국토교통기술축진연구사업 11기술혁신F01

# 인공동결공법을 이용한 불교란시료 채취기술 및 시험법 개발 최종보고서

2014. 6. 19.

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관 / 두산건설(주)
공동연구기관 / 한국건설기술연구원
공동연구기관 / 고려대학교
공동연구기관 / 대산사업가스(주)
공동연구기관 / (주)동아지질

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

# 제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

이 보고서를 "인공동결공법을 이용한 불교란시료 채취기술 및 시험법 개발"과제의 보고서로 제출합니다.

2014 . 06. 19

주관연구기관명 : 두산건설(주)
주관연구책임자 : 박영미
공동연구기관명 : 한국건설기술연구원
공동연구책임자 : 김영석
공동연구기관명 : 고려대학교
위탁연구책임자 : 이종섭
공동연구기관명 : 대성가스산업(주)
공동연구책임자 : 문홍만
공동연구기관명 : 동아지질
위탁연구책임자 : 김찬홍

# 보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>11기술혁신<br>E01</td><td>해 당 단 계<br>연 구 기 간</td><td>3</td><td>단 계 구 분</td><td>3/3</td></tr>
<tr><td>연 구 사 업 명</td><td colspan="5">국토교통기술촉진연구사업</td></tr>
<tr><td rowspan="5">연 구 과 제 명</td><td>최 상 위<br>과 제 명</td><td colspan="4">인공동결공법을 이용한 불교란 시료 채취기술<br>및 시험법 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="4">단위과제명</td><td colspan="4">동결시료 시험법 개발 및 성능평가</td></tr>
<tr><td colspan="4">지반 동시동결 시스템 구축</td></tr>
<tr><td colspan="4">동결지반 굴착 및 시료채취 매뉴얼 구축</td></tr>
<tr><td colspan="4">지반인공동결 가이드라인</td></tr>
<tr><td>연 구 책 임 자</td><td>박 영 미</td><td>총연구기간<br>참 여<br>연구원수</td><td>총 : 25명<br>내부 : 25명<br>외부 : 0명</td><td>총연<br>구비</td><td>정부 : 563,000천원<br>기업 : 588,080천원<br>계 : 1,151,080천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및<br>소 속 부 서 명</td><td colspan="2">주관: 두산건설(주)<br>공동: 고려대학교<br>대성산업가스(주)<br>(주)동아지질<br>한국건설기술연구원</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">희송지오텍</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="5">상대국명 : 해당없음 상대국연구기관명 : 해당없음</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td>224</td></tr>
<tr><td colspan="6">현장의 포화모래지반과 화강풍화토 지반을 대상으로 성능을 평가하고 개선사항을 도출하였으며, 전절에서 기술한 각종 동결샘플링 핵심 unit 및 시스템의 성능을 평가한다. 또한 지반동결~채취~운반~보관 과정에 있어서 기타 핵심기</td></tr>
</table>

술에 대해서도 현장 성능평가를 실시한다. 이로써 개발기술의 현장 성능평가를 수행하여 동결샘플링 시스템의 전체 프로세스를 검증한다. 또한, 인공동결 시료의 강도평가와 탄성파 특성변화를 관찰하기 위해 다양한 시료의 상태를 조성하여 동결-융해 특성을 파악한다. 인공동결공법으로 채취된 비교한 시료의 교란 방지를 위한 동결채취시료의 시편제작 기술을 소개하고 이의 연장선인 삼축압축시험법의 적용과 방법을 정리한다. 대상 및 기술의 시공 방법 및 관련 소요비용에 대한 검토와 기존 공법에 대한 소요비용의 검토를 통해 적정 소요 비용을 기준으로 한 경제성을 분석하여 보고 관련 기술의 경제성을 분석하는 것을 목표로 한다.


| | | |
|---|---|---|
| 색 인 어 (각 5개 이상) | 한 글 | 동결샘플링, 인공동결 시스템, 지반조사, 불교란 시료, 전단파 속도 |
| | 영 어 | Freezing Sampling, Artificial Ground Freezing, Site Investigation, Undisturbed Sample, Shear Velocity |

# 요 약 문

## Ⅰ. 서 론

본 연구의 최종목표는 사질지반에 인공동결공법을 이용한 고품질의 불교란 시료 채취 기술 및 시험법을 개발하고, 시험결과의 활용기법을 제안하는 것으로서 채취 장비의 설계 및 제작/운반/보관/시험에 이르는 전 단계를 완성하는 실용적 성격의 연구이다.

## Ⅱ. 국내·외 기술개발 현황(목적, 필요성, 범위 등을 기술)

동결샘플링은 지반을 인공적으로 동결시켜 시료를 채취하는 기술이며 대상으로는 모래·사질토 지반과 자갈질토 지반 등 자립이 되지 않는 지반을 대상으로 한다. 동결샘플링을 이용하는 경우 굴착·채취·운반 과정에서의 교란이 극소화되어 강도·변형특성을 정량적으로 평가할 수 있는 고품질의 시료채취(Perfect Sampling)가 가능하다. 본 절에서는 기술개발 현황 인지 목적으로 국외 캐나다, 일본, 독일 등의 전례와 국내 적용가능한 대상지역을 소개한다. 또한, 중요 SOC구조물의 경제적·안정적 설계의 근간이 되는 고품질의 시료채취기법인 지반동결 시스템 및 해외 동결샘플링 현황조사 결과에 대해 소개하고, 이와 관련한 국내외 기술동향 분석 및 기술개발을 위해 시급히 요구되는 기술을 제시하고자 한다.

## Ⅲ. 동시동결 채취 운용시스템 구축 및 현장 성능 평가

현장의 포화모래지반과 화강풍화토 지반을 대상으로 성능을 평가하고 개선사항을 도출하였으며, 전절에서 기술한 각종 동결샘플링 핵심 unit 및 시스템의 성능을 평가한다. 또한 지반동결~채취~운반~보관 과정에 있어서 기타 핵심기술에 대해서도 현장 성능평가를 실시한다. 이로써 개발기술의 현장 성능평가를 수행하여 동결샘플링 시스템의 전체 프로세스를 검증한다.

## Ⅳ. 동결샘플링 시료에 대한 성능 평가기번 개발

인공동결시료의 강도평가와 탄성파 특성변화를 관찰하기 위해 다양한 시료의 상태를 조성하여 동결-융해 특성을 파악한다. 또한 인공동결공법으로 채취된 비교한 시료의 교란방지를 위한 동결채취시료의 시편제작 기술을 소개하고 이의 연장선인 삼축압축시험법의 적용과 방법을 정리한다.

## Ⅴ. 동결샘플링 시스템 운용 및 활용방안 분석

동결샘플링 시스템 현장 운용 기준을 구축하고자 지반동결, 운반 및 보관, 추출 및 성형, 그리고 이를 시뮬레이션하여 분석한다. 이러한 새로운 공법의 경우 공법의 활용 및 관련 소요비용에 대한 검토를 통해 관련 공법 개발 및 사용에 대한 검토를 한다.
따라서 본 절에서는 대상 및 기술의 시공 방법 및 관련 소요비용에 대한 검토와 기존 공법에 대한 소요비용의 검토를 통해 적정 소요 비용을 기준으로 한 경제성을 분석하여 보고 관련 기술의 경제성을 분석하는 것을 목표로 한다.

## Ⅵ. 결론

# SUMMARY

## Ⅰ. Introduction

Purpose of this study is development of high quality undisturbed specimen sampling technique and test method using by artificial freezing system in sandy soil. Furthemore, propose utilizing techniques of test result to complete the system design, production, transportation, storage and experiment which is whole process of the practical mechanism.

## Ⅱ. Technical developments at home and abroad

Frozen sampling means a technique of sampling soil using by artifical freezing, and the targets of the skill are sand and sandy soil which can not stand on those own competence. Disturbance of the sample during excavation, sampling, transport process is minimized when worker uses frozen sampling system so that it is possible to evaluate high quality specimen(Perfect Sampling). In this chapter, introduce the case study in Canada, Japan, Germany and applicable domestic area to recognize the technique development in nowadays.

## Ⅲ. Building simultaneous freezing sampling system and evalution

Evaluate a competence of system to field saturated sand soil and weathered granite soil targets. And then, derive improvement and estimate various frozen sampling core unit which is described in chapter 2. Furthemore, evaluate the other core techniques during ground freezing, sampling, transportation, storage process. Hereby, verify a whole process of frozen sampling system by conducting field evaluation of developed tecnique.

## Ⅳ. Development of frozen sample evaluation

To observe strength evaluation of artificial frozen soil and change of seismic characteristics, comprehend freezing-melting property by making various condition of specimen. Moreover, introduce trimming frozen soil technique by artificial freezing system and arrange application and procedure of triaxial compression test.

## Ⅴ. Analysis of frozen sampling system operation

Ground freezing, transportation, storage, extraction, forming, and simulation are used to build a criteria of field frozen sampling system. Such as this new system, checking method of construction and use through application of system and examination of related cost is necessary.

## Ⅵ. Conclusion

# CONTENTS


Chapter 1 Introduction ····· 1

1. Research background ····· 1
2. Research purpose and main contents ····· 4
   가. Total research objective and main contents ····· 4
   나. Research objective of the year and main contents ····· 7

Chapter 2 Technical developments at home and abroad ····· 9

1. Frozen sampling system and case of home and abroad ····· 9
   가. Outline ····· 9
   나. Development of frozen sampling system at home and abroad ····· 11
   (1) Outline of refrigerant for ground freezing ····· 11
   (2) Classification of used refrigerant ····· 14
   (3) Classification by number of freezing tube ····· 15
   (4) Classification by freezing depth ····· 18
   다. Frozen sampling application case at home and abroad ····· 19
   (1) Duncan dam in Canada ····· 19
   (2) CANLEX project ····· 20
   (3) Frozen sampling case in Japan ····· 22
   라. Discussion of ground artificial freezing technique at home and abroad ·· 23
   (1) Crossing construction on a riverbed case ····· 23
   (2) Shield tunnel protection case ····· 24
   (3) Shield tunnel protection case at underground connecting ····· 25
   (4) contaminated soil purification case ····· 26
   마. Method of frozen sample sampling·transportation·storage ····· 27
   (1) Method of sampling frozen sample ····· 27
   (2) Cutting cross section of core ····· 31
   (3) Transportation·storage of cross section of core ····· 31

ㅂ. Test using by frozen sample ····· 34
2. Analysis of frozen sampling system cost ····· 38
ㄱ. Investigation of validity of technical development at home and abroad ·· 38
ㄴ. Investigation of domestic applicable area/construction ····· 44
ㄷ. Analysis of base data for analysis of technical feasibility ····· 50
(1) Evaluation of frozen sampling cost ····· 50
(2) Cost comparison between frozen and unfrozen sampling ····· 52
(3) Assignment of future ····· 54
3. Conclusion ····· 55
4. Research result up to current ····· 56
ㄱ. 1st year ····· 56
(1) Summary of research result in 1st year ····· 56
(2) Outcomes of 1st year ····· 56
ㄴ. 2nd year ····· 69
(1) Summary of research result in 2nd year ····· 69
(2) Outcomes of 2nd year ····· 69

**Chapter 3 Building simultaneous freezing sampling system and evluation of field performance ····· 89**

1. Development simultaneous freezing sampling system ····· 89
ㄱ. Outline ····· 89
ㄴ. Multiple freezing tube for simultaneous ground freezing ····· 90
ㄷ. Rapid refrigerant supply system ····· 92
2. Evaluation of artificial freezing system and operation technology ····· 94
ㄱ. Outline ····· 94
ㄴ. Target area terrain and soil characteristics ····· 95
(1) Geology of target area terrain ····· 95
(2) Engineering properties of target area ····· 101
ㄷ. Ground freezing ····· 103
(1) Installation of frozen sampling system on site ····· 103
(2) Refrigerant injection and underground temperature measurement ····· 107

라. Non-destructive testing before and after freezing ····· 113
(1) Electrical resistivity tomography ····· 113
(2) Conclusion ····· 120
3. Frozen ground excavation and development of sampling·transport technique 121
가. Research of excavation and sampling method for frozen ground ····· 121
나. Research of transportation and storage of frozen sample ····· 124
4. Conclusion ····· 126

Chapter 4 Development of frozen sample evaluation ····· 129

1. Frozen soil strength evaluation and seismic characteristics ····· 129
가. Frozen soil using by Jumunjin sand ····· 129
나. Frozen soil by artificial freezing system ····· 146
(1) Location of target site ····· 146
(2) Ground non-destructive test before and after freezing ····· 146
(3) Lab test to evaluate undisturbed frozen sample ····· 154
2. Freezing-melting characterization of sand-silt mixture ····· 165
3. Technique of making frozen specimen ····· 180
4. Technique of making frozen specimen and triaxial compression test ····· 182
가. Coverage ····· 182
나. Cited standard ····· 183
다. Notice ····· 183
라. Definition ····· 183
마. Test equipment ····· 184
(1) Refrigerator ····· 184
(2) Freezing chambet ····· 184
(3) Triaxial compression test machine ····· 185
(4) Deaerator ····· 186
(5) Elastic wave measurement system ····· 187
(6) Other organization ····· 187
바. Setting sample ····· 188
사. Making specimen ····· 191

ㅇ. Triaxial compression test procedure ····· 192
(1) Setting specimen ····· 192
(2) Melting ····· 193
(3) Circulation ····· 193
(4) Saturation ····· 193
(5) Consolidation ····· 194
(6) Shear ····· 194

Chapter 5 Analysis of frozen sampling system operation ····· 195

1. Criteria of field operation of frozen sampling system ····· 195
가. Geound freezing ····· 195
나. Transportation and storage ····· 195
다. Extraction and forming ····· 196
라. Ground freezing·sample extraction·transportation·storage simulation ····· 198
(1) Sampling place and geological configuration ····· 198
(2) Freezing using by liquid nitrogen ····· 198
(3) Freezing tube insulation ····· 198
(4) Frozen sampling procedure ····· 198
마. Multiple freeze-tube & rapid refrigerant supply system safety instruction and manual ····· 201
(1) Multiple freeze-tube & rapid refrigerant supply system instruction ····· 201
(2) Multiple freeze-tube & rapid refrigerant supply system manual ····· 203
2. Economic evaluation of developed technique ····· 205
가. Outline ····· 205
나. Economic analysis target review and analysis method ····· 205
다. Analysis of frozen sampling cost ····· 206
라. Analysis of comparison method cost비교공법 소요비용 분석 ····· 210
3. Conclusion ····· 214

Chapter 6 Conclusion ····· 215

Reference ····· 218

# 목 차


**제 1 장 서 론 ····· 1**

1. 연구배경 ····· 1
2. 연구의 목적 및 주요내용 ····· 4
   가. 최종연구목표 및 주요내용 ····· 4
   나. 당해연도 연구목표 및 주요연구내용 ····· 7

**제 2 장 국내·외 기술개발 현황 ····· 9**

1. 동결샘플링 시스템 및 국내·외 적용사례 ····· 9
   가. 개요 ····· 9
   나. 국내·외 지반동결 시스템 개발 사례 ····· 11
   (1) 지반동결을 위해 사용되는 냉매 개요 ····· 11
   (2) 사용냉매에 다른 분류 ····· 14
   (3) 동결관 본수에 다른 분류 ····· 15
   (4) 동결심도에 따른 분류 ····· 18
   다. 국내·외 동결샘플링 적용 사례 ····· 19
   (1) 캐나다 Duncan dam ····· 19
   (2) CANLEX project ····· 20
   (3) 일본의 동결샘플링 사례 ····· 22
   라. 국내·외 지반 인공동결기술 방안 고찰 ····· 23
   (1) 하저 횡단공사에 적용된 사례 ····· 23
   (2) 쉴드터널 발진부 방호사례 ····· 24
   (3) 쉴드터널 지중 접합 시의 방호 사례 ····· 25
   (4) 오염 토양 정화 대책으로서의 적용사례 ····· 26
   마. 동결시료 채취·운반·보관방법 ····· 27
   (1) 동결시료 채취방법 ····· 27
   (2) 코어 단면의 절삭 ····· 31
   (3) 코어 단면의 운반·보관 ····· 31

바. 동결시료를 이용한 시험 ····· 34
2. 동결샘플링 시스템 코스트 분석 ····· 38
가. 국내·외 기술개발 타당성 조사 ····· 38
나. 국내 적용가능 대상지역/대상구조물 조사 ····· 44
다. 개발기술의 경제성 분석을 위한 기초자료 분석 ····· 50
(1) 동결샘플링 코스트 평가 ····· 50
(2) 동결샘플링과 비동결 샘플링 코스트 비교 ····· 52
(3) 이후의 과제 ····· 54
3. 소결 ····· 55
4. 현재까지 연구성과 ····· 56
가. 1차년도 ····· 56
(1) 1차년도 연구성과 요약 ····· 56
(2) 1차년도 추진실적 ····· 56
나. 2차년도 ····· 69
(1) 2차년도 연구성과 요약 ····· 69
(2) 2차년도 추진실적 ····· 69

**제 3 장 동시동결 채취 운용시스템 구축 및 현장 성능 평가 ····· 89**

1. 동시동결 채취 운용시스템 개발 ····· 89
가. 개요 ····· 89
나. 동시 지반동결을 위한 다중 동결관 ····· 90
다. 급속 냉매 공급시스템 ····· 92
2. 인공동결 시스템 성능 및 운용기술 평가 ····· 94
가. 개요 ····· 94
나. 대상지역 지형 및 지반특성 ····· 95
(1) 대상지역 지형 지질 ····· 95
(2) 대상지반의 공학적 특성 ····· 101
다. 지반동결 ····· 103
(1) 동결샘플링 시스템 현장설치 ····· 103
(2) 냉매주입 및 지중온도 계측 ····· 107
라. 동결전·후 지반 비파괴시험 ····· 113

(1) 전기비저항 토모그래피 ····· 113
(2) 소결 ····· 120
3. 동결지반 굴착 및 시료 채취·운반 기술 개발 ····· 121
가. 동결지반에 대한 굴착 및 채취기법 연구 ····· 121
나. 채취 동결시료에 대한 운반 및 보관기법 연구 ····· 124
4. 소결 ····· 126

**제 4 장 동결샘플링 시료에 대한 성능 평가기번 개발 ····· 129**

1. 동결시료의 강도평가와 탄성파 특성변화 ····· 129
가. 주문진 표준사를 이용한 동결시료 ····· 129
나. 인공동결공법을 이용한 동결시료 ····· 146
(1) 대상지역 위치 ····· 146
(2) 동결 전후 지반 비파괴시험 ····· 146
(3) 비교란 동결시료의 실내실험 평가 ····· 154
2. 탄성파를 이용한 모래-실트 혼합토의 동결-융해 특성 ····· 165
3. 동결채취시료 시편제작 기술 ····· 180
4. 동결시료의 시편제작 기술 및 삼축압축실험법 ····· 182
가. 적용범위 ····· 182
나. 인용표준 ····· 183
다. 주의사항 ····· 183
라. 용어정의 ····· 183
마. 시험장비 ····· 184
(1) 냉동고 ····· 184
(2) 동결용 챔버 ····· 184
(3) 삼축압축시험기 ····· 185
(4) Deaerator ····· 186
(5) 탄성파 측정시스템 ····· 187
(6) 기타기구 ····· 187
바. 시료의 준비 ····· 188
사. 공시체 제작 ····· 191
아. 시험방법 ····· 192

(1) 시료거치 ····· 192
(2) 융해 ····· 193
(3) Circulation ····· 193
(4) 포화 ····· 193
(5) 압밀 ····· 194
(6) 전단 ····· 194

**제 5 장 동결샘플링 시스템 운용 및 활용방안 분석 ····· 195**

1. 동결샘플링 시스템 현장 운용 기준(안) ····· 195
가. 지반동결 ····· 195
나. 운반 및 보관 ····· 195
다. 추출 및 성형 ····· 196
라. 지반동결·시료채취·운반·보관 시뮬레이션 ····· 198
(1) 시료 채취 장소와 지층 구성 ····· 198
(2) 액체 질소를 이용한 동결 ····· 198
(3) 동결관 단열방식 ····· 198
(4) 동결샘플링 작업 수순 ····· 199
마. 다중 동결관 및 급속 냉매 공급시스템 안전지침 및 운전 매뉴얼 ····· 201
(1) 다중 동결관 및 급속 냉매 공급 시스템의 안전지침 ····· 201
(2) 다중 동결관 및 급속 냉매 공급 시스템의 운전 매뉴얼 ····· 203
2. 개발기술의 경제성 평가 ····· 205
가. 개요 ····· 205
나. 경제성분석 대상검토 및 분석방법 ····· 205
다. 동결샘플링 소요비용 분석 ····· 206
라. 비교공법 소요비용 분석 ····· 210
3. 소론 ····· 214

**제 6 장 결론 ····· 215**

**참고문헌 ····· 218**

# 제 1 장

# 서 론

## 1. 연구배경

최근 일본열도를 뒤흔든 동일본 대지진(2011.3.11, 진도 9.0)이 발생하면서 국내 내진 설계 기준 중요성이 대두되고 있다. 국내에서도 연간 지진발생건수가 2009년 60회에 달하고, 특히 13지점의 다목적댐 인근에서 36회 이상의 지진이 기록되는 등 지진에 대해 완전히 안전하다고만 할 수 없으며, 언제든 큰 지진이 닥칠지 모르는 상황에서 지진에 대한 구조물 안정성 평가를 위한 체계적인 연구개발이 필요하다.

또한 최근 해저터널 및 인공섬 등 해안 관련 공사가 늘어나면서 지진 시 지반의 액상화 평가 등 모래지반을 정량적으로 평가할 필요성이 높아지고 있다.



그림 1-1 일본 동북부 대지진 (2011.3.11)

이와 같이 지진에 대한 구조물의 안정성 평가를 위해서는 1차적으로 고품질의 불교란 상태의 시료채취 기술이 필요하고, 2차적으로 채취시료를 이용한 효율적인 실험을

통해 건물의 내진안정성 평가기법의 구축이 요구된다.

액상화 평가를 위한 실험의 경우, 비교란 사질토의 채취가 어렵고 경제적 부담이 요구되며 시료가 교란된 경우, 상대밀도나 응력상태는 실험실에서 재현이 가능하지만 그 밖의 여러 가지 요소들은 재현이 불가능하다. 따라서 실험으로부터 정확한 동적물성치를 얻기 위해서는 시료를 대상지반으로부터 채취할 때 교란이 되지 않게 하는 것이 핵심사항이다.

모래지반을 평가하는 방법으로 SPT나 탄성파 탐사가 수행되고 있으나, 설계 시 요구되는 지반정수를 정량적으로 평가하기 위해서는 모래지반을 교란시키지 않고 직접 채취한 후 삼축압축실험을 통해 내부마찰각 등 강도정수를 구하는 것이 가장 확실한 방법이다.

국내 기존 공사현장에 대한 토질의 경우 전국 74개 지역, 176개 택지 공사현장의 심도 1~5m에 위치한 시료 3,861개에 대한 통일분류(USCS)법으로 인한 토질의 종류를 분류하였는데, 조립질의 사질성분의 분포는 그림 2와 같이 약 77.7%로 나타났다(대한주택공사, 2007).

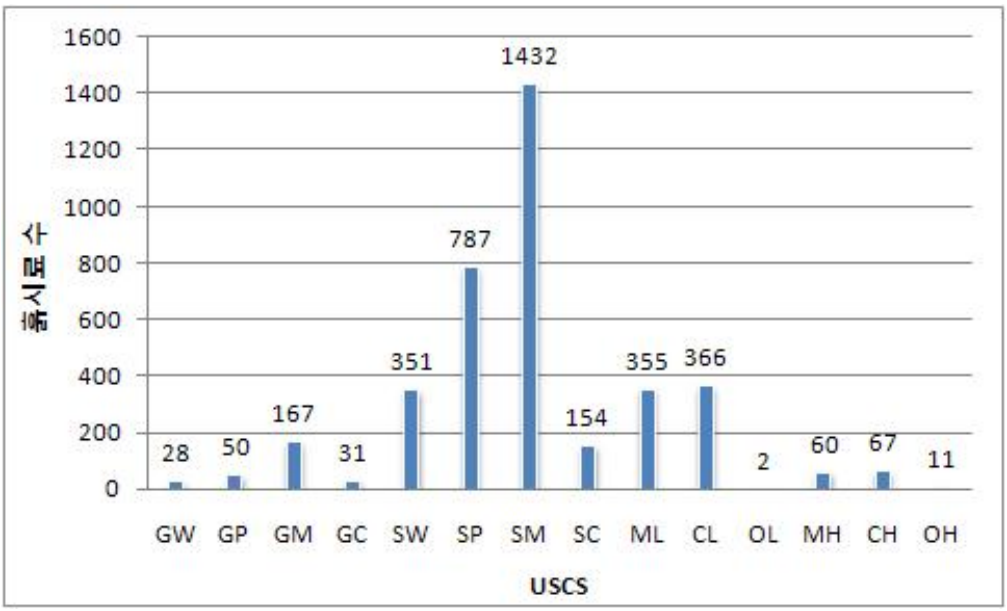



그림 1-2 전국 택지공사 지역 토질분류, 대한주택공사(2007)

대구경 샘플러, 3중관식 샘플링 등 국내외적으로 모래지반을 교란시키지 않고 채취하려는 시도가 여러 차례 있었으나, 일본에서 현장에 적용된 바 있는 “인공동결에 의한 샘플링”을 제외하고는 아직까지 모래지반을 교란시키지 않고 채취하는 방법은 없다.

현재 사질지반상의 중요 토목/건축 구조물의 내진설계의 신뢰성 향상을 위해 동결샘플링에 의한 고품질의 불교란 사질토 채취를 통한 내진평가를 수행하도록 정책적·기술적 전환을 진행하고 있으며, 전 세계의 동결샘플링 채취 시장은 각국의 정책적 제도에 따라 정량화할 수 없으나, 시장규모는 매우 클 것으로 예상된다. 국내에서도 사질토의 동결샘플링을 통한 내진설계의 신뢰성 향상을 중요 연구개발분야로 설정하여, 토목지반 및 기계분야의 핵심기술 연구개발을 계획 중에 있다.



그림 1-3 현장 동결시료 채취 (동결쏘일리서치, 2011)

고품질 사질토 시료 채취를 위한 핵심기술은 신속한 지반동결 기술, 채취 및 운반 기술, 공시체 성형 기술 등이며, 일반적인 연약점토시료의 샘플링 기술에 비하여 기술적·경제적 고려사항이 많지만, 고품질의 불교란 사질시료의 채취 및 이를 이용한 실험은 중요 토목/건축 구조물의 합리적 설계 및 경제성 향상으로 직결되므로, 국내의 지반조사 전문업체 자체적으로 개발계획을 수립하고 있는 실정이다.

국내는 아직 동결샘플링기법을 이용한 사질토 채취 경험 및 장치는 전무하나, 동결샘플링기술분야의 최고 선진국인 일본의 경우 2004년 시점에서 동결 길이의 총계는 720m를 넘어섰고, 2009년까지 집계된 적용 건수는 100건을 넘었음. 또한, 이 중 설계목적으로 적용된 경우가 64%를 차지하는 것으로 나타나 중요 토목/건축구조물의 설계시 동결샘플링이 실무적인 조사법으로 인식되고 있다.

“인공동결공법을 이용한 모래지반 및 자갈의 불교란시료 채취기술”을 개발하여 사질

토 지반의 액상화 평가 및 전석·자갈·화강풍화토·쓰레기 매립지반의 정량적 평가기술을 개발함으로써 난조건 지반에 축조하는 토목, 건축 구조물을 경제적, 안정적으로 설계, 시공할 필요가 있다.

## 2. 연구의 목적 및 주요내용

### 가. 최종연구목표 및 주요내용

본 연구의 최종목표는 사질지반에 인공동결공법을 이용한 고품질의 불교란 시료 채취 기술 및 시험법을 개발하고, 시험결과의 활용기법을 제안하는 것으로서 채취 장비의 설계 및 제작/운반/보관/시험에 이르는 전 단계를 완성하는 실용적 성격의 연구이다.

전 세계에 있어서 동결샘플링이 가장 활발하게 이루어지고 있는 일본의 경우는 바닷가를 중심으로 지반 액상화의 주요원인이 되는 느슨한 모래층이 폭넓게 분포되어 있는 반면, 국내는 산악지형을 중심으로 화강풍화토가 폭넓게 분포하고 있어, 흙의 입도구성을 비롯한 여러 조건에서 지반 특성이 상이하여 일본 장비를 그대로 적용하기에는 어려움이 있다. 따라서 동결샘플링 장비의 소형화로 이동이 간편하고, 국내 지반 여건에 맞는 굴착비트를 개발하는 등 '한국형 동결샘플링 장비'를 개발하는 것이다.

국내에 폭넓게 분포하는 지층인 화강풍화토 지반과 지진과 같은 동적하중에 의한 지반피해에 큰 영향을 미치는 모래지반과 같은 사질토지반을 대상으로 인공동결공법을 이용한 동결시료 채취/ 운반/ 보관 시스템 개발 및 시험법을 체계화하고, 개발 기술시스템의 현장 실증연구 및 실내 실험을 통해 실용화 기반을 구축하여, 향후 수년 내에 국내 지반조사 분야의 상용 기술로 활용하고자 한다.

최종 목표를 달성하기 위한 주요 요소기술은 다음과 같다.

○ 인공동결공법을 이용한 불교란시료 채취기술 개발
- 국소범위 지반동결기술
- 동결시료 채취기술

○ 인공동결공법을 이용한 불교란시료 채취장비 구축
- 인공동결 샘플링장비 유닛(unit) 제작
- 기술적용을 위한 장비 조합

○ 샘플링한 동결시료의 불교란상태유지를 위한 교란요소 제거기법 개발

- 코어링 후의 샘플의 응력해방 방지 기술
- 채취한 시료의 운반/보관 방법

○ 동결채취시료 시험법 개발 및 현장 활용기법 개발

- 동결채취시료에 대한 원지반 응력상태 재현가능한 시험법 개발
- 지반 설계정수 간이추정기법 개발
- 지반 지진안정성 평가기법 개발

세부 연구 내용은 다음의 표 1-1에 나타내었다.

표 1-1 최종 연구목표 및 세부 연구내용

| 세부기술분야 | 연구내용 및 범위 |
|---|---|
| ■ 동결샘플링시스템 개발 | ■동결샘플링 장치 핵심 유닛(unit) 설계<br>·동결시료 샘플링 장치 설계<br>·최적의 지반동결을 위한 지반 열손실 방지기술 정립<br>■동결샘플링 시스템(동결/채취/운반/보관)(1단계)<br>·동결지반 천공용 굴착 Bit 제작<br>·이중순환시스템을 활용한 급속 동결장치 개발<br>·열손실 방지를 위한 동결채취 샘플 tube 제작<br>·동결지반 샘플링용 인공 동결관 제작<br>·동결시료 운반장치 제작<br>■경제성을 감안한 동시동결 채취기법 개발<br>·다량의 동결 채취가 가능한 대용량 동결플랜트 개발<br>·동결 distributer 장치 개발 |
| ■지반동결샘플링 성능평가 | ■포화 사질지반에 대한 대상지 사전조사<br>·전단파 주상도 획득을 위한 원위치 관입실험<br>·물리탐사(표면파, 전기비저항)<br>·시추공내 시험<br>■동결샘플링 시스템 현장시험<br>·동결샘플의 동결상태 실시간 Monitoring 및 분석<br>·동결확산영역 경시변화 계측 및 시스템 성능평가<br>■동결·채취·운반·보관 기법 평가<br>■원지반 응력조건 모사가능 동결시료 융해법 적용<br>■시료의 교란효과 평가기법<br>·채취시료의 동결융해 거동특성 평가<br>·채취시료의 액상화 강도 평가<br>·채취시료의 동적 물성치 평가<br>·실내 비파괴 시험을 통한 시료의 품질 평가<br>·현장적용 대상지 기초조사결과와 실내실험결과 비교분석 |
| ■동결샘플링 운용/시험기법 확립 및 활용방안 | ■동결샘플링 운용방안 수립<br>·동결샘플링 시스템 운용방법 제시<br>·채취시료 시험기법 제시<br>·동결시료 성능평가 기준 제시<br>■동결샘플링 시스템의 경제성 평가<br>■활용방안 제시<br>·불교란 사질지반에 대한 설계정수 제시<br>·국내 사질지반 원위치 강도변형 특성 간이추정법(안) 제시<br>·국내 사질지반 지진 안정성 평가기법(안) 제시 |

나. 당해연도 연구목표 및 주요연구내용

최종연도인 당해연도(3차년도) 연구는 1차, 2차년도에서 개발한 핵심 unit 및 기반기술의 수준을 향상시키고, 이를 현장에 적용해 봄으로써 실용화기반 마련을 목표로 하고 있다. 1차년도가 핵심 unit들을 개발하고, 이상화된 시험조건에서의 지반동결성능을 평가하는 단계였고, 2차년도에는 핵심 unit의 구조 변경, 시스템의 자동화 등 동결플랜트를 비롯한 시스템 개선을 도모하고, 이에 대한 현장실증실험을 수행하였다. 최종연도인 3차년도에는 동결샘플링 현장실증을 위해 안동 (한국건설기술연구원 하천실험연구센터 내) 모래/모래자갈지반을 대상으로 개발한 모든 기술에 대한 성능을 평가하고, 동시에 개선사항을 도출하여 기술을 완성하고자 한다. 그리고 각종 현장물리탐사(전기비저항, 표면파탐사, 토모그라피탐사)과 실내물리·역학실험을 통해 동결채취시료의 교란도 및 실내시험법의 확립에 토대를 마련한다. 지반인공동결 실내성능평가부분에서는 4계절 지반인공동결실험이 가능한 전용 야외실험동을 구축하고, 이를 통해 지하수 흐름, 포화조건 등의 복잡한 현장상황을 반영한 실험을 실시한다. 또한, 실험결과의 심층분석을 위해 간극수의 잠열을 고려한 수치해석프로그램을 작성하고, 이를 이용해 지중온도해석 및 지반인공동결 성능을 평가한다. 세부 연구내용은 표 1-2에 나타내었다.

표 1-2. 3차년도 연구목표 및 세부 연구내용

| 연구목표 | 세부 연구내용 |
|---|---|
| ■ 경제성을 감안한 동시동결 채취기법 개발 | ■ 동결샘플링 장비 제작 (2차년도)<br>· 열손실 방지를 위한 동결채취 샘플 tube 개발<br>· 지반 부분심도 동결관 개발<br>· 현장 적용 동결 plant 보완<br>· 동결채취시료 전용 운반 용기 제작<br>■ 동결샘플링 핵심 unit 실내 검증 (이월분)<br>· 지반 온도경시변화 및 거동특성 평가<br>· 지반 투수조건에 따른 동결성능 평가<br>· 지반 간극비별에 따른 동결성능 평가<br>· 지반 함수율에 따른 동결성능 평가<br>■ 동결샘플링 시스템 적용 대상지 기본 현장조사(2차)<br>· 전단파 주상도 획득을 위한 원위치 관입실험법 적용-FVP<br>· 물리탐사(표면파, 전기비저항) |

| | |
|---|---|
| | · 시추공내 시험(전단시험, 투수시험 외)<br>■ 지반 동시동결 채취기법 개발 및 현장적용<br>· 다량의 동결 채취가 가능한 대용량 동결플랜트 개발<br>· 동결 distributer 장치 개발<br>· 동결채취시료 전용 운반 용기 개발<br>· 열손실 방지 부분 동결관 개발<br>· 블록 동결시료 코아 채취기 제작<br>· 포화모래지반/화강풍화토지반에 대한 동시동결 채취기법 현장실증<br>■ 동결지반 굴착/채취 기술 개발(2-2단계)<br>· 지반재료별 드라이아이스를 이용한 실내/현장 동결실험<br>· 굴착 Bit 및 코어베럴 최적 조합 및 운용 조건 도출<br>■ 동결샘플링 시스템(동결 · 채취 · 운반 · 보관 프로세스) 매뉴얼 제작 |
| ■ 동결샘플링 시료에 대한 시험법 정립 | ■ 원지반 응력조건 모사가능 동결시료 융해법 확립 및 매뉴얼 작성<br>■ 채취한 불교란 시료의 분석(2)<br>· 시료의 교란효과 평가기법 확립<br>· 현장적용 대상지 기초조사결과와 실내실험결과 비교분석 |
| ■ 동결샘플링 시스템 운용/시험기법 확립 및 활용방안 제시 | ■ 동결샘플링 운용방안 수립<br>· 동결샘플링 시스템 운용방법 제시<br>· 채취시료 시험기법 제시<br>· 동결시료 성능평가 기준 제시<br>■ 동결샘플링 시스템 및 시험법 원가분석을 통한 경제성 평가<br>■ 활용방안 제시<br>· 불교란 사질지반에 대한 설계정수 제시<br>· 국내 사질지반 원위치 강도변형 특성 간이추정법(안) 제시<br>· 국내 사질지반 지진 안정성 평가기법(안) 제시 |

# 제 2 장

# 국내·외 기술개발 현황

## 1. 동결샘플링 시스템 및 국내외 적용사례

### 가. 개요

동결샘플링은 지반을 인공적으로 동결시켜(시료 채취 시 지반온도 -15℃), 지반의 강성을 증가시킨 후 시료를 채취하는 기술이다. 대상지반으로는 모래·사질토 지반과 자갈질토 지반 등 자립이 되지 않는 지반을 대상으로 한다. 이러한 지반에서는 기존의 튜브법으로는 교란되지 않은 시료채취가 불가능하지만, 동결샘플링을 이용하는 경우 굴착·채취·운반 과정에서의 교란이 극소화되어 강도·변형특성을 정량적으로 평가할 수 있는 고품질의 시료채취(Perfect Sampling)가 가능하다.

동결샘플링기술에 있어서 핵심 되는 기술은 지반을 동결시키는 기술로서, 1862년 영국에서 광산용 수직갱 건설시 대수층의 붕괴방지를 목적으로 처음 적용된 인공동결공법을 모태로 하고 있다. 인공동결공법은 지반시료 채취를 위한 목적 이외에 도시 지하도, 하천 하부의 터널 건설에 일본을 중심으로 활발히 적용되고 있고, 지하수위가 높은 도시에서의 지하철, 상하수도, 전력선, 지하 저류조 등과 같은 지하 굴착 공사, 하천 및 해저 터널 공사, 병렬터널간의 피난 연락갱 접속공사, 터널과 수직갱 간의 연결 공사, 지하 확폭 등으로 확대 적용되면서, 최근에는 중금속, 휘발성 유기화합물, 기름 등으로 오염된 지반을 정화하는 공법으로도 적용이 확대되고 있다.

동결샘플링은 모래·사질토 지반과 자갈질토 지반을 대상으로 한 불교란 채취기술로 정의할 수 있다. 기존의 튜브법으로는 교란되지 않은 시료채취가 곤란한 모래와 자갈질토의 강도·변형특성을 정량적으로 평가하기 위한 교란되지 않은 고품질의 시료채취가 가능하다. 동결샘플링은 이러한 지반에서 토립자의 미시적인 구조를 유지하도록 지반을 팽창시키지 않는 범위 내에서 천천히 동결을 시킨 후, 동결된 지반으로부터 코어보링에 의해 동결상태로 시료를 채취한다. 그림 2-1과 2-2에 동결샘플링 개요도, 현장 적용 및 채취된 동결시료 전경을 나타냈다.

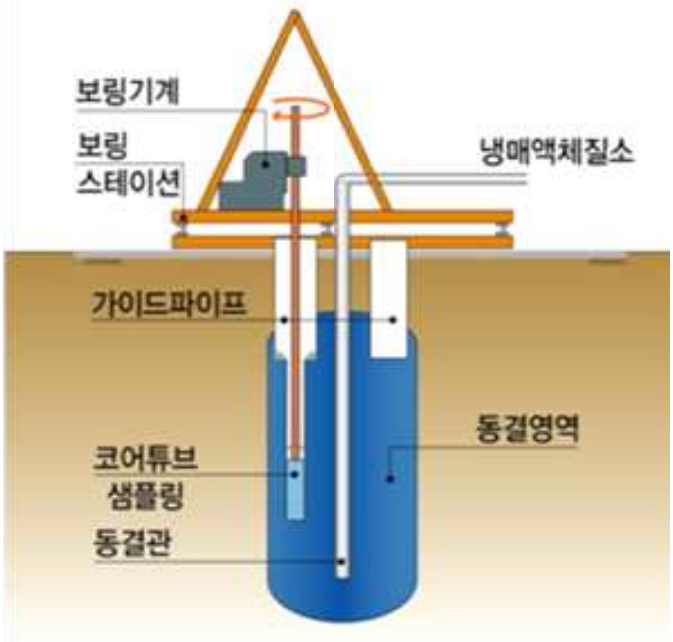



그림 2-1. 동결샘플링 개요도



그림 2-2. 현장적용 및 채취시료 전경(동경소일리서치)

표 2-3. 동결샘플링 적용을 위한 지반조건 및 샘플링 조건

| 조 건 | 항 목 | 비 고 |
|---|---|---|
| 지반 조건 | ① 동결에 필요한 포화도가 높은 지반 | 일반적으로 지하수위 이하 지반 |
| | ② 세립분 함유율이 낮은 지반 | 세립분 함유율이 높은 지반, 구속압이 낮은 지반일수록 동결시 팽창될 가능성이 높음 |
| | ③ 적당한 구속압이 주어진 지반 | |
| 샘플링 조건 | ④ 동결관 외측방향으로 간극수가 배제되는 상태로 동결함 | 동결로 인한 지반팽창 방지 |
| | ⑤ 동결관에서 떨어진 부분에서 샘플링함 | 동결관 삽입을 위해 천공한 직경의 1배 정도 떨어진 지점에서 샘플링 |

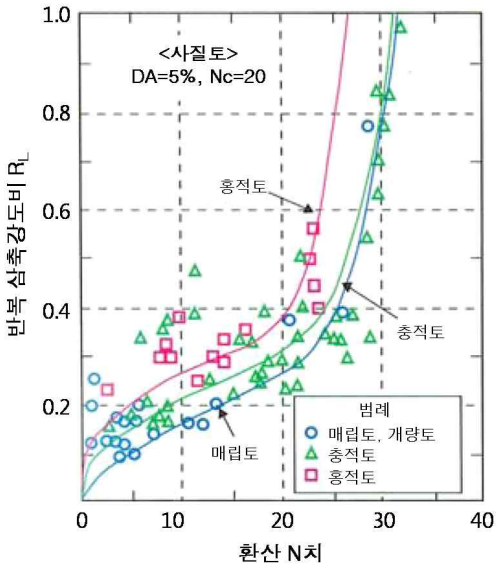



그림 2-3 . 동결시료를 이용한 환상 N치와 반복삼축강도비 관계(Matsuo, 1997)

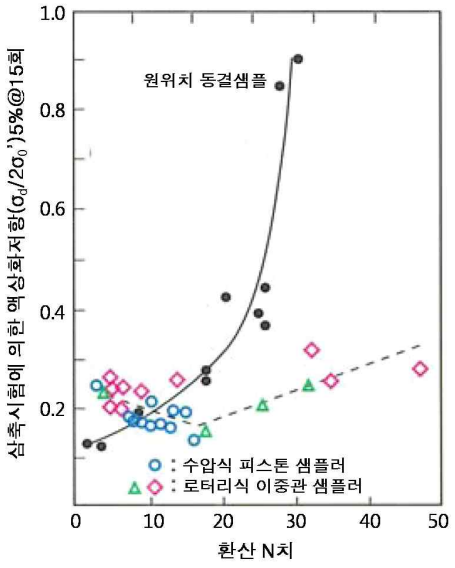



그림 2-4. 동결시료와 튜브시료의 액상화 저항~환산N치 관계(Yoshimi, 1994)

일본에서는 동결샘플링의 우수성이 여러 현장을 통해 입증되어 '건축기초구조설계지침', '도로교시방서 V내진설계편', '철도구조물설계표준 내진설계'에 기준으로 채택되어 있다(예, 그림 2-3;일본 도로교시방서 액상화 판정방법의 기준). 그림 2-4은 기존 시료채취 방법과 동결샘플링에 의해 채취한 시료를 이용한 반복삼축시험결과와 환산 N치와의 관계를 나타내고 있는데, 그림에서 알 수 있듯이, 기존 튜브샘플링 방법에서는 진동에 의해 느슨한 지반에서는 원위치 상태보다 조밀한 시료가 얻어지는 반면, 조밀한 지반에서는 느슨한 시료가 얻어져, 지반이 조밀해지는데 따른(N치 증가) 액상화 강도의 증가가 뚜렷하게 나타나지 않는다. 이는 곧 기존 샘플링 방법으로는 정확한 지반 물성치를 구할 수 없다는 것을 의미한다.

본 절에서는 중요 SOC구조물의 경제적·안정적 설계의 근간이 되는 고품질의 시료채취 기법인 지반동결 시스템 및 해외 동결샘플링 현황조사 결과에 대해 소개하고, 이와 관련한 국내외 기술동향 분석 및 기술개발을 위해 시급히 요구되는 기술을 제시하고자 한다.

## 나. 국내·외 지반동결 시스템 개발 사례

### (1) 지반동결을 위해 사용되는 냉매 개요

지반을 동결시키는 방법은 강관 속을 순환시키는 냉매의 종류에 따라 2종류로 나뉘고, 몇 본의 동결관을 이용하는 가에 따라 단관 동결과 복수의 동결관을 동시동결 방법으로, 동결심도에 따라서도 전심도동결과 부분심도동결 나뉜다. 이하에는 상술한 각 동

결공법에 대해 기술한다.

(가) 액체질소

액체질소는 질소가 액화된 상태로 대기압 하에서 -196℃에서 액체로 존재한다. 공기 중의 약 79%를 차지하고 있는 질소를 생산하는 방법은 흡착법, Membrane법 등이 있지만 액체질소를 생산할 수 있는 방법은 공기를 액화점 이하로 냉각하여 분리하는 심랭식 공기분리장치(Cryogenic Air Separation Unit) 방법이 유일하다. 액체질소는 비점온도가 낮고 액화를 위한 동력소모가 크기 때문에 냉동유닛과 같은 냉동기에서 사용되는 1차냉매와 같은 방법으로는 사용할 수 없으며 별도의 공기액화 공정을 통해서만 액화질소를 생산할 수 있다. 이러한 액체질소는 다른 유체와 비교하여 공기분리장치를 통하여 대규모로 생산되고 시중에 유통되는 액체질소를 손쉽게 구할 수 있기 때문에 초저온을 요구하는 다양한 산업에 동결용도로 많이 사용되고 있다. 예를 들어 식품동결 및 의학분야(혈액 및 정액보존 등) 및 저온분쇄(플라스틱, 고무, 금속, 사료) 등에 이용되고 있으며, 콘크리트 냉각 및 토양동결 용도로도 사용될 수 있다.

액체질소를 이용한 토양동결의 경우 장치의 구성이 간단하고 낮은 비점온도로 인하여 빠른 동결시간을 얻을 수 있는 장점이 있다. 따라서 소규모의 지반 동결이나 급속동결 또는 단시간 내에 동결효과를 얻어야 하는 곳에서 적절하게 이용될 수 있다.

하지만, 액체질소를 이용한 동결은 액체질소의 상변화에 따른 잠열을 이용하는 방법으로 기화된 액체질소를 재액화 하기 위해서는 상당한 동력 소모 및 복잡한 장치 구성이 필요하기 때문에 동결 후 기화된 가스질소를 재활용하는 데에는 한계가 있으며, 이에 따라 대규모 지반 동결을 위해서는 액체질소의 사용비용이 증가하는 문제점을 가지고 있다.

(나) 재사용 냉매

온도를 떨어뜨리기 위해 사용되는 물, 공기, 저온의 액체질소 및 헬륨등도 모두 냉매의 범주에 포함된다. 특히 냉동기와 같이 냉매시스템 내에서 순환되는 유체의 경우 1차냉매라고 하며, 일반적으로 암모니아, 프레온계(CFC, HCFC,.), 혼합냉매 등이 주로 사용된다. 이러한 1차 냉매는 냉동사이클을 순환하면서 압축, 응축, 팽창 증발 과정을 거치면서 상변화가 이루어지고 이 상변화 과정에서 냉각효과를 발생시킨다.

1차 냉매는 비점이 낮고 증발잠열이 커야하며, 응축압력 및 비체적이 낮은 유체가 효율적인 냉매로 사용된다. 하지만 이 외에도 안정성 및 부식성 등의 영향을 고려한 냉매

의 선택이 필요하다. 이와 같은 특성을 보이면서 가장 많이 사용되는 1차 냉매로는 암모니아 및 프레온계열 냉매로 CFC, HCFC 계열 냉매 등이 있으며, 자연냉매로 CO2 등이 사용된다.

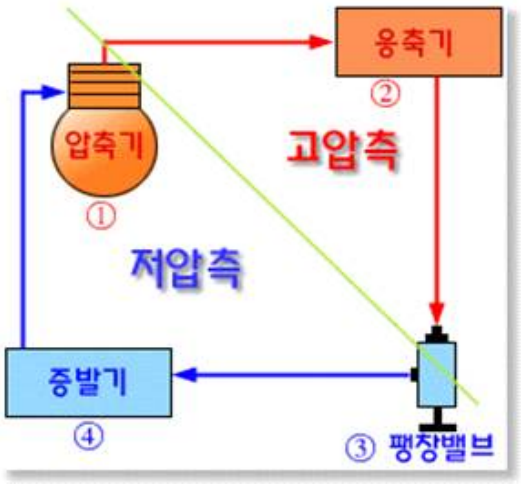



그림 2-5. 일반적인 냉동사이클

이와 같이 1차 냉매를 이용한 냉동에서는 액체질소를 사용한 지반 동결과는 다르게 순환되는 냉매를 재사용할 수 있으며, 별도의 누출이 없는 한 영구적으로 사용할 수 있다. 하지만 액체질소와 비교하여 초저온의 까지 냉각하지 어렵기 때문에 동결시간은 상대적으로 더 소요되며, 냉동사이클에 필요한 장치를 구성하여 사용해야 한다는 단점이 있다.

한편, 일반적인 냉동사이클만을 이용하여 유체를 냉각 및 냉동하는 방법은 1차 냉매만을 사용하는 직접냉각 방식이며, 냉동사이클을 통해 얻어진 냉열을 저온을 운반하는 매개체인 간접냉매(물, 브라인 등)를 사용하여 냉각하는 간접냉각 방식이 있다. 간접냉각 방식을 사용하는 것은 장치의 제어 및 온도 조절의 용이성 때문이다. 이와 같은 브라인은 냉동사이클의 증발기에서 증발하는 1차 냉매의 냉동력을 전달하는 역할을 수행하게 된다. 일반적으로 냉매는 저온의 열을 잠열의 형태로 고온부에 운반하는데 비하여 브라인은 현열의 형태로 냉동력을 운반하는 차이점을 가지고 있다. 따라서 브라인은 직접냉매와 달리 그 상태가 변화되지 않고 언제나 액체 상태이다. 일반적으로 브라인으로 사용되는 것은 염화나트륨, 염화칼슘 등의 무기 브라인과 에틸렌글리콜, 프로필렌글리콜 등의 유기 브라인이다. 이 중 염화칼슘 브라인은 현재 가장 널리 사용되고 있으며, 동결점도 매우 낮고(비중 1.286, -55℃) 부식성도 비교적 적으며 값이 싸다는 장점이 있다. 동결 온도를 -55℃까지 내릴 수 있기 때문에 제빙, 동결 및 냉장에 널리 이용되며,

농도에 따라 적당한 동결온도의 용액을 만들 수 있다.

지반 동결을 위한 냉동시스템을 구축하기 위해서는 앞서 언급한 냉동시스템에 2차 냉매인 브라인을 사용하여 자동 제어 및 온도제어를 용이하게 할 수 있는 방법으로 구성하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

(2) 사용냉매에 따른 분류

지반동결에 사용되는 주요 냉매는 브라인과 같이 재사용할 수 있는 것과 액체질소와 같이 재사용이 불가능한 것으로 나눌 수 있다. 지반동결의 효율성 향상을 위해서는 사용하는 냉매특성에 대 잘 이해할 필요가 있다.

(가) 액체질소 방식 (그림 2-6)

액체질소의 특성을 이용하여 지반을 동결하는 방법이다. 액체질소 1kg당, -196℃에서 기화할 때, 약 48kcal의 열량과, 더 기화하여 0℃까지 온도가 상승하는데 48kcal의 열량을 냉각 대상체로부터 빼앗아 간다. 따라서 액체질소 1kg을 동결관내에 넣어 0℃까지 온도가 상승한 질소가스를 대기 중으로 방출한다고 하면 동결관 주위로부터 96kcal의 열량을 빼앗는 것이 된다. 이런 액체질소를 연속적으로 동결관내에 공급하여 주변 지반을 동결하는 것이 본 방식이다. 일반적으로 Tank lorry로 운반된 액체질소를 동결관으로 직접 보내, 그 기화열로 지반을 동결시키며, 지반의 열을 빼앗아 기화된 질소 가스는 대기 중으로 배출된다.

액화가스 방법은 그림 2-6와 같이 액화가스 제조 공장으로부터 시공 현장까지 탱크를 운반해 파이프를 연결하여 액화가스의 기화열에 의해 동결시킨다. 이 방법의 장점은 지반의 동결속도가 빨라 공기를 단축시킬 수 있고, 기계설비가 간단하며 Brine 방법에 비해 지하수의 흐름이 빠른 지반에서도(약 10m/day) 적용이 가능한 점이다. 단점으로는 규모가 작고(동결토량 200$m^3$ 이하) 공기가 짧은 공사에 적용된다는 점과 배기가스의 대책이 필요하다는 점이다.

(나) 브라인 방식 (그림 2-7)

브라인 방식은  냉각기, 압축기, 응축기, 냉각탑 및 순환펌프로 구성되어 있으며, 물, 냉매(HCFC가 주류), 냉매($CaCl_2$ 수용액, -20℃~-30℃)를 순환펌프를 통해 지중에 매설된 강관으로 순환시켜 지반의 열이 대기에 방출된다. 지반으로부터 열을 빼앗아 온도가 높아진 brine은 냉각기로 되돌려져 다시 냉각된 후 강관으로 보내지는 순환과정을 반복

함으로써 동토가 차츰 성장하게 된다. 압축기에서 압축된 프레온가스는 응축기에서 냉각수에 의해 냉각되어 액화되고, 냉각기에 보내져 온도가 높아진 brine 부동액의 열을 빼앗아 기화된 후 다시 압축기로 돌아오는 과정을 되풀이한다. 지중의 열은 강관→brine→냉각기→프레온가스→응축기→냉각수를 거쳐 대기 중에 방출된다.

본 방식은 전술의 액체질소 방식과 대비하여, 200m$^3$~35000m$^3$ 정도에 달하는 대량의 동토를 생성할 수 있어 대규모 공사에 적용하는 방법으로 시공기간이 긴 대규모 공사에 적합하나, 대용량의 냉동설비와 넓은 부지를 필요로 하며, 동결 기간이 길며, 지하수 유속에 영향을 많이 받는다.

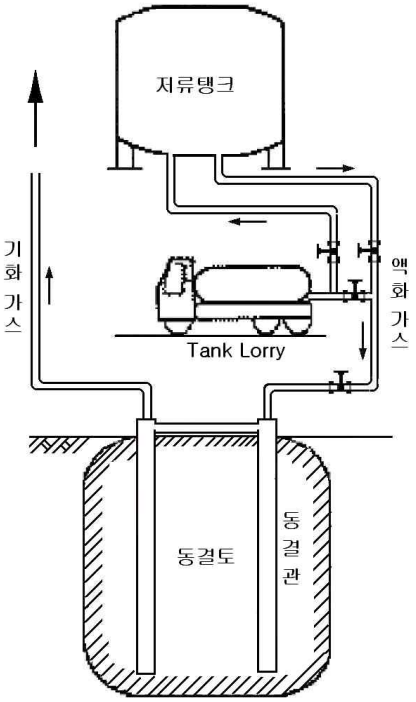



그림 2-6. 액체질소 방식

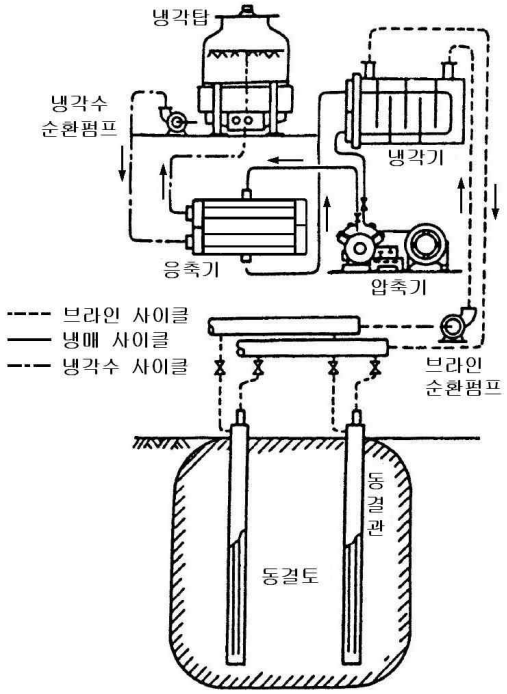



그림 2-7. 브라인 방식

(3) 동결관 본수에 따른 분류

한편, 지반동결 시 몇 본의 동결관을 적용하는가에 따라 단관동결과 복수관의 동시동결로 나눌 수 있다.

(가) 단관동결

단관동결의 경우는 채취시료의 양이 많지 않은 경우 본의 동결관을 이용하여 소량의

시료를 채취하는 방법으로 그림 2-1에 개요도를 나타냈다. 반면, 복수관을 이용한 동시동결은 채취시료의 양이 많고, 시간적 여유가 충분히 없는 경우 수 개의 동결관을 지중에 매설하여, 단관동결보다 훨씬 넓은 면적의 동결토를 형성하는 방법이다.

(나) 동시동결

캐나다 특허정보에 따르면, 3본의 동결관을 병렬로 배치하여 지반을 동결시키는 방법이 등록되어 있었다. 그림 2-8에 나타난 바와 같이 각 동결관에 온도계가 부착되어 있고, 오른쪽 끝부분에 동결냉매 주입구로부터 한 쪽에서만 주입하는 것으로 되어 있다. 첫 번째 관에 냉매주입이 끝나면, overflow된 냉매(액체질소)는 다음 동결관으로 순차적으로 이동하게 되는 구조이다. 이 구조를 적용하여 지반을 동결시키는 경우, 그림 ?에 나타난 바와 같이 지반내 온도는 냉매가 먼저 주입되는 관일수록 온도가 저하하고, 나중에 주입될수록 동결온도가 높게 나오는 등 동결관의 배치에 따라 온도분포가 불균등하게 나타나는 단점이 있다.

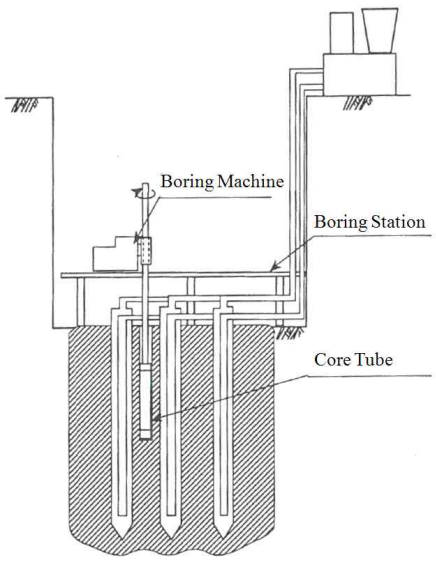



그림 2-8. 병렬형식의 동시동결 개념도

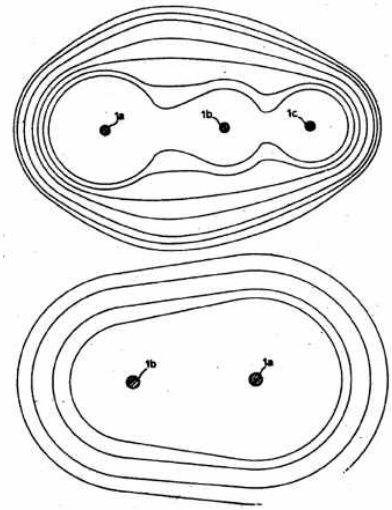



그림 2-9. 병렬형식의 동시동결시
지반온도 분포(캐나다)

반면 그림 2-10에 나타낸 직렬형식의 동시동결방법은 온도분포가 불균등한 병렬형식의 지반동결방법의 단점이 나타나지 않기 때문에, **복수관 사용 지반동시동결방법은 본 연구의 3차년도에 개발할 예정에 있다.** 그러나 액체질소를 사용하는 경우 자동벨브의 수급이 원활하지 않고(국산의 경우 내구성이 짧음), 개당 3~4백만원(국산)으로 매우 고가인 단점도 있다.

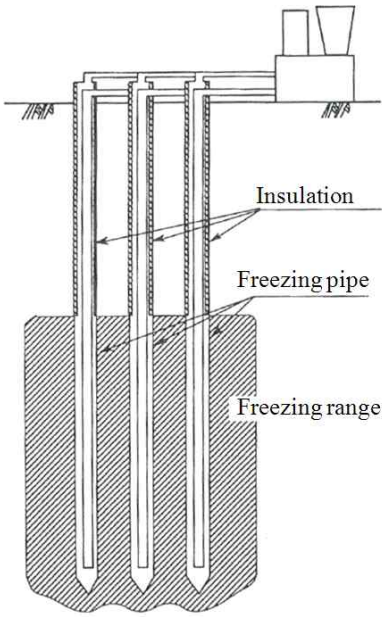



그림 2-10. 직렬형식의 동시동결 개념도

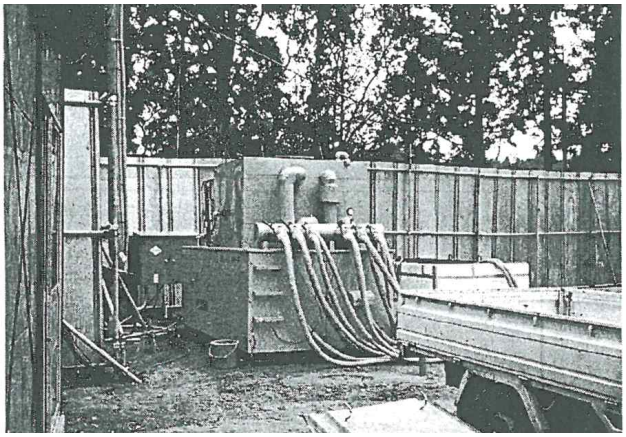


그림 2-11. 직렬형식의 동시동결 형플랜트(동경소일리서치)

(4) 동결심도에 따른 분류

마지막으로 지반의 동결심도에 따라 전심도 동결과 부분 동결로 나눌 수 있다.

(가) 전심도 동결

전심도 동결은 지반을 동결시킬 때 표층부터 소정의 깊이까지 연속적으로 동결시키는 방법이다.

(나) 부분 동결

부분 동결은 표층에 비동결 부분을 남겨 놓고 지중의 특정층을 대상으로 동결시키는 경우가 있다. 부분 동결을 위해서는 비동결부분에서는 지반 냉각이 이루어 지지 않아도 되기 때문에, 이 부분의 단열처리가 냉매 효율성 향상을 위해 반드시 필요하고, 이를 위해 그림 2-12에 나타낸 특수한 동결관이 사용된다.

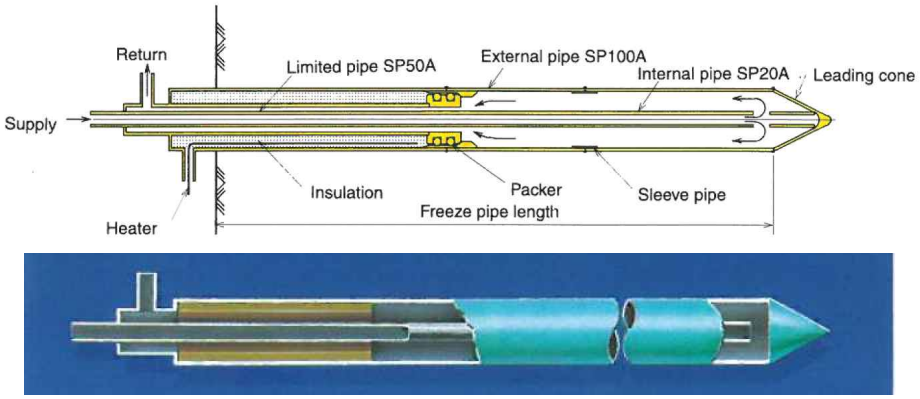



그림 2-12. 부분동결을 위한 동결관

다. 국내외 동결샘플링 적용 사례

(1) 캐나다 Duncan dam

캐나다의 브리티쉬 컬럼비아주의 주관으로 개정된 지진하중에 대해 컬럼비아강 8 km 상부에 위치한 Duncan댐의 액상화 안정성 평가를 위해 인공동결 샘플링공법을 적용하여 비교란된 모래시료를 채취하였다. 그림 2-13과 같이 비교란된 동결 모래시료를 얻기 위해 액체질소를 냉매로 이용하는 동결 시스템을 사용하였다. brine 부동액을 사용하는 냉매공급 시스템은 특별한 플랜트시설, 압축기, 순환펌프 등이 필요하고, 현장은 손쉽게 전기를 공급받기 어려운 지역에 위치하므로 액체질소를 사용한 동결시스템을 이용하였다. 동결하고자 하는 지역에 근접하게 steel casing을 하였고, 직경 50mm의 동결관 내에 액체질소를 투입하는 직경 13mm의 구리관을 설치하였다. 동결관의 아래쪽은 벤토나이트 plug로 봉인되었다. 10m 이하에 있는 비교란 시료를 얻기 위한 캐나다 내 최초의 시도였기 때문에 의미가 있는 실험이며, 인공동결 샘플링방법을 통해 채취한 시료의 간극비를 현장에서 γ-γ density logging을 통해 구한 간극비와 비교해 본 결과 기타 piston을 통한 시료와 달리 동결샘플링을 통해 채취한 시료의 간극비가 현장실험 결과와 일치함을 보임으로써 동결샘플링을 통해 얻은 비교란 시료의 우수성을 밝혔다.

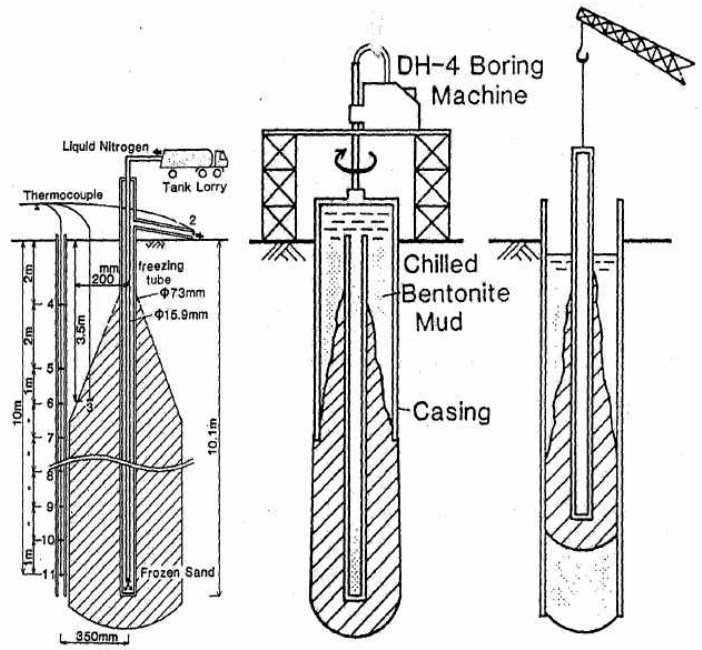



그림 2-13 동결과 샘플링 과정 (Duncan dam)

(2) CANLEX project

The Canadian Liquefaction Experiment(CANLEX project) 는 사질토의 동적, 정적 액상화강도 평가를 위해 가장 효과적인 방법을 결정하기 위해 행해졌다. 6개의 site에서 액체질소를 이용해 동결된 시료를 얻어, 현장의 동결 모래시료를 코어링하고 동결하기 위한 활용 방법을 조사하였다. 인공동결공법 적용 전에 예비조사로서 지반을 인공동결시키는데 영향을 주는 샘플링 목표지점에서의 시료의 동결민감성, 입도분포, 세립분함량, 부동수분량 등과 같은 요소를 고려해서 적지를 선정해야 하기 때문에 각 현장에 대하여 동결샘플링을 하기 위한 요소들을 확인하였다. CANLEX project에서 사용한 지반의 동결 시스템은 그림 2-14와 같다. 50mm직경의 동결관을 설치하고, 동결관 설치로 인한 인근 100mm 교란지역을 피하기 위해 그 중심에서 0.6m가량 떨어진 지역에 260mm크기의 borehole을 천공하여 시료를 채취하였다. 인공동결공법을 활용하여 얻은 동결시료를 활용하기 위하여, 이른 융해를 막기 위해 냉동고에서 trimming 후, 정육면체형태의 시료를 얻어내었다.  인공동결공법을 통해 얻은 시료의 간극비와 현장에서 down hole nuclear density technique를 활용한 물리검층(gammao-ray scattering)을 통해 구한 간극비를 비교해본 결과, 그림 2-15와 같이 각 깊이별로 매우 유사한간극비를 얻었다. 이를 통해 동결샘플링을 통해 직적으로 우수한 비교란 모래시료를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 원하는 직경의 모래기둥을 얼리는데 필요한 시간과 냉매로 사용되는

액체질소의 양을 예상할 수 있는 기술 또한 소개되었다.

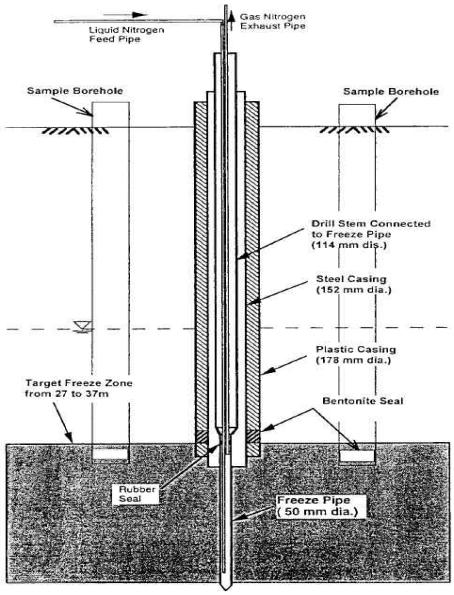



그림 2-14. CANLEX project에 적용된 지반의 동결 시스템

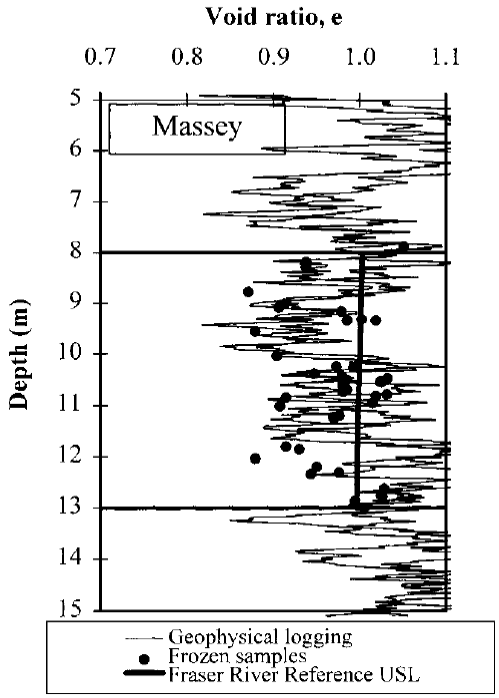



그림 2-15 물리검층결과와 실내실험결과의 비교(Hofmann et al, 2000)

(3) 일본의 동결샘플링 사례

동결샘플링 기술개발은 일본에서 1964년 니가타 지진이 발생한 다음 해인 1965년에 시작되어 1983년에 동결샘플링 관련 핵심기술(동결관, 동결관 보호관, 동결냉매, 냉매순환시스템, 굴착비트/튜브) 개발을 완료한 상태이나, 현재도 동결냉매를 최소화하기 위한 기술개발을 꾸준히 하고 있다. 현재 일본 내에서 동결샘플링은 오직 한 개의 업체가 독점적으로 수행하고 있고, 약 100건의 실적과 총 길이 720m의 실적(2009년)을 보유하고 있다. 이 중 64%가 설계목적으로 사용되었으며, 토목/건축구조물 설계 시 실무적인 조사법으로 인식될 정도로 적용이 활발하다.

한편, 동결시료 채취기술 확보를 위해서는 표 2-2에 나타낸 바와 같이, 동결관, 냉매순환시스템, 굴착비트 및 운용시스템 분야의 연구가 필요한 것으로 나타났다. 그리고 동결샘플링 장비를 구성하는 핵심 unit은 자국의 지반조건에 적합한 형태로 제작되어 있었다. 일본의 경우 바닷가를 중심으로 지반 액상화의 주요 원인이 되는 느슨한 모래층이 폭넓게 분포되어 있는 반면, 국내는 산악지형을 중심으로 화강풍화토가 폭넓게 분포하고 있어, 흙의 입도구성을 비롯한 여러 조건에서 지반 특성이 상이하여 일본 장비를 그대로 적용하기 어려운 것으로 나타났다. 이는 동결샘플링 장비의 소형화로 이동이 간편하고, 국내 지반여건에 맞는 굴착비트를 개발하는 등의 노력을 통해 '한국형 동결샘플링 장비'를 개발할 필요가 있는 것을 시사한다. 국내연구 인프라 수준을 종합적으로 고려해볼 때, 지반동결 및 시료채취분야와 동결시료를 이용한 시험법 분야는 선진국에 비해 다소 부족한 상황이나, 체계적인 지원이 뒷받침된다면, 가까운 시일 내에 충분히 기술개발을 할 수 있는 인프라가 갖춰져 있다고 판단된다.

표 2-4. 국내외 동결시료 채취기술 수준 비교

| 구 분 | 국 내 | 국 외 |
|---|---|---|
| 동결관보호관<br>(열손실 방지) | 없음 | 공벽 보호 및 열손실 방지를 위한 별도의 보호관 적용 |
| 동결관 | 없음 | 냉매 흡배기 구조를 채용한 동결관 적용 |
| 동결냉매 | 액체질소,<br>액체산소 생산 | 액체질소(동결샘플링),<br>브라인(지반동결공법) 등<br>다양한 냉매 생산 적용 |
| 냉매순환시스템 | 공조시스템 보유 | 일정한 지반 동결온도 유지를 위한 전자동 시스템 |
| 굴착비트/코어튜브 | 다이아몬드 비트,<br>3중관 코어튜브 | 직경 1m이상 굴착 및 채취가능 |
| 운용시스템 | 부재 | 특수용기를 통한 운반, 시료보관 |

라. 국내외 지반 인공동결기술 방안 고찰

(1) 하저 횡단공사에 적용된 사례

그림 2-16은 독일의 마인즈강 바닥 횡단 지하철공사에서 사용했던 예이다. 터널하부의 지반조건이 좋아서 터널 상부에만 마제형(馬蹄形)의 동토를 만들었다. 이 지하철은 강의 앞쪽에서 2개의 터널로 나눠지는데 약 200m 길이의 강바닥 부분을 30m마다 동결공법으로 방호하고, 순차굴진(順次掘進)하는 방법을 적용하였으며, 깊은 우물에 의한 수위저하공법과 NATM 공법을 병용하였다. 이 방법은 스위스의 상수도공사에서도 사용된 바 있다(윤건신 등, 2007). 그림 2-6, 5는 세계에서도 손꼽을만한 대규모 공사의 예이다. 연직동결관에 의해 전횡단면 내를 동결한 것으로 전동토형(全凍土型)이라고 부르고 있다. 냉동기설비는 900kW, 동결관 연장 17.9km, 동결토량은 3만m 이었다. 이 공사에서는 동결팽창성이 큰 흙을 주위에서부터 둘러싸는 형태로 동결했기 때문에, 그 팽창력과 변위에 의해 전동결관의 7% 정도가 손상을 입었으며, 게다가 누출된 brine이 동토를 침식할 우려가 있었다. 다행히, 굴착작업 전에 발견했기 때문에, 손상된 동결관을 복구, 증설해서 냉각능력을 보강하고, 누출된 brine에 의한 동토(凍土)의 침식을 방지하기 위해 세정작업을 하고 안전성을 확인한 뒤에 공사를 무사히 완성할 수 있었다(了戒公利, 1990).

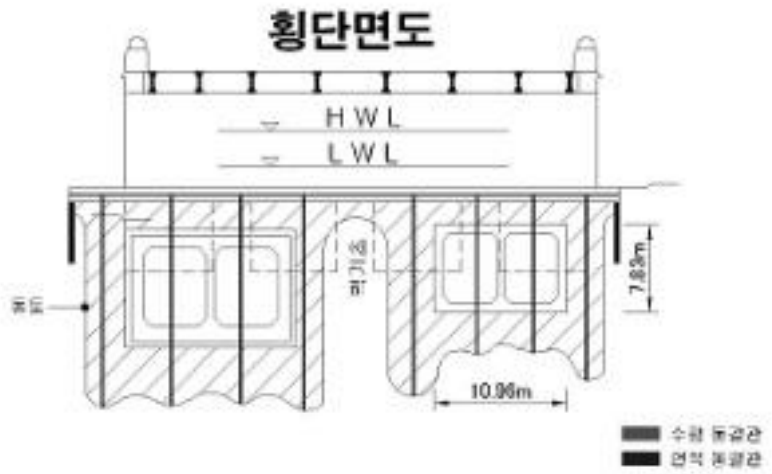
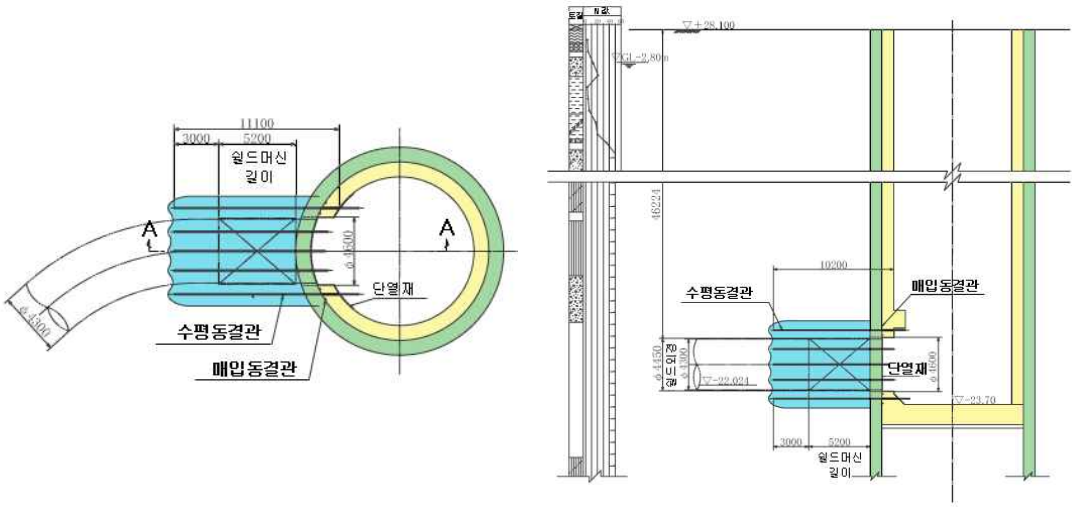



그림 2-16. 마인즈강 바닥 횡단 지하철공사에 적용된 인공동결공법

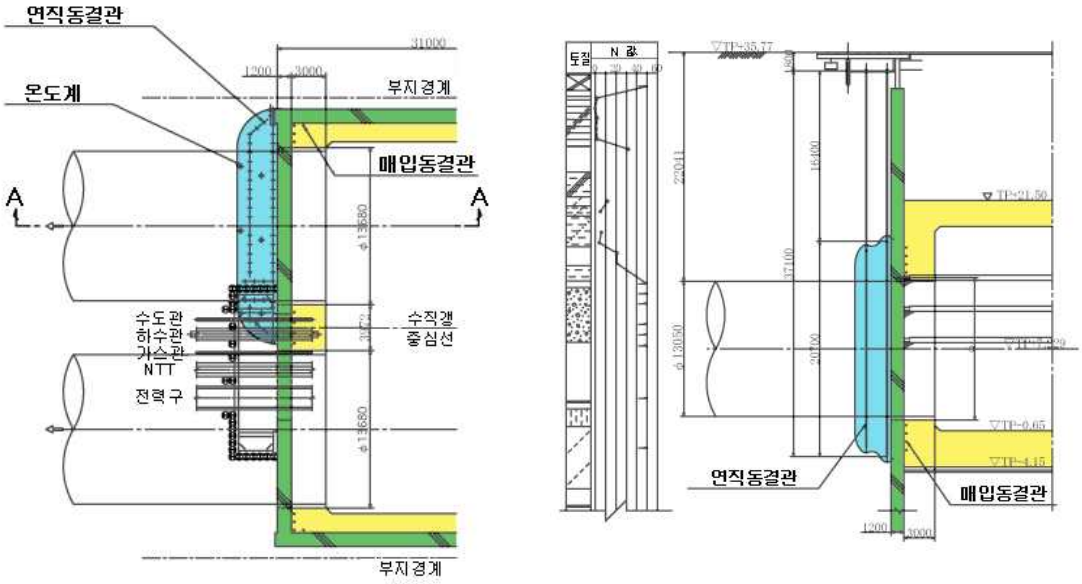
(2) 쉴드터널 발진부 방호사례

수직갱을 이용한 쉴드터널 발진부에서 인공동결공법이 적용된 사례로서, 그림 2-17은 동경 수도고속도로 중앙환상 신쥬쿠선 공사에서 외경 13.05m 쉴드터널 발진부 방호를 위해 인공동결공법(동결토량 : 1,350m3)이 적용된 사례이며, 그림 2-18은 동경 하수도 정비를 위한 외경 4.45m의 쉴드터널 공사 시 주택지에서의 노상 작업에 제한이 있어, 수직갱 하부에서의 수평 시공에 의해 인공동결지반(동결토량 : 420m³)을 조성한 사례이다.




(a) 평면도 (b) A-A 단면도

그림 2-17. 일본 수도고속 중앙환상 신주쿠선 공사 시 적용 사례

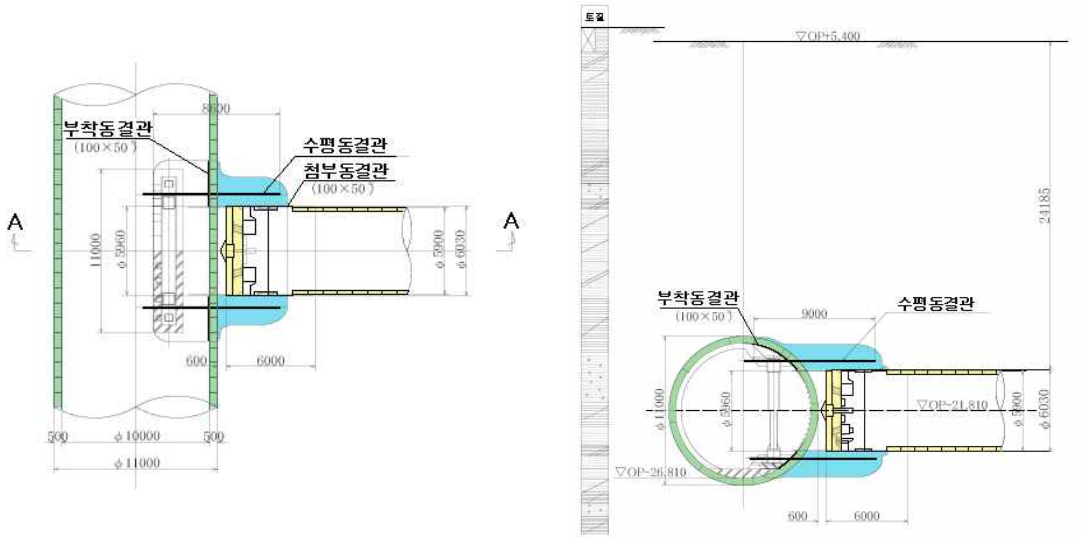



(a) 평면도 (b) A-A 단면도

그림 2-18. 일본 동경 하수도 공사 시 적용 사례

(3) 쉴드터널 지중 접합 시의 방호 사례

터널과 터널이 연약한 지반 내에서 지중 접합하는 일반적인 경우는, 기설 터널과의 접합부 주변을 인공동결한 후, 신설 터널을 기설 터널쪽으로 관통하는 경우이다. 그림 2-19에서의 사례는 기설 터널 내에서 인공동결공법을 실시하였지만, 신설 터널 내에서도 접합부의 인공동결은 가능하다. 반대방향에서 동시에 추진해 온 쉴드 머신의 대표적인 지중접합 사례가 일본 동경만 횡단도로 Aqua Line(山田憲夫외, 1997)이다. 본 쉴드 터널의 특징은 대구경(세그먼트 외경 13.9m), 고수압(0.6MPa)하에서의 해저 장거리굴진이다, 그림 2-20에서와 같이, 3곳의 발진부로부터 8대의 쉴드 장비가 굴진을 시작하여, 4개소에서 지중접합이 이루어졌다. 지중 접합 지점에서의 보조공법은, 선박의 왕래가 많은 해상에서 실시하는 것이 불가능하기 때문에, 해저 하에서의 과거의 시공 실적을 고려하여, 강도 및 차수에서 신뢰가 있는 인공동결공법을 적용되었다. 동결작업은, 그림 2-21에서와 같이, 먼저 도착한 쉴드 머신으로부터 48본의 방사 동결관과 부착 동결관을 이용하였고, 뒤에 도착한 쉴드 머신쪽에서는 부착 동결관을 이용하여 진행되었다. 동결지반의 두께는 1.4m로 하였다.




(a) 평면도 (b) A-A 단면도

그림 2-19. 일본 오사카 지하저류조 공사 시 적용 사례

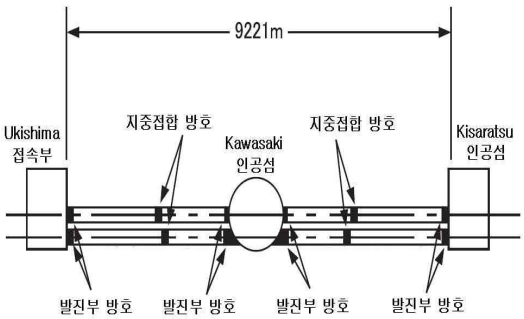



그림 2-20. 동경만 횡단도로 인공동결공법 적용 위치 개요도

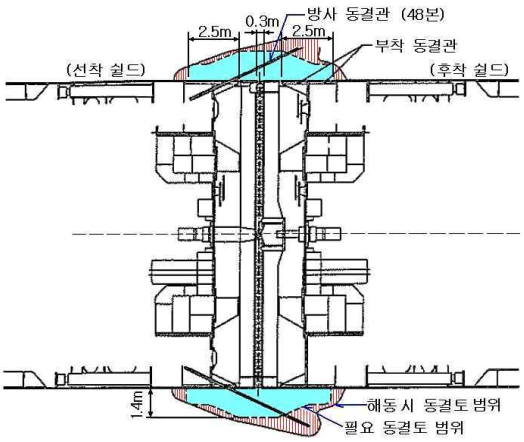



그림 2-21. 동경만 횡단도로 지중접합 개소에서의 인공동결 개요도

(4) 오염 토양 정화 대책으로서의 적용사례

인공동결공법을 이용하여 오염물질 이동 차단을 목적으로 하는 동결 차수벽에 관한 기초적 연구(신은철 외, 2009, 2010, 2011)가 국내에서도 진행 중에 있다. 아직 인공동결공법의 현장 적용을 위한 관련 설비 구축이 되지 않은 단계이기 때문에 현장 적용 사례는 없지만, 해외의 사례를 보면 인공동결공법 또는 인공동결과 가스흡인방식의 혼합에 의한 오염 토양의 정화 사례가 보고되고 있다 .

인공동결과 가스흡인방식의 혼합에 의한 정화촉진공법은, ① 오염 토양 부분을 천공

한 후, 열매체 통로와 가스흡인통로를 가지는 동결융해관을 삽입하고, 그 관에 냉매액을 주입하여 관 주변의 오염 토양을 동결시켜 토양 중에 존재하는 휘발성 유기화합물(VOC) 오염 물질을 관의 주변에 집적/농축시킨다. ② 그 다음에는 관에 온매액을 주입하여 동결된 토양을 융해한다. 이때, 토양입자의 간극이 증대하고 토양의 통기성이 높아져, 오염가스를 흡인하기 쉽게 된다. ③ 융해 후, 관에 부속되어 있는 가스 흡인관 내부를 고부압으로 하여, 가스흡인통로가 있는 복수의 공으로부터 집적된 오염물질을 순식간에 오염가스로서 제거한다. 제거된 가스는 활성탄에 흡착되어 회수되고, 무해의 상태로 외부에 반출되기 때문에, 배출가스에 의한 대기 오염문제는 없다는 특징을 가지고 있다.

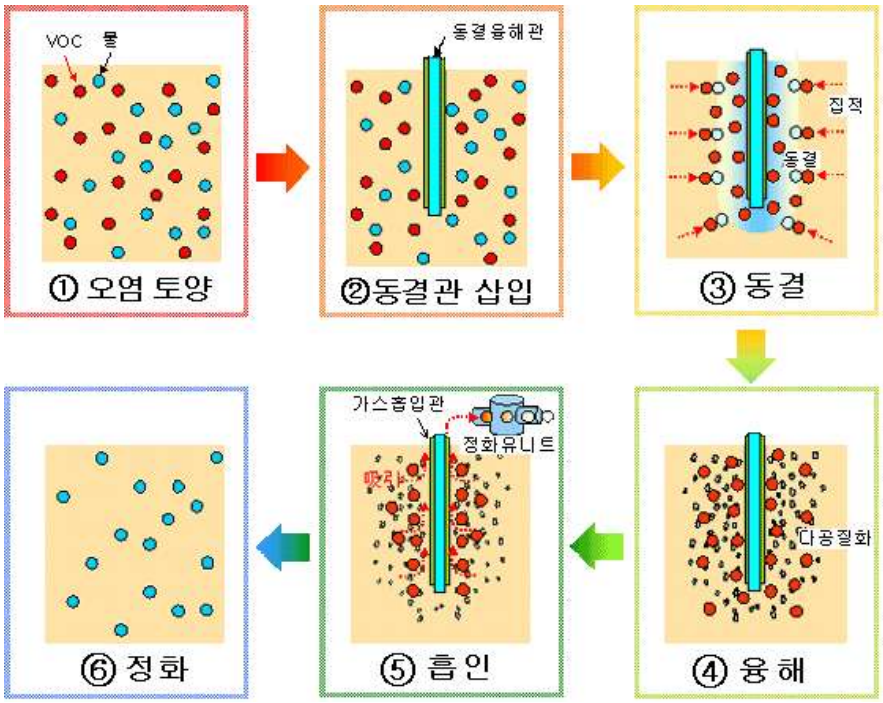



그림 2-22. 토양 동결과 가스 흡인처리에 의한 오염 토양 정화공법의 개념도

마. 동결시료 채취·운반·보관방법

(1) 동결시료 채취방법

동결토를 샘플링하는 방법은 동결토의 종류와 심도에 따라 다르다. 동결토가 지표 부근에 있을 때는 직접 인발하거나 파 올리는 방법이 경제적이다. 반면에 지표 부근에 있을 때는 인발저항이 크기 때문에 코어링을 하는 것이 일반적이다.

코어링 방법에는 아래의 2가지 방법이 있다.

(가) 동결토 거의 전체를 샘플링하는 전면코어링(over coring) - 사질토지반

사질동결토에서는 동결외관을 중심으로 하여 동결토 전체를 직경 약 600mm의 단일 코어튜브(single core tube ; 선단에 금속제 비트 or 다이아몬드 비트 부착)을 이용하여 -5℃ 가량의 냉각수를 송수하면서 코어링하는 전면코어링방식이 주로 이용된다. 이 방식은 지하 5m~25m 깊이까지 확실하게 샘플링할 수 있는 방식이다. 직경 600mm 정도의 동결토 흙기둥을 샘플링하면, 동결내외관을 착공할 때 교란영역 바깥에 있는 교란되지 않은 채 동결된 흙시료를 실내 시험용 시료로 떼어낼 수 있다. 금속제 비트 or 다이아몬드 비트를 사용하며, 통상 길이 2.5m 정도의 단일코어튜브를 연결해 나가면서 동결토를 하나의 원주상으로 도려낸 다음, 크레인으로 들어올려(그림 2-23) 현장에서 블록상태로 절단한 후 포장하고, -10℃~-20℃상태를 유지하면서 실험실로 운반한다.

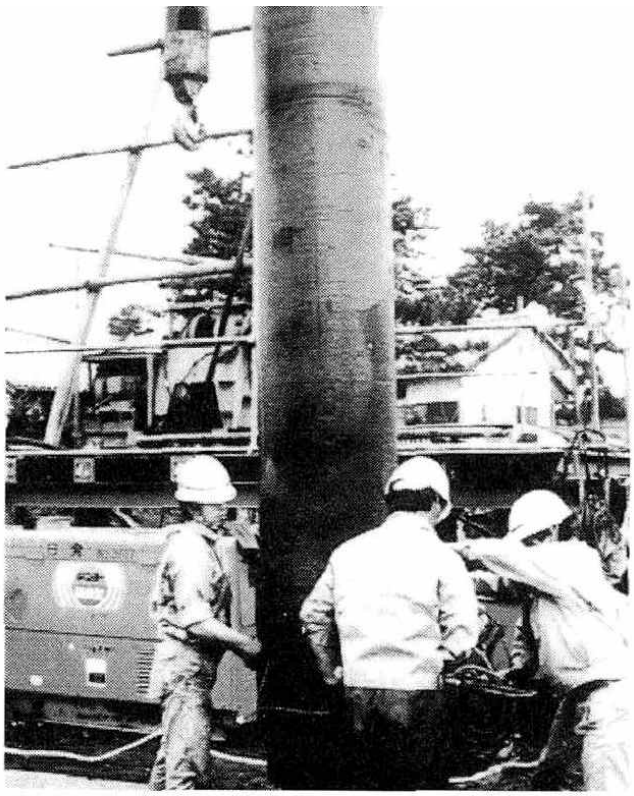


그림 2-23. 전면코어링법으로 채취한 원주형의
동결사질토

(나) 일부만을 샘플링하는 부분코어링(partial coring) - 자갈지반

자갈을 사용하여 실내시험을 할 경우 공시체의 직경이 약 30cm 이상으로 크게 되므

로 실내시험용 공시체와 같은 직경으로 동결지반을 코어링하면 코어링 후 시료의 다듬기 및 운반 작업이 편리해진다. 따라서 성장한 동결토 기둥의 중심(동결외관)으로부터 좀 떨어진 부분의 동토를 공시체 직경만큼 코어링하여 채취한다. 예를 들면, 직경 300mm의 공시체를 얻기 위해서 직경 340mm의 더블코어튜브를 이용하고, 냉각액을 송수하면서 굴착을 하여 길이 60cm 이상(약 1m)의 시료를 코어링한다. 그 다음, 시료 선단부를 코어튜브로 구속하고 시료와 코어튜브를 일체화시킨 후 크레인으로 뽑아낸다. 단, 동결관 주변 교란영역의 바깥부분에서는 직경 300mm의 시료를 채취하기 위해서는 적어도 직경 2m 정도의 동토를 준비하여야 한다. 이때 샘플링용 가이드관을 적절히 배치하면 동일 깊이에서 4본 정도의 시료를 채취할 수 있다. 삭공용 비트는 다이아몬드 비트가 주류를 이룬다. 금속비트는 자갈의 크기가 작고 모래 성분이 많은 토질은 삭공할 수 있지만, 자갈이 단단하고 자갈의 직경이 클 때 금속비트를 사용하면 굴진시간이 많이 소요되며, 채취한 시료의 절단면의 마무리 상태가 좋지 않게 되어 역학시험용 시료로서 이용하기가 어려워진다.

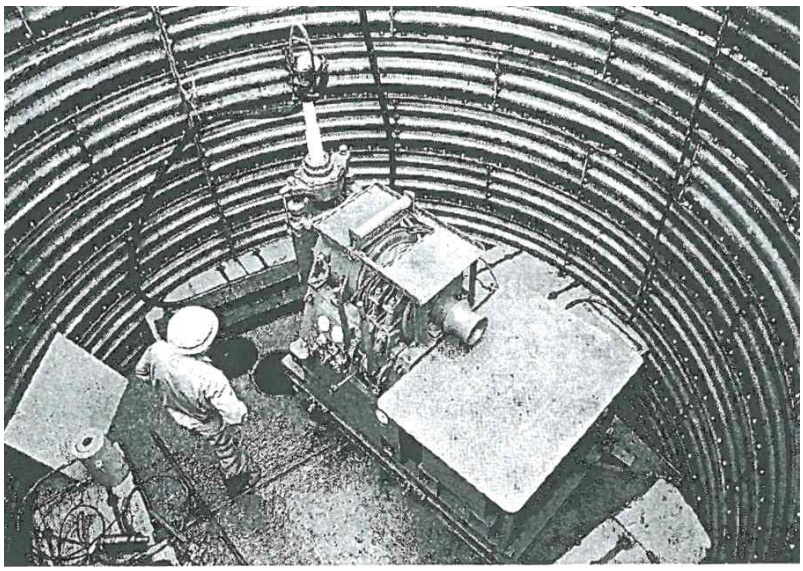


그림 2-24. 부분코어링 전경(万田野) (後藤 茂, 1996)



그림 2-25. 부분코어링 시료
전경(万田野)

최근에는 자갈지반용으로 개발된 부분코어링법을 사질토에도 적용하고 있으며, 이 때 실내공시체보다 큰 직경으로 샘플링한 후 소정의 치수로 다듬는 방법이 효율적이다. 부분코어링은 전면코어링에 비해 공사비를 낮출 수 있는 여지가 많고, 국내의 경우 자갈지반을 채취한다 하더라도 시험할 수 있는 장치가 거의 없기 때문에, 본 연구(2차년도 이후 현장적용성 연구)에서는 사질토 지반에 대해 부분코어링법에 중점을 두고 연구할 계획이다.

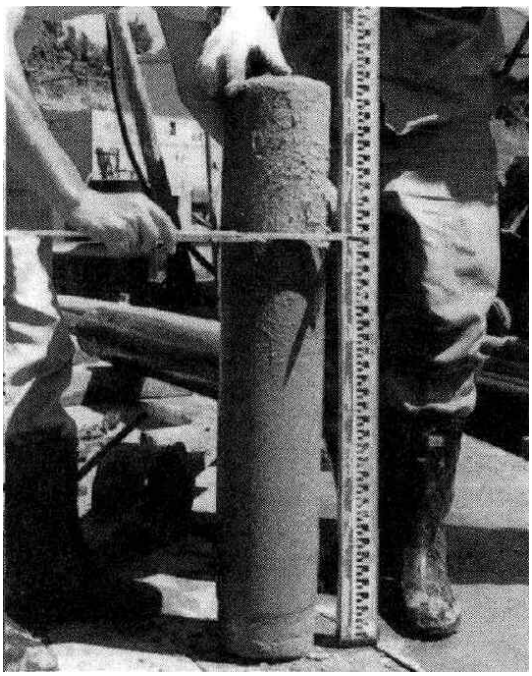


그림 2-26. 부분코어링으로 채취한 모래 시료 전경

(2) 코어 단면의 절삭

코어링 후의 시료를 역학시험용 공시체로 성형하기 위해서는 소정의 길이(12cm, 상하부 1cm 버림)로 코아 양단면을 평탄하게 절삭할 필요가 있다. 일본의 동경소일리서치에서는 그림 2-27에 나타낸 바와 같이 콘크리트 상판의 절삭에 이용하는 다이아몬드 블레이드 컷터를 이용하는 경우, 코어를 -20℃정도로 냉각하여 커터날 선단을 냉각시키면서 절삭하면 선단이 평탄한 코어시료를 얻을 수 있다는 것을 보고한 바 있다.

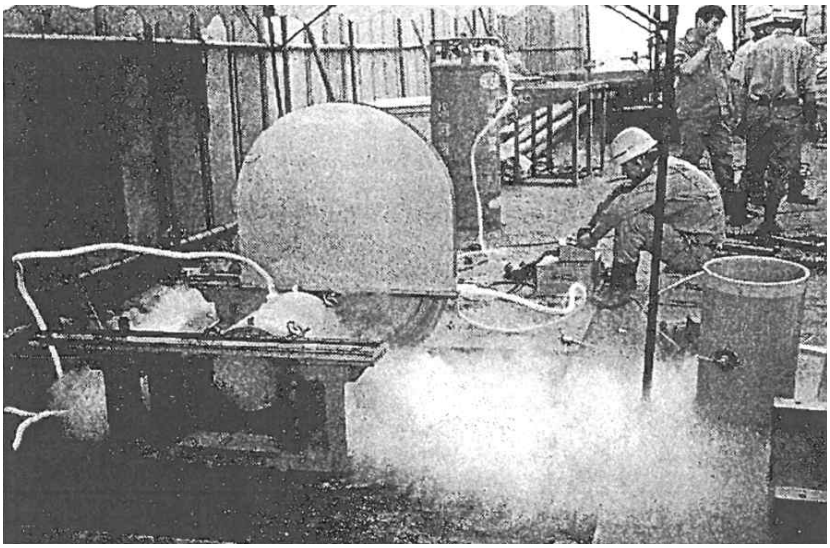


그림 2-27. 다이아몬드 블레이드 컷터를 이용한 시료단면의 절단

(3) 코어 단면의 운반·보관

또한 동결소일리서치에서는 운반 시와 보존 시에는 공시체상으로 된 시료를 보호하기 위한 목적으로 그림 2-28에 나타낸 바와 같이 특수한 용기을 사용하고 있었다. 이 용기는 강제 내에 5cm의 단열재(발포 스티로폴)가 매입되어 있고, 내부 강제면에는 두께 4mm의 고무슬리브로 시료를 둘러싸 시료를 구속하는 구조로 되어 있다. 동결시료의 보존에 있어서 문제로 되는 것은 얼음분의 기화에 의한 시료의 노화와 냉각기의 트러블 등의 환경온도 상승에 의한 시료의 융해이지만, 기화에 대해서는 고무슬리브가 유효하게 작동하고, 채취 후 1년 이상 경과한 시료에 대해서도 표면에 거의 변화가 없었음을 보고하였다. 또한 환경온도의 상승에 대해서는 동결사력공시체를 이용한 확인실험을 수행하여, -20℃정도로 냉각된 공시체는 보존용기에 수납되어 있다면 환경온도가 실온 (+20℃)로 변화한 경우에도 표면조차 융해되지 않는 상태를 48시간 이상 유지할 수

있다고 보고하였다. 이 시간은 냉각기 등의 트러블에 충분히 대응할 수 있는 시간이고, 본 연구에서 수행하는 현장실증실험에서는 이와 같은 효율성을 가지는 절삭/운반 장치를 고안할 계획이다.

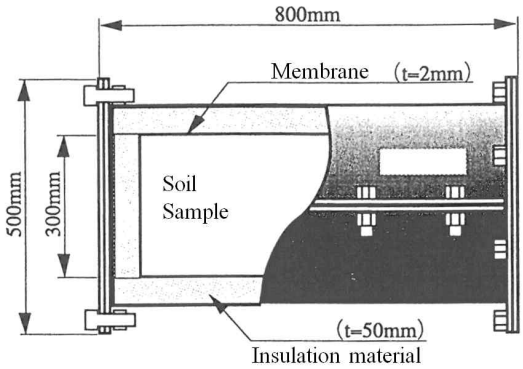



그림 2-28. 공시체 운반·보관용용기 모식도

시료의 교란은 시료 채취 시에서부터 운반 보관 시에 발생 할 수 있으며, 일본지반공학회는 시료의 교란원인과 대책을 표 2-3과 같이 제시하였다. 인공동결공법은 동결관 주위의 지반을 동결시킨 상태에서 샘플링을 하여 시료의 교란을 최소화하고자 하는 것이 핵심이기 때문에 시료 채취 시, 지반의 동결로 인한 과잉간극수압의 발생으로 시료에 추가적인 응력이 가해지는 것을 막아야한다는 점이 매우 중요하다.

표 2-5. 시료의 교란 원인과 현상 및 대책 (일본지반공학회, 1990)

| 원인 | 현상 | 대 책 |
|---|---|---|
| 기계적인 교란 | 천공에 따르는 압축과 응력해방 및 전단 | 샘플링에 따르는 교란현상을 최소화할 수 있는 샘플링 기술의 향상이 필요함 |
| | 지상에 취급한 시료의 응력해방과 전단변형 | 시료 취급 시 최대한 주의를 요함 |
| | 응력해방에 따르는 흡수, 팽창과 강도저하 | 성형 시료 등은 수분을 흡수하지 않도록 함 |
| | 밀봉, 운반시의 충격과 진동 | 운반, 보관에 주의 요함 |
| 물리적 변화 흙의 구성성분 (토립자, 공기, 물의 이동과 집적) | 온도변화에 의한 토성의 변화 | 직사일광등을 받지 않도록 한다. |
| | 흙의 함수비변화, 공기의 이동에 따른 응력상태의 변화 | 밀봉상태를 양호하게 하여 보관 |
| 화학반응 | 흙의 화학적 변화와 변질 | 시간이 경과하면 화학변화가 진행되므로 시료를 단시간 내에 사용 |
| 생물의 영향 | 박테리아 곰팡이 등으로 인한 흙의 성상 변화 | 장기보존시료를 사용하지 않으며 보존상태를 양호하게 유지 |

또한 채취된 시료를 실험실로 운반하는 경우, 현장조건과 같은 온도조건을 유지하여 시료가 융해되지 않도록 하는 것이 중요하다. 동결샘플을 보관할 때에도 추가적인 수분의 공급 및 수분함량의 변화가 발생하지 않도록 하는 것이 중요하다고 판단된다. 동결시료의 보관은 그림 2-29와 같이 대형 냉동고에 -20도 조건으로 보관하고 있다.




그림 2-29. 동결시료 보관(응용지질)



그림 2-30. 동결보관시료- 녹았을 때는 암회색을 보임

따라서 본 연구에는 아래 표를 참고하여 동결시료의 채취, 운반, 보관에 있어서 인공동결샘플링 기술의 특성 상, 온도변화에 의한 토성의 변화가 최소화 될 수 있도록 하는

방안을 마련하고자 한다.

바. 동결시료를 이용한 시험

Sasitharan등(1993)은 시료의 동결과 융해 과정에서의 교란 정도를 평가하기 위하여 시료의 동결 전 원상태의 전단파 속도와 간극비를 측정하고, 시료의 동결-융해 후 전단파 속도와 간극비를 측정하였다. Yoshimi 등(1984)은 동결시료와 튜브시료의 액상화 특성을 비교하였다. 액상화 특성을 분석하기 위하여 반복전단시험을 통하여 포화된 공시체를 비배수조건 하에서 반복전단응력을 작용시켜 액상화 저항을 구하였다. 이에 비추어, 본 연구에서도 반복전단시험과 전단파 속도를 이용하여 시료의 질을 평가하고자 한다.

현재 일본 내에서 동결샘플링은 오직 한 개의 업체가 독점적으로 수행하고 있고, 약 100건의 실적과 총 길이 720m의 실적(2009년)을 보유하고 있다. 동결샘플링 실적이 가장 많고 적용이 활발한 일본의 기업과 연구소에서 운반 및 보관기법을 보유하고 있다.

일본의 응용지질은 직원 수 1,200명, 자본금 1조 5천억에서 알 수 있듯이 토목 컨설팅에서부터 지반조사까지 자체적으로 수행하는 기술력을 가지고 있다. 동결채취시료의 채취, 보관, 시험 시스템을 모두 갖추고 있다.

시료의 추출에 있어서는 올코어 샘플링으로 채취한 시료에서 공시체 사이즈의 시료를 추출하기 위해 별도의 시료추출 시스템을 갖추고 있다. 추출 시에 온도상승으로 인한 시료교란을 막기 위해 영하의 질소가스를 박스 내에 주입하여 온도상승을 억제하는 것이 특징이다. 또한 (대형)반복삼축압축시험장치, 직접전단시험장치(정체적, 정압시험 모두 가능), 불포화삼축압축시험장치, 수분특성시험장치 등 다양한 장치를 보유하고 있으며, 특히 시료 교란도를 측정할 수 있는 비파괴시험시스템이 모두 구비되어 있어 시료의 추출과 보관 뿐 아니라 시험도 자체적으로 할 수 있다.




그림 2-31 동결시료 추출장치



그림 2-32 삼축압축시험장치



그림 2-33 직접전단시험장치



그림 2-34. 대형
삼축압축시험장치(사력시료)



그림 2-35. 중형삼축압축시험장치



그림 2-36. 중공비틂시험장치




그림 2-37. 불포화 수분특성 시험장치

현재 구비된 자동삼축압축시험기, 전단시험기를 바탕으로 본 연구의 2차년도에서는 다기능 직접전단시험장치 및 반복삼축시험장치를 제작할 계획이며, 모든 장비에는 비파괴시험시스템을 부착할 예정이다.



(a) (b)

그림 2-38 (a) 자동화 삼축압축시험기 (b)탄성파 및 전기비저항 측정 페데스탈

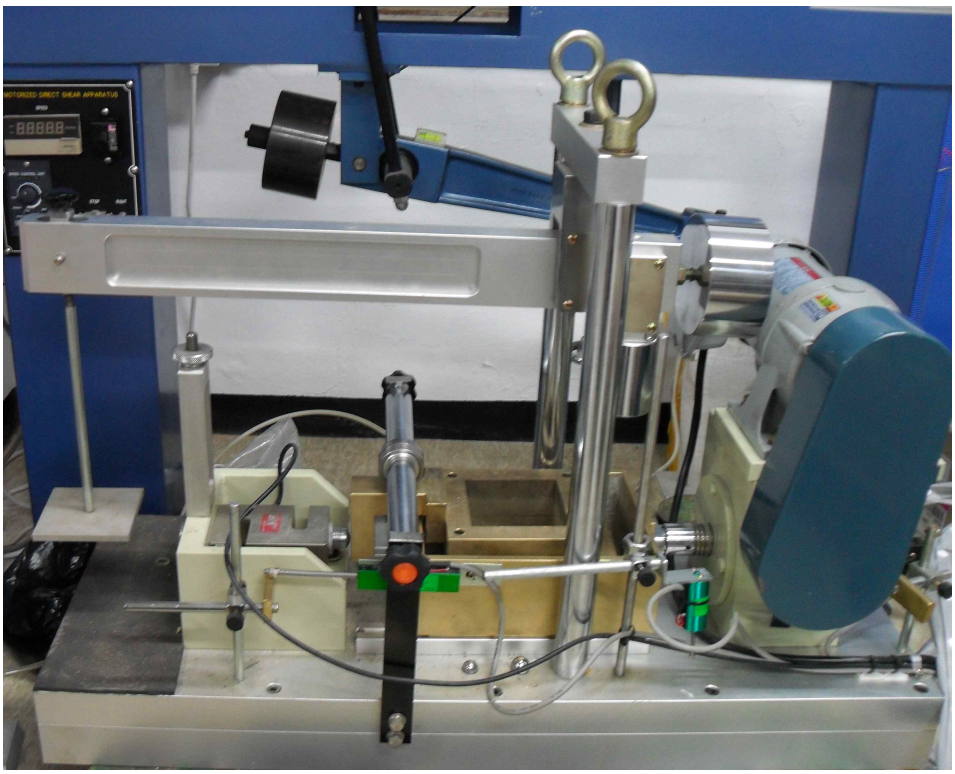


그림 2-39 전단시험기

## 2. 동결샘플링 시스템 코스트 분석

### 가. 국내외 기술개발 타당성 조사

대부분의 건설공사는 지반 위나 지중에서 이루어진다. 지반은 그 구성성분인 흙이나 자갈의 수평, 수직분포상태 및 지질구조, 지하수의 존재 유무 등에 따라서 인접한 지역에서도 다양한 특성을 보인다. 따라서 건설공사의 설계, 시공 및 유지관리를 안정적이고 경제적으로 수행하기 위해서는 사전에 지반조사를 철저히 실시하고 그 결과를 정확히 분석하는 기술이 매우 중요하다.

지진이 발생할 경우 사질토 지반은 액상화에 의한 피해를 받기 쉬운데 이러한 지반의 액상화 가능성을 평가하기 위한 방법의 하나로 진동삼축압축시험이나 진동단순전단시험, 공진주시험등이 실시되고 있다. 그런데 이러한 시험을 위해서는 원지반의 사질토 시료를 교란되지 않게 채취 후 이를 교란이 발생하지 않게 실험실까지 운반하는 기술이 중요하다.

현재 사질토 지반의 시료를 교란시키지 않고 채취하기 위하여 세계 여러 나라에서 다중관 샘플러등 다양한 종류의 샘플러를 개발하고 있지만 아직까지는 인공동결에 의한 샘플링만큼 정도 높게 사질토 지반의 비교란 시료를 채취할 수 있고, 아울러 채취한 시료를 비교란 상태로 실험실까지 운반할 수 있는 방법은 사실상 없다

현재까지 국내에서 사질토 지반의 인공동결공법을 이용한 비교란 시료 채취기술과 관련한 어떠한 관련 연구도 수행된 바가 없다. 또한 채취한 시료를 비교란 상태로 실험실까지 운반할 수 있는 방법은 사실상 없는 실정이다. 그 이유로서는, 첫째로 고품질의 시료채취를 통한 실내실험 결과를 설계에 직접적으로 반영하기보다 기존 제안 값들의 하한치를 적용하여 안전측으로 설계하는 관행으로 인해 동결샘플링에 대한 수요가 부족하였다. 둘째로, 시료를 채취하는데 장시간 소요되며, 시료의 보관 및 운반이 용이하지 않고, 시험법이 체계화되지 않아, 일선 엔지니어가 신뢰를 가지고 적용하기에 무리가 있었다. 셋째로 동결샘플링에 대한 홍보가 부족하여 동결샘플링의 파급효과에 대한 인식이 부족하였다.

반면, 인공동결공법 및 동결토의 거동특성과 관련한 연구는 특수건설, 인천대학교(이상 지반동결 분야), 한국건설기술연구원(지반샘플링 장비개발 분야)에서 일부 기초적인 연구를 수행한 바 있다.

표 2-6 인공동결공법에 관한 국내 연구현황

| 연 도 | 제 목 | 연구기관 | 연구책임자 |
|---|---|---|---|
| 2006년 | 건설공사의 경제성과 안전성 향상을 위한 첨단지반조사 장비개발 및 실용화 연구 | 한국건설기술연구원 | 김영석 |
| 2007년 | 인공동결공법의 설계/시공 및 현장적용 기술개발 | 특수건설 | 윤건신 |
| 2008년 | 지반동결공법을 이용한 친환경 복원드레인 시스템의 오염토양 정화기술 | 인천대학교 | 신은철 |
| 2008년 | 지반동결을 통한 오염지반 차폐 및 흐름제어시스템 개발 | 인천대학교 | 신은철 |
| 2009년 | 지반동결공법을 이용한 오염지반 차폐 및 흐름제어벽 개발 | 인천대학교 | 신은철 |

또한 국내에서는 2007년 4월 가스공사 인천기지 LNG 탱크에 대한 안전점검의 일환으로 동결공법이 일부 적용된 사례가 보고된 외에 현재까지 실질적으로 적용된 사례는 없는 것으로 조사되었다.

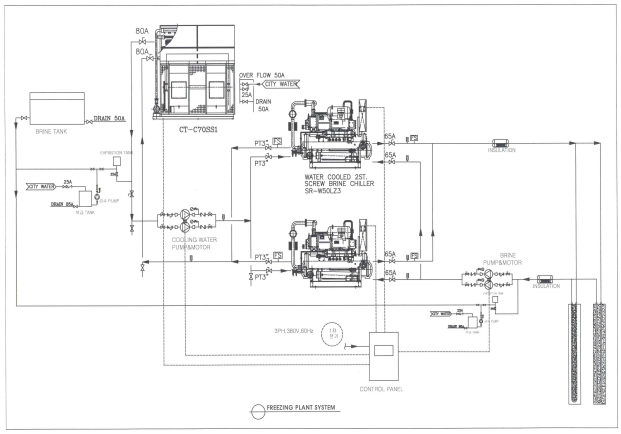
그러나 본 연구의 참여 연구기관인 대성산업가스 초저온연구소에서 2007년 ○○터널 현장에 대한 보조공법으로 동결공법 적용 가능성 검토를 위해 내부적으로 동결 플랜트를 설계하고 현장적용성을 평가한 바 있다.

표 2-7. 주기기 사양

| 기종 | 75 kW형 |
|---|---|
| 전원 주파수(Hz) | 60 |
| 냉각능력( kcal/h) (운전조건) ('C) | 129,200 |
| | BRINE(출구) -25 |
| | 냉각수(입구) +32 |
| 압축기 | 반밀폐형 2단 압축SCREW식 |
| 전동기(kW) | 37 X 2 |
| 전원 | 200V 3상 |
| BRINE | 염화 카르시움 수용액 |
| 냉각수 | 냉각탐순환수 |
| 사용랭매 | 프레온 22 |
| 외형치수법 | 3600 W x 2400 D X 2400 H |
| 제품 중량: (kg) | 6.000 |

표 2-8. 보조기기 사양

| 기용명칭 | 75 kW형 동결 Unit용 |
|---|---|
| BRINE·펌프 | 2단 와권(screw) 펌프 |
| | 100 MS2·11 |
| | 15 kw 전폐형전동기부착 |
| | 0.8 m3/min, 41 m |
| 냉각수 펌프 | 흡수 screw pump |
| | 80 SG-3.7 |
| | 3.7 KW전폐형 전동기부착 |
| | 0.65$m^3$/min.19 m |
| 냉각탑 | 초저소음형 |
| | MT-5014 S |
| | 195, 000 kcal/h |
| | 표준수량 650 /min |
| | Freon용 전동기는 inverter 제어 |




| ITEM | DESCRIPTION | MTL. | REMARK | SHEAR SIZE | WEIGHT |
|---|---|---|---|---|---|
| 01 | COMPRESSOR | | | GC-S6000S21(45kW) | |
| 02 | CONDENSER | | | SHELL & TUBE(DWG.NO.: CR201455) | |
| 03 | EVAPORATOR | | | SHELL & TUBE(DWG.NO.: CR201442) | |
| 04 | OIL COOLER | | | SHELL & TUBE(DWG.NO.: CU200B20) | |
| 05 | OIL SEPARATOR | | | SHELL & TUBE(DWG.NO.: CU200732) | |
| 06 | SUBCOOLER | | | SHELL & TUBE(DWG.NO.: CR200B89) | |
| 07 | OIL TANK | | | CR300997 | |
| 08 | HIGH PRESS. GAUGE | | | 0~35kg/cm²G | |
| 09 | LOW PRESS. GAUGE | | | -76cmHg~15kg/cm²G | |
| 10 | OIL PRESS. GAUGE | | | 0~35kg/cm²G | |
| 11 | INTERMEDIATE PRESS. GAUGE | | | -76cmHg~15kg/cm²G | |
| 12 | HIGH PRESS. S/W | | | ASS'Y | |
| 13 | OIL PRESS. S/W | | | ASS'Y | |

| ITEM | DESCRIPTION | MTL. | REMARK | SHEAR SIZE | WEIGHT |
|---|---|---|---|---|---|
| 14 | INSULATION | | | P.E.FOAM | |
| 15 | FRAME | | | CR201456 | |
| 16 | CHECK V/V | | | 65A | |
| 17 | SUCTION FILTER | | | 65A | |
| 18 | STOP V/V(SUCT.) | | | 65A | |
| 19 | FILTER DRYER | | | 7/8" | |
| 20 | MANIFOLD BLOCK | | | ASS'Y | |
| 21 | SIGHT GLASS | | DANFOSS | 7/8" | |
| 22 | SOLENOID V/V | | DANFOSS | 7/8" | |
| 23 | EXPANSION V/V | | ALCO | HFESS 1/2HC OR | EQUIV. |
| 24 | EXPANSION V/V | | DANFOSS | TEX12-12 | |
| 25 | SERVICE V/V | | | 1 3/8" | |
| 26 | SERVICE V/V | | | 1" | |
| 27 | CONTROL BOX | | | ASS'Y | |

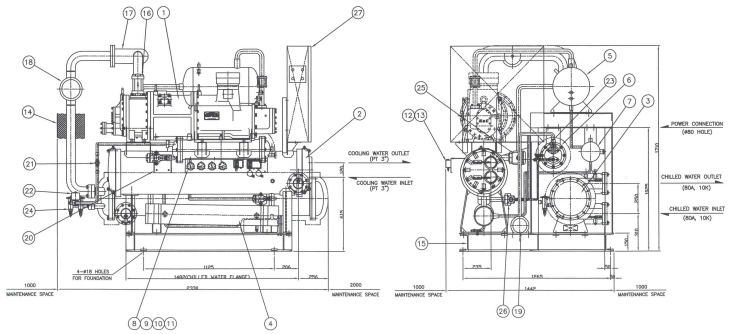



그림 2-40 현장 동결시료 채취, 동결쏘일리서치, 2011

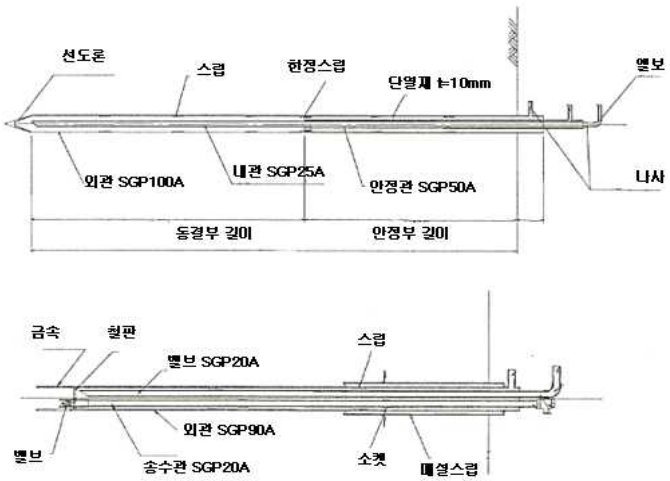



그림 2-41 동결관 설계

본 연구에서 추진하고자 하는 인공동결에 의한 지반굴착공법과 동결 샘플링은 국내 건설시장에서 바로 적용할 수 있고, 토목·건축 구조물의 안전성 증대를 도모할 수 있는 기술로써 그 시장규모 역시 연간 수백억 원에 달할 것으로 판단된다.

또한, 인공동결에 의한 지반조사기술 개발을 통하여 국내 건설현장의 지반조사 분야에 활용하는 기술 역시 국내 건설현장에 그대로 적용할 수 있는 것으로 그 시장규모는 연간 수백억 원에 달할 것으로 판단된다.

교란이 액상화 강도에 미치는 영향은 흙의 밀도와 구조에 따라 달라지는데 N-value가 큰 흙에서 교란의 영향에 의해 액상화 강도가 저하하는 경향이 있으며 이는 지지층의 내진성을 평가할 때 특히 중요하게 고려해야한다. 동결샘플링을 통한 시료의 불교란 효과를 검증하고 액상화평가 및 내진설계에 필수적인 동적물성치 획득을 위한 실내실험체계를 정립한다면 국내의 기술보급 효과와 함께 학술적으로도 크게 도약할 수 있는 계기가 될 것으로 판단된다.

또한 동결샘플링은 모래지반의 강도를 정밀하게 평가할 수 있고 그 결과를 이용하여 기초구조물을 더욱 합리적이고 경제적으로 설계, 시공할 수 있는 기술이므로 이 기술이 상용화 된다면 국내시장에서의 수요는 매우 클 것이라고 판단된다.

표 2-9. 연도별 동결샘플링 관련산업 매출 추이 (시추조사학회(2010), 대한지구물리학회(2010), 냉동공조신문(2010))

| 연도별 관련산업 매출 추이 (단위 : 억원) | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 구 분 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 |
| 지반조사 | 4,625 | 5,278 | 5,542 | 5,755 | 6,105 | 7,018 | 7,272 | 7,798 | 7,936 | 8,081 | 8,166 |
| 냉동공조 | 3,647 | 3,674 | 5,129 | 5,824 | 3,606 | 5,631 | 6,133 | 4,705 | 4,861 | 7,937 | 12,260 |

동결샘플링은 다른 샘플링 방법보다 비용이 비싸지만 이는 단편적인 시각일 뿐 액상화에 대한 위험도가 높은 지역이나 액상화예측이 어려운 지반에 대해서 완벽한 비교란 시료를 채취해 정밀도 높은 실내실험을 수행하여, 액상화에 대한 피해에 대비할 수 있다면 이로부터 얻어지는 효과는 초기에 들어가는 샘플링 비용과 견줄 수 없다고 보고한 바 있다. (B.A Hofmann, D.C. Sego, in situ ground freezing to obtain undisturbed samples of loose sand)

예를 들어 토사사면 보강에 있어서 동결샘플링된 시료를 이용한 시험결과를 이용한다면 그렇지 않은 경우에 비해 훨씬 정확한 결과가 얻어지므로, 동결샘플링은 매우 고가이지만, 잘못된 조사로 인한 구조물의 파괴 시 들어가는 복구비용과 비교하면 아무것도 아닐 것이다. 같은 논리를 기초구조물 등의 다른 토목건축구조물에 적용해 본다면, 기술개발의 타당성은 높을 것으로 판단된다.

표 2-10. 주요 국가의 시장 규모(Engineering News Record, 일본건설공업조사회 등)

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

나. 국내 적용가능 대상지역/대상구조물 조사

인공동결공법을 이용한 불교란 시료 채취기술의 현장적용성을 평가하기 위해 현재 두산건설에서 진행 중인 시공현장들을 조사하였으며 각 현장의 일반현황, 공사개요 및 진행현황은 다음과 같다.

(1) 강남순환 5공구

표 2-11 강남순환 5공구 사업개요

| | | |
|---|---|---|
| 일반 현황 | 공종 구분 | 도시고속화도로 |
| | 사업 유형 | 민자(BTO) |
| | 주무관청 | 서울특별시 |
| | 발주처 | 강남순환도로(주) |
| | 계약 방식 | 계속비공사 |
| | 현장 위치 | 금천구 시흥동~관악구 신림동 |
| 공사개요 | 규모 | 총 연장 5.1km |
| | 주요 공사 | 관악터널 1개소 4.9km, 금천영업소 1개소(14차로) |
| 진행 현황 | 공기 | 07.11.20~14.05.19 (78개월) |




그림 2-42 강남순환 5공구 조감도 및 시공현황

(2) 강남도로 시공사업단

표 2-12 강남순환도로 사업개요

| | | |
|---|---|---|
| 일반 현황 | 공종 구분 | 도로 |
| | 현장 위치 | 금천구 시흥동~강남구 우면동 |
| 공사개요 | 규모 | 총 연장 12.4km |
| | 주요 공사 | 터널 3개소 10.60km, 교량 2개소(0.67km) |
| 진행 현황 | 공기 | 07.11.20~14.05.19 (78개월) |

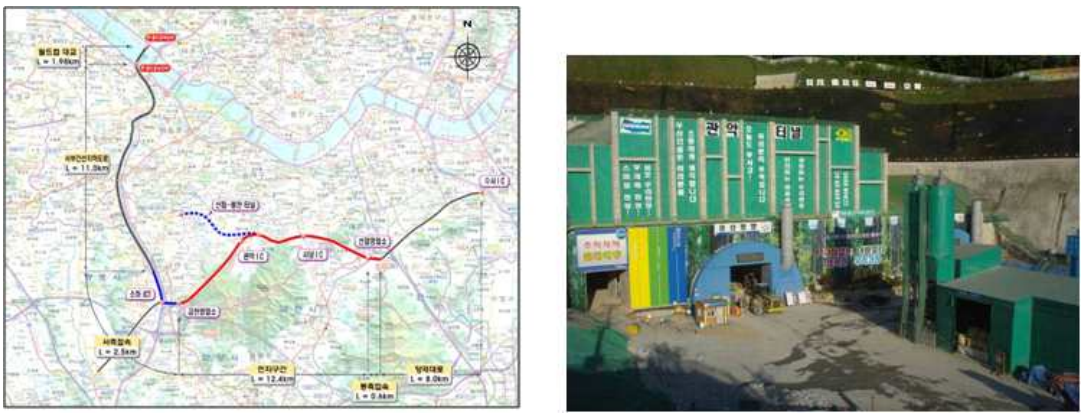


그림 2-43. 강남도로 조감도 및 시공현황

(3) 경남 혁신도시 진입교량

표 2-13 경남 혁신도시 진입교량 사업개요

| | | |
|---|---|---|
| 일반 현황 | 공종 구분 | 도시계획도로 |
| | 현장 위치 | 진주시 상평동~문산읍 소문리 |
| 공사개요 | 규모 | 총 연장 1.15km |
| | 주요 공사 | 사장교 347.5m외 교량 4개소 |
| 진행 현황 | 공기 | 09.12.21~12.12.19 (36개월) |






그림 2-44 경남 혁신도시 진입교량 조감도 및 시공현황

(4) 담양성산도로

표 2-14 담양성산도로 사업개요

| | | |
|---|---|---|
| 일반 현황 | 공종 구분 | 고속도로 |
| | 현장 위치 | 경남 함양군 병곡면 옥계리~ 함양읍 백천리 |
| 공사개요 | 규모 | 총 연장 10.2km |
| | 주요 공사 | 교량 8개소, 터널 2개소, 출입시설(IC,JCT) 2개소 |
| 진행 현황 | 공기 | `08.11.20~13.12.31 (1,500일) |






그림 2-45. 담양성산도로 조감도 및 시공현황

(5) 대구도시철도 1-1공구

표 2-15 대구도시철도 1-1공구 사업개요

| | | |
|---|---|---|
| 일반 현황 | 공종 구분 | 지하철 |
| | 현장 위치 | 달서구 대곡동~달성군 화원읍 |
| 공사개요 | 규모 | 총 연장 997.5m |
| | 주요 공사 | 정거장 1개소 150m<br>터널(NATM) 843.52m |
| 진행 현황 | 공기 | 10.06.25~16.04.18 (71개월) |




그림 2-46. 대구 도시철도 1-1공구 조감도 및 시공현황

(6) 저수지 둑 높이기 사업(4공구)

표 2-16 저수지 둑높이기사업 사업개요

| | | |
|---|---|---|
| 일반 현황 | 공종 구분 | 저수지 |
| | 현장 위치 | 경남 산청군 신등면 일원, 경남 하동군 옥종면 일원 |
| 공사개요 | 규모 | 추가저수량 총 9.5 백만$m^3$ |
| | 주요 공사 | 이설도로 총 6.7km<br>제당 신설 L=312m, H=58.2m |
| 진행 현황 | 공기 | ~12.12.31 |




그림 2-47 저수지 둑높이기 사업 4공구 조감도 및 시공현황

(7) 미호천 1교

표 2-17 미호천 1교 사업개요

| | | |
|---|---|---|
| 일반 현황 | 공종 구분 | 교량공사 |
| | 현장 위치 | 충남 연기군 남면 월산리, 동면 용호리 |
| 공사개요 | 규모 | 총 연장 700m |
| | 주요 공사 | 교량공사(주경간교 320m, 접속교 310m)<br>지하차도 1개소(L=90m, B=18m) |
| 진행 현황 | 공기 | 10.07.20~12.11.19 (28개월) |



그림 2-48. 미호천 1교 조감도 및 시공현황

(8) 서수원-의왕간 고속화도로

표 2-18 서수원-의왕간 고속화도로 사업개요

| | | |
|---|---|---|
| 일반 현황 | 공종 구분 | 고속화도로 |
| | 현장 위치 | 경기 수원 권선구 금곡동~의왕 청계동 |
| 공사개요 | 규모 | 총 연장 13.07km |
| | 주요 공사 | 터널(상행 400 , 하행495m)<br>교량 25개소 2,469m, 영업소, 휴게소 1개소 |
| 진행 현황 | 공기 | 09.07.01~12.12.31 (42개월) |



그림 2-49. 서수원-의왕 간 고속화도로 조감도 및 시공현황

(9) 소사벌 하수

표 2-19 소사벌 하수 사업개요

| | | |
|---|---|---|
| 일반 현황 | 공종 구분 | 하수처리장 |
| | 현장 위치 | 경기 수원 권선구 금곡동~의왕 청계동 |
| 공사개요 | 부지면적 | 15,800m² |
| | 하수처리용량 | 22,000톤/일 |
| 진행 현황 | 공기 | 10.07.19~12.09.18 (26개월) |



그림 2-50. 소사벌 하수 조감도 및 시공현황

(10) 신림봉천 터널

표 2-20 신림 봉천터널 사업개요

| | | |
|---|---|---|
| 일반 현황 | 공종 구분 | 도시고속도로 |
| | 현장 위치 | 서울시 관악구 난곡교차로 일원 |
| 공사개요 | 규모 | 총 연장 3.1km (4차로) |
| | 주요 공사 | 터널 1개소 L=1,753m<br>지하 Box L=1,101m(2차로), 관리동 |
| 진행 현황 | 공기 | 10.10.05~17.12.31 (87개월) |




그림 2-51. 신림봉천 터널 조감도 및 시공현황

다. 개발기술의 경제성 분석을 위한 기초자료 분석

동결샘플링은 비동결샘플링법과 비교해 지반의 물성을 정확하게 파악하기 위해 필요한 흐트러지지 않은 고품질의 비교란시료를 채취할 수 있는 수법이다. 한편, 동결샘플링 비용은 통상 비동결샘플링에 비해 고가인 점이 최대의 문제이다. 기술의 성숙을 도모하기 위해서는 코스트 다운을 목표로 해나갈 필요가 있다. 본 절에서는 일본의 동결샘플링 적용 사례로부터 코스트다운 기술개발의 검토 자료로 활용하기 위해 일본의 실제 현장(Tadotu 지역)에서 적용한 동결샘플링 코스트 분석 결과를 기술하고자 한다. 본 자료는 한정된 자료이므로, 동결샘플링 비용의 일반적이고 정확한 평가에는 다소 어려움이 있다는 점을 염두에 두길 바란다.

(1) 동결샘플링 코스트 평가

Tadotu 지역에서 실시한 동결샘플링 적용 조건은 다음과 같다.

동결방법 : 액체질소를 이용한 1(주동결관)+3(보조동결관) 동시동결.

1본의 주동결관에서는 액체질소의 잠열을 이용하여, 지반온도 강하

3본의 보조동결관에서는 주동결관에서 배출된 -130℃의 가스를 주입하여, 현열로서 지반온도 강하

액체질소 : 동토량은 약 34m$^2$이므로 필요양은 73ton

채취시료 : 직경 30cm×높이 45cm 16본, 채취길이 7.2m

직경 30cm×높이 60cm 9본, 채취길이 5.4m

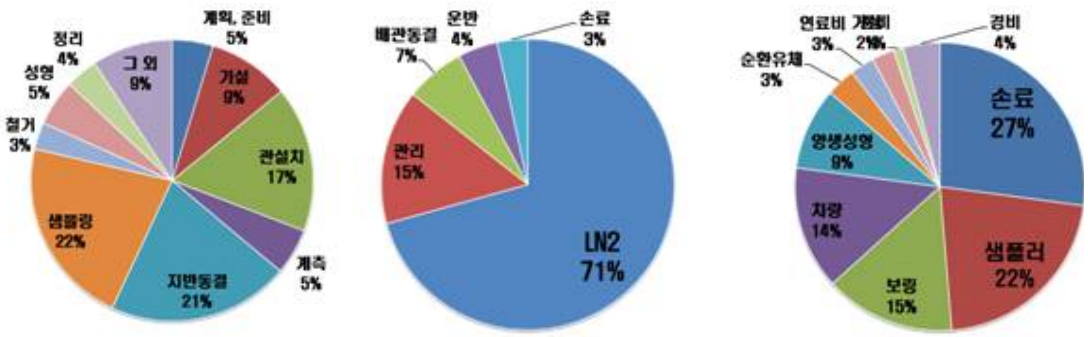
직경 30cm×높이 65~70cm 12본, 채취길이 8.4m

채취길이 총계 21m

굴착장 : 3본(8.15m, 8.7m, 8.4m), 총굴착장 25.25m

시료채취지점 온도 : -15℃

그림 2-52는 상기의 조건에 대한 총액의 내역을 나타낸 것으로, 공사항목을 총 9개로 나누어, 공사의 순서에 따라 시계방향으로 총액에 대한 각 항목의 비율을 나타내고 있다. 비용 중 그 외에 속하는 비용항목은 숙박비, 교통비 등이 있다. 총액에 대한 비율이 큰 항목은 관설치공, 지반동결, 샘플링공 순으로 이들 공사의 합계비용은 전체의 약 60%를 차지하고 있다. 그림 ?의 (b), (c)는 이들 공비의 내역을 나타내고 있다. 샘플링공의 비용은 샘플링시료의 대구경화에 따라 대형 굴착장비, 크레인 등의 사용으로 비용지출이 크게 되었다. 또한 관설치공에 대해서도 샘플링공과 동일한 이유로 비용이 분포한다. 지반동결비용은 액체질소비용이 71%를 점하고 있고, 총공사비에 대한 비율은 약 15%이다.




(a) 총 공사비 내역 (b) 지반동결공비 내역 (c)샘플링 공비 내역

그림 2-52. 동결샘플링 비용 내역(Tadotu 지역)

표 2-19는 그림 2-52의 동결샘플링 비용을 좌우하는 항목을 정리한 것이다. 이들 항목에는 쉽게 변경할 수 있는 것과 할 수 없는 것이 있다. 비용의 영향을 크게 주는 것은 지반조건, 채취심도, 채취본수를 생각할 수 있다. 또한 지하수 항목도 유속과 포화도 값에 따라 큰 폭으로 비용이 달라질 가능성이 있다. 인위적으로 변경할 수 없는 항목에 대해서는 그 지점 고유의 문제이지만, 비용에 큰 영향을 미치기 때문에 최적의 샘플링 방법의 확립을 도모해나가기 위해서 중요하다.

표 2-21. 동결샘플링 비용에 영향을 주는 항목

| 항목 | | 비용 up 요인·방향 |
|---|---|---|
| 지반조건 | 입도 | 자갈함유율의 증가, 자갈입경이 크게 되면 굴착속도가 저하할 가능성 있음 |
| | 자갈의 경도 | 딱딱하면 굴진속도가 저하하고, 비트의 마모가 빨리 됨 |
| 지하수 | 염분농도 | 농도에 따라서 영점강하가 있음. 농도가 높으면 동토의 강도저하 가능성 있고, 동결에너지가 증대함 |
| | 유속 | 유속이 빠를수록 열손실이 크게 됨 |
| | 포화도 | 낮게 되면 동토의 강도 저하, 동결효율이 저하할 가능성이 있음. 동결에너지가 증대함 |
| 핸들링 기술 | 연직굴진 정도 | 낮으면 심부 보링에서는 동결토체적이 증가하고, 동결에너지가 증가함 |
| | 동결공의 삭공기술 | 비동결지반 삭공에 의해 교란이 크게 되면, 샘플링공 위치를 동결공에서 멀리 떨어트릴 필요가 있으므로 동토체적이 증대함 |
| | 샘플러의 굴착성능 | 자갈질 지반의 굴착에 적합한 비트구조, 코어 캡쳐로서 성능이 낮으면 코아 품질, 채취율, 작업능력이 저하함 |
| 샘플링 | 심도 | 너무 깊어지면 동결효율이 저하, 작업공정이 증가함. 기계재료의 증가, 기계의 용량 증대 가능성 있음 |
| | 시료채취 본수 | 본 수 증가는 동토 체적, 보링공 수의 증가로 이어짐 |
| 지반동결 | 냉매 액체질소, 브라인 | 지반·지하수 조건, 공기, 샘플링 본수 등을 고려해서 선택함. 일반적으로 동토의 체적이 적은 경우 공기의 단축화가 필요한 경우 액체질소의 사용이 적합함 |
| | 동시동결 | 동결 효율화, 공기의 단축 메리트가 작으면 동시동결할 경우 보링 비용의 증대함 |

(2) 동결샘플링과 비동결 샘플링 코스트 비교

2.3.1절에서 동결샘플링 코스트 분석을 실시한 예를 소개하였으나, 본 절에서는 동일한 사력지반에서 ϕ300mm의 동결샘플링과 비동결 샘플링으로 채취하였다고 가정한 양자의 코스트 비교를 수행한 예를 소개한다. 동결샘플링 코스트는 전절에서 소개한 분석

결과를 이용하고 있다. 비동결샘플링은 실제 실시하지 않았으나 그 비용은 동결샘플링의 실적과 이하에 나타내는 비동결샘플링 조건에 기초하여 산정하였다.

① 비동결샘플링법에서 불교란시료를 채취할 수 있는 샘플러는 개발되어 있지 않다. 따라서 코스트도 불명확하기 때문에 여기서는 동결샘플링에 이용한 샘플러와 같은 가격으로 한다.
② 채취시료 길이는 채취후의 취급을 용이하게 하기 위해 1.2m로 한다.
③ 샘플링은 공벽의 붕괴를 방지하기 위해 케이싱을 투입하며 진행한다.
④ 이상의 샘플링방법에 따르는 경우 작업공정이 길어지므로 24시간의 시료채취 본수는 2개로 한다.
⑤ 채취한 시료는 운반 시 교란을 방지하고, 단면성형을 쉽게 하기 위해 현장에서 포화 냉동시켜 운반한다.
⑥ 시료의 절단은 현장에서 실내반입후에 수행한다.
⑦ 삭공기계와 차량, 기자재(지반동결용 이외의 기자재) 등은 동결샘플링법과 같이 것으로 한다.

이상의 조건에 기초하여 공정별로 추정한 실가동일 수와 소요인력수를 표 2-19에 나타냈다. 이들 총 수는 비동결샘플링법에서는 각각 102일 256인, 동결샘플링에서는 153일 354인이고, 비동결샘플링법의 실가동일수와 소요 인력수는 동결샘플링법에 비해 각각 67%와 72%로 된다. 공정별로 동결샘플링법과 비동결샘플링법의 실가동일수와 소요인력수를 비교하면, 비동결샘플링법이 많은 것은 샘플링공, 시료성형과 양생 정도에 지나지 않는다. 이것은 비동결지반의 샘플링보다 동결샘플링의 경우가 채취후 동결과정에서 교란을 받기쉽기 때문에 특히 주의을 기울여야 하는 작업이기 때문에 비동결샘플링에 비해 많이 투입되는 것으로 되어 있다.

그림 2-53는 비동결 샘프링 코스트와 동결샘플링 코스트를 비교하고 있다. 그림 중에 숫자는 동결샘플링 총공사비에 대한 비율을 나타낸다. 비동결샘플링을 실시한 경우의 코스트는 동결샘플링 보다 싸게 되지만, 지반동결 비용이 약 21%를 차지하므로, 그 외 비용이 4%에 지나지 않는 것으로 나타났다. 참고로 모래지반에서 비동결법으로 φ100mm 시료를 채취하는 경우 코스트를 계산하면 그 코스트는 동결샘플링 코스트의 1/10 수준이다.

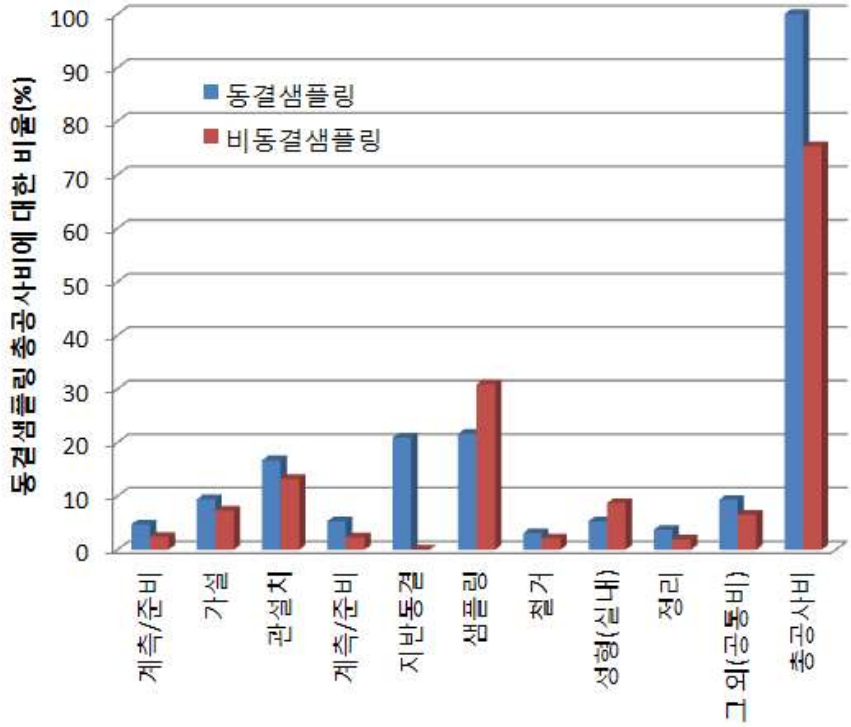



그림 2-53 동결/비동결 샘플링 코스트 비교

무엇보다 중요한 점은 비동결샘플링에 의해서 채취한 시료의 품질은 동결샘플링으로 채취한 시료와 같이 고품질 불교란시료라고 생각할 수 없다. 따라서 고품질 불교란 시료를 채취하는 목적으로 샘플링을 수행하는 경우는 현시점에서는 다음 절에서 논하는 바와 같은 과제를 조금이라도 반영하여 코스트다운을 도모한다면, 동결샘플링법은 불교란시료를 채취하는 최고의 방법이 될 것이다.

(3) 이후의 과제

이상의 분석·비교에 근거하여 동결샘플링 코스트다운화에 기여할 수 있는 것으로 생각되는 과제는 다음과 같다.

① 공법의 시스템화를 도모한다.

동결샘플링에서는 많은 작업항목이 있고, 많은 기자재를 필요로 한다. 공법의 시스템화를 도모하여, 공사의 간소화, 공기의 단축, 기자재의 유효이용을 추진한다.

② 동결효율의 향상

토조실험에 따르면 지반의 동결에 액체질소를 책체 그대로 이용하는 것보다도 기화질소를 효율적으로 이용한 편이 빠르게 냉각하는 것이 확인되고 있다. 실제 지반동결에

배출양을 배출구 위치에서 조절하는 것으로 기화열을 효율적으로 이용하고, 동결효율을 높일 가능성이 있다. 또한 배출구 위치의 조정이 가능하다면 동결지반의 심도방향의 온도차를 작게 하는 것이 가능하다고 생각된다.

## 3. 소결

(1) 동결샘플링 시스템 국내외 적용사례

- 사용냉매/동결관 본 수/샘플링 심도에 따른 지반동결 방법에 대해 조사한 결과, 액체질소를 이용한 지반동결방법이 샘플링에 있어서 이상적인 방법으로 판단됨.

- 동결→채취→운반→보관→성형에 이르는 과정의 진행에 필요한 장치 및 기준에 대해 조사하였고, 본 성과는 차년도 연구에 기여할 것으로 사료됨.

(2) 동결샘플링 코스트 분석

- 일본의 TADOTU 지역에서 실시한 동결샘플링 조건에 대한 간접적으로 분석하였음. 그 결과,

- 자갈질토에 대한 동결/비동결샘플링 비용은 동결샘플링의 경우가 4%정도 추가적 비용이 발생하는 것으로 나타나, 상기 지반에 대한 적용성은 높은 것으로 판단됨.

- 사질토에 대해서 굴착비용은 거의 동일하므로, 전체 코스트에서 액체질소 비용이 절대적인 영향을 미치는 것으로 나타났고, 기존 샘플링은 동결샘플링의 10% 수준인 것으로 분석되었음.

- 동결샘플링의 적용 확대를 위해서는 지반동결의 효율성을 극대화하는 기술이 필요함.

# 4. 현재까지 연구성과

가. 1차년도

(1) 1차년도 연구성과 요약

1차년도의 핵심연구성과를 요약하면 다음과 같다.

① 국내외 동결샘플링 시스템 현황 및 코스트 조사

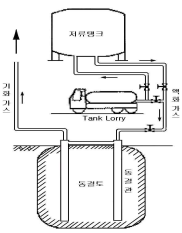
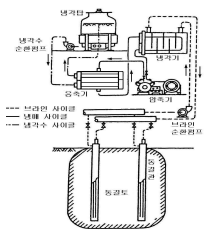
② 동결샘플링 장비 설계 및 시스템 구축

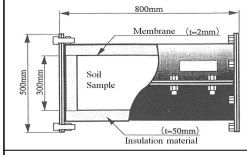
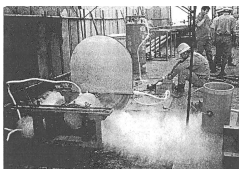
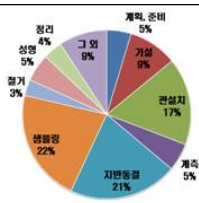
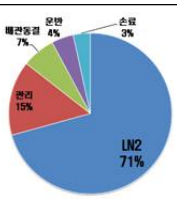
③ 동결샘플링 장비 성능 및 동결시료 평가 방안 마련

④ 실증지 선정 및 현장 운용방안 수립

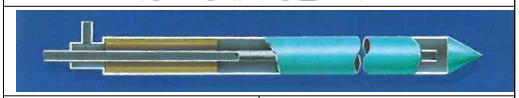
(2) 1차년도 추진실적

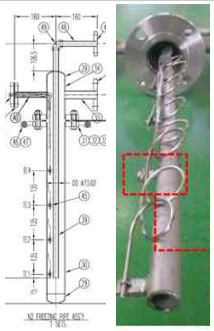
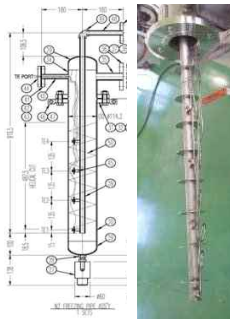
1차년도의 핵심항목별 연구성과를 정리하면 다음과 같다.

<table>
<tr><th colspan="2">연구개발의 내용</th><th>연구 결과</th><th>비고</th></tr>
<tr><td rowspan="2">1. 국내외 동결샘플링 시스템 현황 및 코스트 조사</td><td rowspan="2">1-1 동결샘플링 시스템 및 국내외 적용사례</td><td>• 지반동결방법 도출<br>- 국내지반조건, 건설환경 등을 고려하였을 때 액체질소를 이용한 지반동결방법의 도출은 현시점에서 타당<br>- 그러나 액체질소를 이용한 지반동결방법이 최적합의 방법이라는 결론을 뒷받침하기 위해서는 정밀 원가분석이 필요<br><table><tr><th>(a) 액체질소 방식</th><th>(b) 브라인 방식</th></tr><tr><td>▪장 · 단점<br>동결시간이 짧고, 비교적 간단한 구조이나, 대규모 지반동결을 위해서는 액체질소의 사용비용이 증가함.<br>  </td><td>▪장 · 단점<br>냉매를 영구적으로 재사용할 수 있으나, 냉동사이클에 필요한 플랜트가 필요하고, 동결속도가 빠르지 못함.<br>  </td></tr></table></td><td>pp.10-17</td></tr>
<tr><td>• 동결샘플링 시스템 프로세스 조사<br>- 동결샘플링 시스템의 운용에 있어서 동결→채취→운반→보관→성형과정의 진행에 있어서 필요한 장치 및 기준에 대해 조사</td><td>pp.29-35</td></tr>
</table>

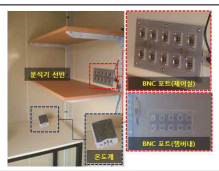
<table>
<tr><td></td><td></td><td>
<table>
<tr><td colspan="2">액체질소를 이용한 동결샘플링 구성 요소</td></tr>
<tr><td>코어링</td><td>채취</td></tr>
<tr><td>다이아몬드/메탈비트<br>  </td><td>더블/트리플 코어베럴<br>  </td></tr>
<tr><td>운반</td><td>보관</td></tr>
<tr><td>온도손실을 최소화한 특수한 용기를 사용<br>  </td><td>-20℃로 장기 보관<br>  </td></tr>
<tr><td>성형</td><td>커팅</td></tr>
<tr><td>블록샘플은 특수한 성형기로 시료 성형<br>  </td><td>다이아몬드 블레이드 컷터를 이용한 절단<br>  </td></tr>
</table>
</td><td></td></tr>
<tr><td></td><td>1-2 동결샘플링 시스템 코스트 조사</td><td>• 경제적 적용 타당성 조사<br>- 일본의 Tadotu 지역에서 실시한 동결샘플링 조건에 대한 코스트 평가자료를 분석하여, 기존 샘플링에 비한 경제적 적용 타당성에 대해 평가<br>
<table>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>(a) 총 공사비</td><td>(b) 지반동결공비</td></tr>
<tr><td colspan="2">동결샘플링 비용 내역</td></tr>
</table>
• 동결샘플링 비용에 영향을 주는 항목<br>- 동결샘플링 비용에 영향을 주는 항목인 지반조건/지하수/핸들링기술/샘플링/지반동결에 있어서 비용 증가 요인과 개발방향에 대해 검토</td><td>pp.51-55<br><br>pp.52-53</td></tr>
<tr><td>2. 동결샘플링 장비 설계 및 시스템 구축(1단계)</td><td>2-1 동결샘플링 장치 핵심 유닛 설계</td><td>• 국소변위 지반동결을 위한 인공동결관 제작<br>- 이중관 형태의 동결관 구조<br>- 열교환 효율을 높이기 위해 내관과 외관 사이에 나사선방식의 Baffle 설치</td><td>pp.57-59</td></tr>
</table>

이중관 형태의 동결관 구조

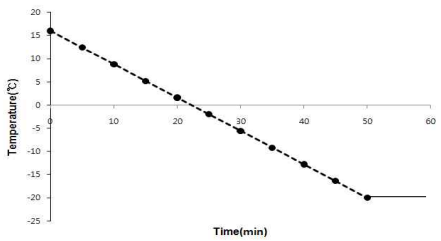


| 일반적인 동결관 | 배플타입 동결관 |
|---|---|
|  |  |

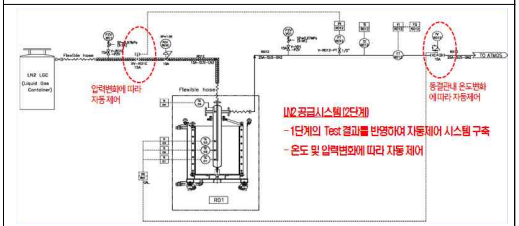
• 동결시료 운반 · 보관 장치 pp.62-69
- 일정한 온도 유지를 토한 시료의 안전한 보관을 위해 대형동결챔버 제작 (300cmX500cm)
- 다양한 동결실험을 수행할 수 있도록 충분히 크게 설계
- 성능평가시험을 통한 보완 및 성능 확보

| 동결챔버 전경 | 챔버내 제어실 상세 |
|---|---|
|  |  |
| 챔버내부 | BNC 포트 결빙 방지 |
|  |  |

동결챔버의 온도변화 양상

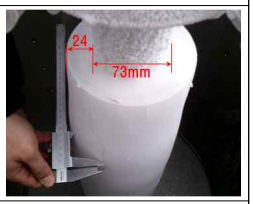



• 동결지반 천공용 굴착 Bit와 코어배럴 pp.70-73
- 여러 종류의 비트를 사용하여 모래 동결시료 코아 회수 성능을 비교
- 다이아몬드 비트(12종류)와 메탈비트를 준비하여, 현장실험에 적용

| | | | |
|---|---|---|---|
| | |   <br>메탈크라운 비트 / 다이아몬드비트(3호)<br>   <br>더블코어배럴 / 트리플코어배럴 | |
| | 2-2 동결샘플링 시스템 구축(1단계) | • 동결관내 냉매공급 시스템<br>- 액체질소의 주입량을 압력계/유량계/온도계 output 데이터로부터 안정적으로 조절할 수 있는 자동 공급 시스템 구축<br>자동제어를 통한 액체질소 공급 시스템<br>  | pp.60-61 |
| 3. 동결샘플링 장비 성능 및 동결시료 평가 방안 마련 | 3-1 동결샘플링 실내검증장치 구축 | • 실내검증장치 구축<br>- 핵심유닛 및 냉매주입시스템을 일체화하여 실내 실험장치 구축<br>- 실내검증장치는 스테인리스 재질의 토조와 인공동결관으로 구성<br>전체 인공동결 실험장치 전경<br>  | pp.75-77 |
| | 3-2 동결시료의 교란효과 평가를 위한 실내실험 | • 동결샘플링 시스템 실내검증장치<br>- 동결실험장치 핵심 unit 및 액체질소 주입 시스템 등의 점검 수행<br>- 토조내 온도센서 설치, 포화모래시료 포설 후 동결실험 수행<br>- 상온수에 대한 동결, 수평동결, 수직동결의 3가지 실험 후 시료추출을 통한 타 | pp.74-92 |

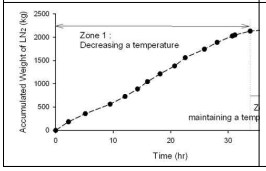
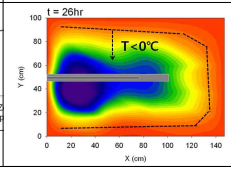
격시험, 온도측정

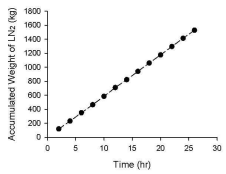
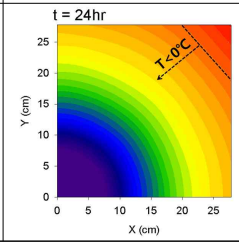
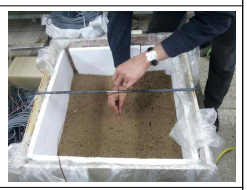
① 상온수 동결실험
- 장비, 센서점검 차원에서 상온수를 동결시키는 실험
- 액체질소 주입 중 동결기둥이 균질한 원통형 형태로 성장
- 동결관 상단부는 상대적으로 고온인 대기온도로 인해 약간의 온도손실이 발생하여 하향으로 갈수록 얼음이 두꺼운 형태를 나타냄
- 공기를 다량 포함한 수돗물을 사용하여 동결시켜 얼음이 하얀색을 나타내었으며 금속제 망치로 충격을 가한 경우 쉽게 부서져 강도가 매우 약하게 나타남

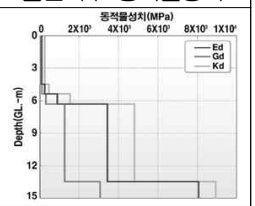
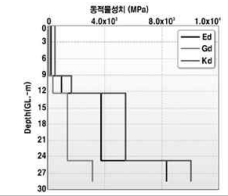
| 인공동결실험장치전경 | 동결관과 토조 전경 |
|---|---|
|  |  |
| 실험 전경 | 실험 55분 경과 후 |
|  |  |
| 얼음 상태_1 | 얼음 상태_2 |
|  |  |

② 포화모래지반에 대한 수평 동결실험
- 토조내 동결관을 수평으로 설치한 후 느슨한 포화사질지반을 조성
- 동결관 주위의 온도분포 확인을 위해 설치된 총 20개의 온도센서로부터 지반내 온도경시변화를 관찰
- 토조를 완전 단열처리(그래스울을 수겹 도포)로하여 외부온도로 인한 온도손실을 방지
- 액체질소통의 무게를 지속적으로 관찰하여 액체질소 사용량을 기록

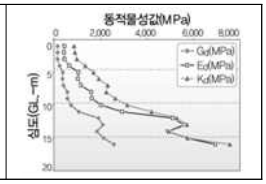
| 토조 전경 | 실험 중 |
|---|---|

<table>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td>
<table>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>실험 종료</td><td>표면부 강도 확인</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>액체질소 사용량</td><td>지반내 온도분포</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
</table>
<br>
③ 포화모래지반에 대한 연직 동결실험<br>
- 수평 동결실험시 설치되지 않았던 유량계를 부착하여 액체질소 주입량을 일정하게 조절<br>
- 온도센서를 동결관 중앙부에 집중적으로 설치(2cm간격)함으로써 온도경시변화를 보다 정밀하게 계측
<table>
<tr><td>시료세팅 전경</td><td>온도센서 부착</td></tr>
<tr><td>  </td><td> 
</td></tr>
<tr><td>26시간 후 전경</td><td>시료 추출 전경</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>동결토 전경</td><td>표면부 온도측정</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
</table>
</td>
<td></td>
</tr>
</table>

<table>
<tr><td></td><td></td><td>
<table>
<tr><td>액체질소 사용량</td><td>지반내 온도분포</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
</table>
</td><td></td></tr>
<tr><td></td><td>3-3 코어 Bit 및 코어 배럴 최적 성능 도출을 위한 실증실험</td><td>
• 실내동결실험<br>
- 드라이아이스를 이용한 실내동결실험<br>
- 13mm 합판박스를 이용하여 동결토조를 제작하여(가로×세로×높이 각 60cm) 방수비닐을 깔고 스티로폼으로 단열시킴<br>
- 내부에 소정의 포화모래 시료를 채우면서 온도센서를 하단에서 20cm위치에 설치하고, 40cm까지 시료를 채움<br>
- 이후, 드라이아이스를 이용하여 시간에 따른 온도의 저하양상을 관찰<br>
- 실험 결과, 최적의 코어링 조건을 찾기 위해 드라이아이스를 이용하여 지반을 동결시키는 방법은 유효한 것으로 판단됨<br>
<table>
<tr><td>포화모래시료 조성</td><td>온도센서 설치</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>드라이아이스 설치완료</td><td>동결시험시 온도변화</td></tr>
<tr><td>  </td><td> 
</td></tr>
</table>
<br>
• 현장동결실험<br>
- 코어 Bit 및 코어베럴의 최적 조합 및 작업환경 등의 결정을 위해 드라이아이스를 이용한 동결실험을 수행<br>
- 동결실험 완료 후, 다이아몬드비트(D3 코어베럴)와 메탈크라운 비트(크리플 코아베럴)에 대해 작업수량, 회전수를 변화시켜 가며 코어링 작업을 수행<br>
- 시추결과, 다이아몬드 비트 및 더블코아베럴(D3 코아베럴)을 사용하여 코아채취시, 고회전수(450rpm)보다는 저회전수(150rpm), 작업수의 양은 다량(30L/min)일때보다 소량(5L/min)일때 양질의 코아 회수가 가능
</td><td>pp.93-94<br><br>pp.95-104</td></tr>
</table>

<table>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td>
<table>
<tr><td>동결모형틀 고정</td><td>48시간 동결</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>-4.9℃ 작업수 조제</td><td>굴진 전경</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>동결샘플링 시료(Bad)</td><td>동결샘플링 시료(Good)</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
</table>
</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>4. 실증지 선정 및 현장 운용방안 수립</td>
<td>4-1 동결샘플링 시스템 현장실증지 조사 및 최적지 선정</td>
<td>
• 현장실증지 조사 및 최적지 선정<br>
- 두산건설 및 동아지질의 토목현장 60개소 중 동결샘플링에 적합한 현장 3개소(율현지구, 손항지구, 진주 혁신도시 진입교량 현장)를 선정<br>
- 각 현장에 대하여 지반상태, 입지조건 등을 면밀히 조사하여 경남혁신도시를 동결샘플링 대상 현장으로 선정
<table>
<tr><td>율현지구 전경</td><td>율현지구 동적물성치</td></tr>
<tr><td>  </td><td> 
</td></tr>
<tr><td>손항지구 전경</td><td>손항지구 동적물성치</td></tr>
<tr><td>  </td><td> 
</td></tr>
<tr><td>경남혁신도시 전경</td><td>혁신도시 동적물성치</td></tr>
</table>
</td>
<td></td>
</tr>
</table>

<table>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td>

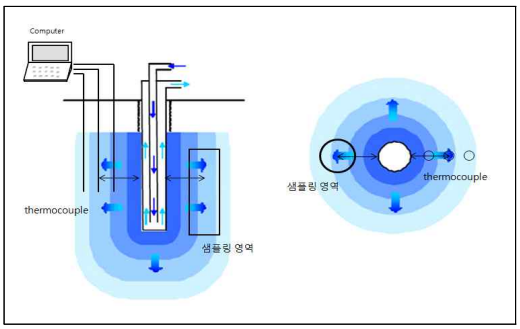


<br>경남혁신도시 진입교량 현장 위치<br>


</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>4-2 동결샘플링 시스템 현장 운용방안 수립</td>
<td>• 현장 운용방안 수립<br>-「동결→채취→운반→보관→추출→성형」에 있어서 현재 가장 부족한 부분은 동결과 성형방법<br>- 동결샘플링을 위한 지반동결시 액체질소 사용에 관한 문헌을 지속적으로 수집<br>- 현장실증실험 전 실내실험을 충분히 실시하여, 액체질소 주입기준을 설정<br>- 시료성형방법은 다이아몬드소우를 이용한다고 되어 있으나, 시료 성형은 어떠한 성형장치보다는 노하우와 관련성이 높으므로, 해외의 선행연구자들과 직접 접촉하여 노하우를 습득할 필요가 있음<br>동결시료 추출장치<br>


</td>
</tr>
</table>

| | | | |
|---|---|---|---|
| | 4-3 동결 채취 · 운반 · 보관 프로세스 수립 | • 운반 및 보관<br>- 시료는 채취시의 위치와 같은 수직으로 운반하고 보관<br>- 완충재를 깔아 진동의 영향을 최소화<br>- 고온과 직사일광을 피하고 저온 고습한 상태에서 보관<br><br>• 추출 및 성형<br>- 실험실은 저온, 고습(상대습도 95%이상) 상태를 유지<br>- 시료 단면 전체가 추출되도록 시료추출기 피스톤의 플런저는 튜브의 내경과 거의 같은 사이즈로 사용<br><br>• 동결샘플링 채취·운반·보관 시뮬레이션<br>-「동결→채취→운반→보관→추출→성형」에 이르는 전 과정을 반복·시뮬레이션하여 부족한 부분을 보완<br>- 일본의 타카라츠카에서 수행된 동결샘플링 문헌을 참고로 하여 시뮬레이션 수행<br>동결샘플링 작업수순 시뮬레이션<br>  <br> | |
| 5. 동결지반 온도 모니터링 및 동결시료 교란효과 평가방안 | 5-1 동결지반 온도 모니터링 방안 | • 지반의 동결상태 모니터링 기법 설계<br>- 소요 액체질소의 양에 따른 지반의 동결속도를 산정<br>- 실내동결실험 모니터링을 위해 동결관으로부터 거리에 따라 thermocouple을 설치하여 동결과정을 모니터링<br>- 현장에서는 시료를 채취하고자 하는 영역의 반대방향으로 thermocouple을 매설하여 모니터링 수행<br>지반의 동결 온도 모니터링 | pp.107-108 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | |  <br>• 지반의 동결상황을 추정하기 위한 수치해석 방법<br>- 지반의 동결온도 모니터링 시스템을 마련하기 위해서 현장에서 계측한 온도 데이터와 지반의 동결을 지배하는 방정식 및 기존의 수치해석 방법과의 비교/분석을 수행<br>- 지반동결을 이용하여 불교란시료 채취 후 원위치 액상화강도를 평가하기 위해서는 동결에 의해 발생하는 지반의 팽창 변형을 파악하는 것이 중요<br>- 동결면의 위치에 대한 해석정도를 높이기 위한 목적으로 지반의 열적 수치해석 기법을 고안 | pp.109-117 |
| | 5-2 동결시료의 교란효과 평가기법 설계 | • 기존의 비교란시료 채취방법<br>- 현장시험은 대상지반의 교란이 작고 현장 상태 그대로 실험 가능하나 높은 시험비용과 다양한 응력조건 및 경계조건 모사가 불가능한 단점으로 실제로는 다양한 실내시험이 함께 수행됨<br>- 실내시험에서는 시료의 교란으로 인하여 정확한 실험결과를 얻기 어려움<br>- 교란은 흙 구조뿐만 아니라 함수비와 간극비에도 변화를 일으켜, 강도특성과 입밀특성에 영향을 미치게 됨<br>• 시료 교란의 원인<br>- 시료채취 과정에서는 응력해방, 시료채취과정, 운반과정에서의 교란이 필연적으로 발생<br>• 기존의 교란도 평가방법<br>- 점성토 교란 평가방법에는 유효 잔류응력에 의한 방법, 체적변형률에 의한 방법, 압밀곡선을 이용한 방법, 일축압축강도와 탄성계수를 이용한 방법 등이 있음<br>- 사질토 시료는 배수전단강도, 다일러턴시 벡터, 밀도 분산, 전단탄성계수와 액상화 응력비에 의한 방법 등이 있음 | pp.118-120<br>pp.121-122<br>pp.123-142 |

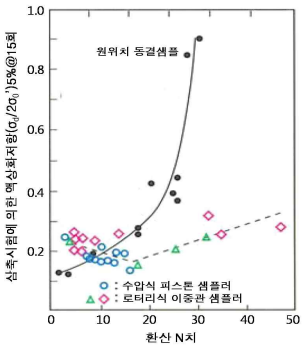
교란도 평가방법




• 동결샘플링의 교란도 평가방법
- 비교란 시료는 현장에서의 함수비와 유효응력이 유지되어야 하나 실제로 두 조건을 다 만족하는 것은 불가능
- 동결샘플링은 두 가지를 최대한 만족시킬 수 있으며 따라서 동결샘플링 시료의 교란 정도를 평가하는 일이 중요
- 동결 전 FVP로 획득된 현장지반의 전단파속도와 실내의 삼축압축실험을 통한 전단파속도를 비교하여 동결샘플링의 교란도를 평가

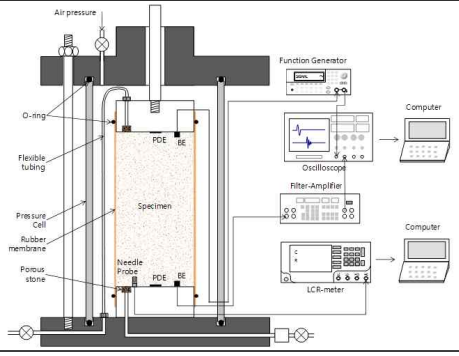
pp.143-153

동결/비동결 시료의 액상화 강도 차이



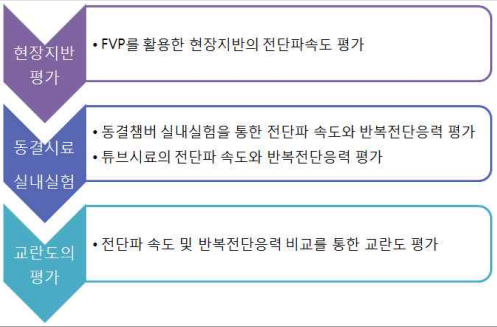

| FVP 실험 주변장치 | 실험 후 FVP 인발 |
|---|---|
|  |  |

삼축압축시험 모식도




| 자동화 삼축압축시험기 | 탄성파 및 전기비저항 측정 페데스탈 |
|---|---|
|  |  |

교란도평가 모식도




pp.154

• 원지반 응력조건 모사가능 동결시료 융해법(안) 설계
- 동결된 시료의 융해방법에 따라 시료의 교란도가 달라질 수 있음
- 전단파 속도비교를 통해 자연융해와 강제융해를 비교/분석하여 차년도 과제의 목표달성을 위한 최상의 시료 융해법을 제안하고 원지반 응력조건을 모사할 수 있는 동결시료의 융해법을 제안

나. 2차년도

(1) 2차년도 연구성과 요약

2차년도의 핵심연구성과를 요약하면 다음과 같다.

① 동결샘플링 시스템 구축(2단계)

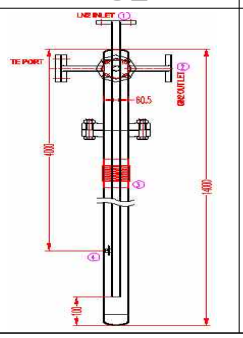
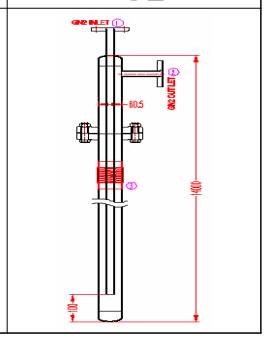
② 동결샘플링 장비 핵심 unit 실내 성능평가

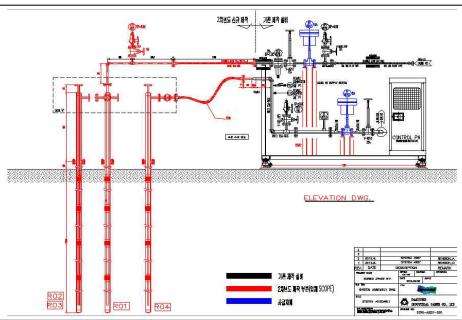
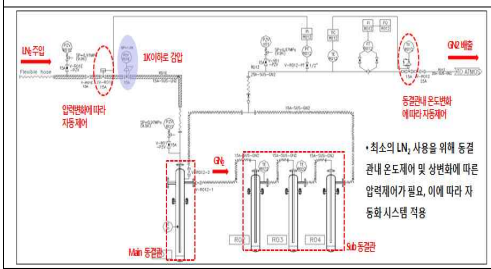
③ 동결샘플링 시스템 현장 실증

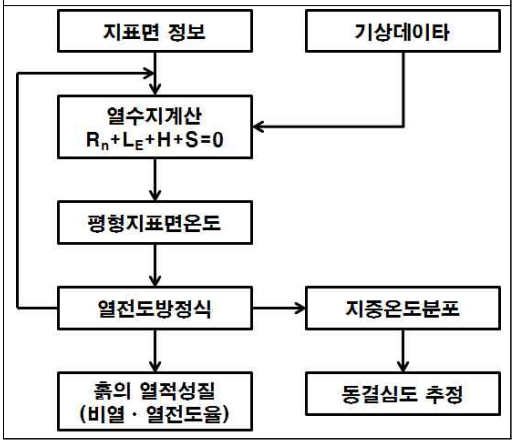
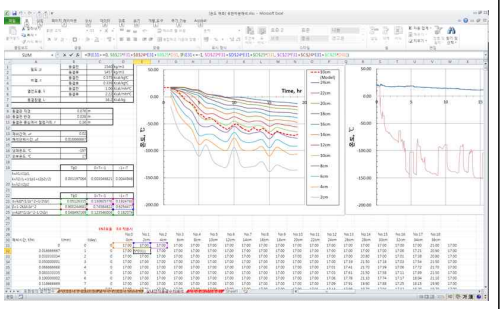
④ 동결시료의 교란도 평가 및 시험법 개발

(2) 2차년도 추진실적

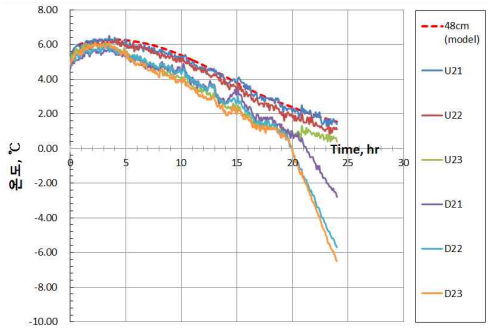
2차년도의 핵심요소별 연구성과를 정리하면 다음과 같다.

<table>
<tr><th colspan="2">연구개발의 내용</th><th>연구 결과</th><th>비고</th></tr>
<tr><td>1. 동결샘플링 시스템 구축 (2단계)</td><td>1-1 동결샘플링 장비 제작</td><td>• 운반 · 조립 · 해체가 용이한 현장적용 인공동결관 설계/제작<br>- 지반동결의 효율성은 영상상태의 지반을 0℃ 가깝게 떨어뜨리는 것에 좌우됨<br>- GN2를 현열로서 이용하는 방법을 고안하여 Main 동결관과 Sub 동결관으로 두 가지 Type으로 설계·제작<br>- Main 동결관 및 Sub 동결관은 기본적으로 동일한 구조와 사양(외관파이프 외경 60.5mm, 내관 파이프 외경 21.7m)<br>- 각 3m 길이의 개별 Unit으로 제작하여 설치 및 해체가 용이하도록 나사형식 체결법으로 제작<br><table><tr><th>Main 동결관</th><th>Sub 동결관</th></tr><tr><td>  </td><td>  </td></tr></table></td><td>pp.11-14</td></tr>
</table>

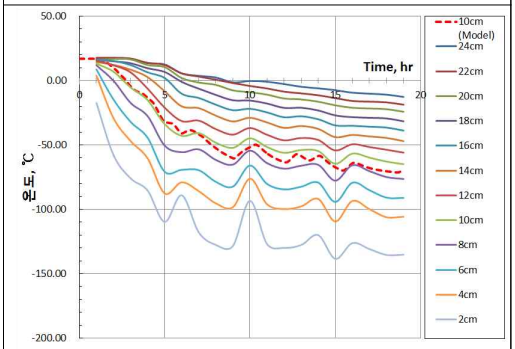
| | | | |
|---|---|---|---|
| | | 토양 동결용 LN2 공급 시스템<br>  <br><br>동결관 제작완료 / 동결관 조립준비<br>   <br>• LN2 자동공급시스템 설계/제작<br>- 1차년도 개발 시스템을 최소한의 LN2 사용 및 유량을 제어하기 위해 자동운전 개념을 적용하여 개조<br>- 자동밸브/온도센서/PT(Pressure Transmeter)를 연동시켜 자동냉매공급이 가능토록 설계<br>- 적산 가능한 유량계를 설치하여 실제 목표치의 지반을 동결하기 위해 소모한 LN2량을 확인<br>자동냉매공급 시스템 개념도<br>  <br><br>개조된 LN2 공급시스템<br>  | pp.15-16 |
| 2. 동결샘플링 장비 | 2-1 지반열해석 프로그 | • 지반열해석 수치해석 프로그램 작성 | pp.57-64 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 핵심 unit 실내 성능평가 | 램을 이용한 1차년도 실험결과 분석 | - 지하수의 상변화로 인한 잠열을 겉보기 열용량으로 고려하여 유반차분해로 식을 전개하여 이를 Microsoft Excel을 이용하여 작성<br>평행지표면온도에 의한 동결심도의 해석흐름<br>  <br><br>Excel을 이용한 방사형 열확산 예측 프로그램<br>  <br>• 1차년도 지반동결실험 결과 심층분석<br>- 1차년도에 수행된 실내실험결과(수평동결관, 수직동결관을 이용한 지반동결실험)에 대해 지중온도 예측프로그램을 이용한 심층분석을 수행<br>- 잠열을 열용량개념으로 고려한 해석모델은 실제실험결과와 비교적 일치하며, 현장 적용성이 충분한 것으로 판단됨<br>- 열해석 시뮬레이션에 있어서 경계조건의 영향이 커 실험수행시 경계조건에 해당하는 온도를 정확히 측정할 필요가 있음<br>- 열효율이 70~80%로 나타나 이를 해석에 반영한 결과, 실험값과 예측값의 오차가 줄어듦 | pp.64-73 |

동결관 수평설치 온도-시간 그래프




동결관 수직설치 온도-시간 그래프




액체질소 효율 70% 산정 근거

**수직동결모형실험 1회 동결시 소요 질소량 추정**

**목표 : 동결관 중심에서 -10℃(평균온도)의 반경 30cm 동토벽 조성**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1. 흙의 중량, Msoil (ton) | | | 조건 | |
| 흙의 단위중량 γd= | 1.500 | t/m³ | 초기온도 : | 17 ℃ |
| 동결관 체적 Φ73mm×0.5m= | 0.029 | m³ | 목표온도 : | -35 ℃ |
| 토조 체적, V = | 0.352 | m³ | ⊿T | 52 ℃ |
| 흙의 중량 Msoil = | 0.485 | ton | | |
| | | | 액체질소 잠열 | 47.57 kcal/kg |
| 2. 물의 양, Mwater (ton) | | | 액체질소 비열 | 0.248 kcal/kg℃ |
| 간극비 e = | 0.767 | | | |
| 함수비 w = | 0.289 | | | |
| 물의 양 Mwater = | 0.140 | ton | | |
| 3. 물얼리기 열용량 (kcal) = | 16,059.0 | | | |
| ① 17℃의 물을 0℃의 물로 : | | | | |
| 1kcal/kg℃×Mwater×⊿T℃ | 2,384.3 | | | |
| ② 0℃의 물을 0℃의 얼음으로 : | | | | |
| 80kcal/kg×Mwater | 11,220.2 | | | |
| ③ 0℃의 물을 -35℃의 얼음으로 | | | | |
| 0.5kcal/kg℃×Mwater×⊿T℃ | 2,454.4 | | | |
| 4. 흙얼리기 열용량 (kcal) = | 12,604.5 | | | |
| ① 17℃의 흙을 -35℃의 흙으로 : | | | | |
| 0.5kcal/kg℃×Msoil×⊿T℃ | 12,604.5 | | | |
| 5. 공급배관 Cool down 용량 = | 296.5 | | | |
| ① LGC에서 동결관 내부배관 | | | | |
| 17℃ pipe → -196℃ pipe | | | | |
| 5.1kg×0.12kcal/kg℃×213℃ | 130.4 | | | |
| ② 동결관 자캣배관 | | | | |
| 17℃ pipe → -196℃ pipe | | | | |
| 6.5kg×0.12kcal/kg℃×202℃ | 166.1 | | | |
| 6. 공급배관 방사열량 (kcal) = | 396.0 | | | |
| 55kcal/m²h×0.3m²×24h | 396.0 | | | |
| 7. 토조 방사열량 (kcal) = | 9,936.0 | | | |
| 150kcal/m²h*2.765m²×24h | 9,936.0 | | | |
| 8. 총 필요열량 (kcal) | 56,131.3 | | | |
| 계산용량=총 필요열량×효율 | | | | |
| 필요열량=계산용량/효율(70%) | 56,131.3 | | | |
| 8. 액체질소 필요량 계산 | | | | |
| ① -196℃액체질소 → -196 ℃질소가스 | 47.57 | kcal/kg | | |
| ② -196℃액체가스 → -100 ℃질소가스 | 23.808 | kcal/kg | ←무시 | |
| ③ 액체질소량 | 1180 | kg | | |
| ④ 액체질소량 | 1460.8 | Liter | | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | 2-2 동결샘플링 핵심 unit 실내검증 | • 지반인공동결실험 전용 야외 실험동 구축<br>- 4계절 실험이 가능한 국내유일의 지반인 | pp.74-79 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | 공동결 성능평가 실험실 구축<br>- 지반내 지하수의 흐름을 모사할 수 있는 토조와 액체질소 주입을 위한 3ton용량의 저류조를 제작<br>- 소형 컨테이너 실험실(3m×3m)을 구축하여 내부에 측정장비를 비치, 막사를 설치하고 내부를 보온함으로써 동계시에도 실험이 가능하도록 구축<br>LN2 저류조 및 야외 실험동 전경<br>  <br>각종 센서설치 / 토조내 시료 조성<br>   <br>각종 센서배선 / 실험실 내부<br>   <br>• 지반인공동결실험[2단계] 수행<br>- 포화도조건, 동결관 온도, 동수경사 조건을 달리하여 총 9개의 시험 case 구성<br>- 동결시작후 약 20시간 지난 시점에서 동결을 종료하고 표면에서 코어를 채취<br>- 동결시작 23시간 후, 반경 50cm의 동토기둥이 생성되었고, 평균 동결속도는 21.7mm/h로 나타남<br>- 액체질소를 지속적으로 주입한 경우의 실험결과는 연속성이 양호하여, 수치해석결과와도 일치성이 높았음 | pp.80-89 |

실내동결성능평가 실험조건

| 구분 | 시험조건 | | | 시료 | 해당연도 | 수행여부 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 포화도 | 동결관 온도 | 동수경사 | | | |
| 1 | 100% | -196℃ | 0 | 물 | 1차년도 | O |
| 2 | 100% | -196℃ | 0 | 모래 | 1차년도 | O |
| 3 | 100% | -196℃ | 0 | 모래 | 1차년도 | O |
| 4 | 100% | -196℃ | 0 | 모래 | 2차년 | O |
| 5 | 100% | -170℃ | 0 | 모래 | 2차년 | - |
| 6 | 100% | -196℃ | 0.2 | 모래 | 2차년 | - |
| 7 | 100% | -196℃ | 0.5 | 모래 | 3차년 | - |
| 8 | 80% | -196℃ | 0 | 모래 | 3차년 | - |
| 9 | 70% | -196℃ | 0 | 모래 | 3차년 | - |

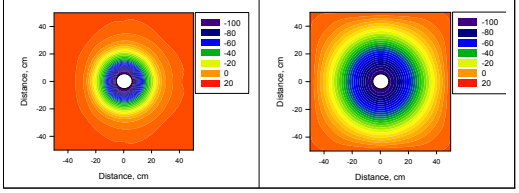
동결진행에 따른 토조표면 동결



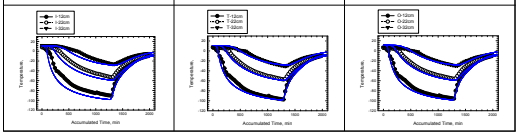
표층부 코어채취 | 코어채취시료



토조내 온도변화(8hr) | 토조내 온도변화(22hr)




Inlet부 온도예측결과 | 흐름직각방향 온도예측결과 | Out부 온도예측결과

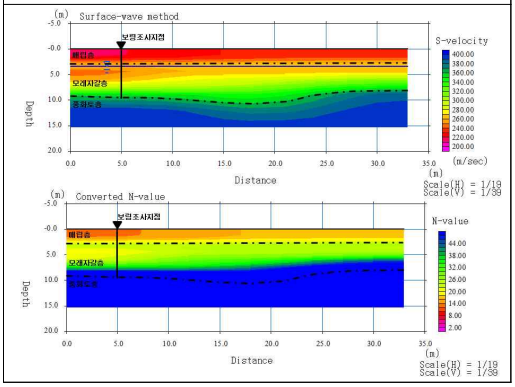


| | | | |
|---|---|---|---|
| 3. 동결샘플링 시스템 현장 실증 | 3-1 동결샘플링 시스템 적용 대상지 기본 현장조사 | • 경남혁신도시 진입교량 현장 지반조사 (시추조사/표면파탐사)<br>- 동결샘플링 대상지역은 진주시 현장 교량 주탑부 주변/접속교 Pier-1 주변<br>- 교량 주탑 인근 지반에 대한 지반조사결과, 순수모래층이 존재하지 않아 시험대상으로 부적절 | pp.17-22 |

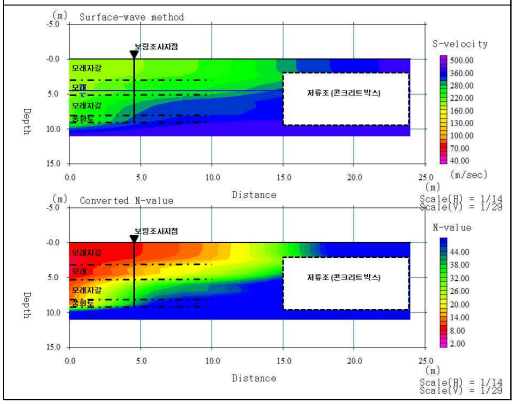
- Pier-1 주변부 지반조사결과, 동결대상이 지반두께는 약 70cm정도로 확인됨

| 제내지 주탑인근 | 접속교 Pier-1 |
|---|---|
|  |  |

대상지역1 MASW 탐사결과



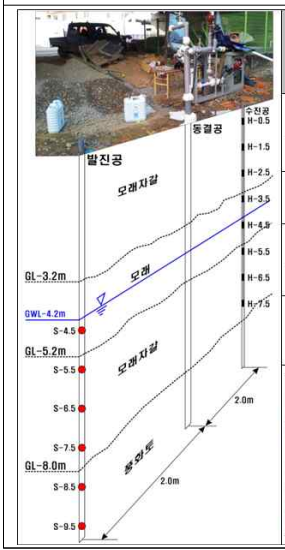

대상지역2 MASW 탐사결과




- 인공동결지반 동결전 · 후 현장물리탐사 (토모그라피/표면파) pp.39-46

- 탄성파토모그래피탐사는 GeoTomCG 소프트웨어를 사용하여 2차원 속도단면도 분석을 실시
- 표면파는 동결관을 설치하고 약 2.5일간 동결시킨 후 조사
- 인공동결지반의 경우 동결전·후 전기비저항, 토모그라피 탐사에서는 동결영역을 확실히 추정하기는 어려웠음
- 표면파탐사에서는 동결후 Vs파가 큰 폭으로 상승하는 것으로 나타났으나, 동결영역의 경계를 확실히 추정하기는 곤란하였음

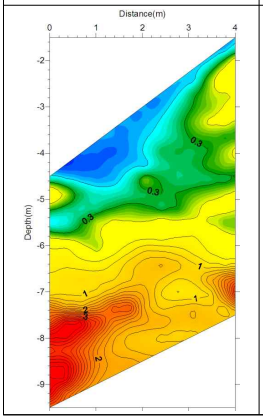
## 단면모식 및 지층현황



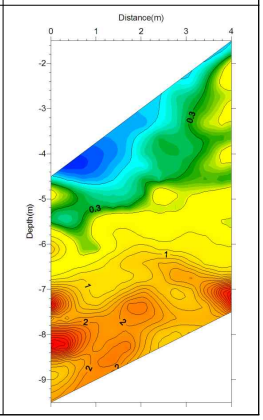

| 지층명 | 설명 |
|---|---|
| 모래자갈 | 자갈 30 ~ 40% |
| 모래 | 모래층 |
| 모래자갈 | 자갈 30% 정도 함유 |
| 풍화토 | 기반암의 조직을 유지 |



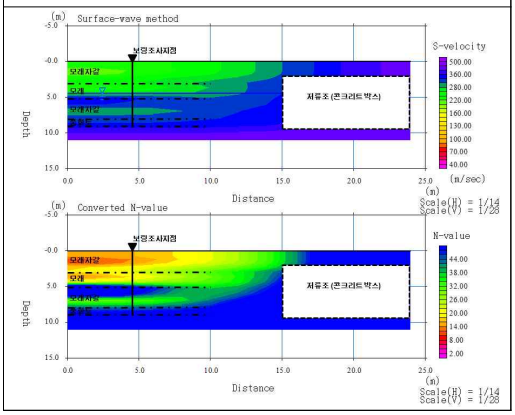
## 인공동결전 속도단면

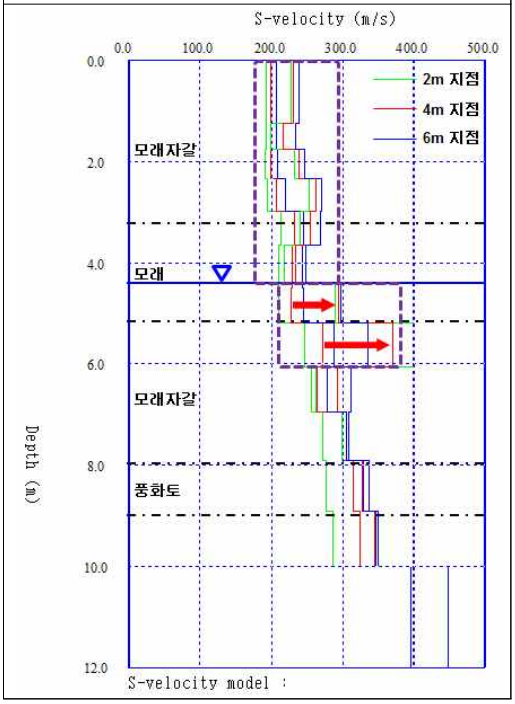
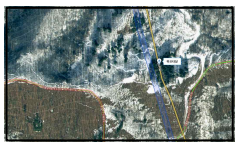


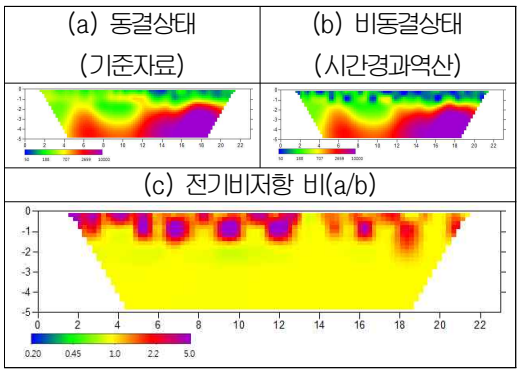

## 인공동결후 속도단면

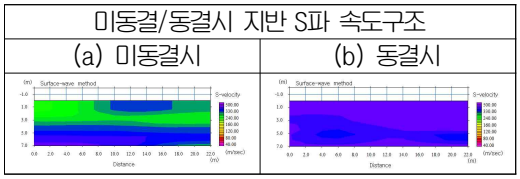


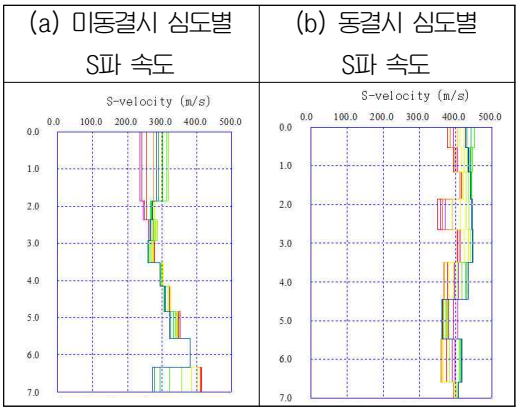

## 동결시작 2.5일 후 MASW 결과

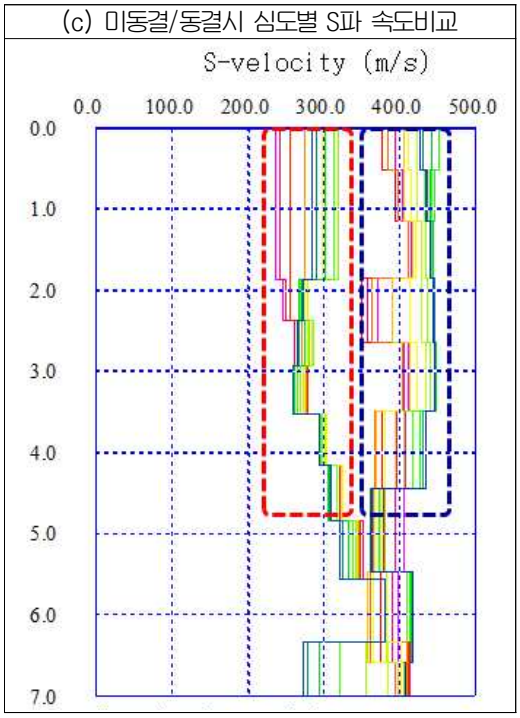


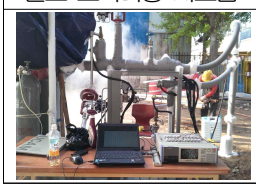
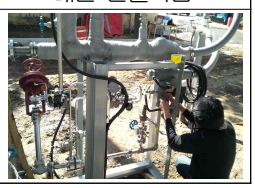
| | | | |
|---|---|---|---|
| | | 동결관 매설지점에서의 동결전후 S파 속도구조 및 심도분포 비교<br>  <br><br>• 자연동결지반 동결전 · 후 현장물리탐사 (전기비저항/표면파)<br>- 강원도 화천군 하오터널 주변 노지에서 전기비저항 탐사와 표면파탐사를 수행하여 지반동결에 따른 물성 변화 파악<br>- 전기비저항 탐사는 안정적인 자료획득을 위해 시간경과 역산 적용<br>- 자연동결지반의 동결전·후 전기비저항, 표면파탐사결과, 동결영역에서 공학적 변화가 뚜렷하였으며 인공동결지반과 비교하여 동결영역의 추정이 용이하였음<br>터널 인근 위성사진 / 인근 부지 전경<br>  <br>  <br> | pp.47-54 |

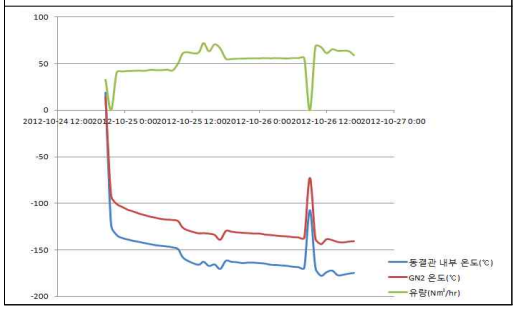

(a) 동결상태
(기준자료)
(b) 비동결상태
(시간경과역산)
(c) 전기비저항 비(a/b)


미동결/동결시 지반 S파 속도구조
(a) 미동결시
(b) 동결시

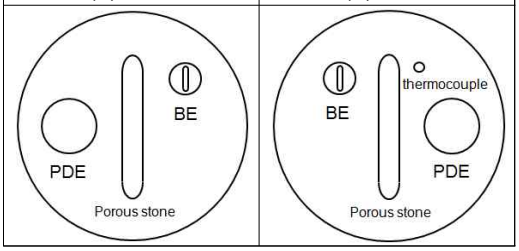

(a) 미동결시 심도별
S파 속도
(b) 동결시 심도별
S파 속도
S-velocity (m/s)
0.0 100.0 200.0 300.0 400.0 500.0
0.0 1.0 2.0 3.0 4.0 5.0 6.0 7.0

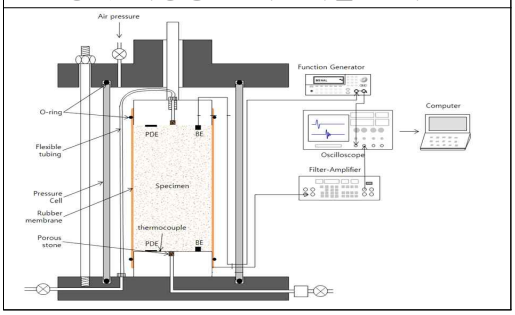

(c) 미동결/동결시 심도별 S파 속도비교
S-velocity (m/s)
0.0 100.0 200.0 300.0 400.0 500.0
0.0 1.0 2.0 3.0 4.0 5.0 6.0 7.0

<table>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td>• 동결샘플링 시스템 현장설치<br>- 지반을 기존 보링장비를 이용해 NX사이즈로 지반천공<br>- 동결관과 지중온도센서 설치(온도센서는 동결관에서 거리, 심도별로 총 9개 설치)<br>- 냉매공급시스템 설치(동결관과 LN2 공급시스템을 배관 스풀로 연결)<br>- 배관 및 동결관 노출부를 아트론 보냉재로 단열
<table>
<tr><td>동결관 삽입 완료</td><td>LN2공급시스템 설치</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>온도 모니터링 시스템</td><td>배관 단열작업</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
</table>
</td>
<td>pp.23-27</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>3-2 동결샘플링 시스템 현장 실증</td>
<td>• 냉매주입 및 지중온도예측<br>- 13m의 동결관을 지반에 삽입한 후, 액체질소 충전용량 9ton의 탱크로리 퍼지카를 이용하여 64hr 동안 평균 공급 유량 55Nm3/hr로 연속동결을 실시<br>- LN2 공급 후 지반에 삽입된 동결관 표면을 시작으로 주변 지반이 서서히 동결되는 것을 육안으로 확인<br>- 배전설비로 인한 지중온도센서 사용이 불가하여 동결샘플링 시점 판단을 위해 방사선 열확산방정식을 이용한 지중온도 예측을 수행<br>- 약 60시간 동결 후 동결샘플링을 실시
<table>
<tr><td>퍼지카를 이용한 LN2 공급</td></tr>
<tr><td>  </td></tr>
</table>
</td>
<td>pp.28-33</td>
</tr>
</table>

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | 운전시간에 따른 온도, 유량 관찰<br>  <br><br>• 경남혁신도시 현장의 모래층 및 자갈층에 대한 동결시료 굴착/채취 검증<br>- 동결 후 동결관을 중심으로 방사방향으로 4개소에 대해 샘플링을 실시<br>- 1차년도 연구결과에 따라 다이아몬드 비트, 더블코어 배럴을 적용(비트의 회전수는 150rpm, 작업수의 수량은 5L/min) | pp.33-34 |
| | | 보링 작업(동결토 샘플링)<br>  <br>• 동결지반 굴착/채취를 위한 -5℃의 작업수 현장 제조<br>- 동결토 샘플링시 융해방지를 의해 청수에 부동액과 드라이아이스를 첨가하여 작업수의 온도를 -5℃로 유지<br>- 부동액은 청수의 15%, 드라이아이스는 열량 손실 등을 고려 900kg으로 산정 | pp.33-35 |
| | | 보링 작업수<br>  <br>• 경남혁신도시 현장 동결샘플링 결과 | pp.35-37 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | - 1차년도 실내 동결실험 결과를 현장 지반에 적용<br>- 지하수위 상부의 모래에 있어서도 동결 샘플링이 가능하였음<br>- 시추공의 코어회수율은 지하수위상부 90%, 지하수위 하부 100%, RQD는 100%로 나타남<br>- 코어직경 감소 및 변형, 작업수에 씻김 현상이 발생되지 않았으며 시료표면이 매끄러움<br>- 현장 동결지반에 있어 1차년도 연구결과가 적용성이 높은 것으로 판단됨<br><br>BH-1 지점 Core / BH-2 지점 Core<br>   <br>BH-3 지점 Core / BH-4 지점 Core<br>   <br><br>• 동결토 샘플의 운반 및 보관<br>- 동결토 샘플은 현장조건과 같은 온도조건을 유지하여 시료가 융해 되지 않도록 하는 것이 중요<br>- 동결토 샘플의 수분함량의 변화가 발생하지 않도록 비닐랩에 바로 포장하여 샘플링 보관함에 보관 후 냉동차에 보관<br>- 시료의 교란도 평가 및 실내실험을 위해 실험실 내 냉동고에 -20℃의 상태에서 보관<br>- 시료 적재 상자 외부를 진공그리스로 처리하여 냉동고 내의 습도로 인해 발생할 수 있는 시료의 함수비 변화를 방지<br>- 냉동고가 위치한 실내 실험실의 습도를 제습기를 이용하여 일정하게 유지 | pp.37-38 |

<table>
<tr><td></td><td></td><td>냉동탑차를 이용한 동결시료 운반<br>  </td><td></td></tr>
<tr><td>4. 동결시료의 교란도 평가 및 시험법 개발</td><td>4-1 채취한 불교란시료의 분석</td><td>• 다기능 삼축시험장비 구축<br>- 동결샘플링 시료의 전단파, 압축파 속도 및 전단강도를 측정을 위해 시료 고정용 페데스탈에 벤더 엘리먼트(전단파)와 피에조 디스크 엘리먼트(압축파)를 설치<br>- 시료의 동결-융해 시 온도를 측정하기 위해 하부 페데스탈에 온도센서를 설치<br>삼축압축실험용 페데스탈<br>(a) 상부 (b) 하부<br> 

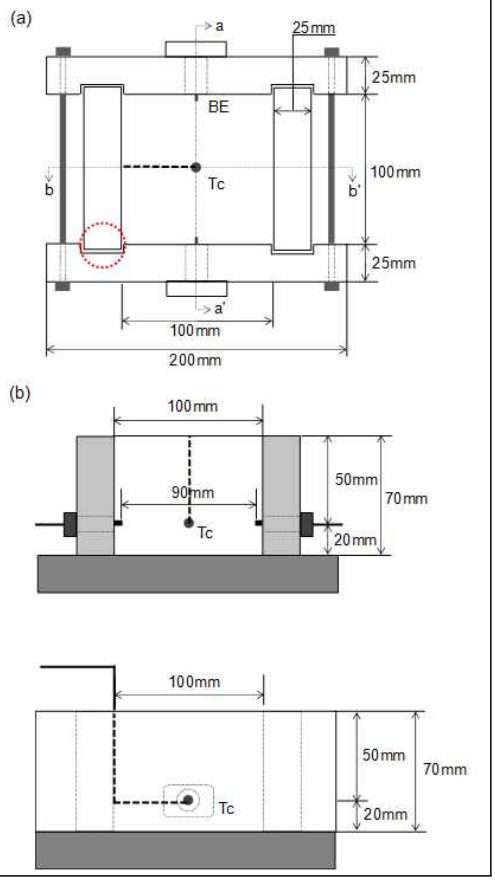
<br>탄성파 측정용 삼축압축실험 시스템<br> 

<br>• 온도와 포화도 변화에 의한 표면장력이 전단파 속도에 미치는 영향<br>- 온도가 감소함에 따라 표면장력이 증가한다는 사실에 따라 포화도가 다른 시료를 조성하여 표면장력 발생정도를 조절<br>- 시료의 온도변화에 따른 전단파 측정을 위해 나일론재질의 셀을 제작 (100mm×100mm×70mm)<br>- 전단파 속도변화양상은 포화도에 따라 100%~80%(포화도 감소에 따른 전단파 속도 증가), 80%~20%(전단파속도 일</td><td>pp.91-92<br><br>pp.93-106</td></tr>
</table>

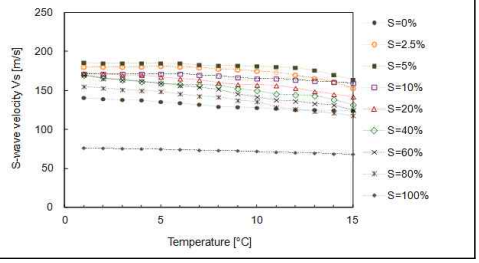
정), 20%~0%(포화도 5%에서 가장 큰 전단파속도, 포화도 5%이하에서 급격히 감소) 세 가지 구간으로 구분됨

- 포화도 변화(건조과정)에 따라 측정된 전단파속도의 변화과정은 포화도 100%~90%(포화도가 감소하면서 전단파 속도가 증가), 90%~20% (불포화토의 거동을 보이며 전단파 속도는 완만한 기울기를 나타내면 증가), 20%~0%(전단파 속도가 급격히 증가) 세 단계로 구분됨

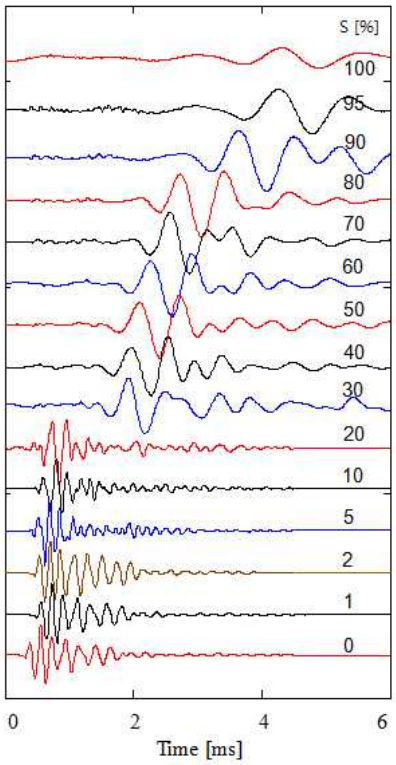
전단파 측정 셀



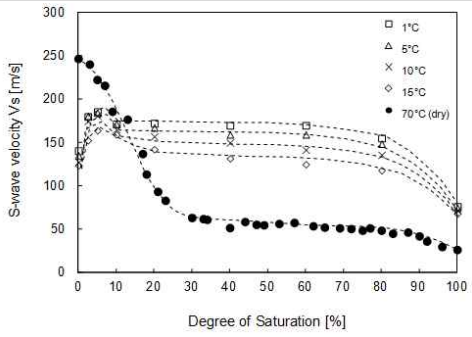

온도변화에 의한 시료의 전단파 속도 (포화도 0%~100%)



건조과정에 의한 포화도 별 전단파신호



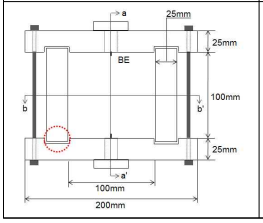
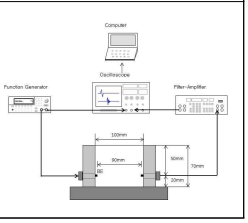
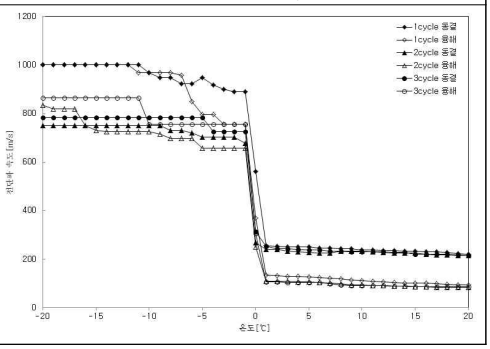

시료의 포화도 별 전단파 속도



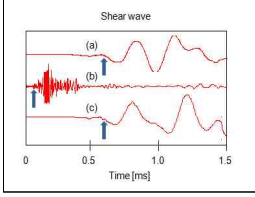
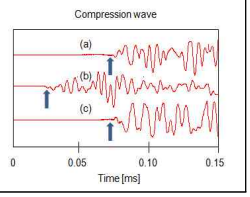

• 흙의 동결-융해 반복에 따른 전단파 속도변화

- 동결-융해과정에서의 전단파 속도변화 관찰을 위해 10kPa 상재하중을 받는 모래시료(실트 10%, 모래 10%)에 대하여 세 번의 동결-융해 반복실험(-20℃~20℃)을 수행
- 전단파의 속도는 입자내 표면장력의 영향으로 상온의 동결과정에서 온도가 감소할수록 점차 증가하였고, 융해 시에도 온도가 증가할수록 전단파속도가 감소함
- 시료가 동결됨에 따라 흙입자 내부의 간

pp.107-110

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | 극수로 인해 흙 입자간 결합력이 증대되어 전단파의 속도가 급격하게 증가하며 일정한 값에 수렴함<br>- 같은 온도에서, 동결과정에서의 전단파 속도에 비하여 융해과정에서의 전단파 속도가 확연히 느려짐<br>- 같은 온도에서의 두 번째 사이클의 전단파 속도는 첫 번째 사이클의 전단파속도보다 감소했으나, 세 번째 사이클의 전단파 속도는 두 번째 사이클의 전단파속도와 비슷한 결과를 나타냄<br>전단파 측정용 셀 및 측정시스템<br>(a)전단파 측정용 셀 (b)전단파측정 시스템<br>  <br><br>  <br><br>동결-융해시(-20℃~20℃) 전단파 속도<br>  <br><br>• 동결시료의 액상화강도<br>- 동결 샘플링 시료의 전단강성 및 전단강도를 동시에 파악하고자 다기능 삼축압축실험 장비를 통해 삼축압축실험을 실시하며 단계별로 전단파 속도를 측정<br>- 시료는 직경 5cm, 높이 10cm로 상대밀도 80%로 조성(포화 모래지반 비교란 시료 시추구경과 유사하게 조성)<br>- 시료 동결 후 전단파속도와 압축파속도는 급격히 증가<br>- 동결전 시료와 동결 후 융해된 시료의 탄성파속도 차이는 나타나지 않았으며 이는 동결-융해과정에 의한 시료의 교란도가 매우 적음을 나타냄<br>- 동결과 융해를 완료한 후, 인공동결공법으로 채취된 동결모래시료의 삼축압축실험의 예비실험으로서 비배수 전단강도실 | pp.131-132 |

험을 수행한 결과, 전단강도는 610kPa로 나타남

| 동결 융해 전·후에 따른 탄성파 속도 비교<br>(a) 동결 전, (b) 동결 후, (c) 융해 후 | |
|---|---|
|  |  |

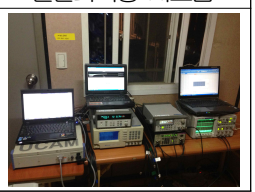
• 간극비, 전단강성 기준에 따른 교란도 평가기준(안) 마련

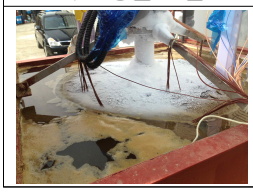
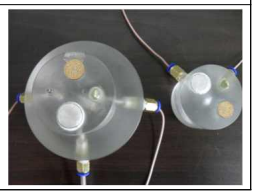
pp.133-140

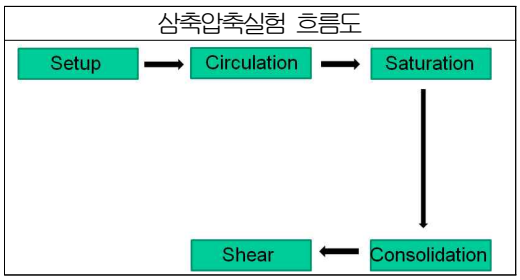
- 동결샘플링 시료의 간극비는 부피체적, 탄성파속도, 전기비저항을 이용해 아래 식과 같이 산정할 수 있음

| | |
|---|---|
| 부피체적 | $e = \frac{\omega G_s}{S}$ |
| 탄성파속도 | $n = \frac{\rho^s - \sqrt{(\rho^s)^2 4(\rho^S - \rho^F)K^F/[V_p^2 - 2(1-\upsilon^{SK})/(1-2\upsilon^{SK})V_S^2}}{2(\rho^S - \rho^F)}$ |
| 전기비저항 | $\frac{\rho_b}{\rho_f} = a \bullet n^{-m}$ |

- 원위치 시험의 전단파속도로부터 현장의 전단강성을 평가할 경우 과대평가될 우려가 있음
- 채취된 동결샘플링 시료를 삼축압축시험을 통해 융해시킨 후 전단파속도를 측정하여 이를 기준 전단파속도와 비교함으로써 동결샘플링 방법이 원지반 시료의 교란도에 미치는 영향을 파악할 수 있음

| 토조내 센서 설치 | 모래시료조성 |
|---|---|
|  |  |
| 시료포화 | 전단파측정 시스템 |
|  |  |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | 지반 동결 모습 / 동결시료 채취<br>    <br>동결샘플링 시료의 전단파 측정<br>  | |
| | 4-2 원지반 응력조건 모사가능 동결시료 융해법 적용 | • 삼축압축실험을 이용한 동결시료 융해법(안) 도출<br>- 동결샘플링은 현장의 함수비와 유효응력을 최대한 만족할 수 있는 방법임<br>- 현장과 실내실험의 탄성파속도 비교를 통한 동결시료의 교란도를 평가<br>- 자연융해와 강제융해의 비교를 통해최적의 융해속도 및 융해방법을 도출<br>- 삼축압축실험 단계마다 탄성파를 측정하여 각 단계가 시료의 교란도 및 시험법에 미치는 영향을 평가하여 인공동결공법으로 채취된 시료의 시험법을 개발<br>다기능 삼축압축시험기 / 탄성파 측정 페데스탈<br>   | pp.141-144 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | |  삼축압축실험 흐름도<br>Setup<br>Circulation<br>Saturation<br>Consolidation<br>Shear | |

# 제 3 장

# 동시동결 채취 운용시스템 구축 및 현장 성능 평가

## 1. 동시동결 채취 운용시스템 개발

가. 개요

토양동결에서 시료채취에 이르기까지의 과정은 지반 천공 → 동결관 삽입 → 동결관과 천공경 사이 공간 채움재 투입 → LN2 공급을 통한 지반동결 → 동결지반 굴착 및 동결시료 채취 → 운반 → 보관 순으로 이루어진다. 상기의 동결샘플링 과정 중, 동결관과 LN2 자동 공급장치는 토양동결 실험의 가장 핵심적인 장치로서, 투입장비, unit 및 시스템은 다음과 같다.

① 동결관

: sus304재질의 이중관 형태로 Main 동결관 및 Sub 동결관 2가지 타입으로 설계 및 제작

- Main 동결관 : LN2가 유입되어 지반과 열교환
- Sub 동결관 : Main 동결관에서 열교환을 끝내고 기화된 GN2를 현열로 이용

② LN2 공급을 통한 지반동결

: LN2 자동공급장치, LN2공급원(탱크로리)

1차년도에 수동제어를 통한 LN2공급하는 등의 실험실 수준으로 개발하였으며, 2차년도에서 현장적용성 향상을 위해 LN2자동제어기술을 개발·적용하여 성능향상을 도모하였으나 1차년도 실내실험에서 사용한 LN2 자동공급 시스템을 개조하여 사용한 관계로 용량등의 제한으로 인해 자동운전이 불가능 하였다. 이를 보완하여 당해 연도 실험에서는 동결관 및 LN2 자동공급시스템의 용량을 자동운전이 가능하도록 최적 설계 및 제작하여 실험을 진행하였다.

나. 동시 지반동결을 위한 다중 동결관

3차년도 과제의 동결관은 2차년도 현장적용 테스트 결과를 반영하여 기존의 동결관 보다 Size 및 동결관의 연결 방법등을 변경하여 설계, 제작하였다. 그림 3-1은 다중동결관의 조립도로 2차년도 실험 시 50A(OD:60.5x1400L)의 Size로 제작하여 실험하였으나 동결관의 Size가 작아 LN2공급시스템의 자동운전이 불가능하여 이번 3차년도 에서의 동결관은 80A(OD:89.1X1100L)로 Scale Up하여 설계, 제작 하였다. 다중 동결관은 이중관 구조로 되어 있으며 내관에 LN2가 유입되어 토양동결에 사용된 후 기화하여 GN2로 외관을 통해 배출되도록 설계 되었다. 그림 3-2는 동결관의 내관으로 외관과 플랜지로 연결되도록 설계, 제작 되었다.

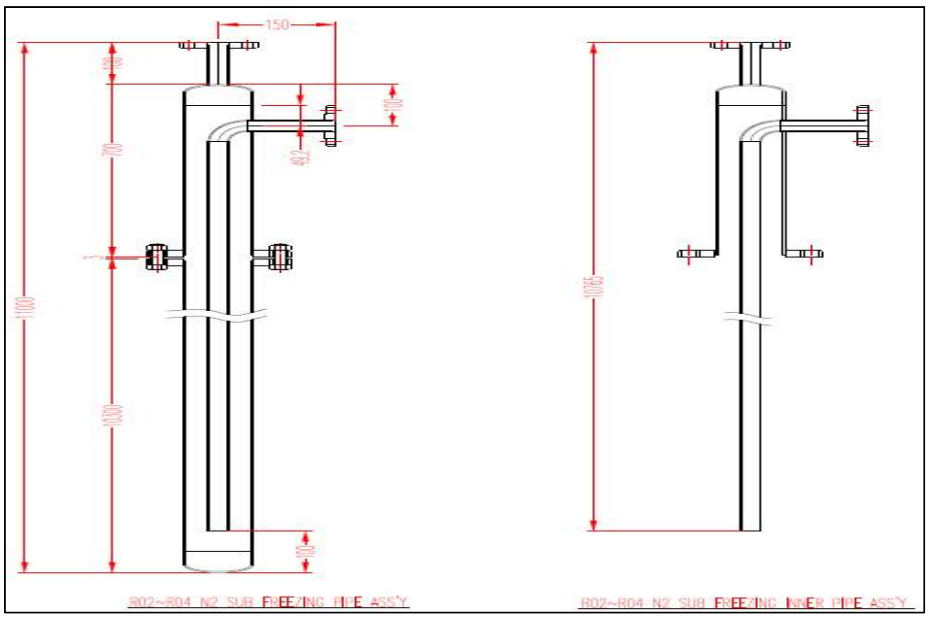



그림 3-1. 3차년도 적용 동결관




그림 3-2. 동결관 내관

이 다중 동결관은 보링장치(천공경 150mm or 100mm)에 적용하기 위하여 외관 파이프의 경우에는 외경이 100mm이하로 설계(80A SUS304 Pipe)되었으며, LN2가 유입되는 내관 파이프는 외경 27.2mm(20A SUS304 Pipe)로 설계되었다. 결관은 총 5EA를 제작 하여 지반에 각 1.5M 간격으로 설치, LN2 공급시 토양이 동결되어 가는 모습을 확인할 수 있도록 하였다.

실제 현장에 적용되는 동결관은 총 길이 11m로 설계 및 제작 되었으며, 실

제 지반에는 약 10m의 깊이, 1.5m 간격으로 지반에 삽입되며, LN2 유입부등 지면에 노출되는 동결관의 높이는 약 1m로 설계, 제작 되었다. 2차년도 당시 보링기계로 지반을 천공할수 있는 높이가 약 3m임을 감안하여 동결관의 각 3m 지점에 유니온을 이용하여 현장에서 손쉽게 체결 및 해체 작업을 할 수 있도록 제작 하였으나, 현장 테스트 과정에서 불필요한 부분임을 확인하여 3차년도의 다중 동결관의 경우 동결관을 현장 체결 부분없이 하나의 동결관으로 설계. 제작하여 보링기계로 10m를 천공하여 크레인을 이용, 동결관을 한 번에 삽입하도록 하였다.



그림 3-3. 다중 동결관 제작 완료

그림 3-4는 기 제작 된 토양동결용 LN2 공급시스템의 조립도로서, 상부의 LN2 공급라인으로부터 토양동결을 위한 냉매인 LN2 Main 동결관으로 유입되어 지반과 열교환을 한 후 방출 되는 GN2가 Sub 동결관으로 유입되어 저온의 GN2의 현열을 한번 더 이용하여 지반의 동결에 사용되어 LN2 공급시스템 하부의 방출라인을 통해 대기 방출하게 된다.

현장 설치 시 먼저 수행한 시추 조사 및 표면탐사의 결과와는 달리 자갈층이 존재하여 굴착작업에 많은 시간을 소요하게 되었다. 이에 따라 LN2 공급을 위한 탱크로리 사용일정등의 사정으로 인해 기존 계획되었단 5EA의 동결관을 사용하는것이 불가능하게 되어 다중동결을 확인할 수 있는 최소 수량인 2EA의 동결관을 삽입하여 실험을 진행

하였다.

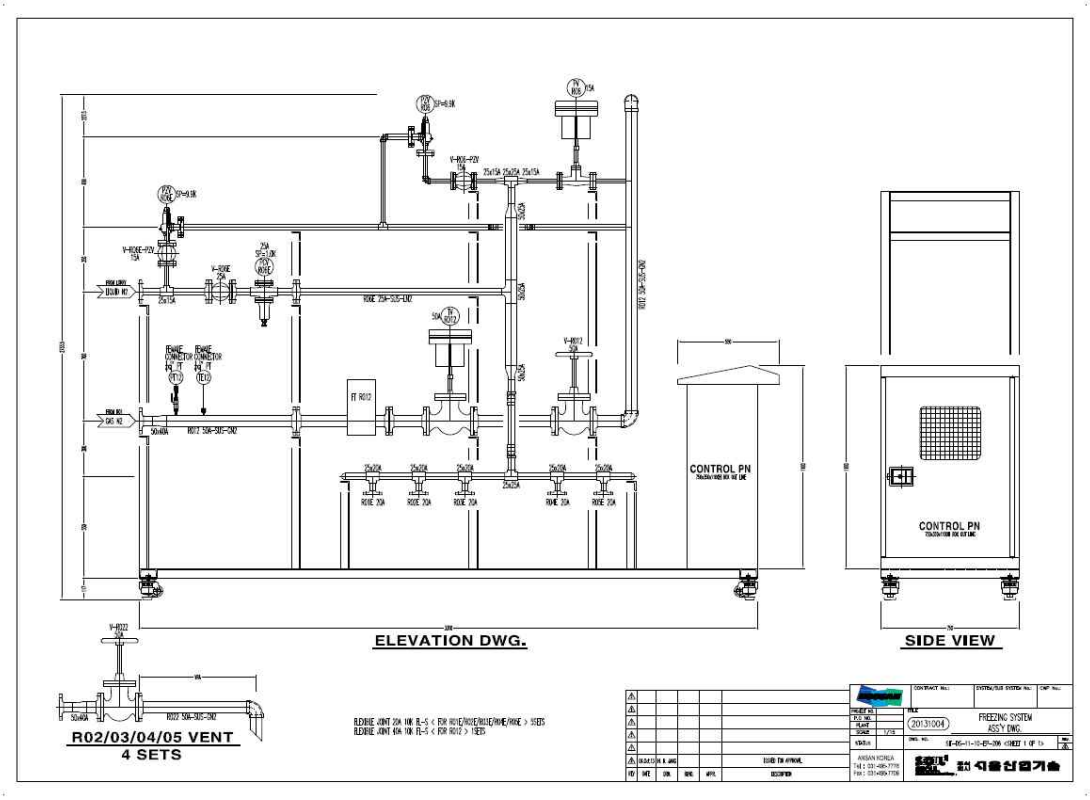



그림 3-4. 토양동결용 LN2 공급시스템

다. 급속 냉매 공급시스템

동결관과 함께 토양을 동결시키기 위한 냉매(LN2)를 공급하기 위한 LN2 공급시스템은 자동운전이 가능하도록 설계. 제작되었다. 1, 2차년도 실험의 경우 100% 수동운전을 통해 LN2를 공급하였으나 이번 3차년도의 경우 최소한의 LN2 사용 및 유량을 제어하기 위해 자동운전 개념을 적용하였다. LN2의 공급 및 차단을 위한 자동밸브를 공급시스템 전단에 설치하고, 배출되는 GN2를 제어하기 위한 자동밸브를 공급시스템 후단에 설치하여 동결관 내부의 온도가 일정온도로 떨어지게 되면 LN2의 공급을 차단하며, 온도가 다시 상승하게 되면 LN2를 공급하여 동결관 내부의 온도를 다시 떨어뜨릴 수 있도록 제작하였다. 제한적인 연구비등의 문제로 5개의 다중 동결관 모두에 대해 자동운전을 적용하기가 불가능하여 하나의 동결관에만  자동운전이 되도록 적용하였으며,

나머지 4EA의 동결관의 경우 지반과 열교환을 마친 GN2는 대기방출 되도록 설계. 제작하였다. 아울러 적산이 가능한 유량계를 동결관 후단 즉, 지반과 열교환을 마친 GN2가 대기 방출되는 부분에 설치하여 실제 목표치의 지반을 동결하기 위해 필요한 LN2의 소모량을 확인할 수 있도록 하였다. 또한 LN2 공급시스템으로 유입되는 LN2는 대기중으로 배출되기 때문에 공급되는 LN2의 압력이 높을 경우 압력차이가 커져 동결관 내의 LN2의 유속이 빨라져 지반의 효율이 떨어질 수 있다. 따라서 레귤레이터를 설치하여 LN2 공급시스템에서 1차적으로 공급되는 LN2를 약 1kg/cm$^2$ 이하로 감압하여 대기압과 압력차이를 최대한 작게 하여 낮은 유속으로 공급될 수 있게 설계, 제작 되었다.

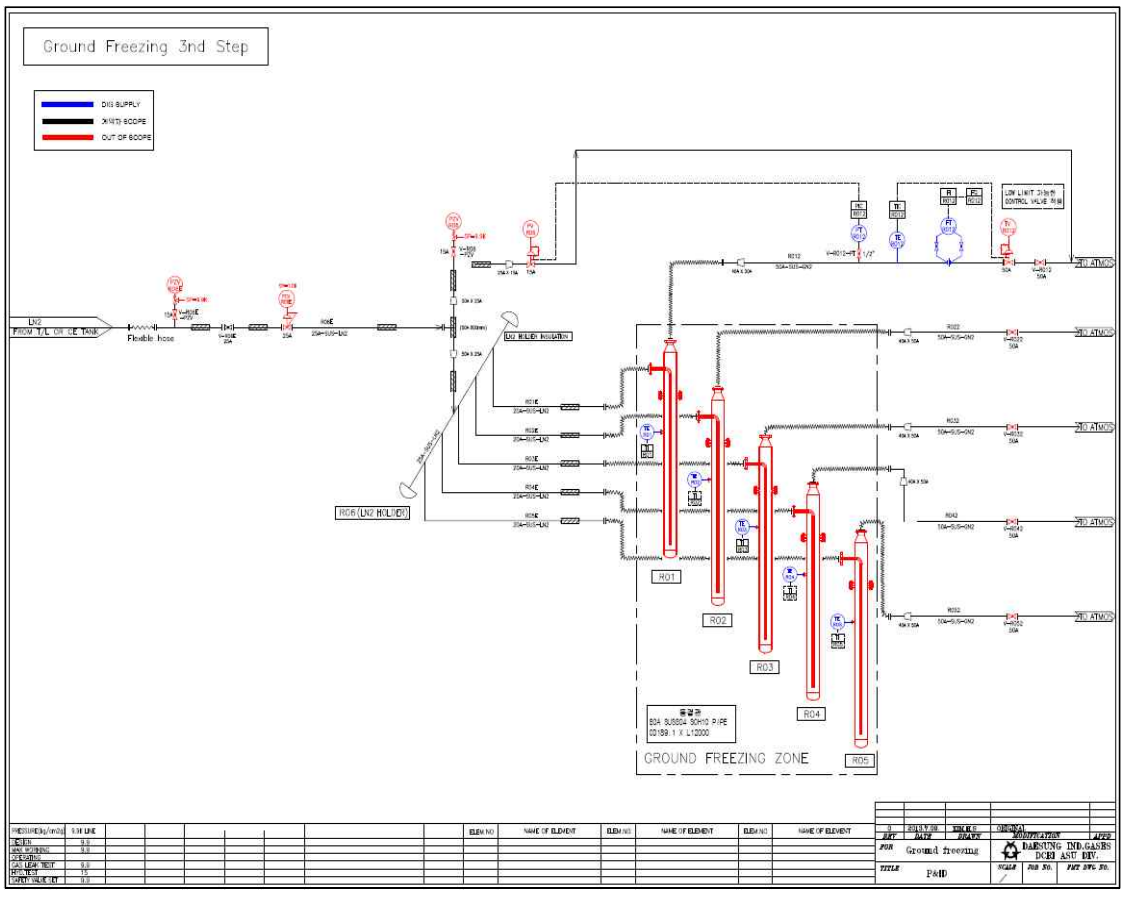



그림 3-5. 자동냉매공급 시스템 개념도



그림 3-6. 다중 동결용 냉매공급 시스템

## 2. 인공동결 시스템 성능 및 운용기술 평가

가. 개요

당해연도(3차년도)에는 현장의 포화모래지반과 화강풍화토 지반을 대상으로 성능을 평가하고, 개선사항을 도출하는 것을 목표로 하고 있다. 전절에서 기술한 각종 동결샘플링 핵심 unit 및 시스템의 성능을 평가할 뿐만 아니라, 지반동결~채취~운반~보관 과정에 있어서 기타 핵심기술에 대해서도 현장 성능평가를 실시한다.

동결샘플링 시스템의 현장 성능평가에 있어서 각 과정별 주요 수행사항 및 평가사항은 다음과 같다.

① 지반동결

: 동결샘플링 시스템 세팅,

지중온도 모니터링 시스템 적용,

지중온도 예측 프로그램 평가,

② 동결지반 굴착 및 채취

: 작업수 조제방법에 대한 평가,

굴착Bit 회전수 및 작업수량에 대한 평가

③ 동결샘플 운반 및 보관

: 운반 중 온도변화 및 진동에 의한 시료교란 여부

보관 중 온도변화

④ 지반동결 전·후의 지반물리탐사

: 토모그래피탐사, 표면파탐사, 전기비저항탐사

나. 대상지역 위치 및 지반특성

(1) 대상지역 지형 및 지질

(가) 지형

본 조사지역은 행정구역상 경상북도 안동시 남후면 하아리 낙동강 일원으로서 북북서향의 태백산맥과 남서향의 소백산맥이 "入"자형으로 갈라지는 안쪽에 형성된 영주-예천분지의 남단에 위치한다. 주요 산계로는 조사지역 북측의 소백산맥에서 이어지는 봉수산(570.4m), 조운산(630.0m) 및 보문산(643.0m)이 비교적 높은 산세를 이루고 조사지역의 남측은 봉화산(400.6m) 및 마늘봉(361.0m)이 낙동강 인접지역에 낮은 산세로 위치한다.

본 지역에 발달하는 수계는 우선 낙동강 본류가 동서방향을 취하며 이의 지류는 낙동강 이북지역에서 유입되는 것들은 N40~50°E의 방향을 가지는 것이 대부분이나 낙동강 이남지역에서 유입되는 것들은 대략 N30°W, NS, 및 N40°E를 보이며 능선의 방향 역시 이와 유사하다. 낙동강의 방향은 단층 및 퇴적암의 주향 방향과 대체로 일치하며, 북쪽은 수지상수계, 남쪽은 격자상수계를 보이는데 이는 암질의 풍화양상의 차이에서 기인되었다. 조사지역인 낙동강의 상류에는 안동호 및 임하호 등이 발달하였으며 낙동강은 동서로 사행하는 전형적인 사행천이다.




그림 3-7. 현장시험 위치

(나) 동결지반 현장 위치

본 지역의 기반은 쥬라기의 흑운모화강암으로 구성되어 있다. 조사지역은 낙동강을 따라 동서로 분포하는 2개의 잠재적인 구조대 사이에 있어 흑운모화강암과 백악기 퇴적암류가 교호하는 양상을 보인다. 흑운모화강암은 시대미상의 변성암류를 관입하고 경상누층군에 의하여 부정합으로 피복된다. 시대미상의 변성암류는 후기의 화강암류의 관입에 의하여 소규모로 잔존된 암체가 많으며 이후 부정합관계를 가지는 백악기 퇴적암류의 퇴적과 화강암 암맥들이 이를 관입하고 있다. 본 과업지역의 특성상 하천을 따라 제 4기 충적층이 전반적으로 기반암을 피복하고 있다.

① 호상편마암 : 본 암은 과업지역 북동부에 소규모로 분포하며 시대미상 변성암류의 기저를 이루나 대부분이 쥬라기 흑운모화강암에 의해 소규모의 포획체로 존재하는 경우가 많다. 잔류하는 편마암은 N40°E 방향에 따라 분포하며 또한 이들에서 관찰되는 편리의 방향도 상술한 방향과 일치한다. 호상편마암은 비교적 조밀한 호상구조를 보이며 1cm 폭의 호층을 이

루기도 한다.

② 각섬암 : 본 암은 북측의 풍산읍 안교리 방담일대 및 현외에 소규모로 분포한다. 엽리가 잘 발달되어 있으며 곳에 따라 호상구조를 보이기도 한다. 방담일대에서는 흑운모화강암 및 우백질화강암에 의하여 관입되어 있고 하산동층에 의하여 부정합으로 피복되어 있다.

③ 흑운모화강암 : 본 암은 조사 지역 일대를 비롯하여 낙동강의 북측에 광역적으로 분포한다. 시대미상의 변성암류의 잔유물을 함유하고 있으며 시대미상의 변성암류를 관입하고 백악기의 퇴적암류와 부정합의 관계를 가진다. 본 암 내에 포획 산재된 변성암의 분포양상이나 변성암과의 지질경계선 방향은 N40~50°E로 흑운모화강암 내에 국부적으로 형성된 편마상구조의 엽리 방향과 유사한 경향을 보인다. 조사지역의 북동부인 이문동 및 상리동 지역에서는 시대미상의 변성암류와 본 암 사이에 편마상구조가 매우 발달된 편마상화강암이 분포한다. 조사지역의 시추코어에서도 편마구조가 관찰되어지며 변성암 잔유물을 포획하고 있다. 구성광물은 주로 석영, 미사장석, 정장석, 사장석, 흑운모, 각섬석 및 소량의 인회석, 저어콘, 녹렴석 등이 관찰되며 흑운모는 일정한 방향성을 가진다.

④ 우백질화강암 : 본 암은 과업지역 북측의 흑운모화강암내에 북북동의 방향으로 길게 신장되어 분포한다. 이는 시대미상의 호상편마암 및 흑운모편마암의 분포방향과 거의 일치한다. 시대미상의 호상편마암을 관입하고 백악기의 흑운모화강암의 관입을 받았으며 호상편마암과의 경계지역에는 편마암의 잔류구조가 많이 남아 있다. 주로 석영, 정장석, 미사장석 사장석 및 소량의 흑운모, 백운모로 구성되어 있다.

⑤ 일직층(이암, 셰일 사암 및 석회암) : 본 암은 낙동강 남측에 가장 넓게 분포되는 지층이다. 안동단층과 거의 평행한 방향의 축을 가지는 경사구조를 취하고 있으며 안동단층과 접하는 곳에서는 지층의 경사가 심하여 50~80°NE 내지는 수직층을 형성하는 것이 일반적이다. 자색층은 역암, 역질알코스사암, 알코스사암, 셰일 및 이회암 등으로 구성되어 있으며 역의

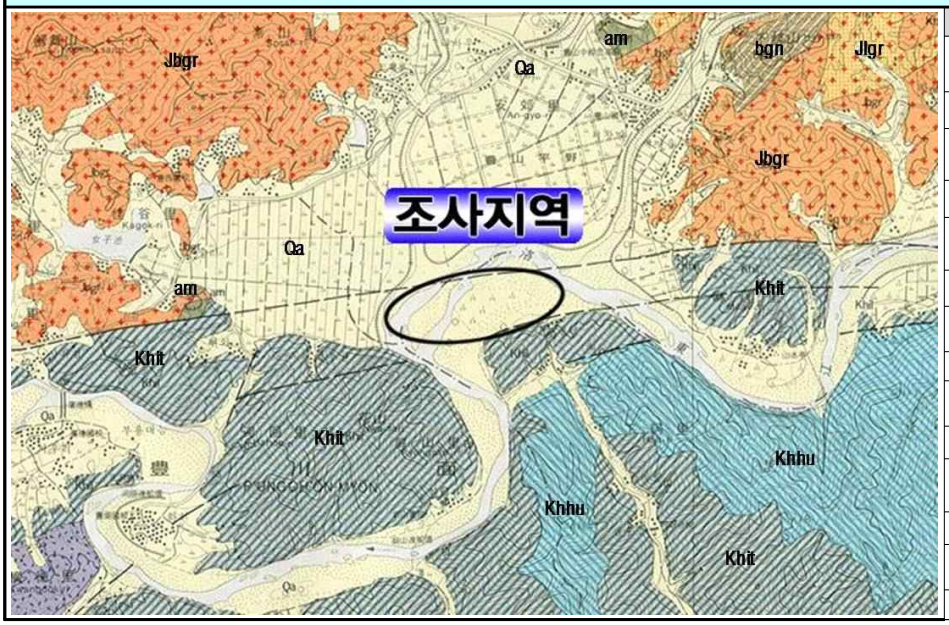
크기는 2~3cm 아원역상으로 분급이 나쁘며 역의 구성은 규암, 편마암 및 화강암 등이다.

⑥ 후평동층(이회암, 역암, 세일 사암 및 쳐트) : 본 암은 낙동강 남측에 일직층과 정합의 관계를 가지며 분포하고, 일직층과 접하는 곳에서 지층이 급하게 50°NE 가량 경사되어 나타난다. 자색 내지 암녹회색 실트암과 세립에서 조립에 이르는 담갈색 알코스질사암, 역암 및 사암 등이 호층을 이루고 있다.

(다) 지질도

조사지역에 대한 지질도는 다음과 같다.

**조 사 지 역 지 질 도**




**지 질 계 통 도**

| 지 층 명 | 지 질 계 통 | |
|---|---|---|
| 충적층 | 제4기(QUATERNARY) | 신생대(CENOZOIC) |
| ~ ~ ~ 부정합(Unconformity) ~ ~ ~ | | |
| 산성암맥 | 백악기(CRETACEOUS) | 중생대 (MESOZOIC) |
| 화강암류 | | |
| ––– 관 입 (Intrusion) ––– | | |
| 후평동층(이회암, 역암, 셰일 사암 및 쳐트) | | |
| 일직층(이암, 셰일 사암 및 석회암) | | |
| ~ ~ ~ 부정합(Unconformity) ~ ~ ~ | | |
| 우백질화강암 | 쥬라기(JURASSIC) | |
| 흑운모화강암 | | |
| ––– 관 입 (Intrusion) ––– | | |
| 흑운모편마암 | 시대미상 | |
| ––– 관계미상 ––– | | |
| 편암류 | | |
| ––– 관계미상 ––– | | |
| 각섬암 | | |
| ––– 관계미상 ––– | | |
| 호상편마암 | | |

참조 : 한국지질도 안동도폭(1:50,000) (한국동력자원연구소)

(라) 시추조사 결과

금번 시추조사 결과 확인된 지층의 구성 및 특성을 BH-1, BH-2 지점으로 구분하여 정리하면 다음과 같다.

① BH-1 지점

시추조사 결과 확인된 BH-1 지점에 대한 시추조사 총괄표는 표 1과 같다.

표 3-1. 시추조사 총괄표 (단위: m)

| 공 번 | 모래층 | 자갈질 모래층 | 풍화토층 | 계 |
|---|---|---|---|---|
| BH-1 | 3.4 | 4.4 | 2.2 | 10.0 |

㉮ 모래층

- 본 층의 분포심도는 현지표면으로부터 G.L-3.4m 구간에 분포하고, 주로 모래로 구성되어 있으며, G.L -2.0~-3.4m에서 자갈이 20~30% 함유되어 나타나며, 지층의 두께는 3.4m로 나타난다.
- 표준관입시험 결과, N값은 12~29/30(회/cm)로 나타나며, 색조는 황갈색을 띤다.

㉯ 자갈질 모래층

- 본 층은 G.L-3.4m에서 출현하고, 주로 자갈섞인 모래로 구성되어 있으며, 자갈이 10~20% 함유되어 있다. 일부 지층에서 모래층이 협재되어 나타나며, 지층의 두께는 4.4m로 나타난다.
- 표준관입시험 결과, N값은 12~20/30(회/cm)로 나타나며, 색조는 황갈색을 띤다.

㉰ 풍화토층

- 본 층은 G.L-7.4m에서 출현하고, 기반암의 풍화대로 되어 있다.
- 표준관입시험 결과, N값은 50/28(회/cm)로 나타나며, 색조는 황갈색을 띤다.

② BH-2 지점

금번 시추조사 결과 확인된 BH-2 지점에 대한 시추조사 총괄표는 표 2와 같다.

표 3-2. 시추조사 총괄표 (단위: m)

| 공 번 | 모래층 | 자갈질 모래층 | 모래자갈층 | 계 |
|---|---|---|---|---|
| BH-2 | 3.7 | 4.4 | 1.9 | 10.0 |

㉮ 모래층

- 본 층의 분포심도는 현지표면으로부터 G.L-3.7m 구간에 분포하고, 주로 모래로 구성되어 있으며, 지층의 두께는 3.7m로 나타난다.
- 표준관입시험 결과, N값은 6~15/30(회/cm)로 나타나며, 색조는 황갈색을 띤다.

㉯ 자갈질 모래층

- 본 층은 G.L-3.7m에서 출현하고, 주로 자갈섞인 모래로 구성되어 있으며, 자갈이 10~20% 함유되어 있다. 지층의 두께는 4.4m로 나타난다.
- 표준관입시험 결과, N값은 12~20/30(회/cm)로 나타나며, 색조는 황갈색을 띤다.

㉰ 모래자갈층

- 본 층은 G.L-8.1m에서 출현하고, 중립, 조립질의 모래 및 자갈로 구성되어 있다.
- 표준관입시험 결과, N값은 50/3(회/cm)로 나타나며, 색조는 황갈색을 띤다.



그림 3-8. BH-1, BH-2 시료박스 사진

(2) 대상지반의 공학적 특성

(가) 채취 시료의 실내시험 결과

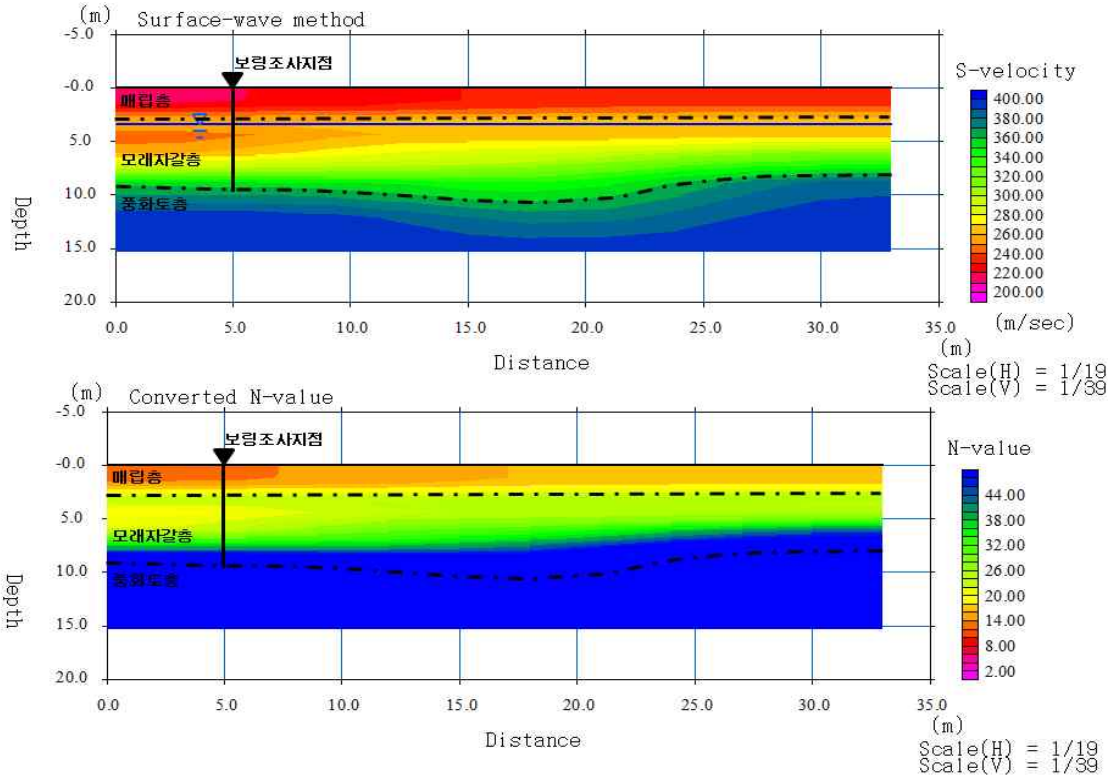
본 과업에서 수행한 시추조사를 통해 채취된 교란시료 에 대하여 물리적 특성을 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

표 3-3. 실내토질시험 결과

| 공 번 | 심도 (G.L.-m) | 함수비 (%) | 비중 | Atterberg Limits(%) | | 입도분석(통과율, %) | | | | | USCS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | LL | PI | # 4 | # 10 | # 40 | # 200 | # 0.005 | |
| BH-1 | 12.0 | 12.4 | 2.66 | N.P | - | 99.9 | 99.2 | 79.7 | 41.5 | 9.0 | SM |
| BH-2 | 1.5 | 11.0 | 2.64 | N.P | - | 99.2 | 95.2 | 59.1 | 9.9 | - | SP-SM |

(나) 표면파 탐사

그림 3-9에 현장 지반에 대한 시추조사 및 표면파탐사를 실시하였다. 시점부에서 약 5m 위치에서 수행한 시추조사결과에 따르면, 매립층, 모래자갈층, 암층이 순차적으로 나타났다.




| 탐 사 결 과 | ● 측점간격: 1.5m, 측선연장: 34.5m, 신뢰심도: 약 11m, 조사환경: 상/중/하<br>● 지표에서 약 3m두께에서 S파 속도가 240m/s의 저속도층이 나타난 후, 하부로 갈수록 S파 속도는 증가하는 양상을 나타냄. |
|---|---|

그림 3-9. MASW 표면파탐사 결과

다. 지반동결

(1) 동결샘플링 시스템 현장설치

동결샘플링 시스템 현장설치는 아래와 같은 순서로 진행되었고, 각 과정에 있어서 상세는 후술하는 바와 같다.

① 동결관 설치, 지중 온도센서 설치, 토모그라피 실험을 위한 지반 천공
② 동결관 및 지중 온도센서 설치
③ 냉매공급시스템 연결
④ 노출부 단열

(가) 지반 천공

동결관, 지중 온도센서, 토모그라피 실험을 위한 지반을 기존 보링장비를 이용해 NX 사이즈로 천공하였다.

동결관은 상부캡의 직경을 고려하여, GL-1m까지는 150mm로 천공하였고, 이후 심도에서는 NX 사이즈로 천공하였다. 지반이 자립이 불능한 모래~모래자갈 지반이므로 케이싱 회수는 동결관 삽입을 완료한 후에 실시하였다.

토모그라피 실험을 위한 천공은 동결관을 중심으로 반경 2m 떨어진 거리에 2공을 설치하였고, 플라스틱 케이싱을 설치하여 공벽붕괴를 방지하였다.

(나) 동결관 및 지중 온도센서 설치

동결관의 설치는 기존 보링장비를 이용할 수 있도록 NX 사이즈의 직경선정 및 커텍터부 가공 제작을 하였으나, 보링장비를 이용한 동결관의 체결 및 해체시 sus재질의 특성상 원만한 작업이 되지 않을 가능성이 높기 때문에, 그림 2-10에 나타낸 바와 같이 수동조립한 후 크레인을 이용하여 설치하였다. 같은 방법으로 지중온도센서를 동결관 외주면에서 20cm, 40cm. 60cm 떨어진 위치에 3공 설치하였고, 각 공에 있어서 매설심도는 GL-6m, -4m, -2m의 3지점으로 총 9개의 지중온도 센서를 설치하였다.



그림 3-10. 동결관 삽입 전경



그림 3-11. 삽입 완료 된 동결관

(다) 냉매공급시스템 연결

보링장치를 이용하여 동결관 외관을 지반에 삽입 한 후 크레인을 이용하여 동결관 내조를 동결관 외조에 삽입한 후 파이프렌치를 사용하여 동결관을 체결하였다. LN2 공급시스템 또한 크레인을 이용하여 동결관과 연결이 가능한 적당한 위치에 안착시킨 후 동결관과 LN2 공급시스템을 연결하기 위한 배관 스풀들을 연결하였다.



그림 3-12. LN2 공급시스템 설치

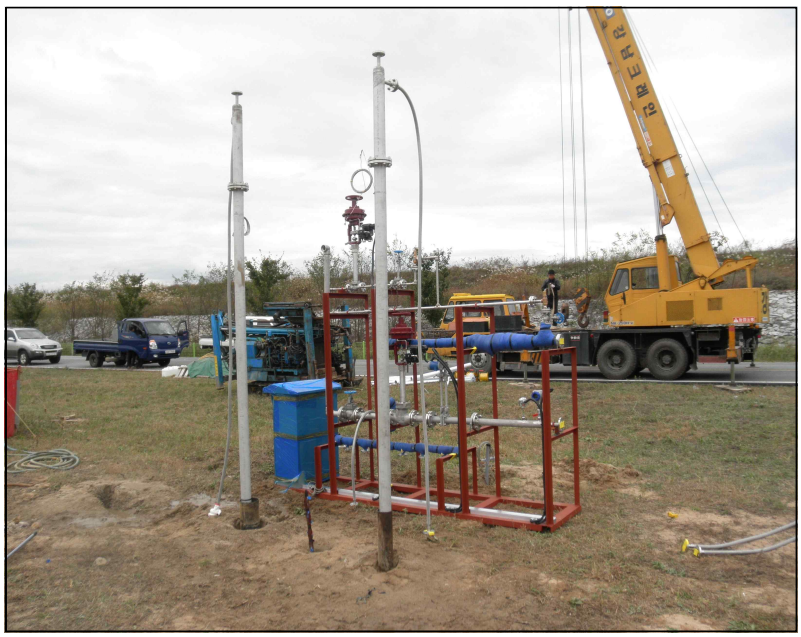


그림 3-13. 동결관 및 LN2 공급시스템 연결

(라) 노출부 단열

단열을 위한 아트론 보냉재를 배관 및 동결관 상부에 부착하여 현장 설치를 완료하고 지반동결을 위한 LN2 공급 준비를 완료하였다.



그림 3-14. 동결관 및 배관 단열작업



그림 3-15. 동결관 및 배관 단열작업

(2) 냉매주입 및 지중온도 계측

LN2 공급시스템 및 다중 동결관의 설치 완료 된 후 토양 동결을 위한 냉매로 쓰이는 LN2공급을 2차년도와 같이 당사 양산공장에 있는 탱크로리 퍼지카를 이용하였다. 충전용량 9ton 규모의 퍼지카는 GOC 본부 및 영남지역 물류

팀, 영남지역 장비관리팀 그리고 Bulk 북부영업부의 협조를 받아 실험이 진행되는 기간 동안 사용할 수 있었다.



그림 3-16. LN2 공급



그림 3-17. LN2 현장충전

테스트 당일 퍼지카가 도착하였을 시 5kg/cm$^2$의 압력으로 약 6ton이 충전되어 있었으며 퍼지카와 LN2 공급시스템을 플렉시블 호스로 연결 한 후 24시간 연속운전으로 LN2를 공급 시작 하였다. 3일 동안 LN2의 사용량을 추측하여 하루에 1번 총 2회에 걸

쳐 구미공장으로부터 탱크로리를 통해 LN2를 현장에서 충전, 공급받아 총 72시간의 연속운전으로 LN2를 공급하였다.




그림 3-18. LN2 공급 120분 경과

LN2 공급을 시작하고 동결관 내부의 온도 및 지반과 열교환 한 후 배출되는 GN2의 온도가 점차적으로 떨어지는 것을 확인 할 수 있었으며 수동운전을 통해 LN2가 안정적으로 공급되고 동결관의 온도가 떨어지는 것을 확인한 후 온도제어를 통한 자동운전을 위한 시작하였다. GN2 방출부의 설정온도를 -120℃로 하여 자동밸브가 정상적으로 개폐되고 온도제어가 되는지를 확인하였으며, 확인 결과 설정된 온도 범위 내에서 정상적으로 작동 하였다.




그림 3-19. LN2 공급 120분 경과

LN2를 공급하기 시작한 후 약 30여분이 지나자 동결관 내부의 온도가 영하로 떨어지기 시작하였으며 약 120여분이 지난 뒤 동결관 내부의 온도는 약-50℃, GN2가 방출되는 후단의 온도는 약 -116℃로 확인되었으며 이 때 대기로 방출되는 GN2의 유량은 약 150$Nm^3$/hr로 확인되었다. LN2 공급 시작 한 후 대략적으로 2시간이 지나자 동결관 내부의 온도와 GN2 출구 온도는 거의 안정적으로 유지되었으며, 안정된 운전이 확인된 후 자동운전 모드로 LN2를 공급하였다. GN2 방출부의 설정온도를 -120℃로 설정한 후 자동운전 상태를 확인한 결과 설정 온도 범위 내에서 정상적으로 온도제어가 이루어지는 것을 확인하였다. 이때 동결관 1, 2의 온도는 약 -60~80℃로 유지되었으며 유량은 약 100~170$Nm^3$/hr 로 유량조절을 통해 온도제어가 됨을 잘 확인 할 수 있었다. 자동운전으로 정상운전이 됨을 확인한 후 GN2 방출부의 혼도를 -120℃가 유지되도록 유량을 맞추고 24시간 연속운전을 계속 진행하였다.

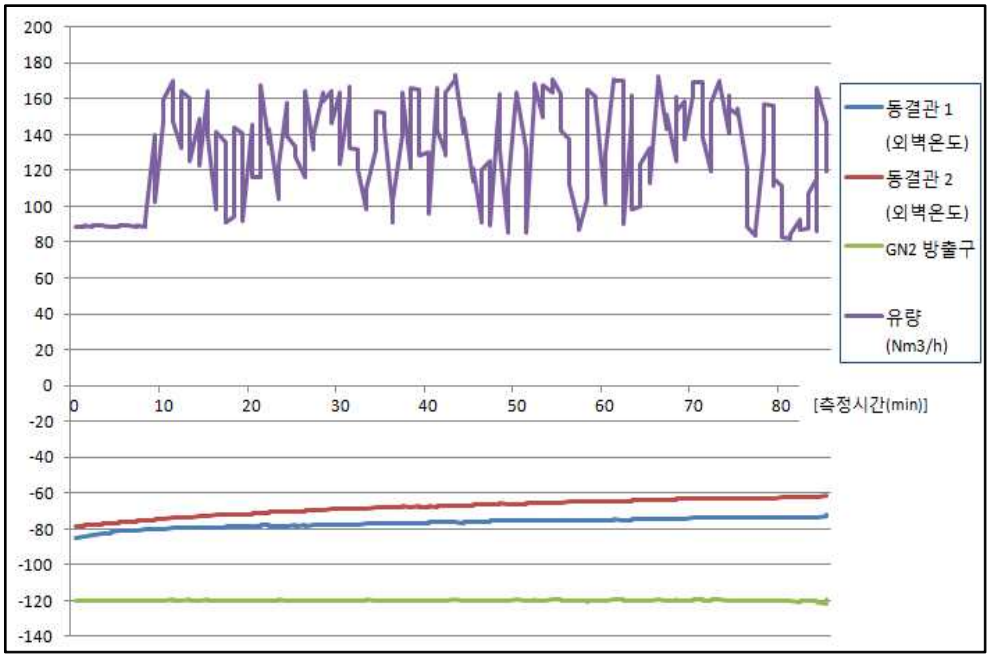



그림 3-20. 운전시간에 따른 운도제어

동결관을 통해 LN2를 공급하면서 토양이 동결되는지의 여부는 초기에는 육안으로 확인 할 수 없었지만 LN2 공급시간이 길어질수록 동결관 주변에 성에가 끼기 시작하면서 지반에 삽입된 동결관 표면을 시작으로 주변 지반이 서서히 동결되고 있음을 확인 할 수 있었다. 실제로 토양이 동결되면 동결관 최하부에 LN2가 있을 것으로 예측되므로, 동결관의 최하부가 가장 두껍게 동결되며 지표면에 가까워질수록 동결면의 직경이 작은 것으로 판단되었다. 72시간 연속운전으로 LN2를 공급한 결과 약 7~800mm 직경의 표면이 동결된 것을 확인 할 수 있었다. 동결관 사이에 지반이 지표면에 가까울수록 동결면의 직경이 작다고 생각되므로, 동결관의 하부로 갈수록 동결면이 더 두터울 것으로 판단된다. 동결관을 1.5m 간격으로 삽입하였기 때문에 동결관 사이의 지반이 충분히 동결되었다고 판단되어 LN2의 공급을 중단 한 후 동결된 토양에 대한 샘플링 작업을 실시하였다. 물을 사용하여 굴착하는 보링장비 때문에 동결된 토양이 녹는 것을 우려하여 사용되는 물 또한 드라이아이스와 부동액을 사용하여 영하의 온도로 유지시킨 후 동결토에 대한 샘플링 작업을 수행하였다.



그림 3-21. LN2 공급 후 동결관(a)



그림 3-22. LN2 공급 후 동결관(b)

라. 동결전·후 지반 비파괴시험

동결전·후 지반의 물성변화, 개략적인 동결범위 파악, 동결샘플의 교란도평가를 위한 기초자료 제공의 목적으로 전기비저항 토모그래피탐사, 표면파탐사 및 전기비저항탐사를 실시하였다.

(1) 전기비저항 토모그래피

전기비저항 토모그래피법은 지표 전기비저항탐사와 같은 원리를 이용한 탐사법이다. 일반적으로 지표와 시추공을 이용하여 조사 대상 영역을 둘러싸도록 전극을 설치하고, 지하에 전류를 흘려 발생한 전위를 측정하는 방법이다. 전극을 시추공 내에 설치하여 탐사 대상에 근접시킨다는 점과 탐사 영역을 전극으로 둘러싼다는 점에서 2차원 전기비저항탐사에 비하여 해석 정밀도 및 분해능을 향상시키는 기법이다. 전기비저항 토모그래피법은 1980년대 중반에 들어 제안되기 시작하여(Shima and Sakayama, 1987) 현재까지 활발하게 연구, 다양한 분야에 적용되고 있는 고분해능 탐사이다. 전기비저항탐사 토모그래피 방법은 고해상도 지하영상화 수요 증가로 인해 지하수, 단층 및 파쇄대, 환경오염대 등의 정밀조사에 널리 쓰이고 있다.

(가) 전기비저항 토모그래피 자료 획득

본 조사지역은 경상북도 안동시 남후면 하아리 낙동강 일원으로서 시추결과 지하수위는 약 3.5 m 하부에서 나타났으며 지층 구성은 모래 및 모래자갈 혼합층으로 나타났다. 동결지반 탐지를 위하여 지반 동결 방향과 수직한 방향으로 2개의 토모그래피 시추공을 각각 10 m 천공하였다. 그림 3-23은 인공동결 지반에서 수행되는 전기비저항 토모그래피 모식도를 나타낸 것이다. 지반 인공동결을 위한 동결관은 A, B와 같이 1.5 m 이격되어 있으며 인공동결 범위를 고려하여 인공동결 구간과 수직한 방향으로 토모그래피용 시추공 BH-1과 BH-2를 천공하였다. 시험용 시추공은 인공동결관 매설 위치에서 각각 3 m 이격시킨 후 심도 10 m까지 굴착하였다. 전기비저항 토모그래피 전극 간격은 1 m로 하였으며 시추공-시추공 자료 및 시추공-지표 자료 획득을 위하여 BH-1과 BH-2 시험공에 각각 11개의 전극을 설치하였으며 지표에 5개의 전극을 설치, 토모그래피를 위한 27개의 전극을 설치하였다. 전극 매설은 그림 3-24와 같이 직경 30 mm의 PVC관을 10 m 연장하여 PVC관 외벽에 원형 전극을 설치하였다. 제작된 전극을 시추 케이싱 내부로 삽입 후 케이싱을 제거하였다.

케이싱 제거 후 지하수면 상부의 비 접촉 구간에 대하여 흙 되메움 하여 전극과 땅의 접지저항을 최소화 하였다.

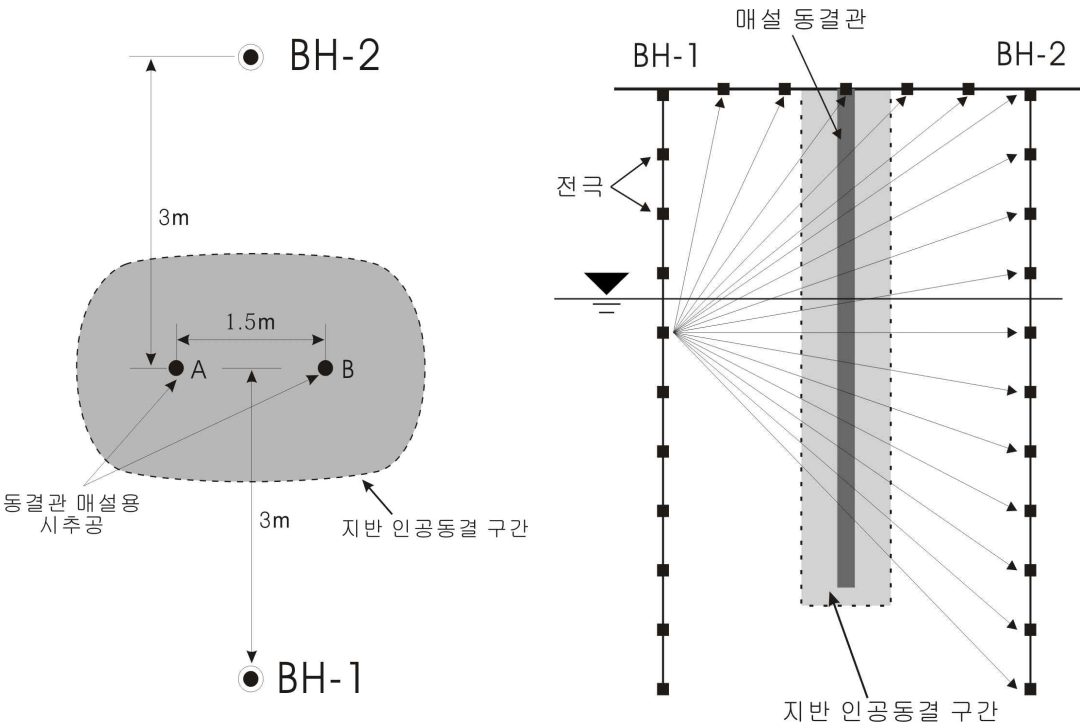



그림 3-23. 인공동결지반 전기비저항 토모그래피 모식도





그림 3-24. 전기비저항 토모그래피용 전극매설

그림 3-25는 전기비저항 토모그래피를 위해 전극 매설된 시추공 BH-1과 BH-2를 보여 주고 있다.



그림 3-25. 전기비저항 토모그래피용 전극 매설 공 BH-1 및 BH-2

토모그래피탐사는 고해상도의 지하정보를 획득할 수 있는 장점을 가지고 있으나 시추와 같은 지반교란, 케이싱 매설 같이 작은 지반변화에도 민감하게 반응하기 때문에 알고자하는 대상 지층 파악을 어렵게하는 단점을 가지고 있다. 본 조사에서는 지반 인공동결에 대한 영향을 파악하고자 표 3-4와 같이 조사하였다. 인공동결 토모그래피는 동일 시추공에서 총 4회 실시하였으며 인공동결관 매설을 위한 지반교란 및 지반인공동결 변화를 밝히기 위하여 지반의 인위적 변화가 발생하였을 때마다 전기비저항탐사 자료를 획득하였다.

표. 3-4. 인공동결지반 전기비저항 토모그래피 탐사 공정

| 조사횟수 | 조사일시 | 내 용 | 지반상태 |
|---|---|---|---|
| 1차 | 2013. 10. 02 | 토모그래피 시험공 굴착 | |
| 2차 | 2013. 10. 22 | 심도 약 8.5m 까지 직경 20cm 케이싱 매설 | 지반교란 |
| 3차 | 2013. 10. 24 | 지반인공동결을 위한 질소가스 주입 후 30시간 | 지반동결 |
| 4차 | 2013. 10. 25 | 지반인공동결을 위한 질소가스 주입 후 50시간 | 지반동결 |

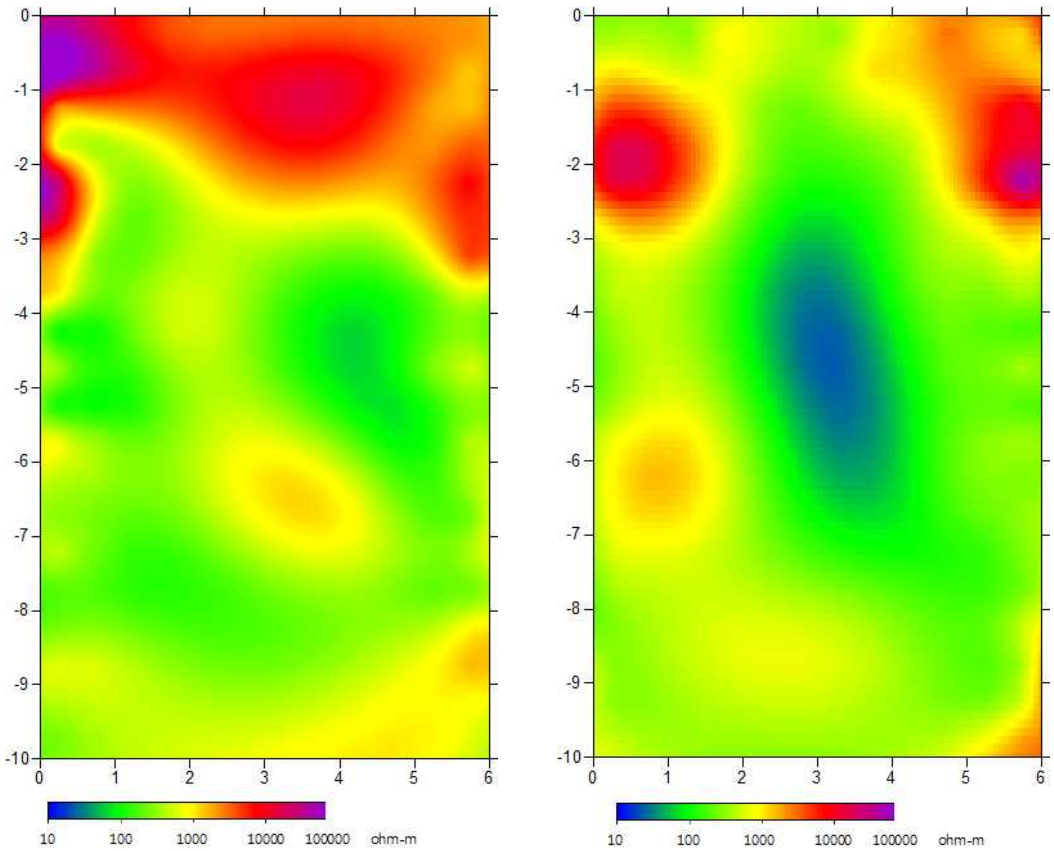
그림 3-26은 인공동결을 위한 동결관 매설 전, 후의 조사 현장을 보여주고 있다. 동결관 매설 전인 1차 조사 자료는 원지반의 물성을 잘 대변할 것으로 판단되며 인공동결에 의한 지반상태 변화의 기준자료로 사용된다. 인공동결관 매설을 위해 직경 200 mm의 스틸케이싱이 1.5 m 간격으로 심도 약 8.5 m 까지 매설되어져 있다. 동결관 매설용 스틸케이싱 및 굴착에 의한 지반교란은 토모그래피 자료에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되며, 원지반의 전기비저항 값을 낮출 것으로 예상된다.




그림 3-26. 인공동결관 매설 전(2013. 10. 02), 후(2013. 10. 22)의 조사지역 전경

(나) 전기비저항 토모그래피 자료 해석

그림 3-27은 지반인공동결 전에 획득한 전기비저항 토모그래피 역산 결과이다. (a)는 1차 조사로 2013년 10월 2일에 획득한 자료이며, (b)는 2차 조사로서 2013년 10월 22일에 획득한 결과이다. 1차조사시 토모그래피 시험용 시추공 굴착에 의하여 작업수 유입 및 지반교란이 일부 발생하였을 것으로 판단된다. 특히, 지하수면 상부의 매설된 전극의 경우 되메움 상태에 따라 접지저항이 매우 크게 나타다. 1차 조사 결과, 조사 지역의 전기비저항은 지하수면 상부인 심도 약 3.5 m까지 수천 ohm-m 이상의 높은 전기비저항 분포를 보이고 있으며, 심도 3.5~10 m까지는 1000 ohm-m 이하의 전기비저항을 보이고 있다. 전기비저항 결과로부터 지하수면 상부와 지하수면 하부 지층 경계는 뚜렷이 나타나는 반면, 모래 및 자갈 섞인 모래층의 구분은 어렵다. (b)는 인공동결관 매설 후 측정된 전기비저항 토모그래피이다. 시추 작업수에 의해 지표면의 전기비저항이 낮게 나타나고 있으며 직경 약 200 mm의 금속 동결관에 의해 단면 중앙에 수직한 방향으로 낮은 전기비저항을 보이고 있다.




(a) 1차 조사(2013. 10. 02) (b) 2차 조사(2013. 10. 22)

그림 3-27. 전기비저항 토모그래피 기준자료 역산 결과

그림 3-28은 스틸 케이싱 매설 및 지반 굴착에 따른 지반의 상태 변화를 전기비저항 변화비로 나타내고 있다. 변화비가 1일 경우, 지반의 상태변화가 없는 것을 의미하며, 10일 경우 전기비저항이 10배 증가, 0.1일 경우 10배 감소한 것을 나타낸다. 1차 및 2차 조사 시 얻어진 기준자료의 전기비저항 변화비를 보면, 단면 중앙에 전기비저항이 10배 이상 감소한 구간을 나타내고 있다. 이것은 지반동결관 매설을 위해 설치된 직경 200 mm의 스틸 케이싱에 의한 영향으로 판단된다. 2차 조사 자료를 기준자료로 사용할 경우 중앙부의 낮은 전기비저항으로 인해 인공동결에 의한 지반동결 범위가 실제보다 크게 나타날 수 있는 문제점을 가지고 있다. 따라서 1차 및 2차 조사 자료를 기준자료로 선정하여 지반동결 후 얻어진 자료와 비교하여 보았다.

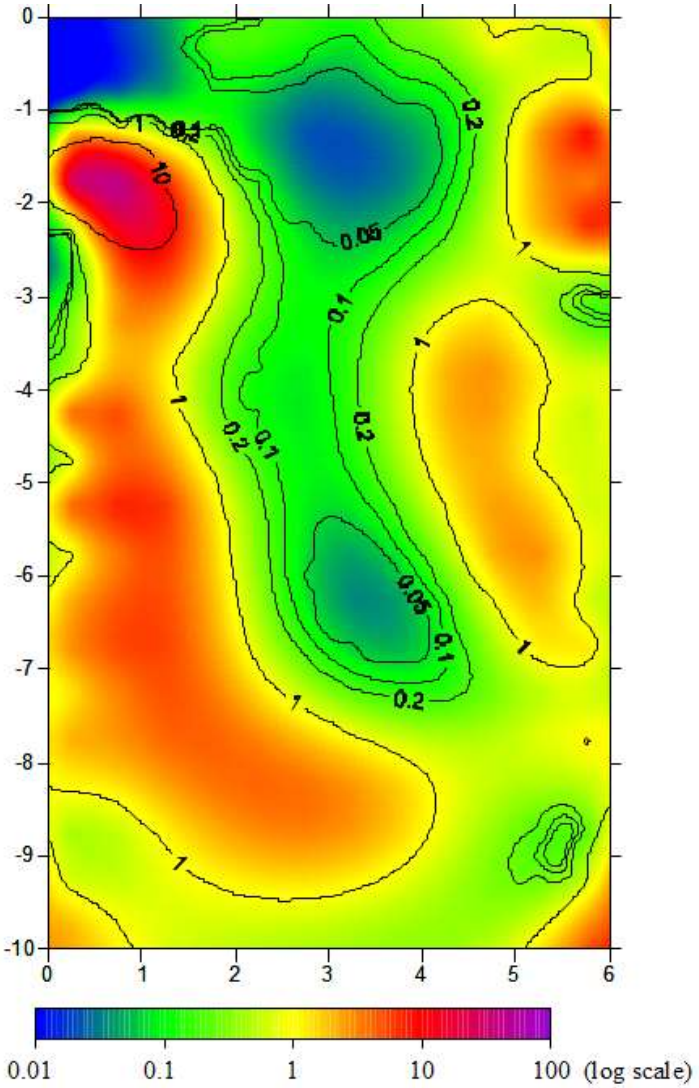
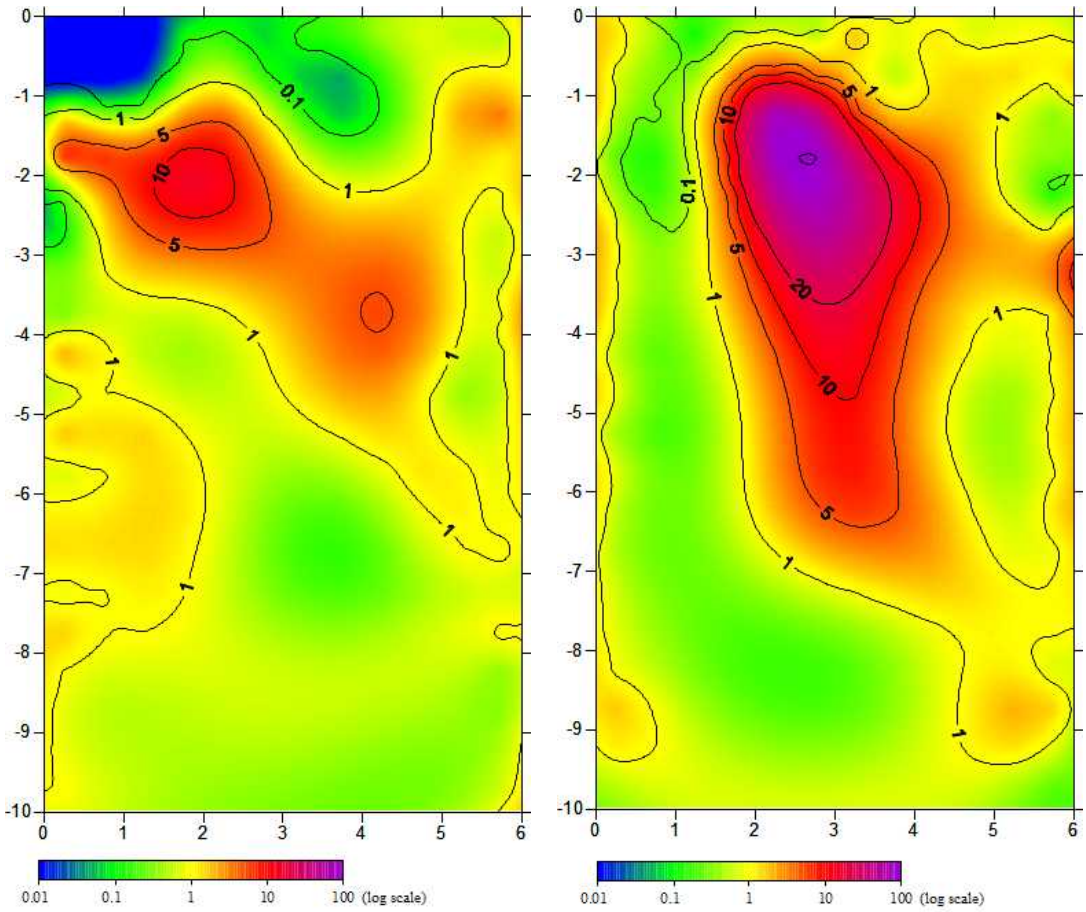



그림 3-28. 전기비저항 토모그래피 기준자료의 변화비(2차/1차)

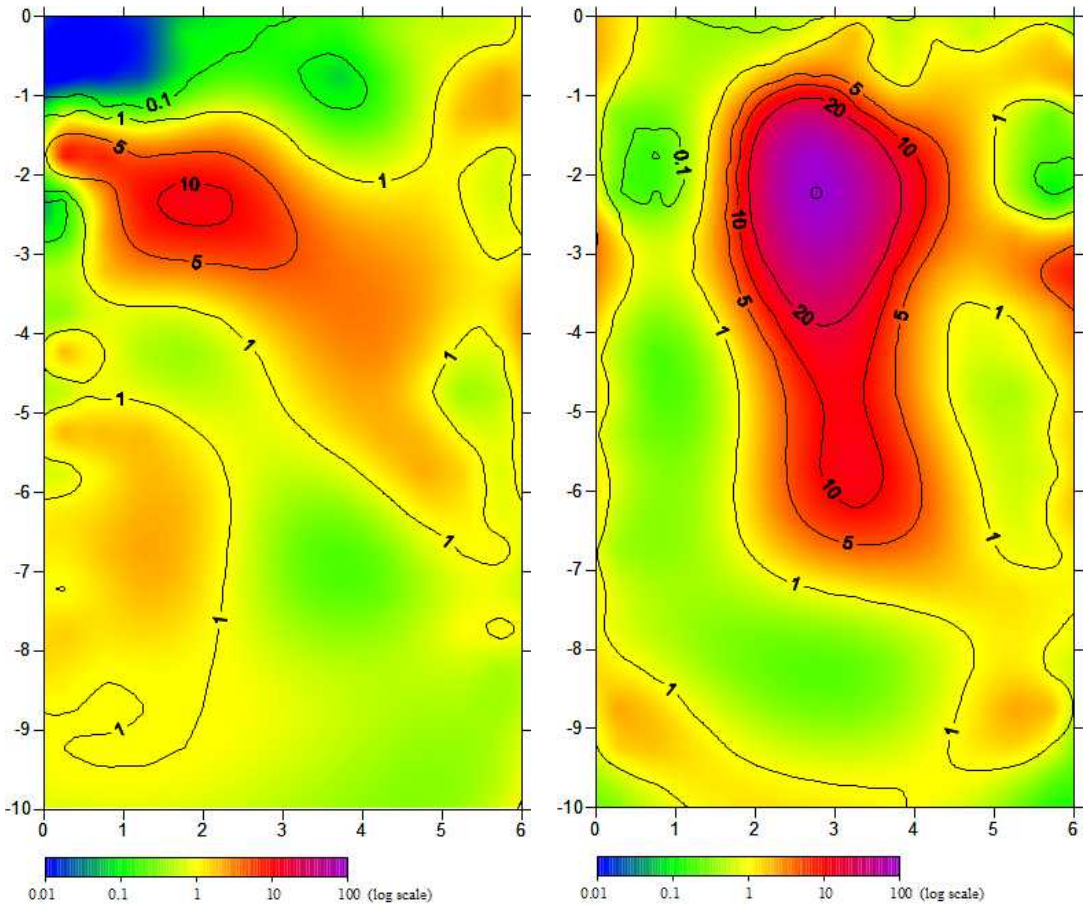
그림 3-29는 3차 조사 전기비저항 토모그래피 변화비를 보여주고 있다. 변화비가 1일 경우, 지반의 상태변화가 없는 것을 의미하며, 10일 경우 전기비저항이 10배 증가, 0.1일 경우 10배 감소한 것을 나타낸다. (a)는 1차 조사를 기준으로 3차 조사의 변화비를 도시한 결과이며 (b)는 2차조사를 기준으로 3차 조사 변화비를 도시한 결과이다. (a)의 단면에서는 지반동결 변화가 잘 나타나고 있지 않으며 (b)의 단면에서는 중앙의 전기비저항이 5배 이상 증가한 것으로 나타났다. 이는 3차 조사가 진행되는 동안 지중 케이싱 주변은 동결되어 전기비저항이 크게 증가하였으며 아직 지반동결의 범위는 크지 않은 것을 의미한다.




(a) 변화비(3차/1차) (b) 변화비(3차/2차)

그림 3-29. 지반 인공동결에 따른 3차조사 전기비저항 변화비

그림 3-30은 4차 조사시 얻은 전기비저항 토모그래피 변화비를 보여주고 있다. (a)는 1차 조사를 기준으로 4차 조사의 변화비를 도시한 결과이며 (b)는 2차조사를 기준으로 4차 조사 변화비를 도시한 결과이다. (a)의 변화비 단면에서는 인공동결에 의한 지반동결 변화가 잘 나타나고 있지 않다. 이러한 원인은 4차 조사 시까지 지반을 충분히 동결시키지 못한 것으로 판단된다. (b)의 단면에서는 중앙의 전기비저항이 5배 이상 증가한 것으로 나타났다. 이러한 결과가 의미하는 바는 인공동결관 주변 지층이 동결되어 케이싱과 같은 전도성 매질의 전류 흐름을 차단하여 케이싱에 대한 저비저항 영향이 배제된것을 의미한다. 4차 조사 결과 인공동결 매설관 주변은 동결된 것으로 나타났으나, 지반 인공동결의 범위는 크지 않은 것으로 나타났다.




(a) 변화비(4차/1차) (b) 변화비(4차/2차)

그림 3-30. 지반 인공동결에 따른 4차조사 전기비저항 변화비

(2) 소결

지반 인공동결에 따른 물성변화를 측정하기 위하여 해상도가 높은 물리탐사 기법중의 하나인 전기비저항 토모그래피를 수행하였다. 전기비저항 토모그래피는 지반동결 전 2회, 지반동결 후 2회, 총 4회 수행하였다. 일반적으로 사질토의 동결 시 전기비저항이 크게 증가하는 것으로 알려있기 때문에 전기비저항 토모그래피법은 지반 인공동결에 의한 상태 변화를 정확히 탐지 할 것으로 기대하였다.

- 전기비저항 토모그래피 1차 조사 결과 조사지역의 모래 및 모래자갈 지층은 심도 약 3.5 m 지하수면을 경계로 지하수면 상부에서는 3000~10000 ohm-m의 전기비저항을 보이고 있으며, 지하수면 하부에서는 1000 ohm-m 이하의 전기비저항을 보인다.
- 지반 동결용 동결관 매설 후 얻은 2차 조사 결과, 시추에 의한 지반교란 및 스틸

케이싱에 의한 낮은 전기비저항이 관찰되었다.

- 지반 인공동결 후 약 30시간 및 50시간 후에 획득된 3차 및 4차 조사 결과, 지반 동결관 주변의 전기비저항은 5배 이상 증가한 것으로 나타났으나, 인공동결에 의해 지반동결 범위는 크지 않은 것으로 나타났다.
- 지반 인공동결에 의한 지반 상태변화 파악을 위하여 전기비저항 토모그래피 법을 수행한 결과 지반의 교란, 매설관에 의한 영향, 동결관 주변의 동결 등 지반 상태의 작은 변화를 잘 탐지하였으며 지반의 동결 규모는 크지 않은 것으로 나타났다.

## 3. 동결지반 굴착 및 시료 채취·운반 기술 개발

### 가. 동결지반에 대한 굴착 및 채취기법 연구

지반동결을 위한 LN2의 공급을 중단 한 후 동결된 토양에 대해서 동결관을 중심으로 300mm내외의 공간에서 방사방향으로 4개소에 대해 샘플링을 실시하였다. 작업수를 이용하여 굴착하는 보링장비의 특성상 일반적인 청수의 경우 샘플링을 위한 천공 시 동결된 토양을 융해시킬 수 있으므로 이를 방지하기 위하여 청수에 부동액을 첨가한 후 드라이아이스를 투입하여 작업수의 온도를 -5℃로 유지시킨 상태에서 샘플링을 실시하였다.

작업수의 온도를 -5℃로 유지하기 위하여 부동액의 비율은 경제성 등을 고려하여 청수의 15%로 결정하였으며 외기, 드라이아이스의 열량 손실 등을 고려하여 일반적인 드라이아이스의 승화열을 약 25% 저감하여 드라이아이스 사용량을 산정하였다. 드라이아이스 사용량 산정조건 및 산정결과는 다음과 같다.

- 산정조건

- 청수 용량 : 4,000L(작업수 탱크 용량의 67%)
- 부동액 용량 : 600L(청수의 15%)
- 청수 온도 : 19℃
- 적용 드라이아이스 승화열 : 107.25kcal/kg(일반적인 드라이아이스의 승화열은 143kcal/kg이나 열량 손실 등을 고려하여 약 25% 저감시켜 적용함)

- 산정결과

• 작업수의 온도를 -5℃로 유지하기 위한 열량 : 1kcal/L/℃ × (4,000L+600L) × [19℃ - (-5℃ )] = 96,000kcal

• 드라이아이스 투입량 : 96,000kcal / 107.25kcal/kg = 895.1kg ≒ 900kg

샘플링은 전술한 바와 같이 4개소에서 실시하였으며, 1, 2차년도 연구결과에 따라 샘플링시의 비트 및 코아배럴은 다이아몬드 비트 및 더블코어 배럴을 적용하였으며 비트의 회전수는 150rpm을, 작업수의 수량은 5L/min을 적용하였다.



그림 3-31. 보링 작업(동결토 샘플링)

지반동결전 시추조사 결과, 동결샘플링 대상 위치의 지층 구성은 최상부의 매립층(3.2m), 모래층(2.0m) 및 모래자갈층(2.8m)으로 구성되어 있으며 각 샘플링 지점의 대표적인 코어전경은 그림 3-32~33에 나타낸 바와 같다. 그림 3-32에 나타난 모래시료는 지하수위 위의 시료로, 낮은 함수비로 인해 동결의 효과가 비교적 높지 않았기 때문에 채취시료의 상태가 지하수위 이하의 모래층에 비해 양호하지 않은 것을 볼 수 있다. 그러나 지하수위 상부의 모래에 있어서도 동결샘플링이 가능하였다는 점은 괄목할만한 성과로 사료된다. 또한, 그림 3-33에 나타낸 BH-3의 경우 자갈이 많이 함유된 지반임에도 불구하고, 매우 양호한 동결시료 채취가 가능하였다.

종합적으로 판단컨대, 전년도에 시행한 실내 동결시료를 이용한 샘플링 결과에 따라 샘플링시의 비트, 코아배럴, 비트의 회전수 및 작업수의 수량을 적용하여 현장 동결지반을 샘플링한 결과, 각 시추공의 코어 회수율은 90%(지하수위 상부)~100%(지하수위 하부)의 범위로 양호하게 나타났으며, RQD는 100%를 나타냈다. 또한, 코어직경의 감소 및 변형,

작업수에 의한 씻김 현상이 발생하지 않았고 시료 표면의 상태 또한 매끄럽게 나타났다. 따라서, 전년도의 연구결과는 현장 동결지반에도 그 적용성은 높은 것으로 확인된다. 굴착·채취속도는 1시간당 10m까지도 가능하지만, 본 작업에 있어서 중요한 점은 시료를 불교란상태로 채취하는 것이다. 시료채취성능은 채취시점에서의 지반온도 및 작업수 온도에 영향을 받겠지만, 본 실험조건인 지반온도 -20℃, 작업수 온도 -5℃에서는 시간당 5m정도로 나타났고, 이는 비교적 단시간에 많은 시료를 채취할 수 있다는 것을 증명한다.



그림 3-32. BH-1 지점 Core 전경



그림 3-33. BH-2 지점 Core 전경

나. 채취 동결시료에 대한 운반 및 보관기법 연구

시료의 교란은 시료 채취 시에서부터 운반 보관 시에 발생 할 수 있다. 인공동결공법은 동결관 주위의 지반을 동결시킨 상태에서 샘플링을 하여 시료의 교란을 최소화하고자 하는 것이 핵심이기 때문에 시료 채취 시, 지반의 동결로 인한 과잉간극수압의 발생으로 시료에 추가적인 응력이 가해지는 것을 막아야한다는 점이 매우 중요하다. 또한 채취 이후, 실험실로의 운반과정 및 실험실에서의 보관과정에서 발생할 수 있는 교란의 가능성을 최소로 줄여야 한다.

운반 중에 시료가 진동을 받으면 재 성형되는 효과가 발생하여 강도는 떨어진다고 한다(Kallstenius, 1958). 인공동결공법에 의해 채취된 동결된 시료가 융해되지 않도록 동결온도를 유지하여 운반 및 보관하는 것이 중요하다. 따라서 현장에서 채취한 동결시료는 샘플러에서 분리하자마자 그림 4-4와 같이 별도의 칸막이가 있는 보관용기에 넣는다. 이때 동결시료의 함수비 변화를 방지하기 위해 밀폐비닐(비닐랩)과 같은 것을 이용하여 채취된 시료를 바로 포장한 후 보관용기에 보관한다. 운반과정 중 충분히 낮은 온도를 유지할 수 있는 냉동차에 보관용기를 적재한다. 냉동차를 이용한 운반과정 중 충격에 의한 시료손상을 방지하기 위해 시료보관함 내부, 시료 사이 및 시료보관함 외부에 충격을 완화할 수 있는 완충재를 설치한다. 또한 운반 시 냉동차의 냉동고 문제나 도로사정에 의한 문제에 신속히 대응하기 위해 포장된 드라이아이스를 냉동고에 같이 적재한다.



그림 3-34. 냉동차를 이용한 동결채취시료 운반

시료가 실험실에 도착하면 즉시 밀봉상태, 시료의 팽창여부, 운반중의 변형여부를 확인하여 밀봉에 이상이 없으면 다시 밀봉하고, 만약 시료가 운반 중에 변형을 받았으면

교란시료로 분류하여 강도나 압밀특성 등의 시험에 사용하지 않도록 한다. 시료는 고온과 직사일광을 피하고 저온 고습한 상태에서 보관하여야 한다. 실험실로 옮겨진 동결시료는 동결된 현장 지반의 온도보다 충분히 낮은 온도를 유지할 수 있는 그림 3-35와 그림 3-36과 같은 냉동고에 -20℃이하 상태에서 보관 중이며, 냉동고 온도 센서의 정밀도는 ± 1℃이다. 또한 냉동고 내의 습도로 인해 발생할 수 있는 시료의 함수비 변화를 방지하기 위하여 시료가 담겨진 적재 상자 외부를 진공 그리스로 처리하였다. 또한 냉동고가 위치한 실내 실험실의 습도를 제습기를 이용하여 일정하게 유지하였다. 냉동고를 가동하기 위한 전력에 문제가 생길 것을 대비하여 즉시 드라이아이스를 공급할 수 있도록 준비한다. 동결시료의 보관에 있어서 문제로 되는 것은 얼음분의 기화에 의한 시료의 노화와 냉각기의 문제 등의 환경온도 상승에 의한 시료의 융해이지만, 기화에 대해서는 고무슬리브가 유효하게 작동하고, 채취 후 1년 이상 경과한 시료에 대해서도 표면에 거의 변화가 없었음을 보고하였다. 또한 환경온도의 상승에 대해서는 동결사력공시체를 이용한 확인실험을 수행하여, -20℃정도로 냉각된 공시체는 보존용기에 수납되어 있다면 환경온도가 실온 (+20℃)로 변화한 경우에도 표면조차 융해되지 않는 상태를 48시간 이상 유지할 수 있다고 보고하였다. 이 시간은 냉각기 등의 트러블에 충분히 대응할 수 있는 시간이다.



그림 3-35. 시료보관용 냉동고



그림 3-36. 냉동고에 보관된 동결시료 보관함

교란을 방지하는 데는 무엇보다도 시료채취 시와 취급에 종사하는 기술자의 중요성 인식과 정성이 중요하다. 이를 위해 시료의 채취자, 운반책임자, 보관책임자의 실명을 기록한 표를 부착하여 책임감을 부여하는 등의 지속적인 관심이 필수적이라고 할 수 있다. 또한 시료의 채취 직후부터 실험실에 도착 할 때까지 받는 온도와 진동 및 충격 모니터링을 위하여 자동으로 온도와 가속도를 기록하는 장비를 시료상자에 부착하고, 그 결과를 분석하여 시료의 교란정도를 판단하고 원인을 제거하기 위한 자료로 활용하는 것도 교란을 줄이는 한 가지 방법이다.

# 4. 소결

(1) 동시동결 채취 운용시스템 개발

- 동결 채취 운용시스템은 동결관과 LN2 자동 공급장치로 구성되며 당해연도에는 동시에 여러 개의 동결관을 동결시키기 위해 동결관 및 LN2 자동공급시스템의 용량을 자동운전이 가능하도록 최적 설계 및 제작함.

- 다중 동결관은 이중관 구조로 되어 있으며 내관에 LN2가 유입되어 토양동결에 사용된 후 기화하여 GN2로 외관을 통해 배출되도록 제작함.

- 동결관과 함께 토양을 동결시키기 위한 냉매(LN2)를 공급하기 위한 LN2 공급시스템은 자동운전이 가능하도록 설계. 제작함.

(2) 인공동결 시스템 성능 및 운용기술 평가

▪ 당해연도에는 현장의 포화모래지반과 화강풍화토 지반을 대상으로 성능을 평가하고, 개선사항을 도출하는 것을 목표로 하고 있으며 각종 동결샘플링 핵심 unit 및 시스템의 성능을 평가할 뿐만 아니라, 지반동결-채취-운반-보관 과정에 있어서 기타 핵심기술에 대해서도 현장 성능평가를 실시함.

▪ 한국건설기술연구원 안동 하천종합 실험센터 내 포화모래지반과 화강풍화토 지반에서 개발기술의 현장 성능평가를 수행하여 동결샘플링 시스템의 전체 프로세스(지반동결, 굴착 및 채취, 운반 및 보관, 지반동결 전후 지반물리탐사)를 검증함.

▪ 지반동결

- 동결관을 지반에 삽입한 후, 액체질소를 5kg/cm$^2$의 압력으로 약 6ton이 충전되어 있었으며 퍼지카와 LN2 공급시스템을 플렉시블 호스로 연결 한 후 24시간 연속운전으로 LN2를 공급 시작 하였으며 3일 동안 LN2의 사용량을 추측하여 하루에 1번 총 2회에 걸쳐 구미공장으로부터 탱크로리를 통해 LN2를 현장에서 충전, 공급받아 총 72시간의 연속운전으로 LN2를 공급함.
- LN2 공급을 시작하고 동결관 내부의 온도 및 지반과 열교환 한 후 배출되는 GN2의 온도가 점차적으로 떨어지는 것을 확인할 수 있었으며 수동운전을 통해 LN2가 안정적으로 공급되고 동결관의 온도가 떨어지는 것을 확인한 후 온도제어를 통한 자동운전을 위한 시작함. GN2 방출부의 설정온도를 -120℃로 하여 자동밸브가 정상적으로 개폐되고 온도제어가 되는지를 확인하였으며, 확인 결과 설정된 온도 범위 내에서 정상적으로 작동함.
- LN2를 공급하기 시작한 후 약 30여분이 지나자 동결관 내부가 영하로 떨어지기 시작하였으며 약 120여분이 지난 뒤 동결관 내부의 온도는 약-50℃, GN2가 방출되는 후단의 온도는 약 -116℃로 확인되었으며 이 때 대기로 방출되는 GN2의 유량은 약 150Nm$^3$/hr로 확인됨.
- LN2 공급 시작 한 후 대략적으로 2시간이 지나자 동결관 내부의 온도와 GN2 출구 온도는 거의 안정적으로 유지되었으며, 안정된 운전이 확인 된 후 자동운전 모드로 LN2를 공급하였다. GN2 방출부의 설정온도를 -120℃로 설정 한 후 자동운전 상태를 확인한 결과 설정 온도 범위 내에서 정상적으로 온도제어가 이루어지

는 것을 확인함.

▪ 굴착 및 채취

- 지반동결을 위한 LN2의 공급을 중단 한 후 동결된 토양에 대해서 동결관을 중심으로 300mm내외의 공간에서 방사방향으로 4개소에 대해 샘플링을 실시하였음.
- 작업수의 온도를 -5℃로 유지하기 위하여 부동액의 비율은 경제성 등을 고려하여 청수의 15%로 결정하였으며 외기, 드라이아이스의 열량 손실 등을 고려하여 일반적인 드라이아이스의 승화열을 약 25% 저감하여 드라이아이스 사용량을 산정하여 적용하였음.
- 샘플링시의 비트 및 코아배럴은 다이아몬드 비트 및 더블코어 배럴을 적용하였으며 비트의 회전수는 150rpm을, 작업수의 수량은 5L/min을 적용한 결과, 모래시료뿐만 아니라 자갈시료까지 불교란 상태로 채취할 수 있었음.

▪ 지반 동결전·후 물리탐사

- 전기비저항 토모그래피 1차 조사 결과 조사지역의 모래 및 모래자갈 지층은 심도 약 3.5 m 지하수면을 경계로 지하수면 상부에서는 3,000~10,000 ohm-m의 전기비저항을 보이고 있으며, 지하수면 하부에서는 1,000 ohm-m 이하의 전기비저항을 타나냄.
- 지반 동결용 동결관 매설 후 얻은 2차 조사 결과, 시추에 의한 지반교란 및 스틸 케이싱에 의한 낮은 전기비저항이 관찰됨.
- 지반 인공동결 후 약 30시간 및 50시간 후에 획득된 3차 및 4차 조사 결과, 지반 동결관 주변의 전기비저항은 5배 이상 증가한 것으로 나타났으나, 인공동결에 의해 지반동결 범위는 크지 않은 것으로 나타남.
- 지반 인공동결에 의한 지반 상태변화 파악을 위하여 전기비저항 토모그래피 법을 수행한 결과 지반의 교란, 매설관에 의한 영향, 동결관 주변의 동결 등 지반 상태의 작은 변화를 잘 탐지하였으며 지반의 동결 규모는 크지 않은 것으로 나타남.

▪ 운반 및 보관

- 시추시의 지반온도인 -20℃를 유지하도록, 냉동탑차의 온도를 -20℃로 하여, 시료로의 수분 공급 및 시료의 수분함량의 변화가 발생하지 않도록 비닐랩에 포장하여 운반하였음.

# 제 4 장

# 동결샘플링 시료에 대한 성능 평가기법 개발

## 1. 동결시료의 강도평가와 탄성파 특성변화

### 가. 주문진 표준사를 이용한 동결시료

최근 복잡하고 대형화된 건설구조물에 대한 수요가 증가함에 따라 점토지반과 사질토지반 같이 상대적으로 열악한 조건의 지반에서도 건설공사를 수행해야 하는 경우가 증가하고 있다. 대부분의 건설 구조물은 지반을 그 기초 대상으로 하는 만큼, 해당지반에 대한 정확한 조사와 이해가 필수적이다. 지반의 특성을 조사하는 방법은 현장실험과 실내실험으로 구분할 수 있으며, 합리적인 지반의 강도정수를 산정하기 위해서는 현장에서 채취한 비교란 시료를 이용한 실내실험을 통하여 강도정수를 산정하는 것이 가장 효과적이다. 특히 동적 하중에 따른 사질토 지반의 액상화 평가 등을 위하여 사질토 지반의 비교란 시료 채취에 대한 연구자들의 관심이 증가하고 있으며, 현재 인공동결공법을 이용한 비교란 동결시료의 채취가 가장 효과적인 방법으로 알려져 있다(Kim, 2005).

사질토 지반의 강도와 변형 특성은 시료의 상대밀도, 원지반 응력상태와 응력이력에 영향을 받는다(Ladd et al., 1977). 인공동결공법을 이용한 비교란 동결시료의 특성을 평가하기 위해 Yoshimi 등(1978)은 동결시료와 비동결시료를 조성하여 배수 삼축압축실험을 실시하였으며, 동결-융해과정은 사질토의 강도와 변형에 큰 영향을 미치지 않는다고 하였다. Yoshimi 등(1984)은 동결시료가 융해 시 받는 구속압에 따른 액상화 강도의 변화를 관찰하였으며, 구속압 5kPa부터 98kPa까지는 액상화 강도에 큰 영향이 없다고 제안하였다. Sasitharan 등(1994)은 사질토의 실트 함량에 따른 동결-융해 시 특성변화를 관찰하기 위해 전단파 속도를 측정하였고, 동결 시 시료에 융기가 발생하지 않으면 동결-융해 전 후의 전단파 속도변화는 무시할 정도라고 하였다. 선행연구에서는 사질토 시료의 동결에 의한 강도 및 미소변형 특성을 관찰하고자 비동결시료를 삼축압축실험용 페데스탈에 거치한 상태에서 동결과 융해과정을 연속적으로 실시한 후 실험을 수행하였고, 비동결시료와 비교하였다. 그러나 이러한 방법의 실험은 인공동결공법으로 채취된 동결시료의 실험조건을 충분히 모사하지 못하는 한계를 가진다. 본

연구에서는 인공동결공법으로 채취된 동결시료의 강도평가 실험을 수행하기 위하여, 조성된 동결시료의 트리밍과정부터 페데스탈에 거치하여 융해까지의 과정을 실시한 후 삼축압축과정을 실시하였다.

본 연구에서는 주문진 표준사를 이용하여 수중강사법으로 상대밀도 60%, 80%를 가지는 동결시료와 비동결시료를 각각 조성하였다. 조성된 동결시료는 트리밍을 실시한 후 삼축압축실험용 페데스탈에 거치하여 자연융해시켰다. 이후 동결-융해시료와 비동결시료는 동일한 조건으로 비배수 삼축압축실험을 실시하였다. 동결시료의 융해과정에서 시료의 온도변화를 관찰하고자 삼축압축실험용 하부 페데스탈에 열전대(Thermocouple, K-type)를 설치하였다. 또한, 삼축압축실험 과정에서 시료의 미소변형 특성을 관찰하고자 압축파와 전단파를 측정할 수 있는 피에조 디스크 엘리먼트와 벤더 엘리먼트를 상·하부 페데스탈에 설치하여 포화, 압밀, 전단과정에서 연속적으로 압축파와 전단파를 측정하였다.

본 연구의 목적은 인공동결공법으로 채취된 동결시료의 강도평가를 위한 실험을 수행하여 동결시료와 비동결시료의 강도특성과 탄성파 특성 변화를 관찰하는 것이다. 본 논문에서는 인공동결공법을 이용한 비교란 시료채취에 대한 이론적 배경을 시작으로 시료의 조성과 트리밍 방법, 삼축압축실험과 탄성파 측정에 대해 설명하였다. 또한 각각의 상대밀도에 해당하는 동결-융해시료와 비동결시료의 삼축압축실험 결과와 산정된 압축파와 전단파 속도변화의 원인 및 분석에 대해 기술하였다.

본 연구에서는 비교란 시료 채취를 위한 인공동결공법의 적용 대상이 되는 사질토 지반을 모사하기 위하여 주문진 표준사를 이용하여 시료를 조성하였다. 시료 동결 시 시료 팽창을 발생시킬 수 있는 세립자의 영향을 최소화하고(Sasitharan et al., 1994), 입자크기에 대한 영향을 최소화하기 위해(Lee et al., 2008) 30번체와 50번체 사이의 평균입경 0.45mm를 가지는 주문진 표준사를 사용하였으며, 시료의 최대간극비와 최소간극비는 ASTM 기준으로 산정하였고(ASTM D4253; ASTM D4254) 그 값은 0.94와 0.67이며, ASTM D854의 방법으로 산정한 비중은 2.66으로 나타났다.

인공동결공법을 이용한 비교란 시료 채취공법은 일반적으로 지하수위 아래 지반을 대상으로 하므로, 본 실험에서는 수중강사법으로 시료를 조성하였다. 각각 상대밀도 약 60%, 80%로 동결-융해시료와 비동결시료를 높이 10cm, 직경 5cm 크기로 조성하였다. 동결-융해 시료의 경우 직경 5cm의 몰드에 조성된 시료를 냉동고에 넣어 동결시켰으며 이때 냉동고의 온도는 $-50^{0}$C로 설정하여 24시간 이상 동결하였다. 비동결 시료는 동결-융해시료와 같은 수중강사법으로 조성하였고, 동결-융해시료에서 결정된

상대밀도와 유사한 값을 가지도록 조성하였다.

삼축압축실험 과정에서 온도, 압축파 및 전단파를 측정하기 위해 제작된 페데스탈은 그림 4-1과 같다. 페데스탈은 아크릴 재질로 시료의 직경과 같은 5cm의 크기로 제작하였으며 온도와 탄성파를 측정할 수 있는 트랜스듀서를 설치하였다. 하부 페데스탈에는 온도를 측정할 수 있는 열전대를 설치하였다. 상·하부 페데스탈에는 각각 압축파를 측정할 수 있는 피에조 디스크 엘리먼트와 전단파를 측정할 수 있는 벤더 엘리먼트를 설치하였다. 전단파 트랜스듀서로 사용된 벤더 엘리먼트는 흙과 트랜스듀서와의 결합효과가 뛰어나다고 알려져 있다(Lee and Lee, 2006). 상·하부 페데스탈 중앙부에 다공석(Porous stone)을 설치하여 삼축압축실험 중 시료내부에 유입되는 물이 시료 입자구조에 직접적으로 미치는 영향을 최소화하였다.

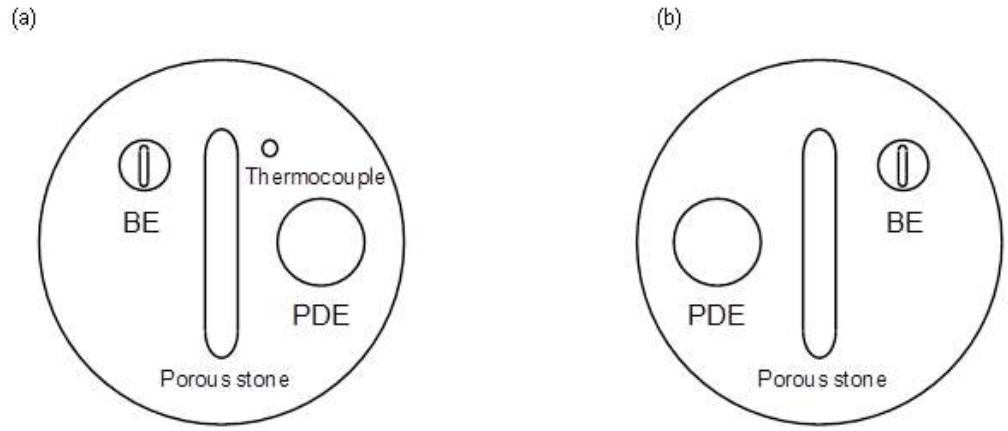



그림 4-1. 탄성파와 온도측정이 가능한 삼축압축실험용 페데스탈: (a) 상부 페데스탈, (b) 하부 페데스탈

온도와 탄성파를 측정하기 위해 페데스탈에 설치된 트랜스 듀서의 측정시스템은 그림 4-2와 같다. 하부 페데스탈에 부착된 열전대는 데이터로거(Data Logger, Agilent 34970A)에 연결하여 1분 간격으로 온도를 측정하였다. 압축파와 전단파의 측정을 위하여 신호발생기(Function Generator, Agilent 33220A)에서 발생된 신호가 발신 트랜스듀서로 보내지고 시료를 통과한 신호가 수신 트랜스듀서로 보내진다. 모든 신호의 방향은 상부에서 하부로 진행하도록 설정하였다. 수신된 신호는 필터(Filter-Amplifier, Krohn-Hie 3361)를 통해 잡음을 제거하고 신호를 증폭시킨 후 오실로스코프(Oscilloscope, Agilent 54624A)를 통해 신호를 확인하여 컴퓨터로 저장하였다.

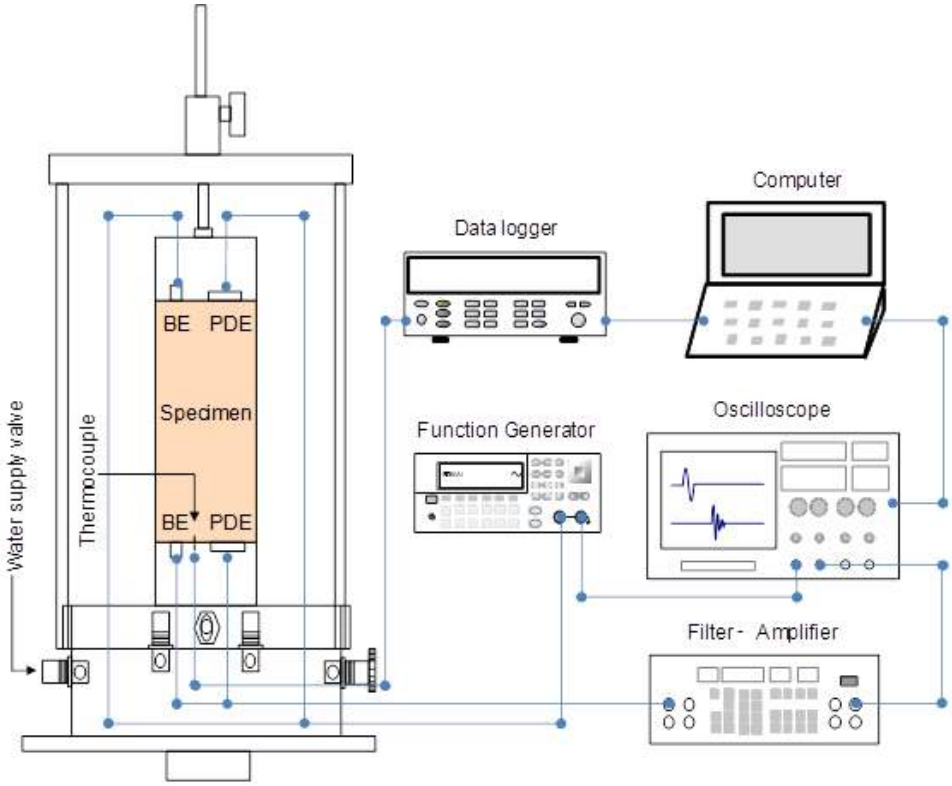



그림 4-2. 측정시스템

조성된 동결시료를 멤브레인에 장착한 후 삼축압축실험용 페데스탈에 거치하고 비배수 상태로 상온에서 자연융해시켰다. 시료 외부로 연결되는 Cell pressure는 10kPa로 설정하여 동결시료의 융해로 인한 시료의 변형을 최소화하며 자립할 수 있도록 하였다. 동결시료와 Cell에 공급되는 물의 큰 온도차이로 인한 동결시료의 갑작스러운 융해를 방지하고자 1℃이하로 냉각된 증류수를 Cell의 공급수로 이용하였다. 동결시료의 내부까지 완전히 융해되도록 시료의 온도와 실험실의 온도가 평형을 이루는 시점까지 융해를 실시하였으며, 하부 페데스탈에 설치된 열전대를 이용하여 1분 간격으로 온도를 측정하였다.

동결시료의 융해가 완전히 이루어진 후, 비배수 삼축압축실험과정은 비동결시료와 동일하게 진행하였다. 시료 내부 및 시료와 멤브레인 사이에 존재하는 미세한 공기를 제거하기 위하여 Cell과 Pore의 압력을 10kPa와 0kPa로 유지한 상태로 멤브레인 내부에 물을 순환시키는 Circulation과정을 실시하였다. 물의 흐름은 하부에서 상부로 향하도록 하였으며 상부 페데스탈에 설치된 다공석(porous stone)을 통해 외부로 유출시켰다. Circulation과정이 완료되면 포화과정, 압밀과정, 전단과정의 순서로 실험을 진행하였다. 포화과정에서는 Cell Pressure와 Pore Pressure를 순차적으로 20kPa씩 증가

시켜 B-value를 측정하였으며, 측정된 B-value가 0.95이상이 되면 완전히 포화되었다고 판단하였다(ASTM D4767). 압밀과정에서는 동결-융해시료와 비동결시료 모두 80kPa의 하중으로 등방압밀 하였으며, 압밀과정이 완료된 후 0.2%/min의 속도로 축변형률을 가해 전단파괴를 유도하였다. 축변형률이 25%에 도달할 때까지 전단파괴 하였으며, 전단이 완료된 후 회수한 시료의 건조무게를 측정하여 상대밀도를 재확인하였다.

비배수 삼축압축실험과정에서 탄성파를 포화, 압밀, 전단과정에서 연속적으로 측정하여, 각 단계가 시료의 탄성파 특성에 미치는 영향과 동결-융해시료와 비동결시료의 특성을 관찰하였다. 측정된 신호는 다음과 같은 식을 이용하여 초기도달시간을 구할 수 있다.

$$V = \frac{L}{\Delta t}$$

여기서, L은 피에조 디스크 엘리먼트 및 벤더 엘리먼트 끝단의 거리를 의미하며 ⊿t는 압축파와 전단파의 초기도달시간을 의미한다. 탄성파를 측정할 수 있는 트랜스듀서는 상·하부 페데스탈에 설치되어 있으므로, 실험 과정 중 발생하는 축변형률이 탄성파 속도에 영향을 미치게 된다. 따라서 탄성파 측정이 이루어진 시점에서 축변형률을 고려한 트랜스듀서 간의 거리(L)를 적용하여 탄성파 속도를 산정하였다.

동결시료를 삼축압축실험용 페데스탈에 거치한 후 자연융해하면서 하부 페데스탈에 설치된 열전대를 이용하여 온도를 측정하였고, 그 결과는 그림 4-3과 같다. 그림 4-3(a)와 4-3(b)는 각각 상대밀도 79%와 62%를 가지는 동결시료의 융해 시 온도변화 양상이다. 동결시료의 낮은 온도로 인하여 측정 초기에 시료 하부 경계면 온도는 -1℃까지 하강하였으며, 이후 Cell에 냉각된 물이 주입되면서 온도가 상승하여 실험실 온도(25℃)와 평형을 이루었다. 융해 시 시료의 온도변화는 시료 외부의 수온과 시료의 경계면에서의 열 교환이 지배적이다. 따라서 시료 내부에 남아있을 가능성이 있는 빙정까지 완전히 융해시키기 위해 시료의 온도와 실험실의 온도가 평형을 이루는 시점까지 융해과정을 실시하였고, 약 300분이 소요되었다.

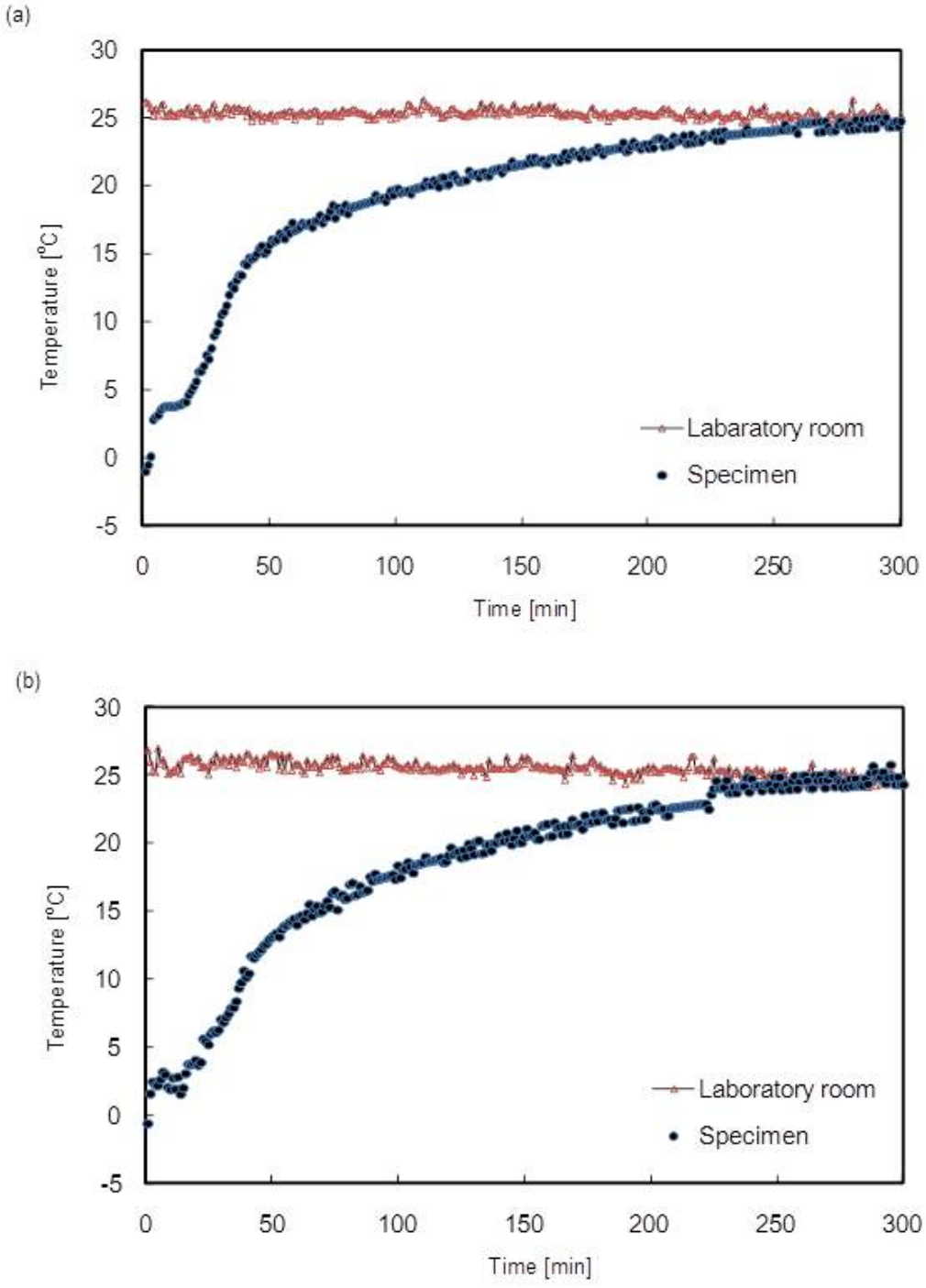



그림 4-3. 동결시료의 융해 시 온도변화 양상: (a) 동결-융해시료 Dr 79%, (b) 동결-융해시료 Dr 62%

동결-융해시료와 비동결시료의 비배수 삼축압축실험을 통해 산정된 결과는 표 4-1과 같다. 그림 4-4(a)는 축방향 변형률에 따른 축차응력의 관계를 나타내며, 그림 4-4(b)는 과잉간극수압의 발생경향을 보여준다. 축차응력과 과잉간극수압은 상대밀도

와 동결-융해 여부에 따라 다른 결과를 나타냈다. 축차응력은 상대밀도가 낮을수록 작은 값을 나타냈으며, 유사한 상대밀도의 시료에서는 동결-융해과정을 겪은 시료가 비동결시료보다 작은 값을 나타냈다. 과잉간극수압은 모든 동결-융해시료와 비동결시료에서 전단과정 초기에 소폭 증가 한 후 감소하여 음의 값을 보였으며, 조밀한 상태의 사질토에서 일반적으로 관찰되는 경향과 유사하였다. 과잉간극수압의 감소량은 상대밀도가 낮을수록 작았으며, 동결-융해시료가 비동결시료에 비해서 작게 감소하였다. 그림 4-5는 시료들의 응력경로 결과를 보여준다. 상대밀도와 동결-융해여부에 따라 최대값은 다르게 분포하고 있지만, 같은 상대밀도의 시료에서는 동결-융해여부에 상관없이 동일한 기울기를 가진다. 표 4-1과 같이, 전단강도는 축차응력과 동일하게 상대밀도가 낮을수록 작은 값을 나타냈고 동결-융해과정에 의해 감소된 값으로 나타났다. 동결-융해과정에 의한 전단강도의 감소현상은 상대밀도 80%와 60% 시료에서 각각 약 1%, 4% 발생하였다.

표 4-1. 비배수 삼축압축 실험 결과

| Segment | | Strain at failure [%] | Deviator stress at failure [kPa] | Shear strength at failure [kPa] | Mean effective stress at failure [kPa] | Excess pore pressure at failure [kPa] | Friction angle at failure [o] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Frozen-thawed | Dr 79 % | 11.2 | 1401.2 | 768.4 | 1000.9 | -452.88 | 34.5 |
| | Dr 62 % | 13.5 | 1243.4 | 621.6 | 973.7 | -479.3 | 31.1 |
| Unfrozen | Dr 80 % | 10.5 | 1547.5 | 774.1 | 1098.9 | -502.4 | 34.6 |
| | Dr 61 % | 12.3 | 1275.7 | 646.5 | 994.1 | -489.1 | 31.5 |

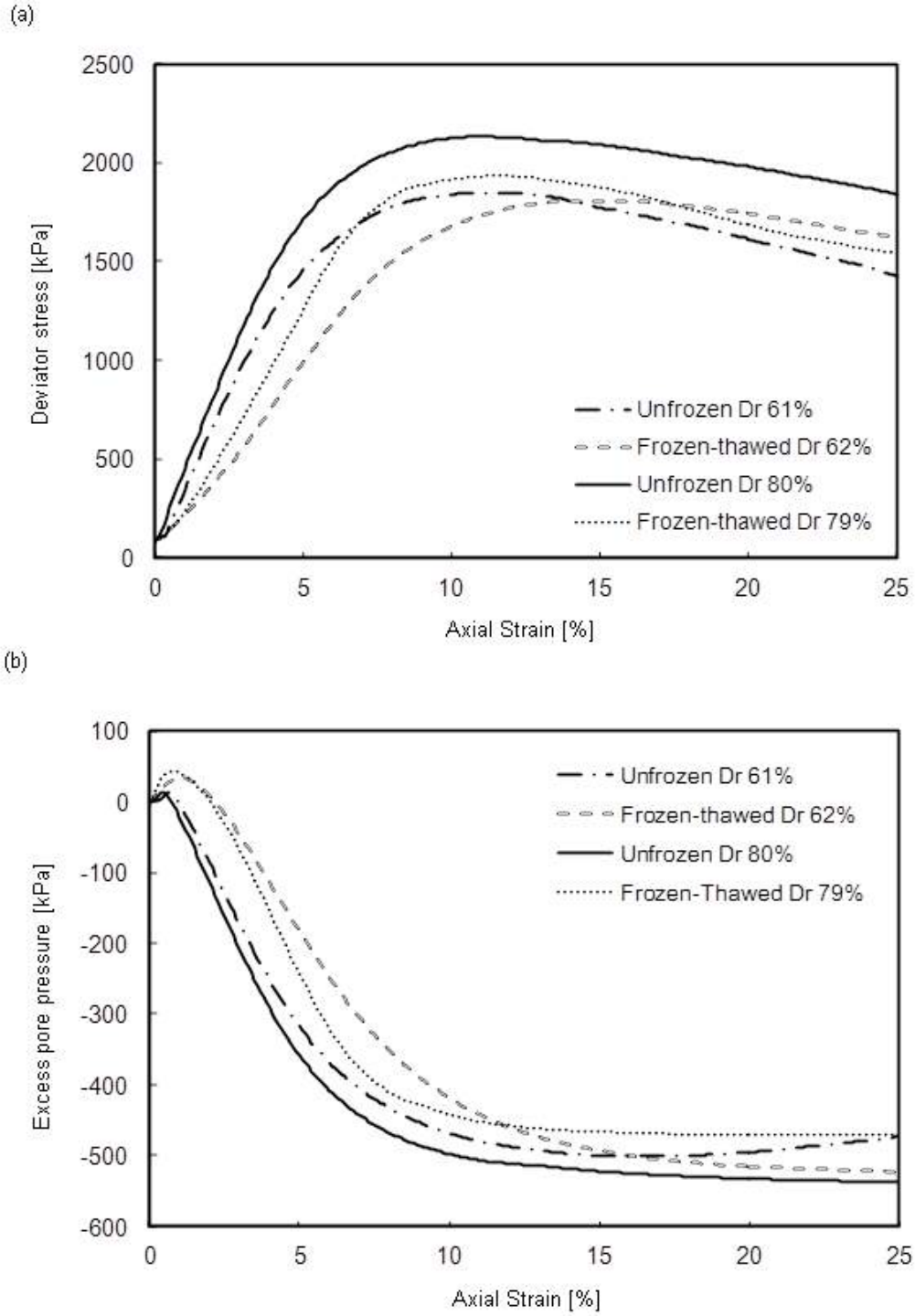



그림 4-4. 비배수 삼축압축 실험결과(전단과정): (a) 축차응력, (b) 과잉간극수압

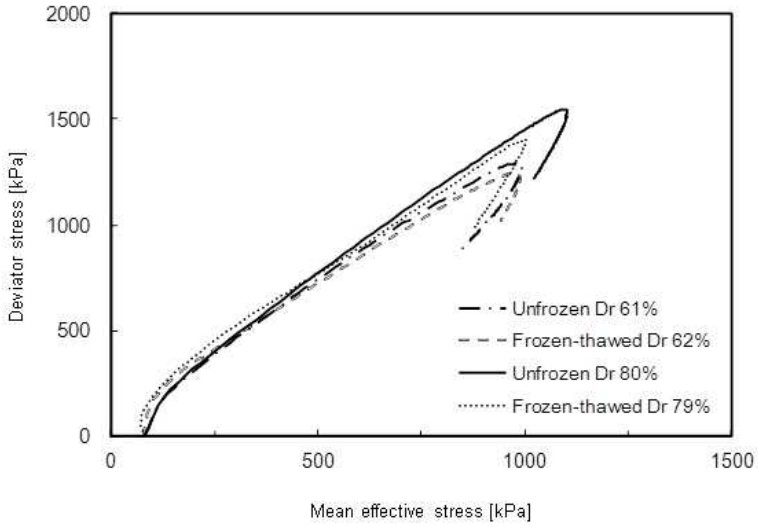



그림 4-5. 응력경로

그림 4-6에서는 첨두 내부마찰각을 산정하여 상대밀도와 동결-융해 여부에 따라 구분하여 나타내었다. 내부마찰각은 상대밀도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였지만, 동결-융해시료와 비동결시료의 비교에서는 큰 차이를 보이지 않고 매우 유사한 값으로 나타났다. 시료의 동결-융해과정으로 인해 입자배열과 응력이력은 변할 수 있으므로 동결-융해시료에서 축차응력과 전단강도가 감소하는 경향을 보였지만, 강도정수인 내부 마찰각은 큰 차이를 보이지 않았다.

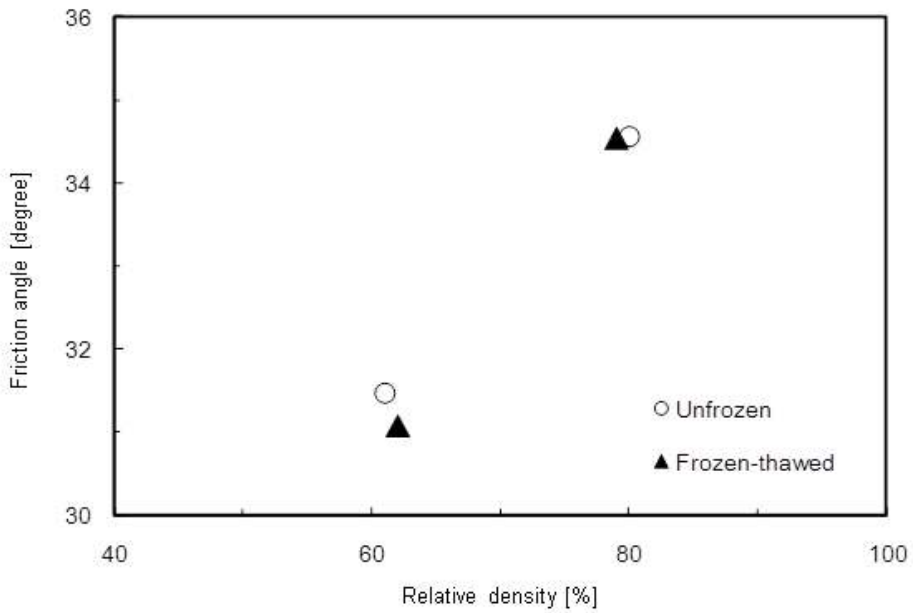



그림 4-6. 상대밀도와 동결-융해과정에 따른 내부마찰각 변화 양상

압축파 속도는 함수비의 영향을 많이 받기 때문에(Ishihara et al., 1998) 포화도를 나타낼 수 있는 지표인 B-value와 큰 연관관계가 있다. 압축파는 시료를 통과하면서 잔류하는 공기방울에 의해 속도가 감소되고 그 값으로 포화의 정도를 산정할 수 있다. B-value와 압축파 속도의 상관관계에 대한 선행연구에서는 그림 4-7(a)와 같이 B-value가 0.8이하 일 경우는 압축파 속도가 1000m/s까지 서서히 증가하다가 B-value가 0.8이상이 되면 급격히 증가하여 1500m/s 이상의 값을 나타낸다고 보고하였다(Kim et al., 2006; Tamura et al., 2002). 압축파를 이용하여 시료의 포화도 및 B-value와 비교하는 경우, 시료 사이에 위치하는 공기방울의 크기와 위치에 따라 속도가 달라질 수 있다(Tamura et al., 2002). Naesgaard 등(2007)은 시료 내부에 위치하는 공기방울 분포의 균등 정도에 따라 압축파 속도가 받는 영향에 대해 연구하였으며, 공기방울이 시료 내부에 비균등하게 분포한다면 압축파 속도는 시료와 물의 강성에 크게 영향을 받으므로 상대적으로 더 강성이 높은 곳을 지나기 때문에, 낮은 B-value에서도 1500m/s에 가까운 압축파 속도를 나타낼 수 있다고 제안하였다.

포화과정에서 상대밀도 80% 비동결 시료의 압축파 속도변화는 그림 4-7(a)와 같으며, 각 시료의 포화과정 시작과 완료 후의 압축파 속도는 그림 4-7(b)와 같다. 시료들의 초기 압축파 속도는 다르지만 모든 시료에서 B-value가 낮은 값에서도 1400m/s 이상의 상대적으로 높은 압축파 속도를 나타내었고 B-value가 증가함에 따라 각각의 압축파 속도는 약 1800m/s로 수렴하는 현상을 보였다. 일반적인 유체의 압축파 속도는 1500m/s~2000m/s의 범위 안에 있고, 순수한 물에서는 약 1500m/s로 알려져 있으며 시료가 포화된 경우 그 값은 증가한다(Kokusho, 2000). 따라서 0.95 이상의 B-value와 약 1800m/s로 수렴하는 압축파 속도로 미루어 보아 시료는 완전히 포화되었다고 판단하였으며, 포화과정에서 압축파 속도는 상대밀도와 동결-융해여부와 상관없이 분포하였다.

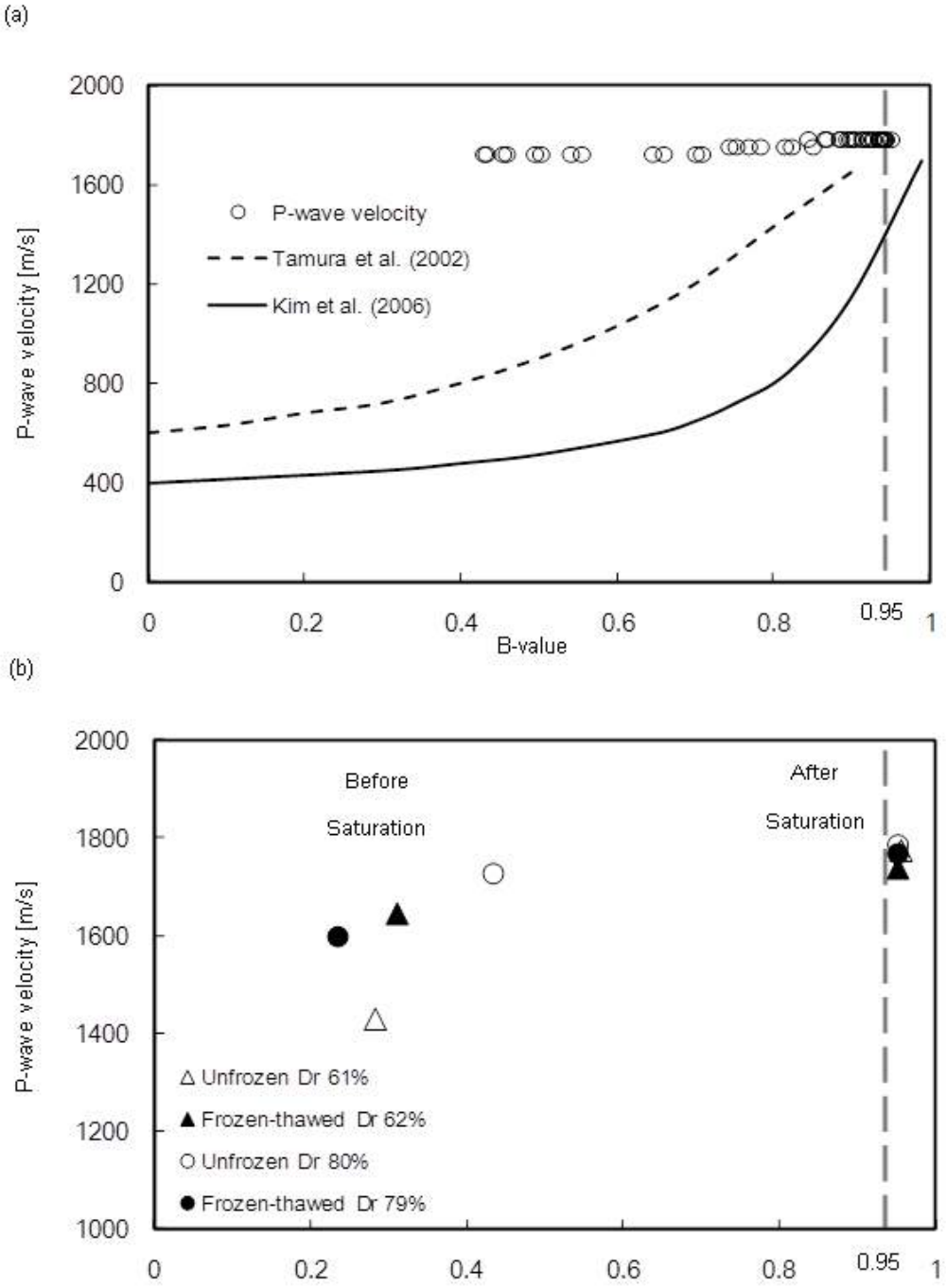



그림 4-7. 포화과정에서 압축파 변화양상: (a) 비동결 Dr 80%, (b) 포화 전과 후의 압축파 속도

압밀과정에서는 80kPa의 등방압밀을 하면서 시간에 따른 압축파 속도 변화를 관찰하였고 그 결과는 그림 301과 같다. 압밀에 따라 간극수압의 변화는 발생하나, 포화도의 변화는 발생하지 않아 압밀 전과 압밀 후의 압축파 속도에는 변화가 없는 것으로 판단된다.

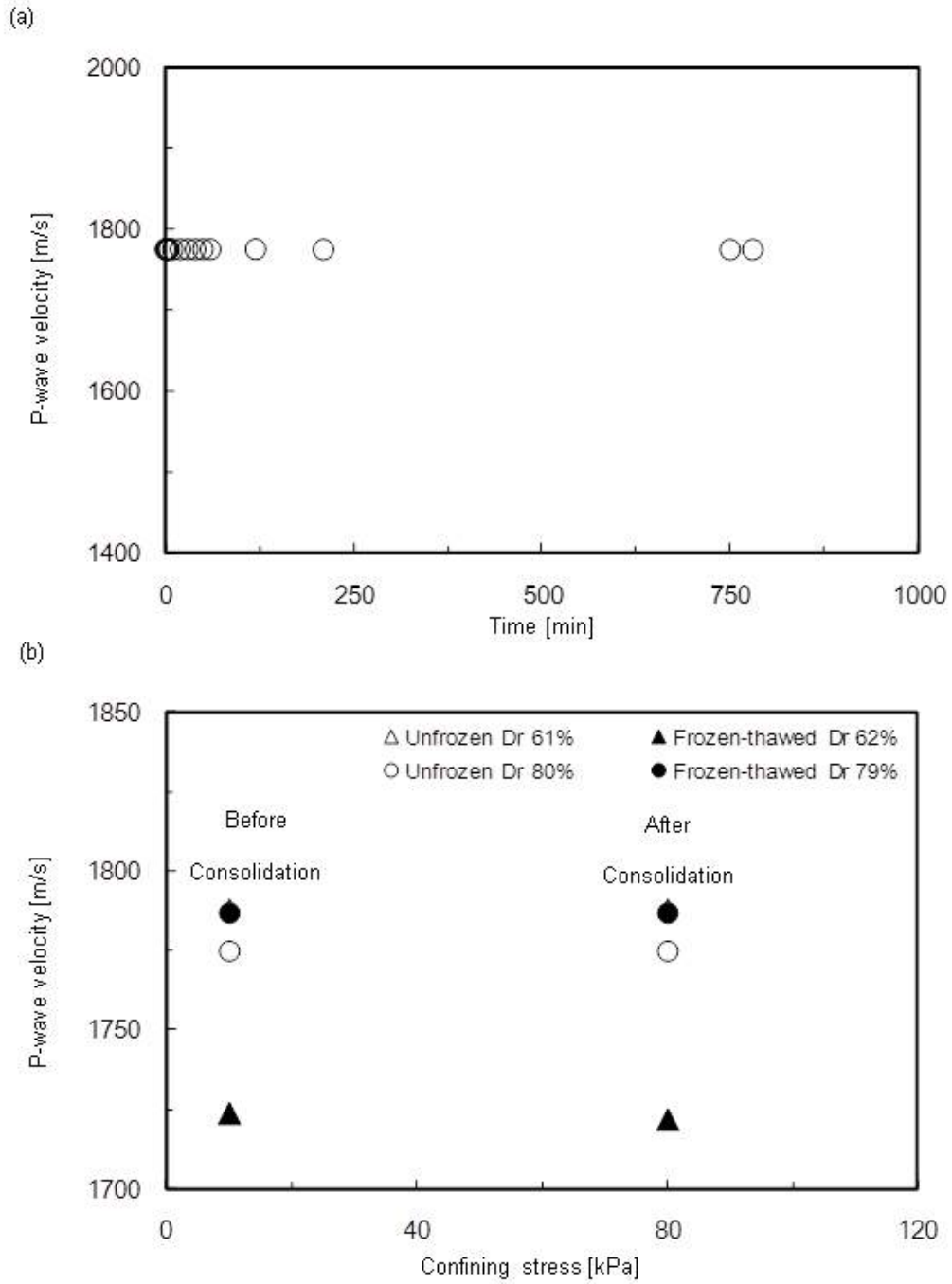



그림 4-8. 압밀과정에서 압축파 변화양상: (a) 비동결 Dr 80%, (b) 압밀 전과 후의 압축파 속도

전단과정에서 압축파 속도의 변화는 그림 4-9와 같다. 축변형률이 증가함에 따라 모든 시료에서 유효응력이 증가하고 과잉간극수압과 간극수압이 감소하여 음의 값으로 나타났지만, 비배수 전단시험으로 시료 내 함수비의 변화가 없어 압축파 속도는 전단변형과 관계없이 일정한 값을 보였다.

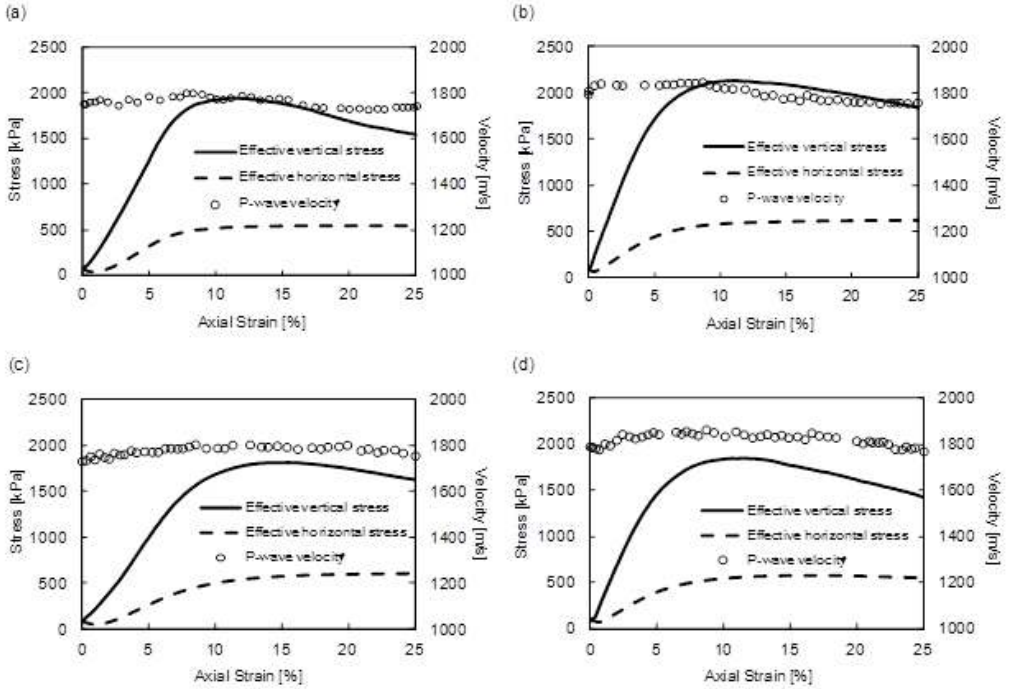



그림 4-9. 전단과정에서 압축파 변화양상: (a) 동결-융해 Dr 79%, (b) 비동결 Dr 80%, (c)동결-융해 Dr 61%, (d) 비동결 Dr 60%

벤더엘리먼트를 통해 산정한 전단파 속도는 유효응력의 크기에 영향을 받으며 다음과 같은 식으로 유효응력의 함수로 표현할 수 있다(Roesler, 1979).

$$V_s = \alpha\left(\frac{\sigma_0'}{P_a}\right) = \alpha\left(\frac{\sigma_w' + \sigma_m'}{2P_a}\right)^{\beta}$$

본 실험에서는 포화과정에서 연속적으로 전단파 속도를 측정하였으며, 그 결과는 그림 4-10과 같다. 전단파 속도는 상대밀도와 동결-융해 여부에 상관없이 B-value가 증가할수록 약 10%정도 감소하는 결과를 보였다. Kim 등(2006)은 탄성파 측정이 가능한 비틀림 전단실험기에서 B-value 증가에 따른 전단파 속도를 비교하였고, B-value가 0.97에 도달한 후 약 10%의 전단파 속도 감소현상을 보인다고 보고하였다. B-value는 포화의 정도를 측정할 수 있는 지표로서, B-value가 증가할수록 포화도가 높아지고 이에 따라 시료가 받는 유효응력이 감소하여 전단파 속도가 느려진다고 판단된다.

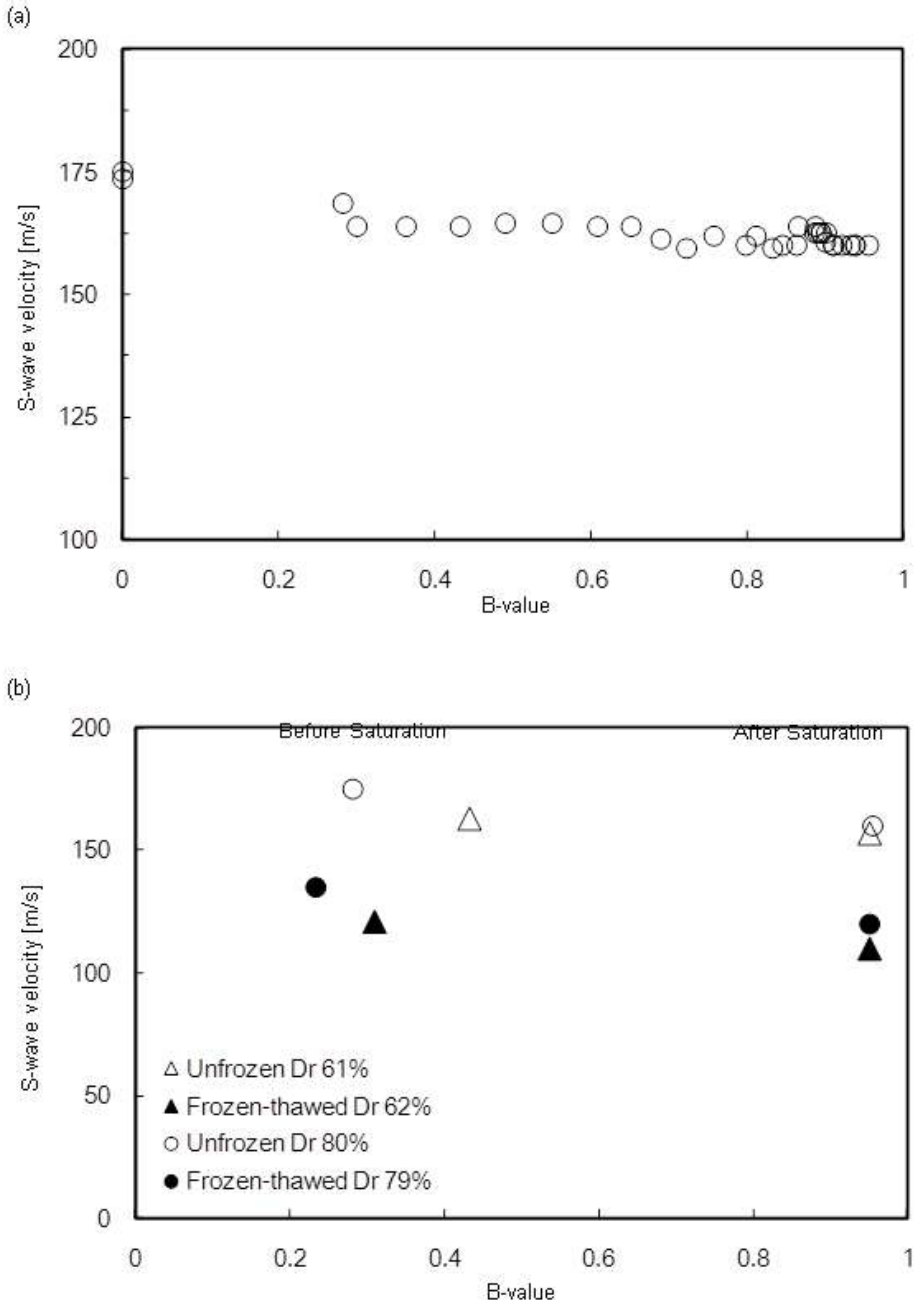



그림 4-10. 포화과정에서 전단파 변화양상: (a) 비동결 Dr 80%, (b) 포화 전과 후의 전단 속도

압밀 전과 압밀 후의 전단파 속도 경향은 그림 4-11과 같다. 전단파 속도는 유효응력에 지배적인 영향을 받기 때문에 구속압의 증가에 따라 상대밀도와 동결-융해과정의 구분 없이 증가하는 경향을 나타냈다.

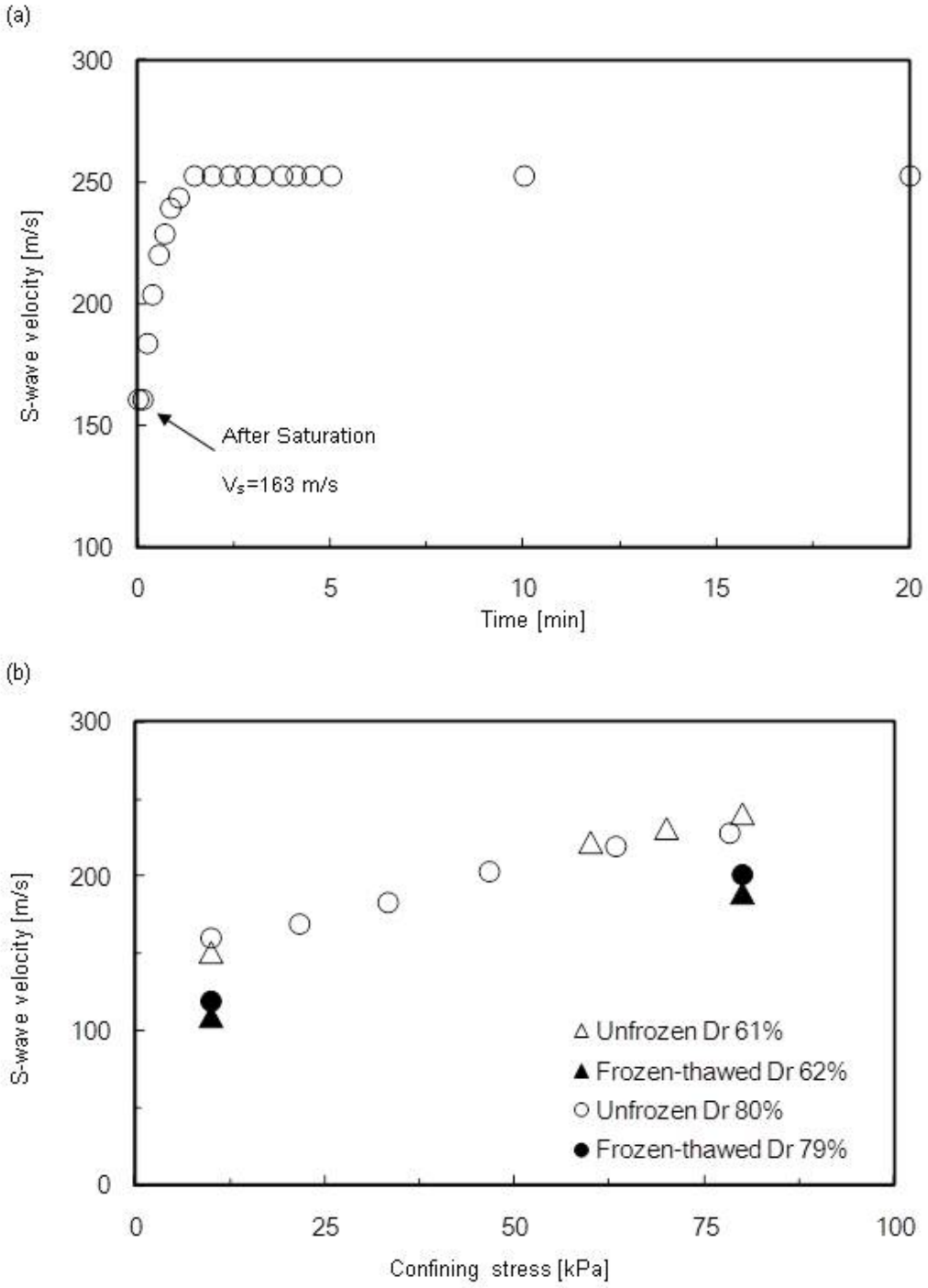



그림 4-11. 압밀과정에서 전단파 변화양상: (a) 비동결 Dr 80%, (b) 압밀 전과 후의 전단 속도

전단과정에서 연속적으로 측정한 각 시료의 전단파 속도와 유효응력 경향을 그림 4-12에 나타내었다. 전단변형률이 발생함에 따라, 그림 4-12와 같이 과잉간극수압이 증가하다 감소하여 부의 값을 나타내고 이후 일정한 값을 유지한다. 이로 인하여 수직

유효응력과 수평유효응력은 초기에 모두 증가하나, 최대값을 보인 이후에는 수직유효응력은 소폭 감소하는 경향을 보였지만 수평유효응력은 큰 변화없이 거의 일정한 크기를 유지하였다. 전단파 속도는 전단 초기에 유효응력이 증가함에 따라 증가하는 모습을 보이다가, 유효응력이 최대값을 보인 이후에는 일정한 값을 유지하였다. 그림 4-13(a)와 (b)는 시료가 파괴되는 시점의 전단파 속도와 전단강도, 전단파 속도와 평균유효응력을 비교한 것이다. 그림 4-13(a)과 같이 시료의 상대밀도가 감소하면 동결-융해시료와 비동결 시료의 구분 없이 일정하게 전단강도와 전단파 속도가 감소하였다. 그러나 유사한 상대밀도에서 동결-융해시료는 비동결 시료에 비하여 전단파 속도와 전단강도가 감소하는 경향을 나타내었다. 그림 4-13(b)와 같이 전단파 속도는 평균유효응력의 크기에 따라 거동하며, 동결-융해시료에서 평균유효응력과 전단파 속도가 비동결시료에 비해 모두 감소하는 경향을 보였다. 이는 시료의 동결-융해 반복에 따른 전단파 속도 감소에 대한 선행연구(Kang et al., 2013)와 유사한 결과를 보이고 있다

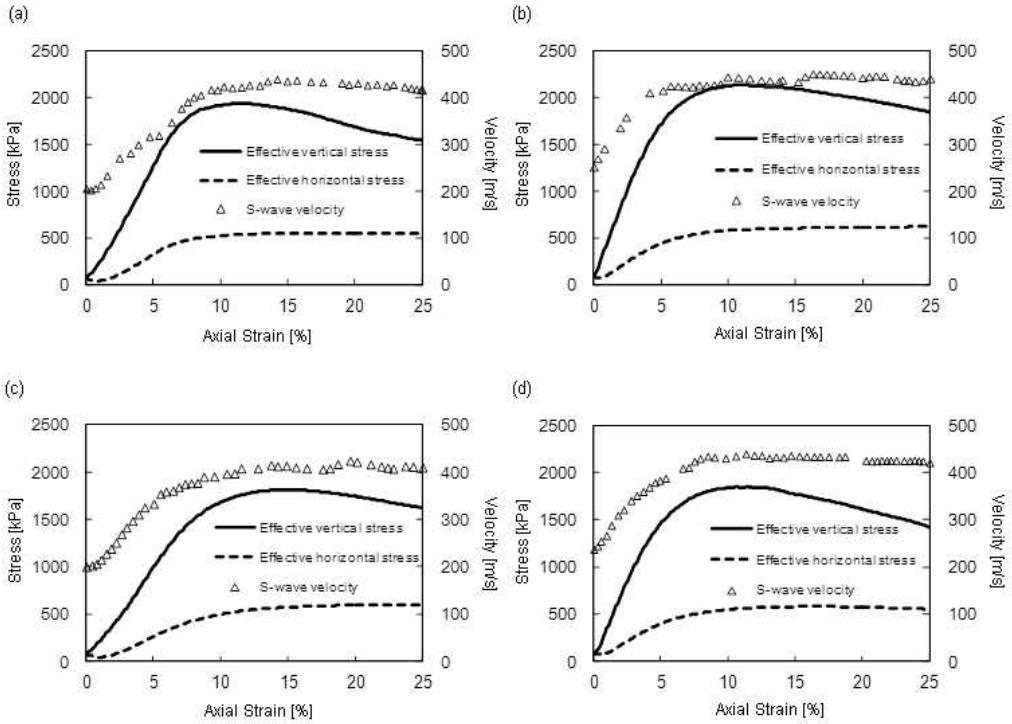



그림 4-12. 전단과정에서 전단파 변화양상: (a) 동결-융해 Dr 79%, (b) 비동결 Dr 80%, (c)동결-융해 Dr 61%, (d) 비동결 Dr 60%

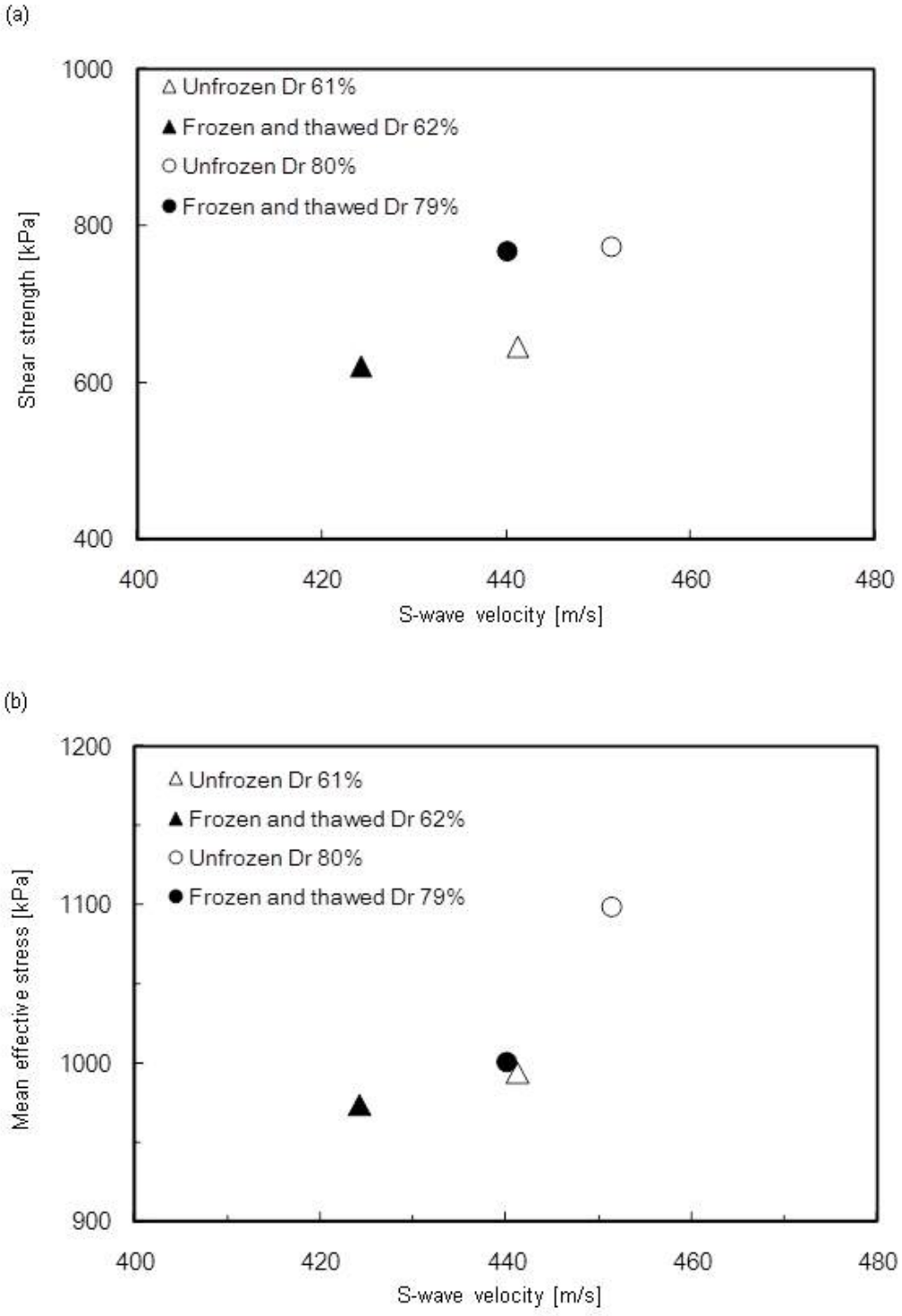



그림 4-13. 동결-융해 과정이 전단파 속도에 미치는 영향: (a) 전단강도와 전단파 속도, (b) 평균유효응력과 전단파 속도

나. 인공동결공법을 이용한 동결시료

(1) 대상지역 위치

대상지역은 그림에 나타낸 바와 같이 경상남도 진주시 상평동 (도시계획 도로 중로 1-12호) ~ 진주시 문산읍(혁신도시, 대로 3-20호선)에 위치하고 있으며, 현장내 동결샘플링 대상후보지는 교량 주탑부 주변과 접속교 Pier-1 주변 지반이다.



그림 4-14. 현장 내 동결샘플링 시스템 적용지역

(2) 동결 전·후 지반 비파괴시험

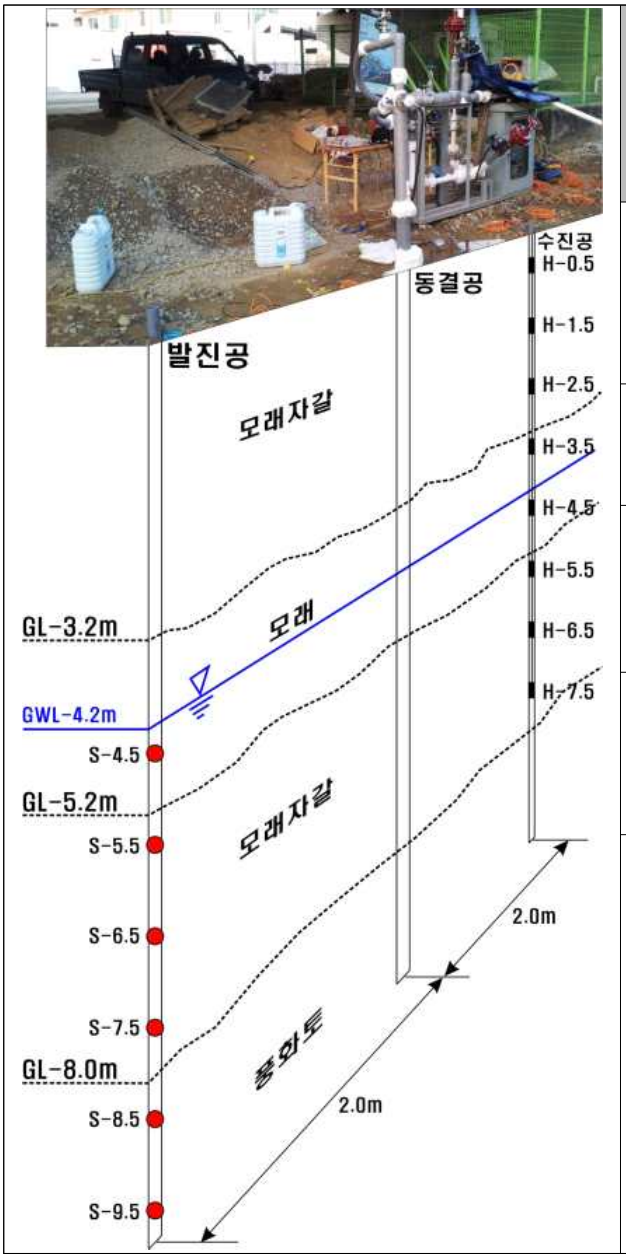
동결 전 · 후 지반의 물성변화, 개략적인 동결범위 파악, 동결샘플의 교란도평가를 위한 기초자료 제공의 목적으로 탄성파토모그래피탐사, 표면파탐사 및 전기비저항탐사를 실시하였다.

(가) 탄성파토모그래피

① 시험조건

현장에서 실시한 탄성파토모그래피탐사는 시추공간의 거리를 4미터로 설정하고 중간 2미터 지점에 인공동결장치를 설치하여 약9미터에 달하는 기둥형태로 동결을 실시하였다. 발진공에서의 타격은 각 1m마다 실시하였으며, 수진공의 하이드로폰 설치간격도 1미터로 설정하였다. 현장 조사 당시 지하수위는 GL-4.2m에 위치하고 있었으며, 수진공 및 발진공 데이터수를 높이기 위해 공내에 물을 채워 측정을 시도하였다. 수진공은

지표까지 물이 채워져 총 8개의 하이드로폰으로 수진을 하였으며, 발진공은 물을 채워도 지표까지 채워지지 않고 지속적으로 물이 빠져나가 측정은 GL-4.5m부터 실시하였다.




| 지층명 | 설명 |
|---|---|
| 모래자갈 | 자갈 30 ~ 40% |
| 모래 | 모래층 |
| 모래자갈 | 자갈 30% 정도 함유 |
| 풍화토 | 기반암의 조직을 유지 |



그림 4-15. 단면 모식 및 지층현황

② 결과

- 탄성파 초동주시 분석 :

현장 인근은 도심의 각종 시설물과 진주혁신도시 진입교량 공사 중장비의 이동 등으로 인해 잡음파에 노출되어 있는 곳으로 탄성파 자료 획득에 다소 불량한 조건을 갖고 있다. 원시파형의 획득 후, 실내분석에서 고주파 및 저주파의 필터링을 통해 가장 이상적인 파형을 도출해 내는 데 중점을 두었다. 원지반에서 분석된 파형과 인공동결 후 분석된 파형을 중첩시켜 초동주시를 분석하였다.

각 발진점에서 전달된 P파의 수진점 도달시간을 분석하여 각각의 발진점-수진점간의 속도를 비교하였다. 지층은 지표에서 GL-3.2m까지 모래자갈층, GL-3.2m ~ GL-5.2m 구간은 모래층, GL-5.2, ~ GL-8.0m 구간은 모래자갈층, GL-8.0m 하부는 풍화토로 구성되어 있다. 지하수위가 GL-4.2m에 형성되어 있어 최초 발진원의 위치는 GL-4.5m부터 시작하였다. 이 구간은 모래층으로 구성된 지층으로 발진한 속도분석결과 동결 전후의 속도는 뚜렷한 차이를 보이고 있으며, 반면 하부의 모래자갈층에서의 도달속도는 동결 전후의 속도가 비슷한 값을 보이고 있다.

표 4-2. 각 수진점에서의 도달시간 분석

| 발진점 | 수진점 (GL-m) | 도달시간(ms) | | 도달거리 (m) | 속도(m/s) | | 속도차 (m/s) | 동결 전후의 속도값 비교 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 동결전 | 동결후 | | 동결전 | 동결후 | | |
| GL-4.5m | 1.5 | 23.045 | 20.617 | 5.00 | 217 | 243 | 26 | |
| | 2.5 | 18.783 | 18.552 | 4.47 | 238 | 241 | 3 | |
| | 3.5 | 16.509 | 16.101 | 4.12 | 250 | 256 | 6 | |
| | 4.5 | 13.603 | 13.326 | 4.00 | 294 | 300 | 6 | 증가 |
| | 5.5 | 10.721 | 10.135 | 4.12 | 385 | 407 | 22 | |
| | 6.5 | 7.777 | 7.160 | 4.47 | 575 | 625 | 50 | |
| | 7.5 | 7.376 | 6.405 | 5.00 | 678 | 781 | 103 | |
| GL-5.5m | 1.5 | 19.353 | 18.474 | 5.66 | 292 | 306 | 14 | |
| | 2.5 | 17.388 | 16.316 | 5.00 | 288 | 306 | 19 | |
| | 3.5 | 14.690 | 13.395 | 4.47 | 304 | 334 | 29 | |
| | 4.5 | 12.293 | 10.929 | 4.12 | 335 | 377 | 42 | 증가 |
| | 5.5 | 8.093 | 8.023 | 4.00 | 494 | 499 | 4 | |
| | 6.5 | 5.619 | 4.879 | 4.12 | 734 | 845 | 111 | |
| | 7.5 | 5.264 | 4.208 | 4.47 | 850 | 1063 | 213 | |
| GL-6.5m | 1.5 | 13.781 | 14.027 | 6.40 | 465 | 456 | -8 | |
| | 2.5 | 12.324 | 12.131 | 5.66 | 459 | 466 | 7 | |
| | 3.5 | 8.887 | 9.272 | 5.00 | 563 | 539 | -23 | |
| | 4.5 | 6.335 | 6.875 | 4.47 | 706 | 650 | -55 | 감소 |
| | 5.5 | 6.382 | 7.083 | 4.12 | 646 | 582 | -64 | |
| | 6.5 | 3.777 | 4.016 | 4.00 | 1059 | 996 | -63 | |
| | 7.5 | 3.445 | 3.445 | 4.12 | 1197 | 1197 | 0 | |
| GL-7.5m | 1.5 | 12.810 | 12.941 | 7.21 | 563 | 557 | -6 | |
| | 2.5 | 11.191 | 11.137 | 6.40 | 572 | 575 | 3 | |
| | 3.5 | 8.416 | 8.270 | 5.66 | 672 | 684 | 12 | |
| | 4.5 | 6.220 | 5.865 | 5.00 | 804 | 853 | 49 | 감소 우세 |
| | 5.5 | 4.894 | 5.834 | 4.47 | 914 | 767 | -147 | |
| | 6.5 | 2.489 | 2.721 | 4.12 | 1657 | 1515 | -141 | |
| | 7.5 | 1.919 | 1.919 | 4.00 | 2084 | 2084 | 0 | |
| GL-8.5m | 1.5 | 12.971 | 13.280 | 8.06 | 622 | 607 | -14 | |
| | 2.5 | 11.137 | 11.106 | 7.21 | 647 | 649 | 2 | |
| | 3.5 | 8.416 | 8.332 | 6.40 | 761 | 768 | 8 | |
| | 4.5 | 6.235 | 6.027 | 5.66 | 907 | 939 | 31 | 증가 우세 |
| | 5.5 | 4.694 | 3.622 | 5.00 | 1065 | 1380 | 315 | |
| | 6.5 | 2.343 | 2.605 | 4.47 | 1909 | 1717 | -192 | |
| | 7.5 | 2.844 | 2.543 | 4.12 | 1450 | 1621 | 172 | |
| GL-9.5m | 1.5 | 13.146 | 13.511 | 8.94 | 680 | 662 | -18 | |
| | 2.5 | 11.368 | 11.530 | 8.06 | 709 | 699 | -10 | |
| | 3.5 | 8.771 | 8.771 | 7.21 | 822 | 822 | 0 | |
| | 4.5 | 6.451 | 6.351 | 6.40 | 993 | 1008 | 16 | 증가 우세 |
| | 5.5 | 4.705 | 4.046 | 5.66 | 1202 | 1398 | 196 | |
| | 6.5 | 2.717 | 2.983 | 5.00 | 1840 | 1676 | -164 | |
| | 7.5 | 2.913 | 2.809 | 4.47 | 1535 | 1592 | 57 | |

- 초동주시 속도값 분석 결과 :

도심지 공장부지의 여러 시설물과 건설 중장비의 진동 등으로 인해 시험구간은 각종 잡음파에 노출되어 있는 지역으로 탄성파토모그래피 시험으로는 다소 불량한 조

건을 갖고 있다. 또한 인공 동결 시험의 규모가 작기 때문에 발진공과 수진공의 거리를 보다 가까운 거리로 설정할 수밖에 없는 관계로 초동주시의 정확한 분석에는 다소 어려운 조건을 갖고 있다. 잡음파의 상쇄를 위해 고주파수대역과 저주파수대역의 필터링 작업을 수행하여 인공 동결 전후의 속도값을 비교 분석하였다.

동결 전후 초동의 도달시간을 분석한 결과, 심도별로 동결 전후의 속도 변화가 발생되었다. 발진원 GL-4.5m와 GL-5.5m에서 발진된 P파는 동결 후 더 빠른 속도값(3~213m/s)을 보이고 있으며, 이 구간은 모래층 구간에 해당된다. 그리고 모래자갈층에 해당하는 GL-6.5m와 GL-7.5m에서 발진된 P파는 동결 후에 오히려 감소된 속도값(-147~49m/s)을 보이고 있다. 최하부 풍화토층인 GL-8.5m와 GL-9.5m에서 발진된 P파는 동결 후 증가가 우세한 속도값(-192~315m/s)이 분석되었다.

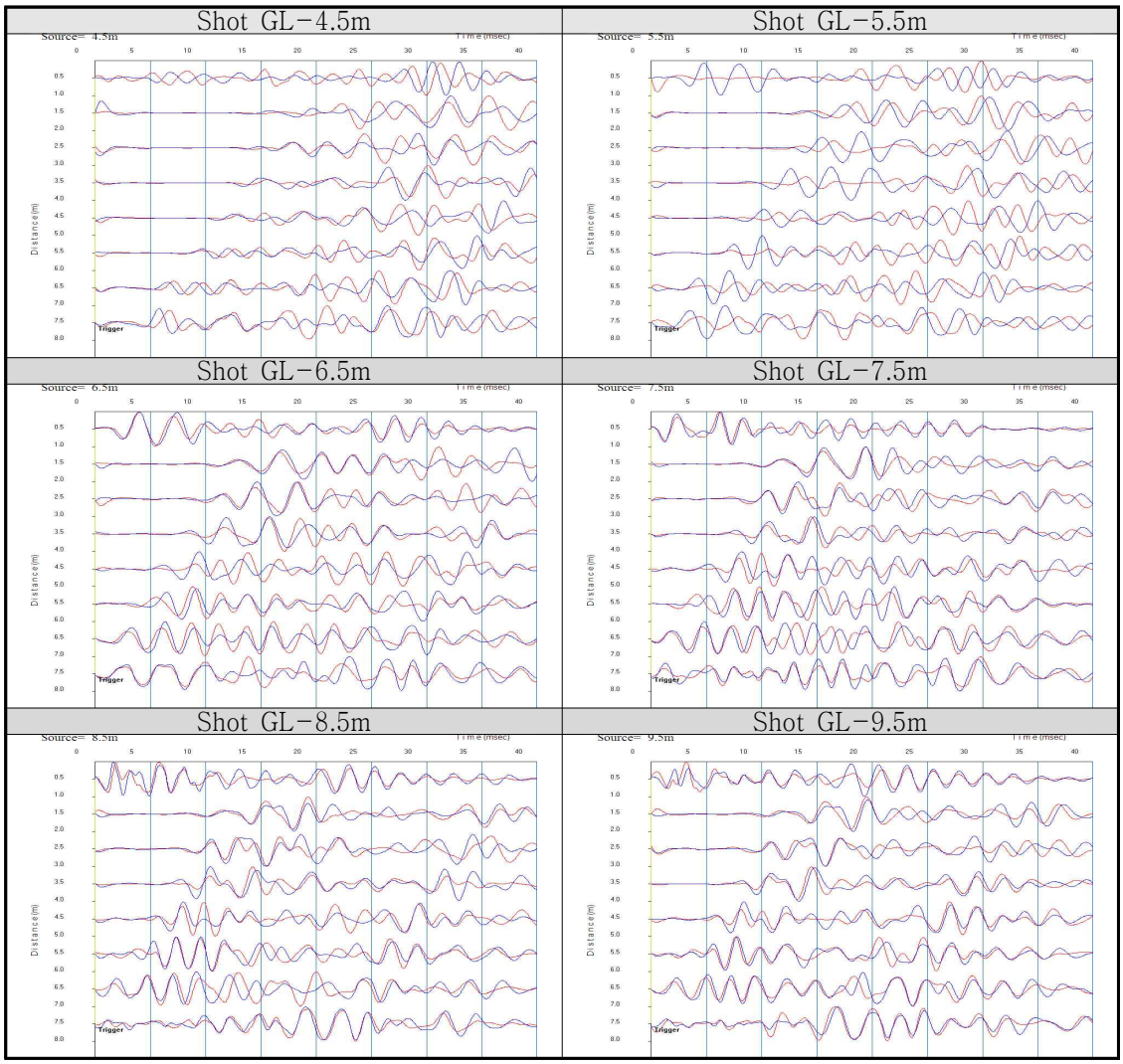



그림 4-15. 동결 전후의 초동주시 분석(적색 : 동결 전, 청색 : 동결 후)

– 속도단면도 분석 결과 :

초동주시 분석자료를 이용하여 GeoTomCG 소프트웨어를 사용하여 2차원 속도단면도 분석을 실시하였다. 발진점 상부(GL-4.5m 상부)와 수진점 하부(GL-8.5m 하부)의 탐사자료를 획득하지 못하여 해석 결과 단면은 다소 왜곡된 형태의 속도 분포를 보이고 있다. 300m/sec의 속도선은 동결 후에 상향 이동된 양상을 보이고 있으며, 하부구간으로는 뚜렷한 속도변화가 확인되지 않는다. 도심지 공장부지의 여러 시설물과 건설 중장비의 진동 등으로 인해 시험구간은 각종 잡음파에 노출되어 있는 지역으로 탄성파토모그래피 시험으로는 다소 불량한 조건을 갖고 있다. 인공 동결 시험의 규모가 작기 때문에 발진공과 수진공의 거리를 보다 가까운 거리로 설정할 수밖에 없는 관계로 초동주시의 정확한 분석에도 다소 어려운 조건을 갖고 있다. 따라서 이상적인 결과를 획득하기 위해서는 지층상태가 균질한 곳이어야 하며, 주변 잡음파가 발생되지 않는 현장여건, 그리고 동결범위를 보다 확장시켜 발진점과 수진점과의 거리를 보다 이격시켜야 하며, 굴착 깊이도 금번 조사의 두 배 이상이어야 보다 양호한 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

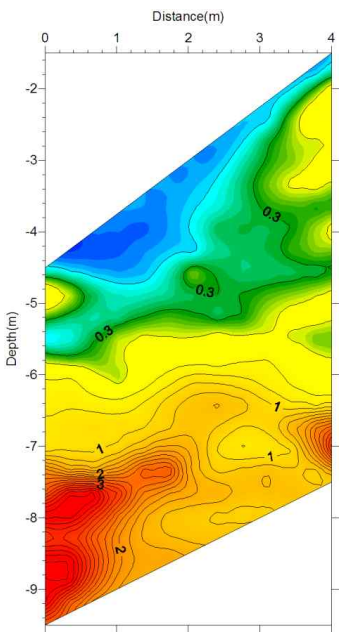
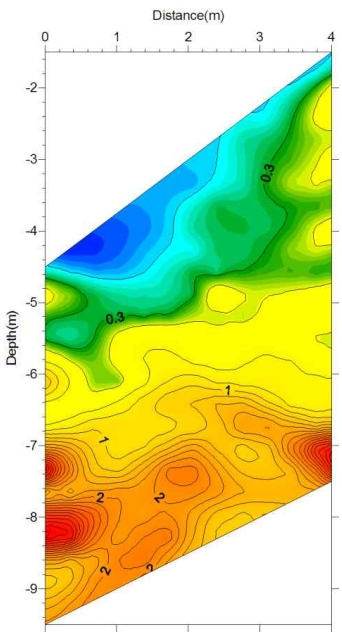
| 인공 동결 전 | 인공 동결 후 | 비고 |
|---|---|---|
|  |  | * 속도 단위 : km/sec<br>* 발진점 : GL-4.5m ~ GL-9.5m 1m 간격<br>* 수진점 : GL-1.5m ~ GL-7.5m 1m 간격<br>* 동결 후 상부구간의 속도는 상승한 양상을 보이고 있으며, 하부구간은 큰 변화는 나타나지 않음. |



그림 4-16. 인공 동결 전후의 속도단면도 비교

(나) 표면파탐사 (MASW탐사)

① 시험조건

지오폰 설치개수 및 간격은 각각 24ch, 1.0m로서, 총 측선연장은 23.0m이다. 그림 2-37에는 조사지역의 측선배치 전경을 나타내고 있다. 동결관 좌측과 우측에는 각각 5번 센서, 6번 센서가 설치되어 있다.



그림 4-17. 조사지역의 측선배치 전경

② 시험결과

교량 시점부 제내지 Pier-1에서의 보링조사지점에 동결관을 설치하고 약 2.5일간 동결시킨 후 조사한 결과, 지하수위 4.5m 위의 S파 속도변화에 있어서 큰 변화는 나타나지 않았다. 그러나 4.5~8m 부근의 S파 속도는 약 360m/s를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 동결관 주변의 동결지반만이 아니라 수평방향으로 넓은 범위에 지반의 S파 속도가 높게 나타났는데, 이는 표면파탐사에 있어서 시점부 하부 분산곡선의 단절에 기인한 것으로 판단된다.

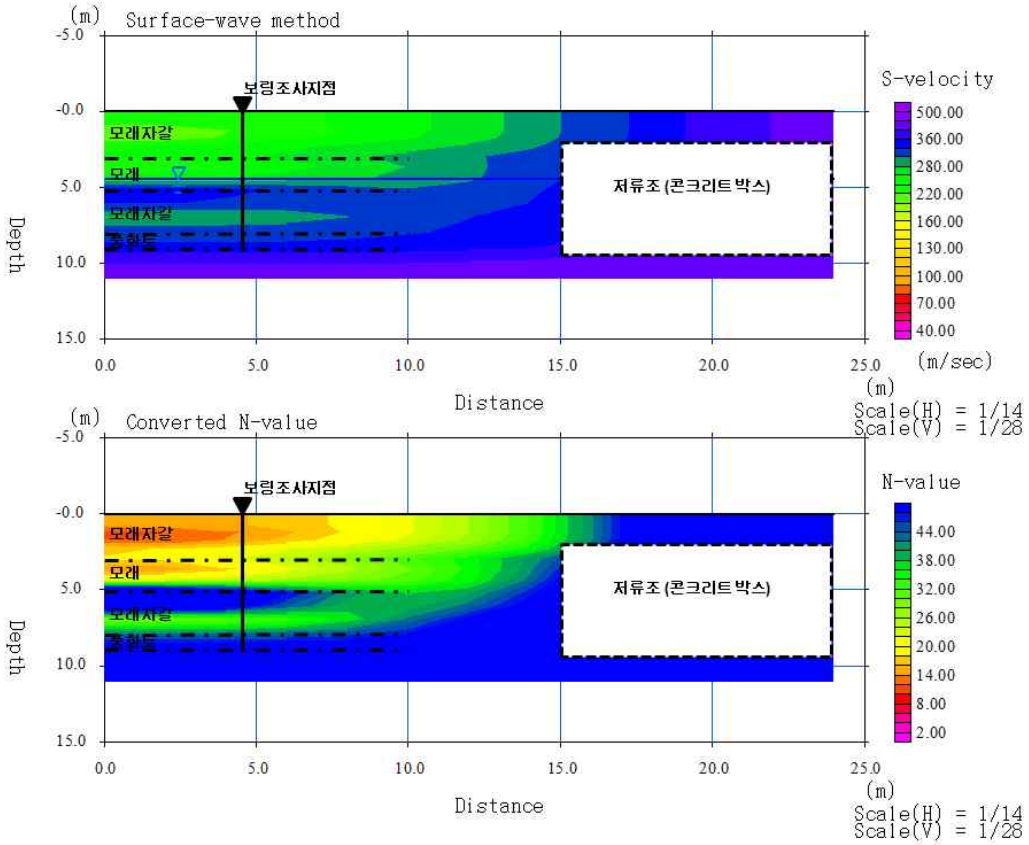



그림 4-18. 동결시작 2.5일 후 MASW 표면파탐사 결과

2차원 지반 S파 속도구조콘타는 위치하는 곳의 분산곡선값이 존재하지 않는 경우 주변의 값으로부터 추정하여 콘타를 완성하기 때문에, 동결전·후의 S파 속도변화의 비교를 위해서는 동결관에 가장 까가운 위치에서의 분산곡선을 비교하는 것이 합리적이라고 사료된다. 동결관은 4.5m 위치에 설치되어 있으므로, 이와 가장 가까운 4m지점에서 얻어진 S파 속도로부터 동결 전·후를 비교해 보면, 지하수위 이하 모래층에서의 S파 속도증가가 뚜렷하게 나타났고, 지하수위 상부층도 약 30~50cm/sec정도의 속도증가가 나타났음을 알 수 있다. 동결관에서 수평으로 50cm 떨어진 위치인 4m지점은 동결면 최고 외곽부로 예상되고, 확실하게 동결되어 있는 위치인 경우는 연암수준의 S파 속도가 기대된다.

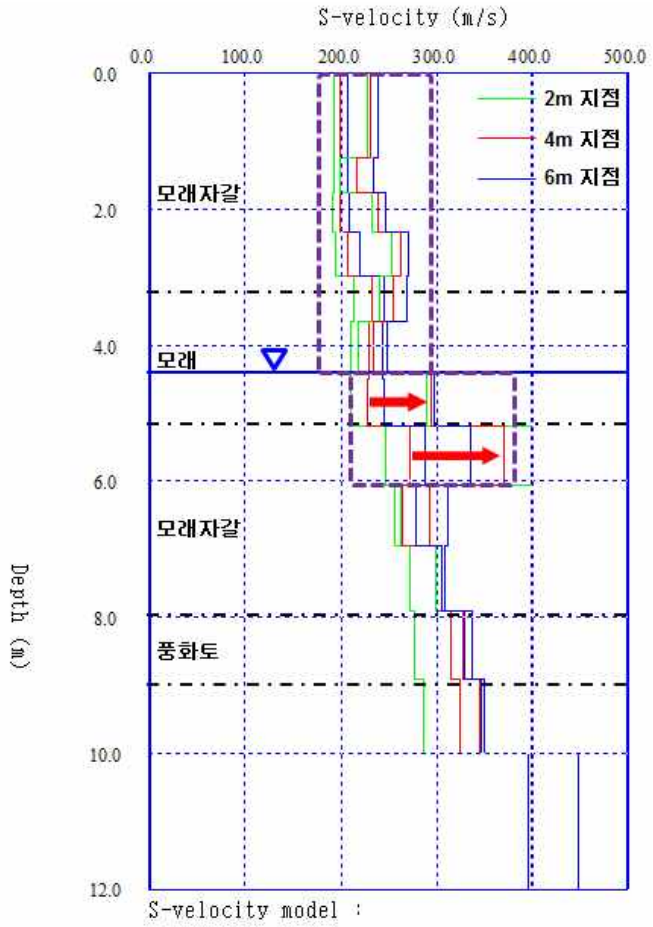



그림 4-19. 동결관 매설지점에서의 동결전·후 S파 속도구조 심도분포 비교

(3) 비교란 동결시료의 실내실험 평가

대상현장에서 동결상태로 채취된 비교란 동결시료를 냉동차를 이용하여 실험실까지 운반하였다. 실험실에서는 융해로 인한 응력상태의 변화와 국부적인 융해를 방지하고자 -50℃의 온도를 유지하는 냉동고에 보관하였다. 본 연구에서는 인공동결공법으로 채취된 동결시료의 전단강도를 측정하기 위해 비배수 삼축압축실험을 실시하였으며, 모든 실험과정에서 탄성파를 측정하여 동결시료의 미소변위특성을 관찰하였다. 본 실험에서는 비교란 동결시료의 비배수 삼축압축실험 후, 동일한 상대밀도의 재성형 비동결시료를 조성하여 동일한 조건으로 실험을 실시하였다. 또한 인공동결공법이 아닌 실험실의 냉동고를 이용하여 재성형 동결시료를 조성하여 실험하였다. 진주에서 채취한 시료의 비중은 2.67이며, 최대, 최소 간극비는 각각 1.27, 0.88로 나타났다. 비배수 삼축압축실험의 경우 목표하는 시료의 높이 및 직경에 맞게 시료를 트리밍 해야 하는

데 일반적인 비동결 비교란 시료와는 다르게 동결시료의 경우 매우 높은 강도를 보이게 된다. 따라서 일반적으로 사용하는 실톱과 같은 일반적인 장비로는 시편제작이 불가능하다. 본 연구에서는 동결시료의 트리밍을 위해 그라인더와 핸드드릴을 이용하여 시편제작 및 성형을 실시하였다. 또한 시편제작을 할 때 시료와 외부 온도와의 큰 차이로 인한 시료의 융해를 방지해야 한다. 따라서 영하 20℃를 유지할 수 있는 동결 챔버에서 트리밍을 실시하였다. 냉동고에 보관 중인 동결시료를 동결 챔버로 이동하여 시료의 완전한 동결을 유지한 채 트리밍을 실시하였다. 실험 후 건조무게로 측정한 시료의 상대밀도는 47%로 나타났으며, 재성형 비동결시료와 재성형 동결시료 역시 동일한 상대밀도로 시료를 조성하여 실험하였다.

삼축압축실험 과정에서 온도, 압축파 및 전단파를 측정하기 위해 제작된 페데스탈은 아크릴 재질로 시료의 직경과 같은 5cm의 크기로 제작하였으며 온도와 탄성파를 측정할 수 있는 트랜스듀서를 설치하였다. 하부 페데스탈에는 온도를 측정할 수 있는 열전대를 설치하였다. 상·하부 페데스탈에는 각각 압축파를 측정할 수 있는 피에조 디스크 엘리먼트와 전단파를 측정할 수 있는 벤더 엘리먼트를 설치하였다. 전단파 트랜스듀서로 사용된 벤더 엘리먼트는 흙과 트랜스듀서와의 결합효과가 뛰어나다고 알려져 있다(Lee and Lee, 2006). 상·하부 페데스탈 중앙부에 다공석(Porous stone)을 설치하여 삼축압축실험 중 시료내부에 유입되는 물이 시료 입자구조에 직접적으로 미치는 영향을 최소화하였다.

온도와 탄성파를 측정하기 위해 페데스탈에 설치된 트랜스 듀서의 측정시스템은 그림과 같다. 하부 페데스탈에 부착된 열전대는 데이터로거(Data Logger, Agilent 34970A)에 연결하여 1분 간격으로 온도를 측정하였다. 압축파와 전단파의 측정을 위하여 신호발생기(Function Generator, Agilent 33220A)에서 발생된 신호가 발신 트랜스듀서로 보내지고 시료를 통과한 신호가 수신 트랜스듀서로 보내진다. 모든 신호의 방향은 상부에서 하부로 진행하도록 설정하였다. 수신된 신호는 필터(Filter-Amplifier, Krohn-Hie 3361)를 통해 잡음을 제거하고 신호를 증폭시킨 후 오실로스코프(Oscilloscope, Agilent 54624A)를 통해 신호를 확인하여 컴퓨터로 저장하였다.

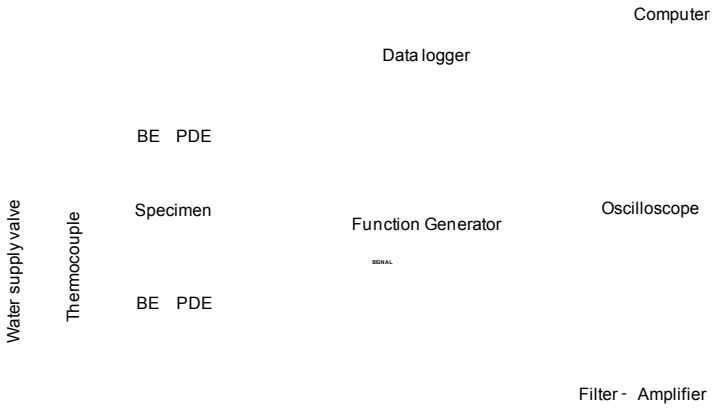



그림 4-20 삼축압축실험 및 탄성파 측정시스템

인공동결공법으로 채취된 동결시료를 멤브레인에 장착한 후 삼축압축실험용 페데스탈에 거치하고 비배수 상태로 상온에서 자연융해시켰다. 동결시료의 융해방법은 자연융해와 강제융해가 있으며, 인공동결공법에 대한 연구가 활발한 일본에서는 자연융해법이 시료의 교란에 미치는 영향이 작은 것으로 알려져 있다. 시료 외부로 연결되는 Cell pressure는 10kPa로 설정하여 동결시료의 융해로 인한 시료의 변형을 최소화하며 자립할 수 있도록 하였다. 동결시료와 Cell에 공급되는 물의 큰 온도차이로 인한 동결시료의 갑작스러운 융해를 방지하고자 1℃이하로 냉각된 증류수를 Cell의 공급수로 이용하였다. 동결시료의 내부까지 완전히 융해되도록 시료의 온도와 실험실의 온도가 평형을 이루는 시점까지 융해를 실시하였다.

동결시료의 융해가 완전히 이루어진 후, 비배수 삼축압축실험과정은 비동결시료와 동일하게 진행하였다. 시료 내부 및 시료와 멤브레인 사이에 존재하는 미세한 공기를 제거하기 위하여 Cell과 Pore의 압력을 10kPa와 0kPa로 유지한 상태로 멤브레인 내부에 물을 순환시키는 Circulation과정을 실시하였다. 물의 흐름은 하부에서 상부로 향하도록 하였으며 상부 페데스탈에 설치된 다공석(porous stone)을 통해 외부로 유출시켰다. Circulation과정이 완료되면 포화과정, 압밀과정, 전단과정의 순서로 실험을 진행하였다. 포화과정에서는 Cell Pressure와 Pore Pressure를 순차적으로 20kPa씩 증가시켜 B-value를 측정하였으며, 측정된 B-value가 0.95이상이 되면 완전히 포화되었

다고 판단하였다(ASTM D4767). 압밀과정에서는 원지반의 응력을 모사하기 위해 80kPa의 하중으로 등방압밀 하였으며, 압밀과정이 완료된 후 0.2%/min의 속도로 축변형률을 가해 전단파괴를 유도하였다. 축변형률이 25%에 도달할 때까지 전단파괴 하였으며, 전단이 완료된 후 회수한 시료의 건조무게를 측정하여 상대밀도를 재확인하였다.

비배수 삼축압축실험과정에서 탄성파를 포화, 압밀, 전단과정에서 연속적으로 측정하였으며, 측정된 신호는 다음과 같은 식을 이용하여 초기도달시간을 구할 수 있다.

$$V = \frac{L}{\Delta t}$$

여기서, L은 피에조 디스크 엘리먼트 및 벤더 엘리먼트 끝단의 거리를 의미하며 ⊿t는 압축파와 전단파의 초기도달시간을 의미한다. 탄성파를 측정할 수 있는 트랜스듀서는 상·하부 페데스탈에 설치되어 있으므로, 실험 과정 중 발생하는 축변형률이 탄성파 속도에 영향을 미치게 된다. 따라서 탄성파 측정이 이루어진 시점에서 축변형률을 고려한 트랜스듀서 간의 거리(L)를 적용하여 탄성파 속도를 산정하였다.

표 4-3. 비배수 삼축압축실험 결과

| 구분 | Strain at failure [%] | Shear strength at failure [kPa] | Friction angle at failure [o] | Effective major principle stress [kPa] | Effective mminor principle stress [kPa] |
|---|---|---|---|---|---|
| 비교란 동결 | 18.9 | 220.5 | 28.16 | 632.3 | 191.3 |
| 재성형 비동결 | 19.2 | 195.92 | 27.52 | 571.95 | 180.11 |
| 재성형 동결 | 19.9 | 179.48 | 27.31 | 527.11 | 168.16 |

표와 같이, 진주현장에서 인공동결공법으로 채취된 비교란 동결시료의 비배수 삼축압축 실험결과, 재성형 비동결시료는 비교란 동결시료에 비해 전단강도와 내부 마찰각의 크기가 감소하는 것을 알 수 있다. 전단강도의 경우 약 10%의 감소량을 나타냈으며, 내부마찰각 역시 상대적으로 작은 수치지만 감소하는 경향을 나타내었다. 재성형시료를 냉동고를 이용하여 동결시킨 후 심험한 결과는 재성형 비동결시료에 바해 소폭 감소하는 경향을 나타냈다. 그러나 재성형 시료끼리의 차이는 비교란 동결시료와의 차이보다는 작게 나타남을 알 수 있다. 따라서 인공동결공법에 의한 시료의 동결에 비해 냉동고를 이용한 재성형 동결시료에서 강도의 감소 특성이 크게 나타난다고 판단하였다. 이는

인공동결공법의 중요한 부분인 동결속도(동결임계속도) 문제와 연관성이 있다. 동결로 인한 간극수의 흐름 및 상변화로 인한 부피팽창 등 시료의 교란에 미칠 수 있는 가능성이 급속한 지반의 동결을 유도하는 인공동결공법에 비해 냉동고를 이용한 방법이 크다고 판단된다.

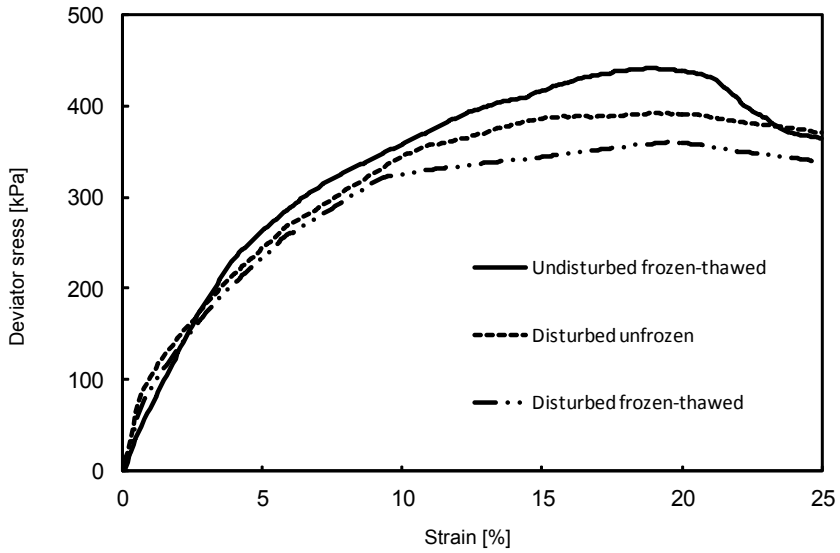



그림 4-21. 축변형율에 따른 축차응력

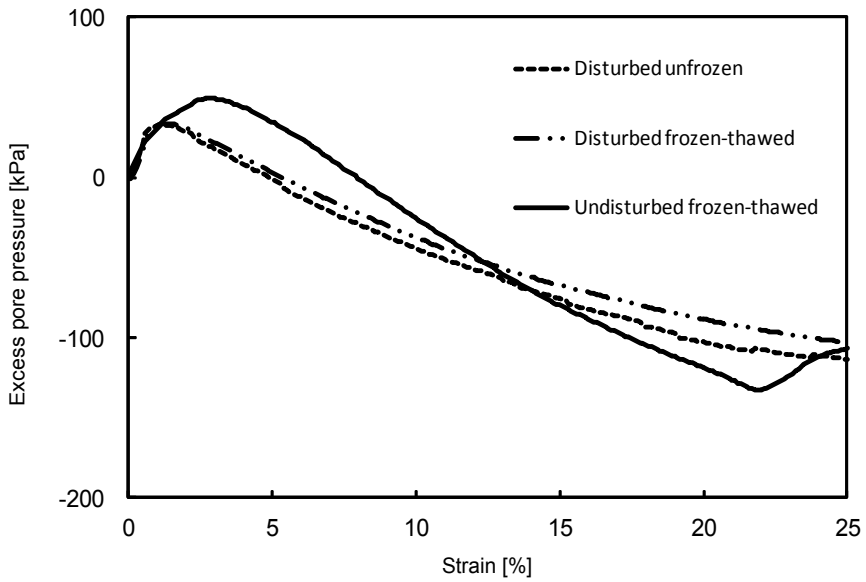



그림 4-22. 축변형률에 따른 과잉간극수압

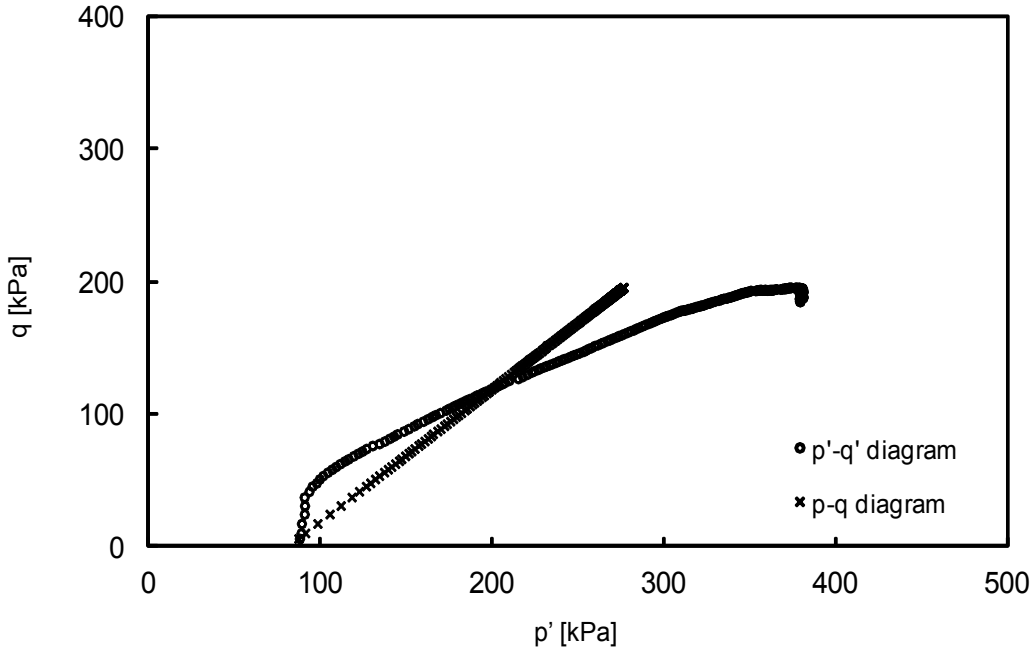



그림 4-23. p-q 다이아그램 (비교란 동결시료)

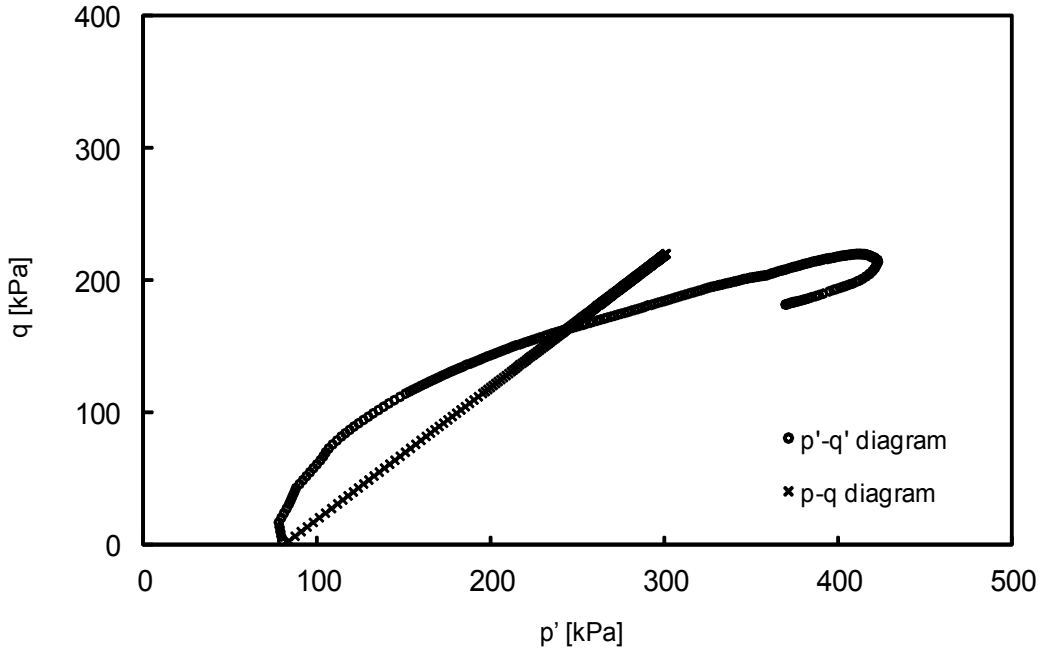



그림 4-24. p-q 다이아그램 (재성형 비동결시료)

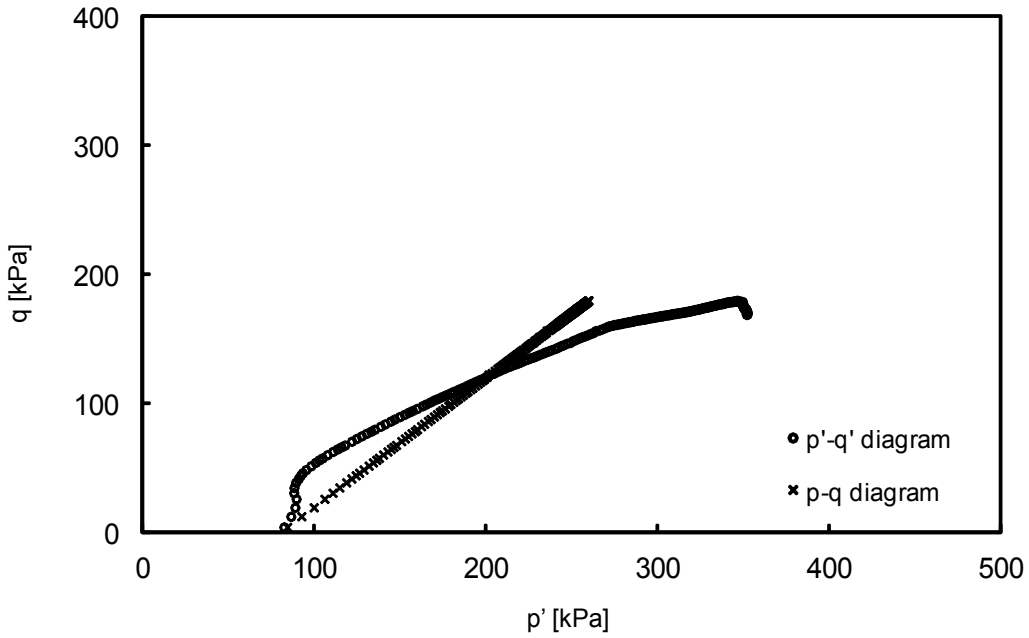



그림 4-25. p-q 다이아그램 (재성형 동결시료)

비배수 전단실험 중 연속적으로 압축파와 전단파를 측정하여 속도를 산정하였다. 압축파 속도는 함수비의 영향을 많이 받기 때문에(Ishihara et al., 1998) 포화도를 나타낼 수 있는 지표인 B-value와 큰 연관관계가 있다. 압축파는 시료를 통과하면서 잔류하는 공기방울에 의해 속도가 감소되고 그 값으로 포화의 정도를 산정할 수 있다. 그림에서와 같이 B-value가 증가할수록 압축파 속도는 증가하여 1600m/s 이상의 값을 나타냈으며, 산정된 압축파 속도로 시료는 완전히 포화되었다고 판단하였다. 특히 압축파 속도는 B-value가 0.8이상이 되었을 때 급격히 증가하는 경향을 보였으며, 이는 B-value, 포화도와 압축파 속도의 연관관계에 대해 연구한 선행연구와 유사한 결과를 보여준다(Kim et al., 2006; Tamura et al., 2002). 포화과정에서 전단파 속도는 B-value가 증가할수록 소폭 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 포화도의 증가에 따른 유효응력의 감소로 인한 현상으로 판단되며 모든 시료에서 동일한 현상이 발생하였다.

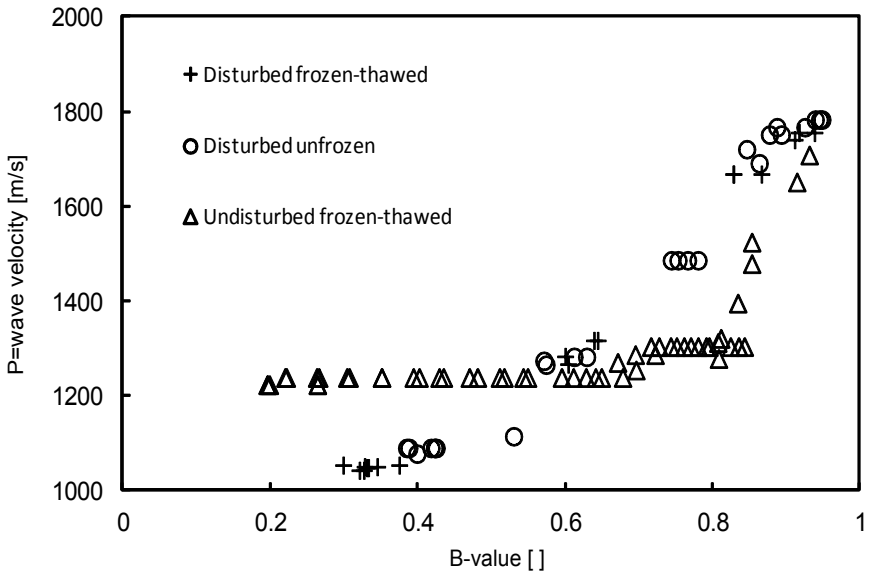



그림 4-26. 포화과정에서 압축파 속도변화

압밀과정에서는 80kPa의 등방압밀을 가하면서 시간에 따른 압축파 속도 변화를 관찰한 결과, 압밀에 따라 간극수압의 변화는 발생하나 포화도의 변화는 발생하지 않아 압밀 전과 압밀 후의 압축파 속도에는 변화가 발생하지 않았다. 전단파 속도는 유효응력에 지배적인 영향을 받기 때문에 구속압의 증가에 따라 시료의 구분 없이 증가하는 경향을 나타냈다.

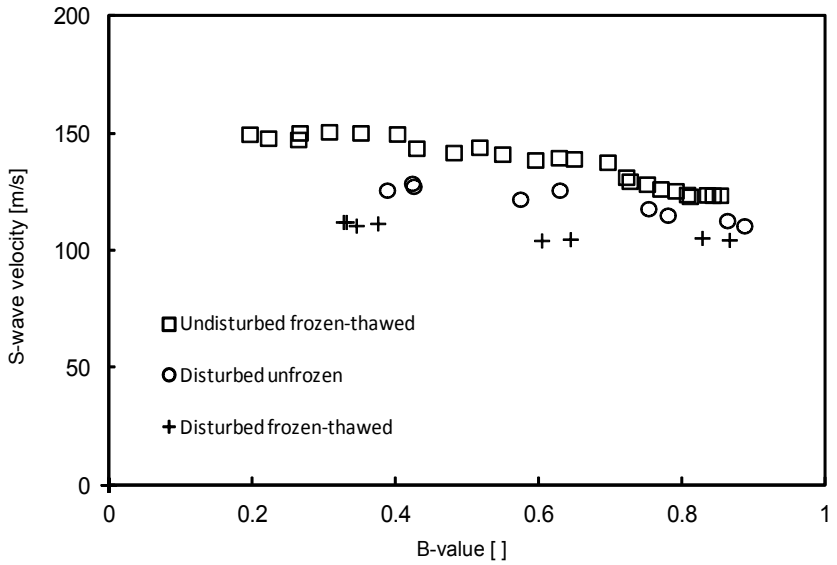



그림 4-27. 포화과정에서 전단파 속도변화

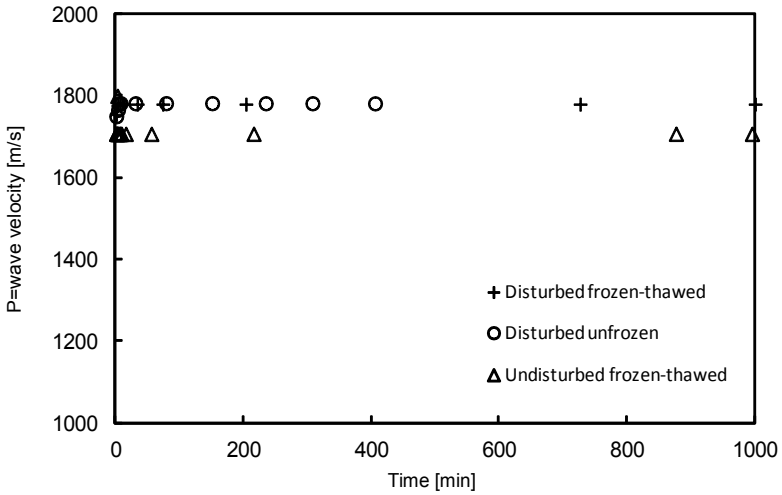



그림 4-28. 압밀과정에서 압축파 속도변화

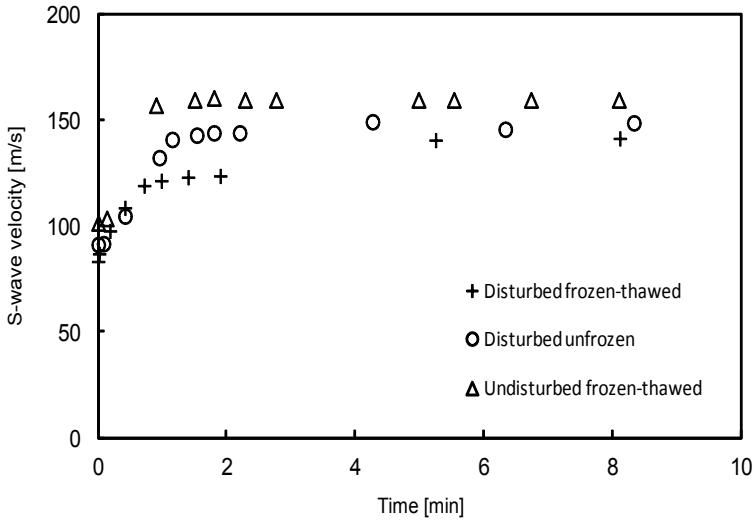



그림 4-29. 압밀과정에서 전단파 속도변화

전단과정에서 연속적으로 측정한 각 시료의 전단파 속도와 유효응력 경향을 그림에 나타내었다. 전단변형률이 발생함에 따라 과잉간극수압이 증가하다 감소하여 부의 값을 나타내고 이후 일정한 값을 유지한다. 이로 인하여 수직유효응력과 수평유효응력은 초기에 모두 증가하나, 최대값을 보인 이후에는 수직유효응력은 소폭 감소하는 경향을 보였지만 수평유효응력은 큰 변화 없이 거의 일정한 크기를 유지하였다. 전단파 속도는 전단 초기에 유효응력이 증가함에 따라 증가하는 모습을 보이다가, 유효응력이 최대값을 보인 이후에는 거의 일정한 값을 유지하였다.

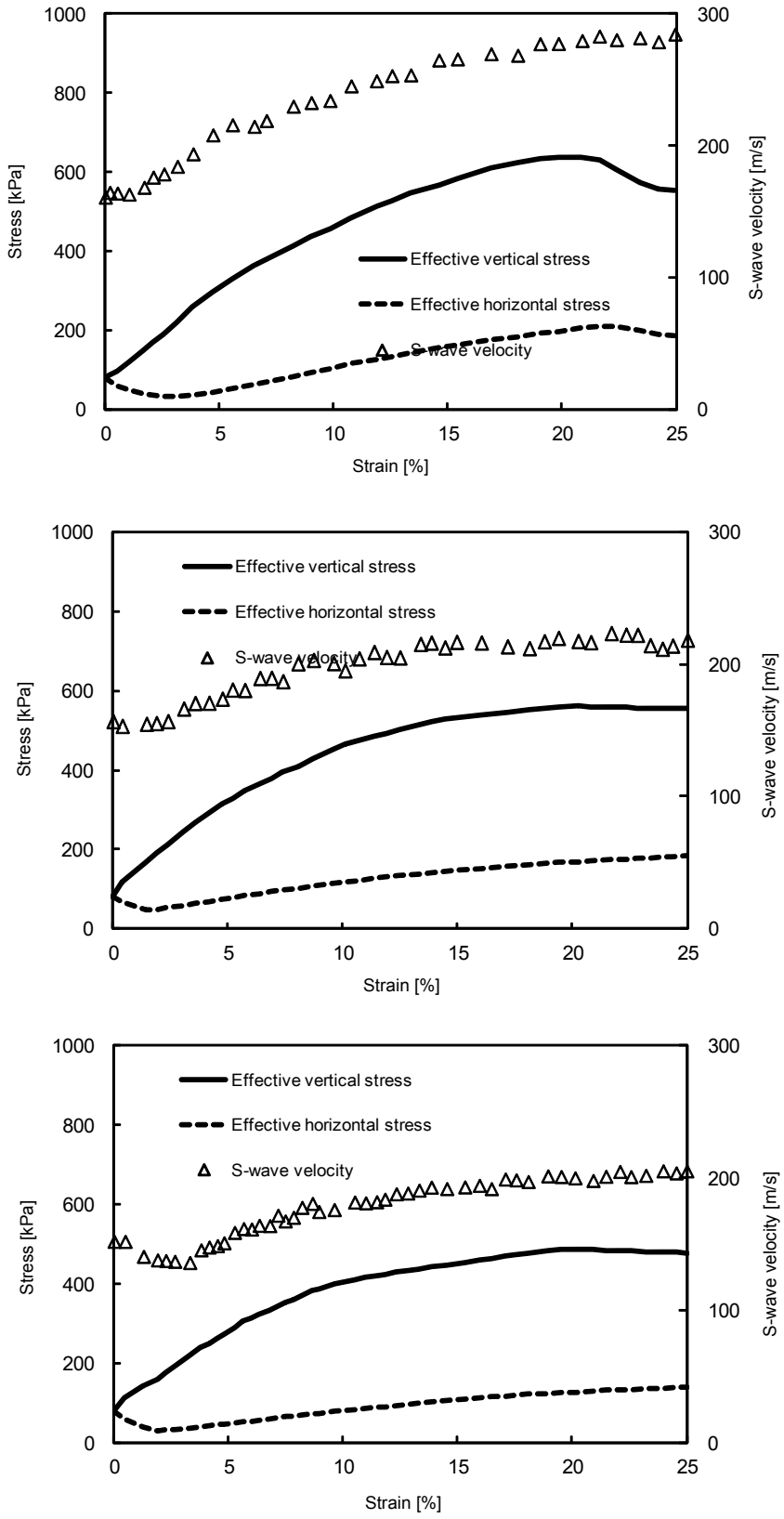



그림 4-30. 전단과정에서 전단파 속도변화

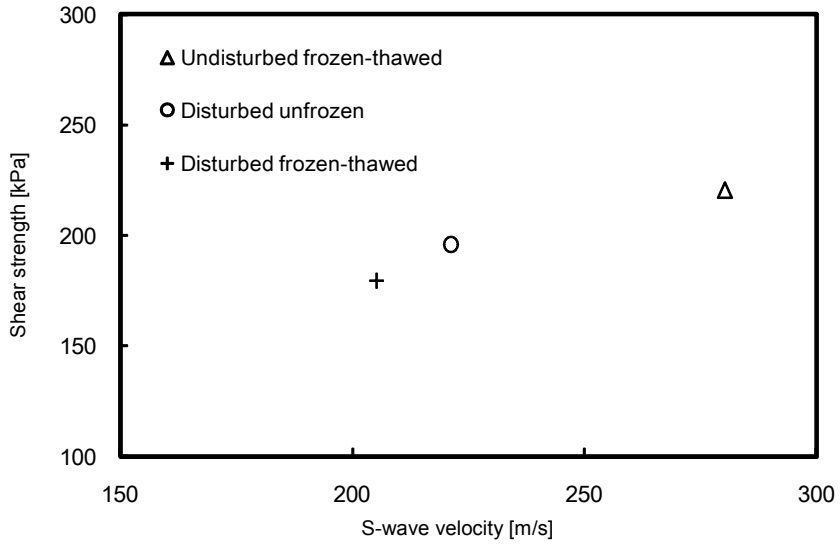



그림 4-31. 전단강도와 전단파 속도

전단과정에서 연속적으로 측정한 각 시료의 전단파 속도의 최대값과 전단강도를 나타내었다. 벤더엘리먼트를 통해 산정한 전단파 속도는 유효응력의 크기에 영향을 받으며 다음과 같은 식으로 유효응력의 함수로 표현할 수 있다(Roesler, 1979).

$$V_s = \alpha\left(\frac{\sigma_0'}{P_a}\right) = \alpha\left(\frac{\sigma_w' + \sigma_m'}{2P_a}\right)^{\beta}$$

전단파 속도는 유효응력의 지배적인 영향을 받는 함수이므로 축차응력을 많이 받아 전단강도가 크게 산정된 시료일수록 빠른 전단파 속도를 보였다. 비교란 시료를 채취한 지역에서 표면파 탐사를 통해 해당심도의 전단파 속도를 산정한 결과 약 300m/s의 속도로 나타났다. 하지만 실내실험 압밀완료 시점에서의 전단파 속도는 150m/s의 값으로 현장에서 측정한 값보다 작게 측정되었다. 원지반 응력상태를 모사할 경우 교란이 전혀 발생하지 않았을 경우 미소변형을 측정하는 탄성파의 속도도 변화가 없어야 한다. 하지만 현장지반에서 표면파를 측정할 경우 해당심도를 측정하기 위해 탄성파가 통과하는 구간의 매질이 균질하지 않는다면 정확한 지반의 탄성파 속도가 산정될 수 없다고 판단된다. 예를 들어, 현장에서 탄성파가 상대적으로 통과속도가 빠른 자갈과 같은 층을 통과하게 된다면, 측정된 속도는 원하는 지반의 속도보다 빠르게 산정될 수 있다.

본 실험에서는 인공동결공법으로 채취된 비교란 동결시료를 이용하여 비배수 삼축압축실험을 실시하였다. 삼축압축실험에 적합한 크기(직경 5cm, 높이 10cm)의 시료로 제작하기 위하여 -20℃ 이하를 유지하는 동결용 챔버에서 트리밍을 실시하였다. 트리밍이 완료된 시료는 삼축압축실험용 페데스탈에 거치한 후 자연융해법으로 융해시켰다.

융해는 시료의 온도와 실험실의 온도가 평형을 이루는 시점까지 실시하였으며, 약 5시간이 소요되었다. 융해 이후의 실험과정은 일반적인 삼축압축실험 과정과 동일하게 포화, 압밀, 전단과정의 순서로 실시하였다. 포화과정은 시료가 나타내는 B-value 값이 0.95이상이 될 때까지 실시하였으며, 포화과정을 실시하기 이전에 시료내부에 충분히 많은 양의 물을 흘려보내 실험 과정에서 시료내부에 존재할 가능성이 있는 공기방울을 제거하였다. 압밀과정에서는 원지반 응력을 모사하기 위해 80kPa의 하중으로 등방 압밀을 실시하였으며, 동일한 압력으로 24시간 이상 유지시켰다. 전단과정에서는 변형률 제어법으로 0.2%/min의 속도로 전단변형률을 증가시켜 전단파괴를 유도하였으며, 배수상태는 비배수 조건으로 실험을 진행하였다. 실험이 완료되면 실험에 사용한 시료의 건조무게를 측정하여 상대밀도를 산정하였다. 동일한 방법으로 재성형 시료를 조성하여 실험을 반복하였으며, 재성형 동결시료를 제작하여 실험을 수행하였다. 또한, 각 실험과정에서 압축파와 전단파를 연속적으로 측정하여 속도를 산정하였으며, 그 결과를 비교하였다.

실험결과, 전단강도와 내부마찰각, 유효응력 등은 비교란 동결시료에서 가장 큰 값을 나타냈다. 재성형 비동결시료와 재성형 동결시료에서도 차이가 발생하였지만, 상대적으로 비교란시료와 재성형 시료에서 큰 차이가 발생하였다. 압축파 속도는 포화도에 가장 영향을 많이 받는 함수인 만큼, 포화과정에서 B-value가 증가함에 따라 증가하여 완전히 포화된 시료에서의 속도를 나타내었고, 이후의 압밀과정과 전단과정에서는 큰 변화를 보이지 않았다. 전단파 속도는 포화과정에서 B-value가 증가하면서 유효응력이 감소함에 따라 소폭 감소하는 경향을 보였으며, 압밀과정에서는 모든 실험에서 동일한 크기의 하중을 가했으므로 증가하는 속도 경향은 유사하게 나타났다. 전단파 속도는 유효응력에 지배적인 지배를 받는 함수이기 때문에 전단과정에서 발생한 유효응력의 경향에 따라 속도가 변하였으며. 그 크기 역시 유효응력의 크기와 비례하였다.

## 2. 탄성파를 이용한 모래-실트 혼합토의 동결-융해 특성

지반의 온도는 대기 온도에 큰 영향을 받으며, 일정 깊이의 동결 심도에 이르는 지반은 대기의 온도가 영하와 영상을 오가는 겨울철에 동결 및 융해작용을 반복한다. 이러한 지반의 동결-융해작용은 지반의 많은 특성에 영향을 미치며, 특히 기온이 올라가는

해빙기에는 지반의 강도저하 및 융해침하로 인하여 도로, 철도, 지중 매설관, 사면 등 지중 기반시설에 피해가 발생한다. 국내의 경우 특히 수도권의 겨울철 이상저온 발생빈도가 높으므로(Heo, 2006), 이러한 지반의 동결-융해작용에 대한 연구가 요구된다.

동결-융해작용이 지반에 미치는 영향을 분석하기 위하여 다양한 연구가 수행되었다. 흙의 동결-융해작용은 흙의 입자구조를 느슨하게 하고, 결합력을 감소시키며 강성의 저하를 일으킨다(Graham & Au, 1985; Qi et al., 2008). Yoon et al.(2003)은 화강풍화토의 동결-융해 전후의 시료에 대하여 반복삼축시험을 수행하였으며, 전단탄성계수가 감소한다는 결과를 보고하였다. Kim et al.(2004)은 화강풍화토에 대하여 200회 이상의 동결-융해작용을 반복하여 입도분포의 변화와 비중변화 등 풍화도에 대하여 연구하였으며, 풍화토 입자의 세립화와 비중의 감소가 발생한다고 보고하였다.

탄성파는 흙의 미소변위에서의 거동을 비파괴적으로 판단할 수 있는 방법으로서, 많은 연구자들에 의하여 지반의 특성 규명을 위하여 사용되었다 (Lee & Lee, 2006; Yoon et al., 2009). 흙의 동결특성 역시 탄성파를 이용하여 규명하고자 하는 노력이 지속되어 왔다. 액침법을 이용한 동결토의 탄성파 특성에 대한 연구가 수행되었으나 (Wang et al., 2006; Christ & Park, 2009), 이는 동결 과정에서의 탄성파 특성을 모니터링 할 수 없다는 한계점이 있었다. Park et al.(2012)은 벤더엘리먼트를 이용하여 흙의 동결과정에 따른 전단파 특성을 연구하였다. 하지만 동결-융해 과정에서의 탄성파 특성에 대한 연구는 수행되지 않았다. 동결-융해 과정에 대한 탄성파 또는 전기비저항을 이용한 연구(Kang et al., 2013; Seo et al., 2013)가 최근 활발히 진행되고 있으나, 실트함량에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구는 모래-실트 혼합토가 동결-융해과정을 거치는 과정에서의 전단파 및 탄성파의 특성을 파악하고, 이를 통하여 흙의 미소변위 거동 특성을 파악하기 위하여 수행되었다. 본 논문은 실험을 위하여 조성된 시료의 특성으로부터 시작하여 본 실험을 수행하기 위하여 제작된 셀의 특징, 탄성파 측정 시스템에 대하여 기술하였으며, 마지막으로 시료의 동결 및 융해과정에서의 온도변화에 따른 탄성파 특성에 대하여 분석하였다.

본 연구를 위하여, 다양한 실트비율을 가진 모래-실트 혼합재가 시료로 사용되었다. 시료 조성에 사용된 모래는 주문진 표준사를 사용하였다. 입자 크기의 영향을 최소화하기 위하여 30번체와 50번체 사이의 입경을 가지는 모래를 사용하였으며, 모래의 평균입경 D50은 0.45mm로 나타났다. ASTM D854 (2006)에 따라 측정한 모래시료의 비중은 2.62로 측정되었다. ASTM D4254 (2006)과 ASTM D4253 (2006)에 의하

여 측정된 모래시료의 최대 및 최소간극비는 1.02와 0.57로 측정되었다. 시료 조성에 사용된 실트는 200번체를 통과한 Crushed limestone을 사용하였으며, 실트의 평균입경 D50은 0.019 mm로 나타났다. ASTM D854 (2006)에 의해 측정된 실트시료의 비중은 2.72, 최대간극비(ASTM D4254) 및 최소간극비(ASTM D4253)는 1.99과 0.78로 측정되었다.

실험 수행을 위하여, 모래무게에 대한 실트무게의 비(Silt fraction = Wsilt/Wsand × 100%)가 40%, 60%, 그리고 80%인 총 3가지의 모래-실트 혼합토를 조성하였다. 모래-실트 혼합토의 포화도는 40%이며 상대밀도는 70%로 조성하였다. ASTM D854 (2006)에 따라 측정한 각 시료의 비중(Gs)은 실트 무게비가 40%, 60%, 80%인 시료에서 각각 2.66, 2.66, 2.67로 측정되었다. 각 시료의 최대간극비와 최소간극비는 ASTM D4254 (2006)과 ASTM D4253 (2006)에 따라 측정하였으며, 실트 무게비가 40%, 60%, 그리고 80%의 시료에서 최대간극비는 0.83, 0.99, 1.03로, 최소간극비는 0.43, 0.44, 0.46로 나타났다. 모든 시료는 동일한 3개의 층으로 나누어 다짐법(Tamping method)으로 조성하였으며, 각 층은 동일하게 1.5kg의 다짐추를 이용하여 10회씩 다짐하였다.

조성된 시료가 동결 및 융해되는 동안 탄성파를 측정하기 위하여 그림 4-31과 같이 탄성파 측정용 셀을 제작하였다. 동결-융해 셀의 재질은 온도에 따른 변형이 적은 MC 나일론으로 제작하여 저온의 실험환경에 최적화하였다. 동결-융해 셀의 가로 및 세로 길이는 100mm, 높이는 70mm, 각 벽면의 두께는 25mm로 제작하여 시료가 동결되는 동안 부피변화 및 측방향 변형을 최소화하였다. 시료가 아닌 셀의 벽면을 통하여 탄성파가 전달되지 않도록 그림 4-31의 점선 원으로 표시한 바와 같이 벽면 교차부분이 분리되도록 제작하였다. 탄성파의 측정을 위하여 깊이 5cm의 위치에 크로스홀(cross-hole)방식으로 벤더엘리먼트 및 피에조 디스크 엘리먼트를 설치하였다.

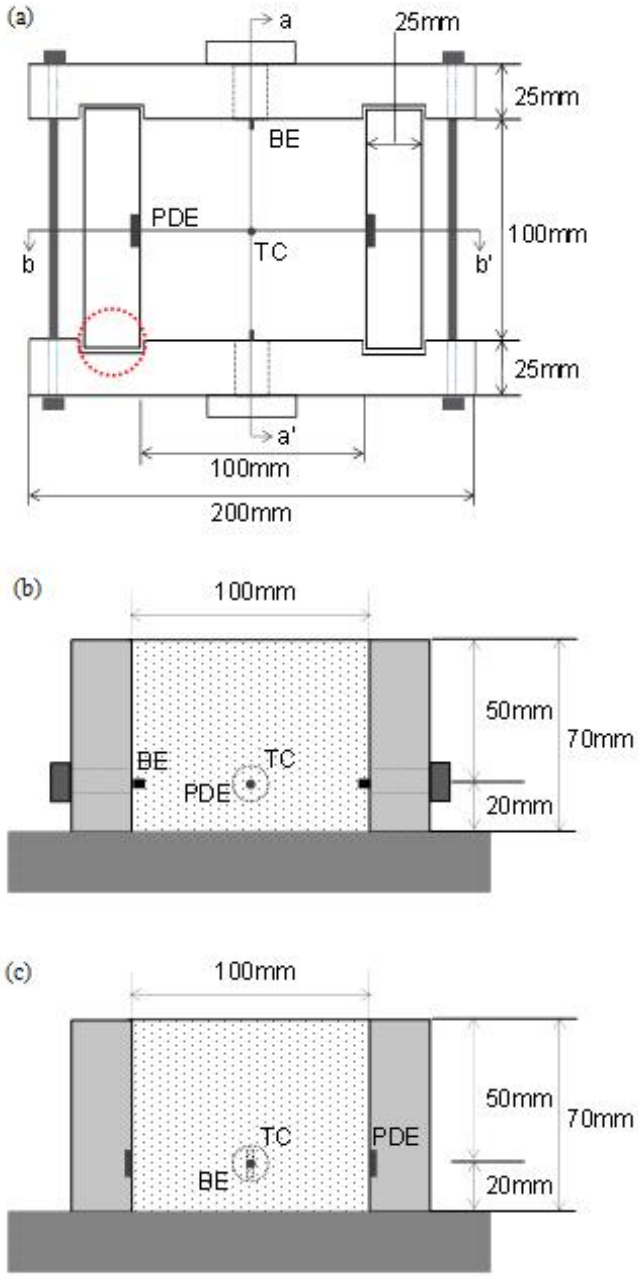



그림 4-31. 탄성파 측정용 동결-융해 셀: (a) 평면도, (b) a-a 단면도, (c)b-b 단면도

실험과정에서의 온도변화를 측정하기 위하여 그림 4-31과 같이 열전대(thermocouple)를 설치하였다. Park et al. (2013)은 냉각된 찬공기에 노출된 표면에 가장 가까운 시료의 상부로부터 하부에 따른 순서로 온도의 변화가 나타남을 보였으므로, 탄성파 트랜스듀서가 설치되어 있는 시료의 상부로부터 50mm깊이 중앙부(평면도)에 1개의 열전대를 설치하였다. 열전대로 측정된 온도는 데이터로거(Agilent 34970A)

를 이용하여 컴퓨터에 저장하였다. 탄성파의 측정을 위하여 전단파 트랜스듀서로 벤더 엘리먼트를, 압축파 트랜스듀서로 피에조 디스크 엘리먼트를 이용하였다. 벤더 엘리먼트는 흙과 트랜스듀서간의 결합이 뛰어나 명확한 결과를 관찰할 수 있어 실내실험에 많이 이용되고 있으며(Lee & Lee, 2006), 피에조디스크 엘리먼트는 압축파의 측정을 위해 많은 실험 및 실무에 사용되고 있다(Lee et al., 2010; Yoon et al., 2010). 탄성파 측정 시스템을 그림 4-32와 같이 나타내었다. 시료의 공진주파수를 찾기 위하여 frequency sweeping과정을 통하여 입력주파수를 산정하였으며, 산정된 입력주파수를 갖는 단일 정현파를 신호발생기에서 발신 트랜스듀서로 전달하도록 하였다. 발생된 탄성파는 시료을 통해 수신 트랜스듀서로 전달되며, 수신된 탄성파는 필터-증폭기(Filter - Amplifier)로 전달되어 신호의 잡음을 제거하고 신호를 증폭시킨다. 필터-증폭기를 거친 신호는 오실로스코프(Ocilloscope)를 통해 육안으로 관찰할 수 있으며 이를 컴퓨터로 저장하였다. 잡음을 제거하기 위하여 1024개의 신호를 평균하여 저장하였으며, 필터-증폭기의 주파수 범위를 500Hz ~ 2MHz 로 설정하여 필터링 주파수가 실험결과에 영향을 미치지 않도록 방지하였다(Lee & Lee, 2006).

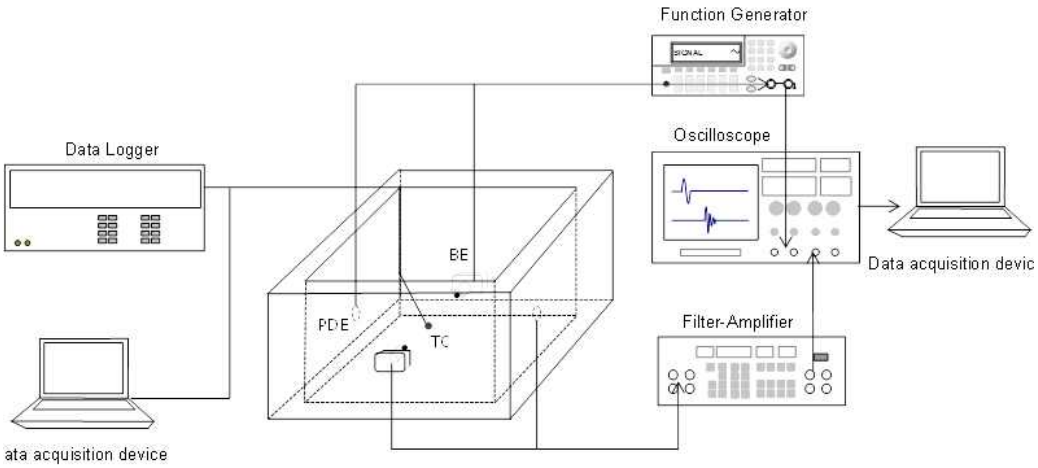



그림 4-32. 측정시스템

실트함량 40%, 60%, 80%의 각 시료를 동결-융해 셀에 조성한 후, 실험용 냉동고 내부에 배치하였다. 냉동고의 설정 온도는 -20℃로 설정하였으며, 이를 약 10시간의 동결시간동안 유지하였다. -10℃까지 동결된 시료는 약 18시간동안 같은 온도를 유지하였으며, 이후 실험실 상온(20℃)에서 20℃까지 융해되었다. 동결과 융해를 반복하는 동안, 동결-융해 셀에 설치된 열전대를 통하여 온도를 연속적으로 측정하였으며 탄성

파 트랜스듀서를 통하여 전단파 및 압축파 또한 연속적으로 측정하였다. 상부로부터 하부로 동결이 진행되는 실제 동결-융해 지반을 모사하기 위하여 동결-융해 셀의 주변은 스티로폼 박스로 단열하였다. 동결-융해과정의 반복이 흙에 미치는 영향은 첫번째 사이클이 가장 크고 이후의 영향은 미미하므로(Yong et al., 1985; Othman & Benson, 1993) 실험은 1번의 사이클만 진행되었다.

시료가 동결-융해되는 동안 탄성파 트랜스듀서와 같은 깊이에 설치된 열전대를 이용하여 실트함량 40%, 60%, 80%의 시료에 대하여 온도변화를 측정하였다. 시간에 따른 실트함량 40% 시료의 깊이별 온도변화를 그림 4-33에 나타내었다. 실트함량이 60%와 80%인 모래-실트 혼합토의 온도변화는 그림 4-33과 유사하였다. 시료가 동결과정 및 융해과정에서 0℃에 도달하였을 때, 약 2시간동안 온도가 변화하지 않는 구간을 보인다. 물의 응고 및 액화에는 80cal/g의 열에너지가 소요되며(Zumdahl & Zumdahl, 2008), 이로 인하여 시료 간극수의 상변화에 소요되는 응고열 및 액화열에 의하여 이러한 일정 온도구간이 나타난다. Park & Lee (2014) 에서도 유사한 결과가 관찰되었다.

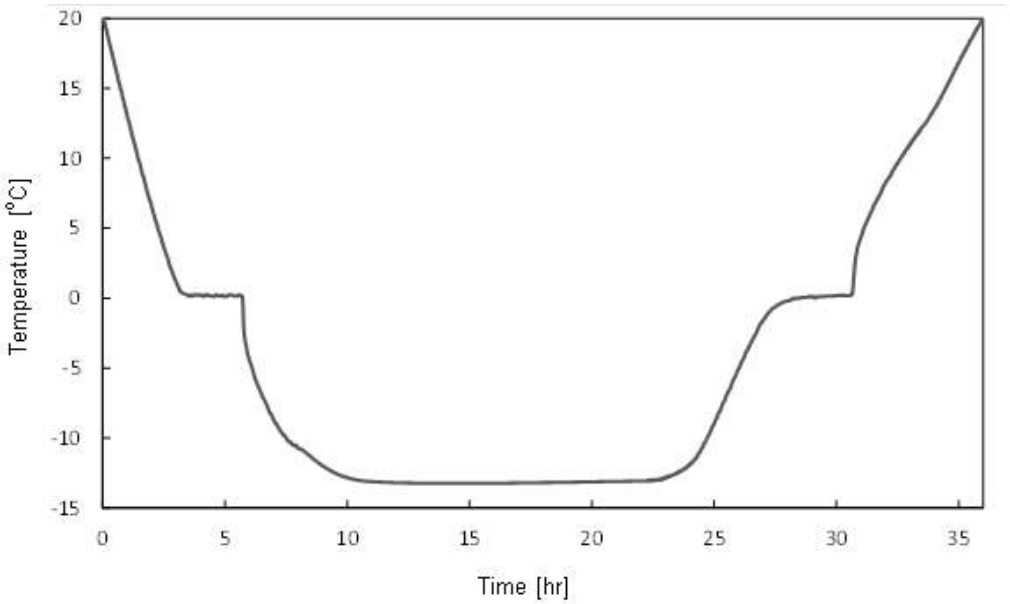



그림 4-33. 온도변화 양상 (실트함량 40%)

동결-융해가 진행되는 동안, 동결-융해 셀에 설치된 벤더엘리먼트를 통하여 전단파를 측정하였다. 각기 다른 실트함량을 가지는 시료의 온도에 따른 전단파 신호형상을 그림 4-34에 나타내었다. 동결 시 전단파의 초기도달 시간은 상온에서 동결 과정에

따라 서서히 빨라지는 모습을 보이며, 이와 유사하게 융해시에는 서서히 느려지는 모습을 보인다. 동결이 진행됨에 따라, 0℃를 경계로 신호의 형상이 완전히 변화하는 모습을 보인다. 전단파 신호의 초기도달 시간은 0℃에서 급격하게 빨라지는 모습을 보이며, 신호의 파장은 급격하게 작아지는 모습을 보인다. 시료의 융해시에도 마찬가지로 0℃를 경계로 상온에서 초기도달 시간은 느려지고 파장은 증가하는 결과를 나타낸다. 시료가 같은 온도일 때, 동결 이전의 전단파 신호와 융해 이후의 전단파 신호은 다른 형상을 보인다. 융해 이후의 전단파 신호는 동결 이전에 비하여 초기도달시간은 느려지고 파장은 증가하였다.

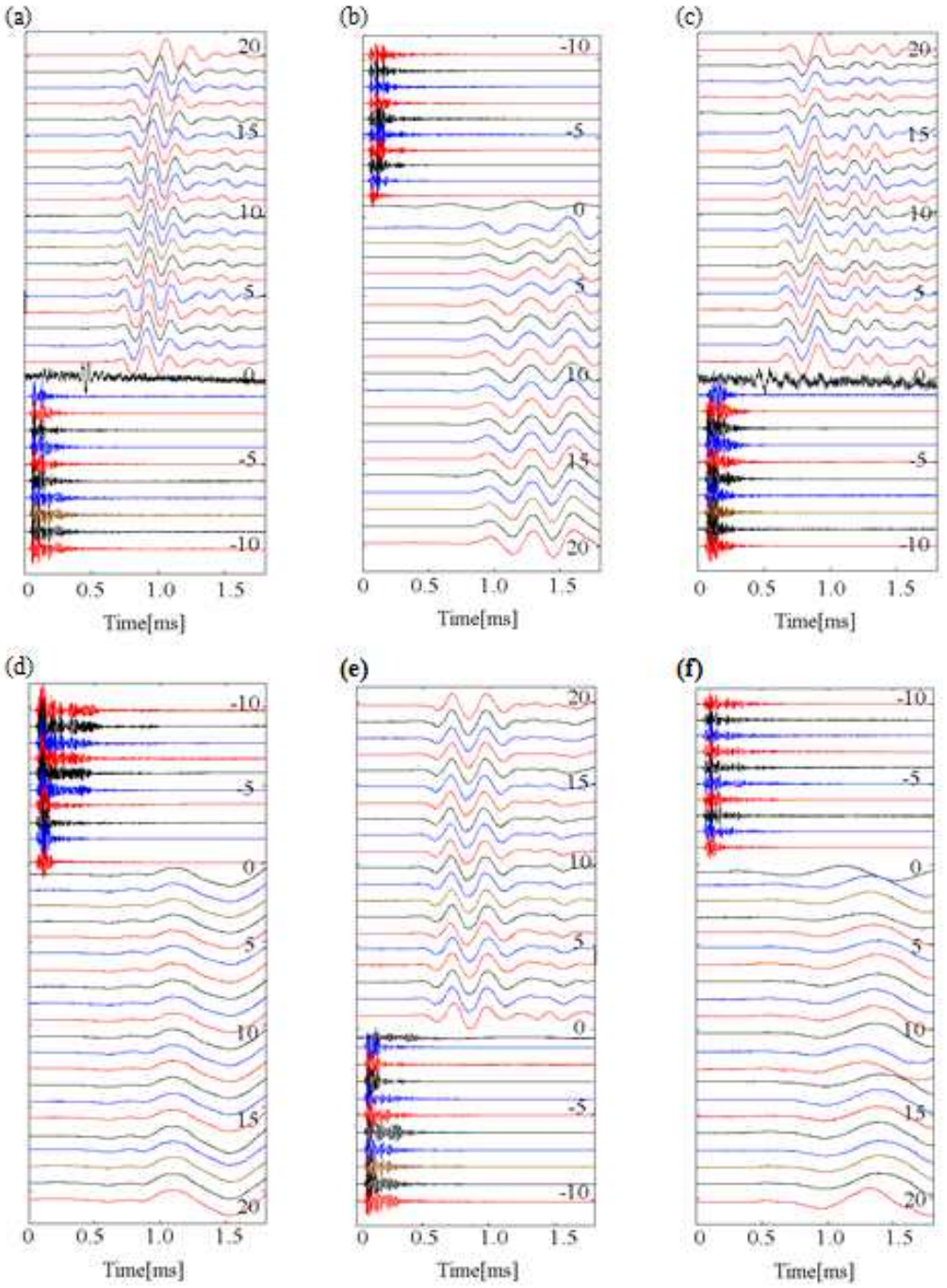



그림 4-34. 전단파 신호: (a) 실트함량 40% 동결, (b) 실트함량 40% 융해, (c) 실트함량 60% 동결, (d) 실트함량 60% 융해, (e) 실트함량 80% 동결, (f) 실트함량 60% 융해

측정된 전단파 신호를 이용하여 전단파 속도를 산정하였다. 전단파 신호의 초기도달시간(tS)와 벤더엘리먼트간의 거리(Ltip)을 이용하여 전단파 속도(VS = Ltip/tS)를 산정하였다. 동결-융해시의 온도에 따른 전단파 속도를 그림 4-35에 도시하였다. 전

단파의 속도는 상온에서 온도가 감소함에 따라 점차 증가하는 모습을 보이며, 융해시에는 온도가 증가함에 따라 점차 감소하는 양상을 보인다. 시료의 온도 0℃ 이후 전단파의 속도는 크게 증가하여 일정한 속도에 수렴한다. 융해 이후의 전단파 속도는 같은 온도의 동결 이전의 전단파 속도에 비하여 감소한 결과을 보이며, 이는 그림 4-36에 나타난다.

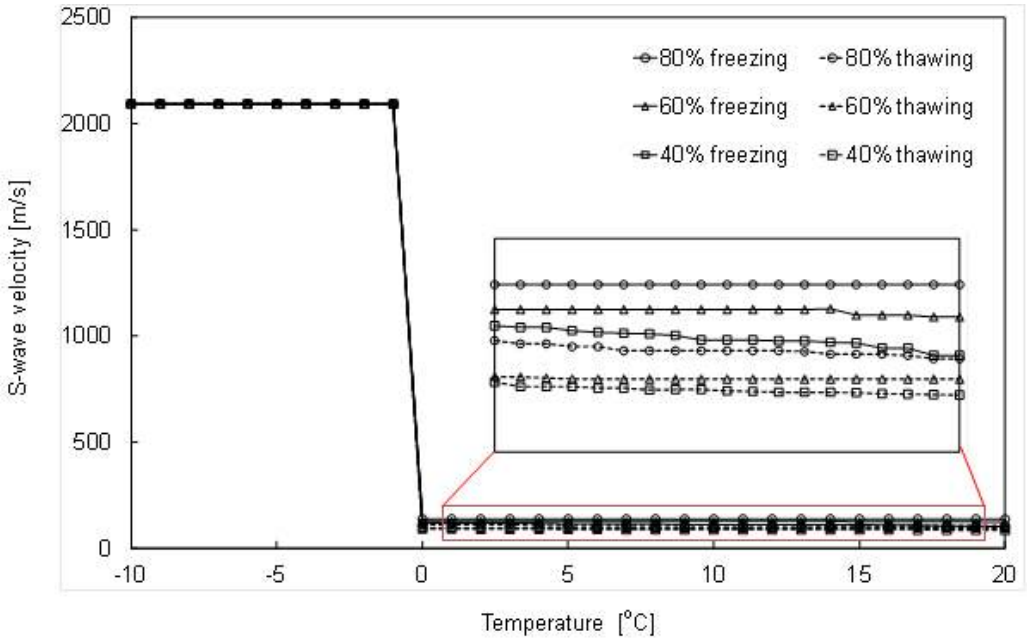



그림 4-35. 온도변화와 전단파 속도 양상

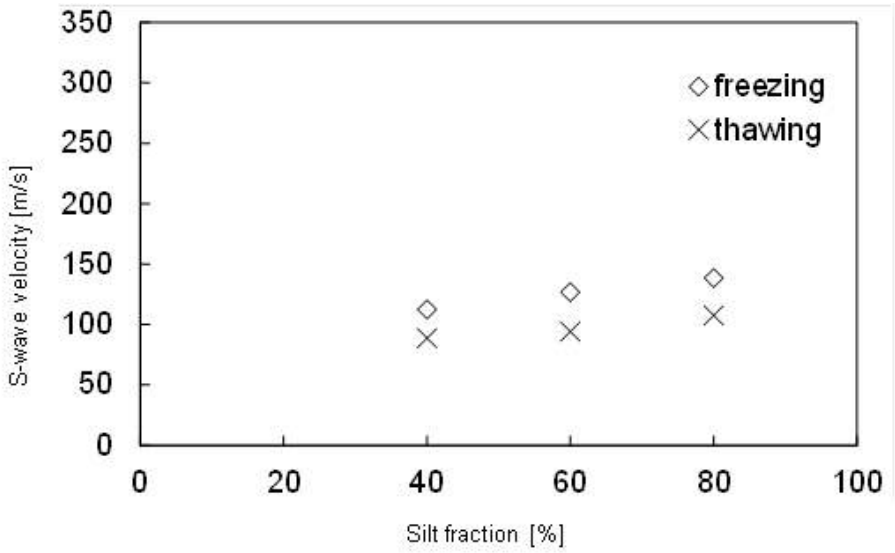



그림 4-36. 동결-융해 전과 후의 전단파 속도 변화

동결-융해가 진행되는 동안, 동결-융해 셀에 설치된 피에조 디스크 엘리먼트를 통하여 압축파를 측정하였다. 각기 다른 실트함량을 가지는 시료의 온도에 따른 압축파 신호형상을 그림 4-37에 나타내었다. 동결 시 압축파의 형상 및 초기도달 시간은 전단파와 달리 상온에서 거의 변화가 없으나, 0℃를 경계로 신호의 형상이 완전히 변화하는 모습을 보인다. 동결 시 압축파 신호의 초기도달 시간은 0℃를 경계로 급격하게 빨라지는 모습을 보이며, 신호의 파장은 크게 작아지는 모습을 보인다. 융해시에도 0℃를 경계로 상온에서 느려진 초기도달 시간과 증가한 파장을 관찰할 수 있다. 또한 압축파 역시 같은 온도의 동결 이전 압축파 신호에 비하여 융해이후의 압축파 신호는 초기도달시간이 다소 느려진 결과를 보인다.

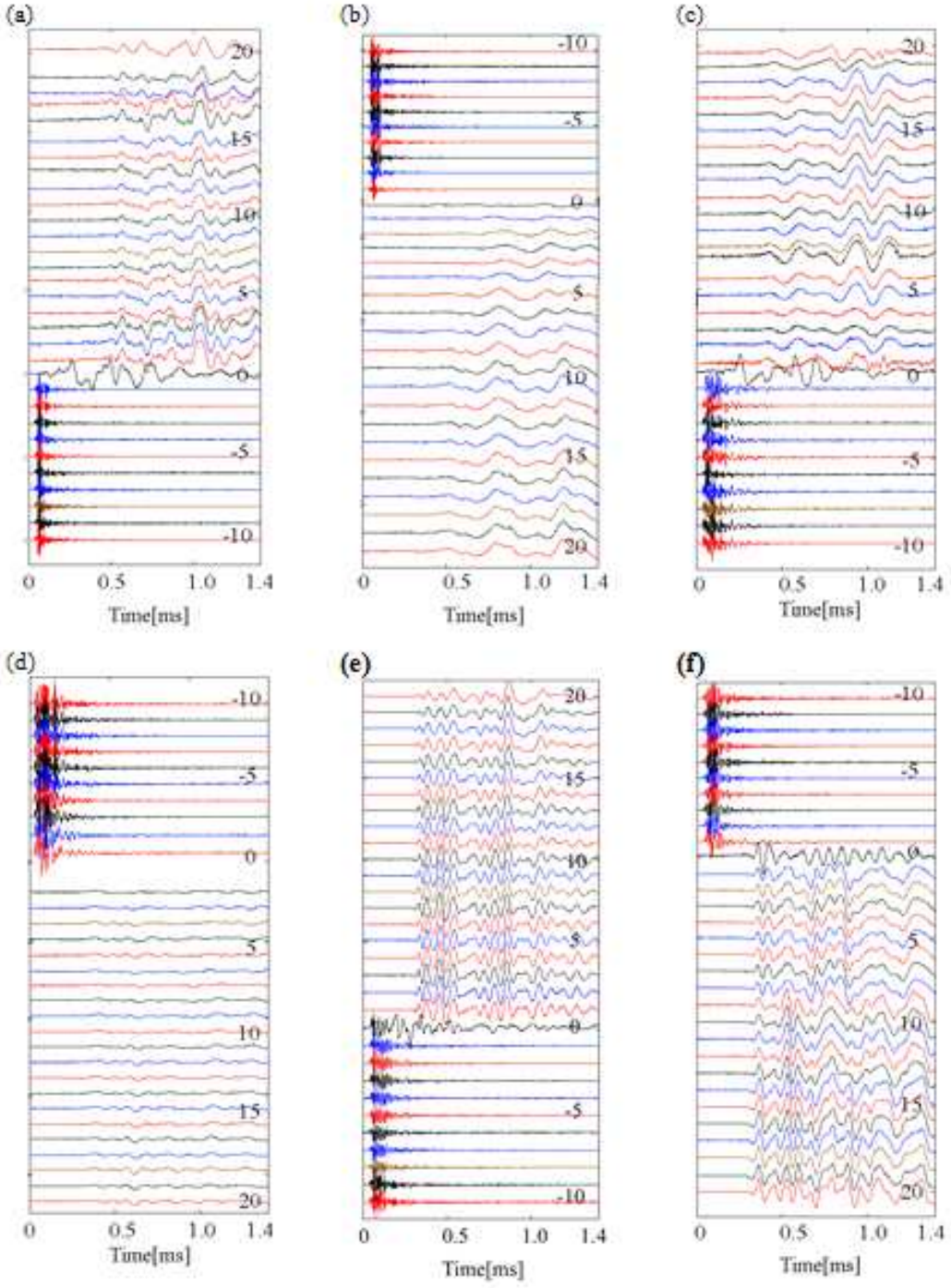



그림 4-37. 압축파 신호: (a) 실트함량 40% 동결, (b) 실트함량 40% 융해, (c) 실트함량 60% 동결, (d) 실트함량 60% 융해, (e) 실트함량 80% 동결, (f) 실트함량 60% 융해

측정된 압축파 신호를 이용하여 압축파 속도를 산정하였다. 압축파 신호의 초기도달 시간(tP)와 피에조 디스크 엘리먼트간의 거리(Lplate)을 이용하여 압축파 속도(VP = Lplate/t)를 산정하였다. 동결-융해시의 온도에 따른 압축파 속도를 그림 4-38에 나

타내었다. 압축파의 속도는 상온에서는 전단파와 달리 온도 변화에 따라 거의 변화를 보이지 않는다. 그러나 시료의 온도가 0℃ 이하로 내려갈 때 전단파 결과와 유사하게 압축파의 속도는 크게 증가하여 일정한 속도에 수렴한다. 또한 그림 4-39와 같이 융해 이후의 압축파 속도는 같은 온도의 동결 이전의 압축파 속도에 비하여 감소한 결과를 보인다.

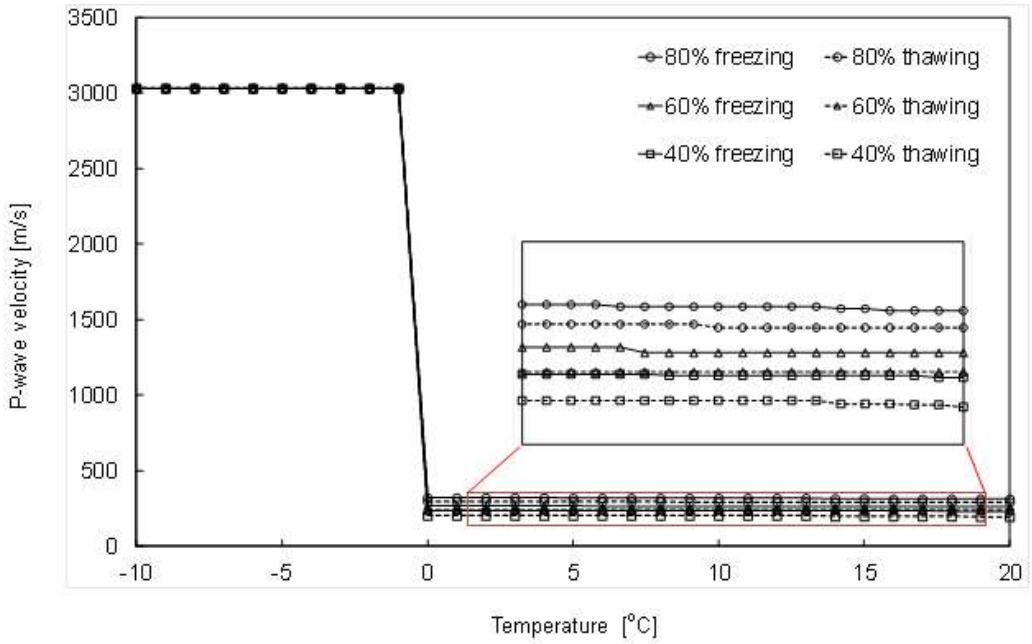



그림 4-38. 온도변화와 압축파 속도 양상

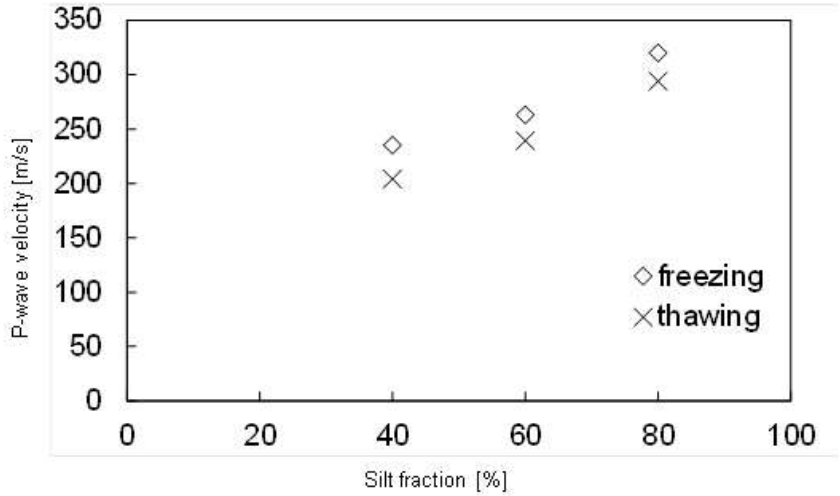



그림 4-39. 동결-융해 전과 후의 압축파 속도 변화

시료가 동결되고 융해됨에 따라, 0℃를 경계로 상온에서 영하로 시료의 온도가 변화할 때 전단파 및 압축파의 속도는 급격하게 증가한다. 이는 시료 내부의 간극수의 상변화(Phase change)에 따라 시료가 입상체에서 연속체로 변화함에 따른 영향으로, 동결된 간극수가 시료 입자사이의 간극을 얼음으로 연결하여 시료 입자간의 결합력을 증가시킨다. 이로 인하여 탄성파의 속도는 크게 증가하고 주파수도 크게 증가한다 (Deschartres et al., 1988; Park et al., 2013; Park & Lee, 2014).

그림 4-19과 그림 4-22에 나타난 바와 같이, 동일온도(예: 10℃)에서 동결 이전에 비하여 융해 이후의 전단파와 압축파의 속도는 확연히 감소한 모습을 보인다. 흙의 동결시 시료 내부의 간극수가 액체에서 고체로 상변화 과정을 거친다. 얼음이 흙의 간극 내에서 완전히 자유롭게 팽창할 수 없으므로 압력이 발생하며, 이는 시료의 미세한 입자구조의 변화를 일으킨다. 이러한 흙의 구조적 변화는 융해됨에 따라 완전히 회복되지 않는다 (Yoon et al., 2003). 이러한 미세구조 변화는 흙 입자의 미소변위 거동을 반영하는 탄성파 형상에 의하여 나타난다. 시료의 응력상태가 등방성일 경우, 탄성파의 전파 속도는 다음 식으로 나타낼 수 있다(Roesler, 1979).

$$V = \alpha\left(\frac{\sigma_0'}{P_a}\right)^{\beta}$$

여기서, $\sigma$’ 0는 입자의 평균 유효응력, Pa는 유효응력과 같은 단위의 대기압을 의미한다. $\alpha$와 $\beta$는 실험적을 통하여 결정되는 상수로서, $\alpha$ 계수는 입자구조, 강성, 간극비 등에 좌우되며 $\beta$ 계수는 입자구조 및 입자의 접촉면의 특성 등에 좌우된다 (Santamarina et al., 2001). 동결-융해과정 이후의 전단파 속도의 감소는 동결에 의하여 느슨해진 입자구조가 융해 이후 완전히 회복되지 못하는 입자 구조변화의 결과로써, 입자간 접촉면의 수가 감소하였기 때문으로 판단된다(Santamarina et al., 2001; Lee et al., 2005; Lee et al., 2006).

동일 온도(10℃)에서, 동결 전의 탄성파 속도로 융해 이후의 탄성파 속도를 정규화한 결과를 그림 4-40에 나타내었다. 그림 4-23은 동결-융해로 인한 전단파 속도의 감소비에 비하여 압축파 속도의 감소비가 작음을 보여준다. 전단파 및 압축파의 속도는 다음 식으로 표시할 수 있다(Santamarina et al., 2001).

$$Vs = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

$$Vp = \sqrt{\frac{M}{\rho}} = \sqrt{\frac{B + \frac{4}{3}G}{\rho}}$$

여기서, M은 시료의 구속탄성계수, G는 시료의 전단탄성계수, B는 시료의 체적탄성계수, 그리고 $\rho$는 시료 밀도를 의미한다. 입자와 액체의 혼합재에서, 식 (3)에 나타난 구속탄성계수 M은 혼합재의 포화도가 100%일 때 액체의 체적탄성계수 Bf에 주로 좌우되며, 이는 매우 적은 포화도의 감소에도 큰 영향을 받는다 (Santamarina et al., 2001). 압축파의 속도는 포화도가 100%일 때 1500~2000m/s의 속도를 보이나, 포화도 99% 이하의 범위에서는 급격하게 감소하여 약 300~400m/s의 속도에 수렴하는 경향을 보이며, 이는 Eom et al.(2009)의 연구에서 보고된 바 있다. 또한 Ishihara et al. (1998)은 압축파의 속도는 유효응력보다는 포화도에 더 영향을 받는다고 보고한 바 있다. 즉, 압축파의 속도는 시료의 포화 여부에 의해 주로 좌우되며, 압축파 속도가 수렴하는 구간에 속하는 포화도에서 수행된 본 실험에서 큰 변화를 보이지 않았다고 판단된다.

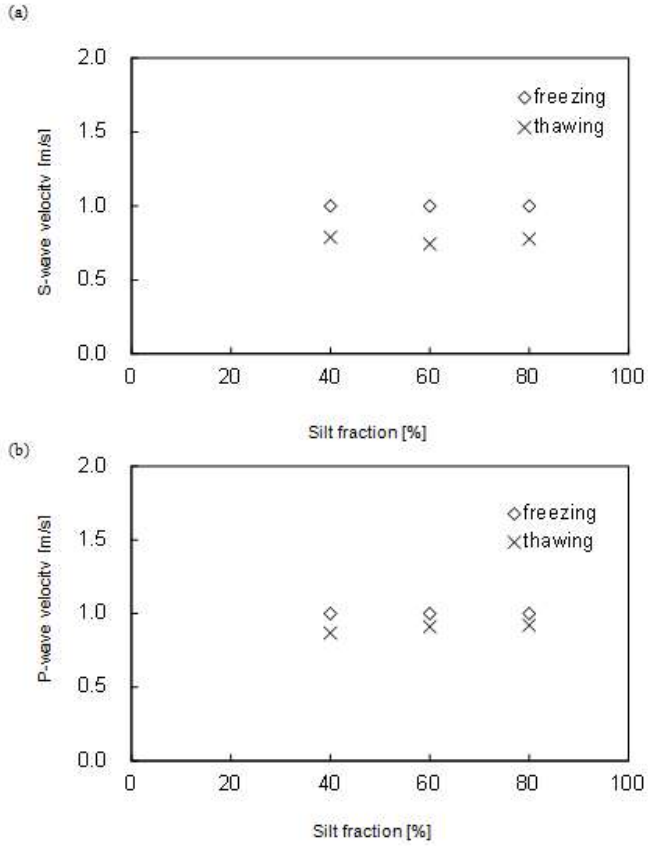



그림 4-40. 동결-융해 전과 후의 탄성파 속도변화: (a) 전단파, (b) 압축파

전단파의 속도는 시료의 포화도에 따라 3가지의 구간을 보인다. 포화도 100%~90%에 이르는 첫번째 구간에서는 포화도의 감소에 따라 전단파의 속도가 크게 증가한다. 포화도 90%~20%의 두번째 구간에서 전단파의 속도는 완만하게 증가하며, 포화도 20%~0%의 세번째 구간에서는 시료조성의 영향에 따라 상이한 결과를 보이나 주로 포화도 5% 에서 최고점을 보인후 감소하는 경향을 보인다 (Eom et al., 2009; Park et al., 2011). 즉, 본 논문에서 사용된 포화도 40%의 시료는 동결-융해에 의한 영향을 전단파의 속도가 더 민감하게 반영할 수 있는 포화도 범위에 있었다고 판단된다. 따라서, 불포화 지반의 동결-융해에 의한 입자구조의 변화는 압축파보다 전단파를 통하여 더 효과적으로 관찰할 수 있을 것으로 보인다.

동결 이전과 융해 이후의 동일온도 10℃에서 탄성파 속도를 나타낸 그림 4-19와 그림 4-22와 같이, 전단파 속도 및 압축파 속도는 실트 함량이 증가함에 따라 증가하는 모습을 보인다. 식 (1)으로 표현되는 흙 입자의 미소변위에서 탄성파 속도는 입자의 거칠기 및 입자간의 접촉면 특성, 입자 packing 종류 등에 좌우된다(Santamarina

et al., 2001). 모래-실트 혼합토에서 실트의 함량이 증가함에 따라 모래입자는 실트입자에 매몰되어 유동하게 되며 모래입자의 접촉면은 하중 체인(force chain)의 역할을 잃는다 (Thevanayagam, 1998). Tran et al.(2011)은 입자간의 접촉점 수가 감소하면 입자조직이 불안정해져 전단강도가 감소함을 수치해석을 통해 보고한 바 있다. 본 실험에 사용된 모래와 실트의 평균입경 비율은 0.04로 모래입자가 실트입자의 약 25배의 직경을 가진다. 같은 부피의 모래시료에 비하여 실트시료 입자가 가지는 비표면적이 훨씬 크기 때문에, 시료의 실트함량이 커질수록 시료 입자의 비표면적이 커짐에 따라 입자 간 접촉면이 증가한다. 즉, 실트함량의 증가에 따른 탄성파 속도의 증가는 입자간 접촉면의 증가로 입자조직이 견고해진 영향으로 판단된다.

## 3. 동결채취시료 시편제작 기술

인공동결공법으로 재취된 비교란 동결시료는 입자 사이의 동결로 인한 교란을 방지하는 것이 핵심이므로 실험을 시작하기 전까지 융해로 인한 교란을 방지하는 기술이 필수적이다. 따라서 시료가 채취되자마자 냉동기능이 있는 냉동차에 보관하여 실험실로 운반하게 된다. 실험실에서도 현장의 동결온도보다 낮은 온도를 유지할 수 있는 냉동고를 이용하여 항시 동결상태를 유지할 수 있도록 해야 한다.

채취된 동결시료를 이용하여 실험실에서 실험을 실시할 경우에도 시료의 융해를 방지하여야 한다. 삼축압축실험의 경우 목표하는 시료의 높이 및 직경에 맞게 시료를 트리밍 해야 하는데 일반적인 비동결 비교란 시료와는 다르게 동결시료의 경우 매우 높은 강도를 보이게 된다. 따라서 일반적으로 사용하는 실톱과 같은 일반적인 장비로는 시편제작이 불가능하다. 본 연구에서는 동결시료의 트리밍을 위해 그라인더와 핸드드릴을 이용하여 시편제작 및 성형을 실시하였다. 또한 시편제작을 할 때 시료와 외부 온도와의 큰 차이로 인한 시료의 융해를 방지해야 한다. 따라서 그림 4-41과 같이 영하 20℃를 유지할 수 있는 동결 챔버에서 트리밍을 실시하였다. 냉동고에 보관 중인 동결시료를 동결 챔버로 이동하여 시료의 완전한 동결을 유지한 채 트리밍을 실시하였다. 본 연구에서 사용한 비교란 동결시료는 샘플러 자체의 직경과 실험에 사용하는 직경의 차이가 크지 않아 직경에 대한 트리밍보다 목표하는 길이의 시료를 만들기 위한 절단에 집중하였다. 그라인더 및 핸드드릴을 이용할 경우 비트의 강한 회전으로 인한 시료

와의 마찰열이 상당히 발생할 수 있는데, 동결용 챔버에서 트리밍을 실시한 결과, 마찰열로 인한 시료의 국부적인 융해는 발생하지 않았다.



그림 4-41.동결용 챔버 전경

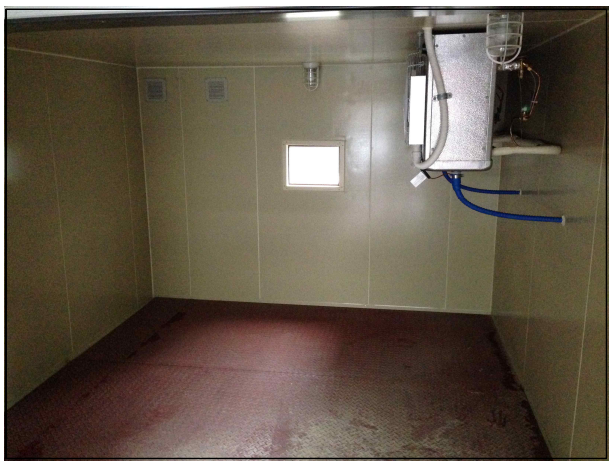


그림 4-42. 동결용 챔버 내부




그림 4-43. 동결용 챔버 온도조절 장치

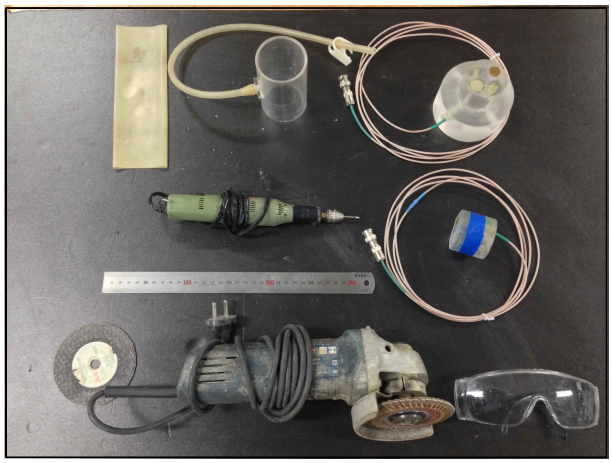


그림 4-44. 동결시료 트리밍을 위한 장비 사진

## 4. 동결시료의 시편제작 기술 및 삼축압축실험법

### 가. 적용범위

이 표준은 동결시료의 제작과 트리밍 기술과 동결시료를 이용한 삼축압축실험법에 대하여 규정한다. 단, 동결토의 융해 후 삼축압축실험하는 것을 전제로 하며, 인공동결 공법에 의해 채취된 동결시료의 실험법을 포함한다.

나. 인용표준

ASTM D4254-06 (2006), “Standard test methods for minimum index density and unit weight for soils calculation of relative density", Annual Book of ASTM Standard

ASTM D4254-06 (2006), “Standard test methods for minimum index density and unit weight for soils calculation of relative density", Annual Book of ASTM Standard

ASTM D4253-06 (2006), “Standard test methods for maximum index density and unit weight for soils using a vibratory table", Annual Book of ASTM Standard

ASTM D854-10 (2010), “Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer", Annual Book of ASTM Standard

다. 주의사항

① 이 표준과 부분적으로 다른 방법을 사용한 경우에는 그 내용을 보고사항에 기입해야 한다.

② 이 표준은 동결시료의 시편을 제작하는 기술과 삼축압축실험을 수행하는데 기본이 된다.

③ 동결-융해 과정의 유무에 따른 사질토의 거동을 규명한다.

④ 이 표준은 포화된 공시체를 대상으로 한다.

⑤ 제작된 흙을 대상으로 하고 주로 수중 강사법을 이용하여 시험을 수행한다.

⑥ 시료의 동결 시 간극수의 상변화로 인해 발생하는 시료의 높이 변화를 고려해야 한다.

라. 용어정의

① 동결

흙이 0℃ 이하의 환경에서 간극수가 어는 현상을 말한다.

② 동결토

시료입자 내부의 간극수가 상변화를 겪어 얼음으로 변한 상태를 말한다.

③동결 챔버

동결 시료를 조성 및 동결상태를 유지하기 위해 영하의 온도를 유지할 수 있는 실험용 공간을 말한다.

④ 인공동결공법

지반을 국부적인 부분을 일시적으로 동결시키는 공법을 말한다. 지반에 삽입된 관에 액체질소와 같이 낮은 온도를 가지는 물질을 순환시켜 지반에 존재하는 간극수를 동결시키는 공법이다.

마. 시험장비

(1) 냉동고 (그림 1)

비교란 동결시료의 융해로 인한 교란을 방지하기 위해 -20℃ 이하의 온도를 유지할 수 있어야 한다.



그림 1. 동결시료 보관용 냉동고

(2) 동결용 챔버 (그림 2)

동결용 챔버는 영하 20℃의 온도를 유지할 수 있도록 두 개의 Unit Cooler을 설치하여 냉동고 내부의 온도를 낮춘다. 각각의 cooler의 온도를 설정할 수 있도록 컨트롤 판넬을 설치하였다. 운전과 제상 작업을 거치게 되며 열교환 핀에 수증기가 동결될 가능

성이 있기 때문에 일정한 시간이 지나면 히터를 종하여 핀의 얼음을 녹여 외부로 방출시킨다. 냉동기 가동이 중지되어 내부의 온도가 상승하면 챔버 내부의 부피가 팽창하여 기압이 상승할 수 있다. 따라서 팽창된 부피에 의하여 기압이 상승하면 자동으로 내부와 외부의 기압을 동일하게 조정해주는 기압조정변이 설치되어 있다. 동결 챔버 벽면에 외부와 내부를 연결해주는 케이블 커넥터를 만들어 실험 제어 및 정보획득을 용이하게 하였다. 또한 외부와 내부의 온도차이로 인한 성에 발생과 성에 동결로 인한 문제들을 방지하기 위해 열선을 설치하여 항상 영상의 온도를 유지하도록 하였다. 열선은 Cooler에 설치되어 있는 배관, 유리창과 문틀에 설치하였다.



그림 2. 동결용 챔버

(3) 삼축압축실험기 (그림 3)

삼축압축실험기는 Geocomp사의 자동화삼축압축실험기를 사용하였으며 시험장치는 Loadtrac과 Flowtrac로 구성된다. Geocomp사의 자동화삼축압축실험기는 실험 전 Initialize, Saturation, Consolidation, Shear 과정에서 원하는 조건을 설정하면 이후 모든 실험과정에서 Pore 및 Cell 벨브의 개폐기능, 압력 조절 및 기록을 자동으로 수행하게 된다. Loadtrac은 시료 하부에 부착된 하중판이 상하로 움직일수 있으며 시료 상부에 설치된 로드셀에서 하중을 측정할 수 있다. Floetrac은 Pore와 Cell로 구성되어 두 대의 장비를 사용하며 각각 시료 내부와 시료 외부의 압력을 조절하는 기능을 가진다. Flowtrac의 Output 벨브를 통해 물이 공급되며 압력센서가 설치되어 있어 실시간으로 압력체크가 가능하다. 또한 공급되는 물 흐름의 양의 지속적으로 저장하여 체적변형을 측정할 수 있다. 삼축압축실험용 셀에는 피스톤과 함께 구성되어 로드셀과 연결되는 실린더와 두 대의 Flowtrac에 연결되는 벨브로 구성된다. 삼축압축용 셀은 외부와의 어떠

한 흐름도 통제해야 하는 실험이므로 각 배관들이 연결되는 부분과 아크릴 셀과의 접합 부분의 압력이 새어나가는 일이 생기지 않도록 주의하여야 한다.



그림 3. 삼축압축실험기

(4) Deaerator (그림 4)

삼축압축실험은 물을 이용하여 압력을 조절하며 완전히 포화가 된 상태에서 실험을 실시하게 되므로 물에 녹아있는 공기를 제거하기 위해 Deaerator을 사용하였다. 전원을 연결하면 하부의 팬이 돌아가며 물을 회전시키며 상부에 연결되어 있는 공기 튜브를 통해 공기가 빠져 나간다. 이때 외부로 연결된 튜브를 이용하여 진공펌프로 석션(Suction) 상태를 유지하여 공기가 쉽게 빠져 나갈 수 있도록 한다.

그림 4. Deaerator(공기제거기)

(5) 탄성파 측정시스템

온도와 탄성파를 측정하기 위해 페데스탈에 설치된 트랜스 듀서의 측정시스템은 Fig. 2와 같다. 하부 페데스탈에 부착된 열전대는 데이터로거(Data Logger, Agilent 34970A)에 연결하여 1분 간격으로 온도를 측정하였다. 압축파와 전단파의 측정을 위하여 신호발생기(Function Generator, Agilent 33220A)에서 발생된 신호가 발신 트랜스듀서로 보내지고 시료를 통과한 신호가 수신 트랜스듀서로 보내진다. 모든 신호의 방향은 상부에서 하부로 진행하도록 설정하였다. 수신된 신호는 필터(Filter-Amplifier, Krohn-Hie 3361)를 통해 잡음을 제거하고 신호를 증폭시킨 후 오실로스코프(Oscilloscope, Agilent 54624A)를 통해 신호를 확인하여 컴퓨터로 저장하였다.

(6) 기타기구 (그림 5)



그림 5. 각종 도구

① 그라인더

절단 과정 중 동결토의 융해를 최소화하고 절단면이 매끄러워야 한다.

② 저울

±0.01 g의 정밀도를 가져야 한다.

③ 자

0.01 mm의 정밀도를 가져야 한다.

④ 핸드드릴

⑤ 동결용 몰드

목표하는 동결시료의 직경과 같아야 하며, 동결에 의한 압력을 견딜 수 있어야 한다.

⑥ 멤브레인

시료 내부와 외부를 완전히 분리할 수 있어야 하며 완전히 밀폐된 것을 사용한다.

바. 시료의 준비

① 사용하는 시료의 비중, 최대·최소 간극비를 산정한다.

② 목표하는 시료 크기와 상대밀도에 해당하는 무게의 건조된 주문진 표준사를 준비한다.

③ 직경 5cm와 높이 10cm이상의 몰드를 준비한다. 몰드의 상부 뚜껑은 열고 닫을 수 있어야 하며, 몰드 벽면은 좌우로 분리되는 것을 사용하여 동결시료와 분리 시 용이하도록 한다. (그림 6)

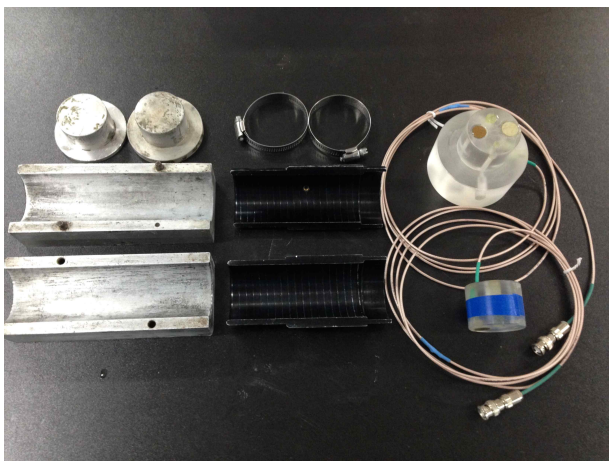


그림 6. 동결시료 제작을 위한 몰드(분리)

④ 몰드 내부와 외부에 증류수를 채운다. 몰드 내부와 외부는 물의 이동은 가능하도록 하되, 흙 입자는 이동되지 않도록 몰드를 조립한다. 동결에 의한 시료의 부피팽창으로 몰드 연결부가 변형되는 것을 방지하기 위해 고정틀을 설치한다. (그림 7)



그림 7. 동결시료 제작을 위한 몰드(조립)

⑤ 포화된 시료를 조성하기 가장 적합하다고 알려져 있는 수중강사법을 이용하여 조성한다. 이때 실험 전 목표로 한 시료 높이로 조성하여 상대밀도에 변화를 최소화하도록 한다.

⑥ 몰드 상부 뚜껑을 닫는다. 이때 상부뚜껑으로 인해 시료의 높이에 변화가 발생하지 않도록 해야 한다. 시료뚜껑까지 물에 완전히 잠기도록 증류수를 추가한다.

⑦ 시료와 증류수가 완전히 동결되도록 -50℃의 온도로 설정된 냉동고를 이용하여 24시간 이상 동결시킨다.

⑧ 시료가 완전히 동결되면, 몰드외부에 있는 증류수 얼음을 제거한다. (그림 8)



그림 8. 동결시료(몰드 탈착 전)

⑨ 몰드의 상하부 뚜껑과 벽면을 제거하여 동결시료의 높이를 측정한다. 측정된 동결시료의 높이와 동결 전 목표로 한 시료의 높이를 비교한다. (그림 9)



그림 9. 동결시료(몰드 탈착 후)

사. 공시체 제작

① 동결시료는 일반적인 방법으로는 트리밍이 불가능하기 때문에 그라인더(Grinder)와 핸드드릴(Hand drill)을 이용한다. (그림 5)

② 트리밍 시 마찰열로 인한 시료의 국부적인 융해를 방지하고자, -20℃로 설정된 동결 챔버에서 작업을 진행한다.

③ 동결시료를 실험에서 사용할 높이로 절단한다. 이때 상· 하부면은 삼축압축실험용 페데스탈과 완벽한 접촉할 수 있도록 한다. (그림 10)

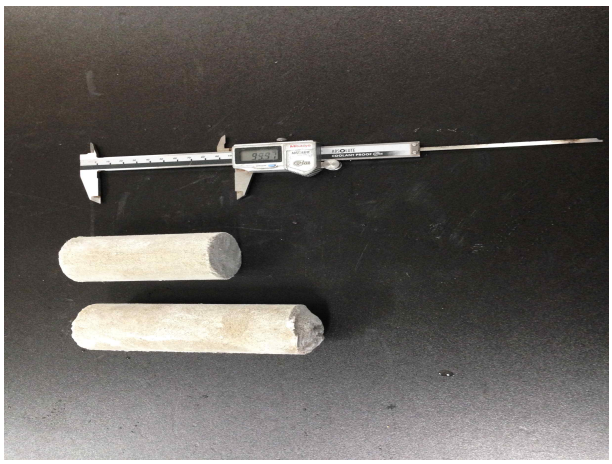


그림 10. 동결시료(트리밍 후)

④ 동결시료 표면이 매우 거칠 경우, 삼축압축실험 시 사용되는 멤브레인에 손상을 입힐 수 있으므로, 돌출된 부분은 제거한다.

⑤ 삼축압축실험에서 탄성파를 측정하기 위한 센서들과의 결합(coupling)을 높이기 위해 접합되는 부분에 약간의 홈을 만들어 줄 수 있다.

⑥ 트리밍이 완료된 시료는 무게를 측정한 후, 함수비의 변화를 막기 위해 밀폐된 용기에 넣어 냉동고에 보관한다. (그림 11)

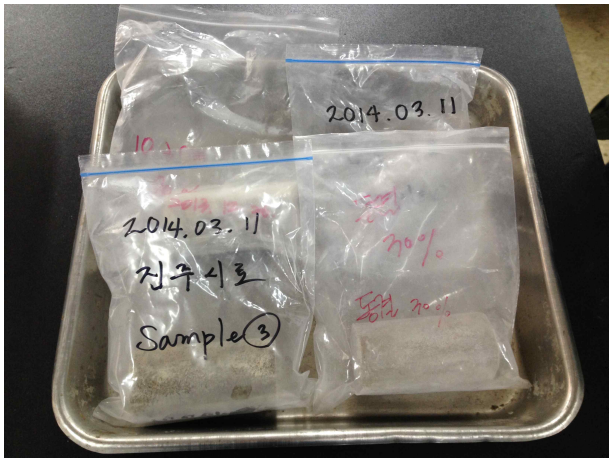



그림 11. 동결시료 보관법

아. 시험방법

(1) 시료 거치

① 준비된 동결시료를 멤브레인에 장착한 후 페데스탈에 거치한다. 이때 동결시료와 페데스탈을 최대한 접합시켜야 한다.

② 멤브레인으로 상·하부 페데스탈을 덮은 후 고무링으로 고정하여 멤브레인 외부와 내부를 완전히 차단시킨다. (그림 12)

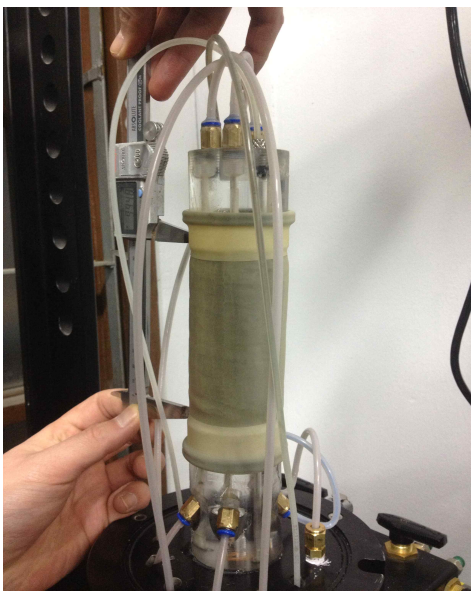


그림 12. 삼축압축실험을 위한 시료 거치

③ 시료 거치 후, 상·하부 페데스탈간의 간격을 측정한다.

④ 재성형 비동결 시료를 조성할 경우, 멤브레인을 페데스탈과 몰드에 설치하고 시료를 조성한 후 몰드를 제거한다. 시료의 높이를 재확인한다. 이때 멤브레인과 몰드의 접합이 이루어져야 원하는 직경의 시료를 조성할 수 있으며, 몰드와 멤브레인 사이에 진공펌프를 연결하여 밀착시킨다.

(2) 융해

① 시료와 공급수의 큰 온도차이로 인한 갑작스러운 융해를 방지하고자 공급수를 1℃이하로 냉각시킨 후 사용한다.

② 융해 시 Cell의 압력은 시료의 자립을 위한 최소의 압력으로 설정하고, 시료내부와 연결되는 벨브는 차단하여, 페데스탈 하부로 주입되는 공급수에 의해 발생할 수 있는 불균등한 융해를 방지한다.

③ 하부 페데스탈에 설치되어 있는 열전대(Thermocouple, K-type)에서 시료 하부의 온도를 측정한다. 이때 측정되는 온도는 시료하부의 온도임에 주의하여야 한다. 따라서 하부에서 측정된 온도가 영상의 온도를 나타내더라도 시료 내부에 남아있을 작은 빙정까지 융해시키기 위해 실험실의 온도와 평형을 이루는 시점까지 융해를 실시한다.

(3) Circulation

① 융해가 완료되면 시료 내부와 연결되는 Pore pressure output 벨브와 시료 내부의 물을 밖으로 배출할 수 있는 벨브를 동시에 열어서 공급수를 시료에 순환시킨다.

② 이때 물의 흐름은 하부에서 상부로 향하게 하여 시료 내부에 남아있는 공기들을 셀 외부로 배출한다.

③ 빠른 속도로 Circulation을 실시하게 되면 하부에서 공급되는 공급수가 시료의 모든 곳을 균등하게 지나는 것이 아니라 한 곳으로 집중적으로 지나서 배출될 수 있기 때문에 최대한 느린 속도로 통과할 수 있도록 한다.

④ Citculatiuon과정이 종료되면 시료 외부로 배출되는 벨브를 잠근다. 이후 시료 전체적으로 균등한 압력을 받을 수 있도록 안정화 과정을 실시한다.

(4) 포화

① 삼축압축실험에서의 포화개념은 Pore와 Cell의 압력을 순차적으로 올려 시료내부에 존재할 수도 있는 공기방울을 압축시켜 B-value를 상승시키는 것이다.

② Circulation이 끝나면 Cell과 Pore의 압력은 20kPa, 10kPa로 시료가 받는 유효응력은 10kPa이다.

③ B-value는 증가하는 유효응력으로 인해 증가하는 과잉간극수압의 비로 계산하게 된다.

④ 포화단계에서 한 단계에서 압력의 상승폭은 20kPa으로 설정하며, Cell부터 반복적으로 상승시킨다. 압력을 상승시킨 후 10분의 안정화 시간을 거치게 되며, 이때 과잉간극수압은 연속적으로 측정하게 된다.

⑤ Cell과 Pore에 가하는 최대 압력은 Cell이 견딜 수 있는 최대압력에서 압밀과정과 전단과정에서의 여유분을 고려한 크기의 압력이어야 한다.

⑥ Cell과 Pore의 압력이 최대압력에 도달했음에도 원하는 B-value에 도달하지 못했을 경우, 최대압력에 도달하기 직전 압력으로 돌아가는 것을 반복하는 Cyclic을 실시한다.

(5) 압밀

① 압밀과정은 포화과정에서 발생한 과잉간극을 모두 소산시키는 단계이다. 또한 실제 지반에서 받은 응력을 모사하여 원지반 응력상태를 모사할 수 있는 과정이다. 실제로 채취된 시료의 원지반 상태를 고려하여 원지반 상태를 모사할 수 있다.

② 포화가 완료된 상태의 압력에서 Cell pressure을 조절하여 원하는 하중으로 압밀을 실시한다.

③ 과잉간극수압이 완전히 소산되거나, 시료의 부피변화가 없어질 때까지 압밀과정을 실시한다.

(6) 전단

① 압밀이 완료되면 일정한 속도로 축변형률을 가하여 전단파괴를 유도한다. 실험 종류에 따라 전단단계 시 배수조건을 다르게 적용한다.

② 완전한 전단파괴를 관찰하고자 축변형률 25%까지 전단변형률을 증가시킨다.

③ 전단이 완료되면 시료를 회수하여 건조시킨 후 무게를 측정하여 실험 전 목표했던 무게와 비교한다.

# 제 5 장

# 동결샘플링 시스템 운용 및 활용방안 분석

## 1. 동결샘플링 시스템 현장 운용 기준(안)

### 가. 지반동결

액체질소를 이용한 지반동결시 동결관을 본관만을 이용할지, 본관과 함께 보조관을 이용하는지에 따라 지반동결시간은 달라진다. 지하수가 포함된 지반 온도경시변화에서 알 수 있듯이, 상온에서 0℃까지 도달하는데 걸리는 시간이 0℃에서 영하로 감소하는 시간에 비해 수 배 정도 걸리기 때문에 보조관을 이용하는 경우 지반동결에 소요되는 시간이 비약적으로 짧아진다. 지반의 조밀상태에 따른 동결시간에 있어서는 지반의 열적성질이 지반의 조밀한 상태에 큰 영향을 받지 않으므로, 지반동결계획시간 설정시 지반의 조밀상태여부는 크게 고려하지 않아도 될 듯 하다. 그러나 지하수의 흐름이 있는 경우 손실되는 열량으로 인해 지반동결 시간이 길어지게 되므로, 이에 대한 실내실험결과를 바탕으로 동결시간을 사전에 고려할 필요가 있다. 본 연구에서 개발한 지반동결플랜트를 이용한 경우, 동결관에 액체질소를 가득 채웠을 때, 현재까지 얻은 동결성능은 1시간에 직경 100cm 정도의 동토기둥을 형성할 수 있고, 동결샘플링이 가능한 온도인 -15℃는 직경 70cm 정도 범위로 나타났다. 상기 실험값에 충분한 안전율을 부여하여 30시간 이상의 동결시간이 확보된다면, 동결샘플링을 위한 동토범위가 충분히 확보될 것으로 판단된다.

### 나. 운반 및 보관

운반 중에 시료가 진동을 받으면 재 성형되는 효과가 발생하여 강도는 떨어진다고 한다(Kallstenius, 1958). 특히 약한 실트질 점토나 모래질 점토가 포함된 시료의 경우 튜브를 수평으로 했을 때 더 심한 결과를 초래한다. 진동으로 인한 다짐효과로 시료는 비틀림을 받고, 간극수가 이동하며 밀봉한 왁스가 손상되기도 한다. 이 같은 영향을 줄

이기 위해 완충재를 깔고 시료를 수직으로 유지함으로써 진동의 영향을 줄일 수 있다. 블록 샘플의 경우 크기가 크고 시료를 수용하는 튜브가 없기 때문에 진동에 대하여 더 위험하며, 취급 시나 운반 시에 더 주의를 요한다. 각각의 시료는 별도로 칸막이가 있는 보관상자에 넣고 그 주변은 완충재로 채워서 움직이지 않도록 해야 한다. 시료는 채취시의 위치와 같은 수직으로 운반하고 보관하여야 한다. 시료를 적재, 운반 및 하역 과정에서는 기술자가 감독하여야 한다.

시료가 실험실에 도착하면 즉시 밀봉상태, 시료의 팽창여부, 운반중의 변형여부를 확인하여 밀봉에 이상이 있으면 다시 밀봉하고, 만약 시료가 운반중에 변형을 받았으면 교란시료로 분류하여 강도나 압밀특성 등의 시험에 사용하지 않도록 한다.

또 시료는 고온과 직사일광을 피하고 저온 고습한 상태에서 보관하여야 한다.

Hvorslev(1949)는 시료의 밀봉방법에 따른 수분변화량을 연구하였다. 보통 파라핀 왁스로 밀봉하여 어느정도 좋은 효과를 보지만 이것도 약 6개월이 지나면 소성변형이 발생하여 함수비가 급격하게 변하는 것으로 알려져 있다. 그런 0.4mm의 두께로 파라핀 밀봉을 한 후 플라스틱 캡으로 막은 경우 1250일간 6.8g의 수분만이 손실된 양호한 결과를 얻었다.

블록샘플의 경우 표면적이 크고 튜브샘플에서와 같이 주변을 밀봉해주는 튜브가 없기 때문에 수분의 증발이 쉽게 일어나므로 주의를 요한다.

교란을 방지하는 데는 무엇보다도 시료채취 시와 취급에 종사하는 기술자의 중요성 인식과 정성이 중요하다. 이를 위해 시료마다 채취자, 우반책임자, 보관책임자의 실명을 기록한 표를 부착하여 책임감을 부여하는 것도 한 가지 방법이다. 또한 시료의 채취 직후부터 실험실에 도착 할 때까지 받는 온도와 진돈 및 충격을 모니터하기 위하여 자동으로 온도와 가속도를 기록하는 장비를 시료상자에 부착하고, 그 결과를 분석하여 시료의 교란정도를 판단하고 원인을 제거하기 위한 자료로 활용하는 것도 교란을 줄이는 한 가지 방법이다.

다. 추출 및 성형

실험실에서 일어날 수 있는 교란으로는 다음과 같은 세 가지 원인을 들 수 있다.

① 추출시의 교란 - 추출 시에 너무 고압을 가한다든가 강도가 약한 점토를 추출할 때 제대로 받치지 못함으로서 인한 교란.

② 큰 단면의 시료 내에서 작은 단면의 시료들을 제작하는데 있어서 잘못된 계획

③ 포화시키는 과정 또는 재압밀 시키는 과정에서의 구조의 손상

실험실은 저온, 고습(상대습도 95%이상) 상태를 유지하여 성형된 시료가 건조하지 않도록 하여야 한다.

시료추출기 피스톤의 플런저는 튜브의 내경과 거의 같은 사이즈로 사여 시료 단면 전체가 추출될 수 있도록 해야한다. 추출 시에도 수직으로 추출하면 약한 시료의 경우도 휨을 받지 않는다. 불가피하게 수평으로 추출 할 때는 시료 밑에 반원형 관을 받쳐서 처지지 않도록 한다. 한번 사용할 시료는 일정한 속도로 쉬지 않고 추출하여야 한다. 얇은 모래나 실트층, 유기물, 조개껍질 등이 혼입되어 있을 때는 그 내용을 실험 시트에 기록한다.

시료가 너무 약하거나 조개껍질, 나무저작 등 이 물질이 있어서 추출 시 또는 성형시에 형태의 유지가 되지 않을 때는 소형 실내 베인시험(직경 20mm, 길이 40mm, 두께 1mm)을 실시하여 참고자료로 사용할 수 있다.




그림 5-1. 동결시료 추출장치

장민철(2000)은 채취튜브 내의 위치에 따른 교란정도를 연구한바, 윗 부분 10~15cm의 부분과 아랫부분 10cm 정도의 시료는 교란을 비교적 많이 받는다고 하였다. 이 부분은 강도나 압밀시험보다는 물리적 시험에 사용하는 것이 바람직하다.

시료를 트리밍 할 때는 실톱을 사용하며, 시료표면을 너무 매끄럽게 다음을 경우 표면이 교란되고 스미어효과가 발생하여 배수에 영향을 미치므로 주의해야 한다. 시료는 수분을 경과하지 않도록 바로 사용하도록 하여야한다.

시료의 일부를 다른 실험을 위하여 다시 보관하여야 할 경우는 다시 잘 밀봉하여 비닐포장지에 넣어서 보관하여햐 한다.

블록샘플의 경우, 큰 단면에서 작은 시료를 성형해야 하기 때문에 주의를 기울이지 않으면 튜브샘플보다 더 많은 교란이 발생할 수 있다.

라. 지반동결·시료채취·운반·보관 시뮬레이션

본 절에서는 동결샘플링 시스템 현장적용에 앞서 각 과정을 시뮬레이션하는 운용단계를 상세히 기술하였다.

(1) 시료 채취 장소와 지층 구성

시료 채취 장소에 대한 예제를 그림 5-1에 나타냈다. 지층구성은 위의 그림 5-1에 나타냈으며 대상 지반에 대해 표준 관입시험과 대형관입시험 및 탄성파 측정 결과를 제시하였다. 탄성파 측정시험은 동결샘플링 시료의 교란도를 측정하고 비교하기 위한 것이다. 대형관입시험의 경우 대형 관입샘플러를 사용하는데 관입에너지가 크기 때문에 향후 사력 조립토 지반에서의 적용성을 기대해 볼 수 있다.

(2) 액체 질소를 이용한 동결

액체 질소는 끓는점이 -196℃이므로 반드시 비용이 발생하나 냉각능력이 좋고 1본의 동결관 사용 시 충분한 동결범위를 확보할 수 있는 장점이 있다. 동결관은 2중관으로 각기 다른 재질을 사용한다(내관 : Sus 304 ϕ21.7mm, 외관 : 일반 강관 ϕ73mm).

(3) 동결관 단열방식

냉각에너지 소비를 최소화하기 위해 동결관에 단열처리를 하였다. 동결관 단열방식은 외단열방식을 사용하였다. 외단열방식은 간단하지만 굴착경이 커져서 상재하중이 감소하기 때문에 동결 시 지반이 팽창하는 단점이 있다. 단열재료로는 친환경 단열재인 그래스울(glass wool)을 사용한다.




그림 5-2. 대상지반의 지층분포

(4) 동결샘플링 작업 수순

① 코어비트는 인플리 타입의 다이아몬드 코어비트이고, 삭공 여유를 만들기 위해 리머부에는 서피스 타입의 다이아몬드가 부착되어 있다.

② 대형 보링머신(TL2000)에 더블코어튜브를 붙여서, 가이드관에 4개소의 코어링 가이드파이프를 통해서 코어링을 실시한다.

③ 굴삭공의 순환액으로는 냉각한 부동액(에틸렌그리코르)을 사용한다.

④ 지반과 시료의 분리에 들어간 힘은 110kN~150kN이다.

⑤ 동결사력코어의 단면적으로 인발강도를 환산하면 1.5MPa~2.0MPa 정도이다.

⑥ 지반에서 빼낸 동결사력코어를 냉동실에서 재냉각한 후, 액체질소로 냉각시켜가면서 전용커터로 절단한다. 전용커터로는 콘크리트 절단용 다이아몬드 블레이드 커터를 사용한다.

⑦ 라텍스 고무 멤브레인을 장착하여 보존용기에 밀봉한다.

⑧ 실험실 챔버의 온도는 -20℃를 유지한다.




그림 5-3. 동결샘플링 작업수순 시뮬레이션

마. 다중 동결관 및 급속 냉매 공급시스템의 안전지침 및 운전 매뉴얼

(1) 다중 동결관 및 급속 냉매 공급시스템의 안전지침

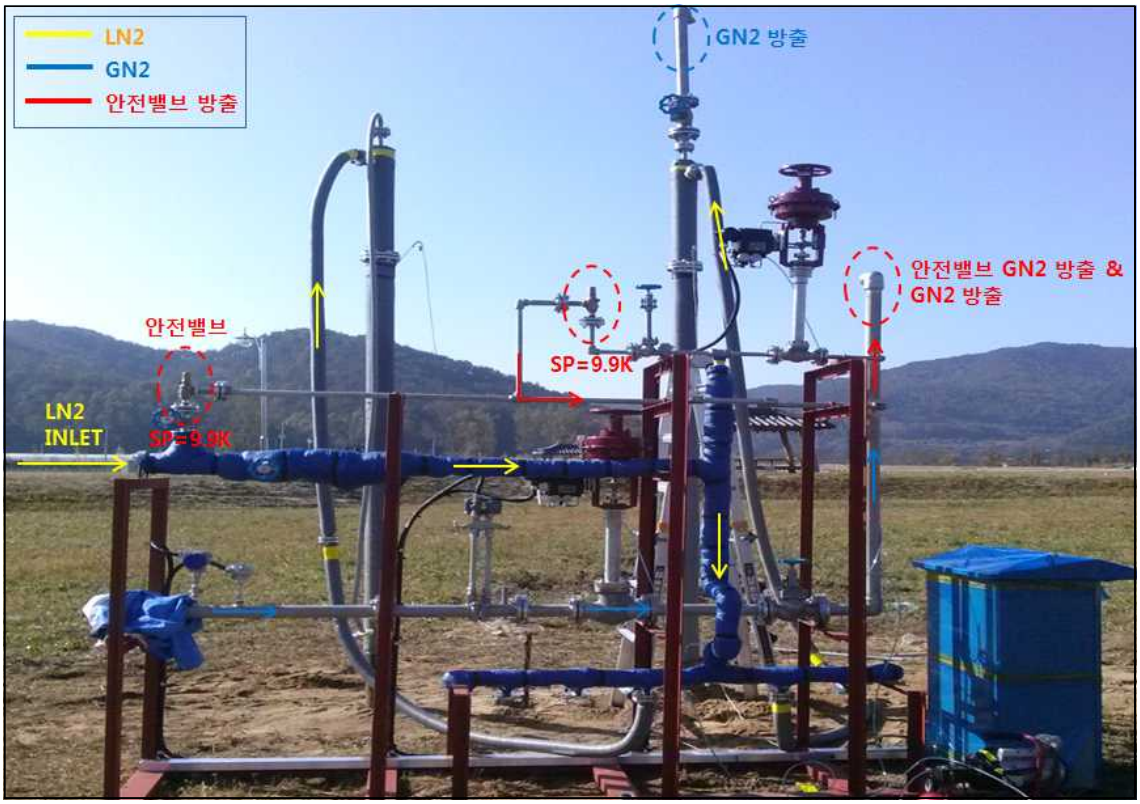



그림 5-4. 동결관 및 냉매공급 시스템 흐름도

LN2를 사용함에 있어 LN2의 공급압력이 급격히 높아지거나 밸브의 오작으로 인해 유로가 막혀 압력이 급상승하게 되면 LN2 공급시스템의 파손 및 이에 따른 LN2의 누출로 인한 사고가 발생될 우려가 있다. 따라서 이러한 위험요소를 사전에 방지하기 위한 안전조치가 필요하다. 해당 동결관 및 냉매공급시스템에는 오퍼레이터의 안전을 고려하여 LN2 공급 단에 안전밸브를 설치하였다. 안전밸브는 냉매공급시스템의 설계압력인 9.9Kg/cm2으로 세팅되어 있으며, 냉매 공급중 시스템상의 압력이 세팅압력 이상이 되면 LN2를 방출하여 설계압력 이하로 내부 압력을 떨어트려 장치의 파손 등을 미연에 방지하여 안전하게 운전이 되도록 설계 및 제작되었다.

안전밸브가 작동되어 방출되는 GN2와 토양 동결을 위해 동결 관으로 주입된 후 방출되는 GN2의 방출구 또한 사람의 키보다 높은 지점에서 방출될 수 있게 제작하여 오퍼레이터와 저온의 GN2가 접촉하게 되어 동상 및 부상이 생기는 문제를 방지하도록 하였다.

LN2 및 GN2를 취급함에 있어서 해당 유체에 대한 안전관리 지침을 사전에 잘 파악하여 취급하여야 작동중 발생되는 문제에 대해 유연하게 대처할 수 있을 것이다.

따라서 LN2와 GN2에 대한 안전관리 지침은 아래와 같다.

(가) 유체명 : 질소(NITROGEN)

(나) 유해 및 위험성

- 압력하에서 극히 찬 액체와 가스임
- 액체와 직접적인 접촉은 동상을 일으킬수 있음.
- 밀폐된 공간에서 누출 시 빠르게 질식을 일으킬 수 있음.

(다) 응급조치 요령

- 눈에 들어갔을 때 : 눈을 크케 뜨고 다량의 물로 즉시 씻은 후 의상의 조언을 구할 것.
- 피부에 첩촉했을 때 : 동상의 경우 즉시 의료 치료를 받을 것. 가능하면 빨리 노출된 부위를 40℃를 초과하지 않는 따뜻한 물에 담글 것. 피부 조직이 손상될 수 있으므로 동결관 부위는 문지르지 말 것. 살균 된 거즈로 상처부위를 덮어 줄 것.
- 흡입했을 때 : 신선한 공기가 있는 곳으로 옮길 것. 호흡이 힘들거나 호흡하지 않으면 인공호흡을 실시할 것.

(라) 누출사고시 대처방법

- 안전한 장소로 대피 시키고 밀폐된 공간이라면 주위를 환기 시킬 것.
- 산소 농도를 체크 할 것.
- 밀폐된 실내의 경우 대기가 안전하다고 증명되지 않는 한 자급식 호흡기를 착용할 것.
- 추가적인 누출 혹은 유출을 방지 할 것.

(마) 안전 취급 방법

- 사용 전 제품의 특성과 위험성을 알고 이해할 것.
- 경험이 많고 숙련된 작업자가 취급할 것.
- 가스 시스템은 사용전 누출의 유무를 확인 할 것.
- 용기의 경우 산소결핍 환경이 만들어 지는 것을 피하기 위하여 환기가 잘 되는 곳에 보관 할 것.
- 압력 상승을 방지하기 위하여 시스템과 배관에 적합한 압력방출 장치를 사용할 것.

- 밸브 및 시스템, 안전장치에 손상을 일으킬 수 있는 비정상적인 기계적 충격을 용기에 가하지 말 것.

(바) 개인 보호 장구

- 호흡기 보호 : 밀폐된 공간의 경우 자급식 공기 호흡기(SCBA)를 착용 할 것.
- 눈 보호 : 액체의 튀김으로부터 보호하기 위하여 보안경을 착용 할 것.
- 손 보호 : 액체질소를 취급 할 경우 적합한 내열처리 된 장갑 또는 극저온용 장갑 착용.
- 피부 및 신체 보호 : 단열되지 않은 배관이나 용기 접촉 시 보호되지 않는 신체의 일부가 닿지 않도록 할 것
- 발 보호 : 작업 중 안전화를 착용 할 것.

(2) 다중 동결관 및 급속 냉매 공급시스템의 운전 매뉴얼

(가) 구성 기기

① 다중 동결관

냉매인 LN2를 주입하여 지반과 열교환을 한 후 기화된 GN2를 방출하도록 제작 된 내관, 외관의 2중구조의 SUS 재질의 이중관.

② 냉매 공급 시스템

냉매인 LN2를 다중 동결관으로 공급하기 위한 장치로써, 동결관 내부의 온도 변화에 따른 냉매 공급을 자동으로 제어 및 운전이 가능하게 하여 안정적으로 냉매를 공급.

③ 컨트롤 판넬

다중 동결관 및 냉매 공급시스템의 가동시 동결관의 온도, 공급시스템의 냉매 공급유량, 온도등을 실시간으로 확인 할 수 있도록 하는 장치.

(나)장치의 운전

① 초기 확인

- 가동을 하기에 앞서 가동준비가 잘 되었는지 실험장치 주변등을 정리한다.
- 밸브의 개폐여부를 확인하고 안전밸브의 블락밸브가 열려있는지 확인한다.

- GN2 방출밸브가 열려있는지 확인한다.
- 컨트롤 판넬의 전원을 ON 하고 전원이 들어오는지를 확인한다.
- 컨트롤 판넬에 동결관의 온도, 냉매 공급시스템의 온도, 압력등이 뜨는지 확인한다.
- 자동밸브등의 계장에어가 정상적으로 공급되는지 확인한다.
- 운전 데이터 확보를 위해 컨트롤 판넬의 데이터 로거를 키고 USB를 연결한다.
- 냉매 공급 시스템에 냉매 공급원(LN2 탱크로리)을 연결한다.

② 장치 가동
- 냉매 공급원의 밸브를 열어 냉매 공급시스템에 냉매의 공급을 시작한다.
- 냉매 공급시 밸브를 조금씩 열어 냉매 공급시스템 및 다중동결관의 냉각이 서서히 이루어 지도록 한다.
- 장치의 냉각이 안정적으로 이루어 진 후 냉매의 공급량을 서서히 늘려간다.
- 냉매를 공급 한 후 지반과 열교환을 한 GN2의 온도가 점차적으로 떨어지는 것을 컨트롤 판넬을 통하여 확인한다.
- LN2가 안정적으로 공급되고 동결관 및 GN2의 온도가 안정 되는 것을 확인 하면, 자동운전 준비를 한다.
- 동결관 및 GN2의 안정되는 온도를 확인하여 컨트롤 판넬을 통해 자동밸브에 대해 온도 세팅을 한 후 운전온도 범위내에서 정상 작동 하는지 여부를 확인한다.
- 냉매의 공급량 및 유량을 확인하여 냉매의 교체주기 등을 파악한다.

③ 장치 가동 완료
- 실험의 완료 후 냉매 공급시스템과 냉매 공급원의 연결을 끊는다.
- 동결관 및 냉매 공급시스템에 LN2의 잔량이 남아 있을수 있으므로 GN2 방출밸브 및 안전밸브 블락밸브 등의 밸브는 열어 둔다.
- 컨트롤 판넬의 데이터로거의 저장장치를 제거한다.
- 컨트롤 판넬의 전원을 OFF 한다.
- 실험이 완료 된 후 주변 정리등을 한다.

## 2. 개발기술의 경제성 평가

### 가. 개요

작업국내지반조건 및 자연환경과 관련하여 사질토지반상의 구조물 피해를 해결하기 위한 방법으로 연구되고 있는 인공동결공법을 이용한 불교란시료 채취기술은 안전과 관련된 매우 중요한 기술이라 할 수 있다.

인공동결공법을 이용한 불교란시료 채취 기술은 기본적으로 토지의 지반을 조사하기 위한 시료채취 기술로서 기존의 시료채취 기술 및 공법으로는 채취가 불가능한 사질토에 대한 불교란시료를 채취하기 위한 방법이다.

이러한 새로운 공법의 경우 공법의 활용 및 관련 소요비용에 대한 검토를 통해 관련 공법 개발 및 사용에 대한 검토를 한다는 측면에서 필요성 볼 수 있다.

따라서 본 항에서는 대상 및 기술의 시공 방법 및 관련 소요비용에 대한 검토와 기존 공법에 대한 소요비용의 검토를 통해 적정 소요 비용을 기준으로 한 경제성을 분석하여 보고 관련 기술의 경제성을 분석하는 것을 목표로 한다.

### 나. 경제성 분석 대상검토 및 분석방법

경제성 분석에 있어서 가장 기본적으로 사용되는 방법은 비용·편익분석이다.

비용·편익분석은 기업차원의 재무성 분석과는 달리 사회적 관점 또는 국민경제 전체의 관점에서 비용과 편익을 파악한다.

비용·편익 분석에서의 의사결정에 관한 기본원칙은 어떠한 상황에서도 가장 큰 순편익(net benefits)을 제공해 주는 대안을 선택한다는 것이다. 순편익이란 총편익에서 총비용을 뺀 금액을 뜻한다.

비용·편익 분석은 발생하는'이득'(Benefit)이 목표의 달성을 위해 지불해야하는 '비용'(Cost)보다 클 때, 경제적 타당성이 있다고 평가하게 되므로 비용과 편익 대상 분석 및 방법이 매우 중요하다.

기술 및 공법의 소요비용이란 개발된 공법을 적용하여 원하는 결과를 얻을 수 있기까지 소요되는 비용을 말하며, 관련된 공법의 적용에 따른 공종, 소요인력, 작업시간 및 관련 장비에 대한 검토를 필요로 한다.

인공동결공법을 이용한 불교란시료 채취기술의 경우 소요되는 비용에 대한 분석은 소요 장비 및 시공 방법에 따른 품산정을 기준으로 산출이 가능할 것이며, 그 가치 기

준은 향후 발생하는 비용에 대한 산정이 아니라 단순 시추에 대한 부분으로 현재 채취에 소요되는 비용을 기준으로 검토할 수 있을 것이다.

일반적으로 편익은 사용가치(use value), 비사용가치(non-use value), 교환가치(exchange value) 등으로 볼 수 있다.

사용가치(use value)는 확인 가능한 인간의 필요나 욕망을 충족시키는 재화의 유용성(有用性) 또는 효용을 의미한다. 예를 들어 사용 가치는 환경을 지속가능한 상태로 유지시키면서 직접적 또는 간접적으로 이용하여 사회적 편익을 얻을 수 있는 가치를 말한다. 비사용가치(non-use value)는 보통 존재가치(existence), 고유가치(intrinsic) 혹은 선택가치(option value)등의 이름으로 불린다. 이는 현재 또는 미래에 사용가능성 여부에 상관없이 단순히 존재하는 것을 아는 것만으로도 흡족스럽게 느끼는 가치를 말한다. 교환가치는 상이한 가치를 지니는 상품들 간의 교환비율로 사용가치가 기술의 사용에 따른 유용성(有用性)이라면, 교환가치는 이러한 사용가치를 지닌 대상 간의 교환비율이나 교환의 정량적 부분을 말한다.

인공동결공법을 이용한 불교란시료 채취기술의 편익에 대한 분석을 사용가치에 따른 편익으로 보자면 시료채취 분석 후 향후 사용하게 될 토지의 용도 및 구축대상 구조물의 현황 등 대상의 향후 사용과 관련된 다양한 요인들에 의한 안전상, 비용적 가치를 고려할 수 있으나, 현 분석 시점에서는 그 사용가치의 평가, 해당기술의 기여도의 추정 및 산출이 불가능하므로 적용이 어려렵다.

따라서 대체 기술에 대한 교환가치를 편익으로 보아, 기존의 대체기술로는 시료채취가 불가능 하지만 유사 대체공법에 의한 채취에 소요되는 비용을 기준으로 검토할 수 있을 것이다.

본 경제성 분석에서는 관련 표준 품을 기준으로 에 유사 방법에 따른 시추, 시료채취 추정 비용을 편익으로 분석하였다.

### 다. 동결샘플링 소요비용 분석

인공동결공법을 이용한 불교란시료 채취기술은 공사현장에서 사용하는 시료채취 기술로서 그 기준은 건설공사 표준품셈과 지반조사 표준품셈이라 할 수 있다.

동결샘플링의 소요비용을 위해 지반관련 시추 조사의 기준이 되는 지반조사 표준품셈-지질조사, 토질 및 기초조사표준품셈 통합본(2004. 5. 한국엔지니어링진흥협회)을 기초로하고, 건설공사표준품셈(2014, 한국건설기술연구원)의 기준을 적용하여 산출하였으

며 동결공정에 대한 부분은 실시공 관련 시간 및 장비기준을 적용하여 산출 하였다.
산출 세부 기준은 다음과 같다.

① 재 료 비

재료비는 직접재료비와 간접재료비가 있으나, 공법의 경제성 비교를 위해 순공사 비용만을 검토하였으므로 직접재료비만을 산출하였다.
직접재료비는 계약목적물의 실체를 형성하는 물품의 가치로서 소요량에 단가를 곱하여 산출하였다.
- 소 요 량 : 공사목적물의 기본적 구성형태를 이루는 물품의 가치재료로 시공에 소요되는 직접 비용으로 품셈의 기준 및 공법의 시공특성에 따라 산출 적용하였다.
- 적용단가 : 물가조사전문기관의조사가격(2014년05월물가자료,물가정보) 등 시중조사가격 및 업체의 거래실례가격을 기준으로 적용하였다.

② 노 무 비

노무비는 직접노무비 및 간접노무비가 있으나, 공법의 경제성 비교를 위해 순공사 비용만을 검토하였으므로 직접노무비만을 산출하였다.
직접노무비는 현장에서 시료채취를 위하여 직접작업에 종사하는 노무자에 의하여 제공되는 노동력의 대가로서 노무공수에 임율을 곱하여 산출하였습니다.
- 노무공수 : 표준 품에 따른 소요인력과 해당 시공방법에 따른 소요인력을 기준으로 하여 산출하였다.
- 임 율 : 직접노무비는 시중공사노임(대한건설협회발표, 2014.1.1.) 에 의거, 노무공수에 임율을 곱하여 산출하였다.

③ 경 비

경비는 기계경비로소 공종 작업에 소요되는 장비의 손료를 말하며, 표준품셈 및 시공과 관련된 자료에 의거하여 산출하였습니다.
- 손료계수 : 건설공사표준품셈(2014년, 한국건설기술연구원) 및 지반조사 표준품셈-지질조사, 토질 및 기초조사표준품셈 통합본(2004. 5. 한국엔지니어링진흥협회)을 참고로 하여 산출하였다.

이러한 기준에 따라 순공사비를 재료비, 노무비, 경비의 공사원가계산 순공사비를 산출하였다.

순공사비 산정의 전제 사항은 다음과 같다.

- 시추깊이 : 10m
- 동결시간 : 48시간
- 시료채취 개수 : 10개
- 장비가격 : 품셈 및 조사단가와 개발장비 예상 장비가액 적용

이와 같은 전제 및 근거로 인공동결 공법을 이용한 불교란 시료채취기술의 소요비용을 산출한 결과는 다음과 같다.

10m, 10개 기준(단위:원)

| 공종 | 재료비 | 노무비 | 경비 | 계 |
|---|---|---|---|---|
| 동결천공 | 245,266.2 | 1,831,453.5 | 38,481.9 | 2,115,201.6 |
| 냉동장비 운반 및 설치 | 14,037.5 | 173,716.9 | 19,037.9 | 206,792.3 |
| 동결 인건비 | | 1,772,131.2 | | 1,772,131.2 |
| 동결장비 및 경비 | 812,000.0 | | 10,792,800.0 | 11,604,800.0 |
| 동결시료 채취 | 230,456.8 | 1,025,306.2 | 1,087,580.0 | 2,343,343.0 |
| 철수 및 마무리 | 14,037.5 | 929,801.9 | 19,037.9 | 962,877.3 |
| 합계 | 1,315,798.0 | 5,732,409.7 | 11,956,937.7 | 19,005,145.4 |

이 같은 결과는 10m 기준의 시료채취에 3,882,824원의 비용이 소요되는 것으로 m당 388,288원이 된다.

이와 같은 비용을 요소별로 분석해 보면 다음의 그림과 같다.

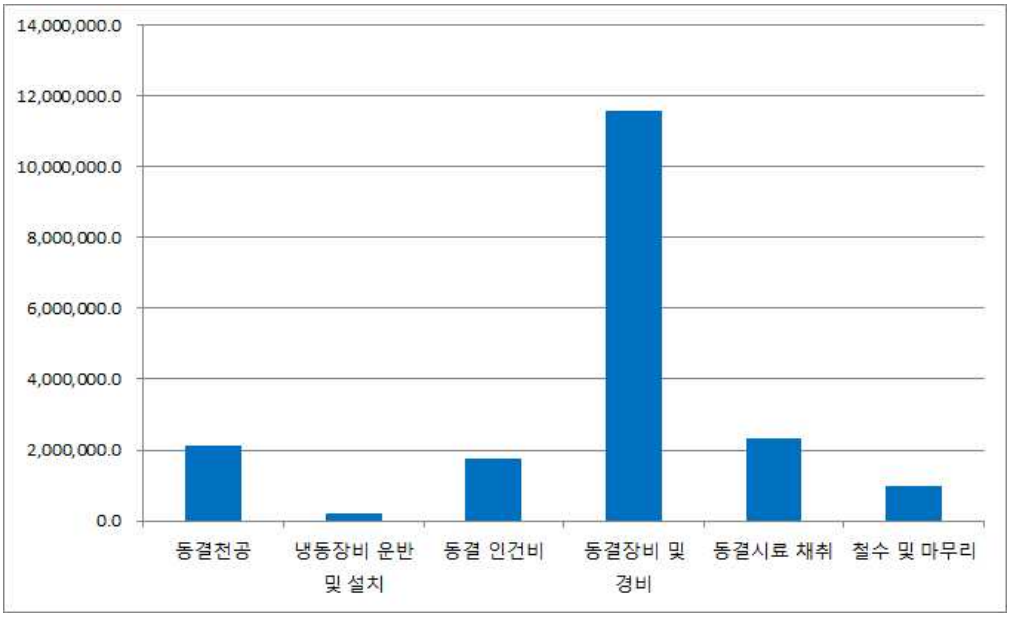



그림 5-4. 인공동결 공법을 이용한 불교란 시료채취기술의 소요비용

비용의 구성을 보면, 시료재취에 소요되는 비용이 약 12.33% 시료채취 비용은 매우 적으며, 대부분의 비용이 인공동결에 사용되는 것을 볼 수 있다.

이러한 비용의 구성비를 보면 다음의 그림과 같다.

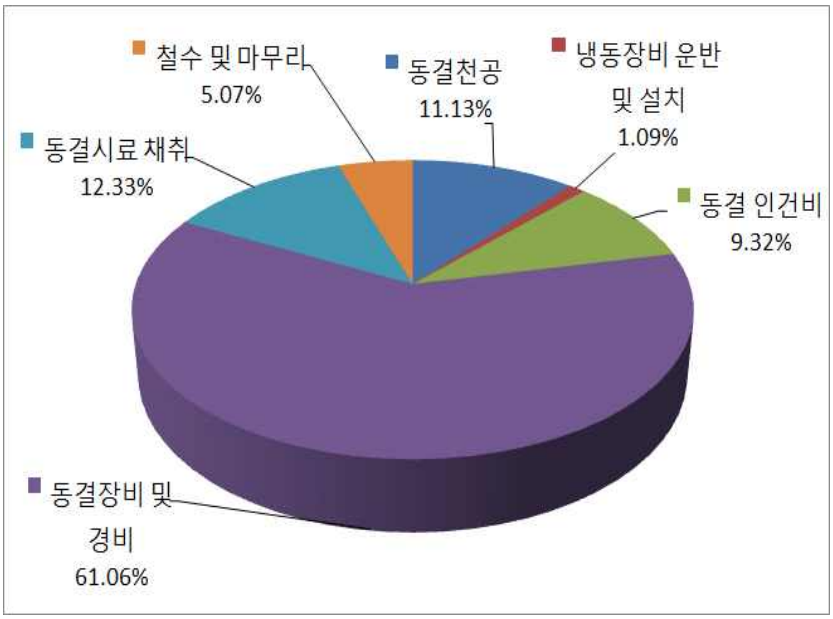



그림 5-5. 인공동결 공법을 이용한 불교란 시료채취기술의 소요비용 구성비

전체 비용 중 가장 많은 비중을 차지하는 항목은 동결장비 및 경비로 61.06%를 차지

하는 것을 볼 수 있으며, 동결시료채취를 위한 비용이 매우 적은 것을 볼 수 있다.

라. 비교공법 소요비용 분석

비교공법은“지반조사 표준품셈”(2004. 5. 한국엔지니어링진흥협회)의 토질시추 Φ116mm 10m를 기준 시료채취를 적용하여 산출하였다.

산출 세부 기준은 다음과 같다.

① 재 료 비

재료비는 직접재료비와 간접재료비가 있으나, 공법의 경제성 비교를 위해 순공사 비용만을 검토하였으므로 직접재료비만을 산출하였다.

직접재료비는 계약목적물의 실체를 형성하는 물품의 가치로서 소요량에 단가를 곱하여 산출하였다.

- 소 요 량 : 공사목적물의 기본적 구성형태를 이루는 물품의 가치재료로 시공에 소요되는 직접 비용으로 품셈의 기준에 따라 산출 적용하였다.
- 적용단가 : 물가조사전문기관의 조사가격(2014년05월물가자료, 물가정보) 등 시중조사가격 및 업체의 거래실례가격을 기준으로 적용하였다.

② 노 무 비

노무비는 직접노무비 및 간접노무비가 있으나, 공법의 경제성 비교를 위해 순공사 비용만을 검토하였으므로 직접노무비만을 산출하였다.

직접노무비는 현장에서 시료채취를 위하여 직접작업에 종사하는 노무자에 의하여 제공되는 노동력의 대가로서 노무공수에 임율을 곱하여 산출하였습니다.

- 노무공수 : 표준 품셈에 따른 소요인력으로 산출하였다.
- 임 율 : 직접노무비는 시중공사노임(대한건설협회발표, 2014.1.1)에 의거, 노무공수에 임율을 곱하여 산출하였다.

③ 경 비

경비는 기계경비로소 공종 작업에 소요되는 장비의 손료를 말하며, 표준품셈에 의거하여 산출하였습니다.

- 손료계수 : 건설공사표준품셈(2014년, 한국건설기술연구원) 및 지반조사 표준품셈-지

질조사, 토질 및 기초조사표준품셈 통합본(2004. 5. 한국엔지니어링진흥협회)을 참고로 하여 산출하였다.

이러한 기준에 다라 순공사비를 재료비, 노무비, 경비의 공사원가계산 순공사비를 산출하였다.

순공사비 산정의 전제 사항은 다음과 같다.

- 시추깊이 : 10m
- 시료채취 개수 : 10개
- 장비가격 : 품셈 및 격조사 단가 적용

이와 같은 전제 및 근거로 인공동결 공법을 이용한 불교란 시료채취기술의 소요비용을 산출한 결과는 다음과 같다.

10m, 10개 기준(단위:원)

| 공종 | 재료비 | 노무비 | 경비 | 계 |
|---|---|---|---|---|
| 천공기계기구설치 | | 291,370.0 | | 291,370.0 |
| 일반시료채취 | 2,966,940.2 | 15,400,835.9 | 1,550,264.9 | 19,918,041.0 |
| 폐공 및 마무리 | | 799,209.4 | | 799,209.4 |
| 합계 | 2,966,940.2 | 16,491,415.3 | 1,550,264.9 | 21,008,620.4 |

품셈에 따른 일반 시추 샘플링의 비용산정 결과는 10m 기준의 시료채취에 3,927,347원, m당 392,734원이 된다.

이와 같은 비용을 요소별로 분석해 보면 다음의 그림과 같다.

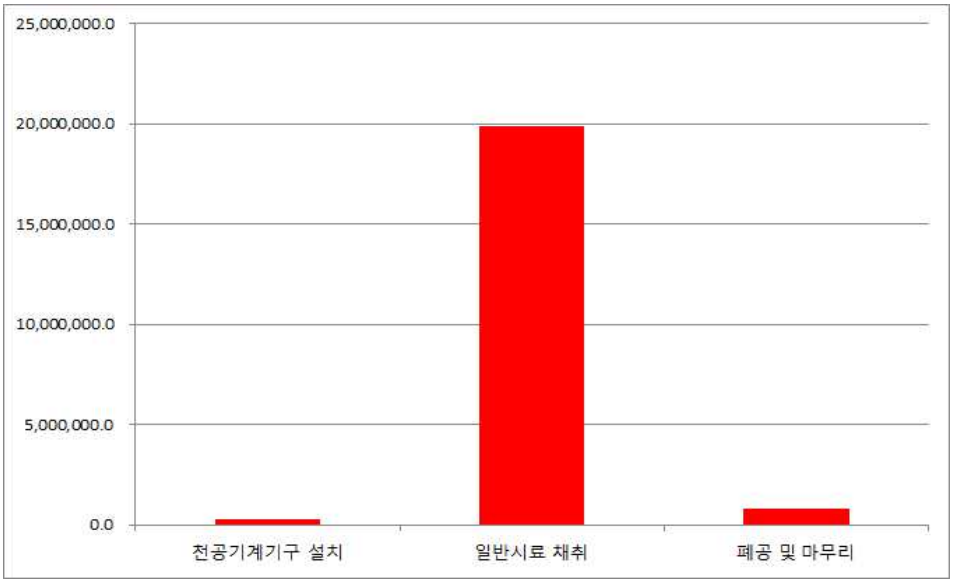



그림 5-6. 인공동결 공법을 이용한 불교란 시료채취기술의 소요별 비용

비용의 구성을 보면, 시료재취를 위한 시추비용이 89.42%로 전체 비용 중 대부분이 시추비용인 것을 볼 수 있다. 이는 실제 모래·사질토 지반과 자갈질토 지반 등 자립이 되 않는 지반의 경우를 불교란시료 채취를 하는 것을 가정하여 시추 난이도를 높게 보았기 때문이다.

이러한 비용의 구성비를 보면 다음의 그림과 같다.

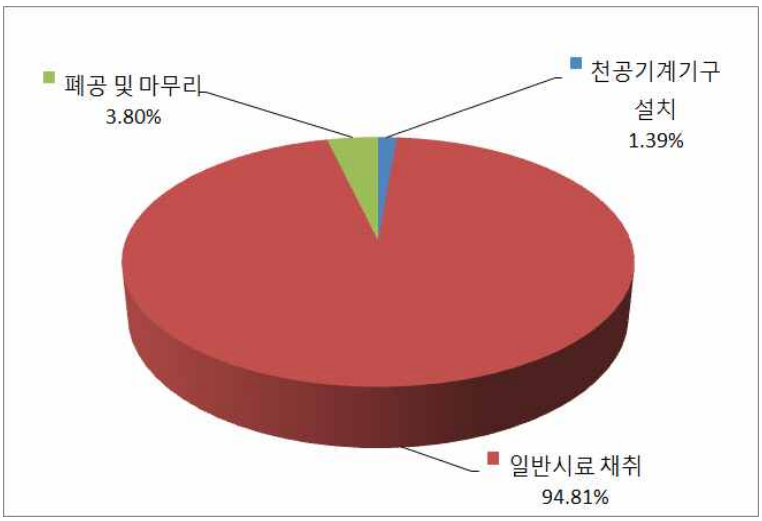



그림 5-7. 인공동결 공법을 이용한 불교란 시료채취기술의 비용 구성비

전체 비용 중 가장 많은 비중을 차지하는 항목은 시료채취이며 불교란시료채취를 위

해 천공 정도의 시료채취 소요공수의 적용에 따른 결과로 볼 수 있다.

일반샘플링에 의한 비용과 동결샘플링에 의한 비용을 비교하여 보면 다음과 같다.

10m기준(단위:원)

| 구분 | 재료비 | 노무비 | 경비 | 계 |
|---|---|---|---|---|
| 동결샘플링 | 131,579 | 573,240 | 1,195,693 | 1,900,512 |
| 일반샘플링 | 296,694 | 1,649,141 | 155,026 | 2,100,861 |

산출된 결과 금액을 구성비항목별로 비교하여 보면 다음과 같다.

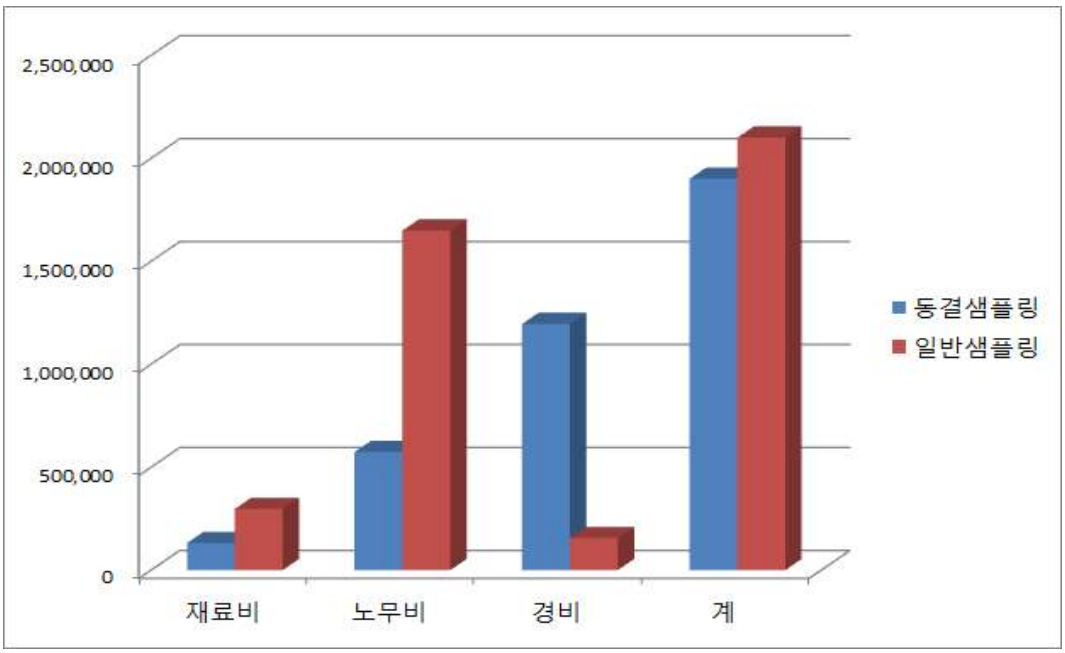



그림 5-8. 인공동결 공법을 이용한 불교란 시료채취기술의 소요비용 항목별

두 공법을 비교하여 보면 동결샘플링의 소요비용이 적고, 비용구조를 보면 동결장비의 비중이 큰 동결샘플링이 경비와 재료비의 비중이 더 큰 것을 볼 수 있다.

교환가치로 적용하여 대체공법의 비용인 일반채취에 소요되는 비용을 편익으로 적용하여 비용편익 분석을 할 수 있을 것이다.

비용·편익 측면에서 경제성의 내용을 분석해 보면,

비용·편익비율의 공식은 $\frac{B}{C} = \sum_{t=0}^{n} \frac{B_t}{(1+r)^t} / \sum_{t=0}^{n} \frac{C_t}{(1+r)^t}$ 로 편익비율을 산출하여 보명 1.1(2,100,861원/1,900,512원)로 교환 가치에 의한 편익으로 볼 수 있는 일반 샘플링에 비해 인공동결공법을 이용한 불교란시료 채취기술이 경제성을 가지는 것으로 볼 수 있다.

## 3. 소론

- 비용·편익분석(CBA : cost benefit analysis)을 통한 경제성 분석

비용(Cost)은 기술 및 공법의 소요비용이란 개발된 공법을 적용하여 원하는 결과를 얻을 수 있기까지 소요되는 비용으로 분석.

편익(Benefit)은 대체 기술에 대한 교환가치를 편익으로 보아, 기존의 대체기술로는 시료채취가 불가능 하지만 유사 대체공법에 의한 채취에 소요되는 비용을 기준으로 검토.

- 비용 분석 결과

10m기준(단위:원)

| 구분 | 재료비 | 노무비 | 경비 | 계 |
|---|---|---|---|---|
| 동결샘플링 | 131,579 | 573,240 | 1,195,693 | 1,900,512 |
| 일반샘플링 | 296,694 | 1,649,141 | 155,026 | 2,100,861 |

- 비용·편익 분석을 통한 경제성 분석

편익비율을 산출하여 보명 1.1(2,100,861원/1,900,512원)로 교환 가치에 의한 편익으로 볼 수 있는 일반 샘플링에 비해 인공동결공법을 이용한 불교란시료 채취기술이 경제성을 가지는 것으로 볼 수 있다.

# 제 6 장

# 결론

2장 동결샘플링 시스템 구축 및 현장 성능 평가:

- 1차년도에 개발된 동결관을 현장 적용성 향상을 위해 현장설치 및 해체가 용의하도록 개선하였고, 동결관내 자동냉매공급시스템도 동결관 내부의 온도 및 라인의 압력을 기준으로 액체질소 공급량을 자동으로 제어하는 자동화시스템을 구축함.
- 경남혁신도시 진입교량 건설공사 현장내 포화모래지반을 대상을 개발기술의 현장성능평가를 수행하여, 동결샘플링 시스템의 전체 프로세스(지반동결, 굴착 및 채취, 운반 및 보관, 지반동결 전후 지반물리탐사)를 검증함.
- 지반동결
  - 13m의 동결관을 지반에 삽입한 후, 액체질소 충전용량 9ton의 탱크로리 퍼지카를 이용하여 64hr 동안 평균 공급 유량 55Nm3/hr로 연속동결을 실시하였음.
  - 동결샘플링의 가부를 결정하기 위한 온도조건은 -15℃이고, 동결샘플링 시점을 판단하기위해 방사형 열확산방정식을 이용한 지중온도예측을 수행하였음. 동결관 외주면에서 40cm 떨어진 지점의 최종온도는 약 -27℃로서 동결샘플링이 가능한 온도범위에 있는 것으로 예상되어, 샘플링을 수행함.
- 굴착 및 채취
  - 지반동결을 위한 LN2의 공급을 중단 한 후 동결된 토양에 대해서 동결관을 중심으로 300mm내외의 공간에서 방사방향으로 4개소에 대해 샘플링을 실시하였음.
  - 작업수의 온도를 -5℃로 유지하기 위하여 부동액의 비율은 경제성 등을 고려하여 청수의 15%로 결정하였으며 외기, 드라이아이스의 열량 손실 등을 고려하여 일반적인 드라이아이스의 승화열을 약 25% 저감하여 드라이아이스 사용량을 산정하여 적용하였음.
  - 샘플링시의 비트 및 코아배럴은 다이아몬드 비트 및 더블코어 배럴을 적용하였으며 비트의 회전수는 150rpm을, 작업수의 수량은 5L/min을 적용한 결과, 모래시료뿐만 아니라 자갈시료까지 불교란 상태로 채취할 수 있었음.
- 운반 및 보관
  - 시추시의 지반온도인 -20℃를 유지하도록, 냉동탑차의 온도를 -20℃로 하여, 시

료로의 수분 공급 및 시료의 수분함량의 변화가 발생하지 않도록 비닐랩에 포장하여 운반하였음.

▪ 지반 동결전·후 물리탐사

- 인공동결지반의 경우 동결전·후 전기비저항, 토모그라피 탐사에서는 동결영역을 확실히 추정하기는 곤란하였음. 단, 표면파탐사에서는 동결후 Vs파가 큰 폭으로 상승하는 것으로 나타났으나, 동결영역의 경계를 확실히 추정하기는 곤란하였음.
- 자연동결지반의 경우 동결전·후 전기비저항, 표면파탐사에서 동결영역에서 공학적 변화가 뚜렷하게 나타나, 인공동결지반의 경우와 비교해서는 동결영역의 추정이 용이한 것으로 나타남.

3장 지반동결시스템 실내성능평가 :

- 지반온도경시변화 예측프로그램 작성에 있어 지하수의 상변화, 즉, 잠열을 겉보기 열용량으로 고려하는 이론을 유한차분해로 식을 전개하였고, 이를 범용 소프트웨어인 Microsoft Excel을 이용하여 작성하였음.
- 잠열을 열용량개념으로 고려한 해석모델은 실제실험결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타나, 실용상 적용성이 충분한 것으로 판단됨.
- 열해석 시뮬레이션에 있어서 경계조건의 영향이 매우 큰 것으로 나타나, 실험수행시 경계조건에 해당하는 온도를 정확히 측정할 필요가 있음.
- 비열, 밀도, 열전도계수 각각이 해석에 미치는 영향은 인정되나, 임의 토사에 있어서 조합으로 작용할 때 해석결과에 큰 차이를 만들어 내지는 못함.
- 액체질소 사용량은 예측사용량의 1.2~1.3배로 계산되어, 열효율이 70~80%나타났음. 열효율을 열원의 온도조절을 통해 해석에 반영한 결과, 실험값과 예측값의 오차가 줄어들었음.
- 토조내 지하수 흐름을 조절할 수 있는 토조를 제작하였고, 연속적인 액체질소 주입을 위한 3ton용량 저류탱크를 제작하였음.
- 동절기에도 지반인공동결실험이 가능한 전용 야외실험동을 구축하였음.
- 동결시작 23시간 후, 반경 50cm의 동토기둥이 생성되었고, 평균 동결속도는 21.7mm/h(=500mm/23h)로 나타났음. 이는 1차년도의 실험결과인 12mm/h보다 향상된 동결성능이며, 액체질소의 지속적 공급에 따른 효과로 판단됨.
- 액체질소를 지속적으로 주입한 경우의 실험결과는 연속성이 양호하여, 수치해석결

과와도 일치성이 높았음.

4장 동결시료의 교란도 평가 및 시험법 개발:

- 동결샘플링 시료의 교란도를 평가하기 위해 흙의 삼상관계, 탄성파 속도 및 전기비저항을 이용하여 간극비 및 전단강성을 기준으로 하는 교란도 평가방안을 마련하였다.
- 현장에서 채취한 동결시료를 이용하여 설계정수를 산정하기 위해 수행되는 실내실험과정에서의 교란효과를 실시간으로 모니터링 할 수 있는 시험법을 개발함.

5장 동결샘플링 시스템 현장운용 방안 :

- 본 연구에서 개발한 시스템의 현장운용방안에 있어서, 동결샘플링의 전체 프로세스별로 구체적인 현장운용방안을 수립하였음.

# 참 고 문 헌


1. 강민구, 변용훈, 이종섭, 채종길 (2012), “액체질소를 이용한 국소지반의 동결시스템 개발 및 성능평가”, 대한토목학회 정기학술대회, pp. 1294-1297.
2. 곽정민, 정성교, 백승훈, 이영남, 조기영 (2003), “부산점토에 대한 시료채취 기술에 따른 시료교란과 시험방법에 따른 압밀정수의 비교”, 한국지반공학회 논문집, 제19권, 4호, pp. 43-53.
3. 권오일, 백용, 서용석. 임성빈(2006), “동결-융해에 영향을 받는 국내 암반사면의 열화심도 계산”, 2006 대한토목학회 정기학술대회, pp.1156-1159
4. 김영진, 김현민 (2003), “피스톤 샘플러와 대구경 샘플러로 채취한 시료의 특성에 관한 연구”, 대한토목학회 논문집, 제23권, 제2C호, pp. 71-77.
5. 김용수, 김수삼, 장범수, 신창건(2004), “동결융해 반복에 따른 화강풍화토의 공학적 특성 분석”, 2004 대한토목학회 정기학술대회, pp.5408-5412
6. 박정희, 홍승서, 김영석, 이종섭(2011), ″흙의 동결 시 전단파의 특성변화″, 2011 한국지반공학회 학술 발표회, pp.330-336
7. 박정희, 강민구, 채종길, 이종섭(2012), ″표면장력과 온도변화에 의한 전단파 속도변화″, 2012 한국지 반공학회 학술발표회, pp.1547-1552
8. 박정희, 홍승서, 김영석, 이종섭 (2012), “흙의 동결에 의한 모래-실트 혼합토의 탄성파 특성“, 지반환경공학회 논문집, 제13권, 4호, pp. 27-36.
9. 윤여원, 김세은, 강병희, 강대성 (2003) 화강풍화토의 동결-융해 후의 동적거동, 한국지반공학회지, 제 19권, 5호, pp. 69-78
10. 이세현, 서원석, 윤준웅, 김동수 (2006), “모관흡수력 조절을 이용한 다짐 후 함수비 변화에 따른 노상토의 탄성계수 평가를 위한 시스템 개발”, 2006 한국도로회 학술발표회, pp. 85-94.
11. 이종섭, 이창호 (2006), “벤더엘리먼트 시험의 원리와 고려사항”, 한국지반공학회 논문집, 제22권, 5호, pp. 47-57
12. 이창호, 윤형구, 이우진, 이종섭 (2008), “고결된 Engineered Soils의 탄성파 특성”, 한국지반공학회지, 제 24권, 2호, pp.87-97
13. 조계춘, 이인모 (2002), “탄성파를 이용한 흙의 특성연구”, 한국지반공학회 논문집, 제18권, 6호, pp. 83-101.

14. 片山功藏 · 齊藤彬夫 · 服部　賢 : 非定常熱伝導の數値解法, pp.189~197, 1976.
15. 齊藤武雄 : 移動境界伝熱學, 養賢堂, pp.61~62, 1994.
16. 土谷富士夫　:　冬季の寒冷氣候を利用した土塊凍結層の長期保存とその熱的解析, 1986, 1987, 1988年科學研究補助金(一般研究C)研究成果報告書, pp.1~83, 1989.
17. 福田正己 · 石崎武志 : 平衡地表面溫度による土塊凍結深推定モデル, 雪氷, Vol.42, No.2, pp.71~80, 1980.
18. 齊藤武雄 : 移動境界伝熱學, 養賢堂, pp.25~26, 1994.
19. 齊藤武雄 : 數値伝熱學, 養賢堂, pp.167~169, 1996.
20. ASTM D854 (2006), Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, AnnualBookofASTMStandard
21. ASTM D4253 (2006), Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table, AnnualBookofASTMStandard.
22. ASTM D4254 (2006), Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils Calculation of Relative Density, Annual Book of ASTM Standard.
23. Bachmann, J., and Ploeg, R. R. (2002), "A review on recent developments I soil water retention theory: interfacial tension and temperature effects", Journalofplantnutritionandsoilscience,Vol.165,No.4,pp.468-478.
24. Bishop, A. W. and Blight, G. E. (1963), "Some aspects of effective stress in saturated and unsaturated soils", Geotechnique,Vol.13,No.3,pp.177-197.
25. Chahal, R. S. (1965), " Effect To Temperature and Trapped Air on Matric Suction", Soilsciene,Vol.100,No.4,pp.262-266.
26. Chaney, R. and Mulilis, P. J. (1978), Suggested method for soil specimen remolding by wet raining, Geotech.TestingJ.ASTM,Vol.1,No.2,pp.107-108.
27. Cho, G. C. and Santamarina J. C. (2001), Unsaturated particulate materials-particle-level studies, Journal of Geotech GeoenvironEng, ASCE, Vol.127, No.1, pp.84 - 96
28. Christ, M., and Park, J. B. (2009), Ultrasonic technique as tool for determining physical and mechanical properties of frozen soils, Cold Regions Science and Technology, Vol.58, pp.136 - 142.

29. Christ, M. and Park, J. B. (2011), “Determination of elastic constants of frozen rubber-sand mixes by ultrasonic testing”, Journal of cold regions engineering, Vol.25, No.4, pp.196-207.
30. Dallavalle, J. M. (1943), “Micrometrics”, Pitman, London.
31. Das B. M.(2008), Advanced soil mechanics. Taylor & Francis Group, London. pp.567
32. Deschartres, M. H., Cohn-Tenoudji, Fr., Aguirre-Puente, J. and Khastou, B. (1988), Acoustic and Unfrozen Water Content Determination, In Proc.5th Inl. Conf.on Permafrost, pp.324-328.
33. Gittens, G. J. (1968), “Variation of Surface Tension of Water with Temperature”, Journal of Colloid and Interface Science, Vol.30, No.3, pp. 406-412.
34. Grant, S. A., and Bachmamm, J. B. (2002), “Effect of temperature on capillary pressure”, Geophysical monograph, Vol.129, pp.199 - 212.
35. Hopmans, J. W, Dane, J. H. (1986), “Temperature Dependence of Soil Water Retention Curves1”, Soi lScience Society of America journal, Vol.50, No.3, pp.562-567.
36. Hong, S. S., Kim, Y. S., Kim, H. S., and Bae, G. J. (2010), A Fundamental Study of Artificial Ground Freezing, 2010 Korean Geo-Environmental Society Fall Conference, pp.417-421.
37. IAPWS (1994): International Association for the Properties of Water and Steam Release on Surface tension of Ordinary Water Substance.
38. Ishihara, K., Huang, Y., and Tsuchiya, H. (1998). Liquefaction Resistance of Nearly Saturated Sand as Correlated with Longitudinal Wave Velocity. Proc. Biot Conf. on Poromechanics, Poromechanics - A Tribute to Maurice A. Biot, Thimus, J.F., Abousleiman, Y. Cheng, A.H.D. Coussy, O., and Detournay, E., eds, pp 583-586.
39. Kayser, W. B. (1975), “Temperature Dependence of the Surface Tension of Water in Contact with Its Saturated Vapor”, Journal of Colloid and Interface Science, Vol.56, No.3, pp.622-627.
40. Kim, Y. C., Bae, J. H., and Song, W. K. (2002), An experimental Study on

the Unfrozen Water Contents and Ultrasonic Wave Velocity in Frozen Soil, Journal of Korean Society of CivilEngineers, Vol2, No3-C, pp.207-217.

41. Kim, Y. C. (2003), An Experimental Study on the Electrical Resistivity and Ultrasonic Wave Velocity in Frozen Soil, Korean Geoenvironmental Society, 2003 conference, pp.135-142.
42. Kramer, S. L. (1996)," Geotechnical earthquake Engineering", Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River.
43. Lechman, J., Lu, N. (2008), "Capillary Force and Water Retention between Two Uneven-Sized Particles", Journal of Engineering mechanics, ASCE, Vol.134, No.5, pp.374-384.
44. Lee, I. M. (2011), Principle of soil mechanics, Saeron, Seoul, pp. 566.
45. Lee, I. M., Hung Truong, Q., Kim, D. H., and Lee, J. S. (2009). Discontinuity detection ahead of a tunnel face utilizing ultrasonic reflection: Laboratory scale application. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.24, No.2, pp.155-163.
46. Lee, J. S. and Lee, C. H. (2006), Principles and Considerations of Bender Element Tests, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol.22, No.5, pp.47-57.
47. Lee, J. S. and Santamarina, J. C. (2006). Discussion "Measuring Shear Wave Velocity Using Bender Elements" By Leong, E. C., Yeo, S. H., and Rahardjo, H. (Geotechnical Testing Journal, Vol. 28, No. 5), Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol.29, No.5, pp.439-441.
48. Lee, C., Truong, Q. H., Lee, J. S. (2010), Cementation and Bond Degradation of Rubber-Sand Mixtures, Canadian Geotechnical Journal,Vol. 47, No. 7, pp. 763-774
49. Lee, J. S. and Santamarina, J. C. (2005), Bender Elements: Performance and Signal Interpretation, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.131, No.9, pp.1063-1070.
50. Likos, W. J. (2009), "Pore-Scale Model for Water Retention in Unsaturated Sand", Proceeding of the 6$^{th}$ international conference on Micro mechanics of Granular Media, pp.907-910.

51. Liu, H. H., and Dane, J. H. (1993), “Reconciliation between Measured and Theoretical Temperature Effects on Soil Water Retention Curves”, Soil Science Society of America journal, Vol.57, No.5, pp.1202-1207.
52. Lu, T. X., Biggar, J. W., and Nielsen, D. R. (1994), “Water Movement in Glass Beads Porous Media, 2., Experiments of Infiltration and Finger Flow”, Water Resour. Res, Vol.28, pp.3283-3290.
53. Molenkemp, F., and Nazemi, A. H. (2003), “Interactions between two rough spheres, water bridge and water vapor”, Geotechnique,Vol.53,No.2,pp.255-264.
54. Nakano, Y., Arnold, R. (1973), Acoustic properties of frozen Ottawa sand, Water Resources Research, Vol.9, No.1, pp.178 - 184.
55. Nakano, Y., Martin, R. J. and Smith, M. (1972), Ultrasonic Velocity of the Dilation and Shear Wave in Frozen Soil, Water Resources Research, Vol.8, No.4, pp.1024-1030.
56. Nimmo, J. R., and Miller, E. E. (1986), “The temperature dependence of isothermal moisture vs. Potential characteristics of soils”, Soil Science Society of America journal, Vol.50, No.5, pp.1105-1113.
57. Park, J. H., Hong, S.S., Kim, Y, and Lee, J.S. (2012-a), Characteristics of Elastic Waves in Sand-Silt Mixtures due to Freezing, Journal of Korean Geoenvironmental Society, Vol.13, No4, pp.27-36.
58. Park, J. H., Kang, M. G., Seo, S. Y., and Lee, J. S. (2012-b), The Effect of Surface Tension on Shear Wave Velocities according to Changes of Temperature and Degree of Saturation, JournalofKoreanSocietyofCivilEngineers,Vol32,No6C,pp.285-293
59. Qi, J.L., Ma, W., and Song, C. (2006). “Influence of freeze - thaw on engineering properties of a silty soil”, Cold Regions Science and Technology, Vol. 53, No.3, pp. 397-404
60. Qi, J.L., Ma, W., and Song, C. (2006). “Ultrasonic technique as tool for determining physical and mechanical properties of frozen soils”, Cold Regions Science and Technology, Vol. 58, No.3, pp. 136-142.
61. Roesler, S. K. (1979), Anisotropic Shear Modulus due to Stress Anisotropy, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.105, No.7,

pp.871-880.

62. Romero, E., Gens, A., and LLotet, A. (2001), “Temperature effects on the hydraulic behavior of an unsaturated clay”, Geotechnical and Geological Engineering, Vol.19, pp.311-322.
63. Rose, J.(1999), Ultrasonic Waves in Solid Media, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp.476.
64. Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, M. A. (2001), Soils and Waves-Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring, Wiley, NewYork, pp.508
65. Sasitharan, S., Robertson, P.K., Sego, D.C.(1993), "Sample disturbance from shear wave velocity measurements", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, No.1, pp.119-124.
66. Sawangsuriya, A., Fall, M., and Fratta, D. (2008), “Wave-Based Techniques for Evaluating Elastic Modulus and Poisson’s Ratio of Laboratory Compacted Lateritic Soils”, Geotechnical and Geological Engineering, Vol.26, No.5, pp.567-578.
67. Shin, E. C and Kim, J. S. (2011), Experimental Study on Freezing Soil Barrier Wall for Contaminant Transfer Interception, Journal of Korean Geosynthetics Society, Vol.10, No.2, pp.29-34.
68. Truong, Q. H., Eom, Y. H., Byun, Y. H., and Lee, J. S. (2010), Characteristics of Elastic Waves According to Cementation of Dissolved Salt, Vadose Zone Journal, Vol.9, No.3, pp.662-669.
69. Timur, A.(1968), Velocity of compressional waves in porous media at permafrost temperatures. Geophysics,Vol.33,No.4,pp.584 - 595.
70. Tanaka et al. (2000): Small strain characteristics of soils in Hualian, Taiwan, Soils and Foundations, 30(3), 111-126.
71. Vaid, Y. P. and Nequssey, D. (1984), Relative density of air and water pluviated sand, Soils and Foundations, Vol.24, No.2, pp.101-105.
72. Wang, D. Y., Zhu, Y. L., Ma, W., and Niu, Y. H. (2006), Application of Ultrasonic Technology for Physical-Mechanical Properties of Frozen Soil, Cold Regions Science and Technology, Vol. 44, pp. 12-19.

73. Wood, A. B. (1941), A textbook of sound, The Mac-millan Company, New York. pp.578.
74. Wyllie, M. R., Gregory, A. E., and Gardner, L. W. (1956), Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. Geophysics, Vol.21, No.1, pp.41 - 70.
75. Yong, R. N., Boonsinsuk, P., and Yin, C. W. P.(1985), Alteration of soil behaviour after cyclic freezing and thawing, The 4th International Symposium on Ground Freezing, pp.187-195
76. Yoon, H. K., and Lee, J. S. (2010), Field velocity resistivity probe for estimating stiffness and void ratio. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.30, No.12, pp.1540-1549.
77. Yu, J. D., Bae, M. H., Han, S. I., Lee, I. M., and Lee, J. S. (2008). Defect ratio evaluation of the rock bolt grouting using the reflection method of guided ultrasonic waves, Journal of Korean Tunneling and under ground space association, Vol.10, No.3, pp.221-232.
78. Yu, P. and Richart, F. E. Jr., (1984), Stress Ratio Effects on Shear Modulus of Dry Sands, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.110, No.3, pp.331-345.
79. Wilkinson, G. E. and Klute, A. (1962), The Temperature Effect on the Equilibrium Energy Status of Water Held by Porous Media1, Soil Science Society of America journal, Vol. 26, No. 4, pp. 326-329.
80. Zumdahl, S.S and Zumdahl,S. A. (2008), Chemistry, Brooks Cole, Belmont, p.477.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토해양부에서 시행한 건설기술혁신사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.