 습도가 과하거나 지하수가 가까이 위치하고 있을 경우에는 증발이 쉬운 팜과 zero level 지역
- 크리프 지반으로 되어 있는 구역일 경우 암석, 배수, 기타 변형되지 않은 지반에 파진 부분이 있는 곳
- 크리프 지반으로 되어 있는 경사지역에 둑과 팜이 있는 곳
- 점토질 흙으로 되어 있는 높이 2m 이상인 둑
- 기초 크리프 지반이 동결되거나 융해할 수 있는 위치에 있거나 배수관이나 교량에 근접한 둑
- 파이프라인으로 인하여 주변 지반의 온도가 변하는 크리프 지반
- 배수성 토질(간극빙의 크리프 발생 가능성이 있는 지반)에서 지하수가 지나가는 지층의 계절에 따라 녹는 경사면 범위 내 경사 5:1로 되어 있는 경사진 부분이나 그 끝단

(러시아 도로시설관리부에서 기존의 크리프 현상이 일어나는 부분과 침하된 부분을 고려할 목적으로 철도에 대한 매뉴얼에 이런 자료를 넣었음.)

해마다 주기적인 철도 수선, 감속으로 인한 열차 통과 능력 저하, 철도 구조물의 짧은 수명 (특히 궤도와 침목을 자주 교체할 필요성이 생길 때) 등과 같이 비생산적 지출이 따르므로 이러한 변위현상을 예방하기 위해서 철도를 강화시킬 필요가 있다.

본 기술 매뉴얼에서는 현재의 철도 운영방법에 맞게 철도시설물을 강화시킬 목적으로 노반의 크리프 현상과 침하 현상을 배제하기 위해 필요한 요구사항과 추천사항을 정리하였다.

본 자료는 러시아 철도국, 도로시설관리국 산하 과학설계담당 부서, 도로시설관리국과 교통건설부의 경험을 바탕으로 철도에 대한 러시아 기술기준에 의하여 작성된 것이다.

철도 궤도의 크리프 및 침하를 해결하기 위한 본 기술적 지시서가 도입된 후 기존의 지시서(도로시설관리국에서 발행한 “철도궤도 크리프 및 침하를 해결하기 위한 본 기술적 지시서” 제SP/4369, 1986.03.07와 “크리프 예방을 위한 폼 플라스틱 시용 기술지시서”, 제 SP/3350, 1976.08.06)들은 더 이상 효력을 발휘하지 않는다.

## 1. 일반 규칙

1.1 본 기술 지시서는 설계연구소, 도로관리공사, 역관리공사, 기술지질기지국, 노선연구소에서 크리프와 처짐이 있는 지역에 건설할 철도를 설계하고 철도에 대한 반변형적 조치를 취하는 직원들을 위한 것이다.

1.2 본 기술 지시서의 요구사항 및 추천사항은 계절동토 지반 또는 영구동토층(병합된 영구동토층과 병합되지 않은 영구동토층)이 있는 지역에 철도를 건설하기 위한 것이다.

1.3 크리프와 처짐이 있는 구간에서 철도를 강화시키는 일은 관찰 결과 자료와 노선에 대한 매뉴얼을 이용해 크리프 지반의 위치와 처짐의 위치를 표시하는 노선에 대한 기술적 요구사항을 작성한 프로젝트(안)를 가지고 수행한다.

1.4 반변형적 조치에 대한 지시는 크리프로 인해 생긴 변형의 성질과 원인, 동결된 지반의 조건, 지면의 구조, 배수시설 등을 감안한 기술 비교 등을 바탕으로 이

루어진다. 비교대상으로 조치를 취한 후 노반 운영에 대한 안정성을 보장할 신뢰가 된다.

노반을 개선하는 기본 계획 외에 배수시설을 달리 해서 반변형적 구조물과 별도로 침투되는 강수량을 완벽하게 배수하고 노반의 사면 안정을 확보하기 위한 조치를 취한다.

1.5 궤도에 생긴 크리프와 처짐 부분을 제거하기 위해서 ballast 처리 장비를 이용해 정기적으로 또는 중간에 일시적으로 수선작업을 실시할 경우에는 설계와 작업이 종합적으로 이루어져야 한다. 정기적인 수선작업일 경우에는 궤도와 침목을 제거해 노반수선 작업을 실시한다. 이때 노반수선을 위해 쓰는 포크레인을 비롯해 최대한 많은 장비를 이용해 작업을 실시해야 한다.

1.6 크리프와 처짐이 많이 일어나는 구간에서는 연구 결과에 따라 반변형적 조치를 취한 다른 구역으로 철도를 이동할 수 있다.

## 2. 설계를 위한 기초 자료

2.1 강화시킬 구간을 기술적으로 또는 지질학적으로 연구하기 위해서 다음 데이터가 필요하다.

(가) 변형하고 있는 구간 범위 내 크리프와 침하된 부분의 위치, 크리프와 처짐량, 크리프의 폭, 또는 근접구역의 일정한 크리프에 대한 크기

(나) 계절동토 구역 내 변형되는 노반에 대한 흙의 성질, 종류, 구조 및 상태, 지하수·지질 조건(지하수 위치, 로칼 수분 원천 출구 등)

(다) 노반의 토질 성질과 그 구성요소의 성질 - 노반의 평평함, 배수상태(도랑, 수채, 하수구, 배수구), 노반 경사면의 안정성

(라) 철도 상부 구조에 대한 정보(레일의 종류, 레일 하부의 구조물, 배수구와 경사면에 누적된 자재를 포함한 각 층의 ballast자재 능력), 인위적으로 만든 구조물(교량, 파이프, 파이프라인교류, 전력장치, 통신시설 등)

(마) 지역의 기후 조건

2.2 지반 동결 시 기준치 이상의 크리프가 일어나는 원인에는 다음과 같은 것들이 있다

(가)계절동토 구간에 분포된 토질의 불균질함(폭과 깊이), 낮은 둑 기초의 불균질

(나) 깊이가 서로 다른 ballast층에 침투되는 대기 중의 수분이 재 분포되므로 수분의 불균질한 침투

(다) 국부적인 지하수나 물이 고여 있는 곳 때문에 노반의 수분 분포가 균일하지 못하게 된다

(라)시설물(노반을 지나가는 파이프라인, 내부에서 어는 배수관 등)이 설치된 곳에 도상과 노반이 불균질하게 동결되기 때문임

상기 원인들이 개별적으로 나타날 수도 있고 한꺼번에 나타날 수도 있다. 이 때 이러한 시설 부근의 토질이 동결되는 것과 토질의 구조가 불균질할 경우에 점토질의 지반에 침하된 부분이 있다는 점은 지반이 동결할 때 나타나는 크리프현상을 더 악화시킨다는 것이다.

특수한 크리프는 교량과 파이프라인과 근접한 크리프 및 얼음의 크리프를 말한다. 얼음의 크리프는 상부에 배수토질, 하부에 불투수층(암벽, 영구동토, 조밀점토 등)으로 구성되어 있는 경사지에 나타날 수 있다.

2.3 기술적 지반공학적으로 연구할 경우에는 다음과 같이 기초 데이터를 받는다.

크리프의 크기, 정확한 위치, 크리프의 불균질함을 알아 내기 위해서 부록1 규정에 따라 구간을 2회 leveling한다. leveling 결과에 따라 동절기(또는 춘절기)와 하절기 구간의 위치에 맞는 레일 두 가닥 헤드대로 경선 단면을 설치한다. 단면에 크리프 패드의 위치와 치수를 표시하고, 크리프 최대치수와 최소치수의 가장 근접한  크리프 위치를 알아낸다.

이 곳(비교하기 위해서 최소 2곳이 되어야 함)과 근접한 곳에서 배수토질과 크리프 하지 않은 토질의 총 두께를 알아보고 크리프하지 않은 노반의 윤곽을 알아내는 test pit를 설치한다.

지반의 구조를 알아보기 위해서도 피트를 설치하는데 직선의 크리프와 처짐일 경우에는 레일 대로 피트를 설치하고, 한쪽으로 기울어졌거나 경사 크리프일 경 에는 침목 끝 부분에 피트를 설치한다. 피트는 녹거나 어는 층보다 0.5-1.0m

낮은 깊이까지 파낸다.

연구 시 복잡한 작업을 피하기 위해서 레이더방식이나 전자접촉 동적프로브방식을 사용할 수 있다. 이 때 설치하려고 하는 피트 수를 줄일 수 있다.

피트 수를 결정하는 근거는 크리프의 비균질성, 높이, 종류, 분포거리, 처짐의 성질이 될 수 있다.

배수토질의 두께와 기본층의 윤곽은 서로 25-30cm에 떨어져 있는 두 개의 경사면에서 알아낸다: 침목박스 단면과 옆에 있는 침목의 밑 부분의 단면이 되겠다. 배수토질의 두께가 0.8m 미만일 경우에는 기본층의 윤곽은 침목 박스 단면으로만 가능하다. 기본층의 수준은 단면의 다음 포인트에서 측정이 가능하다: 양쪽 레일(외부) 아래의 레일 축 대로 측정, 양쪽 침목에서 20-40cm에 떨어져 있는 위치에서 측정.

기본층외 노반 위에 누적되는 배수토질의 두께도 연구 시 알아 본다 (배수구 시설이 있는 곳, 경사면)

철도가 처져 있는 구간의 길이와 치수는 측정전용열차의 기록테이프, 연구자료, 승무원들의 의견 조사자료에서 알아볼 수 있다. 이 때 한 시즌 안에 실시한 수선작업 후 크리프의 치수를 감안한 총 치수를 알아본다.

피트의 깊이는 동결 융해층보다 0.5-1.0m 낮게 계산한다. 노반의 밀도를 알아내기 위해서 흩어지지 않은 구조의 토질에서 샘플 채취를 할 수 있도록 샘플러의 직경이 확보되어야 한다.

지반 샘플링은 각 암석화적 차이에서 선별하는데 단 그 간격은 1.0m 이상이 되어야 한다. 자연수분함유량을 알아보기 위해서 0.2m 간격, 점토질 흙과 섞인 입자가 큰 자갈층 측정은 0.5m 간격으로 샘플링을 실시한다.

토질의 구조와 상태는 보링 시 채취한 샘플을 연구실에서 실험해서 나온 데이터로 알아 본다. 지반의 물리적 특성은 통계처리에 충분한 데이터로 결정한다.

실험실 테스트결과 기록부에서 토질 분류 및 계산을 하기 위한 다음 데이터가 있어야 한다.

- 자연수분 We
- 소성한계 Wp와 액성한계 WL, 소성지수 Ip
- 액성지수 IL
- 건조 밀도 (토질의 골조) ρd

- 간극비 e(e 값을 계산하기 위해서 모래질 흙 밀도 2.65g/cm$^3$, 사질토 토질밀도 2.70g/cm$^3$, 실트 밀도 2.71 g/cm$^3$, 점토밀도 2.74 g/cm$^3$ 을 기준으로 한다)

- 내부마찰각 ϕ와 점착력 c (SNiP 2.02.01-83, 부록1참조)

- 모래질 흙의 입자구조

입자가 큰 자갈층의 자연수분량을 전 샘플 토질(총습도) We과 점토골재WM에 대해서 결정한다. 점토골재에 대한 자연수분량은 다음과 같이 계산된다.

$$W_M = \frac{W_e - W_{sm}\,a}{1-a},$$

$W_{sm}$ - 입자가 큰 (2mm이상)흙에 대한 토질수분보유

큰 입자 보유, 단위의 비율

큰 입자 자갈 함유를 최소화시키고 점토를 샘플링할 수 있으면 점토의 수분은 다음과 같이 결정할 수 있다. 석재와 자갈이 조금 들어 있는 점토의 수분측정을 한 다음 각 샘플을 별도로 물에 적셔 체에 걸러낸다. 체에 걸린 물질들을 온도 105°에서 말리고 중량을 측정한 다음 샘플 용량 내 그 물질이 몇 퍼센트 들어 있었는지 알아본다. 전에 계산한 수분 측정데이터를 앞서 실험결과를 반영해 수정한다.

Plasticity 범위는 총 샘플 체에 걸러내는 방식으로 분석할 시 clay fraction (점토 프락션)에 의해 결정한다. 실험실 내에서 흙의 물리적 성질을 알아보는 기준과 자료처리기준은 다음 기준에 따른다.

GOST 25100-95. 토질 . 분류
GOST 12536-79. 토질. 실험실 내 입자구성을 결정하는 방법
GOST 5180-84. 토질. 실험실 내 물리적 특성을 알아보는 방법
GOST 20522-75. 토질. 특성에 대한 결과를 통계처리 방법

기술·지반공학적으로 연구하는 동안 변형된 구간에 대해서 수·지반공학적 특성을 알아본다. 지반공학적으로 실시된 모든 연구에서는 지하수 위치에 대해서 관찰한다.

기본 용역 내 지하수 위치와 일반 조건(자연조건)하의 위치와의 관계를 알아보기 위해서 지하수 위치에서 좀 떨어져 있는 곳(경사면이나 팜의 가장자리, 둑 밑의 부

분)에 피트를 박는다.

지반공학적 관찰 외 roadbed에서 가까운 위치에 있는 상수(강, 자연 및 인공 저수지, 샘, 늪)가 있는 여부를 확인한다. 특히 roadbed 범위 내 분포된 local sources of moisture에 대해서 주의를 돌린다.

동시 기록한 지반공학적 자료와 수질공학적 자료로도 지하수면 위의 지반에 대해서 충분한 판단을 할 수 없다면 지하수가 mining work 시에 나오는 현상은 roadbed 구조에 결함이 있다는 것을 알 수 있다(막다른 밸러스트, 도랑에 물 들어 있음, 등).

연구 시 기상청 자료를 이용해 동결지수의 합계, 여러 해 평균 온도, 10년 기준의 최저온도를 알아본다. 계산하기 위해서 월 평균 온도를 기준으로 한다.

기상청 자료를 이용하여 여러 해의 월별 평균강수량과 적설층의 높이를 알아본다. 이런 데이터는 현지에서 roadbed의 다양한 구성요소를 위해서 확인한다.

2.4 기술적・지반공학적 연구는 다음 기간 내 실시한다.

지반이 최대로 얼려 있을 봄에 눈이 ballast 프리즘에서 내려왔으나 지반이 녹기 전에 크리프현상이 일어난 변형된 구간을 관찰한다. 가로단면과 세로단면의 변형 상태를 보고 변형된 구간을 확인하고 leveling작업을 벌인다.

지반이 완전히 녹은 후 2차 leveling을 실시한다. 계절에 따라 동결 구간에서는 5-6월에 leveling을 실시하고 영구동토와 연결되어 있지 않은 구간에서는 7-8월에, 영구동토와 연결되어 있는 구간에서는 9월에 leveling을 실시한다.

creep현상으로 위험한 구간을 보링하고 연구하는 일은 완전히 녹은 땅에서 실시한다. 길이 움푹 들어간 구간에서는 여름철 기술적・토질공학적 작업을 벌이는 시기가 겹친다. 관찰은 배수 ballat층이 녹은 후에 실시하는데 단 roadbed의 점토층이 완전히 녹기 전, 즉 creep 현상이 제일 많이 일어나는 시기 전에 벌여야 한다.

2.5 기술적・지반공학적 연구 자료 분석에 의하여 제2.2 요구사항에 따라 roadbed의 불균일한 creep의 원인을 알아 본다.

2.6 기술적・지반공학적 연구 끝에 강화시키려는 구간에 대해서 다음과 같은 자료가 작성되어야 한다.

(가) creep 현상이 일어난 위치, 길이 처진 곳, 지면이 변형된 곳(크리프현상, 틈,

지반이 침하된 곳 등), 배수구, 시설물과 설비가 설치된 곳, 전에 실시한 기술적•토질공학적 작업 등을 표시한 구간 지도 (척도 M1:1000)

(나) 여름철 위치와 겨울철 위치에 맞는 길의 단면 자료

(다) 운영 시 roadbed 안에서 일어난 변형 (매립된 도랑, ballast 등)을 반영한 가로・세로 단면자료

(라) 흙의 구조, 특성, 상태에 대한 실험실 실험 결과 자료

(마) 지역의 기후적 조건

(바) 불균일한 크리프 또는 길이 처짐에 대한 원인이나 여러 원인을 기재한 연구 결과 자료

2.7 철도에서 지반공학적 작업을 실시하는 절차, 안전적인 열차의 운행, 승객들의 안전성, 기술적・지반공학적 작업을 실시할 때 안전 신호 표시 등은 현지 조건과 작업 용량에 따라 설계사무실 담당자들과 구간관리 담당자들이 공동작업으로 실시한다.

## 3. 반변형적 조치 지시에 대한 조건

3.1 creep와 처짐으로 인하여 변형된 roadbed를 제거하고 궤도를 강화시키기 위해서 다음과 같은 반변형적 조치를 취한다.

- creep성 지반의 융해나 동결을 방지하기 위해서 폼 플라스틱을 이용해 단열재를 설치한다.
- 수분량을 줄이고 흙의 creep현상을 방지하기 위해서 중합체 필름으로 되어 있는 방수재를 설치한다.
- 길이 처진 곳에 부직포를 사용한다.
- 계절동토 부분에 잡종 토질이 들어 있는 곳에 패드를 설치하거나 ballast층까지 길을 올린다.
- ballast층보다 낮은 roadbed의 기본 노면의 설계
- 동결 융해 구역에서 creep성 흙을 배수 또는 creep되지 않는 흙으로 일부 교체 또는 전면 교체하는 것(패드나 복합소재로 대체)
- 세로 배수구와 도인을 설치하는 것

위와 같은 지침서와 함께 상수를 제거하고 roadbed 흙을 건조시키는 조치도 동시에 한다. 상수를 제거하고, 지하수를 따라잡아 수위를 낮추기 위해서 세로 도랑을 포함한 깊은 도랑, 로트, 배수구(closed type)를 사용한다.

3.2 변형이 일어나는 원인에 따라 roadbed의 구조종류가 다양할 경우에 반변형적 조치에 대한 지시조건은 표1에 정의된다.

3.3 반변형적 구조로써 다음과 같은 토질을 사용한다.

- 먼지모래를 제외하는 모든 종류의 모래, 모래자갈혼합물, 자갈, 암설
- 증발이 쉬운 암석토질, 부스러기 돌, 암설이 들어 있는 토질
- 석면폐기물
- 용광로와 보일러에서 나오는 슬래그

표 1.

| 변형이 일어나는 원인 | Roadbed의 종류와 구성요소 | 변형의 종류 | 반변형적 조치 |
|---|---|---|---|
| 계절에 따라 녹거나 어는 구역에서 세로, 가로로 다양한 토질이 불균일하게 분포됨 | 1. 움푹 들어간 곳과 각종 토질의 구간이 번갈아 되는 zero level (점토, 부스러진 돌, 점토 골재, 배수토질, 암석토양) | 모든 종류의 creep(언덕, 구멍, 스웡 등), 길 처짐 | 폼플라스틱소재로 단열. creep 허용치수와 노반의 지지능력에 따라 동결 또는 융해 구역에 패드를 설치한다. |
| | 2. 배수토질로 이루어진 둑과 연결된 creep토질 내 구멍(움푹 들어간 곳)의 끝 부분 | creep스웡, 길 처짐 | |
| | 3. creep토질로 이루어진 암설구멍 | creep 언덕, 길 처짐 | |
| | 4. Roadbed 단면에 불균일한 토질, 경사지에 움푹 들어간 곳 | 한쪽으로 기울어진 creep, 길 처짐 | |
| 계절에 따라 녹거나 어는 구역에서 세로, 가로로 다양한 토질이 불균일하게 분포됨 | 5. 제2로(철도)가 들어가면서 역 공사시 가져온 각종 토질의 둑 | 한쪽으로 기울어진 creep과 경사 creep | 폼플라스틱소재로 단열. 동결 융해 구역에 패드를 설치한다. |
| ballast층의 깊이가 다양하고 자연수분이 침 | 1)Roadbed 상부에 있는 배수성 토질이 있을 시 움푹 들어간 곳과 zero level | 모든 종류의 creep | 폼플라스틱소재로 단열.철도를 bllast에 올리거나 creep구간을 완전히 제거 시 패드를 사용한다. |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 투되므로 토질이 불균일하게 수분을 빨아들임 | 2)기복이 있는 creep 토대에 배수토질로 이룬 낮은 둑 | creep언덕, 한쪽으로 기울인 creep, 길의 처짐 | 중합체필름으로 방수코팅한 장치. 지반의 지지력을 확보하면서 밸러스트 층보다 낮은 위치에 roadbed를 설계한다. |
| 지하수 로컬 원천에서 수분공급을 받아 불균일하게 수분을 빨아들임 | 1. 단종의 점토질 지반에 움푹 들어간 곳과 Zero Level (점토, 실트, 사질토)<br>2. 점토질 토질로 이룬 둑 | 모든 종류의 creep, 길 처짐 | 지하수 도인, 배수구 설치. 폼 플라스틱 소재로 단열. 계산을 하여 creep토질을 배수토질로 교체. |
| 설치된 시설로 인하여 동결 융해층의 위치가 바뀌고 토질의 온도환경이 바뀜 | creep토질에 움푹 들어간 곳과 zero level | creep언덕, 움푹 들어간 곳, 길 처짐 | 파이프 윗부분의 creep 토질을 배수성 토질로 교체함. |
| 교량과 파이프라인과 접촉하는 지반의 동결 creep | 1. 송수관 주변토질이 송수관의 동결로 인하여 크리프가 일어나는 곳에 언덕쌓기 | 크리프 또는 움푹 들어간 곳 | 동결 구간 전체의 크리프성 토질을 배수성 토질로 교체함. 방수패드를 사용해 노반을 밸러스트층보다 낮게 설계한다. |
| Ballast층이 있는 곳에 과도한 수분으로 노반의 지지능력이 떨어짐 | 2. 송수관이 지나가는 구역에 언덕, 움푹 들어간 곳, zero level<br>교량과 파이프라인 주변 언덕 | 길 처짐 | 중합체소재로 된 패드를 방수용도로 사용한다. 부직포 커버. |
| 배수성 토질에 지하수 지류와 동결 현상 | 움푹 들어간 곳, zero level, 점토질 지반의 크리프 | 얼음 creep | 노반의 지지능력을 확보하면서 roadbed을 ballast층보다 낮게 설계한다.<br>배수구와 지하수도인 설치 |
| | 움푹 들어간 곳, zero level, 1:5 경사지에 낮은 언덕, 지하수가 기스락부분에 자나갈 경우 기스락 부분에 언덕쌓기 | | |

비고: 모든 조치는 배수장치를 필히 설치함으로써 이루어진다.

배수토질과 creep되지 않는 소재에는 크기 0.1mm 미만인 입자가 전체 중량의 10%를 넘어서는 안된다.

암석노반을 사용했을 경우에는 점토질 노반 위에다 입자가 작은 자갈이나 모래를 0.1m 이상 깔아야 한다. 암석 노반 위에 ballast층의 손상 방지를 위하여 slack이나 자갈을 깔고 roller로 마감처리한다.

3.4 단열재로 폼플라스틱을 사용한다. 폼플라스틱에 대한 구비요건은 4.4항에 정의되어 있다.

3.5 방수재로는 중합체 재료필름을 사용한다. 중합체 재료필름에 대한 구비요건은 4.5항에 정의되어 있다.

3.6 부직포는 4.6항의 요구사항에 상응되어야 한다.

## 4. 반변형적 구조에 대한 계산 및 설계

4.1 일반 요구사항

배수 및 creep되지 않는 소재로 만든 반 크리프성 패드에 대한 계산은 다음 조건에서 나온다.

1) 동결로 인하여 creep현상이 일어날 경우에는 선로 변형의 크기 제한 조건

2) 점토질 노반에 대한 필요한 재하능력을 확보하는 조건

수집한 데이터 중 값이 가장 높게 나온 데이터를 기준으로 한다. 첫번째 조건에 대해서 제4.2항에 정의된 방법에 의하여 roadbed 토질의 동결 또는 융해층의 깊이를 측정한다.

두번째 조건에 대한 계산은 제 4.3에서 제시하는 대로 실시한다.

동결로 인하여 creep이 생긴 길의 변형의 크기는 다음 조건에 의하여 제한시킨다.

-동결현상의 creep을 완전히 제거하는 조건

-허용된 creep 치수 조건

허용된 creep크기는 철도의 가로 세로 단면에 대한 오차가 기준범위 내 들어갈 경우를 말한다.

계산된 허용 creep치수 $P_{доп}$ 는 열차속도 $v$ 와 철도의 타입에 따라 채택한다. 표2 참조.

표 2.

| 열차속도 $v$ 시(km/h) $P_{доп}$ 의 치수 | | |
|---|---|---|
| 121-140<br>(철도 타입 1,2) | 101-120, 81-100<br>(철도 타입 1-3) | 61-80, 41-60, 40 미만<br>(철도 타입 2-5) |
| 20 | 25 | 35 |

철도 타입 1-3급은 creep 높이 15mm 이상일 경우에는 creep현상을 제거할 때까지 열차운행이 금지된다. 또한 점토질 흙이 밖으로 빠져나올 경우에도 운행 금지하도록 되어 있다. 철도 타입 4급일 경우에는 creep현상이 일어난 곳 높이 25mm 이상, 점토질 흙이 밖으로 빠지면서 길의 처짐 현상이 일어날 경우, 5급 경우에는 크리프현상이 일어날 곳 높이 50mm이상일 경우에는 creep현상을 제거한다.

4.2 Roadbed의 동결 융해 깊이 계산

Roadbed의 동결 융해 깊이는 계산도표를 이용하여 계산한다. 계산도표는 계절에 따라 동결 융해 노반을 계산하고 (그림2, a), 또한 북위 60도보다 남쪽으로, 동경110도보다 동쪽으로 위치하는 영구동토층의 병합구역을 위한 계산은 (그림2, b)를 참조한다.

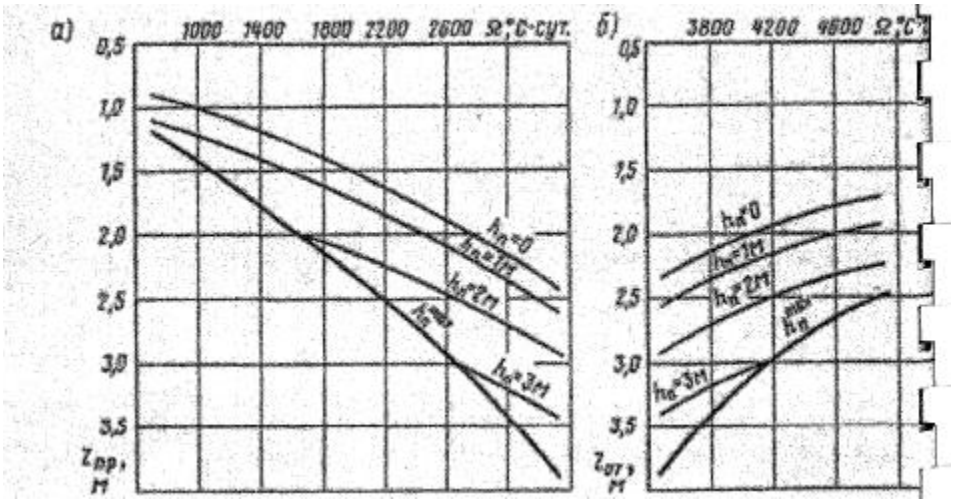



그림 2. 모래자갈층의 동결지수 Ω에 따른 융해 (б) 또는 동결 $z_{пр}$ (а) 깊이 산정 도표

기타 영구동토층 병합구역을 계산하기 위한 도표는 그림 3을 참조한다.

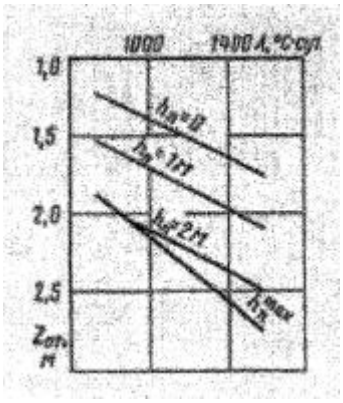



그림 3. 모래자갈층의 동결지수에 따른 융해 $z_{от}$ 또는 동결깊이 산정 도표

배수토질로 되어 있는 roadbed 축에 따른 동결 융해층의 깊이는 다음 공식으로 계산한다.

$$z_{пр-от}^{дз} = K_в \alpha z_{пр-от}^{д}, \qquad (4.1)$$

그림 2,3의 곡선 $h_п^{max}$로 계산하는 배수토질 한겹의 동결 융해층의 깊이

- 노반의 열적 매개변수의 크기를 나타내는 계수(그림 3참조). 그림 3은 노반의 열적 매개변수의 실제 크기를 감안하는 계수

계절동토 지역의 동결깊이를 산정하는 공식은 다음과 같다.

$$\alpha = \sqrt{\lambda_M / Q}\ ; \qquad (4.2)$$

Roadbed의 영구동토병합조건 하에 계절에 따라 동결깊이를 산정하는 공식은 다음과 같다.

$$\alpha = \sqrt{\lambda_T / Q}, \qquad (4.3)$$

$\lambda_M$ $\lambda_T$ 은 동결토와 융해토의 실제 열전도율(kcal/m.h.°C)을 나타낸다. 그림 4 도표를 참조한다. $Q$ 은 열량(kcal.m$^3$)을 나타낸다.

$$Q = \rho_d \frac{W^\phi}{100} i\,80\ , \qquad (4.4)$$

$\rho_d$ 은 노반 건조밀도 kg/m$^3$; f-는 지반 속 물의 동결 비율을 보여 준다(모래: $i = 1{,}0$, 실트와 경사질토: $i = 0{,}9$; 중사질토와 점토: $i = 0{,}8$); 노반의 수분계산: $W^\phi$

표 3.

| 노반의 종류 | 다음 조건에 맞는 계수 $K_n$의 크기 | |
|---|---|---|
| | 영구동토와 병합되지 않는 계절성 동결 조건 | 영구동토와 병합한 조건 |
| 배수 | 82 | 86 |
| 점토 | 123 | 140 |

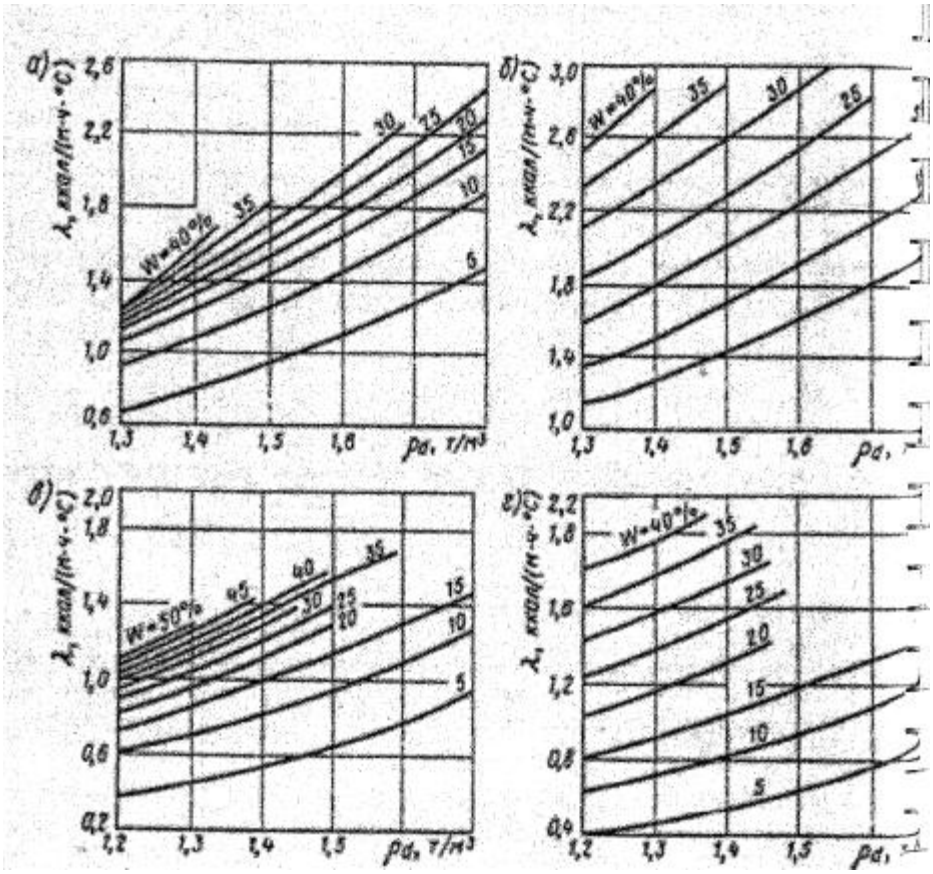


그림 4. 흙의 함수비수 W와 건조밀도 p4에 따라 열전도율 $\lambda$을 계산하기 위한 도표

배수소재 층 아래 분포되는 점토질 흙 하부에 위치한 roadbed의 동결 또는 융해 층의 깊이는 다음 공식으로 계산한다.

$$z^{\text{п}}_{\text{пр-от}} = z^{\text{рп}}_{\text{пр-от}} + (z^{\text{пп}}_{\text{пр-от}} - z^{\text{п}}_{\text{пр-от}})(z^{\text{рп}}_{\text{пр-от}} - z^{\text{рп}}_{\text{пр-от}})/(z^{\text{п}}_{\text{пр-от}} - z^{\text{п}}_{\text{пр-от}}), \qquad (4.5)$$

$z^{\text{рп}}_{\text{пр-от}}$는 점토질 노반의 한 층(융해 또는 동결층)깊이 계산; $z^{\text{п}}_{\text{пр-от}}$는 그림 2와 3의 도표에 의하여 곡선 $h_{\text{п}} \cong 0$으로 계산되는 점토질 노반의 한 층의 깊이(융해 또는 동결층).

ballast층을 포함한 배수노반의 두께와 같은 크기인 $h_{\text{п}}$ 에 상응되는 도표 곡선으로 결정하는 융해 또는 동결층

한편

$$z_{np-ot}^{pp} = K_B \alpha z_{np-ot}^{n} \qquad (4.6)$$

얼음형성 $Q$의 열을 알아보기 위한 계산용 노반 함수비 $W^P$은 가을철 실시하는 토질공학적 관찰결과에 의하여 산출한 값 중 최대값으로 결정한다. 또한 $W^P = 0.8\ W_L$ 공식으로 계산하는데 여기서 $W_L$ 는 노반의 액성한계이다.

4.3 roadbed의 점토질 노반의 재하능력을 확보하는 조건 하에 반변형적 구조 계산

아래층에 있는 점토질 노반의 재하능력을 확보하는 조건 하에 ballast와 배수소재 H의 층 두께를 계산으로 결정한다.

선로의 처짐 현상 제거 시 H층의 최소 두께와 계절에 따른 동결 또는 융해층의 상부 부분에 패드 설치 시 H층의 최소 두께의 크기는 표4에 의하여 계산한다.

ballast층이 있을 경우에는 creep 노반의 교체는 상기 요구사항에 따라 실시하는데 단 ballast층보다 0.1m 이상 낮은 위치에 작업을 실시한다.

유동경계에 노반 액성한계 $W_L > 0.35$일 경우에는 점토질 노반에 대한 노반 재하능력을 확보하는 조건을 결정하는 것은 다음 순서대로 한다.

표 4.

| Roadbed의 크리프 노반의 종류 | ballast층과 배수 소재층의 최소두께H, m (동결지수 합계가 "Ω, ℃/일"일 경우) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1000 | 1500 | 2000 | 2500 | 3000 | 3500 |
| 사질토, 점토 | 0.9 | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.4 |
| 실트 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.1 | 1.2 | 1.2 |
| 지하수 주변 점토질흙과 섞인 조잡한 토질 (지하수 정도는 $\leq z_{np}+1$ м이다) | 1.2 | | | | | 1.4 |
| 지하수위가 낮은 경우 $> z_{np}+1$ м) | 1.1 | | | | | |

비고: Ω크기와 동토 깊이 $z_{np}$ 치수가 수년간 수집한 자료에 상응한다.

노반상태 계산 기준은 노반의 융해시기로 한다. 점토질 노반 상부의 층 변위를 방지하기 위해서 임계하중 $P_{kp}$과 노반(하중)의 크기가 같아야 하며, 열차하중 및 노반중량에 대한 tension $\sigma$ 의 합계와 같아야 한다.

$$\sigma = P_{zp} = \frac{\pi (C_p \operatorname{ctg}\varphi + 0{,}1\rho h)}{\operatorname{ctg}\varphi + \varphi - \pi/2} + 0{,}1\rho h \,, \qquad (4.7)$$

$C_r$ 는 특정 커플링, $10^5$ Па (кгс/см$^2$); $\varphi$ 는 내부마찰각, 라디안; p는 노반밀도, г/см$^3$; h-는 ballast층 상부에서 계산선까지, m

건설기술기준 “철도. 레일 1520mm”, 1995년에 의하여 4륜 화물열차의 roadbed에 대한 tension은 294kH인데 그림 5를 참조한다.

융해 노반의 커플링치수는 다음 공식으로 계산한다.

$$C_p = \frac{C_r}{K_c} - Bf \,, \qquad (4.8)$$

$C_r$는 융해 노반의 커플링, $10^5$ Па (кгс/см$^2$); $K_c$는 노반이 녹은 후 노반의 커플링이 감소되는 비율

B는 땅이 동결되므로 크리프 크기가 0,007일 경우에는 노반 밀도감소를 감안하는 비율, $f$는 배수성 노반과 접촉하는 곳에 점토 노반 크리프에 대한 상대변형, %

노반이 녹아 있는 상태에서 노반의 경도에 대한 기준은 표준 SNiP2.02.01-83 “건물과 시설의 기초” (부록1 표2)에 따른다.

크리프에 대한 상대적 변형을 감안한 노반의 공극률($\eta$)은 다음과 같다.

$$e_0 = \frac{\rho_s (1 + f) - \rho_d}{\rho_d} \,, \qquad (4.9)$$

$p_i$는 노반입자밀도, $\rho_d$는 동절기 전 건조한 노반의 밀도

자연함수비가 $0{,}8\, W_L$와 같을 경우 융해 시 액성지수 $I_L$ 를 자연함수비 $W_e$을 위해 찾아야 한다.

노반에 대한 상대creep $f$은 creep허용치수 $P_{доп}$로 결정한다.

지하수위가 깊은 경우

$$f = 2P_{доп} / (z_{zp} - H), \qquad (4.10)$$

지하수위가 가까이 있는 경우

$$f = P_{доп} / (z_{пр} - H), \qquad (4.11)$$

H는 ballast층과 패드 두께에 대한 합계, m; $P_{доп}$는 표1에 의하여 인정되는 creep허용치수이다.

1 - 노반중량, ballast층과 철도의 상부 구조로 인하여 생성되는 로컬 입력

2 - 로컬 압력과 열차의 동적열차의 합계 tension

3 - $W_L = 0{,}38$ 을 위한 $P_{пр}$

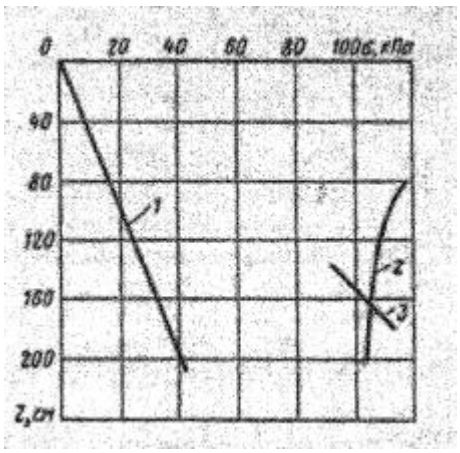



그림 5. ballast층과 roadbed층의 tension 분포

커플링을 결정하기 위해 그 외 경험치(empirical dependence)를 이용한다.

$$C_p = (1 - \sqrt{I_L}) \left[0{,}04 + 93 \left(\frac{W_p - 0{,}07}{e_0 - 0{,}2}\right)^4\right], \qquad (4.12)$$

$W_p$ 는 Rolling 경계선의 노반의 수분이다

(4.8)과 (4.12) 공식에서 얻은 커플링의 두 개의 치수 중 최소치수를 인정한다.

노반 흙의 내부마찰각을 계산하기 위한 치수로는 기준치보다 2도 낮은 크기를 정하는데 다음과 같은 공식으로 계산한다.

$$\varphi_n = 32 - 10\, e_0 - 0{,}25\, W_p. \qquad (4.13)$$

상기 같이 나온 $C_p$ 와 $\varphi_p$ 치수는 공식 (4.7)에 사용한다. $P_{kp}$ 치수는 roadbed 두께 2m까지의 위치에서 찾고, 이 노반의 tension 상태를 결정하는 치수와 비교한다. (그림5참조). $\sigma = P_{kp}$ 가 도달되는 깊이까지 점토질 노반이 열차하중 및 기후적 영향을 받지 않고 1년 내내 변형되지 않는 배수성 노반으로 교체해야 한다.

계산은 다음과 같은 계산 범위에서 이루어진다: 동결지수의 합계 범위 $(\Omega)$- > 1500미만, 1500-3000; 3000이상 °C/days

상기 범위 내 Roadbed의 동결깊이는 제4.2항에 언급한 지침서에 따라 계산한다. 각 범위 별 계산 시 동결층의 최고 깊이에 해당되는 치수를 기준으로 한다(그 지역에 가장 적합한 깊이임). 즉 $\Omega = 1500; 3000$ 와 $3400$ °C/days

예문)

(4.7) 공식에 따라 fluidity경계선의 수분 $W_L$ 가 0.38일 경우에는 $P_{kp}$ 를 계산한다.

교체기능포인트 $(P_{kp})$ 와 로컬tension과 열차 $(\sigma)$ 이동에 대한 tension의 합계는 밸러스트 층과 패드의 두께(H)합계를 나타낸다. 그림 5참조

$W_L = 0,38;\ W_e = 0,30;\ W_p = 0,21;\ I_p = 0,17.$ 시

Fluidility 치수는 $I_L = \frac{0,30 - 0,21}{0,17} = 0,53.$ 이다.

허용치수 $P_{доп} = 20$ мм 와 4.2항에 의하여 계산된 어는 층의 깊이 $z_{пр} = 2,7$ м ( $\Omega > 3000$ °C /days 시) 시 지하수가 가까이 있을 경우를 가정하여 점토노반이 배수노반과 접촉될 곳의 creep에 대한 상대변형은 다음 공식으로 결정한다. (4.11) $f = \frac{0,02}{2,7 - 1,7} = 0,02.$

$\rho_s = 2,7$ и $\rho_d = 1,50$ т/см$^3$ 시 공식 (4.9)에 따름.

$$e_0 = \frac{2,7\,(1 + 0,02) - 1,50}{1,50} = 0,85.$$

SNiP2.02.01-83에 의하여 기준치수 $C_r = 0,16$ кгс/см$^2$ 와 $\varphi_r = 16°$ 를 알아본다.

공식 (4.8) $C_p = \frac{0,16}{1,1} - 0,007 \cdot 2 = 0,13$ кгс/см$^2$.

공식 (4.12) $C_p = (1-\sqrt{0,53})[0,04+93(\frac{0,21-0,07}{0,85-0,2})^4] = 0,07$ кгс/см$^2$.

공식 (4.13) $\varphi_n = 32 - 10 \cdot 0,85 - 0,25 \cdot 21 = 18°$.

계산을 위해서 $C_p = 0,07$ кгс/см$^2$ 와 $\varphi_n = 16° - 2° = 14°$ 의 최소크기를 인정한다.

공식 (4.7)에 의하여 깊이 $h = 1,75$ м 로 다음과 같이 계산한다.

$$P_{sp} = \frac{3,14(0,07 \cdot 4,01 + 0,1 \cdot 2 \cdot 1,75)}{4,01 + 0,244 - 3,14/2} + 0,1 \cdot 2 \cdot 1,75 = 1,10 \text{ кгс/см}^2 .$$

깊이 $h = 1,45$ м 에 대해서 $P_{sp} = 0,95$ кгс/см$^2$. 을 계산한다.

따라서 fluidity 경계선 수분이 $W_L = 0,38$,와 같은 토대에 대해서 축 정적 하중이 294kH 시 ballast와 배수소재 층의 합계두께 H는 1.65m이며, 패드두께(detective Layer)는 $h = H - h_b = 0,95$ м. 이다.

4.4 폼 플락스틱재로 단열

4.4.1 단열을 위해서 폼 플라스틱재를 사용하는 조건은 표1과 같다. 폼플라스틱재는 계절에 따라 노반이 어는 지역이나 동토가 병합되지 않은 roadbed 지역에 일어나는 creep현상을 제거하기 위한 재료로 쓰는 것이다.

사용되는 폼 플라스틱재는 표5에 정의한 기준에 상응해야 한다. 단열재로 압출폴리스티렌 또는 폴리염화비닐재를 사용해야 한다(압출이 아닌 다른 공법으로 만들어진 폴리스티렌 폼 플라스틱재를 사용하면 안된다). 폼 플라스틱으로 되어 있는 단열층의 두께(cm)를 다음과 같은 공식으로 계산한다.

$$h_T^R = 19 h_T \lambda_T \gamma_n (1 + 0,18 W_{06}) , \qquad (4.14)$$

- 지역의 기후 조건 또는 ballast재 $h$ 층 (커버 배수패드)의 두께에 따라 도표 6에 의하여 계산되는 단열층의 기준 두께(cm); $\lambda_T$ - 폼플라스틱 열전도율; $\gamma_n$ - 1, 2와 같은 안전율; $W_{06}$-부피에 대한 기준 물 흡수율, 허용된 치수는 0.5%임.

표 5.

| 지표 | 치수 | 실험방법 |
|---|---|---|
| 밀도, kg/m$^3$ | 35 | GOST 17177-94 |
| 기계식 특성: | | |
| 선형변형이 10%시 압축에 대한 강도, MPa | | GOST17177-94 |
| 곡선일 시 극한 강도MPa | | GOST17177-94 |
| 여러 회 동적하중일 시 변형율, % | | 별도의 프로그램에 의함[1] |
| 볼륨에 대해서 물 흡수율, 24시간, % | | GOST17177-94 |
| 촉촉한 상태에서 열전도율, kcal/(m-h °C) | | GOST 30290-94 |
| 판의 규격 | | |
| 길이, m | | GOST17177-94 |
| 폭, m | | |
| 두께[2], m | | |
| | 0.4-0.6 | |
| | 40-50-60 | |
| [1] 실험프로그램은 러시아 도로시설관리청에서 확정한다. | | |
| [2] 한 로트당 판의 두께는 최고 2mm까지 오차만 허용된다. | | |
| 비고: 판은 솔기를 덮을 수 있도록 slot가 있어야 한다 | | |

계절에 따라 땅이 어는 현상(평균 영하 온도/일수: $\Omega \le 2500$ °C/days)이 일어나는 지역에 대한 기후 기준으로는 최근 10년간 최대치수$\Omega_{10}$를 인정한다. 10년 기간을 계산하기 위해서 최대 합계치수를 나타내는 $\Omega_i(\sum_{i=1}^{i=10} \Omega_i = \max)$. 최근 50년 온도를 참고로 한다. Roadbed ($\Omega > 2500$ °C/days)에서 계절에 따라 어는 기후 조건과 동토가 병합되지 않은 기후조건 하에 기후 매개변수를 결정하는 것은 다년간 평균 영하 온도/일수가$\Omega_i$ 되는 것이다.

폼플라스틱 아래 있는 배수패드 두께$\delta$ 계산을 위해서 설계대로 폼플라스틱 아래 수준까지 토대를 제거한 후 남아 있는 ballast층 단면의 최소 두께 치수를 인정한다. ballast 파임이 있을 시 최소 두께 치수는 침목 끝부분에서 40cm떨어져 있는 위치에서 측정한다.

두께 $h_T^p$는 층의 전체 너비만큼 같은 상태로 유지해야 한다. 너비(폭) $(B_0)$는 4.5; 5.0; 5.5;6.0m로 기후구역 I ($\Omega \leq 2000$ °C·일), II ($2000 < \Omega \leq 2500$ °C·일), III ($2500 < \Omega \leq 3000$ °C·일) и IV ($\Omega > 3000$ °C·일). 에 상응되어야 한다.

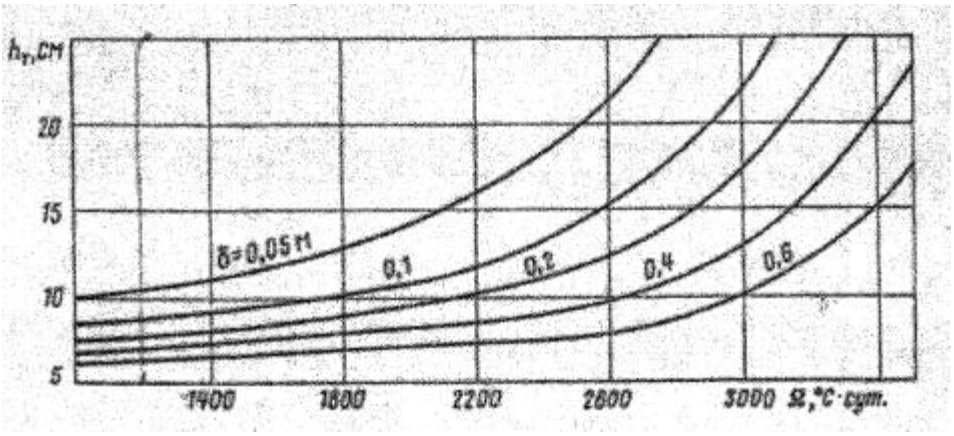



그림6. Roadbed 층에 계절에 따라 얼거나 동토가 병합되지 않는 조건 하에 단열층 $h_1$의 기준 두께를 알아보기 위한 도표

4.4.2 폼플라스틱은 남아 있는 ballst층 위, 침목보다 0.4m 이상의 깊은 위치에 배치한다. 폼플라스틱 아래 점토질 흙이 있을 경우에는 노반을 더 파서 모래로 된 배수패드를 두께 0.1m 이상으로 배치한다.

폼플라스틱 설치와 정기 또는 비정기 수선을 병행했을 경우에는 장비를 이용해 자갈포설작업(6.5항 참조)을 실시할 때 detective layer없이 자갈을 폼플라스틱 바로 위에 배치시킨다(그림 7a). 폼 플라스틱 단열층의 두께를 원 두께 $h_T^p$ 10cm미만일 경우에는 1cm, $h_T^p > 10$ см.일 경우에는 2cm로 늘려야 한다.

레일과 침목을 제거할 경우(6.6항 참조)에는 압축변형은 5kgs/cm$^2$, 극한 강도 10%시 폼플라스틱을 이용한다. 이 때 폼 플라스틱 위에 입자 10-25mm 모래, 석면 폐기물, 자갈로 보호층(detective layer)을 만든다. (그림7 b)

4.4.3 폼플라스틱 판은 촘촘하게 설치한다. 판 사이 틈은 1cm 미만이 되어야 한다.

여러 층이 올라갈 경우에는 솔기부분을 10-15cm로 겹쳐서 판을 올린다. 단열

커버는 기후지역 I, II, II, IV에 따라 b치수(기후지역에 따라 0.9; 1.1; 1.4; 1.6) 만큼 침목 밖으로 나와야 한다. (그림 7참조)

전철기(포인트) 부분에 크리프현상을 제거할 때는 단열재는 각 사이드에서 전환 사이드실(side sill) 길이보다 치수 b만큼 넘는 가변 폭 방식으로 설치한다 (그림8). 커버로부터 물을 제거하려면 (커버 끝부분에서) 배수구를 세로로, (15m간격으로) 배수구를 가로로 설치한다.

4.4.4 폼플라스틱 두께를 줄이기 위해서 ballast층을 좀 올리거나 땅을 더 파서 필요한 두께 δ로 배수소재를 폼플라스틱 밑에 추가로 넣는다.

철도길 축을 따라 밸러스트프리즘 상부에서 크리프성 노반까지 배수자재층의 기존 두께 H가 하중에 필요하고 변위를 예방하기 위한 두께보다 낮을 경우에는 추가로 선로를 높여야 한다. (표4참조) 높여야 할 치수는 요구되고 있는 두께와 기존의 밸러스트 층 두께 차이의 치수로 계산한다.

4.4.5 열차가 시속 >100km/h 달렸을 때와 달렸을 것을 가정 하에 단열커버는 크리프가 불균일하게 형성되는 구역에서 균일한 크리프의 치수인 각각 30mm와 50mm 이상으로 넣는다. 이 때 균일한 크리프현상이 일어나는 구간 내 단열의 분포길이는 각 사이드에서 5m 미만이 되어야 한다.

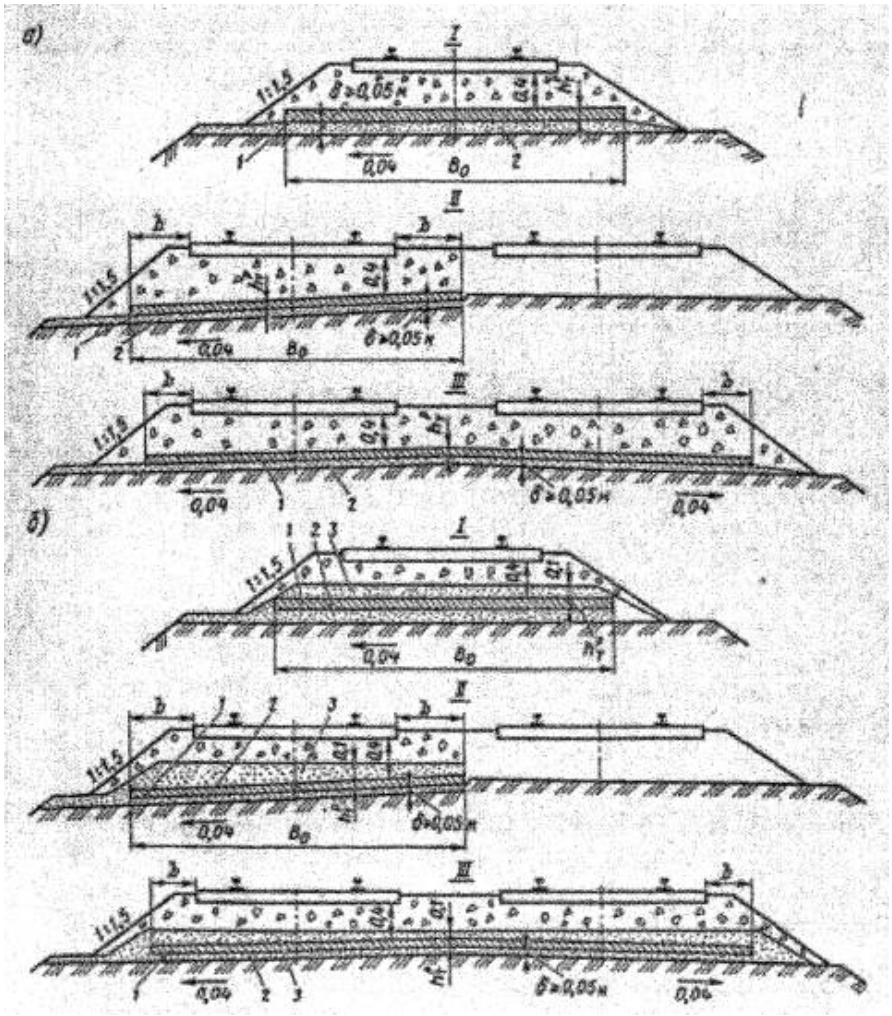


그림7. 폼플라스틱재로 단열을 이루는 장치의 구도:

Detective Layer 무(a)/ Detective Layer 유(b)

편도구간 ; II- 편도구간의 반; III - 왕복 구간의 반

1 - 단열층; 2- 배수패드; 3- 보호층

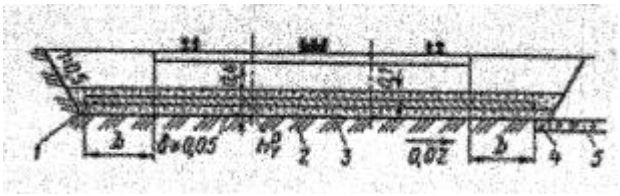


그림 8. 전철기(포인트)부분의 폼플라스틱재 단열장치구도

단열의 첫 번째 층 ; 2 - 배수배드; 3 - 보호층; 4- 세로배수구; 5 - 가로배수구

시속 100km/h 시 단열층의 최소 길이 L은 20m, 시속100km/h시 L=25m이다.
파이프라인과 접촉하는 노반에 크리프 현상이 일어나는 경우 단열층의 최소 길이는 표6에 따라 결정한다.

보호자켓 안의 온도(자켓의 표면 온도)는 동결시기가 끝날 때쯤 됐을 때 파이프 축 대로 자켓 윗부분까지 설치되는 피트 또는 자켓 안쪽에 설치한 온도계로 측정한다.

4.4.6 전철기(포인트) 구간에서 크리프를 제거했을 경우에는 단열층의 길이가 전철기 길이보다 짧으면 안된다.

4.4.7 단열재 끝부분에 동결깊이를 부드럽게 연장하기 위해서 커플링을 실시한다. 커플링을 이룰 수 있는 것은 단열재 두께와 폭을 줄이는 작업 때문이다.

표 6.

| 밸러스트 프리즘에서 보호자켓 윗부분까지의 파이프라인이 들어가는 깊이, m | 반변형적 구조의 길이, m<br>보호자켓 온도 (℃) 시 | | |
|---|---|---|---|
| | 10 | 20 | 30 |
| 1.5<br>2.0<br>3.0<br>4.0<br>5.0 | 20(25)<br>20(25)<br>25<br>30<br>35 | 30<br>40<br>60<br>70<br>80 | 50<br>60<br>75<br>90<br>100 |

비고: ( )의 치수는 지속 100km/h이상을 위한 것임

구역의 끝 부분은 계절에 따라 융해 또는 동결하는 배수성 노반(암석노반) 구역과 접촉하게 되면 커플링을 고려하지 않는다.

커플링의 길이 $l_k$는 반변형적 구조물(단열 커버층)의 끝부분에서 일어나는 균일한 크리프현상의 크기와 다음 공식에 따라 허용되는 레일 이동 각도 $i_{acc}$크기로 결정된다.

$$l_k = P_p / i_{acc}. \qquad (4.15)$$

여기서

$P_p = k \cdot P_{pm}$ 이다.

$P_{pm}$ - 크리프구간 외 균일한 크리프의 관찰된 크기 또는 크리프(반변형적 구조물의 끝부분); $k$ - 균일한 크리프의 증가율

$P_{pa}$시 $k$치수는 다음과 같다

| $P_{pm}$, мм | 10—20 | 30 | 40 | 50 | 50 이상 |
|---|---|---|---|---|---|
| $k$ | 1,5 | 1,3 | 1,2 | 1,1 | 1,0 |

기존의 레일에 추가로 레일 이동각도에 대한 허용치수는 열차의 속도와 관련이 있다. 이것은 속도 100km/h이면 0.001, 속도 100km/h라면 0.0005이다.

4.4.8 커플링은 길이 $P_1$로 별도의 요소로 나누고, 그 수량은 폼플라스틱판의 층수와 같은 것이다. (그림9). 각 엘레멘트마다 위에 길이 $C^c$의 블록을 설치하는데, 이 길이는 표준 사이즈의 5개의 판의 폭과 같은 것이다(예: $C^c = 5 \times 0{,}6 = 3$ м). 커플링 구간 $P$범위 내 전체 블록의 수량 $C^c$을 설치해야 한다. 이 블록의 폭은 치수 $(n+1)$에 대해서 비례적으로 줄이는데 $n$는 커플링 구간의 블록의 수를 의미한다.

전철기 구간 내 설치된 단열층 끝부분의 커플링은 3 방향으로 설치한다: 레일 프레임 뒤, 십자의 뒷부분과 사이드부분

4.4.9 단열재를 삽입하기 위해서 레일 밑 부분의 노반(클리프성 노반을 제거함)을 제거 시 roadbed의 설계를 경사 0.02로 한다.

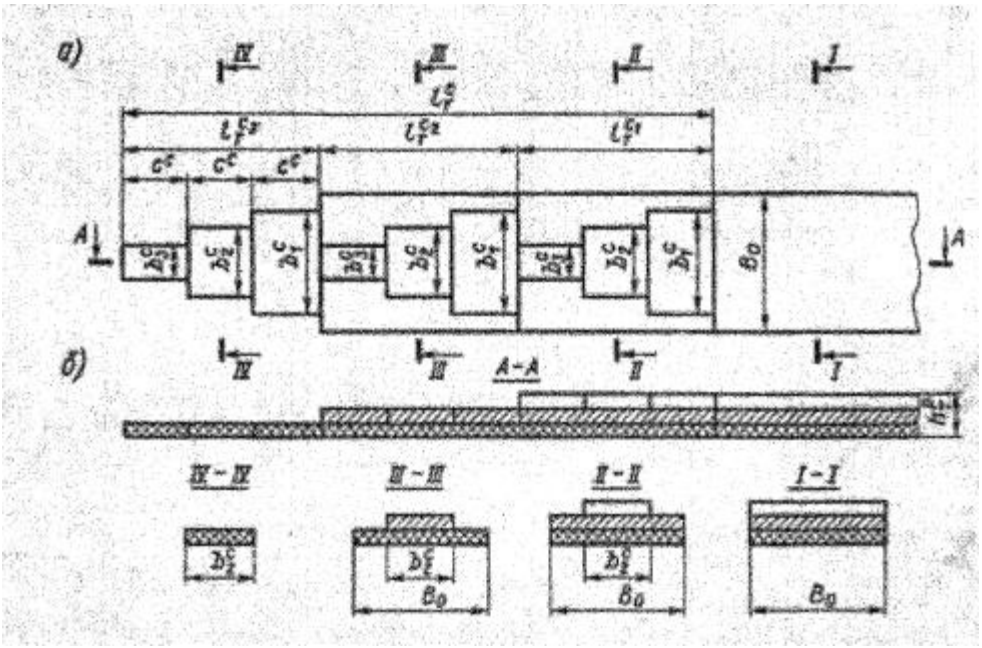


그림 9. 폼플라스틱으로 만들어진 단열 커플링의 구조

계획; b) 단면

계철에 따라 동결되거나 융해하는 노반 및 roadbed 동토가 병합되지 않는 구간에서는 폼플라스틱재로 되어 있는 단열층을 노반온도가 최대 올라가 있을 때 설치한다.

4.5 중합체 재료필름으로 되어 있는 방수커버

4.5.1 빗물이 침투되어 수분이 과도하게 형성되므로 점토질 노반에 크리프현상이 일어나고 선로에 처짐 현상이 생기는 구간에서 어떤 기후 조건과 관계없이 크리프 현상을 제거하는 방법으로 방수커버를 사용한다.

4.5.2 커버로써 폴리염화비닐필름을 쓰는데 이 필름은 다음과 같은 사양을 가진다.

| | |
|---|---|
| 폭..... | 700이상 |
| 두께..... | 0.23이상 |
| 인장 시 파괴강도 | 100이상 |
| 인장 시 상대적 늘어남 | 140이상 |
| 수증기 투과성(24시간, g/m2) | 1.1 미만 |
| 부스러지는 온도, °C | -25 |

보호층에는 모래, 석면폐기물, 부직포를 사용한다. 부직포에 대한 요구사항은

4.6.2항에 나온다.

4.5.3 방수필름은 roadbed 전 구간에서 경사 0.04로 침목위치보다 아래에 깊이 0.4m 이상으로 배치한다(그림10). station이나 전철기 구간에는 방수필름을 침목 끝부분에 0.9m 이상 배치한다.

4.5.4 방수커버에 침투되는 빗물을 배수구를 통해서 빼준다. 밸러스트층이나 배수성 노반층의 두께가 $h_{BC} > 1$일 경우에 방수커버 끝부분에 설치되는 배수로로 빼준다(그림 11). 배수로 위치는 ballast층에서 0.15m 낮은 곳에 둔다. 역(station) 구간 철로에 방수커버를 설치한 경우에는 세로로 설치되 있는 로트나 배수로로 물을 제거한다.

지하수위가 가까이 있는 구간(어는 노반 경계선에서 1m미만 거리)에는 방수커버 처리 부분에서 지하수 용량의 수분을 낮추기 위해서 세로 배수로를 설치한다. 배수로를 설치하지 않고 방수커버 장치를 배치시키는 것이 허용되지 않는다.

4.5.5 밸러스트층과 배수 자재층 두께가 점토질 노반의 하중능력을 확보하기 위한 치수(표 4)보다 낮을 경우에는 방수필름 처리 후 최소 허용 두께 치수를 확보하기 위해서 층의 두께를 추가로 늘린다.

4.5.6 방수커버는 근접한 균일한 크리프(10mm이상)구간을 커버하면서 불균일한 변형이 일어나는 구간에 설치한다. Roadbed의 연결노반이 잘려 있을 경우에 길 방향에 따라 구간 끝 부분에 0.02 경사로 세로구조를 넣는다(레일 가장자리 또는 레일과 침목 사이).

방수필름은 한 겹 또는 두 겹으로 만든다. 방수커버를 한 겹으로 할 경우에 아랫부분에 보호층을 넣는다. 모래와 석면폐기물을 이용한 두께가 0.05 이상이 나와야 한다. 두 겹으로 설치할 경우에는 보호층을 별도로 안 넣어도 되며 이미 되어 있는 자갈, 모래자갈 또는 석면폐기물 위에 바로 올려 놓는다.

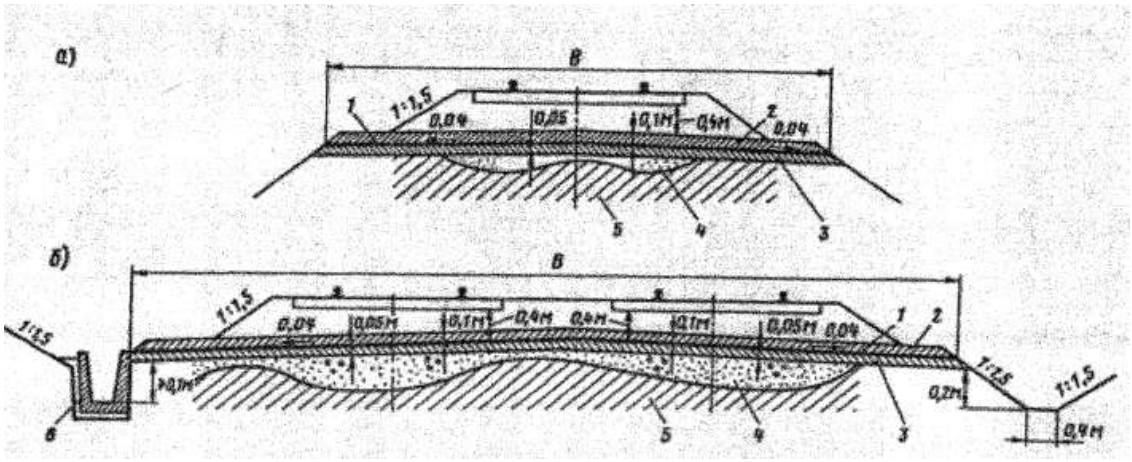


그림 10. 편도(a)와 왕복(b) 구간의 방수커버구조

방수, 2, 3 - 보호 위, 아랫층; 4- 제거되지 않은 기존의 ballast층;

5- 점토질 노반; 6 - 로트

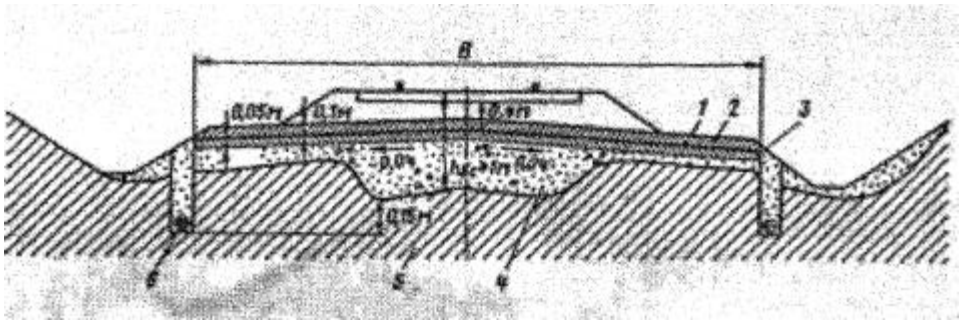


그림11. ballast층 두께 $h_{bc} \geq 1$ м일 경우 방수커버구조

1 - 방수; 2,3- 보호 위·아랫층; 4- 제거되지 않은 기존의 ballast층;

5- 점토질 노반; 6 - 낮은 위치의 배수구

연결된 Roadbed 노반 필름 아랫부분에 0.1m 이상의 두께로 모래층을 포설한다. 모래와 석면폐기물로 되어 있는 상부 보호층의 두께가 0.1m 이상이 되어야 한다.

필름조각들은 길 방향으로 여러 겹으로 깔아놓는데 다음 층의 조각이 아랫층 조각과 최소 10cm 겹치게 올려 놓는다. 열의 수는 조각의 폭으로 결정한다. 방수필름을 두겹으로 설치할 경우에 상부층 배치는 아랫층 배치방법과 동일하다. 그 때 가로로 설치하는 이음줄은 서로 30cm 이상의 간격으로 자리를 잡아야 한다. 필요 시 각 층의 일부 필름의 조각들이 서로 연결될 수 있다. 이 때 겹치는 부분의 폭은 시공 이음과 관계가 있다.

4.5.7 방수커버 양쪽에서 횡단 배수구를 설치한다. 배수구는 점토질 노반에 설치하는데 배수구 끝부분이 밸러스트층보다 0.1m 이상으로 낮아야 한다. 아귀바닥경사는 0.04가 되어야 한다. 출구 쪽에 아귀바닥은 물이 빠질 배수장치 위치 수준보다 0.2m이상까지 올라가야 한다. 방수커버와 접촉되는 아귀바닥과 벽도 방수필름으로 처리한다.

4.5.8 교량 부근에서 발생하는 크리프현상 또는 움푹 들어간 곳과 선로의 처짐현상을 억제하는 작업은 크리프현상이 일어나는 구간의 roadbed 방수에 대한 지침서를 따른다.

4.6 부직포 커버

4.6.1 변형이 일어나는 roadbed의 불안정한 부분이나, 선로의 처짐과 레일변형이 일어나는 구간에는 부직포로 커버를 씌운다. 커버에는 바늘이 통과 가능한 부직포와 서모픽스 기능을 가지고 있는 부직포를 쓴다.

철도의 반변형 구조에 쓰이는 부직포는 다음 사양에 상응해야 한다.

| | |
|---|---|
| 중량 1m2, g | 500이상 |
| 파열하중, H- 자재조작 폭 5cm | |
| 기준 - 세로로 | 600이상 |
| 가로로 | 400이상 |
| 파열 시 인장율, % | |
| 세로 방향으로 | 80미만 |
| 가로방향으로 | 140미만 |
| 기포의 크기 mm | 0.08미만 |
| 방수 (투수계수), m/days | 10이상 |

서모픽스 기능이 있는 부직포(SPANDBOND 타입의 내열성 제어텍스타일(고분자 용융섬유자재) 에 대한 요구사항은 표 7에 나타나 있다.

표 7.

| 구분 | 치수 | 실험방법 |
|---|---|---|
| 비중, g/cm$^3$ | ≥200 | GOST 15902.3-79 |
| 성능 | | |
| 파열 시 인장에 대한 강도, kH/m | ≥20 | GOST 15902.3-79 |
| 파열 시 상대적 인장, kH | | |
| stamp으로 눌렀을 때 강도, kH | ≥30 | GOST 15902.3-79 |
| | ≥2,5 | |
| 유압기능 | | |
| 압력 200kPa시 여과율(방수), m/days | 10 | GOST 8847-85 |
| 기포의 작동직경, mkm | 80 | |
| 규격 | | Soyuz ??? 장비로 측정 |
| Roll의 폭, m | | |
| 길이, m | | DIN60500 |
| 직경, cm | | |
| 비고: 자재는 화학, 생물학적 안정성을 확보해야 한다. 한 달 동안 산, 알카리, 자연 박테리아에 강해야 한다. 강도가 약해지는 현상 없이 직사광선에 강해야 한다. | | |

부직포로 만든 반변형 구조에 대한 사용조건은 표1에 언급되었다 (표 1참조).

4.6.2 밸러스트 층 깊이는 0.5m 미만인 곳에 부직포로 된 커버는 침목바닥($\sigma_n$)에서 0.4m 이상 낮은 위치에 roadbed 전체구간에 설치된다. 이 커버는 미리 제거된 밸러스 프리즘에 경사 0.04로 들어간다(그림12). ballast 프리즘에서 실트· 사질토의 roadbed의 기본 구간까지의 길이는 0.7m 미만 (액성한계 $W_L < 0,3$; 길 방향), 그것보다 더 무거운 실트·사질토인 경우에는 1m 미만일 경우에 부직포를 설치한 후 요구되는 위치까지 선로의 높이를 올린다.

4.6.3 움푹 들어간 곳과 zero level 곳의 배수구 바닥은 커버보다 0.2m 낮게, 밸러스 트층보다 0.15m낮게 배치되어야 한다. 이 조건이 안 맞을 경우에는 배수구를 재설치하여 배수구바닥의 높이를 낮춘다.

4.6.4 왕복 철도일 경우 한 쪽에 크리프현상이 일어나지 않았을 때는 크리프현상이

일어난 한 쪽만 커버를 설치할 수 있다. 역(station)과 전철기(포인트) 구간에 커버를 설치할 때는 커버의 끝부분이 침목이나 레일 밖으로  0.9m 이상 나와야 한다. 커버 세로대로 선로 사이에 작은 배수구를 설치한다.

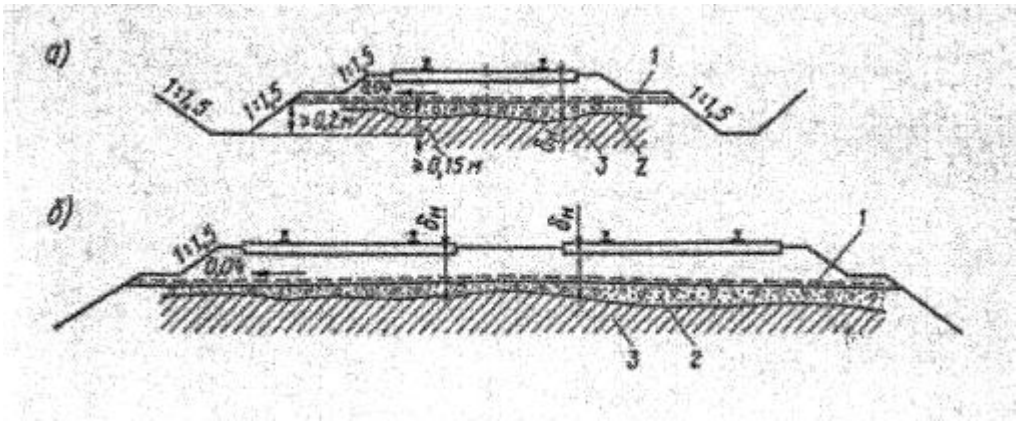



그림 12. 불안정한 편도(a)와 왕복(b) roadbed 구간에 선로의 처짐과 레일 장애를 제거하기 위한 부직포 커버의 구조
1 - 부직포, 2- ballast, 3 - 점토질 노반

4.6.5 ballast에 기준에 맞는 크기의 자갈을 사용할 경우에는 부직포의 두께 5-10cm로 모래, 석면폐기물 또는 10-25mm의 자갈 fraction을 올려 놓는다. 물기가 있는 노반이 ballast층을 통과해 밖으로 나온 구간에는 부직포를 두겹으로 설치한다. 부직포를 두겹으로 설치할 때는 자갈을 부직포 바로 위에 부설해도 좋다.

부직포의 일부 조각들은 선로의 처진 부분을 제거하기 위해서 가로로 설치한다. 이러한 조각들의 길이는 커버폭과 같아야 한다. 부직포를 두겹으로 설치할 때는 불안정한 구간 단면과 레일 장애를 제거할 시 0.2m 이상 서로 겹치도록 부직포를 세로(길 방향 기준)로 설치하는 것을 허용한다.

4.6.6 변형구간과 변형 구간 각 사이드에서 30m 떨어져 있는 곳에 커버를 설치한다.

부직포 커버의 최소 분포길이는 30m이다.

4.6.7 roadbed에 ballast층이 0.5m 이상 박힐 때 크리프현상을 제거하기 위해서 부직포 커버와 방수필름 설치 등 즉 복합적 방법을 선택해야 한다. 필름은 부

직 포 사이에 배치시킨다. 복합커버에 대한 요구조건은 방수커버에 대한 요구조건과 동일하다. 크리프현상을 배제할 목적의 부직포와 방수필름으로 된 구조도 이러한 요구조건에 따른다.

4.7 Roadbed 기본 도상의 설계

4.7.1 빗물이 도상에 침투되면서 수분이 과하게 또는 불균질하게 분포되므로 점토질 노반(점토, 실트, 사질토)의 크리프와 침하가 일어나는 roadbed에 고립된 ballast 파임이 있을 때 변형된 구간에서 설계를 한다. (표1참조)

4.7.2 크리프현상과 침하 발생 시 기본 도상을 설계할 때 최대깊이 위치로부터 0.1m 이상 더 내려간 깊이에서 노반을 제거한다.

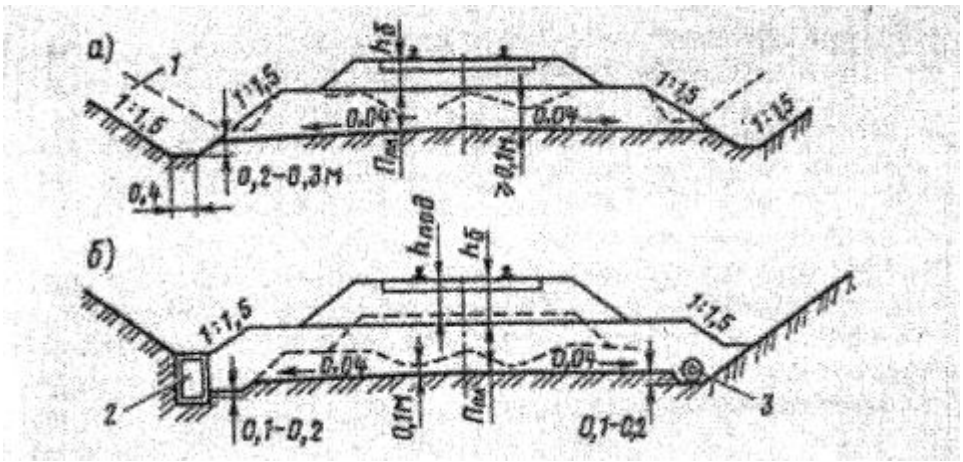



그림 13. Roadbed 기본 도상의 설계구도

a - 도상을 높이지 않았을 경우; b - 도상을 추가로 높이는 경우; 1 - 깊은 파임; 2 - 로트 ; 3 - ,낮은 배수구; 4 - 올라가는 높이

제거된 노반을 배수성 노반으로 교체한다. 배수성 노반층의 두께는 점토질 노반의 하중 확보 조건 하에 결정한다(제4.3항). 이 때 두께가 표4에 나오는 치수보다 낮으면 안된다.

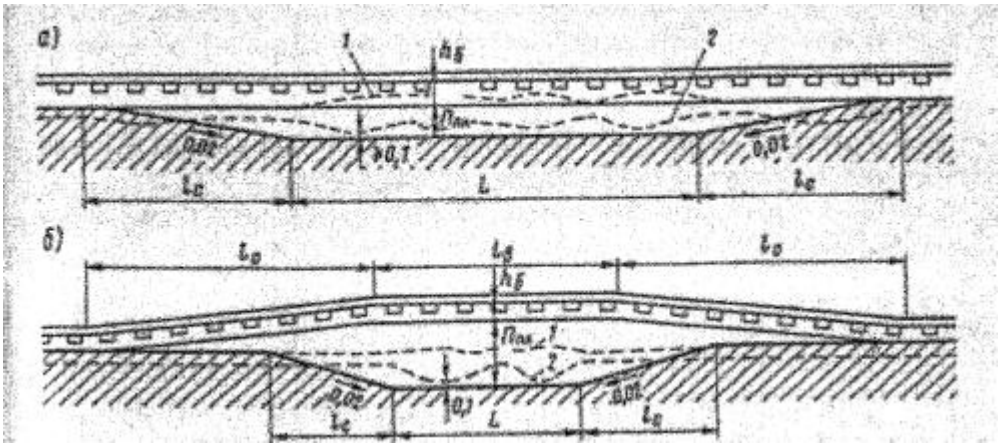


그림 14. ballast가 패인 곳의 기본 도상 설계도의 단면

a - 도상을 추가로 높이지 않았을 경우; b - 도상을 추가로 높이는 경우; 1 - 기본 도상의 최고 높이; 2- ballast 파임의 바닥 수준; $l_n$, $l_o$ 레일을 높이거나 돌리는 구간의 길이

배수성 노반층의 두께는 ballast 패임이나 선로 부설 높이보다 낮게 노반을 제거하므로 확보할 수 있다(0.1m와 비교하여) (그림13참조).

4.7.3 제거된 노반 끝 부분에 세로로 경사 0.02미만의 위치에 제거되지 않은 노반과 직선연결부를 설치한다(그림 14). 연결부의 길이는 지반 관찰 시 설치된 도상의 최고높이와 노반 설계높이의 차이로 결정된다. 연결구간의 노반 설계는 크리프언덕 쪽으로 경사 0.04로, 또는 배수구쪽으로 가로방향으로 이루어진다.

4.8 허용된 크리프 규격에 의하여 반변형적 천연자재구조 계산

모래자갈 혼합 또는 모래로 된 패드 두께 계산 시, 또는 선로를 ballast층까지 부설 할 때 그림 2,3의 도표를 사용한다. 석면폐기물에 대해서는 그림 15, 17의 도표를 사용하고, 용광로나 보일러 슬래그에 대해서는 그림 16, 17b를 참조한다. 도표15와16을 사용하는 순서는 그림 2, a와 동일하고, 그림17 경우에는 그림 3과 동일하다(제4.2항 참조).

크리프성 노반구간에서 크리프현상 전체 제거 또는 부분 제거 시 사용되는 삽입형 패드 계산, ballast층까지 길을 부설하는 계산, 포설 패드 계산은 그림 18에 따른

다.

크리프성 노반에서 융해 또는 동결 구간을 완전히 제거할 경우에 모래자갈 혼합물, 석면 폐기물, 슬래그로 만든 삽입형 패드의 두께는 다음 공식으로 결정한다.

$$П = mnz^{max} - h_б, \qquad (4.16)$$

$z^{max}$ - 융해 또는 동결 전 구간에 패드 설치 시 융해 또는 동결 roadbed의 깊이; $h_б$ - ballast 설계 시 두께 (침목상부에서); m - $\Omega \le 2500$ °C/days와 $\Omega > 2500$ °C/days 시 비율 $m = \sqrt{\Omega_{10}/\Omega}$ 과 $m = 1$; n - 언덕(1.05), zero level(1.0), 파임(0.95) 비율과 같은 비율; $\Omega$에 대한 $z^{max}$크기는 곡선 $h_б^{max}$로 결정한다.

ballast에 선로를 부설하거나 패드를 설치하는 것은 크리프성 노반에서 계절에 따라 동결 또는 융해되는 부분을 완전히 제거하는 조건 하에 실시한다.

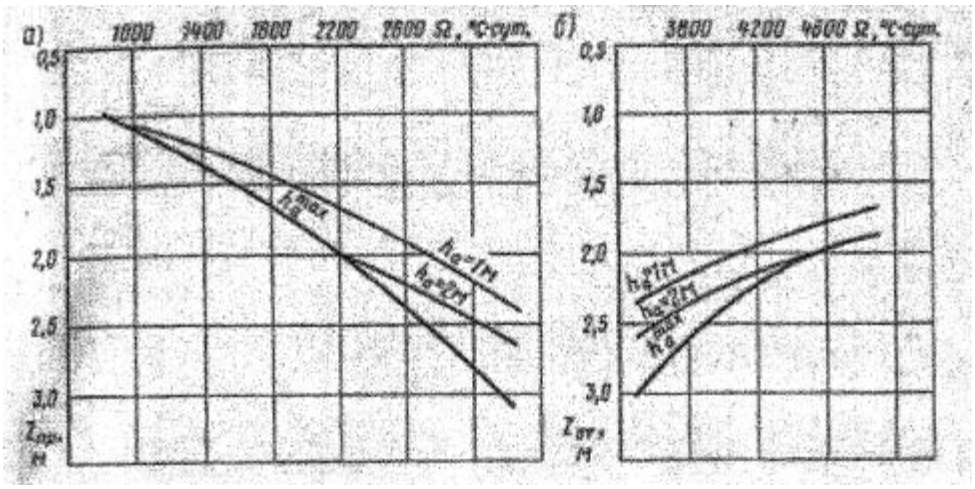



그림 15. 석면 폐기물 패드 사용 시 동결깊이 $z_{пр}$ (а)(a)와 융해깊이 $z_{от}$ (b)를 산정하기 위한 도표

모래자갈혼합물이나 석면폐기물로 형성된 ballast층까지 길을 부설하는 높이

$$П'' = rmnz^{max} - h_{бс}, \qquad (4.17)$$

r- 모래자갈혼합물층용 비율은 1.0, 석면폐기물용 비율은 0.9와 같은 비율;

- 침목 상부에서 도상 크리프성 노반까지의 기존의 ballast층의 두께(길 방향대로)

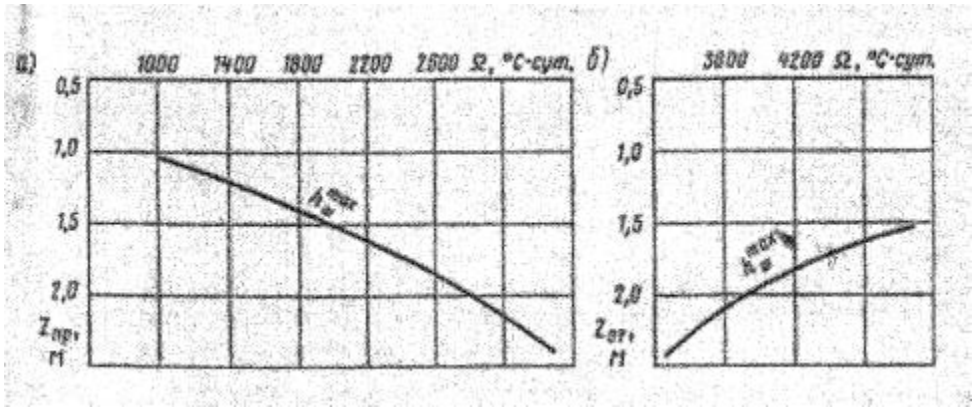



그림16. 슬래그 패드 사용 시 동결깊이 $z_{пр}$ (а)(a)와 융해깊이 $z_{от}$(b)를 산정하기 위한 도표

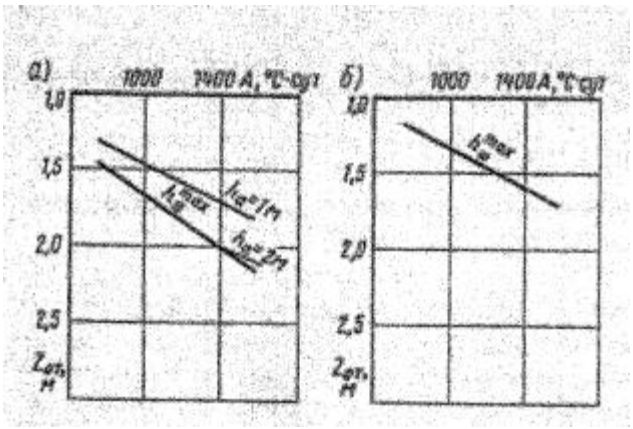



그림 17. 석면폐기물 패드(a)와 슬래그 패드(b) 사용 시 $z_{от}$ 결정하기 위한 도표

자갈 ballast 프리즘안에 사용 시 석면폐기물 패드 또는 슬래그 패드의 두께 (포설 두께 산정식)

$$\Pi'' = s m z^{max} - h_{0c} - h_б, \qquad (4.18)$$

$s$ 는 석면폐기물과 슬래그를 결정하는 비율 0.95와 0.85와 같은 비율

(4.18)공식에는 $z^{max}$치수는 모래자갈 혼합물 패드구조에 상응되는 도표로 결정한다. 석면폐기물 또는 용재로 만들어진 패드(올려 놓는 식)의 두께 0.2m 미만일 경우에 이런 패드를 설치하지 않고 공식 (4.17)에 따라 부설할 높이를 정하면서 밸러스트에 선로를 부설할 것을 설계한다.

크리프성 노반에서 융해 또는 동결 노반을 부분적으로 제거했을 경우에 설치하는 모래자갈혼합물 또는 석면폐기물로 만들어진 패드의 두께는 다음과 같다

$$IT = mnz' - h_б - h_{доп}, \qquad (4.19)$$

$x'$ - 동결 또는 융해 부분 상부에 패드 설치 시 융해, 동결 roadbed의 깊이; $h_{доп}$ -- 패드 아래 크리프토대의 융해 동결층에 대한 허용 두께

$z'$ 치수는 본 기후 조건을 갖춘 지역을 위해 곡선 $h_п$와 $h_в$로 결정하는데 필요시 그 사이의 치수로 한다. 삽입 시 곡선 $h_п^{max}$ 또는 $h_в^{max}$ 에 있는 $h_п$ 나 $h_в$ 층의 두께는 이러한 기후 조건에 맞게 녹거나 어는 층 $z^{max}$과 같은 것이다. $h_п$ 나 $h_в$ 차수로써 패드와 밸러스트층의 합계 두께를 정의한다. $(IT + h_б)$

용재패드 설치 시곡선$h_{пр}^{max}$로 결정하는 두께가 치수$z'$에 대한 것이다.

공식 (4.19)에 대해서 모래자갈혼합물 또는 석면폐기물로 만들어진 패드의 두께를 치수 $h_{доп}$ 를 정한 다음 근사방법으로 찾는다. $h_{доп}$치수가 알려져 있으면 다음과 같이 계산한다.

$$IT + h_б = mnz' - h_{доп}. \qquad (4.20)$$

패드 $h_{доп}$ 아래 있는 녹거나 어는 크리프성 노반의 두께는 다음 공식으로 계산하다.

$$h_{доп} = P_{доп} / C_0 f_c, \qquad (4.21)$$

- 크리프의 허용 치수 (제4.1 표2참조); $C_0$ - 계절에 따라 융해하거나 동결되는 노반과 병합되지 않은 동토가 있는 조건 하에 1,0 와 같은 비율 또는 1,4 는 병합되는 동토에 대한 비율; $f_c$ -노반의 상대변형을 계산하기 위한 평균치수

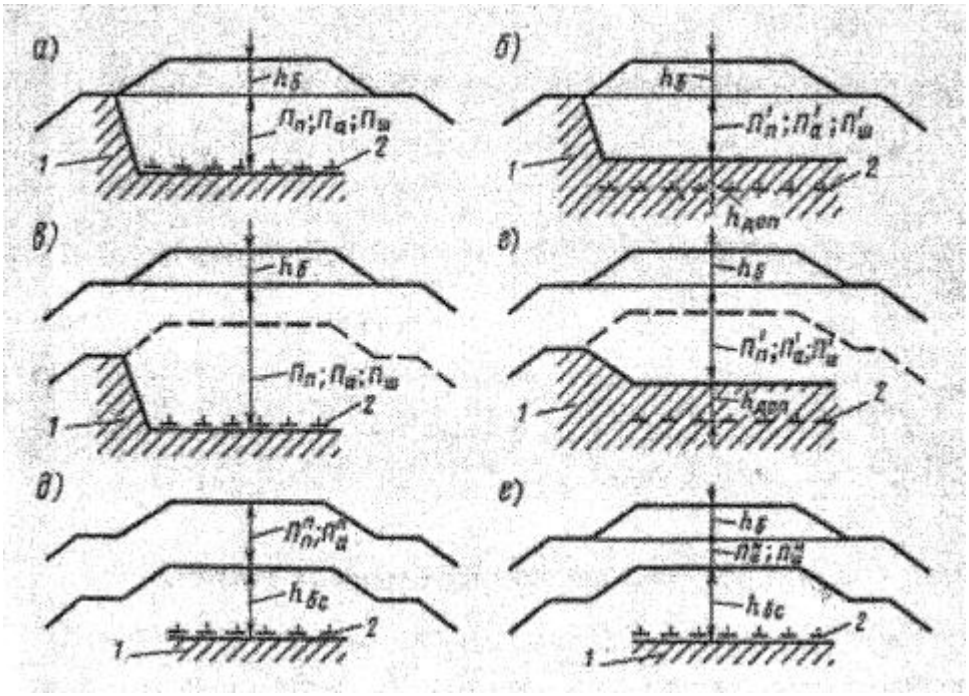



그림 18. 반변형적 구조를 위한 계산구도

a,b - 동결구역에서 크리프성 노반을 전부 또는 부분적으로 제거했을 때 삽입하는 패드; c,d - 복합패드; e - ballast층까지 선로를 부설한 것; f - 부설한 패드; 1 - 크리프성 노반; 2 - 동결 경계선

$$f_c = P_{max}/(z'_{6c} - h_{6c}), \qquad (4.22)$$

$P_{max}$- 크리프성 노반에 가록된 최대 크리프 크기(땅이 얼어서 생기는 크리프를 의미함); $z'_{6c}$ - (4.5)공식에 의하여 크기 $h_{6c}$ 시 roadbed의 동결층 두께, 이 때 $h_{6c} = h_n$; $z'_{6c} = z_{hp-cr}$. 이다.

<예제>. 배수성 노반과 접촉하는 실트에 깊이 5m 위치에서 세로 커플링을 동결 구역에서 부분적으로 제거될 수 있는 크리프둑과 스윙이 관찰된다. 본 구역이 있는 곳은 수년의 평균 치수인 $\Omega = 3100\ ^{\circ}C/$ days으로 정의된다. 밸런스트 배수자재 기존층의 두께는 $h_{6c} = 1.0$ м. 이다. 동결구간 실트의 자연함수비는 25%, 모래는 7%이다. 실험실에서 나온 동결된 모래와 실트의 열전도율은 2.0과 2.2kcal m/h°C이다. 노반재의 밀도는 2000와 1686kg/m$^2$이다. 이 구간에서 열차 최대속도는 90km/h이다.

크리프허용치수 $P_{доп}$인 조건 하에 석면 폐기물 패드의 두께를 계산해 본다. 밸러스트층의 두께는 프로젝트 상 $h_б = 0{,}45$ м이다.

먼저 공식(4.5)에 의해 $z'_{бс}$ 조건 하에 roadbed의 동결 두께의 다년간 평균 치수를 알아본다. 그림 2 도표에 따라 곡선 $h_п = 0$ 에서 $\Omega = 3100$ °C·сут $z^{п}_{пр} = 2,2$ м; $z^{д}_{пр} = 3,6$ м 위한 치수를 찾아본다. 모래는 공식 (4.4)에 의거하여 $Q^{п} = 2000\frac{7}{100} \cdot 1,0 \cdot 80 = 11200$ ккал/м³ 와 공식 (4.2)에 의거하여 $\alpha = \sqrt{2,0/11200} = 0,0134$; , 실트는 $Q^{п} = 1600\frac{25}{100} \cdot 0,8 \cdot 80 = 25600$ kcal/м³ 와 $\alpha = \sqrt{2,2/25600} = 0,0093$. 이다.

공식 (4.1) $z^{дп}_{бс} = 82 \cdot 0,0134 \cdot 3,6 = 3,95$ м 와 공식 (4.6) $z^{пп}_{пр} = 123 \cdot 0,0093 \cdot 2,2 = 2,5$ м. 대로 알아본다.

공식 (4.5)에 의거한다.

$$z^{д}_{пр} = z'_{бс} = 2,5\,(2,4 - 2,2)\,(3,95 - 2,5)\,(3,6 - 2,2) = 2,7 \text{ м}.$$

공식 (4.22)

$$(4,22)\ f_c = 0,06(2,7 - 1,0) = 0,035$$

공식 (4.21)

$$h_{изол} = 0,025/1 \cdot 0,03 = = 0,7 \text{ м}.$$

공식 (4.20)에 의하여 그림 15의 도표와 함께 연속근사법을 이용하여 석면패드의 두께를 판단한다. $h_в = Пг + h_б = 1,5$ м. 공식을 사용한다. 이 때 $\Omega = 3100$ °C·сут $z' = 2,40$ м 에 대하여 $Пг + h_б = mnz' - h_{изол}\ (1,5 = 1 \cdot 0,95 \cdot 2,40 - 0,7 = 1,6)$ (공식4.20)의 등식이 지켜지지 않으면 $h_в = 1,6$ м. 식을 채택한다. 이 때 $z' = 2,45$ м 일 경우 $h_в = 1,6$ м 와 $mnz' - h_{изол} = = 1,0 \cdot 0,95 \cdot 2,45 - 0,7 = 1,6$ м. 같은 것이다.

## 4.9 반크리프성 패드 구조

4.9.1 삽입식 패드는 크리프 노반을 제거하고 배수성 노반이나 크리프되지 않는 노반으로 교체하기 위해서 사용하는데 기존의 레일헤드 표시를 유지하는 것이다. 복합패드는 크리프성 노반을 제거하고 교체할 때 자주 이용되고, 어떤 때는 선로를 패드자재와 ballast 위에 부설하기도 한다. 복합 패드는 크리프성 노반을 제거할 층의 깊이를 줄이기 위해서 사용하거나 선을 높이는데 제한이 있을 경우에도 사용하기도 한다(교량 밑 규격, 전선 위치 등).

선로를 부설하는 작업과 삽입패드가 두께가 두껍지 않고 규격이나 선로 단면에 대해서 제한사항이 없는 크리프층에 대해서 사용한다.

4.9.2 삽입패드 또는 복합패드는 사용 시 크리프층 교체 깊이, 선로를 올리는 높이와 패드의 두께(II)는 허용된 크리프 크기를 감안하고, 크리프성 노반에서 동결 또는 융해 구간을 완전히 제거하는 조건 하에 변형원인에 맞게 결정해야 한다(표1 참조). 앞에 언급한 조건 중 첫 번째 조건에 따라, 또는 roadbed 기본 도상을 설계할 때 패드에 대한 추가 계산은 점토질 (크리프되는) 노반 재하능력에 맞게 실시한다. 계산방법은 4.8과 4.3항에 기재되어 있다.

4.9.3 삽입식 패드(그림 19,20)는 가로방향으로 한 쪽 또는 양쪽에 배수구를 둑 경사 면에 설치하여 설계한다. 패드바닥의 횡단경사는 0.04이상이 되어야 한다. 배수구 구조는 현지조건에 맞게 설계한다.

지하수위가 동결 경계선에서 1m 이상 아래 있을 경우에는 석면폐기물 패드 설치 시 배수를 하지 않고 설치할 것을 허용한다.

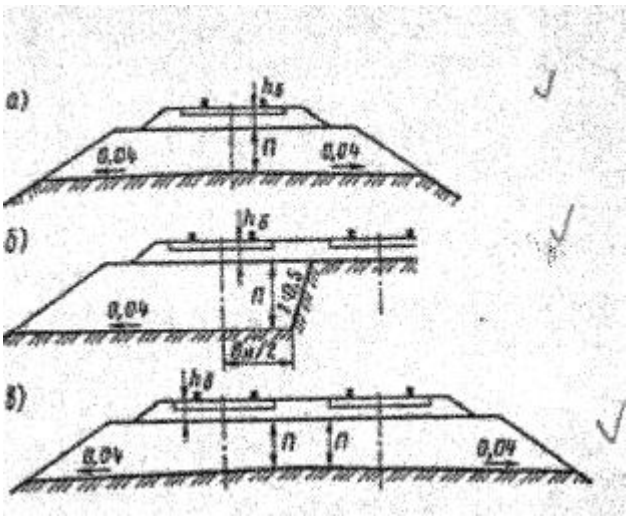



그림 19. 편도 선로 둑에 삽입식 패드 구조 (a), 왕복선로에는 한 선로 아래 설치(b), 두 선로 아래 설치(c)

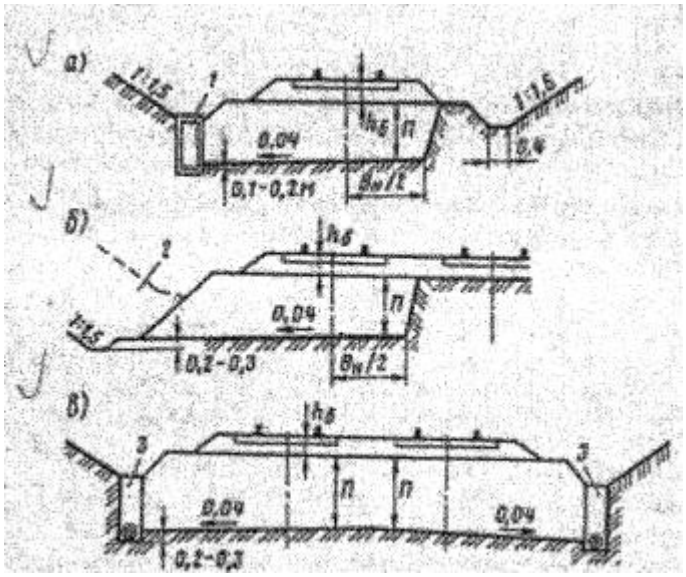



그림 20. 편도길 움푹 들어간 곳에 삽입식 패드 구조 (a), 왕복길에는 한 선로 아래 설치 건(b), 두 선로 아래 설치 건(c) 로트; 2 - 깊은 배수로, 3 - 배수

한 쪽에만 패드로 배수로를 설치했을 경우 선로축에서 제거되지 않은 노반까지의 길이는 (패드 바닥 Вн/2 기준) 1.8m이상이 되어야 한다. 패드 삽입부분의 경사 기울기 기준은 1:0.5 미만인 수준에서 인정한다.

2m 깊이로 들어간 곳에서 배수를 하기 위해 배수로를 깊게 설치하는 것이 바람직하다. 더 깊은 곳에는 로트나 배수시설을 설치한다.

역(station) 쪽의 삽입패드를 선로 간(그림21)에 있는 배수시설이나 로트에 물이 빠질 수 있도록 설치한다. 선로의 마지막 부분에서는 물을 둑경사 부분이나 깊은 배수로로 배수한다.

침하가 발생하지 않은 노반일 경우 낮은 둑 있는 곳의 크리프성 노반을 교체하는 구간에서 배수로를 삽입패드 위치보다 낮게 설치한다 (그림22,a). 침하성 동토일 경우 낮은 둑에 설치하는 삽입 패드 구조를 그림 22, b에서 보여 주고 있다. 이 때 물은 배수관으로 배수시킨다.

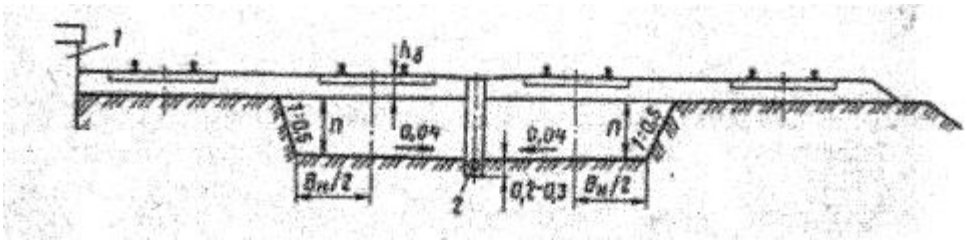


그림 21. 역 구간의 삽입패드 설치구조

승객플랫폼, 2 - 배수

복합패드 설치 시 (그림23, 24) 크리프성 노반을 도상 또는 ballast층 바닥보다 0.1m 이상 낮은 위치에서 교체한다.

패드배치를 위해 둑을 넓히는 것은 패드가 삽입된 높이까지 한다. 제거하는 구간은 3m 미만, 또는 경사면에 ballast 테일(tail)이 있을 경우에 넓히는 것은 배수성 노반으로 실시하고 투수계수는 3m/days 이상이다(그림 25, a,b). 제거하는 구간은 3m이상, 둑 높이 2m 이상일 경우에 넓히는 작업을 하는데 현장노반을 사용할 것을 허용한다(그림 25, b). 높은 둑(2<Hu<6m)에서 ballast 테일을 제거하고 제거된 자리에서 레지(ledge)를 0.5-1m의 높이에 배치한다.

선로를 ballast층(그림 26)까지 높일 때 둑을 기존의 선로 높이까지 넓히고, 그루브(groove)부분의 선로는 roadbed 도상의 확장 없이 부설한다. 이 경우에는 세로 배수는 낮게 설치된 배수장치에서 이루어지고, 또한 기존의 배수로 바닥에 설치되었거나 경사면으로 변위된 로트로 물이 빠지게 한다.

4.9.4 삽입패드와 복합패드 설치 시 크리프성 노반 제거와 교체된 구간의 길이 L은 별도의 크리프구간이나 가라앉은 구간의 길이와 같은 것이다. 불균일한 크리프 구간일 경우에 L은 한 레일에 크리프현상이 일어나는 지점부터 다른 레일의 크리프가 제거된 지점까지의 길이다. L의 최소 치수는 제4.4.4항의 요구사항에 따라 결정한다. 파이프라인이 지나가는 지점에서 크리프현상 제거 시 패드 길이를 표6에 정하는 식에 따라 결정한다.

4.9.5 융해 및 동결 과정 또는 노반 크리프와 침하과정에서 레일의 기하학적 배열을 완만하게 바꾸기 위해 제거된 가장자리에 세로 커플링 설치를 고려해야 한다.

근접 구간에 크리프성 노반이 있을 경우에는 세로 커플링이 제거된 부분의 깊이를 줄이며 선형으로 배치시킨다 (그림 27,a). 커플링의 길이 lc는 지반공학적 관찰을 통해 나온 크리프 크기(균일한 크리프)와 제 4.4.7항에 의하여 레일의 허용 경사 1доп 로 결정된다.

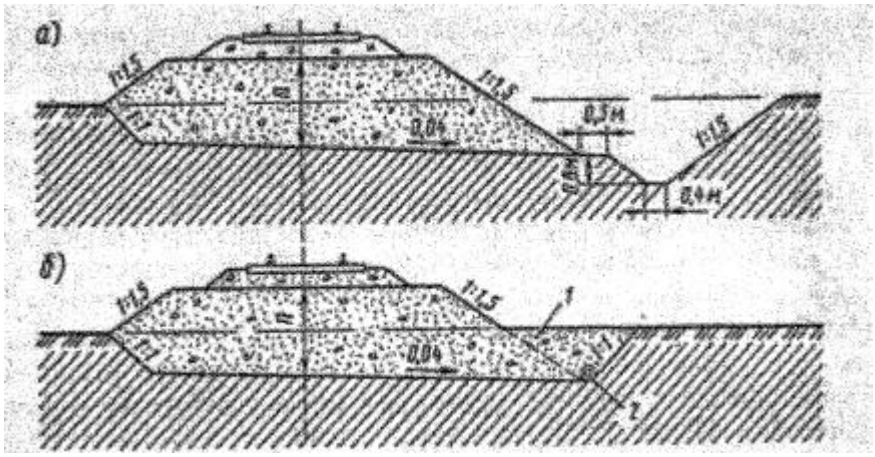



그림 22. 둑 밑 부분의 노반 교체로 배수층의 구조

침하하지 않는 기초; b- 침하하는 기초; 1- 배수둑; 2 - 배수관

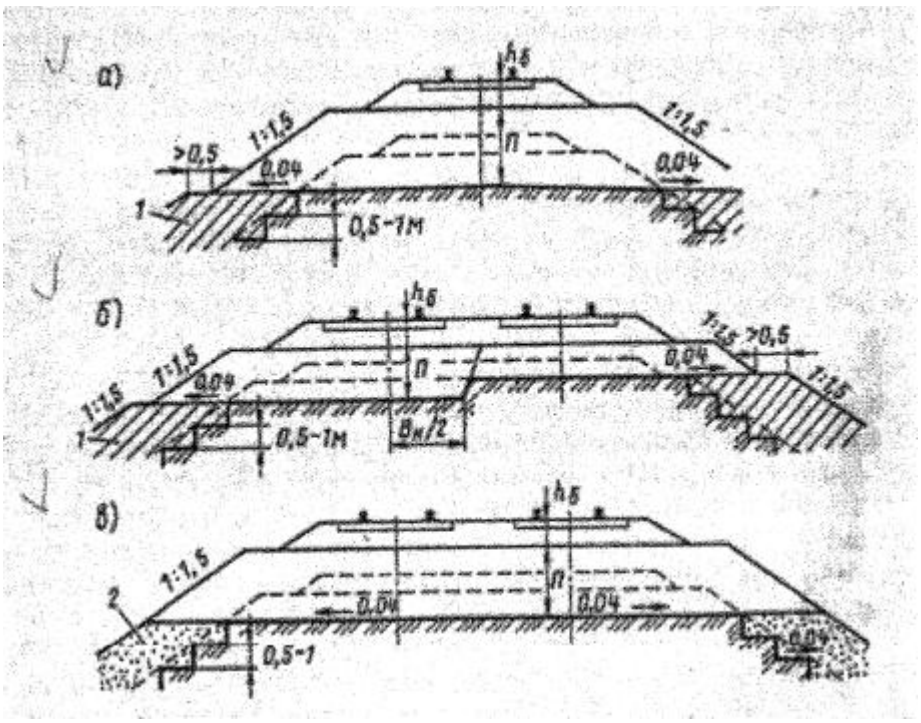



그림 23. 편도 선로 둑에 설치된 복합패드 구조

- 한 선로 밑에 설치; (b) - 두 선로 밑에 설치; (c) - 왕복 선로 밑에 설치
1,2 - 현장 토질 및 배수성 노반으로 둑을 가득 채움

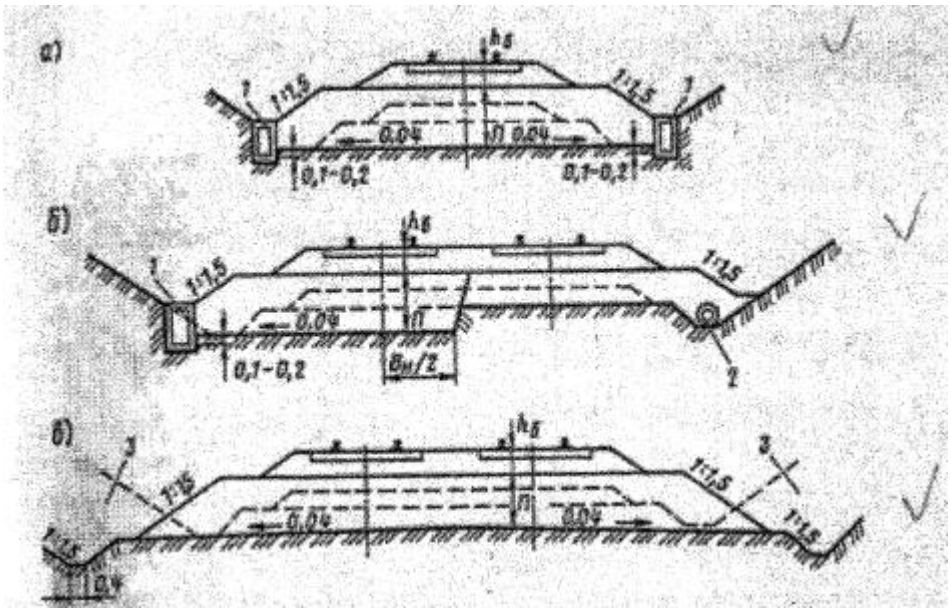



그림 24. 편도 구간 홈에 복합패드 설치구조

(a) - 한 선로 밑에 설치; (b) - 두 선로 밑에 설치; (c) - 왕복 선로 밑에 설치
1 - 로트; 2 - 낮은 위치에 있는 배수; 3 - 깊은 배수로

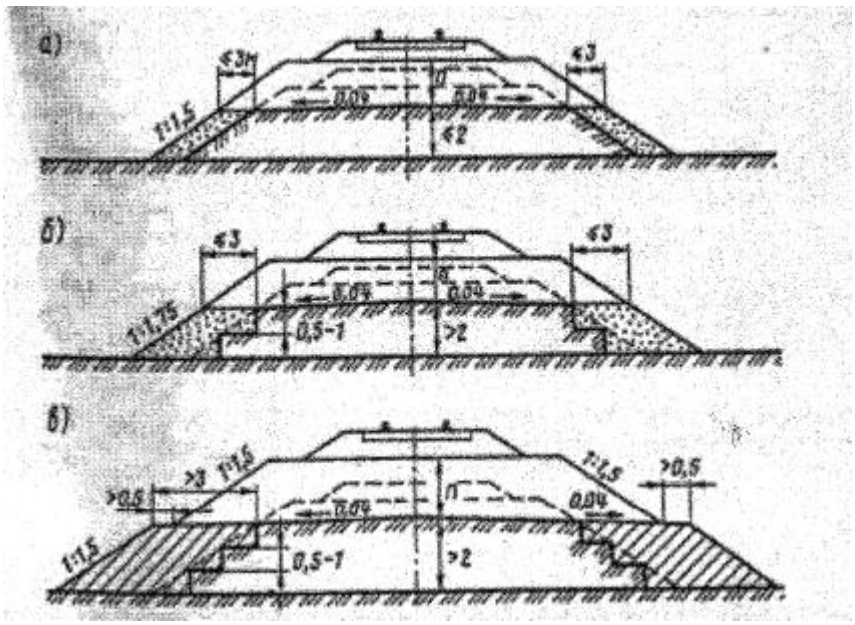



그림 25. 배수(a,b)와 현장(c) 노반을 이용해 복합패드 설치 시 둑 넓힘 구조

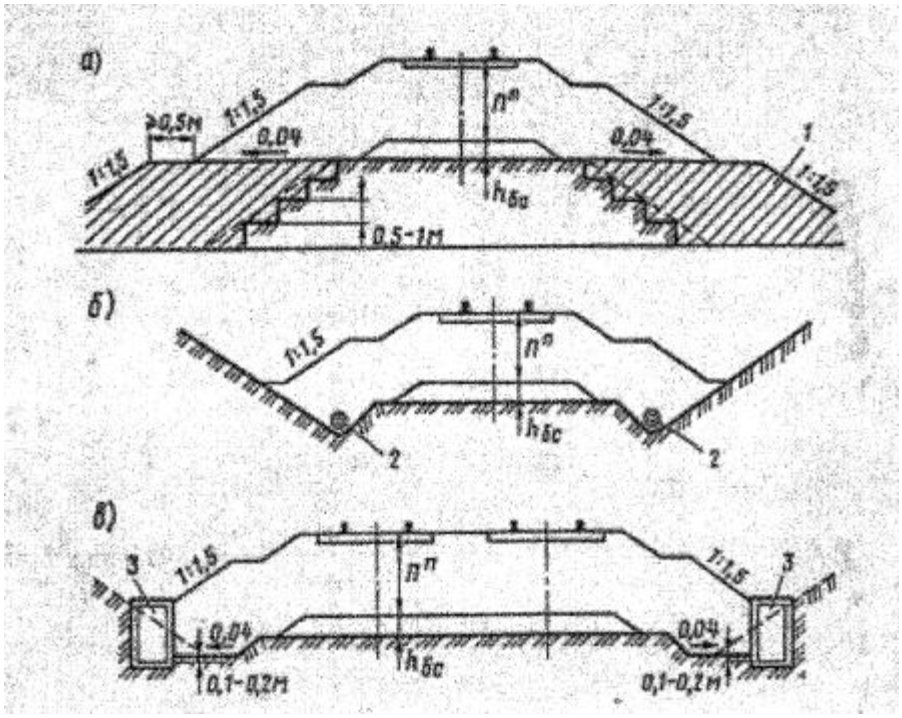



그림 26. ballast층까지 올린 선로의 단면

a,b- 크리프구간의 둑과 홈; a-b two-way 구간에 홈 현장 노반 가득 채움; 2 - 낮은 위치의 배수; 3 - 로트

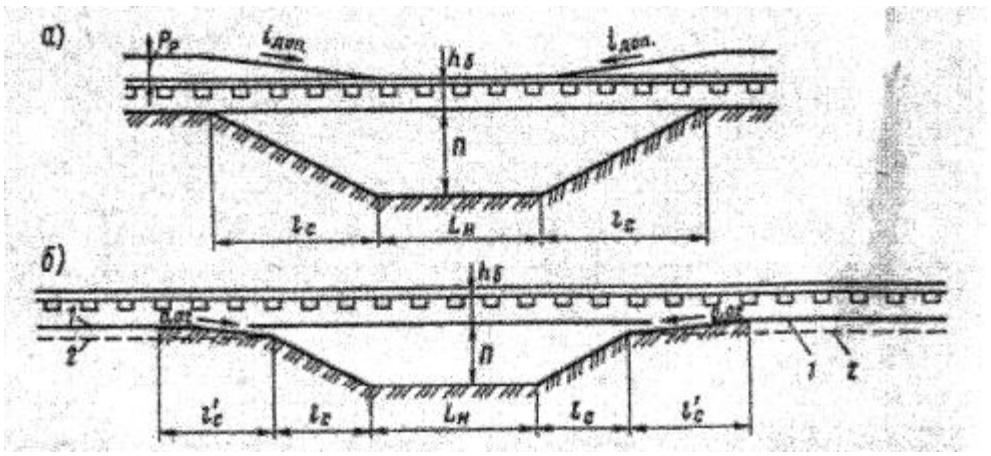



그림 27. 커플링을 포함한 삽입식 패드의 단면

a - 도상에 ballast층이 없을 시; b - ballast층이 있을 시 2 - ballast층의 높이

$$l_c = \frac{P_p - P_{non}}{i_{non}}, \qquad (4.23)$$

Pp - 커플링 구간에 균일한 크리프를 위한 계산 치수 (제4.4.7항 참조)

크리프성 노반에서 동결구간을 완전히 제거할 경우 공식(4.23)에 의하여 $P_{non} = 0.$을 채택한다.

도상에 ballast층이 있을 때 규정된 요구사항에 의하여 커플링이 경사 0.02로 추가 세로커플링으로 수행한다.

커플링 $l_c'$의 길이는 도상의 최고높이(보통 길가 또는 길의 축 부분)과 움푹 들어간 바닥 높이의 차라고 한다(그림 27b). 커플링의 최소길이는 10m가 되어야 한다. 제거된 부분의 가장자리에 크리프되지 않는 노반(암석, 배수성 노반)이 있을 시에는 구간에서 크리프성 노반을 부분적으로 제거 시 제거한 부분의 깊이 연장은 어는 구간의 계산된 경계선까지 한다 (그림28). 크리프성 노반이 깊이 $L+2l_c$ 이상 들어 있을 경우에 크리프성 노반을 부분적으로 교체한다. L의 치수는 제4.4.5항의 구비요건에 의하여 결정한다. 이러한 조건을 준수하지 않을 경우에 크리프성 노반을 동결된 깊이만큼 교체한다.

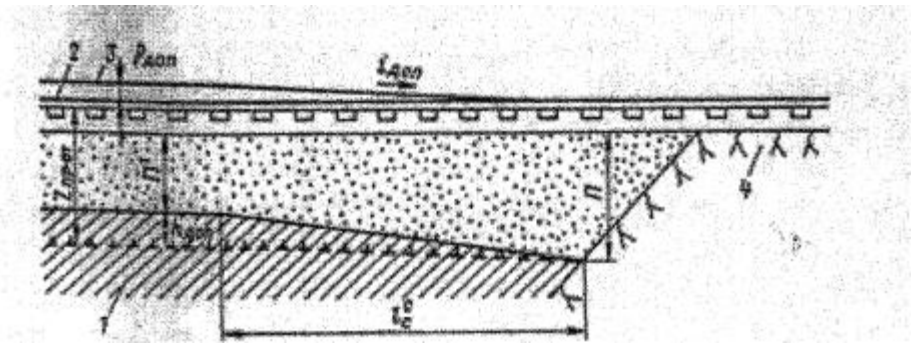



그림 28. 암석(배수) 노반으로 되어 있는 구간 끝부분에서 크리프성 노반을 부분적으로 제거하는 세로커플링의 구조

1 - 크리프성 노반, 2 ,3 - 여름과 겨울철의 길의 위치; 4 - 암석 노반

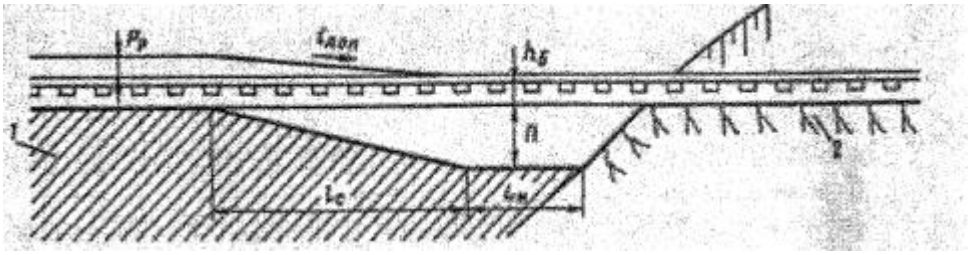


그림29. 암석홈과 접촉하는 크리프성 노반 둑이 있는 지점에 삽입식 패드의 단면
1 - 점토질 노반; 2 - 암석

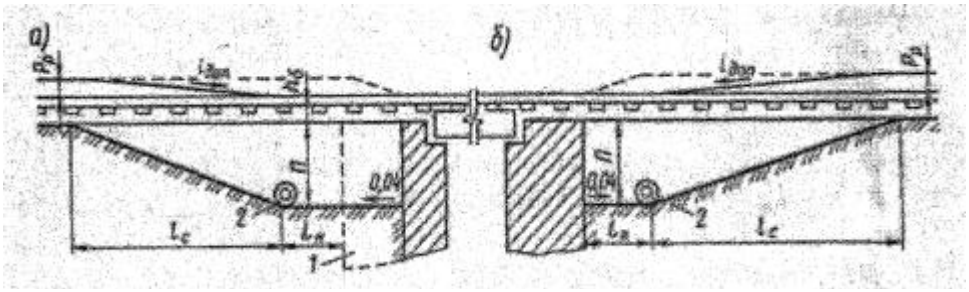


그림 30. 교량 크리프 제거 시 삽입식 패드의 단면

a - 안쪽 벽을 포함한 교대 근처; b- 매설교대 근처; 1 - 교대의 안쪽 벽; 2 - 횡단배수

크리프둑이 암석홈과 교대와 접촉하는 구간에서 크리프현상을 방지하기 위해서 노반을 완전히 제거하는데 제거하는 길이는 암석과 교대에서 $L_н = 5$ м 이상이 되어야 하며, 그 뒤로 선형방식으로 제거하는 부분을 줄인다. (그림 29, 30)

4.9.6 올려 놓는 패드의 길이나 밸러스트층에 갈을 올리는 높이는 크리프구간의 길이 보다 짧으면 안되고, 거기서 tapping의 길이는 “철도 레일 1520mm”, 건축 기술기준, 세로단면 요소 설계에 대한 구비요건에 따른다.

4.9.7 파이프라인이 지나가는 roadbed일 경우에 불균질한 크리프현상을 예방하기 위해서 A부록 2에 나와 있는 요구사항을 준수해야 한다.

## 5. 동토 조건에서의 배수설계

5.1 동토 조건에서의 배수는 물 배수를 하기 위해서 반변형적 구조와 함께 종합적으로 설계한다. 자체에서 조치를 취함으로써 지하수 유입으로 생기는 얼음 크리프를 제거한다.

5.2 수평식 관형 배수는 흡수파이프 (건조시키는 파이프)와 tapping 라인으로 구성되어 끝 부분에는 방출구가 있다. 흡수파이프는 관통된 파이프라인이데 필터나 파이프필터 포함한다. Tapping pipe는 방출구에 파이프 안 쪽이 얼기 시작하면 이때 작동되는 파이프라인을 사용한다. 배수 방출구는 오픈식(배수로)와 클로즈식(흡수우물, 도랑)이 있다.

배수는 배수로 밑에 한 쪽 길이나 양쪽 길에다 세운다. 배수방출은 물을 편리하게 방출할 수 있는 위치에 둔다. 흡수파이프와 방출구를 연결하는 tapping라인의 길은 최소 길이로 최대허용치수 범위 내 세로경사를 확보해야 한다.

5.3 대수층이 열려 있는 높이에 따라 배수종류는 불투수층 깊이로 결정된다. 깊지 않은 곳(4m까지)에 위치할 경우에 완벽한 타입의 배수로 불투수층과 0.3-0.5m로 삽입되어 있다. 불투수층은 강도가 높은 점토질 노반이나 암석 노반으로 되어 있다.

불투수층은 또한 여과율이 200배 높은 다른 층과 접촉이 가능하다.

미완벽 타입의 배수 깊이는 구간의 용도와 지반 조건으로 결정된다. 자체에서 반변형적 기능을 가지고 있는 배수 설치 시 배수의 깊이는 배수도랑에 들어오는 물 수위를 감안해 노반의 동결 깊이와 동일하게 한다. 단 배수깊이는 3.5-4m를 넘으면 안된다.

반변형적 구조로부터 물을 뺄 수 있도록 설치되는 배수의 깊이는 이 구조의 규격으로 결정한다.

5.4 배수를 설계할 때 두 가지의 결정적 시기에 맞는 tapping line에 대한 열 계산을 한다. 너무 빠른 동결방지를 위한 방출 보호가 필요한 시기인 겨울과 동토지역 파이프라인의 기초에 대한 강도를 확보해야 할 시기인 여름-가을철이 그 결정적 시기가 되겠다.

제1 결정적 시기의 열계산으로 확인된 방출구조, tapping pipe line의 매개변수와 배수운영방안은 일년내내 방출의 작동(지하수가 무제한으로 들어있을 경우) 또는 배수관에서 물을 다 뺀 후 다시 어는 것과 tapping line의 다시 어는

것(지하수가 충분히 들어있지 않을 경우)을 보장해야 한다. 클로즈타입의 흡수도랑 설계 시 겨울철 결정적 시기의 기초 데이터로 유압계산을 실시한다.

제2결정적 시기의 열계산으로 tapping line의 구조와 매개변수는 파이프라인 동토기초에 강수량이 침투되는 것을 막는 역할을 해야 한다.

제1결정적 시기의 계산기간은 다음과 같다: 일년 내내 작동되는 배수에 대해서는 1월부터 3월 중순까지, 정기적으로 작동되는 배수에 대해서는 배수의 흐름이 최대치수(여름철 치수)의 0.1까지 감소되거나 배수로가 들어가 있는 깊이의 0.9가 되는 도상이 동결되는 기간까지이다.

제2결정적 시기는 10월 초로 정한다.

5.5 배수로를 설치할 때 기준 TU33-5-80에 따라 여과파이프나 필터를 포함한 관통파이프를 사용한다. Tapping line으로써 고무 가스켓이나 플라스틱 소켓으로 연결된 석면시멘트 stand 송수관을 기준 GOST539-80에 따라 사용할 것을 추천한다. 이동하중 (moving load) 구간에서 Tapping line 설치 시 스틸파이프를 사용할 것을 추천한다.

배수로 대로 50-70m간격으로 설치되는 맨홀(inspection chamber)은 밖에서는 단열재로 처리되고, 내부에서는 나무캡으로 분리되어 있는 보온시설로 반변형적 기능을 가지고 있는 철근 콘크리트구조로 구성되어야 한다. 맨홀에 파이프라인을 투입하는 것은 고무씰 gap 방식으로 처리되어 이루어진다.

오픈식 드레인 파이프라인을 현장토질로 감싸놓는다. 파이프라인의 보온 샤프트는 노반이 동결되는 계산상의 깊이보다 긴 반지름(파이프라인 중앙에서 측정됨)의 둘레 대로 설계한다. 샤프트의 끝 부분은 나무받침이나 slag concrete 받침대로 마감처리 된다. 물 배수는 깊이 1.5m 이상의 오픈되어 있는 배수로로 이루어진다. 이때 파이프 밑 부분에서 배수로바닥까지의 길이는 0.5m 이상이 되어야 한다. 합리적인 열 계산으로 방출 cap구조에는 샤프트와 받침벽의 표면 단열과 벽 안쪽 단열, 파이프라인에 단열재를 포설하는 과정을 넣는다.

클로즈식 배수방출은 돌여과재로 채우고 단열재로 덮는 방식의 도랑이다. 도랑의 단면은 사다리꼴 형태다. 도랑을 채울 때 도랑 중앙부분에는 직경 10-15cm 호박돌을, 끝 부분으로 갈수록 자갈과 같은 사이즈의 돌멩이로 채운다.

## 6. 작업의 조직 및 기본 규칙

6.1 작업은 MPS(도로시설관리부)에서 승인되고 전형적인 기술과정을 기초로 작성된 working technological process에 따라 이루어진다.

6.2 working technological process은 수리현장에 대한 technological project의 일부분이 되겠다.

크리프와 길의 처짐을 제거하는 작업은 working technological process와 typical technological process의 일부분이 되어야 한다.

technological process에는 크리프와 선로의 처짐 현상을 제거하기 위한 작업의 특징을 고려한다.

6.3 작업을 위해 자갈선별기계, 도로용 크레인, 쟁기, 전기밸러스터, hopper batcher, dumpcar, 불도저, motor-driven grader, 포크레인, 배수로전용 정비 등이다.

반변형적 시설을 설치하기 위한 작업은 준비작업, 기본작업, 최종작업으로 나눈다.

준비작업에는 커플링과 tapping라인을 포함한 반변형적 구조물을 배치 및 고정작업을 실시한다. 폼플라스틱, 방수필름, 부직포로 커버를 할 경우에는 자재를 꺼내 놓을 자리를 지정한다. 부직포를 필요한 사이즈별로 스트립으로 잘라 작업을 준비한다. 폼플라스틱 판을 필요한 사이즈로 재단하고 블록 안에 설치하고, 마킹하고 순서대로 배치시킨다.

기본작업에 들어가기 전에 레벨을 이용해 레일침목을 제거하는 작업과 동시에 설계 시 설정된 노반 깊이를 관리하기 위해서 10m마다 고정된 지점에 침목 윗부분에 해당 표시를 한다. 해치는 길을 연결시키기 위해 고정된 섹션에 제 2선로나 임시로 설치된 철로와 연결해 작업을 실시한다.

6.4 반변형적 구조물 설치를 위한 기본 작업은 철도 상부 부분을 수리를 병행하면서 실시하거나 별도로 진행시킨다.

6.5 자갈 선별기계를 이용할 경우에는 폼플라스틱이나 부직포로 된 커버를 자갈 선별 과정에서 설치한다.

중합체 재료로 커버를 설치하는 것은 노반을 깊은 곳까지 클리닝하고 밸러스트층을 제거하는 작업까지 포함한 완전분해수리 또는 부분분해수리에 대한 technological process의 일부분이 된다. 자갈 deep cleaning 작업은 PM-80,

PM-76, SHOM-6, SCHU-800, SCH-600, UM 또는 SHOM-6P와 같은 자갈선별기를 이용해 이루어진다.

ballast층의 이물질을 청소하기 위해서 체인을 이용한 폼플라스틱 설치 시 침목 밑부분에서 50cm 밑으로, 부직포 설치 시 40cm 밑으로 한 지점까지 층을 잘라 낸다. 제거작업은 길가 방향으로 경사 0.04되게 한다. 자재를 넣은 후 선별된 자갈을 공급해 준다. 걸러낸 이물질은 10대의 반vagon으로 되어 있는 열차에 실어 밖으로 반출한다.

선로는 장비 VPR-02로 수정하고, 선로 안정화는 DSP 안정기로 잡아주고, 밸러스트 프리즘 맨드릴은 고속 맨드릴기계로 한다.

마감처리는 전형적인 기술구도로 이루어진다. SCHU-800 장비를 섰을 경우에는 부직포를 설치할 후 모래로 된 보호층(ballast패드)을 두께 20cm까지 올릴 수 있다. 위에 선별된 자갈을 깐다.

커버를 설치하기 위해 레일침목을 제거하고 작업을 실시할 경우에 설계 시 지정한 위치까지 기존의 ballast 자재를 잘라내고 기초를 설계한다. Two-way 구간에서는 두번째 길을 사용할 수 있으면 스노브레이커 대패장비를 이용해 여러 번 왔다갔다한다. 한 쪽에서 준비된 피트에 탭핑할 수 있도록 대패를 이용해 작업을 벌이고, 다른 쪽에서는 (구간 끝 부분)불도저를 이용해 작업을 실시한다. 열차를 통과시키기 위해서 레일침목이 서로 맞도록 탭핑(tapping)은 추가 경사가 20% 미만이 되어야 한다. 선로가 하나만 있거나 선로 2개 중 다른 선로를  사용하지 못할 경우에는 노반을 불도저를 이용하거나 고성능장비를 이용해 작업한다. 장비의 수와 작업시간은 ballast층 제거, 설계 용량과 장비성능에 따라 달라질 수 있다.

레일침목을 폼플라스틱 판(블록), 방수필름 또는 부직포 바로 위에 배치하는데 자재가 뒤집혀서는 안된다. 길을 깔아놓은 ballast층에 전기밸러스터나 다른 장비를 이용해 부설한다. Lining 작업은 ballast층이 침목과 커버 사이에 두께 20cm 이상 들어 올려 있을 때 라이닝 장비를 이용해 실시한다. 두께가 20cm미만일 경우에는 커버가 파손이 될 가능성이 높아 지정 장비들의 사용을 허용하지 않는다.

삽입패드나 복합패드 설치 또는 도상을 설계할 경우에 레일침목을 분해하거나 이동(작업기간 동안 임시시설을 할 경우)시켜 노반을 제거한 후 피트를  배수성 노반이나 크리프되지 않는 자재로 채운다. 레일침목을 설치하거나 제자리에 돌려 놓는다. 레일침목 설치 후 자재를 추가로 깔며 설계 시 지정 두께 높이 까지 선로를 부

설한다. 선로를 부설할 때마다 레일 라이닝 작업을 실시한다. 그 다음에 ballast를 깔고 선로를 올려 놓은 후 노반 상면과 측면에서 수정한다.

6.7 최종 작업 시 선로의 가장자리를 설계하고 제거된 노반을 정리하고 배수로를 만든다.

6.8 반변형적 구조로부터 물을 탭핑하기 위한 세로배수 설치 작업은 배수설치에 대한 기술 지침서에 따라 장비를 이용해 실시한다.

배수로를 만들거나 경사를 설계하고 ballast자재를 치우기 위해서 배수로 클리닝 장비SZP-600을 사용한다.

6.9 반변형적 구조물 설치에 대한 기술공정(technological process)상 다음과 같은 서류를 작성한다.

-작업팀 인원 구성, 필요한 공구와 장비 리스트, 노동비용과 노동자 수; 각 공정별 장비운영시기; work train 구도(열차길이 표시), 작품일정, 공정 정의, 일수별 작업배분리스트, 담당자 표시

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 미래철도기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.