건설핵심기술연구개발사업 최종 보고서

T6032172

GOVP1201010363

R&D/06건설핵심 D03

시베리아 동토지역 진출을 위한 미래건설기술 개발

- 동토의 공학적 특성분석과 Pipe line의 설계 · 시공기술을 중심으로 -

2009. 12.

주관연구기관 / 한국건설기술연구원
협동연구기관 / (주)서영엔지니어링
참 여 기 업 / (주)동 아 기 술 공 사
위탁연구기관 / 컴 텍 리 서 치
D A L N I I S

국 토 해 양 부
한국건설교통기술평가원

Land Transport and Maritime R&D Report

제 출 문

국토해양부장관(한국건설교통기술평가원장) 귀하

이 보고서를 "시베리아 동토지역 진출을 위한 미래건설기술개발" 과제의 보고서로 제출합니다.

2009. 12.

주관연구기관명 : 한국건설기술연구원
주관연구책임자 : 김 영 석
연 구 원 : 강 재 모
연 구 원 : 홍 승 서
연 구 원 : 김 학 승
협동연구기관명 : (주)서영엔지니어링
협동연구책임자 : 오 민 균
연 구 원 : 한 신 인
연 구 원 : 정 윤 원
참 여 기 업 명 : (주)동아기술공사
참여기업책임자 : 허 승 범
연 구 원 : 김 현 민
위탁연구기관명 : 컴택리서치
위탁연구책임자 : 김 광 진
연 구 원 : 최 미 정
위탁연구기관명 : 러시아극동건설기술연구소
위탁연구책임자 : Abbasov.Pulat Abbsovich

보 고 서 요 약 서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>06건설핵심
D03</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td colspan="2">2008.06.17~
2009.12.16</td><td>단 계 구 분</td><td>3차/3차</td></tr>
<tr><td>연 구 사 업 명</td><td colspan="6">건설핵심기술 연구개발 사업</td></tr>
<tr><td>연 구 과 제 명</td><td colspan="6">시베리아 동토지역 진출을 위한 미래건설기술개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">김 영 석</td><td>해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 : 23명
내부 : 17명
외부 : 6명</td><td>해당단계
연 구 비</td><td colspan="2">정부 :
544,000천원
기업 :
568,600천원
계 :
1,112,600천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 26명
내부 : 17명
외부 : 9명</td><td>총연구비</td><td colspan="2">정부 :
880,000천원
기업 :
760,000천원
계 :
1,640,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">한국건설기술연구원
지반연구실</td><td>참여기업명</td><td colspan="3">(주)서영엔지니어링
(주)동아기술공사</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="6">상대국명 : 러시아 상대국연구기관명 : DALNIIS</td></tr>
<tr><td rowspan="2">위 탁 연 구</td><td colspan="6">연구기관명 : 컴택리서치 연구책임자 : 김광진</td></tr>
<tr><td colspan="6">연구기관명 : DALNIIS 연구책임자 : Abbasov.Pulat Abbsovich</td></tr>
<tr><td colspan="5">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="7">o 시베리아 지역 지질특성 및 공학적 특성 분석
o 온도변화에 따른 pipe line 거동 파악을 위한 제반 실험 수행
o 영구동토 지역에서 pipe line 거동 수치해석 프로그램 개발
o 러시아 블라디보스토크 현장 실물 실험 완료
o 동토지역 pipe line 설계·시공 매뉴얼 작성</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="5">시베리아, 영구동토, 동상, 파이프라인, 서멀사이펀</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="5">Siberia, Permafrost, Frost heave, Pipe line, Thermal siphon</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제 목

시베리아 동토지역 진출을 위한 미래건설기술 개발
- 동토의 공학적 특성분석과 pipe line의 설계·시공기술을 중심으로 -

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

■ 연구개발의 개요

시베리아 동토지대의 기후, 지형 및 지반의 공학적 특성 규명과 인문 사회, 건설관련 제도, 법률 현황 등을 분석하고, 영구동토지대에서의 석유, 가스 등 에너지 수송 시설(파이프라인 등)의 설계, 시공 등 특수 건설기술을 개발하여 국내 건설업체 및 자원개발업체가 향후 이들 지역에 진출할 수 있도록 미래 건설수요에 대처하고자 함.

■ 연구개발의 필요성

(1) 기술적 측면

시베리아 영구 동토지대에서 에너지 수송용 파이프라인이나 도로, 철도, 교량, 주택 등의 건설 활동을 할 때 표면으로부터 2~3m에 달하는 활동층에서는 겨울철 동상(frost heave)에 의한 융기와 말뚝과 같은 기초에 작용하는 동착력(adfreezing force)으로 구조물이 파손된다. 반면 여름철에는 부분적인 해빙에 의한 부등침하로 구조물이 파손된다.

또한 3m 보다 깊은 영구동토층은 콘크리트에 버금가게 단단해서 백호나 불도져 같은 장비로는 굴착이 불가능하다.

따라서 영구동토지대에서는 특수한 건설기술이 필요하고, 아울러 특수한 건설자재 및 건설장비 운용기술이 필요하다.

동토지대에서 필요한 건설기술을 연구 개발할 경우 그 결과는 국내 건설현장에서도 다양하게 활용된다. 즉, 터널공사나 지반의 깊은 굴착 시 다른 보조공법을 적용할 수 없는 현장에서는 인공동결공법으로 안정화를 시켜야 하는데 이때 시베리아 영구동토지대에 필요한 건설기술 개발과정에서 얻은 동토의 열전도 해석, 동상과 융해 침하 예측 및 대책, 강도와 비파괴 특성 규명, 단열소재 등을 활용할 경우 국내 건설기술의 발전에 크게 기여할 수 있다.

(2) 경제·산업적 측면

러시아는 매장량을 기준으로 석유 세계 8위, 가스 세계 1위의 자원부국이다. 따라서 미국, 일본, 중국, 유럽의 선진국들은 앞 다투어 러시아와 에너지 도입 조약을 체결하는 한편, 석유 · 가스 파이프라인 건설에 필요한 동토지역 특수 건설기술의 개발을 위해 범국가적 차원에서 심혈을 기울이고 있다. 우리 정부는 1996년부터 시베리아에 매장된 가스와 석유를 도입하기 위해 러시아와 수차례의 정상회담을 가졌으며, 2004년 노무현 대통령과 푸틴 러시아 대통령의 정상회담을 통해 한-러 간 가스 협정을 체결하였다.

본 연구를 통하여 시베리아 동토지대의 기후, 지형, 영구동토 지반의 특성을 규명하고, 이 지역의 건설 제도, 건설관련 법령, 기준과 인문사회 환경 및 동토지대에서의 건설장비 운영 요령, 석유나 가스를 수송하기 위한 파이프라인 건설기술을 개발함으로써 미래 국가 에너지 위기에 대응하고 장차 우리 자원개발업체나 건설회사가 이들 지역에 진출하여 활발한 활동을 하기 위한 미래 건설시장을 개척하고자 한다.

(3) 사회·문화적 측면

최근 러시아와 한국 사이에는 예술, 체육, 문화 활동 등의 교류가 이루어지고 있다. 본 연구를 통해 시베리아 지역의 기후, 지리, 인문, 자연, 환경 등을 규명할 경우 이 지역에 대한 문화적 진출과 역사적 고증 등의 영역에서 활발한 발전이 이루어질 것으로 기대된다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

연구내용	연구범위
▪ 영구동토지대 통과 pipe line 부대시설의 설계 및 시공기술 개발 ▪ Thermal siphon의 성능 평가 실험 ▪ Pipe line 설계·시공 매뉴얼 작성	▪ Pipe line 동해방지용 단열재 개발 및 성능 실험
	▪ Pipe line support system 보호용 thermal siphon 성능평가실험
	▪ 시베리아에서의 pipe line 거동현장실험
	▪ Pipe line 설계·시공 매뉴얼 작성

Ⅳ. 연구개발결과

연구목표	주요 연구 성과
○ 러시아 동토지역 건설 활동에 필요한 법규, 제도, 시방 등의 분석 ○ 시베리아 영구동토 지역의 물리 역학적 특성 규명 ○ 동토지역 pipe line 설계·시공 매뉴얼 작성 ○ 영구동토지대 pipe line 보호용 thermal siphon 성능평가 실험	○ 시베리아 지역 지질특성 및 공학적 특성 분석 ○ 온도변화에 따른 pipe line 거동 파악을 위한 제반 실험 수행 ○ 영구동토 지역에서 pipe line 거동 수치해석 프로그램 개발 ○ 러시아 블라디보스토크 현장 실물 실험 완료 ○ 동토지역 pipe line 설계·시공 매뉴얼 작성

V. 연구개발결과의 활용계획

- 시베리아 송유관 2단계 건설공사에 국내 건설업체가 참여하여 외화획득 및 건설기술 진출분야의 다변화 추진.
- 2012년 까지 건설되는 남극 제 2기지 건설시 활용
- 영구동토 개발사업 수행 시 국내 기업의 참여 기회 증대 및 시장 선점 효과.
- 영구동토 건설 진출 시 효율적인 공사현장 관리 및 예산 절감 효과.
- 영구동토(동시베리아, 알래스카, 사할린 등) 에너지 개발 사업에 참여 할 수 있는 기반을 제공하여 국내의 중장기적인 에너지원 확보 가능.
- 영구동토(동시베리아, 알래스카, 사할린 등) 에너지 개발 사업에 참여 하여 국내의 중장기적인 에너지원 확보 가능.
- 영구동토 지역 송유관 건설, 석유 및 천연가스 생산 시설 건설, 해양 석유, 가스 생산 시설 및 수송 시설에 직접 참여 할 경우, 국내 관련 산업, 즉 강관생산, 건설장비, 해양 구조물 건설 등에도 2차적인 효과를 누릴 수 있을 것으로 기대됨.

SUMMARY

Ⅰ. Title

Development of Future Construction Technology for Advancing into Siberia Frozen Ground

Ⅱ. Purposes & Necessities

■ Purposes

- Analysis of construction regulations in the Russian
- Physical characteristics of siberian frozen soils by laboratory tests, program analysis and field test
- Manual on siberian gas and pipe line construction
- Testing product development(efficiency test of thermal siphon to protect pipe line in the permafrost)

■ Necessities

(1) Technology aspect

When the construction work is performed in the siberian permafrost, frost heave and adfreezing force destroy structures, because permafrost layers are harder than concrete. Therefore, construction in the permafrost regions requires special equipments and particular construction methods.

Development of special equipments and construction methods will be widely contributed to domestic construction field.

III. Contents & Scope

Contents	Scope
▪ Analysis of construction regulations of the Russia	▪ Ground and foundation in the permafrost ▪ Construction equipment in the permafrost
▪ Analysis of russian climate and geological characteristics ▪ Analysis of construction equipments in the permafrost	▪ Siberian permafrost
▪ Analysis of physical characteristic of siberian permafrost	▪ Sampling soils in the Vladivostok, Iruktsk and laboratory test - Thermal conductivity test - Unfrozen water contents test - Uniaxial compression test - Sing around ultrasonic test

IV. Results

Results
○ Research of siberian climate and geological characteristics ○ Research of laws and regulations of the Russia ○ Research of Russian oil & gas pipe line project ○ Research of Russian geotechnical theory on the permafrost region ○ Planning about field test of various gas pipe lines in the permafrost

V. Application

- Widening opportunity for domestic construction company to participate in the Siberian gas pipe line project
- Providing fundamental construction technology in the antarctic base construction
- Cutting down Construction expenses in permafrost
- Enlarging opportunity to participate in construction project in the permafrost
- Establishing constituency of joining energy development projet

목 차

제 1 장 서론 ····· 1

제 1 절 연구개발의 배경 및 목적 ····· 1
제 2 절 연구 사업의 내용 및 수행 방법 ····· 2
제 3 절 활용방안 및 파급 효과 ····· 3

제 2 장 시베리아 동토지대의 지리 지질 환경적 특성 ····· 4

제 1 절 시베리아·극동지역의 지리적 특성 ····· 4

1. 동시베리아의 자연 지리적 특징 ····· 5
2. 극동지역의 자연 지리적 특징 ····· 7
3. 극동지역의 기후 조건 ····· 8

제 2 절 시베리아 및 러시아 극동지방의 계절 및 영구동토층의 지질공학적 특성 분석 ····· 10

1. 서 시베리아 ····· 10
1.1 영구동토 퇴적층의 발달 역사와 최근 설빙학적 조건의 메커니즘 ····· 12
1.2 제 4기 이전 퇴적층으로 구성된 삭박평원의 일반적 지질 공학적 특성 ····· 15
1.3 제3기 후기 - 제4기 전기 충적층으로 구성된 삭박-퇴적평원 지역의 지질 공학적 특징 ····· 19
1.4 제 4기 중기 빙하퇴적층으로 구성된 퇴적평원의 지질 공학적 특징 ····· 23
1.5 제 4기 중후반 해양 퇴적층으로 구성된 퇴적평원의 지질 공학적 특징 ····· 26
1.6 제 4기 퇴적층으로 구성된 강 계곡의 지질 공학적 특징 ····· 28
2. 동 시베리아 ····· 30
2.1 영구동토 퇴적층 발달의 역사와 최근 지질설빙학적 조건의 메커니즘 ····· 34
2.2 제 4기 퇴적층 및 형성 조건 ····· 39
3. 극동 지방 ····· 55
3.1 영구동토암 발달의 역사 및 최근 지질설빙학적 조건의 메커니즘 ····· 57
3.2 제 4기 퇴적층: 극동지방 ····· 60
4. 소결론 ····· 69

제 3 장 러시아 천연가스 관련 현황 분석 ····· 70

제 1 절 러시아 천연가스 관련 기관 현황 ····· 70

1. 러시아 연료 에너지부(Ministry of Fuel Energy) ····· 70
2. 러시아 천연 자원부(MINISTRY OF NATURAL RESOURCES) ····· 72
3. 가스프롬(GAZPROM) ····· 73
   3.1 가스프롬의 조직, 기능 및 지분 ····· 73
   3.2 가스프롬 보유 천연가스 매장량 및 생산 시설현황 ····· 74
4. 시단코 석유(SIDANKO: Siberia and Far East Oil Company) ····· 77

제 2 절 러시아 에너지부문의 외국기업 투자현황 ····· 79

1. 투자 동향 ····· 79
2. 국가별 투자현황 ····· 81

제 3 절 러시아의 석유, 가스 합작 프로젝트 현황 ····· 83

1. 러시아 천연가스 산업구조 ····· 83
   1.1 생산과 수송부문의 산업구조 및 소유구조 ····· 83
   1.2 민영화에 따른 소유구조 ····· 83
   1.3 지역 분배산업의 구조와 소유권 ····· 84
   1.4 천연가스산업의 규제정책 ····· 85
2. 천연가스의 생산 및 설비현황 ····· 86
   2.1 천연가스의 생산 ····· 86
   2.2 천연가스의 수송 ····· 88
   2.3 공급의 안정성 ····· 88
   2.4 저장설비 ····· 89
   2.5 가스의 누출과 손실 ····· 89
   2.6 향후 전망 ····· 90
3. 천연가스 수요 ····· 91
4. 천연가스의 교역 ····· 92
   4.1 구소련 공화국간의 천연가스 교역 ····· 93
   4.2 유럽으로의 수출 ····· 95
   4.3. 향후의 교역 전망 ····· 97
      4.3.1 구 소련 공화국과의 교역 ····· 97

4.3.2 대유럽으로의 수출 전망 ····· 98
5. 러시아 주요 석유 · 가스 프로젝트 추진 현황 ····· 99
5.1 석유 · 가스개발 외국인 투자동향 ····· 99
5.2 사할린 프로젝트 ····· 100
5.3 야말(Yamal) 프로젝트 ····· 102
5.3.1 추진배경 ····· 102
5.3.2 매장 현황 및 개발 여건 ····· 103
5.3.3 Yamal Project의 개요 ····· 104
5.3.4 프로젝트의 투자재원 조달 ····· 106
5.3.5 향후 프로젝트 전망 ····· 107

제 4 장 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 동토 공학적 특성 ····· 109

제 1 절 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 기본 성질 ····· 109

1. 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 기본 성질 ····· 109
1.1 입도분포 ····· 109
1.2 액성 한계와 소성 한계 ····· 110
1.3 비중시험 ····· 111
1.4 다짐시험 ····· 112

제 2 절 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 열전도 특성 ····· 113

1. 흙의 열전도 실험 ····· 113
1.1 개요 ····· 113
1.2 열전도율 측정법 ····· 114
2. 시험장비 ····· 115
3. 실험방법 ····· 116
4. 실험결과 ····· 117

제 3 절 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 부동수분 특성 ····· 120

1. 부동수분 ····· 120
1.1 부동수분의 정의 ····· 120
1.2 부동수분이 존재하는 이유 ····· 120
2. 실험장비 ····· 123

3. 실험방법 ····· 124
4. 실험결과 ····· 126

제 4 절 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 동결압축강도 특성 ····· 129

1. 시험 장치 및 방법 ····· 129
2. 온도변화에 따른 압축강도 실험결과 ····· 131

제 5 절 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 동결인장강도 특성 ····· 135

1. 시험 방법 ····· 135
2. 온도변화에 따른 인장강도 실험결과 ····· 138
3. 압축강도와 인장강도의 비교 ····· 140

제 6 절 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 동결 전단강도 특성 ····· 142

1. 실험장치 및 방법 ····· 142
2. 직접전단실험 결과 ····· 143

제 7 절 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 동결 비파괴 특성 ····· 146

1. 초음파의 특징 ····· 146
   1.1 초음파의 진행특성 ····· 146
   1.2 초음파의 종류와 음속 및 파장 ····· 147
2. 초음파 속도측정방법 ····· 147
   2.1 Pulse-Echo-Overlap 방법 ····· 147
   2.2 Pulse Superposition 방법 ····· 148
   2.3 Sing-Around 방법 ····· 148
   2.4 Phase Adjustment 방법 ····· 148
3. 시험방법 ····· 149
   3.1 측정장비 ····· 149
   3.2 측정원리 ····· 150
   3.3 측정방법 ····· 150
      3.3.1 액체의 초음파 측정 ····· 151
      3.3.2 시료의 종파 측정 ····· 152
      3.3.3 시료의 횡파 측정 ····· 152

3.3.4 시료의 제작 및 측정방법 ····· 154
4. 시험 결과 ····· 154
4.1 온도변화에 따른 kerosene용액의 초음파 속도 ····· 154
4.2 흙시료의 온도변화에 따른 초음파 속도 ····· 154
4.3 동토의 탄성계수(E)와 포아슨비(υ) ····· 157

제 8 절 수직지지대 기초에 작용하는 동착력 특성 ····· 160

1. 실험방법 ····· 160
2. 실험결과 ····· 164

제 9 절 EPS조각 혼합토의 열전도 특성 ····· 166

1. EPS조각 혼합토의 기본 성질 ····· 166
1.1 비중시험 ····· 166
1.2 다짐시험 ····· 167
1.3 투수시험 ····· 168
2. EPS조각 혼합토의 열적 특성 ····· 169
2.1 시험방법 ····· 169
2.2 시험결과 ····· 169

제 10 절 소결론 ····· 170

제 5 장 모형실험에 의한 파이프라인 거동 분석 ····· 171

제 1 절 하바로프스크 흙과 파이프라인의 거동 특성 ····· 171

1. 실험장치 특징 ····· 171
1.1 냉동챔버 ····· 171
1.2 모형실험용 토조 ····· 172
1.3 온도센서 ····· 172
1.4 스트레인게이지 ····· 173
2. 실험방법 ····· 173
3. 실험결과 ····· 175
3.1 위치별 온도변화 ····· 175
3.2 위치별 스트레인 변화 ····· 176

제 2 절 폐타이어 조각 혼합토와 파이프라인의 거동 특성 ····· 178

1. 개요 ····· 178
2. 실험방법 및 결과 ····· 178
2.1 온도분포 변화 ····· 179
2.2 위치별 스트레인 변화 ····· 180

제 3 절 EPS조각 혼합토와 파이프라인의 거동 특성 ····· 181

1. 개요 ····· 181
2. 실험방법 및 결과 ····· 181
2.1 온도분포 변화 ····· 182
2.2 위치별 스트레인 변화 ····· 184
3. 모형토조를 이용한 실험 결과값 비교 ····· 184

제 4 절 폐타이어 혼합토 경제성 평가 ····· 188

1. 경제성 평가 목적 ····· 188
2. 평가 조건 ····· 188
2.1 현장조건 ····· 188
2.2 재료조건 ····· 188
3. 평가 기준 및 내용 ····· 189
3.1 경제성 평가 시 검토 내용 ····· 189
4. 경제성 평가 ····· 190
4.1 수량 산출 ····· 190
4.2 산출 내역서 ····· 191
4.3 산출 근거 ····· 193
4.4 운반 거리표 ····· 197
4.5 실적 공사비 근거 ····· 197
4.6 국도 설계 기준 ····· 200
4.7 물가 자료 ····· 201
5. 경제성 평가 결과 ····· 202

제 6 장 Thermal siphon을 이용한 실내 모형실험 ····· 204

제 1 절 실험용 계측장치 및 thermal siphon ····· 204

1. 개요 ····· 204
2. 실험장치 특징 ····· 204
2.1 냉동챔버 ····· 204
2.2 매설관 시험용 모형토조 ····· 206
2.3 온도센서 ····· 206
2.4 Thermal siphon의 원리 및 설계 ····· 206
3. 실험방법 ····· 208

제 2 절 실험결과 및 분석 ····· 211

1. 깊이에 따른 온도변화 ····· 211
2. 수평방향 거리에 따른 온도변화 ····· 215

제 7 장 Pipe Line용 동상방지용 단열재 개발 ····· 218

제 1 절 동상방지용 단열재 개발 사례조사 ····· 218

1. 폐기물 활용 동상방지재 개발사례 ····· 218
2. 토목섬유를 활용한 동상방지 개발사례 ····· 219

제 2 절 페스티로폼을 활용한 단열효과에 관한 실험적 분석 ····· 221
1. 페스티로폼 조각 혼합토의 동토 공학적 성질 ····· 221
1.1 서론 ····· 221
1.2 사용시료의 기본 특성 ····· 222
1.2.1 페스티로폼 조각 ····· 222
1.2.2 화강풍화토 ····· 222
1.3 페스티로폼 조각 혼합토의 배합비 및 공시체 제작 ····· 223
1.3.1 배합비 결정 ····· 223
1.3.2 양생방법 ····· 223
1.4 페스티로폼 조각 혼합토의 다짐시험 결과 ····· 223
1.4.1 다짐시험 ····· 223

1.4.2 시험결과 ····· 223
1.5 페스티로폼 혼합토의 부동수분시험 ····· 225
1.5.1 시험개요 ····· 225
1.5.2 시험결과 ····· 226
1.6 열팽창 실험 ····· 228
1.6.1 열팽창계수 ····· 228
1.6.2 열팽창계수 측정의의 ····· 229
1.6.3 실험방법 ····· 229
1.6.4 시험결과 ····· 230
1.7 페스티로폼 조각 혼합토의 일축압축강도 특성 ····· 232
1.7.1 시험방법 ····· 232
1.7.2 시험결과 ····· 233
2. 현장 도로 모형실험 ····· 234
2.1 시험목적 ····· 234
2.2 현장지반 조성 및 시험방법 ····· 234
2.3 실험결과 ····· 236
2.3.1 현장 포장체 온도분포 측정결과 ····· 236
2.3.2 동결심도 측정결과 ····· 237
2.3.3 동결지수와 동결심도와의 상관관계 ····· 237

제 8 장 블라디보스토크 현장 파이프라인 거동 실험 ····· 240

제 1 절 현장 조건 ····· 240

1. 현장실험 계획 ····· 240
1.1 매설관에 작용하는 토압 ····· 240
1.2 매설관 변위 ····· 241
1.3 매설관 주변 지반 온도분포 ····· 241
1.4 데이터 수집장치 ····· 242
1.5 Thermal siphon ····· 242

제 2 절 파이프라인 매설 및 계측 장비 설치 ····· 243

1. 부지 선정 및 설치 작업 ····· 243
2. 블라디보스토크 현장모형 실험을 위한 작업 과정 ····· 244

제 3 절 실험 결과 및 분석 ····· 248

1. 매설관내 온도분포 ····· 248
2. 매설관에 작용하는 동결 변위 ····· 250
3. 매설관에 작용하는 토압분포 ····· 252

제 9 장 동결토압을 받는 매설관의 유한요소 해석기법 ····· 254

제 1 절 동결토압을 받는 매설관의 유한요소 해석기법 ····· 254

1. 서론 ····· 254
2. 열전도 해석 ····· 255
2.1 열전도 유한요소식 ····· 255
2.2 상전이와 동결관 모델링 ····· 256
2.3 흙과 매설관의 열 특성 ····· 258
2.3.1 흙의 열특성 ····· 258
2.3.2 매설관에 작용하는 열특성 ····· 261
3. 열응력 해석 ····· 263
3.1 열응력 유한요소식 ····· 263
3.2 동상력 (Frost Heaving Force) 모델링 ····· 264
3.2.1 Step Expansion 모델 ····· 264
3.2.2 Moisture Migration 모델 ····· 265
3.2.3 Porosity Rate 모델 ····· 266
4. 동상시험 열전도 수치해석 ····· 269
4.1 상전이(Phase change) 검증예제 ····· 269
4.2 지하수가 공급되는 지반에 매설된 매설관의 열전도 수치해석 ····· 276
5. 열팽창 모듈 사용자 메뉴얼 ····· 294
6. 열팽창 모듈 Fortran Code ····· 297
7. 소결론 ····· 313

제 2 절 페타이어 혼합토의 열특성 및 동결 팽창률 계산 ····· 315

1. 동결전 페타이어 혼합토 ····· 317
2. 동결후 페타이어 혼합토 ····· 325
2.1 혼합토 최소 체적팽창 (Lower Bound Expansion) ····· 326
2.1.1 혼합토에 체적증가량이 없는 경우 ····· 327

2.1.2 혼합토에 체적증가량이 있는 경우 ····· 330
2.1.3 체적 부동함수비와 중량 부동함수비 관계 ····· 334
2.2 혼합토 최대 체적팽창 (Upper Bound Expansion) ····· 342
2.2.1 체적 부동함수비와 중량 부동함수비 관계 ····· 346
2.3 페타이어 혼합토 밀도 ····· 351
2.4 페타이어 혼합토 체적열용량 ····· 351
2.5 페타이어 혼합토 체적잠열 ····· 352
2.6 페타이어 혼합토 체적열용량, 체적잠열, 체적팽창률 계산순서 요약 ····· 352
3. 혼합토 열용량/동결팽창률 프로그램 ····· 355
4. 동결팽창 실험 및 해석 ····· 365
4.1 동결팽창 실험 ····· 365
4.2 동결팽창 해석 ····· 365
4.3 동결팽창 실험과 해석결과 비교 ····· 366

제 3 절 동결토압 발생 Mechanism ····· 383

1. 일축변형상태에서 동결토압 ····· 383

제 10 장 참고문헌 ····· 388

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발의 배경 및 목적

러시아는 현재 확인 매장량 기준 천연가스 세계 1위, 석유 7위의 세계적인 자원부국이다. 특히, 시베리아·극동지역은 헤아릴 수 없는 많은 천연자원의 보고임에도 불구하고 아직까지 개발이 미진한 상황이다. 최근에 들어 시베리아가 가지는 발전 잠재력에 주목을 하기 시작하였으며, 푸틴 대통령 집권 이후에 세계 에너지 시장의 위상확대를 위해 마련된 국가 에너지 전략 2020(National Energy Strategy)을 통해 동시베리아 및 극동지역의 개발을 가속화 시키고 있다.

2004년 12월에는 러 프라드코프 총리의 내각령으로 동시베리아 송유관 건설계획이 승인되어 2008년까지 1단계 건설이 완료될 예정에 있으며, 궁극적으로 시베리아·극동지역에 매장된 석유 및 가스를 개발하고 동북아지역에 파이프라인과 전력 송전선을 구축하여 아·태지역과 러시아간 에너지통합시스템을 구축한다는 계획을 수립하고 있다.

현재, 중국은 정상외교를 통하여 사할린 가스전의 중국 북동부 지역 PNG공급, 러시아의 Gazprom과 중국의 국영석유가스기업인 CNPC와의 협력협정체결 등 시베리아의 자원 도입에 적극적으로 나서고 있는 상황이며, 일본은 막강한 자금력을 바탕으로 동시베리아 송유관을 나호트카 노선으로 강력추진, 사할린 자원에 전폭적인 투자 등을 통해 자원경쟁에서 우위를 차지하기 위해 노력하고 있는 상황이다.

우리나라의 경우도 1990년도 초 최초로 추진된 야쿠츠크 가스전 개발 사업을 시작으로 이르쿠츠크 코빅타 가스전 개발 사업 참여, 한·러 양국 간 가스분야 협력 협정 체결 등을 통해 시베리아의 자원도입에 나서고 있으며, 현재는 한국 가스수출방안을 포함한 동시베리아 및 극동 통합가스개발계획(UGSS)이 진행 중에 있다.

향후 양국 간의 협력협정이 활성화됨에 따라 시베리아 지역의 자원의존도는 점차 높아질 예정이며, 시베리아 가스파이프라인 개발, 국내 기업의 시베리아 진입등으로 인해 시베리아라는 특수한 환경 하에서의 건설기술에 대한 수요도 점차 커질 것으로 예상된다.

시베리아의 건설 환경을 토목 공학적 측면에서 보면 에너지 수송용 파이프라인이나 도로, 철도, 교량, 주택 등의 건설 활동을 할 때 표면으로부터 2~3m에 달하는 활동층에서는 겨울철 동상(frost heave)에 의한 융기와 말뚝과 같은 기초에 작용하는 동착력(adfreezing force)등의 특이한 현상으로 인해 구조물에 심각한 손상을 미치게 되며, 계절동토의 경우 해빙으로 인한 부등침하가 발생하기도 한다. 3m 이상의 깊은 영구동토층은 그 강도가 콘크리트를 능가해서 일반 굴

착장비로는 작업이 불가능한 경우도 있어 이러한 특수한 환경에 적합한 건설기술 및 건설장비 운용기술은 반드시 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 시베리아 동토지대의 기후, 지형 및 공학적 특성을 규명하고 인문사회, 건설관련 제도, 법률 현황 등을 분석하여 향후 국내 건설업체 및 자원개발업체의 진출 시 활용하도록 하였으며, 영구동토지대에서의 석유, 가스 등 에너지 수송시설(파이프라인)의 설계, 시공 등 특수건설기술을 개발하여 미래 건설 수요에 대처하고자 한다.

제 2 절 연구 사업의 내용 및 수행 방법

본 연구에서는 우선 시베리아 동토의 공학적 특성을 분석하기 위해 블라디보스토크와 하바로프스크에서 흙 시료를 직접 채취하였다. 그리고 한국건설기술연구원으로 운반하여 흙의 기본 성질 시험, 동결시켰을 때의 열전도율시험, 부동수분(unfrozen water)시험, 영하 상태에서 온도변화에 따른 압축강도시험, 인장강도 시험을 실시하였다. 또한 비파괴 특성을 알아보기 위하여 동결 시 온도변화에 따른 초음파속도 시험을 실시하였다.

아울러 영하의 온도와 영상 온도를 자유자재로 조절할 수 있고, 온도 싸이클을 조절할 수 있는 대형냉동챔버 (길이 3m * 폭 2m * 높이 3m) 속에 시베리아에서 채취한 흙으로 지반을 형성하였으며, 그 속에 직경 16cm의 가스파이프를 매설한 후 토압계, strain gauge, 온도센서 설치 및 methylene blue를 매설하여 대기 온도 저하에 따른 매설관에 작용하는 토압의 변화, 매설관에 작용하는 응력변화, 지중 온도분포, 동결심도 변화를 실험하였다.

그리고 대형냉동챔버 속에 시베리아 흙과 폐타이어조각을 50대 50의 비율 및 85대 15의 비율로 섞어 지반을 형성한 후 각각의 경우에 대하여 역시 온도 저하에 따른 매설관에 작용하는 토압의 변화, 응력의 변화, 지중 온도의 변화, 동결심도 변화 및 폐타이어 조각 혼합에 따른 단열효과, 토압경감효과, 응력변화 등을 실험하였다.

아울러 러시아 블라디보스토크에 위치한 극동건설기술연구소 부지에 매설관을 설치하고, 현장 흙과 EPS 조각을 이용해 각각 되메우기를 하였다. 각각의 경우에 대해 토압계와 스트레인 게이지, 온도센서 등을 이용하여 되메움 재료에 따른 매설관의 거동을 분석하고, 이와 동시에 매설관 주변부에 thermal siphon을 설치하여 그 적용성도 검토하였다.

본 연구에서는 또한 프로그램 해석을 통해 지반의 온도 변화시 가스관에 작용하는 응력과 토압변화 및 폐타이어 조각 혼합에 따른 단열효과, 토압경감효과를 검증, 실험결과와 비교하였다.

마지막으로 러시아 지역의 관련 지침과 법제, 시방 등을 준용하여 "영구동토 지역에서의 파이프라인 설계·시공 매뉴얼"과 "시베리아 영구동토 지역 파이프라인 기초 설계 매뉴얼"을 작성하였다.

제 3 절 활용방안 및 파급 효과

국내 건설업체인 계룡건설이 이미 시베리아의 하바로프스크에서 현지법인을 설립하고, 주상복합건물을 건설하기 시작하였으며, 경남기업은 사할린에서 석유개발 사업을 착수하였다. 또한 카자흐스탄이나 우즈베키스탄에서도 한국 석유공사나 한국가스공사가 유전 및 가스정 개발 사업을 추진하고 있어 향후 국내 자원개발업체 및 건설회사의 시베리아 등 동토국가 진출은 더욱 활발해 질 것으로 판단된다. 따라서 본 연구 결과는 이들 국내 업체들이 시베리아나 구소련 연합국가의 동토지역 진출 시 유용하게 활용할 수 있을 것으로 사료되며, 국내 겨울철 매설관 공사, 도로 동상방지층 공사 및 개성공단 등 북한 개발 사업에서도 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

제 2 장 시베리아 동토지대의 지리 지질 환경적 특성

제 1 절 시베리아·극동지역의 지리적 특성

넓은 의미의 개념으로서 시베리아는 동양과 서양을 구분하는 우랄산맥(혹은 오비 강)의 동쪽 지역에서부터 캄차트카 반도, 사할린 섬과 쿠릴열도를 포함한 북태평양까지의 광대한 지역을 의미한다. 시베리아의 자연 지리적 경계선 북쪽은 북극해(서쪽부터 카라 해, 랍테프 해, 동시베리아해, 추코트 해)와 맞닿고 있으며, 동쪽은 북태평양(베링 해, 오호츠크 해,동해)과 경계를 이루고 있다. 시베리아의 남쪽은 세계의 지붕인 파미르고원, 천산산맥, 사얀산맥, 알타이산맥, 야블로노비산맥, 스타노보이산맥, 주그주르산맥 등의 높은 산맥과 늪지대와 경계를 이르고 있다. 시베리아 육상경계선은 남쪽에 카자흐스탄(러시아와 총국경선 6,846km), 몽골(3,441km), 중국(남동쪽 3,605km, 남쪽 40km), 그리고 북한(19km)과 맞닿고 있다. 시베리아의 서쪽 경계선은 높지 않은 산과 구릉지를 형성하고 있으며, 동서양을 구분하는 우랄산맥과 맞닿고 있다.

넓은 의미의 시베리아는 시베리아의 북극해(랍테프 해)로 흘러 들어가는 레나 강을 중심으로 서쪽은 서시베리아, 레나 강의 동쪽부터 태평양까지 지역을 동시베리아라고 말한다. 일반적으로 시베리아라는 곳은 동시베리아를 의미한다. 구소련과 러시아연방의 경제지역 구분과 공식 통계에 의하면 시베리아는 세 지역으로, 서시베리아와 동시베리아 그리고 극동지역으로 구분된다. 북극해(카라 해)로 흘러 들어가는 예니세이 강의 서쪽부터 우랄산맥(혹은 오비 강)사이의 지역을 서시베리아로 칭하고 있으며, 예니세이 강부터 레나 강의 사이를 동시베리아라고 말한다. 극동지역은 레나 강의 동쪽부터 태평양에 이르는 넓은 영토와 사할린 섬과 쿠릴열도를 포함하고 있다.

시베리아·극동지역은 러시아의 최북단과 최동단 지점을 갖고 있다. 러시아 대륙에서 가장 북쪽 끝은 동시베리아 타이미르 반도에 위치한 북위 77도 43부, 동경 104도 18부 첼류스킨 곶에 위치하고 있으며, 북극해 섬, 제믈랴 프란짜-이오시파 군도의 루돌파 섬의 최북단의 위도는 북위 81도 5부까지 펼쳐져 있다. 동쪽지역에서 대륙의 끝은 데쥬네프 곶으로 서경 169도 40부와 북위 66도 5부 지점이며, 이보다 먼 동쪽 끝은 미국과 국경을 이루고 있는 베링해협의 라트마노프 섬에 위치하고 있다. 추코트카 반도의 일부지역과 브랑겔랴 섬 일대는 서반구에 위치하고 있다. 러시아는 지리적으로 11시간 격차의 시간대(실제적으로는 10시간)를 이루고 있다. 주민이 적은 지역과 영해지역에서는 자오선에 따른 시간대가 구성되며, 인구조밀 지역에서는 자치공화국, 변강주, 주의 행정적 경계에 따라 운용된다.

1. 동시베리아의 자연 지리적 특징

동시베리아지역은 옛 소련지역 중에서 가장 큰 면적을 지녔으나 야쿠티야 자치공화국(현재는 사하 공화국)이 극동지역에 편입되면서 극동지역에 이어 제2위를 차지하고 있다. 동시베리아지역은 서시베리아와 극동지역 사이에 북위 50도와 70도에 위치하고 있다. 남북으로는 몽골과 중국의 만주지역에서부터 북극해의 랍테프 해까지 약 2,000~2,500km의 길이를 갖고 있다. 동시베리아의 자연환경은 수자원이 풍부한 수천 킬로미터의 하천, 끝없는 타이가지대와 수많은 산악과 고원지대, 넓은 평원의 툰드라지대를 형성하고 있다. 서시베리아와는 달리 동시베리아의 대부분은 높은 산악지대와 고원을 이루고 있으며, 이 지역의 대부분은 중앙시베리아의 고원지대가 차지하고 있다. 이 지역의 3/4은 산악지대를 형성하고 있다.

특히 동시베리아 고원지대에는 넓은 평원이 존재한다. 이곳에 시베리아 플랫폼에 위치한 상층부는 침전에 의해 형성된 산악 암석층으로 이루어졌다. 동시베리아의 거대한 퉁구스 탄전의 구성은 이 암석층과 관련되어 있다. 시베리아 플렛폼 가장자리에서도 침전에 의해 형성된 암석층에서 거대한 매장량을 지닌 칸스크-아친스크 탄전과 레나 탄전이 위치하고 있다. 시베리아 플랫포옴의 하층부에 있는 캄브리아기 이전의 지층에는 앙가라-일름스크 광산 등 대규모의 철광석과 금을 비롯한 광물들이 매장되어 있다. 동시베리아 평원은 동시베리아 남쪽과 동쪽에 위치한 산맥들인 예니세이 구릉지, 사얀산맥과 바이칼 호수지역의 산맥들에 의해 둘러싸여 있다.

동시베리아의 기후는 온도의 진폭이 강한 극단적인 대륙성기후의 영향을 받고 있다. 그러므로 겨울에는 매우 추우며, 여름에는 더운 편이다(표 2.1.1 참조).

동시베리아 면적의 약 1/4은 북극권 지역을 형성하고 있다. 위도의 방향에 따라 자연지대와 식생대가 바뀌어진다. 북쪽지역으로부터 북극 사막지대, 툰드라지대, 타이가지대(가장 넓은 자연지대)를 형성하고 있으며, 남쪽지역에서는 삼림스텝지대와 스텝지대가 교차하고 있다. 동시베리아지역은 삼림 보유량 면에서 러시아 경제지역 중에서 제1위를 기록하고 있다.

표 2.1.1 시베리아·극동지역의 평균기온 및 강우량

경제지역	평균기온(도)						강우량(mm)					
	1997년		1998년		1999년		1997년		1998년		1999년	
	1월	7월	1월	7월	1월	7월	1월	7월	1월	7월	1월	7월
1. 서시베리아지역			-22.1	18.4					16	55		
-알타이공화국	-12.6	18.6	-23.5	22.0	-15.1	22.9	19	41	5	39	39	22
-알타이변강주	-12.6	18.6	-19.8	16.7	-15.3	21.6	19	41	7	91	27	43
-케메로보주	-10.9	17.5	-21.8	20.7	-16.6	21.2	35	42	4	38	41	47
-노보시비르스크주	-14.0	17.3	-24.0	22.0	-17.3	21.8	33	40	3	30	31	25
-옴스크주	-17.0	15.7	-23.4	23.3	-16.2	21.2	39	35	5	38	23	38
-톰스크주	-19.5	15.3	-22.6	20.4	-21.8	20.3	35	77	15	21	36	40
-튜멘주	-26.3	11.3	-17.6	22.5	-24.5	15.1	25	53	11	91	32	61
-한티-만시자치구			-18.7	20.3	-23.1	17.9			30	79	40	55
-야말로-네네츠자치구			-23.1	13.0	-29.0	10.6			24	54	21	52
2. 동시베리아지역			-28.2	15.2					14	67		
-부랴티야공화국	-24.7	16.7	-25.5	17.6	-23.7	18.0	4	80	6	160	6	89
-투바공화국	-25.2	15.8	-22.1	19.1	-25.0	20.4	10	61	8	48	13	33
-하카시야공화국	-18.8	15.9	-19.5	19.0	-16.8	20.2	22	73	9	57	23	47
-크라스노야르스크변강주	-18.3	15.0	-22.0	18.3	-22.9	18.9	25	124	25	38	23	41
-타이미르자치구			-28.2	6.1	-26.9	18.3			16	16	7	40
-에벤크자치구			-36.8	16.7	-36.7	18.9			19	10	14	34
-이르쿠츠크주	-22.4	16.5	-31.4	17.7	-24.4	17.8	13	67	17	105	14	73
-우스트-오르딘스크 부랴티야자치구			-31.4	17.7	-24.4	17.8			17	105	14	73
-치타주	-29.1	17.4	-28.3	18.8	-25.8	18.8	5	70	4	152	4	83
-아긴스크부랴티야자치구			-28.3	18.8	-25.8	18.8			4	152	4	83
3. 극동지역			-29.9	14.6					18	44		
-사하(야쿠티야)공화국	-35.1	16.7	-35.6	14.5	-33.7	17.9	9	55	9	38	11	44
-유대인자치주	-19.1	18.5	-25.8	18.8	-20.8	20.2	9	171	24	18	26	88
-추코트카자치구	-24.9	10.3	-26.0	9.1	-27.7	10.3	14	34	15	29	8	45
-연해변강주	-15.6	21.0	-18.0	17.9	-14.5	20.7	24	64	10	134	11	93
-하바로프스크변강주	-19.1	18.5	-25.8	18.8	-20.8	20.2	23	98	24	18	29	77
-아무르주	-25.5	19.5	-30.2	20.8	-24.6	21.4	12	75	5	76	14	93
-캄차트카주	-7.6	12.4	-13.7	13.1	-10.3	11.7	39	55	42	52	36	79
-코랴크자치구			-13.7	13.1	-10.3	11.7			42	52	36	79
-마가단주	-26.9	11.5	-26.0	13.4	-28.2	11.0	9	53	19	71	10	62
-사할린주	-10.6	13.9	-13.3	14.2	-13.4	14.2	47	72	38	32	52	104

동시베리아지역은 이르쿠츠크주 북부 코빅친스코예 천연가스전 등을 비롯한 풍부한 연료자원 이외에도 다양한 유용광물, 즉 철광, 구리, 니켈, 등 여러 종류의 금속성분을 지닌 광석, 금, 운모, 흑연 등이 거대한 규모로 매장되어 있다. 그러나 혹독한 기후, 영구동토지대와 1천 미터를 상회하는 두께와 광산의 분산 등으로 채굴조건은 매우 열악한 상황이다. 또한 동시베리아지역에서는 수자원과 거대한 수력발전자원 잠재력을 지니고 있다. 특히 예니세이 강은 풍부한 수자원을 지니고 있다. 예니세이 강과 그 지류인 앙가라 강 주변에는 러시아에서 가장 큰 수력발전소가 건설됐다. '시베리아의 진주'라고 불리는 바이칼 호수는 세계에서 아홉 번째로 크며, 그 면적은 31,500km^{2}에 이르고 있다. 이 호수의 남북 길이는 636km이며, 가장 넓은 동서길이는 80km이며, 수심은 적어도 600m이며, 제일 깊은 곳은 1,637m로서 세계에서 가장 깊은 호수이다. 이 호수는

지표면에 있는 세계 담수자원의 20%, 즉 2만 3천㎢를 보유하고 있는 것으로 알려져 있다. 333개의 하천이 유입되는 바이칼 호수는 유일하게 남서쪽의 앙가라 강으로 유출, 예니세이 강의 지류와 연결되면서 북극해의 랍테프 해로 유출된다.

2. 극동지역의 자연 지리적 특징

극동지역은 러시아연방의 경제지역 구분 중에서 가장 큰 면적을 지니고 있다. 극동지역은 러시아연방의 전체 태평양 해안에서부터 북동쪽의 베링해까지 펼쳐져 있다. 북극양에 위치한 노보시비르스키예 섬, 추코트해의 브랑겔랴 섬, 베링해의 코만도르스키예 제도, 북태평양의 사할린 섬과 쿠릴열도를 포함하고 있다. 극동지역은 북한과 국경을 맞대고 있는 포시에트 만에서부터 미국의 알래스카 해양 국경선 사이까지 광활한 지역으로 세계 육지면적의 1/20을 차지하고 있다. 극동지역 남부에서 북부까지 위도 격차는 28도이며, 남서쪽에서부터 북동부지역까지, 즉 북한의 국경선부터 베링해까지 무려 4,500km나 된다.

극동지역의 북쪽은 북극양의 랍테프 해, 동시베리아 해, 추코트 해와 경계를 이루고 있다.

야쿠티야의 중앙지역은 대평원을 이루고 있으며, 북극 해안선을 따라 넓은 저지대를 형성하고 있다. 그 이외의 극동지역 대부분은 산악지형을 구성하고 있으며, 보통 높이의 산들로 형성되어 있다. 극동지역의 산맥으로는 스타노보이 산맥, 체르스키 산맥, 베르호얀스크 산맥, 시호테알린 산맥 등이 있다. 극동의 동쪽지역에는 낮은 계곡과 함께 이루어진 해양의 돌출부는 왕성한 습곡형성체계로 이어진다. 러시아의 영토 중에서 극동 지역이 가장 왕성한 지진과 활화산이 활동하고 있다. 캄차트카 반도와 쿠릴열도에서 20개의 활화산이 작동하고 있다. 캄차트카 반도에 위치한 클류체프스카야 소프카 산은 극동지역에서 가장 높은 산으로 그 정상은 4,760m이며 활화산 중의 하나이다.

극동지역에서 거대한 하천은 레나 강과 아무르 강과 그 지류, 콜리마강, 인디기르카 강, 야나 강 등을 들 수 있다. 특히 아무르 강과 그 지류들은 풍부한 수자원을 보유하고 있다.

북극지대까지 펼쳐져 있는 극동의 북부지역의 면적은 거대하며 기후는 차가운 대륙성기후의 영향을 받고 있으며, 남부지역 태평양연안에 위치한 연해 변강주와 캄차트카 주와 사할린 주의 기후는 적당한 몬순기후의 영향을 받고 있다. 극동지역의 대부분은 지나치게 혹독한 대륙성기후이다. 겨울의 특징은 시베리아 고기압의 영향을 받아 평온(무풍)하고 청명하며, 얼어붙은 듯한 추위를 동반하고 있다. 여름은 덥고 건조하나 그 기간은 짧은 편이다. 야쿠티야(사하)공화국에 위치한 베르호얀스크와 오미야콘 지역은 북반구에서 가장 추운 지역으로 영하 72도를 기록하고

있다(표 2.1.2 참조).

극동지역에는 풍부한 삼림지대가 존재한다. 대부분의 삼림은 산악지대에 있기 때문에 벌채에 어려움이 있다. 타이가지대에는 많은 모피 짐승들이 서식하고 있다. 아무르 강의 중류지역을 따라 비옥한 토지의 스텝지대와 삼림스텝지대의 중간지대가 형성되어 있다.

극동지역은 유용한 광물들의 보고이다. 레나 광산과 남부 야쿠티야 석탄산지, 사할린 주에서의 석유와 가스와 석탄, 야쿠티야에 천연가스, 알단강 주변에 철광석 산지가 있다. 또한 비철금속과 희귀 광물, 금과 다이아몬드는 미르니 시와 야쿠티야 공화국에 풍부하게 매장되어 있다.

3. 극동지역의 기후 조건

극동은 태평양 분수령을 중심으로 동쪽은 몬순기후지구, 서쪽은 대륙성기후지구로 구분된다. 몬순의 영향을 받고 있는 이 지역은 겨울에는 대륙에서 발생하는 고기압부에서 알류산 열도 방면의 저기압부를 향해 건조한 찬바람이 분다. 여름이 되면 태평양 방면에서 방생한 여름철 몬순이 이 지역에 밀려온다. 여름과 가을에 걸쳐 오는 태풍은 동해연안과 쿠릴열도, 사할린, 캄차카 등지에 폭풍우를 몰고 온다.

대륙성기후의 영향을 받고 있는 태평양분수령 서쪽지역은 겨울의 혹한과 기온의 일교차 및 연교차가 격심하고 강수량이 적다. 겨울의 경우 대륙성기후 영향을 받고 있는 야쿠트 사하 자치공화국의 베르호얀스크나 오이마콘 지역은 가장 추운지역으로 과거 최저온도는 영하 69.8도까지 떨어지기도 한다. 한편 극동남부의 내륙지역인 아무르주의 경우는 1월 평균기온이 영하 25도나 된다. 겨울에 가장 따뜻한 지역은 연해 남부지방으로 스이훈분지의 경우 1월 평균기온이 영하 11도이다. 그러나 남부에서는 산지는 영하 37~40도로 춥다.

극동지역의 봄가을은 아주 짧은데 남부 내륙부에서는 연안부나 반도 도서 지방보다 기온상승이 빨라 사할린, 천도 캄차카보다 20~25일 먼저 봄이 온다. 반도 도서지방과 북부지방은 5월초가지 영하의 날씨가 계속되고 5월말가지도 눈이 내릴 때가 있다

여름의 경우 남부의 대륙평야에서는 비교적 건조한 맑은 날씨가 계속되고 기온도 30도를 넘어선다. 북부 및 해안부는 한냉 다습한 기후를 보여 쌀쌀하고 흐린 날씨가 많다. 캄차카 내륙이나 대륙붕의 분지에서는 다른 북부지역보다는 따뜻해 7월 평균 기온이 15℃를 넘어선다.

표 2.1.2 극동지역 주요도시의 기온과 강수량

	기 온 (℃)		강수량(mm)	
	1월	7월	1월	7월
하바로프스크	-24.3	26.4	15	144
블라디보스톡	-16.3	21.0	15	124
유지노 사할린스크	-19.1	21.0	48	87
야쿠츠크	-44.5	18.3	9	39
마가단	-19.5	11.5	14	69
페트로파블로프스크 캄챠트키	-10.8	12.4	81	80
블라고베시첸스크	-27.8	20.9	5	134

자료 : World Meteorological Organization(2010)

제 2 절 시베리아 및 러시아 극동지방의 계절 및 영구동토층의 지질공학적 특성 분석

1. 서 시베리아

시베리아와 극동 지방은 아시아에 걸친 러시아 지역으로 우랄 산맥에서 태평양 동쪽 연안까지 뻗어 있다. 광활한 러시아 영토가 지닌 가장 큰 지리적 특징은 서 시베리아, 동 시베리아와 극동이라는 세 개의 독립적인 지역으로 구성되어 있다는 점이다.

서 시베리아는 유라시아에서 가장 거대한 고원이 있다. 총 면적은 350만 km^2 이며 자오선을 따라 길게 뻗어 있다. 남쪽 끝의 세미파라틴스크에서 북쪽 끝의 지단스키 반도까지의 길이는 2,400km이며 고원의 북쪽 끝에 있는 뉴랜드까지는 2,900km 에카테린부르크까지의 거리는 1,900km이다. 이 광대한 영토는 북쪽에 황폐한 툰드라 지대, 최남단에는 건조한 스텝 지역으로 이루어지며 대부분은 타이거 지대이다.

동 시베리아는 서쪽은 예니세이강, 동쪽은 태평양 연안까지 뻗은 분수령, 북쪽은 카라해, 랍테프해, 동시베리아해 등의 바다와 남쪽은 러시아 연방의 남쪽 국경으로 둘러싸여 있다. 이 지역의 면적은 7백만 km^2가 넘는다.

극동지방은 동쪽 끝의 프리베르호얀스크와 베르흐네 - 아무르스크 하향요곡까지 닿은 거대한 러시아 영토를 아우르고 있으며 북쪽에서 동쪽으로 이어진 중생대 암벽, 프리아무리 (아무르강 유역) 및 시호테-알린 산맥, 동아시아 화산성 지역 및 중생대-신생대에 형성된 사할린의 습곡지대, 캄차카, 코르야크, 고지대와 쿠릴섬 등의 광대한 지역을 모두 포괄한다. 현재의 지향사(geosynclinal)는 동 캄차카 지역을 감싸는 쿠릴 산맥과 깊은 골, 그리고 참호 등에 의해 형성되었다고 볼 수 있다. 국경의 바다 (베링해, 오호츠크해, 동해)를 따라 펼쳐진 이 지역은 북서 태평양 변동대에 해당한다.

지질 공학적 관점에서 서 시베리아고원은 통일된 지반을 지니고 있다. 고원을 덮은 중생대에서 신생대까지의 퇴적층과 최근에 생긴 물과 지반 융기는 바로 이 지역의 지각변동에 의해서 생성된 것이다. 이렇게, 시베리아고원의 지반은 지질 공학적 면에서 아주 중요한 특징을 지닌다.

이 지역의 주요 특징은 중생대와 신생대 초반, 즉 신(新) 3기에 걸쳐서 생성되었다는 점이다. 고원의 지반 표면에서는 상대적으로 고른 바닥표면을 지닌 아주 거대한 함몰지가 형성되었으며 북쪽으로 경사지면서 북동쪽에 가파른 마루터기를 형성하였고 남서쪽의 가장자리는 다소 완만한 경사를 이루고 있다. 이 함몰지에는 고원의 두터운 퇴적암 덩어리가 쌓이게 되었다.

이곳은 수년간 지질층이 발전하면서 진흙과 점토암 퇴적물이 쌓였고 거친 입자의 모래와 사암, 석탄을 함유한 조립사암(두께 100~1,400m)이 띠처럼 형성되었으며 실트암, 석회암, 사암이 틈에 낀 육중한 판상의 역청점토(두께 100~1,000m)와 여러 색깔의 석회질 사암과 이회토, 석회암과 육성(陸成) 탄산염 백운암이 100~400m의 두께로 형성되어 있다.

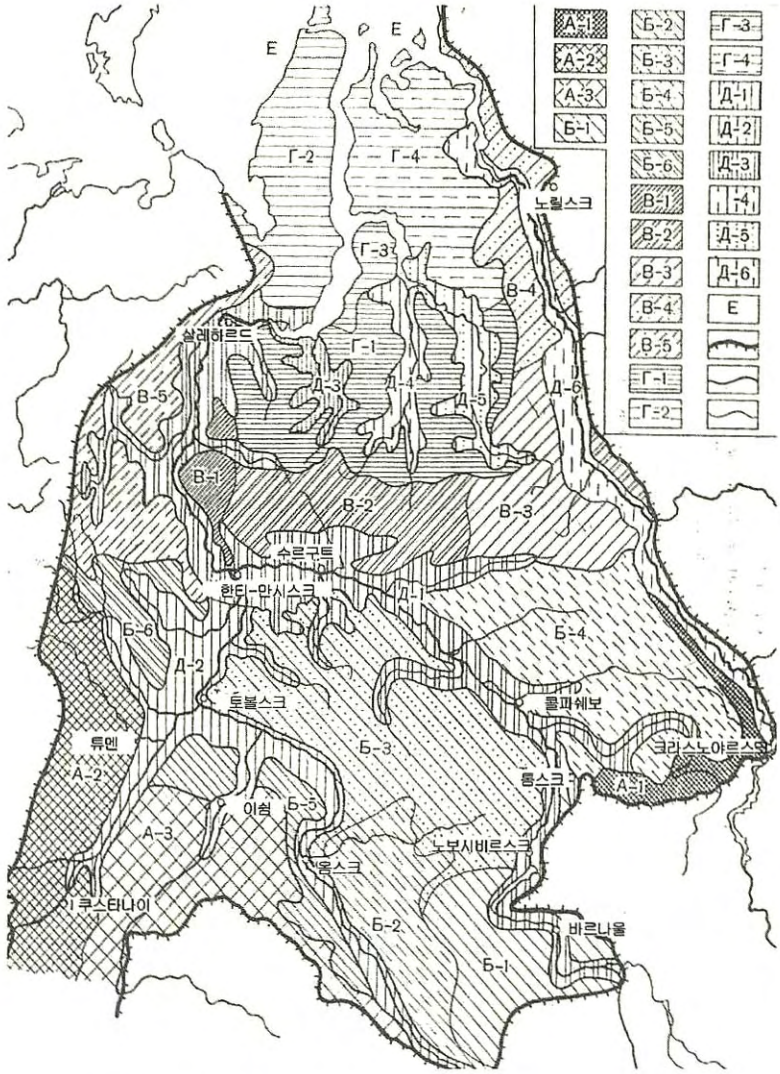


그림 2.2.1 서 시베리아 고원의 지질 공학적 단면도

A-1 투리모-에니세이스카야 지역 A-2 차우랄스카야 지역 A-3 프라이카즈흐스탄스카야 지역
B-1 유즈노-오브스카야 지역 B-2 차노-카룬딘스카야 지역 B-3 이르티쉬스카야 지역
B-4 유즈나야-에니세이스카야 B-5 토볼-이르티쉬스카야 지역 B-6 타브딘스코-콘딘스카야 지역
C-1 오브스코-카짐스카야 지역 C-2 첸트랄노-시비르스카야-우발스카야 지역 C-3 바흐-타조브스카야 지역
C-4 세베로-에니세이스카야 C-5 무치노-시스빈스카야 지역 D-1 세베르나야 오브-에니세이카야 지역
D-2 야말스카야 지역 D-3 타조브스카야 지역 D-4 지단스카야 지역 E-1 오브계곡 E-2 이르티쉬 계곡
E-3 나딤 계곡 E-4 푸르 계곡 E-5 타츠 계곡 E-6 - 에니세이 계곡

엄청난 두께(최대 1,900m)의 회색빛의 육지 퇴적층은 가변적 암석구조를 지니고 육성 퇴적작

용으로 형성된 석회질 실트암, 사암을 지닌 회녹색 조밀 점토의 두께는 200~1,900m이다.

그리 길지 않은 기간이지만(1만 2천년), 완신세기 동안 서 시베리아고원의 지질 공학적 조건은 상당한 발전을 이루어 그 결과 현재의 경제적 발전에 중요한 토대가 되었다. 완신세기 동안 고원의 북쪽에는 모든 강의 유역에 범람원과 두터운(40~60m) 충적층, 광활한 해안 및 석호가 생성되었을 뿐 아니라 최초로 해안단구 및 석호 단구, 범람원이 형성되었다. 대부분의 고원 지역에서는 이탄지가 발달하였으며 두터운 이탄층이 축적되어 특이한 지질 공학적 특징을 보여준다.

지질 공학적 측면에서 완신세가 지닌 가장 특이한 점으로는 광활한 고원에 소택지가 잘 발달되었다는 점이다. 두꺼운 이탄 축적물이 형성된 결과 복합적인 완신세기 호성- 소택지 퇴적물이 만들어졌다. 이들은 특히 서 시베리아 고원의 중부 및 북부 지방에서 기복(起伏)은 그대로 보존하며 범람원 안을 비롯하여 범람원 위의 하성평야와 단구 곳곳에 형성되었다. 이들은 특히 하천 사이의 평원인 타이거 지대에 잘 발달되어 왔다. 이 퇴적물은 대부분 이탄 덩어리로 나타나지만 아주 드물게는 엄청난 양의 화산 분출물을 함유한 실트의 양토로 나타나기도 한다. 툰드라 지역의 이탄 덩어리의 두께는 드물게 2m나 되는 경우도 있지만 대부분은 1m를 넘지 않는다.

1.1 영구동토 퇴적층의 발달 역사와 최근 설빙학적 조건의 메커니즘

서 시베리아 북쪽 지방은 이탄 퇴적층이 빙하를 다량 함유한 영구 동토층의 상태가 된다. 고원의 대부분의 지역에서는 이 퇴적물이 녹아 아주 많은 수분과 공극, 강력한 압축성을 지니게 된다. 계절 동토 또는 영구 동토층인 완신세기에 형성된 소택지는 아주 척박한 땅이다.

서 시베리아 고원의 상단에 형성된 암석의 구성이나 조건은 완신세기 동안 상당한 변화를 겪었다. 이는 다양한 암석이 서로 다른 동결과 융해 과정을 겪고 완신세기의 기후 변화로 인해 고원의 토양이 서로 다른 단계에서 침수와 건조를 겪었기 때문이다. 특히 고원 북부 지역의 영구 동토층의 두께가 상당히 변화하였다. (그림 2.2.2)

계절 동결의 과정과 화학적 풍화작용은 시기와 퇴적물에 따라 다양한 성격의 성층을 만들어 내었다. 사토분의 파괴와 점토분의 융합 때문에 실트 입자로 집적되면 삼림지대와 스텝지대 내의 퇴적물이 용탈되고 황토화된다. 이 결과 특징적 형태의 황토 퇴적물이 만들어지고 침하라는 지질공학적 특성이 나타나게 된다.

최근의 지질환경 변화와 그에 의해 생성된 환경은 서 시베리아 고원 내의 지질 공학적 조건에 많은 영향을 주었다. 이 복합적 원인에는 토양의 동결 및 융해, 다양한 소택지대와 이탄지, 산사태, 암석의 풍화, 마모에 의한 파괴, 강물의 침식작용, 뢰스의 자연 침하, 바람에 의한 퇴적 등이

포함된다. 이 모든 과정은 별다른 제한 없이 복성암으로 이루어진 고원의 상단 지방에 나타난다. 현재 이 암석의 성질은 지역에 따라 다른 형태를 보여서, 공학적 구조의 활동 조건과 활용을 더욱 복잡하게 만들고 있다.

또한 서 시베리아 고원의 북부 지역에서 광범위하게 발달된 극저온 층은 열이 부족해서 발생한 것으로 이곳의 지질 공학적 조건들을 극도로 복잡하게 만들고 있다.

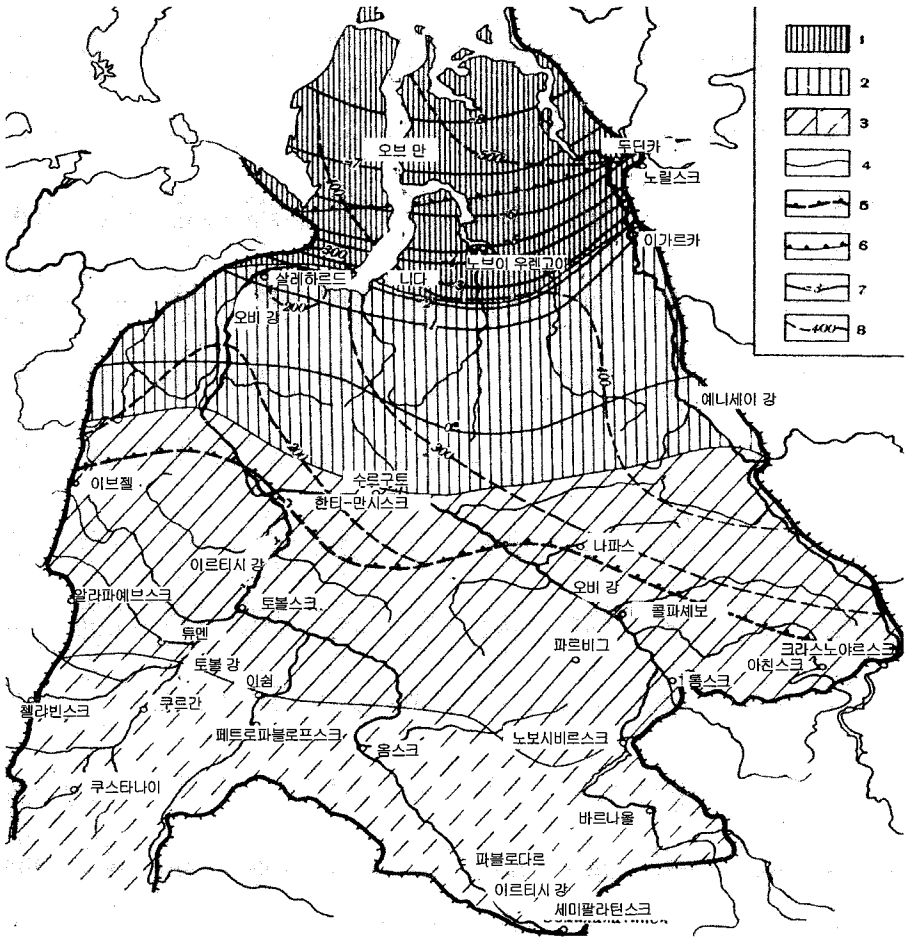


그림 2.2.2 서 시베리아 고원 내 영구동토층의 확산 및 암석의 계절 동결 현상

그림 2.2.2에서 영역 1은 영구동토층이 지속적으로 확산되는 지역이며 영역 2는 영구동토층의 불규칙적 확산을 보여주며 영역 3은 계절동토층의 확산 구역이다. 영역 4는 각 구역과 영구동토층의 소(小)지역 사이의 경계를 나타내고 영역 5는 잔존 동결 두께가 확산되는 남쪽 경계 (경계의 지붕은 약 150~200 m 깊이), 영역 6은 단구 및 하성평야 하단의 동생적 영구동토층 및 충적층 확산의 남쪽 경계, 영역 7은 고산지 영구동토퇴적층의 연평균 온도 등치선(0°는 영구동토 광물 토양의 남쪽 경계선과 일치한다.) 영역 8은 영구동토층의 최대 깊이를 나타내는 선이다.

광범위하게 분포 되어있는 융기지역은 지질 공학적으로 중요한 구간이다. 이곳은 장기간의 동결 과정에서 발달하였고 여러 형태의 기복(起伏)이나 장기간의 융해과정에서 비롯된 열카르스트 지형마다 그 수와 형태가 아주 다양하게 나타난다.

동상(凍上) 과정, 그리고 이로 인해 생긴 극저온의 융기 지역의 발달은 현재도 서 시베리아 고원의 북쪽에서 진행되고 있다. 이 중 이탄 및 점토 지반이 가장 많이 융기한다. 이 때 지반이 융기하는 정도는 수 미터에 이른다. 이때 열카르스트-침식작용에 의해 형성된 평평한 구릉 이탄지는 툰드라 지역 남쪽과 툰드라 삼림지역에 나타나고 대규모의 구릉 이탄지는 북부 타이가 지역에 나타난다.

범람원처럼 퇴적물의 동결이 발생하는 곳에서는 융기둔덕이 잘 발달한다. 특히 최근의 융기둔덕은 평균 연간 온도가 최저 영하 10~20℃에서 영하 30~50℃인 곳까지 확대되었다. 예컨대 영구동토 퇴적층이 지속적으로 확산되는 남부 지방이나 간헐적으로 확산되는 북부 지역 등으로 더 많이 확산되었다. 융기 둔덕의 높이는 3~5m에서 10~15m로 다양하며 전반적으로 남쪽에서 북쪽으로 가면서 더욱 높아진다. 융기 둔덕 기준선의 직경은 100~200 m 이상이며 가끔 타원형으로 발생되는 경우도 있다.

서 시베리아 고원의 북부 지역에는 다각형의 미세기복(起伏)이 잘 발달되어 있다. 이는 지반빙하 파편이 무너지면서 형성되었는데 주로 빙하가 언 양질사토, 양토, 점토, 이탄 덩어리 등으로 구성되어 있으며 약 67~68도 위도 북쪽에 위치하고 있다. 빙하 파편으로 무너진 결과 형성된 균열은 물이나 침수된 흙으로 채울 수 있다. 반복된 쐐기 빙하는 전자에 의해, 빙토 광맥은 후자에 의해 발달된다.

빙하의 융해과정에서 생긴 함몰지는 둥글거나 타원형의 모양을 가지며 길이는 10~20m에서 2,000~3,000m에 이른다. 깊이는 1.5~3.0m를 넘지 않는다. 반복 쐐기 빙하 위에 생긴 열카르스트 함몰지는 좁은 구덩이 같아서 깊이가 1m이며 빙하 lodes가 교차하는 곳에서는 확장된다. 거대한 빙하덩어리가 융해되어 축적된 곳에는 10~15m 깊이, 직경 50~100m의 호수가 형성된다. 열카르스트 호수는 침식 작용을 받아 자연적으로 아래 방향으로 조금씩 이동하게 된다.

서 시베리아 고원 내의 영구동토층의 강도는 북위로 갈수록 커지고, 열카르스트도 다양해진다.

야멜, 기단 등 여러 평야지역 안에서는 강력한 바람에 의한 침식작용이 일어나는데 남부 지역에서는 바람에 의한 침식이 많지 않다. 침식 작용에 의한 퇴적물이 협곡을 만들거나 산사태를 일으키기도 하며, 겨울철에는 융해된 토양이 다시 1.5~2.0m 이상 두께의 빙토가 된다.

1.2 제 4기 이전 퇴적층으로 구성된 삭박평원의 일반적 지질 공학적 특성

이 지역은 서 시베리아 고원의 남동부와 남서부 지방의 산맥 경계에 위치한 곳이다. 넓은 남서부와 남동부를 차지하면서 남북으로 길게 늘어진 지형이라 아주 다양한 환경 조건을 지니고 있다. 북부지역은 주로 타이가 지대여서(아한대 침엽수림대) 연간 평균 온도가 아주 낮으며 남북의 온도 차이는 영상 1℃에서 -3.2℃까지 비교적 큰 편이다. 계절동토 구간은 2.0m를 넘지 않는다.

이 지역의 남부 지방은 삼림 스텝 지대로 평년 기온이 비교적 높은 편이고(1.6℃~-1.8℃) 습기가 적기 때문에 뢰스 표면(황토와 같은 양토)이 침하되는 지질 특징을 만들어 내었다. 미네랄 함량이 높은 지하수가 다양한 깊이에서 나오지만 대부분은 5m이상의 깊이를 지닌다. 표면에서는 가용성이 높은 염분을 함유한 암석의 염분화가 발생하며 계절 동결구간이 생긴다(2.5~4.0m). 이 지역은 고원 중심에서 약간 기울어져 있으며 평원 및 준평원이 복합적으로 나타난다. 준평원의 높이는 80~400m로, 다양하지만 대부분의 지역은 120~200m 높이이다. 동부 지역(추리모-예니세이스크 지역)에서는 가장 깊은 침식 지대(최대 200m)가 발견된다. 이 지역의 남부 및 서남부에서는 드넓은 호수가 자리하고 있다.

이 지역의 남부에는 강 유역에 소택지가 있으며 함몰지와 단구와 범람원의 내부 단층선에 주로 발달된다. 강 유역을 제외한 북부 지방에는 편편한 강 유역의 작은 지역에서만 소택지가 발달되었다. 최근의 소택지 퇴적물은 침수된 이탄으로 구성되는데 주로 저산형의 이탄층이 있으며, 북부지방에는 상대적으로 낮은 이탄 붕괴율을 지닌 고산형과 중산형이 많이 있다. 일반적으로 이탄의 총 두께는 2m 이하이며 2.5~3.5m일 경우도 있다.

호성-소택지 형태의 고산형, 중산형, 저산형의 이탄이 지닌 지질 공학적 특징은 다음과 같다.

밀도: 0.96g/cm^3, 함수율: 385~1,020%, 공극률: 6.1~18.2, 소성지수: 187~328(함수율1,020%인 고산형 이탄은 소성 상태가 아님), 체적 수축율: 43~54%, 압축계수: (2.96~19.72)×10^{-5}Pa^{-1}, 변형계수: 0.111~0.259, 응력 간격: 0~0.05 MPa, 응착력: 0.002~0.014 MPa.

저산형의 충적토-소택지 이탄이 지니는 지질 공학적 특징은 다음과 같다.

밀도: 1.57~1.97g/cm^3, 함수율: 180~390%, 공극률 지수: 3.8~6.5, 소성 지수: 11~143, 체적 수축율: 17~34%, 압축계수: (0.51~3.39)×10^{-5}Pa^{-1}, 변형계수: 0.324-1.058, 응력간격: 0~0.05 MPa, 응착력: 0.014-0.032MPa.

홍적세 호성층은 이곳의 서부 및 남부에서 발달하였다. 퇴적층은 실트, 이탄, 부니, 식용소금, 석고, 최대 2m의 두께를 지닌 미라빌라이트를 지닌 점토와 사토 탄산염 등으로 구성된다. 이곳

에는 퇴적물의 염분화가 진행된다. 총 두께는 1~8m에서 20~25m까지 다양하다.

지표 및 호상 충적층은 모든 지역에서 실질적으로 잘 발달되었다. 이들 중 식양토가 가장 발달 했는데, 식양토는 대부분 황토처럼 보이며 침하 성격을 보인다(특히 남부 지역). 북부 지역의 식양토는 높은 수분과 부드러운 소성 강도를 지니고 있다.

점토와 사토를 함유한 양토는 노란빛이 나는 황갈색과 연한 노란빛의 황갈색을 지니고 있고 탄산염을 함유하며 전체적으로 공극률이 크다. 천연 습도는 19~24% 이며 항복점은 24~20%이다. Rolling-out 한도는 14~25%, 공극률은 40~45%이다. 자연 상태에서는 황토 같은 양토는 가소성이 낮고 약간의 강도를 지니며 19% 이하의 함수율 하에서 침하되며 깊이는 최대 3.5~5m 이다.

제 4기 퇴적층은 그리 두껍지 않기 때문에 아래에 있는 암석은 아주 중요한 성질을 띤다. 이 중 가장 최근 것은 신(新)제3기 퇴적물로 이 지역의 남서부와 남동부 지역에 1차적으로 발달하였다. 이들은 충적토-호수 및 다양한 시리즈의 충적층으로 구성되며 (아라리안, 질라디안, 추실릭, 쿠스타나이, 키르나에브), 이는 중신세 전기-중기(아라리안 시리즈)의 호성-충적 복합층 등의 퇴적물을 가리킨다. 두께는 최대 50m, 평균 20m이다. 함수율은 10~46%까지 다양하며 아래로 내려갈수록 증가한다. 평균 공극률은 34~40%이며 응착력은 0.5×10^5Pa, 내부 마찰각은 15°30′, 응력 하의 내마모성은 5×10^5~1.87×10^5 Pa이다. 남서부 지방의 경우 150~240m, 그리고 280~350m의 절대표지 위에는 키르나에브스카야 시리즈의 퇴적층이 발달되어 있는데, 이들은 중신세 전기의 호성-충적층이라 할 수 있다. 이 퇴적층은 분류되지 않은 불균등 사토로 발현되는데 자갈이 85~90%를 차지하는 경우도 있다. 이 자갈들은 극심한 풍화를 겪었으며 손으로 압착하면 쉽게 점토 상태가 되며, 수분을 가할 때는 소성상태로 변한다.

자갈의 충전재는 모래 섞인 상토로, 부피의 30% 정도를 차지한다. 여기저기 널린 자갈들은 사질-점토질 시멘트나 가수성 산화 2제 2철로 접합되어 있다. 두께는 30~50m에서 80~100m까지 다양하다. 고(古)제3기 퇴적물은 주로 점신세의 해양, 호성-충적층 및 호성-소택지 퇴적층으로 나타난다. 네크라소브스카야 시리즈의 점신세 후기 호성-충적층 및 호성-소택지 퇴적물, 즉, 육성 갈탄이 널리 발달되어 있다. 이들은 표면이나 표면 바로 아래에 얇게 나타난다(10m 이하). 이 지역 동부 지방의 퇴적층은 충적층-호성, 호성 퇴적층, 및 벨스카야 시리즈의 소택지 퇴적층과 건조되지 않은 점신세 후기 퇴적층으로 구성된다. 이들 중 점토질 퇴적층이 가장 널리 발달되었는데 주로 밀도와 소성이 높은 암석, 최대 3.2m 두께의 층간 갈탄, 점토질 실트암과 사토로 구성되어 있다. 이들의 특징은 낮은 공극률(37~41%), 비교적 낮은 가소성(10~12의 소성지수)이다. 함수율은 rolling-out 한도(20~24%)에 가깝다. 응력 간격에서 이들의 특징은 압축계수

0.004×10^{-5}~$0.005\times10^{-5}Pa^{-1}$, 내부 마찰각 14~25°, 응착력 0.4×10^{5}~0.8×10^{5}Pa 등으로 나타난다. 퇴적층의 수분 안정성은 낮아 5cm^{3}의 샘플을 모두 적시는데 두시간 이상이 걸린다. 때로 점토는 비탈이나 굴착 등에 노출되었을 경우 풍화가 빨리 일어난다. 남동부의 경우 사토 중 점토는 그리 많이 않다. 키아, 테치, 튜헤타 강 유역에 있는 이들 퇴적층 두께는 보통 25m이며 멘델-케츠키 유역의 경우는 20~50m, 켐-케츠키강 유역의 경우 180m나 된다.

서부와 남부의 경우 갈탄 함유층은 지질적 특성에 따라 네 부분으로 나뉜다. 이중 가장 최근것은 호성-충적층 및 점신세 후기의 호성 소택지며 나우르줌스카야 시리즈의 퇴적층도 있다. 이 지층의 상단에는 고령토로 구성된 양토 및 점토가 있으며 하단에는 자갈 바닥층을 지닌 사토가 있다. 때로 거친 사암도 발견되며 석고와 백악토도 발견된다. 두께는 30m이다. 대부분의 경우 사토는 아주 미세하고 미사가 많으며 때로는 거친 자갈선이 나타나기도 한다. 사토의 비중은 1.39~1.57g/cm^{3}이다. 자연 상태에서 사토는 구성 밀도에 따라 평균 정도의 비중을 차지한다. 이 사토는 공극률이 42~45%, 함수율 20~50%이며, 건조 상태일 경우 마찰각은 22~45°이며 습기가 있을 경우 20~39°이다. 이 사토의 특징은 투과율이 약하다는 점인데, 투과율은 24시간당 4.0~4.5 m으로 변한다. 남부지역의 점토는 주로 수운모가 첨가된 고령토가 주성분이다. 북부지방의 경우 몬모릴로나이트와 수운모가 많고 다양한 점토가 잘 발달되어 있다. 이들은 단단하고 때로는 염분을 함유하는 경우도 있다. 천연 상태에서는 고체 및 반고체 점토가 있으며 수분이 높을 경우 침수된다. 북부지방의 퇴적물은 수분율이 20~50%로 비교적 높은 편이다. 밀도는 1.55에서 1.90g/cm^{3}까지 다양하다. 공극률은 44~57%이며 소성 지수는 1~32까지 변한다. 대부분의 토양은 소성 견고도가 낮으며 아주 드물게 반고체, 또는 고체 상태를 보인다. 0.2~0.4MPa의 응력 하에서는 높은 압축률을 보이며 내부 마찰각은 17~28°, 응착력은 0.025~0.095MPa이다. 침식협곡의 경우 점신세 후기의 지질학적 특성을 지닌 호성 및 호성 충적토와 관련된 퇴적층이 발생한다. 이들은 주로 사층리, 거친 입자의 사암과 고령토 등을 함유하고, 점토 층간을 보이는 입자가 불량한 사토로 대표되며 이 시리즈의 두께는 2~20m 이다. 북동 지방의 경우 위에 기술된 퇴적층은 미사토가 점토나 실트암과 번갈아가며 나타난다. 지질적 특성으로 보았을 때 점신세 전기-중기의 호성-충적층 및 호성-소택지 퇴적층은 칠리틴스카야 시리즈의 퇴적물로 발현되는데 두께는 약 10~20 m이다. 점신세 전기-중기의 퇴적층은 대부분 사토로 구성된 쿠탄불라크스카야 시리즈로 발현되며 아래쪽은 점토가 많이 발견된다. 쿠스타나이에서 북쪽 투르가이크를 잇는 축의 퇴적층은 석고를 많이 함유한 점토로 발현되며 이는 북동부의 아틀림스카야 시리즈의 사토로 대체된다.

남부 및 서부에서는 백악기 후기- 점신세 전기 퇴적층이 널리 분포되어 있다. 이 퇴적층은 다

양하게 구성되는데 육성 퇴적층은 (탈리츠카야, 체간스카야 시리즈) 강 유역과 호숫가에서 성장한 것이다. 두께는 10~100 미터 이상으로 다양하게 나타난다. 서부지역의 경우 규질-육성 퇴적층(이르비츠카야 및 세로브스카야 시리즈)이 표면 가까이(이세트, 피쉬마, 니챠강 유역, 1.5~12m 깊이)에서 나타난다. 두께는 주로 100m 이상이다. 이들은 무거운 질식양토와 경식토와 중식토 등으로 구성되는데 비중은 1.8~2.0g/cm^3, 공극률은 27~63%, 함수율은 9~61%, 압축계수는 (0.01~0.042)×10^{-5}Pa^{-1}이며 내부 마찰각은 8~300, 응착력은 0.015~0.124MPa이다.

남동부에서는 육성 고령토 퇴적층이 발달하였다. (시모노프스카야 및 심스카야 시리즈).

이 퇴적층의 대부분의 단면을 차지하는 사토는 점토-고령토로 구성된 시멘트로 굳어졌다. 이들은 반고화 사토의 렌스와 균열을 함유하고 있으며 이들은 때로 균질적이다. 균열은 석영-clint 자갈로 응축되어 있으며 고령토 균열의 두께는 3~5m이다. 산맥 경계와 동쪽 가장자리를 따라 존재하는 퇴적층의 두께는 10~20m에서 40m까지 변화하며 서쪽은 200m까지 융기하는 경우도 있다.

동부 지역에서는 표면 가까이에 더 오래된 퇴적층이 있다. (전기 백악기 및 주라기). 지역 내 발달된 상단 아래의 백악기 퇴적층은 두 개의 퇴적층, 즉 육성-탄산염 (일레크스카야, 칸스카야, 테레추르스카야 시리즈)와 회색빛의 석탄층 (피로브스카야 시리즈)으로 구성된다. 상단 중간의 주라기 퇴적층은 석탄층 퇴적층 (마카로브스카야, 이타츠카야, 치히타츠카야 시리즈)로 구성된다. 주라기 퇴적층은 배사 구조와 향사 웡인 이타츠카야 구조, 바란다츠카야 골(trough) 및 기타 구조의 표면 위로 돌출되어 있다. 전기 백악기 및 주라기 퇴적층의 총 두께는 일반적으로 100m가 넘는다.

이 지역의 진흙바닥 (점토와 양토)은 연하고 낮은 소성 견고도를 보이며 반고체인 경우는 극히 드물다. 진흙바닥이 빙결액 및 액체 상태인 층도 있다. 함수율은 16~40%로 다양한 변화를 보이고 밀도는 1.55에서 2.0g/cm^{3}까지 다양하며 내부 마찰각은 14~280, 응착력은 0.01~0.09MPa이다. 사토는 자갈, 철광석, 사암 등으로 층을 이루고 있다. 전체적으로 사토는 입자가 미세하다. 사토의 함수율은 1.69~1.95 g/cm^{3}을 보인다. 사토는 반 고체 또는 밀도가 낮을 경우 공극률이 48~58%이며 밀도가 높을 경우 37~48%이다. 함수율은 20%로 높은 편이고 40~50%일 경우도 있다. 건조 상태일 때 마찰각은 22~45°이며 물 아래에서는 20~39°를 보인다. 투과계수는 시간당 최대 4~4.5 m로 나타난다.

1.3 제3기 후기 - 제4기 전기 충적층으로 구성된 삭박-퇴적평원 지역의 지질 공학적 특징

이 지역은 오브강 위도에서 남쪽으로, 그리고 바흐강, 오브 이르티쉬강, 타브도-콘디아크 하천 사이 및 파브로다 프리르티쉬에서 남쪽까지 오브-예니세이 하천 사이를 아우르며 서 시베리아 고원의 빙하 지역 대부분을 차지하는 곳이다.

지질 공학적인 면에서 이 지역의 자연환경은 아주 다양한 특질을 지니고 있는데, 이는 남북과 동서로 길게 뻗은 광대한 영토를 아우르며 다양한 식물 기후대를 지니고 있기 때문이다

이곳의 북부지방은 타이거 지대이므로 연중 평균 온도가 아주 낮고 북부와 남부의 평균 기온은 각 0℃와 1℃정도이다. 계절동결지대는 0.3~0.8m(이탄 위)에서 2.0~2.5 m(사토 내)까지 변한다. 표면의 퇴적층은 대부분 액체상태이며 아주 드물게 (강 유역을 따라 있는 배수가 잘 되는 지역)에서만 반고체 상태이다. 나머지 지대는 훨씬 침수가 잘되며 이탄을 많이 함유한다. 이탄의 두께는 2~4m에서 변하며 때로 6~8m가 되는 경우가 많다.

동부 지역은 삼림 스텝 지역으로 건조하며, 습기가 부족하고 다량의 열이 공급되기 때문에 염화 퇴적층이 발생하였다. 따라서 이 지역은 황토와 황토퇴적층, 가용성이 높은 염분, 낮은 함수율 등의 특징을 지닌다.

전체적으로 이 지역은 고도가 높고 부드럽고 연한 건조한 기복(起伏)를 특징으로 한다. 표면의 절대표지는 북쪽(70~80m)에서 남쪽(250~400m)으로 솟아 있다. 남동부는 프리 오브스코에 고원와 추키샤카야에 해당하며 최고 절대표지(프리오보스코에 고원은 150~400m, 추미샤카야 사면의 경우 200~2,340m) 및 평평한 둔덕과 가파른 기복(起伏)를 특징으로 한다. 이곳은 최근에 융기한 곳으로 후기 제 4기 이후로 퇴적층이 쌓이지 않았으며 더 오래된 퇴적물은 침식되어 있다. 따라서 이 지역은 울퉁불퉁한 침식 지역과 수많은 분화구 등으로 표면이 아주 복잡하다.

이곳의 진흙바닥은 아주 다양한 물리적 특성을 지니는데 밀도는 1.81~2.05g/cm^3, 함수율은 21~31%, 공극률은 32~52%, 소성 지수는 5~20이다. 견고도 지수는 0~0.8 이며 이는 견고한 토양이 부드럽게 변화했다는 증거이다. 내부 마찰각은 4.5~33°, 응착력은 0~0.099MPa이다. 이 황토땅의 밀도는 1.5~2.15g/cm^3, 함수율은 8~33%, 공극률은 30~50%이며 실질적으로 침하가 없었기 때문에 침하 계수는 0.002이다. 사토 대부분은 석영으로 구성되어 있으며 밀도는 1.14에서 1.59g/cm^{3}까지 다양하며 여과계수는 시간당 평균 9~20m 이지만 드물게 0.5~11m일 경우도 있다.

남부 지역은 쿨룬딘스카야 평원이 자리한 곳이다. 바라빈스카야 평원의 남부지역은 상대적으로 평평하고 부드러운 기복(起伏)를 특징으로 한다. 이곳은 북동쪽에서 남서쪽으로 지대가 확연

히 기울어 있으며 절대표지는 북동쪽은 145m, 남서쪽은 105m이다. 봉우리와 봉우리 사이의 함몰지(바라빈스카야 평원), 쿨룬딘스카야 평원의 고대 배수 협곡기 이 기복(起伏)의 구조에 중요한 영향을 미친다. 봉우리간 함몰지는 북동쪽에서 시작하여 남서쪽으로 더 많이 발달되어 있으며 봉우리의 길이는 2~4km, 너비는 0.5~1.5km, 높이는 5~10m이다. 봉우리간 함몰지는 협곡으로 구성되어 있으며 이중 가장 거대한 협곡에는 호수와 소택지대가 자리잡고 있다.

최근 알리, 바르바울카, 카스말라, 쿨룬다 강의 유역은 호수와 소택지에는 표면을 일련의 평행한 둔덕으로 가르는 배수 협곡과 연결되어 있다. 이 쿨룬딘스카야 평원 남쪽에는 사토가 흐르는 과정에서 생긴 사구(砂丘) 기복(起伏)이 있으며 북부지역 (케트-팀스카야, 타브도-콘딘스카야 사면, 토볼-이르티쉬스카야 사면의 북부, 바시우간스코에 고원)은 완만한 평원이 널리 펼쳐져 있다. 이곳의 절대표지는 낮은 편이라 북부는 70~80m, 남부는 166m이다. 최고의 절대표지(140~166)는 바라빈스코-피흐토브스카야 단사, 메호브스키 아치 등과 연결되어 있다. 또한 이 지역에는 배수체제가 널리 발달되어 있다. 가장 많은 개석은 후기 제 4기에 신속한 융기를 겪은 (바시우간스코-카멘스카야 배사층, 세가르스코-바크차그스카야 함몰지, 알레크샌드고브스카야 구조 단구 등) 구조에서 보인다. 이 지역을 통과하는 오브강 및 이르티쉬강 등의 크고 작은 강들은 평야를 50m 깊이로 개석한다. 오브강 유역의 대표적 강은 팀, 케트, 출림, 바시우간, 살림, 유간, 데미안카, 타라, 옴, 이쉼, 바가이, 노볼, 콘다 강 등이 있다. 전체적으로 강 유역은 잘 발달되어 있고 범람원과 2-3개의 범람원 단구가 존재한다. 이 지역의 가장 큰 특징은 20%에서 90%까지 침수작용이 강력하게 발생한다는 점이다.

지질 공학적 특징을 보면, 이 지역의 상부는 주로 제3기 후기부터 제 4기 전기 (코흐코브스카야, 레도소브스카야 시리즈), 제 4기의 전기와 중기 (크라스노두브로브스카야, 슬라드하보드스카야 시리즈), 제 4기 중기 (바흐틴스티. 토볼스카야, 쿨룬딘스카야 시리즈), 제 4기의 전기-후기 (카라수크스카야 지리즈) 퇴적층으로 구성되어 있으며 대부분은 호성 충적토 이며 극히 드물게 육성 충적토가 있다. 두께는 평균 30~50m이며 간간히 100m 이상이 되는 곳도 있으며 (프리오브스코에 평원) 10m 에 지나지 않는 곳도 있다. (제 4기 전기 퇴적층, 고(古)제3기와 신(新)제3기). 최근의 소택지 퇴적물도도 이와 유사하게 펼쳐져 있다. 나머지 발생형태의 퇴적층 (빙퇴석, 호수, 기성암 및 비탈퇴적) 의 두께는 2~3m, 혹은 5m이다.

이 소택지 퇴적물의 구성 및 특성은 관련된 상(相)에 따라 변화하기도 하고 일정한 모습을 보이기도 한다. 따라서 아래에 기술된 이탄은 전 지역에서 일반적으로 나타난다. 이들은 저산형, 이전형 및 고산형의 상을 지니고 있으며 조사된 거의 모든 종류의 이탄의 분해도는 낮거나 (25%) 중간 정도(50%) 이다. 밀도는 이탄분해도의 감소에 따라 1.34~1.66g/cm^{3}내에서 증가세

를 보인다. 고산형 이탄 퇴적물의 함수율은 1,500% 로 아주 높은 편이며 저산형 이탄의 경우에는 거의 500%를 넘지 않는다. 이탄이 지닌 가장 중요한 특징 중 하나는 체적 수축율이 아주 높다는 점이다. 소택지대의 이탄 중 특히 고산형의 체적 수축율은 25.4~82%에 달한다. 이탄 퇴적물이 지닌 낮은 밀도와 분해도 및 구조의 특성 때문에 수축율이 아주 높게 나타난다(118×10^{-5}~$32.02\times10^{-5}Pa^{-1}$). 소택지대의 고지이탄은 아주 높은 압밀계수와 여과계수를 보인다. 여과율이 낮은 경우는 콜로이드 입자와 식물 조직의 세포가 수분을 많이 함유하고 있기 때문이다. 그러나 중요한 점은 충적토-호성층이 세월의 변화에도 불구하고 공통된 특징을 많이 가지고 있다는 것이다. 따라서 전체적으로 상단의 경우 두터운 점토 퇴적층, 하단의 경우 사토 퇴적층이 우세하다는 점에서 전형적인 2중 구조를 지니고 있다.

점토분은 몬모릴로나이트, 수운모, 혼합 자유 미네랄, 고령토 등의 광물로 구성되어 있고 녹니석과 석영이 분산되어 있으며 불규칙적 질감을 지닌다. 이 지역 내에서 발달된 퇴적층이 균등한 광학적 구성을 지니고 있기 때문에 유사한 입자 크기와 물리-기계적 특성을 지니고 있다.

점토질 퇴적물에는 점토, 양토, 양실 사토가 있고 이중 중양토, 경점토가 많다. 전체적으로 점토질 퇴적물은 제3기 후기 - 제 4기 전기 퇴적물로, 좀 더 가벼운 퇴적물은 카라수크스카야 시리즈의 제 4기 후기 퇴적물로 구분된다. 삼림-스텝 및 스텝 지대 중 남부 지방의 퇴적층은 황토와 유사한 양토와 점토가 표면에 나타나며 침하의 특색을 지닌다. 두께는 약 10~20 m 이상이다. 황토 퇴적물은 배수가 아주 잘 되는 타이거 지대가 있는 북부 지방에도 나타나는데, 함수율이 높아(습도가 0.6 이상) 침하 특성은 나타나지 않는다.

황토 퇴적층의 밀도는 1.56에서 1.74 g/cm^3까지 변한다. 황토 밀도는 층위가 낮아짐에 따라 증가한다. 공극률은 38에서 54%까지 변화하고 상단 황토층에서 공극률이 가장 높에 나타난다. 황토 퇴적층의 함수율 또한 다양한 변화를 보인다(8~27%). 프리오브스코에 평원은 황토 퇴적층의 습도에 따라 세 지역으로 나눌 수 있다. 자연 상태에서 양토의 여과계수는 시간당 0.02~1.45m이며 교란 상태의 양토인경우 여과계수는 시간당 0.001~0.085m를 보인다. 황토와 같은 양질사토의 여과계수는 2/3정도 높다. 함수율의 경우 30~70분 동안 천천히 수분이 침투한다. 황토와 같은 양토의 소성지수는 5~25이며 13~17이 흔하게 나타난다. 황토와 같은 양토는 아주 견고하다. 자연 상태이며 평균 함수율을 지닌 프롤루비얼-충적 양토파쇄저항은 0.3~1.2MPa이다. 제 4기 중기의 프롤루비얼 양토의 경우, 파쇄저항은 다소 높게 나타나며 함수율이 8~12%일 때, 최고 응력 10MPa에서 파괴가 발생한다. 제 4기 중기의 충적토-프롤루비얼 양토의 압축률을 응력 0.1~0.2MPa에서 시험해 보니 0.01~0.05MPa^{-1}의 압축계수를 보였다. 베르흐냐야 이르멘 평원의 맨틀에서 나온 에올리언 황토는 0.6~2MPa^{-1}의 압축계수를 보였다. 프롤루비얼-충적층의

제 4기 황토 유사 양토는 중간 정도의 압축률을 보이며 압축 계수는 0.2~0.8MPa^{-1}등으로 변한다. 중제 4기 초기와 전제 4기의 황토 퇴적층은 압축률이 낮았다.

이 지역의 북부 (타이거 지대)에서 발달한 점토질 퇴적물은 수분이 많고 일반적으로 총 0.7~0.8 이상의 보수력을 보인다. 미사질 입자와 높은 계절 동결이라는 특징을 지닌 이 점토질 퇴적물은 동상 (凍上)의 기원으로 도로나 건축부지 어디에나 나타난다.

이곳 강들의 유역은 제 4기뿐 아니라 그 이전에 축적된 퇴적층이 있다. 타라강 하구에서 남쪽 방향에 있는 보로노보 마을에는 신(新)제3기 에 생성된 다양한 육성 퇴적층 퇴적층이 있다. 중신세 중기 (타볼한스카야 시리즈)의 지질학적 특징을 지닌 호성 퇴적층은 두께가 8.0~25.0m이며 발생 깊이는 15m에서 32m로 다양하다. 중신세 후기-제3기 중기(파블로다르스카야 시리즈)의 지질적 특성을 지닌 호성 및 호성-충적 복합퇴적층은 두께가 30m이며 발생 깊이는 0.0m에서 3.2m까지 다양하다. 이 복합의 퇴적물은 이르티쉬강과 그 지류, 오브강을 따라 생성되었고 남부지역의 섬을 구성하게 되었다. 이들은 하단 부분에서는 중신세 전기(페트로파블로브스카야 시리즈)의 호성-충적층 복합 퇴적층으로 변하였고 그 두께는 30~40m이다. 이 복합 퇴적층은 표면(30m 이상 깊이)에서 훨씬 더 깊에 위치하였기 때문에 지상의 민간용이나 군용 건축물에는 영향을 주지 않는다. 중앙 및 동부 지역은 중신세 전기의 지질적 특성을 지닌 충적 복합층이 자리하고 있다. 이들은 림벨카, 코세츠, 오를로브카, 울루-율, 볼.유크사강의 계곡에 노출되었다. 이 퇴적층은 케트-팀스퀘 및 팀-바흐스퀘 하천 사이 지역에 2.5m 깊이에 자리하고 있으며 오브강 계곡 쪽으로 가라앉아 있다. 이 복합 퇴적층은 미사질 사토, 미세한 혹은 중간 크기 입자의 사토로 대부분 구성되며 약간의 장석 혼합물(0.5~4%)를 지닌 석영으로 구성되어 있다. 퇴적층의 두께는 10~40m로 다양하다. 중부 및 동부의 타라강에서 북쪽으로는 점신세의 육성(陸成) 함탄 퇴적층 퇴적층에 제 4기 퇴적물이 생성되었다. 이 퇴적층 내에는 총 4 개의 지질적 특성을 지닌 복합층이 있는데 자세한 사항은 제 2장에 기술되어 있다. 점신세 전기-중기의 충적층은 동부지역의 팀강, 오를로브카 강에만 노출되어 있다. 이 퇴적층은 남서쪽으로 가면서 더욱 가라앉아 있으며 아주 깊은 곳에서 광천 등에 면하게 된다. 동부지역 점신세 전기-중기의 호성 충적토 및 호성 소택지 퇴적물은 여러 강 (팀강, 반질강, 림벨카강 등)에서 노출되어 있고 나머지 지역에서는 보통 30~80m의 깊이로 나타난다. 북부 및 중부지방에서는 점신세 후기에 호성층과 호성-충적층 퇴적물이 강에 노출되어 있다. 북부에서 동남부로 갈수록 복합의 퇴적물은 상(相) 변이성을 보인다. 호성 및 호성-소택지 복합 퇴적층은 거의 표면에 가까운 곳에서 발생한다. 이들은 남부지역의 토볼, 타라, 옴스크 프리이르티쉬강과 오브-에니세이 하천 사이의 지류 등에 의해 노출된다.

최근의 배관체제로 개석된 가장 오래된 퇴적층은 백악기 후기에서 점신세 전기로 거슬러 올라간다. 서부 지역에서는 (로즈바 및 펠림강 유역) 육성 및 규질-육성 퇴적층이 많이 보이고 동부 지역 (슬림, 콜트쿰, 카스강)의 퇴적층은 육성-고령토 퇴적층을 보인다. 이곳에서는 규조토나 게이즈가 자주 보인다. 게이즈는 아주 미세한 입자를 지니고 있으며 밀도는 규화작용에 따라 1.04에서 1.86g/cm^{3}까지 변화를 보인다. 공극률은 55%이다. 규조토의 압축 저항성은 2~4MPa, 게이즈의 경우 4.8~8.0MPa로 나타난다. 게이즈와 유사한 점토는 내부 마찰각이 13~32°, 응착력이 0.09~0.23MPa이다. 사토의 밀도는 1.47~1.53g/cm^3, 공극률은 42~44%이다.

1.4 제 4기 중기 빙하퇴적층으로 구성된 퇴적평원의 지질 공학적 특징

제 4기 중반의 빙하성 및 빙하퇴적층으로 구성된 퇴적평원지역은 서 시베리아 고원 북부의 절반을 차지하고 있다. 이 지역의 북서부는 로즈바강과 콘다강에서 바이다라츠카야 베이까지 남북으로 광활하게 뻗어 있으며 시베리아 봉우리(시비그스키 우발리) 안에서 좁아져 다시 프리 예니세이스크지방에서는 갑자기 넓어진다.

전체 영토는 함수량이 높으며 연평균 온도는 남부의 경우 영하 1~3℃ (수르구트는 -3.3℃)에서 북부는 영하 9~11℃ (두딘카는 -10.7℃)이다. 대부분의 지역이 타이거지대 (북부와 중부) 북서부와 북동부는 툰드라와 삼림-툰드라 지대에 속한다.

신기구조 평야는 토양이 비균질적이며 북 우랄의 광대한 지질구조, 전체 시베리아 우랄 봉우리, 북 예니세이 지질구조의 남쪽 절반을 덥고 있다. 전체적으로 지역 내에는 양의 신구조(neo-structure)가 두드러지며 아치 모양의 융기 고지와 거대한 강둑을 지니고 있다.

이 지역의 가장 큰 특징은 굽이굽이 굴곡이 심하고 높은 빙하퇴적 평원이 발달되어 있고 리울린-보르 힐, 벨로고르스크 마테리크, 베르크네-타조브스크 힐 등에 의해 개석되었다는 점이다. 절대표지 는 70~80m에서 280~300m로 변화가 심한 편이다. 대부분의 토양의 절대표지는 100~120m 에서 150m이다. 서 시베리아 고원 북부에서 가장 높은 평원은 세베로-소스빈스카야, 치오르니 고리, 무즈힌스키 우랄, 스레드네 및 베르흐네-타조브스카야 등이며 높은 고원의 모습을 띈다. 이곳에서는 고(古)제3기 또는 백악기 퇴적층에 제 4기 빙하퇴적층이 직접 쌓였다. 이 비교적 높고 건조한 평원과 평행하게는 완전히 침수되어 호수 평원이 된 곳이 있다. 이 평원 중 소위 수르구츠퀘 폴레시가 가장 거대한데, 이곳은 남서부 평원으로 기울어져 있고, 제 4기 중기의 빙하퇴적 그리고 호성-충적사토 퇴적물로 구성되어 있고 주로 리람, 핀, 트로미간 및 아겐 강 유역에 존재한다. 이와 유사한 침수된 평야가 바흐강 유역 오른쪽, 그리고 리울린-보르 힐의 남

쪽으로 흐르는 세베르나야 소스바강 유역에 존재한다.

이곳 대부분의 지역은 제 4기 중기의 빙하퇴적 평원이다. 제 4기 후기(지리안스키)의 빙하퇴적 평원은 이 지역의 북서부에만 발달되었는데, 케츠카야의 북동부에 존재한 우랄 산맥과 직접 면해 있고 예니세이강의 우측 제방이 하단과 닿아 있다. 이 지역의 주요 지질 공학적 특이성은 제 4기 중후반의 빙하 퇴적물이 이곳 상단부에 두껍게 널리 퍼져 있다는 점이다. 대부분 지역의 퇴적물의 두께는 수십 미터에 이르고 오래된 기복(起伏)의 경우 100m 이상에 다다른다. 백악기(우랄산맥 및 예니세이 고원)에 생성된 고지대와 고(古)제3기 퇴적층의 경우에는 10~15m에 지나지 않는다. 동 지역의 북부 지역(오브강 좌측에서 북쪽 세브.소스바강 유역까지, 카짐강 및 쿠노바트하천 사이, 시비르스키 우발리의 북쪽 중턱)에서는 제 4기 중기의 빙하퇴적층이 해양 및 빙하성 해양, 연안 퇴적물과 함께 층을 이루고 있다.

빙하성 복합층은 다양한 입자로 구성된 자갈에서 양토, 점토에 이르는 다양한 퇴적물로 구성된다. 하지만 이 모든 퇴적물이 이 지역 널리 퍼져 있는 것은 아니다. 모래 퇴적물 중 가장 두드러진 것은 중간 입자의 사토, 미세사토 등이며 이들은 각각 서부 및 동부 지방에서 비롯된 자갈 성분 등을 약간씩 포함하고 있다. 이 지역에서는 거친 역질 모래가 자주 발견되지만 다양하게 산재된 사토와 비교했을 때 별다른 가치를 지니지 못한다. 이 사토의 특징은 입자 크기구성에 따라 달라진다. 밀도는 1.58~2.0g/cm^3, 평균 공극률은 37~44%, 함수율은 5~25%, 여과계수는 24시간당 3.7~9.6m이다. 마찰각은 건조상태일 때 27~34%, 침수되었을 경우 2~5%로 낮아진다.

점토질 퇴적물 중에는 경량 및 중량의 양토가 지배적이다. 나머지 사질 및 점토질 퇴적물은 별다른 중요성을 갖지 못한다. 이들의 밀도는 1.74~1.91g/cm^3. 공극률은 37-46%. 소성 지수는 9~12이다. 대부분의 지역, 특히 중부 지방에서는 빙퇴석과 빙하퇴적물이 5~6m 두께의 이탄 위에 축적되었다.

기술된 제 4기 퇴적층은 점신세, 시신세와 그보다 오래된 퇴적층 위에 쌓여 있다. 대부분 중부 지방에는 점신세의 사토질 및 점토질의 갈탄 함유 퇴적물만이 수변보다 높게 발견된다. 규질 육성 퇴적층을 지닌 시신세 퇴적물은 보통 오브스코-소스빈스쾨 하천 사이, 그리고 우랄지역 근처와 베르흐네-타조브스카야, 스레드네-타조브스카야 둔덕 내에는 백악기의 육성 사토질 및 점토질 퇴적물이 발견된다.

이 지역 상단의 퇴적물은 완신세에 발달되었다는 점과 열 공급의 면에서 다른 곳과 상당한 차이점을 보인다. 대부분의 지역에서는 영구동토층이 발달되었으며 지속적으로 북극권의 북쪽으로 계속 확산되고 있다. 온도는 -2℃~-7℃, 두께는 최대 300-400 m, 전체적으로 견고한 구조이

다. 이 퇴적물은 후생적으로 동결되었으며 빙하 함유량은 아주 높다. 이 지역에서 계절적 융해 과정은 안정적 대륙형이며 동부에서는 더 높은 대륙형을 보인다. 이탄은 0.3~0.6m 두께에서 계절적 융해가 발생하고 사토의 경우 1.0~1.5m 두께에서 발생한다. 북극권의 남쪽방향으로는 영구동토층의 확산이 불규칙적으로 발생한다. 연평균 온도는 0℃에서 -2℃도이며 빙결 구간은 2층 구조로 되어 있다. 영구동토층 상단의 두께는 북부의 경우 80~150m에서 남부의 경우 5~15m이다. 이 지역의 계절적 융해 및 동결형태는 계속 변화하며 깊이는 수분과 빙하의 함유량에 따라 이탄의 경우 0.6~12m, 0.8~1.2m, 양토의 경우 1.0~1.5m, 사토의 경우 1.2~2에서 2.0~3.5m 사이로 변한다.

이 지역은 영구동토층이 발달하면서 아주 특이한 외생적 지질 과정을 초래하였다. 계절동결과 융해 외에도 조류에 의해 호수변의 열마모 및 융해 침식작용이 발생하였으며 동상침식 및 빙결토양의 융기, 열 카르스트, 열카르스트가 진행되는 지역에서 호수의 성장 및 토양의 침수 같은 현상이 발생하였다.

북 소스빈스코- 오브스크하천 사이, 그리고 벨로고르스키 바테리크의 남서부 지역과 그레드네-나조브스카야 남부지역에서는 영구동토층이 거의 보이지 않는다. 이곳은 융해가 진행되어 침수된 사토질 및 점토질, 이탄질의 퇴적물이 많이 쌓인 곳이다. 또한 사질, 양질 사토 및 양질 퇴적물과 이탄에 계절적 융해와 계절적 동결이 진행된 것이다. 각 지역에서는 안정적인 대륙적 형태의 계절적 동결이 사토에서 발달되었다. 이탄 소택지에서의 최소 동결 두께는 1.0~1.2m이며 젖은 모래가 거의 없는 건조한 땅에서는 최대 2.5~3m이다.

빙하지대에 최근 나타난 외생적 지질 과정과 현상은 북부 지방과 비교했을 때 매우 복잡하다. 조사 및 건축 과정에서 가장 어려운 점은 광대한 지역이 강력한 침수가 일어났다는 점이다. 침식은 하천의 제방을 따라 발생하였지만 자연상태에서 그 속도는 그리 빠르지 않다. 이 지역에서 가장 어려운 점은 자연상태에서도 오브강 유역을 따라 급격히 산사태로 무너진 토사가 발달한다는 점이다.

이 지역에서 발달된 다양한 성격의 퇴적물은 모든 복합 퇴적층이 그렇듯이 광범위한 지질공학적 특성을 지니고 있다. 특히, 중기 및 후기의 점토질 빙퇴석은 광범위하게 변화하였는데, 이는 연평균 온도와 빙하 함유율의 폭이 크기 때문이다. 용해된 빙퇴석 점토질 퇴적물은 높은 내마모성을 지니고 있고 다소 낮은 압축성 지반을 구성한다. 이 지역내에 광범위하게 발달한 사질 빙하퇴적층은 보통 수분을 다량 함유하고 있다. 밀도는 1.42~2.0g/cm^3, 평균 공극률은 40%, 마찰각은 33~42°이고 습기가 있을 경우 24~36°이다.

1.5 제 4기 중후반 해양 퇴적층으로 구성된 퇴적평원의 지질 공학적 특징

서 시베리아 고원 북부지방의 절반 이상은 제 4기 해양성 퇴적층으로 구성되어 있다. 이 지역은 시비르스키 우발리 산의 북부지역에서 카라해안까지 펼쳐진 곳이다. 습도는 많지만 열 공급이 적어 이곳의 기후는 혹독할 정도로 춥다. 연평균 온도는 남부의 경우 3.5~4℃이며 북부지방의 경우 -10~-12℃까지 내려간다. 이 광대한 영토의 대부분은 툰드라로 덮혀 있으며 남부 지방은 가파른 이탄 소택지의 단층지괴로 구성된 북부 타이거 지대로 분류된다.

신기구조의 면에서 이곳은 야말로-네네츠카야 단사와 북부 예니세이의 서부지방이 상당히 다른 모습을 보인다. 분명히 구분되는 층은 이곳 기복(起伏)의 특징이다. 이곳에는 6개의 단구 같은 해양 및 석호-해양성 레벨이 있으며 이와 관련한 호성-충적 레벨이 존재한다. 이 레벨의 평평한 표면은 주로 침식이나 동결 과정에서 변하게 된다. 절대 표지는 0~5m에서 120~160m로 다양하며 카라해, 오브스카야, 타조브스카야, 지단스카야 군도 및 예니세이스키 베이의 경우 이보다 더욱 높게 나타난다. 지역 전체의 평균 절대표지는 40~80m이다.

이 지역은 대부분 제 4기 중기 및 후기의 해양 평원이며 절대표지가 60~70m에서 100~120m에 달한다(제 4기 후기의 경우 150~160m 이상). 남부지방 호성-충적평원의 절대표지는 45~70m이다. 이 해양평원은 제 4기 후기 해양성 및 호수 해양성 단구와 최근 라이다와 경계를 맞대고 있다.

위 지역의 지질공학적 특이성은 바로 제 4기 중기-후기의 퇴적층이 널리 퍼져 있다는 점이며 상단부에는 최근에 쌓인 해양성 및 연안 퇴적물이 발달했다는 점이다. 두께는 200~300m에 달한다. 소택지 퇴적물 외 다른 형태의 퇴적물(충적토, 호성 충적토 등)은 그리 큰 중요성을 지니지 않는다.

제 4기 해양 퇴적층은 자갈에서부터 역질모래, 무거운 점토질 등 퇴적물의 분산 형태마다 다르게 나타난다. 하지만 양토, 가벼운 점토질 및 양질 사토와 실트질 사토가 이 지역 퇴적물의 특징을 잘 나타낸다. 동시에 점토질 토양이 (점착재료)이 북부 지역 하단에서 발생하여 염화되는 경우가 많다. (북부 2~5m 와 남부 10m 이상의 깊이)의 상단에는 실트질 사토와 미세사토, 양질 사토가 많이 있다. 이들은 바로 연안과 해안의 발달 단계에서 생긴 퇴적물이다. 점토질 퇴적물 중에는 각종 광물로 구성된 양토가 지배적이다. 소성 지수는 3~24이며 점토질에서는 29이다. 수용성 염분 함유율은 0.02~1%로 다양하다. 이 퇴적층의 상단의 압축률은 꽤 높은 편이며 내부 마찰각은 13~30°, 응착력은 0.04~0.15MPa이다. 용해된 상태에서 점토질 퇴적물은 주로 소성 견고도를 지니고 있다. 사토는 미세하고 실트질이 많다. 공극률은 27~52%, 여과계수는 24

시간당 0.8~3m, 마찰각은 30~34°, 습기가 있을 경우 2~5°로 떨어진다. 대부분의 지역에서 퇴적물은 영구동토 상태로 존재한다.

제 4기 퇴적층은 고(古)제3기와 백악기 퇴적물 위에 쌓여 있다. 대부분 점신세와 시신세 퇴적층은 다양한 사토와 규질 퇴적물로 구성되어 있는데 (규조토, 점토 등) 특히 타조브스키 반도 남단, 나딤-푸로브스뢰 하천 사이 및 폴루이강 상류 등에서 나타난다. 야말 및 기단에서는 팔레오세나 백악기 퇴적층은 그리 많지 않다.

이 지역은 아주 특이한 지질공학적 즉징을 지닌 엄청난 넓이의 영구동토 퇴적층이 분포되어 있다. 이 지역에서는 주로 동생적 동결층(야말, 지단스키, 타조브스키 반도 북부)과 후생적 동결층이 발달하였고 장기간 안정적인 대륙형의 계절적 융해라는 특징을 지니고 있다. 북극권과 그 남부 지역과 가까운 곳에 발달된 영구동토 퇴적층에서는 전 지역과 단면에 걸쳐 후생적으로 깊은 빙결이 비연속적으로 발생한다. 온도는 영하 2~3℃ 이상이며 2층의 빙결 구조가 발달하였으며 최근에는 열카르스트 과정이 진행되고 있다. 그리고 계절적 융해 및 동결 과정은 주로 대륙적인 형태를 지니며 동부의 경우 더 강한 대륙형을 지닌다. 전체적으로는 융해 퇴적층이 전 지역의 15% 이상을 넘지 않는다. 남부지방의 경우 융해 퇴적층은 40~54%를 차지한다. 모든 융해 퇴적층은 충분한 함수 작용 때문에 수분을 많이 함유하고 있다.

이 지역의 퇴적층은 특이한 지질 공학적 특징을 지니고 있는데 우선 퇴적물의 종류가 다양하고 빙하를 함유한 퇴적물이 발달하였고 각기 온도가 다르다는 점이다. 전체적으로 이 점토질 충적층과 사질 충적층은 빙하 함유율이 현격히 다르기 때문에 완전히 다른 지질학적 암군의 성질을 지니게 되었다. 이와 동시에 다른 형태의 지질학적 특성을 지닌 암군에서 발달되었지만 동일한 구성과 동일한 형태의 동결구조 등을 갖춘 사토는 유사한 특성을 보인다. 점토질 퇴적층은 크게 세 가지의 형태로 분류할 수 있는데, 첫 번째는 제 4기 후기와 완신세의 점토질 퇴적물인 동생적으로 깊이 발달한 빙결 구조로서 빙하, 특히 슐리렌 빙하를 많이 함유한 형태이다. 두번째로, 제 4기 후기와 완신세의 해양성 및 호성-해양성 점토질 퇴적층은 후생적으로 빙결과정을 거쳤으며 수분을 많이 함유하게 된 형태이다. 전체적으로 이 퇴적층은 빙하를 덜 함유하고 특성의 변화가 적다. 제 3 형태는 살레하르드스카야 시리즈의 점토질 퇴적물과 관련되어 있는데, 후기 홍적세 초기에 동결과정을 거치기 전 어느정도 석화되었다는 특징을 지닌다. 완신세의 온도하에서 퇴적층은 배수 및 건조화과정을 거쳐 동결 과정에서 빙하 함유도가 낮아졌기 때문이다. 그 결과 퇴적층은 별다른 특성을 지니지 않고 더욱 두껍게 되었다.

북부지방의 빙결 퇴적층은 낮은 연평균 온도에 의해 많은 영향을 받았고 광범위한 공간에서 별다른 변화를 경험하지 않았다. 하지만 퇴적층의 온도가 영하 3도 이상인 남부의 경우 그 지역

이 넓지 않아 그 내에서 높은 변화가 이루어 졌다. 이 지역에서 용해된 점토질 퇴적층은 높은 수분에 의한 낮은 내하력과 높은 압축률을 특징으로 한다

영구 동토층의 확산으로 이 지역 북부와 남부에서는 동결 과정으로 인한 특이한 암군이 생성되었었다. 북부 지방은 동파작용에 의한 파열, 그 결과 동결과정에 의한 새로운 형태의 퇴적물 형성, 호수변과 해안가 퇴적층의 열마모에 의한 파괴, 남부 지역 비탈 토양의 동상침식 등의 특징을 지니게 되었으며 남부지방의 형성에는 열카르스트가 주된 역할을 하였는데, 이는 침수된 토양을 생성하여 지질 공학적 조건을 더욱 복잡하게 만들고 있다.

1.6 제 4기 퇴적층으로 구성된 강 계곡의 지질 공학적 특징

이 지역에는 오브, 이르티쉬, 예니세이, 나딤, 푸르, 타즈강과 그 지류들의 계곡이 있다. 이 지역에서 발달된 범람원 위 제 3 또는 제 4 고조 단구에 지역의 경계가 있다. 이 지역은 고원의 남쪽 경계부터 북쪽 경계까지 뻗어 있으며 광범위한 지역 내에는 다양한 자연 지대가 공존한다. 고원의 남쪽 경계부 옴스크-노보시비르스크까지는 삼림 스텝이, 카짐강까지는 타이거 지대가, 그 북부는 북 타이거, 삼림-툰드라 및 툰드라 지대가 펼쳐져 있다.

주요 지질 공학적 특징을 결정하는 골짜기의 일반적 형태는 이들 골짜기의 발달 역사, 특히 역사적인 기후조건과 신기구조적 이동 등에 의해 결정된다. 제 4기의 구조지질학적 운동을 통해 남부에서 북부까지 고원의 단층이 생성되었으며 하천망이 형성되었고 북쪽으로 가면서 강의 깊이가 더욱 깊이지게 되었다. 세미파라틴스크 근처 이르티쉬강 수변의 절대표지는 185m, 파브로다르강은 108m, 옴스트강은 69m, 칸티-만시스크강은 23m이다. 오브강의 경우 128m, 바르나울 강 근처에서는 93m로 바뀌고 노보시비르스크 근처에서는 오브스크 베이의 바흐에서 풀 어귀에 35m로 바뀐다. 후기 제 4기 및 완신세 동안 발생한 운동의 속도는 서로를 절개하는 수렴 단구를 형성하였고 절단 깊이는 새로운 단구가 오래된 단구보다 더 깊도록 형성되었다. 구조지질학적 운동의 방향은 퇴적층 축적의 역동적 단계, 구조, 및 형태를 결정하였다. 사질 퇴적층은 따뜻한 기후의 구조지질학적 운동하에서 형성되었고 점토질 퇴적층은 이보다 추운 기후 하에서 생성되었다.

전반적으로 강 유역의 골짜기들은 음의 구조 (골(trough)과 요곡)과 관련이 있다. 수많은 강의 지류들이 북동쪽 및 북서쪽 방향으로 흐르는데 주요 하천의 계곡과 그 지류의 길이는 고원 (옴, 타라, 데미안카, 타브다, 치하프카 강 등)의 퇴적층의 단층화, 교차 등과 관련이 있다. 수원(水源)의 너비는 25~30km이며 중간 및 하구는 100km 이상이다. 골짜기는 주로 수원의 범람원과 그

위의 네 개의 단구로 구성되어 있다.

범람원과 그 위의 단구는 강바닥에서부터 계단식으로 솟아 있다. (이르티쉬 계곡, 오브강 중류 우측 제방). 이 지역에는 범람원이 대부분을 차지하며 모든 강과 지류의 유역에 실선처럼 뻗어 있으며 강 어귀의 너비는 20~40km 정도이지만 수원쪽은 2~4km로 줄어든다. 수변 아래 범람원의 상대 높이는 2~8m이다. 또한 제 3단구가 광범위한 하천 계곡을 차지하고 있으며 10~40km의 너비, 길이는 수십 킬로미터에 이르기도 한다. 범람원 위 제 2단구는 범람원 위 제 3단구보다는 작지만 꽤 넓은 편이다. 제 1 단구는 가장 넓이가 작은데 그 이유는 국소적으로, 규모가 작은 곳에서만 발전하였기 때문이다. 범람원 위 제 4 (혹은 다섯 번째) 단구는 오브강, 이르티쉬강 등과 같은 큰 강의 수원에서 발달하는데 보통 너비가 25~70km이다. 제 1 단구의 높이는 6~10m, 두 번째는 12~20m, 제 3는 25~30m, 제 4는 35~40m이다.

전체적으로 수원의 단구는 침식 및 퇴적형이며 중간이나 하구에서는 퇴적작용이 더 활발하다. 암석 구성의 규칙적이고 일시적인 변화는 이 충적층의 특징이다. 충적층은 범람원의 경우 깊이가 5~10m(강어귀)이며 중간이나 하구에서는 25~30m이다. 범람원 위 제 1단구의 깊이는 5~25m, 제 2단구는 10~30m, 제 3단구는 10~35m이다. 범람원과 그 위의 제 1단구는 사토, 특히 미세 사토와 실트질 사토가 잘 발달되어 있다. 양토와 양질사토, 이탄 등은 전반적으로 띠 모양의 형태로 번갈아 층층이 쌓여 있고 상단에 5~10m 정도의 두께를 형성한다. 제 2단구 및 제 3단구는 사질 및 점토질이 거의 동일한 비율로 발견된다. 점토와 양토는 상단 10~15m 부근을 차지하고 있다. 이 중 중양토가 가장 많이 발견된다. 하단에는 사질 퇴적층이 발견되는데 이 중 실트질 토양 및 미세 토양이 가장 발달되어 있다. 상류 단구의 바닥에는 중간 크기의 거친 입자를 지닌 사토는 거의 발견되지 않는다. 제 4 단구의 퇴적물은 30~60m 이상의 두께를 지녔다. 바닥(1~15m)에는 입자가 거칠고 자갈이 섞인 사토가 띠를 이루고 있는 것이 보이는데 위로 올라가면서 미세하고 입자가 약간 작은 사토가 발견되며 상단은 전체적으로 양질사토와 양토, 황토 등이 보이며 사토는 거의 나타나지 않는다.

점토질 토양의 밀도는 토양의 구성, 조건, 수분(빙하의 함유 유무)에 따라 0.95~2.30g/cm^3로 변한다. 특히 빙결 퇴적물의 경우 변화 정도가 심한데 층을 이룬 극저온 구조의 빙결 퇴적층은 가장 밀도가 낮다. 용적 중량이 1.40g/cm^3 이하인 잘레하르드스카야시리즈의 빙결 점토질 퇴적층은 1.51~1.70g/cm^3의 용적중량을 지닌 퇴적층과 동일하다 점토질 토양의 밀도는 토양의 구성, 조건, 습도 (빙하 함유율)에 따라 0.95에서 2.30g/cm^3까지 다양하게 변한다. 특히 동결 충적층의 경우 밀도가 상당히 변화하는 것을 볼 수 있다. 층리화된 동결 구조를 지닌 동결 충적층은 밀도가 가장 낮다. 용적 중량이 1.40g/cm^3 이하인 동결 점토질 충적층으로는 살레하르드스카야

시리즈 단면이 있는데, 이는 용적 중량 1.51~1.70g/cm^{3}인 충적층과 유사하게 잘 발견이 된다. 용적 중량 1.71~1.80g/cm^{3}에서 2.11~2.20g/cm^{3}인 충적토의 경우에도 마찬가지이다. 빙결퇴적층과 달리 이러한 점토질 퇴적층의 밀도는 1.53~2.30g/cm^{3}로 더욱 다양하게 변화한다.

오브강의 중류 및 하류와 이르티쉬강의 하류의 범람원의 경우 제 2, 제 3단구는 호성, 호성-충적토로 구성되어 있으며 이 중 점토질 퇴적물이 대부분을 차지한다.

단구의 하단에는 다양한 퇴적층이 존재하는데 상단의 경우 단구 바닥은 화강암, 사암, 석영, 반암 등 고생대 암석으로 구성되어 있다. 이르티쉬 중류의 단구는 신 제3기 부를린스카야 시리즈의 점토질 퇴적물로 구성되어 있다. 오브강 중류 및 하류, 이르티쉬 하류 등에서는 점신세 후기의 사암질과 실트질 퇴적물 및 제 4기 중기의 사암질 점토질 퇴적층이 발견된다.

최근의 기후 조건과 신기구조의 운동은 이들 골짜기의 지질 공학적 특징에 많은 영향을 주었는데, 특히 지하수의 깊이와 광물질화, 구성과 퇴적층, 최근 외생적 과정의 특징 및 강도 등을 결정하는 요인이 되었다.

2. 동 시베리아

동 시베리아의 지질 구조 및 역사는 지질공학적 관점에서 아주 많은 특징을 지니고 있다.(그림 2.2.3 참조) 이곳은 강하게 굳은 퇴적층이 널리 분포되어 있고 대부분이 화산암으로 구성되어 있다. 등부 및 남서고원에서는 삭박 기복(起伏), 제 4기 퇴적물이 주를 이루며 빙퇴석은 거의 발견되지 않는다. 바이칼호에 면한 고원의 남동부는 높은 지진활동도가 특징이다. 영구동토층의 암석은 이곳의 대부분에 뻗어 있으며 만년설도 곳곳에 발견된다.

제 1기에는 고원의 하단에 습곡구조가 형성되어 알다니안 순상지, 아나바르스키 단층지괴, 예니세이강의 안가로-칸스카야의 고원 위로 돌출되어 있다. 시생대의 마그마 효과로 화강암화작용이 일반적으로 발달하였고 이는 다시 편마상 화강암과 혼성암을 발생시켰다. 시생대 구조지질학적 구조에는 거대한 습곡대가 형성되어 있다. 이 중 알다니안 순상지와 아나바르 단층지괴의 시생대 습곡은 북서쪽으로 뻗어 있다.

원생대지향사 시스템 (바이칼리드)에서는 두 개의 거대한 구조상 암군이 분리되어 있는데, 이는 특히 예니세이강에 잘 나타나 있다. 이는 오래된 고원 가까이에 쌓인 육성(陸成) 및 탄산염 퇴적층의 전형적 모습을 갖추고 있다. 이는 지향사의 중부 지방에 퇴적된 두터운 화산성 녹옥으로 주로 구성되어 있다. 예니세이 지향사에서는 거대한 융기 및 습곡 과정이 발생하였다. 그 후 이 융기 지역은 리피안 삭박과 육성, 육성-탄산염과 탄산염의 퇴적에 의해 한층 부드러워졌다.

예니세이 지역의 지향사 단계의 발달은 고생대 전기 시베리아 고원의 일부인 원생대와 캄브리아기의 거대한 구조지질학적 운동으로 완성되었다.

상단 구조는 후기 원생대부터 제 4기의 암석으로 구성되었는데 여러 레벨로 구성된다. 전기, 중기 및 고생대 퇴적층은 주로 몰라세와 유사한 육성 암석이 주를 이루고, 탄산염과 육성-탄산염 층은 거의 남아 있지 않다. 제 3 구조 레벨은 페름기와 트라이아스 중후기 석탄층으로 구성되는데, 10° 이하의 기울기를 지닌 퇴적물이 존재한다. 이 단면은 함탄층 및 마그마 함유층으로 나타난다. 제 4 구조 레벨은 중생대 후기에서 신생대 전기의 함탄층과 홍석층으로 발현된다.

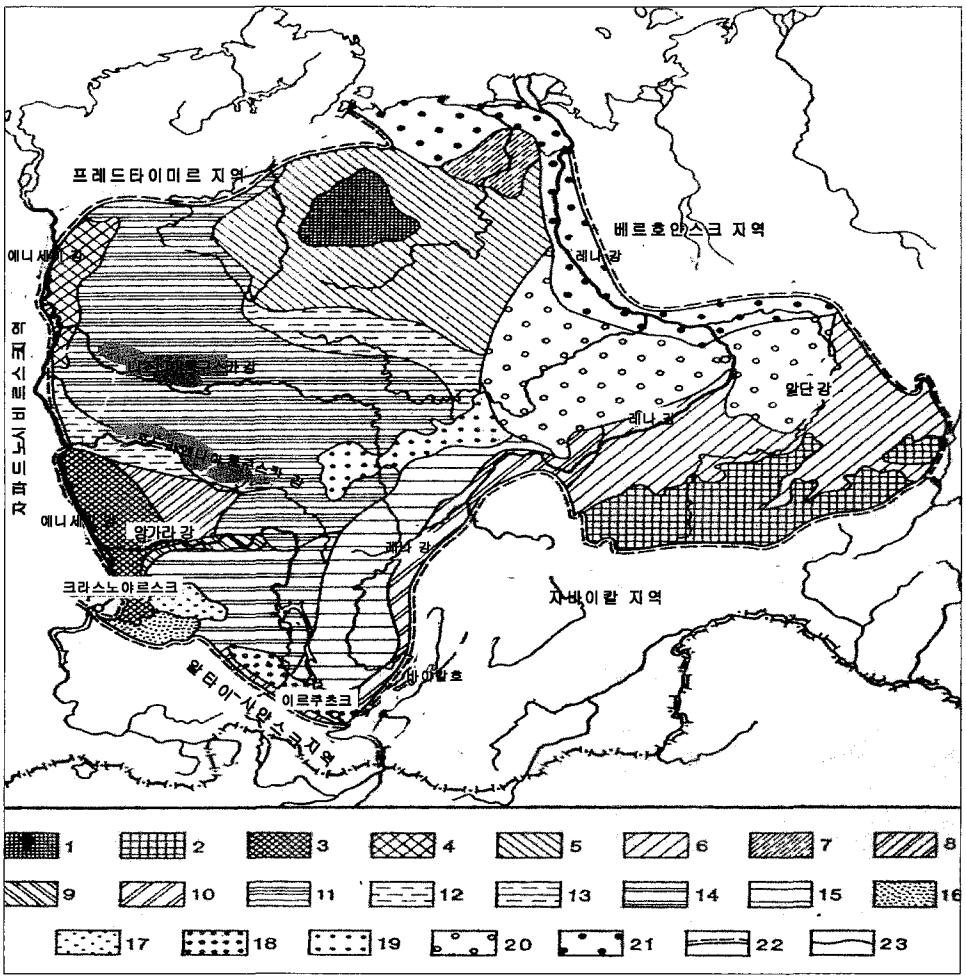


그림 2.2.3 시베리아 고원을 지질공학적 기준으로 나눈 구역도

1-아나바르스키 2-알단스키 3-예니세이스키 4 - 노릴스코-투루한스키 5 - 프리아나바르스키 6 - 프리알단스키 7 - 올레네크스키 8 - 보스토호노 - 예니세이스키 9 - 안가르스키 10 - 프리바이칼스키 11 - 튼구스키 12 - 자파드노-튼구스키 13 - 보스토호노-튼구스키 14 - 튼구스키 15 - 안가로-렌스키 16 - 리빈스키 17 - 칸스키 18 - 이르투츠키 19 - 안가로-빌루이스키 20 - 빌루이스키 21 - 프리베르호얀스키 및 아나바로-렌스키 22 - 시베리아 고원 23 - 2차 지질 공학적 지역

시베리아 고원에서는 전기 레벨에서 후기 레벨까지 암석의 석화작용 및 암석화 과정이 지속적

으로 축소되었다. 이는 하단의 습곡구조 및 고원의 퇴적물 모두에 적용된다. 고생대 전기 및 중기의 퇴적암은 암석화가 상당히 진행되어 견고한 사암과 점토암 등을 생성시켰다. 중생대와 신생대 전기의 암석은 두껍게 형성되었지만 암석화는 중간 강도로만 진행되었다. 제 4기 퇴적층은 부드러움 점토, 압축 가능한 실트질 양토와 양질사토, 무른 사토와 자갈 등, 낮은 등급의 암석화로 발현된다.

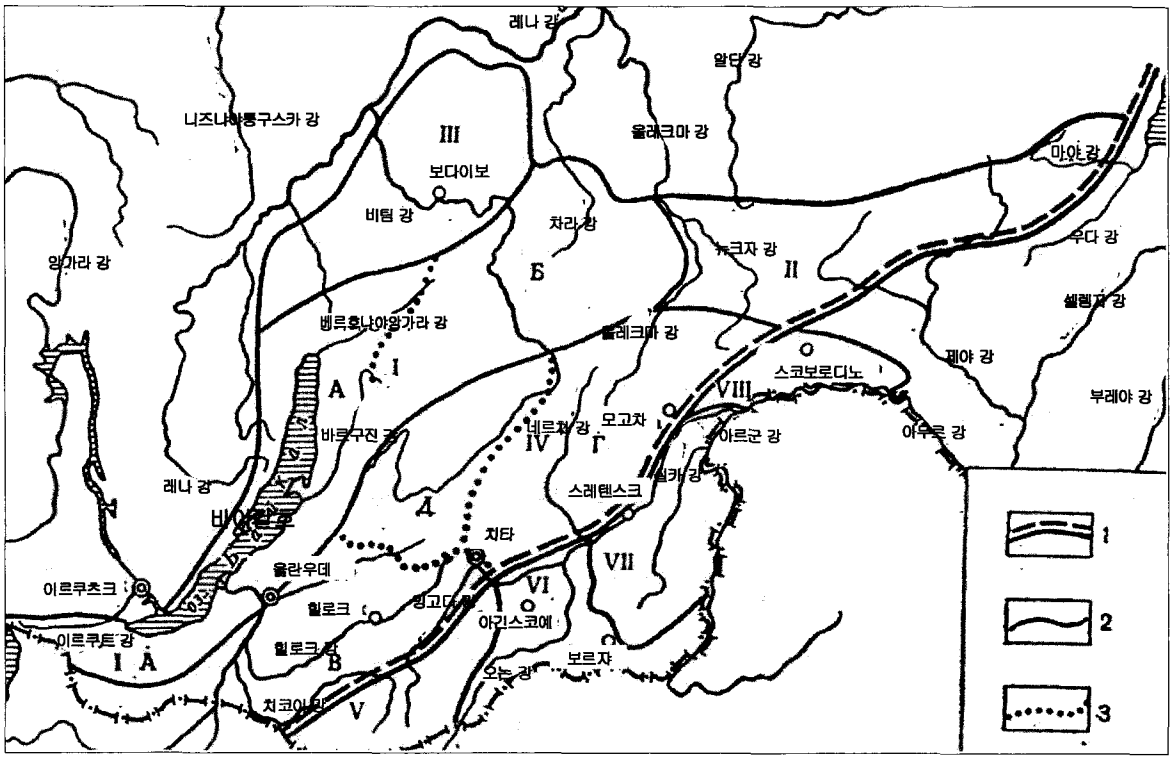


그림 2.2.4 트란스바이칼리아 지대의 지질공학적 단면도

1-지질공학적 지역 (제 1차): I-바이칼-스타노보이, II-몽골로-오호츠키
2-지질공학적 지역 (제 2차): I-바이칼스키, II-츠후그츠후로-스타노보이, III-바이칼로-포톰스키, IV-셀렝기노-비팀스키, V-다이르스키(케엔테이-치코이스키) VI-아긴스키(오논-아르군스키) VII-실킨스코-아르군스키, VIII-베르흐네-아무르스키
3-지질공학적 지역: A-프리바이칼스카야, B-스타노보에 고원, C-셀렝긴스카야, D-네르차-올레크민스카야, E-비팀스카야

남 시베리아의 조산대는 러시아에서 가장 거대한 고지 중 하나인데 트란스바이칼리아(그림 2.2.4)가 이에 해당되며 면적은 약 1,200,000km^{2}에 달한다. 다년형 퇴적층, 화산성 암석 및 관입암은 이 트란스바이칼리아의 대표적 지형 특징이다. 이 지역의 특색을 정리하면 다음과 같다.

- 화성암, 주로 화강암 구조로 되어 있다.

- 대부분의 지역은 산의 기복(起伏)이 발달하였고 산 사이, 침수된 곳에 평원이 발달하였다.
- 영구동토층 암석이 널리 분포;
- 대륙성 기후 때문에 지반의 계절적 동결을 초래하였다.
- 높은 지진 활동 (리히터 규모 6~10도)

알타이-사얀 고지(그림 2.2.5) 쿠즈네트스키 알라 타우, 서부 및 동부 사얀, 탄누-올라, 상길렌, 아카데미시안 오브루체브 및 미누신스키와 투빈스키 요곡의 산악 구조를 덮고 있다. 알타이-산얀 고지의 지질 구조적 성격으로 본다면 가장 복잡한 러시아 지역 중 하나이다. 이 지역은 시생대에서 제 4기까지 다양한 구조와 연대를 지닌 두꺼운 퇴적층, 화산성 암석 및 관입암 등으로 구성되어 있다.

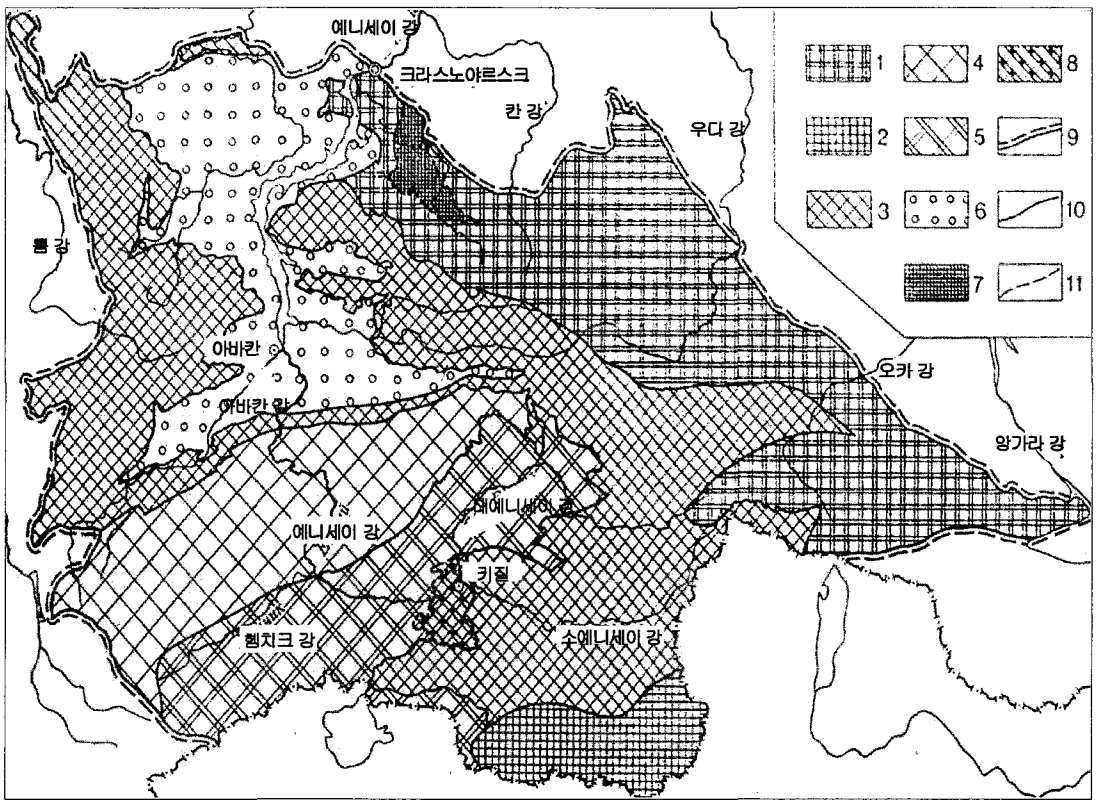


그림 2.2.5 알타이-사얀 고지의 지질 공학적 단면도

지질공학적 지역 (제 2차):
1-동부 사얀; 2-상길렌스키; 3-사얀-알라타우; 4-서부 사얀; 5-투빈스키; 6-미누신스키
지질공학적 지역 (제 3차):
7-만스키; 8-키질스키: 9-알타이-사얀 고지; 10-지역(제 2차); 11-지역(제 3차).

알타이-사얀 고지의 기복(起伏) 및 퇴적층은 이미 기복의 형성과 재형성이 외생적 과정으로 이루어진 중생대에 형성되기 시작하였다. 고(古)제 3기 동안 북부에서는 흰색, 핑크색, 갈색 점토로 발현되는 붉은색 토양이 발달하였는데, 이는 주로 몬모릴로나이트, 수운모, 고령토 등으로 구성된다. 함탄층은 호성-충적성 환경에서 형성되는데 이 퇴적층은 두터운 층의 갈탄을 함유하고 있으며 호수 가까이에는 사질 점토질의 붉은색 퇴적층이 발달한다. 호성 및 호성 충적층의 점토질 퇴적물은 미누싱크 함몰지에 형성되었다. 남 미누신스크 함몰지에서 형성된 자갈들은 바로 이 단계와 연관이 있다. 파괴된 용암과 재들이 이 지역의 동부에서 발생하였고, 그 두께는 10~140m에 이른다.

2.1 영구동토 퇴적층 발달의 역사와 최근 지질설빙학적 조건의 메커니즘

영구동토 퇴적층 배치와 두께의 규칙성은 이 고원의 역사적, 기후적, 지질구조적 특이성과 관련이 있다. 지질설빙학적 지대는 이 시베리아 고원 내에서 남부와 북부 지대로 나눌 수 있다. 각 지대의 경계는 바로 환신세 후기 및 홍적세의 동결층 경계와 일치하며 이 경계에 의해 최근의 지질설빙학적 특징이 나뉘기 때문에 지질 공학적 중요성도 꽤 높다.

이 지역의 대부분의 표면에서는 기반암이 생성되었다. 북부 지대에서 가장 특징적인 부분은 30~60m 깊이로 높은 열개성과 빙하를 함유한 기반암이 존재한다는 점이다. 동결 과정에서 발달한 것은 다음과 같다. 지반의 동파작용, 파쇄 및 분리, 융빙 퇴적 과정, 반복 쐐기 빙하의 형성과 함께 동파 작용. 상대적인 침하 및 퇴적작용에 의해 광활한 중앙 야쿠츠크 저지대의 지질설빙학적 특징이 발생하였다. 이곳에서는 두터운 사질 점토질 퇴적물의 동결이 퇴적작용과 동시에 발생하였고 그 결과 퇴적물은 높은 빙하 함유율을 지니게 되었다. 그 주된 이유는 깊이 50m까지 동생적 반복 쐐기 빙하가 발달했기 때문이다. 제 4기 퇴적층의 높은 빙하 함유율, 반복적 쐐기 빙하의 광범위한 발달 등과 함께 열카르스트가 진행되고 동파작용 및 융기가 초래되었다. 시베리아 고원의 남부 지역의 빌리위스키와 프리베르호얀스키 지역에서는 융기 둔덕이 열카르스트 함몰지의 바닥과 관련되어 있다.

레노-암긴스코예 하천간 지역은 전체 함몰지의 20~30%가 있는 곳이다. 융기 둔덕의 높이는 1.5~40m까지 다양하며 바닥의 지름은 20~100m까지 다양하다. 둔덕의 중심부는 무거운 빙하를 함유한 지반 혹은 빙하성 렌스로 구성되며 두께는 최대 9m나 된다.

나머지 동결층은 남부 및 동부 가장자리를 따라 한정된 지역에서만 발달하였다.

니즈나야 툰구스카 강 유역에서는 영구동토 퇴적층이 불연속적으로 확장된 지역 내에서 융기

둔덕이 널리 발달하였다. 계절동결 및 영구동결을 거친 융기둔덕은 단구와 하천 사이의 평평한 침수 지역에 발달된다. 둔덕의 높이는 1~2m를 넘지 않으며 주로 광물 토양 및 이탄으로 구성되어 있다.

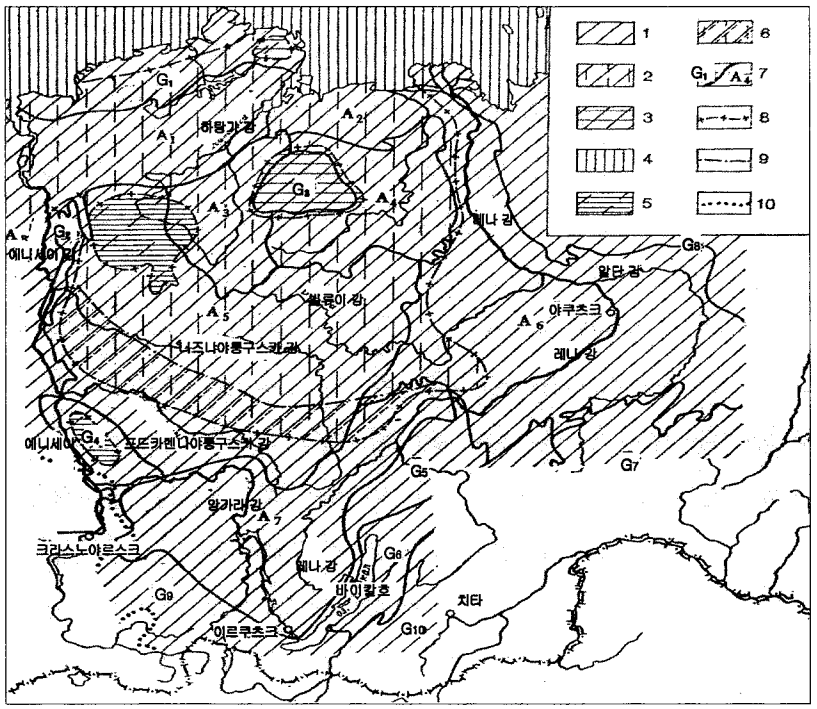


그림 2.2.6 시베리아 고원의 동결층 형태

1 - 1층(1형); 2 - 2층(2형); 3 - 2층(3형); 4 - 2, 4, 6형; 5 - 2, 3, 7형 및 8형; 6 - 2형 동결구조의 하위 "b"형. Bounds: 7 - 1차 수리지질학적 분지; 8 - 다양한 형태의 동결층의 확산 지역; 9 - 하위 형태의 동결층 확산 지역; 10 - 영구동토암 지역. A - 1-8 빙하를 지닌 아르테시안 분지: 카탄기스키, 아나바로-올레네크스키, 코투이스키, 올레네크스키, 툰구스키, 야쿠츠키, 안가로-렌스키, 서 시베리아 G- 1-0 빙하를 지닌 수리지질학적 단층지괴체제: 타이미르스카야, 카크타이스카야, 아나바르스카야, 파토모-비팀스카야, 바이칼로-타르스카야, 베르호이아노-콜림스카야, 보스토츠노-사얀스카야, 다우르스카야.

예니세이강의 하루에서는 실트질 퇴적층이 융기하였다. 영구 융기 둔덕 및 계절적 융기 둔덕 중 빙하 코아를 지니는 곳도 있다. 1년 된 둔덕의 크기는 모두 다르며 길이도 몇 미터에서 100 미터까지 다양하다. 라이다의 융기 둔덕 높이는 7~10m, 때로 15m일 경우도 있다. 이들의 규모는 20~200m까지 다양하며 한 둔덕의 길이가 300m인 경우도 있다. 전체적으로 둔덕은 0.5~0.6m 깊이의 이탄으로 구성되며 하단은 5~7m 두께의 빙하성 렌스를 포함한 빙하성 실트질 양토가 덮여 있다. 알단 지역의 경우 표면의 빙결층, 그리고 계절적 융해를 거친 바닥이 융기 과정을 촉진시켜 융기 둔덕과 다양한 형태의 미세기복지형을 만들어 내었다.

프리바이칼리의 남동부 지역에는 빙퇴구와 우각호가 발달하였다.

이 영토의 대부분이 지니는 설빙학적 조건은 수리지질적 조건과 밀접한 관련이 있다.

이와 더불어 설빙학적 조건을 형성하는 데에 중요한 영향을 미치는 요인은 바로 암석학적 조건이다. 무엇보다도 영구동토층의 암석, 탄산염 퇴적의 확산 과정에는 어느 정도의 규칙성이 발견되며 카르스트의 확산 및 발달 조건을 평가할 수 있다. 이 지역의 동굴수는 융해되는 과정에서 암석의 높은 온도, 비연속성, 동결 퇴적물의 얇은 두께 등에 강력한 영향력을 미친다. 시베리아 고원의 단사 카르스트 계곡, 특히 야쿠츠스키, 안가로-렌스키, 툰구스키 계곡의 경우 아주 좋은 예가 될 수 있다. 알단 습곡 지역에서는 유흐틴스코-일리마흐스키 및 기단스키 카르스트 계곡이 이 예에 속한다.

퇴적층의 온도와 두께 형성, 동결 퇴적물의 비연속성과 두께에 영향을 미치는 국지적 요인들을 알아보기 위해서는 제 4기 퇴적층의 비탈의 노출, 적설, 초목, 퇴적층의 구성 및 습도 등을 구분해서 살펴보는 것이 좋다. 위의 정보 없이는 이 지역의 발달 과정에서 지질설빙학적 상황의 변화를 예측하는 것이 어렵거나, 심지어는 불가능하기 때문이다.

자바이칼리의 영구동토 퇴적층의 확산은 이 지역에서 매우 불규칙적으로 이루어진다. 실카, 우다, 바르구진강과 즈히다, 인고다, 치코이 강 유역은 모두 영구동토암으로 덮여 있으며 융해퇴적층은 전체 면적의 불과 5%에 지나지 않는다. 대부분의 경우 연속적 영구동토퇴적층의 두께는 영하 1.5~2도의 온도에서 100~200m 이상이다. 가장 두터운 곳은 (-7℃이하, 800m이상)은 코다르와 우도칸의 산악지대로 이 곳의 영구동토 퇴적층의 두께는 300~900m에 다다르며 코다르의 두께는 -12℃에서 1,200m나 된다. 영구동토지대의 불연속성은 거대한 강과 호수의 골짜기, 그리고 지하수 근처에서 발견된다.

1℃ 이상인 온도에서 20~25m 이하의 두께를 지닌 산발적 영구동토층은 10~20%정도의 확률로 두 개의 단절된 영역 내에서 관찰된다. 이 영역은 광대하고 평평한 계곡과 상대적으로 따뜻한 기후라는 특징이 있다. 이곳은 남서쪽 바이칼 호수변과 서부 셀렝가강의 계곡, 동쪽의 오논과 아르군 하천 사이의 지역을 의미한다. 여기에 산재된 섬들은 기복지형과 구조지질학적 분지의 함몰지역에 집중되어 있다. 기복(起伏)의 비균일한 개석을 지닌 다른 모든 영토는, 연평균의 추운 온도차가 많이 나는 곳에서 강하고 약한 비연속적 영구동토층이 발생하는데, 상대적으로 얇은 두께(25~120m)와 영하의 온도(-1~-2.5℃)를 특징으로 한다.

융기 지역의 특징인 후생적 영구동토층은 지속적으로 확산되고 있다.

암석의 동결 구조는 균열과 공극률에 의해 결정된다. 결정암의 빙하 함유율을 그리 높지 않다. 풍화 및 파쇄 등으로 초래된 빙하성 균열의 길이는 5~15cm, 때로는 30~50cm일 경우도 있다. 조밀하지 않은 퇴적층은 빙하를 더 많이 함유하며 반복된 쐐기 빙하, 매설 빙하에서는 균열과

렌스가 발견된다.

트란스바이칼리아는 북부와 남부의 두 개의 지질설빙학적 지대로 나뉜다. 북부 지대는 동결암, 상당한 두께 등 상대적으로 통일된 지질설빙학적 조건을 지니고 있다.

산악지대의 동결암의 최대 두께는 산의 범위와 강, 함몰지 등과 관련이 있다. 트란스바이칼리아의 중하급 산에서는 반비례 관계를 보인다.

대부분의 프리바이칼리 지역은 상단 빙결띠 내에 자리잡고 있는데, 이곳 암석의 온도는 골짜기의 하단에서 강의 유역까지 지속적으로 감소하는데, 보통 100m당 평균 0.8~3.5도씩 낮아진다. 최저 온도를 지닌 두터운 동결암 덩어리는 상단 지질설빙학적 띠에 형성된다.

지하수가 침투하는 곳은 온도 변화가 일어난다. 따라서 눈이나 암석의 융해로 비롯된 물은 거친 입자의 퇴적암이 쌓인 강의 골짜기나 함몰지 중앙부에 쌓이게 된다. 이러한 요인들 때문에 강유역이나 강바닥에 복잡하고 불안정하게 탤릭이 확산되는 것이다.

바이칼 호수와 같은 거대한 분지는 영구 동토층의 암석이 지속적으로 발달한다 하더라도 지반과 수표면의 영향으로 탤리크가 20%이상 솟아나기도 하며 자바아킬스카야 함몰지(12%)보다 더 높을 때도 있다. 하천 분지의 지질적 조건은 영구동토층의 암석이 비연속적이고 산발적으로 확산되는 지역에서 그 차이점이 더욱 두드러진다. 영구 동토층 암석의 확산과 형성이 지니는 특이성에 의해, 프리바이칼리와 자바이칼리의 구조분지와 바이칼스키 및 자바이칼스키 형태의 영구동토층 암석이 구별된다. 바이칼스키 형태의 암석은 바이칼스카야 열곡대의 구조분지에만 해당하며 이는 신(新)제3기-제4기의 두터운 퇴적층으로 완성되었다(500m이상).

자바이칼스키 형태의 영구동토층 암석은 동일한 이름의 구조분지에서 나타난다. 동결암의 최대 두께는 -0.1℃에서 -4.4℃일 때에 100~350m나 되며 5m의 깊이에서, 또는 남부의 경우 10m 이상 깊이에서 동결암의 균열이 일어난다.

트란스바이칼리아 지역의 영구동토층과 동결암의 확산과 형성이 지니는 특이성은 설빙학적 지역과 하위 지역의 영토를 구분하는 요인이 된다.

영구동토층과 트란스바이칼리아의 기후적 조건은 빙구, 토양의 융기, 열카르스트 등의 다양한 응결과정의 특징을 결정한다.

영구적 융기둔덕은 계절적 융기둔덕보다 훨씬 넓고 대부분은 켄테아-치코이스쾨 평원에 산재해 있다. 이들의 높이는 3~10m, 극히 드물게는 16m 정도 되며 직경은 80~100m에 이른다. 단일 둔덕도 있고 무리를 지은 융기 둔덕도 발견된다. 주로 무리 둔덕은 저류를 따라 늘어서 있다.

자바이칼리스키 지역 널리 영구동토층이 발달함으로써 최근의 수리지질학적 조건이 결정되었으며 초동결, 저동결, 동결간 지하수를 형성하는 데에 영향을 미쳤다.

몽골로-오호츠크 지방에서는 지반의 동결융기가 아주 흔하게 일어난다. 함수량이 높은 양질 토양으로 구성된 계곡의 하단, 하성평야, 단구 등은 이러한 과정을 발전하는 데에 가장 유리한 곳이다. 여기서 계절적 융기와 영구적 융기 둔덕이 모두 형성된다.

계절적 융기둔덕의 높이는 0.5~3.5m이며 직경은 2~30m에 달한다. 계절적 융기의 첫 번째 신호는 11월 말부터 12월 초에 관찰된다. 둔덕의 성장은 3월까지, 때로는 5월에서 6월까지 지속된다.

알타에-사윤스카야 고지의 중요한 특징은 넓은 지역에서 영구동토층이 발달했다는 점이다. 두터운 암석과 공간 배치 때문에 고도상 벨트의 기후적 특징의 영향을 받지 않으며 홍적세로의 발달이 촉진되었다. 영구동토층 암석은 이 지역, 특히 산간지역에서 광범위하게 발달되었다.

동 사얀 (키토이스키 및 벨트스키 봉우리)에서 보면 영구동토층 암석의 두께는 유역의 경우 600m, 높이는 2,100~2,150m(바룬-콜빈스쾨 퇴적물)에 달하며 산허리에서는 650m(피오니어의 퇴적지역)에 달한다.

지온증가율은 0.8~2℃ 사이에서 변한다. 영구동토층 암석의 두께는 대부분의 경우 절대 높이가 상승할 경우 증가하며 계곡 아래에서는 감소한다. 평균 온도가 자주 바뀌는 동 사얀의 경우 암석층의 두께는 30~40m이며 이 깊이에서 암석의 온도는 1℃에서 8.5℃까지 변화한다. 산악지역의 계절적 융해를 거친 지반의 두께는 25~30cm이며 보통 1~1.5m를 넘지 않으며 함몰지 가장자리나 남쪽 비탈의 경우 2.5m 정도이다.

비 영구동토층 암석 벨트와 산악 지대의 골짜기에 있는 동결지대의 두께는 최대 3m이며 때로 (켐치스카야 함몰지)는 4.5m일 경우도 있다. 계절적 동결 암석은 6월 말 혹은 7월 초에 융해 과정이 끝나지만 날씨에 따라 2~3년 내내 융해되지 않는 경우도 있다. 이 경우 만년설이 발달하게 된다.

영구동토퇴적층 및 계절적 융해 지대의 존재는 동상침식과정을 초래한다. 영구동토층이 아닌 곳에서의 계절적 동결은 특정 토양과 동결 현상을 일으키게 된다.

주로 열카르스트에서 생성된 호수는 저수지 아래의 비연속적 동결층을 결정하는데 이와 함께 광활한 야노-콜림스카야 및 콜림스카야 저지에 탤리크가 발달하기도 한다.

영구동토층 암석이 드문드문하게 대규모로 발달하는 지대에서 빙결 퇴적층은 10-15% 이상을 차지하지 않으며 범람원이나 그 위의 단구, 이탄지, 북쪽 산허리, 삼림지역 등의 침수된 지대에 한정되게 발달한다. 이 지대 내의 탤리크는 발생학적으로 보면 수리지질적, 수문학적 특징을 지닌다. 이 지역은 영구동토층의 발달 지대보다 훨씬 더 넓으며 이 지역의 남부 저지대에는 영구동토층 암석이 없다.

2.2 제 4기 퇴적층 및 형성 조건

제 3기 후기에서 홍적세 전기의 충적층은 툰구스키 지역의 중부에서 가장 많이 발달하였다. 평균 두께는 50~90m이다. 남부의 경우 높은 하안 단구(절대표지 60~110m)에 얇은 층 (1~15m)의 퇴적층이 발견된다. 충적층은 사질과 자갈 퇴적물로 구성되며 중부의 경우 8~10m의 두께를 지닌다. 남부지방의 경우 자갈로 이루어진 퇴적층은 다시 사토와 양질사토로 뒤덥혀 있다. 사토는 입자가 거칠고 다양하다. 옥석과 자갈은 화성암이며 남부지역에서는 부싯돌, 규암, 석영 등도 발견된다. 점토질 물질은 주로 몬모릴로나이트로 구성된다. 낮은 하단은 아주 촘촘한 퇴적물이 쌓여 있는데, 마치 고화되지 않은 사암, 사력층과 역암 등과 닮아 있다.

레나, 빌리루이, 마르크하, 알담과 같은 높은 하안단구의 퇴적층은 먼저 입자가 다양한 사토로 구성된다. 이 사토는 하단에 철 역암으로 고체화된 자갈을 많이 포함하고 있다. 고조 단구의 퇴적층 두께는 10~30m이다. 레나 계곡은 하단으로 갈수록 거친 입자의 석영이나 자갈등이 증가한다. 레나강의 좌측 퇴적층은 점토질 사토로 구성되어 있다.

제 3기-제 4기 전기까지 아나바르스키 지역의 충적층은 빌리루이 유역에 분포해 있는데 절대표지는 280~400m이며 무나강 북쪽으로는 250~280m이다. 무나강은 점토, 석영, 석회암, 화성암 및 사암 등으로 구성되어 있다. 이 퇴적층의 특징은 수많은 이탄 렌스인데, 빙하 함유율이 높고 15m 정도의 두께를 지닌다. 수평으로 불연속적 층으로 이루어진 대부분의 구간에서, 0.5~0.9m 깊이부터는 얇은 층(1~30mm)의 분리된 빙하가 있다. 때로 빙하성 소맥이 다양한 각도로 존재하여 거친 망상조직을 형성한다. 2~5m 깊이의 수평적 빙하 균열 두께는 0.1~0.2m 정도이다.

자갈은 마르하, 타이웅, 무나 및 모토르춘 강의 분지의 평평한 유역에서 발달되었으며 절대표지는 130~200m이다.

예니세이, 타지바야, 앙가라 사이, 침식지 및 카르스트 분지의 상단에 함몰된 유역 의 충적층 두께는 100m이다.

자갈들은 풍화작용을 많이 받아 landwastes의 경우 고령토로 구성된 점토질 물질로 이루어져 충전재가 되는 데에 중요한 역할을 하였다. 건조한 상태의 사토의 마찰각은 32~37%, 수분 함유시는 22~25% 이다. 사토의 여과계수는 24시간당 0.5~2.5m이며 사토-자갈 퇴적층은 24시간당 5~10m, 자갈은 20m이다.

후기 제3기 - 전기 홍적세 퇴적층 (고조 단구 의 충적층) 은 계곡에서 가장 널리 확산되어 이 지역의 지질 공학적 특징을 결정하였다. 표면 수면은 두터운 점토질과 낮은 여과계수를 지닌 침수 상태의 소성을 지닌다. 이 특징들은 아래쪽으로 갈수록 거친 상(相)으로 변한다.

제 4기 중기-후기(Q2-Q3)의 빙하 퇴적층은 다양한 시대의 빙퇴석으로 구성된다. 빙하퇴적 평원은 프리예니세이스카야, 노릴스카야, 무루크틴스카야, 아가닐리스카야, 포니가이스카야 함몰지, 프리베르호얀스카야 등 광대한 지역에서 발생하며 단구 하단 또는 예니세이, 니츠, 툰구스카, 레나 강 등의 유역에서는 높이가 다양하게 나타난다.

빙하 퇴적층의 상호 관계는 아주 복잡하다. 빙하 퇴적물은 서로간 층을 이루고 있거나 표면이 빙하퇴적토 혹은 빙하-호성층으로 대체되는 경우가 많다. 두께가 1~3m, 때로는 50~60m인 빙퇴석은 (프리베르호얀스카야 평원에서는 최대 10m) 옥석 양질 사토, 양토, 혹은 사토나 점토 등으로 구성된다. 옥석-자갈 물질은 60~80%정도 되고 깊이가 깊어질수록 분량도 증가한다. 전체적으로 옥석은 큰 규모를 가지며 보통 0.5~1m 이상이다. 옥석-자갈 구성은 사질-알루라이트분(aleurite fraction)처럼 빙하 작용 중앙의 (푸토라나 평원, 아나바르스키 단층지괴, 올레네크스코-빌루이스쾨하천 사이 분지) 빙퇴석의 위치에 따라 달라진다. 빙퇴석의 빙하 함유율은 낮고 불완정한 층을 이루고 있으며 불완전한 망상 동결 조직을 지니고 있다. 사질 및 양질 빙퇴석 퇴적층의 수분은 10~15%, 극히 드물게 20%일 경우도 있으며 16m 이상 깊어지면 수분도 감소한다. 양질 빙퇴석은 빙하성이며 거친 망상 조직과 20m의 두께를 지닌 빙하 퇴적물을 지니고 있다.

자갈을 함유한 양토와 양질사토는 다음과 같이 측정된다. 항복점에서의 함수율: 24~25%, 소성 지수: 6~7, 동토의 밀도: 1.98~2.0g/cm^3, 동토 함수율: 19%, 융해시 함수율: 18%, 융해 토의 밀도: 2.04~2.05g/cm^3. 빙퇴석 층 상단의 높은 빙하 함유율, 층리를 이룬 동결 조직과 빙하성 렌스, 이질적 빙퇴석의 구성 등을 고려한다면 불규칙한 퇴적층이 상당히 많이 존재할 것이라는 예측을 할 수 있다.

노릴스크 지역의 옥석 양토와 양질사토는 평균 39~46%가 자갈, 옥석 등으로 구성되어 있고 사질 입자는 22~28%, 일트질 입자는 23~31%로 구성되어 있다. 융해 상태에서 함수율은 9~30% (양질사토의 경우 평균 20%, 양토의 경우 18%)이다. 여름에 빙퇴석 퇴적물의 평균 함수율은 양질사토의 경우 25%, 양토의 경우 30%이다. 동토의 밀도는 2.11~2.13g/cm^3, 공극률은 37%이다.

제 4기 중기-후기의 호성-빙적토, 호성퇴적토, 호성-충적토 및 완신세의 호성퇴적토, 호성-소택토 중에서 호성-빙적토는 함몰지나 아르가-살라강, 올레네크강 및 그 지류를 따라, 혹은 니츠. 툰구스카강과 그 지류, 쿠레이카 등의 계곡 내에서 발견된다. 이곳에서 호성-빙적토는 단구 높이에 따라 서로 다른 단면에서 발생된다. 두께는 무루크틴스카야 분지의 경우 5~20m, 때로는 30m에 달하는 경우도 있다. 때로 이 퇴적물은 1m의 얇은 맨틀에 의해 유역을 다시 덮을 때도 있다. 동결조직은 양토와 양질사토의 경우 층리가 되어 있다. 양질사토의 경우 평균 함수율은 3

5~40%, 실트질 사토의 경우 30~35%, 미세한 입자의 사토인 경우 20~28%이다. 입자가 고운 빙하퇴적토의 밀도는 1.94~2.24g/cm^{3}이다.

호성 및 빙적토는 점토질 입자는 거의 없는 가운데 실트질 입자가 높은 토양이다(3~35%). 호성점토의 점토질 입자는 50~80%에 이른다. 점토질 광물은 몬모릴로나이트로 발현된다. 사토는 미세하거나 작은 입자의 점토질로 구성된다. 영구동토층의 점토질 및 양질 퇴적층은 수평적 층으로 형성된 망상 동결 구조로 되어 있다. 빙하의 함유율은 30~60%이며 14~15m보다 깊을 경우 5~10%이다. 사토의 경우 통상적으로 괴상 구조를 지닌다. 점토질 퇴적물의 밀도는 1.7~2.0g/cm^3, 공극률은 40~60%, 함수율은35~45%이다. 높은 빙하 함유율과 공극률, 층리를 이룬 동결구조를 고려하였을 때 융해시 높은 토지 압축률을 기대할 수 있다.

호성, 호성-소택토는 얇아진 분지 및 단구 위 과대성장한 우곡에서 발견된다. 이 퇴적물은 코투야와 모예로하천 사이, 니츠강 유역 등에서 발견되며 툰구스카와 그 지류, 쿠레이카와 멜카야 소후, 리우스키나와 디우프쿤 호수 등에서도 발견된다.

최근의 소택토는 광범위한 영역에서 발견되는데, 보통 제 4기 퇴적층 위에 분포되어 있다. 이 퇴적층의 두께는 6~12m, 호성-소택토의 경우 2~6m, 그리고 호수지역 및 쿠레이카강의 경우 40~50m에 달한다. 이 퇴적층은 사질암 점토, 양토 및 양질사토로 발현되는데 주로 세베르나야, 우챠미강 유역 및 디우프킨, 리우스키노 호수 지역 등에 분포되어 있다. 호성-소택토에는 두께 1.5~2m, 또는 2~5m의 이탄 균열이 발견된다.

노릴스크-투루한스키 지역의 호성-소택토는 호수 가까운 평원 등에서 발달한다. 이는 0.5~0.6m 두께의 낮은 붕괴도를 지닌 이탄으로 구성되며 이 위에는 0.5m의 이탄 균열을 지닌 회색빛 양토, 양질 사토, 실트질 사토가 존재한다. 양질토는 보통 빙결 상태로 있고 90% 정도의 빙하 함유율을 지닌 얇고 거친 층의 동결 조직을 지닌다. 이 퇴적물의 밀도는 빙결 상태일 경우 1.46g/cm^3, 융해 상태일 경우 1.77g/cm^3 이다. 함수율은 33~35%로 높은 편이며 양토의 응착력은 0.025MPa이다. 융해가 진행되는 경우 토양은 유체 견고도를 얻게 되어 쉽게 변형 및 축소된다. 지반 침하율은 13~20%에 달한다. 동결 조직은 거친층, 망상층 및 괴상층으로 되어 있으며 아이스 밴드는 1.5m에 달한다. 함수율은 81~174%이며 평균 310%에 달한다. 밀도는 1보다 적다. 공극률은 70~90%이다. 이탄은 융해를 통해 토양 침하율는 60~80%에 달한다.

호성-소택토는 빙결 상태를 유지할 수 있는 일시적 조직의 기반으로만 사용될 수 있다.

제 4기 중후기의 빙하퇴적층은 아간닐리스카야, 무루크틴스카야, 포피가이스카야 분지, 우즈하 및 비인차임, 볼.쿠오남카강 및 아그라-살라 하천 사이, 니츠.툰구스카 계곡 및 지류, 코투이강 유역 등 넓은 지역에 분포하고 있다. 두께는 2~10m, 때로는 40m (미이페강)이 되는 경우도

있다. 동 빙하퇴적층은 사질 자갈 퇴적물 혹은 사층리된 사토, 양질사토 및 양토로 구성되며 이들은 거의 50% 이상을 차지한다. (아나바로-포피가이스키 유역). 빙퇴석과 같은 옥석 자갈 및 쇄설 물질, 사질-실트질 분말의 구성은 빙하작용이 발생하는 중심지점의 노두의 배치에 따라 달라진다. 사토는 다양하고 거친 입자로 구성되며 괴상 동결 조직을 지닌 미세한 실트질이 보이기도 한다. 양질사토 및 실트질 사토의 조직은 거친 망상, 얇은 슐리렌이다. 함수율은 20~40% 이다. 양질사토와 자갈 항복점의 함수율은 26%이며 자갈이 함유된 양토일 경우 30%이다. Rolling-out 한도에서 함수율은 이에 따라 18%, 21%가 되며 소성지수는 8과 10이다. 빙결 양질사토의 밀도는 1.9g/cm^3, 양토의 밀도는 1.8g/cm^{3}이다. 융해 양질사토의 밀도는 2.03g/cm^3, 양토는 1.98g/cm^{3}이다. 융해 과정에서는 퇴적층이 비균일한 일 가능성이 많다.

제 4기 중후기의 빙하성-해양성 퇴적층은 프리예니세이스키 지방과 노릴스코-리빈스카야 함몰지에 분포되어 있고 융기된 지역에도 존재한다. 이 퇴적층은 주로 자갈, 사토, 양질사토, 양토로 구성되어 있으며 입자는 거칠고 두께는 1~150m까지 다양하다. 20~25%의 양질-사질 및 양질 충전재를 지닌 자갈 퇴적층은 융해 상태나 빙결 상태나 모두 동일한 물리적 성질을 지닌다. 공극률은 25~37%, 26~36%이다. 이 퇴적층의 빙하 함유율은 낮아 침하율도 낮다. 사토는 괴상 동결조직을 지닌 자갈, 실트질 및 석영 장석으로 구성된다. 거친 입자의 물질 함유율은 20%를 넘지 않는다. 깨끗한 사토의 93% 정도는 거친 중간 입자로 구성된다. 함수율은 10~20%이며 미세 입자일 경우 10%이다. 융해된 사토의 공극률은 30~40%이며 빙결 사토일 경우 40~50%이다. 점토질 퇴적층 중에는 실트질 양토와 양질사토가 가장 많다. 이 중 자갈과 옥석의 함유율은 5~30%에 달한다. 이 퇴적물은 동결구조, 망상 및 망상층구조를 지닌다. 빙하 층의 두께는 2~10cm이다. 카이에르칸스키 탄광의 양질 퇴적물에는 빙하 렌스가 많이 발견되며 두께는 8~15m 이상이다. 빙결 점토질 퇴적물의 수분은 소성 상한선에 가깝거나 그 이상일 경우도 있다. 점토질 토양의 주요 특성은 퇴적층의 열 조건 및 발생 깊이에 따라 달라지는데 융해 및 빙결 퇴적층의 경우 밀도는 증가하고 공극률은 감소하는 것으로 나타난다. 융해 퇴적층의 밀도는 빙결 퇴적층보다 높으며 공극률은 낮다. 양질사토는 높은 빙하 함유율을 지니며 항복점에 가까운 함수율 하에서는 침전된다(0.41~0.004). 중간 정도의 빙하성 양질사토는 침전되지 않으며, 0.4Mpa 재하시 침하율은 3~8%이다. 비 침전성 토양과 관련된 중간급-빙하성 양토, 융해 및 0.4MPa 재하시의 침하율은 2%를 넘지 않는다. 항복점에 가까운 함수율의 고 빙하성 양토는 침전(0.055~0.065)을 보이고 항복점보다 1.5배나 함수율이 높은 경우 침전율도 높다. 0.3MPa 재하시 융해에 의한 침하율은 15~55%이다.

제 4기 중후기 및 완신세의 충적층에서는 광범위한 강의 계곡에서 발견되며 20~35m의 단구

높이부터는 빙퇴석과 호성-빙적토가 번갈아 나타난다.

안가라, 비루우사, 우다, 일림 단구의 충적층 두께는 2~5m이며 때로는 30~50m까지 깊은 경우도 있다. 이 퇴적층은 자갈, 사질 퇴적물로 구성되며 2~4cm의 자갈이 30~60%를 차지하며 사질분은 27~38%, 점토질은 1~9%를 차지한다. 자갈은 트랩, 석영, 백운암, 사암, 그리고 드물게 실트암과 점토암으로 구성된다. 자갈의 여과계수는 24시간당 10~350m이며 압축저항은 0.5~1MPa이다. 사토는 다양한 크기의 입자로 구성되어 있는데 점토분은 2~3%, 실트질 입자는 4~29%, 사질 입자는 45~95%이다. 사토는 장석-석영 및 석영으로 구성되어 있으며 함수율은 4~48%, 공극률은 36~56%이다. 여과계수는 24시간당 0.98~5.7m, 4.9~16.5m이다. 약간 굳은 토양의 경우 마찰각은 34~39°, 수면 밑에서는 31~34°이다. 압축저항은 0.1~0.3 MPa이다. 점토 퇴적층은 약간 아래에 위치하고 있는데 무거운 양토, 실질적으로 비염화 양토로 구성되어 있다. 점토질 물질은 제 4기 전기-중기의 몬모릴로나이트-수운모 퇴적물, 제 4기 후기와 완신세의 수운모-고령토 퇴적물로 구성되어 있다. 밀도는 1.72~1.8g/cm^{3}이고 평균 함수율은 21%이다. 중간 소성의 토양인 경우 침전되지 않으며 공극률은 44~48%이며 압축율은 0.0004~0.007MPa, 응착력은 0.013~0.027MPa이다.

아나바르, 말, 쿠오남카, 로쏘하강의 자갈 혹은 옥석 자갈 퇴적층은 두께가 3~10m이며 거친 입자의 사토층으로 덮여 있다. (포피가이스카야 분지)

큐팅데강을 따라 존재하는 구 레나 계곡은 20~25m 두께의 사질-자갈 퇴적물로 구성되어 있다. 2~25m 두께의 범람원 상(相)은 층리간 점토질 사토, 양질사토, 양토, 실트, 이탄 등으로 구성되어 있으며 상단의 경우 1.5m 두께의 이탄 렌스가 발견되기도 한다. 최근의 충적층은 미세한 입자의 사토에서 직경 0.5m 이상의 옥석까지 다양한 퇴적물로 구성되어 있다. 자갈과 사질 자갈 퇴적층이 많이 분포하고 있으며 쿠티웅딘스키 요곡에는 사토가 널리 분포한다.

완신세 충적층에는 두께 5~25m의 범람원 위에 I 단구가 형성되어 있는데 충적층의 두께는 1~3m이다.

범람원의 퇴적층, 범람원 충적층, 그 위의 I 단구에는 부정적 성질이 많이 있다. 양토와 양질사토는 망상층의 동결 조직으로 되어 있으며 빙하 함유량이 높고 때로는 빙하성 렌스와 균열도 존재한다. 이탄의 균열은 빙하가 포화된 상태이다. 이 퇴적물의 습도는 25~50%, 때로는 90%에 다다른다. 빙하성 이탄의 경우에는 100~200%나 될 때도 있다. 리므니 지방 양토의 공극률 지수는 0.5에서 2.0까지 변하며 가소성은 11~15%, 상한 등급에서는 25~40%, 하한의 경우 15~30%를 보인다. 사토는 실트질에서 작은 입자의 괴상동결 조직을 지닌 사토까지 다양하다. 실트질 사토는 높은 빙하 함유율을 지니며 작은 균열, 빙하 렌스, 때로는 층리가 형성된 동결 구조를 갖는

다. 우각호의 사토도 유사한 정도의 빙하 함유율을 지닌다. 사토의 함수율은 15~65%, 공극률 지수는 0.61~1.32이다. 사토의 밀도는 1.3~1.9g/cm^{3}를 보인다. 토양은 아주 무겁고 불균질한 빙하성이며 융해되었을 경우 20%까지 비균질적 수렴을 보인다. 실트질 사토는 표사의 특성을 얻을 수 있다.

범람원 위 2 단구의 사토 및 양질사토는 좀 더 좋은 성질을 보이는데 작은 알갱이의 사토가 지닌 함수율은 20.5~36.2%, 밀도는 1.96~2.1g/cm^3, 공극률은 35~49.1%이다. 건조상태의 마찰각은 28~30°이며 수분 함유시는 26~27°이다. 동토의 표준압력 저항력은 1.7MPa이다. 함수율은 사토의 경우 20.4~53.6%이며 양질사토의 경우 34.4~70.2%이다. 따라서 공극률은 1.77~2.12g/cm^3 또는 1.73~1.81g/cm^{3}을 보인다. 소성 지수는 양질사토의 경우 1.4~4.3 이며 공극률은 실트질 사토의 경우 34.1~54.5%, 양질 사토의 경우 50.7~54.8% 이다. 건조 상태에서 실트사토의 마찰각은 29~32%, 수분 함유시는 24~27%이다. 동토의 표준압력 저항력은 실트사토의 경우 1.7MPa, 양질사토의 경우 1.4MPa 이다.

그러나 융해에 의해 토양은 불균등하게 수렴한다. 미르니는 범람원과 범람원 위의 I 단구의 자갈은 괴상 동결 조직을 가진다. 여기서 사토는 충전재며 40%의 공극률을 지닌다. 함수율은 10~15%, 범람원 위의 2 단구 및 더 고조 단구의 사토는 밀도 0.98~1.68g/cm^3(평균 1.39g/cm^3)을 지니며 평균 공극률은 38~46% 이며 함수율은 8~12%이다. 이르쿠트, 칸 안가라 계곡의 자각 퇴적물이 지니는 공극률은 29~35%이고 밀도는 2.03~2.17g/cm^3, 여과계수는 20~1,200m/24시간, 건조 상태의 내부 마찰각은 29~35°, 수분 함유시는 26~29%이다.

점토 및 양토는 증가하는 압축률(0.005 MPa)에 의해 구분되는데 높은 물 포화율(0.75)과 약한 팽창률(0.6)을 특징으로 한다. 소성 지수는 6~28까지 변하며 평균 내부 마찰각은 9°, 응착력은 0.0127~0.0140MPa이다. 입자 구성의 경우, 실트질 퇴적물은 공극률 계수 0.75~0.95를 지닌다.

홍적세의 중후기 퇴적층은 예니세이강의 범람원 위 낮은 (I-V) 단구로 구성되어 있으며 상대 높이는 10~80m이다. 예니세이 중류에 있는 가장 오래된 퇴적층은 제 3단구 (35~50m)의 상단과 제 4 단구(50~70m)를 구성한다. 호수의 경우 단구는 10km 너비의 한 경사진 표면으로 병합된다. 이 퇴적층은 거친 입자인 진흙 사토, 양질사토 및 양토로 구성된 얇은 (1~3m) 바닥을 특징으로 한다. 이 지평층은 황토일 경우도 있다. 총 두께는 함몰지의 경우 10~25 m에서 40~45 m에 다다른다. 예니세이강 하류의 단구 표면은 침수되어 단구 가장자리는 깊은 계곡으로 분리된다.

니츠니야 툰구스카강 계곡과 지류 및 코투이, 쿠레이카, 세베르나야강 유역에 존재하는 충적층의 총 두께는 15~25m이다. 이중 하단은 수로며 상단은 범람원이다. 니츠, 툰구스카강의 중상

류와 안가라강의 중류는 6~10m 때로는 15m 두께의 충적층으로 구성되며 단면의 상단은 주빙하 충적층 덩어리이며 두께 6~12m의 미세한 물질로 구성된다.

충적층의 수로는 자갈, 드물게는 사질 자갈 퇴적물로 구성된다. 범람원은 사토, 양질사토, 양토 등이 분포하며 자갈이 섞여 있다. 주빙하 충적층은 사토, 양질사토, 양토 등으로 구성된다.

수로의 사토는 작은 알갱이에서 거친 입자의 알갱이로 구성되는데 자갈 함유율은 보통 20~50%까지 다양하다. 범람원의 사토는 입자가 거칠며 자갈에 따라 입자의 크기가 다르다. 상단으로 갈수록 중간 입자, 작은 입자, 미세 입자의 사토, 후에는 점토질 사토로 변한다. 주빙하 충적층의 사토는 미세한 입자의 실트질, 점토질 석영으로 구성된다. 2~3m 두께의 양토 및 양질사토는 미세하고 거칠고 동질적인 성질을 지닌다. 결빙 점토질-양질 퇴적층은 망상층의 동결조직을 지닌다. 아래로 갈수록 빙하 함유율은 50%에서 10%로 감소한다. 양질사토는 괴상조직과 동결조직을 지니며 아래로 갈수록 빙하 함유율은 20%에서 3%로 감소한다. 균열의 두께와 빙하 렌스는 0.1~2m이다. 0.1~0.6 m 두께의 빙하 렌스 및 균열은 주빙하 충적층에서 발견된다. 범람원의 충적층의 영구동토층이 지니는 통상적 특징은 다음과 같다. (투라의 경우): 물리적-역학적 특성(변이계수는 10-55%). 높은 함수율(18-58%) 토양의 점토 밀도는 1.5~2g/cm^{3}이며 공극률은 39~59%이고 함수율은 31~58%(44%), 소성 지수는 17~33(20)이다. 습한 땅의 양토 밀도의 경우 1.3~2.15g/cm^3, 공극률은 39~59%, 함수율은 18~45%, 소성 지수는 7~17이다. 습한 땅의 양질사토 밀도는 1.1~2.4g/cm^3, 공극률은 31~60%, 함수율은 5~45%, 소성 지수는 1~7이다. 융해시의 토양은 비동질적으로 수렴되며 이 때 사토는 표사의 특성을 얻을 수 있다.

홍적세 후기의 황토 퇴적층 중에서 고원 남부 및 중부 지역의 퇴적층은 최대 2~10m 깊이의 황토를 포함하여 실트질 퇴적물을 지니고 있다. 충적토, 양토, 양질사토의 실트분은 47~59%에 달하며 미세집합 계수는 4~23.4%, 실리콘은 50~73%, 습한 땅의 밀도는 1.37~1.95g/cm^3, 공극률은 42~52%, 함수율은 14~29%, 습도는 0.5~077, 가소성 계소는 8~15, 0.3MPa 상재하의 압축인자는 (0.0023~0.0062Mpa이며 마찰계수는 (0.0092~0.221)MPa이다. 0.3 MPa 상재하의 상대 침전계수는 0.001~0.048이다.

수용성 염분은 0.3~0.4% 이내이며 염분은 황산염-탄산염, 탄산염 및 염소-탄산염 형태를 지닌다. 6~8m 두께의 단면을 분석하면 다음의 특징을 지니고 있다. 최대 실트성은 0.5~2.5m 사이, 토양 염분화의 전향적 형태, 5m 이상의 깊이에는 침전 특성의 부재. 침전의 조건은 3~13cm이다. 프리바이칼스키 지역의 황토 퇴적층은 주로 중양토, 약한 집합성, 비 조밀성, 약한 가소성, 중간 정도의 압축률 및 침전 등의 특성을 지닌다.

프리바이칼스키 지역의 호성 퇴적층은 이탄 지평층으로 된 계곡의 입자 작은 사토로 대표된

다. 두께는 72m이다. 호성사토는 수평적 적층물을 지니고 있다. 0.25~0.05mm의 작은 입자분은 약 67~91%가 포함되어 있다. 사토는 쉽게 흩어지며 표사질의 특성을 지니게 된다.

노릴스크-투구한스키 지역 고원의 북부지방은 60m 두께의 점토, 양토, 양질사토로 구성되며 수평적 층리이며 때로는 계절적 밴드, 균열 및 이탄 렌스, 층-망상 동결조직 등의 특징을 지니고 있다. 점토질은 융해 상태에서 유체-소성 견고도를, 결빙 상태에서는 높은 빙하 함유율을 지닌다. 점토는 수분이 많고 공극률은 융해토의 경우 41~61%, 결빙토의 경우 59~70%이다. 융해에 의한 열 침하율은 15~48%이다. 양토도 수분을 많이 함유하고 있고 물 포화율이 높다. 융해에 의한 침하율은 4%에서 48%까지 다양하게 변한다. 응착력은0.02~0.048MPa(평균 0.032MPa)이다. 양질사토의 특징은 거의 동일한 특성을 보인다. 호성층의 경우 평균 함수율은 항복점을 넘는다. 융해된 점토 및 양토는 아주 높은 압축률을 보인다. 0.1-0.3MPa 상재하의 상대적 침전계수는 평균 0.01×10^{-5}~$0.03\times10^{-5}Pa^{-1}$이며 때로는 $0.08\times10^{-5}Pa^{-1}$일 때도 있다. 동토층은 10%에서 50%로 변한다. 융해상태의 호성층은 극히 드문 경우에만 건축 지반으로 사용될 수 있으며 동결상태일 경우에는 동결상태가 유지될 경우 사용될 수 있다.

이르쿠츠크 지역에서는 풍성 퇴적물이 비탈과 하천 사이, 타지브스키 지역의 계곡의 사토로 구성된다. 두께는 0.5~10m로 변한다. 사토는 소중형 입자로 구성되며 실트질 입자의 혼합물은 0.3%에서 23%로 변한다. 공극률은 40~43%, 습도는 10~15%이다. 다짐계수는 0.15~0.16이며 마찰계수는 34~38%이며 수분 함유시는 30~33%이다.

시생대의 풍화 저항 편마암과 규암, 원생대의 규암과 사암 및 캄브리아기 석회암과 백운암에서는 양질 및 양조 사질 충전재를 지닌 거친 덩어리가 많은 잔적층과 gruss 퇴적물이 발달하였다. Gruss와 암설 함유율은 깊이에 따라 30~80% 증가한다. 암반의 두께는 1~3m이며 그 이상일 때도 있다. 시생대 잔적층, 고생대의 탄산염과 육성암(사암, 실트암, 점토암, 슬레이트, 얇은 백운암, 이회암)은 상단과 하단 두 지대로 나뉜다. 상단은 양질 및 사질 양질과 극히 드물게 암설 및 gruss의 혼합물 30~35%를 혼합한 사질 암석으로 구성되며 두께는 0.5~2m이다. 하단 지대는 양질 및 사질 양질 충전재를 포함한 gruss-쇄설로 구성되는데 두께는 0.5~6m이다.

결빙 양토 및 양질사토의 특징은 얇은 겉껍질로 덮인 콩 모양의 동결조직이다. 쇄설층은 거친 겉껍질로 덮여 있는 괴상 동결조직이다. 조립현무암의 밀도는 1.85~2.18g/cm^3이고 함수율은 15~공극률은 30~45%이다. 응착력 0인 상태에서 마찰 상수는 0.5이다. 퇴적층과 응회암의 잔적층의 특징은 다음과 같다. 밀도는 1.78g/cm^3, 함수율은 20-40%(기복(起伏)의 함몰지는 60%까지), 공극률은 30-50%, 응착력 0하의 마찰 상수는 0.25이다. 융해에 의한 동토는 유체-소성 및 유체 상태로 변하는 능력이 있고 비동질적 침전의 특징을 지닌다. 미르니시 지역의 모암 탄산암

의 잔적층이 지니는 특징은 다음과 같다. 밀도는 2.17g/cm^3, 함수율은 15.7%, 공극률은 29.8, 공극률 계수는 0.43이다. 융해에 의한 동일한 퇴적물은 퇴적층 내 빙하의 비균등적 분포 때문에 비동질적 침전을 지닌다. 육성-탄산암의 잔적층의 밀도는 1.2~1.9g/cm^3, 함수율은 10~20%, 함몰지의 경우 최대 60%이다. 융해에 의해 30~40%의 습도를 지닌 토양은 마찰상수 0.25를 지닌 유체-소성 및 유체 상태로 변한다. 0 이하의 응착력은 비균질적 침전을 보인다.

트랜스바이칼리아의 지리적 역사에서 중요한 사건은 바로 제 4기의 빙하작용이다. 빙하작용은 300km^{2}이상의 봉우리 및 계곡, 이와 동시에 북서부 산허리에서 발생하였다. 프리바이칼리아 산맥과 스타노보이 봉, 즈구주르봉 남서쪽의 빙하가 가장 대표적이다.

빙퇴석의 기저, 측면 및 끝은(Q2 - Q3) 은 gruss, 암설, 자갈이 많은 옥석 및 퇴적물 덩어리, 암설을 포함한 사질, 양질-사질, 양질 충전재, 극히 드물게는 양질사토 또는 양토 등으로 구성되며 두께는 몇 미터에서 200m까지 변한다.

거의 모든 빙적층은 영구동토층이 퍼진 지역에 존재한다. 따라서 토양의 밀도는 극도로 불규칙적이고 토양의 조직뿐 아니라 습도, 빙하 함유도에 따라 달라진다. 빙적토의 습도는 1.93에서 73%까지 아주 큰 변화를 보인다.

점토 빙퇴석의 경우, 얼음은 시멘트의 형태로 존재하며 퇴적물에 괴상 동결 조직을 형성한다. 때로는 0.5m 정도 두께의 빙하 덩어리가 발견되기도 한다. 점토 빙퇴석의 밀도는 1.87~2.17g/cm^3, 소성 지수는 7.2~19.54, 공극률은 41.2~43.8%를 보인다. load 1×10^{5}Pa 하, 융해에 의한 상대적 침전은 13~39mm/m이다.

빙하작용의 시작은 영구동토층의 발달과 함께 시작되었으며 이를 기해 모든 트란스바이칼리아 지역 깊은 곳에 암석이 발달 되었다. 또한 특별한 형태의 풍화 과정이 급속도로 발달하였는데, 이 때에 화강암-편마암이 암설로의 분해단계 없이 갑작스럽게 gruss와 사토로 분해 되었다.

제 4기 퇴적층을 이루는 다양한 사토의 퇴적 현상: 트란스바이칼리아는 풍화의 특이성을 보여주는 지역이다. 바이칼 호수의 경우 퇴적층의 두께가 200~400m에 이른다. 서 트랜스바이칼리아 (셀렌긴스크)의 경우 홍적세 사토 및 양질 사토가 함몰지 남쪽 가장자리의 고조 단구와 봉우리에 생성되었고 수많은 하천의 유역과 습곡을 덮었다. 북서쪽 산허리의 경우 함몰지 위로 300m나 솟아 있으며 낮은 언덕의 정상보다 더 높은 경우도 있다.

셀렌긴스크 지방의 골짜기와 강 유역에 있는 보통 사토의 두께는 40~100m이며 울단-우데 산악지역의 우딘스카야 함몰지의 경우 최대 150~180m인 경우도 있다. 사토와 양질 사토의 두께는 비탈 각도 15~18°에서 10~12m로 나타난다.

트란스바이칼리아의 사토는 고립되고 단조로운 암석으로 구성되고 지평층에 발달된다. 이 사

토는 보통 제 4기 전기, 중기, 후기 동안 발달되었다.

충적토, 호성토, 빙하퇴적토, 프롤루비얼 및 기타 토양은 두께의 구조에 영향을 미치지만 이중 풍성퇴적물이 가장 중요한 역할을 한다. 이 퇴적물은 작거나 중간 크기의 입자로 구성되는데, 보통 실트질, 점토질 입자의 작은 혼합물, 극히 드물게는 양질 사토로 이루어진다. 좀 더 거칠거나 점토질로 된 퇴적물은 산간지방의 깊은 계곡에서 발견된다.

사토의 물리 역학적 성질은 다음과 같다. 수면아래의 밀도는 1.52~1.90g/cm^3, 함수율은 1.44~13(4.99)%, 공극률은 36.73~47.98%, 내부 마찰각은 23~35°, 여과계수는 1.88~11.0(4.28)m/24 hrs~20m/24hrs이다.

비팀 평원의 자라강과 같은 암군 동토의 물리 역학적 성질은 다음과 같다.

사질 충적재를 지닌 자갈 토양으로 이루어지며 수분 함유시 밀도는 1.95~1.97g/cm^3, 충전재 함수율은 10~16%, 공극률은 32~33.6%, 공극률 지수는 0.4~0.56이다.

사력층 사토: 수분 함유시 밀도는 1.72~1.80g/cm^3, 빙하에 의한 토양 밀도는 0.5~0.9, 공극률은 40~43.4, 공극률 지수는 0.75~0.77이다. 토양의 조밀성은 매우 높은데 이는 빙하 함유량이 낮아서이다. 융해에 의한 상대적 침전은 20~60mm 정도 된다.

후기 홍적세의 남부 트란스바이칼리아 지방의 주빙하 지대는 황토와 유사한 퇴적층으로 되어 있다. 퇴적층은 1~2m의 두께, 때로는 8~12m의 두께로 황토, 양질사토, 드물게 양토 등으로 나타난다. 또한 홍적세 에올리언 사토의 형성과 관련된 풍성 퇴적물도 발견되는데 그 두께는 8~15m 정도이다.

모든 종류의 황토 퇴적층은 다양한 종류의 광물을 포함하고 있고 보통 몬모릴로나이트의 점토분으로 구성된다. 또한 연노랑색의 빛깔, 탄산화, 높은 공극률과 수직 구조 등을 특징으로 한다. 수분을 함유한 상태에서는 침전을 보이지만 몬모릴로나이트가 있기 때문에 침전 변형은 감소한다.

산비탈의 암설은 동결풍화, 동상침식의 과정에서 발생하며 발생 지역은 주로 셀렝긴스카야 중부 산악지역이다. 이 퇴적층은 주로 Gruss와 양질-사질 충전재를 함유한 쇄설 토양으로 구성되며 드물게는 gruss, 사토, 양질 사토, 양토도 발견된다. 두께는 0.5~0.6m이다. 때로 좀 더 높은 표면의 gruss 잔적층은 10~15m의 두께를 보일 때도 있다.

완만한 비탈의 경우 퇴적층 두께는 3~4m 정도 된다. 완만한 비탈의 빙하 함유량은 암질, 및 이탄에 따라 35~45% 내에서 달라진다. 하지만 다각형의 쐐기 빙하가 발달한 곳에서는 60~70% 내에서 다양하게 나타난다. 양질사토는 융해에 의해 소성 또는 유체 견고도를 획득하고 틱소트로피의 성질이 나타나게 된다.

스타노보이 산악지대 내 비탈이 지니는 토양의 다양성은 주로 중간 수준의 압축률과 관련이 있다. 단위 압력이 1×10^5Pa일 경우, 양질-쇄설의 다짐계수는 0.013에서 0.061로 변하며 6×10^5Pa 하에서는 0.005에서 0.023으로 변한다. 융해 상태일 때 토양의 내하력은 2×10^5~3×10^5Pa, 동결 상태일 경우 3.5×10^5~5×10^5Pa이다.

비팀 평원 내 동결 비탈 암설이 지니는 물리 역학적 성질은 다음과 같다. 동토 밀도는 1.61~2.01g/cm^3, 함수율은 13.3~28.3%, 빙하 함유율은 0.24~0.31, 공극률은 35.28~51.65%, 2×10^5Pa 일 경우 융해에 의한 동토의 상대 침전은 49~63 mm/m이다.

하얀색 사토는 그 빛깔 때문에 눈에 잘 띄는데 주로 광물적 요인, 특히 석영에 의해 생성된 색깔이다. 사토 내에 균열과 렌스의 형성 원인이 되는 자갈은 산성화성암과 관련하여 중요한 역할을 한다.

사토는 입자가 중간 크기이며 때로는 사력층이나 작은 자갈을 포함하여 입자가 거칠고 작은 경우도 있다. 자연 상태에서 사토의 밀도는 2.14g/cm^{3}이고 아주 느슨한 상태에서는 1.37~1.47g/cm^{3}이며 아주 조밀한 상태에서는 2.20g/cm^3 이다. 자연상태의 공극률은 43.13%, 느슨한 상태에서는 44.53~48.88%, 아주 조밀한 상태에서는 37.74~38.81% 이다. 공극률 지수는 0.6~0.8이며 상대 조밀성은 0.6으로 나타난다.

오늘날까지 이어지는 침식 및 퇴적 과정은 지속적으로 변화한다. 이 기간 동안 후생적 계곡과 단구 시리즈 (3,2,I) 및 범람원이 형성되었다. 2단구는 자갈로 구성되며 범람원 위 3 단구의 상단 충적층은 metamorphic 및 관입암 조각으로 이루어진다. 다양한 입자의 사토는 자갈 속 충전재이며 그 함유량은 10% 정도로 나타난다. 충적층 2 단구의 상단 사토는 균열과 렌스의 형태로 발견된다.

자갈의 밀도는 2.01~2.09g/cm^{3}이며 사질 충전재의 함수율은 4~10%까지 다양하게 나타나지만 평균적으로 5%이다. 자갈은 실질적으로 압축이 불가능하고 아주 조밀하거나 중간 정도의 조밀함을 보인다. 이 자갈은 우선 영구동토층의 환경에 존재하며 딱딱한 표면의 동결조직을 지니고 있다. 빙하 함유율은 10~15%이다.

제 4기 후기와 완신세의 충적층은 범람원, 범람원 위 I 단구를 구성하며 계곡에 상당히 널리 분포되어 있다. 이 퇴적층은 2중 하부표면 구조, 즉, 하단의 거친 수로상과 상단의 미세한 범람원 상으로 구성된다. 수로상은 사질-자갈 퇴적물, 또는 드물게 옥석-자갈 퇴적물과 사토로 구성되어 있다. 범람원 상의 경우 작은 입자의 실트질 사토, 양질사토, 양토로 구성된다. 호성-소택토상은 습지에서 생성한 사토, 실트, 때로는 이탄으로 대표되는데 범람원상의 충적층과 아주 밀접한 공생 관계를 지닌다. 수로상의 사질-자갈 퇴적층은 50~80% 의 자갈과 사력층, 15~40%의

사질분, 5~10%의 점토질과 실트질분을 포함한다. 밀도는 1.90~2.09g/cm^3, 공극률은 10~38%, 공극률 지수는 0.3~0.65로 나타난다. 여과계수는 10~200m/24hrs로 다양하게 나타난다. 사력층-자갈 퇴적층의 사토는 충전재이며 때로 3~4m의 균열이나 렌스를 형성한다. 범람원과 그 위의 I 단구의 사토는 모두 수로와 범람원상을 구성한다. 사토는 미세한 입자에서 자갈로 구성된 석영-장석이며 10~30%까지 자갈이나 사력층을 포함한다. 융해된 사토의 물리 역학적 성질은 다음과 같다. 밀도는 1.34~1.75g/cm^3, 함수율은 1~21(8~9)%, 공극률은 37~57%, 공극률 지수는 0.37~1.31(0.92), 건조한 토양의 마찰각은 26~43°이며 수분 함유시는 19~38°이다.

이 지역의 북부에는 암군 퇴적층이 있는데, 영구 동토층의 환경을 지니고 있다. 이 퇴적층은 아주 다양한 동결 조직으로 구성되어 있고 동생 단층지괴, 쐐기 빙하가 발견되지만 가장 많이 발견 되는 것은 괴상 동결 조직이다.

알타이-사얀 산악지대의 제 4기 퇴적층의 낮은 산의 계곡, 고원의 표면, 완만한 산허리에는 용탈 퇴적물이 발견된다. 두께는 3~4m 정도이다. 모물질의 잔적층이 지닌 구성 및 특성은 기반암의 특징에 따라 달라진다. 주라기의 점토암과 실트암의 풍화에 의해 높은 점토질(30~46%)과 실트질(54~64%) 입자를 지닌 점토와 양토가 발달되었다. 공극률은 중간 정도(44%)이다. 이 퇴적층은 수분을 함유하거나 물이 포화된 상태이다. 내부 마찰각은 13~20°, 응착력은 0.03~0.07 MPa이다. 주라기와 백악기 사토의 풍화에 의해 미세한 입자의 조밀한 사토가 형성되었다. 데본기의 실트암과 점토암은 쉽게 침식되며 두께 3~5m, 보통은 1~1.25m의 양질사토, 양토, 점토 실트질로 변한다. 이 퇴적층은 다공성을 지니고 있고(44-47%), 압축률은 0.02×10^5~0.2×10^5 Pa^{-1} 이며 밀도는 1.6~1.92g/cm^3, 함수율은 12.7~25%, 소성 지수는 6.7~21, 응착력은 0.01~0.09 MPa를 보인다.

분출암은 약하게 풍화한다. 아르가 지역의 용탈층에 대해서는 연구가 꽤 많이 진행되었다. 풍화된 모든 지평층은 잔적층에 분리되어 견고도가 약한 암석에서 발달된다. (슬레이트, 반암). 견고한 암석의 용탈층은 (석회암과 화성암) 불규칙적으로 층화된 양질 쇄설의 퇴적층으로 구성되는데 그 두께는 1~1.5m이다. 그 아래에는 열상 퇴적층이 있다. 양질 퇴적층은 실트질(39.2%) 및 사질(40.5%) 입자로 구성된다. 퇴적층의 압축률은 상당히 높은 공극률 (39~45%)임에도 불구하고 0.006×10^{-5}~0.035×10^{-5}Pa^{-1}로 다소 낮은 편이다.

전단 저항도 상당히 높은데 내부 마찰각은 14~28°, 응착력은 0.7×10^{-5}~1.25×10^{-5}Pa이다. 키야-샬티르스키 광산 지역의 양질-사질 용탈토는 1.6~1.8m의 두께로 총 탄성 계수는 13.5MPa이고 전단 저항은 높다(내부 마찰각은 30º, 응착력은 0.0175 MPa). 습도는 0.78, 공극률 지수는 0.94이며 압축률은 0.021×10^{-5}~0.060×10^{-5}Pa^{-1}이다. 용탈층은 기저 평원의 표면에서 발달되는데

거친 퇴적토로 구성되며 그 두께는 몇 미터에 달한다. 덩어리의 크기는 0.5~1.5m이다.

퇴적층의 빙하 암군은 강물이 골짜기의 바닥, 완만한 비탈 지역과 가장 낮은 강의 유역을 덮은 오래된 침식 함몰지에서 발견된다. 높은 산악지대의 카르스 바닥은 빙퇴석으로 덮여 있다. 토즈힌스카야 함몰지와 볼. 사얀 봉우리의 동부 지역에서는 광범위한 빙적층이 발달하였다. 이들 퇴적층은 홍적세 전기에서 후기 사이에 완성된 것이다. 완신세 빙적층은 홍적세의 퇴적층을 따라서 발달하였다. 빙하 암군은 빙퇴석, 빙하퇴적, 호성빙하 및 기타 퇴적물로 구성된다.

빙퇴석층은 널리 퍼져 있는데 주로 옥석과 거친 자갈 양토로 구성되어 있다. 가장 거대한 옥석 덩어리의 경우 부피가 3~4m^3에 달한다. 사토분은 충전재를 구성하며 점토분은 실트암을 이룬다(15~20% 이하). 전체적으로 퇴적층은 오래되었고 층화가 덜 되었으며 조밀하다. 오래된 계곡이나 카르스의 빙퇴석 두께는 2~40m까지 다양하고 빙퇴석이 광범위하게 발달한 지역의 경우 170m나 된다. (세르리크헴스카야 유역) 퇴적물은 높은 밀도, 낮은 압축률 및 안정적인 내하력을 특징으로 한다.

동부 사얀의 중앙지대에 있는 빙퇴석은 사질-옥석층으로 구성되는데 두께가 100~150m에 이른다.

빙하퇴적층은 빙하성 하안 단구를 형성하는데 보통 이 지역의 동부 지대에서 발견된다. 동 퇴적층은 주로 옥석과 자갈이 많고 빙퇴석 층의 가장자리로 갈수록 더욱 거칠어진다. 대부분의 충전재는 점토질 사토로 구성되어 있다. 사토와 양토는 빙하퇴적토 내 수많은 균열과 렌스 현상의 원인이 된다. 동부 투바에 있는 빙하퇴적층은 두께 1-3m 가량의 황토와 유사한 양토로 덮여 있는데 기둥 모양의 구조, 높은 공극률, 탄화 작용 등을 특징으로 한다. 빙하퇴적층의 두께는 85m 이상일 경우도 있다. (카마사라강)

호성-빙적층은 이 지역의 대표적 퇴적층으로 분포 넓이가 10km^2나 된다. 이들은 띠 모양의 점토로 구성되며 10cm의 탄산염 응괴로 구성된다. 그 상단에는 사력층과 자갈 퇴적층이 있다. 이 퇴적층의 최대 두께는 30m 정도이다.

충적층. 충적층은 범람원, 하안 단구, 광대한 평원, 산으로 둘러쌓인 분지 등에 발달한다. 미누신크 지역의 예니세이강 수력발전소에 의해 만들어진 저수지 덕분에 이 충적층은 고조 단구(출림과 예니세이의 계곡) 퇴적층이 남아 있는 지역 외에는 물에 잠겨 있다. 대부분 충적층은 표면 바로 위에 생성되지만 말. 예니세이강의 계곡 같은 경우 기저암 아래에 발달하기도 한다.

범람원 상의 사토-자갈 퇴적물의 두께는 범람원의 경우 2~8m, 나자로브스카야 함몰지의 단구는 12m, 유즈노-미누신스카야 함몰지는 9~40m에 달한다. 상단의 경우 양질-점토질 퇴적층으로 구성되며 때로는 우각상을 지니고 있을 때도 있다. 그 두께는 나자로브스카야 함몰지 내에

서는 1~4m (범람원)에서 13~17m (저조 단구)이며 남부 지대의 경우 3~9m이다. 고조 단구의 경우 상단 두께는 10~30m로 다양하다. 표면에서 3~7m 깊이의 양질 퇴적층은 황토와 유사한 특징을 보인다.

예니세이강, 아바칸강, 투바강 계곡의 유즈노-미누신스카야 함몰지에 자리한 저조 단구의 충적층은 주로 자갈과 사질로 구성되어 있다. 사력층-자갈퇴적층의 충전재는 미세한 사토에서 거친 입자의 사토까지 다양하다.

관입암과 퇴적암은 주로 사력층과 자갈로 구성되어 있다. 자갈의 밀도는 평균 2.17~2.18g/cm^{3}이며 충전재의 함수율은 1%에서 40% (보통 1~3%)까지 다양하다. 양질 및 양질-사질 충전재의 경우 높은 습도(20~40%)를 특징으로 한다. 자갈 충적층의 여과계수는 4~200m/24hrs로 다양하게 나타나고 이는 내부의 이질성이 매우 높음을 암시한다. 건조 상태일 경우 마찰각은 45~50°, 수분 함유시는 47~55°이다. 경사 사면의 경우 자갈은 5.5m 높이의 수직 벽을 지탱할 수 있다. 시도-에르빈스카야 함몰지 내의 예니세이강 하류에는 저조 단구의 자갈 퇴적층에서는 자갈이 현격히 줄어준다(30%). 고조 단구의 자갈은 둥근 옥석 혼합물로 되어 있는데 충전재(15~45%)는 다양한 거친 자갈 모래로 구성된다. 강변에서 발견된 자갈의 두께는 5~15m에 달한다. 범람원상의 사토는 주로 석영-장석으로 구성되는데 이들은 미세 입자에서 자갈 입자까지 다양한 물질이 함유되어 있다. 습도는 6.6%에서 26%로 다양하고(평균 습도는 0.19~0.65) 물 포화상태의 경우 미세 입자의 사토는 유체 토양의 성격을 보인다. 평균 밀도는 1.44~1.67g/cm^{3}이고 전단 저항의 경우 내부 마찰각은 30°, 응착력은 0.0025~0.0075MPa, 여과계수는 0.4~3.5m/24hrs이다.

북부 분지의 충적층은 압축 가능한 소성 점토질-양질 퇴적층으로 구성되며 상당한 두께를 지닌다. 나자로브스카야 함몰지 내 튤림 계곡에 있는 퇴적층은 실트질분(70~75%) 함량이 높으며 고조단구 퇴적층의 점토질 입자는 30~35%정도 함유되어 있으며 저조 단구와 범람원의 경우 18.5%를 넘지 않는다. 이곳에는 다층의 광물, 수운모, 몬모릴로나이트가 존재한다. 자연 상태에서 퇴적물은 함수율이 높으며 공극률은 평균 41.4~45.7 %이다. 양질 범람원 퇴적층은 높은 밀도를 지닌다(평균 1.99g/cm^3).

고조 단구 충적층 상단은 (표면에서 7m 깊이까지) 황토를 함유하고 있는데 표면은 주로 밀도가 낮고(1.39~1.47g/cm^3) 공극률은 높다(45~48%). 양토의 역학적 특징은 단구 퇴적층의 평균 응착력(0.031~0.038MPa)에 의해 결정되는데 이는 거의 범람원 퇴적물의 절반 정도이다(0.017 MPa). 거의 모든 퇴적물의 평균 내부 마찰각은 비슷하다(19~22°).

깊이가 깊어질수록 내부 마찰각은 증가하고 응착력은 감소하는데, 이는 하단으로 갈수록 사질 입자가 많아지기 때문이다. 압축률의 경우 축적층은 높은 압축률의 퇴적층과 관련이 있고 압축

률은 0.02×10^{-5}~$0.038\times10^{-5}Pa^{-1}$)를 보이며 깊어질수록 감소한다. 하지만 10~18m의 깊이에서도 압축률은 비교적 높은 편이다. 단구 중 6~7m까지 점토 퇴적층이 발견되는데 수분 함유시 0.3 MPa 상재하에서 추가적 침전을 보인다(상대침전 계수는 고조단구 퇴적층의 경우 0.051에서 범람원 위 I단구 퇴적층의 0.036까지 다양하다). 함수율은 23~25%, 소성 지수는 12~20이다.

80m의 단구에는 직경 1m, 깊이 0.5m의 침전 깔때기가 존재한다. 서 사얀 지역의 예니세이강 상류에서는 총 충적층의 두께가 2~7m가 된다. 테바코보-발라크틴스카야 및 시도-예르빈스카야 함몰지 내의 저조 단구의 충적 양토는 높은 다공성을 지니며 낮은 습도와 밀도, 다소 높은 공극률을 특징으로 한다. 예니세이강 범람원 위의 2 단구의 양토는 침전을 보인다. (상대침전평균계수는 0.03). 예니세이 고조 단구에는 입자가 미세하고 높은 다공성을 지니며 침전을 보이는 실트질 양질 사토가 발견된다. 이 퇴적층의 물리 역학적 성질은 쿠르타크 지역 2m 깊이에서부터 결정된다. 양질사토의 공극률 지수는 0.94, 0.05~0.3Mpa 상재하의 상대침전계수는 0.019~0.057, 자연 상태에서 압축률은 5.53Mpa 이고 수분 함유시는 3.55MPa 이다.

사력층-자갈 퇴적층은 밀도가 2.09g/cm^3, 충전재 습도가 6.4%이다. 미세한 알갱이의 사토 및 실트질이 이곳에 광범위하게 발달하였다. 자연 상태에서 사토는 조밀하지 않으며(공극률 지수는 미세 알갱이일 경우 0.936, 실트질일 경우 1.045) 낮은 습도를 보인다(0.3~0.44). 실트질 사토의 밀도는 1.56g/cm^3. 양질사토는 실트질을 함유하며(실트질 입자는 평균 48%를 차지), 공극률 지수는 0.978이다. 양토는 62%가 실트질분으로 구성되어 있으며 공극률 지수는 0.97이다. 0.1~0.15Mpa일 경우 양토는 2%까지 추가 침전을 보이며 밀도는 1.76g/cm^3이다.

투빈스키 지역 (예니세이강 최상류층)의 충적층도 유사하다. 자갈의 두께는 수십 미터에 이르며 그 위의 사토와 양질사토는 1~5m의 두께를 보인다. 직경이 10mm 이상인 자갈은 체적의 75~85% 이상을 차지하는데 입자의 크기는 0.1~2.7mm 정도이다(카단강의 I 단구). 때로 자갈은 부분적으로 또는 모두가 쇄설 퇴적물로 대체되기도 한다. 키질시의 아크-수그강, 토프사강의 좌측 제방, 투라-켐 마을의 충적층이 지니는 지질 공학적 특징은 다음과 같다. 밀도는 거친 쇄설질 토양에서는 2.05~2.15g/cm^3, 사질 토양에서는 1.89~2.06g/cm^3이며 사질토양의 함수율은 1.6~22.86%, 공극률은 거친 쇄설질 토양의 경우 22~51%, 사질 토양의 경우 44~47%이다. 거친 쇄설질 토양의 마찰각은 건조한 상태일 경우 35~37%, 사토일 때 31~37%이다. 거친 쇄설질 토양일 경우 수분 함유시 마찰각은 34~75% 이고 사질토양에서는 33~40%이다.

예니세이강 및 켐찬강 암군의 저조단구에 분포한 양질 사토 퇴적층의 지질 공학적 특징은 다음과 같다. 습도 높은 토양의 밀도는 1.71~1.87g/cm^3, 공극률은 42~59%, 함수율은 30~42%, 소성 지수는 0~9.5이며 토양의 수축량은 0~14.47 mm이다. 마찰각은 35.5~36° 수분 함유시에

는 35.5~37°이다.

입도상 구성으로 볼때, 발가진 지역의 충적 평야를 구성하는 퇴적층은 (키질 함몰지 남쪽) 실트질 사토와 양질사토로 구분된다. 실트질 사토의 상대침전계수는 0.004에서 0.051이며 양질사토는 0.012(30N/cm^2 상재시)이고 모든 사토의 내부 마찰각은 31~41°에서 변한다. 전단 계수는 0.60~0.85, 응착력은 0.28~0.055MPa(30N/cm^2 상재시)이며 실트질 사토의 공극률 지수는 10% 감소하고 양토는 3% 감소한다.

주어진 데이터를 비교해보면 충적층의 특성은 단구와 달리 다양한 강이나 함몰지의 계곡에서 발생하며 서로 매우 유사한 특성을 지니며 거친 쇄설질 충적상을 지닌다.

충적층의 여과 특징은 매우 다양한데 토즈신스카야 유역의 사토의 여과계수는 0.1에서 12.2 m/24hrs로 변하고 사력층-자갈퇴적층의 경우 6에서 73m/24hrs까지 변한다.

제 4기 전기 호성-충적층 은 미누신스크 지역에서 광범위하게 발생한다. 나자로브스카야 함몰지의 경우 퇴적층은 300~370m 높이의 고지대에 분포하고 있으며 점토질 및 실트질 양토로 대표된다. 제 4기 중기의 호성-충적층은 U자 계곡에 분포하며 그 위에는 범람원과 단구의 충적층이 분포한다. U자 계곡은 주로 사력층-사토 충전재로 이루어진 사토와 자갈로 구성된다. 체바코보-발라호틴스카야의 중부 및 유즈노-미누신스카야 함몰지 동부는 호성-충적층이 오래된 기복을 덮고 있으며 단계별로 구조가 변화한다. 전반적으로 사토, 황토 유사 양질 사토, 양토 및 렌스와 균열이 있는 점토가 층리에서 발견되며 퇴적층의 두께는 몇 미터에서 180m까지 다양하게 나타난다.

자갈에는 10~60mm 규모의 둥근 쇄설이 40~60%를 차지하며 충전재 형태의 사토분은 11~25%를 차지한다. 자갈의 밀도는 조밀하지 않을 경우 1.9~1.95g/cm^3, 조밀한 경우 2.10~2.20g/cm^3이다. 따라서 공극률은 47~49%에서 33~37%로 변한다. 사력층-자갈층의 여과계수는 50~200m/24hrs이다.

사토는 수평층과 포선형의 층리로 구성되고 입자는 미세하며 탄산화 작용을 거쳤으며 때로는 석회암 응괴를 지니고 있다. 밀도는 조밀하지 않은 상태에서 1.3~1.4g/cm^3, 조밀한 상태에서 1.85~1.9g/cm^3이며 따라서 공극률은 48~53%, 31~33%이다.

투수성은 1~10m/24hrs까지 변하며 높이 40~60m의 사토 퇴적층으로 구성된 자연 제방은 안전한 경사도를 지닌다. 투수성은 24시간당 1에서 10m로 변한다. 40~60m의 사토퇴적층으로 구성된 자연 제방은 40~42°로 안정적이다. 물의 유출로 웅덩이나 우곡이 발달되었다. 웅덩이의 가장자리는 대칭적이며 60~70° 각도로 불안정한 slide rock으로 이루어져 있다. 요선의 기울기는 30°이다. 요선 기울기가 12~18%, 가장자리의 기울기가 30~40°가 될 때 침식 과정은 감소한다.

나자로브스카야 함몰지의 호성-충적층의 점토와 양토에 대해서는 자세한 연구가 수행되었다. 점토분의 경우 사층리가 없는 광물이 지배적이다. 제 4기 전기의 충적층을 볼 때 0.001mm 이하의 입자는 30.1~34.1%를 차지하고 0.05~0.25mm의 입자는 12.6~22.5%를 차지한다. 제 4기 중기 충적층의 경우 점토분은 25.1~34.1%, 사토분은 16.8~28.1%를 차지한다. 자연상태에서 점토질 퇴적물은 수분을 함유하며 극히 드물게 물 포화 상태에 있다. 깊이 들어갈수록 분산도는 감소하고 밀도는 증가하며 수분과 가소성이 발견된다. 층 표면에는 풍화 과정이 일어나서 밀도와 공극률에 변화가 일어난다.

점토와 양토는 유사한 역학적 특징을 지닌다. 퇴적층의 내부 마찰각은 8~30°(평균 17~21°)로 변하며 평균 응착력은 0.043~0.056Mpa로 나타난다. 깊이 들어갈수록 압축률은 감소하고 6m 정도의 깊이에서는 낮은 압축률의 양토가 발견된다. 0.3Mpa 상재하의 양토의 침전계수는 0.021~0.103으로 변하며 깊어질수록 감소한다. 양토의 침전은 6m 깊이에서 확대된다.

3. 극동 지방

홍적세 극동지방은 신기구조 이동에 의해 변형된 대기중 삭박의 다양한 시기의 평원의 개석 결과로 산악지방의 기복이 상승하였다. 대기중 삭박의 이 평원은 그리 넓지 않은 잔존 지역의 형태로 대부분의 산악 지역에 남아 있으며 때로는 광활한 분지의 표면을 형성하였다. 옛날에 형성된 기복의 잔존은 특히 시호테-알린 중부지역, 니츠지 프리아무리 및 체르스코고 체인의 서 프리오크호티의 산악지역, 유카기르스쾨 대지, 안유이스쾨 평원과 코르야크 평원 등지에서 발달되었다. 아무르-자이스카야 함몰지 북부지방에서는 광활하고 가파른 평원이 발달하였다.

신기구조의 이동의 결과 형성된 구조적 형태 는 다음과 같은 특징을 지닌다.

a) 봉우리 - 큰 곡률반경을 지닌 복배사 (자파드노-사할린스키 산맥, 시호테-알리 등);

b) 봉우리 - 비대칭적 습곡 혹은 대규모 복배사 (비르호얀스크, 체르스코고 등)

c) 지구 - 향사로 발생된 산맥 지역 (스레드네-아무르스카야 함몰지, 사할린의 팀-포로나이스카야 함몰지 등) 중첩분지(에보론-추크차기르스카야, 우딜-키진스카야 및 아무로-암군스카야 함몰지 등).

특히 캄차카와 쿠릴섬 중심부는 성층화산, 용암류, 용암 암상 등이 형성되었다. 쿠릴섬의 경우 수많은 산맥이 쿠릴-캄차츠카야 함몰지에 11,700m로 솟아 있고 39개의 활화산을 비롯 85개의 화산이 존재한다. 가장 큰 화산섬은 높이 2,239m의 알라이드섬이 있는 아틀라소바섬이다. 캄차

카의 동부 화산지대에는 29개의 활화산을 포함, 80개의 화산이 존재한다.

시호테-알린의 서쪽 산허리를 따라서는 홍적세 전기에 그리 크지 않은 침식 화산이 형성되었다. 볼쇼이 아니우이와 인디기르카 계곡의 화산은 아주 최근에 형성된 것으로 여기서 흘러나온 용암이 범암원의 충적층 위에 덮여 있다.

두터운 층의 화산성 암석은 연안이나 지표에 형성되어 있는데 (쿠릴로-캄타츠코-올리유토르스키 지역)의 화산 효과와 관련이 있다.

홍적세의 빙하작용은 위 지역의 북쪽 지대에 중요한 지질적 영향을 주었다. 홍적세와 완신세의 베르호얀스크 봉우리 (특히 서쪽 산허리), 테르스코고, 코라이크 평원, 오호츠코-콜림스키 유역, 스레디니 봉우리, 동부 캄차카의 연안 평원 등은 빙하작용의 가장 큰 호조건이 되었다. 최근에도 순타르-하야타, 부오르다호스키 단층지괴, 체르스코고 봉우리, 레드야나야산 (코르야크 평원) 및 스레디니 북쪽 봉우리, 클리우체브스카야 화산군 및 크로노츠키 반도 (캄차카) 등 몇몇의 고립 지역에 작은 빙하작용이 발생하고 있다. 최근 대부분의 빙하는 태평양연안에 자리하고 있는데, 이 지역은 설선이 비교적 낮다. 베링해 근처의 코리야크 평원의 설선은 500-600m의 고도에 있는데, 서쪽으로 가면서 점처 높아져 오룰간 산맥의 경우 1,800m에 달한다.

마지막 빙하의 축소에 의해 종퇴석이 형성되었는데, 그 부피는 다른 지역에 비해 아주 크다. (극동지방 남부 산악지역보다 2~3배, 캄차카보다 8배)

홍적세 중기 빙하작용이 활발해지며 스칸디나비아 형태의 지형이 생겼다. 빙적층의 확산을 고려하였을 때 이 빙하작용의 범위는 후기 홍적세와 많이 다르다. 두 번의 빙하작용의 최대 확대거리는 거의 일치한다. 서 프리베르호야니, 서 캄차카, 사할린 지역의 경우 산맥으로부터 많이 떨어져 있어 평평하고 침식이 많이 된 빙적층 혹은 빙하퇴적층 혹은 빙퇴석층이 많이 발견된다.

홍적세 후기 빙하작용의 종류와 그 범위를 알아보기 위하여 가파른 빙퇴석, 종퇴석, 카르스, 등의 확대를 보면 북동쪽의 산악지역에 대규모의 빙하작용이 발생했다는 점을 알 수 있다. 콜리마, 인디기르카강 유역에 있는 곡빙하는 길이가 수십 킬로미터에 다다르지만 산악지방 내에서는 산간의 골 밖을 나가지 안않는다. 또 다른 특징으로는 베르호얀스크 봉우리의 서부 둔덕지역이 특히 강력한 빙하작용을 받았는데 이곳의 곡빙하는 산악지대뿐 아니라 레나강 유역까지 영향을 미쳐 말라스피나 빙하와 같은 거대 빙하를 형성시켰다.

극동 산악지방의 경우 (얌-알린, 바찰스키 등의 봉우리) 홍적세 후기의 빙하작용이 거의 영향을 미치지 않았다. 곡빙하의 길이는 20~30km를 넘지 않는다. 썰크 빙하작용도 넓은 지역에서 활발하게 발생하였지만 사할린, 시호테-알린, 쿠릴섬의 경우 약하게 작용하였다. 곡빙하작용이 소규모로 이루어졌다는 점은 산악의 단층지괴 (시호테-알린의 타르도키-야니산, 사할린 지역의

로파티나산 등)에 한정된 점을 보면 알 수 있다.

3.1 영구동토암 발달의 역사 및 최근 지질설빙학적 조건의 메커니즘

극동지방에는 영구동토 퇴적층이 널리 분포되어 있고 그 두께는 1천미터 이상이다. 다만 사할린, 쿠릴섬, 캄차카 남부와 프리모리의 경우에는 영구 동토 퇴적층이 존재하지 않는다.

영구동토층의 발달은 지질적 역사와 고지리학적 특징이 관련이 있다. 깊은 영구동토암은 홍적세 전기에 형성되었다. 당시 베르호얀스크봉, 체르스코보 고지, 콜리마 봉우리, 코리야크 봉우리 및 기타 고지에서는 낮은 온도로 인해 봉우리에 눈이 쌓이지 않은 곳을 동결시켰다.

올레르스카야 시리즈의 호성 충적층에 있는 반복 쐐기 빙하는 콜마 평원에서 발생한 홍적세 전기의 동결 과정을 말해준다. 물론 이런 깊이의 동결 조건은 그보다 일찍 발생했다. 따라서 제 4기 초기에 적어도 극동지방의 높은 산맥에서는 활발한 동결과정이 있었다고 추측을 할 수 있다.

제 4기 동안 영구동토층의 암석은 지속적으로 형성되었다. 암석의 동결작용이 지속되는 시기의 기온은 급격히 떨어졌으며 산악지대에서는 빙하작용이 일어났다. 물론 간빙기에는 상대적으로 높아진 기후 때문에 동결된 암석이 부분적으로는 해동이 되었다. 토양에 빙하가 퇴적됨으로써 특정 환경 아래에서는 열카르스트가 발생하기도 하였고 융해된 분지는 다시 후생적 반복 쐐기 빙하의 형성으로 동결되었다. 산악지역의 경우 몹시 추운 기후 속에서 동결 풍화, 동상침식 과정이 발생하였다.

완신세의 따뜻한 기후 속에서 북부 극동지방의 남부지대에서는 융해가 발생하였다. 이 지역의 북부는 수로가 발생하면서 열카르스트 과정이 활발해졌고 이는 다시 거대한 실트질 봉우리, "불군냐히" 등을 발생시켰다. 이 때 토양 표면층에 불어난 물이 영구동토층을 일부 녹이기도 하였다.

동결 퇴적층에서 동생적 빙퇴 과정이 지속되기는 하였지만 그 전보다는 강력하지 않았다. 후생적 동결의 과정에서는 호성 및 해상성(사토제방) 퇴적층을 형성시켰다.

영구동토층 암석에 따르면 극동지방은 그림 2.2.7과 같이 3개의 지대로 나뉠 수 있다.

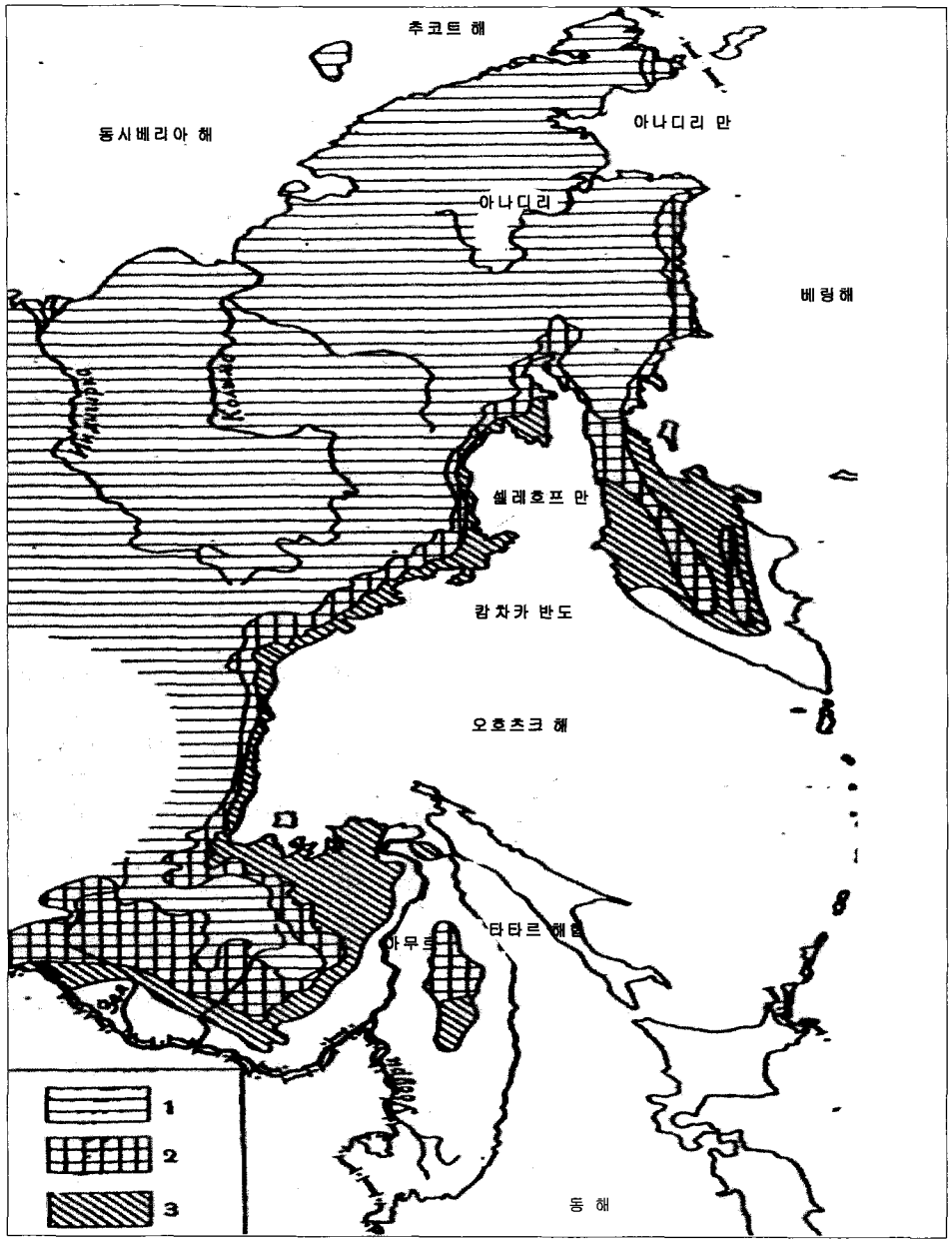


그림 2.2.7 영구동토층 암석의 분포도

영구동토층 암석이 지속적으로 확대되는 지역의 경우, 암석은 이 지역의 90% 이상을 차지하고 극동지방의 대부분의 북부 지대에 분포하고 있다. 하지만 영구동토층의 확대는 주로 수리지질 및 수문학적 요인(영구 동토층 아래 흡수와 갈수의 영향, 거대한 저수지(결빙되지 않은 하천이나 호수))때문에 불연속성을 보인다. 영구동토층 아래의 고수 유량의 영향으로 거대한 수로가 생겨 개방형 탤리크 퇴적층이 형성되었다. 개방형 흡수, 갈수 및 배수 탤리크는 강 유역에만 존재한다. 넓은 하천의 유역에는 거대한 탤리크가 형성되는데 주로 자갈로 구성된다. 예컨대 마르코브스카야 함몰지의 탤리크는 직경이 15~20km이다. 규모가 큰 개방형 탤리크는 차운 상류,

마인강, 예로폴강, 발리카야강, 콜리마강, 인디기르카강의 중·하류에서도 발견된다. 델겐스카야강 계곡의 경우 발열 발생의 탤리크가 발견되는데 이는 지하수에 의한 황의 산화에 의한 것이다. 최근 빙하작용이 발생한 지역(순타르-카야타 봉우리)에는 상대적으로 얇은 빙하가 있어 동결로부터 강 지류의 바닥을 보호하지 못하고 있으며 2,500~3,000m 이상 높이의 산에는 전혀 탤리크를 발견할 수 없다.

계절적 융해 및 동결은 위도, 경도, 눈, 식물, 기복, 토양의 암석구조 및 습도(그림 2.3.2)에 따라 결정된다. 데이터에 의하면 잔디층을 제거하면 계절적 융해층이 30에서 250%로 증가하며 이끼층을 제거하면 융해 두께가 100에서 500%로 증가한다. 이는 북부 지역에서 가장 효과가 있는 것으로 밝혀졌다. 나무와 덤불 같은 식물의 경우 적설을 통해 간접적으로만 효과를 미친다. 토양의 층을 통한 계절적 융해 구간의 변화는 해당 장소의 퇴적층 습도의 변화, 식물이 덮인 두께에 따라 달라지며 잔디층의 존재 유무에 따라 이끼층이 있는 지역의 융해 두께는 20%에서 60%까지 바뀔 수 있다. 암석의 습도가 높을수록 융해되는 깊이가 작아진다. 충분한 수분의 양질 토양일 경우 계절적 융해의 최소한의 영향을 받고 에 영향을 받고 수분이 거의 없는 양질의 토양, 양질-사질의 토양, 사질의 토양은 계절적 융해의 영향을 최대로 받게 된다.

눈이 쌓이면 융해의 깊이에 어느정도의 영향을 행사하는데, 적설량이 많을 경우 계절적 융해를 받는 층의 깊이는 평균 10~20%, 최대 50%까지 증가한다.

똑 같은 조건 하에서 남부 지역의 경우 북부지방보다 적설량의 영향을 더 많이 받는다.

불투명도가 계절적 융해의 대상이 되는 두께에 대한 영향력은 (삼림, 밀집된 수풀, 개방된 지역 등) 남부와 북부가 다르다. 남부 평야의 암반은 북부보다 계절적 융해에 더 많은 영향을 받는다. 자연적인 적설량에 따라 토양이 받는 계절적 융해의 영향은 북부의 경우 20%, 남부의 경우 10% 정도이다.

극동지방 영구동토층의 암반이 확산되는 지역은 계절적 융해가 토양층에 미치는 영향에 따라 다섯 지대로 구분할 수 있다(그림 2.2.8). 모든 지대에서 계절적 융해를 받는 토양층은 매우 변화가 심하며 지리적 지형적 조건에 따라 달라진다.

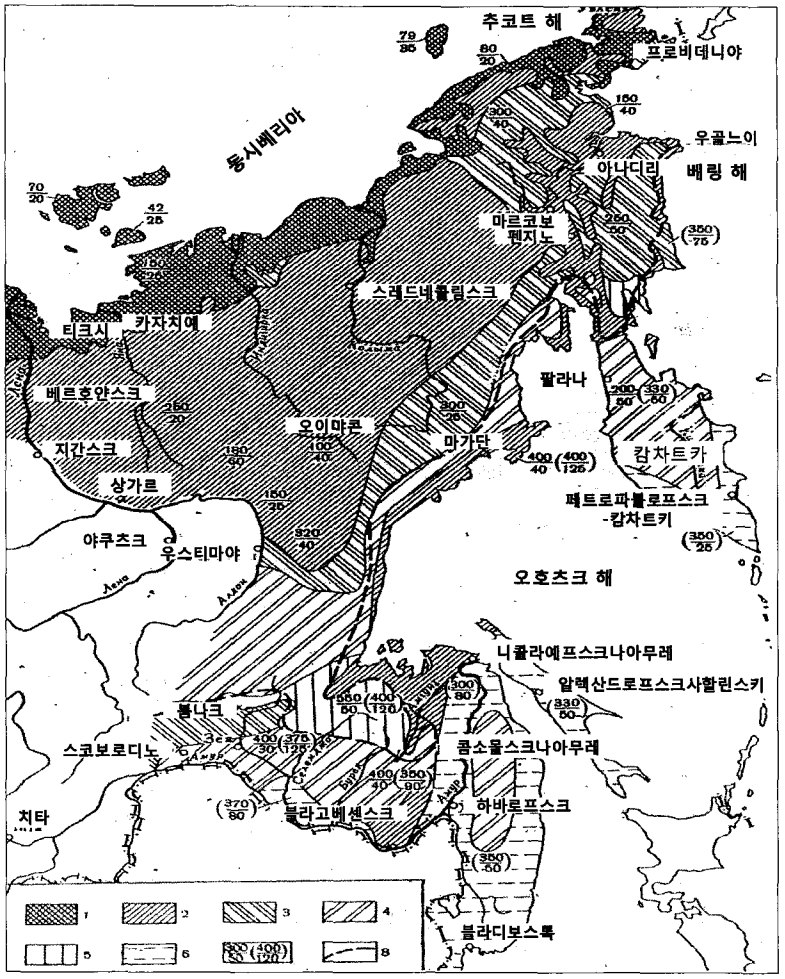


그림 2.2.8 계절적 융해와 계절적 동결의 층 및 두께를 나타낸 단면도

계절적 융해 지역의 암석: 1 - 50cm 이하, 2 - 50～100cm, 3 - 100～150cm, 4 - 150～200cm, 5 - 200～300cm, 계절적 동결 지역의 암석: 6 - 50～375cm 7 - 계절적 융해가 일어나는 퇴적층의 최대(분자) 및 최소(분모) 두께(소괄호 - 계절적동결층), 8 - 계절적 융해가 지속적으로 확산되는 지역의 경계

3.2 제 4기 퇴적층: 극동지방

제 4기 퇴적층은 기복과 동시에 형성되었다(그림 2.2.9). 대륙형 퇴적층(충적층, 호성, 호성-충적층, 빙하 및 빙하퇴적층)이 가장 널리 발달하였으며 이들은 산간지역과 강 유역, 광활한 평야를 뒤덮고 있다. 용탈 퇴적층은 특히 넓은 산악지역에서 발달하였다. 해안에서는 해안, 빙하성-해안 및 충적-해안성 퇴적층으로 바뀐다.

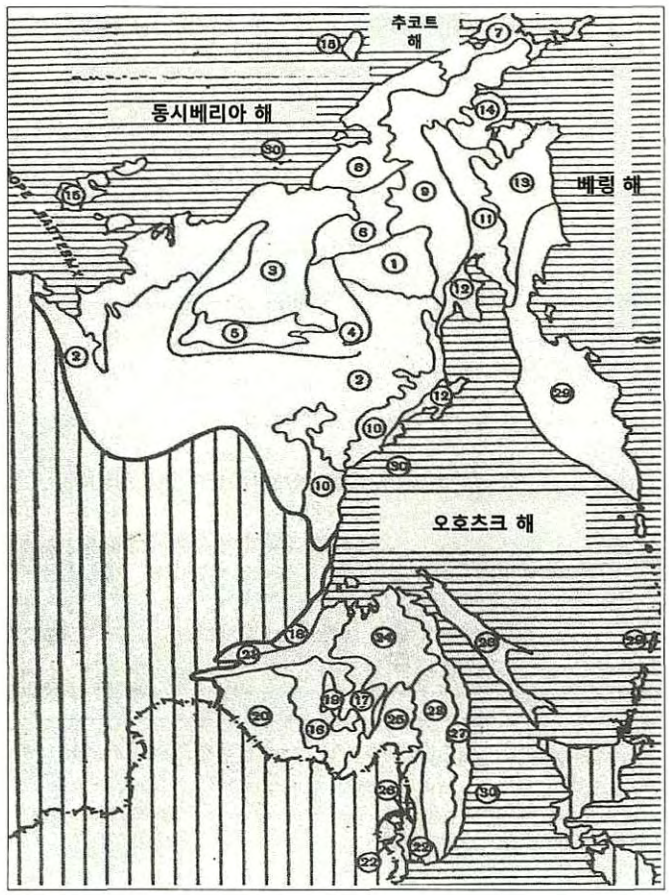


그림 2.2.9 극동지방의 지질 공학적 지대

1.오모론키, 2.베르호얀스키, 3.야노-콜림스키, 4.프리콜림스키, 5.몸스키, 6.올리스키, 7.Vostochno-추코츠키, 8.아누이스코-추코츠키, 9.추코츠키, 10.오크호츠키, 11.펜진스코 - 아나디르스키, 12.타우이스코-타이고노스키, 13.코리야크스키, 14.아나디스키, 15.북극섬, 16.킹가노-부레인스키, 17.투쿠링라-즈하그딘스키, 18.우드스키, 19.부레인스키, 20.아무로-자이스키, 21.베르호네-자이스키, 22.아르스니브스키, 23.시호테-알린스키, 24.니츠네-아무르스크, 25.스레드네-아무르스키, 26.프리한카이스키, 27.보스토츠노 -시호테-알린사키, 28.사할린스키, 29.쿠릴로-캄차츠코-올루토르스키, 30.북부 및 극동 해안 대륙붕

비탈 퇴적물 은 거의 모든 지역에서 발달하였다. 이는 전 지역의 80%가 산악 지역이라는 점에서 알 수 있다. 비탈 퇴적층은 붕적토, 비탈-붕적토, 비탈-동상 침식토와 같이 다양하게 구성된다. 이의 지질 공학적 특성은 분지의 용탈 및 용탈-동상 침식 퇴적층과 유사하다.

비탈 퇴적물의 특성은 얇은 두께, 높은 역동성에 있고 산허리의 형태, 하위토양층의 암석 성질 및 풍화의 정도, 기후 등에 따라 달라진다.

북부 툰드라 지역 (보스토츠노-추코트키, 오크호츠코-추코츠키, 오몰론스키, 몸스키, 베르크호윤스키트 지역)에서는 물리적 동결 풍화과정을 극심하게 거친 붕적층이 널리 발달하였다. 이곳은 거친 암석이 20~30도 경사의 비탈을 덮고 있고 이것이 붕괴되면 봉우리부터 기슭까지, 때로는 강 유역까지 직접 떨어지는 경우도 있다. 30도 이상의 경사를 지닌 곳에서는 퇴적층이 20~

30m로 덮고 있는 인근 비탈이나 산기슭에서 암석 조각들이 떨어지는 경우가 많다. 평평한 분지나 완만한 산비탈의 경우 부서지기 쉬운 (60~80%) 용탈성-비탈퇴적층이 널리 분포하며 보통 양질-사질 충전재를 함유하고 있다. 쇄설암의 크기와 형태는 기저의 암석과 상호 연관이 있다. 관입암의 용탈성 잔적층에는 퇴적층은 부서지기 쉬운 암석, 드물게는 양질-사질, 사질 충전재 (30~50%)가 있으며 덩어리의 규모는 0.1~0.8에서 1~3m 사이다.

위 퇴적층은 동결을 거치며 높은 빙하 함유율 (평균 25~38%)을 특징으로 한다. 이들의 물리 역학적 성질은 발생 깊이, 빙하 함유도, 입도상 구성, 퇴적층의 암석적 특징에 따라 달라진다. 평균적으로 미세 퇴적층의 장기적 압축 저항력은 2MPa이며 평균 일시적 압축저항률은 5.36MPa이다. 30N을 재하할 경우 동토의 변형계수는 16~25MPa이며 쇄설성 토양에 대한 표준 압력은 02~0.25MPa를 넘지 않는다. 전체적으로 양토와 양질사토는 단단하고 낮은 가소성 견고도를 보이며 접착성은 10Pa이다. 동결 상태에서 수직 로드 30N에서 변형계수는 10MPa이다.

삼림 툰드라 및 북부 타이거 지역 (베르호얀스키 지역)에서는 계곡의 동상 침식, 비탈 퇴적층의 동상 침식 및 용탈-비탈 퇴적층 등이 널리 발달하여 1~2m에서 5~10m의 두께가 비연속적으로 산비탈을 덮고 있다. 퇴적물의 구성은 상당히 변동성이 많은데 10mm 이상 크기의 분말이 8~53%, 32%를 차지한다. 충전재는 양질사토로 구성되고 때로 양토(50%)로 구성될 경우도 있다. 퇴적물은 주로 동결과정을 겪는다. 계절적 융해 지대에서의 양토와 양질사토는 소성과 불안정한 견고도를 지니며 동결지대에서는 불규칙적인 빙하성을 띤다(10~58%).

두께 10mm의 빙하성 균열은 토양에 비균등 조직을 만들어 힘을 감소시킨다. 전체적으로 퇴적층의 강도는 동토의 온도가 낮아짐에 따라 증가한다. t=4℃의 경우 표준적 압력은 200kPa이며 t=1.5℃ 아래서는 50kPa로 감소한다.

높이가 비교적 낮은 산 (니츠네-아무르스키, 시호테-알린스키 지역)은 타이거 지대 중남부에 자리잡고 있으며 비탈-붕적층을 특징으로 한다. 퇴적층의 두께는 비탈 아래로 내려가면서 증가하며 기슭 근처에서는 수 미터에 다다른다. 양토를 지닌 gruss는 화강암에서 발달한다. 암석과 gruss는 20m부터 깊어질수록 70%씩 증가한다. 화학적 풍화가 강하게 일어난 남부 침활혼성림 지대는 대부분의 충전재가 몬모릴로나이트-수운모나 무거운 양질과 점토질 퇴적층으로 이루어졌다. 타이거 중간 지대의 경우 수운모-양토가 널리 발달하였다. 수운모 양토는 무겁기 때문에 기저층에 발달한다. 완만한 비탈과 분지의 양토는 0.5m 깊이의 독립적 지평층을 구성한다. 현무암 대지의 표면에는 양질 지평층의 두께가 1~3m에 달하는 경우도 있다. 프롤루비얼-비탈-용탈성 양토의 물리 역학적 특성은 다음과 같다. 밀도는 1.84~2.21g/cm^3, 공극률은 23.9~44%, 내부 마찰각은 7~27°, 응착력은 0.01~0.17MPa이며 상재하중 30N하의 변형계수는 3.3에서 41.7MPa

이며 표준 압력은 0.25MPa이다.

점토질 퇴적층의 가소성은 주로 광물적, 입도상 구성과 관련이 있으며 6~22까지 다양하다. 함수율은 기후 변화에 따라 함께 변한다. 따라서 시호테-알린 남부의 경우 표면 지평층의 습도는 10~15%를 넘지 않는다. 부레인스키와 니츠네-아무르스키 지역의 북부 산허리에는 습도가 20~42%로 증가하며 낮은 소성 견고로도 바뀐다. 평균 쇄설지평층의 밀도는 1.95g/cm^{3}이며 공극률은 깊이가 깊어질수록 48%에서 29%로 낮아진다.(따라서 공극률 지수는 각각 0.91과 0.41) slide rock은 높이 1,500m 이상의 고지대에만 분포한다. 이곳에는 아주 느린 이동을 겪은 비교적 안정적이고 오래된 둔덕이 존재한다. 붕적토양의 경우 덩어리-쇄설 및 양질, 또는 쇄설-양질 지평층이 번갈아 나타나는데, 이는 퇴적층의 환경이 변화하고 있음을 증명한다. 결이 거친 지평층의 경우 빙하기에 혹독한 추위를 겪었음을 의미하고 쇄설-양질 지평층은 간빙기의 날씨를 겪었음을 증명한다. 극동지방 남부에서는 양토에 따라 두 블록의 지평층이 발달하였는데, 이는 홍적세 중 후기에 두 번의 추위가 찾아왔음을 알려준다.

극동지방의 충적층은 아무르, 야나, 콜리마, 인디기르카강 등 대규모 강의 계곡에서 가장 많이 발달하였다. 낮은 하안단구의 경우 거의충적층으로 구성되며 높은 단구는제 4기 이전의 암반 위에 몇 미터의 두께로 충적토가 덮여 있다. 하안단구는 그 규모, 높이, 지역 등에서 많은 변화를 겪지만 대규모 강의 유역은 크게 범람원, 저조 단구, 중간 단구, 고조 단구로 분류될 수 있다.

학자들은 구조지질학적 운동이 강의 경사를 변화시키기 때문에 구조지질학적 요인이 충적층의 퇴적 과정에 결정적 영향을 준다는 결과를 내왔다. 두 번째 요인은 기후로서 하천의 물 함유량, 풍화 작용의 강도 및 비탈 삭박에 영향을 준다. 이 가설은 극동지방에 존재하는 하천에 적용된다. 따라서 대규모의 계곡 내에서는, 특히 음의 구조를 지닌 곳에서는 사질 수로 충적층의 두께가 20~70m에 달하고 양질-사질 범람원 충적층의 두께는 2~4.5m에 달한다. 양의 구조에서는 강의 계곡이 급격하게 수렴하는데, 충적층은 거친 물질로 변하며 두께는 10m까지 감소한다.

기복을 경계로 한 산악지대의 특징은 충적층 형성에 대단히 많은 영향을 미친다. 예컨대, 아무르강 지류는 높은 부레이노-바즈할스코이 산맥에서부터 흘러나오는데, 기울기가 아주 크고 해류 유속이 높다. 또한 이곳의 충적토에는 자갈이 많이 있다.

충적층 형성에 영향을 주는 기후적 특성을 규명하는 일은 쉽지 않지만 얼마간의 규칙성을 구별할 수 는 있다. 첫째, 극동지방 남부의 몬순 기후는 하천의 수리지질학적 특징을 결정한다. 여름, 그리고 늦여름과 초가을 사이 충적암과 침전물의 변이성은 아무르강의 충적층 결과 매우 복잡하고 다양한 형태를 낳았다. 또한 북부지방의 추운 기후는 충적층의 구조와 구성에 엄청난 영향을 끼쳤다. 북부지방 축적층의 원류는 지속적인 동결상태와 많은 양의 실트질과 점토질 분말,

동상 침식 과정과 연관성을 지닌다.

특히 충적층의 경우, 규모나 단면에서 암석 구조의 변화를 자주 겪는다. 상단은 실트질 균열(범람원상)로 채워진 양질사토와 사토, 양토로 구성되고 하단은 거의 자갈이 발견되지 않는 점이 충적토의 전형적 단면 모습이다. 대규모 하천의 충적층은 강변에서 중앙까지 수로 과정의 변화 때문에 표면적 변화가 자주 발견된다.

아무르-자이스타야, 스레드네-아무르스카야, 우딜-키진스카야 및 기타 함몰지 내에서 충적층은 사토와 양질사토, 동생적 광물 구성, 뚜렷한 성층 등의 특징을 지닌 저지 하천의 영향을 많이 받는다.

고지 충적층은 매우 불안정한 암석 형성 물질, 불분명한 성층 등의 특징을 지니며 거친 물질(자갈)이 많이 분포한다. 퇴적층의 두께는 5~10m이며 대규모 하천의 계곡은 20~50m에 이른다. 충적층의 두께는 2~5m, 때로는 1m로 낮아지는 경우도 있다. 얌-앨린, 데조프, 바즈할스키 봉우리의 계곡 및 유속이 빠른 하천의 경우 기반암 충적층은 옥석 덩어리가 많고 자갈 쇄설이 있는 퇴적물로 대표된다. 대부분 하천의 계곡이 발달된 곳에서는 자갈 퇴적물이 많고 북서쪽으로 가면서 점토질 자갈이 발견된다. 기반암 충적층을 따라서는 계곡의 길이와 너비에 따라 모가 난 물질의 함유량이 많아지기도 한다. 따라서 작은 하천의 계곡에는 각이 많은 물질이, 넓고 긴 계곡의 경우 자갈-쇄설 물질 및 자갈과 옥석 퇴적물이 많이 발견된다. 자갈 퇴적물의 특징은 다음과 같다. 밀도는 2.12~2.22g/cm^3, 공극률은 35~45%, 변형 계수는 40MPa이상, 내부 마찰각은 37~40°이다.

대규모 하천의 중류 및 하류의 수로는 주로 자갈과 사토로 구성된다. 킨가노-부라인스키 지역의 계곡에는 여러 종류의 자갈이 있는데 15~30%의 사력층, 옥석, 10~30cm 정도의 블록 등이 함께 발견된다. 서 시호테-알린의 하천 유역에는 둥근 자갈, 사토와 중간 입자의 사력층이 대부분이다. 아르세니브스키 지역 하천 유역에는 주로 사력층과 사질-사력층으로 구성된 수로 퇴적층이 있다.

이곳의 자갈 퇴적물이 지니는 특징은 다음과 같다: 밀도는 2.07~2.15g/cm^3, 공극률은 37% 이하, 변형계수는 40MPa이하, 내부 마찰각은 37°이상이다.

범람원의 충적층은 주로 사토, 양질사토, 양토로 구성된다. 하류의 경우 투란, 킨간, 북부 및 서부 시호테-알린, 부라인스키 산맥의 지맥에 존재하는 범람원 충적층은 사력층과 자갈(40%)을 포함한 사질토양이 많다(사토 함유율은 20~50%). 양토의 함수율은 환경적 영향을 많이 받는다. 남부지역의 경우, 침활혼성림이 많아 18~25%의 함수율을 지니며 양토는 낮은 소성 견고성을 지니는 경우가 많다. 침엽수림대에는 양토의 함수율이 30~45%로 증가한다. 충적층의 구조는

상당히 조밀한 편이다.

충적토 사질을 분석하면 전체적으로 퇴적기원단계에서 형성되었기 때문에 자갈 퇴적물은 거의 발견되지 않는다. 침강 기간 동안 충적층은 조밀함을 보였기 때문에 해가 갈수록 더욱 단단해졌다는 점을 알 수 있다. 따라서 제야강과 셀렘즈가강의 하류는 홍적세 후기와 중기 미세한 사토가 많으며 후기 공극률은 44%이다. 중기 홍적세 사토의 공극률은 40%이다. 밀도는 1.83~1.90g/cm^{3}이고 건조 상태일 때 마찰각은 33~36°, 수분 함유시는 26~32°이다.

충적층의 풍화 정도는 완신세 이전의 퇴적층으로 가면서 더욱 증가한다. 완신세와 홍적세 후기의 사토와 자갈은 거의 풍화의 영향을 받지 않았다. 홍적세 중기의 충적층은 침식 사력층과 자갈, 분출암과 화강암이 많이 발견된다. 제 3기 전기의 충적층에서는 자갈과 사력층의 높은 풍화뿐 아니라 사토의 장석 분말의 풍화도 발견되는데 이는 충전재의 점토화가 6%, 그보다 오래된 것은 19%나 진행되었기 때문이다.

호성층은 대규모의 산간지방에 널리 발달되었다. 우수리-칸카이스카야, 스레드네-아무르스카야, 니즈네-아무르스카야강 유역의 퇴적층에 대해서는 자세한 연구가 수행되었다. 전체적으로 호성층은 얇은 점토층으로 구성되고 보통 담수 저수지에서 퇴적작용이 일어난 형태이다. 신(新)제3기에서는 넓은 지역을 호수가 차지하고 있었는데, 그 다음의 시기에서는 물의 표면과 깊이가 감소하였다. 호수의 주기적 이동은 제 3기의 아열대 기후에서 홍적세 빙하기의 온순기후로 급변한 현상과 관련이 있다. 기후의 변화 및 호수변의 주기적 침수는 저수지에도 영향을 미쳐 서로 다른 시기의 호성 점토의 색깔도 변동하게 되었다. 밝은 붉은빛, 초콜릿빛, 갈색이 도는 회색빛의 제 3기-홍적세 전기의 점토는 산화 혹은 건조한 기후 및 식물의 감소 등이 발생했음을 의미한다.

호성 점토의 지질공학적 특성은 퇴적층의 강화, 그리고 탈수 현상에 많은 영향을 미쳤다. 암석화 정도를 고려할 때 호성 점토는 세 개의 군으로 나눌 수 있다. 첫 번째 군은 암석의 고화 정도가 높은 고(古)제3기-중신세 점토이다. 두 번째 군은 중간 정도의 암석 고화정도를 지닌 제 3기-홍적세의 슬레이트 점토에 해당한다. 제 3 군은 홍적세 중후기 및 완신세 점토로 대표되는데, 암석의 고화 정도가 아주 낮다.

통합된 층서의 지평층 내에 존재하는 호성 점토의 암석고화 정도는 퇴적 과정의 지속성에 따라 달라지는데 이는 간섭에 의해 점토가 침식을 경험하여 밀도 및 역학적 힘이 감소하기 때문이다. 풍화도 이와 유사하게 중요한 요인으로써, 함수율의 증가, 역학적 힘의 감소 등을 초래하여 퇴적층의 특성 변화에 많은 영향을 미친다. 홍적세 전기의 점토는 4~7m의 다양한 풍화 지대를 지니며, 홍적세 중기의 경우 2~3m의 풍화지대를 발견할 수 있지만, 홍적세 후기와 완신세에서

는 풍화 지대가 거의 나타나지 않는다.

호성-충적층 은 극동지방 남부의 대규모 하천 (아무르강) 유역, 그리고 북부의 저지 평원 (야나강, 콜리나강, 아나디르강 유역)에 해당한다.

극동 지방 남부의 호성-충적층에서는 얕은 호수와 만이 많이 발달되어 있다. 여기는 사질토양과 단조로운 지평층 혹은 기복이 심한 층리로 된 사질토양이나 점토로 대표된다. 점토 퇴적물의 평균적 특징은 다음과 같다. 밀도는 1.8~2.0g/cm^3, 변형계수는 9~22MPa, 응착력은 0.02~0.07MPa, 내부 마찰각은 11~15°이며 평균 13°이다. 점토와 양토는 수분이 많으며 극히 일부분을 제외한 대부분의 지역에서 약한 소성을 지닌다. 중앙으로 갈수록 호성-충적층은 수평적 층리를 지닌 전형적인 호성 실트질 점토로 바뀐다. 퇴적층의 두께는 3~20m이다. 전체적으로 얇은 층이 번갈아 형성되고 다양한 물질로 구성된 양토(가벼운, 중간 무게의, 무거운 실트질 혹은 사질)와 점토, 양질사토, 이탄이 번갈아 나타난다. 점토분은 9~49%까지 다양하게 나타난다. 최소치는 델타상과 관련이 있고 최대치는 호성과 관련이 있다. 따라서 사질 분말은 50~60에서 5~10%까지 함유율이 변한다.

호성-충적층 퇴적의 두 번째 특징은 배지(培地) 조건에 있다. 가장자리의 이동에 의한 얕은 저수지 제방의 침수는 배지의 축소를 촉진시켰다. 축소된 배지는 무거운 퇴적층을 발생시켰으며 침수로 인해 유기물질이 상당량 증가하였다(6~14%).

이질적인 구성물, 형성 조건의 특이성 등은 퇴적층의 속성작용에 영향을 미친다. 얕은 호수와 만, 델타에는 퇴적층이 빠르게 쌓이고 건조되며 수축 과정을 경험하게 된다. 이 결과 역행불가능한 응고를 통해 점토질 퇴적물의 가소성이 감소한다. 이 과정을 통해 아마도 소성지수와 입도상 구성이 불일치하는 이유를 알 수 있을 지도 모른다. 수축은 호성토에 비해 호성-충적토가 더욱 강화되는 이유가 된다. 탈수는 후성설의 주요한 과정이다. 자연 재하와 시간의 영향을 받은 축소 과정은 호성층보다 훨씬 약하게 발달한다.

빙적층은 동북부의 산악 지역, 아나디르스카야와 반카렘스카야 등에 널리 발달되었다. 극동지방의 남부 지대, 특히 캄차카와 사할린에서는 빙퇴석 퇴적층이 국소적으로 발견된다. 빙퇴석의 두께는 5~10에서 60~160m까지 아주 다양하게 변한다. 산 계곡에서의 빙하작용은 빙적층의 구성과 물리 역학적 특성에 영향을 미쳤고 봉우리에서 산기슭까지, 가장자리에서 함몰지 중앙까지 다양한 성격을 낳게 하는 요인이 되었다.

하천의 유역, 봉우리, 평지 등에는 다소 발달된 옥석-사력층-자갈 퇴적층이 발생하였는데, 이들은 주로 양질사토, 양토, 사토로 구성되어 있다. 단면으로 볼 때에는 다양한 암석이 번갈아 생겨나며 지역적으로는 불규칙하게 발생한다. 거친 분말의 함유율은 10~60%까지 매우 다양하다.

자갈과 작은 옥석(5~20cm)이 대부분을 차지하지만 1.5~5m 규모의 큰 암석덩이도 발견된다. 미세한 입자의 사토분과 거친 입자의 실트(0.25~0.01)는 최적층의 50~60%를 차지한다. 점토는 전체 18%를 넘지 않는다. 빙퇴석의 입도구성은 니즈네-아나디르스카야 함몰지에서 발견되었듯이 점토분은 많지 않다(1~19%, 평균 10%). 실트질분은 20~50%(평균 40%), 사질분은 12~80%(30%), 사력층은 3~35%(12%), 자갈 및 옥석은 1.5~18%(3%)를 차지한다. 다양한 암석 구성, 빙퇴석 퇴적물의 다양한 강화 점도로 인해 용적 중량이 크게 변한다. 예컨대 오호츠코-추코츠키 지역의 경우에는 1.25~2.01g/cm^{3}로 변한다. 옥석 양토의 평균 용적 중량은 1.87g/cm^3, 양토 사토의 경우 1.95g/cm^3, 점토(아나디르스키 지역)의 경우 2g/cm^{3}이다. 공극률은 양토는 48%, 양질사토는 41%, 점토는 39%, 옥석-자갈 퇴적물은 24%이다.

빙적토는 서부 프리베르호야니, 아나디르스카야 함몰지, 대규모 하천 유역의 평야 등지에서 빙퇴석을 따라 형성되었다. 빙적토 중에는 빙하 하천가의 자갈과 빙하 수로에서 나온 사토가 있다. 근처의 옥석 구성 퇴적층은 거친 층의 옥석을 품은 자갈(50~70%)과 다양한 입자의 사토 또는 양질사토에서 비롯된 충전재 등으로 구성되며 여러 형태의 자갈층, 0.1~2m 두께의 사질 렌스가 번갈아 층리를 형성한다. 0.5~1km 정도 옥석 열을 제거하면 자갈층이 다양한 입자의 사층리된 사토와 번갈아가며 나타난다. 사토는 빙퇴석 퇴적층을 제거할수록 증가한다. 전체적으로 사력층-자갈 퇴적층은 작은 자갈층과 사토 렌스 층으로 구성된 사력층 퇴적물이 번갈아 나타난다. 여기서 옥석은 5~10% 이하를 차지하며 사력층은 30%, 자갈은 35%, 점토분은 5~7%(보스토츠노-추코츠키 지역)을 넘지 않는다.

니즈네-아나디르스카야 함몰지의 사토는 작은 자갈부터 중간입자, 큰 입자의 자갈까지 다양하게 구성되어 있다. 빙적토의 밀도는 1.57~2.67g/cm^{3}내에서 다양하게 나타나고 사토의 경우 평균 1.95g/cm^3, 양질 사토의 경우 1.69g/cm^{3}로 나타난다. 전체적으로 이 퇴적층의 강화도는 낮다. 즉, 양질사토의 경우 45.5%, 사토의 경우 48.7%를 보인다(아나디르스키 지역). 빙적토는 응결되지만 빙하 함유율은 낮다(보통 13%, 극히 드물게 40%).

호성-빙적토는 기복지역 등, 그리 넓지 않은 지역에 분포한다. 호성빙적토는 끈끈한 점토질, 수평적 층리를 이룬 양질사토로 구성된다. 이중 실트질 분말(86%), 점토질 분말(33~5%)이 주를 이루고 주로 표면층에 위치한다. 이 퇴적물은 응결이 되며 모든 빙적층의 암군에서 높은 빙하 함유율을 지닌다(아나디르스키 지역). 융해에 의해 점토는 고체에서 액체로 변하고 계절적 동결에 의해 융기된다. 평균 온도 0.5~1.5℃인 경우 지반의 평균 압력은 다음과 같다. 사토의 경우 0.3~0.8MPa, 양질사토, 양토 및 점토의 경우 0.2~0.5MPa, 자갈의 경우 0.6~0.9MPa를 보인다.

해양성, 충적층-해양성 및 빙하성-해양성 퇴적물은 해안가, 제방을 따라 내륙까지 비연속적으로 발달되며(콜루친스카야, 차운만, 크레스트만, 아나디르피르스 등), 섬과 반도의 해안 (사할린, 쿠릴, 캄차카)등의 반도에서도 나타난다. 이는 완신세 퇴적층이며 최근의 퇴적층(라이다, 해변, 저조 단구) 등을 형성하고 더 오래된 퇴적층의 암군은 고조단구의 퇴적층을 형성한다. 전반적으로 후자는 높이 100~120m의 작은 쇄설지 형태로 나타난다.

해양성 퇴적물의 지질 공학적 특징은 해안의 지질적 구조 및 기복, 조류 과정, 최근 퇴적층의 상태에 결정을 주는 기후 조건, 빙하의 조건 및 파도, 등 수많은 요인에 의해 달라진다.

북부 및 극동지방 해안에서는 이러한 요인들이 상호 작용을 거쳐 다양한 조건의 해상성 퇴적층을 만들어 낸다

추코트카의 해양성 퇴적층은 완신세에서 홍적세 전기까지 다양한 시대의 단구로 구성된다. 가장 넓은 지역은 제 2 단구가 차지하고 있는데, 이는 주로 자갈층으로 된 양질사토와 그 위의 사토로 구성되어 있다. 제 1 단구는 해안을 따라 불연속적으로 발달해 있다. 광활한 만 위에 쌓인 퇴적층은 주로 사토로 구성되어 있으며 석호 주변의 경우 상당한 유기물을 함유한 양토 및 양질사토가 수평적으로 성층을 이루고 있다. 최근 단구는 해변 등 대부분의 지역에서 발달되었고, 주로 사력층과 자갈로 구성되었으며 현재까지 지속적으로 형성 중이다. 고조 단구 (3 및 IV)는 좀 더 복잡하게 발달되었는데, 단면의 중앙에는 해양성 사토와 자갈층이 빙하성-해양성, 그리고 해양성 옥석 양토와 번갈아 층을 이루고 있다. 전체적으로 해양성 퇴적층은 상당히 변화하기 때문에 일련의 퇴화 퇴적물이 자리잡고 있다. 자연 상태에서 해양성 단구의 퇴적층은 습도가 낮고 조밀하다. 해변 퇴적층, 비치리지는 물 포화 상태에 있다. 사력층과 다양한 입자의 사토의 밀도는 2.0~2.3g/cm^3, 공극률은 50~60% 에서 70~85%로 변하며, 자갈과 사력층의 내부 마찰각은 38~40°이며 사력층을 포함한 양질사토의 마찰각은 21°, 응착력은 0.025MPa, 양질사토의 변형계수는 22MPa, 자갈의 변형계수는 50MPa이다.

동북지역 해양성 퇴적층의 특징은 용적 중량, 공극률(30~70%) 및 빙하 함유율(27~83%)에서 상당한 차이를 보인다. 석호상은 부드러운 실트질 점토로 구성되는데 빙하 함유율이 104.8%(샤테르스키)에 달한다.

타타르 해협 및 동해의 해양성 퇴적층은 대부분 완신세에 형성되었으며 홍적세 중기-후기의 해양성 퇴적층은 단편적으로 발견되며 20m까지는 퇴적-파식 단구로 이루어져 있다. 단구는 주로 1~2m 두께의 사력층과 자갈물질로 구성되어 있다. 양토와 양질사토는 사력층, 자갈, 옥석 및 5~6m의 덩어리로 이루어져 있다. 해변과 bay bar는 주로 사력층 사토로 구성되어 있고 간조시기의 토양은 사질-실트 및 실트로 되어 있다. 총 퇴적층의 두께는 최대 30m에 다다른다. 근

해-해양성 사토와 자갈은 조밀함, 약한 염분 등을 특징으로 한다. 사토는 다양한 입자의 물질로 구성되어 있으며 자갈은 둥글고 작다. 석호성-해양성 퇴적층의 물리적 특징은 다음과 같다. 양토의 밀도는 2.04g/cm^3, 공극률은 63%, 내부 마찰각은 21°, 응착력은 0.022MPa이다. 양질사토의 밀도는 2.13g/cm^3, 공극률은 47%, 내부 마찰각은 25°, 응착력은 0.034MPa이며 실트의 밀도는 1.45~1.98g/cm^3, 공극률 지수는 0.99~2.24, 변형계수는 2~3MPa이다.

캄차카의 해양성 퇴적물은 5~15km의 연속적 띠로 발달되었는데 완신세-홍적세 전기에 형성되었다.

대규모 하천의 입구에는 충적층-해양성 퇴적층이 발달하였는데, 보통 입자의 사토, 양토, 점토, 실트 등으로 구성되어 있다. 해양성 퇴적층의 총 두께는 30m이며 충적층-해양성 퇴적층은 15m 이다.

사토는 실트질(45%의 실트질 입자)로 구성되었으며 밀도는 1.9g/cm^3, 공극률은 48~50%, 변형계수는 25MPa 이하, 내부 마찰각은 물 포화 상태일 경우 22~27°이다. 점토질 토양은 30~59%의 항복점을 지닌 양토로 구성되어 있으며 밀도는 1.45~1.64g/cm^3, 공극률은 36~40%, 변형계수는 10~15MPa이다.

석호-해양성 퇴적물은 전체적으로 피터만에 분포되어 있다. 계곡 가장자리의 두께는 5~9m, 중앙부는 30~35m 이상이다. 석호성-해양성 퇴적물은 온순다습한 날씨의 얕은 염분호에 형성된다. 20~30m 깊이까지의 암군은 주로 실트로 구성되는데 그 위에는 4~9m의 이질사토가 자리한다.

실트의 함수율은 43~123%(평균 70%)의 불안정한 견고성을 지닌다. 밀도는 1.33~1.75g/cm^3, 공극률은 50~90%이다. 실트의 조밀도는 낮으며 친수성이 높다. 이는 조기 속성 작용을 겪었기 때문에 구조적 견고성과 기계적 힘이 낮다는 점을 증명한다.

4. 소결론

본 절에서는 시베리아와 극동 지역을 지질학적으로 3개 구역으로 구분하고, 각 지역들의 지층이 형성된 외부적인 원인과 그 메커니즘을 설명 하였다.

각 지역별 지질설빙학적 메커니즘에 대한 설명과 더불어 실제 지반설계에 활용할 수 있는 여러 가지 지반 공학적 인자들의 수치(밀도, 내부마찰각, 공극률, 함수비, 변형계수)를 직접 제공함으로써 각 지역의 토질 성상을 보다 쉽게 이해 할 수 있도록 하였으며, 향 후 해당 지역의 지반설계 시 아주 유용한 자료로 활용될 것으로 기대된다.

제 3 장 러시아 천연가스 관련 현황 분석

제 1 절 러시아 천연가스 관련 기관 현황

1. 러시아 연료 에너지부(Ministry of Fuel Energy)

러시아 연료 에너지부는 1991년 러시아 연방 정부의 발족과 함께 설립되었다. 주요 기능은 러시아 연방내의 연료 및 에너지 정책을 수립 집행하는 것이다. 그 기능을 구체적으로 열거하면 다음과 같다.

- 각종 연료 에너지 자원의 합리적이고 효율적인 활용.
- 각종 연료 에너지 자원 개발의 주요 정책 방향 설정.
- 각종 연료 에너지 자원 산업의 사유화 및 경쟁 시스템 구축.
- 러시아 경제 체제와 에너지와의 유기적 결합.
- 에너지 수출 전략 수립 및 국제 에너지 기구 내에서 활동 방향 설정.
- 국내 기업 활동 관련 입법, 에너지 표준 설정 등의 관련 규정 마련.

연료 에너지부에서 관장하고 있는 에너지원으로는 석탄, 전력, 석유, 가스 등이며 원자력의 경우 원자력위원회라는 독립 정부 조직에서 이를 관장 운영하고 있다. 러시아 연료 에너지부의 조직체계는 장관을 정점으로 하여 3인의 제1차관과 7인의 차관 조직 하에 총 28개의 부서로 되어 있다. 연료 에너지부 장관의 경우 1991년 러시아 연방 공화국 수립 이후 현재까지 6년간 5명의 장관이 경질되는 등 러시아 내각의 수반 중 가장 정치적 영향력을 많이 받는 각료의 하나이다. 이는 에너지 산업이 러시아 재정 수입 및 산업 생산 중 가장 중요한 역할을 담당하고 있기 때문이다. 즉, 러시아 내 주요 에너지 기업들은 모두 정치적 로비를 통하여 정치적 영향력을 정부 내에 미치고 있으며, 정치 세력 또한 에너지 기업으로부터 정치 자금을 지원 받는 것이 러시아의 일반적인 정경 유착 형태이다. 예를 들면 현 총리인 체르노미르딘의 경우 전직 GAZPROM 사장이었으며, 전임 제1부총리인 포타닌은 시탄코 석유사의 소유주이다. 따라서 러시아 연료 에너지부 장관의 경우 러시아 정계의 정치적 실세의 직접적 영향을 받는 대표적 각료이다.

과거 연료에너지부 장관을 열거하면 A.Dyakov, V.Lopukin, Y.Shafranik, P.Rodionov 등이 있었다. 특히 전임 장관인 Rodionov의 경우 전직 GAZPROM 사장이자 현 총리인 체르노미르딘의

정치적 세력으로 제1부총리 추바이스 등 그의 정적들이자 개력파 정치세력들은 체르노미르딘 총리에 대한 정치적 견제로서 '97년 3월 장관 경질을 단행했던 것으로 알려지고 있다.

현재 연료 에너지부의 장관은 정부 제 1총리인 보리스 넴초프가 겸직하고 있으며, 제 1차관으로 S.Kiriyenko, A.Shatalov 가 활동하고 있다.

현재 석유·가스 분야 제 1차관은 A.Shatalov로서 산하조직으로 석유산업국(DEPARTMENT OF OIL INDUSTRY), 국제경제관계국(DIRECRTORATE OF FOREIGN ECONOMIC RELATIONS)을 관장하고 있다. 특히 A.Shatalov 제 1차관은 석유 및 천연가스 개발허가권, 생산물 분배법 관련 정책을 총괄하는 책임자로서 해외 석유 · 가스 투자 산업 관련 사항을 결정하는 주요 정책 입안 책임자이기도 하다.

또 다른 제 1차관인 크리엔코의 경우 '97년 5월에 입각한 35세의 신임 각료이다.

전직은 에너지부 장관인 넴초프가 전직 주지사로 있었던 니즈니 노보고르드의 NORSI-OIL의 사장으로서, 넴초프가 전격 발탁하여 입각시킨 것으로 알려지고 있다. 특히 그의 주요 역할은 넴초프와 함께 러시아 주요 에너지 독점기업인 GAZPORM, ROSNEFT, TRASNEFT 등을 관리하여 독점체제를 탈피하여 완전 경쟁 체제로 러시아내 에너지 시스템을 전환시키는 역할을 수행하는 것으로 알려져 있다. 특히 그는 넴초프의 정치적 배경을 뒤에 업고, 현 연료 에너지부 유효 인력의 30% 감축 안을 실행시키려 하고 있으며, 공무원 임금 체계의 현실화 등 개혁적 입안을 추진하고 있어 언론의 큰 관심을 끌고 있다.

향후 러시아 연료에너지부는 옐친의 정치적 신임과 개혁과 정치인중 거의 유일하게 국민적 지지를 얻고 있는 연료에너지부 장관인 넴초프와 그의 정치적 동료인 제 1차관 크리엔코 2인이 정책과 업무를 주도해 나갈 것으로 예상된다. 현재 넴초프에 의해 주도되고 있는 러시아 연료에너지 산업의 정책적 이슈는 러시아 에너지산업의 독점규제와 에너지 가격의 자유화이며 GAZPROM의 독점규제 문제가 우선적으로 이슈화되고 있다.

2. 러시아 천연 자원부(MINISTRY OF NATURAL RESOURCES)

러시아 천연 자원부는 '96년 10월 정부의 조직 개편과 함께 발족되었다. 주요 기능은 지질 및 자원관련 정책의 입안, 관리 및 집행이다. 본 행정 조직은 과거 구소련 시기의 지질부의 기능이 그대로 이전되었다고 생각하면 큰 무리가 없다. 구소련 시절 지질부는 '92년 러시아 연방공화국의 탄생과 함께 환경·천연자원부에 흡수 통합되어, 산하 5개 위원회의 하나인 지질 지하자원 사용위원회로 조직이 축소 조정된바 있다. 하지만 러시아 내의 방대한 자원 및 지구과학과 관련한 정부 역할의 중요성으로 인하여 '96년 천연자원부로 다시 독립하게 되었다. 천연자원부의 주요 기능은 다음과 같다.

- 지하자원 관련 탐사권, 개발권등의 사용권 허가.
- 지하자원 사용권의 허가절차, 탐사계획, 자원 개발 촉진 등의 광업정책 수립.
- 지하자원 탐사 및 개발 관련 법규의 제정 및 조정.
- 국가 지하자원 기금의 집행 및 지질조사 계획 수립.
- 러시아의 지구과학 및 지하자원 개발, 사용에 관한 독자적 연구.
- 지하자원의 합리적 사용, 표준화, 규제, 연구 등에 대한 절차 및 지침 실행여부 감독.
- 지하자원 관련 정보 수집, 분석 및 관리 체계의 구축.
- 지하자원 관련 국제 협력 방안 제시 및 협력 체제 구축.

특히 천연 자원부는 지하자원 사용권자가 에너지 및 광물자원 탐사, 채굴, 자원보호 등에 관한 규정을 위반했을 경우 사용권의 취소, 정지, 제한 등의 권한이 부여되며, 국가 기금으로 수행된 지질 및 탐사자료를 통합 관리하며 유상으로 이를 판매하고 있다.

러시아 천연자원부의 조직은 모스크바 중앙을 정점으로 하여 러시아 각 지역에 53개의 지부를 설치하여 관련 업무를 수행 감독하고 있다. 또한 10개의 구소련 공화국과는 구소련 공화국 지질 위원회를 설치하여 자원 및 지질 관련 협력 업무를 이어오고 있다.

모스크바 중앙 부처의 조직은 장관을 정점으로 하여 2인의 제 1차관과 6인의 차관을 두고 있으며, 산하 20개의 전문 부처로 세분되어 있다.

3. 가스프롬(GAZPROM)

3.1 가스프롬의 조직, 기능 및 지분

세계 최대의 가스 회사로 알려진 러시아 가스프롬은 구소련 시절인 1989년 소련 가스 산업성(Ministry of Gas Industry) 산하의 공기업으로 탄생되었다. 이후 러시아 공화국이 등장하며, 보다 급격한 경제 개혁 정책의 추진과 함께 천연가스 시장에 있어 효율 제고 및 시장 경제 개념의 보다 적극적 도입을 위하여 1993년에 2월 현재와 같은 주식회사 형태의 가스프롬(RAO "GAZPROM" Russian Joint stock Company) 조직이 탄생되었다. 1997년 기준으로 가스프롬은 모스크바 중앙 본사와 28개 산하기관(Subsidiary enterprises), 23개의 산하 자회사(Subsidiary joint-stock companies), 5개의 특수 조직(special purpose enterprises)을 거느리고 있다.

가스프롬이 담당하고 있는 주요 기능은 다음과 같다.

- 육상 및 해상 석유 및 가스 탐사 사업
- 가스, 가스 콘덴세이트 및 유전개발, 생산
- 탐사, 시추 및 개발정 굴착
- 가스, 가스 콘덴세이트 정제 및 처리
- 액화 하이드로카본, 에탄, 프로판, 부탄, 유황, 헬륨의 생산
- 가스, 가스 콘덴세이트의 수송 및 공급
- 통합 가스 공급 시스템(Unified Gad Supply System)
- 지하 가스 저장
- 자동차 연료로의 가스 활용
- 산업용 가스 관련 장비 제작
- 가스 파이프라인 및 관련 설비제작 및 수리
- 가스 관련 과학 기술 연구개발

상기 방대한 조직 및 기능에서 알 수 있듯이, 세계 최대의 천연가스 보존국의 독점 가스기업인 가스프롬은 총 360,000명의 인력을 고용하고 있으며, 세계 최장인 144,000Km 석유 및 석유화학 기계 제작의 파이프라인 네트워크를 보유하고 있다.

현재 가스프롬의 소유권은 가스프롬 설립자인 러시아 연방정부가 주식의 40%를 보유하고 있

으며, 외국인이 보유한 지분은 97년 7월을 기준으로 1%미만에 불과하다. 러시아 정부는 정부 보유 지분 40%를 1999년까지 유지할 방침이며 이후 보유 지분을 점차 축소하여 가스프롬을 완전 민영화시킬 방침인 것으로 알려지고 있다. 가스프롬은 1996년 10월 국제 자본 시장에 대한 적극적인 참여를 목적으로 자사 주식의 1%를 주당 15.75$에 매각한 바 있다. 이러한 주식 매각은 러시아 기업이 직접적으로 국제 자본 시장에 성공적으로 참여한 첫 케이스로 LUKOIL, YUKOS 등 기타 러시아 에너지 기업의 서방 자본시장의 직접적인 참여를 자극하였다. 특히 가스프롬의 성공적인 서방 자본시장 참여는 가스프롬 및 러시아 정부를 크게 고무시켜, 자사 주식의 9%를 London Stock Exchange에 매각한다는 신규 계획을 수립하는 계기가 되었다.

3.2 가스프롬 보유 천연가스 매장량 및 생산 시설현황

가스프롬이 보유한 천연가스 매장량은 표 3.1.1과 같다. 먼저 가스프롬이 보유한 지질학적 자원양은 총 235.6조㎥(세계의 24.5%), 그리고 32.2%를 차지하는 막대한 양이다. 확인매장량의 경우 47.6조㎥(세계의 23%)로 나타났다. 지질학적 매장량의 경우 세계 매장량에서 차지하는 비율이 크게 높은 이유는 시베리아 및 극지의 경우 확인 시추 작업이 이루어지지 못한 곳이 많기 때문이다. 이러한 GAZPROM의 보유 매장량은 세계 석유, 가스 기업 중 사례가 없는 막대한 양으로서 러시아내 가스 공급은 물론 유럽, 동아시아는 물론 남아시아 지역까지 가스공급 시스템을 구축할 수 있는 양으로 평가되고 있다.

표 3.1.1 가스프롬 보유 천연가스 매장량(2008년 기준)

구분	매장량(A)	A/세계 매장량(%)
자원량(resources)	235.6조㎥	32.26%
매장량(reserves)	47.6조㎥	24.5%
상업적 생산기능 매장량	33.1조㎥	17%

[자 료 : Russia-Gas-GAZPROM, 2008]

표 3.1.2 가스프롬 천연가스 생산 및 수출 추이 (단위:bcm)

Index	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	2008
Total Porduction	546.7	57.1	596.0	602.8	602.8	577.7	570.6	559.5	549.7
Gas exports	89.7	102.5	110.0	105.2	99.2	100.9	105.9	117.4	164.3
Gas exports,% to total production	16.4	17.9	18.5	17.5	16.5	17.5	18.6	21.0	29.8

[자료 : GAZPROM IN Europe, 1996, GAZPROM Annual Report, 2008]

가스프롬의 천연가스 생산동향을 살펴보면 1992년 602.8십억㎥를 최고점으로 하여 1995년 559.5십억㎥로 최근 천연가스 생산이 다소 감소하고 있는 추세를 보이고 있다. 이러한 생산 감소의 원인은 러시아 산업 생산의 위축에 따른 자국 내 천연가스 수요 감소에 기인하고 있다. 이러한 자국 내 가스 수요 감소에 따라 현재 가스프롬은 유럽지역에 대한 가스 수출을 확대시키고 있는데 1995년의 경우 자사 생산량의 21%인 117.4십억㎥를 수출하였다. 이러한 수출비중은 1992년의 16.5%에 비해 크게 늘어난 수치이며 당분간 수출 점유율은 확대될 것으로 예상된다.

한편 가스프롬이 보유한 가스 관련 설비 능력은 표 3.1.3과 같다. 먼저 가스프롬은 총 67기의 가스처리설비(gas treatment plants)를 보유하고 있으며 이들 설비의 총 처리 용량은 645십억㎥에 달하고 있다. 또한 31곳에 콤프레셔 기지를 설치 운영하고 있다. 또한 GAZPROM이 보유한 가스정 수는 총 5,348개로, 서 시베리아 지역에만 3,802개를 보유하며 전체의 57%를 차지하고 있다. 또한 가스 생산의 93%를 서 시베리아에 의존하고 있어 현재까지 GAZPROM의 주요 전략 지역이 서 시베리아 지역에 집중되어 왔음을 알 수 있다.

표 3.1.3 GAZPROM 보유 가스관련 설비능력 현황

구분	총량	서 시베리아 지역	기타 지역
가스처리 시설 설비수	67	42	25
총용량(십억㎥)	(645)	(605)	(40)
가스콤프레셔 설치기지수	31	28	3
총용량(백만wt)	(1,520)	(1,160)	(360)
가스 개발정수	5,348	3,082	2,266

[자료 : Anuual Report 95, RAO GAZPROM, 1996]

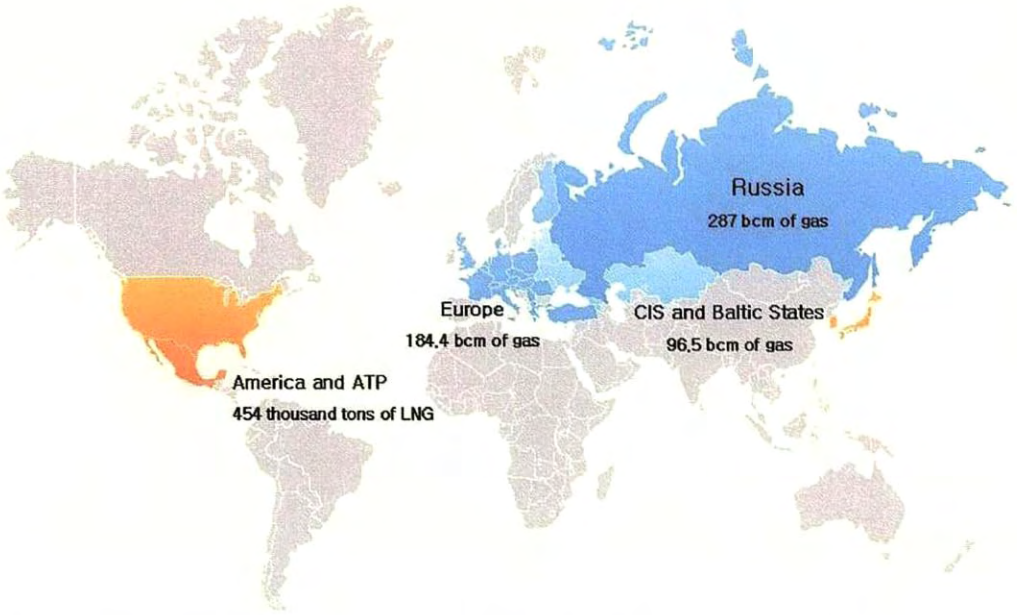


그림 3.1.1 가스프롬 천연가스 수출현황(GAZPROM Annual Report, 2008)

4. 시단코 석유(SIDANKO: Siberia and Far East Oil Company)

시단코 석유는 1994년 5월 신설된 러시아의 전형적인 수직통합석유사(Vertical Imtegrated Oil Company)이다. 옐친 정부는 국내 석유산업을 민간화 하며, 그 모델로 서방측의 석유 메이저사를 모델로 하여, 석유의 생산, 수송, 유통, 가공, 판매를 총괄하는 기업 형태를 만들어 이를 민간에 불하하는 형태를 취하였다. 이러한 러시아의 수직통합석유사들은 1992년 이후 태동 발전하게 되었는데, 대표적인 기업으로는 LUKOIL, YUKOS, SURGUTNEFTEGAZ 등을 들 수 있다.

특히 시단코 석유사가 주목되는 이유로는 회사명에서 알 수 있듯이 활동 무대를 시베리아 및 극동 러시아 지역에 초점을 맞추고 있으며, '96년 한보가 지분을 참여한 KOVIKTINSKI 가스전의 경우도 광권을 갖고 있는 루시아페트롤륨사의 모 기업이 시단코 석유사이며, 동 시베리아 지역의 가스화 사업 또한 시단코 석유사에 의해 적극적으로 추진되고 있는 것으로 알려지고 있다.

특히 시단코 석유사가 소속된 오넥심 재벌그룹(ONEXIM GROUP)의 회장은 전 경제 제 1부 총리인 포탄닌으로, 현재 진행 되고 있는 가스프롬에 대한 독점규제의 대안으로 시단코 석유사의 가스사업 참여가 동 시베리아 및 극동 지역을 중심으로 현실화 될 것으로 예상된다.

표 3.1.4 시단코 석유사의 주요 재무 제표

구 분	단 위	1995년(A)	1996년(B)	A/B(%)
순수익(C)	십억 Rub	1,473	684	46
순매출(D)	〃	19,033	26,567	140
연말자산(E)	〃	48,931	58,650	122
C/D	%	7.7	2.6	34
C/E	%	3.1	1.2	39

[자 료 : SIDANCO, 1997.]

현재 시단코 석유사는 총 28개의 자회사를 보유한 거대조직으로 러시아내 5번째 규모의 석유사이며, 세계 석유회사 중 23번째 규모를 갖고 있는 세계적인 석유사이다. 시단코사의 28개 자회사를 활동 영역별로 구분해 보면 석유 및 가스개발 7개, 정유 및 석유화학 3개, 석유제품 판매 14개, 기계제작 2개, 서비스회사 2개 등이다. 시단코 석유사가 보유한 석유 및 가스 매장량은 총 2.8billion TOE이며, 이는 세계 석유사중 20위에 해당되는 매장량 보유 물량이다. 보유 유전수는 총 119개 이며 서부 시베리아 및 동부 시베리아 지역에 보유 유전이 주로 분포되어 있다.

표 3.1.5 시단코 석유사의 생산 및 수출 실적

구 분	단 위	1995년(A)	1996년(B)	A/B(%)
- 총 생산량	백만t(천bl/C)	26.9(538)	25.2(504)	94
- 순 생산량	백만t(천bl/C)	22.9(458)	20.8(416)	91
- 정제량	백만t(천bl/C)	20(400)	17.5(350)	88
- 총 수출량	백만t	6.5	5.6	86
-석유 수출량	백만t	4.2	4.9	116
- 총 직원	천명(人)	101.7	97.3	96

[자 료 : SIDANCO, 1997.]

제 2 절 러시아 에너지부문의 외국기업 투자현황

1. 투자 동향

외국기업의 대 러시아 연료산업에 대한 투자는 구소련 시절부터 있어 왔으나, 투자 사업 수나 규모에 있어 미미한 수준에 그쳤다. 러시아의 연료산업에 대한 추자가 본격적으로 확대되는 시기는 1990년대 이후 개방과 경제 개혁 정책이 확정되는 시기와 일치하며, 특히 옐친정부의 등장과 가이다르총리의 개방 정책이 본격화되는 1992년이 가장 활발한 투자 활동이 있었던 것으로 나타났다.

표 3.2.1 외국기업의 러시아 연료 산업에대한 투자현황

년 도	투 자 건 수
1989년	2건
1990년	11건
1991년	24건
1992년	46건
1993년	21건
1994년	23건
1995년	16건
합 계	151건

[자 료 : Goskomstat]

이는 표 3.2.1에 잘 나타나고 있다. 1989년 2건에 불과했던 외국기업의 러시아 연료 산업 투자는 1990년대 들어 활발히 추진된 개혁정책과 함께 점차 확대되기 시작하였으며, 옐친 정부의 등장 시기인 1992년 46건의 외국투자를 기록한 이후 다시 그 투자건수 및 규모가 감소되기 시작하여 1995년 16건의 투자 규모를 나타내고 있다.

이러한 투자 규모 감소는, 1993년 러시아 정부가 실시한 외국 합작기업에 대한 세제상의 혜택과 유리한 수출 조건이 취소됨과 함께 새로운 조세 및 수출규제가 시작되었기 때문이다. 즉, '92년 이전 석유·천연가스 개발관련 외국 기업이 부담해야 할 세금은 1%의 소득세와 25%의 이윤세만을 납부하는 특권을 부여받고 있었다. 하지만 '92년 신규 부과된 수출세를 포함하여 재산세, 천연자원 이용 부담금등 총 10여 가지의 세금 납부 의무가 부과되며, 이미 러시아 내에서 활동중이거나 활동을 준비했던 많은 외국기업들이 러시아 투자를 유보하거나 러시아 투자를 포기하는 결과를 가져오게 되었다.

하지만 최근 들어 대 러시아 투자는 다시 증가하는 양상을 보이고 있다. 그 원인으로는 1996년 대선에서 엘친의 재선이 확정됨에 따라 외국기업의 투자심리가 안정되었으며, 1995년 12월의 생산물분배법(Production Sharing Agrement)의 통과와 1997년 6월의 PSA 대상광산목록의 의회통과, 그리고 1996년 6월에 있었던 석유·가스에 대한 수출세 폐지 등을 들 수 있다. 이에 따라 러시아에 대한 외국인 투자는 1995년 38억$로 3배 이상 증가하였으며 이러한 증가 추세는 1997년에도 이어지고 있다.

2. 국가별 투자현황

1995년 말까지 러시아 연료산업에 투자된 외국기업의 투자액은 3백3십8억 5천4백만$에 달하는 것으로 추계 되었다. 이중 가장 많은 투자액을 보인 나라는 미국으로 총 26건, 2백십1억 5천9백만$의 투자를 보여 전체 투자의 62.5%를 차지하였다. 미국의 이와 같은 투자는 미국 내 석유메이저들의 막대한 자본력과 정보 수집, 정치 교섭력 등에 의해 과감한 투자 결정이 가능했기 때문이다.

표 3.2.2 러시아 연료산업에 대한 국가별 투자현황(1995년 말까지) (단위: 백만$)

국 명	건 수	금 액	총 투자액 대비(%)
미국	26	21,159,28	62.5
오스트리아	7	4,703,89	13.9
영국	19	2,177,00	6.4
독일	18	1,530.76	4.5
스위스	8	756.99	2.2
네덜란드	4	615.64	1.8
체코	1	435.02	1.3
싸이프러스	10	425.63	1.3
캐나다	10	382.93	1.1
아일랜드	4	68.16	0.2
이탈리아	7	60.33	0.2
프랑스	4	51.90	0.2
기 타	34	1486.91	4.3
합 계	151	33,854.44	100

[자료 : ROSKOMSTAT]

두 번째의 투자국은 오스트리아로서 총 7건의 프로젝트에 4십7억3백만$의 투자액을 기록하여 전체투자의 13.9%를 점유하였다. 오스트리아의 이 같은 높은 투자는 과거 냉전 시기에 있어, 영세 중립국이었던 오스트리아가 오랜 기간 동안 동·서 진영의 경제적 중개자의 역할을 수행하여 왔음에 따라 러시아에 대한 많은 경제적 정보와 교섭 관행의 축적을 통하여, 러시아의 개방 이후 높은 수익이 기대되는 러시아 에너지산업에 대해 선점적 투자를 시행할 수 있었기 때문인 것으로 파악된다.

다음으로 영국과 독일이 각각 2,177백만$와, 1,530백만$를 투자하여 전체 투자액의 6.4%와 4.5%를 차지하고 있다. 이들 상위 4개국의 총 투자액은 2백9십5억 7천9십3만$로서 전체 투자액

의 87.3%를 차지하고 있어, 실제적인 러시아 연료산업에 대한 외국인 투자의 대부분이 이들 4개국에 의해 이루어지고 있다.

특히 눈에 띄는 것은 사이프러스, 스위스, 에콰도르, 싱가포르 등 국가 경제 규모가 비교적 작은 국가들의 연료산업 투자 또한 우리어졌는바, 이는 1990년대 초반 러시아 정부의 외국 투자기업에 대한 우대 조치에 의해 연료산업에 대한 기술 및 투자 관리 방식에 대한 노하우를 보유하고 있을 경우, 소규모의 자본으로도 적절한 수익이 가능하였던 바, 이들 국가의 참여가 있을 수 있었다.

특이한 사항으로는 일본 측의 대 러시아 연료산업 투자가 활발치 않다는 점이다.

이는 일본의 경우 자원 및 에너지 산업에 대한 해외투자의 전형이 자본 참여라는 투자 리스크를 회피하는 방법을 이용함에 따라 투자 규모가 상대적으로 소규모로 나타났으며 북방 7개 섬을 둘러싼 일 · 러간의 영토문제로 인해 일본 헌법에 의해 규정된 대 러시아 투자 금지 조항에 따라 투자가 부진했던 것으로 파악된다. 현재 일본은 Sodeco 콘소시움 형식으로 참여한 사할린 I, 그리고 Mitsui사와 Mitsubishi사가 참여한 사할린II, 그리고 서 시베리아 지역의 석유 · 가스전에 대한 자본참여가 추진되고 있다.

제 3 절 러시아의 석유, 가스 합작 프로젝트 현황

1. 러시아 천연가스 산업구조

러시아 천연가스의 95%를 생산하고 있는 Gazprom에 의하여 주도되고 있다. 또한 Gazprom은 러시아의 모든 고압 파이프라인과 관련 기반시설의 소유주이다. 천연가스의 분배는 자치주, 자치지역, 그리고 지방 도시가스회사에 의하여 수행되고 있는데, 이들 중 대부분은 아직도 연방분배회사인 Rosgazifikatsiya의 영향력 아래에 있다. 모스크바와 St.Petersburg 에서의 지역분배는 지방 도시가스 회사인 Mosgas 와 Lengas사가 담당하고 있다.

1.1 생산과 수송부문의 산업구조 및 소유구조

Gazprom은 8개의 생산조직으로 구성되어 있는데, 천연가스 생산의 대부분은 대규모 가스전에서 활동하고 있는 3대 시베리아 회사(Urengo-ygazprom(Urengoy 가스전 부근), Yamburg gazodobycha(Yanburg 가스전), Nadymgazprom(Medvezhe 가스전 및 기타 가스전))가 담당하고 있다. 대략 5%정도의 가스는 석유회사에 의하여 생산되고 있는데, 이중 대부분은 Tyumen 유전에 위치한 Rosnefit사가 생산하는 제조가스이다. 또한 Norisk-gazprom과 Yakutgazprom은 Gazprom 계열은 아니지만, 동부 시베리아에서 소비되는 소량의 가스를 생산하고 있다.

현재 Gazprom은 55bar 이상의 압력으로 운영되는 모든 파이프라인을 소유·운영하고 있다. 가스의 수송과 저장은 Gazprom 산하의 15개 가스 수송회사가 담당하고 있으며, 이중에서 가장 중요한 역할을 담당하는 수송회사는 내수와 수출을 위하여 시베리아 천연가스를 러시아 서부로 수송하는 회사이다. Uraltransgaz, Permtransgaz, Volgagradtransgaz, Lentransgaz, Mostrangaz는 시베리아의 천연가스를 북부화 서부지역의 파이프라인을 통하여 러시아 전역으로 수송하는 반면, Tyumentransgaz는 Tyumen지역으로의 수송만을 담당하고 있다.

이와 더불어 일부 수송회사는 생산부문에도 참여하여 소량의 가스를 생산하고 있으며, 이들 회사들은 특정지역에 대한 개발면허를 가지고 있어 향후 이들의 가스 생산량 증대가 예상된다.

1.2 민영화에 따른 소유구조

1989년 Gazprom은 Soviet Ministry of the Gas Industry의 독립 산하기관으로 재편되었으며,

구소련 붕괴이후인 1992년 6월에는 러시아 공화국에 편입되었고, 동년 12월에는 법령에 의하여 주식회사로 전환되었다. 이후 1994년 Gazprom의 주식 약 60%는 러시아내에서 다음과 같은 방식으로 매각되었다.

- Gazprom의 직원들에게 전체주식의 15%를 구입할 수 있는 기회제공.
- 서로다 른 Gazprom의 계열사들이 담당하고 있는 61개 지역(공화국, Karis, Oblast 포함)에서 약 75만명이 Gazprom 지분의 35%에 상당하는 주식을 구입.
- Gazprom은 전체 주식의 10%를 자체적으로 구입하였는데, 이중 9%는 1995년 해외 투자자들에게 매각됨.

1994년 9월 17일 제정된 법령에서는 Gazprom의 잔여 지분을 민영화 일정에 따라 매각하는 것으로 되어 있지만, 현재까지 40%의 잔여 지분은 아직도 러시아 정부가 보유하고 있다.

1.3 지역 분배산업의 구조와 소유권

현재, 지역분배회사(LDCs)는 12~0.75bar 내외의 압력으로 운영되는 모든 파이프라인의 소유권을 가지고 있다. 일반적으로 0.75bar 이하의 압력으로 운영되는 파이프라인은 지방자치단체가 소유하고 있지만, 일부 지역에서는 자치기관 소유의 파이프라인을 지역분배회사에 양도하는 법안을 통과시켰다. 러시아 지역분배산업의 구조와 소유권은 매우 복잡하며, 현재 변화단계에 있다. 1989년 Rosgazifikatsiya가 Ministry of Housing and Municipal Affairs에 의하여 출현되었으며, 900개 이상의 지점이 있는 통합된 독립가스 분배회사로서 구 소련의 각료회의에 배속되어 있었다가 나중에는 자치주, 자치지역, 그리고 지역분배회사로 각자의 독립을 주장하면서 세분화되었다. 이러한 변화는 1992년 12월 8일에 제정된 전매권 해제 및 민영화에 관한 법령에 의하여 가속화 되었으며, 동 법령을 통하여 Rosgazifikatsiya에 소속된 모든 지역분배회사는 도립적인 주식회사가 되었다. 1994년 말까지 이러한 지역분배회사의 구조조정은 주식회사로 변환되지 않은 9개 지역의 지역분배회사를 제외하고는 거의 완료된 상태이다.

그러나 현재에도 Rosgazifikatsiya는 지역분배회사의 후원기관으로서 존재하고 있는데, 동 기관은 정책입안과 압력단체로서의 역할뿐만 아니라, 계약을 통하여 특정 서비스를 지역분배회사에 제공하기도 한다. 이중에서 가장 중요한 역할은 연구개발, 기술정책, 각종 법령과 규제, 그리고 가격정책 등에 대한 조언이다. 부가적으로 Rosgazifikatsiya는 폴리에틸렌 파이프라인 및 부

품을 제조하는 주식회사의 주식과 부품제조 등과 관련된 주식회사의 주식을 소유하고 있다. 한편 이러한 역량을 갖추고 있는 Rosgazifikatsiya는 파이프라인을 설치하고 여기에서 발생하는 수익을 지역분배회사와 나누어 갖기도 한다. Rosgazifikatsiya의 소유권은 연방정부가 59.69%, 지역분배회사가 40.00%, 종업원이 0.31%를 각각 보유하고 있다.

1.4 천연가스산업의 규제정책

구소련 붕괴 이후 러시아 가스 산업에 대한 법률적 규제는 매우 완화되어 가고 있다. 가스 산업에 대한 규제는 대부분 정부 위원회에 의한 가정 · 산업부문의 도 · 소매 요금결정과 관련되어 있다. 현재 러시아 정부는 경쟁촉진을 위한 독립적인 규제기관의 설립을 준비중에 있는데, 동 기관의 의무 중에는 제 3자들의 파이프라인 이용(third party access) 및 요금에 대한 규제가 포함되어 있다. 이러한 규제기관은 영국의 가스 산업 규제기관인 Ofgas나 미 연방규제위원회 등과 비슷한 성격을 갖는 것이다.

러시아의 가스 산업에서는 "경제를 위한 규제" 뿐만 아니라 Gazprom이 지역분배회사의 파이프라인을 우회하여 대규모 산업용 소비자에게 직접적으로 공급할 수 있는 직공급 가능성도 고려되고 있다. 사실상 기존의 가격체계를 엄밀하게 분석해보면, 지역분배회사는 Gazprom이 산업용 소비자에게 직접적으로 공급하는 것을 제한할 아무런 제재장치도 없는 것으로 알려지고 있다. 또 하나 현재 만연된 Gazprom에 대한 지역분배회사의 미수금 문제는 결국 Gazprom으로 하여금 대규모 소비처와 직접적인 거래를 모색하게 하는 강력한 유인을 제공하고 있는 것이다.

2. 천연가스의 생산 및 설비현황

2.1 천연가스의 생산

현재 러시아 천연가스 생산량의 약 90% 이상은 단일 가스전(Unique)에서 생산되고 있다. 표 3.3.1은 1993년 Gazprom이 생산한 물량과 다른 석유, 가스 생산회사의 생산물량을 구분하고, 다음으로 Gazprom의 각 계열사의 생산물량으로 세분화하였다. 동 자료에 의하면, 전체 생산물량 중 대부분이 시베리아에서 조업중인 3대회사(Urengoy, Yamburg, Nadym)와 Orenburg에 집중되어 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 4개의 계열사가 4개의 가스전에서 생산하는 물량은 러시아 전체 생산물량의 약 90%를 상회하고 있다.

표 3.3.1 러시아의 천연가스 생산 현황 (1990~1995)

	1990	1991	1992	1993	1994	1995
러시아연방	**641.0**	**643.0**	**640.0**	**617.3**	**606.8**	**600.0**
Gazprom		594.7	599.0	577.6	570.6	
시베리아		533.3	549.8	533.7	529.1	
Nadymgazprom		68.9	69.1	68.0	64.3	
Yamburggazodobycha		166.8	178.2	174.0	179.3	
Urengoygazprom		282.8	287.6	262.8	249.4	
Surgutgazprom		14.8	14.9	28.9	36.1	
시베리아 이외		61.4	49.2	43.9	41.5	
Orenburggazprom		48.0	36.4	34.5	32.6	
severgazprom		5.2	4.9	4.2	3.4	
Astrakhangazprom		3.3	2.9	3.0	3.3	
기타						
석유회사		48.3	41.0	39.7	36.2	
연합가스		35.1	32.0	28.8	25.8	
비연합가스		13.2	9.0	10.9	10.4	

[자 료 : Petroleum Economist, Mintopenergo,1996, IEA추정치]

러시아의 천연가스 생산은 1991년 643bcm으로 최고에 달했다가 1993년에는 617bcm으로, 그리고 1995년에는 약 600bcm으로 각각 감소하였다. 1992년 이후 가스 생산이 감소된 주요 요인은 국내외 시장의 부족에 있으며, 이에 따라 잉여설비가 발생하게 되었다. 또한 이러한 요인 때

문에 1994년에는 30bcm 규모의 생산계획이 취소되었다. 따라서, 향후 천연가스 생산은 가스시장의 확대여부에 달려있을 뿐만 아니라 신규 프로젝트의 추진을 위한 재원조달도 중요한 요인으로 작용할 것으로 전망된다.

구소련이 붕괴된 1990년 중반이후 Yamal 반도의 가스전 개발에 대한 계획이 개략적으로 수립되었으며, 새로운 재원조달 가능성과 수익성에 대한 새로운 인식으로 보다 구체화 되었다. 그러나 현재 생산중인 가스전 가운데 Yamburg 가스전을 제외한 모든 가스전이 최대 생산시기를 넘겼기 때문에(아직 사향 단계에 들어서지는 않았음), 기존의 생산능력을 유지하고 생산량을 확대하기 위해서는 신규 가스전의 개발이 필요하다. 이에 따라 1994년 말 새로운 신규 공급원 확보에 대한 계획이 검토되었으며, 이에 대한 일환으로 서 시베리아에서 추진되어야 할 선행적 과제는 다음과 같은 것으로 알려지고 있다.

- Yamburg 가스전 생산설비의 완전 가동
- Urengoy 가스전의 사향화 방지
- Medvezhe, Urengoy, Yamburg 등의 인접 가스전 개발
- Yamal 프로젝트에 대한 기초작업 수행

원래 Yamburg 가스전의 연간 생산능력은 205bcm으로 계획되었으나, 현재에는 연간 175-180bcm의 물량만을 생산하고 있는데, 이는 목표 수준을 생산하는데 필요한 투자가 최근에 이루어지지 않았기 때문이다.

Urengoy 가스전의 생산량은 1988년 약 300bcm으로 최고조에 달했으나, 현재에는 감소추세를 보이고 있다. 또한 전체 270~280bcm의 생산물량 중 일부는 주변의 소규모 위성 가스전으로 부터의 생산물량으로 충당되고 있다. Urengoy와 Medevzhe 가스전의 사향화 속도는 불확실하기 때문에, 가스전의 부가적인 응압상태에 따라 다르게 나타날 것이다.

시베리아에서는 현재의 생산물량이 이미 사향화 추세에 있기 때문에 보다 소규모 가스전에 대한 개발 및 생산이 개시되었다. 이미 1992년 Komsomolskoye (Urengoy서부) 가스전에서의 생산이 개시되었으며, 1993년에는 Yubilyeynoye (Medvezhe와 Urengoy의 중간지역) 가스전에 대한 생산이 시작되었다. 향후 10년 이내에 생산이 개시될 기타 가스전으로는 Yamsoveuskoye(연간 25bcm생산), Kharvutinskoye(연간 30bcm생산), West Takalinskoye(연간 20bcm생산), Zapolyarnoye(연간 100bcm생산) 가스전 등을 들 수 있다.

2.2 천연가스의 수송

러시아 가스 산업에 가장 시급한 문제는 파이프라인과 승압 기지를 포함하여 노후화 증세를 보이고 있는 기존의 배관망 시스템을 보수하는 문제일 것이다. 러시아의 주배관망 14만Km중 지난 10년 사이에 건설된 파이프라인은 7.5%에 불과하며, 42%는 10~20년 3.5%는 20~30년 17.5%는 30~40년 이전에 건설되었으며, 40년 이상 된 파이프라인의 비율도 2.5%나 된다. 부가적으로 파이프라인 설계 당시의 예상수명은 33년이었다. 승압설비의 약 15%(6백만Kw)도 수명이 이미 20년을 넘어섰기 때문에 현대화하거나 교체하여야 한다. 노후설비 교체를 위한 러시아의 5개년 계획에서는 필요한 작업 중 일부만이 고려되고 있다. 한판 계속적인 파이프라인 수명의 노후화로 인하여 향후 10년 이후에는 보수의 필요성이 가속화 될 것이다.

5개년 보수 계획에 따른 주요 사업은 러시아와 이탈리아 Tragaz의 합자투자로 승압기지에 설치된 외국산 설비를 교체하거나 보수하기 위하여 15억불의 차관을 확보하였다. 구소련 시기 가스 산업의 특징 중 하나는 배관망 확장을 위하여 수입제품(파이프라인과 승압기지에 모두 사용)을 사용하였다는 것이다. 따라서 해외설비를 주문하거나 러시아 제품을 보수하는데 외국의 지원을 받아야 할 것이다. 그러나 Gazprom측은 자신들이 지분을 보유하고 있는 군수공장을 개조하여 수년내에 수입설비의 기준에 부합하는 터빈을 제조할 수 있을 것으로 믿고 있다.

Gazprom의 통계자료에 의하면 매 4,000Km구간에서의 사고건수가 1972년 1.1건에서 1993년 0.215건 까지 감소되어 20년 동안 매년 꾸준히 감소되었음을 알 수 있다. 이러한 사고 중 약 20%는 부실시공에 의한 것인데, 과거에는 파이프라인 건설을 Ministry of Oil & Gas Construction에서 담당하여, Gazprom은 건설 사업에 거의 관여할 수 없었다. 그러나 현재에는 Gazprom에서 선정한 기관에 의하여 사업이 진행되기 때문에 통제력이 훨씬 강화되었다.

전체 가스사고의 약 16%는 보호 장치의 부실로 인한 외적인 부식에 의한 파이프라인 손상에 있었다. 또 압력에 의한 부식으로 발생한 13%의 사고요인을 해결하기보다 어려울지 모르지만, 적절한 보호설비를 사용함으로서 개선할 수 있다.

2.3 공급의 안정성

Gazprom은 공급라인에서 가스 공급의 안정성에 많은 관심을 기울이고 있기 때문에, 파이프라인이나 승압기지에 사고가 발생하더라도 불편을 느끼는 소비자는 매우 드물다. 이것은 러시아의 파이프라인이 특정지점에 문제가 발생할 경우, 타 경로를 통하여 공급이 가능할 수 있도록 고안

되어져 있기 때문이다. 또한 동일구간에 평행하는 몇 개의 파이프라인이 설치되어 있기 때문에, 하나의 파이프라인에 문제가 발생하더라도 또 다른 파이프라인으로 공급하는 것이 가능하며, 파이프라인 사고에 대처하기 위하여 승압기지에 저장설비를 설치하여 운영하고 있다.

그러나 러시아의 파이프라인 시스템에는 이러한 대처능력에도 불구하고 약간의 취약성이 존재한다. 이중에서 가장 심각한 문제는 러시아 천연가스 수송물량의 약 90% 정도를 수송하고 있는 Nadym-Punga간의 연결지점에 있는데, 이 구간의 파이프라인은 10-15m 간격으로 15개의 50인치의 배관이 통과하고 있다. Gazprom도 이지역의 사고에 대한 취약성을 인정하고 있다.

2.4 저장설비

현재 러시아에는 20여개의 지하저장설비가 있으며, 전체 저장능력은 66bcm을 상회하고 있다. 그러나 이러한 저장설비들의 상태는 정상이 아니기 때문에 사용가능 용량은 48.4bcm 정도일 것으로 추정되고 있다.(일간 최대 방출물량은 5bcm임). 비축설비의 약 80%는 고갈된 가스전을 이용하고 있는데, 이러한 설비의 대부분은 Moscow와 Saratov 주변에 위치해 있으며, 나머지 20%는 대수층을 이용하고 있다. 그러나 구소련의 붕괴로 인하여 러시아는 우크라이나에 위치한 35bcm의 저장설비를 잃었기 때문에, 다소 어려운 상태에 놓이게 되었다. 이것은 우크라이나의 저장설비가 동계기간 동안 유럽에 수출하는 물량을 조절하는데 매우 중요한 역할을 담당했기 때문이다.

2.5 가스의 누출과 손실

Gazprom과 Rosgazifikatsiya는 수송과정에서 배관망을 통하여 누출되는 가스의 물량이 약 1%정도인 것으로 발표하였다. 그러나 어떠한 방식으로 이러한 수치를 추정하였는지, 또는 이러한 수치가 정확한 것인지는 시스템 내에 부분별로 계량기가 부족하다는 사실을 감안하는 경우 의문이 가중된다. 일반적으로 고압 배관망에서의 손실물량(주로 승압설비의 운영과정에서 발생)을 약 10%정도로 보고 있는데, 이러한 물량은 전체 생산물량이 640~643bcm인 경우 55~60bcm이지만 발표 자료는 10%이하이다. Rosgazifikatsiya의 자료에 의하면, 연간 3.5bcm에 이르는 손실물량중 약 80%는 고객의 설비에서, 그리고 약 20%는 저압 배관망에서 발생한다고 한다. 그러나 이러한 수치는 너무 낮아 보이며, 고압 배관망에서와 마찬가지로 저압 배관망의 보수도 중요한 문제인 것으로 보인다.

2.6 향후 전망

기존 생산부문과 수송부문은 현재 진행 중인 작업이 매우 미흡하기 때문에 설비보수가 매우 시급한 실정이다. 이것은 Rosneftegazstory(구소련의 석유 및 가스 건설부서)와 같은 건설회사의 문제로, 건설회사 40만의 종업원들이 기존 천연가스 기반설비의 대부분을 건설하였다. 건설부분의 압력단체들은 Yamal 프로젝트와 같은 신규 프로젝트에서 외국기업들의 참여를 배제하고, 러시아의 노동력과 자재만을 이용하여 추진하기 위해 노력하고 있다.

3. 천연가스 수요

현재까지 러시아의 발전부문은 천연가스에 대하여 최대 규모의 최종 소비자였으며, 중앙난방을 위한 보일러설비와 산업부문 소비자들은 그 다음 순위에 있었다. 이와는 대조적으로 가정 · 상업부문에 의한 직접적인 가스 소비는 일반적인 대규모 가스시장을 확보한 국가에서 기대되는 예상소비수준 보다도 훨씬 낮은 편에 속한다. 러시아의 내수부문 천연가스 소비는 구소련 말기에 최고조에 달하였으나, 1990~1994년 기간 중에는 10%감소하였다. 이러한 감소요인중 약 60%는 산업생산의 침체에 기인한 결과이며, 약 40%는 미수금으로 인한 인도물량의 감소에 기인한 결과로 분석되고 있다. 현재 발전부문과 보일러 설비의 수요는 안정적이지만, 전체 산업부문(특히 중화학공업부문)의 수요는 감소되고 있다. 반면에 가정 · 상업부분의 수요는 상승추세에 있다. 산업부문의 수요는 가스 산업의 비용보전을 위한 가격인상으로 인하여 지속적으로 줄어들 전망이다. 1994년까지 Gazprom과 Rosgazifikatsiya사이에서는 시장의 구분에 대하여 심각한 논란이 있었다. 이제까지 Gazprom은 고압배관망을 통하여 대규모 소비자들에게 직접적으로 가스를 공급하였으며, Rosgazifikatsiya(현재에는 다수의 회사로 분리되었음)는 공급거점 (City gate)에서 가스를 공급하였다. Gazprom에 의하여 직접 공급받는 대규모 기업들은 수적인 면에서 크지는 않았으나, 총 수요 물량의 약 30%정도를 차지하고 있다. Rosgazifikatsiya회사들은 압력이 12bar 이하인 모든 배관망을 운영하고 있기 때문에, 수요의 70%를 차지하는 저압배관망을 통한 공급부문에서 독점권을 가지고 있다. 그러나 1991년 이후 Gazprom은 고압 배관망을 통하여 산업부문 소비자들을 직접 공급함으로서 Rosgazifikatsiya사들을 우회하기 시작하였다.

Rosgazifikatsiya의 판매물량은 1990년 307bcm에서 1994년에는 240bcm으로 감소하였는데, 판매물량 감소분의 약 605는 Gazprom의 우회판매에 기인한 결과이다.

4. 천연가스의 교역

러시아의 천연가스 수출물량은 1990~1992년 기간 동안에는 연간 200bcm을 상회하였으나 다음해부터는 감소하기 시작했다.(표 3.3.2 참조) 이러한 수출물량 중 약 절반은 구소련 공화국(우크라이나가 최대 수입국임)에 공급되었으며, 나머지 절반은 동 · 서유럽에 각각 절반씩 수출되고 있다. 천연가스는 러시아와 교역 당사국간에 교역되는 품목 중 가장 중요한 상품 중 하나이다.

표 3.3.2 러시아의 천연가스 교역 추이(1990~1994) (단위:bcm)

	1990	1991	1992	1993	1994
소련연방내 거래(근거리 무역)					
수 입	**70.0**	**69.0**	**7.0**	**4.0**	**4.0**
수 출	**153.2**	**155.8**	**106.1**	**78.8**	**76.1**
우크라이나	60.8	60.7	77.6	54.9	55.0
벨라로스	14.1	14.3	17.7	16.4	14.0
몰도바	2.3	2.5	3.4	3.2	3.2
카자흐스탄	1.7	1.1	0.5		
리투아니아	6.1	6.0	3.2	1.8	1.6
라트비아	3.4	3.2	1.6	1.0	1.3
에스토니아	1.7	1.9	0.9	0.4	0.5
소련연방 이외 거래(원거리 무역)					
수 출	**96.0**	**91.0**	**89.0**	**100.9**	**105.0**
중앙 및 동유럽	33.0	27.0	29.0	36.2	35.0
서유럽	63.0	64.0	60.0	64.7	70.0
통계오차	0.1	1.1	-2.0	-0.3	
터 키	3.3	4.1	4.5	5.0	
핀란드	2.7	2.9	3.0	3.1	
오스트리아	5.1	5.2	5.1	5.3	
스위스	0.3	0.4	0.4	0.4	
프랑스	10.6	11.4	12.1	11.6	
이탈리아	14.3	14.5	14.1	13.8	
독 일	26.6	24.4	22.9	25.8	
러시아연방의 총거래량					
수 입	**70.0**	**69.0**	**7.0**	**4.0**	**4.0**
수 출	**249.2**	**246.8**	**195.1**	**179.7**	**181.1**
순 수출	179.2	177.8	188.1	175.7	177.1
Turkmenistan의 원거리 무역	13.0	15.6	11.2	10.6	

[자 료 : Goskomstat, Mintopenergo, Gazprom, IEA 추정치]

4.1 구소련 공화국간의 천연가스 교역

구소련의 붕괴 이전까지 연방 내 각 공화국 사이의 천연가스 교역은 공화국간 파이프라인 시스템의 연결로 원활하게 추진되어 왔으며, 공화국간에 인도된 천연가스에 대한 요금지불은 각 공화국에 소속된 Gazprom의 내부거래 방식으로 이루어져왔다. 그러나 구소련의 붕괴이후 요금 및 수송요금과 관련된 문제로 공화국간 내부교역물량은 급격히 감소하였으며, 우크라이나 등의 대규모 미불금을 포함한 소비자들의 지급불능으로 러시아의 공화국간 천연가스 수출입체계는 혼란에 직면하였다.

구소련 붕괴의 가장 직접적인 효과는 투르크메니스탄과 타 공화국, 특히 러시아와 우크라이나 사이의 천연가스 공급체계가 붕괴되어다는 점이다. 1991년 투르크메니스탄은 70bcm이상의 천연가스를 타 공화국에 판매하였고, 이중에서 약 27bcm이 우크라이나에, 그리고 13bcm의 물량이 러시아에 인도되었는데, 러시아는 투르크메니스탄으로부터 인도된 천연가스에 수출 쿼터를 할당하여 1993년까지 유럽에 수출하고 대금은 Gazprom을 통하여 지불하였다.

그러나 1994년에 들어와 이러한 투르크메니스탄의 쿼터물량은 대폭 감축되었다. 그러나 투르크메니스탄의 우크라이나, 그루지아, 아르메니아, 아제르바이잔 등 구 연방으로의 공급자 역할은 지속되고 있다.

또한 러시아는 소규모 이지만 카자흐스탄과의 천연가스 교역을 수행해 왔지만 1993년 이후 순수한 교역물량은 거의 없었다.

러시아의 대유럽 수출 통로인 우크라이나는 구연방내 러시아의 최대고객으로 1990~1994년간 판매물량은 약 55~77bcm에 달하였는데, 이것은 동기간 내에 유럽으로의 총 수출량이 89~110bcm 임을 감안할 때 상당한 규모이다. 한편, 러시아는 백러시아를 통하여 수송되는 7bcm을 제외한 모든 물량을 우크라이나를 통하여 유럽으로 수출하고 있다.

구소련의 붕괴 이후, 우크라이나에 판매되는 천연가스의 가격과 유럽 동·서부로 수송되는 천연가스의 통행료에 대한 협상은 많은 난항을 겪었다. 이것은 우크라이나가 러시아와 타협한 가격으로의 요금지불을 거부하였고, 그 시점까지의 미지불금이 너무 누적되어 상환이 불가능한 상태에 직면하였기 때문이었다.

이 기간 동안 러시아는 우크라이나에 대한 가스공급을 축소하고, 중단하겠다는 압력을 가하기 시작하였는데, 이에 대하여 우크라이나는 유럽으로 공급되는 가스 중 일부를 차지하여 러시아의 천연가스의 안정성에 대한 유럽국가 들의 우려를 유발하였다.

이에 따라 1994년 러시아와 우크라이나는 정부 간의 협의를 통하여 유럽으로 수출되는 러시

아 천연가스에 대한 안정성을 보장하고, 수송물량을 확대하는 방안을 강구하였으며, 채무상환에 대한 방안의 하나로 우크라이나의 파이프라인과 저장설비를 Gazprom에 양도하는 방안이 제기되었다.

백러시아는 연방 내에서 우크라이나와 비슷함에도 불구하고 수출물량은 상대적으로 안정되어 있다. 러시아와 백러시아의 정부는 누적된 부채의 상환에 대한 방법으로 백러시아는 파이프라인 설비를 일정기간동안 Gazprom에 임대하는 방안에 합의하였으나, 백러시아의 의회에서는 아직까지 이러한 안에 대하여 비준하지 않고 있다. 그러나 설비임대에 대한 백러시아 의회의 비준이 완료되면, Beltransgaz는 Gazprom 시스템의 일부로서 운영될 뿐만 아니라, Gazprom은 백러시아와 폴란드를 통하여 독일로의 수송라인을 확장시킬 수 있어, 향후 이 지역은 Yamal 파이프라인 프로젝트의 거점역할을 담당할 것으로 예상된다. Gazprom에 상당한 부채를 안은 세 번째 공화국은 Moldova로 우크라이나 및 백러시아와 마찬가지로 Moldova도 러시아의 대유럽 천연가스 수출에서 중요한 역할을 담당하고 있다.

그러나 이전 두 공화국과의 차이는 Moldova의 공화국내 천연가스 수요물량이 상대적으로 적다는 것이다. Gazprom은 과거의 미수금과 미래의 요금에 대한 보상으로Moldova의 파이프라인 설비에 대한 지분을 보유하고 있다. 현재까지 우크라이나, 백러시아, 그리고 Moldova는 러시아의 대유럽 천연가스 수출에서 중요한 경유지 역할을 수행하고 있으며, 이러한 역할은 향후에도 지속될 전망이기 때문에 Gazprom은 이들 공화국의 미수금에 대하여 어쩔 수 없이 회유적인 입장을 취해 왔으며, 이러한 태도는 지속되어야 할 것으로 보인다. Gazprom은 1994년 초까지 구 공화국들의 미수금이 약 4조 4천억 루블(약 18억불)인 것으로 추정하였는데, 공화국별로는 우크라이나가 약 3조 루블, 백러시아가 약 1조 루블, 그리고 몰도바와 라트비아가 각각 3천억 루블, 1천억 루블인 것으로 나타났다.

발트연안 3국인 라트비아, 리투아니아, 그리고 에스토니아는 기존의 공화국과는 다소 다른 입장에 직면해 있다. 1991년 이후 러시아와 이들 3국간의 교역은 유럽 국가들과 동일한 원칙으로 수행되도록 합의가 이루어졌기 때문에, 이들 3국은 유럽에서의 국경인도가격과 동일한 수준의 가격을 러시아에 지불하고 있다. 1993년 이들 3국에 대한 러시아의 수출물량은 1990년 1/3 수준으로 감소되었는데, 이것은 가스보다 낮은 가격으로 석유를 사용할 수 있어 대대적인 연료전환이 발생했기 때문이기도 하지만, 이들 공화국의 산업이 급격히 붕괴되어 가스수요가 현저하게 감소하였기 때문이다. 향후 발트 3국으로의 러시아 천연가스 공급이 이 지역의 경제를 가속적으로 회복시키고 이에따라 가스공급도 증가할 것으로 예상되지만, Gazprom은 보다 이들 공화국에 대하여 보다 신축적인 가격체계의 도입을 준비하여야 한다.

4.2 유럽으로의 수출

유럽으로 수출되는 모든 천연가스는 Gazprom의 일부인 Gazexport(구소련 시대에는 Soyuzgazexport로 알려짐)에 의하여 통제되고 있다. 러시아는 계약조건과 전반적인 상업적 관계 때문에 유럽시장을 OECD국가와 중동부 유럽에 있는 구소련 위성국인 CMEA 국가를 구분하고 있다. OECD 유럽국가에 대하여 러시아는 대부분의 물량을 엄격한 강제인수조항(take-or-pay)이 적용되는 20~25년의 장기 계약 하에서 공급을 수행하고 있다. 1960년대 말과 1970년 초에 체결된 초기의 계약들은 이미 연장되었다. 연간 인도물량에서의 신축성은 표 3.3.3에 제시된 자료를 통하여 알 수 있다. 일반적으로 연간 및 계절 간 신축성이 소규모이기는 하지만 각각의 수입회사들은 자국시장의 특정 환경에 따라 서로 다른 계약상의 신축성을 가지고 있다.

표 3.3.3 Gazporm의 무역상사 및 합작투자 현황

	마케팅 회사	제휴 합작투자회사
독 일	WINGAS WIEH Zarubezgaz erdgas Gesellschaft Gmbh DITGAS	-BASF(Wintrshall) -Ferrostashi(Metaprom)
프랑스	Fragaz	
오스트리아	GVH(Gaz und Varenhandelshaus GmbH)	
이탈리아	Promgaz	
슬로베니아	Tagdern	
그리스	Prometheus Gas	
폴란드	Gaztrading	-POGC(Europol Gaz)
미 국	Behtel(Nordgas)	
헝가리	MOL/Minerallimpex/DKG East(panrusgas)	
핀란드	Neste(Gasum)	

[주 : 마케팅회사는 불가리아, 터키, 슬로바키아, 체코 등지에도 설립되었음.]

CEMA국가에 대한 계약상 위치는 서로 다르다. 구 소련시절의 공급물량은 각 년도 별로 설정되었으며 정부 간에 공동으로 협의된 장기계약은 존재하지 않았다. 이러한 국가들은 주요 배관망의 건설에 필요한 자재, 노동력, 자본 등을 제공하고 이에 대한 대가로 매년 특정물량의 가스

를 제공받았다. Yamburg정부와의 합의에 따른 공급은 1998년까지이며, Gazexport는 중·동부 유럽의 고객들과 보다 장기의 계약관계를 수립하기 위하여 협상을 추진 중에 있다.

지난 5년 동안 러시아 대유럽 천연가스 수출전략은 상당히 변화하였다. 전통적으로, 러시아의 천연가스는 수입국의 국경에서 판매되었기 때문에 수입국들의 하류부문에 대한 러시아의 투자는 전무하였다. 1990년 Gazporm은 가스의 수송과 판매를 위하여 독일의 Wintershall과 합작투자를 위하여 제휴하였다. 이러한 제휴에 따라 독일에는 러시아의 천연가스를 수송하는 두 개의 주요 파이프라인 시스템(MIDEL과 STEGAL)이 1994년에 완공되었다. 판매부문의 합작투자회사인 Wingas사는 독일시장에서 상당한 영향력을 가지게 되었다. 독일 외부에서는 WIEH사가 중·동부유럽 국가에 러시아의 천연가스를 판매하고 있다. Gazprom의 목적은 가스를 판매할 수 있는 모든 국가에 무역상사나 합작회사를 설치하는 것이다. 표 3.3.3에서 제시된 바와 같이 이러한 작업은 순조롭게 진행되고 있다. Gazprom은 이들의 배치에 상당한 신축성을 보이고 있는데 일부국가에서는 무역상사가 설치된 반면, 일부에서는 합작회사의 지분(최고 50%이상에서 최저 25%까지)을 보유하고 있기도 하다. Gazprom의 전반적인 전략은 장기 계약 하에서 일정물량의 가스판매를 담당할 수 있는 기관을 설치하는 것인데, Gazprom은 장기계약을 받아들이는데 매우 조심스럽다.

예기치 못한 정치적 사건이 없는 경우, 러시아의 대유럽 수출물량은 향후 10년간 또는 이후의 기간에도 상당히 확대될 것으로 보인다. 이에 대한 러시아의 의도를 가장 명확하게 표현한 것이, 백러시아-폴란드-독일을 연결하는 Yamal 파이프라인 프로젝트 추진으로, 1996년 초 가스 공급이 가능할 수 도 있다. Yamal 파이프라인 프로젝트는 가스전에서 소비시장까지 연결하는 사업이며, Yamal 가스전과의 연결은 최종단계에서 이루어질 것이다. 이에 따라 중·단기 공급계약은 Yamal 가스전에서 공급되지 않고, 기존의 시베리아 가스전에서 공급될 예정이다. 본 프로젝트의 최종계획은 연간 67bcm의 천연가스를 수송하기 위하여 백러시아-폴란드-독일을 경유하는 파이프라인을 건설하는 것이다. 첫 번째 파이프라인 30bcm(폴란드와 백러시아에 대한 공급을 배제하는 경우)의 천연가스를 수송하여 이중에서 20bcm을 독일과 기타의 시장에서 이용할 수 있을 것이다. 그러나 이러한 20bcm의 물량을 신중하게 조정하지 않을 경우, 시장에 상당한 파문을 가져올 수 있다. 20여년이 넘는 유럽 가스사업의 경험에 비추어, Gazexport는 이러한 문제를 잘 인식하고 있기 때문에 유럽 가스시장의 균형을 저해하지는 않을 것이다. 1994년 후반 이러한 물량 중 소량에 대한 장기계약만이 발표되었다. 연간 약 5.5bcm의 물량이 이탈리아에 인도되는데 이 물량은 이탈리아 합작투자 회사의 승압기지 보수에 대한 대가로 제공되는 물량이다.

Gazprom이 어떠한 방식으로 유럽시장에 추가적인 가스를 판매할 것인가 하는 문제는 유럽국

가들의 최대 관심거리중 하나이다. Gazexport는 이들 시장에 가스를 팔기 위한 법적 기반의 마련 뿐만 아니라 잠재적인 가스시장의 개발, 최종 소비자들에 대하여 연구 중에 있다. 이러한 연구를 통하여 발전부문에 추가적인 가스수요가 발생할 가능성이 높다는 것을 알아내어, Gazprom은 유럽에서의 발전 사업에 참여할 의사를 보이고 있다. 유럽의 발전 사업에 대한 참여는 서로 다른 많은 형식을 취할 수 있지만, Gazprom의 분명한 의도는 발전 사업이 단순한 가스의 판매보다 더 많은 이윤을 가져올 것이라는 계산이 있기 때문이다. 발전 사업은 Gazprom에게 가사의 판매이외에 부가적인 수익을 가져올 수 있는 기회를 제공해줄 것이다(결코 유일한 기회는 아님). 그렇지만 수송능력의 확대로 발생하는 잠재적인 물량에 대하여, 대다수의 시장참여자들은 사전에 언급되었던 시장에 대한 파급효과에 대하여 관심을 보이고 있다.

냉전시대의 종결로 러시아의 가스에 대한 전략적 의존성을 완화되었지만, 여타 분야의 안정성에 대한 우려는 남아있기 때문에, 수출물량 증가에 따라 안정성에 대한 관심이 확대될 수도 있다. 파이프라인 시스템의 붕괴나 사고와 같이 논리적으로 발생할 수 있는 많은 문제점들은 위에서 이미 언급하였으며, 구 소련 붕괴이후의 우크라이나를 통한 가스수송과정에서 발생할 수 있는 문제들도 살펴보았다. Yamal 파이프라인(백러시아-폴란드-독일경유)은 기존의 우크라이나 통과 라인과는 분산화 되어 있기 때문에, 유럽에 거의 개벽적인 것으로 간주되고 있으며, 수송거리, 안정성, 신축성 등의 측면에서의 이점도 가지고 있다.

4.3. 향후의 교역 전망

4.3.1 구 소련 공화국과의 교역

러시아와 구소련 공화국간의 천연가스 교역(특히 우크라이나와 백러시아, 그리고 몰도바와의 교역)은 가까운 미래에 증가할 것 같지는 않으며, 오히려 감소할 전망인 반면, 먼 미래에는 보다 낙관적일 것으로 보인다. 아울러 교역확대의 가능성은 공화국간의 요금 지불 방식과 수입국의 경기회복 여부에 달려 있으며, 러시아와 우크라이나의 정치적 관계도 교역규모에 중요한 영향을 미칠 것이다. 우크라이나의 대유럽 수송 경유지로서의 중요성은 감소되지 않을 것이며, 수송국으로써 러시아의 지위가 상당히 증가하였음에도 불구하고 Gazprom이 미수금 문제로 우크라이나에 가할 수 있는 압력에는 한계가 있을 것이다.

중앙아시아(특히 투르크메니스탄)로 부터의 러시아 가스수입은 보다 장기의 계약으로 바뀔 가능성이 높다. 현재 투르크메니스탄에는 생산이 중단된 상당 규모의 가스가 있기 때문에, 구소련

시대와 마찬가지로 러시아 및 우크라이나와 연계된 파이프라인의 수송능력에 따라 낮은 가격으로 러시아의 대유럽 수출을 대체할 수 있을 것이다.

4.3.2 대유럽으로의 수출 전망

러시아의 대유럽 수출은 미래에도 상당한 규모로 증가될 가능성이 높다. 가스는 유용하게 쓰일 수 있을 것이고, 추가적인 수송능력도 창출되고 있다. 그러나 전반적인 에너지 가격의 하락에 따라 러시아의 천연가스는 타 연료와 경쟁할 것으로 보인다. 이에 따라 러시아의 대유럽 수출 규모는 현재의 100bcm수준에서 2000년경에는 40% 정도 증가할 것으로 보인다.7

러시아의 천연가스 수출확대와 병행하여 공급의 안정성에 관한 문제도 제기되고 있다. 이에 대하여 러시아는 수송 시스템의 신뢰성과 효율성을 증진하기 위하여 주요 대규모 보수 프로그램을 추진 중에 있다. 그러나 러시아 국경 외부에 있는 구소련 공화국 횡단 수송라인과 우크라이나의 저장설비와 관련한 공급의 안정성이 본질적인 문제로 남아있다. 따라서 러시아의 대유럽 가스수출에 있어서의 성패는 우크라이나와의 전반적인 정치, 경제, 전략적 관계에 대한 새로운 정립과 양국 간의 가스교역에 대한 문제의 해결에 달려 있다고 할 수 있다.

5. 러시아 주요 석유 · 가스 프로젝트 추진 현황

5.1 석유 · 가스개발 외국인 투자동향

외국 기업의 석유 · 천연가스 개발 사업을 위한 러시아 내 주요 관심지역은 다음과 같다.

(1) 북유럽 지역
(2) 서 시베리아 지역
(3) 카스피해 연안지역
(4) 극동 러시아지역(사할린지역)
(5) 극동 러시아지역(야쿠치아, 이르쿠츠지역)

특히 미국의 메이저와 유럽 지역 에너지기업의 투자가 활발한 지역은 북유럽지역과 서 시베리아 지역으로서 대러시아 연료산업투자액의 90%가 이들 두 지역에 집중되고 있다. 먼저 북 유럽 지역은 티만 · 페초라 석유 · 가스지역을 비롯하여 아르항겔스크, 페름주 등이 포함되며 서방투자의 64.6%가 이들 지역에 집중 투자되었다. 석유 및 천연가스의 상대적 매장량은 서 시베리아에 비하여 크게 낮은 수준은 이지만, 유럽지역과 가장 인접하고 있다는 지리적 이점에 따른 파이프라인 건설비용의 절감, 포함된 석유 · 가스 파이프 수용량에 따른 바렌츠해의 해양수송의 편의성, 그리고 70여개에 달하는 신규 석유 · 가스전의 분포 등이 이러한 투자 유인을 불러올 수 있었던 것으로 보인다.

다음으로 외국 기업의 투자가 집중된 곳은 서 시베리아다. 서 시베리아는 러시아 최대 석유 · 가스전이 분포되어있는 튜멘지역과 야말반도, 우렌고이, 얌부르그가스전등 현재 러시아의 대표적 유전과 가스전이 모두 분포되어있는 곳이다. 현재 이곳에는 총 54개의 외국기업의 투자 사업이 진행 중이며, 투자액은 총 85억 5백만$로서 전체의 25.1%를 점유하고 있다. 이들 투자의 대부분은 러시아 북유럽과는 달리 미국 석유회사를 통해 이루어지고 있다.

미국기업들은 오브강 중류의 석유가스전과 야말반도의 신규 석유 · 가스전에 집중하여 투자하고 있으며 러시아 내 효율적인 석유 · 가스개발을 위해 설립한 미 · 러 기술센터 또한 이곳 튜멘지역에 위치하고 있다. 석유 · 가스의 부존 잠재력으로 보아 향후 수년간 러시아에 대한 연료산업 투자의 대부분은 이곳 서 시베리아지역으로 집중될 것으로 보이며, 서방 금융기관의 프로젝트 융자의 대부분이 이들 지역에 집중되고 있어 타 지역에 비해 상대적으로 좋은 사업여건을 형

성하고 있다.

표 3.3.4 외국 기업의 러시아 연료산업에 대한 지역별 투자현황 (단위 : 백만$)

지 역	건 수	금 액	비 율(%)
북유럽지역	**21**	**21,894.18**	**64.6**
페름주	4	11,398.09	33.7
코미공화국	13	7,937.72	23.4
아르한겔스크주	2	1,1916.37	5.7
우드무르트공화국	2	597.00	1.8
서시베리아지역	**54**	**8,505.82**	**25.1**
튜멘주	27	6,945.06	20.5
바쉬코르토스탄공화국	5	1,157.97	3.4
케메로보주	22	402.79	1.2
기타지역	**76**	**3,457.44**	**10.3**
합 계	**151**	**33,857.44**	**100**

[자 료 : Roscomstat]

사할린 지역은 현재 미국 · 일본기업 등이 컨소시엄을 통해 참여하고 있다. 사할린 육상과 대륙붕의 풍부한 석유 · 가스 자원과 동아시아 및 미국의 에너지 수요를 고려할 때 사할린 지역의 연료산업은 유망한 장래성을 갖고 있는 것으로 보인다. 사할린 지역의 경우 각각의 사업들이 생산물분배계약(PSA)을 통해 추진되는 것이 타 지역과 비교하여 특이한 사항이다.

한편 동시베리아 미치 극동지역의 대규모 석유 · 가스전이 분포되어있는 이르쿠츠크, 크라스노야르스크, 사하 · 아쿠치야 석유 · 가스전의 경우 수송문제로 인하여 유럽 및 미국기업의 참여가 현재까지는 이루어지고 있지 못하며, 한국, 일본, 중국기업들이 사업 가능성을 모색하고 있는 단계이다.

5.2 사할린 프로젝트

구소련 시절 구소련 지역의 대부분 석유, 천연가스 지역이 서방국가들에게 폐쇄되었던 것과는 달리, 사할린의 경우 인근 대륙붕지역에 대한 서방투자의 유인은 1972년까지 거슬러 올라간다. 2차 세계대전 중 사할린을 점유하고 있던 일본은 사할린에 보존된 에너지 자원의 이용을 위해 체계적인 지질, 자원조사를 수행하여 관련 자료를 보관하고 있었으며, 사할린 지역의 에너지 자원개발을 통하여 재정수입 및 지역 개발을 도모하려 했던 구소련은, 구소련 중앙 지역까지의 에

너지 수송이 불가능한 사할린 자원 개발을 위해 일본측 자본 유인 정책을 실시하게 된다.

서로의 조건이 충족되었던 소련과 일본은 1974년 SODECO(Sakhalin Island Development Corporation)사를 설립, 일본 측 자본을 유인하여 사할린 인근 대륙붕 지역의 석유 · 가스에 대한 탐사활동을 시작하게 된다. SODECO측은 280백만$를 투입 1977년 Odoptu유전을 발견하게 되며, 1979년 Chaivo유전을 발견하는 성과를 얻게 된다.

하지만 소련의 아프가니스탄 침공과 함께, 동서 진영의 냉전 관계가 심화되며, 미국 측의 대소 에너지 기술 이전 금지 조치에 따라 사할린 대륙붕 지역의 석유 · 가스전 개발은 순연되게 된다. 1980년대 중반 Chaivo 석유 · 가스전에 대한 개발을 소 · 일 양국은 합의 한 바 있는데, 당시 크게 하락된 원유 가격과, LNG의 장기 구매 계약 가격에 대한 양국 의견의 불일치로 개발은 다시 순연되게 되었다.

1990년대 러시아 지역의 서방 기업들에 대한투자 확대와 함께 SODECO는 다시 사할린 석유 · 가스전 개발을 현실화하려는 시도를 시작하였으며, 1995년 6월 미국 Exxon과 함께 사할린-1프로젝트라는 이름으로 생산물분배계약(PSA)체결을 통해 개발을 모색 중이다. 또한 인근 필튼-아스토흐스코예, 툰수코예 석유 · 가스전의 경우 사할린-2프로젝트라는 이름으로 1994년 생산물 분배 계약(PSA)이 이루어 졌으며, 기타 사할린-3, 사할린-4 등의 사업추진이 계획되고 있다. 이들 각각의 사업의 개요를 살펴보면 표 3.3.5와 같다.

표 3.3.5 사할린 대륙붕 석유가스 프로젝트 사업 현황

구 분	사할린1	사할린2	사할린3	사할린4
광구	차이보 오드푸투 알쿠튼-다기	필튼-아스토흐스코예, 툰스코예	아야쉬스코예, 동오도프투키 린스크	슈미드크 아스트라칸 베닌스키
참여업체	Exxon(30%) Sodeco(30%) Rosneft(17%) Rosneft-Sakhalin morneftegaz(23%)	Sakhalin Energy Invest CO. -Marathon(30%) -Mcdermott(30%) -Mitsui(20%) -Royal Dutchshall(20%) -Mitsubishi(10%)	Exxon Mobil Texeco 기타 (러시아측)	Mobil Texaco Sakhalinmomefte -gaz, Demorneftegeofi -zika
자원 매장량	원유 290백만T 가스 425억㎥	원유 60백만T 가스 3,500억㎥	-	NA
투자규모	120억$	100억$	-	151백만$(탐사비)
사업개시	1997년 6월	1996년 7월	-	NA
생산시기	2003년	1999년	-	NA
계약체결일	1995년 6월	1994년 6월	-	-

5.3 야말(Yamal) 프로젝트

5.3.1 추진배경

러시아의 Yamal 반도에서 유럽지역으로 천연가스를 공급하는 Yamal-Europe간 PNG 프로젝트는 총 투자비가 1,000억불 이상 소요될 것으로 예상되는 금세기 최대의 천연가스 수출 프로젝트로서, 이러한 대규모 프로젝트가 추진된 배경은 다음과 같다.

먼저 러시아의 경우를 살펴보면, 구소련이 붕괴된 1990년 중반 이후 천연가스의 수출에 대한 새로운 전략을 수립하는 과정에서, 현재 생산중인 가스전의 대부분이 이미 최대 생산시기를 넘겼기 때문에(아직까지 사향 단계는 아님), 기존의 생산능력을 유지함과 동시에 생산량을 확대하기 위해서는 신규가스전의 개발이 필요하기 때문에, 이에 대한 몇 가지 대책을 수립하는 과정에서 Yamal 프로젝트 추진의 필요성이 제기되었다.

반면에 소비시장인 서유럽 지역의 경우, 역내 천연가스 생산은 2000년 이후 감소추세를 보일 것으로 예상되기 때문에 이를 충족시키기 위해서는 상당한 물량의 가스 수입이 불가피할 것으로 전망된다. 또한 러시아가 2010년을 기준으로 유럽에 대한 현재의 시장점유율 수준을 유지하기 위해서는, 약 50bcm 규모의 추가적인 물량공급이 요구되고 있다.

북극의 카라해 인근에 위치한 야말 반도에는 육상지역에만 러시아 천연가스 매장량의 약 25% 부존되어 있는 것으로 추산되며, 카라해 대륙붕을 포함할 경우 점유 비율은 이를 훨씬 초과할 것으로 예상된다. 주요 대상 천연가스전은 Bovanenkovo, Kharasavey, Kruzenshtern 3대 가스전으로 야말반도 내의 확인 매장량 10조㎥의 70%가 이곳에 집중되어 있다. 현재 확인된 상업적으로 채굴 가능한 천연가스 매장량만으로도 연간 720억㎥의 생산규모로 30년 이상 가행할 물량이 확보되어, 러시아 서부 및 유럽지역의 수요를 능히 충족시킬 수 있을 것으로 보인다.

현재 가스전 개발 및 파이프라인 건설에 필요한 투자액은 최소 400억$ 이상이 소요될 것으로 추산되고 있다, 파이프라인 건설사업의 경우, 직경 1,220의 파이프라인 5관을 2개의 경로로 나누어 설치하는 사업이 계획되어 있다. 첫 번째는 중앙러시아 지역을 통과하는 선으로, Yamal-UKhta-Torzhok 지역에 3개의 관을 부설하는 사업이며, 두 번째로는 러시아 Ukhta에서 -백러시아-폴란드-독일을 잇는 2개의 관을 건설하는 사업이다.

현재 야말 지역에는 기존 인프라가 전무한바 관련 시설의 건설을 위하여, Obskaya에서 Bovahenkovo까지 505km의 철도 건설이 계획되고 있으나 극지의 혹한과 극지 환경 문제등에 대한 기술적 검토가 아직 완료되어 있지 못하다.

본 사업을 위하여 참여하고 있는 러시아내의 연구기관은 YUZZNIIgiprogaz등이며, 관련시설 건설사업 참여기관은 YAamalgazpromstroy, Yamalstroigazdobchya, Arktikneftegazctroy등 총 12개 기관이다. 경제성평가사업(Feusibility study)의 경우 YuzhNIIgiprogaz, Giprospetsgaz, SeverNIPIgaz, VNIIST, VNIIgaz등이 수행하였으며, Batdaratskaya Guba해저 수송 프로젝트는 Pitergaz에 의해 수행되었다.

야말 지역의 특수한 기후 및 환경여건에 따라 관련 설비 건설시 특수한 고려사항들이 필요하다. 즉 노동자들의 순환작업, 특수한 주거 시설 건설등이 현재 시행되고 있다. 또한 도로 및 수로의 결핍으로 하절기의 경우 Se-Yakha항과 Kharasavey항으로 선박 수송이 우리어지며, 동절기의 경우 트랙터를 통한 화물수송이 이루어지고 있다.

파이프라인 유지 및 관리의 편의를 위하여 Kharasavey에서 Gagaratskaya가압기지까지 도로 건설이 예정되어 있는데 1996년말 현재 30km의 도로가 Bovanenkovo가스전 인근에 건설 완료되었으며, 향후 30km 도로가 연장 건설될 예정이다.

Bovanenkovo 가스전 도로에는 총 132개의 교량이 건설되어야 하는데 혹한으로 인한 문제가 상존하고 있다. 이들 문제 외에도 가스개발 및 시설 건설에 따른 주변 환경 영향 및 환경 훼손 방지 기술, 인근지역의 사회·경제 개발계획 등에 대한 대책 마련이 필요하다. 이를 위하여, 현재 야말 가스전 개발 및 수송 관련 과학 기술 프로그램이 개발 수행 중에 있는바, 현재 100여개의 연구기관이 이에 참가하여, 프로토타입 테스트 및 극지 환경에서 파이프라인 건설 기술 등에 대한 연구가 진행 중이다.

5.3.2 매장 현황 및 개발 여건

야말반도의 대규모 가스전은 반도의 끝부분에서 약 600km 북부에 위치해 있으며, 이 지역의 환경여건은 영구동토로서 부식토로 덮여 있기 때문에 대단히 열악하다. 또한 혹독한 육상 환경뿐만 아니라, 반도의 연안은 년 중 9개월 동안은 빙하로 덮여 있으며, 가장 가까운 철도에서 가스전까지의 거리는 수백km에 이르기 때문에 대구경의 장거리 파이프라인을 부설하는 것이 매우 어려울 것으로 평가되고 있다.

Yamal 프로젝트는 이와 같이 열악한 환경 하에서 작업이 진행되기 때문에, 개발비용이 매우 높을 것으로 예상되는데 지금까지 구소련에서 추진되었던 Urengoy 가스전 및 Jamburg 가스전 등과 비교할 때 북극권내 200km에 위치한 야말반도의 가스전을 개발하는 것은, 기존의 가스전과 비교해 1.5배 정도의 비용이 소요될 것으로 평가되고 있다.

표 3.3.6 Yamal 반도의 천연가스 가치 매장량 분포 현황 (단위 : bcm)

가 스 전	매 장 량
Bowanenkowo	4,400
Kharasawey	1,200
North Tambey	1,000
Kruzenstern	960
South Tambey	1,000
Maltgin	440
Tasiy	360
Nowoportow	210
기타 가스전	1,120
총 매장량	10,400

자료 : Reliable supply of Yamal gas to Europe, V.I.Rezunenko, Gazprom.

야말 반도의 최대 가스전은 1971년에 발견된 Bowanenkowo 가스전으로 가채 매장량이 약 4,400bcm 정도인 것으로 평가되고 있으며, 주변에 위치한 기타 25개 가스전의 매장량은 10,400bcm으로 러시아 전체 확인 매장량의 약 20% 정도를 차지하고 있다.

5.3.3 Yamal Project의 개요

Yamal 프로젝트에 대한 타당성 조사는 1993년말에 Gazprom과 Wintershall이 공동으로 수행하여 경제성을 가진 것으로 평가되었으며, 1994년 5월 Gazprom 중역회의의 승인을 얻어 이탈리아의 Milan에서 개최된 IGU회의에 제출되었다.

이에 따른 프로젝트의 기본개요는 Yamal 매장량의 약 65%정도를 차지하고 있는 3개의 가스전(Bowanenkowo, Kharasavey, Kruzenstern)을 개발하여, 동 유럽을 경유하는 파이프라인을 통하여 독일에 공급하는 것으로, 가스전에서부터 75bar 압력으로 운영되는 2,500km 파이프라인 3개 라인을 통하여 모스크바에 인접한 Torzhok까지 수송하며, 여기에서 러시아-백러시아 국경까지는 2개의 파이프라인 건설함과 더불어, 백러시아 역내에서는 84bar의 압력으로 운영되는 575km의 56인치 복선 파이프라인을 통하여 폴란드 국영 석유·가스회사와 Gazprom, 그리고 Wintershall은 EuRoPol GAZ s.a. 라는 합작회사를 설립하였는데, 동 사가 폴란드 역내를 통과하는 84bar 압력의 56인치 복선 파이프라인 665km 건설을 담당하고 있다.

또한 독일 역내에서의 수송을 위해서는 Wintershall, Gazprom, Wingas가 합작투자로 두개의 파이프라인을 건설하는데, 한 개의 파이프라인은 벨기에 국경의 Eynayyen에서 Fraukfurt/Oder

까지 연결되는 770km의 파이프라인으로 MIDAL 파이프라인과 연결되며, 다른 하나는 프랑크푸르트에서 독일 남서부지역까지 연결되는 980km의 파이프라인으로 STEGAL 파이프라인과 연결될 예정이다.

표 3.3.7 Yamal-Europe Project 개요

구 간	파이프라인 연장	라인수	구경(inch)	압력(bar)	승압기지수
러시아 Yamal-Torschok Torshok-백러시아	2875	3 2	56 56	75 75	24 19 5
백러시아	625	2	56	84	5
폴란드	670	20	56	84	5
독 일 West Route Southwest Route	1,750 770 980	1 1	48/40 48/40	100 100	5
합 계	5,920				39

자 료 : "Planned Gas Pipelines around the Wolrd", Cedigaz, 1995

Gazprom 과 Winstershall의 타당성조사 결과에 의하면, Yamal에서 프랑크푸르트까지 수송되는 물량은 연간 52bcm이며, 14bcm의 물량이 폴란드에 그리고 7.1bcm의 물량이 백러시아에 공급되며, 승압기지의 운영에 필요한 물량은 연간 총 10.1bcm으로 러시아내에서 7bcm을 그리고 백러시아와 폴란드에서 각각 1.4 및 1.7bcm이 소요될 것으로 추정되고 있다.

한편 Gazprom은 Baydaratskaya 해협을 횡단하는 해저 파이프라인을 건설하기 위하여 HOGD(Heerema Oil&Gas Development)와 구간에 대한 세부적인 설계 및 건설에 대한 관리계약을 체결하였으며, 이에 따라 1993년 9월에 하청업체들의 합작회사인 Petergaz가 설립되었다.

○ Baydaratskaya 해협 횡단

- 계약자 : Heerema Oil&Gas Development
- 건설기간 : 최초의 2개 라인에 3년 소요
- 라인수 : 4개 - 길이 : 70km(1라인당) - 구경 : 48inch

표 3.3.8 Petergaz의 구성현황

국 가	참여회사	하청업무
네덜란드	Zeetech Engineering (John Brown Division)	Pipeline Design
캐 나 다	HBT AGRA	Permafrost, Grotechnicla Engineering, Enviroment Protection Study
영 국	Andrew Palmer Assoc	Construction Engineering

표 3.3.9 Baydaratskaya 해협 횡단 프로젝트의 추진일정

Projcet Schedule	1차년도	2차년도	3차년도
Preparations for Yanal Shore Crossing	***		
Install Yanal Shallow Water Pipe Line	***		
Install Ural Onshore Pipeline and Scraper Facilities		********	
Preparation for Ural Shore Crossing		**	
Install Ural Shallow Water Pipeline		**	
Install First Deep Water Pipeline		**	
Install yamal Onshore Pipe Line and Scraper Facilities			********
Install Second Deep Water Pipe Line			**
Pre-Commissioning			***

자료 : Pipeline & Gas Industry, 1995, 1

5.3.4 프로젝트의 투자재원 조달

Yamal 프로젝트 수송부문의 총 투자비용은 독일역내의 파이프라인 투자비용을 포함하여, 약 400억불정도 소요될 것으로 추정되고 있으며. 가스전 개발비용은 100-120억불정도 소요될 것으로 추정되고 있다.

동 파이프라인의 러시아 국내구간은 대략 일부에서 건설이 진행되고 있는데, 금융권의 관측에 따르면, 당초 Gazprom은 러시아 국내구간의 필요자금을 전액 독자적으로 조달할 계획이었으나, 실제 조달 가능자금은 조달 예정액에 훨씬 미달되는 것으로 나타났다. 이에 따라 Gazprom은 1997년 2월 독일의 Dresdner Bank의 주선으로 19개 국제은행으로부터 Syndicated Loan 방식으로 융자하는데 서명하였다.

러시아 구간은 동 국가가 대 러시아 채무 4억불 중 일부를 변제하는 조건으로 자신들이 파이

프라인을 건설하는 방식으로 러시아 · 백러시아 양국 간에 합의가 이루어 졌으며, 폴란드 구간의 건설(EuRoPol 이라는 폴란드와 러시아 합작회사가 담당)은 1996년 6월부터 개시되어 현재 일부 구간의 공사가 완료되었는데, 동 구간의 파이프라인 건설비용은 약 25억불 정도로 추산되고 있는데, 이중에서 15%(3억5천만불)는 폴란드 회사가 정부보증을 통하여 조달하고 나머지는 러시아가 조달할 예정이다.

또한, 1997년에 완공될 예정인 독일 구간의 파이프라인은 폴란드와의 국경인 프랑크푸르트 안 델오델을 기점으로 도이치반다스할사와 Gazpromdml 합병회사인 반 가스사가 조업하고 있는 슈데가르 파이프라인에 접속시킬 예정이다. 독일 국내 구간의 파이프라인 건설에는 10억불이 필요할 것으로 추산되는데, 이에 필요한 재원은 독일의 민간부문에서 조달할 예정이다.

ㅇ 국별 Gazprom의 파트너

- 백러시아 : Beltransgaz
- 폴란드 : PGNiG(Polskie Gornictwo Naftowe I Gazownictwo)
- 독 일 : Wintershall

5.3.5 향후 프로젝트 전망

동 프로젝트의 추진은 유럽에 대한 천연가스 수출을 증가시킬 뿐만 아니라, 유럽에 대한 천연가스 수출경로를 현재의 우크라이나 경유가 아닌 또 다른 루트를 다른 곳으로 확보한다는 데에 의의가 있다.

현재 러시아는 기존 우크라이나를 경유 유럽으로 수출되는 파이프라인에서 우크라이나가 가스를 파이프라인에서 가로채는 문제와 이에 대한 요금을 지불하지 않는 문제에 봉착하고 있지만, 우크라이나 경우 이외의 대유럽 가스 수출 경로를 가지고 있지 않은 러시아는 근본적인 해결책을 강구하지 못하였다.

그러나 야말에서 유럽까지의 파이프라인이 완성되면 연간 약 500억㎥(LNG 환산 약 3,500만톤)의 천연가스를 유럽에 수출할 수 있는 능력을 구비하게 되기 때문에, 향후에는 러시아 수출물량의 절반정도를 우크라이나를 경유하지 않고 유럽에 수출할 수 있게 된다.

현재까지 동 프로젝트의 추진은 관련국가간의 긴밀한 협조로 매우 순조롭게 진행되고 있다. 최근 Wingas의 발표에 의하면, 이미 일부구간이 완공되어 폴란드의 기존배관망에 연결되어 폴란드까지의 공급이 개시되었으며, 독일에 대한 공급도 조만간 개시될 계획이다. 그러나 모든 공

정이 완료되어 계획된 물량을 수송하기 위해서는 아직도 상당한 시일이 소요될 것으로 전망되고 있다.

제 4 장 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 동토 공학적 특성

제 1 절 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 기본 성질

1. 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 기본 성질

하바로프스크 및 블라디보스토크 흙에 대해 아래와 같이 KS규정에 따른 흙의 기본물성 시험을 실시하였다.

- 입도분포시험 (KS F 2302)
- 액성한계와 소성한계 (KS F 2303)
- 다짐시험 (KS F 2312)
- 비중시험 (KS F 2308)

1.1 입도분포

입도는 흙을 구성하는 흙 입자의 입경과 각 입경에 대한 중량분포를 나타낸 것이다. KS F2306에서는 '흙 입자의 크기가 분포하는 상태를 중량백분율로 나타낸 것'이라고 정의한다.

시험대상 재료의 공학적 특성을 파악함에 있어서 재료의 입자 크기와 입도분포는 중요하다. 흙의 분류 목적은 성질이 서로 다른 여러 가지 흙을 일련의 시험에 의해 몇 가지 무리로 나누어 그 흙의 개략적 성질을 알아보고, 또 공학적 성질을 예측해 볼 수 있다. 일반적으로 폭 넓게 사용하는 분류방법은 통일분류법(Unified Soil Classification System)과 AASHTO(American Association of State Highway of Transportation Officials) 분류법이 있다.

일반적으로 흙의 입도분석에서 조립토는 체분석을 실시하고, 세립토는 비중계 분석을 실시하며, 혼합토인 경우는 체분석과 비중계분석을 함께 실시한다.

체분석(Sieve Analysis)은 서로 다른 눈금 크기의 체를 규정에 정해진 순서대로 준비한 후 실험대상 시료를 넣고 체를 일정한 시간동안 흔들어서 각 체에 남아있는 시료의 양을 전체 양에 대하여 통과 또는 잔류비율로 나타내 시료의 입도분포를 파악하는 방법이다. 이 때 주의할 사항은 점토질의 성분이 많은 경우, 시료의 엉김으로 인한 시험 오차를 제거하기 위하여 물을 사용하여 세척하고, 0.074mm체를 통과한 시료는 비중계 시험을 실시한다.

0.074mm체를 통과한 미세입자가 약 10%이상이면 체분석으로는 유효입경(D10)과 균등계수(Cu), 곡률계수(Cg)를 구할 수 없다. 따라서 흙의 성질을 판단할 수 있는 결과를 얻을 수 없게 되므로, 이때에는 0.074mm체 통과분에 대하여 stokes법칙에 의한 비중계 분석을 실시하여 입도분포를 구한다. 이는 흙 입자가 섞인 현탁액에서 시간경과에 따라 입자가 크기 순서대로 가라앉는데, 이때 현탁액의 농도 즉, 비중이 변하므로 현탁액의 비중을 측정하여 흙 입경과 분포를 간접적으로 측정하게 된다. 본 실험에서는 KS F 2302, 2309에 규정된 시험법으로 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙에 대해서 시험을 실시하였고 결과는 그림 4.1.1과 같다.

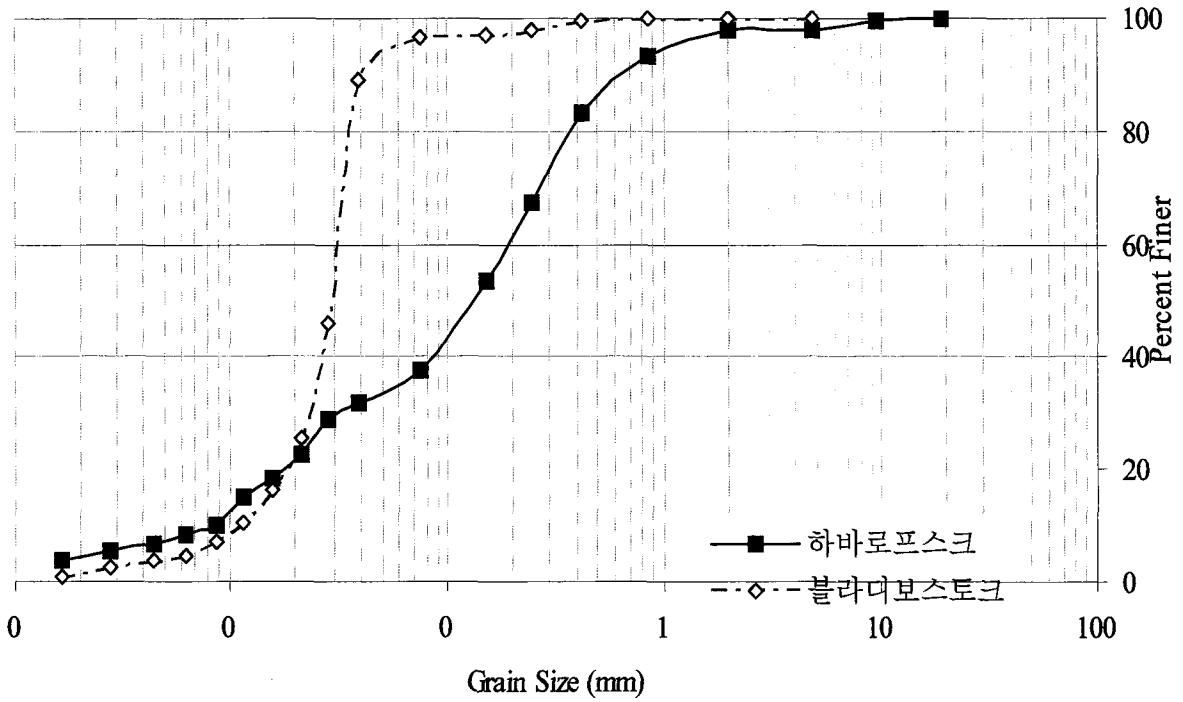


그림 4.1.1 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 입도분포곡선

1.2 액성 한계와 소성 한계

일반적으로 점성이 있는 흙은 함수비에 따라 그 형상 및 성질이 달라진다. 즉, 함수비가 클 때에는 액체상태가 되며 함수비가 작아지면 고체상태가 된다. 이렇게 함수비에 따라 형상이 달라지는 것은 흙 입자를 둘러싸고 있는 물의 표면장력 때문이다. 함수비가 작을 때에는 물의 표면장력에 의하여 흙 입자간의 결합력이 강하지만 함수비가 커지면 물로 둘러싸인 흙 입자간의 거리가 멀어지고 흙 입자는 서로 분리되어 입자간의 마찰이 거의 없어지기 때문에 함수비가 아주 커지면 흙 입자는 액체와 같이 자유롭게 유동하게 된다. 따라서 흙의 형상은 함수비에 따라 달라지며 형상의 경계가 되는 함수비를 아터버그한계(Atterberg Limits)라고 한다. 아터버그한계

는 시료마다 각각 다른 값을 나타낸다. 즉 높은 함수비를 함유해도 고체 상태를 유지하는 시료가 있는 반면, 낮은 함수비에도 유동상태로 변하는 시료가 있다.

액성한계시험 (KS F 2303)은 시료를 담은 접시를 1cm의 높이에서 1초에 2회의 비율로 25회 떨어뜨렸을 때, 양분된 부분의 흙이 홈 양축으로부터 흘러내려 약 1.5 cm의 길이로 합쳐졌을 때의 함수비로 정의된다. 소성한계시험 (KS F 2303)은 흙의 소성상태와 반고체 상태의 한계를 나타낸 함수비로, 흙덩어리를 손으로 밀어 지름 3mm 국수 모양으로 만들어 부슬부슬해질 때의 함수비로 정의된다. 본 실험에서는 KS F 2303에 규정된 시험법으로 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙 두 시료 흙에 대해서 시험을 실시하였고 결과는 표 4.1.1과 같다.

1.3 비중시험

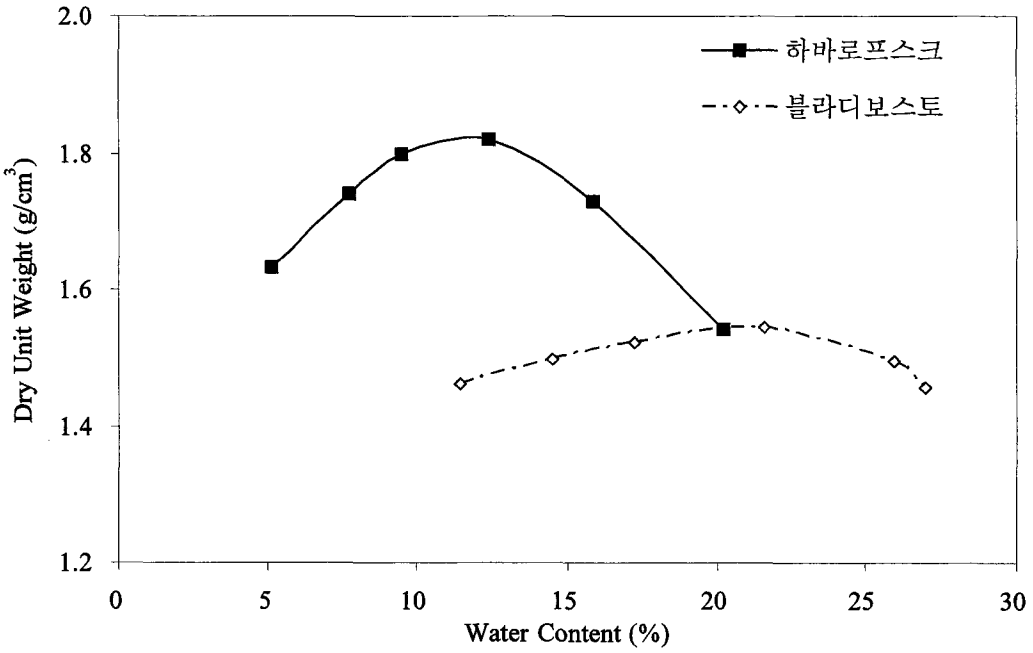
비중이란 증류수의 단위중량에 대한 입자의 단위중량과의 비를 말한다. 흙의 비중은 흙의 분류에 중요한 요소로 흙의 간극비와 포화도를 계산하거나 비중계 시험에 사용된다. 비중시험은 비중병을 이용하여 측정하는데, 10번체 (2.0 mm)체를 통과한 노건조 시료를 50g이상씩 (비중병 용량 250㎖일 때) 준비하고, 각 시료마다 3회씩 시험하여 그 오차가 ± 0.03 이내에 들어올 경우 평균치로 결정한다. 본 실험에서는 KS F 2303에 규정된 시험법으로 하바로프스크 및 블라디보스토크 두 종류의 흙에 대해서 시험을 실시하였고 결과는 표 4.1.1과 같다.

표 4.1.1 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 시험결과

종류	하바로프스크	블라디보스토크
비중	2.65	2.50
최대건조단위중량(g/㎤)	1.82	1.53
최적함수비(%)	11.7	19.8
액성한계(%)	35.2	39.5
소성한계(%)	22.8	31.1
통일분류법	SM	ML

1.4 다짐시험

다짐시험은 37.5mm 체를 통과한 흙의 건조밀도-함수비 곡선을 그린 후 최대 건조밀도와 최적 함수비를 구하기 위한 시험이다. 여기서 최적함수비란, 최대건조밀도에서의 함수비를 말한다. 래머의 무게, 몰드의 안지름, 다짐 층수, 1층당 다짐 횟수, 허용 최대입자지름에 따라 A, B, C, D, E 5가지 방법이 있다. 본 시험에서는 D다짐시험을 실시하였으며, 래머 질량 4.5kg, 몰드 안지름 15cm, 다짐층수 5층, 1층당 다짐횟수 55회, 허용 최대 입자 지름은 19mm로 하였다. 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙에 대해서 시험을 실시하였고 결과는 그림 4.1.2와 같다.



4.1.2 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 다짐시험결과

제 2 절 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 열전도 특성

1. 흙의 열전도 실험

1.1 개요

열의 전도란 물질의 이동을 수반하지 않고 고온부에서 이것과 접하고 있는 저온부로 열이 전달되어 가는 현상을 말한다.

예를 들어 금속막대의 한 쪽 끝을 불속에 오래 놓아두면 손잡이가 뜨거워진다. 이때 에너지가 금속을 통하여 손잡이로 전도 된 것이다. 불의 온도가 높기 때문에 금속의 원자나 전자가 진동하는 폭이 상대적으로 크다. 이런 원자의 에너지가 원자들의 충돌을 통해서 원자에서 원자로 전달되어 금속을 따라 손잡이까지 온도가 올라간 것이다. 온도가 다른 물체끼리의 접촉에 의해 열의 이동이 일어나는 경우가 이에 해당한다. 액체나 기체 내부에서의 열의 이동은 주로 대류(對流)에 의해 일어나지만, 고체 내부에서는 주로 전도에 의해서 열이 이동한다. 열전도에 의한 물체 내부에서의 열의 전달속도는 물질 내부에서의 온도기울기(단위 길이당의 온도차)에 비례하지만, 물질의 종류에 따라 큰 차이가 있다.

표 4.2.1 물질별 열전도율(Halliday, 2001)

물 질	k(W/m · K)
스테인리스 강철	14.0
납	35.0
알루미늄	235.0
구리	401.0
건조상태 공기	0.026
유리섬유	0.048
전나무	0.11
창유리	1.0

예를 들어 표 4.2.1과 같이 구리나 철과 같은 전기의 양도체에서는 열이 매우 빠르게 전달되지만, 유리이나 전나무와 같은 전기적으로 절연체인 물질에서는 늦게 전달된다. 또 액체나 기체는 고체에 비해 매우 늦고 전도에 의해서만 연전달이 된다고 가정한다면, 그 일부에 가해진 열을

전체에 확산시키기는 어렵다. 이것은 열전도의 메커니즘이 각각의 물질에 따라 다르기 때문이다. 이것을 수치로 나타내는 데는 두께 1cm의 물질층의 양면에 1℃의 온도차를 두었을 때, 그 층의 1cm^{2}의 넓이를 1초 사이에 통과하는 열량을 사용하며, 이것을 그 물질의 에너지양인 열전도율(熱傳導率)이라고 한다.

일반적으로 그 값은 온도에 따라 다소 달라지는데, 물질의 종류에 따라 거의 정해진 값을 가지는 물질상수로 보아도 좋다. 또 금속의 열전도도와 전기전도도 사이에는 비례관계가 있으며, 동일 온도에서의 양쪽의 비는 금속의 종류에 관계없이 일정한 값을 가지고 있다는 사실이 1853년에 G.H.비데만과 R.프란츠에 의해 발견되어, 이것을 비데만-프란츠의 법칙이라고 한다.

금속 내에서의 열전도는 금속 내부에서 자유롭게 운동할 수 있는 자유전자가 존재하는데, 그것이 고온부에서 저온부로 열을 운동에너지의 형태로 운반하기 때문에 일어난다. 이 때문에 금속의 열전도도는 높고, 열전도도와 전기전도도 사이의 상관관계가 나타나며, 온도가 높아지면 열전도도가 어느 정도 낮아지는 것은 자유전자의 운동이 결정격자의 열 진동에 의해 방해를 받기 때문이라고 생각된다. 한편 같은 자유전자를 가지지 않는 유전체(절연체)에서는 열에 의해 그 일부에서 발생된 원자·분자의 진동이 일종의 파동성(波動性)을 가져서 물질 내부로 퍼져나가, 그것이 표면에서 반사되어 정상파를 만들며, 정상파 전체의 에너지가 균일하게 내부에너지를 높이는 메커니즘에 의해 열을 전달한다. 이 파동의 전달은 비교적 느리게 진행하므로 유전체의 열전도도가 금속에 비해서 낮다. 또 액체의 열전도 메커니즘도 거의 유전체와 같은데, 기체의 경우는 고체·액체와는 완전히 다른 메커니즘을 가지며, 서로 다른 온도를 가지는 2개의 기체층의 경계에서 분자가 교환(확산)되면서 서로 운동에너지를 교환함으로써 열이 전달된다. 이 확산과정이 늦기 때문에 기체의 열전도도는 다른 상태보다 아주 작은 값을 가진다(Halliday, 2001).

1.2 열전도율 측정법

현재 사용되고 있는 열전도율계는 크게 나누어 정상적인 방법과 비정상적인 방법이 있다(표 4.2.2 참조). 이들 중 정상법에 속하는 것은 원리에 충실하고 오랜 역사를 가지고 있지만 실용적인 면에서는 시료의 정상열류를 주어 측정을 하는데 오랜 시간을 요하고, 시료 측면으로 열이 손실되는 것을 막기가 곤란하며 표면온도나 열류 또는 통과열량의 측정 시 숙련된 기술을 요하는 등 많은 결점을 갖고 있다. 따라서 실제 현장에서 사용되는 일은 거의 없고 일종의 원기로서 보관되는 경우가 많다.

반면, 비정상 측정법은 신속히 측정할 수 있기에 실제로 사용되도록 상품화되는 경우가 늘고

있지만 열선법 이외의 것으로는 구해지는 측정량이 열확산율 α이며 열전도율 λ를 구하기 위해서는 그 외의 다른 물리량들, 예를 들면 저항법에서는 재료의 비열을 측정해야 하며 후랏슈법에서는 샘플표면에서 흡수되는 열류치를 구할 필요가 있는 등 불편한 점이 많다.

이에 비해 열선법은 열전도율을 직접적이며 신속히 측정할 수 있는 뛰어난 방법이며 이를 개량 발전시킨 방법이 프로브(probe)법이다.

표 4.2.2 열전도율 측정법의 종류(김영진, 2005)

종 류	구 분	비 고
정 상 법	절대 측정법 비교 측정법	JIS A-143 R-2616 ASTM C-177 C-518
비 정 상 법	저 항 법 후랏슈법 열 선 법 QTM®법	 ASTM D 2326 JIS R-2618

2. 시험장비

통상 열선법에서는 가열선을 두 장의 시료편으로 잡고서 측정하므로 측정도를 높이기 위해서는 시료표면에 가열선을 밀착시키기 위하여 상당한 노력이 필요하다.

그러나, QTM식 Probe는 1대의 시료편으로 측정할 수 있게 한 것으로 본 시험에 사용한 Kemtherm QTM-D3(신속 열전도율계)은 이 Probe를 사용한 측정 시스템이다. 가열선을 동질의 시료편으로 잡는 대신 한쪽을 열전도율이 이미 알려진 단열성 재료로 바꾸어 놓는다면 측정시료의 열전도율은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\lambda = K \cdot \frac{I^2 \ln(t_2/t_1)}{V_2 - V_1} - H \qquad (4.2.1)$$

여기서, K, H는 정수λ_N

V_1, V_2는 각각 t_1 및 t_2의 열전대의 기전력(mV)

I 는 가열선에 흐르는 전류(A)

본 시험에 사용한 QTM Probe는 열전도율을 가진 물질의 표면에 가열선과 열전대가 배치된 상태로서, 이 물질은 단열성이 좋으며 탄성이 있고 시료의 표면과 잘 밀착되게끔 만들어졌다(그림 4.2.2 참조).

이 Probe를 사용해서 측정할 때에는 시료면 위에 Probe의 저면(5×10cm)과 같은 정도 혹은 그보다 약간 작은 평면부분이 있으면 되며 시편을 잘라 내거나 표면을 정밀히 다듬을 필요는 없다. 따라서 비파괴적으로 열전도율을 측정할 수 있다.



그림 4.2.1 열전도시험기와 QTM식 Probe



그림 4.2.2 QTM식 Probe 접촉면

3. 실험방법

각각의 채취시료는 최적함수비에서 아크릴 재질의 시료적재상자(가로 8cm, 세로 15.1cm, 높이 8cm)에 다져 넣었다. 다짐이 끝난 후에는 냉동챔버에 넣어 공시체의 온도를 -20℃~-0.1℃까지 단계별로 변화시키면서 열전도율을 측정하였다. 각 단계에서는 열전도율을 3회 측정하여 평균값을 사용하였다. 실험 전에는 그림 4.2.3의 reference plates를 이용하여 측정값을 보정하였다(그림 4.2.4 참조).



그림 4.2.3 Reference Plates



그림 4.2.4 열전도 측정장치 보정

4. 실험결과

하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 열전도를 측정하였다. 각각의 시료는 다짐시험에 도출한 최적함수비와 최대건조밀도를 기준으로 열전도율 측정 시는 최대건조밀도의 90%와 최적함수비 상태에서 다짐을 하여 아크릴 시료 적재상자(가로 8cm, 세로 15.1cm, 높이 8cm, 체적 966.4cm3)에 넣은 후 QTM 열전도율 probe를 상자 윗면에 놓고 열전도율을 3회 측정하여 평균

값을 구하였다.

그림 4.2.5는 각 흙 시료에 대하여 온도변화에 따른 열전도율 변화곡선을 나타내고 있다. 그림 4.2.5와 같이 영하의 온도에서 급격히 열전도율이 상승한 후 온도가 하강함에 따라 서서히 증가함을 관찰할 수 있다. 물의 열전도율은 0.58W/(m k), 얼음의 열전도율은 -5℃에서 2.25W/(m k)이다. 이는 간극 사이에 있던 물이 얼음으로 변화하면서 열전도율이 증가하기 때문이다. 또한 얼음으로 변화한 후에도 영하의 온도가 내려갈수록 부동수분 양이 감소하면서 열전도율도 증가하였다.

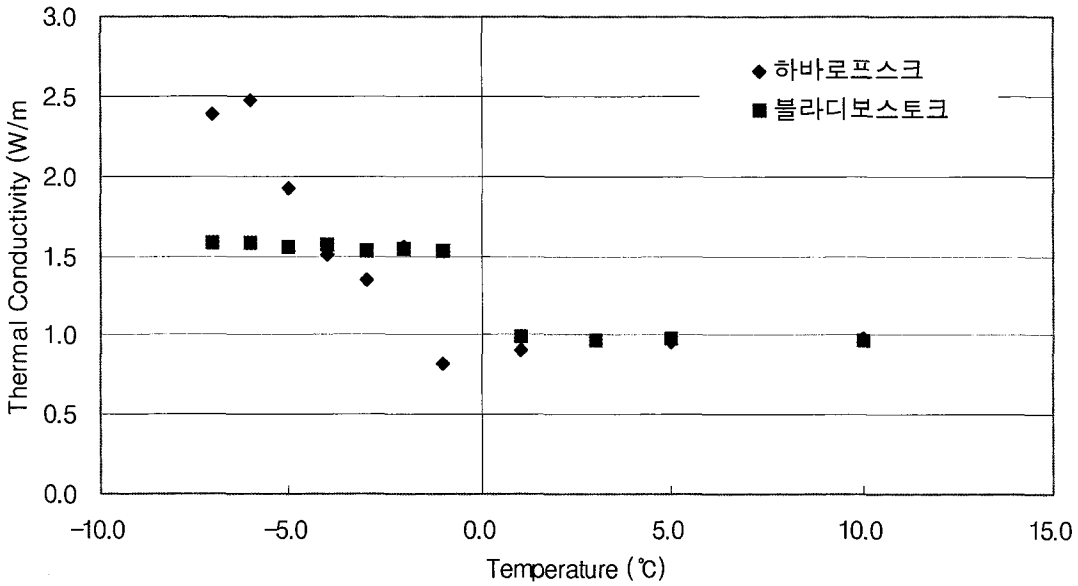


그림 4.2.5 온도변화에 따른 열전도율 변화

입도분포시험을 통하여 0.075mm체 통과량을 기준으로 블라디보스토크(96.6%), 하바로프스크(37.7%) 순으로 나타났다. 이순서는 열전도율의 크기순서와 일치한다. 그 이유는 시료에 세립분이 많을수록 비표면적이 크고, 비표면적에 비례하여 부동수분의 양이 많기 때문이다.

즉, 영하에서 모래나 실트가 점토보다 열전도율이 높음을 알 수 있다(표 4.2.3 참조). 이러한 경향은 표 4.2.4와 같이 스웨덴 지반연구소(SGI, Swedish Geotechnical Institute) 에서 제시한 가이드라인(Sundberg, 1988)의 경향과 일치함을 확인할 수 있다.

표 4.2.3 각 시료의 열전도율

Temperature (℃)	하바로프스크 W/(m K)	블라디보스토크 W/(m K)
10.0	0.984	0.967
5.0	0.959	0.976
3.0	0.972	0.973
1.0	0.905	0.994
-1.0	0.821	1.533
-2.0	1.561	1.539
-3.0	1.348	1.534
-4.0	1.508	1.571
-5.0	1.923	1.558
-6.0	2.473	1.585
-7.0	2.387	1.579

표 4.2.4 흙 종류에 따른 열전도율 가이드라인(Sundberg, 1988)

Soil	Thermal conductivity(W/m.K)	
	Unfrozen	Frozen
Clay with high clay content	0.85-1.1	2.0-2.2
Silty clay	1.1-1.5	2.3-2.8
블라디보스토크	1.2-2.4	2.3-3.2
Sand below gw-table	1.5-2.6	2.7-3.3
Sand above gw-table	0.4-1.1	0.4-1.0
Gravel below gw-table	1.6-2.1	2.8-3.0
Gravel above gw-table	0.7-0.9	0.8-0.9

제 3 절 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 부동수분 특성

1. 부동수분

1.1 부동수분의 정의

동토 중에는 0℃ 이하에서도 얼지 않는 수분이 존재하는데 이를 부동수(unfrozen water)라고 부른다. 동토 중의 부동수의 양은 흙의 비표면적 및 입자배열 상태, 온도 등에 따라서 달라지는 것으로 알려져 있다. 따라서 부동수분 양에 따라 동토의 투수계수, 강도, 열전도율 등이 달라지므로 자연지반의 동결심도를 구한다거나, 인공동결공법에서 동결된 지반의 강도를 알고자 할 때, 또는 영하 165℃ 상태의 LNG 저장탱크의 주변 지반이 동결에 의해 얼마만큼 팽창할 것인지 알고자 할 때 온도변화에 따른 동토의 부동수분 양을 파악하는 것은 매우 중요하다.

1.2 부동수분이 존재하는 이유

Uhlmann(1966)과 Kuroda(1980)는 동토 중에 부동수가 존재하는 까닭을 계면 화학적 견지에서 설명하고 있다. 즉, 얼음과 흙 입자가 직접 접촉하였을 때의 계면자유에너지보다 얼음과 흙 입자가 부동수를 사이에 지니고 접촉했을 때의 계면자유에너지의 합이 작기 때문에 부동수가 흙 입자 표면에서 안정적으로 존재한다고 보고 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$\sigma_{is} - (\sigma_{iw} + \sigma_{ws}) > 0 \qquad (4.3.1)$$

여기서, σ_{is} : 얼음과 흙 입자간의 계면자유에너지

σ_{iw} : 얼음과 부동수간 계면자유에너지

σ_{ws} : 부동수와 흙 입자간 계면자유에너지

동토 중에 부동수가 존재하는 이유는, 부동수의 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 원인에 대하여 김영진(2005)은 다음의 3

가지 이유로 설명하였다.

(1) 용질에 의한 응고점 강하

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

$$\Delta T_f = K_f C \tag{4.3.2}$$

여기서, K_f는 단위농도(1mol/kg)당의 응고점 강하량(℃)이며, 흙속의 물의 경우 1.86℃ kg/mol의 값을 갖는다.

(2) 모관의 영향에 의한 응고점 강하

흙의 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(ΔT_f)은 모관의 반경(r)을 이용하여 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta T_f = \frac{2 V_w T_m \sigma_{iw}}{Lr} \tag{4.3.3}$$

여기서, V_w : 물의 비용적(cm^3/g), 0℃에서 1.00597

T_m : 일반적인 물의 동결온도(°K), 273°K

σ_{iw} : 동결잠열(cal/g), 물의 경우 80cal/g

얼음과 부동수간의 계면자유에너지로서 $35erg/cm^2$로 보면(Penner, 1966), 다음 식의 ΔT_f(℃)와 r(m)과의 사이에는 다음과)과 같은 관계가 성립한다.

$$\Delta T_f = 5.7\times10\text{-}8(1/r) \qquad (4.3.4)$$

상기 식의 의미는 모관의 영향에 의한 응고점 강하는 모관반경에 반비례하며, 예로서 모관반경(r)이 0.1㎛일 때 응고점 강하량은 0.57℃가 된다는 뜻이다.

(3) 흙 입자 표면의 흡착력장의 영향

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

$$C = C_0 \exp\left(\frac{-ze\Psi}{kT}\right) \qquad (4.3.5)$$

여기서, C : 중량 mole 농도

e : 음이온의 전하

Ψ : 물에 대한 상대 전위

C_0 : 일반적인 물의 농도

k : Boltzmann 정수

T : 절대온도

z : 이온의 원자가(ionic valence)

점토입자의 표면전하가 마이너스이므로 Ψ도 마이너스 값을 갖게 되어 상기 식에서 우변 전체의 값은 C_0보다 큰 값이 된다. 양이온의 농도는 흙 입자 표면 근처에서 크게 되기 때문에 흙 입자 표면 근처에 흡착되어 있는 물의 응고점 강하량은 크게 된다.

앞의 세 가지 요인들이 영향을 미쳐 주어진 온도조건에서 동토 중의 부동수분량이 결정된다. 부동수분량이 많은 흙은 비표면적이 큰 점토성분을 많이 함유하고 있는 흙이므로 이중 세 번째 요인인 흙 입자 표면의 흡착력장의 영향이 가장 중요하다.

2. 실험장비

TDR (Time Domain Reflectometry)은 검침기 (Probe)를 시료 속에 삽입한 후, 전자파를 발생시켜 전자파의 속도를 계산하여 흙의 유전율 (Dielectric Constant)을 측정한다. 흙을 구성하는 요소인 토립자, 얼음, 간극수, 공기 등의 서로 다른 유전율을 갖고 있기 때문에 이를 응용하여 동토의 부동수분(체적함수비)를 측정하는 장치이다.

본 시험에 사용한 TDR 시험기는 독일의 IMKO사 제품(Trime FM2)으로서 시험시 측정용 probe를 동토 속에 넣고, 시험기에서 전자파를 발생시키면 전자파가 probe의 길이를 따라 왕복하면서 그 속도를 자동적으로 계산하고 시험기는 이를 토대로 흙의 부동수분을 산출해 낸다.



그림 4.3.1 부동수분량 측정장비 TDR



그림 4.3.2 세 가지 종류의 Probe

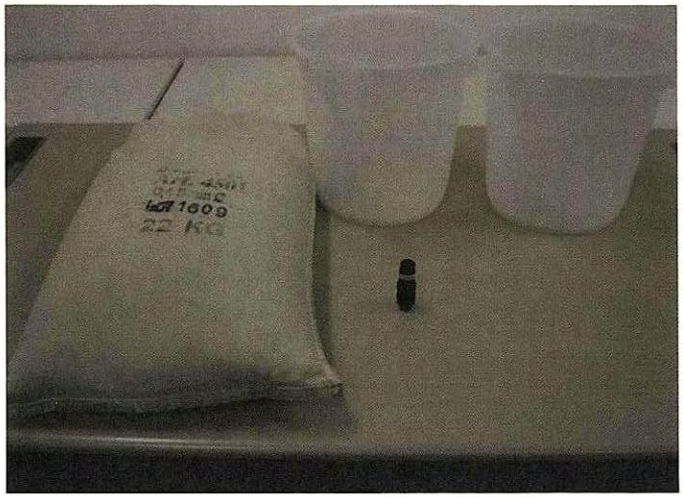


그림 4.3.3 Calibration Set

3. 실험방법

흙 시료를 직경 10cm, 높이 17.5cm되는 몰드에 채워 넣고 부동수분시험을 수행하였다. 주변의 열전도를 최소화하기 위해서 몰드 밑면과 측면에는 5cm두께의 단열재로 처리하였다. 공시체(Sample)의 밀도와 함수비는 열전도시험 시 공시체의 제작조건과 동일하게 하였다. 몰드용량에 따라 적당한 크기의 Probe를 사용할 수 있으며(그림 4.3.2 참조), 사용 전에는 주기적으로 calibration set을 이용하여 값을 보정하여 주었다(그림 4.3.3 참조).

먼저 TDR probe와 온도측정용 센서를 공시체 속에 삽입한 후 냉동챔버 속에 넣고, TDR probe 연결선과 온도측정용 센서를 냉동챔버 외부로 연결하여 시료 내부의 온도와 부동수분을 측정한다. 온도센서는 TDR probe와 최대한 근접한 거리에 삽입하였고, 온도센서는 가급적 공시체 내부 정중앙의 온도를 측정할 수 있도록 설치하였다(그림 4.3.5 참조).

공시체의 온도는 -0.1℃~-20℃까지 단계별로 변화시키면서 부동수분량을 측정하였다. 이 때 다음의 식을 이용하여 체적함수비로 측정되는 부동수분량을 일반적으로 사용하는 질량함수비로 변환하여 분석하였다.

체적함수비와 질량함수비의 관계

$$w_m = w_v \frac{\rho_w}{\rho_{tr}} \qquad (4.3.6)$$

여기서, w_m : 질량함수비($= \frac{m_w}{m_{tr}} \times 100$)

w_v : 체적함수비($= \frac{V_w}{V_{ges}} \times 100$)

m_w : 시료 속에 포함된 물의 질량

m_{tr} : 건조된 흙의 질량

V_w : 시료 속에 포함된 물의 체적

V_{ges} : 시료 전체의 체적

ρ_w : 물의 질량

ρ_{tr} : 건조단위질량($= \frac{m_{tr}}{V_{ges}}$)

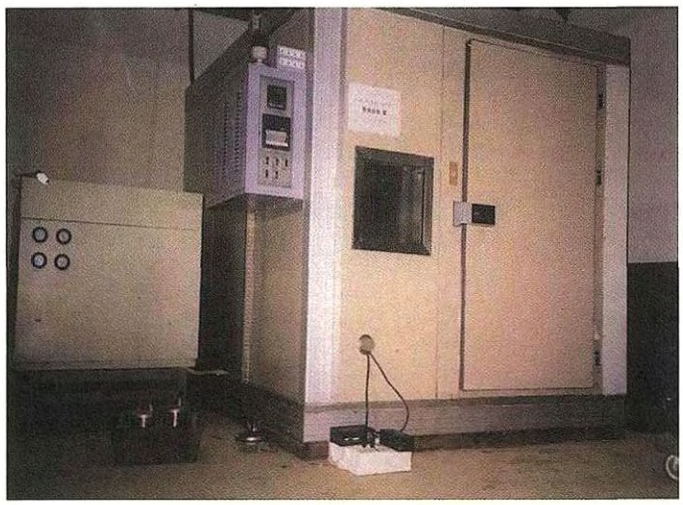


그림 4.3.4 부동수분실험을 수행한 냉동챔버

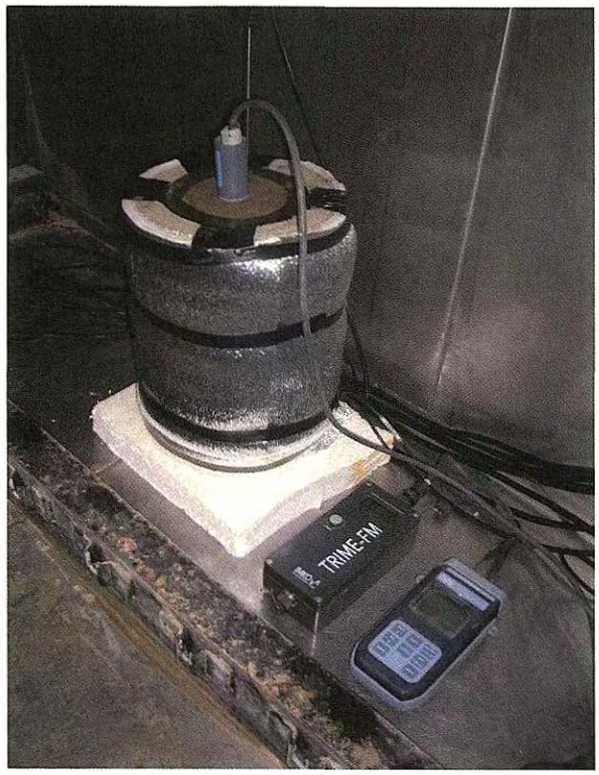


그림 4.3.5 공시체에 부동수분 및 온도측정 센서 삽입

4. 실험결과

그림 4.3.6은 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 부동수분 측정결과를 나타낸 그래프이다. 초기 온도(0℃~-5℃)에서 부동수분이 크게 감소하였다가 그 후의 온도에서는 부동수분의 감소가 상대적으로 작게 나타났다.

즉 -5℃로 떨어지는 초기온도에서 부동수분은 크게 감소하며 그 이후에는 완만하게 감소하는 경향을 나타내었다. 그 이유는 공극에 있던 자유수가 얼음으로 변화하는 양이 초기에 많기 때문에 그래프에서 감소폭이 크다.

그 후 온도가 하강하며, 그래프의 기울기는 완만해짐을 볼 수 있다. 그 이유는 공극에 있던 자유수가 거의 동결되고 흙 입자 사이의 전기적 성질에 의해 얼지 않는 부동수분만 존재하기 때문이다. 기울기가 완만해진 이후에도 조금씩 부동수분의 양이 감소함을 확인할 수 있었다.

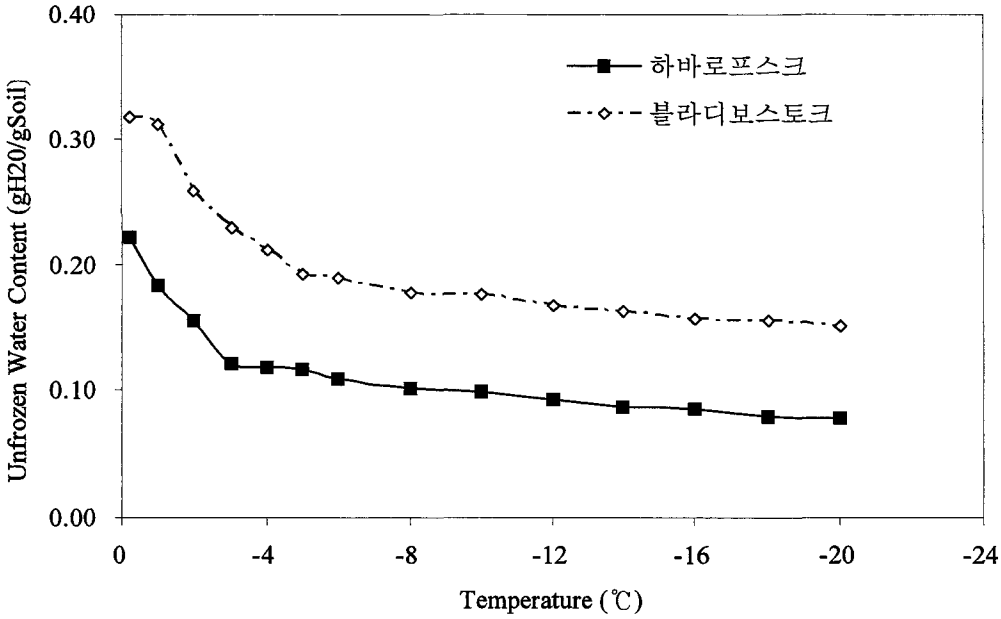


그림 4.3.6 온도변화에 따른 흙 시료의 부동수분 변화

입도분포시험을 통하여 0.075mm체 통과량을 기준으로 블라디보스토크(96.6%)가 하바로프스크(37.7%)보다 부동수분의 값이 크게 나타나며 이 결과는 앞에서 비교했던 열전도율의 순서와는 반대되는 결과이다.

즉, 흙 입자의 세립분이 부동수분과 열전도율에 큰 영향 인자임을 확인 할 수 있다. 세립분이 많은 점토일수록 부동수분 양이 높기 때문에 비열이 커서 열전도율이 낮아지고, 반대로 세립분이 소량인 모래에서는 비열이 큰 수분의 양이 적기 때문에 열전도율이 높다고 할 수 있다. 실트는 -20℃의 온도에서 처음 함수비의 50% 이상이 부동수인 상태로 남아 있었다. 이 같은 부동수분의 변화는 여러 문헌에서 비슷한 경향을 보인다(Romanovsky and Osterkamp, 2000; Watanabe and Mizoguchi, 2002).

하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 부동수분 변화값과 Anderson, Tice와 Mckim(1973)이 발표한 다른 시료의 부동수분의 변화를 비교해 보면 그림 4.3.7과 같으며, 그 결과들이 표 4.3.1에 표시된 식에 수렴됨을 알 수 있다.

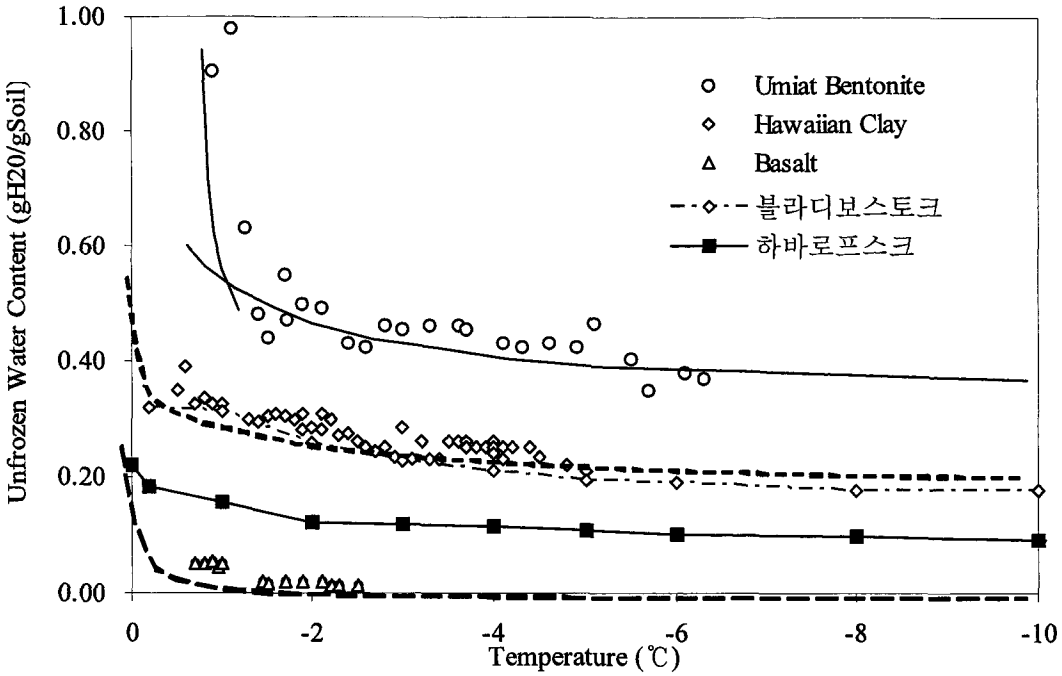


그림 4.3.7 여러 시료의 부동수분 곡선 비교

표 4.3.1 5가지 시료의 부동수분 수렴식

Soil	a	b	R^2	
Umiat Bentonite	67.55	-0.343	-	Anderson, Tice and McKim, 1973
Hawaiian Clay	32.42	-0.243	-	Anderson, Tice and McKim, 1973
Basalt	3.45	-1.130	-	Anderson and Tice, 1972

* Unfrozen Water content: Wu = a(-T)b

제 4 절 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 동결압축강도 특성

압축강도는 가장 중요한 역학적 특성 중에 하나이며, 동토지역에서 구조물 설계시 중요한 고려요소이다. 동토의 강도에 대한 연구는 이미 여러 학자들에 의해 연구된 바 있다. Ladanyi(1981) 같은 학자들은 동토의 압축강도에 관한 많은 연구해왔으며, 1984년과 1987년에는 Zhu Yuanlin과 David L. Crabee가 알래스카 Fairbank 지역에서 채취한 실트질 시료를 동결시켜 온도 변화에 따른 일축압축시험을 통해 동토의 응력-변위특성 및 creep 거동을 분석한 바 있다. 본 시험은 두 가지 시료에 대하여 온도변화에 따른 일축압축강도 실험과 다양한 함수비에서의 일축압축강도 실험을 실시하여 강도특성을 분석하였다.

1. 시험 장치 및 방법

시험에 사용한 장비는 한국 선길사 제품으로 일반 일축압축장비와 동일하다. 상재하중을 가하는 본체부와 재하속도 및 기계의 작동 및 정지를 조정하는 조절장치, 시험 도중 측정된 시료의 응력-변형을 기록, 저장하는 자료수집 장치로 구성된다. 본 장비는 하중 제어 및 변형률 제어가 가능하며, 최대 2,000kN의 하중까지 측정이 가능하며 매초 변위와 하중 값을 자동으로 수집하여 저장 할 수 있다. 시료의 크기는 높이100mm, 지름 50mm이며, 다짐시험에서 얻어진 최적함수비 및 최대건조단위중량으로 다져서 성형하였다.

온도를 극지 환경과 최대한 유사하고, 시료제작과 운반에 따른 오차를 최소한으로 줄이기 위해 시험기 자체를 극지 환경 냉동 챔버 안에 넣어서 실험하였다. 제작 완료된 공시체는 각각 -20℃, -15℃, -10℃, -5℃, -2℃, 20℃ 상태의 냉동챔버 속에서 48시간 동안 동결시켰다. 공시체 내부에 온도센서를 설치하여 공시체의 표면온도와 내부온도의 차이가 없는지를 확인한 후 시험을 실시하였다. 압축강도시험은 분당 1mm의 변형속도로 압축을 하였으며, 공시체가 파괴되거나 15% 변형에 도달하면 압축을 종료하였다.

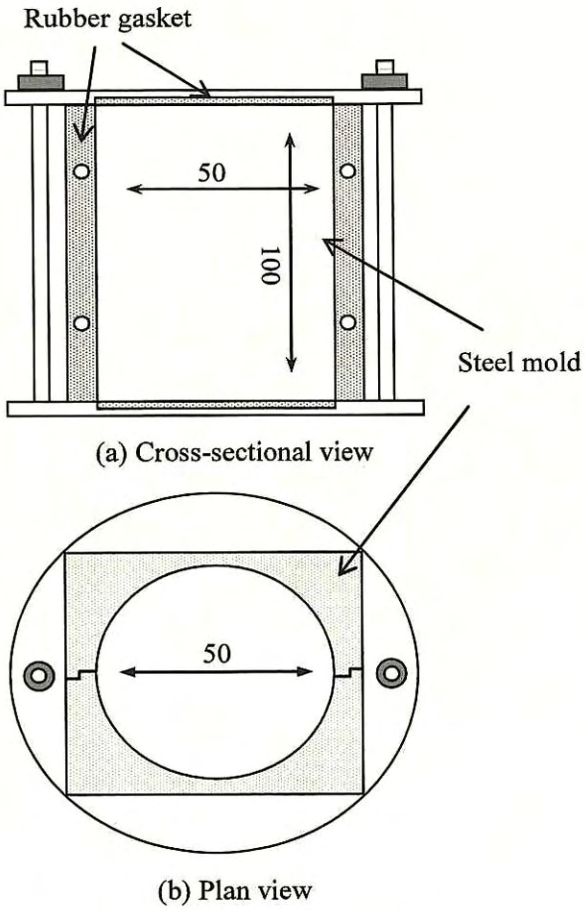


그림 4.4.1. 압축강토 실험을 시료성형 몰드 단면

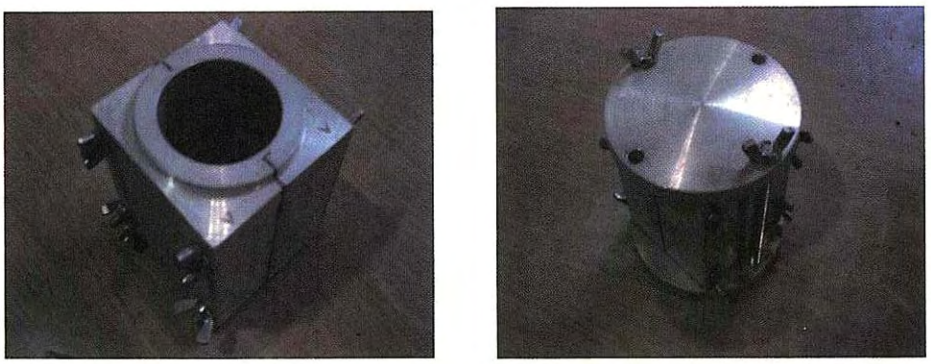


그림 4.4.2 압축강토 실험을 시료성형 몰드



그림 4.4.3 하중재하봉과 로드셀



그림 4.4.4 하중재하 조절장치 및 데이터 수집 장치

2. 온도변화에 따른 압축강도 실험결과

본 시험에서는 -20℃, -15℃, -10℃, -5℃, -2℃, 20℃ 상태에서 실험을 수행하였다. -10℃에서의 응력-변형률 곡선은 그림 4.4.5에 나타내었다. 온도에 따른 각 시료의 압축강도와 Young's modulus는 표 4.4.1에 정리하였다.

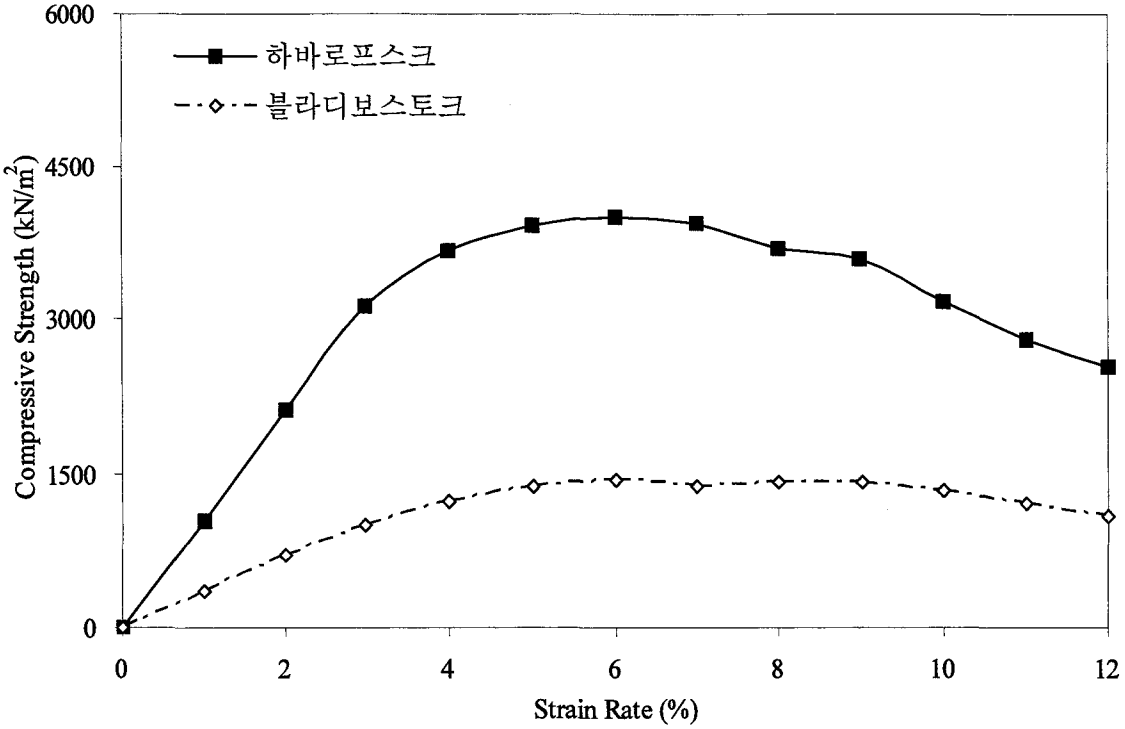


그림 4.4.5 -10℃에서 압축응력-변형률 곡선

표 4.4.1 압축강도 실험 결과

	하바로프스크		블라디보스토크	
온도(℃)	압축강도 (kN/m2)	Young's modulus (x103 kN/m2)	압축강도 (kN/m2)	Young's modulus (x103 kN/m2)
-20	6575	250.49	3476	108.44
-15	5581	177.14	1998	61.79
-10	3996	110.55	1423	34.11
-5	2455	106.55	799	14.80
-2	1553	80.54	349	7.83
+20	305	60.92	84	3.60

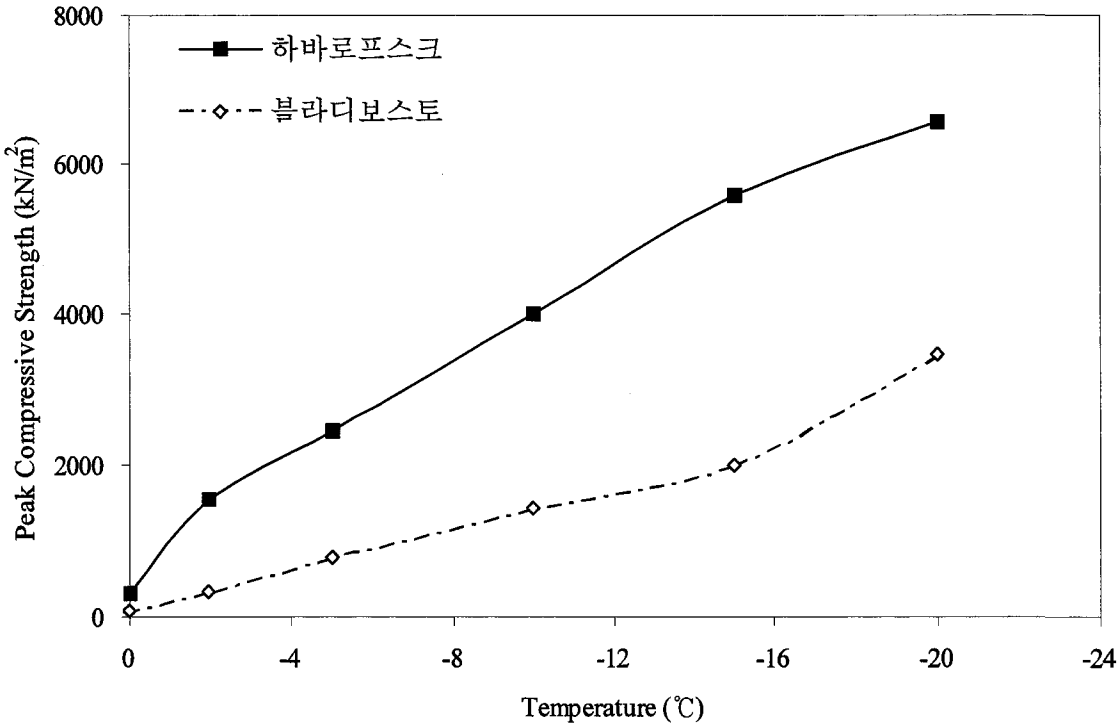


그림 4.4.6 온도변화에 따른 최대압축응력의 변화

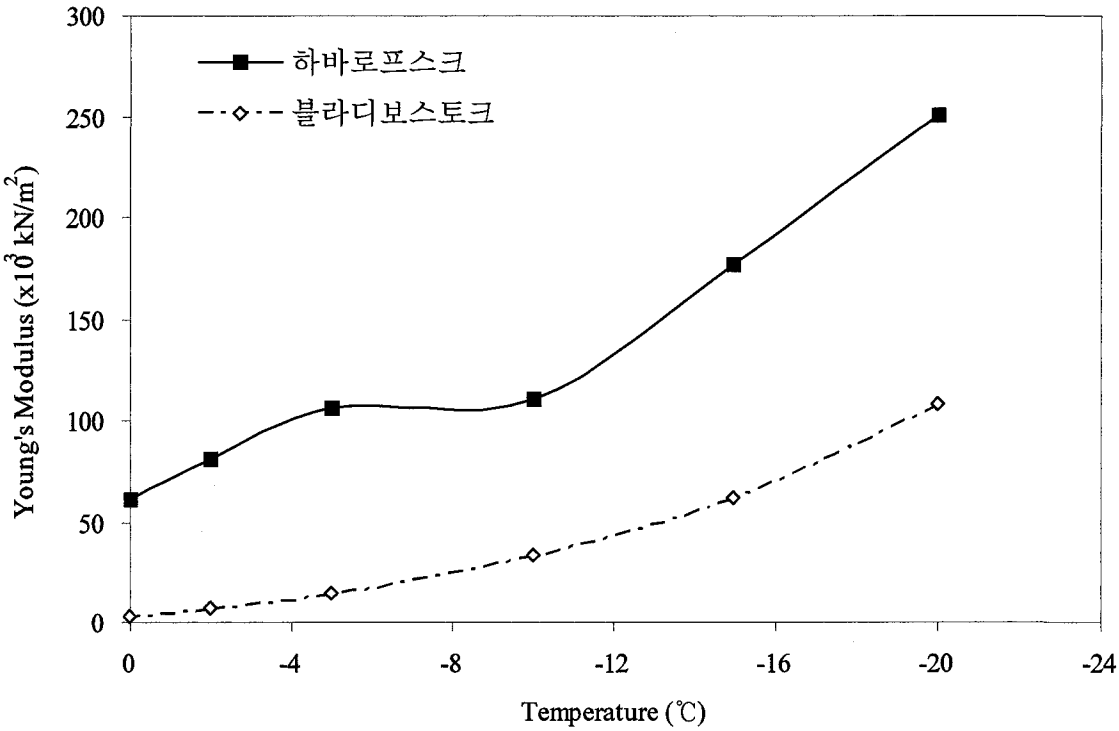


그림 4.4.7 온도변화에 따른 Young's modulus 변화

그림 4.4.6은 온도의 변화에 따른 시료의 압축강도 변화 그래프를 나타낸 것이다. 온도가 하강함에 따라 압축강도가 증가하는 것을 알 수 있다. 온도의 하강에 대한 Young's modulus의 변화를 그림 4.4.7에 나타내었다. 압축강도에 따른 Young's modulus의 변화는 온도의 감소에 따른 압축강도의 증가와 비슷한 경향을 나타낸다.

온도가 하강함에 따라 동토의 강도가 증가하며, 그 이유는 얼음의 강도증가, 토립자와 얼음사이의 부착력증가로 설명할 수 있다.

동토의 강도는 -10℃보다 -20℃에서 60~140% 증가한다. 이는 본 실험에서 실제 측정한 얼음의 강도증가율 20%보다 높은 수치이다. 그 이유는 공극에 있는 얼음의 강도증가 뿐만 아니라 얼음과 흙 입자 사이의 부착력 증가 때문이라 추론된다.

하바로프스크가 블라디보스토크보다 강도가 큰 이유는 크게 두 가지이다. 첫째는 부동수분의 양이 적기 때문이다. 흙 입자 사이사이에 수분의 양이 적을수록 입자사이의 마찰력이 증가한다. 두 번째 이유는 하바로프스크 공시체의 입자크기가 크기 때문이다. 입자의 크기가 클수록 단면적에서 흙 입자가 차지하는 비율이 높아지기 때문에 하바로프스크가 블라디보스토크 시료보다 강도가 크다.

제 5 절 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 동결인장강도 특성

1. 시험 방법

인장강도 시험장비는 압축강도 시험 장비를 사용하되, 그림 4.5.1에서 보여 주는 바와 같이 흙의 공시체를 아령 모양으로 만들어 상하로 직접 잡아 당겨 파괴하는 직접인장강도 시험법을 택하였다. 지금까지 많은 연구자들이 동토의 인장강도시험 시 암석이나 콘크리트의 쪼갬 인장강도 시험법을 택하였지만 동토의 경우 선하중이나 점하중 재하 시 공시체가 관입 파괴될 가능성이 높고, 측정값의 신뢰도가 낮아질 것을 우려하여 본 시험에서는 직접인장강도 시험을 택하였다.

인장강도 시험용 공시체 제작시도 압축강도 시험용 공시체 제작 시와 마찬가지로 수분의 증발이나 누수에 의한 함수비 변화를 최소화하기 위하여 알루미늄 몰드 사이에 지수용 고무킷을 삽입하였다(그림 4.5.2 참조). 또한 공시체가 최대단위중량을 갖도록 최적함수비의 시료를 준비한 후, 몰드를 제작하였다. 소형다짐기를 사용하여 모든 시료가 동일한 다짐도를 갖도록 성형한 후 무게를 확인하고 냉동챔버에 넣기 전에 상부와 하부의 동상에 의한 팽창압을 방지하기 위하여 고정 볼트로 정밀하게 밀착시켰다.

제작 완료된 공시체는 각각 -2℃, -5 ℃, -10℃, -15℃, -20℃ 상태의 냉동챔버 속에서 48시간 동안 동결시켰다. 공시체 내부에 온도센서를 설치하여 공시체의 표면온도와 내부온도의 차이가 없는지를 확인한 후 시험을 실시하였다.

인장강도시험도 압축강도시험과 동일하게 분당 1mm의 변형속도로 인장을 하였으며, 공시체가 파괴되거나 10% 변형에 도달하면 인장을 종료하였다.

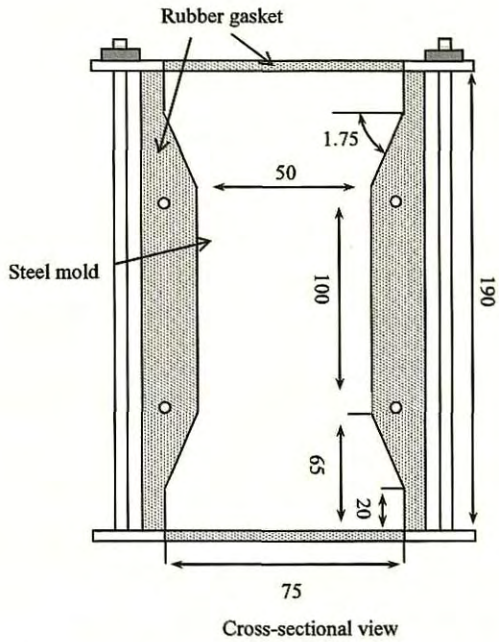
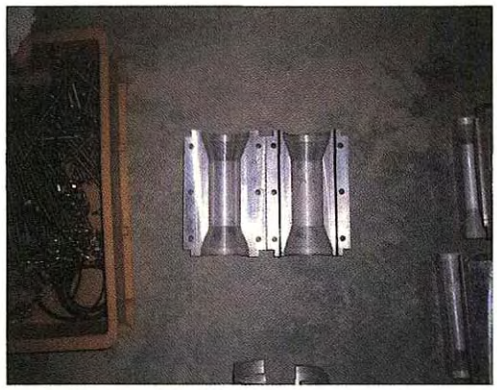


그림 4.5.1 인장강도시험용 몰드 및 공시체의 치수



(a) 인장 몰드 준비



(b) 몰드 조립



(c) 최적함수비의 시료준비

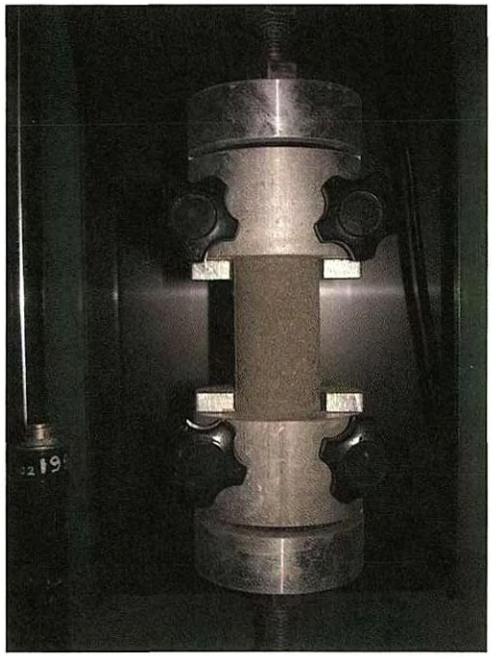


(d) 다짐 작업

그림 4.5.2 인장강도 시험용 시료 준비



(a) 인장강도 시험기



(b) 인장강도용 공시체 삽입 모습



(c) 인장강도 공시체의 파괴된 모습

그림 4.5.3 인장강도 시험기 및 인장시험 방법

2. 온도변화에 따른 인장강도 실험결과

그림 4.5.4에서는 -10℃에서의 인장강도를 보여 주고 있다. 온도에 따른 각 시료의 인장강도와 Young's modulus는 표 4.5.1에 정리하였다.

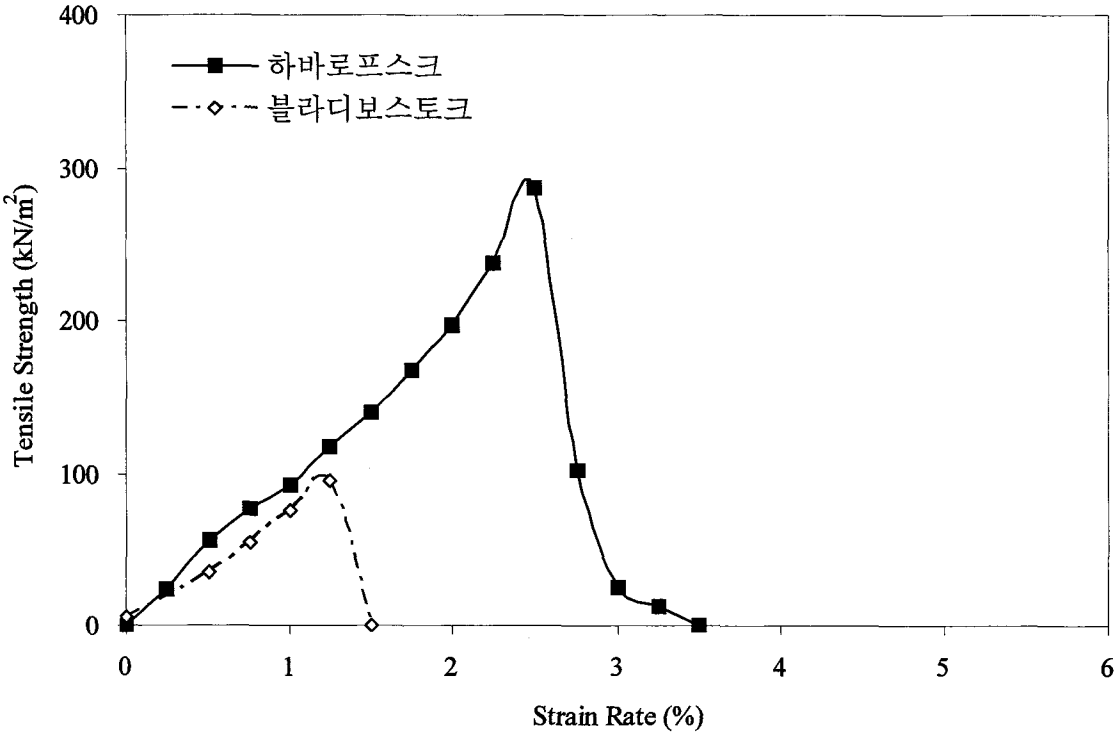


그림 4.5.4 -10℃에서의 인장응력-변형률 곡선

표 4.5.1 인장강도 실험결과

	하바로프스크		블라디보스토크	
온도 (℃)	인장강도 (kN/m2)	Young's modulus ($x10^3$ kN/m^2)	인장강도 (kN/m2)	Young's modulus ($x10^3$ kN/m^2)
-20	1733	21.48	325	4.34
-15	819	14.61	132	4.87
-10	287	9.35	95	4.48
-5	177	6.97	75	3.18
-2	92	6.08	15	1.19

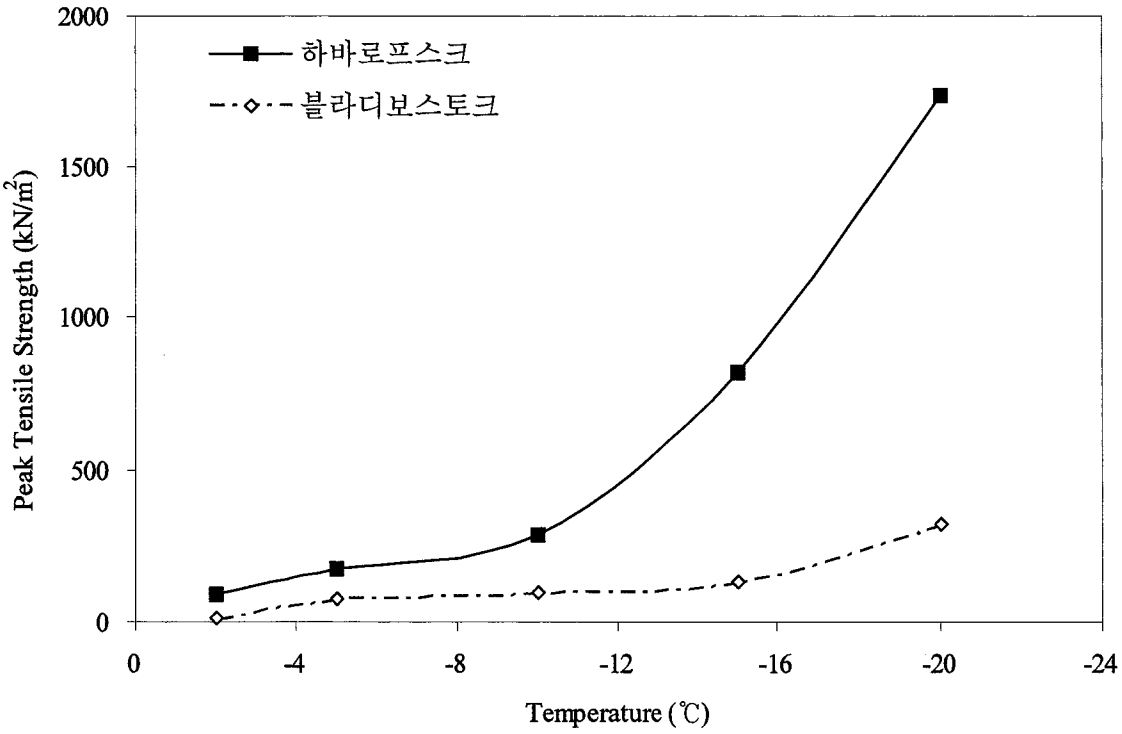


그림 4.5.5 온도변화에 따른 최대인장응력의 변화

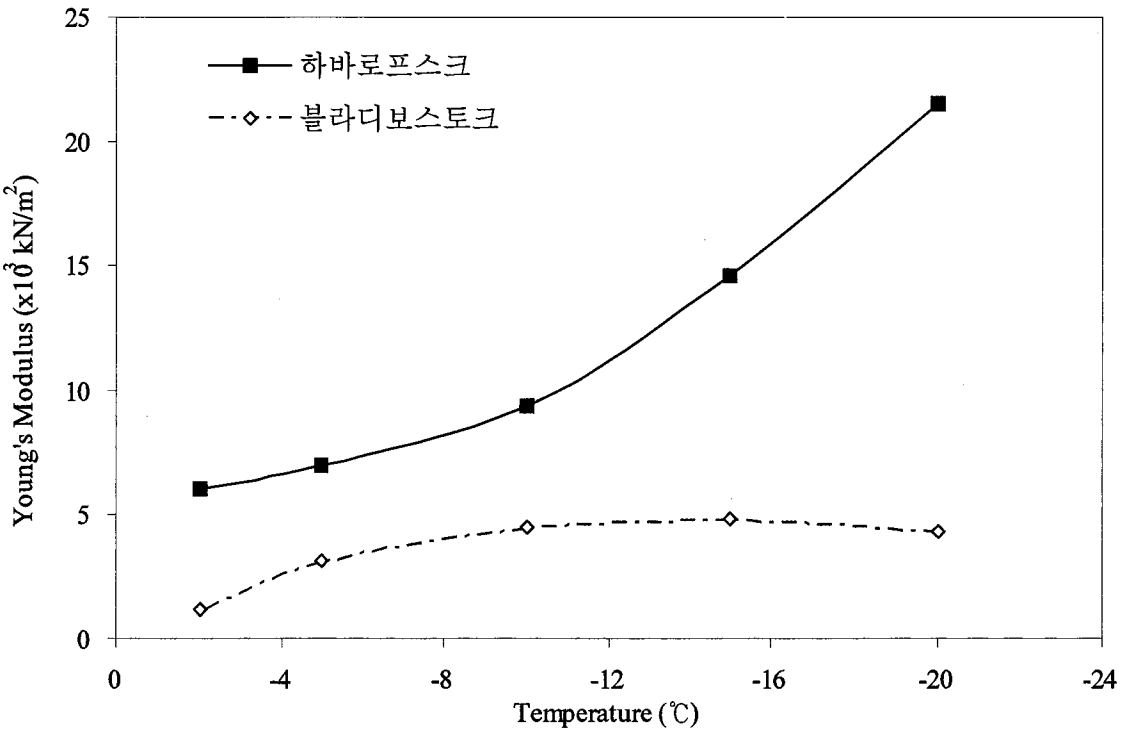


그림 4.5.6 온도변화에 따른 Young's modulus 변화

그림 4.5.5는 온도의 변화에 따른 시료의 압축강도 변화 그래프를 나타낸 것이다. 온도가 하강함에 따라 인장강도가 증가하는 것을 알 수 있다. 온도의 하강에 대한 Young's modulus의 변화를 그림 4.5.6에 나타내었다. 인장강도에 따른 Young's modulus의 변화는 온도의 감소에 따른 인장강도의 증가와 비슷한 경향을 나타낸다.

온도의 변화에 따른 인장강도의 변화는 압축강도시험에서와 같은 경향을 보이는데 즉, 온도가 낮아질수록 토립자와 간극수가 강하게 밀착하여 인장강도가 크게 나타났다. 하바로프스크에서는 온도저하에 따라 인장강도가 증가하는 비율은 온도저하에 따라 압축강도가 증가하는 비율보다 약간 더 큰 기울기를 보이며 증가하였다.

3. 압축강도와 인장강도의 비교

그림 4.5.7, 그림 4.5.8에 온도변화에 따른 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 압축강도 및 인장강도를 나타내었다.

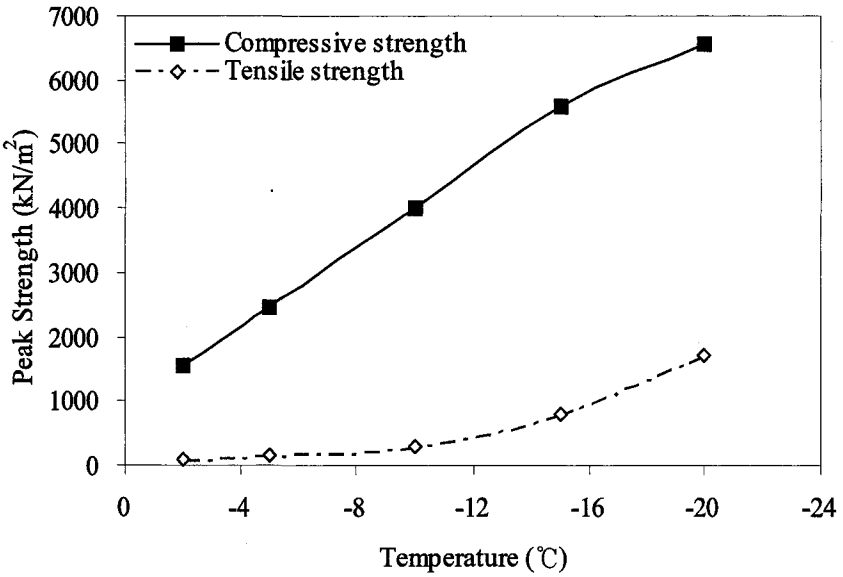


그림 4.5.7 온도변화에 따른 하바로프스크의 압축 및 인장강도

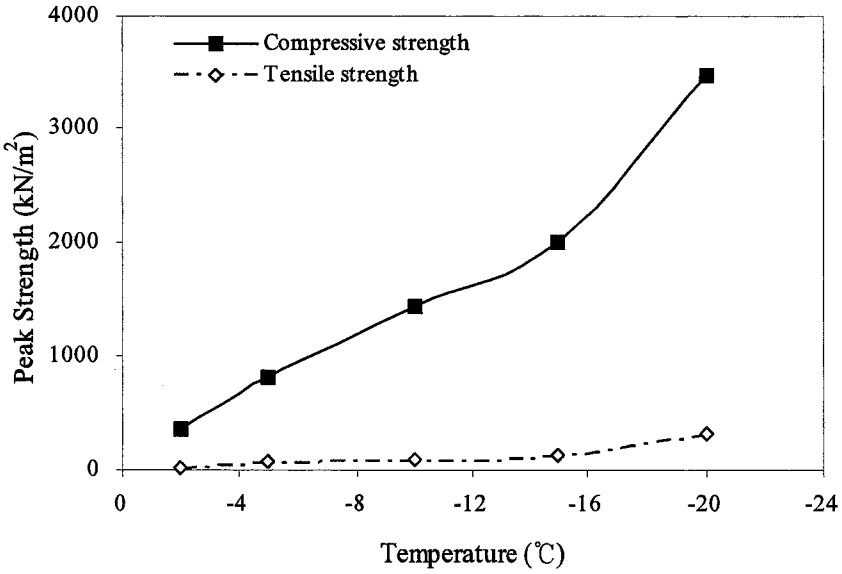


그림 4.5.8 온도변화에 따른 블라디보스토크의 압축 및 인장강도

하바로프스크에서 압축강도/인장강도의 비율을 비교해 보면 -5℃에서는 압축강도가 인장강도보다 약 14배 정도 컸고, -10℃에서는 약 9배 , -15℃에서는 약 7배, 그리고 -20℃에서는 약 4배 큰 값을 보였다. 초기 온도에서 압축강도/인장강도의 비율이 더 크게 나타난 것은 초기 온도에서 인장강도가 상대적으로 매우 작게 나타났기 때문이다. 본 시험의 범위에서 압축강도는 인장강도보다 4~14배 큰 값을 보였다.

제 6 절 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 동결 전단강도 특성

1. 실험장치 및 방법

흙 지반은 보통의 고체재료와 같이 인장이나 전단에 의하여 파괴된다. 그런데 지반의 인장저항력은 무시할 수 있을 만큼 작으므로, 지반은 인장저항력이 없다고 간주해도 무방하다. 따라서 지반에서는 대개 전단저항력만이 문제가 되며 흙이 최대로 발휘할 수 있는 전단저항력을 전단강도(shear strength)라고 한다.

일반적으로 직접전단시험은 배수조절을 하지 않고 간극수압이나 부피변화의 측정이 없으므로 시험의 속도가 빠를 뿐 아니라, 시험절차가 간단하여 강도정수만을 목적으로 할 경우 실용적으로 많이 활용되는 시험이다. 즉, 직접전단시험을 통하여 시료가 전단파괴되는 최대 수평력을 시료의 단면적으로 나눈 최대전단응력과 수직하중을 단면적으로 나눈 수직응력을 얻는데 이들을 좌표로 하는 Mohr의 파괴포락선에서 시료의 강도정수인 내부 마찰각과 점착력을 구할 수 있다. 그러나 직접전단시험은 전단강도정수(내부 마찰각과 점착력)들을 결정하는데 가장 널리 사용되지만, 다음과 같은 단점을 가지고 있다. 첫째, 흙 시료는 가장 약한 평면이 아닌 미리 정해진 평면(수평면)을 따라 전단되도록 하중을 받는다. 둘째, 전단면에서는 응력이 불균등하게 분포한다. 즉, 전단면의 중심에서보다 가장자리에서 응력이 더 크게 나타난다. 이러한 형태의 응력 분포는 점진적인 파괴를 초래한다.

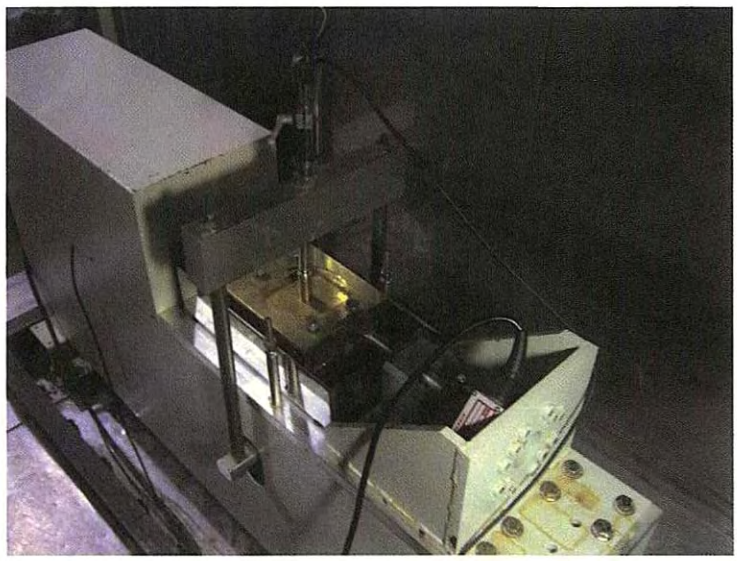


그림 4.6.1 직접전단 시험기

공시체 제작 방법은 공시체가 최대단위중량을 갖도록 최적함수비의 시료를 준비한 후, 원형전단박스(78.54cm^2)에 소형다짐기를 사용하여 모든 시료가 동일한 다짐도를 갖도록 하였다. 전단강도 시험을 실시하는 시료의 두께는 40mm이다. 그림 4.6.1에 직접전단시험기의 사진을 나타내었다. 직접전단시험은 +20, -2, -5, -10℃에서 실행하였다. 대형 냉동챔버 속에서 48시간 동안 온도를 일정하게 유지한 후 실험을 실시하였다. 수직응력은 3가지 표준응력 31.8kN/㎡, 63.7kN/㎡, 127.3kN/㎡을 가한 다음 전단시험을 시행하였다.

2. 직접전단실험 결과

전단시험 결과와 조건이 표 4.6.1에 요약되어 있다. 그림 4.6.2는 -10℃에서 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙에 관한 대표적 전단 수평응력-수평변위곡선을 보여준다. 그림 4.6.3은 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙에 대한 온도와 최대전단강도의 관계를 보여주고 있다. 그림 4.6.4는 -10℃에서 표준응력과 전단강도를 비교하여 보여준다. 테스트 결과 부동, 동결된 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 전단강도는 압축강도와 유사한 점을 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 이류는 얼음의 형성과 흙 입자들의 얼음결합으로 인해 접착력이 증가하고 그로인한 전단강도의 증가로 판단된다. 더 나아가, -2℃에서 -10℃로 온도가 내려갈수록 전단강도가 계속적으로 증가하였다. 표준응력 증가 후, 동결된 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙 그리고 동결되지 않은 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 전단강도가 조금 증가하였다. 약간의 변화에도 불구하고, 동결된 두 시료가 온도감소와 함께 마찰각이 감소하는 경향을 보인다.

표 4.6.1 온도에 따른 직접전단시험 결과

T (℃)	Normal stress (kN/m^2)	하바로프스크			블라디보스토크		
		Strength (kN/m^2)	Cohesion (kN/m^2)	Friction (°)	Strength (kN/m^2)	Cohesion (kN/m^2)	Friction (°)
20	31.25	40	23	31	35	23	25.3
20	61.5	63			57		
20	125	97			81		
-2	31.25	722	708	26	338	323	24.2
-2	61.5	741			351		
-2	125	769			380		
-5	31.25	1282	1269	26	685	670	26.1
-5	61.5	1301			701		
-5	125	1328			731		
-10	31.25	2193	2188	26	1215	1205	22.2
-10	61.5	2232			1236		
-10	125	2243			1255		

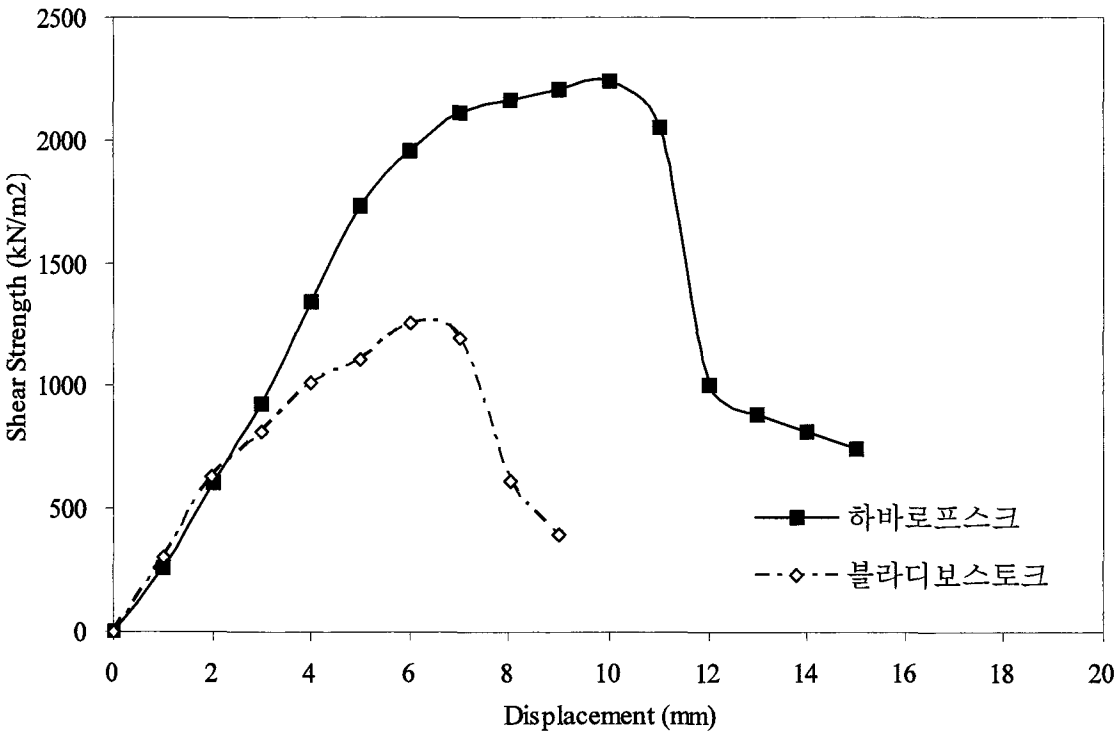


그림 4.6.2 -10℃에서 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 전단응력-수평변위 곡선

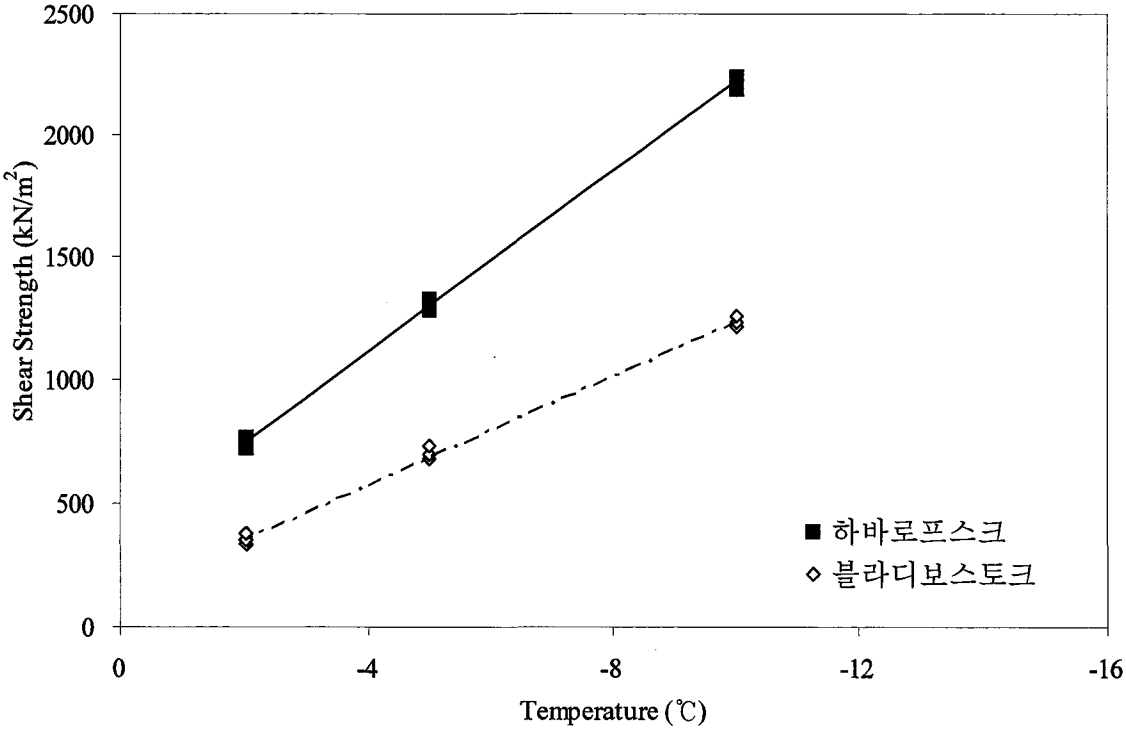


그림 4.6.3 온도변화에 따른 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 전단강도

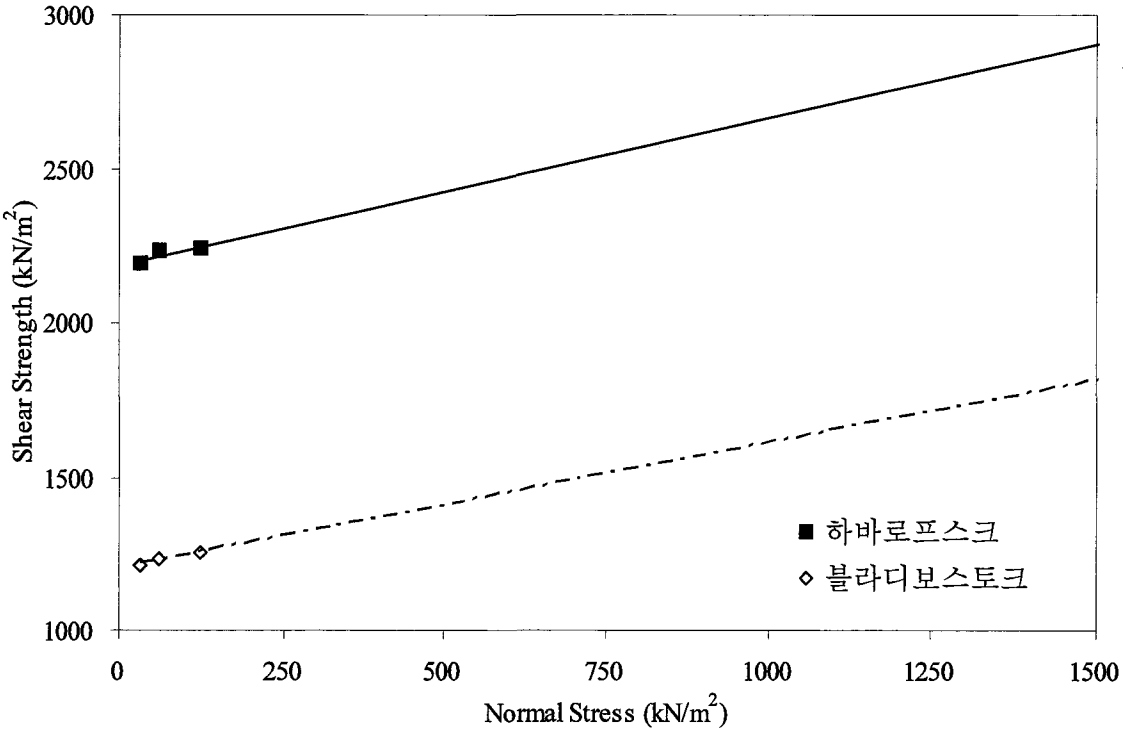


그림 4.6.4 -10℃에서 수직응력에 따른 전단강도

제 7 절 하바로프스크 및 블라디보스토크 흙의 동결 비파괴 특성

비파괴검사는 금속 및 비금속등 검사하고자 하는 시험체에 손상 및 파괴시키지 않고 시험체의 성질, 상태, 내부결함 등 물리적 현상을 알아내는 검사방법으로 시험체에 물리적 에너지(빛, 방사선, 초음파, 전기, 자기)등을 가해서 그 에너지변화를 읽어 측정한다.

비파괴검사에는 방사선투과시험, 초음파탐상시험, 자분탐상시험, 액체투과탐상시험, 와전류시험, AE시험 등이 있다. 이 중 이번 실험에 사용한 흙의 동결 비파괴특성을 분석하기 위해 초음파탐상시험을 수행하였다.

1. 초음파의 특징

1.1 초음파의 진행특성

귀로 듣는 통상의 음파와 마찬가지로 초음파의 경우에도 음이 진행하는 물질 중에 있어서 기계적 진동이 있는 것은 같다. 그러나 음파는 음원으로부터 사방팔방 어느 쪽으로도 진행하는데 대해, 초음파는 주파수가 높기 때문에 자동차의 헤드라이트와 같이 윤곽이 명확한 음속(초음파빔)이 되어 직진한다. 송진자로부터 발진된 초음파빔은 어느 거리까지는 거의 확산되지 않는데, 이 범위를 근거리 음장(近距離音場, near zone)이라고 한다. 또 이보다 먼 범위에서는 일정하게 확산되며, 이를 원거리음장(遠距離音場, far zone)이라고 한다. 이와 같이 확산되기 때문에 거리가 멀어짐에 따라 초음파가 약해진다.

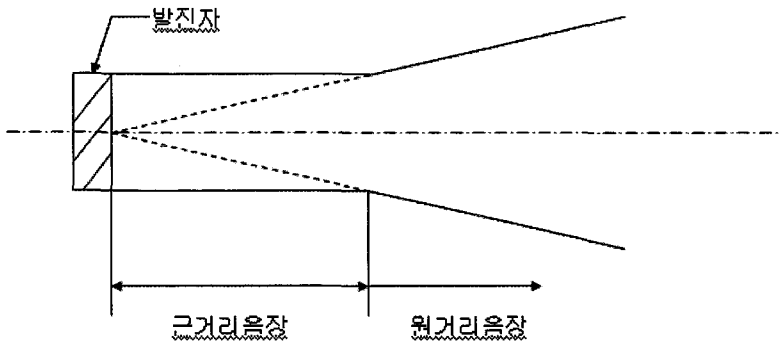
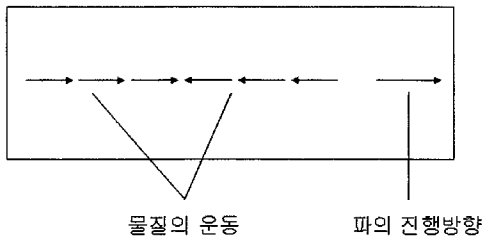
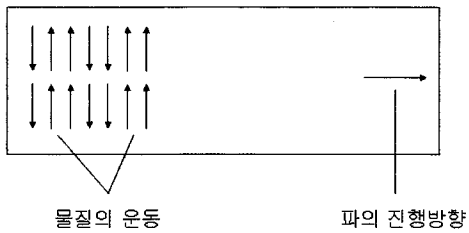


그림 4.7.1 근거리음장과 원거리음장

1.2 초음파의 종류와 음속 및 파장

초음파에는 종파(縱波, longitudinal wave), 횡파(橫波, transverse wave) 등의 파형이 있다. 물 등의 액체나 공기와 같은 기체에는 횡파는 존재하지 않고, 종파만이 진행하며 금속재료 등의 고체 중에는 종파와 횡파가 진행한다.

표 4.7.1 초음파의 종류

종류	진동양식	비고
종파	진동방향이 진행방향에 평행  	액제 중에서는 종파만 존재한다
횡파	진동방향이 진행방향에 수직  	고체중에만 존재하고 진행속도는 종파의 약 1/2

2. 초음파 속도측정방법

2.1 Pulse-Echo-Overlap 방법

Pulse-Echo-Overlap(PEO) 방법은 매우 다용도적이고 초음파 속도측정에 있어서 높은 정확성을 가지고 있다. 절대치 측정에 대한 정확성은 한 에코의 주기에서 다음 에코의 일치하는 주기까지 얼마나 정확하게 측정할 수 있는가 하는 사실에 달려있고 빔 분산에 대한 적절한 보정을 할 수 있기 때문에 대부분의 다른 방법보다 월등한 정확성을 가지고 있다. 또한 다음과 같은 장

점을 갖고 있다.

(1) 시편과 탐촉자를 직접적으로 결함 또는 buffer rod를 사용하여 측정할 수 있다.
(2) 광대역 펄스를 사용할 수 있기 때문에 명확한 에코에 대해 적절한 중첩을 시킬 수 있다.
(3) 투과법을 적용할 수 있다.
(4) 군속도와 위상속도를 측정할 수 있는 방법이다.

단점은 에코의 중첩을 직접 조작하여야 하기 때문에 자동화가 불가능하다는 점이다.

2.2 Pulse Superposition 방법

Pulse Superposition(PS) 방법도 속도측정방법으로 뛰어난 정확성을 갖고 있다. 단지 PEO방법과 같이 buffer rod나 광대역 펄스에서는 사용될 수 없는 단점을 갖고 있다. 그러나 피드백 기능으로 자동화가 가능하며 절대값 측정에 대한 정확성은 한 신호의 주기로부터 일치하는 다음 신호의 주기까지 정확하게 측정할 수 있다는 사실에 있다.

2.3 Sing-Around 방법

Sing_Around 시스템은 자동화된 초음파 속도측정방법으로 매우 높은 정확성과 함께 초음파 속도의 변화를 감시할 수 있다.

이 방법은 절대값을 측정하기 위한 이상적인 방법이지만 시료의 형상이 다른 방법에 적용될 수 있다면 상대적인 측정방법으로도 매우 유용하다. 측정은 두개의 탐촉자를 이용한 투과법(through-transmission)을 사용하여야 한다.

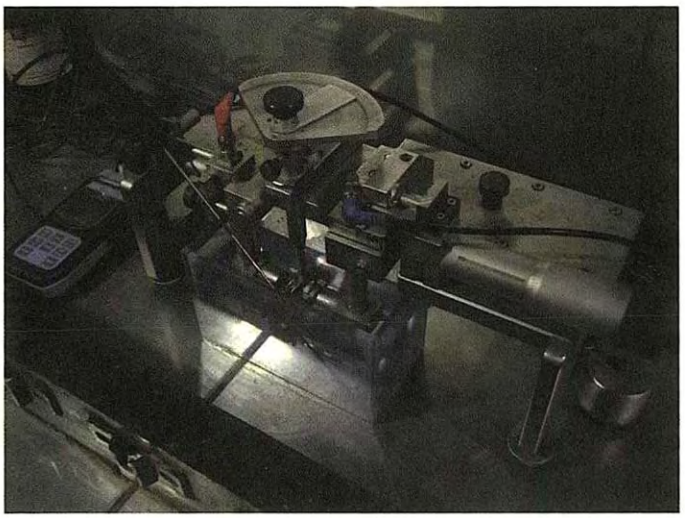
2.4 Phase Adjustment 방법

천천히 변하는 rf 주파수를 면화시켜서 초음파의 속도를 측정할 수 있는 방법이다. 중요한 것은 rf 주파수의 변화로 탐촉자가 초음파의 반사에 포함되어져 있거나 공명 없이 구동되었을 때, 그리고 가변주파수(variable-frequency)의 사용에서는 위상보정이 따라야 한다는 것이다. 특기할만한 장점은 rf 주파수를 직접적으로 카운트할 수 있다는 것이다.

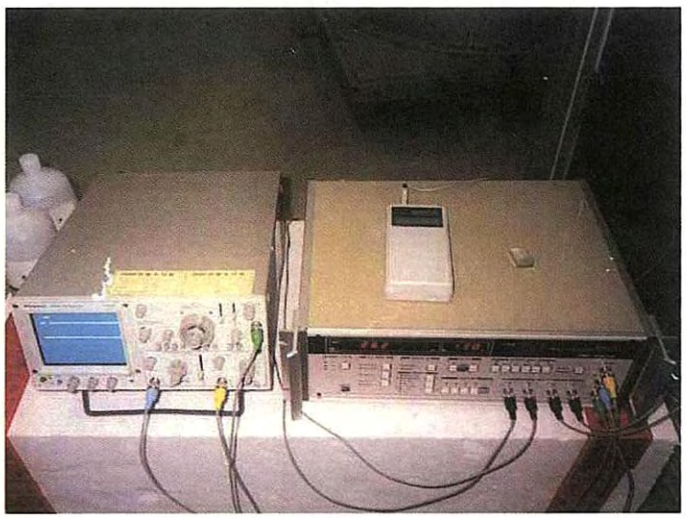
3. 시험방법

3.1 측정장비

본 시험에서 사용된 측정 장비는 일본 초음파공업(주)에서 생산된 제품으로 초음파 발생장치인 Sing Around Unit은 액체가 담긴 box에 측정할 시료를 넣는 AC-M2형 cell, 수신 파형을 모니터 하는 oscilloscope, 초음파의 주기를 읽을 수 있는 time counter로 구성되어 있다(그림 4.7.2).



(a) Sing Around unit와 AC-M2형 cell



(b) Oscilloscope와 Time Counter

그림 4.7.2 초음파 측정장비

이 장비는 -50℃~80℃까지 사용이 가능하며 발신 주파수는 2 MHz를 표준으로 한다. 초음파 발생장치의 송·수신자 사이의 최대이동거리는 50 mm이고 최소 5/1000 mm까지의 이동거리를 측정할 수 있다. 시료를 설치하는 샘플홀더 (Sample Holder)는 송·수신자측을 기준으로 ±60° 평면방향으로 회전이 가능하고, 최소 1/10°의 회전각을 측정할 수 있다. 초음파속도 측정 시 cell 속에는 등유(Kerosene)를 채운다.

3.2 측정원리

Sing Around 시험의 측정계통도는 그림 4.7.3과 같다.

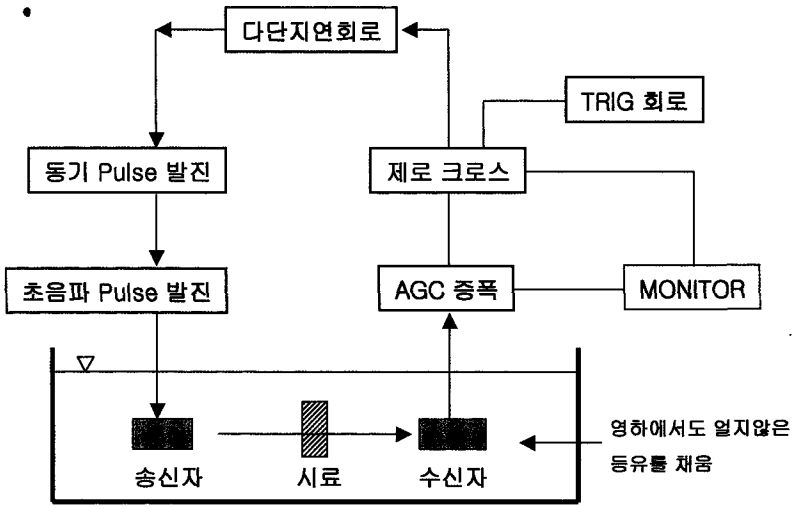


그림 4.7.3 초음파 시험장비의 측정 계통도

즉, 송진자로부터 발진된 초음파 펄스 (Pulse)가 시료 → 수신자 → AGC (Automatic Gain Control) 증폭 → 제로 cross 시간검출 → 다단지연회로 → 동기 펄스 발진을 경유하여 다시 송진자로 되돌아 온 후 동일 폐회로를 반복하여 발진한다. 이러한 일련의 과정을 Sing Around라고 한다.

3.3 측정방법

초음파 속도 측정의 기본 원리는 식 4.7.1과 같다.

$$C=\frac{L}{T} \tag{4.7.1}$$

여기서 C : 초음파 속도

L : 송신자와 수진자의 거리(시료에 송신자와 수신자를 직접 밀착시키는 측정법에서는 시료의 길이)

T : Sing Around 주기

3.3.1 액체의 초음파 측정

그림 4.7.4와 같이 cell 속에 등유 (Kerosene)을 넣고 이 cell을 정밀하게 온도조절이 가능한 상자 속에 넣는다. 해당온도에서 송신자와 수신자 사이의 거리가 L_1일 때 Sing Around의 주기 T_1을 읽는다. 그런 다음 거리를 L_2로 변화시키고 그 때의 주기 T_2를 읽는다. L_1 및 L_2의 거리조정은 정확성을 기하기 위해 두께 40mm의 철제 블록 게이지(block gauge)를 사용한다. 이 블록 게이지를 삽입할 경우 L1 - L2는 정확이 40mm를 유지하게 된다. 해당 온도에서의 액체시료 (Kerosene)의 초음파 속도 V_0는 식 4.7.2와 같이 계산된다.

$$V_0=\frac{L_1-L_2}{T_1-T_2}=\frac{\Delta L}{T_1-T_2} \tag{4.7.2}$$

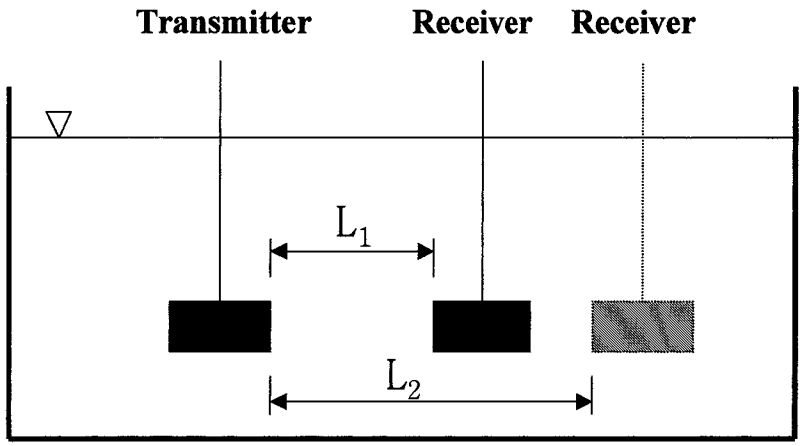


그림 4.7.4 액체시료의 초음파 측정

3.3.2 시료의 종파 측정

cell을 역시 정밀하게 온도조절이 가능한 상자 속에 넣고 그림 4.7.5에서 cell 속에 시료가 없는 액체 상태의 주기 T_1을 읽는다. 그런 다음 그림 4.7.5의 cell 속의 액체에 시료를 넣었을 때의 주기 T_2를 측정한다. 이때 액체의 초음파 속도 V_0는 식 4.7.2의 방법으로 구한다.

해당온도에서 시료의 종파속도 V_ℓ는 다음의 식 4.7.3으로부터 구할 수 있다.

$$V_\ell = \frac{1}{\frac{1}{V_0} - \frac{T_1 - T_2}{L}} = \frac{L}{\frac{L}{V_0} - (T_1 - T_2)} \tag{4.7.3}$$

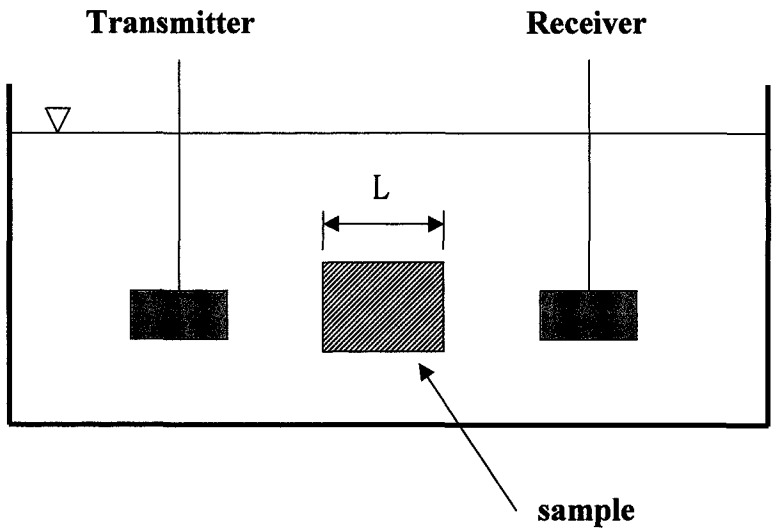


그림 4.7.5 고체시료의 초음파 측정

3.3.3 시료의 횡파 측정

cell을 온도 조절이 가능한 상자 속에 넣고 우선 해당 온도에서 액체만의 주기 T_1을 읽는다. 그런 다음 그림 4.7.6과 같이 두께 L인 원형 시료를 넣고 오실로스코프 상에 나타난 파의 모습이 선명해질 때까지 각도 Θ만큼 회전시킨 후, 주기 T_2를 읽는다. 이때 Snell의 법칙에 의해 식 4.7.4와 같은 관계식이 성립한다.

$$\frac{\sin\Theta}{\sin\phi} = \frac{V_0}{V_s} \tag{4.7.4}$$

여기서 V_0 : 액체의 초음파 속도 (m/sec)

V_s : 시료의 횡파속도 (m/sec)

Θ : 파의 입사각

ϕ : 파의 굴절각

V_s 값은 시료의 처음 종파속도의 60 %로 가정하고 식 4.7.4에 대입하여 $\sin\phi$를 구한 다음의 식 4.7.5에 넣어 다시 V_s를 계산한다.

$$V_s = \frac{1}{\frac{(T_2 - T_1)\cdot\cos\Phi}{L} + \frac{\cos(\phi-\Theta)}{V_0}} \tag{4.7.5}$$

이 값을 V_1이라 하고, 이 V_1값을 다시 식 4.7.4에 넣어 Φ_2를 구한 다음 다시 식 4.7.5에 Φ_2값을 대입하여 V_2를 계산한다. 이 V_2값을 다시 식 4.7.4에 넣어 Φ_3를 구한 후 Φ_3를 식 4.7.5에 넣어 V_3값을 계산한다. 이러한 일련의 시행착오법을 통해 계산하다보면 V_n의 값이 거의 일정하게 되는데 이때의 V_n 값이 시료의 횡파속도가 된다.

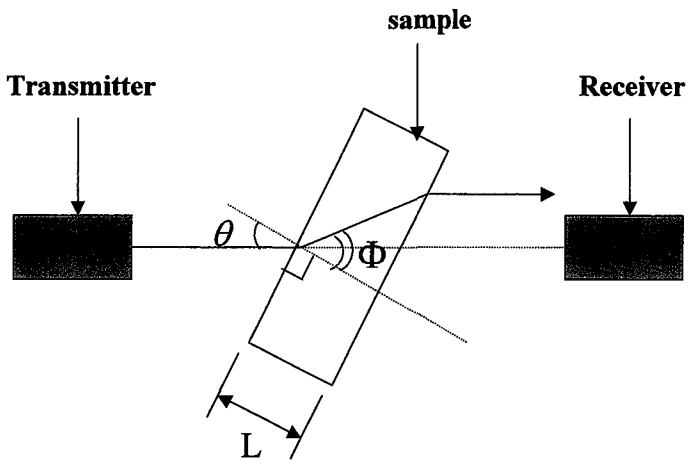


그림 4.7.6 고체시료 회전 시 투과한 초음파의 이동

3.3.4 시료의 제작 및 측정방법

공시체 제작은 충분히 포화시킨 시료에 대해, 직경 35mm, 두께 7.3mm의 고체 시료를 제작하였다. 초음파 시험용 공시체는 크기가 작기 때문에 10번체 (2mm) 통과시료를 사용하여 공시체의 매질이 균질한 상태가 되도록 하였다.

그런 다음 완성된 시험시료를 냉동챔버에 넣어 -20℃상태에서 24시간 동안 동결시켰다. 시험시료의 제작이 끝나면 -20℃에서 얼려진 시료를 홀더(Holder)에 설치하고, -20℃~-1℃까지 온도를 높여가면서 액체 및 고체 시료의 초음파 속도를 측정하였다.

4. 시험 결과

4.1 온도변화에 따른 kerosene용액의 초음파 속도

kerosene은 영하에서 얼지 않고 용액이 비교적 균질하기 때문에 온도저하에 따른 초음파 속도의 증가 경향이 뚜렷하고, 높은 결정계수를 갖는 선형적인 관계를 나타낸다. 이러한 성질을 통해 동토의 온도변화에 대한 초음파 속도의 정량적인 평가 가능성을 확인할 수 있다.

4.2 흙시료의 온도변화에 따른 초음파 속도

동토에서의 초음파 속도는 온도, 흙의 종류, 수분, 얼음 등의 결합형태에 따라 달라진다. 그림 4.7.7 그림 4.7.8은 온도변화에 따른 흙 시료의 초음파속도를 측정한 결과이다. 흙 시료의 초음파 속도는 영하의 온도에서는 온도가 상승할수록 감소하고 있다. 온도가 상승할수록 초음파속도가 감소하는 것은 부동수분량의 변화와 밀접한 관계가 있다. 즉, 동토에서 온도가 상승할수록 부동수분량이 증가하며, 물의 초음파 속도가 얼ㄹ음의 초음파속도보다 작기 때문에 온도가 상승할수록 초음파 속도는 감소하게 된다.

횡파는 종파 속도의 약 60%정도 작게 나타났다. 그림 4.7.9 및 그림 4.7.10에서 종파 속도와 횡파 속도의 상관관계를 살펴보면 두 시료 모두 높은 상관계수를 나타내고 있어 두 파 속도간의 뚜렷한 상관성을 나타냈다.

이와 같이 저온에서 온도변화에 따 흙 시료의 초음파속도(종파, 횡파)를 측정하여 흙의 탄성계수, 포아슨비, 전단탄성계수, 체적탄성계수 등을 구할 수 있다.

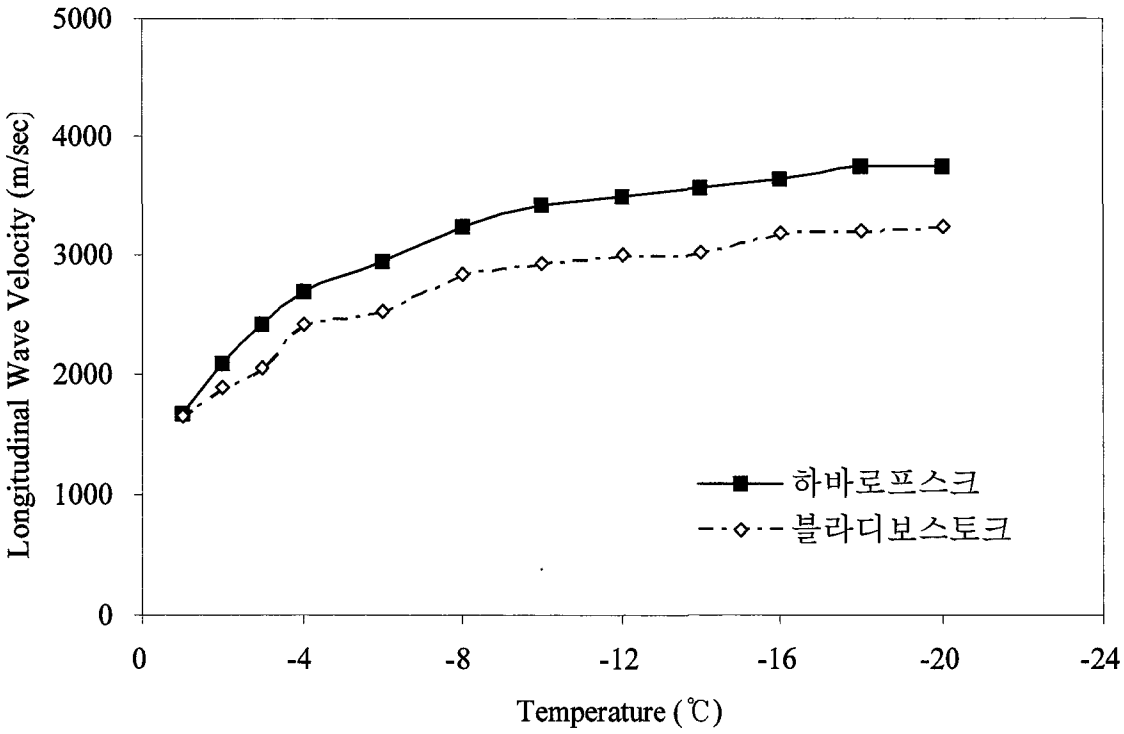


그림 4.7.7 온도 변화에 따른 흙시료의 초음파 속도(종파)

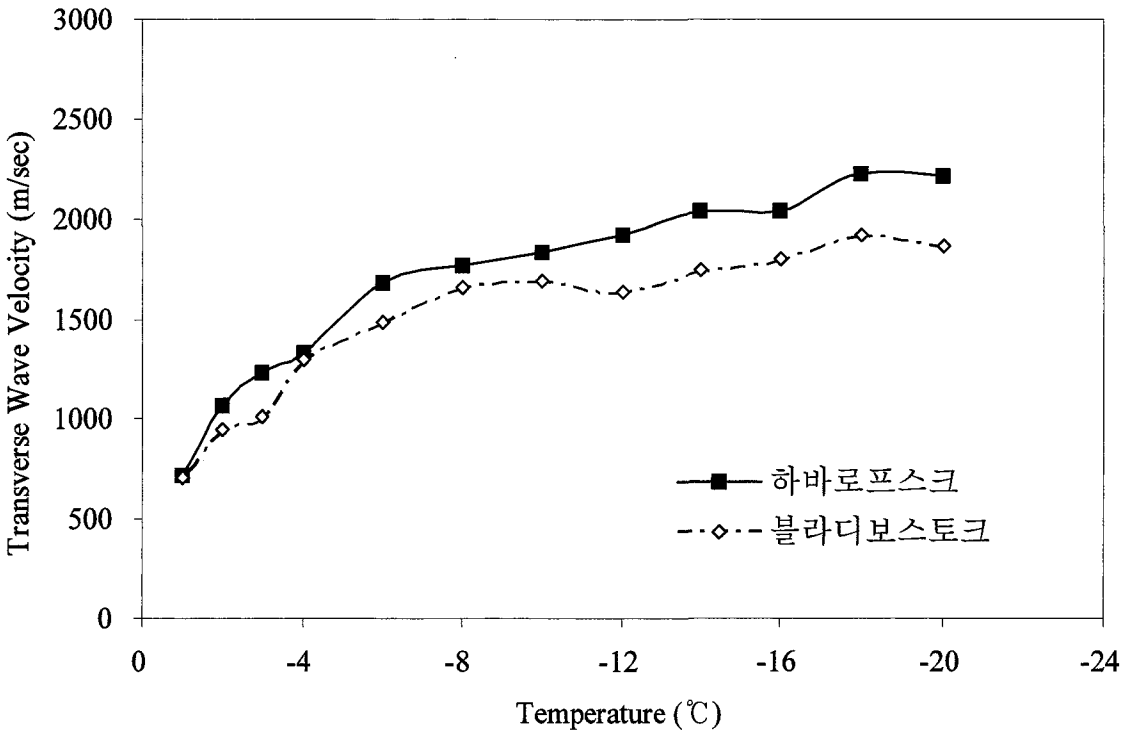


그림 4.7.8 온도 변화에 따른 흙시료의 초음파 속도(횡파)

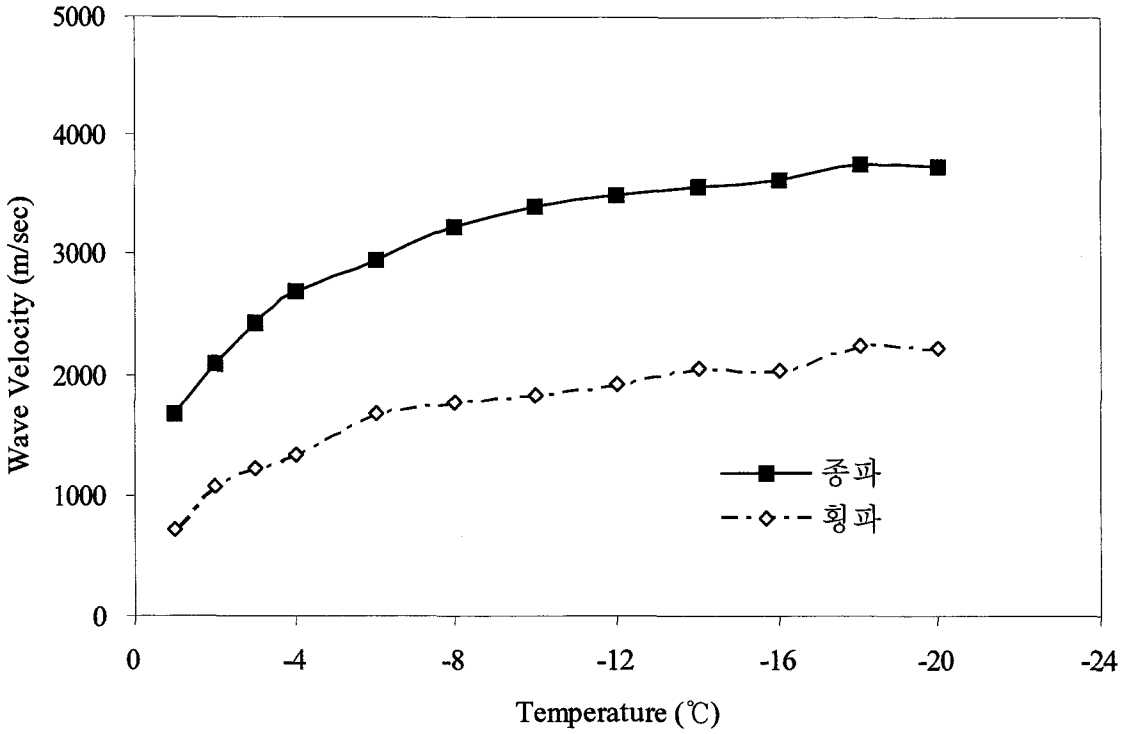


그림 4.7.9 하바로프스크의 종파와 횡파의 상관관계

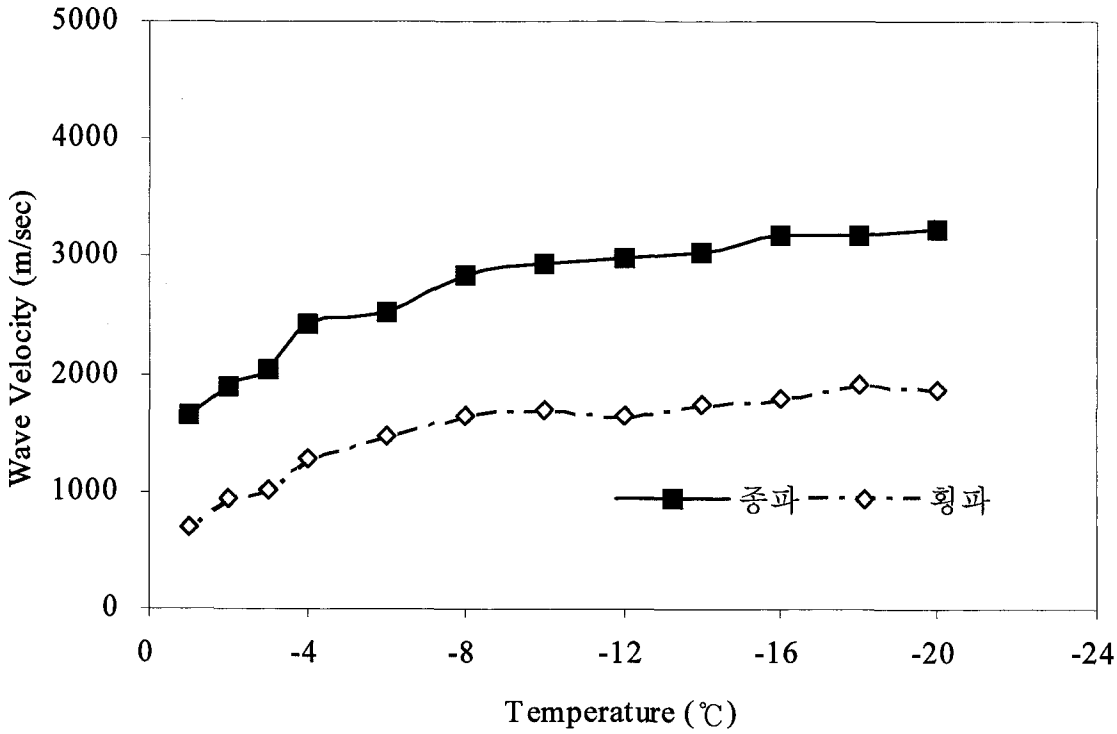


그림 4.7.10 블라디보스토크의 종파와 횡파의 상관관계

4.3 동토의 탄성계수(E)와 포아슨비(υ)

ASTM(American Society for Testing Materials)Standard D2845-83에서 제안하는 방법으로 초음파 속도로부터 흙의 탄성계수(E)와 포아슨비(υ)를 구할 수 있다.

$$E = [\rho V_s^2(3V_p^2 - 4V_s^2)]/(V_p^2 - V_s^2) \qquad (4.7.6)$$

여기서, E : 탄성계수(Pa)

ρ : 흙의 단위중량 (g/cm^3)

V_p : 흙시료의 종파

V_s : 흙시료의 횡파

$$\nu = [(V_p/V_s)^2/2 - 1]/[(V_p/V_s)^2 - 1] \qquad (4.7.7)$$

여기서, υ : 포아슨비

측정한 초음파 속도를 총해 저온에서의 흙 시료의 포아슨비, 탄성계수 및 전단계수의 변화를 그림 4.7.11, 그림 4.7.12, 그리고 그림 4.7.13에 도시하였다.

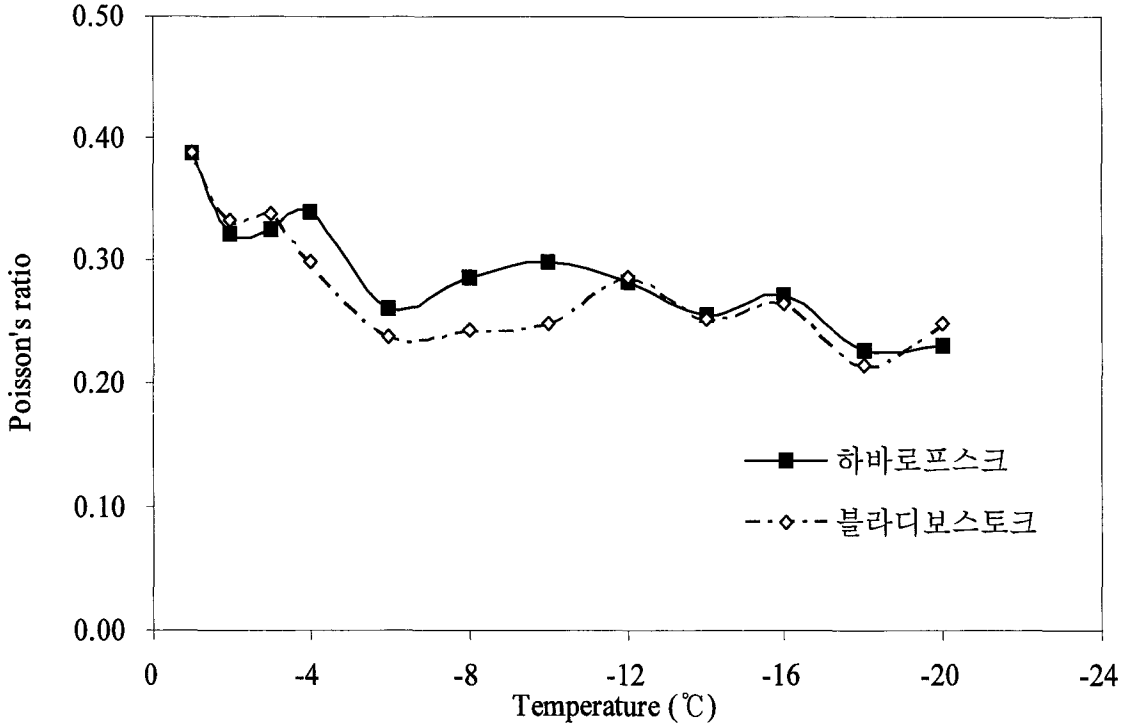


그림 4.7.11 온도 변화에 따른 흙 시료의 포아슨비 변화

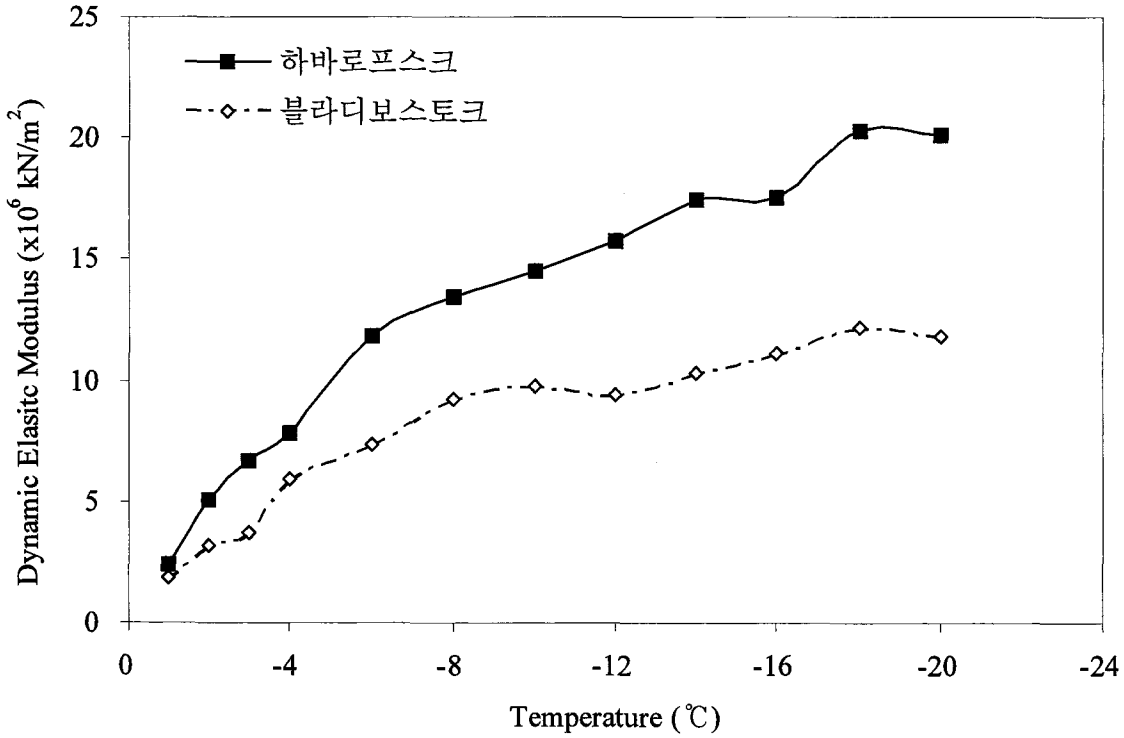


그림 4.7.12 온도변화에 따른 흙 시료의 탄성계수 변화

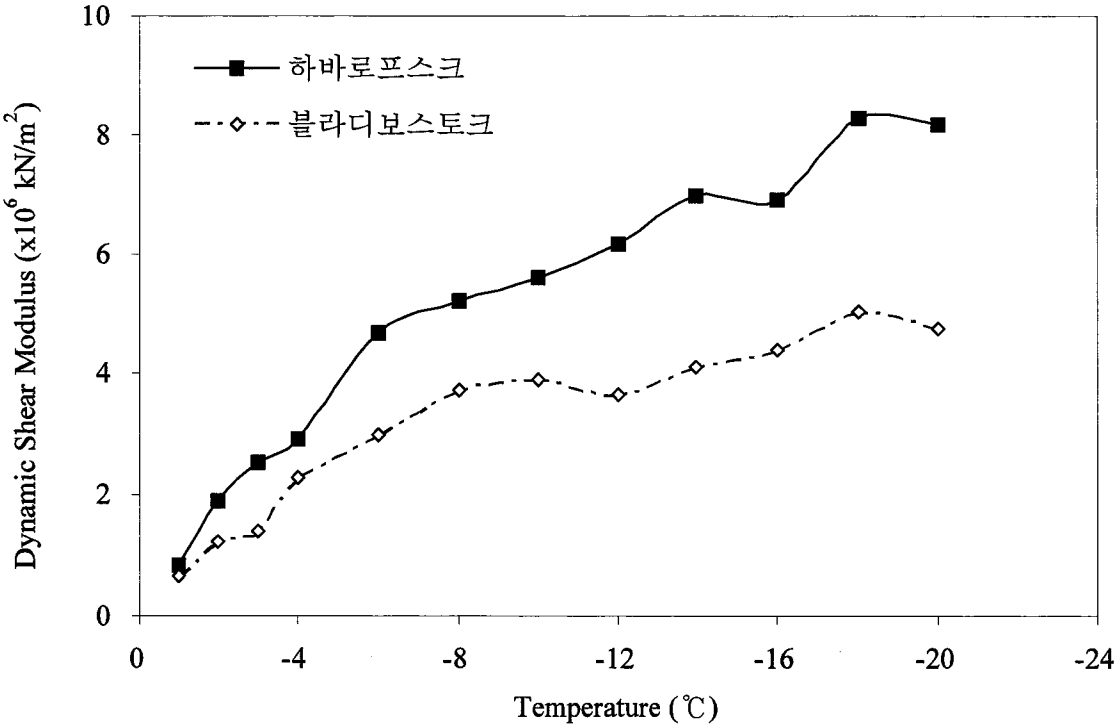


그림 4.7.13 온도변화에 따른 흙 시료의 전단계수 변화

참고로 DAS(1984)는 다수의 실험을 통해 각종 흙의 탄성계수와 포아슨비를 도출하였는데 그 결과는 표 4.7.2와 같다.

표 4.7.2 각종 흙의 탄성계수 및 포아슨비

흙의 종류	탄성계수(E, t/m^2)	포아슨비
느슨한 모래	1,000~2,400	0.20~0.40
중간정도의 촘촘한 모래	1,700~2,800	0.25~0.40
촘촘한 모래	3,500~5,500	0.30~0.45
하바로프스크	1,000~1,700	0.20~0.40
자갈	6,900~17,200	0.15~0.35
연약한 점토	200~500	
중간 점토	500~1,000	0.20~0.50
견고한 점토	1,000~2,400	

제 8 절 수직지지대 기초에 작용하는 동착력 특성

하절기와 동절기에 융해와 동결을 반복하는 층을 활동층(Active Layer)이라고 한다. 활동층에서 동절기에 지반 재 동결로 인하여 주변의 흙과 말뚝 주면에 상향응력으로 작용하는 힘을 동착력(Adfreeze Force)이라고 하는데 이 동착력을 분석하기 위하여 본 연구에서는 모형말뚝을 제작하였다. 또한 경기지역의 화강풍화토를 채취하여 모형토조 속에 넣고, 모형말뚝을 삽입한 후, 모형말뚝에 작용하는 동착력을 측정하였다. 그리고 동착력을 감소시키기 위하여 플라스틱 조각(Pellet)을 모형말뚝 주변에 포설하고 모형말뚝에 작용하는 동착력이 얼마나 감소하는지 분석하였다.

김영진 등(2003)은 플라스틱이 동상량을 대폭 감소한다고 보고하였고, 이에 근거하여 플라스틱 골재를 말뚝 주변에 포설하면 동착력을 줄일 수 있을 것으로 판단되어 플라스틱 골재를 사용한 말뚝 주변의 동착력 감소시험을 수행하게 되었다.

1. 실험 방법

말뚝에 작용하는 동착력을 측정하기 위한 전체적인 모습을 그림 4.8.1에 나타내었다. 이 실험장치는 높이 1000mm와 직경 900mm의 제원을 갖는 원통형토조, 스트레인 게이지가 부착되어 말뚝 위치별로 작용하는 동착력 측정이 가능한 폐단강관말뚝(그림 4.8.2 참조)과 동착력 측정을 위한 상부 프레임으로 구성되어 있다.

모형토조의 경우, 깊이별로 온도센서를 매설하여 모형지반의 온도분포를 측정하였고, 모형지반의 동결시 지하수의 원활한 공급을 위하여 측면과 하면으로부터의 열확산을 방지하고 냉기가 지표면으로만 전달되는 일차원적인 동결시스템을 묘사하기 위하여 몰드주위와 바닥면에 50mm 두께의 스펀지를 이중으로 덮어 냉기의 손실을 방지한 후 실험을 수행하였다. 모형토조에서 동상작용 묘사를 위하여 물저장 실린더에서 실린더 내의 물이 동수경사에 의해 자연스럽게 토조 하단부로 유입되게 하여 지반의 하부에 지하수의 공급을 묘사하였다. 여기서 유입되는 물의 동결방지를 위하여 온도조절장치를 부착하였다.

모형말뚝은 길이 600mm, 직경 40mm와 두께 2mm의 강관파이프로서 스트레인 게이지를 부착하여 말뚝의 위치별로 작용하는 동착력을 측정할 수 있다. 그리고 말뚝에 작용하는 전체 동착력 측정을 위하여 토조 상부에 로드셀이 부착된 프레임을 장착하여 동착력을 측정하였다.

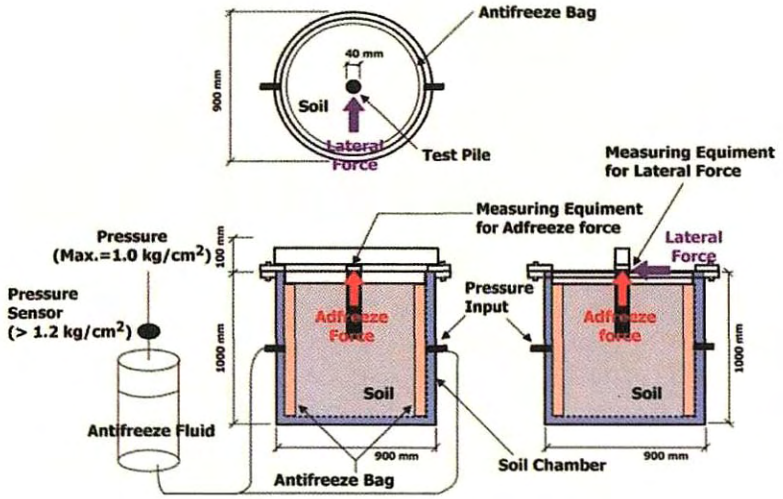


그림 4.8.1 동착력 실험 개요도

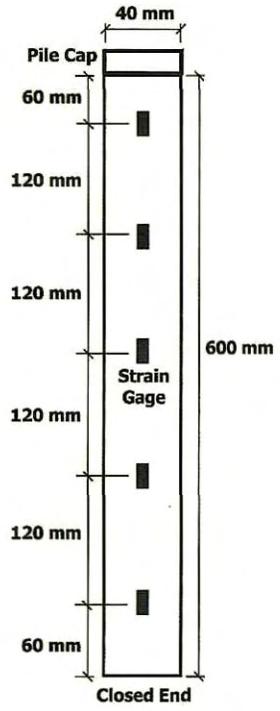


그림 4.8.2 모형말뚝 개요도

본 실험에서는 경기지역의 화강풍화토를 사용하여 실험을 수행하였다. 표 4.8.1에서는 화강풍화토의 기본적인 지반공학적 성질을 나타내었다.

표 4.8.1 경기지역 화강풍화토의 공학적 특성

흙시료	비중	지연함수비 (%)	소성지수	통일분류 (USCS)	내부마찰각 (°)	점착력 (kg/cm^2)
화강토 (경기파주)	2.61	16.3	NP	SW	27.3	0.05

모형지반의 형성은 다짐시험에서 얻어진 최적함수비와 최대건조밀도의 90%를 기준으로 하여 진동 다짐기로 다짐을 하여 모형지반을 형성하였다.

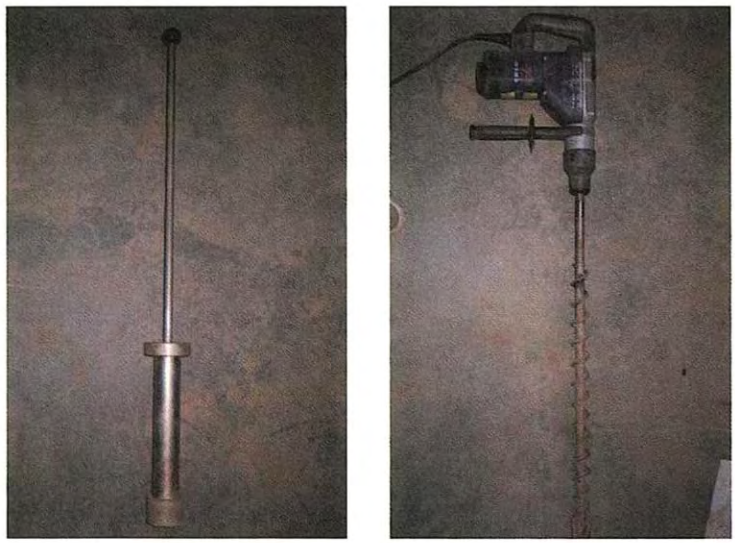
모형지반 형성 후, 말뚝 시공방법에 따른 동착력을 비교분석하기 위하여 본 실험에서는 두 가지의 말뚝 설치방법을 묘사하였다. 첫번째는 항타방법으로 모형토조에 49.8N의 말뚝항타기(Rammer)를 660mm의 낙하고에서 자유낙하시켜 타격관입을 하였다. 두번째는 직경 40mm의 오거로 선굴착한 후 말뚝을 매입하는 방법을 사용하였다.

말뚝이 설치된 모형토조는 냉동챔버에 넣은 후 -26℃로 설정하여 말뚝에 작용하는 동착력을 측정을 시간별로 측정하였다.

말뚝에 작용하는 동착력를 감소시키기 위하여 말뚝 주면과 선단주위 지반(폭 200mm 와 높이 600mm)을 플라스틱 조각으로 치환하여 말뚝을 근입시킨 후 동착력 감소효과를 분석하였다. 전체적인 실험계획은 표 4.8.2에 정리하였다.

표 4.8.2 실험 계획

실험 No.	모형말뚝 시공방법	플라스틱 골재 사용 유무
T-1	항 타	무
T-2	항 타	유
T-3	매 입	무
T-4	매 입	유



(a) 말뚝 항타기 (b) 오거

그림 4.8.3 모형말뚝 시공장비

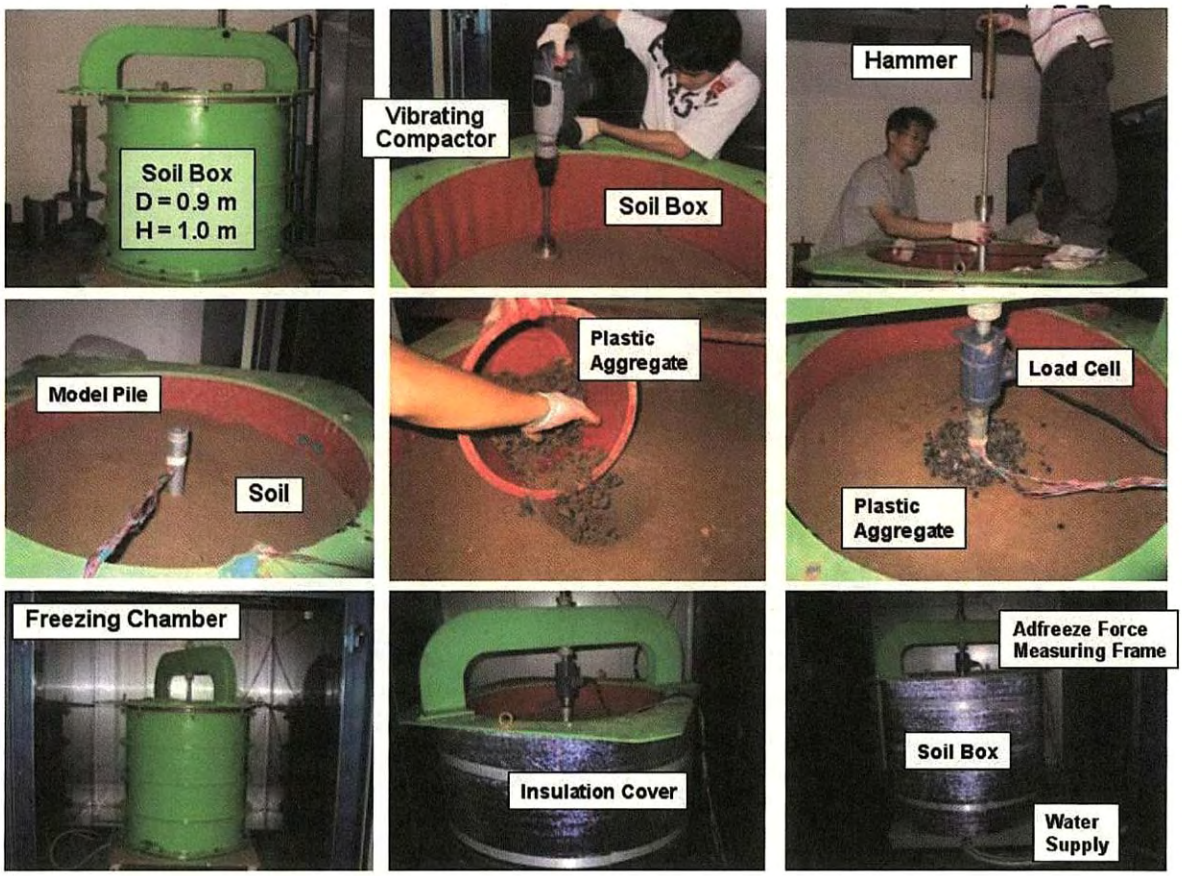


그림 4.8.4 실험순서

2. 실험결과

말뚝의 시공방법에 따른 동착력 시험 결과를 그림 4.8.5에 도시하였다. 항타말뚝의 경우 약 80시간 만에 최대 동착력 0.60kg/cm^{2}에 도달하였으며, 플라스틱 골재에 항타관입된 말뚝의 동착력은 약 120시간 만에 최대 동착력 0.21kg/cm^{2}에 도달하였다. 매입말뚝의 경우 약 100시간 만에 최대 동착력 0.51kg/cm^{2}에 도달하였으며, 플라스틱 조각에 매입된 말뚝의 동착력은 약 100시간 만에 최대 동착력 0.18kg/cm^{2}에 도달하였다.

본 연구를 통하여 플라스틱 조각을 사용한 경우, 말뚝의 시공방법에 상관없이 약 65%의 동착력이 감소하였다. 플라스틱 조각을 사용함으로써 동착력의 감소효과가 나타나는 것이 입증되었다. 그림 4.8.6에서는 모형말뚝 두부에서 측정된 전체 동착력의 하중별 단계에서의 모형말뚝 위치별로 작용하는 동착력의 분포도를 보여주고 있다.

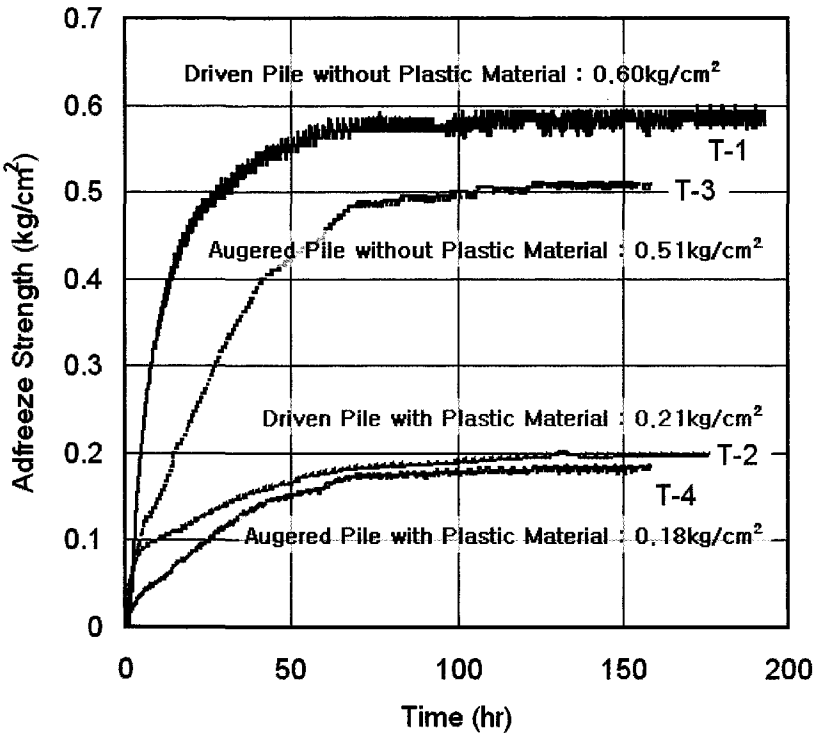


그림 4.8.5 동착력 실험 결과

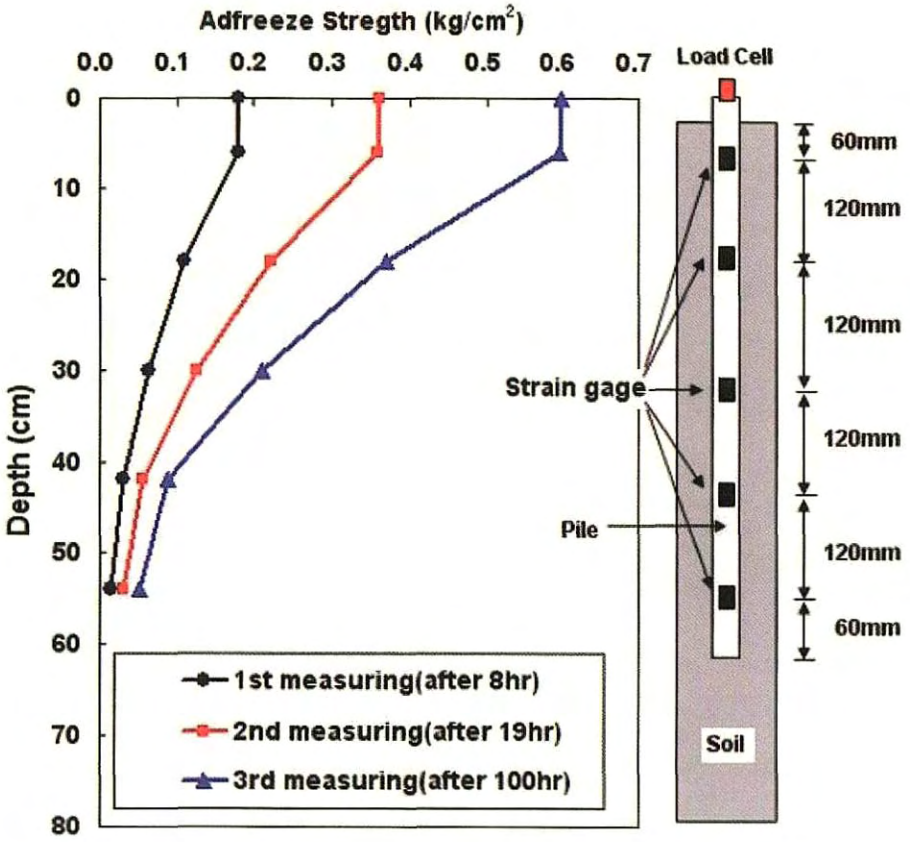


그림 4.8.6 동착력 분포도

(플라스틱 조각을 사용하지 않은 항타관입한 말뚝의 경우)

제 9 절 EPS조각 혼합토의 열전도 특성

우리나라는 계절 동토 지역에 속하는 관계로 겨울철 일부 남쪽 지방을 제외하고는 지반이 동결되는데, 이때 동결토의 특성은 지반구조물의 거동에 상당한 영향을 미친다. 겨울철 및 봄철에 우리나라에서는 도로, 철도, 매설관 등이 동상이나 융해로 인하여 구조물에 피해가 발생하게 된다. 지금까지 국내 도로에는 동상을 방지하기 위한 방안으로 동상성(frost susceptibility)인 흙을 비동상성 재료인 자갈이나 쇄석으로 치환하는 방법을 이용하여 왔다.

본 연구에서는 동상방지층용 자갈의 대체 재료로서 단열효과가 크고, 환경적으로도 무해한 발포스틸렌(EPS, Expanded PolyStylene)를 사용하여 실험을 실시하였다. EPS를 하바로프스크 시료와 20%, 25%, 30%의 부피비로 혼합하여 비중시험, 다짐시험, 투수시험 그리고 열전도율실험을 실시하였다.

1. EPS조각 혼합토의 기본 성질

실험에 사용한 EPS는 시중에서 흔히 구할 수 있는 제품으로 2~5mm의 크기로 부순 후 사용하였다. 그림 4.9.1은 하바로프스크 시료와 ESP조각을 부피비 80:20, 75:25, 70:30으로 섞어서 만든 시료를 보여주고 있다.

1.1 비중시험

비중이란 증류수의 단위중량에 대한 입자의 단위중량과의 비를 말한다. 흙의 비중은 흙의 분류에 중요한 요소로 흙의 간극비와 포화도를 계산하거나 비중계 시험에 사용된다. 비중시험은 비중병을 이용하여 측정하는데, 10번체 (2.0 mm)체를 통과한 노건조 시료를 50g이상씩 (비중병 용량 250㎖일 때) 준비하고, 각 시료마다 3회씩 시험하여 그 오차가 ±0.03 이내에 들어올 경우 평균치로 결정한다. 본 실험에서는 KS F 2303에 규정된 시험법으로 EPS조각 혼합토에 대해서 시험을 실시하였고 결과는 표 4.9.1과 같다.



(a) 부피비 80:20의 혼합토



(b) 부피비 75:25의 혼합토



(c) 부피비 70:30의 혼합토

그림 4.9.1 하바로프스크 흙과 EPS조각의 혼합토

1.2 다짐시험

다짐시험은 37.5mm 체를 통과한 흙의 건조밀도-함수비 곡선을 그린 후 최대 건조밀도 와 최적 함수비를 구하기 위한 시험이다. 여기서 최적함수비란, 최대건조밀도에서의 함수비를 말한다. 래머의 무게, 몰드의 안지름, 다짐 층수, 1층당 다짐 횟수, 허용 최대입자지름에 따라 A, B, C, D, E 5가지 방법이 있다. 본 시험에서는 D다짐시험을 실시하였으며, 래머 질량 4.5kg, 몰드 안지름 15cm, 다짐층수 5층, 1층당 다짐횟수 55회, 허용 최대 입자 지름은 19mm로 하였다. 부피비에 따른 EPS조각 혼합토에 대해서 시험을 실시하였고 결과는 그림 4.9.2와 같다.

1.3 투수시험

투수시험은 KS F2022의 규정에 의하여 변수위투수 시험을 실시하였다. 하바로프스크와 EPS 조각의 혼합비에 따라 다짐시험을 실시한 결과 구하여진 최적함수비와 최대건조단위중량으로 다져서 공시체를 제작하였다. 시험은 각 공시체별 3회를 실시하여 평균값을 구하였다. 실험결과는 표 4.9.1에 나타내었다. 시험결과 EPS조각의 함유비가 높아질수록 투수계수가 커지는 것을 알 수 있다.

표 4.9.1 EPS조각 혼합토의 비중, 다짐, 투수계수 시험결과

하바로프스크 : EPS조각	비중	최적함수비(%)	최대건조 단위중량(g/cm^3)	투수계수 (cm/sec)
80 : 20	2.42	12.9	1.72	8.07×10^{-4}
75 : 25	2.20	14.7	1.65	9.70×10^{-4}
70 : 30	2.13	15.3	1.58	1.20×10^{-3}

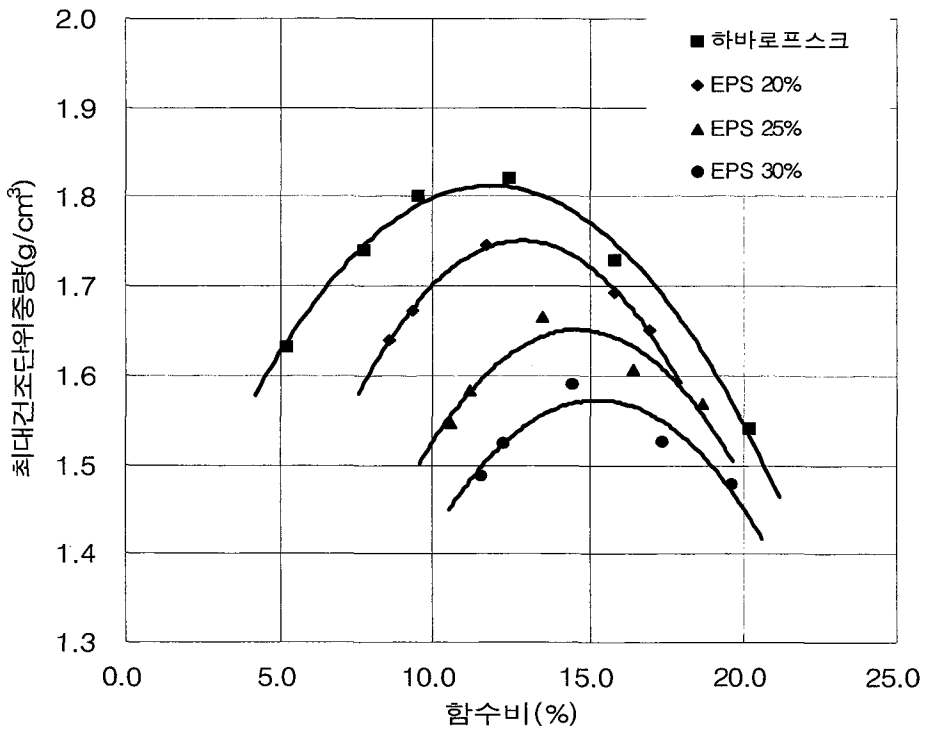


그림 4.9.2 EPS조각 혼합토의 다짐시험 결과

2. EPS조각 혼합토의 열적 특성

2.1 시험방법

폐타이어 조각을 크기가 25×25×10cm인 측정상자에 최대건조밀도의 90%로 다져 넣었다. 그 후 QTM식 Probe를 시료면 위에 놓고 열전도율을 5회 측정하여 평균값을 이용하였다.

2.2 시험결과

온도와 EPS의 혼합비에 따른 열전도율의 변화를 그림 4.9.3에 나타내었다. 실험결과 EPS조각의 함유량이 많을수록 열전도율이 작아지는 것을 알 수 있다. 또한 영하의 온도에서 급격히 열전도율이 상승한 후 온도가 하강함에 따라 서서히 증가함을 관찰할 수 있다. 그 이유는 열전도율이 0.6W/m · K인 물이 1.88W/m · K인 얼음으로 변하기 때문이다. 공극에 있는 자유수가 모두 동결된 후에도 열전도율은 서서히 증가한다. 그 이유는 부동수분의 양이 점점 줄어들고, 얼음의 열전도율도 1.88W/m · K에서 2.03W/m · K로 증가하기 때문이다.

하바로프스크는 영하의 온도에서 열전도율이 1.619W/m · K~2.175W/m · K의 값을 가지고, EPS조각의 함유비율이 30%인 혼합토는 1.001W/m · K~1.587W/m · K사이의 값을 나타내었다.

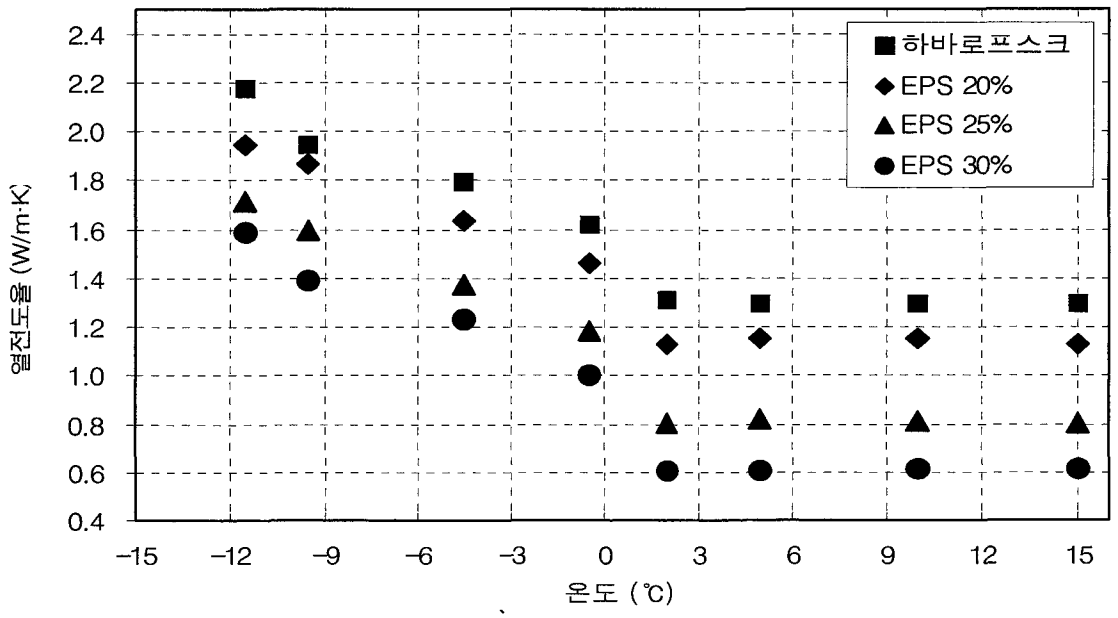


그림 4.9.3 온도와 EPS조각 혼합비율(부피비)에 따른 열전도율 변화

제 10 절 소결론

4장에서는 시베리아 흙을 대상으로 한 여러 가지 실험들을 통하여 대상 시료의 기본 성질과 동토공학적인 특성을 확인 하고자 하였다. 시베리아 시료의 기본적인 특성을 파악하기 위해서는 입도실험, 액성한계와 소성한계실험, 비중실험, 다짐실험 등을 실시하였고, 이를 통해 통일 분류법에 의한 흙의 특성을 규정하고, 동결특성 파악을 위한 실험의 기본 자료로 활용하였다. 시료의 동토 공학적 특성을 파악하기 위해서는 흙의 열전도 시험, 부동수분 시험, 동결압축 및 인장강도 시험, 흙의 비파괴 시험 등을 실시하였다. 또한 EPS 혼합토의 비중실험, 다짐실험, 투수시험을 실시하였고, 동결특성을 파악하기 위하여 열전도 실험을 실시하였다. 그 결과는 다음과 같다.

① 열전도값은 물체의 열적 특성을 규정하는 가장 기본적인 인자이다. 특히, 지반의 경우 온도가 영하로 내려갈 경우 물이 얼음으로 변화 하면서 지반의 성질에 변화를 주게 되는데, 이는 동토공학에서 매우 중요한 요소로 간주 된다.

② 동토에서 부동수분은 0℃이하에서도 얼지 않는 수분을 말하며, 동토에서 지반이 얼마만큼 팽창할 것이지 알고자 할 때 온도변화에 따른 부동수분 변화는 매우 중요하다. 본 실험 결과에 의하면 블라디보스토크 시료가 하바로프스크 시료 보다 부동수분의 값이 크게 나타나며 이 결과는 열전도율의 순서와는 반대되는 결과이다. 이는 세립분이 많은 점토일수록 부동수분량이 높기 때문에 비열이 커서 열전도율이 낮아지고, 반대로 세립분이 소량인 모래에서는 비열이 큰 수분의 양이 적기 때문에 열전도율이 높다고 판단 할 수 있다.

③ 시베리아 흙을 대상으로 압축강도, 인장강도, 비파괴 강도 측정 실험을 실시하였으며, 특히 비파괴 강도 시험의 경우 영구 동토층과 같은 지역의 강도를 측정하는데 있어 매우 유용한 실험이다. 본 장에서는 압축 및 인장강도와 비파괴 실험을 통해 얻은 강도 값을 서로 비교하여 상관관계를 분석하였으며, 본 실험으로 얻어진 상관관계는 향후 현지 비파괴 강도 실험을 할 때 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

제 5 장 모형실험에 의한 파이프라인 거동 분석

제 1 절 하바로프스크 흙과 파이프라인의 거동 특성

1. 실험장치 특징

1.1 냉동챔버

동결챔버는 그림 5.1.1과 같이 폭 2.5m×너비 3m×높이 4m로 -30℃~+50℃의 범위에서 자유롭게 온도를 설정할 수 있다. 냉동챔버는 실험기간 온도를 다양하게 설정하여 실험을 수행할 수 있으며 연속적으로 동결융해를 반복할 수 있다. 또한 제어장치를 통하여 온도를 설정할 수 있으며 챔버 내부 5방향 벽면에 설치된 온도 센서를 통하여 외부 스크린에서 벽면 각각의 온도를 확인 할 수 있다. 또한 원하는 온도로 1시간 이내로 조절 할 수 있는 장점이 있으며, 대기 순환식이기 때문에 온도 오차는 약 ±1℃이다.



그림 5.1.1 극지 연구용 냄동챔버



(a) 냉기 배출구



(b) 챔버 내부바닥



(c) 냉동장치



(d) 냉동 제어반

그림 5.1.2 냉동챔버 주요 구성장치

1.2 모형실험용 토조

모형실험에 사용된 토조의 크기는 가로 400mm×세로 400mm×높이 400mm이다. 그림 5.1.3은 매설관 실험 모형토조의 실제 모습이다.

1.3 온도센서

온도센서는 토조의 깊이별로 5cm 간격으로 8개, 파이프 상단부에 1개 등 총 9개의 thermo couple을 설치하였다. thermo couple은 측정범위가 -270℃~400℃이며 센서선단부에 온도를 감지하는 원리이다. 또한 측정데이터는 자동온도 기록장치인 Grant-1200을 사용하였다.



그림 5.1.3 매설관 시험용 모형토조

1.4 스트레인게이지

실험에 사용된 스트레인게이지는 일반용 스틸 게이지로 수 미크론의 합금박을 이용한 제품이다. 스트레인게이지의 사용온도 범위는 -20~+80℃이며, 저항소자는 Cu-Ni박이며, 스트레인을 측정하는 주된 대상재료는 금속, 유리, 세라믹 등에 폭넓게 사용이 가능하다.

2. 실험방법

일반적으로 실내 동상실험 방법에는 자연지반에서의 동상현상처럼 동결면으로 모관수의 계속적인 공급이 가능한 개방형 방식(Open System)과 물의 계속적인 공급을 고려치 않는 폐쇄형방식(Closed System)이 있다. 본 연구에서는 폐쇄형방식 의한 동상현상을 구현하였다. 시험에 사용된 대상 시료는 하바로프스크에서 채취한 시료로써 함수비 18.5%, 최대건조단위중량 1.62g/cm^3 이다.

실내 모형토조 내에 설치하는 매설관 및 온도센서(thermocouple)의 위치는 그림 5.1.4와 같다. 모형토조의 측벽과 바닥은 보온이 잘 되는 100mm 스티로폼으로 단열처리를 하였고 안쪽 벽에 오일 그리스를 칠하여 마찰을 최소화 시켰다. 온도센서는 수직 깊이 5cm 간격으로 총 8개, 파이프 상단부에 1개 등 총 9개를 설치하였다. 스트레인게이지는 원주방향 및 축방향으로 90°간격으

로 4방향으로 8개를 설치하였으며 스트레인의 측정은 데이터 수집 장치인 TDS-530을 사용하였다. 그림 5.1.5에 스트레인게이지의 부착위치 및 방향을 나타내었다.

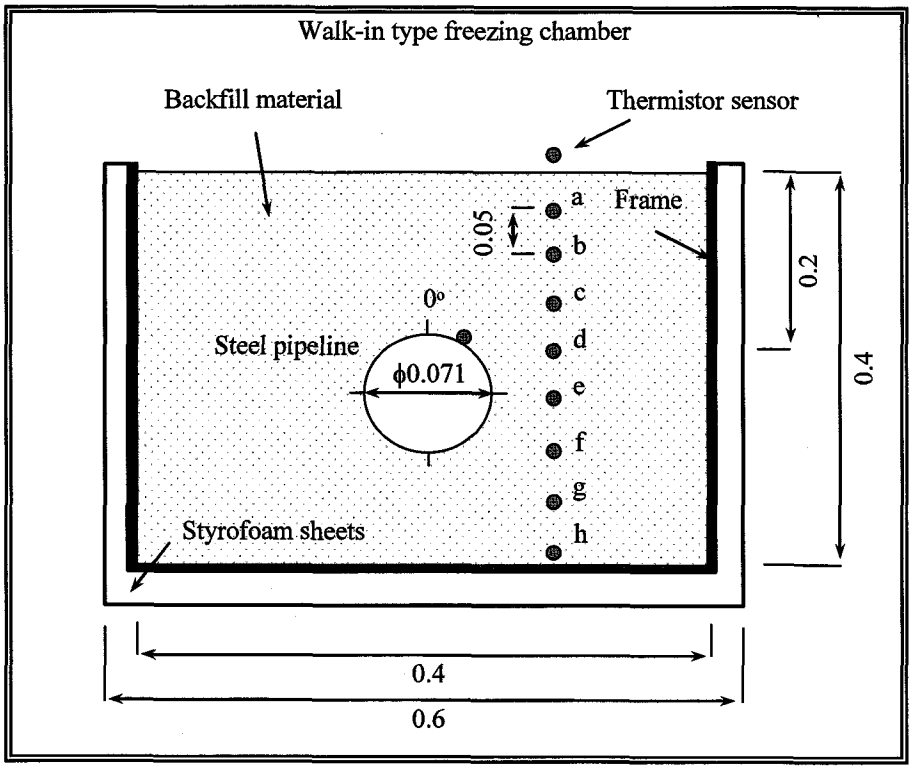


그림 5.1.4 모형토조 내부의 온도센서 설치 단면

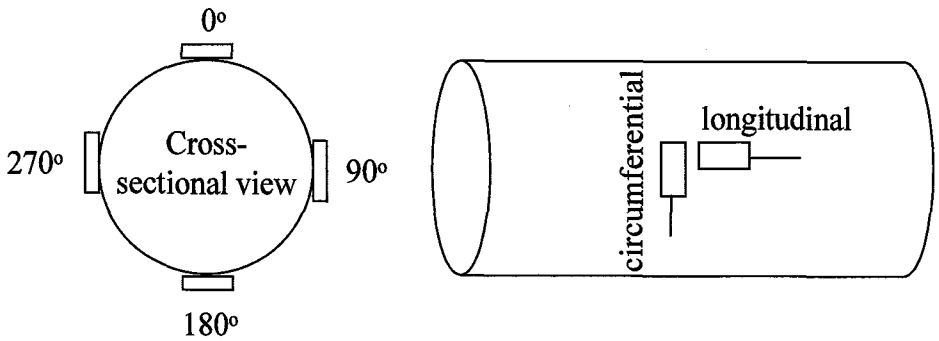


그림 5.1.5 스트레인게이지의 부착위치 및 방향

모형지반의 조성과정은 먼저 바닥과 측벽에 10cm의 스티로폼을 설치하여 상부 이외에 찬 공기가 침투하는 것을 방지하였다. 스티로폼 설치가 끝난 후에는 시료를 함수비 18.5%로 혼합한

후 토조 내에 채운 다음 균일한 다짐 작업을 수행하였다. 다짐은 최대건조단위중량 80~90%로 다짐을 실시하였고, 다짐 높이는 매층 5cm로 하였고, 스틸자를 이용해 다져진 높이를 정확히 측정하였다. 그림 5.1.6은 모형토조 내에 파이프가 설치된 장면이다.



그림 5.1.6 스트레인게이지 및 온도센서 설치

3. 실험결과

3.1 위치별 온도변화

모형토조를 냉동챔버에 넣은 후 챔버의 온도를 -14℃로 세팅하였다. 냉동챔버 내의 온도는 -13~-15℃사이를 유지하였다. 시간이 지나면서 차가운 공기가 하단으로 침투하면서 동결면이 하단으로 이동하는 것을 알 수 있었다. 동결면은 43시간 후에 파이프에 도달하였으며, 66시간이 경과한 후 모형토조 하단까지 진행되었다. 그림 5.1.7에 깊이별 온도변화를 나타내었고, 그림 5.1.8에 시간에 따른 동결면의 깊이변화를 나타내었다. 실험결과 5~15cm 까지는 온도의 변화를 확연히 알 수 있지만, 20~40cm사이의 온도는 크게 차이가 나지 않은 것을 알 수 있다.

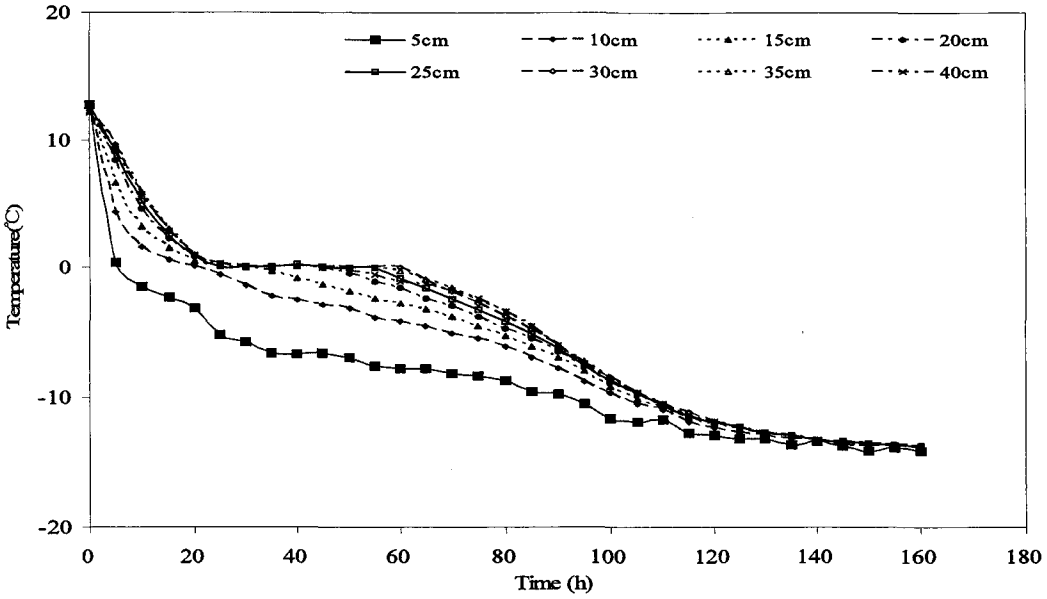


그림 5.1.7 하바로프시료 시간에 깊이별 온도 변화

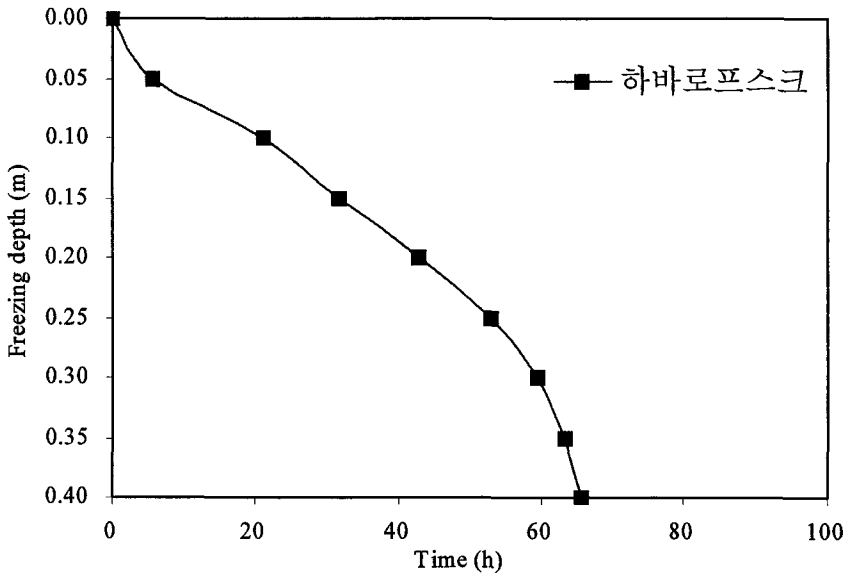


그림 5.1.8 하바로프시료 시간에 따른 동결깊이 변화

3.2 위치별 스트레인 변화

매설관의 변형을 파악하기 위하여 축방향 및 원주방향으로 90° 간격으로 4개씩, 총 8개의 스트레인게이지를 부착하였다. 동결로 인해 매설관에 작용하는 스트레인의 분포는 표 5.1.1에 나타내었다. 스트레인은 파이프의 온도가 0℃가까이 내려갈수록 급격한 변화를 나타내었다. 원주방

향 및 축방향 변형은 상부와 하부에서 가장 크게 나타났으며, 이러한 이유는 파이프의 상단과 하단의 압력이 증가하여 물의 부피 팽창에 의한 것으로 사료된다.

표 5.1.1 하바로프스크 시료로 성토된 파이프의 시간에 따른 스트레인

시간 (h)	파이프 온도 (°C)	원주방향 변형					축방향 변형				
		Position				평균	Position				평균
		0°	90°	180°	270°		0°	90°	180°	270°	
0	10.5	-5	-8	-19	-4	-9	-21	-17	-27	-15	-20
40	0.1	-171	-45	-69	-20	-76	-78	-101	-128	-86	-98
100	-8.2	-308	-53	-157	93	-106	-142	-75	-189	-71	-119
160	-13.7	-313	-76	-211	53	-137	-194	-127	-247	-124	-173

제 2 절 폐타이어 조각 혼합토와 파이프라인의 거동 특성

1. 개요

기존의 자갈보다 단열효과가 우수한 폐타이어 조각을 포장도로의 동상방지재로 활용할 경우 외부로의 찬 공기가 침투되는 것을 차단하여 도로의 동결심도 및 동결하중이 감소될 것으로 예상된다. 흙의 동결하중은 토압보다 훨씬 더 크게 작용하지만 현재까지 경험적인 방법을 제외하고는 동결하중을 추정하는 것은 쉽지 않다. 동결하중은 토질역학에서도 특수한 분야로 영하에서의 동결된 흙의 거동을 의미한다. 동결하중이란 흙이 0℃ 이하로 냉각되는데 따른 지반이 동결함에 따라 발생하는 하중의 증가를 말하며, 동결팽창압(동결토압)이라고도 부른다. 이때 발생되는 지반의 동결팽창은 수평방향뿐만 아니라 수직방향으로도 작용한다. 이러한 수직방향의 동결팽창으로 인하여 도로나 매설관이 파손되기도 한다.

본 실험에서는 지반의 동결로 인한 매설관의 파손을 방지하기 위하여 매설관 주변의 성토를 폐타이어 조각과 일반 흙을 혼합한 혼합토로 조성한 실내 모형실험을 수행하였다. 이 실험으로부터 모형지반의 온도 및 변위를 측정하여 일반 흙을 포설한 지반과의 실험결과와 비교하였다.

2. 실험방법 및 결과

폐타이어를 15% 포함한 모형토조의 실험은 하바로프스크 시료를 사용한 시험방법과 동일하게 실시하였다. 사용한 시료의 함수비는 18.7%, 최대건조단위중량은 1.41g/cm^3 이다. 타이어는 4mm 크기로 잘라낸 후 흙과 부피비 15%로 일정하게 혼합하였다. 그림 5.2.1에 폐타이어 조각 혼합토를 나타내었다.



그림 5.2.1 폐타이어 조각 혼합토(85:15)

2.1 온도분포 변화

모형토조를 냉동챔버에 넣은 후 챔버의 온도를 -14℃로 세팅하였다. 냉동챔버 내의 온도는 -13~-15℃사이를 유지하였다. 시간이 지나면서 차가운 공기가 하단으로 침투하면서 동결면이 하단으로 이동하는 것을 알 수 있었다. 동결면은 49시간 후에 파이프에 도달하였으며, 77시간 후에는 모형토조 하단까지 진행되었다. 동결면이 하강하는 시간이 일반 흙으로 실험한 결과 값 보다 오래 걸린 이유는 폐타이어 혼합토의 열전도율의 값이 더 작기 때문인 것으로 판단된다. 그림 5.2.2에 깊이별 온도변화를 나타내었고, 그림 5.2.3에 시간에 따른 동결면의 깊이변화를 나타내었다. 실험결과 흙으로만 성토한 결과와 마찬가지로 5~15cm 까지는 온도의 차이가 비교적 크게 나타났으나 깊이 20~40cm 사이에서는 비슷한 온도 분포를 나타내었다.

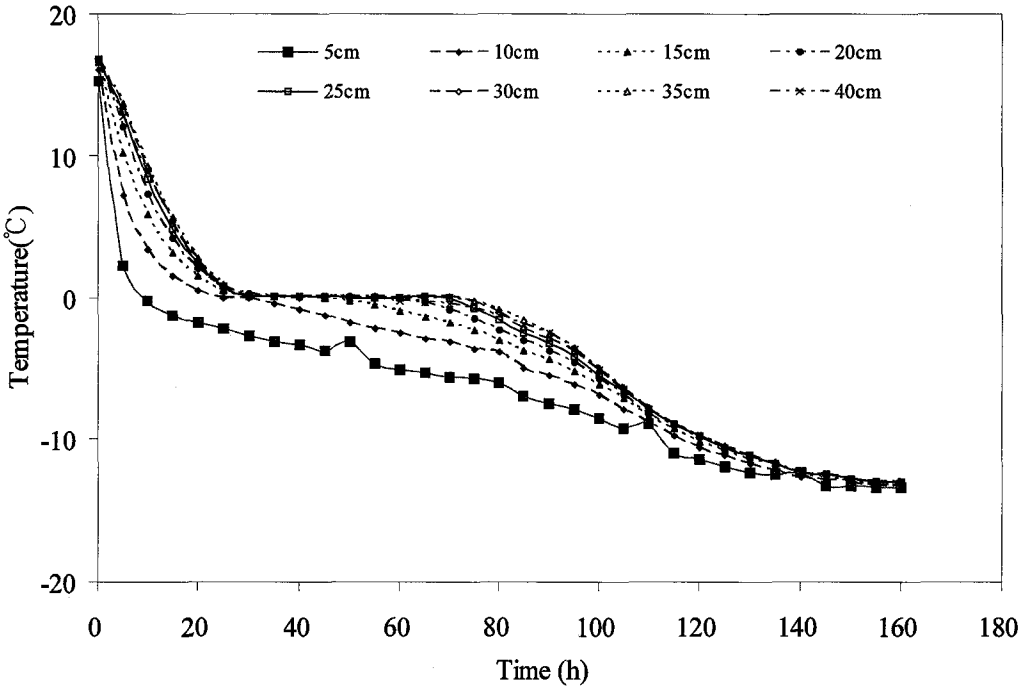


그림 5.2.2 폐타이어 조각 혼합토의 시간에 깊이별 온도 변화

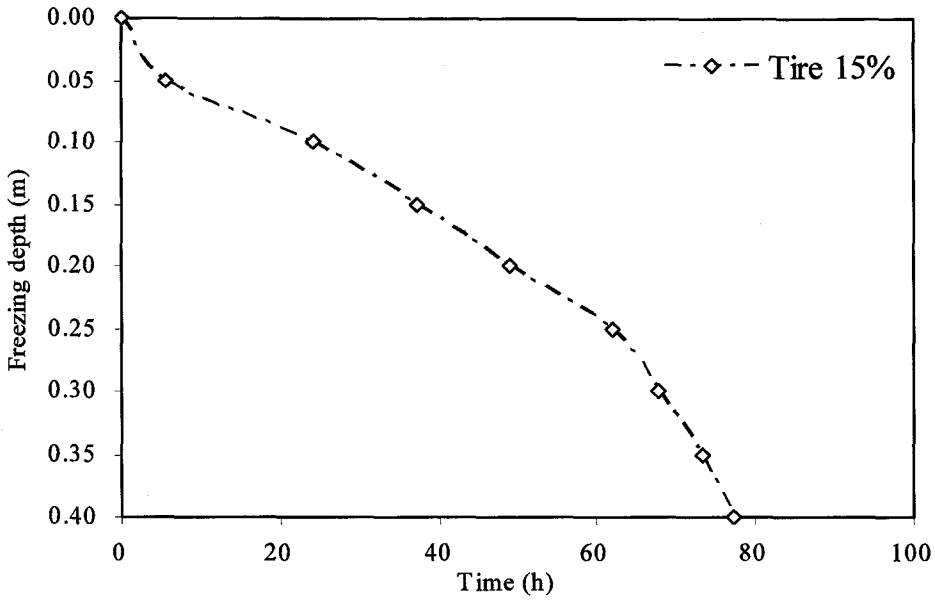


그림 5.2.3 폐타이어 조각 혼합토의 시간에 따른 동결깊이 변화

2.2 위치별 스트레인 변화

매설관의 변형을 파악하기 위하여 축방향 및 원주방향으로 90° 간격으로 4개씩, 총 8개의 스트레인게이지를 부착하였다. 동결로 인해 매설관에 작용하는 시간에 따른 스트레인의 변화는 표 5.2.1에 나타내었다. 스트레인은 일반 흙으로 실험했을 경우와 동일하게 파이프의 온도가 0℃가까이 내려갈수록 급격한 변화를 나타내었다. 폐타이어 혼합토로 실험한 결과 흙으로만 성토를 실시한 경우와 비교 했을 때 스트레인의 값이 작게 나오는 것을 알 수 있다.

표 5.2.1 폐타이어 혼합토로 성토된 파이프의 시간에 따른 스트레인

시간 (h)	파이프 온도 (°C)	원주방향 변형					축방향 변형				
		Position				평균	Position				평균
		0°	90°	180°	270°		0°	90°	180°	270°	
0	15.2	1	10	-25	-42	-14	-4	-11	7	-12	-5
40	0.1	-141	-62	-102	-19	-81	-59	-129	-78	-12	-70
100	-4.6	-154	-41	-116	-73	-96	-106	-124	-143	-57	-108
160	-12.9	-150	-54	-148	-108	-115	-143	-159	-183	-94	-145

제 3 절 EPS조각 혼합토와 파이프라인의 거동 특성

1. 개요

우리나라는 계절동토 지역에 속하는 관계로 겨울철 일부 남쪽 지방을 제외하고는 지반이 동결되는데, 이때 동결토의 특성은 지반구조물의 거동에 상당한 영향을 미친다. 겨울철 및 봄철에 우리나라에서는 도로, 철도, 매설관 등이 동상이나 융해로 인하여 구조물에 피해가 발생하게 된다. 지금까지 국내 도로에는 동상을 방지하기 위한 방안으로 동상성(frost susceptibility)인 흙을 비동상성 재료인 자갈이나 쇄석으로 치환하는 방법을 이용하여 왔다.

본 실험에서는 동상방지층용 자갈의 대체 재료로서 단열효과가 크고, 환경적으로도 무해한 EPS를 하바로프스크 흙과 30%의 부피비로 혼합하여 깊이에 따른 온도변화 및 파이프의 변형을 측정하여, 흙만 포설한 지반 및 폐타이어 혼합토로 성토한 실험과 실험결과를 비교하고자 한다.

2. 실험방법 및 결과

EPS조각을 30% 포함한 모형 토조의 실험은 하바로프스크 시료를 사용한 시험방법과 동일하게 실시하였다. 사용한 시료의 함수비는 19.2%, 최대건조단위중량은 1.56g/cm^3 이다. EPS조각은 2~5mm 크기로 파쇄한 후 부피비 15%로 일정하게 혼합하였다. 그림 5.3.1은 EPS조각 혼합토를 나타낸 것이며, 그림 5.3.2는 파이프가 매설된 상태이다. 실험 중 수분의 증발을 막아서 함수비를 일정하게 유지하기 위하여 비닐을 덮어둔 모습을 그림 5.3.3에 나타내었다.



그림 5.3.1 EPS조각 30% 혼합토



그림 5.3.2 EPS 혼합토에 매설된 파이프



그림 5.3.3 수분방지를 위해 비닐로 덮어둔 모습

2.1 온도분포 변화

모형 토조를 냉동챔버에 넣은 후 챔버의 온도를 -14℃로 세팅하였다. 동결면은 51시간 후에 파이프에 도달하였으며, 83시간 후에는 모형 토조 하단까지 진행되었다. 동결면이 하강하는 시간이 폐타이어 혼합토 보다 오래 걸린 이유는 EPS 혼합토의 열전도율의 값이 더 작기 때문인

것으로 판단된다. 그림 5.3.4에 깊이별 온도변화를 나타내었고, 그림 5.3.5에 시간에 따른 동결면의 깊이변화를 나타내었다. 실험결과 하부 15cm까지는 온도차이가 확연히 구분이 가능 하지만, 20cm부터 바닥까지는 온도의 차이가 크게 나타나진 않았다.

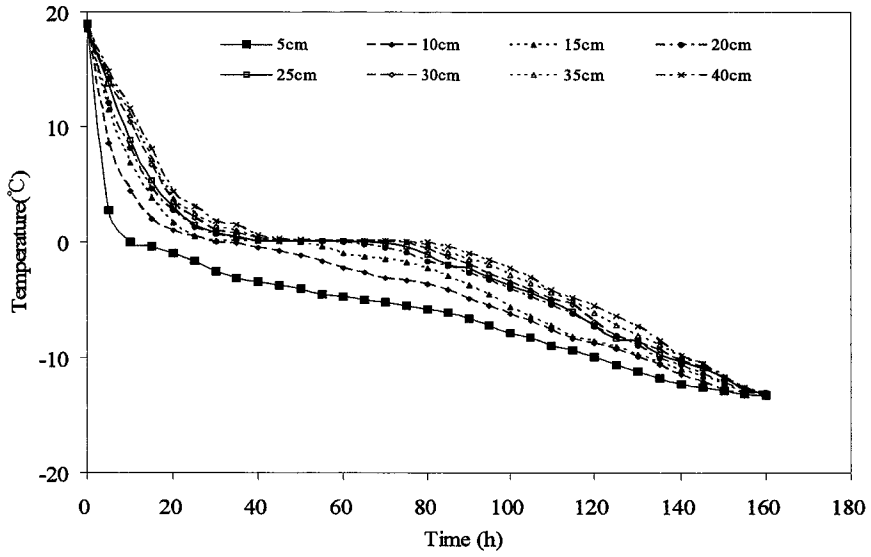


그림 5.3.4 EPS 혼합토의 시간에 깊이별 온도 변화

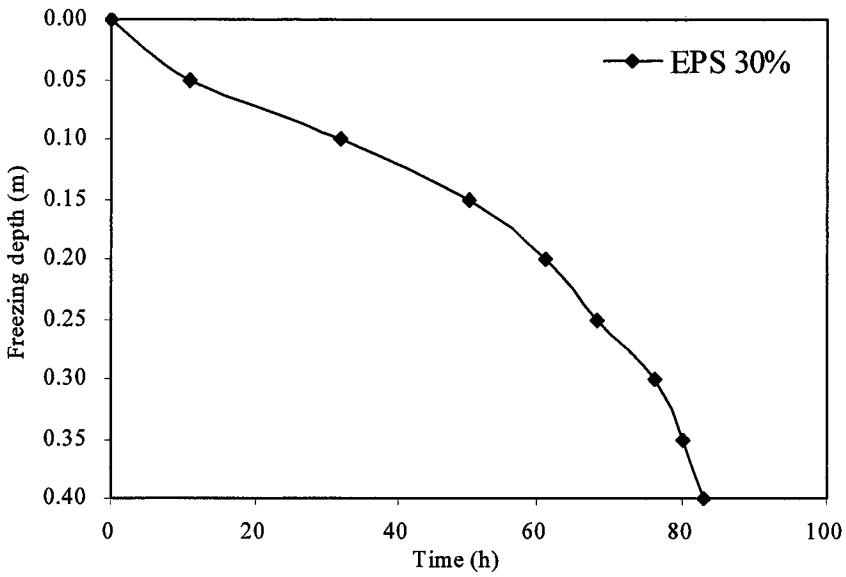


그림 5.3.5 EPS 혼합토의 시간에 따른 동결깊이 변화

2.2 위치별 스트레인 변화

매설관의 변형을 파악하기 위하여 축방향 및 원주방향으로 90° 간격으로 4개씩, 총 8개의 스트레인게이지를 부착하였다. 동결로 인해 매설관에 작용하는 시간에 따른 스트레인의 변화는 표 5.3.1에 나타내었다. 동결면이 하향으로 이동함에 딸 파이프의 스트레인도 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 원주방향 변형은 상부와 하부에서 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

표 5.3.1 폐타이어 혼합토로 성토된 파이프의 시간에 따른 스트레인

시간 (h)	파이프 온도 (°C)	원주방향 변형					축방향 변형				
		Position				평균	Position				평균
		0°	90°	180°	270°		0°	90°	180°	270°	
0	18.6	-3	-18	-9	-30	-15	-3	-15	-7	-11	-9
40	0.2	-134	-57	-87	-12	-73	-48	-122	-65	-12	-62
100	-4.3	-147	-53	-111	-64	-94	-84	-117	-124	-63	-97
160	-12.9	-142	-61	-129	-102	-109	-126	-142	-166	-87	-130

3. 모형토조를 이용한 실험 결과값 비교

모형토조를 이용한 실험은 폐타이어 혼합토(15%), EPS 혼합토(30%)의 단열효과를 비교하기 위하여 실시하였다. 동일한 조건으로 하바로프스크 시료, 폐타이어 혼합토, 그리고 EPS 혼합토로 성토된 파이프의 변형 및 깊이별 온도분포를 비교하였다.

각각의 실험별 깊이에 따른 온도분포 변화를 비교해 보면 열전도율이 가장 낮은 EPS 혼합토의 온도변화가 완만하게 측정되었다. EPS 혼합토와 폐타이어 혼합토의 온도분포 차이는 깊이가 깊어짐에 따라 더 크게 나타났다. 그림 5.3.6~그림 5.3.9 에 시료의 종류에 따른 깊이별 온도변화를 나타내었다. 그림 5.3.10에 성토 재료별 동결면 하향 시간을 나타내었다. 동결면이 바닥까지 도달하는 시간을 살펴보면 하바로프스크 시료, 폐타이어 혼합토, 그리고 EPS 혼합토가 각각 66시간, 77시간, 그리고 83시간이 걸렸다. 이러한 이유는 열전도율의 차이로 설명이 가능하며, 열전도율 값이 가장 작은 EPS 혼합토가 동결면의 하향속도가 가장 느린 것을 알 수 있다.

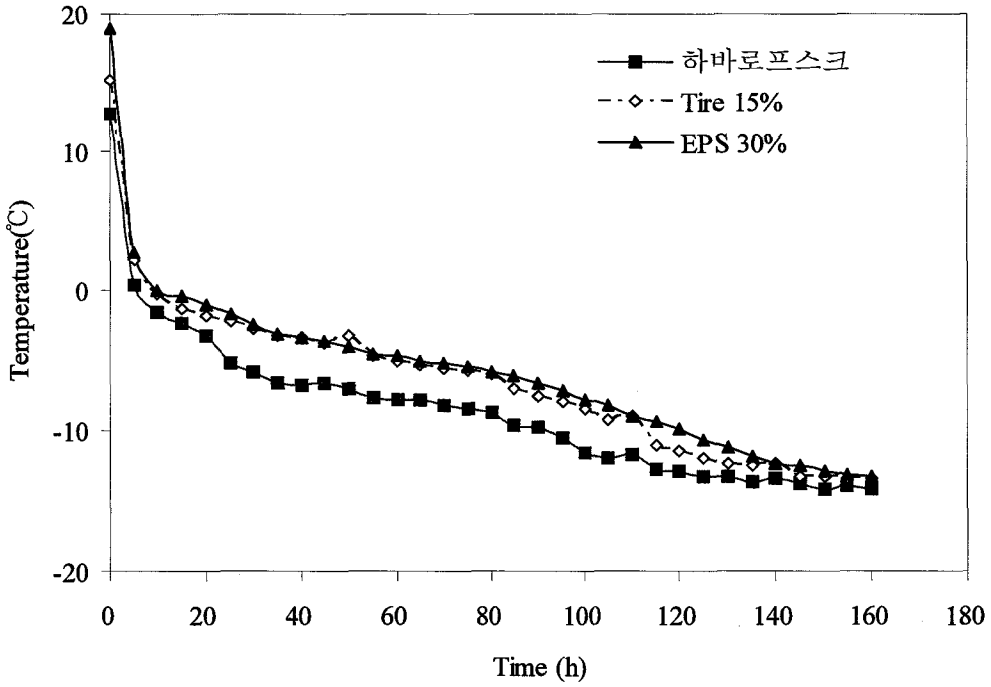


그림 5.3.6 5cm 깊이에서 성토재료별 온도변화 비교

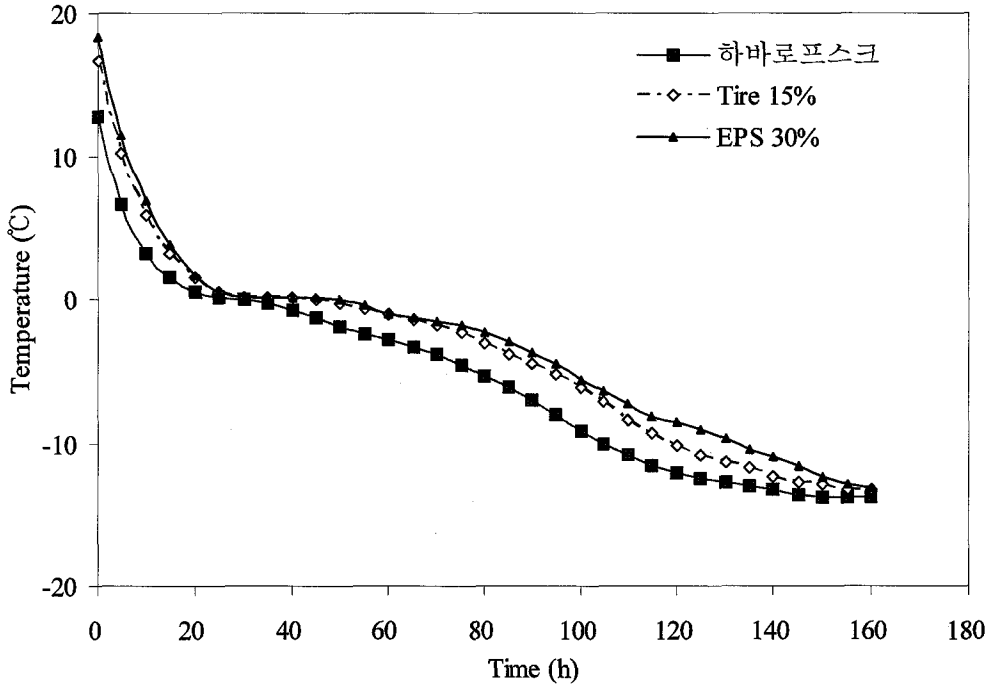


그림 5.3.7 15cm 깊이에서 성토재료별 온도변화 비교

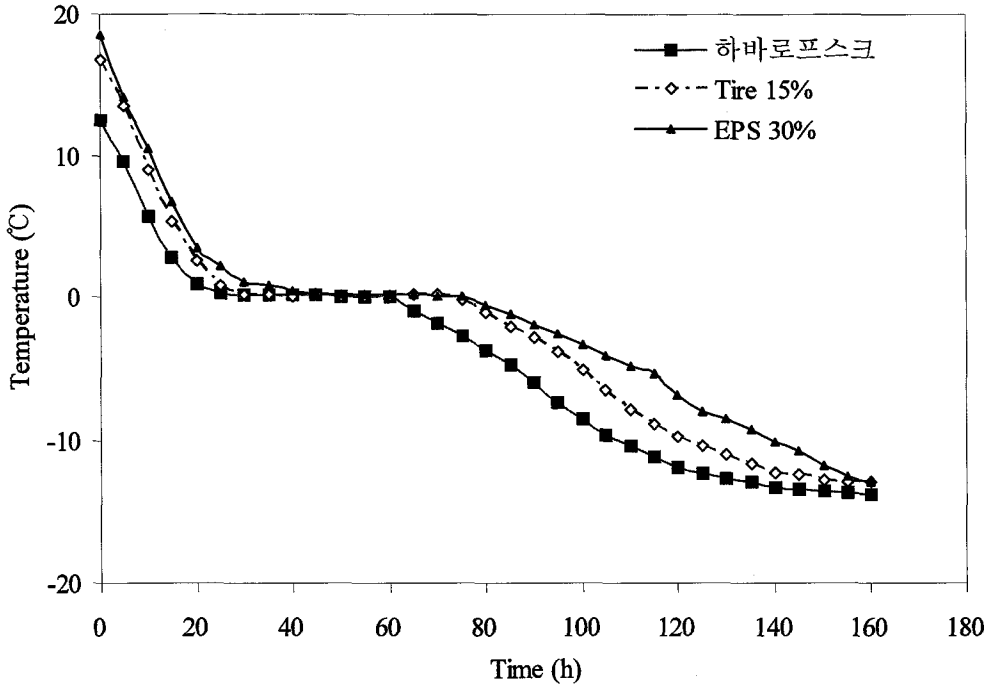


그림 5.3.8 30cm 깊이에서 성토재료별 온도변화 비교

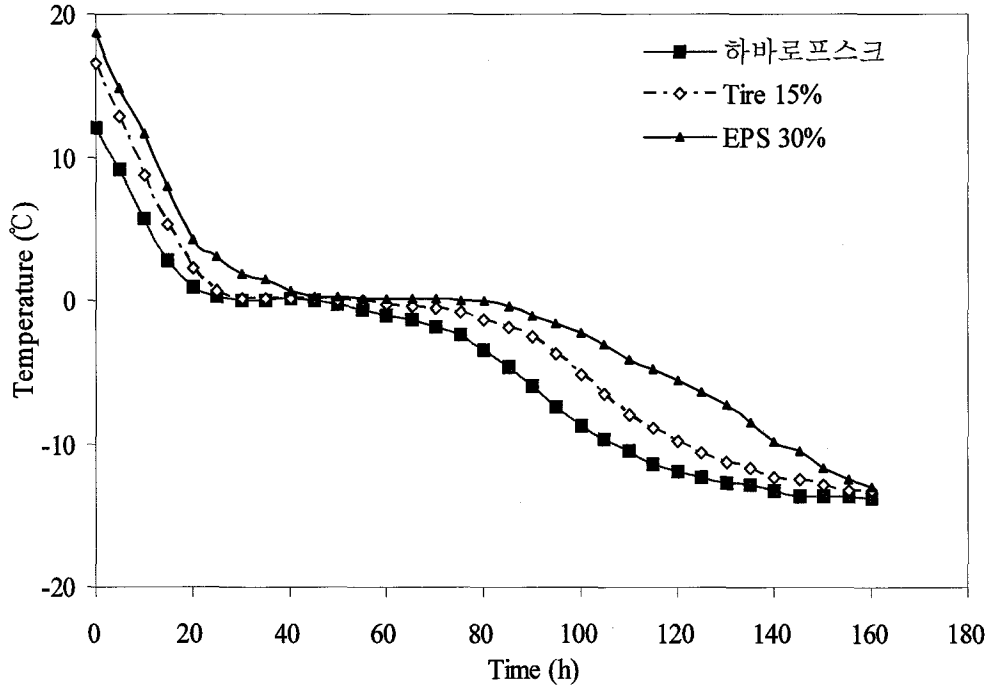


그림 5.3.9 40cm 깊이에서 성토재료별 온도변화 비교

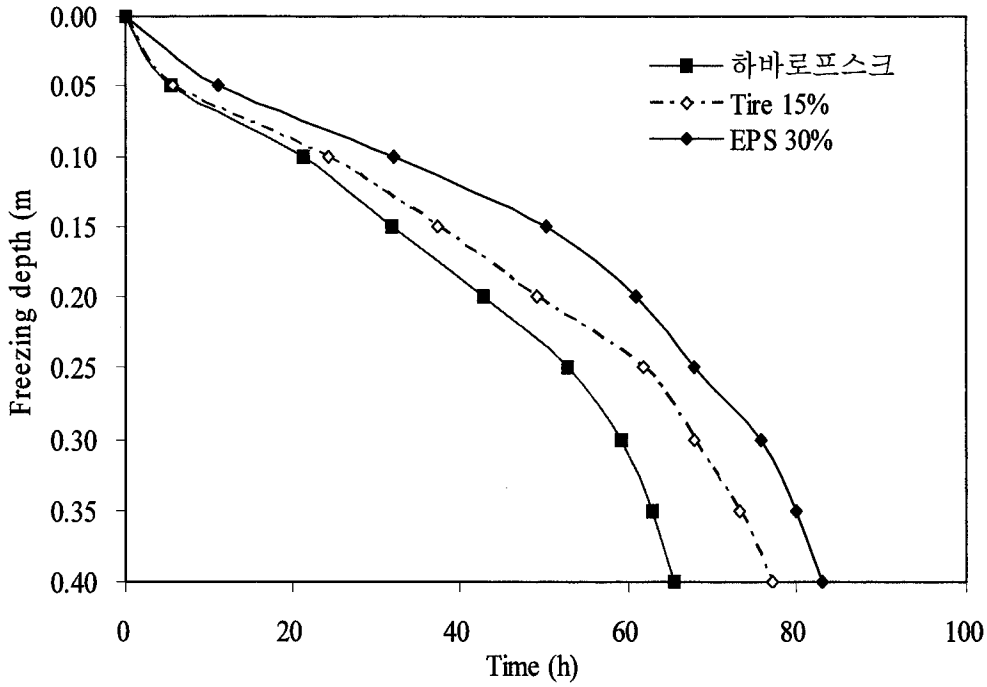


그림 5.3.10 성토재료의 종류에 따른 동결면 하향시간 비교

제 4 절 폐타이어 혼합토 경제성 평가

1. 경제성 평가 목적

매설관의 되메움 재료로 폐타이어 혼합토를 활용하는 경우와 일반모래를 포설하는 경우에 대한 경제성을 검토하고자 하였다. 이때 매설관의 되메움 재료는 ① 상부에 가해지는 하중을 균일하게 분산시켜 지하 매설물에 직접적인 하중재하를 방지하고, ② 우수 및 지하수(침투수)를 원활하게 배제하며, ③ 터파기 작업으로 인한 주변지반의 교란에 따른 지지력 저하 방지 등의 목적에 부합하여야 한다.

2. 평가 조건

폐타이어 혼합토의 경제성을 평가하기 위하여 다음과 같이 현장 조건과 재료 조건을 가정하여 경제성 평가를 실시하였다.

2.1 현장조건

- 매설현장 : 토사구간
- 관　　경 : Φ 530mm
- 기후조건 : 극한지로서 동결심도를 검토해야 함.
  (되메움재료 특성에 따른 동결심도 차이로 인해 1안의 터파기 깊이는 173cm, 2안은 187cm로 함)
- 사 토 장 : 현장에서 10Km거리

2.2 재료조건

- 1 안 : 폐타이어15% + 일반토사85% 혼합
- 2 안 : 일반모래
- 되메움재료의 열전달 특성차에 따라 1안은 별도의 관보호공이 불필요하나, 2안의 경우 유리섬유 (glass wool)로 피복 시켜야 함.

- 본 검토에서는 가스관의 운반, 하역, 용접등 제반 비용은 고려하지 않음.

3. 평가 기준 및 내용

- 터파기 기준 관련근거 : 「국도건설공사 설계실무 요령, 2008.9 국토해양부」
- 관련내용 (종배수관기준 적용)
  - ○ 터파기 적용경사 : 토사구간1:1.0, 풍화암구간1:0.5, 발파암구간1:직
  - ○ 적용단면 : 그림 5.4.1 참조

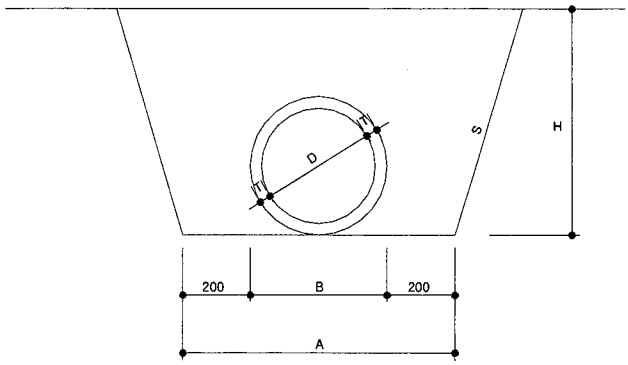


그림 5.4.1 경제성 평가 적용 단면

3.1 경제성 평가 시 검토 내용

① 공사비 영향 요소(1 안 : 폐타이어15% + 일반토사85% 혼합토)
- 폐타이어 재료비 : 560,000원/ton
- 터파기 - 되메우기 및 다짐비

② 공사비 영향 요소(2 안 : 일반모래)
- 모래구입비 : 18,000원/㎥
- 유리섬유 피복비 (재료비 및 설치비)
- 터파기 - 되메우기 및 다짐비 - 토사사토비

③ 공사 개요도 : 그림 5.4.2, 그림 5.4.3 참조

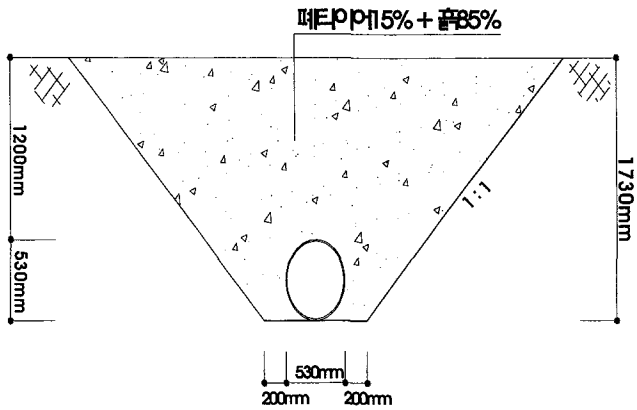


그림 5.4.2 제 1 안 공사 개요도

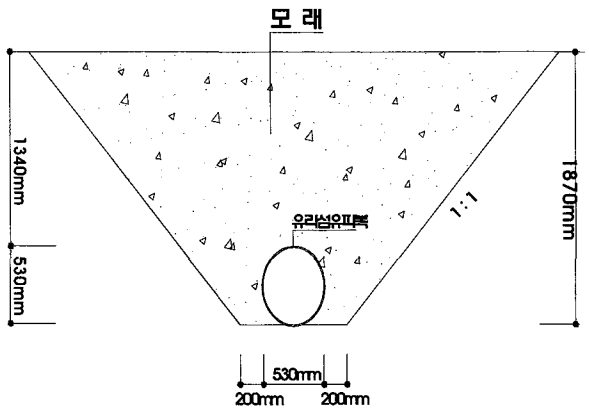


그림 5.4.3 제 2 안 공사 개요도

4. 경제성 평가

4.1 수량 산출

표 5.4.1 폐타이어 혼합토 수량 산출

(폐타이어 15% + 흙 85%)의 경우 단위 수량		
공종	산출근거	수량
터파기	{(0.93) + (4.39)} × 1/2 × 1.73	4.602 m^3/m
되메우기	1. 총 되메우기 : 4.602-{π × (0.53)2 }/4	4.381 m^3/m
	2. 폐타이어 비율(15%) : 총 되메우기 × 15% (4.381 × 0.15)	0.657 m^3/m
	3. 흙 비율 (85%) : 총 되메우기 × 85% (4.381 × 0.85)	3.724 m^3/m
잔토	터파기- 흙되메우기 : 4.602-3.724	0.878 m^3/m
폐타이어 중량	0.657 × 0.534 t/m³	0.351 t/m

표 5.4.2 일반모래 수량 산출

(일반모래부설)의 경우 단위 수량		
공종	산출근거	수량
터파기	{(0.93) + (4.67)} × 1/2 × 1.87	5.236 m^3/m
되메우기	5.236 - {π × (0.53)2 }/4	5.015 m^3/m
잔토	터파기량	5.236 m^3/m
단열재(유리섬유)	{π × (0.53) } × 1.0	1.665 m^3/m

4.2 산출 내역서

표 5.4.3 폐타이어 혼합토 산출 내역

공종명	규격	수량	단위	합계		재료비		노무비		경비	
				단가	금액	단가	금액	단가	금액	단가	금액
1. 배수공		1	식	12,947	12,947			7,726	7,726	5,221	5,221
2. 사급자재비		1	식	224,000	224,000	224,000	224,000				
가. 직접공사비계					236,947		224,000		7,726		5,221
1. 배수공		1	식		12,947				7,726		5,221
1.01. 토공					12,947				7,726		5,221
a.구조물터파기	0-2m	5	m^3	839	4,195			302	1,510	537	2,685
b.되메우기(혼합)	기계 100%	4	m^3	2,188	8,752			1,554	6,216	634	2,536
2. 사급자재비		1	식		224,000		224,000				
2.01 폐타이어					224,000		224,000				
a.폐타이어		0.4	ton	560,000	224,000	560,000	224,000				

표 5.4.4 일반모래 산출내역

공종명	규격	수량	단위	합계		재료비		노무비		경비	
				단가	금액	단가	금액	단가	금액	단가	금액
1. 토공		1	식	48,375	48,375	21,330	21,330	15,465	15,465	11,580	11,580
2. 배수공		1	식	146,056	146,056	101,002	101,002	41,684	41,684	3,370	3,370
3. 사급자재비		1	식	90,000	90,000	90,000	90,000				
가.직접공사비계					284,431		212,332		57,149		14,950
1. 토공		1	식		48,375		21,330		15,465		11,580
1.01 사토					48,375		21,330		15,465		11,580
a. 사토운반	(토사, L=10.0 Km)	5	M3	9,675	48,375	4,266	21,330	3,093	15,465	2,316	11,580
2. 배수공		1	식		146,056		101,002		41,684		3,370
2.01. 토공					4,195				1,510		2,685
a.구조물터파기	0-2m	5	m3	839	4,195			302	1,510	537	2,685
2.02. 모래부설	(기계90%+인력10%)	5	M3	21,821	109,105	18,848	94,240	2,836	14,180	137	685
2.03. 단열재설치					32,756		6,762		25,994		
a. 방수층보호재	glass wool 단열재 ,T = 40mm	2	㎡	16,378	32,756	3,381	6,762	12,997	25,994		
3. 사급자재비		1	식		90,000		90,000				
3.02 골재					90,000		90,000				
a. 모래	강모래	5	M3	18,000	90,000	18,000	90,000				

4.3 산출 근거

표 5.4.5 공사비 산출 근거(사토운반)

산출근거	재료비	노무비	경비	합계
산근 # 1 사토운반 (토 사)/M3	4,539	3,290	2,458	10,287
1.적 사(로더 2.87 ㎥ 타이어)				
qo = 2.87, K = 1.2, f = 1/1.25 = 0.80				
Eo=0.6 , m=1.8, L=8, t1 = 6, t2 = 14				
Cm = 1.8 * 8 + 6 + 14 = 34.40 <min>				
Q = 3600*2.87*1.2*0.8*0.6/34.4= 173.00 <㎥/Hr>				
재 료 비 : 29,661.69 / 173 = 171.4	171.4			171.4
노 무 비 : 23,742 / 173 = 137.2		137.2		137.2
경 비 : 30,904 / 173 = 178.6			178.6	178.6
소 계	171.4	137.2	178.6	487.2
2.운 반 (덤프 15 ton)				
E = 0.9, f1 = 1 / 1.25 = 0.80				
q1 = 15 / 1.6 * 1.250 = 11.72 <㎥/대>				
N = 11.72 / (2.87 * 1.2)= 3.40 <회/대>				
t1 = (34.4 * 3.4) / (60 * 0.6) = 3.25				
t2 = 70.0 <min> (운반거리표참조)				
t3 = 1.05 , t4 = 0.42 , t5 = 0.5				
Cm1=3.25+70+1.05+0.42+0.5 = 75.22 <min>				
Q2 =(60*11.72*0.8*0.9)/75.22=6.73 <㎥/Hr>				
재 료 비 : 27,559.15 / 6.73 = 4,094.9	4,094.9			4,094.9
노 무 비 : 19,897 / 6.73 = 2,956.4		2,956.4		2,956.4
경 비 : 14,383 / 6.73 = 2,137.1			2,137.1	2,137.1
소 계	4,094.9	2,956.4	2,137.1	9,188.4
전체 합계	4,266.0	3,093.0	2,316.0	9,675.0
⇒ t2(왕복시간) : 운반거리/적재시 평균주행속도 + 운반거리/공차시 평균주행속도)				

표 5.4.6 공사비 산출 근거(모래부설)

산출근거	재료비	노무비	경비	합계
산근 # 2 모래 부설 (기계90%+인력10%)/M3	18,848	2,836	137	21,821
※ 기 계 (90%) + 인 력 (10%)				
1. 모래구입 :				
18,000 * 1.0 M3 *1.04 = 18,720.0	18,720			18,720
소 계 :	18,720			18,720
2. 모 래 부설				
인 부 : 0.40 <인> * 66,622 * 0.1 = 2,664.8		2,664.8		2,664.8
소 계 :		2,664.8		2,664.8
3. 기 계 (백호우 0.7m³) : 90%				
q1 = 0.7 <m³> , K = 1.1, f = 1				
E = 0.90, Cm = 20 <Sec> (135°)				
Q = 3600*0.7*1.1*1*0.9/20 = 124.74 <m³/Hr>				
경 비 : 18,961 / 124.74 * 0.9 = 136.8			136.8	136.8
노 무 비 : 23,742 / 124.74 * 0.9 = 171.2		171.2		171.2
재 료 비 : 17,774.91 / 124.74 * 0.9 = 128.2	128.2			128.2
소 계 :	128.2	171.2	136.8	436.2
계 :	18,848.2	2,836	136.8	21,821
전체 합계	18,848	2,836	137	21,821

표 5.4.7 공사비 산출 근거(방수층 보호재)

산출근거	재료비	노무비	경비	합계
산근 # 3 방수층보호재 glasswool 단열재, T = 40mm/㎡	3,381	12,997		16,378
◈ 방수층보호재(유리섬유단열재,T = 40mm) : ㎡당				
1. 재 료 비				
glass wool단열재(T = 40mm) : 3,220*1.05 ㎡ = 3,381.0	3,381			3,381
계	3,381			3,381
2. 설 치 비				
방 수 공: 76,896*0.110 인 = 8,458.5		8,458.5		8,458.5
특별인부: 84,686*0.030 인 = 2,540.5		2,540.5		2,540.5
보통인부: 66,622*0.030 인 = 1,998.6		1,998.6		1,998.6
계		12,997.6		12,997.6
전체 합계	3,381	12,997		16,378

표 5.4.8 중기 산출 근거(굴삭기)

굴삭기(무한궤도) 0.7 M3				
중기가격 : 93,042 천원			분류코드 : E0002010070	
명칭	수량	단위	단가	금액
경 비 굴삭기(무한궤도)	0.2038	천원	93,042	18,961
* 소 계				18,961
재 료 비 경 유	11.6	L	1,256	14,569.6
잡 품	22	%		3,205.31
* 소 계				17,774.91
노 무 비 중기운전기사	1	인	19,897	19,897
중기조장	0.2	인	19,228	3,845
* 소 계				23,742
** 총 계				60,477.91

표 5.4.9 중기 산출 근거(로우더)

로우더(타이어) 2.87 M3				
중기가격 : 151,640 천원			분류코드 : E0003020287	
명칭	수량	단위	단가	금액
경 비 로우더(타이어)	0.2038	천원	151,640	30,904
* 소 계				30,904
재 료 비 경 유	16.4	L	1,256	20,598.4
잡 품	44	%		9,063.29
* 소 계				29,661.69
노 무 비 중기운전기사	1	인	19,897	19,897
중기조장	0.2	인	19,228	3,845
* 소 계				23,742
** 총 계				84,307.69

표 5.4.10 중기 산출 근거(덤프트럭)

덤프트럭 15 Ton				
중기가격 : 64,995 천원			분류코드 : E0006020150	
명칭	수량	단위	단가	금액
경 비 덤프트럭	0.2213	천원	64,995	14,383
* 소 계				14,383
재 료 비 경 유	15.9	L	1,256	19,970.4
잡 품	38	%		7,588.75
* 소 계				27,559.15
노 무 비 중기운전기사	1	인	19,897	19,897
* 소 계				19,897
** 총 계				61,839.15

4.4 운반 거리표

① 사토운반(관내) L=10.0km

현 장 — 5km (V=15km/h) — 5km (V=20km/h) — 사토장

- T2 = (5/15+ 5/20) × 2 × 60 = 70min
- V=15Km,20Km : 교차가 가능한 산간지도로 및 제방도로, 미포장도로

※ 관련근거 : 건설공사 표준품셈 (2009) 자료집

4.5 실적 공사비 근거

실적 공사비는 다음과 같이 "2009년 건설공사 실적 공사비 적용 공종 및 단가(국토해양부)"를 참조 하여 편성하였다.

■ DG10*(DG****) 흙쌓기공/ 비다짐

공종코드	공종명칭	규격	단위	단가	노무비율
DG100.30000	흙쌓기/토사	비다짐	m^3	530	28%

【단가정의】

① 이 단가는 도쟈 등 장비에 의한 정지비용으로 운반은 흙 운반에서 계상된다.

■ DH11*(DH11**) 되메우기 및 다짐공(인력 30%)

공종코드	공종명칭	규격	단위	단가	노무비율
DH110.30000	되메우기/토사	-	m^3	5,834	91%

【단가정의】

① 이 단가는 구조물의 인력 및 기계 되메우기 비용과 기계다짐비용 등을 포함하며, 인력 30% 기계 70%를 기준으로 한다.

■ DH11*(DH11**) 되메우기 및 다짐공(인력 10%)

공종코드	공종명칭	규격	단위	단가	노무비율
DH110.10000	되메우기/토사	-	m^3	3,985	84%

【단가정의】

① 이 단가는 구조물의 인력 및 기계 되메우기 비용과 기계다짐비용 등을 포함하며, 인력 10% 기계 90%를 기준으로 한다.

■ DH11*(DH11**) 되메우기 및 다짐공(기계)

공종코드	공종명칭	규격	단위	단가	노무비율
DH110.00000	되메우기/토사	-	m^3	2,188	71%

【단가정의】

① 이 단가는 구조물의 기계 되메우기 및 다짐비용 등을 포함한다.

■ DE***(DE****) 터파기/기계

공종코드	공종명칭	규격	단위	단가	노무비율
DE110.10000	터파기/육상토사	0-2m	m^3	839	36%
DE120.10000	터파기/육상토사	0-4m	m^3	923	36%
DE130.10000	터파기/육상토사	0-6m	m^3	956	36%
DE140.10000	터파기/육상토사	6-10m	m^3	1,197	42%
DE110.20000	터파기/용수토사	0-2m	m^3	1,329	36%
DE120.20000	터파기/용수토사	0-4m	m^3	1,406	36%
DE130.20000	터파기/용수토사	0-6m	m^3	1,593	36%
DE140.20000	터파기/용수토사	6-10m	m^3	1,823	42%
DE210.10000	터파기/육상리핑암	0-2m	m^3	20,169	59%
DE220.10000	터파기/육상리핑암	0-4m	m^3	21,489	59%
DE230.10000	터파기/육상리핑암	0-6m	m^3	21,684	59%
DE240.10000	터파기/육상리핑암	6-10m	m^3	23,134	67%
DE210.20000	터파기/용수리핑암	0-2m	m^3	28,154	59%
DE220.20000	터파기/용수리핑암	0-4m	m^3	28,389	59%
DE230.20000	터파기/용수리핑암	0-6m	m^3	28,892	59%
DE240.20000	터파기/용수리핑암	6-10m	m^3	29,344	67%
DE310.10000	터파기/육상발파암	0-2m	m^3	24,804	72%
DE320.10000	터파기/육상발파암	0-4m	m^3	25,328	72%
DE330.10000	터파기/육상발파암	0-6m	m^3	26,009	72%
DE340.10000	터파기/육상발파암	6-10m	m^3	26,812	81%
DE310.20000	터파기/용수발파암	0-2m	m^3	36,665	75%
DE320.20000	터파기/용수발파암	0-4m	m^3	37,246	75%
DE330.20000	터파기/용수발파암	0-6m	m^3	38,110	75%
DE340.20000	터파기/용수발파암	6-10m	m^3	41,677	86%

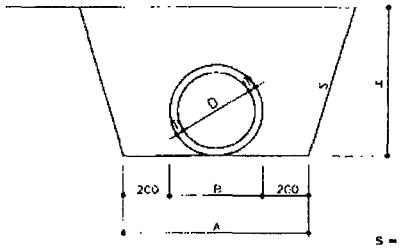
【단가정의】

① 이 단가는 구조물 터파기의 토질별·깊이별 소요비용으로, 기계시공에 준한다.

② 발파암 터파기는 착암기에 의한 암석절취비용(발파비, 기계사용료) 및 집토비용을 포함한다.

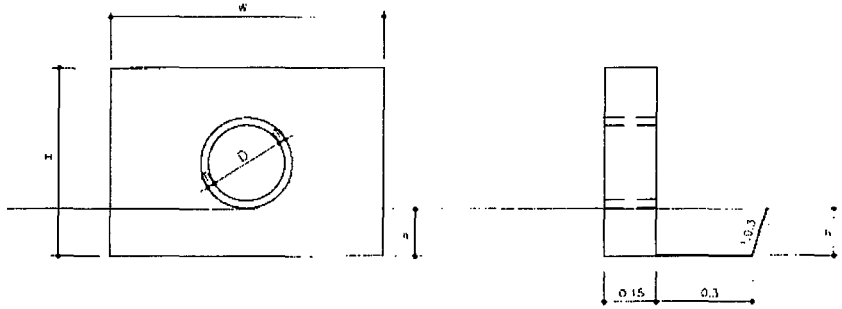
종 배 수 관

종배수관 토공 단위수량



S = 토사 1 : 1
리핑 1 : 0.5
풍화 1 : 0

면 벽 단 위 수 량



1. 터 파 기
   (0.9+hX0.3)XhXWX1/2
2. 되메우기
   (0.6+hX0.3)XhXWX1/2
3. 유용토(흙시멘구 콘발용중, 그외는 90%)
   (터파기 − 되메우기)
4. 기 푸 림
   2X(HX0.15)+2X(WXH−(πX(D+2T)²X1/4))
5. 콘크리트
   HX0.15W−0.15−X(πX(D+2T)²X1/4)

치수표 및 재료표

(1M/M)

규 격 구 배	H	H	A	터파기			되메우기			유용토	몰탈(1:2)	비 고
(M/M)	(M/M)	(M/M)	(M/M)	토 사 (M³)	리 핑 (M³)	발 파 (M³)	토 사 (M³)	리 핑 (M³)	발 파 (M³)	(M³)	(M³)	
ø 600	50	900	700	1,100	1,800	1.395	0.990	1.415	1.010	0.805	0.385	0.0048	
ø 800	66	1,100	932	1,332	2.675	2.070	1.465	1.993	1.388	0.782	0.682	0.0064	
ø 1,000	82	1,300	1,164	1,564	3.723	2.878	2.033	2.659	1.814	0.959	1.064	0.0119	
ø 1,200	95	1,500	1,390	1,790	4.935	3.810	2.685	3.418	2.293	1.168	1.517	0.0142	

* 몰탈 배합비 및 몰탈량은 건고부 표준품셈 적용.

* 터 파 기 : (2A + 0.6H) X H/2
* 되메우기 : 터 파 기 − (πB²/4)
* 유 용 토 : 터 파 기 − 되메우기

치수표 및 재료표

D (M/M)	T (M/M)	H (M/M)	W (M/M)	h (M/M)	콘크리트 25-21-8 (M³)	거푸집 (합판 용) (M²)	터파기 (M³)	되메우기 (M³)	유용토 (M³)	비 고
ø 300	30	750	1,000	150	0.103	1.613	0.075	0.052	0.024	
ø 450	38	1,000	1,500	250	0.192	2.865	0.183	0.127	0.056	
ø 600	50	1,200	2,100	250	0.320	4.595	0.256	0.177	0.079	
ø 800	66	1,600	2,700	250	0.505	7.186	0.329	0.228	0.101	
ø1,000	82	1,700	3,400	250	0.707	9.947	0.469	0.326	0.143	
ø1,200	95	2,000	4,100	300	1.002	13.965	0.744	0.523	0.221	

공 사 명	시 행 청	용 역 회 사	측 량	설 계 일 자				도 면 명	도면번호
[illegible] 도로건설공사	국토해양부 [illegible]지방국토관리청							송 바 수 관	3.007

4.7 물가 자료

(略解說)
受渡場所 : ③店舖上車渡
決濟條件 : 現金
生來規模 : 單位當
附 價 稅 : 別途

〔注 記〕
* 유리섬유셀프카바는 난연방수 은박지, 은박크라프트양으로 결단장한 배관용 유리면단열재로서 시공이 편리함.

(調査段階)
① 메 이 커 - ② 도 매 상 - ③ 수 요 자

유리섬유셀프카바(Glass Fiber Self Pipe Cover)　(價格單位 = 원)

名	規格	單位	價 ③ 格 25t	40t	50t	75t	品名	規格	單位	價 ③ 格 25t	40t	50t	75t
유셀프카바	15mm ½"	m	1,190	2,150	3,180	6,730	유리섬유셀프카바	80mm 3"	m	2,670	4,540	6,140	11,380
"	20 ¾	"	1,320	2,380	3,420	7,090	"	100 4	"	3,090	5,430	7,260	12,340
"	25 1	"	1,460	2,610	3,710	7,230	"	125 5	"	3,660	6,320	8,380	14,290
"	32 1¼	"	1,660	2,920	4,070	7,850	"	150 6	"	4,210	7,260	9,500	15,950
"	40 1½	"	1,810	3,140	4,360	8,230	"	200 8	"	-	9,030	11,740	20,190
"	50 2	"	2,120	3,550	4,860	9,040	"	250 10	"	-	10,860	13,990	23,750
"	65 2½	"	2,340	4,110	5,570	10,490	"	300 12	"	-	13,200	16,970	27,360

유리섬유파이프카바(Glass Fiber Pipe Cover)　(價格單位 - 원)

名	規格	單位	價 ③ 格 25t	40t	50t	75t	品名	規格	單位	價 ③ 格 25t	40t	50t	75t
섬유	15mm 1/2"	m	1,080	1,950	2,880	6,090	유리 섬유	80mm 3"	m	2,420	4,110	5,560	10,300
프카바	20 3/4	"	1,200	2,160	3,100	6,410	파이프카바	100 4	"	2,800	4,910	6,570	11,350
	25 1	"	1,330	2,380	3,360	6,550	"	125 5	"	3,320	5,720	7,580	12,920
	32 1¼	"	1,530	2,640	3,690	7,100	"	150 6	"	3,820	6,570	8,600	14,420
	40 1½	"	1,640	2,840	3,940	7,450	"	200 8	"	-	8,170	10,620	18,260
	50 2	"	1,930	3,220	4,410	8,190	"	250 10	"	-	9,820	12,650	21,470
	65 2½	"	2,130	3,720	5,040	9,490	"	300 12	"		13,140	16,880	27,220

미네랄울파이프카바(Mineral Wool Pipe Cover) -KSL 9102-　(價格單位 - 원)

名	規格	單位	價 ③ 格 25t	40t	50t	75t	品名	規格	單位	價 ③ 格 25t	40t	50t	75t
울	15mm 1/2"	m	1,320	2,780	3,590	6,560	미네랄 울	65mm 2½"	m	2,890	4,640	5,700	10,250
프카바	20 3/4	"	1,450	3,050	3,850	6,940	파이프카바	80 3	"	3,210	5,120	6,310	11,120
	25 1	"	1,670	3,350	4,200	7,410	"	100 4	"	3,460	5,590	7,440	12,820
	32 1¼	"	1,920	3,660	4,620	8,030	"	125 5	"	4,010	6,510	8,560	14,570
	40 1½	"	2,120	3,860	4,800	8,360	"	150 6	"	4,710	7,440	9,720	16,300
	50 2	"	2,400	4,140	5,080	9,190							

시리카(규산칼슘) 파이프카바(Silica Pipe Cover) -KSL 9101-　(單位 : m) (價格單位 = 원)

名	規格	價 ③ 格 30mm	40mm	50mm	65mm	75mm	100mm	品名	規格	價 ③ 格 30mm	40mm	50mm	65mm	75mm	100mm
	呼 徑								呼 徑						
리 카	15A 1/2inch	1,890	2,990	4,330	6,790	8,710	14,590	시 리 카	200A 8inch	8,970	12,430	16,130	22,120	26,410	38,190
프카바	20 3/4	2,070	3,230	4,620	7,160	9,160	15,170	파이프카바	250 10	10,860	14,950	19,270	26,210	31,130	44,470
	25 1	2,310	3,550	5,050	7,710	9,790	16,010	"	300 12	12,710	17,410	22,350	30,220	35,760	50,640
	32 1¼	2,640	3,980	5,580	8,390	10,590	17,070	"	350 14	13,810	18,880	24,190	32,620	38,510	54,320
	40 1½	2,850	4,270	5,930	8,870	11,120	17,790	"	400 16	15,620	21,300	27,210	36,540	43,050	60,360
	50 2	3,270	4,840	6,640	9,790	12,190	19,220	"	450 18	17,440	23,720	30,240	40,460	47,580	66,410
	65 2½	3,820	5,560	7,520	10,960	13,520	21,010	"	500 20	19,250	26,140	33,260	44,400	52,120	72,460
	80 3	4,240	6,170	8,310	11,950	14,670	22,530	"	550 22	21,070	28,560	36,290	48,320	56,650	78,510
	90 3½	4,730	6,790	9,080	12,950	15,830	24,080	"	600 24	22,880	30,980	39,310	52,260	61,190	84,560
	100 4	5,160	7,360	9,790	13,880	16,910	25,500	"	650 26	24,680	33,400	42,340	56,190	65,730	90,610
	125 5	6,160	8,680	11,450	16,040	19,380	28,820	"	700 28	26,500	35,820	45,360	56,500	70,270	96,650
	150 6	7,150	10,010	13,100	18,180	21,880	32,140	"	750 30	28,310	38,240	48,390	64,050	74,800	102,700


물가DB 20만여 건
적산DB 1만여 건
www.kprc.or.kr
무엇보다 빠르고 정확한 비즈니스를 꿈꾸는 당신을 위해 (사)한국물가협회는 Web Site를 통하여 보다 알차고 앞선 경제관련 Data Base를 제공합니다.
인터넷광고 연중 수시 접수!!
인터넷 회원 문의_Tel.(02)799-0750 Fax.(02)799-0882
인터넷 광고 문의_Tel.(02)799-0730 Fax.(02)799-0882
한국물가협회

5. 경제성 평가 결과

앞의 2가지 되메우기 방법에 대한 공사비 산출결과 1안(폐타이어15%+일반토사85%)의 공사비가 단위 m당 237,000원으로 2안(일반모래)의 284,400원에 비해 약 17% 저렴하게 산출됨.

1안의 경우 터파기한 토사를 다시 되메움에 따라 사토비가 발생하지 않으며, 더욱이 폐타이어를 재활용 할 수 있어 환경 측면에서 유리함.

2안의 경우 되메움용 모래를 구입하게 되어 공사비 증액은 물론 환경측면에서도 불리하고 잔토처리를 위한 운반비 발생으로 공사비가 고가임. 특히, 사토장이 멀어 운반 거리가 긴 경우에는 공사비가 더욱 커지게 되며, 공사규모가 클 경우 사토장 확보 등 부대비용이 증가하고 환경적으로 불리함.

표 5.4.11 폐타이어15% + 일반토사85%일 경우 (직접공사비)

명 칭	규 격	단위	수 량	단 가	금 액	비 고
1. 배수공					12,947	
	구조물터파기	㎥	5	839	4,195	품셈
	되메우기 및 다짐	㎥	4	2,188	8,752	실적
2. 자재비					224,000	
	분쇄용폐타이어	ton	0.4	560,000	224,000	
계					236,947	

표 5.4.12 일반모래일 경우 (직접공사비)

명 칭	규 격	단위	수 량	단 가	금 액	비 고
1. 토공					48,375	
사토처리		㎥	5	9,675	48,375	품셈
2. 배수공					146,056	
	구조물터파기	㎥	5	839	4,195	실적
	모래부설	㎥	5	21,821	109,105	품셈
	단열재설치	㎡	2	16,378	32,756	품셈
3. 자재비					90,000	
	모래	㎥	5	18,000	90,000	
계					284,431	

※ 단열재(glass wool) 자재비는 2009.07 물가자료 인용

※ 사토처리비는 사토운반거리를 10.0Km를 기준으로 금액을 산정 하였으나, 운반거리 및 사토장 확보가 곤란한 현장 조건일 경우에는 "토공" 공사비의 증액이 예상됨.

제 6 장 Thermal siphon을 이용한 실내 모형실험

제 1 절 실험용 계측장치 및 thermal siphon

1. 개요

영구동토지대에서 건설되는 파이프라인, 철도, 항만 등 인프라의 설계 및 시공에서 기초지반의 거동에 따른 구조물의 안정성 문제는 중요한 부분으로 다루어 져야 한다. 특히 영구동토지역의 경우 시공과정 및 사용과정에서 발생할 수 있는 지반의 열변형을 차단하여 지반을 안정화 하는 기술이 근간을 이룬다. Thermal siphon은 기체와 액체의 상변화에 의해 열을 수송하는 원리로 다양한 작동유체를 사용하여 사용 환경에 적합한 열적 안정화를 기대할 수 있는 장치이다.

본 실험은 모형토조에 국내에서 제작한 thermal siphon을 설치하여 수행하였다. Thermal siphon의 효과를 확인하기 위하여 깊이별, 수평방향별 온도센서를 매설하여 온도 분포를 분석하였다.

2. 실험장치 특징

2.1 냉동챔버

동결챔버는 그림 6.1.1과 같이 폭 2.5m×너비 3m×높이 4m로 -30℃~+50℃의 범위에서 자유롭게 온도를 설정할 수 있다. 냉동챔버는 실험기간 온도를 다양하게 설정하여 실험을 수행할 수 있으며 연속적으로 동결융해를 반복할 수 있다. 또한 제어장치를 통하여 온도를 설정할 수 있으며 챔버 내부 5방향 벽면에 설치된 온도 센서를 통하여 외부 스크린에서 벽면 각각의 온도를 확인 할 수 있다. 또한 원하는 온도로 1시간 이내로 조절 할 수 있는 장점이 있으며, 대기 순환식이기 때문에 온도 오차는 약 ±1℃이다.



그림 6.1.1 극지 연구용 냄동챔버



(a) 냉기 배출구



(b) 챔버 내부바닥



(c) 냉동장치



(d) 냉동 제어반

그림 6.1.2 냉동챔버 주요 구성장치

2.2 매설관 시험용 모형토조

모형실험에 사용된 매설관 시험용 모형토조의 크기는 가로 1.2m×세로 1.0m×높이 1.2m이다. 그림 6.1.3은 매설관 실험 모형토조의 실제 모습이다.

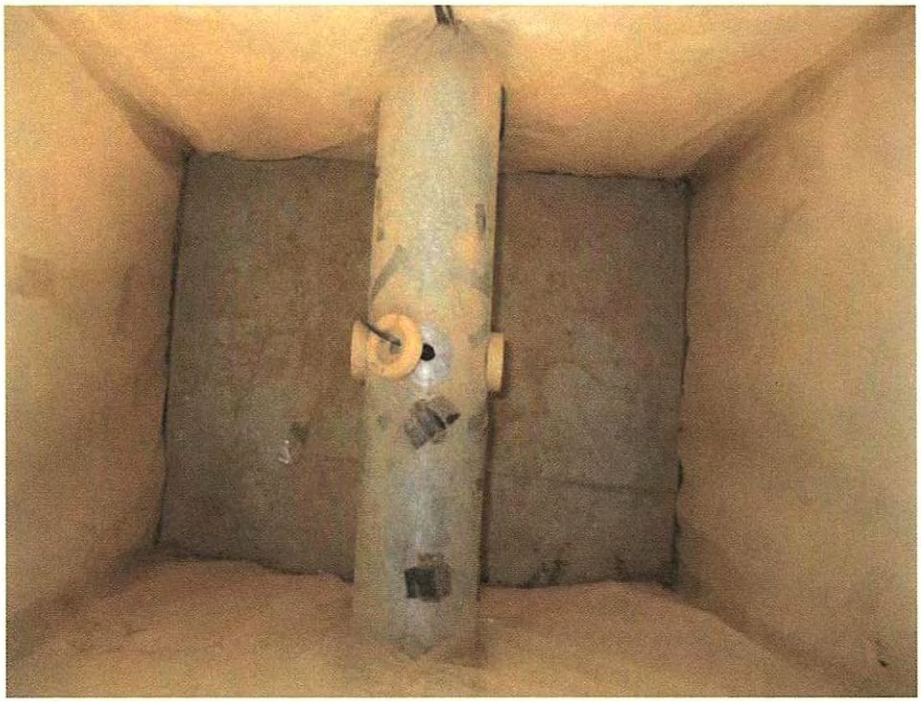


그림 6.1.3 실험에 사용된 모형토조

2.3 온도센서

온도센서는 토조의 깊이별로 10cm 간격으로 8개, 파이프 상단부에 1개 등 총 9개의 thermo couple을 설치하였다. thermo couple은 측정범위가 -270℃~400℃이며 센서선단부에 온도를 감지하는 원리이다. 데이터 수집을 위해서 Tokyo Sokki사의 TDS-530을 이용하며, 계측 소프트웨어로는 KMTL사에서 제작한 Static-LCS(Ver 3.0)을 이용하였다.

2.4 Thermal siphon의 원리 및 설계

Thermal siphon은 파이프 본체에 들어 있는 기체, 액체의 상변화에 의해 열을 수송하는 작동유체를 이용하여 효과적으로 지중의 열을 공기 중으로 배출할 수 있도록 고안된 장치이다. 작동

유체는 기화열을 받아 급격히 증발을 시작하기 때문에 증발부는 기체압이 높아져 응축부와 압력차가 생기고 기체의 이동이 시작된다. 증발부에서 기체가 응축부로 흘러가면 낮은 온도 때문에 응축하여 액체로 변화하고 액체에서 기체로 변환되었을 때 흡수한 기화열을 파이프로 방출하기 때문에 파이프는 가열부와 거의 같은 온도까지 상승한다. 액화된 작동유체는 중력에 의해 증발부로 복귀하고, 다시 증발을 반복하는 과정을 거치면서 결과적으로 증발부의 높은 온도를 감소시키게 된다.

Thermal siphon은 영구동토지대에서 구조물을 시공하거나 사용하는 도중 발생할 수 있는 열적변형을 효과적으로 방지해서 구조물 전체의 안정성을 유지하는 장치로 활용된다. 특히 알라스카나 시베리아 지역에서 도로, pipe line 등 중요 구조물의 안정성을 확보하기 위해서 thermal siphon을 활용한 사례가 많다. thermal siphon의 장점 중 하나는 대상지반의 환경에 맞춰서 작동유체를 달리하거나 thermal siphon의 형태 및 사이즈를 변경하여 효과적인 적용이 가능하다는 것이다. 실내 모형실험에 사용된 thermal siphon은 프레온(R-22)를 작동유체로 하였으며, 응축부 30cm, 단열부 20cm, 증발부 50cm로 설계하였다. 증발부와 단열부는 구리로 제작하였으며, 응축부는 외기에 의한 열 방출이 쉽도록 하기 위해서 알루미늄 소재에 fin 가공부를 별도로 두었다. 그림 6.1.4에 thermal siphon의 작동 원리를 나타내었고, 그림 6.1.5에 여러 종류의 thermal siphon을 나타내었다.

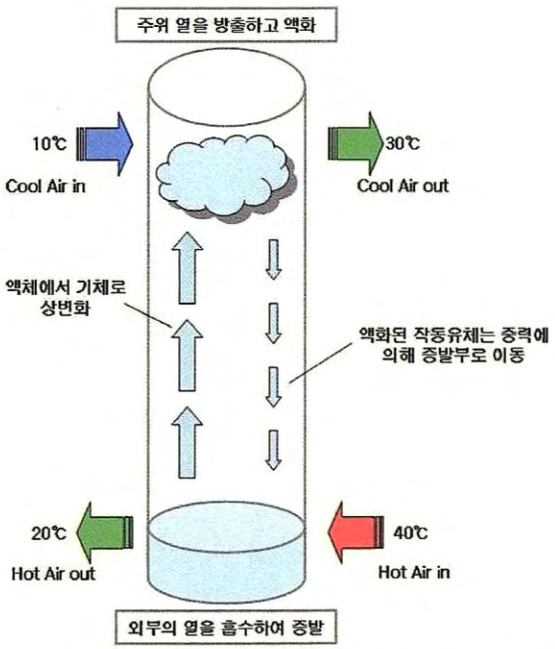


그림 6.1.4 Thermal siphon 작동 원리



그림 6.1.5 다양한 종류의 Thermal siphon

3. 실험방법

시험에 사용된 대상 시료는 하바로프스크에서 채취한 시료로써 함수비 18.5%, 최대건조단위중량 1.62g/cm^3 이다. 최대 건조단위중량의 80~90%로 다짐을 실시하였고, 10cm 간격으로 소형 전동 다짐기로 다짐을 실시하였다.

토조의 벽면 15cm 지점에 thermal siphon을 설치하고 수평으로 15cm 떨어진 지점에 지표면으로 부터 10cm 깊이로 온도센서를 설치하였다. 또한 thermal siphon의 성능을 실험하기 위하여 thermal siphon으로부터 75cm 떨어진 거리에 깊이별 10cm 간격으로 온도센서를 설치하였다. 수평방향으로 thermal siphon의 영향을 측정하기 위하여 설치지점으로부터 수평으로 15cm 간격으로 3개의 온도센서를 설치하였다. 대기 중 찬 공기는 상부에서 1차원적으로만 침투할 수 있도록 토조 내 벽면에 10cm의 스티로폼을 설치하여 측벽으로의 찬 공기의 침투를 차단하였다. 그림 6.1.6은 실내 모형실험 모식도이다.

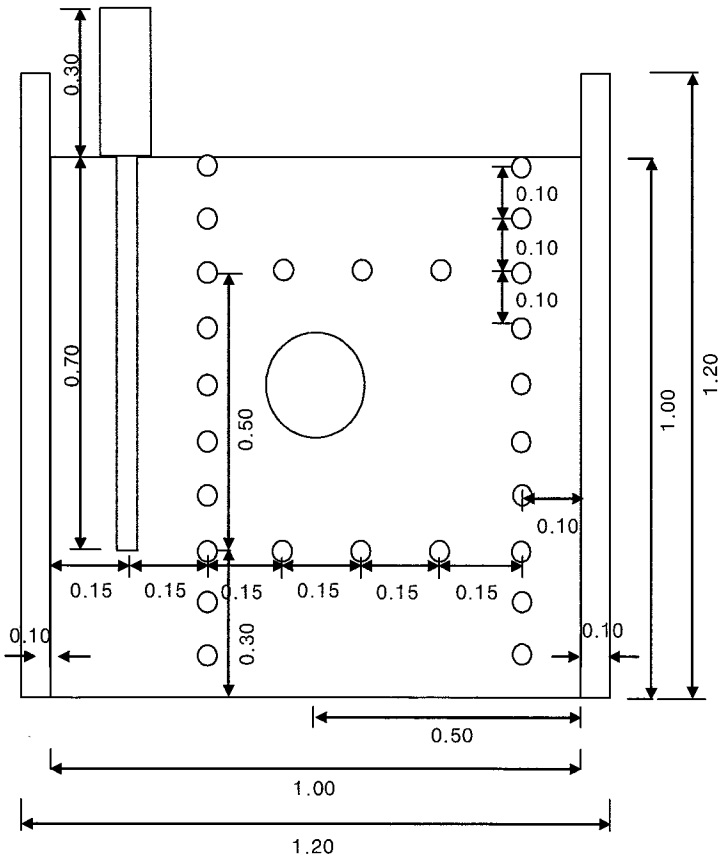


그림 6.1.6 실내시험 모식도(단위:m)

모형 매설관 지반의 조성은 우선 토조의 바닥면과 측벽에 10cm의 스티로폼을 설치하여 상부 이외에 찬 공기가 침투하는 것을 방지하였다. 또한 스티로폼 설치면에 비닐을 덮어 이중으로 찬 공기를 차단하였고 흙이 팽창되면서 발생하는 토조면과 흙시료가 압착되는 현상을 방지하고자 하였다. 또한 온도센서를 토조 내부에 10cm 간격으로 설치하였다.

다짐작업은 소형 vibrator를 사용하였고 다짐 높이는 매층 10cm 높이로 구분하여 계획된 다짐밀도를 맞추면서 작업하였다. 다짐작업이 끝나면 실험 중, 흙 시료에서 수분이 날아가는 것을 방지하기 위하여 토조 상부에 비닐을 덮는다. 마지막으로 토조를 대형챔버로 옮긴 후, 동결실험을 수행하였다. 냉동챔버의 온도를 -15℃로 설정 하고 270시간 냉동을 시킨 후 실온에서 해동을 실시하였다. 그림 6.1.7~그림 6.1.13 까지 실험의 진행과정을 나타내었다.



그림 6.1.7 실험에 사용한 thermal siphon



그림 6.1.8 깊이별 온도센서를 매설하는 장면



그림 6.1.9 Thermal siphon 설치 후 다짐작업

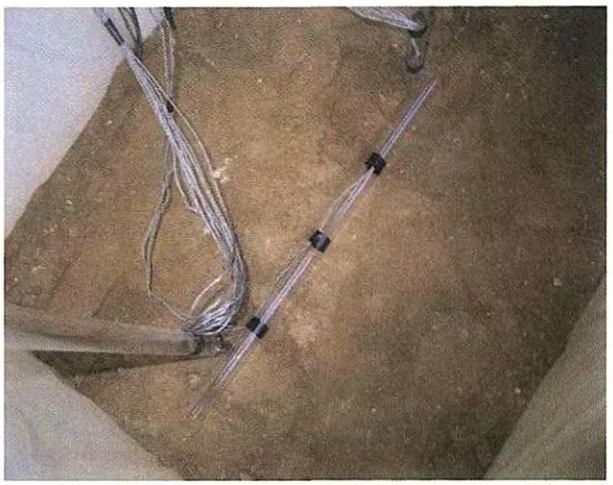


그림 6.1.10 수평방향 온도센서 설치 장면



그림 6.1.11 다짐작업 완료 모습그림



6.1.12 모형토조를 냉동챔버에 설치한 장면

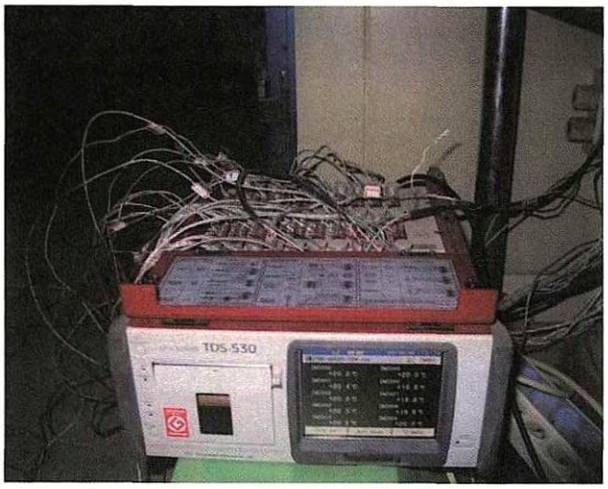


그림 6.1.13 데이터 로거

제 2 절 실험결과 및 분석

1. 깊이에 따른 온도변화

Thermal siphon의 성능을 시험하기 위하여 thermal siphon으로부터 수평방향으로 15cm 및 75cm 떨어진 지점에 표면으로부터 수직방향으로 10cm 간격으로 온도센서를 설치하였다. 그림 6.2.1에 thermal siphon으로부터 15cm 이격된 지점에 설치한 온도센서의 깊이별 온도분포를 나타내었고, 그림 6.2.2에 thermal siphon으로부터 75cm 떨어진 지점에 설치한 깊이별 온도분포를 나타내었다.

실험 시작 후 115시간 경과 후 냉동챔버의 전원이 꺼지고 130시간 정도 경과한 후 전원이 다시 켜지는 상황이 발생하였다. 대기의 급격한 온도 변화가 발생 하더라도 60cm이하의 깊이에서는 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다.

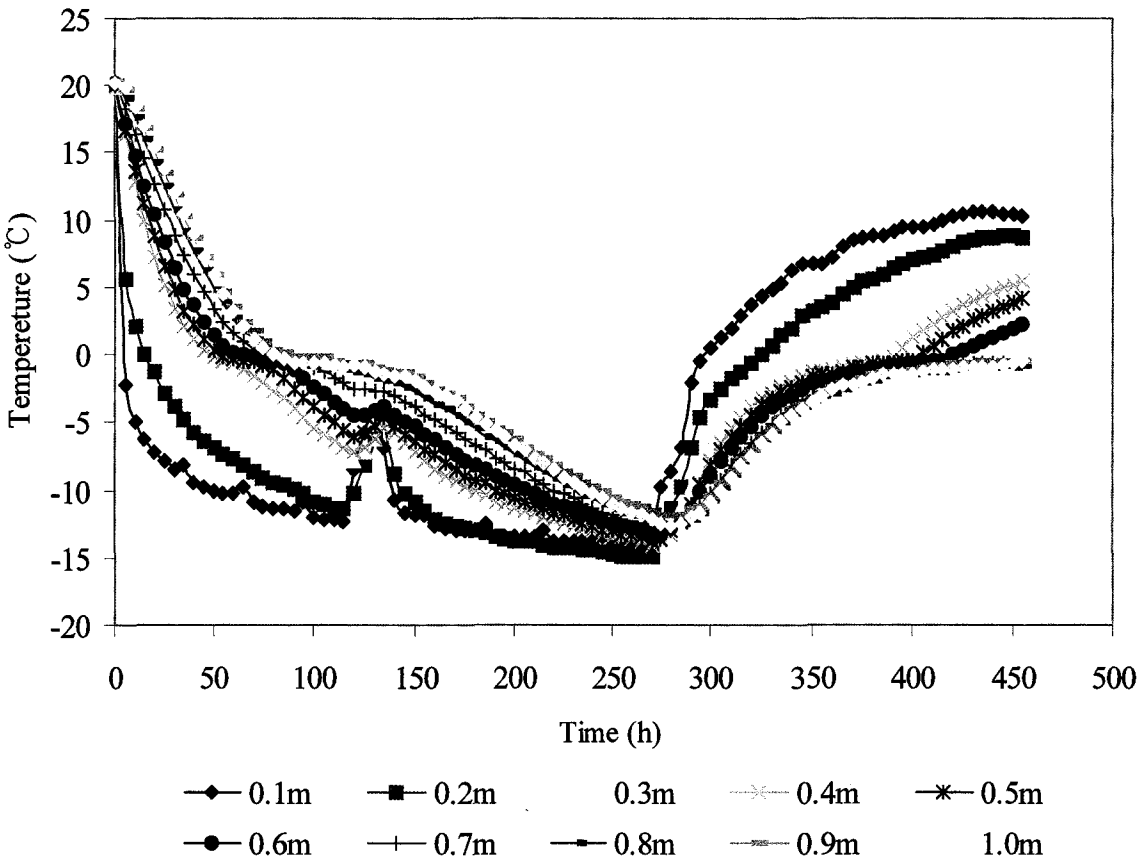


그림 6.2.1 Thermal siphon으로부터 15cm 지점에 설치한 온도센서의 깊이별 온도분포

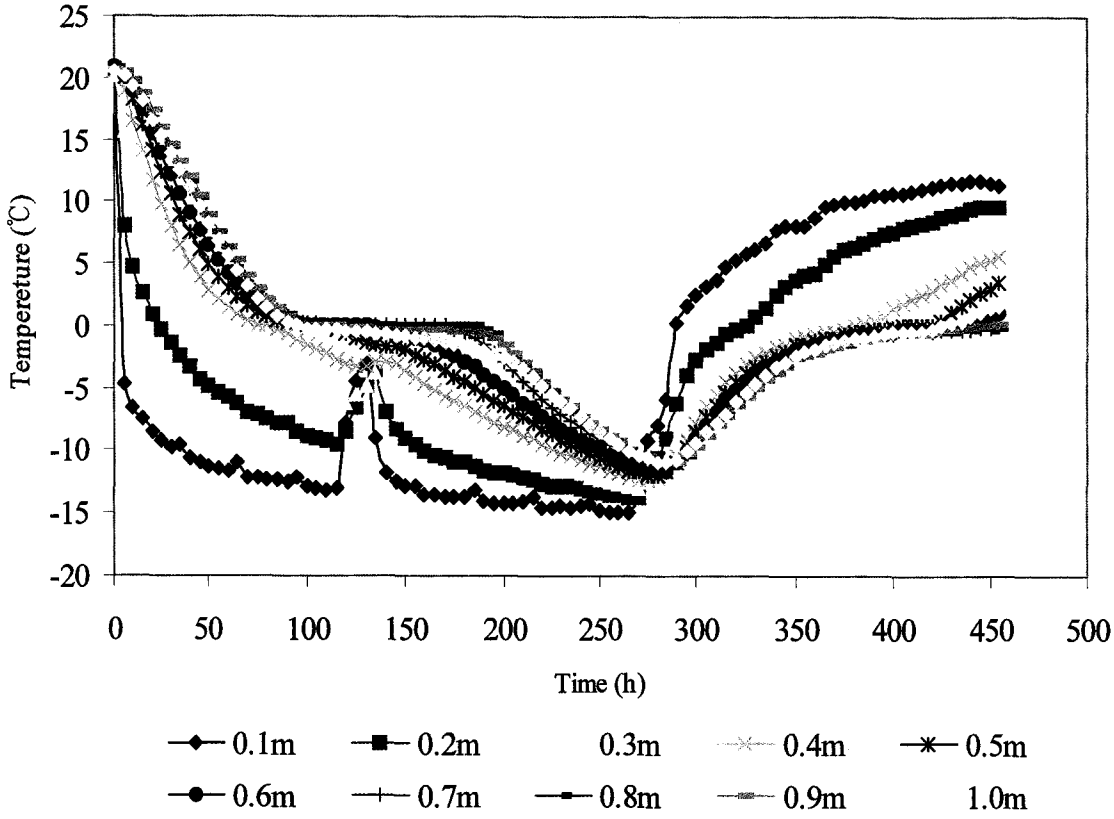


그림 6.2.2 Thermal siphon으로부터 75cm 떨어진 지점에 설치한 깊이별 온도분포

그림 6.2.3~그림 6.2.6 에 thermal siphon으로부터 15cm 및 75cm 떨어진 지점에 설치한 깊이별 온도분포의 차이를 나타 내었다. 표면으로부터 10cm 깊이 까지는 thermal siphon이 매설된 지점과 거리가 가까울 때 온도가 더 높게 나타났으나 깊이가 깊어질수록 thermal siphon과 거리가 가까운 지점의 온도가 낮게 분포됨을 알 수 있다. Thermal siphon이 설치 된 지반은 지반의 열변형을 차단하여 지반을 안정화 하는데 충분한 성능을 나타낼 것으로 기대된다. Thermal siphon의 응축부에는 증발부의 따뜻한 열이 올라와서 차갑게 식혀서 작동유체가 하강해야 최상의 성능을 발휘한다. 그러나 실내실험에서는 냉동챔버 내의 공기 순환이 원활하지 않아 응축부에 따뜻한 공기가 정체된 상황이 발생하므로 thermal siphon의 성능이 최대한 발휘되지 못한 측면이 있다.

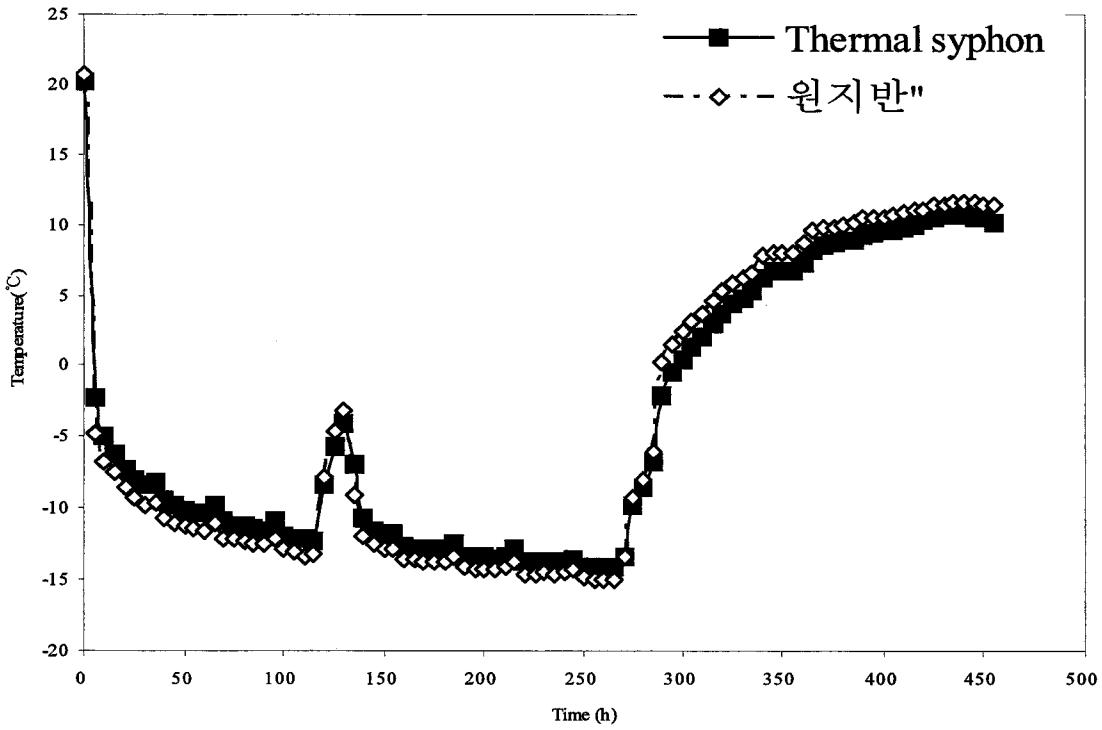


그림 6.2.3 10cm 깊이에서의 온도분포 변화

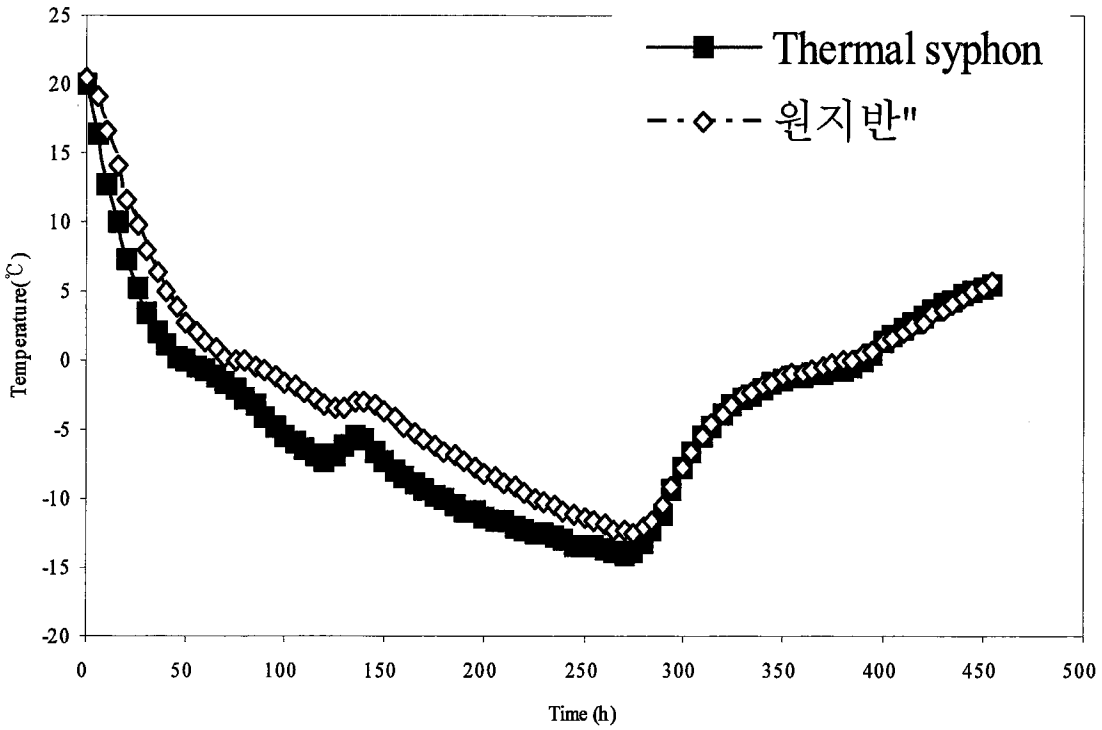


그림 6.2.4 40cm 깊이에서의 온도분포 변화

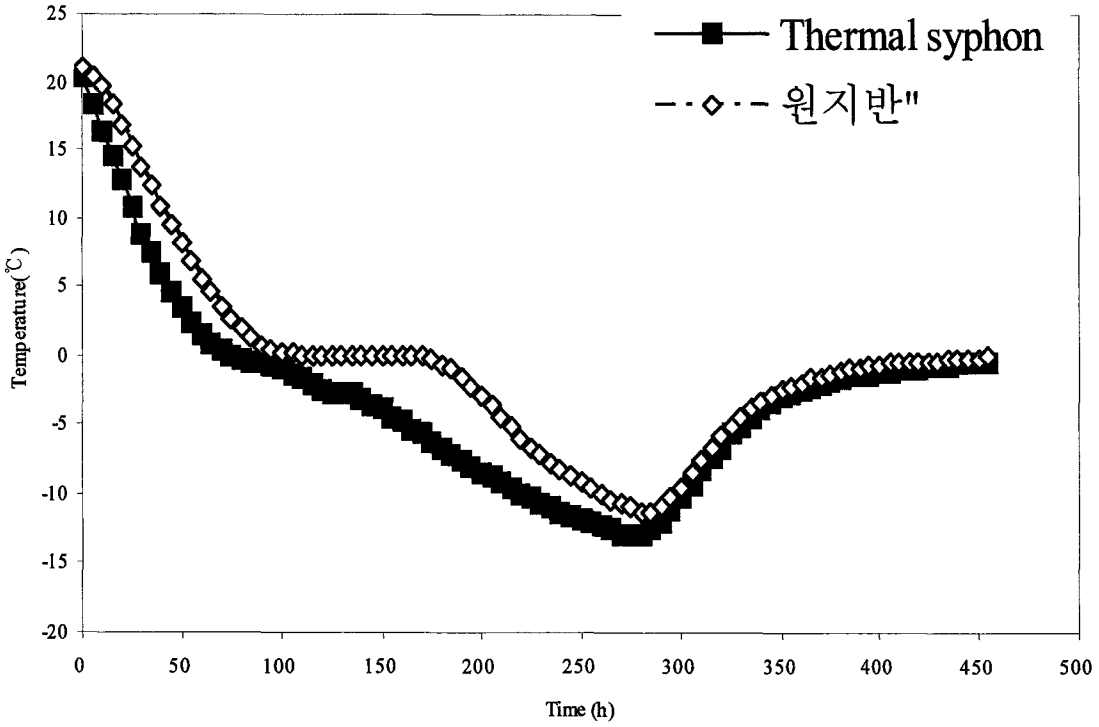


그림 6.2.5 70cm 깊이에서의 온도분포 변화

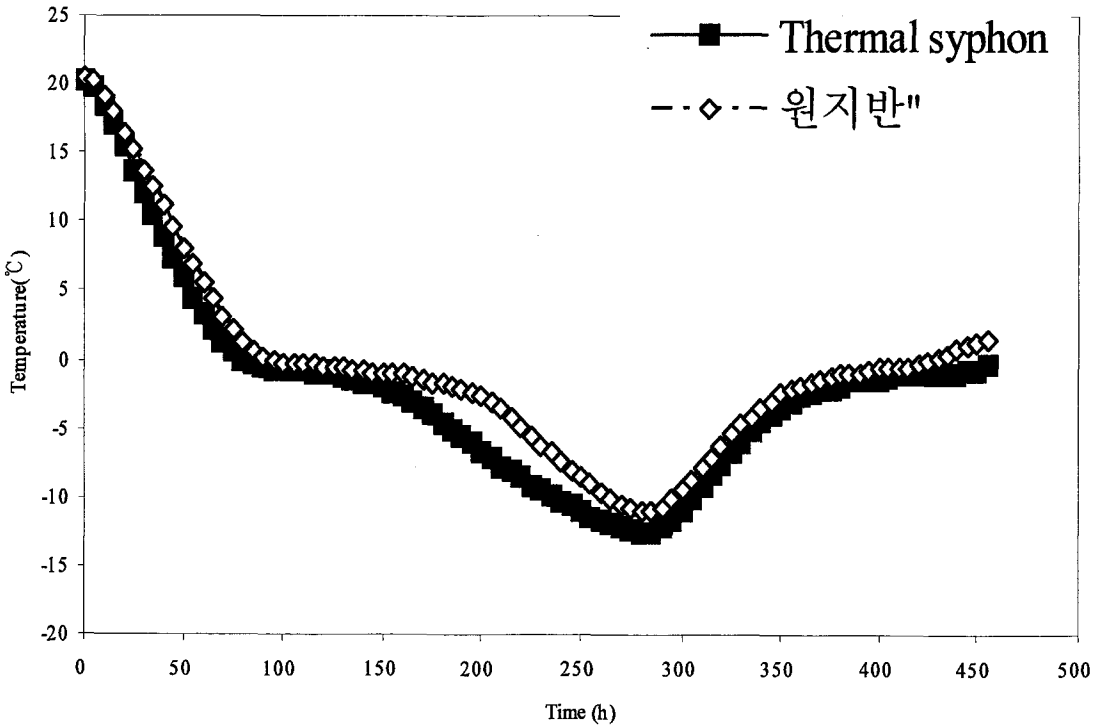


그림 6.2.6 100cm 깊이에서의 온도분포 변화

2. 수평방향 거리에 따른 온도변화

Thermal siphon의 수평방향의 거리에 따른 성능을 평가하기 위하여 지표면으로부터 30cm, 70cm 깊이에 수평방향으로 30cm, 45cm, 60cm 떨어진 거리에 온도센서를 설치하였다. 실험결과 30cm깊이에서는 수평방향의 온도 변화의 차이가 적은 것으로 나타났으나 70cm 깊이에서는 thermal siphon과 거리가 가까울 수록 효과가 확실하게 증명되었다. 그림 6.2.7, 그림 6.2.8에 깊이 30cm, 70cm 지점에서 수평방향 거리별 온도분포를 나타내었다. 또한 그림 6.2.9~그림 6.2.11에 깊이별 수평방향의 온도분포를 비교하였다.

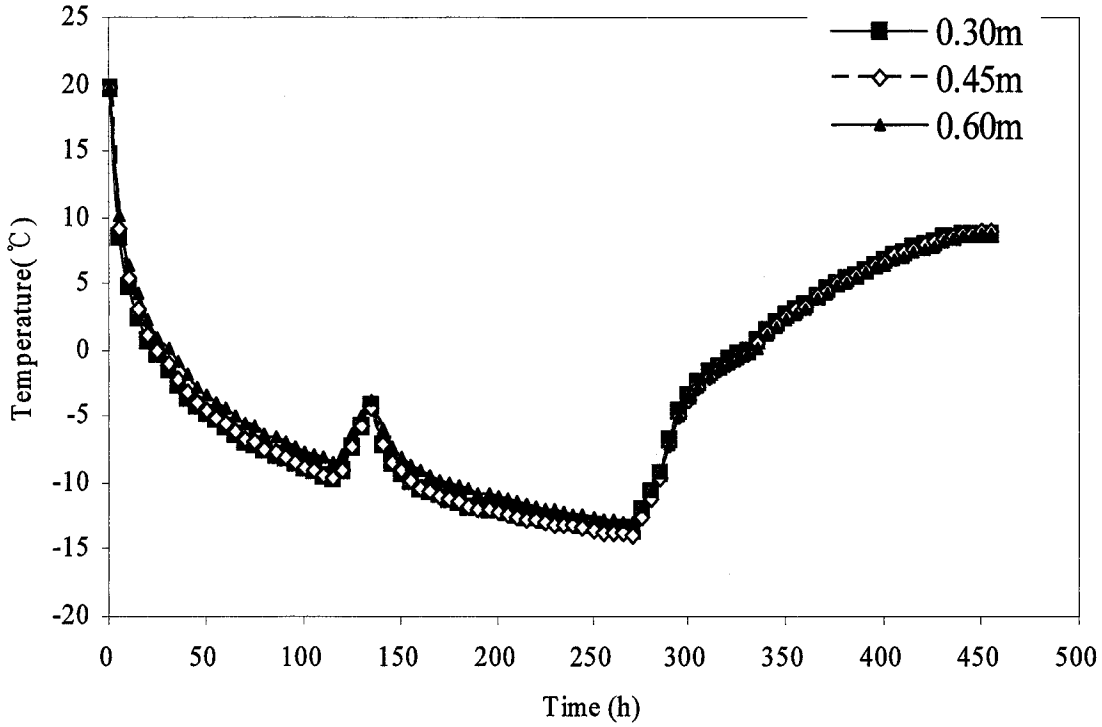


그림 6.2.7 표면으로부터 깊이 30cm 지점의 수평방향 온도분포

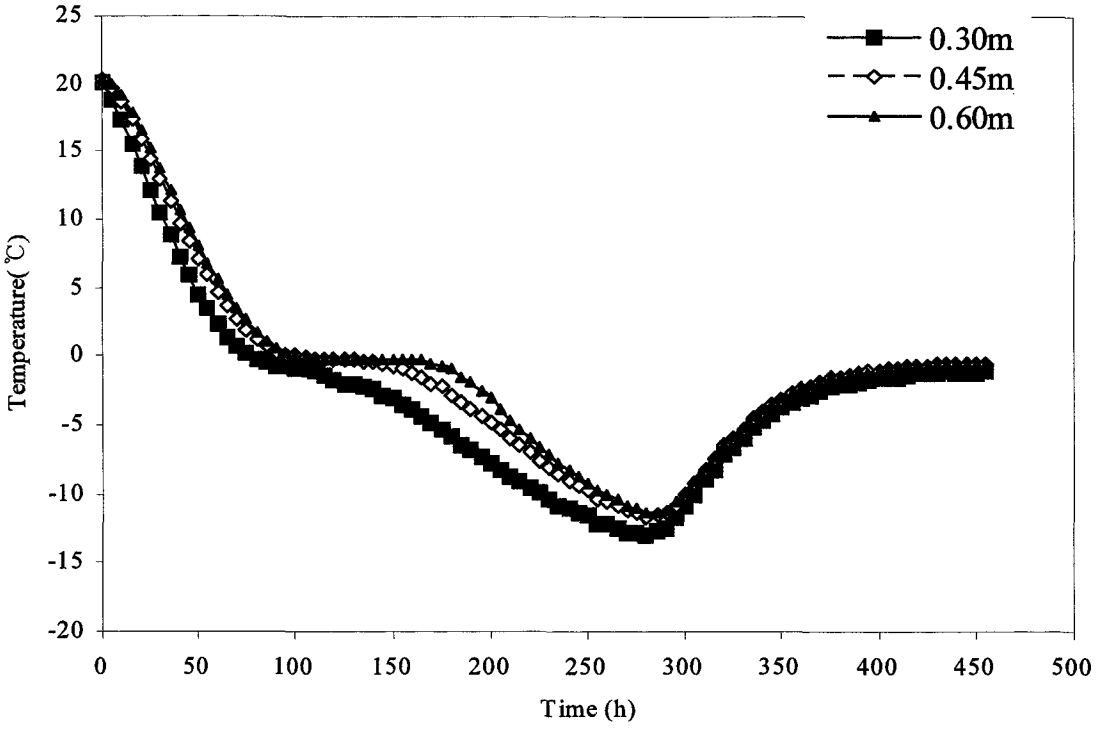


그림 6.2.8 표면으로부터 깊이 70cm 지점의 수평방향 온도분포

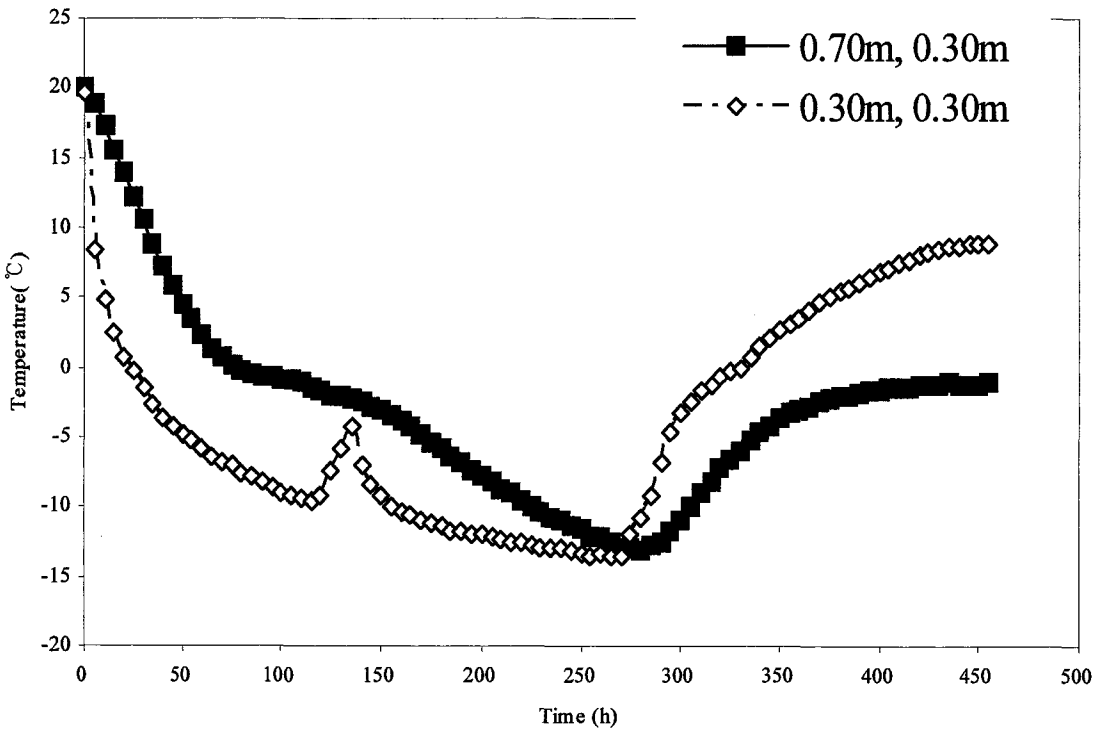


그림 6.2.9 수평방향 30cm지점의 깊이별 온도분포

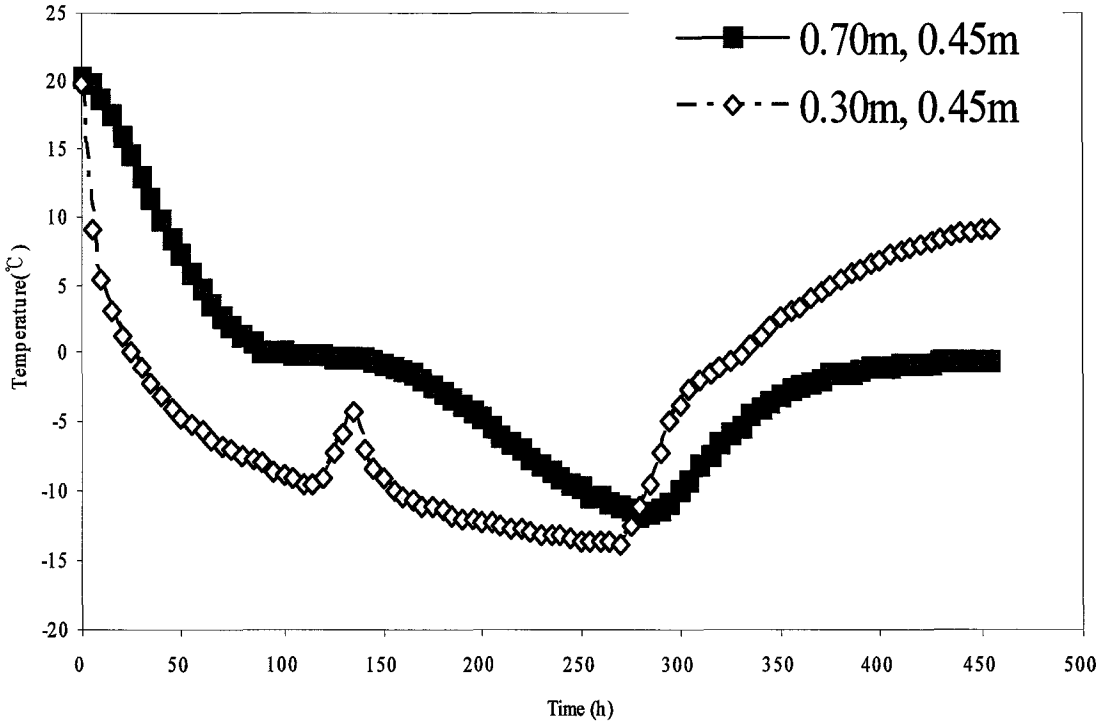


그림 6.2.10 수평방향 45cm지점의 깊이별 온도분포

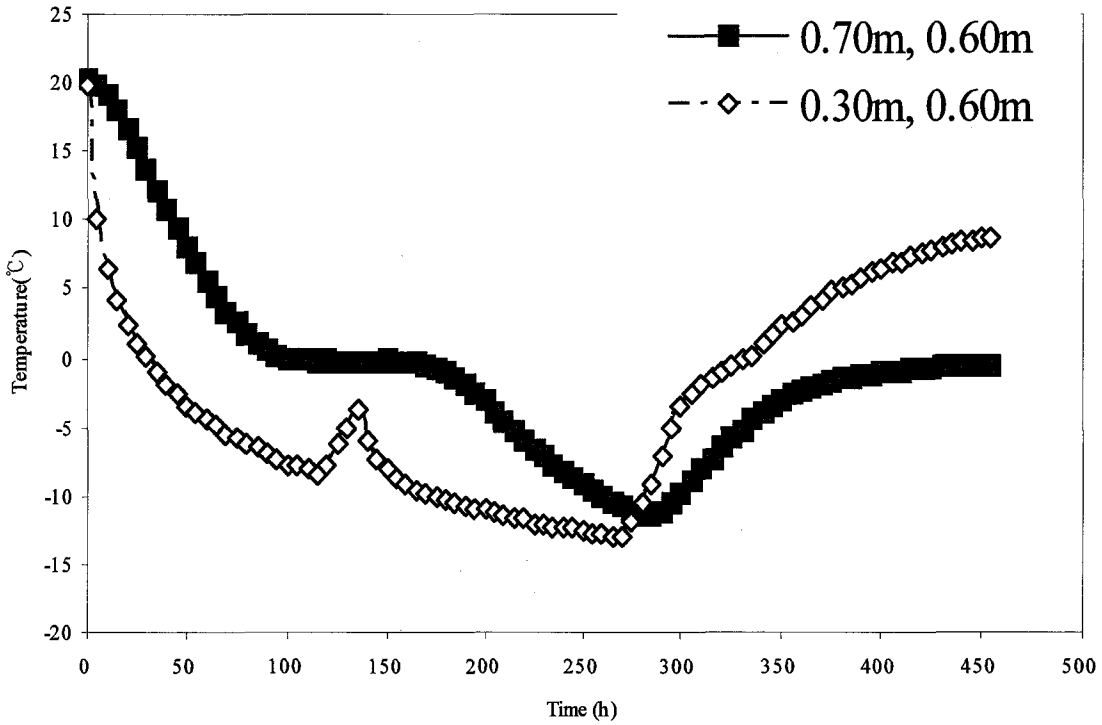


그림 6.2.11 수평방향 60cm지점의 깊이별 온도분포

제 7 장 Pipe Line용 동상방지용 단열재 개발

제 1 절 동상방지용 단열재 개발 사례조사

1. 폐기물 활용 동상방지재 개발사례

일반적으로 지반의 동상방지에 사용하고 있는 재료는 조립질인 자갈을 이용하고 있으나 최근에는 천연골재의 부족분을 감안할 때 대체 재료로 단열성 폐기물을 사용하는 연구가 보고되고 있다.

Gandahl(1985)은 재료의 종류가 다른 단열재를 지반의 동상 방지재료로 포설하여 동절기간 동안 동상량을 장기간 현장 계측하여 동상방지 효과 및 동상량 감소정도를 분석하였으며 재료 종류(일반자갈층, 나무껍질(Bark), 경량골재, 플라스틱)에 따른 동상방지층의 두께를 제안하였다. 스웨덴의 북부지역은 겨울철의 평균 동상량이 최소 30cm이고 동결지수는 900~1,000℃ · day정도의 추운 지역으로 도로포장체에 스티로폼(polystyrene foam)을 동상방지층 재료로 10cm의 두께로 포설하였으며 현장 측정결과 동결심도 및 동상량이 현저히 감소하였다.

Henry와 Morin(1997)은 폐유리 100%와 중량비 폐유리 혼합(30%) 골재를 건설용 골재에 첨가한 경우에 대하여 동상감소효과를 분석하였다. 폐유리는 무시할 정도의 아주 낮은 동상 민감성을 지니고 있으며, 폐유리를 흙 시료에 혼합한 경우에는 폐유리의 혼합비에 따라 동상 민감성이 감소할 수 있는 것을 실험적으로 증명하였다.

일본의 이와테현에 위치하고 있는 공업기술연구센터에서는 폐 EPS를 용융하여 자갈모양으로 만든 후 동상방지용 노반재로 활용하였다. 폐EPS 골재는 경량이면서 열전도율이 뛰어나며 현장 모형실험에서 일반토층의 동결심도가 97cm일 때, 폐EPS 골재층은 26cm로 나타나 동결심도가 크게 감소하였다.

노르웨이 도로국(Norwegian Public Roads Administration, 2006)은 실제 노르웨이 에서 생산되고 있는 동상방지 단열재인 경량점토골재(lightweight clay aggregate, LWCA), 유리 골재(foam glass aggregate), 스티로폼 비드(extruded polystyrene beads, XPS)를 도로 현장에 동상방지층으로 포설하여 그 단열효과를 입증하였다.



그림 7.1.1폐 EPS 골재
(이와테 공업기술연구센터, 2004)



그림 7.1.2 유리 골재
(foam glass aggregate)



그림 7.1.3현장에서 스티로폼 비드(XPS)를 현장토와 혼합하는 장면

2. 토목섬유를 활용한 동상방지 개발사례

토목섬유를 이용하여 지반의 동상방지기법으로 개발된 사례가 보고된 바 있다. 토목섬유는 일반적으로 필터층의 역할이나 분리기능을 가지고 있으며 Bell(1983), Holtz(2001) 등은 모관상승 억제를 통해 동상 방지를 위하여 토목섬유인 geotextile 활용을 연구한 바 있다.

토목섬유의 동상방지는 메커니즘은 간극이 큰 층(자갈층)을 지하수면과 freezing front사이에 배치하여 동결작용이 발생할 때 물의 상향 흐름을 막는 것이다. 노상토는 구조적으로 지지해 줄 수 있는 자갈과 같은 층을 포설하는 위치까지 모세관 방지막(capillary barrier)의 상부에 놓여진다. 자갈이나 쇄석이 비싸거나 구하기 어려운 경우에는 전체 동상성 지반을 치환하는 것에 비하여 경제적인 효과가 있는 것으로 평가된다.

즉, 토목섬유인 모세관 방지막은 간극이 작은 지반상부에 설치하는 것으로 (i)물의 상향흐름을 줄이고, (ii)상부의 불포화토에서 모세관 방지막을 통하여 하부 흙으로 물의 이동을 억제한다.

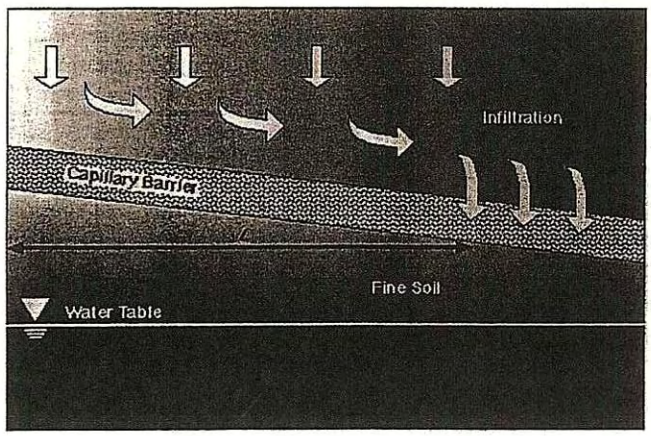


그림 7.1.4 토목섬유를 이용한 모관상승 억제(Holtz, 2001)

제 2 절 폐스티로폼을 활용한 단열효과에 관한 실험적 분석

1. 폐스티로폼 조각 혼합토의 동토 공학적 성질

1.1 서론

지금까지 도로나 매설관 등 동상을 방지하기 위한 방안으로 동상성(frost susceptibility) 흙을 비동상성 재료인 자갈이나 쇄석으로 치환하는 방법을 이용하여 왔다. 그러나 최근 대형건설공사로 인해 쇄석 및 자갈의 수요가 늘어나므로 새로운 대체 재료의 개발을 고려할 필요가 있다. 따라서 기존의 동상방지재로 사용하고 있는 자갈의 대체 재료로서 열전도율이 낮은 폐스티로폼 조각을 일반 흙과 적정비율로 혼합하여 이용할 경우, 지반의 동상을 효과적으로 방지할 수 있을 뿐만 아니라, 산업부산물을 처리할 수 있으므로 환경 문제 해결에도 효과적일 것으로 판단된다.

스티로폼의 종류에는 제조공정에 따라 비드(bead) 발포법으로 만든 EPS(Expanded Polystyrene) 스티로폼과 압축 발포법으로 만든 XPS(Extruded Polystyrene) 스티로폼이 있다. XPS는 EPS보다 강도가 우수하고 물에 대한 흡수성이 적다. 1972년 노르웨이에서는 도로의 동상방지층에 압축 발포법으로 제작한 스티로폼 판(XPS, Extruded Polystyrene)을 설치하여 외부의 찬 공기가 유입되는 것을 차단하도록 하였다. 그러나 스티로폼 판은 오랜 시간이 경과하면 스티로폼 판과 판 사이가 벌어지며 그 틈새로 모관수가 올라오거나, 외부의 찬 공기가 통과되어 동상방지 효과를 감소시키는 문제가 발생하고 있다. 이러한 단점을 해결하기 위한 대안으로 일본에서는 EPS 조각(beads)을 쇄석과 혼합하여 토질시험 및 열전도시험을 실시하는 한편, 현장시험시공을 통해 도로의 단열성 노반재로의 활용가능성을 연구한 바 있다(日本鋪道 技術研究所, 1990).

본 연구에서는 산업부산물인 폐스티로폼 조각 혼합토를 도로의 동상방지층 재료로 활용하기 위해 열팽창시험, 부동수분량시험, 일축압축강도시험을 실시하였다. 또한, 실제 현장에 모형축소도로를 조성한 후, 동절기간 동안에 동결지수 변화에 따른 동결깊이 변화를 실측하여 폐스티로폼 조각 혼합토의 동상방지효과를 규명하였다.

1.2 사용시료의 기본 특성

1.2.1 폐스티로폼 조각

본 연구에 사용한 폐스티로폼은 작은 구슬모양(beads)의 발포 폴리스티렌 수지를 사용한다. 발포 폴리스티렌 수지는 S.M(Styrene Monomer)의 중합체에 발포제를 침투시켜 열을 가할 때 발포제가 외기로 확산, 휘발되는 과정에서 발포되도록 하여 제작된 것이다. 이 수지는 발포 시, 내부에 독립기포 구조를 형성하게 되고 이 기포 내에는 공기가 유입되기 때문에 열이나 소음, 습기에 대한 차단 효과가 좋고 충격, 흡수성이 좋아 보온 등으로 많이 사용되고 있다. 본 실험에 사용한 폐스티로폼 발포립의 입경은 0.5~2mm의 크기로 되어 있고 둥근 모양의 입자로 되어 있다.



그림 7.2.1 폐스티로폼 조각 (beads)

1.2.2 화강풍화토

실험에 사용한 화강토는 경기도 파주시 통일동산에서 채취한 시료로 기본물성은 다음과 같다.

표 7.2.1 일반토의 기본특성 결과

액성한계(%)	소성한계(%)	소성지수	200번체통과량 (%)	비중	USCS
-	-	N.P	12.1	2.63	SM

1.3 폐스티로폼 조각 혼합토의 배합비 및 공시체 제작

1.3.1 배합비 결정

폐스티로폼 조각 혼합토의 배합은 폐스티로폼 조각의 혼합비 변화에 따른 특성 분석이 주요 목표이므로 폐스티로폼 조각의 혼합비에 따라 공시체를 제작하였다. 폐스티로폼 조각의 함량은 사전의 충분한 예비실험을 거쳐 중량비로 0%, 0.1%, 0.3%, 0.5%, 1.0%로 선정하였다. 폐스티로폼 조각의 혼합비가 1.0% 이상일 때에는 공시체의 성형이 용이하지 않았다. 시멘트의 혼합비도 각각 10%와 20%로 구분하였다.

1.3.2 양생방법

제작된 공시체는 실험실 내에 있는 수조 안에 가로 150cm, 세로 100cm, 높이 100cm 크기에 벽면을 비닐로 이중으로 덮어 공시체를 양생시킬 수 있는 공시체 저장소에 보관하였다. 공시체 저장소는 5cm 높이로 물을 채운 후, 그 위에 바닥판을 수면 바로 위에 설치하고 가습기를 가동하여 최대한의 습윤 상태를 유지할 수 있도록 하였다.

1.4 폐스티로폼 조각 혼합토의 다짐시험 결과

1.4.1 다짐시험

폐스티로폼 조각의 혼합비에 따라 다짐시험을 수행하였다. 또한 시멘트를 10%와 20%로 나뉘어 다짐시험을 실시하였다. 본 시험에서 각각의 폐스티로폼 혼합비와 시멘트의 혼합비에서 도출되는 최대건조단위중량(γ_{dmax}, g/cm^3)와 최적함수비(OMC)는 부동수분시험, 열팽창시험, 일축압축강도시험에서 제작되는 시험용 공시체의 밀도 및 함수비의 기준으로 활용될 것이다.

1.4.2 시험결과

폐스티로폼 조각 혼합토의 시험결과는 다음과 같다.

표 7.2.2 폐스티로폼 조각 혼합토의 다짐시험 결과

시멘트 혼합비(%)	폐스티로폼 혼합비(%)	최적함수비ω_{opt} (%)	최대건조밀도 γ_{dmax} (g/cm^3)
10	0	14.6	1.945
	0.1	15.3	1.714
	0.2	15.7	1.628
	0.3	16.3	1.515
	0.5	17.1	1.404
	1.0	18.4	1.038
20	0	15.3	1.939
	0.1	16.3	1.709
	0.2	16.9	1.598
	0.3	17.3	1.502
	0.5	18.2	1.357
	1.0	18.9	1.064

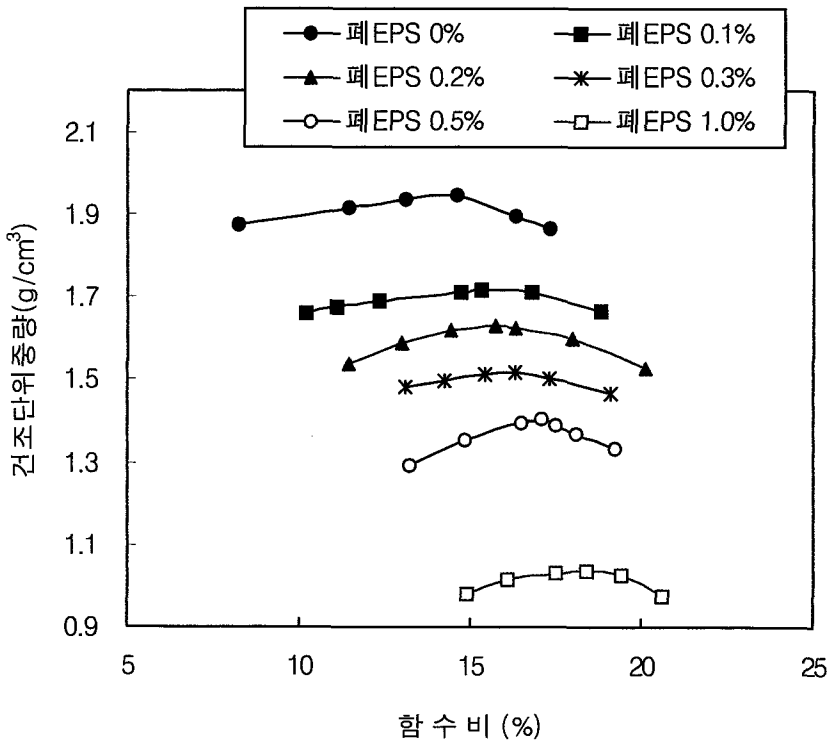


그림 7.2.2 폐스티로폼 혼합토의 다짐곡선 (시멘트 10%)

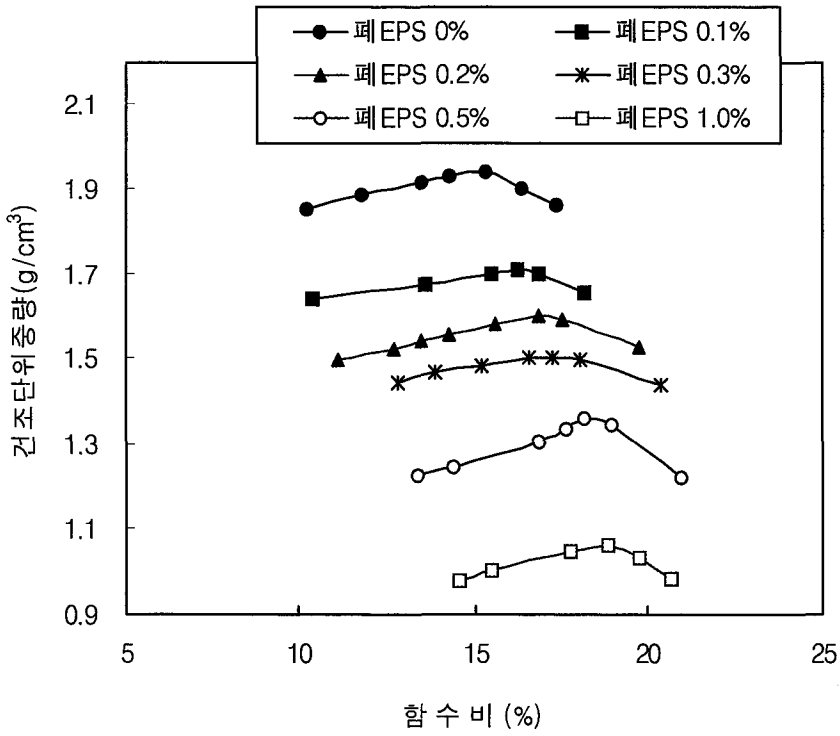


그림 7.2.3 폐스티로폼 혼합토의 다짐곡선 (시멘트 20%)

1.5 폐스티로폼 혼합토의 부동수분시험

1.5.1 시험개요

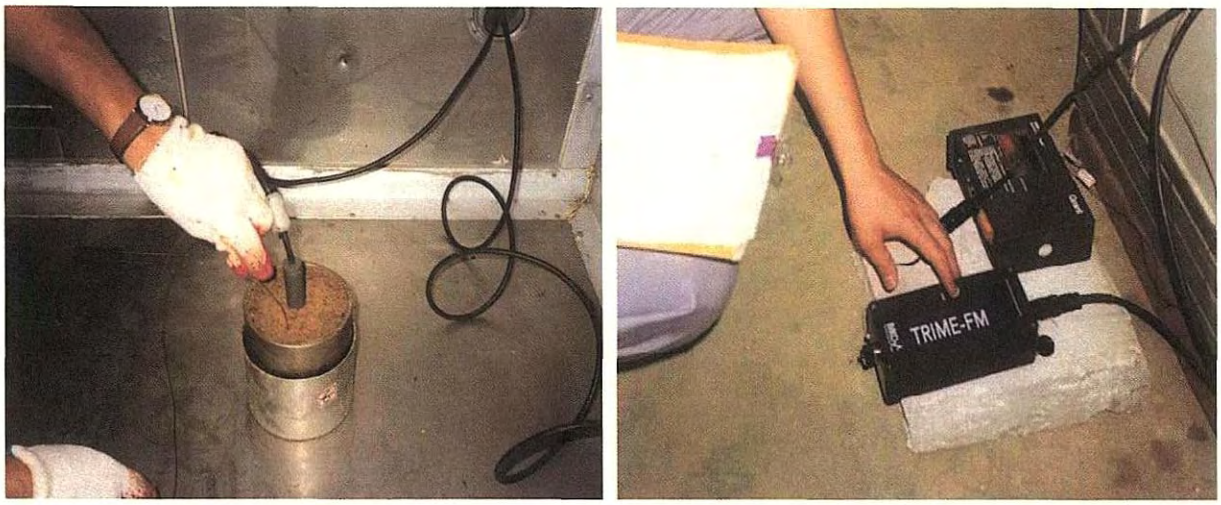
폐스티로폼 조각을 동상방지재로 활용하기 위해서는 폐스티로폼 조각의 혼합에 따른 부동수분량은 매우 중요한 요인이다. 본 시험에서는 폐스티로폼 조각을 혼합비별로 저온에서의 온도변화에 따라 부동수분량을 측정하였다.

공시체의 제작은 다짐시험에서 도출한 최대건조단위중량과 최적함수비를 기준으로 공시체를 제작하였다. 폐스티로폼 조각의 혼합비는 0%, 0.1%, 0.3%, 0.5%, 1.0%로 하였고, 시멘트는 각각 10%와 20%로 구분하였다.

공시체 몰드는 직경 10cm, 높이 15cm이며 시료의 제작이 끝난 후에는 포화장치를 이용하여 강제 포화시켰다. 공시체의 포화를 위해 몰드의 하단부에 0.2kg/cm^2~0.4kg/cm^{2}의 수압을 가하였고, 일정 시간이 경과한 후에 투수몰드 상부의 밸브에서 물이 흘러나올 때 공시체가 포화된 것으로 간주하였다.

공시체의 포화가 완료되면 부동수분량 측정 TDR probe 및 온도 측정용 센서를 삽입한 한 후, 28일동안 습윤양생한다. 양생기간이 지나며 공시체를 냉동챔버 속에 넣은 후 동상시험기의

온도를 - 20℃로부터 약 - 0.1℃까지 단계별로 변화시키면서 해당 온도에서의 부동수분량을 측정하였다.



(a) TDR probe 및 온도센서 연결 (b) 부동수분량 측정

그림 7.2.4 TDR을 이용한 폐스티로폼 혼합토의 부동수분 시험

1.5.2 시험결과

그림 7.2.5와 그림 7.2.6의 부동수분 측정결과를 살펴보면 부동수분은 폐스티로폼 조각의 혼합비가 클수록 감소하였다. 특히, 온도 0℃~-5℃의 초기온도에서 부동수분량은 현저히 감소하였다. 동일 온도에서 폐스티로폼 조각 혼합토의 부동수분량(3.9~15.6%)은 화강토의 부동수분량보다 적게 나타났다.

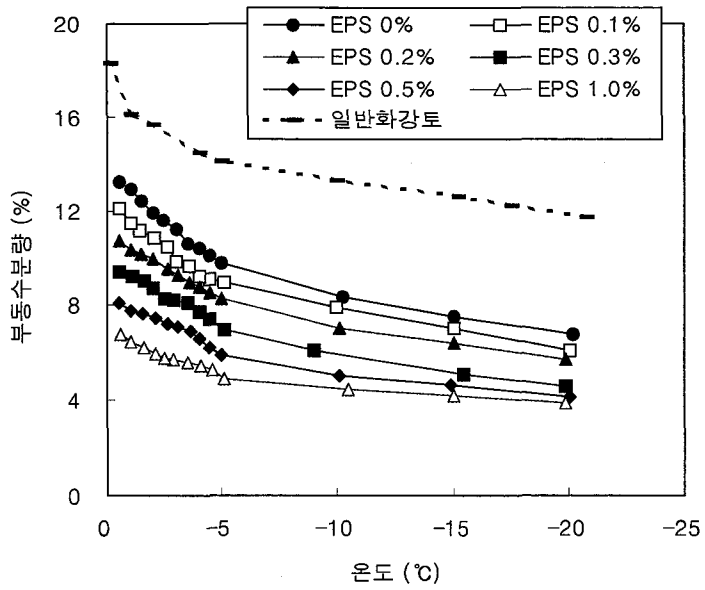


그림 7.2.5 폐스티로폼 조각 혼합토의 부동수분량 시험결과(시멘트 10%)

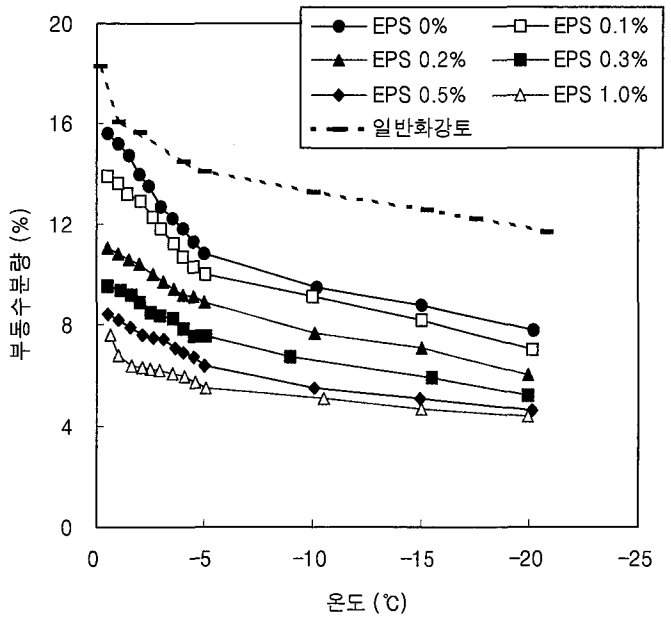


그림 7.2.6 폐스티로폼 조각 혼합토의 부동수분량 시험결과(시멘트 20%)

1.6 열팽창 실험

1.6.1 열팽창계수

저온 상태에서의 흙의 용적 변화는 동결면에서의 물의 이동과 그 때의 빙정분리에 의해 대부분 좌우된다. 이 현상들의 주된 요인은 온도변화이다.

물질을 가열 혹은 냉각하는 경우에 보통, 물질의 용적은 가역적으로 변화되며 열팽창계수 α는 식 7.2.1과 같이 단위 길이당 온도 T에 대한 길이 L의 변화율로 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{1}{L_0}\frac{dL}{dT} = \frac{d\varepsilon}{dT} \qquad (7.2.1)$$

여기서, L_0 = 팽창 전 공시체의 길이

ε = 변형률

만일 재료가 등방성(isotropic) 이라면 열팽창계수 $\alpha = \alpha_v/3$ 이다. 여기서 α_v는 열팽창의 체적계수이다.

Drouin and Michel(1971)은 얼음의 경우 열팽창계수는 아래 식 7.2.2의 관계와 같고 온도에 따라 그 값은 변한다고 설명하였다.

$$\alpha(℃)^{-1} = (54 - 0.18\Theta)\times10^{-6} \qquad (7.2.2)$$

실험을 통해 도출된 얼음의 일반적인 평균 열팽창계수는 $52\times10^{-6}(℃)^{-1}$로 나타났다. 그림 7.2.7은 frozen sand에 대한 열팽창계수를 얼음(ice)과 석영(quartz)에서 구한 열팽창계수와 비교한 것이다.

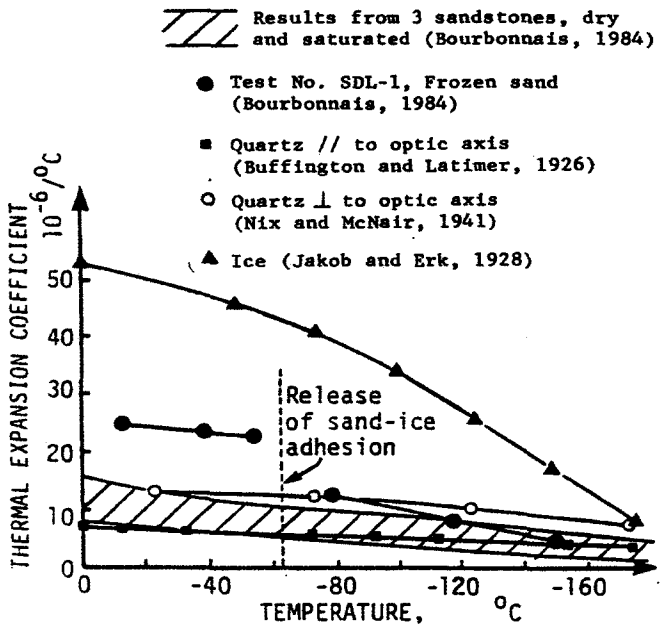


그림 7.2.7 frozen sand와 다른 재료의 열팽창계수 비교

1.6.2 열팽창계수 측정의의

토립자는 온도저하에 따라 용적이 수축하므로 동토 역시 온도저하에 따라 수축한다는 사실을 예측할 수 있다. 그러나 동토의 경우에는 흙 속에 존재하는 부동수의 영향에 의해 그 경향이 복잡하다. 즉 온도가 저하함에 따라 토립자 및 얼음은 그 용적이 감소되지만 동토 중의 부동수가 물로부터 얼음으로 상전이(相轉移)할 때 그 용적의 차만큼 반대로 팽창하는 것을 고려할 수 있다.

이러한 열적 성질은 동상균열(frost cracking)에 의한 도로의 유지 문제나 잠재적으로는 매립지(landfill) 표면의 틈을 발생시키게 한다. 또한, 지하 암반이나 점토층에 설치하는 LNG(Liquefied Natural Gas) 저장 시설의 설계에 있어서도 -160℃ 이하 온도에서의 열적 특성에 관한 지식을 요구한다.

1.6.3 실험방법

직경 5cm×5cm(직경×높이)의 실험용 몰드에 열팽창 시험용 공시체를 제작하였다. 몰드와 상부 덮개는 저온에서도 변형이 발생하지 않으며 재료의 성질이 바뀌지 않는(동토의 일차원적 팽창이 가능하도록) 금속재질로 제작하였다.

공시체의 제작은 다짐시험에서 도출한 최대건조단위중량과 함수비에 따라 중량을 계산하여

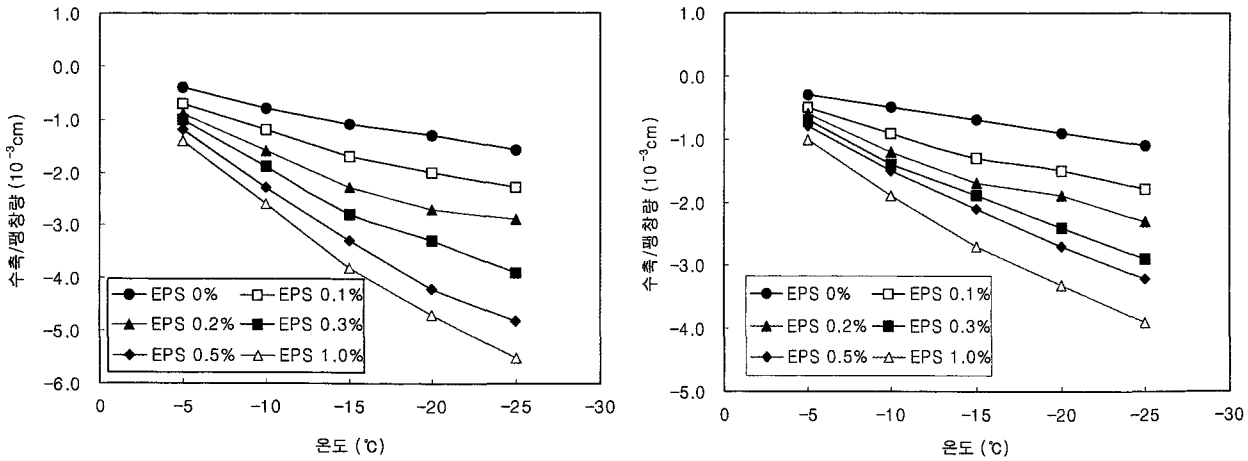
공시체를 제작한다. 폐스티로폼 조각의 함량은 사전의 충분한 예비실험을 거쳐 0%, 0.1%, 0.3%, 0.5%, 1.0%로 하였고, 시멘트는 각각 10%와 20%이다. 완성된 공시체는 28일 동안 습윤양생한 후, 냉동챔버에 넣고, 다이얼 게이지를 부착한다.

다이얼 게이지의 설치가 끝나면 냉동챔버 내부의 실내 온도를 -5 ℃, -10 ℃, -15 ℃, -20, -25℃상태로 유지하면서 각 시료에 대한 변위량을 측정하였다. 시험이 끝난 후, 다음 온도를 측정하기까지 24시간 동안 온도를 유지하여 공시체 내부가 해당온도에 충분히 도달한 후에 팽창/ 수축량을 측정하였다. 측정된 변위량에 대해 열팽창계수를 산출하여 시료 혼합비에 따른 열팽창계수를 분석하였다.

1.6.4 시험결과

① 수축/ 팽창량 측정결과

폐스티로폼 조각 혼합토의 수축/ 팽창량 측정결과는 그림 7.2.8에 나타난 바와 같다. 시험결과, 폐스티로폼 조각이 많아질수록 수축하였다. 또한, 시멘트의 함량이 많은 20%에서의 수축량이 10%보다 적게 발생하였으며 온도저하에 따라 폐스티로폼 조각 혼합토는 일정하게 수축하고 있었다.



(a) 시멘트 10%　　(b) 시멘트 20%

그림 7.2.8 폐스티로폼 조각 혼합토의 열팽창량

② 열팽창 계수 산정 결과

폐스티로폼 조각 혼합토의 열팽창계수 측정결과는 아래의 표 7.2.3과 표 7.2.4에 나타냈다. 그림 7.2.9와 그림 7.2.10의 시험결과에서 열팽창계수는 온도저하에 따라 일정하게 감소하는 경향을 보여주고 있다. 또한, 폐스티로폼 조각의 혼합비가 증가할수록 열팽창계수는 증가하고 있었다. 이는 폐스티로폼 조각의 증가하면 부동수분량은 감소하기 때문에 열팽창계수가 증가한 것으로 판단된다.

측정된 결과는 화강토의 열팽창계수(α=5.6~8.1×10-6/℃(배정호 외, 2001))와 스티로폼의 열팽창계수(α=50~70×10-6/℃(이경철, 1995) 범위에서 나타나고 있었다.

표 7.2.3 열팽창 계수 측정결과 (시멘트 10%) (단위 : 10^{-1}℃)

온도 (℃) / EPS 혼합비(%)	-5	-10	-15	-20	-25
0	1.6×10^{-5}	1.6×10^{-5}	1.5×10^{-5}	1.3×10^{-5}	1.3×10^{-5}
0.1	2.8×10^{-5}	2.4×10^{-5}	2.3×10^{-5}	2.0×10^{-5}	1.8×10^{-5}
0.2	3.6×10^{-5}	3.2×10^{-5}	3.1×10^{-5}	2.7×10^{-5}	2.3×10^{-5}
0.3	4.0×10^{-5}	3.8×10^{-5}	3.7×10^{-5}	3.3×10^{-5}	3.1×10^{-5}
0.5	4.8×10^{-5}	4.6×10^{-5}	4.4×10^{-5}	4.2×10^{-5}	3.8×10^{-5}
1	5.6×10^{-5}	5.2×10^{-5}	5.1×10^{-5}	4.7×10^{-5}	4.4×10^{-5}

표 7.2.4 열팽창 계수 측정결과 (시멘트 20%) (단위 : 10^{-1}℃)

온도 (℃) / EPS 혼합비(%)	-5	-10	-15	-20	-25
0	1.2×10^{-5}	1.0×10^{-5}	9.3×10^{-6}	9.0×10^{-6}	8.8×10^{-6}
0.1	2.0×10^{-5}	1.8×10^{-5}	1.7×10^{-5}	1.5×10^{-5}	1.4×10^{-5}
0.2	2.4×10^{-5}	2.4×10^{-5}	2.3×10^{-5}	1.9×10^{-5}	1.8×10^{-5}
0.3	2.8×10^{-5}	2.8×10^{-5}	2.5×10^{-5}	2.4×10^{-5}	2.3×10^{-5}
0.5	3.2×10^{-5}	3.0×10^{-5}	2.8×10^{-5}	2.7×10^{-5}	2.6×10^{-5}
1	4.0×10^{-5}	3.8×10^{-5}	3.6×10^{-5}	3.3×10^{-5}	3.1×10^{-5}

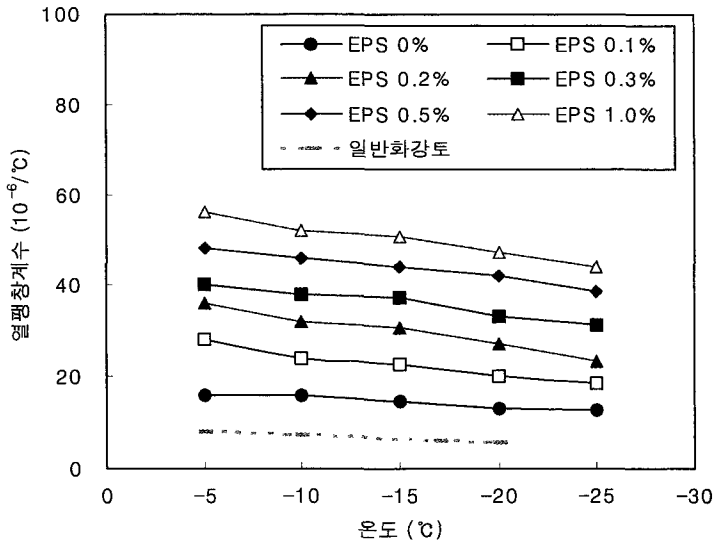


그림 7.2.9 폐스티로폼 조각 혼합토의 열팽창 계수 (시멘트 10%)

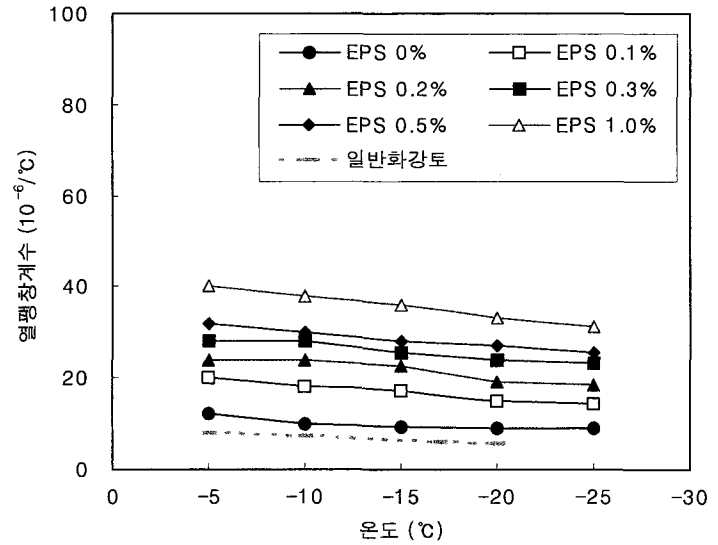


그림 7.2.10 폐스티로폼 조각 혼합토의 열팽창 계수 (시멘트 20%)

1.7 폐스티로폼 조각 혼합토의 일축압축강도 특성

1.7.1 시험방법

본 연구에서 수행한 일축압축강도시험은 KS F 2314에 준하여 수행하였고, 공시체는 직경 5cm, 높이 10cm로 제작하여 h/d가 2가 되도록 하였다.

시험 과정은 우선 폐스티로폼 조각 혼합토를 혼합비별로 나누어 다짐시험에 구한 최적함수비

와 최대 건조밀도의 조건으로 3층으로 다진다. 공시체의 밀도와 함수비는 미리 무게와 물량을 계산하여 다진다. 시료를 다진 후에는 압출기를 사용하여 공시체를 압출하고 공시체를 양생 수조로 운반하여 습윤양생한다.

일축압축시험은 (주) 대신정밀에서 제작한 일축압축시험장비를 사용하였다. 이 장비는 최대 5톤까지 측정이 가능하고, 변위는 0.01mm까지 디지털로 표시된다. 또한 하중재하 속도는 1m/min로 고정하는 변형률 제어방식으로 수행하였고 실내온도는 상온을 유지하였다.

1.7.2 시험결과

그림 7.2.11에 나타난 바와 같이 폐스티로폼 조각의 함유량이 증가할수록 일축압축강도는 감소하였다. 강도의 감소추이는 시멘트 양에 관계없이 동일한 경향을 보이고 있는데, 스티로폼의 혼합비가 0.2%내에서는 강도의 감소가 크게 발생하였으나 0.2%이후에서는 완만하게 감소하고 있었다.

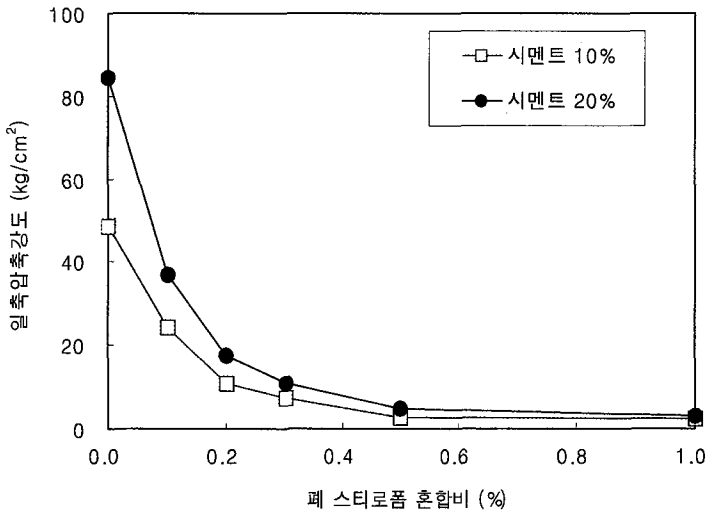


그림 7.2.11 폐스티로폼 조각 혼합토의 일축압축강도

2. 현장 도로 모형실험

2.1 시험목적

폐스티로폼 조각 혼합토를 동상방지층에 포설한 모형지반을 조성하고 지반단면에 깊이별로 온도센서를 설치하여 동절기에 온도분포 변화를 실측하였다. 이와 같이 현장의 온도분포를 계측함으로써 폐스티로폼 조각 혼합재를 설치한 지반의 동상방지 효과를 규명하였다.

폐스티로폼 조각 혼합토를 동상방지재로 포설할 경우, 재료 자체의 높은 단열성으로 인해 외부로부터의 찬 공기의 침투를 차단하여 도로의 동결심도는 감소될 것이며, 아울러 동상방지층의 설계 두께도 작아져 많은 비용절감을 예상할 수 있다.

Cole(1998)은 단열재를 포설한 지반과 단열재가 설치되지 않은 지반의 온도분포를 2년 동안 실측하여 동결지수(영하기온×누적지속기간)의 변화에 따른 동결깊이의 상관관계를 분석했는데, 같은 기후조건 및 자연조건하에서 단열재가 설치된 지반의 동결심도는 단열재가 포설되지 않은 지반의 동결심도보다 작게 나타나 기존의 동결심도 산정식과 다른 동결심도 예측 모델을 제시한 바 있다.

2.2 현장지반 조성 및 시험방법

모형현장은 길이 240cm×폭 120cm×깊이 100cm로 구성되었다. 먼저, 굴삭기를 이용하여 깊이 100cm까지 지반을 굴착한 후, 바닥에서부터 노상(20cm), 동상방지층(20cm), 보조기층(20cm), 아스콘층(20cm)을 차례로 시공하였다.

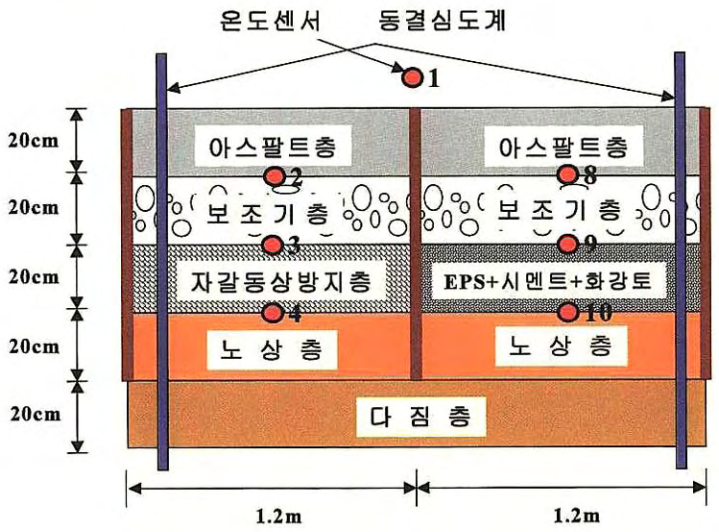


그림 7.2.12 현장 모형지반 단면도

이 현장지반은 2개의 구간으로 나누어 한 곳에는 폐스티로폼 조각, 시멘트, 화강토를 각각 0.2% : 10% : 89.8%를 혼합한 재료를 동상방지층에 설치하였고, 다른 한 곳에는 도로의 동상방지층 재료 기준에 맞춰 입경이 70mm인 자갈을 동상방지층에 설치하였다.

그림 7.2.12와 같이 각 층에는 온도센서(thermocouple)를 설치하였고 지표상부로부터 10cm 위치한 곳에 온도센서를 설치하여, 포장체 내부와 대기의 온도를 측정할 수 있도록 하였다. 온도측정은 2시간 간격으로 측정하였고 측정결과는 온도기록장치인 Grant1200에 저장하였다.

또한 각 도로에 동결심도를 측정할 수 있는 Methylen Blue 동결심도계를 설치하여 동결심도 변화를 알아보았다.



(a) 모형도로의 측면부의 거푸집 축조



(b) 측면부 단열재 설치



(c) 폐스티로폼 조각 혼합재 설치



(d) 자갈 동상방지층 설치



(e) 아스콘 포설



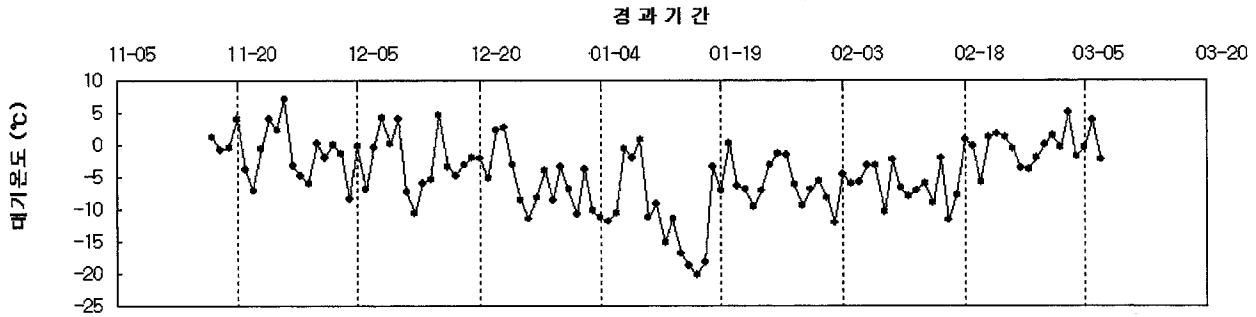
(f) 아스콘 다짐

그림 7.2.13 현장 모형도로 조성

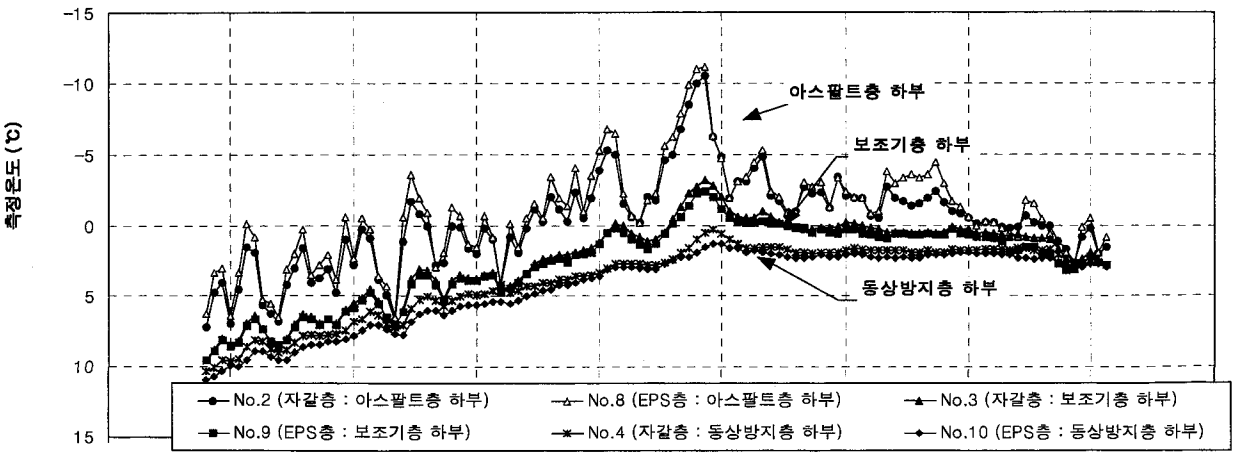
2.3 실험결과

2.3.1 현장 포장체 온도분포 측정결과

모형축소도로 일별 온도 측정결과는 아침 9시에 측정한 결과를 사용하여 동결심도를 측정한 시간과 동일하게 하였다. 일별 온도 분포 결과는 그림 7.2.14와 같다. 그림에서 대기온도는 일별 온도 차이에 의해 지중의 온도는 변화하고 있었다. 지속적으로 날씨가 영하로 가면서 온도는 점진적으로 낮게 나타나고 있었으며 1월 17일~1월 19일 사이에서 각 층의 온도가 최저로 나타났고 이후에는 상승하였다. 지표에 가까울수록 대기온도의 영향으로 온도의 감소가 크게 나타났고 하부로 내려갈수록 온도의 감소는 적게 나타났다.



(a) 대기온도 측정결과



(b) 도로내부의 온도분포 결과

그림 7.2.14 대기온도 변화에 따른 포장체의 온도분포

동상방지층 하부의 온도분포를 살펴보면, 폐스티로폼 조각 혼합재를 포설한 층의 최저온도가 1.3℃(1월 19일 측정)이고, 자갈층의 최저온도는 1월 17일에 -0.2℃로 측정되어 폐스티로폼 조각

혼합 동상방지층의 온도차단 효과가 기존에 사용하고 있는 자갈 동상방지층보다 우수하였다. 이는 폐스티로폼 조각 혼합재의 열전도율이 자갈보다 작아 단열효과가 더 좋은 폐스티로폼 혼합 동상방지층의 온도가 높게 나타난 것이다.

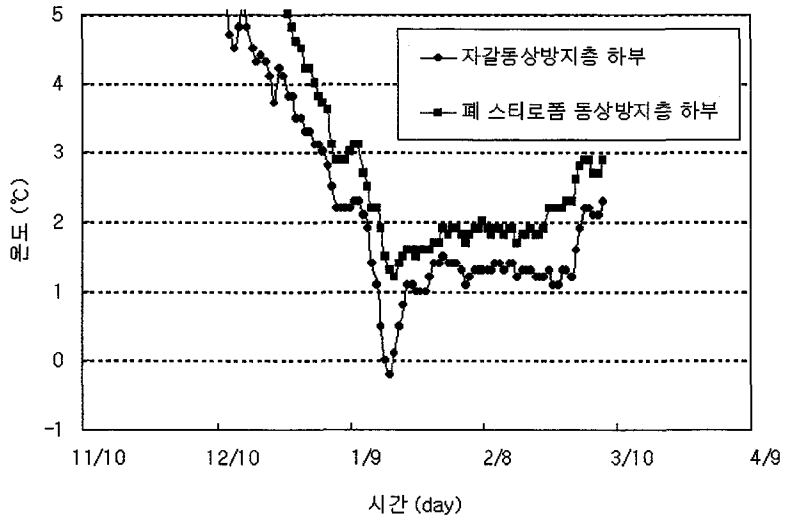


그림 7.2.15 동상방지층 하부의 온도분포 결과

2.3.2 동결심도 측정결과

그림 7.2.16에서 폐스티로폼 혼합 동상방지층과 자갈 동상방지층 도로의 동결심도 변화추이는 1월 초순까지는 유사한 경향을 보이나 1월 초순이후부터 3월초까지는 자갈 동상방지층 도로의 동결심도가 더 크게 나타났다. 최대 동결심도는 폐스티로폼 조각 혼합 동상방지층 도로는 56cm로 나타났고, 자갈 동상방지층 도로는 64cm로 측정되었다. 이는 앞서 도출된 온도분포 경향과 동일하다.

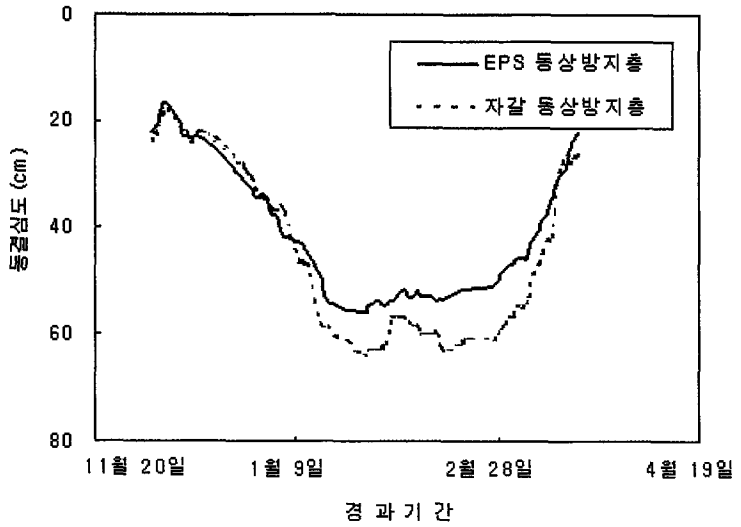


그림 7.2.16 동결심도 측정결과

2.3.3 동결지수와 동결심도와의 상관관계

현장의 대기온도와 동결심도계로부터 측정된 동결심도 실측결과를 바탕으로 동결지수(영하온도×동결지속기간, ℃ · day)변화에 따른 동결깊이 상관관계를 그림 5.8에 도시하였다. 이 상관관계로부터 동결지수 변화에 따른 동결심도를 예측할 수 있다.

Stefan 식을 통해 도출되는 동결심도 산정식은 $z = C\sqrt{F}$로 나타내며 실측되는 동결지수(F)와 동결심도(z)로부터 정수 C를 도출하게 된다.

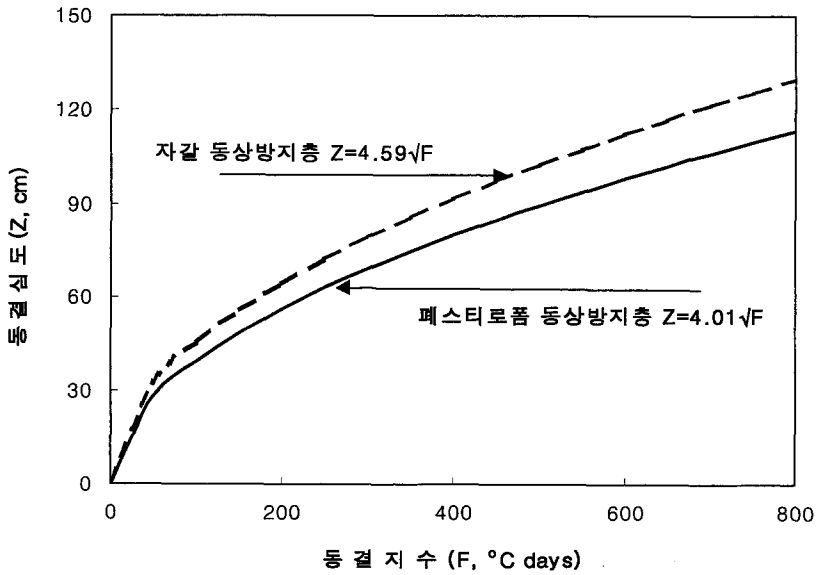


그림 7.2.17 동결지수-동결깊이 상관관계

그림 7.2.17에서 폐스티로폼 혼합 동상방지층 도로의 동결심도 예측곡선은 $Z=4.01\sqrt{F}$이고 자갈 동상방지층 도로의 동결심도 예측곡선은 $Z=4.59\sqrt{F}$관계로 나타났다. 일반적으로 동결깊이 추정 정수 C가 높으면 동결심도는 크게 나타난다. 따라서 동일한 자연조건에서 폐스티로폼 혼합 동상방지층 도로의 동결깊이 추정정수가 크게 나타났으며, 이는 폐스티로폼 혼합 동상방지층이 기존의 자갈 동상방지층보다도 우수한 단열성과 동상방지효과를 갖고 있으며 이로 인해 동결깊이가 작게 나타난 것이다.

제 8 장 블라디보스토크 현장 파이프라인 거동 실험

제 1 절 현장 조건

1. 현장실험 계획

매설관의 지반거동을 알아보기 위하여 매설관에 작용하는 토압, 매설관 변위, 매설관 주변 지반 온도분포를 파악하고, 추가로 동결심도를 측정하고자 하였다.

직경 530mm, 길이 2.5m의 강관을 현장에 1.5m 깊이로 두개를 매설하고, 하나는 원지반 상태를 유지하며, 나머지 하나는 현지에서 구입한 EPS조각과 원지반을 혼합하였을 경우 단열효과를 알아보기 위하여 EPS조각을 30% 혼합하여 설치하였다.

현장실험을 위한 매설관 및 측정장치 설치를 위한 계획은 다음과 같다.

1.1 매설관에 작용하는 토압

매설관에 작용하는 토압을 측정하기 위하여, Tokyo Sokki사의 토압계를 이용하였으며, 영하의 온도에서도 제 기능을 발휘 할 수 있는 계측기를 선정하였다. 토압계를 강관에 부착하기 위하여 강관 직경에 맞는 별도의 지그를 제작하여 계측기 설치 후 외부토압을 제외한 예상하지 못한 변위 및 토압의 영향을 받지 않도록 하였다.

강관 하나당 4개씩 총 8개의 토압계를 이용하여 강관의 상하측면부에 부착하여 작용하는 토압을 측정하도록 하였으며, 부착 위치는 그림 8.1.1과 같다.

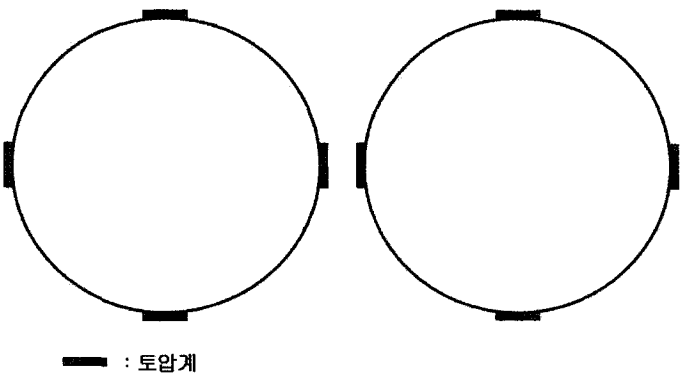


그림 8.1.1 토압계 설치 위치도

1.2 매설관 변위

매설관의 변형을 파악하기 위하여 강관 하나당 4개씩 총 8개의 스트레인 게이지를 부착하여 변위를 측정하고자 하였으며, 부착 위치는 그림 8.1.2와 같다. 스트레인 게이지의 부착 시 지반 되메움으로 인한 피해를 방지하기 위하여 매설관 내측에 스트레인 게이지를 부착하도록 하며, 장기간의 계측임을 감안하여 주변 차량이동, 기타 예상하지 못했던 사고로 인하여 스트레인 게이지 케이블이 손상되는 것을 방지하기 위하여 실드 처리된 연장 케이블을 활용하였으며, 게이지 부착시 도포 처리 및 실링 테이프를 이용한 긁힘을 방지하고자 하였다.

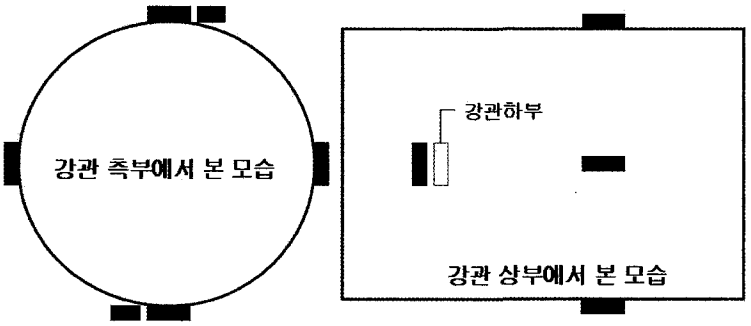


그림 8.1.2 스트레인 게이지 부착도

1.3 매설관 주변 지반 온도분포

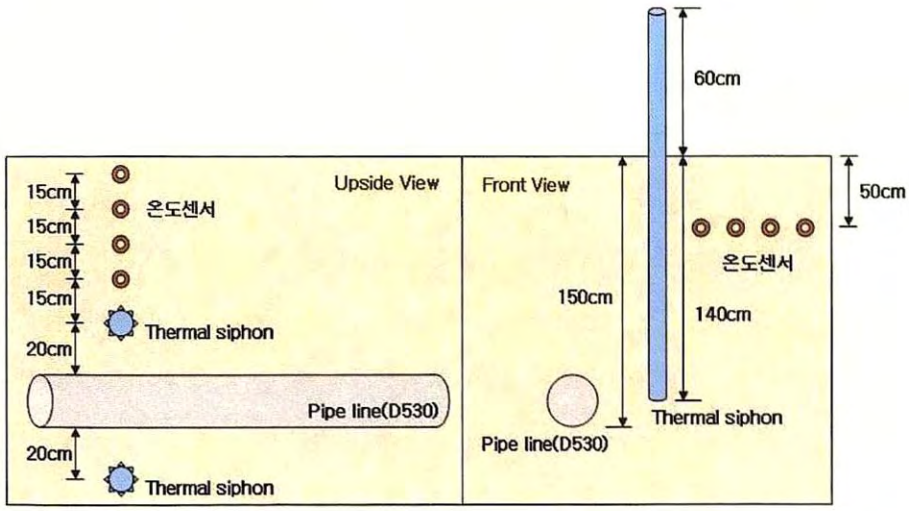
매설관 주변 지반의 온도변화를 확인하기 위하여 T-Type의 온도센서를 층별로 설치하며, 매설관 양 측면부 지반에 50cm 간격으로 각각 4개씩 설치하였다. 가장 상부에 위치한 온도센서는 매설지점 노면부의 온도를 측정할 수 있도록 하였으며, 50cm 간격으로 일반 흙과 EPS조각을 30%혼합한 지반부의 온도분포를 확인할 수 있도록 하였다. EPS조각을 포함하지 않은 매설관 양쪽으로 20cm 떨어진 지점에 Thermal siphon을 수직으로 설치하였고, 증발부(0.4m)와 단열부(1.0m)는 지중에 매설하고, 응축부(0.6m)는 외부로 나오게 하여 지중의 열을 외부로 배출하도록 하였다. 지표면으로부터 0.5m 깊이에 Thermal siphon 설치지점으로부터 수평으로 15cm 간격으로 4개의 온도센서를 설치하여 Thermal siphon이 매설관 주변 지반의 온도분포에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

1.4 데이터 수집장치

데이터 수집을 위해서 Tokyo Sokki사의 TDS-530을 이용하며, 계측 소프트 웨어로는 KMTL 사에서 제작한 Static-LCS(Ver 3.0)을 이용하였다. 기본적으로 30channel의 계측이 가능하며, 토압계, 스트레인 게이지, 온도센서의 계측 데이터를 저장한다. 실제 계측 Interval은 30분으로 하여, 약 5개월간 동일한 Interval로 데이터 수집을 진행하였다. 데이터의 저장은 내장 메모리와 별도의 CF메모리에 이중으로 저장하도록 하여, 데이터 손실에 대한 위험성을 배제하였으며, 저장 파일의 포맷은 Excel에서도 활용이 가능하도록 지정하였다.

1.5 Thermal siphon

블라디보스토크 현장실험에 사용된 thermal siphon은 프레온(R-22)를 작동유체로 하였으며, 응축부 60cm, 단열부 40cm, 증발부 100cm로 설계하였다. 증발부와 단열부는 구리로 제작하였으며, 응축부는 외기에 의한 열 방출이 쉽도록 하기 위해서 알루미늄 소재에 fin 가공부를 별도로 두었다. 지표면 50cm 깊이에 Thermal siphon 설치지점으로부터 수평으로 15cm 간격으로 4개의 온도센서를 설치하여 Thermal siphon이 매설관 주변 지반의 온도분포에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 그림 8.1.3은 현장시험 모식도이다.



8.1.3 현장시험시공 모식도

제 2 절 파이프라인 매설 및 계측 장비 설치

1. 부지 선정 및 설치 작업

현장시험은 본 연구의 위탁연구기관인 러시아 블라디보스토크에 위치한 극동건설연구소(DALNIIS)의 도움으로 DALNIIS 부지에서 실시하였다. 파이프라인 설치 작업을 위한 작업순서는 그림 8.2.1과 같다. 사전 예비작업 및 검사작업을 통하여 계측장비들의 이상 유무를 파악하였으며, 파이프라인 설치 후 매설작업에 앞서 검사를 통해 관련 계측장비들의 상태를 확인 하였다. 그 후 파이프라인의 매설작업 및 다짐작업을 완료 후 계측장비의 작동유무를 재확인 하고 데이터 수집을 시작하였다. 그림 8.2.1에 작업순서도를 나타내었다. 그림 8.2.2는 현장시험을 실시하기 전의 모습이다.

위치선정

↓

예비작업 및 매설관 측정센서 셋팅

↓

EPS조각 분쇄 작업

↓

현장부지 굴착작업

↓

매설관 안착

↓

Thermal syphon 설치

↓

계측장비 설치 작업

↓

계측장비 연결작업

↓

흙과 흙+EPS(30%)를 이용한 성토작업

↓

데이터 수집 장치 시운전

↓

최종 점검 및 계측 실시

그림 8.2.1 작업 순서도

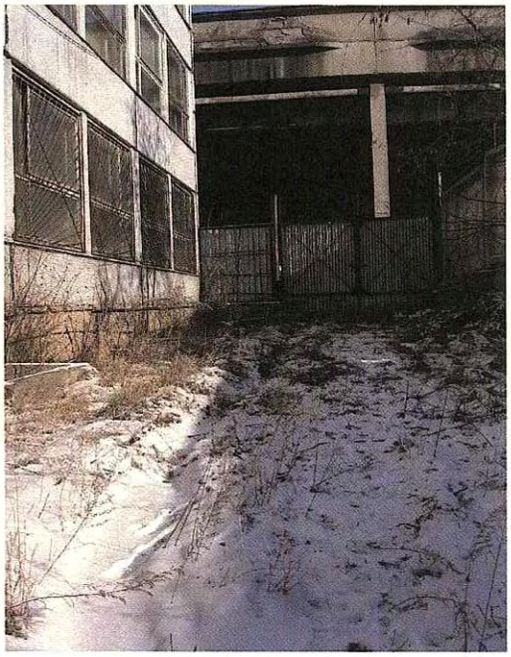


그림 8.2.2 매설관 설치 전 현장시험 부지

2. 블라디보스토크 현장모형 실험을 위한 작업 과정

블라디보스토크 현장모형 실험을 위한 작업 과정은 다음과 같다.

① 매설관에서 계측장비를 부착할 지점을 대상으로 그라인드로 이물질을 제거 하고, Sand paper를 이용하여 계측장비 부착면을 정리해 준다(그림 8.2.3 참조).



그림 8.2.3 지그 및 계측센서 부착지점 손질

② 블라디보스토크 현지에서 실험을 위하여 EPS판을 구입하여 현장에서 실험을 위하여 분쇄 작업을 하였다(그림 8.2.4, 그림 8.2.5).



그림 8.2.4 실험에 사용한 EPS판



그림 8.2.5 실험을 위하여 분쇄한 EPS판

③ 실험 대상 부지에서 백호를 이용하여 계획깊이 만큼 굴착하고, 강관을 매설지점에 설치한다. 강관에 스트레인게이지 및 토압계용 지그에 토압계를 설치하고 주변부에 온도센서 및 thermal siphon을 설치한다(그림 8.2.6~그림 8.2.10 참조).



그림 8.2.6 굴착작업



그림 8.2.7 매설관 설치



그림 8.2.8 토압계 설치용 지그 부착



그림 8.2.9 스트레인 게이지 부착



그림 8.2.10 thermal siphon 설치

④ 강관의 매설 및 다짐 작업에 앞서 관련 계측장비의 이상 유무를 점검하고 데이터 수집장치를 실내에 설치하였다(그림 8.2.11, 그림 8.2.12 참조).



그림 8.2.11 측정장비와 데이터로거 연결



그림 8.2.12 측정센서 이상유부 확인

⑤ 관련 측정 장비 설치 후 한개의 매설관은 흙으로 성토를 하였으며, 나머지 하나는 EPS가 30% 함유된 흙을 성토하였다. 최종점검을 마친 후 일반흙과 EPS 혼합흙을 이용하여 성토작업 후 다짐 작업을 완료함 (그림 8.2.12, 그림 8.2.13 참조).



그림 8.1.12 현장 성토 작업



그림 8.2.13 EPS 30% 포함 성토지점

제 3 절 실험 결과 및 분석

1. 매설관내 온도분포

매설관 주변의 온도분포를 확인하기 위하여 원지반과 EPS조각이 30% 함유된 지반에 50cm간격으로 각각 4개의 온도센서를 설치하였다. 온도센서가 묻혀 있는 대상 지반의 온도분포를 살펴보면 다음과 같다.

그림 8.3.1은 EPS조각이 30% 함유된 지반의 온도 분포이며, 그림 8.3.2는 원지반의 온도분포를 나타낸다. 측정 기간은 2009년 1월 23일부터 2009년 5월 31일 까지 이며, 2월 중순경이 지중 온도가 가장 낮은 것으로 나타났다. 표토에서 150cm 깊이에서부터는 지중온도가 거의 0℃정도를 유지하는 것을 볼 수 있다. 150cm의 지중 온도 분포는 EPS가 함유된 지반과 원지반이 거의 비슷한 경향을 보이는 반면 100cm 구간까지 지표와 가까운 부분은 EPS조각을 30% 함유한 지반의 지중 온도가 더 작게 나타난다.

그림 8.3.3은 지표면 50cm 아래에서의 일반흙과 EPS조각 30% 혼합토의 온도분포를 비교한 그래프이다.

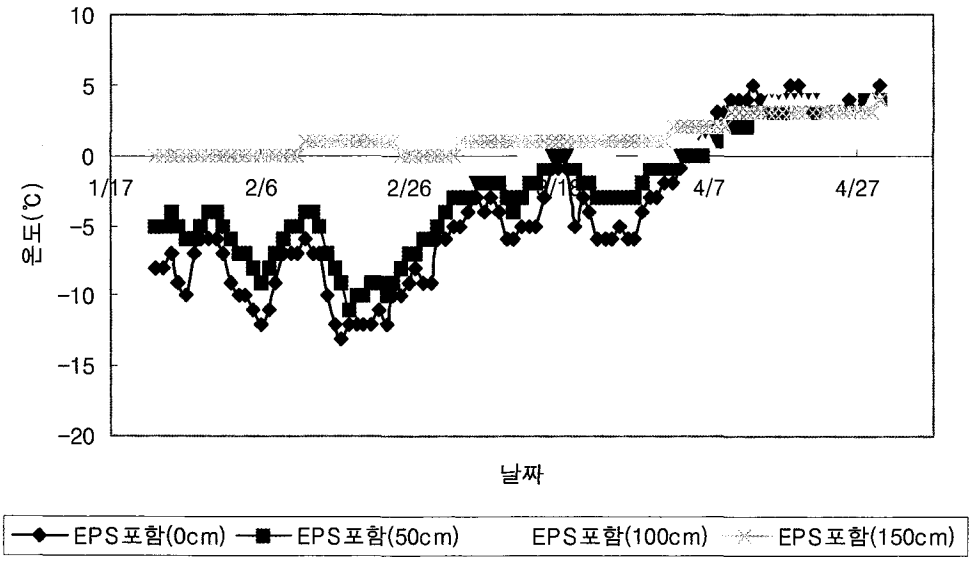


그림 8.3.1 EPS조각이 30% 함유된 지반의 지중 온도 분포

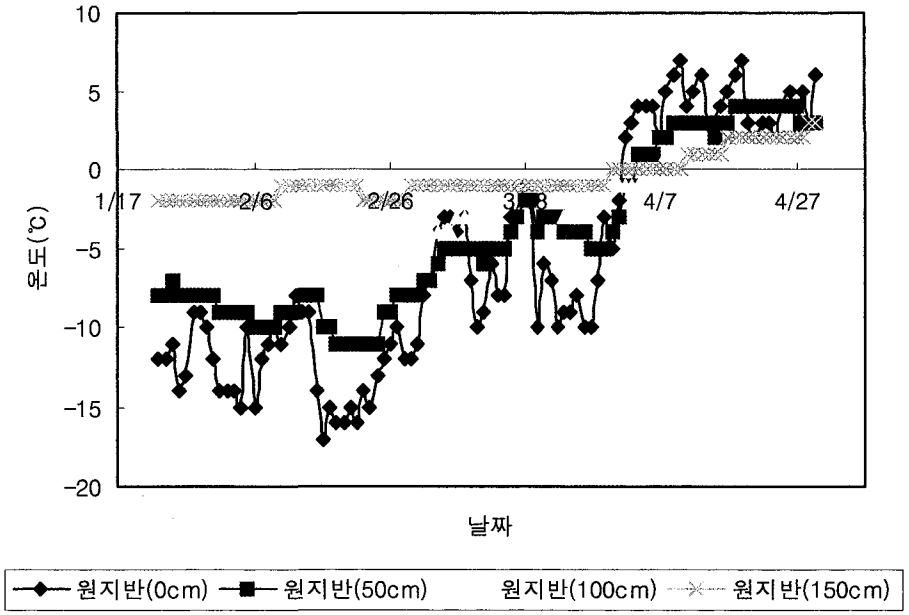


그림 8.3.2 원지반 지중 온도 분포

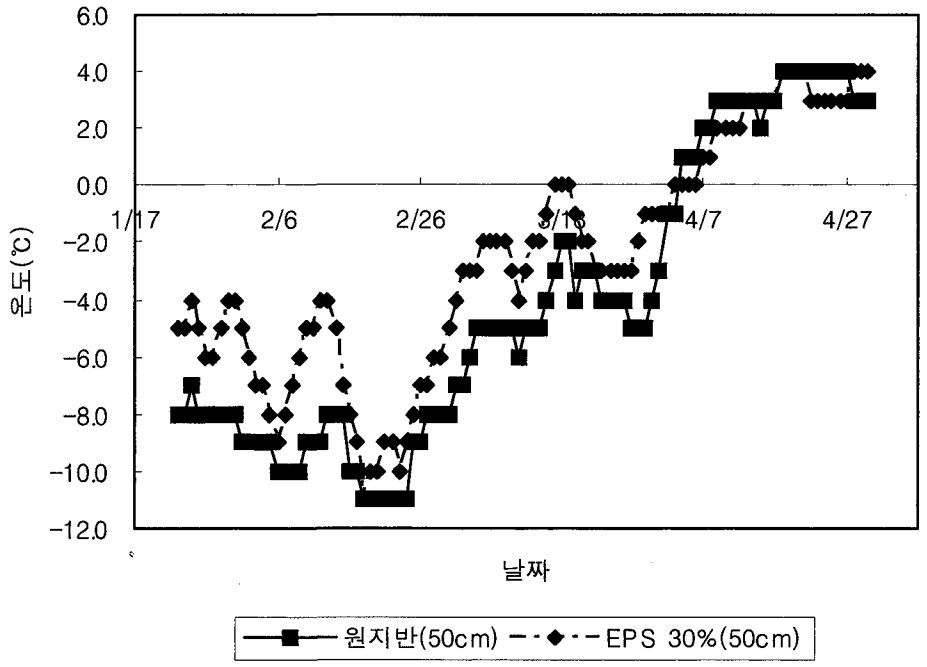


그림 8.3.3 지표 50cm 아래의 원지반과 EPS30% 혼합토의 온도 분포

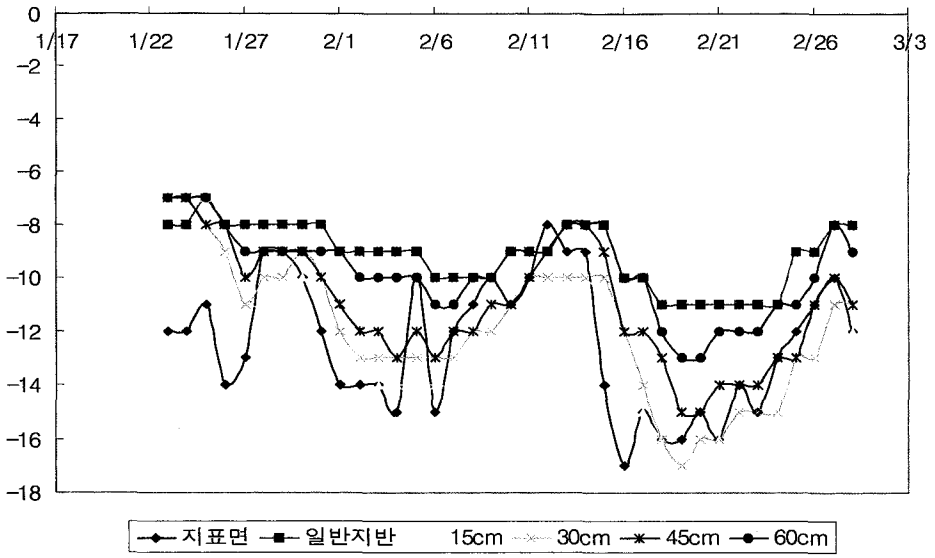


그림 8.3.4 thermal siphon 주위의 지중 온도 분포

그림 8.3.4는 매설관에서 50cm 떨어진 지점에 설치한 thermal siphon 주변의 온도분포를 나내었다. Thermal siphon이 설치된 구간에서 지중 0.5m 깊이에서의 온도분포는 전체적으로 지표에서의 온도분포와 유사한 경향을 보였다. 이러한 결과는 thermal siphon의 작용으로 인해 외부와 지중의 온도편차가 커질수록 지중의 열을 외부로 발산하는 열전달 효과가 커지고, 결과적으로 외부의 온도변화에 동조하는 경향을 보이는 것으로 판단된다. thermal siphon으로부터 60cm 떨어진 구간에서의 온도분포는 일반 지반의 온도 분포와 거의 비슷한 경향을 보였는데, 이는 thermal siphon의 영향범위를 벗어났기 때문으로 해석된다.

2. 매설관에 작용하는 동결 변위

매설관의 변형을 파악하기 위하여 강관 하나당 4개씩 총 8개의 스트레인 게이지를 부착하여 변위를 측정하고자 하였다. 스트레인 게이지의 부착시 지반 되메움으로 인한 피해를 방지하기 위하여 매설관 내측에 스트레인 게이지를 부착하도록 하며, 장기간의 계측임을 감안하여 주변 차량이동, 기타 예상하지 못했던 사고로 인하여 스트레인 게이지 케이블이 손상되는 것을 방지하기 위하여 실드 처리된 연장 케이블을 활용하였으며, 게이지 부착시 도포 처리 및 실링 테이프를 이용한 긁힘을 방지하고자 하였다.

동결로 인해 매설관에 작용하는 스트레인의 분포는 그림 8.3.5, 그림 8.3.6에 정리하였다.

전체적으로 강관에 작용하는 토압에 비해 강관 자체의 강성이 커서 변위는 거의 발생하지 않

은 것으로 나타났으며, 특히 강관의 측면부에는 거의 변위가 없는 것으로 나타났다.

그림 8.3.5에서 나타낸바와 같이 강관의 하부를 기준으로 했을 때, EPS조각을 30% 함유한 지반의 변위 정도가 원지반에 크게 나타난 것으로 측정되었다. 이러한 이유는 영하의 추운날씨에 강관이 오랫동안 노출되어 있다 매설된 깊이의 온도가 EPS혼합토가 더 높기 때문인 것으로 사료된다. 강관의 상부와 하부의 변위 정도를 비교해 보았을 때 초기에는 비슷하나 날씨가 따뜻해질수록 상부측의 변위가 더 큰 것으로 나타났다. 이러한 이유는 상부측이 온도의 영향에 빨리 노출된 것으로 판단된다.

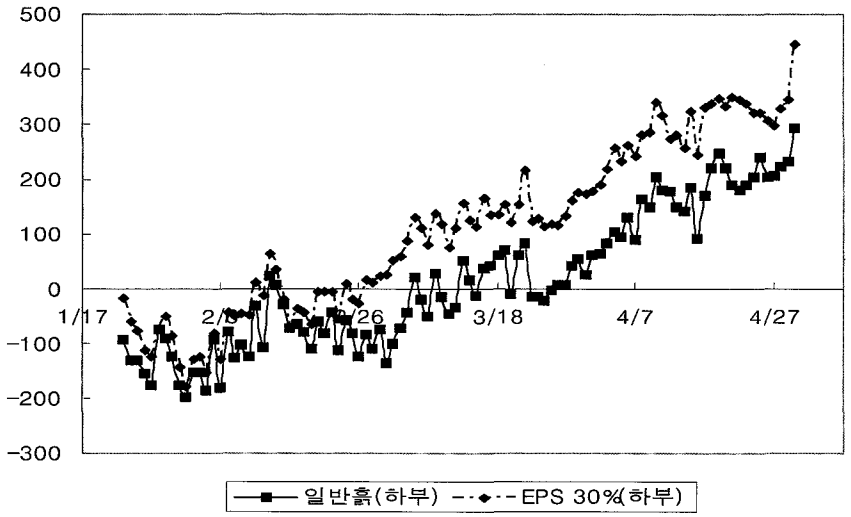


그림 8.3.5 매설관 하부의 스트레인 분포

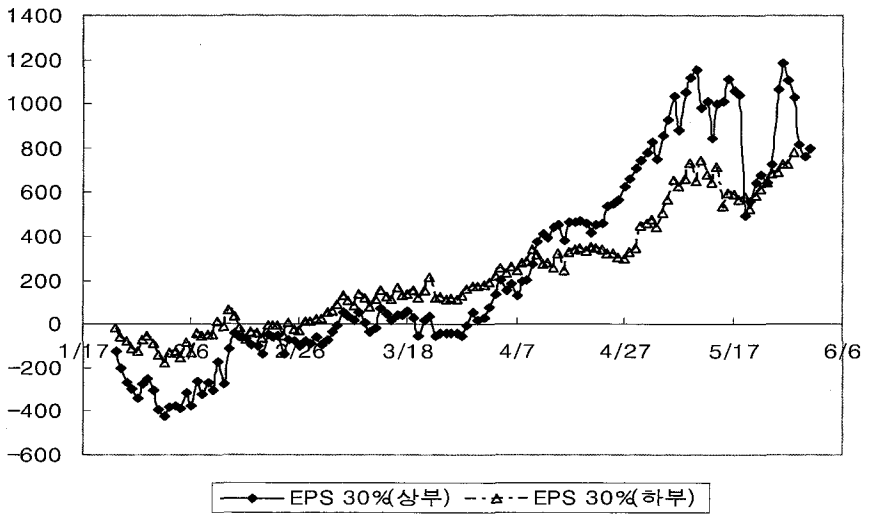


그림 8.3.6 EPS조각 30% 혼합토의 상부와 하부 스트레인 분포

3. 매설관에 작용하는 토압분포

동결에 의해 지중 매설관에 작용하는 동결토압을 알아보고, EPS조각이 함유될 때 토압의 경감효과를 확인하기 위하여 매설된 두개의 강관에 상하부와 양 측면부에 토압계를 설치하였다.

그림 8.3.7 ~그림 8.3.9는 EPS조각이 30% 포함된 지반과 원지반의 토압분포를 나타낸 그래프이다.

EPS조각이 포함된 지반과 원지반 두 곳 모두 강관의 하부에 가장 많은 토압이 걸리고 양측면부에는 토압이 작게 걸리는 것을 알 수 있다. 앞의 절의 온도분포도 상에서 지반의 융해가 시작되는 3월 중순을 전후하여 토압이 작아지는 것을 알 수 있다.

특히, 주목할 것은 원지반의 경우 초기 토압이 어느 정도 걸린 상태에서 시간 경과에 따라 토압이 증감해 가는데 비해, EPS조각 혼합토 매설 지역은 원지반에 비해 초기 토압이 작고, 지반 융해가 진행됨에 따라 서서히 토압이 경감하는 것을 알 수 있다. 이는 EPS 자체 중량이 작아 매설관에 작용하는 흙의 자중에 의한 토압을 경감 시키고, 단열효과에 의해 지반의 동결을 완화시키기 때문으로 판단된다.

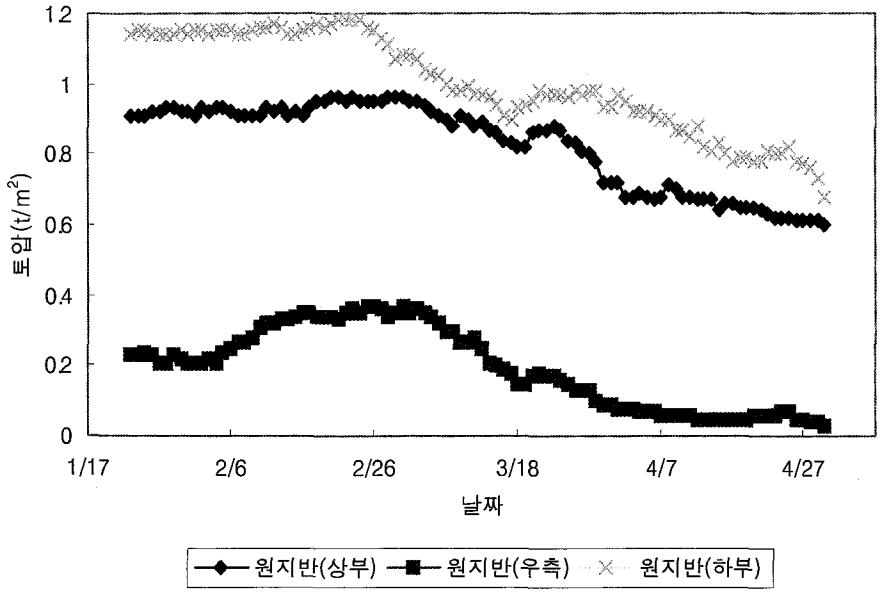


그림 8.3.7 원지반의 매설관 토압분포

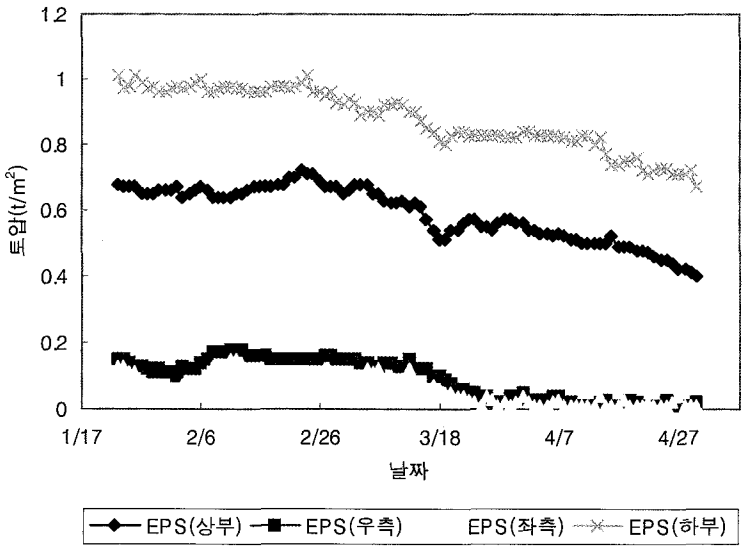


그림 8.3.8 EPS조각 30% 포함된 지반의 매설관 토압분포

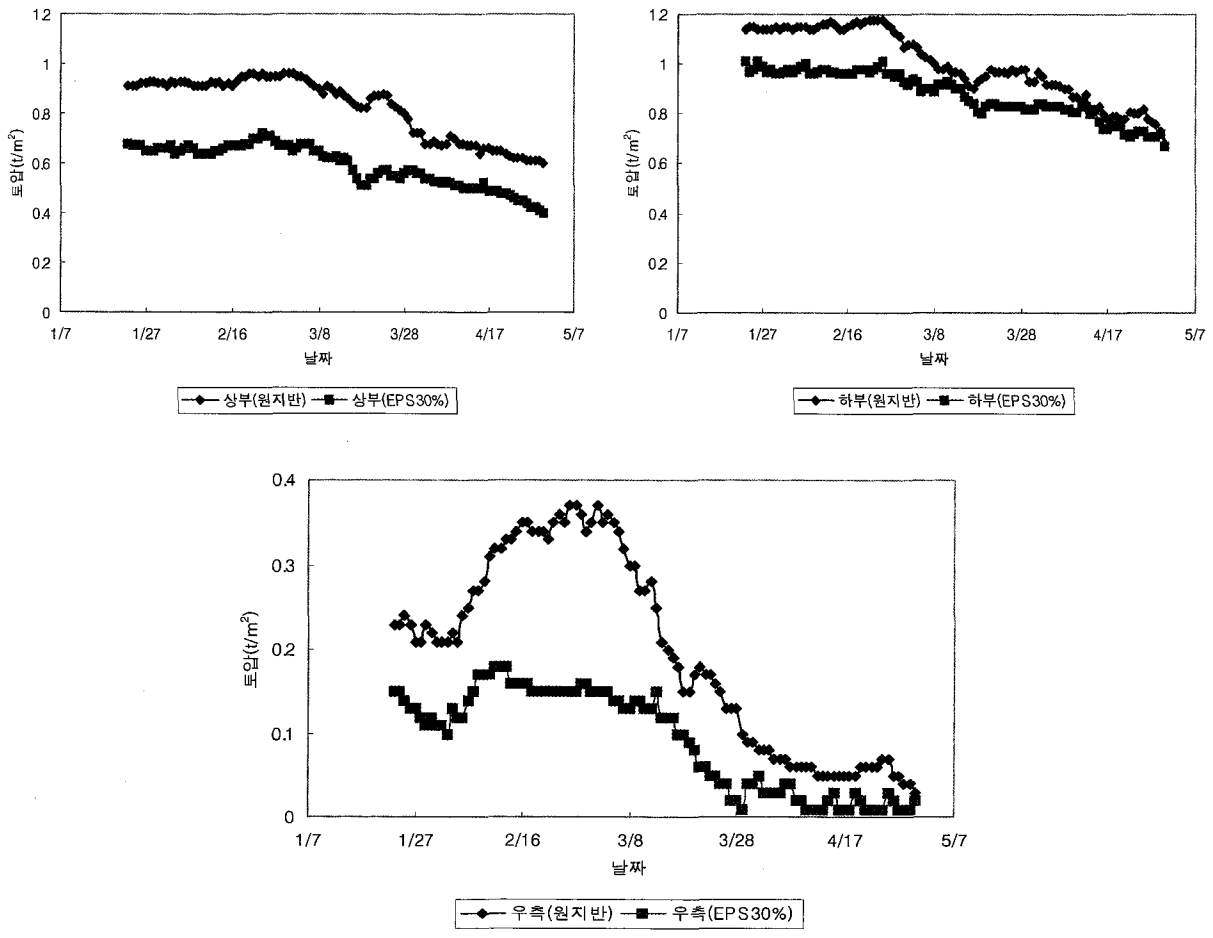


그림 8.3.9 강관 위치별 토압 비교

제 9 장 동결토압을 받는 매설관의 유한요소 해석기법

제 1 절 동결토압을 받는 매설관의 유한요소 해석기법

1. 서론

동절기 온도가 영하로 떨어짐에 따라서 지표면 부근의 수분을 포함한 흙은 공극속의 수분이 얼음으로 변하면서 부피가 팽창한다. 이와 같이 고정된 수분이 얼음으로 상이 변하면, 9%의 결빙팽창을 초래한다. 동결면(Freezing Front)이 지하수와 접해있고 동결속도가 서서히 진행되는 비교적 미립자로 구성된 동상성 흙 (Frost Susceptible Soil)일 경우에는 지하수가 동결면 속으로 흡입되어 빙정 (Ice Lens)이 형성된다. 이와 같은 빙정은 시간이 경과됨에 따라 동결면에 계속 발달되고, 이에 따른 흙의 부피 팽창으로 동상(Frost Heave)이 발생하며 이 동상이 토압이나 주변 구조물 등에 의해 구속을 받을 경우에 동상력 (Frost Heaving Force)이 발생하여, 도로 포장, 지하 매설관, Pipe Line, Culvert, 교각 등 인접 지반 구조물의 안전에 위험한 영향을 주는 동결하중으로 작용된다. 따라서 동상력을 구현하는 신뢰성 있는 열역학적 (Thermo mechanical) 해석은 동상에 위협받는 기존 구조물의 안전성 검토는 물론 향후 구조물 설계시 반영되어 안정된 구조물 설계를 수행 하는데 도움이 된다.

본 장에서는 포화된 토사나 다공성 암반의 동결 시 열전도 및 열응력에 대한 구성방정식, 동토지반에서의 매설관 모델링, 흙과 매설관의 열특성, 동상력 모델링 등에 대한 유한요소 수치해석 기법을 설명하였다. 그리고 한국건설기술연구원에서 수행한 개방형 동상시험에서 열전달 부분인 Thermal Analysis를 수행하여 시험결과와 비교하였다.

2. 열전도 해석

2.1 열전도 유한요소식

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

$$[C]\{\dot{T}\}+[K]\{T\}=\{Q\} \tag{9.1.1}$$

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 t와 t+Δt 사이에서 선형으로 변화한다고 가정하고, 시간 t+Δt 에서 에너지 평형방정식을 세우면 다음과 같은 Two-time level recurrence 식을 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{1}{\Delta t}[C]+\theta[K]\right)\{T_{t+\Delta t}\}=\left(\frac{1}{\Delta t}[C]-(1-\theta)[K]\right)\{T_t\} + (1-\theta)\{Q_t\}+\theta\{Q_{t+\Delta t}\} \tag{9.1.2}$$

여기서, θ = 0 Euler scheme
= 1/2 Crank-Nicolson scheme
= 2/3 Galerkin scheme
= 1 Backward difference scheme

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

Lees(1966)는 식 9.1.3과 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.

$$\left(\frac{1}{2\Delta t}[C]+\frac{1}{3}[K]\right)\{T_{t+\Delta t}\}=-\frac{1}{3}[K]\{T_t\} \qquad (9.1.3)$$
$$+\left(\frac{1}{2\Delta t}[C]-\frac{1}{3}[K]\right)\{T_{t-\Delta t}\}+\{Q_t\}$$

Three-time level recurrence 식 9.1.3의 장점은 시간 t-△t 와 t+△t의 중간인 t에서 평형방정식을 세우므로 비선형 열전도 문제에서 Iteration을 할 필요가 없으며, 처음 계산이 시작할 때 추가로 필요한 온도벡타 $\{T_t\}$는 식 9.1.1의 Two-time level recurrence 식을 사용하여 구할 수 있다.

2.2 상전이와 동결관 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 9.1.4와 같이 온도구배 변화에 대한 Enthalpy 구배변화를 바탕으로한 열용량 평균화 방법을 제안하였다. 2차원 문제에서 상전이 시 평균 열용량은 다음과 같이 구해진다.

$$\langle \rho C \rangle_{x,y}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial H}{\partial x}\Big/\frac{\partial T}{\partial x}+\frac{\partial H}{\partial y}\Big/\frac{\partial T}{\partial y}\right) \qquad (9.1.4)$$

여기서, Enthalpy H는 열용량을 온도에 관해 적분한 것이다.

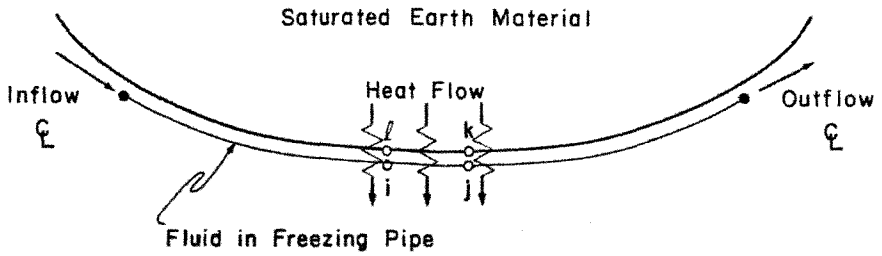
식 9.1.4의 열용량 평균화 방법은 해석시 Time step이 클 경우에는 만족할만한 해석결과를 구하기 어렵다. Kim(1994)은 온도 변화에 대한 Enthalpy 변화의 이력을 바탕으로한 식 9.1.5와 같은 보다 단순하고 효율적인 열용량 평균화 방법을 제안하였다.

$$\langle \rho C \rangle = \frac{H_t - H_{t-\Delta t}}{T_t - T_{t-\Delta t}} \qquad (9.1.5)$$

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

다음으로 포화된 지반의 동결 시 사용되는 매설관 모델링의 실용적인 방법을 설명하고자 한다. 아래 그림에서 보는 바와 같은 포화된 주변 지반으로부터 매설관으로 전달되는 열흐름(Heat flow)은 식 9.1.6과 같이 근사화 시킬 수 있다.

$$Q = Ah(T_o - T) \qquad (9.1.6)$$



여기서, A = Area of surface of contact

h = Heat transfer coefficient

T = (Tl + Tk) / 2

To = (Ti + Tj) / 2

식 9.1.6의 매설관으로 열흐름 메커니즘을 고려하기 위해서는 Conductivity matrix [C]와 Heat flux vector {Q}를 수정해야 하며 매설관 내의 물질의 온도는 식 9.1.7과 같이 근사화 할 수 있다.

$$T_j = [(1-\gamma)T_i + \gamma(T_l + T_k)]/(1+\gamma) \qquad (9.1.7)$$

여기서, $\gamma = Ah / 2 \cdot \rho V c$

ρ = Mass density of the fluid

c = Specific heat of the fluid

V = Flow of the fluid (volume / time)

2.3 흙과 매설관의 열 특성

본 문은 흙과 매설관의 열 특성값을 계산하는 유용한 공식에 대해 설명한다. 『2.3.1 흙의 열특성』에서는 포화된 토사나 공극을 가진 암반의 동결 및 미동결 상태에서 열전도와 열용량을 계산하는 공식과 상전이(Phase change)때 발생하는 잠열(Latent heat) 계산식을 설명한다. 또한 『2.3.2 매설관에 작용하는 열특성』에서는 중앙 매설관의 대류열전달계수(Convective heat transfer coefficient) 계산식을 설명한다.

2.3.1 흙의 열특성

흙의 열전도 계산식으로 Johansen(1975), Kersten(1959), 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.

$$k_{sat} = k_s^{(1-n)} k_w^n \qquad (9.1.8)$$

여기서, k_s = Effecitive solid thermal conductivity

k_w= Thermal conductivity of water

n = Soil porosity

동결 포화토의 열전도계수 k_{sat}는 다음과 같다.

$$k_{sat} = k_s^{(1-n)} k_i^{(n-w_u)} k_w^{w_u} \qquad (9.1.9)$$

여기서, k_i = Thermal conductivity of ice

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

$$k_s = k_q^q k_o^{1-q} \tag{9.1.10}$$

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. 예를들면 공극비 50%의 실트와 공극비 35%의 모래 그리고 공극비 15%의 Sandstone의 열전도계수 값이 표 9.1.1에 나타나 있다. 석영(Quartz)의 함유량은 50%로 가정하였다. 이들 값은 Johansen의 경험식을 사용하여 계산하였고 Johansen(1975), Kersten(1949), Wolfe et al.(1964), Andersland and Anderson (1978), 그리고 Clack(1966) 등이 실험에서 측정한 값과 잘 일치한다.

표 9.1.1에 계산된 체적열용량(Volumetric heat capacity)과 체적잠열(Volumetric latent heat)은 아래 공식으로 계산한다.

미동결 포화토의 체적열용량 C는 다음과 같다.

$$C = \frac{\gamma_d}{\gamma_w}(c_s + w)C_w \tag{9.1.11}$$

동결 포화토의 체적열용량 C는 다음과 같다.

$$C = \frac{\gamma_d}{\gamma_w}(c_s + wG_i c_i)C_w \tag{9.1.12}$$

상전이 시 포화토의 체적잠열 λ는 다음과 같다.

$$\lambda = \gamma_d L w \qquad (9.1.13)$$

여기서, γ_d = Dry bulk density (g/㎤)

γ_w = Density of water (g/㎤)

c_s = Specific heat of solid grains (cal/g-℃)

c_i = Specific heat of ice (cal/g-℃)

G_i = Specific gravity of ice

w = Water content

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

L = Latent heat of water (cal/g)

표 9.1.1의 Dry sandstone 열특성 값은 Somerton(1958)으로부터 구하였다.

표 9.1.1 포화된 토사 및 다공성 암반의 열특성

Material	Frozen		Unfrozen		Latent Heat (λ)
	k	C	k	C	
Ice-Water	2.40	1.81×10^6	0.606	4.19×10^6	3.34×10^8
Silt (n = 50%)	3.08	1.88×10^6	1.54	3.07×10^6	1.67×10^8
Sand (n = 35%)	3.30	1.90×10^6	2.04	2.73×10^6	1.17×10^8
Saturated Sandstone (n = 15%)	3.65	1.93×10^6	2.98	2.28×10^6	5.02×10^7
Dry Sandstone (n = 20%)	0.88	1.60×10^6	0.88	1.60×10^6	0

Note : n = Porosity
k = Thermal conductivity (W/m - ℃)
C = Volumetric heat capacity (J/m^3- ℃)
λ = Volumetric latent heat (J/m^3)

2.3.2 매설관에 작용하는 열특성

주변지반으로부터 매설관에 전달되는 열흐름을 적절히 모델링하는 것은 수치해석에서 고려해야 할 중요한 사항중의 하나이다. 예를 들면 매설관 내의 물체의 중량비 30% $CaCl_2$를 포함하는 냉각물질을 생각하면, 이 냉각물질의 빙점은 대략 -43.3℃가 될 것이다. 이와 같은 냉각물질은 적절한 온도(예 -34.3℃)로 일정한 속도(예 1.22 m/sec)로 매설관에 흐르게 되어 주변지반의 더운 열을 흡수한다.

매설관을 흐르는 냉각물질의 흐름분포는 일정하지 않고 매설관 벽과 흐르는 냉각물질 사이에 흐름구배가 형성되고 매설관 벽에 인접한 냉각물질은 비교적 천천히 흐르고, 상대적으로 온도가 높아 흐르는 보다 차고 빠른 냉각물질과 벽 사이에서 일종의 단열 작용을 한다. 이와 같은 흐름구배로 인해 방해되는 열전달 특성은 매설관 내를 흐르는 냉각물질의 대류열전달계수 (Convective heat transfer coefficient) h로 정의된다.

이 대류열전달계수는 냉각물질의 특성, 흐름속도, 그리고 매설관 직경의 함수로 나타나며 Dittus and Boelter(1930)가 제안한 Nusselt 식으로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$h = 0.1305 \frac{k}{D} \left(\frac{V D \rho}{\mu}\right)^{0.8} \left(\frac{c\mu}{k}\right)^{0.4} \qquad (9.1.14)$$

여기서, D = Diameter of the pipe (m)

ρ = Mass density (kg/m³)

μ = Absolute viscosity (kg/m-s)

k = Thermal conductivity (W/m-℃)

c = Specific heat (J/kg-℃)

단열작용을 하는 냉각수 Boundary layer의 대류열전달계수 뿐만 아니라 매설관 자체의 열전도도 주변 지반으로부터 냉각물질로 전달되는 열흐름에 영향을 준다. 이와 같이 강관의 열전도를 고려한 전열전달계수 (Overall heat transfer coefficient) U는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$U = \frac{1}{\frac{r_o}{h r_1} + \frac{r_o \log_e(\frac{r_2}{r_1})}{k}} \qquad (9.1.15)$$

여기서, r_1 = Inner radius of pipe

r_2 = Outer radius of pipe

r_o = $(r_1 + r_2)/2$

k = Thermal conductivity of steel pipe (approximately 45 W/m-℃ for steel)

3. 열응력 해석

3.1 열응력 유한요소식

열응력 평형방정식은 유한요소의 형상함수를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다

$$K_t \cdot \Delta u_n = F_n - R_{n-1} \tag{9.1.16}$$

여기서, $K_t = \sum \int_v [B]^T [D^{ep}] [B] dv$

$F_n = \sum \int_s [N]^T \{T\} ds$

$R_{n-1} = \sum \int_v [B]^T \{\sigma_{n-1}\} dv$

Δu_n = Nodal displacement increment vector

$[B]$ = Strain-Displacement matrix

$[D^{ep}]$ = Elasto-Plastic stress-strain matrix

$[N]$ = Shape function

$\{T\}$ = Traction vector on the boundary surface

$\{\sigma_{n-1}\}$ = Stresses at step n - 1

시간 n 단계에서 응력벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{\sigma_n\} = \{\sigma_{n-1}\} + \{\Delta\sigma\} \tag{9.1.17}$$

응력증분벡터 $\{\Delta\sigma\}$는 변형률증분과 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\{\Delta\sigma\} = [D^e](\{\Delta\epsilon\} - \{\Delta\epsilon^p\} - \{\Delta\epsilon^T\}) \tag{9.1.18}$$

여기서, $[D^e]$ = Elastic Stress-Strain vector

$\{\Delta\epsilon\}$ = Total Strain increment

$\{\Delta\epsilon^p\}$ = Plastic Strain increment

$\{\Delta\epsilon^T\}$ = Thermal Strain increment

$\{\triangle \epsilon^T\}$는 열팽창과 관련된 변형률증분벡터로 동상(Frost heaving) 시 변형률은 다음 3.2장에서 설명한다.

3.2 동상력 (Frost Heaving Force) 모델링

동상력에 관한 기초연구와 실험은 1920년대 이후 꾸준히 발전되어 왔으나 다차원 수치해석에 구성방정식으로 사용할 수 있는 검증된 신뢰성 있는 모델은 아직 존재하지 않는 실정이다. 이와 같은 이유는 아마도 동상현상이 토립자, 간극수, 공기로 구성된 Multi Phase 구조 속에서 동결이 형성됨에 따른 수분의 이동과 수분이 얼음으로의 상변화 (Phase Change) 등 다변수의 복합적인 물리적 현상을 포함하고 있기 때문으로 사료된다.

본 장에서는 다차원 유한요소 프로그램에 재료의 구성방정식으로 사용할 수 있는 단순한 모델과 비교적 중요한 모든 동상 Mechanism을 포함하고 있는 동상모델을 설명하고자 한다.

3.2.1 Step Expansion 모델

본 모델은 그림 9.1.1에서 보는 바와 같이 흙이 동결시 결빙온도 (T_o)이하에서 $\triangle T_o$의 비교적 작은 양의 온도에 걸쳐 간극수의 상변화에 의한 부피 팽창을 분포시켰으며, 이후 온도 저하에 의한 부피 변화는 무시하였다. 일반적으로 동상은 이방성이므로 동결진행 방향으로의 변형율 (ϵ_{11})과 동결진행 방향에 수직인 변형율 ($\epsilon_{22}, \epsilon_{33}$)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{11} = \xi \cdot \epsilon_m^{\alpha} \qquad (9.1.19)$$

$$\epsilon_{22} = \epsilon_{33} = \frac{1}{2}(1-\xi) \cdot \epsilon_m^{\alpha} \qquad (9.1.20)$$

여기서, ξ 는 동상의 이방성을 나타내는 상수로 동상이 등방팽창일 경우 $\xi = \frac{1}{3}$이고, 동상이 동결진행 방향으로만 팽창할 경우 $\xi = 1$ 이다. 본 모델은 동결이 급속도로 진행되어 동상을 수반하지 않는 간극수만의 동결팽창일 경우 유용하게 사용될 수 있으며, 동상이 수반되는 경우 ϵ_m^{α}는 지표면 온도 T_s의 함수로 나타낼 수 있으며, 이와 같은 함수는 동상실험을 통해 구할 수

있다(건설교통부, 2002).

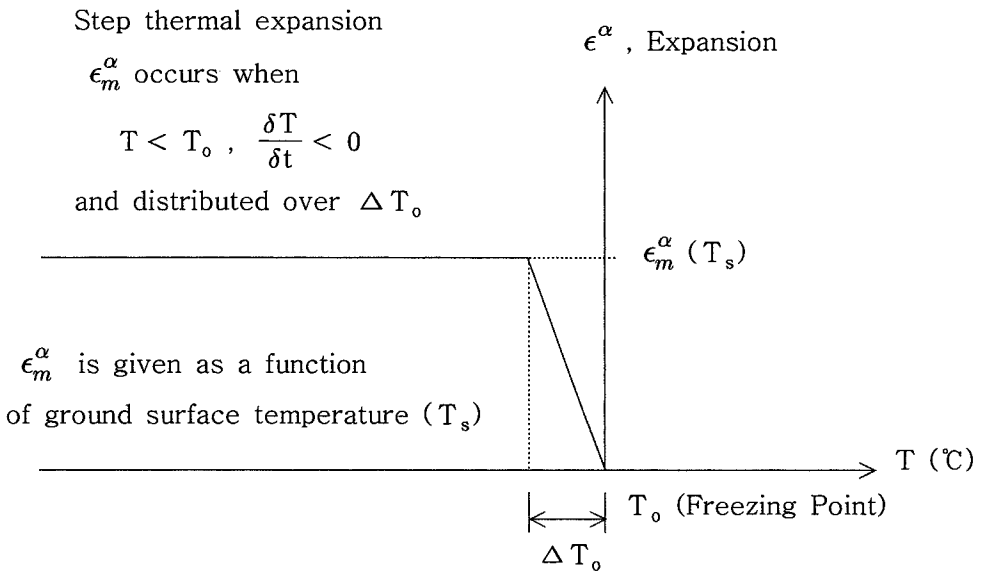


그림 9.1.1 Step Expansion 모델

3.2.2 Moisture Migration 모델

본 모델은 Lai et al 에 의해 동상력을 받는 교각해석에 사용되었으며 동상으로 인해 흡입된 함수비를 고려하여 다음과 같이 체적 변형율 증분 ($\Delta\epsilon_v^\alpha$)을 구하였다.

$$\Delta\epsilon_v^\alpha = 0.09(\theta_o + \Delta\theta - \theta_u) + \theta_o + \Delta\theta - n \qquad (9.1.21)$$

여기서, θ : 초기 함수비

$\Delta\theta$: 흡입된 함수비

θ_u : 부동 함수비

n : 간극비

그리고 동상에 의한 변형을 등방향으로 생각하면 수직 변형율 (Normal Strain) 증분은 다음과 같다.

$$\Delta\epsilon_x^{\alpha} = \Delta\epsilon_y^{\alpha} = \Delta\epsilon_z^{\alpha} = \frac{1}{3}\Delta\epsilon_v^{\alpha} \tag{9.1.22}$$

그리고 전단 변형율 (Shear Strain) 증분은 다음과 같다.

$$\Delta\gamma_{xy}^{\alpha} = \Delta\gamma_{yz}^{\alpha} = \Delta\gamma_{xz}^{\alpha} = 0 \tag{9.1.23}$$

본 모델은 상변화에 근거한 간단한 체적 변형율 식이지만, $\Delta\theta$에 대한 실용적인 식이 제시되어 있지 않다.

3.2.3 Porosity Rate 모델

본 모델은 Miller(1974)의 Rigid Ice Model 개념을 바탕으로 Michalowski and Zhu (2006)에 의해 제안된 동상모델로 동상 Mechanism의 중요한 모든 특성을 포함하고 있으며 동상 시 빙정 (Ice Lens) 성장과정을 Macroscopic Level의 Porosity Rate (n) 함수로 다음과 같이 구현하였다.

$$\dot{n} = \dot{n}_m \cdot \bar{T}^2 \cdot e^{1-\bar{T}^2} \cdot \frac{\left|\frac{\delta T}{\delta l}\right|}{gT} \cdot e^{-|\sigma_{kk}|/\zeta} \tag{9.1.24}$$

$$\bar{T} = \frac{T - T_o}{T_m} \tag{9.1.25}$$

여기서, $\dot{n}_m$: 주어진 흙의 최대 Porosity Rate

T_m : $\dot{n}_m$ 발생시 온도 (℃)

T_o : 결빙 온도 (℃)

T : 흙의 평균온도 (℃)

$\frac{\delta T}{\delta l}$: 동결방향으로 온도구배 (℃/m)

gT : $\dot{n}_m$ 발생시 온도구배 (℃/m)

σ_{kk} : First Stress Invarient (MPa) 흙의 평균압력의 3배

ζ : 응력증가에 따른 동상저지 Parameter (MPa)

식 9.1.24의 $\dot{n}_m$, gT , ζ 와 식 6.1.25의 T_m은 주어진 흙의 물성치이며 식 9.1.24는 동결이 진행되는 동안만 적용된다.

$$T < T_o \text{ and } \frac{\delta T}{\delta t} < 0 \qquad (9.1.26)$$

그림 9.1.2는 동결온도 변화에 대한 Porosity Rate 값의 변화를 나타내며, Silt의 경우 물의 결빙온도 보다 조금 낮은 온도에서 집중적으로 큰 값을 보여주고, 동상성 점토의 경우 Porosity Rate 의 최대값은 Silt보다 현저하게 작지만 완만하게 분포되어 있어 낮은 동결온도에서도 빙정이 계속 성장되는 실험결과를 잘 반영해 주고 있다.

식 9.1.24의 4번째 항은 온도구배 ($\frac{\delta T}{\delta l}$)가 Porosity Rate에 미치는 영향으로, 동결 시 온도구배가 가장 크게 예측되는 동결면에서 큰 값을 갖고, 온도구배가 작게 예측되는 동결면 뒤에서는 작은 값을 갖는 실험결과를 반영해 주고 있다.

그림 9.1.3은 식 9.1.24의 마지막 항으로 응력이 증가함에 따라 Porosity Rate 의 감소를 나타내며 Overburden Stress가 증가함에 따라 빙정성장이 감소되는 실험결과를 반영해 주고 있다.

다음은 동결진행방향으로 빙정이 보다 많이 성장되는 실험결과를 반영하기 위하여 동결진행방향의 Porosity Rate를 $\dot{n}_{11}$ 그리고 동결진행 방향과 수직을 이루는 다른 두 방향의 Porosity Rate를 각각 $\dot{n}_{22}$, $\dot{n}_{33}$ 이라 하면,

$$\dot{n}_{11} = \xi \cdot \dot{n} \qquad (9.1.27)$$

$$\dot{n}_{22} = \dot{n}_{33} = \frac{1}{2}(1 - \xi)\dot{n} \qquad (9.1.28)$$

여기서, ξ 는 동상의 이방성을 나타내는 상수로서 동상이 등방 팽창인 경우 $\xi = \frac{1}{3}$ 이고, 동상이 동결진행 방향으로만 팽창하는 경우 $\xi = 1$ 이다.

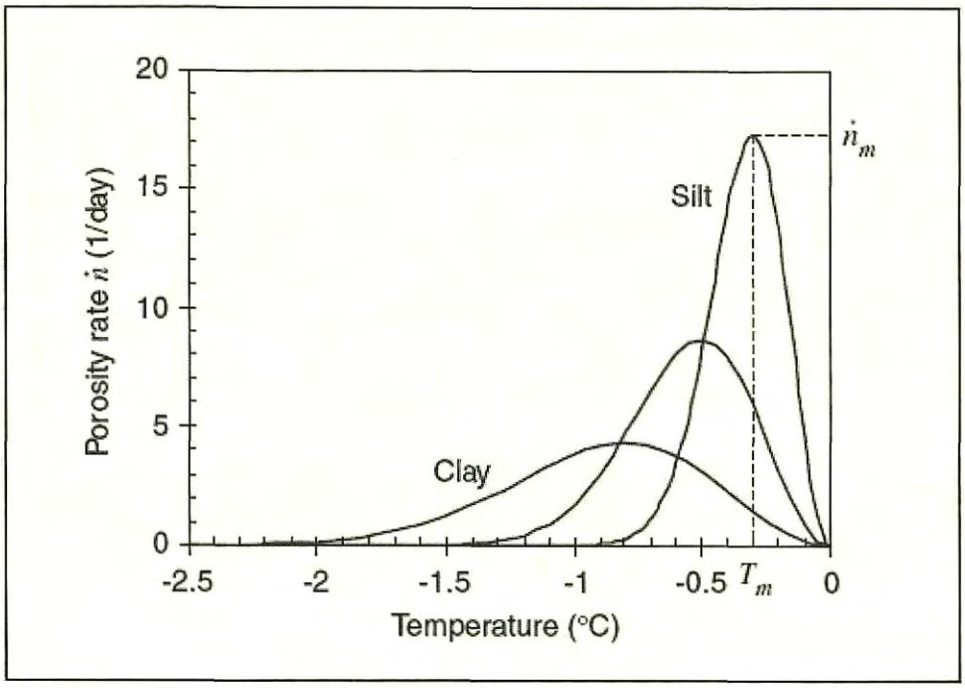


그림 9.1.2 Porosity Rate 함수, $\dot{n}_m \cdot T^2 \cdot e^{1-T^2}$, Michalowski(2006)

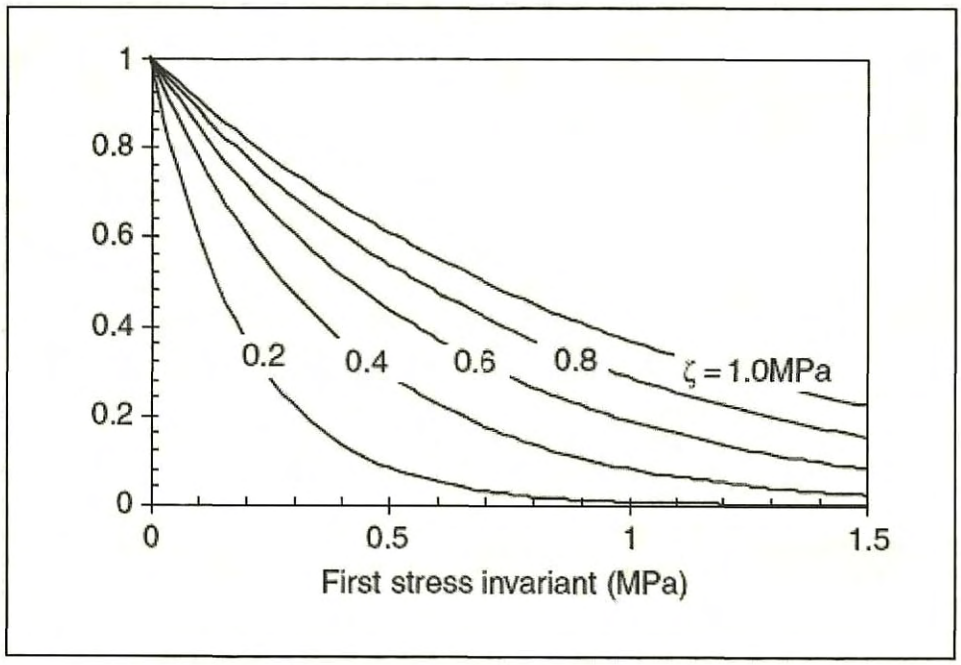


그림 9.1.3 응력증가에 따른 Porosity Rate 감소, , Michalowski(2006)

4. 동상시험 열전도 수치해석

4.1 상전이(Phase change) 검증예제

전절 2.2에서 상전이에 대한 잠열(Latent heat)의 수치해석 모델로 단순하고 효율적인 열용량 평균화 방법인 식 9.1.5를 제안하였다. 여기서는 제안된 식 9.1.5를 사용한 수치해석 결과를 이론해(Closed form solution)와 비교하여 정확성을 검증하고자 한다.

본 검증예제는 초기온도 10℃인 무한대의 길이를 가진 일차원 물기둥이 그 표면에서 갑자기 -20℃로 온도가 떨어졌을 때 물기둥에 따라 진행되는 동결면과 온도분포를 계산하는 예제이다.

본 수치해석은 SMAP-T2를 사용하여 수행하였으며 식 9.1.3의 Three-time level recurrence 방법을 적용하였고 유한요소의 길이는 0.0125m 그리고 Time Step은 200 sec를 사용하였다. 사용된 재료의 물성치는 다음과 같다.

Frozen : $k = 2.22$ W/m-℃

$\rho c = 1.762 \times 10^6$ J/㎥-℃

Unfrozen : $k = 0.556$ W/m-℃

$\rho c = 4.226 \times 10^6$ J/㎥-℃

Latent Heat : $\lambda = 338 \times 10^6$ J/㎥

Assumed Width of Phase-Change Interval : $2\Delta T = 0.5$ ℃

표 9.1.2는 본 상전이 검증예제에 사용된 SMAP-T2 입력 Data이다.

본 연구와 관련하여 사용한 2차원 열전도 유한요소 해석 프로그램 SMAP-T2의 사용자 매뉴얼과 검증예제들을 부록 1에 첨부하였다.

표 9.1.2 상전이 (Phase change) 검증예제 입력 Data

```
* CARD 1.1
* TITLE
  Verification Problem For Phase Change
* CARD 2.1
* IP   NBAND  IBATCH
  1     1      0
* CARD 3.1
* NCYCL  NST
  1440   1
* CARD 3.2
* LEE  TETA
  1    1.0
* CARD 3.3
* IDELT  DT
  0      200.
* CARD 4.1
* NUMNP
  162
* CARD 4.2
* CMFAC  XREF
  1.0    0.0
* CARD 4.3
* NODAL COORDINATES
* NODE  ID   IDF      XC          YC           T           CF
  1     1    1  .000000E+00  .000000E+00  .100000E+02   1.0
  2     1    1  .100000E+01  .000000E+00  .100000E+02   1.0
  3     0    0  .000000E+00 -.125000E-01  .100000E+02  .000000E+00
  4     0    0  .100000E+01 -.125000E-01  .100000E+02  .000000E+00
  5     0    0  .000000E+00 -.250000E-01  .100000E+02  .000000E+00
  6     0    0  .100000E+01 -.250000E-01  .100000E+02  .000000E+00
  7     0    0  .000000E+00 -.375000E-01  .100000E+02  .000000E+00
  8     0    0  .100000E+01 -.375000E-01  .100000E+02  .000000E+00
  9     0    0  .000000E+00 -.500000E-01  .100000E+02  .000000E+00
  10    0    0  .100000E+01 -.500000E-01  .100000E+02  .000000E+00
  11    0    0  .000000E+00 -.624999E-01  .100000E+02  .000000E+00
  12    0    0  .100000E+01 -.624999E-01  .100000E+02  .000000E+00
```

```
  149    0    0  .000000E+00 -.925000E+00  .100000E+02  .000000E+00
  150    0    0  .100000E+01 -.925000E+00  .100000E+02  .000000E+00
  151    0    0  .000000E+00 -.937500E+00  .100000E+02  .000000E+00
  152    0    0  .100000E+01 -.937500E+00  .100000E+02  .000000E+00
  153    0    0  .000000E+00 -.950000E+00  .100000E+02  .000000E+00
  154    0    0  .100000E+01 -.950000E+00  .100000E+02  .000000E+00
  155    0    0  .000000E+00 -.962500E+00  .100000E+02  .000000E+00
  156    0    0  .100000E+01 -.962500E+00  .100000E+02  .000000E+00
  157    0    0  .000000E+00 -.975000E+00  .100000E+02  .000000E+00
  158    0    0  .100000E+01 -.975000E+00  .100000E+02  .000000E+00
  159    0    0  .000000E+00 -.987500E+00  .100000E+02  .000000E+00
  160    0    0  .100000E+01 -.987500E+00  .100000E+02  .000000E+00
  161    0    0  .000000E+00 -.100000E+01  .100000E+02  .000000E+00
  162    0    0  .100000E+01 -.100000E+01  .100000E+02  .000000E+00
* CARD 5.1
* NCONT
  80
* CARD 5.2.1
* NTNC
  1
* CARD 5.2.2.1
* TITLE
  MATERIAL 1
* CARD 5.2.2.2
* MATNO  MATFN  COND  SPH  RO    TLF   TRF   HLT
  1       1     0.0   0.0  0.0  -0.25  0.25  3.38E+08
* CARD 5.3
* ELEMENT INDEX
* NEL    I    J    K    L  MATNO IDH
    1    2    1    3    4    1    0
    2    4    3    5    6    1    0
    3    6    5    7    8    1    0
    4    8    7    9   10    1    0
    5   10    9   11   12    1    0
    6   12   11   13   14    1    0
    7   14   13   15   16    1    0
    8   16   15   17   18    1    0
    9   18   17   19   20    1    0
   10   20   19   21   22    1    0
   11   22   21   23   24    1    0
```

```
   68   136   135   137   138     1     0
   69   138   137   139   140     1     0
   70   140   139   141   142     1     0
   71   142   141   143   144     1     0
   72   144   143   145   146     1     0
   73   146   145   147   148     1     0
   74   148   147   149   150     1     0
   75   150   149   151   152     1     0
   76   152   151   153   154     1     0
   77   154   153   155   156     1     0
   78   156   155   157   158     1     0
   79   158   157   159   160     1     0
   80   160   159   161   162     1     0
* CARD 9.1.1
* NTNP
  0
* CARD 9.2.1
* NPIPE
  0
* CARD 9.3.1
* NCONV
  0
* CARD 9.4.1
* NTIMF  NTIM
  1      2
* CARD 9.4.2
* TIME       FN1
  0.0       -20.
  1.E+10    -20.
* CARD 9.5.1
* NTEMF  NTEM
  1      4
* CARD 9.5.2
* TEMP     COND1     ROC1
  -50.     2.22      1762000.
  -0.25    2.22      1762000.
  0.25     0.556     4226000.
  50.      0.556     4226000.
* CARD 10.1
* NTPRNT
```

```
  10
* CARD 10.2.1
* NHPEL
  1
* CARD 10.2.2
* NEL1
  1
* CARD 10.3.1
* NHPMT
  1
* CARD 10.3.2
* NODE1
  1
* CARD 10.4.1
* NTIME
  4
* CARD 10.4.2
* LISTING OF TIMES
  18000.  72000.  144000.  288000.
*
* CARD 11  ( PLTDS Plot Information )
* ---------------------------------------------
* CARD 11.1
* NPTYPE
  1
* CARD 11.2.1
* TITLE
  Verification Problem 3
* CARD 11.2.2
* IUNIT
  3
* CARD 11.2.3
* NCHR
  1
* LABEL
  M
* CARD 11.2.4
* IMODE
  1
* CARD 11.2.5
* NGROUP
```

```
  1
* CARD 11.2.6
* NSS   NEE   NIC   NNN
  1    80     1     1
* ---------------------------------------------
* CARD 11.1
* NPTYPE
  0
* ---------------------------------------------
* PLTXY  Plot  Informations
* ---------------------------------------------
* Temperature Profiles at 5, 20, 40 and 80 Hrs.
* CARD 12.1
* IPTYPE
  4
* CARD 12.5.1
* IPLOT
  1
* CARD 12.5.2
* NOTM
  4
* CARD 12.5.3
* LISTING OF TIMES
  18000.  72000.  144000.  288000.
* CARD 12.5.4
* NDPQ
  1
* CARD 12.5.5
* KY1
  31
* CARD 12.5.6
* ISCALD  ILTNUM  XSTART
  1        0      0.0
* CARD 12.5.7
* FOR SEQUENTIAL ORDER
  2
* NSTAR  NINCR  NPONT
  1      2      81
* FOR END OF GENERATION
  0
* CARD 12.5.8
```

```
* TPFAC  SDFAC
  1.0    100.
* CARD 12.5.7
* TITLE
  Temperature Profile
* X-LABEL
  Distance ( Cm )
* Y-LABEL
  Temperature ( Deg. C )
* ------------------------------------------------
* CARD 12.1
* IPTYPE
  0
* ------------------------------------------------
* CARD 13.1
* IFEMAP
  0
* ------------------------------------------------
```

그림 9.1.4는 5, 20, 40 그리고 80시간 경과 후 물기둥의 온도분포를 나타낸 것으로 Luikov(1968)의 이론해와 비교하였다. 그림 9.1.4에서 보는 바와 같이 제안된 식 9.1.5를 사용한 수치해석 결과는 이론해와 잘 일치하고 있다.

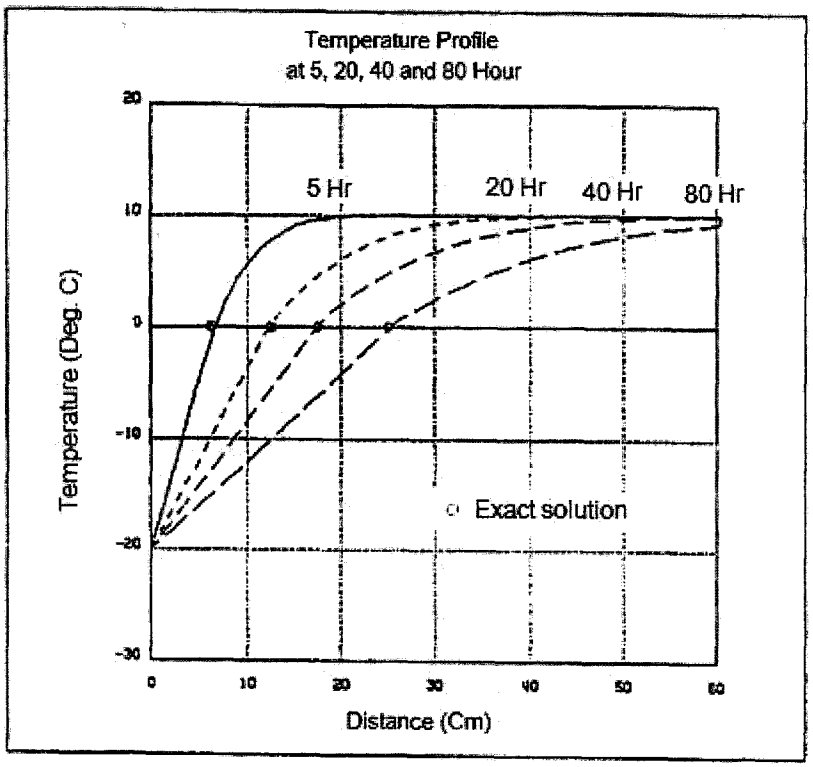


그림 9.1.4 상전이(Phase change) 검증예제

4.2 지하수가 공급되는 지반에 매설된 매설관의 열전도 수치해석

그림 9.1.5는 지하수가 공급되는 지반내에 매설된 매설관의 개략도로 시험에 사용된 시료적재 상자의 크기는 500㎜ × 500㎜ × 300㎜ 이고 강관은 직경이 6㎜로 시료의 중간 높이에 있고, 온도센서는 적재상자 상 · 하부에서 5㎝ 떨어진 위치에, 소형 토압계는 강관 상 · 하부에 고정되어 있다. 시험기내 대기의 설정온도는 -17℃, 수조부의 물 온도는 4℃로 유지하며 시험이 수행되었다.

No scale

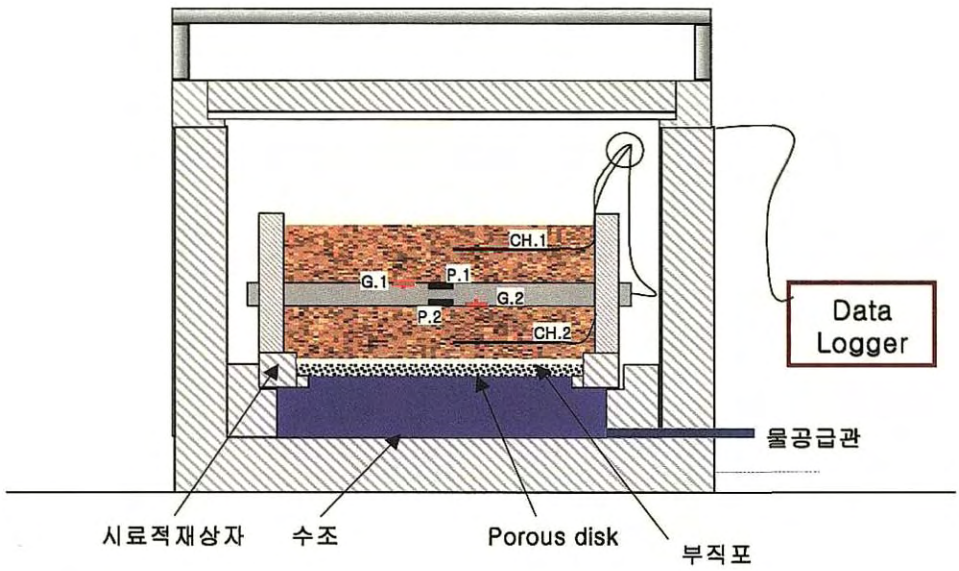


그림 9.1.5 지하수 공급지반의 매설관 거동 시험장치

본 시험장치의 열전달 해석은 상용프로그램 SMAP-T2를 사용하여 수행하였으며, 그림 9.1.6은 본 해석에 사용된 유한요소망으로 해석에 사용된 절점과 요소의 수는 각각 344, 302개 이다.

본 해석에 사용된 흙시료의 Thermal Property는 다음과 같다.

동결 전 Thermal Conductivity = 1.52 W/m-℃
Volumetric Heat Capacity = 2.73×10^6 J/m³-℃

동결 후 Thermal Conductivity = 2.78 W/m-℃
Volumetric Heat Capacity = 1.90×10^6 J/m³-℃
Volumetric Latent Heat = 1.17×10^8 J/m³

표 9.1.3은 본 매설관 열전도 수치해석에 사용된 SMAP-T2 임력 Data이다.

표 9.1.3 매설관 열전도 수치해석 입력 Data

```
Mesh File Input Data
====================

Thermal Analysis Mesh

NUMNP   NCONT   NBEAM   NTRUS
359     320      0       0
NODAL COORDINATES

NODE  ID  IDF     XC            YC            T      CF

1      1   1    .000000E-02   .200000E+00   13.0    1.0
2      1   1    .200000E-01   .200000E+00   13.0    1.0
3      1   1    .400000E-01   .200000E+00   13.0    1.0
4      1   1    .600000E-01   .200000E+00   13.0    1.0
5      1   1    .720000E-01   .200000E+00   13.0    1.0
6      1   1    .855556E-01   .200000E+00   13.0    1.0
7      1   1    .100667E+00   .200000E+00   13.0    1.0
8      1   1    .117333E+00   .200000E+00   13.0    1.0
9      1   1    .135556E+00   .200000E+00   13.0    1.0
10     1   1    .155333E+00   .200000E+00   13.0    1.0
11     1   1    .176667E+00   .200000E+00   13.0    1.0
12     1   1    .199556E+00   .200000E+00   13.0    1.0


349    0   0    .990752E-02   .990752E-02   13.0    0.0
350    0   0    .195562E-01   .919000E-02   13.0    0.0
351    0   0    .000000E+00   .000000E+00   13.0    0.0
352    0   0    .100000E-01   .000000E+00   13.0    0.0
353    0   0    .200000E-01   .000000E+00   13.0    0.0
354    0   0    .000000E+00  -.100000E-01   13.0    0.0
355    0   0    .990752E-02  -.990752E-02   13.0    0.0
356    0   0    .195562E-01  -.919000E-02   13.0    1.0
357    0   0    .000000E+00  -.200000E-01   13.0    1.0
358    0   0    .919000E-02  -.195562E-01   13.0    1.0
359    0   0    .178624E-01  -.178624E-01   13.0    1.0
*
* Card 3.2 [Main File Card 5.3]
*
```

Continuum Element Indexes

NEL	I	J	K	L	MATNO	IDM
1	2	1	15	16	1	0
2	3	2	16	17	1	0
3	4	3	17	18	1	0
4	5	4	18	19	1	0
5	6	5	19	20	1	0
6	7	6	20	21	1	0
7	8	7	21	22	1	0
8	9	8	22	23	1	0
9	10	9	23	24	1	0
10	11	10	24	25	1	0
11	12	11	25	26	1	0
12	13	12	26	27	1	0

309	349	348	351	352	2	0
310	350	349	352	353	2	0
311	114	350	353	113	2	0
312	352	351	354	355	2	0
313	353	352	355	356	2	0
314	113	353	356	181	2	0
315	355	354	357	358	2	0
316	356	355	358	359	2	0
317	181	356	359	182	2	0
318	358	357	186	185	2	0
319	359	358	185	184	2	0
320	182	359	184	183	2	0

0

Main File Input Data

==========

```
* CARD 1.1
* TITLE
  THERMAL ANALYSIS
* CARD 2.1
* IP   NBAND  IBATCH  IELTEMP
  1     0      0       1
* CARD 3.1
* NCYCL  NST
```

```
  2880   1
* CARD 3.2
* LEE  TETA
  1     1.0
* CARD 3.3
* IDELT  DT
  0       200.
* CARD 4.1
* NUMNP
  359
* CARD 4.2
* CMFAC  XREF
  1.0     0.0
* CARD 5.1
* NCONT
  320
* CARD 5.2.1
* NTNC
  2
* ------------------------------------------------------------
* CARD 5.2.2.1
* TITLE
  MATERIAL 1
* CARD 5.2.2.2
* MATNO  MATFN  COND  SPH  RO    TLF   TRF   HLT
  1       1     0.0   0.0  0.0  -0.25  0.25  1.17E+08
* ------------------------------------------------------------
* CARD 5.2.2.1
* TITLE
  MATERIAL 2
* CARD 5.2.2.2
* MATNO  MATFN  COND  SPH  RO    TLF   TRF   HLT
  2       2     0.0   0.0  0.0  -0.25  0.25  0.00E+00
* ------------------------------------------------------------
* CARD 9.1.1
* NTNP
  0
* CARD 9.2.1
* NPIPE
  0
* CARD 9.3.1
```

```
* NCONV
  0
* CARD 9.4.1
* NTIMF  NTIM
  2      4
* CARD 9.4.2
* TIME        FN1    FN2
  0.0          13.0   13.0
  36000.      -5.0    4.0
  144000.     -17.0   4.0
  1.E+10      -17.0   4.0
* CARD 9.5.1
* NTEMF  NTEM
  2      4
* CARD 9.5.2
* TEMP     COND1     ROC1
  -50.     2.78      1900000.
           0.0243    1295.
  -0.25    2.78      1900000.
           0.0243    1295.
   0.25    1.52      2730000.
           0.0243    1295.
    50.    1.52      2730000.
           0.0243    1295.
* CARD 10.1
* NTPRNT
  40
* CARD 10.2.1
* NHPEL
  2
* CARD 10.2.2
* NEL1
  27  264
* CARD 10.3.1
* NHPMT
  2
* CARD 10.3.2
* NODE1
  29  303
* CARD 10.4.1
* NTIME
```

```
  6
* CARD 10.4.2
* LISTING OF TIMES
  18000.  72000.  144000.  288000.  432000.  576000.
* END OF DATA
```

Post File Input Data

==========

```
*
* CARD 11  ( PLTDS Plot Information )
* ------------------------------------------
* CARD 11.1
* NPTYPE
  1
* CARD 11.2.1
* TITLE
  THERMAL ANALYSIS
* CARD 11.2.2
* IUNIT
  3
* CARD 11.2.3
* NCHR
  1
* LABEL
M
* CARD 11.2.4
* IMODE
  1
* CARD 11.2.5
* NGROUP
  1
* CARD 11.2.6
* NSS   NEE   NIC   NNN
  1     302     1     1
* ------------------------------------------
* Temperature at Time = 2, 40, 80, 160 Hrs.
* CARD 11.1
* NPTYPE
  2
```

```
* CARD 11.3.1
* TITLE
  THERMAL ANALYSIS
* CARD 11.3.2
* IUNIT
  3
* CARD 11.3.3
* NCHR
 1
* LABEL
M
* NCHRC
  6
* LABELC
Deg. C
* CARD 11.3.4
* NLTIME  TIMEref
  4       0.0
* TIME1
  72000.  144000.  288000.  576000.
* CARD 11.3.5
* NCTS
  31
* CARD 11.3.6
* DELTA  IRES  IRGP  IENL  RX   RY
  0.0    0     1     0    0.0  0.0
* NOTE: USE DELTA = -0.2 FOR LINE CONTOUR PLOT
* CARD 11.3.7
* NGROUP
  1
* CARD 11.3.8
* NSS  NEE  NIC  NNN
  1  302    1    1
* CARD 11.3.9
* NRL
  0
* CARD 11.3.10
* N1  N2  N3  N4  N5
*  1   6  36  31   1
* ---------------------------------------------
* CARD 11.1
```

```
* NPTYPE
  0
* ------------------------------------------------
* PLTXY  Plot  Informations
* ------------------------------------------------
* Temperature Time History
* CARD 12.1
* IPTYPE
  1
* CARD 12.3.1
* IPLOT
  1
* CARD 12.3.2
* NODE
  2
* CARD 12.3.3
* LIST OF NODES
  27   264
* CARD 12.3.4
* NDPQ
  1
* CARD 12.3.5
* KX  KY
  1  31
* CARD 12.3.6
* TMFAC        TPFAC
  2.778E-04    1.0
* CARD 12.3.7
* TITLE
  Temperature Time History
* X-LABEL
  Time ( Hour )
* Y-LABEL
  Temperature ( Deg. C )
* ------------------------------------------------
* PLTXY  Plot  Informations
* ------------------------------------------------
* Profiles at 5, 20, 40, 80, 120, 160 Hrs.
* CARD 12.1
* IPTYPE
  4
```

```
* CARD 12.5.1
* IPLOT
  1
* CARD 12.5.2
* NOTM
  6
* CARD 12.5.3
* LISTING OF TIMES
  18000.  72000.  144000.  288000.  432000.  576000.
* CARD 12.5.4
* NDPQ
  1
* CARD 12.5.5
* KY1
  31
* CARD 12.5.6
* ISCALD  ILTNUM  XSTART
  1        0      0.0
* CARD 12.5.7
* FOR SEQUENTIAL ORDER
  2
* NSTAR  NINCR  NPONT
  14     14      8
* CARD 12.5.7
* FOR ARBITRARY ORDER
  1
* NRL
  5
* N1, N2, ---
  180, 179, 178, 244, 245
* CARD 12.5.7
* FOR SEQUENTIAL ORDER
  2
* NSTAR  NINCR  NPONT
  246     14      8
* FOR END OF GENERATION
  0
* CARD 12.5.8
* TPFAC  SDFAC
  1.0    1.0
* CARD 12.5.7
```

```
* TITLE
  Temperature Profile
* X-LABEL
  Distance ( M )
* Y-LABEL
  Temperature ( Deg. C )
* ------------------------------------------------
* CARD 12.1
* IPTYPE
  0
* ------------------------------------------------
* CARD 13.1
* IFEMAP
  0
* ------------------------------------------------
* END OF DATA
```

그림 9.1.7부터 9.1.10은 해석결과 20, 40, 80, 160 시간 경과 후 온도 분포도를 나타내며 온도 분포는 강관에서 조금 떨어져서는 거의 1차원에 가까운 분포상태를 나타내며 동결면의 하강은 처음 80시간까지는 현저하게 진행되지만 이 후로는 매우 느린 속도로 이동됨을 보여준다.

그림 9.1.11은 온도 센서가 설치된 위치에서의 수치해석 결과와 측정치를 비교한 그래프로 대체적으로 같은 경향을 보여주고 있으며, 온도가 수렴된 상태에서는 측정값이 해석결과보다 약 2℃정도 낮은 온도를 보여준다.

그림 9.1.12는 측벽에서의 온도 Profile로 대략 80시간 경과 후 온도 분포는 수렴된 상태이고 동결면을 기준으로 동결된 상부 흙과 비 동결된 하부 흙의 온도구배가 현저하게 상이함을 알 수 있다.

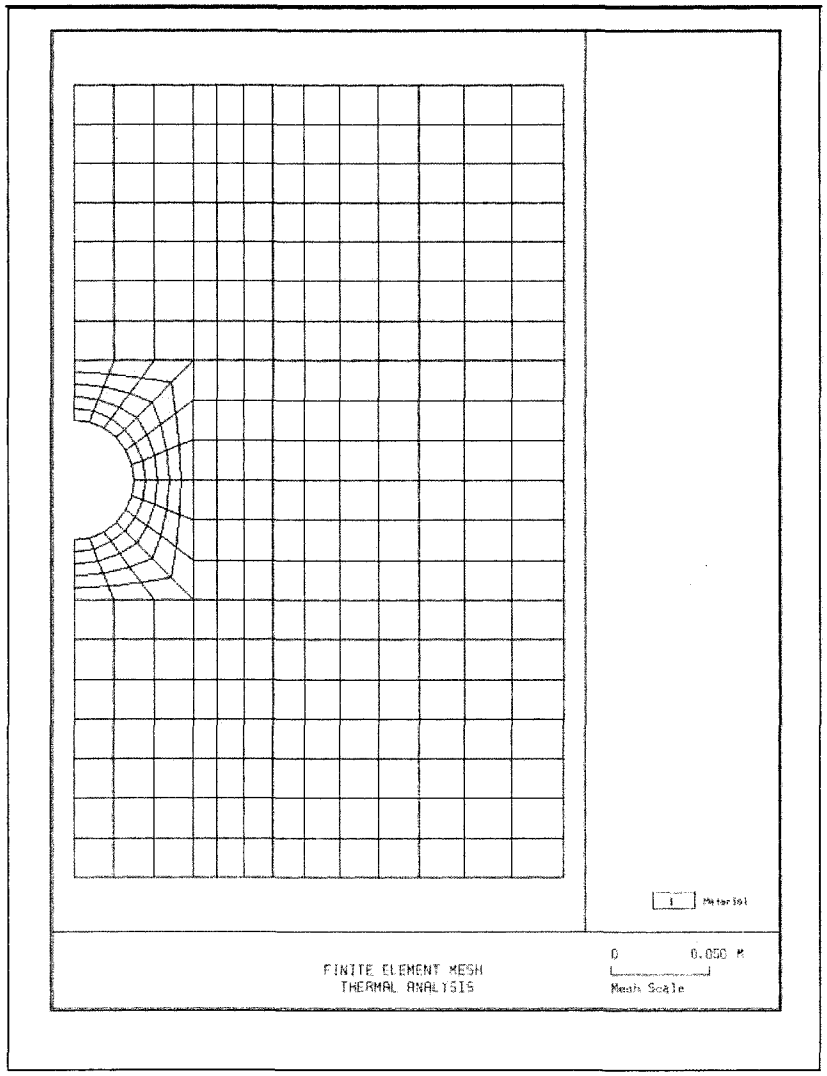


그림 9.1.6 Thermal Analysis에 사용한 유한요소망

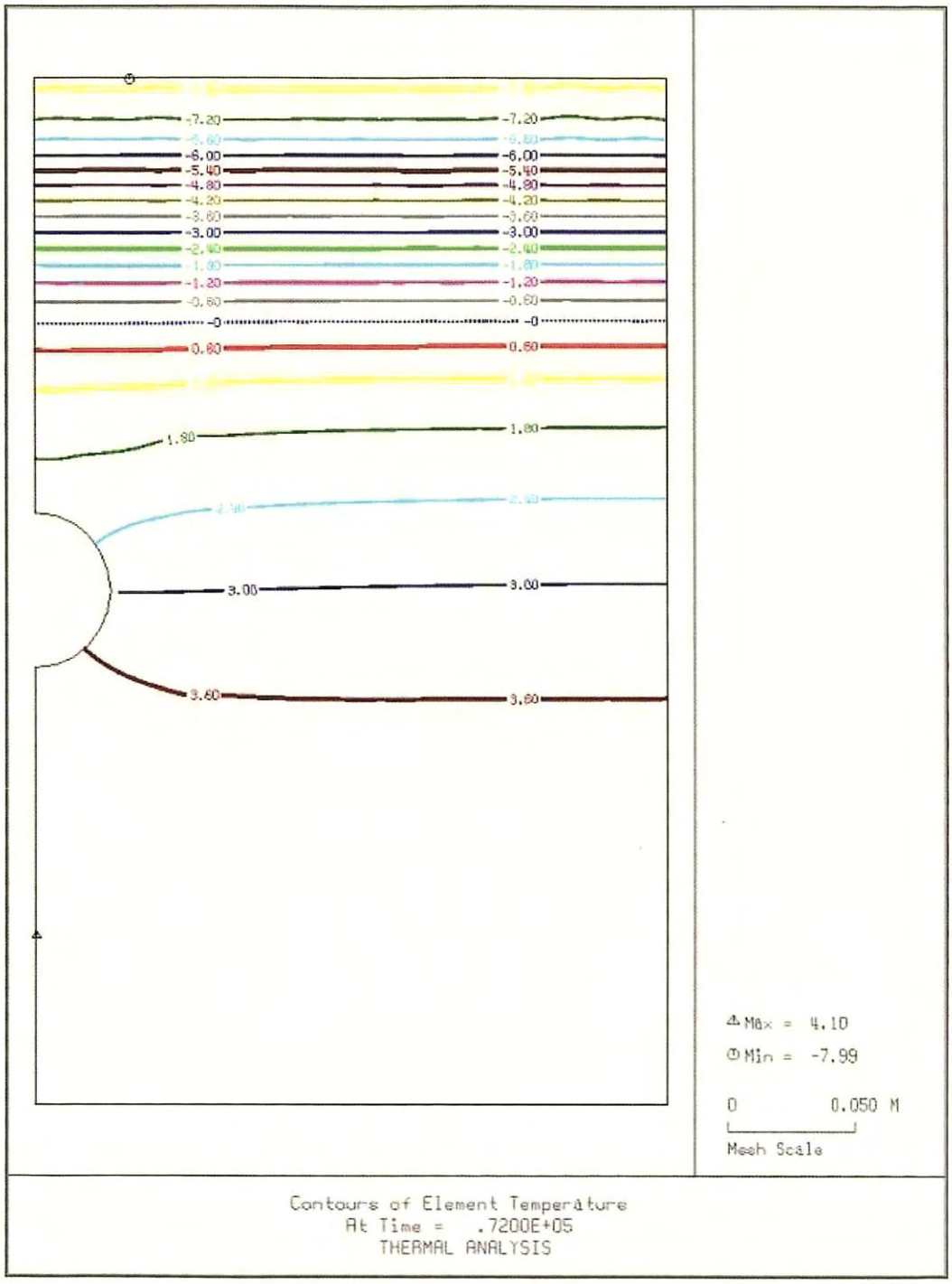


그림 9.1.7 20시간 경과 후 온도분포도

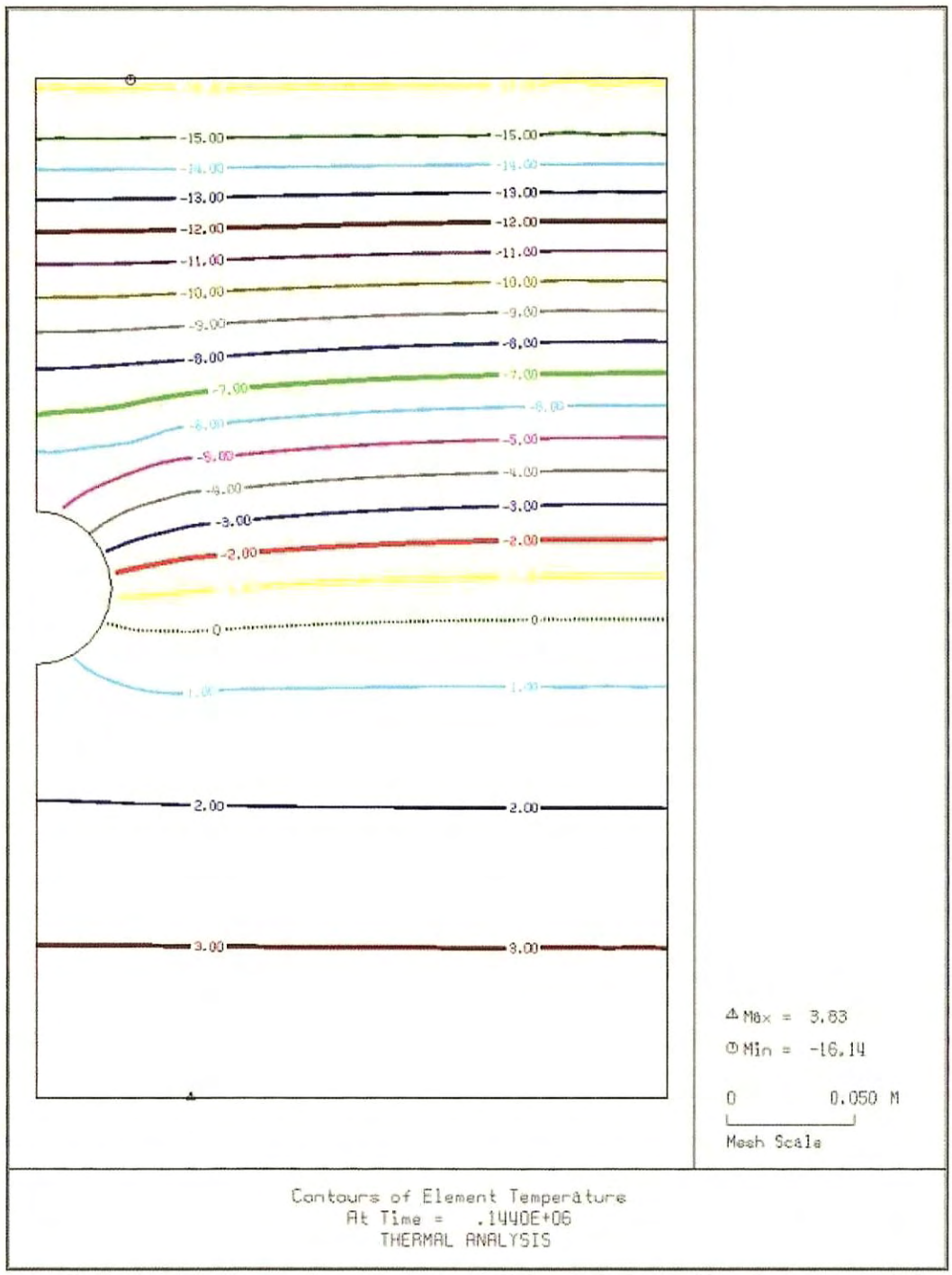


그림 9.1.8 40시간 경과 후 온도분포도

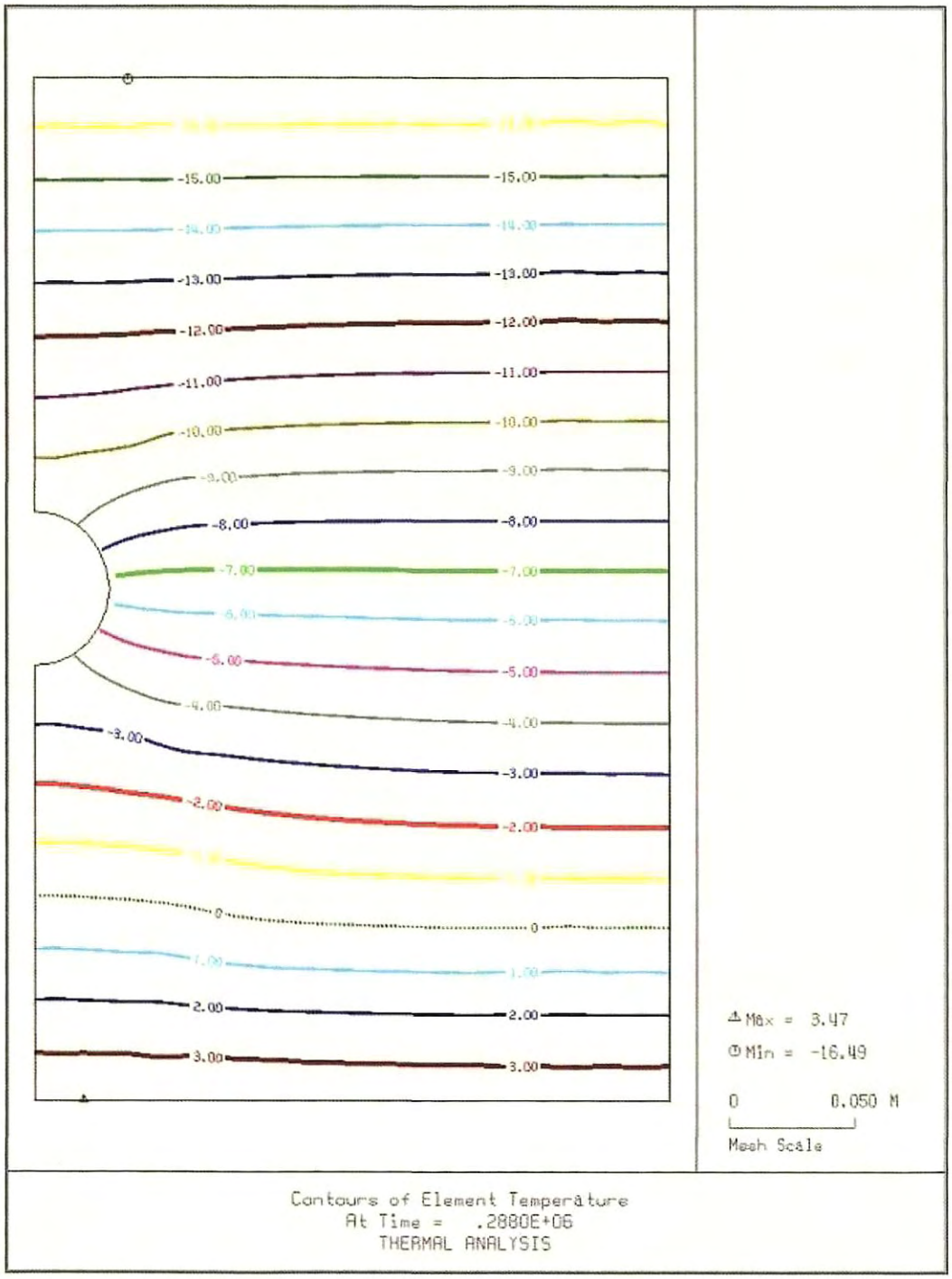


그림 9.1.9 80시간 경과 후 온도분포도

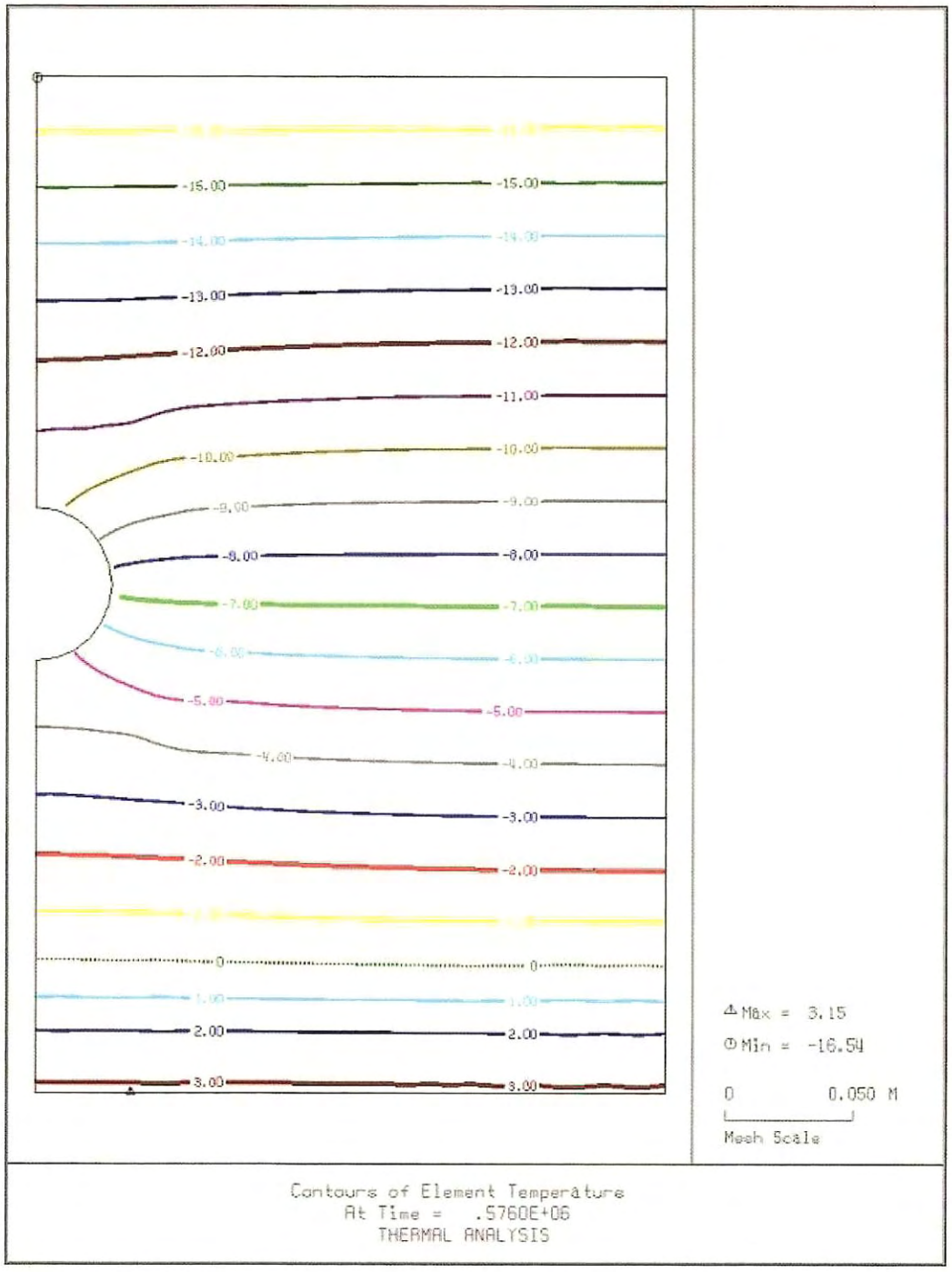


그림 9.1.10 160시간 경과 후 온도분포도

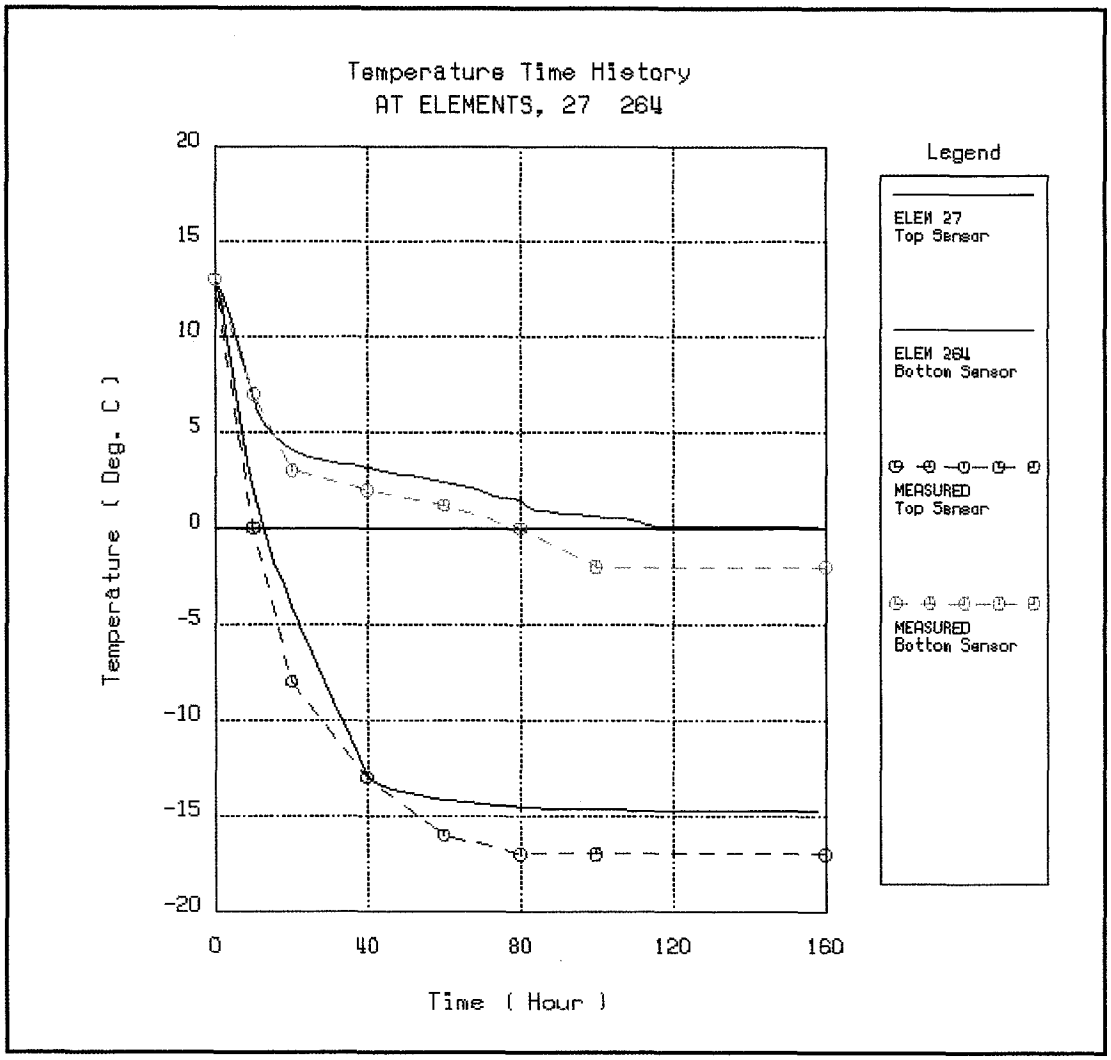


그림 9.1.11 온도센서 위치에서 온도의 Time History 비교

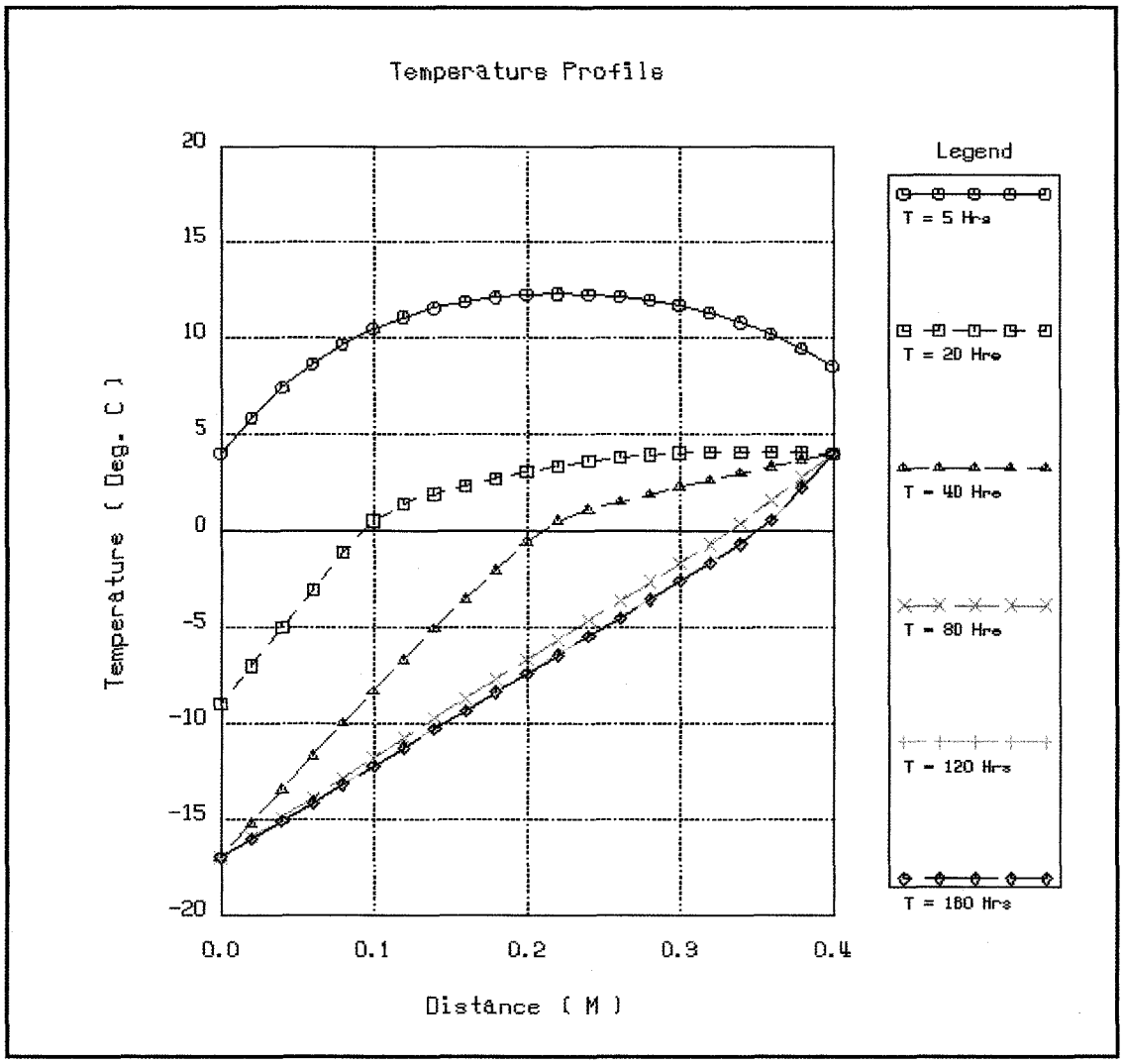


그림 9.1.12 측벽에서의 온도 Profile

Card Group	Input Data and Definitions (Main File)	
열특성 물성치	1.1 TITLE [Character string] TITLE Project title	
	2.1 LABEL 1 [Character string] LABEL 1 Label for Card 2.2	
	2.2	2.2.1 MATNO, MODEL MATNO Material property number If MATNO = -1, end of Card 2.2. MODEL = 1 Constant thermal expansion = 2 Step thermal expansion = 3 Porosity rate dependent expansion
	For Each Mat.	2.2.2 T_o, E_da T_o Freezing temperature (℃) E_da Anisotropic expansion parameter (ζ)

Card Group	Input Data and Definitions (Main File)	
열특성 물성치	2.2 For Each Mat.	2.2.3 E_u, V_u, E_f, V_f E_u Unfrozen Young's modulus V_u Unfrozen Poissin's ratio E_f Frozen Young's modulus V_f Frozen Poisson's ratio
		2.2.4 [Required only for MODEL = 1] Alpha_c Alpha_c Coefficient of thermal expansion (L/L/Temperature)
		2.2.5 [Required only for MODEL = 2] Strain_m, dT_o Strain_m Maximum expansive strain dT_o Strain_m distributed over dT_o(℃)
		2.2.6 [Required only for MODEL = 3] RateN_m, T_m, g_T, Z_eta RateN_m Maximum porosity rate T_m Temperature(℃) at RateN_m g_T Temperature gradient (℃/m) at RateN_m Z_eta Stress parameter, ζ, in stress unit (Mpa) used for reducing porosity rate

Card Group	Input Data and Definitions (Main File)
3 온도 Data	3.1 LABEL 2 [Character string] LABEL 1 Label for Card 3.2
	3.2 $TIME_i$ $TIME_i$ Time. TIME, should be 0.0 for intial state. If TIME = -1.0, end of data. Temperature Profile, Can be repeated for each TIME
	3.3 LABEL 3 [Character string] LABEL 3 Label for Card 3.4
	3.4 NELNO MATNO T_{top} T_{bot} $T_{,x}$ $T_{,y}$ $T_{,z}$ - - - - - - - - - - - - - - NELNO Element number If NELNO = -1, end of Card 3,4. MATNO Material property number. T_{top} Temperature on top surface T_{bot} Temperature on bottom surface $T_{,x}$ Temperature gradient in x direction $T_{,y}$ Temperature gradient in y direction $T_{,z}$ Temperature gradient in z direction

6. 열팽창 모듈 Fortran Code

```
C
C ***********************************************************************
C *                                                                     *
C *   Thermal Expansion Including Frost Heave                           *
C *                                                                     *
C *   Following routines are implemented in the SMAP-2D program         *
C *   to compute thermal stresses associated with temperature change.   *
C *                                                                     *
C ***********************************************************************
C
C     Note: Following variables represent the increment of temperatures
C           ETOP_C   ETOP_O
C           EBOT_C   EBOT_O
C           TAVG     TAVGOLD
C           TDIF     TDIFOLD
C           Following Arrays are not used currently
C           TBALPHA  (15-20,200)
C           ETGR_OLD (1-3,99990)

C
      SUBROUTINE TEMPINC (TM, DT, NUMEL)
C
      COMMON /NTEMP/ NTEMP, ITPROP     (99990), TBALPHA   (20,200),
     +                      ETEM_CUR   (99990), ETEM_OLD   (99990),
     +                      ETGR_CUR (3,99990), ETGR_OLD (3,99990),
     +                      ESTI_CUR (6,99990), ESTI_OLD (6,99990),
     +                      ETOP_C     (99990), ETOP_O     (99990),
     +                      EBOT_C     (99990), EBOT_O     (99990),
     +                      TEM_CUR,            TEM_OLD,
     +                      TGR_CUR  (3),       TGR_OLD  (3),
     +                      STI_CUR  (6),       STI_OLD  (6),
     +                      TAVG,               TAVGOLD,
     +                      TDIF,               TDIFOLD,
     +                      NELCUR,             HTCUR
C
      COMMON /TEMP_T1T2/ T1, T2
C
      CHARACTER*1 ISKIP
      CHARACTER*72 LETTER
C
      IF (TM.NE.DT) GO TO 110
C
C     ===============================================================
C
C     INITIALIZE
C
      KDISK1 = 221
```

```
      KDISK2 = 222
C
      MDISKP = 330
C
      MDISK1 = 331
      MDISK2 = 332
C
      OPEN (MDISKP, FILE='..WELTEMP.DAT',  STATUS='OLD')
C
      OPEN (KDISK1, FILE='FIL221.TMP', STATUS='UNKNOWN')
      OPEN (KDISK2, FILE='FIL222.TMP', STATUS='UNKNOWN')
C
      OPEN (MDISK1, FILE='FIL331.TMP', STATUS='UNKNOWN')
      OPEN (MDISK2, FILE='FIL332.TMP', STATUS='UNKNOWN')
C
      CALL IZERO (ITPROP,    NUMEL   )
      CALL SZERO (TBALPHA,   20*200  )
C
      CALL SZERO (ETOP_C,    NUMEL   )
      CALL SZERO (ETOP_O,    NUMEL   )
C
      CALL SZERO (EBOT_C,    NUMEL   )
      CALL SZERO (EBOT_O,    NUMEL   )
C
      CALL SZERO (ETEM_CUR,  NUMEL   )
      CALL SZERO (ETEM_OLD,  NUMEL   )
C
      CALL SZERO (ETGR_CUR,  3*NUMEL )
C
      CALL SZERO (ESTI_CUR,  6*NUMEL )
      CALL SZERO (ESTI_OLD,  6*NUMEL )
C
C     ================================================================
C
C     READ THERMAL PROPERTY DATA
C
      READ (MDISKP, 1) ISKIP
C
      READ (MDISKP, 1) ISKIP
      READ (MDISKP, 1) ISKIP
      READ (MDISKP, 1) ISKIP
      READ (MDISKP, 1) ISKIP
      READ (MDISKP, 1) ISKIP
      READ (MDISKP, 1) ISKIP
C
    1 FORMAT ( A1 )
    2 FORMAT ( A72)
C
   20 CONTINUE
C
```

```
      READ (MDISKP, *)   rMatno,    rModel
C
      MATNO   = INT (rMatno)
C
      READ (MDISKP, *)   T_o,       E_da
C
      READ (MDISKP, *)   E_u,       V_u,     E_f,     V_f
C
          IF (MATNO .EQ. 1) THEN
C     ------------------------------------------------------
C
      READ (MDISKP, *)   Alpha_c
C
      ELSE IF (MATNO .EQ. 2) THEN
C     ------------------------------------------------------
C
      READ (MDISKP, *)   Strain_m,  dT_o
C
      ELSE IF (MATNO .EQ. 3) THEN
C     ------------------------------------------------------
C
      READ (MDISKP, *)   RateN_m,   T_m,     g_T,     Z_eta
C
      END IF
C     ------------------------------------------------------
C
      IF (MATNO.EQ.-1) GO TO 30
C
      IF (MATNO.EQ.0 .OR. MATNO.GT.200) THEN
       MATNO  = 1
       rModel = 0.0
      END IF
C
      TBALPHA (1,  MATNO) = rModel
C
      TBALPHA (2,  MATNO) = Alpha_c
C
      TBALPHA (3,  MATNO) = T_o
      TBALPHA (4,  MATNO) = E_da
C
      TBALPHA (5,  MATNO) = E_u
      TBALPHA (6,  MATNO) = V_u
      TBALPHA (7,  MATNO) = E_f
      TBALPHA (8,  MATNO) = V_f
C
      TBALPHA (9,  MATNO) = Strain_m
      TBALPHA (10, MATNO) = dT_o
C
      TBALPHA (11, MATNO) = RateN_m
      TBALPHA (12, MATNO) = T_m
```

```
      TBALPHA (13, MATNO) = g_T
      TBALPHA (14, MATNO) = Z_eta
C
      GO TO 20
C
   30 CONTINUE
C
C     ================================================================
C
C     READ INITIAL TEMPERATURE
C
      TMLIMIT = 1.0E+30
      NDATA   = 0
      REWIND MDISK1
C
      REWIND KDISK1
C
      READ (MDISKP, 2) LETTER
      WRITE(KDISK1, 2) LETTER
      READ (MDISKP, *) T1
                       T1 = 0.0
      WRITE(KDISK1, *) T1
      READ (MDISKP, 2) LETTER
      WRITE(KDISK1, 2) LETTER
C
   50 CONTINUE
C
      READ (MDISKP, *) NELNO, MATNO, TTOP, TBOT, Tcx, Tcy, Tcz
      WRITE(KDISK1, *) NELNO, MATNO, TTOP, TBOT, Tcx, Tcy, Tcz
C
      IF (NELNO.EQ.-1) GO TO 100
C
      NDATA         = NDATA + 1
      ITPROP(NELNO) = MATNO
C
      WRITE (MDISK1, *) NELNO, TTOP, TBOT, Tcx, Tcy, Tcz
C
      GO TO 50
C
  100 CONTINUE
C
      WRITE (MDISK1, *) -1, -1.0, -1.0, -1.0, -1.0, -1.0
C
C     ================================================================
C
      NDATA = NDATA + 4
C
      REWIND KDISK2
C
      READ (MDISKP, 2) LETTER
```

```
      WRITE(KDISK2, 2) LETTER
      READ (MDISKP, *) T2
      WRITE(KDISK2, *) T2
      READ (MDISKP, 2) LETTER
      WRITE(KDISK2, 2) LETTER
C
  102 CONTINUE
C
      READ (MDISKP, *) NELNO, MATNO, TTOP, TBOT, Tcx, Tcy, Tcz
      WRITE(KDISK2, *) NELNO, MATNO, TTOP, TBOT, Tcx, Tcy, Tcz
C
      IF (NELNO.EQ.-1) GO TO 104
C
      GO TO 102
C
  104 CONTINUE
C
C
C
  110 CONTINUE
C
      IF (TM.GE.TMLIMIT) GO TO 500
C
C     ================================================================
C
C     FIND T1 AND T2 TO INTERPOLATE VALUE AT TM
C
  120 CONTINUE
C
      IF (TM.GE.T1.AND.TM.LE.T2) GO TO 130
C
      T1 = T2
C
      KDISKT = KDISK1
      KDISK1 = KDISK2
      KDISK2 = KDISKT
C
      REWIND KDISK1
      REWIND KDISK2
C
      READ (MDISKP, 2) LETTER
      WRITE(KDISK2, 2) LETTER
      READ (MDISKP, *) T2
      WRITE(KDISK2, *) T2
C
      IF (T2.EQ.-1.0) TMLIMIT = T1
      IF (T2.EQ.-1.0) GO TO 500
      READ (MDISKP, 2) LETTER
      WRITE(KDISK2, 2) LETTER
C
```

```
  122 CONTINUE
C
      READ (MDISKP, *) NELNO, MATNO, TTOP, TBOT, Tcx, Tcy, Tcz
      WRITE(KDISK2, *) NELNO, MATNO, TTOP, TBOT, Tcx, Tcy, Tcz
C
      IF (NELNO.EQ.-1) GO TO 124
C
      GO TO 122
C
  124 CONTINUE
C
      GO TO 120
C
  130 CONTINUE
C
C     READ T1 DATA
C     ============================================================
C
      REWIND KDISK1
C
      READ (KDISK1, 1) ISKIP
      READ (KDISK1, *) T1
      READ (KDISK1, 1) ISKIP
C
  150 CONTINUE
C
      READ (KDISK1, *) NELNO, MATNO, TTOP1, TBOT1, Tcx1, Tcy1, Tcz1
C
      IF (NELNO.EQ.-1) GO TO 200
C
      ETOP_C     (NELNO) = TTOP1
      EBOT_C     (NELNO) = TBOT1
C
      ETGR_CUR (1,NELNO) = Tcx1
      ETGR_CUR (2,NELNO) = Tcy1
      ETGR_CUR (3,NELNO) = Tcz1
C
      GO TO 150
C
  200 CONTINUE
C
C     READ T2 DATA, COMPUTE VALUE AT TM, AND SAVE ON MDISK2
C     ============================================================
C

      REWIND MDISK2
C
      REWIND KDISK2
C
      READ (KDISK2, 1) ISKIP
```

```
      READ (KDISK2, *) T2
      READ (KDISK2, 1) ISKIP
C
  250 CONTINUE
C
      READ (KDISK2, *) NELNO, MATNO, TTOP2, TBOT2, Tcx2, Tcy2, Tcz2
C
      IF (NELNO.EQ.-1) GO TO 300
C
      TTOP1 = ETOP_C     (NELNO)
      TBOT1 = EBOT_C     (NELNO)
C
      Tcx1  = ETGR_CUR (1,NELNO)
      Tcy1  = ETGR_CUR (2,NELNO)
      Tcz1  = ETGR_CUR (3,NELNO)
C
      TTOP  = TTOP1 + (TTOP2 - TTOP1) * (TM - T1) / (T2 - T1)
      TBOT  = TBOT1 + (TBOT2 - TBOT1) * (TM - T1) / (T2 - T1)
C
      Tcx   = Tcx1  + (Tcx2  - Tcx1 ) * (TM - T1) / (T2 - T1)
      Tcy   = Tcy1  + (Tcy2  - Tcy1 ) * (TM - T1) / (T2 - T1)
      Tcz   = Tcz1  + (Tcz2  - Tcz1 ) * (TM - T1) / (T2 - T1)
C
      WRITE (MDISK2, *) NELNO, TTOP, TBOT, Tcx, Tcy, Tcz
C
      ETOP_C     (NELNO) = TTOP
      EBOT_C     (NELNO) = TBOT
C
      ETEM_CUR   (NELNO) = TTOP
C
      ETGR_CUR (1,NELNO) = Tcx
      ETGR_CUR (2,NELNO) = Tcy
      ETGR_CUR (3,NELNO) = Tcz
C
      GO TO 250
C
  300 CONTINUE
C
      WRITE (MDISK2, *) -1, -1.0, -1.0, -1.0, -1.0, -1.0
C
C     ================================================================
C
C     COMPUTE TEMPERATURE INCREMENT
C
      REWIND MDISK1
C
  350 CONTINUE
C
      READ (MDISK1, *) NELNO, OLDTOP, OLDBOT, oTcx, oTcy, oTcz
C
```

```
      IF (NELNO.EQ.-1) GO TO 400
C
      ETOP_C(NELNO) = ETOP_C(NELNO) - OLDTOP
      EBOT_C(NELNO) = EBOT_C(NELNO) - OLDBOT
C
      GO TO 350
C
C     ================================================================
C

  400 CONTINUE
C
C     SWITCH MDISK1 AND MDISK2 FOR NEXT STEP
C
      MDISKT = MDISK1
      MDISK1 = MDISK2
      MDISK2 = MDISKT
C
      GO TO 800
C
C     TM IS OVER TMLIMIT (NO DATA TO INTERPOLATE)
C
  500 CONTINUE
C
C     ASSUME THE SAME TEMPERATURE PROFILE AT TMLIMIT
C
  800 CONTINUE
C
      RETURN
      END
C
      SUBROUTINE TEMPOLD (NUMEL)
C
      COMMON /NTEMP/ NTEMP, ITPROP     (99990),  TBALPHA   (20,200),
     +                      ETEM_CUR   (99990),  ETEM_OLD   (99990),
     +                      ETGR_CUR (3,99990),  ETGR_OLD (3,99990),
     +                      ESTI_CUR (6,99990),  ESTI_OLD (6,99990),
     +                      ETOP_C     (99990),  ETOP_O     (99990),
     +                      EBOT_C     (99990),  EBOT_O     (99990),
     +                      TEM_CUR,             TEM_OLD,
     +                      TGR_CUR  (3),        TGR_OLD  (3),
     +                      STI_CUR  (6),        STI_OLD  (6),
     +                      TAVG,                TAVGOLD,
     +                      TDIF,                TDIFOLD,
     +                      NELCUR,              HTCUR
C
      DO 100 I = 1, NUMEL
C
      ETOP_O    (I) = ETOP_C    (I)
      EBOT_O    (I) = EBOT_C    (I)
```

```
C
      ETEM_OLD  (I) = ETEM_CUR  (I)
C
      ESTI_OLD(1,I) = ESTI_CUR(1,I)
      ESTI_OLD(2,I) = ESTI_CUR(2,I)
      ESTI_OLD(3,I) = ESTI_CUR(3,I)
      ESTI_OLD(4,I) = ESTI_CUR(4,I)
      ESTI_OLD(5,I) = ESTI_CUR(5,I)
      ESTI_OLD(6,I) = ESTI_CUR(6,I)
C
  100 CONTINUE
C
      RETURN
      END
C
      SUBROUTINE TEMPGET ( ABS_I1 )
C
      COMMON /NTEMP/ NTEMP, ITPROP     (99990),  TBALPHA   (20,200),
     +                      ETEM_CUR   (99990),  ETEM_OLD   (99990),
     +                      ETGR_CUR (3,99990),  ETGR_OLD (3,99990),
     +                      ESTI_CUR (6,99990),  ESTI_OLD (6,99990),
     +                      ETOP_C     (99990),  ETOP_O     (99990),
     +                      EBOT_C     (99990),  EBOT_O     (99990),
     +                      TEM_CUR,             TEM_OLD,
     +                      TGR_CUR  (3),        TGR_OLD  (3),
     +                      STI_CUR  (6),        STI_OLD  (6),
     +                      TAVG,                TAVGOLD,
     +                      TDIF,                TDIFOLD,
     +                      NELCUR,              HTCUR
C
      COMMON /GCALP/ NCYCL,DT,NUPDAT,NITER,TOLER,MNEWRP,TM,CMFAC,SCFP
C
      DIMENSION      DC(4,4)
C
C
        MATNO      = ITPROP     (NELCUR)
C
        rModel     = TBALPHA (1,  MATNO)
C
        Alpha_c    = TBALPHA (2,  MATNO)
C
        T_o        = TBALPHA (3,  MATNO)
        E_da       = TBALPHA (4,  MATNO)
C
        E_u        = TBALPHA (5,  MATNO)
        V_u        = TBALPHA (6,  MATNO)
        E_f        = TBALPHA (7,  MATNO)
        V_f        = TBALPHA (8,  MATNO)
C
        Strain_m   = TBALPHA (9,  MATNO)
```

```
        dT_o        = TBALPHA (10, MATNO)
C
        RateN_m     = TBALPHA (11, MATNO)
        T_m         = TBALPHA (12, MATNO)
        g_T         = TBALPHA (13, MATNO)
        Z_eta       = TBALPHA (14, MATNO)
C
        TAVG        = 0.0
        TDIF        = 0.0
C
        TAVGOLD     = 0.0
        TDIFOLD     = 0.0
C
        STI_CUR(1) = 0.0
        STI_CUR(2) = 0.0
        STI_CUR(3) = 0.0
C
        STI_CUR(4) = 0.0
        STI_CUR(5) = 0.0
        STI_CUR(6) = 0.0
C
        STI_OLD(1) = ESTI_OLD(1,NELCUR)
        STI_OLD(2) = ESTI_OLD(2,NELCUR)
        STI_OLD(3) = ESTI_OLD(3,NELCUR)
C
        STI_OLD(4) = ESTI_OLD(4,NELCUR)
        STI_OLD(5) = ESTI_OLD(5,NELCUR)
        STI_OLD(6) = ESTI_OLD(6,NELCUR)
C
        MODEL       = INT (rModel)
C
      IF (MODEL .EQ. 0) THEN
C     ######################################################################
C
C     MODEL = 0 : No Thermal Expansion
C
C
       RETURN
C
      ELSE IF (MODEL .EQ. 1) THEN
C     ######################################################################
C
C     MODEL = 1 : Constant Thermal Expansion
C
C
        TAVG        = Alpha_c * (ETOP_C(NELCUR)+EBOT_C(NELCUR)) * 0.5
        TDIF        = Alpha_c * (ETOP_C(NELCUR)-EBOT_C(NELCUR)) / HTCUR
C
        TAVGOLD     = Alpha_c * (ETOP_O(NELCUR)+EBOT_O(NELCUR)) * 0.5
        TDIFOLD     = Alpha_c * (ETOP_O(NELCUR)-EBOT_O(NELCUR)) / HTCUR
```

```
C
        STI_CUR(1) = TAVG
        STI_CUR(2) = TAVG
        STI_CUR(3) = TAVG
C
        STI_CUR(4) = 0.0
        STI_CUR(5) = 0.0
        STI_CUR(6) = 0.0
C
      ELSE IF (MODEL .EQ. 2) THEN
C     ###################################################################
C
C     MODEL = 2 : Step Thermal Expansion
C                 Ground Freezing With Calibrated Thermal Expansion
C
C
        Slope_m     = Strain_m / dT_o
        T_left      = T_o - dT_o
C
        TEM_OLD     = ETEM_OLD   (NELCUR)
        TEM_CUR     = ETEM_CUR   (NELCUR)
C
        Tcx         = ETGR_CUR (1,NELCUR)
        Tcy         = ETGR_CUR (2,NELCUR)
        Tcz         = ETGR_CUR (3,NELCUR)
C
        T_L         = SQRT (Tcx**2 + Tcy**2 + Tcz**2)
C
       IF (TEM_CUR .GE. TEM_OLD) GO TO 210
C      ===================================
C
       IF (TEM_CUR .GE. T_o    ) GO TO 210
C      ===================================
C
       IF (TEM_OLD .LE. T_left ) GO TO 210
C      ===================================
C
       IF (T_L     .LE. 1.0E-10) GO TO 210
C      ===================================
C
        DC(1,1)     = Tcx / T_L
        DC(2,1)     = Tcy / T_L
        DC(3,1)     = Tcz / T_L
C
        ADC_11      = ABS (DC(1,1))
        ADC_21      = ABS (DC(2,1))
        ADC_31      = ABS (DC(3,1))
C
        ADC_min     = AMIN1 (ADC_11, ADC_21, ADC_31)
C
```

```
          IF (ADC_11 .EQ. ADC_min) THEN
C       ---------------------------------
         DC(1,4)    = 1.0
         DC(2,4)    = 0.0
         DC(3,4)    = 0.0
C
        ELSE IF (ADC_21 .EQ. ADC_min) THEN
C       ---------------------------------
         DC(1,4)    = 0.0
         DC(2,4)    = 1.0
         DC(3,4)    = 0.0
C
        ELSE IF (ADC_31 .EQ. ADC_min) THEN
C       ---------------------------------
         DC(1,4)    = 0.0
         DC(2,4)    = 0.0
         DC(3,4)    = 1.0
C
        END IF
C       ------
C
         CALL g_CROSS (DC(1,1),DC(1,4),DC(1,3))
C
         CALL g_CROSS (DC(1,3),DC(1,1),DC(1,2))
C
C
           dStrain  = 0.0
C
        IF (TEM_OLD .GT. T_o) THEN
C       ==========================
C
          IF (TEM_CUR .GE. T_left) THEN
C         ----------------------------
C
           dStrain  = Slope_m * ABS (T_o - TEM_CUR)
C
          ELSE
C         ----
C
           dStrain  = Strain_m
C
          END IF
C         ------
C
        ELSE
C       ====
C
          IF (TEM_CUR .GE. T_left) THEN
C         ----------------------------
C
```

```
          dStrain  = Slope_m * ABS (TEM_OLD - TEM_CUR)
C
         ELSE
C        ----
C
          dStrain  = Slope_m * ABS (TEM_OLD - T_left)
C
         END IF
C        ------
C
       END IF
C      ======
C
         rN11       = dStrain *  E_da
         rN22       = dStrain * (1 - E_da) / 2.
         rN33       = dStrain * (1 - E_da) / 2.
C
         STI_CUR(1) = rN11*DC(1,1)**2 + rN22*DC(1,2)**2 + rN33*DC(1,3)**2
         STI_CUR(2) = rN11*DC(2,1)**2 + rN22*DC(2,2)**2 + rN33*DC(2,3)**2
         STI_CUR(3) = rN11*DC(3,1)**2 + rN22*DC(3,2)**2 + rN33*DC(3,3)**2
C
         STI_CUR(4) = rN11*DC(1,1)*DC(2,1) + rN22*DC(1,2)*DC(2,2) +
     +                rN33*DC(1,3)*DC(2,3)
C
         STI_CUR(5) = rN11*DC(2,1)*DC(3,1) + rN22*DC(2,2)*DC(3,2) +
     +                rN33*DC(2,3)*DC(3,3)
C
         STI_CUR(6) = rN11*DC(1,1)*DC(3,1) + rN22*DC(1,2)*DC(3,2) +
     +                rN33*DC(1,3)*DC(3,3)
C
         STI_CUR(4) = STI_CUR(4) * 2.0
         STI_CUR(5) = STI_CUR(5) * 2.0
         STI_CUR(6) = STI_CUR(6) * 2.0
C
C
  210 CONTINUE
C      ========
C
       ELSE IF (MODEL .EQ. 3) THEN
C      ###################################################################
C
C
C      MODEL = 3 : Porosity Rate Dependent Thermal Expansion
C                  Frost Heave Model
C
C
         TEM_OLD    = ETEM_OLD   (NELCUR)
         TEM_CUR    = ETEM_CUR   (NELCUR)
C
         Tcx        = ETGR_CUR (1,NELCUR)
```

```
      Tcy         = ETGR_CUR (2,NELCUR)
      Tcz         = ETGR_CUR (3,NELCUR)
C
      T_L         = SQRT (Tcx**2 + Tcy**2 + Tcz**2)
C
      IF (TEM_CUR .GE. TEM_OLD) GO TO 310
C     ===================================
C
      IF (TEM_CUR .GE. T_o    ) GO TO 310
C     ===================================
C
      IF (T_L     .LE. 1.0E-10) GO TO 310
C     ===================================
C
      DC(1,1)     = Tcx / T_L
      DC(2,1)     = Tcy / T_L
      DC(3,1)     = Tcz / T_L
C
      ADC_11      = ABS (DC(1,1))
      ADC_21      = ABS (DC(2,1))
      ADC_31      = ABS (DC(3,1))
C
      ADC_min     = AMIN1 (ADC_11, ADC_21, ADC_31)
C
          IF (ADC_11 .EQ. ADC_min) THEN
C     ---------------------------------
      DC(1,4)     = 1.0
      DC(2,4)     = 0.0
      DC(3,4)     = 0.0
C
      ELSE IF (ADC_21 .EQ. ADC_min) THEN
C     ---------------------------------
      DC(1,4)     = 0.0
      DC(2,4)     = 1.0
      DC(3,4)     = 0.0
C
      ELSE IF (ADC_31 .EQ. ADC_min) THEN
C     ---------------------------------
      DC(1,4)     = 0.0
      DC(2,4)     = 0.0
      DC(3,4)     = 1.0
C
      END IF
C     ------
C
      CALL g_CROSS (DC(1,1),DC(1,4),DC(1,3))
C
      CALL g_CROSS (DC(1,3),DC(1,1),DC(1,2))
C
C
```

```
        To_Tm_2    = ( (TEM_CUR - T_o) / T_m )**2
C
        Exp_T      = EXP (1. - To_Tm_2)
C
        Exp_I1     = EXP (-ABS_I1 / Z_eta)
C
        RateN      = (RateN_m * T_L / g_T) * To_Tm_2 * Exp_T * Exp_I1
C
        rN11       = DT * RateN *  E_da
        rN22       = DT * RateN * (1 - E_da) / 2.
        rN33       = DT * RateN * (1 - E_da) / 2.
C
        STI_CUR(1) = rN11*DC(1,1)**2 + rN22*DC(1,2)**2 + rN33*DC(1,3)**2
        STI_CUR(2) = rN11*DC(2,1)**2 + rN22*DC(2,2)**2 + rN33*DC(2,3)**2
        STI_CUR(3) = rN11*DC(3,1)**2 + rN22*DC(3,2)**2 + rN33*DC(3,3)**2
C
        STI_CUR(4) = rN11*DC(1,1)*DC(2,1) + rN22*DC(1,2)*DC(2,2) +
     +               rN33*DC(1,3)*DC(2,3)
C
        STI_CUR(5) = rN11*DC(2,1)*DC(3,1) + rN22*DC(2,2)*DC(3,2) +
     +               rN33*DC(2,3)*DC(3,3)
C
        STI_CUR(6) = rN11*DC(1,1)*DC(3,1) + rN22*DC(1,2)*DC(3,2) +
     +               rN33*DC(1,3)*DC(3,3)
C
        STI_CUR(4) = STI_CUR(4) * 2.0
        STI_CUR(5) = STI_CUR(5) * 2.0
        STI_CUR(6) = STI_CUR(6) * 2.0
C
C
  310 CONTINUE
C     ========
C
      END IF
C     ###################################################################
C
C
        ESTI_CUR(1,NELCUR) = STI_CUR(1)
        ESTI_CUR(2,NELCUR) = STI_CUR(2)
        ESTI_CUR(3,NELCUR) = STI_CUR(3)
C
        ESTI_CUR(4,NELCUR) = STI_CUR(4)
        ESTI_CUR(5,NELCUR) = STI_CUR(5)
        ESTI_CUR(6,NELCUR) = STI_CUR(6)
C
C
      RETURN
      END
C
C
```

```
      SUBROUTINE g_CROSS (A,B,C)
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      DIMENSION A(4),B(4),C(4)
      X    = A(2)*B(3)-A(3)*B(2)
      Y    = A(3)*B(1)-A(1)*B(3)
      Z    = A(1)*B(2)-A(2)*B(1)
      C(4) = SQRT(X*X+Y*Y+Z*Z)
      C(3) = Z/C(4)
      C(2) = Y/C(4)
      C(1) = X/C(4)
      RETURN
      END
C
C
```

7. 소결론

본 연구에서는 포화된 토사나 다공성 암반이 동결할 때 열전도 및 열응력의 구성방정식과 유한요소 수치해석기법을 설명하였고 한국건설기술연구원에서 수행한 매설관 모형시험에서 열전달 부분인 Thermal Analysis를 수행하여 시험결과와 비교하였다.

특히 동결에 따른 상전이(Phase change) 수치해석 모델로 Kim(1994)이 제안한 단순하고 효율적인 열용량 평균화 방법은 이론해와 비교하여 정확성을 검증하였고, 이 방법을 사용한 개방형 동상시험 수치해석 결과는 계측결과와도 잘 일치하므로 실용적인 상전이 해석 모델로 사용될 수 있다.

그리고 다차원 유한요소 프로그램에 재료의 구성방정식으로 사용할 수 있는 단순한 열팽창모델과 비교적 중요한 모든 동상 Mechanism을 포함하고 있는 동상모델을 설명하였고 이들 모델을 실용적으로 사용할 수 있도록 Fortran으로 Coding된 열팽창 모듈 프로그램을 개발하였다. 본 동상모델은 향 후 수행될 동결토압을 받는 Pipe line 해석시 이용된다.

제 2 절 폐타이어 혼합토의 열특성 및 동결 팽창율 계산

불포화 폐타이어 혼합토는 그림 9.2.1에서 보는 바와 같이 Pore Air, Pore Water, Tire Grain, 그리고 Soil Grain으로 구성되어있으며, 동결후에는 그림 9.2.2에서 보는 바와 같이 Pore Water는 Unfrozen Water (부동수분)과 Frozen Water (얼음)으로 구분된다. 이와 같은 여러 성분으로 구성된 혼합체의 체적 열용량 (Volumetric heat capacity)을 비롯하여 열특성 값과 동결 팽창율을 구하기 위해서는 각 성분이 차지하는 용적비를 알아야한다. 특히 동결 후에는 대부분의 Pore Water는 동결되어 그 체적이 증가되므로, 동결 후 각성분의 용적비 계산에 이 체적증가가 고려되어야 한다.

본 절에서는 혼합토의 습윤 단위중량, 함수비, Tire / Soil 비, 부동함수비, 그리고 각 성분의 비중, 비열 등이 주어졌을 때 동결전과 동결 후 혼합토의 밀도, 체적열용량, 체적잠열 (Volumetric latent heat) 그리고 체적팽창율 (Volumetric expansion strain)을 구하는 식을 유도하였다. 혼합토의 열용량과 동결팽창율 계산식을 쉽게 활용할 수 있도록 Visual Basic을 사용하여 입·출력 GUI를 갖춘 컴퓨터 프로그램 MSHC (Mixed Soil Heat Capacity)를 개발하였다.

가정사항

(1) 동결전과 동결 후 각 성분의 질량의 변화는 없다.

(2) 동결 후 Pore Water는 Frozen Water (얼음)와 Unfrozen Water (부동수분)의 두 성분으로 구분하였으며, 모든 성분의 온도변화에 따른 밀도 및 비열의 변화는 무시한다.

(3) 동결에 따른 혼합토의 체적증가는 Frozen Water의 물에서 얼음으로 상전이 (Phase change)에 기인한다.

(4) 최소 체적 팽창율 계산 (Lower bound expansion)
Frozen Water 체적증가량이 동결 전 Pore Air 체적보다 작을 경우, 혼합토의 체적변화는 없다. Frozen Water 체적증가량이 동결 전 Pore Air 체적보다 클 경우, 동결 후 Pore Air 공간을 채우고 남은 체적증가량이 혼합토의 체적증가량이 된다.

(5) 최대 체적 팽창율계산 (Upper bound expansion)

동결전과 동결 후에 Pore Air의 체적변화는 없다. 따라서 혼합토의 체적증가량은 Frozen Water 체적증가량과 동일하다.

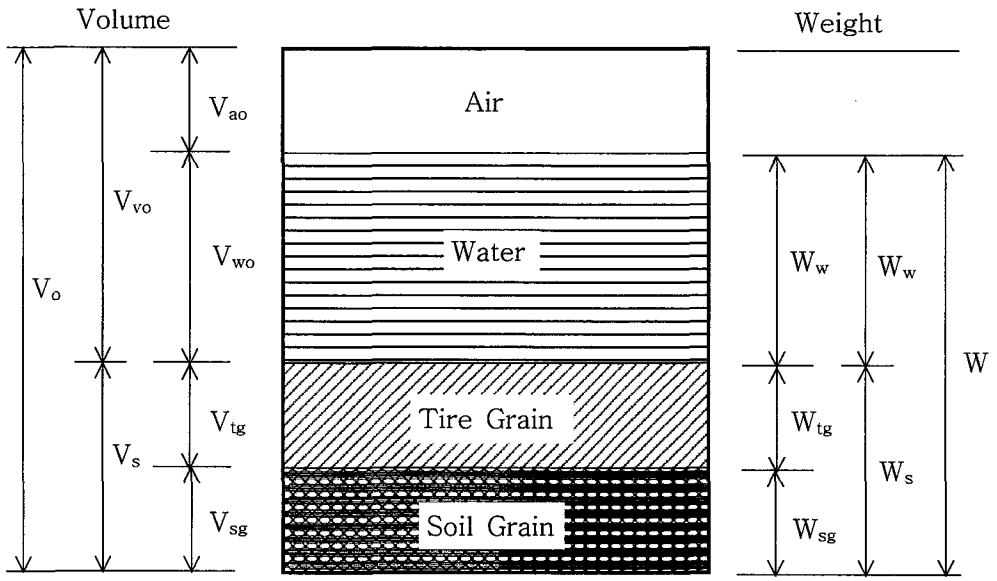


그림 9.2.1 동결전 폐타이어 혼합토 구성상태

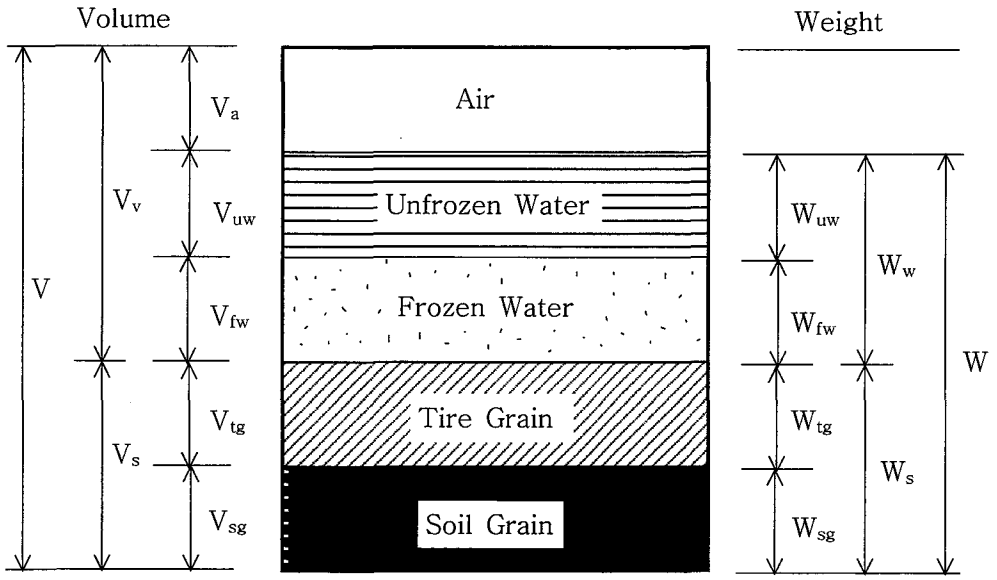


그림 9.2.2 동결후 폐타이어 혼합토 구성상태

1. 동결 전 폐타이어 혼합토

동결 전 폐타이어 혼합토는 그림 9.2.1과 같이 Pore Air, Pore Water, Tire Grain, 그리고 Soil Grain으로 구성되어있다.

측정된 물성치

$$\gamma_{to} = \frac{W}{V_o} \quad : \text{Wet unit weight} \tag{9.2.1}$$

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \quad : \text{Water content} \tag{9.2.2}$$

$$a = \frac{W_{tg}}{W_{sg}} \quad : \text{Ratio of tire to soil grain weight} \tag{9.2.3}$$

G_{sg} : Specific gravity of soil grain

G_{tg} : Specific gravity of tire grain

폐타이어 혼합토에서 간극율, 포화도, 함수비, 습윤 단위중량 관계

간극율 (η_o)와 포화도 (S_o)는 다음과 같이 정의된다.

$$\eta_o = \frac{V_{vo}}{V_o} \quad : \text{Porosity} \tag{9.2.4}$$

$$S_o = \frac{V_{wo}}{V_{vo}} \quad : \text{Degree of saturation} \tag{9.2.5}$$

Water 중량 (W_w) :

식 9.2.4와 9.2.5로부터

$$\begin{aligned} W_w &= \gamma_w \cdot V_{wo} \\ &= \gamma_w \cdot S_o \cdot V_{vo} \\ &= \gamma_w \cdot S_o \cdot \eta_o \cdot V_o \end{aligned} \tag{9.2.6}$$

Soil과 Tire Grain 체적 (V_s) :

식 9.2.4를 이용하면

$$\begin{aligned} V_s &= V_{sg} + V_{tg} \\ &= V_o - V_{vo} \\ &= (1-\eta_o)\cdot V_o \end{aligned} \tag{9.2.7}$$

Soil Grain 체적 (V_{sg}) :

$$V_{sg} = \frac{W_{sg}}{G_{sg}\cdot\gamma_w} \tag{9.2.8}$$

Tire Grain 체적 (V_{tg}) :

$$\begin{aligned} V_{tg} &= \frac{W_{tg}}{G_{tg}\cdot\gamma_w} \\ &= \frac{a\cdot W_{sg}}{G_{tg}\cdot\gamma_w} \end{aligned} \tag{9.2.9}$$

Soil Grain 중량 (W_{sg}) :

식 9.2.8과 9.2.9를 식 9.2.7에 대입하면

$$(1 + a\cdot\frac{G_{sg}}{G_{tg}})\cdot\frac{W_{sg}}{G_{sg}\cdot\gamma_w} = (1-\eta_o)\cdot V_o$$

$$W_{sg} = a_o\cdot\gamma_w\cdot V_o \tag{9.2.10}$$

여기서

$$a_o = \frac{(1-\eta_o)\cdot G_{sg}}{(1 + a\cdot(G_{sg}/G_{tg}))} \tag{9.2.11}$$

Soil과 Tire Grain 중량 (W_s) :

식 9.2.3과 9.2.10으로부터

$$\begin{aligned} W_s &= W_{sg} + W_{tg} \\ &= (1+a)\cdot W_{sg} \\ &= (1+a)\cdot a_o \cdot \gamma_w \cdot V_o \end{aligned} \tag{9.2.12}$$

함수비 (ω) :

식 9.2.6과 9.2.12를 식 9.2.2에 대입하면

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{W_w}{W_s} \\ &= \frac{S_o \cdot \eta_o}{(1+a)\cdot a_o} \end{aligned} \tag{9.2.13}$$

습윤 단위중량 (γ_{to}) :

식 9.2.2와 9.2.12를 식 9.2.1에 대입하면

$$\begin{aligned} \gamma_{to} &= \frac{W_s + W_w}{V_o} \\ &= \frac{(1+\omega)\cdot W_s}{V_o} \\ &= (1+\omega)\cdot(1+a)\cdot a_o \cdot \gamma_w \end{aligned} \tag{9.2.14}$$

간극율 (η_o) :

$$\eta_o = 1 - \frac{(1+a\cdot(G_{sg}/G_{tg}))\cdot\gamma_{to}}{(1+w)\cdot(1+a)\cdot(G_{sg}\cdot\gamma_w)} \tag{9.2.14a}$$

폐타이어가 없는 경우 간극비, 포화도, 함수비, 습윤 단위중량 관계 (a = 0)

함수비 (ω) :

a = 0을 식 9.2.11과 9.2.13에 대입하면

$$\omega = \frac{S_o \cdot \eta_o}{(1-\eta_o) \cdot G_{sg}} \tag{9.2.15}$$

습윤 단위중량 (γ_{to}) :

a = 0을 식 9.2.11과 9.2.14에 대입하면

$$\gamma_{to} = (1+\omega) \cdot (1-\eta_o) \cdot G_{sg} \cdot \gamma_w \tag{9.2.16}$$

Pore Air / Soil Grain 체적비 계산

그림 9.2.1의 혼합물 각 성분의 중량 및 체적을 Soil Grain 체적 (V_{sg})로 표현하고자 한다.

Soil Grain 중량 (W_{sg}) :

$$W_{sg} = G_{sg} \cdot \gamma_w \cdot V_{sg} \tag{9.2.17}$$

Tire Grain 중량 (W_{tg}) :

식 9.2.3과 9.2.17로부터

$$W_{tg} = a \cdot W_{sg} = a \cdot G_{sg} \cdot \gamma_w \cdot V_{sg} \tag{9.2.18}$$

Tire Grain 체적 (V_{tg}) :

$$V_{tg} = \frac{W_{tg}}{G_{tg} \cdot \gamma_w} = a \cdot \left(\frac{G_{sg}}{G_{tg}} \right) \cdot V_{sg} \tag{9.2.19}$$

Water 중량 (W_w):

식 9.2.2, 9.2.3, 9.2.17로부터

$$\begin{aligned} W_w &= \omega \cdot W_s \\ &= \omega \cdot (W_{sg} + W_{tg}) \\ &= \omega \cdot (1 + a) \cdot W_{sg} \\ &= \omega \cdot (1 + a) \cdot G_{sg} \cdot \gamma_w \cdot V_{sg} \end{aligned} \tag{9.2.20}$$

Water 체적 (V_{wo}) :

$$\begin{aligned} V_{wo} &= \frac{W_w}{\gamma_w} \\ &= \omega \cdot (1 + a) \cdot G_{sg} \cdot V_{sg} \end{aligned} \tag{9.2.21}$$

Mixture Total 중량 (W) :

$$W = W_{sg} + W_{tg} + W_w \tag{9.2.22}$$

식 9.2.17, 9.2.18, 9.2.20을 식 9.2.22에 대입하면

$$W = a_1 \cdot G_{sg} \cdot \gamma_w \cdot V_{sg} \tag{9.2.23}$$

여기서

$$\begin{aligned} a_1 &= 1 + a + \omega \cdot (1 + a) \\ &= (1 + a) \cdot (1 + \omega) \end{aligned} \tag{9.2.24}$$

Mixture Total 체적 (V_o):

$$V_o = V_{sg} + V_{tg} + V_{wo} + V_{ao} \tag{9.2.25}$$

식 9.2.19와 9.2.21을 식 9.2.25에 대입하면

$$V_o = a_2 \cdot V_{sg} + V_{ao} \tag{9.2.26}$$

여기서

$$a_2 = 1 + a \cdot \left(\frac{G_{sg}}{G_{tg}} \right) + \omega \cdot (1 + a) \cdot G_{sg} \tag{9.2.27}$$

Pore Air 체적 (V_{ao}) :

식 9.2.23과 9.2.26을 식 9.2.1에 대입하면

$$\gamma_{to} = \frac{a_1 \cdot G_{sg} \cdot \gamma_w \cdot V_{sg}}{a_2 \cdot V_{sg} + V_{ao}} \tag{9.2.28}$$

식 9.2.28로부터 V_{ao}를 구하면

$$V_{ao} = a_3 \cdot V_{sg} \tag{9.2.29}$$

여기서

$$a_3 = a_1 \cdot G_{sg} \cdot \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_{to}} \right) - a_2 \tag{9.2.30}$$

Soil Grain 용적비 (η_{sgo}) 계산

$$\eta_{sgo} = \frac{V_{sg}}{V_o} \tag{9.2.31}$$

식 9.2.29를 식 9.2.26에 대입하면

$$V_o = (a_2 + a_3) \cdot V_{sg} \tag{9.2.32}$$

식 9.2.32를 식 9.2.31에 대입하면

$$\eta_{sgo} = \frac{1}{(a_2 + a_3)} \tag{9.2.33}$$

Tire Grain 용적비 (η_{tgo}) 계산

$$\eta_{tgo} = \frac{V_{tg}}{V_o} \tag{9.2.34}$$

식 9.2.31과 9.2.19를 식 9.2.34에 대입하면

$$\eta_{tgo} = a \cdot \left(\frac{G_{sg}}{G_{tg}} \right) \cdot \eta_{sgo} \tag{9.2.35}$$

Pore Water 용적비 (η_{wo}) 계산

$$\eta_{wo} = \frac{V_{wo}}{V_o} \tag{9.2.36}$$

식 9.2.31과 9.2.21을 식 9.2.36에 대입하면

$$\eta_{wo} = \omega \cdot (1 + a) \cdot G_{sg} \cdot \eta_{sgo} \tag{9.2.37}$$

Pore Air 용적비 (η_{ao}) 계산

$$\eta_{ao} = \frac{V_{ao}}{V_o} \tag{9.2.38}$$

식 9.2.31과 9.2.29를 식 9.2.38에 대입하면

$$\eta_{ao} = a_3 \cdot \eta_{sgo} \tag{9.2.39}$$

2. 동결 후 폐타이어 혼합토

동결후 폐타이어 혼합토는 일반적으로 그림 9.2.2와 같이 Pore Air, Unfrozen Water, Frozen Water, Tire Grain, 그리고 Soil Grain으로 구성되어 있다.

측정된 물성치

$$\omega_u = \frac{W_{uw}}{W_s} \quad : \text{Unfrozen water content} \tag{9.2.40}$$

G_{fw} : Specific gravity of frozen water (ice)

Frozen Water 체적 팽창량 ($\triangle V_{fw}$) 계산

Frozen Water 중량 (W_{fw}):

$$W_{fw} = W_w - W_{uw} \tag{9.2.41}$$

식 9.2.2와 9.2.40을 식 9.2.41에 대입하면

$$W_{fw} = (\omega - \omega_u) \cdot (W_{sg} + W_{tg}) \tag{9.2.42}$$

식 9.2.17과 9.2.18을 식 9.2.42에 대입하면

$$W_{fw} = (\omega - \omega_u) \cdot (1 + a) \cdot G_{sg} \cdot \gamma_w \cdot V_{sg} \tag{9.2.43}$$

Frozen Water 체적 (V_{fw}) :

$$V_{fw} = \frac{W_{fw}}{G_{fw} \cdot \gamma_w} \tag{9.2.44}$$

액체상태로 되돌아 갔을 때의 Frozen Water 체적 (V_{fwo}) :

$$V_{fwo} = \frac{W_{fw}}{\gamma_w} \tag{9.2.45}$$

Frozen Water 체적 팽창량 (ΔV_{fw}):

$$\Delta V_{fw} = V_{fw} - V_{fwo} \tag{9.2.46}$$

식 9.2.43, 9.2.44, 9.2.45를 식 9.2.46에 대입하면

$$\Delta V_{fw} = a_4 \cdot V_{sg} \tag{9.2.47}$$

여기서

$$a_4 = \left(\frac{1}{G_{fw}} - 1\right) \cdot G_{sg} \cdot (\omega - \omega_u) \cdot (1 + a) \tag{9.2.48}$$

2.1 혼합토 최소 체적팽창 (Lower Bound Expansion)

본 계산은 가정 사항 (4)를 적용하므로 혼합토 체적팽창의 하한값이다. 동결에 따른 Frozen Water의 물에서 얼음으로 상전이 (Phase change)에 의한 체적증가량이, 동결 전 Pore Air 체적보다 클 경우는 동결 후 Pore Air 공간은 Frozen Water로 채워져서 동결 후 Pore Air 공간은 없어지고, 동결 전 Pore Air 체적보다 작을 경우는 동결후 Pore Air 공간은 Frozen Water 체적 증가로 채워지고 남은 공간으로 가정하였다.

식 9.2.47을 V_o으로 나누면,

$$\frac{\Delta V_{fw}}{V_o} = a_4 \cdot \frac{V_{sg}}{V_o} \tag{9.2.49}$$

식 9.2.31과 9.2.33을 식 9.2.49에 대입하면,

$$\frac{\triangle V_{fw}}{V_o} = \epsilon_{fw} \tag{9.2.50}$$

여기서

$$\epsilon_{fw} = \frac{a_4}{(a_2 + a_3)} \tag{9.2.51}$$

2.1.1 혼합토에 체적증가량이 없는 경우 ($\epsilon_{fw} < \eta_{ao}$)

Frozen Water 체적증가량 ($\triangle V_{fw}$)이 동결 전 Pore Air 체적 (V_{ao})보다 작을 경우, $\triangle V_{fw}$는 동결 전 Pore Air 공간의 일부를 차지하고 혼합토의 체적증가는 없다.

동결 후 Pore Air 체적 (V_a) 계산

$$V_a = V_{ao} - \triangle V_{fw} \tag{9.2.52}$$

식 9.2.29와 9.2.47을 식 9.2.52에 대입하면

$$V_a = (a_3 - a_4) \cdot V_{sg} \tag{9.2.53}$$

동결 후 페타이어 혼합토 Wet Unit Weight (γ_t) 계산

동결 후 Mixture Total 체적 (V) :

$$V = V_o \tag{9.2.54}$$

동결 후 Wet Unit Weight (γ_t) :

$$\gamma_t = \frac{W}{V} = \frac{W}{V_o} = \gamma_{to} \tag{9.2.55}$$

동결후 Soil Grain 용적비 (η_{sg}) 계산

$$\eta_{sg} = \frac{V_{sg}}{V} = \frac{V_{sg}}{V_o} = \eta_{sgo} \tag{9.2.56}$$

동결후 Tire Grain 용적비 (η_{tg}) 계산

$$\eta_{tg} = \frac{V_{tg}}{V} = \frac{V_{tg}}{V_o} = \eta_{tgo} \tag{9.2.57}$$

동결후 Frozen Water 용적비 (η_{fw}) 계산

$$\eta_{fw} = \frac{V_{fw}}{V} = \frac{V_{fw}}{V_o} \tag{9.2.58}$$

식 9.2.43, 9.2.44, 9.2.56을 식 9.2.58에 대입하면

$$\eta_{fw} = (\omega - \omega_u) \cdot (1 + a) \cdot \left(\frac{G_{sg}}{G_{fw}}\right) \cdot \left(\frac{V_{sg}}{V_o}\right)$$

$$= (\omega - \omega_u) \cdot (1 + a) \cdot \left(\frac{G_{sg}}{G_{fw}}\right) \cdot \eta_{sgo} \tag{9.2.59}$$

동결 후 Unfrozen Water 용적비 (η_{uw}) 계산

$$\eta_{uw} = \frac{V_{uw}}{V} = \frac{V_{uw}}{V_o} \tag{9.2.60}$$

Unfrozen Water 중량 (W_{uw}) :

식 9.2.40, 9.2.3, 9.2.17로부터

$$\begin{aligned} W_{uw} &= \omega_u \cdot (W_{sg} + W_{tg}) \\ &= \omega_u \cdot (1 + a) \cdot W_{sg} \\ &= \omega_u \cdot (1 + a) \cdot G_{sg} \cdot \gamma_w \cdot V_{sg} \end{aligned} \tag{9.2.61}$$

Unfrozen Water 체적 (V_{uw}) :

$$V_{uw} = \frac{W_{uw}}{\gamma_w} \tag{9.2.62}$$

식 9.2.61, 9.2.62, 9.2.56을 식 9.2.60에 대입하면

$$\begin{aligned} \eta_{uw} &= \omega_u \cdot (1 + a) \cdot G_{sg} \cdot \left(\frac{V_{sg}}{V_o}\right) \\ &= \omega_u \cdot (1 + a) \cdot G_{sg} \cdot \eta_{sgo} \end{aligned} \tag{9.2.63}$$

<u>동결 후 Pore Air 용적비 (η_a) 계산</u>

$$\eta_a = \frac{V_a}{V} = \frac{V_a}{V_o} \tag{9.2.64}$$

식 9.2.53과 9.2.56을 식 9.2.64에 대입하면

$$\begin{aligned} \eta_a &= (a_3 - a_4) \cdot \left(\frac{V_{sg}}{V_o}\right) \\ &= (a_3 - a_4) \cdot \eta_{sgo} \end{aligned} \tag{9.2.65}$$

참고 : 동결 후 각성분의 용적비의 합은 1이어야 한다.

$$\text{용적비 합} = \eta_{sg} + \eta_{tg} + \eta_{fw} + \eta_{uw} + \eta_a = 1 \qquad (9.2.66)$$

<u>페타이어 혼합토 체적팽창율 (ϵ_v) 계산</u>

Frozen Water 체적증가량 (ΔV_{fw})이 동결 전 Pore Air 체적 (V_{ao})보다 작은 경우이므로 ΔV_{fw}는 동결전 Pore Air 공간의 일부를 차지하고 혼합토의 체적증가는 없다.

$$\epsilon_v = 0 \qquad (9.2.67)$$

2.1.2 혼합토에 체적증가량이 있는 경우 ($\epsilon_{fw} \geq \eta_{ao}$)

Frozen Water 체적증가량 (ΔV_{fw})이 동결전 Pore Air 체적 (V_{ao})보다 같거나 클 경우, ΔV_{fw}는 동결 전 Pore Air 공간을 다 차지하여 동결 후 Pore Air 공간은 없어지고 남은 체적 증가량은 혼합토 체적증가량이 된다.

$$V_a = 0 \qquad (9.2.68)$$

<u>동결 후 페타이어 혼합토 Wet Unit Weight (γ_t) 계산</u>

동결 후 Mixture Total 체적 (V) :

$$V = V_o + (\Delta V_{fw} - V_{ao}) \qquad (9.2.69)$$

식 9.2.29와 9.2.47을 식 9.2.69에 대입하면

$$V = V_o + (a_4 - a_3) \cdot V_{sg} \qquad (9.2.70)$$

동결 후 Wet Unit Weight (γ_t) :

$$\gamma_t = \frac{W}{V} \tag{9.2.71}$$

식 9.2.70을 식 9.2.71에 대입하면

$$\gamma_t = \frac{W}{V_o + (a_4 - a_3) \cdot V_{sg}}$$
$$= \frac{(W / V_o)}{1 + (a_4 - a_3) \cdot (V_{sg} / V_o)} \tag{9.2.72}$$

식 9.2.1, 9.2.31, 9.2.33을 식 9.2.72에 대입하면

$$\gamma_t = \frac{\gamma_{to}}{1 + \frac{(a_4 - a_3)}{(a_2 + a_3)}} \tag{9.2.73}$$

<u>동결 후 Soil Grain 용적비 (η_{sg}) 계산</u>

$$\eta_{sg} = \frac{V_{sg}}{V} \tag{9.2.74}$$

식 9.2.70을 식 9.2.74에 대입하면

$$\eta_{sg} = \frac{V_{sg}}{V_o + (a_4 - a_3) \cdot V_{sg}}$$
$$= \frac{(V_{sg} / V_o)}{1 + (a_4 - a_3) \cdot (V_{sg} / V_o)} \tag{9.2.75}$$

식 9.2.31과 9.2.33을 식 9.2.75에 대입하면

$$\eta_{sg} = \frac{(1/(a_2 + a_3))}{1 + (a_4 - a_3)/(a_2 + a_3)}$$

$$= \frac{1}{a_2 + a_4} \tag{9.2.76}$$

동결 후 Tire Grain 용적비 (η_{tg}) 계산

$$\eta_{tg} = \frac{V_{tg}}{V} \tag{9.2.77}$$

식 9.2.19와 9.2.74를 식 9.2.77에 대입하면

$$\eta_{tg} = a \cdot \left(\frac{G_{sg}}{G_{tg}}\right) \cdot \left(\frac{V_{sg}}{V}\right)$$

$$= a \cdot \left(\frac{G_{sg}}{G_{tg}}\right) \cdot \eta_{sg} \tag{9.2.78}$$

동결 후 Frozen Water 용적비 (η_{fw}) 계산

$$\eta_{fw} = \frac{V_{fw}}{V} \tag{9.2.79}$$

식 9.2.43, 9.2.44, 9.2.74를 식 9.2.79에 대입하면

$$\eta_{fw} = (\omega - \omega_u) \cdot (1 + a) \cdot \left(\frac{G_{sg}}{G_{fw}}\right) \cdot \left(\frac{V_{sg}}{V}\right)$$

$$= (\omega - \omega_u) \cdot (1 + a) \cdot \left(\frac{G_{sg}}{G_{fw}}\right) \cdot \eta_{sg} \tag{9.2.80}$$

동결 후 Unfrozen Water 용적비 (η_{uw}) 계산

$$\eta_{uw} = \frac{V_{uw}}{V} \tag{9.2.81}$$

Unfrozen Water 중량 (W_{uw}) :

식 9.2.40, 9.2.3, 9.2.17로부터

$$\begin{aligned} W_{uw} &= \omega_u \cdot (W_{sg} + W_{tg}) \\ &= \omega_u \cdot (1 + a) \cdot W_{sg} \\ &= \omega_u \cdot (1 + a) \cdot G_{sg} \cdot \gamma_w \cdot V_{sg} \end{aligned} \tag{9.2.82}$$

Unfrozen Water 체적 (V_{uw}) :

$$V_{uw} = \frac{W_{uw}}{\gamma_w} \tag{9.2.83}$$

식 9.2.82, 9.2.83, 9.2.74를 식 9.2.81에 대입하면

$$\begin{aligned} \eta_{uw} &= \omega_u \cdot (1 + a) \cdot G_{sg} \cdot \left(\frac{V_{sg}}{V}\right) \\ &= \omega_u \cdot (1 + a) \cdot G_{sg} \cdot \eta_{sg} \end{aligned} \tag{9.2.84}$$

동결 후 Pore Air 용적비 (η_a) 계산

$$\eta_a = \frac{V_a}{V} = 0 \tag{9.2.85}$$

<u>페타이어 혼합토 체적팽창율 (ϵ_v) 계산</u>

$$\epsilon_v = \frac{V - V_o}{V_o} \tag{9.2.86}$$

식 9.2.31과 9.2.33을 식 9.2.70에 대입하면

$$\begin{aligned} V &= V_o + \left((a_4 - a_3) / (a_2 + a_3)\right) \cdot V_o \\ &= \frac{(a_2 + a_4)}{(a_2 + a_3)} \cdot V_o \end{aligned} \tag{9.2.87}$$

식 9.2.87을 식 9.2.86에 대입하면

$$\epsilon_v = \frac{(a_4 - a_3)}{(a_2 + a_3)} \tag{9.2.88}$$

2.1.3 체적 부동함수비 (η_{uw})와 중량 부동함수비 (ω_u) 관계

체적 부동함수비 (Volumetric unfrozen water content)는 다음과 같이 정의한다.

$$\eta_{uw} = \frac{V_{uw}}{V} \tag{9.2.89}$$

중량 부동함수비 (Unfrozen water content)는 다음과 같이 정의한다.

$$\omega_u = \frac{W_{uw}}{W_s} \tag{9.2.40}$$

부동수분 측정에서 ω_u 대신에 체적 부동함수비 (η_{uw})가 측정되었다고 가정한다.

Frozen Water 체적 팽창량 (ΔV_{fw}) 계산

식 9.2.44와 9.2.45를 식 9.2.46에 대입하면

$$\Delta V_{fw} = \left(\frac{1}{G_{fw}} - 1\right) \cdot \frac{W_{fw}}{\gamma_w} \tag{9.2.90}$$

Total Water 중량 (W_w) :

식 9.2.31과 9.2.33을 식 9.2.20에 대입하면

$$\begin{aligned} W_w &= \omega \cdot (1 + a) \cdot G_{sg} \cdot \gamma_w \cdot \eta_{sgo} \cdot V_o \\ &= \omega \cdot \frac{(1 + a)}{(a_2 + a_3)} \cdot G_{sg} \cdot \gamma_w \cdot V_o \\ &= b_1 \cdot V_o \end{aligned} \tag{9.2.91}$$

여기서

$$\begin{aligned} b_1 &= \omega \cdot \frac{(1 + a)}{(a_2 + a_3)} \cdot G_{sg} \cdot \gamma_w \\ &= \frac{\omega}{(1 + \omega)} \cdot \gamma_{to} \\ &= \omega \cdot \left(\frac{W_s}{V_o}\right) \\ &= \omega \cdot \gamma_d \end{aligned} \tag{9.2.92}$$

여기서 γ_d는 페타이어 혼합토의 건조 단위중량이다.

Unfrozen Water 중량 (W_{uw}) :

$$W_{uw} = \gamma_w \cdot V_{uw} \tag{9.2.93}$$

식 9.2.89를 식 9.2.93에 대입하면

$$W_{uw} = \gamma_w \cdot \eta_{uw} \cdot V \tag{9.2.94}$$

Frozen Water 중량 (W_{fw}) :

$$W_{fw} = W_w - W_{uw} \tag{9.2.95}$$

식 9.2.91과 9.2.94를 식 9.2.95에 대입하면

$$W_{fw} = b_1 \cdot V_o - \gamma_w \cdot \eta_{uw} \cdot V \tag{9.2.96}$$

식 9.2.96을 식 9.2.90에 대입하면

$$\Delta V_{fw} = \left(\frac{1}{G_{fw}} - 1\right) \cdot \frac{1}{\gamma_w} \cdot (b_1 \cdot V_o - \gamma_w \cdot \eta_{uw} \cdot V) \tag{9.2.97}$$

Frozen Water 체적 팽창율 (ϵ_{fw}) 계산

$$\epsilon_{fw} = \frac{\Delta V_{fw}}{V_o} \tag{9.2.50}$$

식 9.2.97을 식 9.2.50에 대입하면

$$\epsilon_{fw} = \left(\frac{1}{G_{fw}} - 1\right) \cdot \left(\frac{b_1}{\gamma_w} - \eta_{uw} \cdot \frac{V}{V_o}\right) \tag{9.2.98}$$

식 9.2.98에서 V를 V_o으로 가정하면 ϵ_{fw}의 근사값 ϵ'_{fw}는 다음과 같다.

$$\epsilon'_{fw} = \left(\frac{1}{G_{fw}} - 1\right) \cdot \left(\frac{b_1}{\gamma_w} - \eta_{uw}\right) \tag{9.2.99}$$

2.1.3.1 혼합토에 체적증가량이 없는 경우 ($\epsilon'_{fw} < \eta_{ao}$)

Frozen Water 체적팽창량 (ΔV_{fw})이 동결전 Pore Air 체적 (V_{ao})보다 작은 경우이므로 ΔV_{fw}는 동결 전 Pore Air 공간의 일부를 차지하고 혼합토의 체적증가는 없다.

$$V = V_o \tag{9.2.100}$$

식 9.2.100을 식 9.2.94에 대입하면

$$W_{uw} = \gamma_w \cdot \eta_{uw} \cdot V_o \tag{9.2.101}$$

Soil과 Tire Grain 중량 (W_s) 계산

$$W_s = W_{sg} + W_{tg}$$

$$= (1 + a) \cdot W_{sg} \tag{9.2.102}$$

식 9.2.17을 식 9.2.102에 대입하면

$$W_s = (1 + a) \cdot G_{sg} \cdot \gamma_w \cdot V_{sg} \tag{9.2.103}$$

식 9.2.31과 9.2.33을 식 9.2.103에 대입하면

$$W_s = (1 + a) \cdot G_{sg} \cdot \gamma_w \cdot \eta_{sgo} \cdot V_o$$

$$= \frac{(1 + a)}{(a_2 + a_3)} \cdot G_{sg} \cdot \gamma_w \cdot V_o$$

$$= \frac{b_1}{\omega} \cdot V_o \tag{9.2.104}$$

중량 부동함수비 (ω_u) 계산

식 9.2.101, 9.2.104, 9.2.92를 식 9.2.40에 대입하면

$$\omega_u = \frac{\gamma_w \cdot \eta_{uw} \cdot V_o}{\left(\frac{b_1}{\omega}\right) \cdot V_o}$$

$$= \frac{\gamma_w \cdot \eta_{uw}}{(\gamma_{to} / (1+\omega))}$$

$$= (1+\omega) \cdot \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_{to}}\right) \cdot \eta_{uw}$$

$$= \frac{\gamma_w}{\gamma_d} \cdot \eta_{uw} \qquad (9.2.105)$$

식 9.2.105는 동결 전 함수비 (ω)와 동결 후 체적 부동함수비 (η_{uw})가 주어 졌을 때 동결 후 중량 부동함수비 (ω_u)를 구하는 식이다.

2.1.3.2 혼합토에 체적증가량이 있는 경우 ($\epsilon'_{fw} \geq \eta_{ao}$)

동결 후 전체 체적 (V) :

$$V = V_o + (\Delta V_{fw} - V_{ao}) \qquad (9.2.106)$$

Unfrozen Water 체적 (V_{uw}) :

식 9.2.89와 9.2.106으로부터

$$V_{uw} = \eta_{uw} \cdot V$$

$$= \eta_{uw} \cdot (V_o + (\Delta V_{fw} - V_{ao})) \qquad (9.2.107)$$

Frozen Water 중량 (W_{fw}) :

$$W_{fw} = W_w - W_{uw} \tag{9.2.95}$$

식 9.2.33, 9.2.38, 9.2.39, 9.2.91, 9.2.93, 9.2.107을 식 9.2.95에 대입하면

$$\begin{aligned} W_{fw} &= b_1 \cdot V_o - \gamma_w \cdot (\eta_{uw} \cdot (V_o + (\Delta V_{fw} - (a_3 / (a_2 + a_3)) \cdot V_o))) \\ &= b_2 \cdot V_o - \gamma_w \cdot \eta_{uw} \cdot \Delta V_{fw} \end{aligned} \tag{9.2.108}$$

여기서

$$b_2 = b_1 - \gamma_w \cdot \eta_{uw} \cdot a_2 / (a_2 + a_3) \tag{9.2.109}$$

Frozen Water 체적 팽창량 (ΔV_{fw}) 계산

식 9.2.44와 9.2.45를 식 9.2.46에 대입하면

$$\Delta V_{fw} = \left(\frac{1}{G_{fw}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\gamma_w} \cdot W_{fw} \tag{9.2.110}$$

식 9.2.108을 식 9.2.110에 대입하면

$$\Delta V_{fw} = \left(\frac{1}{G_{fw}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\gamma_w} \cdot \{ b_2 \cdot V_o - \gamma_w \cdot \eta_{uw} \cdot \Delta V_{fw} \} \tag{9.2.111}$$

식 9.2.111에서 ΔV_{fw}을 구하면

$$\left\{ 1 + \left(\frac{1}{G_{fw}} - 1 \right) \cdot \eta_{uw} \right\} \cdot \Delta V_{fw} = \left\{ \left(\frac{1}{G_{fw}} - 1 \right) \cdot \frac{b_2}{\gamma_w} \right\} \cdot V_o$$

또는

$$\Delta V_{fw} = b_5 \cdot V_o \tag{9.2.112}$$

여기서

$$b_5 = \frac{b_4}{b_3} \tag{9.2.113}$$

$$b_3 = 1 + \left(\frac{1}{G_{fw}} - 1 \right) \cdot \eta_{uw} \tag{9.2.114}$$

$$b_4 = \left(\frac{1}{G_{fw}} - 1 \right) \cdot \frac{b_2}{\gamma_w} \tag{9.2.115}$$

Unfrozen Water 체적 (V_{uw}) 계산

식 9.2.33, 9.2.38, 9.2.39, 9.2.112를 식 9.2.107에 대입하면

$$\begin{aligned} V_{uw} &= \eta_{uw} \cdot \left(V_o + b_5 \cdot V_o - \left(a_3 / \left(a_2 + a_3 \right) \right) \cdot V_o \right) \\ &= \eta_{uw} \cdot b_6 \cdot V_o \end{aligned} \tag{9.2.116}$$

여기서

$$b_6 = 1 + b_5 - a_3 / \left(a_2 + a_3 \right) \tag{9.2.117}$$

Unfrozen Water 중량 (W_{uw}) 계산

식 9.2.116을 식 9.2.93에 대입하면

$$W_{uw} = \gamma_w \cdot \eta_{uw} \cdot b_6 \cdot V_o \tag{9.2.118}$$

중량 부동함수비 (ω_u) 계산

$$W_s = W_{sg} + W_{tg}$$
$$= (1 + a) \cdot W_{sg} \qquad (9.2.119)$$

식 9.2.17을 식 9.2.119에 대입하면

$$W_s = (1 + a) \cdot G_{sg} \cdot \gamma_w \cdot V_{sg} \qquad (9.2.120)$$

식 9.2.31과 9.2.33을 식 9.2.120에 대입하면

$$W_s = (1 + a) \cdot G_{sg} \cdot \gamma_w \cdot \eta_{sgo} \cdot V_o$$
$$= \frac{(1 + a)}{(a_2 + a_3)} \cdot G_{sg} \cdot \gamma_w \cdot V_o$$
$$= \frac{b_1}{\omega} \cdot V_o \qquad (9.2.121)$$

중량 부동함수비 (ω_u):

식 9.2.118과 9.2.121을 식 9.2.40에 대입하면

$$\omega_u = \frac{\gamma_w \cdot \eta_{uw} \cdot b_6 \cdot V_o}{\left(\frac{b_1}{\omega}\right) \cdot V_o}$$
$$= \frac{b_6}{b_1} \cdot \gamma_w \cdot \eta_{uw} \cdot \omega$$
$$= b_6 \cdot \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_d}\right) \cdot \eta_{uw} \qquad (9.2.122)$$

식 9.2.122는 동결 전 함수비 (ω)와 동결 후 체적 부동함수비 (η_{uw})가 주어 졌을 때 동결 후 중량 부동함수비 (ω_u)를 구하는 식이다.

2.2 혼합토 최대 체적팽창 (Upper Bound Expansion)

본 계산은 가정 사항 (5)를 적용하므로 혼합토 체적팽창의 상한값이다. 따라서 동결에 따른 Frozen Water의 물에서 얼음으로 상전이 (Phase change)에 의한 체적 증가량은 곧 혼합체의 동결 후 체적증가량이 된다.

동결후 폐타이어 혼합토 Wet Unit Weight (γ_t) 계산

동결후 Mixture Total 체적 (V) :

그림 9.2.2로부터

$$V = V_{sg} + V_{tg} + V_{fw} + V_{uw} + V_a \tag{9.2.123}$$

또는

$$V = V_o + \Delta V_{fw} \tag{9.2.124}$$

식 9.2.47을 식 9.2.124에 대입하면

$$V = V_o + a_4 \cdot V_{sg} \tag{9.2.125}$$

동결 후 Wet Unit Weight (γ_t) :

$$\gamma_t = \frac{W}{V} \tag{9.2.71}$$

식 9.2.125를 식 9.2.71에 대입하면

$$\gamma_t = \frac{W}{V_o + a_4 \cdot V_{sg}}$$

$$= \frac{(W / V_o)}{1 + a_4 \cdot (V_{sg} / V_o)} \qquad (9.2.126)$$

식 9.2.1, 9.2.31, 9.2.33을 식 9.2.126에 대입하면

$$\gamma_t = \frac{\gamma_{to}}{1 + \frac{a_4}{(a_2 + a_3)}} \qquad (9.2.127)$$

동결 후 Soil Grain 용적비 (η_{sg}) 계산

$$\eta_{sg} = \frac{V_{sg}}{V} \qquad (9.2.74)$$

식 9.2.125를 식 9.2.74에 대입하면

$$\eta_{sg} = \frac{V_{sg}}{V_o + a_4 \cdot V_{sg}}$$

$$= \frac{(V_{sg} / V_o)}{1 + a_4 \cdot (V_{sg} / V_o)} \qquad (9.2.128)$$

식 9.2.31과 9.2.33을 식 9.2.128에 대입하면

$$\eta_{sg} = \frac{1}{a_2 + a_3 + a_4} \qquad (9.2.129)$$

동결 후 Tire Grain 용적비 (η_{tg}) 계산

$$\eta_{tg} = \frac{V_{tg}}{V} \tag{9.2.77}$$

식 9.2.19와 9.2.74를 식 9.2.77에 대입하면

$$\begin{aligned}\eta_{tg} &= a \cdot \left(\frac{G_{sg}}{G_{tg}}\right) \cdot \left(\frac{V_{sg}}{V}\right) \\ &= a \cdot \left(\frac{G_{sg}}{G_{tg}}\right) \cdot \eta_{sg}\end{aligned} \tag{9.2.78}$$

동결 후 Frozen Water 용적비 (η_{fw}) 계산

$$\eta_{fw} = \frac{V_{fw}}{V} \tag{9.2.79}$$

식 9.2.43, 9.2.44, 9.2.74를 식 9.2.79에 대입하면

$$\begin{aligned}\eta_{fw} &= (\omega - \omega_u) \cdot (1 + a) \cdot \left(\frac{G_{sg}}{G_{fw}}\right) \cdot \left(\frac{V_{sg}}{V}\right) \\ &= (\omega - \omega_u) \cdot (1 + a) \cdot \left(\frac{G_{sg}}{G_{fw}}\right) \cdot \eta_{sg}\end{aligned} \tag{9.2.80}$$

동결 후 Unfrozen Water 용적비 (η_{uw}) 계산

$$\eta_{uw} = \frac{V_{uw}}{V} \tag{9.2.81}$$

Unfrozen Water 중량 (W_{uw}) :

식 9.2.40, 9.2.3, 9.2.17로부터

$$W_{uw} = \omega_u \cdot (W_{sg} + W_{tg})$$
$$= \omega_u \cdot (1 + a) \cdot W_{sg}$$
$$= \omega_u \cdot (1 + a) \cdot G_{sg} \cdot \gamma_w \cdot V_{sg} \quad (9.2.82)$$

Unfrozen Water 체적 (V_{uw}) :

$$V_{uw} = \frac{W_{uw}}{\gamma_w} \quad (9.2.83)$$

식 9.2.82, 9.2.83, 9.2.74를 식 9.2.81에 대입하면

$$\eta_{uw} = \omega_u \cdot (1 + a) \cdot G_{sg} \cdot \left(\frac{V_{sg}}{V}\right)$$
$$= \omega_u \cdot (1 + a) \cdot G_{sg} \cdot \eta_{sg} \quad (9.2.84)$$

<u>동결 후 Pore Air 용적비 (η_a) 계산</u>

$$\eta_a = \frac{V_a}{V} \quad (9.2.130)$$

식 9.2.29와 9.2.74를 식 9.2.130에 대입하면

$$\eta_a = a_3 \cdot \left(\frac{V_{sg}}{V}\right)$$
$$= a_3 \cdot \eta_{sg} \quad (9.2.131)$$

참고 : 동결후 각성분의 용적비의 합은 1이어야 한다.

$$\text{용적비 합} = \eta_{sg} + \eta_{tg} + \eta_{fw} + \eta_{uw} + \eta_a = 1 \quad (9.2.66)$$

폐타이어 혼합토 체적팽창율 (ϵ_v) 계산

동결 후 혼합토 체적 팽창율 (ϵ_v)는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\epsilon_v = \frac{\Delta V_{fw}}{V_o} \tag{9.2.132}$$

식 9.2.142를 식 9.2.132에 대입하면

$$\epsilon_v = c_5 \tag{9.2.133}$$

또는 식 9.2.47을 V_o으로 나누면

$$\frac{\Delta V_{fw}}{V_o} = a_4 \cdot \frac{V_{sg}}{V_o} \tag{9.2.134}$$

식 9.2.31, 9.2.33, 9.2.134를 식 9.2.132에 대입하면

$$\epsilon_v = \frac{a_4}{(a_2 + a_3)} \tag{9.2.135}$$

2.2.1 체적 부동함수비 (η_{uw})와 중량 부동함수비 (ω_u) 관계

체적 부동함수비 (Volumetric unfrozen water content)는 다음과 같이 정의한다.

$$\eta_{uw} = \frac{V_{uw}}{V} \tag{9.2.89}$$

중량 부동함수비 (Unfrozen water content)는 다음과 같이 정의한다.

$$\omega_u = \frac{W_{uw}}{W_s} \tag{9.2.40}$$

부동수분 측정에서 ω_u 대신에 체적 부동함수비 (η_{uw})가 측정되었다고 가정한다.

Frozen Water 중량 (W_{fw}) 계산

Total Water 중량 (W_w) :

식 9.2.31과 9.2.33을 식 9.2.20에 대입하면

$$\begin{aligned} W_w &= \omega \cdot (1+a) \cdot G_{sg} \cdot \gamma_w \cdot \eta_{sgo} \cdot V_o \\ &= \omega \cdot \frac{(1+a)}{(a_2+a_3)} \cdot G_{sg} \cdot \gamma_w \cdot V_o \\ &= b_1 \cdot V_o \end{aligned} \tag{9.2.91}$$

여기서

$$b_1 = \omega \cdot \frac{(1+a)}{(a_2+a_3)} \cdot G_{sg} \cdot \gamma_w \tag{9.2.92}$$

Unfrozen Water 중량 (W_{uw}) :

$$W_{uw} = \gamma_w \cdot V_{uw} \tag{9.2.93}$$

동결 후 전체 체적 (V) :

$$V = V_o + \Delta V_{fw} \tag{9.2.136}$$

Unfrozen Water 체적 (V_{uw}) :

식 9.2.89와 9.2.136으로부터

$$V_{uw} = \eta_{uw} \cdot V$$
$$= \eta_{uw} \cdot (V_o + \Delta V_{fw}) \quad (9.2.137)$$

Frozen Water 중량 (W_{fw}) :

$$W_{fw} = W_w - W_{uw} \quad (9.2.95)$$

식 9.2.91, 9.2.93, 9.2.137을 식 9.2.95에 대입하면

$$W_{fw} = b_1 \cdot V_o - \gamma_w \cdot (\eta_{uw} \cdot (V_o + \Delta V_{fw}))$$
$$= (b_1 - \gamma_w \cdot \eta_{nw}) \cdot V_o - \gamma_w \cdot \eta_{uw} \cdot \Delta V_{fw} \quad (9.2.138)$$

Frozen Water 체적 팽창량 (ΔV_{fw}) 계산

식 9.2.44와 9.2.45를 식 9.2.46에 대입하면

$$\Delta V_{fw} = \left(\frac{1}{G_{fw}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\gamma_w} \cdot W_{fw}$$
$$= c_2 \cdot W_{fw} \quad (9.2.139)$$

여기서

$$c_2 = \left(\frac{1}{G_{fw}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\gamma_w} \quad (9.2.140)$$

식 9.2.138을 식 9.2.139에 대입하면

$$\Delta V_{fw} = \left(\frac{1}{G_{fw}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\gamma_w} \cdot \{(b_1 - \gamma_w \cdot \eta_{uw}) \cdot V_o - \gamma_w \cdot \eta_{uw} \cdot \Delta V_{fw}\} \quad (9.2.141)$$

식 9.2.141에서 ΔV_{fw}을 구하면

$$\left\{1+\left(\frac{1}{G_{fw}}-1\right)\cdot\eta_{uw}\right\}\cdot\Delta V_{fw}=\left\{\left(\frac{1}{G_{fw}}-1\right)\cdot\frac{(b_1-\gamma_w\cdot\eta_{uw})}{\gamma_w}\right\}\cdot V_o$$

또는

$$\Delta V_{fw}=c_5\cdot V_o \tag{9.2.142}$$

여기서

$$c_5=\frac{c_4}{c_3} \tag{9.2.143}$$

$$c_3=1+\left(\frac{1}{G_{fw}}-1\right)\cdot\eta_{uw} \tag{9.2.144}$$

$$c_4=\left(\frac{1}{G_{fw}}-1\right)\cdot\frac{(b_1-\gamma_w\cdot\eta_{uw})}{\gamma_w} \tag{9.2.145}$$

Unfrozen Water 체적 (V_{uw}) 계산

식 9.2.142를 식 9.2.137에 대입하면

$$\begin{aligned}V_{uw}&=\eta_{uw}\cdot(V_o+c_5\cdot V_o)\\&=\eta_{uw}\cdot(1+c_5)\cdot V_o\end{aligned} \tag{9.2.146}$$

Unfrozen Water 중량 (W_{uw}) 계산

식 9.2.146을 식 9.2.93에 대입하면

$$W_{uw}=\gamma_w\cdot\eta_{uw}\cdot(1+c_5)\cdot V_o \tag{9.2.147}$$

중량 부동함수비 (ω_u) 계산

$$W_s = W_{sg} + W_{tg}$$
$$= (1 + a) \cdot W_{sg} \quad (9.2.119)$$

식 9.2.17을 식 9.2.119에 대입하면

$$W_s = (1 + a) \cdot G_{sg} \cdot \gamma_w \cdot V_{sg} \quad (9.2.120)$$

식 9.2.31과 9.2.33을 식 9.2.120에 대입하면

$$W_s = (1 + a) \cdot G_{sg} \cdot \gamma_w \cdot \eta_{sgo} \cdot V_o$$
$$= \frac{(1 + a)}{(a_2 + a_3)} \cdot G_{sg} \cdot \gamma_w \cdot V_o$$
$$= \frac{b_1}{\omega} \cdot V_o \quad (9.2.121)$$

중량 부동함수비 (ω_u):

식 9.2.147과 9.2.121을 식 9.2.40에 대입하면

$$\omega_u = \frac{\gamma_w \cdot \eta_{uw} \cdot (1 + c_5) \cdot V_o}{\left(\frac{b_1}{\omega}\right) \cdot V_o}$$
$$= \frac{(1 + c_5)}{b_1} \cdot \gamma_w \cdot \eta_{uw} \cdot \omega$$
$$= (1 + c_5) \cdot \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_d}\right) \cdot \eta_{uw} \quad (9.2.148)$$

식 9.2.148은 동결전 함수비 (ω)와 동결후 체적 부동함수비 (η_{uw})가 주어졌을때 동결후 중량 부동함수비 (ω_u)를 구하는 식이다.

2.3 페타이어 혼합토 밀도

동결 전 혼합토 밀도 (ρ_o)는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\rho_o = \eta_{sgo} \cdot \rho_{sg} + \eta_{tgo} \cdot \rho_{tg} + \eta_{wo} \cdot \rho_{uw} \tag{9.2.149}$$

동결 후 혼합토 밀도 (ρ)는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\rho = \eta_{sg} \cdot \rho_{sg} + \eta_{tg} \cdot \rho_{tg} + \eta_{fw} \cdot \rho_{fw} + \eta_{uw} \cdot \rho_{uw} \tag{9.2.150}$$

여기서

$$\rho_{sg} = \frac{G_{sg} \cdot \gamma_w}{g} \tag{9.2.151}$$

$$\rho_{tg} = \frac{G_{tg} \cdot \gamma_w}{g} \tag{9.2.152}$$

$$\rho_{fw} = \frac{G_{fw} \cdot \gamma_w}{g} \tag{9.2.153}$$

$$\rho_{uw} = \frac{\gamma_w}{g} \tag{9.2.154}$$

여기서 γ_w는 물의 단위중량이고, g는 중력가속도이다.

2.4 페타이어 혼합토 체적열용량

동결 전 혼합토 체적열용량 (C_o)는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$C_o = \eta_{sgo} \cdot \rho_{sg} \cdot c_{sg} + \eta_{tgo} \cdot \rho_{tg} \cdot c_{tg} + \eta_{wo} \cdot \rho_{uw} \cdot c_{uw} \tag{9.2.155}$$

동결 후 혼합토 체적열용량 (C)는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$C = \eta_{sg} \cdot \rho_{sg} \cdot c_{sg} + \eta_{tg} \cdot \rho_{tg} \cdot c_{tg} + \eta_{fw} \cdot \rho_{fw} \cdot c_{fw} + \eta_{uw} \cdot \rho_{uw} \cdot c_{uw} \tag{9.2.156}$$

여기서, c_{sg} : Specific heat of soil grain

c_{tg} : Specific heat of tire grain

c_{fw} : Specific heat of frozen water

c_{uw} : Specific heat of unfrozen water

2.5 페타이어 혼합토 체적잠열 (λ)

동결 후 혼합토 체적잠열 (λ)는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\lambda = \eta_{fw} \cdot \rho_{fw} \cdot L_w \tag{9.2.157}$$

여기서, L_w : Latent heat of fusion of water per unit mass

2.6 페타이어 혼합토 체적열용량, 체적잠열, 체적팽창율 계산순서 요약

각성분 물성치

G_{sg}	:	Specific gravity of soil grain
G_{tg}	:	Specific gravity of tire grain
G_{fw}	:	Specific gravity of frozen water (ice)
c_{sg}	:	Specific heat of soil grain
c_{tg}	:	Specific heat of tire grain
c_{fw}	:	Specific heat of frozen water (ice)
c_{uw}	:	Specific heat of unfrozen water
L_w	:	Latent heat of fusion of water per unit mass

동결 전 측정된 물성치

$\gamma_{to} = W / V_o$: Wet unit weight

$\omega = W_w / W_s$: Water content

$a = W_{tg} / W_{sg}$: Ratio of tire to soil grain

동결 후 측정된 물성치

$\omega_u = W_{uw} / W_s$: Unfrozen water content

상수

$$a_1 = 1 + a + \omega \cdot (1 + a)$$

$$a_2 = 1 + a \cdot (G_{sg} / G_{tg}) + \omega \cdot (1 + a) \cdot G_{sg}$$

$$a_3 = a_1 \cdot G_{sg} \cdot (\gamma_w / \gamma_{to}) - a_2$$

$$a_4 = (1 / G_{fw} - 1) \cdot G_{sg} \cdot (\omega - \omega_u) \cdot (1 + a)$$

$$\eta_{ao} = a_3 / (a_2 + a_3)$$

$$\epsilon_{fw} = a_4 / (a_2 + a_3)$$

동결 후 각성분 용적비와 체적팽창율 (ϵ_v) 계산

최소 체적팽창 (Lower Bound Expansion) :

혼합토에 체적증가량이 없는 경우 ($\epsilon_{fw} < \eta_{ao}$)

$$\eta_{sg} = 1 / (a_2 + a_3)$$

$$\eta_{tg} = a \cdot (G_{sg} / G_{tg}) \cdot \eta_{sg}$$

$$\eta_{fw} = (\omega - \omega_u) \cdot (1 + a) \cdot (G_{sg} / G_{fw}) \cdot \eta_{sg}$$

$$\eta_{uw} = \omega_u \cdot (1 + a) \cdot G_{sg} \cdot \eta_{sg}$$

$$\eta_a = (a_3 - a_4) \cdot \eta_{sg}$$

$$\epsilon_v = 0$$

혼합토에 체적증가량이 있는 경우 ($\epsilon_{fw} \geq \eta_{ao}$)

$$\eta_{sg} = 1/(a_2 + a_4)$$
$$\eta_{tg} = a \cdot (G_{sg}/G_{tg}) \cdot \eta_{sg}$$
$$\eta_{fw} = (\omega - \omega_u) \cdot (1 + a) \cdot (G_{sg}/G_{fw}) \cdot \eta_{sg}$$
$$\eta_{uw} = \omega_u \cdot (1 + a) \cdot G_{sg} \cdot \eta_{sg}$$
$$\eta_a = 0$$
$$\epsilon_v = (a_4 - a_3)/(a_2 + a_3)$$

최대 체적팽창 (Upper Bound Expansion) :

$$\eta_{sg} = 1/(a_2 + a_3 + a_4)$$
$$\eta_{tg} = a \cdot (G_{sg}/G_{tg}) \cdot \eta_{sg}$$
$$\eta_{fw} = (\omega - \omega_u) \cdot (1 + a) \cdot (G_{sg}/G_{fw}) \cdot \eta_{sg}$$
$$\eta_{uw} = \omega_u \cdot (1 + a) \cdot G_{sg} \cdot \eta_{sg}$$
$$\eta_a = a_3 \cdot \eta_{sg}$$
$$\epsilon_v = a_4/(a_2 + a_3)$$

<u>동결 후 폐타이어 혼합토 밀도 (ρ), 체적열용량 (C), 체적잠열 (λ) 계산</u>

$$\rho = \eta_{sg} \cdot \rho_{sg} + \eta_{tg}\rho_{tg} + \eta_{fw} \cdot \rho_{fw} + \eta_{uw} \cdot \rho_{uw}$$
$$C = \eta_{sg} \cdot \rho_{sg} \cdot c_{sg} + \eta_{tg}\rho_{tg} \cdot c_{tg} + \eta_{fw}\rho_{fw} \cdot c_{fw} + \eta_{uw}\rho_{uw} \cdot c_{uw}$$
$$\lambda = \eta_{fw} \cdot \rho_{fw} \cdot L_w$$

3. 혼합토 열용량/동결팽창율 프로그램

본 문 2.6에서 요약된 폐타이어 혼합토의 열용량과 동결팽창율 계산식을 쉽게 활용할 수 있도록 Visual Basic을 사용하여 컴퓨터 프로그램 MSHC (Mixed Soil Heat Capacity)를 개발하였다.

그림 9.2.3은 프로그램 MSHC의 초기화면으로 폐타이어 혼합토의 동결전과 동결 후 구성 상태 개략도를 나타낸다. 이미 저장된 File의 Input Data를 수정하여 열용량과 동결 팽창율을 계산하고자 할 경우에는 "열기" 버튼을 클릭하여 저장된 Input Data를 불러온다. 저장된 File이 없거나 프로그램 내에 내장된 Default Input Data를 사용하고자 할 경우에는 그림 9.2.3의 오른쪽 위에 있는 "혼합토 열용량/팽창율 계산"탭을 클릭하면 그림 9.2.4에서 보는 바와 같은 MSHC 프로그램 내에 내장된 Default Input Data가 나타난다.

Input Data는 각성분의 물성치, Tire/Soil 중량비, 중량기준 선택 시 습윤단위중량과 함수비, 체적기준 선택 시 간극비와 포화도, 그리고 동결후 중량 또는 체적 부동함수비가 포함된다. 혼합토가 아닌 일반 Soil의 경우는 Tire/Soil 중량비를 0으로 입력하면 된다.

Output Data는 "혼합토 용적비/열용량/팽창율 계산 실행" 버튼을 클릭하면 그림 9.2.5에서 보는 바와 같이 동결 전 용적비/열용량/팽창율 계산 결과가 화면에 출력된다. 동결 후 계산 결과는 최소 체적팽창 (Lower bound expansion)과 최대 체적팽창 (Upper bound expansion)이 포함되며 완전 포화된 혼합토의 경우 Lower bound와 Upper bound 해석 결과는 동일하다. 계산 결과를 Text File로 출력하고자 할 경우에는 MSHC 프로그램 창의 하단에 있는 "저장" 버튼이나 "다른 이름으로 저장" 버튼을 클릭하면 표 9.2.1과 같은 Text로 된 Output File을 구할 수 있다.

표 9.2.2는 프로그램 MSHC의 Visual Basic Source Code로 폐타이어 혼합토 열용량/동결팽창율 계산에 사용된 Subroutine이다.

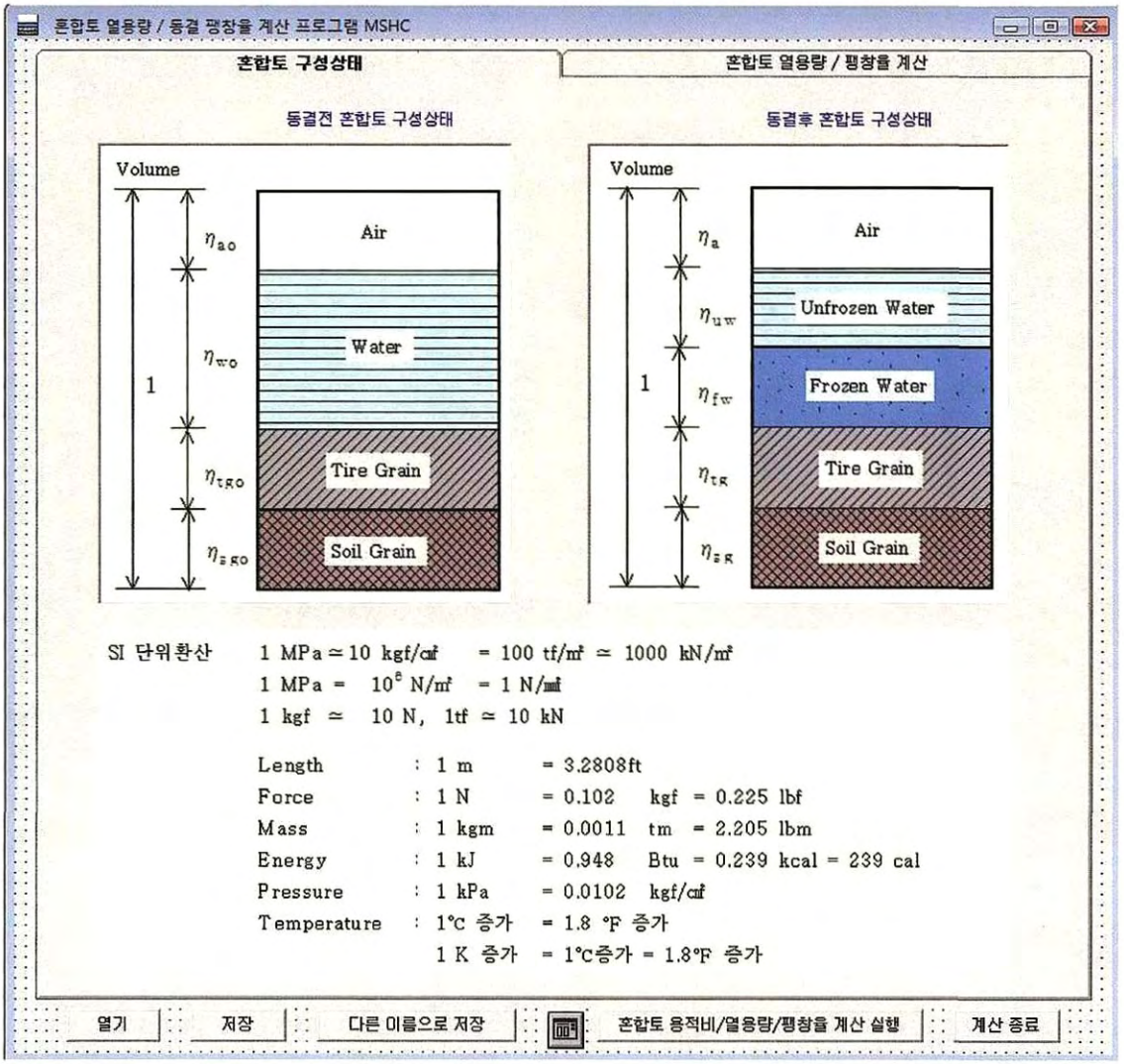


그림 9.2.3 혼합토 열용량/동결팽창율 프로그램 MSHC 초기화면

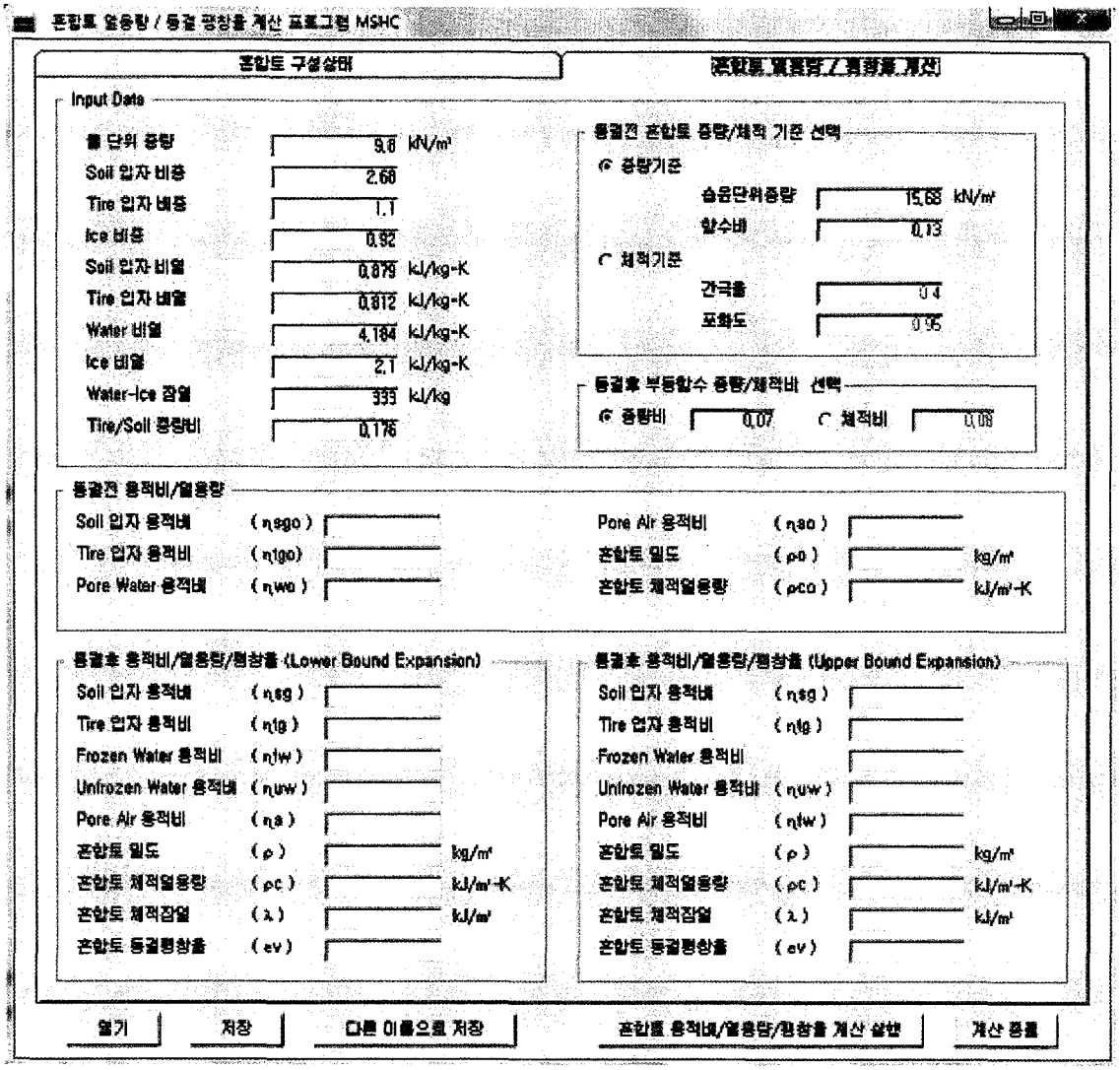


그림 9.2.4 혼합토 열용량/동결팽창율 프로그램 MSHC 초기 Default Input Data

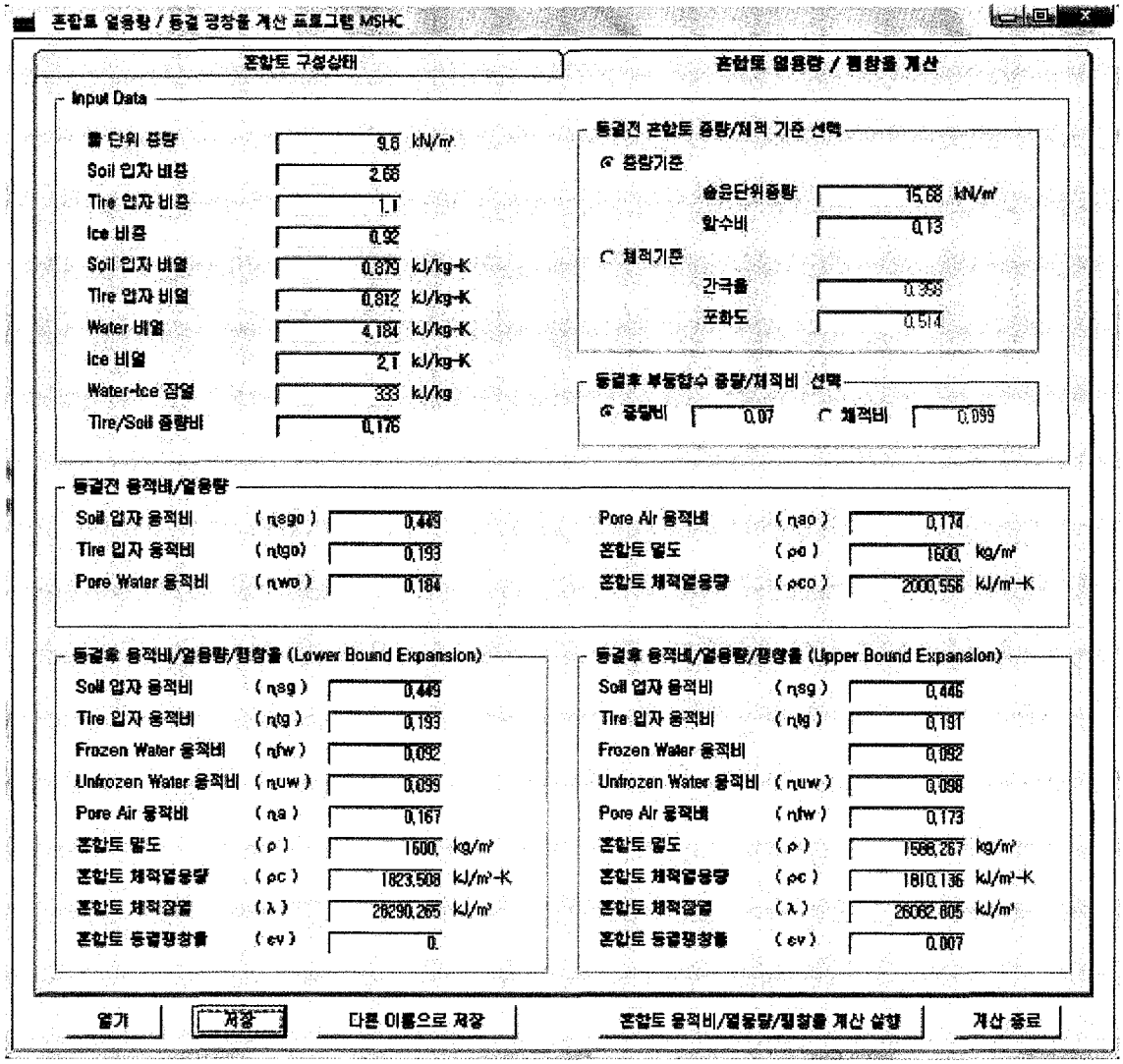
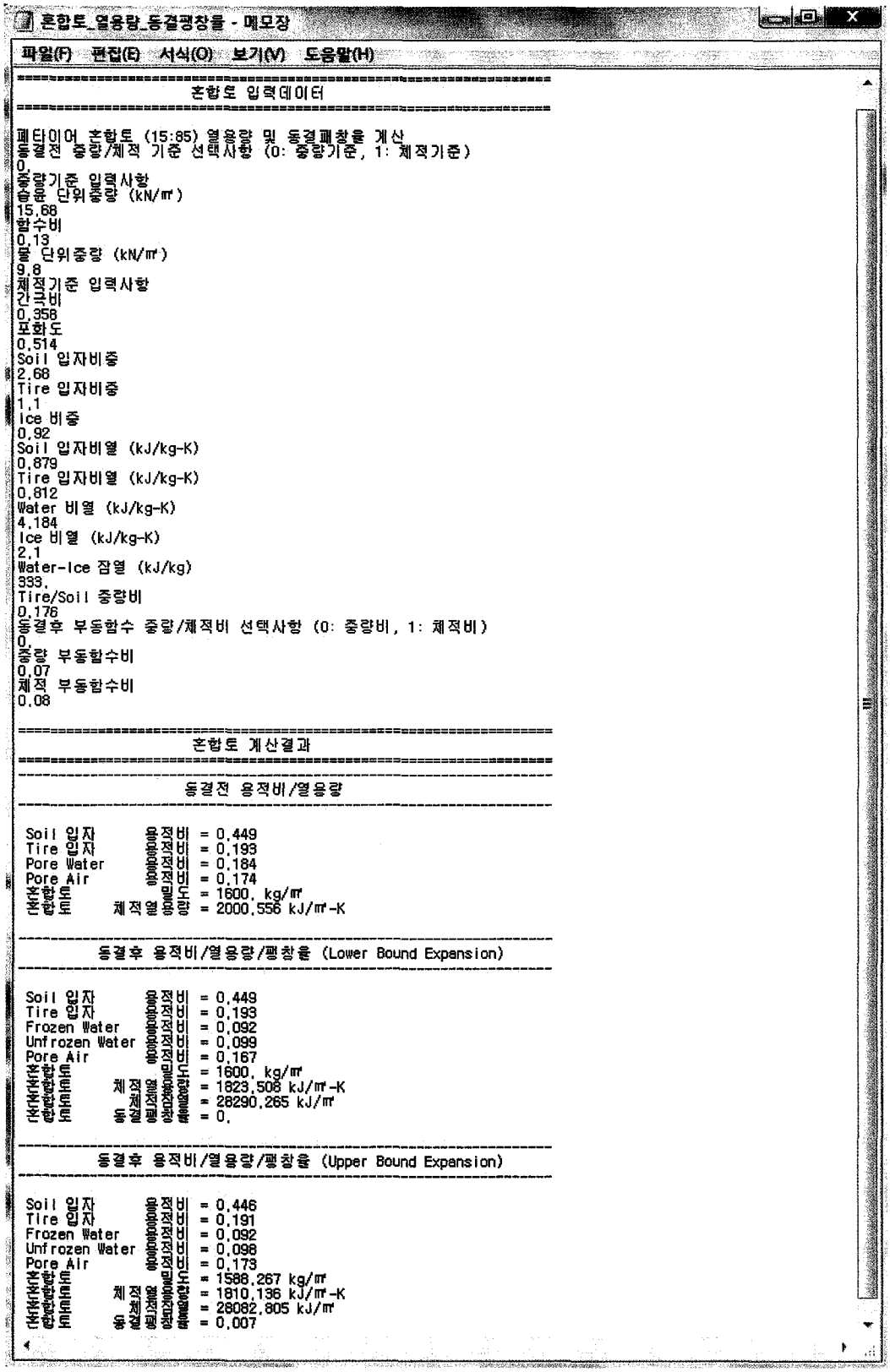


그림 9.2.5 혼합토 열용량/동결팽창율 프로그램 MSHC 계산 결과

표 9.2.1 혼합토 열용량/동결팽창율 프로그램 MSHC 계산 결과 텍스트 출력



혼합토_열용량_동결팽창율 - 메모장

파일(F) 편집(E) 서식(O) 보기(V) 도움말(H)

```
==========================================================
                    혼합토 입력데이터
==========================================================

페타이어 혼합토 (15:85) 열용량 및 동결팽창율 계산
동결전 중량/체적 기준 선택사항 (0: 중량기준, 1: 체적기준)
0,
중량기준 입력사항
습윤 단위중량 (kN/㎥)
15.68
함수비
0.13
물 단위중량 (kN/㎥)
9.8
체적기준 입력사항
간극비
0.358
포화도
0.514
Soil 입자비중
2.68
Tire 입자비중
1.1
Ice 비중
0.92
Soil 입자비열 (kJ/kg-K)
0.879
Tire 입자비열 (kJ/kg-K)
0.812
Water 비열 (kJ/kg-K)
4.184
Ice 비열 (kJ/kg-K)
2.1
Water-Ice 잠열 (kJ/kg)
333.
Tire/Soil 중량비
0.176
동결후 부동함수 중량/체적비 선택사항 (0: 중량비, 1: 체적비)
0,
중량 부동함수비
0.07
체적 부동함수비
0.08

==========================================================
                    혼합토 계산결과
==========================================================
----------------------------------------------------------
                  동결전 용적비/열용량
----------------------------------------------------------

 Soil 입자       용적비 = 0.449
 Tire 입자       용적비 = 0.193
 Pore Water      용적비 = 0.184
 Pore Air        용적비 = 0.174
 혼합토          밀도 = 1600. kg/㎥
 혼합토      체적열용량 = 2000.556 kJ/㎥-K

----------------------------------------------------------
        동결후 용적비/열용량/팽창율 (Lower Bound Expansion)
----------------------------------------------------------

 Soil 입자       용적비 = 0.449
 Tire 입자       용적비 = 0.193
 Frozen Water    용적비 = 0.092
 Unfrozen Water  용적비 = 0.099
 Pore Air        용적비 = 0.167
 혼합토          밀도 = 1600. kg/㎥
 혼합토      체적열용량 = 1823.508 kJ/㎥-K
 혼합토          체적열량 = 28290.265 kJ/㎥
 혼합토      동결팽창율 = 0.

----------------------------------------------------------
        동결후 용적비/열용량/팽창율 (Upper Bound Expansion)
----------------------------------------------------------

 Soil 입자       용적비 = 0.446
 Tire 입자       용적비 = 0.191
 Frozen Water    용적비 = 0.092
 Unfrozen Water  용적비 = 0.098
 Pore Air        용적비 = 0.173
 혼합토          밀도 = 1588.267 kg/㎥
 혼합토      체적열용량 = 1810.136 kJ/㎥-K
 혼합토          체적열량 = 28082.805 kJ/㎥
 혼합토      동결팽창율 = 0.007
```

표 9.2.2 혼합토 열용량/동결팽창율 프로그램 MSHC Visual Basic Code

```
Private Sub Compute()
' Input Data
' ==========
Gamma_to = CDbl(txtGamma_to.Text)
W = CDbl(txtW.Text)
Gamma_w = CDbl(txtGamma_w.Text)
No = CDbl(txtNo.Text)
So = CDbl(txtSo.Text)
Gsg = CDbl(txtGsg.Text)
Gtg = CDbl(txtGtg.Text)
Gfw = CDbl(txtGfw.Text)
Csg = CDbl(txtCsg.Text)
Ctg = CDbl(txtCtg.Text)
Cfw = CDbl(txtCfw.Text)
Cuw = CDbl(txtCuw.Text)
Lw = CDbl(txtLw.Text)
A = CDbl(txtA.Text)
Wu_0 = CDbl(txtWu_0.Text)
Wu_1 = CDbl(txtWu_1.Text)
rho_sg = Gsg * Gamma_w * 1000 / g
rho_tg = Gtg * Gamma_w * 1000 / g
rho_fw = Gfw * Gamma_w * 1000 / g
rho_uw = Gamma_w * 1000 / g

If radWV_1.Value = True Then
'============================
a0 = (1# - No) * Gsg / (1# + A * (Gsg / Gtg))
```

```
W = So * No / ((1# + A) * a0)
Gamma_to = (1# + W) * (1# + A) * a0 * Gamma_w
txtGamma_to.Text = Format(Gamma_to, "0.###")
txtW.Text = Format(W, "0.###")
Flag_WV = 1
Else
'===
Flag_WV = 0
End If
'======

' Output Data
' ===========
'동결전 용적비/밀도/열용량 계산
'------------------------------
a1 = 1# + A + W * (1# + A)
a2 = 1# + A * (Gsg / Gtg) + W * (1# + A) * Gsg
a3 = a1 * Gsg * (Gamma_w / Gamma_to) - a2
Nsgo = 1# / (a2 + a3)
Ntgo = A * (Gsg / Gtg) * Nsgo
Nwo = W * (1# + A) * Gsg * Nsgo
Nao = a3 * Nsgo
If radWV_0.Value = True Then
'==========================
No = Nwo + Nao
So = Nwo / No
txtNo.Text = Format(No, "0.###")
txtSo.Text = Format(So, "0.###")
End If
```

```
Rho_o = Nsgo * rho_sg + Ntgo * rho_tg + Nwo * rho_uw
Rhoc_o = Nsgo * rho_sg * Csg + Ntgo * rho_tg * Ctg + Nwo * rho_uw * Cuw
txtNsgo.Text = Format(Nsgo, "0.###")
txtNtgo.Text = Format(Ntgo, "0.###")
txtNwo.Text = Format(Nwo, "0.###")
txtNao.Text = Format(Nao, "0.###")
txtRho_o.Text = Format(Rho_o, "0.###")
txtRhoc_o.Text = Format(Rhoc_o, "0.###")

'동결후 용적비/밀도/열용량 계산 (Lower Bound Expansion)
'-----------------------------------------------------
If radWu_0.Value = True Then
'==========================
wu = Wu_0
Else
'===
b1 = W * (1# + A) * Gsg * Gamma_w / (a2 + a3)
efwp = (1# / Gfw - 1#) * (b1 / Gamma_w - Wu_1)
If efwp < Nao Then
'-----------------
wu = (1# + W) * (Gamma_w / Gamma_to) * Wu_1
Else
'---
b2 = b1 - Gamma_w * Wu_1 * a2 / (a2 + a3)
b3 = 1# + (1# / Gfw - 1#) * Wu_1
b4 = (1# / Gfw - 1#) * b2 / Gamma_w
b5 = b4 / b3
b6 = 1 + b5 - a3 / (a2 + a3)
wu = (b6 / b1) * Gamma_w * Wu_1 * W
```

```
End If
'-----
txtWu_0.Text = Format(wu, "0.###")
End If
'======
a4 = (1# / Gfw - 1#) * Gsg * (W - wu) * (1# + A)
efw = a4 / (a2 + a3)
If efw < Nao Then
'================
Nsg_L = Nsgo
Ntg_L = Ntgo
Nfw_L = (W - wu) * (1# + A) * (Gsg / Gfw) * Nsgo
Nuw_L = wu * (1# + A) * Gsg * Nsgo
Na_L = (a3 - a4) * Nsgo
Ev_L = 0#
Else
'===
Nsg_L = 1# / (a2 + a4)
Ntg_L = A * (Gsg / Gtg) * Nsg_L
Nfw_L = (W - wu) * (1# + A) * (Gsg / Gfw) * Nsg_L
Nuw_L = wu * (1# + A) * Gsg * Nsg_L
Na_L = 0#
Ev_L = (a4 - a3) / (a2 + a3)
End If
'======
txtWu_1.Text = Format(Nuw_L, "0.###")
Rho_L = Nsg_L * rho_sg + Ntg_L * rho_tg + Nfw_L * rho_fw + Nuw_L * rho_uw
Rhoc_L = Nsg_L * rho_sg * Csg + Ntg_L * rho_tg * Ctg + Nfw_L * rho_fw * Cfw
+ Nuw_L * rho_uw * Cuw
```

```
Lamda_L = Nfw_L * rho_fw * Lw
txtNsg_L.Text = Format(Nsg_L, "0.###")
txtNtg_L.Text = Format(Ntg_L, "0.###")
txtNfw_L.Text = Format(Nfw_L, "0.###")
txtNuw_L.Text = Format(Nuw_L, "0.###")
txtNa_L.Text = Format(Na_L, "0.###")
txtRho_L.Text = Format(Rho_L, "0.###")
txtRhoc_L.Text = Format(Rhoc_L, "0.###")
txtLamda_L.Text = Format(Lamda_L, "0.###")
txtEv_L.Text = Format(Ev_L, "0.###")

'동결후 용적비/밀도/열용량 계산 (Upper Bound Expansion)
'-----------------------------------------------------
If radWu_1.Value = True Then
'============================
c2 = (1# / Gfw - 1#) / Gamma_w
c3 = 1# + (1# / Gfw - 1#) * Wu_1
c4 = (1# / Gfw - 1#) * (b1 - Gamma_w * Wu_1) / Gamma_w
c5 = c4 / c3
wu = ((1# + c5) / b1) * Gamma_w * Wu_1 * W
Flag_Wu = 1
Else
'===
Flag_Wu = 0
End If
'=====
a4 = (1# / Gfw - 1#) * Gsg * (W - wu) * (1# + A)
Nsg_U = 1# / (a2 + a3 + a4)
Ntg_U = A * (Gsg / Gtg) * Nsg_U
```

```
Nfw_U = (W - wu) * (1# + A) * (Gsg / Gfw) * Nsg_U

Nuw_U = wu * (1# + A) * Gsg * Nsg_U

Na_U = a3 * Nsg_U

Ev_U = a4 / (a2 + a3)

Rho_U = Nsg_U * rho_sg + Ntg_U * rho_tg + Nfw_U * rho_fw + Nuw_U * rho_uw

Rhoc_U = Nsg_U * rho_sg * Csg + Ntg_U * rho_tg * Ctg + Nfw_U * rho_fw * Cfw
+ Nuw_U * rho_uw * Cuw

Lamda_U = Nfw_U * rho_fw * Lw

txtNsg_U.Text = Format(Nsg_U, "0.###")

txtNtg_U.Text = Format(Ntg_U, "0.###")

txtNfw_U.Text = Format(Nfw_U, "0.###")

txtNuw_U.Text = Format(Nuw_U, "0.###")

txtNa_U.Text = Format(Na_U, "0.###")

txtRho_U.Text = Format(Rho_U, "0.###")

txtRhoc_U.Text = Format(Rhoc_U, "0.###")

txtLamda_U.Text = Format(Lamda_U, "0.###")

txtEv_U.Text = Format(Ev_U, "0.###")

End Sub
```

4. 동결팽창 실험 및 해석

본 장에서는 그림 9.2.6에서 보는 바와 같이 직경이 10 Cm이고 높이가 15 Cm인 Silty-Sand 시료를 폐쇄형 (물 공급이 없는) 동상 실험기에 넣고 일축 동결팽창 실험을 수행하였다. 실험 중에 몰드 (Mould)와 시료가 부착되는 것을 방지하기 위해 얇은 유지 (Waxed Paper)를 사용하였다.

본 동결팽창 실험결과는 본 문 3장에서 설명한 동결팽창율 계산 프로그램 MSHC의 해석결과와 비교 분석하였다.

4.1 동결팽창 실험

본 동결팽창 실험에 사용한 Silty-Sand의 물성치는 표 9.2.3과 같다. 그림 9.2.7은 Silty-Sand의 온도변화에 따른 부동함수비가 동결전 시료의 초기함수비에 영향을 받는 것을 보여준다. 그림 9.2.8은 실험이 진행하는 동안 Chamber 내 공기 및 시료의 온도변화를 보여준다. Chamber 내 공기의 온도는 실험이 시작된 1시간 경과 후 -7℃에 도달하고 이 후 온도는 서서히 하강하여 19시간 경과 후 (실험이 종료됨) -12.5℃를 나타낸다.

동결팽창 실험결과는 표 9.2.4에 요약하였다. 그림 6.2.9는 실험이 진행되는 동안 시간에 따른 팽창량을 보여 주며, 실험 종료 시 팽창량은 수렴되었음을 알 수 있다.

4.2 동결팽창 해석

동결팽창 해석은 동결팽창율 계산 프로그램 MSHC를 사용하여 수행하였다. 각 TEST에 대하여 그림 9.2.7로부터 추정한 부동함수비(ω_u)를 적용하는 경우와 부동함수비가 0인 경우의 동결팽창율을 계산하였다. 해석에 사용된 입력 Data와 해석결과는 각 Test No 별로 그림 9.2.10부터 9.2.15에 걸쳐 나타나 있다.

Lower Bound Expansion 해석결과는 그림 9.2.15b의 포화도가 92.7%이고 부동함수비가 0인 Test No 5 를 제외한 모든 경우에 동결팽창율은 0으로 계산되었고, Upper Bound Expansion 해석결과는 일반적으로 초기함수비가 증가함에 따라 선형으로 비례하여 증가하고, 부동함수비를 적용한 경우는 부동함수비를 0으로 계산한 경우에 비해 동결팽창율은 일정량 감소한 값을 보여준다.

4.3 동결팽창 실험과 해석결과 비교

동결팽창 실험결과와 프로그램 MSHC의 해석결과를 그림 9.2.16에서 보는 바와 같이 시료의 초기함수비의 함수로 비교하였다. 실험 계측 결과는 모든 Test에 있어서 부동함수비를 적용한 Upper Bound Expansion 계산 값보다 큰 값을 보여 주고, 초기함수비가 작은 시료의 경우 (ω < 13%)에 계측 값은 부동함수비를 사용하여 계산한 값보다 조금 큰 값을 보여주며, 초기함수비가 큰 시료의 경우 (ω > 16%)에 계측 값은 부동함수비를 0으로 계산한 값보다 조금 작은 값을 보여준다.

초기함수비가 큰 시료에서 계측된 동결팽창율이 부동함수비를 적용한 Upper Bound Expansion 계산 값보다 큰 값을 보여주는 현상은 아마도 포화도가 큰 시료의 경우에 동결팽창과 관련하여 시료의 골격을 형성하는 입자와 입자 사이의 간격이 증가하는 시료 골격의 겉보기 팽창에 기인한 것으로 사료된다.

표 9.2.3 Silty - Sand 물성치

Soil properties			Remarks
G_s		2.65	
γ_d (kN/m^3)		18.2	
ω_{opt} (%)		11.7	
Liquid Limit (%)		35.2	
Plastic Limit (%)		22.8	
Soil Type		Silty-Sand	
USCS Classification		SM	
Thermal Conductivity (W/(m·K))	unfrozen	0.96	at ω_{opt}, γ_d
	frozen	1.92	at ω_{opt}, γ_d

표 9.2.4 동결팽창 실험결과 요약

Test No.	H×D (mm)	$\gamma_t(\gamma_d)$ (t/m^3)	ω (%)	e	S (%)	팽창율 (%)
1	150×100	1.78(1.64)	8.93	0.616	38.42	0.4
2	150×100	1.90(1.65)	14.82	0.606	65.24	1.3
3	150×100	1.98(1.64)	21.25	0.616	91.43	2.5
4	150×100	1.81(1.61)	12.31	0.646	50.50	0.5
5	150×100	1.88(1.63)	17.03	0.626	65.32	2.2
6	150×100	1.86(1.63)	21.89	0.626	92.7	2.8

- G_s = 2.65, ω_u (at T = -6℃) = 0.11
- Unidirectional freezing from top to bottom
- 90% compaction
- Void ratio and S were calculated
- Water content determined before and after the experiment

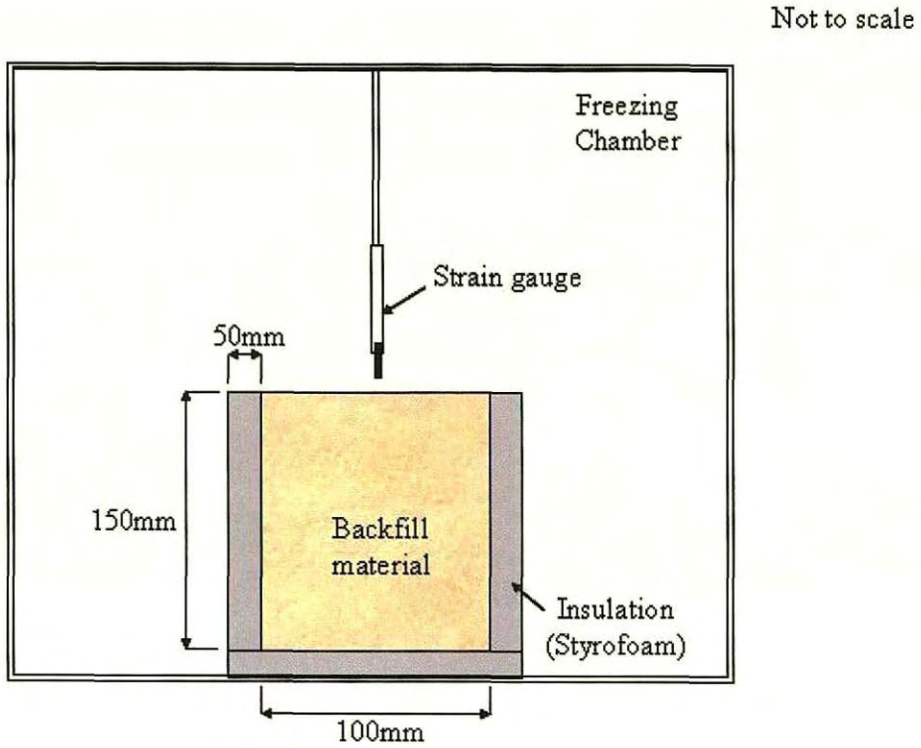


그림 9.2.6 동결팽창 시험장치

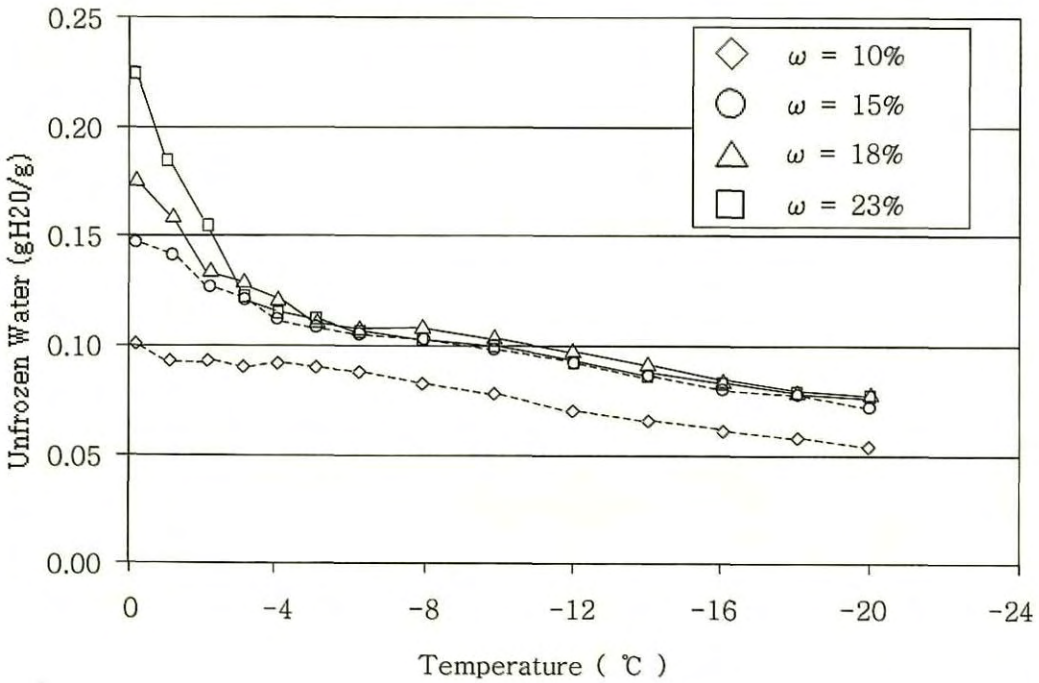


그림 9.2.7 Silty - Sand의 온도변화에 따른 부동함수비

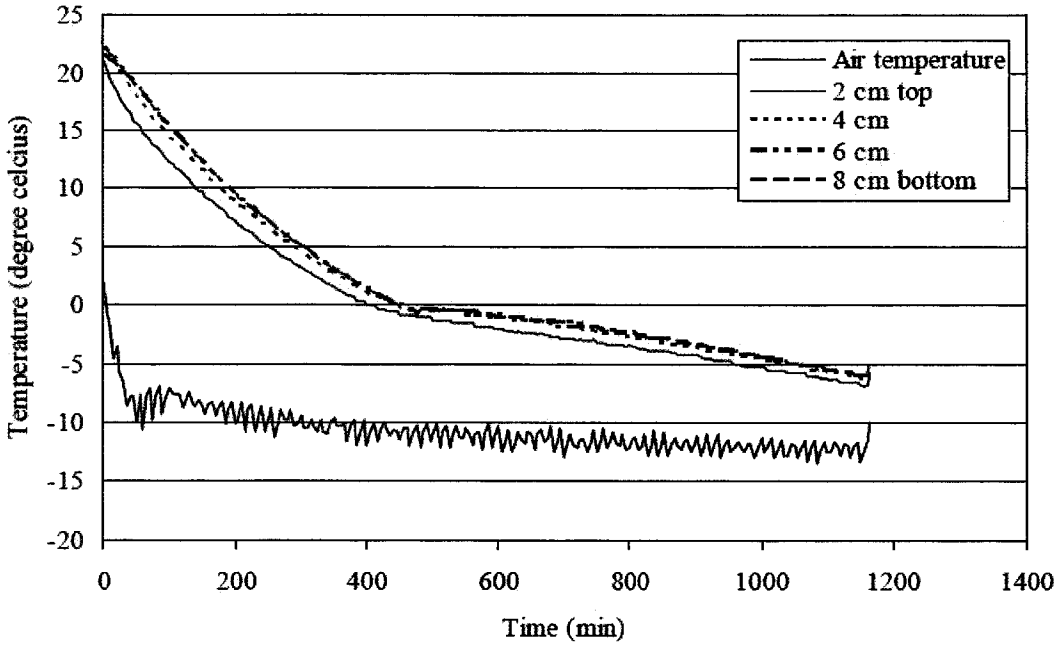


그림 9.2.8 시간에 따른 공기 및 시료의 온도변화

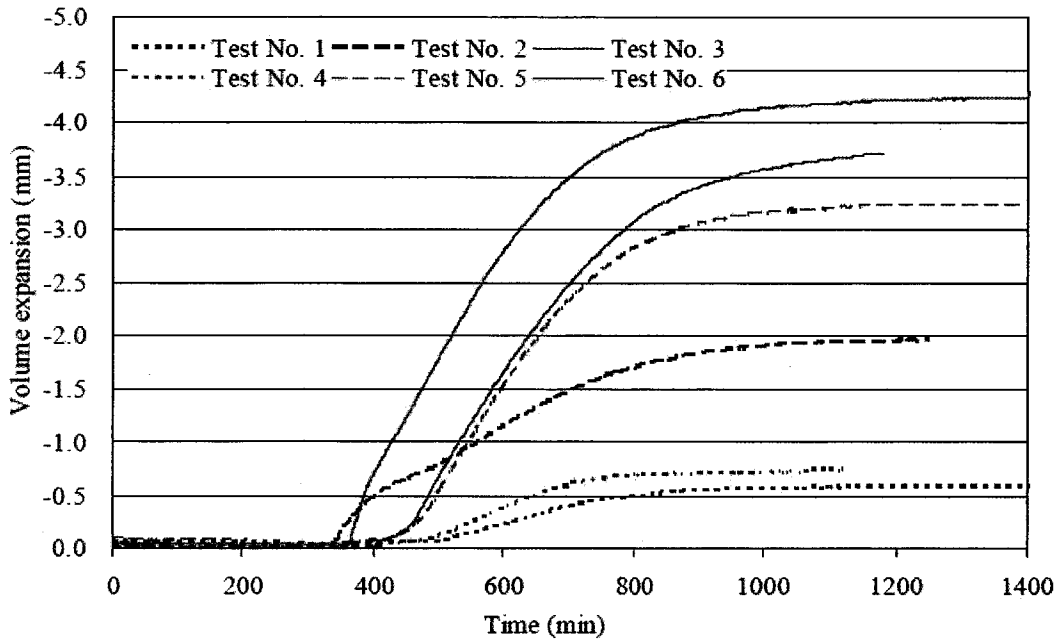


그림 9.2.9 동결팽창 실험결과

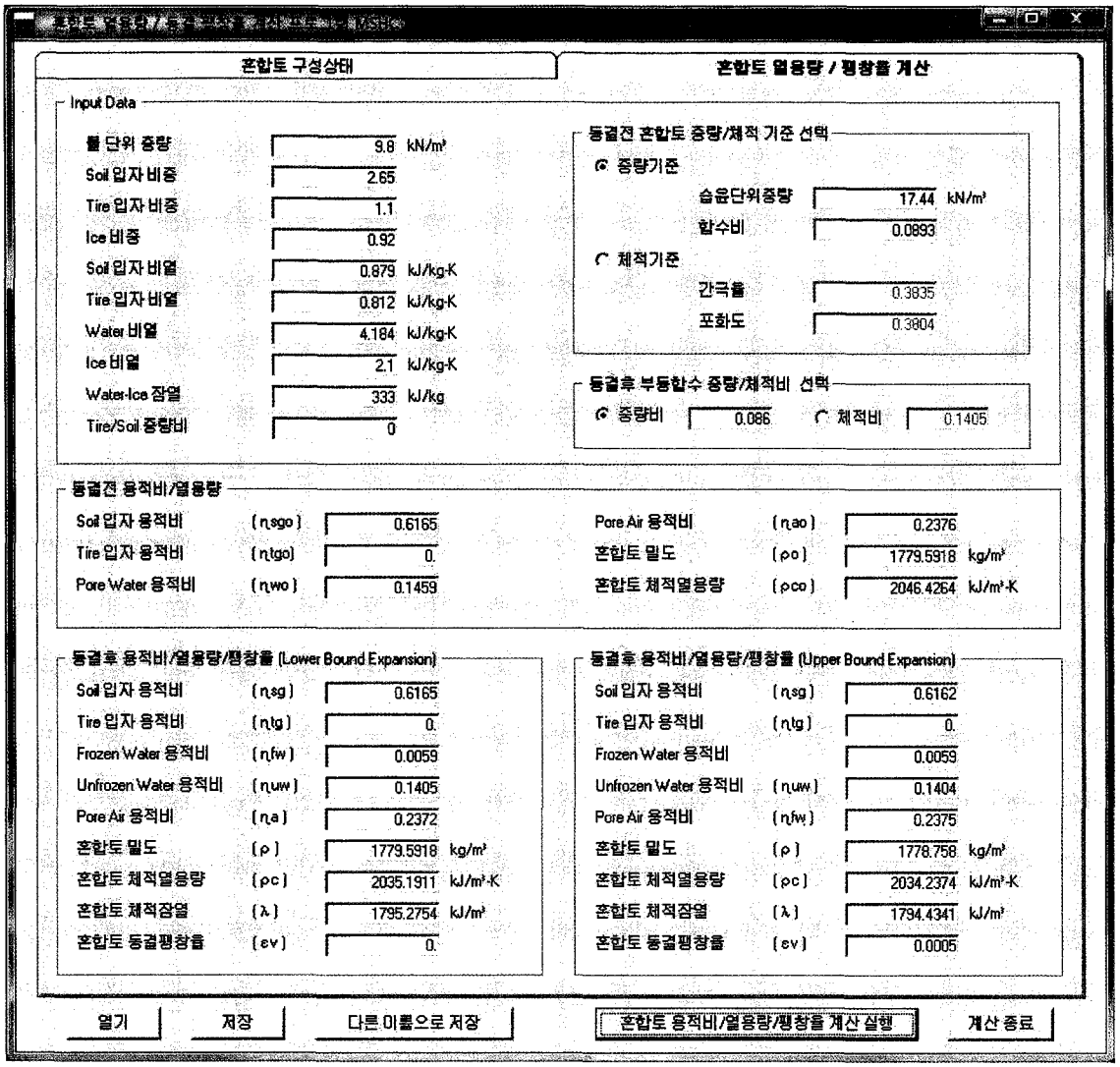


그림 9.2.10a 동결팽창 해석결과, Test No 1 (S = 38.42%) : ω_u = 8.6%

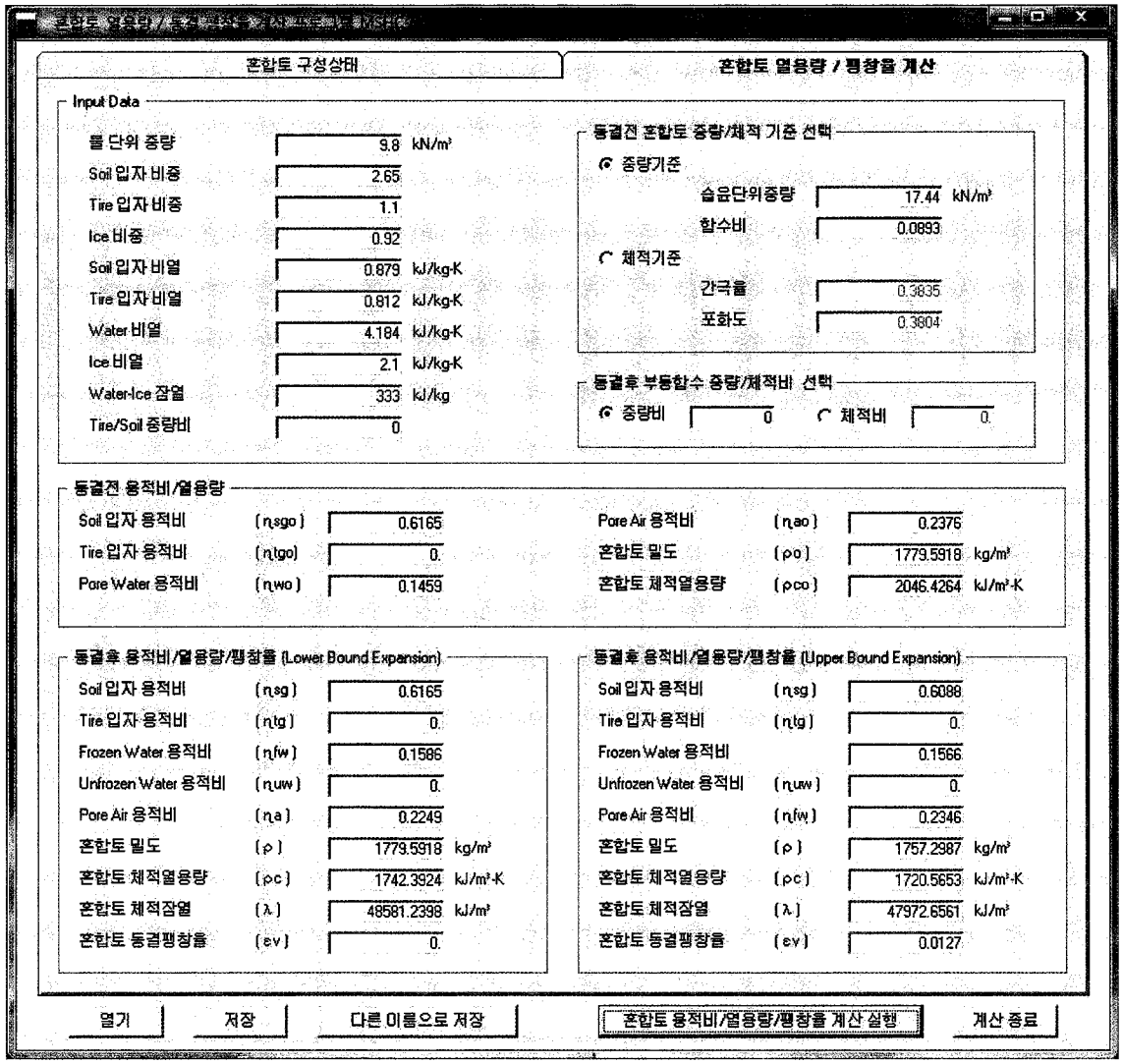


그림 9.2.10b 동결팽창 해석결과, Test No 1 (S = 38.42%) : ω_u = 0%

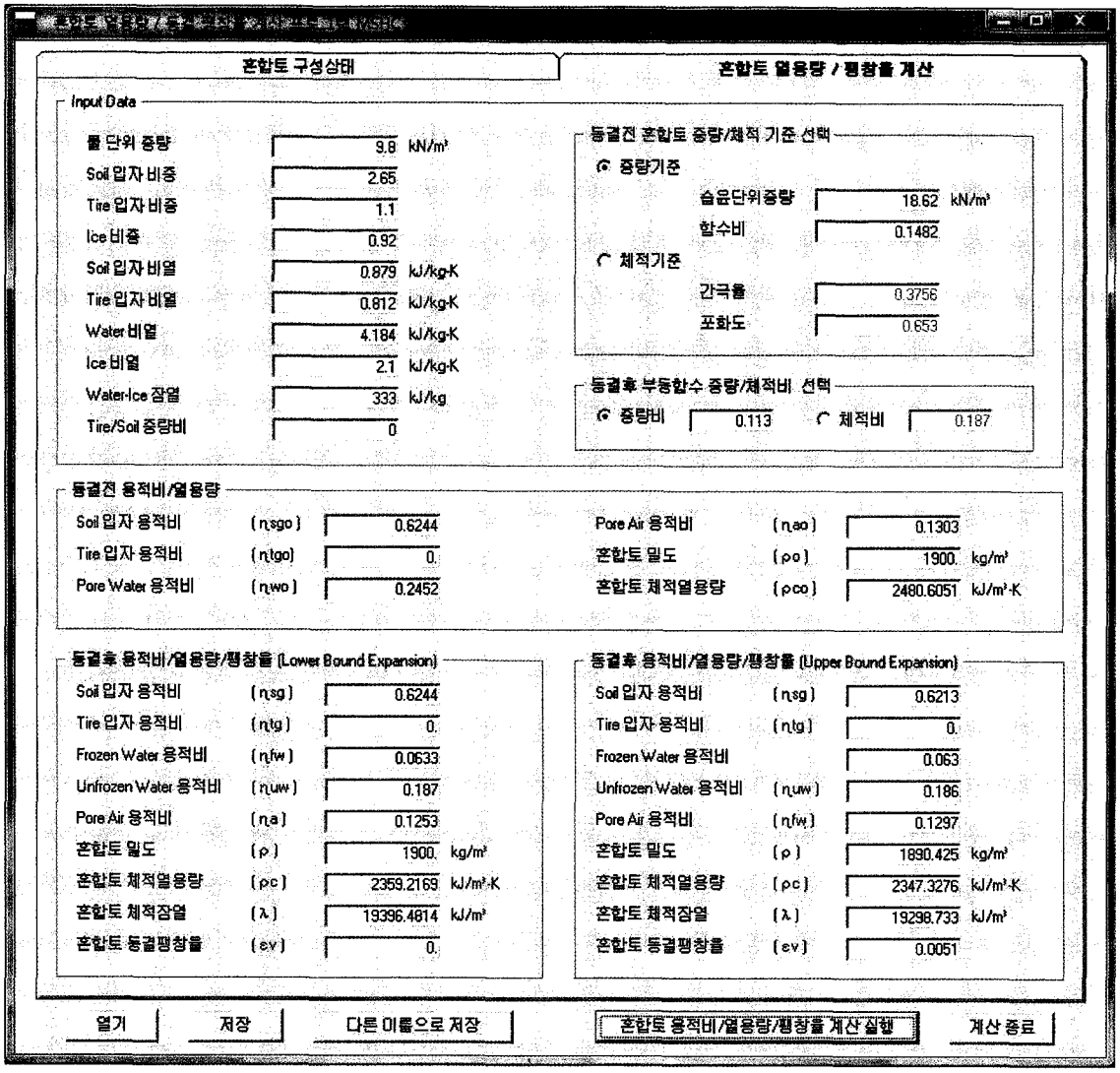


그림 9.2.11a 동결팽창 해석결과, Test No 2 (S = 65.24%) : ω_u = 11.3%

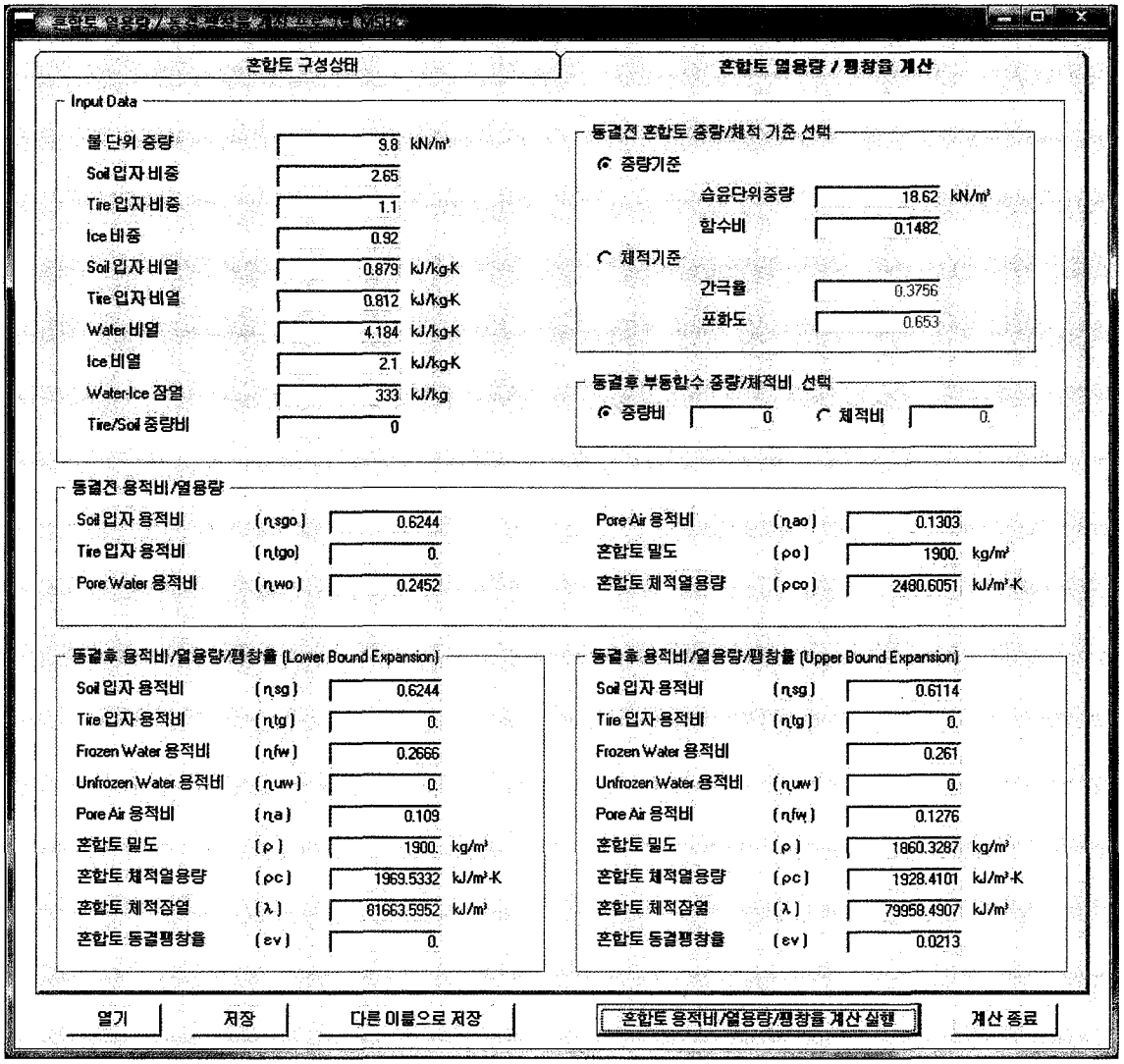


그림 9.2.11b 동결팽창 해석결과, Test No 2 (S = 65.24%) : ω_u = 0%

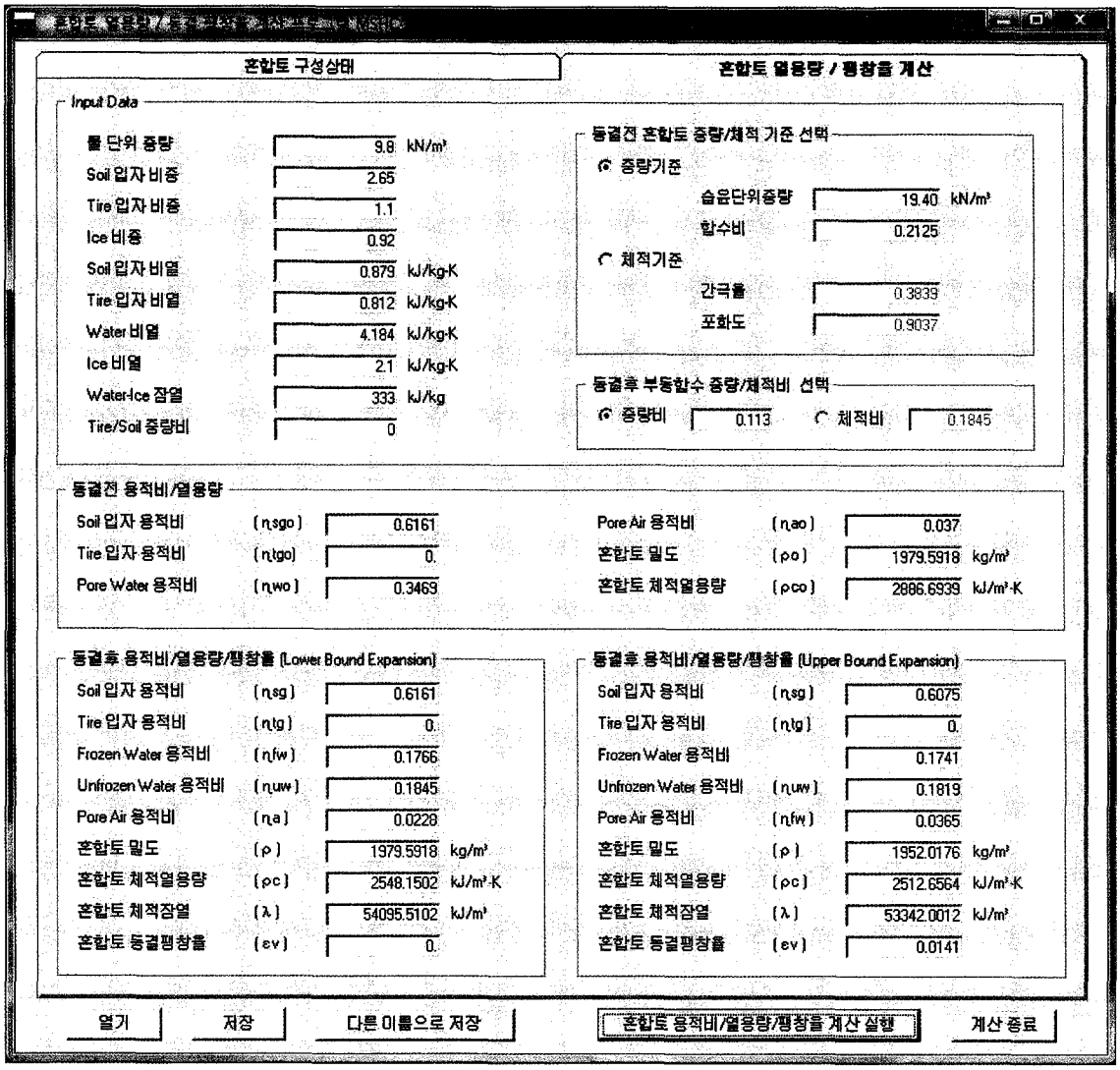


그림 9.2.12a 동결팽창 해석결과, Test No 3 (S = 91.43%) : ω_u = 11.3%

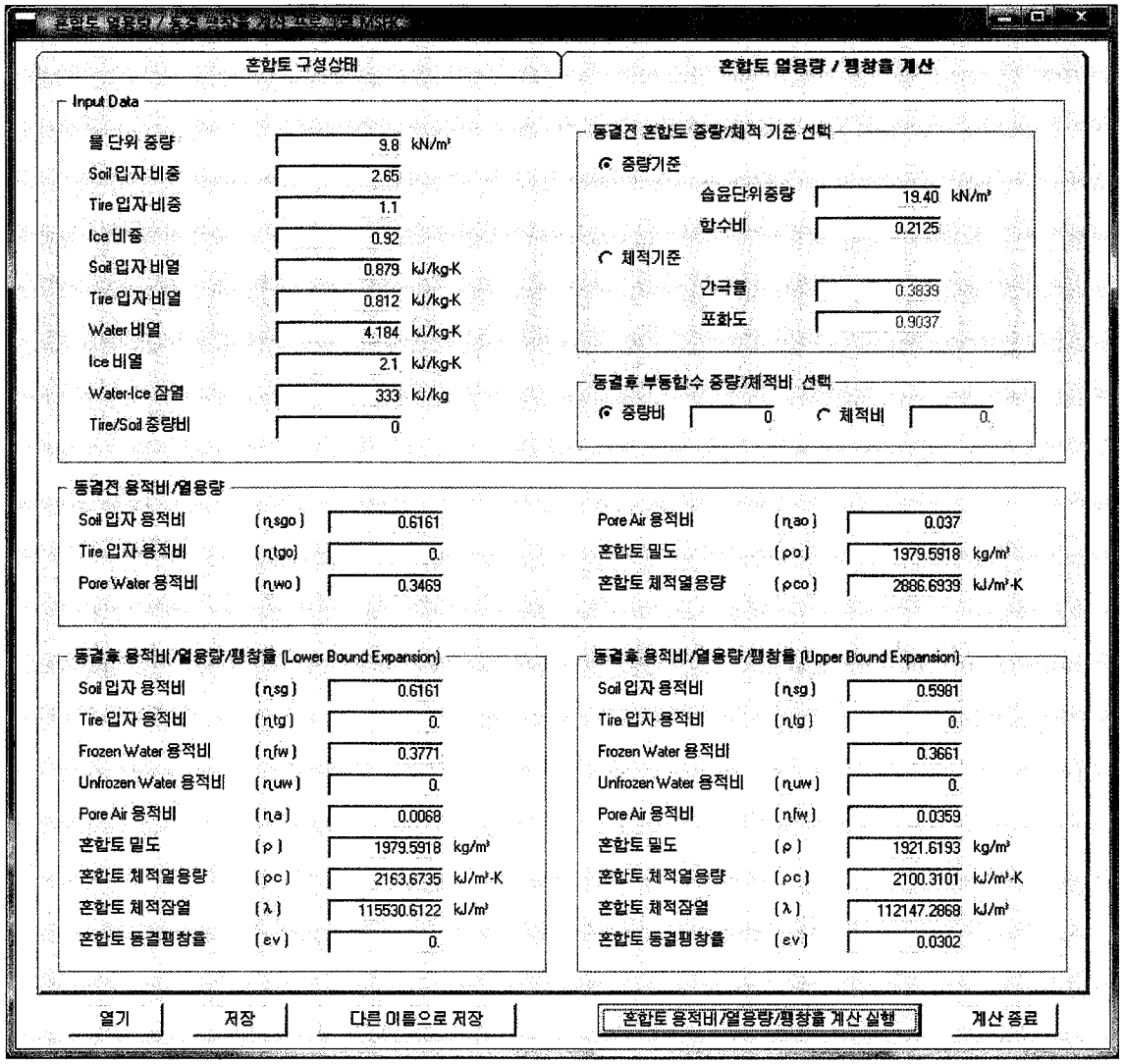


그림 9.2.12b 동결팽창 해석결과, Test No 3 (S = 91.43%) : ω_u = 0%

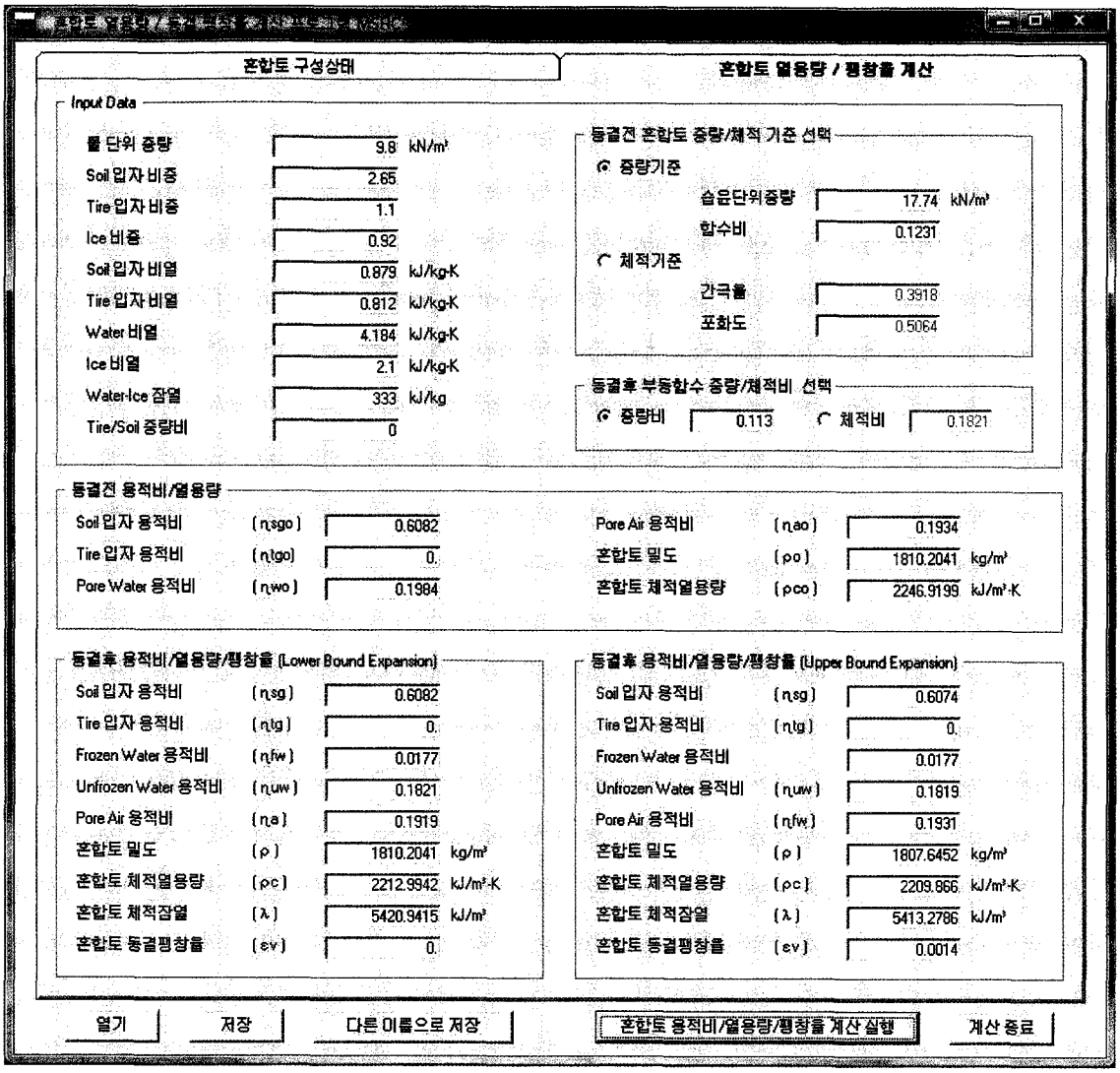


그림 9.2.13a 동결팽창 해석결과, Test No 4 (S = 50.50%) : ω_u = 11.3%

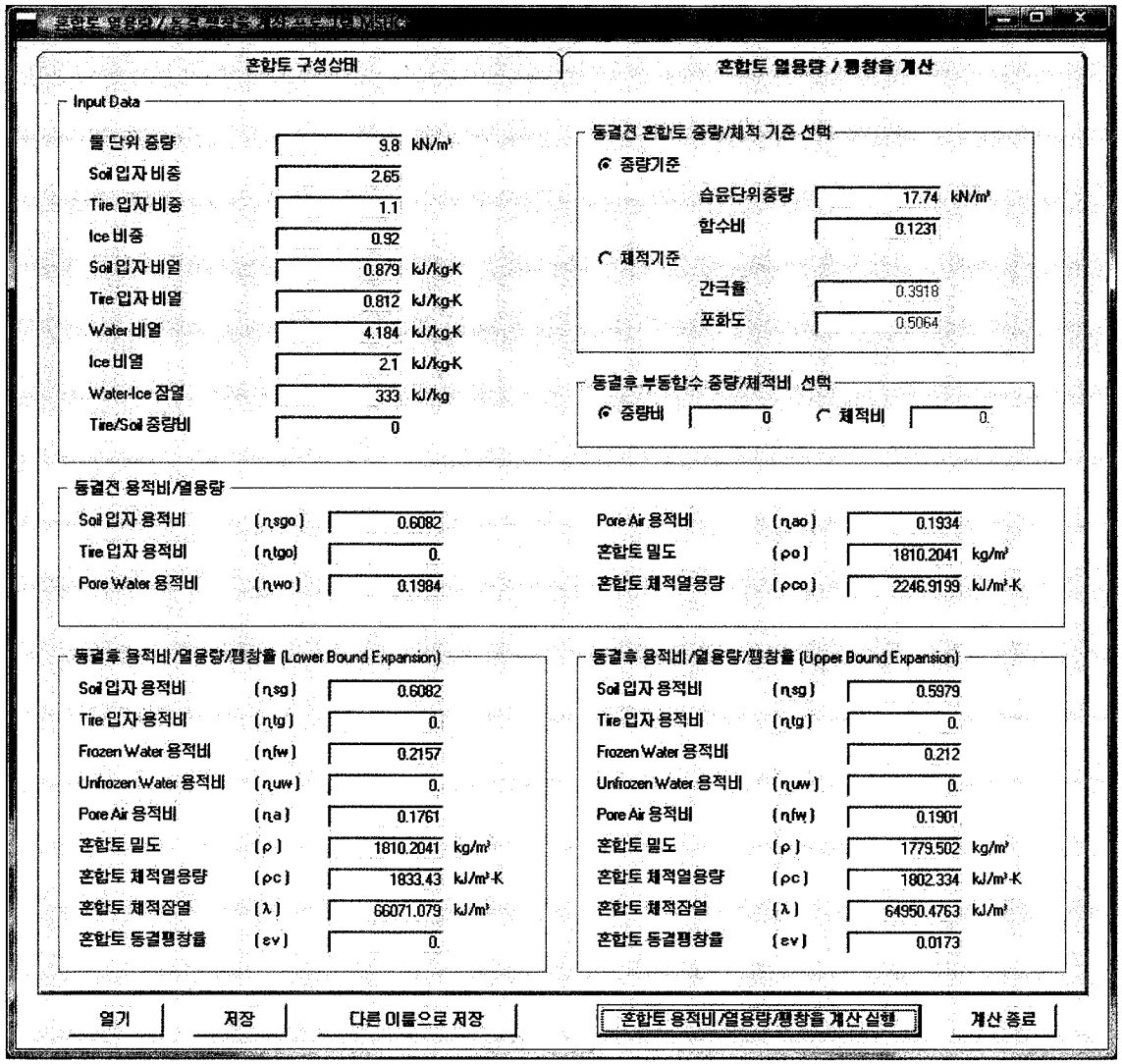


그림 9.2.13b 동결팽창 해석결과, Test No 4 (S = 50.50%) : ω_u = 0%

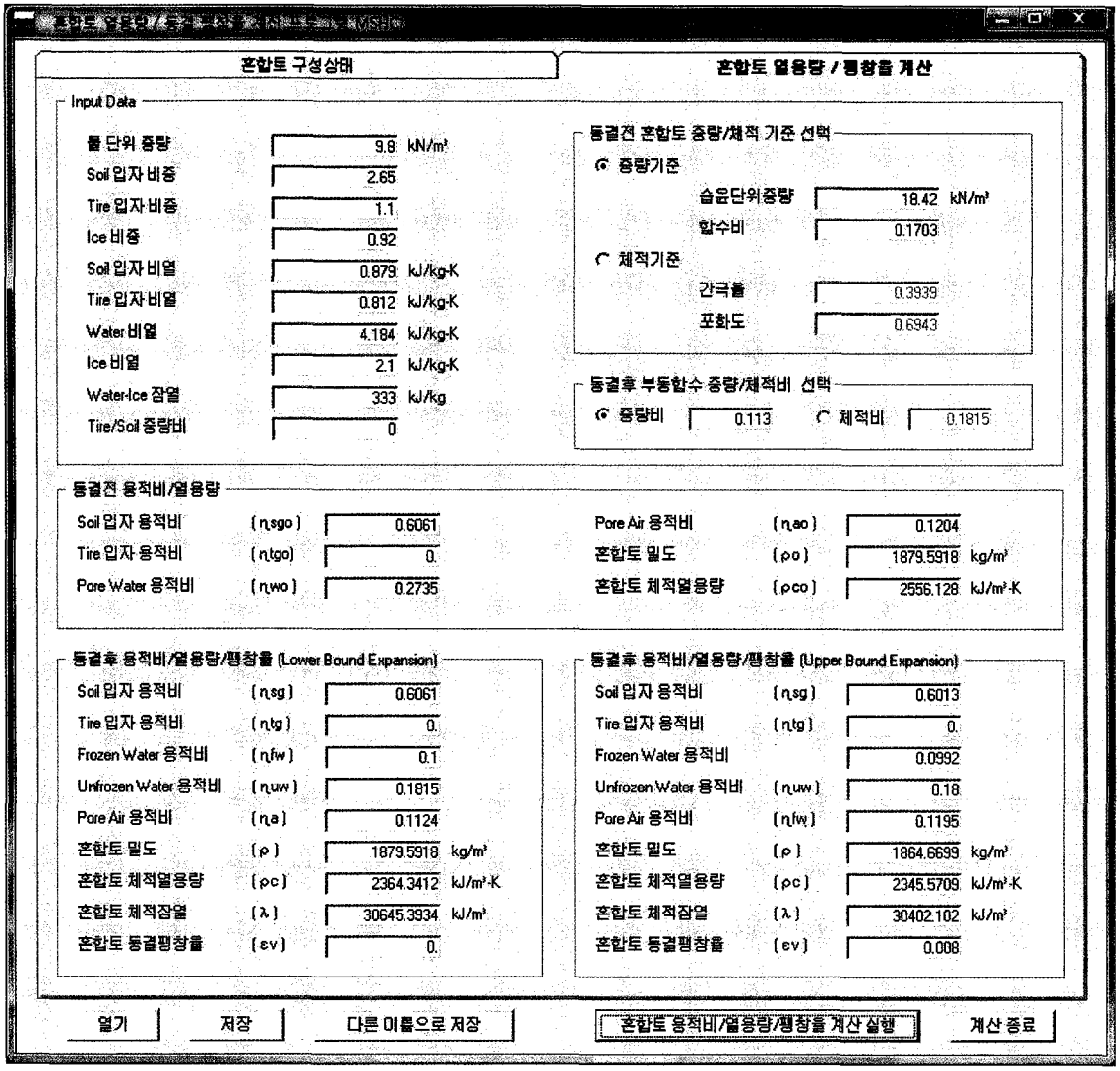


그림 9.2.14a 동결팽창 해석결과, Test No 5 (S = 65.32%) : ω_u = 11.3%



그림 9.2.14b 동결팽창 해석결과, Test No 5 (S = 65.32%) : ω_u = 0%

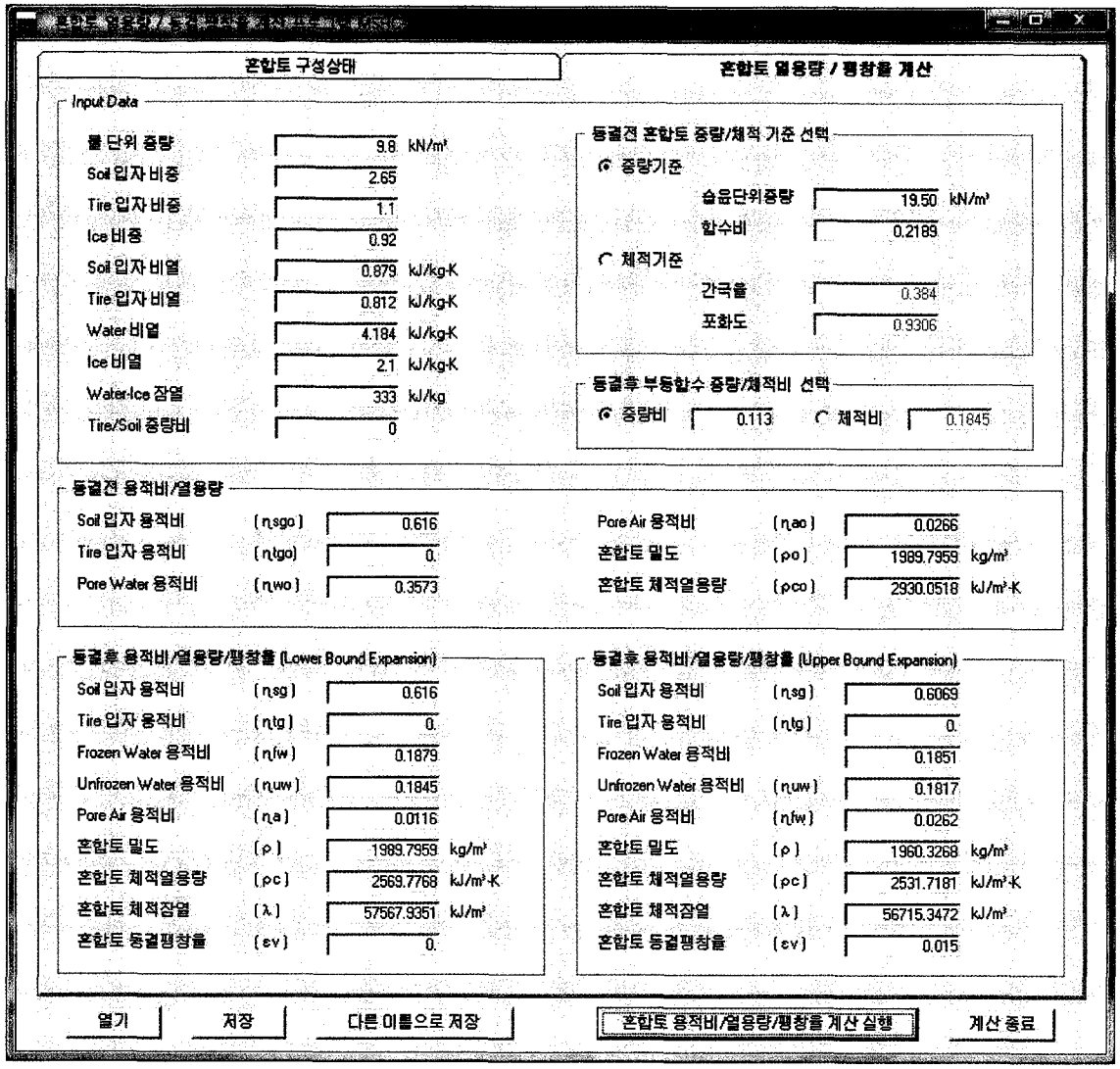


그림 9.2.15a 동결팽창 해석결과, Test No 6 (S = 92.7 %) : ω_u = 11.3%

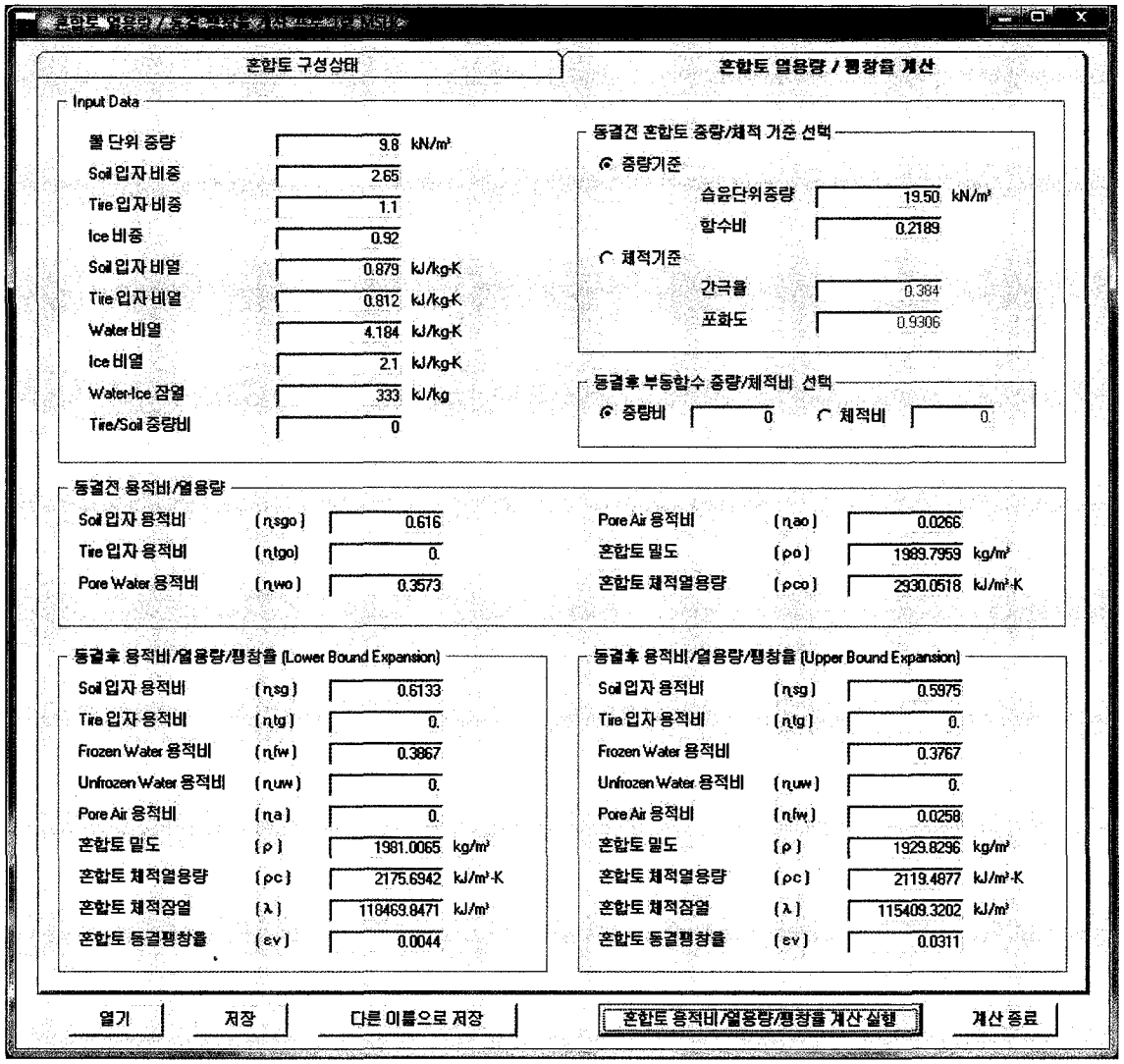


그림 9.2.15b 동결팽창 해석결과, Test No 6 (S = 92.7 %) : ω_u = 0%

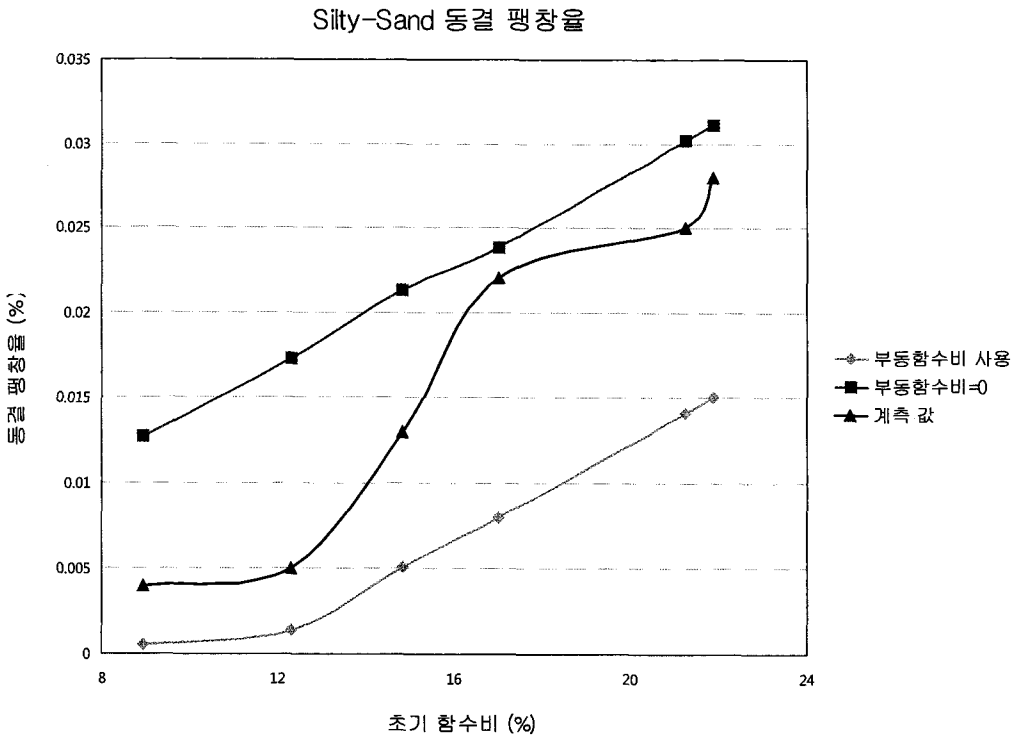


그림 9.2.16 동결팽창 실험과 해석결과 비교

제 3 절 동결토압 발생 Mechanism

제 2 절에서는 동상 (Frost heave)을 수반하지 않고 지하수의 이동이 없는 단위부피의 혼합토의 열용량과 동결팽창율 계산식을 유도하였다.

본 절에서는 일축 변형상태의 비동상성 원지반에 동결토압이 발생하는 주된 Mechanism을 규명하고자 한다.

1. 일축변형상태에서 동결토압

겨울철 지표면에 작용하는 영하의 찬공기로 인해 지중에 동결토압이 발생하는 Mechanism을 개략적으로 설명하기 위하여 그림 9.3.1과 같은 일축변형 (Uniaxial Strain) 상태의 균질한 탄성 Soil Column을 생각하였다.

따라서 지표면에서 깊이 y에서 수직응력 (σ_y)는

$$\sigma_y = \gamma_{to} \cdot y \qquad (9.3.1)$$

수평응력은

$$\sigma_x = K_o \cdot \sigma_y \qquad (9.3.2)$$

여기서 K_o은 정지토압계수이다.

다음은 그림 9.3.2의 두께 h_1의 Top Soil 층이 동결한다고 생각하면 Top Soil 층 내의 수분이 얼음으로 상전이 (Phase Change) 함에 따라 구속이 없는 지상으로 Δu_{y1} 만큼 팽창하지만 응력의 변화는 없다. 동결 완료후 Top Soil 층은 주변 벽면에 단단히 흡착되어 더 이상 Roller Boundary가 유지되지 않고 주변 마찰저항강도를 갖는다. 또한 동결후 Top Soil 층의 탄성계수는 동결전 탄성계수보다 상당히 큰 값을 갖는다. 따라서 여기서는 쉽게 설명하기위하여 동결 완료된 Top Soil 층을 강체로 생각하고 주변 벽면과는 Fixed Boundary로 생각하였다.

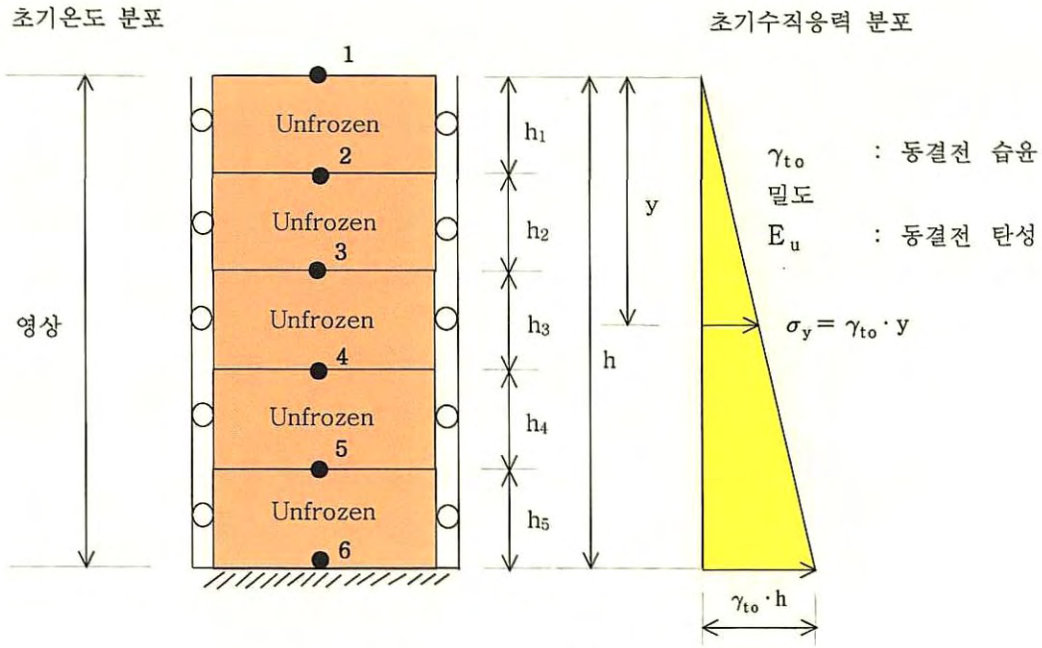


그림 9.3.1 동결전 초기응력분포 (Step 1)

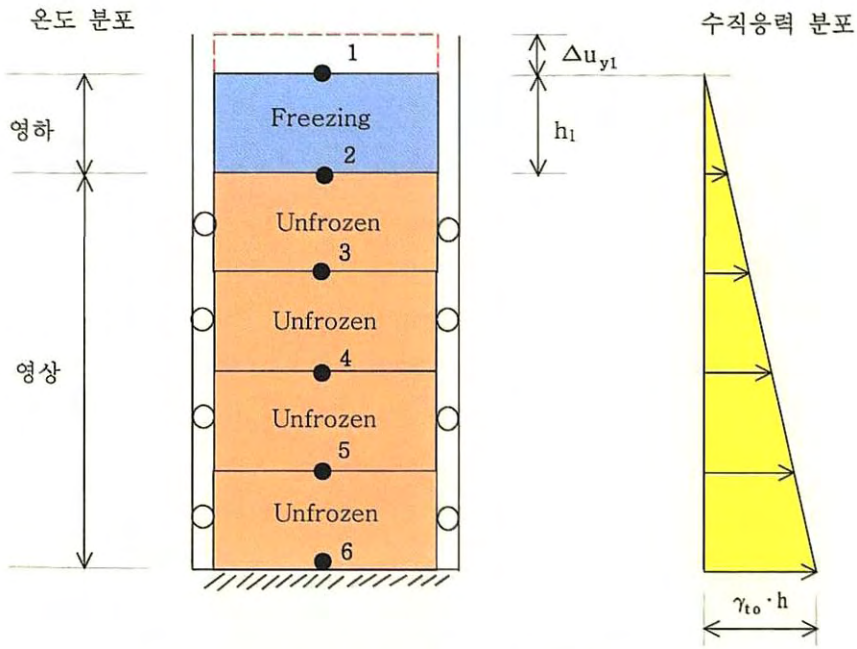


그림 9.3.2 Top Soil 층 동결 (Step 2)

다음은 그림 9.3.3의 두께 h_2의 Second Soil 층이 동결한다고 생각하면 Top Soil 층이 강체로 고정되어 있으므로 이 Top Soil 층을 지지대로 하여 하향으로 Δu_{y3} 만큼 동결 팽창할 것이다.

이 하향 변위 Δu_{y3}는 Second Soil 층 아래에 있는 Soil 층 들을 압축시켜 $\Delta\sigma_{y3}$ 만큼 수직응력과 $\Delta\sigma_{x3}$ 만큼 수평응력을 증가시킨다.

$$\Delta\sigma_{y3} = M_u \cdot \frac{\Delta u_{y3}}{(h_3 + h_4 + h_5)} \qquad (9.3.3)$$

$$\Delta\sigma_{x3} = \frac{\upsilon_u}{(1-\upsilon_u)} \cdot \Delta\sigma_{y3} \qquad (9.3.4)$$

식 9.3.3에서 M_u는 Constrained Modulus로 Young's Modulus ϵ_u, 포아송비 υ_u와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$M_u = \frac{\epsilon_u \cdot (1-\upsilon_u)}{(1+\upsilon_u)\cdot(1-2\cdot\upsilon_u)} \qquad (9.3.5)$$

식 9.3.3에서 두께 h_2인 Second Soil 층의 동결팽창변위 Δu_{y3}는 본문 제 2 절의 동결팽창율 ϵ_v를 사용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta u_{y3} = \epsilon_v \cdot h_2 \qquad (9.3.6)$$

다음은 그림 9.3.4의 두께 h_3의 Third Soil 층이 동결한다고 생각하면 Second Soil 층이 강체로 고정되어 있으므로 이 Second Soil 층을 지지대로 하여 하향으로 Δu_{y4} 만큼 동결 팽창할 것이다. 이 하향 변위 Δu_{y4}는 Third Soil 층 아래에 있는 Soil 층 들을 압축시켜 $\Delta\sigma_{y4}$ 만큼 수직응력과 $\Delta\sigma_{x4}$ 만큼 수평응력을 증가시킨다.

$$\Delta\sigma_{y4} = M_u \cdot \frac{\Delta u_{y4}}{(h_4 + h_5)} \qquad (9.3.7)$$

$$\Delta\sigma_{x4} = \frac{\upsilon_u}{(1-\nu_u)} \cdot \Delta\sigma_{y4} \qquad (9.3.8)$$

$$\Delta u_{y4} = \epsilon_v \cdot h_3 \qquad (9.3.9)$$

따라서 Third Soil 층 동결후 Node 4에서 수직토압 ($\Delta\sigma_{y4}$)와 수평토압 ($\Delta\sigma_{x4}$)는 다음과 같다.

$$\Delta\sigma_{y4} = \gamma_{to} \cdot (h_1 + h_2 + h_3) + \Delta\sigma_{y3} + \Delta\sigma_{y4} \qquad (9.3.10)$$

$$\Delta\sigma_{x4} = K_o \cdot \gamma_{to} \cdot (h_1 + h_2 + h_3) + \Delta\sigma_{x3} + \Delta\sigma_{x4} \qquad (9.3.11)$$

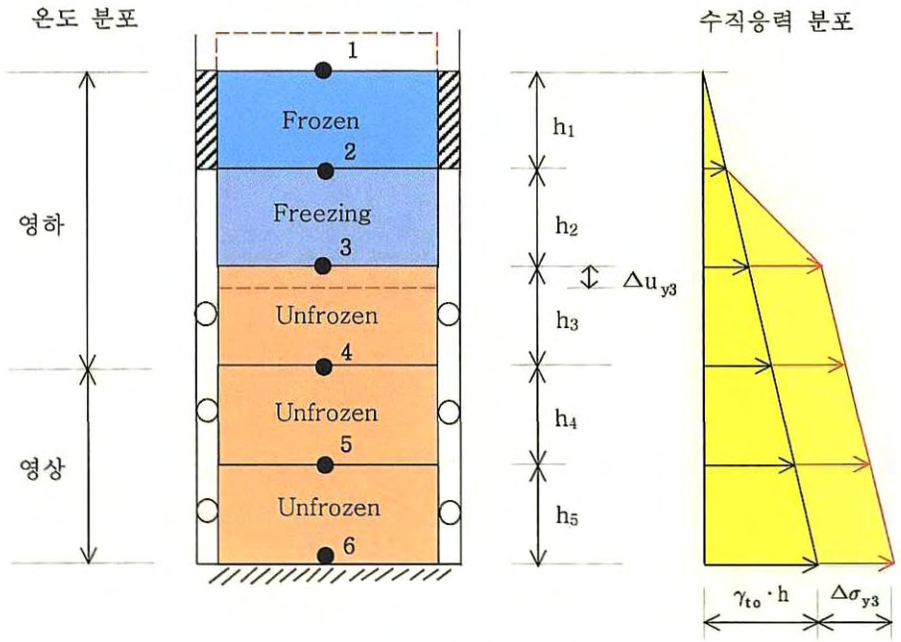


그림 9.3.3 Second Soil 층 동결 (Step 3)

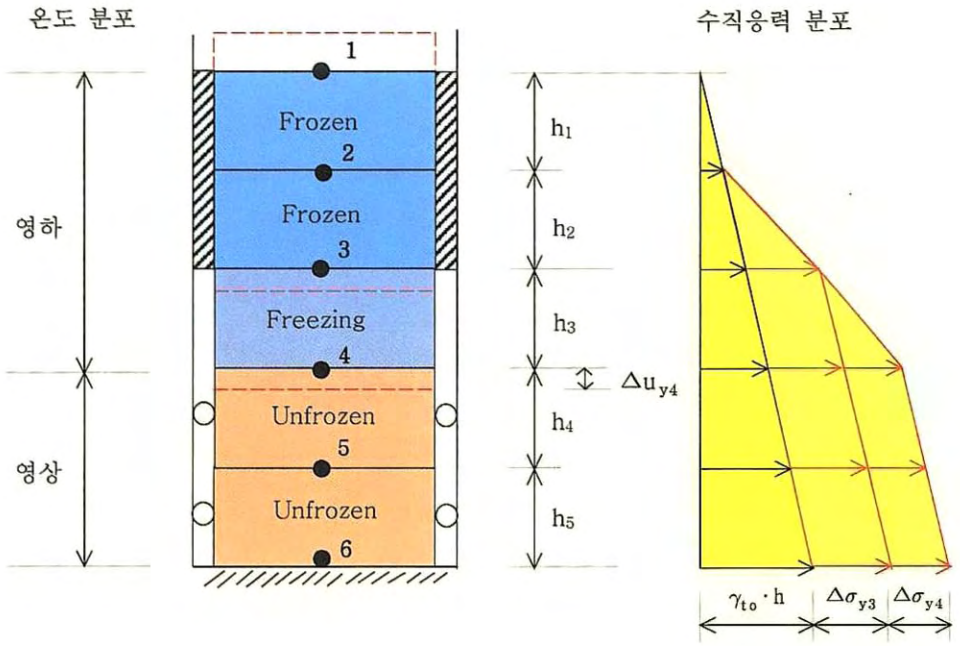


그림 9.3.4 Third Soil 층 동결

제 10 장 참고문헌

1. Ad hoc Panel on Polar Ice Coring, Committee on Glaciology, Polar Research Board Commission on Physical Sciences, Mathematics and Resources, National Research Council (1986), Recommendations for a U.S. Ice Coring Program. National Academy Press, Washington, D.C.

2. Andersland, O.B. and Anderson, D.M., Geotechnical Engineering for Cold Regions, McGraw-Hill, New York, 1978.

3. Andrew M. Taylor, Bracewell & Giuliani LLP. (2005), The Next Major Supply of

4. Blacic, J.D., Dreesen, D.S., Mockler, T. (2000), Report on Conceptual Systems Analysis of Drilling Systems for 200 m Depth Penetration and Sampling of the Martian Subsurface. Los Alamos National Laboratory.

5. Blouin, S.E, and Kim, K.J., "Use of Frozen Backfill as a Combination Egress/Heat Sink System for Deep Basing", Contract No. DE-AC01-82FE60199, October 1, 1983.

6. Brown, J., Christiansen, H.H. (2005), The international polar year: status of planned permafrost activities, Frozen Ground, 29, 3-9.

7. Casas, J.M., Sabat, F., Vilaplana, J.M., Pares, J.M., Pomeroy, D.M. (1998), A new portable ice core drilling machine: application to tephra studies. Journal of Glaciology, 44(146), 179-181.

8. Catton, I., and Edward, D.K., "Effect of Side Walls on Natural Convection Between Horizontal Plates Heated from Below," J. Heat Transfer 89, pp. 295-299, 1967.

9. Comini, G., Del Guidice, S., Lewis, R.W., and Zienkiewicz, O.C., "Finite Element Solution of Non-Linear Heat Conduction Problems with Special Reference of Phase Change," International Journal of Numerical Methods for Engineering, Vol. 8, pp. 613-624, 1974.

10. Craven, M., Allison, I., Brand, R., Elcheikh, A., Hunter, J., Hemer, M., Donoghue, S. (2004), Initial borehole results from the Amery ice shelf hot-water drilling project. Annals of Glaciology, 39, 531-539.

11. Crory, F.E. (1991), Construction Guidelines for Oil and Gas Exploration in Northern Alaska. U.S. Army Corps of Engineers Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire.

12. DeVries, D.A., "The Thermal Conductivity of Soil," Translated by Building Research Station (Library Communication No. 759), England.

13. Dittus, F.W., and Boelter, L.M.K., University of California Pub. Eng., 2, p. 443., 1930.

14. Dome-F Ice Core Research Group (1998), Preliminary investigation of palaeoclimate signals recorded in the ice core from Dome Fuji station, east Dronning Maud Land, Antarctica. Annals of Glaciology, 27, 338-342.

15. Donea, J., "On the Accuracy of Finite Element Solutions to the Transient Heat-Conduction Equation," International Journal of Numerical Methods for Engineering, Vol. 8, pp. 103-110, 1974.

16. Environmental Science and Technology Online News (2001), Design of natural gas pipeline questioned.

17. Farouki, O.T., Thermal Properties of Soils, CRREL Monograph 81-1, 1981.

18. Govoni, J.W., Tucker, I.W.B. (1989), An update on portable hot-water sea ice drilling. Cold Regions Science and Technology, 16(2), 175-178.

19. Griggs, G., et al. (2004), M/ADD Drill Project Progress Report. M/ADD Drill Project Team.

20. Heisler, M.P., Trans. ASME, 69, pp. 227-236, April, 1947.

21. Heitz, W.L., and Westwater, J.W., "Extension of the Numerical Method for Melting and Freezing Problems," Int. J. Heat Mass Transfer 13, pp. 1371-1375, 1970.

22. Hnatiuk, J. (1983), Exploration methods in the Canadian Arctic. Cold Regions Science and Technology, 7, 181-193.

23. Hsu, T.R., and Pizey, G., "On the Prediction of the Fusion Rate of Ice by Finite Element Analysis," Journal of Heat Transfer, Vol. 103, pp. 727-732, November, 1981.

24. Humphrey, N. (1990), Hot-water drilling and bore-hole closure in cold ice. Journal of Glaciology, 36(124), 287-298.

25. Johansen, O., "Thermal Conductivity of Soils," Ph. D. Thesis, Trondheim, Norway, 1975, (CRREL Draft Translation 637, 1977) ADA044002.

26. Jones, J.J.S. (1981), State-of-the-art report - engineering practice in artificial ground freezing. Engineering Geology, 18(1-4), 313-326.

27. Jons, J.A. (1975), Drilling problems in frozen ground. Pipeline and Gas Journal,

February, 50-57.

28. Jumikis, A.R. (1979), Some aspects of artificial thawing of frozen soils. Engineering Geology, 13, 287-297.

29. Kersten, M.S., Laboratory Research for the Determination of the Thermal Properties of Soils, ACFEL Technical Report 23, AD 712516, 1949.

30. Lai Yuanming, Zhang Xuefu, Xiao Jianzhang, Zhang Shujuan, and Liu Zhiqiang, "Nonlinear Analysis For Frost - Heaving Force of Land Bridges on Quing - Tibet Railway in Cold Regions. Journal of Thermal Stresses, 28:317-331,2005.

31. Lees, M., "A Linear Three-Level Difference Scheme for Quasilinear Parabolic Equations," Maths. Comp., Vol. 20, pp. 516-522, 1966.

32. Linell, K.A., Lobacz, E.F. (1980), Design and Construction of Foundations in Areas of Deep Seasonal Frost and Permafrost. U.S. Army Corps of Engineers Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire.

33. Luikov, A.V., Analytical Heat Diffusion Theory, Academic Press, New York, 1968.

34. Mancinelli, R.L. (2000), Accessing the Martian deep subsurface to search for life. Planetary and Space Science, 48(11), 1035-1042.

35. Miller RD. "Frost heaving in non-colloidal soils" Third International Conference on Permafrost, Edmonton, 1974.

36. Morgan, V.I., Wookey, C.W., Li, J. Ommen, T.D., Skinner, W., Fitzpatrick, M.F. (1997), Site information and initial results from deep ice drilling on Law Dome, Antarctica. Journal of Glaciology, 43(143), 3-10.

37. Natural Gas-The Alaska Gas Pipeline, Austin, Texas.

38. Osterkamp, T.E., Payne, M.W. (1981), Estimates of permafrost thickness from well logs in northern Alaska. Cold Regions Science and Technology, 5(1), 13-27.

39. Poplin, J.P., Ralston, T.D., Lawrence, W.S. (1987), A thermal ice drill for profiling thick multiyear ice. Cold Regions Science and Technology, 14(1), 1-11.

40. Radoslaw L. Michalowski and Ming Zhu, "Frost heave modeling using porosityrate function", International Journal For Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2006; vol 30:703-722.

41. Sakhalin Energy Investment Co. Ltd. (2003), The Trans Alaska Pipeline System

(TAPS) and Comparison with the Sakhalin II Pipeline Transportation System.

42. Sellmann, P.V. (1972), Geology and Properties of Materials Exposed in the USA CRREL Permafrost Tunnel. U.S. Army Corps of Engineers Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire.

43. Somerton, W.H., "Some Thermal Characteristics of Porous Rocks," Journal of Petroleum Technology, Technical Note 2008, May, pp. 61-64, 1958.

44. Swinzow, G.K. (1969), Certain aspects of engineering geology in permafrost. Engineering Geology, 3, 177-215.

45. Talalay, P.G., Removal of cuttings in deep ice electromechanical drills. Cold Regions Science and Technology, In Press, Corrected Proof.

46. Talalay, P.G. (2003), Power consumption of deep ice electromechanical drills. Cold Regions Science and Technology, 37(1), 69-79.

47. Tucker, I.W.B., Govoni, J.W. (1987), A portable hot-water ice drill. Cold Regions Science and Technology, 14(1), 57-64.

48. Ueda, H.T., Garfield, D.E. (1969), The USA CRREL drill for thermal coring in ice. Journal of Glaciology, 8(53), 311-314.

49. Whittaker, A. (1985), Coring Operations; Procedures for Sampling and Analysis of Bottonhole and Sidewall Cores. Kluwer Academic Publishers, Boston.

50. Wolfe, L.M., and Thieme, J.O., "Physical and Thermal Properties of Fronzen Soil and Ice," Journal of the Society Petroleum Engineers, pp. 67-72, March, 1964.

51. Zagorodnov, V., Thompson, L.G., Kelley, J.J., Koci, B., Mikhalenko, V. (1998), Antifreeze thermal ice core drilling: an effective approach to the acquisition of ice cores. Cold Regions Science and Technology, 28(3), 189-202.

52. Zienkiewicz, O.C., The Finite Element Method in Engineering Science, McGraw-Hill, London, 1971.

53. 고의찬, 혼합 폐플라스틱의 재활용 기술 개발, 한국자원재생공사, 1998.

54. 김동호, 김재환, 허탁 "재생 폴리우레탄을 이용한 폴리우레탄 복합재료의 특성", 폴리머, 한국고분자학회, Vol. 20, No. 2, 1996, pp. 364~377.

55. 김륜관, 농업용 폐비닐을 이용한 Wood-Polymer Composites(WPC) 개발에 관한 연구, 광주과학기술원, 신소재공학과, 1997.

56. 김무한 (1978), 한중콘크리트 기상조건과 초기 동해방지에 관한 연구 , 일본쯔쿠바대학.
57. 김영진, 허승범, 홍성완 (1992), 흙의 동상 특성에 관한 실험 연구, 대한토목학회 1992년도 학술발표회 개요집 (I), pp 425 ~ 428
58. 김영진, 김학삼, 홍성완, 조천환 (1993), 동토지역 기초구조물의 최적설계 시공기법 개발 (II), 한국건설기술연구원 연구보고서.
59. 김영진, 폐비닐 골재의 특성에 관한 연구, 한국건설기술연구원, 1999.
60. 김영진, 배정호, 송원근 (2002), 동결토의 온도변화에 따른 부동수분과 초음파 속도의 변화에 관한 실험적 연구, 대한토목학회논문집.
61. 김영진 (2005), 부동수가 동토의 성질에 미치는 영향, 한국지반환경공학회지.
62. 김영진, 홍승서, 강재모(2005), "남극 세종기지에서 채취한 흙시료의 실험적 연구", 한국건설기술연구원 연구성과 발표회 논문집.
63. 김예동(2004), 극지의 활용, 토목의 기회-전환기의 새로운 영역 제52권 제9호, pp22~88
64. 김정호, "폐플라스틱의 재활용 기술 현황", 화학공업과 기술, 한국화학공학회, Vol. 12, No. 1, 1994. pp. 46~51.
65. 김정호, 김의식, 지해성, 고의찬, "폴리에틸렌, 폴리프로필렌 및 PET 혼합폐플라스틱의 재활용에 관한 연구", 한국폐기물학회지, 한국폐기물학회, Vol. 14, No. 8, 1997, pp. 895~900.
66. 김정호, "혼합 폐플라스틱 물질 재활용 기술개발 동향", 제2회 재활용 국제 심포지움, 산업폐기물 재활용기술개발사업단, 2002, pp. 97~116.
67. 김진현, "미국의 폐플라스틱 재활용 현황", 자원리싸이클링, 한국자원리싸이클링학회, Vol. 6, No. 2, 1997, pp. 70~77.
68. 김혜태, 혼합 플라스틱 발생실태 및 재활용기술 현황에 관한 조사연구, 한국자원재생공사, 1996.
69. 건설교통부 "응력부식 균열을 동반하는 수도 강관의 동절기 구조적 파손원인 규명" 2002.12.
70. 과학기술부 (2000), 선도기술개발사업 성과분석 및 추진방향에 관한 연구, 과학기술부 보고서.
71. 나종태 (1993), 우리나라 동결심도와 정수C에 관한 연구, 동국대 석사학위 논문.
72. 박철환 (2001), 남극대륙 빈판대의 터널건설, 한국암반공학회, Vol 11, No. 3, pp. 200-205.
73. 산업자원부 정책연구보고서, "러시아 동북아 지역 석유 수출시장 확장과 역내 국가의 동시베리아 석유자원 도입·활용 전략", 2006.04

74. 산업자원부 정책연구보고서, "미국의 동시베리아·극동지역 에너지개발 참여 구상과 동북아 에너지 협력", 2006.04
75. 손원근, 박수길, 김영철, 신동근, "폴리우레탄으로 강인화한 폐놀수지와 목분 복합체의 물성", 화학공업과 기술, 한국화학공학회, Vol. 9, No. 2, 1998, pp. 238~242.
76. 여종기, "폐플라스틱의 재활용 기술", 자원리싸이클링, 한국자원리싸이클링학회, Vol. 6, No. 2, 1997, pp. 22~28.
77. 윤태호, 농업용 폐비닐의 재활용에 관한 연구, 광주과학기술원, 1997.
78. 정영숙, 폐비닐의 재활용에 있어서 무기성 Filler의 첨가에 따른 물성의 변화, 중앙대학교 건설대학원, 1994.
79. 한국가스공사 (1999), 극한지역에서의 세계 주요 PNG 배관 설계 및 유지보수 사례연구, 한국가스공사 연구 개발원 보고서.
80. 한국가스공사 (2005), 對러시아 천연가스사업 추진 계획, 한국가스공사 보고서.
81. 한국가스공사, "동북아 천연가스 파이프라인의 경제성 분석 및 역내국가간 협력방안에 관한 연구", 1997.09
82. 한국건설기술연구원 "차량하중 등에 의해 동결지반 매설관에 작용하는 응력분포에 관한 실험적 연구" 2001.6.
83. 현대건설주식회사 (1993), 남극과학기지공사 건설지, 현대건설주식회사 보고서.
84. 한국폐플라스틱연료화협동조합, "국내 폐플라스틱 재활용업체 현황과 시장분석", 월간폐기물21, (주)일보코리아, Vol. 1, No.7, 2000, pp. 38~43.
85. 홍성완 (1989), 영구동토와 토질공학적 문제점, 특별강연, 대한토질공학회 제5회 정기총회 특별강연집, 45p.
86. 홍성완 (1989), 한지와 영구동토, 대한토목학회지, 제37권 제3호, pp.46-64
87. 홍성완, 조천환 (1991), 지구 온난화에 따른 동토지역에서의 기초 , 구조물 및 환경문재 국제세미나, 해외출장 복명서, 한국건설기술연구원.
88. 홍성희, 민경섭, 윤호석, 정한석, "소각분진과 폐비닐을 이용한 재활용 합성수지 개발", 대구시보건환경연구원, 2000, pp. 43~67.

여 백

부록 1

SMAP-T2

User's Manual

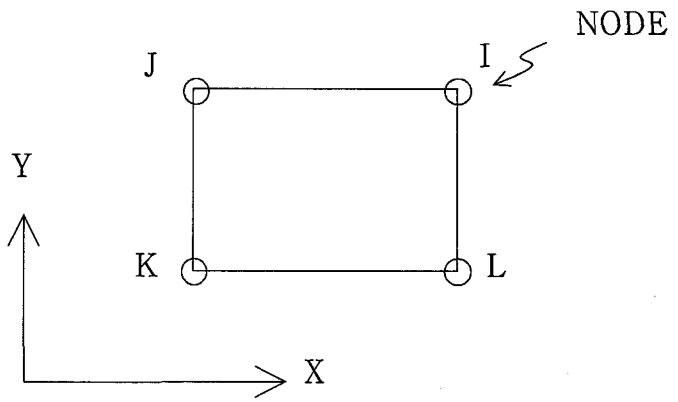
여 백

Card Group	Input Data and Definitions
1 Title	1.1 **TITLE** TITLE : Title (49 characters maximum)
2 Analysis	2.1 **IP, NBAND** IP = 0 Axisymmetric geometry. (Y-axis is axis of symmetry) = 1 Plane geometry. NBAND = 0 Use user-defined node numbers. = 1 Renumber to reduce bandwidth.

Card Group	Input Data and Definitions
3 Computation Parameters	3.1 Cycles and Interval to Update Global Matrix **NCYCL, NST** NCYCL : Number of solution cycles. (Total number of time steps) NST : Number of time steps for which the global conductivity and capacity matrix are assumed to be constant.
	3.2 Numerical Time-Integration Method. **LEE, TETA** LEE = 0 Two-point difference sheme with θ. = 1 Three-point scheme starting with θ. TETA (θ) = 1.0 Backward difference scheme. = 2/3 Galerkin difference scheme. = 0.5 Crank-Nicolson difference scheme.
	3.3 Time Steps 3.3.1 **IDELT, DT** IDELT = 0 Constant time step (Δt). = -1 Every 100 steps use new time step at Card 3.3.2. = 1 Every step use new time step at Card 3.3.2. DT : Constant time step (Δt) for IDELT = 0.
	3.3.2 (If IDELT = 0, go to Card Group 4) **NUMDT** **DT_1, DT_2, DT_3, ..., DT_{NUMDT}** NUMDT : Number of specified time steps. DT_i : Specified time step.

Card Group	Input Data and Definitions
4 Coordinate	4.1 **NUMNP** NUMNP : Total number of nodal points.
	4.2 **CMFAC, XREF** CMFAC : Coordinate multiplication factor. XREF : Reference number to be added to all X coordinates. *Note* : new X and Y coordinates are CMFAC * (X+XREF) and CMFAC * Y respecitively.
	4.3 NUMNP Cards ┌ $NODE_1$, ID_1, IDF_1, X_1, Y_1, T_1, CF_1 └ - - - - - - - NODE : Node number. ID = 0 Specified external heat flow. = 1 Specified temperature. IDF : Identification number of the time dependent functions at Card 9.4. If IDF = 0, the external heat flow is zero for all times. X, Y : X and Y coordinates respectively. T : Initial temperature. CF : Coefficient of time dependent function for heat flow or temperature at the node.

Card Group	Input Data and Definitions
5 Continuum Element	5.1 **NCONT** NCONT : Total number of continuum element.
	5.2 Material Property Data 5.2.1 NTNC NTNC : Number of material property set for continuum elements.
	For Each Material Property Set 5.2.2.1 TITLE TITLE : Material name. (50 characters maximum)
	5.2.2.2 MATNO, MATFN, COND, SPH, RO, TLF, TRF, HLT MATNO : Material identification number. MATFN : Temperature dependent function ID number for nonlinear conductivity and capacity at Card 9.5. COND : Conductivity for MATFN=0. SPH : Specific heat for MATFN=0. RO : Density for MATFN=0. TLF : Lower bound freezing point for MATFN > 0. TRF : Upper bound freezing point for MATFN > 0. HLT : Latent heat for MATFN > 0.

Card Group	Input Data and Definitions
5 Continuum Element	5.3 NCONT Cards ┌ NEL, I, J, K, L, MATNO, IDH └ – – – – – – – – NEL : Element number. I, J, K, L : Element corner node numbers. MATNO : Material property number. IDH : Time dependent function ID number for heat generation at Card 9.4. 
6	Not Available
7	Not Available
8	Not Available

Card Group	Input Data and Definitions		
9 Boundary Conditions	9.1 Freezing Pipe Property	9.1.1 **NTNP** NTNP : Number of property set for freezing pipe. If NTNP = 0, go to Card Group 9.2.	
		For Each Property Set	9.1.2.1 **TITLE** TITLE : Property name. (50 characters maximum)
			9.1.2.2 **MATP, FLOW, SPHL, ROL, HTC** MATP : Property ID number. FLOW : Flow of liquid (Volume/Sec). SPHL : Specific heat of liquid. ROL : Density of liquid. HTC : Heat transfer coefficient from the pipe to the solid body.

Card Group	Input Data and Definitions		
9 Boundary Conditions	9.2 Freezing Pipe Specifications	9.2.1 **NPIPE** NPIPE : Number of pipe groups. If NPIPE = 0, go to Card Group 9.3.	
		For Each Pipe Group	9.2.2.1 **TITLE** TITLE : Group name. (50 characters maximum)
			9.2.2.2 **IDP, MATP, IDFNP, NODEP** $N_1, N_2, N_3, ..., N_{NODEP}$ IDP : Pipe ID number. MATP : Pipe property number at Card 9.1.2. IDFNP : Time dependent function ID number for the liquid temperature at the beginning of the pipe at Card Group 9.4. NODEP : Number of nodes along the pipe. $N_1, N_2, N_3, ..., N_{NODEP}$: Node numbers along the pipe.

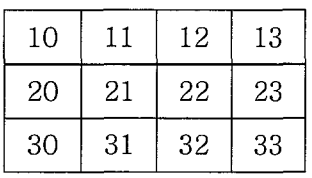
Card Group	Input Data and Definitions		
9 Boundary Conditions	9.3 Convective Boundary Specifications	9.3.1 **NCONV** NCONV : Number of convective boundary groups. If NCONV = 0, go to Card Group 9.4.	
		For Each Convective Boundary Group	9.3.2.1 **TITLE** TITLE : Group name. (50 characters maximum)
			9.3.2.2 **IDC, IDFNC, IDFNT, NODEC** $N_1, N_2, N_3, ..., N_{NODEC}$ IDC : Convective boundary ID number. IDFNC : Time dependent function ID number for convective heat transfer coefficient at Card Group 9.4. IDFNT : Time dependent function ID number for the external temperature at Card Group 9.4. NODEC : Number of nodes along the convective boundary. $N_1, N_2, N_3, ..., N_{NODEC}$: Node numbers along the convective boundary.

Card Group	Input Data and Definitions	
9 Boundary Conditions	9.4 Time Dependent Function Specifications	9.4.1 **NTIMF, NTIM** NTIMF : Number of time dependent functions. NTIM : Number of time points. If NTIMF = 0, go to Card Group 9.5.
		9.4.2 $\begin{matrix} \text{TIME}_1, & \text{FN}_{1,1}, & \text{FN}_{2,1} & \cdots, & \text{FN}_{\text{NTIMF},1} \\ \text{TIME}_2, & \text{FN}_{1,2}, & \text{FN}_{2,2} & \cdots, & \text{FN}_{\text{NTIMF},2} \\ - & - & - & - & - \\ - & - & - & - & - \\ \text{TIME}_{\text{NTIM}}, & \text{FN}_{1,\text{NTIM}}, & \text{FN}_{2,\text{NTIM}}, & \cdots, & \text{FN}_{\text{NTIMF},\text{NTIM}} \end{matrix}$ TIME_j : Specified time. $\text{FN}_{i,j}$: Value of Function i at specified time j.

Card Group	Input Data and Definitions	
9 Material Property Data	9.5 Temperature Dependent Conductivities and Capacities	9.5.1 **NTEMF, NTEM** NTEMF : Number of temperature dependent conductions and capacities. NTEM : Number of temperature points. If NTEMF = 0, go to Card Group 10.
		9.5.2 $TEMP_1$ $COND_{1,1}$ $ROC_{1,1}$ $COND_{2,1}$ $ROC_{2,1}$ – – $TEMP_2$ $COND_{1,2}$ $ROC_{1,2}$ – – – – – – $TEMP_{NTEM}$ $COND_{1,NTEM}$ $ROC_{1,NTEM}$ $COND_{2,NTEM}$ $ROC_{2,NTEM}$ – – $COND_{NTEMF,NTEM}$ $ROC_{NTEMF,NTEM}$ $TEMP_j$: Specified temperature. $COND_{i,j}$: Conduction of Function i at specified temperature $TEMP_j$. $ROC_{i,j}$: Product of specific heat and density of Function i at specified temperature $TEMP_j$.

Card Group	Input Data and Definitions
10 Requested Output	10.1 **NTPRNT** NTPRNT : Number of cycles between output data print.
	10.2.1 **NHPEL** NHPEL : Number of elements at which temperature time histories are requested.
	10.2.2 If NHPEL = 0, skip the following Card. NEL_1, NEL_2, ..., NEL_{NHPEL} NEL_i : Element number to be printed.
	10.3.1 **NHPMT** NHPMT : Number of nodes at which temperature time histories are requested.
	10.3.2 If NHPMT = 0, skip the following Card. $NODE_1$, $NODE_2$, ..., $NODE_{NHPMT}$ NODE : Node numbers to be printed.
	10.4.1 **NTIME** NTIME : Number of times at which temperature profiles are rquested.
	10.4.2 If NTIME = 0, skip the following Card. $TIME_1$, $TIME_2$, ..., $TIME_{NTIME}$ TIME : Time to be printed.

Card Group	Input Data and Definitions
11 PLTDS Plot Informations	11.1 **NPTYPE** NPTYPE = 0 End of Plotting output. = 1 Finite element mesh/element number. = 2 Contours of element temperature. If NPTYPE = 0, skip the rest of Card Group 11.
For NPTYPE = 1 (Finite Element Mesh)	11.2.1 **TITLE** TITLE : Any title of up to 70 characters.
	11.2.2 **IUNIT** IUNIT = 1 Inch = 2 Cm = 3 User-specified unit.
	11.2.3 (These Cards are required only if IUNIT = 3) **NCHR** **LABEL** NCHR : Number of characters for mesh unit. LABEL : Name of mesh unit.

Card Group	Input Data and Definitions
11 PLTDS Plot Informations (For NPTYPE = 1 (Finite Element Mesh)	11.2.4 **IMODE** IMODE = 1 Plot Finite element mesh. = 2 Plot mesh and element numbers. = -2 Plot mesh and node numbers.
	11.2.5 **NGROUP** NGROUP = 0 Plot all elements. > 0 Plot specified element groups (max = 1000).
	11.2.6 (If NGROUP = 0, skip this Card) NGROUP Cards: NSS NEE NIC NNN NSS : Starting element number in a row. NEE : Number of elements in a row. NIC : Element number increment for next row. NNN : Total number of rows.  Example, NSS = 10 NEE = 4 NIC = 10 NNN = 3

Card Group	Input Data and Definitions	
11	11.3 For NPTYPE = 2 (Contours of Element Temperatures)	11.3.1 TITLE TITLE : Any title of up to 70 characters.
		11.3.2 IUNIT IUNIT = 1 In, Fahrenheit = 2 Cm, Centigrade = 3 User-specified unit
		11.3.3 (These Cards are required only if IUNIT = 3) NCHR LABEL NCHRC LABELC NCHR : Number of characters for mesh unit. LABEL : Name of mesh unit. NCHRC : Number of characters for temperature unit. LABELC : Name of temperature unit.
		11.3.4 NLTIME, $TIME_{REF}$ $TIME_1$, $TIME_2$, ..., $TIME_{NLTIME}$ NLTIME : Number of specified times (max = 1000). $TIME_{REF}$: Reference time. TIME : Specified time. If $TIME_{REF}$ is not equal to 0.0, contour plots at $TIME_i$ are relative to $TIME_{REF}$.

PLTDS Plot Informations

Card Group	Input Data and Definitions	
11	11.3	11.3.5 **NCTS** NCTS : Variable to be plotted. Use NCTS = 31 for temperature contour.
PLTDS Plot Informations	For NPTYPE = 2 (Contours of Element Temperatures)	11.3.6 **DELTA, IRES, IRGP, IENL, R_x, R_y** DELTA : Desired contour interval (In color Plot, use -DELTA for line contour and use DELTA = 0.0 for solid block contour). IRES = 0 Draft copy. = 1 Fine copy. IRGP = 0 Values at ref. grid points are not added. = 1 Values at ref. grid points are added. IENL = 0 Standard view. = 1 Enlarged view. R_x R_y : Enlarged view starts at (R_xL_x, R_yL_y) where L_x and L_y are the width and height of the standard view.

Card Group		Input Data and Definitions
11 PLTDS Plot Informations	11.3 For NPTYPE = 2 (Contours of Element Temperatures)	11.3.7 **NGROUP** NGROUP = 0 Plot at all elements. > 0 Plot at specified element groups (max = 1000).
		11.3.8 (If NGROUP = 0, skip this Card) NGROUP Cards **NSS, NEE, NIC, NNN** – – – – – – – – Refer to Card Group 11.2.6.
		11.3.9 **NRL** NRL : Number of nodes to be connected by a solid line. (max = 5000).
		11.3.10 (If NRL = 0, skip this Card) **$NODE_1$, $NODE_2$, ..., $NODE_{NRL}$** NODE : Reference node numbers.

Card Group	Input Data and Definitions
12 PLTXY Plot Informations	12.1 **IPTYPE** IPTYPE = 0 End of plotting output. = 1 Element temperature (time history). = 2 Nodal temperature (time history). = 3 Element temperature vs. distance (snapshot). = 4 Nodal temperature vs. distance (snapshot).
For IPTYPE = 1 (Element Temperature Time History)	12.2.1 **IPLOT** IPLOT = 0 For each specified element, number of different pair of quantities are plotted. = 1 For each specified pair of quantities, number of different element data are plotted.
	12.2.2 **NOEL** NOEL = 0 All elements in Card 10.2.1 are used. > 0 Number of elements to be used.
	12.2.3 If NOEL > 0, **LIST(I), I = 1, NOEL** LIST(I) : List element numbers to be used.
	12.2.4 **NDPQ** NDPQ : Number of different pair of quantities. (Use NDPQ = 1)

Card Group	Input Data and Definitions	
12	For IPTYPE = 1 (Element Temperature Time History)	12.2.5 NDPQ Cards $\begin{cases} K_{x1}, & K_{y1} \\ K_{x2}, & K_{y2} \\ - & - \\ - & - \end{cases}$ Use K_x = 1 and K_y = 31.
		12.2.6 TMFAC, TPFAC TMFAC : Multiplication factor for time. TPFAC : Multiplication factor for temperature.
		12.2.7 For each element (IPLOT = 0) or each pair of quantities. (IPLOT = 1), TITLE (50 characters). X - LABEL (50 characters). Y - LABEL (50 characters).
PLTXY Plot Informations		

Card Group		Input Data and Definitions
12 PLTXY Plot Informations	12.3 For IPTYPE = 2 (Nodal Temperature Time History)	12.3.1 **IPLOT** IPLOT = 0 For each specified node, number of different pair of quantities are plotted. = 1 For each specified pair of quantities, number of different node data are plotted.
		12.3.2 **NODE** NODE = 0 All nodes in Card 10.3.1 are used. > 0 Number of nodes to be used.
		12.3.3 If NODE > 0, **LIST(I), I = 1, NODE** LIST(I) : List node numbers to be used.

Card Group	Input Data and Definitions	
12 PLTXY Plot Informations	12.3 For IPTYPE = 2 (Nodal Temperature Time History)	12.3.4 **NDPQ** NDPQ : Number of different pair of quantities. (Use NDPQ = 1)
		12.3.5 NDPQ Cards K_{x1}, K_{y1} K_{x2}, K_{y2} – – – – Use K_x = 1 and K_y = 31.
		12.3.6 **TMFAC, TPFAC** TMFAC : Multiplication factor for time. TPFAC : Multiplication factor for temperature.
		12.3.7 For each node (IPLOT = 0) or each pair of quantity. (IPLOT = 1), **TITLE** (50 characters). **X - LABEL** (50 characters). **Y - LABEL** (50 characters).

Card Group		Input Data and Definitions
12 PLTXY Plot Informations	12.4 For IPTYPE = 3 (Element Temperature vs. Distance Snapshot)	12.4.1 **IPLOT** IPLOT = 0 For each specified time, number of different quantities are plotted. = 1 For each specified quantity, number of different time data are plotted.
		12.4.2 **NOTM** NOTM = 0 All times in Card 10.4.1 are used. > 0 Number of times to be used.
		12.4.3 If NOTM > 0, **TLIST(I), I = 1, NOTM** TLIST(I) : List times in sequential order.
		12.4.4 **NDPQ** NDPQ : Number of different pair of quantities. (Use NDPQ = 1)
		12.4.5 NDPQ Cards K_{y1} K_{y2} – – Use K_y = 31.
		12.4.6 **ISCALD, ILTNUM, XSTART** ISCALD = 0 Unscaled distance. = 1 Scaled distance. ILTNUM = 0 Do not list element numbers. = 1 List element numbers below X-axis, XSTART : Reference starting X-coordinate. *Note* : If ISCALD = I and ILTNUM = 1, "X-LABEL" is used for distance unit.

Card Group		Input Data and Definitions
12 PLTXY Plot Informations	12.4 For IPTYPE = 3 (Element Temperature vs. Distance Snapshot)	12.4.7 Element Number Specification (Maximum = 800 Elements). For arbitrary order > 1 NRL N_1, N_2, N_{NRL} For sequential order > 2 NSTAR, NINCR, NPONT For end of generation > 0 NRL : Number of elements. N_1, N_2, N_{NRL} : Element numbers. NSTAR : Starting element numbers. NINCR : Element number increment. NPONT : Number of element.
		12.4.8 TPFAC, SDFAC TPFAC : Multiplication factor for temperature. SDFAC : Multiplication factor for distance.
		12.4.9 For each specified time (IPLOT = 0) or each quantity. (IPLOT = 1), TITLE (50 characters). X - LABEL (50 characters). Y - LABEL (50 characters).

Card Group		Input Data and Definitions
12 PLTXY Plot Informations	12.5 For IPTYPE = 4 (Nodal Temperature vs. Distance Snapshot)	12.5.1 **IPLOT** IPLOT = 0 For each specified time, number of different quantities are plotted. = 1 For each specified quantity, number of different time data are plotted.
		12.5.2 **NOTM** NOTM = 0 All times in Card 10.4.1 are used. > 0 Number of times to be used.
		12.5.3 If NOTM > 0, **TLIST(I), I = 1, NOTM** TLIST(I) : List times in sequential order.
		12.5.4 **NDPQ** NDPQ : Number of different pair of quantities. Use NDPQ = 1.
		12.5.5 NDPQ Cards $\begin{bmatrix} K_{y1} \\ K_{y2} \\ - \\ - \end{bmatrix}$ Use K_y = 31.

Card Group		Input Data and Definitions
12 PLTXY Plot Informations	12.5 For IPTYPE = 4 (Nodal Temperature vs. Distance Snapshot)	12.5.6 **ISCALD, ILTNUM, XSTART** ISCALD = 0 Unscaled distance. = 1 Scaled distance. ILTNUM = 0 Do not list node numbers. = 1 List node numbers below X-axis, XSTART : Reference starting X-coordinate. *Note* : If ISCALD = 1 and ILTNUM = 1, "X-LABEL" is used for distance unit.
		12.5.7 Node Number Specification (Maximum = 800 nodes). For arbitrary order > 1 NRL N_1, N_2, ..., N_{NRL} For sequential order > 2 NSTAR, NINCR, NPONT For end of generation > 0 NRL : Number of nodes. N_1, N_2, ..., N_{NRL} : Node numbers. NSTAR : Srarting node numbers. NINCR : Node number increment. NPONT : Number of nodes.

Card Group	Input Data and Definitions	
12	12.5	12.5.8 TPFAC, SDFAC TPFAC : Multiplication factor for temperature. SDFAC : Multiplication factor for distance.
PLTXY Plot Informations	For IPTYPE = 4 (Nodal Temperature vs. Distance Snapshot)	12.5.9 For each specified time (IPLOT = 0) or each quantity. (IPLOT = 1), TITLE (50 characters). X - LABEL (50 characters). Y - LABEL (50 characters).

여 백

SMAP-T2

Verification Problems

여 백

1. Long Cylinder Subjected to Sudden Change in Environmental Temperature

The first verification problem concerns an infinitely long cylinder with finite diameter as shown in Figure A-1. The cylinder, initially at 100 °F, is subjected to a sudden 400 °F increase in environmental temperature. Thus, heat is transferred to the cylinder by convection. Thermal properties and parameters used in SMAP-T2 are shown in Figure A-1. Table A-1 shows the listing of input file for the verification problem 1. A comparison of the temperature time history on the axis of symmetry computed using SMAP-T2 with the analytic solution of Heisler (1947) is also shown in Figure A-1. The agreement between numerical and analytical results is excellent.

Table A-1 Listing of input file for verification problem 1.

```
* CARD 1.1
* TITLE
  Verification Problem 1
* CARD 2.1
* IP    NBAND   IBATCH
  0       1       0
* CARD 3.1
* NCYCL  NST
  500     1
* CARD 3.2
* LEE   TETA
  0     1.0
* CARD 3.3
* IDELT  DT
  0       0.01667
* CARD 4.1
* NUMNP
  12
* CARD 4.2
* CMFAC  XREF
  1.0     0.0
* CARD 4.3
* NODAL COORDINATES
* NODE  ID   IDF      XC          YC          T           CF
    1    0    0  .000000E+00  .100000E+01  .100000E+03  .000000E+00
    2    0    0  .000000E+00  .000000E+00  .100000E+03  .000000E+00
    3    0    0  .500000E-01  .100000E+01  .100000E+03  .000000E+00
    4    0    0  .500000E-01  .000000E+00  .100000E+03  .000000E+00
    5    0    0  .100000E+00  .100000E+01  .100000E+03  .000000E+00
    6    0    0  .100000E+00  .000000E+00  .100000E+03  .000000E+00
    7    0    0  .150000E+00  .100000E+01  .100000E+03  .000000E+00
    8    0    0  .150000E+00  .000000E+00  .100000E+03  .000000E+00
    9    0    0  .200000E+00  .100000E+01  .100000E+03  .000000E+00
   10    0    0  .200000E+00  .000000E+00  .100000E+03  .000000E+00
```

```
   11    0    0  .250000E+00  .100000E+01  .100000E+03  .000000E+00
   12    0    0  .250000E+00  .000000E+00  .100000E+03  .000000E+00
* CARD 5.1
* NCONT
   5
* CARD 5.2.1
* NTNC
   1
* CARD 5.2.2.1
* TITLE
  MATERIAL 1
* CARD 5.2.2.2
* MATNO  MATFN  COND  SPH  RO      TLF  TRF  HLT
   1      0     19.3  1.0  92.718  0.0  0.0  0.0
* CARD 5.3
* ELEMENT INDEX
* NEL    I    J    K    L  MATNO IDH
    1    3    1    2    4    1    0
    2    5    3    4    6    1    0
    3    7    5    6    8    1    0
    4    9    7    8   10    1    0
    5   11    9   10   12    1    0
* CARD 9.1.1
* NTNP
   0
* CARD 9.2.1
* NPIPE
   0
* CARD 9.3.1
* NCONV
   1
* CARD 9.3.2.1
* TITLE
  GROUP 1
* CARD 9.3.2.2-1
* IDC  IDFNC  IDFNT  NODEC
   1     2      1      2
* CARD 9.3.2.2-2
```

```
* N1  N2
  11  12
* CARD 9.4.1
* NTIMF  NTIM
   2      2
* CARD 9.4.2
* TIME     FN1     FN2
  0.0      500.    11.029
  100.     500.    11.029
* CARD 9.5.1
* NTEMF  NTEM
   0      0
* CARD 10.1
* NTPRNT
   10
* CARD 10.2.1
* NHPEL
   1
* CARD 10.2.2
* NEL1
   1
* CARD 10.3.1
* NHPMT
   1
* CARD 10.3.2
* NODE1
   1
* CARD 10.4.1
* NTIME
   1
* CARD 10.4.2
* TIME1
  1.667
*
* CARD 11  ( PLTDS Plot Information )
* ------------------------------------------
* CARD 11.1
* NPTYPE
```

```
 1
* CARD 11.2.1
* TITLE
  Verification Problem 1
* CARD 11.2.2
* IUNIT
    3
* CARD 11.2.3
* NCHR
    4
* LABEL
Feet
* CARD 11.2.4
* IMODE
    1
* CARD 11.2.5
* NGROUP
    1
* CARD 11.2.6
* NSS   NEE   NIC   NNN
     1     5     1     1
* ----------------------------------------------------
* CARD 11.1
* NPTYPE
  0
* ----------------------------------------------------
* PLTXY  Plot  Informations
* ----------------------------------------------------
* Midplane Temperature Time History
* CARD 12.1
* IPTYPE
    2
* CARD 12.3.1
* IPLOT
    0
* CARD 12.3.2
* NODE
    1
```

```
* CARD 12.3.3
* LIST OF NODES
   1
* CARD 12.3.4
* NDPQ
   1
* CARD 12.3.5
* KX  KY
   1  31
* CARD 12.3.6
* TMFAC  TPFAC
  1.0    1.0
* CARD 12.3.7
* TITLE
  Midplane Temperature Time History
* X-LABEL
  Time ( Hour )
* Y-LABEL
  Temperature ( Deg. F )
* ----------------------------------------
* CARD 12.1
* IPTYPE
  0
* ----------------------------------------
* CARD 13.1
* IFEMAP
  0
* ----------------------------------------
```

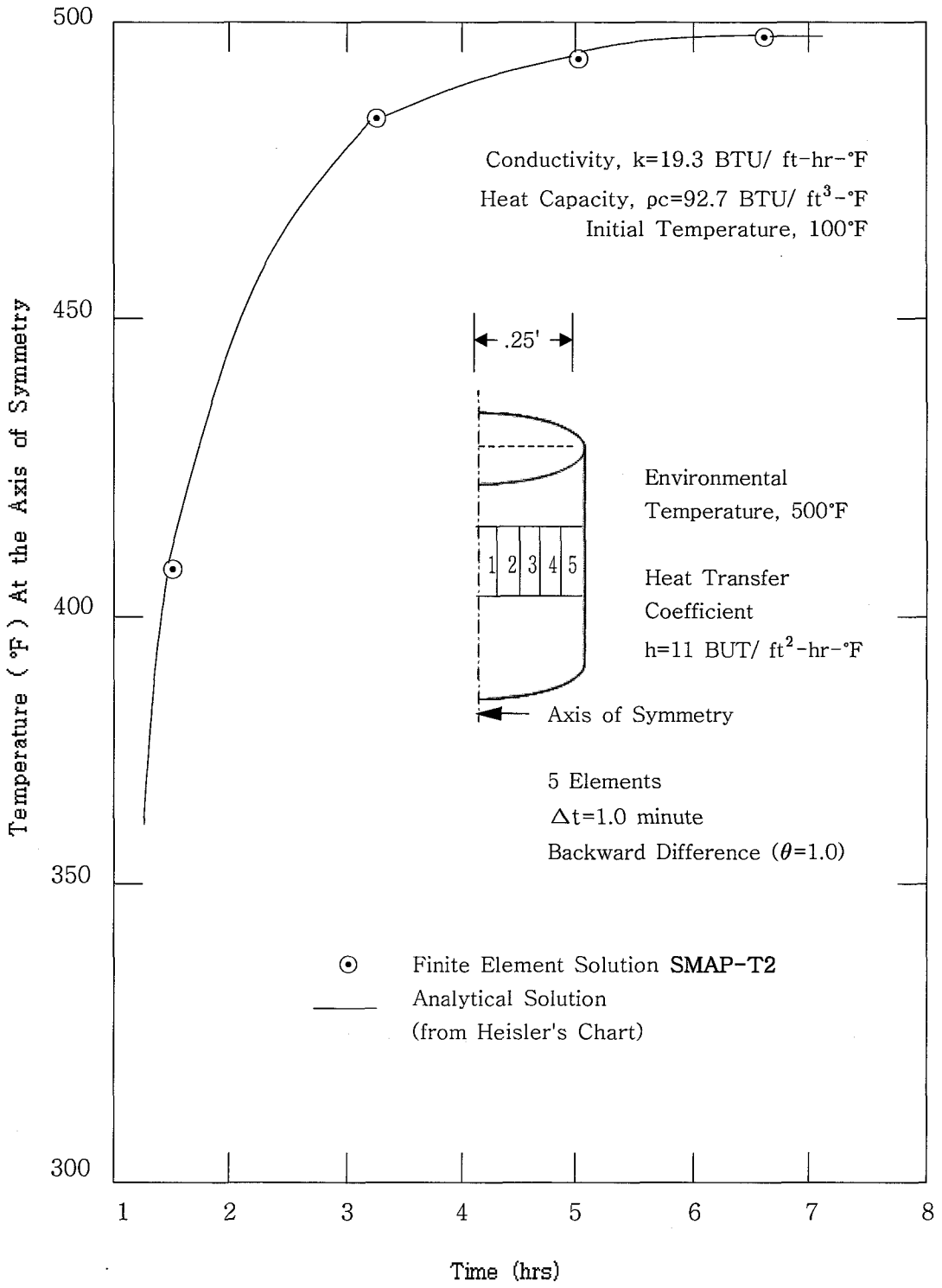


Figure A-1 Long Cylinder Subjected to Sudden Change in Environmental Temperature.

2. Long Square Bar Subjected to Sudden Drop in Surface Temperature

The second verification problem considers a two-dimensional heat conduction as shown in Figure A-2. An infinitely long square bar, initially at a uniform temperature of 30 °F, is subjected to a sudden drop in surface temperature to 0 °F. Taking advantage of symmetry, only a quadrant of the bar is modeled using 25 elements. Using the thermal properties of the bar shown in Figure A-2, temperature profiles at 1.2 hours along the symmetric plane AF are computed. The Crank-Nicolson difference scheme, because of its advantage of second-order terms, shows better accuracy than the backward difference scheme. Reduction of the time step from 0.05 to 0.005 hours in the Crank-Nicolson scheme, results in very close agreement with the analytical solution presented by Donea (1974). Table A-2 shows the listing of input file for the verification problem 2.

Table A-2 Listing of input file for verification problem 2.

```
* CARD 1.1
* TITLE
Verification Problem 2
* CARD 2.1
* IP   NBAND  IBATCH
  1     1      0
* CARD 3.1
* NCYCL  NST
  240     1
* CARD 3.2
* LEE  TETA
  0    0.5
* CARD 3.3
* IDELT  DT
  0      0.005
* CARD 4.1
* NUMNP
  36
* CARD 4.2
* CMFAC  XREF
  1.0    0.0
* CARD 4.3
* NODAL COORDINATES
* NODE  ID   IDF      XC          YC          T           CF
  1     1    1  .000000E+00  .150000E+01  .300000E+02  .000000E+00
  2     1    1  .000000E+00  .120000E+01  .300000E+02  .000000E+00
  3     1    1  .000000E+00  .900000E+00  .300000E+02  .000000E+00
  4     1    1  .000000E+00  .600000E+00  .300000E+02  .000000E+00
  5     1    1  .000000E+00  .300000E+00  .300000E+02  .000000E+00
  6     1    1  .000000E+00  .000000E+00  .300000E+02  .000000E+00
  7     0    0  .300000E+00  .150000E+01  .300000E+02  .000000E+00
  8     0    0  .300000E+00  .120000E+01  .300000E+02  .000000E+00
  9     0    0  .300000E+00  .900000E+00  .300000E+02  .000000E+00
  10    0    0  .300000E+00  .600000E+00  .300000E+02  .000000E+00
  11    0    0  .300000E+00  .300000E+00  .300000E+02  .000000E+00
```

```
  12    1    1  .300000E+00  .000000E+00  .300000E+02  .000000E+00
  13    0    0  .600000E+00  .150000E+01  .300000E+02  .000000E+00
  14    0    0  .600000E+00  .120000E+01  .300000E+02  .000000E+00
  15    0    0  .600000E+00  .900000E+00  .300000E+02  .000000E+00
  16    0    0  .600000E+00  .600000E+00  .300000E+02  .000000E+00
  17    0    0  .600000E+00  .300000E+00  .300000E+02  .000000E+00
  18    1    1  .600000E+00  .000000E+00  .300000E+02  .000000E+00
  19    0    0  .900000E+00  .150000E+01  .300000E+02  .000000E+00
  20    0    0  .900000E+00  .120000E+01  .300000E+02  .000000E+00
  21    0    0  .900000E+00  .900000E+00  .300000E+02  .000000E+00
  22    0    0  .900000E+00  .600000E+00  .300000E+02  .000000E+00
  23    0    0  .900000E+00  .300000E+00  .300000E+02  .000000E+00
  24    1    1  .900000E+00  .000000E+00  .300000E+02  .000000E+00
  25    0    0  .120000E+01  .150000E+01  .300000E+02  .000000E+00
  26    0    0  .120000E+01  .120000E+01  .300000E+02  .000000E+00
  27    0    0  .120000E+01  .900000E+00  .300000E+02  .000000E+00
  28    0    0  .120000E+01  .600000E+00  .300000E+02  .000000E+00
  29    0    0  .120000E+01  .300000E+00  .300000E+02  .000000E+00
  30    1    1  .120000E+01  .000000E+00  .300000E+02  .000000E+00
  31    0    0  .150000E+01  .150000E+01  .300000E+02  .000000E+00
  32    0    0  .150000E+01  .120000E+01  .300000E+02  .000000E+00
  33    0    0  .150000E+01  .900000E+00  .300000E+02  .000000E+00
  34    0    0  .150000E+01  .600000E+00  .300000E+02  .000000E+00
  35    0    0  .150000E+01  .300000E+00  .300000E+02  .000000E+00
  36    1    1  .150000E+01  .000000E+00  .300000E+02  .000000E+00
* CARD 5.1
* NCONT
  25
* CARD 5.2.1
* NTNC
  1
* CARD 5.2.2.1
* TITLE
  MATERIAL 1
* CARD 5.2.2.2
* MATNO  MATFN  COND  SPH  RO   TLF  TRF  HLT
  1      0     1.25  1.0  1.0  0.0  0.0  0.0
* CARD 5.3
```

```
* ELEMENT INDEX
* NEL     I     J     K     L  MATNO  IDH
    1     7     1     2     8     1     0
    2     8     2     3     9     1     0
    3     9     3     4    10     1     0
    4    10     4     5    11     1     0
    5    11     5     6    12     1     0
    6    13     7     8    14     1     0
    7    14     8     9    15     1     0
    8    15     9    10    16     1     0
    9    16    10    11    17     1     0
   10    17    11    12    18     1     0
   11    19    13    14    20     1     0
   12    20    14    15    21     1     0
   13    21    15    16    22     1     0
   14    22    16    17    23     1     0
   15    23    17    18    24     1     0
   16    25    19    20    26     1     0
   17    26    20    21    27     1     0
   18    27    21    22    28     1     0
   19    28    22    23    29     1     0
   20    29    23    24    30     1     0
   21    31    25    26    32     1     0
   22    32    26    27    33     1     0
   23    33    27    28    34     1     0
   24    34    28    29    35     1     0
   25    35    29    30    36     1     0
* CARD 9.1.1
* NTNP
    0
* CARD 9.2.1
* NPIPE
    0
* CARD 9.3.1
* NCONV
    0
* CARD 9.4.1
```

```
* NTIMF  NTIM
  1      2
* CARD 9.4.2
* TIME     FN1
  0.0      0.0
  100.     0.0
* CARD 9.5.1
* NTEMF  NTEM
  0      0
* CARD 10.1
* NTPRNT
  1
* CARD 10.2.1
* NHPEL
  1
* CARD 10.2.2
* NEL1
  1
* CARD 10.3.1
* NHPMT
  1
* CARD 10.3.2
* NODE1
1
* CARD 10.4.1
* NTIME
  1
* CARD 10.4.2
* TIME1
  1.2
*
* CARD 11  ( PLTDS Plot Information )
* ------------------------------------------
* CARD 11.1
* NPTYPE
  1
* CARD 11.2.1
* TITLE
```

```
  Verification Problem 2
* CARD 11.2.2
* IUNIT
  3
* CARD 11.2.3
* NCHR
  1
* LABEL
M
* CARD 11.2.4
* IMODE
  1
* CARD 11.2.5
* NGROUP
  1
* CARD 11.2.6
* NSS   NEE   NIC   NNN
  1    25     1     1
* ----------------------------------------
* Contours of Temperature at Time = 1.2 Hrs.
* CARD 11.1
* NPTYPE
  2
* CARD 11.3.1
* TITLE
  Verification Problem 2
* CARD 11.3.2
* IUNIT
  3
* CARD 11.3.3
* NCHR
  1
* LABEL
M
* NCHRC
 6
* LABELC
Deg. F
```

```
* CARD 11.3.4
* NLTIME  TIMEref
  1       0.0
* TIME1
  1.2
* CARD 11.3.5
* NCTS
  31
* CARD 11.3.6
* DELTA  IRES  IRGP  IENL  RX   RY
  0.0    0     1     0     0.0  0.0
* NOTE: USE DELTA = -0.2 FOR LINE CONTOUR PLOT
* CARD 11.3.7
* NGROUP
  1
* CARD 11.3.8
* NSS  NEE  NIC  NNN
  1   25    1    1
* CARD 11.3.9
* NRL
  5
* CARD 11.3.10
* N1  N2  N3  N4  N5
  1   6  36  31   1
* ------------------------------------------------
* CARD 11.1
* NPTYPE
  0
* ------------------------------------------------
* PLTXY  Plot  Informations
* ------------------------------------------------
* Temperature Profile Along the Symmetric Plane
*    ( Time = 1.2 Hrs )
* CARD 12.1
* IPTYPE
  4
* CARD 12.5.1
```

```
* IPLOT
  0
* CARD 12.5.2
* NOTM
  1
* CARD 12.5.3
* TIME1
  1.2
* CARD 12.5.4
* NDPQ
  1
* CARD 12.5.5
* KY1
  31
* CARD 12.5.6
* ISCALD  ILTNUM  XSTART
  1        0      0.0
* CARD 12.5.7
* FOR SEQUENTIAL ORDER
  2
* NSTAR  NINCR  NPONT
  1      6      6
* FOR END OF GENERATION
  0
* CARD 12.5.8
* TPFAC  SDFAC
  1.0    1.0
* CARD 12.5.7
* TITLE
  Temperature Profile Along the Symmetric Plane
* X-LABEL
  Distance ( M )
* Y-LABEL
  Temperature ( Deg. F )
* ----------------------------------------
* CARD 12.1
* IPTYPE
  0
```

```
* ----------------------------------------
* CARD 13.1
* IFEMAP
  -1
* ----------------------------------------
```

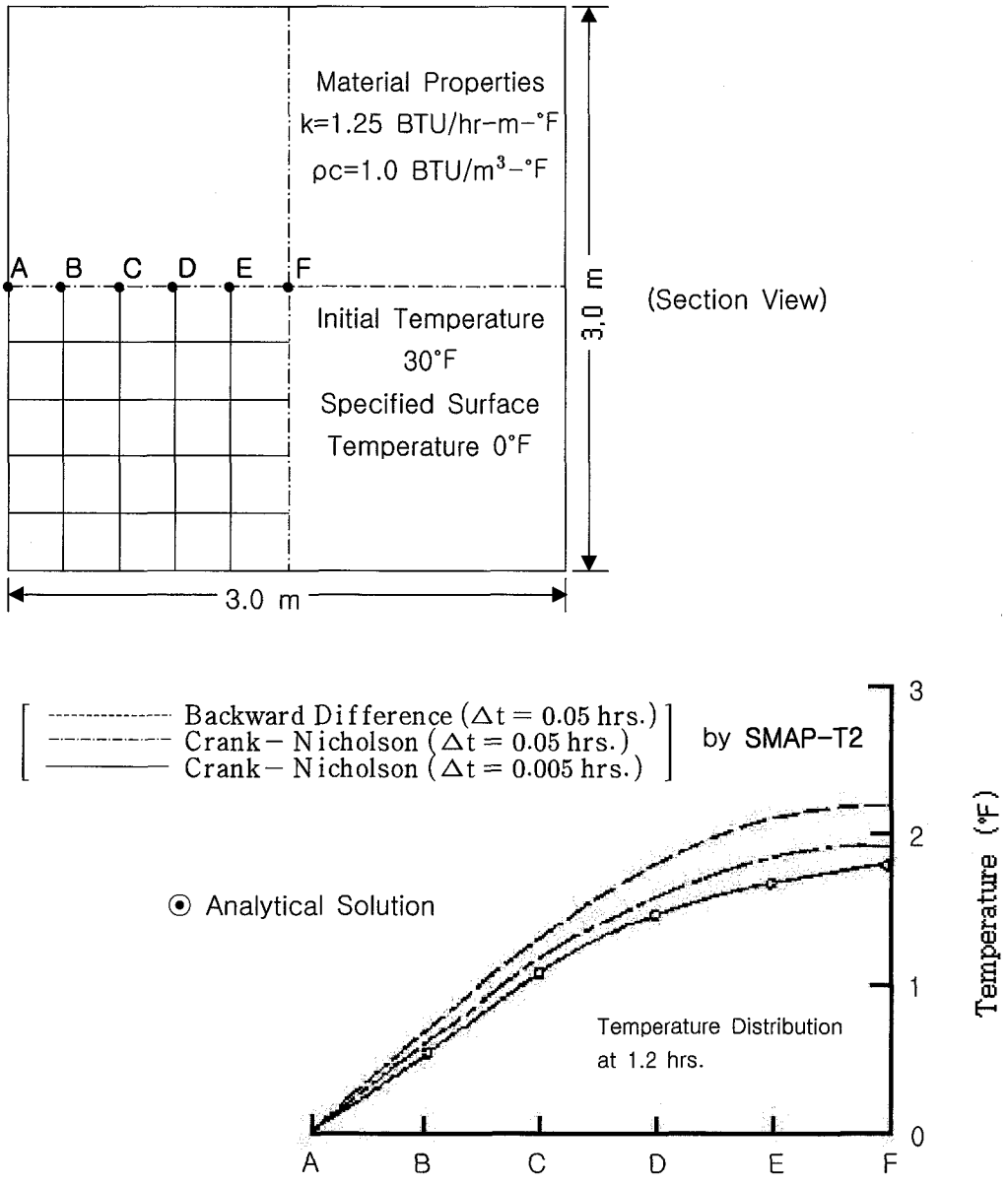


Figure A-2 Long Square Bar Subjected to Sudden Drop in Surface Temperature.

3. Saturated Cylindrical Sand Column Subjected to Central Freezing Pipe Running along Axis of the Column

The third verification problem concerns freezing saturated sand backfill using a central freezing pipe running along the axis of the column as shown in Figure A-3. The central freezing pipe consists of a 10 in diameter inner pipe and a 14.2 in diameter outer pipe. The cold brine (-30 °F) leaves the refrigeration plant via the inner pipe and returns to the plant along the annulus between the two pipes. Heat is absorbed from the surrounding backfill by the brine as it returns to the plant. The tubes are designed for an average flow velocity of 0.4 ft/sec. Table A-3 shows the listing of input file for the verification problem 3.

The overall heat transfer coefficient for the freezing pipe is calculated according to Equations 6.1.14 and 6.1.15 and listed in Figure A-3. Saturated sand with the porosity of 35% which is listed in Table A-4 is assumed to represent the backfill. The backfill is insulated from the surrounding rock so that no heat transfer is allowed across the boundary between the backfill and the surrounding rock.

As shown in Figure A-4, the sand backfill is modeled by 25 elements in the radial direction and 10 elements in the axial direction. The element sizes are all equal.

Temperature profiles in the sand backfill at times 10, 50, 200, 500 and 1000 Hrs. are plotted in Figures A-5 and A-6.

Figure A-5 shows temperature profiles along the pipe. It should be noted that these profiles are temperatures on the inner surface of sand backfill. Generally, backfill temperatures at the end of freezing pipe are slightly higher than those at the beginning since the brine temperature in the pipe increases as the brine flows out along the pipe. This problem is practically 1-dimensional heat conduction since temperature difference between the beginning and end of pipe is very small.

Figure A-6 shows temperature profiles along the radial direction. Temperatures in the sand backfill drop gradually with time. At 1000 Hrs, backfill temperature profile close to the insulated boundary shows flat top, indicating phase change from unfrozen state to frozen state.

Table A-3 Listing of input file for verification problem 3.

```
* CARD 1.1
* TITLE
  Verification Problem 3
* CARD 2.1
* IP    NBAND   IBATCH
  0      1       0
* CARD 3.1
* NCYCL  NST
  1000    1
* CARD 3.2
* LEE   TETA
  0     1.0
* CARD 3.3
* IDELT  DT
  0       1.
* CARD 4.1
* NUMNP
  286
* CARD 4.2
* CMFAC  XREF
  1.0    0.0
* CARD 4.3
* NODAL COORDINATES
* NODE  ID   IDF      XC          YC          T           CF
  1      0    0  .590000E+00  .000000E+00  .700000E+02  .000000E+00
  2      0    0  .590000E+00 -.300000E+01  .700000E+02  .000000E+00
  3      0    0  .590000E+00 -.600000E+01  .700000E+02  .000000E+00
  4      0    0  .590000E+00 -.900000E+01  .700000E+02  .000000E+00
  5      0    0  .590000E+00 -.120000E+02  .700000E+02  .000000E+00
  6      0    0  .590000E+00 -.150000E+02  .700000E+02  .000000E+00
  7      0    0  .590000E+00 -.180000E+02  .700000E+02  .000000E+00
  8      0    0  .590000E+00 -.210000E+02  .700000E+02  .000000E+00
  9      0    0  .590000E+00 -.240000E+02  .700000E+02  .000000E+00
  10     0    0  .590000E+00 -.270000E+02  .700000E+02  .000000E+00
  11     0    0  .590000E+00 -.300000E+02  .700000E+02  .000000E+00
  12     0    0  .866400E+00  .000000E+00  .700000E+02  .000000E+00
```

```
  275    0    0  .722360E+01 -.300000E+02  .700000E+02  .000000E+00
  276    0    0  .750000E+01  .000000E+00  .700000E+02  .000000E+00
  277    0    0  .750000E+01 -.300000E+01  .700000E+02  .000000E+00
  278    0    0  .750000E+01 -.600000E+01  .700000E+02  .000000E+00
  279    0    0  .750000E+01 -.900000E+01  .700000E+02  .000000E+00
  280    0    0  .750000E+01 -.120000E+02  .700000E+02  .000000E+00
  281    0    0  .750000E+01 -.150000E+02  .700000E+02  .000000E+00
  282    0    0  .750000E+01 -.180000E+02  .700000E+02  .000000E+00
  283    0    0  .750000E+01 -.210000E+02  .700000E+02  .000000E+00
  284    0    0  .750000E+01 -.240000E+02  .700000E+02  .000000E+00
  285    0    0  .750000E+01 -.270000E+02  .700000E+02  .000000E+00
  286    0    0  .750000E+01 -.300000E+02  .700000E+02  .000000E+00
* CARD 5.1
* NCONT
  250
* CARD 5.2.1
* NTNC
  1
* CARD 5.2.2.1
* TITLE
  MATERIAL 1
* CARD 5.2.2.2
* MATNO  MATFN  COND  SPH  RO    TLF    TRF    HLT
  1      1      0.0   0.0  0.0   31.75  32.25  3150.
* CARD 5.3
* ELEMENT INDEX
* NEL    I    J    K    L  MATNO IDH
  1     12    1    2   13    1    0
  2     13    2    3   14    1    0
  3     14    3    4   15    1    0
  4     15    4    5   16    1    0
  5     16    5    6   17    1    0
  6     17    6    7   18    1    0
  7     18    7    8   19    1    0
  8     19    8    9   20    1    0
  9     20    9   10   21    1    0
  10    21   10   11   22    1    0
  11    23   12   13   24    1    0
```

```
  239   273  262  263  274    1    0
  240   274  263  264  275    1    0
  241   276  265  266  277    1    0
  242   277  266  267  278    1    0
  243   278  267  268  279    1    0
  244   279  268  269  280    1    0
  245   280  269  270  281    1    0
  246   281  270  271  282    1    0
  247   282  271  272  283    1    0
  248   283  272  273  284    1    0
  249   284  273  274  285    1    0
  250   285  274  275  286    1    0
* CARD 9.1.1
* NTNP
  1
* CARD 9.1.2.1
* TITLE
  PIPE MATERIAL 1
* CARD 9.1.2.2
* MATP   FLOW   SPHL   ROL    HTC
  1     785.4  0.63   80.5   64.35
* CARD 9.2.1
* NPIPE
  1
* CARD 9.2.2.1
* TITLE
  PIPE GROUP 1
* CARD 9.2.2.2
* IDP   MATP   IDFNP   NODEP
  1     1       1      11
* LISTING OF NODE NUMBERS
  1  2  3  4  5  6  7  8  9  10  11
* CARD 9.3.1
```

```
* NCONV
  0
* CARD 9.4.1
* NTIMF  NTIM
  1      2
* CARD 9.4.2
* TIME        FN1
  0.0        -30.
  1.E+10     -30.
* CARD 9.5.1
* NTEMF  NTEM
  1      4
* CARD 9.5.2
* TEMP     COND1     ROC1
  -100.    1.91      28.3
  31.75    1.91      28.3
  32.25    1.18      40.7
  100.     1.18      40.7
* CARD 10.1
* NTPRNT
  10
* CARD 10.2.1
* NHPEL
  1
* CARD 10.2.2
* NEL1
  1
* CARD 10.3.1
* NHPMT
  1
* CARD 10.3.2
* NODE1
  1
* CARD 10.4.1
* NTIME
  5
* CARD 10.4.2
```

```
* LISTING OF TIMES
  10.   50.   200.   500.   1000.
*
* CARD 11  ( PLTDS Plot Information )
* ------------------------------------------
* CARD 11.1
* NPTYPE
  1
* CARD 11.2.1
* TITLE
  Verification Problem 4
* CARD 11.2.2
* IUNIT
  3
* CARD 11.2.3
* NCHR
  4
* LABEL
Feet
* CARD 11.2.4
* IMODE
  1
* CARD 11.2.5
* NGROUP
  1
* CARD 11.2.6
* NSS   NEE   NIC   NNN
  1     250   1     1
* ------------------------------------------
* CARD 11.1
* NPTYPE
  0
* ------------------------------------------
* PLTXY  Plot  Informations
* ------------------------------------------
* Temperature Profile Along the Radial Distance
* CARD 12.1
```

```
* IPTYPE
  3
* CARD 12.4.1
* IPLOT
  1
* CARD 12.4.2
* NOTM
  5
* CARD 12.4.3
* LISTING OF TIMES
  10.   50.   200.   500.   1000.
* CARD 12.4.4
* NDPQ
  1
* CARD 12.4.5
* KY1
  31
* CARD 12.4.6
* ISCALD  ILTNUM   XSTART
  1       0        0.7282
* CARD 12.4.7
* FOR SEQUENTIAL ORDER
  2
* NSTAR  NINCR  NPONT
  1      10     25
* FOR END OF GENERATION
  0
* CARD 12.4.8
* TPFAC  SDFAC
  1.0    1.0
* CARD 12.4.7
* TITLE
  Temperature Profiles Along Radial Distance
* X-LABEL
  Distance ( Feet )
* Y-LABEL
  Temperature ( Deg. F )
* ----------------------------------------------
```

```
* Temperature Profile Along the Freezing Pipe
* CARD 12.1
* IPTYPE
  4
* CARD 12.5.1
* IPLOT
  1
* CARD 12.5.2
* NOTM
  5
* CARD 12.5.3
* LISTING OF TIMES
  10.   50.   200.   500.   1000.
* CARD 12.5.4
* NDPQ
  1
* CARD 12.5.5
* KY1
  31
* CARD 12.5.6
* ISCALD  ILTNUM   XSTART
  1       0        0.0
* CARD 12.5.7
* FOR SEQUENTIAL ORDER
  2
* NSTAR  NINCR  NPONT
  1      1      11
* FOR END OF GENERATION
  0
* CARD 12.5.8
* TPFAC  SDFAC
  1.0    1.0
* CARD 12.5.7
* TITLE
  Temperature Profiles Along the Pipe
* X-LABEL
  Distance ( Feet )
* Y-LABEL
```

```
  Temperature ( Deg. F )
* ------------------------------------------------
* CARD 12.1
* IPTYPE
  0
* ------------------------------------------------
* CARD 13.1
* IFEMAP
  0
* ------------------------------------------------
```

Table A-4 Thermal Properties of Saturated Soils and Porous Rocks.

MATERIAL	FROZEN		UNFROZEN		LATENT HEAT (λ)
	K	C	K	C	
ICE-WATER	1.39	27.0	0.35	62.4	8990
SILT (n=50%)	1.78	28.0	0.89	45.7	4500
SAND (n=35%)	1.91	28.3	1.18	40.7	3150
SATURATED SANDSTONE (n=15%)	2.11	28.7	1.72	34.0	1350
DRY SANDSTONE (n=20%)	0.51	23.8	0.51	23.8	0

NOTE : n = Porosity
K = Thermal conductivity (BTU/FT - HR - °F)
C = Volumetric heat capacity (BTU/FT^3 - °F)
λ = Volumetric latent heat (BTU/FT^3)

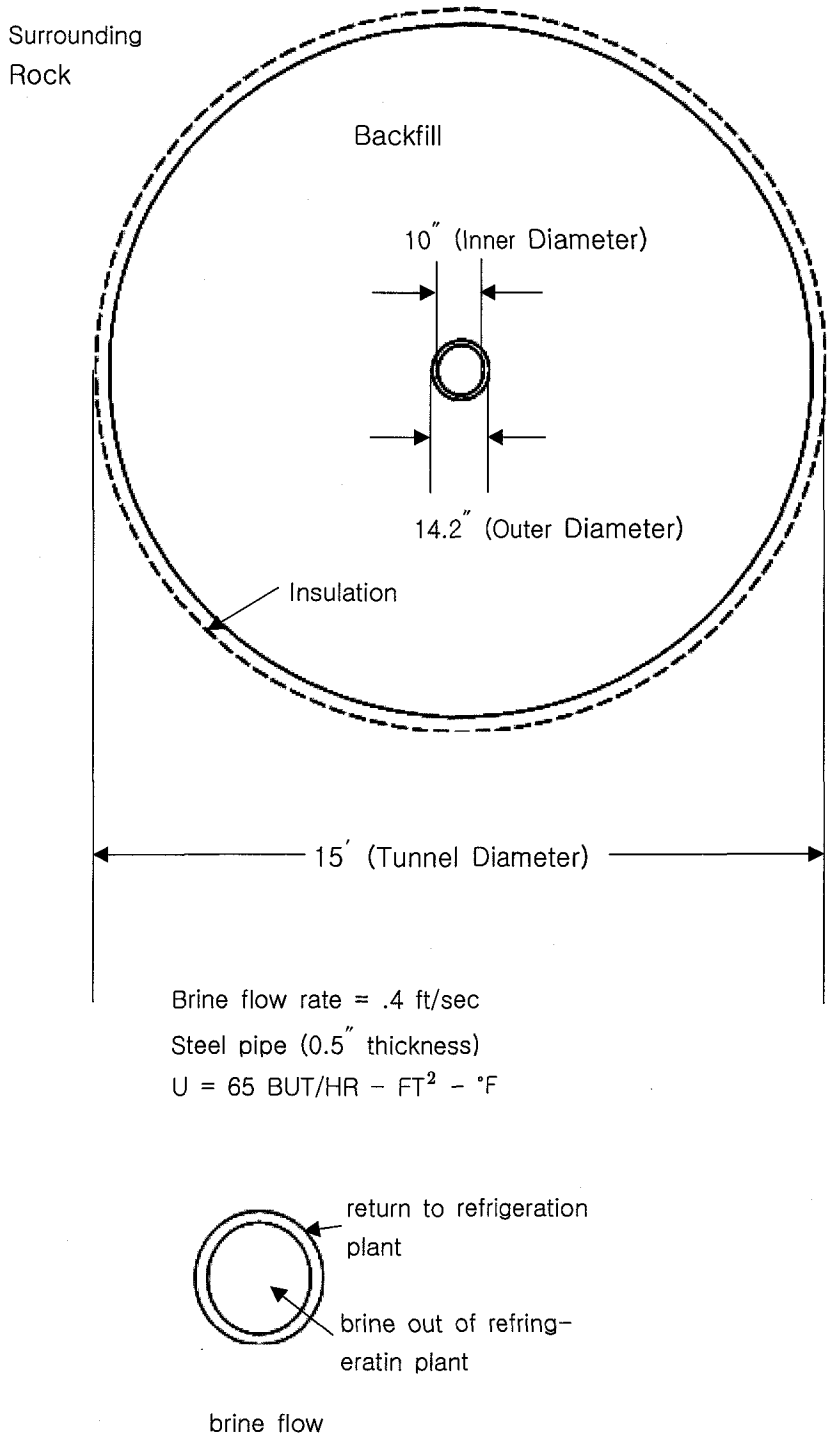


Figure A-3 Saturated Cylindrical Sand Column Subjected to Central Freezing Pipe.

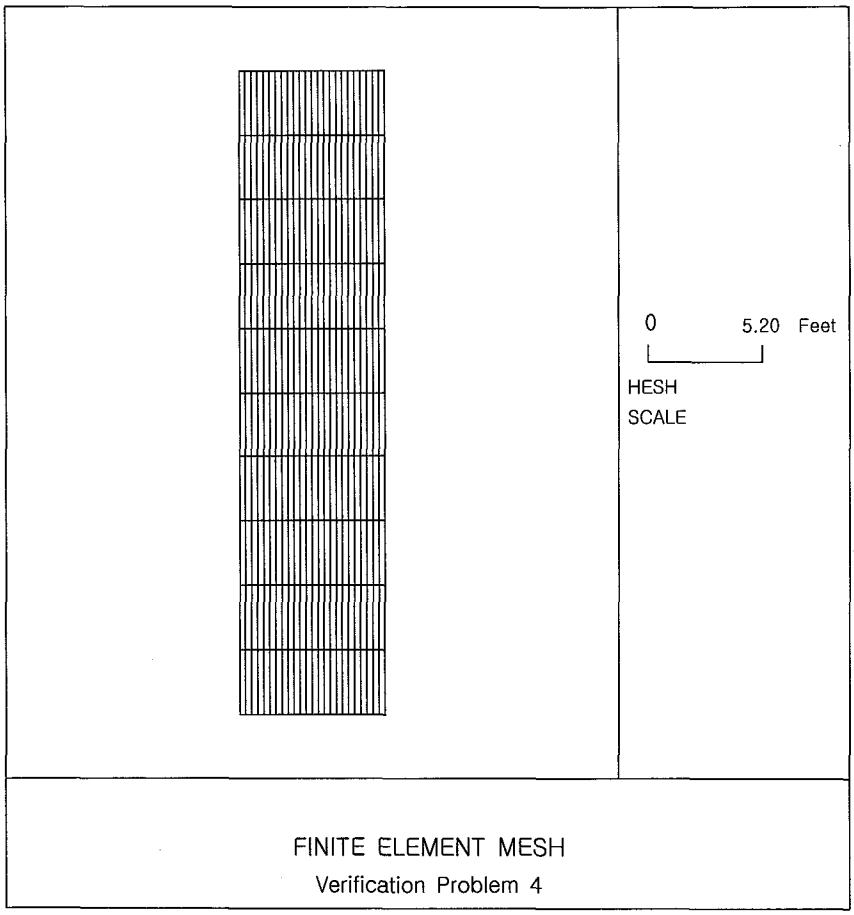


Figure A-4 Finite Element Mesh, Verification Problem 3.

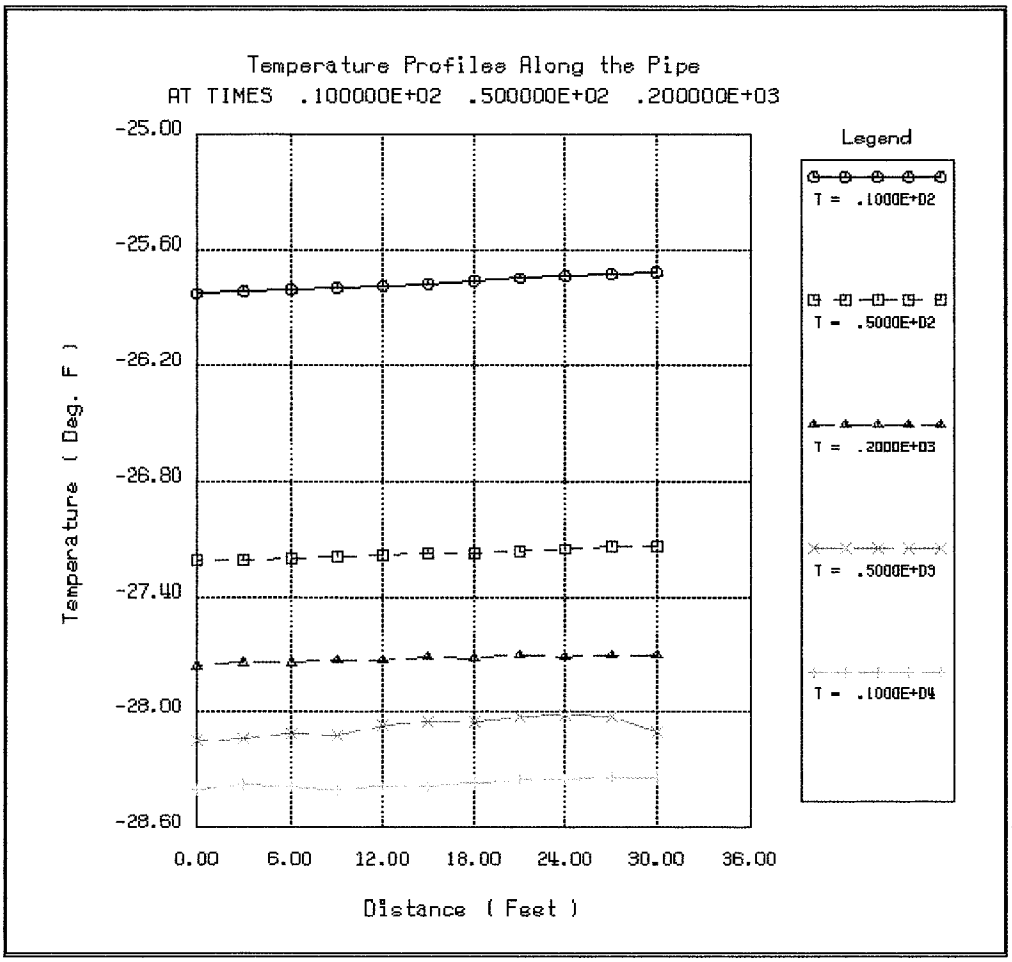


Figure A-5 Temperature Profiles Along the Pipe, Verification Problem 3.

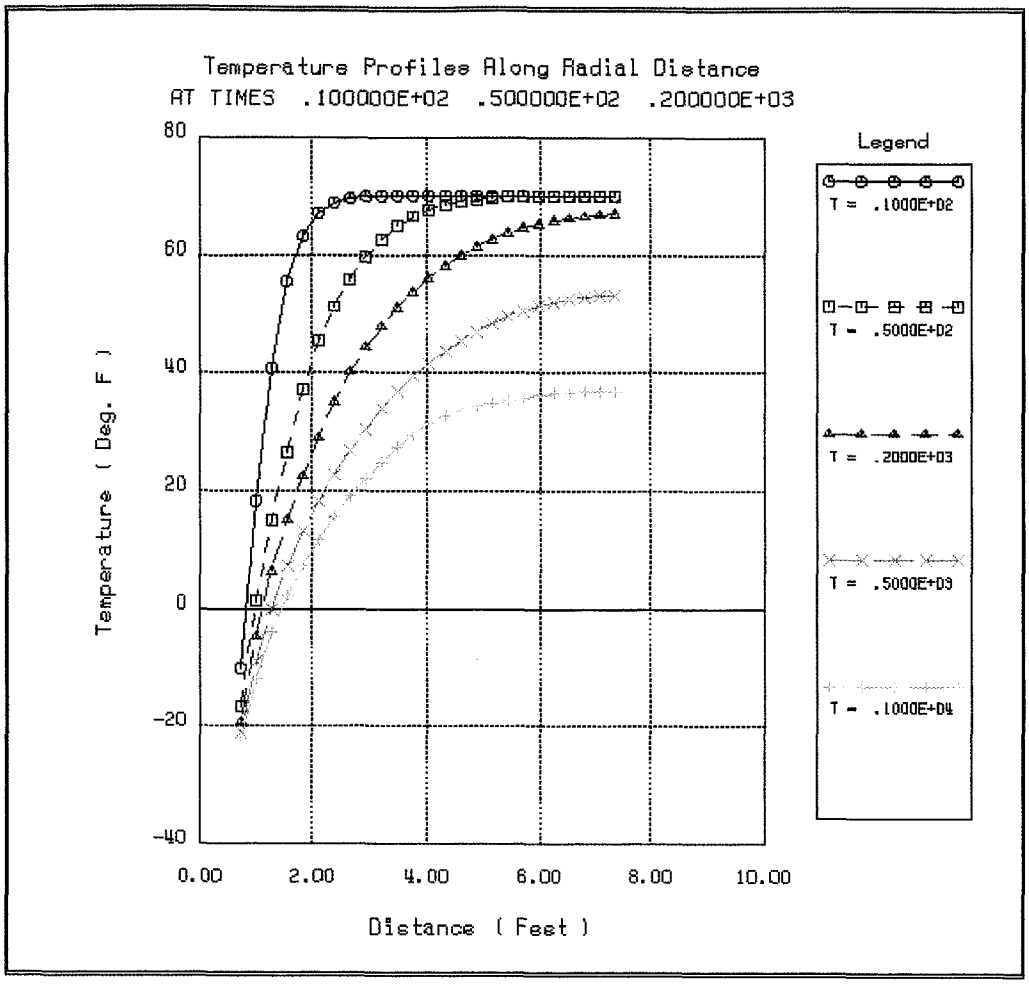


Figure A-6 Temperature Profiles Along the Radial Distance, Verification Problem 3.

주 의

1. 이 보고서는 국토해양부에서 시행한 건설핵심기술연구개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토해양부에서 시행한 건설핵심기술연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.

본 보고서와 관련하여 문의를 원하시는 분은 아래의 문의처로 연락을 주시기 바랍니다.

■ **문의처 : 한국건설교통기술평가원** TEL 031)381-6311

한국건설기술연구원 TEL 031)910-0556

06 건설핵심 D03

시베리아 동토지역 진출을 위한 미래건설기술 개발

■ 발행일 / 2010. 01. 13.

■ 발행처 / 한국건설기술연구원

경기도 고양시 일산구 대화동 2311번지, TEL : 031-9100-114

■ 인쇄처 / 카피코