2005건설기술기반구축사업 최종보고서(안)

R&D/05기반기술-A06-01

하상재료를 이용한 하천제방 축조기술 연구

2007. 6.

주관연구기관 / 한국건설기술연구원
위탁연구기관 / 인천대학교
영남이공대학
(주)삼보지오텍

건 설 교 통 부
한국건설교통기술평가원

Construction & Transportation R&D Report

제 출 문

건설교통부장관(한국건설교통기술평가원장) 귀하

본 보고서를 “하상재료를 이용한 하천제방 축조기술 연구”의 최종보고서(안)으로 제출합니다.

2007. 6. 29.

주관연구기관 : 한국건설기술연구원
원 장 정 낙 형
위탁연구기관 : 인천대학교
영남이공대학
(주)삼보지오텍

■ **총 괄 연 구 책 임 자** / 책임연구원 김진만 연구총괄

■ **주관연구기관 참여연구원** / 선임연구원 이대영 국내 하상토 관련 기준 조사
/ 연 구 원 최봉혁 수치해석 및 현장시험
/ 선임연구원 김경민 국내외 연구동향 및 지오튜브 현장시험
/ 연 구 원 강민수 현장시험
/ 책임연구원 조삼덕 하상토 관련 설계 및 시공기법 조사
/ 선임연구원 김주형 실내 모형실험

■ **위탁연구기관 참여연구원** / 인 천 대 최계운 외 하상토 관련 법규 및 퇴적메커니즘
/ 영남이공대학 김학삼 외 하상토의 공학적 특성 분석
/ 삼보지오텍 윤종렬 외 현장 물리탐사기법 및 하상토부존량 평가

요 약 문

Ⅰ. 제 목

하상재료를 이용한 하천제방 축조기술 연구

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

가. 연구개발의 목적

연구개발의 최종 목표는 실내 및 현장실험을 통한 합리적인 장비선정, 포설두께, 다짐방법 제시, 장비를 이용한 하상토/양질토 혼합에 따른 품질관리 기법 개발, 하상토 관련 하천설계기준 및 시방서 1차 개정(안) 및 하상토 활용과 관련한 실무지침(조사・설계・시공・품질관리)을 제시하는 것이다.

1차년도에는 하상토 및 제방축조관련 국내외 자료 조사・분석, 국내 하상토 발생현황 분석, 하상토의 공학적 특성 평가, 하상토의 안정 처리에 따른 공학적 특성 평가 등을 통해 하상토를 이용한 신개념 제방 축조 설계 기법(I)을 제시하고 하상토 이용 제방축조기준 개정(안) 및 실무지침서를 작성하였다.

2차년도에는 하상토의 침식 및 마찰특성 평가, 하상토의 공학적 특성에 따른 합리적인 제방 설계법 제시, 하상토를 이용한 신개념 제방 축조 설계 기법(II), 하상토 이용 제방축조의 기준 개정 및 실무지침서(II)를 제시하였다.

나. 연구개발의 필요성

하천제방의 축제 재료와 관련하여 1990년대까지는 하상토를 이용하여 제방공사를 시행하였으나, 최근 피해사례를 감안하여 다짐 및 재료관리가 어려운 하상토의 축제 재료로의 사용을 원칙적으로 금지하고, 2002년 개정된 하천설계기준을 통하여 하천제방의 축제 재료로써 전단강도 및 투수특성이 양호한 양질토를 사용하여 시공토록 지침이 시달되고 있는 실정이다.

하천제방의 안정성 향상을 위해서는 양질의 성토재료 사용, 철저한 다짐관리,

적절한 수리구조물 및 차수벽 설치 등이 필요하며, 여기서 하천제방 축조를 위한 많은 양질의 성토재료는 시공 현장 쉽게 구할 수 없어 하천제방의 경제성 및 안정성에 있어서 가장 중요한 요인이다. 따라서 경제적이고 안정적인 하천제방 축조를 위해서는 하상재료를 이용한 제방축조기술의 연구가 필수적이다.

미국, 유럽, 일본 등 선진국에서는 이미 안정적이고 경제적인 하천제방 축조기술을 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 최근 국내에서도 친환경적인 최적설계기법의 확립을 위한 하상토 활용 하천제방 축조기술에 대한 관심이 높아지고 있다.

따라서 하상토의 공학적 특성 평가, 현장 적용성 실험을 통하여 표준화된 조사, 설계 및 시공방법을 마련하고 하천설계기준, 시방서 등에 반영하여 안전한 하상토 활용방법 정립이 필요하다. 또한, 긴급 보수공사 등에 활용을 위하여 하상준설토 및 폐자원(석분토 등)을 토목섬유 컨테이너에 담아서 활용하는 “지오튜브 공법”에 대한 설계·시공기법 정립이 필요하다.

신뢰성 있는 하상토 활용기술 개발은 현장 적용시 하상 준설장비와 제방축조 공사비를 절감할 수 있으며, 환경보존 및 폐자원 활용 등에 적용될 수 있으므로 본 연구를 통해 하상토의 합리적 활용 방안 제시 및 하상토 활용 제방축조방법의 표준화된 조사, 설계, 다짐 및 품질 관리 방법 개발이 필요하다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

가. 하상토 관련제도 및 연구동향 분석

(1) 하상토 관련 국내 관련 제도

(2) 하상토 관련 국내외 연구 동향

(3) 하상토의 퇴적 메커니즘 분석 및 발생현황

(4) 현장 다짐 및 혼합장비

나. 국내 하상토의 제방 성토재로서 적합성 평가

(1) 낙동강 수계 하상토의 발생특성 분석

(2) 국내 하상토의 공학적 특성 분석

(3) 안정 처리된 하상토의 공학적 특성 평가

(4) 현장 시험을 통한 공학적 특성 평가

(5) 하상혼합토의 제체 침투에 대한 안정성 평가

(6) 하상토 부존량 파악을 위한 물리탐사기법

다. 지오튜브를 이용한 하상준설토 제방 설계

(1) 공법 개요 및 시공사례

(2) 국내외 연구동향 분석

(3) 지오튜브 설계

라. 하상토 이용 제방축조기준 개정 및 실무지침서 작성

(1) 하상토 활용 안정처리 기법 제시

(2) 하상토 활용 현장 품질관리 및 설계 기법 제시

Ⅳ. 연구개발결과

가. 하상토 관련제도 및 연구동향 분석

(1) 하상토 관련 국내 관련 제도

◦ 하천설계기준 및 하천공사표준시방서, 댐 설계기준, 환경 관련 기준 조사

(2) 하상토 관련 국내외 연구 동향

◦ 하상토의 하천제방 축조 등 건설재료로서의 재활용에 관한 연구 조사

◦ 국외(미국, 유럽, 일본, 중국)의 하상토 처리방안 및 관리 체계에 대한 연구 조사

(3) 하상토의 퇴적 메커니즘 분석 및 발생현황

◦ 하천에서 유사량 산정공식 적용

◦ 국내외 하상토의 발생 특성

◦ 하도준설 및 준설시공 조사

(4) 현장 다짐 및 혼합장비

◦ 다짐 및 혼합장비의 현황 및 특성

나. 국내 하상토의 제방 성토재로서 적합성 평가

(1) 국내 4대 수계 하상토의 발생특성 분석

◦ 국내 4대 수계(금강, 낙동강, 섬진/영산강, 한강)의 하상토 및 제방재료의 입도시험결과 분석

◦ 하천설계기준 및 NAVFAC 메뉴얼상 부적절한 제방재료로서 하상토 활용에 따른 안정대책 수립 필요

(2) 국내 하상토의 공학적 특성 분석

◦ 국내 하상토의 전단강도특성 분석

◦ 국내 하상토의 투수특성 분석

(3) 안정 처리된 하상토의 공학적 특성 평가

◦ 화강풍화토를 혼합한 하상토의 투수특성 분석

◦ 시멘트를 첨가하여 안정처리한 하상토의 투수특성 분석

(4) 현장 시험을 통한 공학적 특성 평가

◦ 혼합비율에 따른 하상혼합토의 강도특성 평가

(5) 하상혼합토의 제체 침투에 대한 안정성 평가

◦ 침투모형실험 및 모형 단면을 이용한 수치해석

◦ 하상혼합토의 혼합비에 실 단면 수치해석

(6) 하상토 부존량 파악을 위한 물리탐사기법

◦ 하상토 조사 물리탐사기법 및 사례분석

◦ 하상토 부존량 평가를 위한 물리탐사법 현장 적용성 평가

◦ 하상준설량 조사기법 지침

다. 지오튜브를 이용한 하상준설토 제방 설계

(1) 공법 개요 및 시공사례

(2) 연구동향 분석

(3) 지오튜브 설계

◦ 지오튜브의 설계이론 및 설계 시 고려사항

라. 하상토 이용 제방축조기준 개정 및 실무지침서 작성

(1) 실내 및 현장실험을 통한 합리적인 장비선정, 포설두께, 다짐방법 제시

(2) 장비를 이용한 하상토/양질토 혼합에 따른 품질관리 기법 개발

(3) 하상토 관련 하천설계기준 및 시방서 1차 개정(안) 제시

(4) 하상토 활용과 관련한 실무지침서(조사・설계・시공・품질관리) 작성

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

(1) 하상토의 공학적 특성 및 현장 적용성 실험을 통하여 표준화된 조사, 설계 및 시공방법을 마련하고 하천제방설계기준, 시방서 등에 반영하여 하상토 활용방법개발로 안전하고 비용을 절감할 수 있는 하천제방 설계기술로 활용

(2) 하천제방방재계획 수립을 위한 보수・보강 실무지침서로 활용

(3) 하상토 활용 하천제방 축조현장 등에서 설계/시공 관련 기술자들에게 기준 및 지침 제시

(4) 국내에서 발생하는 하상준설토 및 폐자원(석분토 등)의 활성화 및 지오튜브를 이용한 하천제방 축조기법의 개발/적용 및 기술이전

Summary Document

Ⅰ. Subject

Construction Techniques of Levee using Bed Sediment and Dredged Material of River

Ⅱ. The Object and Necessity of Research and Development

Part Ⅰ. The Object of Research and Development

The final object of this study is presented a reasonable equipment selection, spreading depth, compaction method, quality control technique according to bed sediment/good quality mixing method, levee design standard, primary revised specification and practical specification (investigation, design, construction, quality control) concerned with bed sediment by the laboratory tests and field tests.

In the first step study it was suggested that levee design standard using the bed sediment, primary revised specification and practical work specification(investigation, design, construction, quality control) through the review of levee in domestic and abroad, arising condition of bed sediment, evaluation of geotechnical characteristics of bed sediment, evaluation of geotechnical characteristics of stabilized bed sediment.

The purpose of second step study it was suggested that levee design standard using the bed sediment(II), revised specification and practical work specification(investigation, design, construction, quality control)(II) on characteristics of erosion and friction for bed sediment.

Part Ⅱ. The Necessity of Research and Development

Until 1990's levee has constructed using the bed sediment. Recently, levee was damaged cause by problems of compaction, fill material management. It was prohibited as fill material for levee in principle. It is possible to construction of levee with a shear strength and permeability characteristic satisfied as filll materials of a levee through a river design standard revised in 2002.

To improvement of levee stability, it is required that using the good quality fill materials, intensive management, appropriate hydraulic structure and construction of cut-off wall. Hence, it is difficult to acquired that good quality of fill material for levee in field and it is a most important factor of levee construction technology using the bed sediment for safety and economic of levee. Therefore, this study for a levee construction technology using the bed sediment of stability is essential.

Already, it has been preformed to study for safety and economic levee construction technology actively in developed nations such as U.S.A., Europe, Japan. Recently, it is rising that the levee construction technology for establishment of ecotechnology optimum design in domestic.

Therefore, it is needed that the evaluation of geotechnical characteristic of bed sediment, standardized investigation, design and construction method through field application tests, and beneficial use of bed sediment is reflected river design standard and specification. Also, it is necessary a design and construction technology for geotube method which is filled bed sediment or recycling material(stone dust et al.) in geotube for emergency repair construction.

Resonable application technology development of bed sediment will be reduce the bed dredging equipment and a levee construction cost and environmental preservation or apply the utilizing a waste resources.

In this study, it is suggested that levee design standard using the bed

sediment, revised specification and practical specification(investigation, design, construction, quality control) and a design and construction technology for geo tube method.

Ⅲ. Contents and Range of Research and Development

Part Ⅰ. Guideline concerned with Bed Sediment and Technologic Trend Investigation In Domestic & Abroad

(1) Investigation of Guidelines concerned with Bed Sediment In Domestic
(2) Literature Review of concerned with Bed Sediment in Domestic and Abroad
(3) Analysis of Generation Mechanism and Status for Bed Sediment
(4) Field Compaction & Mixing Equipment

Part Ⅱ. Evaluation of Compatibility as Fill Material of Levee

(1) Analysis of Generation Characteristics of Nakdong River Water System
(2) Analysis of Geotechnical Characteristics for Bed Sediment in Domestic
(3) Analysis of Geotechnical Characteristics for Stabilized Bed Sediment in Domestic
(4) Analysis of Geotechnical Characteristics through the Field Tests
(5) Seepage Analysis Levee of consist of Mixed bed sediment
(6) Analysis of Generation Status for Bed Sediment Using the Physical Exploration Technology

Part Ⅲ. Levee Design using Geotextile tube filled with Bed Sediment

(1) Geotube Method and Case Investigation

(2) Literature Review of concerned with Bed Sediment in Domestic and Abroad

(3) Design of Geotube Method

Part Ⅳ. Revising Levee Design Standard & Practice Work Specification

(1) A Proposal of Stabilization Technology using Bed Sediment

(2) A Proposal of Field Quality Control & Design Technology using Bed Sediment

Ⅳ. Research & Development Result

Part Ⅰ. Guideline concerned with Bed Sediment and Technologic Trend Investigation In Domestic & Abroad

(1) Investigation of Guidelines concerned with Bed Sediment In Domestic

◦ Investigation of River Design Standard, River Construction Standard Specification, Dam Design Standard, Environmental Standard Load Transfer Mechanism of Culvert and Conduit

(2) Literature Review of concerned with Bed Sediment in Domestic and Abroad

◦ Investigation of Research for Beneficial use of Bed Sediment as Construction Material

◦ Investigation of Research for Bed Sediment Treatment & Management System in Abroad

(3) Analysis of Generation Mechanism and Status for Bed Sediment

◦ Application of Generation Amount of Bed Sediment

◦ Generation Characteristics of Bed Sediment in Domestic and Abroad
◦ Investigation of Bed Dredging & Dredging Construction
(4) Field Compaction & Mixing Equipment
◦ Characteristics of Compaction & Mixing Equipment

Part Ⅱ. Evaluation of Compatibility as Fill Material of Levee

(1) A Proposal of Stabilization Technology using Bed Sediment
◦ Grain Size Analysis Test for Bed Sediment : Geum Riv., Nakdong Riv., Seumjin Riv., Han Riv.
◦ Comparison to River Design Standard and Grain Size Analysis Test results
(2) Analysis of Geotechnical Characteristics for Bed Sediment in Domestic
◦ Analysis of Shear Strength for Bed Sediment
◦ Analysis of Permeability for Bed Sediment
(3) Analysis of Geotechnical Characteristics for Stabilized Bed Sediment in Domestic
◦ Analysis of Permeability for Weathered Soil Mixed-Bed Sediment
◦ Analysis of Permeability for Stabilized Bed Sediment
(4) Analysis of Geotechnical Characteristics through the Field Tests
◦ Analysis of Strength Characteristics by Mixing Ratio
(5) Seepage Analysis Levee of consist of Mixed bed sediment
◦ Seepage Model Test and Numerical Analysis using Model Section
◦ Numerical Analysis of Practice Section Analysis by Mixing Ratio
(6) Analysis of Generation Status for Bed Sediment Using the Physical Exploration Technology
◦ Physical Exploration Technology & Case Investigation
◦ Field Application of Physical Exploration Technology for Estimation of Generation Amount of Bed Sediment
◦ A Proposal of Investigation Specification of Bed Sediment

Part . Ⅲ Levee Design using Geotube filled with Bed Sediment

(1) Geotube Method and Case Investigation

(2) Literature Review of concerned with Bed Sediment in Domestic and Abroad

(3) Design of Geotube Method

◦ Consideration on Design theory and Design

Part Ⅳ. Revising Levee Design Standard & Practice Work Specification

(1) A Proposal of Stabilization Technology using Bed Sediment

◦ Reasonable Equipment Selection, Spreading Depth, Compaction Method by the laboratory tests and field tests

◦ Development of Quality Management Technology by Bed Sediment/Good Quality Mixing using Equipment(backhoe et al.).

(2) A Proposal of Field Quality Control & Design Technology using Bed Sediment

◦ A Proposal of Levee Design Standard & Revised(I) Specification

◦ A Proposal of Beneficial Use of Bed Sediment and Practical Specification (Investigation, Design, Construction, Quality Control)

Ⅴ. Application Plan of R&D Results

(1) Reducing the Bed Dredging Equipment and a Levee Construction Cost and Environmental Preservation or Apply the Utilizing a Waste Resources.

(2) Utilization of Repairing & Reinforcement for Establishment of Disaster Prevention Plan of Levee.

(3) Application of Practical Design/Construction Specification for related

engineer.

(4) Design and construction technology for Geotube method which is filled bed sediment

목 차

제 1 장 서 론 ····· 1

제 1 절 연구개발의 필요성 ····· 1

제 2 절 연구개발 목표 및 내용 ····· 2

제 3 절 추진전략 및 방법 ····· 3

제 4 절 기대성과 및 활용방안 ····· 5

제 2 장 국내외 기술개발 현황 ····· 7

제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과 ····· 9

제 1 절 하상토 관련제도 및 연구동향 분석 ····· 9

1. 하상토 관련 제방붕괴 현황 및 제도 ····· 10

가. 하상토 관련 제방붕괴 현황 ····· 10

나. 하상토 관련 국내 규정 ····· 14

(1) 하천설계기준 ····· 14

(2) 하천공사표준시방서 ····· 18

(3) 댐 설계기준(2003, 한국수자원학회) ····· 21

(4) 하상토 준설과 관련된 환경기준 ····· 24

다. 소결론 ····· 29

2. 하상토 관련 국내외 연구 동향 ····· 30

가. 국내 ····· 30

(1) 하상토 오염 및 처리 대책 관련 연구 ····· 30

(2) 하상토 공학적 특성 평가 및 활용 관련 연구 ····· 31

(3) 물리탐사를 이용한 하상토 관련 연구 ····· 34

나. 국외 ····· 35

(1) 미국 ····· 35

(2) 유럽 ····· 43

(3) 일본 ····· 48

(4) 중국 ····· 65
다. 소결론 ····· 68
3. 하상토의 퇴적 메커니즘 분석 및 발생현황 ····· 70
가. 하상토의 퇴적 메커니즘 ····· 70
(1) 하상토의 형성과 이동 ····· 70
(2) 하상토의 침식 및 퇴적과정 ····· 71
(3) 하상토의 퇴적량 산정 ····· 75
나. 국내·외 하상토의 발생 특성 ····· 87
(1) 하상토 퇴적 영향 ····· 87
(2) 국내 하상토 발생현황 ····· 88
(3) 낙동강 하상토 특성 ····· 93
다. 하도준설 ····· 113
(1) 국내 하도준설사업현황 ····· 113
(2) 하도준설의 개요 ····· 114
(3) 준설선의 선정 및 시공 ····· 114
라. 소결론 ····· 123
4. 현장 다짐 및 혼합장비 ····· 124
가. 다짐장비의 현황 및 특성 ····· 124
(1) 현장다짐 개요 ····· 124
(2) 다짐장비 ····· 131
(3) 혼합장비 ····· 137

제 2 절 국내 하상토의 제방 성토재로서 적합성 평가 ····· 139
1. 국내 하천제방 및 하상토 재료 특성 조사 ····· 139
가. 실험 개요 및 방법 ····· 139
나. 실험결과 및 분석 ····· 141
(1) 금강 수계 ····· 141
(2) 낙동강 수계 ····· 148
(3) 섬진/영산강 수계 ····· 155
(4) 한강 수계 ····· 160

다. 소결론 ····· 163
2. 국내 하상토의 공학적 특성 분석 ····· 166
가. 실험개요 ····· 166
(1) 실험목적 ····· 166
(2) 실험대상시료 ····· 166
(3) 실험항목 ····· 167
나. 실험결과 및 분석 ····· 168
(1) 비중 ····· 168
(2) 입도분포 ····· 168
(3) 액성한계와 소성한계 ····· 170
(4) 다짐특성 ····· 171
(5) 투수특성 ····· 173
(6) 전단특성 ····· 174
다. 소결론 ····· 175
3. 불포화 하상토의 전단강도특성 ····· 177
가. 이론 분석 ····· 177
(1) 불포화전단강도 ····· 177
(2) 불포화투수계수 ····· 179
나. 불포화토 전단강도실험 ····· 180
(1) 실험 방법 및 장비 ····· 180
(2) 실험 대상 시료 ····· 183
다. 불포화 삼축실험 결과 ····· 184
(1) ONI 시료 ····· 184
(2) Clay 시료 ····· 188
(3) SP 시료 ····· 192
(4) 결과 비교 ····· 196
라. 불포화 투수실험결과 ····· 198
(1) 함수특성곡선 ····· 198
(2) 불포화투수곡선 ····· 199
마. 소결론 ····· 200

4. 안정 처리된 하상토의 공학적 특성 평가 ····· 202
가. 실험개요 ····· 202
(1) 실험목적 ····· 202
(2) 실험대상시료 ····· 202
나. 안정처리된 왜관하상토-1(SP)의 공학적 특성 평가 ····· 203
(1) 실험항목 및 방법 ····· 203
(2) 실험결과 및 분석 ····· 204
다. 안정처리된 실트질 흙(ML)의 공학적 특성 평가 ····· 213
(1) 실험항목 및 방법 ····· 213
(2) 실험결과 및 분석 ····· 214
라. 안정처리된 점토(CL)의 공학적 특성 평가 ····· 230
(1) 실험항목 및 방법 ····· 230
(2) 실험결과 및 분석 ····· 230
마. 소결론 ····· 236
5. 현장 시험을 통한 공학적 특성 평가 ····· 241
가. 현장 시험 개요 ····· 241
(1) 시험목적 ····· 241
(2) 시험대상시료 ····· 241
(3) 시험항목 ····· 243
나. 현풍 하상토(SP)의 공학적 특성 ····· 245
(1) 현장 다짐 특성 ····· 245
(2) 현장 다짐에 따른 강도 특성 ····· 250
(3) 현장 혼합 특성 ····· 252
다. 인천 하상토(ML)의 공학적 특성 ····· 254
(1) 현장 다짐 특성 ····· 254
(2) 현장 다짐에 따른 강도 특성 ····· 259
(3) 현장 혼합 특성 ····· 261
라. 소결론 ····· 264
6. 하상혼합토의 제체 침투에 대한 안정성 평가 ····· 266
가. 침투모형실험 ····· 266

(1) 모형실험 개요 ····· 266
(2) 모형실험 결과 ····· 269
나. 모형 단면을 이용한 수치해석 ····· 270
(1) 수치해석 개요 ····· 270
(2) 수치해석 결과 ····· 270
다. 하상혼합토 이용 축조제방의 안정성 평가 ····· 272
(1) 수치해석 개요 ····· 272
(2) 수치해석 결과 ····· 274
라. 소결론 ····· 278
7. 하상토 부존량 파악을 위한 물리탐사기법 ····· 280
가. 수상물리탐사기법 특성 ····· 280
(1) 수상물리탐사법의 종류 ····· 281
(2) 수상물리탐사법 적용성 분석 ····· 282
나. 하상토 조사 물리탐사기법 및 사례분석 ····· 283
(1) 지하투과레이다탐사 ····· 283
(2) 굴절법탄성파탐사 ····· 288
(3) 음파탐사 ····· 294
다. 하상토 부존량 평가를 위한 물리탐사법 현장 적용성 평가 ····· 298
(1) 조사개요 ····· 298
(2) 고도측량 ····· 300
(3) 시추조사 ····· 301
(4) GPR탐사 ····· 302
(5) 굴절법탄성파탐사 ····· 307
라. 하상토 부존량 평가를 위한 물리탐사법 적용 기준 ····· 315
(1) 발진원의 주파수 특성에 따른 분해능(resolution) 분석 ····· 315
(2) 발진원의 주파수 특성에 따른 가탐심도 분석 ····· 316
(3) 하천심도에 따른 물리탐사 적용성 분석 ····· 316
마. 하상준설량 조사기법 지침 ····· 316
(1) 하상특성별 물리탐사법 선정 기준 ····· 317
(2) 탐사측선 및 탐사파라미터 설계 ····· 317

(3) 레벨측량 ····· 319
(4) 시추조사 ····· 319
(5) 물리탐사 자료 해석 ····· 319
(6) 퇴적층 심도 자료 2차원 내삽 ····· 319
(7) 대상지역내 퇴적층 부피 계산 ····· 319
바. 소결론 ····· 320
8. 물리탐사법을 이용한 하상토의 공학적 특성 분석 ····· 321
가. 지하매질의 탄성파 속도와 탄성계수 ····· 322
(1) 지하매질의 탄성파 속도 특성 ····· 322
(2) 지하매질의 탄성계수 특성 ····· 324
나. 전단파 속도측정을 위한 물리탐사 방법 ····· 326
다. 벤더 엘러멘트를 이용한 실내 전단파 측정 실험 ····· 327
(1) 실험원리 ····· 327
(2) 벤더 엘리먼트의 고정 및 방수 처리 ····· 329
(3) 실험장치 및 실험방법 ····· 330
라. 현장실험 ····· 331
(1) 실험방법 및 내용 ····· 331
(2) 실험시료 ····· 333
(3) 실험결과 및 분석 ····· 334
마. 소결론 ····· 341

제 3 절 지오튜브를 이용한 하상준설토 제방 설계 ····· 343
1. 공법 개요 및 국내외 시공사례 ····· 343
가. 공법 개요 ····· 343
나. 국내외 시공사례 ····· 345
(1) 연진항 재해 위험지구 정비사업 ····· 346
(2) 울진원자력 5, 6호기 온배수 저감시설 공사 ····· 346
(3) 일산대교 건설공사 ····· 347
(4) 미국 Florida의 Tampa만 ····· 347
(5) 필리핀 마닐라 Wack-Wack 골프장 ····· 348

(6) 미국 텍사스의 Bolivar 반도 ····· 349
다. 소결론 ····· 349
2. 국내외 연구 및 기술동향 분석 ····· 350
가. 국내 ····· 350
나. 국외 ····· 351
다. 소결론 ····· 352
3. 지오튜브 제방의 설계 및 안정성 평가기법(안) ····· 353
가. 지오튜브의 설계이론 ····· 353
나. 지오튜브 제방의 안정성 평가기법(안) ····· 356
(1) 활동에 대한 안정 ····· 356
(2) 전도에 대한 안정 ····· 357
(3) 지반지지력에 대한 안정 ····· 359
다. 지오튜브의 공학적 특성 평가 ····· 360
(1) 실험 내용 및 범위 ····· 360
(2) 실험 항목 및 방법 ····· 361
(3) 실험결과 ····· 374
라. 호안시스템과 흙시료와의 마찰특성 평가 ····· 376
(1) 호안 기능 및 설계 방법 ····· 376
(2) 실험개요 ····· 381
(3) 실험결과 및 분석 ····· 386
마. 소결론 ····· 390
4. 지오튜브를 이용한 현장시험시공 ····· 392
가. 시험시공 개요 ····· 392
(1) 현장 뒤채움흙 ····· 393
(2) 지오튜브 ····· 394
나. 시공방법 ····· 394
다. 현장계측 ····· 399
(1) 평가항목 및 계측기 종류 ····· 399
(2) 계측기 매설 위치 및 방법 ····· 400
라. 현장 계측 결과 ····· 403

(1) 토압 및 변형특성 ····· 403
(2) 침하특성 ····· 405
(3) 제체 활동 ····· 405
(4) 지오튜브의 변형 ····· 406
(5) 간극수압 ····· 410
마. 지오튜브 제방의 안정성성 평가 예 ····· 411
바. 지오튜브 제방의 경제성 평가 예 ····· 415
사. 소결론 ····· 416
5. 하상토 및 지오튜브를 이용한 제방의 안정성 평가 ····· 418
가. 수치해석 개요 ····· 418
나. 하천제방 안정성 평가 방법 ····· 420
(1) 하천제방 사면안정 해석 기법 ····· 420
(2) 하천제방 제체 누수에 따른 파이핑 평가 기법 ····· 422
(3) 수치해석 결과 ····· 424
다. 소결론 ····· 433

제 4 절 하상토 활용 제방 매뉴얼 ····· 434
1. 설계일반 ····· 434
2. 하상토를 이용한 제방의 구조 및 종류 ····· 440
3. 제방 재료 ····· 441
4. 제방의 시공 ····· 446

제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외기여도 ····· 449
제 1 절 연구개발 목표 달성도 ····· 449
제 2 절 관련분야 기술발전 기여도 ····· 450

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획 ····· 451

제 6 장 참고문헌 ····· 453

표 목 차

<표 1.2-1> 연차(단계)별 연구목표 및 내용 ····· 3
<표 3.1-1> 2006년 제방붕괴 원인(건설교통부, 2006) ····· 12
<표 3.1-2> 토사 재료기준 ····· 19
<표 3.1-3> 암버럭 재료기준 ····· 19
<표 3.1-4> 제방의 더돋기 ····· 20
<표 3.1-5> 미국의 퇴적물질 기준 및 특성 ····· 26
<표 3.1-6> 동경만 및 요코하마만의 퇴적물 제거기준 ····· 27
<표 3.1-7> 일본의 준설 기준 사례 ····· 27
<표 3.1-8> 국내 하천 및 호수 퇴적물 제거 기준 ····· 28
<표 3.1-9> 다짐 및 CBR시험 결과 ····· 32
<표 3.1-10> 경량혼합처리토 특성 평가를 위한 실내시험 내용(윤길림 등, 2002) ····· 33
<표 3.1-11> 입도분포에 따른 제체 재료별 파이핑 및 균열 저항성 특성(NAVFAC, 1986) ····· 37
<표 3.1-12> 다짐시험 결과 (Ali Maher, 2005) ····· 40
<표 3.1-13> 투수시험 결과 요약 (Ali Maher, 2005) ····· 40
<표 3.1-14> 입도분포에 따른 삼축강도시험 결과 요약 (Ali Maher, 2005) ····· 41
<표 3.1-15> 처리방법에 따른 기술 범주(SEDNET, 2004) ····· 45
<표 3.1-16> 처리기술의 선정 기준표(SEDNET, 2004) ····· 46
<표 3.1-17> CSG공법의 시공실적 (豊田光雄 등, 2000) ····· 51
<표 3.1-18> 건설기계의 주행에 필요한 콘 지수 ····· 55
<표 3.1-19> 불량토 대책공법 종류 ····· 57
<표 3.1-20> Driscoll 방법에 의한 혼합 입도분포 사례 ····· 61
<표 3.1-21> 토질별 첨가율 기준 ····· 63
<표 3.1-22> 각 유사량 공식의 특징 ····· 76
<표 3.1-23> 총유사량 추정 방법들의 비교 분석 ····· 76
<표 3.1-24> Ackers & White 공식의 계수들 ····· 85
<표 3.1-25> 우리나라 4대 강 현황 ····· 89

<표 3.1-26> 한강권역 하상토 발생량 ····· 89
<표 3.1-27> 금강권역 하상토 발생량 ····· 90
<표 3.1-28> 섬진강・영산강권역 하상토 발생량 ····· 91
<표 3.1-29> 낙동강권역 하상토 발생량 ····· 92
<표 3.1-30> 낙동강의 유로간천 연장 ····· 95
<표 3.1-31> 지점 선정조건 ····· 97
<표 3.1-32> 월포지점 산정방법별 총유사량 비교 ····· 104
<표 3.1-33> 김천지점 산정방법별 총유사량 비교 ····· 105
<표 3.1-34> 왜관지점 산정방법별 총유사량 비교 ····· 106
<표 3.1-35> 동촌지점 산정방법별 총유사량 비교 ····· 107
<표 3.1-36> 청도지점 산정방법별 총유사량 비교 ····· 108
<표 3.1-37> 진동지점 산정방법별 총유사량 비교 ····· 109
<표 3.1-38> 하도준설 사업 연차별 투자계획 ····· 114
<표 3.1-39> 토질별 적용 선박 종류 ····· 116
<표 3.1-40> 심도별 적용 선박 종류 ····· 119
<표 3.1-41> 디젤선의 여굴 깊이 ····· 120
<표 3.1-42> 토질조건에 따른 최적장비와 전달 에너지 ····· 128
<표 3.1-43> 흙 종류별 다짐장비의 적합성(철도청, 1999) ····· 129
<표 3.1-44> 다짐장비의 유효다짐 폭과 표준 다짐속도(철도청, 1999) ····· 130
<표 3.1-45> 다짐시공시 표준치 ····· 130
<표 3.1-46> 다짐장비에 대한 일반적 기준 ····· 131
<표 3.1-47> 로드 롤러의 적용 토질 ····· 131
<표 3.1-48> 국내 사용 머캐덤 롤러의 제원 ····· 132
<표 3.1-49> 국내 사용 탠덤 롤러의 제원 ····· 133
<표 3.1-50> 타이어 롤러의 접지압력 ····· 134
<표 3.1-51> 국내 사용 타이어 롤러의 제원 ····· 134
<표 3.1-52> 국내 사용 진동 롤러 제원 ····· 136
<표 3.2-1> 제방 재료별 제체누수에 대한 저항성 (NAVFAC DM 7.02, 1986) ··· 140
<표 3.2-2> 금강 수계 조사위치 별 입도분포 특성 및 통일분류 결과 ····· 142
<표 3.2-3> 낙동강 수계 조사위치 별 입도분포 특성 및 통일분류 결과 ····· 148

<표 3.2-4> 섬진-영산강 수계 조사위치 별 입도분포 특성 및 통일분류 결과 ····· 156
<표 3.2-5> 한강 수계 조사위치 별 입도분포 특성 및 통일분류 결과 ····· 161
<표 3.2-6> 기본특성시험에 사용된 흙 종류별 채취 위치 ····· 167
<표 3.2-7> 실험항목 및 내용 ····· 167
<표 3.2-8> 낙동강수계 하상토 및 화강풍화토의 입도시험 결과 ····· 169
<표 3.2-9> 시험대상시료의 투수계수 ····· 174
<표 3.2-10> 시험대상시료의 전단강도 ····· 175
<표 3.2-11> 시료 성형 조건 ····· 184
<표 3.2-12> 삼축시험 결과 구해진 시료별 강도정수 비교 ····· 197
<표 3.2-13> 각 시료에 대한 함수특성곡선 식의 변수들 ····· 199
<표 3.2-14> 안정처리된 왜관하상토-1(SP)의 공학적 특성 평가를 위한 실험항목 및 범위 ····· 203
<표 3.2-15> 왜관하상토-1(SP) 혼합토의 기본특성시험 결과 ····· 205
<표 3.2-16> 왜관하상토-1(SP) 시멘트 안정처리토의 기본특성시험 결과 ····· 205
<표 3.2-17> 왜관하상토-1(SP) 벤토나이트 안정처리토의 기본특성시험 결과 ····· 206
<표 3.2-18> 안정처리된 왜관하상토-1(SP)의 다짐시험 결과 ····· 208
<표 3.2-19> 안정처리된 왜관하상토-1(SP)의 투수시험결과 ····· 211
<표 3.2-20> 안정처리된 왜관하상토-1(SP)의 전단시험결과 ····· 213
<표 3.2-21> 안정 처리된 실트질 흙(ML)의 공학적 특성 평가를 위한 실험항목 및 범위 ····· 214
<표 3.2-22> 왜관하상토-2(ML-1) 혼합토의 기본특성시험 결과 ····· 215
<표 3.2-23> 안산 하구언 하상토(ML-2) 혼합토의 기본특성시험 결과 ····· 215
<표 3.2-24> 왜관하상토-2(ML-1) 안정처리토의 기본특성시험 결과 ····· 216
<표 3.2-25> 안산 하구언 하상토(ML-2) 안정처리토의 기본특성시험 결과 ····· 217
<표 3.2-26> 실트질 흙(ML)의 화강풍화토 혼합비율에 따른 다짐시험 결과 ····· 218
<표 3.2-27> 실트질 흙(ML)의 시멘트 혼합비율에 따른 다짐시험 결과 ····· 219
<표 3.2-28> 실트질 흙(ML)의 화강풍화토 혼합비율에 따른 투수시험결과 ····· 221
<표 3.2-29> 실트질 흙(ML)의 시멘트 혼합비율에 투수시험결과 ····· 222
<표 3.2-30> 실트질 흙(ML)의 화강풍화토 혼합비율에 따른 전단시험결과 ····· 223
<표 3.2-31> 실트질 흙(ML)의 시멘트 혼합비율에 따른 전단시험결과 ····· 224

<표 3.2-32> 실트질 흙(ML)의 화강풍화토 혼합비율에 따른 일축압축시험결과 (kg/cm^2) ····· 226
<표 3.2-33> 왜관하상토-2(ML-1) 안정처리토의 일축압축시험결과(kg/cm^2) ····· 228
<표 3.2-34> 안산 하구언 하상토(ML-2) 안정처리토의 일축압축시험결과(kg/cm^2) 229
<표 3.2-35> 안정 처리된 점토의 공학적 특성 평가를 위한 실험항목 및 범위 ··· 230
<표 3.2-36> 만경강 하상토(CL) 안정처리토의 기본특성시험 결과 ····· 231
<표 3.2-37> 만경강 하상토(CL)의 시멘트 혼합비율에 따른 다짐시험 결과 ····· 232
<표 3.2-38> 만경강 하상토(CL)의 시멘트 혼합비율에 투수시험결과 ····· 233
<표 3.2-39> 만경강 하상토(CL)의 시멘트 혼합비율에 따른 전단시험결과 ····· 234
<표 3.2-40> 만경강 하상토(CL) 안정처리토의 일축압축시험결과(kg/cm^2) ····· 236
<표 3.2-41> 현장시험 재료 별 평가항목 및 변화인자 ····· 244
<표 3.2-42> 현풍하상토(SP)의 다짐특성 평가 결과(자연함수비, t/m^3) ····· 245
<표 3.2-43> 현풍하상토(SP)의 다짐특성 평가 결과(함수비 증가, t/m^3) ····· 246
<표 3.2-44> 현장 화강풍화토(SW)의 다짐특성 평가 결과 ····· 247
<표 3.2-45> 현풍화강풍화토(SW)의 다짐특성 평가 결과(성토고 30cm, t/m^3) ···· 249
<표 3.2-46> 인천하상토(ML)의 다짐특성 평가 결과(자연함수비, t/m^3) ····· 255
<표 3.2-47> 인천하상토(ML)의 다짐특성 평가 결과(함수비 감소, t/m^3) ····· 255
<표 3.2-48> 파주화강풍화토(SW)의 다짐특성 평가 결과 ····· 257
<표 3.2-49> 현장 하상혼합토(ML)의 다짐특성 평가 결과(성토고 30cm, t/m^3) ·· 258
<표 3.2-50> 시간 경과에 따른 간극수압 및 수두 변화(제체 중앙부) ····· 269
<표 3.2-51> 해석에 이용된 지층구성 및 지반 물성치 ····· 270
<표 3.2-52> 해석에 이용된 지층구성 및 지반 물성치 ····· 273
<표 3.2-53> 해석결과에 따른 사면안정성 및 유속벡터 ····· 275
<표 3.2-54> 수상물리탐사의 탐지 대상 및 적용법(Yuzuru, 2002) ····· 281
<표 3.2-55> 수상물리탐사 장비 특성 ····· 282
<표 3.2-56> GPR탐사기(PulseEkko 100 system) 제원. ····· 286
<표 3.2-57> 탄성파탐사기 McSeis SX24의 제원. ····· 292
<표 3.2-58> 탐사장비 특성 ····· 296
<표 3.2-59> 고주파 음파탐사 측선 정보 ····· 296
<표 3.2-60> 물리탐사 및 시추조사 범위. ····· 299

<표 3.2-61> 퇴적층 부피(용인 월촌교) ····· 306
<표 3.2-62> 해석단면상의 각 지층별 탄성파 속도 ····· 307
<표 3.2-63> 퇴적층 부피(용인 월촌교) ····· 314
<표 3.2-64> 퇴적층 부피(예천 담암제) ····· 314
<표 3.2-65> 물리탐사법별 송신원 주파수 ····· 315
<표 3.2-66> 하상조사를 위한 물리탐사법 특성 ····· 317
<표 3.2-67> 토사, 암반 및 여러 가지 물질의 탄성파 속도(장현삼 등, 1999) ····· 323
<표 3.2-68> 물리탐사 현장실험 및 실내시험 종류와 내용 ····· 333
<표 3.2-69> 다짐도에 따른 실험시료의 일축압축강도특성 ····· 334
<표 3.2-70> 현장실험에 따른 토질별 전단파 속도 및 다짐도 측정결과 ····· 335
<표 3.2-71> 실내실험에 따른 토질별 전단파 속도 및 다짐도 측정결과 ····· 336
<표 3.3-1> 지오튜브의 기본 특성시험 종류 및 관련기준 ····· 361
<표 3.3-2> 광폭인장강도시험(KS K ISO 10319) 개요 ····· 362
<표 3.3-3> 스트립인장강도시험의 개요 ····· 364
<표 3.3-4> 열노화성 시험(KS M 3071)의 개요 ····· 368
<표 3.3-5> 마모 시험의 개요 ····· 369
<표 3.3-6> 연소성 시험(KS M 3071)의 개요 ····· 370
<표 3.3-7> 유효입경 시험방법 요약 ····· 372
<표 3.3-8> 지오튜브의 물리적 특성 시험 결과 ····· 375
<표 3.3-9> 흙 시료의 공학적 특성 ····· 383
<표 3.3-10> 마찰시험 종류와 내용 ····· 385
<표 3.3-11> 마찰시험에 의한 대형직접전단시험 결과 ····· 388
<표 3.3-12> 채움재의 기본특성 ····· 393
<표 3.3-13> 시험시공시 평가된 항목 ····· 399
<표 3.3-14> 이론 토압과 실측 토압의 비교 ····· 415
<표 3.3-15> 지오튜브 제방과 일반성토 제방의 경제성 비교 (단위 : 천원) ····· 415
<표 3.3-16> 각 CASE 별 제체 조건 및 해석단면 ····· 418
<표 3.3-17> 해석에 사용된 물성치 ····· 420
<표 3.3-18> 제체 상태에 따른 안전율(하천설계기준 2002) ····· 420
<표 3.3-19> 국내 하천제방 사면안정해석 모델 ····· 421

<표 3.3-20> 한계유속 (하천설계기준, 2005) ····· 423
<표 3.3-21> 복토층 두께 변화에 따른 사면안정해석 결과 ····· 427
<표 3.3-22> 복토층 두께 변화에 따른 제체 파이핑 안정해석 결과 ····· 427
<표 3.3-23> 안정처리 방법에 따른 사면안정해석 결과 ····· 429
<표 3.3-24> 안정처리 기법에 따른 제체 파이핑 안정해석 결과 ····· 430
<표 3.3-25> 복토층 두께 변화에 따른 사면안정해석 결과 ····· 432
<표 3.3-26> 안정처리 기법에 따른 제체 파이핑 안정해석 결과 ····· 433
<표 3.4-1> 제체 상태에 따른 안전율 ····· 439
<표 3.4-2> 토양오염에 관한 환경기준 ····· 442
<표 3.4-3> 제방 성토재료로서의 품질 ····· 444
<표 3.4-4> 제방의 축제 재료의 다짐 기준 ····· 447
<표 3.4-5> 토질에 따른 다짐로울러 기종의 선정 ····· 447

그 림 목 차

<그림 3.1-1> 제방붕괴 유형 (한국건설기술연구원, 2004) ····· 12
<그림 3.1-2> 대곡제 붕괴 모습 ····· 13
<그림 3.1-3> 월동천 붕괴 관련 사진 ····· 14
<그림 3.1-4> 제방의 구성 및 개요도(하천설계기준, 2005) ····· 15
<그림 3.1-5> 재령-시멘트혼합비-일축압축강도 (김영수 등, 2006) ····· 32
<그림 3.1-6> EPS함유율에 따른 압축강도-변형특성(윤길림 등, 2002) ····· 34
<그림 3.1-7> EPS함유율에 따른 극한압축강도의 변화 (윤길림 등, 2002) ····· 34
<그림 3.1-8> 제체 재료의 입도분포 (NAVFAC, 1986) ····· 36
<그림 3.1-9> 시료채취 위치 (Ali Maher, 2005) ····· 38
<그림 3.1-10> 하상준설토 활용 흐름도 ····· 43
<그림 3.1-11> 준설・처리시 관리 흐름도 (SEDNET, 2004) ····· 44
<그림 3.1-12> 네덜란드 준설공사 처리기술 선정 구축망 개략도(AKWA, 2000) ····· 46
<그림 3.1-13> CSG 공법에 사용된 현장토 발생토의 평균입도 (豊田光雄 등, 2000) ····· 50
<그림 3.1-14> 북해도 불량토 개략 분포도 ····· 52
<그림 3.1-15> 북해도에서의 불량토 조사와 판정과 관련된 작업 흐름도 ····· 54
<그림 3.1-16> 불량토 대책공법 선정 흐름도 ····· 57
<그림 3.1-17> 디스크 할로우 ····· 58
<그림 3.1-18> 트렌치 굴착 공법 ····· 58
<그림 3.1-19> 점성토용 건조플랜트 ····· 59
<그림 3.1-20> 고속통기형 건조장치 ····· 59
<그림 3.1-21> 이종플랜트 믹서 ····· 61
<그림 3.1-22> 중앙플랜트식의 플랜트전경 ····· 61
<그림 3.1-23> Driscoll의 도해법 ····· 61
<그림 3.1-24> 안정처리공법의 첨가재 혼합방식 ····· 64
<그림 3.1-25> 석회안정처리에 있어서의 생석회, 소석회의 사용상황 ····· 64
<그림 3.1-26> 양쯔강 유역 현황 및 유사부유량 특성(2004, MWR) ····· 66

<그림 3.1-27> 하상토를 이용한 연차별 제방축조 사례(2004, MWR) ····· 68
<그림 3.1-28> 하천의 일반적 개요 ····· 70
<그림 3.1-29> 균등한 흙 입자별 침식-퇴적 관계특성 곡선 (Hjulstrom, 1935) ···· 71
<그림 3.1-30> 유역과 하도에서 지표면의 침식 발생 (자료 : http://www.ecostar.co.kr) ·· 72
<그림 3.1-31> 하방침식 ····· 72
<그림 3.1-32> 측방침식 ····· 72
<그림 3.1-33> 구간 별 유사의 퇴적과정 ····· 74
<그림 3.1-34> 아인슈타인공식의 Φ_*-Ψ_* ····· 79
<그림 3.1-35> 차폐계수 ξ의 값 ····· 79
<그림 3.1-36> 양력보정계수 Y의 값(Einstein, 1950) ····· 80
<그림 3.1-37> 평균유속과 유속 분포식들의 계수 x의 값(Einstein, 1950) ····· 80
<그림 3.1-38> 우리나라 4대권역 ····· 88
<그림 3.1-39> 한강 권역 하상토 발생량 ····· 90
<그림 3.1-40> 금강 권역 하상토 발생량 ····· 91
<그림 3.1-41> 섬진강·영산강권역 하상토 발생량 ····· 92
<그림 3.1-42> 낙동강권역 하상토 발생량 ····· 93
<그림 3.1-43> 낙동강 수계 모식현황 ····· 95
<그림 3.1-44> 유사량 분석지점 ····· 96
<그림 3.1-45> 월포 측정지점 ····· 98
<그림 3.1-46> 김천 측정지점 ····· 99
<그림 3.1-47> 왜관 측정지점 ····· 100
<그림 3.1-48> 동촌 측정지점 ····· 101
<그림 3.1-49> 청도 측정지점 ····· 102
<그림 3.1-50> 진동 측정지점 ····· 103
<그림 3.1-51> 월포지점 유사량 산정공식의 비교 ····· 110
<그림 3.1-52> 김천지점 유사량 산정공식의 비교 ····· 110
<그림 3.1-53> 왜관지점 유사량 산정공식의 비교 ····· 111
<그림 3.1-54> 동촌지점 유사량 산정공식의 비교 ····· 111
<그림 3.1-55> 청도지점 유사량 산정공식의 비교 ····· 112
<그림 3.1-56> 진동지점 유사량 산정공식의 비교 ····· 112

<그림 3.1-57> 준설시공 흐름도 ····· 119
<그림 3.1-58> 머캐덤 롤러 ····· 132
<그림 3.1-59> 탠덤 롤러 (2륜식) ····· 133
<그림 3.1-60> 타이어 롤러 ····· 134
<그림 3.1-61> 쉬프트 롤러 ····· 135
<그림 3.1-62> 턴 풋 롤러 ····· 135
<그림 3.1-63> 진동 롤러 ····· 136
<그림 3.1-64> 진동 컴팩터 ····· 137
<그림 3.1-65> 탬퍼 ····· 137
<그림 3.1-66> 블레이드+스캐리파이어 그레이더 ····· 138
<그림 3.2-1> 하천제방 제체 및 하상토 조사 위치도 ····· 141
<그림 3.2-2> NAVFAC 기준에 따른 금강 수계의 제체누수 저항성 분석 결과 ··· 147
<그림 3.2-3> NAVFAC 기준에 따른 낙동강 수계의 제체누수 저항성 분석 결과 ··· 155
<그림 3.2-4> NAVFAC 기준에 따른 섬진/영산강 수계의 제체누수 저항성 분석 결과 ··· 160
<그림 3.2-5> NAVFAC 기준에 따른 한강 수계의 제체누수 저항성 분석 결과 ··· 162
<그림 3.2-6> 비중 시험 ····· 168
<그림 3.2-7> 실험대상 시료의 입도분포곡선 ····· 170
<그림 3.2-8> 액·소성한계 시험 ····· 171
<그림 3.2-9> 다짐시험 장면 ····· 172
<그림 3.2-10> 시험대상 시료의 다짐곡선 ····· 172
<그림 3.2-11> 투수시험장면 ····· 173
<그림 3.2-12> 직접전단 시험기 ····· 174
<그림 3.2-13> 불포화 삼축압축실험 셀 내부구조 ····· 181
<그림 3.2-14> 불포화 투수 실험장비 ····· 182
<그림 3.2-15> ONI 시료에 대한 다짐곡선 ····· 183
<그림 3.2-16> Clay 시료에 대한 다짐곡선 ····· 184
<그림 3.2-17> ONI 시료에 대한 모관흡수력 변화에 따른 응력-변형률곡선 ····· 186
<그림 3.2-18> ONI 시료에 대한 불포화 파괴포락곡선 ····· 186
<그림 3.2-19> ONI 시료에 대한 비선형 겉보기 점착력 ····· 187
<그림 3.2-20> 각 모관흡수력에 해당하는 ϕ^b의 변화 (ONI 시료) ····· 187

<그림 3.2-21> 구속압 150 kPa 조건에서 얻어진 불포화 전단강도 비교 (ONI 시료) ·· 188
<그림 3.2-22> ONI 시료에 대한 평균적인 값 ϕ^b 산정 ····· 188
<그림 3.2-23> Clay 시료에 대한 모관흡수력 변화에 따른 응력-변형률곡선 ····· 189
<그림 3.2-24> Clay 시료에 대한 불포화 파괴포락곡선 ····· 190
<그림 3.2-25> Clay 시료에 대한 비선형 겉보기 점착력 ····· 190
<그림 3.2-26> 각 모관흡수력에 해당하는 ϕ^b의 변화 (Clay 시료) ····· 191
<그림 3.2-27> 구속압 150 kPa 조건에서 얻어진 불포화 전단강도 비교 (Clay 시료) ·· 191
<그림 3.2-28> Clay 시료에 대한 평균적인 값 ϕ^b 산정 ····· 192
<그림 3.2-29> SP 시료에 대한 모관흡수력 변화에 따른 응력-변형률곡선 ····· 193
<그림 3.2-30> SP 시료에 대한 불포화 파괴포락곡선 ····· 193
<그림 3.2-31> SP 시료에 대한 비선형 겉보기 점착력 ····· 194
<그림 3.2-32> 각 모관흡수력에 해당하는 ϕ^b의 변화 (SP 시료) ····· 194
<그림 3.2-33> 구속압 150 kPa 조건에서 얻어진 불포화 전단강도 비교 (SP 시료) ··· 195
<그림 3.2-34> SP 시료에 대한 평균적인 값 ϕ^b 산정 ····· 195
<그림 3.2-35> 각 시료별 C_{max} 값 비교 ····· 197
<그림 3.2-36> 각 시료별 ϕ^b_{avg} 값 비교 ····· 197
<그림 3.2-37> 각 시료에 대한 불포화 전단강도 비교 ····· 198
<그림 3.2-38> 각 시료에 대한 함수특성곡선 비교 ····· 199
<그림 3.2-39> 각 시료에 대한 불포화 투수곡선 비교 ····· 200
<그림 3.2-40> 안정처리된 왜관하상토-1(SP)의 다짐곡선 ····· 208
<그림 3.2-41> 안정처리된 왜관하상토-1(SP)의 투수계수 변화 곡선 ····· 210
<그림 3.2-42> 안정처리된 왜관하상토-1(SP)의 전단강도 변화 곡선 ····· 212
<그림 3.2-43> 실트질 흙(ML)의 화강풍화토 혼합비율에 따른 다짐곡선 ····· 218
<그림 3.2-44> 실트질 흙(ML)의 시멘트 혼합비율에 따른 다짐곡선 ····· 219
<그림 3.2-45> 실트질 흙(ML)의 화강풍화토 혼합비율에 따른 투수계수 변화 곡선 ··· 220
<그림 3.2-46> 실트질 흙(ML)의 시멘트 혼합비율에 따른 투수계수 변화 ····· 222
<그림 3.2-47> 실트질 흙(ML)의 화강풍화토 혼합비율에 따른 전단강도 변화 곡선 ··· 223
<그림 3.2-48> 실트질 흙(ML)의 시멘트 혼합비율에 따른 전단강도 변화 곡선 ·· 224
<그림 3.2-49> 실트질 흙(ML)의 화강풍화토 혼합비율에 따른 일축압축강도 변화
(상대다짐도 90%) ····· 226

<그림 3.2-50> 왜관하상토-2(ML-1) 안정처리토의 일축압축강도 변화 곡선 (다짐도 90%) ····· 227
<그림 3.2-51> 안산 하구언 하상토(ML-2) 안정처리토의 일축압축강도 변화 곡선 (다짐도 90%) ····· 229
<그림 3.2-52> 만경강 하상토(CL)의 시멘트 혼합비율에 따른 다짐곡선 ····· 232
<그림 3.2-53> 만경강 하상토(CL)의 시멘트 혼합비율에 따른 투수계수 변화 ····· 233
<그림 3.2-54> 만경강 하상토(CL)의 시멘트 혼합비율에 따른 전단강도 변화 곡선 ·· 234
<그림 3.2-55> 만경강 하상토(CL) 안정처리토의 일축압축강도 변화 곡선 (다짐도 90%) ····· 235
<그림 3.2-56> 시험 부지 및 시험 시료 ····· 242
<그림 3.2-57> 현장 시험시료의 입도분포 곡선 ····· 243
<그림 3.2-58> 현장 다짐 및 계측 장면 ····· 244
<그림 3.2-59> 현풍하상토(SP)의 성토고 및 다짐횟수에 따른 건조밀도 변화 ····· 247
<그림 3.2-60> 현풍화강풍화토(SW)의 실내 다짐시험 곡선 ····· 248
<그림 3.2-61> 현풍하상혼합토의 실내 다짐시험 곡선 ····· 249
<그림 3.2-62> 현풍하상토(SP)의 성토고 및 다짐횟수에 따른 콘 저항치 변화 ··· 251
<그림 3.2-63> 현풍하상토(SP)의 현장 콘관입 시험 후 모습 ····· 252
<그림 3.2-64> 실내 시험을 통한 현풍하상토(SP)의 혼합비율에 따른 입도분포곡선 ·· 252
<그림 3.2-65> 현풍하상토(SP)의 현장 혼합횟수에 따른 입도분포곡선 ····· 254
<그림 3.2-66> 인천하상토(ML)의 성토고 및 다짐횟수에 따른 건조밀도 변화 ···· 256
<그림 3.2-67> 파주화강풍화토(SW)의 실내 다짐시험 곡선 ····· 257
<그림 3.2-68> 인천하상혼합토의 실내 다짐시험 곡선 ····· 259
<그림 3.2-69> 인천하상토(ML)의 성토고 및 다짐횟수에 따른 콘 저항치 변화 ·· 261
<그림 3.2-70> 실내 시험을 통한 인천하상토(ML)의 혼합비율에 따른 입도분포곡선 ·· 261
<그림 3.2-71> 인천하상토(ML)의 현장 혼합횟수에 따른 입도분포곡선 ····· 263
<그림 3.2-72> 인천하상토(ML)의 현장 혼합 장면 및 하상혼합토 ····· 263
<그림 3.2-73> 모형토조 ····· 267
<그림 3.2-74> 주요 시험장비 ····· 267
<그림 3.2-75> 모형실험 단면 및 수위 조건 ····· 268
<그림 3.2-76> 제체 조성 및 제외지 수위 조절 ····· 268

<그림 3.2-77> 모형시험을 통한 시간경과에 따른 제체 내 수두변화 ····· 269
<그림 3.2-78> 수치해석을 통한 시간경과에 따른 제체 내 수두변화 ····· 271
<그림 3.2-79> 시간경과에 따른 모형실험결과와 수치해석결과의 비교 ····· 272
<그림 3.2-80> 실물 침투해석 단면 및 수위조건 ····· 273
<그림 3.2-81> 제체 재료에 따른 사면안정해석결과 ····· 276
<그림 3.2-82> 제체 재료에 따른 유속벡터 변화(수위 지속시간 8일 째) ····· 277
<그림 3.2-83> 제체 재료에 따른 포화도 변화(수위 지속시간 8일 째) ····· 278
<그림 3.2-84> GPR탐사 모식도 ····· 284
<그림 3.2-85> GPR 탐사기 구성 및 저주파 안테나(PulseEkko, Canada). ····· 286
<그림 3.2-86> 미사리 조정경기장 퇴적층 GPR 단면. ····· 288
<그림 3.2-87> 굴절법탄성파탐사 모식도 및 해석원리. ····· 289
<그림 3.2-88> 토모그래피 역산을 위한 탄성파 경로추적 모식도 ····· 291
<그림 3.2-89> 탄성파기록기와 수진기 ····· 292
<그림 3.2-90> Raft 강 열수지대의 탄성파 속도 단면. ····· 293
<그림 3.2-91> LPG 지하저장기지 건설을 위한 굴절법탄성파탐사 속도단면 ····· 294
<그림 3.2-92> 음파탐사 모식도. ····· 295
<그림 3.2-93> 음파탐사 측선도. ····· 297
<그림 3.2-94> 음파탐사 해석단면 ····· 298
<그림 3.2-95> 조사지역 광역위치도 ····· 299
<그림 3.2-96> 물리탐사 측선 및 시추 위치도 ····· 300
<그림 3.2-97> 조사지역 고도 ····· 300
<그림 3.2-98> 시추코아 사진 ····· 301
<그림 3.2-99> 시추 주상도 ····· 301
<그림 3.2-100> GPR탐사 측선도 ····· 302
<그림 3.2-101> GPR탐사 해석단면. ····· 304
<그림 3.2-102> GPR탐사 해석단면 fence diagram ····· 305
<그림 3.2-103> 퇴적층 두께 분포 ····· 305
<그림 3.2-104> 퇴적층 고도 분포 ····· 306
<그림 3.2-105> 굴절법탄성파탐사 측선도 ····· 307
<그림 3.2-106> 굴절법탄성파탐사 해석단면(용인 월촌교) ····· 309

<그림 3.2-107> 굴절법탄성파탐사 해석단면(예천 담암제) ····· 310
<그림 3.2-108> 굴절법탄성파탐사 해석단면 fence diagram ····· 311
<그림 3.2-109> 퇴적층 두께 분포 ····· 312
<그림 3.2-110> 퇴적층 고도 분포 ····· 313
<그림 3.2-111> Fresnel zone ····· 315
<그림 3.2-112> 실체파(body wave) 입자의 운동방향 (민경덕 등, 1987) ····· 322
<그림 3.2-113> 프와송비 모식도 ····· 324
<그림 3.2-114> 전단탄성계수 모식도 ····· 325
<그림 3.2-115> 탄성파형 수진 기록. ····· 327
<그림 3.2-116> 벤더 엘리먼트의 원리 ····· 327
<그림 3.2-117> 전압을 반대로 할 때 벤더 엘리먼트의 거동 ····· 328
<그림 3.2-118> 본 장치에 장착했을 때 벤더 엘리먼트의 거동 ····· 328
<그림 3.2-119> 벤더 엘리먼트와 페데스탈의 고정 ····· 329
<그림 3.2-120> 벤더 엘리먼트의 방수가공 ····· 329
<그림 3.2-121> 전단파 계측 장비 ····· 330
<그림 3.2-122> 전달시간 $\triangle T$와 전달거리 L의 정의 ····· 331
<그림 3.2-123> 현장시험 전경 ····· 332
<그림 3.2-124> 시험대상시료의 입도분포곡선 ····· 333
<그림 3.2-125> 다짐특성 곡선 ····· 334
<그림 3.2-126> 모래 흙의 현장 전단파 속도 측정 결과 ····· 337
<그림 3.2-127> 점토 흙의 현장 전단파 속도 측정 결과 ····· 338
<그림 3.2-128> 광암제 현장 다짐도와 전단파 속도의 상관관계 ····· 339
<그림 3.2-129> 만경읍 매립지 현장 다짐도와 전단파 속도의 상관관계 ····· 340
<그림 3.3-1> 지오백 형태 ····· 344
<그림 3.3-2> 지오튜브 형태 ····· 344
<그림 3.3-3> 지오튜브 공법의 시공순서도 ····· 345
<그림 3.3-4> 지오컨테이너 형태 ····· 345
<그림 3.3-5> 영진항 재해 위험지구 정비사업 시공 전경 ····· 346
<그림 3.3-6> 울진원자력 5,6호기 온배수 저감시설 공사 ····· 347
<그림 3.3-7> 일산대교 건설공사 ····· 347

<그림 3.3-8> 미국 Florida 해안선 제방공사 ····· 348
<그림 3.3-9> 필리핀 마닐라 분리제방 공사 ····· 348
<그림 3.3-10> 미국 텍사스 지중제방 ····· 349
<그림 3.3-11> 지오튜브의 설계개념도 (GeoCoPS(2.0), 2001) ····· 353
<그림 3.3-12> 지오튜브의 축방향 인장응력 ····· 356
<그림 3.3-13> 광폭인장강도시험 모습 ····· 363
<그림 3.3-14> 스트립인장강도시험 모습 ····· 364
<그림 3.3-15> 인열강도시험 모습 ····· 365
<그림 3.3-16> 재질분석시험 모습 ····· 366
<그림 3.3-17> 두께시험 모습 ····· 366
<그림 3.3-18> 무게시험 모습 ····· 367
<그림 3.3-19> 열노화성시험 중인 열챔버 모습 ····· 368
<그림 3.3-20> 마모시험 모습 ····· 369
<그림 3.3-21> 연소성시험 모습 ····· 371
<그림 3.3-22> 유효입경시험 모습 ····· 373
<그림 3.3-23> 투수시험 모습 ····· 373
<그림 3.3-24> 지오튜브의 광폭인장응력-인장변형률 곡선 ····· 374
<그림 3.3-25> 유효입경 분포곡선 ····· 375
<그림 3.3-26> 세립토의 세굴심-시간 그래프 (Briaud 등, 1999) ····· 378
<그림 3.3-27> 호안의 구조 ····· 378
<그림 3.3-28> 국내 하천 호안보호공법 ····· 379
<그림 3.3-29> 호안 안정해석 개념도 ····· 380
<그림 3.3-30> 지오멤브레인 타입의 전단시험방법 ····· 382
<그림 3.3-31> 대형직접전단시험기 ····· 382
<그림 3.3-32> 시험시료 포설 전경 ····· 382
<그림 3.3-33> 시험대상시료의 입도분포곡선 ····· 383
<그림 3.3-34> 다짐특성 곡선 ····· 384
<그림 3.3-35> 실험대상 지오튜브 및 호안블록 모습 ····· 385
<그림 3.3-36> 시험시료의 변형-전단응력 관계 곡선 ····· 387
<그림 3.3-37> 시험시료의 수직응력-전단응력 관계 곡선 ····· 389

<그림 3.3-38> 채움재의 입도분포곡선 ····· 393
<그림 3.3-39> 지오튜브 단면도 ····· 394
<그림 3.3-40> 지오튜브를 이용한 현장계측 시공순서 ····· 395
<그림 3.3-41> 지오튜브 현장시공 모습 ····· 399
<그림 3.3-42> 계측기 매설도 ····· 400
<그림 3.3-43> 지오튜브 설치 계획도 ····· 401
<그림 3.3-44> 토압계 설치 장면 ····· 402
<그림 3.3-45> 간극수압계 설치 장면 ····· 402
<그림 3.3-46> 스트레인게이지 설치 장면 ····· 402
<그림 3.3-47> 침하판 설치 장면 ····· 403
<그림 3.3-48> 경사계 설치 장면 ····· 403
<그림 3.3-49> 지오튜브의 수직 및 수평토압의 변화 ····· 404
<그림 3.3-50> 경과시간에 따른 침하 특성 변화 ····· 405
<그림 3.3-51> 벽체높이에 따른 지오튜브의 지중수평변위 변화 ····· 406
<그림 3.3-52> 각 단면별 지오튜브의 유발변위 변화 ····· 408
<그림 3.3-53> GPR탐사 작업 장면 ····· 409
<그림 3.3-54> 225MHz 안테나 취득 자료 ····· 409
<그림 3.3-55> 450MHz 안테나 취득 자료 ····· 410
<그림 3.3-56> 지오튜브 저면의 간극수압 변화 ····· 411
<그림 3.3-57> 해석 단면 및 수위조건 ····· 419
<그림 3.3-58> 파괴발생시의 실제 유속과 입경의 관계(杉井俊夫 등, 1989) ····· 424
<그림 3.3-59> 양질토 복토층 두께 결정을 위한 해석단면 ····· 425
<그림 3.3-60> 복토층 두께 및 시간 경과에 따른 침윤선 변화 ····· 426
<그림 3.3-61> 제체 누수에 따른 파이핑 안정성 평가 위치 ····· 428
<그림 3.3-62> 안정처리된 제체의 안정성 평가를 위한 해석단면 ····· 428
<그림 3.3-63> 안정처리된 하상토 제체의 시간 경과에 따른 침윤선 변화 ····· 429
<그림 3.3-64> 지오튜브를 이용한 제체의 안정성 평가를 위한 해석단면 ····· 430
<그림 3.3-65> 지오튜브를 이용한 제체의 시간 경과에 따른 침윤선 변화 ····· 431
<그림 3.4-1> 침투해석에 사용된 단면 ····· 435
<그림 3.4-2> 메쉬 크기에 따른 해석 결과 ····· 435

<그림 3.4-3> 정상수위조건 ····· 436
<그림 3.4-4> 고수위지속시간에 따른 침투해석 결과 ····· 436
<그림 3.4-5> 비정상수위조건의 수위파형 ····· 437
<그림 3.4-6> 변수 a, n, m 평가 사례 (김석남 등, 2005) ····· 439
<그림 3.4-7> 일반 제방단면의 구조와 명칭 ····· 440
<그림 3.4-8> 하상토 활용 제방 형식 ····· 440
<그림 3.4-9> 현장 및 실내시험에 의한 입도조정 사례 ····· 443
<그림 3.4-10> 입도조정의 조사・검토 흐름 ····· 444
<그림 3.4-11> 현장 혼합 전경 ····· 448

Contents

Chapter 1. Introduction ····· 1

Section 1. Necessity of R&D ····· 1

Section 2. The Object and Necessity of Research and Development ····· 2

Section 3. Driving Strategy & Method ····· 3

Section 4. Expected Result & Application Plan ····· 5

Chapter 2. The Situation of Technology Development in Domestics & Abroad ····· 7

Chapter 3. Performance Contents of R&D And Result ····· 9

Section 1. Related system of Bed Sediment and Analysis of Research Trend ·· 9

1. Present Condition of Levee Collapse and System about Bed Sediment ····· 10

A. Present Condition of Levee Collapse about Bed Sediment ····· 10

B. Related regulations about Bed Sediment in domestic ····· 14

(1) Guide of Design Levees in River ····· 14

(2) Standard specifications for river construction ····· 18

(3) Guide of Dam Design(2003, Korea Water Resources Association) ····· 21

(4) Dredging Bed Sediment and Related Standard of Natural Environment ····· 24

C. Tentative Decision ····· 29

2. Research Trend about Bed Sediment in Domestic and Abroad ····· 30

A. Domestic ····· 30

(1) Concerned Research of Containment and Treatment of Bed Sediment · 31

(2) Concerned Research ofEngineering Characteristics and Using ····· 34

(3) Concerned Research of Geophysical Exploration ····· 34

B. Abroad ····· 35

(1) USA ····· 35

(2) Europe ····· 43
(3) Japan ····· 48
(4) China ····· 65
C. Tentative Decision ····· 68
3. Accumulation mechanism and Producted Present Condition of Bed Sediment · 70
A. Accumulation Mechanism of Bed Sediment ····· 70
(1) Formation and Transfer of Bed Sediment ····· 70
(2) Erosion and Process of Accumulated Bed Sediment ····· 71
(3) Calculation Amount of Accumulated Bed Sediment ····· 75
B. Characteristic of Productive Bed Sediment in domestic and Abroad ····· 87
(1) Effect of Accumulated Bed Sediment ····· 87
(2) Producted Present Condition of Bed Sediment in Domestic ····· 88
(3) Characteristic of Bed Sediment in Nakdong River ····· 93
C. Dredging River Channel ····· 113
(1) Present Condition of Dredging River Channel in Domestic ····· 113
(2) Outline of Dredging River Channel ····· 114
(3) Choice and Construction of Dredger ····· 114
D. Tentative Decision ····· 123
4. Construction Field Compaction and Mixed Equipment ····· 123
A. Present Condition and Characteristic of Compaction Equipment ····· 124
(1) Outline of Construction Field Compaction ····· 124
(2) Compaction Equipment ····· 131
(3) Mixed Equipment ····· 137

Section 2. Suitability Evaluation : Bed Sediment in Domestic as Levee Material ····· 139
1. Material Characteristic Investigation of Levee & Bed Sediment in Domestic 139
A. Test Outline and Method ····· 139
B. Test Result and Analysis ····· 141
(1) Gum River Water system ····· 141

(2) Nakdong River Water system ····· 148
(3) Sumjin River and Youngsan River Water system ····· 155
(4) Han River Water system ····· 160
C. Tentative Decision ····· 163
2. Characteristic Analysis of Bed Sediment in Domestic : a View-Point Engineering ····· 166
A. Outline of Test ····· 166
(1) Purpose of Test ····· 166
(2) Materials for Experiment ····· 166
(3) Item of Test and Method ····· 167
B. Test Result and Analysis ····· 168
(1) Specific Gravity ····· 168
(2) Grain Size Distribution ····· 168
(3) Liquid Limit and Plastic Limit ····· 170
(4) Compaction Characteristic ····· 171
(5) Permeability Characteristic ····· 173
(6) Shearing Characteristic ····· 174
C. Tentative Decision ····· 175
3. Shearing Strength Characteristic of Unsaturated Bed Sediment ····· 177
A. Theoretical Analysis ····· 177
(1) Unsaturated Shear Strength ····· 177
(2) Unsaturated Coefficient of Permeability ····· 179
B. Shear Strength Test of Unsaturated Bed Sediment ····· 180
(1) Test Method and Equipment ····· 180
(2) Item of Test ····· 183
C. Result of Triaxial Test of Unsaturated Bed Sediment ····· 184
(1) ONI Sample ····· 184
(2) Clay Sample ····· 188
(3) SP Sample ····· 192
(4) Comparison of the Result ····· 196

D. Result of Permeability Test of Unsaturated Bed Sediment ····· 198
(1) Characteristic Curve of Water Content ····· 198
(2) Curve of Permeability of Unsaturated Bed Sediment ····· 199
E. Tentative Decision ····· 200
4. Characteristic Analysis of Stabilized Bed Sediment : a View-Point Engineering ····· 202
A. Outline of Test ····· 202
(1) Purpose of Test ····· 202
(2) Materials for Experiment ····· 202
B. Characteristic Analysis of Stabilized soil-1(SP) of soil of River Bed in Waegwan : a View-Point Engineering ····· 203
(1) Item of Test and Method ····· 203
(2) Test Result and Analysis ····· 204
C. Characteristic Analysis of Stabilized Silty Soil(ML) : a View-Point Engineering ····· 213
(1) Item of Test and Method ····· 213
(2) Test Result and Analysis ····· 214
D. Characteristic Analysis of Stabilized Clay(CL) : a View-Point Engineering ····· 230
(1) Item of Test and Method ····· 230
(2) Test Result and Analysis ····· 230
E. Tentative Decision ····· 236
5. Engineering Characteristic Analysis through Construction Field Test ····· 241
A. Outline of Construction Field Test ····· 241
(1) Purpose of Test ····· 241
(2) Materials for Experiment ····· 241
(3) Contents of Test ····· 243
B. Geotechnical characteristics of Hyunpoong(SP) ····· 245
(1) Compaction Characteristic in Construction Field ····· 245
(2) Strength Characteristic According to Construction Field Compaction ····· 250

(3) Strength Characteristic in Construction Field of Mixed Bed Sediment : According to Mixing Ratio ····· 252
C. Geotechnical characteristics of Incheon(ML) ····· 254
(1) Compaction Characteristic in Construction Field ····· 254
(2) Strength Characteristic According to Construction Field Compaction ····· 259
(3) Strength Characteristic in Construction Field of Mixed Bed Sediment : According to Mixing Ratio ····· 261
D. Tentative Decision ····· 264
6. Stability Evaluation about Levee Permeability of Mixed Bed Sediment ····· 266
A. Outline of Permeability Model Test ····· 266
(1) Outline of Model Test ····· 266
(2) Result of Model Test ····· 269
B. Numerical Analysis Using Model Section ····· 270
(1) Outline of Numerical Analysis ····· 270
(2) Result of Numerical Analysis ····· 270
C. Stability of Levee using the Mixed Bed Sediment ····· 272
(1) Outline of Numerical Analysis ····· 272
(2) Result of Numerical Analysis ····· 274
D. Tentative Decision ····· 278
7. Geophysical Exploration Method for Grasping amount of Bed Sediment ····· 280
A. Characteristic of Water Surface Geophysical Exploration Method ····· 280
(1) Type of Water Surface Geophysical Exploration Method ····· 281
(2) Application Analysis of Water Surface Geophysical Exploration Method ····· 282
B. Geophysical Exploration Method for Bed Sediment Investigation and Example Analysis ····· 283
(1) Underground Penetration Radar Exploration ····· 283
(2) Refraction Method Elastic Wave Exploration ····· 288
(3) Sonic prospecting Acoustic Exploration ····· 294
C. Apply Construction Field to Geophysical Exploration Method for Evaluation Amount of Bed Sediment ····· 298

(1) Outline of Investigation ····· 298
(2) Altitude Survey ····· 300
(3) Exploratory Drilling Investigation ····· 301
(4) GPR Exploration ····· 302
(5) Refraction Method Elastic Wave Exploration ····· 307
D. Application Standard of Geophysical Exploration Method for Evaluation Amount of Bed Sediment ····· 315
(1) Resolution Analysis According to Frequency Characteristic of Oscillation Center ····· 315
(2) Measurable Depth Analysis according to frequency Characteristics Small Epicenter ····· 316
(3) Apply Geophysical Exploration Method to Analysis According to River Depth ····· 316
E. Investigation Technical Guide for Amount of dredge River Bed ····· 316
(1) Choice Standard of Geophysical Exploration Method According to Bed Sediment Characteristic ····· 317
(2) Exploration Sidetrack and Exploration Parameter Design ····· 317
(3) Level Measurement ····· 317
(4) Exploratory Drilling Investigation ····· 319
(5) Geophysical Exploration Data Analysis ····· 319
(6) 2-D Interpolation of Sedimentary Layer Depth Data ····· 319
(7) Sedimentary Layer Volume Calculation in Target Area ····· 319
F. Tentative Decision ····· 320
8. Characteristic Analysis of Bed Sediment using by Geophysical Exploration Method : a View-Point Engineering ····· 321
A. Velocity of Elastic Wave & Elastic Modules in Subearth Medium ····· 322
(1) Characteristic of Elastic Wave Velocity in Subearth Medium ····· 322
(2) Characteristic of Elastic Modules in Subearth Medium ····· 324
B. Geophysical Exploration for Shear Wave Velocity ····· 326

C. Laboratory Shear wave Test by Bander Element ····· 327
(1) Principle of Test ····· 327
(2) Fixing & Waterproofing of Bander Element ····· 329
(3) Equipment & Method of Test ····· 330
D. Outline of Construction Field Test ····· 330
(1) Test Outline and Method ····· 330
(2) Materials for Experiment ····· 333
(3) Test Result and Analysis ····· 334
E. Tentative Decision ····· 341

Section 3. Bed Sediment Dredged Soil Levee Design Using Geotube ····· 343
1. Outline of Engineering Method and Example of Construction of Domestic and Foreign ····· 343
A. Outline of Engineering Method ····· 343
B. Example of Construction of Domestic and Foreign ····· 345
(1) Disaster Dangerous Area Maintenance Project in Yonjin Port ····· 346
(2) Warm-drainage Reduction Facilities Construction in Uljin Nuclear Generator No 5, 6 ····· 346
(3) Ilsan Grand Bridge Construction ····· 347
(4) Tampa Bay of Florida in USA ····· 347
(5) Wack-Wack Golf Course of Manila in Philippines ····· 348
(6) Bolivar Peninsula of Texas in USA ····· 349
C. Tentative Decision ····· 349
2. Analysis of State of the Art for Research and Technique ····· 350
A. Analysis of Domestic ····· 350
B. Analysis of Overseas ····· 351
C. Tentative Decision ····· 352
3. Design and Stability of Geotube Levee ····· 353
A. Design Theory of Geotube ····· 353
B. Stability of Geotube Levee ····· 356

(1) Stability of Sliding ····· 356
(2) Stability of Over turning ····· 357
(3) Stability of Bearing Capacity ····· 359
C. Evaluation Characteristic of Geotube ····· 360
(1) Contents and Scope of Tests ····· 360
(2) Contents of Tests and Methods ····· 361
(3) Results of Tests ····· 374
D. Evaluation Characteristic of Shore Protection System Friction with Soils ····· 376
(1) Function of Shore Protection and Design Method ····· 376
(2) Outline of Test ····· 381
(3) Results and Analysis of Tests ····· 386
E. Tentative Decision ····· 390
4. Construction Field Test Using Geotube ····· 392
A. Outline of Construction Field Test ····· 392
(1) Field Back-Fill Soil ····· 393
(2) Geotube ····· 394
B. Construction Method ····· 394
C. Field Measurement ····· 399
(1) Measurement Item and Instruments ····· 399
(2) Installation of Instruments ····· 400
D. Result of Field Measurement ····· 403
(1) Characteristic of Earth Pressure and Deformation ····· 403
(2) Characteristic of Settlement ····· 405
(3) Sliding of Levee ····· 405
(4) Deformation of Geotube ····· 406
(5) Pore Water Pressure ····· 410
E. Example for Stability of Geotube Levee ····· 411
F. Example for Economic Evaluation of Geotube Levee ····· 415
G. Tentative Decision ····· 416
5. Stability Evaluation of Levee using Bed Sediment Material and Geotube ····· 418

A. Outline of Numerical Analysis ····· 418
B. Evaluation Method of Levee Stability ····· 420
(1) Slope Stability of Levee ····· 420
(2) Piping Analysis by Leakage of Water in Levee ····· 422
(3) Result of Numerical Analysis ····· 424
C. Tentative Decision ····· 433

Section 4. Levee Construction Manual using Bed Sediment Material ····· 434
1. General of Design ····· 434
2. Levee Structure and Type using Bed Sediment Material ····· 440
3. Levee Construction Material ····· 441
4. Construction of Levee ····· 446

Chapter 4. Object Achievement Chart of R&D ····· 449
Section 1. Degree of Achievement ····· 449
Section 2. Degree of Contribution to Related Fields ····· 450

Chapter 5. Application Plan of R&D Results ····· 451

Chapter 6. References ····· 453

List of Table

<Table 1.2-1> The Object and Necessity of Research and Development ····· 3
<Table 3.1-1> Cause of Levee Collapse in 2006(Ministry of Construction & Transportation, 2006) ····· 12
<Table 3.1-2> Standard of Soil Material ····· 19
<Table 3.1-3> Standard of Rock Bloc ····· 19
<Table 3.1-4> Levee Reinforcement of Weld ····· 20
<Table 3.1-5> Standard of Deposit Material and Specificity in U.S.A. ····· 26
<Table 3.1-6> Standard of Removal of Deposit in the Gulf of Tokyo and Yokohama · 27
<Table 3.1-7> Standard of Dredging in Japan ····· 27
<Table 3.1-8> Standard of Removal of Deposit in River and Lake in Domestic ···· 28
<Table 3.1-9> Compaction and Result of CBR test ····· 32
<Table 3.1-10> Laboratory Test for Estimate of Light Weight Mixed Soil Specificity(Yoon, et al., 2002) ····· 33
<Table 3.1-11> Piping and Resistance of Crack classified by Levee Material ; separated by Grain Size Distribution(NAVFAC, 1986) ····· 37
<Table 3.1-12> Result of Compaction Test(Ali Maher, 2005) ····· 40
<Table 3.1-13> A Summary the Result of Permeability Test(Ali Maher, 2005) ··· 40
<Table 3.1-14> A Summary the Result of Triaxial compression Test ; separated by Grain Size Distribution(Ali Maher, 2005) ····· 41
<Table 3.1-15> Category of Technology according to Processing Method(SEDNET, 2004) ····· 45
<Table 3.1-16> Standard Table of Selection by Processing Method(SEDNET, 2004) 46
<Table 3.1-17> Construction Result for CSG Method(Mitsuo, 2000) ····· 51
<Table 3.1-18> Cone Index for Traveling of Construction Equipment ····· 55
<Table 3.1-19> Measure Method for Low Quality Soil ····· 57
<Table 3.1-20> A Case of Mixed Grain Size distribution ; according to Driscoll · 61
<Table 3.1-21> Standard of Annexing Rate classified by Soil ····· 63

<Table 3.1-22> Each Peculiarity of Method of Sediment Discharge ····· 76
<Table 3.1-23> Comparison and Analysis of Estimation Method of Total Sediment Discharge ····· 76
<Table 3.1-24> Ackers & White Modulus ····· 85
<Table 3.1-25> A State of 4 River System in Korea ····· 89
<Table 3.1-26> Bed Sediment Discharge in Han River ····· 89
<Table 3.1-27> Bed Sediment Discharge in Gum River ····· 90
<Table 3.1-28> Bed Sediment Discharge in Sumjin River and Youngsan River · 91
<Table 3.1-29> Bed sediment Discharge in Nakdong River ····· 92
<Table 3.1-30> Nakdong River Extension ····· 95
<Table 3.1-31> Condition of Area Selection ····· 97
<Table 3.1-32> Comparison of Total Sediment Discharge ; classified by Method of Estimation in Walpo Bridge ····· 104
<Table 3.1-33> Comparison of Total Sediment Discharge ; classified by Method of Estimation in Kimpo ····· 105
<Table 3.1-34> Comparison of Total Sedimentt Discharge ; classified by Method of Estimation in Waegwan ····· 106
<Table 3.1-35> Comparison of Total Sediment Discharge ; classified by Method of Estimation in Dongcheon Bridge ····· 107
<Table 3.1-36> Comparison of Total Sediment Discharge ; classified by Method of Estimation in Cheongdo ····· 108
<Table 3.1-37> Comparison of Total Sediment Discharge ; classified by Method of Estimation in Jindong ····· 109
<Table 3.1-38> According to Year Investment Planning of Channel of Stream Dredging Project ····· 114
<Table 3.1-39> Application of Several Vessel according to Soil type ····· 116
<Table 3.1-40> Application of Several Vessel according to Depth ····· 119
<Table 3.1-41> A Outbreak Dept of Diesel Ship ····· 120
<Table 3.1-42> According to Soil Condition, Optimum Equipment and Transmission Energy ····· 128

<Table 3.1-43> Suitability of Compaction Equipment by Classification of Soil (Railroad Administration, 1999) ····· 129
<Table 3.1-44> Effective Width by Compaction and Standard Compaction Velocity of Compaction Equipment (Railroad Administration, 1999) ····· 130
<Table 3.1-45> The Standard of Compaction Construction ····· 130
<Table 3.1-46> General Standard of Compaction Equipment ····· 131
<Table 3.1-47> Proper Soil for Apply to Road Roller ····· 131
<Table 3.1-48> Resources of Macadam Roller, using in Domestic ····· 132
<Table 3.1-49> Resources of Tendam Roller, using in Domestic ····· 133
<Table 3.1-50> Contact Pressure of Tire Roller ····· 134
<Table 3.1-51> Resources of Tire Roller, using in Domestic ····· 134
<Table 3.1-52> Resources of Vibration Roller, using in Domestic ····· 136
<Table 3.2-1> Resistance of Levee Leakage of Water (NAVFAC DM 7.02, 1986) ····· 140
<Table 3.2-2> Characteristic of the Grain Size Distribution of Soil and Result of Unified Classification by Investigation Area in Geum River Water system ····· 142
<Table 3.2-3> Characteristic of the Grain Size Distribution of Soil and Result of Unified Classification by Investigation Area in Nakdong River Water system ····· 148
<Table 3.2-4> Characteristic of the Grain Size Distribution of Soil and Result of Unified Classification by Investigation Area in Seumjin-Yeongsan River Water system ····· 156
<Table 3.2-5> Characteristic of the Grain Size Distribution of Soil and Result of Unified Classification by Investigation Area in Han River Water system ····· 161
<Table 3.2-6> Sampling Station of Classification of Soil that used in Basic Character Test ····· 167
<Table 3.2-7> Test Head and Contents ····· 167
<Table 3.2-8> The Result of Soil of River Bed in Nakdong Precipitation &

Mechanical Analysis of Granitic Soil of Weathered Rock ····· 169
<Table 3.2-9> Hydraulic Conductivity of the Sample Soil for Testing ····· 174
<Table 3.2-10> Shear Strength of the Sample Soil for Testing ····· 175
<Table 3.2-11> Molding Condition of Sample ····· 184
<Table 3.2-12> Parameters of Water Content Characteristics Curve each Soil Sample ····· 197
<Table 3.2-13> Variation Factor of Water Content Characteristics Curve each Soil Sample ····· 199
<Table 3.2-14> Test Item & Range for Evaluating Engineering Characteristics of Stabilized Soil of River Bed(SP) in Waegwan ····· 203
<Table 3.2-15> The Result of Basic Characteristics Test for Mixed soil-1 (SP) of soil of River Bed in Waegwan ····· 205
<Table 3.2-16> The Result of Basic Characteristics Test for Stabilized soil-1(SP) of soil of River Bed in Waegwan by Cement ···· 205
<Table 3.2-17> The Result of Basic Characteristics Test for Stabilized soil of soil -1(SP) of soil of River Bed in Waegwan by Bentonite ···· 205
<Table 3.2-18> The Result of Compaction Test for Mixed soil-1 (SP) of soil of River Bed in Waegwan ····· 206
<Table 3.2-19> The Result of Permeability test for Mixed soil-1 (SP) of soil of River Bed in Waegwan ····· 208
<Table 3.2-20> The Result of Shear Test for Mixed soil-1 (SP) of soil of River Bed in Waegwan ····· 211
<Table 3.2-21> Test Item & Range for Evaluating Engineering Characteristics of Stabilized Silty Soil(ML) ····· 213
<Table 3.2-22> The Result of Basic Characteristics Test for Mixed soil-2(ML-1) of soil of river bed in Waegwan ····· 214
<Table 3.2-23> Result of Basic Characteristics Test for Mixed soil(ML-2) of river bed on an estuary Levee in Ansan ····· 215
<Table 3.2-24> The Result of Basic Characteristics Test for Stabilized soil-2(ML-1) of soil of river bed in Waegwan ····· 216

<Table 3.2-25> Result of Basic Characteristics Test for Stabilized soil(ML-2) of river bed on an estuary Levee in Ansan ····· 217
<Table 3.2-26> The Result of Compaction Test for Silty Soil(ML) by Mixing Rate with Granitic Soil of Weathered Rock ····· 218
<Table 3.2-27> The Result of Compaction Test for Silty Soil(ML) by Mixing Rate with Cement ····· 219
<Table 3.2-28> The Result of Permeability Test for Silty Soil(ML) by Mixing Rate with Weathered Granitic Soil ····· 221
<Table 3.2-29> The Result of Permeability Test for Silty Soil(ML) by Mixing Rate with Cement ····· 222
<Table 3.2-30> The Result of Shear test for Silty Soil(ML) by Mixing Rate with Granitic Soil of Weathered Rock ····· 223
<Table 3.2-31> The Result of Shear test for Silty Soil(ML) by Mixing Rate with Cement ····· 224
<Table 3.2-32> The Result of Unconfined Compression Test for Silty Soil(ML) by Mixing Rate with Weathered Granitic Soil(kg/cm^2) ····· 226
<Table 3.2-33> The Result of Unconfined Compression Test for Stabilized soil-2(ML-1) of soil of river bed in Waegwan(kg/cm^2) ····· 228
<Table 3.2-34> The Result of Unconfined Compression Test for Stabilized soil (ML-2) of river bed on an estuary Levee in Ansan(kg/cm^2) · 229
<Table 3.2-35> Test Item & Range for Evaluating Engineering Characteristics of Stabilized Clay ····· 230
<Table 3.2-36> Result of Basic Characteristics Test for Stabilized soil(CL) of soil of river bed in Mankyung River ····· 231
<Table 3.2-37> The Result of Compaction Test for soil(CL) of soil of river bed in Mankyung River by Mixing Rate with Cement ····· 232
<Table 3.2-38> The Result of Permeability Test for soil(CL) of soil of river bed in Mankyung River by Mixing Rate with Cement ····· 233
<Table 3.2-39> The Result of Shear Test for soil(CL) of soil of river bed in Mankyung River by Mixing Rate with Cement ····· 234

<Table 3.2-40> The Result of Unconfined Compression Test for Stabilized soil(CL) of soil of river bed in Mankyung River(kg/cm^2) ····· 234
<Table 3.2-41> Evaluation List and Variation Factor by Material of Test in Field ····· 244
<Table 3.2-42> The Result of Compaction Characteristics Test of Soil of River Bed in Hyunpoong (moisture content in nature, t/m^3) ····· 245
<Table 3.2-43> The Result of Compaction Characteristics test of soil of river Bed in Hyunpoong (increase of moisture content, t/m^3) ····· 246
<Table 3.2-44> The Result of Compaction Characteristics Test for Weathered Granitic Soil(SW) in field ····· 247
<Table 3.2-45> The Result of Compaction Characteristics test for Weathered Granitic Soil(SW) in Field (height of banking 30cm, t/m^3) ··· 249
<Table 3.2-46> The Results of Compaction Characteristics of Incheon(ML)(moisture content in nature , t/m^3) ····· 255
<Table 3.2-47> The Results of Compaction Characteristics of Incheon(ML)(decrease of moisture content , t/m^3) ····· 255
<Table 3.2-48> Results of Compaction Characteristics of Paju(SW) ····· 257
<Table 3.2-49> Results of Compaction Characteristics of Field Mixing Soil(ML)(height of banking 30cm, t/m^3) ····· 258
<Table 3.2-50> Variation of Pore Pressure and Water Head according to Passing time ····· 269
<Table 3.2-51> Geologic Layer & Foundation Physical Properties used for Analysis ····· 270
<Table 3.2-52> Geologic Layer & Foundation Physical Properties used for Analysis ····· 273
<Table 3.2-53> Slope Stability & Velocity Vector by using Analysis Result ····· 275
<Table 3.2-54> The Range of Physical Prospecting & Boring Investigation (Yuzuru, 2002) ····· 281
<Table 3.2-55> Characteristics of Aquatic Physical Exploration Equipment ····· 282
<Table 3.2-56> GPR Explorer(PulseEkko 100 system) Factor. ····· 286

<Table 3.2-57> The Factor of Seismic Prospector, McSeis SX24. ····· 292
<Table 3.2-58> The Characteristics of Water Surface Physical Exploration ···· 296
<Table 3.2-59> High Frequency Sound Wave Exploration Information ····· 296
<Table 3.2-60> Range of Physical exploration and boring. ····· 299
<Table 3.2-61> The Volume of a Sedimentary Layer (Wol-Chon Bridge, Yong-In) ····· 306
<Table 3.2-62> Elastic Wave Velocity of Cross Section on Layer in Analysis ····· 307
<Table 3.2-63> The Volume of Sedimentary layer (Wol-Chon Bridge, Yong-In) ····· 314
<Table 3.2-64> The Volume of Sedimentary layer (Dam-Am Bridge, Yae-Cheon) ····· 314
<Table 3.2-65> The Seismic Velocity on each Geologic Layer of Analysis section ····· 315
<Table 3.2-66> The Characteristics of Physical Prospecting Method for River Bed Investigation ····· 317
<Table 3.2-67> Elastic Wave Velocity(Soil, Rock etc., ; Jang, et al., 1999) ····· 323
<Table 3.2-68> Sort & Content of Test(In-situ, Laboratory) ····· 333
<Table 3.2-69> The Characteristics of Unconfined Compression Test According to Degree of Compaction ····· 334
<Table 3.2-70> The Result of Shear Wave Velocity & Degree of Compaction According to Soils(In-situ Test) ····· 335
<Table 3.2-71> The Result of Shear Wave Velocity & Degree of Compaction According to Soils(Laboratory Test) ····· 336
<Table 3.3-1> Concerned Standard and Characteristics Test ····· 361
<Table 3.3-2> Outline of Wide-width Tensile Test(KS K ISO 10319) ····· 362
<Table 3.3-3> Outline of Strip Tensile Test ····· 364
<Table 3.3-4> Outline of Thermal Fatigue Test ····· 368
<Table 3.3-5> Outline of Wearing Test ····· 369
<Table 3.3-6> Outline of Combustion Test(KS M 3071) ····· 370
<Table 3.3-7> Summary of Effective particle Size Test ····· 372
<Table 3.3-8> Results of Physical Characteristics Tests ····· 375
<Table 3.3-9> Results of Engineering Characteristics of Soil ····· 383
<Table 3.3-10> Items and Contents of Friction Test ····· 385

<Table 3.3-11> Results of Large scale Direct Shear Test ····· 388
<Table 3.3-12> Basic Characteristic of Fill Material ····· 393
<Table 3.3-13> List of Item for Field Measurement ····· 399
<Table 3.3-14> Comparison of Earth Pressure for theoretic and measuring ···· 415
<Table 3.3-15> Economic Efficiency compare Earth Levee to Geotube Levee 415
<Table 3.3-16> Analysis Condition and Section for Each CASE ····· 418
<Table 3.3-17> Material Property applied to Analysis ····· 420
<Table 3.3-18> Guideline Safety for Levee Condition ····· 420
<Table 3.3-19> Domestic Slope Stability Model for Levee ····· 421
<Table 3.3-20> Critical Velocity ····· 423
<Table 3.3-21> Result of Slope Stability by Cover Soil Thickness Variation ···· 427
<Table 3.3-22> Result of Piping Stability by Cover Soil Thickness Variation ··· 427
<Table 3.3-23> Result of Slope Stability by Stabilization Technic Variation ···· 429
<Table 3.3-24> Result of Piping Stability by Stabilization Technic Variation ···· 430
<Table 3.3-25> Result of Slope Stability by Levee Material Variation ····· 432
<Table 3.3-26> Result of Piping Stability by Levee Material Variation ····· 433
<Table 3.4-1> Guideline Safety for Levee Condition ····· 439
<Table 3.4-2> Environmental Standard of Soil Pollution ····· 442
<Table 3.4-3> Quality for Levee Construction Material ····· 444
<Table 3.4-4> Guideline of Compaction for Levee Construction Material ····· 447
<Table 3.4-5> Selection of Compaction Roller by Soil Property ····· 447

List of Figures

<Fig. 3.1-1> Type of Levee Collapse(Korea Institute of Construction Technology, 2004) ····· 12
<Fig. 3.1-2> Picture of Collapse in DaeGok-Levee ····· 13
<Fig. 3.1-3> Picture of Collapse in WeolDong River ····· 14
<Fig. 3.1-4> Levee organization and Outline Diagram ····· 15
<Fig. 3.1-5> Curing time-Cement Mixture Ratio-Unconfined Compressive Strength ·· 32
<Fig. 3.1-6> Compression Strength According to EPS Content by Percentage ····· 34
<Fig. 3.1-7> Ultimate Compression Strength According to EPS Content by Percentage ·· 34
<Fig. 3.1-8> Grain Size distribution of Levee Material(NAVFAC, 1986) ····· 36
<Fig. 3.1-9> Sampling Station(Ali Maher, 2005) ····· 38
<Fig. 3.1-10> Flowchart of Bed Sediment Dredged Soil Application ····· 43
<Fig. 3.1-11> Control Flowchart of Dredging · Management(SEDNET, 2004) ··· 44
<Fig. 3.1-12> Construction-net Outline Diagram of Selected Management Technique for dredging Construction in Netherlands (AKWA, 2000) ····· 46
<Fig. 3.1-13> Average Grain Size of Original Soil used CSG method ····· 50
<Fig. 3.1-14> Distribution Outline Chart of Low Quality Soil in Hokkaido ····· 52
<Fig. 3.1-15> Flowchart of Investigation, Decision of Low Quality Soil in Hokkaido ··· 54
<Fig. 3.1-16> Selection Flowchart of Counterplan Method of Low Quality Soil ·· 57
<Fig. 3.1-17> Disk Hollow ····· 58
<Fig. 3.1-18> Trench Excavation Method ····· 58
<Fig. 3.1-19> Dry Plant the Use of Cohesive Soil ····· 59
<Fig. 3.1-20> Dry Equipment of high Deed Airing Type ····· 59
<Fig. 3.1-21> Two Kind of Plant Mixer ····· 61
<Fig. 3.1-22> Plant Front view of Center Plant Method ····· 61
<Fig. 3.1-23> Graphical Solution of Driscoll ····· 61
<Fig. 3.1-24> Additive Mixing Type of Stabilization Method ····· 64
<Fig. 3.1-25> State of Use Quicklime, Calcium hydroxide for Lime Safe Treatment ··· 64

<Fig. 3.1-26> The Yangtze valley Present State and Characteristic of Bed Sediment Floating Amount(2004, MWR) ····· 66
<Fig. 3.1-27> Classified by Annual Levee Construction Using Levee Sediment (2004, MWR) ····· 68
<Fig. 3.1-28> General Outline of River ····· 70
<Fig. 3.1-29> Relation Characteristic Curve of Erosion-Accumulation Classified by Equal Soil Particle(Hjulstrom, 1935) ····· 71
<Fig. 3.1-30> Erosion at the Surface of a drainage basin and river bed ····· 72
<Fig. 3.1-31> Downward Erosion ····· 73
<Fig. 3.1-32> Downward Erosion ····· 73
<Fig. 3.1-33> Accumulation Process of Bed Sediment ····· 74
<Fig. 3.1-34> Φ_*-Ψ_* Relation of Einstein Equation(Einstein, 1950) ····· 79
<Fig. 3.1-35> Value of Cover Coefficient (Einstein, 1950) ····· 79
<Fig. 3.1-36> Value of Lift Compensation Coefficient Y(Einstein, 1950) ····· 80
<Fig. 3.1-37> Value of Coefficient X; Average Speed of a Current and Distribution Expression(Einstein, 1950) ····· 80
<Fig. 3.1-38> 4 River System of Korea ····· 88
<Fig. 3.1-39> Bed Sediment Produced Amount of Han River ····· 90
<Fig. 3.1-40> Bed Sediment Produced Amount of Gum River ····· 91
<Fig. 3.1-41> Bed Sediment Produced Amount of Sumjin River and Youngsan River ····· 92
<Fig. 3.1-42> Bed Sediment Produced Amount of Nakdong River System ····· 93
<Fig. 3.1-43> Present State of Nakdong River System ····· 95
<Fig. 3.1-44> Measurement Point of Bed Sediment ····· 96
<Fig. 3.1-45> Measurement Point of Walpo ····· 98
<Fig. 3.1-46> Measurement Point of Kimcheon ····· 99
<Fig. 3.1-47> Measurement Point of Waegwan ····· 100
<Fig. 3.1-48> Measurement Point of Dongchon ····· 101
<Fig. 3.1-49> Measurement Point of Chungdo ····· 102
<Fig. 3.1-50> Measurement Point of Jindong ····· 103

<Fig. 3.1-51> Comparison of Bed Sediment Amount Computable Equation in Walpo ····· 110
<Fig. 3.1-52> Comparison of Bed Sediment Amount Computable Equation in Kimcheon ····· 110
<Fig. 3.1-53> Comparison of Bed Sediment Amount Computable Equation in Waegwan ····· 111
<Fig. 3.1-54> Comparison of Bed Sediment Amount Computable Equation in Dongchon ····· 111
<Fig. 3.1-55> Comparison of Bed Sediment Amount Computable Equation in Chungdo ····· 112
<Fig. 3.1-56> Comparison of Bed Sediment Amount Computable Equation in Jindong ····· 112
<Fig. 3.1-57> Flowchart of Dredging Construction ····· 119
<Fig. 3.1-58> Macadam Roller ····· 132
<Fig. 3.1-59> Tandem Roller(2 wheel) ····· 133
<Fig. 3.1-60> Tire Roller ····· 134
<Fig. 3.1-61> Sheep's Roller ····· 135
<Fig. 3.1-62> Turn Foot Roller ····· 135
<Fig. 3.1-63> Vibrate Roller ····· 136
<Fig. 3.1-64> Vibrate Compactor ····· 137
<Fig. 3.1-65> Tamper ····· 137
<Fig. 3.1-66> Blade+Scarifier Grader ····· 138
<Fig. 3.2-1> Investigation Position Diagram of Levee and Bed Sediment ····· 141
<Fig. 3.2-2> Resistibility Analysis about Levee Material Leakage of Levee Material According to NAVFAC Standard in Geum River Water system ····· 147
<Fig. 3.2-3> Resistibility Analysis about Levee Material Leakage of Levee Material According to NAVFAC Standard in Nakdong River Water system ····· 155
<Fig. 3.2-4> Resistibility Analysis about Levee Material Leakage of Levee

Material According to NAVFAC Standard in Seumjin-Yeongsan River Water system ····· 160
<Fig. 3.2-5> Resistibility Analysis about Levee Material Leakage of Levee Material According to NAVFAC Standard in Han River Water system ····· 162
<Fig. 3.2-6> Specific Gravity ····· 168
<Fig. 3.2-7> Grain Size distribution Curve ····· 170
<Fig. 3.2-8> Liquid limit · Plastic Limit Test ····· 171
<Fig. 3.2-9> Picture of Compaction Test ····· 172
<Fig. 3.2-10> Grain Size distribution Curve of Bed Sediment ····· 172
<Fig. 3.2-11> Picture of Permeability Test ····· 173
<Fig. 3.2-12> Direct Shear Test ····· 174
<Fig. 3.2-13> Inner Structure of Unsaturated Triaxial Compression Test Cell ·· 181
<Fig. 3.2-14> Equipment of Unsaturated Permeability Test ····· 182
<Fig. 3.2-15> Compaction Curve of ONI Sample ····· 183
<Fig. 3.2-16> Compaction Curve of Clay ····· 184
<Fig. 3.2-17> Stress-Strain Curve of ONI Sample According to Capillary Absorption ····· 186
<Fig. 3.2-18> Unsaturated Failure Envelop of ONI Sample ····· 186
<Fig. 3.2-19> Non-linear Apparent Cohesion of ONI Sample ····· 187
<Fig. 3.2-20> Variation of ϕ^b According to Capillary Absorption(ONI Sample) ··· 187
<Fig. 3.2-21> Comparison of Unsaturated Shear Strength(Confining Pressure 150 kPa, ONI Sample) ····· 188
<Fig. 3.2-22> Determination Average ϕ^b of ONI Sample ····· 188
<Fig. 3.2-23> Stress-Strain Curve of Clay Sample According to Capillary Absorption ····· 189
<Fig. 3.2-24> Unsaturated Failure Envelop of Clay Sample ····· 190
<Fig. 3.2-25> Non-linear Apparent Cohesion of Clay Sample ····· 190
<Fig. 3.2-26> Variation of ϕ^b According to Capillary Absorption(Clay Sample) ·· 191
<Fig. 3.2-27> Comparison of Unsaturated Shear Strength(Confining Pressure 150 kPa,

Clay Sample) ····· 191
<Fig. 3.2-28> Determination Average ϕ^b of Clay Sample ····· 192
<Fig. 3.2-29> Stress-Strain Curve of SP Sample According to Capillary Absorption ····· 193
<Fig. 3.2-30> Unsaturated Failure Envelop of SP Sample ····· 193
<Fig. 3.2-31> Non-linear Apparent Cohesion of SP Sample ····· 194
<Fig. 3.2-32> Variation of ϕb According to Capillary Absorption(SP Sample) ·· 194
<Fig. 3.2-33> Comparison of Unsaturated Shear Strength(Confining Pressure 150 kPa, SP Sample) ····· 195
<Fig. 3.2-34> Determination Average ϕb of SP Sample ····· 195
<Fig. 3.2-35> Comparison of C_{max} Value According to Sample ····· 197
<Fig. 3.2-36> Comparison of ϕ^b_{avg} Value According to Sample ····· 197
<Fig. 3.2-37> Comparison of Unsaturated Shear Strength According to Sample ··· 198
<Fig. 3.2-38> Comparison of Water Content Characteristic Curve According to Sample ····· 199
<Fig. 3.2-39> Comparison of Unsaturated Permeability Curve According to Sample ··· 200

<Fig. 3.2-40> Compaction Curve of Stabilized Waegwan river bed soil-1(SP) ·· 208
<Fig. 3.2-41> Permeability Coefficient Variation Curve of Stabilized soil-1(SP) of soil of river bed in Waegwan ····· 210
<Fig. 3.2-42> Shear Strength Variation Curve of Stabilized soil-1(SP) of soil of river bed in Waegwan ····· 212
<Fig. 3.2-43> Compaction Curve of Silty Soil(ML) by Mixing Rate with Granitic Soil of Weathered Rock ····· 218
<Fig. 3.2-44> Compaction Curve of Silty Soil(ML) by Mixing Rate with Cement ··· 219
<Fig. 3.2-45> Permeability Coefficient Variation Curve of Silty Soil(ML) by Mixing Rate with Granitic Soil of Weathered Rock ····· 220
<Fig. 3.2-46> Permeability Coefficient Variation Curve of Silty Soil(ML) by Mixing Rate with Cement ····· 222
<Fig. 3.2-47> Shear Strength Variation Curve of Silty Soil(ML) by Mixing Rate

with Granitic Soil of Weathered Rock ····· 223
<Fig. 3.2-48> Shear Strength Variation Curve of Silty Soil(ML) by Mixing Rate with Cement ····· 224
<Fig. 3.2-49> Unified Compression Strength Variation Curve of Silty Soil(ML) by Mixing Rate with Granitic Soil of Weathered Rock(Degree of Relative Compaction 90%) ····· 226
<Fig. 3.2-50> Unified Compression Strength Variation Curve of Stabilized soil-2 (ML-1) of soil of river bed in Waegwan(Degree of Relative Compaction 90%) ····· 227
<Fig. 3.2-51> Unified Compression Strength Variation Curve of Stabilized soil (ML-2) of river bed on an estuary Levee in Ansan(Degree of Relative Compaction 90%) ····· 229
<Fig. 3.2-52> Compaction Curve of soil(CL) of soil of river bed in Mankyung River by Mixing Rate with Cement ····· 232
<Fig. 3.2-53> Permeability Coefficient Variation Curve of soil(CL) of soil of river bed in Mankyung River by Mixing Rate with Cement ····· 233
<Fig. 3.2-54> Shear Strength Variation Curve of soil(CL) of soil of river bed in Mankyung River by Mixing Rate with Cement ····· 234
<Fig. 3.2-55> Unified Compression Strength Variation Curve of Stabilized soil(CL) of soil of river bed in Mankyung River(Degree of Relative Compaction 90%) ····· 235
<Fig. 3.2-56> Test Site and Sampling Station ····· 242
<Fig. 3.2-57> Grain Size Distribution Curve of Field Soil ····· 243
<Fig. 3.2-58> A Picture of Compaction of Field Soil and Measurement ····· 244
<Fig. 3.2-59> Variation of Dry Density according to Levee Height and Compaction Number for Hyunpoong(SP) ····· 247
<Fig. 3.2-60> Compaction Test for Hyunpoong(SW) ····· 248
<Fig. 3.2-61> Compaction Curve of Mixed Bed Sediment for Hyunpoong ····· 249
<Fig. 3.2-62> Variation of Cone Resistance Value according to Compaction Height and Number ····· 251

<Fig. 3.2-63> A Picture after Cone Penetration Test at Field(Hyunpoong(SP)) ···· 252
<Fig. 3.2-64> Grain Size Distribution Curve according to Mixing Ratio through Lab. Test ···· 252
<Fig. 3.2-65> Grain Size Distribution Curve according Mixing Number of Times at Field(Hyunpoong(SP)) ···· 254
<Fig. 3.2-66> Variation of Dry Density according to Levee Height and Compaction Number(Incheon(ML)) ···· 256
<Fig. 3.2-67> Compaction Curve of Paju(SW) ···· 257
<Fig. 3.2-68> Compaction Curve of Incheon(ML) ···· 259
<Fig. 3.2-69> Variation of Cone Resistance Value according to Levee Height and Compaction Number(Incheon(ML)) ···· 261
<Fig. 3.2-70> Grain Size Distribution Curve according to Mixing Ratio through Lab. Test(Incheon(ML)) ···· 261
<Fig. 3.2-71> Grading Distribution Curve according Mixing Number of Times at Field(Incheon(ML)) ···· 263
<Fig. 3.2-72> A Picture of Mixing(Incheon(ML)) ···· 263
<Fig. 3.2-73> Schematic of Model Test ···· 267
<Fig. 3.2-74> Test Equipments ···· 267
<Fig. 3.2-75> Cross Section of Model Test and Water Level Condition ···· 268
<Fig. 3.2-76> Levee Material and Water Level Control ···· 268
<Fig. 3.2-77> Variation of Water Head in Levee Material according to Passing Time through Model Test ···· 269
<Fig. 3.2-78> Head Variation in Levee Material according to Passing Time Pass through Numerical Analysis ···· 271
<Fig. 3.2-79> Comparison of Model Test Results with Numerical Analysis Results according to Passing Time ···· 272
<Fig. 3.2-80> Practical Cross Section of Seepage Analysis and Water Level Condition ···· 273
<Fig. 3.2-81> Analysis Result of Stability of Slope according to Levee Material ···· 276
<Fig. 3.2-82> Variation of Flow Vector according to Levee Material (Maintain

Water Level : 8 days) ····· 277
<Fig. 3.2-83> Saturation Degree Variation according to Levee Material (Maintain Water Level : 8 days) ····· 278
<Fig. 3.2-84> Schematic of GPR Exploration ····· 284
<Fig. 3.2-85> GPR Exploration Equipment and Low Frequency Antenna (PulseEkko, Canada). ····· 286
<Fig. 3.2-86> Cross Section of Sediment Layer GRP at Misari Boating Field ····· 288
<Fig. 3.2-87> Refraction Method Elastic Wave Exploration Schematic and Analysis Theory ····· 289
<Fig. 3.2-88> Elastic Wave Course-Tracking Schematic for Tomography Reverse Operation ····· 291
<Fig. 3.2-89> Elastic Wave Recorder Geophone ····· 292
<Fig. 3.2-90> Elastic Wave Speed Cross Section of Hydro-thermal Zone, Raft River ····· 293
<Fig. 3.2-91> Speed Cross of Refraction Method Elastic Wave Exploration for Construction of LPG Underground Storage Base ····· 294
<Fig. 3.2-92> Schematic of Sonic Prospecting Acoustic Exploration ····· 295
<Fig. 3.2-93> Traverse's Course Diagram of Sonic Prospecting Acoustic Exploration ····· 297
<Fig. 3.2-94> Cross Section for onic Prospecting Acoustic Exploration Analysis ····· 298
<Fig. 3.2-95> Wide-Area Position Diagram of Investigation Area ····· 299
<Fig. 3.2-96> Geophysical Exploration Traverse's Course and Drilling Position Diagram ····· 300
<Fig. 3.2-97> Height of Investigation Area ····· 300
<Fig. 3.2-98> A Picture of Drilling Core ····· 301
<Fig. 3.2-99> Drilling Column Diagram ····· 301
<Fig. 3.2-100> Traverse's Course Diagram of GPR Exploration ····· 302
<Fig. 3.2-101> Cross Section for Analysis of GPR Exploration ····· 304
<Fig. 3.2-102> Cross Section for Analysis of GPR Exploration(Fence Diagram) ····· 305
<Fig. 3.2-103> Sediment Layer Thickness Distribution ····· 305
<Fig. 3.2-104> Sedimentary Layer Height Distribution ····· 306

<Fig. 3.2-105> Traverse's Course Diagram of Refraction Method Elastic Wave Exploration ····· 307
<Fig. 3.2-106> Cross Section for Analysis of Refraction Method Elastic Wave Exploration(Waechon Bridge, Yongin) ····· 309
<Fig. 3.2-107> Cross Section for Analysis of Refraction Method Elastic Wave Exploration(Damamje, Yecheon) ····· 310
<Fig. 3.2-108> Cross Section for Analysis of Refraction Method Elastic Wave Exploration (fence diagram) ····· 311
<Fig. 3.2-109> Sediment Layer Thickness Distribution ····· 312
<Fig. 3.2-110> Sediment Layer Height Distribution ····· 313
<Fig. 3.2-111> Fresnel Zone ····· 315
<Fig. 3.2-112> Processing Direction of Body Wave Particle ····· 322
<Fig. 3.2-113> Schematic of Poisson′ Ratio ····· 324
<Fig. 3.2-114> Schematic of Shear Modules ····· 325
<Fig. 3.2-115> Record of Wave Type by Geophone ····· 327
<Fig. 3.2-116> Theory of Bander Element ····· 327
<Fig. 3.2-117> Movement of Bander Element in Inverting Voltage ····· 328
<Fig. 3.2-118> Movement of Bander Element in Installing Equipment ····· 328
<Fig. 3.2-119> Fixing Bander Element & Pedestal ····· 329
<Fig. 3.2-120> Waterproofing of Bander Element ····· 329
<Fig. 3.2-121> Equipment of Shear Waves ····· 330
<Fig. 3.2-122> Definition of Transfer Time & Distance ····· 331
<Fig. 3.2-123> Picture of In-situ Test ····· 332
<Fig. 3.2-124> Grain Size distribution Curve of Test Material ····· 333
<Fig. 3.2-125> Characteristic of Compaction Curve ····· 334
<Fig. 3.2-126> Result of Field Shear Wave Velocity of Sand ····· 337
<Fig. 3.2-127> Result of Field Shear Wave Velocity of Clay ····· 338
<Fig. 3.2-128> Correlation of Field Compaction & Shear Wave Velocity in GwangAmJae ····· 339
<Fig. 3.2-129> Correlation of Field Compaction & Shear Wave Velocity in

ManKyung Landfill ····· 340
<Fig. 3.3-1> Type of Geobag ····· 344
<Fig. 3.3-2> Type of Geotube ····· 344
<Fig. 3.3-3> Construction Sequence Diagram of Geotube Construction Method ··· 345
<Fig. 3.3-4> Type of Geocontainer ····· 345
<Fig. 3.3-5> Disaster Dangerous Area Maintenance Project in Yongjin Port ·· 346
<Fig. 3.3-6> Warm-drainage Reduction Facilities Construction in Uljin Nuclear Generator No 5, 6 ····· 347
<Fig. 3.3-7> Ilsan Grand Bridge Construction ····· 347
<Fig. 3.3-8> Shoreline Levee Construction of Tampa Bay of Florida in USA ··· 348
<Fig. 3.3-9> Separation Levee Construction of Manila in Philippines ····· 348
<Fig. 3.3-10> Ground Levee of Texas of USA ····· 349
<Fig. 3.3-11> Design Concept of Geotube(GeoCoPS(2.0), 2001) ····· 353
<Fig. 3.3-12> Tensile stress of Axial direction ····· 356
<Fig. 3.3-13> Wide-width Tensile Test ····· 363
<Fig. 3.3-14> Strip Tensile Test ····· 364
<Fig. 3.3-15> Splitting Resistance Test ····· 365
<Fig. 3.3-16> Material Quality Test ····· 366
<Fig. 3.3-17> Thickness Test ····· 366
<Fig. 3.3-18> Weight Test ····· 367
<Fig. 3.3-19> Heat Chamber in Thermal Fatigue Test ····· 368
<Fig. 3.3-20> Wearing Test ····· 369
<Fig. 3.3-21> Combustion Test ····· 371
<Fig. 3.3-22> Effective particle Size Test ····· 373
<Fig. 3.3-23> Permeability Test ····· 373
<Fig. 3.3-24> Correlation Curve of Wide-width Tensile Stress-Tensile Strain ·· 374
<Fig. 3.3-25> Distribution Curve of Effective Opening Size ····· 375
<Fig. 3.3-26> Curve of Erosion Depth-Time in Cohesive Soil (Briaud et. al. 1999) ····· 378

<Fig. 3.3-27> Structure of Shore Protection ····· 378
<Fig. 3.3-28> Shore Protection System in Domestic ····· 379
<Fig. 3.3-29> Stability of Shore Protection ····· 380
<Fig. 3.3-30> Shear Test Method of Geomembrane Type ····· 382
<Fig. 3.3-31> Large scale Direct Shear Test ····· 382
<Fig. 3.3-32> Spreading of Test Material ····· 382
<Fig. 3.3-33> Particle Distribution Curve of Subject Mateial ····· 383
<Fig. 3.3-34> Curve of Compaction ····· 384
<Fig. 3.3-35> Geotube and Concrete Block ····· 385
<Fig. 3.3-36> Correlation Curve of Strain-Shear stress of Test Material ····· 387
<Fig. 3.3-37> Correlation Curve of Vertical stress-Shear stress of Test Material ····· 389
<Fig. 3.3-38> Grain Size Distribution of Fill Material ····· 393
<Fig. 3.3-39> Cross Section of Geotube ····· 394
<Fig. 3.3-40> Construction Sequence Diagram of Geotube Construction Method ····· 395
<Fig. 3.3-41> Picture of Geotube Construction ····· 399
<Fig. 3.3-42> Cross Section of Instruments Installation ····· 400
<Fig. 3.3-43> Cross Section of Geotube Installation ····· 401
<Fig. 3.3-44> Installation of Earth Pressuremeter ····· 402
<Fig. 3.3-45> Installation of Pore Water Pressuremeter ····· 402
<Fig. 3.3-46> Installation of Strain Gauge ····· 402
<Fig. 3.3-47> Installation of Settlement Plate ····· 403
<Fig. 3.3-48> Installation of Inclinometer ····· 403
<Fig. 3.3-49> Variation of Vertical and Horizontal Earth Pressure ····· 404
<Fig. 3.3-50> Variation of Settlement ····· 405
<Fig. 3.3-51> Variation of Deformation ····· 406
<Fig. 3.3-52> Variation of Strain for Each Section ····· 408
<Fig. 3.3-53> Picture of GPR Exploration ····· 409
<Fig. 3.3-54> Acquisition Data using 225MHz Antenna ····· 409

<Fig. 3.3-55> Acquisition Data using 450MHz Antenna ····· 410
<Fig. 3.3-56> Variation of Pore Water Pressure below Geotube ····· 411
<Fig. 3.3-57> Analysis Section and Water Level Condition ····· 419
<Fig. 3.3-58 > Relationship of Real Velocity and Grain Size at Failure(Sugii Toshio et al., 1989) ····· 424
<Fig. 3.3-59> Analysis Section for Decision of Cover Soil Thickness ····· 425
<Fig. 3.3-60> Change of Seepage Line for Cover Soil Thickness and Time Change ····· 426
<Fig. 3.3-61> Position for Evaluation of Piping by Levee Leakage ····· 428
<Fig. 3.3-62> Analysis Section for Stability Evaluation of Stabilized Levee ··· 428
<Fig. 3.3-63> Change of Seepage Line for Stabilized Levee ····· 429
<Fig. 3.3-64> Analysis Section for Stability Evaluation of Levee using Geotube ····· 430
<Fig. 3.3-65> Change of Seepage Line for Levee using Geotube ····· 431
<Fig. 3.4-1> Analysis Section for Seepage Analysis ····· 435
<Fig. 3.4-2> Result of Mesh Size Variation ····· 435
<Fig. 3.4-3> Steady State Water Level Condition ····· 436
<Fig. 3.4-4> Result of Seepage Analysis for High Water Level Retention Time ···· 436
<Fig. 3.4-5> Water Level Wave Type of Transient Water Level Condition ···· 437
<Fig. 3.4-6> Example of a, n, m Assessment ····· 439
<Fig. 3.4-7> Structure and Name of General Levee ····· 440
<Fig. 3.4-8> Type of Levee using Bed Sediment Material ····· 440
<Fig. 3.4-9> Example of Grain Size Adjustment by Lab. and Field Test ····· 443
<Fig. 3.4-10> Investigation Flow Chart for Grain Size Adjustment ····· 444
<Fig. 3.4-11> Picture of Field Mixture ····· 448

제 1 장 서 론

제 1 절 연구개발의 필요성

최근 이상기후에 따른 홍수로 인한 하천제방 붕괴 및 홍수피해가 급증하고 있다. 하천제방 관련 홍수피해는 다양한 원인에 의해 발생되나, 2002년까지의 하천제방 관련 피해조사 결과에 따르면 하천제방의 붕괴는 축제 재료 선정, 다짐불량 등 제방의 토공부분과 관련된 피해사례가 약 52% 정도인 것으로 평가되고 있다. 한편, 하천제방의 축제 재료와 관련하여 1990년대까지는 하상토를 이용하여 제방공사를 시행하였으나, 최근 피해사례를 감안하여 다짐 및 재료관리가 어려운 하상토의 축제 재료로의 사용을 원칙적으로 금지하고, 2002년 개정된 하천설계기준을 통하여 하천제방의 축제 재료로써 전단강도 및 투수특성이 양호한 양질토를 사용하여 시공토록 지침이 시달되고 있는 실정이다.

한편, 국내 하상토 준설은 최근 하도준설사업(1999~2012)등을 통하여 장기간 토사가 퇴적된 하천의 홍수소통능력 회복을 위하여 약 1억9,800백만m^3의 하상토 준설이 추진되고 있으며, 건설교통부 자체감사에서 하상준설토를 인근 공사현장에서 적극 활용하는 방안을 강구토록 수차례 지적한 바 있다. 따라서 하상준설토의 활용을 통한 준설폐기물 감소 및 모래 등 천연골재를 대체하여 하천제방 축조에 사용할 수 있는 기술이 필요한 실정이다.

하천제방의 안정성 향상을 위해서는 양질의 성토재료 사용, 철저한 다짐관리, 적절한 수리구조물 및 차수벽 설치 등이 필요하며, 여기서 하천제방 축조를 위한 많은 양질의 성토재료는 시공 현장에서 쉽게 구할 수 없어 하천제방의 경제성 및 안정성에 있어서 가장 중요한 요인이다. 따라서 경제적이고 안정적인 하천제방 축조를 위해서는 양질의 성토재료 확보를 위한 하상재료를 이용한 제방축조기술의 연구가 필수적이다.

미국, 일본 등 선진국에서는 이미 안정적이고 경제적인 하천제방 축조기술을 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 일본의 경우 고화처리 준설토 및 굴삭잔토 하상 퇴적물을 이용한 CSG(Cemented Sand and Gravel) 구조물 축조 등에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다. 최근 국내에서도 친환경적인 최적설계 기법의 확

립을 위한 하상토 활용 하천제방 축조기술에 대한 관심이 높아지고 있는 실정이나, 하상토 활용을 위한 구체적인 연구는 시작단계인 것으로 평가되고 있다.

한편, 하상토는 위치에 따라 토질 변화가 심하고 함수비가 매우 높으므로, 충분히 건조시키거나, 양질토와 완전히 혼합시키지 않을 경우 요구되는 안전도 확보가 어려운 특성을 보인다. 따라서 하상토 활용은 하상토의 공학적 특성 평가, 현장 적용성 실험을 통하여 표준화된 조사, 설계 및 시공방법체계 확립과 관련 하천설계기준 및 시방서 등에 대한 반영이 요구된다.

또한, 하상토는 대부분 강사라고 불리우는 빈입도 모래(SP)로 구성되어 있어 전단강도의 경우 우수한 특성을 보이나 침식 및 세굴에 취약한 특성을 보인다. 외국에서는 이러한 하상토 특성을 보완하고자 긴급 보수공사 및 일반 하상토 활용제방 축조 공사에 하상준설토 및 폐자원(석분토 등)을 토목섬유 컨테이너에 담아서 활용하는 “지오튜브 공법”이 널리 활용되고 있다.

따라서 본 연구에서는 국내 하상토 활용 기술을 재정립하고자 국내외 관련 연구동향 분석, 국내 하상토의 공학적 특성 평가, 안정처리 및 품질관리기법 제시, 하천제방재료로서 하상토 및 폐자원(석분토) 활용 가능성 검토, 현장 적용성 실험을 통하여 표준화된 조사, 설계 및 시공방법 개발, 응급보수공사 및 하상토의 안정적 활용이 가능한 “지오튜브 공법”의 설계·시공기법 정립 등을 추진하고자 한다.

제 2 절 연구개발 목표 및 내용

연구개발의 최종 목표는 하상토를 이용한 하천제방 축조기술 정립을 위하여, 문헌조사, 실내 및 현장실험, 수치해석 등을 통한 합리적인 포설두께, 다짐방법 제시, 장비를 이용한 하상토/양질토 혼합에 따른 품질관리 기법 개발, 하상토 관련 하천설계기준 및 시방서 개정(안) 및 하상토 활용과 관련한 실무지침(조사・설계・시공・품질관리)을 제시하는 것이다.

연구개발 최종목표 달성을 위하여, 1차년도에는 하상토 및 제방축조관련 국내외 자료 조사・분석, 국내 하상토 발생현황 분석, 하상토의 공학적 특성 평가, 하상토의 안정 처리에 따른 공학적 특성 평가 등을 통해 하상토를 이용한 신개념 제방

축조 설계 기법(I)을 제시하고 하상토 이용 제방축조기준 개정(안) 및 실무지침서를 작성하였다.

한편, 2차년도에는 하상토의 침식 및 마찰특성 평가, 하상토의 공학적 특성에 따른 합리적인 제방 설계법 제시, 하상토를 이용한 신개념 제방 축조 설계 기법(II), 하상토 이용 제방축조의 기준 개정 및 실무지침서(II)를 제시하고자 한다.

본 연구개발의 연차별 목표 및 내용은 <표 1.2-1>과 같다.

<표 1.2-1> 연차(단계)별 연구목표 및 내용

연 차	연구 목표	주요 내용 및 범위
1차년도	하상토의 공학적 특성 평가 및 신개념 제방축조설계기법 제시	◦ 선진국 및 국내의 기술동향 조사 ◦ 하상토의 공학적 특성 평가 ◦ 하상토를 이용한 신개념 제방 축조 설계 기법(I) 마련 ◦ 하상토 이용 제방축조 기준 개정(안) 및 실무지침서 작성(I)
2차년도	하상토 이용 제방축조의 기준 개정(안) 및 실무지침서 작성	◦ 하상토의 침식 및 마찰특성 평가 ◦ 하상토의 공학적 특성에 따른 합리적인 제방 설계법 제시 ◦ 하상토를 이용한 신개념 제방 축조 설계 기법(II) 마련 ◦ 하상토 이용 제방축조의 기준 개정(안) 및 실무지침서 작성(II)

제 3 절 추진전략 및 방법

본 연구에서는 국내 발생 하상토의 공학적 특성 평가 및 현장 적용성 평가 결과에 따라 제시된 표준화된 조사, 설계 및 시공방법의 하천설계기준 및 시방서 등 국

내 하천제방 관련 기준 반영을 통하여 안전한 하상토 활용방법을 제시하고, 긴급 보수공사 등에 활용을 위하여 하상준설토 및 폐자원(석분토 등)을 토목섬유 컨테이너에 담아서 활용하는 “지오튜브 공법”에 대한 설계·시공기법을 제시하고자 한다.

이를 위하여, 1차년도에는 국내외 하상토 활용 연구동향과 하상준설 및 지오튜브 관련 설계 기법/기준의 조사·분석을 통하여 선진국 및 국내외 기술동향 조사를 실시하였다. 또한, 다양한 실내 및 현장실험을 통하여 하상토의 공학적 특성 평가, 안정처리된 하상토의 공학적 특성 평가, 현장 다짐 및 혼합 특성 평가, 물리탐사 기법을 이용한 하상토 부존량 측정 기법 제시 등을 수행하였으며, 지오튜브 설계 방법 분석 및 다양한 모형실험과 수치해석 결과를 이용한 하상토 활용 제방 설계 기법을 제시하여 하상토를 이용한 신개념 제방 축조 설계 기법(Ⅰ)을 제안하였다.

1차년도에는 이러한 연구결과를 바탕으로 하상토 활용 안정처리 기법, 하상토 활용 현장 품질관리 및 설계 기법, 하상토 부존량 측정을 위한 물리탐사 기법을 제시하여 하상토 이용 제방축조 기준 개정(안) 및 실무지침서 작성하였다.

한편, 2차년도에는 하상토의 침식 및 마찰특성 평가, 하상토의 공학적 특성에 따른 합리적인 제방 설계법 제시, 하상토 불포화 삼축시험, 하상토를 이용한 신개념 제방 축조 설계 기법(Ⅱ) 마련, 하상토 이용 제방 축조 기준 개정(안) 및 실무지침서(Ⅱ)를 제시 등을 수행하였다. 이때, 하상토의 침식 및 마찰특성을 평가하기 위해 호안블록/하상토, 지오튜브/하상토의 마찰특성시험을 수행하고, 흙 종류에 따른 침식저항 특성 평가 시험을 수행하였다. 또한, 국내 하상토에 대한 불포화 삼축시험 등을 통하여 불포화 투수 및 전단강도 특성을 제시하고 이를 바탕으로 합리적인 하상토를 이용한 하천제방 설계 기법을 제시하였으며, 현장실험 및 계측에 의한 지오튜브 공법의 안정성 평가를 수행하였다.

한편, 최종 연구결과는 1차년도와 2차년도에 수행된 연구결과를 종합하여, 하상토를 이용한 신개념 제방 축조 설계 기법(Ⅱ)으로 지오튜브 공법과 하상토 및 안정처리된 하상토를 활용한 하천제방 표준단면(안)을 제시하고, 하상토 이용 제방 축조 기준 개정(안) 및 실무지침서(Ⅱ)실무지침서(조사·설계·시공·품질관리) 등 하상토 관련 기준 개정을 위한 하상토 활용 매뉴얼을 제시하고자 한다.

제 4 절 기대성과 및 활용방안

현재까지 국내에서 하상토 활용 제방 축조기술과 관련한 연구개발실적은 거의 없으며, 외국에서는 하상토를 이용한 하천제방 설계 및 시공기술이 축적되어있는 실정으로, 하상토 및 일반 성토재에 대한 공학적 특성을 이용한 합리적인 하천제방 설계 기법 및 시공법이 제시되어 하천제방 축조시 안정성과 경제성을 고려하여 적용하고 있다.

본 연구결과를 통하여 제시된 표준화된 조사, 설계 및 시공방법은 하천제방설계기준 및 시방서 반영을 통하여 안전하고 비용을 절감할 수 있는 하상토를 활용한 하천제방 설계 및 시공기술, 하천제방방재계획 수립을 위한 보수·보강 실무지침서로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

한편, 본 연구성과로 제시된 기법이 활성화 된다면 국내에서 발생하는 하상준설토 및 폐자원(석분토 등) 활용의 활성화, 지오튜브 공법을 이용한 하천제방 축조기법의 적용이 활성화될 것으로 사료되며, 이에 따른 국내 토목섬유분야의 발전이 기대된다. 또한 하상토 활용 하천제방 설계 및 시공 관련업체와의 연계·협력을 통한 기술개발에 따른 관련 산업 활성화가 가능할 것으로 판단된다.

또한, 현재 하천제방축조에 사용되는 기존 양질의 성토재 외에 하상준설토 및 폐자원(석분토 등) 활용에 따른 천연골재 대체 및 공사비 절감 효과로 인한 친환경적이고 경제적인 공법개발 및 관련분야의 활성화에 기여할 것이며, 하상토의 합리적인 활용방안 제시를 통한 국내 하천제방 축조기술 선진화 및 선진국화를 통하여 기술수준 대비 기술수준 90% 수준으로 향상될 것으로 사료된다.

본 연구개발 결과에 따라 제시된 하상토 활용기술은 현장 적용시 하상 준설장비와 제방축조 공사비를 이중으로 절감할 수 있으며, 매년 투입되는 약 1조원의 치수사업비 중 하천제방 축제비가 50% 이상임을 감안할 때 막대한 규모의 예산 절감이 기대되며, 기존 하천제방 축조에 사용되는 양질토를 하상토로 대체할 경우 경제적인 비용효과와 더불어 천연자원의 보존 및 환경피해를 감소시킬 수 있는 유·무형의 효과를 고려할시 국가적 차원의 막대한 비용절감 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

하천제방 및 하상토 관련 연구는 국내의 경우 최근 하천제방의 붕괴원인 및 안정성 향상 기법에 대한 연구가 진행되고 있으며, 저수지 및 해양 발생 준설토 활용 방안 연구 등에 관한 연구가 수행되고 있으나, 하상토 및 하상준설토 활용 하천제방 축조기술에 대한 체계적인 연구가 수행되지 않고 있는 실정이다.

한편, 일본의 경우 하천제방 안정성 평가에 관한 많은 실험 등을 통한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 하천제방설계지침(2000, 건설성)에 합리적인 하천제방 설계를 위하여 침투특성에 영향을 미치는 지반의 불포화 투수특성 및 전단강도 특성을 설계에 반영하고, 제방의 안전도평가를 위한 구체적인 침투, 월류, 침식에 대한 내·외력 산정방법을 제시하여 경험적인 판단에 의한 제방설계에 우선하도록 하고 있다.

또한 하상준설토의 활용과 관련하여 일본은 경량기포 혼합토 이용 구조물 축조, CSG구조물 제작, 하천제방 축조 등에 하상토를 활용한 공법에 대한 연구 및 현장 적용 실적이 있으며, 미국, 유럽 등지에서는 토목섬유 컨테이너 공법을 이용한 기법이 적극적으로 활용되고 있다.

따라서 국내에서도 합리적인 하천제방 안정성 평가를 위한 지반의 불포화 투수 및 전단강도 특성 평가, 하상재료를 이용한 선진화된 하천제방 설계시스템 개발을 통해 하천제방의 성능향상, 하천설계기준 및 실무지침서의 작성이 필요하다.

제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과

제 1 절 하상토 관련제도 및 연구동향 분석

하상토 활용에 관해서 법적으로 규정되어 있는 사항을 검토하기 위해 일본, 영국, 미국의 관련법규를 검토하고 국내 하천법과 이와 관련된 시행령과 시행규칙에 언급되어 있는 관련 법규를 비교, 분석하였다.

일본의 경우 제방의 건설과 관련하여 하상토에 대해 언급되어 있는 부분은 없었으며 다만, 하천구역내 공사가 이루어질 경우 그 범위가 제방과 관련이 있는 경우 관련기관에 신고와 허가를 얻도록 구성(일본 하천법 제 27조; 토지의 굴착 등의 허가)되어 있다. 하지만 직접적인 하상의 굴착에 대한 언급은 없으며 주로 하천주변의 공사와 관련하여 제방의 안전과 관련된 규제와 허가에 대한 내용으로 구성되어 있는 것이 특징이다.

영국의 경우 수자원법으로 국가하천공단을 설립하여 수자원관련 업무와 수질오염관련 업무를 수행토록 되어 있다. 직접적으로 준설과 관련하여 하상토 관련된 사항은 언급되어 있지 않으며, 일반적인 하천구조물과 관련된 항목은 제 4편 105조와 106조에 언급된 일반적 홍수방지 업무(general functions with respect to flood defence)와 위원회를 통한 홍수방지업무 관련 의무(obligation to carry out flood defence functions through committees)에 주 관리체계가 언급되어 있고 특히, 109조 주요하천의 구조(structures in, over or under a main river)에서는 공단의 승인 없이는 주요 하천의 일부를 구성하는 수로 위, 아래, 또는 그 안에 어떠한 구조물도 설치할 수 없도록 하고 있어 공단의 관리와 판단위주로 구성되어 있는 것이 특징이라 할 수 있다.

미국의 경우 미국연방법내 하천항국법의 Title 33. 항해 및 항해가능 수계부분의 9장 401조에 교량, 제방도로, 댐, 제방의 건설과 관련하여 다음과 같이 언급되어 있다. “항구, 항구 외연의 정박소, 만, 항해 가능한 하천 또는 수계 내 또는 그 위에 교량, 제방도로, 댐, 제방 등을 건설할 때에는 의회의 동의가 있어야 한다. 교량 및 제방도로의 계획은 교통부장관의 승인이 있어야 하고, 댐 및 제방의 계획은 육군장

관과 공병단장의 허가가 있어야 한다. 그러나 이러한 건축물이 한 주의 관할권에 속하여 있는 경우 교통부장관이나 육군장관과 공병단장 승인과 함께 주 의회의 동의로 건설될 수 있다"라고 언급되어 있어 공단의 역할이 중요시되는 영국과는 달리 육군장관, 공병단장, 주 의회 등의 판단에 의해 결정되는 경향을 볼 수 있다.

국내 하천법은 총 8장으로 구성되어 있고 본 연구와 관련 있는 항목은 제2장 하천의 관리의 제2절 수문조사·홍수예방 등의 내용에서 30조(비관리청의 하천공사)와 제4절 하천의 점용에서 33조(하천의 점용허가 등)의 내용과 연관이 있다. 외국법규와 마찬가지로 직접적으로 언급한 사항은 없으나 정부투자기관이나 허가를 받은 경우에 한해서 하천공사나 하천의 유지·관리를 수행할 수 있도록 되어 있고 대부분의 법규내용이 하천의 사용과 관리에 있어서 관리청의 업무와 관련공사의 허가내용, 책임의 한계 등을 정의하는 것으로 구성되어 있는 것이 특징이다.

이렇듯 선진국에서는 굴착과 관련되어 하상토에 관한 사항은 주로 주무 기관을 두어 판단하도록 되어 있는 체계로 구성되어 있었고, 국내 또한 하상토에 관련사항은 구체적으로 언급되어 있는 것이 아니라, 하천의 관리와 사용에 있어서 필요한 책임한계 정도 위주로 작성되어 있음을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 진행될 하상토 활용방안에 대해서 특별히 국내에 사용제한 등에 대한 내용은 없는 것으로 조사되어 재해방지를 목적으로 수행되는 하천의 굴착, 준설 등에 따라 발생하는 하상토를 활용하는 방안은 충분히 적용 가능한 것으로 나타났다.

본 장에서는 하천제방 축조 시 하상토의 활용성을 평가하기 위한 기초문헌조사로서, 국내외 하천설계 및 관련 기준 검토 및 국내외 하천제방 축조 등의 하상토의 활용에 대한 연구 동향을 분석하였다.

1. 하상토 관련 제방붕괴 현황 및 제도

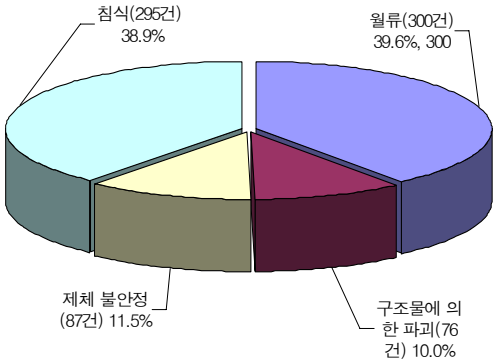
가. 하상토 관련 제방붕괴 현황

1987년부터 2002년까지 발생한 홍수에 대한 제방파괴 실태를 조사한 한국건설기술연구원(2004) 연구결과에 의하면, 국내 하천제방붕괴는 <그림 3.1-1>에서 보듯이 2002년 이전 제방파괴 총 조사건수 250건에서 월류의 경우 100건 40%, 제방 세굴이 97건으로 38.8%, 제체 불안정에 의한 것이 43건으로 17.2%, 하천구조물 파괴에

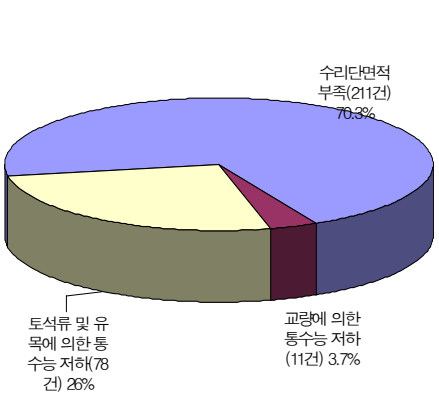
의한 발생이 10건으로 4%를 차지하는 것으로 조사되었다. 또한, 2002년 홍수에 의한 하천제방붕괴는 조사 건수 453건으로 이중 월류가 39.5%, 제방 세굴 42.2%, 제체 불안정 6.4%, 하천구조물 접합부 파괴가 11.9% 등으로 조사되었다.

2003년 이전 및 2003년 홍수에 의한 제방 파괴 요인 조사 건수를 통합한 건수는 758건으로 이중 월류가 300건으로 39.6%를 차지하고 침식이 295건으로 38.9%, 구조물에 의한 파괴가 76건으로 10.0%, 제체 불안정이 87건으로 11.5%를 차지하는 것으로 조사되었다(한국건설기술연구원, 2004).

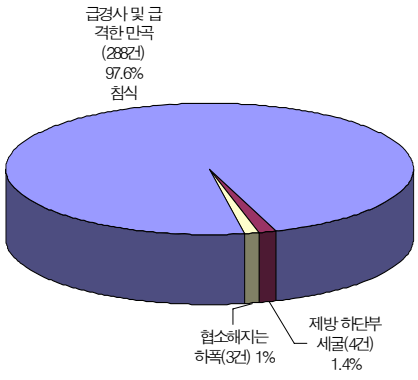
한편, 2006년 홍수 시 발생한 제방붕괴는 <표 3.1-1>에서 보듯이 총 13건, 붕괴지점 개소수의 경우 19개 지점이다. 붕괴건수와 붕괴지점수가 다른 이유는 제방붕괴 1건에 여러 지점이 붕괴된 경우가 있기 때문이다. 제방붕괴는 <표 3.1-1>에서 보듯이 13건의 제방붕괴 중 월류에 의한 것이 9건(69%)을 차지하며, 앞비탈면 침식이 3건(23%), 누수가 1건(8%)인 것으로 보고되어졌다(건설교통부, 2006).



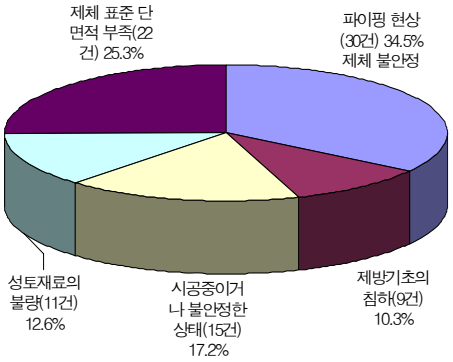
(a) 주요 원인별 제방붕괴 유형



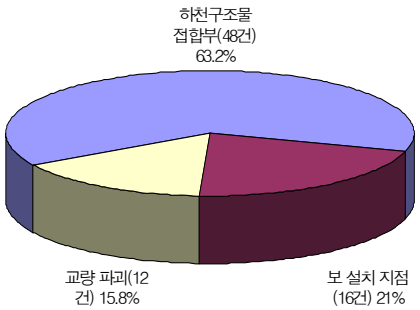
(b) 월류



(c) 침식



(d) 제체 불안정



(e) 구조물 접합부

<그림 3.1-1> 제방붕괴 유형 (한국건설기술연구원, 2004)

<표 3.1-1> 2006년 제방붕괴 원인(건설교통부, 2006)

피해 지역	하천명	붕괴 지점명	붕괴 개소	붕괴 원인	세부원인
안성천 수계	조령천	구송동교 하류 500m 우안	1	침식	◦ 계획홍수위 초과 ◦ 여유고 구간(호안 미설치 구간)에서 침식이 시작되어 붕괴
		구송동교 하류 700m 좌안	1	침식	
	월동천	조령천,월동천 합류부 상류 170m 좌안	1	침식	◦ 만곡외측 ◦ 여유고 구간(호안 미설치 구간)에서 침식이 시작되어 붕괴
안양천 수계	안양천	양평제 (양평교 직하류 우안)	1	누수	◦ 지하철 공사로 인해 제방 뒷비탈 단면 잠식으로 제체단면부족 ◦ 교대 접합부 또는 차수판 사이로 누수 발생 추정
남강 수계	남강	마진제	1	월류	◦ 홍수량 증가로 인한 월류 붕괴 ◦ 단면 축소 ◦ 만곡부 ◦ 배수영향(문산천)
		대곡제	3		
	대곡천	덕곡제	5		
	영천강	영천강 일대	5		
		문산천 (영천강 지류)	1		
합 계			19		

지금까지 제방붕괴 원인에 대한 분류는 <그림 3.1-1>에서 보듯이 월류, 세굴(침식), 제체 불안정, 하천구조물 접합부 등으로 구분되어 있다. 이중 하상토와 관련된 붕괴는 침식(하천의 급경사 및 만곡, 협착부, 제방 하단부 세굴) 및 제체불안정(성토재료의 불량, 제체 표준 단면적 부족, 파이핑 현상, 제방기초 침하)이다. 특히 하상토 사용은 조사건수 758건 중에서 직접적인 원인인 성토재료 불량(하상토 사용)이 1.5%를, 간접적인 원인인 침식이 38.9%를 차지하는 것으로 평가되었다.

2006년 대곡제 붕괴는 <그림 3.1-2>에서 보듯이 모두 침수 및 붕괴유형이 월류에 의한 제방 붕괴가 발생된 곳이다. 붕괴 원인은 하상토(세사류의 강사 혼합) 사용에 따른 월류에 의한 급격한 제방 침식(붕괴) 발생 등이다.



(a) 활동의 방향성 사진　　(b) 용수관 주변 사진

<그림 3.1-2> 대곡제 붕괴 모습

또한, 안성천 수해는 구송동교 10m (구동성교), 구송동교 하류 500m (우안), 구송동교 하류 700m (좌안), 백성교, 월동천 제방 등에서 발생되었다. 구송동교 10m 지점의 붕괴유형은 <그림 3.1-3>에서 보듯이 제체 재료의 무분별한 하상토 사용과 하도폭 감소(병목현상)에 따른 소류력 증대 등에 따른 세굴에 의한 붕괴로 보고되었다.

하상토 활용은 앞서 언급된 조사결과에서 보듯이 직접적인 원인으로 성토재료 불량의 경우 1.5% 정도이나 침식세굴이 발생된 곳의 경우 대부분 하상토를 사용함으로써 국내 제방붕괴의 주요 원인이 되고 있다. 따라서 하상토 활용은 수해방지대책으로서 국가적인 관심을 가져야 할 시기라고 판단된다.



(a) 구송동교에서 본 제방 붕괴지점 교각부



(b) 구송동교 제방축제 재료



(c) 월동천 붕괴 지점



(d) 월동천 제방축제 재료

<그림 3.1-3> 월동천 붕괴 관련 사진

나. 하상토 관련 국내 규정

하상토는 하천제방, 도로의 노반 및 노체, 각종 매립 및 뒤채움재, 위생매립장 등 다양한 분야에 활용될 수 있다. 본 절에서는 하상토 활용 분야 중 가장 수요량이 많은 하천제방 축조분야의 활용성 평가를 위해 하천설계기준과 다른 관련 기준상의 제방 축조 관련 사항 등을 검토하였다.

(1) 하천설계기준

국내 하천설계기준에서는 제23장에 '제방'편을 별도로 두어 제방 설계 시 조사사항과 설계기준에 관한 사항에 대해서 언급하고 있다.

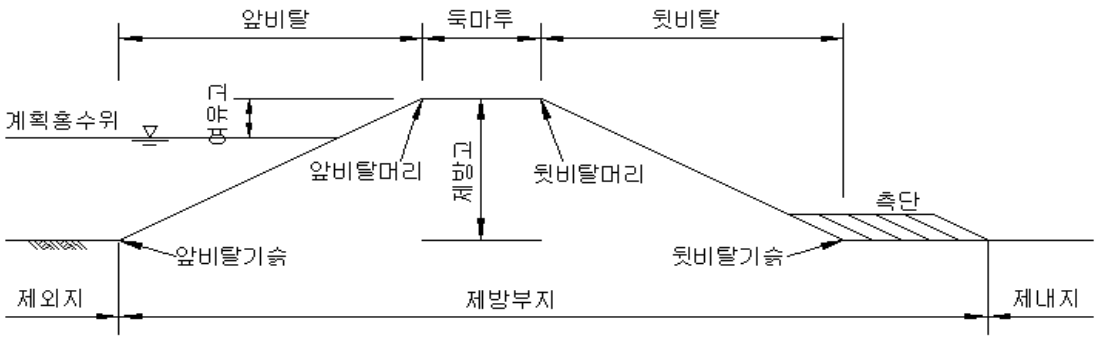
하천설계기준(2005, 한국수자원학회)에서는 하상토를 제방재료로 활용하는 것과

관련하여 『적절한 재료의 선정은 제방의 안전을 위해서 매우 중요하므로, 하상재료를 제체재료로 사용하는 것은 원칙적으로 금한다. 부득이 사용할 경우에는 하상재료 채취에 따른 하상변동, 평형 하상경사의 변화 및 하천 생태계에 미치는 영향, 엄격한 다짐관리, 제체의 침투 및 활동에 대한 안정성 등을 종합적으로 검토하여 사용한다』라고 언급하고 있다. 하천설계기준상 하상토 활용은 제방의 안전상의 이유로 원칙적으로는 금하나 단서조항에서 보듯이 하상토 사용이 완전히 배제된 상태는 아니며 적절한 설계·시공, 품질관리방안이 확립된다면 적극 권장하고 있다.

제방에서 하상토의 적용 여부를 판단하기 위해서는 제방의 개념과 설계 및 시공과정을 명확히 알아볼 필요가 있다. 본 절에서는 하천설계기준(2005, 한국수자원학회)에 언급되어 있는 제방의 개념과 조사과정 및 제방재료에 대해서 정리하여 하상토의 제방재료 활용방안에 대해서 조사하였다.

(가) 제방의 구성 및 종류

하천설계기준(한국수자원학회, 2005)에서는 하천제방의 정의를 유수의 원활한 소통을 유지시키고 제내지를 보호하기 위하여 하천을 따라 흙으로 축조한 공작물이라고 명시하였다. 일반적으로 하천제방은 <그림 3.1-4>과 같이 구성되며 필요에 따라 형태를 조정해서 사용할 수 있도록 되어 있다. 또한, 하천제방의 분류는 용도에 따라 본제, 부제, 놀둑, 윤중제, 횡제, 도류제, 가름둑, 월류제, 역류제 등으로 나눌 수 있으며 무엇보다도 월류, 침투, 사면붕괴, 세굴파괴 등과 관련된 안전성을 검토하도록 하고 있다.



<그림 3.1-4> 제방의 구성 및 개요도(하천설계기준, 2005)

(나) 제방 조사과정

제방에 대한 조사는 예비조사, 본조사, 보완조사로 구별된다. 몇 개의 후보지점이 선정되면 선정된 위치와 그 인근의 지형, 지질, 토질, 토사퇴적, 제방축조재료, 토지이용현황, 식생현황, 도로상황 및 도시계획과의 관련사항 등에 대한 자료를 수집하기 위해 조사 및 답사를 통해 축제 가능성을 검토하여 기초자료로 활용하도록 하고 있다. 특히 구하도에 제방을 축조할 경우 지층상태에 따라 지반 누수의 원인이 되어 제방붕괴의 심각한 상태를 초래할 수 있으므로 과거 유로를 파악해야 할 필요가 있고, 구하도에 대한 지적 및 과거 지형도를 수집 및 검토하는 것도 고려하도록 되어 있다.

(다) 제방재료 고려 시 필요시험

하천제방 재료의 제방 재료로서 타당성 확인은 토질시험을 수행하여 검토하여야 한다. 이때, 요구되는 토질시험은 각 조사단계에서 채취한 시료를 대상으로 한 물리적·역학적 특성시험을 말하는데, 물리적 특성 시험으로는 비중, 함수비, 액성한계, 소성한계, 입도분포, 체가름, 투수시험 등을 시행하며, 역학적 특성 시험으로는 일축압축강도, 직접전단, 삼축압축, 압밀, 다짐시험(토취장 또는 제체재료 사용시) 등을 시행하고, 역학적 특성 시험은 불교란 시료를 대상으로 실시하는 것이 원칙이나 필요에 따라 원지반 상태로 성형하여 시행할 수 있다. 토질시험 방법은 한국산업규격에 따르며, 한국산업규격이 없는 경우 현장상태에 따라 적정한 시험방법을 적용할 수 있도록 하고 있다.

(라) 제방재료 선정을 위한 조사

제방재료의 안전성 확인을 위한 조사는 필요에 따라 흙의 실내시험법에 의해 비중, 함수비, 액성한계, 소성한계, 입도분포, 체가름, 다짐시험, 일축압축강도시험, 삼축압축(UU)시험, 직접전단시험, 투수시험 등을 실시한다.

이때, 시료채취는 오거보오링(auger boring), 회전 수세식 시추, 인력파기 등에 의하여 흐트러진 시료를 한 토층에서 적어도 1개 이상 채취함이 원칙이며, 균일한 토층이라도 굴착범위가 넓을 때는 500㎥에 1개의 비율로 시료를 채취한다. 하나의 시료에 대해 필요한 채취시료의 양은 시험항목 및 방법에 따라 다르나 표준량은

흙의 분류를 위한 시험(약 1kg 정도), 흙의 단위체적중량(0.3～1kg), 흙의 다짐시험 및 실내에서의 정적원추관입시험(10～50kg), 흙의 투수시험(10～20kg), 흙의 전단시험(10～20kg) 등과 같다.

시험방법은 KS F 규정을 따르도록 되어 있다. 또한 투수성이 문제인 재료의 경우 투수시험을, 강도가 문제인 재료의 경우 전단시험을 각각 실시하고, 고함수비의 점성토와 화산회토 등에서는 장비주행성이 문제가 되는 경우에는 함수비를 조정한 축조재료를 몰드에 다져서 정적원추시험을 실시하여 함수비와 콘 지수의 관계를 구하도록 되어 있다.

(마) 제방재료

제방재료는 일반적으로 흙을 사용하는 것으로 되어 있으며, 일반 도로의 경우와 달리 흙의 전단강도측면 뿐만 아니라 물의 침투방지를 고려한 투수특성을 충분히 고려하도록 되어 있다. 다음은 하천설계기준에 언급된 규정을 정리한 것이다.

① 제방재료는 통일분류법상 GM, GC, SM, SC, ML, CL 등과 같은 일정 정도 점토(C) 및 실트(M)와 같은 세립분을 함유해야 한다.

② 재료의 최대 치수는 100㎜ 이내로 하는 것이 바람직하다.

③ 하상재료를 제방재료로서 사용하는 것은 원칙적으로 금한다.

④ 하상재료를 제방재료로서 부득이 사용할 경우 하상재료 채취에 따른 하상변동, 평형하상경사의 변화 및 하천 생태계에 미치는 영향 등과 하천설계기준 '23.4 제방설계'에서 언급될 침식방지, 제체의 침투 및 활동에 대한 안정성 평가를 통하여 제방강화 형태(단면확대공법, 앞비탈 피복공법) 등을 선정함으로써 제방안정에 대한 신뢰성을 향상시켜야 한다.

⑤ 대규격제방은 제내지쪽 성토재로 하상재료를 사용할 수 있다.

또한, 제방재료로서 흙은 부득이한 경우를 제외하고는 다음과 같은 조건을 만족시키도록 하고 있다.

① 물이 포화되었을 때 비탈면 활동이 잘 일어나지 않을 것

② 투수계수가 작을 것 ($k=10^{-3}$㎝/s 이하)

③ 굴착, 운반, 다짐 등의 시공이 용이할 것

④ 물에 용해되는 성분을 포함하지 않을 것

⑤ 내부마찰각이 클 것. 특히, 물이 포화상태일 때 내부마찰각이 크게 낮아지지 않을 것

⑥ 습윤이나 건조에 의한 팽창, 수축이 크지 않을 것

⑦ 풀이나 나무뿌리 등의 유기물을 포함하지 않을 것

⑧ 부득이한 경우에는 제방의 안전성에 문제가 없음을 입증시키는 정밀한 시험을 행한 후 사용할 것

이상과 같이 하천설계기준은 제방재료로 하상토를 활용하기 위해서 필요한 여러 가지 기준을 제시하고 있다. 따라서 하상토가 제방재료로 활용되기 위해서는 이런 기준을 만족하느냐를 판별하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

(2) 하천공사표준시방서

하천공사표준시방서(1999, 건설교통부) 「4.2 제방축조공」에 따르면 굴착이나 준설한 토양(이하 하상토로 함)의 활용에 대해서 다음과 같이 언급하고 있다.

하상토의 토질이 제방쌓기에 합당하지 못할 경우 흙의 배분계획은 이 하상토의 이용 여부에 따라 수립되어야 한다. 현장 여건상 제방쌓기에 적합하지 않은 하상토를 양질의 피복토와 혼합하여 사용해야 될 경우 흙의 배분계획은 현장 하상토를 이용계획에 포함하여 수립해야 하며, 현장 하상토의 이용이 경제적으로 불가능할 경우 흙의 배분계획은 사전에 주변여건을 고려한 잔토처리계획과 병행하여 수립해야 한다.

한편, 제방재료로서 하상토의 활용유무를 판별하기 위해서는 일정한 기준이 필요하다. 하천공사표준시방서(1999년) 및 하천설계기준(2005년)의 경우 제방 성토재료의 기준은 액성한계 50% 미만, 소성한계 25% 미만, 건조밀도(A) 1.5t/㎥ 이상,

간극률 42% 미만인 흙을 사용하며, 다음의 흙은 사용을 금지하고 있다.

① 벤토나이트(Bentonite), 온천여토, 산성백토, 유기질토 등 흡수성이 크며, 압축성이 큰 흙.

② 빙토, 빙설, 초목, 나무등걸 및 다량의 부식물을 함유한 흙

한편 하천공사표준시방서에 나타난 토사 재료의 기준은 <표 3.1-2>과 같고 암버럭의 재료기준은 <표 3.1-3>와 같이 나타나 있다.

<표 3.1-2> 토사 재료기준 (하천공사표준시방서, 1999)

구분	제방의 축제재료의 품질기준	비고
재료 최대 치수	300mm 이하	
수침 C.B.R	2.5% 이상	
1층 시공 두께	30㎝이하	다짐 후 두께
실내다짐시험방법	A, B방법	
다짐기준밀도	최대 건조밀도의 90%이상	KS F 2312참조
완성면의 시공오차	± 5㎝	

<표 3.1-3> 암버럭 재료기준 (하천공사표준시방서, 1999)

구분	제방의 축제재료의 품질기준	비고
재료 최대 치수	60㎝ 이하	
성토부위	노체완성면 아래 60㎝ 하부까지	
1층 시공 두께	60㎝ 이하	
다짐기준	시험시공에 의하여 결정	
다짐장비	1층 시공두께를 고려하여 대형 장비 사용	

또한, 하천공사표준시방서에서는 일반적으로 함수비가 높은 하상토와 관련된 함수비 조정에 대해 『4-2 제방축조공 중 3.7 함수비 조정』에서 다음과 같이 언급하고 있다.

① 제방쌓기용 흙으로서 함수비가 높은 육상 하상토는 가능한 한 표면배수를 촉진시키고, 또한 배수도랑을 파서 흙의 함수비를 낮추어야 한다.

② 재료의 함수량이 소정의 밀도를 얻기에 적합한 함수량으로 조절되거나 다짐 규정에 맞는 적절한 함수상태가 되기 전에는 다짐을 하여서는 안 된다.

③ 건조시키거나 추가로 물을 뿌리거나하여 함수량을 조절하는 방법은 승인된 다짐장비의 기종에 따라 결정되어야 하고, 소요함수량은 다짐을 시행할 전 층에 걸쳐 균일해야 하며, 다짐작업이 진행되는 동안 그 균일성을 유지해야 한다.

④ 기상 등 자연조건이 과다한 함수량을 제거하는데 부적합한 경우에는 소정의 함수량을 얻을 수 있는 상태가 될 때까지 다짐작업을 연기해야 한다.

⑤ 강우 시 함수비가 커짐에 따른 시공능률 저하를 방지하기 위해 임시 물막이나 차수시트를 덮는 등 가능한 최적함수비를 유지할 수 있는 함수비 조절방법을 강구해야 한다.

한편, 제방의 더돋기는 제방쌓기 후 제체 및 기초지반의 장기적 압밀을 충분히 고려하여 설계도서에 명시된 높이로 시공하며 기초지반이 연악하지 않거나 소규모 공사의 경우는 다음 <표 3.1-4>을 이용하도록 하고 있다.

<표 3.1-4> 제방의 더돋기 (하천공사표준시방서, 1999)

제체의 특성		보 통 흙		모 래 · 자 갈	
기초지반의 토질		보 통 흙	모래섞인 자갈 자갈섞인 모래	보 통 흙	모래섞인 자갈 자갈섞인 모래
통일분류법에 의한 기초지반의 토질		SW, SP SM, SC	GW, GP GM, GC	SW, SP SM, SC	GW, GP GM, GC
제 방 높 이	3m 이상	20cm	15cm	15cm	10cm
	3~5 m	30cm	25cm	25cm	20cm
	5~7 m	40cm	35cm	35cm	30cm
	7m 이상	50cm	45cm	45cm	40cm

이상과 같이 하천공사표준시방서(1999, 건설교통부)에서는 하상토 활용과 관련하

여 안전성 확보에 대한 체계적인 대안수립을 사전에 수립할 것을 권장하고 있는 것으로 나타났으나, 외국에 비해 그 구체성이 다소 떨어지는 것으로 평가되었다.

(3) 댐 설계기준(2003, 한국수자원학회)

제체 재료조사와 관련해서 댐 설계기준에는 다음과 같이 언급되어 있다.

(가) 제체 재료조사

① 댐지점 주변에 있는 암석, 사력, 흙 등 필댐 축조 재료의 조사는 기술적으로 사용이 가능하다고 생각되는 모든 재료에 대하여 그 분포, 수량, 통일분류, 공학적인 성질을 파악한다.

② 조사구역

○ 예정한 지점을 중심점으로 하여 최초는 500m 또는 1km 이상의 지역에 대하여 조사한다. 축제 예정수량에 미달할 때는 점차 그 반경을 확대하여 넓힌다.

○ 조사단계에서는 「어느 곳에, 어떤 자료가, 얼마나 있는가」를 파악하는 것이 주된 목적이므로 특정한 장소에 대하여 집중적으로 조사할 것이 아니라 지형조건에 따라서 다르기는 하나 경제적인 운반관계를 고려하여 범위를 정하고, 정해진 범위 내에서 조사를 진행한다. 개략적으로 본다면 재료는 조사의 정도에 따라서 설계수량의 2~3배를 준비할 필요가 있다.

③ 조사방법

○ 답사결과, 후보지가 결정되었다면 그 지역의 재료의 성질, 수량, 퇴적상황, 종류, 지하수위 등의 개요를 알기 위하여 간략한 시추, 시험굴, 트랜치(trench) 등을 이용하여 관찰 또는 시료를 채취 검토하여 성질을 분명히 파악하여 두도록 한다. 지질학적 또는 지형적 판단에 따라 개략 깊이와 퇴적상황은 판명되므로 이것을 바탕으로 간단한 조사공을 판다.

○ 조사공은 일반적으로 10m 이하로 충분하다. 조사공의 배치는 후보지에 50~100m의 네모꼴로 짜서 1,000~1,500㎡ 당 1개공을 표준으로 판다.

○ 조사공은 지형이나 상황에 따라 각종 방법을 혼용하여 조사를 추진한다.

○ 오거 시추(수동 또는 동력) : 수동식 오거는 작업이 간편하며, 7m 정도까지

의 조사에 적합하며, 자갈층이나 지하수면하의 사질토의 경우 부적당하다. 채취된 시료는 지상에 차례로 배열하여 관찰이 편리하도록 한다. 함수비의 변동을 방지하기 위해서는 투명한 포대에 넣어 둔다. 소정의 깊이까지 시추한 후 시료를 채취하고, 특히 층의 두께가 큰 것 또는 대표적 시료로 볼 수 있는 것에 대해서는 공학적 검토를 실시할 것이므로 충분한 양을 채취하여 두도록 한다. 동력식 오거는 쉽게 15m 정도까지 파들어 갈 수 있으며, 다소간의 자갈이 있어도 굴진되므로 조사속도를 매우 빠르게 하여 효과도 크다. 시료 취급은 수동식과 동일하다.

○ 시추 : 회전식의 기계가 사용된다. 빗트(bit) 직경은 일반적으로 20mm 이상, 자갈을 포함하는 지반의 경우 10cm 이상을 사용하고, 20mm 이하의 사력을 포함하는 지역과 그 외의 경우 4.5cm 이상의 가급적 큰 것을 사용한다. 토질지반은 시추 시 흙탕물에 의하여 흐트러지는 것은 절대로 피해야 한다. 시추코아(boring core)로 부터 공학적인 여러 가지 시험의 시료를 채취하는 것은 양적으로 무리이므로 시험자로서는 그 취급과 시험방법 및 시험의 종류 등에 충분한 검토를 한 뒤에 시험에 착수해야 할 것이다.

○ 트렌치(trench) : 본 방법은 조사대상이 대략 지하수면 이하일 때 시행된다. 퇴적상황이나 종류가 직접 판명되며 시험시료도 충분히 채취할 수 있어서 유리하다.

○ 시험굴 : 본 방업은 굴진속도가 느리면 깊게 파던지 지하수가 있는 곳에서는 지보공을 하는 등 작업에 어려움은 있으나 지층의 구조나 변화를 완전하게 조사할 수 있고 시료채취가 용이하며, 또한 기계력 반입이 곤란한 곳에서도 쉽게 실시할 수 있다. 시험굴 크기는 작업자가 갱내에서 작업할 수 있는 최소 크기면 된다.

④ 토질 시험

○ 채취한 시료에 대하여는 다음의 시험을 행한다. 시험은 채취된 시료전부에 대하여 시행되는 것이 바람직하나 경비, 시간, 댐의 규모 등에 의하여 전문기술자의 지도에 따라 대표적인 시료를 선정하여 실시해야 한다.

○ 필수적으로 시행할 시험 : 함수량, 비중, 입도, 콘시스턴시(consistency), 표준다짐

○ 필요에 따라 시행할 시험 : 투수, 압밀, 일축압축, 전단, 수축, 흡수, 팽창, 유기물 함유량, 가용성분 함유물, 암석에 대해서는 비중, 단위중량, 흡수율, 압축, 내구성 등을 시험하도록 한다.

○ 토질시료의 시험이 끝나면 공학적 분류를 통일분류법에 의하여 분류한다. 규격이 없는 시험에 대해서는 전문 기술자의 지시를 받아야 하며, 시험결과는 축제 재료조사의 총괄표로서 요약 정리해 둔다.

⑤ 통일분류법의 이용 대상

○ 토질재료에 관한 예비적 추정을 할 경우

○ 세부설계를 함에 필요한 현장조사의 범위를 결정할 경우

○ 경제적인 현장시험 계획의 입안, 실내시험에 필요한 자료의 채취계획을 세울 경우

○ 추가조사를 행할 경우

⑥ 암석의 시험

○ 암석의 종류, 풍화상황, 채취시의 암괴의 크기, 채취 가능량을 조사한다.

○ 비중, 흡수율, 압축강도, 내구성(규산나트륨법), 내마모성의 여러 가지 시험을 행한다.

○ 경암의 경우에는 이 밖에도 동결융해, 건습반복시험, 충격시험, 낙하시험, 간극율시험 등을 행한다.

(나) 콘크리트 골재의 조사

① 댐, 여수로, 취수설비 등에 사용하는 콘크리트골재가 댐 지점의 부근에 천연적으로 또는 가공에 의해서 얻을 수 있는가를 조사해야 한다.

② 필댐에서의 콘크리트 사용량은 얼마 안 되므로 공사비면에서 별문제가 되지 않으나 콘크리트 댐으로서의 가능성을 검토하기 위해서는 중요한 요소가 된다.

③ 골재는 보통 하상퇴적의 모래, 자갈을 사용하던지 암석을 깬 쇄석이나 쇄사를 인공적으로 제조하여 사용하게 된다. 골재의 성질로서는 필댐 축제 재료

보다 훨씬 엄격한 조건이 요구되고 있으며, 청정, 견고, 내구적이고 적당한 입경, 입도를 가지면서 먼지나 진흙(진토), 유기물 등의 유해물을 포함하고 있으면 제외하도록 하고 있다.

(4) 하상토 준설과 관련된 환경기준

하천수저에 퇴적물이 수역의 이용목적에 저해가 되거나 환경에 대해 악영향을 미치게 되면 퇴적물을 제거하고 유지 관리해야 환경보전을 수행할 수 있다. 이렇게 수행되는 준설은 통수능을 확보하기 위해 이루어지는 하도 준설과는 개념이 다르게 환경보존을 위한 오염된 퇴적물의 제거이며 이에 따라 오염을 판단하기 위한 지표와 기준, 준설후 처리과정이 매우 중요하게 다루어지게 되나, 국내의 경우 아직 명확한 기준이 제시되어 있지 않을 만큼 오염된 퇴적물을 판단하는 지표와 기준, 법적으로 정의된 사항은 없는 실정이다.

하천의 오염은 주로 강우 유출에 의해 나타나는 비점오염물과 도시, 농촌으로부터 유입되는 오염물 등에 의해 지속적으로 이루어지고 있으며, 이에 따라 하천수저 퇴적물도 함께 오염되므로 하상토 활용을 위해서는 환경기준 정립을 통하여 퇴적물의 오염정도를 판단하고, 정화 또는 복구 등의 적절한 처리가 필요한지를 검토한 후 합리적인 하상토 활용방안이 검토될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 국외의 퇴적물에 대한 환경지표 및 기준과 이에 따른 처리과정을 조사하고 국내 적용사례를 검토하여 하상토에 대한 환경기준이 어떻게 적용되고 있는지에 대하여 조사하였다.

(가) 개요

하상토와 관련하여 퇴적물질 기준은 기준의 설정목적, 기준 설정의 과학적 근거, 기준의 법적인 성격 등에 따라 다양한 용어로 표현되고 있기 때문에 아직까지 국내외적으로 명확하고 일관적인 정의는 확립되어 있지 않은 실정이다.

국내에서는 이창희 등(한국환경정책·평가연구원, 2000)이 퇴적물 관리와 관련된 기준과 관련하여 관리대상을 수질/자연자원관리, 준설퇴적물관리, 수저퇴적물 관리로 분류하고 이에 따라 관리기준을 퇴적물 지표, 퇴적물투기기준, 퇴적물 제거기준,

퇴적물 예비기준, 퇴적물권고기준, 퇴적물준거기준, 퇴적물질표준 등을 제안한 바 있다.

(나) 미국 퇴적물 환경기준 설정

미국에서는 그동안 오염퇴적물에 대한 연구가 활발히 진행되어 많은 퇴적물 기준이 제안되었지만 실질적인 규제기준으로 사용되고 있는 퇴적물 관련 기준은 많지 않으며, 대부분의 퇴적물기준은 퇴적물 오염평가를 위해 사용되는 예비기준 또는 퇴적물 관리에 있어 참고적인 차단기준으로 사용되는 권고기준의 사용되고 있다. <표 3.1-5>는 미국의 퇴적물질 관련 기준 개발현황을 나타낸 것이다.

한편, 미국 해양대기청과 일부 주 정부는 환경보호청의 퇴적물 환경기준 개발과 별도로 퇴적물 오염지역 선별, 오염평가, 오염퇴적물 정화 등의 오염퇴적물 관리를 위해 프로그램 또는 주 정부 차원의 퇴적물 관리기준을 설정하여 사용하고 있다.

(다) 캐나다 퇴적물 환경기준 설정

캐나다 연방정부는 저서생물 보호를 위한 담수퇴적물 및 해양퇴적물에 적용되는 퇴적물질기준 개발을 위한 프로토콜을 발표한 후(CCME, 1996), 1998년에 잠정퇴적물질권고기준과 악영향 기대수준을 발표하였다. 잠정퇴적물질권고기준은 기본적으로 미국해양대기청의 퇴적물권고기준의 개발에 사용된 증거자료 가중법에 의해 설정되었기 때문에 저서생물에 대한 악영향을 확률적으로 표현하고 있다.

연방정부의 퇴적물 권고기준이 설정되기 이전부터 캐나다 온타리오주는 담수퇴적물에 대한 퇴적물질기준을 설정하여 사용해 왔으며, 온타리오 기준은 저서생물의 보호를 위해 생물체에 대한 오염물질의 만성적, 장기적 영향을 기초로 하여 개발되었으며, 많은 주정부와 국가에서 담수퇴적물의 평가에 준용되어져 왔다. 온타리오 기준은 NEL(No Effect Level), LEL(Lowest Effect Level), SEL(Severe Effect Level)로 나누었는데, NEL은 퇴적물에 서식하는 생물체에 어떠한 영향도 미치지 않는 오염수준, LEL은 퇴적물에 서식하는 대다수의 생물체에 영향을 미치지 않는 오염수준, SEL은 저서생물에 악영향을 미칠 수 있는 심하기 오염된 수준의 세단계로 구성되어 진다.

<표 3.1-5> 미국의 퇴적물질 기준 및 특성

관련기관	퇴적물질기준	특 성
캘리포니아주	예비기준	·퇴적물의 유해성은 유해퇴적물 판정기준에 준함 ·퇴적물 재활용기준으로서의 퇴적물질예비기준 설정
매사추세츠주	〃	·자체기준은 제시하지 않고 환경보호청, 미육군공병단, 캐나다 온타리오주 권고기준 사용
텍사스주	〃	·증거자료 가중법에 근거하여 12개 금속류, 131개 유기화합물질에 대한 기준제시
사우스캐롤라이나주	〃	·증거자료 가중법을 이용하여 32개 화학물질의 해양/하구 퇴적물에 대한 기준 제시
해양대기청	권고기준	·전국현황 및 추이 프로그램을 통해 수집한 퇴적물의 오염평가, 비교 악영향 예측을 위한 기준
뉴 욕 주	〃	·평형분배법을 이용하여 64종의 유기화학물질, 스크린 수준 농도법에 의해 12종의 금속에 대한 기준 마련 ·퇴적물 오염수역구분, 오염퇴적물로 인한 악영향을 예측하는 기준으로 사용
플로리다주	〃	·증거자료 가중법을 이용해 34개 물질에 대한 기준제시 ·퇴적물 오염평가, 오염우심지역 파악, 습지환경 복구를 위한 계획, 환경오염에 대한 추이평가 기준으로 활용
환경보호청	준거기준	·퇴적물질표준 개발을 위한 준거기준 ·5개 유기화학물질에 대한 기준개발 완료
워싱턴주	표준 (규제기준)	·악영향 임계법과 퇴적물질 종합평가법을 이용하여 푸젯만 관리에 적용되는 47개 화학물질에 대한 퇴적물질 표준 제시

(라) 일본 퇴적물 환경기준 설정

일본은 국가적 차원의 퇴적물 환경기준은 설정되어 있지 않고 있으나, 각각의 준설사업에 따라 퇴적물 제거기준을 제시하고 있다. 1970년대 초부터 시작된 동경만 퇴적물 연구 결과는 일본 퇴적물 관리의 기초 자료로 이용되고 있는 실정이며, 1972~1981년에 걸쳐 729천㎥의 퇴적물을 준설한 나고야항 퇴적물 제거기준은 강열감량, COD, 유화물 중 2개 항목에서 (+)로 평가되면 제거하는 것으로 설정하였다.

일본 퇴적물 오염 판정을 위한 시료 채취는 지표부근 15cm 이내에서 1,000m^2 당 중앙 1지점 및 5m~10m 사이의 주변 4방위에서 각각 100g 이상 채취한 후 5지점 채취시료를 혼합하여 1개소 시료로 취급한다. 또한, 시험용 시료는 공기건조하여 자갈 및 나무 조각 등을 제거한 후 비금속성 체(2mm)를 통과시킨 것을 사용한다. 이때 시료는 자갈을 많이 포함한 흙의 경우 자갈함유률(%)을 기록한다. 한편, 시료의 분석은 카드뮴 및 그 화합물, 아연과 그 화합물, 비소와 그 화합물, 수은과 그 화합물의 경우 용출량 및 함유량을, 기타 물질의 경우 용출량만을 분석한다 (일

본토질공학회 1994).

<표 3.1-6>과 <표 3.1-7>은 일본에서 호소나 해역 및 만에서 시행된 준설사업의 준설토 제거기준 설정경위와 그에 따른 각 항목 기준치를 나타낸 것이다.

<표 3.1-6> 동경만 및 요코하마만의 퇴적물 제거기준

강열감량(%)	평가점	COD(mg/kg)	평가점	황화물(mg/kg)	평가점	비고
5미만	0	13미만	0	0.6미만	0	총평가점이 6점이상 이면 퇴적물 제거
		20미만	1	1미만	1	
5-15미만	3	30미만	2	5미만	2	
		40미만	4	10미만	4	
15이상	6	40이상	6	10이상	6	

<표 3.1-7> 일본의 준설 기준 사례

구분		준설기준 설정 경위	준설기준	비고
호소	取訪湖	호안의 수심이 얕은 지역에 분리하기 쉬운 유기물이 퇴적되어 있으며 고등 수생식물이 2.5m이상의 수심에서는 번식하지 않는다.	수심 2.5m 보다 얕은 지역 준설	
	中海定道湖	오니중의 중금속은 거의 없고 오염원인 물질은 N, P로 판단된다. 따라서 현재의 토색에 의한 오염 판정지표를 기준으로 흑색, 흑회색토를 제거기준으로 하였다.	흑색, 흑회색토	흑색,흑회색토의 특성 I.L : 12.6~16.0(%) COD : 30.0~36.6(mg/g) T-P: 0.635~0.691(mg/g) T-N : 1.61~2.68(mg/g)
항만 및 해역	田子浦港	저니의 성상은 I.L 20.4% PCB는 28.5ppm 정도, 중금속의 함유는 극히 미량으로써 문제가 없고 PCB의 용출도 검출되지 않았다. 이러한 결과에 의거 I.L 15%이상, PCB 10ppm이상일 때는 제거기준으로 설정	I.L :15%이상, PCB :10ppm이상	
	賴戶內海	해역의 저질조사에서 회수사업을 실시하고 경비, 효율 등을 고려하여 검토하였다.	COD : 40(mg/g) I.L : 15~20(%) T.N : 1(mg/g) T-P : 1(mg/g)	준설저니 두께는 20~30cm정도
	東京灣	만내의 저질조사에 기초하여 종합평가법(I.L, COD, 유화물 등)을 채택. 저니의 평가점이 6점이상의 저니를 제거 대상	평가점 6점이상의 저니	평가점 I.L: 15(%)이상 6점 COD:40(mg/kg)이상6점 유화물:10(mg/kg)이상 6점
	나고야灣	제거기준 설정경위 불명	3항목(I.L, COD, 유화물)중 2항목이(+)가 붙은 저니	제거한정 기준 I.L : 15%이상 (+) COD : 20mg/g이상 (+) 유화물 1mg/g이상 (+)
기타	大板, 妃路, 釜, 三田尻中關		I.L : 15%	
	片室, 尼埼, 西宮, 東幡灣		COD : 20mg/g 유화물 : 1mg/g	
	油津		강열감량 20%	

(마) 국내 퇴적물 환경기준 설정

국내 퇴적오염물질 제거는 1980년 후반에 들어서야 관심을 가지기 시작하여 마산만의 퇴적오염 제거사업을 필두로 1993년에는 '팔당호 퇴적물 준설사업 기본계획'을 수립하였으며 한강하류에도 퇴적오니 제거를 위한 기준을 설정하였으며 그 기준의 설정은 이미 시행된 일본의 예, 팔당호의 기준 및 한강 하류의 특성을 고찰하여 다음과 같이 설정하였다.

<표 3.1-8> 국내 하천 및 호수 퇴적물 제거 기준

지역	항목	기준		비 고
팔당호	T-N(㎎/㎏)	800 이상		4개 항목 중 2~3개 항목이 기준을 초과한 지역 또는 특정항목의 농도가 매우 높은 지역
	T-P(㎎/㎏)	1,100 이상		
	I.L(%)	7.0 이상		
	COD(㎎/㎏)	20 이상		
한강 하류	T-N(㎎/㎏)	2,000 이상		5개 항목 중 2~3개 항목이 기준을 초과한 지역이면서 동경만 기준에 의한 평가점이 6점 이상인 지역
	T-P(㎎/㎏)	1,000 이상		
	I.L(%)	10 이상		
	COD(㎎/㎏)	20 이상		
	황화물(㎎/㎏)	1.1 이상		
대청호	T-N(㎎/㎏)	3,000 이상		4개 항목 중 2개 이상 항목이 기준치를 상회하는 지역
	T-P(㎎/㎏)	1,500 이상		
	I.L(%)	7.0 이상		
	COD(㎎/㎏)	20 이상		
청초호	I.L(%)	0~5 미만	1)	3개 항목이 평가점이 6점 이상이면 퇴적물 제거 (일본의 동경만 평가기준 적용) ※ 1)는 평가점
		5~15 미만	3	
		15 이상	6	
	COD(㎎/㎏)	13 미만	0	
		13~20 미만	1	
		20~30 미만	2	
		30~40 미만	4	
		40 이상	6	
	황화물(㎎/㎏)	0.6 미만	0	
		0.6~1.0 미만	1	
		1.0~5.0 미만	2	
		5.0~10.0 미만	4	
		10.0 이상	6	

상기와 같이 퇴적물 환경기준에 대한 국내외 관련기준을 살펴보면 아직까지 명확한 기준 제시는 없는 것으로 나타났으며 각 상황에 맞춰 환경에 미치는 악영향을 사전에 예방하거나 이미 악영향이 있다고 판단되는 퇴적물에 대해서는 정화 또는 복구 등의 적절한 조치를 취하도록 관리기준을 제시하고 있는 것으로 조사되었다.

다. 소결론

본 절에서는 하천제방 축조 시 하상토의 활용성을 평가하기 위한 기초문헌조사로서, 국내·외 하천법과 하상토와 관련된 규정을 검토한 결과하였다. 검토결과, 국내 하상토 관련 기준은 하상토를 활용한 제방재료로서의 처리에 관한 부분의 경우 일정 수준을 기술하고 있으나 그 수준의 경우 현장에서 직접적으로 활용할 만큼의 자세한 내용을 제시하지 못하는 것으로 평가되었다.

또한, 외국 하상토활용기준은 하상토 활용 시 준설토와 관련된 환경기준을 엄격히 하고 있는 것으로 평가되어, 국내 퇴적물 오염관리 기준의 강화가 필요한 것으로 평가되었다.

2. 하상토 관련 국내외 연구 동향

가. 국내

본 절에서는 하상토를 활용한 하천제방 축조 등 건설재료서의 재활용에 관한 국내 연구 실적을 조사・분석하였다.

(1) 하상토 오염 및 처리 대책 관련 연구

건설교통부(1993)에서는 '하천환경관리기법개발 연구・조사' 사업의 일환으로 하천 및 저수지 등 상수도 취수장의 퇴사(堆砂)로 인한 취수장애, 오염된 하상토 퇴적으로 인한 수질오염 등과 관련된 하도환경에 대한 기초적 조사연구를 수행하였다. 연구 내용은 하천 취수구주위 퇴사실태조사, 오니퇴적 실태조사, 저니의 오염도 평가, 상수도 취수구 주위 퇴사대책, 퇴적오니 대책 등이었다.

또한, 건설교통부(2003)에서는 하천 하상의 준설토사 및 퇴적오니를 건설자재로서 재활용하기 위한 기초연구로서 대상하천 및 퇴적오니의 분포조사, 준설퇴적물의 입도분포와 중금속 등의 오염조사, 오염퇴적물의 처리 및 안정화 방안에 대한 연구를 수행하여 국내 실정에 적합한 퇴적물 처리기술 및 준설퇴적토에 함유된 유효자원을 건설재료로 재활용하는 연구를 수행하였다.

한국토지공사(2001)에서는 자연환경 보전 및 하천공간환경 개선을 위해 하천정비 개선방안의 일환으로, 하천환경 조사(수질조사, 저니질 조사, 오염원 및 오염부하량 조사, 생태환경조사, 하천 생태계 특성 조사 등)에 의한 하천생태계를 고려한 하천환경관리계획의 일반적인 기준을 제시하였다.

농림부(1996)에서는 저수지 준설 현황조사, 준설토 처리현황, 준설토의 토성 등 물리적 성질과 중금속, 화학적 성분 분석, 수질분석을 통한 오염현황 파악을 통해 저수지 준설토의 효율적인 활용방안을 평가하였다. 농어촌연구원(2004)은 저수지 준설물 퇴적에 따른 환경기준 정립 및 준설토 활용에 관한 연구를 수행하여, 퇴적물 오염도 평가, 준설토 재활용 방안을 제시하였으나 준설토 활용 시 오염에 따른 설계기준 및 경제성 분석에 대한 기준이 제시되어 있지 않은 실정이다.

(2) 하상토 공학적 특성 평가 및 활용 관련 연구

토지연구원(1995)은 단지 내 하천시설물 설계·시공요령을 통해 제방쌓기용 하상굴착 및 준설시공 계획을 제안하였으나, 하상토 준설 및 제방시공 등 하상토의 활용에 대한 세부지침이 제시되어 있지 않은 실정이다.

한편, 국내 준설토의 공학적 특성 평가와 관련하여 이영웅 등(1999)은 해양 준설토의 입도 및 다짐특성에 대한 실내시험을 통해 준설토 사용 뒷채움재의 다짐특성을 평가하였다. 이송 등(2002)은 국내 현장조건과 모래가 혼합된 지역을 고려한 준설토의 퇴적 및 압밀 특성을 파악하기 위하여 모래혼합비율에 따른 침강 및 자중압밀시험을 수행하였으며, 김영수 등(2005)은 낙동강 중류지역 실트의 비배수 전단거동평가를 통해 실트질 흙의 거동특성을 평가하였다.

하상토의 활용과 관련된 연구는 김영수 등(2006)의 경우 낙동강 유역 하상재료의 활용을 위한 CSG(Cemented Sand and Gravel)공법의 적용성 평가를 위해 낙동강 유역의 두 지점을 선정하여 시멘트 혼합토의 공학적 특성을 평가하였으며, 시험방법 및 결과는 다음과 같다.

① 시험방법

낙동강 유역 하상토 (SP)에 시멘트 혼합비를 2%, 4%, 6% 및 8% 등으로 변화시켜가며 다짐 및 CBR 시험, 일축압축시험, 삼축압축시험 등을 수행하였음.

▷ 실험 하상토 특성 : 낙동강 유역 2개소 채취 강사(SP)

▷ 안정처리 방법

- 하상토+시멘트 (2%, 4%, 6% 및 8%)

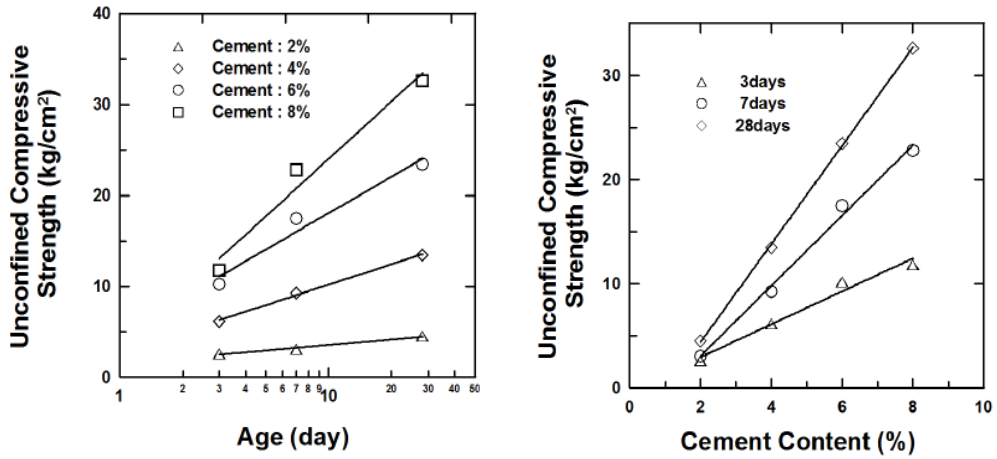
② 시험결과

시험결과는 <표 3.1-9>에서 보듯이 최적함수비의 경우 13.9~15.7% 정도이며, 최대건조단위중량의 경우 1.65~1.81t/m^3으로 시멘트 혼합비에 따라 약간의 차이는 있으나 거의 비슷한 범위의 값을 가지는 것으로 나타났다.

일축압축시험 결과, 시멘트 혼합율에 상관없이 혼합토의 강도는 재령 7일 강도에 비해 재령 28일 강도의 경우 약 2배, 92일 강도의 경우 약 3배 증가하는 것으로 나타났다(<그림 3.1-5> 참조).

<표 3.1-9> 다짐 및 CBR시험 결과 (김영수 등,2006)

구분	시멘트 혼합비	최적함수비(%)	최대건조단위중량(t/m^3)	CBR(%)
성주대교	2%	14.2	1.74	86
	4%	14.0	1.77	107
	6%	15.1	1.78	89
	8%	13.9	1.81	209
장천제	2%	15.1	1.65	79
	4%	15.7	1.70	123
	6%	15.3	1.73	120
	8%	15.1	1.76	107.7



<그림 3.1-5> 재령-시멘트혼합비-일축압축강도 (김영수 등, 2006)

또한, 윤길림 등(2003)은 항만 준설토의 공학적 분석 및 경량혼합토의 강도특성 분석을 통해 준설토 재활용 방안에 관한 연구를 수행하였고, 윤길림과 윤여원 등(2003)은 굴패각 혼합토에 대한 강도특성 평가를 통해 굴패각 고화재를 이용한 천층개량공법을 제시하여 굴패각을 사용하여 준설토를 재활용할 수 있는 방안을 제시하였다. 이주철 등(2002), 윤길림 등(2002)은 해양준설토를 이용한 경량기포혼합토를 제작하여 일축 및 삼축압축시험을 수행하여 건설재료로서의 강도특성을 평가하는 연구를 수행하였다.

이때, 윤길림 등(2002)은 항만공사 등을 통해 다량으로 배출되는 준설토 재활용

을 위해 준설토와 EPS 알갱이를 혼합하고 이를 보통 포틀랜드 시멘트로 고화시켜 제작한 경량혼합처리토의 공학적 특성 평가를 위해 일축 및 삼축압축시험을 수행하여 압축강도-변형특성을 분석하였으며, 시험방법 및 결과는 다음과 같다.

① 시험방법 (<표 3.1-10> 참조)

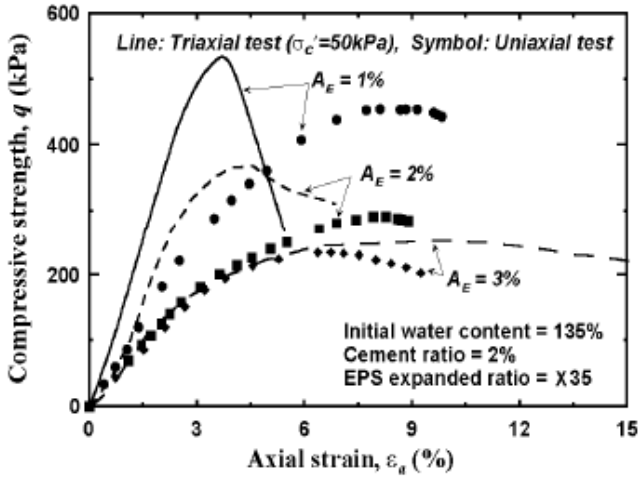
<표 3.1-10> 경량혼합처리토 특성 평가를 위한 실내시험 내용(윤길림 등, 2002)

시험조건	일축압축시험	삼축압축시험
준설토 초기함수비(%)	90, 135, 180	90, 135, 180 (σ_c'=50kPa)
EPS함유율(%)	1, 2, 3	1, 2, 3 (σ_c'=50kPa)
EPS발포배율	35배	35배
시멘트 함유율(%)	1, 2, 3	1, 2, 3 (σ_c'=50kPa)
양생압(kPa)	-	50, 100, 200, 300 (σ_c'=50, 100, 200, 300kPa)
양생기간(day)	3, 7, 15, 28	3, 7, 15, 28
포화도(%)	-	86~92

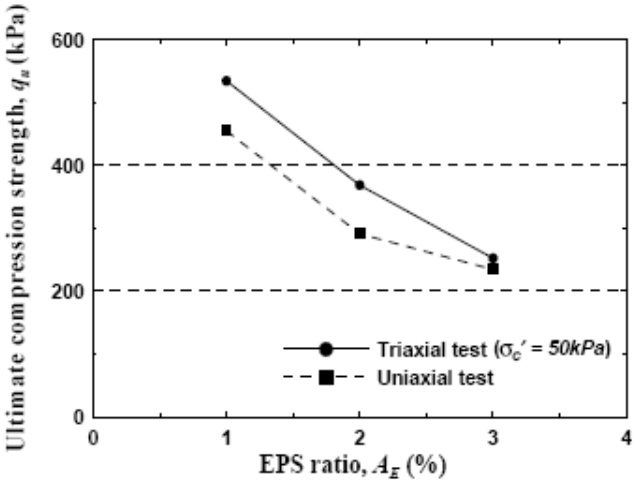
② 시험결과

<그림 3.1-6> 및 <그림 3.1-7>은 경량혼합토 EPS함유율에 따른 압축강도-변형 관계 및 극한압축강도 변화를 보여준다.

- ○ EPS 함유율 1%인 경우 : 파괴 시 압축변형율이 삼축상태가 일축압축 상태보다 50% 감소
- ○ EPS 함유율이 3%~6%인 경우 : 압축변형율 6%까지 삼축 및 일축압축상태가 거의 일치
- ○ EPS 함유율이 6% 이상 경우 : 6%이상인 경우 유효구속압 영향에 의한 삼축 및 일축압축상태 관계곡선이 다르나, 극한 압축강도의 경우 거의 차이가 없음



<그림 3.1-6> EPS함유율에 따른 압축강도-변형특성(윤길림 등, 2002)



<그림 3.1-7> EPS함유율에 따른 극한압축강도의 변화 (윤길림 등, 2002)

(3) 물리탐사를 이용한 하상토 관련 연구

하천과 해양을 포함한 수상물리탐사법은 주로 석유를 중심으로 한 해양 지하자원 탐지를 목적으로 발달하였으며, 현재에도 석유 및 가스하이드레이트, 망간 등의 탐지를 위한 정밀 3차원 물리탐사법이 국외에서 활발하게 개발 및 적용되고 있다.

해양 지하자원 탐지를 위한 물리탐사법은 크게 레이다와 같은 전자파를 송신원으로 하는 전자탐사(Key et al., 2004; Nielsen et al., 2003; Zhdanov et al., 2004)와 음파나 수중진동파와 같은 탄성파를 송신원으로 하는 탄성파탐사(DeAngelo et al.,

2003; Ecker et al., 2000; Rodriguez and Stewart, 2000)로 구분되며 탄성파탐사가 주로 적용되고 있다.

국내 하상물리탐사법은 크게 레이다를 이용한 전자탐사, 전류를 이용한 전기비저항탐사, 화약이나 음원을 이용한 굴절법 및 반사법 탄성파탐사가 주로 적용되고 있다(김정호 외, 2002; 이호영 외, 2002; 정호준 외, 2002; 차성수 외, 2002).

물리탐사 기법을 이용한 기존의 연구를 살펴보면 김경수 등(1999)은 전기비저항 탐사를 이용하여 제방의 누수여부를 평가하였으며, 조동행 등(2000)은 2극법 전기비저항 탐사기법을 이용하여 지하수 탐사를 하였으며 이치섭 등(2001)은 2차원 전기비저항 탐사를 이용하여 단층파쇄대를 탐사하는 연구를 수행하였다. 또한 박삼규 등(1999)등은 지온탐사를 통한 저수지 제방의 누수조사를 통해 하천제방의 안정성 평가를 수행하였다. 그러나 국내에서 활발히 적용되고 있는 하상 전기비저항탐사는 분해능이 떨어져 주로 넓은 지역의 단층대나 연약대 파악에 이용되므로 하상토의 부존량을 정밀히 산정하는데 한계가 있어 본 연구의 적용대상으로 적합하지 않는 방법임을 알 수 있다.

나. 국외

(1) 미국

미국 하상토 관련 주요 활용 매뉴얼 및 연구동향에 대한 요약은 다음과 같다. 본 절에서는 미국 델라웨어강 하상준설토 활용방안으로서 제방 성토재, 도로분야의 노반 및 노상재, 쓰레기 매립장 복토재 등의 검토내용을 분석・정리하였다.

(가) USACE (US Army Corps of Engineers, 1987) 매뉴얼

- ○ EM 1110-2-5 ; Beneficial Uses of Dredged Material
- ○ 본 매뉴얼은 준설에 대한 계획, 준설재료의 유효 이용, 생물학적・경제적・사회적 활용성 등이 고려된 생태학적・공학적 설계, 개발, 관리에 대한 가이드라인 등을 제공한다. 준설재료의 유효 이용은 수많은 미국 수로 현장에 대한 적용 사례를 통하여 유효성이 인정되었으며, 사례별로 정리하면 다음과 같다.
  - ▷ 생태 서식지 개발
  - ▷ 해빈을 위한 모래 공급

▷ 양빈을 위한 해안선 안정 및 침식 억제

▷ 양식 환경 개선

▷ 공원 및 유원지 성토

▷ 농경지·산림·원예지 조성

▷ 노천 광산 및 고형 폐기물 관리용 매립 및 성토

▷ 건설 및 산업적 이용 (항만개발 및 공항, 도시 및 주거)

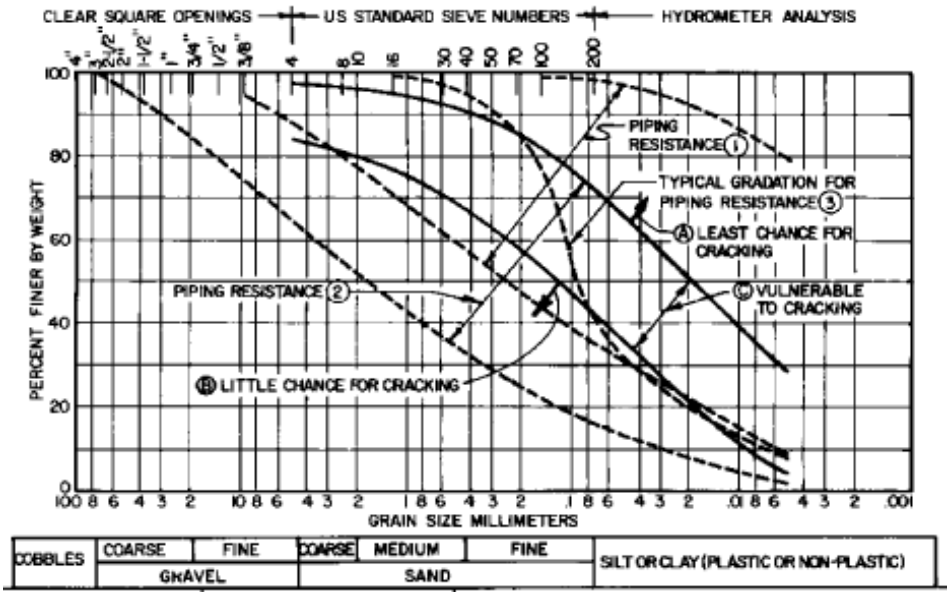
▷ 뒷채움재, 둑, 제방, 주차장, 도로 조성 등

▷ 기타 다양한 이용

(나) NAVFAC (Naval Facilities Engineering Command, 1986) 매뉴얼

○ DM - 7.02 ; Foundations & Earth Structures

○ 본 매뉴얼은 <그림 3.1-8> 및 <표 3.1-11>과 같은 하천제방 축조에 관한 성토재의 공학적 특성을 제시함으로써 준설재료의 제방 활용시 재료원 활용의 공학적 판단 기준을 제시한다.



<그림 3.1-8> 제체 재료의 입도분포 (NAVFAC, 1986)

<표 3.1-11> 입도분포에 따른 제체 재료별 파이핑 및 균열 저항성 특성 (NAVFAC, 1986)

구 분		재 료	특 성
파이핑 저항성	①	◦ 소성지수(PI)>15인 CL, CH ◦ 입도분포가 양호하고 소성지수(PI)>15인 SC	◦ 파이핑 저항성이 가장 큼
	②	◦ 소성지수(PI)<15인 CL, ML ◦ 입도분포가 양호하고 7<소성지수(PI)<15인 SC, GC	◦ 파이핑 저항성이 중간
	③	◦ SP ◦ 입도분포가 균등한 SM ◦ 소성지수(PI)<7인 ML	◦ 파이핑 저항성이 가장 작음
균열 저항성	Ⓐ	◦ D_{50}<0.02㎜, PI>20인 CH	◦ 시공 후 침하량 큼
	Ⓑ	◦ D_{50}>0.02㎜인 GC, SC, SM	◦ 시공 후 침하량 작음
	Ⓒ	◦ PI>20, 0.15㎜>D_{50}>0.02㎜인 CL, ML, SM	◦ 시공 후 침하량 중간

(다) SADAT ASSOCIATION, INC. (2001)

○ Use of Dredged Material for the Construction of Roadway Embankment

○ 본 연구 보고서는 안정 처리된 준설토(Stabilized Dredged Material, SDM)에 대한 2개소 도로제방 축조공사 현장시험 및 계측을 통하여 그 적용성을 제시하고 있다. NYDOT (New York Department of Transportation)에서는 도로건설공사시 SDM 사용에 대한 활용지침서로 활용하고 있다.

▷ 실험 하상준설토 특성 : MH (소성이 큰 실트), 유기물함량 8%

▷ 하상준설토 함수비 : 67%

▷ 안정처리 방법

- RDM+4% 시멘트 (양생기간 1개월, 6개월)
- RDM+8% 시멘트 (양생기간 1개월, 6개월)
- RDM+8% 시멘트+10% 플라이애쉬 (양생기간 1개월, 6개월)

▷ 수행 토질역학시험 : 흙의 분류, 함수비, 다짐시험, 삼축(UU, CU)시험, MR(Resilient modulus)시험, 압밀시험, 내구성시험

(라) Ali Maher (2005)

○ Palmyra Cove Demonstration Project Beneficial Use of Dredged Sediment

○ 본 연구 보고서는 미국 뉴저지주 팰마이러 코브 지역 델라웨어강의 하상토 유효이용을 위한 지반공학적 평가 결과를 제시하였다.

▷ 실험 하상준설토 특성 : SM, SP-SM, SP

▷ NJDOT(New Jersey Department of Transportation) 제방성토재 및 골재 기준 만족

① 실험방법

피스캐터웨이(Piscataway) 대학 Ali Maher 박사(2004)는 뉴저지 주정부 및 NJDOT 해양자원국 요청으로 팰마이러 코브(Palmyra Cove)지역 델라웨어강 하상토의 활용 방안에 대한 연구를 수행하였다. 팰마이러 코브지역은 오랜 세월 동안 하상토가 강 하상에서 주변지역까지 광범위하게 이동·퇴적되어 육화 및 식생이 우거진 곳이다.

델라웨어강 하상준설토는 팰마이러 코브지역 매립장에 약 450,000 yd^3가 야적되어 있다. 본 연구에서는 <그림 3.1-9>에서 보듯이 델라웨어강 하상준설토의 성토재로서의 적합성을 평가하고자 8개 지역에서 20개의 시료를 채취하여 다양한 형태의 공학적 실험을 수행하였다. 이때 시료는 지표면, 3~5ft, 5~10ft 등으로 깊이별로 구분·채취하였다.



<그림 3.1-9> 시료채취 위치 (Ali Maher, 2005)

한편, 실내시험은 I단계 시험 및 II단계 시험으로 구분하여 수행되었다. 단계 I 시험의 경우 도로분야 적용을 위한 기본특성시험 위주로, 단계 II 시험의 경우 관련된 공학적 특성에 따라서 조건을 모사하는 시험에 초점을 맞추었다.

단계 I 시험은 현장 함수비 시험, 입도분포, 비중, 애터버그한계 시험 등을 통한 흙의 공학적 특성 및 분류를 목적으로, 단계 II 시험은 도로 적용성 평가를 위한 다짐시험, 투수시험, CBR, MR(Resilient Modulus), 삼축압축시험(CU) 등을 수행하였다.

② 실험결과

(1) 비중 및 입도분포

흙의 분류는 통일분류법을 이용하며, 균등계수 C_u와 곡률계수 C_c, 등이 이용된다. 균등계수 C_u와 곡률계수 C_c,는 다음 식과 같이 D_{60}, D_{30}, D_{10} 등을 이용하여 계산된다. 흙은 C_u가 6 보다 크거나 C_c가 1~3 사이의 흙인 경우 입도분포가 양호한 모래(SW)로, C_u가 6보다 작고 C_c가 1보다 작고 3보다 클 경우 입도분포가 균등한 모래(SP)로 분류된다.

실험결과, 델라웨어강 하상준설토는 C_u의 경우 2.18~3.98, C_c의 경우 0.8~1.66로서 통일분류상 SM 및 SP로 평가되었다. 흙의 비중은 평균 2.67로서 구성광물이 석영인 것으로 판명되었다.

- 균등계수, $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$

- 곡률계수, $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$

(2) 다짐시험

다짐시험은 <표 3.1-12>에서 보듯이 채취된 깊이별 흙 시료(총 15개 시료)에 대하여 ASTM D 698에 따라 수행하였다. 최대건조밀도는 14.42~18.26 kN/m^3, 평균 16.18kN/m^3 정도이고, 최적함수비는 11~19%, 평균 최적함수비의 경우 16.9%이다.

<표 3.1-12> 다짐시험 결과 (Ali Maher, 2005)

시료 번호	γ_{dmax} (kN/m^3)	최적함수비 (%)	시료 번호	γ_{dmax} (kN/m^3)	최적함수비 (%)
STP 1-1	16.474	14	STP 5-1	15.700	18
STP 1-2	15.856	18	STP 5-2	15.543	17
STP 1-3	15.856	16	STP 6-1	15.700	19
STP 2-1	17.895	11	STP 6-3	15.856	18
STP 2-2	15.543	19	STP 7-1	15.386	18
STP 2-3	15.543	18	STP 7-2	15.543	19
STP 3-1	14.132	19	STP 8-1	17.738	11
STP 4-1	15.856	19			

(3) 투수시험

흙의 투수성은 세립분 함수율(#200번체 통과 실트 또는 점토)과 같은 흙 입도와 직접적으로 관계가 있으며, 입경에 비례 한다. 이때 입경 D10(흙의 중량 통과백분율 10%에 해당하는 입경)은 흙의 입경-투수성과의 경험 상관관계에 사용된다. 본 연구에 사용된 흙 시료는 <표 3.1-13>에서 보듯이 투수계수가 $1.87\times10^{-2}\sim6.24\times10^{-5}$ cm/sec이다.

<표 3.1-13> 투수시험 결과 (Ali Maher, 2005)

시료 번호	투수계수 (cm/sec)	시료 번호	투수계수 (cm/sec)
STP 1-1	3.68E-04	STP 5-1	1.75E-02
STP 1-2	1.48E-03	STP 5-2	1.89E-03
STP 1-3	6.30E-04	STP 6-1	5.08E-03
STP 2-1	6.24E-05	STP 6-3	1.38E-02
STP 2-2	8.10E-03	STP 7-1	7.41E-03
STP 2-3	2.33E-03	STP 7-2	7.94E-03
STP 3-1	5.87E-04	STP 8-1	1.25E-04
STP 4-1	1.80E-02		

(4) 전단강도시험

흙의 강도특성은 다음과 같은 Mohr-Coulomb 파괴기준 식을 이용하여 나타낸다. 흙의 전단강도는 선형적인 관계에 있으며, 연직응력의 함수이다. 삼축압축시험은 ASTM D 698에 의하여 최대건조밀도의 94~100% 정도로 성형된 흙 시료에 대하여 압밀비배수(CU)시험을 수행하였다. 이때 구속압(σ_3)은 34.5, 69.0, 103.4kN/m^2 등으로 하였다.

델라웨어강 하상준설토는 <표 3.1-14>에서 보듯이 c의 경우 5.52~20.68kN/m^2, ϕ의 경우 36~39°인 것으로 나타나 전형적인 조립토 강도특성을 나타낸다.

$$S = c' + \sigma' \tan\phi$$

여기서,

S = 흙의 전단강도

c′= 흙의 유효 점착력(압력 단위)

σ = 연직유효응력

ϕ = 흙의 내부마찰각

<표 3.1-14> 입도분포에 따른 삼축압축강도시험 결과 (Ali Maher, 2005)

시료 번호	ϕ(°)	c(kN/m^2)	시료 번호	ϕ(°)	c(kN/m^2)
STP 1-1	38	14.48	STP 5-1	36	6.89
STP 1-2	38	9.65	STP 5-2	39	12.41
STP 1-3	39	12.41	STP 6-1	36	10.34
STP 2-1	39	20.68	STP 6-3	38	6.21
STP 2-2	39	5.52	STP 7-1	37	6.89
STP 2-3	38	15.17	STP 7-2	39	6.21
STP 3-1	37	18.62	STP 8-1	37	15.86
STP 4-1	36	11.72			

(5) CBR 치

본 시험에서는 ASTM D 1883에 규정에 따라 총 15개 시편에 대한 CBR 시험을 수행하였다. 본 시험결과는 보통 아스팔트 도로포장의 노상, 노반, 도로기층 설계에 활용된다. CBR 시험은 준비된 다짐시료에 원형의 관입 봉이 2.54cm와 5.08cm 들어가는데 필요한 응력 값이다.

델라웨어강 하상준설토의 CBR값은 평균값의 경우 26.1이며, 가장 큰 값의 경우 52.4, 가장 낮은 값의 경우 18.3로 나타났다.

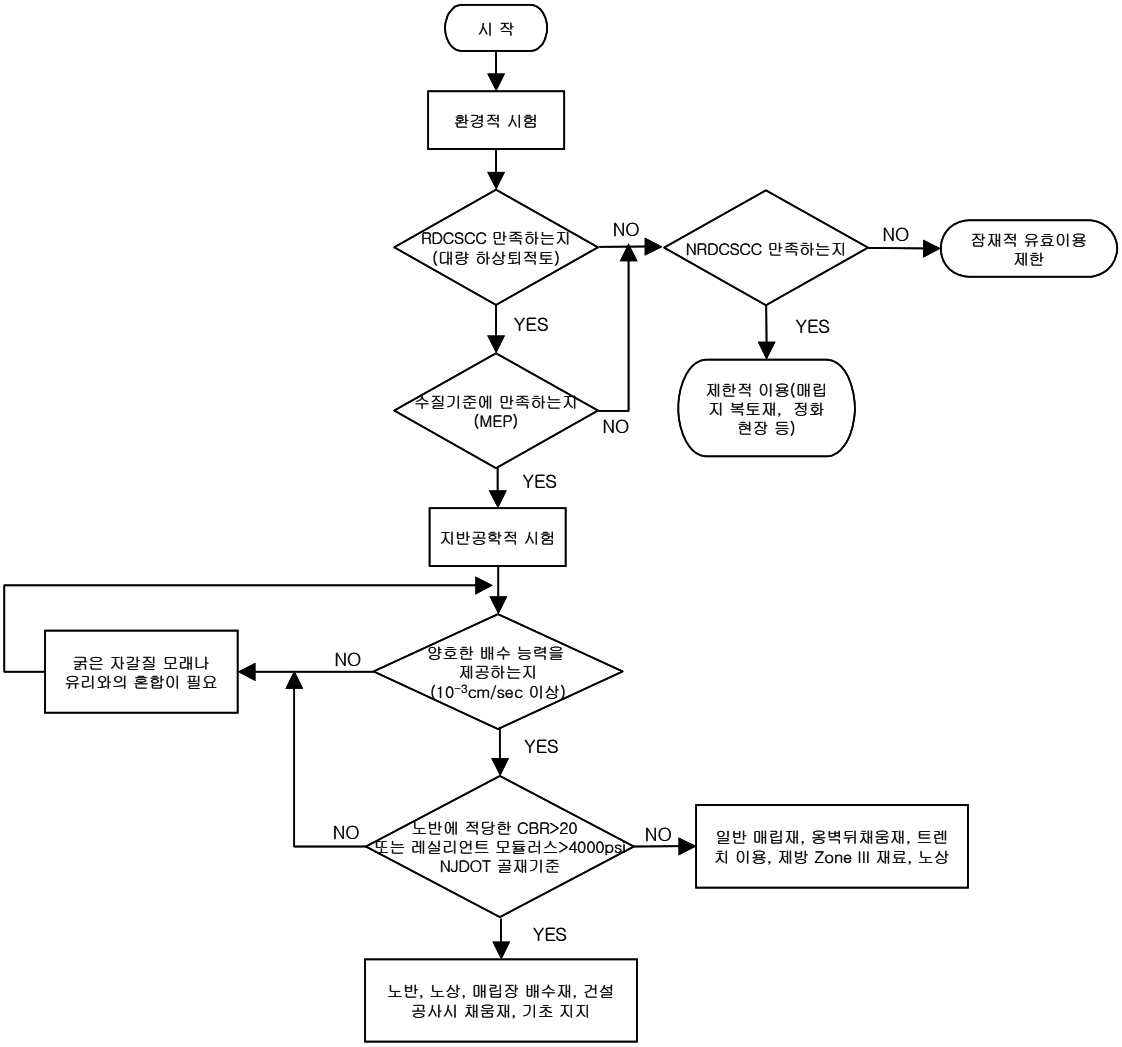
(6) MR (Resilient Modulus) 값

MR값은 CBR값과 마찬가지로 도로설계 시 이용되는 값으로 노반 재료의 동적 거동 평가치를 제공한다. 포장단면은 실제 설계연한동안 충격하중 조건 아래에 있다. 델라웨어강 하상준설토의 평균 MR값은 59,295kN/m^2이며, 가장 큰 값의 경우 78,276kN/m^2, 가장 작은 값의 경우 44,988kN/m^2로 평가되었다.

(7) 종합 활용 방안

Ali Maher 박사(2004)는 Douglas 등 (2003)의 연구결과를 고려하여 뉴저지주의 하상준설토 활용을 위한 흐름도를 <그림 3.1-10>과 같이 제안하였다. 또한, 델라웨어강 하상준설토는 연방 및 주 정부기관의 관련 기준과 비교하여 다음과 같은 분야에 활용하여도 적합한 것으로 보고하였다.

- ○ 도로 노반
- ○ 제방 성토재료
- ○ 옹벽 뒷채움재
- ○ 관 트렌치 베딩(bedding) 재료
- ○ 일반적인 매립 성토재



<그림 3.1-10> 하상준설토 활용 흐름도

(2) 유럽

(가) 유럽의 하상준설토 처리 개요

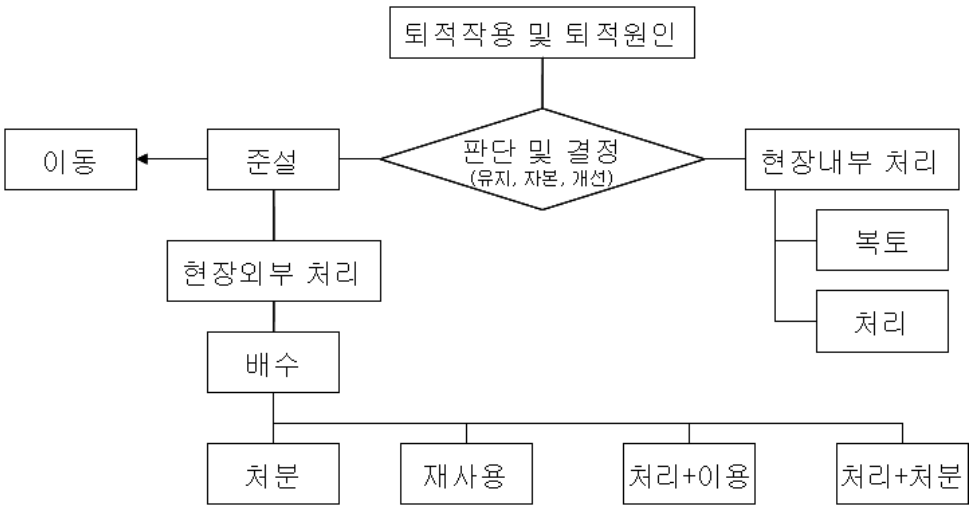
퇴적(sedimentation)은 자연적인 과정으로서 자연복원시스템의 가장 기본적 영역이나, 이때 발생되는 퇴적 침전물(sediment)은 인간의 문화·경제적 활동으로 인해 오염되어 왔다. 유럽에서 발생되는 오염침전물은 유럽 대륙을 관통하여 흐르는 관련 강 유역의 발생 하상 준설토 관리를 환경적·사회적·경제적으로 효과적으로 실행 하도록 구성된 관련국 중심의 네트워크 조직인 SedNet(Europian Sediment Network) 통계에 의하면, 연간 100만~200만 m^3의 오염 침전물이 발생된다고 보고

되고 있다(Giuseppe Bortone et. al., 2004).

한편, 준설은 홍수 방지, 선박 운항, 항구 유지, 기존 물 관리 시스템(유지 및 준설)의 운용, 환경적 복원(remediation) 등에 필요하며, 오염침전물 준설의 경우 오염된 준설물 처리에 따른 제반 문제를 야기시킨다.

유럽의 준설사업은 유지관리측면에서 대체로 수년에 걸쳐서 이루어지며, 발생 준설토의 경우 동일한 물 관리 시스템(Water System)내에 재활용 시키는 것이 일반적인 원칙이다. 예로써 도랑 및 강의 유지관리와 같은 작은 규모의 준설작업은 준설토를 부근의 제방 성토에 활용한다. 이때 제방 성토가 환경, 지형, 공간적인 이유 등으로 불가능할 경우 대안으로는 활용(beneficial use), 공학적 처리(treatment), 매립(confined disposal) 등과 같은 방법이 있다.

SedNet은『SedNet Work Packge 4』에 준설토 처리 및 운용 방법을 <그림 3.1-11>과 같이 요약·제시하였다. 퇴적물 관리는 <그림 3.1-11>에서 보듯이 현장내부(in-situ)처리와 현장외부(ex-situ) 처리 두 가지로 나누어진다.



<그림 3.1-11> 준설·처리시 관리 흐름도 (SEDNET, 2004)

한편, 퇴적물 또는 준설토 처리기술은 <표 3.1-15>와 같으며, 제시된 처리기술을 적용하기 위해서는 다양한 관련 요소들을 분석해야 한다. <표 3.1-16>에서는 퇴적물 및 준설토의 공학적 특성에 따른 처리방법에 따른 기준을 제시한다. 퇴적물

및 준설토의 처리는 <표 3.1-16>에서 보듯이 적용기술들이 퇴적물 및 준설토의 종류(실트, 실트/모래, 모래), 오염의 정도(낮음, 중간, 높음), 오염물 특성(유기물, 무기물) 등을 고려한 기술적 대안들이 선정하도록 되어 있다.

예로써, 기술적 대안의 선정은 사업대상 퇴적물 및 준설토가 처리기술 선정표에서 (+)가 세 개인 경우 처리기술로 선정되고, 하나 또는 두 개인 경우 준설처리 시 단일 공정만으로 활용 가능, 하나의 (-)라도 있는 경우 기술 적용성이 떨어지는 것으로 평가하고 있다.

한편, <그림 3.1-12>에서는 네덜란드에서 『SedNet Work Packge 4』를 이용하여 현장 준설공사에 필요한 관련 처리기술 선정에 사용된 처리기술 구축망 개략도를 보여준다.

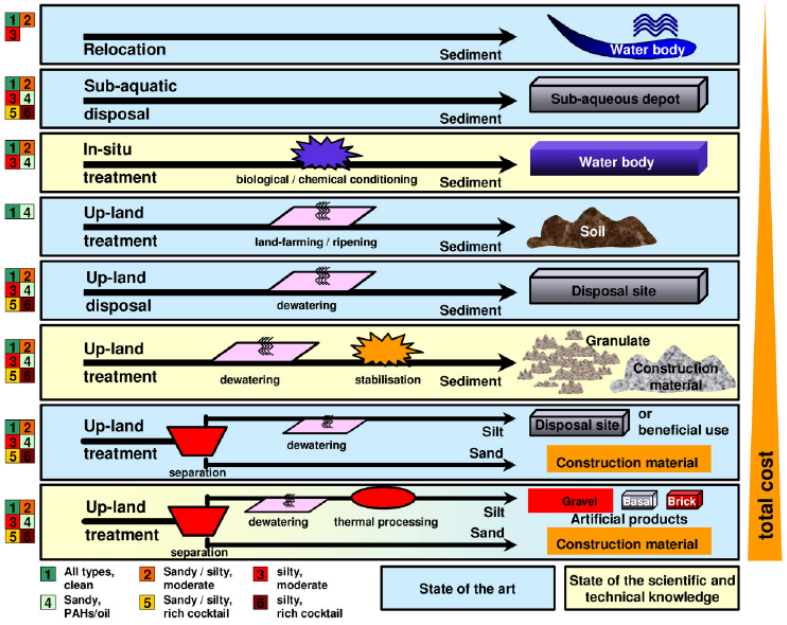
<표 3.1-15> 처리방법에 따른 기술 범주 (SEDNET, 2004)

처리과정 원리	
1. 이동	① 해상 투기
	② 배토관 준설
2. 물리적 선별	① 분류
	② 선별
3. 배수	① 자연증발에 의한 탈수
	② 역학적 탈수
4. 오염물질 분리	① 화학적 추출
	② 열적 탈착
5. 오염물질 파괴	① 생물학적 감소
	② 화학적 산화
	③ 열적 산화
6. 오염물질 고착화	① 화학적 고착화
	② 열적 고착화
7. 매립	① 수중투기(Sub-aquatic) 매립
	② 육상 매립

<표 3.1-16> 처리기술의 선정 기준표 (SEDNET, 2004)

처리과정 원리	퇴적토 및 준설토 종류			오염 정도			오염물 특성	
	실트질	실트질/모래질	모래질	낮음	중간	높음	유기물	무기물
1.1. 해상투기	+	+	+	+	+/−	−	+	+
1.2. 배토관 준설	+	+/−	−	+	+/−	−	+	+
2.1. 분류	+/−	+	+	+	+	+	+	+
2.2. 선별	+/−	+	+	+	+	+	+	+
3.1. 건조 탈수	+	+	+	+	+	+	+	+
3.2. 역학적 탈수	+	+	+	+	+	+	+/−	+
4.1. 화학적 추출	+	+	+	+/−	+	+	−	+
4.2. 열적 탈착	+	+	+	+/−	+	+	+	−
5.1. 생물학적 감소	+/−	+	+	+	+	+/−	+	+/−
5.2. 화학적 산화	+	+	+	+/−	+	+	+	−
5.3. 열적 산화	+	+	+	+/−	+	+	+	−
6.1. 화학적 고착화	+	+	+/−	+	+	+	+/−	+
6.2. 열적 고착화	+	+	+/−	+	+	+	+/−	+
7.1. 수중투기 매립	+	+	+	+	+	+	+	+
7.2. 육상 처분	+	+	+	+	+	+	+	+

\+ 처리과정이 기술적으로 유용하거나 부정적인 효과를 나타내지 않음.
+/− 처리과정이 기술적으로 대부분은 유용하거나 대부분은 부정적인 효과를 나타내지 않음.
− 처리과정이 기술적으로 유용하지 않거나 부정적인 효과를 나타냄.



<그림 3.1-12> 네덜란드 준설공사 처리기술 선정 구축망 개략도(AKWA, 2000)

(나) 네덜란드/독일 사례 분석

네덜란드와 독일은 국가적 차원의 하천 치수 및 이수, 화물수송능력 등을 가진 다뉴브, 라인, 뫼즈, 엘베, 베저, 엠스강과 같은 큰 강을 서로 공유하고 있으며, 네덜란드와 독일은 라인강, 뫼즈강, 엠스강 등의 하상퇴적토 관리 및 운용을 위한 비공식 양자 간 차원으로 하상퇴적토 관련 지식 및 정보, 경험 등을 활발히 교류하고 있는 실정으로 본 절에서는 독일 DGE(Dutch German Exchange)에서 독일/네덜란드 간 합의된 준설/퇴적토의 관리 이해 및 그에 따른 기본사항 등을 정리하였다. .

독일의 DGE에서는 퇴적/준설토 관리 및 그에 따른 기본적인 요구사항 등에 관한 규정들을 제시하였다. DGE는 네덜란드와의 퇴적/준설토 관리 분야에 대한 토의와 유럽 체계 구축 등을 목표로 1) 관련국과의 정보 교류, 2) 특정 사안에 대한 공동협력 강화, 3) 준설토 최종처리장에 대한 공동전략 개발 등을 수행하고 있다. 최근 DGE에서는 퇴적/준설재료에 대한 1) 화학적 기준, 2) 생태동물학/위험도 접근, 3) 생태학 등 친환경 관련 기준들을 강화하고 있다.

전술한 바와 같이 DGE 설립 목적은 유럽 준설/퇴적토 관리에서 다국 간 협력을 지원해 주는 것이다. DGE에서는 아래와 같은 독일/네덜란드 간 합의된 준설재료 및 입법에 관한 내용을 연차별로 수정·정리 하였다.

① DGE Part I (2003년 4월)

- 본 규정은 준설재료 및 그 입법에 관한 내용으로서, 유럽 내 국가 간 준설재료 관리에 대한 최근 독일 입법 현황과 관련 해석 등을 포함하고 있음.
- 준설재료에 대한 복합한 처리 및 관리 등을 포함 함.
- 준설재료와 관련 물질 (물, 흙, 폐기물, 환경 등)에 관한 국제 규약, 유럽과 국제 규약, 관련 국내 규약 등을 적용함. 현재 유럽 준설재료 관련 물질 등의 규약은 국제적인 입법 및 퇴적/준설 재료 관리 등에 영향 끼침으로, 양 국가 간 퇴적/준설물질에 대한 처리를 보다 합리적이고 간편한 규준 체계를 요구함.

② DGE Part II (2002년 9월)

- 본 규정은 준설토의 처리 및 관련 기술에 관한 내용임.
- 본 규정 개요에는 퇴적재료에 적용할 수 있는 광범위한 처리, 유효이용, 폐쇄

처분기술 등에 관련된 독일과 네덜란드의 기술 현황이 서술되어 있음.

○ 부록에서 기술 현황 및 현장사례 등이 관련 내용과 양국 간 기존 가이드라인, 지침, 입법 등의 차이 및 불일치 등을 기술함.

(3) 일본

일본각지에는 관동 롬(loam)을 비롯하여 장비주행성(trafficabillity) 확보가 되어 있지 않거나 성토재료로서의 충분한 강도를 얻을 수 없기 때문에 도로건설공사나 하천축제공사의 장해가 되어 건설재료로 활용하기에 적합하지 않은 다양한 불량토가 분포되어 있다.

특히 북해도의 경우 고함수비 고소성의 화산회질 점성토, 비교적 고함수비의 점성토, 또는 취약한 풍화암 등의 불량토가 널리 분포되어있다. 또한, 북해도는 적설한냉지로 시공적기가 짧기 때문에 양질토라고는 말할 수 없어도 계절이나 기상조건에 따라서는 건설재료로 사용이 가능한 흙이라도 불량토가 되는 경우가 많다.

한편, 국내와 마찬가지로 최근 주변 환경보전상의 제약이 심해져 종래에는 현장 근처에 사토장소를 확보하고 불량토를 투기 후 양질토를 채취하는 경우가 많았으나, 현장 발생 재료의 유효이용 원칙에 따라 부득이하게 불량토를 건설재료로 사용하는 현장이 증가하고 있는 실정이다.

본 절에서는 하상준설토 관련 연구 및 시공이 활발한 일본 및 북해도 개발청의 불량토 관련 주요 연구동향과「북해도 불량토 대책 매뉴얼(안) (1986)」의 주요 내용을 분석・정리하였다.「북해도 불량토 대책 매뉴얼(안)」은 총론, 북해도의 불량토, 불량토 조사와 판정, 불량토 대책공법, 시멘트・석탄회 안정처리공법 등 5개장으로 구성되어 있다.

(가) 불량토 활용관련 연구 동향

① 북해도 불량토 대책 매뉴얼(안) (1986)

본 매뉴얼은 북해도 개발청에서 제시한 북해도 불량토 대책(안)으로서, 특히 첨가제에 의한 안정처리공법에 관련된 기준 등을 제시하고 있다. 또한, 본 매뉴얼은 불량토에 의한 제방축조공사의 계획, 설계・시공・관리 등을 제안함으로써 하상준설토의 적극적 활용을 검토하고 있다.

② 석수천(石狩川) 개수공사 내 석수천 하류발생토 유효이용 검토업무 보고서 (2000)

본 연구는 북해도 석수천내 퇴적되고 있는 하상준설토에 대한 성토재로서의 유효이용, 직접적인 현장시공의 합리적 시공방법 및 개량재 품질관리방법 등을 제시할 목적으로 수행되었다. 본 보고서의 내용은 시험시공계획 및 입안, 시험시공의 품질관리, 관련 토질시험의 수행 및 결과 분석, 결과분석에 의한 시공방법 보정 및 품질관리방법 검토 등으로 이루어져 있다.

③ 석수천(石狩川 개수공사 내 석수천 하류발생토 유효이용 검토업무 보고서 (2001)

본 보고서는 2000년 공사 적용성에 대한 정밀 분석을 목적으로, 시공현장에 대한 평가 조사를 실시하여 하상준설토에 대한 제방성토재로서의 유효이용 타당성을 제시하였다. 또한, 본 보고서는 2000년 검토업무보고서의 시험시공 품질관리, 시험시공 관련 각종 토질시험결과를 시간경과를 고려하여 보완·수정하였으며, 부적합토사의 개량공법 개발, 혼합토의 함수비 조기저하방안 등을 함께 제시하였다.

④ 기술 활용 파일럿 사업실시보고서 (2002)

석수천(石狩川)은 매년 준설공사 수행으로 하상준설토(이토 계열)를 연간 40~50만㎥ 정도가 발생되어, 매립장에 야적되고 있는 실정에 있다. 본 보고서는 하상준설토 활용기법으로서 준설 발생 모래/점성토, 모래/하류지역 이탄 등을 혼합하여 투수특성 확보를 위한 실내배합실험, 장비 주행성, 장비에 의한 현장혼합특성, 시장성 등을 평가·수록 하였다. 본 연구개발 기법들은 실제 제방축조공사에 적용되어 시공성, 건설 발생토 리사이클 추진, 비용 절감 등에 큰 효과가 있는 것으로 평가되었다.

⑤ 혼합토 이용 매뉴얼(안) (2003, 2004)

본 매뉴얼은 하천공사로 인해 발생하는 토사를 유효이용하기 위한 기술 표준 및 적극적 활용 등을 목적으로 제시되었다. 본 매뉴얼은 불량 하상준설토의 입도분포 특성 조정, 실내 배합실험, 시험시공, 현장 적용 시험 등을 수행하여 그 결과를 수록하였다.

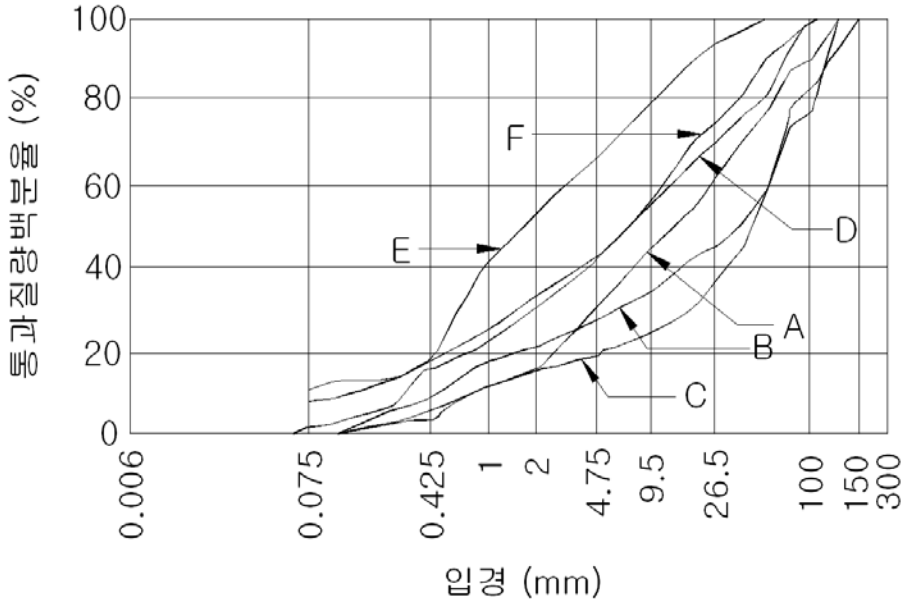
⑥ 건설발생토의 재활용 기술과 비용 절감 (小橋秀俊 등, 2000)

小橋秀俊 등(2000)은 일본 건설성의「리사이클 플랜 21」과「건설 리사이클 추진계획 '97」등의 일환으로, 건설 발생토・건설오니(汚泥)・콘크리트 등의 건설부산물 재이용 촉진을 유도하기 위하여 수행되었다. 일본은 1995년 현재 건설 발생토 재이용률이 30% 정도로, 그 원인중 하나가 고함수비 점성토 등 저품질토 발생 등이다. 본 보고서는 건설발생토 리사이클 기술과 저품질토 처리와 관련된 공법의 효율성 등을 제시하고 있다.

⑦ 굴삭잔토 및 하상퇴적물을 이용한 CSG 구조물(豊田光雄 등, 2000)

豊田光雄 등(2000)은 필댐건설현장, 하상퇴적물 등에서 발생하는 건설잔토를 추가적 처리과정을 거치지 않고 소량의 시멘트를 첨가・혼합하여 사용하는 개량성토재료인 CSG(Cemented Sand and Gravel) 공법에 관한 것이다. 본 공법은 1992년 나가시마댐 가설제방 축조공사에 처음 채용되었다.

본 보고서는 CSG 공법에 대한 주요 공학적 특성, 특히 전단강도특성과 시공방법 등을 서술하고 있다. 다음은 CSG공업에 사용된 모래의 입도특성 및 시공실적을 보여준다.



<그림 3.1-13> CSG 공법에 사용된 현장토 발생토의 평균입도 (豊田光雄 등, 2000)

<표 3.1-17> CSG공법의 시공실적 (豊田光雄 등, 2000)

구조물의 명칭	약칭	준공년	제방 높이 (m)	제방 체적 (m^3)	현장토 특성		시공 함수비 (W_n)	첨가된 시멘트량 (kg/m^3)	혼합법
長島댐2차가설제	A	1992	14.9	30,000	하상퇴적물 모래A	G_a=2.6 Q=1.0%	5~7%	80	스켈톤
忠別댐1차가설제	B	1994	4.0	2,500	하상퇴적물 모래B	G_a=2.5 Q=1.0%	5~8%	60	스켈톤
久婦順川댐2차가설제	C	1994	12.0	13,650	하상퇴적물 모래C	G_a=2.6 Q=0.9%	4~7%	60	플랜트
摺上川댐전류공 옹벽제	D	1996	21.0	14,500	굴삭잔토 응탄암	G_a=2.4 Q=10%	15~18%	60	스켈톤
德山쿠야마댐상류호안	E	1998	7.0	15,000	하상퇴적물 모래	G_a=2.6 Q=1.8%	5~9%	60	스켈톤
川辺댐2차마감제	F	시공중	15.0	43,000	굴삭잔토 점판암	G_a=2.6 Q=1~3%	7~14%	60	플랜트

Ga: 표건 비중, Q: 흡수율, Wn:자연함수비, 스켈톤 : 스켈톤 버켓이 부착된 백호우

(나) 북해도 발생 불량토 종류

앞서 언급하였듯이 북해도 지역은 일본에서도 상대적으로 불량토 발생이 많은 지역으로 북해도 불량토의 개략적인 분포는 <그림 3.1-14>에 나타난 바와 같이 북해도의 남북축에 따른 형태로 신거고담대, 일고변성대가 있기 때문에 이 남북축 부근에는 풍화암이 불량토로서 존재하고 있다.

한편, 석수천(石狩川)을 시작으로 하는 유역에는 고함수점성토・점토분포가 되어 있으며, 북해도 화산이 많은 지역이기 때문에 그 면적의 약 절반은 화산회로 덮여져 있고 그 중에는 풍화하여 약해진 것이 있고, 그것들이 분포된 지구는 천세공항으로부터 고소목동부지구, 니세코지구, 도남에는 혜산지구, 도동에는 근훈지구가 있다. 세립분이 많은 자갈은 동해측의 도남지구와 일고산계에 분포되어 있다.

북해도 불량토 대책 매뉴얼에서는 자연지반을 굴삭한 그대로 자연함수상태에서 성토재료로 사용하는데 적합하지 않은 흙 및 성토완성 후 변화를 일으켜 일반 교통에 지장이 생기거나 하천제방에 문제가 발생할 것이 충분히 예상되는 흙을「불량토」로 정의한다. 이때 불량토 판정은 다음과 같은 몇 가지 특성을 고려한다.

○ 장비주행성 확보 여부
○ 성토 강도 저하 여부
○ 시공 및 시공 후 압축침하 발생 여부



<그림 3.1-14> 북해도 불량토 개략 분포도

① 점성토

점성토는 간극 내 수분량이 많아질수록 미립자 상호이동이 용이하게 되는 특성이 있다. 따라서 고함수비 점성토는 장비주행성 확보, 전단강도 등에 모두 문제가 되는 사례가 현장에서 자주 발생된다. 이러한 점성토 및 점토는 북해도의 대하, 석수천 등을 중심으로 한 하천유역 및 북해도 남북축을 따라 있는 풍화암지구의 표토에서 많이 발견된다.

② 풍화화산암

풍화화산암은 화산회 또는 화산쇄설물이 풍화로 인해 세립 점토화된 흙으로, 지역적으론 천세공항~고소목 동부지구, 니야코지구, 혜산지구, 천로지구 등에서 발견된다. 일본에서는 1985년에 램머무게 2.5kg, 3층 77회 다짐시료에 대한 콘지수 q_c를 측정하여 q_c= 5kgf/cm^2 미만을 풍화, q_c= 5kgf/cm^2 이상을 미풍화로 규정하였다.

③ 세립분이 많은 자갈

일반적으로 자갈은 토공에서 자주 사용되는 흙으로, 불량토로 문제를 삼으면 의문을 제기하는 현장기술자가 많다. 자갈은 입경 74㎛이하의 세립분을 함유정도에 따라 15%미만 및 15~50% 등으로 구분하여 다음과 같은 공학적 문제점이 있다.

세립분이 15% 미만인 자갈은 다짐 시 자갈에 의한 충분한 강도 및 투수성 등으로 양질의 성토재료이다.

○ 세립분이 15% 미만인 경우

- 역암에 사석(死石)이 포함되어 있으면 장비의 주행성 저하가 예상된다.

○ 세립분이 15%이상인 경우

- 자갈은 다짐곡선의 경우 최대건조밀도 ρ_{dmax}가 높고, 최적함수비 W_{opt}가 낮으면서 형상이 날카로운 특성이 있어, 다짐 관리가 어렵다.
- 4,760㎛ 체를 통과한 시료의 콘지지력 q_c가 작고, 장비주행성을 확인할 수 없다.

④ 풍화암

북해도에서 사용되는 풍화암에는 이암・혈암 등의 퇴적암계통과 풍화・세립화한 사문암질 점성토 등 심성암 계통이 있다.

○ 이암・혈암

풍화된 이암・혈암 등은 성토재료로서 사용하는 경우 다음과 같은 문제가 발생된다.

- 성토재료로 사용할 경우 슬레이킹(slaking)에 의한 세립화 등으로, 고성토 시 지하수위 변동이나 강우・융설수 침투 등에 따른 압축침하 및 원호활동 등이 발생할 수 있다.
- 함수비 2~5% 정도의 증가로 장비운행성이 확보되지 않거나 전단강도(c, ϕ)가 저하 된다.
- 세립 점토화 되어 자연함수비 22~25% 정도에서 습지불도저 장비운행성($q_c = 3kgf/cm^2$이상) 확보가 어려운 경우가 많다.

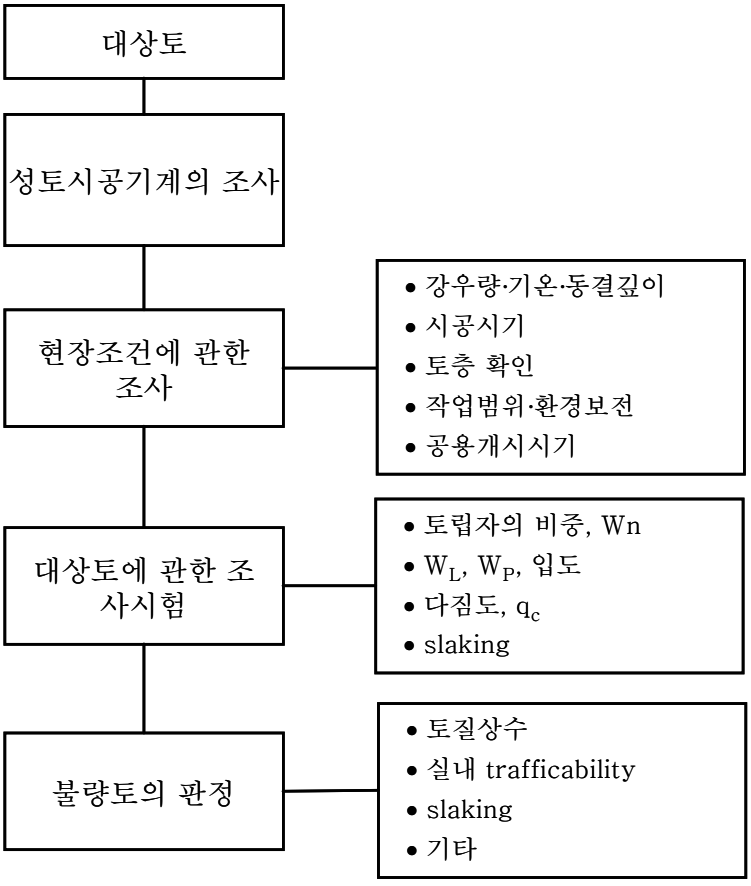
○ 사문암질 점성토

사문암질 점성토는 외견상 점성토이나 실제 변형 및 압축특성이 점성토에 가까운 흙으로서, 다음과 같은 문제점이 있다.

- 낮은 함수비로 포화한다.
- 융설수, 용수 등 물이 공급되면 쉽게 전단저항이 저하된다.

(나) 북해도 불량토 조사와 판정

현재 북해도에서 하상준설토를 이용한 제방축조공사의 설계 및 시공 실무에 직접적으로 적용되고 있는 불량토 매뉴얼 상의 불량토 조사와 판정은 어떤 건설기계로 시공을 할 것인가를 먼저 조사한 후 현장조건 중 기상, 시공시기, 작업범위, 환경보전, 공용개시시간 등을 검토하여 결정한다. <그림 3.1-15>에서는 북해도에서의 불량토 조사와 판정과 관련된 작업 흐름도를 보여준다.



<그림 3.1-15> 북해도에서의 불량토 조사와 판정과 관련된 작업 흐름도

① 불량토 조사시험

불량토 판정을 위한 조사시험은 크게 현지 토층확인 및 실내시험으로 구분된다.

토층확인을 하는 조사방법은 1) 시험굴(test pit), 2) 오거 보오링, 3) 스웨덴식 사운딩, 4) 보오링 등이 있다. 또한 실내시험은 다음과 같은 시험들이 수행된다.

- ○ 물리시험 : 비중시험, 흙의 함수량시험, 흙의 입도시험, 흙의 액성한계시험, 흙의 소성한계시험
- ○ 역학시험 : 동적 다짐시험, 일축압축시험, 장비주행성시험, 슬레이킹(slaking) 시험

② 장비운행성(trafficability) 시험

장비운행성 판정은 연약지반지역에서 군용차통과여부를 판정할 목적으로 미 육군기술본부 수로국(WES)에서 제안한 휴대용 콘 관입시험에 의해서 수행된다. 일반적 콘관입시험은 선단각 30°이고 최대 단면적 3.24㎠의 콘을, 인력으로 1㎝/sec 속도로 관입시킬 때의 저항으로부터 콘지수 q_c(단위면적당 관입저항, 단위 kg/㎠)에 의한 흙의 강도를 판정하는 사운딩 방법이다. <표 3.1-18>에서는 건설장비의 장비주행성에 기초한 콘 지수를 보여준다.

<표 3.1-18> 건설기계의 주행에 필요한 콘 지수

건설기계의 종류	콘 지수, $q_c(kg \cdot f/cm^2)$
초습지불도저	2이상
습지불도저	3 〃
중형 보통 불도저	5 〃
대형 보통 불도저	7 〃
스크레퍼도저	6 (습지형은 4이상)
피견인식 스크레퍼	7 〃
모터 스크레퍼	10 〃
덤프트럭	12 〃

③ 불량토 판정기준

불량토 판정은 다음과 같은 기준을 근거로 한다.

○ 토질상수에 따른 판정

- $\frac{\text{자연함수비}(W_n)}{\text{최적함수비}(W_{opt})} \geq 1.4$
- $\frac{\text{자연함수비}(W_{n)}}{\text{소성한계}(W_{P)}} \geq 1.5$
- 액성지수$(I_L) \geq 0.75$
- $I_L = \frac{\text{자연함수비}(W_n) - \text{소성한계}(W_p)}{\text{소성지수}(I_p)}$

○ 장비주행성에 따른 판정

- $q_c = 3kg \cdot f/cm^2$ 이하의 경우 사토처리

○ 슬레이킹(slaking)에 따른 판정

- Slaking이 일어나는 여부 확인

○ 성토재로서 이용하지 않는 흙

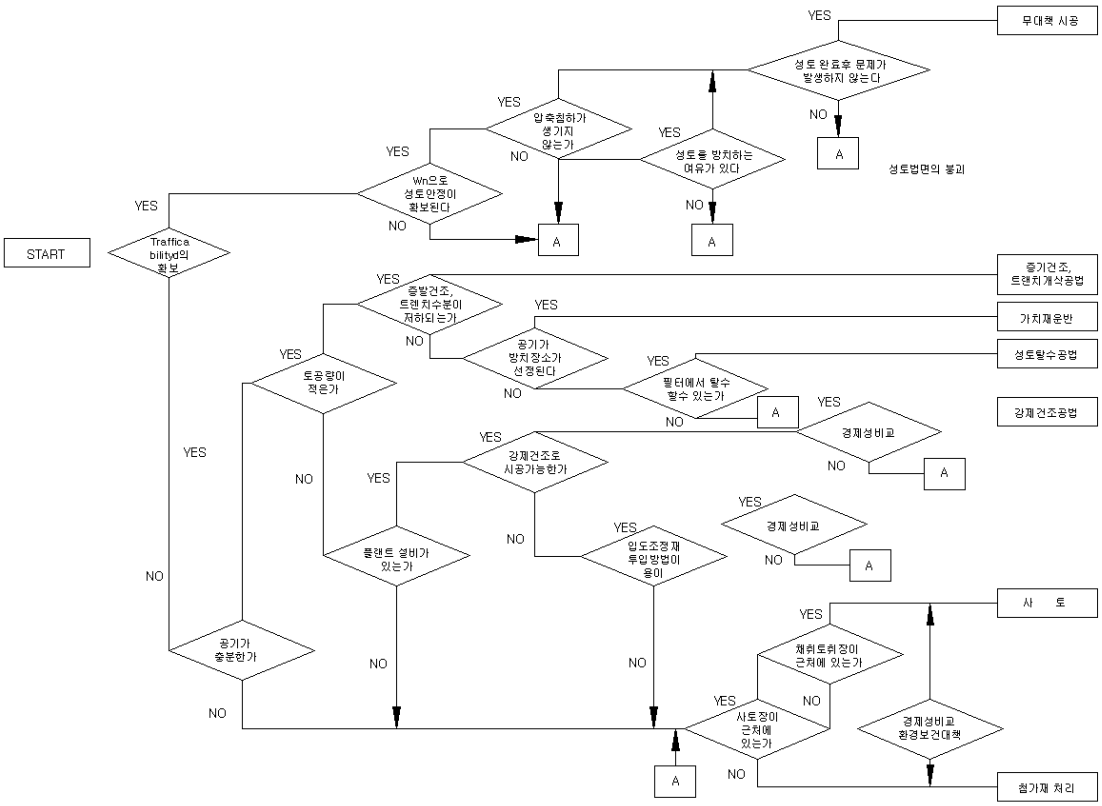
○ 흙 분류에 의한 불량토 판정

- 풍화화산회 VH2 (화산회질 점성토 II형)로 분류된 흙
- CH(소성이 큰 점토)로 분류된 흙
- W_n(자연함수비)가 W_L(액성한계) 보다 높은 경우

(다) 북해도의 불량토 대책공법

일반적으로 불량토 대책공법은 대상재료인 흙이 토립자, 물, 공기로 이루어져 있으며, 입경이 큰 역암에서부터 미세한 점토, 콜로이드 등 그 크기가 다양하고 자연상태에서 불균질한 재료로 존재하며, 함수량에 따른 공학적 특성, 화학적 성질 등이 동일하지 않기 때문에 대상재료인 흙의 특성에 따라 다양한 대책공법이 적용될 수 있다. 본 절에서는 북해도의 불량토 매뉴얼 상 불량토 대책의 흐름 및 공법의 종류에 대해서 정리하였다.

북해도 불량토 대책공법은 <그림 3.1-16>에서 보듯이 장비주행성에 대한 판단에 기초하여 수립되며, <표 3.1-19>에서 보듯이 함수비 규제, 입도조정 및 고밀도화 등과 관련된 8종류의 공법들이 일반적으로 사용된다.



<그림 3.1-16> 불량토 대책공법 선정 흐름도

<표 3.1-19> 불량토 대책공법 종류

원리	대책공법명	점성토		풍화화산회		세립분을 많이 포함하는 자갈		풍화암		비 고
		효과	공비	효과	공비	효과	공비	효과	공비	
함수비 규제	공기건조	△	○	△	○	△	○	×	−	소규모 토공에 대한 효과가 있음
	트랜치굴착	△	○	△	○	△	○	×	−	
	야적운반	△	○	△	○	△	○	×	−	
	강제건조	○	△	○	△	△	△	×	−	소규모 토공으로는 설비가 부피가 커져서 무리임.
	성토탈수	△	△	△	△	△	△	×	−	대규모 토공에서 무리가 있음
입도조정	입도조정	△	△	△	△	○	△	×	−	소규모 토공으로는 설비가 부피가 커져서 무리임.
안정처리 공법	시멘트안정처리	△	△	△	△	○	△	○	△	
	석회안정처리	△	△	○	△	○	△	△	△	

○: 효과 있음, 경제적 공사비용, △ : 효과 적음, 공사비용에 어려운 점 있음, × : 효과 없음

① 공기건조공법

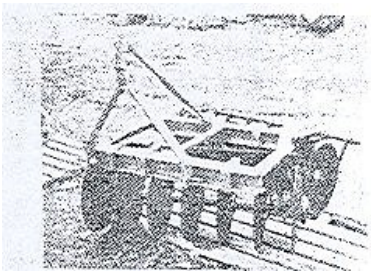
본 공법은 고함수비 점성토나 풍화 화산회를 성토재료로서 사용할 경우 자연지반 또는 성토용지 내에 포설하여 장시간 햇빛에 노출시켜 건조시키는 단순한 공법이다. 본 공법은 <그림 3.1-17>에서 보듯이 디스크 할로우 등으로 갈아서 될 수 있는 한 균일하게 흙을 건조시키는 것이 좋다.

또한, 본 공법은 북해도와 같이 적설 한냉지로 여름이 짧은 지역, 공기건조 중 예측하지 못한 강우 노출 등으로 토공량이 클 경우 적용의 한계가 있다.

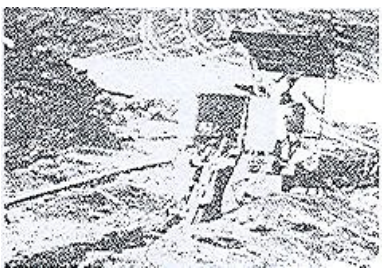
② 트렌치 굴착공법

트렌치 굴착공법은 <그림 3.1-18>에서 보듯이 트랜처 또는 유압 셔블을 이용하여 하상준설 매립지반에 트랜치를 굴착하여 지하수위 및 자연건조에 따른 자연함수비 등의 저하를 유도하는 공법이다. 본 공법은 자연지반 함수비를 저하시키는 경우 모래 또는 실트 지반에 유효하며, 고함수비 점성토나 풍화화산회의 경우 다소 효과가 있다.

불량토 대책공법으로서 본 공법은 단독으로 하는 것보다 공기건조공법과 병행하여 이용하는 경우가 많으며, 토공량이 큰 경우 적절하지 않다.



<그림 3.1-17> 디스크 할로우



<그림 3.1-18> 트렌치 굴착 공법

③ 야적공법

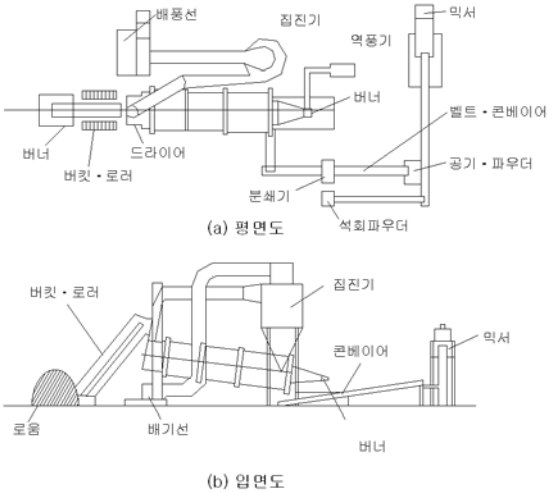
본 공법은 야적지가 확보되어 있어야 하며, 공비의 경우 야적지까지의 운반거리에 비례한다. 시공방법은 성토재료를 일정한 부지에 야적시킬 때 불도저를 이용하여 편평하게 하여 자연 건조시키는 방법과 필터재를 성토재 사이에 포설하여 자연용수시키는 방법이 있다.

본 공법은 운반비, 사토의 고른 포설 등의 작업공정이 있기 때문에 공기건조공법이나 트랜치 개삭공법보다 공비가 다소 비싸며, 필터재를 사용할 경우 더욱 공비가 높아진다.

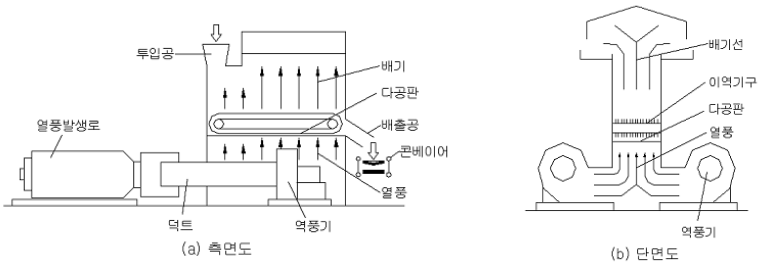
④ 강제건조공법

강제건조공법은 고함수비 점성토 및 풍화화산회에서 <그림 3.1-19>, <그림 3.1-20>와 같은 방법으로 가열처리하는 특수건조 플랜트 설비를 이용하여 강제적으로 함수비를 저하시키는 공법이다. 본 공법은 고속도로 또는 댐과 같이 공사기간과 경제성 등의 문제가 구체적으로 분명하다는 전제조건이 필요하다.

본 공법은 긴급성이 요구되는 토공현장에서 일반적이지는 않지만 첨가재 안정처리공법과 병행하여 사용하기도 한다. 본 공법은 공기건조나 트랜치 굴착공법과 달리 기후에 좌우 되지 않으나, 특수플랜트 설치 및 운반비 등으로 경제성을 고려하여 선정한다.



<그림 3.1-19> 점성토용 건조플랜트



<그림 3.1-20> 고속통기형 건조장치

⑤ 성토탈수공법

성토탈수공법은 고함수비 점성토, 풍화 화산회, 세립분 함유 자갈 등에서 필터재와 불량토를 샌드위치 형태로 시공하여 중력수를 배제하는 하는 공법이다. 이때 필터층 재료는 자갈, 쇄석 등 외 네트 및 시트와 같은 토목섬유가 있다.

본 공법은 필터재 가격, 성토고로 인한 장비주행성 등의 문제로 토공량이 커지면 무리가 있다.

⑥ 입도조정공법

자연상태 흙은 입도분포특성으로 성토재료, 도로의 노반, 동토억제층 재료 등으로 적당하지 않은 경우가 있다. 입도조정공법은 이러한 경우 세립토에 조립토를, 하층노반, 동토억제층 등의 조립토에 세립토를 혼합하여 최적의 입도분포특성을 유도하는 공법이다.

본 공법은 소규모 현장배합방식, 이동플랜트 믹서(<그림 3.1-21> 참조)방식, 대규모 중앙플랜트 방식(<그림 3.1-22> 참조) 등이 있다. 일반적으로 본 공법은 장비주행성 확보를 위해서 보통 조립토(2,000~74㎛의 모래입경)를 사용하며, 흙의 다짐밀도 및 전단강도(c, ϕ) 증진 효과가 있다. 입도조정 배합설계는 다음과 같은 방법들이 있다.

- ○ I_P(소성지수)를 이용하는 방법
- ○ 입도곡선을 이용하는 방법
  - Ruthfucks 방법
  - Driscoll 방법
- ○ 삼각좌표에 따른 방법
- ○ 입도분포 계산법

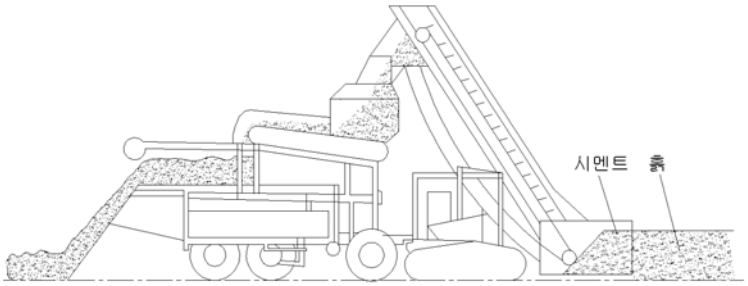
Driscoll 방법은 <표 3.1-20>에서 보듯이 2종류의 흙 A, B를 혼합하여 목표로 하는 표준입도범위에 들어가도록 유도하는 방법이다. 본 방법은 <그림 3.1-23>에서 보듯이 A, B 재료 개별 통과량을 직선으로 연결한다. 그 다음은 각 직선상에서 표준입도범위의 하한치 및 상한치를 각각 연결한다. 예로써, 74㎛ 체통과량의 표준

범위는 10~25%이며 A, B재료 배합비율은 횡축으로 나타난 좌표로부터 28% 동시에 25%일 때 75%가 된다.

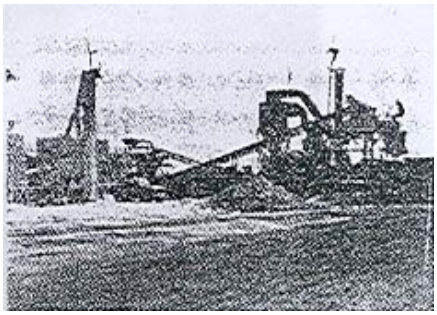
다음은 하한치, 상한치를 각각 연결한 2개의 파선이 가장 내측에 오는 점으로부터 수직으로 내려간 선의 사이가 B재료의 배합비율이 된다. 이 경우 B재료는 28~55%의 범위에 혼합시키면 된다.

<표 3.1-20> Driscoll 방법에 의한 혼합 입도분포 사례

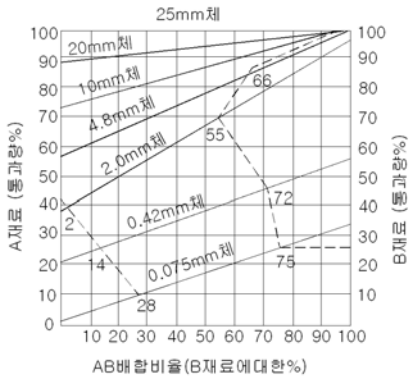
체	A재료	B재료	표준입도범위
25㎜	100	100	100
20	89	100	85~100
10	74	100	65~100
4.8	53	99	55~85
2.0	39	96	40~70
0.42	20	53	25~45
0.074	1	33	10~25
I_P	2	12	4~9



<그림 3.1-21> 이종플랜트 믹서



<그림 3.1-22> 중앙플랜트식의 플랜트전경



<그림 3.1-23> Driscoll의 도해법

⑦ 첨가재 안정처리공법

첨가재 안정처리공법은 첨가재 종류에 따라 시멘트안정처리공법, 석회안정처리공법, 기타 안정처리공법 등으로 구분된다. 본 공법은 1) 높은 강도 및 강성이 요구되는 경우, 2) 기상 영향을 최소화하고, 장기적 안정성을 고려할 경우, 3) 다짐 부족을 보충할 경우, 4) 초연약토의 개량을 필요할 경우, 5) 장비주행성을 확보할 필요가 있는 경우, 6) 굴삭 및 흙 운반을 쉽게 할 필요가 있는 경우 등에 사용된다.

첨가재 안정처리공법에 의한 설계강도는 일축압축강도 q_u로부터 구하며, 다음과 같은 값을 표준으로 한다. 시멘트안정처리공법은 6일간 공기 중 양생 후 1일 수침의 7일 강도를, 석회안정처리공법은 9일 공기 중 양생 후 1일 수침 후 10일 강도를 설계 강도로 하며, 두 공법은 27일간 공기 중 양생 후 1일 수침의 28일 강도를 반드시 측정한다.

○ 저성토(성토고 h=2.5m 미만), $q_u = 1.3kg \cdot f/m^2$ 이상

○ 고성토(성토고 h=2.5m 이상), $q_u = 1.5kg \cdot f/m^2$ 이상

한편, <표 3.1-21>에서는 각 토질별로 저성토 및 고성토별 첨가재의 종류, 첨가율 및 자연지반 건조밀도에 대한 첨가량 기준을 보여준다. 첨가재 안정처리공법은 첨가재와 대상토의 혼합과 전압을 충분히 실시하여 밀도 증가에 따른 첨가재 효과를 최대한 유도한다. 일본 첨가재 안정처리공법 관련 혼합방법은 <그림 3.1-24>과 같이 1) 원위치혼합 방식, 2) 중앙플랜트 방식, 3) 자연지반혼합 방식 등이 있다.

○ 시멘트안정처리공법

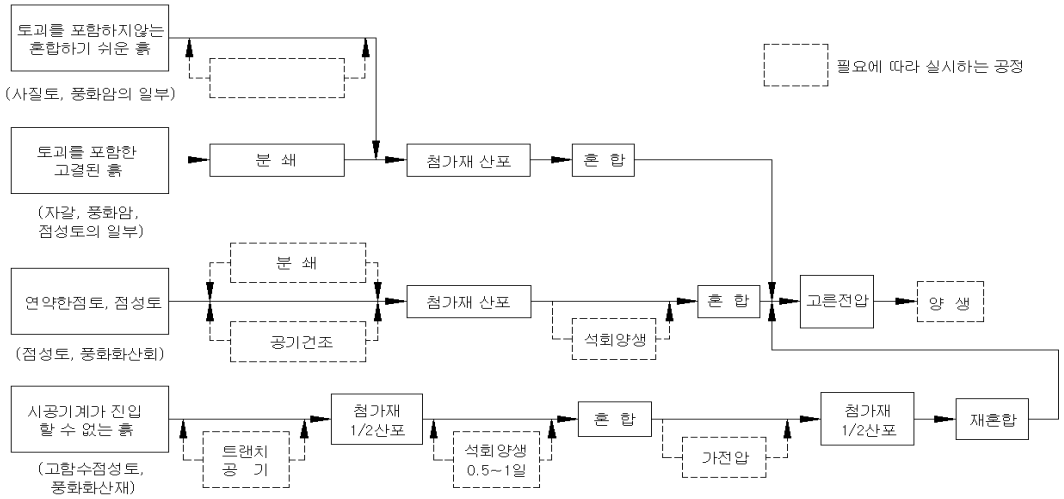
시멘트안정처리공법은 포졸란이나 수화반응을 이용하여 지반물성을 개량하는 것이다. 본 공법은 가장 많이 사용되어 도로의 노상, 노반에서 시공되는 경우가 많다. 최근에는 조립토 뿐만 아니라 세립토에 시멘트를 혼합하는 기반처리 심층혼합 등에 사용되어 있고, 성토재료에도 시멘트를 첨가하여 개량하는 경우도 많아지고 있다.

일반적으로 노상, 노반 및 성토재료와 시멘트 혼합재를 소일시멘트라 한다. 소일시멘트의 설계 및 시공의 주요요소는 흙의 성질, 물량, 시멘트량, 다짐방법, 혼합방

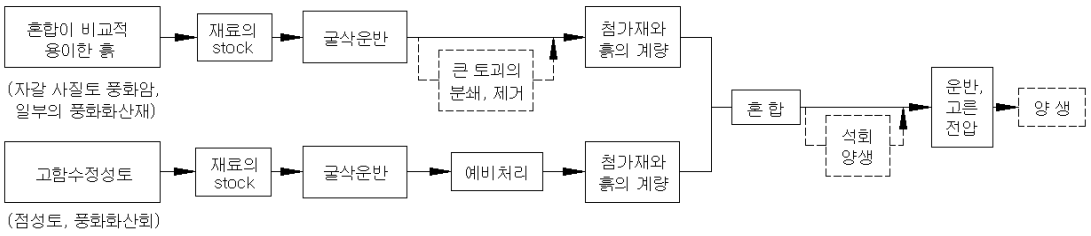
법 등이다.

<표 3.1-21> 토질별 첨가율 기준

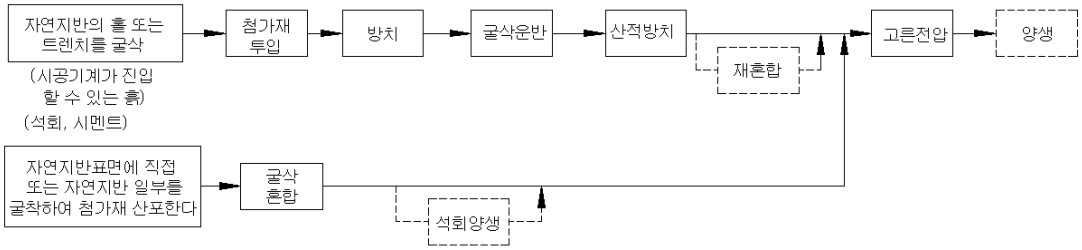
성토조건 / 토질명	저성토 $h=2.5m$ 미만 $q_u=1.3kg\cdot f/cm^2$			고성토 $h=2.5m$ 이상 $q_u=1.5kg\cdot f/cm^2$			비 고
	첨가재	첨가율(%)	자연지반건조 밀도에 대한 첨가량 (kg/m^3)	첨가재	첨가율(%)	자연지반건조 밀도에 대한 첨가량 (kg/m^3)	
고함수점성토	시멘트	4.0	44.4	시멘트	5.0	55.5	$\rho_d=1.109t/m^3$
	〃	15.0	160.7	〃	17.0	182.1	$\rho_d=1.071t/m^3$가많을 때는 생석회와 비교
풍화화산회	생석회	1.5~2.0	21.0~28.0	생석회	1.5~2.0	21.0~28.0	$\rho_d=1.400t/m^3$가적을 때는 시멘트와 비교
	〃	3.0~5.0	31.8~53.0	〃	3.0~5.0	31.8~53.0	$\rho_d=1.060t/m^3$가적을 때는 시멘트와 비교
	〃	15.0	97.5	〃	15.0	97.5	$\rho_d=0.650t/m^3$가적을 때는 시멘트와 비교
세립분을 많이 포함하는 자갈	시멘트	1.5~3.0	23.6~47.1	시멘트	1.5~3.0	23.6~47.1	$\rho_d=1.570t/m^3$가적을 때는 시멘트와 비교
풍화암	〃	2.0~3.0	33.4~50.1	〃	2.0~3.0	33.4~50.1	$\rho_d=1.670t/m^3$가적을 때는 시멘트와 비교



(a) 원위치혼합방식



(b) 중앙플랜트 방식



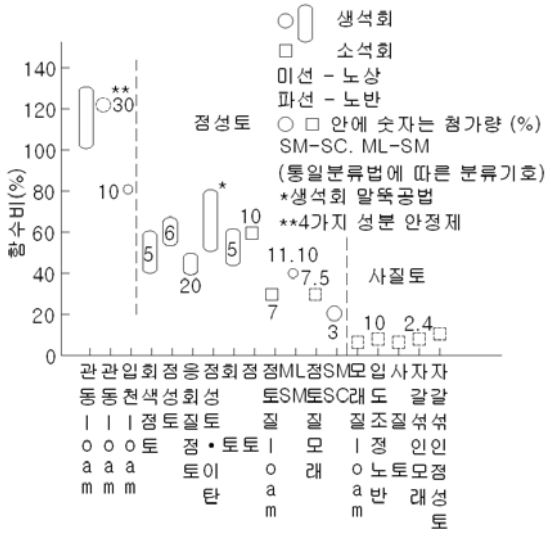
(c) 자연지반혼합 방식

<그림 3.1-24> 안정처리공법의 첨가재 혼합방식

○ 석회안정처리공법

석회안정처리공법은 석회로 인한 포졸란 반응에 의한 토질개량이다. 석회에는 소석회와 생석회가 있으며, 유럽, 미국 및 중국은 현장토사의 함수비가 일본과 비교하여 낮기 때문에 소석회를 이용하고, 일본은 고온다습한 지역특성에 기인하여 생석회를 이용하는 경우가 많다. 생석회는 물과 반응하여 소석회로 변화하고, 그때 발열작용 동반으로 수분에 의한 열 발산이 있어 고함수비 흙에서 더 큰 개량효과가 있다.

일본에서는 <그림 3.1-25>에서 보듯이 함수비 40%이상의 경우 생석회, 40%이하의 경우 소석회를 사용한다.



<그림 3.1-25> 석회안정처리에 있어서의 생석회, 소석회의 사용상황

○ 기타 첨가재 안정처리공법

기타 안정처리공법으로는 아스팔트 종류의 안정처리공법이 있는데 이것은 도로 노반 및 교통량이 적은 자갈도로의 방진처리를 목적으로 하기 때문에 불량토와 같은 함수비가 높은 흙의 사용은 사실상 무리가 있다.

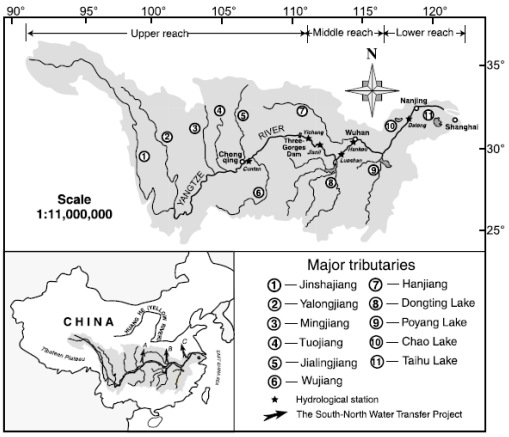
(4) 중국

(가) 하상토 발생 실태

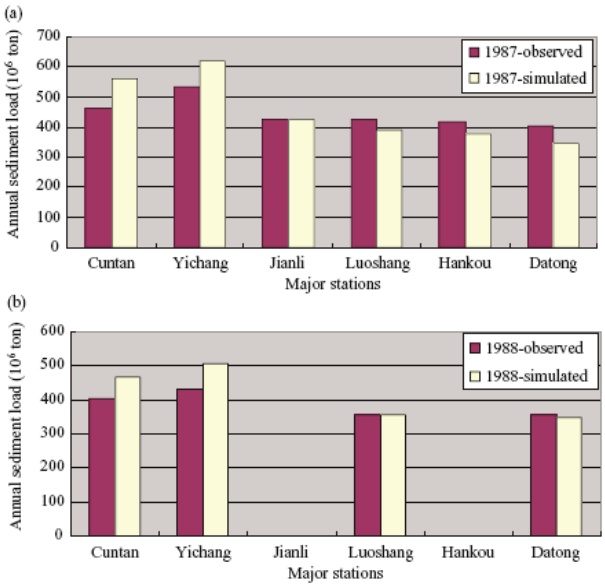
중국은 통계에 의하면 전국 수토 유실 면적의 경우 356만㎢로서 전체 국토면적의 37.1%에 이를 정도로 토양유실이 심한 지역이다. 특히 황허(黃河)는 진흙과 모래가 많은 하천으로 자진 범람으로 인해 동쪽 타이항 산맥~서쪽 칭하이 르웨산[日月山(일월산)], 남쪽 친링산맥 동부 푸뉴산맥~북쪽 만리장성에 이르는 약 40만 ㎢에 이르는 지역이 토지 총면적의 80%에서 토사 유실이 발생되고 있다. 황허는 1㎢당 4000톤~10000톤 가량의 토사유실로, 황허강 중류 하상이 매년 10~20cm씩 높아지며, 정저우 지역의 하류의 경우 3~10m 이상의 천정천(天井川)이 발생된다. 이 밖에 융딩허(永定河), 랴오허 등의 하상토가 모래인 강하류 지역들은 하상이 지속적으로 높아지고, 수재가 그치지 않고 있다.

중국은 1998년에 폭우와 홍수에 의한 창쟝(長江, 양자강), 쑹화쟝(松花江), 넌쟝 유역의 홍수 재해와 근해 적조, 내몽고(內蒙古) 및 신쟝 지역의 흙먼지 폭풍 등의 자연재해가 빈번히 출현하였다. 모의실험에 의한 양쯔강 유사부하량은 1998년 대홍수 기간 중에 상류 배수유역에서 약 930백만 톤, 중류 유역에서 약 520백만 톤, 하류 배수유역에서 약 720백만 톤으로, 지난 50년간 홍수기 평균의 거의 6.5배에 달한다. <그림 3.1-26>에서는 양쯔강 유역 현황과 유사부 유량 및 유량특성을 보여준다.

중국은 1994년 12월 총 공사비 244억 위엔을 들여 양쯔강 중류지역인 후베이성 싼샤에 길이 2.5km, 제방높이 185m, 정상저수수위 175m, 총저수량 393억 ㎥인 싼샤댐을 착공했다. 중국 싼샤댐 건설은 중요 긍정적 효과의 경우 홍수조절이, 부정적 효과의 경우 유속이 느려져 많은 오염물에 의한 수질오염 및 토양오염의 가속, 막대한 양의 하상토 퇴적으로 인한 하천 수심 저하, 타 지역(광동지방 1000개 저수지 고갈)의 가뭄으로 인한 물부족 사태 야기 등이 있다.



(a) 양쯔강 유역 현황도



(b) 유사부유량 특성

<그림 3.1-26> 양쯔강 유역 현황 및 유사부유량 특성(2004, MWR)

한편, 중국은 더우푸짜(豆腐渣)공사라 하여 두부찌꺼기와 거북이 알 등이 들어간 불량토를 사용해 제방을 쌓고 있어 매년 문제가 되고 있으며, 상류 유역에서의 인간 활동 증대가 하류부 및 해안지역으로 이송된 대규모 양의 유사 오염원에 되어 심각한 사회 문제가 되고 있다. 이 밖에 부적절한 법 시행과 관련 법·규정의 부족으로 인해 문제도 들 수 있다.

(나) 하상토 관련 정책 분석

중국은 과거에 하상토를 사용하여 제방을 축조한 경험과 그에 따른 제방붕괴 경험을 가지고 있다. <그림 3.1-27>는 황하강의 연차별 제방 축조 단면을 보여준다. 중국은 <그림 3.1-27>에서 보듯이 1970년도 까지 하상토를 이용하여 제방 축조를 하였으며, 그 이후의 경우 하상토 사용을 자제 하고, 중국수리부에서 제방축제재료 선정에 직접적으로 관여하고 있는 실정에 있다. 한편, 중국 하상토 활용의 사회적 문제는 중국수리부 장관 왕수청(汪恕誠)이 『중국에는 흙모래(하상토)가 많이 퇴적된 강 하류지역이 광범위하게 발달되어 있으며, 물과 흙모래 관련 문제가 국민경제의 지속적 발전에 심각한 장애로 작용하고 있다』고 토로했을 정도로 심각하다.

중국 수자원 관련 정책입안자는 대규모 토양침식지역의 형성 원인이 급속한 경제 및 인구성장에 기인한 것으로 보고, 1988년 물과 토양보존사업(Water and Soil conservation project)을 통하여 양쯔강 상류 지역의 12,000개 저수지(소요예산 2.4억 달러, 소요저수량 300억㎥ 이상) 건설 방안을 수립하여 시행하고 있다. 그 효과는 저수지 건설에 다른 1.24억 톤의 흙 침식을 방지하여 양쯔강 협곡 침식지역을 15%(50만 ㎢) 줄어 든 것으로 나타났다.

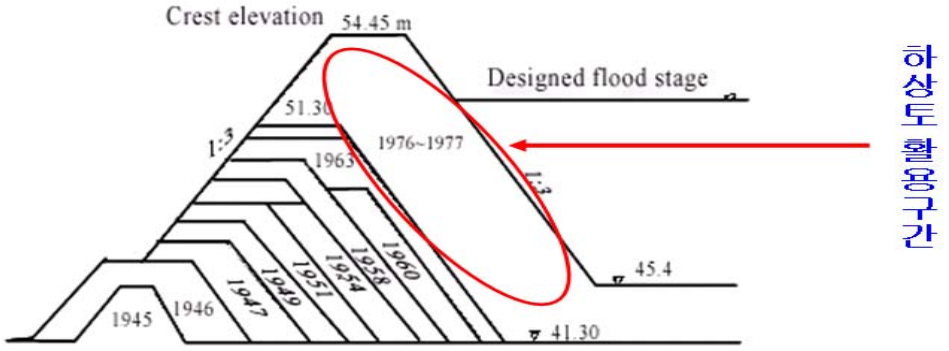
최근 수문학모니터링센터는 최근 발표된 양쯔강 침식 보고(Yangtze River Silt Bulletin)에서 『양쯔강 침식량의 경우 지속적으로 감소하고 있으며, 평균 모래량이 2003년도 위챵시(Yichang City)에서 59%까지, 상하이시에서는 45% 저감되었다』고 보고했다.

또한, 중국은 <중화인민공화국 토지관리법> 개정을 통하여 미비된 법 및 규정 정비를 통한 토지관리 강화 방안을 적극적으로 모색하였다. 본 법안을 기초로 각 지역은 법규에 의한 엄격한 토지관리를 수행하여 토지이용에 대한 거시적 조절 효과를 거두었으며, 토지이용 년도 계획과 건설용지 심사 허가 등의 심의를 통하여 정책의 계획적 추진을 보장하였다.

한편, 2004년 11월 30일 중국 정부와 유네스코는 베이징에서 <중화인민공화국 정부와 유네스코의 국제 흙 모래 연구 훈련 센터 설립에 관한 협정>을 체결했다. 중국 수리부 장관 왕수청(王恕誠)과 유네스코 총간사인 松浦晃一郎은 각각 중국 정부와 유네스코를 대표하여 합의에 서명했다.

지난 20여 년 동안 중국 정부와 유네스코의 협력 하에서 흙모래 센터는 유엔 관

련 조직 및 많은 국가와 손잡고 여러 가지 국제, 지역, 쌍방 및 다변 협력 연구를 벌여왔다. 2004년 10월에는 세계 흙모래 연구 학회가 중국에서 정식으로 설립되는 등 불량토에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.



<그림 3.1-27> 하상토를 이용한 연차별 제방축조 사례(2004, MWR)

다. 소결론

본 절에서는 하상토를 활용한 하천제방 축조 등의 건설재료로서의 재활용에 관한 국내외 연구실적을 조사·분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 국내 연구 동향은 하상토 오염 및 활용에 관한 실태 조사, 시멘트로 안정처리한 하상토의 공학적 특성 평가 등 기초적인 연구가 수행된 수준으로, 하상토 활용을 위한 구체적인 기법이나 대책 등을 제시하지 못하는 열악한 실정에 있는 것으로 평가되었다.

(2) 외국에서는 하상토 조사, 실내 및 현장평가방법, 안정처리를 위한 대책공법, 시공 및 설계방법, 관련된 품질관리기준, 장비, 오염토 처리 기준및 시험방법 등을 구체적으로 제한하고 있다.

(3) 또한, 유럽에서는 하상토 처리에 관하여 국가 간의 긴밀한 협력체계 구축, 환경영향성 평가, 하상토 처리/처분 시스템 구축, 경제성 분석 등의 총괄 관리 프로그램을 국가간에 공유함으로써 합리적인 하상토의 활용 및 처리가 국가 공조체계속에서 실질적으로 이루어지는 것으로 나타났다.

(4) 따라서, 국내에서는 하상토 적용 가능성을 평가하기 위하여 지반공학 및 환경적 측면을 고려한 체계적인 평가시험, 환경영향 평가시험, 품질관리, 모니터링시스템 등 하상토 활용을 위한 구체적인 설계 및 시공 기준의 보완이 요구된다.

3. 하상토 발생 메커니즘 및 현황 분석

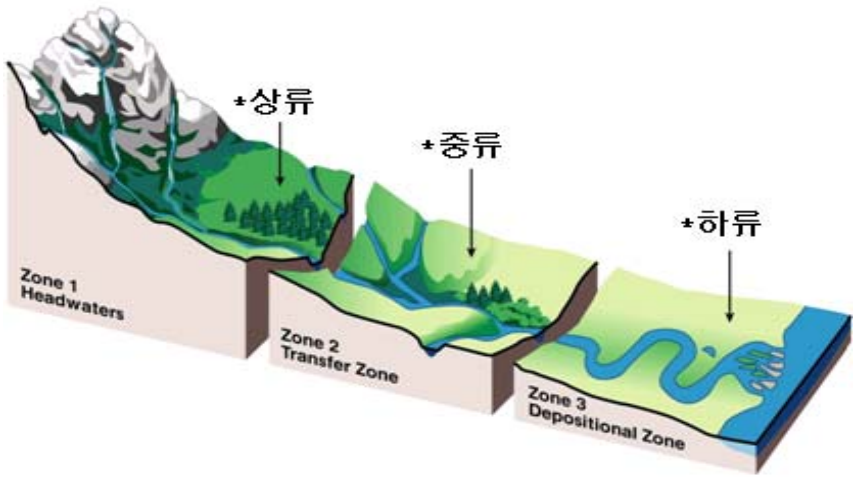
가. 하상토 침식 및 퇴적 메커니즘

하상토의 올바른 활용을 위해서 하상토의 발생과 이동 특징을 우선적으로 파악하는 것은 매우 중요하다. 본 절에서는 하상토의 침식 및 퇴적 메커니즘을 분석하여 하상토 발생과 퇴적량에 대해서 알아보고 우리나라 실정에 대해서 조사하였다.

(1) 하상토의 형성과 이동

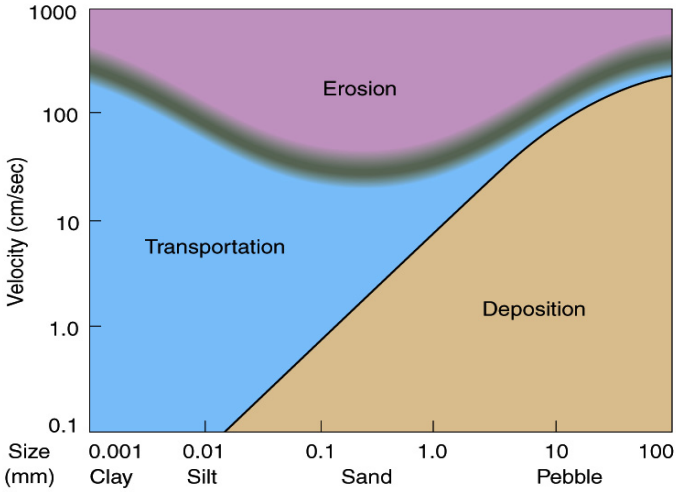
하천에서의 퇴적현상은 흐르는 물에 의한 유사의 침식, 이송, 및 퇴적과정을 말한다. 하천에서의 침식현상의 공학적인 중요성은 하상변동, 제방의 침식, 하천의 안정성 등 광범위하게 걸쳐있다. 따라서 한 하천 유역에 수력발전, 관계·배수, 상수취수, 홍수조절시설, 주운 등 수자원 프로젝트를 계획하는 경우 유사 즉 하상토 문제는 필수적으로 고려되어야 한다.

하천은 다음 <그림 3.1-28>에서 보는 바와 같이 하천의 상류, 중류, 하류로 구성되어 지고, 상류에서는 침식작용이 중류에서는 이송작용이 하류에서는 퇴적작용이 발생하게 된다. 이러한 침식, 이송, 퇴적작용의 반복에 따라 하상토는 발생되고, 상류, 중류, 하류에 입자의 크기순으로 하상토가 퇴적된다. 주로 하상토는 하류 지역의 흙을 주로 사용하지만, 상류, 중류 지역의 흙이 사용하기도 한다.



<그림 3.1-28> 하천의 일반적 개요

<그림 3.1-29>는 균등한 흙 입자별 침식-퇴적 관계특성 곡선(Hjulstrom, 1935)으로 상·중·하류에서 발생되는 침식, 이송, 퇴적의 상관관계를 제시한 도표이며, 이다.



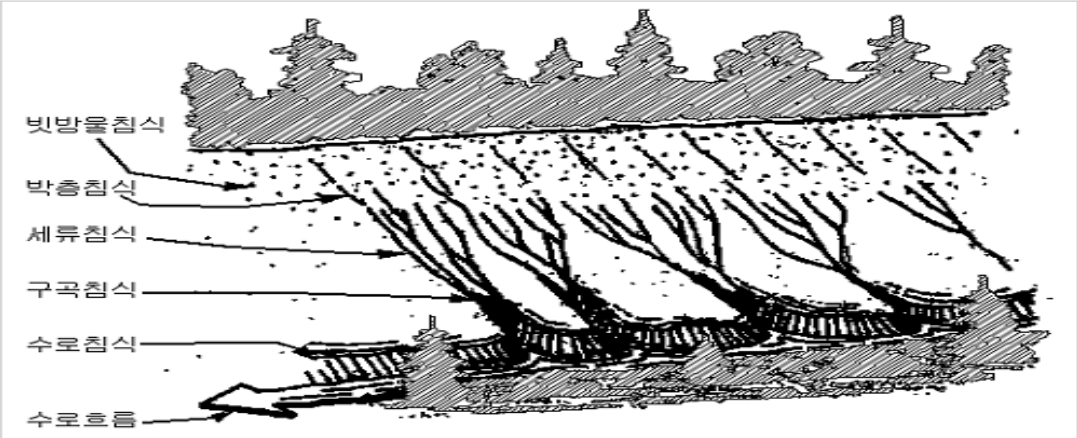
<그림 3.1-29> 균등한 흙 입자별 침식-퇴적 관계특성 곡선 (Hjulstrom, 1935)

(2) 하상토의 침식 및 퇴적과정

하천 침식은 자연적 요인과 인위적 요인으로 나뉠 수 있다. <그림 3.1-30>에서는 유역과 하도에서 주로 발생하는 자연적 요인에 의한 침식과정을 보여준다. 침식은 유역 내 강우가 시작되면 산지의 경우 강우로 인한 지표면 빗방울침식(Raindrop Erosion)이 일어난 후 지표면을 흐르는 얇은 흐름에 의해 지표면 토양이 얇게 벗겨지는 박층침식(Sheet Erosion)과 작은 골이 생기는 세류침식(Rill Erosion)이 발생한다. 이러한 박층침식과 세류침식은 가속화 되면 인간의 손으로 되 메울 수 없는 큰 골이 생기는 구곡침식(Gully Erosion)을 발생시킨다. 또한, 산지를 벗어난 하천에서는 흐름이 일정한 물과 토사가 혼합된 유사가 흐르면서 하천변을 침식시키는 수로침식(Stream and Channel Erosion)이 발생된다.

또한, 하천내 지표면 침식의 대표적인 것은 하천 유량을 인위적으로 바꿈으로써 생기는 하도침식(Channel Erosion)이 있다. 댐 하루 하상 저하나 첩수로의 건설로 인한 하상 침식 등은 이에 해당된다. 또한 피복공이 안 된 흙 수로 침식은 수로 기능에 직접적인 영향을 주기도 한다. 일반적으로 하도의 폭과 깊이는 하류로 갈수록

폭이 넓어지고 깊이가 깊어지는 것이 일반적이지만 지역적인 차이가 있기 때문에 불규칙하게 나타나기도 한다. 대체로 하방침식(Downward Erosion)과 측방 침식(Lateral Erosion)이 진행되면서 하도의 폭이 넓어지고 깊이가 깊어진다. 하도의 평면 형태는 곡류 하도(Meandering), 직선상 하도(Straight channel), 망상 하도(Braided channel) 등으로 구분된다.



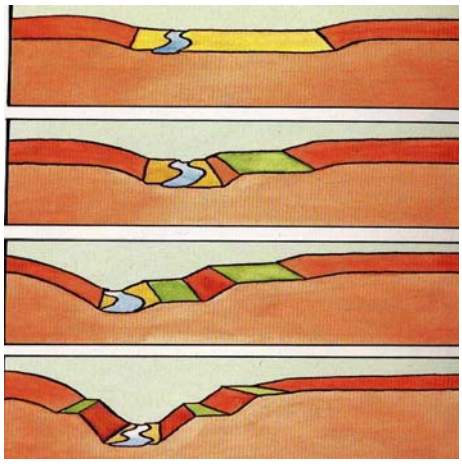
<그림 3.1-30> 유역과 하도에서 지표면의 침식 발생

(자료 : http://www.ecostar.co.kr)

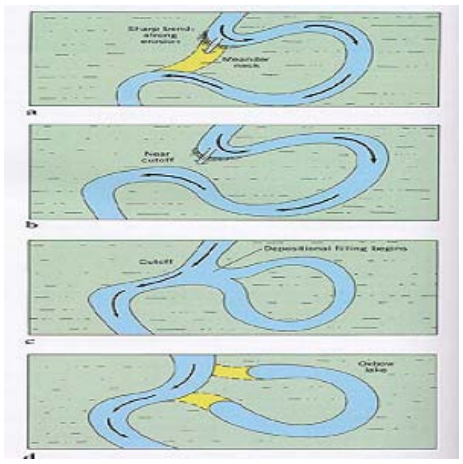
하방침식은 <그림 3.1-31>과 같이 유년기 하천 또는 하천의 상류에서 활발히 진행되는 침식작용의 하나이다. 다량의 조립물질이 하상 위를 통과하며 기반암을 깎는 마식작용이 가장 큰 역할을 하며 굴식과 용식도 보조 역할을 한다. 하방 침식이 활발해지면, 하상이 깊이 파이며 하천 종단면의 구배가 완만해진다. 유년기 지형의 하천은 하곡의 경사가 급한 관계로 하방침식이 성하여 협곡을 형성한다. 장년기 이후에는 하방침식이 약해지면서 측방침식이 커지고, 운반작용이 활발해진다. 지반운동이 부활되어 하상의 경사가 커지면 침식이 부활되어 하방침식이 심해진다. 또한, 능선을 횡단하는 선행성 하천은 산맥의 융기 속도와 같은 속도로 하방침식이 작용되며, 그 곳에 횡곡이 형성된다.

측방침식은 <그림 3.1-32>와 같이 하천에 의한 지형의 침식작용 중의 한 유형을 말한다. 보통 하천의 하방 침식이 활발하게 진행되어 그 하천이 평형 상태에 도달하게 되면서 하방침식은 끝나고, 그 대신 측방 침식이 시작된다. 이것은 주로 하

곡을 좌우로 넓히는 작용이다. 즉 유로를 좌우로 이동시켜가며 곡류 하천을 형성하고 곡저를 넓히면서 하천 양안에 넓은 범람원 즉 충적평야를 형성하게 된다.

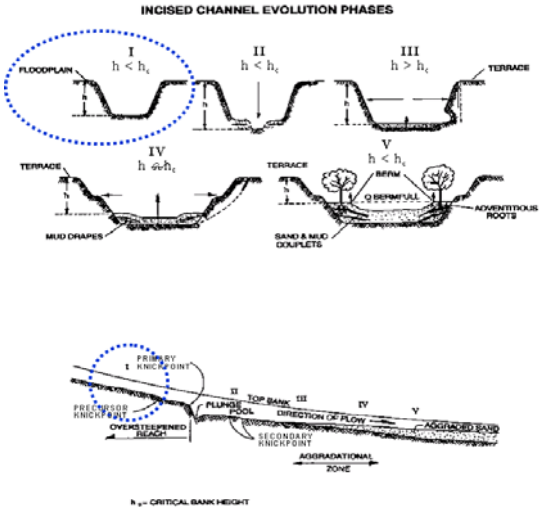


<그림 3.1-31> 하방침식

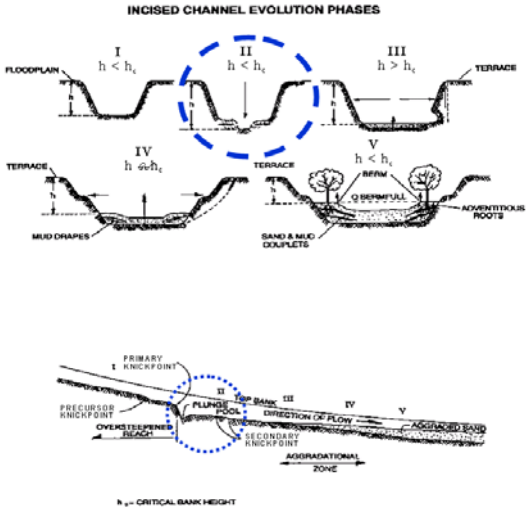


<그림 3.1-32> 측방침식

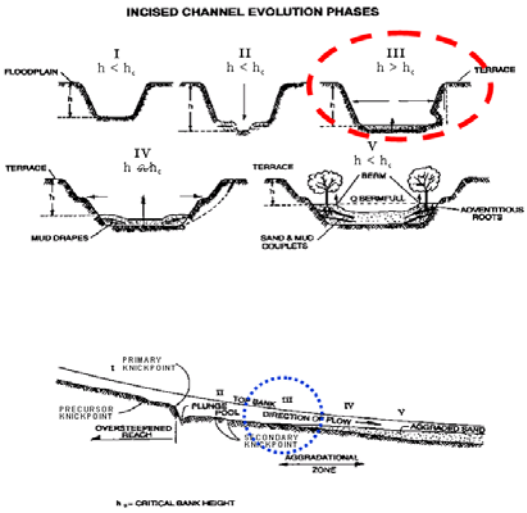
한편, 하천에서 발생하는 유사의 퇴적과정은 오랜 시간을 걸쳐 진행되게 된다. 이러한 과정을 하천 구간 별 종단면과 횡단면으로 살펴보면 다음 <그림 3.1-33>과 같다.



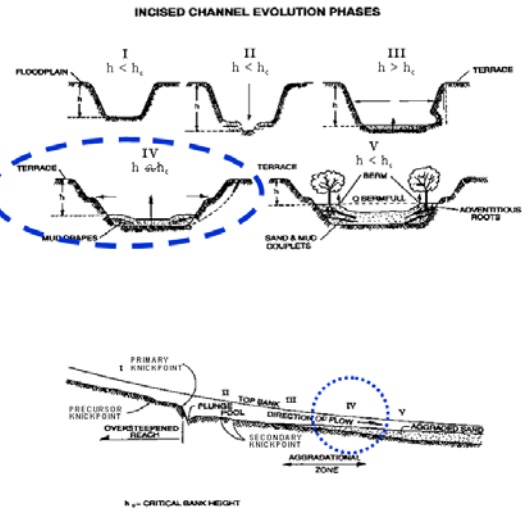
(a) Ⅰ 구간



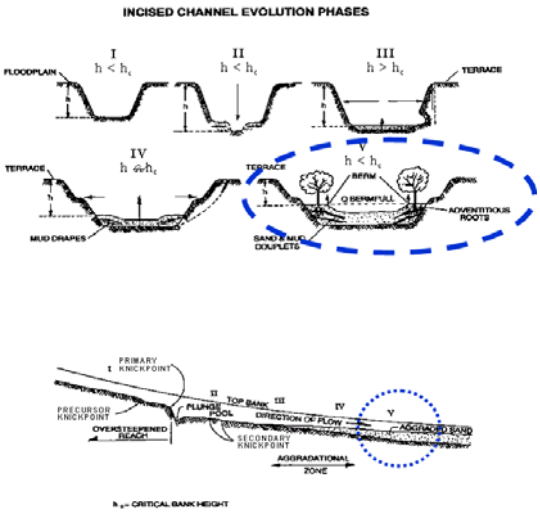
(b) Ⅱ 구간



(c) Ⅲ 구간



(d) Ⅳ 구간



(e) Ⅴ 구간

<그림 3.1-33> 구간 별 유사의 퇴적과정

<그림 3.1-33> (a)는 하천이 발생 초기에 발생하거나 하천에 상류에 많이 나타나는 현상으로 하천이 확장하기 위한 초기 단계에 해당된다. <그림 3.1-33> (b)는 하천 확장이 시작되는 단계로 하천은 시간이 흐름에 따라 확장을 하기 시작하면 횡방향 보다는 종방향으로 확장이 먼저 시작된다. 종방향으로 먼저 확장되는 단

계를 보이고 이 단계까지는 높이가 한계수심보다는 작다. (H<Hc) <그림 3.1-33> (c)에서는 지배적인 단계가 급격한 횡으로 확장으로, 횡으로 급격하게 확장이 되면, 유량 증가가 일어나고, 유사가 하천으로 쌓이게 된다. <그림 3.1-33> (d)단계에 들어오면 횡으로 확장이 급격하게 줄어들고 새로운 평형을 이루게 된다. <그림 3.1-33> (e)단계에 들어오면 유사의 공급과 유사의 이동에 동적인 평형을 보이게 된다. 이러한 <그림 3.1-33>단계의 과정을 거치면서 유사는 하천에 쌓이게 되고 시간의 흐름에 따라 하상토가 발생되는 것이다. 이렇게 발생되는 하상토 양은 일반적으로 다음 절과 같이 산정하고 있다.

(3) 하상토의 퇴적량 산정

(가) 하천에서 유사량 산정공식 적용

한 하천에서 총유사량을 추정하는 방법으로는 실측을 통한 직접적인 방법과 몇 가지 유사 및 수리량 자료를 이용한 계산에 의한 간접적인 방법이 있다. 전자는 직접 유사량과 수리량을 측정하는 방법으로 가장 신뢰도가 높은 방법이나 시간, 노력, 비용이 많이 소요되며, 충분한 신뢰도를 가진 소류사 측정에는 아직 측정방법의 개선이 요구된다. 또한 간접적인 계산에 의한 방법은 각 공식의 계산결과가 천차만별일 경우가 많아서 같은 자료를 적용시켜도 적용 공식에 따라 그 계산 결과는 수 십 배에서 수 백 배까지 차이가 나는 경우가 있다.

한편, 하상토의 발생량을 파악하고 적용하기 위해서는 입경분포별 계산도 가능하고 어느 정도 국내에 적합한 산정공식을 선정할 필요가 있다. 다음 <표 3.1-22>은 과거에 적용되었던 유사량 공식들의 특징을 나타낸다.

이러한 공식들은 직접측정에 의한 방법과 간접계산에 의한 방법을 절충한 것으로 소위 '일부추정+일부계산' 방법이 있다. 그 중에 가장 보편적으로 사용되는 방법이 수정 아인슈타인 방법이이며, 직·간접측정에 의한 방법과 절충법의 특징을 요약하면 <표 3.1-23>와 같다.

현재까지 국내·외적으로 하천에서의 유사량 관련 경험식들이 많이 제시되고 있기는 하지만 물의 역학과 유량-유사량 관계 및 현장에서의 검증이 상당히 복잡하여 아직까지도 만족할 만한 관련공식이 제시되어 있지는 않은 현실이다.

<표 3.1-22> 각 유사량 공식의 특징

공 식 명	발표 년도	산정유사량	공식형태별 분 류	입경분포별 계 산	비 고
Einstein	1950	소류사량 +부유사량	확산-이송형	가능	'Einstein의 소류사함수' 라고도 함
Colby	1964	총유사량	경험식	불가능	도해법
Engelund & Hansen	1967	총유사량	에너지모형	불가능	상사이론에 기초
Toffaleti	1968	소류사량 +부유사량	확산-이송형	가능	Einstein공식의 대폭적인 수정
Shen & Hung	1971	총유사량	경험식	불가능	다중회귀분석 방법에 의한 경험식
Acker & White	1973	총유사량	에너지모형	불가능	차원해석에 의한 준경험식
Yang	1973 1979	총유사량	에너지모형	선택적	Stream Power개념과 회귀분석에 의한 준경험식
Ranga Raju	1981	총유사량	경험식	불가능	하상마찰응력에 기초한 준경험식
Rijn	1984	소류사량 +부유사량	확산-이송형	불가능	준해석식

<표 3.1-23> 총유사량 추정 방법들의 비교 분석

구 분	직접 실측에 의한 방법	간접 계산에 의한 방법	'실측+계산'방법
수행방법	부유사 채취기 및 소류사 채취기로 실측	수리량 및 하상토 특성자료를 유사량 공식에 대입하여 계산	부유사 실측 자료를 이용하여 미측정 구간의 유사량을 포함한 총유사량 산정
장 점	신뢰도 높음	비용, 시간, 노력 적게 듦	신뢰도 높음
단 점	비용, 시간, 노력이 많이 들며, 소류사측정이 어려움	신뢰도가 낮으며, 적절한 공식의 선정이 어려움	소류사 추정이 불필요 한 점 이외에는 직접 실측방법과 동일
필수 자료	부유사량, 소류사량, 수리량	하상토재료, 수리량	부유사량, 하상토재료, 수리량
대표적인 방법 및 기기	P-61부유사채취기, Helly Smith소류사채취기	Engelund & Hansen 공식, van Rijn공식	수정아인슈타인방법

한편, 유사량 산정공식 개발에 관한 연구로는 19세기말경 Duboys의 소류사량 공식으로 시작되는데, Duboys의 소류사공식은 한계소류력의 개념에 기초를 두고 있으며, Schoklitsch(1935)공식이나 Shield공식(1936)에 영향을 주었고 1930-40년대 스위스의 연방공과대학(Swiss Federal Institute of Technology)에서는 Meyer-

Peter의 연구진에 의하여 소류사량 추정공식인 Einstein(1934), Meyer-Peter(1934), Meyer -Peter & Muller공식(1948)을 개발해 내었다. 미국에서 Einstein에 의해 발표된 소류사함수(Bed Load Function)는 충적하천에서의 총유사량을 산정하는 최초의 본격적인 모형인데, 소류사와 부유사를 각각 구분하여 추정하고 다시 합하여 총유사량을 산정하는 기법을 도입하였다. 그리고 Laursen(1958) 은 총유사량을 하상전단응력과 한계소류력의 함수로 표시되었고, 하천의 수리변량과 하상토 특성의 무차원함수로 나타내었다.

총유사량산정에 있어서 유수력(Stream Power)개념을 도입하여 Engelund & Hansen(1967)과 Ackers & White(1973)공식을 개발하였으며, 특히 Yang의 경우는 평균유속과 하천경사의 곱인 단위 유수력(Unit Stream Power) 함수를 개발하였다.

1970년대 이후의 총유사량 개발공식은 컴퓨터의 영향으로 대량의 자료처리에 의해 경험계수들이 결정되어져서 Shen & Hung, Brownlie(1981a)등의 공식을 개발하였다. 특히 Van Rijn은 소류사량과 부유사량을 따로 구해 총유사량을 추정하였으며, 또한 공식의 개발에 기준농도점(Reference Concentration)등 일부 변량들만 경험계수로 사용하였다. 이와 같은 유사량 관련 공식들의 한계를 인정하면서 기존의 유사량 공식들의 국내 적용사례를 살펴보면, Engelund & Hansen공식, Yang공식, Ackers & White공식, Van Rijn공식, Colby공식, Toffaleti공식, Einstein공식, Shen & Hung공식 및 Ranga Raju공식 등이 주로 사용되어 왔다.

그러나, 외국의 충적하천에 기초하여 개발된 유사량 공식들을 한국의 하천에 무분별하게 적용하는 것은 위험스러우며, 하천 유사량 산정 결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 무엇보다도 대상 하천의 지형, 수리, 수문 및 유사 특성 등에 대한 이해가 필요하다.

본 연구에서는 기존의 총유사량 산정공식들 중 한국건설기술연구원(1990)에서 비교적 우리나라에 적합한 것으로 제시한 공식들 중에서 비교적 신뢰성이 높은 수정아인슈타인 방법, Engelund & Hansen공식과 Ackers & White공식, 중간정도의 신뢰성을 가지고 있는 Yang공식 및 신뢰성이 상대적으로 떨어지는 것으로 판단된 Shen & Hung공식과 Ranga Raju공식을 이용하여 측정대상 지점에서의 총유사량을 산정하였으며 비교・검토하여 적용범위를 조사하였다.

(나) 수정 아인슈타인공식

1955년 미국의 지질조사국(USGS)에서 Colby와 Hembree가 제안한 방법으로서, 기존의 아인슈타인 공식을 적절히 수정한 방법인 수정아인슈타인 방법을 사용하여 유사량을 산정하였다. 이 방법은 미국 지질조사국, 개척국 등 수자원 관련 연방정부 기관뿐 아니라 세계적으로 널리 보급되어 지금까지 하천에서 총유사량을 추정하는 대표적인 방법으로 알려져 있으며 수정아인슈타인 방법을 간략히 서술하면 다음과 같다.

아인슈타인 공식의 핵심은 소류사 함수로서 유사의 이송강도(transport intensity) ϕ_*와 전술한 흐름강도 Ψ_*는 다음과 같은 아인슈타인의 소류사 함수식으로 연결된다.

$$\frac{A_*\Phi_*}{1+A_*\Phi_*} = 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-B_*\Psi_*-2}^{B_*\Psi_*-2} e^{-t^2} dt \qquad (3.1\text{-}1)$$

여기서, A_*=43.5, B_*=1/7 이다.

위 식에서, A_*와 B_*는 실험수로자료를 이용하여 <그림 3.1-34>에서와 같이 경험적으로 결정되었다. 각 입경에 대한 이송강도 Φ_*와 흐름강도 Ψ_*는 각각 다음과 같이 표시된다.

$$\Phi_* = \frac{i_B}{i_b} \frac{q_B}{\gamma_s} \left(\frac{1}{g D_i^3} \frac{1}{s-1} \right)^{1/2} \qquad (3.1\text{-}2)$$

$$\Psi_* = \xi_i Y \left(\frac{\beta}{\beta_x} \right)^2 (s-1) \frac{D_i}{R_b' S} \qquad (3.1\text{-}3)$$

여기서, i_B = 입경 i에 해당하는 소류사량의 비율

i_b = 입경 i에 해당되는 하상토량의 비율

q_B = 단위폭당 소류사량

R_b' = 사립조도에 관련된 수리반경

S = 하천경사

s = 사립자의 비중 (= γ_s/γ)

g = 중력가속도

γ_s = 사립자의 단위중량

γ = 물의 단위중량

D_i = i등급의 하상토 입경

ξ_i = 입경 i에 해당하는 아인슈타인의 차폐계수(hiding factor)

Y = 아인슈타인의 양력 보정계수(lift correction factor)

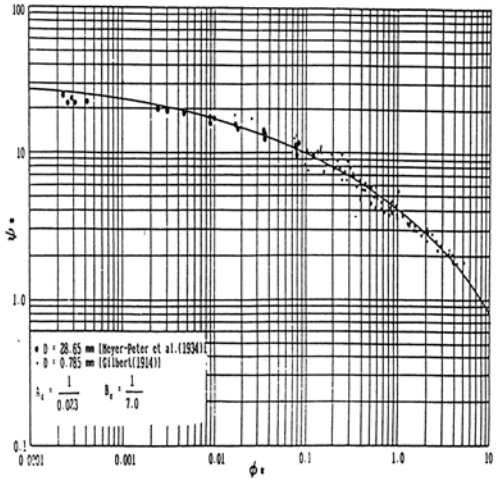
β = log10.6 ; β_x = $\log(10.6X/\Delta)$

Δ = k_s/x ; k_x = 대표사립조도(= D_{65})

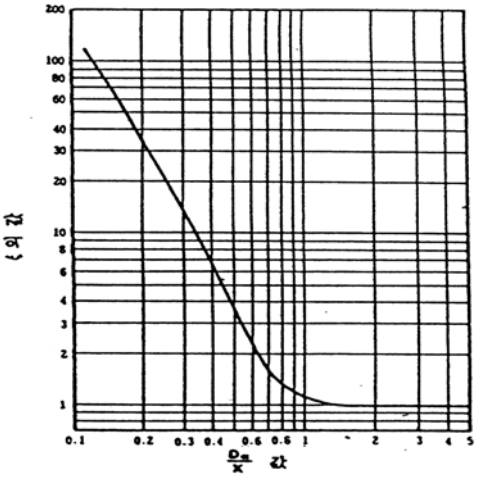
x = $f(k_s/\delta)$; 대수유속분포식의 계수 <그림 3.1-37>

D_{65} = 하상토 무게의 65 %에 해당하는 입경

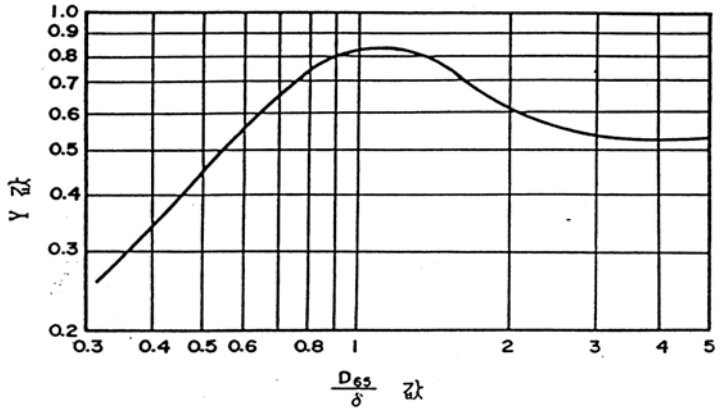
이때 차폐계수 ξ_i와 양력보정계수 Y는 각각 <그림 3.1-35>, <그림 3.1-36>과 같다. β_x식에서의 X값은 식 (3.1-4), (3.1-5)와 같이 결정된다.



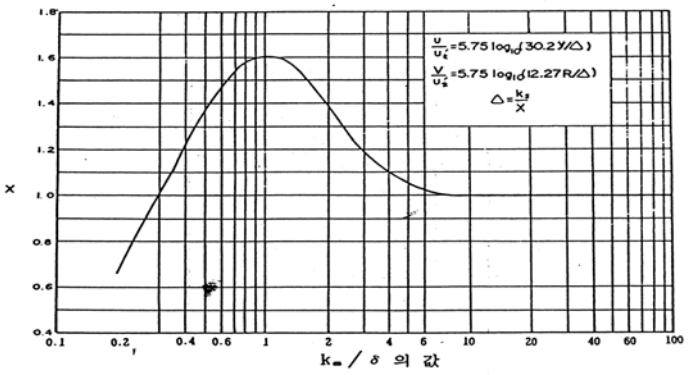
<그림 3.1-34> 아인슈타인공식의 Φ_*-Ψ_* 관계(Eistein, 1950)



<그림 3.1-35> 차폐계수 ξ의 값 (Einstein, 1950)



<그림 3.1-36> 양력보정계수 Y의 값(Einstein, 1950)



<그림 3.1-37> 평균유속과 유속 분포식들의 계수 x의 값(Einstein, 1950)

$$X = 0.77\, k_s/x \quad ; \quad k_s/\delta > 1.8 \text{일 때} \tag{3.1-4}$$

$$X = 1.398\, \delta \quad ; \quad k_s/\delta < 1.8 \tag{3.1-5}$$

여기서, δ = 매끄러운 벽의 층류저층 두께 (= $11.6\,\nu/u_*'$)

ν = 물의 동점성계수

u_*' = 사립조도에 관련된 마찰속도 = $\sqrt{g R_b' S}$

식 (3.1-2)에서 입경 i의 소류사량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_B q_B = \Phi_* i_b \gamma_s \sqrt{g}\, D_i^{3/2} (s-1)^{1/2} \tag{3.1-6}$$

따라서 단위폭당 총 유사량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_B = \sum_i i_B q_B \qquad (3.1\text{-}7)$$

(다) Engelund & Hansen공식

Engelund & Hansen공식(1967)은 하천의 상사이론(similarity principle)에 기초하여 만들어졌으며 마찰계수를 f, 무차원 유사량을 Φ, 무차원 소류력을 Θ, 소류력을 τ_0, 수심을 d라고 했을 경우에 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f\Phi = 0.1\Theta^{5/2} \qquad (3.1\text{-}8)$$

여기서, $f = \frac{2gdS}{V^2}$

$$\Phi = \frac{q_t}{\gamma_s\sqrt{(s-1)dD_{50}^3}}$$

$$\Theta = \frac{\tau_0}{[\gamma(s-1)D_{50}]}$$

$$\tau_0 = \gamma dS$$

식 (3.1-8)을 정리하면 유사량에 대한 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_t = 0.05\gamma_s V^2 \frac{(d \cdot S)^{\frac{3}{2}}}{D_{50}\sqrt{g}(s-1)^2} \qquad (3.1\text{-}9)$$

여기서, q_t = 전유사량(F/T)

γ_s = 유사의 단위중량(F/L^3)

V = 유속(L/T)

d = 수심(L)

S = 하상경사

D_{50} = 유사입경(L)

g = 중력가속도(L/T2)

s = 유사의 비중

Engelund와 Hansen은 수심과 유속 등의 수리량과 유사량을 동시에 구할 수 있는 도표를 제시하였다. 그러나, 수리량이 실측된 경우 그 실측치를 직접 이용하여 유사량을 산정할 것을 권장하였다.

이들은 유사입경 $D_{50} < 0.15$㎜인 경우에는 식 (3.1-9)를 이용하지 말도록 권고하고 있다. 또한 원래 식 (3.1-9)는 경계 Reynolds 수가 12 이상인 Dune 하상에 적용하도록 되어 있으나 실제 적용 결과 Ripple 하상을 제외한 다른 하상에서도 잘 맞는 것으로 알려져 있다. 또한 Engelund & Hansen공식은 무차원량의 함수로 나타나 있으므로 사용단위의 일관성이 있으면 어느 단위 시스템에도 적용이 가능하다.

(라) Yang공식

Yang(1973, 1979)은 하천에서의 유사량은 단위무게의 물의 위치에너지 감소율 즉 단위유수력(Unit Stream Power)에 의존한다고 가정하였다. 또한 Yang은 하천에서 유사량은 물이 가지는 위치 에너지의 감소율에 관계한다고 전제하였다. 즉, 하천이 Δt 시간에 Δz 만큼 위치 에너지가 떨어지면 위치 에너지 감소율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta z}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta t}\frac{\Delta z}{\Delta x} = VS \qquad (3.1\text{-}10)$$

여기서, Yang은 VS를 단위 수류력이라고 불렀으며, 이는 단위 중량당 물이 가지는 동력이다. 반면에 Bagnold의 수류력 $\tau_o V$는 하상 단위면적당 물이 가지는 동력이다. 따라서 단위유수력을 독립변수로 놓고, 제시된 자료를 다중회귀분석하여 다음 다음과 같은 유사농도(ppm) Ct 계산공식을 제안하였다.

$$\log C_t = 5.435 - 0.286\log\frac{wD_{50}}{\nu} - 0.457\log\frac{u_*}{w} + (1.799 - 0.409\frac{wD_{50}}{\nu} - 0.314\log\frac{u_*}{w}) * \log(\frac{VS}{w} - \frac{V_{cr}S}{w}) \quad (3.1\text{-}11)$$

여기서, C_t= 유사농도 (ppm)

W= 침강속도 (L/T)

D= 유사입경(L)

ν= 동점성계수 (L^2/T)

V= 유속(L/T)

S= 하상경사

u_*= 마찰속도(L/T)

또한, 초기이동을 나타내는 한계유속 V_{cr}은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{V_{cr}}{w} = \frac{2.5}{\log(u_* D/\nu) - 0.66} + 0.66 \; ; \quad 1.2 < \frac{u_* D_{50}}{\nu} < 70 \quad (3.1\text{-}12)$$

$$\frac{V_{cr}}{w} = 2.05 \; ; \quad 70 \le \frac{u_* D_{50}}{\nu} \quad (3.1\text{-}13)$$

그러나 Yang은 식 (3.1-11)에서 한계조건을 나타내는 항인 $V_{cr}S/w$를 제거하고 다시 회귀분석(Regression Analysis)을 하여 다음과 같이 유도하였다.

$$\log C_t = 5.165 - 0.153\log\frac{wD_{50}}{\nu} - 0.297\log\frac{u_*}{w} + (1.780 - 0.360\log\frac{wD_{50}}{\nu} - 0.480\log\frac{u_*}{w})\log\frac{VS}{w} \quad (3.1\text{-}14)$$

일반적으로 Yang공식은 균일 차원이므로 어느 단위를 이용하여도 무방하다. 또한 이 공식은 하상토 입경 전체를 하나로 묶어서 산정할 때는 D로 D_{50}을 이용하나, 입경 등급별로 산정할 수도 있다. Yang은 사립자의 침강 속도는 실측 자료를

이용할 것을 추천하였다.

(마) Ackers & White 공식

Ackers & White(1973) 공식은 일종의 에너지 개념 형태의 식이다. 그러나 시작은 다음 식 (3.1-15)와 같이 무차원 유사량은 이동 수(mobility number)에 관계한다는 차원 해석에서 출발한다.

$$G_{gr} = C\left(\frac{F_{gr}}{A} - 1\right)^{m} \qquad (3.1\text{-}15)$$

여기서, G_{gr}은 무차원 유사량을 표시하며, 그 정의는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{gr} = \frac{C_t}{sD}\left(\frac{u_*}{V}\right)^{n} \qquad (3.1\text{-}16)$$

여기서, C_t는 유사무게와 물-유사 혼합물의 무게의 비로 표시되는 유사농도이다. 한편, Ackers & White 공식에서 이동수(Mobility Number) F_{gr}은 다음과 같이 정의하였다.

$$F_{gr} = \frac{\mu_*^{n}}{\sqrt{gD(s-1)}}\left(\frac{V}{\sqrt{32}\log(10d/D)}\right)^{1-n} \qquad (3.1\text{-}17)$$

여기서, 계수 m, C, A, n은 다음 식 (3.1-18)과 같은 무차원 유사입경 D_{gr}의 함수이며, <표 3.1-24>와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{gr} = D\left(\frac{g(s-1)}{V^2}\right)^{1/3} \qquad (3.1\text{-}18)$$

Ackers & White는 입경 D로서 D_{35}를 추천하였다. 이 공식도 균일 차원이므로 어느 단위를 써도 무방하다. 그러나 유사량 공식들의 민감도분석 결과(우효섭 등,

1990)에 의하면, Ackers & White 공식은 D<0.25mm에서 유사량이 과다하게 추정되기 때문에 이 공식은 세사나 극세사에 대해 적용하기 어렵다.

<표 3.1-24> Ackers & White 공식의 계수들

계 수	$1<D_{gr}\leq 60$	$D_{gr}>60$
C	$\log C=2.86\ \log D_{gr}-(\ \log\ D_{gr})2-3.53$	0.025
n	$1\ -\ 0.56\ \log D_{gr}$	0.0
A	$0.23/\ \sqrt{D_{gr}}\ +\ 0.14$	0.17
m	9.66 / Dgr + 1.34	1.50

(바) Shen & Hung공식

Shen & Hung공식의 유사운송기구는 매우 복잡한 현상이므로 몇 개의 변수들의 조합으로 모든 상황에서의 운송기구를 물리적으로 기술하는 것이 불가능하다는 가정아래 이루어진다. 따라서 실용적인 측면에서 복잡한 식보다는 주요 수리 및 하상토 변수에 대한 간단한 회귀식이 계산이 간편하고, 더 나아가 얻어진 회귀식에 과거의 자료에 대한 상관성이 좋다면 다른 자료도 같은 자료의 범위 내에서 적용될 경우 좋은 결과를 얻을 수 있다고 가정하였다. 이들은 독립변수로 유사입자의 침강속도, 유속, 수심, 중앙입경을 선택하였고, 종속변수로 유사농도를 선택하였다. 이들은 실험자료를 이용하여 다중회귀분석을 하여 다음과 같은 회귀식을 구하였다.

$$\log C_t = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 \qquad (3.1\text{-}19)$$

$$x = V^{a_4} S^{a_5} W^{a_6} d^{a_7} \qquad (3.1\text{-}20)$$

여기서, C_t = 유사의 무게농도(ppm)

$a_0 = -107,404.45938164$

$a_1 = 324,214.74734085$

$a_2 = -326,309.58908739$

$a_3 = 109,503.87232539$

$a_4 = 0.00750189$

$a_5 = 0.00428802$

$a_6 = -0.00239974$

$a_7 = 0.0$

이 경우의 변수의 단위로서 C_t는 ppm, V는 ft/sec, w는 ft/sec, d는 ft이다.

(사) Ranga Raju공식

이들은 무차원 유사량 Φ는 무차원 소류력 τ_*'와 매우 밀접한 관계가 있다는 가정을 하였다. 무차원 유사량 Φ와 무차원 소류력 τ_*'는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi = \frac{q_t}{\gamma_s}\left(\frac{\gamma}{\gamma_s-\gamma}\frac{1}{gD^3}\right)^{1/2} \qquad (3.1\text{-}21)$$

$$\tau_*' = \frac{\tau_0'}{(\gamma_s-\gamma)D} \qquad (3.1\text{-}22)$$

여기서 τ_0'=하상에서의 평균사립소류력 = $\gamma R'S$

R′=Strickler 공식에서 구해지는 사립조도에 대한 수리반경

일반적으로 식 (3.1-21)과 (3.1-22)는 다음과 같은 관계를 가지고 있다.

$$\Phi = 60(\tau_*')^3\left(\frac{\tau_0'}{\tau_0}\right)^{-3m} \qquad (3.1\text{-}23)$$

여기서, 식 (3.1-23)의 적용한계는 $0.05 \le \tau_*'\left(\frac{\tau_0'}{\tau_0}\right)^{-m} \le 1.0$이다. 여기서 지수 m은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$m=0$; $u_*/w \leq 0.5$ (3.1-24)

$m=0.2\, u_*/w - 0.10$; $u_*/w \geq 0.5$ (3.1-25)

여기서 사용된 공식을 유도하는데 이용된 자료는 모두 Peterson & Howells (1973)의 자료집을 이용하였다. 그러나 Brownlie(1981c)는 이 자료집의 자료중에서 약 10% 정도가 매우 심각한 오류를 범하고 있다고 지적하였으며, Ranga Raju공식을 적용할 수 있는 한계는 Ripple, Dune, Plane 하상에 한정되며, Antidune이나 기타 하상에 적용해서는 안된다. Ranga Raju 공식도 무차원량의 함수로 표시되므로 단위시스템에 관계없이 성립된다.

나. 국내·외 하상토의 발생 특성

일반적으로 하천에 하상토는 하천의 통수단면적을 감소시키고 하천의 오염의 원인이 되어 수질악화를 초래할 수 있다. 하천의 유지관리와 홍수방지를 위하여 정부에서는 하도준설사업을 수행하고 있는 실정이다. 따라서 본 절에서는 국내외 주요 지점에 대한 하상토의 발생특성을 조사하고 이에 상응하는 준설현황을 파악하여 하상토 발생규모 및 국내외 특성을 분석하였다.

(1) 하상토 퇴적 영향

하상토는 지각의 풍화작용에 의해 생성된 광물질의 조각들로, 유수에 의해 침식, 운반, 퇴적된 입자들을 말한다. 충적하천의 하상토는 대부분 모래로 구성되어 있으며 약간의 자갈이나 점토질이 포함되어 있다. 이러한 하상토가 충적이 되면서 하천에 문제가 발생하게 되었는데, 물리적 변화 측면에서 보면, 하상토 퇴적에 의한 하도 축소로 홍수 시 소통장애를 유발하고, 하도 변경에 의한 세굴구간이 발생하여 교량, 제방 등 하천 시설물에 대한 피해를 유발시키고, 하폭증가에 따른 하천변 시설물의 피해를 유발 시킨다. 하천의 화학적 변화 측면에서 보면, 오염된 하천의 경우 저니 등의 퇴적으로 인한 수질악화를 발생시킨다.

(2) 국내 하상토 발생현황

우리나라의 하천은 크게 4개의 권역으로 나눌 수 있는데 한강권역, 낙동강권역, 금강권역, 영산강권역이 그것이다. 그 중 낙동강권역은 남한 내에서 유역면적으로는 한강권역과 비슷하고, 유로연장으로는 낙동강권역이 가장 길다. <표 3.1-25>은 우리나라 4대강의 유로연장과 유역면적을 보여주고 있고, <그림 3.1-38>은 우리나라 4대강의 권역도를 보여주고 있다.

<그림 3.1-38>에서 보는 바와 같이 우리나라는 크게 4대권으로 구분되어 있으며, 국내 4대강 유역조사는 4대권 구분에 따라 각각 실시되고 있다. 한강권역에 대한 유역조사는 2002년에 실시되었으며, 낙동강권역은 2003년에 실시, 섬진강권역은 1981년에 실시, 금강권역은 1968년에 실시되었다.



<그림 3.1-38> 우리나라 4대권역

<표 3.1-25> 우리나라 4대 강 현황

하천명	주요 수계	유로연장(km)	유역면적(㎢)
한강	북한강, 남한강, 안성천, 동해안수계	481.7	32,200
낙동강	낙동강본류, 형산강	521.5	32,208
금강	금강본류, 만경강, 동진강, 삽교천	395.9	17,767
섬진·영산강	영산강 섬진강	129.5	8,406

※ 출처 : 환경부 수질보전국(www.me.go.kr, 2006.2)

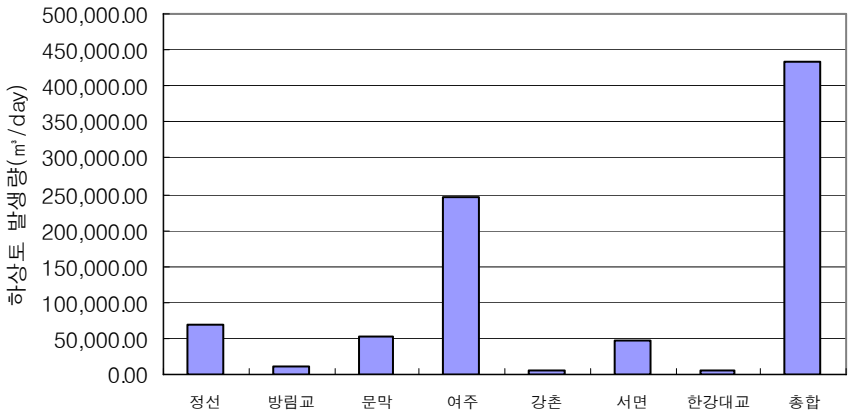
현재 하상토에 대해서는 구체적으로 따로 연구되어 있는 부분은 없고, 유역 조사 시 하상토의 발생량을 따로 조사 하지는 않는다. 따라서 하천에 흘러가는 유사가 퇴적되면 하천의 하상토가 되므로 유사량 발생량을 하상토 발생량으로 가정하여조사하였다.

<표 3.1-26>와 <그림 3.1-39>는 한강권역의 8개 지점에 대한 하상토 발생량을 나타낸 것이다. 여주지점이 가장 많은 하상토 발생량을 보여주고 있으며, 한강대교 지점이 가장 적은 하상토 발생량을 나타내었다.

<표 3.1-26> 한강권역 하상토 발생량

측정지점명	하상토 발생량(㎥/s)	하상토 발생량(㎥/day)	비고
정선	0.811	70,084.52	15회 측정의 평균값
방림교	0.133	11,492.57	11회 측정의 평균값
문막	0.609	52,619.51	13회 측정의 평균값
여주	2.856	246,799.76	13회 측정의 평균값
강촌	0.074	6,422.93	8회 측정의 평균값
서면	0.555	47,986.4	10회 측정의 평균값
한강대교	0.057	4,892.72	6회 측정의 평균값
총합	5.096	433,875.47	

※ 자료 : 국가수자원관리 종합정보시스템(www.wamis.go.kr, 2006. 2)



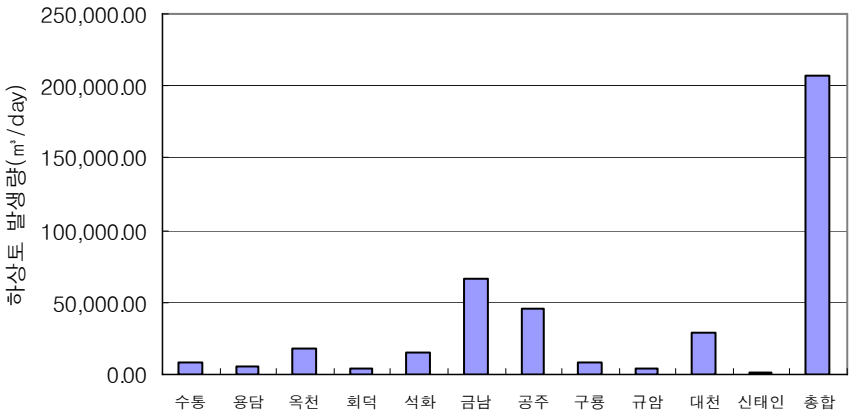
<그림 3.1-39> 한강 권역 하상토 발생량

<표 3.1-27>과 <그림 3.1-40>은 금강권역의 11개 지점에 대한 하상토 발생량을 나타냈다. 금남지점이 가장 많은 하상토 발생량을 가지는 것으로 나타났고, 신태인지점이 가장 적은 하상토 발생량을 나타내었다.

<표 3.1-27> 금강권역 하상토 발생량

측정지점명	하상토 발생량(㎥/s)	하상토 발생량(㎥/day)	비고
수통	0.098	8,476.65	17회 측정의 평균값
용담	0.059	5,111.86	16회 측정의 평균값
옥천	0.213	18,439.08	17회 측정의 평균값
회덕	0.046	3,974.76	11회 측정의 평균값
석화	0.179	15,423.76	9회 측정의 평균값
금남	0.770	66,557.02	12회 측정의 평균값
공주	0.528	45,639.38	14회 측정의 평균값
구룡	0.098	8,443.46	19회 측정의 평균값
규암	0.049	4,244.45	3회 측정의 평균값
대천	0.334	28,861.21	42회 측정의 평균값
신태인	0.0197	1705.03	61회 측정의 평균값
총합	2.394	206,876.66	

※ 출처 : 국가수자원관리 종합정보시스템(www.wamis.go.kr, 2006. 2)



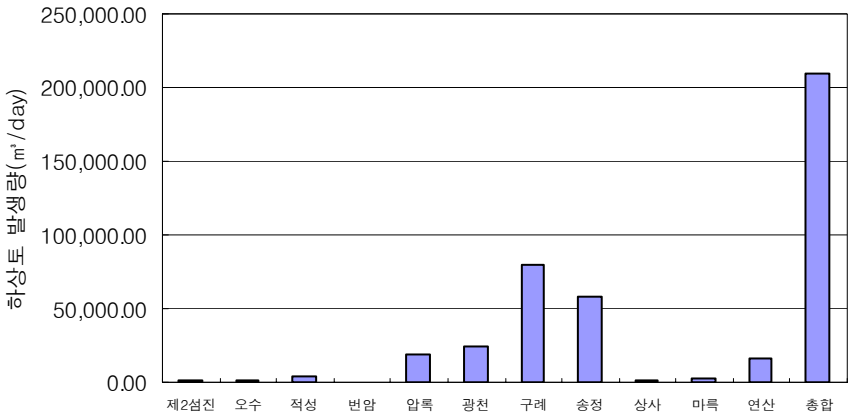
<그림 3.1-40> 금강 권역 하상토 발생량

<표 3.1-28>와 <그림 3.1-41>는 섬진강·영산강권역의 11개 지점에 대한 하상토 발생량을 나타낸 것이다. 구례지점이 가장 많은 하상토 발생량을 가지며, 번암지점이 가장 적은 하상토 발생량을 나타내었다.

<표 3.1-28> 섬진강·영산강권역 하상토 발생량

측정지점명	하상토 발생량(㎥/s)	하상토 발생량(㎥/day)	비고
제2섬진	0.019	1,641.6	1회 측정의 평균값
오수	0.021	1,814.4	2회 측정의 평균값
적성	0.053	4,579.2	2회 측정의 평균값
번암	0.007	561.6	2회 측정의 평균값
압록	0.222	19,180.8	3회 측정의 평균값
광천	0.278	24,019.2	2회 측정의 평균값
구례	0.931	80,395.2	2회 측정의 평균값
송정	0.669	57,830.4	3회 측정의 평균값
상사	0.013	1,123.2	2회 측정의 평균값
마륵	0.024	2,046.54	8회 측정의 평균값
연산	0.192	16,588.8	1회 측정의 평균값
총합	2.429	209,780.94	

※ 출처 : 국가수자원관리 종합정보시스템(www.wamis.go.kr, 2006. 2)



<그림 3.1-41> 섬진강·영산강권역 하상토 발생량

<표 3.1-29>와 <그림 3.1-42>는 낙동강권역의 8개 지점에 대한 하상토 발생량을 나타낸 것이다. 진동지점이 가장 많은 하상토 발생량을 가지며, 병천지점이 가장 적은 하상토 발생량을 나타내었다.

<표 3.1-29> 낙동강권역 하상토 발생량

측정지점명	하상토 발생량(㎥/s)	하상토 발생량(㎥/day)	비고
월포	0.026	2,212.99	16회 측정의 평균값
병천	0.0017	146.05	7회 측정의 평균값
무성	0.025	2,119.53	12회 측정의 평균값
김천	0.0031	246.35	16회 측정의 평균값
왜관	1.908	164,836.5	16회 측정의 평균값
동촌	0.0111	960.14	20회 측정의 평균값
진동	24.61	2,126,568	21회 측정의 평균값
청도	0.011	937.42	22회 측정의 평균값
총합	26.60	2,298,026.98	

※ 출처 : 국가수자원관리 종합정보시스템(www.wamis.go.kr, 2006. 2)



<그림 3.1-42> 낙동강권역 하상토 발생량

이와 같이 국내 4대강 권역으로 하상토 발생량을 살펴보면, 낙동강권역에서 하상토가 가장 많이 발생하는 것을 알 수 있었다. 현재 낙동강권역은 일부구간에서 하상토를 활용하고 있는 지역이기도 하므로 본 연구에서는 이 지역에 대한 현장조사도 함께 수행하여 비교 분석을 진행하였다. 한편, 한강권역에서는 발생하는 하상토 양은 40만 톤으로 낙동강보다 적고, 영산강, 금강, 섬진강권역은 가장 나타내었다.

하지만 본 조사결과가 전체 4대강 전체하천을 살펴 본 것은 아니고, 권역 중에 일부 지역을 대표 지점으로 하여 측정한 것이기 때문에 권역에 정확한 하상토 발생량으로는 볼 수는 없지만, 이러한 결과는 전체적인 경향을 나타낸 것으로 보인다.

(3) 낙동강 하상토 특성

각 권역별로 자세한 현황을 파악하고 하상토 적용유무를 실제 하천을 대상으로 조사하기 위해 낙동강유역의 6개 지점을 선정하여 하상토 발생특성을 평가하였다.

(가) 낙동강 일반현황

낙동강권역은 크게 몇 2개의 수계로 나누어지게 된다. 경북에서 경남으로 흐르게 되는 낙동강본류수계가 제일 큰 수계와 울산에서 흘러 경주, 포항으로 흘러 영

일만으로 흘러 나가는 형산강수계로 나눌 수 있다.

낙동강본류는 강원 태백 함백산에서 발원하여 상류부에서는 안동을 중심으로 반변천을 비롯한 여러 지류를 합치면서 서쪽으로 곡류하다가 함창 부근에서 다시 내성천·영강 등 여러 지류를 구심상으로 받아들이고, 유로를 남쪽으로 돌려 상주 남쪽에서 위천을, 선산 부근에서 감천, 대구 부근에서 금호강, 남지 부근에서 남강을 합친 뒤 동쪽으로 유로를 바꾸어 삼랑진 부근에서 밀양강을 합치고 나서 다시 남쪽으로 흘러 남해로 들어간다.

낙동강은 경사도가 매우 완만하여, 400km 상류의 안동에서도 해발고도 100m에 달하지 못하고 퇴적이 심한 하류부에서는 천정천을 이루다가 삼랑진에서 물금 사이의 약 19km 구간은 홍수 때에 강물의 소통이 잘 안되는 협착부를 이루므로, 지류 남강에 댐이 건설되기 전까지는 범람이 심하였다.

한편 낙동강은 저산성 산지 또는 구릉지를 흐르기 때문에 범람원의 발달이 없고, 따라서 김해삼각주 김해평야를 제외하고는 강 연안을 따라 소규모의 평야가 펼쳐져 있을 뿐, 넓은 충적지는 비교적 적다.

옛날에는 내륙지방의 교통동맥이 되어 조운 등에 크게 이용되면서 강기슭에 하단·구포·삼랑진·수산·풍산·안동 등의 선착장이 번창하였고, 또 6·25전쟁 당시에는 유엔군의 최후 방어선이 된 바 있다. 한편, 김해삼각주 말단부에 있는 을숙도 일대는 세계적으로 알려진 철새도래지이다.

형산강 본류는 울산 울주구 두서면에서 복안천이라는 이름으로 발원, 북류하여 도계를 지나 미역내·인천 등으로 불리며 경주국립공원 지역을 관류한다. 한내·남천 등을 합치며 경주시를 지나 안강읍의 동쪽 경계를 흐르다가 진로를 북동으로 꺾어 연일읍을 거쳐 포항시를 관류, 영일만으로 흘러든다.

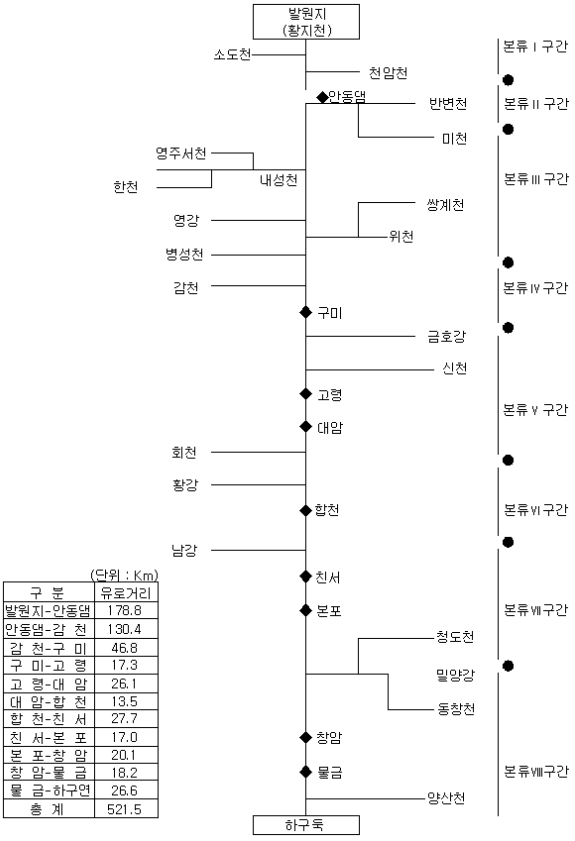
형산강지구대를 흐르며 주변에 교통의 요지를 이루는 형산강은 강으로서는 크지 않고 지류도 많지 않으나, 유역에 비옥한 지구평야를 발달시켰고 예나 지금이나 경주·포항의 젖줄 역할을 한다. 특히 신라의 천년 고도 경주의 성립에 매우 큰 구실을 하였다. 유역은 인구가 조밀하고, 동해남부선 철도의 개통으로 교통이 더욱 편리해졌다.

다음 <표 3.1-30>는 낙동강의 유로간천 연장을 나타내고 있으며, <그림 3.1-43>은 낙동강 수계 모식현황을 보여주고 있고, 상류간천의 유로 연장은 길고, 하류로 내려 갈수록 연장 길이가 짧게 구분한 것을 알 수 있다.

<표 3.1-30> 낙동강의 유로간천 연장

구분	유로연장㎞
발원지 - 안동댐	178.8
안동댐 - 감 천	130.4
감 천 - 구 미	45.8
구 미 - 고 령	17.3
고 령 - 대 암	26.1
대 암 - 합 천	13.5
합 천 - 칠 서	27.7
칠 서 - 본 포	17.0
본 포 - 창 암	20.1
창 암 - 물 금	18.2
물 금 - 하구언	26.6
총계	521.5

※ 출처 : 환경부 수질보전국(www.me.go.kr, 2006. 2)



(단위 : Km)

구 분	유로거리
발원지-안동댐	178.8
안동댐-감 천	130.4
감 천-구 미	46.8
구 미-고 령	17.3
고 령-대 암	26.1
대 암-합 천	13.5
합 천-칠 서	27.7
칠 서-본 포	17.0
본 포-창 암	20.1
창 암-물 금	18.2
물 금-하구언	26.6
총 계	521.5

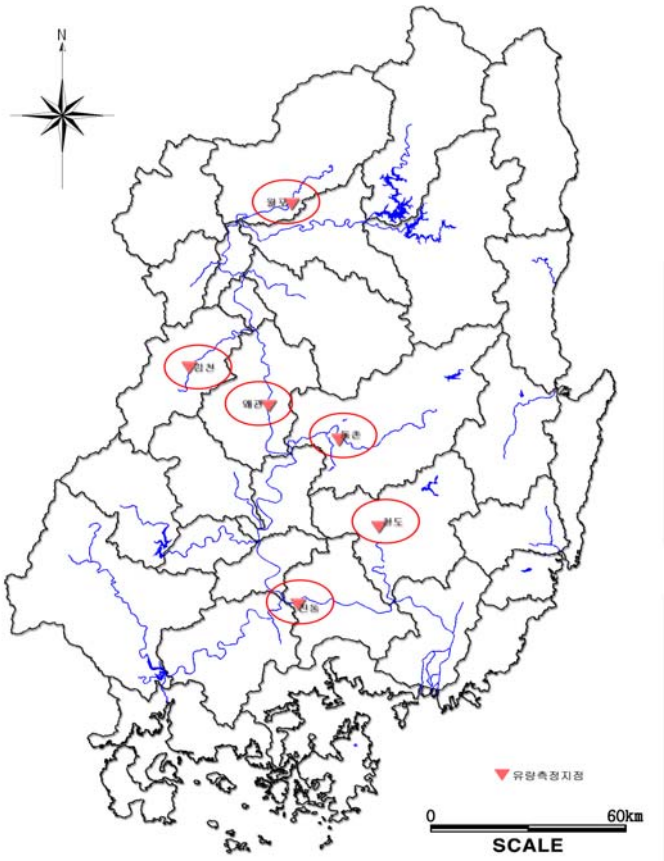
<그림 3.1-43> 낙동강 수계 모식현황

(나) 분석대상지역의 현황

발생 유사량 분석지점의 선정은 일반적으로 개선을 요하는 지점이나 유사량 측정이 추가로 요구되는 지점 등으로 선정하고 댐 방류량 및 댐 퇴사량에 영향을 크게 받는 지점은 제외했다. 유사량 측정은 이전의 조사지점이 많지 않음으로 각 유역의 특성을 대표할 수 있는 지점으로 선정한다.

이번 하상토 유역조사에서는 수리학적 및 지형학적으로 유역의 대표성을 지니고 있는 지점중 측정이 용이한 지점을 기준으로 본류에 2개 지점과 지류 4개 지점을 선정하였다.

유역조사에서 발생 유사량 분석의 6개 선정지점은 지형도상에서 소유역별 지형특성을 검토하였으며, 일반적인 선정기준에 따라 본류에는 왜관, 진동 등 2개 지점과 지류는에 내성천 월포, 감천 김천, 금호강 동촌, 청도천 청도 등 4개 지점을 선정하였다. 유사량 측정 선정지점의 위치도는 <그림 3.1-44>와 같다.



<그림 3.1-44> 유사량 분석지점

(다) 분석대상지점의 선정조건

발생 유사량 분석지점의 선정시 고려사항은 낙동강 수계의 대표적 특징을 알 수 있는 지점, 상류 2지점과 중류 2지점, 중·하류 지점 2지점 등 총 6개 지점을 선별하였다. 우선적으로 이번 지점은 관측소가 위치하고 있어서 유사량을 채취하는데 편리함이 있으며, 유사량 분석을 통하여 유사량이 존재하고 있다는 것을 확인할 수 있는 지점을 대상 지점으로 선정하였다. 다음 <표 3.1-31>은 선정된 6개 지점의 유사량 측정 시 장·단점을 보여주고 있다.

<표 3.1-31> 지점 선정조건

측정지점	유사량 측정 조건		비고
	장점	단점	
월포	낙동강상류의 주요지류로서 본류의 관리를 위한유사량 측정이 요구됨	교량이 비교적 높아 유사량 측정이 어려움	낙동강 상류의 주요 지류로서 합류점인 달지에서 24.3㎞에 위치함
김천	낙동강 본류의 관리를 위한 유사량 측정이 요구되며, 자연상태 유사량 측정이 가능함	김천시내 대구국도에 교량이 있어 안전이 우려됨	낙동강 상류의 지류로서 낙동강 합류점에서 48.6㎞지점에 위치함
왜관	낙동강본류의 지점으로서 감천에서 다량의 유사가 유입되므로 관리를 위한 유사량 측정이 요구됨	교량의 높이가 아주 높으므로 유사량 측정이 어려움	낙동강의 본류 지점으로서 자료의 연속성 및 보완, 분석과 검토에 있어 매우 중요한 지점임
동촌	영천댐에 의한 유사량 변화를 분석해서 본류의 관리를 위한 유사량 측정이 요구됨	대구광역시내의 아양교에서 측정하므로 교통 안전이 요구됨	금호강유역의 시범지역으로 낙동강합류점에서 약 28.9㎞에 위치함
청도	밀양강과 합류하므로 본류관리를 위한 유사량 측정이 요구됨	유역의 평균경사가 급하고 마사토 및 풍화암 지역으로 소류사가 다량 발생	낙동강 본류의 제2지류로서 유사량 추정 및 하상변동 측면에서 중요한 지점임
진동	남강이 본류에 유입되는 직하류에 위치하고 있으므로 유사량 측정이 요구됨	교량의높이가 아주 높으므로 유사량측정이 어려움	낙동강의 본류 지점으로서 자료의 연속성 및 보완, 분석과 검토에 있어 매우 중요한 지점임

(라) 분석대상지점

① 월 포

월포지점은 본류의 합류지점인 달지에서 24.3㎞ 상류인, 내성천 하류의 경북 예천군 호명면 월포리 고평교(경도 128°29′23″, 위도 36° 37′00′)상에 위치하고 있다. 본 지역의 유역면적은 1,134.5㎢로써 내성천 전체 유역면적의 98.4%에 해당되며, 유로연장은 79.9㎞, 하상경사 1/5,000, 하폭은 330m이다(<그림 3.1-45> 참조).

금회 측정지점은 하천 형태학적으로 비교적 직선 구간의 하도이고 하상 구성물질은 입도가 균일한 세사로 형성되어 있어 홍수를 전후하여 다소의 하상변동이 예상된다. 좌안쪽 일부 구간의 고수부지는 수초와 잡목이 자생하고 있고 하도형상은 바른 편이나 고평교 하류 약 500m 지점부터는 만곡부를 이루고 있다. 월포지점은 하상변동 및 유역의 수질오염 원인을 규명하는 데 중요한 지점이다.



<그림 3.1-45> 월포 측정지점

② 김 천

김천수위관측소는 낙동강 본류의 합류부로부터 48.6㎞ 지점인, 감천 상류의 경북

김천시 지좌동 김천교(경도 128°07′58″, 위도 36°06′58″)상에 위치한다. 본 지역의 유역면적은 413.3㎢로서 감천 전체 유역면적의 40.75%에 해당되며, 유로연장은 71.4㎞, 하폭은 168m 이다 (<그림 3.1-46> 참조).

수위관측소가 위치한 감천은 하천 형태학적으로 상류부는 사행하천이고 평·갈수기는 거의 건천으로 비교적 직선 구간의 하도이고, 하상 구성물질은 입도가 균일한 세사로 형성되어 있어 홍수를 전후하여 다소의 하상변동이 예상되며, 우안쪽의 고수부지는 체육공원으로 잔디가 자생하고 있으며 직선하도를 이루고 있다.



<그림 3.1-46> 김천 측정지점

③ 왜 관

왜관은 낙동강 하구로부터 194㎞ 지점인, 경북 칠곡군 왜관읍 왜관리 구철교(경도 128°23′47″, 위도 35°59′50″)상에 위치한다. 본 지역의 유역면적은 11,074.4㎢로서 낙동강 전체 유역면적의 46.8%를 차지하고 있으며, 유로연장은 317.8㎞, 하상구배는 1/2,540, 하폭은 410m 이다 (<그림 3.1-47> 참조).

수위관측소의 좌안은 1986년에 왜관제를 축제하였고 우안은 무제부로서 하천변으로 고수부지가 형성되어 있다. 측정지점의 하류 약 700m 지점에 산지부로서 암반

이 노출되어 있고, 하상은 자갈이 섞인 모래로 구성되어 있다. 하상 조건은 좌·우안이 모두 암반으로 노출된 협착부 고정하안이므로 하도와 하상이 안정화되어 있다. 또한 구미 국가공업단지 하류에 위치하고 있으므로 하도를 파악하는데 중요한 지점이다.



<그림 3.1-47> 왜관 측정지점

④ 동 촌

동촌은 낙동강의 본류 합류부에서 금호강 28.9㎞ 지점인 대구광역시 동구 신암동 아양교(경도 128°38′11″, 위도 35°53′19″) 약 1km 하류 좌안에 위치한다. 동촌수위관측소는 낙동강 수계의 금호강 유역을 대표하는 관측소로서 유역면적은 1,544.0㎢로서 금호강 전체 유역면적의 72.9%를 차지하고 있다. 유로연장은 89.4㎞, 하상구배는 1/1250, 하폭은 264m 이다 (<그림 3.1-48> 참조).

금회 측정지점 상하류 하도는 전반적으로 직선형을 이루고 있고, 하상의 변동도 심하지 않는 편이다.

측정지점은 낙동강 본류와 합류하는 상류지점이고 대구광역시 중간에 위치하므로 영천댐에 의한 유사량변화 및 하상변동, 하도의 수질변동과 수질개선 효과를 측

정할 수 있는 매우 중요한 지점이다.



<그림 3.1-48> 동촌 측정지점

⑤ 청 도

청도는 밀양강과 청도천의 합류부에서 청도천 상류로 약 9.0㎞ 지점인 경북 청도군 청도읍 월곡리(경도 128°46′00″, 위도 35°37′00″)상에 위치한다. 청도수위관측소는 낙동강 하류의 주요 지류인 밀양강 상류에 위치하며, 유역면적은 287.5㎢이고, 하폭은 130m이다 (<그림 3.1-49> 참조).

금회 측정지점 하류에 위치한 청도수위관측소는 하천 형태학적으로 자연형 하천에 속하며, 금회 측정지점인 청도교의 상·하류부는 비교적 안정적인 직선 구간의 하도이고 하상이 안정화되어 있다. 청도천 유역의 평균경사는 경사가 급하고, 지질 또한 마사토 및 풍화암 지역으로서 자갈 등의 소류사가 다량 발생할 가능성이 있는 지점이다. 측정지점이 청도천이 밀양강과 합류 이전에 위치하므로 분석과 검토에 중요한 지점이다.



<그림 3.1-49> 청도 측정지점

⑥ 진 동

진동수위관측소는 낙동강 하구로 부터 84.3㎞ 떨어진 경남 함안군 칠서면 계내리 진동양수장 옆(경도 128°29′09″, 위도 35°22′49″)에 위치한다. 본 지역은 낙동강 유역에서 조수의 영향을 받지 않는 관측소 중에서 하구부로부터 첫 번째에 위치한 관측소이다. 본 지역의 유역면적은 20,311.3㎢로서 낙동강 전체 유역면적의 85%를 차지하고 있으며, 유로연장은 432.0㎞, 하상구배 1/830, 하폭 384m이다 (<그림 3.1-50> 참조).

진동지점은 대체로 직선하도이며, 하상조건은 우안이 암반으로 노출되어 있고, 좌안은 충적층으로 형성되어 있으나 하도와 하상이 비교적 안정화 되어 있고, 분석과 검토에 있어 매우 중요한 지점이다.



<그림 3.1-50> 진동 측정지점

(마) 유사량 분석

이번 조사의 지점 산정은 위에서 언급을 했으나, 조사 지점이 유사량이 없으면 선정의 의미가 없다. 따라서 유사량 산정공식을 가지고, 조사지점에 대하여 유사량 분석을 통하여 지점에 대한 타당성을 분석하였다.

위에서 언급된 6가지 공식을 사용하여 측정대상지점 6개 지점에 대하여 총유사량을 추정하였으며, 그 결과를 비교·검토하였다. 지점별 자세한 유사량 계산결과는 <표 3.1-32>~<표 3.3-37>과 같다.

앞에서 소개된 6가지 유사량 산정공식을 이용하여 대상지점의 총유사량을 계산하였다. 계산에 필요한 입력자료는 실측을 통해 수집 및 분석된 기존의 자료를 이용하였고, 입력자료를 이용하여 계산된 결과를 수정 아인슈타인 공식으로 평가한 결과와 비교하였으며, 그 결과는 <그림 3.1-51>~<그림 3.1-56>과 같다.

총유사량 평가는 본 조사에서의 대상지점이 충적하천으로 이루어진 것을 고려하여 제시된 6가지 공식을 이용하여 계산된 총유사량을 비교하였다. 이때, 지금까지 수정 아인슈타인 방법의 경우 발생 유사량 산정에 있어서 제시된 공식 중에서 가장 신뢰성 있는 공식으로 인정받고 있기 때문에 수정아인슈타인 방법을 이용하여 산정한 결과를 기준치로 가정하였다.

<표 3.1-32> 월포지점 산정방법별 총유사량 비교

관측 순번	측정 시기	수정 아인슈타인 (tons/day)	E & H (tons/day)	A & W (tons/day)	Yang (tons/day)	S & H (tons/day)	Ranga (tons/day)
1	2002.11.02 (09:00~09:20)	28.9	17.3	0.1	14.1	1.0	0.6
2	2002.11.22 (14:30~14:50)	60.8	12.6	0.1	11.6	9.1	10.5
3	2002.12.09 (14:30~14:50)	63.0	13.7	0.1	12.5	8.5	8.9
4	2003.03.31 (13:30~13:50)	70.3	23.3	4.6	23.7	15.9	14.0
5	2003.04.14 (13:30~13:50)	122.0	83.3	110.0	96.1	74.9	46.8
6	2003.04.28 (13:30~13:50)	228.9	143.0	199.4	163.8	137.3	69.2
7	2003.05.09 (14:00~14:20)	673.3	993.7	831.8	1,150.0	1,032.8	260.1
8	2003.06.02 (13:30~13:50)	123.7	85.0	18.2	95.8	48.3	25.0
9	2003.06.16 (14:00~14:20)	81.7	88.1	11.9	100.4	44.8	19.5
10	2003.06.30 (14:30~14:50)	639.1	142.7	665.7	179.5	237.8	174.9
11	2003.07.10 (09:00~09:20)	161,084.0	74,756.5	26,338.1	75,647.7	107,926.6	25,942.0
12	2003.07.10 (14:30~14:50)	82,179.0	31,557.3	25,346.5	35,809.7	58,750.3	17,737.0
13	2003.07.10 (17:30~17:45)	46,297.0	36,163.8	13,435.0	37,560.3	53,932.7	13,242.4
14	2003.07.11 (08:30~08:45)	5,764.4	8,889.9	3,668.2	9,774.6	102,924.8	2,019.7
15	2003.07.11 (11:30~11:45)	1,159.6	5,234.7	1,787.8	5,991.7	4,928.6	882.6
16	2003.07.23 (11:30~11:45)	36,279.1	24,737.2	1,999.6	25,274.0	15,298.6	2,777.9
17	2003.07.23 (18:00~18:15)	13,362.6	13,135.5	5,232.6	14,592.0	16,507.1	3,425.5
18	2003.07.25 (10:00~10:15)	36,847.9	29,618.2	11,256.6	31,886.6	43,656.8	10,486.2
19	2003.07.25 (15:00~15:15)	16,684.7	15,859.7	5,769.9	17,611.8	19,998.3	4,168.8

<표 3.1-33> 김천지점 산정방법별 총유사량 비교

관측 순번	측정 시기	수정 아인슈타인 (tons/day)	E & H (tons/day)	A & W (tons/day)	Yang (tons/day)	S & H (tons/day)	Ranga (tons/day)
1	2002.11.02 (11:00~11:20)	167.7	29.2	14.0	19.6	20.3	22.9
2	2002.11.22 (16:30~16:50)	334.9	24.3	20.4	19.9	32.4	61.0
3	2002.12.09 (15:00~15:20)	203.1	21.3	6.7	14.7	16.2	20.8
4	2003.03.31 (15:00~15:20)	331.9	74.5	89.2	52.6	67.3	69.8
5	2003.04.14 (15:30~15:50)	37.6	24.2	11.3	15.3	12.3	14.4
6	2003.04.28 (15:30~15:50)	201.9	347.3	202.8	202.8	157.3	83.7
7	2003.05.09 (16:00~16:20)	854.7	557.1	636.7	366.1	419.6	267.7
8	2003.06.02 (15:30~15:50)	863.5	752.6	808.6	486.6	556.6	336.0
9	2003.06.16 (16:00~16:20)	1,067.9	185.7	463.7	144.0	225.0	257.1
10	2003.06.30 (16:30~16:50)	2,583.8	990.0	1,838.6	714.9	1,094.6	866.0
11	2003.07.06 (21:00~21:20)	90,783.0	67,639.0	84,835.4	42,704.3	81,969.3	80,249.7
12	2003.07.07 (12:00~12:15)	12,511.2	7,177.7	12,141.7	4,997.5	8,787.6	7,043.5
13	2003.07.07 (14:00~14:15)	9,844.1	4,976.1	6,949.8	3,358.1	5,215.1	3,714.0
14	2003.07.07 (15:00~15:15)	8,966.7	4,670.3	8,562.2	3,341.8	5,708.1	4,685.8
15	2003.07.10 (11:30~11:50)	46,422.5	32,370.3	43,160.5	21,022.1	38,323.5	33,486.6
16	2003.07.10 (16:00~16:15)	20,874.7	24,109.7	24,396.8	14,925.1	24,540.3	19,947.9
17	2003.07.10 (19:00~19:15)	19,095.4	18,628.5	22,037.6	11,895.5	20,211.3	16,193.4
18	2003.07.13 (11:00~11:20)	107,647.7	80,497.5	112,696.5	52,323.4	105,885.2	113,934.9
19	2003.07.13 (14:00~14:20)	70,091.4	53,198.3	64,384.8	33,808.3	62,644.7	59,413.0

<표 3.1-34> 왜관지점 산정방법별 총유사량 비교

관측 순번	측정 시기	수정 아인슈타인 (tons/day)	E & H (tons/day)	A & W (tons/day)	Yang (tons/day)	S & H (tons/day)	Ranga (tons/day)
1	2002.11.02 (10:20~11:00)	1,050.0	567.3	0.1	227.4	3.5	8.4
2	2002.11.23 (10:40~11:20)	1,110.0	559.9	0.1	218.5	3.3	8.5
3	2002.12.10 (11:40~12:15)	980.1	555.9	0.1	217.5	3.7	8.3
4	2003.03.29 (14:10~14:50)	2,455.5	1,189.2	6.0	524.9	20.9	28.3
5	2003.04.12 (14:30~15:15)	4,374.6	2,633.8	50.8	1,266.0	107.2	106.5
6	2003.04.26 (15:10~15:40)	360,299.8	365,750.6	57,731.2	172,297.2	215,147.4	306,585.1
7	2003.05.10 (14:15~14:55)	35,895.3	43,297.2	4,726.7	21,831.4	13,161.5	11,176.8
8	2003.05.30 (12:00~12:30)	34,998.3	44,040.7	4,773.7	22,178.8	13,360.1	11,511.6
9	2003.05.31 (16:00~16:45)	262,899.2	289,898.6	44,346.7	141,188.5	164,537.0	203,712.5
10	2003.06.14 (14:30~15:15)	14,230.4	12,192.5	906.7	6,225.4	1,952.9	1,382.0
11	2003.06.19 (20:10~20:55)	17,996.4	15,458.6	1,194.4	7,625.1	2,659.8	2,135.6
12	2003.06.28 (12:30~13:20)	770,668.8	561,235.3	78,618.4	268,120.5	352,192.2	540,785.4
13	2003.06.28 (19:40~20:15)	935,806.6	637,283.6	108,290.3	306,662.8	445,619.3	625,304.6
14	2003.07.07 (20:30~21:15)	202,654.5	227,326.2	40,918.7	115,000.3	137,732.9	133,453.8
15	2003.07.10 (16:00~16:40)	3,729,028.0	2,440,595.7	289,133.6	1,022,411.7	1,654,548.0	5,661,742.2
16	2003.07.10 (23:00~23:40)	5,065,053.0	2,739,385.2	353,298.4	1,116,916.7	1,887,001.4	7,230,566.2
17	2003.07.11 (02:10~02:55)	4,127,533.0	2,376,726.4	320,885.3	968,094.5	1,615,303.7	6,145,768.4
18	2003.07.11 (12:00~12:45)	1,630,811.0	1,218,784.3	129,378.6	543,765.3	731,270.6	2,025,057.0
19	2003.08.17 (15:40~16:15)	1,097.4	551.1	0.1	261.2	3.8	6.7

<표 3.1-35> 동촌지점 산정방법별 총유사량 비교

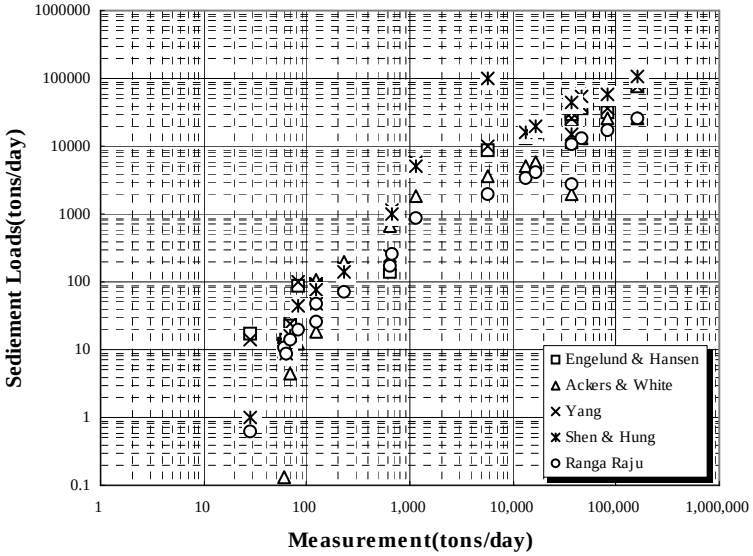
관측 순번	측정 시기	수정 아인슈타인 (tons/day)	E & H (tons/day)	A & W (tons/day)	Yang (tons/day)	S & H (tons/day)	Ranga (tons/day)
1	2002.11.02 (13:30~14:00)	0.4	4.4	0.1	1.6	0.1	0.1
2	2002.11.23 (13:00~13:40)	0.3	29.2	0.1	0.9	0.1	0.1
3	2002.12.10 (14:30~15:00)	0.3	2.2	0.1	0.7	0.1	0.1
4	2003.03.29 (13:00~13:25)	0.1	0.6	0.1	0.2	0.1	0.1
5	2003.04.12 (16:50~17:15)	873.4	51.4	0.1	26.7	0.6	0.5
6	2003.04.26 (17:10~17:40)	178.6	1,592.0	758.8	1,041.5	700.0	201.6
7	2003.05.03 (14:30~15:00)	20.1	211.6	0.3	120.1	5.4	2.8
8	2003.05.10 (16:20~16:50)	21.1	207.4	0.3	118.0	5.3	2.8
9	2003.05.31 (13:40~14:10)	3,192.0	5,281.1	2,752.1	3,585.2	3,391.8	971.4
10	2003.06.19 (23:15~23:45)	13,035.0	19,090.8	8,498.9	12,304.4	15,285.3	4,788.6
11	2003.06.20 (03:35~04:05)	9,420.3	15,324.0	5,920.0	10,027.2	10,678.7	3,200.8
12	2003.06.27 (23:20~23:50)	41,689.5	43,501.0	22,222.8	28,288.1	45,787.9	17,102.1
13	2003.06.28 (10:15~10:45)	556.5	2,956.0	956.6	1,981.8	1,162.5	312.2
14	2003.06.28 (18:25~18:55)	159.5	1,219.4	647.4	836.0	541.2	165.9
15	2003.07.07 (18:10~18:45)	4,624.2	8,858.9	4,409.3	5,959.6	6,342.1	1,860.4
16	2003.07.08 (13:10~13:45)	120.7	1,256.3	449.0	846.4	425.2	122.3
17	2003.07.08 (16:00~16:30)	119.7	1,130.8	414.0	772.4	380.0	111.8
18	2003.07.10 (15:40~16:15)	65,745.0	55,221.3	30,298.9	37,411.6	64,966.2	26,378.5
19	2003.07.11 (17:10~17:40)	81,635.2	72,565.9	35,821.2	47,497.7	83,780.6	35,161.5

<표 3.1-36> 청도지점 산정방법별 총유사량 비교

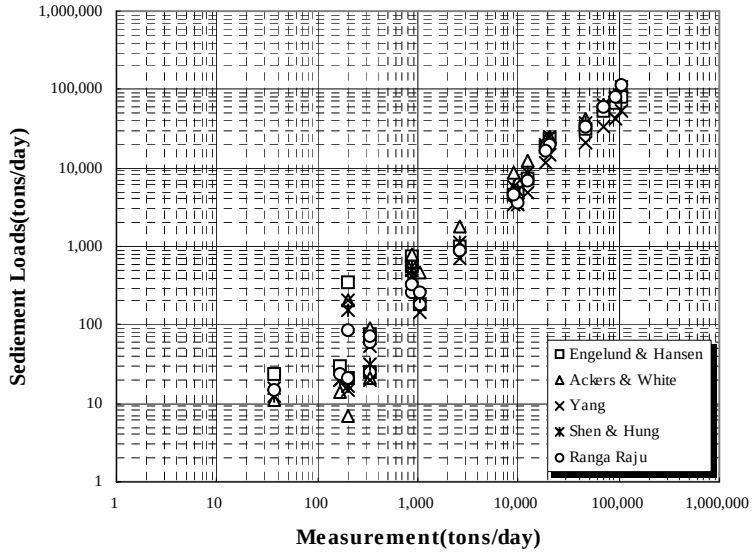
관측 순번	측정 시기	수정 아인슈타인 (tons/day)	E & H (tons/day)	A & W (tons/day)	Yang (tons/day)	S & H (tons/day)	Ranga (tons/day)
1	2002.11.02 (15:10~15:30)	0.4	0.7	0.1	0.3	0.1	0.1
2	2002.12.07 (14:50~15:10)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
3	2003.03.14 (14:30~14:50)	4.2	20.3	1.1	11.4	5.0	3.0
4	2003.03.30 (14:10~14:30)	2.1	10.7	0.1	6.0	2.2	1.9
5	2003.04.29 (15:40~16:00)	69.0	439.5	372.5	296.1	305.5	122.1
6	2003.05.10 (14:35~14:55)	49.6	114.2	20.1	68.8	24.9	9.0
7	2003.06.02 (15:25~15:45)	135.2	235.7	95.3	150.2	90.2	31.7
8	2003.06.14 (14:30~14:50)	97.6	75.2	122.3	56.3	59.8	43.6
9	2003.06.19 (21:20~21:40)	8,871.1	16,468.2	9,663.0	10,220.0	16,831.5	8,670.0
10	2003.06.20 (13:20~13:40)	534.3	12,564.1	731.8	828.4	800.8	281.7
11	2003.07.05 (04:05~04:25)	5,717.6	13,078.0	7,053.5	8,297.0	12,434.8	6,056.6
12	2003.07.05 (11:55~12:15)	9,766.3	19,354.5	9,970.9	12,173.3	19,221.0	10,197.8
13	2003.07.05 (17:32~17:52)	2,463.0	6,988.6	4,014.7	4,564.9	6,208.0	2,698.8
14	2003.07.07 (14:00~14:20)	1,443.8	4,137.7	2,592.9	2,756.7	3,510.0	1,430.2
15	2003.07.11 (13:20~13:40)	5,930.3	11,109.8	6,857.4	7,298.0	11,205.6	5,459.1
16	2003.09.12 (12:30~12:50)	248,219.1	398,400.3	105,297.1	193,306.6	407,829.9	478,551.8
17	2003.09.12 (14:45~15:05)	91,861.9	174,552.7	52,558.7	90,651.7	174,552.7	164,426.7
18	2003.09.12 (16:00~16:20)	58,541.1	102,321.6	37,460.1	56,190.2	106,137.0	84,978.9
19	2003.09.12 (17:00~17:20)	35,745.1	69,938.6	26,136.4	39,288.2	70,217.3	50,712.5

<표 3.1-37> 진동지점 산정방법별 총유사량 비교

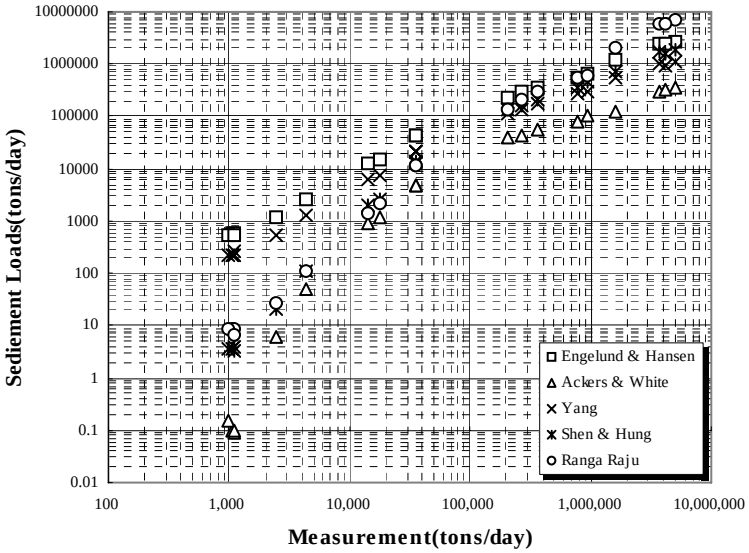
관측 순번	측정 시기	수정 아인슈타인 (tons/day)	E & H (tons/day)	A & W (tons/day)	Yang (tons/day)	S & H (tons/day)	Ranga (tons/day)
1	2002.11.02 (11:40~12:10)	233.6	1,689.0	25.2	692.8	36.4	61.1
2	2002.12.07 (10:50~11:20)	221.2	1,345.5	14.2	533.7	20.8	43.9
3	2003.03.30 (10:15~10:45)	1,665.8	5,236.5	124.4	2,283.6	204.7	444.9
4	2003.04.12 (10:40~11:10)	2,075.6	5,481.1	116.5	2,497.0	207.1	462.9
5	2003.04.19 (10:00~10:30)	6,774.2	5,252.3	113.5	2,389.2	199.4	422.6
6	2003.04.29 (12:10~12:40)	163,739.5	129,430.1	10,042.4	58,936.9	40,331.3	90,832.2
7	2003.05.08 (16:00~16:30)	32,303.5	64,702.5	7,500.9	30,576.2	26,167.3	33,152.9
8	2003.05.10 (10:40~11:10)	312,297.4	203,597.6	12,430.2	90,930.1	61,691.6	235,744.6
9	2003.06.02 (11:15~11:45)	328,393.2	213,482.8	11,757.5	94,474.1	60,858.5	291,547.5
10	2003.06.14 (10:50~11:20)	34,940.4	32,694.3	1,394.7	15,547.0	4,098.2	9,488.2
11	2003.06.19 (22:55~23:25)	169,414.5	137,138.6	8,350.8	61,712.4	36,611.1	120,118.8
12	2003.06.20 (15:05~15:35)	307,550.0	205,803.9	11,621.0	92,224.9	59,884.3	252,225.9
13	2003.06.28 (17:50~18:20)	365,749.3	229,157.6	12,051.4	102,049.3	65,779.8	314,885.6
14	2003.06.29 (10:50~11:20)	797,709.9	555,231.8	32,992.0	239,527.5	218,874.0	1,215,072.6
15	2003.07.05 (19:35~20:05)	1,152,670.0	745,082.7	48,347.6	314,921.6	315,252.8	1,851,116.6
16	2003.07.07 (15:40~16:10)	1,180,033.0	787,041.5	49,743.8	336,281.4	338,325.6	1,904,572.4
17	2003.07.10 (16:40~17:10)	1,031,309.0	730,416.1	45,379.0	313,923.5	317,031.7	1,731,241.6
18	2003.07.11 (11:25~11:55)	5,220,442.0	2,163,438.9	152,424.1	878,897.0	1,180,057.6	7,436,821.1
19	2003.08.16 (10:18~10:50)	4,861.1	10,772.4	260.5	53,712.0	615.1	1,368.3



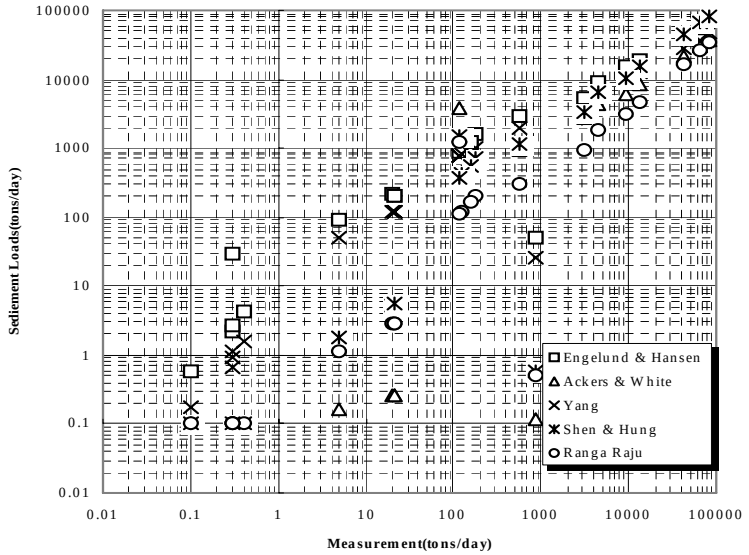
<그림 3.1-51> 월포지점 유사량 산정공식의 비교



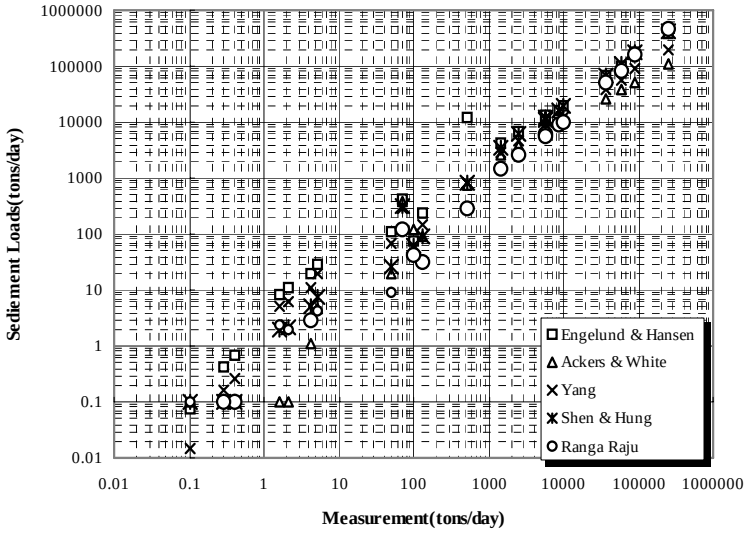
<그림 3.1-52> 김천지점 유사량 산정공식의 비교



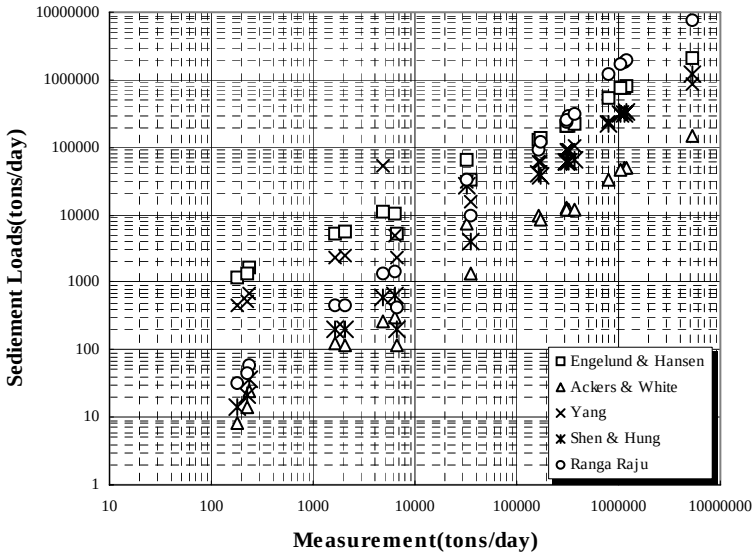
<그림 3.1-53> 왜관지점 유사량 산정공식의 비교



<그림 3.1-54> 동촌지점 유사량 산정공식의 비교



<그림 3.1-55> 청도지점 유사량 산정공식의 비교



<그림 3.1-56> 진동지점 유사량 산정공식의 비교

평가 결과 월포지점 및 왜관지점의 경우 평·갈수시 및 홍수시에 Engelund & Hansen공식이 수정 아인슈타인 공식으로 평가한 기준치에 가장 가깝게 접근하는

것으로 판단된다. 김천지점에서는 평·갈수시 및 홍수시에 Ackers & White공식이 가장 수정 아인슈타인 공식으로 평가한 기준치에 접근하는 것으로 나타났다.

또한 동촌지점은 평·갈수시에는 Shen & Hung공식, 홍수시에는 Ranga Raju공식이 수정 아인슈타인 공식으로 평가한 기준치에 접근하는 것으로 나타났으며, 마지막으로 청도지점 및 진동지점은 평·갈수시에는 Yang공식, 홍수시에는 Ranga Raju공식이 가장 수정 아인슈타인 공식으로 평가한 기준치에 접근하는 것으로 나타났다.

여기서, 유사량 산정공식은 충적하천에만 적용될 수 있으며 하상에 암석이 노출되거나 자갈 등으로 구성된 하천 등에는 적용될 수 없다는 이론적인 배경에 근거를 하고 있으므로 결과치의 신뢰성은 높은 것으로 판단되며, 이번 조사에서 제시한 유사량 산정공식은 하천의 수리특성과 유사특성을 이용하여 그 하천 단면에서의 유사량을 산정하는 방법이다. 이 방법의 기본가정은 흐름에 의해 이송되는 유사는 하천 바닥에 충분히 깔려있어 아무리 강한 흐름에서도 항상 이송되고, 부족하지 않다는 것이다. 계산 결과에서 나온 바와 같이 상류 2지점은 유사가 중·하류 보다는 적지만, 발생 유사량만을 고려할 때 건설재료로 활용하기에 충분한 양인 것으로 판단된다.

다. 하도준설

(1) 국내 하도준설사업현황

하상토가 발생되는 이유 중 대표적인 이유는 하도 준설사업에 인한 하상토 발생 때문이다. 하도준설사업은 건설교통부에서 시행하는 사업으로 전국을 대상으로 오랜 기간 하천에 토사가 퇴적됨에 따라 하상이 높아져 범람이 우려되는 하천에 대해 준설을 실시함으로서 홍수피해방지 및 지역주민의 생계안정 도모가 목적이다. 하도 준설사업의 총사업비는 15,960억원 (전체 26,367, 지방비 10,407)으로 현재 계획된 기간은 1999~2011년이며, 규모는 하도준설 3,795km이고, 지원기준은 2001년까지는 국비의 2/3, 지방비의 1/3이며, 2002년부터는 국비의 60%, 지방비의 40%로 계획되어 있다.

현재 하도준설사업의 추진현황으로는 1999. 7~8월 임진강유역에 대규모 홍수피해가 발생한 것에 대해 홍수피해 항구대책의 일환으로 하도준설 착수 (1999년도 2차추경예산)과 2000년 1월에 전국의 주요하천을 대상으로 하도정비 및 준설사업 실

시해 왔다. 한편, 하도준설 사업의 2004년 예산 편성(안)은 지방비 매칭펀드 사업으로 지방비 확보 등을 감안 전년대비 25% 증액되는 것으로 실시해 왔으며, <표 3.1-38>은 하도준설 사업의 연차별 정부의 투자계획을 나타낸다.

<표 3.1-38> 하도준설 사업 연차별 투자계획

구 분	전체	'02까지	'03예산	'04(안)		장래
				요구	조정	
사업비 (억원)	15,960	1,800	400	600	500	13,260
공 정	100%	11%	14%	18%	17%	100%

(2) 하도준설의 개요

하천공사에서의 준설은 하도에 순차적으로 퇴적하는 토사를 반출하는 유지공사로서 이루어지는 경우와 개보수 계획에 기초하여 하도를 굴착하는 공사로서 이루어지는 경우가 있다.

준설선에는 펌프(pump)식, 버킷(bucket)식, 그래브(grab)식, 디퍼(dipper)식이 있으며, 준설하는 토량, 공사기간, 면적, 수심, 토질, 토사장의 상황, 동력원, 현장조선을 고려하여 적절한 준설공법을 선택하는 것이 중요하다.

최근에는 하천오염 감소를 위한 저니(底泥)준설이 이루어지고 있는데. 준설하는 과정에서 저니를 확산시켜서는 안되며 또한 반출 휘의 토사장에서는 악취, 유기물에 대한 환경문제가 있기 때문에, 기존의 준석공법으로는 미비한 점이 많으므로 저니준설선에 의한 준설을 실시하고 있다.

(3) 준설선의 선정 및 시공

(가) 준설선의 종류

① 펌프(pump)준설선

비교적 단단한 일반 토사를 대량으로 준설하는데 적합한 준설선으로, 샌드펌프를 선상에 설치하여 토사와 물을 함께 흡입하여 준설 한다. 커터를 흡수관 앞에서

회전시켜 토사를 교란시키며 흡입하는 것과 날로 토사를 갈아 교란시키는 것이 있으며 자항식(自航式)과 비항식(非航式)이 있다. 자항실은 선내에 이창(泥倉)이 있어서 토사를 모아 자항하여 토사장으로 운반한다(드래그 석션(Drag Suction)이라고 함). 비항식은 긴 송니관(送泥管)으로 토사장까지 토사를 보낸다. 후자의 펌프선은 일정한 장소에 계류하여 연속으로 준설할 수 있으며 매립공사와 같은 대량 준설공사에 적합하다.

② 그래브(grab)준설선

대선(臺船) 상의 특수한 기중기에 그래브를 현수한 후 이것을 토작하여 토사를 들어 올려 준설작업을 실시한다. 이 준설선의 생명은 그래브의 작업능력에 걸려 있으며 수평의 축을 중심으로 2~4개의 날개가 2줄의 체인 또는 와이어 로프로 개폐하는 그래브에는 다양한 형태가 있다. 이 형식의 것은 단단한 토사의 준설에는 적합하지 않지만 작은 구역의 준설에는 편리하다.

③ 디퍼(dipper)준설선

육상굴착에 사용하는 쇼벨식 굴착기를 대선 위에 설치한 것으로, 대선, A형 가구(架構), 동력부, 스퍼드(spud), 권상기, 디퍼로 이루어진다. 굴착량이 많고 암석이나 단단한 토질에 적합하며 고장이 비교적 적다.

(나) 준설선의 선정

준설 심도, 공사기간, 토량, 토질특성, 토사장까지의 거리, 현장조건, 수상, 기상 등을 검토한 후 종합적으로 감안하여 결정해야 한다. 특히 굴착토의 상태는 토질뿐 아니라 흙의 연경도(硬軟度)가 기종 결정에 많은 영향을 미친다.

또한 선박의 종류에 따라서는 바람, 흐름의 영향을 많이 받는 경우가 있으므로 사전에 기상, 홍수시 유량을 충분히 조사함과 동시에 다른 선박의 운행상황, 작업선의 대피장소도 함께 조사해 두는 것이 중요하다.

각종 준설선의 시공시 특징은 다음과 같다. 또한 각 준설선의 적응토질은 <표 3.1-39>과 같다.

① 펌프준설선

보통, 토사의 대규모 준설에 적합하고 하천 준설에서는 다른 기종에 비해 일반적으로 효율적, 경제적이므로 많이 이용되고 있다. 단, 암반 또는 단단한 토질에는 적합하지 않다. 자항식 펌프선은 준설구역이 산재해 있는 경우 또는 항로 등의 준설에 적합하지만, 일반적으로는 비항식 펌프선으로 작업하는 경우가 많다.

<표 3.1-39> 토질별 적용 선박 종류

토질			적용 선박 종류	적요
분류	상태	N값		
점토질 토사	연니	4미만	P,G	[주] 1. ( )는 쇄암 또는 발쇄(發碎) 후의 적응선박 종류를 나타낸다. 2. P : 펌프준설선 G : 그래브준설선 D : 디퍼준설선 쇄 : 쇄암선
	연질	4~10미만	P,G	
	중질	10~20미만	P,G	
	경질	20~30미만	P,G	
	최경질	30~40미만	P,쇄,(G),D	
	최경질	40~50미만	P,쇄,(G),D	
사질토사	연질	10미만	P,G	
	중질	10~20미만	P,G	
	경질	20~30미만	P,G	
	최경질	30~40미만	P,쇄,(G),D	
	최경질	40~50미만	P,쇄,(G),D	

② 버킷준설선

비교적 광범위하게 준설을 할 수 있으며 능력이 크기 때문에 대규모 준설에 적합하고 준설단가도 비교적 저렴하다. 특히 점성토 준설에 적합하고 암석이나 경질인 지반의 준설에는 불리하다. 일반적으로는 준설한 토사를 다른 토운선에서 받아 운반해야 한다. 악천후, 흐름에 견딜 수 있는 힘은 크지만 선체에서 닻줄을 놓칠 수 있기 때문에 다른 선박의 항행에 장애가 되는 경우도 있으므로 현장조건의 배려해야 한다.

③ 그래브준설선

준설이 중소 규모이고 장소가 비교적 협소한 경우에 유리하다. 따라서 구조물의 앞면과 주변의 준설에 적합하다. 단, 준설능력은 작고 단가도 비교적 높다. 경질인 지반과 점착력이 강한 토질에는 적합하지 않다.

또한 최근에는 대형화된 것도 등장하여 비교적 규모가 큰 준설에도 대응할 수 있게 되었다.

④ 디퍼준설선

굴착력이 커서 다른 기종에서는 곤란한 경질 지반의 준설에 적합하다. 단, 준설능력은 작고 연질(軟質) 토사의 준설은 다른 기종에 비해 단가가 높아진다.

⑤ 저니(底泥)준설선

최근 호수 등의 폐쇄성 수역에서는 물환경 악화 문제가 현저해지고 있다.

원인 중 하나로 퇴적하 저니(유기물)의 분해, 용출을 들 수 있다. 이 개선으로는 퇴적해있는 저니를 직접 제거하는 방법이 유효한 대책이지만, 기존의 펌프준설선(커터식)과 그래브준설선에서는 주변 수역으로의 오염 확산이 발생하는 것, 또한 동일한 펌프준설선(커터리스선)에서도 저니와 함께 대량의 물을 흡인하는 등의 과제가 남는다.

이를 위하여 하천, 호수에 퇴적한 표층의 고함수비 저니를 박층이고 저오염으로 제거할 수 있는 저니준설선이 개발되고 있다.

① 퇴적한 초연약한 표니층(表泥層)을 확산시키지 않고 제거한다.

② 주변 수역으로의 오염확산이 거의 없다.

③ 박층으로 고농도의 준설을 할 수 있다.

④ 여수(余水)처리장이 적다.

(다) 준설에 의한 시공

① 시공개요

하천공사에서 자주 사용되는 펌프준설선에 대하여 소개한다. 준설의 시공내용은

일반적으로 하상의 토사를 준설선에 의해 굴착 양니(揚泥)하고 배사관(상수관, 침설관, 육상관)에 의해 복적하는 토사장소까지 반송함으로써 이루어진다.

② 준설선에 의한 시공

펌프선에 의한 준설은 준설능력을 좌우하는 토질, 준설심도, 양정(揚程), 배니(排泥)거리, 함니량, 작업선의 마모수리와 같은 각 사항을 충분히 조사 검토한 후 실시해야 한다.

○ 준설능력(단위시간당 배니량(排泥量))

준설능력은 토질(입도, 경도, 비중), 흙두께, 준설심도, 양정, 배니거리, 함니율, 관내 유속, 배사관 설치상황과 같은 요소에 의해 좌우되고 각 하천, 시공장소의 상황에 따라 다르므로, 실적치를 기준으로 하여 각종 조건을 조사한 후에 기술적 검토를 추가하여 결정해야 한다.

일반적으로는 해당 지역에서의 준설선 실적을 표시한 성능곡선도(배니거리와 시간당 준설량과의 관계도)를 정리해 두는 것이 좋다.

또한 하도 준설의 경우, 토사장소의 제약, 홍수 때문에 1년간 가동할 수 있는 시간에 제한이 있다. 일반적으로 과거의 실적을 근거로 구한 1년간 준설할 수 있는 토량은 대략 다음과 같다.

▷ 1,000PS, 700,000～1,000,000㎥

▷ 500PS, 400,000～500,000㎥

▷ 200PS, 150,000～200,000㎥

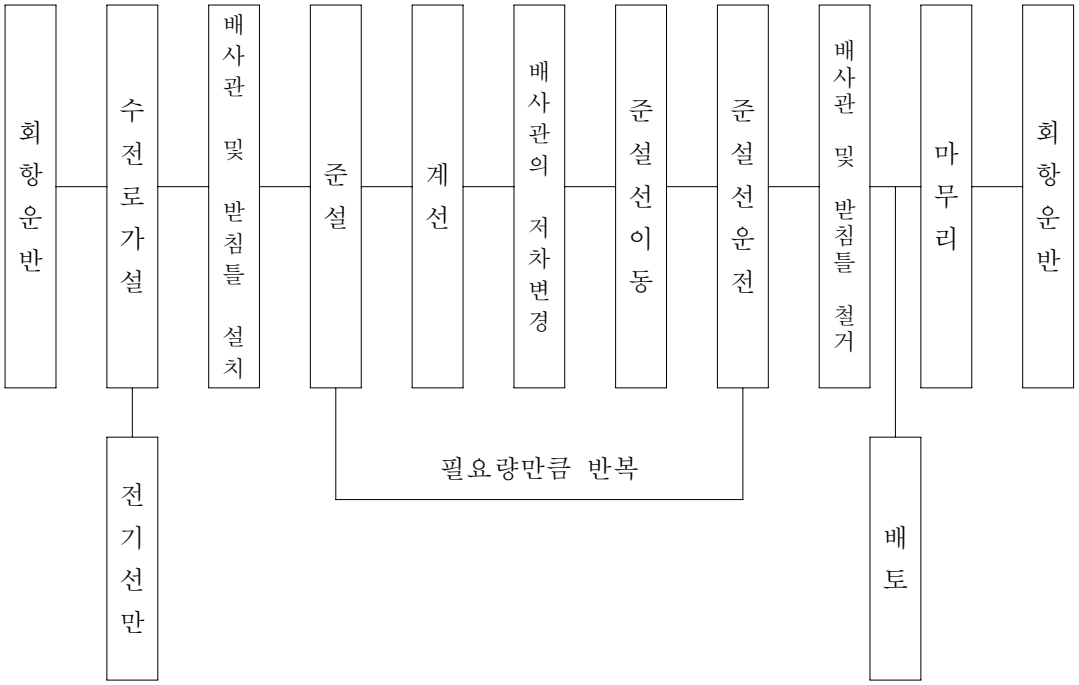
○ 준설토량과 검수

준설토량은 계획준설 단면에 대한 토량으로 하고, 준설 생산토량의 검수는 자동검측・음탐(音探) 등에 의한 적평(跡坪) 검수를 원칙으로 한다.

단, 하천 또는 시공장소의 상황에 따라 하상 토사의 이동이 심하고 준설장소가 단기간에 매몰하여 적평에 의한 검수가 곤란한 경우는 배토(排土) 토량을 확실하게 검수할 수 있도록 각종 대책을 강구한 후에 그 토량을 가지고 준설토량으로 한다.

현재 일반적으로 사용되고 있는 커터펌프식 준설선에서는 계획준설 단면에 대한

여굴(余堀)은 피할 수 없다.



<그림 3.1-57> 준설시공 흐름도

○ 준설심도

펌프준설선의 최대준설심도는 석션(suction) 래더의 길이로 결정된다. 이 길이는 준설선의 크리이트와 관계가 있으며, 일반적으로 <표 3.1-40>과 같다. 석션래더의 각도를 40~50°로 하여 준설하면 접지상태가 양호하고 능률도 높아진다.

<표 3.1-40> 심도별 적용 선박 종류

선 급	최대 심도 (수면 이하)
200PS급	5.0~ 6.0m
500	7.0~9.0m
1,000	10.0~13.5m
1,200	15.0~17.0m

○ 여굴(余堀)

펌프선에 의한 준설은 선박의 형식에 의한 차이는 있지만 여굴은 피할 수 없다. 이것은 선박의 구조적인 것 외에 직접 육안으로 확인할 수 없는 장소의 굴착이기 때문에 본능적으로 안전하게 시공하기 위한 것이다. 여굴 정도는 토질이나 운전기술과도 관계가 있기 때문에 일률적으로 추정하기는 곤란하다. <표 3.1-41>은 허용여굴량의 일례이다. 토사장의 용량 결정시에는 이 여굴량에 대해서도 고려해야 한다.

<표 3.1-41> 디젤선의 여굴 깊이

선급(PS)		여굴깊이(m)	적요
디젤선	250	0.50	현지의 실태를 감안하여 조사 여굴깊이를 결정할 것
	600	0.60	
	1,350	0.70	

○ 배사관(排砂菅) 설비

배사관 설치는 준설장소부터 토사장소에 이르기까지의 지형지물을 잘 조사한 후에 직접 설치하거나 받침틀을 사용 등 지형에 적합한 설치방식을 선택해야 한다. 제방을 횡단하여 설치할 경우, 홍수기에는 제방 파손의 원인으로도 이어지므로 개삭(開削)하지 않고 포설하는 것이 바람직하다. 토사장소의 포설은 이용 목적 외에도, 매립이나 객토(客土)의 경우 가능한 한 평탄하게 토사를 버리는 것이 요구되므로 퇴적 경사가 완만한 이토(泥土)의 경우 150m 전후, 굵은 모래의 경우 70m 전후의 밀도로 포설하는 것이 바람직하다. 한편, 수로를 횡단하여 설치할 경우, 주운에 지장을 초래할 때는 침설관을 설치한다.

○ 토사장소의 임시설비

토사장소에서 토사가 유출하지 않도록 하기 위하여 흙막이공이 필요하다. 흙막이공 설치 공법으로서는 판자울얽기, 소축제(小築堤) 등이 있으며, 토사장의 상황, 준설선의 크기, 토질에 따라 공법을 선택한다. 일반적으로 판자울에 비해 소축제가 경제적인 것으로 알려져 있으며, 준설한 토사는 물과 함께 토사장소로 배송되므로

배수가 필요하다. 이때, 토사는 모두 토사장소 내에 침전시키고 물만 기존 수로 등을 통해 하천에 배수시키지만 필요에 따라 탁수(濁水) 설비를 설치하는 경우도 있다.

○ 굴진(掘進)방법

비항식 펌프준설선은 선체의 뒷부분에 2개의 스팻(spat)을 가지고 있다. 이 중 1개를 준설폭의 중심선 상에 타입한 후 이것을 축으로 하여 선체 양측의 100~150m에 앵커를 두고, 래더의 선단을 통해 연결한 스윙와이어의 한 쪽을 윈치로 감아 조이고 다른 한 쪽을 느슨하게 하면서 70~90°로 선회하며 준설한다. 동시에 커터의 심도도 점차적으로 내려 일정한 깊이에 도달할 때까지 선호 준설을 반복한다.

펌프선을 능률적으로 운전하기 위해서는 펌프의 성능곡선에 따라 작업가능 범위 내에서 운전해야 하며, 배니거리나 토질의 변화에 따른 조정을 실시하게 된다.

이때, 배니거리가 너무 짧은 경우에는 펌프의 토출압력, 출력은 감소하지만 가장 간편한 방법으로 배니관의 토구(吐口)에 조임판을 설치하여 저항을 증가하고 짧은 배니거리를 능률적인 것으로 연장한 것과 동일한 상태로 하는 방법이 있으며, 다음으로 펌프의 회전수를 감소시키는 방법이 있다. 펌프의 회전수를 감소시키면 유량이 감소함과 동시에 토출압력, 출력도 감소하므로 경제적이고 가장 이상적인 방법이다.

한편, 배니거리가 너무 길어 배니관 내의 유속이 지나치게 작아 토사를 배송할 수 없는 경우는 관내 유속을 증가시켜야 한다. 관내 유속 증가 방법은 직류모터의 경우는 회전수를 늘리고 정속모터에서는 임펠러 지름이 큰 것을 사용하여 임펠러(impeller)의 주속도를 늘리는 방법이 있으나, 모터가 과부하가 되지 않도록 주의해야 한다. 여기서, 출력에 여력이 없는 경우는 가는 배니관을 가용하여 펌프의 유량을 작게 하면, 이 때문에 발생한 출력의 여유분만큼 임펠러의 주속도를 늘려 관내 유속을 증가시킬 수 있다.

또한 1대의 펌프선으로 배송능력이 부족한 경우는 종계펌프(부스터 펌프)를 배사관 중간에 직렬로 배치하여 운전한다. 이 경우의 중계펌프는 주펌프와 용량이 거의 동일하고 특성 곡선이 유사한 것을 사용하여 준설선의 펌프에 과잉부하가 걸리지 않도록 하는 것이 좋다.

○ 배사관 및 토사장소의 보수

준설선의 운전 중에는 배사관의 누수나 토사 침체에 의한 배사관 파열 사고를 방지하기 위하여 끊임없이 확인하여야 한다. 또한 토사장소의 소축제가 준설선에서 배출되는 다량의 물에 의해 항상 잠겨있기 때문에 내측을 비닐시트 등으로 보호하며, 월류(越流)나 누수, 붕괴를 미연에 방지하기 위하여 항상 감시해야 한다.

여기에 필요로 하는 노력은 준설선의 크기, 배사관의 연장, 토사장소의 상황에 따라 다르지만 충분히 검토한 후에 배치해 두지 않으면 다른 피해가 발생하는 사고의 원인이 된다.

③ 준설 시공 시 유의사항

○ 준설 시의 하천 오염에 대한 대책을 충분히 실시해야 한다. 일반적으로 준설 지역을 둘러싸도록 오염방지막을 설치하고 있다.

○ 홍수 시의 대피, 계류방법에 대해서는 사전에 꼼꼼한 조사와 안전한 대책이 마련되어야 하며, 작업중지와 대피에 대한 판단기준도 작성해 두어야 한다. 일단 선박이 홍수 시 떠내려가게 되면 준설선 자체의 파손을 초래하게 되고, 이외에 교량이나 제방에 중대한 손상을 주게 되어 사회적으로도 큰 문제가 되므로 주의해야 한다.

○ 준설선의 고정이나 배사관의 포설 시에는 하천구조물 등에 손상을 주지 않는 위치와 방법을 선택하여야 한다.

○ 일반적으로 하천의 경우 주운이 있으므로, 안전한 항로 확보에 주의하여야 한다.

○ 하상 또는 하안을 필요 이상으로 지나치게 굴착하면 부근의 호안, 교량과 같은 구조물에 영향을 미치게 되므로 시공 시 주의하여야 한다.

○ 홍수 시 또는 유속이 큰 하천의 경우 준설부분의 토사 이동이 심한 장소에서는 준설방법을 사전에 결정해 두는 것이 중요하다.

○ 펌프준설선의 경우 토사장소가 제방에 인접해 있으면 배니(排泥)와 함께, 배출되는 물에 의해 제방의 안정성에 악영향을 미치는 경우가 있으므로 주의가 필요하다.

라. 소결론

본 절에서는 국내 하상토 침식 및 퇴적 메커니즘을 분석하고, 현장측정자료를 이용한 국내 활용 유사량 공식의 적용성을 평가하여 다음과 같은 결론에 도달하였다.

(1) 하상토 침식/퇴적 메카니즘, 하상토 발생량, 유사량 평가방법 등을 분석·정리 하였다.

(2) 국내 4대강 권역 1일 하상토 발생은 한강권역 40만m^3, 금강권역 20만m^3, 섬진강·영산강권역 20만m^3, 낙동강 권역230만m^3등으로 나타났으며, 낙동강 권역은 하상토 발생량이 국내 최대로 나타나, 하상토 처리에 대한 합리적인 국가차원의 준설토 활용계획이 요구된다.

(3) 낙동강 수계 6개 지점의 실측자료를 이용한 수정 아인슈타인 공식에 의해 산정된 결과를 기준치로 하여 비교한 결과, 유사량은 평·갈수시 및 홍수시에서 월포 및 왜관지점의 경우 Engelund & Hansen공식이, 김천지점의 경우 Ackers & White공식이, 동촌지점의 경우 평·갈수시 Shen & Hung공식, 홍수시 Ranga Raju공식이, 청도 및 진동지점이 경우 평·갈수시 Yang공식, 홍수시 Ranga Raju공식 등이 가장 접근하는 것으로 나타났다.

(4) 2002년~2003년도까지의 관측소 분석 결과, 하상토 활용은 상류 2지점(월포, 김천)의 경우 유사가 중·하류 보다는 적지만, 유사량 만을 고려하면 제방재료로서 하상토 활용 대책이 시급한 것으로 판단된다.

4. 현장 다짐 및 혼합장비

가. 다짐장비의 현황 및 특성

(1) 현장다짐 개요

다짐은 램머, 컴팩터, 롤라 등과 같은 다짐장비를 이용하여 흙에 다짐에너지를 가함으로써 최종적으로는 흙의 간극특성(단위중량)을 변화시키는 작업이다. 다짐은 다짐장비의 종류(다짐하중 크기 및 다짐하중 특성), 다짐횟수, 함수비, 재료의 종류, 다짐깊이 등에 영향을 받는다.

현장 다짐관리는 최소 관리기준으로 성토체 각 층이 소정의 상대다짐도를 모두 만족시켜야 한다. 예로써 하천제방은 제방구간의 경우 상대다짐도 90%로, 배수통문과 같은 구조물 구간의 경우 95%로 관리한다. 따라서 현장다짐은 계획 수립 시 재료의 종류 및 상태에 따른 다짐 필요 유무, 다짐방법 등을 결정해야 한다. 이때, 현장 다짐방법은 사용 재료에 대한 다짐시험 결과에 의해 결정되며, 재료 종류에 따라 다음과 같은 방식이 있다.

(가) 다짐을 필요로 하지 않는 경우

모래, 쇄석 또는 큰 돌이 섞인 흙 등은 재료적 입도특성에 기인하여 장비 다짐한 전·후의 다짐밀도변화를 발생시키지 않기 때문에 다짐이 불필요하며, 포설두께를 상대적으로 크게 할 수 있다. 또한, 샌드 펌프(sand pump)와 같은 수중 준설은 성토 시 특별한 다짐을 필요로 하지 않는다.

(나) 물 다짐

물다짐(water binding)은 재료가 사질토일 경우 적합한 다짐기법이다. 본 기법은 특별한 기계장비와 주의를 필요로 하지 않는 기법이며, 공법상 제약으로 다른 수단이 사용될 수 없는 성토 현장에 사용한다.

(다) 다짐장비에 의한 다짐

다짐작업의 효율성은 토질 종류에 따른 장비선정에 의해 크게 좌우된다. 따라서

시공 현장에서 다짐장비 선정은 관련 지식과 경험을 요구하는 동시에 토질, 함수비, 지형 조건 등에 대한 충분한 조사와 공사시방서, 공사량, 시공 속도 등을 잘 숙지한 다음 판단하여야 한다.

① 다짐 작업 시 고려사항

○ 다짐 두께

다짐 두께는 다짐 영향이 충분히 전달될 수 있는 흙의 두께를 말하며, 현장토 최대 입경, 소요다짐기준, 다짐장비 등 3가지 요인에 의해 결정한다.

이때, 다짐두께는 현장토 최대 입경의 2배보다 작아서는 안 되며, 구조물 종류에 따른 소요다짐기준을 만족하는 효율적인 다짐두께를 선정하여야 한다. 한편, 다짐장비에 따른 다짐두께의 변화는 크지 않으며 각종 시방서에 규정되어 있다. 예로써, 다짐두께는 30t 이하 롤러로 다짐할 경우 30cm 이하가 좋고 20cm 전후가 가장 많이 활용된다. 또한, 다짐두께는 흙의 포설두께가 얇을수록 좋으나, 시공성 및 경제성이 저하되는 특성이 있다.

○ 부가하중(ballast)

부가하중은 롤러 자중만으로 전압능력이 적을 경우 전압능력을 높이기 위한 추가 하중을 이르는 말이다. 부가하중은 타이어 롤러의 경우 물탱크를, 머캐덤, 탠덤, 탬핑 롤러 등의 경우 롤(바퀴)에 철, 물, 모래 등을 이용한다. 일반적으로 부가하중은 자중의 2배 이상으로 추가 될 수 있다.

한편, 다짐장비는 부가하중(ballast)에 따라 자중 변화를 유도할 수 있는 것이 많으나 부가하중이 무거울수록 반드시 좋은 것은 아니며, 다짐작업은 장비하중이 지반 지지력을 초과할 경우 지반 파괴를 유발시킴으로, 초기 다짐 시 부가하중 없이 수행하고, 점차 중량을 증가시키면서 한다.

○ 기상조건

기상조건은 강우량이 많고 습기가 많을 경우 다짐 작업에 큰 영향을 미친다. 강우는 다짐작업 시 함수비 조절이 곤란하거나 불가능하게 하며, 기온은 다짐작업에

특별한 영향을 미치지 않으나 기온이 0℃이하로 내려갈 경우 흙내 수분이 동결됨으로써 흙의 자체 결합으로 인한 다짐 효과를 저하시키므로 다짐작업 시 이에 유의하여야한다.

○ 시험성토

대규모 성토나 토질 조건이 문제가 되는 성토 시공은 시험 성토를 한 후 시공법을 결정하는 것이 시공 관리뿐만 아니라 경제적으로도 좋다. 시험 성토는 토질, 함수비, 최대 성토의 높이, 포설 방법, 다짐장비의 종류와 크기, 속도, 다짐 횟수 등과 관련된 정보를 얻을 수 있으며, 다짐장비는 다짐두께, 부가하중 및 타이어 공기압 등을 변화시키면서 2~3회 실시한 결과를 토대로 선정한다.

○ 경사면 다짐

경사면 다짐은 진동 컴팩터(vibrating compactor), 진동 롤러(vibration roller) 등에 의한 방법이 있으나, 경사가 낮은 경우 불도저 혹은 유압식 셔블로 경사면을 정리한 후 진동 롤러를 이용하여 경사면을 따라 로프로 감아올리면서(아래서 위로) 다짐 할 수 있다.

○ 다짐속도 · 다짐횟수 · 다짐순서

다짐속도, 다짐횟수, 다짐순서는 시험 성토에 의하여 결정하는 것이 좋다. 일반적으로 다짐속도는 소성이 있는 흙의 경우 느리게 하고, 입상 모양의 흙의 경우 빠른 속도가 효과적이다. 특히 소성이 있는 흙은 속도가 늦을 경우 다짐 영향 범위가 넓어지는 경향이 있으며, 특히 진동식 롤러는 진동이 충분히 흙에 전달되도록 느린 속도가 요구된다.

이때, 일반적으로 다짐은 보통 흙인 경우 1회 통과 보다 2회 통과에서 다짐효과가 적고, 3회, 4회를 통과함에 따라 점차 다짐효과가 저하되어 어떤 횟수 이상에선 거의 효과가 없어진다.

② 흙 종류에 따른 다짐장비별 다짐특성

다짐은 흙의 함수비를 변화시키지 않고 흙에 다짐에너지를 가하여 간극 속에 있는 공기를 배출시켜 입자간 결합을 치밀하게 함으로써 단위중량을 증가시키는 과정이며, 장비에 의한 에너지 전달 능력에 의해 그 효율성이 결정된다. 이때 다짐장비는 에너지 전달 수단으로 정하중, 짓이김 작용, 진동, 충격하중 등을 발생시켜 흙으로 복합적인 에너지를 전달한다. 운행방식에 의해 다짐장비는 굴러서 다지는 전동식, 일정한 높이에서 낙하하는 충격식, 진동 가속도를 이용한 진동식 등으로 분류된다.

흙 종류에 따른 다짐장비의 선택은 위에서 언급한 발생 에너지 형태와 접촉면을 고려해서 결정하며, 일반적으로 점성토는 정하중과 짓이김 형태가 좋고, 사질토는 진동과 충격이 효과적이다. 또한, 다짐장비는 사질토의 경우 쇠바퀴가, 점성토의 경우 타이어와 같은 접촉면의 강성을 고려한다.

토질에 따른 최적 장비와 그 전달 에너지는 <표 3.1-42>와 같다. <표 3.1-42>에서 보듯이 점토는 시프트 롤러, 타이어 롤러, 쇠바퀴 순으로, 모래는 진동, 쇠바퀴, 타이어 롤러 순으로 다짐효율이 좋으며, 돌 및 암석 등의 다짐은 무거운 쇠바퀴 롤러에 진동을 가해 줄 경우 최대 효과가 발생된다.

롤러 규격은 그 중량으로 표시하고 부가하중(ballast)을 추가할 경우 몇 톤이라고 표시한다. 롤러 성능 및 능력은 선압, 윤하중, 접지압, 기진력, 다짐폭 등으로 표시된다. 예로써 로드 롤러(road roller)라고 불리우는 머캐덤(macadam), 탠덤(tandem) 등은 윤하중을 폭으로 나눈 선압으로 다짐능력을 표시한다. 한편, 타이어 롤러는 한 개의 차륜에 작용하는 하중 또는 타이어의 공기압과 비례하는 접지압으로 표시하며, 진동 롤러는 기진력으로 다짐 능력을 판단한다.

여기서, 롤러의 폭은 다짐 면적을 늘리는 데는 기여하나 선압력, 접지압이 감소되므로 다짐 효과를 감소시킨다. 따라서 다짐장비는 선압이 크거나 접지압이 큰 롤러를 선택해야 한다.

<표 3.1-42> 토질조건에 따른 최적장비와 전달 에너지

<table>
<tr><td colspan="7">토 질 조 건</td><td rowspan="3">전달 에너지</td></tr>
<tr><td>점토</td><td>20%</td><td>40%</td><td>60%</td><td>80%</td><td>100%</td><td rowspan="2">rock</td></tr>
<tr><td>100%</td><td>80%</td><td>60%</td><td>40%</td><td>20%</td><td>모래</td></tr>
<tr><td colspan="3">sheep's foot roller</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>정하중, 짓이김</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td colspan="2">grid roller</td><td>정하중, 짓이김</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td colspan="3">vibrating roller</td><td>정하중, 진동하중</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td colspan="4">smooth steel roller</td><td>정하중</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td colspan="3">multi-tired roller</td><td></td><td>정하중, 짓이김</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td colspan="5">hearth pneumatic fired roller</td><td>정하중, 짓이김</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="4">towed tamping foot</td><td></td><td></td><td>정하중, 짓이김</td></tr>
<tr><td rowspan="2">sheep's foot</td><td colspan="4">high speed tamping foot</td><td></td><td></td><td>정하중, 짓이김, 충격, 진동</td></tr>
<tr><td colspan="4">tamping foot</td><td colspan="2">rock tamping foot</td><td>정하중, 짓이김, 충격, 진동</td></tr>
</table>

<표 3.1-43>에서는 흙 종류별 다짐장비의 적합성을 보여준다. 사질토지반에서는 진동을 가하는 다짐장비가 유효하고, 점성토지반에서는 정적하중이 큰 타이어롤러 계통의 다짐장비가 유효하다. 또한, 암버럭 성토지역인 경우에는 양족 롤러나 진동 롤러 등이 주로 사용되는 것을 알 수 있다. 또한, 다짐장비의 다짐횟수는 각 장비별로 4~8회 왕복으로 소정의 다짐도를 획득할 수 있는 것으로 되어있다.

한편, 롤러 운행속도는 에너지를 효과적으로 지반에 전달되도록 점성토의 경우 느리게, 사질토의 경우 빠르게 운행한다. 장비별 운행속도는 롤러의 경우 1~7km/h 이고, 탠덤 롤러의 경우 2~3km/h, 머캐덤 롤러의 경우 3~5km/h, 진동 롤러의 경우 1~2km/h, 타이어 롤러의 경우 4~7km 등 이다. 소일 컴팩터는 5~10km/h 로 고속·운행 한다. <표 3.1-44> 및 <표 3.1-45>는 다짐장비 유효다짐 폭과 표준 다짐속도 및 다짐시공 시 다짐장비의 적성 토질, 적성 공종, 포설두께, 다짐횟수, 표준속도 등을 나타내고 있으며, <표 3.1-46>는 다짐장비에 대한 일반적인 기준을 나타내고 있다.

<표 3.1-43> 흙 종류별 다짐장비의 적합성 (철도청, 1999)

다짐장비 / 흙의 종류	타이어롤러		진동 롤러		자주식 소일 컴팩터	견인식 탬핑 롤러	진동 컴팩터	램머/ 탬퍼	로드 롤러	비탈 다짐기
	자주식	견인식	자주식	견인식						
GW, GP	○	○	◎	◎						
GW-GM GP-GM GW-GC GP-GC	◎	◎	○	○	○					
GM	◎	◎	○	○		○				
SW	◎	◎	○	○					○	
SP-SM SW-SM SP-SC SW-SC	◎	◎	○	○						
경암버럭			◎	◎					○	
GC	◎	◎				○				
SC	◎	◎				○				
SP		○	○	◎						
SM		◎				◎				
연암버럭 리핑암 버럭	○	○	◎	◎						
ML, CL	○	○				◎				
비탈어깨 비탈면		○					○	○		◎
구조물 근접부							○	○		◎

◎ : 유효 ○ : 사용가능

<표 3.1-44> 다짐장비의 유효다짐 폭과 표준 다짐속도(철도청, 1999)

다짐장비명		규격(tf)	유효다짐 폭 (m)	표준 다짐속도 (km/h)
로드 롤러	머캐덤 롤 러	6~8 8~10 10~12 12~15	0.7 0.8 0.8 0.9	1.5~2.0
	탠 덤 롤 러	6~8 8~10 10~13	1.1 1.1 1.2	2.0
타이어 롤러		5~9 8~15 12~25	1.4 1.8 2.0	2.5
진동 롤러		1.5 2.5 4.4	0.7 0.7 0.8	1.0
진동 컴팩터		0,5 1.6	0.4 0.9	0.6 0.8

<표 3.1-45> 다짐시공시 표준치

다짐장비명	적성토질	적성공종	포설두께 (cm)	다짐횟수	표준속도 (km/h)	비고
탠덤 롤러	자갈, 사질토	노상, 마무리	20	5~8	2~2.5	
머캐덤 롤러	자갈, 사질토	쇄석기층, 노상, 노반, 아스팔트 포장초기	20	5~8	2~2.5	
타이어 롤러	롬질토, 점질토, 사질토, 자갈	노상, 노반, 성토공, 아스팔트 포장초기	20~30	5~8	3~4	넓은 범위의 토질 공종에 적합
탬핑 롤러	롬질토, 점질토	노상, 연약지반의 토공	20~30	6~10	4~8	고함수비의 점성토에 적합
진동 롤러	사질토, 자갈	노상, 노반	20~30	8	1~2	
진동 컴팩터	사질토, 자갈	노상, 노반	15~25	4~8	0.4~0.8	
탬퍼, 램머	자갈, 사질토, 롬질토	협소부지	15~25	4~8		비교적 넓은 범위의 토질

<표 3.1-46> 다짐장비에 대한 일반적 기준

토사 성토	암 성토
○ 그레이더 3.6m ○ 진동 롤러 6ton 이상 ○ 타이어 롤러 접지압 5.6kg/cm²이상 ○ 살수차 5.500L 이상	○ 도우저 32 ton 이상 ○ 양족식 롤러 또는 824, 825 콤팩터 ○ 브레이커

(2) 다짐장비

다짐장비는 다짐방법에 따라 다음과 같이 자체 중량을 이용하는 전압식, 진동을 이용하는 진동식, 충격력을 이용하는 충격식 등이 있다.

(가) 전압식

전압식은 표면이 평활한 철륜(롤러) 자중에 의하여 흙이나 아스팔트를 정적으로 다지는 것으로 로드 롤러, 타이어 롤러, 탬핑롤러 등이 있다.

① 로드 롤러(road roller)

로드 롤러는 평탄한 성토면의 다짐에 적합하며, 머캐덤 롤러(macadam roller), 탠덤 롤러(tandem roller) 등이 있다. <표 3.1-47>에서는 로드 롤러의 적용토질을 보여준다.

<표 3.1-47> 로드 롤러의 적용 토질

기층	적용토질
머캐덤 롤러	쇄석 기층의 다짐
	로움질토, 점성토
	아스팔트 포장의 초기 전압
탠덤 롤러	로움질토, 점성토
	아스팔트 포장의 마무리 전압

머캐덤 롤러(macadam roller)는 <그림 3.1-58>에서 보듯이 앞바퀴 1개, 뒷바퀴가 2개인 3륜 자동차와 같은 형태로서 뒷바퀴로 구동 하고, 앞바퀴로 조향을 한다. 본 장비는 아스팔트 초기 다짐에 주로 사용되며 자갈·모래 및 흙 등을 다지는데 매우 효과적이다.

머캐덤 롤러는 자중 10~12톤급이 많고, 축하중 분포의 경우 전륜 3, 후륜 7 정도이다. 본 장비의 선압력은 전륜의 경우 25~30kg/cm이고 후륜의 경우 61~82kg/cm 등으로 후륜측 다짐효과가 크다. 롤러의 운행은 롤러 폭의 1/2~1/4을 겹치게 다짐을 한다. 국내 사용 머캐덤 롤러는 <표 3.1-48>과 같다.



<그림 3.1-58> 머캐덤 롤러

<표 3.1-48> 국내 사용 머캐덤 롤러의 제원

모델명	capacity (ton)	중량(ton)				최대 압력 (kg/cm^2)				power (PS)	속도	
		empty		W/ballast								
		전	후	전	후	전	후	전	후		기어 수	km/h
Sakaiwm7608	8~10	2.56	5.44	3.38	7.12	2.7	68.5	125	52	58	3	2.5~10
Sakaiwm7610	10~12	3.2	6.8	4.02	8.48	32.2	81.5	125	52	57	3	2.5~10

한편, 탠덤 롤러(tandem roller)는 <그림 3.1-59>에서 보듯이 앞바퀴와 뒷바퀴가 일직선으로 되어있으며, 2륜식 및 3륜식으로 앞바퀴의 경우 조향에, 뒷바퀫의 경우 구동에 사용된다. 본 장비는 아스팔트 마지막 다짐작업에 가장 효과적이며, 자갈이

나 쇄석 골재 등을 다져서는 안 된다. 탠덤 롤러는 자중의 경우 8~10톤, 하중배분의 경우 전륜 4, 후륜 6, 후륜 선압력의 경우 40~50kg/cm 이다. 국내 사용되는 탠덤 롤러는 <표 3.1-49>와 같다.



<그림 3.1-59> 탠덤 롤러 (2륜식)

<표 3.1-49> 국내 사용 탠덤 롤러의 제원

모델명	capacity (ton)	중량(ton)				최대 압력 (kg/cm^2)				power (PS)	속도	
		empty		W/ballast								
		전	후	전	후	전	후	전	후		기어 수	km/h
Sakaiwm7706	6~8	2.76	3.84	3.58	5.22	31.1	41.1	115	127	58	3	2.1~8.0
Sakaiwm7708	8~10	3.2	4.8	4.0	6.0	34.8	47.3	115	127	58	3	2.1~8.0

② 타이어 롤러(tire roller)

타이어 롤러는 <그림 3.1-60>에서 보듯이 다수의 공기 타이어를 장착하여 다짐효과를 발휘한다. 본 장비는 조향륜인 전축이 3~5개, 구동축인 후축이 4~6개의 타이어를 장착하고 있으며, 앞바퀴와 뒷바퀴의 동선이 달라 1회 통과로 빠짐없이 전폭을 다지게 된다. 공기 타이어는 쇠바퀴에 비해 점착계수가 크기 때문에 큰 견인력으로 구배가 있거나 미끄러지는 조건에서도 다짐을 할 수 있고, 주행속도가 최고 25km/h 정도로 이동도 가능하다.

타이어 롤러는 타이어 압력과 접지면적으로 다짐능력이 결정된다. 본 장비는 타

이어 공기압을 높이면 다짐능력이 커지고, 공기압을 줄이면 다짐능력이 작아져, 약한 지지력을 갖는 지반에서도 다짐을 할 수 있다. <표 3.1-50>에서는 타이어 롤러의 적용 토질에 따른 접지압력을 나타낸다.

타이어 롤러는 부가하중(ballast) 및 타이어 공기압 등으로 함수비기 높은 토사와 쇄석을 제외하곤 광범위한 시공조건에 적응하여 효과적인 다짐을 할 수 있다. 국내에서 사용되는 타이어 롤러는 <표 3.1-51>과 같다.



<그림 3.1-60> 타이어 롤러

<표 3.1-50> 타이어 롤러의 접지압력

흙의 분류	접지압력(타이어 공기 압력)
모래, 사질토	1.4~2.8 kg/cm^2
점토가 많은 사질토	2.8~4.2 kg/cm^2
점토질 흙	4.6 kg/cm^{2}이상

<표 3.1-51> 국내 사용 타이어 롤러의 제원

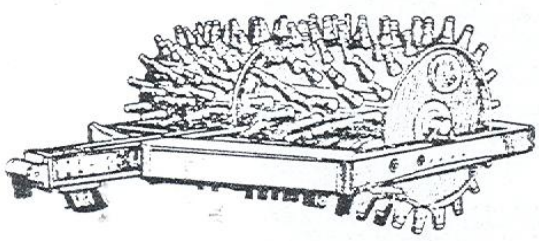
모델명	capacity (ton)	중량(ton)				최대 압력 (kg/cm^2)				power (PS)	속도	
		empty		W/ballast								
		전	후	전	후	전	후	전	후		기어 수	km/h
SakaiTC6709	8~9	3.1	50.	3.55	5.15	1.183	1.287	3	4	68	2	0~16
TA 7510	11~29	4.14	6.56	12.09	16.91	4.030	4.230	3	4	95	4	3.3~23.6
TS 360	11~36	6.54	9.66	15.30	50.40	5.100	5.100	3	4	118.5	2	0~12

③ 탬핑 롤러(tamping roller)

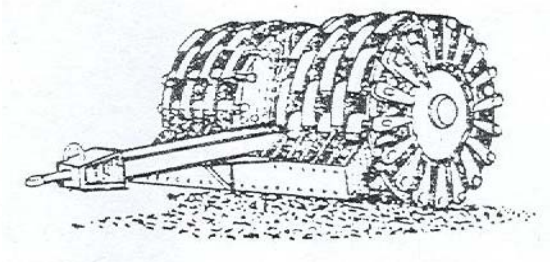
탬핑 롤러는 강판제 드럼 바깥 둘레에 여러 개의 돌기(tamping foot)가 용접으로 고정되어 있어 흙 이완효과, 흙의 파쇄 및 간극수압 제거효과 등으로 함수비가 많은 점토 다짐에 적합하다. 본 장비 종류는 쉬프트 롤러(sheep foot roller), 그리드 롤러(grid roller), 태퍼 풋 롤러(tapper foot roller), 턴 풋 롤러(turn foot roller) 등이 있다.

여기서, 쉬프트 롤러는 <그림 3.1-61>에서 보듯이 무겁고 속이 빈 드럼에 돌기가 배열되어 있어 흙을 다질 수 있는 롤러이다. 본 장비는 흙의 종류에 따라 셀을 교체할 수 있는 특징이 있다.

한편, 턴 풋 롤러는 <그림 3.1-62>와 같으며, 시프트 롤러로 다질 수 없는 표층 두께가 200cm 이상인 연약지반에서 사용된다. 본 장비는 급경사 전압이 가능하고, 그물 눈모양의 바퀴를 사용하므로 흙의 유동을 억제하는 효과가 있다.



<그림 3.1-61> 쉬프트 롤러



<그림 3.1-62> 턴 풋 롤러

(나) 진동식

진동식 롤러는 진동 롤러(vibratory roller), 진동 컴팩터(vibratory compactor) 등이 있으며, 사질토 성토에 많이 사용된다. 특히, 진동 롤러는 각종 건설재료의 다짐에 사용할 수 있는 장비로, 아스팔트 포장, 댐 콘크리트, 제방 및 도로 경사지 모서리 다짐 등에 사용된다. 진동 롤러는 차륜 내 기진기를 장착하여, 자중의 1~2배 기진력으로 진동을 주어 토사의 전단저항력을 감소시켜 다짐 한다. 진동 롤러는 자체 중량이 가벼워도 진동에 의한 타격력에 의하여 토사가 다져지므로 포설 두께가 두꺼워지고, 다짐 횟수를 줄일 수 있다.

<그림 3.1-63>에서는 진동롤러를 보여주며, 흙 종류에 따라 평활한 드럼

(smooth drum)과 양족식(padded drum) 등이 있다. 국내 사용 진동 롤러 제원은 <표 3.1-52>와 같다.



<그림 3.1-63> 진동 롤러

<표 3.1-52> 국내 사용 진동 롤러 제원

caterpillar 모델		CS 323C	CS 433C	CS 533C	CS 583C	CP 323C	CP 433C	CP 533C
드럼 형태		smooth	smooth	smooth	smooth	padded	padded	padded
fly wheel power(PS)		70	105	145	145	70	105	145
속도	전방향 gear×max 속도	1×8.9	2×12.8	2×12.8	2×12.8	1×8.9	2×1.33	2×12.8
	회전 gear×max 속도	1×8.9	2×12.8	2×12.8	2×12.8	1×8.9	2×1.33	2×12.8
중량(kg)		4,540	6,670	9,397	15,460	4,745	6,912	10,760
진동	frequency(Hz)	6,680	12,727	24,060	31,750	6,680	12,460	23,600
	max. force							
드럼 폭(cm)		127.0	168.0	213.0	250.8	12.0	168.0	213.0

한편, 진동 컴팩터는 <그림 3.1-64>에서 보듯이 점성토를 다지는데 사용되며 중량, 풋 모양, 배열 형태 등에 따라 다짐 효과가 달라지므로 흙 종류에 따라 풋의 모양과 배열을 택한다. 진동 컴팩터는 불도저와 같은 배토판을 장착하고 있어서 포설작업도 할 수 있다.

(다) 충격식

① 램머(rammer)

램머는 소형이고 가볍기 때문에 대형기계를 사용할 수 없는 협소한 장소의 다짐에 적합하다. 그러나 작업능률이 낮고 다짐이 불균질화 되기 쉽다.

② 탬퍼(tamper)

탬퍼는 <그림 3.1-65>에서 보듯이 소형으로 접속부 다짐 등 협소한 장소의 다짐에 사용되며, 포장공사에서 콘크리트 등의 표면을 다질 때 유용하다.



<그림 3.1-64> 진동 컴팩터



<그림 3.1-65> 탬퍼

(3) 혼합장비

혼합작업은 2개 이상의 재료를 노상에서 혼합하는 작업으로 블레이드(blade)로 혼합하는 방법과 스캐리파이어(scarifier)로 혼합하는 방법 등이 있다(<그림 3.1-66> 참조).

블레이드 혼합장비는 재료 혼합비에 맞추어 지반에 길게 이랑을 만들고, 절삭시와 같이 블레이드 추진각은 작고 절삭각은 재료의 롤링이 좋게 큰 각으로 하여서, 작업속도 6~10km/h로 전진하여 이랑이 쓸려 없어지게 하는 작업을 반복하면서 혼합한다.

스캐리파이어는 층으로 포설한 재료를 혼합할 때 사용하며 tooth가 전 깊이를 관입하게 하고 작업속도 4~10km/h로 3~4회 통과하면서 혼합한다. 본 방법은 블레이드 혼합방법을 병행한다.



<그림 3.1-66> 블레이드+스캐리파이어 그레이더

제 2 절 국내 하상토의 제방 성토재로서 적합성 평가

앞서 언급하였듯이 국내의 경우 1990년대까지 제방 성토재료로 하상토를 이용하였으나, 최근 피해사례를 감안하여 다짐 및 재료관리가 어려운 하상토의 사용을 원칙적으로 금지하고, 2002년 개정된 하천설계기준을 통하여 전단강도 및 투수특성이 양호한 양질토를 사용하여 시공토록 지침이 시달되고 있는 실정이다.

한편, 제방 공사는 대규모의 건설재료를 필요로 하나 최근 국내 여건 상 양질의 건설재료 확보가 어려워지고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 기존 하천제방 제체 재료 및 하상토의 공학적 특성을 조사하고, 지속적인 건설재료 확보를 위하여 하상토와 산업폐기물로 지정되어 대부분 매립처분 되고 있는 석분토를 대상으로 하천제방 성토재료로서의 활용가능성에 대한 검토를 수행하고자 한다.

1. 국내 하천제방 및 하상토 재료 특성 조사

가. 실험 개요 및 방법

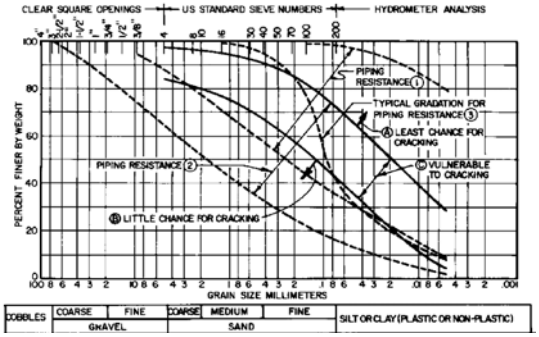
국내 하천제방 제체 및 하상토 재료특성 조사는 조사 위치를 보여주는 <그림 3.2-1>에서 보듯이 금강 수계의 경우 금강공주 권역~금강하구언 구간 중 12개소, 낙동강 수계의 경우 안동댐 하류~낙동강하구언 구간 중 총 22개소, 섬진/영산강 수계의 경우 8개소(섬진강 4개소, 영산강 4개소), 한강 수계의 경우 곡릉천 하류 2개소를 대상으로 입도분포시험 및 통일분류법에 의한 흙 분류 등을 수행하였다.

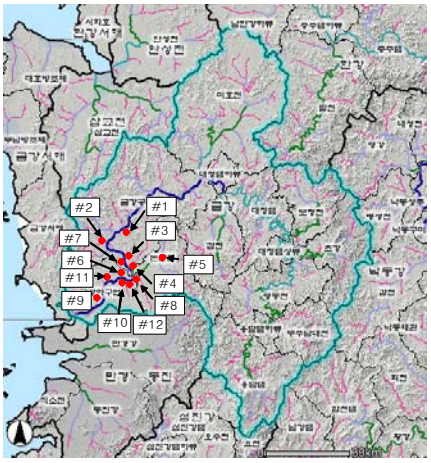
여기서, 조사위치도 작성을 위하여 사용된 지도는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS, Water Management Information System, http://www.wamis.go.kr/)에서 제공되는 수자원 주제도 중 하천망도를 기본으로 조사 위치를 표시하였다.

한편, 제체 및 하상토의 입도분석 시험은 KS F 2302 및 KS F 2309에 규정에 되어 있는 시험법을 적용하였으며, 입도분석 시험 결과로부터 얻어진 입도분포특성(균등계수(C_u), 곡률계수(C_g)) 분석을 통하여 통일분류법(Unified Soil Classification System)에 의한 흙 분류 하는 방식으로 수행되었다. 또한, 제체 재료로서의 적합성 평가는 하천설계기준과 미국 NAVFAC 매뉴얼에서 제안된 제방 재료별 제체누수에 대한 저항성 특성(<표 3.2-1> 참조)과 비교하여 분석을 수행하였다.

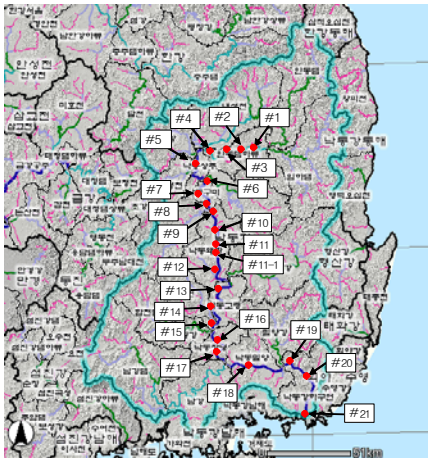
<표 3.2-1> 제방 재료별 제체누수에 대한 저항성 (NAVFAC DM 7.02, 1986)

구분	재 료	제체누수에 대한 저항성	
①	- 소성지수(PI)>15인 CL, CH - 입도분포가 양호하고 소성지수(PI)>15인 SC	가장 큼	
②	- 소성지수(PI)<15인 CL, ML - 입도분포가 양호하고 7<소성지수(PI)<15인 SC, GC	중간	
③	- SP - 입도분포가 균등한 SM - 소성지수(PI)<7인 ML	가장 작음	

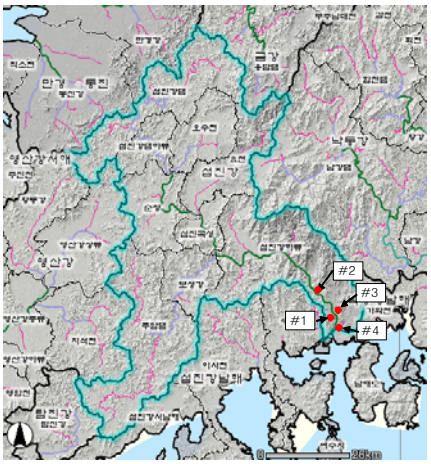




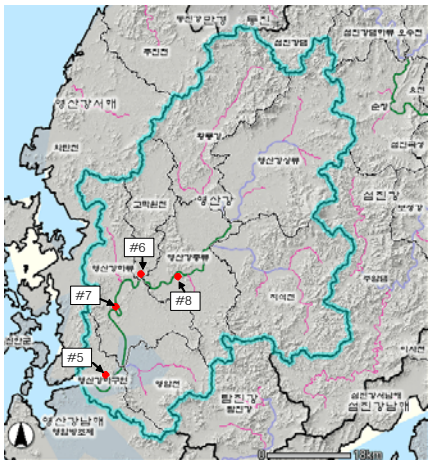
(a) 금강 수계



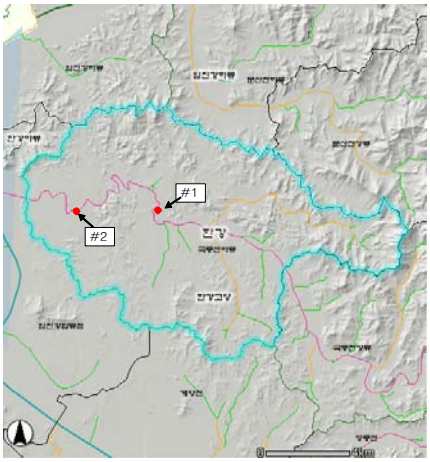
(b) 낙동강 수계



(c) 섬진강 수계



(d) 영산강 수계



(e) 한강 수계

<그림 3.2-1> 하천제방 제체 및 하상토 조사 위치도

나. 실험결과 및 분석

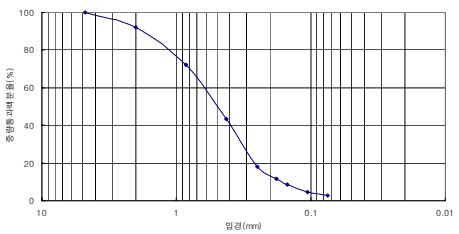
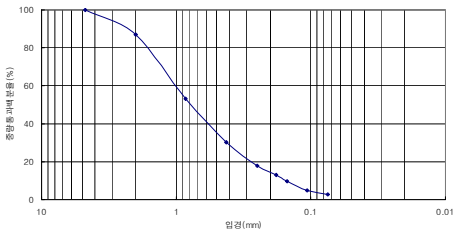
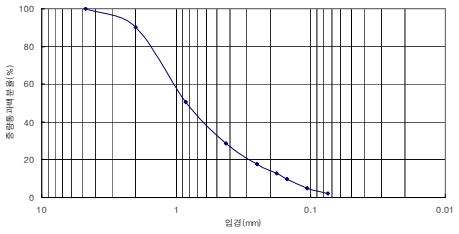
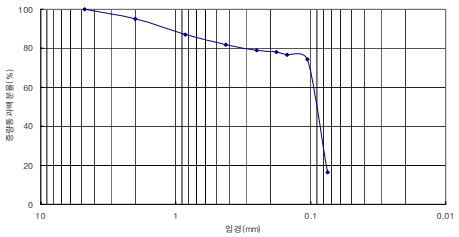
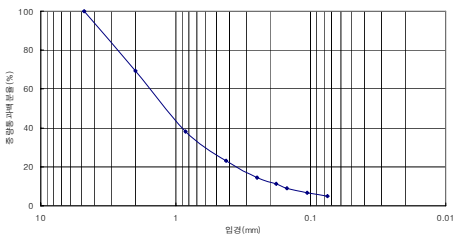
(1) 금강 수계

금강 수계 하천제방 제체 및 하상토 재료는 조사위치 별 입도분포 특성 및 통일분류 결과를 보여주는 <표 3.2-2>에서 보듯이 제체 재료의 경우 전체 12개소 중 균등계수(C_u) 3.93, 곡률계수(C_g) 1.01 정도인 입경이 균등한 사질토(SP)가 1개소, 균등계수(C_u) 6.77~9.80, 곡률계수(C_g) 1.01~1.28 정도인 입도분포가 양호한 사질토(SW)가 7개소, 균등계수(C_u) 10.89~12.27, 곡률계수(C_g) 0.70~1.08 정도인 입경이 균등하고 실트질이 함유된 사질토(SP-SM)이 2개소, 균등계수(C_u) 10.16, 곡률계수(C_g) 1.26 정도인 입도분포가 양호하고 실트질이 함유된 사질토(SW-SM)가 1개소, 체분석 시험 후 세립분에 대한 비중계시험을 수행하지 못하여 C_u와 C_g를 평가하지 못하였으나 세립분이 많이 함유된 사질토(SM 혹은 SC)가 1개소로 조사되었다.

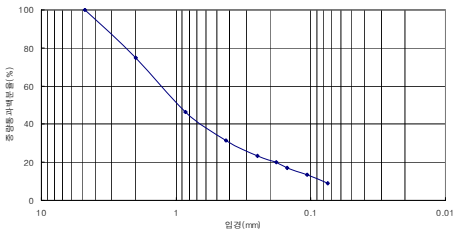
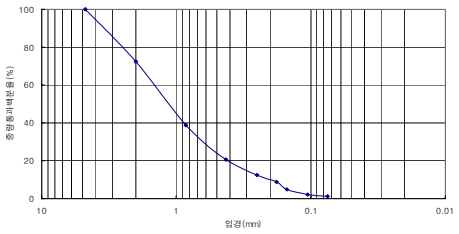
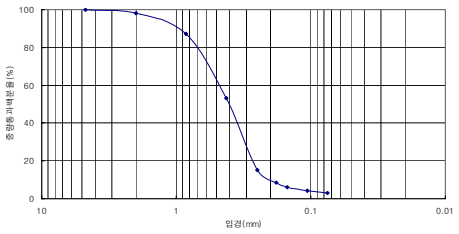
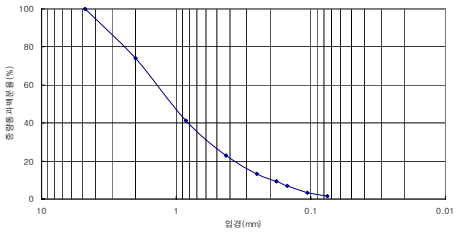
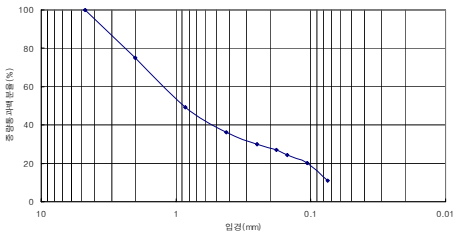
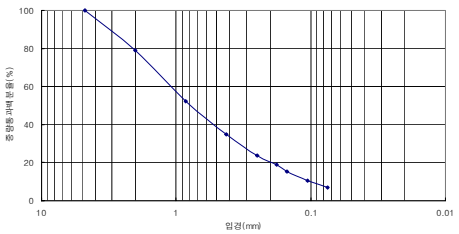
또한, 하상토 재료는 전체 11개소 중 균등계수(C_u) 2.23~2.59, 곡률계수(C_g) 0.86~0.98 정도인 입경이 균등한 사질토(SP)가 2개소, 균등계수(C_u) 6.78, 곡률계수(C_g) 1.10 정도인 입도분포가 양호한 사질토(SW)가 1개소, 균등계수(C_u) 8.13~8.38, 곡률계수(C_g) 0.34~0.77 정도인 입경이 균등하고 실트질이 함유된 사질토(SP-SM)가 2개소, 균등계수(C_u) 14.72~16.05, 곡률계수(C_g) 1.36~1.64 정도인 입도분포가

양호하고 실트질이 함유된 사질토(SW-SM)가 3개소, 체분석 시험 후 세립분에 대한 비중계시험을 수행하지 못하여 C_u와 C_g를 평가하지 못하였으나 세립분이 많이 함유된 사질토(SM 혹은 SC)가 4개소 발생하는 것으로 조사되어 전체적으로 제체 재료와 유사한 특성을 보이는 것으로 평가되었다.

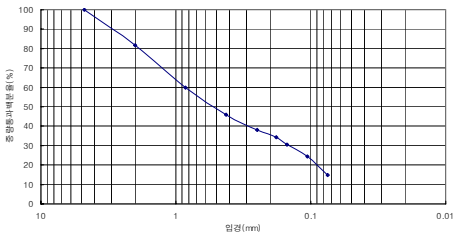
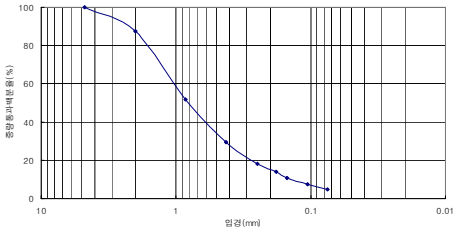
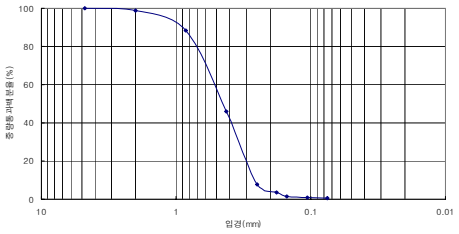
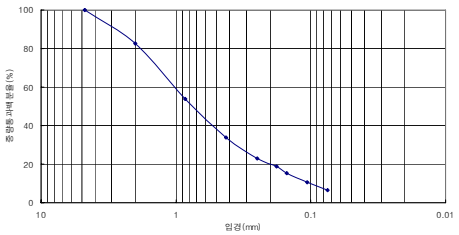
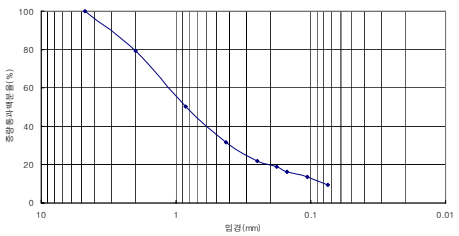
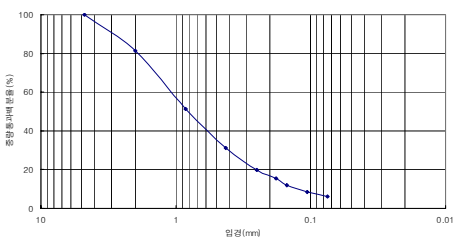
<표 3.2-2> 금강 수계 조사위치 별 입도분포 특성 및 통일분류 결과

시료 번호	위치	구분	입도분포 특성		통일분류
# 1-1	충남 부여군 부여읍 자왕리	제체		D_{10}(㎜)=0.16 D_{30}(㎜)=0.32 D_{60}(㎜)=0.64 C_u=3.93 C_g=1.01	SP
# 1-2	충남 부여군 부여읍 자왕리	하상		D_{10}(㎜)=0.15 D_{30}(㎜)=0.41 D_{60}(㎜)=1.01 C_u=6.78 C_g=1.10	SW
# 2-1	충남 부안군 규암면 진번리	제체		D_{10}(㎜)=0.15 D_{30}(㎜)=0.43 D_{60}(㎜)=1.02 C_u=6.77 C_g=1.20	SW
# 2-2	충남 부안군 규암면 진번리	하상		– D_{30}(㎜)=0.08 D_{60}(㎜)=0.10 – –	SM 혹은 SC
# 3-1	충남 논산시 성동면 개척리 (우곤배수장)	제체		D_{10}(㎜)=0.15 D_{30}(㎜)=0.56 D_{60}(㎜)=1.54 C_u=9.80 C_g=1.28	SW

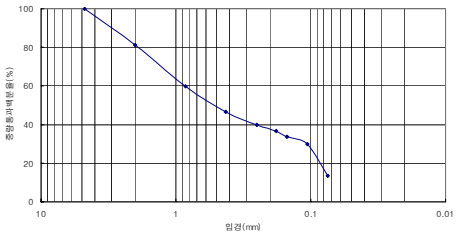
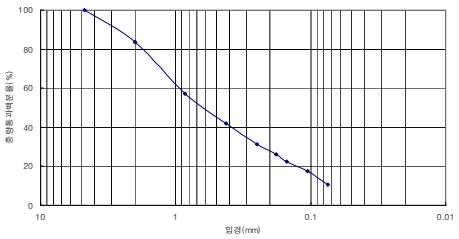
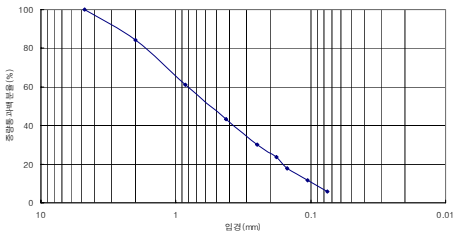
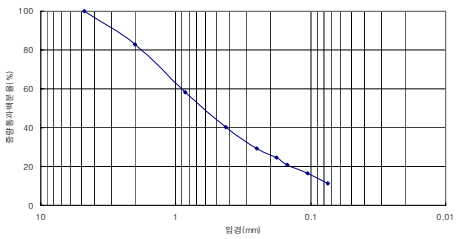
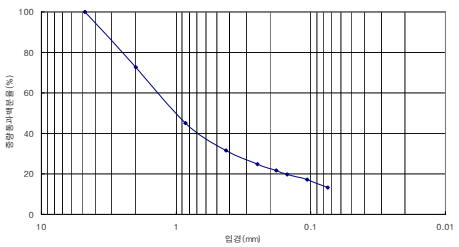
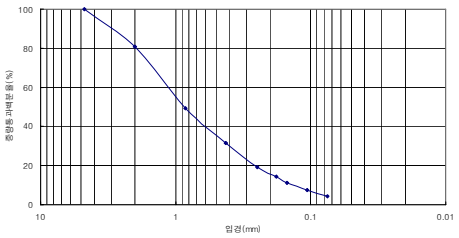
<표 3.2-2> 금강 수계 조사위치 별 입도분포 특성 및 통일분류 결과(계속)

시료 번호	위치	구분	입도분포 특성		통일분류
# 3-2	충남 논산시 성동면 개척리 (우곤배수장)	하상		D_{10}(㎜)=0.08 D_{30}(㎜)=0.38 D_{60}(㎜)=1.27 C_u=15.72 C_g=1.36	SW-SM
# 4-1	충남 논산시 성동면 개척리 (개척배수장)	제체		D_{10}(㎜)=0.20 D_{30}(㎜)=0.60 D_{60}(㎜)=1.46 C_u=7.43 C_g=1.27	SW
# 4-2	충남 논산시 성동면 개척리 (개척배수장)	하상		D_{10}(㎜)=0.19 D_{30}(㎜)=0.30 D_{60}(㎜)=0.49 C_u=2.59 C_g=0.98	SP
# 5-1	전북 익산시 망성면 화산리 (화산배수장)	제체		D_{10}(㎜)=0.19 D_{30}(㎜)=0.56 D_{60}(㎜)=1.38 C_u=7.46 C_g=1.21	SW
# 5-2	전북 익산시 망성면 화산리 (화산배수장)	하상		D_{10}(㎜)=0.15 D_{30}(㎜)=0.25 D_{60}(㎜)=1.22 C_u=8.13 C_g=0.34	SP-SM
# 6-1	충남 부여군 세도면 청포리	제체		D_{10}(㎜)=0.10 D_{30}(㎜)=0.34 D_{60}(㎜)=1.07 C_u=10.89 C_g=1.08	SP-SM

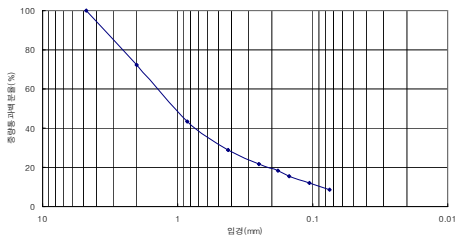
<표 3.2-2> 금강 수계 조사위치 별 입도분포 특성 및 통일분류 결과(계속)

시료 번호	위치	구분	입도분포 특성		통일분류
# 6-2	충남 부여군 세도면 청포리	하상		– D_{30}(㎜)=0.14 D_{60}(㎜)=0.84 – –	SM 혹은 SC
# 7-1	충남 부여군 세도면 반조원리	제체		D_{10}(㎜)=0.14 D_{30}(㎜)=0.42 D_{60}(㎜)=1.02 C_u=7.52 C_g=1.26	SW
# 7-2	충남 부여군 세도면 반조원리	하상		D_{10}(㎜)=0.24 D_{30}(㎜)=0.34 D_{60}(㎜)=0.54 C_u=2.23 C_g=0.86	SP
# 8-1	충남 강경읍 서창리	제체		D_{10}(㎜)=0.10 D_{30}(㎜)=0.35 D_{60}(㎜)=1.00 C_u=10.16 Cg=1.26	SW-SM
# 8-2	충남 강경읍 서창리	하상		D_{10}(㎜)=0.08 D_{30}(㎜)=0.38 D_{60}(㎜)=1.13 C_u=14.72 C_g=1.64	SW-SM
# 9-1	충남 한산면 신성리	제체		D_{10}(㎜)=0.12 D_{30}(㎜)=0.39 D_{60}(㎜)=1.08 C_u=8.86 C_g=1.12	SW

<표 3.2-2> 금강 수계 조사위치 별 입도분포 특성 및 통일분류 결과(계속)

시료 번호	위치	구분	입도분포 특성		통일분류
# 9-2	충남 한산면 신성리	하상		– D_{30}(㎜)=0.12 D_{60}(㎜)=0.82 – –	SM 혹은 SC
# 10-1	전북 익산시 망성면 화산리	제체		D_{10}(㎜)=0.075 D_{30}(㎜)=0.22 D_{60}(㎜)=0.92 C_u=12.27 C_g=0.70	SP-SM
# 10-2	전북 익산시 망성면 화산리	하상		D_{10}(㎜)=0.21 D_{30}(㎜)=0.25 D_{60}(㎜)=0.81 C_u=8.38 C_g=0.77	SP-SM
# 11-1	충남 부여군 임천면 비정리	제체		– D_{30}(㎜)=0.25 D_{60}(㎜)=0.86 – –	SM 혹은 SC
# 11-2	충남 부여군 임천면 비정리	하상		– D_{30}(㎜)=0.37 D_{60}(㎜)=1.34 – –	SM 혹은 SC
# 12-1	충남 논산시 강경읍 동흥리	제체		D_{10}(㎜)=0.13 D_{30}(㎜)=0.39 D_{60}(㎜)=1.11 C_u=8.29 C_g=1.00	SW

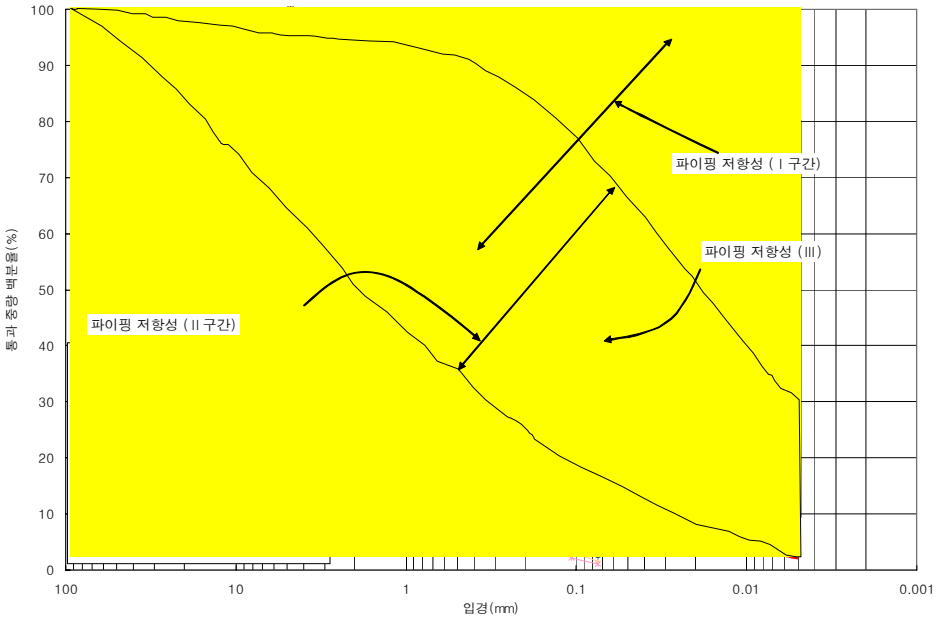
<표 3.2-2> 금강 수계 조사위치 별 입도분포 특성 및 통일분류 결과(계속)

시료 번호	위치	구분	입도분포 특성		통일분류
# 12-2	충남 논산시 강경읍 동흥리	하상		D_{10}(㎜)=0.09 D_{30}(㎜)=0.44 D_{60}(㎜)=1.38 C_u=16.05 C_g=1.60	SW-SM

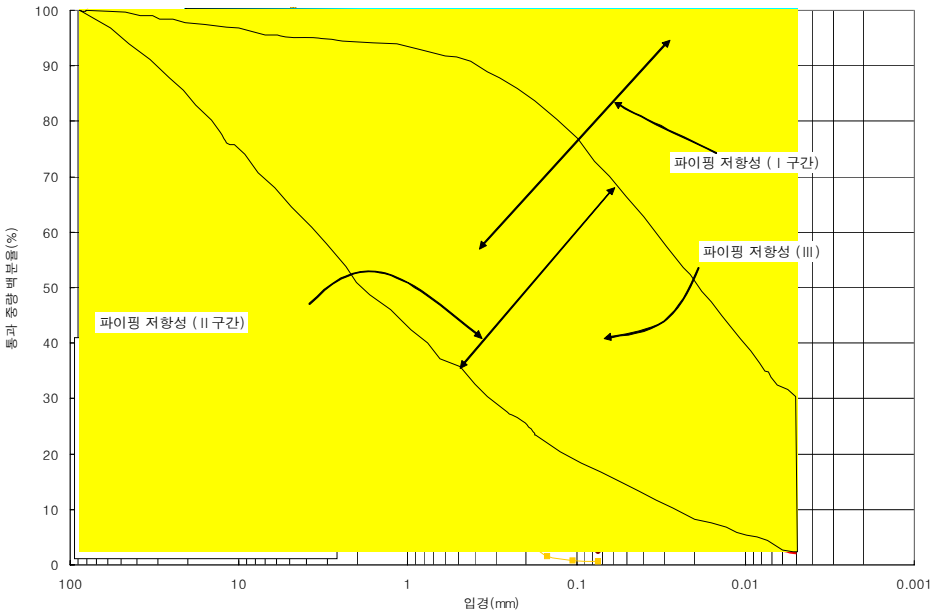
한편, 조사 대상 위치의 제체 및 하상토는 대부분 사질토인 것으로 나타나 전체적으로 제체 재료와 하상재료가 유사한 입도분포 특성을 보이는 것으로 평가되었으며, 통일분류법에 의한 흙 분류 결과 SM 혹은 SC로 평가된 제체 1개소와 하상토 4개소를 제외하고 하천설계기준 상의 전단강도와 투수성을 기준으로 제시된 제방 재료 기준을 만족시키지 못하는 것으로 평가되었다.

또한, 금강 수계의 제체 및 하상토는 NAVFAC 기준에 따른 금강 수계 제체 및 하상 재료의 제체누수에 대한 저항성 분석 결과를 보여주는 <그림 3.2-2>에서 보듯이 제체 재료의 경우 누수저항성이 가장 작은 Ⅲ 구간 재료로, 하상재료의 경우 4개소에서 Ⅱ 구간과 유사한 입도분포특성을 보이며, 그 외의 경우 Ⅲ 구간 재료에 해당하는 것으로 평가되었다.

따라서 금강 수계의 조사대상 제체 및 하상토는 일부 구간을 제외하고 하천제방 제체로 활용 시 하천설계기준 및 NAVFAC 매뉴얼상 누수에 대한 저항성이 취약한 재료로 평가되었다.



(a) 제체 재료



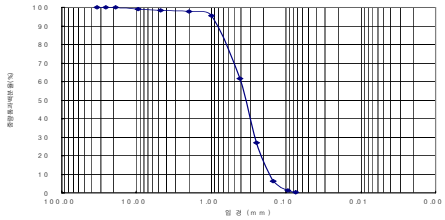
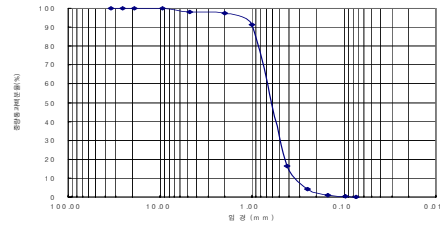
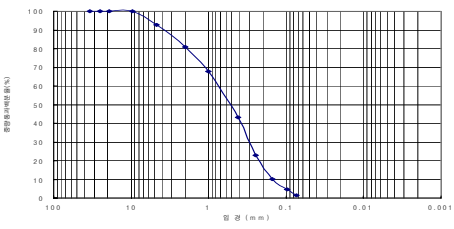
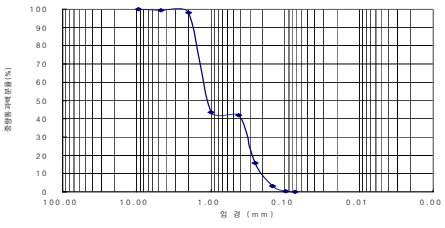
(b) 하상 재료

<그림 3.2-2> NAVFAC 기준에 따른 금강 수계의 제체누수 저항성 분석 결과

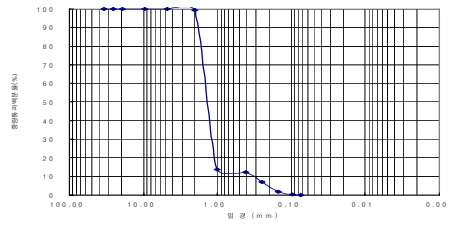
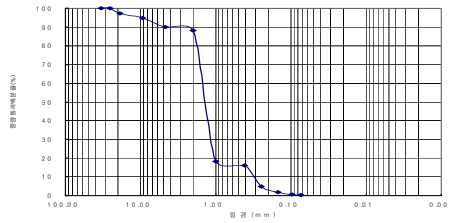
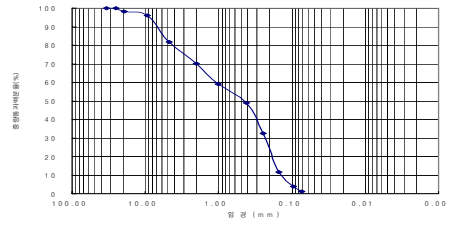
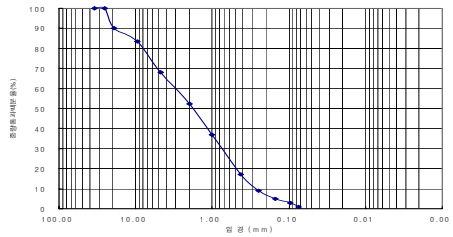
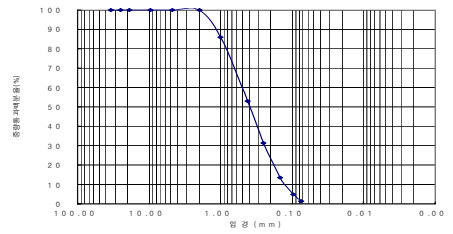
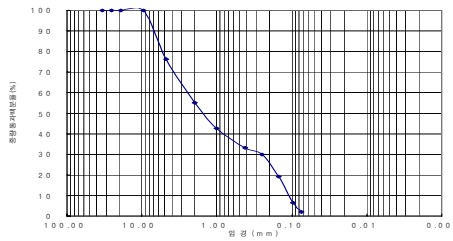
(2) 낙동강 수계

낙동강 수계 하천제방 제체 및 하상토 재료는 조사위치 별 입도분포 특성 및 통일분류 결과를 보여주는 <표 3.2-3>에서 보듯이 제체 재료의 경우 균등계수(C_u) 2.2~16.5, 곡류계수(C_g) 0.4~1.5 정도인 입경이 균등한 사질토(SP)로, 하상토의 경우 균등계수(C_u) 1.8~6.6, 곡률계수(C_g) 0.4~4.8 정도인 입경이 균등한 사질토(SP)로 평가되었으며, 제체 및 하상토는 각각 평균 균등계수(C_u)의 경우 3.2 및 5.2, 평균 곡률계수(C_g) 1.3 및 1.0인 모래(SP)로서 하상토 및 제체재료가 동일한 재료인 것으로 평가되었다.

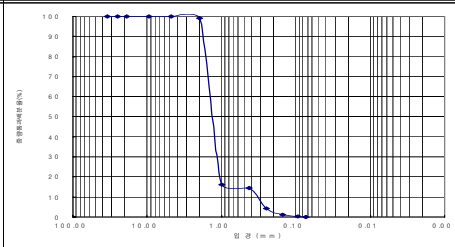
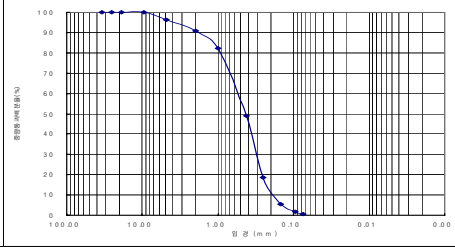
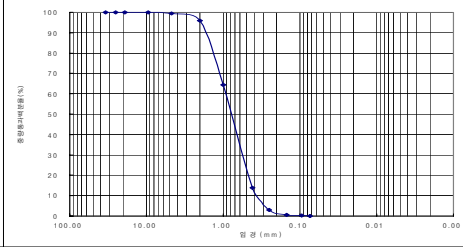
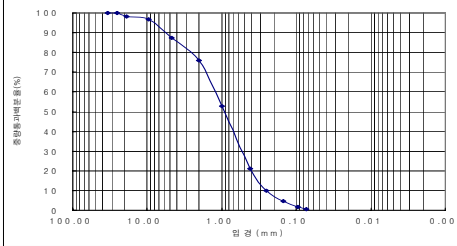
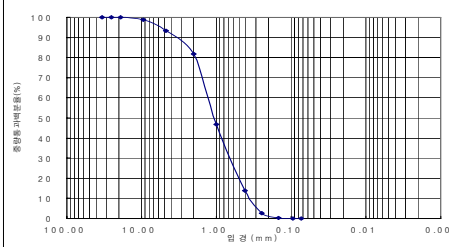
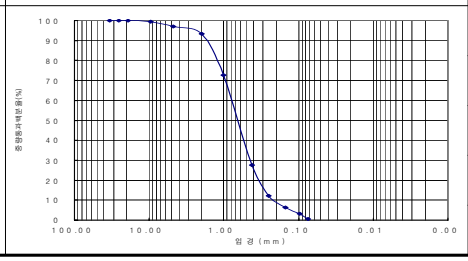
<표 3.2-3> 낙동강 수계 조사위치 별 입도분포 특성 및 통일분류 결과

시료 번호	위치	구분	입도분포 특성		통일분류
# 1-1	경북 안동시 풍산읍 계평리	제체		D_{10}(㎜)=0.17 D_{30}(㎜)=0.26 D_{60}(㎜)=0.40 C_u=2.4 C_g=1.0	SP
# 1-2	경북 안동시 풍산읍 계평리	하상		D_{10}(㎜)=0.34 D_{30}(㎜)=0.50 D_{60}(㎜)=0.68 C_u=2.0 C_g=1.1	SP
# 2-1	경북 예천군 하리면 하리	제체		D_{10}(㎜)=0.14 D_{30}(㎜)=0.30 D_{60}(㎜)=0.74 C_u=5.3 C_g=0.9	SP
# 2-2	경북 예천군 하리면 하리	하상		D_{10}(㎜)=0.20 D_{30}(㎜)=0.31 D_{60}(㎜)=0.10 C_u=5.6 C_g=4.8	SP

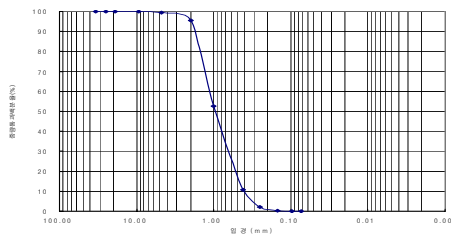
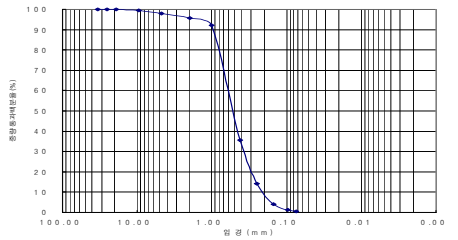
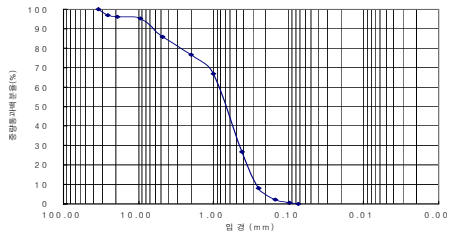
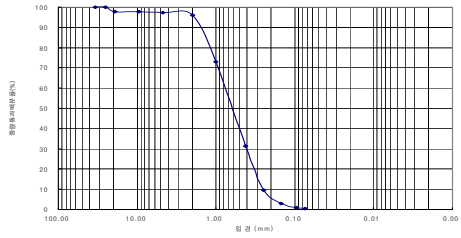
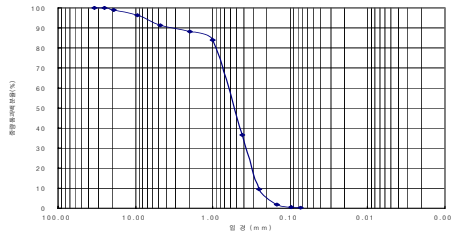
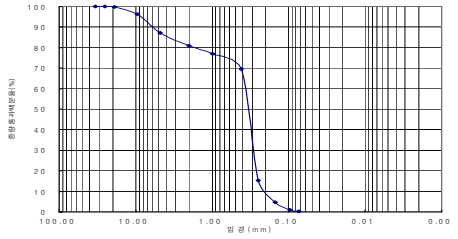
<표 3.2-3> 낙동강 수계 조사위치 별 입도분포 특성 및 통일분류 결과(계속)

시료 번호	위치	구분	입도분포 특성		통일분류
# 3-1	경북 예천군 지보면 구담리	제체		D_{10}(㎜)=0.31 D_{30}(㎜)=0.16 D_{60}(㎜)=1.32 C_u=4.3 C_g=3.3	SP
# 3-2	경북 예천군 지보면 구담리	하상		D_{10}(㎜)=0.31 D_{30}(㎜)=1.10 D_{60}(㎜)=1.40 C_u=4.5 C_g=2.8	SP
# 4-1	경북 예천군 풍양면 청곡리	제체		D_{10}(㎜)=0.13 D_{30}(㎜)=0.22 D_{60}(㎜)=1.06 C_u=8.2 C_g=0.4	SP
# 5-1	경북 예천군 풍양면 효갈리	제체		D_{10}(㎜)=0.30 D_{30}(㎜)=0.90 D_{60}(㎜)=0.50 C_u=16.5 C_g=0.5	SP
# 5-2	경북 예천군 풍양면 효갈리	하상		D_{10}(㎜)=0.13 D_{30}(㎜)=0.23 D_{60}(㎜)=0.50 C_u=4.0 C_g=0.8	SP
# 6-1	경북 상주시 중동면 간물리	제체		D_{10}(㎜)=0.11 D_{30}(㎜)=0.23 D_{60}(㎜)=1.40 C_u=13.2 C_g=0.4	SP

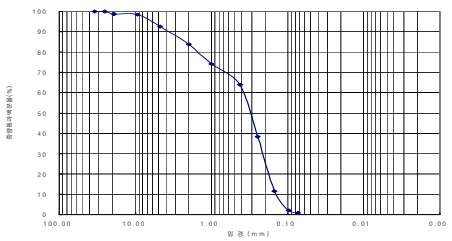
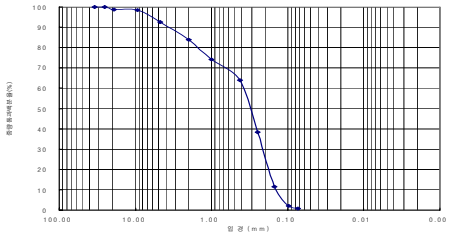
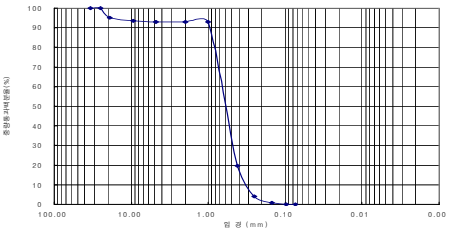
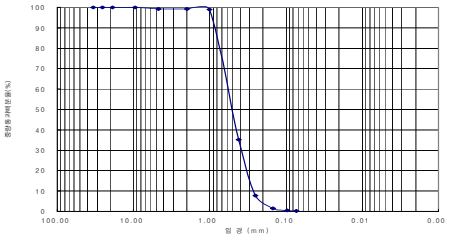
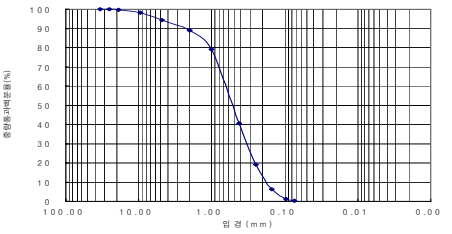
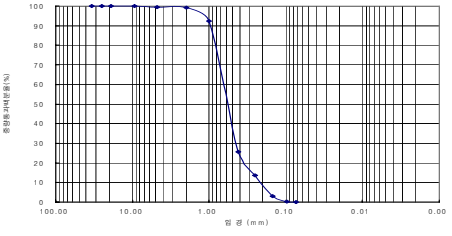
<표 3.2-3> 낙동강 수계 조사위치 별 입도분포 특성 및 통일분류 결과(계속)

시료 번호	위치	구분	입도분포 특성		통일분류
# 6-2	경북 상주시 중동면 간물리	하상		D_{10}(㎜)=0.21 D_{30}(㎜)=1.12 D_{60}(㎜)=1.38 C_u=6.6 C_g=4.3	SP
# 7-1	경북 의성군 단밀면 가산리	제체		D_{10}(㎜)=0.20 D_{30}(㎜)=0.30 D_{60}(㎜)=0.53 C_u=2.6 C_g=0.9	SP
# 7-2	경북 의성군 단밀면 가산리	하상		D_{10}(㎜)=0.38 D_{30}(㎜)=0.55 D_{60}(㎜)=0.92 C_u=2.4 C_g=0.9	SP
# 8-1	경북 구미시 해평면 월곡리	제체		D_{10}(㎜)=0.23 D_{30}(㎜)=0.53 D_{60}(㎜)=1.16 C_u=5.0 C_g=1.1	SP
# 8-2	경북 구미시 해평면 월곡리	하상		D_{10}(㎜)=0.35 D_{30}(㎜)=0.65 D_{60}(㎜)=1.20 C_u=3.4 C_g=1.0	SP
# 9-1	경북 구미시 해평면 낙성리	제체		D_{10}(㎜)=0.21 D_{30}(㎜)=0.43 D_{60}(㎜)=0.78 C_u=3.8 C_g=1.2	SP

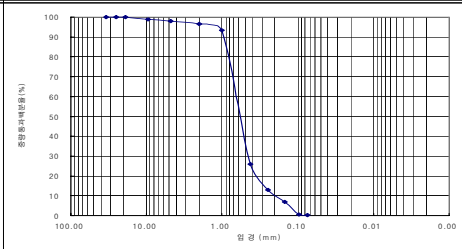
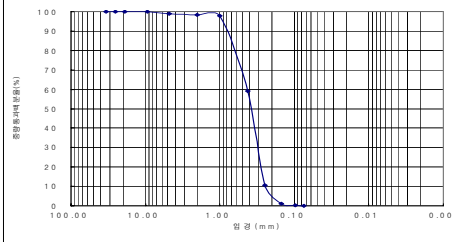
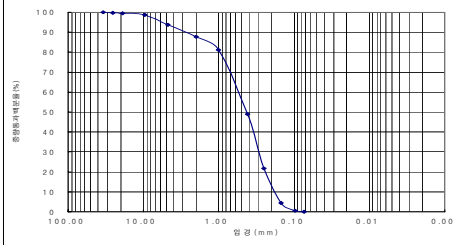
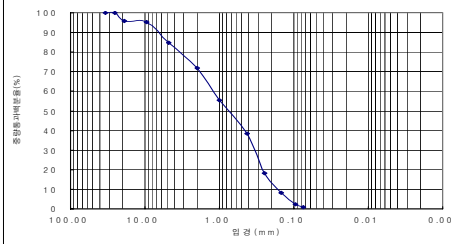
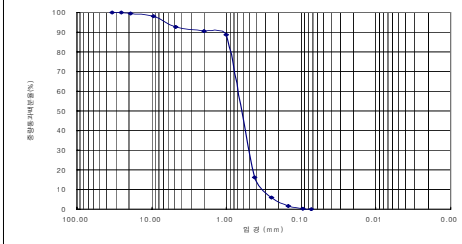
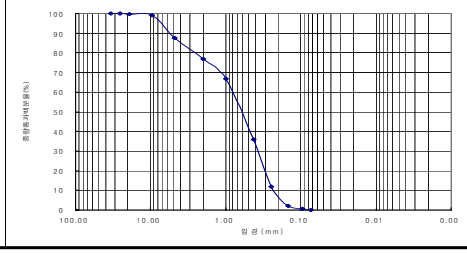
<표 3.2-3> 낙동강 수계 조사위치 별 입도분포 특성 및 통일분류 결과(계속)

시료 번호	위치	구분	입도분포 특성		통일분류
# 9-2	경북 구미시 해평면 낙성리	하상		D_{10}(㎜)=0.41 D_{30}(㎜)=0.63 D_{60}(㎜)=1.07 C_u=2.6 C_g=0.9	SP
#10-1	경북 칠곡군 북삼읍 오평리	제체		D_{10}(㎜)=0.21 D_{30}(㎜)=0.38 D_{60}(㎜)=0.60 C_u=2.9 C_g=1.2	SP
#10-2	경북 칠곡군 북삼읍 오평리	하상		D_{10}(㎜)=0.27 D_{30}(㎜)=0.43 D_{60}(㎜)=0.83 C_u=3.1 C_g=0.8	SP
#11-1	경북 칠곡군 양목면	제체		D_{10}(㎜)=0.23 D_{30}(㎜)=0.40 D_{60}(㎜)=0.77 C_u=3.4 C_g=0.9	SP
#11-2	경북 칠곡군 양목면	하상		D_{10}(㎜)=0.23 D_{30}(㎜)=0.37 D_{60}(㎜)=0.62 C_u=2.7 C_g=1.0	SP
#13-1	경북 성주군 선남면 선원리	제체		D_{10}(㎜)=0.20 D_{30}(㎜)=0.29 D_{60}(㎜)=0.37 C_u=1.8 C_g=1.1	SP

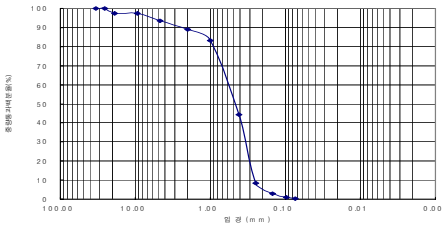
<표 3.2-3> 낙동강 수계 조사위치 별 입도분포 특성 및 통일분류 결과(계속)

시료 번호	위치	구분	입도분포 특성		통일분류
#14-1	대구 달성군 구지면 징리	제체		D_{10}(㎜)=0.13 D_{30}(㎜)=0.21 D_{60}(㎜)=0.36 C_u=2.8 C_g=0.9	SP
#14-2	대구 달성군 구지면 징리	하상		D_{10}(㎜)=0.23 D_{30}(㎜)=0.42 D_{60}(㎜)=0.60 C_u=2.6 C_g=1.3	SP
#15-1	경북 합천군 덕곡면	제체		D_{10}(㎜)=0.31 D_{30}(㎜)=0.50 D_{60}(㎜)=0.66 C_u=2.1 C_g=1.2	SP
#15-2	경북 합천군 덕곡면	하상		D_{10}(㎜)=0.27 D_{30}(㎜)=0.40 D_{60}(㎜)=0.60 C_u=2.2 C_g=1.0	SP
#16-1	경남 창녕군 유어면 미구리	제체		D_{10}(㎜)=0.17 D_{30}(㎜)=0.31 D_{60}(㎜)=0.62 C_u=3.7 C_g=0.9	SP
#16-2	경남 창녕군 유어면 미구리	하상		D_{10}(㎜)=0.21 D_{30}(㎜)=0.43 D_{60}(㎜)=0.62 C_u=3.0 C_g=1.4	SP

<표 3.2-3> 낙동강 수계 조사위치 별 입도분포 특성 및 통일분류 결과(계속)

시료 번호	위치	구분	입도분포 특성		통일분류
#17-1	경남 창녕군 남지읍	제체		D_{10}(㎜)=0.20 D_{30}(㎜)=0.43 D_{60}(㎜)=0.62 C_u=3.1 C_g=1.5	SP
#17-2	경남 창녕군 남지읍	하상		D_{10}(㎜)=0.23 D_{30}(㎜)=0.31 D_{60}(㎜)=0.43 C_u=1.9 C_g=0.9	SP
#18-2	경남 창녕군 부곡면	하상		D_{10}(㎜)=0.18 D_{30}(㎜)=0.30 D_{60}(㎜)=0.53 C_u=2.9 C_g=0.9	SP
#19-1	경남 밀양시 삼랑진읍	제체		D_{10}(㎜)=0.17 D_{30}(㎜)=0.32 D_{60}(㎜)=1.13 C_u=6.7 C_g=0.5	SP
#19-2	경남 밀양시 삼랑진읍	하상		D_{10}(㎜)=0.33 D_{30}(㎜)=0.51 D_{60}(㎜)=0.69 C_u=2.1 C_g=1.2	SP
#20-2	경남 양산시 물금읍 물금리	하상		D_{10}(㎜)=0.21 D_{30}(㎜)=0.38 D_{60}(㎜)=0.80 C_u=3.7 C_g=0.8	SP

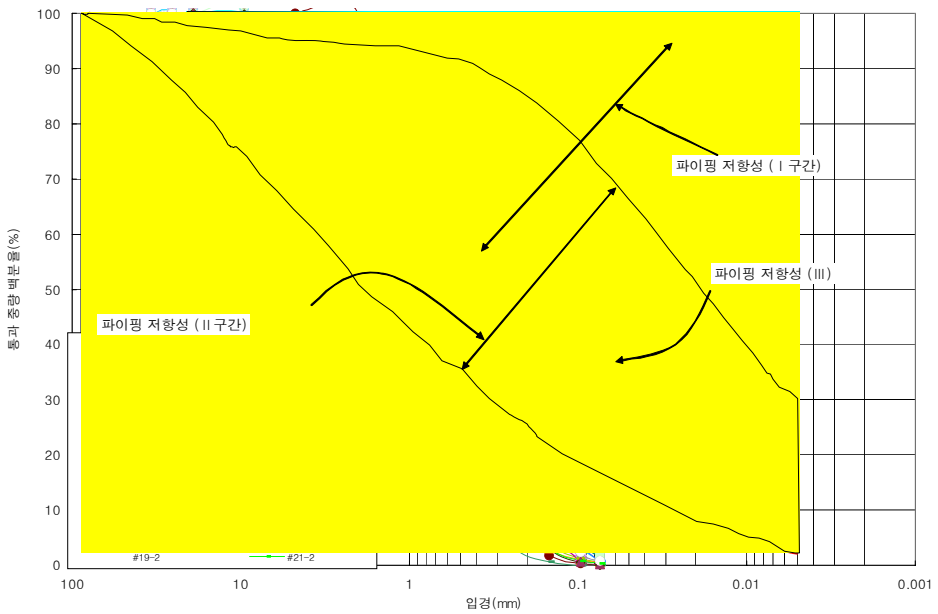
<표 3.2-3> 낙동강 수계 조사위치 별 입도분포 특성 및 통일분류 결과(계속)

시료 번호	위치	구분	입도분포 특성		통일분류
#21-1	부산 사하구 하단동	제체		D_{10}(㎜)=0.26 D_{30}(㎜)=0.32 D_{60}(㎜)=0.57 C_u=2.2 C_g=0.7	SP

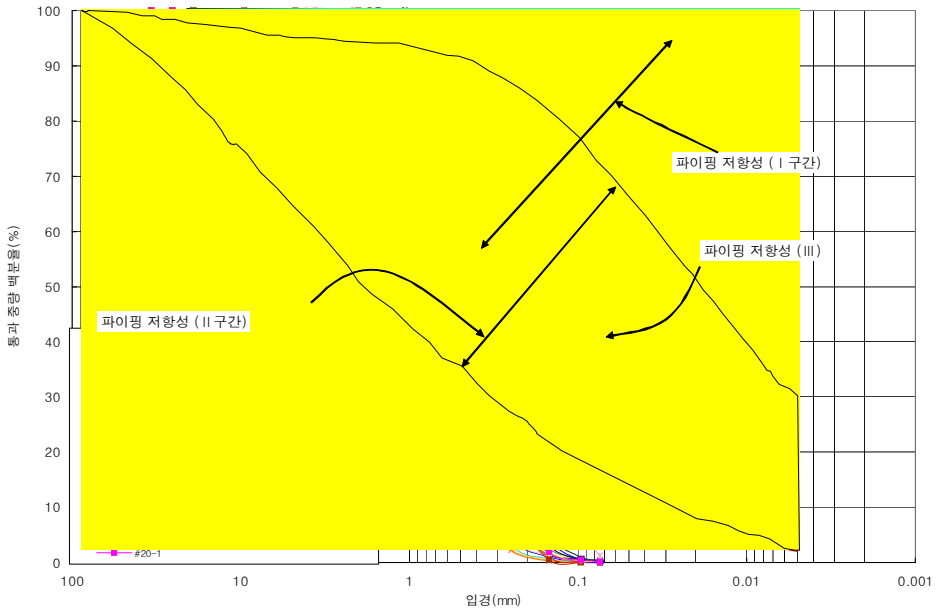
한편, 조사 대상 위치의 제체 및 하상토는 모두 입경이 균등한 모래(SP)인 것으로 나타났으며, 통일분류법에 의한 흙 분류 결과 하천설계기준 상의 전단강도와 투수성을 기준으로 제시된 제방 재료 기준을 만족시키지 못하는 것으로 평가되었다.

또한, 낙동강 수계의 제체 및 하상토는 NAVFAC 기준에 따른 낙동강 수계 제체 및 하상 재료의 제체누수에 대한 저항성 분석 결과를 보여주는 <그림 3.2-3>에서 보듯이 누수저항성이 가장 작은 Ⅲ 구간 재료에 해당하는 것으로 평가되었다.

따라서, 낙동강 수계의 조사대상 제체 및 하상토는 하천제방 제체로 활용 시 하천설계기준 및 NAVFAC 매뉴얼상 누수에 대한 저항성이 취약한 재료로 평가되었다.



(a) 제체 재료



(b) 하상 재료

<그림 3.2-3> NAVFAC 기준에 따른 낙동강 수계의 제체누수 저항성 분석 결과

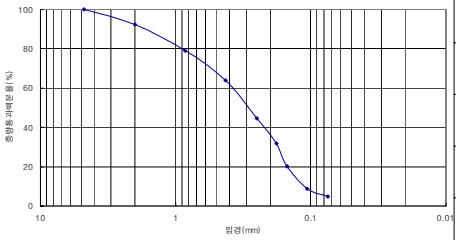
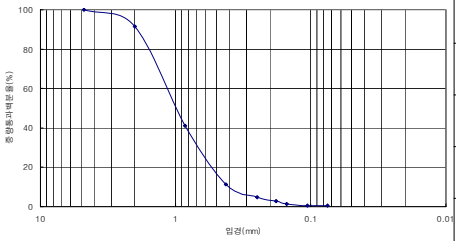
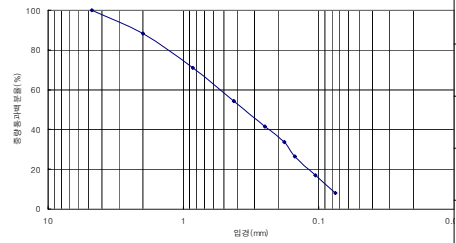
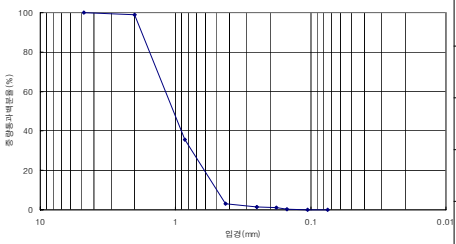
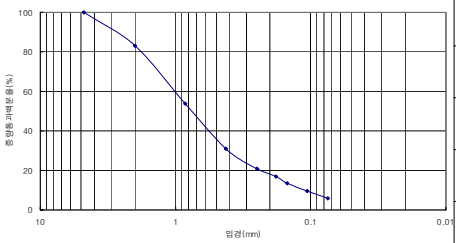
(3) 섬진/영산강 수계

섬진/영산강 수계 하천제방 제체 및 하상토 재료는 조사위치 별 입도분포 특성 및 통일분류 결과를 보여주는 <표 3.2-4>에서 보듯이 제체 재료의 경우 전체 8개소 중 균등계수(C_u) 3.13~5.17, 곡률계수(C_g) 0.48~0.95 정도인 입경이 균등한 사질토(SP)가 3개소, 균등계수(C_u) 6.02, 곡률계수(C_g) 1.06 정도인 입도분포가 양호한 사질토(SW)가 1개소, 균등계수(C_u) 6.76, 곡률계수(C_g) 0.61 정도인 입경이 균등하고 실트질이 함유된 사질토(SP-SM)이 1개소, 균등계수(C_u) 9.35, 곡률계수(C_g) 1.29 정도인 입도분포가 양호하고 실트질이 함유된 사질토(SW-SM)이 1개소, 체분석 시험 후 세립분에 대한 비중계시험을 수행하지 못하여 C_u와 C_g를 평가하지 못하였으나 세립분이 많이 함유된 사질토(SM 혹은 SC)가 2개소로 조사되었다.

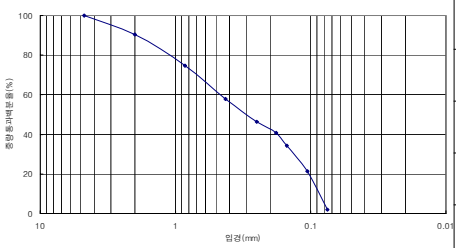
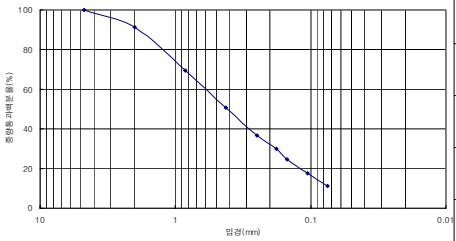
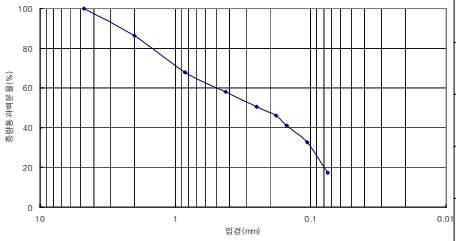
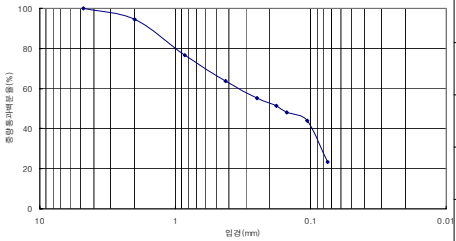
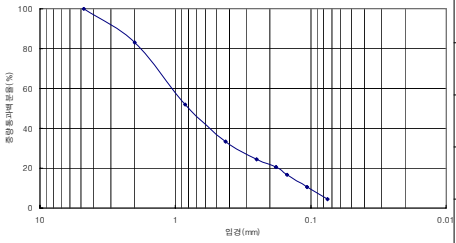
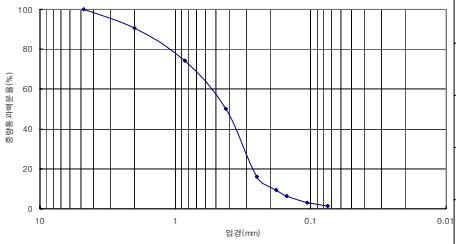
또한, 하상토 재료는 전체 8개소 중 균등계수(C_u) 2.58~5.35, 곡률계수(C_g) 0.45~1.15 정도인 입경이 균등한 사질토(SP)가 6개소, 균등계수(C_u) 10.17, 곡률계수(C_g) 1.10 정도인 입도분포가 양호한 사질토(SW)가 1개소, 체분석 시험 후 세립분

에 대한 비중계시험을 수행하지 못하여 C_u와 C_g를 평가하지 못하였으나 세립분이 많이 함유된 사질토(SM 혹은 SC)가 1개소 발생하는 것으로 조사되어 전체적으로 제체 재료와 유사한 특성을 보이는 것으로 평가되었다.

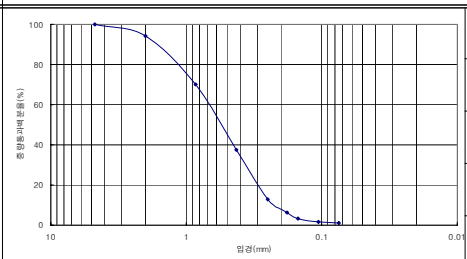
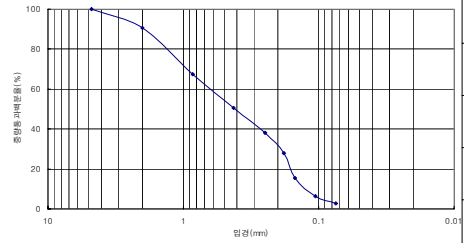
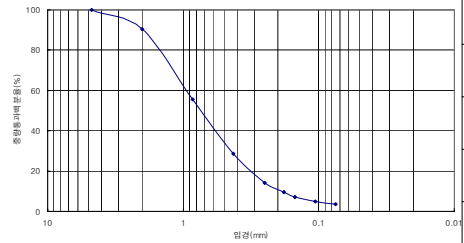
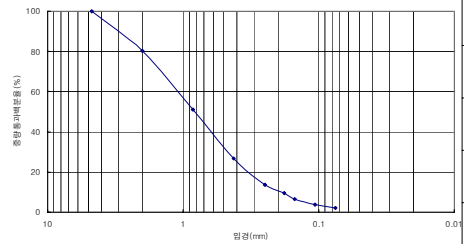
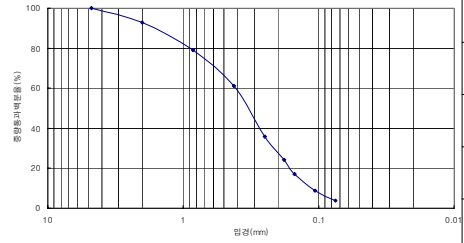
<표 3.2-4> 섬진/영산강 수계 조사위치 별 입도분포 특성 및 통일분류 결과

시료 번호	위치	구분	입도분포 특성		통일분류
# 1-1	전남 구례군 구례읍 신원리	제체		D_{10}(㎜)=0.11 D_{30}(㎜)=0.18 D_{60}(㎜)=0.39 C_u=3.63 C_g=0.76	SP
# 1-2	전남 구례군 구례읍 신원리	하상		D_{10}(㎜)=0.36 D_{30}(㎜)=0.65 D_{60}(㎜)=1.16 C_u=3.25 C_g=1.01	SP
# 2-1	경남 하동군 악양면 평사리	제체		D_{10}(㎜)=0.08 D_{30}(㎜)=0.16 D_{60}(㎜)=0.54 C_u=6.76 C_g=0.61	SP-SM
# 2-2	경남 하동군 악양면 평사리	하상		D_{10}(㎜)=0.45 D_{30}(㎜)=0.73 D_{60}(㎜)=1.17 C_u=2.58 C_g=1.00	SP
# 3-1	경남 하동군 하동읍 신기리	제체		D_{10}(㎜)=0.11 D_{30}(㎜)=0.38 D_{60}(㎜)=1.01 C_u=9.35 C_g=1.29	SW-SM

<표 3.2-4> 섬진/영산강 수계 조사위치 별 입도분포 특성 및 통일분류 결과(계속)

시료 번호	위치	구분	입도분포 특성		통일분류
# 3-2	경남 하동군 하동읍 신기리	하상		D_{10}(㎜)=0.09 D_{30}(㎜)=0.13 D_{60}(㎜)=0.46 C_u=5.35 C_g=0.45	SP
# 4-1	경남 하동군 고전면 전도리	제체		– D_{30}(㎜)=0.18 D_{60}(㎜)=0.60 – –	SM 혹은 SC
# 4-2	경남 하동군 고전면 전도리	하상		– D_{30}(㎜)=0.10 D_{60}(㎜)=0.47 – –	SM 혹은 SC
# 5-1	전남 무안군 일로읍 돈대리	제체		– D_{30}(㎜)=0.08 D_{60}(㎜)=0.33 – –	SM 혹은 SC
# 5-2	전남 무안군 일로읍 돈대리	하상		D_{10}(㎜)=0.10 D_{30}(㎜)=0.34 D_{60}(㎜)=1.04 C_u=10.17 C_g=1.10	SW
# 6-1	전남 나주시 다시면 복암리 기흥 배수장	제체		D_{10}(㎜)=0.18 D_{30}(㎜)=0.31 D_{60}(㎜)=0.56 C_u=3.13 C_g=0.95	SP

<표 3.2-4> 섬진/영산강 수계 조사위치 별 입도분포 특성 및 통일분류 결과(계속)

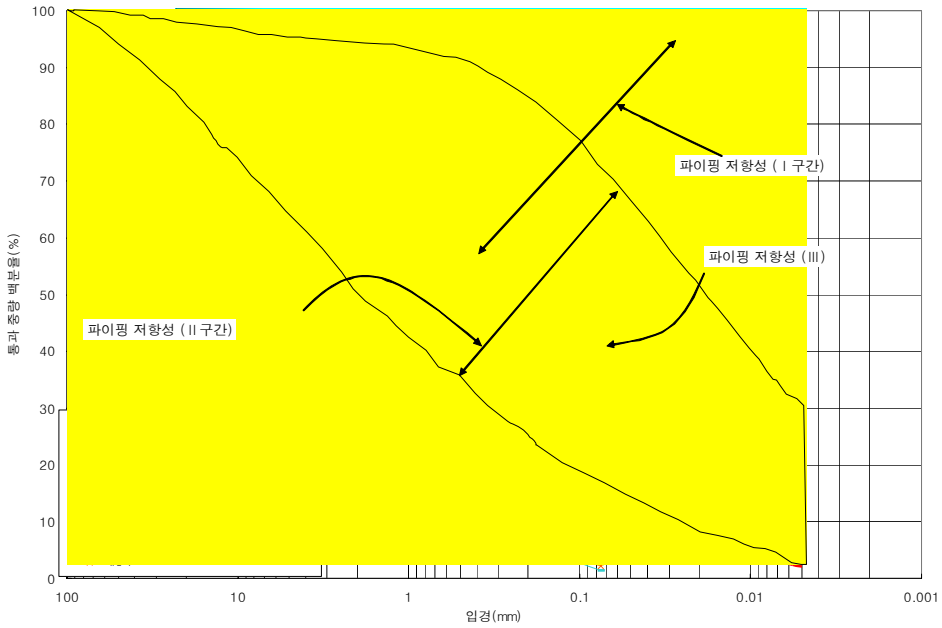
시료 번호	위치	구분	입도분포 특성		통일분류
# 6-2	전남 나주시 다시면 복암리 기흥 배수장	하상		D_{10}(㎜)=0.21 D_{30}(㎜)=0.36 D_{60}(㎜)=0.69 C_u=3.29 C_g=0.88	SP
# 7-1	전남 기안군 동탄면 이산리	제체		D_{10}(㎜)=0.12 D_{30}(㎜)=0.19 D_{60}(㎜)=0.62 C_u=5.17 C_g=0.48	SP
# 7-2	전남 기안군 동탄면 이산리	하상		D_{10}(㎜)=0.18 D_{30}(㎜)=0.44 D_{60}(㎜)=0.94 C_u=5.24 C_g=1.15	SP
# 8-1	전남 나주시 금천면 고동리 금천 배수장	제체		D_{10}(㎜)=0.18 D_{30}(㎜)=0.46 D_{60}(㎜)=1.10 C_u=6.02 C_g=1.06	SW
# 8-2	전남 나주시 금천면 고동리 금천 배수장	하상		D_{10}(㎜)=0.11 D_{30}(㎜)=0.21 D_{60}(㎜)=0.41 C_u=3.68 C_g=0.97	SP

한편, 조사 대상 위치의 제체 및 하상토는 대부분 사질토인 것으로 나타나 전체적으로 제체 재료와 하상재료가 유사한 입도분포 특성을 보이는 것으로 평가되었으며, 통일분류법에 의한 흙 분류 결과 SM 혹은 SC로 평가된 제체 2개소와 하상

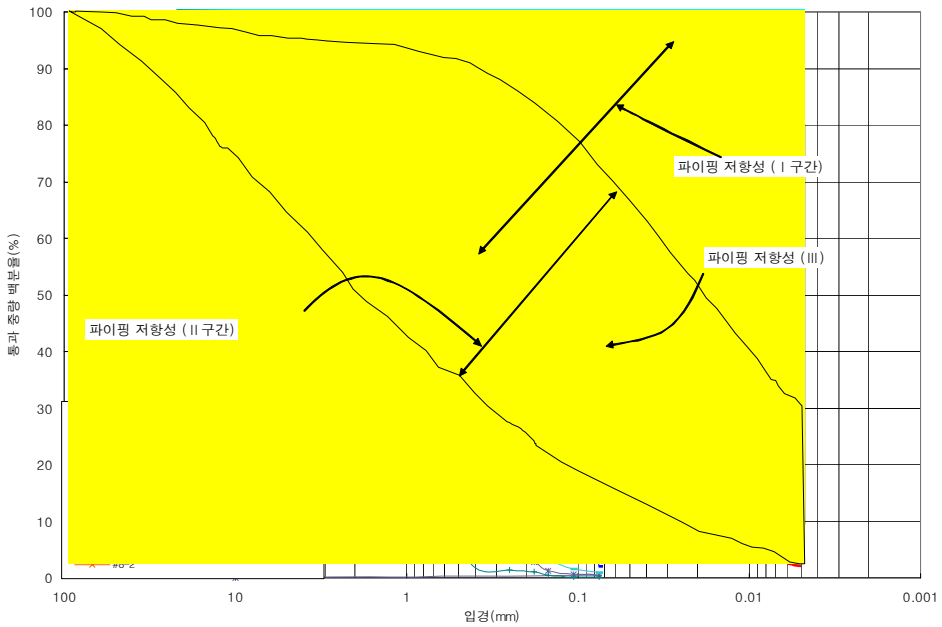
토 1개소를 제외하고 하천설계기준 상의 전단강도와 투수성을 기준으로 제시된 제방 재료 기준을 만족시키지 못하는 것으로 평가되었다.

또한, 섬진/영산강 수계의 제체 및 하상토는 NAVFAC 기준에 따른 섬진/영산강 수계 제체 및 하상 재료의 제체누수에 대한 저항성 분석 결과를 보여주는 <그림 3.2-4>에서 보듯이 각각 1개소에서 Ⅱ 구간과 유사한 입도분포특성을 보이며, 그 외의 경우 Ⅲ 구간 재료에 해당하는 것으로 평가되었다.

따라서, 섬진/영산강 수계의 조사대상 제체 및 하상토는 일부 구간을 제외하고 하천제방 제체로 활용 시 하천설계기준 및 NAVFAC 매뉴얼상 누수에 대한 저항성이 취약한 재료로 평가되었다.



(a) 제체 재료



(b) 하상 재료

<그림 3.2-4> NAVFAC 기준에 따른 섬진/영산강 수계의 제체누수 저항성 분석 결과

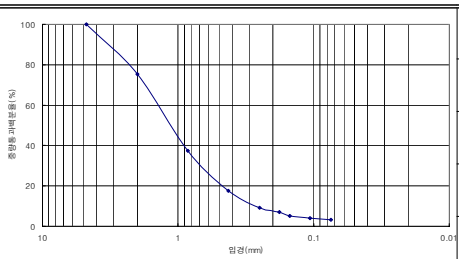
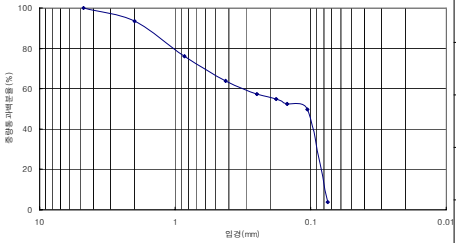
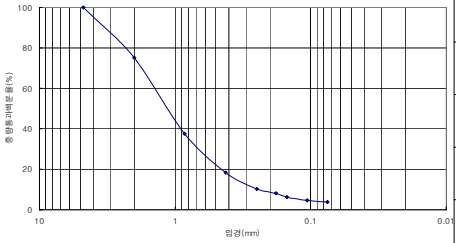
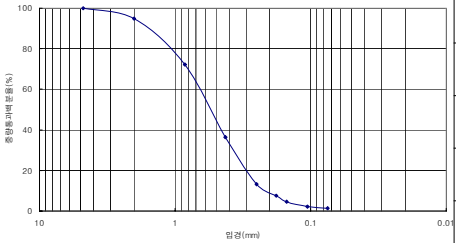
(4) 한강 수계

한강 수계 하천제방 제체 및 하상토 재료는 조사위치 별 입도분포 특성 및 통일분류 결과를 보여주는 <표 3.2-5>에서 보듯이 제체 재료의 경우 전체 2개소 중 균등계수(C_u) 5.60, 곡률계수(C_g) 1.23 정도인 입경이 균등한 사질토(SP)가 1개소, 균등계수(C_u) 6.24, 곡률계수(C_g) 1.26 정도인 입도분포가 양호한 사질토(SW)가 1개소로 조사되었다.

또한, 하상토 재료는 전체 2개소 각각 균등계수(C_u) 3.29, 3.25, 곡률계수(C_g) 0.35, 0.96 정도인 입경이 균등한 사질토(SP)로 평가되었다.

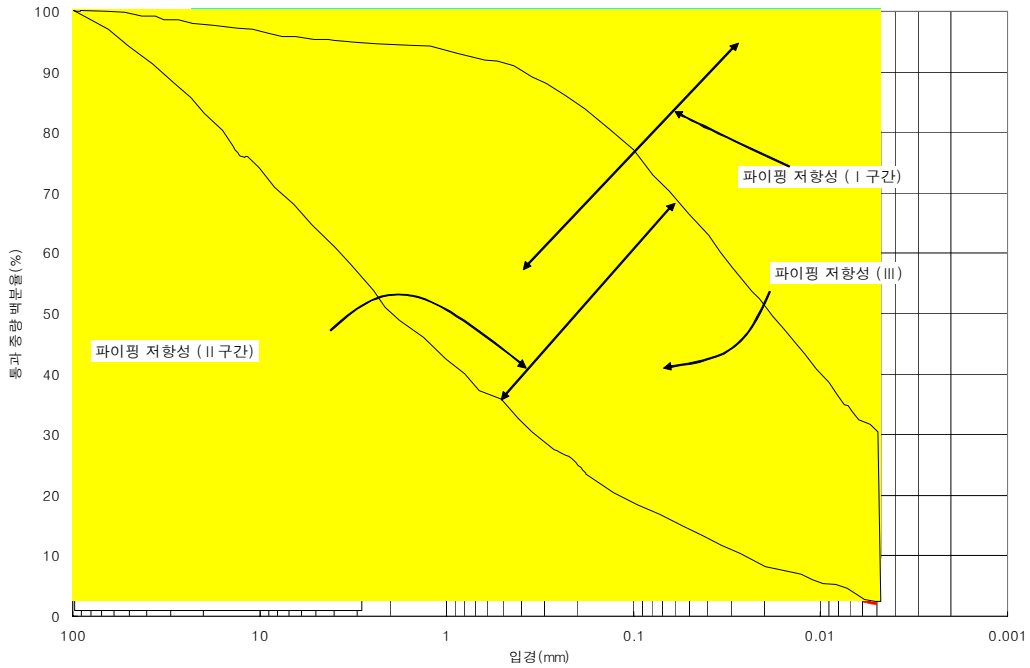
한편, 조사 대상 위치의 제체 및 하상토는 제체 1개소를 제외하고 모두 입경이 균등한 모래(SP)인 것으로 나타났으며, 통일분류법에 의한 흙 분류 결과 하천설계기준 상의 전단강도와 투수성을 기준으로 제시된 제방 재료 기준을 만족시키지 못하는 것으로 평가되었다.

<표 3.2-5> 한강 수계 조사위치 별 입도분포 특성 및 통일분류 결과

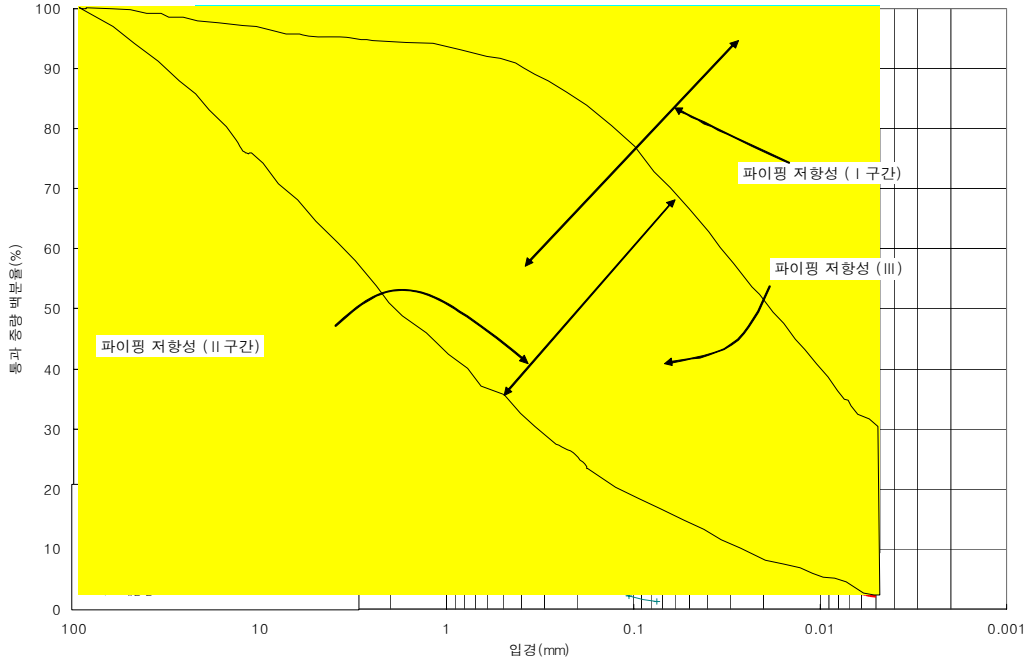
시료 번호	위치	구분	입도분포 특성		통일분류
# 1-1	경기도 파주시 교하면 연다산리	제체		D_{10}(㎜)=0.25 D_{30}(㎜)=0.66 D_{60}(㎜)=1.42 C_u=5.60 C_g=1.23	SP
# 1-2	경기도 파주시 교하면 연다산리	하상		D_{10}(㎜)=0.08 D_{30}(㎜)=0.09 D_{60}(㎜)=0.31 C_u=3.97 C_g=0.35	SP
# 2-1	경기도 파주시 교하면 교하리	제체		D_{10}(㎜)=0.23 D_{30}(㎜)=0.64 D_{60}(㎜)=1.42 C_u=6.24 C_g=1.26	SW
# 2-2	경기도 파주시 교하면 교하리	하상		D_{10}(㎜)=0.20 D_{30}(㎜)=0.37 D_{60}(㎜)=0.66 C_u=3.25 C_g=0.96	SP

또한, 한강 수계의 제체 및 하상토는 NAVFAC 기준에 따른 한강 수계 제체 및 하상 재료의 제체누수에 대한 저항성 분석 결과를 보여주는 <그림 3.2-5>에서 보듯이 누수저항성이 가장 작은 Ⅲ 구간 재료에 해당하는 것으로 평가되었다.

따라서, 한강 수계의 조사대상 제체 및 하상토는 하천제방 제체로 활용 시 하천설계기준 및 NAVFAC 매뉴얼상 누수에 대한 저항성이 취약한 재료로 평가되었다.



(a) 제체 재료



(b) 하상 재료

<그림 3.2-5> NAVFAC 기준에 따른 한강 수계의 제체누수 저항성 분석 결과

다. 소결론

본 절에서는 국내 국가하천 4대 수계를 대상으로 제체 및 하상토 재료 특성 평가를 위하여 금강 수계의 경우 금강공주 권역~금강하구언 구간 중 12개소, 낙동강 수계의 경우 안동댐 하류~낙동강하구언 구간 중 총 22개소, 섬진/영산강 수계의 경우 8개소(섬진강 4개소, 영산강 4개소), 한강 수계의 경우 곡릉천 하류 2개소를 대상으로 수행한 입도분포시험 및 통일분류법에 의한 흙 분류 등을 통하여 국내 하천제방 제체 및 하상토 재료특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 금강 수계 하천제방 제체 및 하상토 재료는 다음과 같은 특성을 보였으며, 전체적으로 제체 재료와 하상재료가 유사한 입도분포 특성을 보이는 것으로 평가되었다.

(ⅰ) 조사 결과 금강 수계의 제체 및 하상재료는 입경이 균등한 사질토(SP)인 제체 1개소, 하상토 2개소를 제외하고 비교적 입도분포가 양호한 재료인 것으로 평가되었으나, 통일분류법에 의한 흙 분류 결과 SM 혹은 SC로 평가된 제체 1개소와 하상토 4개소를 제외하고 하천설계기준 상의 전단강도와 투수성을 기준으로 제시된 제방 재료 기준을 만족시키지 못하는 것으로 평가되었다.

(ⅱ) NAVFAC 기준에 따른 금강 수계 제체 및 하상 재료의 제체누수에 대한 저항성 분석 결과 제체 재료의 경우 누수저항성이 가장 작은 Ⅲ 구간 재료로, 하상재료의 경우 4개소에서 Ⅱ 구간과 유사한 입도분포특성을 보이며, 그 외의 경우 Ⅲ 구간 재료에 해당하는 것으로 평가되었다.

(2) 낙동강 수계 하천제방 제체 및 하상토 재료는 다음과 같은 특성을 보였으며, 전체적으로 제체 재료와 하상재료가 모두 입경이 균질한 모래(SP)로 평가되었다.

(ⅰ) 조사 결과 낙동강 수계의 제체 및 하상재료는 통일분류법에 의한 흙 분류 결과 각각 평균 균등계수(C_u)의 경우 3.2 및 5.2, 평균 곡률계수(C_g) 1.3 및 1.0인 모래(SP)로서 하천설계기준 상의 전단강도와 투수성을 기

준으로 제시된 제방 재료 기준을 만족시키지 못하는 것으로 평가되었다.

(ii) NAVFAC 기준에 따른 낙동강 수계 제체 및 하상 재료의 제체누수에 대한 저항성 분석 결과 제체 및 하상재료 모두 누수에 대한 저항성이 취약한 Ⅲ 구간 재료에 해당해 하는 것으로 평가되었다.

(3) 섬진/영산강 수계 하천제방 제체 및 하상토 재료는 다음과 같은 특성을 보였으며, 전체적으로 제체 재료와 하상재료가 유사한 입도분포 특성을 보이는 것으로 평가되었다.

(i) 조사 결과 섬진/영산강 수계의 제체 및 하상재료는 입경이 균등한 사질토(SP)인 제체 3개소, 하상토 6개소를 제외하고 비교적 입도분포가 양호한 재료인 것으로 평가되었으나, 통일분류법에 의한 흙 분류 결과 SM 혹은 SC로 평가된 제체 2개소와 하상토 1개소를 제외하고 하천설계기준 상의 전단강도와 투수성을 기준으로 제시된 제방 재료 기준을 만족시키지 못하는 것으로 평가되었다.

(ii) NAVFAC 기준에 따른 섬진/영산강 수계 제체 및 하상 재료의 제체누수에 대한 저항성 분석 결과 제체 및 하상재료 모두 1개소에서 Ⅱ 구간과 유사한 입도분포특성을 보이며, 그 외의 경우 Ⅲ 구간 재료에 해당하는 것으로 평가되었다.

(4) 한강 수계 하천제방 제체 및 하상토 재료는 다음과 같은 특성을 보였으며, 전체적으로 제체 재료와 하상재료가 유사한 입도분포 특성을 보이는 것으로 평가되었다.

(i) 조사 결과 한강 수계의 제체 및 하상재료는 제체의 경우 SP 1개소, SW1개소, 하상토의 경우 SP 2개소로 나타나, 하천설계기준 상의 전단강도와 투수성을 기준으로 제시된 제방 재료 기준을 만족시키지 못하는 것으로 평가되었다.

(ii) NAVFAC 기준에 따른 한강 수계 제체 및 하상 재료의 제체누수에 대한 저항성 분석 결과 제체 및 하상재료 모두 누수에 대한 저항성이 취

약한 Ⅲ 구간 재료에 해당하는 것으로 평가되었다.

(5) 전체적인 국내 하상토 발생 특성은 조사 결과에 따르면 하천 본류를 따라 입경이 균등한 모래(SP)가 주로 발생하며, 하천 본류와 지천의 합류부, 자연습지, 하구언 등과 같이 물의 저류로 인한 퇴적특성이 우세한 지역에서 부분적으로 점토나 실트가 포함되어 발생되는 경향을 보였다.

2. 국내 하상토의 공학적 특성 분석

대규모 제방 성토에는 막대한 양의 건설재료가 필요하나 최근 자연환경에 대한 인식 고조로 양질의 건설재료 확보가 어려워지고 있는 실정이다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 지속적인 건설재료 확보를 위하여 하도준설을 통하여 발생하는 준설폐기물인 하상토와 연간 150만ton 이상 발생되고 있으나 산업폐기물로 지정되어 대부분 매립처분 되고 있는 석분토를 대상으로 하천제방 성토재료로서의 활용가능성에 대한 검토를 수행하고자 한다.

본 절에서는 하천제방 성토재료로서의 활용가능성 검토를 위한 공학적 특성 분석에 사용된 재료로 국내에서 발생하는 대표적인 하상토인 낙동강 수계 하상토 2종(SP, ML), 안산 하구언 하상토(ML), 인천 승지천 오니토(MH), 만경강 매립지 하상토(CL)와 현재 산업폐기물로 분류되고 있는 석분토에 대한 각종 물리·역학적 실험을 통하여 국내 하상토 및 석분토의 공학적 특성을 평가하고 제방재료로서의 적합성 평가 등을 수행하였다.

가. 실험개요

(1) 실험목적

본 실험은 각종 물리·역학적 평가를 통하여 국내 발생 하상토 및 석분토의 공학적 특성 분석과 제방재료로서 적합성 평가 등을 목적으로 수행되었다. 이때 시험대상시료는 국내 발생 대표적 하상토인 조립토 1종(SP) 및 세립토 3종(ML, MH, CL), 산업폐기물인 석분토 1종(ML)과 상대적 비교를 위한 양질의 제방재료인 화강풍화토 1종(SM)을 선정하였다.

(2) 실험대상시료

실험대상시료는 <표 3.2-6>에서 보듯이 하상토의 경우 왜관 부근 낙동강 본류에서 채취한 하상토 모래(왜관하상토-1, SP) 및 실트질 흙(왜관하상토-2, ML), 안산 하구언의 실트질 흙(ML), 김제시 인근 만경강 하상토인 점토질 흙(CL), 인천 승지천의 오니토(MH) 등 이다. 한편, 현재 산업폐기물로 구분되어 있는 석분토의 경우 경북 예천군 감천면에서 발생하는 실트질 석분토를 사용하였다.

또한, 본 실험에서는 양질의 제방재료로서 국내에 널리 분포하고 있는 화강풍화토(경북 칠곡군 도로공사현장 소재)를 선정하여 실험대상시료와 비교·분석을 수행하였다. 일반적으로 화강풍화토는 비중 2.6~2.8, 최대건조밀도 및 최적함수비 1.73~1.89g/㎤, 11.2~15.0%, 내부마찰각 32.5°~42°, 점착력 0.02~0.42㎏/㎠, 투수계수 1.43×10^{-5}~9.16×10^{-5}㎝/sec 등의 공학적 특성을 갖는 양질의 성토재료이다.

(3) 실험항목

시험대상시료의 공학적 특성 평가는 실내시험 항목 및 내용을 보여주는 <표 3.2-7>에서 보듯이 기본특성시험은 흙 종류별로 비중시험, 입도시험, Atterberg시험, 다짐시험, 직접전단시험, 투수시험 등과 같은 다양한 시험을 통하여 수행하였다.

<표 3.2-6> 기본특성시험에 사용된 흙 종류별 채취 위치

시료 종류	흙 분류	범례	채취 위치
왜관 하상토-1	SP(모래)	SP	경북 칠곡군 가산면 낙동 제2대교 근처
왜관 하상토-2	ML(실트질 흙)	ML-1	경북 칠곡군 가산면 낙동 제2대교 근처
안산하구언 하상토	ML(실트질 흙)	ML-2	경기 안산시 상록구 사동
만경강 하상토	CL(점토질 흙)	CL	김제시 만경강 매립지 하상토
승지천 오니토	MH(오니토)	ONI	인천 연수구 승지천 일대
석분토	ML(실트질 흙)	ML-3	경북 예천군 감천면 소재 ○○석재 현장
화강풍화토	SM(실트질 모래)	SM	경북 칠곡군 동명면 도로공사 현장

<표 3.2-7> 실험항목 및 내용

번호	실 험 항 목	실험 규격	실 험 시 료
1	비중시험	KS F 2308	SP, ML-1, ML-2, ML-3, CL, ONI, SM
2	입도시험	KS F 2302	SP, ML-1, ML-2, ML-3, CL, ONI, SM
3	Atterberg시험	KS F 2303 KS F 2304	SP, ML-1, ML-2, ML-3, CL, ONI, SM
4	다짐시험	KS F 2312	SP, ML-1, ML-2, ML-3, CL, ONI, SM
5	직접전단시험	KS F 2343	SP, ML-1, ML-2, ML-3, CL, ONI, SM
6	투수시험	KS F 2322	SP, ML-1, ML-2, ML-3, CL, ONI, SM

나. 실험결과 및 분석

본 절에서는 낙동강 수계 및 기타 지역에서 채취된 모래(SP), 실트질 흙(ML), 점토질 흙(CL), 오니토 등 하상토와 석분토를 대상으로 수행한 비중시험, 입도시험, Atterberg시험, 다짐시험, 직접전단시험, 투수시험 등의 기본특성시험 결과를 분석・정리하였다.

(1) 비중

비중은 증류수 단위중량에 대한 토입자 단위중량과의 비를 말한다. 비중시험은 2.0mm체를 통과한 노건조 시료를 20g(비중병 용량 50ml일 때)와 비중병을 이용하여 각 시료마다 3회씩 시험하여 그 오차가 ±0.03 이내에서 평균치로 결정하였다(<그림 3.2-6> 참조).

시험대상시료의 비중시험 결과는 <표 3.2-8>에서 보듯이, 왜관 하상토-1(SP) 2.61, 왜관 하상토-2(ML-1) 2.62, 안산하구언 하상토(ML-2) 2.51, 만경강 하상토(CL) 2.71, 승지천 오니토(MH) 2.62, 석분토(ML) 2.46으로 나타났다. 국내 발생 하상토 및 석분토는 화강풍화토(SM) 비중 2.76 보다 대체적으로 다소 작은 것으로 평가되었다.



<그림 3.2-6> 비중 시험

(2) 입도분포

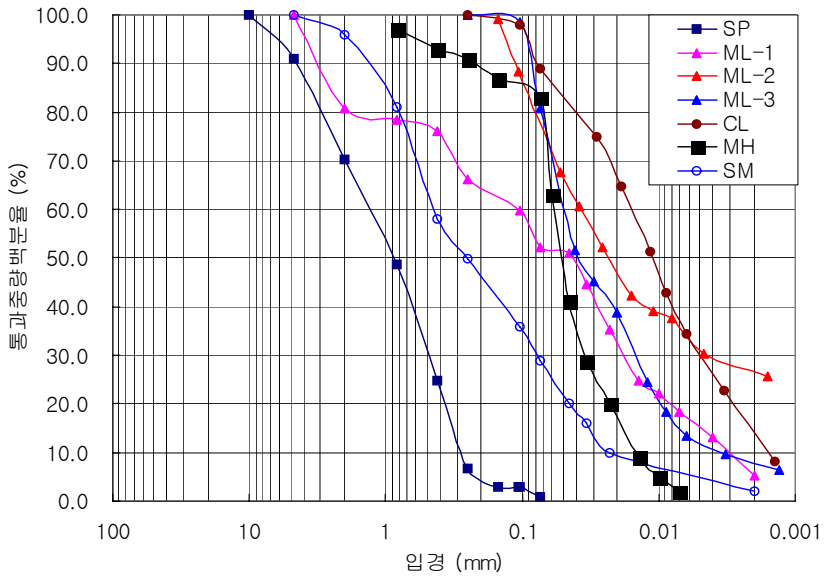
본 시험은 전술한 바와 같이 KS F 2302 및 KS F 2309 등에 의한 체분석 및 비중계 분석 등으로 수행되었다.

시험대상시료의 입도분포특성은 <그림 3.2-7>에서 보듯이 왜관 하상토-1(SP)의 경우 입경이 균등한 모래로서 균등계수(C_u) 8.0, 곡률계수(C_g) 0.5, 왜관 하상토-2(ML-1)의 경우 소성이 작은 실트로서 균등계수(C_u) 43.3, 곡률계수(C_g) 0.7, 안산하구언 하상토(ML-2)의 경우 소성이 작은 실트, 만경강 하상토(CL)의 경우 소성이 작은 점토로서 균등계수(C_u) 14.7, 곡률계수(C_g) 2.4, 승지천 오니토(MH)의 경우 소성이 작은 점토로서 균등계수(C_u) 3.5, 곡률계수(C_g) 1.4, 석분토(ML-3)의 경우 소성이 없는 실트로서 균등계수(C_u) 9.4, 곡률계수(C_g) 0.8, 화강풍화토(SM)의 경우 실트질 모래로서 균등계수(C_u) 21.3, 곡률계수(C_g) 0.9 등으로 판명되었다.

따라서, 시험대상시료는 하천설계기준(2005)상 제방재료기준의 입도분포특성만을 고려할 경우 왜관 하상토-1(SP) 및 승지천 오니토(MH) 등은 부절절한 제방재료로서 양질토 혼합 및 첨가재 등에 의한 안정처리가 요구된다. 또한, 왜관 하상토-2(ML-1), 안산하구언 하상토(ML-2), 만경강 하상토(CL), 석분토(ML-3)는 현장함수비가 적정할 경우 별도의 처리 없이 활용이 가능한 것으로 평가되었다.

<표 3.2-8> 낙동강수계 하상토 및 화강풍화토의 입도시험 결과

특성 \ 하상토 종류		왜관 하상토-1 (SP)	왜관 하상토-2 (ML-1)	안산하구언 하상토 (ML-2)	만경강 하상토 (CL)	승지천 오니토 (MH)	석분토 (ML-3)	화강 풍화토 (SM)
비중		2.61	2.62	2.51	2.71	2.62	2.46	2.76
입도분포	최대입경(㎜)	6.40	4.76	0.15	0.12	0.84	0.26	4.76
	4.76mm체 통과율	91	100	100	100	100	100	100
	0.074mm체 통과율	1.0	52	73	81	83	87	29
	D_{10}(㎜)	0.25	0.003	-	0.003	0.016	0.002	0.023
	D_{30}(㎜)	0.49	0.017	0.0048	0.02	0.035	0.003	0.082
	D_{60}(㎜)	2.0	0.13	0.036	0.05	0.056	0.017	0.49
	균등계수, C_u	8.0	43.3	-	14.7	3.5	9.4	21.3
	곡률계수, C_g	0.5	0.7	-	2.4	1.4	0.8	0.9
연경도	액성한계, LL(%)	-	29.3	27.5	41.4	51.4	-	27.0
	소성한계, PL(%)		25.6	24.4	21.1	43.4	-	24.5
	소성지수, PI(%)	-	3.7	3.1	20.3	8.0	-	2.5
통일분류		SP	ML	ML	CL	MH	ML	SM



<그림 3.2-7> 실험대상 시료의 입도분포곡선

(3) 액성한계와 소성한계

흙은 흙 입자를 둘러싸고 있는 물의 표면장력 영향에 의해 세립토 함유량 및 함수비 변화에 따라 반고체, 소성체, 액체 상태 등으로 존재할 수 있다. 이때, 액성한계 및 소성한계는 함수비에 따른 흙의 상태 변화를 경계 함수비로써 액성한계는 소성체/액체 상태 사이의 경계 함수비를, 소성한계는 소성체/반고체 사이의 경계함수비를 나타낸다.

액성한계는 <그림 3.2-8(a)>에서 보듯이 시료를 담은 접시를 1cm의 높이에서 1초에 2회 비율로 25회 떨어뜨렸을 때 양분된 부분의 흙이 홈 양측으로부터 흘러내려 약 1.5cm의 길이로 합쳐졌을 때의 함수비이며, 소성한계는 흙의 소성상태와 반고체 상태의 한계를 나타낸 함수비로, <그림 3.2-8(b)>에서 보듯이 흙덩어리를 손으로 밀어 지름 3mm 정도의 국수 모양으로 만들어 부슬부슬해질 때의 함수비로 정의된다.



(a) 액성한계 시험



(b) 소성한계 시험

<그림 3.2-8> 액·소성한계 시험

시험대상시료의 액성 및 소성한계는 왜관 하상토-1(SP)와 석분토(ML-3)의 경우 NP(소성이 없음), 왜관 하상토-2(ML-1)의 경우 29.3% 및 25.6%, 안산하구언 하상토(ML-2)의 경우 27.5% 및 24.4%, 만경강 하상토(CL)의 경우 38.4% 및 33.4%, 승지천 오니토(MH)의 경우 51.4% 및 43.4%, 화강풍화토(SM)의 경우 27.0% 및 24.5% 등으로 평가되었다.

한편, 시험대상시료의 소성지수는 만경강 하상토(CL)의 경우 20.3으로 나타나 NAVFAC기준에 의하면 파이핑에 대한 저항성이 큰 재료인 것으로 평가되었으며, 그 외의 시료의 경우 소성이 없거나 2.5~8.0 정도 수준으로 파이핑 저항성이 상대적으로 작은 것으로 평가되었다.

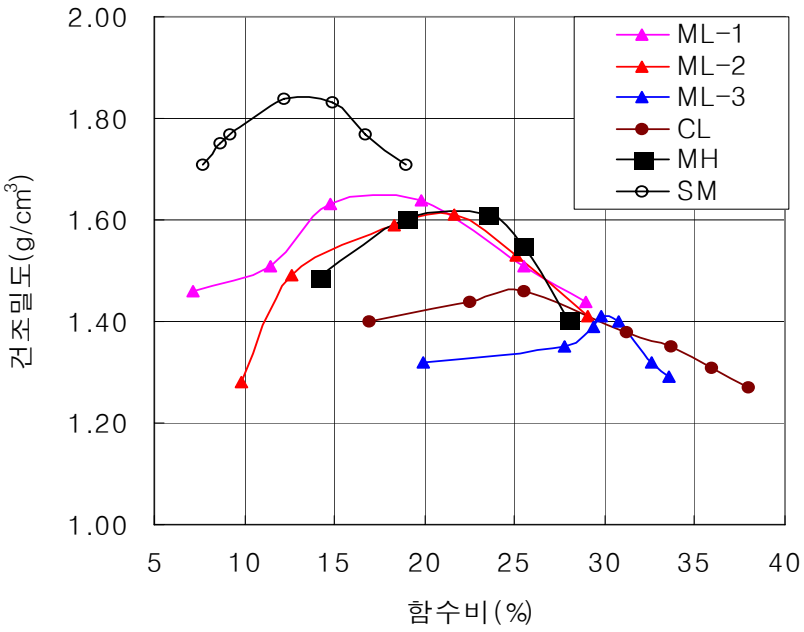
(4) 다짐특성

다짐은 토체 내에 존재하는 간극 감소를 유도하여 흙 입자간 친밀도를 높여 전체적인 흙의 건조단위중량을 증가시키는 과정으로, 흙의 다짐정도는 건조단위중량으로 평가한다. 시험대상시료의 다짐특성 평가를 위한 다짐시험은 <그림 3.2-9>에서 보듯이 KS F 2322 상의 A 다짐 규정에 의하여 함수비 5~40% 범위에 걸쳐서 3% 간격으로 조밀하게 수행하여 최대건조밀도와 최적함수비를 평가하였다.

한편, 다짐시험 결과는 주로 현장 다짐공정관리, 사질토의 상대밀도 등을 구하는데 활용되며, 하천공사표준시방서(1999)의 제방성토 다짐 기준은 1층 다짐 완료 후 두께의 경우 30cm 이하, 상대다짐도 90% 이상 관리하도록 되어 있다.



<그림 3.2-9> 다짐시험 장면



<그림 3.2-10> 시험대상 시료의 다짐곡선

시험대상시료의 최대건조밀도 및 최적함수비는 <그림 3.2-10>에서 보듯이 왜관 하상토-1(SP)의 경우 다짐 불능, 왜관 하상토-2(ML-1)의 경우 1.65g/cm^3 및 18%, 안산하구언 하상토(ML-2)의 경우 1.60g/cm^3 및 21%, 만경강 하상토(CL)의 경우 1.46g/cm^3 및 25.4%, 승지천 오니토(MH)의 경우 1.61g/cm^3 및 23%, 석분토(ML-3)의 경우 1.41g/cm^3 및 29%, 화강풍화토(SM)의 경우 1.84g/cm^3 및 12.5% 등으로 평가되었다. 시험대상시료는 조립토인 화강풍화토가 최대건조밀도가 크고 최적함수

비가 작으며, 세립토인 시험대상시료의 경우 상대적으로 최대건조밀도가 작고, 최적함수비가 큰 특성을 보였다.

(5) 투수특성

투수시험은 일반적으로 현장투수시험과 실내투수시험으로 크게 구분되며, 실내투수시험의 경우 <그림 3.2-11>에서 보듯이 조립토에 적용하는 정수위 투수시험과 세립토에 적용하는 변수위 투수시험이 있다. 시험대상시료의 투수특성 평가를 위한 투수시험은 KS F 2322 규정에 의하여 시험대상시료의 흙 분류특성을 고려하여 정수위 및 변수위 투수시험방식으로 수행되었다.



(a)변수위투수시험 (b)정수위투수시험

<그림 3.2-11> 투수시험장면

시험대상시료의 투수계수는 <표 3.2-9>에서 보듯이 왜관 하상토-1(SP)의 경우 4.85×10^{-2}㎝/sec, 왜관 하상토-2(ML-1)의 경우 2.29×10^{-5}㎝/sec, 안산하구언 하상토(ML-2)의 경우 1.97×10^{-7}㎝/sec, 만경강 하상토(CL)의 경우 7.12×10^{-6}㎝/sec, 승지천 오니토(MH)의 경우 8.77×10^{-5}㎝/sec, 석분토(ML-3)의 경우 2.03×10^{-6}㎝/sec, 화강풍화토(SM)의 경우 2.93×10^{-5}㎝/sec로 나타났다.

여기서, 왜관 하상토-1(SP)은 하천설계기준(2005)의 제방축조재료 투수계수 기준인 10^{-3}㎝/sec 이하와 비교하여 부절절한 재료로서 양질토 혼합 및 첨가재 등에 의한 안정처리가 요구되며, 그 외의 시료의 경우 투수계수기준을 만족하는 것으로

평가되었다.

<표 3.2-9> 시험대상시료의 투수계수

대상 시료	투수계수(cm/sec)	설계기준
왜관 하상토-1(SP)	4.85×10^{-2}	제방축조재료의 투수기준 10^{-3} cm/sec 이하
왜관 하상토-2(ML-1)	2.29×10^{-5}	
안산하구언 하상토(ML-2)	1.97×10^{-7}	
만경강 하상토(CL)	7.12×10^{-6}	
승지천 오니토(MH)	8.77×10^{-5}	
석분토(ML-3)	2.03×10^{-6}	
화강풍화토(SM)	2.93×10^{-5}	

(6) 전단특성

전단특성시험은 KS F 2343 규정에 의해서 <그림 3.2-12>과 같은 직접전단시험기를 이용하여 수행하였다. 이때 전단시료는 다짐시험에서 결정된 최대건조밀도에 대한 상대다짐도 95%에 해당하는 건조밀도와 함수비(습윤측)로 제조된 직경 60mm, 높이 20mm 공시체로 제작하였다. 또한, 전단시험 시 수직하중은 1.0, 1.5, 2.0 kg/cm^2 등으로, 전단속도는 1.0mm/min로 하였다.



<그림 3.2-12> 직접전단 시험기

시험대상시료의 전단강도는 <표 3.2-10>에서 보듯이 왜관 하상토-1(SP)의 경우 점착력 0.01 kg/cm^2, 내부마찰각 34.1°, 왜관 하상토-2(ML)의 경우 점착력 0.27kg/cm^2, 내부마찰각은 29.2°, 안산하구언 하상토(ML-1)의 경우 점착력 0.43kg/cm^2, 내부마찰각 26.8°, 만경강 하상토(CL)의 경우 점착력 0.13kg/cm^2, 내부마찰각 28.2°, 승지천 오니토(MH)의 경우 점착력 0.28kg/cm^2, 내부마찰각 30.3°, 석분토(ML-3)의 경우 점착력 0.11kg/cm^2, 내부마찰각 34.8°, 화강풍화토(SM)의 경우 점착력 0.06kg/cm^2, 내부마찰각 31.4°로 나타났다.

실험 결과를 종합해보면 국내 발생 하상토는 내부마찰각이 26.8°~34.8°로서 하천설계기준 상 비탈면 경사 1 : 3에 의한 자연안식각 18.4° 보다 큼으로써 활동에 대한 안정성이 확보된 것으로 평가되었다. 특히, 왜관 하상토-1(SP), 석분토(ML-3)는 전단강도특성만을 비교해 볼 때 양질의 제방재료인 화강풍화토(SM) 보다 우수한 것으로 평가되었다.

<표 3.2-10> 시험대상시료의 전단강도

대상 시료	점착력(kg/cm^2)	내부마찰각(ϕ)
왜관 하상토-1(SP)	0.01	34.1
왜관 하상토-2(ML-1)	0.27	29.2
안산하구언 하상토(ML-2)	0.43	26.8
만경강 하상토(CL)	0.13	28.2
승지천 오니토(MH)	0.28	30.3
석분토(ML)	0.11	34.8
화강풍화토(SM)	0.06	31.4

다. 소결론

본 절에서는 국내에서 발생하는 대표적 하상토인 조립토(SP), 세립토(ML, MH, CL), 산업폐기물인 석분토(ML)와 상대적 비교를 위한 양질의 제방 성토재료인 화강풍화토(SM)를 대상으로 수행한 각종 물리·역학적 실험을 통하여 국내 하상토 및 석분토의 공학적 특성을 평가하였다.

한편, 시험대상시료는 수행된 공학적 특성 평가결과와 하천설계기준(2005)의 투

수 및 전단강도 관련 기준과의 비교를 통하여 제방재료로서 하상토 활용에 따른 적합성을 평가하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 투수특성 분석결과, 실험대상 시료인 하상토 및 석분토는 왜관 하상토-1(SP)의 경우 4.85×10^{-2}㎝/sec, 왜관 하상토-2(ML-1)의 경우 2.29×10^{-5}㎝/sec, 안산하구언 하상토(ML-2)의 경우 1.97×10^{-7}㎝/sec, 만경강 하상토(CL)의 경우 7.12×10^{-6}㎝/sec, 승지천 오니토(MH)의 경우 8.77×10^{-5}㎝/sec, 석분토(ML-3)의 경우 2.03×10^{-6}㎝/sec, 화강풍화토(SM)의 경우 2.93×10^{-5}㎝/sec 등으로 나타났으며, 왜관 하상토-1(SP)의 경우 하천설계기준 제방재료의 투수계수기준인 10^{-3} cm/sec 이하로 양질토 혼합 및 첨가재 혼합 등과 같은 안정처리가 요구된다.

(2) 전단강도특성 분석결과, 실험대상 시료인 하상토 및 석분토는 내부마찰각이 26.8°~34.8°로서 하천설계기준 상 비탈면 경사 1 : 3에 의한 자연안식각 18.4° 보다 큼으로써 활동에 대한 안정성이 확보된 것으로 나타났으며, 특히 왜관 하상토-1(SP) 및 석분토(ML)는 전단강도특성만을 비교해 볼 때 양질의 제방재료인 화강풍화토(SM) 보다 우수한 것으로 평가되었다.

(3) 한편, 석분토(ML-3)는 앞서 언급하였듯이 연간 150만ton 이상 발생하고 있으나, 현재 산업폐기물로 지정되어 소량의 경우를 제외하고 대부분 매립처분되고 있는 실정이나, 공학적 특성 분석 결과 소성이 없는 실트질 흙(ML)으로 분류할 수 있으며, 투수 및 전단특성 평가결과 “석분토의 재활용 용도 및 방법 (폐기물관리법 시행규칙 제46조제3항 관련 별표11의2 개정)”에 따라 성토재료로 사용하여도 무방할 것으로 판단된다.

3. 불포화 하상토의 전단강도 및 투수특성

하천제방은 홍수위 최고수위 도달 후 평수위로 전환하는 과정에서 제방 앞비탈면에 발생하는 부의 간극수압 및 홍수기간 동안의 지속적인 강우 침투에 의한 불포화 영역의 확산 등에 의하여 제방파괴가 자주 발생된다. 실제적으로 이러한 하천제방 파괴는 전체 활동과 달리 국부적인 작은 영역의 활동을 발생에 의한 2차 제방 침식·세굴 및 활동에 의한 발생된다. 이때 하천제방 관련된 설계요소는 강우침투에 의한 불포화 영역을 고려한 침투 및 강도특성이다.

예로써 제방과 유사한 흙댐은 투수성이 매우 낮은 심벽재료(점토)가 사용되기 때문에 투수성이 큰 재료로 이루어진 댐 상부측의 경우 저수위와 동일한 수위가 나타나지만, 차수존인 심벽을 통과하면서 심벽 댐하류 영역의 경우 불포화 상태로 있다. 이러한 불포화 영역의 발달은 저수위 상승으로 인하여 심벽 내부에서 나타난 음의 간극수압이 작아지거나 소산될 경우 심벽 재료의 전단강도를 감소시켜 흙댐 자체의 안정성에 영향을 미치게 된다.

따라서 본 절에서는 국내 발생 하상토(점토, 모래, 오니토)에 대하여 간극수압 변화에 따른 전단강도 및 투수특성 변화를 고찰하고자 불포화 삼축압축 및 투수시험 등을 수행하여 하천제방 불포화 침투해석 시 요구되는 불포화 전단강도 및 투수계수를 제시하고자 한다.

가. 이론 분석

(1) 불포화전단강도

본 절에서는 여러 문헌연구를 통해 얻어진 기존 불포화토에 대한 전단강도식과 각각에 대한 특성들에 대해 요약, 정리하였다.

Bishop(1955, 1959)과 같은 여러 연구자들은 Terzaghi의 유효응력식을 불포화토에도 확장 적용할 수 있도록 수정하였으며, 이때 Bishop은 불포화토 해석 시 하나의 유효응력변수를 도입하는 것을 제안하였다. 하지만 Bishop의 불포화토 전단강도식의 타당성은 여러 연구자들(Jennings와 Burland 1962, Burland 1964)에 의해 의문이 제기되었다. 이후 Fredlund와 Morgenstern(1977) 등은 불포화토 응력상태변수 개념을 소개하면서 불포화토 전단강도에 대한 2개의 독립 응력상태변수로 해석을

제안하였다.

Bishop의 전단강도식은 식 (3.2-1)과 같이 하나의 응력변수(χ)로 표현된다. 이는 전단강도와 체적변화가 포화토와 유사한 유효응력의 변화에만 유일하게 관계된다는 결과를 나타낸다.

$$\tau_f = c' + [(\sigma_n - u_a) + \chi(u_a - u_w)]\tan\phi' \qquad (3.2\text{-}1)$$

여기서, u_a = 간극공기압

u_w = 간극수압

$(\sigma_n - u_a)$ = 순수직응력(net normal stress)

$(u_a - u_w)$ = 모관흡수력(matric suction)

Fredlund 등(1978)의 식은 2개 독립적인 응력변수, 즉 $(\sigma - u_a))$와 $(u_a - u_w)$를 기초로 한다. 여기서 ϕ'와 ϕ^b는 각각 τ와 $(\sigma - u_a)$, 그리고 τ와 $(u_a - u_w)$의 관계 곡선에서 기울기를 의미한다.

$$\tau_f = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan\phi' + (u_a - u_w)_f \tan\phi^b \qquad (3.2\text{-}2)$$

여기서, c' = 파괴시에 확장된 Mohr-Coulomb 파괴포락선이 순수직응력과 모관흡수력이 0이 되는 전단응력 축에 접하는 값

$(\sigma_f - u_a)_f$ = 파괴시 파괴면의 순수직응력

$(u_a - u_w)_f$ = 파괴시 파괴면의 모관흡수력

즉, 모관흡수력의 전단강도에 대한 기여는 ϕ^b에 의해 주어질 수 있다. 여기서 ϕ^b는 일정한 값으로 선형관계로 가정되었다. 그러나 이후 많은 실험적 결과들은 τ와 $(u_a - u_w)$의 관계가 명확히 비선형적인 관계임을 보여주고 있다(Escario와 Saez, 1986; Gan과 Fredlun, 1988; Abramento와 Carvalho, 1989). Abramento와 Carvalho(1989)는 점토질 다짐시료와 모래질 점토시료에 대해 실행한 실험을 통해

이러한 비선형성을 설명했다. 그리고 Fredlund 등(1987)은 비선형적 파괴포락선의 해석을 위해 여러 개의 선형부분의 사용법을 제안하였다.

하나의 응력변수에 의한 전단강도 추정에 대한 여러 연구자들의 시도는 많은 단점을 보였고, 순수직응력(net normal stress, $\sigma - u_a$)과 모관흡수력(matric suction, $u_a - u_w$)을 2개의 독립적인 응력변수로 이용할 때(Fredlund 등, 1978), 불포화 전단강도 거동이 가장 합리적으로 해석될 수 있는 것으로 인정되고 있다. 이러한 접근방법은 많은 사람들에 의해 성공적으로 적용되어 왔다(Gan 등, 1988; Escario와 Saez, 1986; Abramento와 Carvalho, 1989; Escario와 Juca, 1989). 불포화토에 대한 한계상태 모델들도 Karube(1988), Toll(1990), Wheeler와 Sivakumar(1992) 등에 의해 위의 2개의 독립적인 응력상태변수를 고려해서 개발되었다.

본 연구에서는 겉보기 점착력 거동을 간단한 형태로 표현할 수 있도록 쌍곡선식으로 제안된 다음의 식을 이용하여 불포화토 전단강도를 결정하였다.

$$C_A = c' + \frac{(u_a - u_w)}{a + b(u_a - u_w)} \tag{3.2-3a}$$

$$C_{A,\max} = C_{\max} + c', \; a = \frac{1}{\tan\phi'}, \; b = \frac{1}{C_{\max}} \tag{3.2-3b}$$

(2) 불포화투수계수

불포화 투수곡선은 함수비가 높으면 더 큰 투수특성을 보이는 함수비에 따른 투수특성변화를 보여준다. 또한, 지반의 불포화 투수곡선은 함수특성곡선과 유사한 경향을 보이며, 이러한 특성으로 인하여 함수특성곡선으로부터 투수함수식(Pedo-Transfer Function, PTF)을 추정하여 산정한다. Fredlund 등 (1994)은 다음과 같은 함수특성곡선으로부터 투수계수를 추정하는 식을 제안하였다.

$$k_r = \frac{\int_{\psi}^{\psi_r} \frac{\theta(\vartheta) - \theta(\psi)}{\vartheta^2} \theta'(\vartheta) d\vartheta}{\int_{\psi_{aev}}^{\psi_r} \frac{\theta(\vartheta) - \theta(\psi)}{\vartheta^2} \theta'(\vartheta) d\vartheta} \tag{3.2-4}$$

여기서, k_r = 상대투수계수

ψ_r = 잔류함수비에 해당하는 모관흡수력 값

θ' = 함수특성곡선의 미분 형태

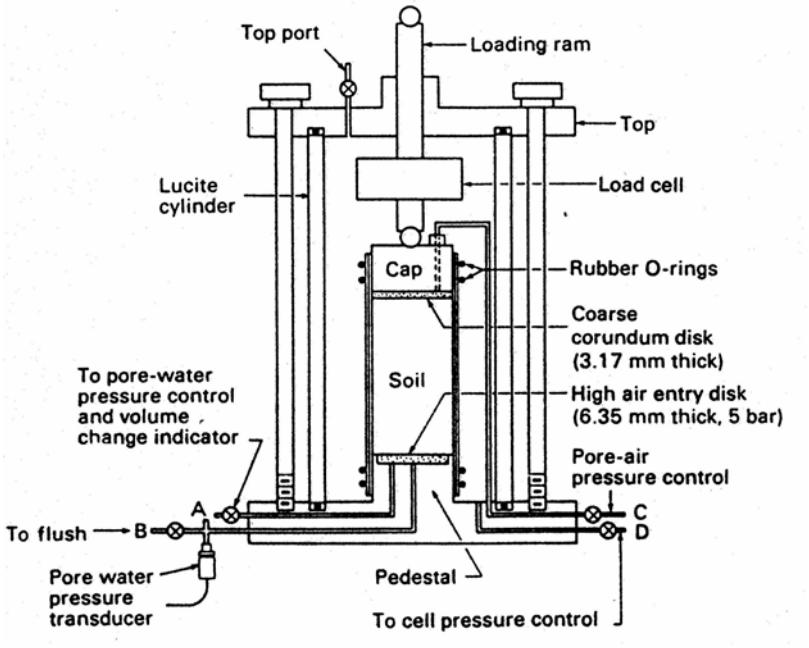
ϑ = 모관흡수력을 나타내는 적분 더미변수

나. 불포화토 전단강도 및 투수시험

(1) 실험 방법 및 장비

불포화전단강도 실험은 불포화 조건을 만족시켜주면서 불포화지반의 강도를 얻기 위한 방법으로 간극수와 간극공기를 모두 배수상태로 하는 CD 삼축압축실험방법을 채택하여 기존의 삼축압축실험장치를 개조해 실험을 수행하였다(<그림 3.2-13> 참조). 시료에 모관흡수력을 유발시키기 위해서는 음의 간극수압을 유지시키도록 해야 하지만 실제로는 음의 간극수압을 1기압까지밖에 발생시킬 수 없어 실험을 위해서 축변환기법(axis-translation technique)을 사용하였다. 이는 간극수압을 양의 값으로 시료의 받침대를 통해 작용시키고 그와 더불어 간극공기압을 간극수압 증가량만큼 증가된 값으로 시료의 cap을 통해 작용시켜 실제 시료에 작용되는 모관흡수력($u_a - u_w$)은 일정하게 유지하였다. 이를 위해서는 간극공기압과 간극수압을 각각 독립적으로 조절할 수 있어야 하므로 5기압(bar)의 공기압까지 공기를 통과시키지 않고 물의 연속성을 유지시킬 수 있는 높은 공기함입치(air entry value)를 갖는 세라믹 디스크를 시료의 받침에 설치하였다.

시료의 압밀과정은 구속압, 간극공기압, 간극수압의 작용으로 이루어진다. 밑판에 작용되는 수압은 트랜스듀서에 기록된다. 압밀과정은 시료로부터의 물의 배출이나 전체적인 부피변화가 더 이상 일어나지 않을 때 평형조건에 도달한 것으로 가정한다.



<그림 3.2-13> 불포화 삼축압축실험 셀 내부구조

작용된 압력 하에서 평형조건을 얻었을 때 시료는 적절한 변형률 속도로 압축에 의해 전단된다. 시료에 작용되는 축하중의 크기는 로드셀을 사용하여 기록될 수 있고, 축하중은 축차응력으로 전환된다. 전단과정은 간극공기와 간극수에 대해 배수조건하에서 실행된다. 전단과정은 선택된 파괴규준(e.g. 최대축차응력)에 도달하였을 때 끝나게 된다.

그리고 시료에 대한 균질성을 유지하기 위해 하나의 시료에 대해 여러 모관흡수력 단계에 대해 실험하는 다단계(multistage) 실험 방법을 채택하여 실험하였다(Fredlund와 Rahardjo, 1995). 다단계 실험의 경우에 위의 과정(즉, 압밀과 전단)은 각 단계에서 반복된다. 이때 각 단계를 위한 압밀은 0의 축차응력에서 시작하거나 이전의 단계로부터 얻어진 최대 축차응력을 유지시키면서 시작할 수 있다. 즉 축하중을 0으로 풀어줌으로써 축차응력을 0으로 가져갈 수 있다. 각 단계에서 전단과정은 마지막 단계를 제외하고 최대축차응력에 도달하는 순간 멈추어야 한다.

한편, 비배수 전단실험에서는 선택된 변형률 속도가 시료 전체에서 유발되는 간극수압의 균일성(equalization)을 확보해야 하고, 배수 전단실험에서는 선택된 변형률 속도가 유발되는 간극수압의 소산(dissipation)을 확보해야 한다. 실험을 위한 변형률 속도의 평가는 일부 이론의 기초와 일부 경험적 검증의 기반 위에서 이루어

져야 한다.

불포화토에 대한 전단강도 실험은 유발되는 간극수압의 균일성이나 소산을 확보하기 위해서 상대적으로 낮은 변형률 속도로 수행되어야 한다. Donald(1961)는 최대축차응력에 대한 변형률 속도의 영향을 변형률 속도의 추정의 기준으로써 추천하였다. Gibson과 Henkel(1954), Bishop과 Henkel(1962)은 변형률 속도에 따른 강도의 변화(즉 파괴시의 축차응력)를 보이는 실험결과를 발표하였다. 기준이 되는 변형률 속도는 시료의 파괴에 대한 변형률 속도의 상한계를 가리키며 특정한 변형률 속도 이하에서는 전단강도는 일정하게 된다. 본 연구에서는 이전 연구자들에 의해 추천된 지반재료에 대한 변형률 속도를 고려하여 0.004(mm/min)의 변형률 속도를 선정하여 실험을 수행하였다.

한편, 불포화투수특성 평가를 위한 함수특성곡선은 <그림 3.2-14>에서 보듯이 각 시료에 대해서 압력판 추출 실험(Volumetric Pressure Plate Extractor, VPPE)을 통하여 결정된다. 얻어진 실험 결과는 Fredlund & Xing이 제안한 함수특성곡선(식 3.2-5)에 맞추어 각 변수 a, n, m을 최적화시켜 구하였다.

$$\theta_s = \frac{\theta}{\left[\ln\left[e + (a\psi)^n\right]\right]^m} \qquad (3.2\text{-}5)$$

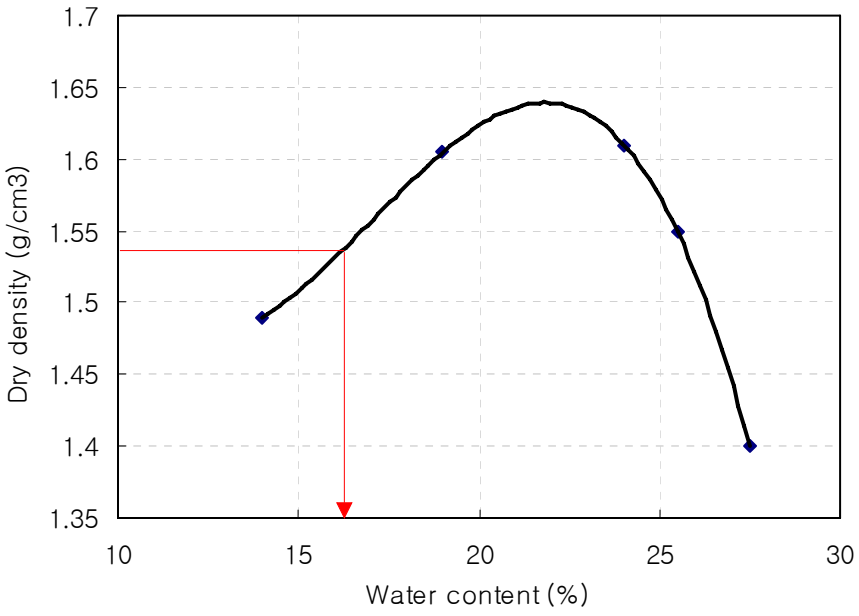
여기서, e = 자연수, ψ = 모관흡수력, a, n, m = 맞춤변수



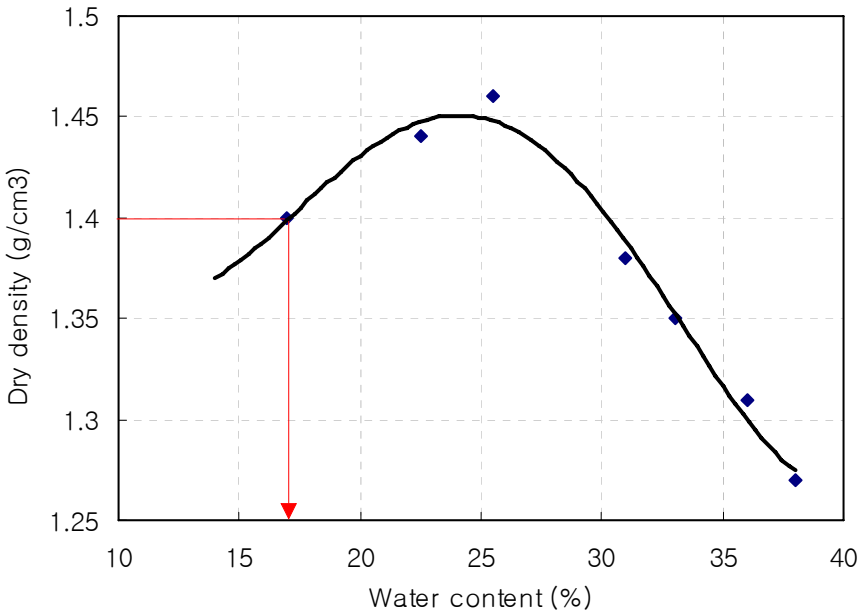
<그림 3.2-14> 불포화 투수 실험장비

(2) 실험 대상 시료

본 실험은 다짐 성형된 시료에 대하여 수행되었으며, 포화 삼축실험 및 불포화 삼축실험은 한국과학기술원에서 직접 수행하였다. ONI 시료와 Clay 시료에 대한 다짐시험 결과는 <그림 3.2-15>와 <그림 3.2-16>에 나타나 있다. 다짐시험 결과 ONI 시료의 경우 최대건조밀도가 1.64g/cm^3, 최적함수비(OMC)가 22% 정도이고, Clay 시료의 경우 최대건조밀도가 1.46g/cm^3, 최적함수비가 26% 이다. 본 시료에 대해 삼축실험을 수행하기 위한 시료를 성형하기 위하여 일반적인 시료성형조건인 최대건조밀도의 95 %에 해당하는 건조밀도와 이에 해당하는 건조 측 함수비를 구하였다. 화강풍화토(Granite weathered soil, GWS)에 대해서는 습윤 측 함수비를 이용하여 다짐 성형하였다. 그 결과 <표 3.2-11>과 같은 건조밀도와 함수비로 다짐을 통해 높이 100 mm, 직경 51 mm의 원통형 시료를 제작하였다.



<그림 3.2-15> ONI 시료에 대한 다짐곡선



<그림 3.2-16> Clay 시료에 대한 다짐곡선

<표 3.2-11> 시료 성형 조건

구분	건조밀도 (g/cm^3)	함수비 (%)
ONI	1.54	16.0
Clay	1.40	17.0
SP	1.80	8.0
GWS	1.64	20.6

다. 불포화 삼축실험 결과

(1) ONI 시료

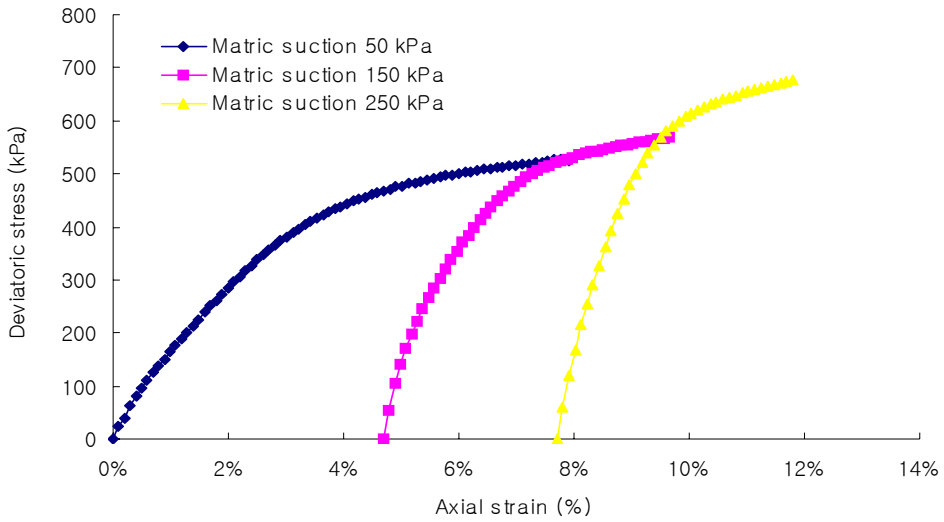
본 연구에서는 불포화 삼축실험을 수행하였으며 모관흡수력 변화에 따른 강도증가 효과를 볼 수 있다. 불포화 삼축실험은 시료성형에 따른 불확실성을 줄이기 위하여 동일한 시료를 대상으로 여러 모관흡수력 단계에서 전단실험을 수행하는 다단계 실험(multi-stage test)을 채택하였다. <그림 3.2-17>은 150 kPa 조건에서 여러 모관흡수력 단계에서 수행된 응력-변형률곡선을 보여준다. 시료 내부의 모관흡

수력이 증가함에 따라 파괴 시 축차응력도 증가하는 경향을 보였다. <그림 3.2-18>은 실험 결과를 Mohr-Columb 파괴포락곡선으로 표현한 것이다. Mohr-Columb 원이 커지면서 파괴전단강도도 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 $(\sigma - u_a)$가 0이 되는 상태에서 겉보기 점착력 또한 증가하고 있다. 파괴포락선의 기울기는 내부마찰각을 의미한다.

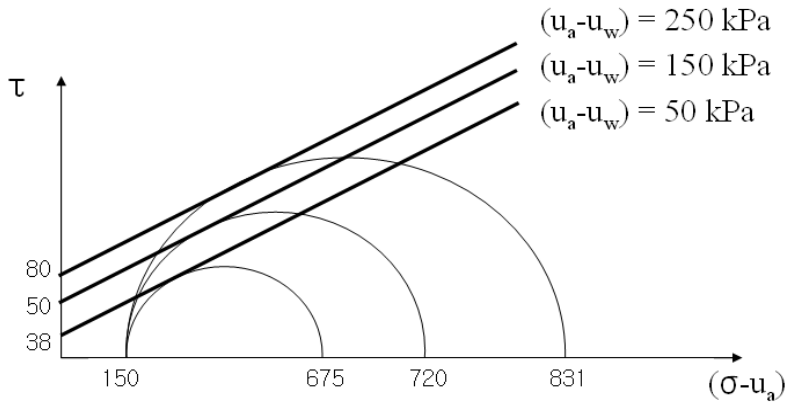
불포화 삼축실험 결과를 앞서 기술한 쌍곡선식을 이용한 겉보기점착력을 표현하는 곡선으로 나타내면 <그림 3.2-19>과 같다. C_{max} 값은 110kPa을 설정하였을 때 실험결과와 잘 일치하고 있다.

또한 결과에서 얻어진 겉보기 점착력(C_A) 값으로부터 수정된 Mohr-Coulomb 파괴포락선에 표현되는 모관흡수력의 영향 정도를 나타내는 ϕ^b로 표현하면, 모관흡수력이 0 kPa인 경우 ϕ^b는 34°에서 250 kPa인 경우 25°로 감소하는 비선형성을 보여주고 있다(<그림 3.2-20> 참조). 그리고 모관흡수력을 고려한 불포화 전단강도의 변화를 살펴보면 <그림 3.2-21>와 같다. 모관흡수력의 변화와 관련된 정수인 ϕ^b를 일정한 값, 즉 내부마찰각과 동일한 값으로 가정하여 전단강도를 산정할 경우, 낮은 모관흡수력 범위에서는 크게 차이나지 않지만 모관흡수력이 100 kPa을 넘어가는 높은 값에서는 점차 차이가 크게 나타나고 있다.

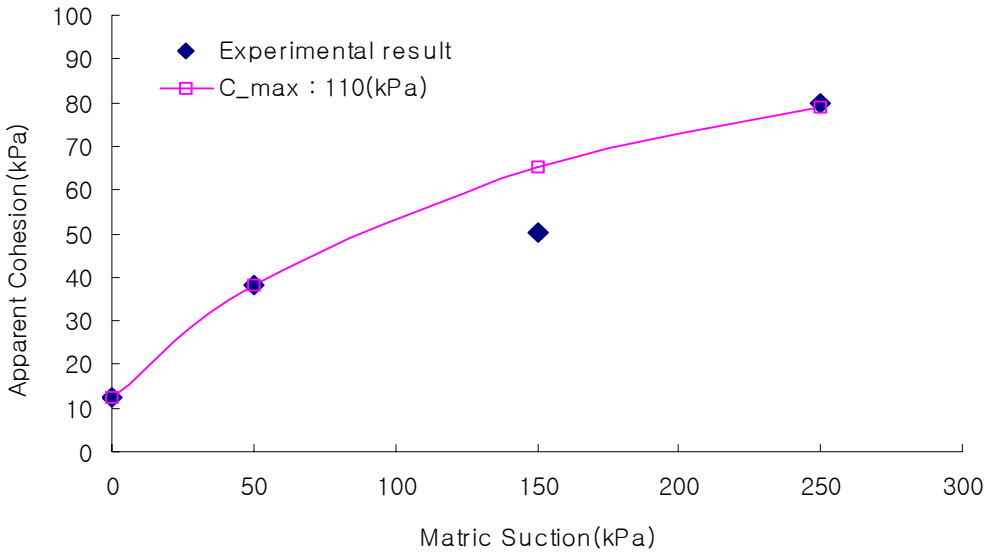
<그림 3.22>에서는 모관흡수력에 따른 겉보기 점착력의 변화를 선형으로 가정하여 점착력(c′)을 지나는 최적화된 ϕ^b 값을 산정하였다. 산정된 ϕ^b 값은 15°이며 이 값은 ϕ^b 값을 ϕ'와 동일하게 가정하였을 경우 불포화 전단강도가 과도하게 산정되는 것을 줄일 수 있으며, 선형적인 강도값을 입력변수로 이용하는 수치해석프로그램(예로서 SLOPE/W)에서 쉽게 활용할 수 있다.



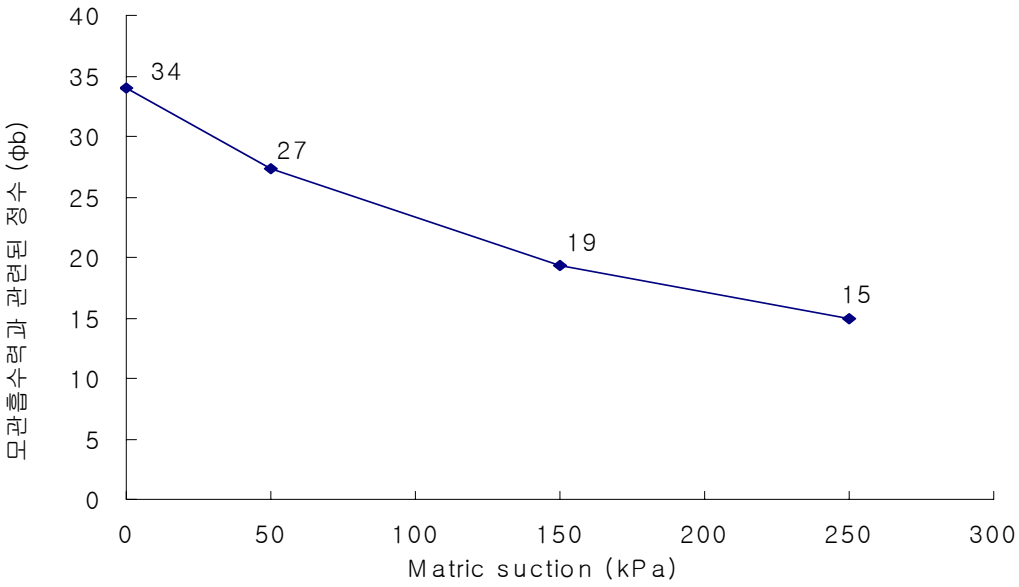
<그림 3.2-17> ONI 시료에 대한 모관흡수력 변화에 따른 응력-변형률곡선



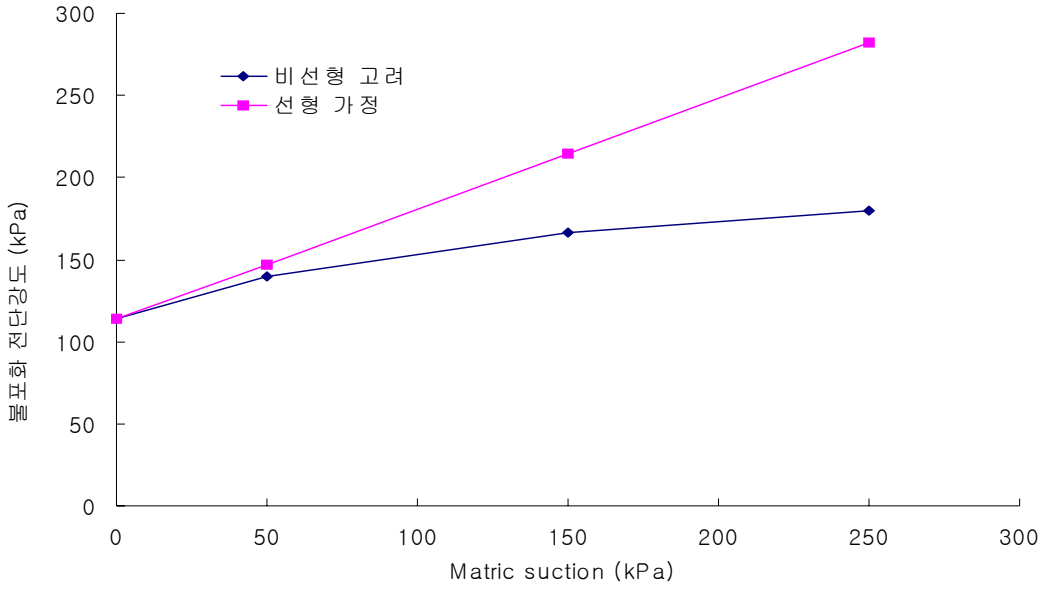
<그림 3.2-18> ONI 시료에 대한 불포화 파괴포락곡선



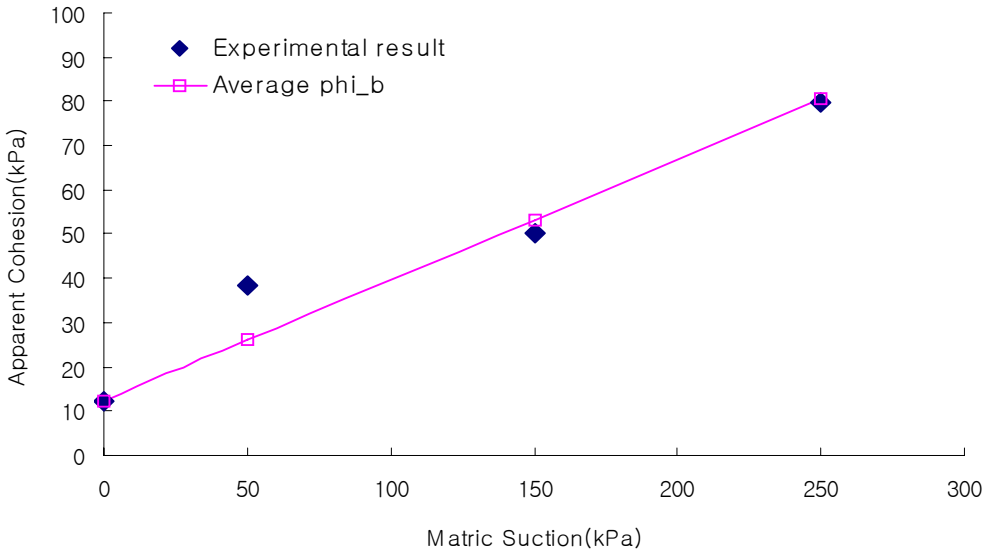
<그림 3.2-19> ONI 시료에 대한 비선형 겉보기 점착력



<그림 3.2-20> 각 모관흡수력에 해당하는 ϕ^b의 변화 (ONI 시료)



<그림 3.2-21> 구속압 150 kPa 조건에서 얻어진 불포화 전단강도 비교 (ONI 시료)



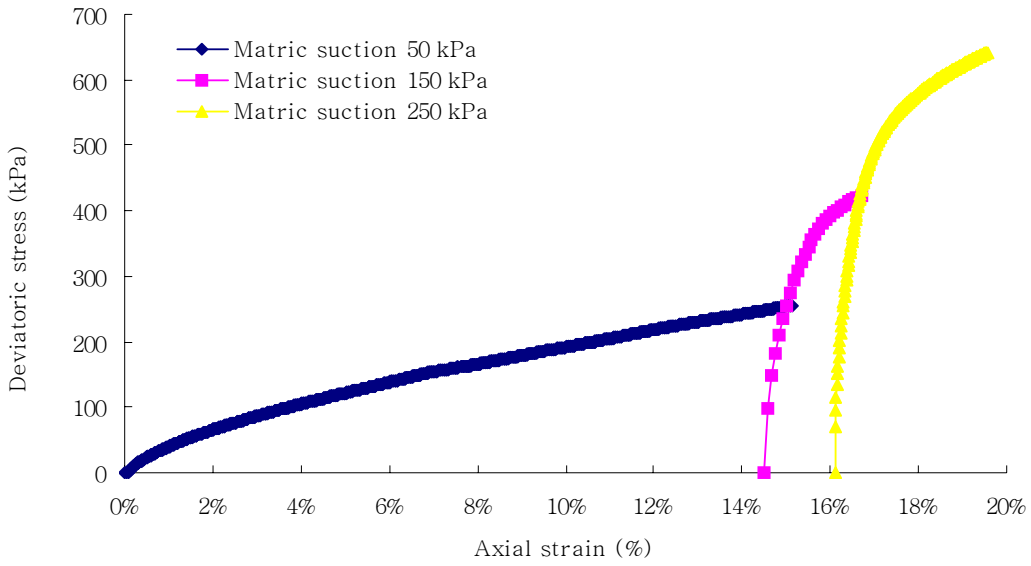
<그림 3.2-22> ONI 시료에 대한 평균적인 값 ϕ^b 산정

(2) Clay 시료

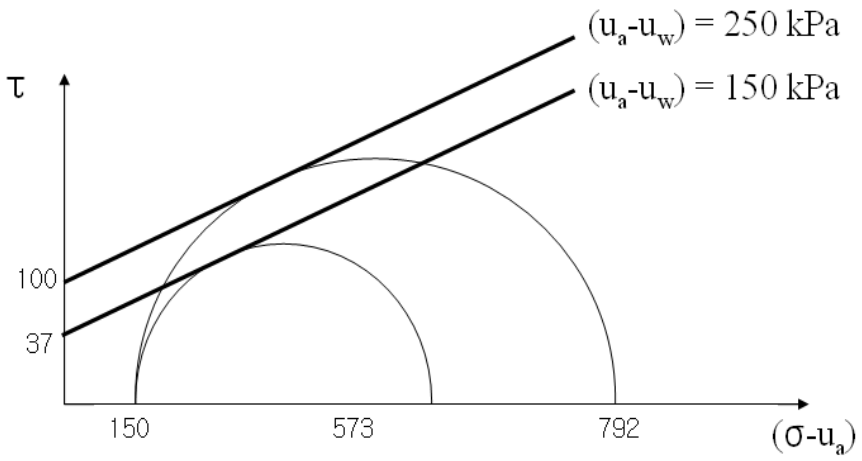
Clay 시료에 대한 불포화 실험 결과 모관흡수력이 증가함에 따라 축차 응력도 크게 증가함을 알 수 있다(<그림 3.23> 참조). <그림 3.24>에서는 모관흡수력에

따른 겉보기 점착력이 크게 증가하는 것을 보여주며, 이때 C_{max}값은 대략 150 정도이다. <그림 3.2-25>에서 모관흡수력이 150 kPa까지 증가하는 동안 발생한 겉보기 점착력의 증가량보다 150 kPa에서 250 kPa로 증가하면서 발생한 겉보기 점착력의 증가량이 훨씬 크다. 이러한 현상은 점토질 흙에서는 시료 내부의 물이 빠지는 모관흡수력, 즉 공기함입치(air entry value)가 크기 때문에 모관흡수력이 150 kPa 까지는 높은 함수비 상태를 유지하면서 강도가 크게 증가하지 않지만 공기함입치를 넘어서면서 시료 내부 함수비가 감소하면서 시료의 강도를 크게 증가시키고 있다.

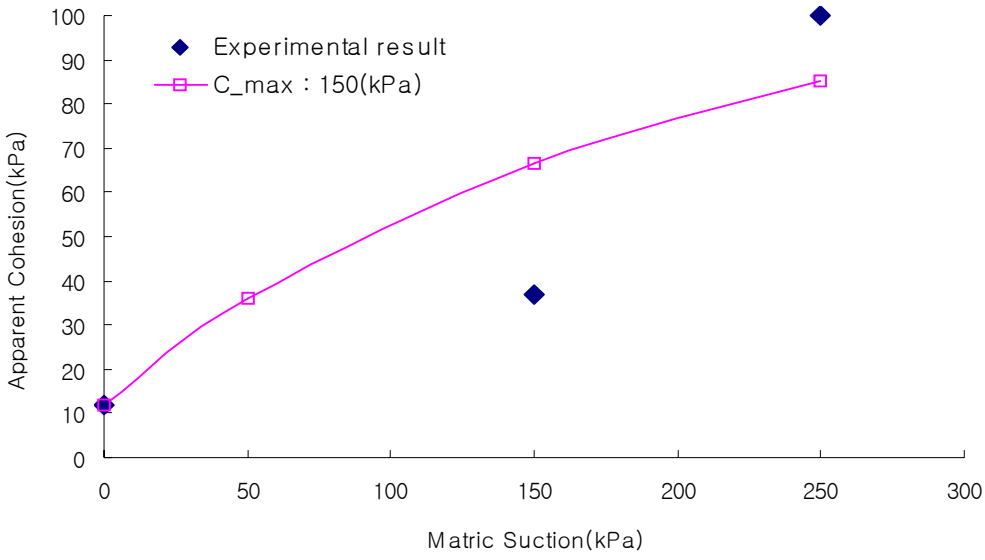
<그림 3.2-26> 및 <그림 3.2-27>에서는 모관흡수력 증가에 따른 불포화 전단강도의 변화를 선형성(일정한 ϕ^b)과 비선형성(C_{max})으로 구분해서 비교해 보았다. 점토질 흙의 경우 내부마찰각이 작기 때문에 $\phi^b=\phi'$으로 가정하더라도 비선형성을 고려한 불포화 전단강도보다 아주 크게 증가하지는 않는다. 따라서 <그림 3.2-28>에서처럼 평균적인 ϕ^b_{avg} 값을 산정하였을 때, 19°로 나타났다.



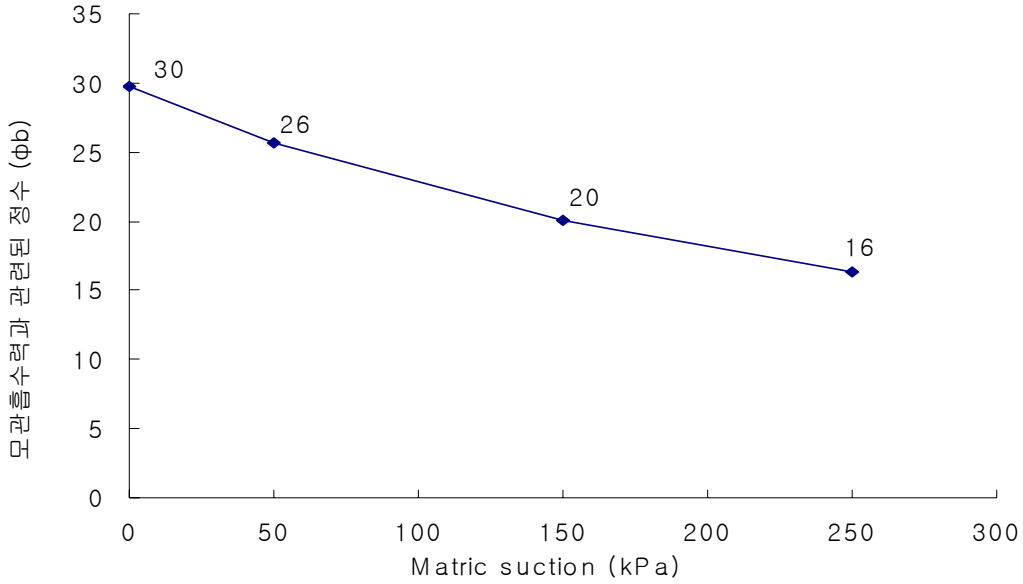
<그림 3.2-23> Clay 시료에 대한 모관흡수력 변화에 따른 응력-변형률곡선



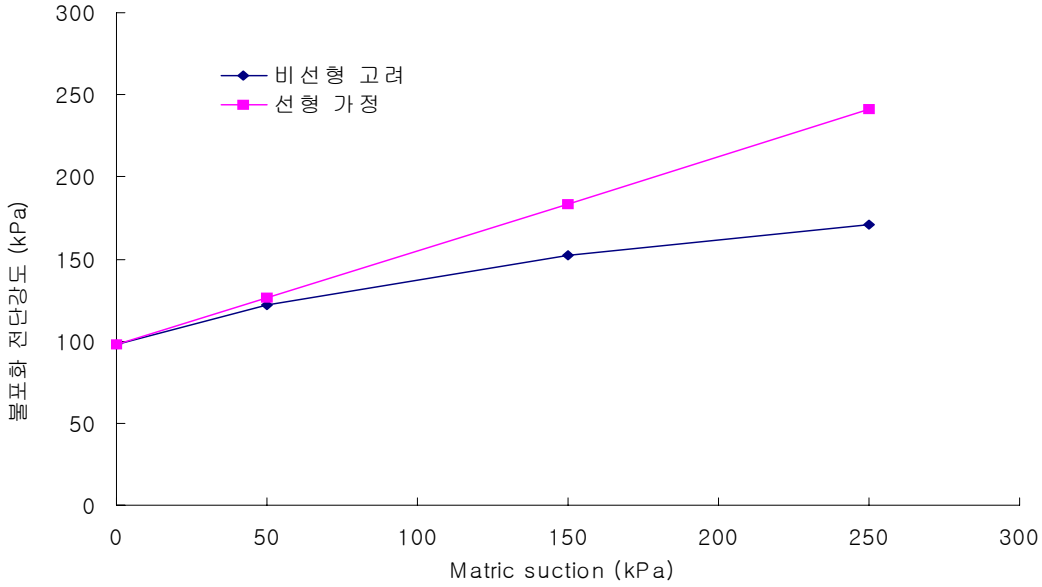
<그림 3.2-24> Clay 시료에 대한 불포화 파괴포락곡선



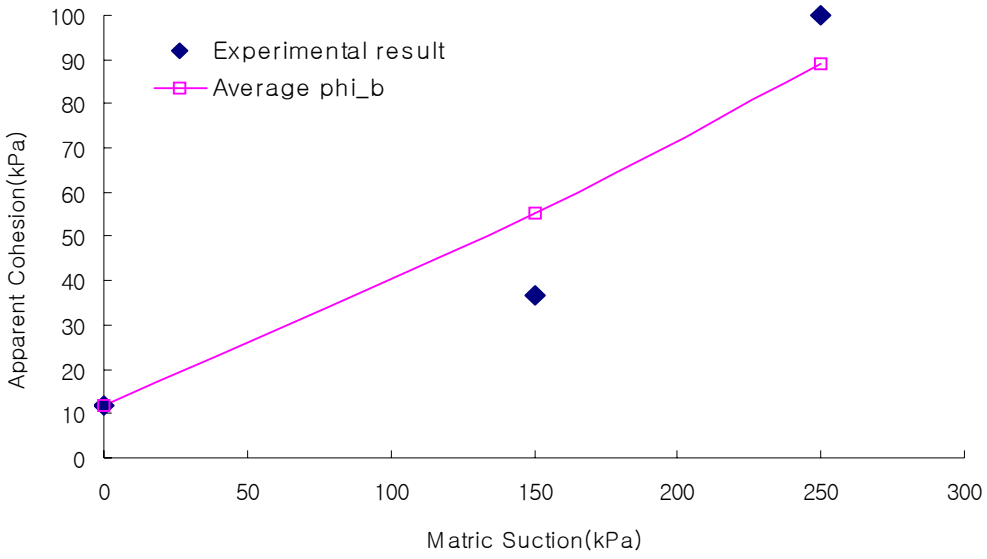
<그림 3.2-25> Clay 시료에 대한 비선형 겉보기 점착력



<그림 3.2-26> 각 모관흡수력에 해당하는 ϕ^b의 변화 (Clay 시료)



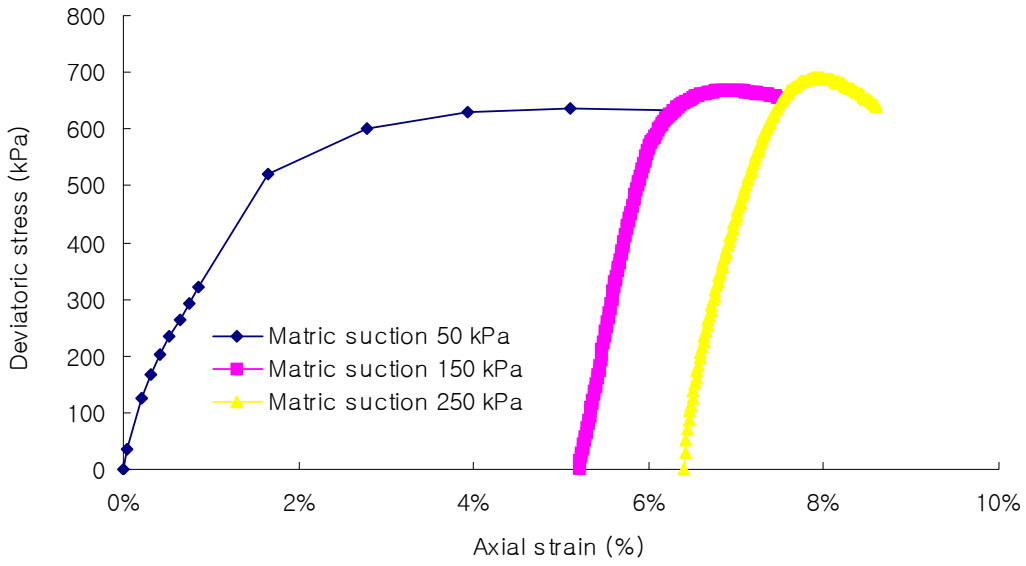
<그림 3.2-27> 구속압 150 kPa 조건에서 얻어진 불포화 전단강도 비교 (Clay 시료)



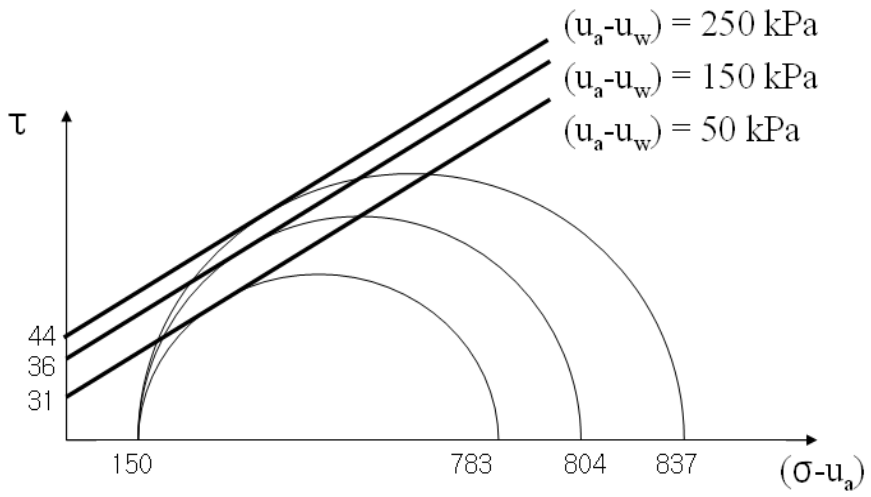
<그림 3.2-28> Clay 시료에 대한 평균적인 값 ϕ^b 산정

(3) SP 시료

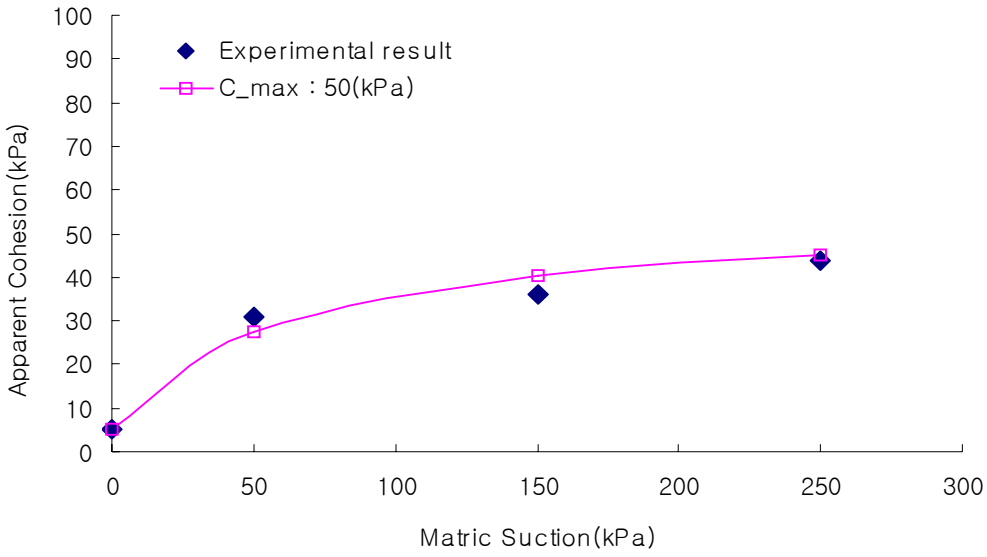
모래성분을 많이 함유하고 있는 SP시료의 경우 모관흡수력 증가에 따른 강도의 증가가 크게 나타나지 않았다. 이는 모래 성분이 많은 흙의 경우 내부 간극의 크기가 크기 때문에 공기함입치가 작아서 낮은 모관흡수력에서도 시료 내부의 수분이 많이 빠져 나가게 된다. 즉 공기함입치가 5 kPa 내외로 아주 작기 때문에 50 kPa 이상의 모관흡수력을 유발한 실험에서는 이미 수분이 대부분 빠져나가 모관흡수력 증가에 따른 강도증가를 보기가 어렵다. 이러한 사실은 <그림 3.2-29>~<그림 3.2-31>에서 쉽게 확인할 수 있다. C_{max} 값은 50으로 나타나 모관흡수력에 따른 강도증가가 크지 않음을 알 수 있다. 모관흡수력과 관련된 지반정수인 ϕ^b값의 변화도 급격히 줄어들어 결국 모관흡수력 증가에 따른 강도증가 효과가 크지 않게 된다(<그림 3.2-32> 참조). 예로서 <그림 3.2-32>에서 보듯이 250 kPa 값에서는 9° 까지 줄어드는 것으로 나타났다. 하지만 비선형성을 고려하지 않고 낮은 모관흡수력에서 나타나는 값으로 가정하면($\phi^b=\phi'$), 내부마찰각이 아주 크기 때문에(38.8°) 모관흡수력이 증가함에 따라 실제 나타나는 강도특성인 비선형의 불포화 전단강도보다 훨씬 큰 강도를 예측하게 된다. 관련 실험결과는 <그림 3.2-33> 및 <3.2-34>와 같다.



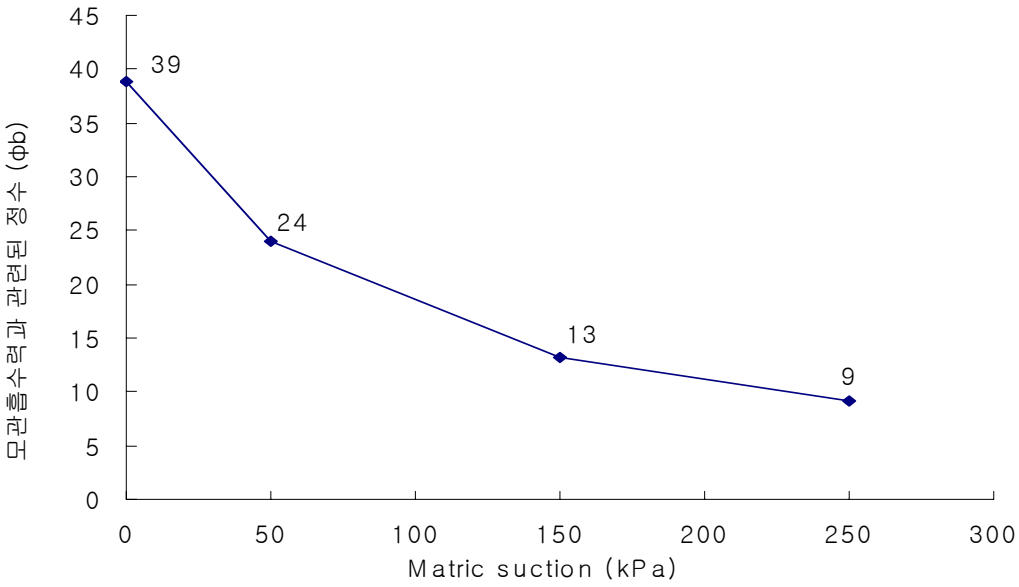
<그림 3.2-29> SP 시료에 대한 모관흡수력 변화에 따른 응력-변형률곡선



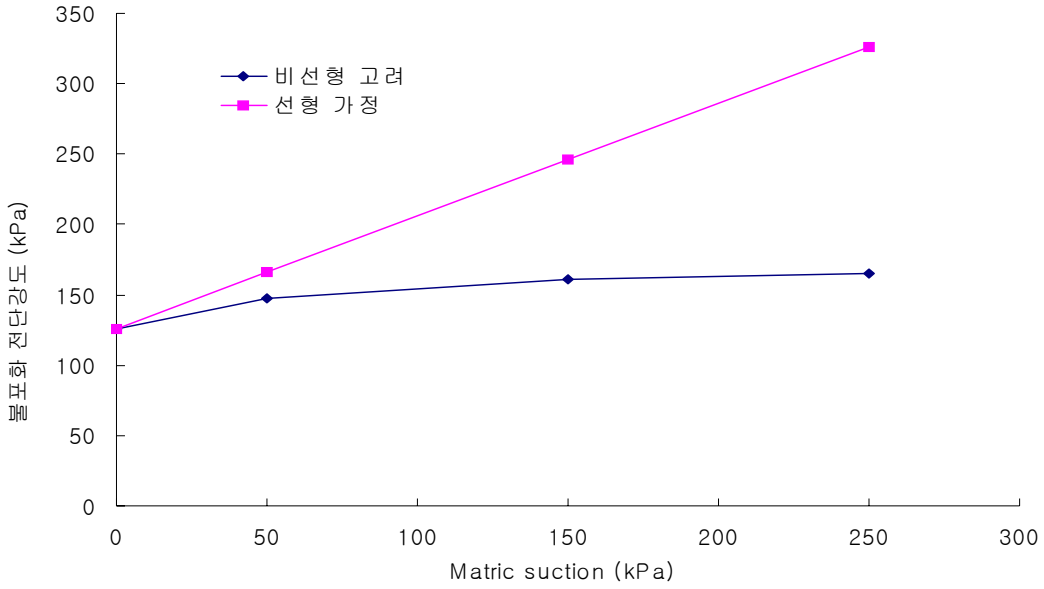
<그림 3.2-30> SP 시료에 대한 불포화 파괴포락곡선



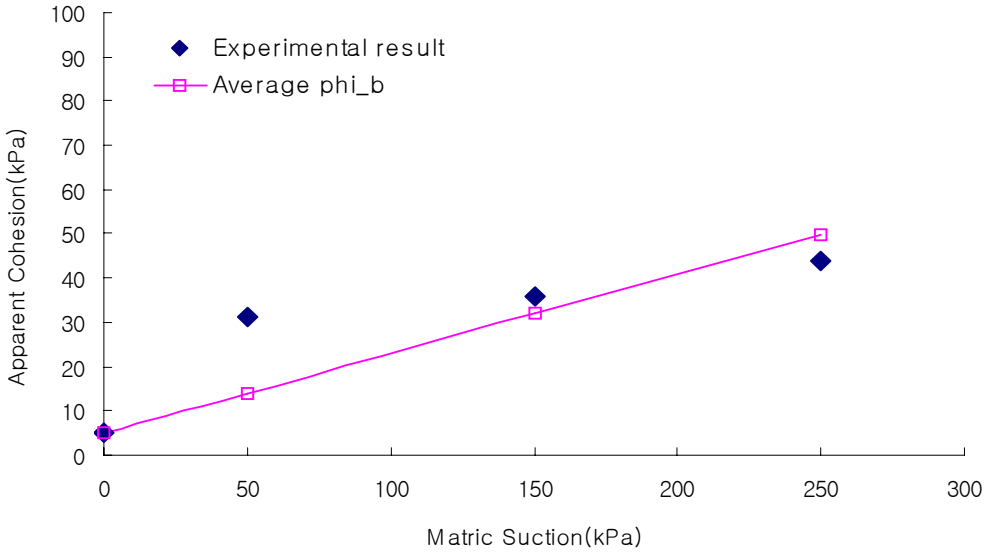
<그림 3.2-31> SP 시료에 대한 비선형 겉보기 점착력



<그림 3.2-32> 각 모관흡수력에 해당하는 ϕ^b의 변화 (SP 시료)



<그림 3.2-33> 구속압 150 kPa 조건에서 얻어진 불포화 전단강도 비교 (SP 시료)



<그림 3.2-34> SP 시료에 대한 평균적인 값 ϕ^b 산정

(4) 결과 비교

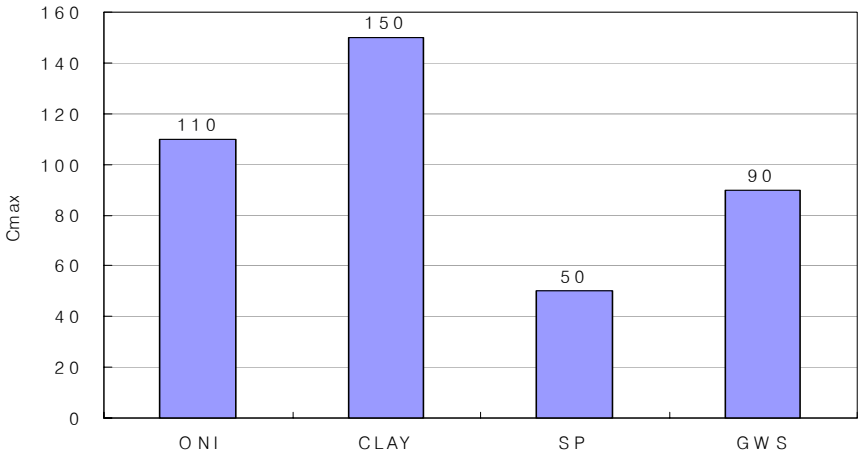
삼축실험 결과 얻어진 ONI, Clay, SP 시료에 대한 전단강도에 대해 정리하면, <표 3.2-12>와 같다. 우선 포화 강도의 경우 SP 시료에서 가장 크게 나타나고 있다. $\tau = c' + \sigma \tan\phi'$ 수식을 이용하여 포화 강도를 계산하면, 순응력이 150 kPa일 때 SP 시료의 경우 126 kPa 값을 나타내고 있으며, ONI 시료와 Clay 시료의 경우 114 kPa과 98 kPa 이다. GWS 시료에 대해서는 순응력이 100 kPa인 경우에 대해 107 kPa 값을 보여주고 있다. 점착력의 경우 ONI 시료와 Clay 시료에서 12 kPa 정도로 크게 나타났으며, SP 시료의 경우 5 kPa로 낮게 나타났다. GWS 시료는 SP 시료에 가까운 6 kPa의 점착력이 나타났다. 이러한 사실은 ONI 시료와 Clay 시료에 세립분이 많이 함유되어 있기 때문이며, SP 시료의 경우 조립분이 많기 때문이다. 반면 내부마찰각의 경우 조립분이 많은 SP 시료에서 가장 크게 나타났고 Clay 시료의 경우 29.8 °로 작은 값을 보여주고 있다.

<그림 3.2-35>과 <그림 3.2-36>에서는 각 시료별 C_{max} 값과 ϕ^b_{avg} 값을 비교하였다. Clay 시료에서 가장 큰 C_{max} 값을 보여주고 있으며, SP 시료의 경우 가장 작은 50 값을 보여주고 있다. 모관흡수력 증가에 따른 겉보기 점착력의 증가분을 의미하는 C_{max}와 ϕ^b_{avg}의 경우 오히려 Clay 시료에서 가장 크고, SP 시료에서 작게 나타났다. SP 시료의 경우 모관흡수력이 증가하면서 강도 증가가 작게 나타남을 의미한다.

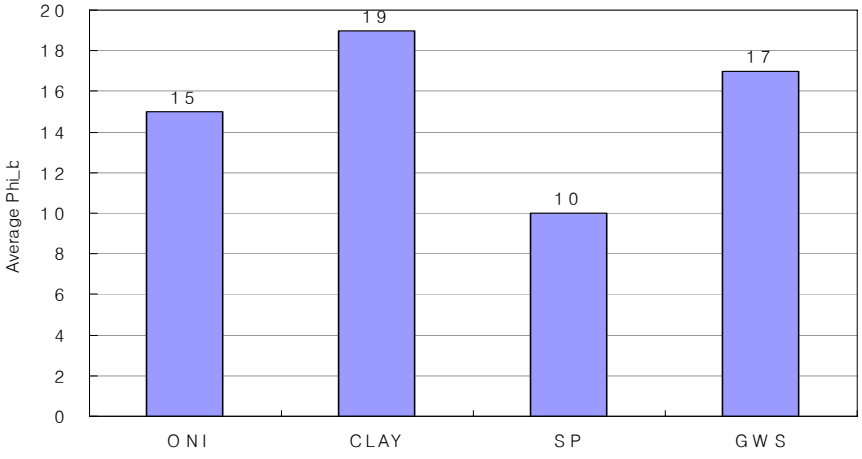
불포화 전단강도의 경우 모관흡수력 증가에 따른 강도의 증가분이 시료마다 다르게 나타나 강도 순위에 변화가 발생했다. <그림 3.2-37>에서 이러한 강도변화를 쉽게 확인 할 수 있다. 순응력이 150 kPa일 때 포화 시(모관흡수력 0인 상태)에는 SP 시료의 전단강도가 가장 크게 나타나지만, 모관흡수력이 250 kPa인 경우에는 ONI 시료에서 더 큰 강도를 나타내고 있다. 이러한 현상은 SP 시료의 경우 공기함입치가 작아서 50 kPa 이전에 시료 내부의 수분이 시료로부터 빠져나와 모관흡수력 변화에 따른 함수비 변화가 작기 때문에 강도 증가량이 작아지는 것으로 설명이 가능하다. GWS 시료의 경우 입도특성이 ONI 시료와 Clay 시료 사이의 분포를 나타내기 때문에 강도특성 또한 ONI 시료와 Clay 시료 사이에서 나타나고 있다.

<표 3.2-12> 삼축시험 결과 구해진 시료별 강도정수 비교

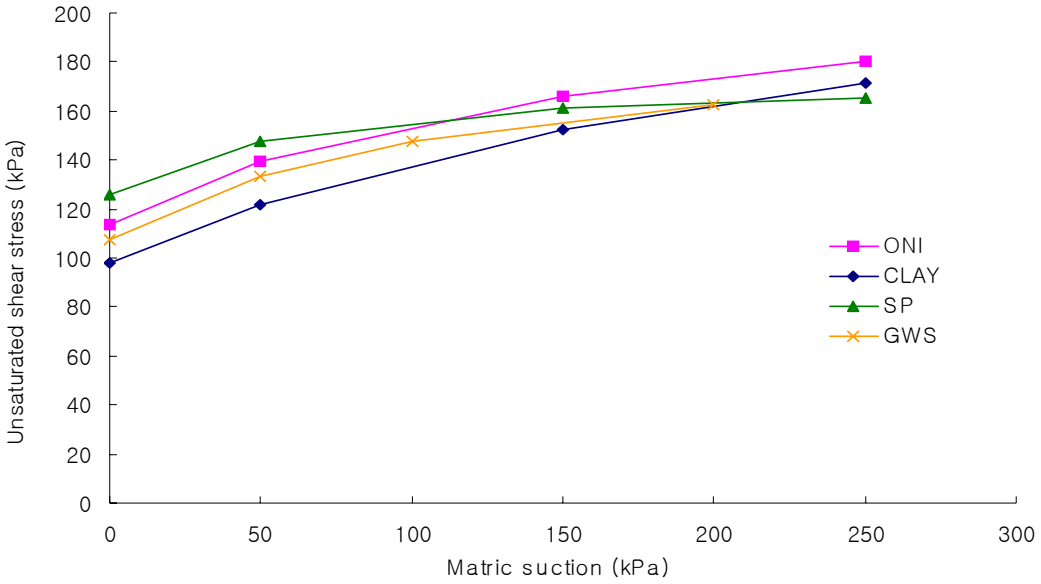
구분	c′ (kPa)	ϕ′ (°)	(σ-u_a)	C_{max}	ϕ^b_{avg} (°)
ONI	12.4	34	150	110	15
Clay	12	29.8	150	150	19
SP	5	38.8	150	50	10
GWS	6	36	100	90	17



<그림 3.2-35> 각 시료별 C_{max} 값 비교



<그림 3.2-36> 각 시료별 ϕ^b_{avg} 값 비교



<그림 3.2-37> 각 시료에 대한 불포화 전단강도 비교

라. 불포화 투수실험결과

(1) 함수특성곡선

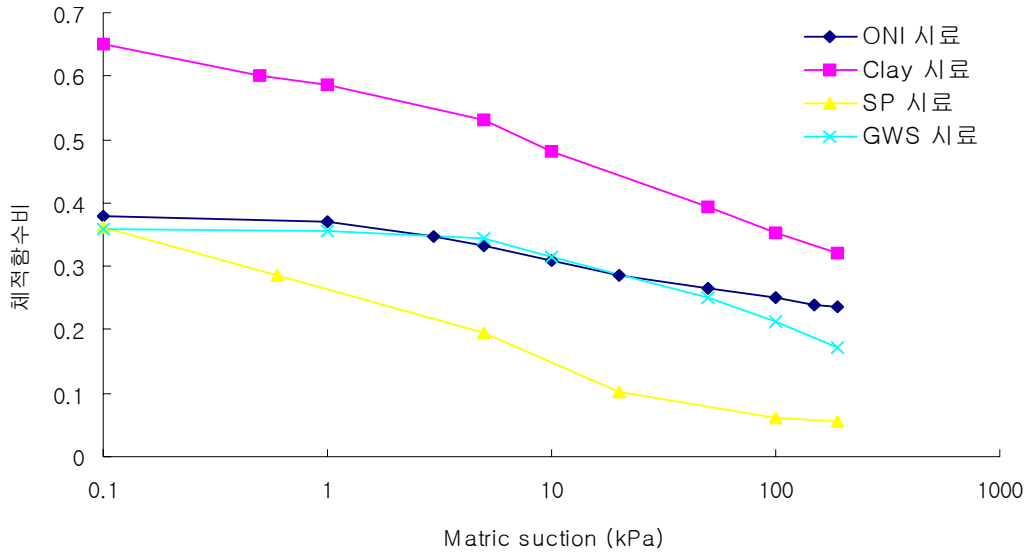
본 실험에서 얻어진 함수특성곡선의 변수들은 <표 3.2-13>에 나타난 바와 같으며, 형태는 <그림 3.2-38>과 같다. 함수특성곡선의 변수값들은 함수특성곡선의 형태를 결정하는데 중요한 역할을 한다. 이때 함수특성곡선 맞춤변수는 a 값의 경우 공기함입치가 커질수록 커지는 경향을 보이며, n 값의 경우 모관흡수력 증가에 따른 함수비의 변화(함수특성곡선의 기울기)와 관련된 변수로써, n 값이 커지면 기울기가 더욱 급해진다. 또한, 맞춤변수 m 값은 잔류함수비와 밀접한 연관성을 나타내는 변수이다.

<표 3.2-13>에서 보듯이 각 시료별 변수를 비교해 보면, a 값은 GWS 시료를 제외하고는 Clay 시료가 가장 크게 나타나고 있다. Clay 시료는 세립질이 많기 때문에 가장 큰 공기함입치값을 보여주고 있다. 반면 함수특성곡선의 기울기(n)는 Clay 시료에서 가장 작게 나타나고 있다. <그림 3.2-38>에서 보듯이 Clay 시료에서는 가장 높은 함수비 상태를 보여주고 있으며, SP 시료의 경우 거의 포화상태인 낮은 모관흡수력 범위에서는 ONI 시료와 GWS 시료와 유사한 함수비를 보이지만, 모관흡수력이 증가함에 따라 함수비가 급격히 감소하면서 가장 낮은 함수비 상태

를 나타내고 있다.

<표 3.2-13> 각 시료에 대한 함수특성곡선 식의 변수들

구분	Fredlund & Xing 함수특성곡선 식의 변수들		
	a	n	m
ONI	2.511	1.253	0.275
Clay	4.404	0.615	0.742
SP	1.908	0.802	1.478
GWS	31.879	0.953	0.961

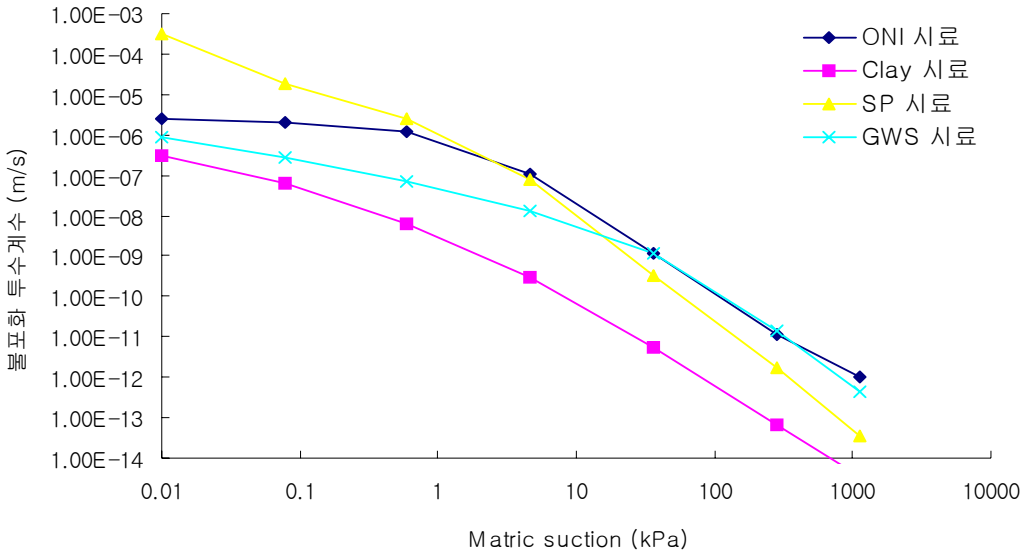


<그림 3.2-38> 각 시료에 대한 함수특성곡선 비교

(2) 불포화투수곡선

<그림 3.2-39>에서는 각 시료에 대한 불포화 투수곡선을 보여준다. 포화 투수계수는 SP 시료의 경우 가장 큰 값을 나타내지만 모관흡수력이 증가하면서 투수계수 값이 감소하면서 5 kPa 이상의 모관흡수력에서 ONI 시료와 GWS 시료의 투수계수가 더 큰 경향을 나타냈다. 이러한 특성은 시료 내부의 함수비가 감소되는 정도가 다르기 때문에 발생하는 것으로 판단된다. 즉 지반의 투수특성은 동일한 모관흡수력값에서 나타내는 함수비 상태에 따라 변한다는 것을 의미한다. Clay 시료는 동

일한 모관흡수력 값에서 높은 함수비를 가지지만 투수계수가 작은 이유의 경우 시료의 입자가 세립질이기 때문에 함수비의 영향보다 작은 간극크기의 영향이 더욱 크기 때문에 나타난다.



<그림 3.2-39> 각 시료에 대한 불포화 투수곡선 비교

마. 소결론

본 연구에서는 하상토를 대상으로 포화 및 불포화 실험을 수행하여 불포화 전단강도 및 투수계수와 관련된 특성을 조사하였다. 이러한 실험결과 및 비교분석으로부터 다음과 같은 결과들을 도출하였다.

(1) 동일한 시료를 대상으로 모관흡수력을 증가시키면서 강도를 얻는 다단계실험(multi-stage triaxial testing)을 수행한 결과, 모관흡수력이 증가함에 따라 강도 또한 증가함을 알 수 있다.

(2) 본 연구에서는 모관흡수력에 따른 강도정수의 변화를 보여주기 위해 쌍곡선식을 이용한 겉보기점착력의 표현식을 제안하였으며, 분석 결과 실험결과를 잘 표현할 수 있는 것으로 판단되었으며, 시료별 모관흡수력 변화에 따른 ϕ^b

의 비선형성을 잘 나타내고 있다.

(3) ONI 시료의 경우 점착력과 내부마찰각은 12.4 kPa과 34° 로 나타났고, Clay 시료와 SP 시료의 경우 각각 12 kPa, 29.8°, 그리고 5 kPa, 38.8° 의 포화 강도정수를 보여주었다.

(4) 비선형특성을 보이는 C_{max} 및 ϕ^b_{avg}값은 Clay 시료의 경우 150kPa 및 19°, ONI 시료의 경우 110kPa 및 15°, SP시료의 경우 50 kPa 및 10°, GWS 시료의 경우 90 kPa 및 17등으로, 공기함입치가 큰 특성에 기인하여 Clay 시료가 가장 큰 것으로 평가되었다.

(5) Clay 시료는 동일한 모관흡수력 값에서 높은 함수비를 가지지만 입자가 세립특성으로 인하여 함수비 영향보다 작은 간극의 영향으로 투수계수가 작게 평가된다.

(6) 실험된 모든 시료는 모관흡수력 증가에 따라 지속적으로 함수비가 감소하여 투수계수가 지속적으로 감소하는 경향을 보이며, 특히 SP 시료의 경우 그 경향이 뚜렷하다.

(7) 국내 하상토는 불포화전단강도가 포화전단강도 보다 상당히 크고, 불포화투수계수가 포화투수계수 보다 작은 것으로 평가되어 불포화특성을 이용한 하천제방설계를 수행할 경우 경제적인 단면설계가 가능한 것으로 평가 되었다.

4. 안정 처리된 하상토의 공학적 특성 평가

앞서 언급했듯이 낙동강 수계는 본류와 지천의 합류부, 자연습지, 하구언 등과 같이 퇴적특성이 우세한 지역을 제외하곤 하상토로서 모래(SP)가 전반적으로 발생됨으로써 하천설계기준에 의한 하상토 활용에 따른 안정대책을 반드시 수립하여야 한다. 한편, 하상토 활용에 따른 안정대책공법은 크게 함수비 조정 기법(공기건조공법, 트랜치굴착공법, 야적공법, 성토탈수공법, 강제건조공법), 입도조정기법(입도조정공법), 안정처리기법(시멘트안정처리공법, 석회안정처리공법)등이 있다.

본 절에서는 앞서 언급된 왜관하상토-1(SP), 왜관하상토-2(ML-1), 안산 하구언 하상토(ML-2), 만경강 하상토(CL) 등에 원시료에 따라 화강풍화토, 시멘트, 벤토나이트를 첨가한 혼합토에 대한 각종 물리·역학적 실험을 수행·분석함으로써 입도조정기법 및 안정처리기법과 같은 하상토 활용 기법의 효율성 및 적합성 등을 평가하였다.

가. 실험개요

(1) 실험목적

본 실험의 목적은 국내에서 발생하는 하상토에 화강풍화토 및 시멘트를 첨가하여 안정처리된 혼합토에 대한 각종 기본물성시험, 다짐시험, 일축압축시험, 직접전단시험, 투수시험 등을 수행하여 최적의 하상토 활용 기법을 제시하는 것이다.

(2) 실험대상시료

본 실험에 사용된 하상토는 앞 절에서 언급하였듯이 경북 왜관 부근의 낙동강에서 채취된 왜관하상토-1(SP)를 사용하였다. 또한, 혼합토 및 안정제로는 앞서 언급된 기본특성시험에서 사용된 화강풍화토와 일반 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

본 절에서는 표기의 간편성을 위하여 하상토에 화강풍화토를 혼합한 시료를 혼합토로, 하상토에 시멘트로 안정 처리한 시료를 안정처리토로 하고자 한다. 예로써 표기는 왜관하상토-1(SP)+화강풍화토 혼합토의 경우 왜관하상토-1(SP) 혼합토로, 왜관하상토-1(SP)+시멘트 안정 처리토의 경우 왜관하상토-1(SP) 시멘트 안정처리

토 등으로 하였다.

나. 안정처리된 왜관하상토-1(SP)의 공학적 특성 평가

(1) 실험항목 및 방법

안정 처리된 왜관하상토-1(SP)의 공학적 특성 평가는 실험항목 및 범위를 보여주는 <표 3.2-14>에서 보듯이 평가실험은 실험대상 시료에 혼합토 및 안정제로서 화강풍화토의 경우 중량에 대한 혼합율 25%, 50%, 75%, 100%, 시멘트의 경우 혼합율 3, 6, 9, 12%, 벤토나이트의 경우 혼합율 3, 6, 9, 12% 등으로 변화시켜가면서 공학적 특성 평가를 위한 기본물성시험, 다짐시험, 직접전단시험, 투수시험 등을 수행하였다.

시험방법은 앞서 언급된 국내 하상토의 공학적 특성 평가에서 사용된 시험방법과 동일한 방법을 사용하였다. 이때 시험공시체는 다짐시험에 의해서 구해진 최대건조밀도 및 최적함수비에 대한 다짐도 85%, 90%, 95%, 100% 등에 해당하는 건조밀도 및 함수비로 제작되었다.

<표 3.2-14> 안정처리된 왜관하상토-1(SP)의 공학적 특성 평가를 위한 실험항목 및 범위

실 험 항 목	변 화 인 자	범 위	실험 시료 및 범례
기본특성시험 (비중, 입도, 액・소성)	혼합율	시멘트: 3, 6, 9, 12% 화강풍화토: 25, 50, 75, 100% 벤토나이트: 3, 6, 9, 12%	왜관하상토-1 (SP)
다짐시험	혼합율	시멘트: 3, 6, 9, 12, 15, 18% 화강풍화토: 25, 50, 75, 100% 벤토나이트: 3, 6, 9, 12%	
투수시험	혼합율	시멘트: 3, 6, 9, 12% 화강풍화토: 25, 50, 75, 100% 벤토나이트: 3, 6, 9, 12%	
직접전단시험	혼합율	시멘트: 3, 6, 9, 12% 화강풍화토:25, 50, 75, 100% 벤토나이트: 3, 6, 9, 12%	

(2) 실험결과 및 분석

(가) 기본특성시험 결과

안정처리된 왜관하상토-1(SP)의 기본특성시험 결과는 왜관하상토-1(SP) 혼합토의 기본특성시험 결과를 보여주는 <표 3.2-15>와 왜관하상토-1(SP) 시멘트 안정처리토의 기본특성시험 결과를 보여주는 <표 3.2-16>, 왜관하상토-1(SP) 벤토나이트 안정처리토의 기본특성시험 결과를 보여주는 <표 3.2-17>에서 보듯이 화강풍화토 혼합토 비중은 화강풍화토 혼합비율이 커질수록 2.61～2.57로 비중이 다소 감소하고, 시멘트 안정처리토의 경우 비중은 시멘트 혼합비율이 커질수록 2.61～2.75로 나타나 비중이 다소 증가하고, 벤토나이트 안정처리토의 경우 벤토나이트 비중이 커질수록 2.61～2.52로 다소 감소하는 것으로 평가되었으나, 증감의 범위는 미미한 것으로 나타났다.

또한, 화강풍화토 혼합토 입도분포특성은 화강풍화토 혼합비율이 25%에서 소성이 없는 SP-SM으로, 50% 이상에서 소성이 없는 SM으로 나타났으며, 시멘트 안정처리토의 경우 시멘트 혼합비율이 15%이상에서 SP에서 소성이 없는 SM으로, 벤토나이트 안정처리토는 벤토나이트 혼합비율 6%이상에서 SP-SM으로 나타나 적합한 제방재료가 되는 것으로 평가되었다.

왜관하상토-1(SP)는 위에서 언급된 입도분포특성 분석결과에서 보듯이 화강풍화토 혼합과 같이 혼합량이 클 경우 공학적 특성이 많이 개선되는 것으로 분석되었다.

한편, 혼합토 및 안정처리토의 소성특성은 소성지수값에서 보듯이 화강풍화토 및 시멘트 혼합비율 등에 상관없이 변화가 없는 것으로 평가되었다. 이러한 거동특성은 화강풍화토 세립분 함유량 및 시멘트 혼합량이 최대 18%로 제한됨으로써 소성에 영향을 미치는 점토성분이 작기 때문인 판단된다.

<표 3.2-15> 왜관하상토-1(SP) 혼합토의 기본특성시험 결과

평가 항목		혼 합 율				
입도분포	하상토+화강풍화토(%)	100+0	75+25	50+50	25+75	0+100
	최대입경(㎜)	6.4	6.3	6.4	5.9	4.76
	4.76mm체 통과율	91	93	96	98	100
	0.074mm체 통과율	1.0	7	13	22	29
	D_{10}(㎜)	0.25	0.19	0.14	0.08	0.023
	D_{30}(㎜)	0.49	0.39	0.28	0.14	0.082
	D_{60}(㎜)	2.0	1.62	1.25	0.87	0.49
	균등계수, C_u	8.0	8.5	8.9	10.9	21.3
	곡률계수, C_g	0.48	0.49	0.45	0.28	0.9
연경도	액성한계, LL(%)	-	-	20.6	23.2	27.0
	소성한계, PL(%)	-	-	-	21.2	24.5
	소성지수, PI(%)	-	-	-	2.0	2.5
흙 분류	통일분류	SP	SP-SM	SM	SM	SM
비중	비중	2.61	2.59	2.58	2.49	2.57

<표 3.2-16> 왜관하상토-1(SP) 시멘트 안정처리토의 기본특성시험 결과

평가 항목		혼 합 율				
입도분포	하상토+시멘트	100+0	91+9	88+12	85+15	82+18
	최대입경(㎜)	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4
	4.76mm체 통과율	91	93	94	96	97
	0.074mm체 통과율	1.0	3	5	6	6
	D_{10}(㎜)	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25
	D_{30}(㎜)	0.49	0.48	0.48	0.49	0.47
	D_{60}(㎜)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	균등계수, C_u	8	8	8.3	8	8
	곡률계수, C_g	0.48	0.48	0.48	0.48	0.44
연경도	액성한계, LL(%)	-	-	-	-	-
	소성한계, PL(%)	-	-	-	-	-
	소성지수, PI(%)	-	-	-	-	-
흙 분류	통일분류	SP	SP	SP	SM	SM
비중	비중	2.61	2.71	2.68	2.70	2.75

<표 3.2-17> 왜관하상토-1(SP) 벤토나이트 안정처리토의 기본특성시험 결과

평가 항목		혼 합 율				
입도분포	하상토+벤토나이트	100 +0	97 +3	94 +6	91+9	88 +12
	최대입경(㎜)	7.1	6.9	7.0	6.8	6.7
	4.76mm체 통과율	91	92	92	93	94
	0.074mm체 통과율	1.0	3.2	6.1	8.5	10.2
	D_{10}(㎜)	0.29	0.22	0.21	0.13	0.07
	D_{30}(㎜)	0.49	0.48	0.43	0.39	0.32
	D_{60}(㎜)	1.35	1.33	1.31	1.30	1.30
	균등계수, C_u	4.7	6.0	6.2	10.0	18.6
	곡률계수, C_g	0.6	0.8	0.7	0.9	1.1
연경도	액성한계, LL(%)	-	-	-	-	-
	소성한계, PL(%)	-	-	-	-	-
	소성지수, PI(%)	-	-	-	-	-
흙 분류	통일분류	SP	SP	SP-SM	SP-SM	SP-SM
비중	비중	2.61	2.60	2.58	2.55	2.52

(나) 다짐시험 결과

① 화강풍화토 혼합에 따른 다짐특성

왜관하상토-1(SP) 혼합토의 다짐특성은 시험대상 시료의 다짐곡선 및 다짐시험 결과를 보여주는 <그림 3.2-40> (a) 및 <표 3.2-18>에서 보듯이 왜관하상토-1(SP) 혼합토의 경우 화강풍화토 혼합비율이 커질수록 최대건조밀도 1.84~1.97g/cm^3, 최적함수비 13.4%~12.1%로 나타나 최대건조밀도는 커지고, 최적함수비는 작아지는 경향을 보였다. 여기서, 왜관하상토-1(SP) 100%의 경우 재료 특성 상 다짐시험이 불가능하여 데이터를 수록하지 못하였다.

이러한 특성은 화강풍화토 혼합비율이 커질수록 양입도 및 조립토화가 진행되어 발생되는 것으로, 화강풍화토 혼합에 따른 하상토 다짐은 입도분포특성과 마찬가지로 제방재료로서 공학적 특성이 점진적으로 개선되는 것으로 평가되었다.

② 시멘트 혼합에 따른 다짐특성

왜관하상토-1(SP) 시멘트 안정처리토의 다짐특성은 <그림 3.2-40> (b) 및 <표

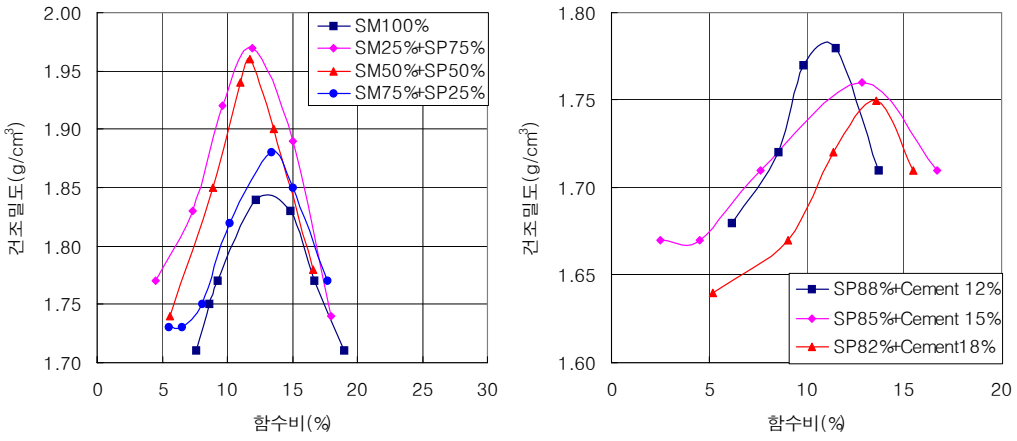
3.2-18>에서 보듯이 시멘트 혼합비율이 커질수록 최대건조밀도 1.78~1.75g/cm^3, 최적함수비 10.8%~13.5%로 나타나 최대건조밀도의 경우 변화가 없고, 최적함수비는 다소 커지는 경향을 보였다. 여기서, 왜관하상토-1(SP) 100%와 시멘트 혼합비율 3, 6%의 경우 재료특성 상 다짐시험이 불가능하여 데이터를 수록하지 못하였다.

이러한 특성은 시멘트 혼합비율이 커질수록 하상토 종류에 상관없이 세립토화가 진행되어 발생되는 것으로 하상토 활용을 위한 시멘트 혼합은 하상토 다짐특성 개선에 영향을 미치지 못하는 것으로 평가되었다.

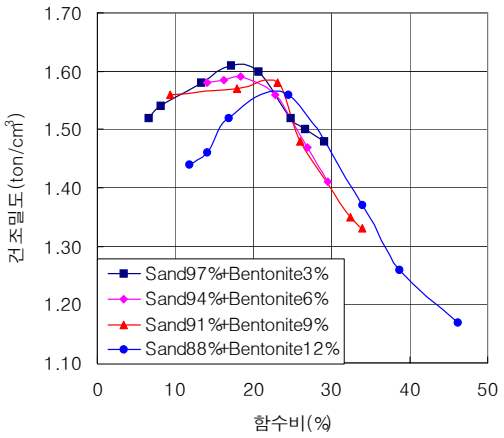
③ 벤토나이트 혼합에 따른 다짐특성

왜관하상토-1(SP) 벤토나이트 안정처리토의 다짐특성은 <그림 3.2-40> (c) 및 <표 3.2-18>에서 보듯이 벤토나이트 혼합비율이 커질수록 최대건조밀도 1.61~1.56g/cm^3, 최적함수비 17.1%~24.5%로 나타나 최대건조밀도의 경우 감소하고, 최적함수비는 다소 커지는 경향을 보였다.

이러한 특성은 시멘트 안정처리토와 마찬가지로 벤토나이트 혼합비율이 커질수록 세립토화가 진행되어 발생되는 것으로 하상토(SP) 활용을 위한 벤토나이트 혼합은 다짐특성 개선에 영향을 미치지 못하는 것으로 평가되었다.



(a) 화강풍화토 혼합토 (b) 시멘트 안정처리토



(c) 벤토나이트 안정처리토

<그림 3.2-40> 안정처리된 왜관하상토-1(SP)의 다짐곡선

<표 3.2-18> 안정처리된 왜관하상토-1(SP)의 다짐시험 결과

시료	혼합비율	최대건조밀도 (g/cm^3)	최적함수비 (%)
왜관하상토-1(SP) + 화강풍화토	100 +0	-	-
	75 +25	1.97	12.1
	50 +50	1.96	12.0
	25 +75	1.88	13.2
	0 +100	1.84	13.4
왜관하상토-1(SP) + 시멘트	100 +0	-	-
	97+3	-	-
	94+6	-	-
	88 +12	1.78	10.8
	85 +15	1.76	12.7
	82 +18	1.75	13.5
왜관하상토-1(SP) + 벤토나이트	100 + 0	-	-
	97 + 3	1.61	17.1
	94 + 6	1.59	18.3
	91 + 9	1.58	23.0
	88 + 12	1.56	24.5

(다) 투수시험 결과

제방 성토재료의 투수특성은 강도특성과 더불어 설계 및 시공과 관련된 중요 특성이다. 하천설계기준(2005) 및 하천공사 표준시방서(1999)는 제방재료로서 적정한 투수계수의 범위를 1×10^{-3}~1×10^{-7}cm/sec로 제시하고 있다. 본 절에서는 실험대상 시료에 화강풍화토, 시멘트, 벤토나이트를 첨가하여 안정처리된 혼합토의 투수특성을 하천공사표준시방서와 비교・분석하였다.

① 화강풍화토 혼합에 따른 투수특성

왜관하상토-1(SP) 혼합토의 투수특성은 투수계수 변화 곡선 및 투수시험결과를 보여주는 <그림 3.2-41> 및 <표 3.2-19>에서 보듯이 화강풍화토 혼합비율이 커질수록 4.85×10^{-2}~3.05×10^{-5}cm/sec로 변화하는 것으로 나타나 투수계수 감소가 크게 발생하였다.

일반적으로 투수계수는 입도분포곡선 상 통과중량 10%에 해당하는 입경, D_{10}에 직접적인 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 즉 투수계수는 D_{10}이 작을수록 작아지는 경향이 있다. 따라서, 왜관하상토-1(SP) 혼합토의 투수계수 감소 효과는 전술한 기본특성평가 시험 결과에서 보듯이 화강풍화토(SM)의 혼합으로 인하여 왜관하상토-1(SP) 혼합토의 D_{10}이 감소에 따라 발생한 것으로 판단된다.

한편, <그림 3.2-41>에서 보듯이 왜관하상토-1(SP) 혼합토는 화강풍화토 혼합율 38% 이상에서 하천설계기준상의 투수기준인 1×10^{-3}cm/sec을 만족시키는 것으로 나타났다. 따라서 왜관하상토-1(SP)와 같은 강모래를 제방재료로 활용할 경우 현장배합시험에 의한 투수특성 평가를 수행하고, 최소 혼합률 40% 이상을 권장한다.

② 시멘트 혼합에 따른 투수특성

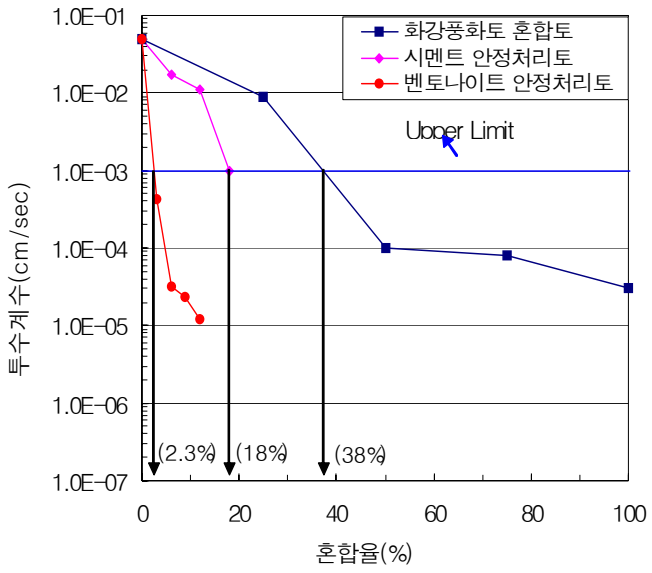
왜관하상토-1(SP) 시멘트 안정처리토의 투수특성은 투수계수 변화 곡선 및 투수시험결과를 보여주는 <그림 3.2-41> 및 <표 3.2-19>에서 보듯이 시멘트 혼합비율이 커질수록 4.85×10^{-2}~9.80×10^{-4}cm/sec로 변화하는 것으로 나타나 시멘트 혼합에 따른 저감효과가 있는 것으로 평가되었다. 이러한 특성은 앞서 언급하였듯이 입도분포곡선상 통과중량 10%에 해당하는 입경, D_{10}에 의한 영향인 것으로 평가된다.

한편, <그림 3.2-41>에서 보듯이 왜관하상토-1(SP) 시멘트 안정처리토는 시멘트 혼합율 18% 이상에서 하천설계기준상의 투수기준인 1×10^{-3}cm/sec을 만족시켜 경제성을 고려해 볼 때 시멘트 안정처리기법이 적합하지 않은 것으로 평가되었다.

③ 벤토나이트 혼합에 따른 투수특성

왜관하상토-1(SP) 벤토나이트 안정처리토의 투수특성은 투수계수 변화 곡선 및 투수시험결과를 보여주는 <그림 3.2-41> 및 <표 3.2-19>에서 보듯이 벤토나이트 혼합비율이 커질수록 4.85×10^{-2}~2.35×10^{-5}cm/sec로 변화하는 것으로 나타나 시멘트 혼합에 비해 큰 저감효과가 작은 것으로 평가되었다.

한편, <그림 3.2-41>에서 보듯이 왜관하상토-1(SP) 벤토나이트 안정처리토는 벤토나이트 혼합율 2.3% 이상에서 하천설계기준상의 투수기준인 1×10^{-3}cm/sec을 만족시켜 벤토나이트 안정처리기법은 투수 특성 향상에 우수한 기법으로 판단되며, 이때, 최소 혼합율은 3% 이상을 권장한다.



<그림 3.2-41> 안정처리된 왜관하상토-1(SP)의 투수계수 변화 곡선

<표 3.2-19> 안정처리된 왜관하상토-1(SP)의 투수시험결과

시료	혼합비율	투수계수 (cm/sec)
왜관하상토-1(SP) + 화강풍화토	100 +0	4.85×10^{-2}
	75 +25	9.00×10^{-3}
	50 +50	1.02×10^{-4}
	25 +75	7.98×10^{-5}
	0 +100	3.05×10^{-5}
왜관하상토-1(SP) + 시멘트	100 + 0	4.85×10^{-2}
	94 + 6	1.75×10^{-2}
	88 + 12	1.09×10^{-2}
	82 + 18	9.80×10^{-4}
왜관하상토-1(SP) + 벤토나이트	100 +0	4.85×10^{-2}
	97 + 3	4.18×10^{-4}
	94 + 6	3.21×10^{-5}
	91 + 9	2.35×10^{-5}

(라) 전단시험 결과

본 실험에서는 실험대상시료에 화강풍화토, 시멘트, 벤토나이트를 혼합하여 안정처리된 혼합토의 전단특성을 평가하고자 비압밀 비배수 전단시험을 수행하였다. 이때 전단시료는 상대다짐도 95%와 상응하는 함수비 조건으로 제작되었다.

① 화강풍화토 혼합에 따른 전단강도 특성

왜관하상토-1(SP) 혼합토의 전단강도 특성은 전단강도특성 곡선 및 전단시험결과를 보여주는 <그림 3.2-42> 및 <표 3.2-20>에서 보듯이 화강풍화토 혼합비율이 커질수록 점착력 0.01~0.06 kg/cm^2, 내부마찰각 34.1° ~31.4° 로 나타나 화강풍화토 혼합에 따라 점착력의 변화 없이 내부마찰각이 감소하는 것으로 평가되었다.

한편, 화강풍화토 혼합토는 내부마찰각이 하상토에 상관없이 하천설계기준 상 비탈면 경사 1 : 3에 의한 자연안식각 18.4° 보다 큼으로서 활동에 대한 안정성이 확보된 것으로 평가되었다.

② 시멘트 혼합에 따른 전단강도 특성

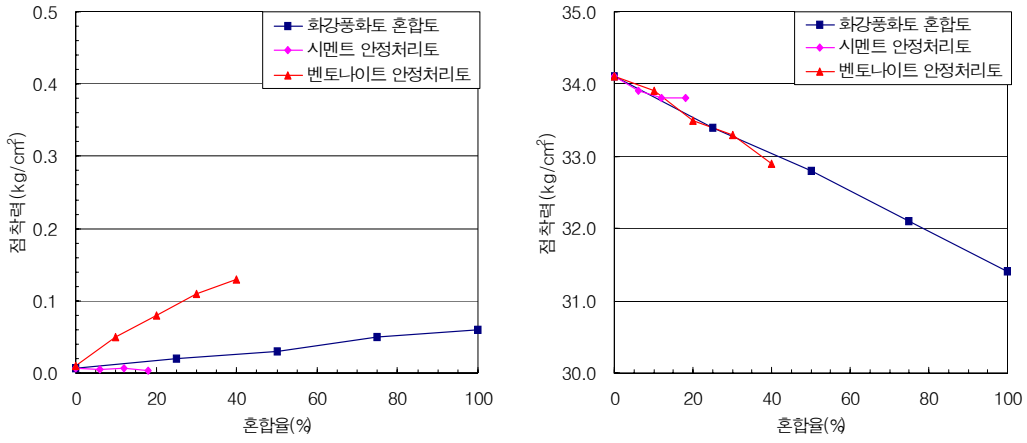
왜관하상토-1(SP) 시멘트 안정처리토의 전단강도 특성은 전단강도특성 곡선 및 전단시험결과를 보여주는 <그림 3.2-42> 및 <표 3.2-20>에서 보듯이 시멘트 혼합비율이 커질수록 점착력 0.01~0.01 kg/cm^2, 내부마찰각 34.1° ~33.8° 로 시멘트 혼합에 따라 점착력의 변화 없이 내부마찰각이 감소하는 경향을 보였다.

한편, 시멘트 안정처리토는 화강풍화토 혼합토와 마찬가지로 내부마찰각이 하천설계기준 상 비탈면 경사 1 : 3에 의한 자연안식각 18.4° 보다 큼으로서 활동에 대한 안정성이 확보된 것으로 평가되었다.

③ 벤토나이트 혼합에 따른 전단강도 특성

왜관하상토-1(SP) 벤토나이트 안정처리토의 전단강도 특성은 전단강도특성 곡선 및 전단시험결과를 보여주는 <그림 3.2-42> 및 <표 3.2-20>에서 보듯이 벤토나이트 혼합비율이 커질수록 점착력 0.01~0.13 kg/cm^2, 내부마찰각 34.1° ~32.9° 로 벤토나이트 혼합에 따라 점착력이 증가하고 내부마찰각이 감소하는 경향을 보였다.

한편, 벤토나이트 안정처리토는 이전의 실험 결과와 마찬가지로 내부마찰각이 하천설계기준 상 비탈면 경사 1 : 3에 의한 자연안식각 18.4° 보다 큼으로서 활동에 대한 안정성이 확보된 것으로 평가되었다.



(a) 점착력 변화 (b) 내부마찰각 변화

<그림 3.2-42> 안정처리된 왜관하상토-1(SP)의 전단강도 변화 곡선

<표 3.2-20> 안정처리된 왜관하상토-1(SP)의 전단시험결과

시료	혼합비율	점착력(kg/cm^2)	내부마찰각(ϕ)
왜관하상토-1(SP) + 화강풍화토	100 +0	0.01	34.1
	75 +25	0.02	33.4
	50 +50	0.03	32.8
	25 +75	0.06	32.1
	0 +100	0.06	31.4
왜관하상토-1(SP) + 시멘트	100 +0	0.01	34.1
	94 +6	0.01	33.9
	88 +12	0.01	33.8
	82 +18	0.01	33.8
왜관하상토-1(SP) + 벤토나이트	100 + 0	0.01	34.1
	97 + 3	0.06	33.9
	94 + 6	0.08	33.5
	91 + 9	0.11	33.3
	88 + 12	0.13	32.9

다. 안정처리된 실트질 흙(ML)의 공학적 특성 평가

(1) 실험항목 및 방법

안정 처리된 실트질 흙의 공학적 특성 평가는 실험항목 및 범위를 보여주는 <표 3.2-21>에서 보듯이 평가실험은 실험대상 시료인 왜관하상토-2(ML-1)와 안산 하구언 하상토(ML-2)에 혼합토 및 안정제로서 화강풍화토와 시멘트의 혼합율을 변화시켜가면서 공학적 특성 평가를 위한 기본물성시험, 다짐시험, 직접전단시험, 투수시험, 재령일수 및 다짐도 별 일축압축시험 등을 수행하였다.

시험방법은 앞서 언급된 국내 하상토의 공학적 특성 평가에서 사용된 시험방법과 동일한 방법을 사용하였으며, 다만, 일축압축시험은 KS F 2314 규정에 의하여 수행하였다. 이때 시험공시체는 다짐시험에 의해서 구해진 최대건조밀도 및 최적함수비에 대한 다짐도 85%, 90%, 95%, 100% 등에 해당하는 건조밀도 및 함수비로 제작되었다.

<표 3.2-21> 안정 처리된 실트질 흙(ML)의 공학적 특성 평가를 위한 실험항목 및 범위

실 험 항 목	변화 인자	범 위	실험 시료 및 범례
기본특성시험 (비중, 입도, 액・소성)	혼합율	시멘트: 3, 6, 9, 12% 화강풍화토: 25, 50, 75, 100%	왜관하상토-2 (ML-1) 안산 하구언 하상토(ML-2)
다짐시험	혼합율	시멘트: 3, 6, 9, 12, 15, 18% 화강풍화토: 25, 50, 75, 100%	
투수시험	혼합율	시멘트: 3, 6, 9, 12% 화강풍화토: 25, 50, 75, 100%	
직접전단시험	혼합율	시멘트: 3, 6, 9, 12% 화강풍화토:25, 50, 75, 100%	
일축압축시험	혼합율	시멘트: 3, 6, 9, 12% 화강풍화토: 25, 50, 75, 100%	
	재령	0, 7, 14, 28일	
	다짐도	85, 90, 95, 100%	

(2) 실험결과 및 분석

(가) 기본특성시험 결과

① 화강풍화토 혼합토 기본특성 평가

화강풍화토 혼합에 따른 안정처리된 실트질 흙(ML)의 기본특성시험 결과는 왜관하상토-2(ML-1) 혼합토의 기본특성시험 결과를 보여주는 <표 3.2-22>과 안산 하구언 하상토(ML-2) 혼합토의 기본특성시험 결과를 보여주는 <표 3.2-23>에서 보듯이 비중의 경우 화강풍화토 혼합비율이 커질수록 왜관하상토-2(ML-1) 혼합토의 경우 2.62~2.57로 비중이 다소 감소하고, 안산 하구언 하상토(ML-2) 혼합토의 경우 2.54~2.57로 거의 변화가 없는 것으로 평가되었다.

또한, 혼합토 입도분포특성은 왜관하상토-2(ML-1) 혼합토의 경우 화강풍화토 혼합비율이 25%이상에서 ML에서 SM으로 변하는 것으로 나타났으며, 안산 하구언 하상토(ML-2) 혼합토의 경우 50%이상에서 ML에서 SM으로 변화하여 전체적으로 적합한 제방재료가 되는 것으로 평가되었다. 실트질 흙(ML)은 위에서 언급된 입도분포특성 분석결과에서 보듯이 화강풍화토 혼합과 같이 혼합량이 클 경우 공학적 특성이 많이 변화하는 것으로 분석되었다.

한편, 혼합토의 소성특성은 소성지수 변화에서 보듯이 화강풍화토 혼합비율에 상관없이 변화가 없는 것으로 평가되었다. 이러한 거동특성은 화강풍화토 세립분

함유량이 원시료(ML)보다 작기 때문에 소성에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

<표 3.2-22> 왜관하상토-2(ML-1) 혼합토의 기본특성시험 결과

평가 항목		혼 합 율				
입도분포	하상토+화강풍화토(%)	100+0	75+25	50+50	25+75	0+100
	최대입경(㎜)	3.55	3.86	3.86	3.86	3.86
	4.76mm체 통과율	100	100	100	100	100
	0.074mm체 통과율	52	46	41	35	29
	D_{10}(㎜)	0.003	0.008	0.013	0.018	0.023
	D_{30}(㎜)	0.017	0.033	0.050	0.066	0.082
	D_{60}(㎜)	0.132	0.225	0.311	0.421	0.49
	균등계수, Cu	43.3	28.1	23.9	23.4	21.3
	곡률계수, Cg	0.74	0.61	0.62	0.57	0.9
연경도	액성한계, LL(%)	29.3	28.5	28.1	27.5	27.0
	소성한계, PL(%)	25.9	26.4	25.2	24.7	24.5
	소성지수, PI(%)	3.4	2.1	2.9	2.8	2.5
흙 분류	통일분류	ML	SM	SM	SM	SM
비중	비중	2.62	2.57	2.46	2.58	2.57

<표 3.2-23> 안산 하구언 하상토(ML-2) 혼합토의 기본특성시험 결과

평가 항목		혼 합 율				
입도분포	하상토+화강풍화토	100+0	75+25	50+50	25+75	0+100
	최대입경(㎜)	0.15	3.71	3.80	3.86	3.86
	4.76mm체 통과율	100	100	100	100	100
	0.074mm체 통과율	73	62	52	40	29
	D_{10}(㎜)	-	0.008	0.013	0.018	0.023
	D_{30}(㎜)	0.0048	0.024	0.043	0.063	0.082
	D_{60}(㎜)	0.036	0.150	0.263	0.377	0.49
	균등계수, Cu	-	18.8	20.2	20.9	21.3
	곡률계수, Cg	-	0.48	0.54	0.59	0.60
연경도	액성한계, LL(%)	27.5	28.1	27.3	27.7	27.0
	소성한계, PL(%)	24.6	24.9	24.9	24.2	24.5
	소성지수, PI(%)	2.9	3.2	2.4	3.5	2.5
흙 분류	통일분류	ML	ML	SM	SM	SM
비중	비중	2.54	2.57	2.55	2.56	2.57

② 안정처리토의 기본특성 평가

시멘트 혼합에 따른 안정처리된 실트질 흙(ML)의 기본특성시험 결과는 왜관하

상토-2(ML-1) 안정처리토의 기본특성시험 결과를 보여주는 <표 3.2-24>와 안산 하구언 하상토(ML-2) 안정처리토의 기본특성시험 결과를 보여주는 <표 3.2-25>에서 보듯이 비중의 경우 시멘트 혼합비율이 커질수록 왜관하상토-2(ML-1) 안정처리토의 경우 2.62~2.67로 비중이 다소 감소하고, 안산 하구언 하상토(ML-2) 혼합토의 경우 2.54~2.66으로 거의 변화가 없는 것으로 평가되었다.

또한, 안정처리토 입도분포특성은 전체적으로 시멘트 혼합비율에 상관없이 왜관하상토-2(ML-1)와 안산 하구언 하상토(ML-2) 안정처리토 모두 실트질 흙(ML)으로 나타나 시멘트 혼합에 따른 입도분포특성 변화는 없는 것으로 평가되었다.

한편, 안정처리토의 소성특성은 소성지수 변화에서 보듯이 왜관하상토-2(ML-1) 안정처리토의 경우 3.4~5.0으로 다소 증가하였으며, 안산 하구언 하상토(ML-2) 안정처리토의 경우 2.9~10.2로 많은 증가를 보였다. 이러한 소성지수의 변화는 원시료의 세립분 함유량이 안산 하구언 하상토(ML-2)가 왜관하상토-2(ML-1)에 비해 많기 때문에 상대적으로 큰 소성변화를 가져온 것으로 판단된다.

<표 3.2-24> 왜관하상토-2(ML-1) 안정처리토의 기본특성시험 결과

평가 항목		혼 합 율				
입도분포	하상토+시멘트	100+0	91+9	88+12	85+15	82+18
	최대입경(㎜)	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55
	4.76mm체 통과율	100	100	100	100	100
	0.074mm체 통과율	52	55	55	57	58
	D_{10}(㎜)	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002
	D_{30}(㎜)	0.017	0.015	0.014	0.014	0.013
	D_{60}(㎜)	0.132	0.141	0.134	0.129	0.131
	균등계수, C_u	44	70.5	67	64.5	65.5
	곡률계수, C_g	0.73	0.80	0.73	0.76	0.65
연경도	액성한계, LL(%)	29.3	31.2	31.8	32.6	33.5
	소성한계, PL(%)	25.9	26.4	27.2	27.7	28.5
	소성지수, PI(%)	3.4	4.8	4.6	4.9	5.0
흙 분류	통일분류	ML	ML	ML	ML	ML
비중	비중	2.62	2.64	2.64	2.65	2.67

<표 3.2-25> 안산 하구언 하상토(ML-2) 안정처리토의 기본특성시험 결과

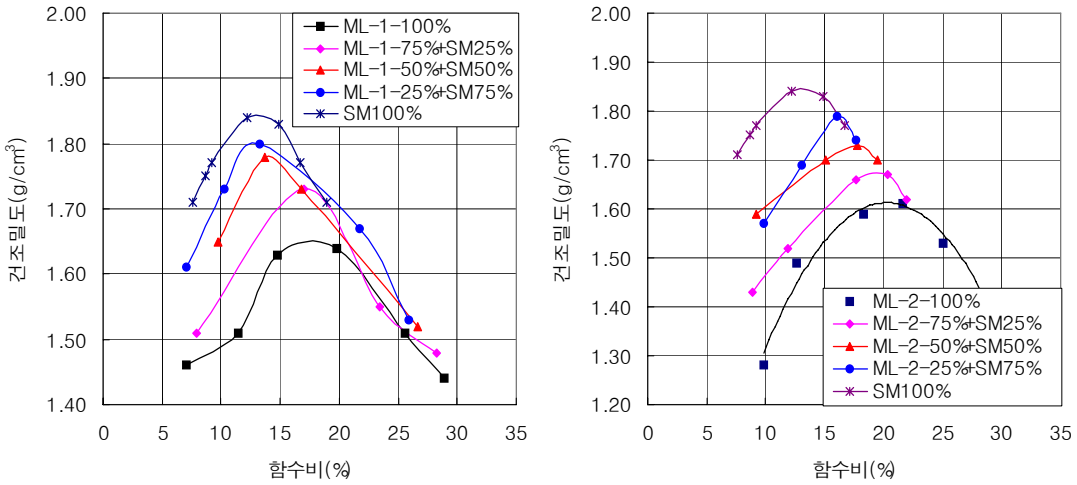
평가 항목		혼 합 율				
입도분포	하상토+시멘트	100+0	97+3	94+6	91+9	88+12
	최대입경(㎜)	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
	4.76mm체 통과율	100	100	100	100	100
	0.074mm체 통과율	73	73	71	71	70
	D_{10}(㎜)	-	-	-	-	-
	D_{30}(㎜)	0.0048	0.0056	0.0065	0.0074	0.0082
	D_{60}(㎜)	0.036	0.037	0.040	0.046	0.052
	균등계수, C_u	-	-	-	-	-
	곡률계수, C_g	-	-	-	-	-
연경도	액성한계, LL(%)	27.5	35.0	34.7	35.3	36.2
	소성한계, PL(%)	24.6	24.8	24.5	25.6	26.9
	소성지수, PI(%)	2.9	10.2	10.2	9.7	9.3
흙 분류	통일분류	ML	ML	ML	ML	ML
비중	비중	2.54	2.56	2.59	2.62	2.66

(나) 다짐시험 결과

① 화강풍화토 혼합에 따른 다짐특성

화강풍화토 혼합에 따른 실트질 흙(ML)의 다짐특성은 시험대상 시료의 다짐곡선 및 다짐시험결과를 보여주는 <그림 3.2-43> 및 <표 3.2-26>에서 보듯이 왜관 하상토-2(ML-1) 혼합토의 경우 화강풍화토 혼합비율이 커질수록 최대건조밀도 1.64~1.84g/cm^3, 최적함수비 19.8%~12.2%로, 안산 하구언 하상토(ML-2) 혼합토의 경우 최대건조밀도 1.61~1.84g/cm^3, 최적함수비 21.6%~12.2%로 나타나 최대건조밀도는 커지고, 최적함수비는 작아지는 경향을 보였다.

이러한 특성은 화강풍화토 혼합비율이 커질수록 양입도 및 조립토화가 진행되어 발생되는 것으로, 화강풍화토 혼합에 따른 하상토 다짐은 입도분포특성과 마찬가지로 제방재료로서 공학적 특성이 점진적으로 개선되는 것으로 평가되었다.



(a) 왜관 하상토-2(ML-1)　　(b) 안산 하구언 하상토(ML-2)

<그림 3.2-43> 실트질 흙(ML)의 화강풍화토 혼합비율에 따른 다짐곡선

<표 3.2-26> 실트질 흙(ML)의 화강풍화토 혼합비율에 따른 다짐시험 결과

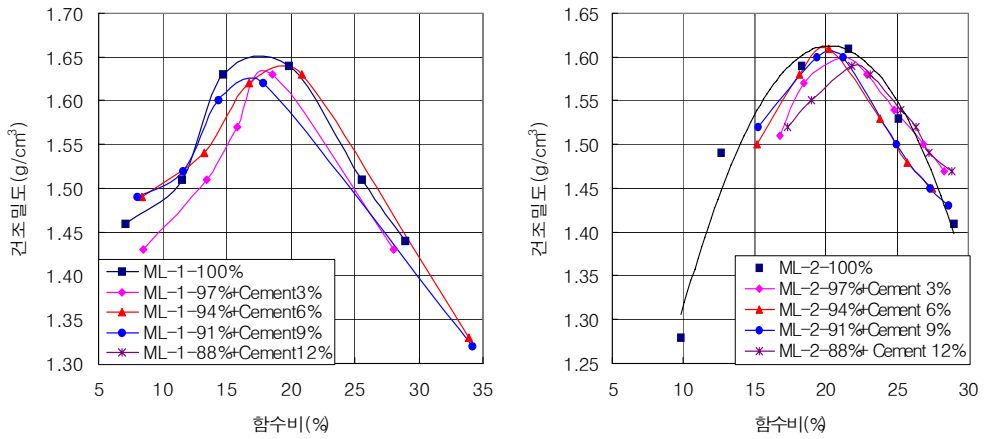
원시료	혼합비율 (원시료+화강풍화토)	최대건조밀도 (g/cm^3)	최적함수비 (%)
왜관하상토-2 (ML-1)	100 +0	1.64	19.8
	75 +25	1.73	17.1
	50 +50	1.78	13.8
	25 +75	1.80	13.3
	0 +100	1.84	12.2
안산 하구언 하상토 (ML-2)	100 +0	1.61	21.6
	75 +25	1.67	20.3
	50 +50	1.73	17.8
	25 +75	1.79	16.1
	0 +100	1.84	12.2

② 시멘트 혼합에 따른 다짐특성

시멘트 혼합에 따른 실트질 흙(ML)의 다짐특성은 시험대상 시료의 다짐곡선 및 다짐시험결과를 보여주는 <그림 3.2-44> 및 <표 3.2-27>에서 보듯이 시멘트 혼합비율이 커질수록 왜관하상토-2(ML-1) 안정처리토의 경우 최대건조밀도 1.65~

1.62g/cm^3, 최적함수비 18.0%~17.9%로, 안산 하구언 하상토(ML-2) 안정처리토의 경우 최대건조밀도 1.59~1.61g/cm^3, 최적함수비 20.2%~21.8%로 나타나 최대건조밀도와 최적함수비의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

이러한 특성은 안정처리를 위하여 혼합한 시멘트의 비율이 화강풍화토에 비해 상대적으로 작고 원시료인 실트질 흙(ML)의 경우 세립분이 많이 함유되어 있어 시멘트와 입도특성이 유사하기 때문이 것으로 판단되며, 하상토 활용을 위한 시멘트 혼합은 하상토 다짐특성 개선에 영향을 주지 못하는 것으로 평가되었다.



(a) 왜관 하상토-2(ML-1) (b) 안산 하구언 하상토(ML-2)

<그림 3.2-44> 실트질 흙(ML)의 시멘트 혼합비율에 따른 다짐곡선

<표 3.2-27> 실트질 흙(ML)의 시멘트 혼합비율에 따른 다짐시험 결과

원시료	혼합비율 (원시료+시멘트)	최대건조밀도 (g/cm^3)	최적함수비 (%)
왜관하상토-2 (ML-1)	100 +0	1.65	18.0
	97 +3	1.64	20.1
	94 +6	1.63	21.0
	91 +9	1.61	17.5
	88 +12	1.62	17.9
안산 하구언 하상토 (ML-2)	100 +0	1.60	21.0
	97 +3	1.60	20.8
	94 +6	1.61	20.2
	91 +9	1.60	20.8
	88 +12	1.59	21.8

(다) 투수시험 결과

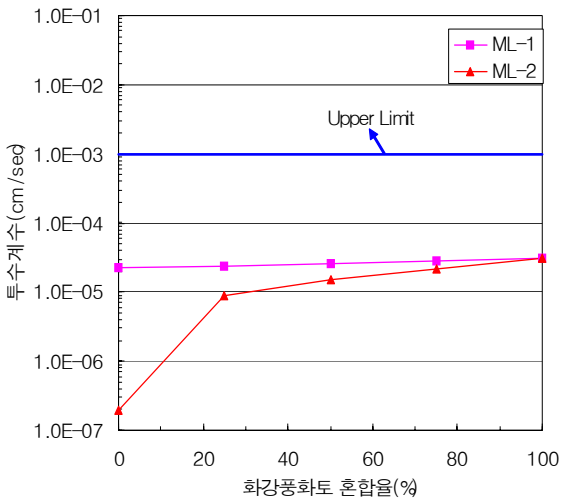
투수특성은 제방 재체재료의 주요 선정 기준으로 본 절에서는 화강풍화토 및 시멘트 혼합율 변화에 따른 투수계수와 하천설계기준(2005) 및 하천공사 표준시방서(1999)에서 제시하고 있는 제방재료로서 적정한 투수계수의 범위(1×10^{-3}~1×10^{-7} cm/sec)와 비교・분석하였다.

① 화강풍화토 혼합에 따른 투수특성

화강풍화토 혼합에 따른 실트질 흙(ML)의 투수특성은 투수계수 변화 곡선 및 투수시험결과를 보여주는 <그림 3.2-45> 및 <표 3.2-28>에서 보듯이 화강풍화토 혼합비율이 커질수록 왜관하상토-2(ML-1) 혼합토의 경우 2.29×10^{-5}~3.05×10^{-5}cm/sec로, 안산 하구언 하상토(ML-2) 혼합토의 경우 1.97×10^{-7}~3.05×10^{-5} cm/sec로 변화하는 것으로 나타나 투수계수가 오히려 증가하는 것으로 나타났다.

이러한 증가 원인은 전술한 기본특성평가 시험 결과에서 보듯이 상재적으로 재료입경이 큰 화강풍화토(SM)의 혼합으로 인하여 실트질 흙(ML) 혼합토의 D_{10} 증가에 따라 발생한 것으로 판단된다.

한편, <그림 3.2-45>에서 보듯이 실트질 흙(ML) 혼합토는 화강풍화토 혼합율에 따라 투수계수가 다소 커질지라도 하천설계기준상의 투수기준인 1×10^{-3}cm/sec을 만족시키나, 화강풍화토 혼합에 따른 투수특성 향상 효과는 없이 오히려 증가하는 것으로 나타났다.



<그림 3.2-45> 실트질 흙(ML)의 화강풍화토 혼합비율에 따른 투수계수 변화 곡선

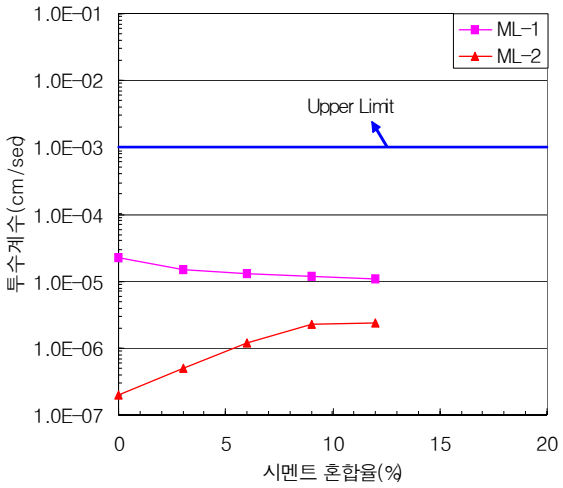
<표 3.2-28> 실트질 흙(ML)의 화강풍화토 혼합비율에 따른 투수시험결과

원시료	혼합비율 (원시료+화강풍화토)	투수계수 (cm/sec)
왜관하상토-2 (ML-1)	100 +0	2.29×10^{-5}
	75 +25	2.38×10^{-5}
	50 +50	2.60×10^{-5}
	25 +75	2.87×10^{-5}
	0 +100	3.05×10^{-5}
안산 하구언 하상토 (ML-2)	100 +0	1.97×10^{-7}
	75 +25	9.02×10^{-6}
	50 +50	1.51×10^{-5}
	25 +75	2.12×10^{-5}
	0 +100	3.05×10^{-5}

② 시멘트 혼합에 따른 투수특성

시멘트 혼합에 따른 실트질 흙(ML)의 투수특성은 투수계수 변화 곡선 및 투수시험결과를 보여주는 <그림 3.2-46> 및 <표 3.2-29>에서 보듯이 시멘트 혼합비율이 커질수록 왜관하상토-2(ML-1) 안정처리토의 경우 2.29×10^{-5}~1.08×10^{-5}cm/sec로, 안산 하구언 하상토(ML-2) 안정처리토의 경우 1.97×10^{-7}~2.32×10^{-6}cm/sec로 변화하는 것으로 나타나 시멘트 혼합에 따른 변화가 작은 것으로 평가되었다. 이러한 특성은 앞서 언급하였듯이 입도분포곡선 상 통과중량 10%에 해당하는 입경, D_{10}에 의한 영향인 것으로 평가된다.

한편, 실트질 흙(ML)은 시멘트 혼합에 따른 투수계수의 변화가 미미한 것으로 판단되며, 전체적으로 하천설계기준상의 투수기준인 1×10^{-3}cm/sec을 만족시키는 것으로 평가되었다.



<그림 3.2-46> 실트질 흙(ML)의 시멘트 혼합비율에 따른 투수계수 변화

<표 3.2-29> 실트질 흙(ML)의 시멘트 혼합비율에 투수시험결과

원시료	혼합비율 (원시료+시멘트)	투수계수 (cm/sec)
왜관하상토-2 (ML-1)	100 + 0	2.29×10^{-5}
	97 + 3	1.50×10^{-5}
	94 + 6	1.28×10^{-5}
	91 + 9	1.21×10^{-5}
	88 + 12	1.08×10^{-5}
안산 하구언 하상토 (ML-2)	100 +0	1.97×10^{-7}
	97 + 3	4.92×10^{-7}
	94 + 6	1.21×10^{-6}
	91 + 9	2.30×10^{-6}
	88 + 12	2.32×10^{-6}

(라) 전단시험 결과

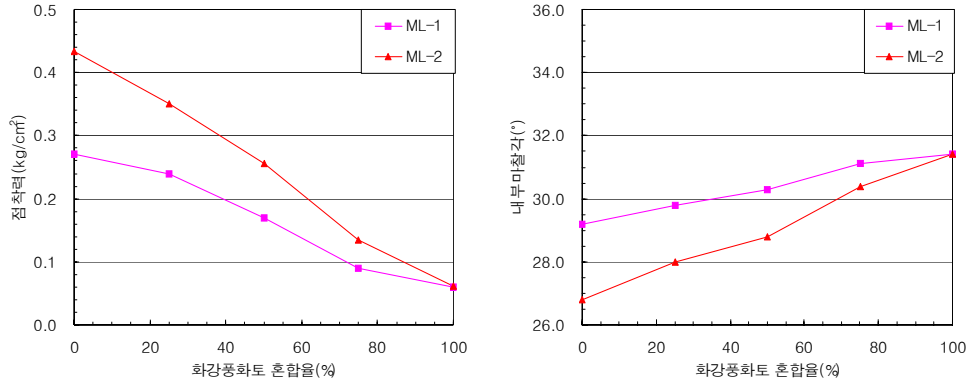
본 실험에서는 실험대상시료인 실트질 흙(ML)에 화강풍화토 및 시멘트를 혼합하여 안정처리된 혼합토의 전단특성을 평가하고자 비압밀 비배수 전단시험을 수행하였다. 이때 전단시료는 상대다짐도 95%와 상응하는 함수비 조건으로 제작되었다.

① 화강풍화토 혼합에 따른 전단강도 특성

화강풍화토 혼합에 따른 실트질 흙(ML)의 전단강도 특성은 전단강도특성 곡선

및 전단시험결과를 보여주는 <그림 3.2-47> 및 <표 3.2-30>에서 보듯이 화강풍화토 혼합비율이 커질수록 왜관 하상토-2(ML-1)의 경우 0.27~0.06 kg/cm^2, 내부마찰각 29.2° ~31.4° , 안산하구언 하상토(ML-2)의 경우 점착력 0.43~0.06 kg/cm^2, 내부마찰각 26.8° ~31.4° 로 나타나 화강풍화토 혼합에 따라 점착력이 감소하는 반면에 내부마찰각이 증가하는 경향을 보였다.

한편, 화강풍화토 혼합에 따른 실트질 흙(ML)의 내부마찰각은 원시료와 화강풍화토의 혼합비율에 상관없이 하천설계기준 상 비탈면 경사 1 : 3에 의한 자연안식각 18.4° 보다 큼으로서 활동에 대한 안정성이 확보된 것으로 평가되었다.



(a) 점착력 변화 (b) 내부마찰각 변화

<그림 3.2-47> 실트질 흙(ML)의 화강풍화토 혼합비율에 따른 전단강도 변화 곡선

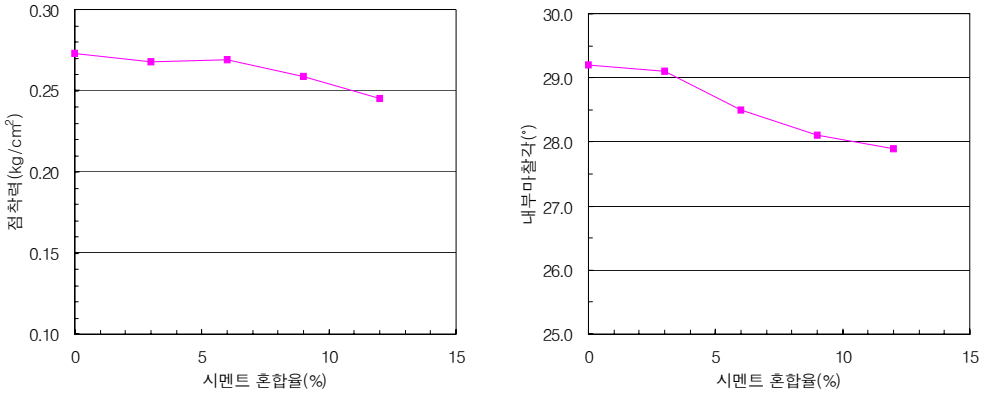
<표 3.2-30> 실트질 흙(ML)의 화강풍화토 혼합비율에 따른 전단시험결과

원시료	혼합비율 (원시료+화강풍화토)	점착력 (c, kg/cm^2)	내부마찰각 (ϕ, °)
왜관하상토-2 (ML-1)	100 +0	0.27	29.2
	75 +25	0.23	29.8
	50 +50	0.18	30.3
	25 +75	0.12	30.9
	0 +100	0.06	31.4
안산 하구언 하상토 (ML-2)	100 +0	0.43	26.8
	75 +25	0.35	28.0
	50 +50	0.26	28.8
	25 +75	0.14	30.4
	0 +100	0.06	31.4

② 시멘트 혼합에 따른 전단강도 특성

시멘트 혼합에 따른 실트질 흙(ML)의 전단강도 특성은 전단강도특성 곡선 및 전단시험결과를 보여주는 <그림 3.2-48> 및 <표 3.2-31>에서 보듯이 시멘트 혼합비율이 커질수록 왜관 하상토-2(ML-1)의 경우 0.27~0.25 kg/cm^2, 내부마찰각 29.2°~27.9° 로 시멘트 혼합에 따라 점착력의 변화 없이 내부마찰각이 감소하는 경향을 보였다.

한편, 시멘트 혼합에 따른 실트질 흙(ML)의 내부마찰각은 화강풍화토 혼합토와 마찬가지로 원시료와 시멘트의 혼합비율에 상관없이 하천설계기준 상 비탈면 경사 1 : 3에 의한 자연안식각 18.4° 보다 큼으로서 활동에 대한 안정성이 확보된 것으로 평가되었다.



(a) 점착력 변화　　(b) 내부마찰각 변화

<그림 3.2-48> 실트질 흙(ML)의 시멘트 혼합비율에 따른 전단강도 변화 곡선

<표 3.2-31> 실트질 흙(ML)의 시멘트 혼합비율에 따른 전단시험결과

원시료	혼합비율 (원시료+시멘트)	점착력 (c, kg/cm^2)	내부마찰각 (ϕ, °)
왜관하상토-2 (ML-1)	100 +0	0.27	29.2
	97 +3	0.28	29.1
	94 +6	0.27	28.5
	91 +9	0.26	28.1
	88 +12	0.25	27.9

(마) 일축압축시험 결과

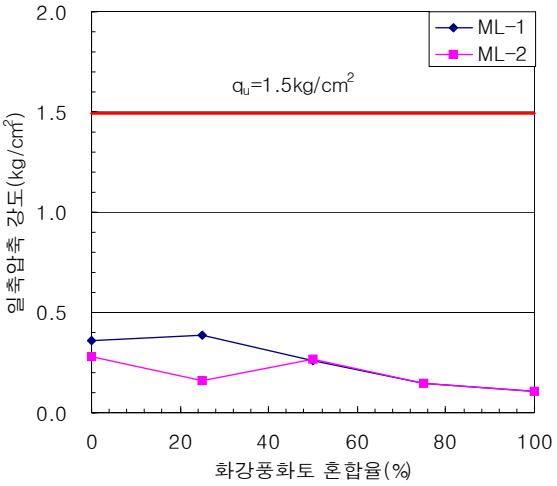
국내 하천설계기준(2005)은 현장 성토품질관리기준인 상대다짐도 관리기준을 제방재료의 경우 85%에서 90%로, 구조물 구간의 경우 95%로 상향 조정하였다. 본 절에서는 하천설계기준의 다짐도 상향 조정 효과, 양질토 혼합 효과, 시멘트 안정처리 효과 등을 평가하고자 하천제방설계 시 이용되는 불량토대책매뉴얼(1985)에 제시된 성토고 10m인 제방재료의 최소요구강도 1.5kg/cm^{2}과 시험결과를 비교·분석하였다.

이때, 일축압축강도 시험 조건은 화강풍화토 혼합토의 경우 재령의 영향을 받지 않으므로 혼합비율 및 다짐도에 따른 변화를 평가하였으며, 시멘트 안정처리토의 경우 재령에 따른 영향을 고려하여 혼합비율, 다짐도, 재령에 따른 변화를 평가하였다.

① 화강풍화토 혼합에 따른 일축압축강도 특성

화강풍화토 혼합에 따른 실트질 흙(ML)의 일축압축강도 특성은 일축압축강도 변화 곡선 및 일축압축강도 시험결과를 보여주는 <그림 3.2-49> 및 <표 3.2-32>에서 보듯이 화강풍화토 혼합토의 일축압축강도는 상대다짐도 90%에서 왜관하상토-2(ML-1)의 경우 대체적으로 화강풍화토 혼합율 25%를 정점으로 0.11～0.39 kg/cm^2 정도로, 안산 하구언 하상토(ML-2)의 경우 화강풍화토 혼합율 0%를 정점으로 0.11～0.28 kg/cm^2 정도로 혼합율 증가에 따라 다소 감소하는 경향을 보였다. 이러한 특성은 화강풍화토 혼합에 따라 세립토에 의한 점착력 특성이 감소되면서 발생하는 것으로 판단된다.

한편, 화강풍화토 혼합에 따른 실트질 흙(ML)의 일축압축강도는 앞서 언급한 일본의 불량토대책매뉴얼(1985)에 제시된 성토고 10m인 제방재료의 최소요구강도 1.5kg/cm^{2}와 비교할 때 왜관하상토-2(ML-1) 및 안산 하구언 하상토(ML-2)는 상대다짐도 90%에서 모두 불량토대책매뉴얼(1985)의 제방재료 최소요구강도를 만족시키지 못하는 것으로 나타났다(<그림 3.2-49> 참조). 그러나 본 결과는 구속응력이 없는 일축압축강도 결과이므로 큰 의미가 없는 것으로 판단된다.



<그림 3.2-49> 실트질 흙(ML)의 화강풍화토 혼합비율에 따른 일축압축강도 변화 (상대다짐도 90%)

<표 3.2-32> 실트질 흙(ML)의 화강풍화토 혼합비율에 따른 일축압축시험결과 (kg/cm^2)

구분 / 원시료	다짐도	혼합비율(원시료+화강풍화토)				
		100+0	75+25	50+50	25+75	0+100
왜관하상토-2 (ML-1)	100%	1.44	1.31	1.66	1.42	1.36
	95%	0.65	0.64	0.91	0.47	0.47
	90%	0.36	0.39	0.26	0.15	0.11
	85%	0일	0.11	0.13	0.15	-
안산하구언 하상토 (ML-2)	100%	0.67	0.88	0.92	0.99	1.36
	95%	0.38	0.41	0.45	0.42	0.47
	90%	0.28	0.16	0.27	0.15	0.11
	85%	0.19	-	-	-	-

② 시멘트 혼합에 따른 일축압축강도 특성

○ 왜관하상토-2(ML-1)의 일축압축강도 특성

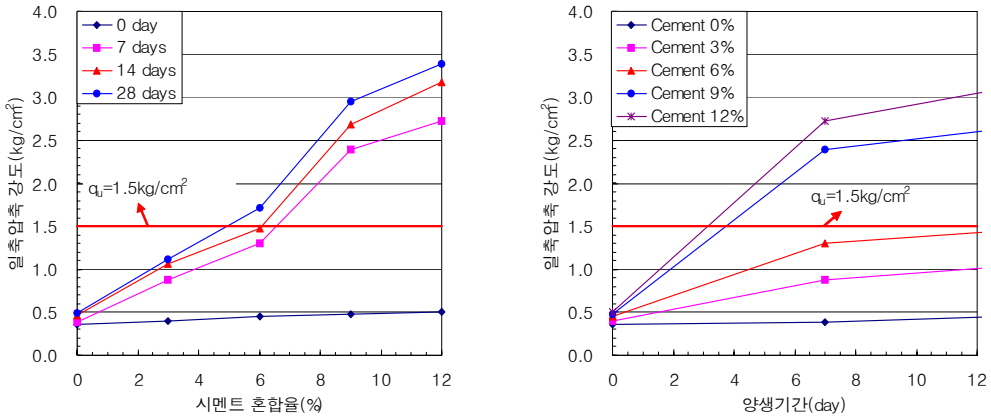
시멘트 혼합에 따른 왜관하상토-2(ML-1)의 일축압축강도 특성은 일축압축강도 변화 곡선 및 일축압축강도 시험결과를 보여주는 <그림 3.2-50> 및 <표 3.2-33>

과 같다. 왜관하상토-2(ML-1) 안정처리토의 재령에 따른 압축강도는 재령에 따라 증가하는 것으로 평가되었으며, 상대다짐도 90%인 경우 왜관하상토-2(ML-1)와 시멘트 혼합율 6%에서 재령에 따라 0.45~1.71kg/cm^{2}로, 최고 3.8배 증가하는 것으로 평가되었다.

또한, 왜관하상토-2(ML-1) 안정처리토의 시멘트 혼합율에 따른 강도특성은 <그림 3.2-50(b)> 에서 보듯이 혼합율에 따라 압축강도가 증가하는 것으로 평가되었으며, 상대다짐도 90%, 재령 28일인 경우 혼합율(0, 3, 6, 9, 12%)이 높아짐으로서 0.49~3.39kg/cm^{2}로, 6.9배 증가하는 것으로 평가되었다.

한편, 왜관하상토-2(ML-1) 안정처리토의 다짐도 변화에 따른 강도특성은 <표 3.2-33>에서 보듯이 다짐도 증가에 따라 압축강도가 증가하는 것으로 평가되었으며, 시멘트 혼합율 6%, 재령 28일인 경우 상대다짐도(85, 90, 95, 100%)가 높아짐으로서 1.12~4.67kg/cm^{2}로, 4.2배 증가하는 것으로 나타났다.

이러한 왜관하상토-2(ML-1) 안정처리토 압축강도특성은 시멘트에 경화특성에 기인하며, 대체적으로 Tayler 제방재료의 최소요구강도를 만족시켰다. 따라서 왜관하상토-2(ML-1)와 같은 세립질의 하상토는 화강풍화토에 의한 혼합 보다 시멘트 안정처리가 더 효과적인 것으로 평가 되었다.



(a) 장기재령 효과 (b) 시멘트 혼합율 효과

<그림 3.2-50> 왜관하상토-2(ML-1) 안정처리토의 일축압축강도 변화 곡선 (다짐도 90%)

<표 3.2-33> 왜관하상토-2(ML-1) 안정처리토의 일축압축시험결과 (kg/cm^2)

구분 / 원시료	다짐도	재 령	혼 합 비 율(원시료+시멘트)				
			100+0	97+3	94+6	91+9	88+12
왜관하상토-2 (ML-1)	100%	0일	1.44	1.21	1.27	1.41	2.08
		7일	1.48	3.09	3.43	5.05	7.23
		14일	1.55	3.12	3.95	5.85	8.15
		28일	1.57	3.34	4.67	8.52	10.15
	95%	0일	0.65	0.79	0.72	0.78	0.93
		7일	0.71	1.61	1.93	3.58	5.05
		14일	0.71	1.72	2.07	5.23	5.85
		28일	0.80	1.91	2.52	5.61	6.21
	90%	0일	0.36	0.40	0.45	0.48	0.51
		7일	0.38	0.88	1.30	2.39	2.72
		14일	0.47	1.06	1.47	2.69	3.17
		28일	0.49	1.12	1.71	2.95	3.39
	85%	0일	0.11	0.37	0.23	0.36	0.34
		7일	0.23	0.78	0.74	1.78	1.97
		14일	0.20	0.89	1.02	2.11	2.35
		28일	0.25	0.85	1.12	2.24	2.88

○ 안산 하구언 하상토(ML-2)의 일축압축강도 특성

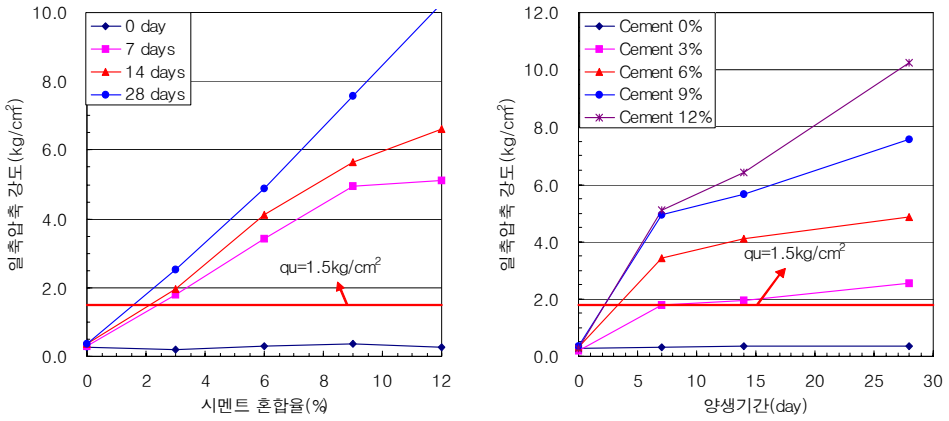
시멘트 혼합에 따른 안산 하구언 하상토(ML-2)의 일축압축강도 특성은 일축압축강도 변화 곡선 및 일축압축강도 시험결과를 보여주는 <그림 3.2-51> 및 <표 3.2-34>와 같다. 안산 하구언 하상토(ML-2) 안정처리토는 상대다짐도 90%인 경우 시멘트 혼합율 6%에서 재령에 따라 0.30~4.11kg/cm^{2}로, 최고 13.7배 증가하는 것으로 평가되었다.

또한, 안산 하구언 하상토(ML-2) 안정처리토의 시멘트 혼합율에 따른 강도특성은 <그림 3.2-51(b)> 에서 보듯이 혼합율에 따라 압축강도가 증가하는 것으로 평가되었으며, 상대다짐도 90%, 14일인 경우 혼합율(0, 3, 6, 9, 12%)이 높아짐으로서 0.35~6.42kg/cm^{2}로, 18.3배 증가하는 것으로 평가되었다.

한편, 안산 하구언 하상토(ML-2) 안정처리토의 다짐도 변화에 따른 강도특성은 <표 3.2-34>에서 보듯이 다짐도 증가에 따라 압축강도가 증가하는 것으로 평가되었으며, 시멘트 혼합율 6%, 재령 14일인 경우 상대다짐도(90, 95, 100%)가 높아짐으로서 4.11~9.24kg/cm^{2}로, 2.2배 증가하는 것으로 나타났다.

이러한 안산 하구언 하상토(ML-2) 안정처리토 압축강도특성은 시멘트에 경화특

성에 기인하며, 대체적으로 불량토대책매뉴얼(1985) 제방재료의 최소요구강도를 만족시켰다. 따라서 안산 하구언 하상토(ML-2)와 같은 세립질의 하상토는 화강풍화토에 의한 혼합 보다 시멘트 안정처리가 더 효과적인 것으로 평가 되었다.



(a) 장기재령 효과 (b) 시멘트 혼합율 효과

<그림 3.2-51> 안산 하구언 하상토(ML-2) 안정처리토의 일축압축강도 변화 곡선 (다짐도 90%)

<표 3.2-34> 안산 하구언 하상토(ML-2) 안정처리토의 일축압축시험결과 (kg/cm^2)

구분 / 원시료	다짐도	재 령	혼 합 비 율(원시료+시멘트)				
			100+0	97+3	94+6	91+9	88+12
안산 하구언 하상토(ML-2)	100%	0일	0.67	1.26	1.45	1.49	1.43
		7일	0.78	2.70	5.71	9.79	14.99
		14일	1.09	3.07	9.24	11.72	16.03
		28일	1.13	4.94	9.46	12.93	19.17
	95%	0일	0.38	0.43	0.71	0.82	0.79
		7일	0.44	1.85	4.32	4.97	7.86
		14일	0.49	2.02	7.20	8.23	10.51
		28일	0.51	2.25	7.89	8.61	12.08
	90%	0일	0.28	0.21	0.30	0.35	0.26
		7일	0.31	1.78	3.43	4.95	5.11
		14일	0.35	1.95	4.11	5.65	6.42
		28일	0.37	2.54	4.87	7.57	10.26
	85%	0일	0.19	0.16	시료성형불가	0.26	0.16
		7일	0.23	1.50	시료성형불가	4.21	4.28
		14일	0.22	1.69	시료성형불가	5.19	7.01
		28일	0.23	1.89	시료성형불가	6.41	8.48

라. 안정처리된 점토(CL)의 공학적 특성 평가

(1) 실험항목 및 방법

안정 처리된 점토(CL)의 공학적 특성 평가는 실험항목 및 범위를 보여주는 <표 3.2-35>에서 보듯이 평가실험은 실험대상 시료인 만경강 하상토(CL)에 안정처리제로서 세립토 안정처리에 효용성이 큰 시멘트의 혼합율을 변화시켜가면서 공학적 특성 평가를 위한 기본물성시험, 다짐시험, 직접전단시험, 투수시험, 재령일수 및 다짐도 별 일축압축시험 등을 수행하였다.

시험방법은 앞서 언급된 국내 하상토의 공학적 특성 평가에서 사용된 시험방법과 동일한 방법을 사용하였으며, 다만, 일축압축시험은 KS F 2314 규정에 의하여 수행하였다. 이때 시험공시체는 다짐시험에 의해서 구해진 최대건조밀도 및 최적함수비에 대한 다짐도 85%, 90%, 95%, 100% 등에 해당하는 건조밀도 및 함수비로 제작되었다.

<표 3.2-35> 안정 처리된 점토의 공학적 특성 평가를 위한 실험항목 및 범위

실 험 항 목	변 화 인 자	범 위	실 험 시 료 및 범례
기본특성시험 (비중, 입도, 액・소성)	혼합율	시멘트 : 10, 20, 30, 40%	만경강 하상토(CL)
다짐시험	혼합율	시멘트 : 10, 20, 30, 40%	
투수시험	혼합율	시멘트 : 10, 20, 30, 40%	
직접전단시험	혼합율	시멘트 : 10, 20, 30, 40%	
일축압축시험	혼합율	시멘트 : 10, 20, 30, 40%	
	재령	0, 7, 14, 28일	
	다짐도	85, 90, 95, 100%	

(2) 실험결과 및 분석

(가) 기본특성시험 결과

안정처리된 만경강 하상토(CL)의 기본특성시험 결과는 만경강 하상토(CL) 안정처리토의 기본특성시험 결과를 보여주는 <표 3.2-36>과 만경강 하상토(CL) 안정처

리토의 기본특성시험 결과를 보여주는 <표 3.2-36>에서 보듯이 비중의 경우 시멘트 혼합비율이 커질수록 만경강 하상토(CL) 안정처리토의 경우 2.71~3.35로 비중이 증가하는 것으로 평가되었다.

또한, 안정처리토 입도분포특성은 전체적으로 시멘트 혼합비율에 상관없이 점토(CL)로 나타나 시멘트 혼합에 따른 입도분포특성 변화는 없는 것으로 평가되었다.

한편, 안정처리토의 소성특성은 소성지수 변화에서 보듯이 만경강 하상토(CL) 안정처리토의 경우 20.3~18.1로 다소 감소하였으나 원시료와 안정처리제의 유사한 특성에 따라 거의 무시할 정도인 것으로 평가되었다.

<표 3.2-36> 만경강 하상토(CL) 안정처리토의 기본특성시험 결과

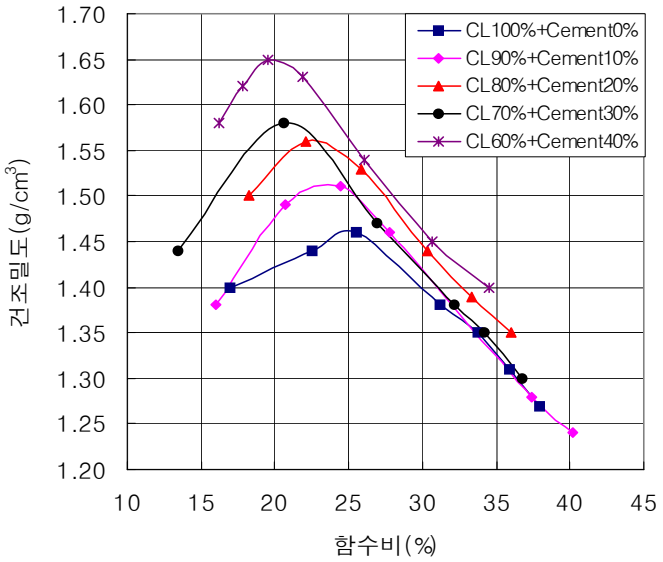
평가 항목		혼 합 율				
입도분포	원시료+시멘트(%)	100+0	90+10	80+20	70+30	60+40
	최대입경(㎜)	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
	4.76mm체 통과율	100	100	100	100	100
	0.074mm체 통과율	81	84	88	90	91
	D_{10}(㎜)	-	-	-	-	-
	D_{30}(㎜)	-	-	-	-	-
	D_{60}(㎜)	-	-	-	-	-
	균등계수, Cu	-	-	-	-	-
	곡률계수, Cg	-	-	-	-	-
연경도	액성한계, LL(%)	41.4	40.3	38.8	36.9	35.3
	소성한계, PL(%)	21.1	18.5	16.7	18.1	17.2
	소성지수, PI(%)	20.3	21.8	22.1	18.8	18.1
흙 분류	통일분류	CL	CL	CL	CL	CL
비중	비중	2.71	2.99	3.11	3.241	3.35

(나) 다짐시험 결과

시멘트 혼합에 따른 만경강 하상토(CL)의 다짐특성은 시험대상 시료의 다짐곡선 및 다짐시험결과를 보여주는 <그림 3.2-52> 및 <표 3.2-37>에서 보듯이 시멘트 혼합비율이 커질수록 만경강 하상토(CL) 안정처리토의 경우 최대건조밀도 1.46~1.65g/cm^3, 최적함수비 25.5%~19.6%로 나타나 최대건조밀도는 증가하고 최적함수비는 감소하는 것으로 나타났다.

이러한 특성은 시멘트 혼합비율이 커질수록 하상토 종류에 상관없이 경화현상의

영향으로 조립토화가 진행되어 발생되는 것으로 판단되며, 하상토 활용을 위한 시멘트 혼합은 하상토 다짐특성 개선에 도움이 되는 것으로 평가되었다.



<그림 3.2-52> 만경강 하상토(CL)의 시멘트 혼합비율에 따른 다짐곡선

<표 3.2-37> 만경강 하상토(CL)의 시멘트 혼합비율에 따른 다짐시험 결과

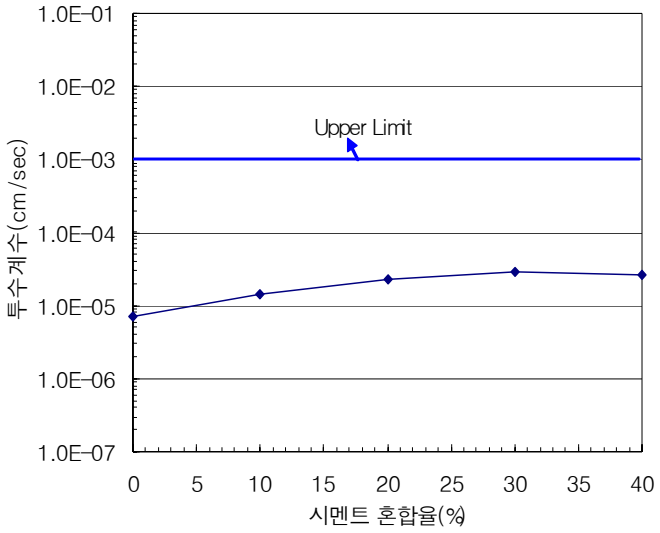
원시료	혼합비율 (원시료+시멘트)	최대건조밀도 (g/cm^3)	최적함수비 (%)
만경강 하상토 (CL)	100 +0	1.46	25.5
	90 +10	1.51	24.5
	80 +20	1.56	22.1
	70 +30	1.58	20.6
	60 +40	1.62	17.8

(다) 투수시험 결과

시멘트 혼합에 따른 만경강 하상토(CL)의 투수특성은 투수계수 변화 곡선 및 투수시험결과를 보여주는 <그림 3.2-53> 및 <표 3.2-38>에서 보듯이 시멘트 혼합비율이 커질수록 만경강 하상토(CL) 안정처리토의 경우 7.12×10^{-6}~2.67×10^{-5}cm/sec로 변화하는 것으로 나타나 시멘트 혼합에 따른 증가하는 평가되었다. 이러한 특성은 앞서 언급하였듯이 입도분포곡선 상 통과중량 10%에 해당하는 입경, D_{10}에 의

한 영향과 시멘트 혼합에 따른 경화현상에 의한 영향인 것으로 평가된다.

한편, 만경강 하상토(CL)는 시멘트 혼합에 따른 투수계수가 증가하더라도, 전체적으로 하천설계기준상의 투수기준인 1×10^{-3}cm/sec을 만족시키는 것으로 평가되었다.



<그림 3.2-53> 만경강 하상토(CL)의 시멘트 혼합비율에 따른 투수계수

<표 3.2-38> 만경강 하상토(CL)의 시멘트 혼합비율에 투수시험결과

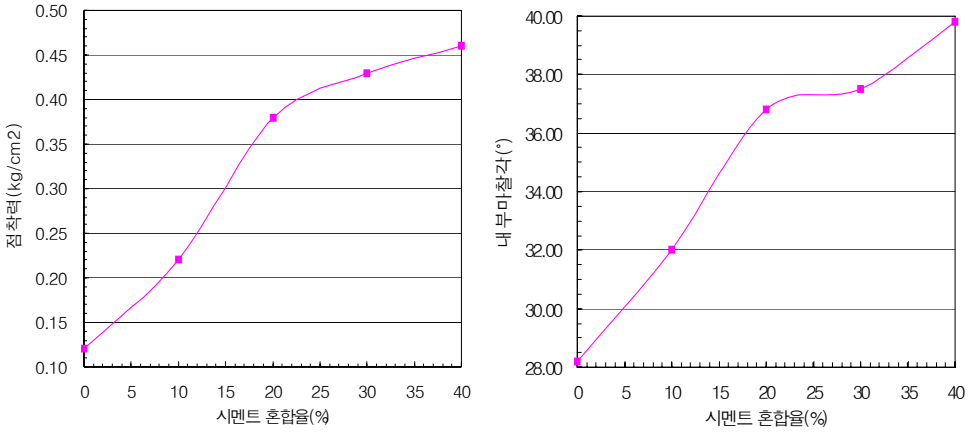
원시료	혼합비율 (원시료+시멘트)	투수계수 (cm/sec)
만경강 하상토 (CL)	100 + 0	7.12×10^{-6}
	90 + 10	1.46×10^{-5}
	80 + 20	2.32×10^{-5}
	70 + 30	2.94×10^{-5}
	60 + 40	2.67×10^{-5}

(라) 전단시험 결과

시멘트 혼합에 따른 만경강 하상토(CL)의 전단강도 특성은 전단강도특성 곡선 및 전단시험결과를 보여주는 <그림 3.2-54> 및 <표 3.2-39>에서 보듯이 시멘트 혼합비율이 커질수록 만경강 하상토(CL)의 경우 0.16~0.46 kg/cm^2, 내부마찰각

28.2° ~39.8° 로 시멘트 혼합에 따른 포졸란반응 및 경화반응 특성에 기인하여 점착력과 내부마찰각 모두 증가하는 경향을 보였다.

한편, 시멘트 혼합에 따른 만경강 하상토(CL)의 내부마찰각은 원시료와 시멘트의 혼합비율에 상관없이 하천설계기준 상 비탈면 경사 1 : 3에 의한 자연안식각 18.4° 보다 큼으로서 활동에 대한 안정성이 확보된 것으로 평가되었다.



(a) 점착력 변화 (b) 내부마찰각 변화

<그림 3.2-54> 만경강 하상토(CL)의 시멘트 혼합비율에 따른 전단강도 변화 곡선

<표 3.2-39> 만경강 하상토(CL)의 시멘트 혼합비율에 따른 전단시험결과

원시료	혼합비율 (원시료+시멘트)	점착력 (c, kg/cm^2)	내부마찰각 (ϕ, °)
만경강 하상토 (CL)	100 + 0	0.12	28.2
	90 + 10	0.22	32.0
	80 + 20	0.38	36.8
	70 + 30	0.42	37.5
	60 + 40	0.46	39.8

(마) 일축압축시험 결과

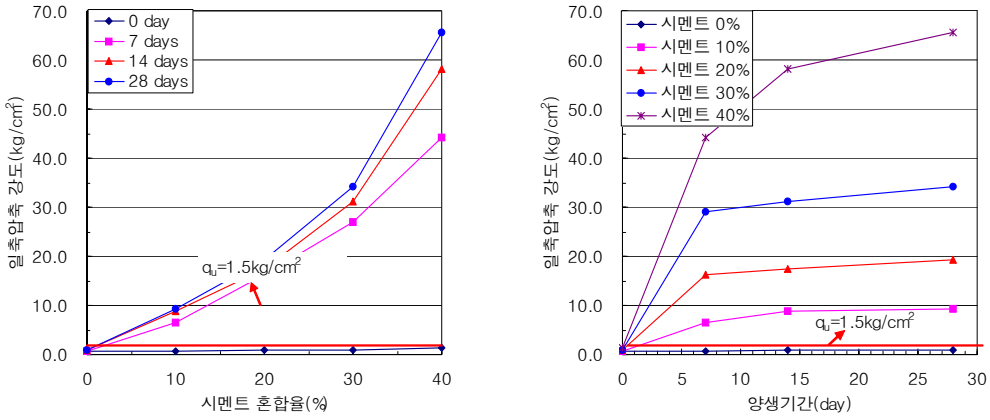
시멘트 혼합에 따른 만경강 하상토(CL)의 일축압축강도 특성은 일축압축강도 변화 곡선 및 일축압축강도 시험결과를 보여주는 <그림 3.2-55> 및 <표 3.2-40>과 같다. 만경강 하상토(CL) 안정처리토의 재령에 따른 압축강도는 재령에 따라 증

가하는 것으로 평가되었으며, 상대다짐도 90%인 경우 만경강 하상토(CL)와 시멘트 혼합율 20%에서 재령에 따라 0.69~19.3kg/cm^{2}로, 최고 28.0배 증가하는 것으로 평가되었다.

또한, 만경강 하상토(CL) 안정처리토의 시멘트 혼합율에 따른 강도특성은 <그림 3.2-55(b)> 에서 보듯이 혼합율에 따라 압축강도가 증가하는 것으로 평가되었으며, 상대다짐도 90%, 재령 28일인 경우 혼합율(0, 10, 20, 30, 40%)이 높아짐으로서 0.89~65.5kg/cm^{2}로, 73.6배 증가하는 것으로 평가되었다.

한편, 만경강 하상토(CL) 안정처리토의 다짐도 변화에 따른 강도특성은 <표 3.2-40>에서 보듯이 다짐도 증가에 따라 압축강도가 증가하는 것으로 평가되었으며, 시멘트 혼합율 20%, 재령 28일인 경우 상대다짐도(85, 90, 95, 100%)가 높아짐으로서 16.9~39.7kg/cm^{2}로, 2.3배 증가하는 것으로 나타났다.

이러한 만경강 하상토(CL) 안정처리토 압축강도특성은 시멘트에 경화특성에 기인하며, 대체적으로 불량토 대책매뉴얼(1985) 제방재료의 최소요구강도를 만족시켰다. 따라서 앞에서 살펴본바와 같이 만경강 하상토(CL)와 같은 세립질의 흙은 시멘트에 의한 혼합이 보다 안정처리가 더 효과적인 것으로 평가 되었다.



(a) 장기재령 효과 (b) 시멘트 혼합율 효과

<그림 3.2-55> 만경강 하상토(CL) 안정처리토의 일축압축강도 변화 곡선 (다짐도 90%)

<표 3.2-40> 만경강 하상토(CL) 안정처리토의 일축압축시험결과 (kg/cm^2)

구분 / 원시료	다짐도	재 령	혼 합 비 율(원시료+시멘트)				
			100+0	90+10	80+20	70+30	60+40
만경강 하상토 (CL)	100%	0일	1.65	2.13	2.54	2.74	3.11
		7일	1.84	9.58	22.1	35.5	69.2
		14일	1.86	14.6	34.8	39.2	75.2
		28일	1.98	16.9	39.7	43.8	84.7
	95%	0일	0.97	1.43	1.67	2.21	2.78
		7일	1.03	7.21	20.6	26.0	54.6
		14일	1.21	11.3	31.2	33.5	64.8
		28일	1.25	13.7	36.8	38.5	71.2
	90%	0일	0.72	0.81	0.95	0.94	1.47
		7일	0.79	6.52	16.3	22.4	44.2
		14일	0.87	8.77	17.5	28.1	58.1
		28일	0.89	9.38	19.3	34.3	65.5
	85%	0일	0.53	0.65	0.74	0.82	0.88
		7일	0.57	5.14	11.5	18.3	35.0
		14일	0.61	6.12	15.3	22.5	38.3
		28일	0.63	7.49	16.9	29.1	58.7

마. 소결론

본 절에서는 앞서 언급된 왜관하상토-1(SP), 왜관하상토-2(ML-1), 안산 하구언 하상토(ML-2), 만경강 하상토(CL) 등에 화강풍화토, 시멘트, 벤토나이트를 첨가한 혼합토에 대한 각종 물리·역학적 실험을 수행·분석함으로써 입도조정기법 및 안정처리기법과 같은 하상토 활용 기법의 효율성 및 적합성 등을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 왜관하상토-1(SP)는 화강풍화토, 시멘트, 벤토나이트 등의 혼합비에 따른 다양한 공학적 특성 평가 결과 다음과 같은 결과를 얻어 최적의 왜관하상토-1(SP)의 공학적 특성 개선 기법은 화강풍화토 혼합기법으로 제시할 수 있으며, 이때 최적의 혼합비율은 투수특성 향상 효과를 고려하여 40% 이상이 합리적일 것으로 판단된다.

(ⅰ) 입도분포특성은 화강풍화토 혼합비율이 25%에서 소성이 없는 SP-SM으

로, 50% 이상에서 소성이 없는 SM으로 나타났으며, 시멘트 안정처리토의 경우 시멘트 혼합비율이 15%이상에서 SP에서 소성이 없는 SM으로, 벤토나이트 안정처리토는 벤토나이트 혼합비율 6%이상에서 SP-SM으로 나타나 적합한 제방재료가 되는 것으로 평가되었다.

(ii) 다짐특성은 화강풍화토 혼합비율이 커질수록 최대건조밀도는 커지고, 최적함수비는 작아지는 경향을 보였으며, 시멘트 및 벤토나이트 혼합의 경우 혼합비율이 커질수록 최대건조밀도의 경우 감소하고, 최적함수비는 다소 커지는 경향을 보여 화강풍화토 혼합이 왜관하상토-1(SP)의 다짐특성 향상에 도움을 주는 것으로 평가되었다.

(iii) 투수특성은 화강풍화토, 시멘트, 벤토나이트 혼합비율이 커질수록 각각 4.85×10^{-2}~3.05×10^{-5}cm/sec, 4.85×10^{-2}~9.80×10^{-4}cm/sec로 4.85×10^{-2}~2.35×10^{-5}cm/sec로 나타났으며, 하천설계기준상의 투수기준인 1×10^{-3}cm/sec을 만족시키는 혼합비는 각각 38%, 18%, 3% 이상으로 나타나 화강풍화토와 벤토나이트 혼합이 왜관하상토-1(SP)의 투수특성 향상에 도움을 주는 것으로 평가되었다.

(iv) 전단강도 특성은 화강풍화토, 시멘트, 벤토나이트 혼합비율이 커질수록 전체적으로 세립화의 영향으로 점착력이 다소 증가하며 내부마찰각이 다소 감소하는 경향을 보였으나, 전체적으로 내부마찰각이 하천설계기준 상 비탈면 경사 1 : 3에 의한 자연안식각 18.4° 보다 큼으로서 활동에 대한 안정성이 확보된 것으로 평가되었다.

(2) 왜관하상토-2(ML-1), 안산하구언 하상토(ML-2) 등 실트질 하상토(ML)는 화강풍화토, 시멘트 등의 혼합비에 따른 다양한 공학적 특성 평가 결과 다음과 같은 결과를 얻어 화강풍화토 혼합기법의 경우 실트질 하상토(ML)의 다짐특성 개선에 유효하며, 시멘트 안정처리기법의 경우 실트질 하상토(ML)의 단기 압축강도증진에 유효한 기법으로 판단된다.

(i) 입도분포특성은 왜관하상토-2(ML-1) 혼합토의 경우 화강풍화토 혼합비율이 25%이상에서 ML에서 SM으로, 안산 하구언 하상토(ML-2) 혼합토의 경우 50%이상에서 ML에서 SM으로 변화하여 전체적으로 적합한 제방재

료가 되는 것으로 평가되었으며, 시멘트 혼합의 경우 혼합비율에 상관없이 왜관하상토-2(ML-1)와 안산 하구언 하상토(ML-2) 안정처리토 모두 실트질 흙(ML)으로 나타나 시멘트 혼합에 따른 입도분포특성 변화는 없는 것으로 평가되었다.

(ii) 다짐특성은 왜관하상토-2(ML-1) 혼합토 및 안산 하구언 하상토(ML-2) 혼합토 모두 화강풍화토 혼합비율이 커질수록 최대건조밀도는 커지고, 최적함수비는 작아지고, 시멘트 혼합의 경우 혼합비율 변화에 따른 최대건조밀도와 최적함수비의 변화가 거의 없는 것으로 나타나, 화강풍화토 혼합이 왜관하상토-1(SP)의 다짐특성 향상에 도움을 주는 것으로 평가되었다.

(iii) 투수특성은 화강풍화토, 혼합비율이 커질수록 왜관하상토-2(ML-1) 혼합토의 경우 2.29×10^{-5}~3.05×10^{-5}cm/sec로, 안산 하구언 하상토(ML-2) 혼합토의 경우 1.97×10^{-7}~3.05×10^{-5} cm/sec로, 시멘트 혼합의 경우 혼합비율이 커질수록 왜관하상토-2(ML-1) 안정처리토의 경우 2.29×10^{-5}~1.08×10^{-5}cm/sec로, 안산 하구언 하상토(ML-2) 안정처리토의 경우 1.97×10^{-7}~2.32×10^{-6}cm/sec로 전체적으로 하천설계기준상의 투수기준인 1×10^{-3}cm/sec을 만족시키는 것으로 평가되었으나, 화강풍화토나 시멘트 혼합에 따른 투수특성 향상은 없는 것으로 평가되었다.

(iv) 전단강도 특성은 화강풍화토 혼합비율이 커질수록 왜관 하상토-2(ML-1)의 경우 0.27~0.06 kg/cm^2, 내부마찰각 29.2° ~31.4° , 안산하구언 하상토(ML-2)의 경우 점착력 0.43~0.06 kg/cm^2, 내부마찰각 26.8° ~31.4° 로 나타나 화강풍화토 혼합에 따라 점착력이 감소하는 반면에 내부마찰각이 증가하는 경향을 보였다. 시멘트 혼합비율이 커질수록 왜관 하상토-2(ML-1)의 경우 0.27~0.25 kg/cm^2, 내부마찰각 29.2° ~27.9° 로 시멘트 혼합에 따라 점착력의 변화 없이 내부마찰각이 감소하는 경향을 보였으나, 전체적으로 내부마찰각이 하천설계기준 상 비탈면 경사 1 : 3에 의한 자연안식각 18.4° 보다 큼으로서 활동에 대한 안정성이 확보된 것으로 평가되었다.

(v) 일축압축강도 특성은 화강풍화토 혼합토의 경우 혼합비율 증가에 따른 세립토의 영향으로 다소 감소하는 경향을 보였으며, 시멘트 안정처리토의

경우 혼합비율 및 재령의 증가에 따라 압축강도가 증가하는 경향을 보여 실트질 하상토(ML)의 경우 시멘트 안정처리에 따른 압축강도 특성 향상에 효과적인 것으로 평가되었다.

(3) 만경강 하상토(CL)는 시멘트 혼합비에 따른 다양한 공학적 특성 평가 결과 다음과 같은 결과를 얻어 시멘트 안정처리기법의 경우 다짐특성, 전단강도특성, 압축강도특성 향상에 유효한 기법으로 판단된다.

(ⅰ) 입도분포특성은 시멘트 혼합비율 변화에 상관없이 원시료와 안정처리제의 유사한 특성에 따라 CL로 나타났으며, 시멘트 혼합비율에 따라 비중의 경우 2.71~3.35로 크게 증가하는 것으로 평가되었다.

(ⅱ) 다짐특성은 시멘트 혼합비율이 커질수록 시멘트의 경화현상에 따라 만경강 하상토(CL) 안정처리토의 경우 최대건조밀도 1.46~1.65g/cm^3, 최적함수비 25.5%~19.6%로 나타나 최대건조밀도는 증가하고 최적함수비는 감소하는 것으로 나타나 다짐특성 개선에 도움이 되는 것으로 평가되었다.

(ⅲ) 투수특성은 시멘트 혼합비율이 커질수록 만경강 하상토(CL) 안정처리토의 경우 7.12×10^{-6}~2.67×10^{-5}cm/sec로 나타나 다소 증가하는 평가되었으나, 만경강 하상토(CL)는 시멘트 혼합에 따른 투수계수가 증가하더라도, 전체적으로 하천설계기준상의 투수기준인 1×10^{-3}cm/sec을 만족시키는 것으로 평가되었다.

(ⅳ) 전단강도 특성은 시멘트 혼합비율이 커질수록 만경강 하상토(CL)의 경우 0.16~0.46 kg/cm^2, 내부마찰각 28.2° ~39.8° 로 시멘트 혼합에 따른 포졸란 반응 및 경화반응 특성에 기인하여 점착력과 내부마찰각 모두 증가하는 경향을 보였으며, 전체적으로 내부마찰각이 하천설계기준 상 비탈면 경사 1 : 3에 의한 자연안식각 18.4° 보다 큼으로서 활동에 대한 안정성이 확보된 것으로 평가되었다.

(ⅴ) 일축압축강도 특성은 시멘트 혼합비율 및 재령 증가에 따라 압축강도가 증가하는 경향을 보여 만경강 하상토(CL)의 경우 시멘트 안정처리에 따른 압축강도 특성 향상에 효과적인 것으로 평가되었다.

(4) 상기와 같은 분석결과, 하상토 활용기법은 입도조정기법의 경우 왜관 하상토-1(SP)와 같은 조립토에 화강풍화토 혼합율 40% 이상에서, 시멘트 안정처기법의 경우 왜관하상토-2(ML-1), 안산 하구언 하상토(ML-2), 만경강 하상토(CL)과 같은 세립토의 전단강도 증진을 목적으로 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

5. 현장 시험을 통한 공학적 특성 평가

가. 현장 시험 개요

(1) 시험목적

전술한 바와 같이 국내 발생 하상토는 하천 본류를 따라 입경이 균등한 모래(SP)가 가장 많이 발생하고 있으며, 세립토의 경우 실트질 흙(ML)이 부분적으로 발생하고 있는 것으로 평가되었다.

한편, 일반적으로 세립토(ML, CL 등)는 고함수비로 장비운행성 및 현장 다짐 기준을 만족시키지 못하며, 전술한 실내시험결과에서 보듯이 모래(SP)는 하천설계기준 제방재료의 투수계수기준인 10^{-3} cm/sec를 만족시키지 못하므로 하천제방 축조재료로 활용하기 위해서는 양질토 혼합 및 함수비 조정 등과 같은 안정처리공법이 요구된다.

따라서, 본 절에서는 국내 발생 하상토 중 현장에서 가장 많이 발생하는 모래(SP)와 세립토인 실트(ML)을 대상으로 원재료 및 양질토인 화강풍화토(SW)와의 혼합에 따른 현장 다짐에 따른 공학적 특성을 평가하고 백호우 등 현장 장비를 이용한 현장 혼합방법 제시하고자 하였다.

(2) 시험대상시료

하상혼합토의 현장 혼합 및 공학적 특성 평가는 모래(SP)와 실트질 흙(ML)의 두 가지 하상토를 대상으로 시험을 수행하였다. 현장 시험에 이용된 하상토 시료인 모래(SP)는 경상남도 대구광역시 달성군 현풍면에 소재한 현풍천에서 채취된 현풍 하상토(SP)를 사용하였으며, 이때 양질토로 사용된 화강풍화토(SW)는 인근 도로공사 현장 유용토를 사용하였다(<그림 3.2-56>, <그림 3.2-57> 참조).

한편, 현장 시험에 사용된 인천하상토(ML)는 전술한 바와 같이 국내의 경우 본류와 지천의 합류부, 자연습지, 하구언 등과 같이 퇴적특성이 우세한 지역을 제외에서 일부 발생하고 있는 재료로 현장 시험을 위한 충분한 양을 채취할 수 없어 공학적으로 동일한 특성을 갖고 있는 인천 송도 매립지의 매립토를 사용하였으며, 양질토인 화강풍화토는 파주 운정지구 택지 공사 현장의 유용토를 사용하여 시험을 수행하였다.



(a) 현장 시험 부지



(b) 현풍하상토(SP) 채취 현장



(c) 현풍-화강풍화토(SW) 채취 현장

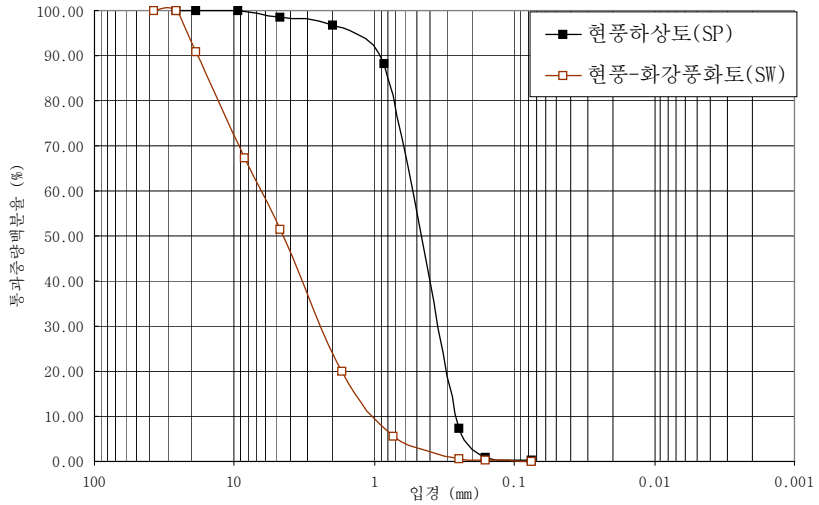


(d) 인천하상토(ML)

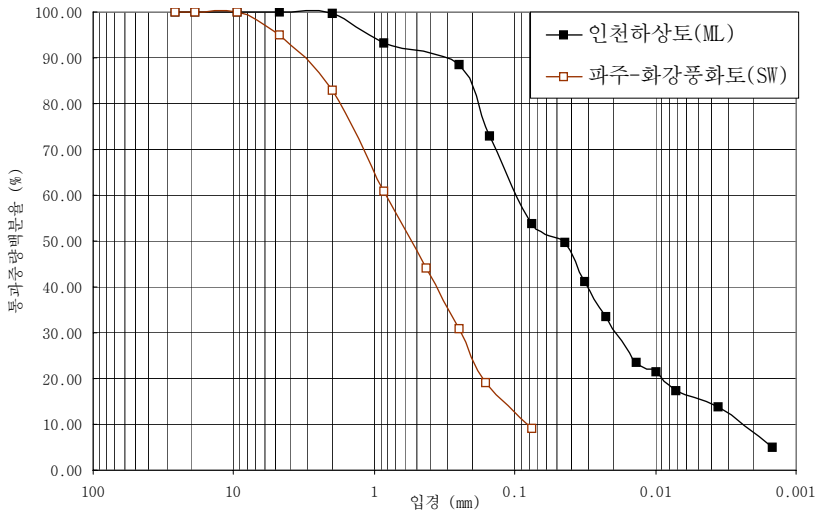


(e) 파주-화강토풍화토(SW)

<그림 3.2-56> 시험 부지 및 시험 시료



(a) 현풍 하상토 및 화강풍화토



(b) 인천 하상토 및 파주 화강풍화토

<그림 3.2-57> 현장 시험시료의 입도분포 곡선

(3) 시험항목

<표 3.2-41>에서는 수행한 현장시험 항목 및 내용을 나타낸다. <표 3.2-41>에서 보듯이 현장시험은 하상토, 화강풍화토, 혼합토 등 재료 별 변화인자에 따라 입도시험, 다짐시험, 현장 들밀도시험, 현장 콘관입시험 등 다양한 시험을 수행하였다.

이때, 현장 다짐에 이용된 장비는 10ton 진동다짐롤러를 이용하였으며, 현장밀도측정

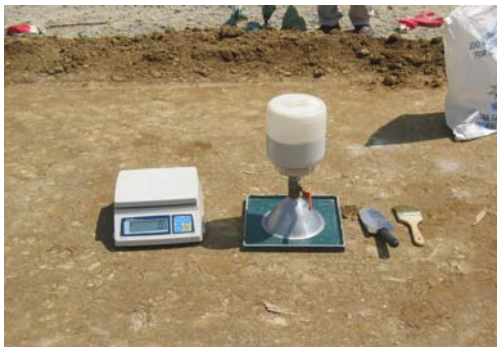
은 모래치환법에 의한 현장들밀도 시험을 통하여 수행하였다(<그림 3.2-58> 참조).

<표 3.2-41> 현장시험 재료 별 평가항목 및 변화인자

재료	평가항목	평가방법	변화인자	
하상토 (SP, ML)	다짐특성	현장 들밀도시험	함수비	자연함수비 함수비 변화 1단계
	강도특성	현장 콘 관입시험	다짐 성토고	10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cm
			다짐횟수(왕복)	0.5회, 1회, 2회, 3회, 4회, 5회
화강풍화토 (SW)	다짐특성	현장 들밀도시험	함수비	자연함수비
			다짐 성토고	30cm
	강도특성	현장 콘 관입시험	다짐횟수(왕복)	0.5회, 1회, 2회, 3회, 4회, 5회
혼합토	다짐특성	현장 들밀도시험	함수비	자연함수비
			다짐 성토고	30cm
	강도특성	현장 콘 관입시험	다짐횟수(왕복)	0.5회, 1회, 2회, 3회, 4회, 5회
	혼합방법	입도분포 시험	양질토 혼합비	0%, 25%, 50%, 75%, 100%



(a) 현장 다짐 장면



(b) 현장 밀도 측정 장면



(c) 현장 콘 관입 측정 장면

<그림 3.2-58> 현장 다짐 및 계측 장면

나. 현풍 하상토(SP)의 공학적 특성

(1) 현장 다짐 특성

(가) 현풍 하상토(SP)의 현장 다짐 특성

자연함수비 상태의 현풍하상토(SP)의 현장 다짐특성은 <표 3.2-42>에서 보듯이 습윤밀도의 경우 1.60~1.82ton/m^3, 건조밀도의 경우 1.41~1.59ton/m^3, 평균함수비의 경우 14.11~14.38% 정도로 나타났다.

각 변화인자별 현장 다짐특성은 성토고 변화의 경우 각 다짐횟수 별로 건조밀도의 변화가 0.12ton/m^3 이하로 거의 발생하지 않는 것으로 나타났으며, 왕복다짐횟수 별 건조밀도는 다짐횟수 증가에 따라 다소 증가하는 경향을 보였으며, 성토고 30cm 단면에서 비교적 다짐횟수에 따른 다짐특성이 잘 나타나는 것으로 평가되었다(<그림 3.2-59(a)> 참조).

<표 3.2-42> 현풍하상토(SP)의 다짐특성 평가 결과(자연함수비 상태, t/m^3)

왕복 다짐 횟수		0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	평균 함수비 (%)
성토고 10cm	습윤밀도	1.67	1.62	1.72	1.62	1.71	1.74	14.11
	건조밀도	1.47	1.41	1.50	1.42	1.50	1.53	
성토고 20cm	습윤밀도	1.60	1.66	1.65	1.76	1.67	1.71	14.25
	건조밀도	1.41	1.45	1.44	1.54	1.46	1.50	
성토고 30cm	습윤밀도	1.61	1.69	1.72	1.74	1.75	1.82	14.12
	건조밀도	1.43	1.48	1.50	1.53	1.54	1.59	
성토고 40cm	습윤밀도	1.61	1.61	1.68	1.68	1.69	1.70	14.16
	건조밀도	1.42	1.41	1.47	1.47	1.47	1.49	
성토고 50cm	습윤밀도	1.63	1.69	1.70	1.75	1.77	1.73	14.38
	건조밀도	1.44	1.48	1.48	1.53	1.54	1.50	

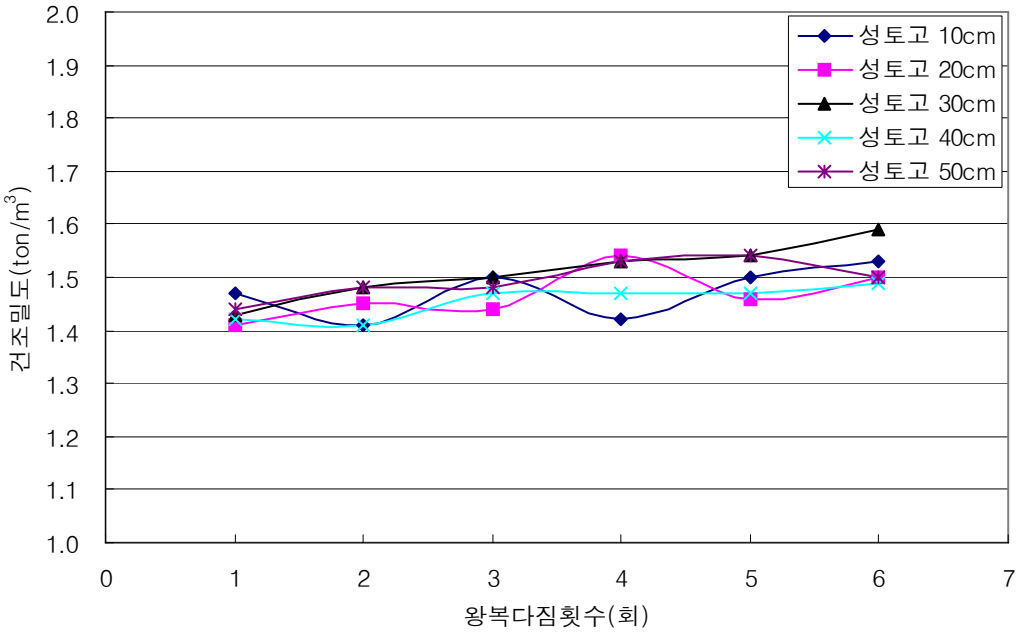
한편, 함수비 증가에 따른 현풍하상토(SP)의 현장 다짐특성은 <표 3.2-43>에서 보듯이 습윤밀도의 경우 1.56~1.89ton/m^3, 건조밀도의 경우 1.30~1.53ton/m^3, 평균함수비의 경우 23.14~23.21% 정도로 나타났다.

함수비 증가 시의 각 변화인자별 현장 다짐특성은 성토고 변화의 경우 각 다짐횟수 별로 건조밀도의 변화가 0.3ton/m^3 이하로 자연함수비 상태에 비해 크게 발생

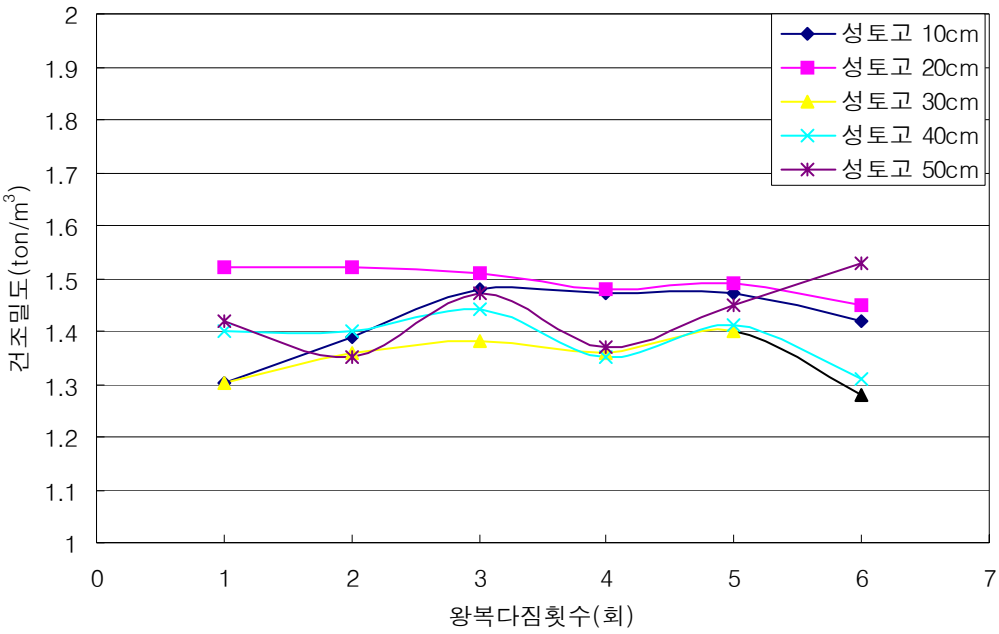
하는 것으로 나타났으며, 왕복다짐횟수 별 건조밀도는 다짐횟수 증가에 따라 거의 변화가 없는 것으로 나타났다(<그림 3.2-59(b)> 참조).

<표 3.2-43> 현풍하상토(SP)의 다짐특성 평가 결과(함수비 증가 상태, t/m^3)

왕복다짐횟수		0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	평균 함수비 (%)
성토고 10cm	습윤밀도	1.56	1.72	1.83	1.82	1.83	1.76	23.21
	건조밀도	1.30	1.39	1.48	1.47	1.47	1.42	
성토고 20cm	습윤밀도	1.82	1.89	1.86	1.83	1.84	1.80	23.14
	건조밀도	1.52	1.52	1.51	1.48	1.49	1.45	
성토고 30cm	습윤밀도	1.56	1.68	1.70	1.69	1.73	1.58	23.17
	건조밀도	1.30	1.36	1.38	1.36	1.40	1.28	
성토고 40cm	습윤밀도	1.68	1.73	1.78	1.68	1.75	1.62	23.14
	건조밀도	1.40	1.40	1.44	1.35	1.41	1.31	
성토고 50cm	습윤밀도	1.71	1.67	1.82	1.70	1.80	1.89	23.15
	건조밀도	1.42	1.35	1.47	1.37	1.45	1.53	



(a) 자연함수비



(b) 함수 증가 시

<그림 3.2-59> 현풍하상토(SP)의 성토고 및 다짐횟수에 따른 건조밀도 변화

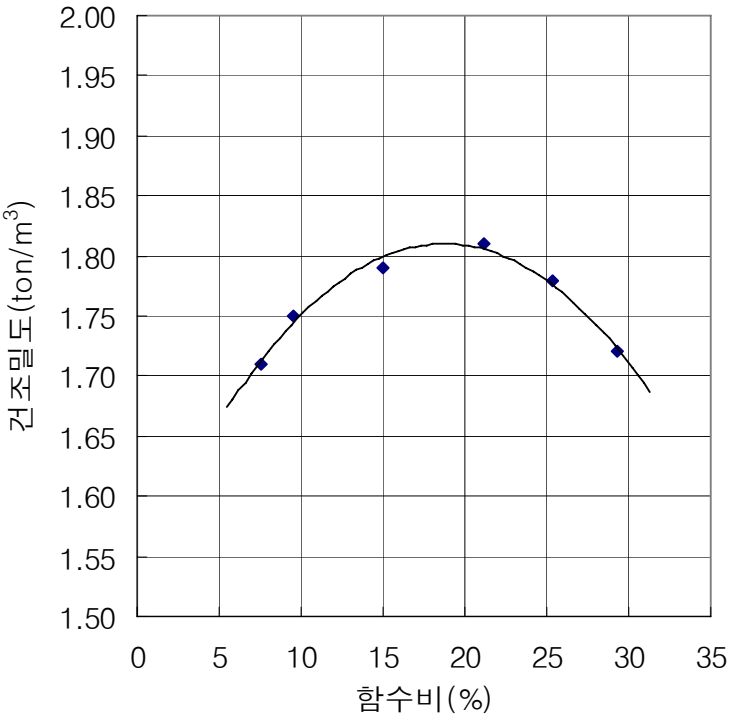
(나) 현풍화강풍화토(SW)의 현장 다짐 특성

현장 화강풍화토(SW)의 현장 다짐특성은 <표 3.2-44>에서 보듯이 습윤밀도의 경우 1.58~2.07ton/m^3, 건조밀도의 경우 1.38~1.81ton/m^3, 평균함수비의 경우 14.25% 정도로 나타났다.

또한, 실내 다짐시험 결과로부터 구한 상대 다짐도는 1회 왕복 다짐 후 94% 이상으로 하천설계기준에서 요구하는 90% 다짐을 만족하는 것으로 평가되었다.

<표 3.2-44> 현장 화강풍화토(SW)의 다짐특성 평가 결과

왕복다짐횟수	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	평균 함수비 (%)
습윤밀도(t/m^3)	1.58	1.93	2.01	2.00	2.01	2.07	14.25
건조밀도(t/m^3)	1.38	1.70	1.76	1.75	1.75	1.81	
상대 다짐도(%)	76%	94%	97%	96%	96%	99%	



<그림 3.2-60> 현풍화강풍화토(SW)의 실내 다짐시험 곡선

(다) 혼합비율에 따른 하상혼합토의 현장 다짐 특성

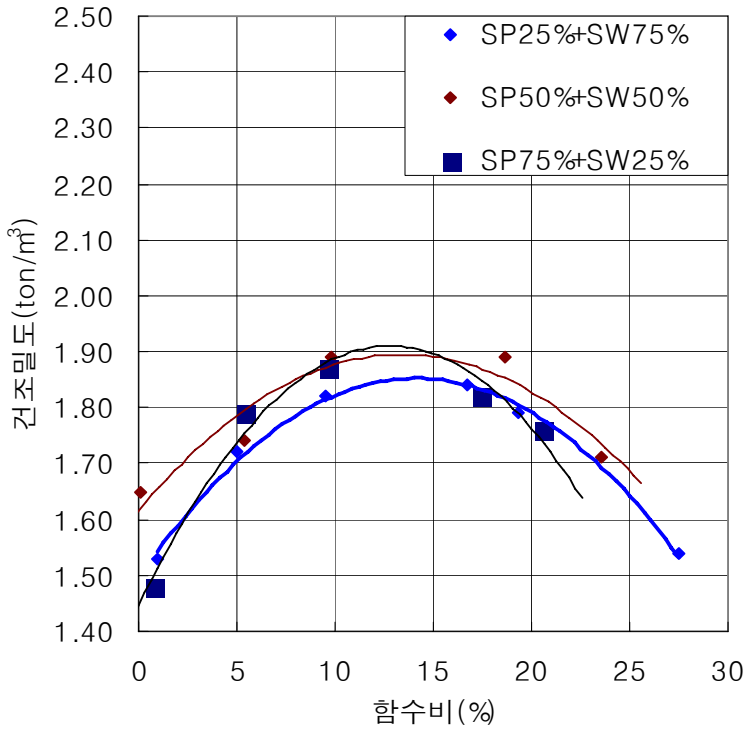
혼합비율에 따른 하상혼합토의 현장 다짐특성은 <표 3.2-45>에서 보듯이 SP25%+SW75%와 SP50%+SW50%의 경우 습윤밀도 1.70~2.81ton/m^3, 건조밀도의 경우 1.52~2.48ton/m^3, 평균함수비의 경우 11.48~18.20% 정도로 아주 양호한 현장 다짐 결과를 나타났다. 실내시험결과에 의한 상대다짐도는 81.9~133.9%로 나타났으며, 2회 왕복 다짐 후 90% 이상으로 하천설계기준에서 요구하는 90% 다짐을 만족하는 것으로 평가되었다.

한편, SP75%+SW25%의 현장 다짐특성은 습윤밀도 15.6~1.82ton/m^3, 건조밀도 1.33~1.54ton/m^3, 함수비 16.28%, 상대다짐도 71.7~83.0%로 나타나, 앞서 두개의 시료와 다르게 현장 다짐에 의한 다짐이 안 되는 것으로 평가되었다.

혼합비율에 따른 현장 다짐특성 평가결과 SP25%+SW75%와 SP50%+SW50%의 경우 양질토로 이용한 현장 화강풍화토(SW)보다 오히려 다짐이 더 잘되는 것으로 평가되었으나, SP75%+SW25%의 경우 다짐에 불리한 모래(SP) 함량이 너무 많아 앞서 수행한 현풍하상토(SP)의 다짐결과와 유사하게 나타났다.

<표 3.2-45> 현풍화강풍화토(SW)의 다짐특성 평가 결과(성토고 30cm, ton/m^3)

왕복다짐횟수		0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	평균 함수비 (%)
SP25% + SW75%	습윤밀도	1.70	1.83	1.90	2.03	2.25	2.43	11.48
	건조밀도	1.52	1.61	1.67	1.81	2.01	2.18	
	상대 다짐도	81.9%	87.0%	90.0%	97.6%	108.8%	118.0%	
SP50% + SW50%	습윤밀도	1.83	2.15	2.41	2.80	2.94	2.81	18.20
	건조밀도	1.52	1.78	2.01	2.34	2.48	2.37	
	상대 다짐도	82.4%	96.1%	108.9%	126.3%	133.9%	128.3%	
SP75% + SW25%	습윤밀도	1.69	1.58	1.82	1.80	1.56	1.71	16.28
	건조밀도	1.41	1.33	1.54	1.54	1.35	1.47	
	상대 다짐도	76.0%	71.7%	83.0%	83.0%	72.9%	79.4%	



<그림 3.2-61> 현풍하상혼합토의 실내 다짐시험 곡선

(2) 현장 다짐에 따른 강도 특성

(가) 현풍하상토(SP)의 현장 강도 특성

자연함수비 상태의 현풍하상토(SP)의 강도특성은 <그림 3.2-62(a)> 에서 보듯이 5.0cm 관입시의 콘 저항치가 왕복다짐횟수 3회 이상에서 일반적으로 장비의 시공성을 위한 장비주행성이 확보되는 기준인 4.0kg/cm^{2}을 넘는 것으로 나타났다.

한편, 함수비 증가에 따른 현풍하상토(SP)의 강도특성은 <그림 3.2-62(b)>에서 보듯이 왕복다짐횟수 증가에 무관하게 전체적으로 콘 저항치가 4.0kg/cm^{2}을 넘지 않아 함수비에 따른 영향이 큰 것으로 평가되었다.

(나) 화강풍화토(SW)의 현장 강도 특성

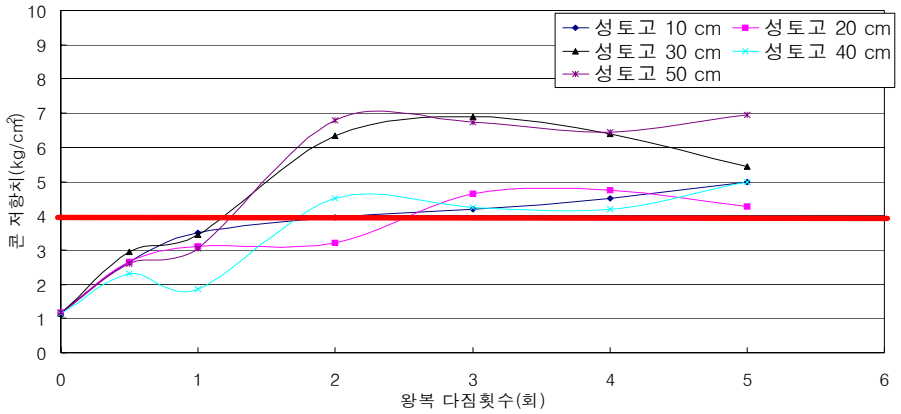
현장 화강풍화토(SW)의 강도특성은 <그림 3.2-62(c)>에서 보듯이 관입시의 콘 저항치가 왕복다짐횟수 0.5회 이상에서 4.0kg/cm^{2}을 넘는 것으로 나타나 시공성 측면에서 아주 양호한 재료인 것으로 평가되었다.

이때, 콘 관입치는 앞서 수행된 현풍하상토의 경우 5.0cm 이상 관입이 이루어져 5.0 cm를 기준으로 하였으나, 화강풍화토(SW)의 경우 현장 콘 관입 시험 후의 모습을 보여주는 <그림 3.2-63>에서 보듯이 관입이 거의 이루지지 않고 관입 저항만 증가하는 경향을 보였다.

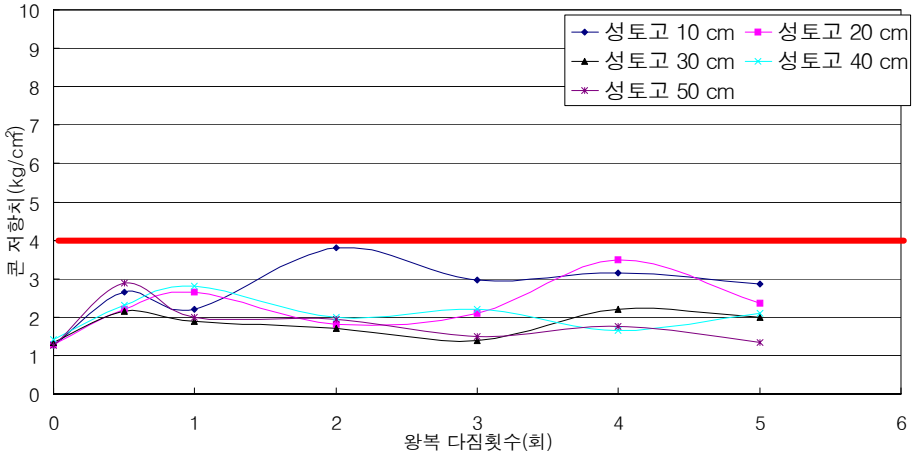
(다) 혼합비율에 따른 하상혼합토의 현장 강도 특성

혼합비율에 따른 하상혼합토의 강도특성은 <그림 3.2-62(c)>에서 보듯이 SP25%+SW75%와 SP50%+SW50%의 경우 관입시의 콘 저항치가 왕복다짐횟수 1회 이상에서 4.0kg/cm^{2}을 넘는 것으로 나타나 시공성 측면에서 아주 양호한 재료인 것으로 평가되었으며, 왕복다짐횟수 3회 이상에서는 오히려 양질토인 화강풍화토(SW)보다 콘 저항치가 크게 나타났다.

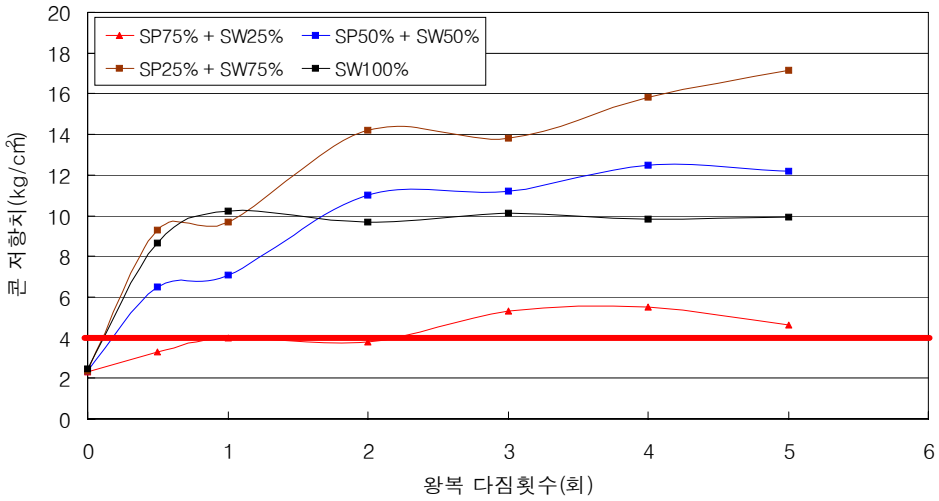
한편, SP75%+SW25%의 강도특성은 콘 저항치가 왕복다짐횟수 3회 이상에서 4.0kg/cm^{2}을 넘는 것으로 나타나 시공성을 확보하기 위해서는 최소한 3회 이상 다짐을 하여야 할 것으로 평가되었다.



(a) 자연함수비



(b) 함수 증가 시



(c) 화강풍화토(SW) 및 혼합비율

<그림 3.2-62> 현풍하상토(SP)의 성토고 및 다짐횟수에 따른 콘 저항치 변화



(a) 현풍하상토(SP)

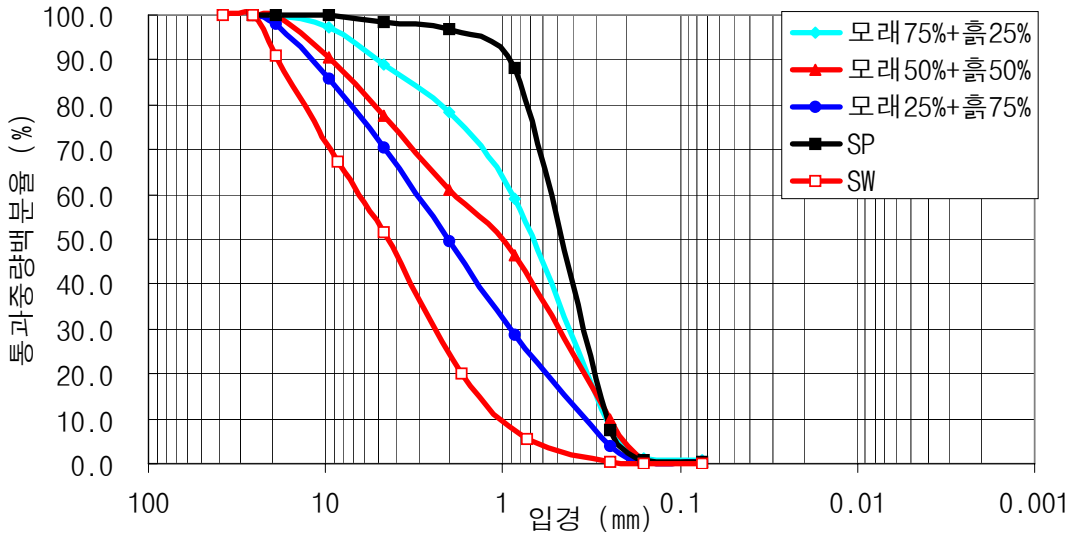


(b) 화강풍화토(SW)

<그림 3.2-63> 현풍하상토(SP)의 현장 콘관입 시험 후 모습

(3) 현장 혼합 특성

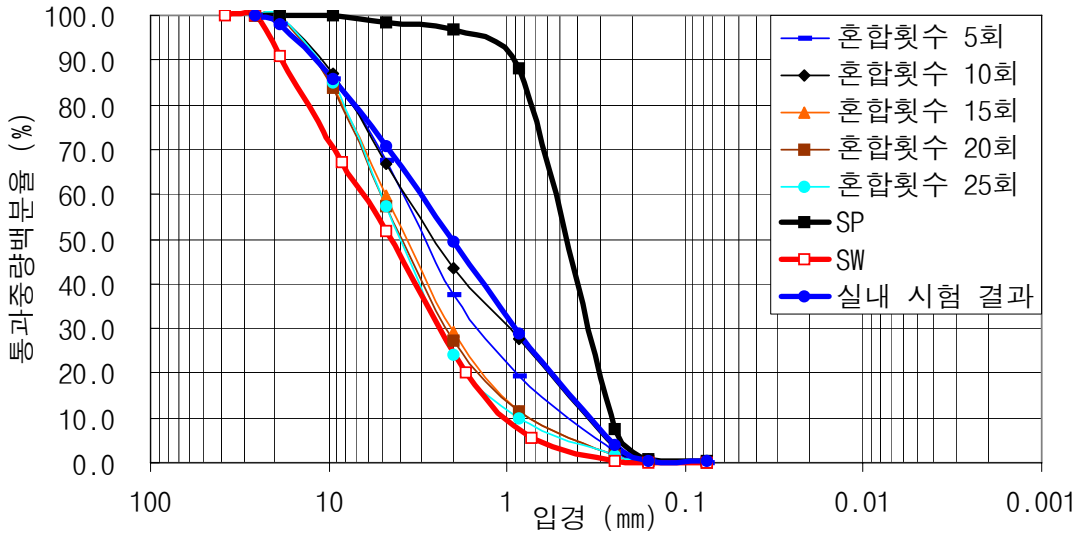
본 절에서는 현풍하상토(SP)와 양질토인 화강풍화토(SW)의 백호우(0.6m^3)를 이용한 현장 혼합방법 제시하고자 실내 시험을 통한 혼합비율에 따른 입도분포곡선(<그림 3.2-64> 참조)과 각 혼합비 별 혼합부피 12m^3의 하상혼합토에 대한 현장 혼합횟수에 따른 입도분포 곡선을 비교하였다.



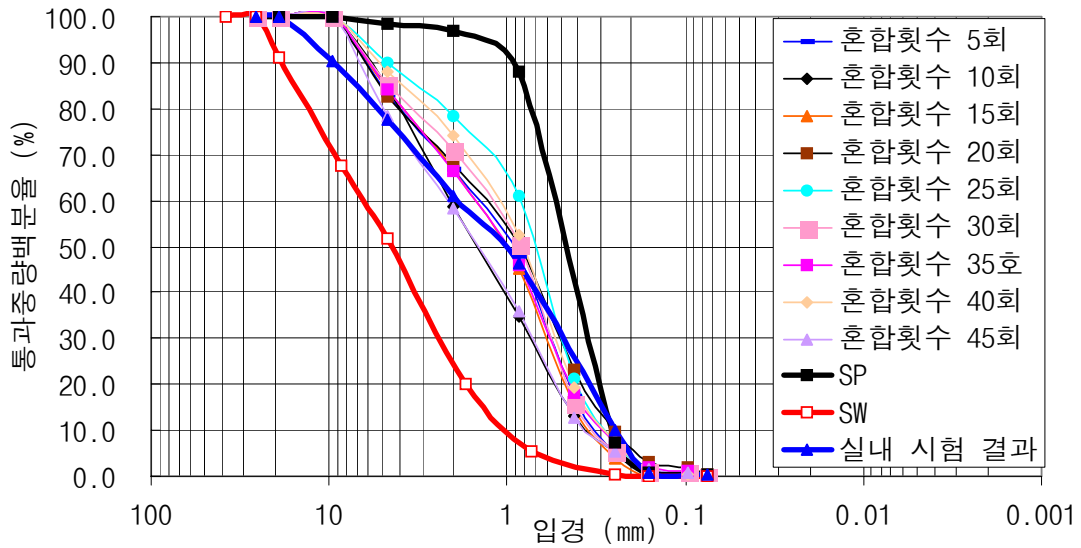
<그림 3.2-64> 실내 시험을 통한 현풍하상토(SP)의 혼합비율에 따른 입도분포곡선

현장 혼합 특성은 12m^3의 하상혼합토에 대한 현장 혼합횟수에 따른 입도분포곡선을 보여주는 <그림 3.2-65>에서 보듯이 전체적으로 5회 혼합 이후 실내 시험 결

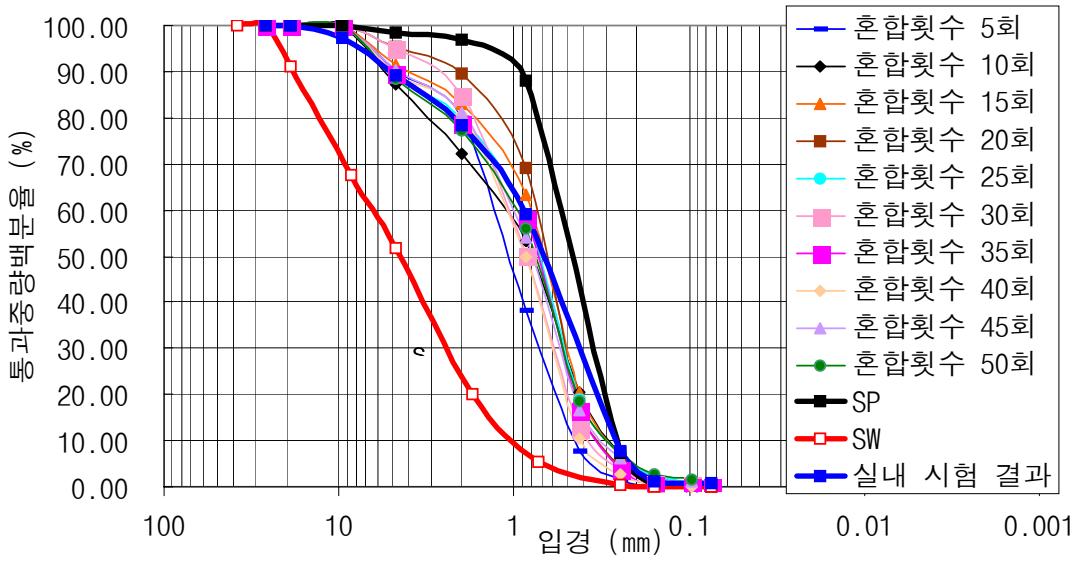
과와 유사한 입도분포 특성을 보였으며, 현장조건을 고려할 경우 10회 이상 혼합하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.



(a) 혼합비율(SP25%+SW75%)



(b) 혼합비율(SP50%+SW50%)



(c) 혼합비율(SP75%+SW25%)

<그림 3.2-65> 현풍하상토(SP)의 현장 혼합횟수에 따른 입도분포곡선

다. 인천 하상토(ML)의 공학적 특성

(1) 현장 다짐 특성

(가) 인천하상토(ML)의 현장 다짐 특성

자연함수비 상태의 인천하상토(ML)의 현장 다짐특성은 <표 3.2-46>에서 보듯이 습윤밀도의 경우 1.72~2.12ton/m^3, 건조밀도의 경우 1.37~1.59ton/m^3, 평균함수비의 경우 25.72~27.68% 정도로 나타났다. 각 변화인자별 현장 다짐특성은 성토고 변화의 경우 각 다짐횟수 별로 건조밀도의 변화가 0.19ton/m^3 정도로 발생하였으며, 왕복다짐횟수 별 건조밀도는 다짐횟수 증가에 따라 다소 증가하나 큰 변화는 없는 것으로 나타났다(<그림 3.2-66(a)> 참조).

한편, 함수비 감소에 따른 인천하상토(ML)의 현장 다짐특성은 <표 3.2-47>에서 보듯이 습윤밀도의 경우 1.71~1.96ton/m^3, 건조밀도의 경우 1.43~1.62ton/m^3, 평균함수비의 경우 21.17~22.26% 정도로 나타났다. 한편, 7일 간의 자연건조를 통한 함수비 감소 시의 각 변화인자별 현장 다짐특성은 성토고 변화의 경우 각 다짐횟수 별로 건조밀도의 변화가 0.17ton/m^3 이하로 자연함수비 상태에 비해 다소 작게 발

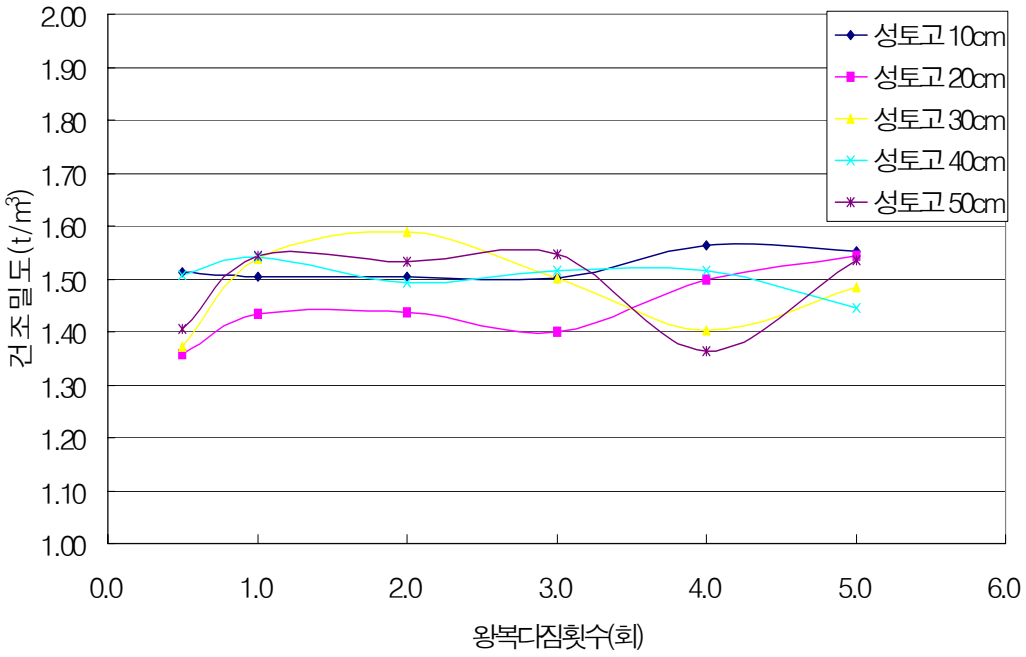
생하는 것으로 나타났으며, 왕복다짐횟수 별 건조밀도는 다짐횟수 증가에 따라 다소 증가하며, 전체적으로 왕복 다짐 2회 이후 수렴하는 것으로 나타났다(<그림 3.2-66(b)> 참조).

<표 3.2-46> 인천하상토(ML)의 다짐특성 평가 결과(자연함수비, t/m^3)

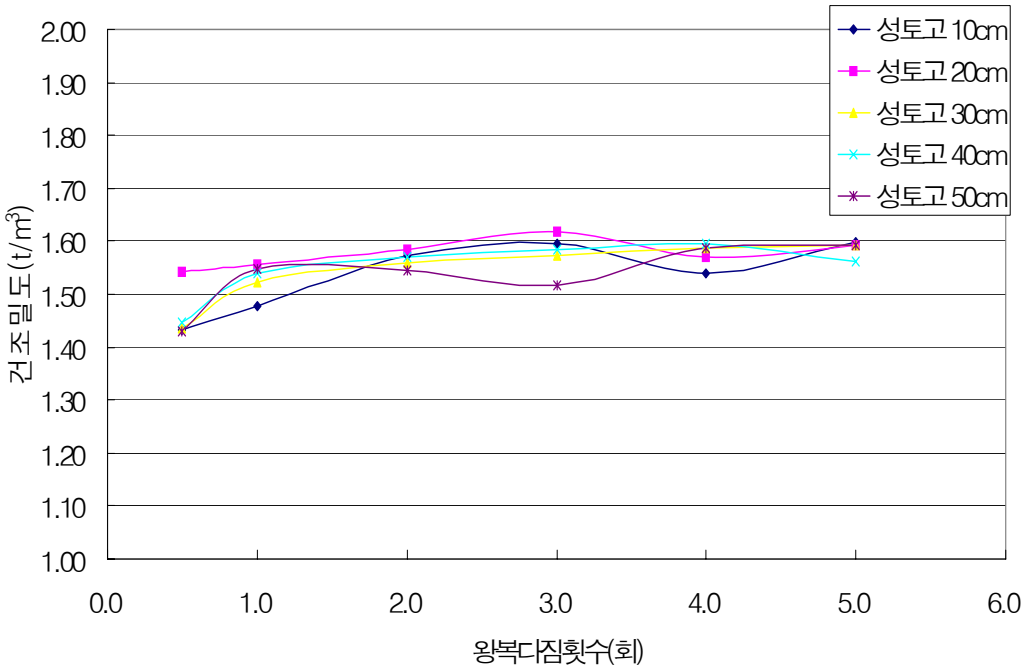
왕복 다짐 횟수		0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	평균 함수비 (%)
성토고 10cm	습윤밀도	1.91	1.91	1.90	1.90	1.96	1.97	26.24
	건조밀도	1.51	1.50	1.50	1.50	1.56	1.55	
성토고 20cm	습윤밀도	1.72	1.84	1.77	1.79	1.87	1.91	25.72
	건조밀도	1.36	1.43	1.44	1.40	1.50	1.54	
성토고 30cm	습윤밀도	1.70	1.92	2.03	1.89	1.82	1.88	26.30
	건조밀도	1.37	1.54	1.59	1.50	1.40	1.48	
성토고 40cm	습윤밀도	1.89	1.92	1.91	1.90	2.12	1.80	27.68
	건조밀도	1.51	1.54	1.49	1.52	1.52	1.44	
성토고 50cm	습윤밀도	1.81	2.00	1.92	1.94	1.78	1.93	26.32
	건조밀도	1.41	1.54	1.53	1.55	1.36	1.54	

<표 3.2-47> 인천하상토(ML)의 다짐특성 평가 결과(함수비 감소, t/m^3)

왕복다짐횟수		0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	평균 함수비 (%)
성토고 10cm	습윤밀도	1.75	1.80	1.94	1.91	1.86	1.96	21.79
	건조밀도	1.43	1.48	1.57	1.60	1.54	1.60	
성토고 20cm	습윤밀도	1.88	1.89	1.95	2.00	1.89	1.90	21.25
	건조밀도	1.54	1.56	1.58	1.62	1.57	1.59	
성토고 30cm	습윤밀도	1.71	1.84	1.91	1.92	1.92	1.95	21.21
	건조밀도	1.44	1.52	1.56	1.57	1.59	1.59	
성토고 40cm	습윤밀도	1.75	1.90	1.85	1.91	1.96	1.92	21.17
	건조밀도	1.45	1.54	1.57	1.58	1.60	1.56	
성토고 50cm	습윤밀도	1.74	1.87	1.90	1.85	1.94	1.96	22.26
	건조밀도	1.43	1.55	1.54	1.52	1.59	1.59	



(a) 자연함수비



(b) 함수비 감소 시

<그림 3.2-66> 인천하상토(ML)의 성토고 및 다짐횟수에 따른 건조밀도 변화

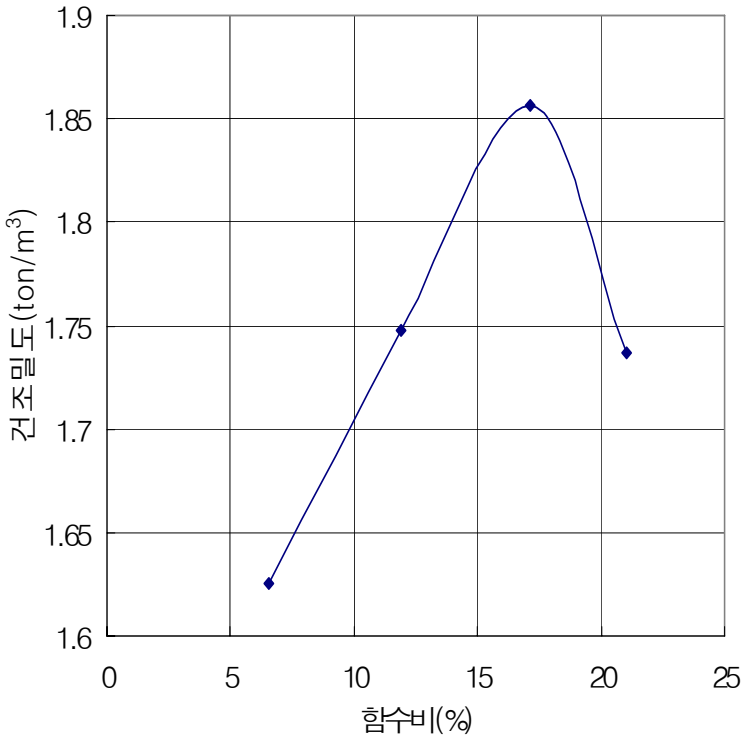
(나) 파주화강풍화토(SW)의 현장 다짐 특성

현장 화강풍화토(SW)의 현장 다짐특성은 <표 3.2-48>에서 보듯이 습윤밀도의 경우 1.77~2.20ton/m^3, 건조밀도의 경우 1.50~1.88ton/m^3, 평균함수비의 경우 17.13% 정도로 나타났다.

또한, 실내 다짐시험 결과로부터 구한 상대 다짐도는 2회 왕복 다짐 후 95% 이상으로 하천설계기준에서 요구하는 90% 다짐을 만족하는 것으로 평가되었다.

<표 3.2-48> 파주화강풍화토(SW)의 다짐특성 평가 결과

왕복다짐횟수	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	평균 함수비 (%)
습윤밀도(t/m^3)	1.77	1.87	2.02	2.02	2.15	2.20	17.13
건조밀도(t/m^3)	1.50	1.59	1.76	1.73	1.82	1.88	
상대 다짐도(%)	81%	86%	95%	93%	98%	101%	



<그림 3.2-67> 파주화강풍화토(SW)의 실내 다짐시험 곡선

(다) 혼합비율에 따른 하상혼합토(ML)의 현장 다짐 특성

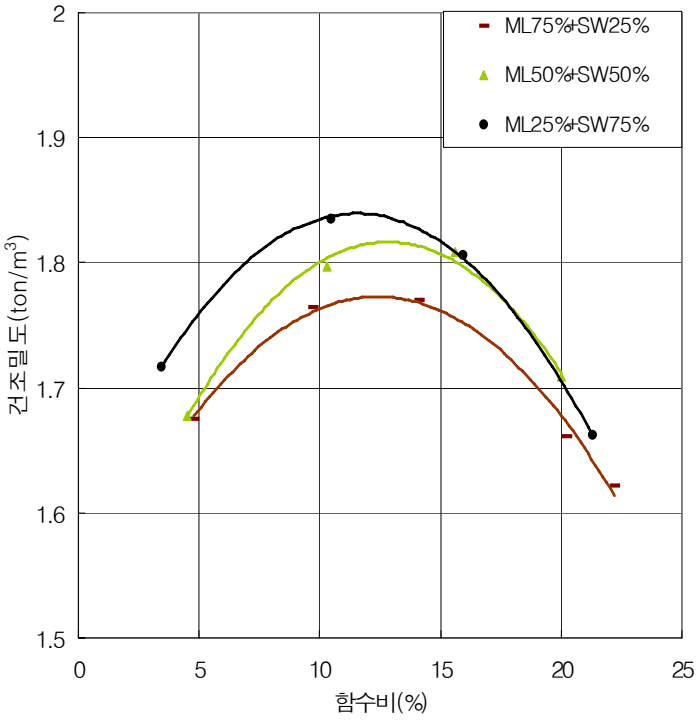
혼합비율에 따른 하상혼합토의 현장 다짐특성은 <표 3.2-49>에서 보듯이 전체적으로 습윤밀도 1.73~2.23ton/m^3, 건조밀도의 경우 1.45~1.86ton/m^3, 평균함수비의 경우 19.61~20.49% 정도로 나타났다. 또한, 실내시험결과에 의한 상대다짐도는 84.4~100.5%로 나타났으며, 2회 왕복 다짐 후 90% 이상으로 하천설계기준에서 요구하는 90% 다짐을 만족하는 것으로 평가되었다.

한편, 이러한 인천하상토(ML)의 혼합비율에 따른 현장 다짐특성 평가결과는 양질토 혼합비율 증가에 따라 양호한 다짐특성을 보이는 전술한 현풍하상토(SP)와 달리 양질토 혼합비율에 의한 영향 보다 <표 3.2-49>에서 보듯이 함수비 변화에 따른 영향이 큰 것으로 평가되었다.

따라서, 인천하상토(ML)과 같은 세립토는 현장 다짐특성 향상을 위하여 양질토 혼합 보다는 함수비 조정 공법을 통한 함수비 저감이 효과적일 것으로 판단된다. 이때, 본 현장 실험을 통한 함수비 저감 효과는 자연건조 7일 경과 후 약 5% 정도의 함수비가 저감되는 것으로 평가되었다.

<표 3.2-49> 현장 하상혼합토(ML)의 다짐특성 평가 결과(성토고 30cm, ton/m^3)

왕복다짐횟수		0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	평균 함수비 (%)
ML25% + SW75%	습윤밀도	1.87	1.96	2.08	2.13	2.06	2.23	20.49
	건조밀도	1.55	1.62	1.72	1.77	1.75	1.85	
	상대 다짐도	84%	88%	93%	96%	95%	101%	
ML50% + SW50%	습윤밀도	1.86	1.77	2.00	2.02	2.05	2.18	19.75
	건조밀도	1.57	1.45	1.72	1.71	1.72	1.76	
	상대 다짐도	86%	80%	95%	94%	95%	97%	
ML75% + SW25%	습윤밀도	1.73	2.01	1.99	2.02	1.98	2.09	19.61
	건조밀도	1.48	1.67	1.69	1.66	1.66	1.72	
	상대 다짐도	84%	94%	96%	94%	94%	97%	



<그림 3.2-68> 인천하상혼합토의 실내 다짐시험 곡선

(2) 현장 다짐에 따른 강도 특성

(가) 인천하상토(ML)의 현장 강도 특성

자연함수비 상태의 인천하상토(ML)의 강도특성은 <그림 3.2-69(a)> 에서 보듯이 5.0cm 관입시의 콘 저항치가 왕복다짐횟수에 무관하게 장비의 시공성을 위한 trackability가 확보되는 기준인 4.0kg/cm^{2}을 넘지 못하는 것으로 나타났다.

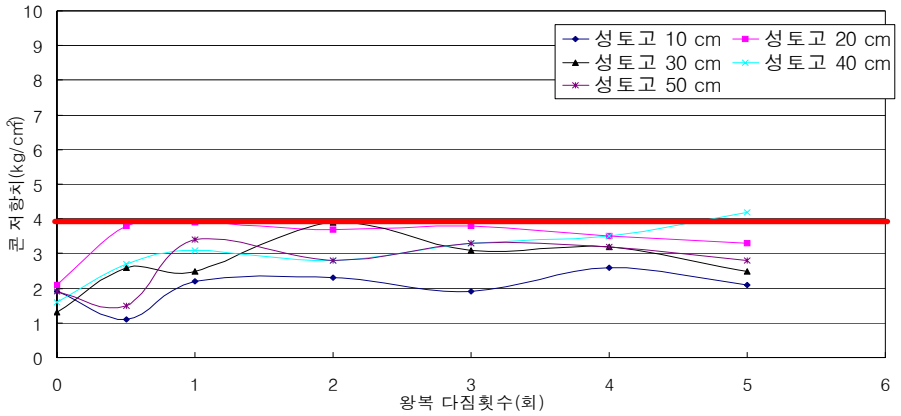
한편, 함수비 감소에 따른 인천하상토(ML)의 강도특성은 <그림 3.2-69(b)> 에서 보듯이 왕복다짐횟수 1회 이후 전체적으로 콘 저항치가 4.0kg/cm^{2}을 넘는 것으로 나타나 함수비에 따른 영향이 큰 것으로 평가되었다.

(나) 파주화강풍화토(SW)의 현장 강도 특성

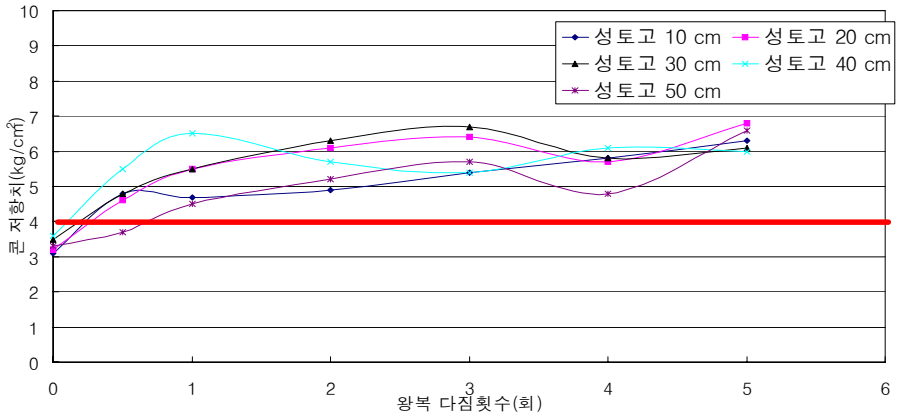
현장 파주화강풍화토(SW)의 강도특성은 <그림 3.2-69(c)>에서 보듯이 관입시의 콘 저항치가 왕복다짐횟수 0.5회 이상에서 모두 4.0kg/cm^{2}을 넘는 것으로 나타나 시공성 측면에서 아주 양호한 재료인 것으로 평가되었다.

(다) 혼합비율에 따른 하상혼합토의 현장 강도 특성

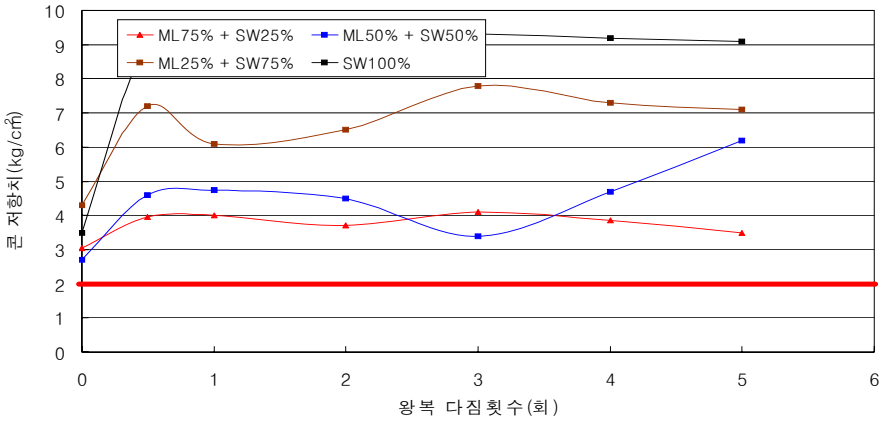
혼합비율에 따른 하상혼합토의 강도특성은 <그림 3.2-69(c)>에서 보듯이 전체 혼합비에 대해 콘 저항치가 4.0kg/cm^{2}을 넘는 것으로 나타나 시공성 측면에서 아주 양호한 재료인 것으로 평가되었으며, 양질토 혼합비 증가에 따라 콘 저항치가 증가하는 것으로 나타났다.



(a) 자연함수비



(b) 함수비 감소 시

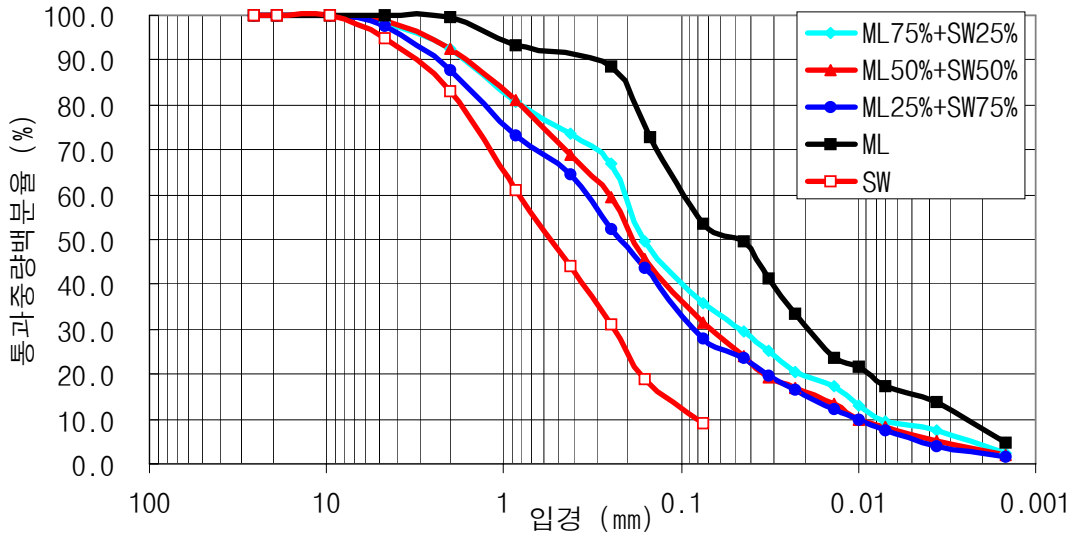


(c) 화강풍화토(SW) 및 혼합비율

<그림 3.2-69> 인천하상토(ML)의 성토고 및 다짐횟수에 따른 콘 저항치 변화

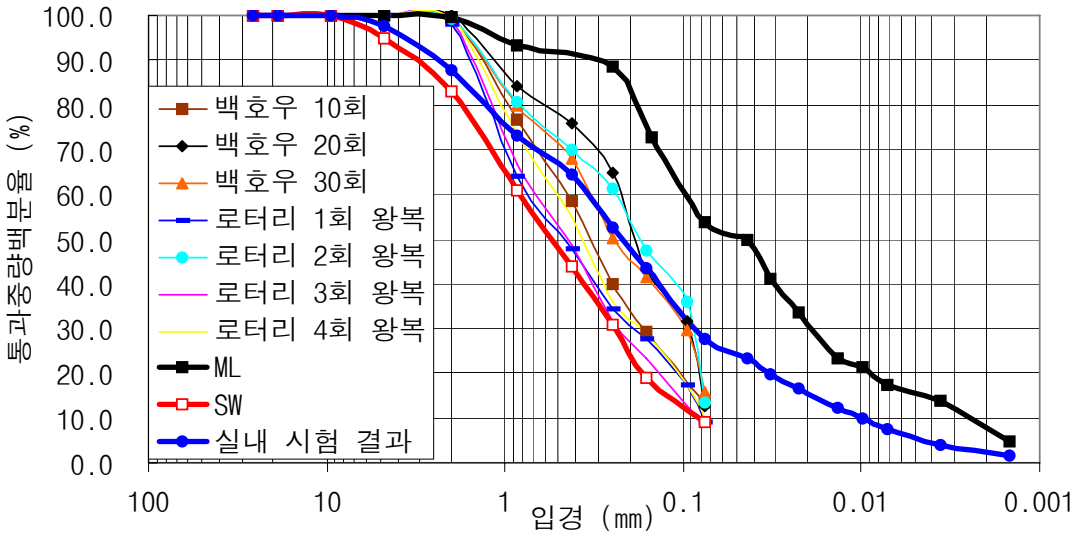
(3) 현장 혼합 특성

본 절에서는 인천하상토(ML)와 양질토인 화강풍화토(SW)의 백호우(0.6m^3) 및 로터리를 이용한 현장 혼합방법 제시하고자 실내 시험을 통한 혼합비율에 따른 입도분포곡선(<그림 3.2-70> 참조)과 각 혼합비 별 혼합부피 12m^{3}의 하상혼합토에 대한 현장 혼합횟수에 따른 입도분포 곡선을 비교하였다.

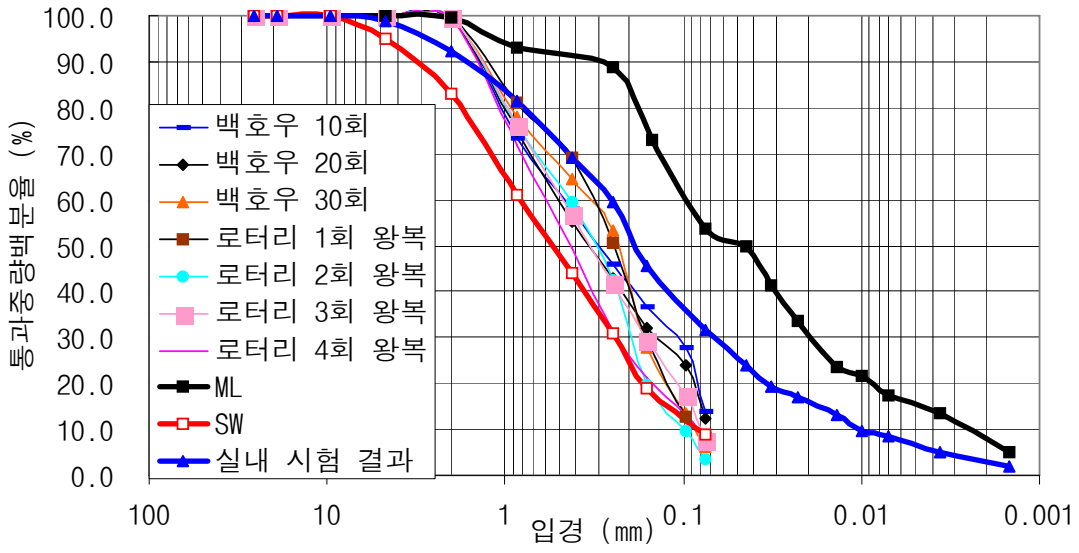


<그림 3.2-70> 실내 시험을 통한 인천하상토(ML)의 혼합비율에 따른 입도분포곡선

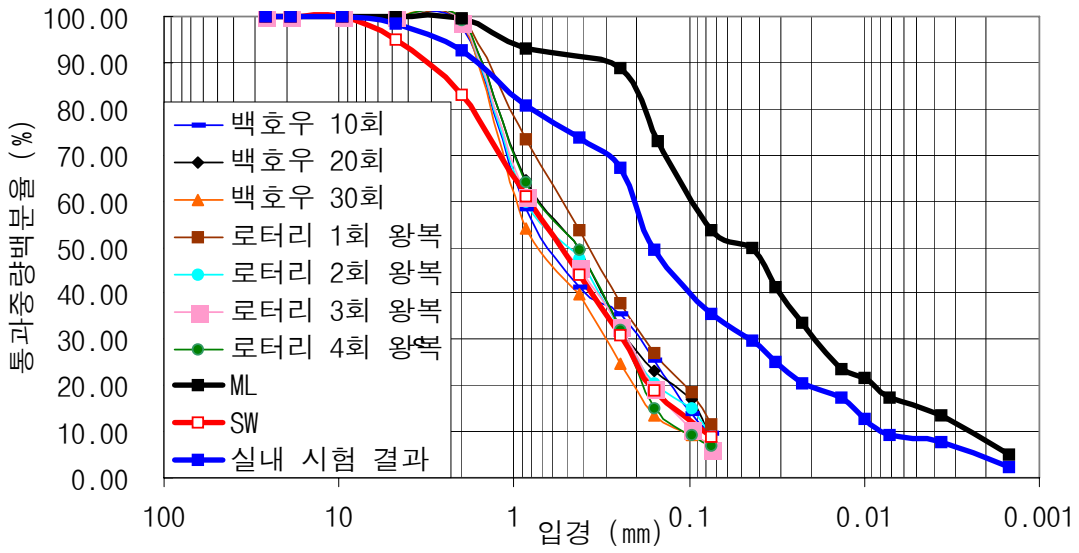
현장 혼합 특성은 12m^{3}의 하상혼합토에 대한 현장 혼합횟수에 따른 입도분포곡선을 보여주는 <그림 3.2-71>에서 보듯이 전체적으로 큰 입경의 재료 함량이 높은 것으로 나타났는데 이것은 현장 하상혼합토를 보여주는 <그림 3.2-72(c)>에서 보듯이 현장 혼합 후에도 인천하상토(ML)와 같은 세립토의 경우 양질토와 완전혼합이 되지 않고 세립토가 덩어리져 있기 때문인 것으로 판단된다.



(a) 혼합비율(ML25%+SW75%)



(b) 혼합비율(ML50%+SW50%)



(c) 혼합비율(ML75%+SW25%)

<그림 3.2-71> 인천하상토(ML)의 현장 혼합횟수에 따른 입도분포곡선



(a) 백호우를 이용한 현장 혼합



(b) 로터리를 이용한 현장 혼합



(c) 현장 혼합 후의 하상혼합토



(d) 하상혼합토 다짐 후의 모습

<그림 3.2-72> 인천하상토(ML)의 현장 혼합 장면 및 하상혼합토

라. 소결론

본 절에서는 국내 발생 하상토 중 현장에서 가장 많이 발생하는 모래(SP)와 세립토인 실트(ML)를 대상으로 원재료 및 양질토인 화강풍화토(SW)와의 혼합에 따른 현장 다짐에 따른 공학적 특성을 평가하고 백호우 등을 이용한 현장 혼합방법 제시하고자 다양한 현장 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 현풍하상토(SP)와 인천하상토(ML)의 현장 다짐 특성은 두 시료 모두 함수비 변화에 영향을 많이 받는 것으로 평가되었으며, 자연건조 조건에 따른 함수비 저하 특성은 인천하상토(ML)의 경우 7일 건조 시 약 5% 정도의 함수비 저감효과가 있는 것으로 평가되었다.

(2) 화강풍화토(SW)의 다짐특성은 현풍화강풍화토의 경우 평균함수비 14.25%, 다짐횟수 1회 왕복 이후 상대다짐도 94% 이상으로 평가되었으며, 파주화강풍화토의 경우 평균함수비 17.13%, 하천설계기준에서 요구하는 90% 다짐을 만족하는 것으로 평가되었다.

(3) 혼합비율에 따른 현장 다짐특성은 현풍하상토(SP)의 경우 화강토 혼합비율 50%의 경우 2회 왕복 다짐 후 90% 이상으로 하천설계기준에서 요구하는 90% 다짐을 만족하는 것으로 평가되어 양질토 혼합에 따른 다짐 특성 향상 특성을 보였으나, 인천하상토(ML)의 경우 혼합비율에 따른 다짐특성 향상보다 함수비 저하에 따른 다짐 특성 향상이 우세한 것으로 평가되었다.

(4) 자연함수비 상태의 하상토의 강도특성은 실험 조건 중 상대적으로 낮은 함수비 상태에서 현풍하상토(SP)의 경우 왕복다짐횟수 3회 이상에서, 인천하상토(ML)의 경우 왕복다짐횟수 1회 이상에서 장비의 시공성을 위한 장비운행성이 확보되는 기준인 4.0kg/cm^{2}을 넘는 것으로 나타났으며, 함수비 증가 시 전체적으로 콘 저항치가 4.0kg/cm^{2}을 넘지 않아 함수비에 따른 영향이 큰 것으로 평가되었다.

(5) 혼합비율에 따른 하상혼합토의 강도특성은 현풍하상토(SP)의 경우 양질토 혼합비 50% 이상, 인천하상토(ML)의 경우 전체 혼합비에서 왕복다짐횟수 1회 이상 다질 경우 4.0kg/cm^2을 넘는 것으로 나타나 시공성 측면에서 양호한 재료인 것으로 평가되었으나, 현풍하상토(SP) 혼합비율 75%의 경우 왕복다짐횟수 3회 이상에서 4.0kg/cm^2을 넘는 것으로 나타나 시공성을 확보하기 위해서는 최소한 3회 이상 다짐을 하여야 할 것으로 평가되었다.

(6) 12m^3의 하상혼합토에 대한 현장 혼합 특성은 현풍하상토(SP)의 경우 백호우를 이용한 현장 혼합횟수 5회 혼합 이후 실내 시험 결과와 유사한 입도분포 특성을 보였으며, 현장조건을 고려할 경우 10회 이상 혼합하는 것이 바람직할 것으로 평가되었으며, 인천하상토(ML)의 경우 세립토의 점착력에 의해 덩어리지는 현상이 나타나 완전 혼합은 어려운 것으로 평가되었다.

(7) 모래(SP)와 세립토인 실트(ML)를 대상으로 수행한 다양한 현장 시험결과 조립토인 현풍하상토(SP)의 경우 양질토 혼합 시 다짐 및 강도 특성이 향상되는 결과를 얻었으며, 현장 혼합효과 역시 상대적으로 우수한 것으로 평가되었으나, 인천하상토(ML)의 경우 양질토 혼합에 의한 영향 보다 오히려 함수비 변화에 따른 영향이 큰 것으로 평가되었다.

6. 하상혼합토의 제체 침투에 대한 안정성 평가

조립토인 모래(SP)는 국내 발생 하상토 중 가장 많은 발생량을 차지하는 재료이며, 일반적으로 모래(SP)는 투수에 대한 저항성이 불량하여 제체 재료로 부적절한 것으로 여겨진다. 그러나, 낙동강 일대 제방 재료는 전술한 바와 같이 하상토와 동일한 모래(SP)인 것으로 평가되어 제체 침투에 대한 안정성 평가를 필요로 한다.

본 절에서는 국내 발생 하상토 및 전술한 혼합비율에 따른 하상혼합토의 제체 재료로서의 적합성 평가를 위하여 하천설계기준(2005)의 제체 표준단면을 이용한 축소 모형시험과 수치해석을 통하여 침투에 대한 안정성 평가를 수행하고자 한다.

가. 침투모형실험

(1) 모형실험 개요

본 실험은 투수저항성이 불량한 모래(SP)를 제체 재료로 사용하였을 경우에 대한 제체 내의 침투특성을 파악하기 위한 것으로, 제체 하부 기초지반은 상대적으로 투수저항성이 큰 화강풍화토(SM)을 사용하여 기초지반으로의 침투를 방지하였다.

침투모형실험에 사용된 모형토조는 <그림 3.2-73>에서 보듯이 $310^{cm}\times96^{cm}\times50^{cm}$ 크기의 철제 박스를 이용하였으며, 박스의 전면은 투명아크릴을 이용하여 제체 형상 및 실험 중 거동 특성을 관찰할 수 있도록 하였다. 모형토조실험에 사용된 주요 장비로는 데이터 수집을 위한 데이터 로거 및 컴퓨터, 간극수압 측정을 위한 간극수압계로 구성되어 있다(<그림 3.2-74> 참조).

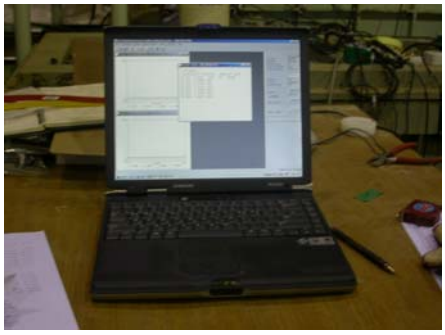
모형실험에 적용한 제방 축소모형은 <그림 3.2-75>에서 보듯이 높이 12cm, 둑마루 폭 12cm, 제체 경사 1:3의 단면으로 제작하였으며, 앞서 언급하였듯이 제체재료의 경우 하상토 모래(왜관하상토-1, SP), 기초지반의 경우 화강풍화토(SM)를 사용하여 실험 중 기초 지반으로의 침투를 방지하였다.

제체 내 간극수압계 설치는 제방 중앙 하부를 중앙부 1개소, 제외지 쪽으로 10cm 이격하여 1개소, 제내지 방향으로 각 10cm 이격하여 3개소를 설치하였고, 수위조건을 측정하기 위하여 제외지 방향 앞비탈 기슭에서 20cm 이격하여 1개를 설치하여 총 6개소를 설치하였다(<그림 3.2-75(a)> 참조). 한편, 모형실험에 적용된

수위조건은 <그림 3.2-75(b)>에서 보듯이 1시간에 걸쳐 최대 수위 10cm로 증가하고, 이후 최대 수위 10cm를 유지하도록 하였다.



<그림 3.2-73> 모형토조



(a) 계측용 컴퓨터

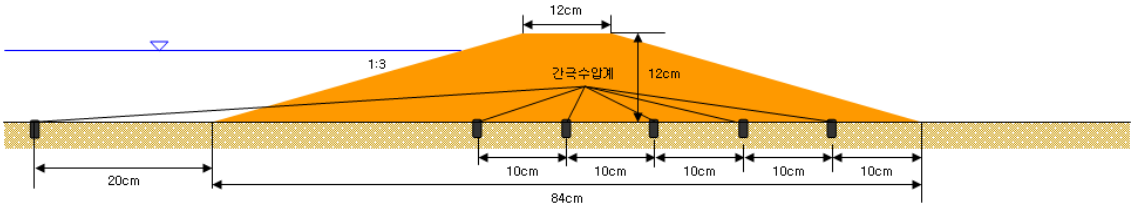


(b) 데이터 로거

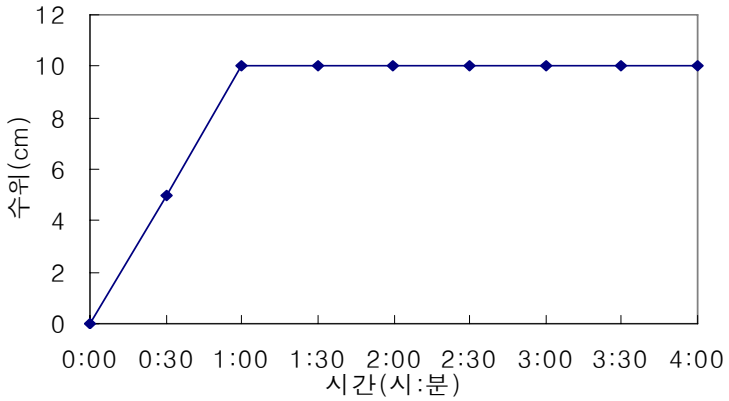


(c) 간극수압계

<그림 3.2-74> 주요 시험장비

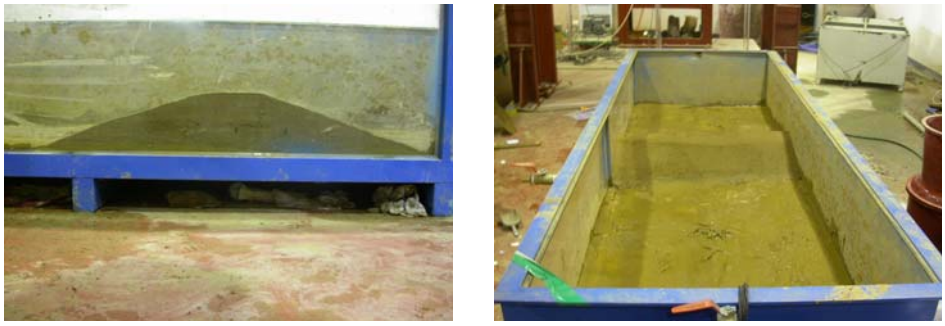


(a) 모형실험 단면

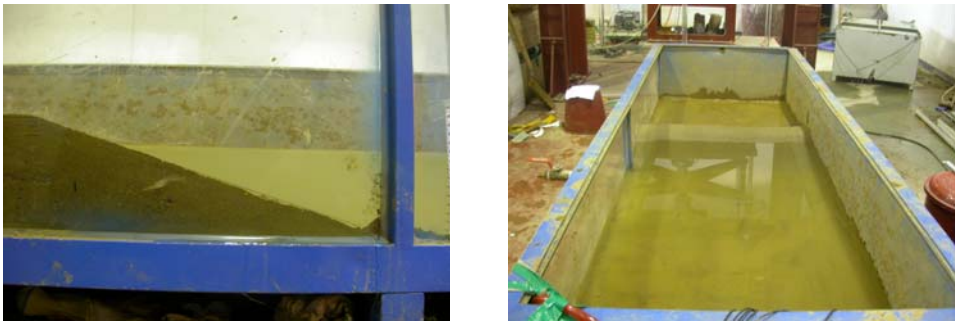


(b) 수위 조건

<그림 3.2-75> 모형실험 단면 및 수위 조건



(a) 제체 조성 완료 후 모습



(b) 제체 조성 후 제외지 수위 10cm 유지

<그림 3.2-76> 제체 조성 및 제외지 수위 조절

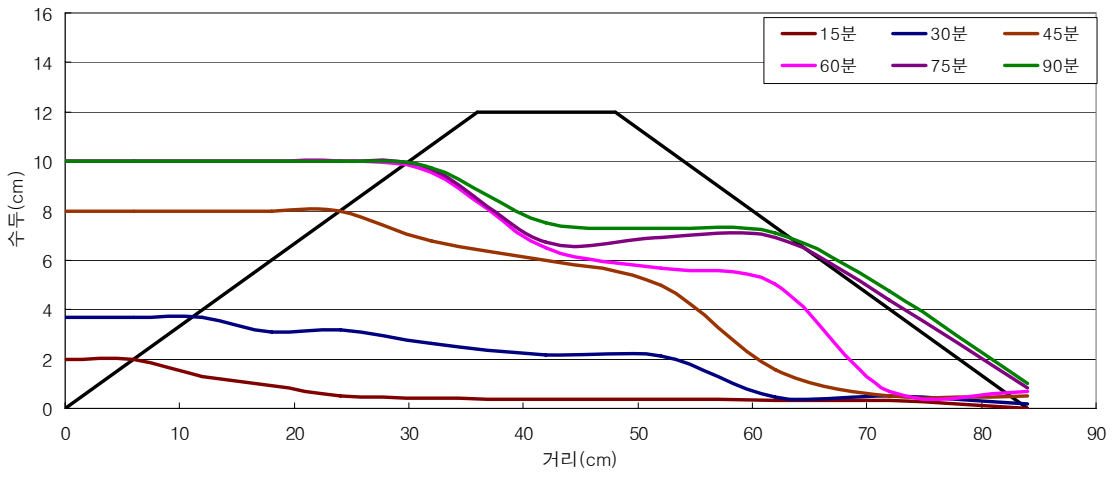
(2) 모형실험 결과

모형실험에 적용된 수위조건은 앞서 언급하였듯이 1시간에 걸쳐 최대 수위 10cm로 증가하고, 이후 최대 수위 10cm를 유지하는 조건으로 홍수 시 수위가 올라가고 일정기간 최대 홍수위가 지속되는 비정상수위조건을 적용하였다.

모형실험 결과는 시간경과에 따른 간극수압 및 수두 변화를 보여주는 <표 3.2-50>에서 보듯이 제체 내 간극수압 및 수두는 경과시간 60분에 걸쳐 최대 수위에 도달하는 수위조건에 따라 점차 상승하고, 최대 수위 도달 이후 계속 상승하여 경과시간 75분(최대 수위 지속시간 15분)에 제체 누수가 발생하는 것으로 나타나 제체 침투만을 고려할 경우 모래(SP)는 제체 재료로 부적절한 것으로 평가되었다.

<표 3.2-50> 시간 경과에 따른 간극수압 및 수두 변화(제체 중앙부)

경과 시간(분)	간극수압(ton/m^2)	수두(cm)
15분	3.6×10^{-3}	0.4
30분	2.3×10^{-3}	2.2
45분	6.0×10^{-3}	6.0
60분	6.5×10^{-3}	6.5
75분	6.7×10^{-3}	6.7
90분	7.5×10^{-3}	7.5



<그림 3.2-77> 모형시험을 통한 시간경과에 따른 제체 내 수두변화

나. 모형 단면을 이용한 수치해석

(1) 수치해석 개요

침투해석은 약 760 여 개의 치밀한 4절점 평면요소로 이루어진 유한요소망을 이용하였다. 수치해석에 이용된 프로그램은 스위스 ZACE 사에서 개발된 지반과 관련된 흙과 암반, 지중 구조물, 굴착, 흙-구조물 상호 작용과 지하의 흐름의 수치해석적 시뮬레이션 등에 주로 적용되는 지반전용 해석 프로그램인 Z-SOIL 프로그램 사용하여 수행하였다.

침투해석은 단면 및 수위 조건을 모형실험과 동일하게 설정하여 수행하였으며, 메쉬의 크기는 제체 높이의 1/10 이하인 가로 1cm, 세로 1cm로 설정하였으며, 해석에 사용된 각 지반의 투수계수는 앞서 수행된 실내 실험 자료를 사용하였으며, 기타 물성치는 대표적인 값을 이용하였다.

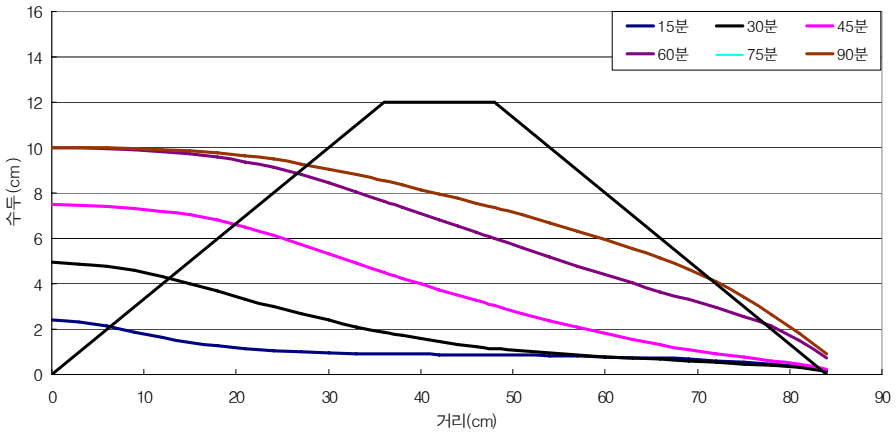
<표 3.2-51> 해석에 이용된 지층구성 및 지반 물성치

재 료	탄성계수 (E, t/m^2)	단위중량 (γ_t, t/m^3)	간극비 (e)	투수계수 (cm/sec)	점착력 (c, t/m^2)	내부마찰각 (ϕ,°)
제체(SP)	3,500	1.7	0.5	4.85×10^{-2}	0.06	34.1
기초(SM)	5,000	1.9	0.43	3.05×10^{-5}	0.62	31.4

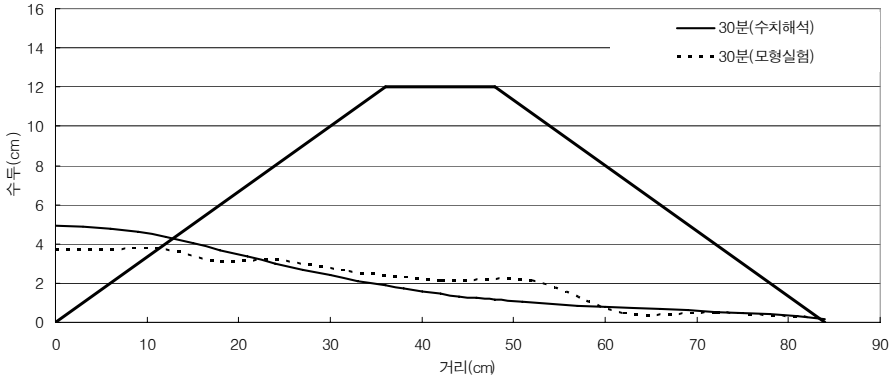
(2) 수치해석 결과

해석결과는 수치해석을 통한 시간경과에 따른 제체 내 수두변화를 보여주는 <그림 3.2-78>에서 보듯이 앞서 수행한 모형시험 결과와 마찬가지로 경과시간 60분에 걸쳐 최대 수위에 도달하는 수위조건에 따라 점차 상승하고, 최대 수위 도달 직후인 경과시간 60분에 제체 누수가 발생하는 것으로 나타났다.

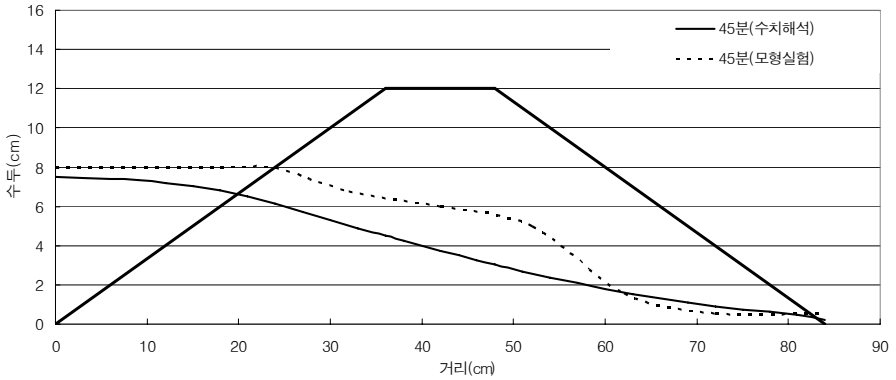
수치해석 결과는 시간경과에 따른 모형실험 결과와 수치해석 결과의 비교를 보여주는 <그림 3.2-79>에서 보듯이 시간 경과에 따라 모형실험결과가 다소 차이가 나타났으나 전체적인 경향은 일치되는 것으로 평가되었다.



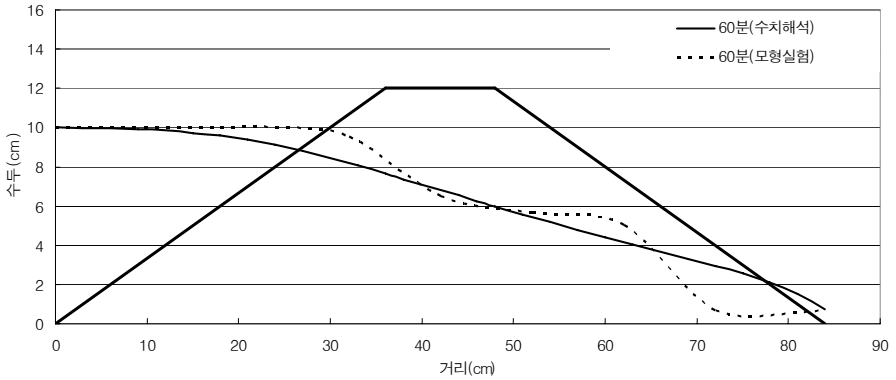
<그림 3.2-78> 수치해석을 통한 시간경과에 따른 제체 내 수두변화



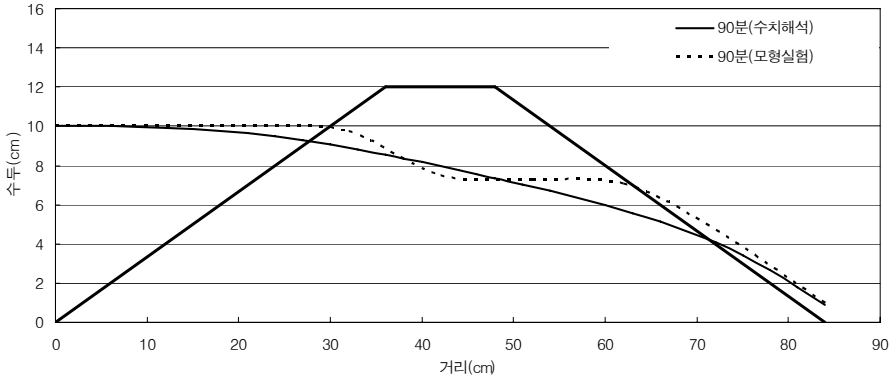
(a) 30분 경과 후



(b) 45분 경과 후



(c) 60분 경과 후



(d) 90분 경과 후

<그림 3.2-79> 시간경과에 따른 모형실험결과와 수치해석결과의 비교

다. 하상혼합토 이용 축조제방의 안정성 평가

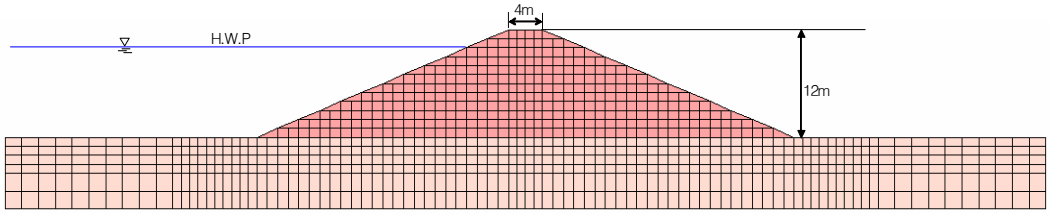
(1) 수치해석 개요

해석에 이용된 단면은 제체 높이 12.0m, 둑마루 폭 4.0m, 제체 경사 1:3의 단면으로 설정하였으며, 제체 재료는 모형실험에 사용된 모래(SP), 화강풍화토(SM), SP25%+SM75%, SP50%+SM50%, SP75%+SM25%로 혼합한 재료를 이용하였다. 이때 기초지반의 경우 투수저항성이 크도록(1.0×10^{-7}cm/sec) 설정한 화강풍화토(SM)를 사용하여 실험 중 기초 지반으로의 침투를 방지하였다.

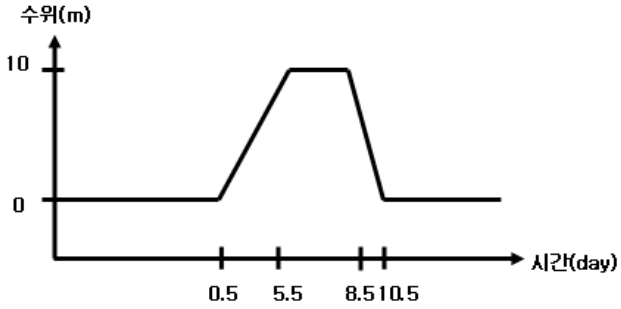
침투해석에 적용된 수위 조건은 평수위 지속시간 10시간, 평수위에서 5일에 걸쳐

최대수위에 도달한 후 3일의 지체시간을 거쳐 2일 동안에 평수위로 돌아오는 비정상 수위조건을 적용하였다.

한편, 해석에 이용된 메쉬 크기는 제체 높이의 1/10 이하인 가로 1m, 세로 1m로 설정하였으며, 해석에 사용된 각 지반의 투수계수 및 기본 물성치는 앞서 수행된 실내 실험 자료를 사용하였으며, 기타 물성치는 대표적인 값을 이용하였다(<그림 3.2-80> 및 <표 3.2-52> 참조).



(a) 침투해석 단면



(b) 적용 수위조건

<그림 3.2-80> 실물 침투해석 단면 및 수위조건

<표 3.2-52> 해석에 이용된 지층구성 및 지반 물성치

재 료		탄성계수 (E, t/m^2)	단위중량 (γ_t, t/m^3)	간극비 (e)	투수계수 (cm/sec)	점착력 (c, t/m^2)	내부마찰각 (ϕ, °)
제체	SP	3,500	1.70	0.5	4.85×10^{-2}	0.06	34.1
	SP25%+SM75%	5,000	1.87	0.4	7.98×10^{-5}	0.55	32.1
	SP50%+SM50%	4,000	1.94	0.4	1.02×10^{-4}	0.34	32.8
	SP25%+SM75%	4,000	1.95	0.4	9.00×10^{-3}	0.21	33.4
	SM	5,000	1.85	0.4	3.05×10^{-5}	0.62	32.1
기초(SM)		5,000	1.9	0.43	1.0×10^{-7}	0.5	30.0

(2) 수치해석 결과

하상혼합토를 이용하여 축조된 제방의 안정성 평가는 혼합비에 따른 제체 사면 안정성평가, 제체 침투에 따른 제체내 포화영역의 변화, 제체 선단부의 유속벡터의 변화를 통해 평가하였다.

사면안정성평가 결과는 하상혼합토 혼합비에 따른 사면안정 해석결과를 보여주는 <표 3.2-53>에서 보듯이 제체 재료 SP의 경우 수위가 상승 중인 4일 째에 사면안전율이 1.1로 불안정한 것으로 평가되었으며, SP75%+SM25%의 경우 최대수위 도달 후 최대수위 지속시간 3일 째인 경과시간 8일에서 사면안전율이 1.2로 불안정한 것으로 평가되었다. 그 외의 제체 재료의 경우 사면의 안정성이 가장 떨어질 것으로 예상되는 최대수위 지속시간 3일 째인 경과시간 8일에서 안전율 2.0 이상으로 안정한 것으로 평가되었다. 이때, 각 혼합비에 따른 하상혼합토로 축조된 제방의 예상파괴면은 <그림 3.2-81>에서 보듯이 제체 사면 내 파괴가 발생하는 것으로 평가되었다.

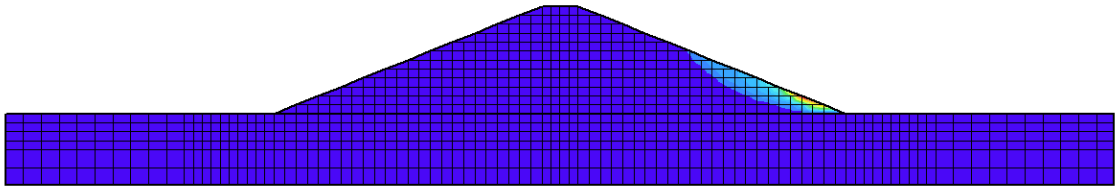
제체 선단부에서 검토한 유속벡터는 <표 3.2-53>에서 보듯이 사면안정해석결과와 마찬가지로 제체 재료 SP, SP75%+SM25%에서는 각각 2.8×10^{-2}, 3.7×10^{-3}로 다른 경우에 비해 1,000배 이상 크게 나타나 상대적으로 제체 누수의 위험성이 있을 것으로 판단된다.

해석결과에 따른 포화영역은 제체 재료에 따른 침투속도 벡터와 포화영역 변화를 보여주는 <그림 3.2-82> 및 <그림 3.2-83>에서 보듯이 제체 재료 SP, SP75%+SM25%의 경우 정상침투상태의 포화영역이 발생하는 반면에 상대적으로 제체 재료의 투수저항성이 큰 SP50%+SM50%, SP25%+SM75%, SM의 경우 제체 침투가 거의 발생하지 않는 것으로 평가되었다.

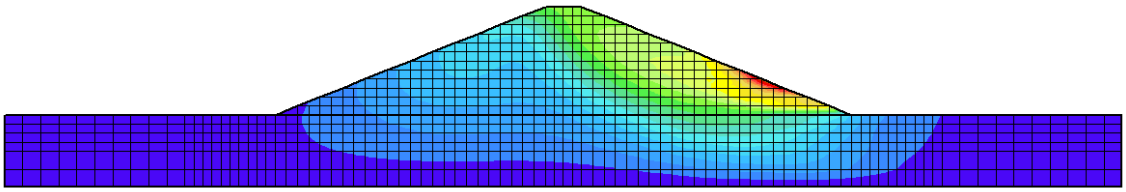
본 해석결과를 종합하면 제체 재료 SP, SP75%+SM25%인 경우 사면안정성이나 제체 침투에 취약하며, SP50%+SM50%, SP25%+SM75%, SM의 경우 상대적으로 안정성이 확보되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 하상혼합토를 이용하여 제방을 축조할 경우 하상토(SP)와 양질토(SM)의 혼합비는 SP:SM이 25:75 이상의 것을 사용하여야 할 것으로 판단된다.

<표 3.2-53> 해석결과에 따른 사면안정성 및 유속벡터

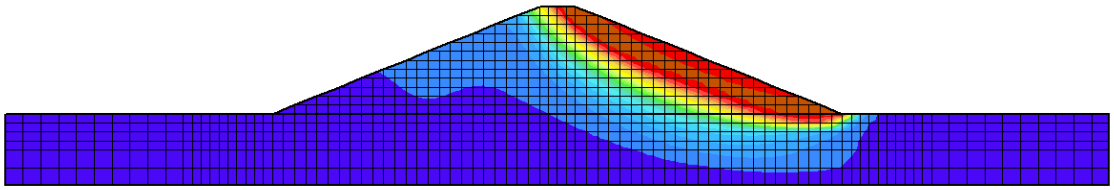
제체 재료	사면안정성		유속벡터(cm/sec)	
	안전율(FS)	경과시간(일)	Vx	Vy
SP	1.1	4	2.8×10^{-2}	7.3×10^{-6}
SP75%+SM25%	1.2	8	3.7×10^{-3}	1.0×10^{-5}
SP50%+SM50%	2.0 이상	8	1.5×10^{-6}	3.9×10^{-7}
SP25%+SM75%	2.0 이상	8	8.9×10^{-7}	2.5×10^{-7}
SM	2.0 이상	8	1.9×10^{-7}	3.6×10^{-8}



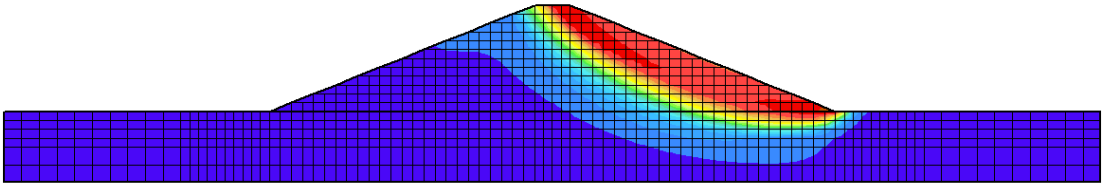
(a) 제체 재료 SP



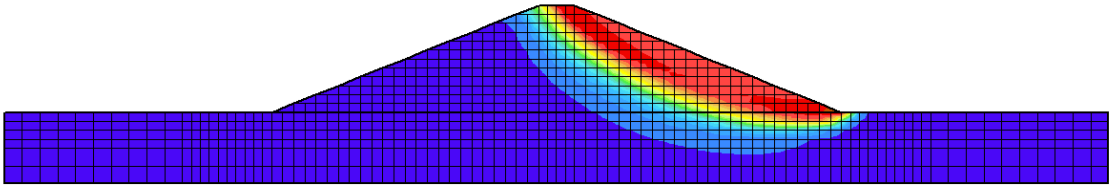
(b) 제체 재료 SP75%+SM25%



(c) SP50%+SM50%

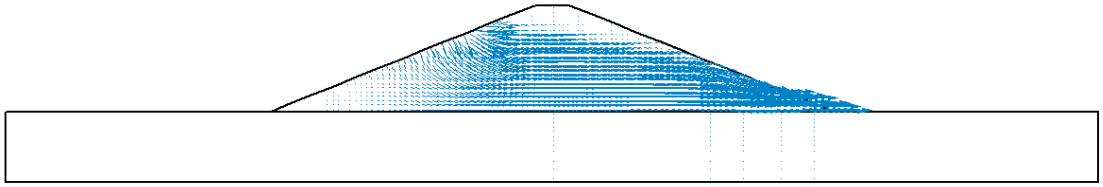


(d) SP25%+SM75%

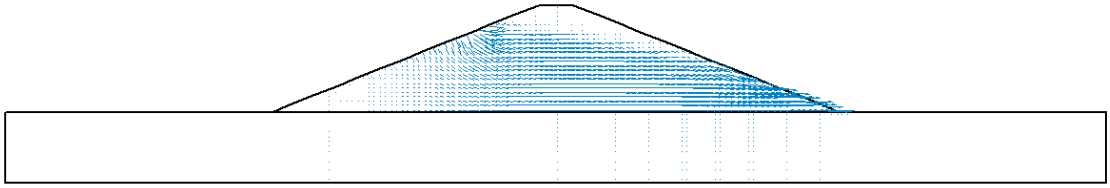


(e) SM

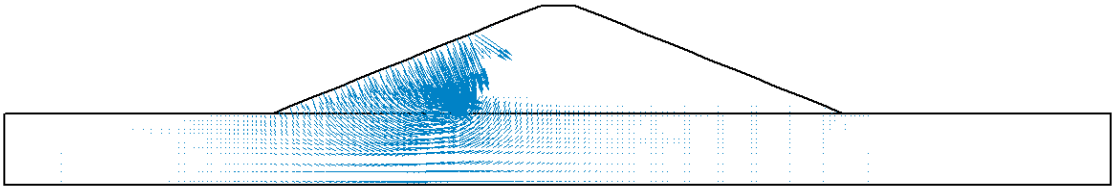
<그림 3.2-81> 제체 재료에 따른 사면안정해석결과



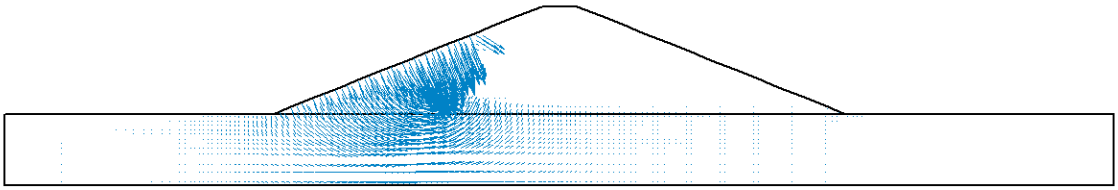
(a) 제체 재료 SP



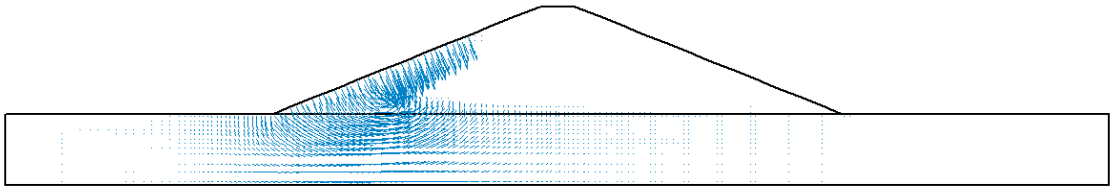
(b) 제체 재료 SP75%+SM25%



(c) SP50%+SM50%

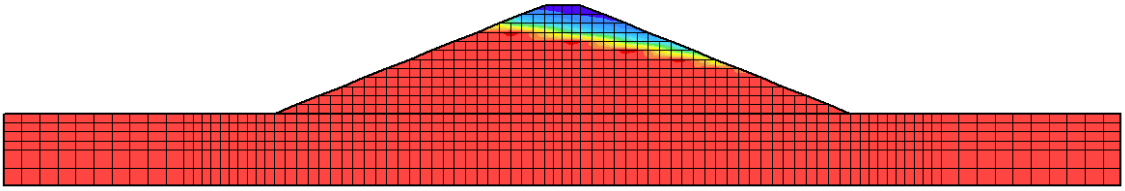


(d) SP25%+SM75%

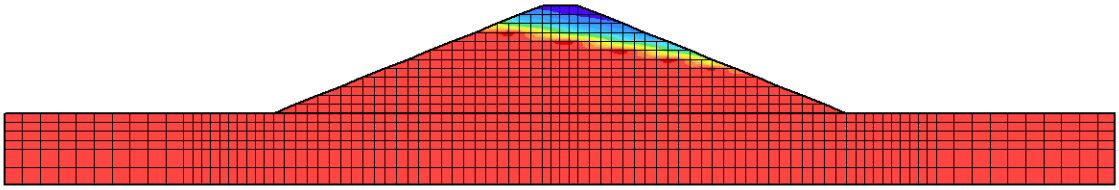


(e) SM

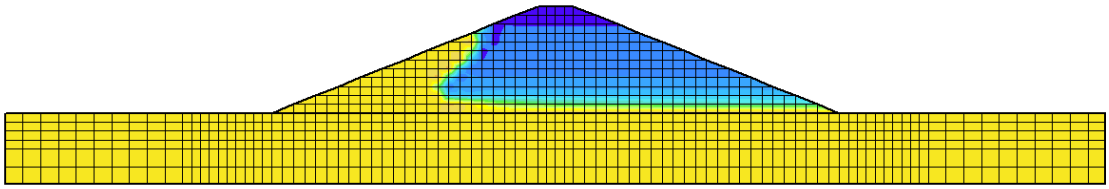
<그림 3.2-82> 제체 재료에 따른 유속벡터 변화(수위 지속시간 8일 째)



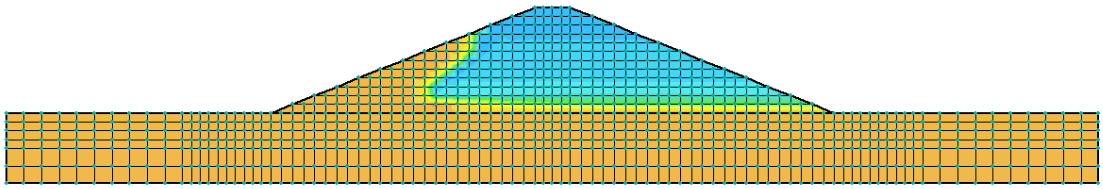
(a) 제체 재료 SP



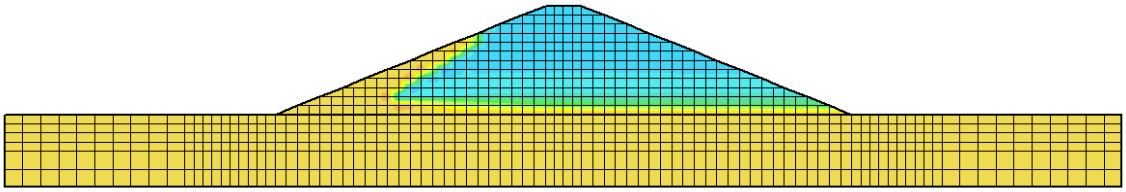
(b) 제체 재료 SP75%+SM25%



(c) SP50%+SM50%



(d) SP25%+SM75%



(e) SM

<그림 3.2-83> 제체 재료에 따른 포화도 변화(수위 지속시간 8일 째)

라. 소결론

본 절에서는 국내 발생 하상토 및 혼합비율에 따른 하상혼합토의 제체 재료로서의 적합성 평가를 위하여 하천설계기준(2005)의 제체 표준단면을 이용한 축소 모형시험과 모형 및 실물에 대한 수치해석 등 제방 안정성 평가를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 제체 재료 모래(SP)를 이용한 축소모형실험 결과를 통한 제체 내 간극수압 및 수두는 경과시간 60분에 걸쳐 최대 수위에 도달하는 수위조건에 따라 점차 상승하고, 최대 수위 도달 이후 계속 상승하여 경과시간 75분(최대 수위 지속시간 15분)에 제체 누수가 발생하는 것으로 나타나 제체 침투만을 고려할 경우 모래(SP)는 제체 재료로 부적절한 것으로 평가되었다.

(2) 모형실험 조건을 이용한 수치해석 결과는 모형시험결과와 마찬가지로 경과시간 60분에 걸쳐 최대 수위에 도달하는 수위조건에 따라 점차 상승하고, 최대 수위 도달 직후인 경과시간 60분에 제체 누수가 발생하는 것으로 나타나 모형실험결과 전체적인 경향은 일치되는 것으로 평가되었다.

(3) 하상혼합토의 혼합비에 실단면 수치해석 결과 제체 재료 SP, SP75%+SM25%인 경우 사면안정성이나 제체 침투에 취약하며, SP50%+SM50%, SP25%+SM75 %, SM의 경우 상대적으로 안정성이 확보되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 하상혼합토를 이용하여 제방을 축조

할 경우 하상토(SP)와 양질토(SM)의 혼합비는 SP:SM이 25:75 이상의 것을 사용하여야 할 것으로 판단된다.

7. 하상토 부존량 파악을 위한 물리탐사기법

현재 하상 퇴적층 조사를 위한 수상물리탐사법으로는 전기비저항탐사나 음파를 이용한 반사법탐사가 일반적으로 적용되고 있으나 이러한 탐사법은 각각 분해능과 수심의 제한이라는 한계를 가지고 있다. 즉 전기비저항탐사는 하상토의 퇴적두께를 파악하는 분해능에 한계가 있으며 음파를 이용한 반사법탐사는 수심이 5 m 이내일 경우 장비의 운용이 어려우며 하저면에서의 강한 다중반사파로 인해 실제 퇴적층의 반사파를 판별해내기 힘들다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 여러 수상 지구물리탐사법중 하상토의 부존량 및 분포양상을 파악하는데 효과적일 것으로 예상되는 지하투과레이다탐사(GPR: Ground Penetrating Radar), 굴절법탄성파탐사 및 음파탐사법을 대상으로 각 물리탐사기법의 특성 및 다양한 하천특성을 고려한 현장 적용 가능성을 평가하였다.

가. 수상물리탐사기법 특성

일반적인 육상물리탐사에 비해 바다나 하천을 대상으로 하는 수상물리탐사법은 물이 지반을 피복하고 있다는 특수성으로 인해 탐사장비의 특성이나 운용법 및 자료해석법에 많은 차이가 있다. 이러한 수상물리탐사법은 1900년대 들어 주로 석유자원 조사를 위한 해상 탄성파탐사 기법을 중심으로 발달되어 왔으며 현재에도 석유 및 가스하이드레이트, 망간 등의 고부가가치 광물자원의 탐지를 위한 정밀 3차원 물리탐사법이 국외에서 활발하게 개발 및 적용되고 있다.(Anderson and Longacre, 2002; Stepler et al., 2004; van Mastrigt et al., 2002). 이러한 해양 자원탐지를 위한 수상물리탐사법은 크게 레이다와 같은 전자파를 송신원으로 하는 전자탐사(Key et al., 2004; Nielsen et al., 2003; Zhdanov et al., 2004)와 음파나 수중진동파와 같은 탄성파를 송신원으로 하는 탄성파탐사(DeAngelo et al., 2003; Ecker et al., 2000; Rodriguez and Stewart, 2000)로 크게 구분되며 탄성파탐사가 주로 적용되고 있다.

해양 자원 탐지나 지각구조 규명을 위한 탄성파탐사는 그 규모가 방대하여 막대한 비용이 소요되므로 국내에서는 제한적인 범위에서 시행되고 있으며 국외에 비해 적용사례가 많지 않다(김한준 외, 2003; 장성형 외, 2001). 그러나 교량 건설시

교각기초 지반조사를 위한 하상에서의 물리탐사는 현재 국내에서 매우 활발하게 적용되고 있으며, 적용 빈도나 기술 수준이 선진국 수준에 근접해 있다고 할 수 있다. 국내 하상물리탐사법은 크게 레이다를 이용한 전자탐사, 전류를 이용한 전기비저항탐사 및 화약이나 음원을 이용한 굴절법 및 반사법 탄성파탐사가 주로 적용되고 있으며(김정호 외, 2002; 이호영 외, 2002; 정호준 외, 2002; 차성수 외, 2002), 적용빈도는 탄성파탐사가 가장 높으며 GPR탐사와 같은 전자탐사의 적용빈도도 높다. 최근 들어 보다 다양한 주파수 범위의 탄성파 및 전자파를 발진원으로 하는 여러 종류의 수상물리탐사법이 개발되고 확대 적용되고 있는 상태이다.

(1) 수상물리탐사법의 종류

일반적으로 하상 퇴적층이나 단층대 및 연약대 조사와 같은 지질구조의 파악을 위한 수상물리탐사법은 음파와 탄성파를 발진원으로 사용하는 다양한 탐사법을 포함하고 있다(<표 3.2-54> 참조). 그러나 음파 또한 넓은 의미로 본다면 탄성파의 한 종류로 볼 수 있으므로 수상물리탐사법은 거의 대부분 탄성파를 발진원으로 사용한다고 볼 수 있다.

<표 3.2-54> 수상물리탐사의 탐지 대상 및 적용법(Yuzuru, 2002)

탐지대상	탐사목적	탐사법
지질	지질구조	음파탐사 탄성파탐사 중력탐사
	토질/지질	시추 토양채취 물리검층
	이상체	자력탐사
하저면	하저지형	Echo sounding 다중빔탐사
	하저스캔	Side-scan sonar ROV(Video・Camera)
Navigation	측지	GPS Radio Navigation
환경인자	기상/수질	수질샘플채취 유속검층

이와 같은 수상탄성파탐사법은 대상 지역의 수심이나 가탐심도 및 분해능 등을 고려하여 최적의 발진장치를 결정해야하며 그에 따른 다양한 탐사법 및 해석법이 존재한다. 각 발진원별 수상물리탐사법의 적용수심 및 가탐심도 등의 특성은 <표 3.2-55>와 같다. 이러한 탄성파탐사법 외에 전자기파와 전류를 에너지원으로 이용하는 레이다탐사법(GPR)이나 비저항탐사법도 수상에서 널리 적용되고 있다.

(2) 수상물리탐사법 적용성 분석

일반적으로 발진원의 주파수가 높을수록 분해능은 증가하나 투과심도나 가탐심도는 감소하게 된다. 또한 발진장비의 규모 및 파동의 반사 및 굴절에 따라 적용수심이 달라지게 되므로 이 모든 것을 고려하여 조사 대상에 알맞은 탐사법을 선택해야 한다. <표 3.2-55>의 다양한 수상물리탐사법은 주로 수심이 5 m 이상 되는 하천이나 해상에서 적용되고 있는 방법으로 본 연구대상과 같이 수심이 매우 낮은 건기의 하천에서는 장비의 운용이 불가능하므로, 현실적으로 적용이 가능한 전기비저항탐사와 GPR탐사 및 굴절법탄성파탐사를 중심으로 적용성을 분석하고자 한다.

<표 3.2-55> 수상물리탐사 장비 특성

발진원	발진원리	발진장치	적용수심	가탐심도	분해능	투과심도
전자파	전파	Radar	0~20m	5m	High	Shallow
탄성파	자기 압력	Sonoprobe	5~100m	30m	↓	↓
	전기 압력	Sea bottom Profiler	3~50m	20m		
		Sub-bottom Profiler	5~100m	30m		
		Chirp sonar	5~3000m	30m		
		Bubble pulser	5~300m	50m		
	전자기 압력	Boomer	5~300m	50m		
	전기 스파크	Sparker	5~1000m	300m		
	압축공기	Air gun	10~3000m	2000m		
		Water gun	10~3000m	2000m	Low	Deep

현재 국내외 하상에서 지질구조 파악을 목적으로 활발히 적용되고 있는 하상 전

기비저항탐사는 경제성이 높고 가탐심도가 크나 분해능이 낮아 주로 넓은 지역의 단층대나 연약대 파악에 이용되므로 하상토의 부존량을 보다 정밀히 산정하는데 한계가 있다. 또한 레이다를 이용한 GPR탐사는 분해능이 가장 높으나 물에 의한 전자파의 감쇠가 심해 수심이나 퇴적층이 깊을 경우 적용성이 떨어지고 음파를 이용한 반사법탄성파탐사는 장비 규모가 크고 수면과 하저면 사이의 다중반사파 간섭현상으로 인해 수심이 10m 이내인 경우 적용이 어려우므로 본 연구에서는 적용성이 떨어진다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 조사대상지역의 수심 및 퇴적층의 개략적인 두께를 고려하여 탐사법을 선정하되, 수심의 영향을 덜 받고 가탐심도와 분해능도 비교적 뛰어난 굴절법탄성파탐사를 3차원 형태로 적용하며 부분적으로 GPR탐사를 병행하여 해석의 정밀도를 높이고자 한다. 또한 수심의 제한으로 인해 직접 적용이 어려우나 대규모 하상 퇴적층 조사를 위해 널리 쓰이고 있는 음파탐사의 적용사례도 분석하고자 한다.

나. 하상토 조사 물리탐사기법 및 사례분석

(1) 지하투과레이다탐사

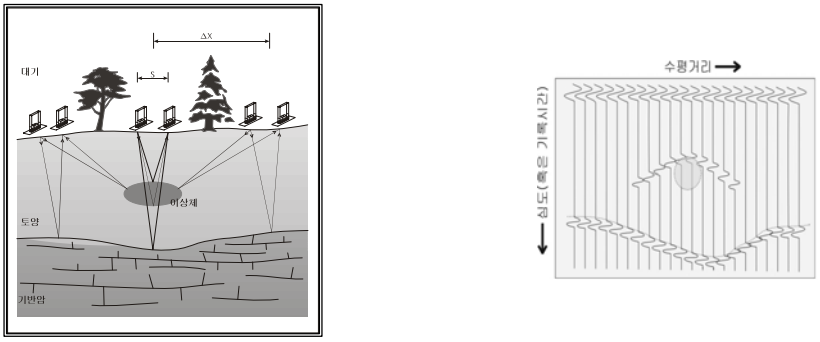
(가) 기본원리

GPR탐사는 수MHz~수GHz 범위의 고주파 전자파를 송신원으로 사용하는 물리탐사법으로 지하매질에 대한 고분해능의 영상을 연속적으로 얻을 수 있다. 또한 타 물리탐사법에 비해 장비운용과 자료 수집 및 처리가 비교적 간단하고 획득 자료의 해상도와 정밀도가 뛰어나기 때문에 보통 수 m 이하의 천부 지반 탐사나 수cm~수m단위의 구조물을 대상으로 하는 조사부문에 효과적으로 이용할 수 있다.

GPR탐사의 기본원리는 전자파 신호를 공중에 방사시킨 후 목표물의 위치를 파악하는 지상레이더를 지하에 적용시킨 것이다. 이처럼 지오레이더의 기본원리는 지상레이더와 같지만 지상레이더의 경우 파의 전달 매질이 균질한 공기이고 탐지 목적이 단순히 탐지대상의 공간상의 위치파악에 있는데 반해, GPR은 불균질한 매질을 대상으로 하기때문에 정밀한 자료처리 및 해석기법이 필요하다.

<그림 3.2-84>의 탐사모식도에서 화살표로 나타낸 직선은 전자파의 반사경로(ray path)를 개념적으로 나타낸다. 송신안테나에서 방사된 전자파가 기반암과 퇴

적층의 경계면 또는 이상체(상수관과 같은 지하매설물)의 선단에서 반사되어 수신 안테나를 통해 기록되고 다음과 같은 자료처리과정을 통해 지하매질을 영상화하게 된다.



<그림 3.2-84> GPR탐사 모식도

① 데이터 편집

측정이 연속되므로 탐사측선을 따른 속도변화는 수평 스케일의 왜곡을 초래하게 되며 장애물이 있는 곳에서는 수직 스케일의 왜곡을 초래하게 된다. 그러므로 수직 및 수평 스케일을 표준화하는 과정이 필요하다.

② 신호포화보정

탐사 신호 중의 초기 시간대에는 지하매질을 전파, 반사된 신호가 아닌 공기를 통해 수신된 직접파가 기록되게 된다. 이러한 공기 중을 통해온 신호는 관심의 대상이 아니므로 제거되어야 하는데 이러한 처리과정을 DEWOW 또는 신호포화보정이라고 한다.

또한, 직접파와 표면파, 그리고 지표근처 반사 물로부터 나타나는 큰 에너지의 입력 때문에 이들이 수신기에서 실제의 반사 신호와 합쳐지게 되어 자료의 질을 떨어뜨릴 수도 있는데 이러한 잡음들은 주로 저주파 성분들이므로 신호 포화보정은 고주파통과 필터를 활용하여 수행 가능하다.

③ 필터링 (Filtering)

먼저 수집된 탐사자료에는 여러 원인에 의한 노이즈가 포함되어 있어 해석이 어

려운 경우가 대부분이다. 그러므로 이러한 노이즈를 제거하고 원래의 반사 신호를 강조하는 작업이 필요하다. 이러한 작업은 필터링 과정을 통해 이루어지며 대상 노이즈에 따라 여러 가지 필터가 적용되고 있다. 주로 사용되는 상관필터는 크게 자기상관(auto correlation)필터와 상호상관(cross correlation) 필터로 나눌 수 있다. 자기상관 필터는 자료의 시간 도면에서 획득된 반사 신호를 그 자신으로 콘볼루션(Convolution)시키는 과정에서 반사면은 더욱 강조가 되어 보기가 쉬워지고 잡음 신호는 감쇠되며 다중 반사파 등을 제거할 수 있다.

또한, 상호상관 필터는 자료의 시간영역에서 획득된 반사 신호를 디콘볼루션(Deconvolution)시킨 후, 이것을 원래의 반사 신호와 콘볼루션(Convolution)시키는 과정으로 자기상관에서와 마찬가지로 다중 반사파가 아닌 실제 반사면에서의 신호를 확인하고 S/N비를 높일 수 있다.

또한 잡음이 많이 포함되어 있는 탐사자료로 예상되는 주파수 대역을 제거함으로서 잡음을 감소시키게 되는데 여기에는 대역통과 필터(Band Pass Filter), 고주파 통과 필터(High Pass Filter) 그리고 저주파 통과 필터(Low Pass Filter) 등이 있다.

④ 고도보정

송신부와 수신부의 고도차, 저속도층의 풍화 정도에 따르는 전자파의 속도변화, 지층의 두께 변화 등에 따라 생기게 되는 반사 주시의 변화를 보정 해주는 것을 고도보정(Static Correction)이라 한다.

고도와 속도 보정은 표면 지형의 영향이 있는 경우에 수행하게 되는데 예로서, 건조모래에서 평균 레이더 속도를 0.125m/ns라 가정하면 지형적인 상향고도보정 (Δt)는 식 (3.2-6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta t = \frac{\text{고도(표고,}m)}{0.125m/ns} \qquad (3.2\text{-}6)$$

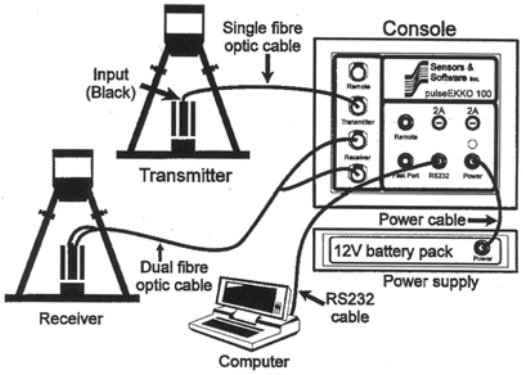
또한, 고도보정은 지표면으로부터 반사 도착시간에 의하여 만들어질 수도 있다.

(나) 장비특성

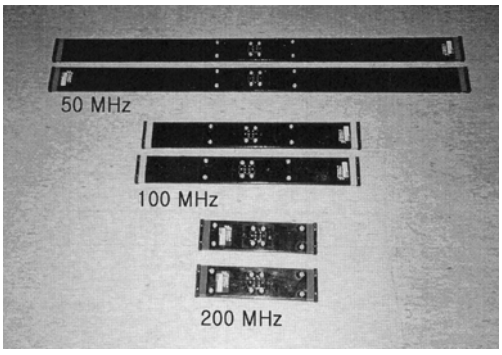
GPR 시스템은 현재 여러 시스템이 상용화되어있으며 제작회사에 따라 장비의 형태나 사양이 약간씩 다르지만 기본적인 구성은 모두 유사하다. 본 연구에서는 캐나다의 Sensors & Software Inc.에서 제작한 pulseEkko 100 시스템을 사용한다. 이 장비는 세계적으로 정밀 지반조사 분야에 주로 사용되고 있으며 국내에도 보유 대수가 많지 않은 매우 고가의 고성능 장비이다(<표 3.2-56> 참조).

<표 3.2-56> GPR탐사기(PulseEkko 100 system) 제원.

Manufacturer	Sensors & Software (CANADA)
Maximum Performance	162 dB
Sampling Interval	10ps～2,000ps in 2ps steps
Equivalent Sampling Rate	100 GHz
Programmable Stacking	1～2,048 stacks
Programmable Time Window	1 ns～32,767 ns



(a) PulseEkko100A 시스템 구성도



(b) 저주파 안테나

<그림 3.2-85> GPR 탐사기 구성 및 저주파 안테나(PulseEkko, Canada).

지하레이다 시스템은 크게 송신부, 수신부, 송・수신부를 제어하는 제어부와 자료의 기록, 처리를 담당하는 컴퓨터부로 나줄 수 있다(<그림 3.2-85> 참조). 송신부는 송신기와 안테나로 구성되며 제어부에서 송신신호와 전원공급을 받아 펄스형태의 전자파를 발생시켜 지반으로 방사시키는 기능을 가진다. 수신부는 수신기와

안테나로 이루어지며 제어부에서 전원공급과 수신시간의 제어를 통해 지하의 반사체에서 반사된 신호를 수신받아 디지털 형태로 변환시킨 후 제어부로 전송하는 역할을 한다.

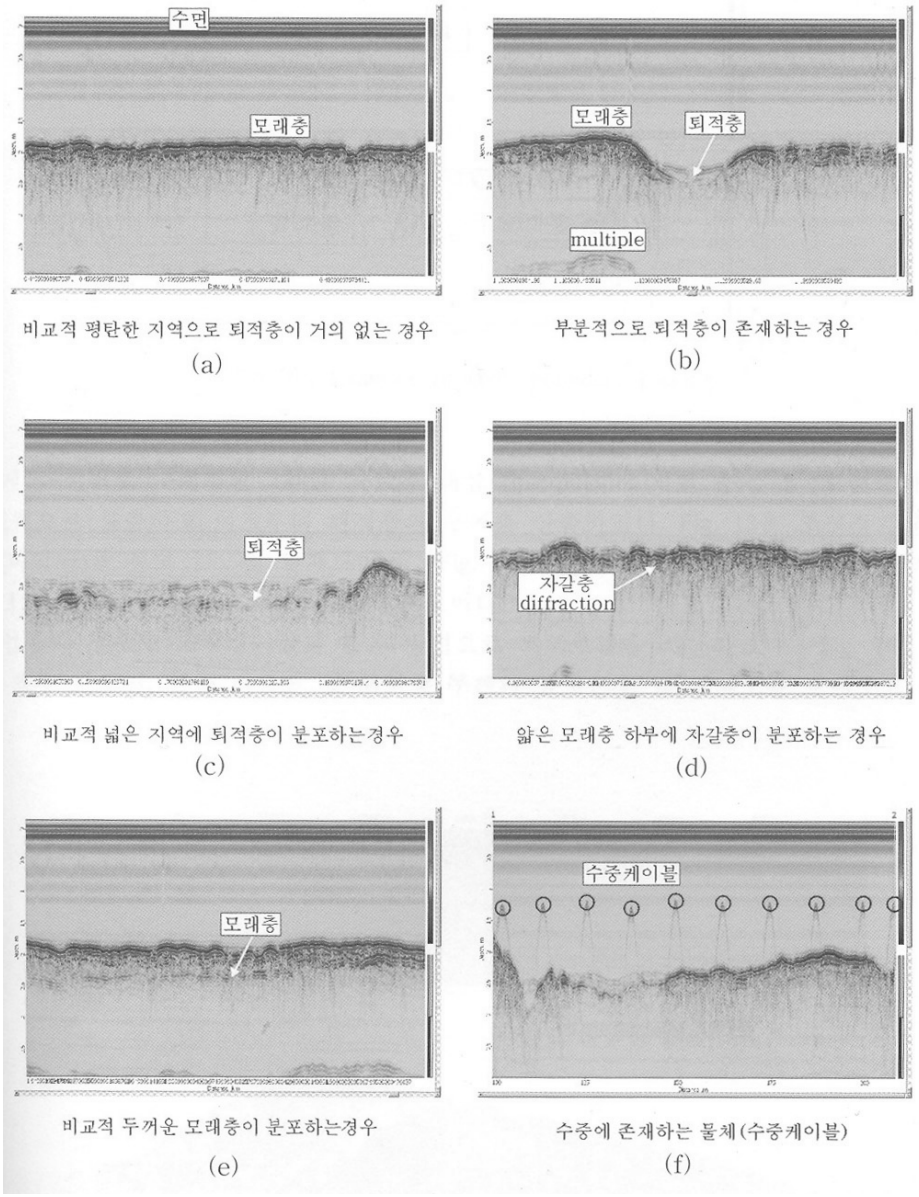
pulseEkko 100 시스템에서는 제어부와 송·수신부는 광케이블로 연결되어 있으므로 탐사시 세심한 주의가 필요하다. 송·수신 안테나는 25~200 MHz 범위의 중심주파수를 가지며 탐사대상 및 심도에 따라 적절한 주파수의 안테나를 선택하여 사용한다(한국지구물리탐사학회, 2002).

(다) 사례분석

미사리 조정경기장 하부의 퇴적토량 및 이의 분포를 파악하여 경정 경기장으로 전환시 필요한 준설계획을 수립하고자 GPR탐사가 수행되었다(장현삼과 정성태, 2002). 조사지역은 수심이 약 2.5m 정도로 매우 얕고 조사대상인 퇴적층의 두께가 0.5m 이내로 매우 얇아 탄성파탐사의 적용이 어렵고 고분해능과 작은 가탐심도를 가지는 GPR탐사를 적용하기에 알맞은 조건을 가지고 있다.

GPR 자료의 해석결과 조정경기장 면적, 즉 2,000m×108m(215,00m^2)에서의 퇴적토량은 약 19,330m^3으로 계산되었으며 같은 비율로 조정경기장 전체 면적에 대하여 계산하면 전체 퇴적토량은 약 21,400m^3으로 추정되었다(<그림 3.2-86> 참조).

일반적으로 GPR탐사는 육상에서 천부의 지층구조 파악이나 구조물 비파괴 검사 및 지하매설물 탐지 등에 주로 사용되어 왔으나, 하상 혹은 호상의 퇴적물 및 수심조사를 위해서도 많이 적용되고 있다. 특히 수심이 얕고 조사대상 퇴적층의 두께가 수 m 이내로 얇을 경우, 높은 분해능으로 그 효용성이 뛰어나며 매우 경제적으로 사용할 수 있다.



<그림 3.2-86> 미사리 조정경기장 퇴적층 GPR 단면.

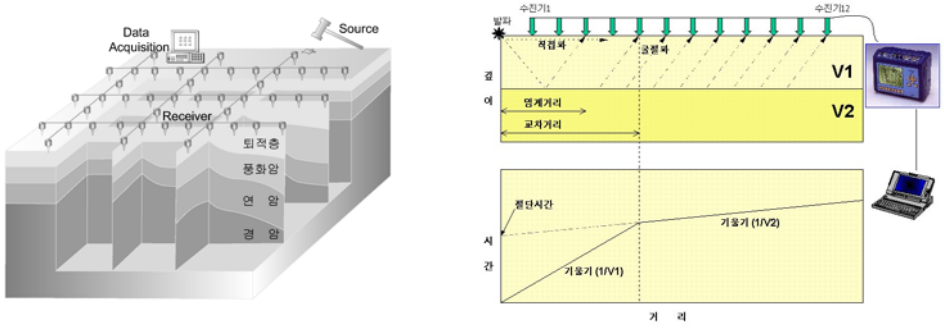
(2) 굴절법탄성파탐사

(가) 기본원리

굴절법탄성파탐사는 탄성파의 전파 과정에서 임계굴절(critical refraction)이 일어날 수 있는 경우에 적용될 수 있으므로 주로 퇴적층이 발달한 지역에서 적용성이 뛰어나다고 할 수 있다. 굴절법 탄성파탐사에서는 일반적으로 각 수진기에 도달하는 초동만을 읽어 주시곡선을 작성하고, 주시곡선상에 나타나는 각 직선들의 기

울기로부터 지층의 속도를 결정한 후 각층의 심도를 계산할 수 있다.

① 고전적 해석법



<그림 3.2-87> 굴절법탄성파탐사 모식도 및 해석원리.

즉, 속도가 낮은 상부층에서 속도가 높은 하부층에 임계각으로 입사한 파는 층의 경계면에 평행하게 굴절된다. 이때 에너지는 경계면을 따라 하부층의 속도로 전파하며, 에너지의 일부는 연속적으로 상부층으로 재굴절하여 지표면에 도달하게 된다. <그림 3.2-87>에 도시한 파면은 각 지점에 가장 먼저 도착한 파를 도시한 것으로서, 처음에는 직접파가 먼저 도달되지만 거리가 멀어지면서 속도가 빠른 하부층에서 굴절된 파가 초동(first arrival)으로 도착되며, 이들을 선두파(head wave)라고 한다. 굴절법 탄성파탐사는 이들 선두파를 획득하여 해석함으로써 지층 구조 및 지층의 탄성파 속도를 계산한다.

탄성파탐사 기록으로부터 직접파와 굴절파 및 반사파의 도달시간을 읽어 작성된 주시곡선(time-distance curve)에서 지표면에서 최초의 굴절파가 감지되는 거리를 임계거리(critical distance)라고 하며, 굴절파가 직접파를 앞질러 처음으로 초동으로 나타나는 지점까지의 거리를 교차거리(cross-over distance)라고 한다. 또한 굴절파의 주시를 나타내는 직선을 원점거리까지 임의로 연장하였을 때 시간 축과 만나는 점을 절단시간(intercept time)이라고 한다.

절단시간(t_i)과 교차거리(X_c)-심도 공식은 수평 다층구조와 경사 다층구조에 대하여 이론적으로 정립되어 있다. 그러므로, 기록된 파의 초동을 발췌하여 주시곡선도를 작성한다면 직선의 기울기로부터 각 층의 속도를 계산할 수 있고 나머지 미

지수인 고속도 굴절체의 심도도 절단시간(t_i)과 교차거리(X_c)-심도 공식을 이용하여 구할 수 있다.

이러한 고전적인 해석 방법은 다음과 같은 가정을 근거로 하며, 다양한 해석법이 개발되어 있다.

- 층 사이의 경계면은 일정한 각으로 경사져 있거나 수평면이다.
- 지표면의 굴곡이 없다.
- 각 층은 동질성이고 등방성이다.
- 층의 속도는 심도에 따라 증가한다.

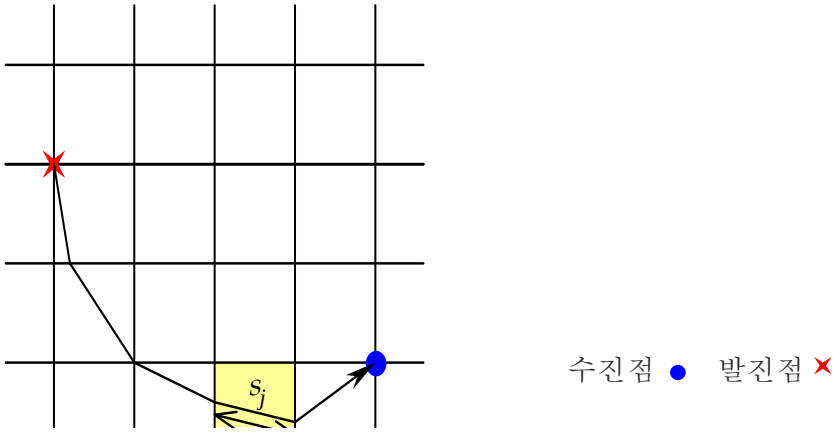
그러나, 실제의 지질구조는 위의 가정을 만족하지 않는 경우가 매우 많으므로, 현재에는 고전적인 해석방법 대신 토모그래피 역산을 이용한 최신 해석법이 사용되고 있다. 본 연구에서는 보다 정밀한 자료해석을 위하여 유한요소법(FEM)을 이용한 토모그래피 역산법을 사용하고자 한다.

② 토모그래피 역산을 이용한 해석법

토모그래피법은 해석 대상을 유한요소로 세분하여 계산한다. 발생원에서 생성된 탄성파는 각 셀(cell)의 탄성파 전달속도에 따라 각기 다른 초동 주시를 가지며 수진기에 기록된다. 가령 매질이 경암일 경우에는 탄성파 속도가 크므로 짧은 주시를 가지게 되고, 반대로 연암일 경우에는 긴 주시를 가지게 된다. 이렇게 여러 셀을 통과한 탄성파의 전체 주시는 현장에서 측정된 탄성파 트레이스의 초동 주시와 같게 될 것이며 이로부터 각 셀의 탄성파 속도를 미지수로 하는 하나의 방정식이 성립된다. 이러한 연립방정식의 해를 구함으로써 각 셀의 탄성파 속도 분포를 구할 수 있게 된다. 연속적인 탄성파 속도분포를 가지는 매질에서 탄성파 도달시간과 탄성파 속도는 식 (3.2-7)과 같은 관계를 가질 것이다.

$$t_i = \int_x \frac{dx}{v(x)} = \int_x s(x)dx \qquad (3.2\text{-}7)$$

여기서 s 는 v 의 역수인 slowness이다.



<그림 3.2-88> 토모그래피 역산을 위한 탄성파 경로추적 모식도

위의 <그림 3.2-88>과 같이 지하매질을 여러 개의 셀로 나누어 생각하면 식 (3.2-7)을 식 (3.2-8)과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$t_i = \sum_{i=1}^{n} s_j l_{ij} \qquad (3.2\text{-}8)$$

식 (3.2-8)을 행렬 형태로 표현하면 식 (3.2-9)와 같이 되며, 여러 가지 방법으로 이 행렬식을 계산하여 각 셀의 slowness를 계산할 수 있다.

$$LS = \begin{pmatrix} l_{11} & l_{12} & \cdot & l_{1n} \\ l_{21} & l_{22} & \cdot & l_{2n} \\ l_{31} & l_{32} & \cdot & l_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ l_{m1} & l_{m2} & \cdot & l_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \cdot \\ s_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ \cdot \\ t_m \end{pmatrix} = T \qquad (3.2\text{-}9)$$

이러한 방정식은 발진점으로부터 수진점까지 탄성파가 통과하는 최소 경로를 반복 연산에 의해 추적하면서 그 해가 구해질 수 있으며, 그로부터 각 셀의 탄성파 속도를 결정할 수 있다.

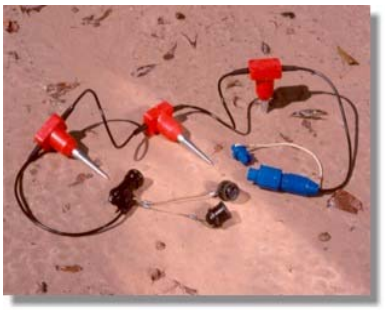
(나) 장비특성

탄성파탐사에 쓰이는 기기는 크게 진동을 전압으로 바꿔주는 수진기(geophoone)

와 전압을 일정한 샘플링간격으로 A/D 변환하여 기록하는 탄성파기록기로 나눌 수 있다. 수진기는 각각 고유주파수를 가지고 있으며 탐사 목적에 따라 적절한 주파수의 수진기를 선택하여 사용한다. 표면파와 같이 저주파의 신호들을 주로 취급할때는 4Hz 내외의 고유주파수를 가지는 저주파 지오폰을 사용하며 굴절법의 경우는 20Hz 내외, 반사법의 경우는 100Hz 내외의 고주파 지오폰을 사용하기도 한다.



(a)탄성파기록기



(b)수진기

<그림 3.2-89> 탄성파기록기와 수진기

<표 3.2-57> 탄성파탐사기 McSeis SX24의 제원.

Data Acquisition		System	
Data Acquisition	24 + 1 aux	CPU	i486DX4, 75MHz
Input Impedance	20k ohms//0.05μF	Display	640*480 dots
Gain	24, 36, 48, 60 dB	Interface	Parallel I/F
Frequency Response	4.5 to 4,600 Hz	Power	12V DC
A/D resolution	18 bit	Consumption Current	3A(max)
Sample Rate	25~2,000μsec	Operating Temp.	0 to 45 ℃
Data Length	1024, 2048	Dimensions	330*280*220 mm
Pre-Trigger	0, 128 samples	Weight	8kg
Trigger Level	100 to 1,000mV	Others	Printer

일반적으로 탄성파탐사기의 성능은 기록가능한 최소진폭대 최대진폭의 비를 나타내는 dynamic range가 넓을수록 고성능이라고 할 수 있으며 이러한 range는 A/D 변환시 bit수와 밀접한 관계가 있다. 현재 국내에서는 18~24 bit의 고성능 탄

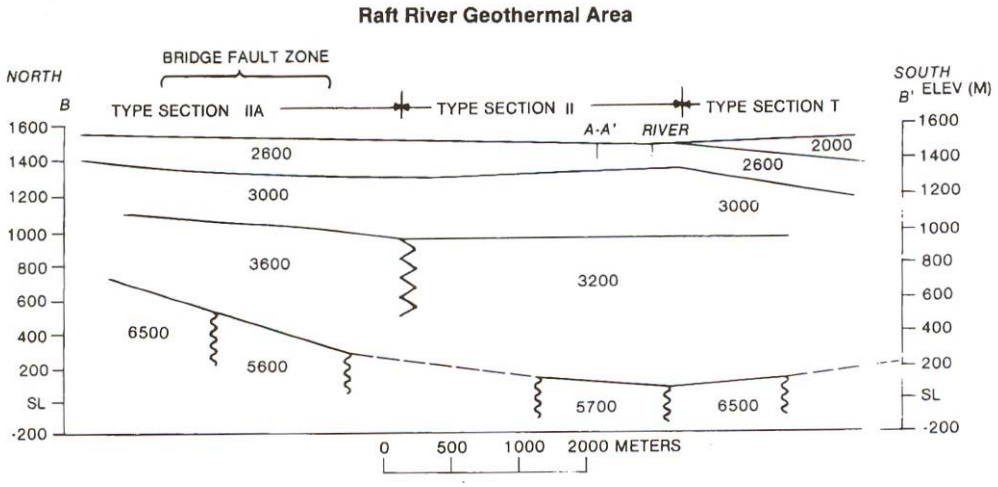
성파기록기가 주로 사용되며 용도에 따라 24개나 48개의 수진기 신호를 동시에 기록할 수 있는 탄성파기록기를 선택해야 한다. 본 연구에서 사용되는 일본 OYO사의 탄성파기록기인 McSeis SX-24의 장비제원은 <표 3.2-57>과 같다.

(다) 사례분석

① Ackermann에 의한 굴절법탄성파탐사 사례(1979)

Idaho 남동쪽에 위치한 Raft 강 열수지대의 지질시스템을 파악하기 위하여 굴절법탄성파탐사를 실시하였다. 탄성파속도의 역산결과 기반암 상부에 위치한 용암류와 복잡한 퇴적상을 확인 할 수 있었다. 또한 퇴적층의 열수변질 정도에 비례하여 탄성파속도가 높아지는 양상을 보였으며 변질된 암석과 신선한 암석의 경계를 중심으로 용출점이 발달하는 것으로 나타났다(<그림 3.2-90>).

이처럼 굴절법탄성파탐사는 복잡한 퇴적상을 보이는 지질구조를 해석하는 것이 가능하고 장비의 운용이 수심의 영향을 거의 받지 않으며 경제성도 뛰어나 적용성이 매우 높은 탐사법중 하나이다.



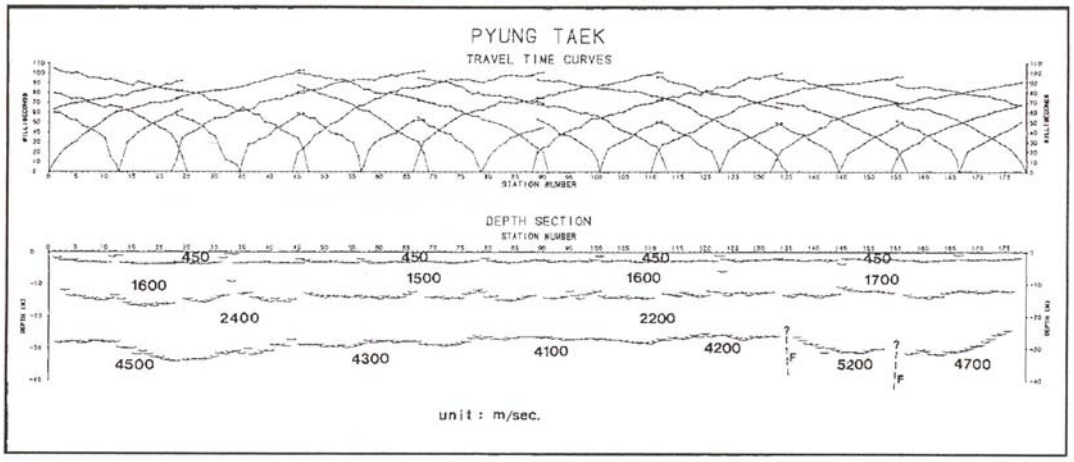
<그림 3.2-90> Raft 강 열수지대의 탄성파 속도 단면.

② 차성수 등에 의한 굴절법탄성파탐사 사례(2002)

남양호 하부에 지하유류 비축시설 건설에 필요한 지반조사 및 설계정수를 도출하기 위해 수상 탄성파탐사가 실시되었다. 인공호수 주변 장애물로 인하여 탐사환

경이 열악하였으므로 반사법 및 굴절법탐사를 병행하여 자료의 신뢰도를 높이고자 하였다. 특히 굴절법탄성파탐사의 경우 국내에서는 처음으로 수륙혼합으로 이루어졌다.

굴절법탐사자료의 GRM 역산결과 기반암의 탄성파속도는 4.5km 이상 지역과 4.0~4.5km/s지역 및 4.0km/s 이하 지역으로 구분할 수 있었으며 호수 저면의 퇴적층이 매우 박층인 것으로 나타났다. 또한 평택측 호안의 제방에서는 3.0km/s의 저속도층이 분포하며 NW-SE 및 NE-SW 방향성의 단층대가 평행하게 발달하는 것으로 조사되었다(<그림 3.2-91> 참조).



<그림 3.2-91> LPG 지하저장기지 건설을 위한 굴절법탄성파탐사 속도단면

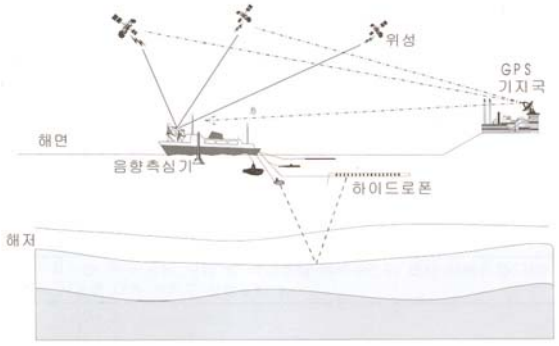
(3) 음파탐사

음파탐사는 수상에서 사용되는 반사법탄성파탐사의 일종으로 단일채널을 사용하여 장비 규모가 작고 기동성 있는 측정이 가능하다는 장점을 가지며 주로 천부의 지질조사에 사용되고 있다.

본 연구에서는 수심의 제한으로 인해 현장에 직접 적용되지 못했으나, 하상탐사로 활용빈도가 높은 음파탐사의 원리 및 실제 적용사례를 분석하여 하상토 부존량 평가의 적용 타당성을 분석 하고자 하였다.

(가) 기본원리

음파탐사는 단일채널을 사용하고 고주파의 음원을 발진원으로 사용한다는 점을 제외하면 반사법탄성파탐사와 다른 점이 거의 없다. 따라서 반사법탐사와 마찬가지로 탐사선이 항해하면서 반사파 기록을 실시간으로 얻기 때문에 효율적인 측정이 가능하고 개략탐사로부터 정밀탐사에 이르기까지 폭넓게 사용되고 있다.



<그림 3.2-92> 음파탐사 모식도.

<그림 3.2-92>에 나타난 것과 같이 수면 부근에서 P파를 발생시키고 하부로부터 반사된 신호를 한 채널의 수진기로 수신하여 왕복주시시간과 그 진폭을 기록하게 된다. 따라서 해석 방법은 GPR탐사나 반사법탄성파탐사의 경우와 기본적으로 동일하다. 그러나 음파탐사의 경우 수면과 하저면 사이에서 다중반사가 일어나기 쉬운데 이러한 다중반사파의 제거가 어려우므로 해석시 지층경계에서의 반사와 다중반사파를 정확히 구별하는 것이 중요하다. 이러한 점에 주의하여 탄성파단면을 해석할 때는 반사의 양상, 반사파 진폭의 대소나 연속성에 착안하여 음향적이 층서를 구분하고 기존의 지질조사 자료와 대비해 토질, 지질 구성을 추정하여 최종 단면도를 작성하게 된다.

(나) 장비특성

음파탐사 장비는 크게 송신부와 수신부로 나눌 수 있다. 이중 수신부는 일반적인 탄성파탐사기와 동일하므로 주로 송신부의 장비특성에 대해 설명하고자 한다. 음파탐사의 송신부, 즉 발진원은 매우 다양한 종류가 존재하는데 탐사심도와 해상

도를 고려하여 적정한 주파수 및 에너지타입을 선택해야 한다.

일반적으로 하상의 퇴적층 조사를 위해서는 3.5 kHz 내외의 주파수를 가지는 chirp 음파탐지기를 주로 사용한다(<표 3.2-58> 참조). 그러나 조립의 퇴적층이 다수 분포하는 경우 높은 주파수대역의 음원으로는 심부의 정보를 얻기 어려우므로 200 J 정도의 방전식 스파커나 전자유도식의 음원을 병행 사용하는 것이 바람직하다(한국지구물리탐사학회, 2002). 또한 음원의 발생 에너지가 클수록 에너지의 충전시간이 길어지고 그만큼 발진간격이 길어져 수평해상도가 감소하게 되므로 장소나 목적에 적합한 음원을 선택하는 것이 필수적이다.

<표 3.2-58> 탐사장비 특성

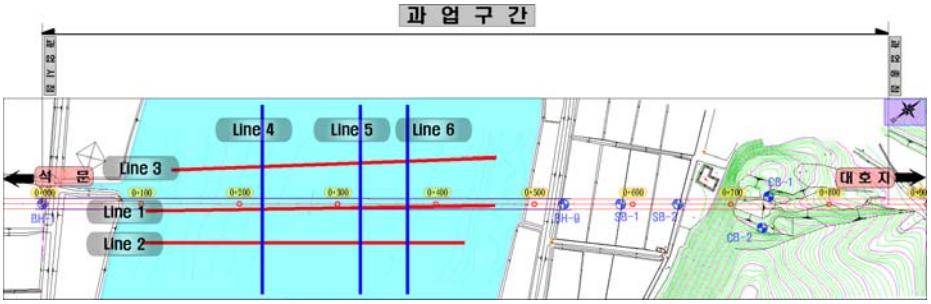
사 용 장 비	발생 주파수	발 신 원	수 신 원
Chirp-Ⅱ 고주파 시스템	10~20 kHz	음 파 (0.25초 간격으로 신호발생)	2~100 kHz의 수신대역을 갖는 8개의 Hydrophone

(다) 사례분석

충남 당진군 초락도와 해창지역을 연결하는 초락교 건설공사 지반조사를 위하여 총 6측선의 음파탐사가 격자모양으로 수행되었으며(두우엔지니어링, 2004) 지층 분석 및 해석단면상의 암선기준 선정을 위해 7공의 시추조사도 수행되었다(<표 3.2-59>, <그림 3.2-93> 참조).

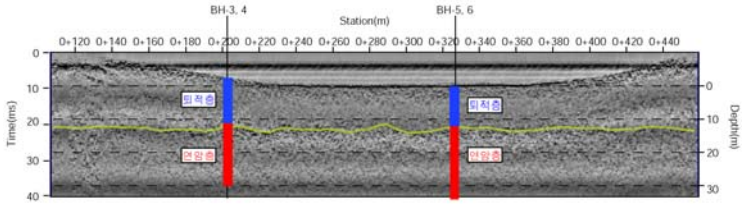
<표 3.2-59> 고주파 음파탐사 측선 정보

측 선 명	연 장(m)	비 고
Line 1	360	종방향
Line 2	325	종방향
Line 3	325	종방향
Line 4	180	횡방향
Line 5	200	횡방향
Line 6	200	횡방향

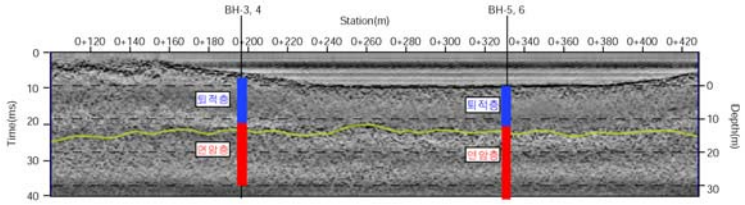


<그림 3.2-93> 음파탐사 측선도.

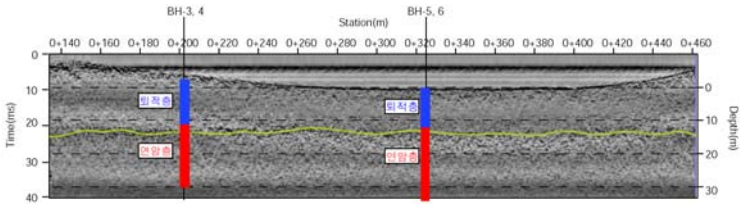
기록된 반사파들을 취합하여 지하매질의 2차원 탄성파단면을 얻었다(<그림 3.2-94> 참조). 반사파단면상의 퇴적층은 탐사측선과 동일선상에서 얻은 시추자료를 기준으로 연속성 있는 일정 반사면을 선택하여 2개 층으로 구분하였으며 하저면의 지형이 거의 평탄하여 구조보정(migration)은 자료 처리 과정에서 제외되었다. 자료의 해석결과 기반암(연암) 상부에 약 13~15m 정도의 거의 일정한 두께를 갖는 퇴적층이 위치하며, 이 퇴적층 내 음파의 평균 속도는 2,700 m/sec 내외로 나타났다. 또한 종측선(Line 1, 2, 3) 하상 반사법 탐사 결과와 지질조사 결과를 종합적으로 비교할 때 N70°W 정도의 주향 방향과 북동쪽 방향의 경사를 갖는 이상대가 Sta. 0+300~330 구간을 대략적인 경계로 종점부 쪽에 밀집되어 분포하는 것으로 분석되었다. 본 사례에서는 교각기초의 지반조사를 위하여 암반심도 및 지질구조만이 해석되었으나 해저면 측량 자료와 결정된 암선자료를 수치화하여 내삽하면 대상지역내 퇴적층의 부존량 산정이 가능하다.



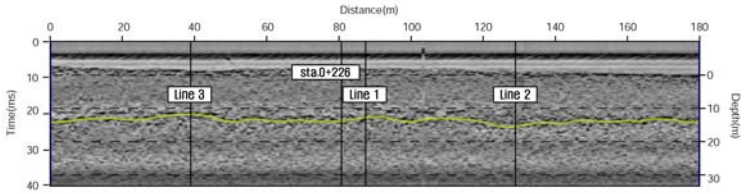
(a) 측선 Line 1



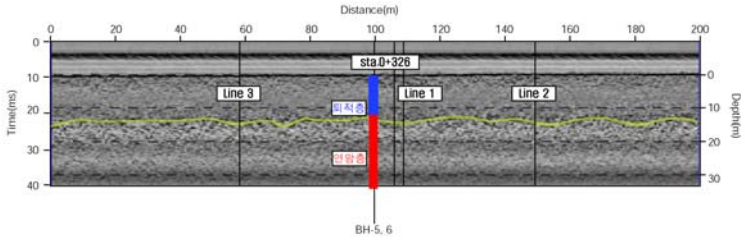
(b) 측선 Line 2



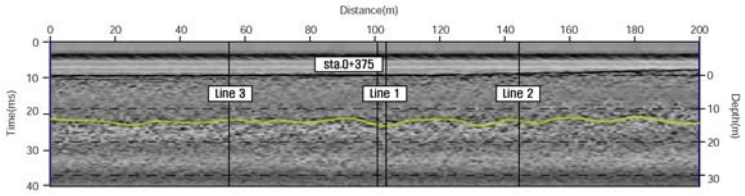
(c) 측선 Line 3



(d) 측선 Line 4



(e) 측선 Line 5



(f) 측선 Line 6

<그림 3.2-94> 음파탐사 해석단면

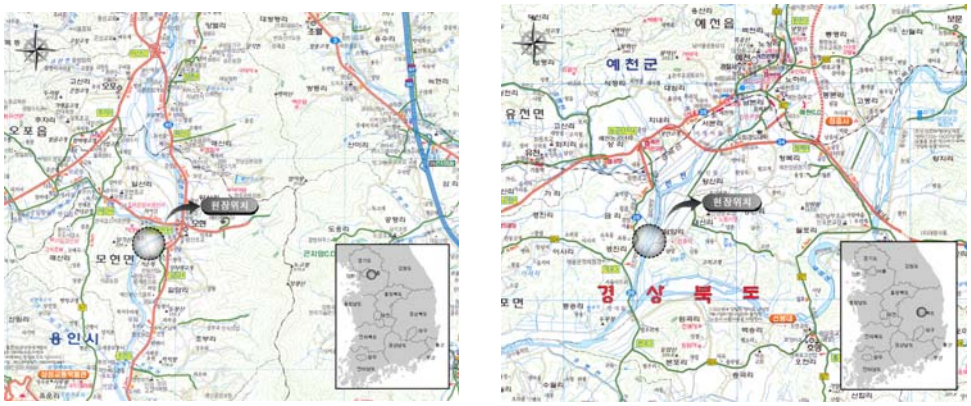
다. 하상토 부존량 평가를 위한 물리탐사법 현장 적용성 평가

(1) 조사개요

본 절에서는 여러 지구물리탐사법중 하상토의 부존량을 파악하는데 효과적일 것으로 예상되는 지하투과레이다탐사(GPR: Ground Penetrating Radar) 및 굴절법탄성파탐사를 상이한 토질의 2개소에 적용하여 토질별 하상토의 부존량 평가 및 탐사기법별 특성을 파악하고자 하였다.

(가) 조사지역

- 용인시 모현면 월촌교 일대 제방 및 예천군 호면면 담암리 담암제(<그림 3.2-95> 참조)



(a)용인 월촌교 (b)예천 담암제

<그림 3.2-95> 조사지역 광역위치도

(나) 조사기간

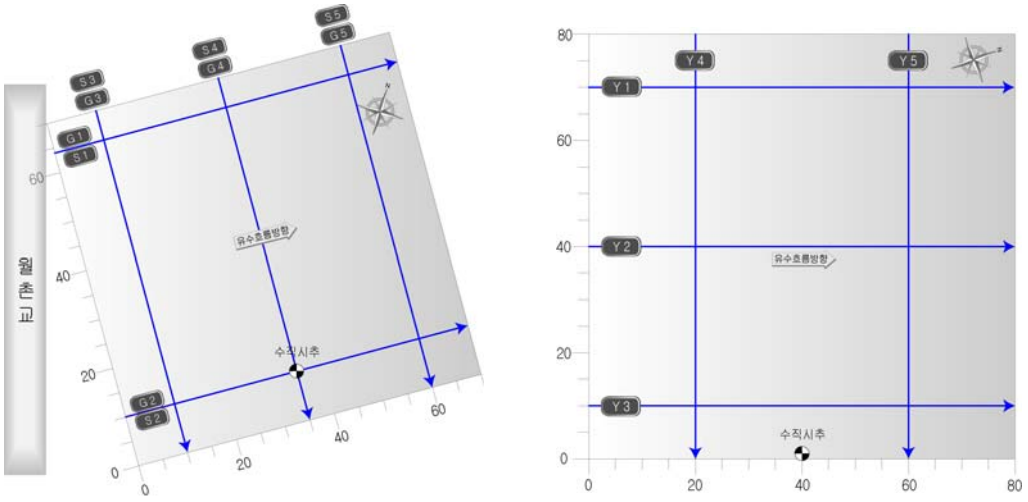
- 2006년 4월 3일 ~ 4월 12일

(다) 조사범위

- 총 10측선의 굴절법 탄성파탐사와 5측선의 GPR탐사가 수행되었다(<그림 3.2-96> 참조). 아울러 물리탐사 자료의 지층 구분 기준 선정을 위해 2개의 시추조사가 병행되었다(<표 3.2-60> 참조).

<표 3.2-60> 물리탐사 및 시추조사 범위.

공 종	측선명/공번	측선길이	측점간격/심도	조사지역
굴절법 탄성파탐사	S1~S5	80m	5m	용인 월촌교
	Y1~Y5	70m	5m	예천 담암제
GPR탐사	G1~G5	70m	0.25m	용인 월촌교
시추조사	BK-1	30m	6.0m	용인 월촌교
	BY-1	95m	12.0m	예천 담암제

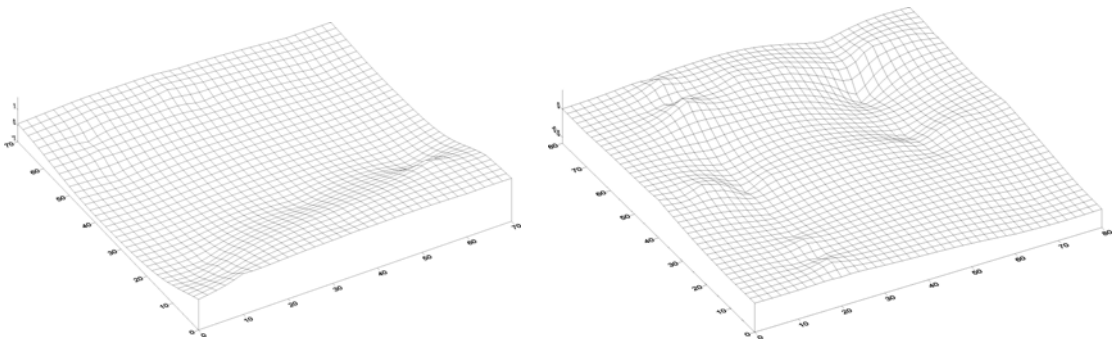


(a)용인 월촌교 (b)예천 담암제

<그림 3.2-96> 물리탐사 측선 및 시추 위치도

(2) 고도측량

각 조사지역에서 5m 간격으로 측선을 따라 격자를 이뤄 레벨측량을 실시하였다. 기준점은 탐사측선 1번의 첫 번째 점을 0으로 설정하였으며, 하상토의 부존량 계산 및 탐사자료의 역산시 지형보정에 이용하였다. 전반적으로 고도차가 1m 이내로 비교적 작은 편이다(<그림 3.2-97> 참조).



(a)용인 월촌교 (b)예천 담암제

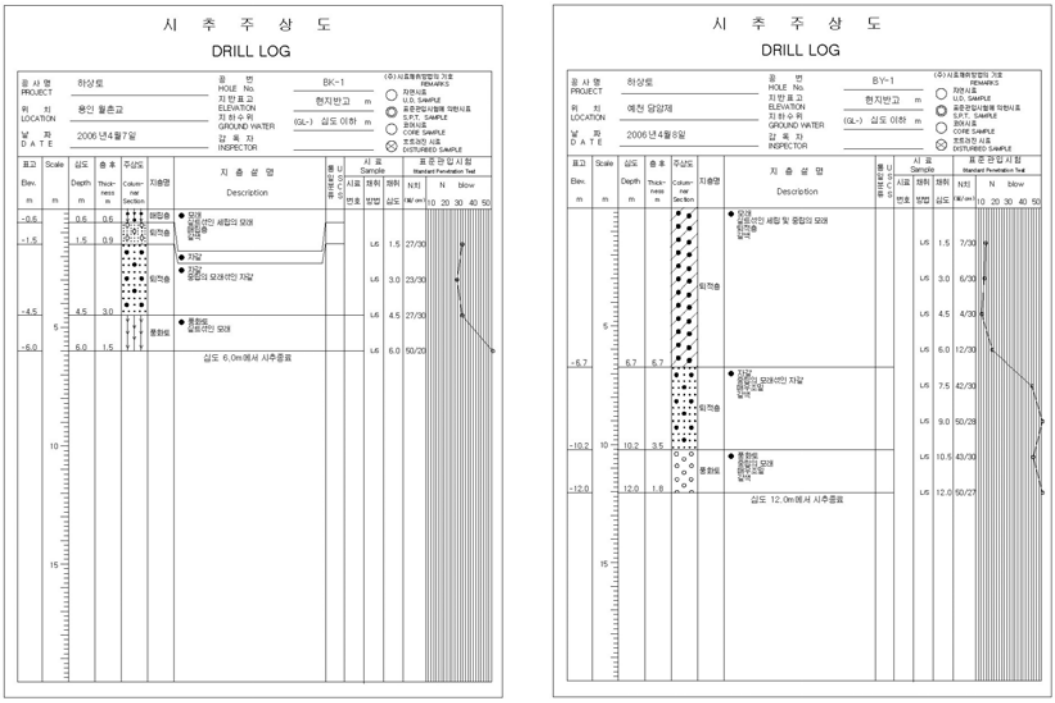
<그림 3.2-97> 조사지역 고도

(3) 시추조사

각 조사 지역당 한 공의 시추조사를 실시하였다. 원칙적으로 시추공 위치를 탐사측선과 중첩되도록 하였으나 예천 담암제의 경우 장비의 진입이 어려워 탐사측선 인근에 시추공 위치를 선정하였다. 시추조사 결과는 각 지역의 하상토 토질을 확인하고 탐사자료의 퇴적층 및 암선 구분의 기준자료로 활용되었다.



<그림 3.2-98> 시추코아 사진



(a)용인 월촌교(BK-1)　　(b)예천 담암제(BY-1)

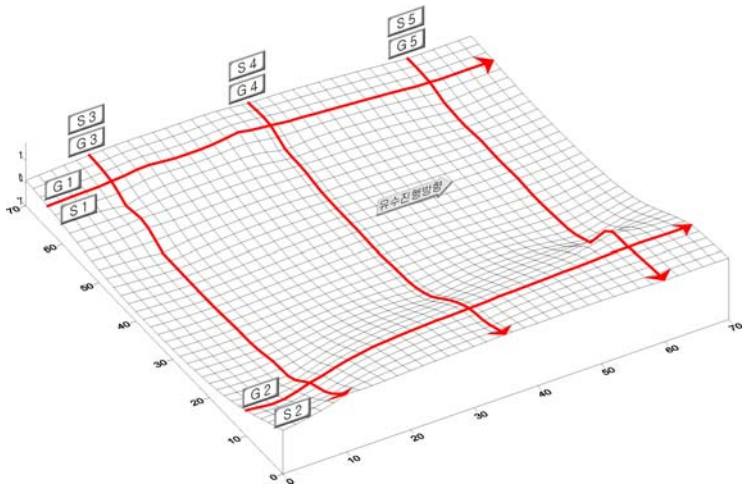
<그림 3.2-99> 시추 주상도

시추조사 결과 모래 및 자갈로 구성된 퇴적층이 풍화토 상부에 나타나며 모래의 경우 용인지역이 예천지역에 비해 실트 성분이 높은 것으로 나타났다. 시추에서 확인된 용인지역의 퇴적층 심도는 4.5 m로 예천지역의 10.2m보다 매우 낮은 분포를 보였다(<그림 3.2-98>, <그림 3.2-99> 참조).

(4) GPR탐사

(가) 탐사개요

용인시 모현면 월촌교 일대에서 5측선의 GPR탐사가 실시되었다(<그림 3.2-100> 참조). 시추조사결과 파악된 퇴적층 심도를 고려하여 고출력 저주파 장비인 PulseEkko 100 (Canada) system 사용하였다.



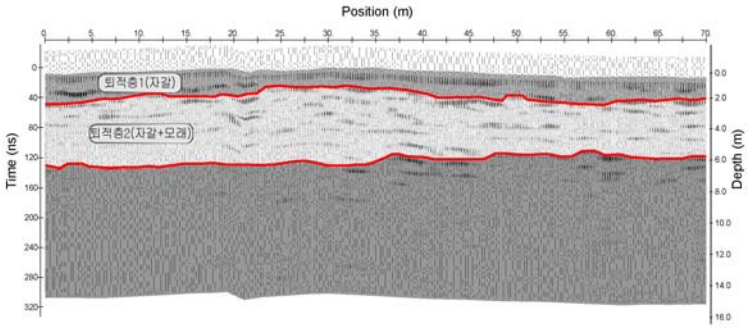
<그림 3.2-100> GPR탐사 측선도

송신 및 수신은 가탐심도가 가장 큰 중심주파수 100 MHz의 안테나를 사용하였다. 보다 정밀한 탐사를 위해 연속모드가 아닌 step 모드로 자료를 취득하였으며 측점간격은 25 cm로 설정하였다. 또한 예천 담암제에서도 동일한 탐사 파라미터로 총 5 측선의 GPR탐사가 수행되었으나 퇴적심도가 10 m 이상으로 매우 깊어 해석 단면상에 퇴적층의 반사면을 감지할 수 없어 본 보고서에는 용인지역 월촌교 일대의 결과만 수록하였다.

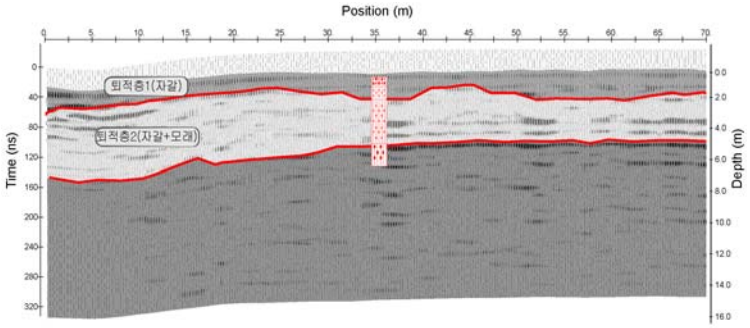
(나) 자료해석

측정된 반사파들을 취합하여 지하매질의 2차원 단면을 작성하였다(<그림 3.2-101> 참조). 본 조사지역은 대부분 고도차가 1 m 이내로 지형기복이 거의 없으므로 해석시 구조보정은 고려하지 않았다.

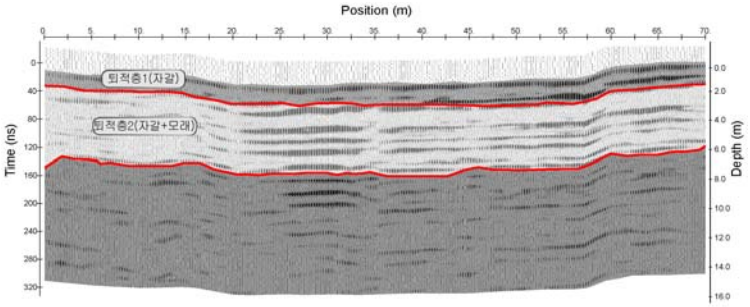
반사파단면상의 퇴적층은 탐사측선과 동일선상에서 얻은 시추자료를 기준으로 연속성 있는 일정 반사면을 선택하여 2개의 퇴적층으로 구분하였다.



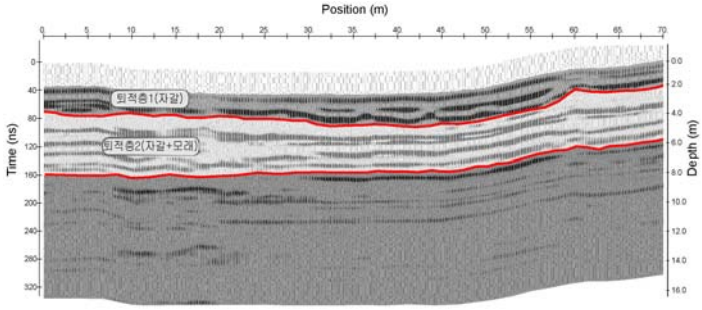
(a) 측선 G1



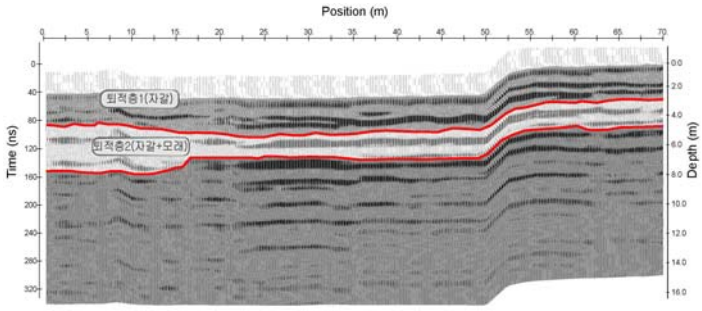
(b) 측선 G2



(c) 측선 G3



(d) 측선 G4

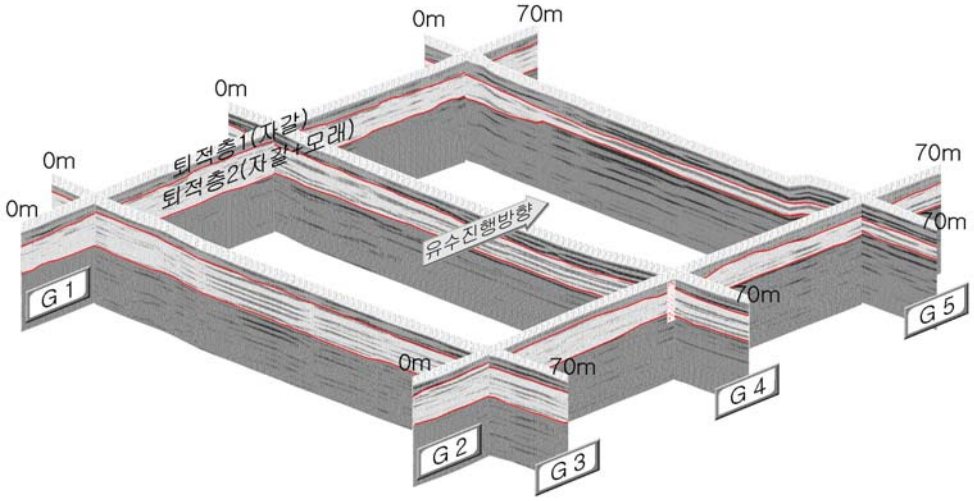


(e) 측선 G5

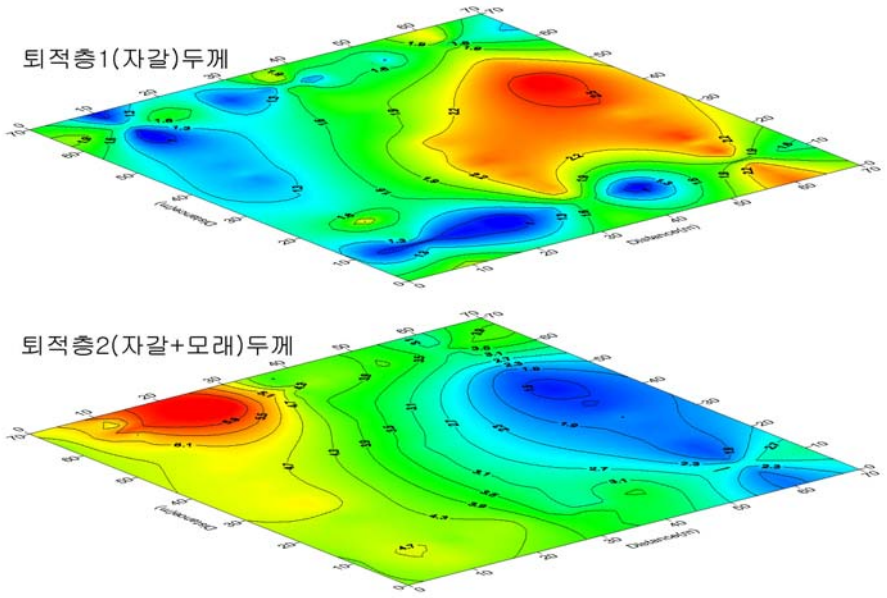
<그림 3.2-101> GPR탐사 해석단면.

① 퇴적층 분포

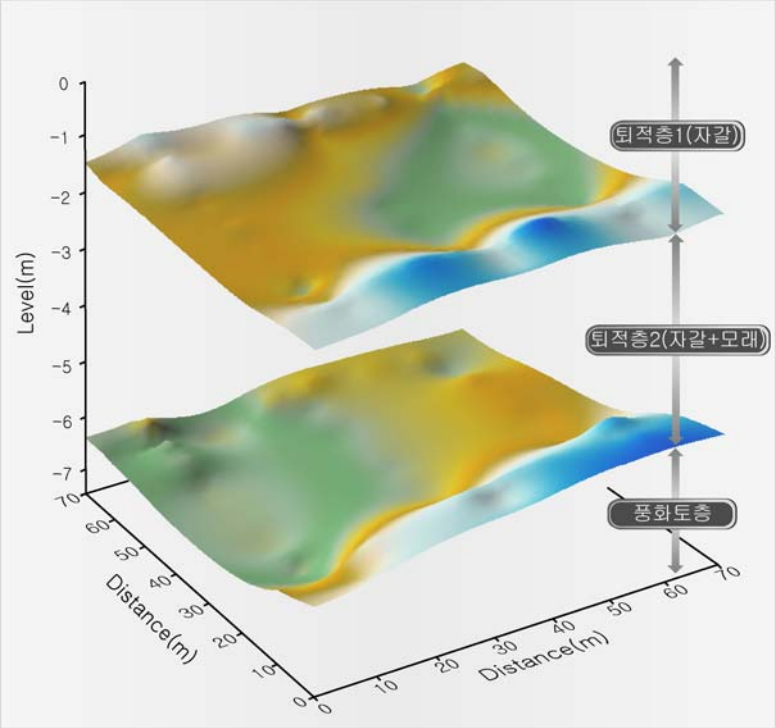
전반적으로 자갈층으로 이루어진 상부 퇴적층의 두께는 0.8~2.6m의 분포를 보이며 하부 퇴적층의 두께는 1.3~5.7m로 두꺼운 양상을 보인다(<그림 3.2-102> 참조). 자갈로 이루어진 상부 퇴적층의 두께는 대상지역 우측에 위치한 측선 G5에서 크게 나타나나, 하부 퇴적층의 두께는 반대로 대상지역 좌측에 위치한 측선 G3에서 두껍게 나타난다(<그림 3.2-103> 참조). 전체 퇴적층 심도는 -2.7~-7.1m의 분포를 보이며 측선 G3에서 가장 깊고 측선 G2에서 가장 낮은 분포를 보인다(<그림 3.2-104> 참조). 측선 G2에서 퇴적층 심도가 낮게 나타나는 것은 이 부근이 고수부지에 해당하여 지표 고도 자체가 높기 때문인 것으로 판단된다.



<그림 3.2-102> GPR탐사 해석단면 fence diagram



<그림 3.2-103> 퇴적층 두께 분포



<그림 3.2-104> 퇴적층 고도 분포

② 퇴적층 부피 산정

GPR탐사 해석단면에서 결정된 퇴적층의 고도값을 수치자료로 환산하여 2차원 내삽한 자료를 바탕으로 각 퇴적층 별 부피를 계산하였다(<표 3.2-61> 참조). 상부 퇴적층 및 하부 퇴적층의 부피는 각각 8,900m^3와 17,600m^3 내외로 하부 퇴적층의 부피가 상부 퇴적층에 비해 약 2배정도 큰 것으로 나타났다. 각각의 퇴적층 부피를 더한 퇴적층의 총 부피는 26,500~26,600m^3 각 계산법별로 큰 차이를 보이지 않는다.

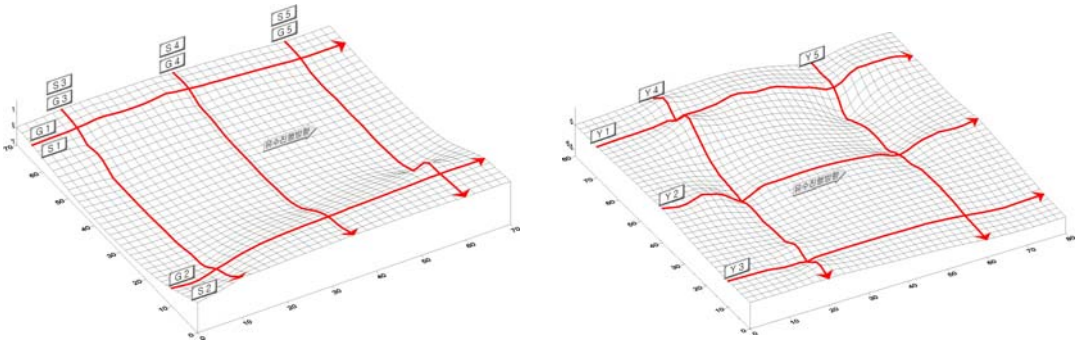
<표 3.2-61> 퇴적층 부피(용인 월촌교)

지층 \ 계산법	Trapezoidal Rule (m^3)	Simpson's Rule (m^3)	Simpson's 3/8 Rule (m^3)
퇴적층1(자갈)	8,923	8,963	8,876
퇴적층2(자갈+모래)	17,640	17,647	17,668
Total	26,563	26,610	26,544

(5) 굴절법탄성파탐사

(가) 탐사개요

용인시 모현면 월촌교 및 예천군 담암제 일대에서 각각 5측선의 굴절법탄성탐사가 실시되었다(<그림 3.2-105> 참조). 퇴적층 심도 및 분해능을 고려하여 수진간격은 5m로 설정하고 24채널의 수진기를 사용하였다.



(a)용인 월촌교 (b)예천 담암제

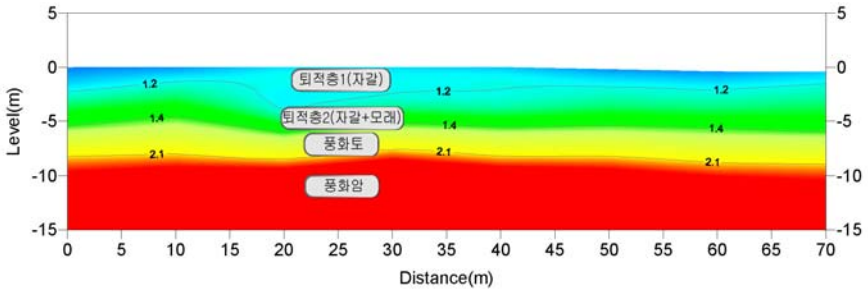
<그림 3.2-105> 굴절법탄성파탐사 측선도

(나) 자료해석

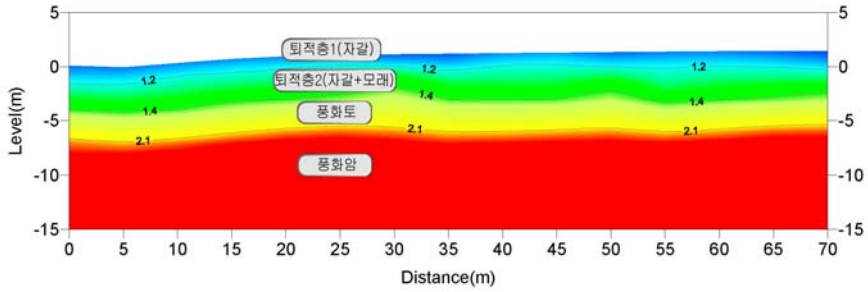
측정된 굴절파의 초동주시시간을 역산하여 지하매질의 2차원 탄성파속도 단면을 얻었다(<그림 3.2-106>, <그림 3.2-107> 참조). 지층의 탄성파 속도는 동일 암종이나 토질이라 하더라도 지역에 따라 편차가 있으므로, 본 연구에서는 시추자료와 탄성파 단면을 비교하여 각 지역별 지층분류 속도를 결정하여 구분하였다(<표 3.2-62> 참조). 상부 퇴적층의 경우 용인지역이 예천에 비해 약간 높으며 하부 퇴적층은 반대양상을 보인다.

<표 3.2-62> 해석단면상의 각 지층별 탄성파 속도

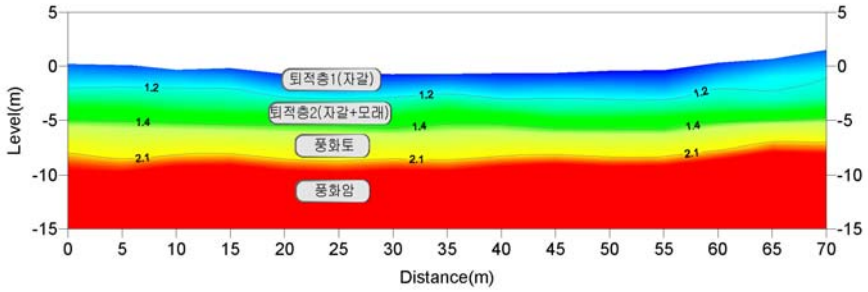
지역	구분	상부 퇴적층	하부 퇴적층	풍화토
용인 월촌교	Vp(km/s)	< 1.2	1.2~1.4	1.4~2.1
	지층	자갈	중립의 모래섞인 자갈	-
예천 담암제	Vp(km/s)	< 1.1	1.1~1.5	1.5~2.0
	지층	세립질 모래	중립의 모래섞인 자갈	-



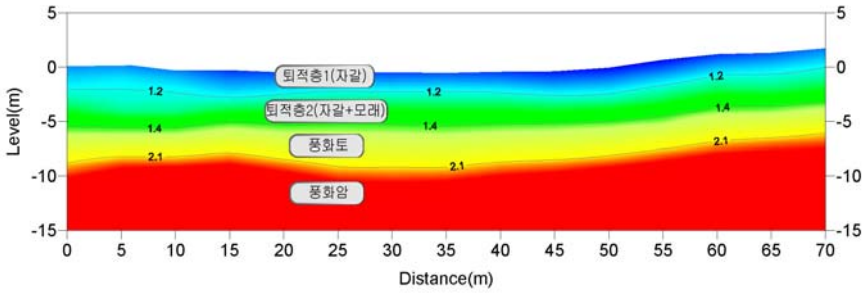
(a) 측선 S1(용인 월촌교)



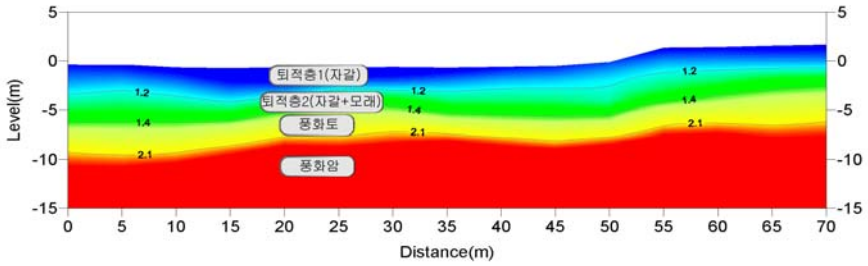
(b) 측선 S2(용인 월촌교)



(c) 측선 S3(용인 월촌교)

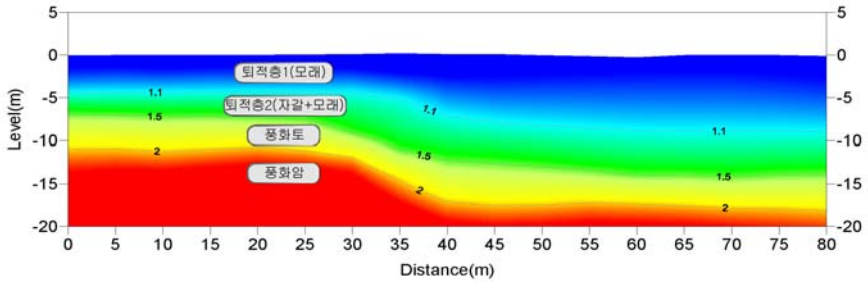


(d) 측선 S4(용인 월촌교)

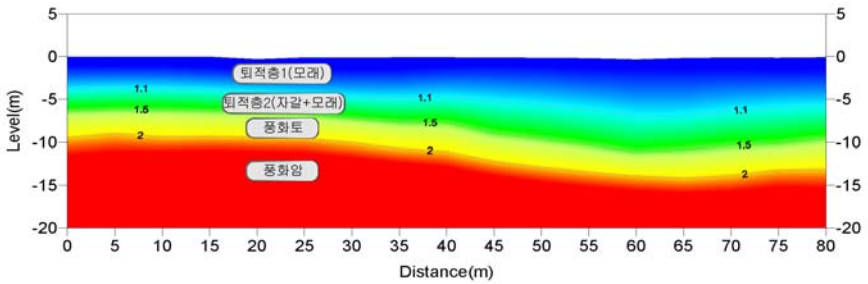


(e) 측선 S5(용인 월촌교)

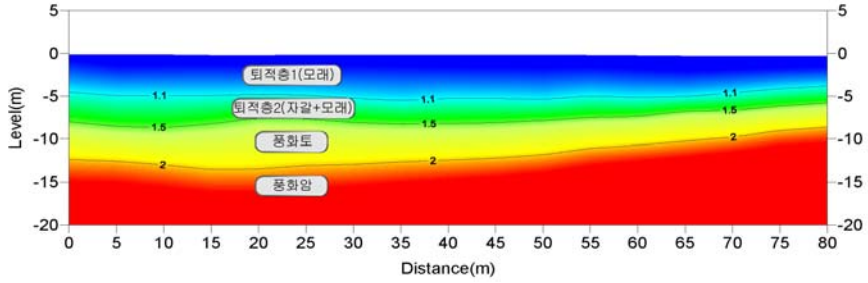
<그림 3.2-106> 굴절법탄성파탐사 해석단면(용인 월촌교)



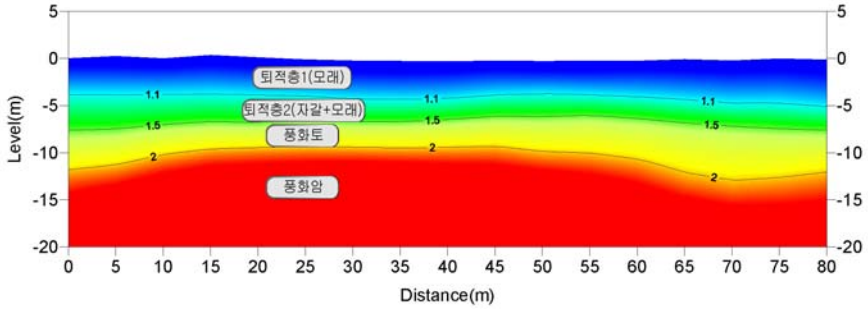
(a) 측선 Y1(예천 담암제)



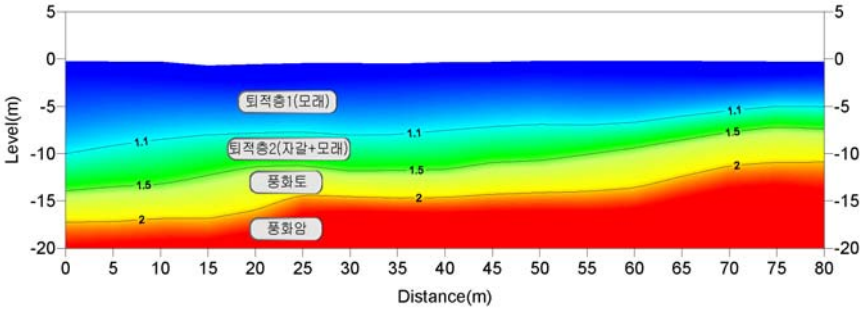
(b) 측선 Y2(예천 담암제)



(c) 측선 Y3(예천 담암제)



(d) 측선 Y4(예천 담암제)



(e) 측선 Y5(예천 담암제)

<그림 3.2-107> 굴절법탄성파탐사 해석단면(예천 담암제)

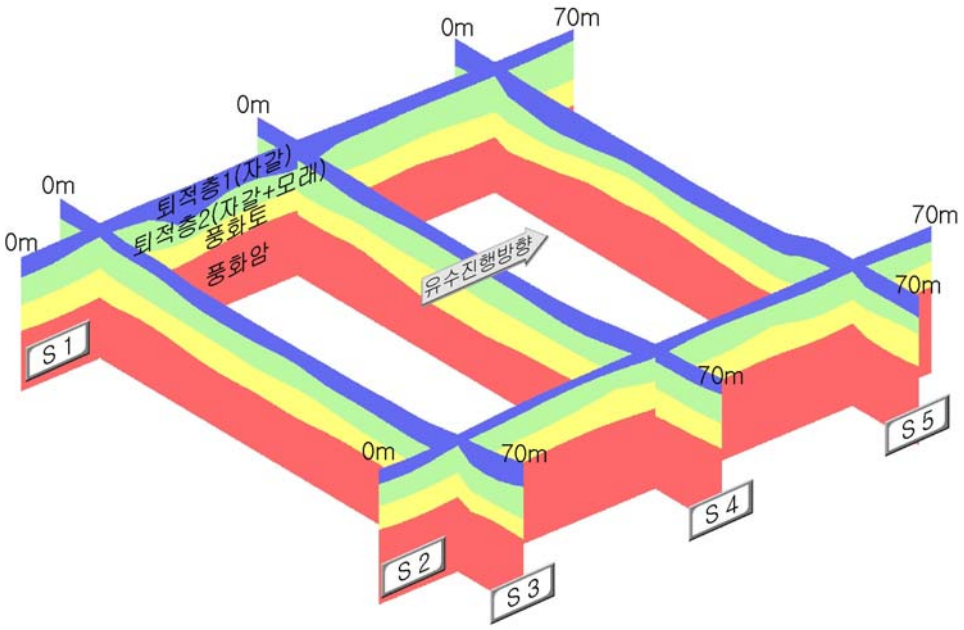
① 퇴적층 분포

용인 월촌교 조사지역의 경우 자갈층으로 이루어진 상부 퇴적층과 하부 퇴적층의 두께는 각각 0.9~3.4m와 1.9~4.4m의 분포를 보인다. 이는 GPR탐사 결과에 비해 상부 퇴적층의 두께는 증가하고 하부 퇴적층의 두께는 약간 감소한 것이다(<그림 3.2-108> 참조). 또한 자갈로 이루어진 상부 퇴적층의 두께는 GPR탐사와 마찬가지로 대상지역 우측에 위치한 측선 S5에서 크게 나타나나, 하부 퇴적층의 두께는 반대로 대상지역 좌측에 위치한 측선 G3에서 두껍게 나타난다(<그림 3.2-109> 참조).

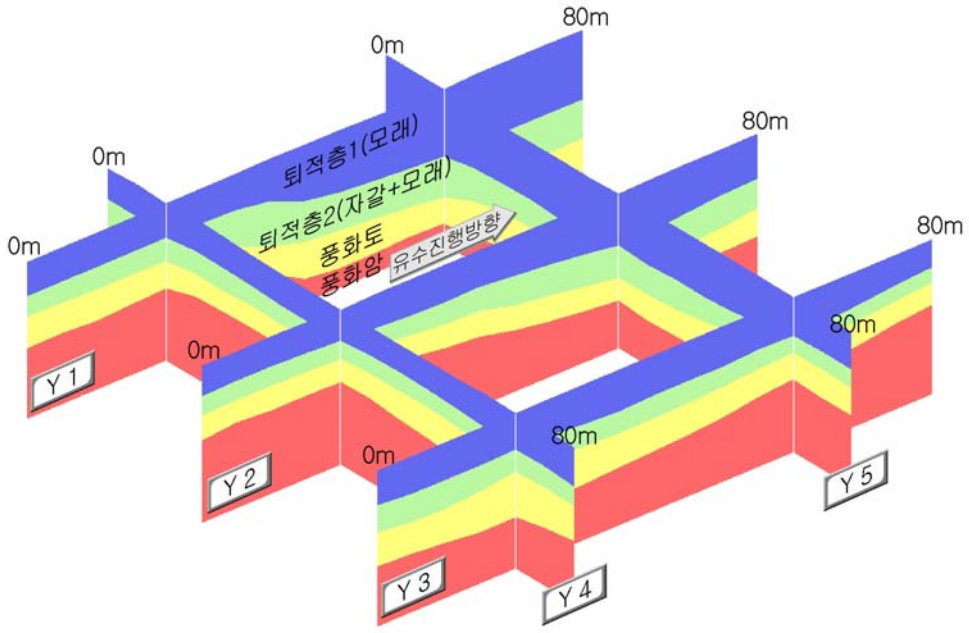
예천 담암제의 경우 모래층으로 이루어진 상부 퇴적층과 자갈과 모래가 혼재하는 하부 퇴적층의 두께는 각각 3.6~9.8m와 1.8~5.8m로 상부퇴적층이 더욱 두꺼운 분포를 보인다.

전체 퇴적층 심도는 용인의 경우 -5.3~-9.0m로 GPR탐사에 비해 약간 깊은 분포를 보이며, 예천의 경우 -6.0~-13.9m로 용인 지역에 비해 퇴적층이 두꺼운 분포

를 보인다(<그림 3.2-110> 참조).

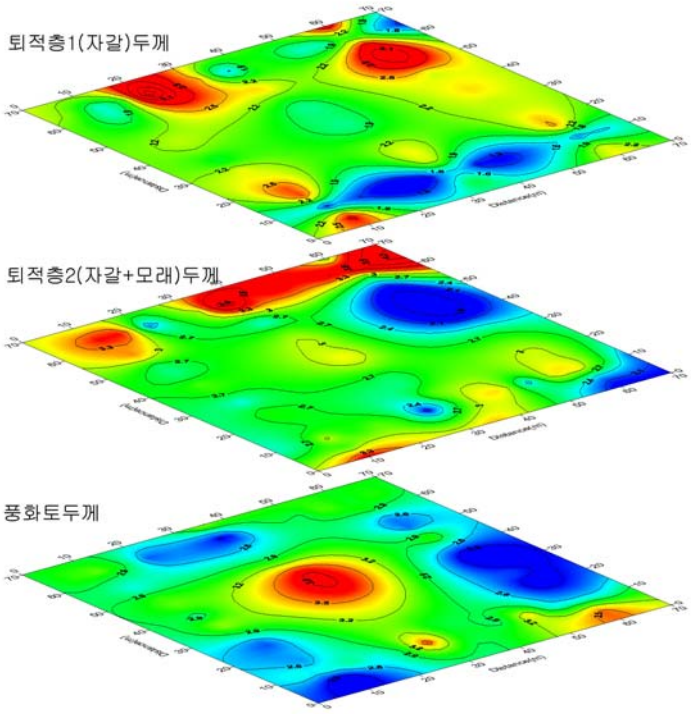


(a) 용인 월촌교

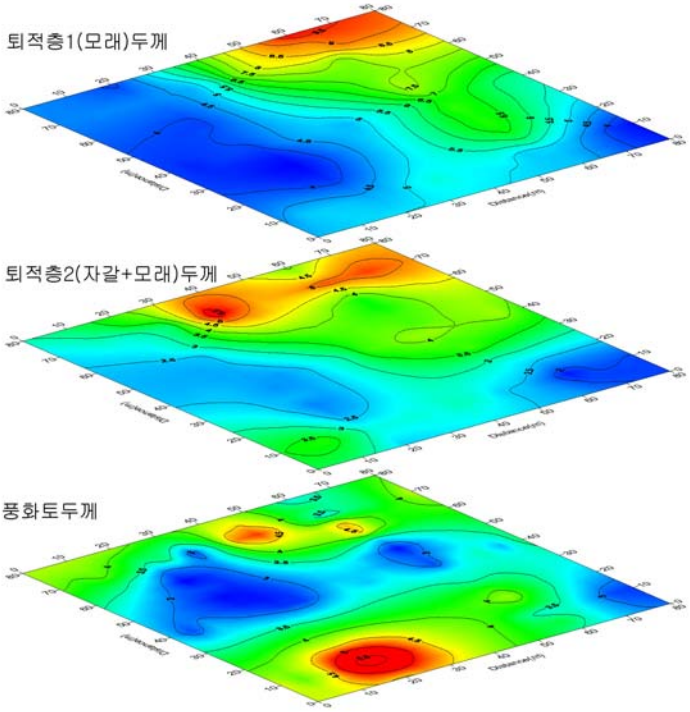


(b) 예천 담암제

<그림 3.2-108> 굴절법탄성파탐사 해석단면 fence diagram

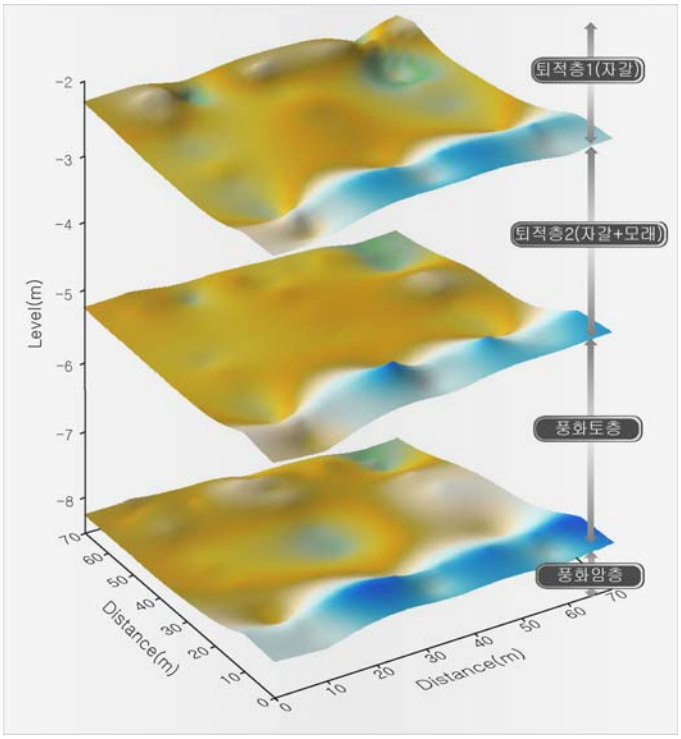


(a) 용인 월촌교

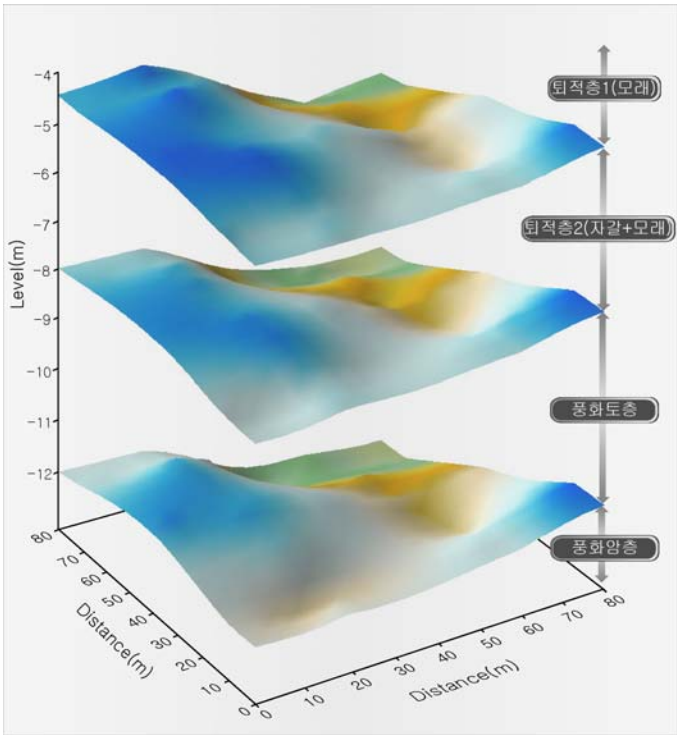


(b) 예천 담암제

<그림 3.2-109> 퇴적층 두께 분포



(a) 용인 월촌교



(b) 예천 담암제

<그림 3.2-110> 퇴적층 고도 분포

② 퇴적층 부피 산정

탄성파탐사 역산단면에서 결정된 퇴적층의 고도값을 수치자료로 환산하여 2차원 내삽한 자료를 바탕으로 하여 지역별로 각 퇴적층의 부피를 계산하였다(<표 3.2-63>, <표 3.2-64> 참조).

상부 퇴적층 및 하부 퇴적층의 부피는 용인의 경우 각각 10,400m^3과 13,600m^3 내외로 GPR탐사에 비해 하부 퇴적층의 부피가 작게 나타났다. 그러나 각각의 퇴적층 부피를 더한 퇴적층의 총 부피는 24,000m^3 내외로 GPR탐사에 비해 약 11% 정도 감소한 수치를 보여 어느 정도 유사한 값을 보인다. 이러한 퇴적층 부피의 차이는 탄성파탐사의 경우 GPR탐사와 달리 반사파를 취합하여 단면을 직접 영상화하지 않고 전파된 초동의 주시를 역산하여 지층을 구분하므로 퇴적층과 하부 풍화토의 점이대에서 영상화 및 역산결과의 차이가 발생되기 때문으로 판단된다.

<표 3.2-63> 퇴적층 부피(용인 월촌교)

계산법 / 지층	Trapezoidal Rule (m^3)	Simpson's Rule (m^3)	Simpson's 3/8 Rule (m^3)
퇴적층1(자갈)	10,386	10,392	10,361
퇴적층2(자갈+모래)	13,606	13,645	13,620
Total	23,992	24,037	23,981

예천 담암제의 상부 및 하부 퇴적층의 부피는 각각 35,000m^3과 21,000m^3 내외로 나타났다. 각각의 퇴적층 부피를 더한 퇴적층의 총 부피는 56,000m^3 내외로 용인지역에 비해 2배 이상 높은 값을 보이며 각 계산법별로 큰 차이를 보이지 않는다.

<표 3.2-64> 퇴적층 부피(예천 담암제)

계산법 / 지층	Trapezoidal Rule (m^3)	Simpson's Rule (m^3)	Simpson's 3/8 Rule (m^3)
퇴적층1(모래)	34,987	34,987	34,977
퇴적층2(자갈+모래)	21,038	21,035	21,049
Total	56,025	56,022	56,026

라. 하상토 부존량 평가를 위한 물리탐사법 적용 기준

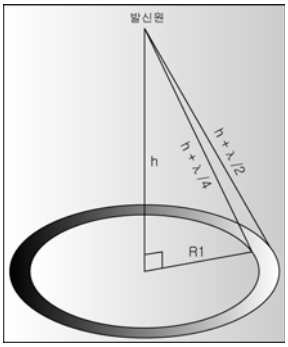
(1) 발진원의 주파수 특성에 따른 분해능(resolution) 분석

하상물리탐사법에 사용되는 송신원은 크게 전자파와 탄성파로 나눌 수 있으나 이들은 모두 물리적으로 파동(wave)이므로 각각 고유의 주파수 대역을 가진다(<표 3.2-65> 참조). 따라서 하상물리탐사법의 분해능은 사용하는 송신원의 주파수(f)에 비례하고 파장(λ)에 반비례하게 된다. 각 탐사법의 수평 및 수직분해능은 각각 프레넬대(<그림 3.2-111> 참조)와 파장과 반비례관계에 있으므로 각 탐사법별 분해능은 GPR이 가장 우수하고 음파탐사와 탄성파탐사의 순으로 분해능이 낮아진다.

<표 3.2-65> 물리탐사법별 송신원 주파수

GPR탐사	탄성파탐사	음파탐사
100~500MHz	50~500Hz	10~20kHz

$$\text{프레넬대(Fresnel zone)} = \sqrt{(h+\frac{\lambda}{4})^2 - h^2}$$



<그림 3.2-111> Fresnel zone

송신원과 퇴적층 경계면의 거리가 증가하고 저주파의 송신원을 사용할수록 수평 및 수직 분해능은 감소하게 된다. 각 탐사법별 분해능은 송신원별 매질의 속도에 따라 달라지겠지만 일반적으로 GPR탐사는 수 cm, 음파탐사는 수십cm 내외이며 탄성파탐사의 경우 1m 내외의 값을 가진다.

동일주파수의 송신원을 사용할 경우 송신원의 매질내 속도가 빠를수록 파장이 커지므로 분해능이 감소하게 된다. 그러나 하상퇴적층의 조사에 있어서는 퇴적층의 탄성파 속도가 암반에 비해 상대적으로 느리므로 분해능이 상대적으로 증가하는 효과를 기대할 수 있다.

(2) 발진원의 주파수 특성에 따른 가탐심도 분석

하상물리탐사법에서 사용되는 발진원의 투과심도(penetration depth) 및 투과에너지는 송신원의 주파수(f)에 반비례한다. 그러므로 각 탐사법의 가탐심도는 분해능의 역순이 된다. 즉 탄성파탐사가 가탐심도가 가장 크며 음파탐사와 GPR탐사의 순으로 가탐심도가 감소한다. 각 탐사법의 가탐심도를 정확히 계산하는 것은 어려우나 일반적으로 GPR탐사의 경우는 수 m, 음파탐사는 20 m 내외이며 탄성파탐사의 경우 수십 m 까지 가능하다. 본 연구에서도 퇴적층의 심도가 10 m가 넘는 예천 담암제의 경우 GPR탐사로써 퇴적층의 두께를 산정할 수 없었다.

이상과 같은 분해능과 투과심도를 동시에 고려하여 적절한 물리탐사법을 적용해야 최상의 결과를 얻을 수 있다.

(3) 하천심도에 따른 물리탐사 적용성 분석

위에서 살펴본 각 탐사법별 분해능과 투과심도는 물리적인 법칙에 의해 결정되는 값들이지만, 현실적으로는 장비의 특성으로 인해 물리탐사법의 적용이 제한되는 경우가 생길 수 있으므로 물리탐사법 선정시에 이를 고려해야 한다. 본 연구대상 탐사법중 탄성파탐사는 수심의 제한을 받지 않으나, 음파탐사의 경우에는 장비의 예인이나 다중반사파의 영향으로 인해 수심이 5 m 이상인 지역에서 적용하는 것이 일반적이다. 또한 GPR탐사의 경우 수심이 깊으면 전자파의 감쇠가 심하므로 20 m 이내의 수심에서 적용하는 것이 바람직하다.

마. 하상준설량 조사기법 지침

하상 퇴적층 부존량 조사를 위해 적용 가능한 물리탐사법은 현실적으로 굴절법 탄성파탐사, GPR탐사 및 음파탐사 등의 세 가지 정도이다. 이들 각 탐사법은 사용

하는 송신원의 종류 및 주파수 특성이 모두 다르므로 분해능과 가탐심도 및 장비 특성 등을 고려하여 각 현장 특성에 적합한 것을 선택하여야 한다(<표 3.2-66> 참조).

<표 3.2-66> 하상조사를 위한 물리탐사법 특성

구 분	GPR탐사	음파탐사	굴절법탄성파탐사
적용수심(m)	< 20	> 5	제한 없음
가탐심도(m)	5~10	20~30	20~50

(1) 하상특성별 물리탐사법 선정 기준

(가) 하천심도별 선정기준

- 수륙혼합형태의 탐사가 필요한 하상에서는 음파탐사가 불가능하므로 GPR탐사나 탄성파탐사를 실시한다.
- 음파탐사는 최소 수심 5m 이상인 하상에서 실시한다.
- GPR탐사는 수심 20m 이상의 하상에서는 시행하지 않는 것이 바람직하다.

(나) 가탐심도별 선정기준

- 퇴적층의 전기전도도에 따라 달라질 수 있으나, 일반적으로 퇴적층 심도가 5m 이상인 곳에서는 가탐심도가 작은 GPR탐사의 적용을 피하고 수심을 고려하여 음파탐사나 탄성파탐사를 실시한다.
- 음파탐사나 탄성파탐사는 가탐심도가 비교적 큰 편이나 음파탐사의 경우 탄성파탐사에 비해 고주파의 송신원을 사용하므로 퇴적층 심도가 30m 이상인 곳에서는 적용이 곤란하다.
- 탄성파탐사의 경우 가탐심도가 가장 크지만 30m 이상의 가탐심도를 유지하기 위해서는 에너지가 큰 화약이나 shot gun 등을 발진원으로 사용한다.

(2) 탐사측선 및 탐사파라미터 설계

각 물리탐사법을 선정한 이후에는 대상 지역의 전체적인 퇴적층 분포를 확인할

수 있도록 충분한 수(최소 5개 측선 이상)의 측선을 격자모양으로 설정한다.

(가) GPR탐사

- 송신원은 조사대상 심도를 투과할 수 있는 범위 내에서 최대한 고주파의 안테나를 사용한다.
- 필요에 따라 공통송신점탐사나 다중채널탐사를 실시하여 탐사지역에서의 전자기파 전파속도를 구한다. 이와 같은 방법이 불가능할 경우에는 유전율을 측정하여 이로부터 간접적으로 매질의 전자기파 속도를 구할 수 있다.

(나) 음파탐사

- 충적층, 홍적측 등과 같은 일반적인 퇴적층이 존재하는 경우에는 3.5 kHz 내외의 주파수를 가지는 천부지층탐사기(Sub Bottom Profiler)나 Chirp 음파 탐사기를 사용하는 것이 해상도면에서 유리하다. 그러나 조립의 퇴적층이 존재할 경우에는 에너지가 크고 주파수가 낮은 전자유도식의 음원을 병행하여 사용하는 것이 바람직하다.
- 담수지역에서는 수중에서 방전하는 것이 어려우므로 방전식 스파커를 음원으로 사용하지 않는 것이 바람직하다.
- 경질의 암반이나 자갈층이 하저면 부근에 분포하는 지역에서는 다중반사가 강하고 음파의 투과율이 낮아 음파탐사가 적합하지 않을 수 있다. 이러한 지역에서는 다중채널 반사법탄성파탐사나 굴절법탄성파탐사를 적극적으로 검토해야 한다.

(다) 탄성파탐사

- 수진간격과 측선 길이는 조사대상지역의 퇴적층 심도를 고려하여 설정한다. 수진간격은 작게 설정하여 분해능을 높일 수 있도록 하되 전체적인 측선 길이가 조사대상 심도의 5배 이상이 되도록 채널수와 수진간격을 조정한다.
- 자료의 신뢰도를 높이고 충분한 가탐심도를 유지하기위하여 채널수는 24개 이상으로 설정한다.
- 양질의 수진자료를 얻기 위하여 측선이 길 경우(120m 이상)에는 해머대신 화약이나 shot gun과 같은 고에너지의 발진원을 사용한다.

(3) 레벨측량

- 각 물리탐사 측선상에서 대상 지역의 전체적인 2차원 표고를 반영할 수 있도록 수진간격 또는 적정 간격으로 레벨 측량을 실시한다.
- 대상지역의 지형기복이 심한 경우 탐사측선이나 적정 간격에 상관없이 실제 지형을 반영할 수 있도록 충분한 수의 지점에서 레벨 측량을 실시한다.

(4) 시추조사

- 물리탐사자료로부터 구해진 해석단면으로부터 퇴적층 구분의 기준을 선정하고 해당 지역의 토질을 확인하기 위하여 최소 1개 이상의 시추조사를 실시한다.
- 시추공은 탐사측선상에 위치하도록 설정하고, 현장여건상 장비진입이 어려운 경우에는 최대한 탐사측선과 근접한 위치로 설정한다.

(5) 물리탐사 자료 해석

- GPR탐사 및 음파탐사는 기록된 반사파를 취합하여 지하매질의 2차원 영상을 도출한 후 시추자료와 비교하여 퇴적층의 심도를 결정한다.
- 굴절법탄성파탐사는 기록된 탄성파의 초동을 발췌하여 역산함으로써 지하매질의 종파속도값을 계산하고 시추자료와 비교하여 퇴적층의 탄성파속도를 결정한다.

(6) 퇴적층 심도 자료 2차원 내삽

- 물리탐사 해석단면상의 퇴적층 심도를 측선별로 수치화하여 대상지역의 상대좌표로 환산한 뒤 모든 자료를 취합하여 2차원 내삽을 실시한다.

(7) 대상지역내 퇴적층 부피 계산

- 표고측량값과 물리탐사로부터 취득된 퇴적층 심도를 일정간격으로 2차원 내삽하여 퇴적층의 부피를 계산한다.

바. 소결론

본 절에서는 여러 지구물리탐사법중 하상토의 부존량을 파악하는데 효과적일 것으로 예상되는 지하투과레이다탐사(GPR: Ground Penetrating Radar) 및 굴절법탄성파탐사를 상이한 토질의 2개소에 적용하여 토질별 하상토의 부존량 평가 및 탐사기법별 특성 분석결과는 다음과 같다.

(1) 용인 월촌교 현장에서 수행된 GPR탐사 결과 상부 퇴적층 및 하부 퇴적층 및 퇴적층의 총 부피는 각각 8,900m^3, 17,600m^3, 26,500~26,600m^3 내외로 하부 퇴적층의 부피가 상부 퇴적층에 비해 약 2배정도 큰 것으로 나타났다.

(2) 탄성파탐사 결과 퇴적층 및 하부 퇴적층 및 퇴적층의 총 부피는 용인의 경우 각각 10,400m^3와 13,600m^3, 24,000m^3, 예천 담암제의 경우 35,000m^3, 21,000m^3 , 56,000m^3 내외로 용인지역에 비해 2배 이상 높은 값을 보이며 각 계산법별로 큰 차이를 보이지 않는다.

(3) 용인 월촌교에서 수행된 탄성파탐사에 의한 결과는 GPR탐사에 비해 하부 퇴적층의 부피가 작게 나타났으며, 총 부피의 경우 약 11% 정도 감소한 유사한 결과를 보였다. 이러한 차이는 탄성파탐사의 경우 GPR탐사와 달리 반사파를 취합하여 단면을 직접 영상화하지 않고 전파된 초동의 주시를 역산하여 지층을 구분하므로 퇴적층과 하부 풍화토의 점이대에서 영상화 및 역산결과의 차이가 발생되기 때문으로 판단된다.

8. 물리탐사법을 이용한 하상토의 공학적 특성 분석

지반의 탄성파 속도는 기본적으로 지반을 탄성체로 가정할 때 밀도, 체적탄성계수(bulk modulus) 및 전단탄성계수(shear modulus) 등의 함수이다. 이러한 탄성파 속도를 결정하는 계수들은 독립 변수가 아니며, P파(종파) 및 S파(횡파, 전단파)의 속도 및 지반 밀도를 측정하면 탄성파 이론에 의해 계산될 수 있다(손호웅 등, 2000). 이러한 계수들은 지반 공학적 특성을 나타내므로, 현장에서의 탄성파 속도 측정은 바로 지반 공학적 특성 파악과 직결된다고 할 수 있다. 따라서 현지 지반에서의 정확한 탄성파속도는 현장 다짐도 관리뿐만 아니라 지반굴착, 암발파 설계, 터널 및 사면 안전성 검토, 내진설계 등의 토목 및 건축구조물 설계 및 시공에 효율적으로 활용될 수 있다.

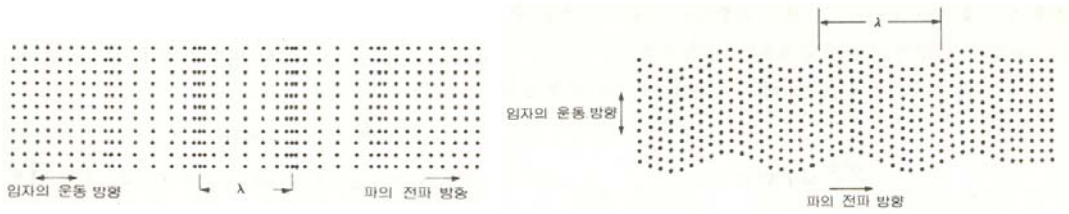
특히 전단파는 탄성파 중에서도 종파에 비해 지반 밀도, 함수율, 강진동 지반응답 효과 등에 더욱 민감하기 때문에 내진설계를 위한 지반 동적 물성치 파악이나 현장 다짐도 측정에 활용 가능성이 크다(목영진 등, 2005; 박철수 등, 2006 ; 황윤구와 김기영, 2006). 국내연구 동향을 살펴보면, 탄성파 관련 연구는 지하구조물 설계를 위한 암반분류(선우춘 등, 2001; 이상규 등, 1998), 내진설계를 위한 지반 동적 거동 특성 파악(김동수 등, 2005; 목영진, 1994; 황세호와 이상규, 1999) 등에 탄성파 속도를 측정하기 위한 다양한 물리탐사법이 활발히 적용되고 있다. 그러나 정밀도가 상대적으로 높은 시추공 물리탐사법은 공벽유지가 용이한 암반을 주 대상으로 하고 토층에 대한 적용빈도는 상대적으로 매우 낮은 상태이므로 토층의 물성이나 전단특성은 주로 실내시험에 의해 파악되고 있는 실정이다(김종렬 등, 2004; 김해경, 2003; 이상은과 박상범, 2006; 조계춘과 이인모, 2002).

본 연구에서는 하상토를 대상으로 시추공 물리탐사를 통해 토질 및 다짐도에 따른 전단파 속도를 파악하여 하상토의 다짐도 및 일축압축강도와 같은 공학적 특성 등을 경제적인 방법으로 현장에서 파악하는 기법을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 현장에서 측정된 다짐도와 탄성파 속도 및 실내시험을 통해 측정된 다짐도에 따른 강도 및 탄성파 속도와의 비교 분석이 이루어졌다.

가. 지하매질의 탄성파 속도와 탄성계수

(1) 지하매질의 탄성파 속도 특성

탄성파의 파동방정식은 응력(stress)과 변형률(strain)의 관계인 Hooke의 법칙과 Newton의 운동법칙을 이용하면 유도될 수 있다. 이러한 파동방정식은 무한 등방성 균질매질에서 두 개의 파동방정식으로 분해될 수 있으며 각각의 파동방정식을 만족하는 P파(primary wave, longitudinal wave)와 S파(secondary wave, transverse wave, shear wave)가 존재하는데 이를 합쳐서 실체파(body wave)라고 한다. 이러한 P파와 S파는 탄성계수나 밀도를 매개변수로 상호 연관성을 가지나, 입자의 운동방향이나 속도 등의 물리적 특성은 상이한 양상을 보인다. P파는 매질의 체적변화(dilatation)에 의해 발생되는 파동으로, 매질 내 입자의 운동방향의 경우 파의 진행방향과 평행하므로 종파라고도 불린다(<그림 3.2-112> 참조). 반면 S파는 매질의 회전변형(shear strain)에 의해 생기는 파동으로 입자의 운동방향은 파의 진행방향과 수직이므로 횡파 또는 전단파라고도 불린다.



(a)P파 입자의 운동방향 (b)S파 입자의 운동방향

<그림 3.2-112> 실체파(body wave) 입자의 운동방향 (민경덕 등, 1987)

일반적으로 P파 및 S파의 속도는 매질의 밀도 ρ 및 Lame 상수인 λ와 μ의 함수이며 식 (3.2-10)과 같이 주어진다.

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \qquad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \tag{3.2-10}$$

이 때, λ와 μ는 체적탄성계수와 전단탄성계수 등과 연관된 상수로 언제나 양의 값을 가지므로 P파의 속도는 S파의 속도보다 항상 크게 된다. 또한 탄성파 속도는

밀도에 반비례하나 매질의 밀도 증가에 따라 Lame 상수가 증가하게 되므로 결과적으로는 밀도에 비례하여 증가하게 된다. 따라서 지반의 탄성파 속도는 밀도와 함께 매질의 종류나 상태에 따라 탄성계수의 영향을 크게 받는다고 할 수 있다. 이러한 속도변화를 일으키는 요인은 매질의 강도, 공극률(porosity), 교결작용(cementation), 균열(crack) 및 공극을 채우고 있는 유체의 종류 등과 같이 다양하므로 <표 3.2-67>에서 보는 바와 같이 동일한 매질에서도 탄성파 속도의 범위가 큰 것을 알 수 있다. 그러므로 지반의 탄성파 속도를 이용하여 매질의 강도나 밀도 등과 같은 공학적 특성을 보다 정확하게 파악하기 위해서는 현장에서의 탄성파 속도 측정이 매우 중요하다고 할 수 있다.

<표 3.2-67> 토사, 암반 및 여러 가지 물질의 탄성파 속도(장현삼 등, 1999)

매질 종류		P파 속도 (m/s)	S파 속도 (m/s)	프와송비	밀도 (g/cm^3)
충적층	점성토	250~700	80~160	0.35~0.50	1.3~1.7
	사질토		60~200		1.6~2.0
	사력		250~350		1.8~2.1
홍적층	점성토	1000~2000	160~250		1.4~1.8
	사질토		200~350		1.7~2.1
	사력		300~600		1.8~2.2
암 석	이암	2000~3000	600~1000	0.30~0.40	2.2~2.6
	사암	2000~3500	700~2000		2.5~2.7
	화강암	4000~5700	2100~3300	0.25~0.35	2.6~2.8
	현무암	4400~6700	2500~3800		2.8~3.0
상부 맨틀		7500~8000	4300~4600	0.25	3.3
공기(건조, 0℃, 1기압)		331	-	-	0
물(증류수, 23~27℃)		1500	-	-	1.0
얼음		3230	1600	0.338	0.338
콘크리트		3100	1960	0.167	2.3
철		5950	3240	0.289	7.86

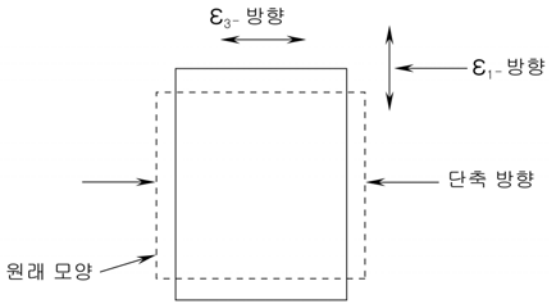
(2) 지하매질의 탄성계수 특성

지반의 탄성계수는 지내력 평가나 침하량 혹은 변형률 계산, 내진설계 등의 기초자료로 사용되며 매질의 강도나 다짐도와 같은 공학적 특성과 직접적인 연관이 있다.

Hooke의 법칙이 적용되는 탄성매질에서는 일축 방향으로 응력 σ를 가하게 되면 변형률 ϵ은 식 (3.2-11)과 같이 응력과 선형적인 관계를 가지며 이때 비례상수 E를 영률(Young′s modulus) 또는 종탄성계수라고 한다.

$$\sigma = E\epsilon \tag{3.2-11}$$

또한, <그림 3.2-113>과 같이 탄성체에 단축 압축을 가하면 응력을 가한 방향으로는 탄성체의 길이가 짧아지지만 응력과 수직인 방향으로는 탄성체의 길이가 늘어나게 된다. 이 두 방향의 변형률의 비에 식 (3.2-12)와 같이 음의 부호를 붙인 값을 프와송비(Poisson′s ratio)라고 하며 0.5보다 작은 값을 가지게 된다.



<그림 3.2-113> 프와송비 모식도

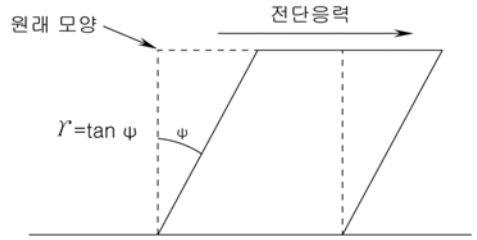
$$\nu = -\frac{\epsilon_1}{\epsilon_3} \tag{3.2-12}$$

이외에도 등방성 매질인 물체에 세 방향에서 응력을 가한다면 원래의 체적 V_0는 V_f가 될 것이며 이 체적 변화율 Δ에 대한 응력변화 ΔP의 비를 체적탄성계수(bulk modulus)라고 한다(식 (3.2-13) 참조). 이러한 K값은 매질의 비압축률(incompressibility)

을 나타내는 지표이며 반대로 K의 역수를 압축률(compressibility)이라고 한다.

$$K = \frac{\Delta P}{\Delta}, \qquad \Delta = \frac{V_f - V_0}{V_0} \tag{3.2-13}$$

마지막으로 <그림 3.2-114>와 같이 전단응력 σ_s를 가하면 전단변형률 γ는 식 (3.2-14)와 같은 관계를 가진다. 이 때 G값을 전단탄성계수(shear modulus) 또는 강성률(rigidity)이라고 한다.



<그림 3.2-114> 전단탄성계수 모식도

$$\sigma_s = G\gamma \tag{3.2-14}$$

위와 같은 4가지 탄성계수는 서로 독립적이 아니며 식 (3.2-15)와 같이 P파와 S파의 함수로 표현할 수 있으므로 탄성파 속도를 측정하면 4가지 탄성계수를 계산할 수 있다. 이처럼 탄성파 속도를 이용하여 측정된 탄성계수를 응력과 변형률 관계를 이용하여 측정한 탄성계수와 구별하여 동탄성계수(dynamic elastic modulus)라고 하며 지반의 동적특성 분석에 있어 매우 중요한 인자가 된다.

$$E = \rho\frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2/V_s^2 - 1},\ \nu = \frac{V_p^2/2V_s^2 - 1}{V_p^2/V_s^2 - 1},\ K = \rho(V_p^2 - \frac{4V_s^2}{3}),\ G = \rho V_s^2 \tag{3.2-15}$$

나. 전단파 속도 측정을 위한 물리탐사 방법

전단파 속도 측정을 위한 물리탐사 방법은 크게 표면파를 이용한 지표물리탐사 기법과 탄성파를 이용한 시추공 물리탐사기법 등이 있다. 일반적으로 지표물리탐사법은 넓은 지역의 탄성파 속도 분포를 빠른 시간 안에 파악할 수 있다는 장점(Stokoe et al., 1994; Xia et al., 1999)이 있는 반면에, 직접적인 탄성파 속도의 측정이 아닌 표면파의 스펙트럼 분석을 통한 역산법(Hayashi and Suzuki, 2002; Ivanov et al., 2000; Park et al., 2000)을 이용하여 속도분포를 간접적으로 파악하게 되므로 공내물리탐사법에 비해 자료의 정밀도가 다소 떨어진다는 단점이 있다. 이와 반대로 공내물리탐사법은 분해능은 높으나 특정 지점에서의 탄성파속도 분포만을 파악할 수 있으므로 넓은 지역을 조사하기 위해서는 많은 비용과 시간이 소요된다는 단점이 있다.

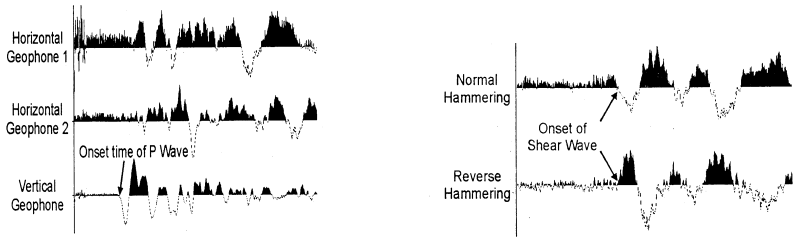
본 연구에서는 토사를 대상으로 토질별, 다짐도별 공학적 특성파악이 주요 목적이므로 넓은 지역의 탄성파 속도 분포를 빠르게 파악하는 것보다는 정밀도가 높은 탐사법의 적용이 적합하다고 판단되어 지표물리탐사법은 배제하고 공내물리탐사법을 적용하였다.

일반적으로 탄성파를 이용한 시추공 물리탐사법은 발진원의 주파수 및 에너지 특성이 탐사법에 따라 각각 다르나 상반되는 위상의 횡파를 발생시켜 횡파의 도달시간을 측정하는 방식은 기본적으로 동일하다. 각 탄성파 발생원에서 생성된 횡파는 진행방향에 대하여 입자의 운동방향이 수직인 수평횡파(SH-wave)이기 때문에 발진 방향을 반대로 하면 S파의 위상은 <그림 3.2-115>와 같이 180°의 차이를 나타나게 된다. 이와 같은 위상변화는 일반적으로 P파 다음에 뒤따라 나타나는 S파를 판독하는데 매우 중요한 정보로서 위상변화를 보장하기 위해서는 수진기가 탄성파의 발진방향과 평행하게 위치하도록 하는 것이 중요하다. 또한 모든 탄성파 물리검층에서는 파의 위상을 쉽게 구분할 수 있도록 3성분 수진기나 복수의 수진기를 사용하고 있다. 한편 현장에서 탄성파 기록을 획득할 때에는 시험측정을 통해 이득(Gain), 샘플링 간격, 측정 시간, 필터 설정 등의 여러 변수를 현장 여건에 맞도록 조절하여야 한다.

수진된 탄성파의 자료처리는 포맷 변환 및 탄성파탐사의 파형 기록정리, 주파수 분석 및 필터링, P파 및 S파의 도달시간 판독, 구간속도 결정 등의 순서로 이루어지게 된다. S파 발생원에 의한 S파는 수진기의 3성분 가운데 두 개의 수평 수진기에서 감지되

고, P파는 수직 수진기에서 감지되게 되므로 탄성파 기록들을 송신원의 방향 및 수진기 성분에 따라 정리해야 한다.

일반적으로 하향식 탄성파 탐사 및 시추공간 탄성파탐사의 자료처리 시 필터링을 하지 않는 것이 좋으므로 주파수 분석 및 필터링은 잡음수준에 비해 탄성파 신호가 미약하여 초동을 판별하기가 곤란한 경우에만 수행하게 되며 이때 필터링에 의한 위상의 찌그러짐을 피하기 위해 세심한 주의가 요구된다. 최종 판독된 각 심도별 초동 도달시간 및 주행거리를 이용하여, 각 심도의 구간속도를 결정하게 된다.



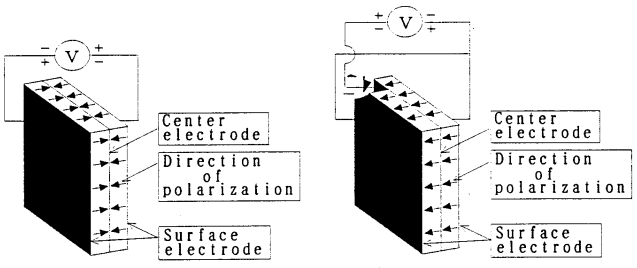
(a) 종파 및 횡파 기록 (b) 횡파 역전 파형

<그림 3.2-115> 탄성파형 수진 기록.

다. 벤더 엘리멘트를 이용한 실내 전단파 측정 실험

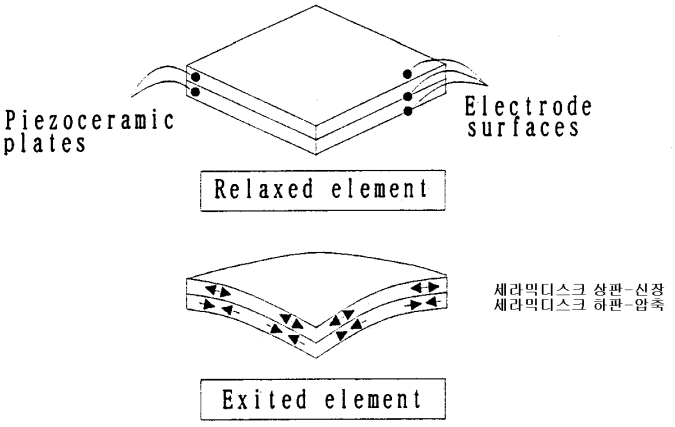
(1) 실험원리

벤더 엘리먼트(Bander Element)는 샌드위치와 같이 2장의 얇은 피에조세라믹(Piezoceramic) 판을 이용해 만들어진 탄성파 측정 장치이다. <그림 3.2-116>~<그림 3.2-118>에서는 벤더 엘리먼트의 원리, 전압을 보냈을 때의 벤더 엘리먼트의 거동, 실험장치에 장착했을 때의 벤더 엘리먼트의 거동 등을 보여준다.

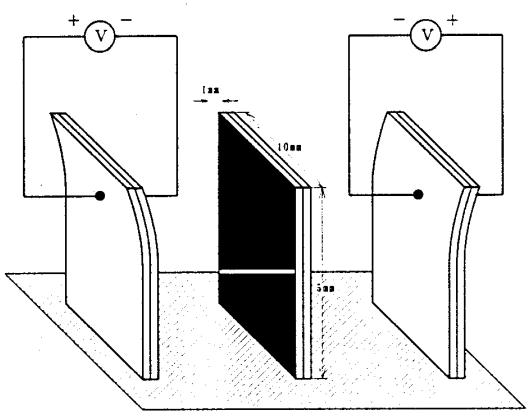


<그림 3.2-116> 벤더 엘리먼트의 원리

전단파 측정을 위한 벤더 엘리멘트 장치의 원리는 외부로부터 전압을 주면 각 피에조세라믹 판이 각각 신장 및 압축 방향으로 변형하여 벤더 엘리먼트 전체에 휨변형이 발생한다. 즉, 전압을 주면 진동이 발생하는 벤더 엘리먼트를 켄틸레버보로하여 발생원으로 이용한 것이다. 또, 이것과는 반대로 외부로부터 벤더 엘리먼트에 휨변형을 가하면 각 피에조세라믹 판에 각각 압축 및 신장 방향으로 변형이 발생하여 벤더 엘리먼트의 내부에 전하가 생기는 구조로 되어 있다. 즉, 진동을 전압으로 변환하여 수신이 가능하다. 이와 같이 벤더 엘리먼트를 이용하는 것으로, 간단하게 전단파의 발생 및 수진(受振)을 측정할 수가 있다.



<그림 3.2-117> 전압을 반대로 할 때 벤더 엘리먼트의 거동



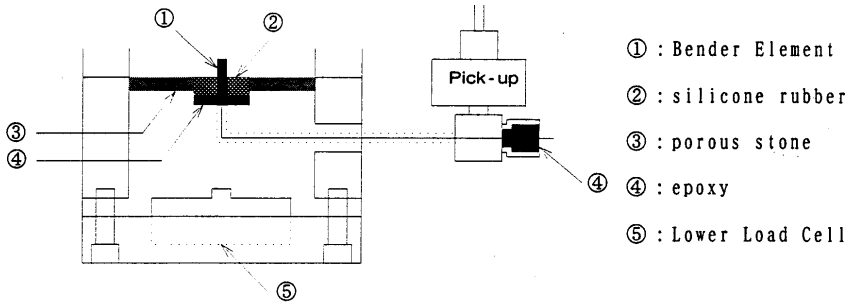
<그림 3.2-118> 본 장치에 장착했을 때 벤더 엘리먼트의 거동

(2) 벤더 엘리먼트의 고정 및 방수 처리

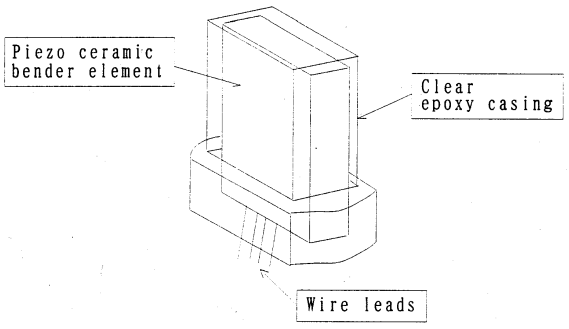
발진 및 수진의 2개의 벤더 엘리먼트를 각각 본 실험 장치의 상부 피스톤 및 하부 페데스탈에 장착할 때, 벤더 엘리먼트와 상부 피스톤은 물론 하부 페데스탈의 간격이 충분히 떨어질 필요가 있다. 이것은 벤더 엘리먼트로 발생한 진동이 상부 피스톤을 경유하여 압밀링에 전달되어 압밀링에 진동이 발생하여, 공시체내를 전달하는 전단파의 정확한 측정이 불가능하게 될 가능성을 막기 위해서 이다.

이것은 하부 페데스탈의 경우에도 같다. 거기서, 본 실험 장치에서는 벤더 엘리먼트와 상부 피스톤 및 하부 페데스탈과의 접촉 면적을 줄이기 위해, <그림 3.2-119>과 같이 벤더 엘리먼트의 저부를 에폭시 접착제로 켄틸레버보 처럼 고정하여 벤더 엘리먼트와 페데스탈의 사이를 실리콘 고무로 묻었다.

또한 벤더 엘리먼트는 매우 높은 임피던스(교류 회로에서의 전압과 전류의 비(比))이기 때문에, 확실한 방수 처리를 실시할 필요가 있다. 따라서 <그림 3.2-120>에 나타낸 것처럼 투명한 에폭시로 케이싱을 하고, 본 실험장치에 물을 넣을 때에도 리드 선에 물의 영향이 미치지 않게, 같은 방법으로 케이싱을 한다.



<그림 3.2-119> 벤더 엘리먼트와 페데스탈의 고정

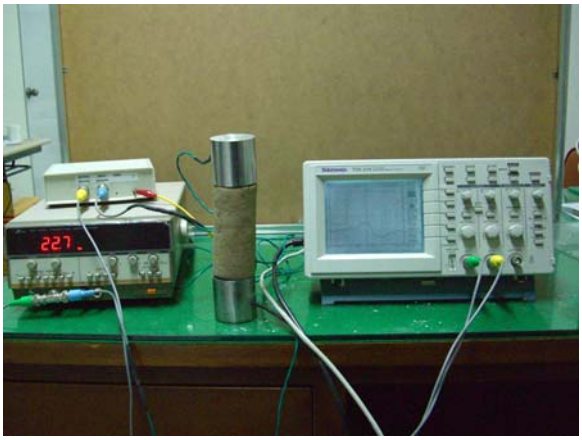


<그림 3.2-120> 벤더 엘리먼트의 방수가공

(3) 실험장치 및 실험방법

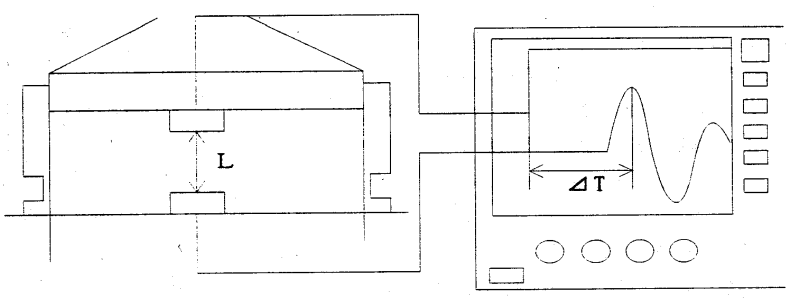
정적다짐시험에 의해 제작된 공시체의 양단면에 전단파를 발생시키고 발생된 전단파를 감지할 수 있는 벤더엘리먼트를 부착한다. 전단파의 발생 장치인 Function Generator(파형발생기)부터 발생된 전기적인 신호(약 5~7V)를 상부 피스톤에 장착된 발진용 벤더 엘리먼트로 줄 수 있어 공시체에 전단파를 주는 것이 가능하다. 또한, 하부 페데스탈에 장착된 수진용의 벤더 엘리먼트를 이용하여 공시체 내부를 전달한 전단파의 전기적 신호 (약 0.1 μsec)를 수진하는 것이 가능하다. 모든 전기를 사용하는 실험장치가 그렇듯이 본 실험 장치에서도 노이즈 발생이 문제가 되어, 이를 최소화하기 증폭기를 사용하였다. <그림 3.2-121>은 본 실험 장치의 전체의 모습을 개략적으로 나타낸 것이다.

Function Generator에서 발진측의 벤더 엘리먼트에 입력한 전기적 신호 (본 연구에서는 구형파를 이용)와 수진측의 벤더 엘리먼트에서 받은 전기적 신호, 즉 전단파를 Oscilloscope 로 읽어, 발진측의 벤더 엘리먼트에서 수진측의 벤더 엘리먼트까지 도달하는데 걸리는 시간 ΔT를 Oscilloscope 에 준비되어 있는 커서를 사용하여 눈으로 읽어, 전단파의 전달 시간(ΔT)을 결정하였다. 또한 <그림 3.2-122>와 같이 공시체의 높이 h 와는 별도로 전단파의 전달 거리 L 은 양쪽 벤더 엘리먼트의 선단에서부터 선단까지의 거리로 정의하여, 그 값을 이용해 공시체 내를 전달하는 전단파 속도 Vs = L/ΔT를 구했다.



<그림 3.2-121> 전단파 계측 장비

본 연구에서, Function Generator 를 이용하여 출력 7V 의 구형파를 주파수 100 Hz 로, 상부의 재하판에 있는 발진측의 벤더 엘리먼트에 보내어 전단파를 발생시킨다. 공시체를 전달한 전단파를 하부 페데스탈에 있는 수진측의 벤더 엘리먼트를 이용해 수진을 실시하여 전기적 신호로서 Oscilloscope에 의해 변환된다. 또 Oscilloscope 에 수진된 수진파의 레벨은 10 mV정도 있어, 응답 주파수의 범위는 20~50 kHz 이다.



<그림 3.2-122> 전달시간 $\triangle T$와 전달거리 L의 정의

라. 현장실험

본 연구에서는 앞서 언급했듯이 동일한 하상토를 대상으로 현장 시추공 물리탐사기법에 의한 현장 전단파 속도와 실내시험에 의한 전단파 속도 등을 측정하여 하상토의 현장 및 실내 전단파 속도와 다짐도와의 공학적 특성 추정 기법 등을 제시하고자 하였다.

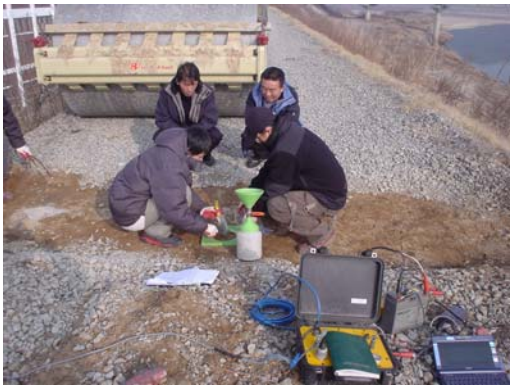
적용된 현장 시추공 물리탐사기법은 P파나 S파의 심도별 속도분포를 세밀하게 파악할 수 있는 하향식 탄성파탐사기법을 적용하였으며, 이때 인한 탄성파 속도 측정은 케이싱 삽입에 의한 오차를 줄이고자 케이싱 매설 없이 현장실험을 실시하였다. 또한, 본 실험은 원지반의 교란을 최소화하기 위하여 핸드오거보링을 지양하고 관입형 말뚝으로 시험공을 형성하여 최대한 불교란 상태에서의 탄성파 속도 값을 얻고자 노력하였다.

(1) 실험방법 및 내용

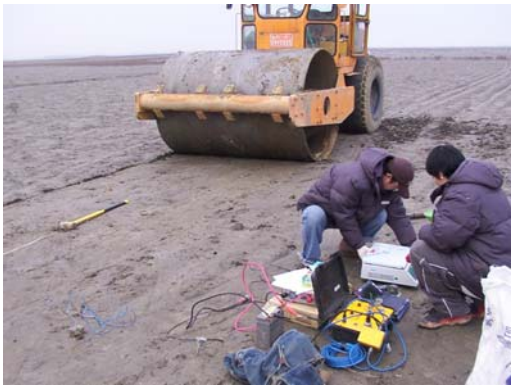
하향식 탄성파탐사법은 하상토의 토질 및 다짐도에 따른 원지반 전단파 속도를

구하기 위하여 수행되었다. 대상지역은 경남 합천군 청덕면 광암제의 빈입도 모래(SP)와 전북 김제시 만경읍 매립지상 소성이 작은 점토(CL)을 대상으로 하였다. 하향식 탄성파탐사법은 <그림 3.2-123>에서 보듯이 현장 다짐도 변화에 따른 전단파 및 일축압축강도특성을 평가하기 위하여 다짐도가 다른 5개 지점과 그 중 2개 지점을 선정하여 10t 다짐롤러를 이용하여 1회 및 2회 다짐된 지반에 대하여 들밀도 시험 및 하향식 탄성파탐사를 수행하는 방식으로 수행되었다.

한편, 하향식 탄성파탐사는 심도별 전단파 속도의 변화를 살피기 위해 동일 지점의 5cm, 35cm, 55 cm 심도에서 자료를 동시에 취득하였다. 수진기 설치는 관입형 말뚝을 사용하여 60cm 시험공을 형성한 후 시험공벽에 최대한 밀착시켜 S/N ratio를 높였다. 또한, 수진기는 수진기와 평행한 방향으로 180°의 위상변화를 주며 전단파를 발진시켜 자료해석시 정밀도를 높이고자 하였다.



(a) 광암제 현장시험



(b) 만경읍 매립지 현장시험

<그림 3.2-123> 현장시험 전경

실내 시험방법은 전술된 벤더 엘리멘트를 이용한 실내 전단파 측정 실험과 같다. <표 3.2-68>에서는 물리탐사법을 이용한 하상토의 공학적 특성 평가를 위해 수행된 현장실험 및 실내시험의 종류와 내용을 보여준다.

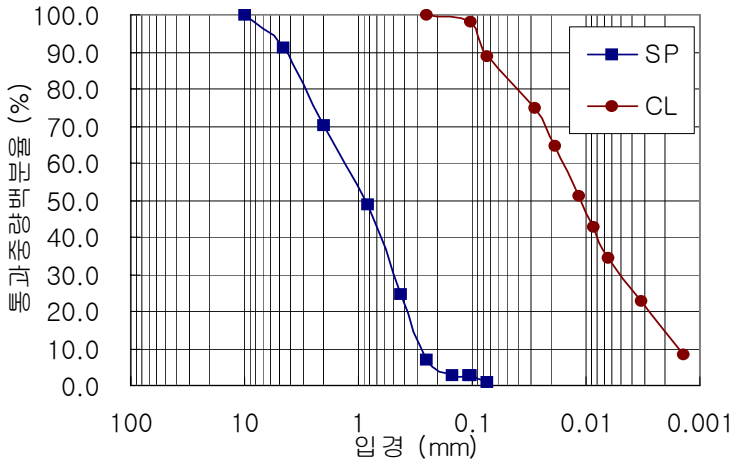
<표 3.2-68> 물리탐사 현장실험 및 실내시험 종류와 내용

실험 조건	변화인자	변 화 값	실험 항목
현장 실험	흙 종류	◦ 모래(SP)/점토(CL)	◦ 전단파 속도 측정
	상대 다짐도	◦ 상대다짐도가 다른 15개소 지점	
실내 실험	흙 종류	◦ 모래(SP)/점토(CL)	◦ 전단파 속도 측정 ◦ 일축압축강도
	상대 다짐도	◦ 85%, 90%, 95%, 100%	

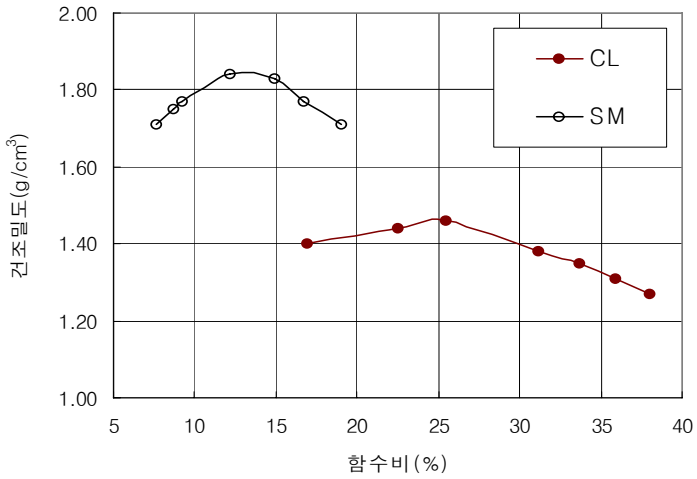
(2) 실험시료

본 연구에 사용된 흙 시료는 하상토의 경우 경남 합천군 청덕면 광암제의 빈입도 모래(SP)와 전북 김제시 만경읍 매립지상 소성이 작은 점토질 흙(CL) 이다. 한편, 대상 흙시료의 공학적 특성을 살펴보면 CL시료는 3.2절에 언급된 CL시료와 동일하며, 광암제 SP시료는 입도분포곡선의 경우 <그림 3.2-124>와 D 다짐에 의한 다짐특성 곡선의 경우 <그림 3.2-125>와 같다.

<표 3.2-69>에서는 다짐도에 따른 실험시료의 일축압축강도특성을 보여준다. <표 3.2-69>에서 보듯이 시험시료는 모래의 경우 구속응력이 없는 관계로 작게 평가되고, 점토의 경우 점착력특성에 기인하여 상대다짐도에 의한 강도증진이 뚜렷한 것으로 나타났다.



<그림 3.2-124> 시험대상시료의 입도분포곡선



<그림 3.2-125> 다짐특성 곡선

<표 3.2-69> 다짐도에 따른 실험시료의 일축압축강도특성

모래 (광암제)		점토 (새만금)	
다짐도 (%)	일축압축강도 (kg/cm^2)	다짐도 (%)	일축압축강도 (kg/cm^2)
85	-	85	0.53
90	0.05	90	0.72
95	0.07	95	0.97
100	0.11	100	1.65

(3) 실험결과 및 분석

(가) 현장 및 실내시험에 의한 전단파 속도특성

<표 3.2-70>, <표 3.2-71> 및 <그림 3.2-126>, <그림 3.2-127>에서는 수행된 현장 및 실내실험 종류에 따른 전단파속도 측정결과를 나타낸다.

현장시험결과 모래 시료의 경우 심도가 증가함에 따라 전단파 속도의 크기가 증가하나 점토시료의 경우에는 심도에 따라 전단파 속도가 감소하는 양상을 보인다. 그러나 각 경우에 있어 심도에 따른 전단파 속도의 변화폭은 크지 않다.

<표 3.2-70>와 <표 3.2-71>에서 보듯이 하상토가 모래인 경우 전단파 속도는

현장실험의 경우 상대다짐도 변화 83.2%~94.9%에서 측정깊이에 상관없이 97m/sec~144m/sec 등으로, 실내실험의 경우 상대다짐도 변화 90%~100%에서 82m/sec~100m/sec 등으로 나타났다. 또한, 하상토가 점토인 경우에는 전단파 속도는 현장실험의 경우 상대다짐도 변화 63.4%~68.9%에서 81m/sec~99m/sec 등으로, 실내실험의 경우 상대다짐도 변화 85%~100%에서 95m/sec~121m/sec 등으로 나타났다.

현장 및 실내시험에 의한 전단파 속도는 모래인 경우 15.5%~30.5%, 점토인 경우 다소 다짐도차가 커서 직접적인 비교가 어렵지만 68.9% 일 때 95.3m/sec로 85%일때 95m/sec 등으로 현장시험에 의한 전단파 속도가 실내실험에 의해 구해진 전단파 속도 보다 큰 것으로 나타났다.

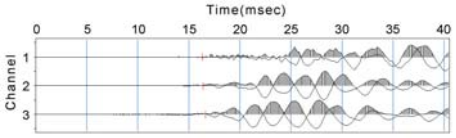
이러한 경향은 실내실험에 있어 샘플링 사이즈의 차이뿐만 아니라 시편과 밴더 엘리멘트의 커플링이 낮아 야기되는 고주파 성분의 감쇠로 인한 것으로 판단된다. 또한 현장시험의 경우 직접파 이외에도 매질의 불균질성으로 인해 굴절파가 발생하여 직접파보다 빠르게 초동으로 도달할 수 있기 때문에 실내시험값에 비해 전단파의 속도값이 커질 수 있다.

<표 3.2-70> 현장실험에 따른 토질별 전단파 속도 및 다짐도 측정결과

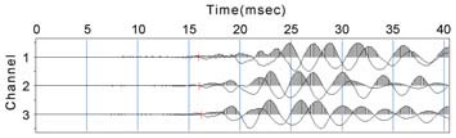
흙종류 / 평가항목 / 시편번호	모래 (광암제)				점토 (새만금)			
	다짐도	Vs(m/s)			다짐도	Vs(m/s)		
		z=5cm	z=35cm	z=55cm		z=5cm	z=35cm	z=55cm
No. 1	89.4	123	124	125	65.0	94	91	91
No. 2	92.2	126	127	128	65.9	96	92	91
No. 3	84.6	112	113	114	64.9	85	83	81
No. 4	90.0	115	118	119	63.8	86	85	83
No. 5	83.2	97	101	105	66.7	88	87	85
No. 6	90.4	135	136	139	65.8	93	92	90
No. 7	92.4	140	142	143	66.0	94	94	92
No. 8	89.4	134	135	138	63.4	83	79	78
No. 9	91.8	141	142	143	65.5	95	94	93
No. 10	89.8	118	119	120	65.8	99	97	95
No. 11	91.5	139	140	144	65.4	95	93	88
No. 12	90.3	129	131	134	67.2	99	96	91
No. 13	94.0	129	130	133	67.7	89	88	88
No. 14	88.1	119	121	122	65.8	97	92	92
No. 15	94.9	132	134	136	68.9	98	95	93

<표 3.2-71> 실내실험에 따른 토질별 전단파 속도 및 다짐도 측정결과

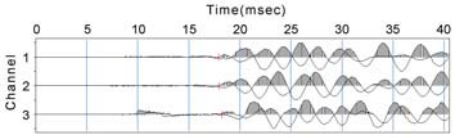
흙 종류 / 평가항목 / 시편 번호	모래 (광암제)		점토 (새만금)	
	다짐도 (%)	Vs(m/s)	다짐도 (%)	Vs(m/s)
No. 1	85%	-	85	95
No. 2	90%	82	90	100
No. 3	95%	95	95	108
No. 4	100%	100	100	121



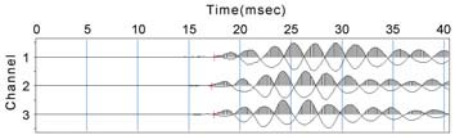
(a) No.1



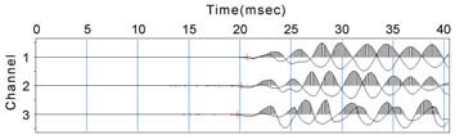
(b) No.2



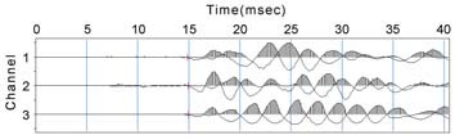
(c) No.3



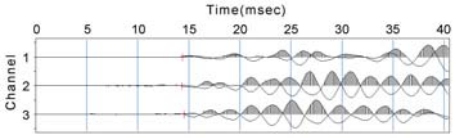
(d) No.4



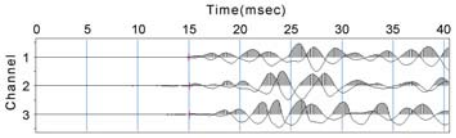
(e) No.5



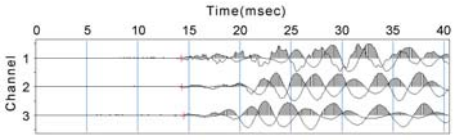
(f) No.6



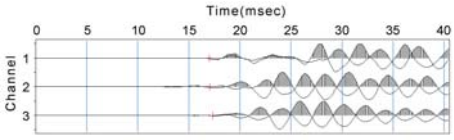
(g) No.7



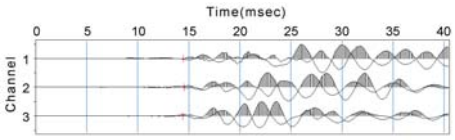
(h) No.8



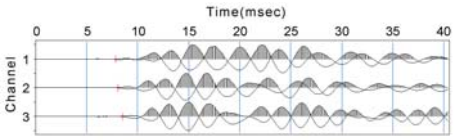
(i) No.9



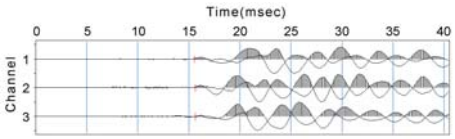
(j) No.10



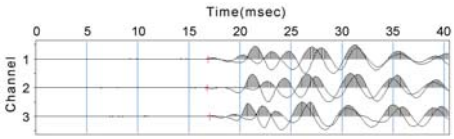
(k) No.11



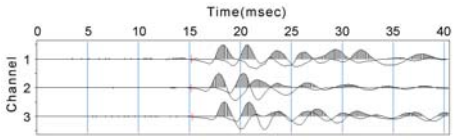
(l) No.12



(m) No.13

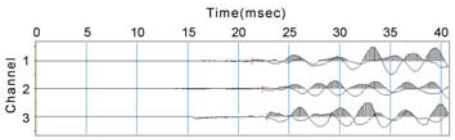


(n) No.14

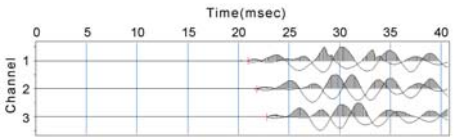


(o) No.15

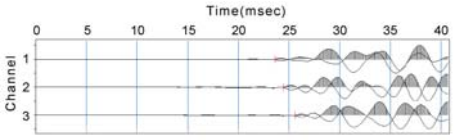
<그림 3.2-126> 모래 흙의 현장 전단파 속도 측정 결과



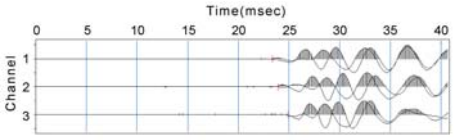
(a) No.1



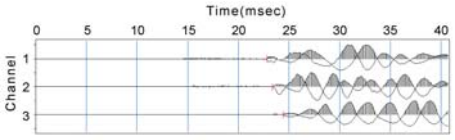
(b) No.2



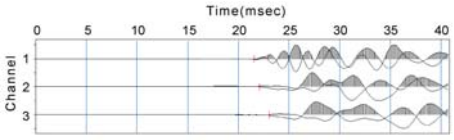
(c) No.3



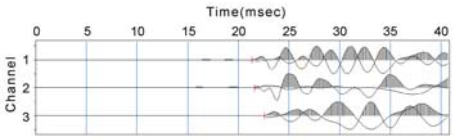
(d) No.4



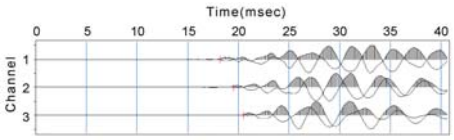
(e) No.5



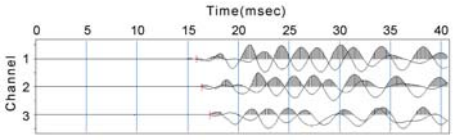
(a) No.6



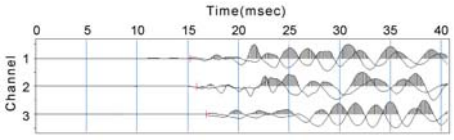
(b) No.7



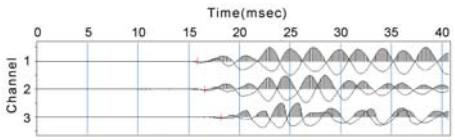
(c) No.8



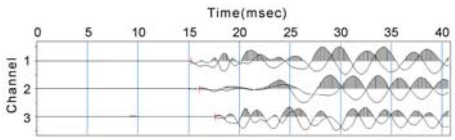
(d) No.9



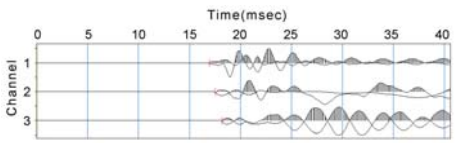
(a) No.10



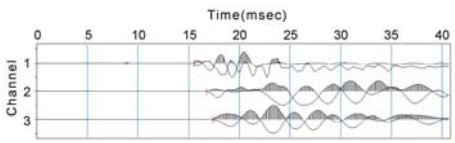
(b) No.11



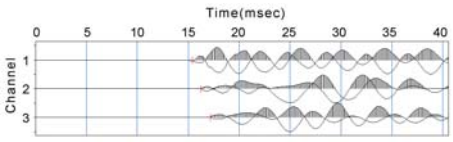
(a) No.12



(d) No.13



(e) No.14



(f) No.15

<그림 3.2-127> 점토 흙의 현장 전단파 속도 측정 결과

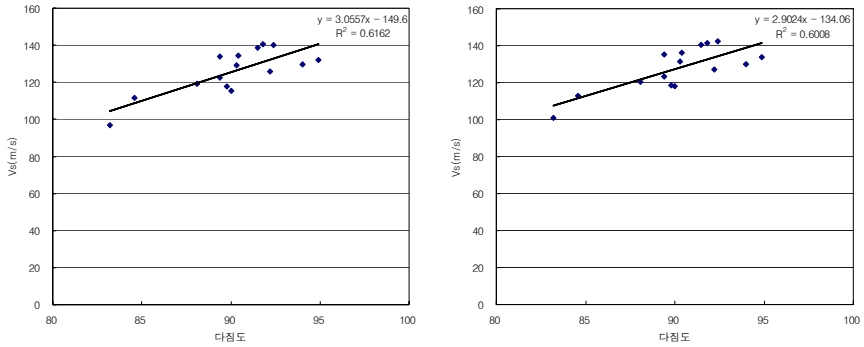
(나) 전단파 속도에 의한 다짐도 및 강도특성

현장 및 실내실험 결과에 따른 다짐도-일축압축강도-전단파 속도 특성을 보여주는 <표 3.2-70>, <표 3.2-71>에서 보듯이 모래질 흙인 광암제 시료는 앞서 언급했듯이 상대다짐도 84%~95%에서, 상응하는 전단파 속도는 97~144 m/s의 분포를 보인다. <그림 3.2-128>에서는 현장에서 측정된 심도별 상대다짐도-전단파 속도의 상관관계를 보여준다. 현장실험결과는 실내시험결과와 마찬가지로 다짐도가 증가함에 따라 전단파 속도가 선형적으로 증가하는 형태를 나타내었다. 회귀분석한 결과, 전단파속도와 상대다짐도의 결정계수는 0.6내외로 비교적 양호한 상관관계를 보였다.

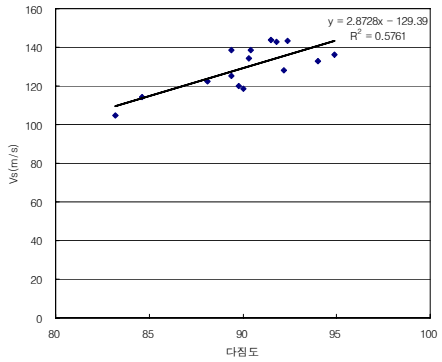
○ Vs(m/s) = 3.06×상대다짐도-149.60 (심도 5cm)

○ Vs(m/s) = 2.90×상대다짐도-134.06 (심도 35cm)

○ Vs(m/s) = 2.87×상대다짐도-129.39 (심도 55cm)



(a) 심도 5cm (b) 심도 35cm



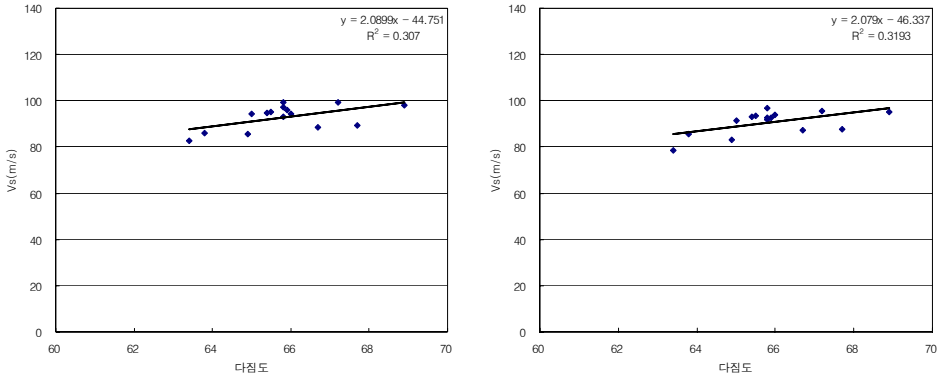
(c) 심도 55cm

<그림 3.2-128> 광암제 현장 다짐도와 전단파 속도의 상관관계

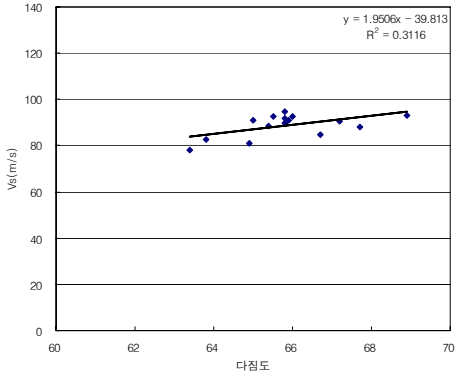
점토질 흙인 만경읍 매립지 시료는 상대다짐도가 63~69%의 낮은 값을 가지며, 이에 상응하는 전단파 속도 역시 78~99 m/s의 낮은 분포를 보인다. 상대다짐도-전단파속도의 상관관계 특성은 <그림 3.2-129>과 같으며, 점토와 마찬가지로 상대다짐도가 증가함에 따라 전단파 속도가 선형적으로 증가하는 양상을 보였다.

아래식과 같이 회귀분석한 결과 결정계수는 0.3내외로서 광암제에 비해 낮은 값을 보인다. 그러나 이는 절대값과 변수의 범위가 작기 때문인 것으로 상호상관성은 광암제와 비슷하게 양호한 것으로 판단된다.

- ○ Vs(m/s)=2.09×다짐도-44.75 (심도 5cm)
- ○ Vs(m/s)=2.08×다짐도-46.33 (심도 35cm)
- ○ Vs(m/s)=1.95×다짐도-39.81 (심도 55cm)



(a) 심도 5cm (b) 심도 35cm



(c) 심도 55cm

<그림 3.2-129> 만경읍 매립지 현장 다짐도와 전단파 속도의 상관관계

마. 소결론

합천 광암제와 김제 만경읍 매립지에서 들밀도시험과 하향식 탄성파탐사를 실시하여 현장에서의 다짐도와 전단파 속도와의 상관관계를 구하고자 하였다. 또한 현장실험과 실내실험을 통해 측정된 전단파 속도를 비교함으로써 전단파 속도 측정을 통한 현장에서의 다짐도 파악에 필요한 자료를 얻고자 하였으며 자료의 분석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실내실험 결과 다짐도가 증가함에 따라 일축압축강도는 선형적으로 증가하였으며 점토에 비해 모래의 경우 다짐에 따른 강도의 증가폭이 작게 나타났다. 이는 모래의 경우 구속응력과 점착력 특성이 없기 때문인 것으로 판단된다.

(2) 실내실험과 현장실험 결과 다짐도가 증가함에 따라 전단파 속도는 선형적으로 증가하는 양상을 보였으며 시료별로 상관식을 구하였다. 이러한 결과는 모래와 점토 시료의 구분없이 공통적으로 나타났으며 이는 다짐에 따른 밀도의 증가 및 수분의 감소가 전단파 속도의 증가로 이어지기 때문인 것으로 판단된다.

(3) 현장 및 실내실험에서 구해진 전단파 속도를 비교 분석한 결과, 실내실험에 비해 현장실험에서 얻은 전단파 속도가 15~30% 정도 높은 값을 가지며 심도에 따라 그 비도 약간씩 증가하는 양상을 보인다. 이는 실내실험의 경우 샘플링 사이즈가 작고 시편과 밴더 엘리멘트의 커플링이 낮아 상대적으로 고주파 성분이 감쇠되기 때문인 것으로 판단된다. 또한 현장실험의 경우에는 직접파 이외에도 매질의 불균질성으로 인해 굴절파가 발생하여 직접파보다 빠르게 초동으로 도달할 수 있기 때문에 균질한 시료에 비해 전단파 속도값이 커질 수 있다.

(4) 현장실험결과 전단파 속도는 모래 시료의 경우 심도에 따라 약 2~4% 증가하는 양상을 보이며 점토 시료의 경우에는 반대로 약 2~3% 감소하는 양상

을 보인다. 이러한 결과는 토질시료의 차이에 기인한다기보다는 점토 시료의 경우 하부가 물로 포화되어 있는 현장 여건을 고려할 때 유체에서 속도가 크게 감소하는 전단파의 특성에 기인한 것으로 판단된다. 그러나 두 가지 경우 모두 전단파의 속도변화폭이 매우 작으므로 적어도 60cm 이내 심도에서는 전단파 속도를 통해 심도별 다짐도를 규명하기는 현실적으로 어려우며 평균적인 다짐도를 파악하는 것이 합리적이다.

제 3 절 지오튜브를 이용한 하상준설토 제방 설계

1. 공법 개요 및 국내외 시공사례

가. 공법 개요

지오튜브(Geotubes) 공법은 폴리에스테르(PET), 폴리프로필렌(PP) 등 고분자 합성섬유로 직조된 투수성 지오텍스타일(직포, 부직포, 복합포) 거대 용기에 물과 혼합된 모래 및 준설토사를 주입하여 채워 넣음으로써 대형 성토구조물을 구축하는 방법이다.

본 공법은 수중제방, 방파제, 가도호안, 해안침식방지, 가호안, 인공섬 축조 등의 해안, 하천구조물 축조 뿐만 아니라 오염준설토 탈수 및 매립 등에 적용되는 등 국내·외적으로 현장토 유용에 따른 환경훼손 최소화, 시공성, 경제성 등을 이유로 많이 활용되는 추세에 있다.

이러한 지오튜브는 크기와 제조방법에 따라 백(Bag), 튜브(Tube), 콘테이너(Container)로 크게 세 종류로 구분된다.

지오백(Geotextile Bags, Geobags)은 <그림 3.3-1>에서 보듯이 용량이 1.0~5.0 ㎥ 정도의 소형으로, 보통 모래를 채움재로 하여 제방축조 혹은 침식안정을 목적으로 사용하며 소형 봉합기로 마무리 봉합한다.

지오튜브는 <그림 3.3-2>에서 보듯이 길쭉한 타원형의 자루모양으로 직경과 길이는 현장조건과 설치 가능성에 따라 조절이 가능하며, 보통 길이 50~600m, 폭 4~5m, 채움높이 1.5~2m 정도이다. 지오튜브 상부는 준설토를 수리학적인 방법으로 채우기 위해 주입구와 배수구가 설치되어 있으며, 주입구 설치간격은 지오튜브 내의 균등한 채움을 위해 모래질 흙의 경우에는 일반적으로 10m 내외이며, 점토질 흙의 경우 이보다 멀게 한다. <그림 3.3-3>에서는 지오튜브 공법의 시공순서를 보여준다.

지오콘테이너(Geotextile Containers, Geocontainers)는 <그림 3.3-4>에서 보듯이 투수성 지오텍스타일로 제조된 거대한 베개모양 구조체로서 호퍼(hopper)나 크람셸 버켓(clamshell bucket) 등에 의해 기계적인 방식으로 모래나 준설토를 속채움한다. 지오콘테이너는 적절한 길이의 지오텍스타일들을 함께 미리 봉합하여 부분

적으로 제조한 후 바닥이 분리되는 덤프 바지선내에 설치하고 모래나 준설토를 채운 다음, 현장에서 봉합기로 마무리 봉합을 한다. 지오콘테이너의 용량은 바지선 바닥 개구부의 폭이 클수록 커질 수 있으며 보통 100~1,000㎥정도이다. 세립분이 많은 준설토를 사용할 경우에는 내부에 부직포와 외부에 직포를 함께 사용하여 복합 지오콘테이너를 제조할 수 있다.




<그림 3.3-1> 지오백 형태




<그림 3.3-2> 지오튜브 형태



(a) 매트 설치 전 기초정리



(b) 침식방지매트 포설



(c) 지오튜브 전개 및 고정



(d) 펌프 준설선 준비



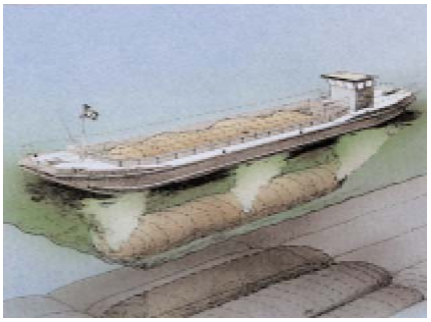
(e) 펌프와 지오튜브 연결



(f) 준설에 의한 지오튜브 채움

<그림 3.3-3> 지오튜브 공법의 시공순서도





<그림 3.3-4> 지오컨테이너 형태

나. 국내외 시공사례

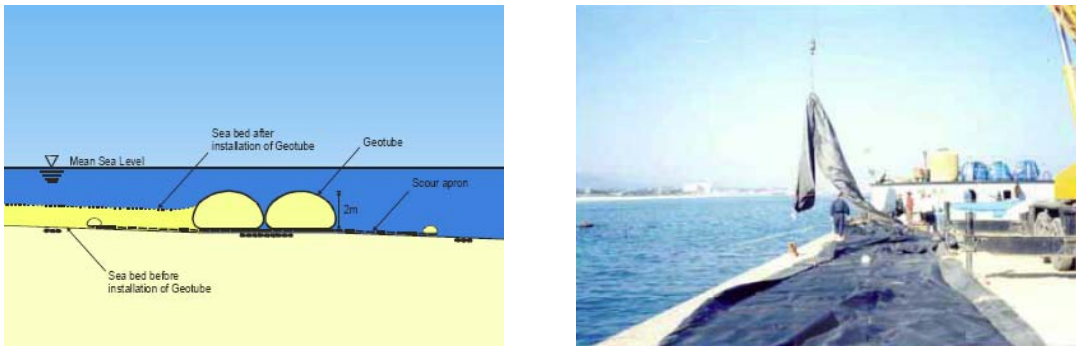
지오튜브 공법은 네덜란드에서 최초로 하상토를 이용한 긴급 보수공법으로서 개발되어, 1986년 독일 라인강 도류제 제방 건설공사, 1987년 네덜란드 침식된 운하의 제방 복구공사 등에 적용되었다. 본 공법의 대표적인 적용분야는 앞서 언급했듯이 수중제방, 방파제, 가도호안, 해안침식방지, 가호안, 인공섬 축조 등의 해안, 하

천구조물 축조, 오염준설토 탈수 및 매립분야 등이다.

본 절에서는 지오튜브 공법을 적용한 대표적인 국내외 시공사례를 분석 정리하였다.

(1) 연진항 재해 위험지구 정비사업

본 현장의 위치는 강원도 강릉시 연곡동 영진해수욕장로서 지오튜브 설치연장 505m, 2열 4개소를 시공하였으며 영진해수욕장 주변 해안선 침식방지와 토사퇴적 유도하기 위하여 시공하였다.



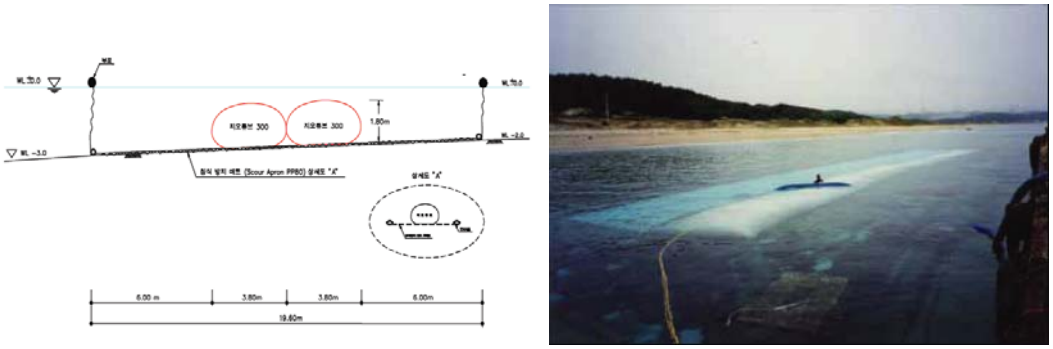
(a) 시공단면도 (b) 지오튜브 시공

<그림 3.3-5> 영진항 재해 위험지구 정비사업 시공 전경

(2) 울진원자력 5, 6호기 온배수 저감시설 공사

본 공사는 울진원자력 5.6호기 주설비(토건)공사 중 온배수저감시설공사로 향후 발전소6개호기 가동으로 인한 온배수영향을 4개호기 가동수준으로 억제하기 위하여 기존 남방파제 및 도류제를 연장시공하고 발전소주변 해양환경보전을 위해 이안제를 설치하는 공사이다.

공사규모는 50m길이와 유효높이 1.8m의 지오튜브를 2개를 붙여 30m간격으로 해변과 나란히 50m 떨어진 수심3.0m 되는 곳에 3개를 시공하였다. 준공 직후 태풍 해일에도 안전하였으며, 이후 해안선이 바다 쪽으로 계속해서 확장되고 있음이 관찰되었다.

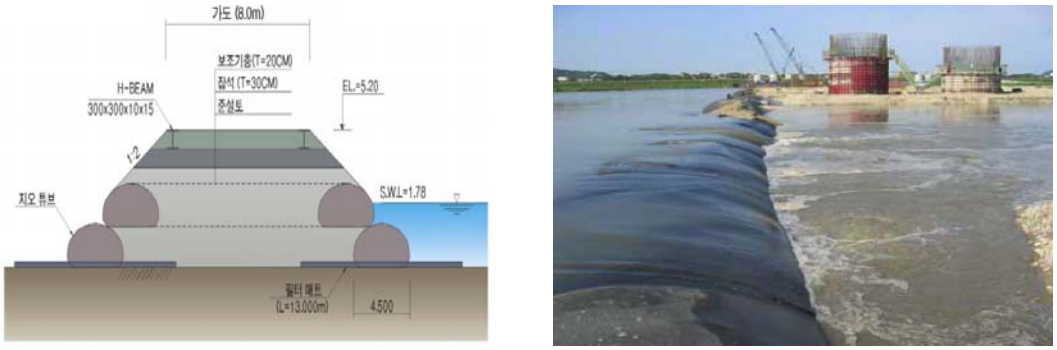


<그림 3.3-6> 울진원자력 5,6호기 온배수 저감시설 공사

(3) 일산대교 건설공사

본 공사는 김포와 일산을 연결하는 일산대교 설치공사 중, 교량축조를 위한 가도, 축도를 지오튜브를 이용하여 설치한 현장으로서 유효높이 2.0m의 지오튜브를 진행방향 좌, 우측에 2단으로 설치하여 그 내부를 주변 모래를 준설하여 채움으로써 교량축조를 위한 가도 및 축도가 완성되었다.

본 현장의 경우 한강상류에서 밀려오는 강물의 빠른 유속과 침식에도 안정하고 변형이 없는 것으로 관찰되고 있다.

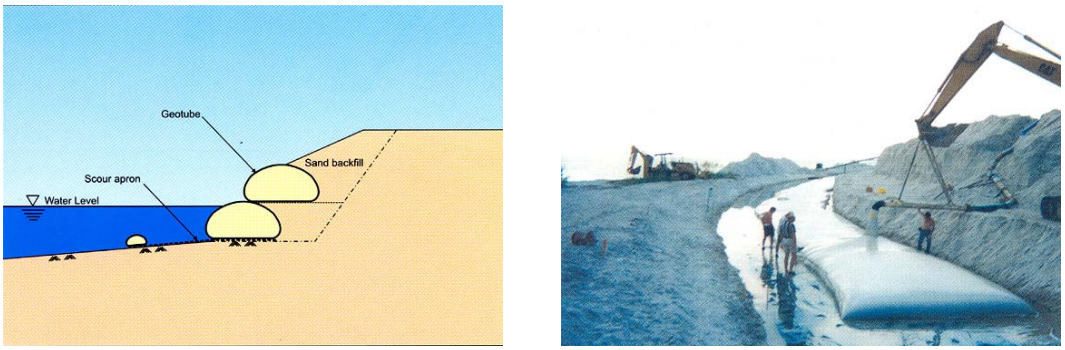


<그림 3.3-7> 일산대교 건설공사

(4) 미국 Florida의 Tampa만

지오튜브가 준설토로 조성된 인공섬의 해안선 제방으로 적용된 사례이다. 방호

제방은 지오튜브를 2단으로 쌓아서 조성하였으며, 하단은 침식으로부터 보호하기위하여 침식방지매트를 설치하였다. 지오튜브 내부 채움재는 현장 모래를 이용하였다.

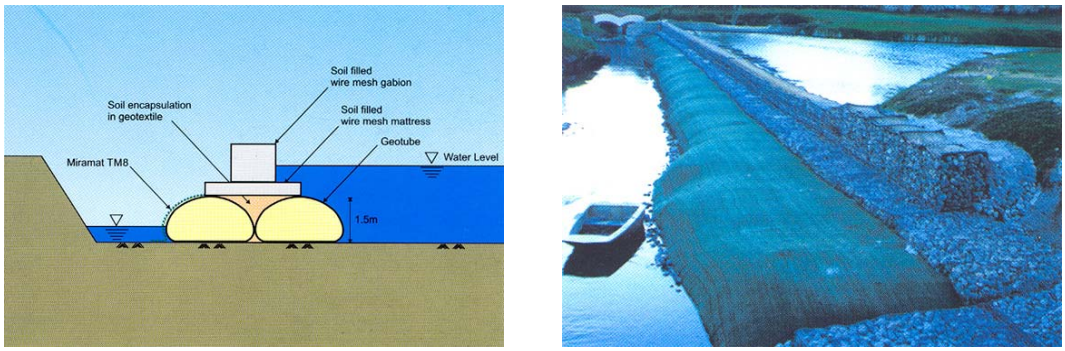


<그림 3.3-8> 미국 Florida 해안선 제방공사

(5) 필리핀 마닐라 Wack-Wack 골프장

지오튜브를 이용하여 골프장 내에 인공호수의 물을 분리하는 제방공사로서 골프장내 7번 홀에 폐수로부터 악취와 더러운 환경으로 인해 깨끗한 물을 유입, 정화시켜 공용배수로에 배수시킨 공사이다.

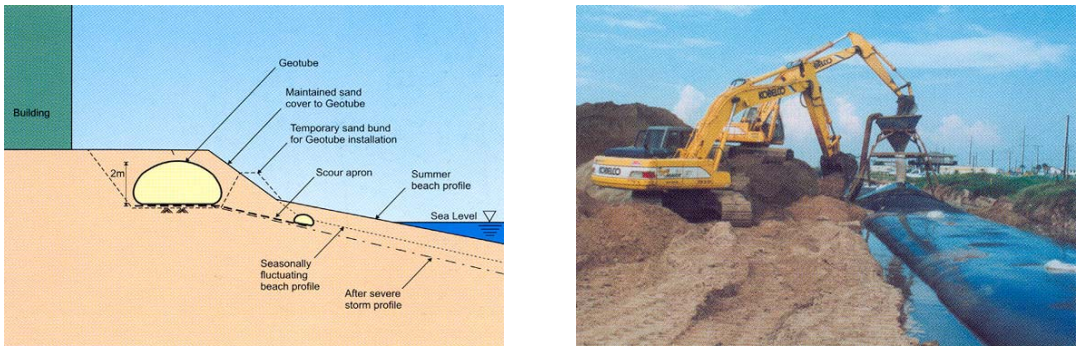
본 제방 공사는 호수 내의 깨끗한 물을 분리 보존하고, 우천시 배수가 원활히 되게 하여 골프에 지장이 없도록 하는 등 중장비나 물빼기 작업의 소음이 없어야 하는 공사로서 지오튜브 제방공사는 이러한 조건을 충족하면서 조기에 완공될 수 있었다.



<그림 3.3-9> 필리핀 마닐라 분리제방 공사

(6) 미국 텍사스의 Bolivar 반도

지오튜브가 해일 피해방지 모래언덕 내의 지중제방으로 시공된 사례이다. 태풍 때마다 Bolivar반도 해안에 있는 가옥들이 피해를 입었고 심할 때에는 침식으로 기초가 유실되어 가옥들을 잃게 되었다. 이에 더 이상의 피해와 침식방지를 위하여 해변 6km에 걸쳐 지오튜브를 사용하여 모래언덕을 보강하였다. 열대폭풍 Allison이 2001년 6월이 지역을 강타했을 때 지오튜브 제방은 매우 안정적이었으며 막대한 경제적 손실을 방지하였다.



<그림 3.3-10> 미국 텍사스 지중제방

다. 소결론

본 절에서는 지오튜브의 일반적인 재료적 특성 및 지오튜브 공법, 시공 순서에 대하여 살펴보고, 국내외 지오튜브를 이용한 제방 시공사례 등을 분석하여 국내발생 하상토를 활용한 제방 축조기술로서 지오튜브 공법의 활용성을 제시하였다.

2. 국내외 연구 및 기술동향 분석

가. 국내

국내에서는 지오백 형태로 오래 전부터 여러 현장에서 임시공법으로 적용한 사례가 많이 있으나, 외국과 같이 진보된 형태인 지오튜브 및 콘테이너 공법의 경우 최근 몇 년 동안 이안제, 가설제방, 가토제 등에 국내 사용실적이 증가하고 있는 실정이다.

국내 연구동향을 살펴보면, 신은철(2001)은 지오텍스타일 튜브 공법에 대한 미국 공병단 최소 요구조건을 바탕으로 실내 및 현장시험을 실시하였다. 본 연구에서는 실대형 현장시험결과를 기초로 지오텍스타일 튜브의 형태 변화 및 지반공학적 거동특성 등을 보고하였다. 이때 수행된 실대형 현장시험은 송도 신도시 부지조성공사 현장에서 두 종류 준설토(모래, 실트질 점토)에 대하여 실시하였으며, 지오텍스타일 튜브 채움작업의 경우 준설선을 이용하였다.

또한, 신은철(2003)은 지오텍스타일 튜브 공법을 이용한 해안 및 침식방지용 이안제 축조 시 지오텍스타일 튜브의 파랑제어효과와 유발응력특성 등을 분석하였다. 이때 수리모형시험은 지오텍스타일 튜브 채움 비율 및 유의파고에 따른 파랑 제어효과 분석을 위하여 파고계를 설치하여 파고에 따른 전단율을 분석하였다.

신은철(2003)은 시공단계별 지오텍스타일 튜브에 대한 실대형 현장실험과 3차원 유한요소해석 비교・연구를 수행하여 속채움 과정에서 발생하는 정수압에 따른 지오텍스타일 튜브의 형태변화, 정수압 및 지오텍스타일의 강성 변화에 따른 매개변수 해석에 따른 지오텍스타일 튜브공법의 3차원 유한요소해석기법을 제시하였다. 오영인(2005)은 수리모형실험을 통하여 지오텍스타일 튜브가 해안구조물로 설치될 경우 수리・동역학적 특성(안정성, 파랑제어 및 전달특성), 구조물 단면 확대 효과, 심해에 설치될 경우를 고려한 다단식 지오텍스타일 튜브의 최적형태 등을 보고하였다.

한편, 국내에서도 순수 국내기술로 지오튜브가 개발되어 전남 광양 수어댐 여수로 공사 현장에 적용・시공된 바 있다(Geotextile System기술자료, 2007). 현재까지 외국산 제품에만 의존했으나 국산제품이 개발됨에 따라 국산 대체효과와 함께 국내 건설회사의 해외공사 수주에도 경쟁력을 확보 할 수 있을 것으로 판단된다.

나. 국외

최근에는 미국, 유럽뿐만이 아니라 세계 각국에서 지오튜브 공법에 대한 많은 현장적용 사례가 발표되고 있으며, 하천 또는 해안 구조물 축조뿐만 아니라 보강성토 축조에도 적용되고 있다. 일본에서는 고함수비 준설토의 유효이용, 자연친화형 제방축조, 초연약지반상의 제방 축조, 오염토 매립을 위한 봉쇄제방 축조 등 환경 관련 분야에 초점을 맞추어 보다 효율적인 설계 및 시공법에 대한 연구가 진행되고 있다(三木博史, 2000).

Heerten은 해안구조물로 사용된 지오텍스타일 제품의 장기 거동특성에 대한 연구를 수행하였으며, 시공 후 시간경과에 따른 시료채취 등 육안조사, 인장강도, 유효입경 시험 등의 지오텍스타일 재료 특성시험을 수행한 바 있다. Dierickx는 지오텍스타일의 입경과 토사의 상관관계를 분석하였고, 유효입경과 간극의 개념을 도입하여 지오텍스타일의 적용성을 검증하였다. Koerner and Koerner는 봉합강도가 인장강도보다 작으므로 지오텍스타일 튜브의 설계시 봉합강도를 기준으로 설계하여야 하며, 최소 인장강도의 90%이상이 확보되어야 한다고 제안하였다.

Silvester는 2차원 평형해석을 통하여 지오텍스타일 튜브의 둘레, 압력, 접촉면적, 채움높이와 폭 등의 관계를 도출하였으며 지오텍스타일에 발생되는 인장력 산정법을 제시하였다. Liu는 모래채움 튜브에 대한 수치해석를 통하여 지오텍스타일에서 발생하는 응력과 평형해석 방정식을 제시하였고, 실내 모형시험을 통하여 지오텍스타일 신율의 영향을 분석하였다. 또한, 토사와 지오텍스타일 간의 접촉면 마찰특성에 따른 모래채움튜브의 형태 변화에 대하여 보고하였다.

Kazimierowicz는 지오텍스타일 튜브를 원주형 쉘로 가정한 2차원 평형해석을 수행하였다. 채움작업 시의 발생되는 압력을 외압만 작용하는 경우, 외압과 정수압이 작용하는 경우, 정수압만 작용하는 경우로 고려하여 형상과 지오텍스타일에 발생하는 응력 간의 관계식을 개발하였으며, 해석결과가 Silvester의 결과와 일치한다고 보고하였다.

U.S. Army Corps Engineers와 Leshchinsky는 미공병단의 CPAR 프로그램의 일환으로 지오텍스타일 튜브공법에 대한 2차원 평면 변형 해석 프로그램인 GeoCops(2.0)ⓒ을 개발하였다. 이 프로그램은 튜브의 원주방향 및 원주 직각방향에서 발생하는 인장응력과 내부에 작용하는 외압 및 정수압의 평형해석을 통하여 지

오텍스타일 튜브의 변형을 결정하였으며, 지오텍스타일의 안전율, 튜브 외측의 하중 등을 영향인자로 고려하였다. 또한, 부피-단위중량 관계를 통한 지오텍스타일 튜브의 압밀 후의 변형에 대한 예측을 수행하였다.

설계 및 시공방안에 관한 연구로는 U. S. Army Corps Engineers에서는 준설토사를 채움재료로 하는 지오텍스타일 튜브의 기본적인 설계개념에 대하여 연구한 바 있으며, WRP(Wetland Reserve Program) 연구의 일환으로 시방규정에 대하여 제시하였다. Pilarczyk은 지오텍스타일 튜브를 활용한 해안구조물 설치 시, 조류 및 파도에 대한 안정성 검토 및 설계방안에 대하여 제시한 바 있다.

다. 소결론

본 절에서는 국내외의 지오튜브에 관한 기술 및 연구동향을 살펴보았으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 국내의 지오튜브에 대한 연구동향을 살펴본 결과, 해안 및 침식방지용 이안제 등 해안구조물에 대한 연구가 대부분을 차지하고 있었으며, 한편 국외의 경우 필터재로서 재료적 특성 분석 및 토사와 지오튜브 간의 마찰특성, 변형특성에 관한 연구가 수행되었으며 하상퇴적토의 유효이용 분야 및 건설재료로서 적용가능성을 제안하였다.

(2) 향후 하천제방 축조공법으로서 지오튜브를 적용하기 위해서는 지오튜브와 하천제방의 수리적 특성뿐만 아니라 지반공학적 특성(마찰특성, 투수특성, 구조물의 안정성 평가 등)에 대한 연구 등이 뒤따라야 할 것이다.

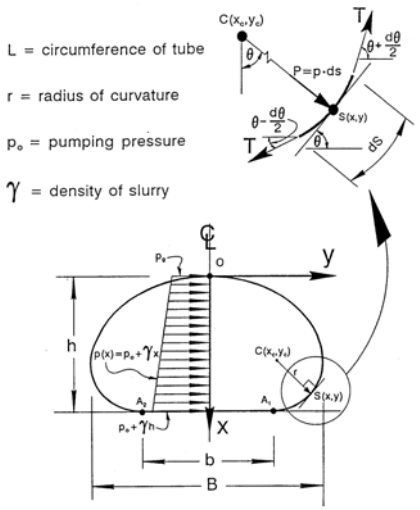
3. 지오튜브 제방의 설계 및 안정성 평가기법(안)

본 절에서는 Leshchinsky(1996)가 제안한 지오튜브 설계이론을 소개하고, 지오튜브 제방에 기존 옹벽의 안정성 평가개념을 적용하여 Coulomb 토압이론에 근거한 지오튜브 제방의 내·외적안정성 평가기법(안)을 제시하였다.

가. 지오튜브의 설계 이론

<그림 3.3-11>에서 보듯이 튜브내부에 슬러리가 채워져 있는 지오튜브의 설계는 평형해석을 바탕으로 하며, 설계 시 가정 사항은 다음과 같다.

첫째, 2차원 평면해석(평면변형)을 수행한다. 즉 지오튜브는 무한히 길고 길이방향 단면의 특성 변화가 없다. 둘째, 지오튜브는 얇고 유연한 재료로서 단위길이 당 중량은 무시한다. 셋째, 지오튜브 내부는 슬러리와 같은 유동체로 채워져 내부 수리학적 응력상태로 존재한다. 끝으로 슬러리와 지오튜브 간의 전단응력은 발생하지 않는다.



<그림 3.3-11> 지오튜브의 설계개념도 (GeoCoPS(2.0), 2001)

<그림 3.3-11>에 나타낸 바와 같이 외부 작용력은 없으며, 단일 슬러리로 구성되어 있다. 지오튜브 단면은 중심선을 기준으로 양쪽 대칭이며 최고높이 h, 전체

최고 폭 B, 바닥면과의 접촉면 길이 b, 펌핑압력 P_0, 슬러리의 평균단위중량 γ일 때 튜브의 O점으로부터 임의심도까지의 수리학적 압력은 $p(x) = P_o + \gamma x$ 이다.

임의의 지오튜브 지점에서 작용하는 응력은 임의의 방정식 $y = f(x)$를 이용하여 튜브의 임의 지점의 지오튜브의 인장응력과 수리학적 압력과의 관계를 식 (3.3-1)과 같이 나타낼 수 있다. <그림 3.3-11>에서 보듯이 $S(x, y)$에서 지오튜브의 곡률반경은 r, 이 곡률의 중심좌표는 $C(x, y)$이며, $y(x)$에 따라 r과 C는 변화한다. 또한 S점에서의 지오튜브의 미소 길이 ds에 초점을 맞추어 고려한다. 이러한 이유로 2차원 평면해석 및 슬러리와 지오튜브 간의 전단응력은 발생하지 않는다고 가정한 것이다.

$$r(x) = T/p(x) \tag{3.3-1}$$

여기서, T = 지오튜브의 인장응력

p(x) = 임의심도까지의 수리학적 압력

$$r(x) = [1+(y')^2]^{3/2}/y'' \tag{3.3-2}$$

여기서 $y' = dy/dx$, $y'' = d^2y/dx^2$

$$Ty'' - (p_o + \gamma x)\cdot[1+(y')^2]^{3/2} = 0 \tag{3.3-3}$$

상기의 비선형미분방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = f(x \mid T, p_0, h, \gamma) \tag{3.3-4}$$

여기서, T : 인장응력, P_0 : 펌핑압력, γ : 슬러리의 단위중량, h : 튜브의 높이

식 (3.3-4)의 첫 번째 구속조건은 O점을 기준으로 튜브가 대칭을 이룬다. 즉,

$$1/y'(O) = 0 \tag{3.3-5}$$

두 번째 구속조건은 바닥면과의 접촉면의 길이 b에서 수직력이 평형상태를 이루어야 하는 조건으로 식 (3.3-6)과 같다.

$$b = W/(P_o + \gamma h) \tag{3.3-6}$$

여기서 $W =$ 튜브내부 전체에 슬러리가 채워졌을 경우, 단위길이당 중량

$$W = 2\gamma \int_0^4 y(x) \cdot dx \tag{3.3-7}$$

접촉면 길이(b) 방정식에 단위길이 당 중량을 합하면 다음 식 (3.3-8)과 같다.

$$b = \frac{2\gamma}{P_0 + \gamma h} \int_0^4 y(x)\ dx \tag{3.3-8}$$

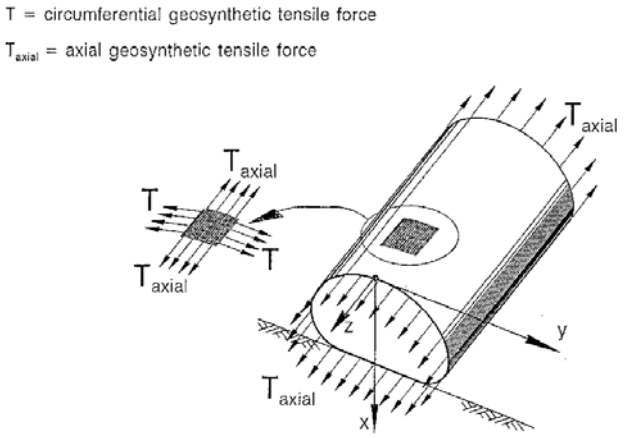
또한 전체 길이 L = b+ $\int_s$ds 이므로 두 번째 경계조건에서 주어진 접촉면 길이를 전체길이에 대입하면 다음 식 (3.3-9)와 같다.

$$L = \frac{2\gamma}{P_0 + \gamma h} \int_0^h y(x)\ dx + 2\int_0^4 [1 + (y')^2]^{1/2} dx \tag{3.3-9}$$

그리고 <그림 3.3-12>에서 보듯이, 실제적으로 설계에서 필요한 단위길이 당 축방향 인장응력(T_{axial})과 수직평면에 작용하는 전체 작용력(P)은 식 (3.3-10), (3.3-11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{axial} = (2/L) \int_0^h (P_0 + \gamma x)\ \mathrm{y(x)dx} \tag{3.3-10}$$

$$P = \int_0^h (P_0 + \gamma x) \cdot y(x) \cdot dx \qquad (3.3\text{-}11)$$



<그림 3.3-12> 지오튜브의 축방향 인장응력

지오튜브가 등방성이라면 축방향 인장응력 T_{axial}값을 구할 필요가 없지만 일반적으로 지오튜브는 제조과정상 비등방성이므로 인장응력(T)과 함께 축방향 인장응력 T_{axial}값을 구하여야 한다. 지오튜브의 시공시 대부분 인장응력(T)이 축방향 인장응력(T_{axial})보다 크게 나타난다. 그러나, 지오튜브의 선정이나 봉합 등으로 인한 강도감소를 고려하여 실제 설계이론에서 구한 축방향 인장응력(T_{axial})과 수직면에 작용하는 전체 작용력(P)에 안전율을 고려하여 적용하여야 한다.

나. 지오튜브 제방의 안정성 평가기법(안)

지오튜브가 설치된 제방의 안정성 평가는 기존의 옹벽시스템의 안정성 평가 개념을 적용하였다. 지오튜브에 작용하는 토압과 여러 하중 조건을 고려하여 전체적인 활동, 지지력, 전도에 대한 안정성을 평가하는 외적안정평가와 지오튜브에 형성되는 각각의 전단면을 따라 수행되는 내적안정평가를 수행하였다.

(1) 활동에 대한 안정

지오튜브 저면을 따른 활동에 대한 안전율은 다음과 같다.

$$FS_{sl} = \frac{\sum \text{수평저항력}}{\sum \text{수평활동력}} = \frac{\sum P_R}{\sum P_d} \geqq 1.5 \qquad (3.3\text{-}12)$$

여기서, 수평저항력은 지오튜브의 저면이나 그 주위의 연약층을 따른 전단저항이며, 수평활동력은 배면토체로부터 지오튜브에 작용하는 토압의 수평분력이다.

(ⅰ) 배면토압, F_T의 산정

$$F_T = K_{af} \cdot \gamma_f \cdot h^2/2 \qquad (3.3\text{-}13)$$

여기서, $h = H + L\tan\beta$

(ⅱ) 수평활동력, P_d의 산정

$$P_d = F_H = F_T \cdot \cos\beta \qquad (3.3\text{-}14)$$

(ⅲ) 지오튜브 저면부에서의 극한마찰계수(일반적으로 $\mu = \tan(2/3\phi_{soil})$) 결정

(ⅳ) 지오튜브의 단위길이당 수평저항력, P_R의 산정

$$P_R = (V_1 + V_2 + F_T \cdot \sin\beta) \cdot \mu \qquad (3.3\text{-}15)$$

(ⅴ) 저면활동에 대한 안전율의 산정

식 (3.3-12)에 의해서 구한 안전율이 설계안전율(추천값 : 1.5)보다 작은 경우에는 지오튜브의 길이를 증가시켜야 한다.

(2) 전도에 대한 안정

지오튜브의 전도에 관한 안전율은 다음과 같다.

$$FS_{ot} = \frac{\sum \text{저항모멘트}}{\sum \text{전도모멘트}} = \frac{\sum M_r}{\sum M_o} \geq 2.0 \qquad (3.3\text{-}16)$$

(i) 저항모멘트(M_r)의 산정

지오튜브의 선단에 작용하는 저항모멘트(M_r)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sum M_r = \sum P_{Vi} X_i \qquad (3.3\text{-}17)$$

여기서, P_{Vi} = 지오튜브에 작용하는 연직력

X_i = 지오튜브의 선단(A점)으로부터 각각의 연직력까지의 수평거리

(ii) 전도모멘트(M_o)의 산정

전도모멘트(M_o)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sum M_o = \sum P_{Hi} Y_i \qquad (3.3\text{-}18)$$

여기서, P_{Hi} = 지오튜브에 작용하는 수평력

Y_i = 지오튜브의 선단(A점)으로부터 각각의 수평력까지의 연직거리

(iii) 전도에 관한 안전율의 산정

위와 같은 방법으로 구한 M_o와 M_r을 비교하여 $M_r/M_o \geq 2.0$인 경우 안정한 것으로 판단하며, 이 조건을 만족하지 못하는 경우에는 지오튜브 저면의 길이를 증가시켜야 한다.

(iv) 지오튜브의 전도에 대한 안정여부는 상기 식 (3.3-16)~식 (3.3-18)과 같은 방법으로도 구할 수 있고 수직합력의 편심거리, e에 대한 다음 식으로도 평가할 수 있다.

e < L/6 : 기초지반이 흙인 경우

e < L/4 : 기초지반이 암반인 경우 (3.3-19)

이 조건을 만족하지 못하는 경우에는 지오튜브 저면의 길이를 증가시켜야 한다.

(3) 지반지지력에 대한 안정

지오튜브의 지지력 파괴유형으로는 전반전단파괴 (general shear failure)와 국부전단파괴 (local shear failure)를 고려할 수 있다. 국부전단파괴는 지오튜브 하부에 얇은 연약한 지반층이 있을 때 이 기초지반의 압착(squeezing)에 의한 전단파괴 형태이다.

전반전단파괴에 대한 지지력 평가에서는 지지력 파괴를 방지하기 위해 기초지반에 작용하는 상부 수직응력이 설계안전율(추천값 : 2.5)을 고려한 기초지반의 허용지지력을 초과하지 않도록 하여야 한다. 경우에 따라서는 지반기술자의 판단에 의해 설계안전율로 2.0을 사용할 수 있다.

$$\sigma_v \leq q_a = \frac{q_{ult}}{FS} \tag{3.3-20}$$

지오튜브 상부에 성토사면하중이 작용하는 경우에 대한 지지력 해석과정은 다음과 같다.

(i) 지오튜브 저면에 작용하는 수직응력의 산정

$$\sigma_v = \frac{V_1 + V_2 + F_T \cdot \sin\beta}{L - 2e} \tag{3.3-21}$$

(ii) 기초지반의 극한지지력, q_{ult} 산정

$$q_{ult} = c_b \cdot N_c + 0.5(L-2e) \cdot \gamma_b \cdot N_\gamma \tag{3.3-22}$$

여기서, c_b와 γ_b는 기초지반의 점착력과 단위체적중량이고, N_c와 N_γ는 Meyerhof의 지지력계수이다.

$$N_c = \left(e^{\pi \tan \phi} \tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) - 1\right) \cdot \cot \phi \qquad (3.3\text{-}23)$$

$$N_\gamma = \left(e^{\pi \tan \phi} \tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) - 1\right) \cdot \tan(1.4\phi) \qquad (3.3\text{-}24)$$

(iii) 허용지지력, q_a의 산정 및 지지력 검토

$$\sigma_v \leq q_a = q_{ult} / FS \qquad (3.3\text{-}25)$$

이 조건을 만족하지 못하는 경우에는 지오튜브 저면의 길이를 증가시키거나 기초지반의 개량을 하여야 한다.

다. 지오튜브의 공학적 특성 평가

(1) 실험 내용 및 범위

본 연구에서는 지오튜브의 공학적 특성을 평가하고자 건설산업재료로서의 배수, 필터, 분리, 보강, 치수, 침식제어, 충격흡수 기능 등의 재료적 특성 평가시험을 수행하였다. 본 실험에서 사용된 지오튜브는 Ten Cate Nicolon사의 GEOLON PP120S(120kN/m)를 사용하였다.

지오튜브의 공학적 특성 평가 실험은 <표 3.3-1>에서 나타낸 바와 같이 실내시험에 의한 인장강도시험, 봉합, 인열, 재질, 무게, 두께, 무게, 열노화 시험, 연소성, 투수시험, 등과 같은 재료적 기본특성시험으로 구분하여 수행하였다.

<표 3.3-1> 지오튜브의 기본 특성시험 종류 및 관련기준

시험재료	시험 항목	관련 기준
지오튜브 (GEOLON PP120S (120KN/m))	인장시험	KS K ISO 10319 KS K ISO 10319(5cm)
	봉합시험	KS K ISO 10321
	인열시험	KS K 0769
	재질	KS K 0210 - 1
	두께	KS K 9863
	무게	KS K 9864
	열노화성 시험	KS K 0521 KS K ISO 10319(5cm)
	마모시험	KS M ISO 5472
	연소성시험	KS K 0583
	유효구멍크기	KS K ISO 12956
	투수시험	KS K 11058

(2) 실험 항목 및 방법

(가) 지오튜브의 강도 특성

인장강도 시험방법은 Grab법과 Strip법으로 크게 구분할 수 있다. Grab 방법은 시험방법에 따라 다소 차이는 있으나 보통은 폭이 100 mm, 길이가 150 mm인 시험편을 25.4 mm의 클램프로 잡아서 시험하고 단위는 kg, lbs, N 등으로 표현된다. 그러나, Grab법은 단위폭 당 강도로 환산되지 않는 점이 문제가 되어 주로 Strip법을 사용하고 있다. Strip법은 시험편의 전 폭을 잡을 수 있는 클램프로 잡아서 시험하는 방법이다. 그러나, 토목섬유의 인장강도 시험방법으로는 광폭 Strip법이 주로 적용된다. 한편, 토목섬유나 그 관련제품들은 단면적을 측정하기 어려운 점 때문에 Strip 인장강도의 단위는 단위폭 당 강도로 표현되고 사용단위는 kg/cm, kN/m 또는 lbs/in 등이다. 인장강도는 원래의 클램프 간격에 대한 시험편이 파단될 때까지 신장된 길이의 백분율로 표현된다.

① 광폭인장강도시험

광폭인장강도시험(Wide-Width Strip Tensile Strength Test)은 최대인장강도와 인장변형 등의 인장특성을 평가하기 위해 광폭시료를 사용하여 수행하는 인장시험이다. 이 시험은 KS K ISO 10319에 규격화되어 있으며, 표준시험방법은 변형제어식(CRE Type) 인장시험기의 상·하에 붙어 있는 클램프(clamp)사이의 거리를 30cm 조절한 후 폭 20cm의 지오그리드 시료를 장착하고 시험기를 가동, 시료가 파단될 때까지 10±5%/min의 속도로 인장을 하여 인장변형에 따른 인장응력을 측정한다. <표 3.3-2>에서는 광폭인장강도시험 개요를 나타내었다.

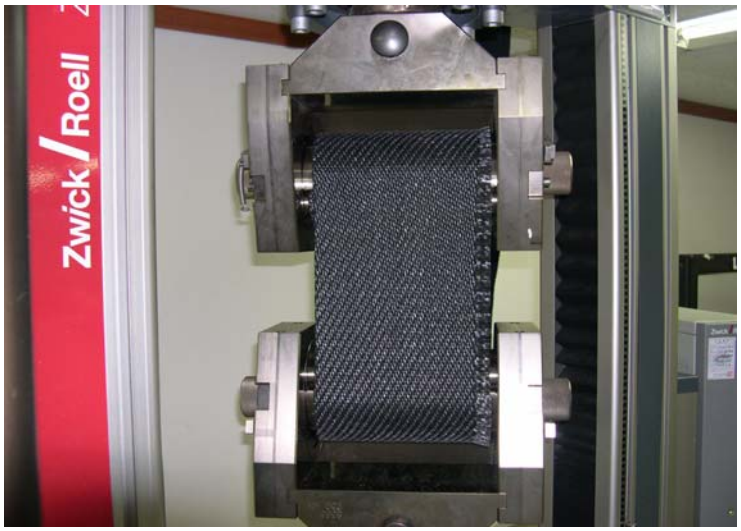
본 연구에서는 (재)한국의류시험연구원(KATRI)의 10t용량 인장시험기 (Zwick 독일)를 사용하여 광폭인장강도시험을 수행하였다. 클램프 사이의 시료파지 길이를 30cm이상으로 하고, 지오튜브 시료 중심부 10cm를 대상으로(인장변형을 측정하기 위해 Video타입을 사용하였다. 또한, 시험시에 클램프의 물림부분(Jaw)안에서 미끄러짐이 발생하거나 물림부분의 안이나 가장자리에서 시료파괴가 일어나는 시험결과는 버리고 재시험을 실시하였다. <그림 3.3-13>에서는 광폭인장강도시험 모습을 나타내고 있다.

<표 3.3-2> 광폭인장강도시험(KS K ISO 10319) 개요

항 목	내 용
시 험 기	변형제어식(CRE 타입) 인장시험기
시험온도	21±2℃
시험습도	65±5%
인장속도	10±5%/min
시료 폭	20cm(단, 시료의 강도가 100kN 혹은 600lb/in이상이면 10cm폭으로 대체할 수 있음)
시료 수	신뢰성 평가를 통해 결정하나, 그렇지 않은 경우에는 6개로 함 (단, 클램프에서의 미끄러짐이 크거나, 편심이 크게 걸려 실패한 시료는 제외함)
평가항목	최대인장강도 및 인장변형, 인장탄성계수

한편, 지오튜브 기본특성을 평가하는데 기초가 되는 최대인장강도와 인장변형률 구하기 위해 광폭인장강도시험을 실시하였다.

지오튜브 재료인 토목섬유의 인장강도 시험은 KS K ISO 10319 시험법 (Strip Method)을 사용하였으며 각각 MD(Machine Direction)와 CD(Cross Machine Direction)를 각각 시험하여 인장강도를 산출하였다.



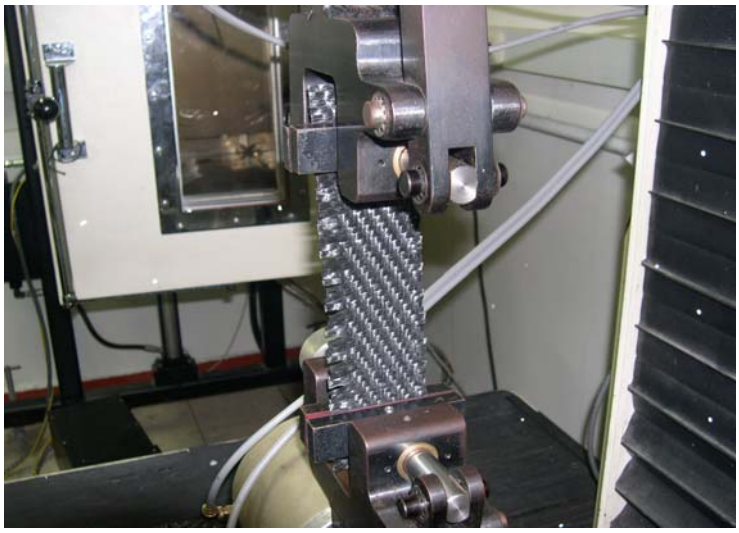
<그림 3.3-13> 광폭인장강도시험 모습

② 스트립(strip)법

인장강도시험은 지오튜브 실험재료의 최대인장강도와 인장변형 등을 평가하기 위한 시험이다. 이 시험은 KS K ISO 10319시험법(준용)에 규격화되어 있다. 이 시험방법은 인장시험기의 상·하에 붙어 있는 클램프사이에 시료의 길이 200mm (파단 신도가 75% 이상 100mm), 시료의 폭 50mm 유지 되도록 한 다음, 인장속도를 20mm/min±2%로 하여 시료가 파단 될 때까지 수행한다. <그림 3.3-14>에서는 스트립인장강도시험 모습을 보여준다.

<표 3.3-3> 스트립인장강도시험의 개요

항 목	내 용
시 험 기	인장강도
시험온도	20±2℃
시험습도	65±5%
인장속도	20mm/min±2%
시료 폭	50mm (파단 신도가 75% 이상일 경우 100mm)×50mm
시료 수	5개
평가항목	최대인장강도 및 인장변형, 인장-변형 곡선



<그림 3.3-14> 스트립인장강도시험 모습

③ 봉합강도시험

지오튜브의 봉합강도시험은 광폭인장강도시험법 KS K ISO 10321을 준용하여 시험시편의 경우 강도가 약한 CD방향으로 봉합된 시편에 대하여 수행되었다. 지오튜브의 봉합선이 시험편의 중앙부분에 위치하도록 샘플링하여 클램프와 평행하게 물리고 규정된 속도로 시험하는 방법이다.

④ 인열강도시험

인열강도강도시험은 지오튜브 실험재료의 찢겨지는 강도를 평가하기 위한 시험

이다. 이 시험은 KS K 0769에 규격화되어 있다. 지오튜브의 내부 채움재로 사용하는 흙시료가 운반 및 거치 중에 모서리 부분에 의한 지오튜브의 손상이 발생될 수 있다. 따라서 이러한 손상에 대한 저항력을 평가하기 위해 인열강도시험을 수행하였다. <그림 3.3-15>는 인열강도시험 모습을 보여준다. 인열강도시험은 폭 7.7cm× 길이 15.4cm로 재단하여, 길이방향 중간 부분을 폭방향으로 1.5cm 깊이로 절단 한 후 절단되어 있는 부분에 인장하중을 가한다. 따라서 인열강도시험으로 부터 사전에 손상되어 있는 지점에 어느 정도의 힘이 가해졌을 때 찢겨지는지를 평가할 수 있다.



<그림 3.3-15> 인열강도시험 모습

(나) 재질 분석

재질분석은 채취한 시료에 부착되어 시험에 장해가 되는 수지, 염료 등은 미리 적당한 방법으로 제거하고 실 상태 또는 섬유상으로 풀어서 시험하는 방법이다. 이 시험은 KS K 0210-1에 규격화되어 있다.

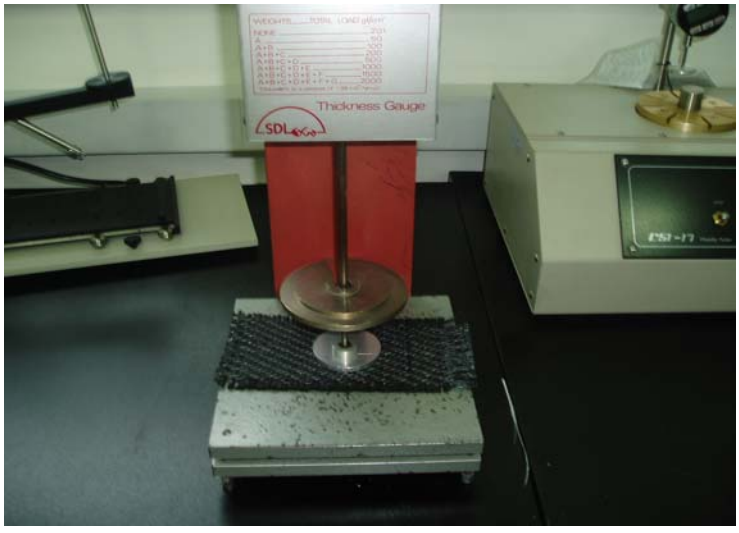
시험방법은 푸리에변환적외선분광광도계(ATR)를 사용하여 각종섬유에 대한 흡수스펙트럼의 주요흡수대와 특정 파수를 측정한다. <그림 3.3-16>에서는 재질분석 시험 모습을 보여준다.



<그림 3.3-16> 재질분석시험 모습

(다) 두께시험

두께시험은 시험편의 놓여 있는 기준판과 시험편에 압력을 가하 한 후 평행한 프레서풋의 접촉면 사이의 거리를 측정하는 시험이다. 이 시험은 KS K ISO 9863에 규격화되어 있다. <그림 3.3-17>은 두께 시험 모습을 보여준다.



<그림 3.3-17> 두께시험 모습

본 시험은 기준판에 규정압력 2±0.01kPa를 가한 프레셔풋을 올려놓고 두께측정

기 0점을 조정한 후 시험편을 기준판과 프레셔풋 사이에 위치시킨다, 시험편에 규정압력이 가해지도록 천천히 프레셔풋을 내리며, 특별한 규정시간이 없는 경우 30초 후 눈금을 읽은 다음 압력을 제거한다. 일반적으로 특별히 규정하지 않는 한 시험편은 최소크기를 프레셔풋 표면의 지름의 1.75이상의 크기로 하며 시료는 10개 이상 시험하여 결과를 산출한다.

(라) 무게시험

무게시험은 지오텍스타일의 단위 면적당 무게를 결정하는 시험방법이다. 이 시험은 KS K ISO 9864에 규격화되어 있다.

본 시험은 시험편을 대표할 수 있는 부위를 100cm^{2}이상 크기로 10개 이상 준비하여 단위면적당 무게를 측정한다. <그림 3.3-18>은 두께 시험 모습을 보여준다.



<그림 3.3-18> 무게시험 모습

(마) 열 노화성 시험

열노화성 시험은 지오튜브 실험재료 재질의 온도 변화에 따른 인장강도 및 변형특성 등을 평가하기 위한 시험이다. 이 시험은 KS M 3071에 규격화되어 있다 (<표 3.3-4> 참조).

<표 3.3-4> 열노화성 시험(KS M 3071)의 개요

항 목	내 용
시 험 기	열노화성 시험기
시험온도	70±1℃
시험습도	65±2% (상대습도)
인장속도	200mm/min±5%
시료 크기	200mm(파단 신도가 75% 이상일 경우 100mm)×50mm
시료 수	평균 5개
평가항목	최대인장강도 및 인장변형, 인장-변형 곡선

본 시험은 온도변화에 따른 시편의 인장변형특성을 평가하고자 수평위치에 있는 링 모양 회전 장치에 시편을 설치한다. 이때 시편은 설치 간격의 경우 10mm 이상으로, 챔버 내부표면에서 50mm 떨어지게 설치한 후 70℃로, 72시간을 방치한다. 이렇게 준비된 시편은 72시간에 지난 후 최대인장강도 및 인장변형 등을 앞서 언급된 인장강도시험 기준에 의하여 평가한다. <그림 3.3-19>에서는 열노화성 시험 모습을 보여준다.



<그림 3.3-19> 열노화성시험 중인 열챔버 모습

(바) 마모시험

마모 시험은 KS M 3332에 규격화되어 있으며, 지오튜브 재료가 외력 및 접촉에 의한 표면 마모 상태를 평가하기 위한 시험이다. 본 시험방법은 시편의 원지름을 120mm 정도로 자른 다음 시편중앙에 구멍을 낸 후 시료 무게를 측정한다, 준비된 시편을 마모시험기 받침대에 설치하여 연마지를 감은 고무제 마모 원판을 회전시켜 마모하는 방식으로 수행된다.

<표 3.3-5> 마모 시험의 개요

항 목	내 용
시 험 기	마모 시험
시험온도	20±2℃
시험습도	65±5%
인장속도	10mm/min±2%
시 료 폭	25mm±1
시 료 수	2개
평가항목	마모량



<그림 3.3-20> 마모시험 모습

시험결과는 시험하중 1000g, 마모횟수 500회 기준으로 하여, 시험 전 무게 10.6g, 시험 후 무게 10.11g, 무게의 차가 0.50g으로 5%정도의 마모량이 발생한 것으로 평가되었다. <표 3.3-5>에서는 마모시험의 개요를 보여주며, <그림 3.3-20>에서는 마모 시험 모습을 보여준다.

(사) 연소성 시험

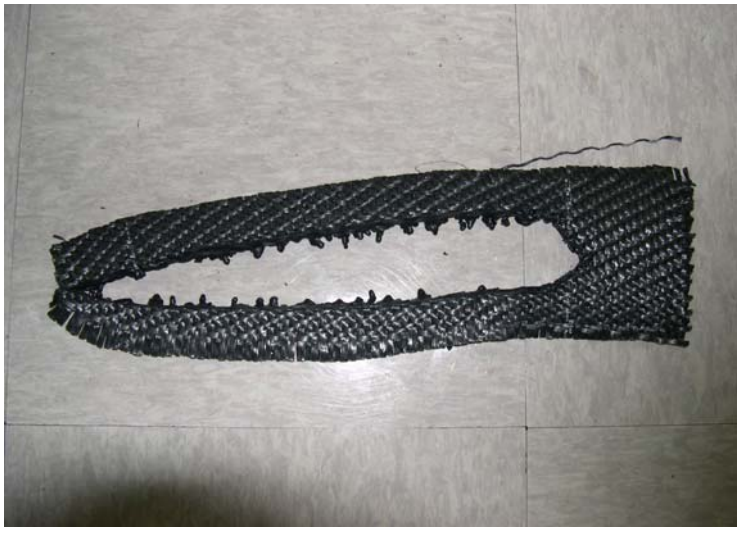
연소성시험은 지오튜브의 연소특성을 평가하기 위한 시험으로, KS K 0583에 규격화 되어 있다. 본 시험은 길이, 250mm, 넓이 100mm의 시료를 수평방향으로 고정시켜, 가스불로 시료 끝에 대고 약 15초 동안 동일한 속도로 착화지시선(4cm)까지 도달케 한 후 불꽃을 재빨리 점화시킨 후 그 순간부터 불꽃이 꺼질 때까지의 시간(초)을 측정하는 방식으로 수행된다. <표 3.3-6>에서는 연소시험의 개요를 보여주며, <그림 3.3-21>에서는 연소시험 모습을 보여준다.

<표 3.3-6> 연소성 시험(KS M 3071)의 개요

항 목	내 용
시 험 기	연소성 시험
시험온도	-
시험습도	30±2% (상대습도)
연소시간	15초±1
시료크기	길이 250mm, 넓이 100mm
시 료 수	시료 5개 평균 값
평가항목	연소 시간



(a) 챔버 안에서 시험중



(a) 시험 후 지오튜브

<그림 3.3-21> 연소성시험 모습

(아) 유효입경 시험

토목섬유는 흙 입자의 이동을 차단하는 필터로서 사용된 동시에 2가지의 중요한 기능을 가진다. 첫째, 흙과 토목섬유의 경계면을 통과하는 물의 흐름이나 유속을 방해하지 않고 흐르게 하는 기능이며, 둘째 흙으로부터 빠져나오는 세립토의 유실을 막아야 하는 기능이다. 이러한 기능을 적정하게 수행하는 인자는 토목섬유에 분포하는 구멍의 크기이며, 이것은 차단되어져야 할 흙의 입도분포와 관련된다. 따라

서 이러한 토목섬유의 수리학적 성능을 결정하는 주요인자의 하나인 토목섬유의 구멍크기는 흙의 입도분포 곡선과 같은 구멍크기 분포곡선으로 표시된다. 이러한 토목섬유의 유효입경을 결정하는 방법은 건식방법, 습식방법 및 수리 동역학적 방법으로 분류된다. <표 3.3-7>은 유효입경 시험방법을 요약 정리하였다.

지오튜브의 유효입경 시험은 KS K ISO 12956 시험법 (Effective Opening Size Test)을 준용하였다. 필터로서의 주된 성능은 흙입자의 보유성과 동시에 물에 대한 투과성이고, 이런 성능을 좌우하는 인자는 토목섬유의 구멍이나 Pore의 크기분포이다. 토목섬유는 이용되는 곳의 흙의 입도분포에 따라서 분리, 여과 및 배수기능을 고려하여 적합한 구멍크기를 가져야 하고 산출방법은 입경 또는 입경 분포를 미리 알고 있는 유리구슬 또는 흙 입자를 이용하여 체분석을 통해 얻어진 분포곡선으로 토목섬유의 구멍크기를 추정하고 그 값을 유효구멍 크기로 나타낸다. <그림 3.3-22>는 유효입경시험 방법으로서 본 연구에서는 습식방법을 사용하여 지오튜브에 대한 유효입경 시험을 수행하였다.

<표 3.3-7> 유효입경 시험방법 요약

시험방법 항목		습식방법(KS K ISO 12956)
사용재료		흙
입경	최대	2.0 mm
	최소	0.02 mm
진동수		50 Hz
진폭		1~3 mm
진동시간		15분(적정한 물 분사
시험중량		7±0.1 kg/m^2
시료크기		130 mm 직경이상
시료갯수		3 개
유효구멍크기		O_{90}
기타		90% 통과 백분율에 해당하는 유리구슬의 입경(mm, μm)



<그림 3.3-22> 유효입경시험 모습

(자) 투수시험

지오튜브의 수직투수시험은 KS K ISO 11058에 의거하여 실시하였다. <그림 3.3-23>에서 보듯이 시험방법은 정수두 하에서 한 방향으로 흐르는 물이 하중을 가하지 않는 한 층의 지오튜브 면에 대해 수직방향으로 투과하는 방법이다.



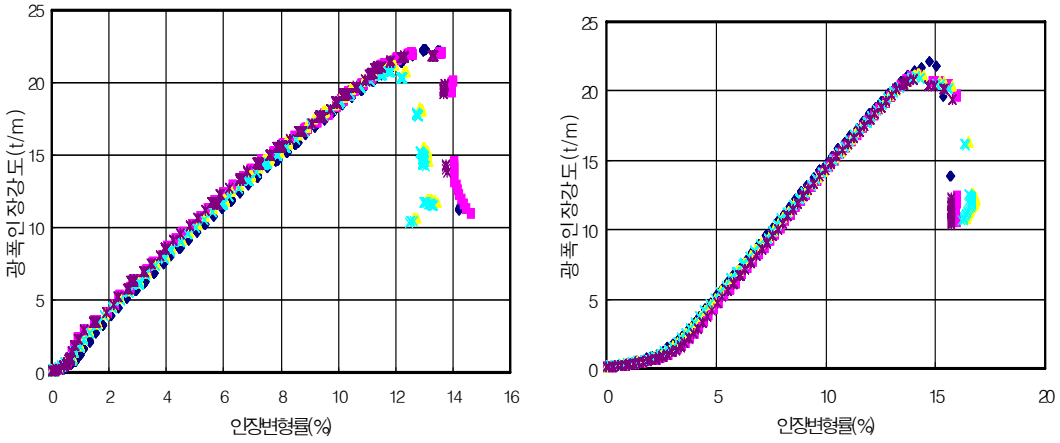
<그림 3.3-23> 투수시험 모습

또한, 시험편을 통과한 물의 수두차가 50mm가 될 때까지 장비에 물을 공급한

후 수위가 일치 하지 않으면 장비 내에 기포를 제거 후 70±50mm의 손실수두가 되도록 유량을 조절하고 30초 정도 수두가 안정되었을 때 유량을 1000cm^{3}이상, 측정시간을 30초 정도로 하여 시험을 수행하였다.

(3) 실험결과

<표 3.3-8>에서는 지오튜브의 공학적 특성시험 결과를 요약 정리하였다. <표 3.3-8>에서 보는 바와 같이 광폭인장강도시험결과, 최대인장강도와 인장율의 경우 MD 및 CD 각각 22.5t/m, 13.1% 및 22.3t/m, 14.8%인 것으로 평가되었다. 따라서 실험결과는 지오튜브 시방기준 MD 및 CD 방향 모두 인장강도 측면에서 문제가 없을 것으로 판단된다. <그림 3.3-24>은 광폭인장강도시험에 의한 최대인장강도-인장변형률 곡선을 보여준다.



(a) MD (경사방향) (b) CD (위사방향)

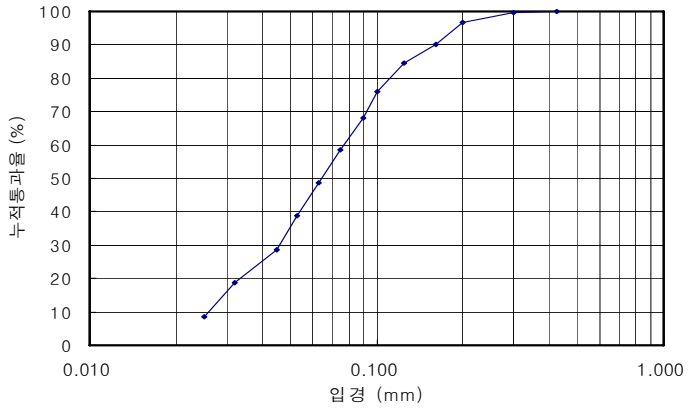
<그림 3.3-24> 지오튜브의 광폭인장응력-인장변형률 곡선

스트립인장강도시험의 경우 최대인장강도와 인장율의 경우 MD 및 CD 각각 955.1kg, 14.2% 및 958.1kg, 21.0%인 것으로 평가되었다 그리고 봉합강도는 시방서 기준으로 광폭인장강도의 50%이상을 요구하고 있으며, 본 지오튜브의 봉합강도는 12.3t/m 로 광폭인장강도의 약 55%로 나타나 이를 만족하는 것으로 평가되었다.

한편, <그림 3.3-25>는 지오튜브 통과시료에 대한 입도분포 곡선을 나타내었다. <그림 3.3-25>에서 보듯이 지오튜브의 유효구멍크기(EOS) O_{90}=0.160mm이고, No.

80~No. 90 사이 크기의 유효입경을 갖는 것을 볼 수 있다.

이러한 지오튜브의 유효입경은 지오튜브의 채움재 선정시 채움재 입경을 결정하는 데 중요한 결정요소가 되므로, 내부의 물은 배출시키고 흙 입자를 잔류시키는 필터 기능에 대한 안정성 평가가 요구되어진다. 이에 FHWA Geotextile Design & Construction Guideline(1989)의 지오텍스타일의 필터기준인 'No.200체 통과량이 50% 이하일 경우 $O_{95(geotube)}<BD_{85(soil)}(4<C_u<8, B=8/C_u,\ C_u=D_{60}/D_{10})'$에 현장시험시공시 채움재(모래)를 적용하여 검토한 결과, 필터 기준을 만족하는 것으로 평가 되었다.



<그림 3.3-25> 유효입경 분포곡선

<표 3.3-8> 지오튜브의 물리적 특성 시험 결과

구 분		지오튜브	
		MD	CD
광폭인장강도	t/m	22.5	22.3
	%	13.2	14.8
스트립인장강도	kg/5cm	955.3	958.1
	%	14.2	21.0
봉합강도	t/m	12.3	
인열강도	kg	689.7	571.3
재질분석 (적외선흡수스펙트럼)		폴리에틸렌+폴리프로필렌	
두께	mm	3.24	
무게	g/m^2	921.3	
열내화성 스트립인장강도	kg/5cm	897.3	915.5
	%	14.0	21.5
유효입경	mm	O_{90}=0.16	
투수계수	cm/sec	1.6×10^{-1}	

라. 호안시스템과 흙 시료와의 마찰특성 평가

본 절에서는 호안공사에서 활용되는 건설재료와 하상토에 대한 다양한 마찰특성 실험을 수행하여 하상토 활용에 따른 호안 시스템의 적합성을 평가하고자 하였다. 이때 마찰실험은 직접전단방식을 이용하여 점토, 모래, 화강토 등의 흙 시료를 사용하여 흙 시료/콘크리트블록, 흙 시료/지오튜브/콘크리트블록 등에 대한 마찰시험을 수행하여 양질의 성토재인 화강풍화토 및 하상토의 마찰특성을 비교・분석하여 호안설계 시 요구되는 합리적인 마찰계수(μ)를 제안하였다.

(1) 제체 비탈면 세굴 메카니즘 및 호안 설계방법

(가) 세굴 메카니즘

세굴은 하천수 또는 강우와 같은 유수에 의해 제체 또는 하상을 구성하는 재료가 굴착되어 운반되어지는 현상으로, 자연적 혹은 인위적 원인에 의해 토사와 유수의 경계면에 발생하는 유수에 의한 전단응력이 세굴에 대한 토사의 저항력 보다 커질 경우 발생한다.

일반적으로 유수에 의한 전단응력은 홍수 발생 시 급격히 증가하며, 이는 제방이나 하상 등 하천 경계면의 토사를 침식하여 이동시키는 능력을 증가시키는 원인이 된다. 특히, 하천 내에 위치한 교각이나 교대와 같은 수리학적 구조물은 흐름을 가속시키거나 와류를 형성시켜 흐름 유형의 변화를 야기함으로써, 구조물 주위에 세굴을 발생시킨다. 또한 최근의 이상기상현상에 의한 집중호우는 단기간에 설계홍수량을 상회하여 급격한 교량기초의 세굴을 유발할 수 있고, 이로 인해 하상 지반의 지지력 감소를 초래할 수 있으므로 교량의 세굴대책에 대한 필요성을 더욱 높이고 있다(한국건설기술연구원, 2006).

세굴은 발생 원인에 따라 지속적인 하천수의 흐름에 의한 장기적인 하상상승・하강 작용, 수축세굴 등이 발생하는 장기변화에 의한 세굴과 수리학적 구조물 축조 등에 따른 단면 축소세굴 및 국부세굴 등이 발생하는 단기변화에 의한 세굴이 있다.

장기변화에 의한 세굴은 장기적인 기상학적 변화, 집수 유역의 변화와 같은 지형학적 변화, 댐의 건설과 같은 인위적인 활동 등에 의해서 반영구적으로 발생하는 하천과 유역의 수리특성 및 하천 단면의 변화와 관련된 장기적인 하상의 상승이나 저하 등으로 발생하는 횡방향 수로 이동 (lateral channel migration), 만곡부 세굴 (bend scour), 합류부 세굴 (confluence scour) 등이 있다(May 등, 2002). 여기서, 장기하상변동의 영향인자는 댐과 저수

지(교량의 상류, 하류), 유역의 토지이용 변화(도시화, 벌채 등), 수로화, 만곡부의 첩수로(cut-off), 하류 하상고의 변화, 하천시스템의 자연적 변화, 하상 준설, 하상에서의 교량 위치, 전체 수계의 자연적인 변화 등으로 알려져 있다(Lagasse 등, 2001).

단기변화에 의한 세굴은 단면축소세굴과 국부세굴로 구분되며, 단면축소세굴은 교량 등 인공구조물 또는 자연적인 요인에 의해 하천내의 통수단면적이 축소되어 발생하는 세굴이며, 국부세굴은 교대와 교각 등 흐름속에 설치된 구조물에 의한 영향으로 발생하는 국부세굴로 나눌 수 있다. 한편, 단기변화에 의한 세굴은 다음과 같은 두가지 상태에 대하여 고려를 한다. 첫째는 이동상세굴 (Live-bed scour)로 교량 상류부로부터 토사의 이송이 있는 경우이며, 상류부로부터 이송되는 토사의 양과 세굴되는 토사의 양이 같아질 때 평형을 이루게 된다. 둘째는 정지상세굴 (Clear-water scour)로 상류부로부터 토사의 이송이 없는 경우이며, 평균 하상전단응력이 하상재료의 한계전단응력보다 작을 때 평형을 이루게 된다.

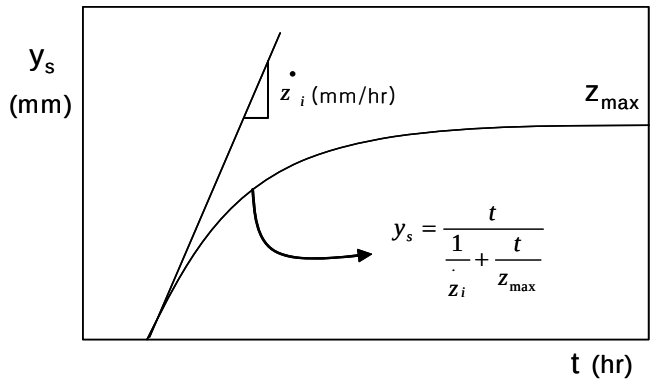
이와 같이 세굴 현상은 흐르는 물에 의한 침식유발능력과 하상 지반의 침식저항능력과의 상호작용에 의하여 발생하는 현상으로서 지반 특성에 따라 상이한 양상을 보인다. 일반적으로 조립토 지반에서의 세굴은 중력과 마찰력의 작용에 의해 결정되는 반면, 세립토 지반에서의 세굴은 중력과 마찰력뿐만 아니라 흙입자의 물리·화학적 성질에도 의존하여 매우 복잡한 양상을 보인다. 조립토 지반의 한계유속 V_c는 평균수심(y, m), 입도분포곡선에서 흙의 중량통과백분율이 50%에 해당하는 입자의 크기(D_{50}, m) 등을 이용하여 구하며(Richardson 등, 2001), 한계유속이 큰 조립토 지반에서는 홍수사상의 강도에 따라 세굴의 형태가 결정되는 것으로 알려져 있다.

$$V_c = 6.19\, y^{1/6} D_{50}^{1/3} \qquad (3.3\text{-}26)$$

한편, 세립토 지반의 세굴은 조립토의 세굴에 비해 매우 느린 속도로 발생하며, 흐름특성보다는 지반의 성질에 더욱 의존하는 것으로 알려져 있다(Briaud 등, 2003). 따라서 조립토에 대해 개발된 세굴공식을 세립토에 그대로 적용한다면 세굴심이 과대평가될 가능성이 크며, 세립토에 대한 세굴해석방법은 수리학적 매개변수뿐만 아니라 시간 효과와 흙의 성질을 고려할 수 있어야 하는 것으로 보고되고 있다(곽기석 등, 2002).

Briaud 등(1999)은 실내실험을 통해 일정한 유속이 지속되는 경우 <그림 3.3-26>에 나타난 바와 같이 세립토 지반의 교각주위에서 발생하는 국부세굴심은 시간의 함수이며, 시간

이 무한대로 지속되었을 경우에 발생하는 최대세굴심(㎜)과 세굴심 변화곡선의 초기기울기인 세굴률(scour rate, ㎜/hr)을 매개변수로 하는 쌍곡선함수의 형태를 따른다는 것을 증명하였다.

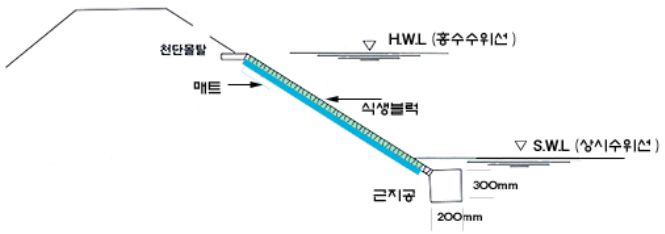


<그림 3.3-26> 세립토의 세굴심-시간 그래프 (Briaud 등, 1999)

(나) 호안의 기능 및 설계방법

호안은 <그림 3.3-27>에서 보듯이 제방 및 하안을 홍수 등의 침식작용에서 보호하기 위해서 설치되며, 지금까지 국내의 경우 간단한 현장 경험과 다음과 같은 건교부 하천설계기준상의 수리현상, 세굴, 퇴적의 변화 등하여 수행되어져 왔다. 이때 제방 비탈면 보호를 위해 사용되는 방법은 1) 비탈덮기, 2) 기초, 3) 비탈멈춤, 4) 밑다짐 등이 있다.

- ○ 급류하천이나 준급류 하천에서는 전구간에 걸쳐서 호안을 설치하고 완류 하천에서는 수충부에 중점적으로 설치한다.
- ○ 호안을 설치해야 하는 유속기준은 일반적으로 유속 3m/sec 이상으로 한다.
- ○ 도시하천에서 비탈경사가 1:2 이하일 때에는 전면적으로 호안을 설치한다.



<그림 3.3-27> 호안의 구조

국내에서는 호안 설치의 경우 소요비용이 크고, 그 기능이 침식방지 뿐만 아니라 자연환경의 보전·재생, 친수성 확보 등과 밀접한 관계를 가지므로 중요성이 증가하는 추세에 있다. 한편, 일본에서는 1987년도부터 건설성 각 지방건설국의 의뢰에 의해 하천환경종합연구소, 건설성 토목연구소, 관련 전문가 등으로 구성된 워킹그룹을 구성하여 호안 설계를 위한 조사항목, 하도특성에 따른 설계외력의 사고방식, 호안 형태별 설계구조세목 등이 포함된 호안 설계법의 전면적인 검토를 수행하였다.

국내 호안설계는 체계적으로 제시된 법규화된 것은 보호공법은 <그림 3.3-28>에서 보듯이 돌망태공, 철제 사석틀공, 식생공, 콘크리트 블록공, 섬유대 호안공(패브릭폼공법), 돌붙임 및 쌓기공 등을 들 수 있다.



(a) 돌망태공



(b) 철제사석틀 공법



(c) 식생블록

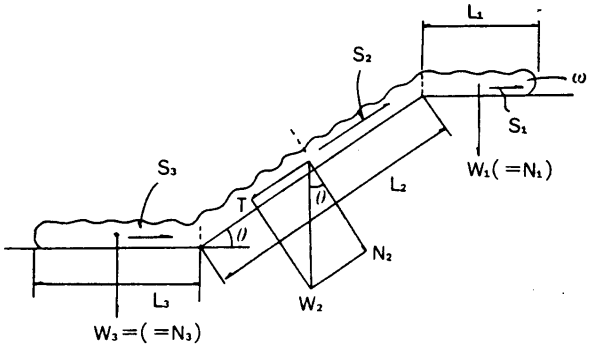


(d) 섬유대공법

<그림 3.3-28> 국내 하천 호안보호공법

호안설계는 세굴 및 활동안정성 등을 검토하며, 이때 활동에 대한 안전율($F_n=S_n/T_n$)은 국가기준으로 확립된 것이 없으나, 최소 $F_n=1.3$ 이상을 확보되어야 한다. 이때 가정사항은 비탈면경사가 최소 1:1 이하임을 전제로 한다. 호안의 활동

안정성 검토는 <그림 3.3-29>과 같은 안정해석 개념에 의해서 수행되며, 불안정시 앵커에 대한 안정성 해석을 추가한다.



<그림 3.3-29> 호안 안정해석 개념도

한편, 활동에 대한 저항력(S_n) 및 활동력(T_n)은 다음과 같고, 저항력의 경우 비탈면, 비탈멈춤 등에 마찰력을 고려하고 정상부분의 비탈머리 부분의 마찰력은 무시한다. 안전율은 1.3~1.5로 한다. 이때 호안/흙 사이의 마찰계수는 주요 설계영향 요소이나 국내의 경우 관련 자료를 제시한 사례가 거의 없는 실정이다.

$$S_n = (L_3 + L_2 \cdot \cos\Theta) \cdot \omega \cdot \mu \cdot \alpha \qquad (3.3\text{-}27)$$

$$T_n = W \cdot L_2 \cdot \mathrm{Sin}\Theta \qquad (3.3\text{-}28)$$

여기서 W = 호안 단위면적당 평균중량(t/m^2)

L_1 = 호안의 비탈머리 길이(m)

L_2 = 호안의 비탈면 길이(m)

L_3 = 호안의 비탈멈춤의 길이(m)

Θ = 비탈면 경사각 (도)

μ = 호안/흙 사이의 마찰계수

α = 호안/비탈면 접지면적율 (%)

(2) 실험개요

(가) 실험방법

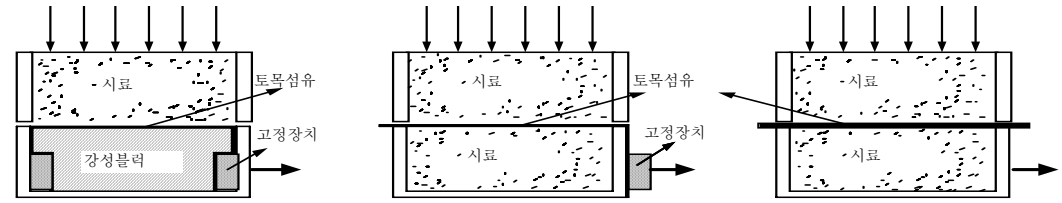
일반적으로 보강재/흙 사이의 마찰특성은 보강토 구조물의 설계 시 가장 중요한 설계요소로 작용되며, 일반적으로 이러한 마찰특성은 보강재/흙 사이의 마찰효율(Ci)로서 언급된다. 한편, 마찰효율(C_i)은 다음 식 (3.3-29)과 같고, 역학적으로 흙의 최대전단저항, $\tan\Phi$에 대한 보강재/흙 사이에 발현되는 최대마찰저항의 크기, $\tan\delta$의 비율을 의미한다.

$$C_i = \frac{\tan\delta}{\tan\Phi} \qquad (3.3\text{-}29)$$

이때 접촉마찰각(δ)는 흙 종류에 따른 대형직접전단시험(ASTM D 5321)이나 인발시험에 의하여 도출해낸다. 지오튜브 시료는 마찰면 접촉이 보강재/흙 및 흙/흙 등으로 발생되는 격자형태의 지오그리드(인발시험으로 평가)와 달리 흙/토목섬유와만의 마찰이 발생됨으로서 대형직접전단시험기에 의한 마찰특성 평가를 수행한다.

대형직접전단시험기를 이용한 마찰시험은 <그림 3.3-30>과 같이 고정식, 비고정식, 부분고정식 등의 세 가지 방법이 있다. 일반적으로 마찰시험은 부분고정식, 고정식, 비고정식 순으로 접촉마찰각이 크게 도출되는 경향이 있다. 본 실험에서는 지오튜브를 더미블록에 고정하여 전단시키는 고정전단방법을 사용하였다.

또한, 마찰시험은 하중변화에 따른 마찰전단력 변화를 측정하는 것이므로, 호안블럭을 하단에 고정시키고 전단면 중앙에 지오튜브를 비고정방법으로 포설한 후 상부 흙 시료를 변화시키면서 수행하였다. 이때 시험에 사용된 대형직접전단시험기는 <그림 3.3-31>에서 보듯이 전단력 측정이 최대 3ton까지 측정가능하며, 전단상자 크기의 경우 30cm×30cm로 하부상자높이 10cm, 상부 상자높이 9cm 등으로서 공기압으로 수직하중이 재하 된다. 또한 시험 시 전단속도는 1㎜/min의 변형률 제어방식으로, 수직응력은 0.5㎏/㎠, 1.0㎏/㎠, 1.5㎏/㎠ 등으로 재하 하였다. <그림 3.3-32>에서는 흙 시료 및 지오튜브가 포설된 모습을 보여준다.

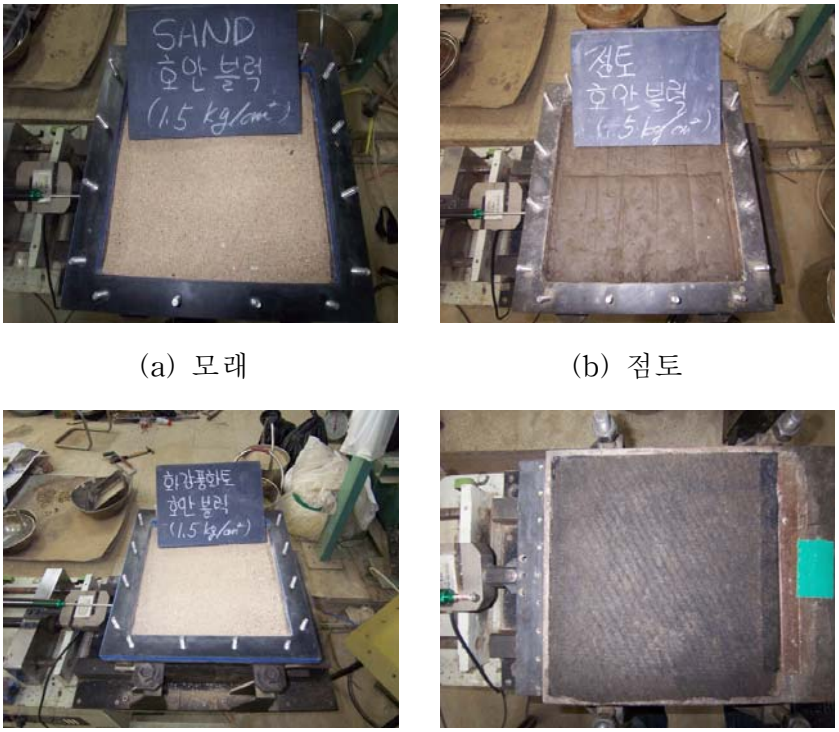


고정전단시험방법 부분고정전단시험방법 비고정전단시험방법

<그림 3.3-30> 지오멤브레인 타입의 전단시험방법



<그림 3.3-31> 대형직접전단시험기



(a) 모래 (b) 점토

(c) 화강풍화토 (d) 지오튜브

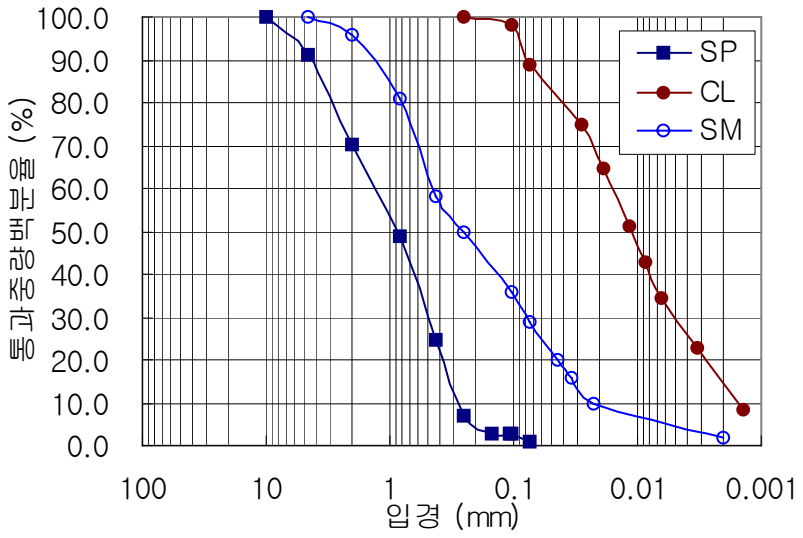
<그림 3.3-32> 시험시료 포설 전경

(나) 실험시료

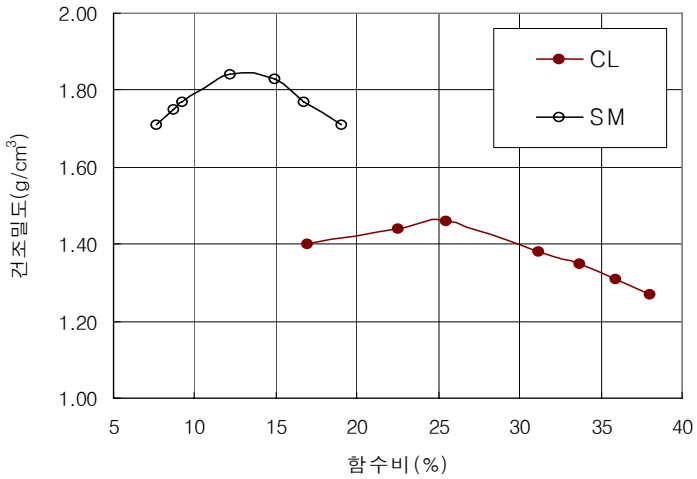
본 연구에 사용된 흙 시료는 하상토의 경우 모래(SP 시료) 및 소성이 작은 점토질 흙 (CL 시료)이고 일반 성토재의 경우 양질의 성토재로 널리 활용되고 있는 화강풍화토(SM 시료) 등이다. 한편, 대상 흙 시료의 공학적 특성을 살펴보면 <표 3.3-9>에서 보는 바와 같다. 이때 각 시료의 분류기호는 모래를 SP로, 점토를 CL로, 화강풍화토를 SM 시료로 하였다. <그림 3.3-33>와 <그림 3.3-34>에서는 각각 흙 시료의 입도분포곡선과 D 다짐에 의한 다짐특성 곡선을 보여준다.

<표 3.3-9> 흙 시료의 공학적 특성

평가항목 / 시료종류	비중	소성지수	흙분류	현장함수비 (%)	다짐시험	
					γ_{dmax} (g/cm^3)	O.M.C (%)
SP 시료	2.59	NP	SW	11.8	2.12	5.65
CL 시료	2.63	NP	SW	11.0	1.99	13.00
SM 시료	2.59	14.52	CL	20.3	1.69	14.70



<그림 3.3-33> 시험대상시료의 입도분포곡선



<그림 3.3-34> 다짐특성 곡선

지오튜브는 비탈면에 호안블록 밑에 포설하여 호안구조물 저면 토사유실을 방지하는 역할을 한다. 시공된 호안블록/지오튜브/흙 포설단면은 흙 사이의 마찰력에 비하여 상대적으로 감소하는 특성을 유도한다. 본 시험에 사용된 지오튜브는 일반적으로 호안공사에 사용되는 지오튜브로서 인장강도 22.3t/m, 단위면적당 중량 921.3g/m^2이다. <그림 3.3-35>에서는 실험에 사용된 지오튜브를 보여준다.

호안블록은 다양한 형태 및 형상으로 각 관련 기업 마다 고유한 모델을 가지고 있으며, 침식 방지를 위한 비탈면 보호 마감재료로 사용된다. 또한, 호안블록은 고강도 콘크리트로 제작되며 흡수율 8%미만, 압축강도 210kg/cm^2으로 건식법을 이용하여 제작되며, 염료의 색깔 및 디자인에 따라 어떠한 표현도 가능하므로 미관을 고려하는 하천공사에 자주 사용된다.실험에 사용된 블록은 <그림 3.3-35>에서 보듯이 호안블록을 모사하기 위하여 30cm×30cm×10cm 두께로 자체 제작된 콘크리트 블록을 사용하였다.




(a) 실험에 사용된 지오튜브 (b) 실험에 사용된 호안블록

<그림 3.3-35> 실험대상 지오튜브 및 호안블록 모습

(다) 실험내용

본 연구에서는 앞서 언급했듯이 하상토 종류 및 호안블록/하상토, 콘크리트/지오튜브/하상토 등 건설재료 변화에 따른 다양한 형태의 마찰시험을 수행하여 양질의 성토재인 화강풍화토 흙시료의 마찰특성과 비교해 봄으로써 하상토 활용에 따른 호안의 역학적 안정성을 평가하고자 하였다. <표 3.3-10>에서는 하상토 활용 호안의 역학적 안정성 평가를 위해 수행된 마찰시험의 종류와 내용을 보여준다.

<표 3.3-10> 마찰시험 종류와 내용

평가 항목	변화인자	변 화 값	하중단계
하상토 마찰특성	흙 종류	◦ 모래/점토	◦ 0.5kg/㎠ ◦ 1.0kg/㎠ ◦ 1.5kg/㎠
	마찰 재료	◦ 흙/호안블록 ◦ 흙/지오튜브/호안블록	
일반토 마찰특성	흙 종류	◦ 화강풍화토	
	마찰 재료	◦ 흙/호안블록 ◦ 흙/지오튜브/호안블록	

이때 마찰실험은 직접전단방식을 이용하여 점토, 모래, 화강토 등의 흙 시료를 사용하여 흙 시료/호안블록, 흙 시료/지오튜브/호안블록 등에 대한 마찰시험을 수행하여 양질의 성토재인 화강풍화토 및 하상토의 마찰특성을 비교·분석하여 호안설

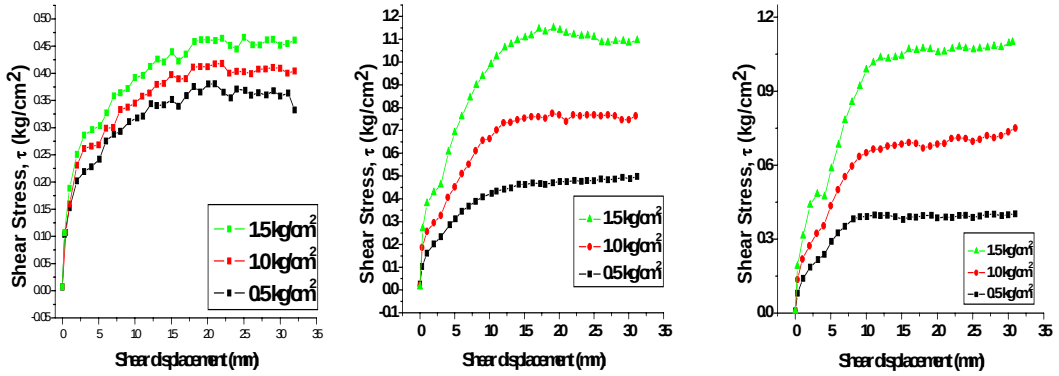
계 시 요구되는 합리적인 마찰계수(μ)값을 제안하였다.

(3) 실험결과 및 분석

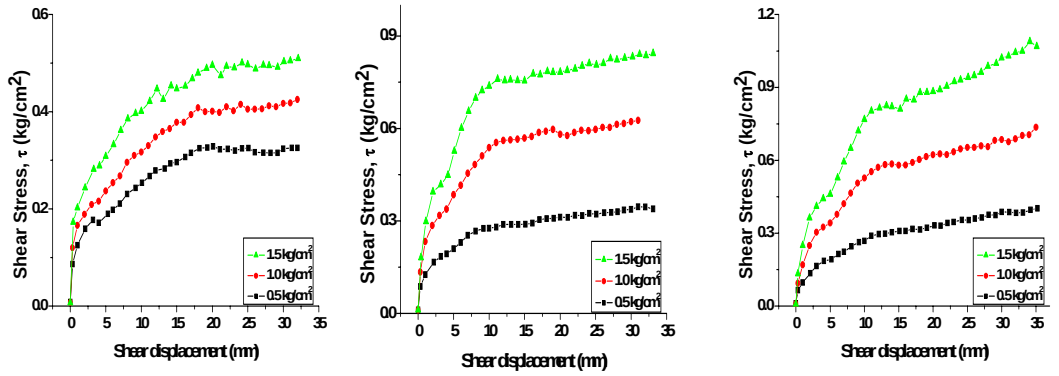
(가) 마찰변형특성

<그림 3.3-36>에서는 대형직접전단시험에 의해 구해진 전단응력-수평변위 관계곡선을 보여준다. 하상토 종류 및 호안건설재료 변화에 따른 다양한 형태의 마찰시험 결과는 <그림 3.3-36>에서 보듯이 뚜렷한 첨두응력 발현없이 전단변형과 수직응력이 증가할수록 전단응력도 지속적으로 증가하는 경향을 보였다.

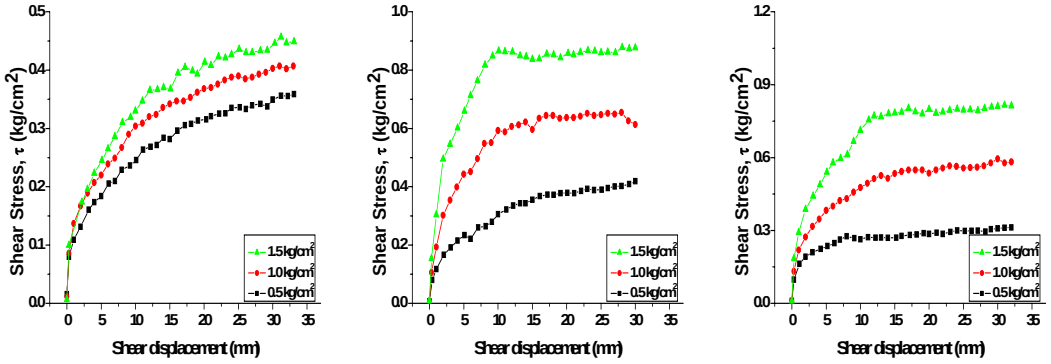
이러한 마찰특성은 일반적으로 느슨한 모래 및 정규압밀된 점토 등에서 발현되는 거동과 유사한 경향을 보이며, 전단변형율 10%(수평변위 30mm)에서 파괴에 이르는 것으로 평가되었다. 따라서 호안블록은 비탈면을 따라 활동이 발생할 경우 일정한 변형이 발생되어야 최대 마찰저항을 나타내는 것으로 평가되었다.



(a) 호안블록/점토 (b) 호안블록/모래 (c) 호안블록/화강풍화토



(d) 지오튜브/점토 (e) 지오튜브/모래 (f) 지오튜브/화강풍화토



(g) 호안블록/지오튜브/점토 (h) 호안블록/지오튜브/모래 (i) 호안블록/지오튜브/화강풍화토

<그림 3.3-36> 시험시료의 변형-전단응력 관계 곡선

(나) 접촉마찰각 특성

<표 3.3-11> 및 <그림 3.3-37>에서는 수행된 마찰시험 종류에 따른 대형직접전단시험 결과를 나타낸다. <표 3.3-11>에서 보듯이 하상토가 모래인 경우 건설재료별 마찰특성은 호안블록/모래의 경우 점착력 0.13kg/cm^2, 내부마찰각 34.2°, 지오튜브/모래의 경우 점착력 0.08kg/cm^2, 내부마찰각 24.5°, 호안블록/지오튜브/모래의 경우 점착력 0.13kg/cm^2, 내부마찰각 26.2° 등으로 평가되었다.

하상토가 점토인 경우 건설재료별 마찰특성은 호안블록/점토의 경우 점착력 0.33kg/cm^2, 내부마찰각 4.7°, 지오튜브/점토의 경우 점착력 0.25kg/cm^2, 내부마찰각 9.5°, 호안블록/지오튜브/점토의 경우 점착력 0.03kg/cm^2, 내부마찰각 5.9° 등으로 나타났다.

내부마찰각만을 고려한 하상토 종류 변화에 따른 마찰특성은 모래에 비해 점토가 호안블록/하상토의 경우 13.7%, 지오튜브/하상토의 경우 38.7%, 호안블록/지오튜브/하상토의 경우 22.5% 정도로 마찰저항력이 매우 작은 것으로 평가되었다.

또한, 화강풍화토에서 건설재료별 마찰특성은 호안블록/화강풍화토의 경우 점착력 0.13 kg/cm^2, 내부마찰각 34.0°, 지오튜브/화강풍화토의 경우 점착력 0.03kg/cm^2, 내부마찰각 27.8°, 호안블록/지오튜브/화강풍화토의 경우 점착력 0.03kg/cm^2, 내부마찰각 27.2° 등으로 나타났다. 이를 내부마찰각만을 고려하여 하상토 중 모래시험결과와 비교해 보면 모래는 화강토에 비해 호안블록/하상토의 경우 100.5%, 지오튜브

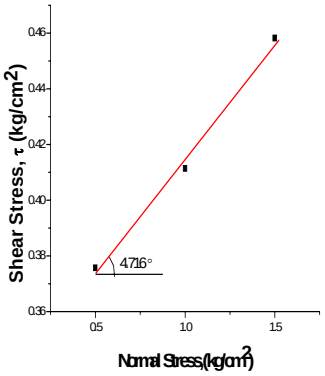
/하상토의 경우 88.1%, 호안블록/지오튜브/하상토의 경우 96.3% 등으로 마찰저항력이 거의 같은 것으로 평가되었다.

이러한 경향은 흙의 마찰특성에 관련된 것으로 세립토 보다 조립토의 큰 전단저항특성에 기인한 것으로 판단된다. 또한 호안블록의 마찰계수(μ)는 대략 점토의 경우 0.07~0.15, 모래의 경우 0.41~0.60, 화강풍화토의 경우 0.46~0.60 정도인 것으로 나타났다.

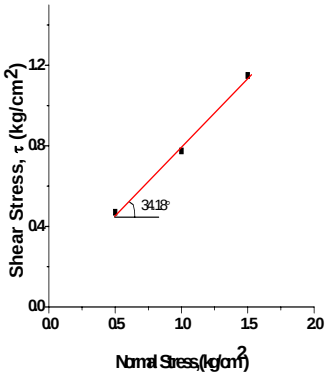
또한, 마찰특성은 조립토인 경우 호안블록/흙시료 마찰에서 크게 나타나 지오튜브 포설이 마찰저항을 약화시키는 반면에 세립토인 점토의 경우 지오튜브/점토 혹은 호안블록/지오튜브/점토 등에서 지오튜브가 포설된 경우 마찰저항이 크게 나타나는 것으로 평가되었다. 이는 조립토는 흙의 내부마찰각에 의하여 마찰저항이 유발됨으로서 지오튜브가 마찰 저항을 약화시키고, 세립토는 흙의 점착력 특성에 기인하여 점토와 지오튜브 사이의 마찰저항력이 증가하는 특성에 기인한 것으로 사료된다.

<표 3.3-11> 마찰시험에 의한 대형직접전단시험 결과

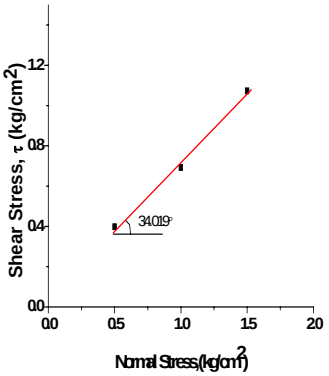
흙 종류		마찰조건	점착력 (kg/cm^2)	접촉마찰각 (°)	마찰계수 (μ)
하상토	모래	호안블록/모래	0.13	34.2	0.60
		지오튜브/모래	0.08	24.5	0.41
		호안블록/지오튜브/모래	0.13	26.2	0.44
	점토	호안블록/점토	0.33	4.7	0.07
		지오튜브/점토	0.25	9.5	0.15
		호안블록/지오튜브/점토	0.03	5.9	0.09
일반토	화강풍화토	호안블록/화강풍화토	0.13	34.0	0.60
		지오튜브/화강풍화토	0.03	27.8	0.47
		호안블록/지오튜브/화강풍화토	0.03	27.2	0.46



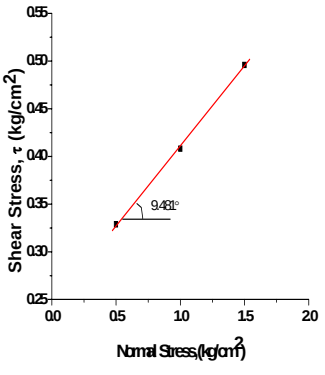
(a) 호안블록/점토



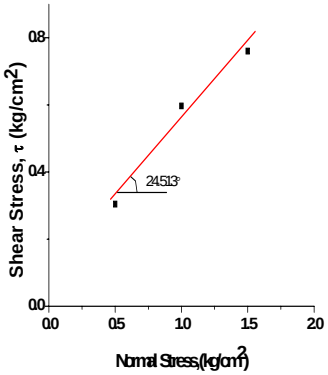
(b) 호안블록/모래



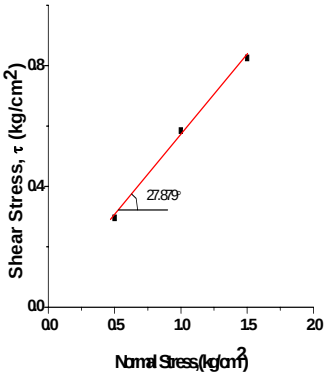
(c) 호안블록/화강풍화토



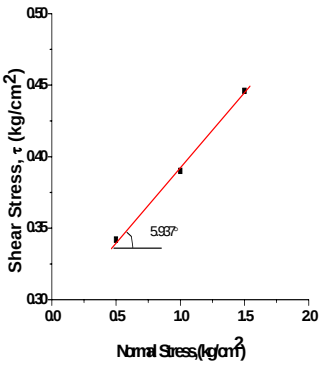
(d) 지오튜브/점토



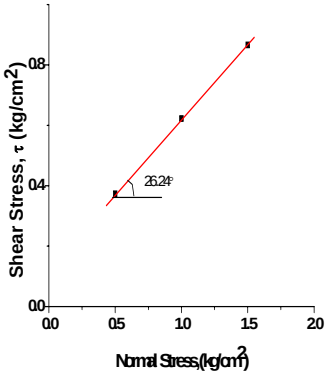
(e) 지오튜브/모래



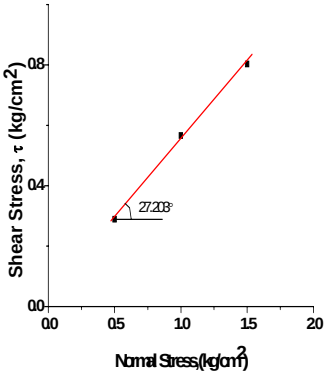
(f) 지오튜브/화강풍화토



(g) 호안블록/지오튜브/점토



(h) 호안블록/지오튜브/모래



(i) 호안블록/지오튜브/화강풍화토

<그림 3.3-37> 시험시료의 수직응력-전단응력 관계 곡선

마. 소결론

본 절에서는 지오튜브 설계이론을 소개하고 지오튜브 제방에 기존 옹벽의 안정성 평가개념을 적용하여, Coulomb 토압이론에 근거한 지오튜브 제방의 내·외적안정성 평가기법(안)을 제시하였다. 또한 다양한 지오튜브의 공학적 특성시험과 각종 호안시스템(호안블록, 지오튜브)과 하상토의 마찰특성시험을 수행하여 하천제방 축조기법으로서의 적용 가능성을 분석하였다.

(1) Leshchinsky(1996)가 제안한 지오튜브 설계이론은 지오튜브의 인장응력(T), 축방향 인장응력(T_{axial})과 내부에 작용하는 외압 및 정수압의 평형해석을 바탕으로 정립한 것이며, 설계시 지오튜브 종류 및 봉합 등으로 인한 강도감소를 고려하여 설계이론에서 구한 축방향 인장응력(T_{axial})과 수직면에 작용하는 전체 작용력(P)에 안전율을 고려하여 적용하여야 한다.

(2) 하천제방 축조재료로서의 활용 가능성을 평가하기 위하여 지오튜브의 공학적 특성 평가 실험으로 인장강도, 봉합강도, 인열강도, 재질분석, 무게, 두께, 무게, 열노화, 연소성, 투수시험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻어 시공조건에 따라 제방축조재료로서 안정한 것으로 판단된다.

(ⅰ) 광폭인장강도시험결과 최대인장강도와 인장율의 경우 MD 및 CD 각각 22.5t/m, 13.1% 및 22.3t/m, 14.8%인 것으로 평가되어 시방기준 MD 및 CD 방향 모두 인장강도 측면에서 문제가 없을 것으로 평가되었다. 또한 봉합강도는 12.3t/m로 광폭인장강도의 약 55%로 나타나 시방기준 50% 이상을 만족하는 것으로 평가되었다.

(ⅱ) 지오튜브의 유효입경 O_{95}는 0.19mm로 나타났으며, 현장시험시 사용되는 채움재(모래)를 적용하여 FHWA(1989)의 지오텍스타일의 필터기준에 대한 적합성 여부를 검토한 결과, 필터기준을 만족하는 것으로 평가되었다.

(3) 하상토 종류 및 호안시스템 변화에 따른 마찰변형 특성분석을 위하여 대형

직접전단시험을 통한 전단응력-수평변위 관계곡선을 분석한 결과, 뚜렷한 첨두응력 발현없이 전단변형과 수직응력이 증가할수록 전단응력도 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 이러한 마찰특성은 일반적으로 느슨한 모래 및 정규압밀된 점토 등에서 발현되는 거동과 유사한 경향을 보이며, 전단변형율 10%(수평변위 30mm)에서 파괴에 이르는 것으로 평가되었다. 따라서 호안블록은 비탈면을 따라 활동이 발생할 경우 일정한 변형이 발생되어야 최대 마찰저항을 나타내는 것으로 평가되었다.

(4) 또한 접촉마찰각 특성 분석 결과, 흙 시료를 기준으로 하상토(모래, 점토) 및 화강풍화토의 마찰계수(μ)는 대략 점토의 경우 0.07~0.15, 모래의 경우 0.41~0.60, 화강풍화토의 경우 0.46~0.60 정도인 것으로 평가되었다.
이러한 경향은 하상토가 조립토인 경우 호안블록/흙시료 마찰에서 크게 나타나 오히려 지오튜브 포설이 마찰저항을 약화시키는 반면에 세립토인 점토의 경우 지오튜브/점토 혹은 호안블록/지오튜브/점토 등에서 지오튜브가 포설된 경우 마찰저항이 크게 나타나는 것으로 평가되었다. 이는 조립토의 경우 흙의 내부마찰각에 의하여 마찰저항이 유발됨으로서 지오튜브가 마찰저항을 약화시키고, 세립토일 경우 흙의 점착력 특성에 기인하여 점토와 지오튜브 사이의 마찰저항력이 증가하는 특성에 기인한 것으로 사료된다.

4. 지오튜브를 이용한 현장시험시공

국내의 경우 자연 성토재가 부족한 실정이며 경제적이고 안정적인 하천제방 축조를 위해서는 준설토 및 오니토, 폐자원 등을 제체재료로 활용하여 제방을 축조하는 기술 연구가 요구된다. 또한, 이상기후 현상으로 인한 자연재해 발생이 빈번해지고 있는 등, 긴급 보수공사에 적용하기 위해서 하상준설토 및 폐자원(석탄회, 석분토 등)을 지오튜브에 담아서 활용하는 “토목섬유 지오튜브 공법”에 대한 설계·시공기법 정립이 필요한 실정이다.

따라서 지오튜브 공법과 같은 하상토 활용기술 개발은 현장 적용시 하상 준설장비와 제방축조 공사비를 절감할 수 있으며, 환경보존 및 폐자원 활용 등에 적용될 수 있다. 이러한 지오튜브를 이용한 제방의 합리적 시공방안 제시 및 하상토 활용 제방축조방법의 표준화된 조사, 설계, 시공방법 개발을 위하여 지오튜브에 대한 토압・변형・침하・간극수압 특성 등의 안정성 자료가 요구된다.

본 절에서는 현장에서 지오튜브를 이용하여 소규모 제방을 축조하고 제체 내부 및 기초지반에 간극수압계, 토압계, 스트레인게이지, 침하계, 경사계 등의 각종 계측기를 매설하여 지오튜브에 작용하는 수평토압, 침하, 변형, 간극수압 등의 대한 계측결과를 분석 정리하였다.

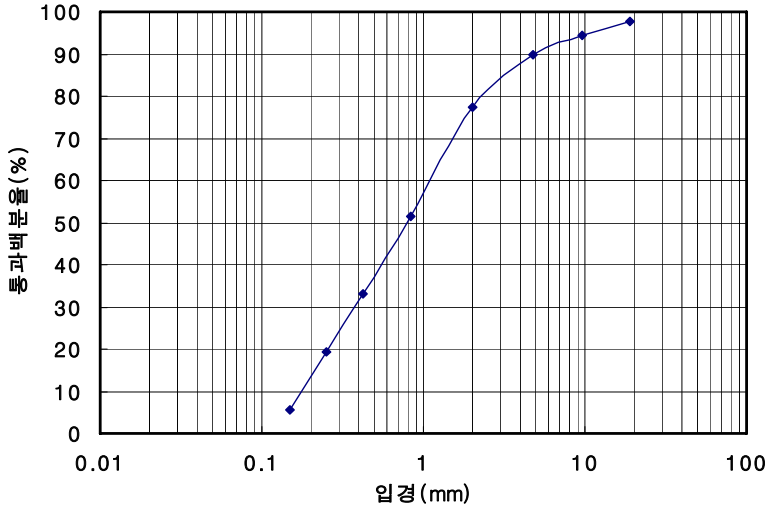
가. 시험시공 개요

본 계측현장은 강원도 삼척시에 위치한 ○○해수욕장으로서 ○○천 하구언과 해안이 만나는 지역이다. 본 현장은 하천에서 해안으로는 흐르는 물길을 막은 후 지오튜브 A, B단면(1단 설치), C단면(2단 설치)을 설치하여, 각종 계측기를 매설하여 현장계측을 실시하였다. 원지반이 모래층으로 분포되어 있으며, 물길을 막은 후 기초기반의 높이를 물길바닥에서 50cm 절토 한 후 침식방지매트로 포설하여 기초지반의 침하 방지 및 바닥수평을 유지되게 시공하였다. 본 현장시험시공은 국내 지오튜브관련 공사실적이 다수 있는 우진건설(주)에서 수행하였다.

본 현장에서 시공에 사용된 채움재의 공학적 특성 및 현장다짐 정도는 다음과 같다.

(1) 현장 뒤채움흙

지오튜브의 채움재로 사용된 흙은 해안에서 넓게 분포되어 있는 모래이다. <그림 3.3-38>은 지오튜브 채움재의 입도분포곡선을 보여준다. 현장 흙시료의 기본특성결과는 <표 3.3-12>에서 보듯이 현장 자연함수비 4.0%, 비중 2.65, 현장다짐밀도 1.34 t/m^3, 통일분류법상 SW으로 나타났다.



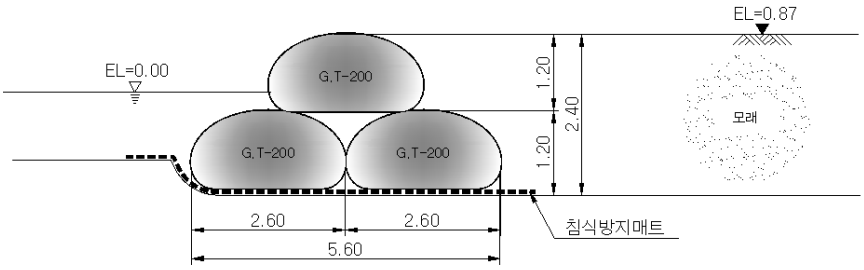
<그림 3.3-38> 채움재의 입도분포곡선

<표 3.3-12> 채움재의 기본특성

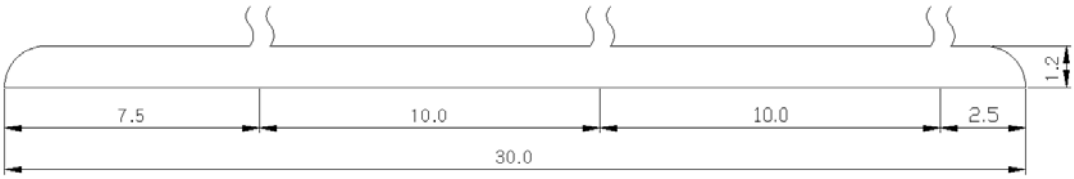
구분		기본특성결과
현장 자연함수비(%)		4.0
입도분포 (%)	자갈 모래	10.1 89.9
소성지수 (PI)		-
비 중(Gs)		2.65
현장 다짐밀도 (t/m^3)		1.34
흙 분류 (통일분류법)		SW

(2) 지오튜브

본 실험에서 사용된 지오튜브는 Ten Cate Nicolon사의 GEOLON PP120S (120kN/m)를 사용하였다. <그림 3.3-39>에서 보듯이 지오튜브는 길이 30m, 채움 전 직경은 5.0m, 채움 유효높이가 1.2m, 3개의 주입구가 위치하도록 설계되었다.



(a) 지오튜브 단면도

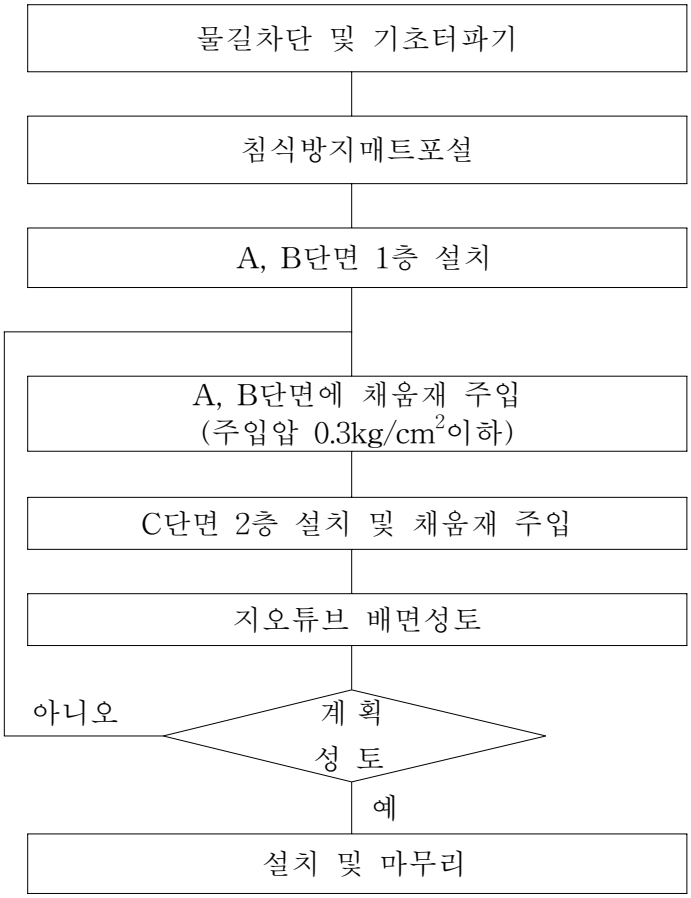


(b) 주입구 위치

<그림 3.3-39> 지오튜브 단면도(우진건설(주))

나. 시공방법

<그림 3.3-40>은 지오튜브 제체에 대한 현장계측의 단계별 시공순서를 보여준다. 지오튜브의 현장시공은 기초지반의 침하방지 및 수평을 유지시킨 다음 30m×5m 크기의 A, B단면(1단 설치), C단면(2단 설치) 지오튜브를 준비하여 주입구에 충진시스템을 이용하여 채움재를 주입 한다. <그림 3.3-41>에서 보듯이 기초지반 터파기 및 침식방지매트포설 후 지오튜브 A, B단면(1단 설치)에 10m 간격으로 주입구가 있어 끝단의 주입구부터 펌프를 사용하여 내부의 모래와 물을 혼합하여 충진시킨 후, C단면(2단 설치)도 같은 방법으로 시공하고, A, B단면(1단 설치), C단면(2단 설치)의 충진 완료 후 지오튜브 배면성토 시공을 마무리 한다.



<그림 3.3-40> 지오튜브를 이용한 현장계측 시공순서



(a) 물길차단



(b) 기초지반 터파기



(c) 원지반에 침식방지매트 설치



(d) A 단면설치



(e) A 단면에 채움재 주입



(f) A단면에 채움재 충진 완료 후 B단면 설치



(g) B단면에 채움재 주입 완료 후 C단면 설치



(h) C단면에 채움재 주입



(i) C단면 주입 완료



(j) 지오튜브 배면성토



(k) 완공 후 모습

<그림 3.3-41> 지오튜브 현장시공 모습

다. 현장계측

(1) 평가항목 및 계측기 종류

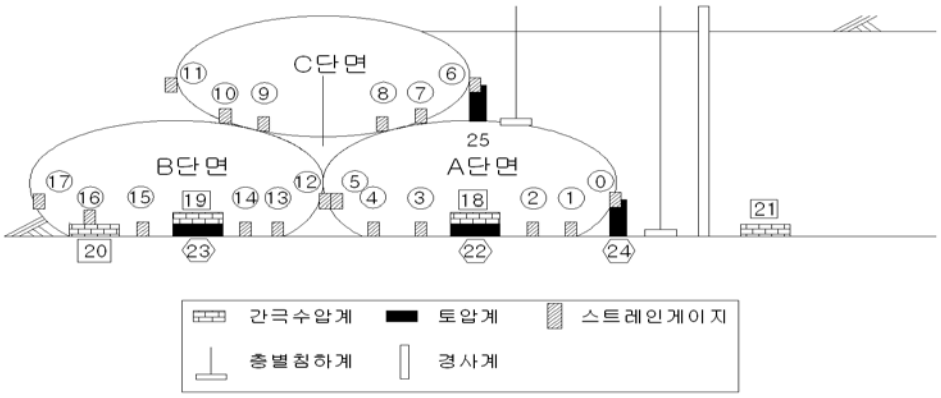
지오튜브 제방의 안정성 검토를 위한 현장계측 항목 및 사용 장비는 <표 3.3-13>과 같다. <표 3.3-13>과 같이 주요 평가 항목은 벽체에 작용하는 수직·수평토압, 지오튜브 변형, 지중침하, 지중변위, 간극수압 특성이며, 이를 계측하기 위한 주요장비로 토압계(용량 2kg/cm^2), 스트레인게이지, 수평토압계, 간극수압계, 침하판, 경사계 등을 사용하였다.

<표 3.3-13> 시험시공시 평가 항목

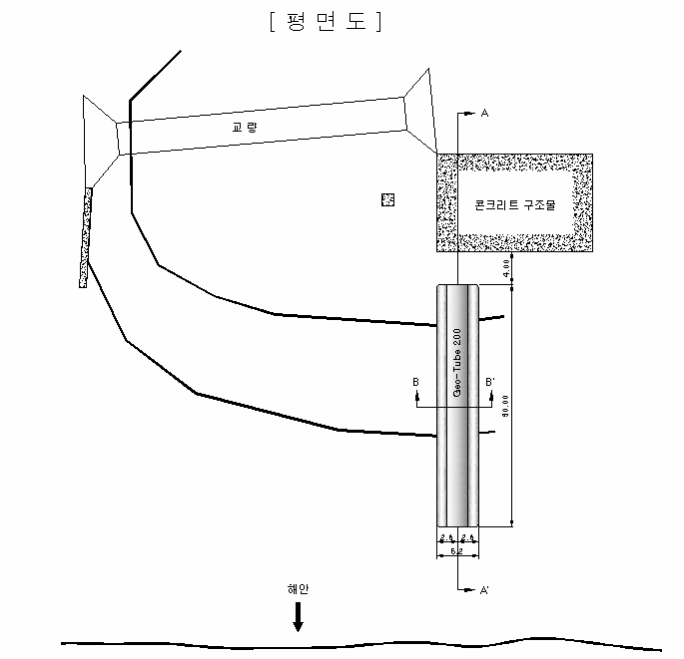
평가항목	사용 장비	계측기 설치 위치
수직토압	토압계	수직토압계 2개소 설치
수평토압	토압계	수평토압계 2개소 설치
지중침하	침하판	기초지반, A단면 상단 각 1개소 설치
변형특성	스트레인게이지	A, B, C 단면의 80cm 간격으로 각 6개소 설치
지오튜브 배면 변형특성	경사계	2.5m 경사계 설치
지오튜브 저면 간극수압	간극수압계	A, B단면 아래 기초지반 및 A단면 4m 떨어진 기초지반에 5개소 설치

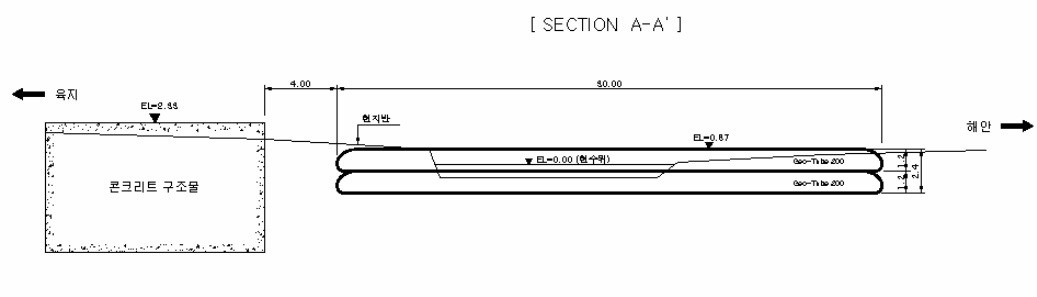
(2) 계측기 매설 위치 및 방법

본 현장에서 지오튜브 제방의 안정성 검토를 위하여 <그림 3.3-42>와 같이 수직 및 수평 토압계 각 2개소, 침하판 2개소, 간극수압계 5개소, 경사계 1개소를 매설하여 시공 중과 시공 후의 거동특성을 계측하였다. <그림 3.3-43>은 지오튜브 설치 계획도를 보여준다.



<그림 3.3-42> 계측기 매설도





<그림 3.3-43> 지오튜브 설치 계획도

또한, 수직 및 수평토압계는 <그림 3.3-44>에서 보듯이 철재판에 고정시켜 지오튜브 기초지반 및 배면에 설치하였다. 또한, <그림 3.3-45>에서는 현장에 설치된 간극수압계의 설치 장면을 보여준다.

스트레인 게이지 설치는 <그림 3.3-46>과 같이 지오튜브의 부착면을 깨끗하게 하고 P2로 표면을 평면하게 한 후, 스트레인게이지 전용접착제(CN)로 접착시킨다. 또한, 방수처리를 위해 방수테이프를 붙인 후 그 주변을 다시 우레탄 수지로 밀봉하여 이중 방수 처리하는 방식으로 수행되었다.

한편, 지중침하를 측정하는 침하판은 <그림 3.3-47>과 같이 40cm×30cm의 강성판, 배관봉, 연결소켓, PVC관 등으로 구성되어 수평을 유지하면서 설치하였다.

또한, 벽체전면의 지중 수평변위를 측정하는 경우 경사계는 기초지반을 천공한 후 케이싱을 설치하는 방법으로 설치하였다(<그림 3.3-48> 참조).



(a) 수직토압계



(b) 수평토압계

<그림 3.3-44> 토압계 설치 장면



<그림 3.3-45> 간극수압계 설치 장면



<그림 3.3-46> 스트레인게이지 설치 장면



<그림 3.3-47> 침하판 설치 장면



<그림 3.3-48> 경사계 설치 장면

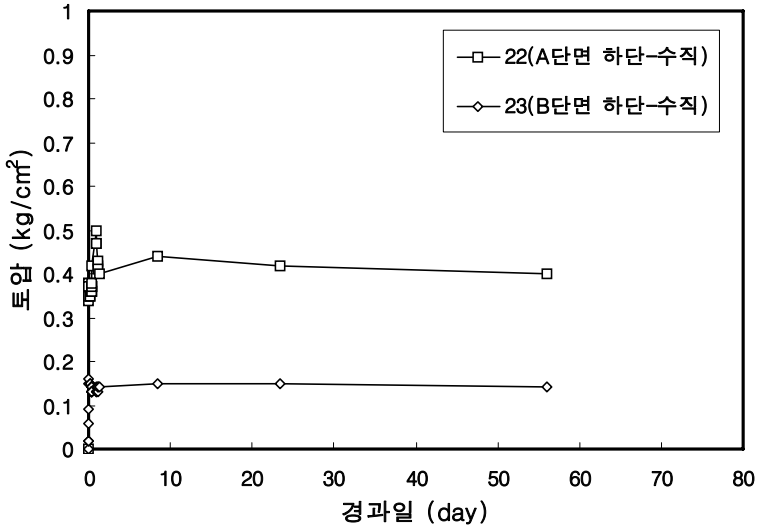
라. 현장 계측 결과

(1) 토압 및 변형특성

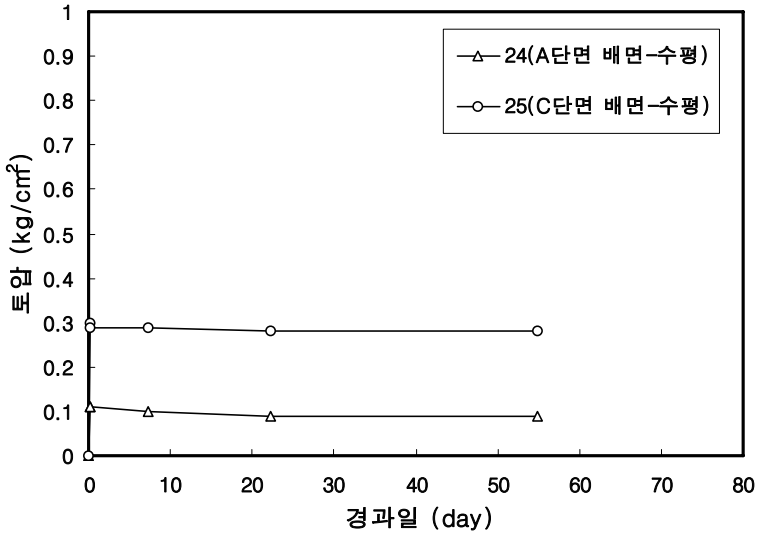
(가) 수평토압 및 수직토압

<그림 3.3-49(a)>에서는 본 현장의 지오튜브 기초지반의 수직토압 계측결과를 보여준다. <그림 3.3-49(a)>에서 보듯이 시공완료 후 56일 경과된 지오튜브 기초지반의 수직토압은 다층 속채움재 효과로 인한 영향으로 초기에는 증가하다가 시간경과에 따라 수렴하는 경향을 나타내었다. 시험결과는 A단면(1층설치) 기초지반인 경우 1490분(1일) 0.5kg/cm^2~80640분(56일) 0.4kg/cm^{2}로 시간경과에 따라 감소하였고, B단면(1층설치) 기초지반인 경우 131분(0.09일)은 0.16kg/cm^2~80640분(56일)

0.14kg/cm^{2}로 평가되었다. 이는 지오튜브 각 층에 작용하는 상재하중 값과 유사한 값을 나타내었다. 또한, <그림 3.3-49(b)>에서는 A단면(1층설치) 및 C단면(2층설치) 배면의 수평토압결과를 보여준다. 시험결과는 A단면(1층설치) 배면인 경우 0.3kg/cm^2~0.28kg/cm^2, 시공완료 후에는 다소 감소하는 경향을 나타내며, C단면(2층설치)인 경우 0.11kg/cm^2~0.07kg/cm^{2}정도로 평가되었다.



(a) 수직토압



(b) 수평토압

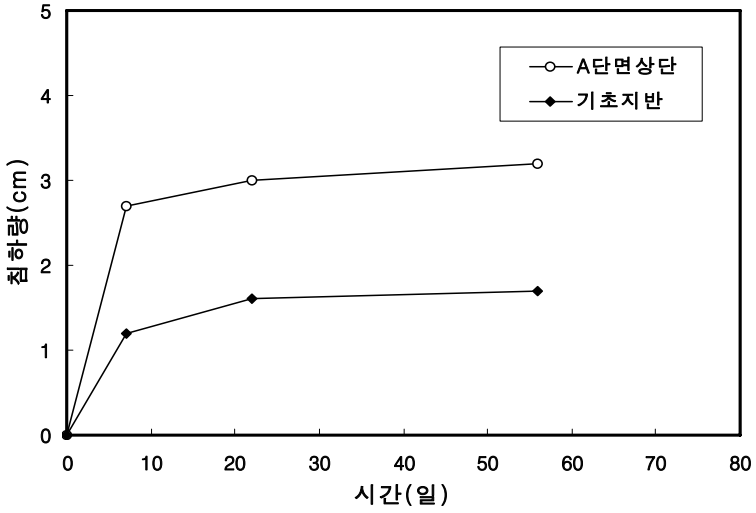
<그림 3.3-49> 지오튜브의 수직 및 수평토압의 변화

(2) 침하특성

침하특성 평가는 침하판을 기초지반, A단면(1층설치) 상단 1.0m에 설치하여 시공완료 후 56일까지 측정하였다. <그림 3.3-50>에서는 시간경과에 따른 지오튜브 제체의 침하 형태를 보여준다.

<그림 3.3-50>에서 보듯이 침하 특성은 현장특성상 기초지반 및 제체 모두 모래로 구성되어 있으므로 시공완료 초기에 즉시침하가 발생한 후 시간경과에 따라 지오튜브 내부의 물이 배수되면서 수렴되는 경향을 나타내었다.

또한, 지오튜브 제체의 침하는 기초지반에서 1.7cm, A단면(1층설치)상단 1.0m 지점에서 3.2cm정도로써 기초지반 보다 A단면(1층설치) 상단층 침하가 다소 커지는 경향을 보인다. 이는 지오튜브의 내부 채움재의 안정화 특성에 영향을 받는 것으로 판단된다.



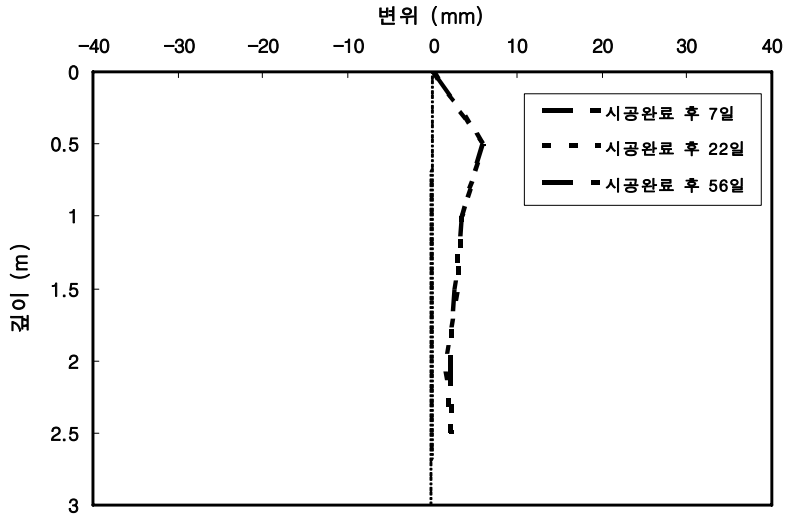
<그림 3.3-50> 경과시간에 따른 침하 특성 변화

(3) 제체 활동

<그림 3.3-51>에서는 지오튜브 배면에서 경사계를 이용하여 측정한 제체높이에 따른 지오튜브의 지중수평변위 변화 특성을 보여준다. <그림 3.3-51>에서 보듯이 지오튜브의 지중수평변위는 지오튜브 높이 0.5m에서 최대수평변위 6.1mm가 발생하고, 지오튜브 저면으로 갈수록 서서히 감소하여 제체 높이 1.0m 이후 3.4mm 이

하로 일정해지는 안정된 특성을 나타내었다.

본 현장은 기초지반이 모래층으로 구성되어 다짐 등이 용이하지 않아 경사계 상부의 움직임으로 변위가 크지만 Canadian Gaeotechnical Society(1985)의 '파괴상태가 되었을 때의 벽체의 회전변위'를 적용할 경우 회전변위 값이 작게 나와 전체 사면활동에 있어서 큰 문제를 야기시키지 않은 것으로 판단된다.



<그림 3.3-51> 벽체높이에 따른 지오튜브의 지중수평변위 변화

(4) 지오튜브의 변형

(가) 스트레인게이지를 통한 변형특성 분석

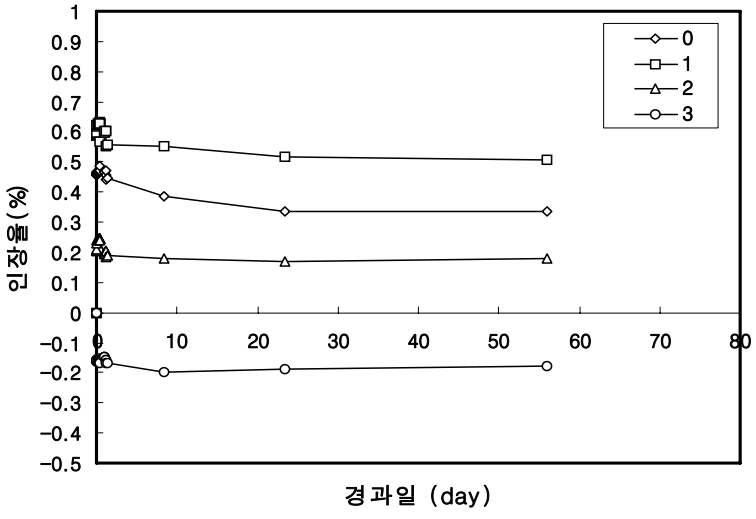
<그림 3.3-52>에서는 각 단면별 지오튜브 유발된 인장 변형특성을 보여준다. <그림 3.3-52>에서 보듯이 지오튜브의 변형특성은 타원형 형태로 A, B단면(1단 설치) 및 C단면(2단 설치)으로 다층으로 포설되어 각 단면의 채움재, 펌프용량, 지오튜브의 형상 등에 따라 변형률이 인장(+) 및 압축(-)으로 나타났다.

<그림 3.3-52(a)>에서 보듯이 A단면(1단 설치)인 경우 0번 0.45~0.33%, 1번 0.63~0.50%, 2번 0.25~0.18%, 3번 (-)0.17~(-)0.18%, 4, 5번이 망실되었고, 시공전·후 측정결과 0번~2번은 0.25~0.63%는 인장, 3번 (-)0.18%는 압축으로 평가되었다. 또한, <그림 3.3-52(b)>에서 보듯이 B단면(1단 설치)인 경우 12번 0.07~0.12%, 13번 (-)0.29~(-)0.14%, 14번 (-)0.29~(-)0.11%, 16번 (-)0.48~(-)0.29%,

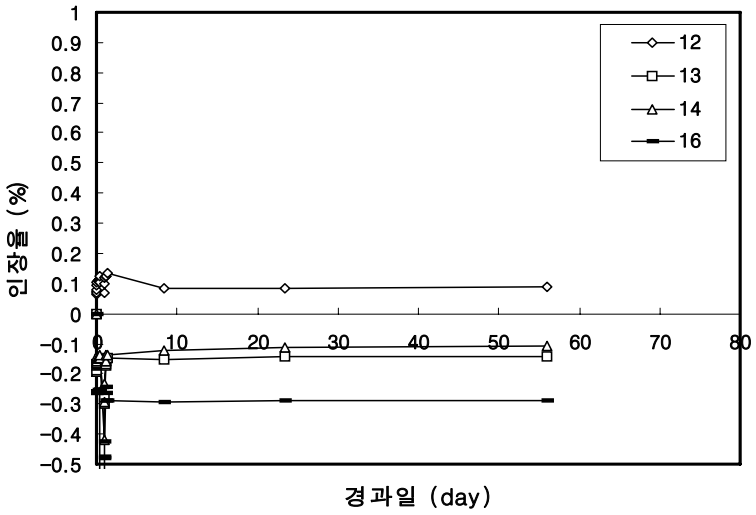
15, 17번 망실되었고 시공 전·후 측정결과, 12번은 0.07~0.12%는 인장, 13번~16번 (-)0.48~(-)0.11%는 압축으로 나타났고, <그림 3.3-52(c)>에서 보듯이 C단면(2단 설치)인 경우 6번 (-)0.32~0.23%, 7번 (-)0.33~(-)0.14%, 8번 (-)0.37~(-)0.20%, 9번 (-)0.52~(-)0.34%, 10번 (-)0.42~(-)0.31% 11번 (-)0.40~0.08%로 평가되었다.

따라서 지오튜브의 인장변형은 시공과정 중 채움재의 주입으로 인해 지오튜브 내부압력이 작용하여 지오튜브 횡방향에서 발생하였으며 주입이 종료된 후에는 일정한 값을 나타내는 것으로 평가되었다.

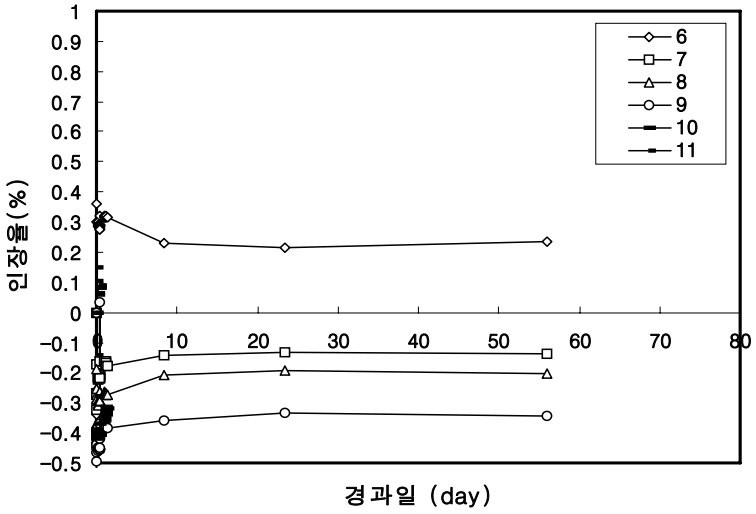
일반적으로 지오튜브는 광폭인장시험 시 지오튜브의 파괴변형률이 13%~14% 정도이므로, 본 현장에서 사용한 지오튜브의 인장변형률은 설계인장변형에 못 미치는 것으로 지오튜브의 인장변형만을 고려하였을 경우 지오튜브는 안정한 것으로 평가된다.



(a) A단면(1단 설치)



(b) B단면(1단 설치)



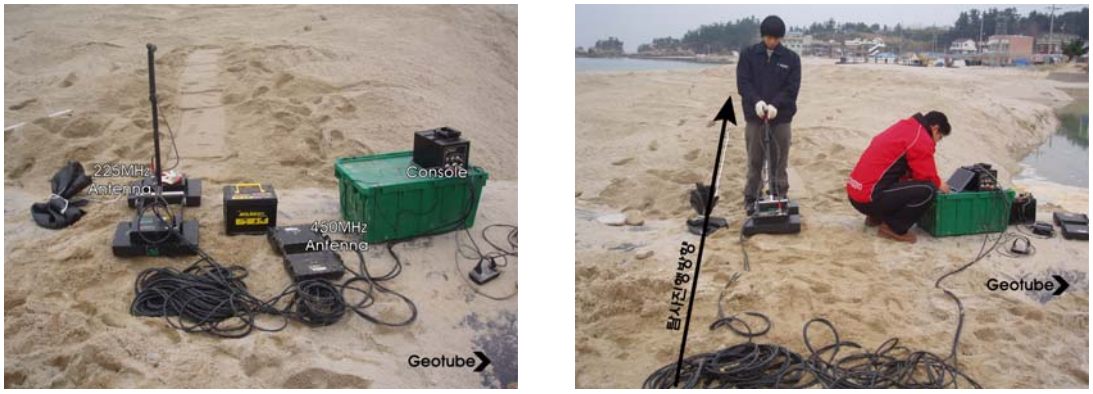
(c) C단면(1단 설치)

<그림 3.3-52> 각 단면별 지오튜브의 유발변위 변화

(나) GPR탐사를 통한 변형특성 분석

매설된 지오튜브의 형상을 GPR탐사로 탐지하기 위하여 지오튜브가 매설된 방향과 직각으로 측선을 설정하고, 225MHz 및 450MHz 안테나를 이용하여 서로 다른 주파수의 탐사단면을 얻었다.

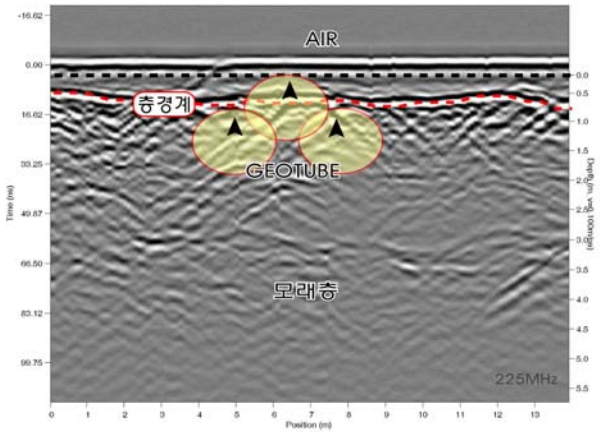
지오튜브는 2단으로 매설되어 있으며 지표에 위치한 중앙부의 지오튜브를 중심으로 그 하단에 양쪽으로 약 0.5~0.8m 심도에 매설되어 있다. 또한 튜브내부와 주변 매질의 물성차가 없는 것을 감안하여 전자파의 반사가 원활하게 일어나도록 상부 튜브의 저면과 하부튜브의 일정구간을 전도성 물질로 둘러싼 후에 탐사를 시행하였다.



(a) GPR탐사기 및 안테나 (b) GPR탐사 장면

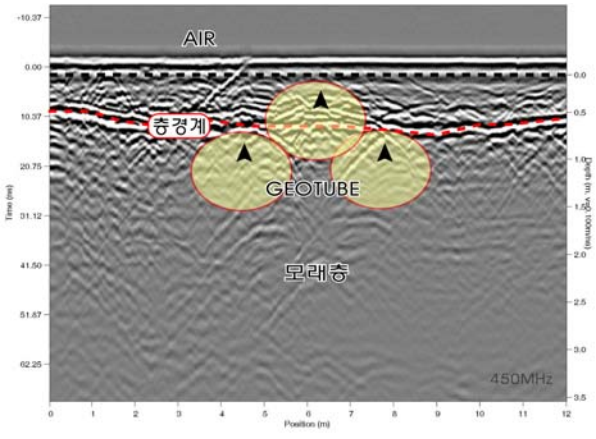
<그림 3.3-53> GPR탐사 작업 장면

자료 해석결과 약 1.5m 이상의 심도에서는 특별한 반사신호가 나타나지 않았는데 이러한 현상은 송수신 주파수와 상관없이 공통적으로 나타났다. 이는 바다와 인접해 있고 바다모래로 충진된 매질의 특성으로 인해 전기전도도가 증가하여 전자파의 감쇠가 크기 때문인 것으로 판단된다.



<그림 3.3-54> 225MHz 안테나 취득 자료

<그림 3.3-54>는 225MHz 안테나를 이용하여 얻은 반사단면으로 지오튜브의 형상을 단면상에 표시하였다. 각 지오튜브의 정점(검은색 화살표)에 해당하는 곳에서는 명확한 반사신호가 나타나지 않으므로 이보다 고주파인 450MHz 안테나를 이용하여 다시 자료를 획득하였다.



<그림 3.3-55> 450MHz 안테나 취득 자료

<그림 3.3-55>에서 보듯이 225MHz의 단면에 비해 반사신호의 분해능이 향상된 것을 볼 수 있다. 단면상에 층경계로 표시한 부분은 기존의 해안 모래사장에 지오튜브를 매설한 후에 모래를 포설한 경계로 판단되며 두 매질간의 다짐정도와 함수비의 차이로 인해 뚜렷한 반사면을 보이고 있다. 225MHz 단면에 비해 지오튜브의 정점(검은색 화살표)에 반사신호가 뚜렷하게 나타나는 것을 볼 수 있으나, 지오튜브 내부와 주변 매질의 물성차가 없고 튜브 외부에도 일부구간에만 전도체를 감싸 튜브와 매질경계의 반사신호가 거의 나타나지 않는다.

따라서 본 GPR탐사에서는 고주파의 안테나를 사용할 경우 심도 1.0m 내외까지는 지오튜브의 위치를 확인할 수 있으나 지오튜브의 정확한 형상을 알기는 어려운 것으로 판단된다.

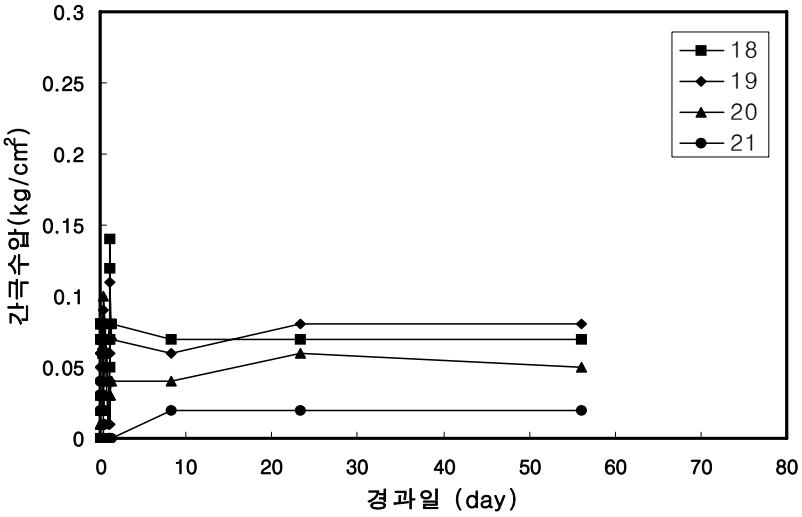
(5) 간극수압

<그림 3.3-56>에서는 본 현장 지오튜브를 이용한 B단면(1단 설치) 끝지점, B단면(1단 설치)중간지점, A단면(1단 설치) 중간지점, A단면(1단 설치)우측 4m 지점

저면의 간극수압 계측결과를 보여준다. <그림 3.3-56>에서 보듯이 시공완료 후 56일 경과 시 측정된 지오튜브 저면의 간극수압은 B단면(1단 설치) 끝지점의 경우 0.14~0.07 kg/cm^2, B단면(1단 설치) 중간지점인 경우 0.11~0.08 kg/cm^2, A단면(1단 설치) 4m 지점인 경우 0.00~0.02 kg/cm^{2}인 것으로 평가되었다.

계측 결과에서 보듯이 시공초기 지오튜브 전면의 수위가 약 1.00m 정도로 1단 높이만큼 상승하여 간극수압이 수두와 유사한 값이 나타내며 시간이 경과함에 따라 일정한 값으로 수렴하는 것으로 나타났다. A단면(1단 설치) 4m 지점인 경우 배면의 간극수압 특성으로서 미미한 제체 침투가 발생한 것으로 평가되었다.

이러한 시공초기의 간극수압의 상승은 시공과정 중 펌프를 사용하여 물과 함께 혼합하여 채움재를 주입하여 발생하는 것으로 판단되며, 현장 특성상 채움재 및 기초지반 모두 모래로 구성되어 있어 시공완료와 동시에 물이 배수되어 과잉간극수압이 소산되는 것으로 사료된다.



<그림 3.3-56> 지오튜브 저면의 간극수압 변화

마. 지오튜브 제방의 안정성 평가 예

지오튜브 제방의 안정성 평가는 옹벽 구조물의 안정성 평가 개념을 적용하여 수행하였으며, 설계조건은 앞서 언급한 실제 현장시험시공 단면과 각종 물성치를 적용하였다.

(1) 설계 조건

가) 단면 형상

성토높이(m) : 2.4 m　　배면 경사(β) : 0.0 °

지오튜브 기울기(α) : 48 °

나) 지오튜브 제원(m)

높이($H_{geotube}$) : 1.2 m　　폭($W_{geotube}$) : 1.0 m

길이($L_{geotube}$) : 2.6 m　　단위중량($r_{geotube}$) : 1.34 t/㎥

지오튜브/지오튜브 마찰각($\Phi_{geotube}$) : 20.0 °　흙/지오튜브 마찰각(Φ′) : 24.5 °

다) 성토재

단위중량(γ_{soil}) : 1.34 t/㎥　　내부마찰각(Φ_{soil}) : 30.0 °

점착력(C_{soil}) : 0.0 t/㎡　　주동 토압 계수(Ka) : 0.921

라) 기초 지반

단위중량(γ_{soil}) : 1.34 t/㎥　　내부마찰각(Φ_{soil}) : 30.0 °

점착력(C_{soil}) : 0.0 t/㎡

마) 상재 하중 (등분포 하중)

q : 0.0 t/㎡

(2) 외적안정성 평가

가) 활동에 대한 안정 계산

- 단위 길이 당 활동에 대한 저항력(P_r) : $P_r = (W+ P_v + P_{qv})\times\mu$ =7.201
- 단위 길이 당 활동력(P_d) : $P_d = P_h + P_{qh}$ =1.417

  ∴ $FS_{sliding} = P_r / P_d$ =5.081 > 1.5 이상　O.K.

여기서, W : 단위 길이 당 지오튜브의 자중(ton/m)

P_v : 단위 길이 당 주동토압의 수직분력(ton/m)

P_{qv} : 단위 길이 당 상재하중에 의한 토압의 수직분력(ton/m)

P_h : 단위 길이 당 주동토압의 수평분력(ton/m)

P_{qh} : 단위 길이 당 상재하중에 의한 토압의 수평분력(ton/m)

나) 전도에 대한 안정 계산

- $M_r = W \times X_w + P_v \times X_{pv} + P_{qv} \times X_{qv} = 21.801$
- $M_d = P_h \times Y_{ph} + P_{qh} \times Y_{pqh} = 1.134$

∴ $FS_{o.t.} = M_r / M_d = 19.229 > 2.0$ 이상 O.K.

여기서, M_r : 단위 길이 당 저항 모멘트 (ton/m · m)

X, Y : 각 경우에 대한 모멘트 팔 길이 (m)

M_d : 단위 길이 당 활동 모멘트 (ton/m · m)

다) 지지력에 대한 안정 계산

- 극한 지지력(Q_{ult}) : $Q_{ult}=cN_c+qN_q+0.5\gamma_f(B_e)N_r = 58.656$ t/㎡

  여기서, 지지력 계수 : $N_c = 30.14$, $N_q = 18.40$, $N_r = 22.40$

  점착력, C : 0 t/㎡

  단위 중량(γ_f) : 1.34 t/㎥

  재하중에 의한 영향 (q) : 얕은 기초 및 옹벽($D_f \leq B$)인 경우 무시함

  환산 폭 ($B_e = L-2e$) : 3.908 m

- 작용 하중(Q_{max}) : $Q_{max} = (W+P_v)/(B_e) = 4.044$ t/㎡

∴ $FS_{bc} = Q_{ult} / Q_{max} = 14.506 > 2.5$ 이상 O.K.

(3) 내적안정성 평가

지오튜브의 내적안정성 평가는 각 지오튜브의 안정성 및 전도에 대한 안정성은 이미 확보되었다는 전제하에 옹벽구조물로서 매설된 지오튜브의 각 매설층의 활동 및 전도에 대한 안정성 여부를 검토하였다. 이때, 내적안정성평가에 이용되는 주동

토압계수, 모멘트 길이, 지오튜브의 자중은 각 층에서의 형상 변화에 따라 변화하므로 다음과 같이 각 매설층에서 각각 산출하여 평가에 이용하여야 한다.

① 각 지오튜브 매설 층에서의 토압계수의 산정

지오튜브 매설층	지오튜브 개수	지오튜브 기울기	주동토압계수
1	1	90	0.296
2	2	48	0.921

② 지오튜브 자중 및 모멘트 길이

지오튜브 매설층	지오튜브 개수	매설깊이 (m)	성토고 (m)	자중 (ton)	모멘트 길이(m)
1	1	1.2	2.2	4.181	0.500
2	2	2.4	1.0	12.542	1.000

③ 주동 토압 및 모멘트 길이

토압계수(K_a)	주동토압(t/m)	수직분력(t/m)	수평분력(t/m)	모멘트 길이(m)	
				X	Y
0.296	0.889	0.815	0.354	1.720	0.400
0.921	3.554	3.259	1.417	2.841	0.800

④ 안정성 평가 결과

지오튜브 매설층	지오튜브 개수	지오튜브 매설 깊이(m)	성토고(m)	$FS_{sliding}$	$FS_{o.t.}$
1	1	1.0	2.2	5.13	24.64
2	2	2.0	1.0	4.06	19.23

(4) 안정성 평가 결과 분석

실제 시험시공 지오튜브 제방에 대한 내·외적안정성을 평가한 결과, 활동/전도/지지력에 대하여 모두 안정한 것으로 평가되었다.

<표 3.3-14>에서 보듯이 이론에서 구한 토압과 실제 계측을 통한 토압 결과를

비교한 결과, 실측치가 이론치에 비하여 작은 값을 나타내어 안정한 것으로 나타났다.

<표 3.3-14> 이론 토압과 실측 토압의 비교

지오튜브 매설층	이론식을 통한 토압		실제 계측을 통한 토압	
	수직토압(t/m^2)	수평토압(t/m^2)	수직토압(t/m^2)	수평토압(t/m^2)
1	1.99	0.87	1.4	0.7
2	7.98	3.47	4.0	2.8

바. 지오튜브 제방의 경제성 평가

일반적으로 공사비라 함은 대상 현장에서 공사를 완성하는데 소요되는 모든 비용을 말하며 직접공사비, 간접공사비, 일반관리비로 나뉘어져 있다. 이중 직접공사비는 재료비, 노무비, 경비로 공사를 수행하는데 있어서 실제 투입되는 비용을 말하며 총 공사비의 60~70% 정도를 차지한다.

지오튜브를 이용한 제방의 경제성 평가는 공종별 모든 항목에 대한 직접공사비를 산정하여 비교·분석하여야 하나, 본 절에서는 재료비, 운반비, 시공비 등의 주요 공종에 대해서 개략적인 경제성 평가를 수행하였다. 직접공사비 산출은 건설공사표준품셈, 물가정보 및 설계사 자료 등을 참조하여 노임 및 재료단가를 기준으로 소요수량에 따른 직접공사비를 산출하는 방식으로 수행되었다. 기준 제방단면은 제체높이 2.4m, 제체 하부폭 10m/상단폭 7m, 제체 연장 30m 기준으로 작성하였다.

<표 3.3-15> 지오튜브 제방과 일반성토 제방의 경제성 비교 (단위 : 천원)

	일반성토 제방	지오튜브 제방	증감액
재료비	-	9,450	9,450
운반비	11,420	-	(-)11,420
시공비	20,880	32,400	11,520
계	32,300	41,850	9,550

- 일반성토제방의 경우 제체재료는 시민사토를 사용 기준, 운반비는 토취장 거리 30km 기준, 흙쌓기다짐기준 90%이상을 기준.
- 지오튜브 제방의 경우 재료비는 지오튜브 및 침식방지매트 비용이며 속채움재의 경우 하상토활용 기준.
- 지오튜브 제방의 경우 운반비는 재료비에 포함.
- 지오튜브 제방의 경우 시공기간은 1일 시공 완료.
- 일반성토 제방의 경우 시공기간은 흙쌓기 속도 1.0m/1일 기준으로 하여 2.4일 소요.

지오튜브 제방의 경제성은 <표 3.3-15>에서 보듯이 일반성토 제방 대비 29% 정도의 공사비용이 증가되는 것으로 나타났다. 이러한 지오튜브 제방의 평가 결과는 평가 시 일반 성토제방이 토사구입비용이 들지 않는 시민사토를 적용하여 재료비가 산정되지 않았고, 지오튜브 제방의 경우 재료비, 모래주입펌핑 작업 등의 비용이 다소 높기 때문에 발생한 것으로 판단된다.

한편, 시공성을 고려한 지오튜브 경제성은 동일한 단면에 대하여 지오튜브 제방의 경우 1일 이내 시공 완료가 가능하나, 일반성토 제방의 경우 하천공사표준시방서 기준에 따라 흙쌓기 속도가 1.0m/일 이므로, 단면이 커질 경우 일반 성토 제방의 시공기간이 길어져 향상된다.

따라서 지오튜브 제방은 급속 시공이 가능할 뿐만 아니라 짧은 시간 내에 구조적 안정성을 얻을 수 있으므로 홍수 피해발생에 따른 수해복구공사와 같은 긴급 보수공사 적용 시 매우 유용할 것으로 판단된다.

사. 소결론

본 절에서는 지오튜브를 이용한 제방의 합리적 시공방안 제시 및 하상토 활용 제방축조방법의 표준화된 조사, 설계, 시공방법 개발을 위하여 현장시험을 수행하였다. 지오튜브를 이용하여 소규모 제방을 축조하고 제체 내부 및 기초지반에 간극수압계, 토압계, 스트레인게이지, 침하계, 경사계 등의 각종 계측기를 매설하여 지오튜브에 작용하는 수평토압, 침하, 변형, 간극수압 등의 대한 계측결과를 분석 정리하였다.

(1) 지오튜브에 작용하는 수직 및 수평토압을 살펴본 결과, 수직토압의 경우 A단면(1층설치) 기초지반인 경우 0.5kg/cm~0.4kg/cm^{2}로 시간경과에 따라 감소하였고, B단면(1층설치) 기초지반인 경우 0.16kg/cm^2~0.14kg/cm^{2}로 평가되어 자중에 의한 상재하중과 유사한 값을 나타내었다. 수평토압의 경우 A단면(1층설치) 배면인 경우 0.3kg/cm^2~0.28kg/cm^2, C단면(2층설치)인 경우 약 0.11kg/cm^2~0.07kg/cm^{2}으로 시공완료 후 안정화에 따라 감소하는 경향을 나타내었다.

(2) 지오튜브를 이용한 기초지반 및 A단면(1층 설치) 상단의 침하특성을 살펴본 결과, 기초지반 보다 A단면(1층설치) 상단층 침하가 다소 커지는 경향을 나타내었으며, 기초지반 및 채움재 모두 모래로 구성되어 시공완료 초기에 배수와 함께 즉시침하가 진행된 후 시간경과에 따라 수렴하는 경향을 나타내었다.

(3) 지오튜브의 변형특성을 분석한 결과, 지오튜브는 광폭인장시험 시 지오튜브의 파괴변형률이 13%~14% 정도이므로, 현장계측 인장변형률이 최대 0.63%이므로 지오튜브의 인장변형만을 고려하였을 경우 안정한 것으로 평가된다.

(4) 한편, 지오튜브의 형상을 파악하기 위해 고주파의 안테나를 사용하여 GPR 탐사를 실시하여, 심도 1.0m 내외까지는 지오튜브의 위치를 확인할 수 있으나 지오튜브의 정확한 형상을 알기는 어려운 것으로 평가되었다.

(5) 간극수압의 경우, 지오튜브 시공 초기에는 펌프를 사용하여 지오튜브 내부에 모래와 물을 혼합하여 충진시키므로 과잉간극수압이 증가하였다가, 시공완료후 물이 배수되는 시점에서는 시간이 경과함에 따라 과잉간극수압이 소산되어 약 25일 경과 후에는 일정한 값으로 수렴하는 경향을 나타내었다.

(6) 앞서 '제3절 3.지오튜브 제방의 설계 및 안정성 평가기법(안)'에서 언급한 안정성 평가기법(안)을 실제 현장시험시공 단면 및 물성치를 적용하여 분석하였고, 그 결과를 실제 계측치와 비교 검토한 결과 현장시험시공 지오튜브 제방의 내외적 안정성 평가에서 모두 안정한 것으로 나타났다.

(7) 현장시험시공 단면을 기준으로 한 분석결과, 지오튜브제방은 일반성토 제방에 비해 재료비 및 장비비 영향으로 공사비용이 29% 높게 산정되는 것으로 평가되었다. 그러나 지오튜브제방은 급속시공이 가능하므로 긴급수해복구공사 적용이 가능함으로써 매우 유용한 공법으로 판단된다.

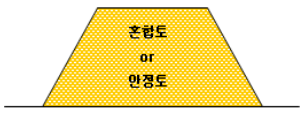
5. 하상토 및 지오튜브를 이용한 제방의 안정성 평가

본 절에서는 하상토, 혼합처리된 하상토, 안정처리된 하상토, 지오튜브를 이용하여 축조한 하천제방의 안정성 평가 및 표준단면 제시를 위하여 다양한 조건에서의 수치해석을 이용한 제체 사면안정성 및 누수에 대한 안정성을 분석하였다.

가. 수치해석 개요

수치해석에 이용된 각 CASE 별 제체 조건 및 해석단면은 <표 3.3-16>에서 보듯이 CASE Ⅰ의 경우 제체 재료를 하상토(SP)로 사용하고, 제체 안정성 확보를 위한 복토층 두께 변화에 따른 영향을 살펴보았으며, CASE Ⅱ의 경우 제체 재료를 안정처리된 하상토인 혼합토(SP+SM)와 안정토(SP+시멘트)로 하였을 경우의 안정성을 검토하였으며, CASE Ⅲ의 경우 하상토(SP)로 속채움된 지오튜브를 적용할 경우의 제체 재료 변화에 따른 영향을 검토하였다.

<표 3.3-16> 각 CASE 별 제체 조건 및 해석단면

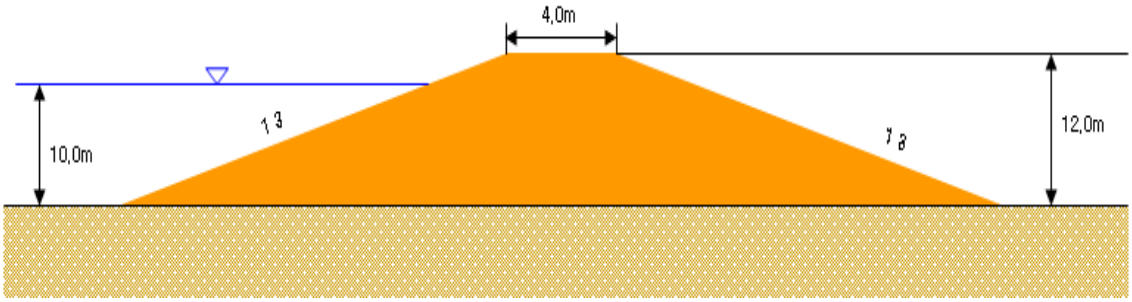
구 분	제 체 조 건		해 석 단 면
CASE Ⅰ	하상토(SP)		 T_h(복토층 두께) 변화
	하상토+복토(SM)		
CASE Ⅱ	혼합토(SP+SM)		
	안정토(SP+시멘트)		
CASE Ⅲ	지오튜브	하상토(SP)	
		혼합토(SP:SM=50:50)	
		안정토(SP:시멘트=82:18)	

한편, 실제 해석에 이용된 단면은 제체 높이 12.0m, 둑마루 폭 4.0m, 제체 경사 1:3의 단면으로 설정하였으며, 경계조건으로는 기초 지반의 하부의 경우 수직 방향, 양 측면의 경우 수평 방향 변위를 구속하였으며, 제체 및 기초 지반의 메쉬 크기는

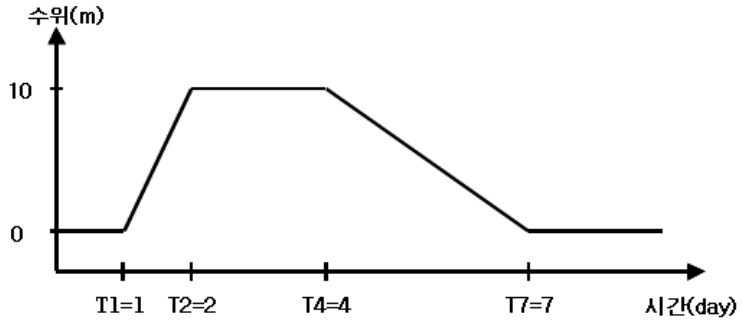
가로의 경우 제체 높이의 1/10 이하인 0.5m, 세로의 경우 2.0m를 기준으로 설정하였다(<그림 3.3-57(a)> 참조).

이때, 제체 및 기초지반의 재료는 해석에 사용된 재료 물성치를 보여주는 <표 3.3-17>에서 보듯이 제체 재료의 경우 모래(SP), 혼합토 (SP50% : SM50%), 안정토(SP82% : Cement18%)를 이용하였다. 한편, 하상토 활용 제방의 침식 방지를 위한 양질의 복토재료는 화강풍화토(SM)를 이용하였으며, 복토에 따른 제체 침투수의 제체 내 저류를 방지하기 위하여 복토층 선단부에 배수를 위한 쇄석 필터층을 설치하였다. 여기서, 기초지반의 경우 제체 재료 변화에 따른 영향만을 분석하기 위하여 투수저항성이 큰 (1.0×10^{-7}cm/sec) 연암으로 가정하여 기초지반으로의 침투를 방지하였다.

한편, 침투해석에 적용된 수위 조건은 2003년 9월 10일~19일 진동 수위관측소 기록을 이용하여 설정된 수위파형을 고려하여, 평수위에서 1일에 걸쳐 최대수위에 도달한 후 2일의 최대수위 지체시간을 거쳐 3일 동안에 평수위로 돌아오는 비정상 수위조건을 가정하여 적용하였다(<그림 3.3-57(b)> 참조).



(a) 해석 단면



(b) 적용 수위조건

<그림 3.3-57> 해석 단면 및 수위조건

<표 3.3-17> 해석에 사용된 물성치

구 분		탄성계수 (E, t/m^2)	γd (t/m³)	간극비(e)	c(kgf/㎠)	φ(°)	k(㎝/sec)
하상토	모래(SP)	3,500	-	0.5	0.01	34.1	4.85×10^{-2}
복토	화강풍화토(SM)	5,000	1.84	0.4	0.06	31.4	7.98×10^{-5}
혼합토	SP50% : SM50%	4,000	1.96	0.4	0.03	32.8	1.02×10^{-4}
안정토	SP82% : Cement18%	3,500	1.75	0.4	0.01	33.8	9.80×10^{-4}
필터층	쇄석	8,000	2.4	0.4	0.0	38	1.0×10^{-2}
기초지반	연암	18,000	2.4	0.1	-	-	1.0×10^{-5}
지오튜브		5,000	1.84	0.4	0.1	30	1.6×10^{-1}

나. 하천제방 안정성 평가 방법

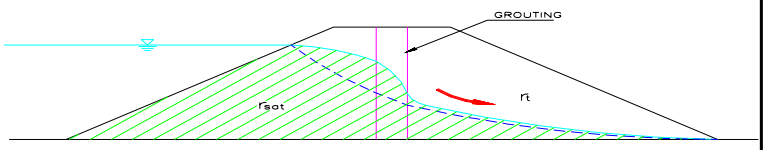
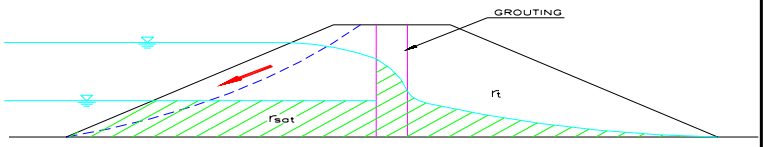
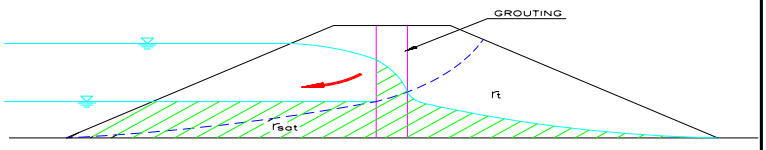
(1) 하천제방 사면안정 해석 기법

일반적으로 하천제방 사면안정해석은 제외지 하천의 수위와 지하수위, 강우시의 침투거동을 고려하여 실시하고 해석 방법으로 한계평형해석법(Limit Equilibrium Analysis)과 수치해석을 이용한 응력-변형해석법(Stress-Deformation Analysis)이 있다. 하천설계기준의 경우 <표 3.3-18>에 나타난 바와 같은 안전율을 만족하도록 제시하고 있으며, 하천제방 사면 안정해석 모델의 경우 <표 3.3-19>와 같은 안정해석 모델을 이용하고 있다.

<표 3.3-18> 제체 상태에 따른 안전율(하천설계기준 2002)

제체상태	간극수압상태	안전율
연직붕괴(crack) 불고려시	간극수압을 고려하지 않는 경우	2.0 이상
	간극수압을 고려하는 경우	1.4 이상
연직붕괴(crack) 고려시	간극수압을 고려하지 않는 경우	1.8 이상
	간극수압을 고려하는 경우	1.3 이상

<표 3.3-19> 국내 하천제방 사면안정해석 모델

제내지측 사면안정 검토 MODEL	 만수위 정상침투상태 안정해석
제외지측 사면안정 검토 MODEL	 무한사면 안정해석
	 수위 급강하시 안정해석

여기서, 한계평형해석법(Limit Equilibrium Analysis)은 임계활동면 위의 토괴를 강체로 가정하고, 이 토괴에 작용하는 힘의 평형을 고려하여 해석하는 방법, 모우멘트 평형을 고려하여 해석하는 방법, 힘과 모우멘트 평형을 모두 고려하여 해석하는 방법 등이 있으며, Rigid-Perfectly Plastic Model을 사용하므로 사면의 변형을 알 수 없는 단점은 있으나 손쉽게 정해에 가까운 근사해를 구할 수 있기 때문에 가장 보편적으로 사용되고 있다.

한편, 본 절에서 수행된 수치해석에 의한 응력-변형해석법(Stress-Deformation Analysis)은 사면에 작용하는 응력의 크기 및 분포와 변형을 알 수 있는 장점을 가지고 있으나, 해석결과의 정확도가 적용하는 응력-변형율 모델(Stress-Strain Model)의 정확도에 달려 있으며 실무에서 결정하는데 어려움이 많은 입력자료들이

필요로 하는 단점이 있다. 그러나, 최근 한계평형해석에서 가장 중요한 간극수압의 적용과 관련하여, 침투해석과 병행하여 실질적인 간극수압의 적용에 의한 사면안정 해석을 수행할 수 있는 프로그램이 개발되면서 이에 대한 사용이 증가하는 추세에 있다.

(2) 하천제방 제체 누수에 따른 파이핑 평가 기법

일반적으로 파이핑에 대한 안정검토는 한계동수경사, 한계유속 그리고 Lane(1935)이 제안한 Creep비(Weighted creep Ratio)가 사용된다.

여기서, Creep비를 이용한 방법은 흙 기초 지반위에 축조된 280개의 석조 댐(masonry dam)중에서 파이핑 파괴가 발생한 150개 댐을 분석하여 얻어진 것으로 석조 댐이나 콘크리트 댐과 같은 불투수성 댐의 기초지반에서의 파이핑을 대상으로 하고 있다. 또한 재료입도만을 고려한 것이기 때문에 대대적인 보완을 가한다 할지라도 현행 다짐시공 방식의 흙 제방에서는 적용이 곤란하다. 실제로 정형식 등(1989)은 흙 제체를 대상으로 모형시험을 실시한 결과 흙 종류에 관계없이 파이핑 파괴가 제체 내에서만 발생하였기 때문에 이를 일반 제방에 적용하는 것은 불합리하다고 밝히고 있다.

한편, 한계동수경사(i_{cr})에 의한 방법은 입자형상, 입도분포, 점착력 등은 고려하지 않고 연직 유효응력이 0이 되는 조건을 생각하여 얻어진 것이기 때문에(김상규 외. 1992) 흐름방향이 상향으로 발생하는 제내지 기초지반의 누수에 따른 파이핑 평가에 적절한 기법이며, 수평흐름이 지배적인 제체 누수에 따른 파이핑 평가의 경우 한계유속을 적용하는 것이 합리적이다.

하천설계기준은 제체 누수에 따른 파이핑 평가기법으로 Justin 방법을 제안하고 있다. Justin 방법은 제체 및 기초의 흙입자의 입경에 대하여 소류력에 의하여 입자가 밀려나가는 한계유속을 다음 식으로 구하며, 흙입자는 그 한계치를 넘으면 파이핑이 발생된다고 본다. 실제 현장 토립자는 여러 크기의 것이 혼합되어 있어 입경의 기준을 정하기 어려우므로 침투류 해석에서 얻어지는 침투류의 실유속이 <표 3.3-20>의 입경에 대한 한계유속의 1/100이하가 되도록 해야 한다.

본 연구에서는 국내 하천설계기준에 따라 Justin 방법을 이용하여 각 경우에 대한 제체 누수 안정성 평가를 수행하였다.

<표 3.3-20> 한계유속 (하천설계기준, 2005)

재료 번호	입경(mm)	한계유속(cm/s)
1	4.0 ~ 4.8	20.0
2	2.8 ~ 3.4	17.0
3	1.0 ~ 1.2	10.0
4	0.7 ~ 0.85	8.5
5	0.4 ~ 0.7	7.0
6	0.25 ~ 0.5	4.2
7	0.11 ~ 0.25	3.5
8	0.075 ~ 0.11	2.5
9	0.044 ~ 0.075	2.0

$$V = \sqrt{\frac{Wg}{A\gamma_\omega}} = \sqrt{\frac{2}{3}(Gs-1)d \cdot g} \qquad (3.3\text{-}30)$$

여기서, W : 토립자의 수중중량(g)

A : 물의 흐름을 받는 토립자의 면적(㎠)

γ_ω : 물의 단위체적 중량(g/㎤)

g : 중력가속도(㎝/s^2)

Gs : 비중

d : 토립자 입경(㎝)

한편, 杉井俊夫 등(1989)의 연구결과에 따르면 Justin의 한계유속은 흙입자의 간극률(n)의 영향을 고려하지 못해 상대적으로 큰 한계유속을 제시하는 것으로 평가하고 있으며, Richardson(1961)에 의해 수행된 실험결과로 부터 제안된 다음 식 (3.3-31), (3.3-32)과 같은 흙입자의 간극률(n)을 고려한 침투유속 산정기법의 적용이 보다 합리적인 결과를 제시한다고 하였다(<그림 3.3-58> 참조).

$$v_n = \frac{n^{\frac{1}{m}}}{18\nu}(G_s-1)d^2g \qquad (Re \le 1 \text{ 일 때}) \qquad (3.3\text{-}31)$$

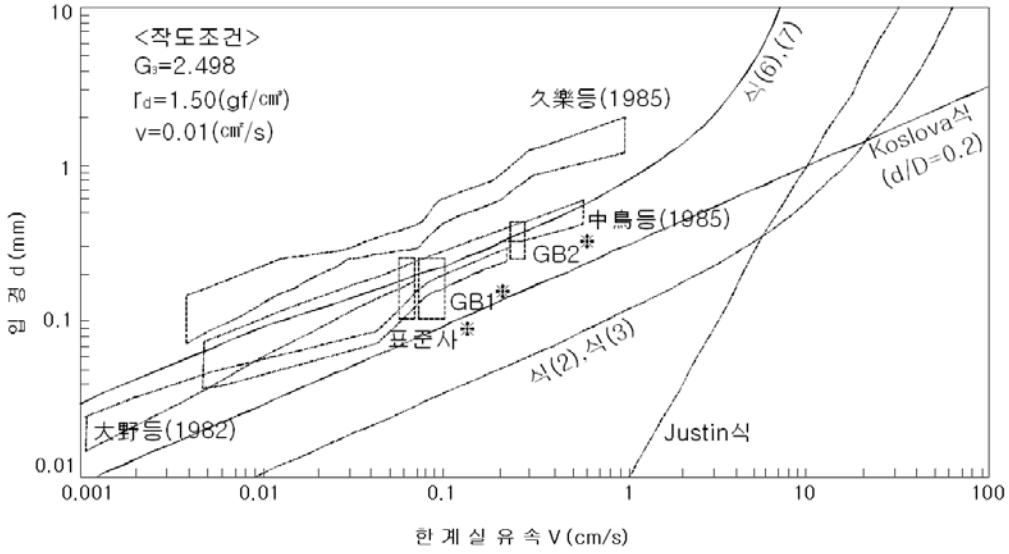
$$v_n = n^{\frac{1}{m}} \sqrt{\frac{4}{3C_D}(Gs-1)dg} \qquad (Re \geq 1 \text{ 일때}) \qquad (3.3\text{-}32)$$

여기서, v_n : 간극률 n일 때 한계유속　　m : Reynolds수에 의해 정해지는 지수

n : 간극률(Porosity)　　ν : 동점성계수(cm^2/s)

G_s : 토입자의 비중　　g : 중력가속도(cm/sec^2)

d : 토입자의 입경(cm)　　C_D : 저항계수(Reynolds수의 함수)



<그림 3.3-58> 파괴발생시의 실제 유속과 입경의 관계(杉井俊夫 등, 1989)

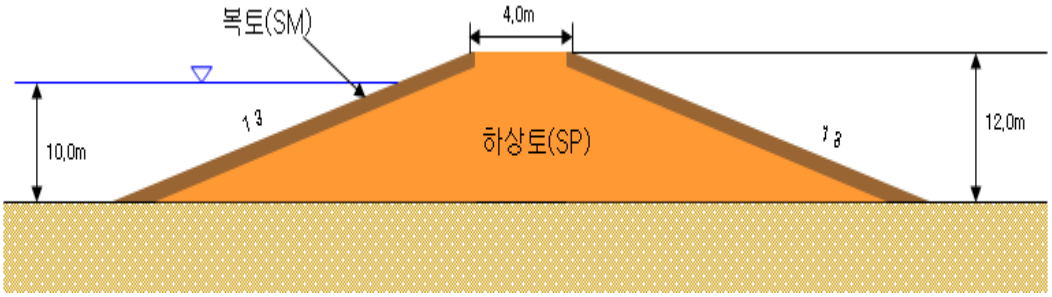
(3) 수치해석 결과

(가) CASE Ⅰ : 하상토(SP) 축조 제방의 안정성 확보를 위한 복토두께 결정

입경이 균등한 모래(SP)는 앞서 조사된 국내 발생 하상토 현황 및 공학적 특성 분석 결과 하천제방 재료로 가장 불안정한 하상토로 평가되었나, 일부 수계의 경우 이를 이용하여 축조된 제방이 다수 있는 것으로 평가된 하상토이다.

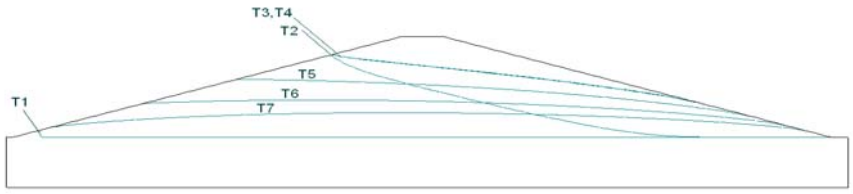
본 절에서는 제체 재료로 불안정한 하상토(SP)로 축조된 제방의 안정성 확보를 위한 양질토 복토층의 합리적인 포설두께 결정을 위하여 제체 재료로 하상토(SP)를 사용하고, 복토층의 두께(T_h =0.0, 0.3, 0.5, 1.0, 1.5m) 변화에 따른 제체 사면안

정성 및 누수에 대한 평가를 수행하였다(<그림 3.3-59> 참조).

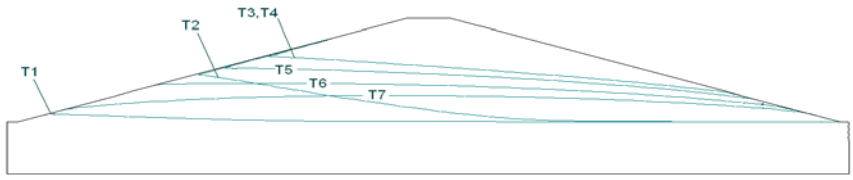


<그림 3.3-59> 양질토 복토층 두께 결정을 위한 해석단면

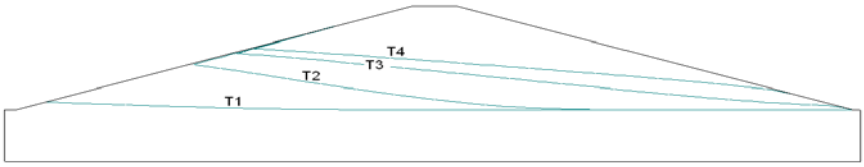
복토층 두께 변화에 따른 침투특성은 시간경과 및 복토층 두께에 따른 침윤선 변화를 보여주는 <그림 3.3-60>에서 보듯이 시간경과에 따라 수위가 상승하는 T1~T4(수위파형의 1일~4일)의 경우 제체 침윤선이 상승하고, 수위가 하강하는 T5~T7(수위파형 5일~7일)의 경우 제체 침윤선이 하강하는 것으로 나타났다. 한편, T4는 각 복토층 두께에서 제체 침윤선이 최고로 상승하는 시점으로 복토층 두께 증가에 따라 그 크기가 감소하는 것으로 나타나 상대적으로 투수계수가 작은 양질토 복토의 경우 제체 침투 저항에 효과가 있는 것으로 보이며, 복토 두께 0.5m 이상의 경우 거의 유사한 효과를 보이는 것으로 판단된다.



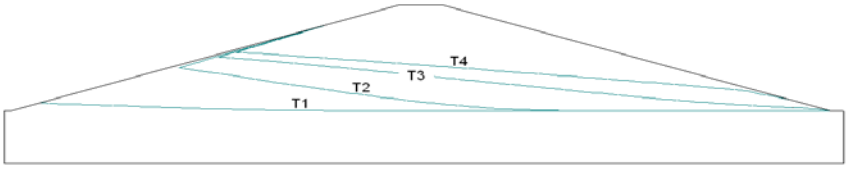
(a) 복토층 두께, Th=0.0m



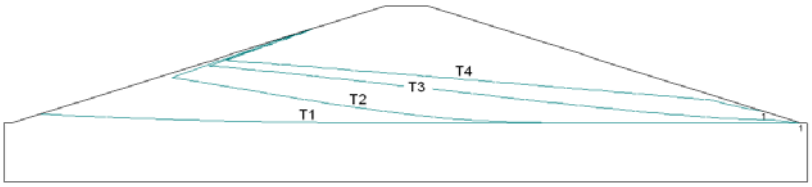
(b) 복토층 두께, Th=0.3m



(c) 복토층 두께, Th=0.5m



(d) 복토층 두께, Th=1.0m



(e) 복토층 두께, Th=1.5m

<그림 3.3-60> 복토층 두께 및 시간 경과에 따른 침윤선 변화

양질토 복토에 따른 사면안정성은 복토층 두께 변화에 따른 사면안정해석 결과를 보여주는 <표 3.3-21>에서 보듯이 복토층 두께 증가에 따라 사면안전율이 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 경과 시간별 사면안전율은 적용 수위파형(<그림 3.3-61> 참조)에서 저수위에서 최고수위에 도달하는 T2(2일 경과)에서의 사면안전율의 경우 복토층 두께에 무관하게 기준안전율 1.4를 만족하는 것으로 평가되었으며, 본 해석 조건에서 가장 취약한 단계인 최고수위 2일 지속 후인 T4(4일 경과)에서의 사면안전율은 복토층 두께 0.5m 이상에서 기준안전율 1.4를 만족하며, 양질토 복토층 포설은 최소 0.5m 이상하여야 할 것으로 판단된다.

여기서, 복토층 두께 변화에 따른 T4(4일 경과)에서의 사면안전율은 복토층 두께 0.0m에 비해 0.3m의 사면안전율이 더 작게 나타났는데 그 원인은 해석에 사용된 물성치를 보여주는 <표 3.3-21>에서 보듯이 하상토와 복토층의 전단강도 특성 차이에 기인한 것으로 판단된다.

<표 3.3-21> 복토층 두께 변화에 따른 사면안정해석 결과

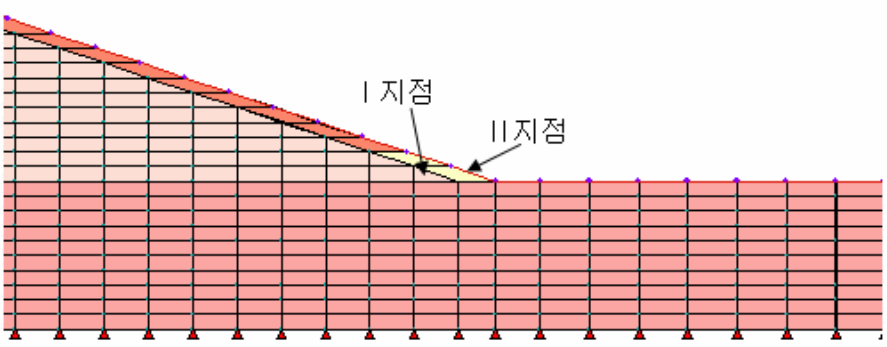
복토층 두께	기준안전율	사면안전율			
		SF_{T2}		SF_{T4}	
0.0m	1.4	2.43	O.K	1.21	N.G
0.3m		2.58	O.K	1.04	N.G
0.5m		2.59	O.K	1.99	O.K
1.0m		2.62	O.K	2.12	O.K
1.5m		2.65	O.K	2.17	O.K

한편, 양질토 복토에 따른 제체 누수 안정성은 복토층 두께 변화에 따른 제체 파이핑 안정해석 결과를 보여주는 <표 3.3-22>에서 보듯이 제체 내 침투유속은 하상토(SP) 재료인 Ⅰ지점의 경우 한계유속의 약 0.9% 정도로, 쇄석 배수층 포설 지점인 Ⅱ지점의 경우 0.031~0.037% 정도로 안정성 평가 기준인 1%를 만족하는 것으로 평가되었다.

여기서, 제체 누수에 따른 파이핑 안정성 평가는 <그림 3.3-61>에서 보듯이 제체 선단부의 하상토(SP) 성토 재료면(Ⅰ지점)과 쇄석 배수층을 포설한 복토층 표면(Ⅱ지점)의 2곳에서 수행하였다.

<표 3.3-22> 복토층 두께 변화에 따른 제체 파이핑 안정해석 결과

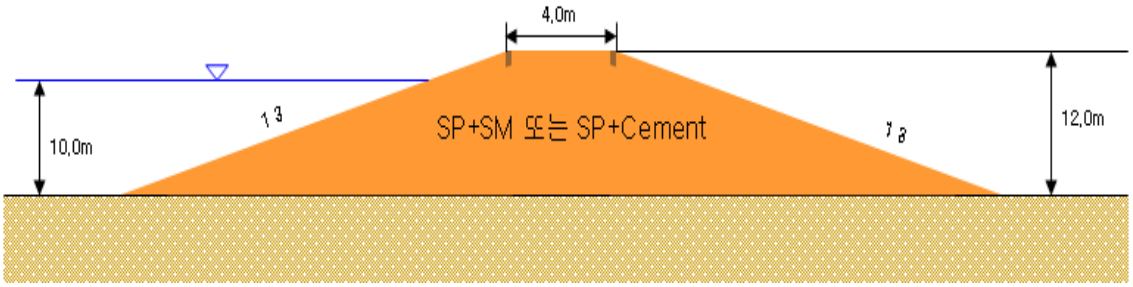
복토층 두께	침투유속 (V_n, m/day)		제체 누수 안전성			
			Ⅰ지점		Ⅱ지점	
	Ⅰ지점	Ⅱ지점	한계유속 (V_c, m/day)	안전성	한계유속 (V_c, m/day)	안전성
0.0m	42.33	-	4,432	O.K	45,543	-
0.3m	42.85	16.48		O.K		O.K
0.5m	43.30	17.13		O.K		O.K
1.0m	43.60	15.83		O.K		O.K
1.5m	42.91	14.31		O.K		O.K



<그림 3.3-61> 제체 누수에 따른 파이핑 안정성 평가 위치

(나) CASEⅡ : 안정처리된 하상토 축조 제방의 안정성 평가

본 절에서는 해석단면을 보여주는 <그림 3.3-62>에서 보듯이 본 연구를 통하여 제안된 하상토 안정처리 기준에 따라 안정처리된 하상토로 축조된 제방의 안정성을 평가하였다. 안정성 평가방법은 CASEⅠ과 마찬가지로 안정처리 방법에 따른 제체 사면안정성 및 누수에 대한 평가를 수행하였다.

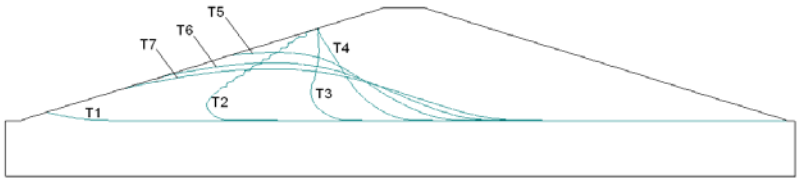


<그림 3.3-62> 안정처리된 제체의 안정성 평가를 위한 해석단면

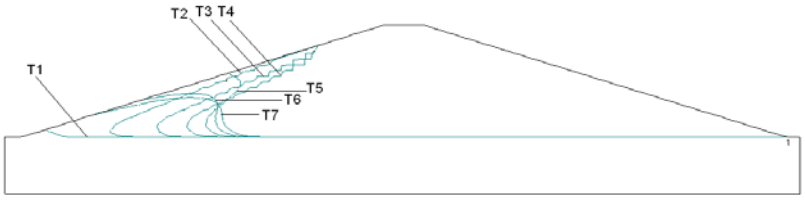
안정처리된 하상토 제체의 침투특성은 시간경과에 따른 침윤선 변화를 보여주는 <그림 3.3-63>에서 보듯이 시간경과에 따라 수위가 상승하는 T1~T4(수위파형의 1일~4일)의 경우 제체 침윤선이 상승하고, 수위가 하강하는 T5~T7(수위파형 5일~7일)의 경우 제체 침윤선이 하강하는 것으로 나타나는 전술한 복토 두께 변화에 따른 침투특성과 동일한 특성을 나타났다.

한편, 동일 시점에서 시멘트 안정처리토의 침윤선이 화강풍화토 혼합토의 침윤선 보다 큰 것으로 나타났으며, 이는 해석에 사용된 물성치를 보여주는 <표

3.3-17>에서 보듯이 재료의 투수계수 차이(시멘트 안정처리토 9.80×10^{-4}cm/sec, 화강풍화토 혼합토 1.02×10^{-4}cm/sec)에 의한 것으로 판단된다.



(a) 시멘트 안정처리토(SP:Cement = 82:18)



(b) 화강풍화토 혼합토(SP:SM = 50:50)

<그림 3.3-63> 안정처리된 하상토 제체의 시간 경과에 따른 침윤선 변화

안정처리된 하상토 제방의 사면안정성은 안정처리 방법에 따른 사면안정해석 결과를 보여주는 <표 3.3-23>에서 보듯이 해석 조건에 무관하게 모두 기준 안전율을 만족하는 것으로 나타났다. 여기서, 경과시간에 따른 변화가 발생하지 않는 이유는 <그림 3.3-63>에서 보듯이 안정처리된 하상토의 높은 투수 저항성에 기인하여 제체 침윤선이 해석 기간 중 제내지 측에 도달하지 않기 때문인 것으로 판단된다.

<표 3.3-23> 안정처리 방법에 따른 사면안정해석 결과

안정처리 방법	기준안전율	사면안전율			
		SF_{T2}		SF_{T4}	
화강풍화토 혼합토 (SP:SM = 50:50)	1.4	2.48	O.K	2.48	O.K
시멘트 안정처리토 (SP:Cement=82:12)		2.46	O.K	2.46	O.K

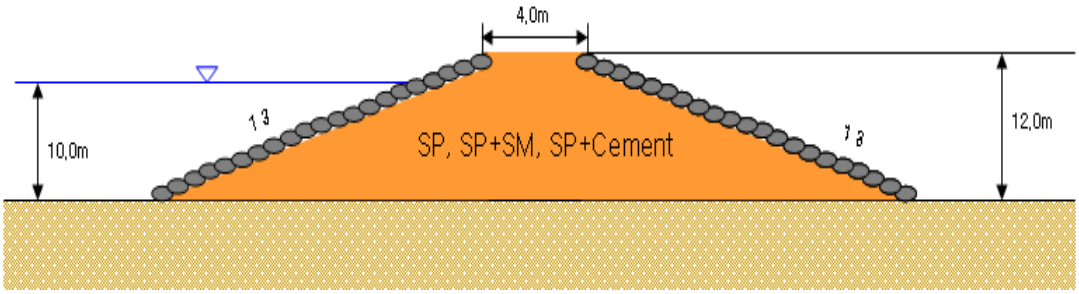
한편, 안정처리된 하상토 제체의 누수 안정성은 복토층 두께 변화에 따른 제체 누수에 따른 파이핑 안정해석 결과를 보여주는 <표 3.3-24>에서 제체 내 침투유속은 화강풍화토 혼합토의 경우 한계유속의 약 0.00003% 정도로, 시멘트 안정처리토의 경우 0.0002% 정도로 안정성 평가 기준인 1%를 만족하는 것으로 평가되었다.

<표 3.3-24> 안정처리 기법에 따른 제체 파이핑 안정해석 결과

안정처리 방법	침투유속 (V_n, m/day)	파이핑 안정성	
		한계유속 (V_c, m/day)	안정성
화강풍화토 혼합토 (SP:SM = 50:50)	1.03×10^{-3}	3,285	O.K
시멘트 안정처리토 (SP:Cement=82:12)	9.31×10^{-3}	4,527	O.K

(다) CASEⅡ : 하상토(SP)로 속채움된 지오튜브를 적용할 경우의 제체 재료 변화에 따른 영향

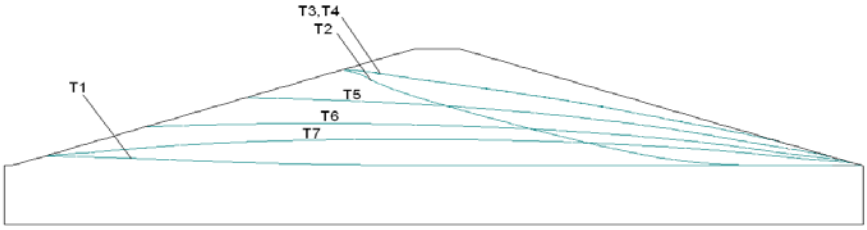
본 절에서는 해석단면을 보여주는 <그림 3.3-64>에서 보듯이 하상토(SP)로 속채움된 지오튜브를 이용하여 축조된 제방의 적용성 평가를 위하여 하상토(SP), 화강풍화토 혼합토(SP+SM), 시멘트 안정처리토(SP+Cement)의 제체 재료 변화에 따른 안정성을 평가하였다. 안정성 평가방법은 CASEⅠ, CASEⅡ와 마찬가지로 안정처리 방법에 따른 제체 사면안정성 및 누수에 대한 평가를 수행하였다.



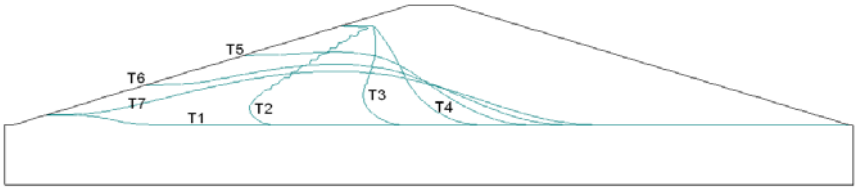
<그림 3.3-64> 지오튜브를 이용한 제체의 안정성 평가를 위한 해석단면

지오튜브를 이용한 제체의 침투특성은 시간경과에 따른 침윤선 변화를 보여주는

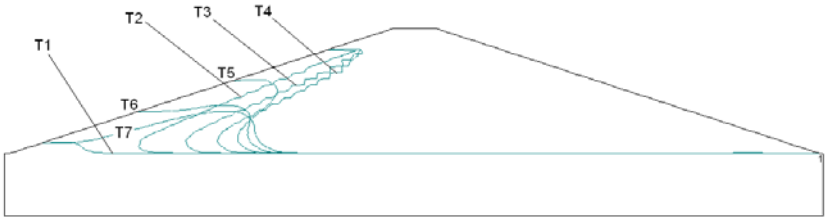
<그림 3.3-65>에서 보듯이 시간경과에 따라 수위가 상승하는 T1~T4(수위파형의 1일~4일)의 경우 제체 침윤선이 상승하고, 수위가 하강하는 T5~T7(수위파형 5일~7일)의 경우 제체 침윤선이 하강하는 일반적인 특성을 보였으며, 제체 재료 변화에 따른 특성은 투수계수 차이에 의해 하상토(SP), 시멘트 안정처리토, 화강풍화토 혼합토의 순으로 침투가 이루어지는 것으로 평가되었다.



(a) 제체 재료 하상토(SP)



(b) 제체 재료 시멘트 안정처리토(SP:Cement = 82:18)



(c) 제체 재료 화강풍화토 혼합토(SP:SM = 50:50)

<그림 3.3-65> 지오튜브를 이용한 제체의 시간 경과에 따른 침윤선 변화

지오튜브를 이용한 제체의 사면안정성은 제체 종류에 따른 사면안정해석 결과를 보여주는 <표 3.3-25>에서 보듯이 해석 조건에 무관하게 모두 기준 안전율을 만족하는 것으로 나타났다. 여기서, 제체 재료 하상토(SP)의 경우 경과시간에 따른 안

전율 변화가 발생하고 화강풍화토 혼합토와 시멘트 안정처리토의 경우 발생하지 않는 이유는 <그림 3.3-65>에서 보듯이 안정처리된 하상토의 높은 투수 저항성에 기인하여 제체 침윤선이 해석 기간 중 제내지 측에 도달하지 않기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 제체 재료 하상토(SP)는 지오튜브를 설치하지 않은 경우 시간경과에 따라 T4에서 사면안전율이 1.21로 기준안전율을 만족시키지 못하나, 지오튜브를 설치한 경우 동일 시점에서 사면안전율이 1.47로 기준안전율 1.4를 만족시키는 것으로 나타나 지오튜브 설치에 따른 사면안정성 증대 효과가 있는 것으로 평가되었다.

<표 3.3-25> 복토층 두께 변화에 따른 사면안정해석 결과

제체 재료		기준안전율	사면안전율			
			SF_{T2}		SF_{T4}	
하상토(SP)		1.4	2.43	O.K	1.21	N.G
지오튜브 설치	하상토(SP)		2.52	O.K	1.47	O.K
	화강풍화토 혼합토 (SP:SM = 50:50)		2.48	O.K	2.48	O.K
	시멘트 안정처리토 (SP:Cement=82:12)		2.46	O.K	2.46	O.K

한편, 지오튜브를 이용한 제체의 누수 안정성은 복토층 두께 변화에 따른 제체 누수에 따른 파이핑 안정해석 결과를 보여주는 <표 3.3-26>에서 보듯이 제체 내 침투유속은 제체 재료 하상토(SP)의 경우 한계유속의 약 0.85% 정도로, 화강풍화토 혼합토의 경우 0.00003% 정도로, 시멘트 안정처리토의 경우 0.0002% 정도로, 안정성 평가 기준인 1%를 만족하는 것으로 평가되었다.

여기서, 파이핑에 대한 안정성 평가위치는 지오튜브의 경우 토목섬유로 전체를 감싸기 때문에 파이핑이 발생하지 않으므로 지오튜브 배면 제체 선단부로 설정하였다.

<표 3.3-26> 안정처리 기법에 따른 제체 파이핑 안정해석 결과

제체 재료	침투유속 (V_n, m/day)	파이핑 안정성	
		한계유속 (V_c, m/day)	안정성
하상토(SP)	37.85	4,423	O.K
화강풍화토 혼합토 (SP:SM = 50:50)	1.03×10^{-3}	3,285	O.K
시멘트 안정처리토 (SP:Cement=82:12)	9.31×10^{-3}	4,527	O.K

다. 소결론

본 절에서는 하상토, 안정처리된 하상토, 지오튜브를 이용한 하천제방의 안정성 평가 및 표준단면 제시를 위한 다양한 조건에서의 수치해석 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 해석결과, 하상토(SP) 축조 제방은 제체 침투에 따른 안정성은 만족하고 있으나, 사면안전율의 경우 1.21 정도로 기준안전율(1.4)을 만족시키지 못하는 것으로 평가되어 앞비탈피복 공법과 같은 복토층에 의한 안정처리가 요구된다. 이때 안정성 확보를 위한 양질토 복토 두께는 수치해석을 통하여 결정하여야 하며, 대체로 0.5m 이상에서 제체 침투와 사면안정이 모두 만족되는 것으로 평가되었다.

(2) 안정처리된 하상토는 화강풍화토 혼합토와 시멘트 안정처리토 모두 본 연구의 해석조건 하에서 제체 침투 및 사면안정성이 만족하는 것으로 평가되었다.

(3) 지오튜브를 이용한 제방 축조기법은 제체 재료 변화에 무관하게 본 연구를 통한 해석조건 하에서 제체 사면안정성 및 제체 누수에 따른 파이핑 안정성을 모두 만족시키는 것으로 평가되었으며, 제체 재료 하상토(SP)만을 볼 때 지오튜브 설치 시 안전율이 증가하여 기준안전율을 만족시키는 것으로 평가되었다.

제 4 절 하상도 활용 제방 매뉴얼

1. 설계일반

(1) 제방설계는 하도와 제내지 상황, 사회·경제적 여건, 하천환경, 축제재료 및 원지반 상태 등을 종합적으로 고려하여 제방단면을 결정한 후 결정된 단면에 대해 안정계산을 실시하여 필요한 안전율을 확보할 수 있도록 최종단면을 결정한다.

(2) 하상재료 사용과 같이 안정성이 확보되지 못할 경우에는 그 대책을 마련하거나 제방 단면의 제원을 수정하여 필요한 안정성이 확보될 수 있도록 해야 한다. 이때 제방의 설계는 일반 구조물과 같이 수리학적 혹은 토질공학적 안정성 검토를 통하여 제방의 침식, 제체의 침투 및 활동에 대한 제방강화 형태 및 구간 등을 선정한다.

(3) 일반사항

① 역학적인 안정성 평가는 기초지반의 압밀침하량 및 측방유동 등을 평가하여 외력과 저항력의 균형, 한계상태의 파괴조건에 근거하여 평가된다. 그러나 제방의 파괴는 월류, 세굴, 누수 등에 의해 발생할 수 있으며, 이러한 현상들은 역학적으로 서로 다른 특성을 지니고 있다.

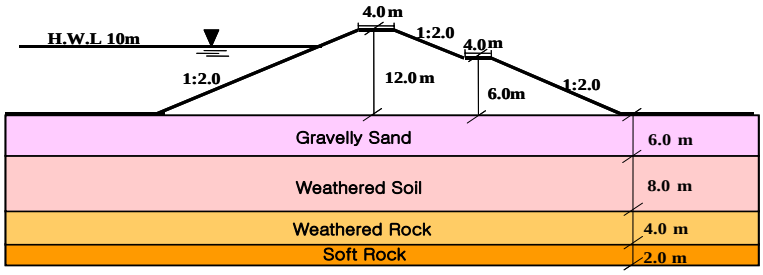
② 침투류 계산 방법은 정상 해석법과 비정상 해석법이 있으며, 비정상 해석법의 경우 포화 해석 및 포화·불포화 해석이 있다. 국내 제방 설계는 침투류 계산시 비정상 포화해석을 채택한다.

③ 제방 활동에 대한 안정성은 비정상 침투류 계산 및 원호 활동법에 의한 안정 계산에 의해서 평가된다. 비정상 침투류 계산은 시간에 따라 변화하는 제방 수위를 외력으로 주어서 침윤면의 위치 및 수두 변화를 분석하는 것으로, 침윤면의 형상과 수두분포로 부터 국부동수경사를 계산할 수 있다.

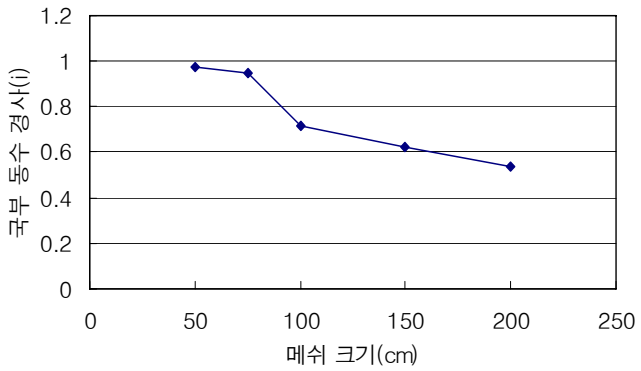
(1) 침투해석을 위한 메쉬 크기

합리적인 침투해석을 위한 메쉬 크기는 기존 제방 단면을 이용한 메쉬 크기에

따른 해석 결과를 보여주는 <그림 3.4-2>에서 보듯이 국부동수경사(i)가 메쉬 크기가 작아질 경우 증가하며, 제체 높이(12m)의 약 1/10인 100cm에서 75cm 사이에 급격히 증가하고, 메쉬 크기 50cm~75cm에서 변화폭이 감소하는 것으로 나타나 메쉬 크기에 따른 침투해석 결과의 차이가 큰 것으로 평가되었다. 따라서, 하천제방 설계를 위한 합리적인 메쉬 크기는 50cm 이하 또는 제체높이의 1/10 이하로 설정하여야 한다.



<그림 3.4-1> 침투해석에 사용된 단면

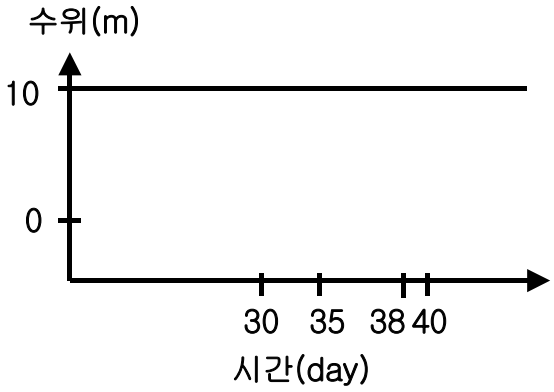


<그림 3.4-2> 메쉬 크기에 따른 해석 결과

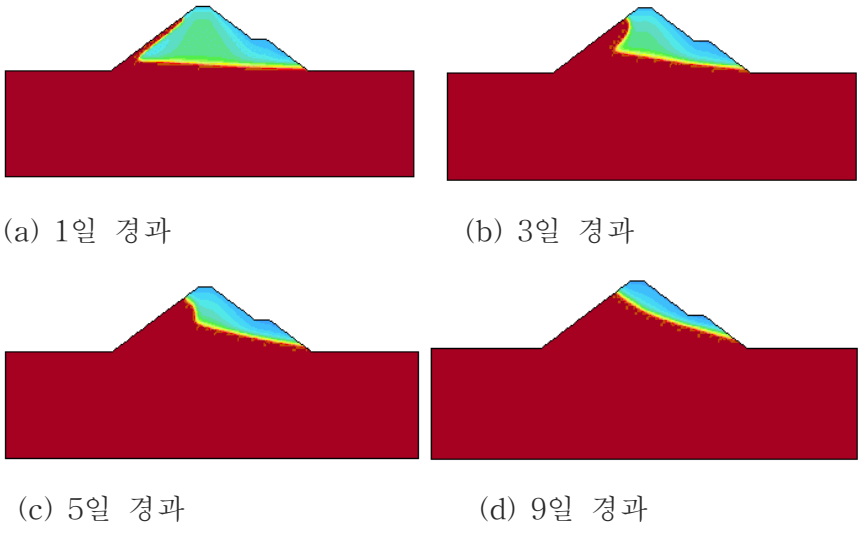
(2) 수위 조건

하천제방 설계 시 침투해석에 적용하는 수위 조건은 설계실무에서 수위파형에 대한 정보가 없을 경우 댐 설계와 동일한 방법으로 적용되는 <그림 3.4-3>과 같은 정상수위조건을 적용한다(댐설계기준, 2001). 본 수위파형은 정상수위지속시간을 무한히 하여 설계하면 과다 설계값이 제시되는 반면에 지속시간을 조정할 경우 과소설계를 유발할 수 있다. 따라서, 합리적인 정상수위조건 시의 고수위 지속시간은

기존 제방 단면을 이용한 해석 결과를 보여주는 <그림 3.4-4>에서 보듯이 입경이 균등한 모래(SP)일 경우 9일 이상, 투수성이 작은 점토질 모래(SC)인 경우 20일 이상인 것으로 나타났다.



<그림 3.4-3> 정상수위조건



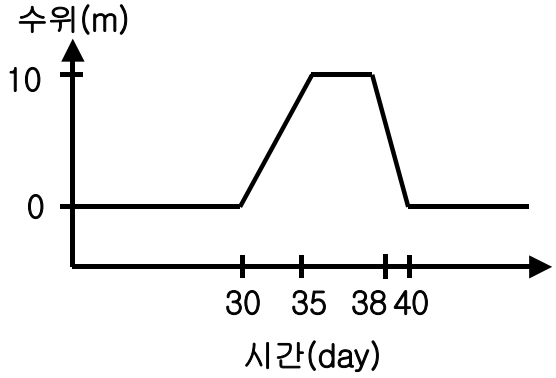
(a) 1일 경과 (b) 3일 경과

(c) 5일 경과 (d) 9일 경과

<그림 3.4-4> 고수위지속시간에 따른 침투해석 결과

한편, 현장 수위관측 데이터가 있는 경우에는 <그림 3.4-5>과 같은 비정상수위 조건의 수위파형을 사용하여야 한다. 이때, 수위파형은 홍수파형 뿐만 아니라 강우특성을 반드시 함께 고려하여 반영하여야 하며, 본 수위파형은 적절한 산정이 이루어졌을 경우 경제적이고 합리적인 설계를 유도할 수 있다.

현재 하천설계기준은 이러한 설계 수위파형에 대한 합리적 대안을 제시하지 못하고 있으나, 일본 하천제방설계지침(日本 建設省, 2000)의 경우 집중호우와 같은 강우특성을 고려하여 시간에 따라 수위가 변화하는 수위파형 모델을 사용하는 비정상 수위 조건의 비정상 침투 해석을 적용하여 합리적이고 경제적 설계를 유도하고 있다.



<그림 3.4-5> 비정상수위조건의 수위파형

(3) 불포화 침투해석 모델

현재 하천설계기준(2005)의 경우 침투해석 시 비정상 포화해석(비경제적 설계)을 채택하고 있으며, 그 결과는 불포화 해석 모델을 적용했을 경우에 비해 안전측인 것으로 평가되고 있으나, 최근보다 합리적인 설계를 위하여 불포화 해석(경제적 설계)을 이용하는 사례가 증가되고 있으며, 일본 하천제방설계지침(日本 建設省, 2000)의 경우 제방 설계 시 침투해석 모델을 불포화 해석모델로 제시하고 있는 실정이다.

불포화 해석 모델은 많은 연구자에 의해 제안되었으며, 그 중 가장 널리 사용되는 모델은 Fredlund 등(1987)에 의해 제시된 포화와 불포화 상태를 동시에 고려할 수 있는 다음과 같은 지배방정식을 이용한 모델이다.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x\frac{\partial H}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y\frac{\partial H}{\partial y}\right)+Q=m_w\gamma_w\frac{\partial H}{\partial t} \qquad (3.4\text{-}1)$$

여기서, H : 총수두(m)

k_x와 k_y : 투수계수(m/day)

Q : 작용하는 유량(m^3/day)

m_w : 비저류용량(Specific Moisture Capacity)

γ_w : 물의 단위중량(ton/m^3)

한편, Fredlund의 불포화 해석 지배방정식을 풀기 위해서는 다음 식으로부터 비저류용량, m_w를 산정하여야 하며, 이때, 변수 a, n ,m은 실험을 통하여 얻어진 함수특성곡선과 Fredlund 등(1994)에 의해 제안된 불포화시 흙의 체적함수비를 구하는 식으로 결정할 수 있다(<그림 3.4-6> 참조).

$$m_w = \frac{\partial \theta_w}{\partial \phi} = \theta_s \frac{nm}{a\left\{\ln\left[e+\left(\frac{\phi}{a}\right)^n\right]\right\}^{m+1}\left[e+\left(\frac{\phi}{a}\right)^n\right]}\left(\frac{\phi}{a}\right)^{n-1} \qquad (3.4\text{-}2)$$

여기서, θ_s : 포화시 흙의 체적함수비(%)

ϕ : 모관흡수력(ton/m^2)

a, n, m : 함수특성곡선을 이용한 곡선맞춤 변수

이때, 불포화 시 흙의 체적함수비는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$\theta_u = C(\phi)\frac{\theta_s}{\left\{\ln\left[e+\left(\frac{\phi}{a}\right)^n\right]\right\}^m} \qquad (3.4\text{-}3)$$

여기서, θ_u : 불포화시 흙의 체적함수비(%)

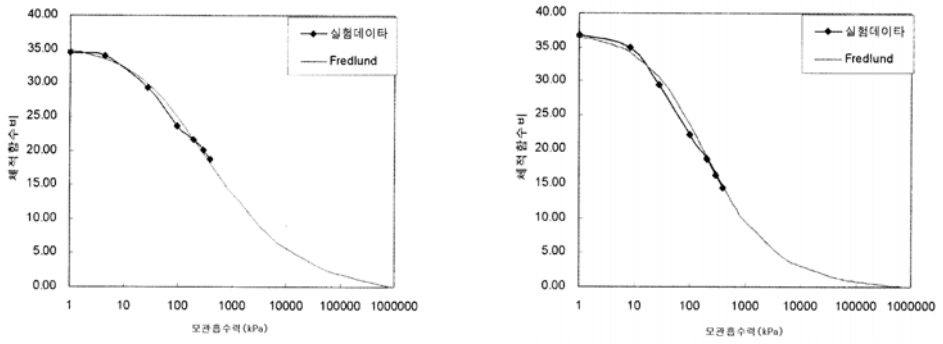
θ_s : 포화시 흙의 체적함수비(%)

$C(\phi)$: 보정함수

$$C(\phi) = 1 - \frac{\ln\left(1+\frac{\phi}{\phi_r}\right)}{\ln\left(1+\frac{1{,}000{,}000}{\phi_r}\right)}$$

ψ : 모관흡수력(ton/m^2)

ψ_r : 잔류함수비에 대한 모관흡수력(ton/m^2)



(a) A 현장(a=95, n=0.68, m=1.23)　　(b) B 현장(a=1005, n=0.8, m=1.62)

<그림 3.4-6> 변수 a, n, m 평가 사례 (김석남 등, 2005)

(4) 사면안정 해석 기준의 적용

하천제방 설계 시 사면안전에 대한 기준 안전율은 하천설계기준(2005)의 제체 상태에 따른 안전율을 보여주는 <표 3.4-1>에서 보듯이 사면활동 해석은 침투에 따른 간극수압 변화, 제체내 인장균열 발생 유·무 등을 고려하도록 되어 있다.

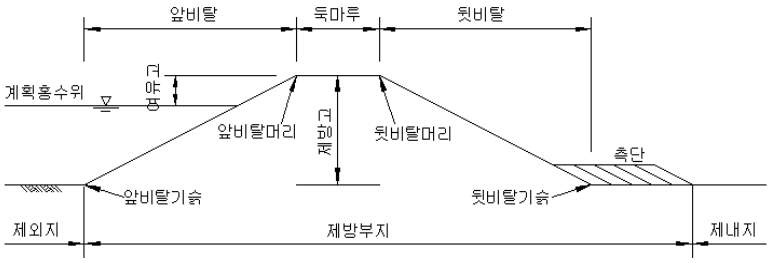
여기서, 인장균열은 제체내 둑마루부에 균열이 발생되어 강우 시 균열면에 물이 포화되면서 발생되어 사면안정을 저해하는 요인으로 인장 균열 고려시 최소 안전율을 1.3으로 제시하고 있으며, 인장균열을 고려하지 않고 제체 침투만을 고려할 경우에는 기준 안전율 1.4를 적용하여야 한다.

<표 3.4-1> 제체 상태에 따른 안전율

제체 상태	간극수압상태	안전율
인장균열 불고려 시	간극수압 고려 간극수압 불 고려	2.0 이상 1.4 이상
인장균열 고려 시	간극수압 고려 간극수압 불 고려	1.8 이상 1.3 이상

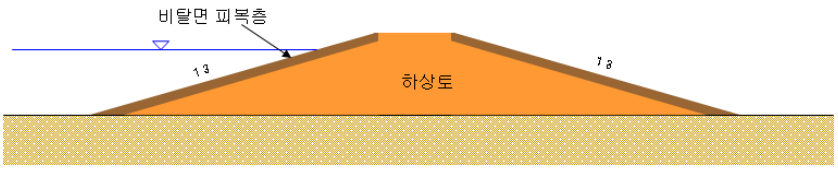
2. 하상토를 이용한 제방의 구조 및 종류

(1) 일반 제방의 구조와 명칭은 <그림 3.4-7>과 같으며, 필요에 따라서 형태를 조정해 사용할 수 있다.

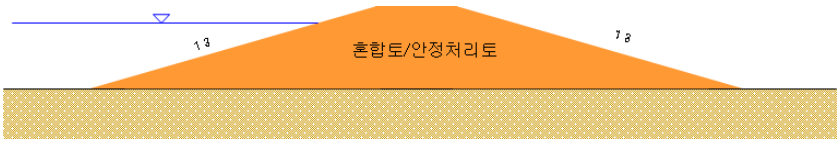


<그림 3.4-7> 일반 제방단면의 구조와 명칭

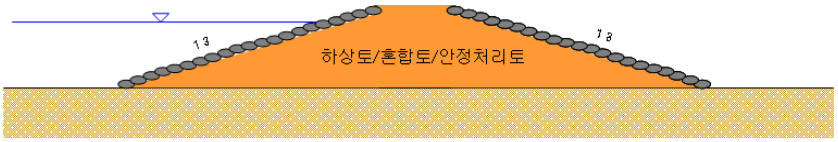
(2) 하상토 활용 제방 형식은 크게 1) 비탈면피복공법, 2) 혼합토/안정처리토공법, 3) 지오튜브공법 등 3가지 방법이 있다. 본 공법의 적용은 침투 및 사면안정해석 등에 대한 설계를 통하여 검토된 최적단면으로 한다.



(a) 비탈면 피복공법



(b) 혼합토/안정처리토 공법



(c) 지오튜브공법

<그림 3.4-8> 하상토 활용 제방 형식

(1) 비탈면피복공법은 해석 결과에 따르면 제체 침투 보다 사면활동에 대한 안정성에 크게 좌우되는 경향을 보인다. 이때 피복층은 두께를 증가시킬수록 침투 및 사면활동에 대한 안정성이 개선되고, 최소 0.5m 이상일 경우 하천설계기준을 만족시키는 것으로 평가되었다. 다만, 본 설계조건은 다소 제한된 조건의 결과이므로 본 공법과 관련된 설계 시 피복층을 변화요소로 다양한 침투 및 활동해석을 통한 설계단면 선정이 요구된다.

(2) 안정처리된 하상토는 전단강도와 투수특성이 통상적으로 만족됨으로서 제체 사면안정성 및 제체 누수에 따른 파이핑 안정성을 쉽게 만족하는 것으로 평가되었다. 다만, 본 공법은 품질관리 및 경제성 등을 고려한 적정의 혼합비율을 제시하여야 한다. 연구결과, 낙동강 발생 하상토는 모래의 경우 화강풍화토 40% 이상에서 세립토의 경우 시멘트 혼합율 3%~6% 이상이 적정한 것으로 나타났다. 원칙적으로 안정처리토 혼합비율은 현장시험을 통하여 결정한다.

(3) 지오튜브를 이용한 제방 축조기법은 제체 재료 변화에 무관하게 본 연구를 통한 해석조건 하에서 제체 사면안정성 및 제체 누수에 따른 파이핑 안정성을 모두 만족시키는 것으로 평가되었다. 다만, 본 공법은 FEM 해석 모델이 정례화 된 것이 없어 설계자 마다 해석결과가 다를 수 있는 소지가 있음으로, 보수적인 설계값 적용을 유도한다.

3. 제방 재료

(1) 제방재료는 일반 도로의 경우와 달리 흙의 전단강도측면 뿐만 아니라 물의 침투방지를 고려한 투수특성을 충분히 고려해야 한다. 따라서 하상토 재료는 다음과 같은 규정을 만족해야 한다.

① 제방재료는 통일분류법상 GM, GC, SM, SC, ML, CL 등과 같은 일정 정도 점토(C) 및 실트(M)와 같은 세립분을 함유해야 한다.

② 재료의 최대 치수는 100 ㎜ 이내로 할 수 있다.

③ 하상재료 투수계수는 투수계수, k가 10^{-3} cm/s 이하인 것을 사용한다.

④ 또한, 하상재료는 제방재료로서 부득이 사용할 경우 하상재료 채취에 따른 하상변동, 평형하상경사의 변화 및 하천 생태계에 미치는 영향 등과 침식방지, 제체 침투 및 활동에 대한 안정성 평가 등을 통하여 제방강화 형태 등

을 선정함으로써 제방안정에 대한 신뢰성을 향상시켜야 한다.

(2) 또한, 하상준설토는 활용 시 토양오염평가를 반드시 실시하고, 오염기준에 적합한 경우에만 사용하며, 오염기준치를 초과할 경우 정화 처리하여 사용한다.

(3) 대규격제방은 제방재료로서 제내지쪽 성토재로 하상재료를 사용할 수 있다.

(4) 앞서 언급된 제방재료기준을 하상토 활용 재료가 만족시키지 못할 경우에는 하상토 활용을 위한 안정대책을 수립한다. 하상토 활용에 따른 안정대책 공법은 크게 입도조정기법(입도조정공법, 시멘트안정처리공법, 석회안정처리공법), 함수비조정기법(공기건조공법, 트랜치굴착공법, 강제건조공법) 등이 있다.

(1) 제방재료

제방재료 관련 기준은 하천설계기준을 참조하여 적용한다.

(2) 하상준설토 토양오염 평가방법

하상준설토는 수질오염 등으로 인한 하상퇴적토의 추가 오염이 발생할 수 있으므로, 이에 대한 환경적 평가가 수행된 후 활용하여야 한다. 이때 토양오염평가방법은 <표 3.4-2>와 같은 토양오염에 대한 환경기준을 적용한다.

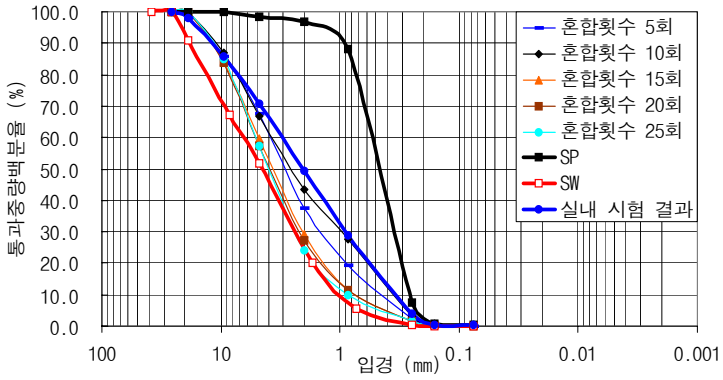
<표 3.4-2> 토양오염에 관한 환경기준

항 목	환경상의 조건
카드뮴	검사액 1리터당 0.01mg 이하이고, 농지에서는 쌀 1kg당 1mg 미만이 될 것
시안	검사액중 검출되지 않을 것
유기인	검사액중 검출되지 않을 것
납	검사액 1리터당 0.1mg 이하일 것
6가크롬	검사액 1리터당 0.05mg 이하일 것
비소	검사액 1리터당 0.05mg 이하이고, 농지(밭에만 해당)에서는 토양 1kg당 15mg 미만이 될 것
총수은	검사액 1리터당 0.0005mg 이하일 것
알킬수은	검사액중 검출되지 않을 것
PCB	검사액중 검출되지 않을 것
구리	농경지(밭에만 해당)에서 토양 1kg당 125mg 미만이 될 것

(3) 입도조정기법

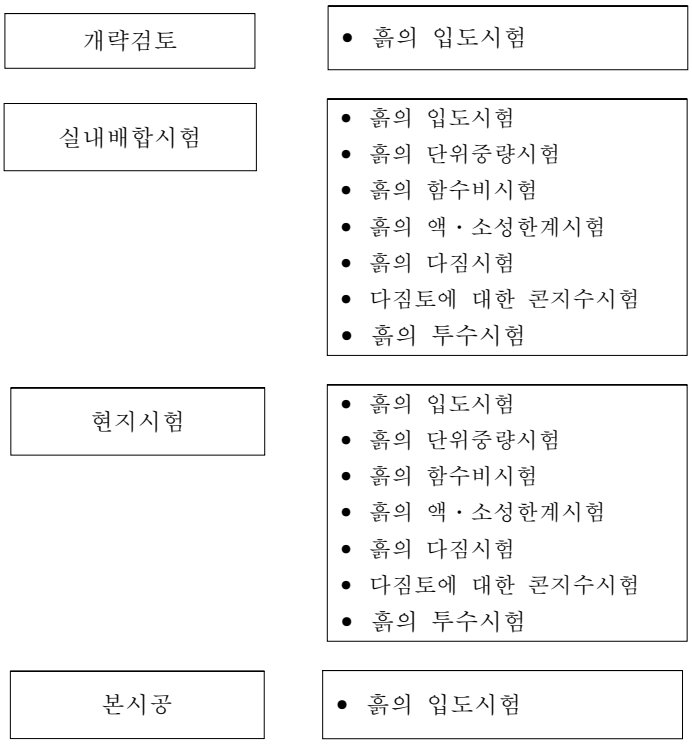
본 절에서는 지속적인 건설재료 확보를 위하여 본 연구를 통하여 수행된 조사결과 대부분 하천제방 재료로 적합하지 않은 하상토 등 불량토 안정처리기법으로서 양질토 및 시멘트 혼합에 따른 입도조정기법을 제시한다.

한편, 입도조정기법은 입도조정 사례를 보여주는 <그림 3.4-9>에서 보듯이 하천제방 재료로 요구되는 재료특성을 만족하는 입도분포특성을 얻기 위하여 불량토와 양질토 혼합하는 기법이다. 이때, 입도조정기법의 적용에 따라 점성토는「장비주행성」이, 사질토는「투수성 증대」가 개선되어 양질의 하천제방 재료가 된다. 본 연구 결과에 따르면, 국내 발생 하상토는 입경이 균등한 모래(SP)의 경우 화강풍화토 혼합율 40% 이상에서 하천설계기준을 만족하는 투수특성을 갖는 것으로 평가되었으며, 실트질(ML) 및 점토질(CL) 토사의 경우 시멘트 안정처리가 전단강도 증진에 적합한 것으로 평가되었다.



<그림 3.4-9> 현장 및 실내시험에 의한 입도조정 사례

입도조정기법은 입도조정의 조사·검토 흐름을 보여주는 <그림 3.4-10>에서 보듯이 개략검토, 실내배합시험, 현지시험, 본 시공의 절차에 따라 수행한다. 이때, 제방 성토재료의 품질목표는 제방 성토재료로서의 품질과 재질을 보여주는 <표 3.4-3>을 기준으로 하며, 기타 사용목적(하천, 도로, 주택 등)이 다른 경우에 대한 품질목표는 사용목적에 따른 재료규정, 다짐 규정 등은 각 기준별 또는 설계도서에 따른다.



<그림 3.4-10> 입도조정의 조사・검토 흐름

<표 3.4-3> 제방 성토재료로서의 품질

투수계수 관리기준	장비주행성을 고려한 콘지수 기준
$k = 1\times10^{-3}$cm/sec 이하	q_c= 400kN/m^2 이상

(4) 함수비조정기법

① 공기건조공법

공기건조공법은 고함수비 점성토를 제방축조재료로 활용할 경우 탈수 목적으로 자연지반 또는 성토용지 내에서 포설한 흙을 포설 한 다음 장시간 햇빛에 노출시켜 건조시키는 극히 단순한 공법이다. 본 공법의 단점은 공기건조 중에 예측하지 못한 강우를 맞으면 오히려 함수가 높게 되어 역효과도 가져올 수 있으므로 주의를 요하고 토공량이 많을 경우 공기건조를 할 수 없다.

② 트랜치 공법

트랜치 공법은 트랜쳐 또는 유압 셔블로 자연지반에서 고랑을 만들어 지하수위 및 자연함수비 저하를 유도하는 공법으로서 해안매립지반의 천층 처리에 많이 활용된다. 본 공법은 고함수비 점성토의 경우 처리기간이 길고, 그 효과도 별로 크지 않는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 공법은 단독 사용 보다 공기건조와 병행하여 이용하는 것이 바람직하다.

③ 강제건조공법

강제건조공법은 특수건조플랜트 설비를 이용하여 가열처리하여 강제적으로 함수비를 저하시키는 방법이다. 본 공법은 특수플랜트를 설치하기 때문에 토공량이 작을 경우 경제성이 없으며, 거리에 따라 운송비가 커지는 경우가 있다.

4. 제방의 시공

(1) 다짐기준

① 다짐도는 KS F-2312의 규정에 따라 실시한 다짐시험결과를 고려하여 90％ 이상으로 한다.

② 하상재료는 구조물 주변에 사용하지 않는 것을 원칙으로 한다.

③ 제체 재료의 다짐은 장비 다짐을 원칙으로 하며, 다짐장비의 선정, 다짐횟수, 포설두께 등의 경우 현장여건을 고려하여 한다.

(2) 다짐 후 현장밀도 측정은 다짐층 별로 1,000 ㎥(단, 구조물주변은 50㎥)마다, 제방길이 방향으로 500 m마다 1회 이상 실시하며, 각 층은 다짐종료 후 다짐 검사를 받고, 승인을 얻은 후 다음 층 시공을 하도록 한다.

(3) 하상재료를 혼합하여 사용할 경우 혼합할 재료의 두께 및 혼합횟수는 현장평가시험을 수행하여 적용하여야 하며, 일반적으로 버킷을 이용하여 혼합할 경우 혼합층 두께는 1.0m 이하, 혼합횟수는 10회 이상으로 한다. 이때, 현장평가시험은 최소 10m×10m 이상의 면적에서 수행한다.

(4) 시공장비

① 다짐장비는 토질에 따라 점성토의 경우 양족식로울러를 사용하고, 사질토의 경우 진동로울러 또는 타이어로울러를 사용한다.

② 혼합장비는 로터리식 스테빌라이저, 버켓 믹싱 스테빌라이저 등이 있으며, 품질확보, 처리능력, 경제성 등을 고려하여 공사감독자의 승인을 받아 선정한다.

(1) 축제 재료의 다짐기준은 KS F-2312의 규정에 따라 실시한 최대건조밀도의 90％ 이상으로 하며, <표 3.4-4>을 따른다.

(2) 흙쌓기 및 되메우기의 다짐은 층다짐으로 하여 다짐부위 전체가 균일한 다짐이 되도록 한다.

(3) 다짐장비의 선정, 다짐횟수 및 포설두께 등의 다짐규정은 <표 3.4-5>의 기

준에 따라 설계하며, 시공 시 다짐에 대한 현장평가시험을 수행하여 적용하여야 한다.

<표 3.4-4> 제방의 축제 재료의 다짐 기준

구 분		기 준	시 험 법
시방 최소 밀도에서 수침CBR		2.5 이상	KS F 2320
다짐도	일반 구간	90 % 이상	KS F 2312 A, B
	구조물 뒤채움 구간	95 % 이상	KS F 2312 C, D
시공함수비		다짐시험방법에 의한 최적함수비 부근과 다짐곡선의 해당 다짐밀도에 대응하는 습윤측 함수비 사이	
시공층 두께	일반 구간	30 ㎝ 이하	한층의 마무리 두께
	구조물 뒤채움 구간	20 ㎝ 이하	

<표 3.4-5> 토질에 따른 다짐로울러 기종의 선정

토양	다짐기계	다짐두께(cm)	다짐도(%)	규격(t)	다짐횟수
점성토	양족식로울러 (자주식)	30	90%	19	5
			95%	19	8
사질토	진동로울러	30	90%	10	6
		20	95%	10	
	타이어로울러	30	90%	8~15	4
		20	95%	8~15	

※ 보축, 지방2급하천의 제체단면이 작은 경우 등 상기 표의 장비 투입이 곤란할 시에는 진동기 등의 대체장비로 할 수 있다.

(4) 하상토 혼합 장비는 로터리식 스테빌라이저, 버켓 믹싱 스테빌라이저 등이 있다. 예로써 로터리식 스테빌라이저에 의한 현장 혼합방법은 <그림 3.4-11>과 같다. 이때, 혼합할 재료의 포설 두께는 1.0m이하로 하며, 혼합장비에 의한 혼합회수는 3~4회 이상하여야 한다.



<그림 3.4-11> 현장 혼합 전경

제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발목표 달성도

본 연구는 최근의 하천제방 피해사례 분석 결과에 따라 2002년 개정된 하천설계기준을 통하여 하천제방 축조 재료로서의 사용이 원칙적으로 금지된 하상토의 활용 기술 재정립을 위해 수행된 연구로서, 연구개발 최종 목표는 하상토를 이용한 하천제방 축조기술 정립이다.

최종 목표 달성을 위한 연차별 세부목표는 1차년도의 경우 하상토의 공학적 특성 평가 및 신개념 제방 축조 설계 기법 제시이며, 2차년도의 경우 하상토 이용 제방 축조 기준 개정(안) 및 실무지침서 작성이다.

연차별 연구내용은 1차년도의 경우 국내외 기술동향 조사·분석, 국내 발생 하상토 공학적 특성 평가, 실내 및 현장실험, 수치해석 등을 통한 하상토 활용을 위한 합리적인 현장 포설두께 및 다짐방법 제시, 장비를 이용한 현장 하상토/양질토 혼합방법 제시 등을 포함한 하상토 이용 제방 축조 기준 개정(안) 제시 등을 수행하였다. 한편, 2차년도의 경우 1차년도의 연구성과를 바탕으로 하상토의 침식 및 마찰특성 평가, 하상토의 공학적 특성에 따른 합리적인 제방 설계법 제시, 하상토를 이용한 신개념 제방 축조 설계 기법(II), 하상토 이용 제방축조의 기준 개정 및 실무지침서(II)를 제시하였다.

이와 같이 1차년도에서 계획한 하상토를 이용한 신개념 제방 축조 설계 기법(Ⅰ) 및 하상토 이용 제방축조 기준 개정 및 실무지침서(안) 연구와 2차년도에서 계획한 하상토의 침식 및 마찰특성 평가, 하상토의 공학적 특성에 따른 합리적인 제방 설계법 제시, 하상토를 이용한 신개념 제방 축조 설계 기법(II), 하상토 이용 제방축조의 기준 개정 및 실무지침서(II)(안) 연구가 계획된 일정에 따라 원활히 수행되었으며, 본 연구의 최종 목표인 하상토를 이용한 하천 제방 축조기술에 대한 설계기법 및 실무지침(안)이 달성된 것으로 판단된다.

제 2 절 관련분야 기술발전 기여도

본 연구성과로 도출된 기술이 활용되면 현재 하천제방축조에 사용되는 양질의 다짐토 외에 하상준설토 및 폐자원(석분토 등)활용으로 천연골재의 대체 및 공사비 절감 효과로 인한 친환경적이고 경제적인 공법개발 및 활성화에 기여할 수 있을 것이다.

또한, 하상토의 합리적인 활용방안 제시를 통한 국내 하천제방 축조기술 선진화 및 선진국 기술수준 대비 기술수준 90% 이상 향상시킬 수 있을 것이며, 하상토 활용기술 개발은 현장 적용시 하상 준설장비와 제방축조 공사비를 이중으로 절감할 수 있으며, 매년 투입되는 약 1조원의 치수사업비 중 하천제방 축제비가 50% 이상임을 감안할 때 막대한 규모의 예산 절감. 기존 하천제방 축조에 사용되는 양질토를 하상토로 대체할 경우 경제적인 비용효과와 더불어 천연자원의 보존 및 환경피해를 감소시킬 수 있는 유·무형의 효과를 고려할시 국가적 차원의 막대한 비용절감 효과를 기대할 수 있다.

한편, 하상토의 공학적 특성 및 현장 적용성 실험을 통하여 표준화된 조사, 설계, 다짐 및 시공방법을 마련하고 하천제방설계기준, 시방서 등에 반영하여 하상토 활용방법 개발로 안전하고 비용을 절감할 수 있는 하천제방 설계기술로 활용할 수 있을 것이다. 뿐만 아니라, 하천제방 방재계획 수립을 위한 보수·보강 실무지침서로 활용 가능하리라 판단된다. 또한, 국내에서 발생하는 하상준설토 및 폐자원(석분토 등)의 활성화 및 지오튜브를 이용한 하천제방 축조기법의 개발/적용 및 기술이전이 가능하리라 판단된다.

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획

본 연구의 최종목표는 하상토를 이용한 하천제방 축조기술 개발로 본 연구결과를 통하여 제시된 표준화된 조사, 설계 및 시공방법은 하천제방설계기준 및 시방서 반영을 통하여 안전하고 비용을 절감할 수 있는 하상토를 활용한 하천제방 설계 및 시공기술 정립과 하천제방방재계획 수립을 위한 보수·보강 실무지침서로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

한편, 국내 하상토를 이용한 하천제방 축조기술 개발은 현재 하천제방축조에 사용되는 양질의 성토재 외에 하상준설토 및 폐자원(석분토 등)활용으로 천연골재의 대체 및 공사비 절감 효과로 인한 친환경적이고 경제적인 공법개발 및 활성화에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 본 연구결과는 하상토의 합리적인 활용방안 제시를 통한 국내 하천제방 축조기술 선진화 및 기술수준을 향상시킬 수 있을 것이며, 하상토 활용기술 개발은 현장 적용 시 하상 준설장비와 제방축조 공사비를 절감할 수는 등 경제적인 비용 효과와 더불어 천연자원의 보존 및 환경피해를 감소시킬 수 있는 유·무형의 효과를 고려할 시 국가적 차원의 막대한 비용절감 효과를 충분히 가지고 있는 것으로 판단된다.

마지막으로, 본 연구는 공공기술 성격이 강하므로 중앙 정부에서 이를 개발하여 보급할 경우, 지방자치단체와 관련 단체로 기술이 파급될 수 있으므로 국가 차원에서 중복 기술 개발 비용을 절감할 수 있을 것으로 판단되며, 이를 위하여 향후 하천제방설계기준 및 시방서 개정 시 하천제방 제체재료로서 하상토 활용 분야 관련 기초 자료로 활용할 계획이다.

제 6 장 참고문헌

곽기석(2002),“S-Sricos 방법: 점성토지반의 교각세굴깊이 예측”, 한국지반공학회 논문집, 제18권 2호, pp 13-21

건설교통부(2001), 댐설계기준.

건설교통부(1993), “하천환경관리기술개발 기초・조사 보고서”, 연구보고서.

건설교통부(2002), 한강수계 하천정비 기본계획.

건설교통부(2003), “호소 및 하천의 퇴적오니 분포조사 및 환경친화적인 준설・재활용 기술개발”, 연구보고서.

김석남, 박치원, 목영진, 김석명(2005), “변형된 삼축시험장치를 이용한 불포화토의 함수특성곡선과 투수계수방정식의 결정”, 한국지반공학회, 제21권, 5호, pp. 59~641.

김영수, 정성관, 정우섭, 권기락(2005), “낙동강 중류지역 실트의 비배수 전단거동”, 대한토목학회논문집, 제 25권, 제 5호, pp. 323~331.

김주철, 이종규(2002), “준설토를 이용한 경량기포토의 역학적 특성 연구”, 한국지반공학회 논문집, 제 18권, 4호, pp. 309~317.

김영웅, 박기순, 손형호, 김종국(1999), “준설토를 이용한 지하구조물 뒷채움 다짐 특성에 관한 연구”, 99 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, pp. 357~364.

김경수, 조기태(1999), “하천제방의 누수탐사 및 누수량 평가에 관한 연구”, 한국지하수환경공학회 논문집, Vol.6, No.4, pp. 213~217.

농림부(1996), “저수지 준설토의 효율적 활용방안 연구”, 연구보고서.

농업기반공사(2003), “저수지 준설 환경기준 정립 및 준설토 활용방안 연구(I)”, 연구보고서.

농업기반공사(2004), “저수지 준설 환경기준 정립 및 준설토 활용방안 연구(II)”, 연구보고서.

송광섭(1999), “준설토의 고화처리 방법” 대한토목학회지, 제51권, 제5호, pp.31-43.

송영우, 김건하, 구동영(1999), “미생물 균체의 주입을 통한 토양의 투수계수 감소” 한국지반공학회 논문집, 제15권, 제6호. pp.273-283.

신은철, 오영인(2001), “지오텍스타일 튜브의 시공방법 및 환경적 영향에 관한 연구”, 한국지반공학회 논문집, 제 17권, 5호, pp. 137～145.

윤길림, 김병탁(2002), “준설토를 활용한 경량혼합토의 역학적 특성 연구”, 한국지반공학회 논문집, 제 18권, 4호, pp. 75～83.

안수한(1988), 수리학, 동명사.

우진건설(주)(2006), “GEOSYSTEM 공법 시공사례”, 우진건설(주).

우효섭, 유권규(1990), “수정 EINSTEIN 방법의 한국하천에의 적용” 연구보고서.

우효섭(1991), “청미천에서의 하천유사 측정 및 분석(II)-유사의 광물특성 및 오염도-” 한국수문학회지, 제24권, 제 3호, pp.49～60.

이길성, 이남주, 오성택(1996), “잠실수중보 상류부 유사량 수지분석”, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제16권, 제 II-2호, pp.135～147.

이남주, 이길성(1998), “좌표변환에 의한 이차원 유사이동모형(II) -모형의 적용-”, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제18권, 제 II-5호, pp.423～436.

이송, 전종구(2002), “조립토가 혼합된 준설토의 퇴적 및 압밀특성”, 한국지반공학회 논문집, 제 18권, 2호, pp.75～86.

지해산업개발(주)(2007), Geotextile System 기술자료.

철도청(1999), 철도공사 전문시방서.

최성욱, 한승규, 오동원(2003), “하상변동 모의를 위한 유한차분 완전연계모형”, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제23권, 제 4B호, pp.327～337.

한국건설기술연구원(1990), “수정 EINSTEIN 방법의 한국하천에의 적용” 연구보고서.

한국건설기술연구원 (2006), “교량기초 장수명화 기술 개발”, 한국건설기술연구원 연구보고서

한국토지공사(2001) “신 하천법에 따른 단지내 하천정비 개선방안에 관한 연구”, 연구보고서.

한국토지연구원(1995), “단지내 하천시설물 설계・시공 요령”, 연구보고서.

한국수자원학회(1999), 하천공사표준시방서.

한중근, 이명호(2007), 환경지반공학, 새론출판사.

해양수산부(2003), “굴패각 혼입 특수콘크리트 개발”, 최종보고서.

해양수산부(2003), “준설토 재활용 방안 연구”, 최종보고서.

日本 建設省 (2000), 河川堤防設計指針.

國土開發 技術硏究 Center(1998), 柔構造 通門 設計의 入門.

小橋秀俊, 三木博史, 山田哲也, 藤井厚企, 小畑敏子(2000), “建設發生土のリサイクル技術とコスト縮減”, 土木技術資料, 42-5, pp.40～45.

豊田光雄, 有銘伸子, 令井裕一(2000), “掘削殘土, 河床堆積物を用 ぃたCSG構造物”, 土木技術資料, 42-5, pp.22～27.

株式會社 ジオテック(2000), 石狩川改修工事の內 石狩川 下流發生土 有效利用 檢討業務 報告書.

株式會社 開發工宮社(2001), 石狩川改修工事の內 石狩川 下流發生土 有效利用 檢討業務 報告書.

石狩川開發建設部(2002), 技術活用 パイロット 事業實施報告書-浚渫發生土を活用した築堤盛土材의への有效活用.

石狩川開發建設部(2004), 混合土利用 マニュアル(案), 石狩川開發建設部 工務課 第一改修係.

北海島開發局 土木試驗所 第3硏究部 土質硏究室(1985), 北海島における 不良土對策マニュアル(案).

杉井後夫, 佐藤 健, 字野尙雄, 山田謹吾(1989), “浸透破壞の發生プロセス土の非均質性”, 土の基礎, 37-6(377), pp.17～22.

Abramento, M. and Carvalho, C. S.(1989), "Geotechnical Parameters for the study of Natural Slopes Instabilization at Sierra do Mar-Brazilian Southeast", proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Vol.3, pp. 1599～1602.

Ali Maher(2005), Palmyra Cove Demonstration Project Beneficial Use of Dredged Sediment.

Allen, J.(1947), "Scale Models in Hydraulic Engineering, Longmans", Green & Co, London.

Bishop, A. W. (1955), "The use of the slip circle in the stability analysis of slopes", Geotechnique, 5, pp.7～17.

Bishop, A. W.(1959), "The Principle of Effective Stress", Publication 32, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, pp.1～4.

Bishop, A. W. and Henkel, D. J.(1962), "The measurement of soil properties in the triaxial test", 2nd ed. London, England: Edward Arnold.

Bogardi, J.(1959), "Hydraulic Similarity of River Models with Movable Bed", Acta Tech. Acad. Sci. Hung., Vol. 24, p.417.

Briaud, J.L., Chen, H.C. Li, P., Nurthahyo, P., and Wang, J. (2003), Complex Pier Scour and Contraction Scour in Cohesive Soils, National Cooperative Highway Research Program, Project No. E24-15, Transportation Research Board, Washington, D.C.

Burland, J. E.(1964), "Effective stresses in partly saturated soils", discussion on "Some aspects of effective stresses in saturated and partly saturated soils", by G. E. Blight and A. W. Bishop, Geotechnique, Vol.14, Feb pp.65~68.

Canadian Geotechnical Society(1985), "Foundation Engineering Manual, 2nd ed., Canadian Geotechnical Society, pp.376.

DGE(2003), Sediment and Dredged Material Management - Relevance and Object.

Donald, I. B.(1961), "The mechanical properties of saturated and partly saturated soils with special reference to negative pore water pressure", Ph.D. dissertation, Univ. of London, London, England.

Escario, V., and Juca, J.(1989), "Strength and deformation of partly saturated soils," Proceedings of the 12th International Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Vol. 3, p. 43~46.

Escario, V. and Saez, J.(1986), "The Shear Strength of Partly Saturated Soils", Geotechnique, Vol. 36, No. 3, pp.453~456.

FHWA(1989), "Geotextile Design & Construction Guidelines", NHI Course No.13213, pp.30~31.

Fredlund, D. G., Xing, A. and Huang, S.(1994), "Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristics curve", Canadian Geotechnical Journal, 31, pp.553~546.

Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. and Widger, R. A. (1978)," The shear strength of unsaturated soils", Canadian Geotechnical Journal, Vol.15, pp. 313~321.

Fredlund, D. G. and Rahardjo, H.(1995), Soil Mechanics for Unsaturated Soils, John Wiley & Sons Inc.

Gan, J. K. M., and Fredlund, D. G., and Rahardjo, H.(1988), "Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 25, pp. 500~510.

Gibson, R. E. and Henken, D. J.(1954), "Influence of duration of tests at constant rate of strain on measured 'Drain' strength", Geotechnique, Vol.4, pp.6~15.

Jennings, J. E., and Burland L, B.(1962), "Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils", Geotechnique, Vol.12, No.2, pp.125~144.

Karube, D.(1988), "New concept of Effective stress in unsaturated soil and its proving test", Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, ASTM STP 977, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp.539~552.

Lagasse, P.F., Zevenbergen, L.W., Schall, J.D. and Clopper, P.E. (2001), Bridge Scour and Stream Stability Instability Countermeasures - Experience, Seclection and Design Guidelines, Hydraulic Engineering Circular No. 23, Second Edition, FHWA NHI 01-003, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

Lam. L. and Fredlund, D. G.(1987), "Transient Seepage Model for Saturated-unsaturated Soil System : a Geotechnical Engineering Approach", Canadian Geotechnical Journal, Vol.24, pp.565~580.

Lane, E. W.(1935), "Security from under-seepage-masonry dams on earth foundation", Transactions American Society of Civil Engineering, 100, pp.1235~1351.

May, R.W.P., Ackers, J.C., Kirby, A.M. (2002), Manual on Scour at Bridges and Other Hydraulic Structures, Construction Industry Research and Information Association, Research Project 611, CIRIA C551, London.

NAVFAC Manual(1986), Foundation & Earth Structures.

Novak, P., and abelka, J.(1981), "Models in Hydraulic Engineering (Physical Principles and Design Application)", Pitman Publishing Inc., Chap. 6.

Richardson, E.V. and Davis, S.R. (2001), Evaluating Scour at Bridges, Hydraulic

Engineering Circular No.18, Fourth Edition, FHWA NHI 01-001, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

SADAT ASSOCIATION, INC., OENJ CORPERATION INC.(2001), Use of Dredged Material for the Construction of Roadway Embankment.

SEDNET(2004). "Sediment and Dredged Material Treatment", Journal of Soils & Sediment 4(4) pp.225~232.

Toll, D. G.(1990), "A framework for unsaturated soils behavior", Geotechnique Vol.40, No.1, pp.31~44.

USACE EM1110-2-5(1987), Beneficial Uses of Dredged Material.

Wheeler, S. J. and Siva Kumar(1992), "Development and application of a critical state model for unsaturated soil", Proceedings, Wroth Memorial Symposium on Predictive Soil Mechanics, Oxford.

Williams, G.P.(1978), "Bank-full Discharge of River," Water Resour. Res, Vol. 12, No. 6, pp.1141~1154.

주 의 사 항

1. 본 보고서는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술 연구개발사업의 중간보고서입니다.
2. 본 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설기술연구개발사업임을 밝혀야 합니다.
3. 국가보안 차원에서 필요하다고 인정되는 내용은 대외적으로 발표 및 공개하여서는 아니 됩니다.

본 보고서와 관련하여 문의를 원하시는 분은 아래의 문의처로 연락을 주시기 바랍니다.

■ 문의처 : 한국건설교통기술평가원 TEL 031)381-6311
한국건설기술연구원 TEL 031)910-0221

R&D/05기반기술-A06

하상재료를 이용한 하천제방 축조기술 연구 최종보고서

■ 발행일 / 2007. 6. 29
■ 발행처 / 한국건설기술연구원
경기도 고양시 일산구 대화동 2311
TEL : 031-910-0114(대)
■ 인쇄처 / 자유기획인쇄
TEL : 02-2263-0270