T00284992

건설기술혁신사업 최종보고서

GOVP1200943544

R&D / 06 건설핵심 C15

Construction & Transportation R&D Report

건설현장 발생토를 이용한 무다짐 유동화 처리공법의 실용화 연구

2008. 12. 16.

주관연구기관 / (주)삼안 기술개발연구원
협동연구기관 / 한양대학교 산학협력단
위탁연구기관 / (주)지구환경전문가그룹

건 설 교 통 부
한국건설교통기술평가원

제 출 문

건설교통부장관(한국건설교통기술평가원장) 귀하

본 보고서를 "건설현장발생토를 이용한 무다짐 유동화 처리공법의 실용화 연구"의 최종 보고서로 제출합니다.

2008. 12. 16.

주관연구기관 : (주)삼안
대 표 이 사 임 종 아
협동연구기관 : 한양대학교 산학협력단
산학협력단장 박 재 근
위탁연구기관 : (주)지구환경전문가그룹
대 표 이 사 정 승 용

■ 총 괄 연 구 책 임 자 / 부 사 장 박용대 연구총괄
■ 주관연구기관 참여연구원 / 부 회 장 강희풍 연구진행 및 결과총괄
/ 부 사 장 김재현 토질 분석
/ 상 무 송규석 IT 및 설계
/ 이 사 이규식 해외정보
/ 이사대우 김진한 지질 및 토질
/ 차 장 유병선 연구기획 및 진행 총괄
/ 사 원 김남균 실무업무
/ 사 원 김희정 행정업무

■ 협동연구기관 참여연구원 / 교　　수 김수삼 협동기관 연구총괄

/ 연구교수 한상재 실내실험 및 시험시공 총괄

/ 박사과정 김종윤 실내실험 결과 분석

/ 박사과정 윤명석 실내실험 수행

/ 박사과정 안동욱 현장 시험 시공 총괄

/ 석사과정 장남주 현장 시험 시공 수행

/ 석사과정 김대라 실내실험 및 현장 시험 시공 수행

/ 석사과정 유현구 실내실험 및 현장 시험 시공 수행

■ 위탁연구기관 참여연구원 / 대표이사 정승용 위탁기관 연구총괄

/ 차　　장 김병일 고화재 선정 실험

/ 과　　장 정재현 프로그램 개발

/ 대　　리 홍강한 문헌 조사 및 분석

/ 대　　리 최동철 수치 해석 및 실험

요 약 문

Ⅰ. 제 목

건설현장발생토를 이용한 무다짐 유동화 처리공법의 실용화 연구

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

전통적인 되메우기 방법은 모래 또는 발생토를 다짐하는 공법이 주로 사용되어 왔으나 이는 시간과 비용이 많이 든다. 특히 관의 하부 및 작은 틈새와 같은 부분은 전통적인 다짐 공법으로는 다지기가 난해하다. 이렇게 메워지지 않은 부분은 시공의 부실로 인해 실제 발생하는 누수 및 유출 사고로 이어지게 된다. 또한 대부분의 공사는 야간에 실시되는데 공사시간이 절대적으로 부족하며, 다짐 시 소음, 진동, 분진이 발생하기 때문에 주변 환경에 대한 오염 및 공해가 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 유동성 뒤채움재를 활용한 공법이 활용되고 있으나 발생 잔토의 처리 및 모래의 수급에 대한 문제가 있으며 뒤채움재의 강도 발현에 필요한 시간이 길고 재료의 pH가 높아 이에 대한 해결책으로 친환경 고화재를 사용한 공법을 제안한다.

본 연구에서 제안하는 친환경 고화재를 사용한 무다짐의 유동화 처리토 공법 실용화 방안은 기존의 다짐공법과 유동성 채움재가 가지고 있는 문제점에 대한 최적의 해결 방안을 제안하는 것을 목적으로 하고 있다. 즉, 기존 다짐공법에서의 여러 가지 문제점들을 줄일 수 있는 새로운 공법인 유동화 처리토를 이용한 무다짐 공법을 개발하고 이를 국내 건설현장에 적용될 수 있도록 친환경 고화재 발굴 및 시공기준을 정립하여 품질 및 안정성 향상, 설계 및 시공 제반 기준을 확립할 수 있을 뿐 아니라 국내 건설 기술수준의 선진화 기반조성 및 생산성 향상이 가능하며, 선진국 기준에 준하는 배합설계를 마련할 수 있으므로 국제 시장에서도 경쟁력을 가질 수 있다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

현장발생토는 각 현장의 상황에 따라 그 토질의 특성이 상이하다. 따라서 대상토의 특성별로 뒤채움시 요구되는 목표기준치를 만족하는 배합비를 표준화할 필요가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 시료를 통일 분류법에 따른 SW, SM, SC, ML, CL와 자갈 함유토, 유기물 함유토, 석탄회 함유토의 토질 특성에 대한 실내 시험을 통해, 각 발생토의 최적 배합비 및 배합설계법을 제안하며, 고화재의 사용에 따른 환경 위해성 조사를 실시하여 친환경성을 확보한다.

또한 국내에서 시판되는 11개의 고화재와 일본에서 유동화 처리토의 고화재로 많이 사용되고 있는 고로슬래그 시멘트를 사용하여, 총 12개의 고화재 중 국내 현장 발생토와 배합했을 때의 공학적 특성 파악 및 고화특성을 파악하고 유동화 처리토의 제조에 적합한 고화재를 선정한다.

실험 결과 분석을 바탕으로 내구성 및 유동성에 미치는 강도, 열 저항율, 유동성, 시간 등과 같은 영향인자를 분석하여 대상토의 최적 배합비를 도출하고, 실내실험을 통해 도출된 영향인자별 강도 발현 특성을 바탕으로 각 반응변수의 회기분석을 수행하여 유동화 처리토와 실재 시료의 적정 혼합비를 산출하는 배합설계 기법을 도출한다.

실내 실험을 통해 도출된 결과를 바탕으로 현장 시험 시공을 실시하여 현장 적용성과 시공성, 경제성 등을 통해 본 연구에서 개발된 기술의 실용화 가능성을 평가한다.

Ⅳ. 연구개발결과

- 기초문헌 조사 및 분석을 통해 일본, 미국, 대만 3개국의 연구내용 및 동향을 파악하여 목표기준치 선정
- 시료종류(SW, SM, SC, ML, CL, 자갈 함유토, 유기물 함유토, 석탄회 함유토)에 따른 슬럼프, 일축압축강도, 블리딩율 등을 파악하여 선정된 목표기준치에 부합하는 배합비 선정
- 총 12가지의 고화재로 실험을 실시하여 목표기준치에 부합하는 적합 고화재 선정
- 유동성 및 일축압축강도 실험을 통해 목표기준치에 부합되는 배합비 선정
- 공기량, 단위용적중량, 투수성, 지지력비. pH 등의 실험을 통해 급결성 유동화 처리토의 특성 파악

- 고화재, 현장토, 물의 총량을 유추할 수 있는 배합설계 모델 개발
- 현장 시험 시공을 통해 현장 적용성과 시공성, 경제성 등을 파악하여 사업화 가능성 평가

V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구에서 제안한 유동화 처리토 공법은 단기간에 경제적으로 시공이 가능한 기술이며 친환경적인 공법으로써, 통일분류법으로 구분된 7가지 시료(SW, SM, SC, ML, CL, 자갈 함유토, 유기물 함유토) 및 석탄회를 첨가한 석탄회 함유토의 목표기준치를 만족하는 최적 배합비를 실내실험을 통해 선정하고자 하였다. 또한 총 12가지의 고화재로 실험을 실시하여 목표기준치에 부합하는 적합 고화재 선정하고 이에 따른 고화특성을 파악하였다. 실내 실험에서 나타난 유동화 처리토 공법의 다양한 영향인자를 평가, 분석하여 고화재와 흙의 적정혼합비를 산출하는 배합설계법을 제안하며, pH, 어독성, 오염물 용탈 시험 등의 조사 및 측정을 통한 환경 위해성 조사를 실시하였다.

본 연구에서 제안된 유동화 처리토 공법의 연구결과의 활용 방안은 본 연구보고서를 기본으로 현장 발생토를 선별하고 해합하여 타설하는 공법을 완성할 수 있으며, 이를 필요한 현장에 공급하는 시스템 구축에 설계 및 매뉴얼로 활용 가능하다.

SUMMARY

Ⅰ. Title

Practical Use of Self-Compacting Liquified Stabilized Method with Surplus Soil

Ⅱ. Purpose and necessity of research and development

A Conventional refilling method, which mainly use sand or surplus soil, requires time, efforts, as well as cost. Especially, there is a problem with these methods to apply to small spaces or under pipes. This problem may bring out leakage or oil spill. Futhermore, that method has other problems in its application to night work due to lack of time and bad influences upon environment because of a loud noise, vibration and dust during its process. Although, liquified stabilized soil, which is made by mixing surplus with water and ordinary portland cement, are used to solve the problems, however, it, also, has problems in treatment of surplus soil, demand and supply of soil, its slowness of hardening, and high acidity of materials. One of the alternatives to solve these problems is to use environmental friendly rapid-setting liquified stabilized soil.

The main purpose of this study upon practical use of self-compacting liquified stabilized soil method using environmental friendly rapid-setting cement, therefore, is to determine the optimum solution for the problems of the conventional refilling method and liquified stabilized soil; in other words, to develop self-compacting liquified stabilized soil method as a new method to solve the problems. And then, through discovery of environmental friendly rapid-setting cement and determination of construction criteria, this new method is not only to improve quality and stability and to determine the design and construction criteria, but also to improve the level of domestic construction skill and productivity, and to arrange a model of mix design being equivalent to the criteria of advanced countries.

Ⅲ. A Content and extent in research and development

Properties of surplus soil are various depending on the each circumstance of sites, and the strength required for each properties of the soil during refilling should be standardized. Accordingly, in this study, the optimum mixing proportion of water, cement and soil, and mixing design are determined depending on soil properties of each surplus soil through laboratory tests for properties of each of five types of soil (SW, SM, SC, ML, CL) classified by Unified Soil Classification System. Moreover, a environmental friendly property of materials is assured through the environmental hazard examination using each rapid-setting cement.

It understands in order to apply about various of surplus soil condition segregation, flowbility, strength, permeability with gravel content and organic content and understands characteristic change of liquified stabilized soil adding coal ash.

Blast furnace slag cement mainly used for liquefied stabilized soil in Japan mixing with surplus soil understand engineering properties and properties of cementation.

Influence factors such as strength, moment of thermal resistance, fluid property, and time are analyzed based on the result of the tests; and the optimum mixing proportion is determined; and regression analysis of each factors are conducted; and mixing design method which calculates suitable mixing proportion of water, cement and soil is determined based on strength property following the consideration of each influence factors derived from laboratory test.

Field test is performed that stands on result of laboratory test and possibility of commercialization developed in this study is estimated application of field, constructability and economic.

Ⅳ. Results of research and development

- The selection of the standard based on the determination of contents and trend in research of three countries(U.S.A, Japan, Taiwan) through investigation and analysis for basic documentaries.
- The selection of the mixing proportion in agreement with the selected standard through determination of slump, unconfined compressive strength, bleeding ratio etc. depending on types of experiment.
- The selection of appropriate rapid-setting cement for the selected standard conducting experiments with 12 rapid-setting cement.
- The selection of the mixing proportion conducting experiments for fluid property and unconfined compressive strength.
- The determination of the properties of the rapid-setting liquified stabilized soil conducting experiments for air content, unit volume weight, permeability, bearing capability ratio and pH etc.
- The development of mixing design model in order to analogize the total amount of rapid-setting cement, surplus soil, and water.
- Understanding of application, construct-ability and economic through field test and estimation of possibility of commercialization.

V. Practical plan for research results

The self-compacting liquified stabilized soil method proposed in this study an environmental method which can be available for economical construction in short period and determinate the optimum mixing proportion following the consideration of the strength and each of seven types of soil classified by Unified Soil Classification System. Characteristic of liquified stabilized soil is understood according to coal ash content and blast furnace slag cement is understood characteristic of cementation.

The mixing design method in order to calculate the appropriate mixing proportion of water, cement and soil on the basis of estimation and analysis of the influence factors which affect the self-compacting liquified stabilized soil method during laboratory tests is proposed; and environmental hazard convey is conducted through the investigation and measurement of pH.

목 차

제 1 장 서론 ····· 1

제 1 절 연구개발의 목적 ····· 1

제 2 절 연구개발의 필요성 ····· 3

1. 연구개발의 필요성 ····· 3
2. 유동화 처리토를 이용한 무다짐 공법 ····· 8

제 2 장 국내·외 기술개발 동향 ····· 15

제 1 절 국내 연구 동향 ····· 15

제 2 절 국외 연구 동향 ····· 17

1. 일본 ····· 17
2. 대만 ····· 22
3. 북미 ····· 22

제 3 절 특허 동향 ····· 24

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 25

제 1 절 이론적 배경 ····· 25

1. 유동화 처리 기술 ····· 25
2. 급결성 유동화 처리토의 성분 ····· 29
3. 유동화 처리토의 물리적 특성 ····· 42
4. 급결성 고화재의 특성 ····· 45
5. 급결성 유동화 처리토의 배합설계 ····· 59
6. 석탄회 활용기술 ····· 61

제 2 절 실내실험 ····· 79

1. 실험목적 및 범위 ····· 79
2. 고화재 및 시료특성 ····· 79
3. 유동화 처리토의 특성분석을 위한 시험 ····· 84
4. 실험 조건 ····· 111

제 3 절 실험 결과 및 분석 ····· 125
1. 고화재 선정 실험 결과 ····· 125
2. 고로슬래그 시멘트를 첨가한 유동화 처리토의 배합 특성 ····· 130
3. 배합비 결정 실험 결과 ····· 170
4. 자갈 함유량에 따른 유동화 처리토의 배합특성 ····· 185
5. 유기질 함유량에 따른 유동화 처리토의 배합 특성 ····· 228
6. 석탄회를 첨가한 유동화 처리토의 배합 특성 ····· 273
7. 급결성 유동화 처리토 특성 파악 실험 결과 ····· 297
8. 실험결과 및 요약 ····· 328
제 4 절 배합설계 프로그램 개발(CLSM-Mixer) ····· 332
1. 개요 ····· 332
2. 프로그램 환경 ····· 340
3. 배합설계 프로그램(CLSM-Mixer)의 적용성 ····· 342
4. CLSM-Mixer 사용 설명 ····· 347
5. 배합설계 프로그램 개발의 결과 및 요약 ····· 367
제 5 절 현장 시험 시공 ····· 368
1. 현장발생토를 이용한 유동화 처리토의 배합설계 (현장 시험 시공) ····· 368
2. 현장발생토 배합실험 ····· 371
3. 유동화 처리토의 현장 적용 ····· 384
4. 현장 적용성 평가 조건 ····· 386
5. 현장 적용성 평가의 결과 ····· 425
6. 현장 적용성 평가의 요약 ····· 449
제 6 절 유동화 처리토 공법의 경제성 ····· 450
1. 본 시험 시공에 사용된 시공비용 ····· 450
2. 본 공법과 타 공법의 제조단가 비교 ····· 455
제 7 절 유동화 처리토의 설계 프로세스 및 시방서 개발 ····· 458
1. 배합설계 ····· 458
2. 프로그램(CLSM-Mixer)에 의한 배합비 도출 ····· 482
3. 시공 ····· 484
제 8 절 결론 및 요약 ····· 495

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도 ····· 497
제 1 절 연구개발 수행 진도율 ····· 497
1. 1차년도 진도율 ····· 497
2. 2차년도 진도율 ····· 498
제 2 절 연구개발 목표의 달성도 ····· 499
제 3 절 관련분야의 기술발전에의 기여도 ····· 500
1. 국내 학술지 ····· 500
2. 국내 학술발표 ····· 500
3. 국외 학술발표 ····· 501
4. 지적소유 ····· 501

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 ····· 502
제 1 절 연구성과의 활용방안 ····· 502
제 2 절 연구성과의 기대효과 ····· 503
1. 기술적 측면 ····· 503
2. 사회·경제적 측면 ····· 503

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ····· 505
제 1 절 일본 ····· 505
제 2 절 대만 ····· 506
제 3 절 북미 ····· 506

제 7 장 참고문헌 ····· 509

별 첨 자체평가의견서

C O T E N T S

Chapter 1. Introduction ····· 1

Section 1. Object of this study ····· 1

Section 2. Purpose and Definition ····· 3

1. Necessity of research and development ····· 3

2. Self-compaction method using liquified stabilized soil ····· 8

Chapter 2. The current aspect of domestic and international technology 15

Section 1. The trend of technical development in the domestic ····· 15

Section 2. The trend of technical development in the abroad ····· 17

1. Japan ····· 17

2. Taiwan ····· 22

3. North America ····· 22

Section 3. The trend of licenses ····· 24

Chapter 3. The contents and results of research ····· 25

Section 1. Background of this study ····· 25

1. Liquified stabilized technique ····· 25

2. ngredient of Rapid-Setting Liquefied stabilized soil ····· 29

3. Physical properties of liquified stabilized soil ····· 42

4. Properties of Rapid-setting cements ····· 45

5. Mixing design of rapid-setting liquified stabilized soil ····· 59

6. Technique of applicated coal ash ····· 61

Section 2. Laboratory tests ····· 79

1. Purpose and scope ····· 79

2. Characteristic of sample and rapid-setting cements ····· 79

3. Laboratory test for the analysis of properties of the liquified stabilized soil ·· 84

4. Test condition ····· 111

Section 3. The results of the laboratory tests ····· 125
1. The results of the determination tests of rapid-setting cements ····· 125
2. Characteristic of rapid-setting liquified stabilized soil using blast furnace slag cement ····· 130
3. The results of the determination tests of mixing proportion ····· 170
4. Mixing properties of rapid-setting liquified stabilized soil with gravel content ·· 185
5. Mixing properties of rapid-setting liquified stabilized soil with organic content ·· 228
6. Characteristic of rapid-setting liquified stabilized soil using coal ash ····· 273
7. The results of the tests on the characteristic of rapid-setting liquified stabilized soil ····· 297
8. The result of test and summary ····· 328
Section 4. Development of mixing design program (CLSM-Mixer) ····· 332
1. Introduction ····· 332
2. Program environment ····· 340
3. Application to the mixing design program(CLSM-Mixer) ····· 342
4. Explanation of a use of CLSM-Mixer ····· 347
5. The result of development of CLSM-Mixer and summary ····· 367
Section 5. Field Test ····· 368
1. Mixing design of liquified stabilized soil using surplus soil(field test) ····· 368
2. Test of mixing design on surplus soil ····· 371
3. Field application of liquified stabilized soil ····· 384
4. Condition of field application ····· 386
5. Result of field application ····· 425
6. The result of field application and summary ····· 449
Section 6. Economic Analysis of liquified stabilized soil method ····· 450
Section 7. Development of design process of liquified stabilized soil ··· 458
1. Mixing design ····· 458
2. Mixing design of determination by CLSM-Mixer ····· 482
3. Construction ····· 484
Section 8. Result and Summary ····· 495

Chapter 4. Accomplishment level for research goal and contribution to related research field ····· 497
Section 1. Achievement degree of the object ····· 497
1. Achievement degree of the object(1st year) ····· 497
2. Achievement degree of the object(2nd year) ····· 498
Section 2. Accomplishment level for research goal ····· 499
Section 3. Contribution degree of related fields ····· 500
1. Domestic journals ····· 500
2. Domestic proceeding ····· 500
3. Abroad proceedings ····· 501
4. Patent ····· 501

Chapter 5. Plan for application of research results ····· 502
Section 1. Practical plan of research results ····· 502
Section 2. Expected effects of research results ····· 503
1. Aspects of technique ····· 503
2. Aspects of society and economy ····· 503

Chapter 6. Abroad information connecting for this study ····· 505
Section 1. Japan ····· 505
Section 2. Taiwan ····· 506
Section 3. North America ····· 506

Chapter 7. Reference ····· 509

Appendix : Statement of oneself views

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발의 목적

전통적인 되메우기 방법은 모래 또는 발생토를 다짐하는 공법이 주로 사용되어 왔으나 이는 시간과 비용이 많이 든다. 특히 관의 하부 및 작은 틈새와 같은 부분은 전통적인 다짐 공법으로는 다지기가 난해하다. 이렇게 메워지지 않은 부분은 시공의 부실로 인해 실제 발생하는 누수 및 유출 사고로 이어지게 된다. 또한 대부분의 공사는 야간에 실시되는데 공사시간이 절대적으로 부족하며, 다짐 시 소음, 진동, 분진이 발생하기 때문에 주변 환경에 대한 오염 및 공해가 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 유동성 뒤채움재를 활용한 공법이 활용되고 있으나 발생잔토의 처리 및 모래의 수급에 대한 문제가 있으며 뒤채움재의 강도 발현에 필요한 시간이 길고 재료의 pH가 높다. 현재 기존에 사용되고 있는 유동성 채움재는 환경 오염 및 강도 발현의 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 토사와 혼합되어 사용되는 고화재 중 친환경 재료를 발굴하여 이의 활용 방안을 제안한다.

현장발생토는 각 현장의 상황에 따라 그 토질의 특성이 상이하기 때문에 대상토의 특성별로 뒤채움시 요구되는 막표기준치를 만족하는 최적 배합비를 표준화할 필요가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 시료를 통일 분류법에 따른 7종류(SW, SM, SC, ML, CL, 자갈 함유토, 유기물 함유토)와 석탄회를 첨가한 석탄회 함유토의 토질 특성에 대한 실내 시험을 통해 최적 배합비 및 배합설계법을 제안하고자 한다. 또한 국내에서 시판되는 11개의 고화재와 일본에서 유동화 처리토의 고화재로 많이 사용되고 있는 고로슬래그 시멘트를 사용하여, 총 12개의 고화재 중 국내 현장발생토와 배합했을 때의 공학적 특성 파악 및 고화특성을 파악하고 유동화 처리토의 제조에 적합한 고화재를 선정한다.

실험 결과 분석을 바탕으로 내구성 및 유동성에 미치는 강도, 열 저항율, 유동성, 시간 등과 같은 영향인자를 분석하여 대상토의 최적 배합비를 도출하고, 실내실험을 통해 도출된 영향인자별 강도 발현 특성을 바탕으로 각 반응변수의 회귀분석을 수행하여 유동화 처리토와 실제 시료의 적정 혼합비를 산출하는 배합설계 기법을 도출하여, 최종적으로 공법의 실용화를 위한 설계 프로세스 및 시방서를 제시하고

자 한다. Fig. 1.1.1에 배합설계법을 개발하기 위한 단계와 검증 방법을 제시하였다.

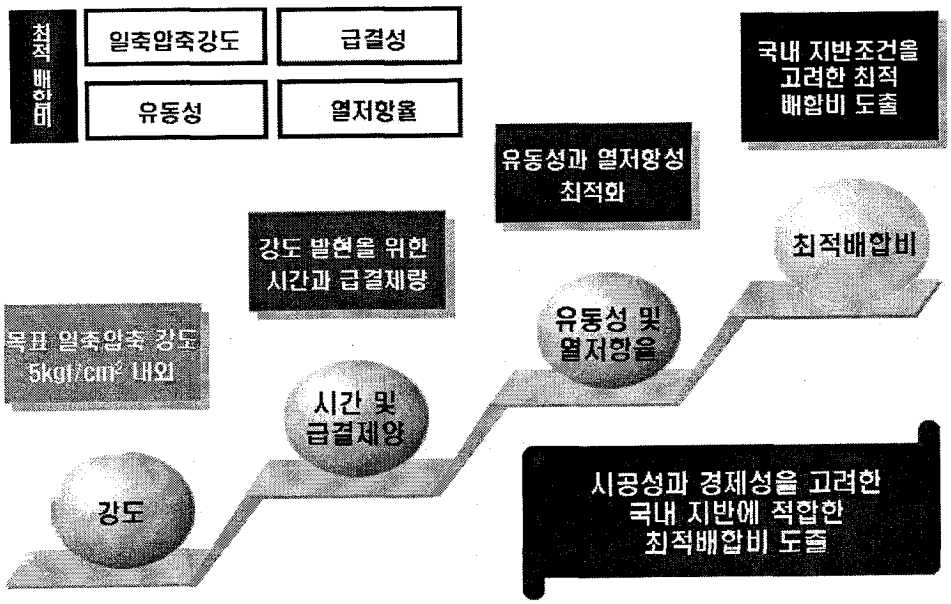


Fig. 1.1.1 배합설계법 개발 및 검증

제 2 절 연구개발의 필요성

1. 연구개발의 필요성

가. 연구개발 개요

최근 도시의 지중에 복잡하게 매설되어 있는 전기, 수도, 가스 등의 공급시설, 하수, 전신전화 등의 다수의 라이프 라인(life line) 구조물은 신설, 개보수, 유지보수 등을 위해 굴착, 매설, 뒤채움 작업이 빈번히 반복되어 행해지고 있으며 그 중 뒤채움의 작업에는 주로 모래를 사용한 다짐 공법이 사용되고 있다.

일반적으로 지중 구조물의 뒤채움 시 뒤채움 부위는 구조물의 거동에 직접적인 영향을 주는 구조적 뒤채움부와 그 외곽의 일반 뒤채움부로 구분한다. 이러한 구조물은 원지반 위에 성토하거나, 원지반을 굴착하여 설치되는데 구조물의 거동에 영향을 주는 구조적 뒷채움 영역은 Fig. 1.2.1과 같이 다이아몬드형, 역사다리꼴형, 사다리꼴형, 변형, 사각형 등 다양한 형태로 시공을 하게 된다.

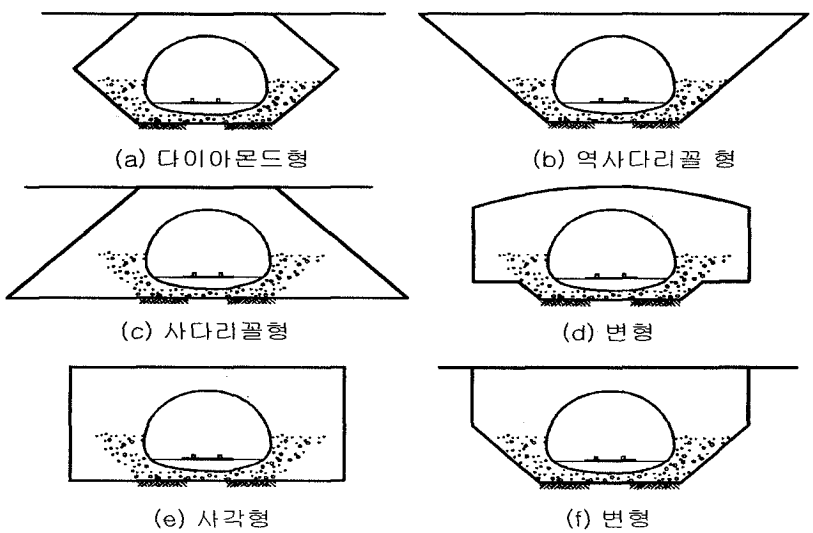
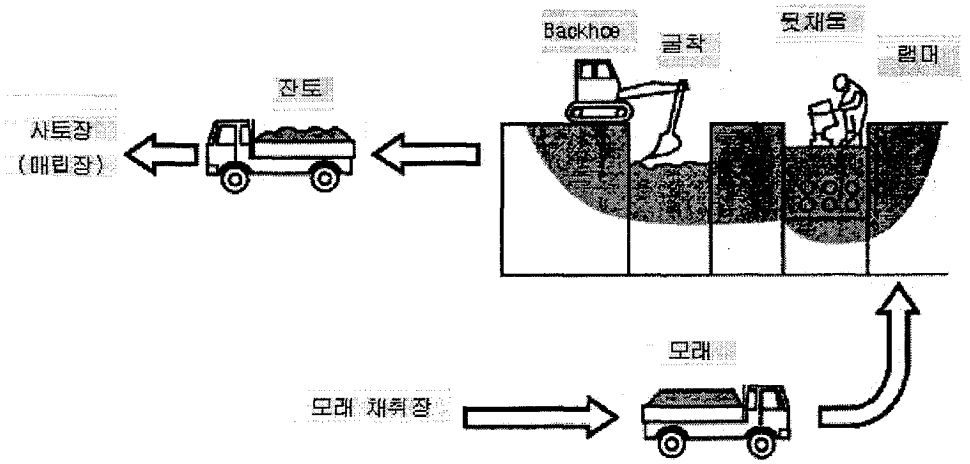


Fig. 1.2.1 다짐 범위의 조정 유형 예

이러한 굴착부에 대한 뒤채움을 하기 위한 재료로는 압축성이 작고 내구성이 우수한 부순 돌, 자갈, 입도분포가 양호한 모래 또는 혼합물을 사용하게 되지만 시공

방법은 여러 가지 문제를 발생시키고 있다(그림 1.2.2). 현재 모래로 뒤채움을 한 도로포장 하부에서는 노후 관로의 누수나 다짐불량으로 인한 포장의 침하발생 및 함몰사고가 빈번히 발생하여 추가적인 비용이 발생되고 있다. 또한 개착식 지하철 건설공사에서는 굴착 잔토의 처리를 위한 사토장이 필요하나 사토장의 확보에 어려움이 많으며 건설 잔토를 폐기물로 처리하는 경우에는 처리비용이 발생하게 된다. 더구나 지하 구조물의 채움재로 사용되고 있는 모래는 환경파괴의 문제와 더불어 재료의 추가 구입비용도 발생하게 된다. 특히 관 하부와 좁은 공간의 뒤채움은 다짐작업이 어려우며 다짐을 하더라도 토사의 특성상 추가 침하가 발생하기 때문에 재포장 후에 굴착했던 부위를 따라 균열이 발생하고 수분이 침투하여 포장의 수명과 매설 관로의 수명을 단축하는 원인이 되고 있다.



- 뒷채움재의 품질관리 어려움
- 시공방법의 다단계
- 뒷채움재의 다짐시 매설된 관 또는 방수쉬트의 손상
- 원형 매설관의 경우 관주변의 부적절한 다짐
- 협소한 구간의 다짐작업 곤란
- 부적절한 다짐으로 도로의 함몰 및 매설물의 변형, 파손

Fig. 1.2.2 기존 뒤채움 작업의 문제점

최근에는 이러한 뒤채움 재료 대신 구조적 뒤채움 영역에 입상토, 물, 플라이애쉬, 시멘트 등으로 구성된 유동성 모르타르 혼합물과 안정 처리된 저강도재료(CLSM)

및 기타 특수재료를 사용하기도 한다. 하지만 이러한 기존의 유동성 채움재는 가격이 저렴한 반면, 강도 발현이 늦어지며 pH가 높고 잔토처리 비용 및 모래 수급의 어려움 등 단점이 있다(표 1.2.1).

최근 국내에서는 고화재의 사용량이 증가하면서 지반에 사용되는 고화재로 인한 환경오염 가능성이 사회적으로 문제화 되고 있고 특히 가용성의 발암물질인 6가크롬에 대해서는 그 함유량을 엄격히 규제하고 있는 실정이다. 따라서 친환경 고화재의 발굴과 더불어 현장발생토에 대한 흙의 특성에 따른 배합 표준법을 활용한 유동화 처리토 공법의 활용이 요구된다.

Table 1.2.1 유동화 처리토와 유동성 채움재의 차이점

구분	유동화 처리토		유동성 채움재
시공시 상태	액상 -> 다짐이 불필요	협소부에서의 확실한 충전	다짐 필요 (협소부에서는 물다짐)
공용시기	3~4시간(급결성 고화재)	고화재의 양에 따라 강도조절	다짐->임시공용->본 공용
공용시 성질	일축압축강도 1~30kg/㎠	점토~연암의 고결도 재굴착 가능 액상화 방지 잔류침하 없음	CBR 3%~20% 입상재료 액상화 가능성이 있음 잔류침하 있음
	저투수성 $k=10^{-6}\sim10^{-7}$cm/sec	물이 통과하지 않음	고투수성 $k=10^{-2}\sim10^{-3}$cm/sec

나. 연구개발의 중요성

라이프라인은 도시의 지하에 복잡하게 매설되어 있는 전기, 수도, 가스 등의 공급시설, 하수, 전신전화 등으로 신설, 개보수, 유지보수 과정에서 다짐에 의한 뒤채움 작업이 빈번히 반복되어 행하여지고 있는데, 이 과정에서 발생할 수 있는 사회적, 기술적, 경제적 문제점은 다음과 같다.

(1) 일반적으로 모래로 뒤채움을 한 도로포장 하부에서 노후 관로의 누수나 다짐 불량으로 인한 포장의 침하발생 및 함몰사고 발생가능성이 높다.

(2) 지하철 등 건설공사에서는 굴착 잔토의 처리를 위한 사토장의 확보에 어려움이 많으며 건설 잔토를 폐기물로 처리하는 경우에는 처리비용이 추가로 발생한다.

(3) 지하 구조물의 채움재로 사용되고 있는 모래는 환경파괴의 문제와 더불어 재료의 구입비용이 부담된다. 그리고 관 하부와 좁은 공간의 뒤채움은 Fig. 1.2.3과 같이 관 하부의 다짐작업이 어려우며 다짐을 하더라도 토사의 특성상 추가 침하가 발생하기 때문에 재포장 후에 굴착했던 부위를 따라 균열이 발생하고 수분이 침투하여 포장의 수명과 매설 관로의 수명을 단축하는 원인이 되고 있다.

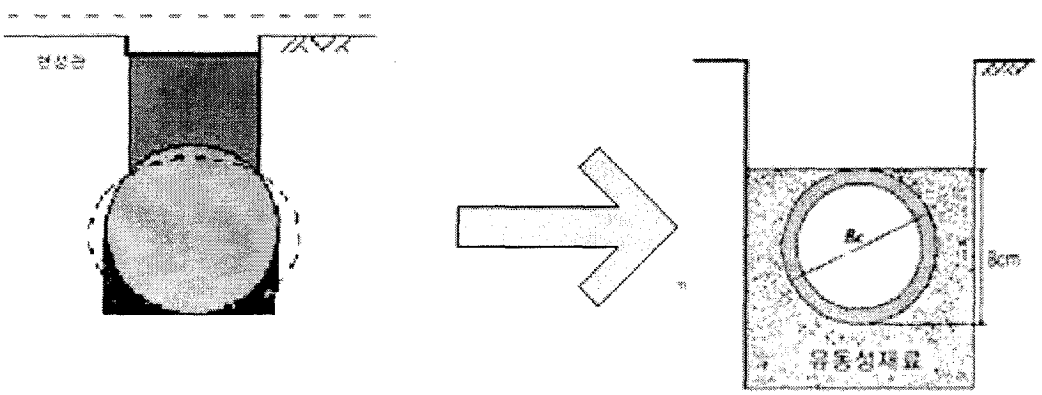


Fig. 1.2.3 기존 다짐 재료와 유동성 재료의 시공 후 차이점

(4) 최근 사용되는 유동성 뒤채움재는 시멘트와 석탄을 연료로 쓰고 있는 화력발전소들로부터 발생되는 플라이 애쉬(Fly ash)를 뒤채움토에 섞어서 시공하는 공법을 활용하고 있다. 그러나 이러한 기존 공법은 늦은 강도발현, 잔토 처리 비용 및 모래수급의 어려움, 높은 pH 등 다양한 문제가 발생한다.

(5) 기존의 혼화제와 모래의 배합비는 현장 조건에 대한 지침이 없기 때문에 필요 강도의 발현이 나타나지 않은 경우가 많고 타설 이후의 지반 침하, 지진 발생 시 지반의 액상화 등의 문제가 발생한다.

이러한 문제점 이외에도 기존 재료의 양생기간, 기존 시방서의 적용, 경제성, 설계법 변경, 시공장비 개발, 건설 잔토처리 시스템 설치와 같은 기술적, 경제적, 환경오염 등의 문제로 인해 실용화에 걸림돌이 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위해 친환경 고화재와 건설잔토를 활용하여 기존 공법이 갖는 경제적, 환경적, 기술적인 문제점을 해결할 수 있는 공법을 개발하고자 하였다.

2. 유동화 처리토를 이용한 무다짐 공법

본 연구에서 제안하는 친환경 고화재를 사용한 무다짐의 유동화 처리토 공법 실용화 방안은 기존의 다짐공법과 유동성 채움재가 가지고 있는 문제점에 대한 최적의 해결 방안을 제안하는 것을 목적으로 하고 있다. 즉, 기존 다짐공법에서의 여러 가지 문제점들을 줄일 수 있는 새로운 공법인 유동화 처리토를 이용한 무다짐 공법을 개발하고 이를 국내 건설현장에 적용될 수 있도록 친환경 고화재 발굴 및 건설기준을 정립하여 품질 및 안정성 향상, 설계 및 시공 제반 기준을 확립할 수 있을 뿐 아니라 국내 건설 기술수준의 선진화 기반조성 및 생산성 향상이 가능하며, 선진국 기준에 준하는 배합설계를 마련할 수 있으므로 국제 시장에서도 경쟁력을 가질 수 있다.

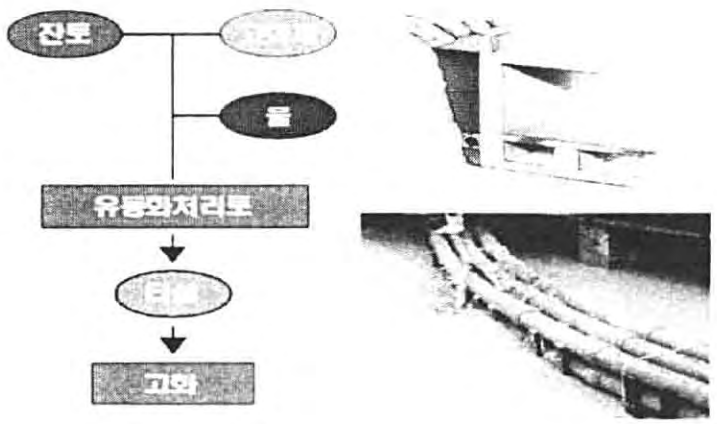


Fig. 1.2.4 유동화 처리토 공법 개요

Table 1.2.2 유동화 처리토의 특징

구분	장점	효과
발생토의 원료화	- 재활용 촉진 	- 잔토처리 비용절감 - 채움재 구입비용 절감 
시공성	- 현장생산 가능 - 타설장비 선택가능 - 고유동성 	- 균질한 품질관리 가능 - 다짐작업 불필요 - 공기단축 - 버켓, 슈트, 펌프 등으로 타설 가능  
강도조절	- 액상화 방지 - 지하수 유출입 불가 - 잔류침하 방지 - 급결성 고화 - 관로주변 강성증가 	- 지반개량 불필요 - 노면침하, 함몰방지, 침하감소 - 조기 교통개방 - 강도 및 내구성 향상 - 관로에 토압경감=관두께 감소  

본 제안은 실제 현장에서 발생하는 문제점을 해결하기 위해 산-학-연의 공동연구로 수행되며 대상 토질에 따른 유동화 처리토의 설계, 배합기준 및 시방기준을 정립하고 품질시험법을 표준화하여 시험시공을 통한 시공성 및 경제성 분석 및 평가

를 통해 시공환경이 다른 각 현장에 적합한 시공법을 적용할 수 있는 기술적 기반을 확보하고자 한다.

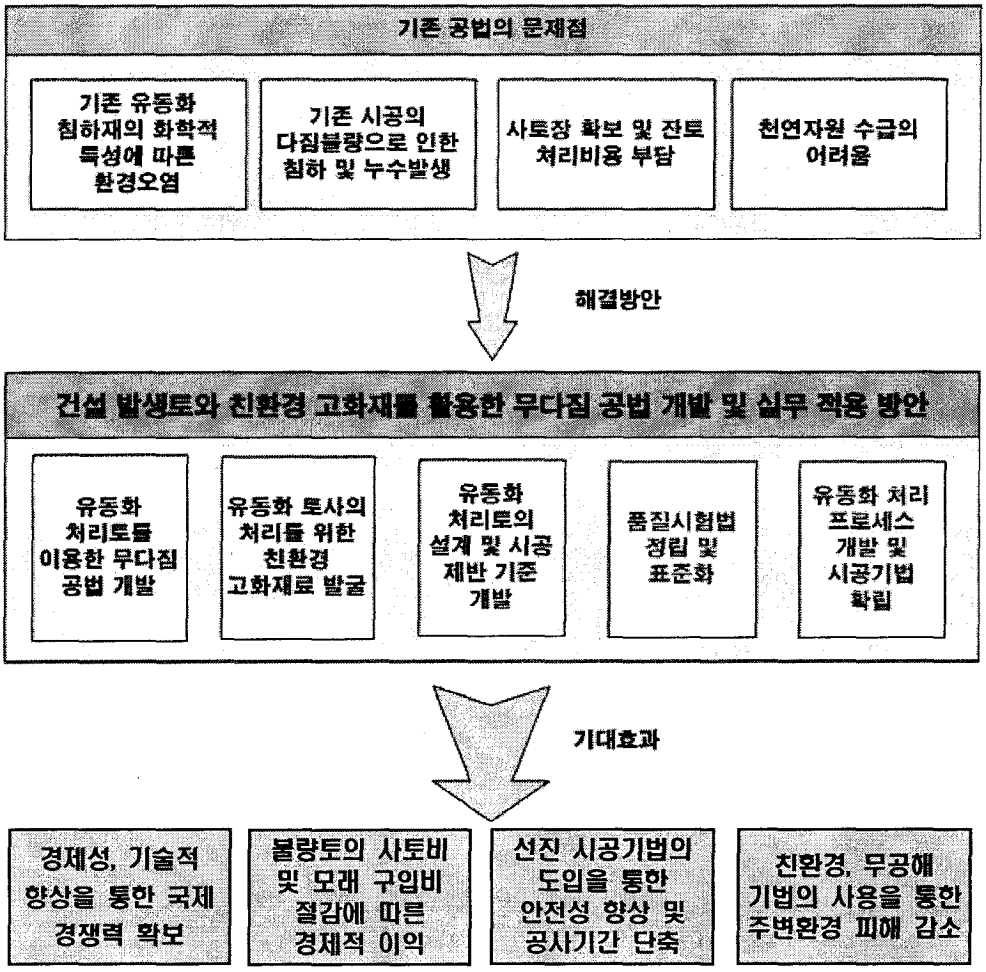


Fig. 1.2.5 유동화 처리토 공법 문제해결 방안

유동화 처리토 공법은 Fig. 1.2.6에 제시한 것과 같이, 건물의 하부 등의 공동 충전, 지중 매설관 주변의 채움, 지하철 노반 아래의 충전, 도로 하부의 공동 충진, 공동구 주변의 채움, 옹벽배면의 뒷채움, 토류벽 채움 등 광범위한 분야에 활용이 가능하다.

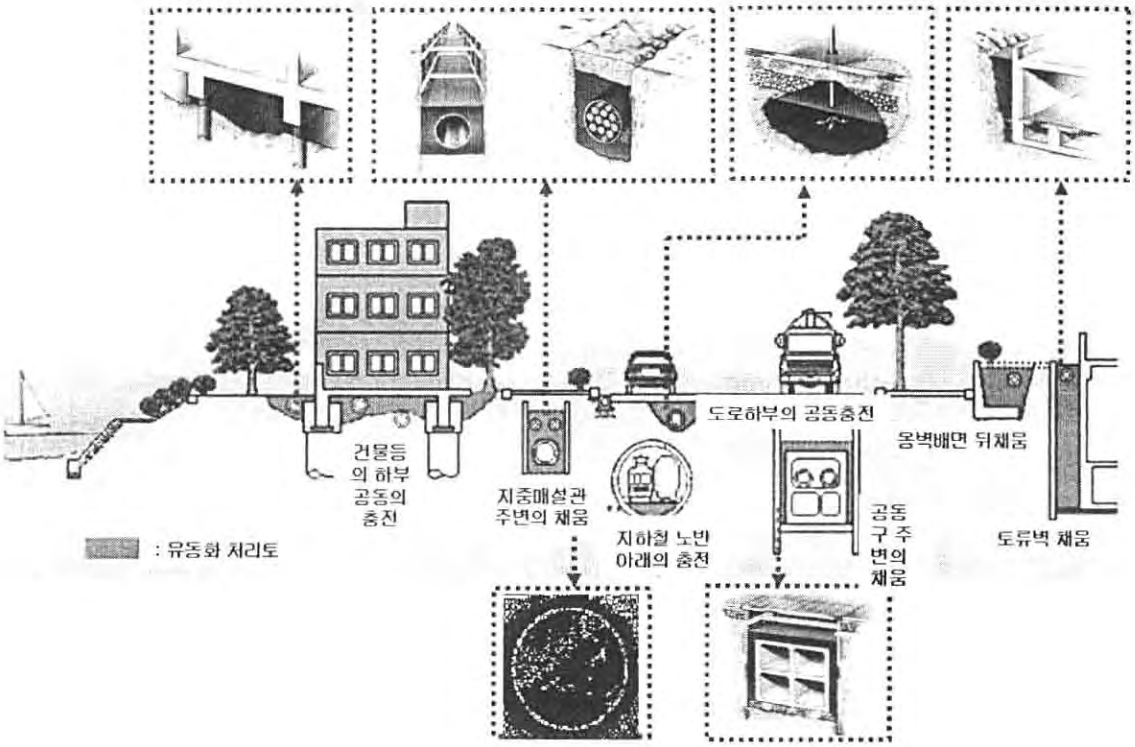


Fig. 1.2.6 유동화 처리토의 활용 분야

Table 1.2.3에 본 연구를 기초로 하여 적용 가능한 연구의 범위를 각각의 건설 분야별로 제시하였다.

Table 1.2.3 본 연구를 기초로 한 적용 가능 연구 범위

분야	연구
터널분야	개착식 터널의 뒤채움공법에 관한 연구
	고강도 유동성 고화처리토를 이용한 터널인버트 시공법에 관한 연구
	쉴드터널공법에 유동성 고화처리 경량 혼합토의 적용에 관한 연구
하천분야	유동성 고화처리토를 이용한 하천제방 심벽축조공법
연약지반	유동성 고화처리 준설토를 이용한 천층 연약지반 개량공법에 관한 연구
건축분야	유동성 고화처리토를 이용한 건축구조물의 매트기초에 관한 연구
	유동성 고화처리 황토를 이용한 벽돌, 블럭제작 공법에 관한 연구
도로분야	유동성 고화처리토를 이용한 도로확폭 구간의 직립벽 성토공법에 관한 연구
	유동성 고화처리토를 이용한 도로포장공법에 관한 연구
	유동성 고화처리토를 이용한 사면보호에 관한 연구
	유동성 고화처리 경량혼합토를 이용한 대단면 성토공법에 관한 연구
환경분야	유동성 고화처리토를 이용한 침출수 방지공법에관한 연구
	건설 오니를 활용한 유동성 고화처리공법에 관한 연구
	유동성 고화처리토를 이용한 폐기물 고화처리공법에 관한 연구

가. 유동화 처리토를 이용한 무다짐 공법의 장점

(1) 기술적 측면

유동성 처리토의 대표적인 특징은 자기수평능력, 자기다짐, 유동성, 인위적인 강도 조절을 들 수 있으며, 이에 따라 추가적인 다짐작업이 필요 없으므로 소음 및 진동이 적어 주변 환경에 끼치는 영향이 적다는 특징을 가지고 있다. 또한 급결성 고화재를 사용한 유동성 처리토의 경우 타설 후 1시간 후에는 보행이, 4시간 후에는 후속작업이 가능하고 몇 개월 후에도 재굴착이 가능하므로 그 사용성이 매우 크다. 특히 국내의 지하매설관의 시공은 주로 모래를 이용하여 시공하고 있는데, 지하매설관의 경우 그 형상이 주로 원형이기 때문에 관의 하단부가 채워지지 않아 부실시공의 문제가 주로 발생한다. 현재에는 이러한 문제점을 개선하기 위한 방책으로 물다짐 공법을 이용하고 있으나, 다짐을 하는 동안 관 주변의 변형 및 파손의 우려가 있어 2차적인 문제점을 유발할 수 있다. 하지만 유동성 처리토를 이용할 경우, 자기다짐성과 높은 유동성으로 인해 기존 뒤채움재의 문제점을 충분히 해결할 수 있다.



< 타설 1시간 후 >



< 3개월 후 재굴착 >

Fig. 1.2.7 유동화 처리토 특징(일본의 연구사례)

또한 시공장소에 따라서 슈트, 컨베이어, 핌프, 버켓 등으로 시공이 가능하며 현장에서 쉽게 생산할 수 있어 시공속도 향상 및 시공 절차의 단순화가 가능하다. 특히 토압 경감에 따른 관 두께를 줄일 수 있으며 강관을 연성관으로 교체하여 사용 가능하다.

(2) 경제 · 산업적 측면

본 연구에서 제안하는 공법의 활용은 다음의 경제적, 산업적 측면에서 중요하다. 첫째, 모래, 자갈 등 천연자원에 의존적인 골재를 사용하지 않고 공사 현장의 잔토를 활용함으로써 토사 구입비용의 절감 효과가 있다. 기존 유동성 뒤채움재에 사용되는 골재는 대부분이 모래인데, 현재 국내의 모래는 천연골재 부족, 하천골재 채취 및 석산 개발의 제한 등 환경보존 조치 등이 잇따름에 따라 모래 물량의 확보에 어려움이 따를 것이 예상되며 모래의 가격 상승이 예상되고 있다. 특히 현재 우리나라에서도 모래채취를 제한하고 있으며, 바다모래, 육지모래 또한 인근주민들의 반발로 인해 국부적 장소에서만 수급할 수 있는 상태이다. 이러한 모래 수급의 어려움을 해결하기 위한 가장 좋은 방법은 현장에서 발생된 잔토를 다시 활용하는 것이라 할 수 있으며 이는 본 연구에서 제안하는 현장발생토와 고화재의 최적화된 배합비를 활용하는 것으로 보다 경제적인 활용이 가능하다. 둘째, 다짐 작업이 없어 시공절차의 단순화가 가능하며 혼합재의 배합을 통해 강도 및 내구성 강화에 대한 변화가 자유롭다. 특히 급결성 고화재를 사용하게 되면 공기가 4시간 내외이므로 조기에 교통 개방이 가능하므로 시공기간 단축에 유리하다. 셋째, 현장에서 발생되는 굴착토의 재활용으로 인해 사토를 처리해야 하는 처리비용과 되메우기 위해 필요한 양질의 토사를 구입하기 위한 비용의 절감 효과를 가져올 수 있다.

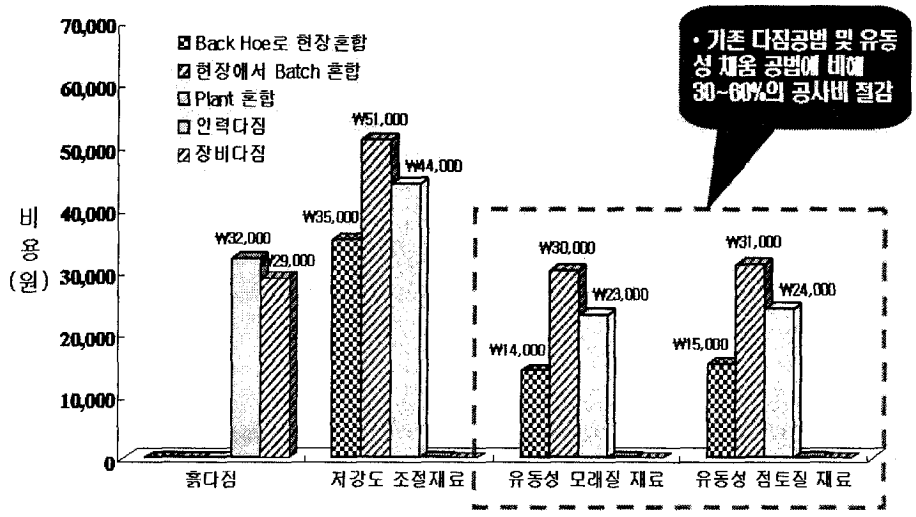


Fig. 1.2.8 각종 채움재의 시공비(원/m^3) 분석(대만의 사례 연구)

(3) 사회·문화적 측면

사회적인 측면에서 보면 지하철 공사, 건축물 시공 등이 활성화 되면서 이에 따른 건설 폐기물의 양이 꾸준히 증가하는 추세이다. 건설폐기물의 처리 방법 중 재활용의 비율은 해마다 증가하는 것으로 나타남에도 불구하고 수도권 매립지에 매립되는 건설폐기물양도 꾸준히 증가하고 있다는 것은 건설공사가 가장 활발하게 발생하는 수도권이라는 지역적인 특징을 고려한다 하더라도 환경 파괴 및 천연자원의 고갈로 인해 사회적, 문화적인 측면에서 다양한 문제가 발생할 가능성이 있다. 또한 고화재로 사용되는 플라이애쉬, 포틀랜드시멘트, 모래를 혼합하여 사용한 유동성 뒤채움재는 pH가 높아 환경 오염의 소지가 있다.

그러나 본 연구에서 제안된 유동화 처리토를 활용하게 되면 토사의 재활용을 통해 천연자원에 대한 의존성이 낮아지며 이에 따른 건설잔토의 재활용율이 증가되며, 환경 오염의 가능성이 낮아진다. 또한 공법의 특성 상 타설 이후의 지반침하, 붕괴 사고의 발생 가능성이 감소하게 되어 안전성이 확보되고, 친환경, 무다짐 공법을 사용하므로 소음, 분진, 공해의 발생이 적어 주변 환경의 침해 및 민원 발생이 줄어든다.

제 2 장 국내·외 기술개발 동향

유동화 뒷채움재가 처음 사용된 것은 1960년대이지만(Howard, 1996), 1970년도 초에 비로써 그 사용량이 증가하였다. 유동화 처리공법은 지중 매설관(가스관, 통신관, 상하수도관, 지중 송변전관 등), 주차장, 지하철, 지하상가 등의 지하 구조물 뒤채움재, 교각기초, 토류벽 등의 뒤채움재, 지하철, 철도 등 하부의 노반재, 강관 말뚝의 뒤채움재 등으로 이용되고 있다. 일반적으로 사용되고 있는 유동성 채움재는 현장발생토+시멘트+플라이애쉬+물, 또는 석분, 폐주물사 또는 모래+시멘트+플라이애쉬+물로 구성되며, 일본에서는 건설 발생토를, 북미에서는 모래를 주재료로 사용하고 있다.

현재까지 진행된 바 있는 유동화처리공법에 관한 국내외 연구동향과 특허동향을 정리하면 다음과 같다.

제 1 절 국내 연구 동향

국내의 경우 대부분의 되메우기 및 뒤채움 작업은 양질의 토사를 이용한 다짐에 의한 토사 뒤채움방법이 사용되고 있으며, 최근에는 석탄을 연료로 쓰고 있는 화력발전소들로부터 발생되는 플라이애쉬(Fly Ash)와 주물공장의 부산물인 폐주물사의 재활용율을 높이기 위하여 90년 말부터 지하 매설관이나 옹벽의 뒤채움에 유동화처리공법의 적용에 관한 연구가 진행되어 프로그램에 의한 수치해석과 현장 시험시공에 의한 계측결과 값을 상호 비교하여 사용된 재료에 따른 기존 이론의 타당성을 검증하고 있다. 그러나 이러한 유동성 뒤채움재는 늦은 강도발현, 잔토 처리비용 및 모래수급의 어려움, 지반 내 발생하는 높은 pH 등의 문제를 야기하며, 보통 포틀랜드 시멘트(1종)의 사용에 따른 양생기간, 기존 시방서의 적용, 경제성 검토, 설계법 변경, 시공 장비 개발, 건설 잔토처리 시스템 설치 등의 문제로 실용화에 걸림돌이 되고 있다. 그러나 이러한 문제점이 발생함에도 특별한 대안 없이 기존 재료의 혼합특성에 대한 연구가 진행되고 있는 실정이다. 국내의 유동화 처리공법에 관한 연구동향을 제시하면 다음과 같다.

변근주(1994), 이승한 등(1998)에 의해 초유동에 초점을 맞춘 고성능 콘크리트에

대한 연구가 진행된 바 있으며, 이용수 등(2000)은 플라이애쉬와 폐주물사를 사용하여 저강도 콘크리트, 각종 분체와 증점제를 이용한 고유동 콘크리트와 폐석회를 재활용한 저유동 고강도 충전재에 대한 연구를 진행하였다. 원종필(1998), 박재헌(2003)은 플라이애쉬와 폐주물사의 재활용률을 높이고, 적은 양의 시멘트 및 혼화제를 혼합하여 지중매설물, 옹벽 등의 뒤채움 재료로 사용하기 위한 연구를 진행하였으나 현장발생토를 사용한 연구는 극히 미비하여 재활용율도 낮았으며, 초기 강도가 작아 공기가 길다는 단점이 있음을 제시하였다.

현재까지 연구를 살펴볼 때, 현장발생토를 사용한 국내의 연구는 극히 미비하다고 볼 수 있으며, 현장발생토에 대한 사용사례가 있다 하더라도 발생토사의 재활용율이 매우 낮았다. 또한 지금까지의 현장발생토를 재사용한 사례에서는 처리토의 초기 강도가 작아 공기가 길다는 단점으로 인해 그 사용성이 제한되어 왔다. 이러한 단점을 극복하고자 여러 가지 혼화제를 이용한 연구가 진행되고 있으며, 관련 연구 동향을 제시하면 다음과 같다.

남궁기(2001)는 셀룰로스 등의 증점제를 이용하여 유동성을 증가시킴으로서 충전성을 향상시킬 수 있음을 제시하였고, 천병식(2001), 김병일(2002)은 고화재를 이용한 저강도 콘크리트(soil cement)에 대한 연구를 진행하여, 유동성이 없어 다짐이 필요하지만 저강도 발현으로 재굴착이 가능함을 제시한 바 있다. 그러나 현장에서 발생하는 굴착 잔토를 사용하여 초기(4시간)강도가 DB24 차량하중을 지지 할 수 있는 강도를 갖는 유동화 되메움재는 개발되어 적용된 사례가 없어 시공 시간의 획기적인 단축을 위하여 굴착 잔토를 재활용한 급결용 유동화 되메움재의 필요성이 더욱 커지고 있음을 제시하였다.

한국전력(주) 전력연구소(2006)에서는 시공의 신속성, 고화재의 급결성, 유지 및 보수를 위한 재굴착성, 그리고 열저항성을 고려한 급결성 유동화 뒷채움재에 대한 연구가 수행되었는데, 실험실에서 인위적으로 사질토에 자갈과 점토의 혼합비를 조성하여 만든 대상토에 대한 급결성 유동화 처리토의 실내시험 결과를 바탕으로 지중전력관 매설공사의 뒤채움재로 적용 가능성을 제시한 바가 있다.

천선호(2006)는 인위적으로 실내에서 조성한 시료를 이용하여, 물/고화재 비 및 고화재 종류에 따른 실내 실험을 수행하였다. 그 결과 최적의 각 시료 종류 별 기준강도에 부합되는 최적의 배합비를 산정한 바 있다. 그러나 이러한 결과는 실제 현장 시료가 아닌 인위적으로 조성된 시료를 사용하였기 때문에, 실제 공법에 적용하

기에는 한계가 있다.

따라서 실제 현장발생토를 이용한 급결성 유동화 처리공법의 국내 현장지반 여건에 적합한 배합비 설계 기준을 제시하고 거동 특성을 파악할 수 있는 연구가 시급한 실정이다.

제 2 절 국외 연구 동향

급결성 유동화 채움재는 흙, 플라이애쉬, 또는 슬래그, 시멘트, 그리고 물의 혼합물에 급결성 혼화제를 첨가하여 물리적 역학적 특성을 만족하며 시공 기간을 최대로 줄여주기 위한 방법이다. 이러한 급결성 유동화 처리 공법의 연구는 주로 미국, 일본, 대만 등지에서 이루어지고 있으며, 이들은 사회적 요구에 따라 급결성 유동화 채움재의 재료 개발과 현장 적용에 관한 연구를 지속적으로 수행하고 있다. 관련 국외 동향을 정리해보면, 다음과 같다.

1. 일본

건설성 주관 하에 "건설 부산물의 발생 억제· 재생 이용기술의 개발"이라는 프로젝트를 1992년도부터 5년간에 걸쳐 실시하였으며, 터널공사에서 발생하는 흙, 콘크리트 및 건축 폐자재 등을 포함하여 연구를 수행하였다. 이로부터 5년 뒤인 1997년 4월에는 민간 기업의 인원들로 구성된 "유동화 처리공법 연구기구"를 설립하여 현재 33개 업체가 연구 및 시공활동을 하고 있다. 연구기구의 자료에 따르면 건설 잔토에 고화재를 혼합한 후 유동화 처리하여 1993년부터 2003년까지 여러 분야에 272만m^3이 시공되었는데 개착식 지하철현장의 뒤채움에 52%가 적용되는 등 일반적으로 사용되는 공법이다. 또한, 유동화 처리 공법을 실용화 하여 건설발생토 또는 슬러지를 재활용하여 고화재와 물의 혼합물인 유동화 채움재를 Ready Mixed Concrete로 생산하고 있다. 일본은 사회적 요구에 의하여 시공 시간을 최소하기 위하여 고화재, 굴착잔토, 물, 그리고 혼화제로 구성된 급결성 유동화 채움재를 현장에 적용하고 있다.

일본에서 수행되고 있는 유동성 뒤채움재에 관한 추가적인 관련 연구동향을 제시하면 다음과 같다.

內田 등(1993)은 시멘트혼합을 통한 유동성과 강도변화에 대한 연구를 진행하였고, 松田哲夫 등(1993)은 시멘트혼합토로 뒤채움한 옹벽에 미치는 토압에 대한 연구를 통하여 토압의 감소효과를 제시하였다. 또한 鬼塚克忠 등(1996)은 생석회와 포졸란 재료 첨가에 의한 강도발현 특성 연구에서 건설발생토와 포졸란 재료의 화학구성 성분(SiO_2+Al_2O_3)이 커지면 포졸란 반응에 의하여 처리토의 강도가 증가함을 밝혔다.

Kamon과 Katsumi(1996)는 생석회와 시멘트로 안정화된 흙에 대하여 황산과 질산을 혼합한 인공산성비의 pH에 따른 영향을 관찰하여, pH 3 이하 조건에서 안정화된 흙의 공학적 특성에 악영향을 미치는 것을 밝혔고, 岩淵 常太郎 등(2003)은 이탄(泥土)과 시멘트 고화재를 이용한 유동화 처리공법을 수행하여, 목표 강도, 습윤밀도, 요구되는 플로우(Flow)치와 블리딩(Bleeding)율을 만족하였음을 제시하였다.

秋重 博之 등(2004)은 유동화 처리공법을 이용한 초고층 빌딩의 기초지반의 개량에 관한 연구를 진행하였다. 그 결과 설계시에 목표로 한 강도 및 강성을 발현시킬 수 있음이 확인되었다.

2003년 4월 1일 개정된 <동경도 토목 재료 시방서>에 유동화 처리토에 대한 배합설계 및 품질관리 시험의 기준을 제시하였다. <동경도 토목 재료 시방서>에는 유동화 처리토를 현장토와 물을 혼화한 오수에 시멘트 또는 시멘트계 고화재를 첨가한 것으로 주로 도로의 점용 굴착 공사에 수반하는 되매움에 사용하는 것으로 정의하고 있고 유동화 처리토에 대한 품질 기준을 제시하였다(Table 2.2.1).

Table 2.2.1 <동경도 토목 재료 시방서>의 유동화 처리토 품질 기준

	기준값	시험빈도	
		배합설계	시공관리
시료의 구분	화산재질 점성토, 점성토, 모래질토	3회 이상	
최대입경	관 둘레 - 13mm 이하 그 외 - 40mm 이하		
일축 압축 실험	교통개방시 - 13N/cm^2 이상 28일 후 - 55N/cm^2 이상	동일 토질에 대해 배합 편성 5조 이상 각 시기 1개 이상/조	토목재료 시방서의 일반용 Ready-Mixed 콘크리트의 기준에 따라 관리함
플로우 값	180mm ~ 300mm	1회/조	3회 이상
블리딩율	1% 미만	1회/조	토목재료 시방서의 일반용 Ready-Mixed 콘크리트의 기준에 따라 관리함
밀도	1.5t/m^3 이상 단, 매설관 경우 : 1.35t/m^3 이상	1회/조	1일 1회 이상
수질구분	본 제물에 사용하는 물은 공업용 수도의 수질 기준치를 만족해야 함 (염소 이온의 함유량에 대해서는 200mg/l 이하 등)		

일본의 경우 여러 기관에서 유동화 처리토에 대한 연구가 진행 중이고, 연구 기관에 따라 유동화 처리토 품질 기준이 약간의 차이를 보인다. 플로우 값, 일축압축강도, 블리딩율, 대상토(현장토)의 밀도 등에 따라 유동화 처리토의 품질 기준을 정의하는데, 동경도 건설국과 국토 교통성을 비교해보면 Table 2.2.2와 같다.

Table 2.2.2 동경도 건설국과 국토 교통성의 유동화 처리토 품질 기준 비교

	동경도 건설국 기준	국토 교통성 기준
플로우 값	180 ~ 300mm	160mm 이상
일축압축강도	재령 28일 강도 55N/cm^2 이상	재령 7일 강도 20N/cm^2 이상
블리딩율	1.0% 미만	1.0% 미만
처리토의 밀도	1.5g/cm^3 이상	1.5g/cm^3 이상

일본에서 유동화 처리토의 고화재로 사용되는 고로시멘트는 다른 시멘트 종류에 비해 6가크롬의 용출량이 작은 친환경적인 재료로서, 일반적인 고화재의 양은 50~60kg/cm^3이다. 유동화 처리토의 현장 적용은 시공 중 현장에서 발생한 발생토를 플랜트로 운반하여 품질기준에 적합한 유동화 처리토를 제조한 후 다시 현장으로 운반하는 시스템으로 이루어진다. 제조방법은 쉴드 터널에서 나온 슬러리 상태의 흙으로 제조하는 오수 방식과 굴착 후 가져온 원상태의 흙으로 제조하는 발생토 방식으로 나뉜다. Table 2.2.3은 현재 동경에 위치한 유동화 처리토의 플랜트 현황을 나타낸 것이고, Fig. 2.2.1은 유동화 처리토 플랜트의 전경을 나타냈다.

Table 2.2.3 동경에 위치한 유동화 처리토 플랜트 개요

플랜트명	주소	제조방법	제조능력
메트로 개발 주식회사	동경도 코토구 신기바	오수 방식	80 m^3/h
주식회사 레이몬드	치바현 이치카와시 코우야시마치	발생토 방식	80 m^3/h
아르마레 엔지니어링(주)	사이타마현 야시오시	발생토 방식	80 m^3/h
주식회사 에코테크노	치바현 이치카와시 다가야	오수 방식	100 m^3/h
삼중건재 주식회사	사이타마현 야시오시 츠루가소네 나카도리	발생토 방식	70 m^3/h
주식회사 TIC	동경도 에도가와구 리카이쵸	발생토 방식	120 m^3/h

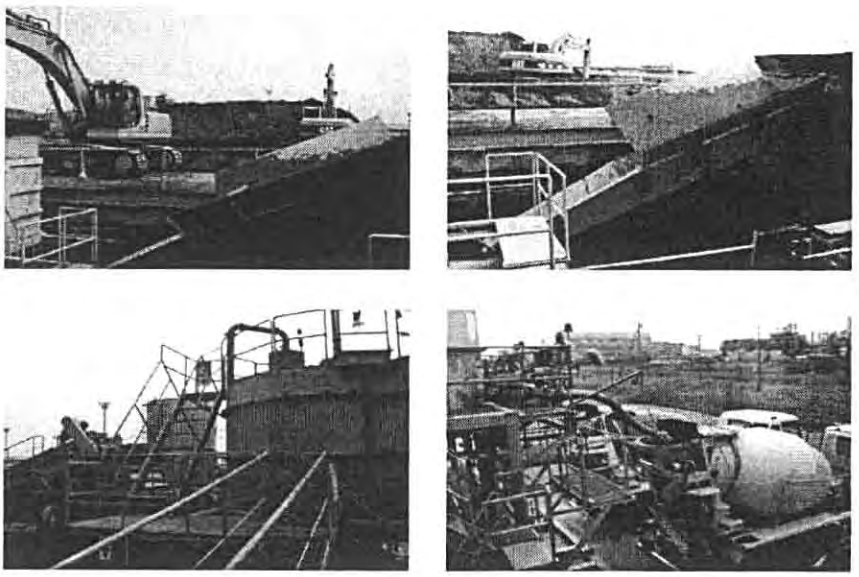
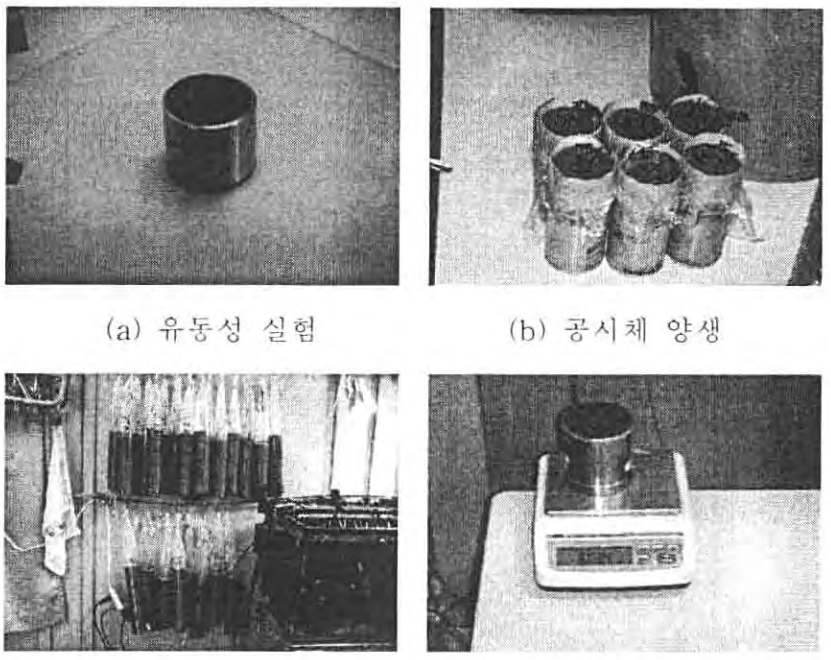


Fig. 2.2.1 유동화 처리토 플랜트 전경

현장 적용시 유동화 처리토의 유동성에 대한 품질 검사를 실시하는데, 플랜트의 제조 단계와 현장 운반 후 실시하여 유동성이 모두 품질 기준에 만족하는 경우에 시공을 한다. Fig. 2.2.2는 플랜트에서 제조된 유동화 처리토의 품질 검사 모습이다.



(a) 유동성 실험 (b) 공시체 양생

(c) 블리딩 실험 (d) 단위 중량 실험

Fig. 2.2.2 플랜트에서의 유동화 처리토의 품질 검사

2. 대만

타이페이시 정부유지보수 공정처의 2002년도 고성능 저강도 재료 연구보고서에 따르면, 지중 매설관, 옹벽, 도로 노반 등에 유동화 처리토를 일반형과 조강형으로 구분 적용하여, 품질시험 방법 규정, 적용분야별 시방기준을 제시하였으며, 기존 다짐방법과 유동화 처리공법에 따른 공사비를 비교 분석하여 유동화 처리토공법에 의한 경제성을 확인하는 등 실용화 단계에 있다(台北市政府養護工程處, 2002).

Cheng et al.(2006)은 CLSM 공법에 사용되는 많은 양의 골재와 모래, 시멘트로 인해 재굴착이 어려운 점을 들어, 현장발생토를 이용한 뒤채움 물질을 이용(Ready-Mixed Soil Material)한 실내 실험을 실시하였다. 그 결과, 기존의 유동화 채움재 보다 일축압축강도가 2~30배 크며, 재굴착이 가능함을 제시하였다.

3. 북미

북미에서는 주로 플라이애쉬의 재활용을 위한 유동성 뒤채움재에 관한 많은 연구가 수행되었는데, 최근에는 플라이애쉬와 시멘트 및 혼화제를 차별적으로 혼합하여 시공 목적에 적합한 유동성 및 강도발현을 나타내는 유동화 저강도 콘크리트에 대한 연구가 주로 진행되고 있다(Jakardhauam et. al., 1992;ACI 229R-94, 1994 ; Tarun et. al., 2001 ; FHWA-IF-03-019, 2003). CLSM은 1991년 버지니아주에서 유동성 뒤채움재에 관한 시방서가 공사에 적용된 이후, 현재는 레미콘 생산업체의 일반 상품 중의 하나로 널리 사용되고 있다. 주로 모래 또는 폐주물사에 플라이애쉬와 시멘트를 기본으로 사용하고, 유동성 확보를 위한 고성능 감수제, 급결을 위한 조강제, 촉진제 등의 혼화제를 첨가하고 있다. 북미에서 수행되고 있는 유동성 뒤채움재에 관한 관련 연구동향을 제시하면 다음과 같다.

Hamernik(1991) 등은 플라이애쉬 종류에 따른 플라이애쉬 혼입 콘크리트의 강도 특성 및 물리적 화학적 특성을 연구하였으며, 특히 강도에 대해서는 플라이애쉬의 종류에 따라 크게 차이가 남을 밝혔다.

Peindl et al.(1992-a,b)은 플라이 애쉬와 콘크리트 혼합체를 뒤채움재로 사용한 대규모 현장시험을 실시하여, 정적, 동적 하중에 의해 성토 중 매설된 파이프의 변위가 일반 토사보다 우수함을 제시하였다.

Janardhanam(1992)은 유동성 플라이 애쉬를 뒷채움재로 사용하기 위한 배합비를 제시하였고, Javed(1994)는 폐주물사와 플라이 애쉬를 혼합한 재료를 성토재로 사용할 때 발생되는 다짐특성 및 강도, 밀도 등에 관한 연구를 진행하였다.

Xu(1994)는 재령에 따른 시멘트와 플라이 애쉬의 입자특성의 변화를 연구하였으며, 그 양상이 거의 동일함을 제시하였고, Bhat(1996) 등은 플라이애쉬와 폐주물사를 혼합한 재료를 유동성 성토재로 사용하기 위한 배합비와 그 강도특성에 관한 연구를 진행하였다.

Naik et al.(1997)은 플라이 애쉬가 대부분을 차지하는 유동성 슬러리와 플라이 애쉬의 85% 정도를 폐주물사로 대체한 강도시험을 실시하여 비교하였다. 90년 말에는 휴스턴대학교에서 수행한 흙에 포틀랜드시멘트, 물, 혼화제를 혼합한 흙-시멘트 슬러리의 특성연구와 미국 공병단에서 보고한 흙에 시멘트, 플라이애쉬를 혼합한 유동화 처리토에 관한 연구를 진행한 바 있다.

Pons et al.(1998)은 일반적인 유동화 채움재와 급결성 유동화 채움재의 역학적 특성을 평가하기 위하여 실내 및 현장 시험을 수행하였다. 그 결과 굴착가능한 유동화 채움재와 급결성 유동화 채움재의 재령 28일 최소 일축압축강도를 1.73kg/cm^2 재령 60일의 최대 일축압축강도로 7kg/cm^{2}을 제안하였다.

FDOT(2000)은 재굴착이 가능한 28일 강도로 100psi를 제안하고 시공시간을 단축하기 위해 급결화된 강도와 일반적인 강도를 시험을 통해 비교하였는데, 급결제 첨가 유무에 따른 비교결과 혼합물의 강도가 증가된 반면, 여러 가지 이유(물-시멘트비, 시멘트량, 고화재 량)에 기인하여 강도의 감소가 발생될 수 있음을 밝혀냈다.

Crouch et al.(2003)는 재굴착이 불가능한 고유동의 급결성 유동화 채움재(ZOOM ⓡ)를 개발하고, 6시간 이전에 응결 및 경화됨을 증명했다. 또한 모래의 입자와 각짐이 혼합물의 유동성, 공기함량, 블리딩 특성에 매우 큰 영향을 미치는 인자임을 파악하였다.

국외의 연구동향을 분석한 결과 현장 잔토를 재활용한 저강도 콘크리트에 대한 연구 대상 시료는 Ottawa sand, ASTM C 33, Foundry sand, Micro fine sand, 그리고 Blasting sands 등 서로 다른 입자크기와 입도분포를 갖는 현장토가 사용되며(Green. B. H.1999;Cho, 2003), 이는 대부분 통일 분류법상 SP 또는 SW 등으로 분류되어 국내 표층의 70~80%를 차지하고 있는 화강 풍화토(SM)와 달라 외국의 기준을 국내에 적용하기에는 한계가 있다.

제 3 절 특허 동향

Table 2.3.1 국내의 관련 특허

출원인	발명자	발명의 명칭
비비엠코리아(주) 이기홍	유성근, 박종면,한재형	무다짐 교량 뒤채움 공법을 이용한 접속슬래브 침하 최소화 공법
유성근,김영호	유성근, 김영호, 정재호	일체식교대 교량에 있어서 배면 수동토압의 최소화와 접속 슬래브의 침하방지를 위한 교대 뒤채움부 구조 및 그 시공방법
지오시스(주)	김남호, 정혁규	포장도로 굴착복구방법
원하종합건설주식회사	박태순	비다짐 무침하 채움재, 그의 제조방법 및 그를 이용한 시공방법

Table 2.3.2 일본 관련 특허

특허번호	발명의 명칭
特許第２７２８８４６号	유동화처리공법
特許第２７５６１１２号	유동화 처리토의 제조방법 및 장치
特願平７－１０２５１７号	지하공동의 충전공법
特願平７－３０８４０１号	매설구의 뒤채움 공법
特許第３５１６０３４号	지하공간의 埋戻공법
特願平７－３０８４０３号	조정오수처리장치 및 처리방법
特願平７－３２７０４７号	埋戻し用土砂の可搬式流動化處理裝置
特願平８－２３５９６４号	교반혼합장치
特願平９－２００１７７号	토공사용의동화처리토의 제조방법 및 장치
特願平９－２００１７８号	유동화 처리토의 제조방법
特願平９－２４６１２７号	泥土의 시멘트 함유량의 추정 방법
特願平９－３５２４５１号	교반 장치 및 교반 방법

국내 특허 출원 실태를 조사해본 결과, 배수가 용이한 입상재료를 이용하여 무다짐으로 시공하는 법, 그리고 플라이애쉬와 석산에서 발생하는 폐석분과 폐미분을 활용한 무다짐 시공법이 있으며, CSA계 조강성 조성물을 이용한 포장도로 굴착복구에 유동화 처리토 공법에 대한 특허가 있으나 실용화 되지 않고 있다. 현재 국내 특허에는 친환경 고화재의 적용, 현장발생토의 특성에 따른 배합기술 및 시공 기준에 대한 특허는 존재하지 않으므로 연구 수행에는 크게 지장이 없을 것으로 판단된다. 또한 일본의 특허를 조사해 본 결과 유동화 처리토의 배합 방법 및 시공 방법에 관한 특허가 주를 이루고 있다.

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 이론적 배경

1. 유동화 처리 기술

가. 유동화 채움재(Controlled Low Strength Materials: CLSM)

ACI 229 Commitee(1982)에 의해 그 명칭이 유래된 유동화 채움재(Controlled Low Strength Materials: CLSM)의 사용상의 정의는 물, 시멘트, 플라이 애쉬, 골재로 구성되며, 28일 강도 84kg/cm^2 이하(ACI Commitee 116R)의 압축강도를 가지는 저강도 물질을 말한다. 그러나 향후 재굴착이 예상되는 경우에는 압축강도가 10.5kg/cm^2 이하가 되어야 한다(Amon, 1990). 이러한 유동성 채움재는 지중구조물 등의 뒷채움재를 시공하는 과정에서 발생하는 과 다짐 또는 빈다짐으로 인한 구조물의 손상, 침하문제, 열전도율 감소 등의 문제를 해결할 수 있다. 재료의 초기 유동성은 다짐으로 인한 기존의 뒤채움재의 문제점을 해결할 수 있는 중요한 요소가 되며, 일반적인 특성을 그대로 가지면서 고화되는 과정에서 지반의 강도를 인위적으로 조정할 수 있다. 유동성 채움재는 죽과 비슷한 반죽질기로 자기 수평(self-leveling)이 되는데, 이는 인위적인 진동이나 충격 없이 최소한의 노력으로 타설될 수 있다. 이 재료는 다른 이름으로 '유동성 모르타르(Flowable mortar)', '빈배합 뒷채움재(Lean-mix backfill)', '강도조절 채움재(Controlled low strength fill)', '다짐조절 채움재(Controlled density fill, CDF)', '유동성 플라이애시(Flowable fly ash)'로 불린다.

그러나 시멘트와 플라이애시, 모래를 혼합하여 이용되는 저강도 강도조절제의 경우, 가격이 저렴한 반면, 강도 발현이 늦으며 pH가 높고 잔토처리 비용 및 모래 수급이 어렵다. 또한 응결과 경화시간이 늦게 발현되고, 이러한 문제점은 시공의 지연과 복잡성을 유발한다.

나. 급결성 유동화 채움재(Rapid-Setting Liquefied Material : RSLM)

일반적으로 시멘트에 물을 가하면 주위의 수경화합물과 물이 화학반응을 일으켜서, 시간 경과에 따라 시멘트 페이스트가 유동성과 점성을 잃고 점차적으로 경화된다. 이러한 상태를 시멘트의 응결(Setting)이라 하며, 한국 산업규격에서는 응결의 시작과 응결의 끝을 각각 1시간에서 10시간 이내로 규정하고 있다. 응결의 종료 후, 수화작용이 계속되어 시멘트 입자 사이가 조밀하게 채워져 굳어짐으로써 강도가 커지게 되는데 이러한 상태를 경화(Hardening)라 한다(신방웅 등, 2002). 그러나 유동성 채움재의 주된 구성 재료가 흙으로 이루어져 있기 때문에 응결과 경화시간은 구성된 흙의 성분에 영향을 받게 된다. 응결시간은 액체 상태에서 소성상태로 변화되는 시점으로 정의되는데, 이 변화는 1시간에서 24시간까지 소요될 수 있다(ACI, 1999). 콘크리트분야에서는 시멘트 페이스트가 응결되는 임의의 단계를 설명하기 위하여 초결과 종결이 사용된다. 시멘트 페이스트의 초결은 더 이상 액체상태가 아니며 충분히 굳은 때의 시간으로 정의되며, 종결시간은 시멘트 페이스트가 단단함에서 매우 작은 강도를 갖는 고체가 되는 시점을 말한다(Young et al., 1998). 일반적으로 포틀랜드 시멘트의 초결은 2~4시간이고 종결은 5~8시간이 소요된다(Troxell et al., 1968). 유동화 채움재의 경화는 몇 시간에서 2~3주가 소요될 수도 있으며(Pons et al., 1998), 이러한 사용 시간의 지연은 유동화 채움재의 사용성을 감소시킨다.

급결성 혼화제는 응결시간을 감소시키고 조기강도를 증가시키기 위하여 콘크리트에 첨가되는 재료이다. 이러한 급결성 혼화제의 종류에는 Alkali hydroxides, Silicate, Fluorosilicates, Organic compounds, Calcium formate, Calcium nitrate, Calcium nitrite, Calcium thiosulfate, Aluminum chloride, Potassium carbonate, Sodium chloride, Calcium chloride 등이 있다. 시멘트의 구성화합물은 물과 접촉하면 각각 특유한 화학반응을 일으켜 다른 화합물이 되는데 이와 같은 작용을 수화작용이라 한다. 수화작용은 응결과 경화를 거쳐 콘크리트가 되도록 하는 작용을 말한다. 수화작용은 알루민산 삼석회(C_3A)가 가장 빠르고 규산 삼석회(C_3S), 규산 이석회(C_2S) 순으로 느려진다(신방웅 등, 2002). 일부 연구자들은 이것이 알칼리도가 미소하게 변화하기 때문이라고 주장하지만(Neville, 1972), 대부분의 연구자들은 염화칼슘이 tricalcium silicate($3CaO \cdot SiO_2$) 의 수화작용을 촉진시키는 것이라고 주장

한다. 촉진된 수화작용은 초기에 수화열의 증가와 C-S-H gel의 형성을 증진시킨다. 그러나 C_3S-$CaCl_2$-H_2O 시스템에서 발생되는 정확한 강도증가 메카니즘은 규명되어 있지 않다.

급결성 유동화 처리 기술은 기존의 기 다짐된 방법을 개선하기 위한 방법 중 하나로서, 기존의 유동화 처리공법(CLSM)에서 사용되는 흙, 플라이 애쉬 또는 슬래그, 시멘트, 물 혼합물에 급결성 혼화제를 첨가하여 물리적 특성을 증대시켜 시공시간을 효율적으로 감소시킬 수 있는 방법이다.

다. 급결성 유동화 처리공법

일반적인 유동화 처리공법에서는 모래와 유동화 채움재를 섞어서 사용하게 되는데, 이는 건설잔토를 재활용한 것에 비하여 물리적, 역학적 성질에 대한 예측이 가능하다는 이점이 있다. 그러나 모래를 채취하여 사용하는 것은 환경적인 측면에서 볼 때 모래 수급으로 인한 환경 파괴를 유발하며, 유실되는 모래의 양과 비례적으로 공사비가 급격히 증가되는 단점이 있다. 이에 일본, 대만 등에서는 현장발생토를 모래대신 재활용한 연구가 활발히 진행되고 있다.

따라서 국내에서도 건설잔토와 급결성 유동화 채움재를 혼합하여 사용하고자 하는 연구의 필요성이 대두되고 있다. 이러한 건설잔토를 이용한 유동화 채움 공법을 국내에서 사용하기 위해서는 실제 지반에서 발생되는 토질별 특성을 파악할 필요가 있다.

라. 급결성 유동화 처리토 사용의 이점

유동성 채움재의 사용에 따라 발생되는 고유의 이점들이 있지만 특히, 현장발생토를 이용한 유동화 처리토에 대한 장점은 다음과 같다.

(1) 장기 침하, 동상, 부분 다짐불량에 의한 문제가 없음
(2) 현장발생토를 재활용하여 잔토 처리비 및 양질의 토사 구입비용 절감
(3) 현장에서 쉽게 생산할 수 있으며 시공속도가 빠르고 품질관리가 용이함 - 시공절차의 단순화

(4) 시공장소 및 물량에 따라서 슈트, 컨베이어, 펌프, 버켓 등으로 시공이 가능

(5) 유동성, 자기다짐(self-compacting), 자기 수평력(self-levelling)에 따라서 다짐 작업이 필요 없어 인력을 절감시킬 수 있음 - 무진동, 무소음

(6) 지진발생 시 액상화 방지 - 지반개량 불필요

(7) 양질의 토사로 다진 것 보다 강도, 내구성이 좋음 - 유지관리 비용절감

(8) 적용범위에 따라서 재굴착, 영구 채움용으로 강도조절이 가능 - 시방기준에 따라서 조정이 가능

(9) 굴착 폭을 줄여 굴착량을 감소시켜 시공비를 절감

(10) 지하수의 유출입이 불가능한 지반(투수계수 $k=10^{-6}\sim10^{-7}$cm/sec)을 형성 가능 - 침하붕괴사고에 따른 안전사고를 줄일 수 있음

(11) 양수작업이 줄어들며 날씨에 큰 영향을 받지 않고 시공이 가능

(12) 토압경감에 따른 관 두께를 줄일 수 있으며, 강관을 연성관으로 교체 사용이 가능

(13) 급결성 고화재 사용시에 조기 교통개방 - 4시간, 공기단축

유동화 처리토의 또 다른 장점은 산업 폐기물인 플라이애쉬, 폐주물사와 같은 재료를 재활용함에 따른 야적문제 등을 해결할 수 있다는 것에 있다. 그러나 급결성 유동화 처리토의 사용에는 다음과 같은 몇 가지 고려되어야 할 사항이 있다.

(1) 경량 파이프에 이용 시에는 부력에 대한 앵커작업이 필요하다.

(2) 응결 전까지는 구속되어야 한다.

(3) 고강도 혼합물은 굴착이 어렵다.

(4) 유동조건에 있는 동안에는 측압이 발생된다(거푸집 또는 파이프는 반드시 측압을 지지하여야 함).

마. 급결성 유동성 채움재의 적용성

급결성 유동성 채움재는 다짐채움재로써 특히, 뒤채움, 시설물 베딩(bedding), 공동충전, 교량의 접속부에 사용된다. 뒤채움은 벽의 뒤채움, 하수관거 트렌치, 교량 교대, 관로 트렌치, 파이프 굴착 그리고 옹벽과 같은 곳에 적용된다. 구조물의 채움

재로서는 기초의 보조기층, 하부기초, 바닥슬래브 기층과 파이프 베딩에 사용된다.

공동충전에 적용은 하수관, 터널 축, 기초 또는 도로 기층, 진흙 압출, 하부 기초 그리고 건물 바닥기초와 같은 다른 지하 구조물의 채움에 적용된다. 또한, 교량 접속 슬래브의 보조기층 또는 다른 부위의 뒤채움재로서 교량의 접속부에 사용된다. 유동성 채움재의 다른 적용은 폐기된 지하저장탱크, 우물, 버려진 지하시설물, 포장 하부의 공극, 하수관, 맨홀, 그리고 진흙탕 지역의 주위에 적용된다. 급결성 유동성 채움재의 사용은 기계적 다짐 시 위험으로부터 작업자들의 안정성 확보에 대한 필요성을 제거하며, 보다 효과적이고, 빠르게 시공을 진행 할 수 있고 트렌치 굴착 폭을 줄일 수 있다.

2. 급결성 유동화 처리토의 성분

굴착잔토를 이용한 유동화 처리토는 잔토, 급결형 고화재, 물의 혼합물이다. 이러한 유동화 처리토의 재료 특성은 흙과 콘크리트 사이의 기준을 갖으며, 배합비율에 따라 달라진다.

가. 굴착잔토

유동화 처리토의 장점 중 하나는 시공 지역의 모래 또는 건설발생토를 사용하여 생산 할 수 있다는 것이다. 즉, 재료의 수급이 원활하기 때문에 먼 곳으로부터 재료를 운반하는 번거로움과 건설발생토를 처리하기 위한 비용을 절감할 수 있다.

유기물질을 함유한 흙이나 소성이 높은 점토를 제외한 모든 종류의 흙은 유동화 처리토의 재료로 사용이 가능하다. 일반적인 유동화 처리토에 사용되는 현장발생토의 경우, ACI-229R-94와 ASTM C 33에서는 No.200번체를 10% 이하로 통과하는 세립분으로 제한하고 있고, NRMCA(National Ready Mixed Concrete Association in USA)은 21% 이하의 세립분만을 사용하도록 권장하고 있다. ASTM D 4832-88에서는 흙의 비소성 또는 약소성의 세립분으로 25%를 포함 할 수 있다고 제안하고 있으며, Texas Department of Transportation(TxDOT)와 미건설국(the Bureau of Reclamation, 2004)은 세립분 함유량을 30%이하로 제한하고 있다.

(1) 흙의 입자크기의 영향

유동화 처리토를 제작하는데 있어서 굴착잔토의 입경은 처리토 체적의 상당부분을 차지하고, 품질 및 구성조건에 처리토 특성에 큰 영향을 미치게 된다. 즉 잔토의 입경에 따라 구조물의 충전성에 영향을 크게 주며, 양호한 유동성 및 재료분리 저항성을 확보하기 위해 잔토의 입경에 대한 고려가 필요하다. Fig. 3.1.1은 입도분포를 가지는 흙에 대한 실험을 문학용(2003) 등이 수행하였다.

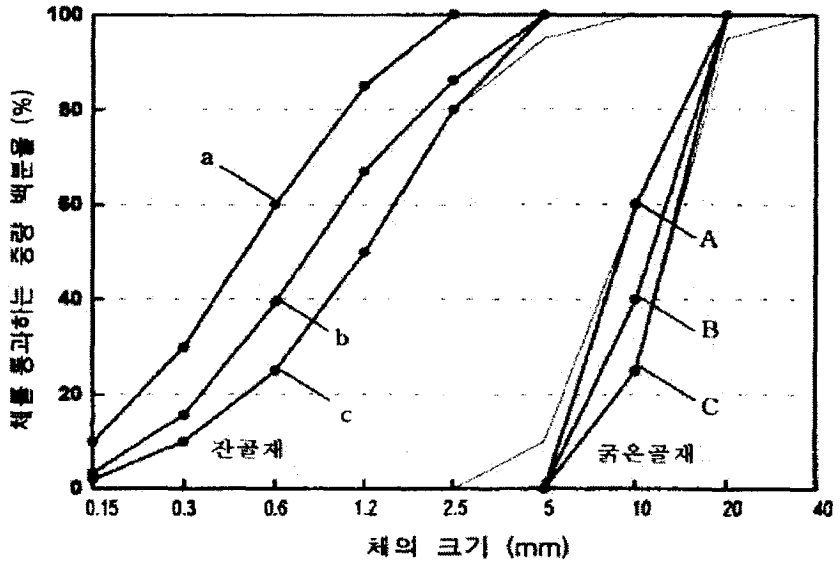


Fig. 3.1.1 골재의 입도분포 곡선

Fig. 3.1.2에서 전반적으로 W/C 증가에 따른 유동성은 감소하며, 조립률의 변화에 따른 유동성은 입경이 작을수록 작아짐을 보인다.

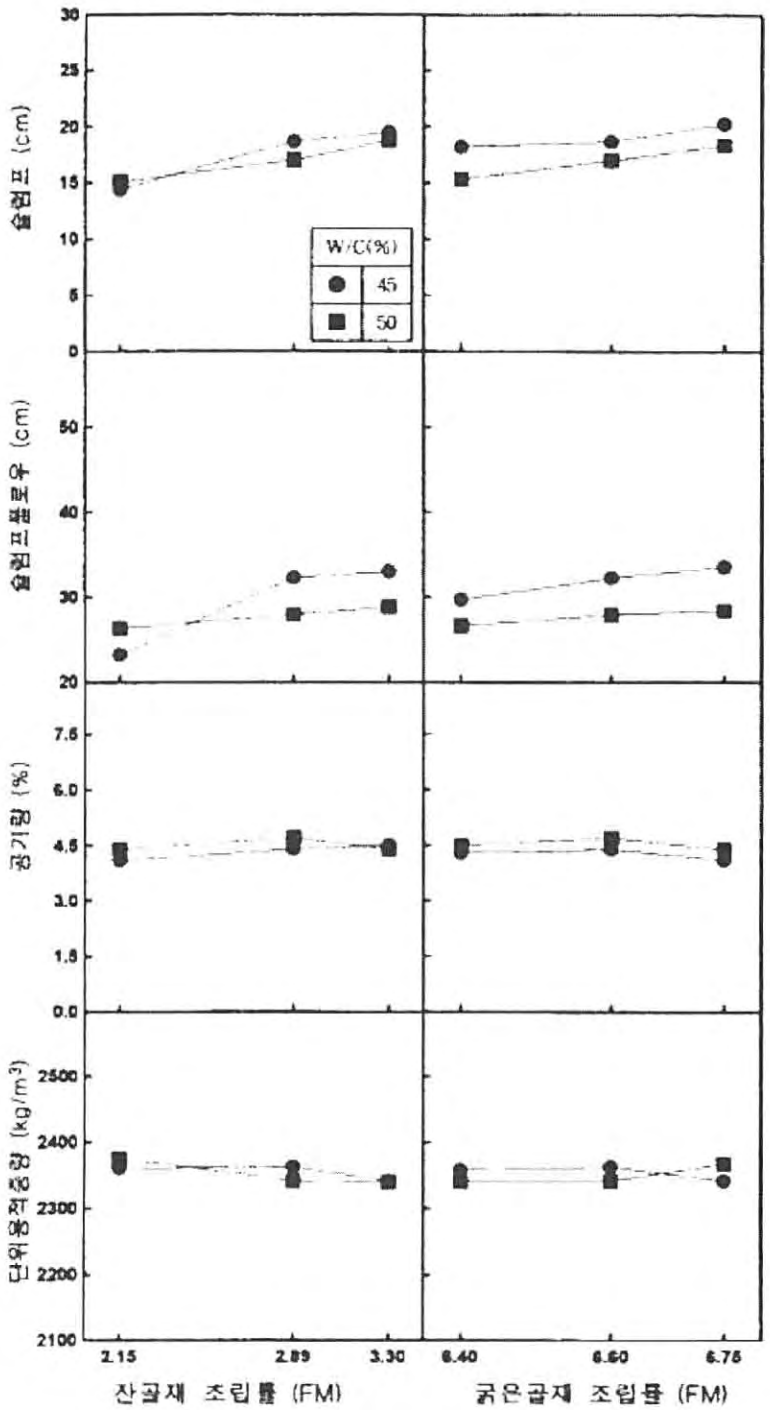


Fig. 3.1.2 조립률 변화에 따른 슬럼프, 슬럼프 플로우, 공기량 및 단위 용적중량

블리딩의 경우 입경이 커지면서 미립분의 감소로 수분 흡착성이 감소하고 미립분의 공극충전효과가 저하함에 따라 표면으로 떠오르는 블리딩이 커지는 것을 Fig. 3.1.3에서 확인 할 수 있다.

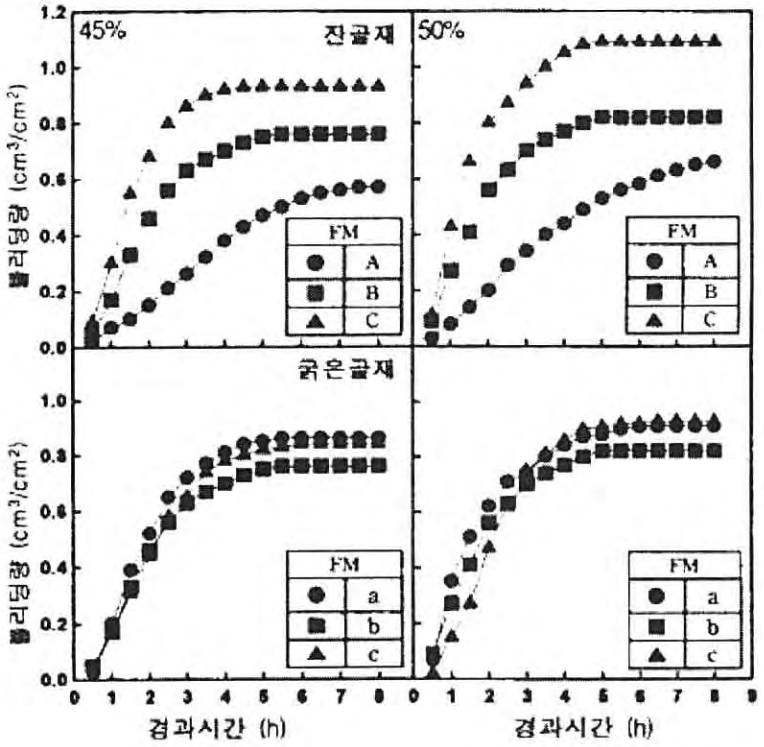


Fig. 3.1.3 잔골재와 굵은 골재의 조립률별, 경과 시간에 따른 블리딩량

(2) 토양의 유기물 함유에 따른 영향

(가) 토양 유기물의 발달과 특징

토양유기물(Soil organic matter)은 단순히 토양에 있는 유기물을 의미하고 있으므로, 본질적으로는 유기물과 다르지 않다. 그러나, 토양에 있는 유기물은 수많은 종류와 수많은 양의 미생물의 영향을 받으면서 변하고 있다는 점이 일반적으로 말하는 유기물과는 다르다. 다시 말하면, 토양에 있는 유기물은 미생물에 의해서 끊임없이 분해되고 중합되어 변화되고 있다는 점이다. 따라서, 토양유기물은 결국 토양환경에 크게 영향을 받고, 영향을 미치므로 일반 유기물과는 달리 복잡한 개념을 갖고 있다.

토양에 있는 유기물은 변화단계로 보아 4종류로 구분이 되며, 이는 살아있는 유기물, 미숙유기물, 비부식, 부식 등이다. 살아있는 유기물이란 식물뿌리, 토양동물, 토

양미생물 등과 같이 세포가 살아있는 유기물을 말하고, 미숙유기물이란 낙엽, 가지, 동식물유체 등과 같이 동식물의 조직이 부식과정에 있는 유기물을 말하고, 비부식(Non-humus)이란 다당류, 단백질, 지질, 아미노산 등과 같이 미숙유기물이 부식화(Humification)되는 과정에 있는 유기물을 말하고, 부식(Humus)이란 비부식이 더욱 변화되어 갈색-흑색의 유기 교질(Colloid)로 된 유기물을 말한다.

부식이란 토양에 들어간 유기물(Organic matter)이 긴 세월 동안에 분해, 축합, 중합되고, 산화되어 이중결합이 증가하고, 축합고리가 형성된 고분자화합물로서, 갈색-흑색의 유기교질 상태의 유기물을 말한다. 여기에서 중합이란 동일분자 2개 이상이 결합되어 중합체(Polimer)가 생성되는 반응을 말하고, 축합이란 동종 또는 이종의 2분자가 물 또는 저분자가 제거되면서 결합하는 반응을 말한다. 그리고 교질(콜로이드)이란 1-100nm 크기의 작은 입자로서 액체 내에서 분산될 수 있는 상태를 말한다.

부식은 이화학적 특성에 따라 휴민(Humin), 휴믹산(Humic acid), 풀빅산(Fulvic acid), 울믹산(Ulmic acid) 등으로 구분한다. 부식의 대부분은 토양의 점토광물에 흡착된 상태로 존재하며, 분해에 대하여 어느 정도 저항성을 지니고 있다. 부식산 제품은 종류에 따라 사용방법이 조금씩 다르기는 하지만, 논, 밭, 과수원, 잔디밭 등 경작지의 토양처리, 모든 작물의 엽면처리, 모든 가축의 사료첨가용 등으로 사용할 경우 놀라울 정도의 효과를 볼 수 있다. 사용효과는 과장된 것이 아니고, 효과에 비해 과소평가되고 있는 경향이 있다. 다음의 Fig. 3.1.4는 토양의 유기물의 구성 모식도를 나타냈다.

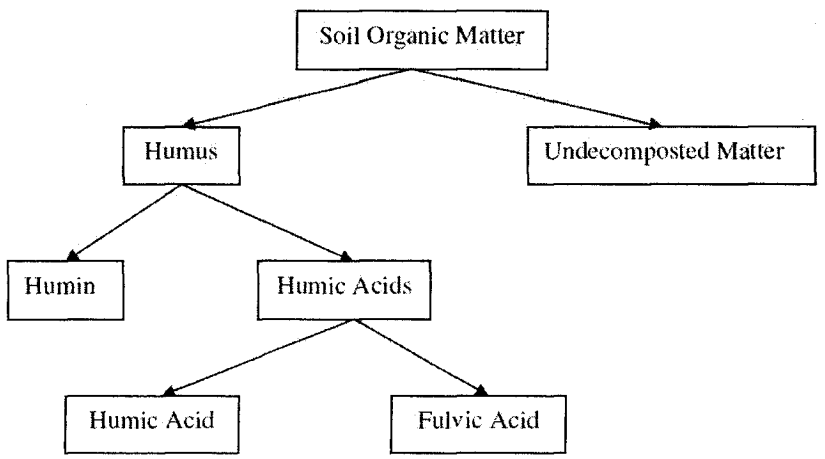


Fig. 3.1.4 토양의 유기물 구성 모식도

일반적으로 경작지 토양에 부식이 들어있다는 것은 당연하다. 경작지에는 유기물이 자연스럽게 들어가기도 하지만, 대체로 인위적으로 퇴비의 형태로 지속적으로 투입되기 때문이다. 그러나 유기물함량이 토양에 따라 다르듯이 부식함량도 토양에 따라 다르다. 토양유기물 중에 들어있는 부식 함량은 일반적으로 높은 편이지만 토양 전체로 보면 결코 많은 양은 아니다.

부식은 유기물함량이 높은 토양에 많을 수밖에 없다. 따라서 완숙퇴비가 많이 투입되어 비옥한 토양에는 부식이 많다. 식물체가 죽고 그 유체가 계속 쌓여가는 토양에 부식이 많을 수도 있으나, 그보다는 경작지에 퇴비가 계속 투입되고, 미생물의 활동이 활발하여 지속적인 분해가 이루어질 수 있는 토양에 많다.

휴믹산은 자연 상태에서는 수용성 물질이 아닌 탄화된 불용성 퇴적물이나 이의 정제 과정을 통하여 흔히 말하는 수용성 휴믹산이 얻어진다. pH가 2 이하의 산성 용액에서는 용해되지 않으나, 더 높은 pH에서는 용해되는 부분이다. 색은 암갈색에서 검은색을 띠며, 분자량은 수천에서 수십만 daltons에 이른다. 토양 내에서의 반감기는 약 100년 이상으로 알려져 있다. 풀빅산은 모든 영역의 pH 영역의 용액에서 용해되는 부분이다. 색은 황색에서 황갈색을 띠며, 분자량은 수백에서 수만 daltons으로 휴믹산에 비해 작다. 토양 내에서의 반감기는 약 10~15년 정도로 알려져 있다. Fig. 3.1.5에서는 휴믹산의 구조를 분자 구조를 나타내었으며, Table 3.1.1은 휴믹물질의 대략적인 구성성분을 나타냈다.

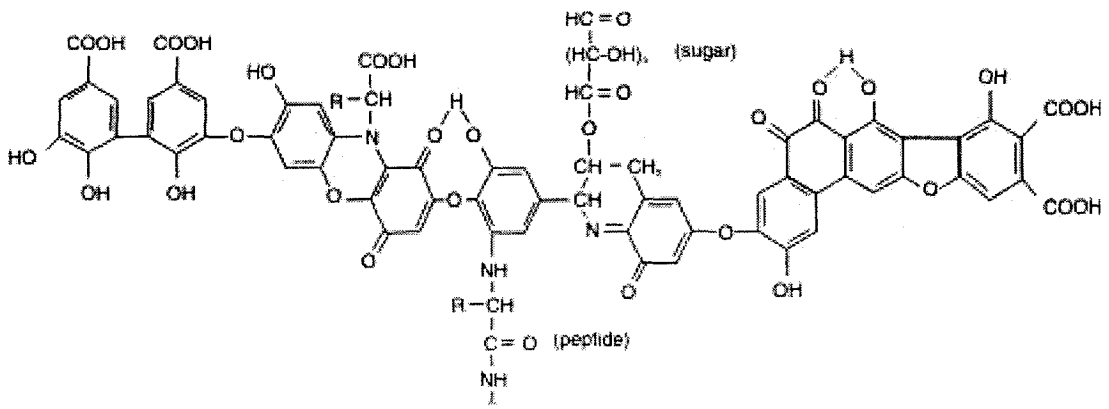


Fig. 3.1.5 휴믹산의 구조(Stevenson, 1982)

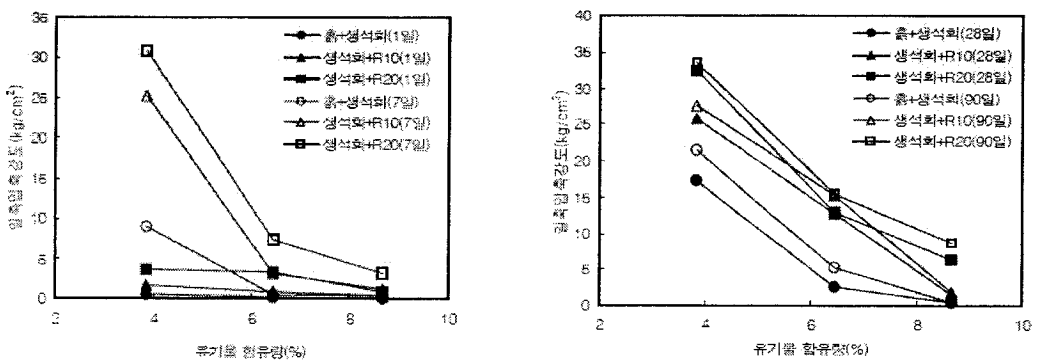
Table 3.1.1 휴믹물질의 대략적인 구성성분 (단위: %)

C	O	H	N	P	S
40~50%	35~40	3~5	3~5	0.5	0.5

(나) 유기질토의 공학적인 특성

유기질토의 함수비 범위는 150%~1500%에 이르고, Brady는 유기물 함유량이 50%이상이며, 이탄(peat)으로 정의하였다. 흙의 공학적 성질에 문제가 되는 유기물 함유량은 10% 이상인 경우이나 흙의 성질을 개량하기 위하여 첨가제를 사용하는 공법에서는 첨가제의 종류에 따라 유기물 함유량이 1%이하라도 문제가 된다.

여러 연구자들에 의한 유기질토의 특성을 보면, Arman(1969)은 섬유 모양의 유기물을 첨가한 경우 흙의 전단강도가 증가됨을 밝힌바 있다. Holts and Krizek(1970)은 유기질의 함유량이 증가할수록 건조단위중량이 감소하는 반면에, 최적 함수비는 증가되었다. Odell 등(1960)은 흙의 유기물 함유량이 증가할수록 소성이 증대됨을 발견하였으나, Buckman and Brady(1969)는 유기물 그 자체가 저소성 물질이므로 유기물이 흙의 소성과 점착력을 감소시킨다 하였다. 김현도(2002)는 유기물 함유량에 따른 강도발현을 분석한 결과 유기물의 함유율이 증가할수록 일축압축강도가 감소되는 경향을 나타내었으며, 재령에 따른 강도 변화 폭에 있어서도 유기물 함유율이 낮을수록 크게 발생되었으며 Fig. 3.1.6 (a), (b)에 각각 재령 1일, 7일 및 28일, 90일의 일축압축강도의 결과를 나타냈다.



(a) 재령 1일, 7일 (b) 재령 28일, 90일

Fig. 3.1.6 유기물 함유량에 따른 일축압축강도 (김현도, 2002)

나. 급결성 고화재

급결성 고화재는 CSA계 광물을 주성분으로 하는 클링커 분말과 조강성 광물, 초속경시멘트, 조강시멘트 또는 초조강시멘트를 이용할 수 있다. 이 중 조강시멘트는 수화속도가 빨라 보통 28일 강도를 7일 만에 발현시킬 수 있고 저온에서도 강도 발현이 양호한 특성을 가지고 있으며, 초조강시멘트는 초기에 수화활성이 큰 시멘트광물 조성을 가지고 있어 1일 강도가 보통 시멘트의 7일강도 정도를 발현시킬 수 있으며 수밀성과 내구성이 우수한 특징이 있다. 또한 초속경시멘트는 2~3시간만에 보통시멘트의 7일 강도를 발현하고 알루미나시멘트보다 조강성이 우수한 특징을 가지고 있다.

유동화 고화재의 효과를 증진시키기 위하여 플라이 애쉬, 슬래그 등의 포졸란 물질이 첨가제로 사용되기도 한다. 혼합비는 흙의 종류와 시공 목적에 따른 요구강도에 따라 다르며, 흙 속에 점토성분이 증가 할수록 채움재의 양은 증가한다.

다. 물

물은 산, 알칼리, 유기물, 무기오염물 등이 없는 비교적 깨끗한 물이 사용되어야 한다. 물의 양은 응결에 영향을 미치고 유동성과 강도에 따라 다양하게 변화되며 물/채움재비의 증가는 유동화 처리토의 유동성을 증가시키고 압축강도를 감소시킨다.

라. 석탄회

(1) 석탄회의 종류와 발생과정

석탄회는 석탄 화력발전소에서 미분탄(微粉炭)을 연소한 후 부산물로 발생되는 회(재)를 말하며 석탄회의 발생위치에 따라 플라이애시(Fly Ash), 바텀애시(Bottom Ash), 신더애시(Cinder Ash)로 구분할 수 있다(Fig. 3.1.7).

플라이애시는 석탄 화력발전소에서 석탄 연소후 발생되는 발전소 부산물로 집진기에서 포집되는 미분말 형태로서 그 화학적/물리적 특성상 알루미노 실리카 계열의 구형 입자 형태로 포졸란(Pozzolan) 특성을 지니고 있을 뿐만 아니라 여러 측면에서

시멘트 대체재로써 우수한 특성을 지니고 있다. 전체 석탄회 발생량 중 약 75-80%를 차지한다. 플라이애시는 구형 입자 속에 여러 겹의 구면을 포함하는 단단한 입자(Plerospheres)와 내부에 CO_2와 N_2가스로 채워져 있는 중공체의 다공성 입자(Cenosphere)로 나눌 수 있다. 입자의 크기는 1~150㎛의 범위에 속하며 평균 입경은 20~30㎛로 시멘트와 비슷하다. 플라이애시의 비중은 1.9~2.3으로 시멘트 비중의 약 2/3에 해당하는데 비중은 화학성분 중의 Fe_2O_3에 의해 좌우된다. 분말도는 포졸란의 활성도와 콘크리트의 작업성에 영향을 주는 매우 중요한 특성으로 3000~4500cm^2/g 정도이다. 플라이애시는 슬래그, 소성점토, 혈암과 같은 인공 포졸란으로써 분말도가 좋고 형태가 구형으로 가장 많이 사용되는 인공 포졸란 물질이다.

석탄이 화력발전소 보일러 내에서 연소될 때, 괴상[塊狀] 또는 입자의 입경이 큰 회 성분이 보일러의 하부로 낙하되는데 이를 바텀애시라고 한다. 전체 석탄회 발생량 중 약 10% 정도를 차지한다. 바텀애시는 대부분 각 화력발전소의 연소 특성에 따라 큰 차이를 보이지만, 입도분포는 입경 1mm의 입자가 50%, 그리고 1mm이상의 입자가 50%를 차지하고 있으며, 색상은 검은색을 띄는 경향을 가진다. 바텀애시의 비중은 2.0~2.4 범위에 속하고 전체단위중량은 약 1.20~1.30g/cm^3으로서 일반 해사보다 25%정도 작게 나타나는 경향을 가지는데, 이는 석탄회 입자의 중공화에 의한 영향 때문으로 사료된다.

신더애쉬는 절단기나 공기예열기 아래에 있는 호퍼에 모이는 것을 말하며 입경분 0.3 - 1.0mm 정도로 석탄회의 약 5%을 차지한다.

세노스페어는 Fly Ash 중 내부가 CO_2 나 N_2 가스로 채워져 수면에 부유하는 물체로 무게는 가볍고 발생량은 Fly Ash 전 중량의 약 2% 정도가 발생되고 입경은 20 - 30 ㎛ 정도로서 경량성, 절연성, 내화학성, 보온성등이 우수하여 새로운 재료로 널리 사용되고 있다.

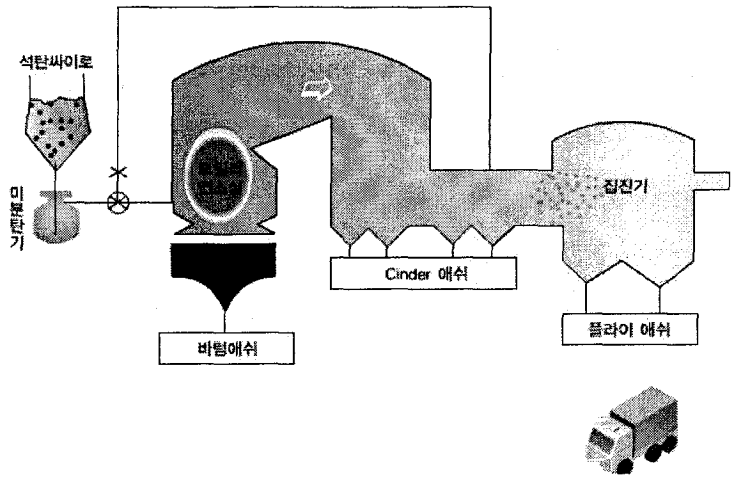


Fig. 3.1.7 석탄회의 발생과정

(2) 석탄회의 재활용

주요 용도별 처리 실적(Table 3.1.2)을 살펴보면, 2004년~2006년 석탄회는 주로 레미콘 등 콘크리트 혼화제(75.9%), 시멘트 원료(16.7%)로 사용되고 있다. 그에 비해 토목 재료로써의 재활용 비율은 10%미만으로써 대부분 재활용되지 못하고 화력발전소 인근 부지에 매립•방치되고 있다. 환경부(2007)는 석탄회의 재활용 용도로써 레미콘 등 콘크리트 혼화제, 시멘트 원료, 경량골재, 시멘트 2차 제품 원료, 성토용 골재, 복토용 골재, 도로용 골재, 목재 접착제 원료, 시멘트클링커 제조원료 대체용, 배수층 골재, 요업용 재료로 재활용이 가능하며 2008년 재활용 목표율을 70%로 하였다.

Table 3.1.2 주요 용도별 처리실적

(단위 : 천톤)

구 분	'04	'05	'06
레미콘 등 콘크리트혼화제	2,836	2,739	3,161
시멘트 원료	716	670	534
시멘트 2차제품 원료	109	125	45
벽돌용골재	42	76	65
균열방지제	14	8	-
성토용골재	7	1	78
기 타	64	22	202
계	3,788	3,641	4,085

연도별 석탄 화력발전소 설비 용량(Fig. 3.1.8)을 살펴보면 무연탄 석탄 화력은 거의 변화가 없지만 유연탄 석탄 화력은 꾸준히 증가하고 있다. 특히 최근 3년간 석탄화력 발전소 설비 용량은 꾸준히 증가하였으며 이에 따라 석탄회 발생량도 꾸준히 증가할 것으로 판단된다(한국전력공사, 2007).

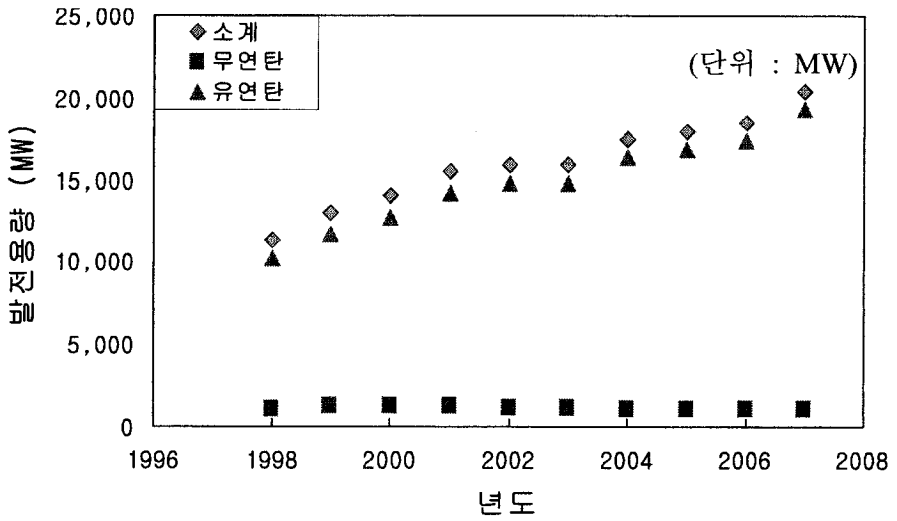


Fig. 3.1.8 연도별 석탄화력발전소 설비 용량

국내에서 사용되는 석탄은 크게 국내산 무연탄과 수입 유연탄으로 분류할 수 있다. 무연탄은 국내에서 채광되는 에너지원이지만 발열량이 낮고, 저질탄이 대부분으로 보조연료로 중유를 사용한다. 유연탄은 미국, 캐나다, 호주, 남아프리카공화국, 중국 및 인도네시아 등 다양한 수입선을 통해 전량 수입되며 제철용으로 50%, 발전용으로 30%정도가 사용되고 나머지는 시멘트 및 기타 산업분야에 사용되고 있다. 사용되는 유연탄은 대부분 역청탄이며, Fig. 3.1.8에서 2003년부터 유연탄 발전소의 건설로 인해 유연탄 석탄회 위주로 발생량이 증가하고 있다.

재생 자원의 유효 이용 및 천연 골재 부족, 매립 용량이 부족한 현실에 대한 대응을 목적으로 일부 선진국에서는 콘크리트용 석탄회 골재 이용에 대한 연구가 개시되어, 석탄회의 활용은 시멘트 원료, 시멘트 혼화제 등의 시멘트 분야와 경량 골재, 시멘트 2차제품 등의 건축분야 그리고 충진재, 노반재 등의 토목 분야로 광범위하게 확대되고 있다. 그러나 국내 발생 석탄회 대부분은 회처리장에 매립되고 있는 실정으로 차후 처리장의 안정적인 확보보다는 근본적으로 석탄회의 대규모 물량을

소화할 수 있는 재활용분야의 개발이 시급한 실정이다. 그러나 석탄회의 경우 다른 재활용 골재와는 달리 품질 편차가 크기 때문에 현재까지 이에 대한 활용성이 저조하였다(프리캐스트 콘크리트용 석탄회 골재, KS F 4570, 2007).

본 연구에서는 굴착 잔토 중 선별작업을 수행한 현장토와 KS F 4570에서 규정하는 석탄회 잔골재를 혼합하였을 때 유동화 처리토의 유동성, 블리딩, 강도특성 변화를 파악하여 석탄회의 활용 가능성을 검토하는 것을 목표로 한다.

화력발전소 부산물인 석탄회를 대체재료로 재활용함으로써 발전소 건설에 대한 부정적 인식을 개선할 수 있고, 골재 수급이 점점 어려워지는 현실에서 대체 재료로 사용함으로서 골재 비용을 절감할 수 있다. 석탄회는 폐기물로 지정되어 매립되고 있으며 우리나라의 경우 전기사용량의 증가로 인해 석탄회 배출량이 향후 2010년에는 연간 800만톤이상의 석탄회가 발생할 것으로 추정되고 있다(전력경제신문, 2007). 이는 상당규모의 회(灰)처리장 건설을 요구하고 있으며, 이에 따른 투자비용의 증가, 환경오염 및 민원의 발생등 다양한 문제점을 야기하고 있다.

석탄회는 발생경로가 확실하고, 그 성상이 균질하며 단위중량이 작고, 내부마찰각이 크기 때문에 공학적으로 매우 양질의 재료라고 할 수 있다. 석탄회와 현장발생토를 혼합하였을 때 예상되는 기술적 경제적 환경적 이점은 Table 3.1.3과 같다.

Table 3.1.3 석탄회와 현장토를 혼합하는 경우 기술적, 경제적, 환경적 이점

기술적 이점	- 유동성 채움재의 균질성 - 지진에 의한 액상화 방지 - 주변 야적장이 필요 없음 - 적용범위에 따른 재굴착 및 영구 채움용으로 강도조절 가능 - 고 유동성으로 인한 자기 다짐, 높은 충진성 - 현장토만을 사용하였을 때보다 높은 강도 발현
경제적 이점	- 석탄회, 굴착잔토의 재활용, 모래 수급 비용 절감 - 다짐 불량에 따른 유지보수비용 절감 - 높은 강도발현으로 인한 시멘트량 절감
환경적 이점	- 천연자원 고갈 및 환경파괴 방지 - 다짐 장비에 의한 진동 소음 공해 감소. - 회처리장 불필요 - 발전소 건설에 따른 부정적 인식 해소

(3) 일반 성토재와 석탄회의 특성 비교

국내에서 가장 많이 활용되고 있는 성토재료로는 화강풍화토와 양질의 해사가 대표적이며 Table 3.1.4에 화강풍화토, 해사, 석탄회의 각종 공학적 특성값을 나타냈다. 석탄회는 화강풍화토와 해사에 비해 비중이 작아 경량성토재로 활용이 가능하다. 직접전단강도 정수 ϕ값이 해사와 비슷한 크기를 가지고 있어 석탄회를 다짐하여 성토재로 활용하여도 충분한 지지력을 확보할 수 있다. 투수계수는 해사가 가장 큰 값을 가지고 있는 것으로 나타났으며, 화강풍화토는 풍화정도에 따라 투수계수가 다르지만 석탄회에 비해 작은 값을 나타냈다.

Table 3.1.4 일반성토재와 석탄회의 특성치 비교

종류	비중	LL	PL	직접 전단 시험		투수계수
				c (kg/cm^2)	ϕ (°)	(cm/sec)
화강풍화토	2.64-2.68	NP	NP	-	-	2.22×10^{-5}- 9.16×10^{-5}
해사	2.65	NP	NP	0	34-42	10^{-2}-1
석탄회	2.17-2.23	NP	NP	0	29-38	3.64×10^{-4} - 4.67×10^{-3}

3. 유동화 처리토의 물리적 특성

가. 경화 전 상태의 특성

(1) 유동성

유동화 처리토의 유동성은 현장에서의 충전성, 시공성 등에 큰 영향을 주며 일반적으로 유동성시험에 의한 흐름 값으로 평가된다. 유동화 처리토를 지중 매설관의 뒤채움이나 공동 충전 등에 이용하는 경우에는 그 충전성이 문제가 된다. 매설물의 뒤채움은 타설 위치를 현장에서 순서대로 적절한 위치로 이동시키면서 시공을 한다. 이 때 유동화 처리토의 유동성에 따라 타설 높이의 저감으로 형성되는 유동구배는 타설 범위나 위치를 결정하는 데 중요한 문제가 된다. 특히 갱도 등의 채움과 같이 타설 장소가 갱도 입구에만 한정되어 있는 경우에는 유동구배의 크고 작음이 특히 중요하게 된다.

유동화 처리토의 고화반응이 시작되면 점성이 증가하고 유동성은 떨어져 유동성은 시간이 지남에 따라 감소된다. 또 고화반응은 온도와 관계가 있으므로 흐름 값의 감소는 겨울보다 여름이 크다. 유동화 처리토의 제조 후에 현장에 운반하여 타설하는 경우, 흐름 값의 저하는 시공 상 배려해야 할 중요한 사항이며, 정량적으로 파악해야 한다.

(2) 온도특성

유동화 처리토는 고화재를 첨가하기 때문에 고화재의 수화반응 시에 온도가 상승한다. 따라서 유동화 처리토를 대량으로 충전하는 경우에는 온도상승이 염려되는 경우도 있다. 한편 한랭지에서 유동화 처리토를 타설하는 경우, 수화반응을 유지하기 위해서는 바깥 공기에 의한 유동화 처리토의 온도저하를 고려해 타설 두께를 조정해야 한다. 이러한 경우에는 일반적으로 사전에 열전도 해석에 의한 온도의 변동예측을 한다. 유동화 처리토의 열전도율은 고화재 첨가량이나 타설 온도에는 그다지 영향을 미치지 않는 데 사질토계 유동화 처리토는 0.4~0.6, 점성토계 유동화 처리토는 0.2정도이다. 일반적으로 현장발생토의 열전도비율은 0.5, 콘크리트는 0.

5~0.6정도인 것으로 알려져 있어 사질토계 유동화 처리토와 비슷하다. 고화재 첨가량과 타설온도는 유동화 처리토의 열확산율에 그다지 영향을 주지 않는다. 사질토계 유동화 처리토는 $140\sim190\times10^5m^2/h$, 점성토계 유동화 처리토는 $70\times10^5m^2/h$정도로 콘크리트의 열확산율 $444\times10^5m^2/h$정도에 비교하면 작은 값이다.

나. 경화 후 상태의 특성

(1) 강도특성

유동화 처리토의 강도는 보통 일축압축강도로 평가하지만 용도나 적용 장소에 따라서 점착력과 내부 마찰각이나 지반 반력계수 등의 강도정수로 평가할 필요가 있다. 예를 들면 배합시험에서는 보통 7일 재령의 일축압축강도가 이용되지만, 시간경과에 따라 강도 증가를 고려해서 28일 재령의 일축압축강도가 필요한 경우도 있다. 따라서 시료 조건 별 7일 강도와 28일 강도의 관계를 규명할 수 있다면, 실제 28일 강도를 예측할 수 있다. 또한 노면 아래의 공동충전이나 도로 하부의 매설관의 뒤채움에는 지지력비(CBR)가 검토되기도 한다.

(2) 투수성

유동화 처리토를 땅속에 묻을 때, 지하수위가 높은 경우에는 지하수에 의한 침투의 영향을 받는 경우가 있다. 이런 경우에는 유동화 처리토의 투수시험을 실시하여 투수성을 파악하여야 한다.

유동화 처리토는 실질적으로 투수계수가 $10^{-5}\sim10^{-7}cm/sec$으로 불투수이기 때문에 침투수에 의한 유동화 처리토 내부의 칼슘이온의 용출도 매우 적다.

(3) 체적수축

체적수축은 단기간에 생기는 것과 장기간에 걸쳐 진행되는 것이 있는 데, 단기적인 수축은 충분히 블리딩율을 억제해서 고화재를 균등하게 섞어서 막을 수 있으며, 장기적인 수축은 유동화 처리토의 공극량이나 유동화 처리토 주변의 지하수위 등

의 환경에도 영향을 받는다.

(4) 주변지반에의 영향

유동화 처리토에는 시멘트계 혹은 석회계의 고화재가 첨가되어 있다. 그 때문에 유동화 처리토가 지하수에 접하는 경우, 유동화 처리토 내부의 칼슘 이온이 용출하며 주변지반에 확산할 가능성이 있다. 토양의 알칼리화에 관해서 점성토 지반의 경우에는 용출된 이온이 점성토의 이온흡착능력에 의해 흡수되어 주변지반에 영향을 주지 않는 것으로 알려졌다. 그러나 사질토 지반의 경우, 이온 흡착능력은 낮아 주변 지반에 칼슘이온 등의 용출이 염려된다. 한편 유동화 처리토는 투수성이 낮기 때문에 유동화 처리토속으로 침투하는 지하수량은 적다.

4. 급결성 고화재의 특성

가. 보통 포틀랜드 시멘트

(1) 알칼리 금속염류를 다량 사용

대표적으로 Na_2CO_3를 가장 많이 사용하는데 이는 시멘트 내에 $Ca(OH)_2$와 반응하여 Na_2CO_3+$CaCO_3$와 같이 난용성 $CaCO_3$를 생성시키는 방향으로 진행되어 C_3S나 β-C_2S의 수화에 따라 생성된 액상의 $Ca(OH)_2$를 난용성 $CaCO_3$로 변화시켜 제거하므로 C_3S, β-C_2S의 수화를 촉진시킨다. 한편 Na_2CO_3와 $Ca(OH)_2$의 반응에 따라 생성된 NaOH는 C_3S나 β-C_2S의 수화초기에 생성하는 저분자 CSH를 가용화 시킨다. 즉 CSH Sol막을 제거하여 수화를 촉진시킨다. 이는 시멘트 내에 C_3A 및 C_4AF의 수화를 촉진시켜 급결화하게 한다. 그러나 Na_2CO_3등의 Na계 알칼리 염류들은 $CaSO_4$와 반응하여 Na_2SO_4로 되는데, 이것은 10분자의 결정을 가지고 있어, 백화현상의 원인이 되고 있다.

(2) 물유리를 사용

일반적으로 물유리는 많은 지반 주입재의 급결재로 사용되고 있다. 물유리는 Na_2O-SiO_2-H_2O계로 점성이 있는 액체상이다. 물유리 3호에서는 Na_2O : SiO_2의 물비가 1:3이고 4호에서는 1:3.6~4이다. 물유리에 소량의 전해질을 넣으면 겔화되는 것이 많고 특히 $Ca(OH)_2$나 포틀랜드 시멘트를 첨가하면 겔화되는 것 이외에 물유리 중의 SiO_2가 CaO분과 반응하여 비정질 C-S-H를 급속하게 생성하여 응고된다. 한편 물유리 중의 Na_2O성분은 NaOH로 (1)에 서술한 것과 같은 작용을 한다.

나. 초속경 시멘트

초속경시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트의 제조에 사용되는 원료 외에, Al_2O_3 공급원으로 보오크사이트(Bauxite), CaF_2 공급원으로는 Fluorite(螢石)가 사용된다. 보통 포틀랜드 시멘트의 클링커 조성과 비교하면 보통 포틀랜드 시멘트의 광물조성(C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF) 중 C_2S, C_3A가 없어지고, 대신 초속경시멘트에는 $C_{11}A_7$ · CaF_2

가 존재한다. 여기에 $CaSO_4$ 또는 $CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$를 주체로 하는 첨가물을 필요에 따라 첨가한다. $C_{11}A_7 \cdot CaF_2$ 광물은 물과 혼합하여, 수 분 후에는 경화가 시작되어 급결한다.

초속경시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트에 존재하지 않는 $3CaO \cdot 3Al_2O_3 \cdot CaSO_4$를 다량으로 함유하고 있어 수화반응시 매우 빠른 속도로 침상결정의 3차원적 망목구조를 형성하는 고황산염의 칼슘설포알루미네이트 수화물을 생성시켜 수시간 내에 높은 강도를 발현하게 된다. 즉 초속경시멘트가 물과 접촉하면 $C_{11}A_7 \cdot CaF_2$ 광물은 곧바로 용해되어 C_3S(Calcium Silicate)의 수화에 의해 유리된 수산화칼슘[$Ca(OH)_2$] 및 별도로 용해된 황산칼슘($CaSO_4$)과 신속하게 반응하여 칼슘 알루미네이트 수화물 및 알루미네이트 수화물을 생성한 후 다시 수분 내에 첨가된 유리석고와 반응하여, 에트린자이트라는 미세한 침상결정을 생성하여 빠른 조기강도를 발현하게 되는 것이다. 이러한 침상의 에트린자이트에 의해 발생되는 팽창력은 콘크리트의 물성개선에 유효하게 작용하며, 이를 콘크리트의 내구성에 손상을 미치지 않도록 작용하기 위해서는 시멘트가 수화하여 경화 · 팽창하는 시기를 맞추는 것이 중요하다. 그러나 에트린자이트를 형성하기 위한 황산칼슘($CaSO_4$)과의 반응이 신속하게 발생하여, 석고가 적당한 황산염이온(Sulfate Ion) 공급을 유지하기까지 급속히 용해되지 않으므로 석고만으로는 응결시간을 조절하기 어려워 작업시간 확보를 위한 응결지연제 사용 및 감수 · 작업성 개선을 위한 감수제 사용을 병행하고 있다.

초속경시멘트가 물과 혼합되면 클링커 성분 중 가장 활성이 큰 $C_{11}A_7 \cdot CaF_2$가 칼슘실리케이트상(C_3S, C_2S)에서 용해된 수산화칼슘[$Ca(OH)_2$], 무수석고($CaSO_4$) 및 탄산나트륨(Na_2CO_3) 등과 반응하여 $Al(OH)_2F$, CAH_{10}, C_2AH_8, C_3AH_6, C_4AH_{10} 등 칼슘알루미네이트 수산화물을 생성한다(권극헌, 1990;문한영 외, 1996). 이 수화물은 별도로 용해된 $CaSO_4$와 신속하게 반응하여 칼슘알루미늄모노설페이트(Calcium Aluminum Monosulfate) 수화물($C_3A \cdot CS \cdot H_{12}$)이나 에트린자이트($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$)를 생성하여 미소공극을 충진시켜 조직을 치밀화 시킴으로서, 수 분 후에는 경화가 시작되고 초기에 높은 강도를 발현한다. 그리고 C-S-H 수화물이 생성되어 안정적으로 후기강도가 증진된다. 이러한 화학반응은 아래와 같은 화학식으로 나타낼 수 있으며, 수화과정을 개략적으로 도식화하면 Fig. 3.1.9와 같다(장복기 외, 1998).

$C_4A_3S + 6CH + 2CS + 30H \rightarrow 3(C_3A \cdot CS \cdot H_{12})$

$C3A \cdot CS \cdot H12 + 2CS + 20H \rightarrow (C_3A \cdot 3CS \cdot H_{32})$

$C4A3S + 6CH + 8CS + 90H \rightarrow 3(C_3A \cdot 3CS \cdot H_{32})$

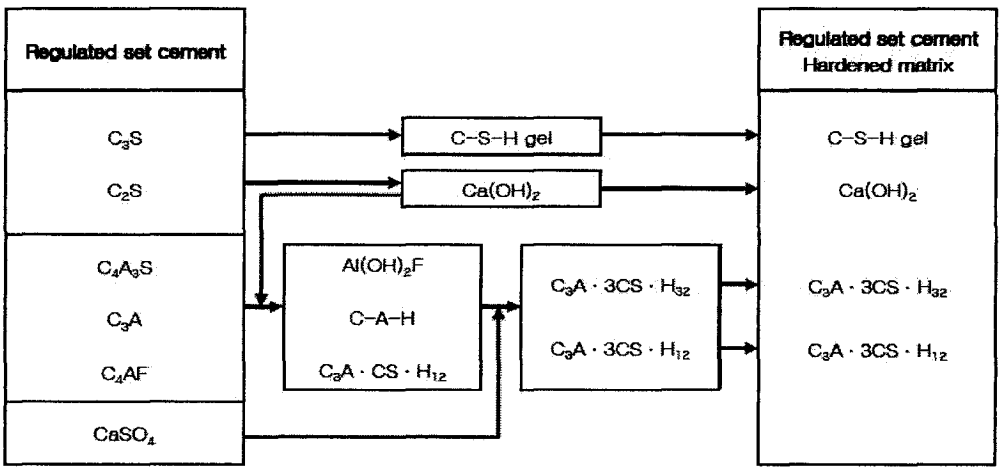


Fig. 3.1.9 기계적으로 조절된 수화반응 메카니즘(쌍용양회, 1999)

또한, 칼슘실리케이트(Calcium Silicate) 상의 수화반응에 의해 에트린자이트 수화물의 골격사이에 C-S-H 수화물이 생성되어 지속적으로 장기강도가 증진된다. 이러한 수화반응이 일어나는 시기는 초속경시멘트 내의 $CaSO_4$ 농도 및 용해속도와 밀접한 관련이 있기 때문에 초속경시멘트에서의 강도발현속도를 적절히 조절하고 팽창 등의 이상 현상이 발생하지 않도록 하기 위해서 $CaSO_4/Al_2O_3$가 최적의 몰(Mole)비가 되도록 석고를 첨가한다. 그밖에 시멘트 화합물의 수화반응은 보통 포틀랜드 시멘트의 경우와 유사하다(권극헌, 1990; 정원경, 2000).

다. 초조강 시멘트

초조강 시멘트는 다음과 같은 특징이 있다.

(1) 분말도가 높다.

(2) C_3S가 많고 C_2S가 적다.

(3) 석고가 많다.

(4) 품질의 변동이 적다.

그리고 제조과정에서 원료의 배합, 소성방법, 분쇄방법의 개선에 따라 다른 성질 저하가 없고, 조기강도가 배로 증대된다. 또한 산화크롬(CrO_3), 형석(CaF_2) 등 특정 성분을 소량 첨가하면 조기강도가 늘어나지만 이들 성분이 첨가되지 않는 것도 있다. 단위AE제량은 단위수량 및 소요공기량을 얻기 위한 것이며, 이것들은 소요 슬럼프를 얻기 위한 것인데, 초조강시멘트의 경우 분말도를 늘렸기 때문에 보통시멘트 보다 약간 많다. 또한 블리딩, 침하, 수축도 보통시멘트보다 시발(始發)이 약간 빠르지만 시공에는 지장이 없다. 초기의 경화속도는 매우커서 급속한 열을 발생하지만 총 발열량은 보통이나 조강시멘트와 거의 같다. 재령 1일의 초조강시멘트 콘크리트 강도는 재령 28일 보통콘크리트 강도의 약 70%에 달하고, 장기강도도 안정하다.

초조강시멘트 콘크리트의 역학적, 물리적, 내구성 등 모든 특성은 보통시멘트 콘크리트와 다르지 않지만 조기에 탈형될 수 있고, 하중을 받는 경우가 많기 때문에 건조 수축 및 크리프 성상에 중요성을 두어야 한다.

라. 알루미나 시멘트

알루미나 시멘트는 Aluminous Cement, High Alumina Cement, Calcium Aluminate Cement라고도 하며, 시멘트 내에 Aluminate($C_3A \cdot 3CaO \cdot Al_2O_3$)가 50%정도 포함되어 있는 시멘트를 말한다. 포틀랜드 시멘트는 규산석회가 주체로 된 시멘트인데 반해, 알루미나 시멘트는 알루민산 석회를 그 주 구성 광물로 한 시멘트이다.

알루미나 시멘트와 포틀랜드 시멘트는 원료의 화학성분, 수화반응 등이 전혀 다르

며 CaO, Al_2O_3는 각각 36~42% 정도이고, Fe 또는 Fe_2O_3는 16%, Si_2O_2는 포틀랜드 시멘트보다 훨씬 적은 4~10%이다. 그러나 알루미나 시멘트 주성분은 CA이다. CA는 수화과정에서 온도에 따라 20℃이하에서는 대부분 CAH_{10}와 소량의 C_2AH_8, 그리고 Al_2O_3 용액인 알루미늄 겔이 생성되고, 35~45℃이상에서는 C_3AH_6이 생긴다. 그러나 상온이나 고온에서는 불완전한 육방층의 수화물이 입방층계 결정인 C_3AH_6와 알루미나 겔로 전이 또는 전화(Convection)된다. 이때 반응식은 다음과 같다.

$$3CAH_{10} \rightarrow C_3AH_6+2AH_3+18H$$

전화는 상온에서 완만하게 고온에서는 급속히 일어나며, 시멘트 페이스트의 조직이 다공질로 변화하여 공극률이 매우 증가하는데, 변화 후에는 고체 부분의 체적이 약 1/2로 줄어들고 강도는 심하게 저하한다. 포틀랜드 시멘트와 석고 또는 무수염 $CaSO_4$를 중량비 1:4로 하고, 알루민산염(CA와 C_5A_3)은 석고와 반응하여 시멘트 페이스트의 강도는 공극률이 적었을 때 대폭 증가한다. 그리고 온도 10~20℃일 때 가장 높은 강도를 얻게 되고 온도가 높아질수록 강도는 저하되고(Fig. 3.1.10) 30℃ 부근에서의 응결도는 현저하게 늦어진다. 그러나 저온에서는 경화에 많은 영향을 미치지는 않는다. 알루미나 시멘트, 염화칼슘, 석고 포틀랜드 시멘트에 섞으면 유리되는 Ca^{2+}로 수화물 C_4A가 생성되어 급속히 응결된다. 재령의 경과와 더불어 강도의 증진은 매우 적어지며 오랜 세월이 지나면 결정의 전화로 강도가 저하된다. 알루미나 시멘트 페이스트의 결정 전화는 고온습윤 상태에서 급속히 진행되어 콘크리트 강도는 대폭 떨어진다. 전화에 의한 강도저하는 고온상태가 되기 전에 경과된 재령에도 불구하고 항상 일어나며, 고온상태를 보전하면 강도가 계속 떨어져서 Fig. 3.1.11에서와 같이 일정치에 접근한다. 완전 전화 후의 강도를 전화강도라 한다.

알루미나 시멘트는 응결시간이 짧고 타설 후 4시간 만에 100kg/cm^2 이상인 강도가 발휘된다. Fig. 3.1.12는 알루미나 시멘트가 보통 포틀랜드 시멘트, 조강시멘트에 비하여 조강성이 좋다는 것을 나타낸다.

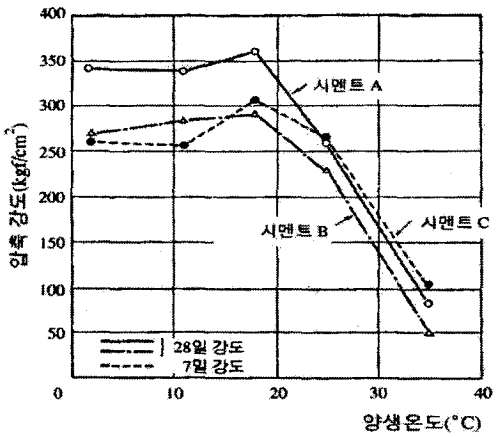


Fig. 3.1.10 알루미나 시멘트 콘크리트 강도에 미치는 온도의 영향(정일영, 2004)

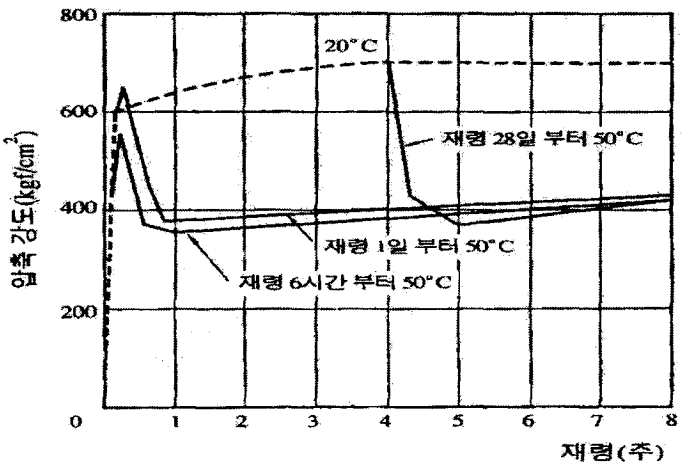


Fig. 3.1.11 알루미나 시멘트 콘크리트의 결정 전환 후의
강도에 미치는 온도 이력의 영향(정일영, 2004)

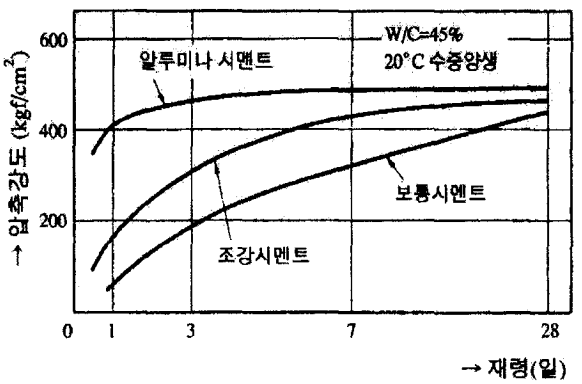


Fig. 3.1.12 각종 시멘트를 사용한 콘크리트 압축강도(정일영, 2004)

Aluminate는 석고가 없는 상태에서 수화가 아주 빨라 물과 급격히 반응한다. Aluminate는 발열도 크며 발열에 의한 수화작용에 의한 수축도 크다. $CaSO_4$는 이러한 급격한 수화반응을 적당히 조절하며 Aluminate와 반응하여 $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$(ettringite)를 생성하고, 석고가 소비되고 나면 생성한 ettringite는 아직 반응하지 않은 Aluminate와 반응하여 $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$(monosulfate hydrate)로 바뀐다. 보통 포틀랜드 시멘트에서 그 양은 6~12%를 차지하며 수화열이 200cal/g으로 4성분 중 가장 높다.

마. CSA(3CaO · 3Al2O3 · CaSO4 : Calcium SulphoAluminate) 시멘트

보통 포틀랜드 시멘트는 시멘트 경화체에서 항상 발생되는 건조수축에 의한 균열 발생, 느린 경화속도, 낮은 인장강도 등의 문제점이 발생되며, 이를 해결하기 위해 팽창 시멘트인 CSA 시멘트가 부각되고 있는 실정이다.

팽창시멘트란 KS F 2562(콘크리트용 팽창제)에 의하면 팽창제를 시멘트 및 물과 함께 혼합할 경우 수화 반응에 따라 에트린가이트(Ettringite) 또는 수산화칼슘 등을 생성하여 모르타르 또는 콘크리트를 팽창시키는 작용이 있는 혼화제료를 말한다. 현재는 팽창성분을 단독적으로 소성·분쇄하여 팽창성 혼합재로서 적량 시멘트에 혼합하는 경우와 공장에서 팽창성분과 시멘트를 혼합하거나 또는 소성과정에서 팽창성분을 함유한 클링커를 소성하여 분쇄한 것이 있다(한국콘크리트학회, 1996).

CSA 시멘트는 자연에서 산출되는 hauyne(아우인)의 모든 Na와 Si성분을 Ca와 Al로 치환시킨 화합물로 hauyne[$(Na, Ca)_{4-8}(Al_6Si_6O_{24})(SO_4S)_{12}$]의 결정구조와 거의 같기 때문에 hauyne이라고도 부른다.

CSA 시멘트는 수화과정 초기부터 에트린자이트가 급속히 생성되는데 에트린자이트의 급속한 생성은 다량의 수분을 요구하므로, 흙 속의 간극으로부터 다량의 간극수를 빼앗아 함수비를 저하시킴과 동시에 그 간극 중에 침상결정으로 성장하여 3차원적으로 연결된 골격구조를 형성해서 간극을 충진한다. 에트린자이트 결정 상호간의 얽힘은 흙 입자간의 고결력을 증가시켜 조기의 강도를 발현하게 하며, 속경성 성분의 수화 이후에는 여분의 C_3S가 활발히 수화하게 되는데 이때 생성하는 tobermorite gel(C-S-H gel)은 미수화 입자간에 형성된 에트린자이트 골격구조내의 간극을 충진하여 조직의 치밀화와 강도를 증진시킨다. 또한 중금속 흡착능력이

우수하여 중금속을 함유한 산업폐기물에 효과적이며, 에트린자이트 생성에 의한 강도발현에는 부식산의 영향이 그 이상 현저하게 미치지 못하므로 고유기질토의 개량에 효과적이다. Fig. 3.1.13은 보통 포틀랜드 시멘트와 CSA 시멘트의 팽창특성을 나타낸 것으로, CSA 시멘트의 초기 팽창성이 보통 포틀랜드 시멘트보다 훨씬 크고, 장기 건조수축은 작다는 것을 보여주고 있다.

CSA 시멘트에 일정량의 무수석고($CaSO_4$)를 첨가하면 수화 촉진으로 다량의 간극수를 소비함으로써 응결시간이 단축된다. CSA의 수화반응이 진행되기 위해서는 일정한 농도의 SO_3^{2-}가 존재해야 하는데, 무수석고를 적당량 첨가하면 CSA의 수화반응과 C_3S의 수화를 촉진시켜 더 많은 에트린가이트가 생성되므로 더욱 더 치밀한 경화체를 형성할 수 있다.

CSA계 고화재는 보오크싸이트, 석회석, 석고 등을 1200℃ 이상으로 소성하여 $C_4A3S \cdot C_2S$를 생성한다. 이에 CaO, SiO_2를 혼합, 분쇄하여 제조하는 것으로 이 고화재는 수화반응 중에 $C_2A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$(ettringite)가 침상결정의 수화물을 생성한다. 이 ettringite는 침상구조를 가지며 이 침상구조의 수화물이 반응에 의해 성장하면서 고화 경화체의 미세 공극을 채워 치밀한 구조를 갖게 한다.

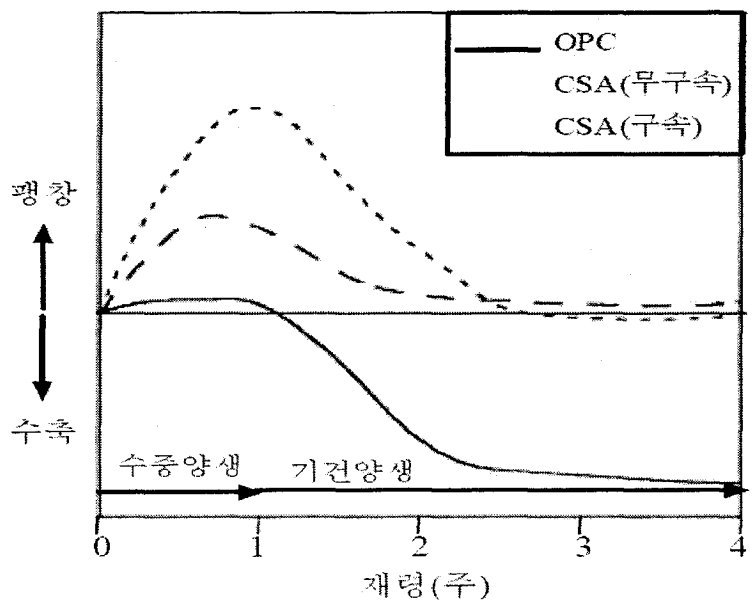


Fig. 3.1.13 보통 포틀랜드 시멘트와 CSA 시멘트의 팽창특성
(한국건자재시험연구원, 1996)

CSA 계열 시멘트의 주성분은 크게 4가지로 구분할 수 있으며, 다음과 같다.

(1) CSA계 광물

$3CaO \cdot 3Al_2O_3 \cdot CaSO_4$ 성분을 중량백분율 60% 이상을 함유하는 클링커이다. 이 CSA계 광물은 수화시에 포틀랜드시멘트, 생석회 또는 소석회, 무수석고와 반응함으로써 에트린자이트 또는 모노설페이트(monosulfate)를 형성하여 조강성 조성물이 속경성을 갖게 한다. CSA계 광물의 분말입도는 블레인(blaine) 비표면적으로 3,000~6,000cm^2/g이 가능하며, 4,000±500cm^2/g이 가장 바람직하다. 이러한 블레인 비표면적은 초기의 반응속도에 영향을 미치는 요소로서 비표면적이 높을수록 빠른 반응속도를 나타낸다.

(2) 천연 무수석고

반수석고나 이수석고와 비교하여 용해속도가 느리기 때문에 CSA계 광물과의 반응성에 적합하고, 고강도 및 고화된 토양체의 안정성에 기여한다. 이 천연 무수석고는 CSA계 광물, 생석회 또는 소석회와 반응하여 에트린자이트를 형성하는 바, 그 배합량은 CSA계 광물, 생석회 또는 소석회의 양에 의해서 결정되며, 바람직하게는 CSA계 광물/무수석고의 중량비가 1이상 3이하로 하며 2.5±0.1이 가장 좋다. 이 CSA계 광물/무수석고의 비는 장기 재령에서의 안정성(치수안정성) 및 내구성에 영향을 미치며, 고강도를 발현하는 데 큰 기여를 한다.

(3) 생석회 또는 소석회

포졸란 반응에 의해 수화물을 생성하여 강도 발현에 기여할 뿐만 아니라, 생석회는 초기에 반응하여 발열하며, 수산화칼슘을 형성함으로써 토양의 함수비를 저감시켜 초기 강도확보와 함께 건조 수축에 의한 균열방지에 도움을 주는 구성요소이므로, 소석회보다는 생석회를 사용하는 것이 유리하다.

(4) 규불화염

Fluosilicic acid의 Salt형으로, fluosilicic acid의 주로 Akaline Earth metal 또는 2개의 Akalin metal이 결합하여 생성된다. CSA계 광물과의 수화반응을 경화가 되는 시점이후부터 촉진시키고 또한 토양으로부터 장기적으로 용출되는 실리카(SiO_2), 알루미나(Al_2O_3) 성분의 용출 속도를 촉진시킴으로써 포졸란 반응을 앞당기게 하여, 특히 초기 재령에서의 고강도에 기여한다.

바. 급결성 고화재의 강도 발현 메카니즘

(1) 고화 반응

(가) 에트린자이트 생성

에트린자이트는 다량의 수분을 결합수로 가지고 있기 때문에 물비를 저하시켜 토립자의 이동을 구속하고 결합이 가능한 상태로 만든다. 규불화염을 포함하면 다량의 에트린자이트의 생성이 촉진된다.

(나) 포졸란반응

규불화염 첨가는 에트린자이트의 생성을 촉진시킬 뿐만 아니라 흙과의 포졸란 반응을 앞당겨서 속경화 · 고강도화가 가능하게 된다.

(다) 토립자의 응집

포틀랜드시멘트, 생석회 또는 소석회로부터 용출된 초기 다량의 칼슘이온은 토립자를 응집시킨다.

(2) 고화 메카니즘

조강성 조성물을 혼입하여 흙의 강도를 증진시키는 공법은 토사에 대한 물성개량과 포졸란 반응에 의한 경화가 전부여서 충분한 강도, 함수비 저하, 이온교환 중단, 소성지수 저감, 수화물 생성경화, 에트린자이트 생성(토양의 네트워킹), 토립자 구

속 등 각종 화학적, 물리적 반응을 통해 획기적 강도증진을 달성할 수 있게 된다. 조강성 유동화 처리토의 강도발현 메카니즘은 흙 자체의 개량효과, 첨가물에 기인한 수화반응, 토양에서 가용되는 성분과 첨가물의 반응의 3단계로 나누워진다.

조강성 조성물의 특성에서 기술한 바와 같은 CSA계 광물을 주성분으로 하는 클링커 분말과 조강성 광물, 초속경시멘트, 조강시멘트 또는 초조강시멘트로 이루어진 군에서 선택되는 어느 하나 이상을 건설 발생토사와 균질하게 혼합한다. 여기서 사용량은 대상 흙의 특성, 복구 후의 요구 강도, 굴착 복구공사 장소, 시간 등에 따라서 결정된다. 그 다음단계로 혼합물에 배합수를 부가하고 슬러리를 제조한다. 슬러리의 유동성을 증가시키기 위해서 계면활성제를 더 부가할 수 있다. 계면활성제는 입자사이에 윤활막을 형성하여 각 성분들 사이의 상호 부착력을 저감시켜 개선된 유동특성을 나타내게 하는 것으로서, 사용 가능한 그 계면활성제의 예를 들면, 멜라민계 고유동화제(Melamine Based Superplasticizer), 나프탈렌계 고유동화제(Naphthalene Based Superplasticizer), 폴리카르복실계 고유동화제(Polycarboxylacid Based Superplasticizer), 리그노설페이트계 고유동화제(Lignosulphonate Based Superplasticizer) 등이 있다. 마지막 단계로 슬러리를 적용부위에 채우고 양생하면 완료된다.

사. 고로슬래그 시멘트

고로슬래그는 제철소에서 선철을 제조하는 과정에서 발생하는 용융 슬래그를 물로 급랭시켜 만든 일종의 산업부산물로 이를 클랭커와 혼합하여 분쇄한 시멘트를 고로슬래그 시멘트라고 한다. 고로슬래그 시멘트의 경우 보통 포틀랜드 시멘트에와 비슷한 성분으로 이뤄져 있으나, 보통 포틀랜드 시멘트에 비해 석회(CaO)의 함유량이 7~8% 낮고 반면에 실리카(SiO_2)와 알루미나(Al_2O_3) 함유량이 많다. 고로슬래그 시멘트의 고결은 보통 포틀랜드 시멘트의 수경성과 다르게 잠재수경성이라는 반응 기구를 지닌다. 이는 보통 포틀랜드 시멘트의 수경성은 물 분자와 접하게 되면 성분들이 용출이 시작되면서 수화물을 형성하여 경화하는 성질인 반면 잠재수경성은 단순히 물과의 접촉만으로는 성분들이. 용출되지 않고 자극제의 존재가 반드시 필요하며 이 자극제가 고로슬래그의 반응을 촉진한다. 고로슬래그는 물과 접

한 직후 Ca^{2+}가 용출되고 그 표면에 투과성이 나쁜 부정형의 ASH_6의 피막이 형성되며 이 피막으로 인해 고로슬래그 미분말 입자 속으로 물의 침투 및 고로슬래그 미분말 입자로부터의 이온의 용출이 억제되기 때문에 수화반응은 진행되지 않는다. 그러나 알칼리 자극제에 의해 OH^-가 흡착되면 유리구조가 파괴되어, SiO_2, Al_2O_3, CaO, MgO의 용출이 촉진된다. 일단 반응이 시작되면 고로슬래그 자신이 용출하는 성분에 의해 높은 pH를 유지함으로써 고로슬래그 중에 함유되어 있는 CaO와 SiO_2가 용출되어, 액상에서 포틀랜드 시멘트의 수화와 같은 반응이 일어나게 되고, CaO-SiO_2-H_2O계의 수화물을 생성하기 때문에 Fig.3.1.14와 같은 메커니즘으로 경화 현상이 일어난다.

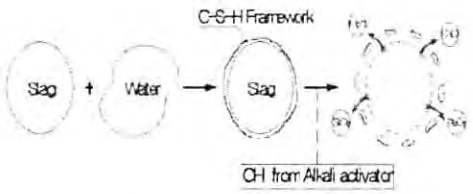
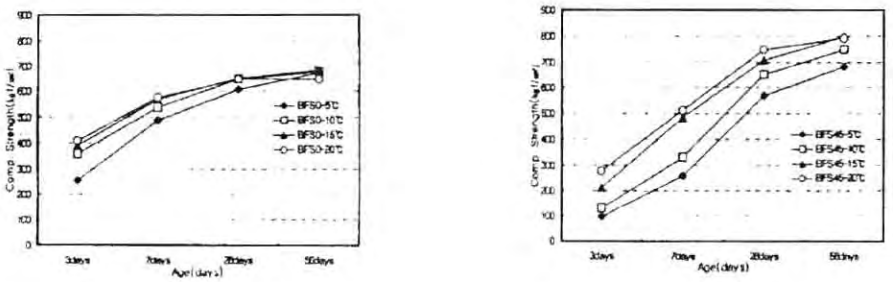


Fig. 3.1.14 알칼리 자극제에 의한 고로슬래그 미분말 입자의 활성 메커니즘

고로슬래그 시멘트는 Fig. 3.1.15에서 보이듯 양생온도에 따른 실험에서 보통 포틀랜드 시멘트에 비해 초기강도(3일, 7일)는 낮으나 장기강도가 높고, 양생온도의 영향이 좀더 크다는 것을 알 수 있다.

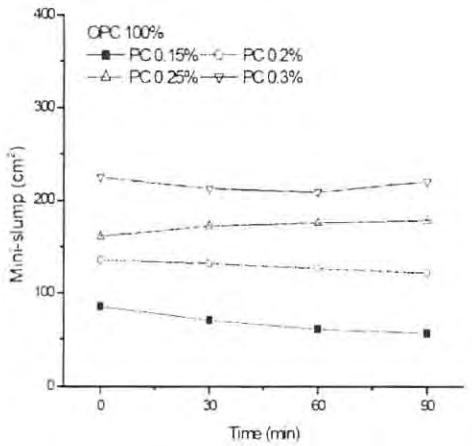


(a)보통 포틀랜드 시멘트 (b) 고로슬래그 시멘트

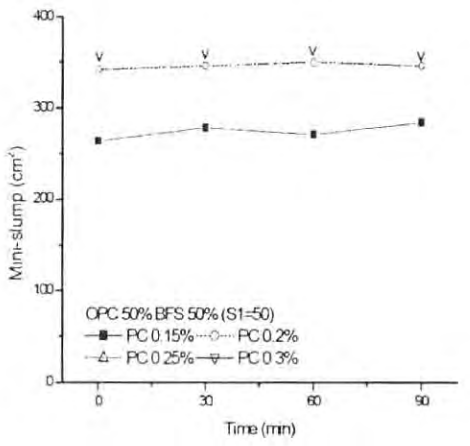
Fig. 3.1.15 양생온도에 따른 압축강도(김태근 등, 2001)

고로슬래그 시멘트의 유동성은 Fig. 3.1.16에 나타나 있다. 고로슬래그(BFS)는 분

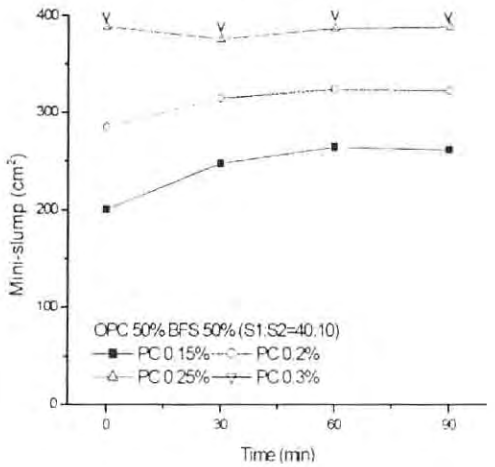
말도의 정도의 따라 S1은 3,500cm^2/g으로 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)와 비슷한 분말도를 가지고 있는 고로슬래그이고, S2는 9,600cm^2/g이다. 또한 폴리카르복시산계 고유동화제(PC)를 의미한다. Fig. 3.1.16에서 a와 b를 비교하면 보통 포틀랜드 시멘트에 비해 고로슬래그 시멘트의 유동성이 좋다는 것을 알 수 있다. 또한 고로슬래그 시멘트에서 b, c, d의 그래프를 비교하면 미분말의 고로슬래그를 포함할수록 유동성이 감소하는 것을 알 수 있다. 유동성은 b에서 가장 크게 나왔으며 미분말이 포함될수록 유동성은 감소하지만 전체적으로 고로슬래그 시멘트가 보통 포틀랜드 시멘트에 비해 유동성 좋다는 것을 알 수 있다.



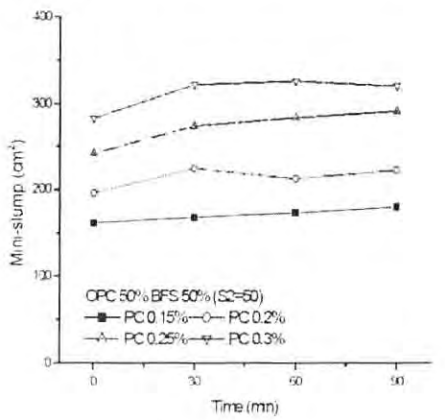
(a) OPC 100%



(b) OPC 50%, BFS 50%(only S1)



(c) OPC 50%, BFS 50%(S1:S2=3:2)



(d) OPC 50%, BFS 50%(only S2)

Fig. 3.1.16 보통 포틀랜드 시멘트와 고로슬래그 시멘트의 유동성 비교

고로슬래그 시멘트는 한국산업규격 KS L 5210에서 고로슬래그 혼합량을 기준으로 Table 3.1.5과 같이 1종, 2종, 3종으로 분류하고 있다.

Table 3.1.5 고로슬래그 시멘트의 분류 (KS L 5210)

항목			1종	2종	3종
슬래그 함유량 (%)			5초과 30이하	30초과 60이하	60초과 70이하
분말도	비표면적(㎠/g)		3,000	3,000	3,300 이상
안정도	오토클레이브 팽창도 또는 수축도 (%)		0.20 이하	0.20 이하	0.20 이하
응결시간	길모어 (Gilmore)	초결 (분)	60 이상	60 이상	60 이상
		종결 (시간)	10 이하	10 이하	10 이하
	비카트 (Vicat)	초결 (분)	45 이상	60 이상	60 이상
		종결 (시간)	7 이하	10 이하	10 이하
강도	압축강도	3일(MPa)	7.0 이상	6.0 이상	5.0 이상
		7일(MPa)	15.0 이상	12.0 이상	10.0 이상
		28일(MPa)	28.0 이상	28.0 이상	27.0 이상
모르터의 공기 함유량 (%)			12 이하	12 이하	12 이하
무수황산 (SO_3, %)			3.0 이하	4.0 이하	4.5 이하
강열감량 (%)			3.0 이하	3.0 이하	3.0 이하
황 분 (S, %)			2.0 이하	2.0 이하	2.0 이하

5. 급결성 유동화 처리토의 배합설계

가. 토사 특성

유동화 처리토의 주요 재료는 토사로써 토공작업에 부적당한 재료로 간주되고 있는 고함수비의 점토, 실트도 사용할 수 있으며 입경이 40mm이하의 자갈을 포함하는 흙의 경우에도 주요 재료로 사용할 수가 있다. 건설 발생토의 거의 모든 흙을 주요 재료로 사용할 수 있지만, 토질 안정처리를 하지 않고 직접 재이용할 수 있는 양질의 흙은 비용 면에서 유리한 것이 많다. 반면에 점성토나 건설이토는 사토처리 비용이 발생하기 때문에 유동화 처리토의 주요 재료로 이용할 수 있으면 유효하다. 또한 한번 뒤채움 등에 이용된 후에 재굴착된 유동화 처리토는 건설 발생토로서 취급할 수 있지만 이 흙도 다시 유동화 처리토의 주요 재료로 이용할 수 있다. 다만 재굴착된 처리토의 일축압축강도가 2~5kg/cm^{2}정도면 그대로 이용할 수 있지만 그 이상의 강도인 경우에는 미리 분쇄할 필요가 있다.

나. 조정 슬러리

주요 재료가 모래질 계통의 흙일 경우에는 재료분리를 방지하기 위하여 비중을 조정한 조정 슬러리를 첨가하여 일정량의 세립분을 확보할 필요가 있다. 여기서 조정 슬러리는 이러한 목적에 이용되는 비중을 조정한 슬러리로서 점토나 실트 등의 세립토에 물을 첨가하여 슬러리 상태로 만들거나, 입도가 불량한 흙의 경우에는 기포 등을 혼입하여 조립분의 분리를 볼 수 없는 상태의 슬러리로 조정한 것이다. 조정 슬러리의 원재료로서는 토취장에서 채취한 세립토, 혹은 건설 공사 등에 따르는 이토, 유해물질을 포함하지 않는 정수장의 점토, 하천 · 호수와 늪 등의 바닥흙이 이용된다.

다. 급결형 고화재

고화재는 주로 시멘트계 고화재, 시멘트, 시멘트 석회복합계 고화재, 석회계 고화재가 이용된다. 유동화 처리토의 고결 후 강도는 고화재의 첨가량 등의 배합조정에

따라 삽으로 인력굴착이 가능한 일축압축강도가 1~2kg/cm^{2}로부터, 구조물의 지지 지반으로서 이용할 수도 있는 고강도 유동화 처리토 70~100kg/cm^{2}까지 조절할 수 있다.

라. 혼화제

혼화제는 유동성이나 고화시간 등의 조정을 위해서 첨가되는 재료이다. 유동화 처리토는 시간의 경과와 함께 시멘트의 고화가 시작되므로 플랜트로부터 떨어진 현장까지 운반되는 경우에는 유동성이 떨어지는 데, 유동성을 일정하게 유지하는 지연제나 고화가 진행된 유동화 처리토의 유동성을 회복하는 분산제 등이 사용된다. 특히 공용 중의 도로하부의 매설관의 뒤채움과 같이 뒤채움 후에 복구가 급하게 이루어지는 경우 등에는 고화 속도를 증진시키는 급결성 혼화제가 시용되기도 한다.

6. 석탄회 활용기술

석탄회의 활용에 관한 연구를 통해 석탄회의 활용비율이 점차 증가하는 일본의 사례를 통해, 국내 석탄회의 활용방안을 모색하고자 하였다. 일본의 석탄회 발생량은 Fig. 3.1.17에 나타낸 것과 같고, 석탄회의 유효이용 상황은 Fig. 3.1.18에 나타낸 것과 같다.

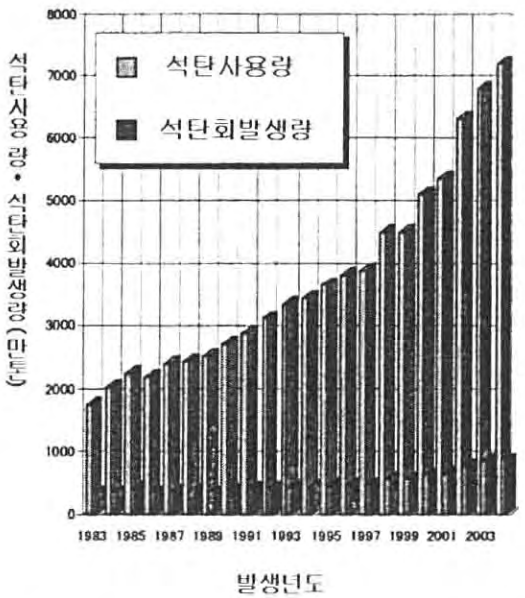


Fig. 3.1.17 일본 전역의 석탄회 발생량 추이

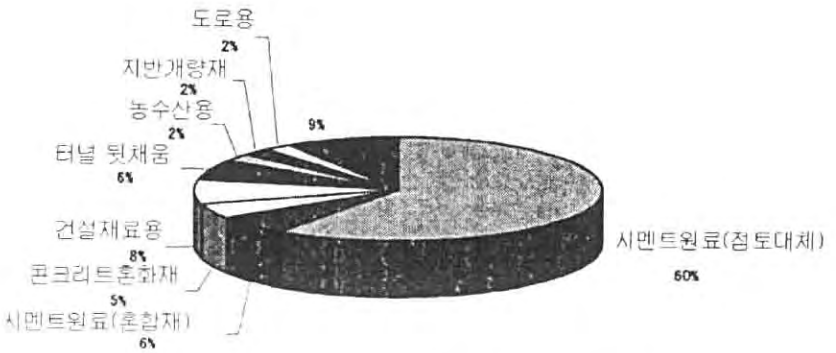


Fig. 3.1.18 일본의 석탄회 유효이용상황

가. 석탄회 이용에 관한 유의점

석탄회의 이용에 관해서는 운반, 저장 및 이용에 있어서 각종법규나 주변환경에 대한 영향 등을 고려하여 적절한 방법을 선정해야한다.

석탄회를 운반 할 경우에는 비산(飛散)·유출 등 주변 생활환경에 영향을 미치지 않도록 유의한다. 석탄회를 덤프트럭에 적재할 때에는 도로교통법에 준하여 과적재, 짐 낙하 등이 발생하지 않도록 적재 상태를 확인하고 운반 중의 비산·유출 등을 방지하기 위한 짐 받침을 시트 등으로 덮는다. 적재 장소에는 필요에 따라 담당자를 배치하고 적재 상태를 확인함과 동시에 타이어를 세정하는 등의 평범하면서도 기본적인 청소 대책을 실시한다. 그리고 안전 확보 및 진동, 소음, 분진 등 생활환경의 보전에 노력함과 동시에 운반경로의 교통상황 등을 파악하여 안전한 운행관리에 노력한다.

석탄회를 성토재료에 이용할 때까지 임시로 저장할 경우에는 품질이 변화하지 않도록 적절한 대책을 강구함과 동시에 주변 환경에 영향을 미치지 않도록 유념한다. 강우나 일사에 의한 함수비의 변화에 따른 석탄회 품질 변화를 방지하기 위해 지붕, 시트 등으로 석탄회를 덮을 필요가 있다. 본 대책을 시행함으로써 표류수에 의한 수질 오탁(汚濁)이나 분진의 비산을 방지할 수 있다.

나. 석탄회의 용출시험 결과

성토시험에서 사용한 석탄회, 건설발생토 및 혼합토(50:50)의 용출시험 결과를 Table 3.1.6에 제시하였다. 그리고 2001년 3월 28일자의 환경부고시 제16호에 의해 환경부고시 제46호(토양의 오염에 관계되는 환경기준에 대해)의 일부가 개정되어 새롭게 "불소"와 "붕소"의 항목에 대해서도 시험을 실시하였다.

Table 3.1.6 일본의 용출시험 결과(2001년도 현장실험 결과)

항목	단위	토양환경기준	클린커 단위	불량토 단체	혼합토(50:50)
pH		-	-	7.1	-
카드뮴	mg/l	0.01 이하	<0.0005	<0.0005	<0.0005
납		0.01 이하	<0.001	0.003	<0.01
6가크롬		0.05 이하	<0.005	<0.005	<0.005
비소		0.01 이하	<0.001	0.002	<0.001
총 수은		0.0005 이하	<0.0005	<0.0005	<0.0005
셀렌		0.01 이하	<0.001	<0.002	<0.001
불소		0.08 이하	0.2	-	<0.1
붕소		1 이하	0.04	-	0.03

다. 일본 석탄회의 기본성질

석탄회는 다짐성능이 뛰어난 미세한 모래로 시멘트 등의 고화재 알칼리 반응이 있으면 장기적으로 경화작용이 기대되는 재료이다. 석탄회는 다음에 나타낸 것과 같이 뛰어난 물리적·화학적 성질을 가진 재료이다.

○ 물리적 성질

비소성 재료 → 모래 재료로서의 성질

입도분포가 양호 → 다짐 성능에 뛰어난 재료

100μm 이하의 미분말 → 흡수 효과

입자형상 : 구형 → 다짐 성능이 높다

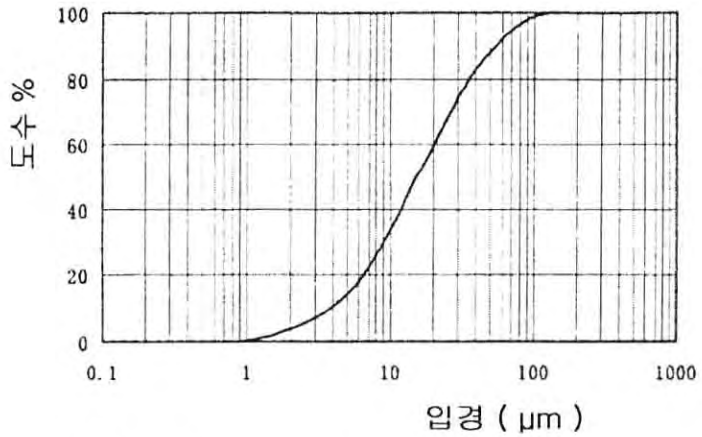
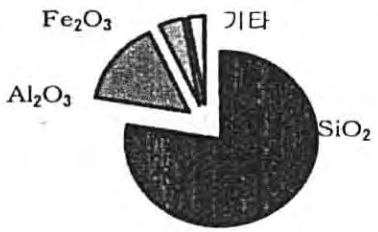


Fig. 3.1.19 일본 석탄회의 입도분포

○ 화학적 성질

주성분 : 실리카(SiO_2), 알루미나(Al_2O_3) → 포졸란 반응에 따른 장기 경화작용
화학적으로 안정된 경화작용



포조란 경화반응

$Ca(OH)_2 + S \rightarrow C_xS_yH_z$
$Ca(OH)_2 + A \rightarrow C_xA_yH_z$
$Ca(OH)_2 + A + S \rightarrow C_aA_xS_yH_z$

C : CaO, S : SiO_2, H : H_2O, A : Al_2O_3

Fig. 3.1.20 일본 석탄회의 화학 조성

라. 석탄회 사용시의 개량효과

석탄회를 사용한 안정처리에 관해서는 다음과 같은 개량효과가 기대된다.

① 대상토의 물성 개선효과(점성토→사질토)

② 함수비 저감효과

③ 다짐 성능의 향상

④ 장기적 경화작용(시멘트 등의 고화처리재와의 재반응에 의한 경화작용)

석탄회가 가진 성질을 유효하게 활용하면 안정처리재로서 이하에 나타낸 것과 같은 뛰어난 특성을 활용할 수 있다.

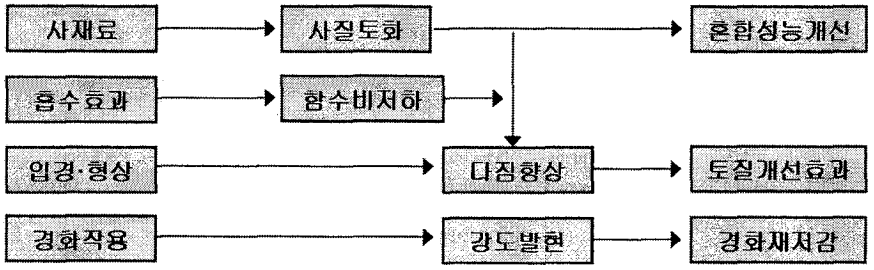


Fig. 3.1.21 석탄회를 사용한 안정처리의 특성

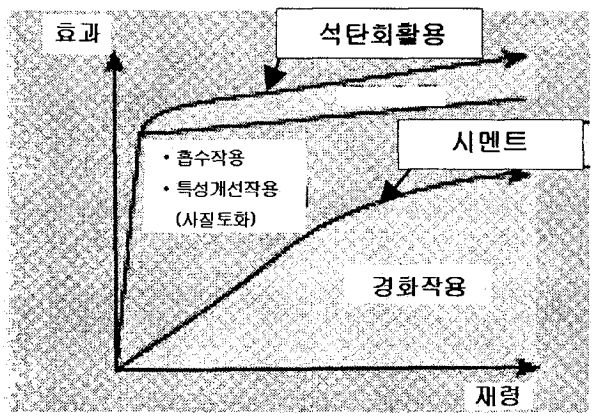


Fig. 3.1.22 석탄회의 개량효과

석탄회를 사용한 안정처리의 개량특성은 Fig. 3.1.22에 나타낸 것과 같이 개량초기부터 장기에 걸쳐 효과를 발휘한다.

(1) 석탄회 사용시의 토질개선 효과

석탄회를 사용한 안정처리에 있어서는 개량대상이 되는 연약 점성토의 물리적 성질이 개량 후에는 시공성 면에서 뛰어난 사질토로 개선된다. 이 때문에 개량 후의 흙이 시공으로 흐트러져도 재령기간이 짧다면 재다짐을 함으로써 강도를 유지할 수 있다. 혼합토를 일단 임시로 저장한 후에 다짐 마무리를 할 필요가 있는 경우나 그에 의해 시공성이 현저하게 향상할 경우에는 석탄회의 활용을 우선적으로 검토한다. 석탄회가 가진 모래 재료로서의 성질에 의해 연약한 점성토가 사질토로 물성이 개선되는 효과가 기대된다.

개량재를 혼합한 후, 2시간 경과한 시점의 개량토의 물리적 특성을 보면 Fig.

3.1.23에 표시한 대로 석탄회의 첨가에 의한 개량효과는 내부마찰각, ϕ 증가 형태로 나타난다.

이와 같이 개량재 혼합 후의 아주 초기 단계에 있어서는 개량재의 기본특성을 현저히 표현할 수 있다. 시멘트 등 종래의 고화재 개량효과가 점착력, C의 증가, 다시 말해 경화하는 작용이라는 점에 비해 석탄회의 개량효과는 내부마찰각, ϕ의 증가 형태, 다시 말해 개량토가 사질토로 물성이 개선 된 것을 알 수 있다.

시멘트 개량의 내부마찰각, ϕ의 증가가 보이는 것은 일정한 수준의 석탄회가 첨가되어 있기 때문이다. 한편 석탄회가 사질토로 물성개선 효과를 발휘하는 것은 시멘트 등의 고화재가 일정 수준 첨가되어 경화작용과 병행되는 경우에 효과적으로 그 물성 개선효과가 발휘되는 것이다.

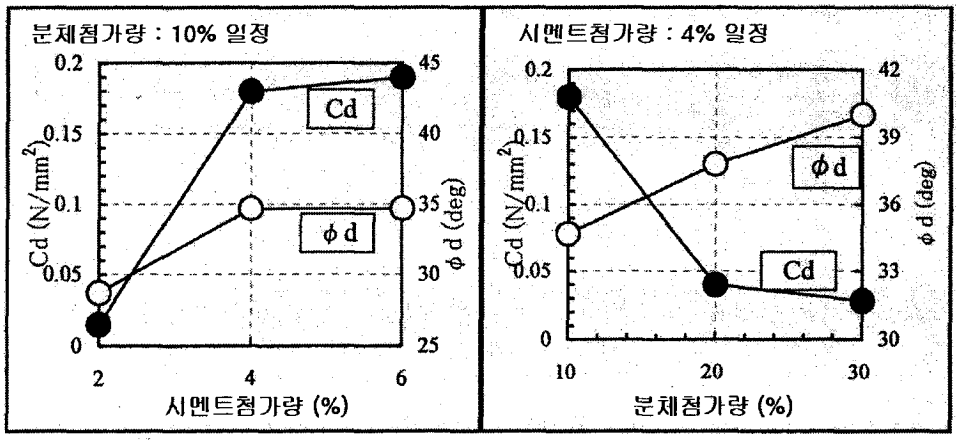


Fig. 3.1.23 재령에 있어서의 개량특성

시멘트 안정처리의 기준 재령(7일)도 Fig. 3.1.24에 나타낸 것과 같이 석탄회의 첨가량 증가에 의해 개량토의 내부마찰각이 증가하여 내부마찰각, ϕ=35도 정도까지 기대할 수 있다. 그리고 석탄회에 의해 물성이 사질토로 개선된 개량토는 경화과정이 틀려도 재차 다짐하면 Fig. 3.1.25에 나타낸 것과 같이 흐트러지지 않은 흙과 비교하여도 큰 강도저하를 일으키지 않는 등 사질토화의 효과는 안정된 것이다.

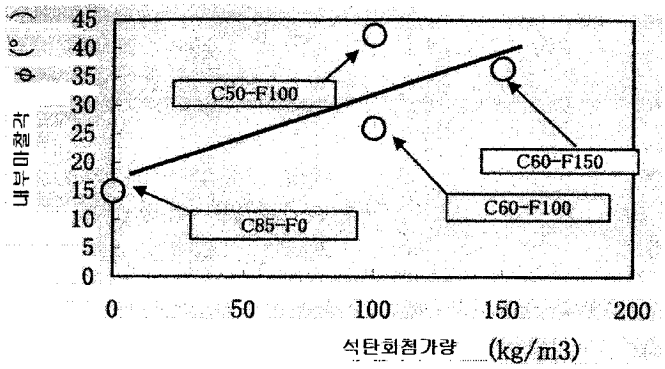


Fig. 3.1.24 고함수 점성토의 개량특성

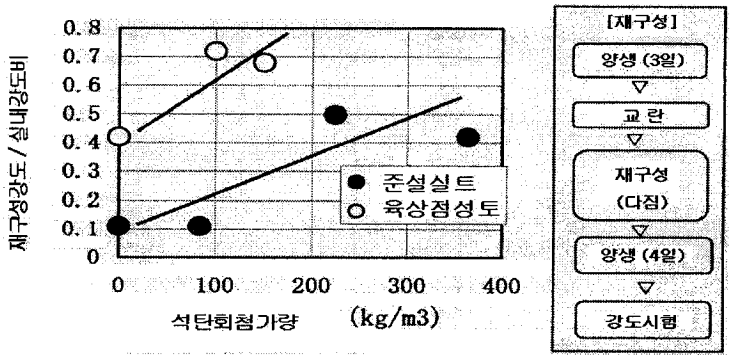


Fig. 3.1.25 경화과정에서 교란시킨 흙의 강도 유지 성능

(2) 가수효과

석탄회는 수분함량 1% 미만(가습회를 사용한 경우 : 5~7%)으로 매우 건조한 분체이며, 석탄회의 첨가에 의해 흙의 물성이 건조측으로 이행된다. 석탄회의 첨가에 의한 함수비의 개선효과는 Fig. 3.1.26과 같다.

$$\omega SF = \frac{m_{sw} + m_{fw}}{m_s + m_f} = \frac{\omega_s \times m_s + m_{fw}}{m_s + m_f}$$

m : 질량, ω = 함수비

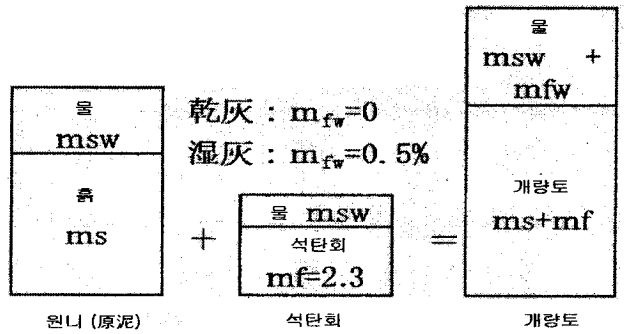


Fig. 3.1.26 석탄회의 첨가에 의한 함수비의 개선효과

(3) 다짐 정도의 개선효과

석탄회를 사용한 안정처리는 개량토의 사질토화 및 함수비 저하작용 등에 따라 다짐성능이 향상된다. Fig. 3.1.27에 나타낸 것과 같이 석탄회의 첨가에 따라 흙의 물성이 건조측으로 이행되므로 다짐을 할 때 건조측으로 이행하여 밀도개선효과를 기대 할 수 있다. Fig. 3.1.28에는 석탄회를 활용한 개량재의 다짐 곡선을 제시하였다. 석탄회의 단위체적중량(부피비중)이 γ=1.0으로 가볍기 때문에 겉보기에는 다짐곡선이 최대 건조밀도가 저하하지만 최적함수비는 건조측으로 이행된다. 하지만 이것을 간극비로 보면 Fig. 3.1.29와 같이 석탄회의 첨가에 따라 간극이 효율적으로 채워져 다짐 성능이 개선되는 것을 알 수 있다. 이 때문에 개량재의 첨가량이 많아도 토량 변화율은 시멘트 등의 안정처리와 다르지 않다.

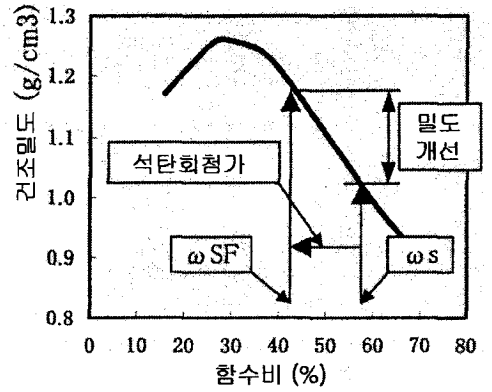


Fig. 3.1.27 함수비 저하에 의한 효과

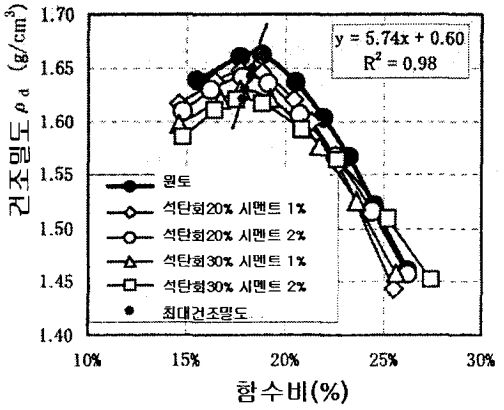


Fig. 3.1.28 다짐곡선

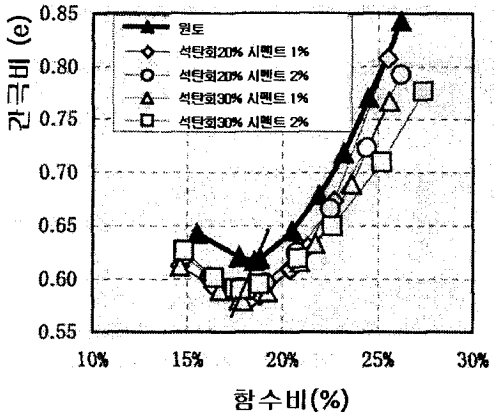


Fig. 3.1.29 포화곡선

마. 경화작용

(1) 석탄회의 경화작용

석탄회를 사용한 안정처리는 석탄회가 가진 포졸란 경화반응성으로부터 경화작용이 예상되고 석탄회 양의 약 20%가 경화재와 같은 작용을 할 것으로 기대된다. Fig. 3.1.30에 목표강도를 얻기 위해 석탄회를 활용했을 때의 시멘트양과 목표강도를 시멘트 단독으로 만족하기 위해 필요한 시멘트 양의 관계를 제시하였다.

이 그림에서도 분명히 알 수 있듯이 현행의 기준재령인 7일 강도는 저감한 시멘트 양의 약 5배의 석탄회를 첨가하면 동등한 강도를 발현시킬 수가 있다. 다시 말해 석탄회는 시멘트 20%의 경화재로서의 효과를 가지고 있는 것이다.

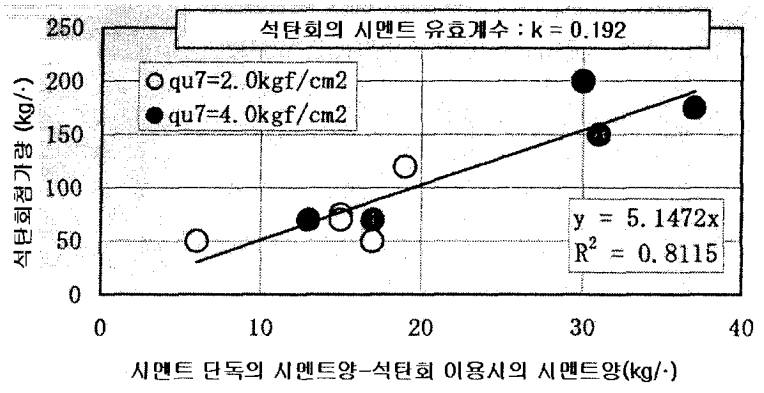


Fig. 3.1.30 석탄회의 시멘트로써의 효과

(2) 장기강도

석탄회의 효과로는 포졸란 반응에 의한 장기 강도 발현성이 기대된다. 기준재령에서 배합설계를 실시하면 Fig. 3.1.31에 나타낸 것과 같이 장기적으로 석탄회의 강도 증진효과가 나타나 장기적으로 안정된 품질의 개량토가 된다.

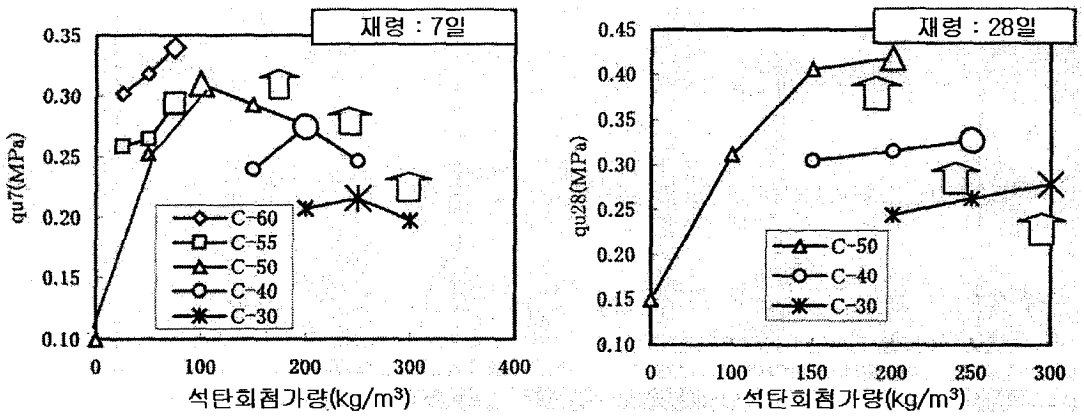


Fig. 3.1.31 석탄회의 장기강도 발현성

(3) 경화재의 저감효과

석탄회의 경화작용에 의해 시멘트 등과 같은 고화재의 약 35%의 기능을 가지고 있다. 석탄회의 경화작용은 포졸란 반응에 필요한 최저 시멘트양의 정의가 필요하다. 이것은 석탄회의 포졸란 반응을 표출할 때 필요한 경화재료와 함께 토질개선효과를 보유하는 데 있어서 경화재가 필요하기 때문이다. Fig. 3.1.32에 석탄회 사용시의 시멘트 양에서의 발현강도 관계, Fig. 3.1.33에 석탄회를 활용했을 때의 시멘트양을 시멘트 단독으로 동일 강도를 얻기 위해 필요한 양의 관계를 나타낸다. 이 그림으로부터 경화작용 및 첨가재 양에서의 평가를 바탕으로 석탄회가 가진 경화작용은 시멘트의 약 35%의 기능을 가지고 있는 것을 알 수 있다.

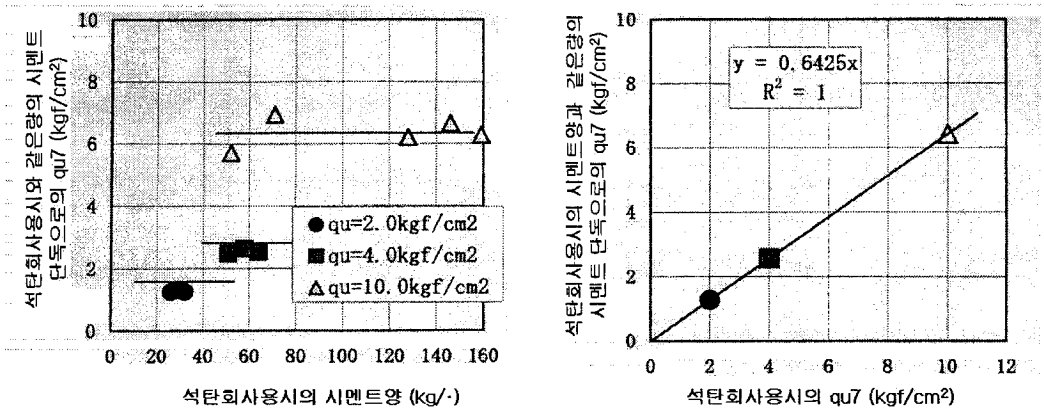


Fig. 3.1.32 석탄회 사용시의 시멘트양과 강도발현의 관계

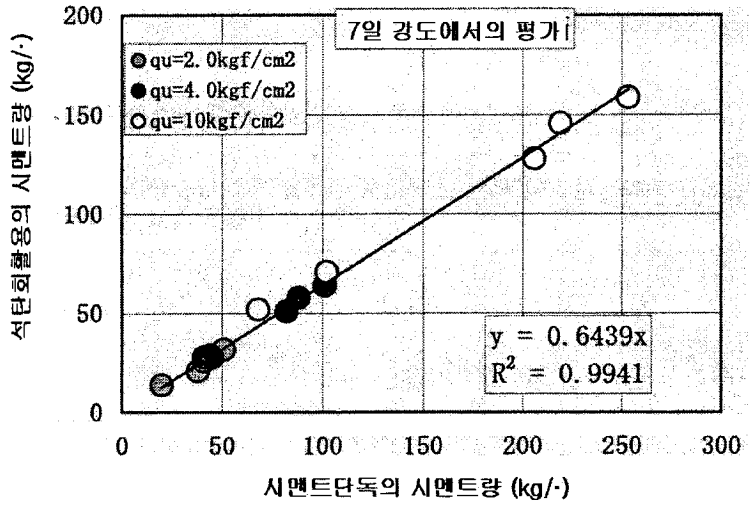


Fig. 3.1.33 석탄회 사용시의 시멘트양과 동일한 강도를 얻기 위한 시멘트 양의 관계

(4) 석탄회의 배합비율

석탄회의 배합비율은 이하를 표준으로 한다.

① 일반 연약토 등 다짐 마무리를 실시할 수 있는 토질 ; 석탄회:고화재=3:1

② 고함수토 등 다짐을 기대할 수 없는 토질 ; 석탄회:고화재=2:1

③ 준설토 상태로 완성된 토질 ; 석탄회:고화재=1:1

Fig. 3.1.34에 석탄회 사용시에 시멘트 양에 대한 적정 석탄회양의 비율을 나타냈다. 석탄회와 시멘트를 병용할 경우의 적정비율은 C:F=1:3 정도가 기준이 된다는

것을 알 수 있다. 그리고 유기질토 등의 다짐을 실시하여도 다짐 정도의 개선이 이루어지지 않는 토질, 부식산·산화철 등이 다량 포함되어 고화재를 대량으로 필요로 하는 경우에는 실내시험에 의해 적정한 배합비율을 선정할 필요가 있다.

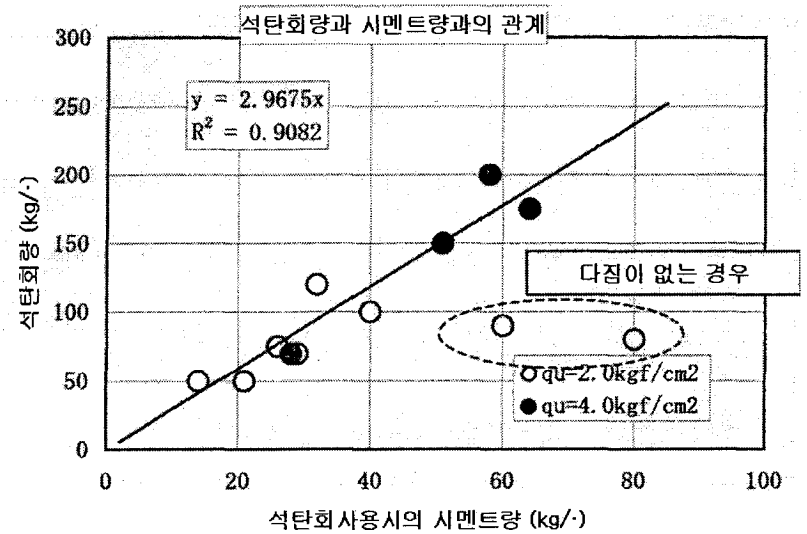


Fig. 3.1.34 석탄회 사용시에 시멘트양에 대한 적정석탄회양의 비율

바. 강도 보유성능

(1) 현장발현강도와 실내시험강도의 관계

석탄회를 사용한 안정처리에서는 현장발현강도는 실내시험강도와 동등한 값이 얻어진다. 이는 석탄회의 토질개선효과가 유효하게 작용하고 있기 때문이다. 안정처리는 실내시험과 비교하여 현장시공에 따른 강도의 저하를 엿볼 수 있다. 이는 혼합상태가 현장 쪽이 실내시험과 비교하여 조건이 나쁜 것에 기인한다. 석탄회를 개량재로 활용할 경우 다짐효과의 개선이나 분체량의 증가 등에 기인하여 현장강도의 발현성이 양호해 지는 사실이 예상된다.

Fig. 3.1.35에 실내강도와 현장강도를 대비, Fig. 3.1.36에 개량재 첨가량과 현장/실내강도비를 나타내지만 석탄회를 첨가한 경우에는 w=100%를 넘는 준설토 등의 다짐이 불가능한 토질 이외는 현장강도와 실내강도는 동등하다고 평가 할 수 있다. 이 강도보유성능은 분체량의 최소관계에 관계없이 안정되게 생기고 석탄회의 물성

개선효과에 따른 현장개량토의 다짐 등의 시공성 향상이 이 결과와 연결되어 있는 것이다.

다짐을 실시하지 않는 경우 석탄회를 사용한 안정처리는 Fig. 3.1.37에 나타난 것과 같이 현장/실내강도비가 변화한다. 평소의 노상·노체 성토 등은 현장밀도가 90% 이상 얻을 수 있다는 것으로부터 실용상 실내강도와 현장강도를 동일하게 평가해도 문제가 없다.

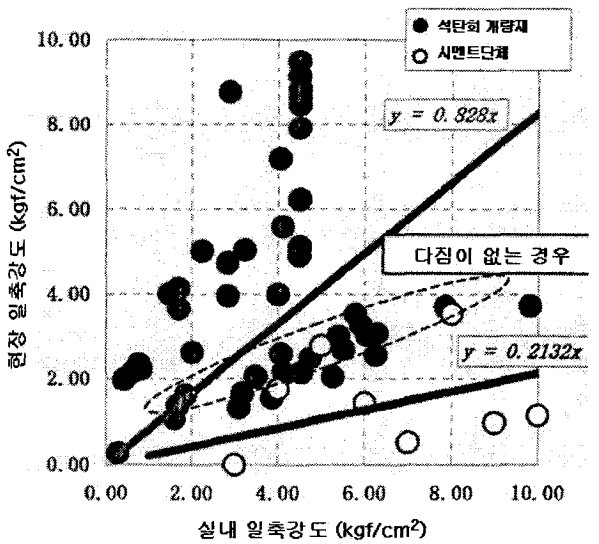


Fig. 3.1.35 실내시험강도와 현장강도의 관계

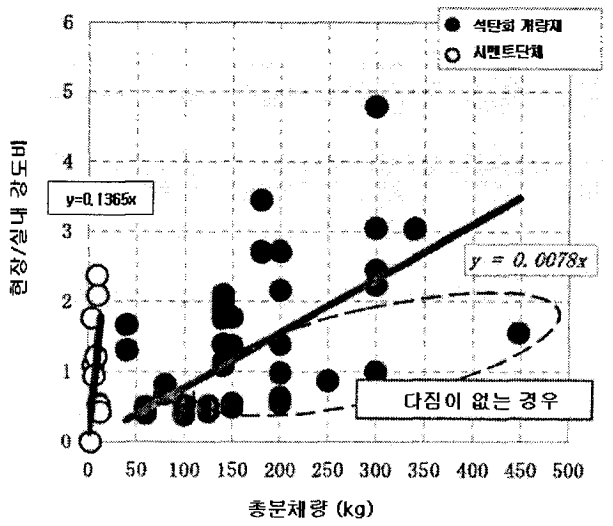


Fig. 3.1.36 개량재 첨가량과 현장/실내강도비

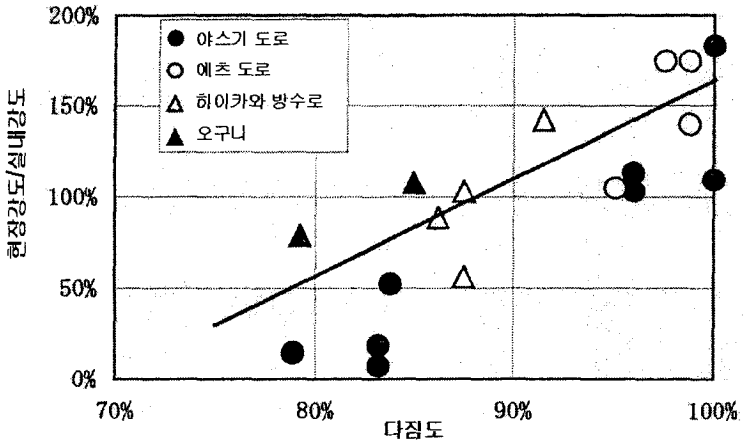


Fig. 3.1.37 다짐도와 강도발현성의 관계

(2) 현장발현강도의 안정성

석탄회를 사용한 안정처리에서는 현장 토질의 특성 변화에 대해서도 상당히 안정된 강도발현성을 나타낸다. 개량대상 토질은 물리적 성질이나 기상조건에 따라 품질 변동이 있고 종래의 시멘트나 석회 등의 안정처리에 있어서는 혼합상태 등도 포함하여 첨가량의 할증을 현장조건에 맞추어 설정했다. 석탄회를 사용한 개량은 전술한 것과 같이 개량재의 혼합성능에 따른 강도저하가 생기기 어려우므로 토질 변동에 대한 보정만을 대상으로 검토 할 필요가 있다.

석탄회는 Fig. 3.1.38에 나타낸 것과 같이 현장의 함수비 변동에 대해서도 안정된 개량효과를 나타낸다. 단 안정처리층의 하부에 불투수층이 있어 현장주변의 빗물이 집수하는 등의 조건하에 있어서는 현장의 다짐 조건이 좋지 않을 것으로 예상되어 다음에 나타낸 "아스팔트 포장요강"에 규정된 범위 내에서 현장에 맞춰 보정 할 것을 검토한다. 그리고 다짐이 충분히 이루어지는 경우에는 할증율은 고려하지 않는다.

○ 점성토 30~50%

○ 사질토 20~40%

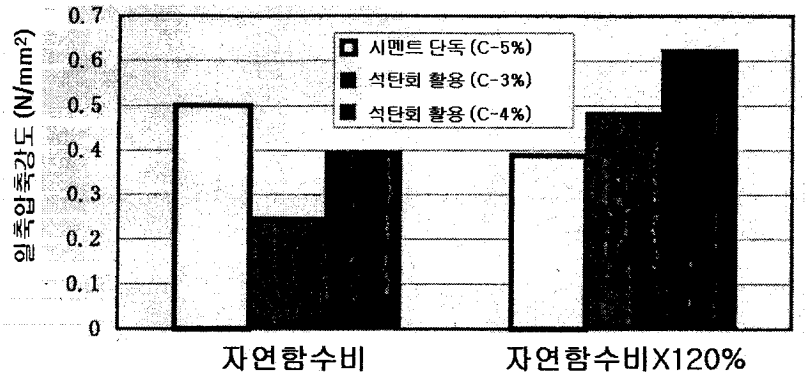


Fig. 3.1.38 함수비 변동과 강도의 관계

그리고 준설토와 같은 높은 함수비인 경우 Fig. 3.1.39를 참고하여 시멘트 등의 고화재 단일 물체로 사용할 경우와 마찬가지로 할증을 한다. 할증 방법은 현장강도/실내강도=50%를 표준으로 하여 고화재의 첨가량을 산정한다.

이와 같은 고함수토의 경우, 석탄회의 활용에 따라 균질한 개량토를 형성할 수 있다. 이는 시멘트 단독인 경우에는 강도가 W/C에 의해 규정되어 있으므로 함수비의 변동에 의해 예민하게 변화하는 데에 반해, 석탄회를 활용함으로서 토질의 개선효과 등으로 안정된 품질이 확보된다.

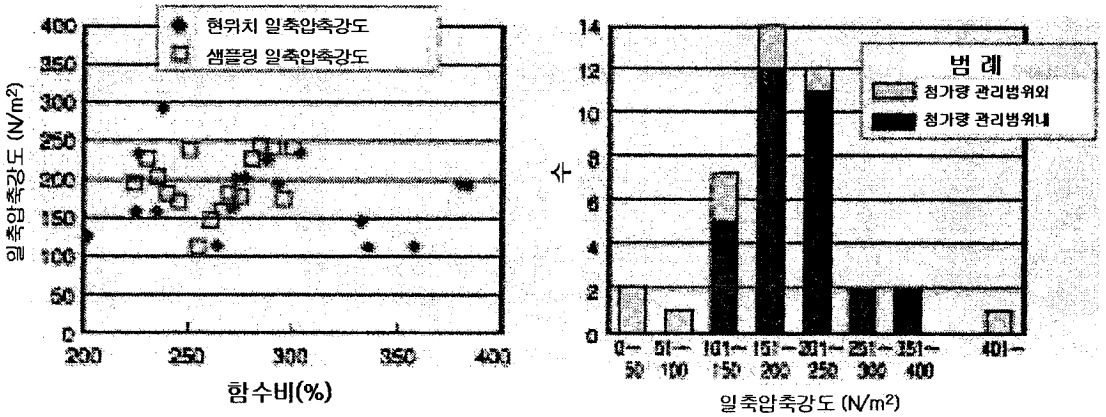


Fig. 3.1.39 준설 혼합토의 강도 안정성

사. 조합 고화재

석탄회를 사용한 안정처리에서는 조합을 할 고화재의 종류를 불문하고 개량효과를 얻을 수 있다. 이 때문에 조합하는 고화재는 안정처리를 할 토질의 성능에 맞는 고화재를 선정한다.

① 시멘트계 개량재 및 시멘트가 적합한 토질 : 고로슬래그 시멘트

② 석회계 개량재 및 석회가 적합한 토질 : 석탄회를 활용하지 않는 경우와 동일한 재료

③ 특수토질 : 토질에 대응하는 재료

석탄회의 개량효과는 수산화 칼슘의 보급이 있으면 경화성능을 발휘 할 수 있으므로 시멘트계 및 석회계의 고화재와 조합을 할 수 있다. Fig. 3.1.40에 개량재를 바꾼 경우의 석탄회 효과의 한 예를 표시하였는데 석탄회의 활용에 의해 고화재의 종류를 불문하고 고화재량을 저감할 수 있는 사실을 알 수 있다.

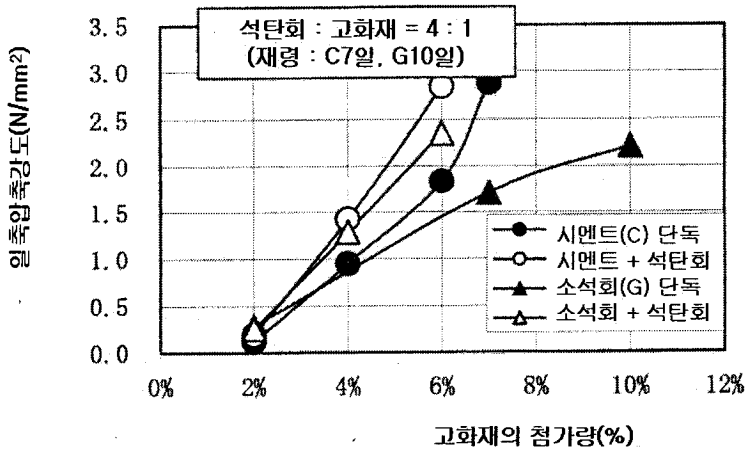


Fig. 3.1.40 고화재의 종류와 강도발현성 (w=30%)

아. 석탄회 품질의 불균형과 그 영향

석탄회의 품질은 불균형 하지만, 안정처리재로써 활용하는 경우에는 그 품질의 변동은 개량효과에 크게 영향을 미치지 않는다. 석탄회를 콘크리트재료로써 활용하는 경우에는 경화 성능만이 지배요인이 되기 때문에 그 품질변동이 크게 영향을 주는 것으로 보이지만, 안정 처리재로써 활용하는 경우, 개량효과로 흡수효과, 토질개선 및 경화작용과 여러 종류의 상승효과가 있기 때문에 석탄회의 품질이 불균형한 것에 대해서는 개량효과에 크게 영향을 미치지 않는다.

Fig. 3.1.41에서 나타내는 것과 같이 석탄회의 경화작용은 불균형하게 나타나지만 안정처리에 있어서의 강도 발현성은 시멘트 등의 고화재와 석탄회 및 토립자의 결합에 의해 정의 되는 것이 된다. 개량 대상토의 양에 비례하고 개량토의 첨가량은 5~10%정도이며, 석탄회의 품질이 개량효과에 크게 영향을 주는 것은 아니다. 개량토의 기준 재령(7~10일)에서는 석탄회의 경화작용은 거의 발휘하지 않고 흡수효과에 의한 수결합재 비의 저감효과, 사질토화, 시멘트 등의 고화재의 성능발휘에 기여하는 것에 의해 강도 발현성이 크게 발생 한다고 생각할 수 있다.

여기까지 기술해 온 석탄회의 효과 확인은 석탄회의 품질을 규정해서 구한 것이 아니라 불균형상태에서의 성능 평가이며, 여러 종류의 석탄회를 활용하여도 높은 상관관계가 있는 것으로도 석탄회의 품질은 크게 문제가 되지 않는다는 것을 알 수 있다.

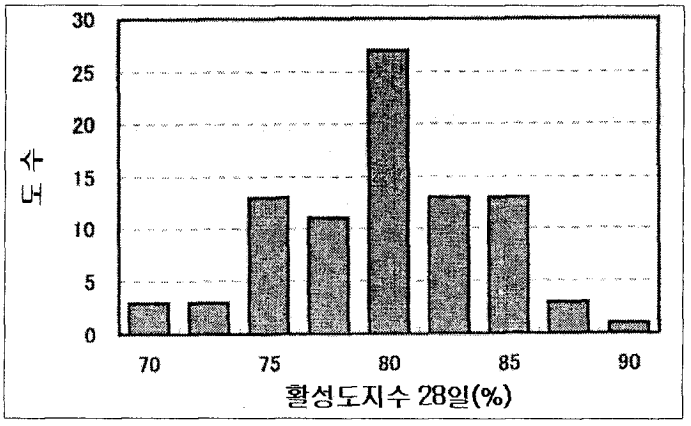


Fig. 3.1.41 활성도지수의 불균형

자. 석탄회 단체로의 활용

트래피커빌리티 확보와 성토의 밀도규정 등이 목적인 개량의 경우에는 현장 토질의 물리적 성질을 고려한 검토를 실행하도록 한다. 트래피커빌리티 확보 등이 목적으로 강도의 규정을 묻지 않는 경우에는 Fig. 3.1.42에 나타낸 것과 같이 토질에 따라서는 함수비 조정만으로도 콘지수를 얻을 수 있는 등 고화재와 조합하지 않고 석탄회 단체로의 활용이 가능한 경우도 있으므로 적용 장소의 특성을 고려한 후 사용을 검토한다.

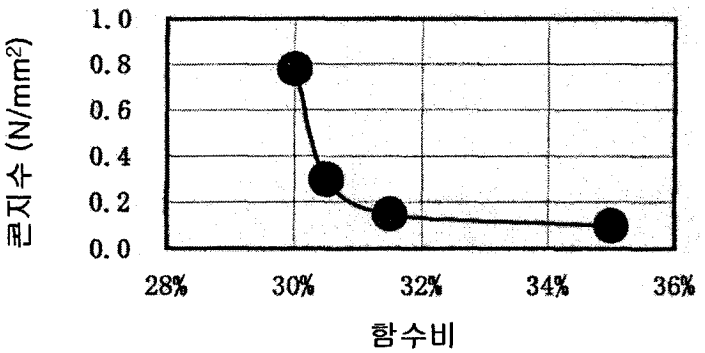


Fig. 3.1.42 함수비와 콘지수의 관계

차. 품질관리

석탄회를 사용한 안정처리는 일반적인 시멘트 등을 사용한 경우와 마찬가지의 품질관리를 실시하도록 한다. 석탄회를 사용한 안정처리는 시멘트나 석회를 사용한 일반적인 안정처리와 마찬가지의 품질관리를 실시하도록 한다.

단, 두꺼운층의 전압이나 하부층이 연약한 경우 등 다짐 밀도가 불명확한 경우에는 충분한 현장밀도 관리를 실시한다. 지금까지 시멘트 개량 역시 밀도가 낮은 경우에 강도부족이 발생하는 일이 있었지만 밀도관리에는 충분히 유의해야만 한다.

제 2 절 실내실험

1. 실험목적 및 범위

본 연구에서는 현장에서 발생되는 건설 잔토를 재활용할 수 있으며, 다짐시공이 어려운 구조물 뒤채움이나, 건축기초, 지하구조물, 각종 매설물 등에 무다짐으로 시공 할 수 있는 고성능 유동화 처리토를 국내 지반 여건에 맞게 제조하기 위하여, 실제 현장 지반에서 채취된 시료를 통일분류법(USCS)으로 분류(SW, SM, SC, ML, CL)하고 각 시료와 고화재를 혼합하여 물-고화재 비에 따라 발생되는 강도, 투수성, 유동성 등을 실험을 통해 정량적으로 파악하고자 하였다. 이를 위해 현재 국내에서 사용 중인 초속경 시멘트, 초조강 시멘트, 알루미나 시멘트, 마이크로 시멘트, CSA계 시멘트 등의 고화재를 수집한 후 5가지 종류의 고화재에 따라 물리/화학적 특성을 파악한 후 실험 조건을 설정하여 고화재 선정 실험을 실시하였다. 본 연구에서 실내 실험 결과를 통해 유동화 처리토 공법에 가장 부합되는 고화재를 적합 고화재라 정의하고, 적합 고화재를 선정한 후, 배합비 결정 실험을 실시하여 각 시료에 대한 물-고화재 비의 범위를 산정하였다. 또한 산정된 물-고화재 비를 바탕으로 본 실험을 실시하여, 물-고화재 비에 따른 목표 강도치 및 고결시간 등을 추정하였다.

2. 고화재 및 시료특성

가. 고화재 특성

실험에 사용되는 고화재의 종류는 국내에서 생산·판매되는 초속경 시멘트, 초조강 시멘트, 알루미나 시멘트, 마이크로 시멘트, CSA계 시멘트, 고로슬래그시멘트 등의 고화재를 수집한 후 6가지 종류의 고화재에 따라 조건을 설정하여 고화재 선정 실험을 실시하였다. 본 실험에 사용된 고화재의 종류를 Table 3.2.1에 제시하였다.

Table 3.2.1 본 연구에서 사용된 고화재

	고화재 특성에 따른 종류	고화재 이름	제조업체
C-01	초조강시멘트	S1	국내 S사
C-02	초속경시멘트	S2	국내 S사
C-03	마이크로시멘트	M6	국내 S사
C-04	마이크로시멘트	M8	국내 S사
C-05	CSA계 시멘트	JC	국내 Z사
C-06	알루미나시멘트	U7	국내 U사
C-07	알루미나시멘트	U8	국내 U사
C-08	알루미나시멘트	Z1	국내 U사
C-09	CSA계 시멘트	G1	국내 G사
C-10	CSA계 시멘트	G2	국내 G사
C-11	CSA계 시멘트	G3	국내 G사
C-12	고로슬래그시멘트	B1	국내 K사

본 연구에서는 높은 물 비에서 수 시간 내에 강도를 발현할 수 있는 4가지 급결형 고화재에 대한 물리 · 화학적 특성을 비교 검토하였으며, 그 결과는 Table 3.2.2, 3.2.3과 같다.

Table 3.2.2 고화재 별 물리적 특성

고화재 종류	분말도	응결(min)		주도	pH	압축강도(kg/cm^2)		
	(cm^2/g)	초결	종결	(sec)		1일	3일	7일
CSA계시멘트	4,540	8	20	27	10.5	370	454	570
고로슬래그시멘트	3,000	60	600	25	11.1	-	60	120
알루미나시멘트	5,110	60	96	27	12.5	540	620	700
초속경시멘트	4,250	11	15	25	13.1	350	379	414
초조강시멘트	4,320	190	300	25	13.2	170	295	450

Table 3.2.3 고화재 별 화학적 특성

고화재 종류	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	SO_3	Total
CSA계시멘트	6.1	38.0	2.4	41.7	2.6	1.6	7.2	99.6
알루미나시멘트	4.8	53.0	1.2	34.2	2.3	3.1	-	98.6
초속경시멘트	5.8	45.1	1.5	36.4	6.7	-	3.0	98.5
초조강시멘트	10.3	14.9	3.0	62.1	3.0	-	4.2	97.5

본 연구에서는 4가지 급결형 고화재 중 응결 시간과 강도발현 효과와 친환경성을 감안하여 pH가 낮으면서 목표 강도치에 비교적 쉽게 접근할 수 있는 CSA(칼슘설포알루미네이트)계열 고화재를 선정하여, 실험에 적용하였다. Table 3.2.4에는 본 연구에서 사용된 CSA 계 시멘트의 구성성분 및 특성을 나타냈다.

Table 3.2.4 본 연구에서 사용된 CSA 계열 고화재의 성분 특성

재료명	화학식	비율(%)	작 용
칼슘설포 알루미네이트	$3CaO \cdot 3Al_2O_3 \cdot CaSO_4$	40	- 에트링자이트 수화물 생성 → 속경성, 고강도화
포틀랜드 시멘트	-	5	- 경화 작용
석회	CaO	25	- 포졸란 반응 - 초기 강도 확보 - 건조 수축에 의한 균열 방지
석고	$CaSO_4$	27	- 반응성 조절 - 고화체의 안정화
규불화염	K_2SiF_6 $MgSiF_6$ $NaSiF_6$	1	- 에트링자이트 생성 반응 촉진 - 토양 성분의 용출 촉진 → 포졸란 반응 촉진 → 초기 고강도화

나. 시료특성

본 연구에서는 고화재 선정을 위해 모래와 점토 함유량 비율을 임의로 조성하여 실험을 실시하였다. 재료분리가 발생하지 않고, 균등한 시료의 조성이 가능한 4.76mm 이하의 입경에 대해 모래와 점토의 함유량 비율을 조절하였다. 현장에 존재하는 자갈의 비율을 본 실험에서는 모래로 대체하여 실험을 실시하였고, 자갈을 첨가함에 따른 재료분리 및 강도특성은 추후 연구를 통해 규명하고자 하였다. 국외 선행 연구에 사용된 유동화 뒷채움재 재료는 주로 모래 또는 혼합토(모래+점토)를 사용하여, 최대 세립분 함량이 10%이하(ASTM C33) 또는 30% 이하(미개척국)인 시료를 사용하였다(정상섬 외, 2006). 이에 본 실험에서는 모래 70%와 점토 30%로 시료를 조성하였으며, W/C(물/시멘트비)는 정상섬 등(2006)이 제시한 급결성 유동화 뒷채움재의 배합비 설계 기준의 풍화토 70%와 점토 30%를 혼합한 혼합토의 W/C와 유사한 약 185%로 조성하였다.

본 연구에서는 흙의 입도와 Consistency 한계에 의하여 흙을 공학적으로 분류하는 방법인 통일 분류법을 사용하여 대상 시료를 분류하였다. 성토, 기초로서의 성질, 도로 활주로의 기초 및 토공에 관련한 성질 등과 대응이 이루어져 있기 때문에, 대다수의 건설 공사에서도 기본적으로 통일 분류법에 의해 흙의 분류를 파악하고 있다. 통일 분류법은 흙의 종류에 따른 분류를 15개로 세분화하여 분류하고 있기 때문에, 최종적으로 다양한 현장발생토의 종류에 따른 각각의 최적 배합비를 산정하고자 하였다.

국외의 연구결과를 통해 유동화 처리토의 적용성을 파악한 결과, 입경이 4.75mm 이상의 대상토와 유기물의 함유량이 높은 대상토에서의 적용이 어려운 것을 알 수 있었다. 그러므로 본 연구에서는 통일 분류법에 의한 15가지 분류 중, 자갈질로 분류되는 GW, GP, GM, GC와 유기물을 함유하고 있는 OL, OH, Pt를 제외한 SW, SP, SM, SC, ML, MH, CL, CH의 8가지 분류토 중 SW or SP, SM, SC, ML or MH, CL or CH의 5가지로 현장발생토를 분류하였다. 또한 유동화 처리토의 자갈 함유토와 유기물 함유토에 대한 적용성 및 석탄회 첨가시의 영향을 파악하기 위해, 자갈 함유량, 유기물 함유량, 석탄회 함유량에 따른 유동화 처리토의 배합특성 실험을 별도로 실시하여 5+3의 체계로 대상시료에 접근하였다.

실제 현장토를 이용하여 유동화 처리토의 적용성을 파악하기 위한 시료는 경기도 안산시 소재 OO대학교 부근에서 채취한 시료(SW, SM, ML)와 남해 광양만 부근 해성점토(CL)를 채취하여 사용하였다. 채취된 시료의 공학적 특성을 파악하기 위해 체가름시험(KS F 2309)과 비중계 시험(KS F 2302)을 실시하여 입도분석을 하였고, 4℃에서 증류수의 단위중량에 대한 흙 입자의 단위중량의 비를 구하기 위한 비중실험(KS F 2308)과 흙의 연경도와 세립토의 유동화 현상을 판단하기 위한 액 · 소성한계 실험(KS F 2303 & 2304)을 실시하였다. 이 실험결과를 바탕으로 흙의 통일분류법(USCS)에 따라 현장에서 채취된 시료를 SW, SM, ML, CL로 분류하였다. 그러나 점토질 모래(SC)의 경우 실제 지반에서의 채취가 용이하지 않아 채취된 입도가 양호한 사질토(SW)와 점토(CL)를 50:50의 중량비로 혼합하여 인위적으로 조성하였다. Table 3.2.5에는 입도분석, 비중, 액·소성한계 실험을 통한 각 시료(SW, SM, SC, ML, CL)의 기본 물성 결과치를 나타내었고, Fig. 3.2.1에는 SW, SM, SC, ML, CL의 입도분포곡선을 나타냈다.

Table 3.2.5 현장발생토의 기본 물성

구 분	시료 1	시료 2	시료 3	시료 4	시료 5
시료조건	자연상태	자연상태	시료1 +시료5	자연상태	자연상태
최대입경(mm)	26.5	19.1	4.75	0.149	0.25
통과 중량백분율 60%의 입경 D_{60}(mm)	2.8	0.55	0.95	0.025	0.02
통과 중량백분율 30%의 입경 D_{30}(mm)	0.77	0.22	0.09	0.015	0.01
통과 중량백분율 10%의 입경 D_{10}(mm)	0.2	0.15	0.05	0.001	0.007
균등계수 $Cu=D_{60}/D_{10}$	14.0	3.7	19.0	2.6	3.1
곡률계수 $Cc=(D_{30})2/(D_{60}\times D_{10})$	1.1	0.6	0.2	1.0	0.8
#200번체 통과율(%)	1.5	5.1	27.7	90.3	99.2
비중 Gs	2.71	2.71	2.71	2.68	2.69
액성한계 LL(%)	-	-	-	31.0	49.1
소성지수 PI	NP	NP	NP	7.8	20.9
통일분류법(USCS)	SW	SM	SC	ML	CL

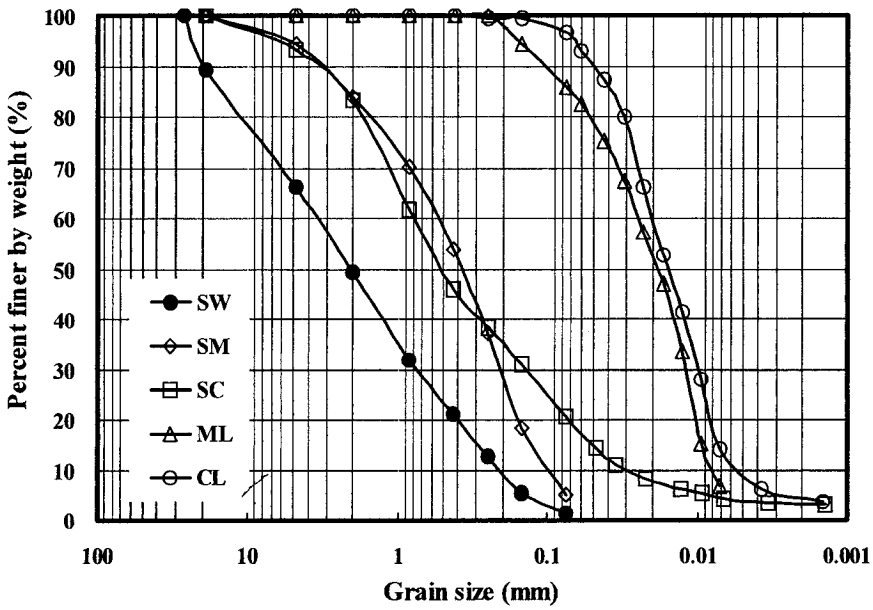


Fig. 3.2.1 각 시료의 입도분포곡선

다. 혼합수

실험에 사용된 혼합수는 기름, 산, 알칼리, 염류 등을 함유하지 않으면서 채취가 용이한 일반 상수도를 사용하였다.

3. 유동화 처리토의 특성분석을 위한 시험

가. 토질의 물리적 특성시험

(1) 토질분류 - KS F 2349

유동화 처리토는 현장발생토의 분류에 따라 배합비가 변화하기 때문에 어떤 방법으로 현장발생토의 토질을 분류할 것인가를 결정하고 그 기준을 정하는 것이 무엇보다 중요하다. 유동화 처리토의 연구 및 현장 적용 사례가 증가하고 있는 일본의 현장발생토의 토질 분류 및 각각의 성상을 Table 3.2.6에 제시하였다.

Table 3.2.6 일본의 현장발생토의 토질 분류표

<table>
<tr><th rowspan="2">구분
(건설성명)</th><th rowspan="2">토질구분</th><th rowspan="2">콘지수
qc kN/m^2</th><th colspan="2">일본 통일토질분류</th><th colspan="2">비 고</th></tr>
<tr><th>중분류</th><th>토질</th><th>함수비
Wn (%)</th><th>굴착방법</th></tr>
<tr><td rowspan="2">제1종 건설발생토
(모래,자갈등 이것들에 준하는 것)</td><td>제1종 발생토</td><td rowspan="2">-</td><td>{G}
{S}</td><td>자갈
모래</td><td>-</td><td rowspan="5">• 배수를 고려하지만,강수,
침출지하수등에 의해 함수비가 증가한다고 예상되는 경우에는 건설성령의 1순위 아래의 구분으로 한다.
• 수중굴착 등에 의한 경우는 건설성령의 2순위 아래의 구분으로 한다.</td></tr>
<tr><td>제1종 개량토</td><td colspan="2">(개량토)</td><td>-</td></tr>
<tr><td rowspan="4">제2종 건설발생토
(사질토,사력질토등 이것들에 준하는 것)</td><td>제2a종 발생토</td><td rowspan="4">800
{8kg/cm^2}
이상</td><td>{GF}</td><td>사질토</td><td>-</td></tr>
<tr><td>제2b종 발생토</td><td rowspan="2">{SF}</td><td>사질토(Fc=15~25%)</td><td>-</td></tr>
<tr><td>제2c종 발생토</td><td>사질토(Fc=25~50%)</td><td>30%정도이하</td></tr>
<tr><td>제2종 개생토</td><td colspan="2">(개량토)</td><td>-</td></tr>
<tr><td rowspan="3">제3종 건설발생토
(보통의 시공성이 확보되는 점성토 및 이것에 준하는 것)</td><td>제3a종 발생토</td><td rowspan="3">400
{4kg/cm^2}
이상</td><td>{SF}</td><td>사질토(Fc=15~25%)</td><td>30~50%정도</td></tr>
<tr><td>제3b종 발생토</td><td>{M},{C}</td><td>실트, 점성토</td><td>40%정도이하</td></tr>
<tr><td>제3종 개량토</td><td>{V}</td><td>화산회질 점성토</td><td>-</td></tr>
<tr><td rowspan="4">제4종 건설발생토
(점성토 및 이것에 준하는 것, 단 제3종발생토를 제외)</td><td>제4a종 발생토</td><td rowspan="4">대체로
200
{2kg/cm^2}
이상</td><td>{SF}</td><td>사질토(Fc=15~25%)</td><td>-</td></tr>
<tr><td rowspan="3">제4b종 발생토</td><td>{M},{C}</td><td>실트, 점성토</td><td>40~80%정도</td></tr>
<tr><td>{V}</td><td>화산회질 점성토</td><td>-</td></tr>
<tr><td>{O}</td><td>유기질토</td><td>40~80%정도</td></tr>
<tr><td>제4종 개량토</td><td colspan="2">(개량토)</td><td>-</td></tr>
<tr><td rowspan="4">(니토)
준설토중에서 대체qc=200kN/m^2{2kg/cm^2}이하의것 및 건설오니</td><td>니 토[a]</td><td rowspan="4">대체로
200
{2kg/cm^2}
이하</td><td>{SF}</td><td>사질토(Fc=15~25%)</td><td>-</td></tr>
<tr><td rowspan="2">니 토[b]</td><td>{M},{C}</td><td>실트, 점성토</td><td>80%정도이상</td></tr>
<tr><td>{V}</td><td>화산회질 점성토</td><td>-</td></tr>
<tr><td>{O}</td><td>유기질토</td><td>80%정도이상</td></tr>
<tr><td>니 토[c]</td><td colspan="2">고유기질토</td><td>-</td></tr>
</table>

Casagrande는 흙의 입도와 Consistency 한계에 의하여 흙을 공학적으로 분류하는 방법(통일분류법)을 고안했다. 이러한 분류는 성토, 기초로서의 성질, 도로 활주로의 기초 및 토공에 관련한 성질 등과 대응이 이루어져 있다. 따라서 거의 모든 건설 공사에서 통상적으로 사용된다. 본 연구에서는 일본의 현장발생토의 토질 분류 방법과 차별화하여, 통일분류법에 의해 현장발생토의 토질을 분류하였다. Table 3.2.7에는 통일분류법에서 사용되는 기호와 뜻을 나타내었으며, Table 3.2.8에는 통일분류법에 의한 흙의 공학적인 분류 방법 및 분류기준을 나타냈다.

Table 3.2.7 통일분류법(U.S.C.S)에 사용되는 기호와 뜻

토질의 종류		제1문자	토질의 속성	제2문자
조립토	자 갈 Gravel	G	- (Well-Graded) 입도분포 양호 - 세립분 거의 없음 (74 μm이하 5%함유)	W
	모 래 Sand	S	- (Poorly-Graded) 입도분포 불량 - 세립분 거의 없음	P
세립토	실 트 Silt	M	- (Silt) 세립분 12%이상 함유 - A 선 하방 소성지수 4이하	M
	점 토 Clay	C	- (Clay-Binder) 세립분 12%이상 함유 - A 선 상방 소성지수 7 이상	C
	유기질의 실트 및 점토 Organic Clay	O	- (Low Compressibility) 압축성 낮음 - $W_L \leq 50$	L
유기질토	이 탄 Peat	Pt	- (High Compressibility) 압축성 높음 - $W_L \geq 50$	H

Table 3.2.8 통일분류법에 의한 흙의 공학적 분류 방법 (KS F 2324)

<table>
<tr><th colspan="3">주 요 구 분</th><th>기호</th><th>대표적인 흙</th><th colspan="3">분 류 기 준</th></tr>
<tr><td rowspan="8">조립토
(Coarse Grained Soils)

200번체(0.075mm)에 50% 이상 남음</td><td rowspan="4">자갈
Gravel

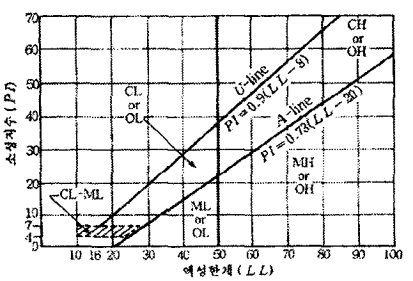
4번체(4mm)에 50% 이상 남음</td><td rowspan="2">세립분이 약간 또는 거의 없는 자갈</td><td>GW</td><td>입도분포가 좋은 자갈 또는 자갈과 모래의 혼합토, 세립분이 약간 또는 없음</td><td rowspan="4">세립분의 함유율에 의한 분류:

200번체 통과율이 5%이하인 경우 GW, GP, SW, SP

200번체 통과율이 12%이상인 경우 GM, GC, SM, SC

200번체 통과율이 5~12%인 경우 2중 문자로 표시</td><td colspan="2">Cu > 4 Cu=D_{60}/D_{10}
1<Cg<3 Cg=$(D_{30})^2/(D_{10}\times D_{60})$</td></tr>
<tr><td>GP</td><td>입도분포가 나쁜 자갈 또는 자갈과 모래의 혼합토, 세립분이 약간 또는 없음</td><td colspan="2">GW의 조건이 만족되지 않을 때</td></tr>
<tr><td rowspan="2">세립분을 함유한 자갈</td><td>GM</td><td>실트질의 자갈, 자갈·모래·실트의 혼합토</td><td>Atterberg 한계가 A선 밑 또는 소성지수가 4이하</td><td rowspan="2">소성지수가 4-7이면서 Atterberg한계가 A선 위에 존재할 때는 2중 문자 표시</td></tr>
<tr><td>GC</td><td>점토질의 자갈, 자갈·모래·점토의 혼합토</td><td>Atterberg 한계가 A선 위 또는 소성지수가 7이상</td></tr>
<tr><td rowspan="4">모 래
Sand

4번체(4mm)에 50%이상 통과</td><td rowspan="2">세립분이 약간 또는 거의 없는 모래</td><td>SW</td><td>입도분포가 좋은 모래 또는 자갈질의 모래, 세립분은 약간 또는 없음</td><td colspan="2">Cu > 6
1< Cg <3</td></tr>
<tr><td>SP</td><td>입도분포가 불량한 모래 또는 자갈질 모래</td><td colspan="2">SW의 조건이 만족되지 않을 때</td></tr>
<tr><td rowspan="2">세립분을 함유한 모래</td><td>SM</td><td>실트질의 모래, 모래와 실트의 혼합토</td><td>Atterberg 한계가 A선 밑에 있거나 소성지수가 5 이하</td><td rowspan="2">소성지수가 4-7이면서 Atterberg 한계가 A선 위에 존재 할 때는 2중 문자로 표시</td></tr>
<tr><td>SC</td><td>점토질의 모래, 모래와 점토의 혼합토</td><td>Atterberg 한계가 A선 밑에 있거나 소성지수가 7 이상</td></tr>
<tr><td rowspan="6">세립토
(Fine-Grained Soil)

200번체(0.075mm)에50% 이상 통과</td><td colspan="2" rowspan="3">액성한계 50% 이하인 실트나 점토</td><td>ML</td><td>무기질의 실트, 매우 가는 모래, 암분, 소성이 작은 실트질의 세사나 점토질의 세립사</td><td colspan="3" rowspan="6">소성도(Plasticity chart)는 세립토에 함유된 세립분과 세립토를 분류하기 위해 사용된다. 소성도의 빗금친 곳은 2중 표기해야 하는 부분이다.
U선 위쪽에 점이 표시되면 시험이 잘못된 것을 의미함.
 
< 세립토의 분류를 위한 소성도표 ></td></tr>
<tr><td>CL</td><td>소성이 중간치 이하인 유기질 점토, 자갈질 점토, 모래질 점토, 실트질 점토</td></tr>
<tr><td>OL</td><td>소성이 작은 유기질 실트 및 점토</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="3">액성한계 50% 이상인 실트나 점토</td><td>MH</td><td>무기질 실트, 운모질 또는 규소의 세사 또는 실트질 흙, 탄성이 큰 실트</td></tr>
<tr><td>CH</td><td>소성이 큰 무기질 점토, 탄성이 큰 점토</td></tr>
<tr><td>OH</td><td>탄성이 중간치 이상인 유기질 점토</td></tr>
<tr><td colspan="3">고유기성 흙</td><td>Pt</td><td>이탄 및 그 밖의 유기질을 많이 함유한 흙</td></tr>
</table>

(2) 흙의 입도분석(Sieve Analysis) - KS F 2309

흙의 입도란 흙의 낱알크기의 분포상태를 중량 백분율로 표시한 것으로써, 입자의 크기 및 분포를 알기 위한 흙의 가장 기본적인 시험이다. 흙 입자의 크기는 침하, 전단강도, 투수, 동상 등 흙의 공학적 성질에 큰 영향을 미치며 시험결과에 의해 흙의 세밀한 분류를 할 수 있다.

건조시료를 기준으로 전 중량에 대한 각 입경의 통과백분율을 중량비로 나타내는 방법이며, 체는 번호(#)나 눈 크기로 표시하는데 지반공학 시험에서 자주 이용되는 체는 Table 3.2.9와 같다. 이들 눈금을 가진 일련의 체에 건조시료를 넣어 통과시킨 후 각 체에 남은 양을 계산하고 체를 통과한 누가중량백분율을 구하여 입도분포곡선(Grain Size Distribution Curve)을 그려서 입도를 판단하는 방법이다.

Table 3.2.9 표준체 크기

체 번 호(NO.)	눈금크기 (mm)
4	4.76
10	2.00
20	0.84
40	0.42
60	0.250
100	0.149
200	0.075

흙의 분류는 여러 가지 방법이 있으나 일반적으로 통일분류법이 가장 많이 사용되고 자갈, 모래, 실트, 점토 등의 입경범위는 분류법마다 기준이 다르다.

Table 3.2.10 입경에 의한 여러 가지 흙의 분류법

분 류 법	입 경 (mm)			
	자 갈	모 래	실 트	점 토
통일분류	76.2 ~ 4.75	4.75 ~ 0.075	세립토(실트, 점토) < 0.075	0.002
미국농업국 분류	> 2	2 ~ 0.05	0.05 ~ 0.002	< 0.002
AASHTO 분류	76.2 ~ 2	2 ~ 0.075	0.075 ~ 0.002	< 0.002
MIT 분류	> 2	2 ~ 0.06	0.06 ~ 0.002	< 0.002

균등계수가 모래에서 6이상, 자갈에서는 4이상이고, 곡률계수가 1~3이면 입도가 좋다고 분류한다. 이는 다양한 입경의 입자가 분포하므로 입자간의 맞물림(interlocking)이 잘 됨을 의미한다.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \qquad C_g = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

여기서, C_u : 균등계수, C_g : 곡률계수,

D_{10}, D_{30}, D_{60} : 각각 10%, 30%, 60% 통과율에 해당하는 직경

균등계수는 입경가적곡선의 경사도를 나타내는 것으로 C_u 값이 작을수록 D_{60}과 D_{10}과의 범위가 좁고 곡선이 직립으로 되어 있는 것을 나타내고 C_u가 커짐에 따라 입도분포가 넓은 것을 나타낸다. 일반적으로 C_u가 4~5 이하의 흙은 입도분포가 나쁘며 10 이상의 흙에 대하여는 입도분포가 양호하다 할 수 있다. 곡률계수는 또한 C_g=1~3은 입도 분포가 좋다는 것을 표시한다.

(3) 흙의 입도분석(비중계분석) - KS F 2302

비중계시험은 현탁액에서 토립자가 침강되는 시간에 따른 현탁액의 밀도를 측정한 결과로, 시료의 입경별 함유량을 구해서 입도곡선을 작성함으로써 0.075mm 보다 작은 세립토의 경도(經度)를 결정하는 방법이다. 완전한 구(球)로 가정한 토립자가 흙탕물 속에서 침강하는 속도는 Stokes의 법칙을 이용한다. 토립자가 굵을수록 침강속도는 빠르고 작을수록 늦게 침강된다. 하지만 너무 굵으면 침강 시에 교란되며 미립자는 브라운 운동이 심해서 구의 직경이 0.2~0.0002mm에서만 유효하다.

$$v = \left(\frac{G_S - G_w}{18\mu}\right) g . d^2$$

(여기서 v, d는 완전한 구로 가정한 토립자의 침강속도(cm/sec), 및 직경(mm))

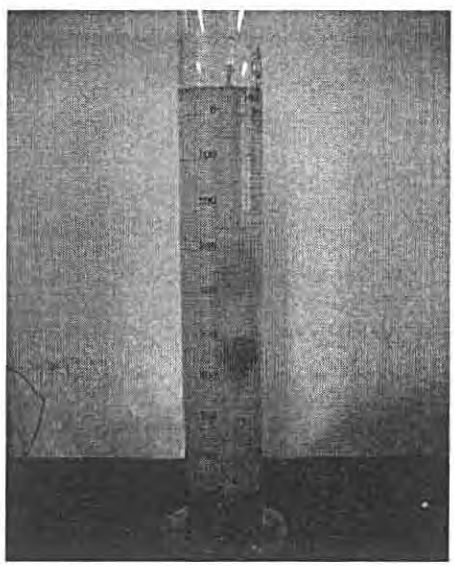


Fig. 3.2.2 비중계 시험 전경

(4) 흙의 액·소성한계시험 - KS F 2303 & 2304

세립토는 함수비에 따라 4가지 상태로 변한다. 건조된 흙에 물을 첨가하면 고체, 반고체, 소성, 액체 등의 상태로 변한다. 이처럼 함수량에 따라 흙의 반죽질기가 변하는 상태를 1911년 스위스 농학자 A. Atterberg가 한계를 실험적으로 구하는 방법을 개발했으며, 이를 Atterberg한계시험이라고 한다.

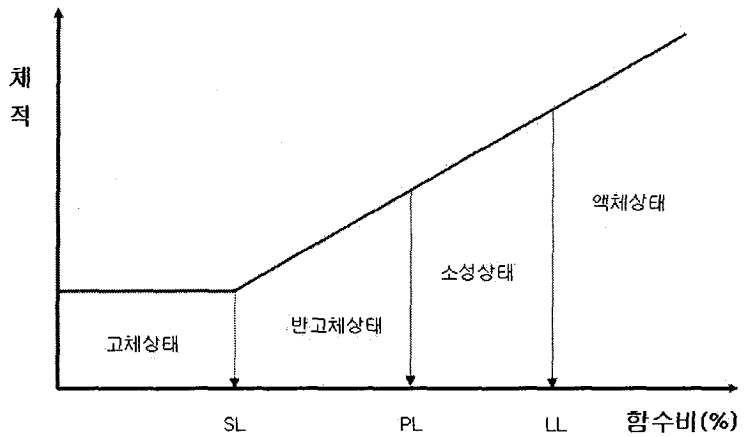


Fig. 3.2.3 Consistency 한계

물로 반죽된 0.425mm 미만의 세립토가 액체상태로 변하는 최소 함수비인 액성한계와 반죽된 시료에서 수분이 제거되면서 소성상태에서 반고체상태로 변하는 한계의 함수비인 소성한계를 구한다.

▶ 액성한계 (Liquid Limit, LL) : 흙이 액성에서 소성으로 옮겨지는 경계의 함수비로 함수비가 증가하면 유동되려는 상태의 함수비를 액성한계라 한다

▶ 소성한계 (Plastic Limit, PL) : 흙이 소성에서 반고체상으로 옮겨지는 경계의 함수비로 흙이 반죽되기 쉽고 손가락으로 눌러서 여러 가지 모양으로 만들 수 있는 상태를 소성상태라 하며, 소성상태의 하한계 함수비를 소성한계라 한다.

▶ 수축한계 (Shrinkage Limit, SL) : 흙이 반고체상태에서 고체상으로 옮겨지는 경계의 함수비가 감소하여도 체적변화가 일어나지 않기 시작하는 때의 함수비를 수축한계라 한다.

Atterberg한계시험은 액성한계를 이용하여 세립토의 흙 분류를 하는데 이용한다. (LL<50 : L, LL>50: H로 구분) 그리고 소성지수를 구하여 소성도로부터 세립토의 흙을 분류하는데 이용한다.

소성지수(PI) = 액성한계(LL) - 소성한계(PL)

Table 3.2.11 세립토의 소성도표에서의 위치와 지반공학적 특성

소성도표의 위치	PI(%)	통일분류명칭	
		영문	국문
LL<50 %	4이하	ML	저소성 실트
	4~7	CL - ML	실트질 점토
	7~21.9	ML or OL	유·무기질 실트, 실트질 점토
	7~37.8	CL	점토
LL≥50 %	-	MH or OH	운모나 규조토가 섞인 가는 모래와 실트
	-	CH	무기질 점토

또한 액성지수를 구하여 세립토의 유동화 현상을 판단을 할 수 있다.

$$\text{액성지수}(LI) = \frac{\text{함수비}(w) - \text{소성한계}(PL)}{\text{소성지수}(PI)}$$

예민한 점토 $LI > 1$, 정규압밀 점토 $LI = 1$ (0.6 ~ 1.0)

과압밀점토 $LI = 0$(0.0 ~ 0.6), 극히 과압밀 점토 $LI < 0$

압밀에서는 액성한계를 이용하여 압축지수, 압밀계수를 구하고 압밀침하량, 압밀 소요시간 계산에 이용된다.

$$Cc = 0.009 \times (LL-10)$$

그리고 Skempton(1953)이 정의한 활성도(activity)에서는 소성지수를 구한 후 활성도(A)를 구하게 되며, 이때 활성도가 클수록 공학적으로 불안정하며 점토입자의 크기가 작을수록, 유기질이 많이 함유될수록 활성도는 크게 나타난다.

$$A = \frac{PI}{2\mu \text{ 이하의 점토입자의 중량백분율}(\%)}$$

여기서, $A < 0.75$: 비활성 점토

$0.75 \leq A \leq 1.25$: 보통 점토

$A > 1.25$: 활성 점토

(5) 흙의 비중시험 - KS F 2308

흙의 비중이란 4℃에서 증류수의 단위중량에 대한 흙 입자의 단위중량의 비를 말한다. 비중시험은 작은 알갱이로 구성된 흙이나 모래시료의 공기 중 및 수중무게로 Archimedes 원리를 적용한 부력을 산출하여 비중을 구하며, 유기물의 함유량에 따라 대개 1.4~2.9 범위이나 2.65 전후가 가장 많다.

대부분 석영으로 구성되어 있는 모래의 비중은 2.65이고, 점토질과 실트질 흙에서는 2.6~2.9로 나타난다. 각 광물에 대한 비중은 Table 3.2.12와 같다.

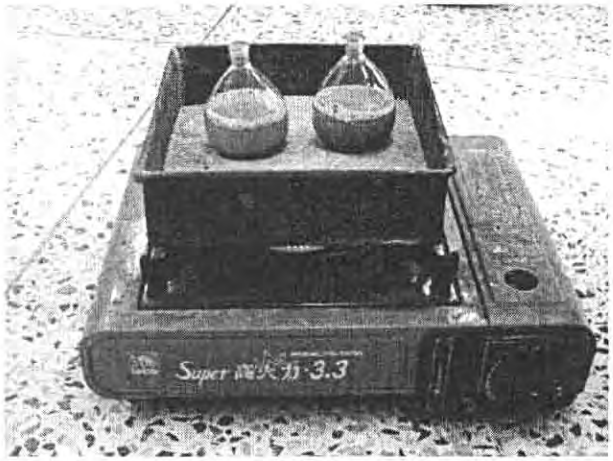


Fig. 3.2.4 비중시험 전경

Table 3.2.12 각 광물의 비중값

광 물	비 중(Gs)	광 물	비 중(Gs)
석영 (Quartz)	2.65	Na-장석, Ca-장석	2.62~2.76
고령토 (Kaolinite)	2.60	녹니석 (Chlorite)	2.60~2.90
일라이트 (Illite)	2.80	흑운모 (Biotite)	2.80~3.20
몬모릴로나이트 (Montmorillonite)	2.65~2.80	백운모 (Muscovite)	2.76~3.10
		각섬석 (Hornblende)	3.00~3.47
할로이사이트 (Halloysite)	2.00~2.55	갈철광 (Limonite)	3.60~4.00
K-장석 (Potassium feldsper)	2.57	감람석 (Olivine)	3.27~3.37

(6) 흙의 함수비시험 - KS F 2306

함수비시험은 흙의 공학적 성질변화에 기본이 되는 흙에 함유되어 있는 함수량을 구하기 위한 시험이다. 함수량은 온도 110±5℃의 건조로에 의해 젖은 흙에서 제거된 수분의 양을 말하며, 흙의 함수량과 건조된 흙의 무게의 비를 흙의 함수비라 하며, 일반적으로 자연 상태에서 점도질 흙의 함수비는 액성한계와 소성한계 사이에 있는 경우가 많고 자연 함수비가 크면 간극비 및 압축성이 크며 단위체적중량 및 전단강도는 작다.

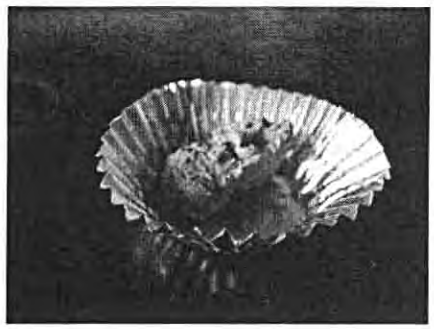


Fig. 3.2.5 노건조 후 시료

나. 경화전 상태의 특성실험

(1) 응결 - 관입저항침에 의한 응결시간 측정 시험(KS F 2436)

본 실험은 유동화 처리토의 관입 저항침에 의해 응결시간을 측정하는데 사용된다. 고화재가 혼합물의 응결 혹은 경화특성 및 변수의 영향을 결정하기 위해 사용하는 방법으로, 현장조건과 동일하게 조정된 시험실 조건에서 적용한다. 저강도 고유동 충전재는 물-결합재비가 매우 크며 단위시멘트량이 소량 첨가되어지기 때문에 오랜 시간의 응결시간을 필요로 한다. Fig. 3.2.6에는 경화시간에 따른 예상 관입저항치의 관계를 나타냈다.

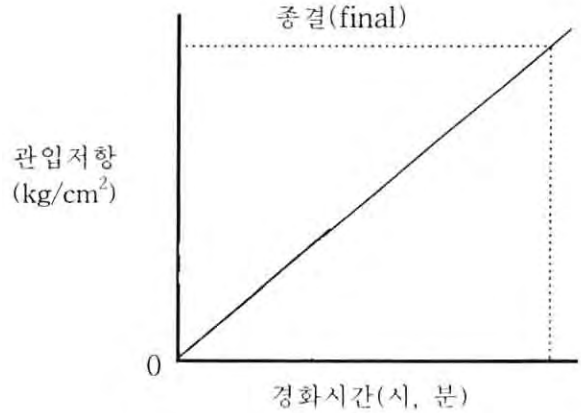


Fig. 3.2.6 경화시간에 따른 관입저항치

응결시간 측정은 KS F 2436에 제시된 방법을 따라 실험을 실시하였으며, 경화속도 시험의 결과는 관입저항과 경화시간과의 관계를 나타내는 곡선으로 표시하며 응결의 종결은 경화속도 곡선에서 결정할 수 있다.

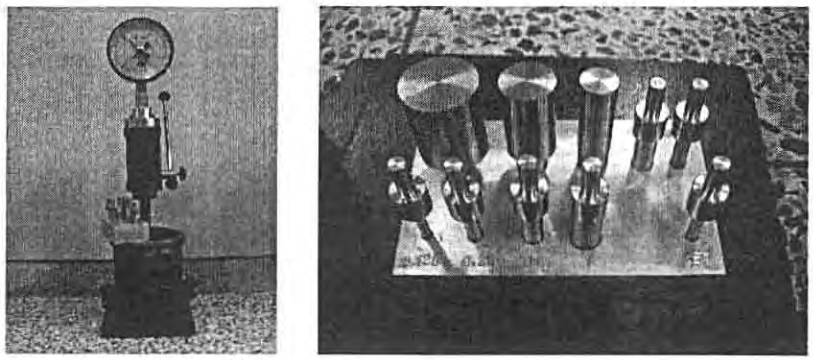


Fig. 3.2.7 응결시간시험기와 관입저항침

시험기구로는 스프링 반력식과 유압형 반력식의 관입저항 시험용 기구가 있는 데, 본 연구에서는 스프링 반력식 시험 기구를 사용하였다. 측정범위는 100kgf, 최소눈금은 1kg이다. 관입저항침은 0.125, 0.16, 0.25, 0.5, 1, 32, 64, 160, 320, 640mm^{2}이 있다. 또한 최소치수 15cm, 깊이 15cm까지의 직사각형 또는 원통형으로 되어있다. 시험방법은 유동화 처리토를 용기에 채운 후 시료 전체 단면에 균등히 분포시킨다. 관입직전 피펫으로 블리딩 현상으로 생기는 물을 제거한다. 관입저항침의 사용은 시험초기에는 굵은 침에서부터 점점 가는 침으로 교환하여 표면에 접촉시키고 천천히 균등하게 아래쪽으로 연직력을 작용시켜 25±5mm 까지 관입시킨다. 관입하는데 소요된 하중과 양생한 후 부터의 경과시간을 기록한다. 다음경과시간에 관입시험을 할 때에는 먼저 시험에서의 흐트러진 면을 피해야 하며 침 관입간격은 사용하는 침 지름에서 최소 2mm이상이어야 한다. 임의의 침 관입위치와 용기 가장자리의 간격은 25mm이상이여야 한다. 관입저항이 일정해 질 때까지 시험을 계속한다. 측정시간은 1시간, 2시간, 4시간, 8시간, 12시간, 1일로 실험을 실시하였다.

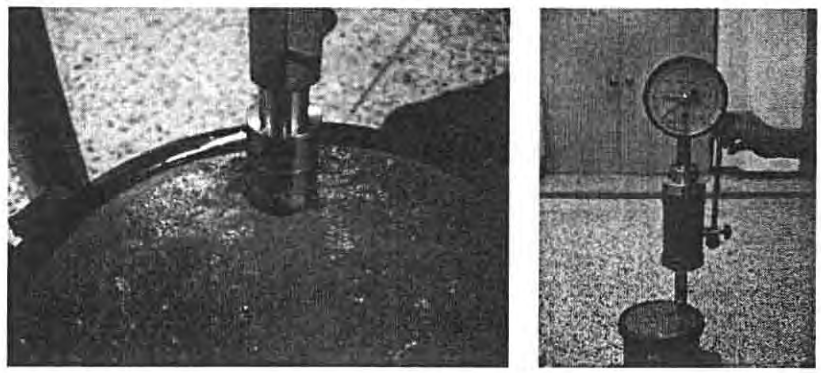


Fig. 3.2.8 응결시간시험 시험기 관입 전경

(2) 유동성

(가) 슬럼프 콘을 이용한 유동성 시험 (KS F 2402)

이 실험은 시험실과 현장에서 슬럼프를 측정하는 방법으로 워커빌리티를 판정하는 하나의 수단이다. 슬럼프콘은 밑면의 안지름이 20cm, 윗면의 안지름이 10cm, 높이가 30cm 인 금속제 원추형으로 되어 있으며 다짐대, 흙손, 스쿱(scoop)으로 구성되어 있다.



Fig. 3.2.9 슬럼프 흐름시험 전경

시험 방법은 먼저 평평하고 단단한 평판위에 놓고 두개의 발판을 디디고 서서 움직이지 않도록 고정시킨 후 배합된 혼합물을 1/3씩 되도록 3층으로 나누어 채운다. 표준은 각층을 다짐대로 25회씩 다지지만 유동화 처리토는 다짐을 하지 않는다. 조심스럽게 수직방향으로 벗기고, 혼합물이 충분히 주저앉은 다음 슬럼프의 flow값을 측정한다.

주의할 점은 슬럼프 콘을 벗기는 작업은 5초 정도로 끝내야 하며 혼합물에 가로방향 운동이나 비틀림 운동을 주지 않도록 조용히 윗 방향으로 들어 올려야 한다. 또한 콘에 채우기 시작해서 시료를 뺄 때까지 전 작업을 중단함이 없이 2분 30초 내로 끝마쳐야 한다. KS F 2402의 기준에 의하면, 슬럼프의 flow값은 500~700mm, flow 속도는 10~60mm/sec의 범위로 나타나있다. 본 실험에서는 600±50mm를 목표로 설계하였다.

(나) 실린더를 몰드를 이용한 유동성 시험(ASTM D 6103, JHS A 313)

유동성 채움재는 뒤채움재로서 충분한 유동성을 갖도록 해야 한다. 이로 인해 자기수평능력을 가지게 되고 뒤채움 공간을 공극 없이 채울 수 있으며, 다짐장비가 필요 없이 자기 다짐의 성질을 갖는다. 이러한 특성은 유동성 채움재가 다짐장비의 이용과 많은 시험을 필요로 하는 다른 뒤채움재와 비교할 때 중요한 장점 중의 하나이다.

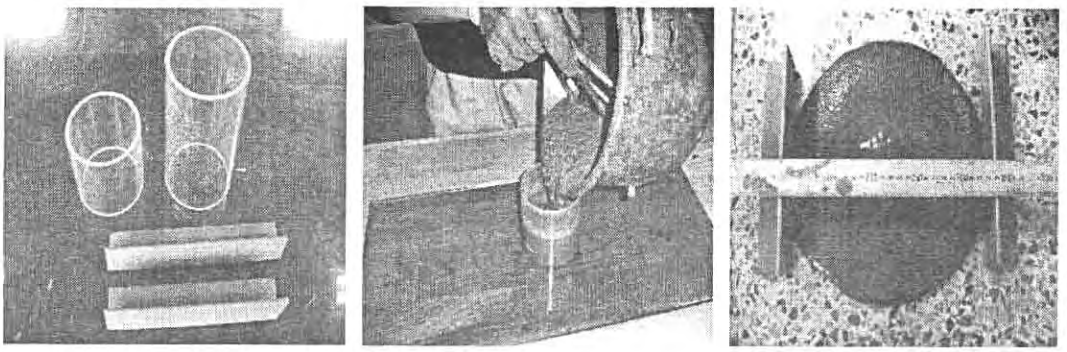


Fig. 3.2.10 실린더를 이용한 유동성 실험(JHS A 313)

설계 흐름값은 미국 콘크리트학회(ACI) 및 표준시험방법(ASTM D 6103)에서는 6in 이하의 흐름값은 저유동, 6~8in는 중간, 8in 이상의 흐름값은 고유동으로 분류하며, 일본 도로공단규격(JHS A 313) 실린더법(∅8cm×H8cm)에 의한 일본 동경전력의 기준은 18~30cm이다. 이는 흐름값이 18cm이하 또는 20cm(ASTM D 6103 규격 몰드)이하인 경우, 매설관의 하부에 고화재의 충전이 완전히 이루어지지 못하므로 유동성은 최소 18cm 또는 20cm이상 이어야 하며, 재료분리를 방지 측면에서 최대 30cm이하로 한다. 각 시료별 유동성 시험은 간편한 장점이 있지만 개인의 숙련도에 의해 측정의 결과가 다르게 나타나는 단점이 있다.

(3) 재료분리 저항 - 블리딩 시험(KS F 2433)

콘크리트 재료에서, 블리딩은 타설 후 시멘트, 골재입자 등이 침하함으로써 물이 분리 상승되어 표면에 떠오르는 현상을 말한다. 이는 비중과 입경이 서로 다른 구성 재료로서 각 재료의 비중 및 입자크기의 차이에 의하여 분리가 발생하기 쉬우

며, 거의 모든 시료에서 발생 된다. 일종의 재료분리이므로 블리딩이 크면 상부가 다공질이 되며 강도, 수밀성 및 내구성이 감소되고, 골재입자 등의 밑 부분에 수막을 만들고 시멘트 풀과 부착을 저해하며 수밀성을 감소시킨다. 블리딩에 미치는 영향요인으로는 배합요인, 재료요인, 시공 및 환경요인 등이 있다. 이외에 대상재료의 특성, 유동성, 배합오차 등에 따라 영향을 받으며 이는 재료분리로 인해 강도 및 내구성 등에 영향을 미칠 수 있다.

본 시험에서의 시험용 기구는 메스실린더, 폴리에틸렌 실린더 등을 이용하며, 폴리에틸렌 실린더는 지름 5cm, 길이 50cm 이상이어야 한다. 혼합 직후의 처리 흙을 폴리에틸렌 실린더에 채워 방치 3시간 및 20시간 후로 분리된 수량을 측정한다.

$$\text{블리딩율}(\%) = A/B \times 100$$

여기서, A : 시료의 블리딩 물의 총량(kg), B : 시료에 포함된 물의 총량(kg)

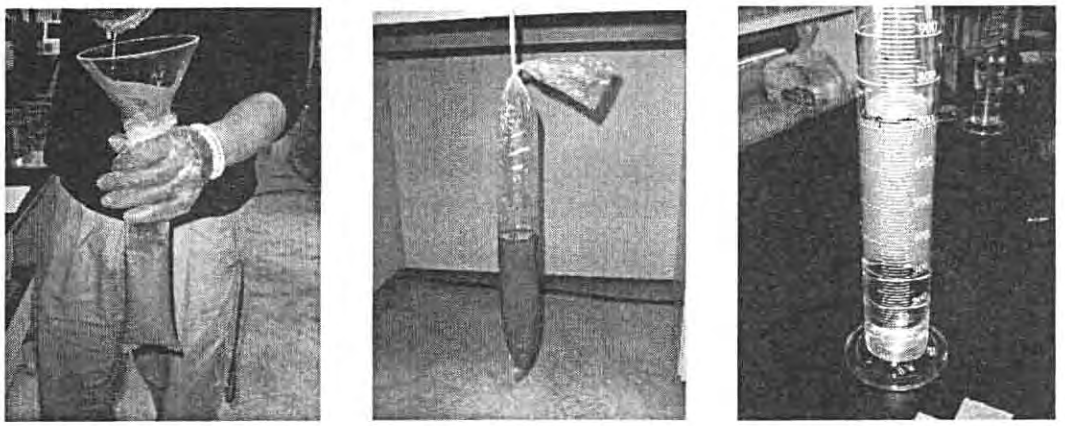


Fig. 3.2.11 블리딩 시험

(4) 공기량 - 공기 함유량 측정시험(공기실 압력방법, KS F 2421)

본 시험은 유동화 처리토의 공기함유량을 압력의 감소에 의하여 시험하는 방법으로 시료 내에 존재하는 공기의 함유량을 파악하고자 시험을 실시한다.

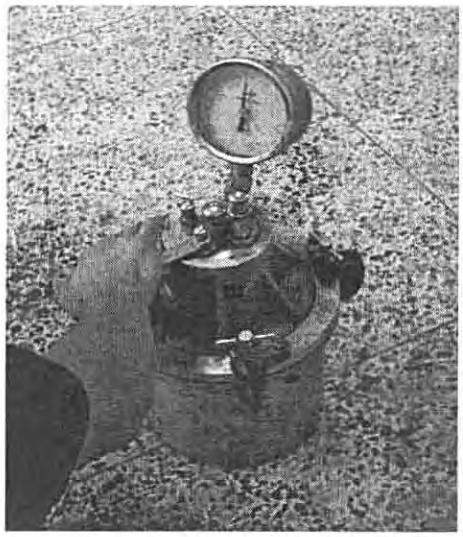


Fig. 3.2.12 공기량 시험 전경

시험 기구는 용기, 압력계, 검정용 기구, 다짐대로 구성되어 있다. 시험에 앞서 용기, 초기압력, 공기량 눈금판에 대한 검정을 해야 한다. 용기의 검정은 용기에 물을 가득 채우고 물의 중량을 단다. 중량은 용기와 물을 합한 중량의 0.1%이하의 감도의 저울로 단다. 두 번째로 초기 압력 검정은 용기에 물을 공기가 다 빠질 때까지 채우며, 뚜껑의 안팎으로 공기가 통하도록 하여 뚜껑을 덮는다. 모든 밸브를 잠그고 초기 압력보다 약간 크게 압력을 준 후, 약 5초 후에 조정밸브를 열어 압력계의 바늘을 초기 압력의 눈금과 일치시킨다. 마지막으로 앞서 행한 검정을 한 후 용기 내의 물을 적당량을 메스실린더에 넣고 물의 총량을 용기의 용적에 대한 백분율로 표시하며, 이를 몇 번 반복하여 꺼낸 물의 백분율로 공기량의 눈금을 비교한다. 이들 값이 각각 일치되어 있을 때 공기량의 눈금은 정확한 것이다.

시험방법은 용기에 혼합물을 3층으로 나누어 채우고 다짐을 하지만 유동화 처리토일 경우 다짐을 하지 않았다. 용기 플랜지의 윗면과 뚜껑 플랜지의 밑면을 완전히 닦아낸 다음, 공기가 통하도록 뚜껑을 용기에 얹어 공기가 새지 않도록 잠근다. 주 밸브는 잠그고 배기구와 주수구 밸브를 열어둔다. 배기구에서 물이 나올 때까지 주

수구에 물을 넣고 잠근다. 공기실에 기압을 초기 압력에 일치시키고 약 5초가 지난 뒤 주밸브를 연다. 충분히 바늘이 안정되었을 때 압력계의 눈금을 읽는다. 이때 측정치는 겉보기 공기량(A_1)이다.

이론적으로 콘크리트일 경우, 공기량이 1% 증가하면 슬럼프치는 2cm 정도 커지고 단위수량은 3% 감소한다. 다만 지나친 공기량의 증가(6% 이상)는 내구성을 저하시키며, 1% 증가 시 압축강도는 3~5% 감소한다. 그러나 저강도 고유동 재료는 내구성에 대해 고려하지 않고 배합설계를 하며 배합설계 시 공기량은 중요한 의미를 갖지 않는다.

(5) 단위용적중량 - 단위용적중량시험(KS F 2409)

이 시험은 굳지 않은 콘크리트의 단위용적중량 및 공기량을 중량에 의하여 시험하는 방법이지만, 굳지 않은 유동화 처리토의 단위용적중량을 측정하는 시험방법으로 적용하였다. 원통형 용기(∅10cm×H 15cm)에 물을 채워서 물의 중량과 온도를 측정하여 용기의 용적을 구한 후, 2회 이상 굳지 않은 유동화 처리토를 채워서 중량을 재어서 평균값을 측정하여 단위용적중량을 구하였다.



Fig. 3.2.13 단위용적중량시험 전경

다. 공시체의 경화 후 특성 실험

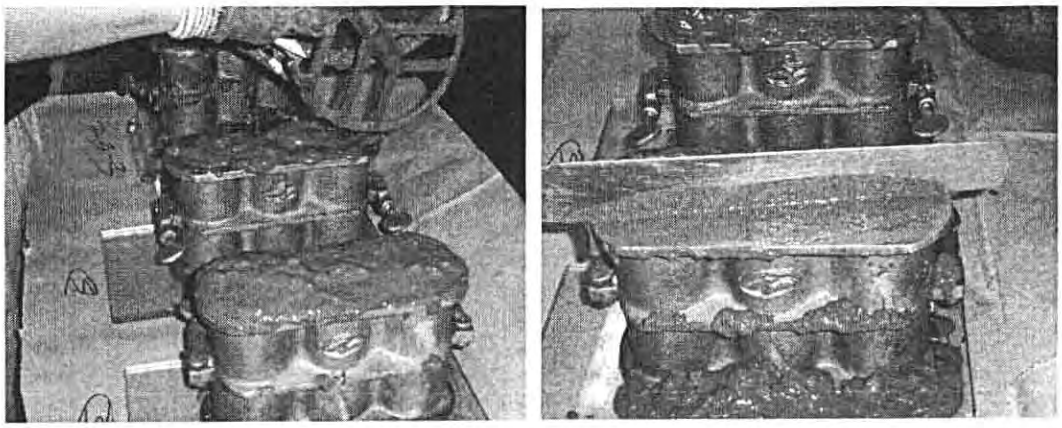
(1) 일축압축강도 - 일축압축시험(KS F 2314)

본 시험은 원주형 점성토 공시체를 측방 구속이 없는 상태로 압축하여 파괴시키는 시험으로 축 변형량과 하중을 측정하며, 파괴 시의 최대전단강도를 결정하는 방법이다. 일축압축강도시험은 배수조건을 조절할 수 없으므로 항상 비배수 조건에서의 시험 결과 밖에 얻지 못한다. 일축압축시험은 간단한 방법으로 비배수 조건에서의 전단강도를 결정할 수 있으므로 교란되지 않는 시료와 교란된 시료의 강도를 비교하는데 많이 이용된다. 시험 결과는 토압이나 지지력의 계산, 사면안정계산, 흙의 개량효과 판정 및 개량지반의 안정성 평가 등에 이용된다.

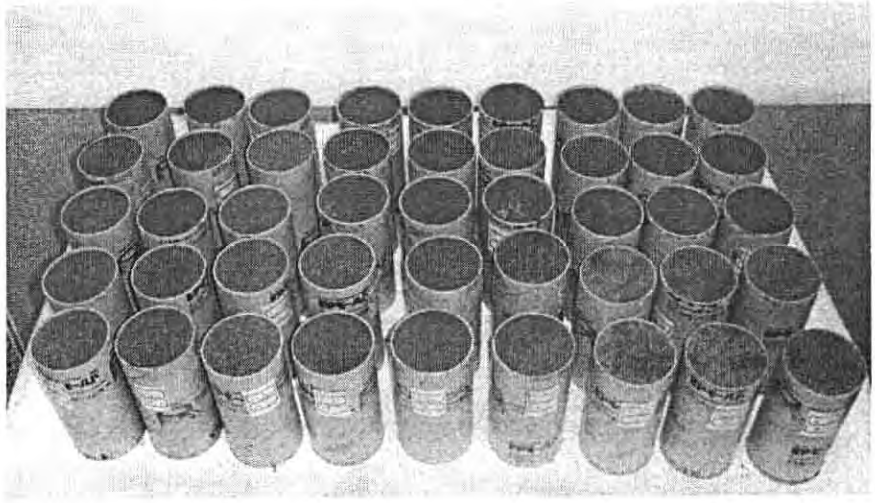
비배수 조건에서의 점착력은 편의상 Mohr 파괴포락선의 반으로 정한다. 즉 $C_u = q_u/2$ 로 나타낼 수 있고, 이때 q_u를 비배수압축강도(q_u)라 한다. 일축압축시험은 실제 현장조건과 부합하지는 않지만, 시험방법이 간단하고 빠른 결과를 알 수 있는 장점이 있다.

미국 콘크리트학회(ACI)에서 정의한 유동성 채움재(CLSM)는 고결성 재료로서 양생 28일 일축압축강도가 83kg/cm^2 이하를 갖는 것으로 정의되고 있으며, 일축압축강도는 유동화 채움재의 하중분담능력을 측정하기 위한 지표로 사용되고 있다. 강도 기준은 일반적으로 인력 굴착이 가능한 강도(7kg/cm^2 이하), 기계굴착이 가능한 강도(40kg/cm^2 이하), 장비굴착이 가능한 강도(83kg/cm^2 이하)로 분류된다(Ayers et al., 1997). 본 연구에서는 인력에 의한 재굴착이 가능한 유동화 뒷채움재의 일축압축강도를 3.5~7kg/cm^{2}로 선정하였으며, 그 강도는 잘다져진 흙의 2-3배의 지지력에 해당한다.

공시체는 선정된 배합비로 혼합한 후, ∅5cm×10cm의 EP-mold에 부어 4시간, 1일, 7일, 28일을 양생시켰다. 4시간 양생은 공기양생을 시켰고 나머지는 진공포장기를 이용해 진공포장 후에 23±2℃ 온도로 양생을 시켜, KS F 2314에 의해 변형속도를 분당 1.0 mm/min로 파괴시켰다. 본 시험에서는 28일강도 기준치를 3.5~5.6kg/cm^{2}로 설정하였는데, 이 강도는 인력으로 굴착이 가능한 정도의 강도(일본 동경전력공사의 기준)로서 최종 양생 후 본 기준에 부합여부를 파악하였다.



(a) 1차년도 공시체 제작 전경



(b) 2차년도 EP-Mold에 의한 공시체 제작 후 전경

Fig. 3.2.14 공시체 제작

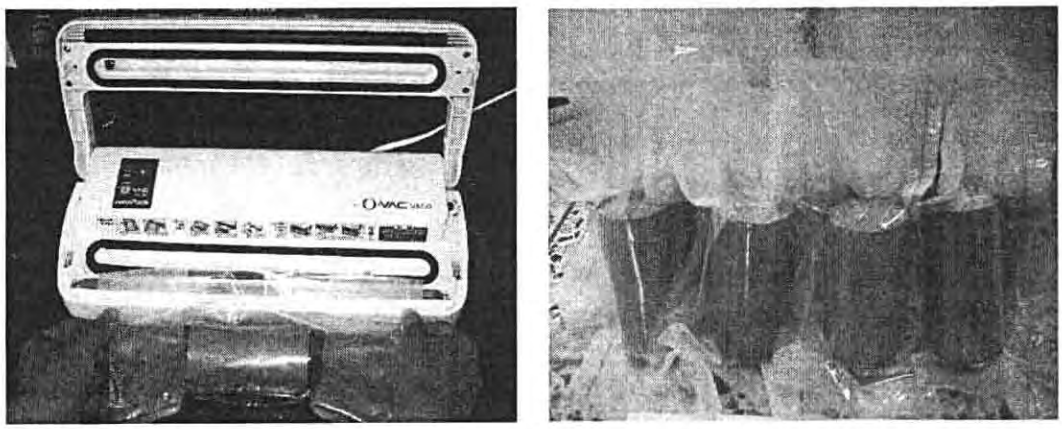
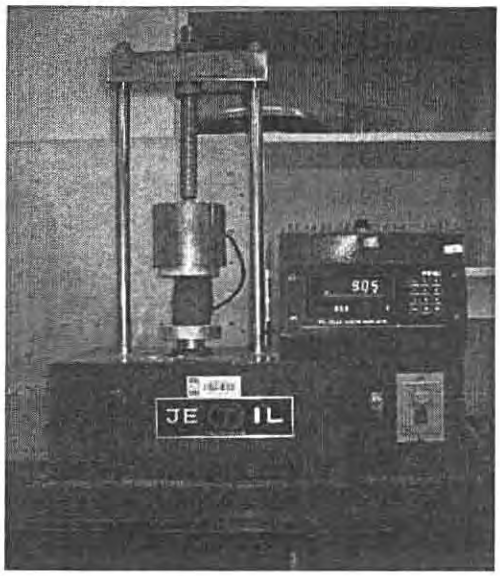
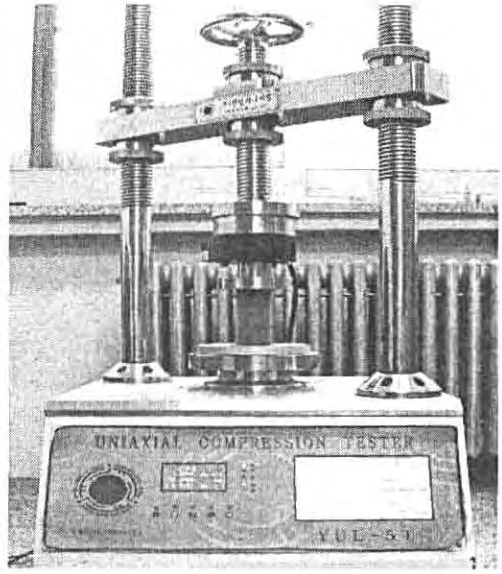


Fig. 3.2.15 공시체의 진공포장 양생



(a) 1차년도

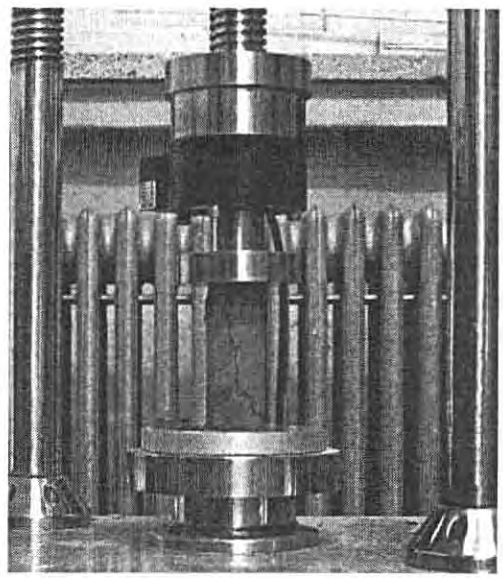


(b) 2차년도

Fig. 3.2.16 일축압축시험기



(a) 1차년도



(b) 2차년도

Fig. 3.2.17 일축압축시험 시험 진경

(2) 삼축압축강도 - 삼축압축시험(비압밀 비배수, UU test, KS F 2346)

본 시험은 원주형 공시체의 지중에서 응력상태를 재현하도록 측방에서 액압을 가하고 축방향에서 압축하여 전단하는 시험이다. 흙의 전단저항은 입자상호 간의 접촉면에서 움직임에 대한 저항의 결과이다. 흙 입자간의 접촉면적은 수직력이 증감함에 따라 증감하는데 수직력은 이 접촉면을 통해 전달될 수 있다. 결합은 접촉면을 형성하며, 입자간의 맞물림 작용으로, 미끌림에 대하여 저항하며, 이로 인하여 전단저항이 생긴다. 입자간 접촉면에서 원자들이 전자를 교환 또는 공유하므로써 형성되는 결합의 주요 메커니즘인, 일차적 평형 결합(primary balance bonds)은 입자들의 응집과 함께 생기는 유효수직응력에 대한 반응으로 발생하는 데 이러한 현상을 물리적 성질이라 한다. 전단저항에 일조하는 결합의 다른 형태는, 재결정 구조의 칼슘 카보네이트(calcium carbonate)와 같이 고체(solid substance)를 통해 입자를 연결하는 화학적 결합 또는 고결화라고 한다. 이 두 결합은 입자간 접촉면적을 증가시키며 결합력 또한 증가하게 된다. 일반적으로 유효수직응력의 증가는 입자간 접촉면을 증가시키고, 따라서 전단저항을 증가시킨다.

유효응력의 변화는 입자간 물리적 결합을 직접 조절하고 화학적 결합이 존재한다면, 간접적으로 이를 조절하게 된다. 유효응력의 증가는 물리적 결합을 증가시키는 반면, 감소는 그 반대의 결과를 가져온다. 반대로 입자상호간 화학적 결합이 발현된 조건으로부터 유효응력의 증가 또는 감소는 화학적 결합을 끊게 된다.

비압밀 비배수 삼축압축강도시험(UU-Test)은 지반의 구속상태 → 시료채취 → 공시체 제작 → 포화 → 구속응력 작용 → 파괴 등을 거치는 단계별 전응력, 간극수압 및 유효응력의 변화이다. 본 시험에서는 배합된 혼합물을 일축압축시험의 공시체 제작 방법과 동일한 방법으로 실시하였다. 전단속도는 1.0mm/min으로 설정하였으며 배합당 3개의 공시체를 제작하여 흙의 내부 마찰각(∅)과 점착력(C)을 구하였다(Fig. 3.2.18).

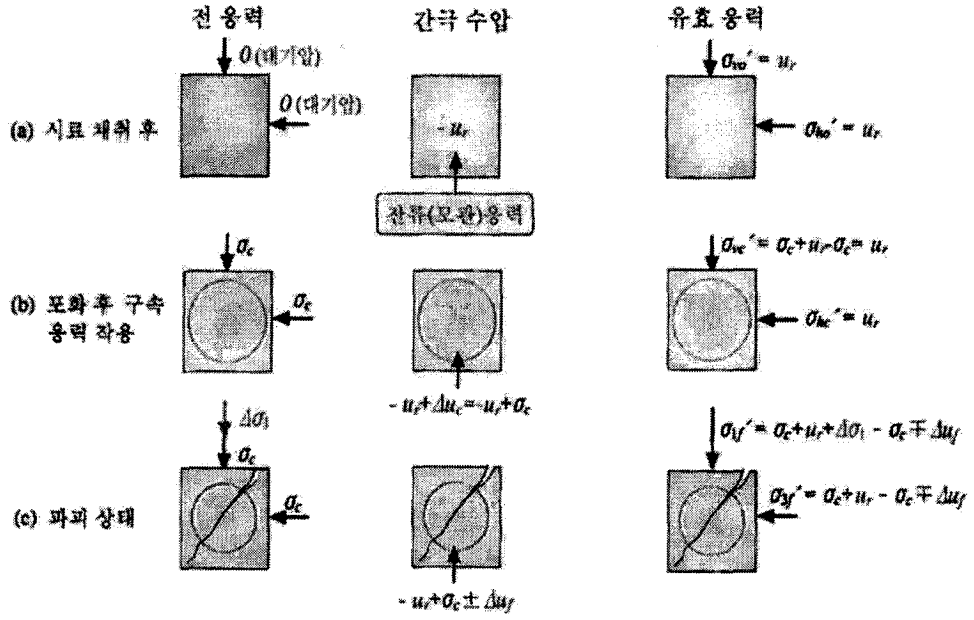


Fig. 3.2.18 UU-test: 시료채취→공시체 제작→포화 →구속응력 작용→파괴 등의 응력변화 (김용필 등, 2002)

Table 3.2.13 토질별 내부마찰각(∅)의 범위(김용필 등, 2002)

토질		시험 종류		
		UU시험	CU시험	CD시험
Gravel	medium size	40° ~ 55°		40° ~ 55°
	Sandy	35° ~ 50°		35° ~ 50°
Sand	loose dry	28° ~ 34°		43° ~ 50°
	loose saturated	28° ~ 34°		
	dense dry	35° ~ 46°		43° ~ 50°
	dense saturated	1° ~ 2° less than dense dry		
Silt or silty sand	loose	20° ~ 22°		27° ~ 30°
	dense	25° ~ 30°		30° ~ 35°
Clay	-	0° if saturated	3° ~ 20°	20° ~ 42°

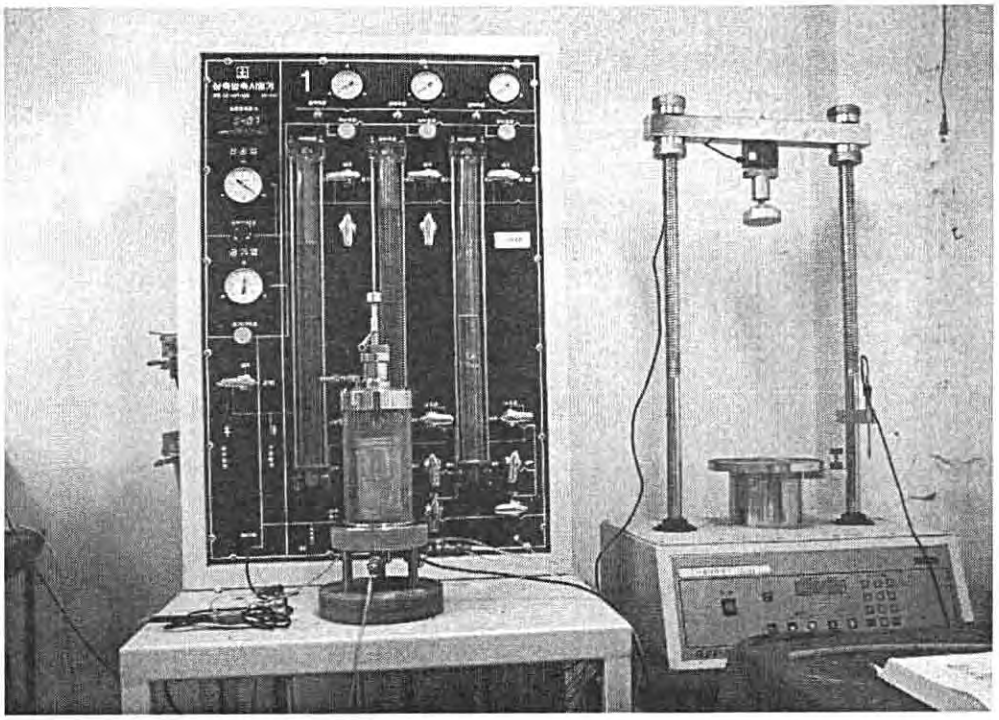
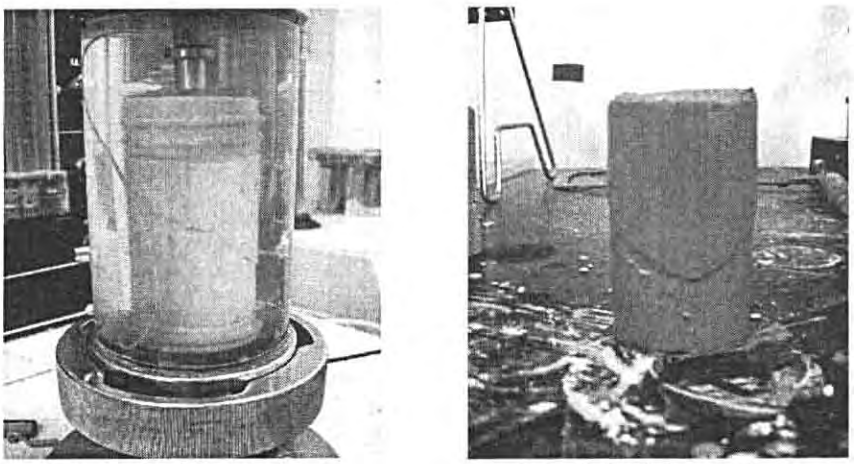


Fig. 3.2.19 삼축압축시험 전경



(a) 삼축압축 실험 중　　(b) 삼축압축 실험 후

Fig. 3.2.20 삼축압축시험 전경

UU-test에서의 포화된 점성토는 $\varnothing=0$이 된다(Terzaghi et al, 1996). 이는 하중이 가해지는 동안 체적변화와 함수비 변화가 없다는 가정 하에 간극수가 하중을 다 받게 됨으로써 유효응력이 0이 되므로 내부마찰각이 생기지 않는다는 것을 의미한다.

그러나 다음과 같은 조건에서 예외 경우가 발생한다.

(가) 압축전단 조건: 연약한 점성토, 실트와 깨끗한 모래의 느슨한 퇴적지반, 즉 완전 포화된 점성토지반과 완전 포화된 모래지반의 느슨한 경우와 중간정도 느슨한 조건을 제외한 경우.

(나) 간극수의 공동화현상: 낮은 구속압에서 하중이 가해질 때 즉 간극수의 응력이 1기압 이하로 떨어지게 되면 공동화 현상이 일어남.

(다) 화학적 결합이 존재할 경우: 화학적 결합에 의해 흙의 삼상상태에서 단상으로 물질이 변화하는 경우.

본 시험에서는 고화재로 시료의 화학적 결합을 유도 했으므로 세 번째인 화학적 결합에 의해 $\varnothing \neq 0$인 값이 나타났다.

또한 미개량 지반의 점착력은 "입자간 점착효과(attraction effect)와 수직응력과 연관 있으며, 함수비와 전단속도와는 무관하다"고 보고되고 있다. 본 연구에서는 토질별로 고화재를 혼합처리하여 화학적 결합을 갖도록 함으로써 나타나는 점착력의 경향에 의한 화학적 반응성이 미치는 개량효과를 분석하였다. 일반적으로 미개량 지반의 비배수 점착력은 2.0kg/cm^{2}이하의 값을 나타내고 있다.

(3) 투수성 - 삼축압축 시험기에 의한 투수시험

유동화 처리토의 투수계수를 측정하기 위해 $\varnothing$50×100mm의 몰드를 형성한 후, 삼축 압축 강도시험과 동일하게 포화를 시킨 후 측압을 4.0kg/cm^2, 상 · 하부의 차이를 1.0kg/cm^{2}를 주어 시간에 따른 흐름양을 측정하여 투수계수를 계산한다.

$$\text{투수계수(k)} = \frac{q}{60 \cdot A \cdot i}$$

여기서, A= sample의 단면적(mm^2), i= 동수경사($\fallingdotseq \triangle p$), q= 유량(ml/minute)

일반적으로 유동화 처리토의 투수계수는 10^{-6}~10^{-7}cm/s의 범위에서 나타난다.

(4) 지지력비 - CBR 시험(KS F 2320)

도로나 비행장의 포장 두께를 결정하기 위해서는 포장을 지지하는 노상토나 노반 재료의 강도, 압축성, 팽창, 수축과 같은 특성을 알 필요가 있다. 미국의 캘리포니아 도로국에서 가요성 포장을 설계할 목적으로 개발되어 세계적으로 널리 사용되어 오고 있는 것이 캘리포니아 지지력비 또는 CBR(California Bearing Ratio)이라 하는 반경험적 지수이다. 국내 도로공사 표준시방서 등에 제시된 노체, 노상 및 뒤채움재의 CBR 기준은 Table 3.2.14와 같다.

Table 3.2.14 성토재료 선정과 관련된 CBR 기준

	노체	노상		뒤채움재	
		하부 노상	상부 노상	하부 뒤채움재	상부 뒤채움재
CBR(%) 기준	2.5 이상	5 이상	10 이상	5 이상	10 이상

실내 CBR시험은 몰드 내에서 다짐한 공시체에 대해 규정된 피스톤(지름 5cm)을 규정속도(1mm/min)로 관입시켜, 관입량별로 구한 시험하중강도를 표준하중강도에 대한 백분율로 구한다. 본 시험에서 수행한 실내 CBR 시험절차는 다음과 같다.

(가) 각 시료에 대하여 고화재를 흙과 혼합하여, 지름 약 15cm, 높이 약 17cm의 몰드에 넣는다.

(나) 위쪽에는 양생 중 부피 변화를 측정할 수 있는 다이얼 게이지를 설치하고 초기의 지지력비를 구하기 위하여 2일은 공기양생을 시키고 그 후로 수조에 넣어 4일 동안 수침시켰다.

(다) 수침과정을 마친 시료에 대해여 CBR 시험을 수행하였다. 관입량이 0 ~ 12.5mm가 될 때까지 정해진 관입량에서의 하중을 측정한 후 KS F 2320에 따라 CBR 값을 구하였다.

$$CBR = \frac{\text{시험단위하중}}{\text{표준단위하중}} \times 100(\%)$$

Table 3.2.15 표준단위하중

관입량(mm)	표준단위하중(kg/cm^2)
2.5	70
5.0	105
7.5	134
10.0	162
12.5	183

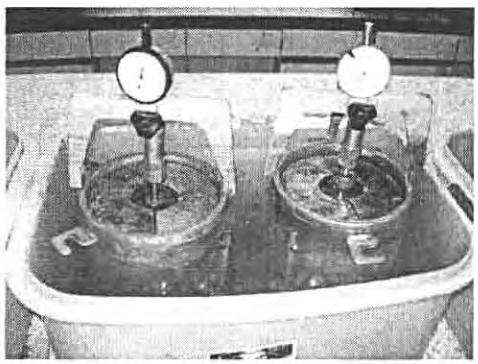


Fig. 3.2.21 CBR몰드 수침 전경



Fig. 3.2.22 pH 측정 전경

(5) pH시험(KS F 2103)

pH는 수용액의 산/알칼리성의 지표로, 배합 직후와 28일 후의 혼합물에 대하여 시료를 채취하여 증류수로 ω=200~300%로 만든 후 pH-meter(Orion 550A)로 측정하였다.

pH-meter는 내부에 pH=7의 용액을 넣은 유리전극과 염화칼슘(KCl) 용액을 넣은 비교전극이 있다. 이 비교 전극 내의 KCl용액은 시료액에 접촉되지 않게 액체 연결부를 통하여 시료액과 전기적으로 접촉함으로써 pH-값 차이로 생긴 전위차를 전압계로 읽게 된다. 흙의 pH는 콘크리트의 노화나 강철 재료의 부식문제, 연약지반이나 고유기질토 등에서의 지반개량, 산업폐기물 처리나 무공해화를 위한 시공 등의 검토에 중요한 지표이다. 대체로 흙의 pH가 6.5 이상은 구조물에 직접적인 영향은 없지만 5.5 이하이면 직접적인 영향을 미친다.

(6) 어독성 시험

환경영향을 평가하기 위한 방법으로 어독성 특성평가를 실시하였다. 어독성 특성은 어류의 생존성 및 활동성을 파악하여 평가(Bio-Assay Test)하였다. 유동화 처리토가 친환경적이지 않은 경우에는 주변 토양 및 생태계에 영향을 미칠 수 있기 때문에 어독성 시험은 실험이 종료된 공시체에서 발생되는 환경에 의한 어독성을 측정함으로써 환경 영향을 분석하는데 사용된다. 어독성 시험장치 및 조건선정은 공시체로부터 용탈된 산성에 의한 어독성을 평가하기 위하여 KS M 0111에 규정된 「어류에 의한 급성 독성시험」(한국표준협회, 1993)법에 근거하여 시험을 실시하였다. 시험수조는 필요에 따라 공기 송풍이 가능하도록 하고, 공시어는 수온, 먹이, 취급 등 실험실에서의 생존조건에 적합한 것으로 크기가 고르고 건강한 금붕어로 선정하였다. 시험수조 내에는 충분한 산소를 공급하기 위해 송풍장치를 부착하였다. Fig. 3.2.23에 어독성 시험 전경을 나타냈다.

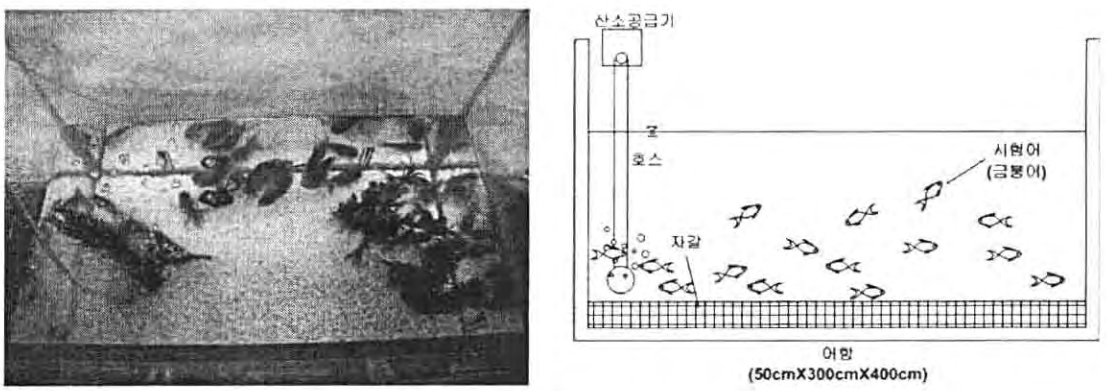


Fig. 3.2.23 어독성 시험 전경

4. 실험 조건

본 실험에서는 국내의 현장 조건 및 유동화 처리토 공법에 가장 적합한 고화재를 선정한 후, 각 실험에 대한 물-고화재 비의 범위를 산정하기 위해 여러 가지 조건에서의 배합비 결정 실험을 실시하였다. 또한 산정된 결과를 바탕으로 물-고화재 비 내에서 유동화 처리토 특성 파악 실험을 실시하였다.

가. 고화재 선정 실험 조건

본 실험에서는 시료종류, 물 비, 고화재비, 시료비, W/C를 고정인자로 하고, 고화재의 종류에 따른 유동성과 일축압축강도를 판단하여 기준에 부합되는 고화재를 선정하고자 하였다. 유동성을 판단하기 위해, 본 실험에서는 슬럼프 콘을 이용한 유동성 실험만을 실시하였고 KS F 2402의 기준에 의해, 600±100mm를 목표하였다. 일축압축강도는 배합 후, ∅10cm×20cm의 몰드에 부어 양생시킨 공시체로 4시간, 1일, 7일에 대한 실험을 실시하였다. 고화재의 특성에 따른 종류가 5가지로 다양하여 최대강도를 예측할 수 없었기 때문에, 일반적인 시멘트 양생에 사용되는 ∅10cm×20cm의 몰드를 사용하여 공시체를 양생한 후 200kN(230kg/cm^2)의 용량을 가지는 일축압축시험기를 사용하였다. Table 3.2.16에 고화재 선정 실험 조건을 제시하였다.

Table 3.2.16 고화재 선정 실험 조건

	고화재 종류	시료 종류	물 비(%)-①	고화재비(%) -②	시료비(%)	W/C(%)- ①/②
C-01	초조강시멘트	모래(70%) + 점토(30%)	26	14	60	186
C-02	초속경시멘트					
C-03	마이크로시멘트					
C-04	마이크로시멘트					
C-05	CSA계 시멘트					
C-06	알루미나시멘트					
C-07	알루미나시멘트					
C-08	알루미나시멘트					
C-09	CSA계 시멘트					
C-10	CSA계 시멘트					
C-11	CSA계 시멘트					

일본 건설업 경영협회 중앙기술 연구소 유동화 처리 공법 기술 연구 위원회(이하 일본 유동화 기술 위원회, 1997)는 실내 실험을 통해, 7일 재령 시의 일축압축강도와 28일 재령 시의 일축압축강도의 관계를 파악하였다(Fig. 3.2.24). 본 실험에서는 일본 유동화 기술 위원회(1997)의 일축압축강도의 관계에 의해 7일 일축압축강도로 28일 일축압축강도를 파악하였다. 변형속도는 KS F 2314에 의해 1.0mm/min로 파괴시켰고, 4시간후 일축압축강도는 1.3kg/cm^{2}이상, 일본 유동화 기술 위원회(1997)의 일축압축강도의 관계에 의해 예측된 28일 일축압축강도 기준치는 5.6kg/cm^2 이하로 설정하였다. 이 강도는 인력으로 굴착이 가능한 정도의 강도(일본 동경전력공사의 기준)로서 최종 양생 후 본 기준에 부합여부를 파악한다.

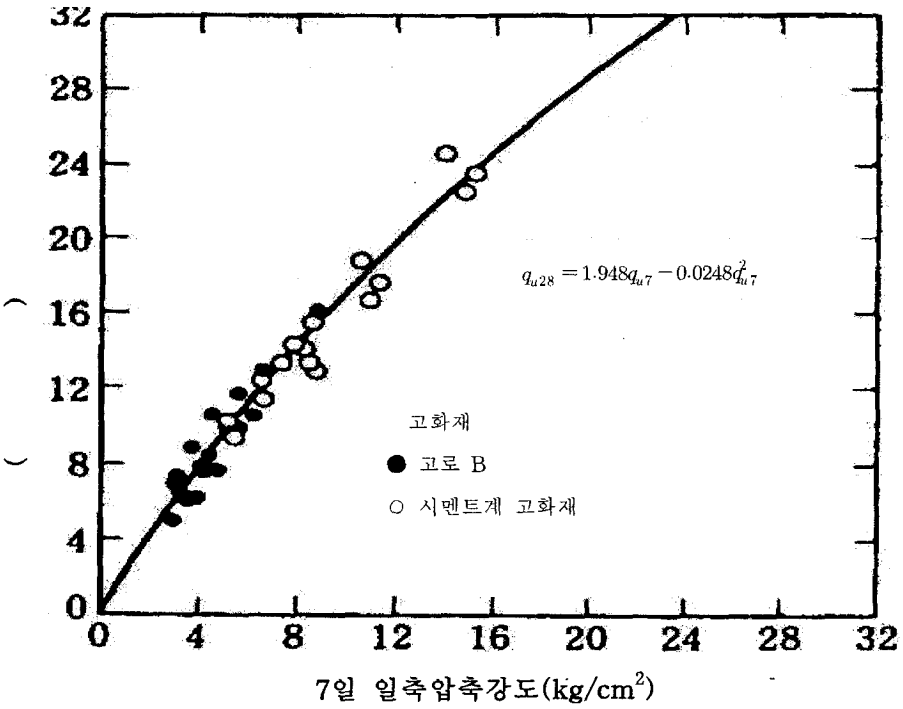


Fig. 3.2.24 재령 7일과 28일 일축압축강도의 관계(일본 유동화 기술 위원회, 1997)

나. 고로슬래그 시멘트를 이용한 유동화 처리토의 배합 특성 실험

1차년도 연구를 통해 적합 고화재를 선정하였으나, 유동화 처리토의 사용 및 현장 적용 사례가 증가하고 있는 일본의 경우 고화재로 고로슬래그 시멘트의 사용 사례가 증가하고 있다. 일본의 경우, 6가크롬에 의한 규제가 엄격하기 때문에 6가크롬의 용출량이 적은 친환경 고화재인 고로슬래그 시멘트의 사용량이 증가한다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 국내의 토질 조건과 고로슬래그 시멘트의 적합 여부를 판단하고자, 1차년도 실험을 통해 적합 고화재로 선정된 CSA계 C-10과 고로슬래그 시멘트로 각각 제조한 유동화 처리토의 시료의 혼합비에 따른 블리딩, 유동성, 일축압축강도(4시간, 1일, 7일, 28일)를 측정하여 비교 분석하였다. 본 연구에 사용한 고로슬래그 시멘트는 국내 사용량 중 가장 큰 비율을 나타내는 광양슬래그 시멘트 공장에서 생산 및 공급되는 고로슬래그 시멘트 중, 고로슬래그의 함유량이 30%~60%인 2종 고로슬래그 시멘트를 사용하여 실험을 실시하였다. Table 3.2.17에 고로슬래그 시멘트의 특성 파악 실험 조건을 나타냈다.

Table 3.2.17 고로슬래그 시멘트의 배합 특성 파악 실험

No.	고화재 종류	시료			비율			W/C (%)
		모래 (%)	점토 (%)		시료 (%)	물 (%)	고화재 (%)	
T3-C1	Slag	50	50	a	50	33	17	194.12
				b	50	35	15	233.33
T3-C6	C-10			c	60	26	14	185.71
				d	60	28	12	233.33
T3-C2	Slag	60	40	a	50	33	17	194.12
				b	50	35	15	233.33
T3-C7	C-10			c	60	26	14	185.71
				d	60	28	12	233.33
T3-C3	Slag	65	35	a	50	33	17	194.12
				b	50	35	15	233.33
T3-C8	C-10			c	60	26	14	185.71
				d	60	28	12	233.33
T3-C4	Slag	70	30	a	50	33	17	194.12
				b	50	35	15	233.33
T3-C9	C-10			c	60	26	14	185.71
				d	60	28	12	233.33
T3-C5	Slag	75	25	a	50	33	17	194.12
				b	50	35	15	233.33
T3-C10	C-10			c	60	26	14	185.71
				d	60	28	12	233.33

다. 배합비 결정 실험 조건

현장토 종류에 따른 유동화 처리토의 특성을 파악하기 위해 흙의 통일분류법상의 SW, SM, SC, ML, CL에 해당하는 현장토를 직접 채취하여, 채취된 시료와 고화재 그리고 물의 비율을 변화시켜 혼합하였다. 혼합 후 유동성 시험, 블리딩 시험, 슬럼프 플로우시험 및 일축압축 강도시험을 실시하여 적정 범위에 맞는 배합비의 범위를 선정하였는데 이때의 배합비는 자연함수비를 감안하여 선정하였다(Table 3.2.18, 3.2.19, 3.2.20). 고화재 선정 실험결과를 통해 일축압축강도특성을 파악한 결과 고화재 선정 실험에 사용하였던 200kN(230kg/cm^2)의 일축압축 강도 실험기보다 최대값의 범위가 더 작은 일축압축 실험기를 사용하는 것이 더욱 정확한 값을 측정할 수 있기 때문에 100kN(115kg/cm^2)의 일축압축 실험기에 맞는 ∅5cm×10cm 사이즈의 공시체로 양생하여 일축압축 강도시험을 실시하였다. 이때 초기 강도발현이 양생온

도에 미치는 영향을 고려하여 양생 시 일정한 온도(23±2℃)를 유지시켰다. 또한 여러 가지 배합비에 대해 각각 블리딩율은 1%이하, 유동성은 180~300mm, 일축압축강도는 4시간 경과 후 1.3kg/cm^{2}이상의 기준에 부합되는 배합비를 선정하였다.

Table 3.2.18 W/C의 변화에 따른 배합비 일람표(SW, SM, SC, ML의 경우)

현장토 종류	물 비(%)-①	고화재비(%)-②	현장토비(%)	W/C(%)-①/②
SW	31.0	15.2	53.8	205
	30.4	16.8	52.8	181
	30.5	18.3	51.2	167
	29.7	17.0	53.3	175
	29.0	17.2	53.8	169
	28.7	18.0	53.3	160
	28.0	18.2	53.8	154
	27.3	18.4	54.4	148
	28.8	19.4	51.7	149
SM	25.1	15.2	59.7	166
	24.6	16.8	58.6	146
	26.1	14.1	59.7	185
	26.0	14.6	59.4	178
	26.9	14.0	59.1	192
	26.7	14.4	58.8	185
SC	37.0	14.1	48.9	262
	38.7	16.3	45.0	238
	39.2	17.8	43.0	221
	38.1	17.7	44.2	215
	39.1	17.2	43.7	227
	38.0	18.1	43.9	210
ML	45.2	13.4	41.4	338
	44.2	15.4	40.4	287
	42.6	18.5	38.9	230
	41.0	21.4	37.5	192
	39.6	24.1	36.2	164

CL 시료의 경우 강도기준에 부합되는 W/C 비를 찾기 위해 여러 가지 현장토비(35.6~54.7%)에서 시험을 실시하였다(Table 3.2.19). 그러나 강도 기준과 유동성 기준에 부합되는 W/C 범위를 산정할 수 없었기 때문에, 촉진제를 사용한 실험을 실시하였다(Table 3.2.20).

Table 3.2.19 W/C의 변화에 따른 배합비 일람표(CL의 경우)

현장토 종류	물 비(%)-①	고화재비(%)-②	현장토비(%)	W/C(%)-①/②
CL	54.7	4.9	40.4	1122
	53.4	7.1	39.4	748
	52.2	9.3	38.5	561
	51.0	11.4	37.6	449
	49.9	13.3	36.8	374
	48.8	15.2	36.0	321
	47.8	17.0	35.2	281
	47.8	17.0	35.2	281
	45.8	20.4	33.7	224
	44.0	23.5	32.5	187
	42.3	26.4	31.2	160
	40.8	29.1	30.0	140
	39.4	31.6	29.0	125
	38.0	33.9	28.1	112
	36.8	36.1	27.1	102
	35.6	38.1	26.2	93

Table 3.2.20 W/C의 변화에 따른 배합비 일람표(촉진제를 혼합한 CL의 경우)

현장토 종류	물 비(%)-①	고화재비(%)-②	현장토비(%)	W/C(%)-①/②
CL	45.0	22.6	32.4	200
	45.9	21.6	32.4	212
	44.0	23.6	32.4	187
	47.6	20.0	32.4	238

라. 자갈 함유량에 따른 유동화 처리토의 배합 특성 실험

본 연구에서는 기존의 유동화 처리토 연구와 차별화하고 현장 조건에 더욱 부합할 수 있도록 자갈을 첨가한 시료를 임의로 조성하여 실험을 실시하였다. 기존의 유동화 처리공법을 현장에 적용할 경우, 현장발생토를 100% 사용하지 못하고, #4번체(4.75mm)를 통과한 시료만을 사용하는 한계를 나타냈다. 이에 본 연구에서는 #4

번체 이상의 시료, 즉 통일 분류법상 자갈로 분류되는 시료의 사용에 대한 활용성을 검토하여 현장발생토의 사용률을 증대시키고자 하였다. 자갈을 첨가하게 되면, 재료분리에 의한 영향이 클 것이라고 판단되는데, 4.75mm 이상 13mm 이하의 자갈을 사용하여 유동화 처리토의 제조 후의 재료분리의 영향 및 유동성과 강도특성, 투수특성을 실험을 통해 규명하고자 하였다.

모래, 점토, 자갈의 비율을 인위적으로 조절하여 실험에 사용될 대상 시료를 조성하였고, 유동화 처리토의 제조 시 시료의 비율과 W/C를 조절하여 실험조건을 결정하였다. 또한 1차년도 적합 고화재로 선정된 C-10 고화재와 1차년도 연구에 사용하지 않았던 CSA계 고화재인 S 고화재를 사용하여, 고화재의 영향을 파악하고자 하였다. Table 3.2.21은 자갈 함유량에 따른 최적 배합비 도출을 위한 실험 조건을 나타낸 것이다.

Table 3.2.21 자갈 함유량에 따른 최적 배합비 도출 실험

No.	고화재 종류	시료				비율			W/C (%)
		모래 (%)	점토 (%)	자갈 (%)		시료 (%)	물 (%)	고화재 (%)	
T1-C1	C-10	55	40	5	a	50	33	17	194.12
					b	50	35	15	233.33
T1-C6	S				c	60	26	14	185.71
					d	60	28	12	233.33
T1-C2	C-10	45	40	15	a	50	33	17	194.12
					b	50	35	15	233.33
T1-C7	S				c	60	26	14	185.71
					d	60	28	12	233.33
T1-C3	C-10	35	40	25	a	50	33	17	194.12
					b	50	35	15	233.33
T1-C8	S				c	60	26	14	185.71
					d	60	28	12	233.33
T1-C4	C-10	25	40	35	a	50	33	17	194.12
					b	50	35	15	233.33
T1-C9	S				c	60	26	14	185.71
					d	60	28	12	233.33
T1-C5	C-10	15	40	45	a	50	33	17	194.12
					b	50	35	15	233.33
T1-C10	S				c	60	26	14	185.71
					d	60	28	12	233.33

마. 유기물 함유량에 따른 유동화 처리토의 배합 특성 실험

현장 조건에 따라 다르지만 국내의 현장발생토에는 평균 약 10~15%의 유기물(이탄)이 함유되어 있다. 본 공법인 유동화 처리토는 현장발생토를 직접 사용하는 것이 목적이기 때문에 유기질토에 대한 배합 특성을 파악하고자 하였다. 국외 연구에 사용된 유동화 뒷채움재는 주로 모래 또는 혼합토(점토+모래)를 사용하였다(천선호, 2006). 이에 본 연구에서는 점토(Kaolinite)와 모래(표준사)를 혼합하고, 유기질 함유량에 따른 유동화 처리토의 배합 특성의 변화를 파악하고자 휴믹산을 첨가하여 시료를 조성하였다. Table 3.2.22에 유기질 함유량에 따른 유동화 처리토의 배합 특성을 파악하기 위한 실험 조건을 나타냈다.

Table 3.2.22 유기물 함유량에 따른 영향 최적 배합비 도출 실험

No.	고화재 종류	시료				비율			W/C (%)
		모래 (%)	점토 (%)	유기물 (%)		시료 (%)	물 (%)	고화재 (%)	
T2-C1	C-10	60	35	5	a	50	33	17	194.12
					b	50	35	15	233.33
T2-C6	S				c	60	26	14	185.71
					d	60	28	12	233.33
T2-C2	C-10	60	30	10	a	50	33	17	194.12
					b	50	35	15	233.33
T2-C7	S				c	60	26	14	185.71
					d	60	28	12	233.33
T2-C3	C-10	60	25	15	a	50	33	17	194.12
					b	50	35	15	233.33
T2-C8	S				c	60	26	14	185.71
					d	60	28	12	233.33
T2-C4	C-10	60	20	20	a	50	33	17	194.12
					b	50	35	15	233.33
T2-C9	S				c	60	26	14	185.71
					d	60	28	12	233.33
T2-C5	C-10	60	15	25	a	50	33	17	194.12
					b	50	35	15	233.33
T2-C10	S				c	60	26	14	185.71
					d	60	28	12	233.33

바. 석탄회를 첨가한 유동화 처리토의 배합 특성 실험

현장발생토는 각 현장의 상황에 따라 그 토질의 특성이 상이하기 때문에 대상토의 특성별로 품질관리를 하는 것이 어렵다는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 화력발전소 부산물인 석탄회를 현장발생토의 대체재료로 재활용하고자 하였다. 석탄회는 발생경로가 확실하고, 그 성상이 균질하며 단위중량이 작고, 내부마찰각이 크기 때문에 공학적으로 매우 양질의 재료라고 할 수 있다. 본 연구에서 사용한 석탄회는 태안 화력발전소에서 발생하는 석탄회를 사용하였고, 현장발생토는 현장 시험 시공 부지에서 채취하였다. 석탄회의 첨가량에 따른 유동화 처리토의 재료분리 특성, 유동성, 강도특성, 투수특성 등을 파악하고자 실내 실험을 수행하였다. 석탄회 첨가량에 따른 영향, W/C 변화에 따른 영향, 현장발생토와 석탄회의 혼합비에 따른 영향의 파악을 위해 Table 3.2.23 ~ Table 3.2.25과 같이 실내 실험을 수행하였다.

Table 3.2.23 석탄회를 첨가한 경우 시료의 양에 따른 배합 특성 실험

No.	고화재 종류	시료		비율			W/C (%)
		현장 발생토 (%)	석탄회 (%)	시료 (%)	물 (%)	고화재 (%)	
T5-C1	C-10	15	15	30	47.4	22.6	210
T5-C2		20	20	40	40.6	19.4	
T5-C3		25	25	50	33.9	16.1	
T5-C4		30	30	60	27.1	12.9	
T5-C5		35	35	70	20.3	9.7	
T5-C6		40	40	80	13.5	6.5	

Table 3.2.24 석탄회를 첨가한 유동화 처리토의 W/C 변화에 따른 배합 특성 실험

No.	고화재 종류	시료		비율			W/C (%)
		현장 발생토 (%)	석탄회 (%)	시료 (%)	물 (%)	고화재 (%)	
T6-C1	C-10	32.5	32.5	65	22.9	12.1	190
T6-C2		32.5	32.5	65	23.3	11.7	200
T6-C3		32.5	32.5	65	23.7	11.3	210
T6-C4		32.5	32.5	65	24.1	10.9	220
T6-C5		32.5	32.5	65	24.4	10.6	230

Table 3.2.25 석탄회를 첨가한 경우 시료 혼합비에 따른 배합 특성 실험

No.	고화재 종류	시료		비율			W/C (%)
		현장 발생토 (%)	석탄회 (%)	시료 (%)	물 (%)	고화재 (%)	
T7-C1	C-10	50	15	65	23.3	11.7	200
T7-C2		45	20	65	23.3	11.7	200
T7-C3		40	25	65	23.3	11.7	200
T7-C4		35	30	65	23.3	11.7	200
T7-C5		30	35	65	23.3	11.7	200
T7-C6		25	40	65	23.3	11.7	200
T7-C7		20	45	65	23.3	11.7	200
T7-C8		15	50	65	23.3	11.7	200

사. 급결성 유동화 처리토 특성 파악 실험

배합비 산정실험을 바탕으로 결정된 범위 내에서 각 시료 별 4가지 유동화 처리토 특성 파악 실험 조건을 산정하였다. CL 시료의 경우, 유동성 실험과 강도 실험의 기준치에 부합되도록 촉진제를 첨가하여 실험조건을 결정하였다.

Table 3.2.26 유동화 처리토 특성 파악 실험 조건

	현장토(%)	고화재(%)	W/C(%)	촉진제(g)
SW-1	53.3	14.0	212	
SW-2	53.3	16.0	186	
SW-3	53.3	18.0	165	
SW-4	53.3	20.0	149	
SM-1	60	13.0	207	
SM-2	60	13.9	192	
SM-3	60	15.5	168	
SM-4	60	17.1	150	
SC-1	43.5	17	231	
SC-2	43.5	18.4	207	
SC-3	43.5	19.2	195	
SC-4	43.5	20	182	
ML-1	38.8	16.9	263	
ML-2	38.8	17.4	241	
ML-3	38.8	19.9	208	
ML-4	38.8	21.0	191	
CL-1	32.4	19.3	251	13.78
CL-2	32.4	20.0	238	14.3
CL-3	32.4	20.8	225	14.9
CL-4	32.4	21.6	212	15.5

아. 본 연구의 목표 기준치

현재까지의 일본과 미국의 유동화 처리토 기술에 대한 연구사례는 대상시료, 유동성, 일축압축강도, 블리딩율, 침하 등을 고려하여 가장 적합한 배합비를 산정하는 것을 목적으로 한다. Table 3.2.27에 국외의 유동화 처리토 기준을 제시하였다.

본 연구에서는 국외의 연구 사례를 기준으로 대상시료, 유동성, 일축압축강도, 블리딩율을 고려하였고, 국내 KS F 2402의 기준에 의해 슬럼프 플로우 값을 추가로 고려하여 대상시료에 따른 적합 배합비를 산정하였다(Table 3.2.28). 강도 특성에 대한 목표기준값은 조기강도와 장기강도 기준으로 나누어 설정하였고, 조기강도는 급속 조기 개방을 고려한 경우, 타설 4시간 후의 강도(1.3kgf/cm^2 이상)를 기준으로 하였고, 일반적인 조기강도는 타설 1일 후의 강도(2.0kgf/cm^2 이상)를 기준을 하였다. 타설 1일 후의 목표강도 설정은 4시간 후와 28일 후의 강도가 일본(Tokyo Electric Power Company R&D Center, 1996)의 일축압축강도를 기준을 만족할 경우를 기준으로 산정하였다. 장기강도는 인력으로 재굴착이 가능한 강도를 기준으로 설정하였기 때문에 타설 28후 강도 기준을 7.0kg/cm^2이하로 하였다. 또한 관입저항치(18시간 응결후), 6일 양생 후 CBR(%), pH, 공기량(%), 재령 28일 후 점착력(c), 재령 28일 후 내부마찰각 (ϕ) 등을 목표기준으로 설정하였다. 관입저항치와 CBR, 점착력, 내부마찰각은 일축압축강도만을 목표기준치로 설정한 국외 사례를 보완하고, 유동화 처리토 지반의 장기거동 및 하중적용시의 영향을 파악하고자 목표기준치로 설정하였고, 공기량은 유동화 처리토 내의 공기는 고화 후 간극을 형성하여 하중 증가에 따른 침하를 유발할 수 있기 때문에 1% 이하의 목표 기준을 설정하였다. 또한 유동화 처리토의 알칼리화에 따른 영향을 제어하고자 pH도 목표기준치로 설정하였다. 본 연구에서의 목표기준치 Table 3.2.28에 제시하였다.

Table 3.2.27 국외 유동화 처리토의 기준

분류	일본(Tokyo Electric Power Company R&D Center, 1996)	미국(ACI 229R-94, 1994)
특징	현장잔토 사용	현장잔토 사용하지 않음
대상시료	모래+점토	Fly Ash +모래 폐주물사+모래
유동성(실린더법)	180~300mm	31.5mm 이상
일축압축강도 (qu)	· 1시간 : 0.3kg/cm^{2}이상 · 4시간 : 1.3kg/cm^{2}이상 · 28 일 : 5.6kg/cm^{2}이하	· 4시간 : 규정 없음 · 3일 강도 : 1.4kg/cm^{2}이상 · 28일 강도 : 2.1~10.6kg/cm^2 * 미국 Ready Mixed 콘크리트 협회 추천값
블리딩율(%)	1% 이하	-
침하	3mm이하	3~6mm

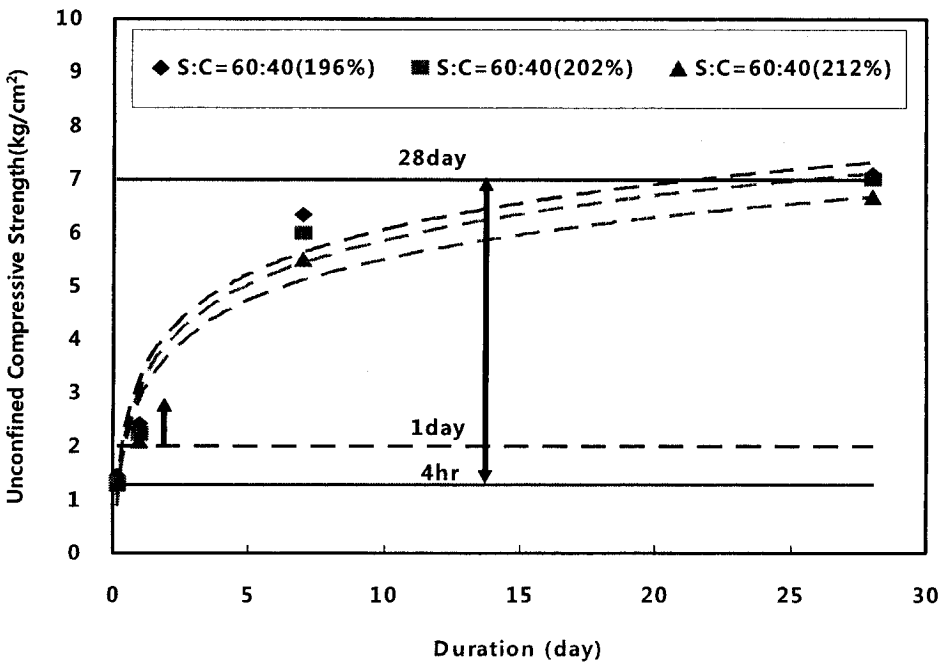


Fig. 3.2.25 일본의 일축압축강도기준을 만족하는 1일 후의 기준강도 산정

Table 3.2.28 본 연구에서의 목표기준치

목 록	목표기준치
대상시료	통일분류법에 의해 분류
밀도	1.5g/cm^3 이상
유동성(흐름값)	180 ~ 300mm(직경80mm×높이80mm 몰드), 31.5mm 이상(직경11.8mm×높이23.6mm)
슬럼프 플로우(slump flow)	500~700mm(KS F 2402)
일축압축강도(qu)	타설 4시간 후 : 1.3kgf/cm^2 이상 (급속 조기 개방시 고려) 타설 1일 후 : 2.0kgf/cm^2 이상 (조기강도 기준) 타설 28일 후 : 7.0kgf/cm^2 이하 (장기강도 기준)
블리딩율(bleeding)	1% 이하
투수계수	10^{-6}~10^{-7}cm/sec
관입저항치(18시간 응결후)	5.0kg/cm^2 이상
6일 양생 후 CBR(%)	6% 이상
공기량(%)	1% 이하
재령 28일 후 점착력 (c)	2.0kg/cm^2 이상
재령 28일 후 내부마찰각 (ϕ)	20° 이상
pH	7.0~10.0
환경 영향	토양환경보전법의 환경기준치 만족

제 3 절 실험 결과 및 분석

1. 고화재 선정 실험 결과

가. 고화재에 따른 유동성 결과

유동성을 판단하기 위해, 본 실험에서는 KS F 2402의 기준에 의거해 슬럼프 콘을 이용한 유동성 실험을 실시하였고, 슬럼프 플로우의 목표 기준치를 600±100mm로 설정하였다.

고화재 특성에 따라 유동성을 비교하면, 초조강 시멘트, CSA계 시멘트가 기준 유동성을 모두 만족하였고, 마이크로 시멘트와 알루미나 시멘트의 일부도 본 실험의 목표치에 부합하는 유동성을 나타냈으나, 초속경 시멘트의 경우 다른 고화재에 비해 유동성이 크게 저하되는 것으로 나타났다. Table 3.3.1은 각각 사용된 고화재에 따른 유동성 실험결과를 제시하고 있으며, 결과적으로 C-01, C-04, C-06, C-07, C-08, C-09, C-10의 고화재가 본 실험에서 기준으로 하는 유동성을 만족시켰다.

Table 3.3.1 고화재에 따른 유동성 실험 결과

	고화재 특성에 따른 종류	고화재 이름	유동성(슬럼프 콘 값)	비고
C-01	초조강시멘트	S1	523.0	OK
C-02	초속경시멘트	S2	386.0	
C-03	마이크로시멘트	M6	726.0	
C-04	마이크로시멘트	M8	687.0	OK
C-05	CSA계 시멘트	JC	482.0	
C-06	알루미나시멘트	U7	597.0	OK
C-07	알루미나시멘트	U8	632.0	OK
C-08	알루미나시멘트	Z1	654.0	OK
C-09	CSA계 시멘트	G1	604.0	OK
C-10	CSA계 시멘트	G2	563.0	OK
C-11	CSA계 시멘트	G3	479.0	

나. 고화재에 따른 강도특성 결과

유동화 처리토에 적합한 고화재를 선정하기 위해 시간 경과에 따른 일축압축강도를 평가하여 강도특성을 파악하였다. KS F 2314에 의해 1.0mm/min의 변형속도로 4시간, 1일, 7일의 일축압축강도를 측정하였으며, 재령 4시간 일축압축강도를 1.3kg/cm^{2}이상, 재령 28일 일축압축강도를 5.6kg/cm^2 이하로 기준치를 설정하여 적합 고화재를 선정하고자 하였다. 특히 재령 28일 일축압축강도는 일본 유동화 기술위원회(1997)에서 제시한 재령 일축압축강도 예측식을 통해 도출하였다. 본 실험에서 기준으로 설정한 1.3~5.6kg/cm^{2}의 일축압축강도 범위는 유동화 처리토 시공이후 인력으로 재굴착이 가능한 정도의 강도이다(일본 동경전력공사의 기준).

Fig. 3.3.1은 재령 4시간 일축압축강도를 나타낸 것이다. 총 11개의 실험조건 중 C-02, C-03, C-04, C-05, C-07, C-11의 경우는 공시체 양생 4시간 후에도 시료가 자립할 수 있을 정도까지 경화되지 않아서 일축압축강도의 측정이 불가능하였다. 실험결과 C-01, C-06, C-08, C-09, C-10 등의 5종류의 고화재만이 재령 4시간 일축압축강도인 1.3kg/cm^2 이상의 조건을 만족시키는 것으로 나타났다.

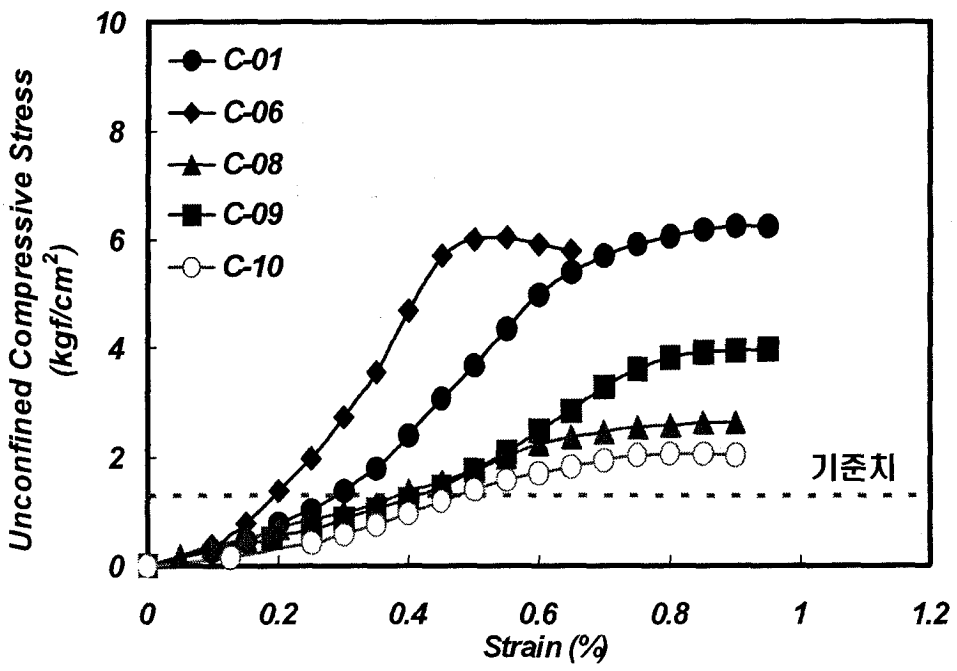


Fig. 3.3.1 고화재에 따른 재령 4시간 일축압축강도

Fig. 3.3.2는 재령 1일 일축압축강도 분포를 나타내고 있다. 실험 결과에 제시된 바와 같이 알루미나 시멘트계 고화재를 혼합하여 양생시킨 C-06과 C-07의 재령 1일 일축압축강도는 타 고화재를 넣어 양생시킨 경우에 비해 최대 압축강도가 약 1.5~2배 크게 발현되었다. 특히 재령 1일 일축압축강도와 재령 4시간 일축압축강도 값을 비교해 볼 때, 대부분 재령 4시간 일축압축강도가 클수록 재령 1일 일축압축강도도 크게 나타나는 경향이 발생하였다.

사용되는 고화재의 종류에 유동화 공시체의 일축압축강도특성은 매우 큰 차이가 발생하였는데, 특히 C-05의 경우에는 재령 4시간 목표 일축압축강도였던 1.3kg/cm^2 에도 미치지 못 하는 작은 강도를 나타났으며, 양생 4시간 후에 자립이 불가능했던 C-02, C-03, C-04, C-07, C-11의 경우는 재령 4시간 목표 일축압축강도였던 1.3kg/cm^2 이상의 강도를 보였다. 특히 C-07의 일축압축강도는 9.8kg/cm^{2}으로 재령 4시간과 재령 1일 사이에 매우 큰 강도증가 현상이 유발되었다.

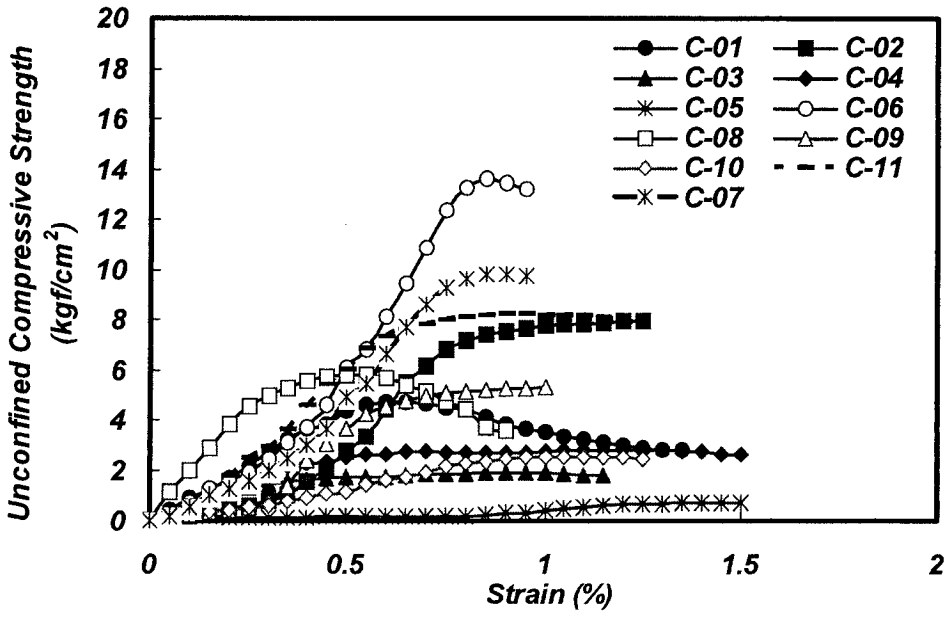


Fig. 3.3.2 고화재에 따른 재령 1일 일축압축강도

Fig. 3.3.3에 재령 7일 일축압축강도를 나타냈다. 대부분의 경우 재령 1일 일축압축강도에 비해 약 2~3배의 강도 증가 현상을 보였는데, C-10의 경우에는 그 증가 현상은 크지 나타나지 않았다. 특히, 재령 1일 일축압축강도에서 매우 낮은 일축

압축강도값을 보였던 C-05의 경우, 7일 경과 후에는 강도 증진효과가 크게 유발되어 최대기준강도(5.6kg/cm^2)를 초과하였으며, 거의 대부분의 실험조건에서 재령 28일 일축압축강도 목표(5.6kg/cm^2)를 상회하는 결과값이 도출되었다.

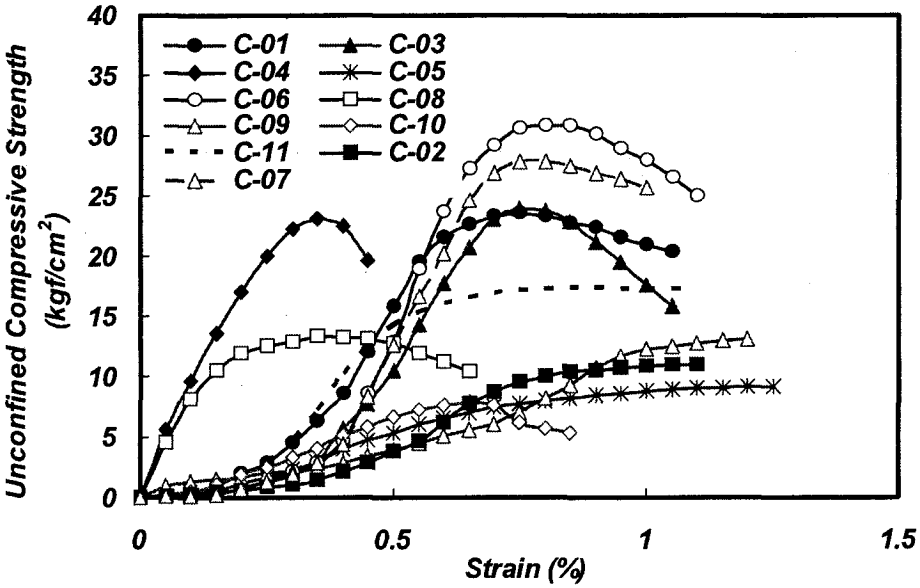


Fig. 3.3.3 고화재에 따른 재령 7일 일축압축강도

재령 28일 일축압축강도는 일본 유동화 기술 위원회(1997)가 제안한 식(3.3.1)에 의해 재령 7일 일축압축강도를 통해 예측하였다.

$$q_{u28} = 1.948 q_{u7} - 0.0248 q_{u7}^2 \qquad (3.3.1)$$

여기서, q_{u28} : 양생 28일 후의 일축압축강도, q_{u7} : 양생 7일 후의 일축압축강도

재령 28일 후의 일축압축강도를 예측해본 결과, Fig. 3.3.4에 제시된 바와 같이 모든 경우에서 최대 일축압축강도(5.6kg/cm^2)를 초과하여 기준치를 초과하는 결과값이 도출되었지만, 이는 고화재 선정실험의 조건에서 고화재와 시료의 비율, W/C의 비율을 임의값으로 고정시켰기 때문에 유발되는 결과라 판단되어 지며, 향후 연구에서 시료조건, 고화재, W/C의 비율의 최적 조건 산정실험을 진행할 경우, 본 연구의 기준치(1.3~5.6kg/cm^2)를 충분히 만족할 것으로 예상된다.

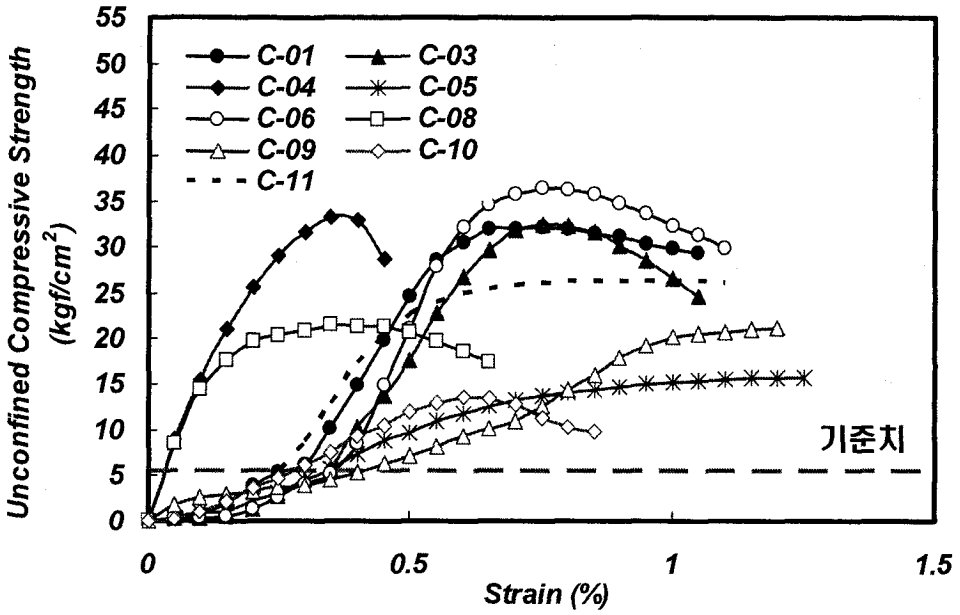


Fig. 3.3.4 고화재에 따른 재령 28일 예측 일축압축강도

다. 유동성과 강도특성을 고려한 적합 고화재 선정

본 실험에서는 슬럼프 플로우 값과 재령 4시간과 재령 28일 일축압축강도를 통해 유동성과 강도특성을 동시에 만족시키는 고화재를 선정하고자 임의 배합비에 따른 유동화 고화재 특성실험을 수행하였으며, 각각 고화재의 종류에 따라 유동성과 최대일축압축강도를 측정하여 그 결과값을 제시하였다. 그 결과, 슬럼프 플로우에 의한 유동성 실험은 C-01, C-04, C-06, C-07, C-08, C-09, C-10의 7가지 경우에서 적합판정을 받았으며, 재령 4시간 일축압축강도는 C-01, C-06, C-08, C-09, C-10의 5가지 경우에서 기준치(1.3kg/cm^{2}이상)에 부합된 결과가 도출되었다. 하지만 일본 유동화 기술 위원회(1997)가 제시한 강도 예측식을 이용하여 산정된 재령 28일 일축압축강도 산정 결과, 대부분의 조건에서 기준치(5.6kg/cm^2 이하)에 부합되는 결과가 나타나지 않았다. 이는 임의로 고정된 고화재와 시료의 비율, W/C 등의 조건으로 인한 영향이라고 판단되며, 향후 최적 배합비 산정실험을 통한 배합비 조정으로 충분히 목표 기준강도(1.3~5.6kg/cm^2)에 부합할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 1차적으로 앞서 제시한 11가지 고화재의 유동성 및 강도특성실험 결과를 바탕으로 28일 일축압축강도 기준치를 제외한 모든 기준치(유동성과 4시간

일축압축강도)를 만족하는 C-06, C-07, C-08, C-09, C-10 등의 5가지 고화재를 이용가능 고화재로 분류하였으며, 그중에서 환경친화성을 고려하여 낮은 시멘트 혼합율로 인해 6가크롬의 용탈율이 가장 낮다고 판단되고, 재령 28일 일축압축강도가 가장 낮게 측정된 C-10 고화재를 본 연구의 적합 고화재로 선정하였다.

2. 고로슬래그 시멘트를 첨가한 유동화 처리토의 배합 특성

가. 재료분리 특성

고로슬래그 시멘트를 고화재로 유동화 처리토를 제조하였을 때의 재료분리 특성을 파악하고자, 동일한 조건에서 C-10 고화재를 사용하여 제조한 유동화 처리토의 재료분리 특성과 비교분석하기 위해 블리딩율을 측정했다. Table 3.3.2에 블리딩율 실험결과를 나타났다. 고로슬래그 시멘트를 고화재로 사용한 경우, 모래 함유량이 65% 이상인 시료에서는 목표 기준인 1% 이상의 블리딩율을 나타낸 반면, C-10 고화재를 사용한 경우에는 모래 함유량이 75%인 경우에서만 목표 기준을 초과하는 블리딩율이 나타났다. 고화재로 고로슬래그 시멘트를 사용할 경우, C-10 고화재에 비해 재료분리에 의한 영향이 클 것으로 판단된다. Fig. 3.3.5는 고로슬래그 시멘트와 C-10 고화재의 재료분리 특성을 파악하기 위한 블리딩율 실험결과를 나타냈다.

Table 3.3.2 재료분리 특성 실험 결과

No.		블리딩율	No.		블리딩율	No.		블리딩율	No.		블리딩율	No.		블리딩율
T3-C1	a	1% 이하	T3-C3	a	1.5%	T3-C5	a	10.0%	T3-C7	a	1% 이하	T3-C9	a	1% 이하
	b	1% 이하		b	2.5%		b	11.5%		b	1% 이하		b	1% 이하
	c	1% 이하		c	2.5%		c	5.0%		c	1% 이하		c	1% 이하
	d	1% 이하		d	5.0%		d	6.5%		d	1% 이하		d	1% 이하
T3-C2	a	1% 이하	T3-C4	a	6.0%	T3-C6	a	1% 이하	T3-C8	a	1% 이하	T3-C10	a	2.0%
	b	1% 이하		b	6.5%		b	1% 이하		b	1% 이하		b	3.5%
	c	1% 이하		c	2.0%		c	1% 이하		c	1% 이하		c	1.5%
	d	1% 이하		d	2.5%		d	1% 이하		d	1% 이하		d	3.0%

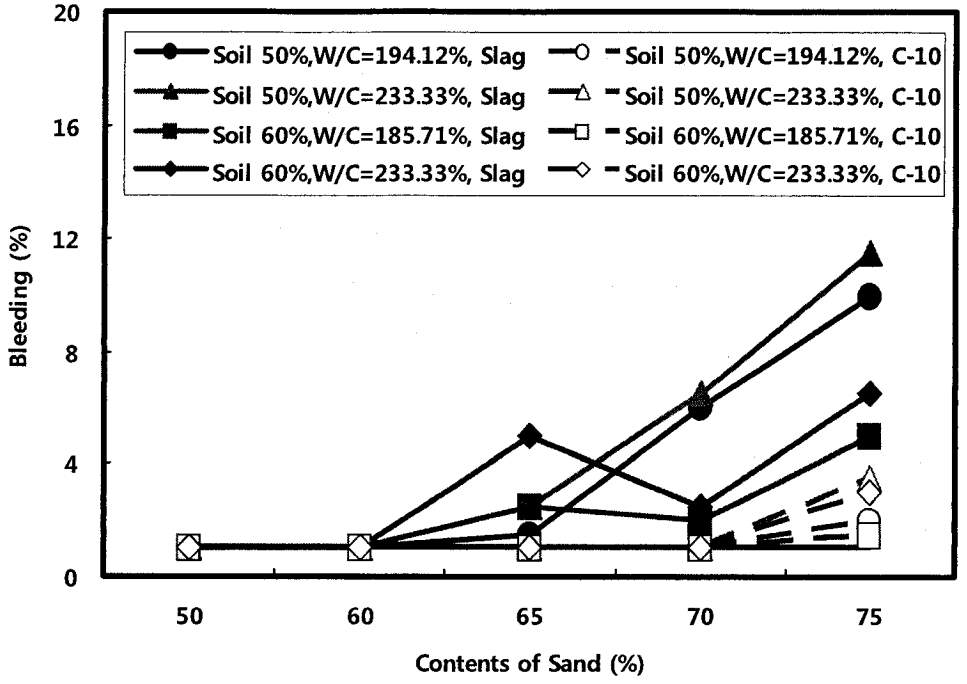


Fig. 3.3.5 모래 함유량에 따른 고로슬래그 시멘트와 C-10 고화재의 재료분리 특성

나. 유동성

(1) Soil=50%, W/C=194.12%

유동화 처리토의 시료비율이 50%이고, W/C가 194.12%인 조건의 유동성을 JHS, ASTM, Slump Flow의 3가지 기준으로 파악하였다. Table 3.3.3에 Soil=50%, W/C=194.12%일 때의 유동성 결과를 제시하였다. 모래 함유량이 50%~65%인 실험 조건에서는 JHS, ASTM, Slump Flow 3가지에서 공통적 유동성이 증가하였으나 70% 이상의 모래 함유량에서는 감소하는 경향을 나타냈다. 특히 모래 함유량이 65%인 조건에서는 고로슬래그 시멘트를 사용한 유동화 처리토와 C-10 고화재를 사용한 유동화 처리토 모두에서 다른 조건에 비해 큰 유동성 값을 보였다. JHS에 의해 유동성을 측정한 결과, 고로슬래그 시멘트를 사용한 경우 모래 함유량이 50%, 60%일 때 목표 기준을 만족하였고, C-10 고화재를 사용한 경우 모래 함유량 50%인 경우에만 목표 기준을 만족하였다. ASTM에 의해 유동성을 측정한 결과, 모래 함유량이 50%인 조건을 제외하고는 목표기준을 만족하는 유동성 결과를 나타냈다.

Slump Flow에 의해 유동성을 측정한 결과, 고로슬래그 시멘트는 모래 함유량이 60%인 조건, C-10 고화재는 모래 함유량이 50%인 조건에서만 목표기준을 만족하였다. Fig. 3.3.6~Fig. 3.3.8에 각각 JHS, ASTM, Slump Flow에 의한 유동성 결과를 제시하였다.

Table 3.3.3 유동성 결과 (Soil=50%, W/C=194.12%)

No.	모래 비율 (%)	고화재 종류	JHS (cm)	ASTM (cm)	Slump Flow (cm)
T3-C1-a	50	Blast Furnace Slag	16.6	25.4	44.6
T3-C2-a	60		25.8	32.5	66.6
T3-C3-a	65		40.6	48.3	77.8
T3-C4-a	70		30.2	37.8	73.5
T3-C5-a	75		35.6	42.6	77.2
T3-C6-a	50	C-10	19.2	24.7	61.2
T3-C7-a	60		25.6	33.1	66.9
T3-C8-a	65		39.8	47.3	76.4
T3-C9-a	70		36.2	43.4	73.6
T3-C10-a	75		40.5	47.2	76.4

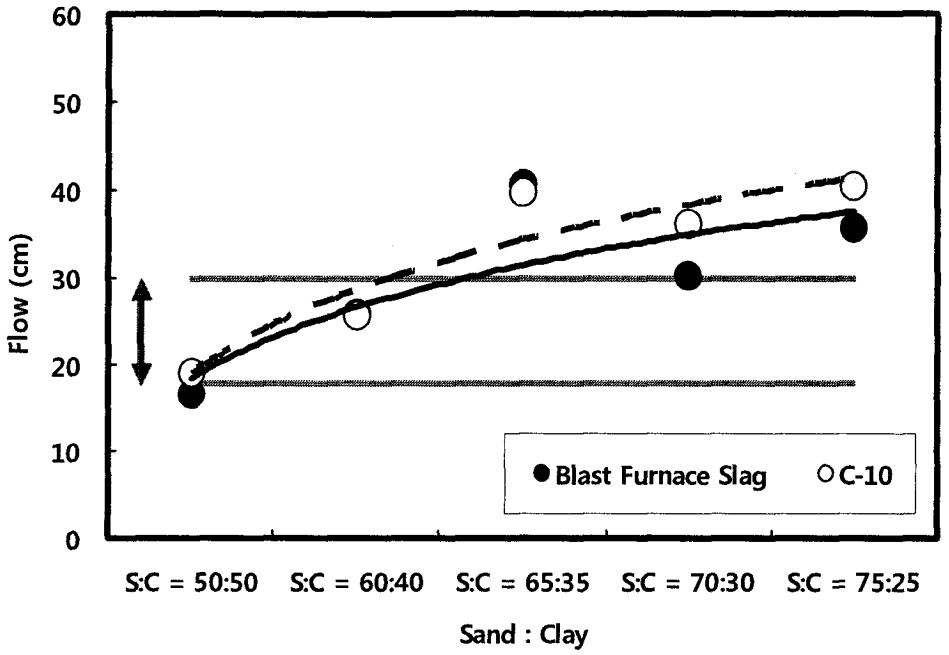


Fig. 3.3.6 Soil=50%, W/C=194.12% 조건에서의 JHS에 의한 유동성

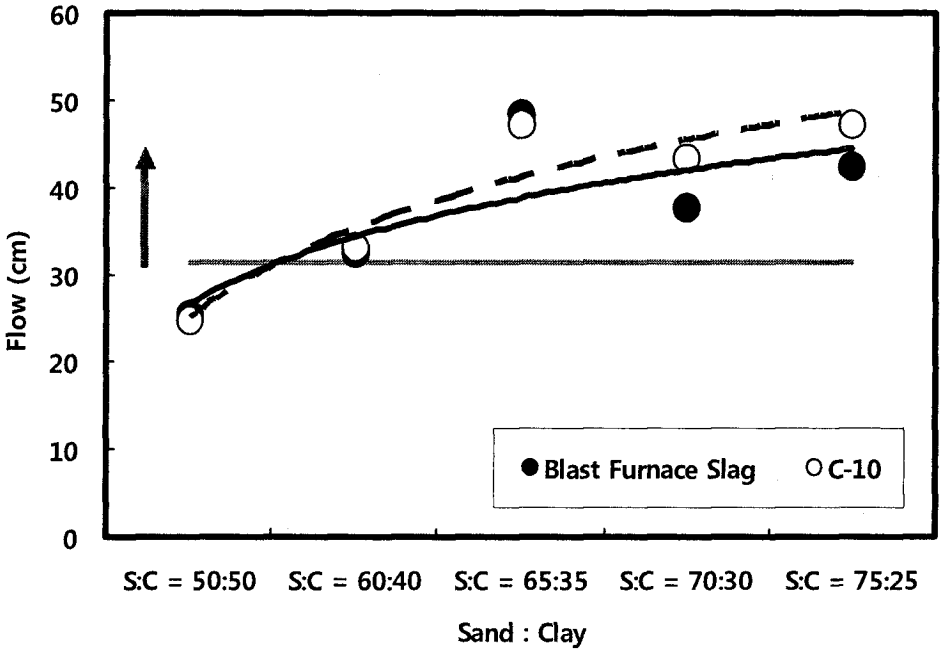


Fig. 3.3.7 Soil=50%, W/C=194.12% 조건에서의 ASTM에 의한 유동성

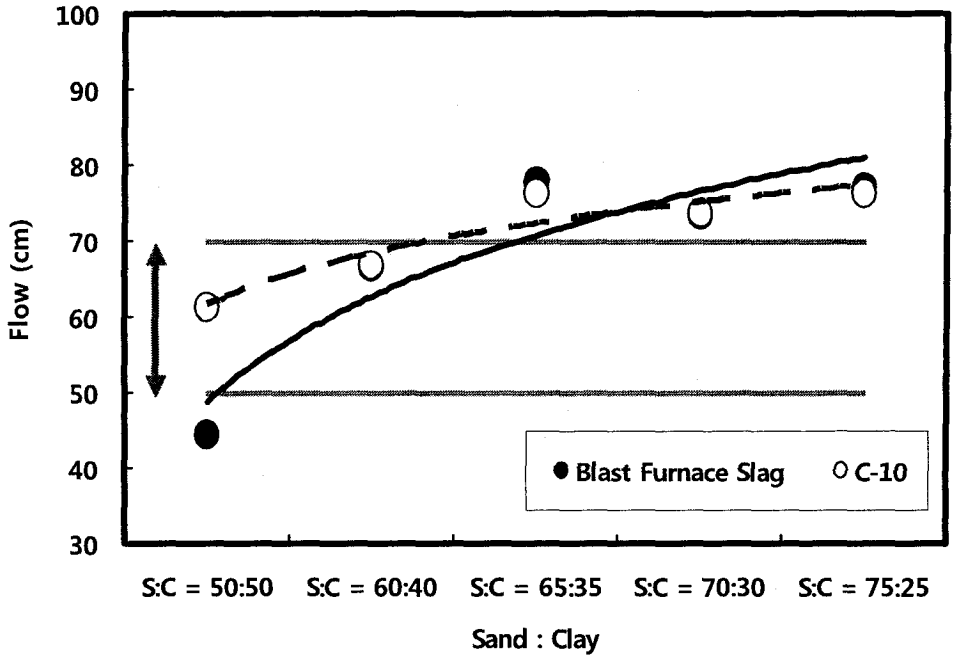


Fig. 3.3.8 Soil=50%, W/C=194.12% 조건에서의 Slump Flow에 의한 유동성

(2) Soil=50%, W/C=233.33%

유동화 처리토의 시료비율이 50%이고, W/C가 233.33%인 조건의 유동성을 JHS, ASTM, Slump Flow의 3가지 기준으로 파악하였다. 표 3.3.45에 Soil=50%, W/C=233.33%일 때의 유동성 결과를 제시하였다. 고로슬래그 시멘트와 C-10 고화재의 차이에 의한 유동성의 차이는 전반적으로 크지 않게 나타났다. JHS에 의해 유동성을 측정한 결과, 고화재의 종류에 상관없이 모래 함유량이 50%인 조건을 제외하고는 목표기준을 초과하는 유동성 결과를 나타냈다. ASTM에 의한 유동성은 모든 실험조건에서 목표 기준을 만족하였으나, 최대 약 25cm 이상 목표 기준을 초과하는 결과를 보였다. Slump Flow 결과, JHS의 결과와 같이 모래 함유량이 50%인 조건을 제외하고는 목표기준을 모두 초과하는 유동성을 보였다. Fig. 3.3.9~Fig. 3.3.11에 각각 JHS, ASTM, Slump Flow에 의한 유동성 결과를 제시하였다.

Table 3.3.4 유동성 결과 (Soil=50%, W/C=233.33%)

No.	모래 비율 (%)	고화재 종류	JHS (cm)	ASTM (cm)	Slump Flow (cm)
T3-C1-b	50	Blast Furnace Slag	24.4	31.2	67.4
T3-C2-b	60		36.4	41.4	78.6
T3-C3-b	65		48.9	53.6	87.4
T3-C4-b	70		42.1	47.2	80.3
T3-C5-b	75		42.4	45.2	79.6
T3-C6-b	50	C-10	25.5	33.1	68.1
T3-C7-b	60		35.5	44.5	72.4
T3-C8-b	65		46.6	55.9	88.4
T3-C9-b	70		46.7	55.5	83.1
T3-C10-b	75		42.2	49.7	78.9

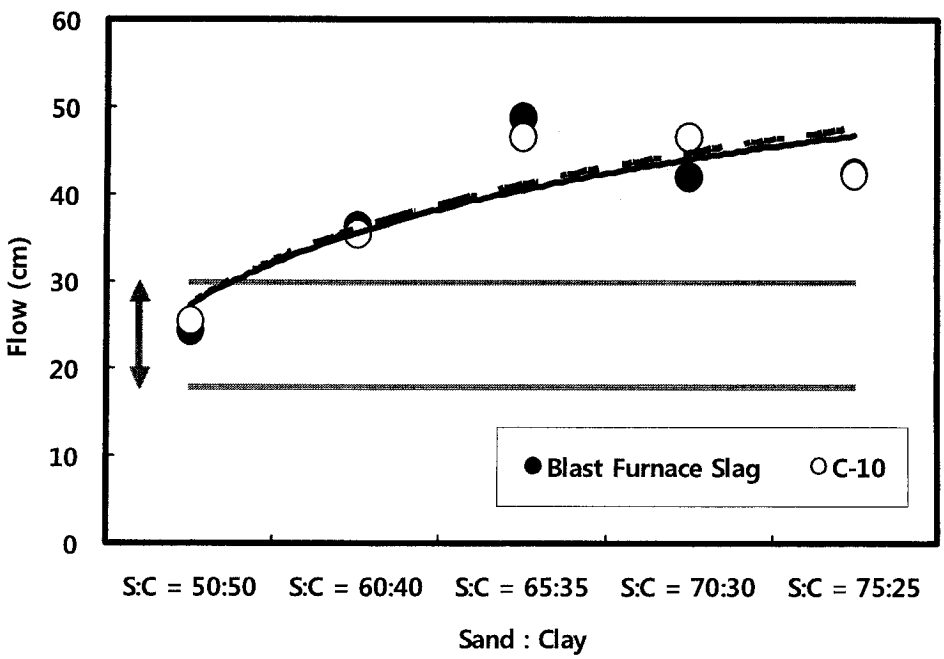


Fig. 3.3.9 Soil=50%, W/C=233.33% 조건에서의 JHS에 의한 유동성

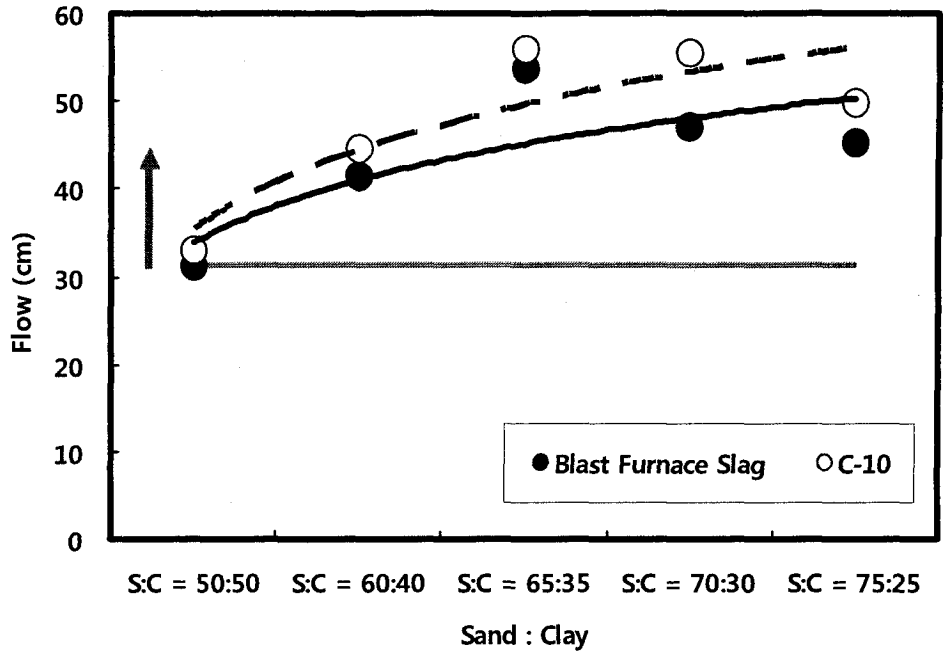


Fig. 3.3.10 Soil=50%, W/C=233.33% 조건에서의 ASTM에 의한 유동성

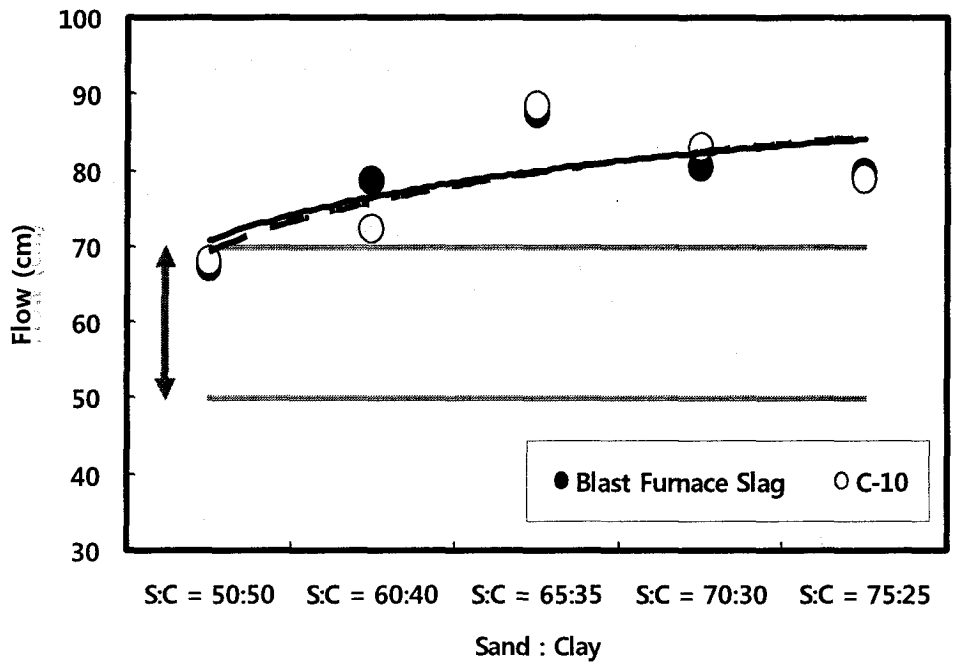


Fig. 3.3.11 Soil=50%, W/C=233.33% 조건에서의 Slump Flow에 의한 유동성

(3) Soil=60%, W/C=185.71%

유동화 처리토의 시료비율이 60%이고, W/C가 185.71%인 조건의 유동성을 JHS, ASTM, Slump Flow의 3가지 기준으로 파악하였다. Table 3.3.5에 Soil=60%, W/C=185.71%일 때의 유동성 결과를 제시하였다. 고화재의 종류에 따른 유동성의 차이는 거의 파악할 수 없었다. JHS로 유동성을 측정한 결과, 모래함유량이 65% 이하의 실험조건에서는 고로슬래그 시멘트와 C-10 고화재를 사용한 실험 모두 목표기준 이하의 유동성을 나타냈고, 모래 함유량이 70%와 75%인 실험에서만 목표기준을 만족하는 유동성을 나타냈다. ASTM에 의한 실험 결과, 모든 실험 조건에서 목표 기준인 31.5cm에 못 미치는 유동성을 보였다. Slump Flow에 의한 유동성 평가 결과, 고화재의 종류에 상관없이 모래 함유량이 70% 이하의 실험 조건에서 목표 유동성을 만족한 JHS의 실험결과와 동일하게 나타났다. Fig. 3.3.12~Fig. 3.3.14에 각각 JHS, ASTM, Slump Flow에 의한 유동성 결과를 제시하였다.

Table 3.3.5 유동성 결과 (Soil=60%, W/C=185.71%)

No.	모래 비율 (%)	고화재 종류	JHS (cm)	ASTM (cm)	Slump Flow (cm)
T3-C1-c	50	Blast Furnace Slag	8.2	14.2	41.8
T3-C2-c	60		12.2	24.5	42.4
T3-C3-c	65		12.1	20.1	45.8
T3-C4-c	70		20.2	27.7	58.9
T3-C5-c	75		22.3	27.2	60.3
T3-C6-c	50	C-10	8.7	16.9	41.6
T3-C7-c	60		14.2	23.4	48.7
T3-C8-c	65		14.7	21.7	41.2
T3-C9-c	70		20.9	27.8	64.7
T3-C10-c	75		22.1	28.4	66.4

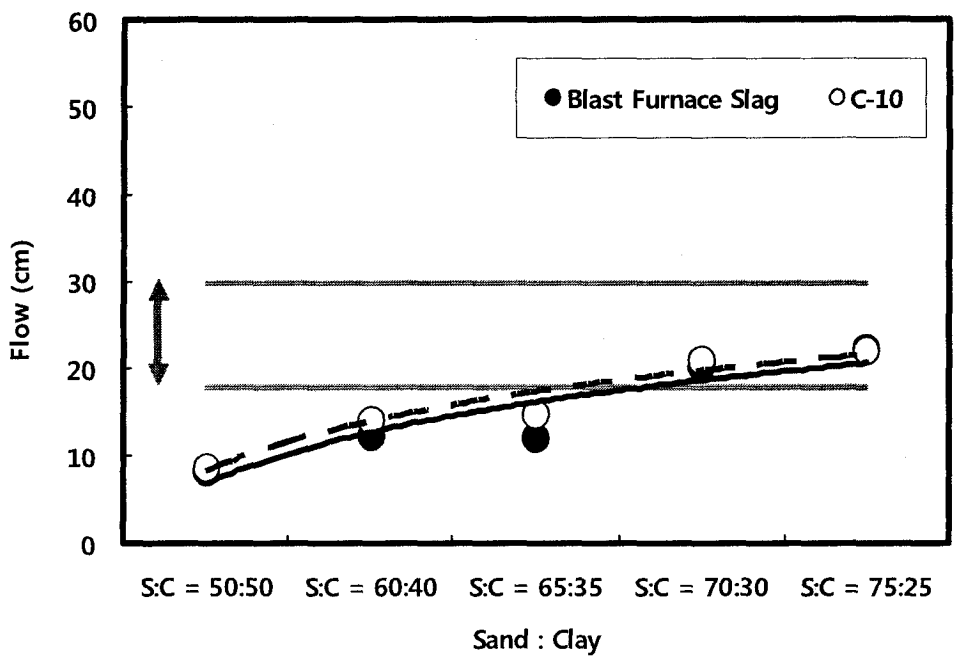


Fig. 3.3.12 Soil=60%, W/C=185.71% 조건에서의 JHS에 의한 유동성

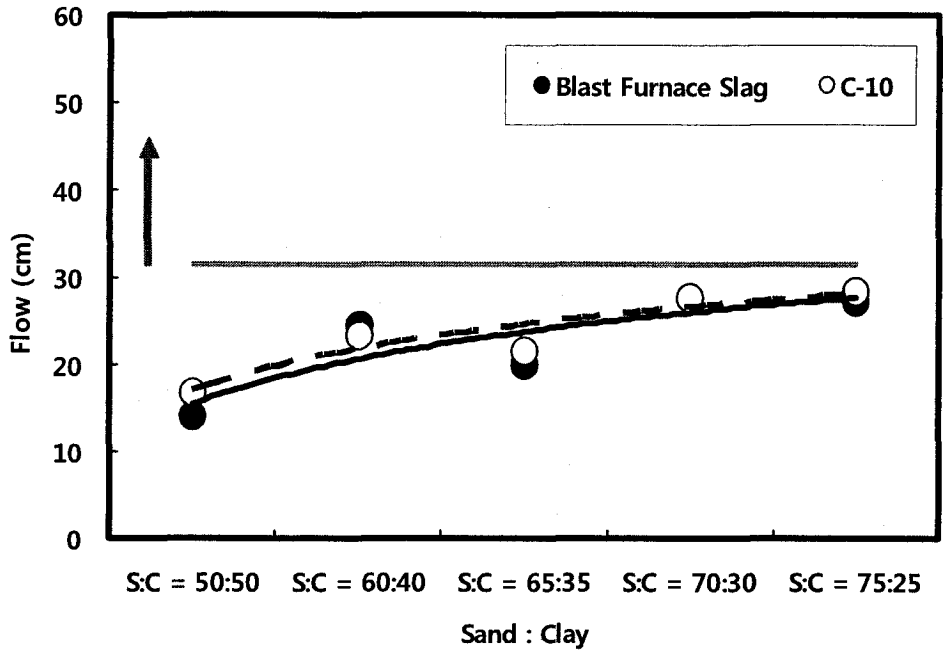


Fig. 3.3.13 Soil=60%, W/C=185.71% 조건에서의 ASTM에 의한 유동성

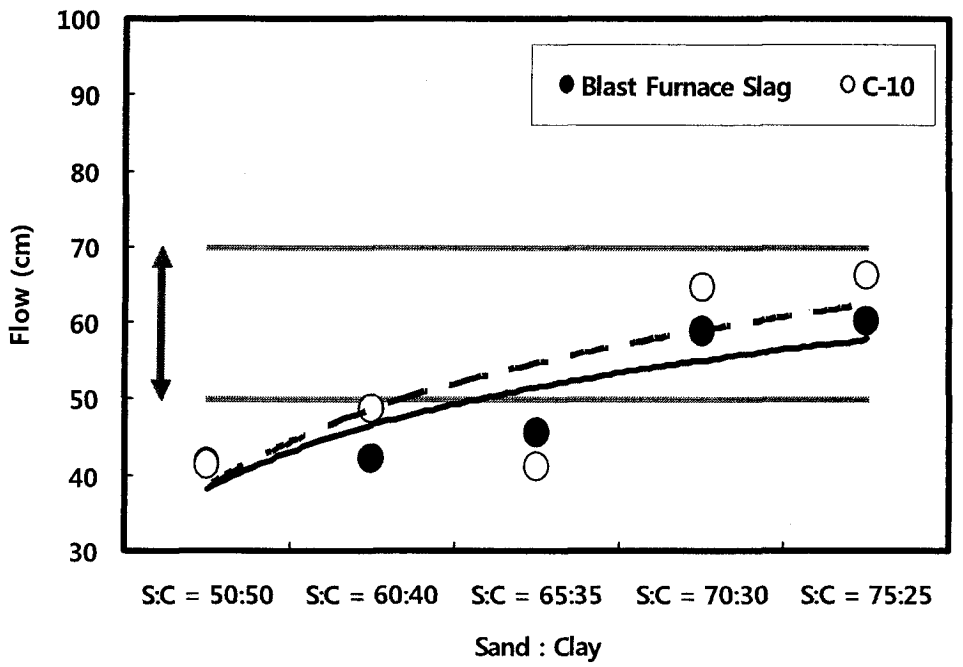


Fig. 3.3.14 Soil=60%, W/C=185.71% 조건에서의 Slump Flow에 의한 유동성

(4) Soil=60%, W/C=233.33%

유동화 처리토의 시료비율이 60%이고, W/C가 233.33%인 실험조건의 유동성을 JHS, ASTM, Slump Flow의 3가지 기준으로 파악하였다. Table 3.3.6에 유동성 결과 (Soil=60%, W/C=233.33%)를 제시하였다. JHS에 의한 유동성 파악 결과, 고로슬래그 시멘트를 사용한 결과 모래 함유량이 65%이상인 경우 목표 기준을 만족하였고, C-10 고화재를 사용한 경우 65%, 70%인 경우에 목표 기준을 만족하였다. ASTM에 의한 실험 결과, 고로슬래그 시멘트를 사용한 결과 모래 함유량 70% 이상인 경우, C-10 고화재를 사용했을 때 모래 함유량 70%인 경우에 목표 기준을 만족하는 유동성을 나타냈다. Slump Flow에 의한 유동성 평가 결과, 고로슬래그 시멘트를 사용한 결과 모래 함유량 70% 이상인 경우, C-10 고화재를 사용했을 때 모래 함유량 60% 이상인 경우에 목표 기준을 만족하는 유동성을 나타냈다. Fig. 3.3.15~Fig. 3.3.17에 각각 JHS, ASTM, Slump Flow에 의한 유동성 결과를 제시하였다.

Table 3.3.6 유동성 결과 (Soil=60%, W/C=233.33%)

No.	모래 비율 (%)	고화재 종류	JHS (cm)	ASTM (cm)	Slump Flow (cm)
T3-C1-d	50	Blast Furnace Slag	9.6	17.6	42.3
T3-C2-d	60		16.6	25.3	43.6
T3-C3-d	65		17.4	24.7	45.2
T3-C4-d	70		25.5	33.7	67.3
T3-C5-d	75		26.6	30.1	68.5
T3-C6-d	50	C-10	10.3	17.4	44.3
T3-C7-d	60		17.1	25.5	52.4
T3-C8-d	65		22.1	30.5	65.3
T3-C9-d	70		23.3	31.4	68.3
T3-C10-d	75		30.7	38.1	70.3

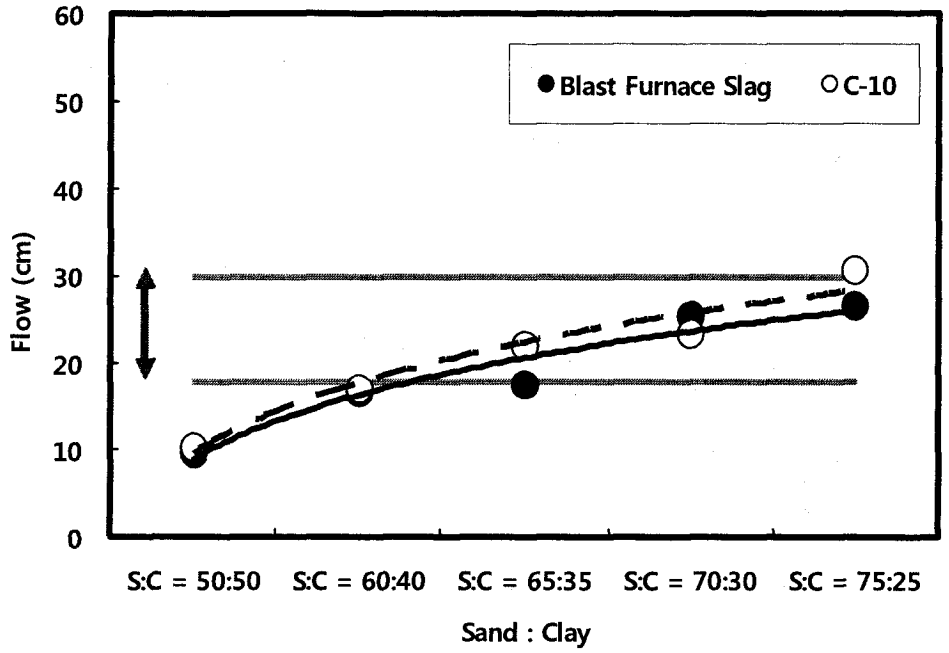


Fig. 3.3.15 Soil=60%, W/C=233.33% 조건에서의 JHS에 의한 유동성

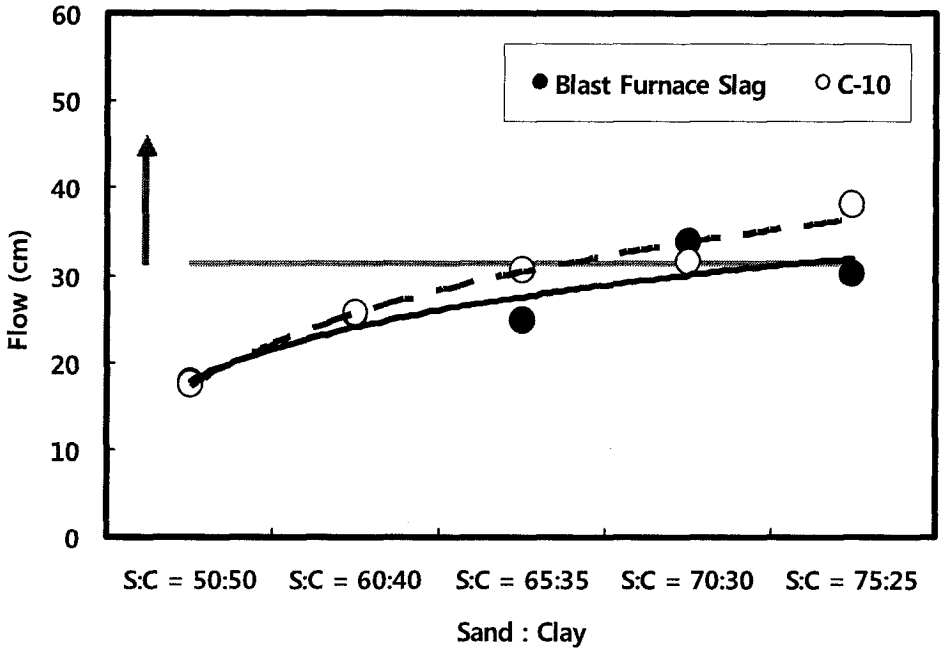


Fig. 3.3.16 Soil=60%, W/C=233.33% 조건에서의 ASTM에 의한 유동성

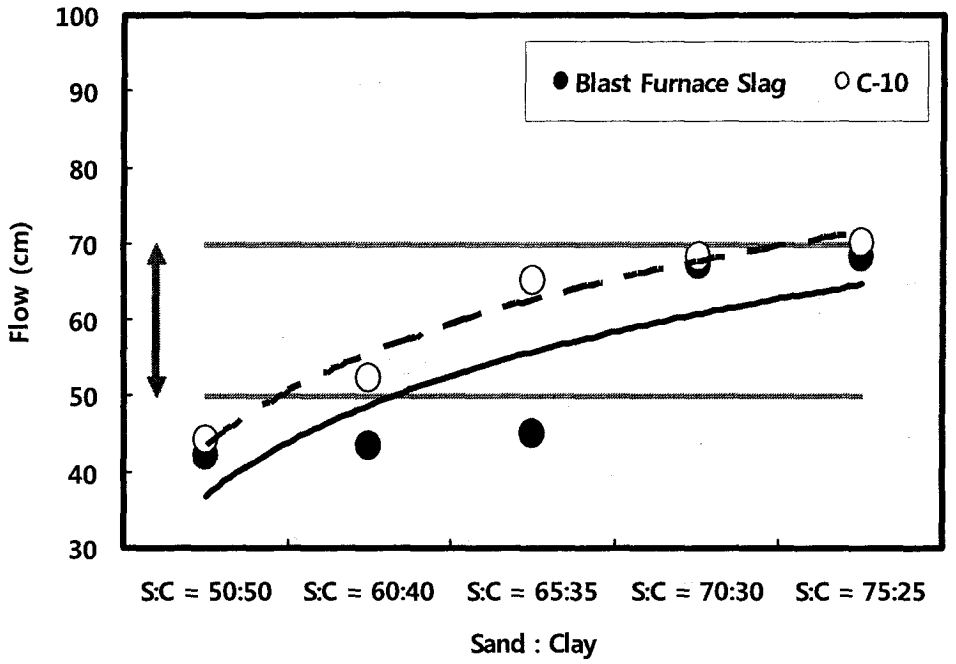


Fig. 3.3.17 Soil=60%, W/C=233.33% 조건에서의 Slump Flow에 의한 유동성

(5) 유동성 종합

Fig. 3.3.18에 시료비율이 50%이고, W/C가 194.12%일 때의 모래 함유량에 따른 JHS, ASTM, Slump Flow의 유동성 관계를 그림으로 나타냈다. 모래 함유량이 60%인 경우에만 고로슬래그 시멘트와 C-10 고화재를 사용하여 제조한 유동화 처리토 모두에서 JHS, ASTM, Slump Flow의 3가지 유동성 평가기준을 모두 만족하는 결과를 나타냈다.

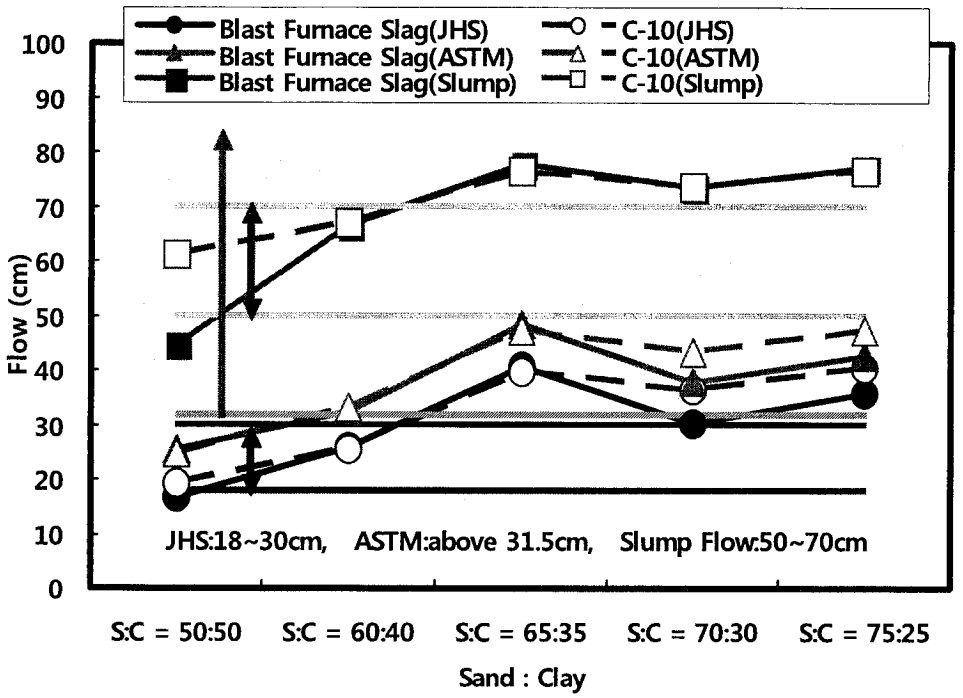


Fig. 3.3.18 Soil=50%, W/C=194.12% 조건의 모래 함유량에 따른 유동성 관계

Fig. 3.3.19에 시료비율이 50%이고, W/C가 233.33%일 때의 모래 함유량에 따른 JHS, ASTM, Slump Flow의 유동성 관계를 종합하여 나타냈다. 모래 함유량이 50%인 경우에 C-10 고화재를 사용하여 제조한 유동화 처리토에서만 JHS, ASTM, Slump Flow의 3가지 유동성 평가기준을 모두 만족하는 결과를 나타냈다.

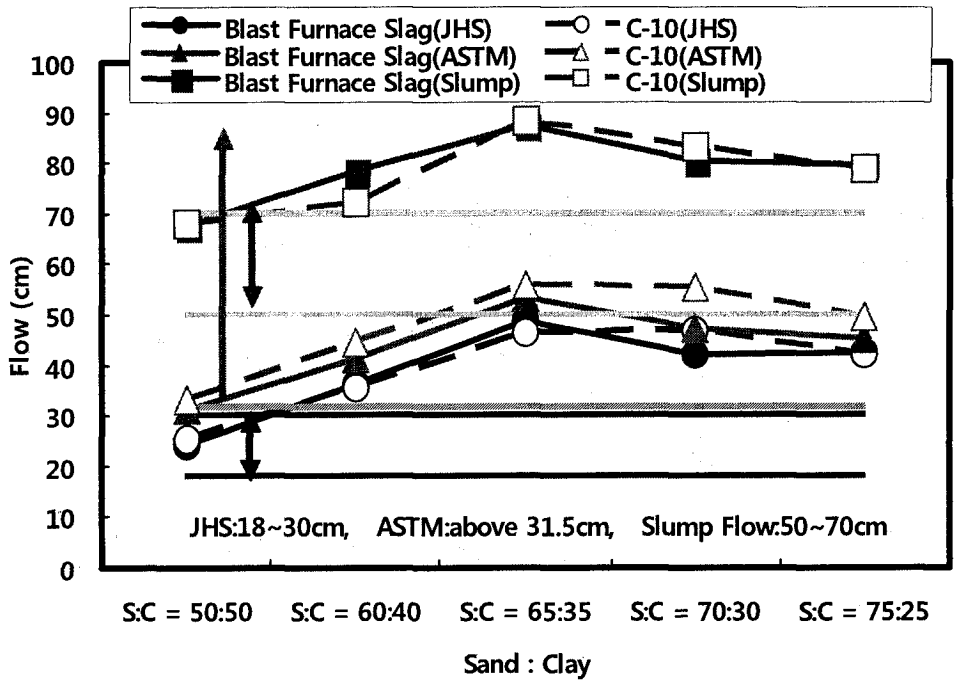


Fig. 3.3.19 Soil=50%, W/C=233.33% 조건의 모래 함유량에 따른 유동성 관계

Fig. 3.3.20은 시료비율이 60%이고, W/C가 185.71%일 때의 모래 함유량에 따른 JHS, ASTM, Slump Flow의 유동성 관계를 종합하여 나타낸 것이다. 고로슬래그 그시멘트와 C-10 고화재를 사용한 모든 실험조건에서 JHS, ASTM, Slump Flow의 목표 기준을 모두 만족하는 실험 조건은 없었다.

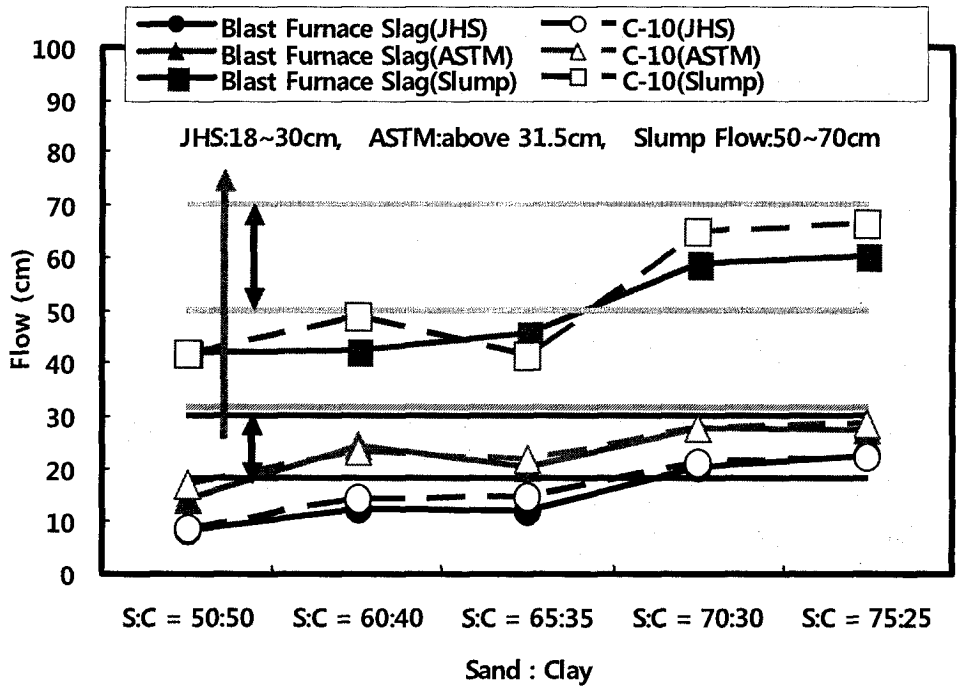


Fig. 3.3.20 Soil=60%, W/C=185.71% 조건의 모래 함유량에 따른 유동성 관계

Fig. 3.3.21에 시료비율이 60%이고, W/C가 233.33%일 때의 모래 함유량에 따른 JHS, ASTM, Slump Flow의 유동성 관계를 종합하여 나타냈다. 모래 함유량이 70%인 경우, 고로슬래그 시멘트, C-10 고화재를 사용하여 제조한 유동화 처리토에서 JHS, ASTM, Slump Flow의 3가지 유동성 평가기준을 모두 만족하였다.

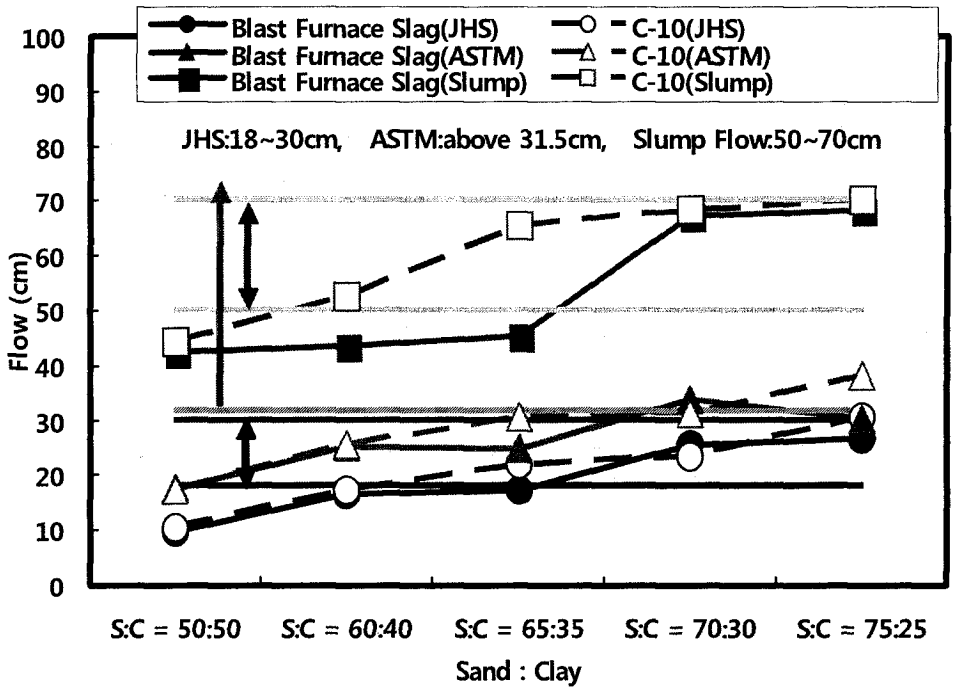


Fig. 3.3.21 Soil=60%, W/C=233.33% 조건의 모래 함유량에 따른 유동성 관계

(6) 고화재의 종류에 따른 유동성

Fig. 3.3.22~Fig. 3.3.25에 실험에 사용된 고화재의 종류에 따른 유동성을 평가하기 위해 고로슬래그 시멘트를 사용하였을 때의 유동성을 C-10 고화재를 사용하였을 때의 유동성으로 정규화 하여 나타냈다. Soil=50%, W/C=194.12% 조건, Soil=50%, W/C=233.33% 조건, Soil=60%, W/C=185.71% 조건, Soil=60%, W/C=233.33% 조건에서 JHS, ASTM, Slump Flow 모두 69%~109% 사이의 값을 나타낸 것을 통해, C-10 고화재를 사용하였을 때의 유동와 처리토의 유동성이 크게 나타난다는 것을 알수 있었으나, 그 차이가 매우 미미하기 때문에 고화재의 종류에 따른 유동성의 차이는 거의 발생하지 않고 판단하였다.

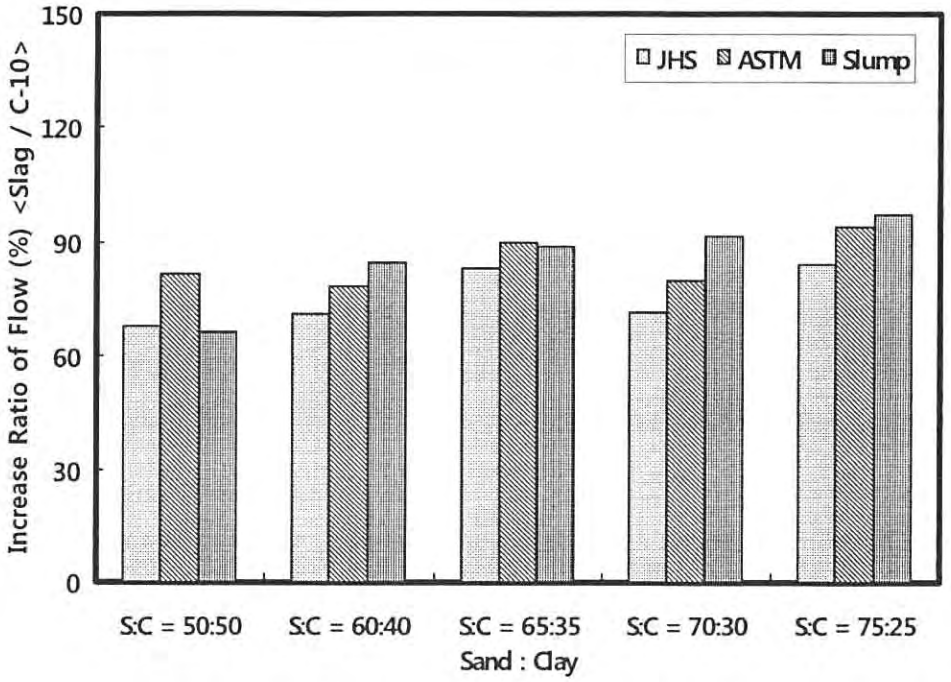


Fig. 3.3.22 Soil=50%, W/C=194.12% 조건의 고화재에 따른 유동성 (Slag / C-10)

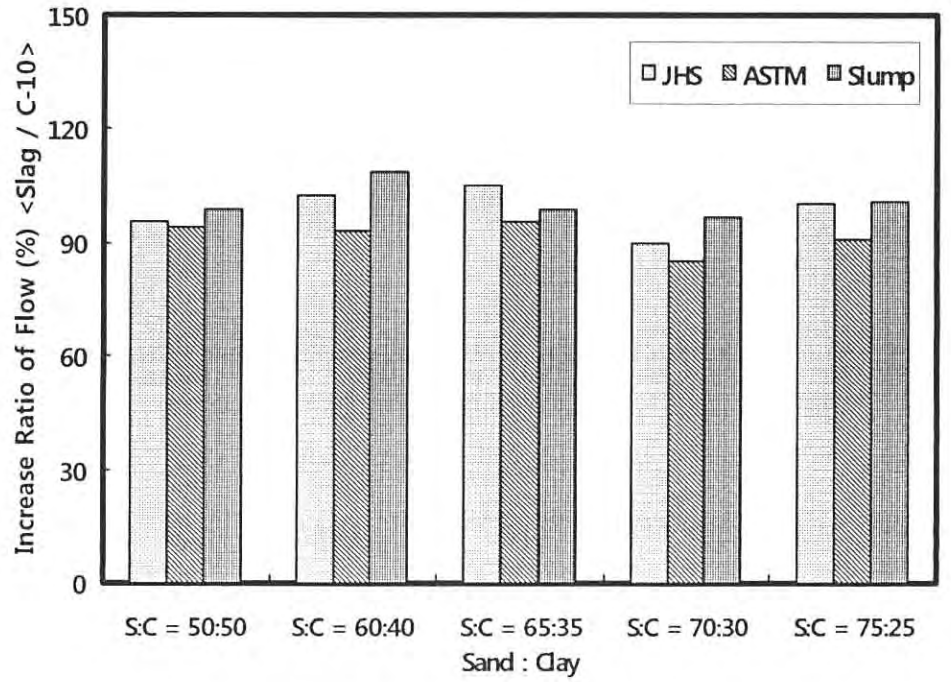


Fig. 3.3.23 Soil=50%, W/C=233.33% 조건의 고화재에 따른 유동성 (Slag / C-10)

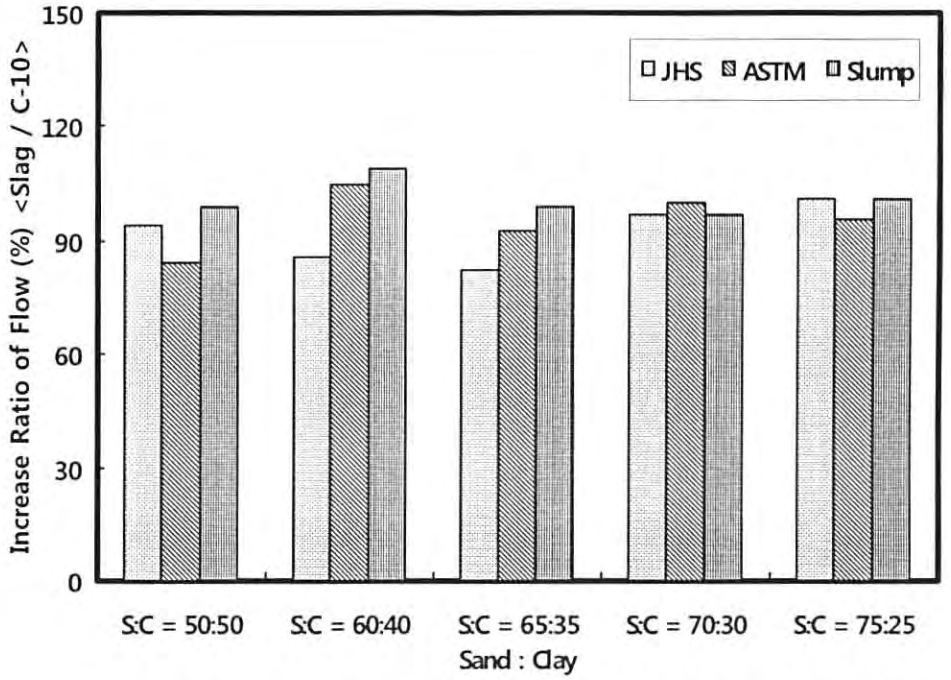


Fig. 3.3.24 Soil=60%, W/C=185.71% 조건의 고화재에 따른 유동성 (Slag / C-10)

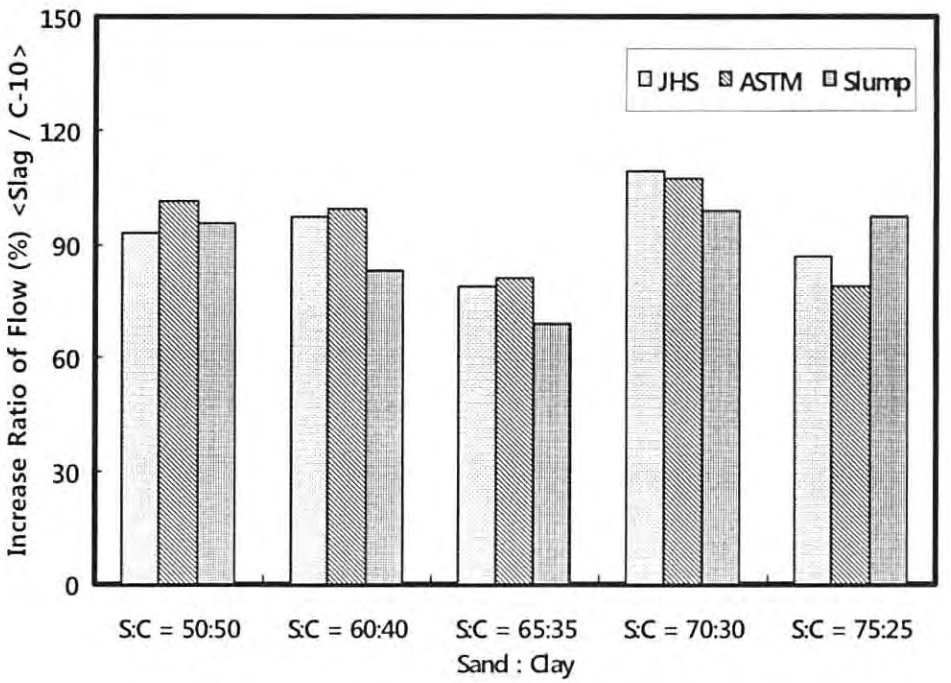


Fig. 3.3.25 Soil=60%, W/C=233.33% 조건의 고화재에 따른 유동성 (Slag / C-10)

다. 강도특성

(1) 모래 함유량에 따른 강도특성

(가) Soil=50%, W/C=194.12%

Fig. 3.3.26~Fig. 3.3.28은 Soil=50%, W/C=194.12%의 실험조건일 때, 모래 함유량에 따른 고화재별 일축압축강도를 나타냈다. 재령 4시간 일축압축강도는 고로슬래그 시멘트로 제조한 유동화 처리토의 모든 실험조건에서 측정할 수 없었다. 재령 1일 일축압축강도의 경우, C-10 고화재를 사용한 경우의 일축압축강도가 고로슬래그 시멘트를 사용했을 때의 일축압축강도보다 2배 이상의 값을 나타냈다. 재령 7일 일축압축강도는 모래 함유량이 50%인 경우를 제외하고 전반적으로 고로슬래그 시멘트를 사용한 실험의 일축압축강도가 크게 나타났다. 재령 28일의 일축압축강도 결과, 고로슬래그 시멘트를 사용했을때의 일축압축강도가 C-10 고화재를 사용했을 때의 일축압축강도에 비해 모든 실험에서 약 1.5배 더 크게 나타났고, 모래 함유량이 증가할수록 일축압축강도가 감소하는 것을 알 수 있었다.

Table 3.3.7 강도특성(Soil=50%, W/C=194.12%)

No.	모래 비율 (%)	고화재 종류	1일 (kg/cm^2)	7일 (kg/cm^2)	28일 (kg/cm^2)
T3-C1-a	50	Blast Furnace Slag	1.206	13.273	30.251
T3-C2-a	60		0.919	10.043	27.741
T3-C3-a	65		0.661	9.587	26.621
T3-C4-a	70		0.489	8.047	25.024
T3-C5-a	75		0.445	6.052	24.853
T3-C6-a	50	C-10	3.207	15.273	23.251
T3-C7-a	60		2.919	9.043	20.741
T3-C8-a	65		2.461	8.587	17.621
T3-C9-a	70		1.894	7.047	16.024
T3-C10-a	75		1.234	5.052	15.853

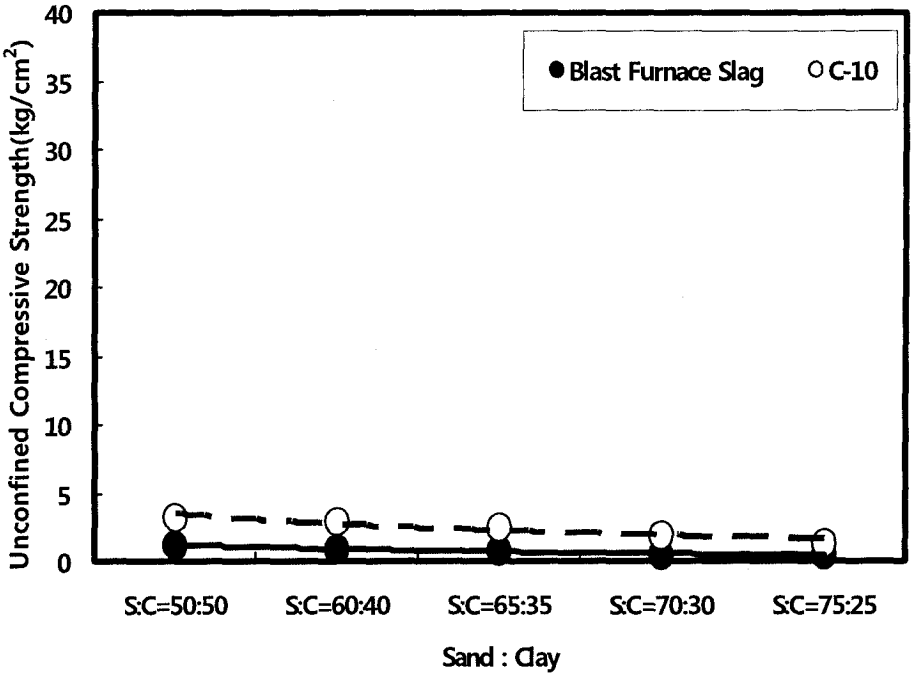


Fig. 3.3.26 재령 1일 일축압축강도 (Soil=50%, W/C=194.12%)

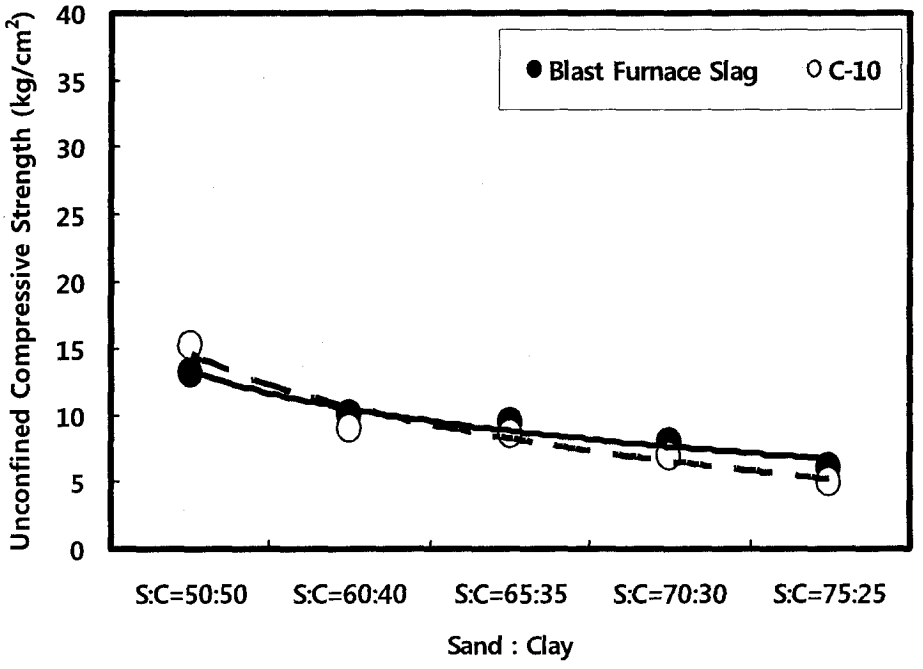


Fig. 3.3.27 재령 7일 일축압축강도 (Soil=50%, W/C=194.12%)

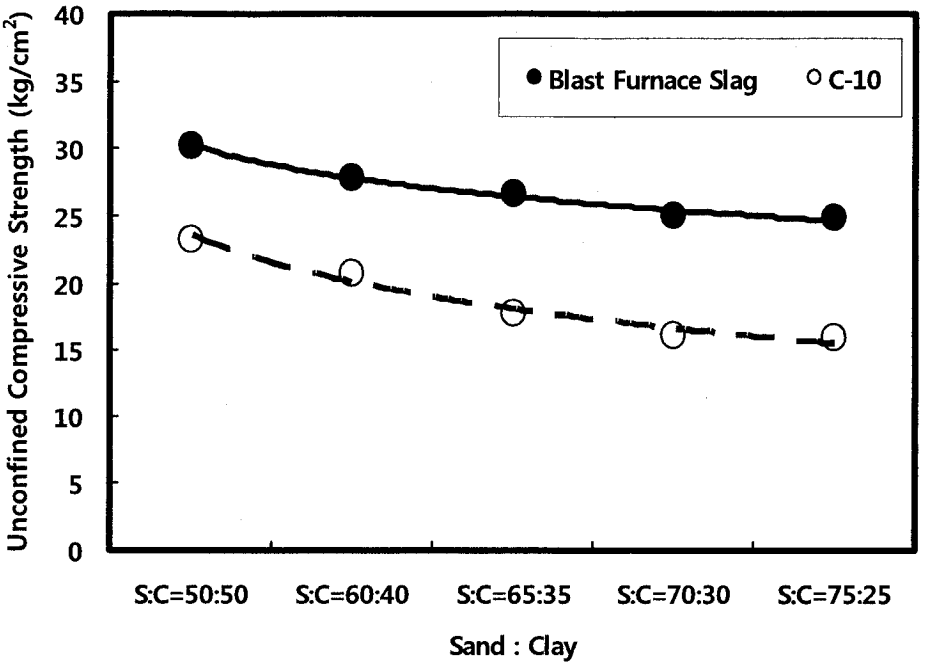


Fig. 3.3.28 재령 28일 일축압축강도 (Soil=50%, W/C=194.12%)

(나) Soil=50%, W/C=233.33%

Fig. 3.3.29~Fig. 3.3.31은 Soil=50%, W/C=233.33%의 실험조건일 때, 모래 함유량에 따른 고화재별 일축압축강도를 나타냈다. 재령 4시간 일축압축강도는 고로슬래그 시멘트로 제조한 유동화 처리토의 모든 실험조건에서 측정할 수 없었다. 재령 1일 일축압축강도의 경우, C-10 고화재를 사용한 경우의 일축압축강도가 고로슬래그 시멘트를 사용했을 때의 일축압축강도보다 최대 7배 이상의 값을 나타냈다. C-10 고화재와 고로슬래그 시멘트의 일축압축강도 차이는 모래 함유량이 증가할수록 점차 감소하였다. 재령 7일 일축압축강도는 재령 1일 일축압축강도와 반대로 고로슬래그 시멘트를 사용한 실험의 일축압축강도가 크게 나타났다. 재령 28일의 일축압축강도 결과, 재령 1일의 일축압축강도 결과와 같이 고로슬래그 시멘트를 사용했을때의 일축압축강도가 C-10 고화재를 사용했을때의 일축압축강도에 비해 크게 나타났고, 모래 함유량 증가에 따른 일축압축강도 감소현상은 미미했다.

Table 3.3.8 강도특성 결과 (Soil=50%, W/C=233.33%)

No.	모래 비율 (%)	고화재 종류	1일 (kg/cm^2)	7일 (kg/cm^2)	28일 (kg/cm^2)
T3-C1-b	50	Blast Furnace Slag	0.334	8.217	22.626
T3-C2-b	60		0.459	7.424	21.321
T3-C3-b	65		1.096	6.633	21.029
T3-C4-b	70		0.193	7.614	21.746
T3-C5-b	75		0.421	5.945	20.195
T3-C6-b	50	C-10	2.434	7.217	21.626
T3-C7-b	60		2.059	6.424	19.321
T3-C8-b	65		1.796	5.633	19.029
T3-C9-b	70		0.793	4.614	18.746
T3-C10-b	75		0.721	3.945	17.195

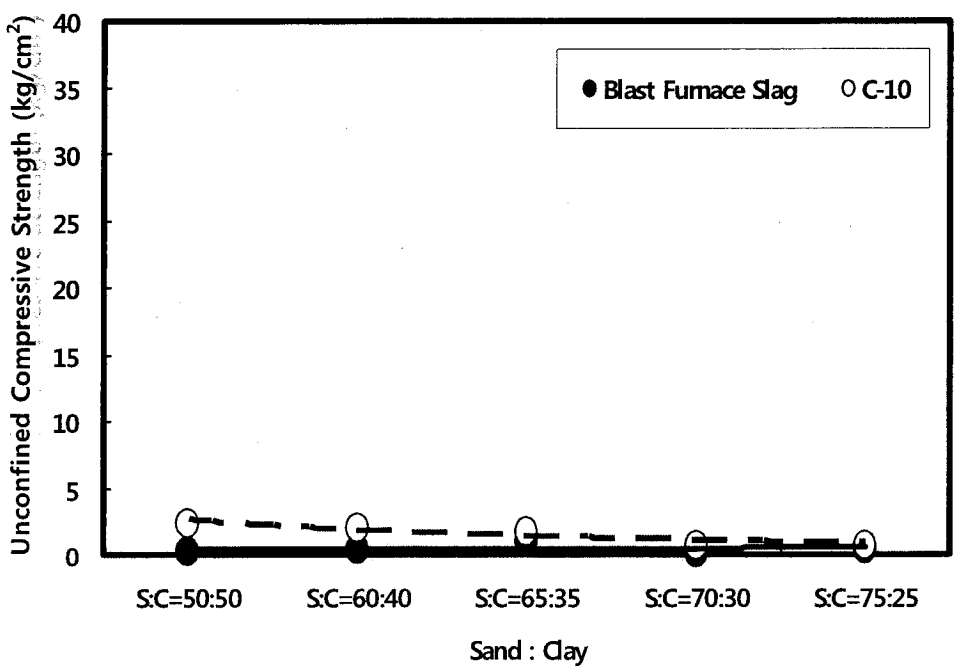


Fig. 3.3.29 재령 1일 일축압축강도 (Soil=50%, W/C=233.33%)

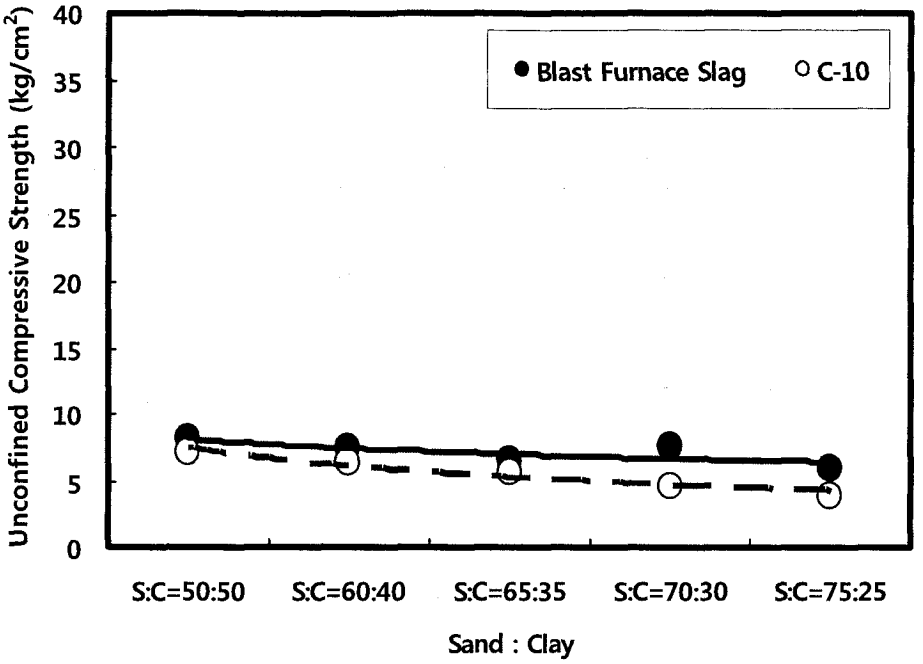


Fig. 3.3.30 재령 7일 일축압축강도 (Soil=50%, W/C=233.33%)

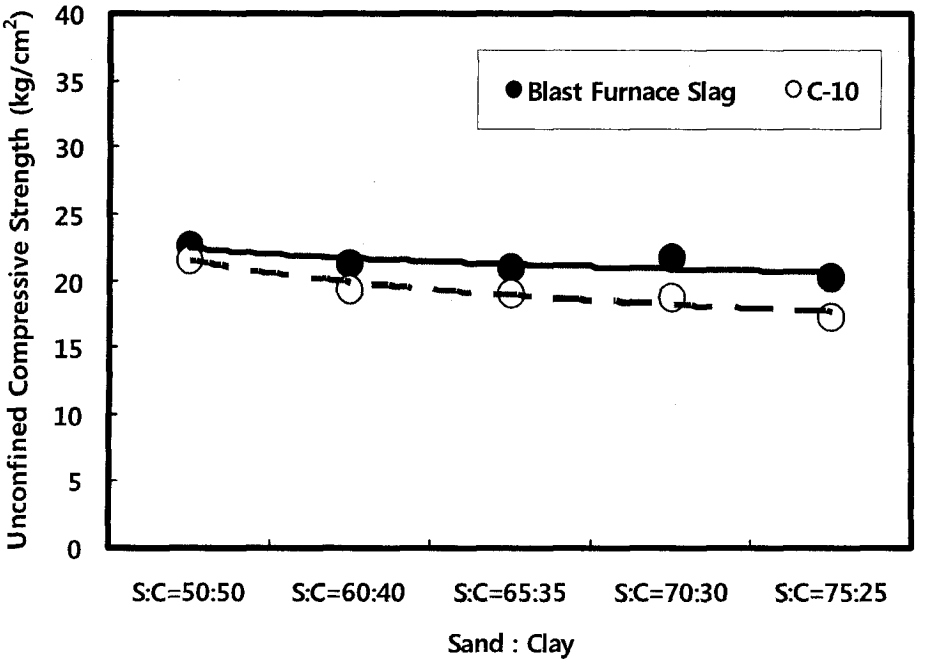


Fig. 3.3.31 재령 28일 일축압축강도 (Soil=50%, W/C=233.33%)

(다) Soil=60%, W/C=185.71%

Fig. 3.3.32~Fig. 3.3.34는 Soil=60%, W/C=185.71%의 실험조건일 때, 모래 함유량에 따른 고화재별 일축압축강도를 나타냈다. 재령 4시간 일축압축강도는 고로슬래그 시멘트를 고화재로 사용한 모든 실험조건에서 측정할 수 없었다. 재령 1일 일축압축강도의 경우, C-10 고화재를 사용한 경우의 일축압축강도가 고로슬래그 시멘트를 사용했을 때의 일축압축강도보다 2배 이상의 값을 나타냈다. C-10 고화재와 고로슬래그 시멘트의 일축압축강도 차이는 모래 함유량에 영향을 받지 않고 거의 일정하였다. 재령 7일 일축압축강도는 고로슬래그 시멘트를 사용한 실험의 일축압축강도가 크게 나타났고, 모래 함유량이 적을수록 고화재의 종류에 따른 일축압축강도의 차이는 더 크게 나타났다. 재령 28일의 일축압축강도 결과, 고로슬래그 시멘트를 사용했을때의 일축압축강도가 C-10 고화재를 사용했을 때의 일축압축강도의 약 2배 이상 큰 값을 보였지만, 고화재의 종류에 따른 일축압축강도의 차이는 모래 함유량의 변화에 큰 영향을 받지 않았다.

Table 3.3.9 강도특성 결과 (Soil=60%, W/C=185.71%)

No.	모래 비율 (%)	고화재 종류	1일 (kg/cm^2)	7일 (kg/cm^2)	28일 (kg/cm^2)
T3-C1-c	50	Blast Furnace Slag	3.166	24.486	34.42
T3-C2-c	60		1.494	18.766	29.122
T3-C3-c	65		1.559	15.69	27.191
T3-C4-c	70		1.023	12.925	26.433
T3-C5-c	75		1.152	9.136	23.769
T3-C6-c	50	C-10	4.166	13.486	15.42
T3-C7-c	60		3.494	12.766	14.122
T3-C8-c	65		2.559	11.69	12.191
T3-C9-c	70		2.023	10.925	11.433
T3-C10-c	75		1.752	7.136	10.769

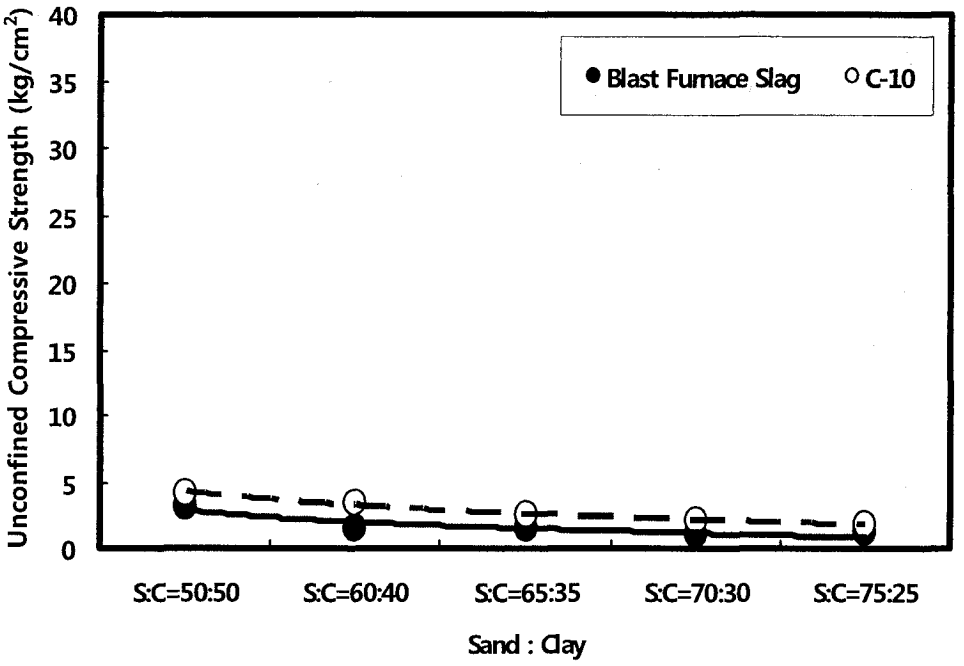


Fig. 3.3.32 재령 1일 일축압축강도 (Soil=60%, W/C=185.71%)

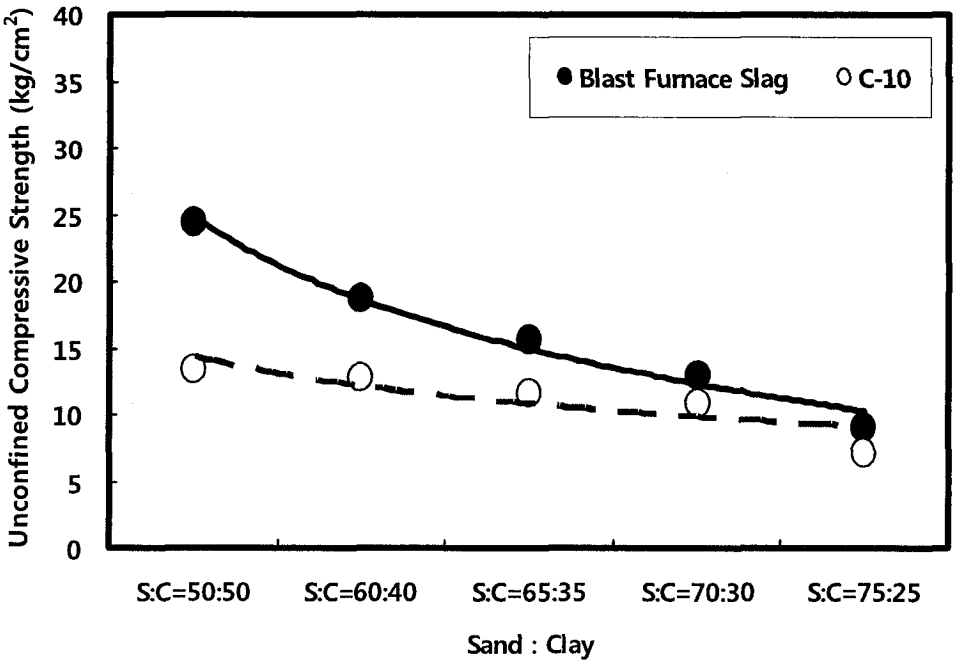


Fig. 3.3.33 재령 7일 일축압축강도 (Soil=60%, W/C=185.71%)

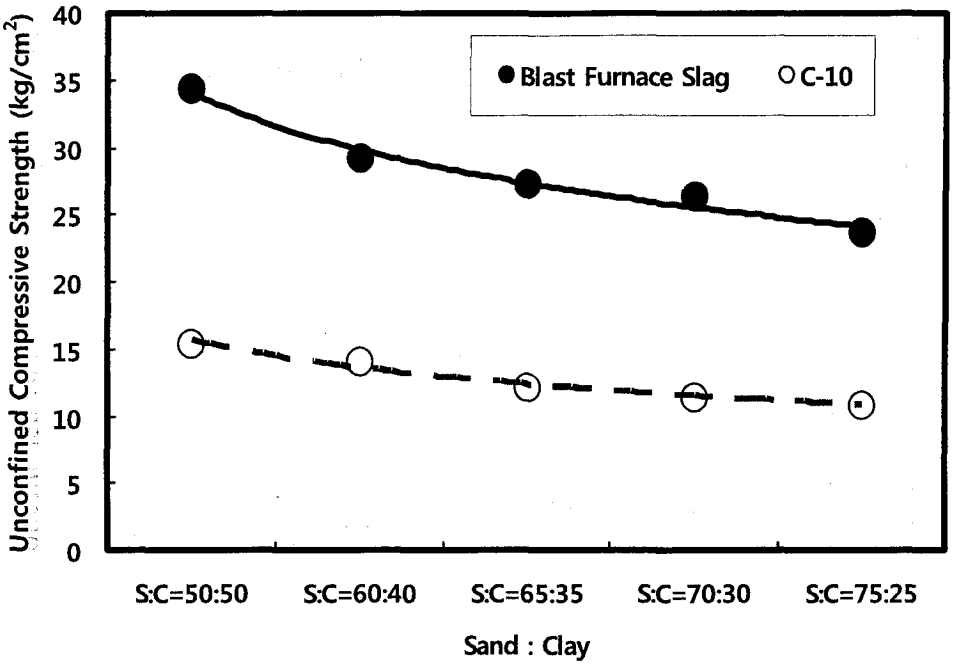


Fig. 3.3.34 재령 28일 일축압축강도 (Soil=60%, W/C=185.71%)

(라) Soil=60%, W/C=233.33%

Fig. 3.3.35~Fig. 3.3.37은 Soil=60%, W/C=233.33%의 실험조건일 때, 모래 함유량에 따른 고화재별 일축압축강도를 나타냈다. 재령 4시간 일축압축강도는 고로슬래그 시멘트를 고화재로 사용한 모든 실험조건에서 측정할 수 없었다. 재령 1일 일축압축강도의 경우, C-10 고화재를 사용한 경우의 일축압축강도가 고로슬래그 시멘트를 사용했을 때의 일축압축강도보다 크게 나타났고, 특히 모래 함유량 50%일 때에는 10배 이상 큰 값을 나타냈다. 재령 7일 일축압축강도는 고로슬래그 시멘트를 사용한 실험의 일축압축강도가 크게 나타났고, 모래 함유량이 증가할수록 일축압축강도는 감소하였다. 재령 28일의 일축압축강도 결과, 고로슬래그 시멘트를 사용했을때의 일축압축강도가 C-10 고화재를 사용했을 때의 일축압축강도 보다 큰 값을 나타냈다. 고로슬래그 시멘트를 고화재로 사용한 실험의 경우, 모래 함유량의 증가에 따른 일축압축강도의 감소가 크지 않았지만, C-10 고화재를 사용한 경우에는 모래 함유량이 증가할수록 일축압축강도가 감소하는 현상이 뚜렷하게 나타났다.

Table 3.3.10 강도특성 결과 (Soil=60%, W/C=233.33%)

No.	모래 비율 (%)	고화재 종류	1일 (kg/cm^2)	7일 (kg/cm^2)	28일 (kg/cm^2)
T3-C1-d	50	Blast Furnace Slag	0.254	13.274	28.569
T3-C2-d	60		1.096	11.227	26.142
T3-C3-d	65		1.062	10.025	25.639
T3-C4-d	70		0.506	6.995	25.622
T3-C5-d	75		0.447	6.183	23.645
T3-C6-d	50	C-10	2.854	8.274	15.569
T3-C7-d	60		2.396	6.227	12.142
T3-C8-d	65		2.062	5.025	7.639
T3-C9-d	70		1.506	4.995	7.622
T3-C10-d	75		0.987	3.183	6.645

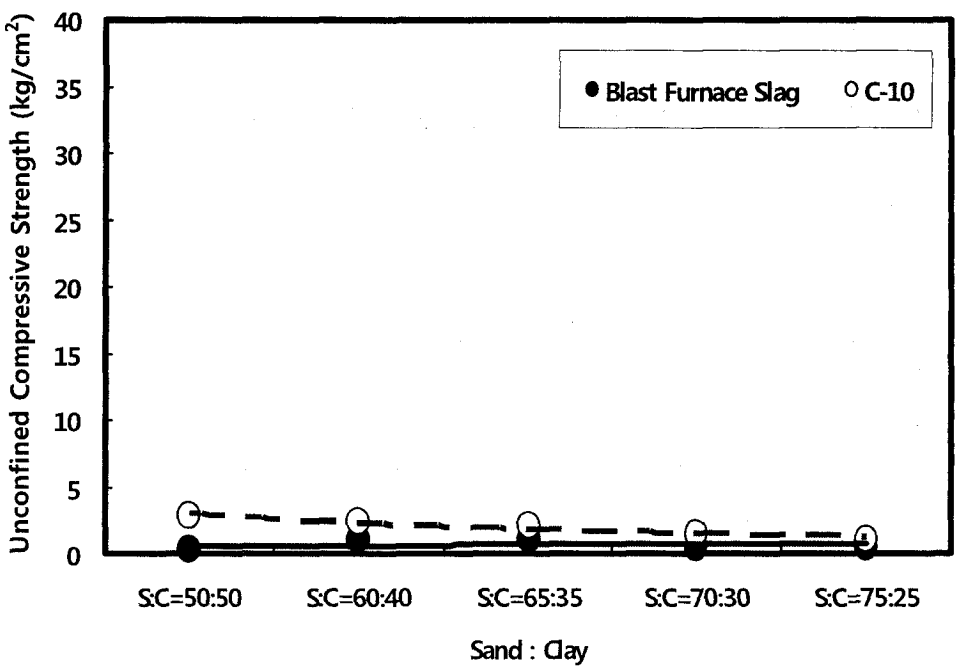


Fig. 3.3.35 재령 1일 일축압축강도 (Soil=60%, W/C=233.33%)

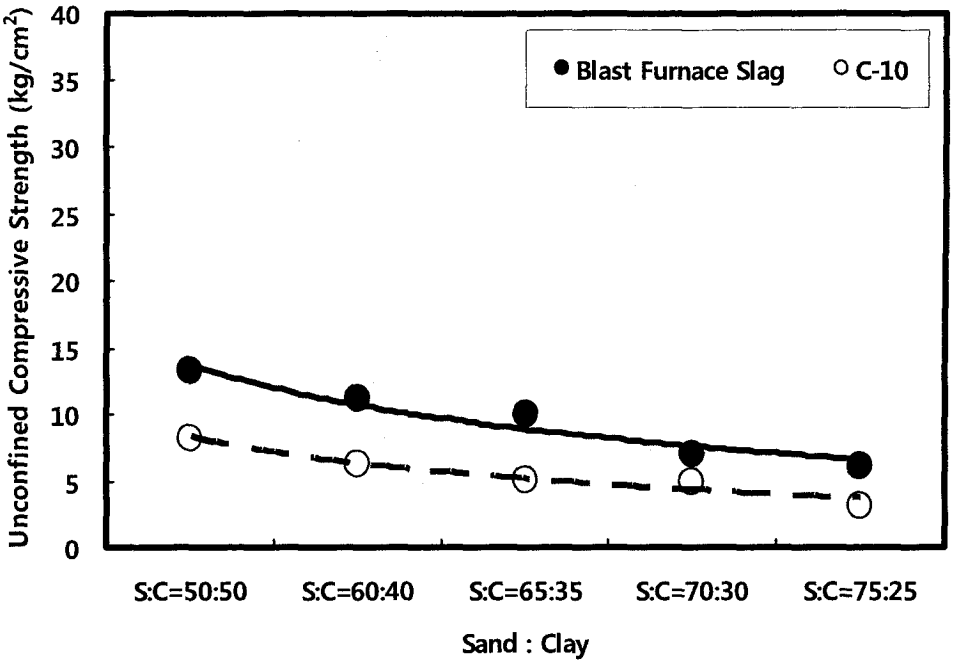


Fig. 3.3.36 재령 7일 일축압축강도 (Soil=60%, W/C=233.33%)

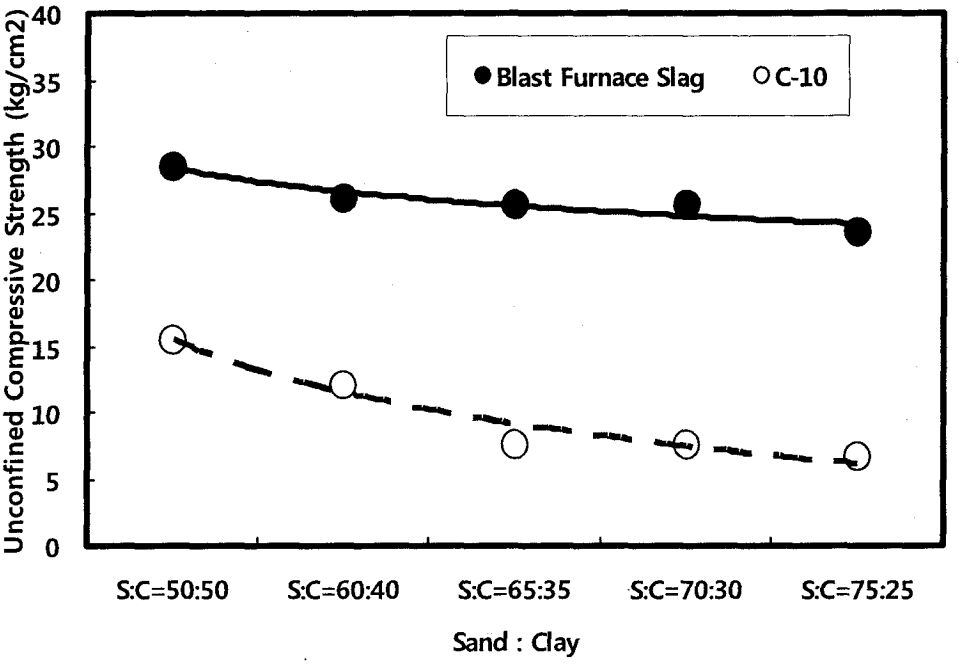


Fig. 3.3.37 재령 28일 일축압축강도 (Soil=60%, W/C=233.33%)

(2) 시료비율과 배합비에 따른 강도특성

(가) Soil=50%, W/C=194.12%

실험조건 Soil=50%, W/C=194.12% Fig. 3.3.38은 고로슬래그 시멘트, Fig. 3.3.39는 C-10 고화재를 사용하여 제조한 유동화 처리토의 양생시간에 따른 일축압축강도를 나타낸 결과이다. 모든 실험 조건에서 시간의 경과에 따라 강도가 증가하였고, 모래 함유량이 적고, 점토 함유량이 많은 실험조건에서 높은 일축압축강도를 나타냈다.

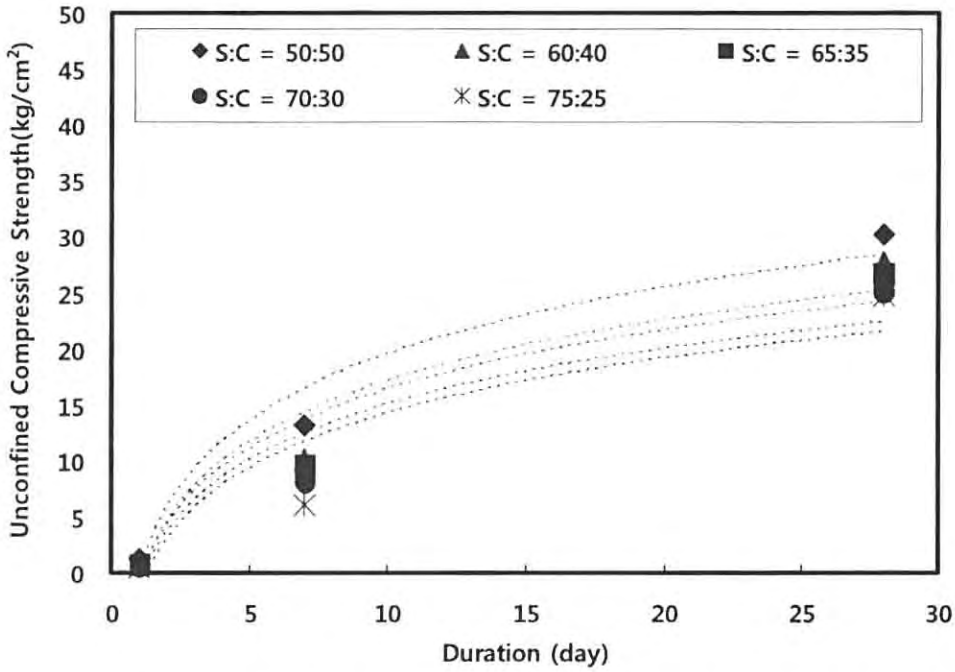


Fig. 3.3.38 Soil=50%, W/C=194.12% 조건의 양생기간에 따른 일축압축강도 (Blast Furnace Slag)

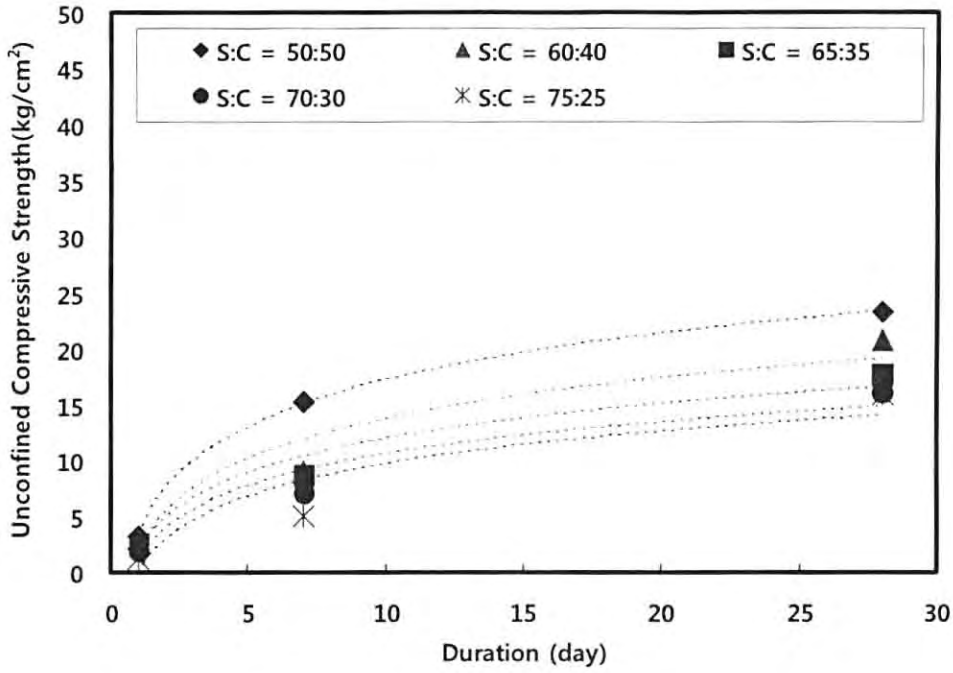


Fig. 3.3.39 Soil=50%, W/C=194.12% 조건의 양생기간에 따른 일축압축강도(C-10)

(나) Soil=50%, W/C=233.33%

Fig. 3.3.40과 Fig. 3.3.41에 Soil=50%, W/C=233.33% 조건일 때, 고로슬래그 시멘트와 C-10 고화재를 사용하여 제조한 유동화 처리토의 양생시간에 따른 일축압축강도를 각각 나타냈다. 모든 실험 조건에서 시간의 경과에 따라 강도가 증가하였고, 양생시간이 경과할수록 모래 함유량에 따른 일축압축강도 차이는 거의 나타나지 않았다.

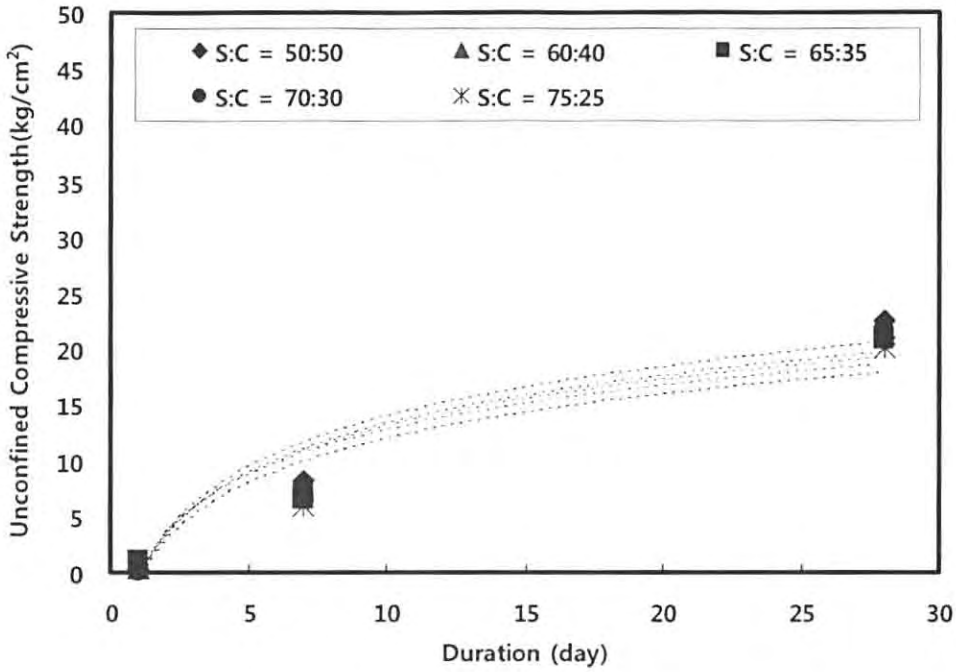


Fig. 3.3.40 Soil=50%, W/C=233.33% 조건의
양생기간에 따른 일축압축강도(Blast Furnace Slag)

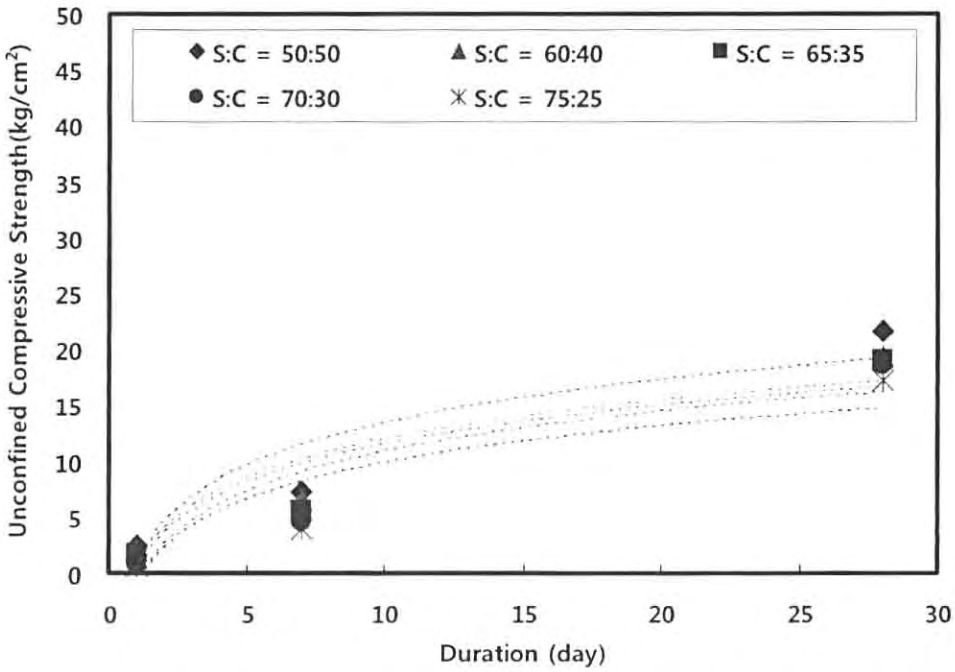


Fig. 3.3.41 Soil=50%, W/C=233.33% 조건의 양생기간에 따른 일축압축강도(C-10)

(다) Soil=60%, W/C=185.71%

Soil=60%, W/C=185.71% 조건에서의 고로슬래그 시멘트와 C-10 고화재를 사용하여 제조한 유동화 처리토의 양생시간에 따른 일축압축강도를 각각 Fig. 3.3.42와 Fig. 3.3.43에 나타냈다. 모든 실험 조건에서 시간의 경과에 따라 강도가 증가하였다. 양생시간이 증가할수록 고로슬래그 시멘트를 사용한 경우에는 모래 함유량에 따른 일축압축강도 변화가 크게 나타났지만, C-10 고화재는 모래 함유량에 따른 일축압축강도의 차이는 크지 않았다.

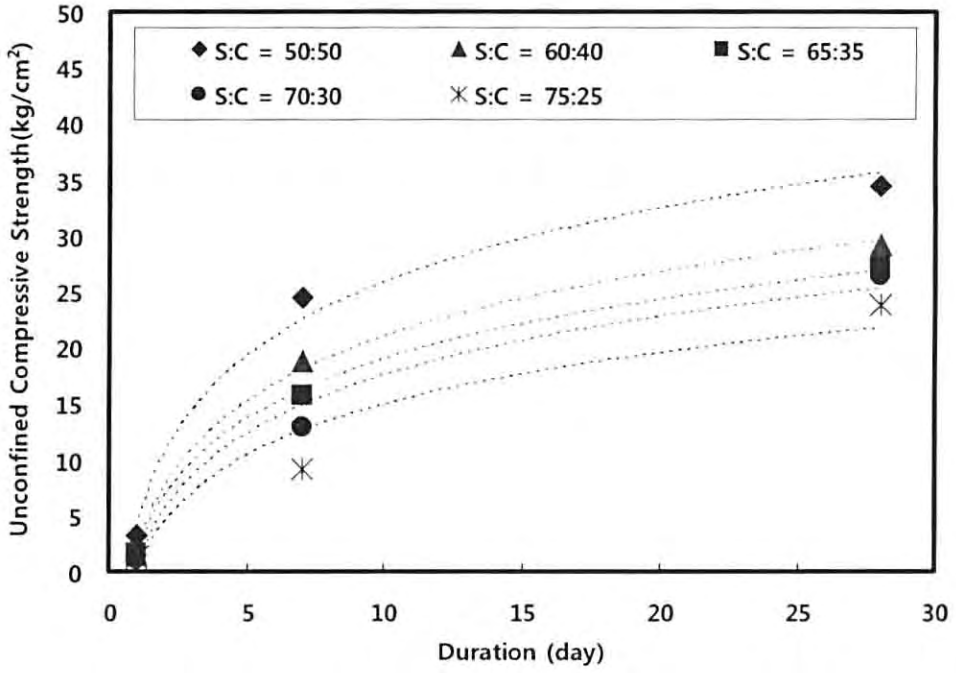


Fig. 3.3.42 Soil=60%, W/C=185.71% 조건의
양생기간에 따른 일축압축강도(Blast Furnace Slag)

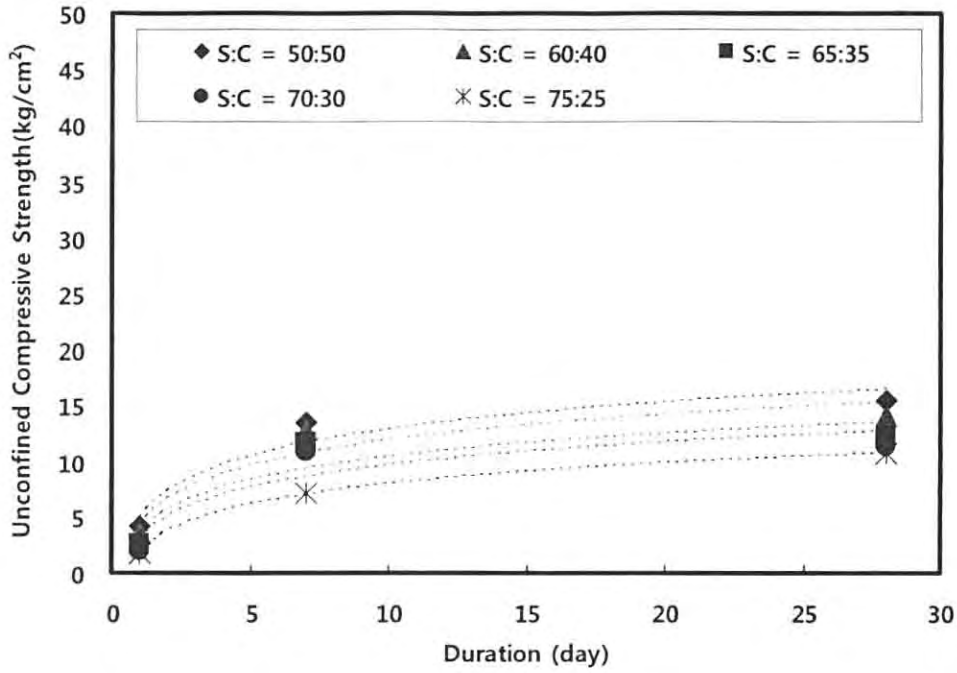


Fig. 3.3.43 Soil=60%, W/C=185.71% 조건의 양생기간에 따른 일축압축강도(C-10)

(라) Soil=60%, W/C=233.33%

Soil=60%, W/C=233.33% 조건에서의 고로슬래그 시멘트와 C-10 고화재를 사용하여 제조한 유동화 처리토의 양생시간에 따른 일축압축강도를 각각 Fig. 3.3.44와 Fig. 3.3.45에 나타냈다. 모든 실험 조건에서 시간의 경과에 따라 강도가 증가했고, 양생시간이 증가할수록 고로슬래그 시멘트를 사용한 경우에는 모래 함유량에 따른 일축압축강도 변화가 크지 않았지만, C-10 고화재는 모래 함유량에 따른 일축압축강도의 차이는 상대적으로 크게 나타났다.

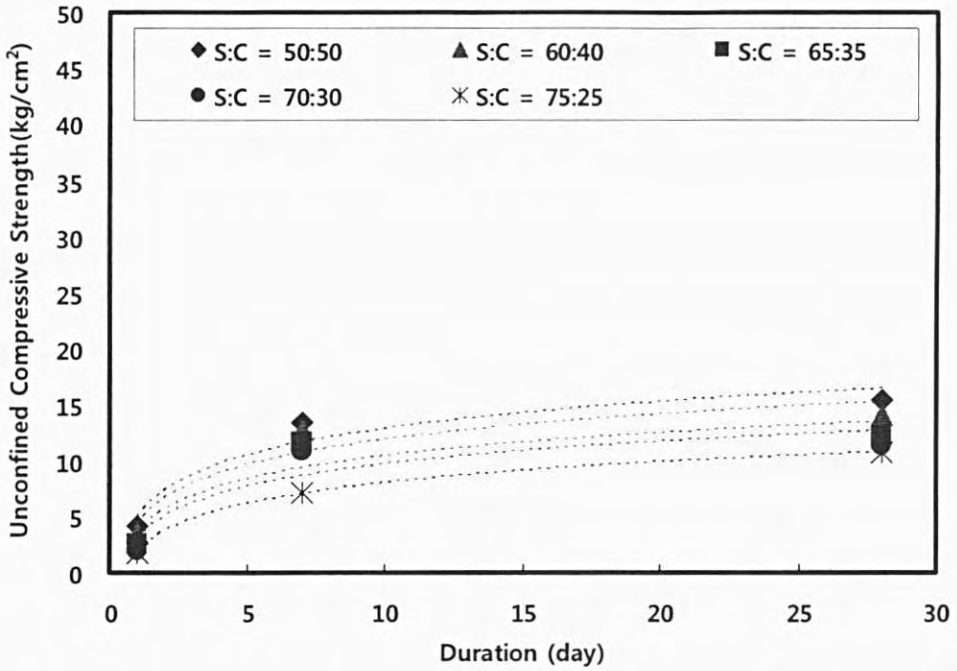


Fig. 3.3.44 Soil=60%, W/C=233.33% 조건의
양생기간에 따른 일축압축강도(Blast Furnace Slag)

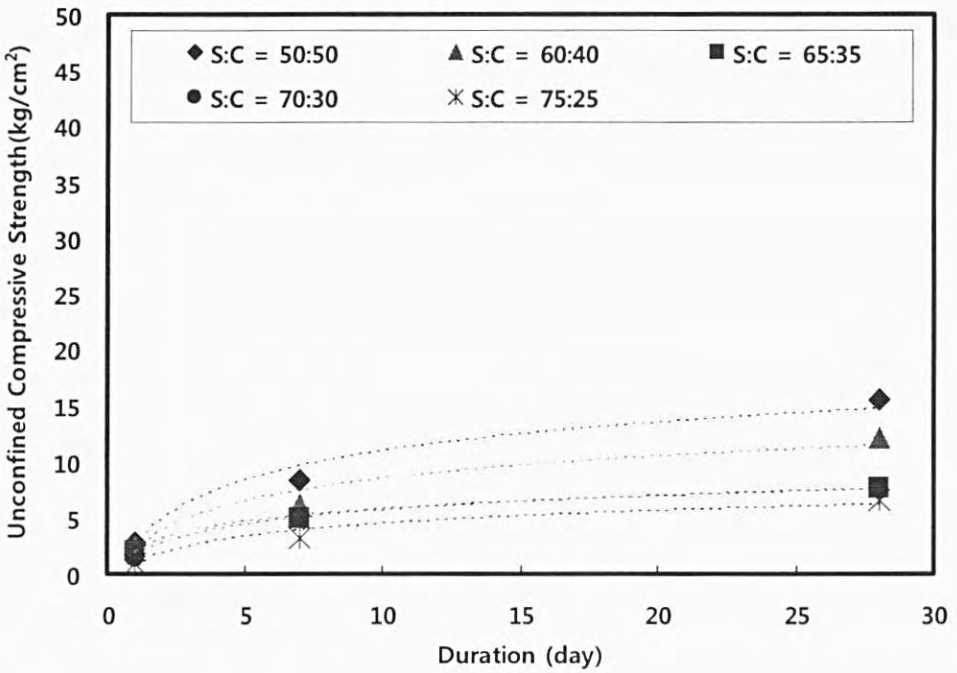


Fig. 3.3.45 Soil=60%, W/C=233.33% 조건의 양생기간에 따른 일축압축강도(C-10)

(3) 고화재의 종류에 따른 강도특성

Fig. 3.3.46~Fig. 3.3.48에 실험에 사용된 고화재의 종류에 따른 강도특성을 평가하기 위해 고로슬래그 시멘트를 사용하였을 때의 재령 1일 일축압축강도를 C-10 고화재를 사용하였을 때의 재령 1일 일축압축강도로 정규화하여 나타냈다. 재령 28일 강도도 동일한 방법으로 나타냈다.

Soil=50%, W/C=194.12% 조건의 경우, 재령 1일 일축압축강도 증가율은 모든 실험조건에서 25%~37%로 C-10 고화재를 사용한 경우가 더 크게 나타났고, 재령 28일 일축압축강도 증가율은 130%~156%로 고로슬래그 시멘트를 사용한 경우에 더 크게 나타났다.

Soil=50%, W/C=233.33% 조건의 경우, 재령 1일의 일축압축강도 증가율은 모든 실험조건에서 13%~61%로 C-10 고화재를 사용한 경우가 더 크게 나타났고, 재령 28일 일축압축강도 증가율은 104%~117%로 고로슬래그 시멘트를 사용한 경우에 더 크게 나타났다.

Soil=60%, W/C=185.71% 조건의 경우, 재령 1일의 일축압축강도 증가율은 모든 실험조건에서 42%~75%로 C-10 고화재를 사용한 경우가 더 크게 나타났고, 재령 28일 일축압축강도 증가율은 206%~233%로 고로슬래그 시멘트를 사용한 경우에 더 크게 나타났다.

Soil=60%, W/C=233.33% 조건의 경우, 재령 1일 일축압축강도 증가율은 모든 실험조건에서 8%~51%로 C-10 고화재를 사용한 경우가 더 크게 나타났고, 재령 28일 일축압축강도 증가율은 183%~355%로 고로슬래그 시멘트를 사용한 경우에 더 크게 나타났다.

고로슬래그 시멘트와 C-10 고화재에 의한 강도특성을 재령 1일 일축압축강도와 재령 28일 강도를 통해서 측정한 결과, 조기강도의 발현은 C-10 고화재, 장기강도의 발현은 고로슬래그 시멘트가 우수한 것을 알 수 있었다. 시료비율이 50%인 경우에는 C-10 고화재에 의한 조기강도의 발현, 시료비율이 60%인 경우에는 고로슬래그 시멘트에 의한 장기강도의 발현이 크게 나타났다. 또한 시료비율이 50%인 경우에는 W/C가 낮을 때 C1-0 고화재에 의한 조기강도 발현이 우수하였고, 시료비율이 60%인 경우에는 W/C가 높을 때 고로슬래그 시멘트의 장기강도발현이 특히 우수한 것을 파악할 수 있었다.

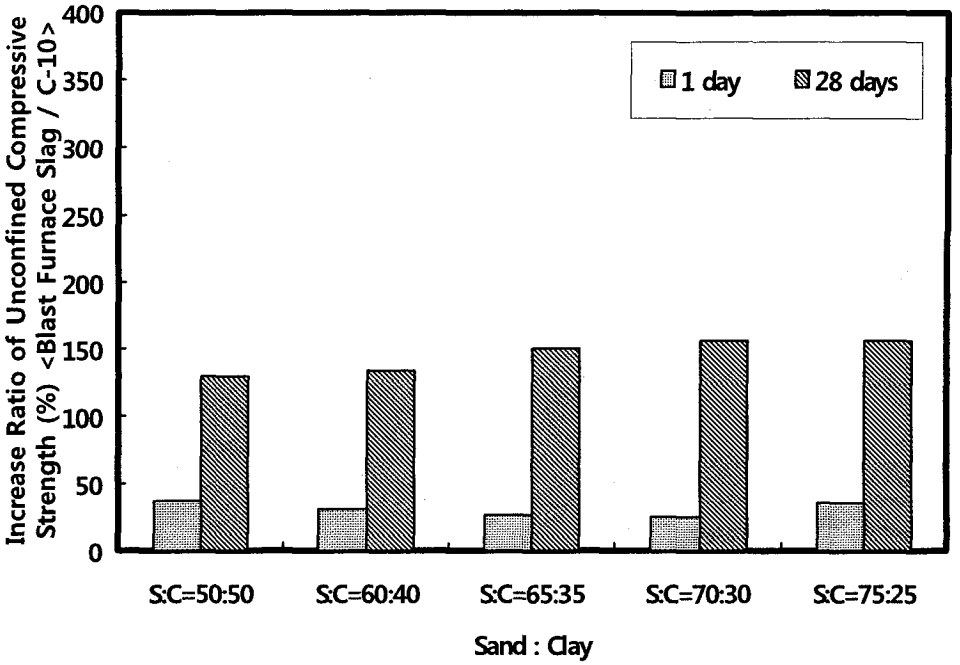


Fig. 3.3.46 Soil=50%, W/C=194.12% 조건의 고화재에 따른 강도특성 (Slag/C-10)

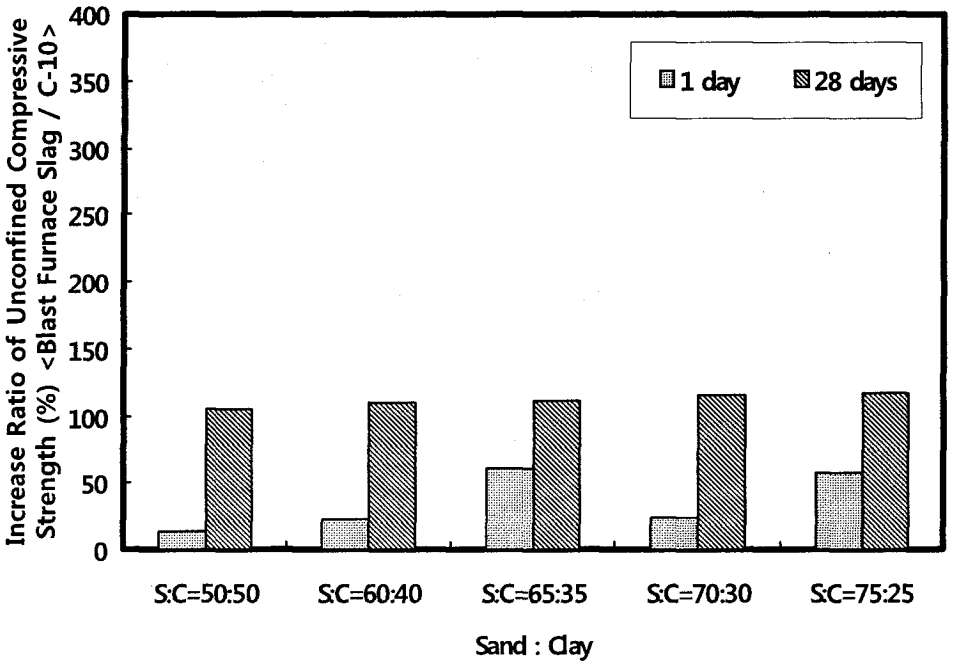


Fig. 3.3.47 Soil=50%, W/C=233.33% 조건의 고화재에 따른 강도특성 (Slag/C-10)

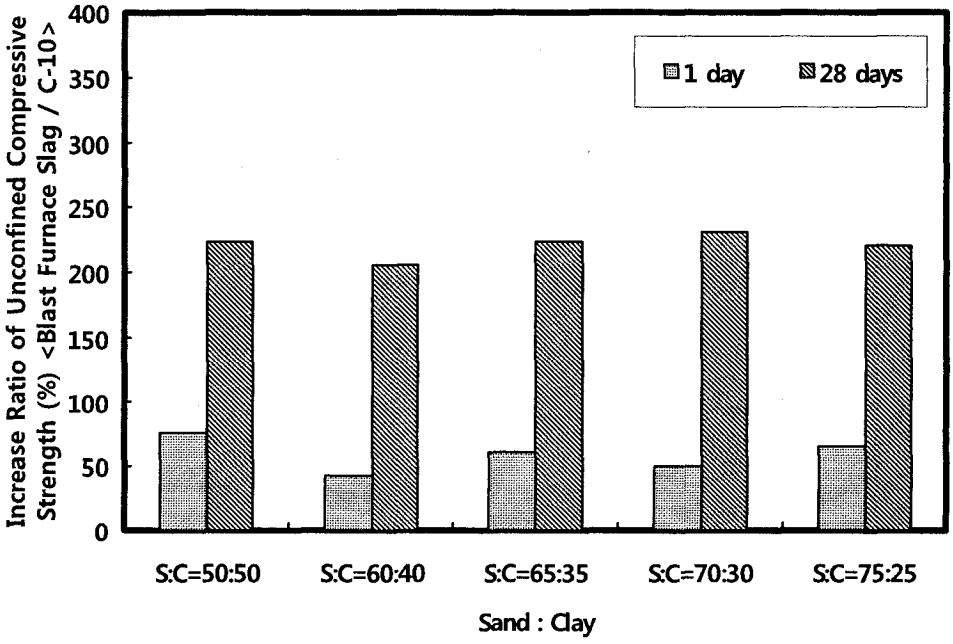


Fig. 3.3.48 Soil=60%, W/C=185.71% 조건의 고화재에 따른 강도특성 (Slag/C-10)

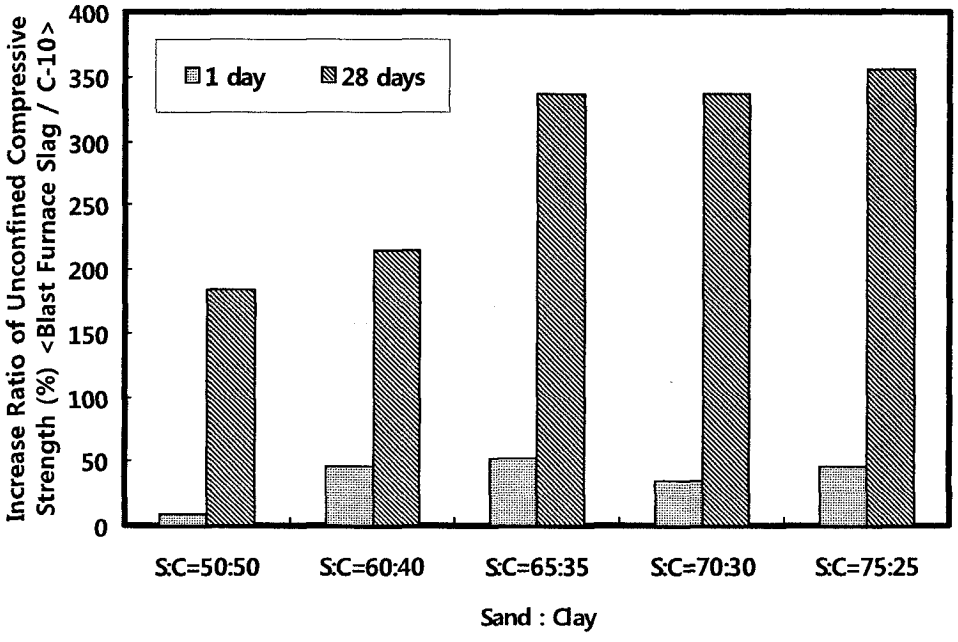


Fig. 3.3.49 Soil=60%, W/C=233.33% 조건의 고화재에 따른 강도특성 (Slag/C-10)

라. 투수특성

고로슬래그 시멘트 및 C-10 고화재를 대상으로 변수위 투수실험을 한 결과를 Table 3.3.11에 제시하였고, Fig. 3.3.50과 Fig. 3.3.51에 각각 나타냈다. 투수계수는 모래 함유량, W/C, 고화재의 종류에 상관없이 2.56×10^{-6}~7.53×10^{-6}cm/sec의 범위를 나타내었으며, 일반적인 유동화 처리토의 투수계수 10^{-6}~10^{-7}cm/sec의 범위에도 적합한 결과를 보였다. 이를 통해, 모래 함유량, W/C, 고화재의 종류가 유동화 처리토의 투수특성에 영향을 주지 않는다는 것을 파악할 수 있었다.

Table 3.3.12 고로슬래그 시멘트를 첨가한 유동화 처리토의 변수위 투수계수(cm/sec)

No.		투수계수	No.		투수계수	No.		투수계수	No.		투수계수	No.		투수계수
T3-C1	a	5.34×10^{-6}	T3-C3	a	7.53×10^{-6}	T3-C5	a	6.54×10^{-6}	T3-C7	a	3.41×10^{-6}	T3-C9	a	4.56×10^{-6}
	b	4.54×10^{-6}		b	3.46×10^{-6}		b	5.66×10^{-6}		b	3.56×10^{-6}		b	7.45×10^{-6}
	c	5.35×10^{-6}		c	6.78×10^{-6}		c	4.75×10^{-6}		c	4.65×10^{-6}		c	6.54×10^{-6}
	d	6.78×10^{-6}		d	4.55×10^{-6}		d	6.78×10^{-6}		d	3.99×10^{-6}		d	6.45×10^{-6}
T3-C2	a	4.23×10^{-6}	T3-C4	a	6.42×10^{-6}	T3-C6	a	2.56×10^{-6}	T3-C8	a	5.53×10^{-6}	T3-C10	a	4.57×10^{-6}
	b	3.65×10^{-6}		b	3.67×10^{-6}		b	3.55×10^{-6}		b	4.55×10^{-6}		b	4.22×10^{-6}
	c	6.23×10^{-6}		c	5.65×10^{-6}		c	3.57×10^{-6}		c	2.44×10^{-6}		c	5.46×10^{-6}
	d	4.56×10^{-6}		d	4.89×10^{-6}		d	4.35×10^{-6}		d	5.68×10^{-6}		d	6.23×10^{-6}

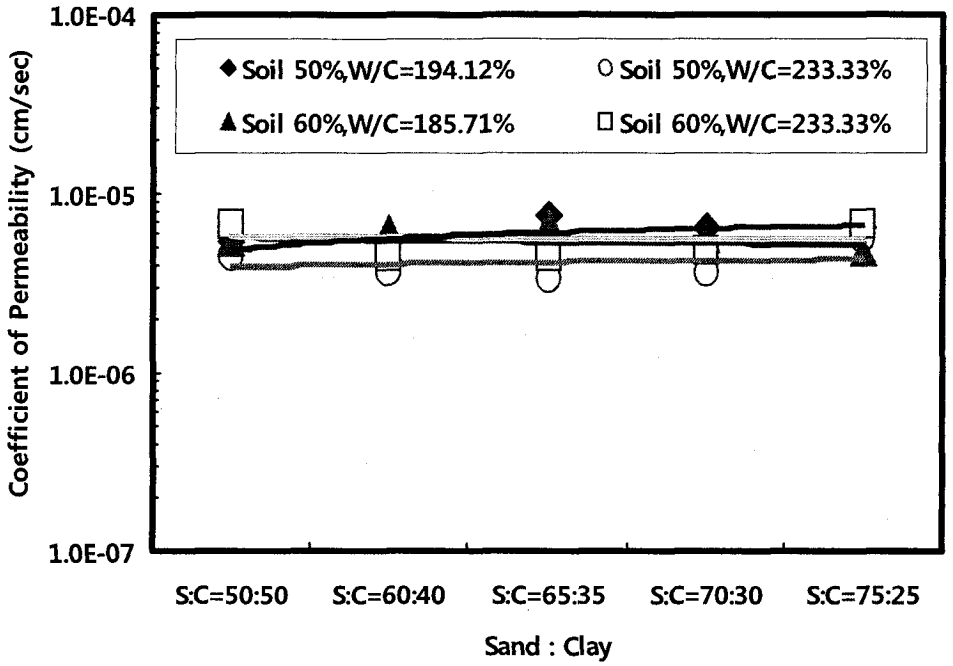


Fig. 3.3.50 모래 함유량에 따른 변수위 투수계수 (고로슬래그 시멘트)

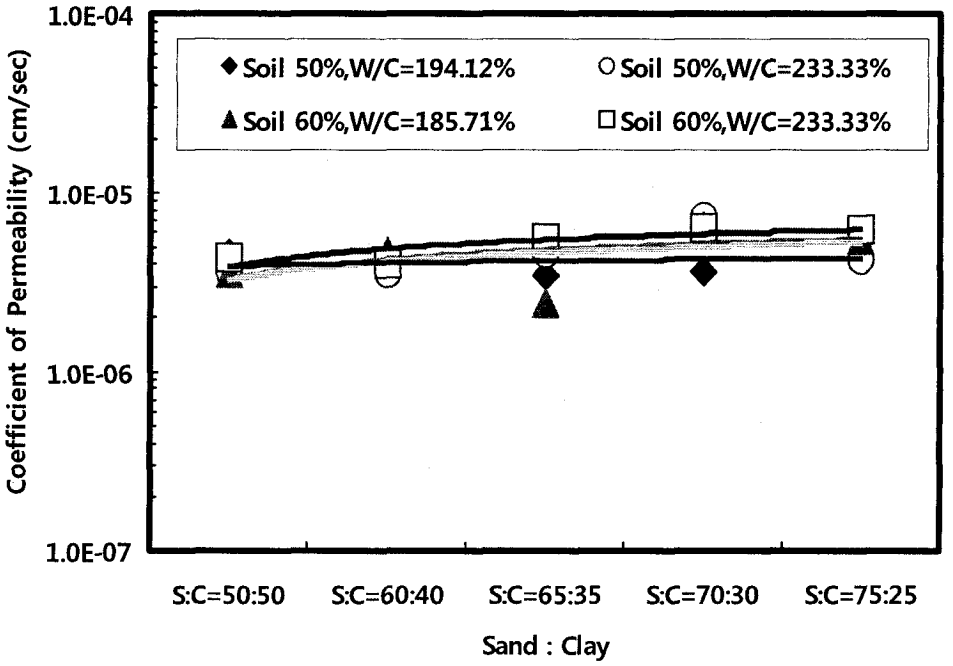


Fig. 3.3.51 모래 함유량에 따른 변수위 투수계수 (C-10)

3. 배합비 결정 실험 결과

현장발생토 종류에 따른 유동화 처리토의 특성을 파악하기 위해 흙의 통일분류법상의 대표적인 5 종류의 흙을 선정하여 CSA계 고화재, 물의 혼합비를 변화시켜 혼합하였다. 혼합 후 유동성 시험, 블리딩 시험, 슬럼프 시험 및 일축압축 시험을 실시하여 적정 범위에 맞는 배합비의 범위를 선정하였다. 이때 초기 강도가 양생온도에 큰 영향을 받는다는 것을 고려하여, 양생 시 일정한 온도(23±2℃)를 유지시켰다.

유동성 처리토의 중요한 특징 중 2가지는 유동성과 일축압축강도이다. 따라서 본 연구에서는 유동성 180~300mm, 4시간 경과 일축압축강도 1.3kg/cm^{2}의 기준에 부합되는 배합비를 선정하기 위한 배합비 결정 실험을 실시하였다. 또한 여러 가지 배합비에 대해 각각 블리딩 1%이하로 조절하였다. 따라서 이러한 배합비 결정 실험의 결과를 바탕으로 각 시료에 대해 본시험의 배합비를 4가지를 선정할 수 있었다.

가. SW와 고화재 혼합실험결과

SW 시료를 이용한 경우, 현장시료를 전체 혼합물의 약 60±2%로 비율을 일정하게 고정시키고 고화재와 물의 비(이하 W/C로 표기)를 148~205%로 변화시키면서 유동성 시험 및 일축압축실험을 실시했다. Table 3.3.13에는 각 시험에 사용된 배합비에 따른 블리딩, 유동성, 일축압축강도 측정치를 나타냈다. 시험 결과 W/C 약 169~180%의 범위에서 일축압축강도, 유동성 기준치에 부합되는 값이 나타났다.

Fig. 3.3.52는 물/고화재비(W/C)의 변화에 따른 일축압축강도를 나타냈다. 그 결과 대부분의 배합비에서 유동화 처리토의 강도기준(4시간)인 1.3kg/cm^{2}보다 높게 나타났다. 그러나 W/C가 180%이상인 경우에서는 일축압축강도가 비교적 낮게 측정되었고, 170% 이하인 경우에서는 대부분 기준치보다 비교적 큰 값이 나타났다.

Table 3.3.13 배합비 결정 실험 결과(SW)

	W/C (%)	블리딩율 (%)	ASTM (cm)	JHS (cm)	일축압축강도 (kg/cm^2) - 4시간 후
1	205	0.005	34.0	24.0	1.19
2	181	0.003	30.0	23.0	1.77
3	167	0.005	37.0	23.0	1.76
4	175	0.006	30.0	22.0	1.86
5	169	0.003	28.0	20.0	1.87
6	160	0.002	32.0	21.0	1.44
7	154	0.001	28.0	18.0	3.41
8	148	0.000	22.0	15.0	2.10
9	149	0.000	31.0	21.0	2.12

Fig. 3.3.53은 ASTM 규격몰드와 JHS 규격몰드를 사용하여 나타난 유동성 시험결과를 나타냈다. 그 결과 기준치인 18~30cm를 만족시키는 배합비가 W/C 약 160~180%의 범위에서 나타났다. 또한 W/C와 일축압축강도로부터 W/C가 커질수록 강도는 작아지며 유동성은 커지는 결과가 나타났다. 블리딩율은 모든 배합비에서 기준치 1%보다 작게 나타났다. 따라서 SW의 시료의 경우에서는 기준치를 만족시키는 배합비 약 160~180%를 기준으로 유동성 처리제 특성 파악 시험의 배합비를 Table 3.3.14와 같이 설정하였다.

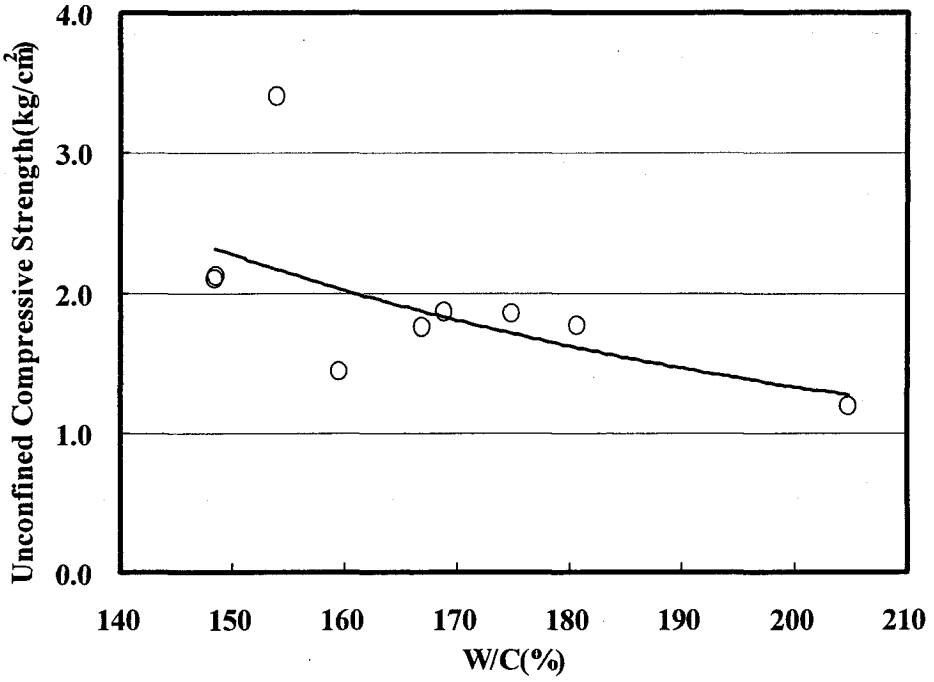


Fig. 3.3.52 W/C와 강도와의 관계(SW)

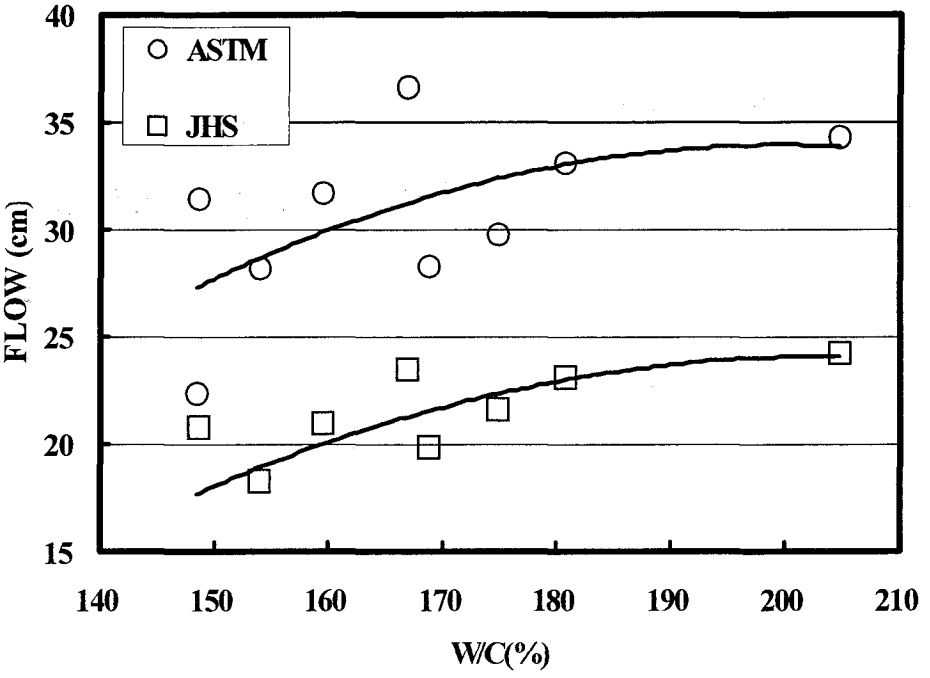


Fig. 3.3.53 W/C에 따른 유동성의 관계(SW)

Table 3.3.14 유동성 처리제 특성 파악 시험의 배합비(SW)

	SW-1	SW-2	SW-3	SW-4
현장토(%)	53.3	53.3	53.3	53.3
고화재(%)	14.0	16.0	18.0	20.0
W/C(%)	212	186	165	149

나. SM과 고화재 혼합시험결과

SM의 시료에서 역시 SW시료와 유사하게, 현장토 59±1%를 기준으로 W/C를 166%~192%로 변화시켜 시험을 실시하였다. Table 3.3.15에는 각 시험에 사용된 배합비에 따른 블리딩, 유동성, 일축압축강도 측정치를 나타냈다. 시험 결과 W/C 약 180~190%의 범위에서 기준치에 부합되는 값이 나타났다.

Table 3.3.15 배합비 결정 실험 결과(SM)

	W/C(%)	블리딩율(%)	ASTM(cm)	JHS(cm)	일축압축강도(kg/cm^2) - 4시간 후
1	166	0.001	28.0	21.0	2.46
2	146	0.001	31.0	21.0	3.49
3	185	0.000	31.0	28.0	1.92
4	178	0.000	27.0	23.0	2.19
5	192	0.001	27.0	24.0	1.54
6	185	0.000	32.0	26.0	1.14

Fig. 3.3.54는 물/고화재비(W/C)의 변화에 따른 일축압축강도를 나타냈다. 그 결과 대부분의 배합비에서 본 연구의 유동화 처리토의 강도기준(4시간)인 $1.3kg/cm^2$보다 높게 나타났다.

Fig. 3.3.55에는 ASTM 규격몰드와 JHS 규격몰드를 사용하여 나타난 유동성 시험 결과를 나타냈다. 그 결과 기준치인 18~30cm를 만족시키는 배합비가 비교적 전 범위에서(W/C 146~192%) 기준치에 부합되는 값이 나타났다. 블리딩율은 전 배합비에서 기준치 1%보다 작게 나타났다.

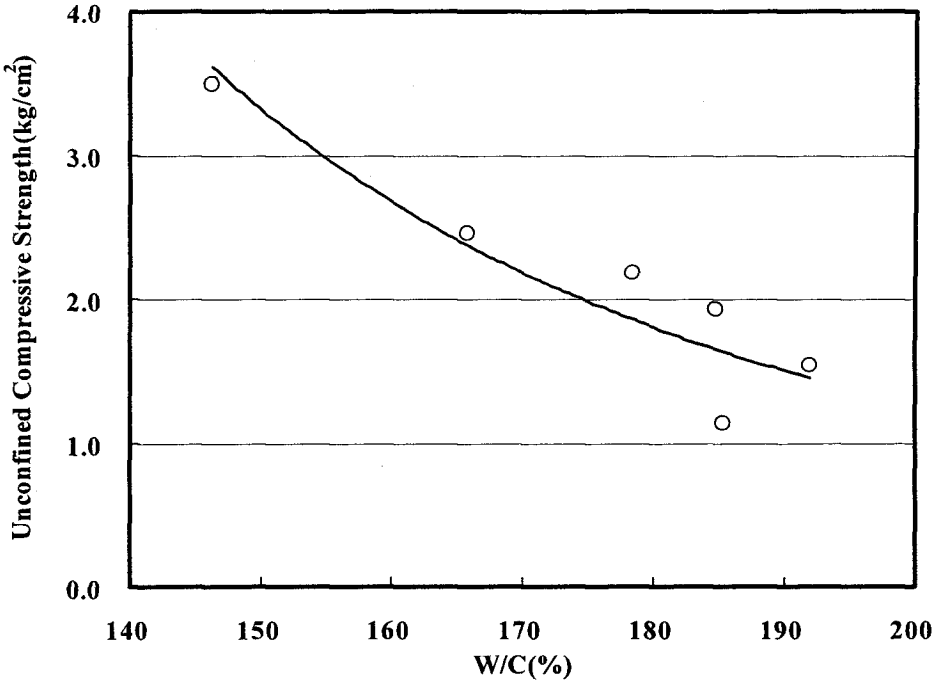


Fig. 3.3.54 W/C와 강도와의 관계(SM)

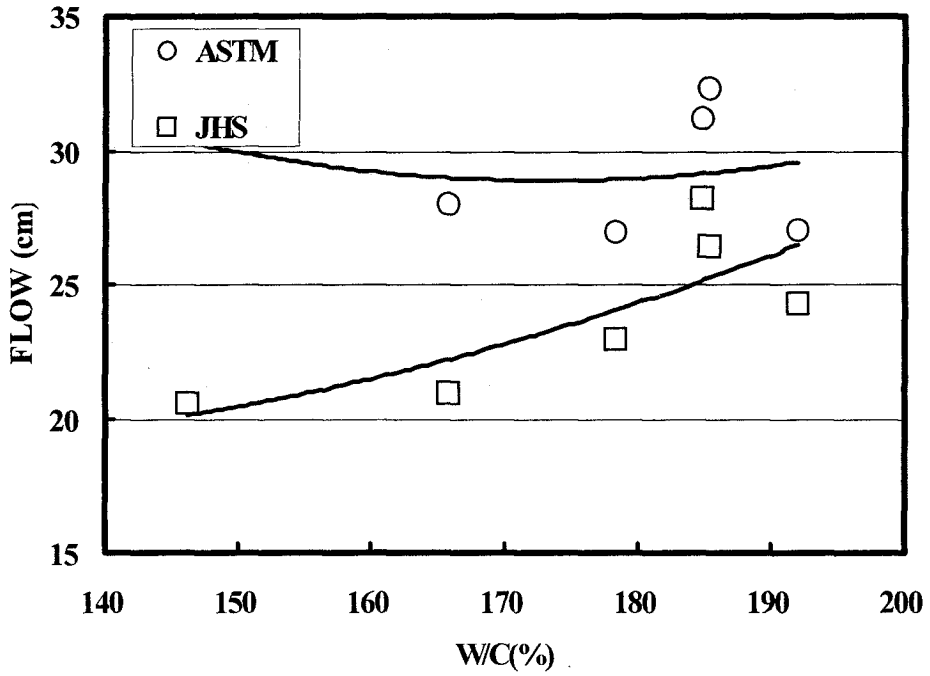


Fig. 3.3.55 W/C에 따른 유동성의 관계(SM)

따라서 SM의 시료의 경우에서는 기준치를 만족시키는 배합비 약 146~192%를 기준으로 최대치와 최소치의 오차를 감안하여 유동성 처리제 특성 파악 시험의 배합비를 Table 3.3.16과 같이 설정하였다.

Table 3.3.16 유동성 처리제 특성 파악 시험의 배합비(SM)

	SM-1	SM-2	SM-3	SM-4
현장토(%)	60	60	60	60
고화재(%)	13.0	13.9	15.5	17.1
W/C(%)	207	192	168	150

다. SC와 고화재 혼합 시험결과

SC시료는 현장 채취가 용이하지 않았기 때문에, SW시료와 CL의 시료를 50:50의 중량비로 혼합한 후 배합비 산정시험을 실시하였다. 이전 시험과 유사한 범위 내에서 현장토(49%)를 고정 시키고 W/C를 변화시키는 방법으로 시험을 실시하였다. 하지만 이전 시료와는 달리 점토시료의 영향으로 SW, SP 시료에 비해 강도는 50%정도 감소되어 측정되었다.

Table 3.3.17에는 전체 시료를 49%로 고정한 경우, 각 시험에 사용된 W/C에 따른 블리딩, 유동성, 일축압축강도 측정치를 나타냈다. 시험 결과 W/C 215%에서만 블리딩, 유동성, 일축압축강도 기준에 부합되는 값이 나타났다.

Table 3.3.17 배합비 결정 실험 결과(SC)

	W/C (%)	블리딩율 (%)	ASTM (cm)	JHS (cm)	일축압축강도 (kg/cm^2) - 4시간 후
1	262	0.000	24.0	15.0	0.56
2	238	0.000	30.0	20.0	0.65
3	221	0.000	34.0	22.0	1.11
4	215	0.000	27.0	19.0	1.33
5	227	0.000	30.0	21.0	1.03
6	210	0.000	28.0	20.0	0.87

Fig. 3.3.56에는 W/C의 변화에 따른 일축압축강도를 나타냈다. W/C 215%를 제외하고는 전 배합비에서 기준 강도(4시간)인 1.3kg/cm^{2}에 도달하지 못하였다. 따라서 유동화 처리토 특성 파악시험 시에는 현장토의 비율을 43.5%까지 줄이고 시험을 진행하였다. 또한, W/C 215%를 기준으로 최대/최소치의 오차를 감안하여 유동화 처리토 특성 파악 시험의 배합비를 Table 3.3.18과 같이 설정하였다.

Fig. 3.3.57에는 유동성 시험결과를 나타내었는데, 대부분의 배합비에서 기준치인 18~30cm를 만족시켰다. 그러나 계속 W/C가 증가되면서 유동성이 감소되는 경향이 나타났다. 블리딩율의 경우에는 영향을 거의 미치지 못함을 알 수 있다.

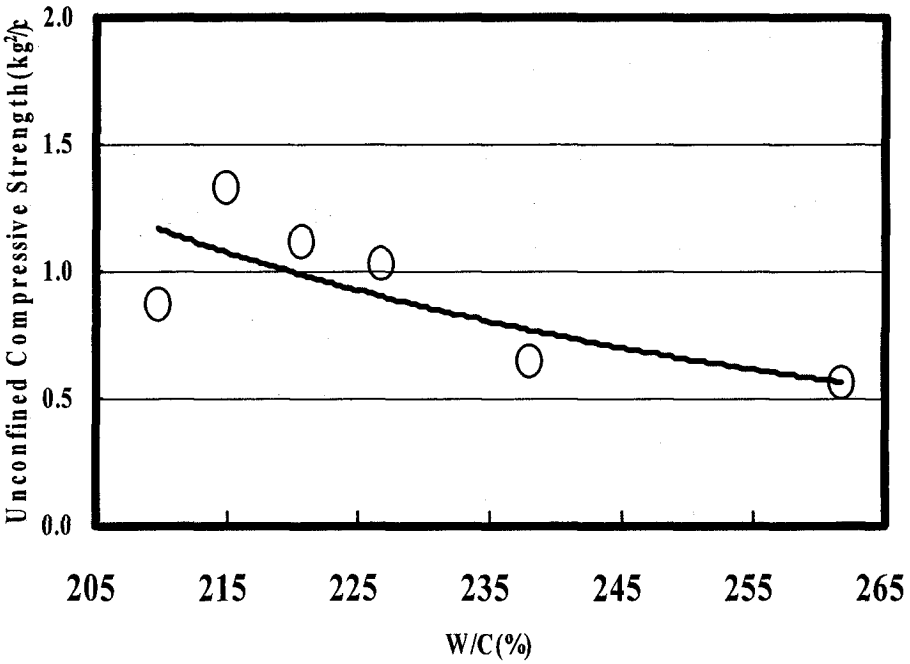


Fig. 3.3.56 W/C와 강도와의 관계(SC)

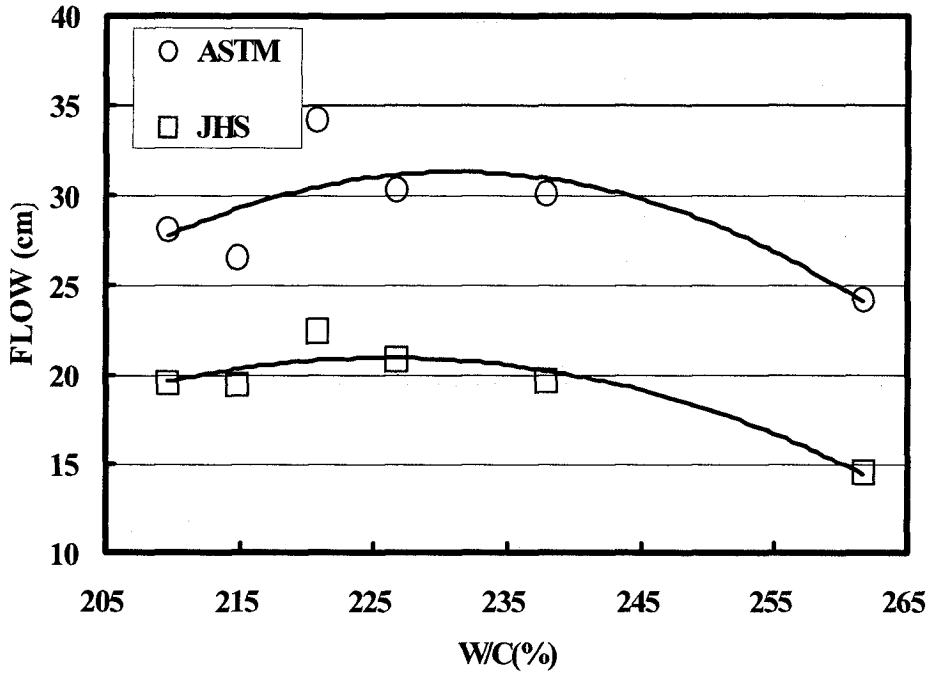


Fig. 3.3.57 W/C에 따른 유동성의 관계(SC)

Table 3.3.18 유동화 처리제 특성 파악 시험의 배합비(SC)

	SC-1	SC-2	SC-3	SC-4
현장토(%)	43.5	43.5	43.5	43.5
고화재(%)	17	18.4	19.2	20
W/C(%)	231	207	195	182

라. ML과 고화재 혼합 시험결과

ML 시료의 경우, 현장토비를 36~42% 범위로 변화 시키며 기준치에 부합되는 W/C 배합비를 찾고자 하였다. 최초 시료 채취상태가 고함수비 상태의 시료가 채취되었으므로, 함수비를 인위적으로 낮추기 위해 자연건조 시킨 후 시험을 진행하였다. Table 3.3.19에는 각 시험에 사용된 배합비에 따른 블리딩, 유동성, 일축압축강도 측정치를 나타냈다. 시험 결과 W/C 164~192%의 범위에서 블리딩율, 유동성, 일축압축강도 기준에 부합되는 값이 나타났다.

Table 3.3.19 배합비 결정 실험 결과(ML)

	W/C(%)	블리딩율(%)	ASTM(cm)	JHS(cm)	일축압축강도(kg/cm2) - 4시간 후
1	338	0.000	35.0	23.0	0.43
2	287	0.000	35.0	23.0	0.61
3	230	0.000	32.0	20.0	1.37
4	192	0.000	30.0	20.0	1.51
5	164	0.000	28.0	19.0	1.62

Fig. 3.3.58은 W/C의 변화에 따른 일축압축강도를 나타낸 그래프이다. W/C 230% 이하의 범위에서 기준 강도치에 부합되는 결과가 나타났다. 그러나 W/C비가 230% 이상에서는 기준 강도(4시간)인 1.3kg/cm^{2}에 도달하지 못하였다. 따라서 유동화 처리토 특성 파악 시험 시 W/C비를 230%이하로 낮추어 적용하였다. Fig. 3.3.59에는 유동성 시험결과를 나타내었는데, W/C가 약 164~230% 범위에서 기준치를 거의 만족시켰다. 그러나 W/C가 230%를 초과하면 유동성 기준치 보다 큰 값이 나타나는 경향을 띠었다. 현장토 함량비를 30%대까지 줄였음에도 불구하고 이와 같은 경향을 나타낸 것으로부터 미립자들의 함유량이 고화재를 이용한 강도증진 효과에 부정적인 영향을 미친다는 것을 파악할 수 있다. 블리딩율은 전 배합비에서 기준치인 1%보다 작게 나타났다.

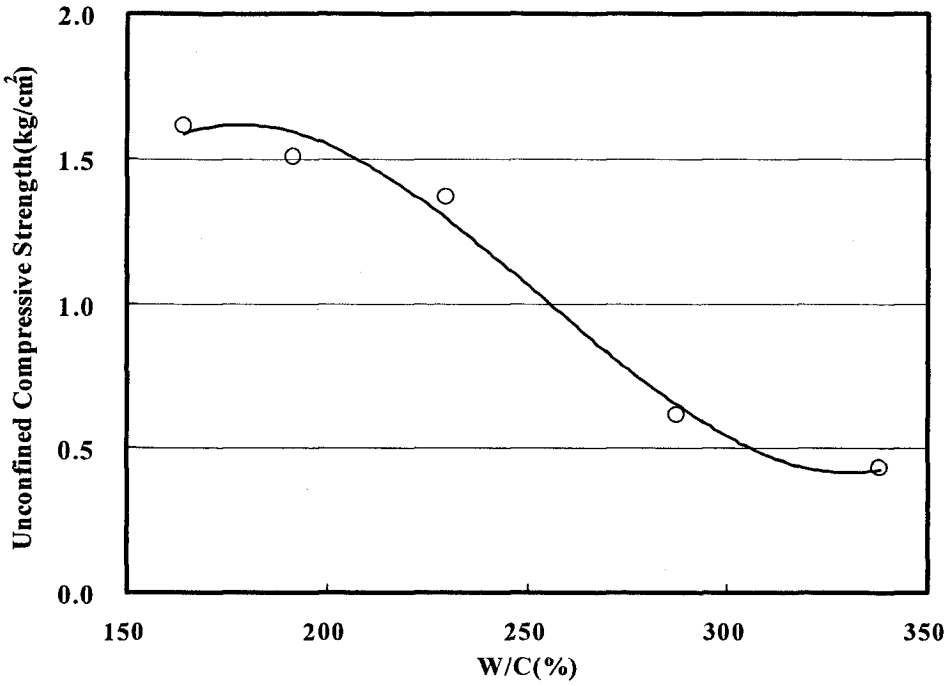


Fig. 3.3.58 W/C와 강도와의 관계(ML)

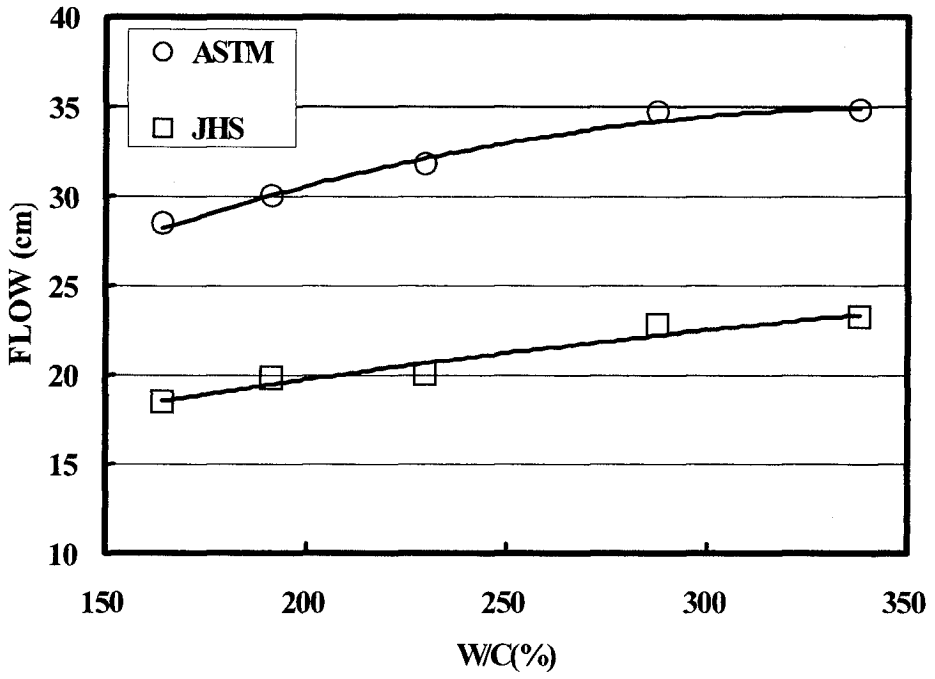


Fig. 3.3.59 W/C에 따른 유동성의 관계(ML)

이상의 결과로부터 ML 시료의 경우에서는 기준치를 만족시키는 W/C비 164~230%를 기준으로 최대/최소치의 오차를 감안하여 본 시험의 배합비를 Table 3.3.20과 같이 설정하였다.

Table 3.3.20 유동화 처리제 특성 파악 시험의 배합비(ML)

	ML-1	ML-2	ML-3	ML-4
현장토(%)	38.8	38.8	38.8	38.8
고화재(%)	16.9	17.4	19.9	21.0
W/C(%)	263	241	208	191

마. CL과 고화재 혼합시험결과

본 실험에 사용된 해성점토의 초기 함수비는 약 45%로 측정되었다. 따라서 인위적으로 물-고화재-현장토의 비를 맞추기 위해 건조시켜 사용하였다. 유동성을 만족시키기 위해 현장토의 비를 35%~40%의 범위에서 W/C비를 변화시키며, 시험을 실시하였다. 먼저 유동성 기준을 만족시키기 위해 Table 3.3.21에 제시한 조건으로 시험을 실시하였다. 그 결과(Table 3.3.21, Fig. 3.3.60) W/C 561~1122% 범위에서 기준치에 부합되는 측정값이 나타났다. 그러나 일축압축강도가 기준치보다 너무 작게 나타났기($0.26kg/cm^2$) 때문에(Fig. 3.3.60), 강도 기준치를 만족시킬 때까지 W/C비를 계속 변화시켜가며 시험을 계속 실시하였다. Fig. 3.3.61은 유동성 기준을 만족한 공시체(W/C 561%이상)의 일축시험 후의 전경을 나타냈다. 그림에 나타난 바와 같이 유동성 기준을 만족시키는 공시체는 스스로 자립이 불가능할 정도로 강도가 낮게 나타났다. 따라서 강도기준에 부합되는 W/C 비를 찾기 위해 여러 가지 현장토비(26~40%)에서 재시험을 실시하였다(Table 3.3.22). 그 결과 W/C 187%이하에서 기준 강도치에 부합되는 측정치가 나타났다. 그러나 187% 이하에서는 유동성에 부합되지 않았으므로, 유동성과 일축압축강도의 기준치를 모두 만족시키는 적합한 W/C비의 범위를 찾을 수가 없었다.

Table 3.3.21 강도를 기준으로 한 배합비 결정 실험 결과(CL-1)

	W/C (%)	블리딩율 (%)	ASTM (cm)	JHS (cm)	일축압축강도 (kg/cm^2) - 4시간 후
1	281	0.000	23.0	16.0	0.26
2	321	0.000	23.0	16.0	0.20
3	374	0.000	24.0	16.0	0.10
4	449	0.000	25.0	16.0	0.04
5	561	0.000	26.0	18.0	0.04
6	748	0.020	29.0	18.0	0.03
7	1122	0.057	29.0	18.0	0.03

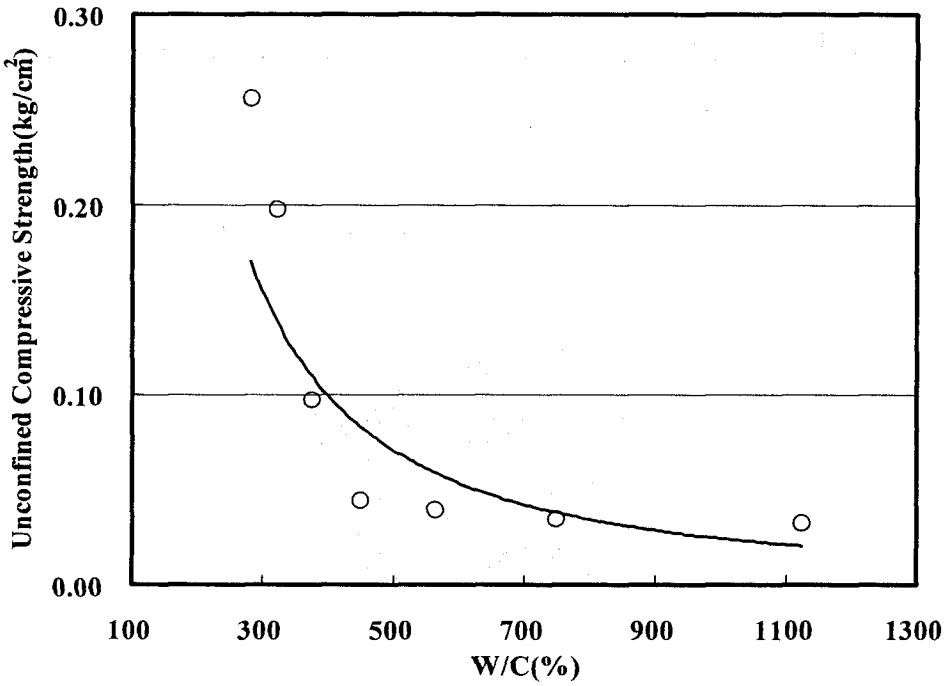


Fig. 3.3.60 W/C와 강도와의 관계(CL-1)

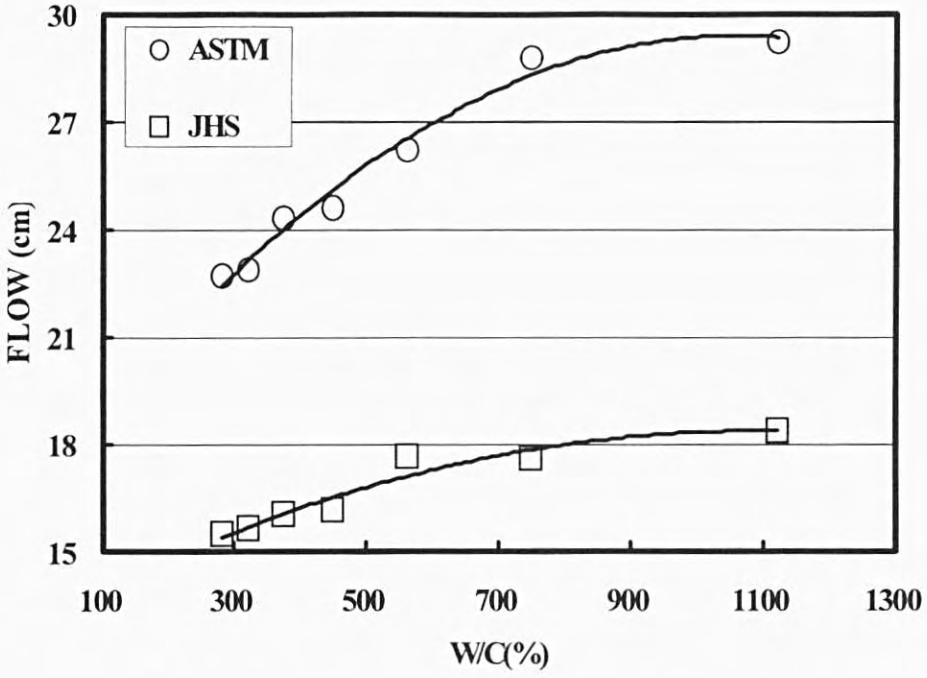


Fig. 3.3.61 W/C에 따른 유동성의 관계(CL-1)



Fig. 3.3.62 유동성 기준에 통과한 CL시료의 4시간 양생 후의 전경

Table 3.3.22 유동성을 기준으로 한 배합비 결정 실험 결과(CL-2)

	물 비(%)	고화재비(%)	현장토비(%)	W/C(%)	일축압축강도(kg/cm^2) - 4시간 후
1	54.7	4.9	40.4	1122	0.03
2	53.4	7.1	39.4	748	0.03
3	52.2	9.3	38.5	561	0.04
4	51.0	11.4	37.6	449	0.04
5	49.9	13.3	36.8	374	0.10
6	48.8	15.2	36.0	321	0.20
7	47.8	17.0	35.2	281	0.26
8	47.8	17.0	35.2	281	0.47
9	45.8	20.4	33.7	224	0.73
10	44.0	23.5	32.5	187	1.58
11	42.3	26.4	31.2	160	1.81
12	40.8	29.1	30.0	140	2.10
13	39.4	31.6	29.0	125	2.66
14	38.0	33.9	28.1	112	3.32
15	36.8	36.1	27.1	102	3.93
16	35.6	38.1	26.2	93	5.38

그러므로 CL의 경우에서는 유동성과 일축강도 기준치에 부합되는 W/C비를 설정하기 위해 급결제 1kg당 촉진제 6g/kg을 첨가하고, W/C비를 달리하여 CL-1 (Table 3.3.22)의 배합비를 기준으로 재배합을 하였다.

Table 3.3.23에는 유동화처리제에 촉진제를 혼합한 CL시료의 시험결과를 나타냈다. 그 결과 강도($1.5kg/cm^2$)와 유동성(18~30cm)을 기준치를 만족하는 W/C가 187와 238%에서만 나타났으며, 다른 W/C비에서도 그 오차가 크지 않았기 때문에 만족 범위를 187~238%로 설정했다(Fig. 3.3.63). 시험 진행 시, 촉진제의 혼합으로 인해, 4시간 일축압축강도가 다른 경우에 비해 비교적 크게 나타났으므로, 실제 현장에 촉진제를 사용하여 시공할 경우에는 작업성(workability)을 고려하여 촉진제의 양을 조절해야 할 것으로 판단된다.

Table 3.3.23 촉진제를 사용한 예비시험 결과(CL-3)

	W/C(%)	블리딩율(%)	ASTM (cm)	JHS(cm)	일축압축강도(kg/cm^2) - 4시간 후
1	200	0.000	26.8	14.5	2.82
2	212	0.000	24.5	15.8	2.44
3	187	0.000	26.6	17.4	1.54
4	238	0.000	27.8	18.2	1.50

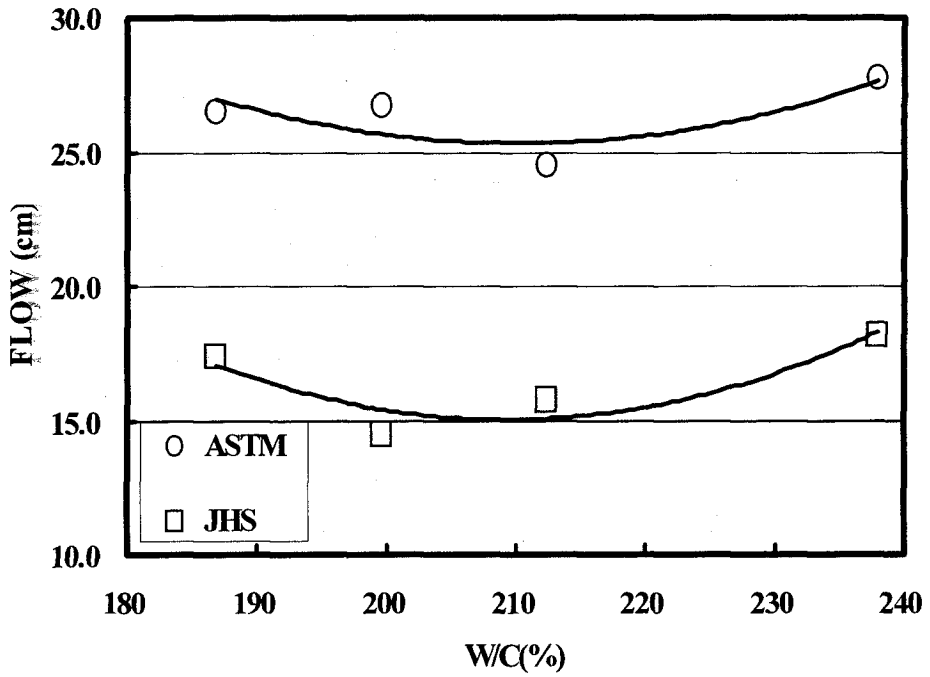


Fig. 3.3.63 촉진제를 사용한 배합비의 W/C에 따른 유동성의 관계

이상의 결과로부터 CL의 시료의 경우에서는 촉진제를 고화재 1kg 당 6g씩 혼합하고, W/C 187~238%를 기준으로 최대/최소치의 오차를 감안하여 본 시험의 배합비를 Table 3.3.24와 같이 설정하였다.

Table 3.3.24 본 시험의 배합비

	CL-1	CL-2	CL-3	CL-4
현장토(%)	32.4	32.4	32.4	32.4
고화재(%)	19.3	20.0	20.8	21.6
W/C(%)	251	238	225	212
촉진제(g)	13.78	14.3	14.9	15.5

4. 자갈 함유량에 따른 유동화 처리토의 배합특성

가. 재료분리 특성

블리딩율을 통해 자갈 함유량에 따른 재료분리 특성을 측정한 결과, Table 3.3.25와 같이 나타났다. 자갈 함유량이 5% 이하인 실험조건에서는 시료의 비율, W/C의 영향, 고화재의 종류에 상관없이 블리딩율은 목표 기준인 1% 이하로 나타났다. 자갈 함유량이 15%일 때에는 시료의 비율이 60%이고 C-10 고화재를 사용한 실험조건에서만 1% 이하의 블리딩율을 나타냈다. 자갈 함유량이 증가할수록 재료분리 특성이 크게 나타나는 것을 알 수 있었고, 이러한 현상은 C-10과 S 고화재 모두에서 동일하게 나타났다. 그러므로 자갈 함유량이 유동화 처리토의 재료분리 특성에 영향을 미친다는 것을 파악할 수 있었다. Fig. 3.3.64에 자갈 함유량에 따른 재료분리 특성을 나타냈다.

Table 3.3.25 자갈 함유량에 따른 재료분리 특성 실험 결과

No.		블리딩율	No.		블리딩율	No.		블리딩율	No.		블리딩율	No.		블리딩율
T1-C1	a	1% 이하	T1-C3	a	2.6%	T1-C5	a	9.9%	T1-C7	a	2.5%	T1-C9	a	7.9%
	b	1% 이하		b	4.3%		b	12.4%		b	3.7%		b	9.3%
	c	1% 이하		c	2.3%		c	5.6%		c	1.4%		c	6.7%
	d	1% 이하		d	3.5%		d	8.2%		d	2.5%		d	8.9%
T1-C2	a	1.6%	T1-C4	a	6.6%	T1-C6	a	1% 이하	T1-C8	a	3.5%	T1-C10	a	11.4%
	b	2.1%		b	8.2%		b	1% 이하		b	5.6%		b	13.2%
	c	1% 이하		c	4.7%		c	1% 이하		c	3.1%		c	10.4%
	d	1% 이하		d	6.3%		d	1% 이하		d	4.5%		d	12.6%

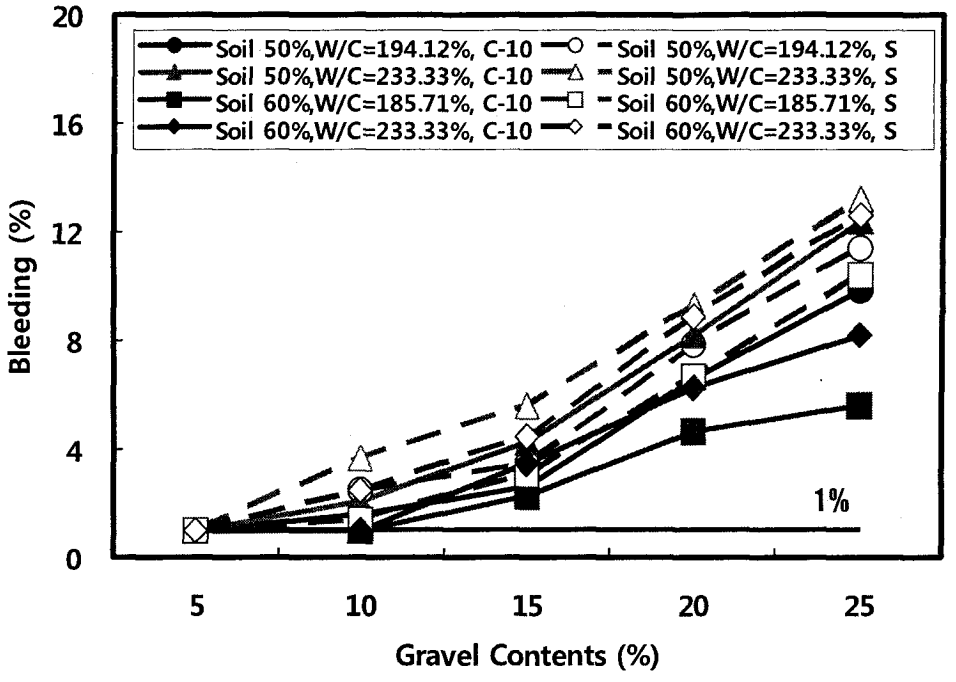


Fig. 3.3.64 자갈 함유량에 따른 재료분리 특성

나. 유동성

(1) Soil=50%, W/C=194.12%

유동화 처리토의 시료비율이 50%이고, W/C가 194.12%인 조건의 유동성을 JHS, ASTM, Slump Flow의 3가지 기준으로 파악하였다. Table 3.3.26에 Soil=50%, W/C=194.12%일 때의 유동성 결과를 제시하였다. 자갈의 비율이 5%~25% 까지 증가할수록 유동성은 증가했고, 이러한 경향은 JHS, ASTM, Slump Flow 3가지에서 공통적으로 나타났다. 자갈의 비율이 25% 이상인 경우에는 점차적으로 유동성이 감소하는 경향이 나타났고, 3가지 유동성 평가 기준에서 모두 확인할 수 있었다. JHS에 의해 유동성을 측정한 결과, 자갈 함유율이 25%인 경우를 제외하고 모든 조건에서 목표 기준을 만족하였고, C-10 고화재와 S 고화재 모두에서 같은 결과를 나타냈다. ASTM에 의해 유동성을 측정한 결과, C-10 고화재와 S 고화재를 사용한 조건에서 모두 목표 기준치인 31.5cm 이상의 유동성을 보였다. Slump Flow를 통해 측정한 유동성 결과, 자갈의 비율이 15% 이하의 경우에는 목표 기준

을 만족하였지만, 25%~45%인 경우는 목표기준 이상의 흐름값을 나타냈다. Fig. 3.3.65, Fig. 3.3.66, Fig. 3.3.67에 각각 JHS, ASTM, Slump Flow에 의한 유동성 결과를 제시하였다.

Table 3.3.26 유동성 결과 (Soil=50%, W/C=194.12%)

No.	자갈 함유량 (%)	고화재 종류	JHS (cm)	ASTM (cm)	Slump Flow (cm)
T1-C1-a	5	C-10	26.7	34.2	67.5
T1-C2-a	15		28.5	36.8	68.7
T1-C3-a	25		31.2	38.4	73.5
T1-C4-a	35		29.8	38.5	73.2
T1-C5-a	45		27.2	33.4	73.4
T1-C6-a	5	S	27.4	33.5	68.8
T1-C7-a	15		27.6	38.4	67.3
T1-C8-a	25		33.4	39.2	74.2
T1-C9-a	35		28.6	38	74.2
T1-C10-a	45		29.5	34	74.6

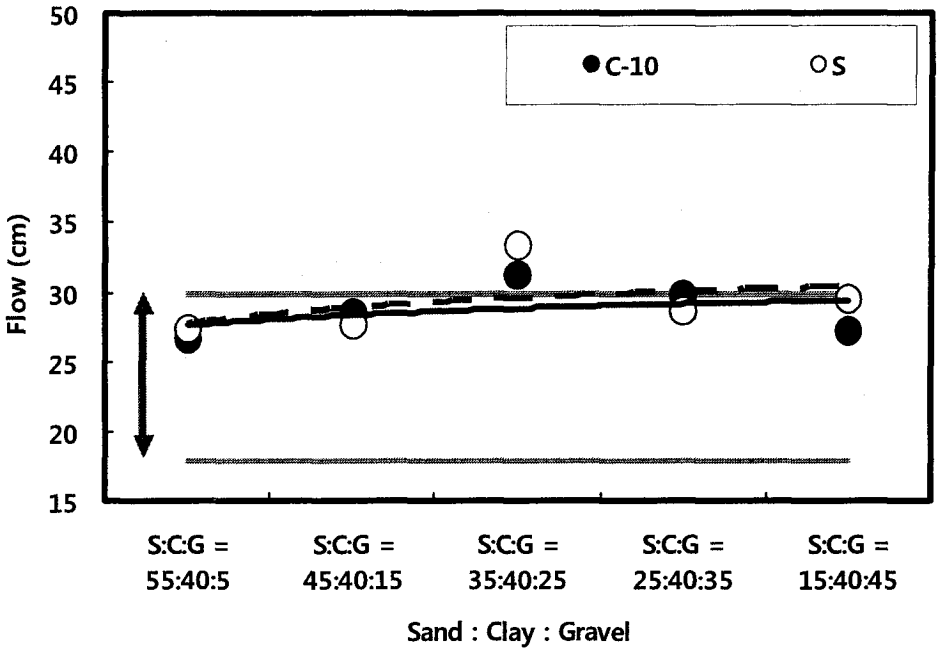


Fig. 3.3.65 Soil=50%, W/C=194.12% 조건에서의 JHS에 의한 유동성

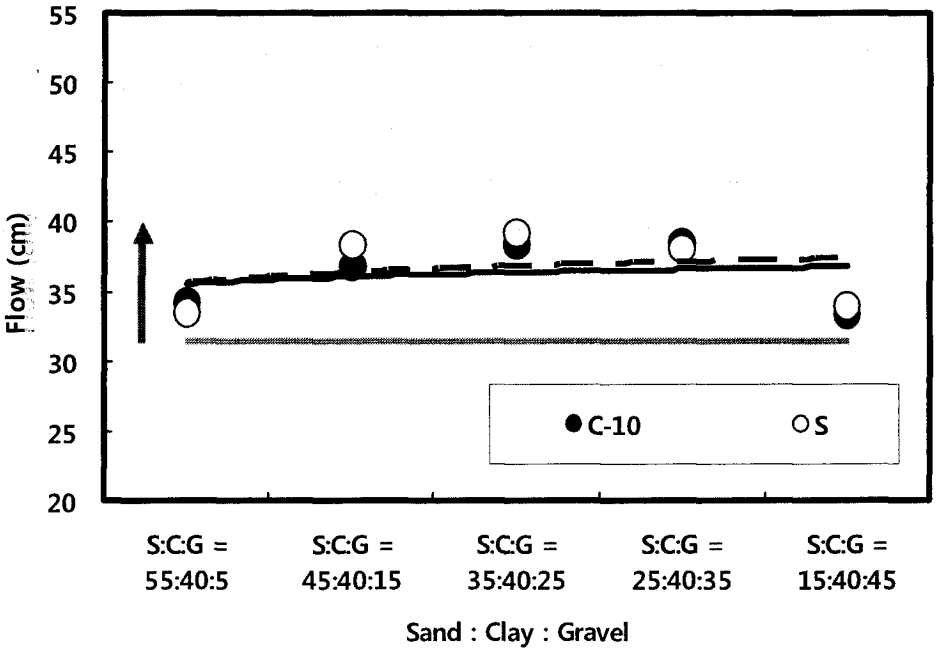


Fig. 3.3.66 Soil=50%, W/C=194.12% 조건에서의 ASTM에 의한 유동성

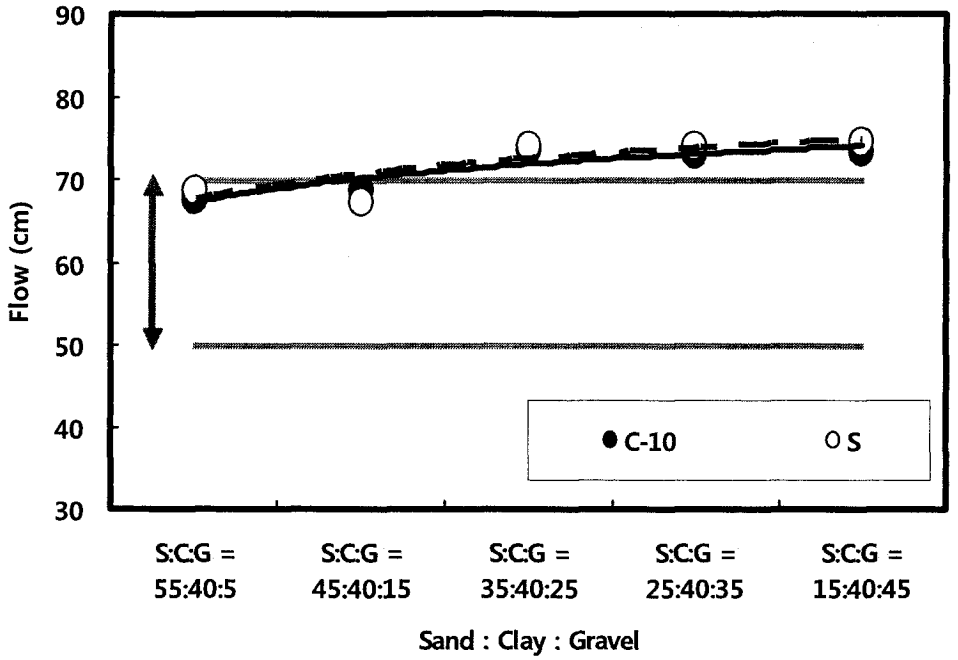


Fig. 3.3.67 Soil=50%, W/C=194.12% 조건에서의 Slump Flow에 의한 유동성

(2) Soil=50%, W/C=233.33%

유동화 처리토의 시료비율이 50%이고, W/C가 233.33%인 조건의 유동성을 JHS, ASTM, Slump Flow의 3가지 기준으로 파악하였다. Table 3.3.27에 유동성 결과(Soil=50%, W/C=233.33%)를 제시하였다. 자갈의 비율이 5%~25% 까지 증가할수록 유동성은 증가했고, 이러한 경향은 JHS, ASTM, Slump Flow 3가지에서 공통적으로 나타났다. 자갈의 비율이 25% 이상인 경우에는 점차적으로 유동성이 감소하는 경향이 나타났고, 3가지 유동성 평가 기준에서 모두 확인할 수 있었다. JHS에 의해 유동성을 측정한 결과, C-10 고화재와 S 고화재를 사용한 모든 실험조건에서 목표 기준 이상의 유동성을 나타냈다. ASTM에 의해 유동성을 측정한 결과, C-10 고화재와 S 고화재를 사용한 조건에서 모두 목표 기준인 31.5cm 이상의 유동성을 나타냈으나, 목표 기준보다 평균 약 15cm 이상 큰 유동성을 보였다. Slump Flow를 통해 측정한 유동성 결과 역시, JHS 기준으로 측정한 유동성 결과와 동일하게 나타났다. Fig. 3.3.68~Fig. 3.3.70에 각각 JHS, ASTM, Slump Flow에 의한 유동성 결과를 제시하였다.

Table 3.3.27 유동성 결과 (Soil=50%, W/C=233.33%)

No.	자갈 함유량 (%)	고화재 종류	JHS (cm)	ASTM (cm)	Slump Flow (cm)
T1-C1-b	5	C-10	36.9	43.2	73.4
T1-C2-b	15		38.7	45.6	75.6
T1-C3-b	25		40.4	50.2	81.2
T1-C4-b	35		36.4	44.6	75.4
T1-C5-b	45		34.2	43.2	72.1
T1-C6-b	5	S	38.2	45.6	74.5
T1-C7-b	15		39.2	45.1	76
T1-C8-b	25		41.5	51.4	80.2
T1-C9-b	35		35.8	46.5	78.8
T1-C10-b	45		33.5	44.5	76.5

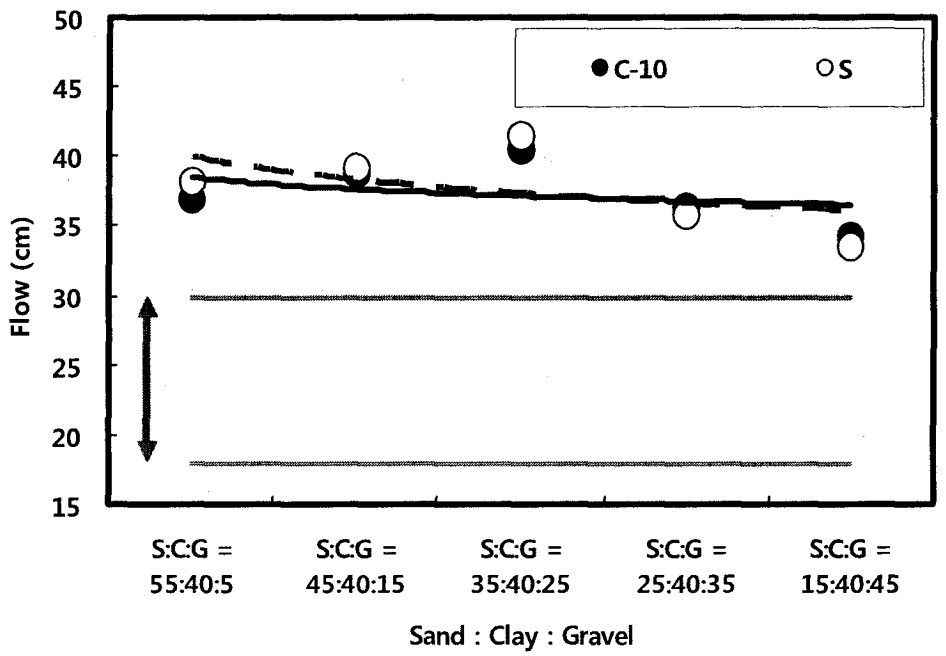


Fig. 3.3.68 Soil=50%, W/C=233.33% 조건에서의 JHS에 의한 유동성

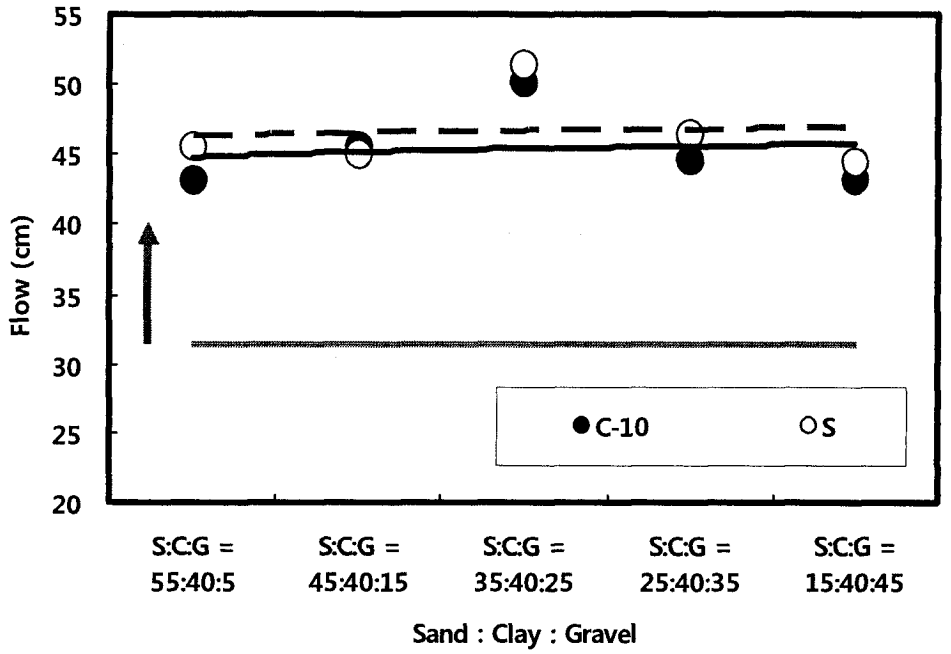


Fig. 3.3.69 Soil=50%, W/C=233.33% 조건에서의 ASTM에 의한 유동성

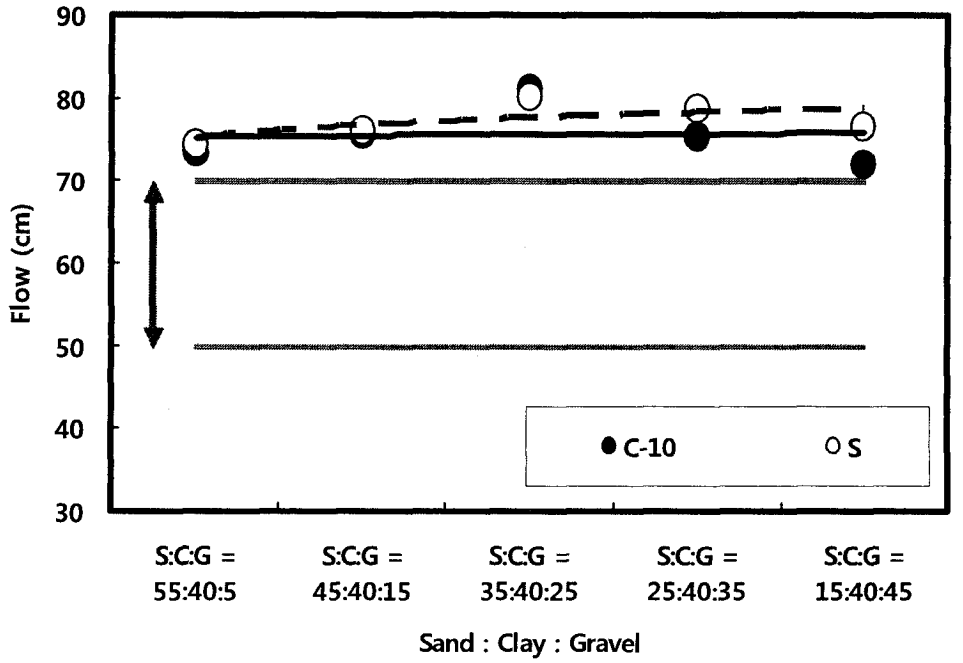


Fig. 3.3.70 Soil=50%, W/C=233.33% 조건에서의 Slump Flow에 의한 유동성

(3) Soil=60%, W/C=185.71%

유동화 처리토의 시료비율이 60%이고, W/C가 185.71%인 조건의 유동성을 JHS, ASTM, Slump Flow의 3가지 기준으로 파악하였다. Table 3.3.28에 유동성 결과(Soil=60%, W/C=185.71%)를 제시하였다. JHS에 의해 유동성을 측정한 결과, 자갈 함유량이 5%인 경우에 목표 기준인 18cm 이하의 흐름값을 나타난 것을 제외하고, C-10 고화재와 S 고화재를 사용한 모든 실험조건에서 목표 기준에 만족하는 유동성을 나타냈다. ASTM에 의해 유동성을 측정한 결과, C-10 고화재와 S 고화재를 사용한 조건에서 모두 목표 기준인 31.5cm보다 낮은 유동성을 나타냈다. Slump Flow를 통해 측정한 유동성 결과, 모든 실험조건에서 목표 기준인 50cm~70cm의 조건을 만족하는 것으로 나타났다. Fig. 3.3.71~Fig. 3.3.73에 각각 JHS, ASTM, Slump Flow에 의한 유동성 결과를 나타냈다.

Table 3.3.28 유동성 결과 (Soil=60%, W/C=185.71%)

No.	자갈 함유량 (%)	고화재 종류	JHS (cm)	ASTM (cm)	Slump Flow (cm)
T1-C1-c	5	C-10	16.3	26.5	51.3
T1-C2-c	15		22.2	27.3	62.4
T1-C3-c	25		24.2	28.4	66.5
T1-C4-c	35		21.3	24.5	63.4
T1-C5-c	45		19.9	26.4	56.7
T1-C6-c	5	S	17.4	26.7	52.5
T1-C7-c	15		21.5	28.6	63
T1-C8-c	25		25.9	29.4	65.3
T1-C9-c	35		22.4	26.5	61.2
T1-C10-c	45		20.8	25.6	59.3

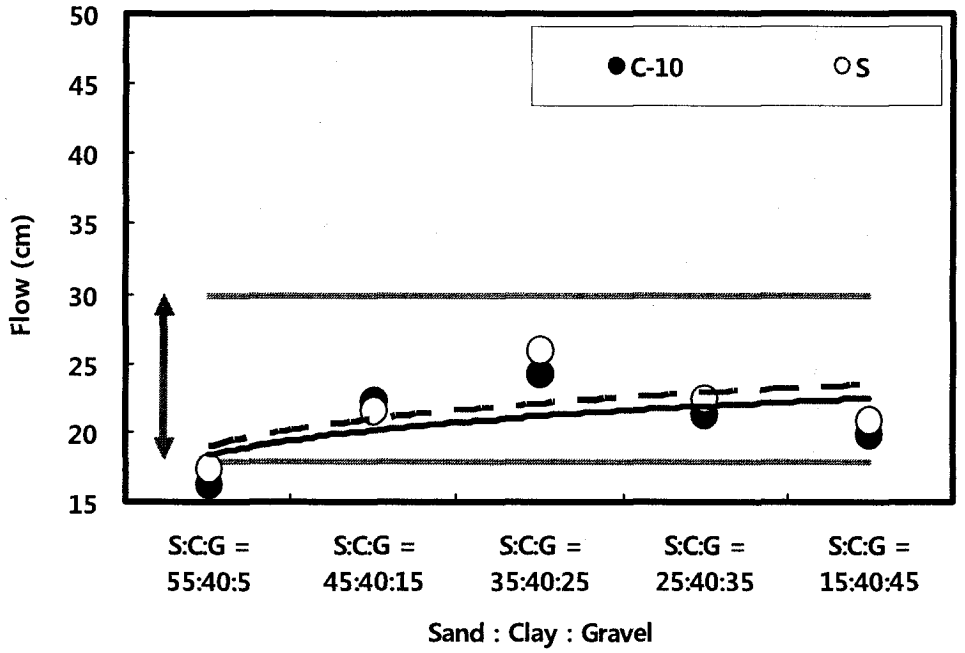


Fig. 3.3.71 Soil=60%, W/C=185.71% 조건에서의 JHS에 의한 유동성

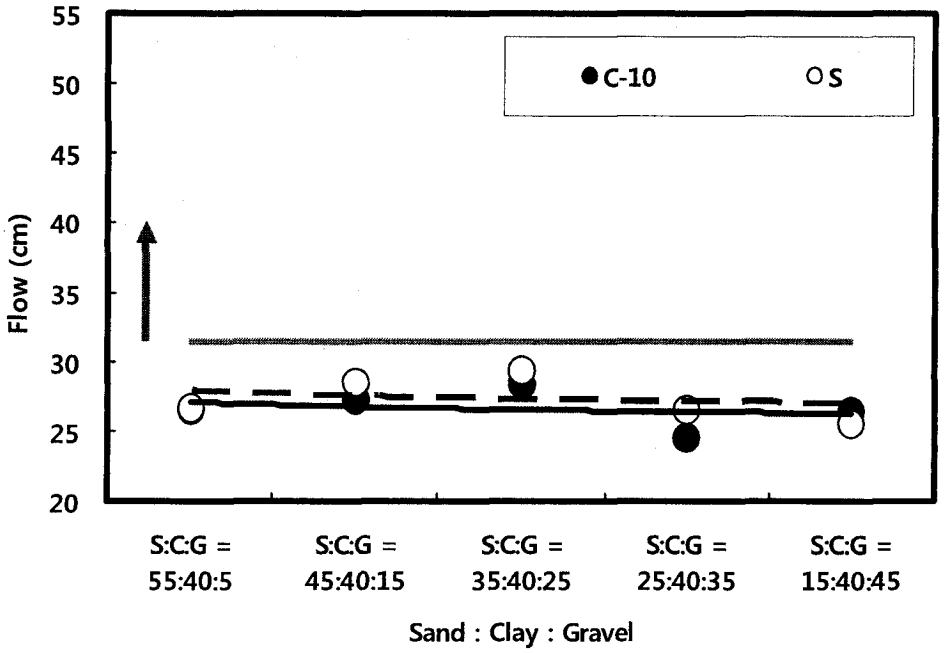


Fig. 3.3.72 Soil=60%, W/C=185.71% 조건에서의 ASTM에 의한 유동성

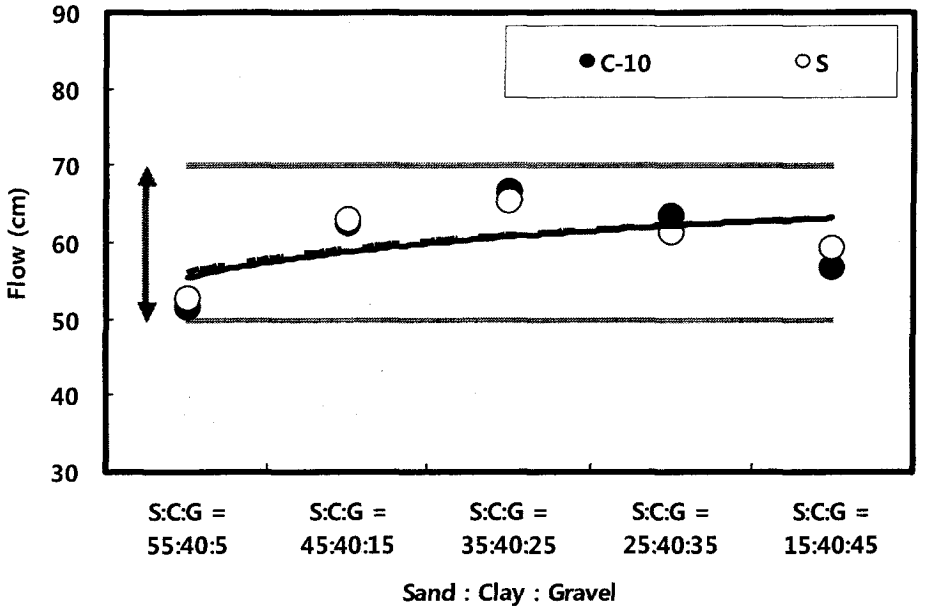


Fig. 3.3.73 Soil=60%, W/C=185.71% 조건에서의 Slump Flow에 의한 유동성

(4) Soil=60%, W/C=233.33%

유동화 처리토의 시료비율이 60%이고, W/C가 233.33%인 실험조건의 유동성을 JHS, ASTM, Slump Flow의 3가지 기준으로 파악하였다. Table 3.3.29에 유동성 결과 (Soil=60%, W/C=233.33%)를 제시하였다. 자갈의 비율이 5%~25% 까지 증가할수록 유동성은 증가했지만, 25%에서 35%로 자갈의 비율이 증가하는 단계에서 유동성이 급격하게 감소하는 경향이 나타났고, 이러한 경향은 JHS, ASTM, Slump Flow의 3가지 실험에서 모두 확인할 수 있었다. JHS에 의해 유동성을 측정한 결과, 고화재의 종류에 따른 영향은 크지 않았고, 모든 실험조건에서 목표 기준인 18cm~30cm를 만족하는 유동성을 보였다. ASTM에 의해 유동성을 측정한 결과, 자갈 함유량이 15%와 20%인 실험조건에서 목표 기준을 만족했으며, 자갈 함유량이 5%, 35%, 45%인 실험조건에서는 목표 기준보다 낮은 유동성을 나타냈다. Slump Flow를 통해 측정한 유동성 결과, 자갈 함유량이 25%인 실험조건에서만 목표 기준을 초과하는 유동성을 보였고, 그 외의 실험조건에서는 모두 목표 기준에 만족하였다. Fig. 3.3.74~Fig. 3.3.75에 각각 JHS, ASTM, Slump Flow에 의한 유동성 결과를 제시하였다.

Table 3.3.29 유동성 결과 (Soil=60%, W/C=233.33%)

No.	자갈 함유량 (%)	고화재 종류	JHS (cm)	ASTM (cm)	Slump Flow (cm)
T1-C1-d	5	C-10	19.2	29.3	54.6
T1-C2-d	15		25.4	33.1	65.2
T1-C3-d	25		28.8	37.2	76.9
T1-C4-d	35		26.5	28.9	68.4
T1-C5-d	45		22.1	27.4	62.1
T1-C6-d	5	S	18.9	27.9	56
T1-C7-d	15		26.7	34.6	66.7
T1-C8-d	25		27.6	37.6	77.8
T1-C9-d	35		28.1	29.9	69.3
T1-C10-d	45		23.6	29.4	64.7

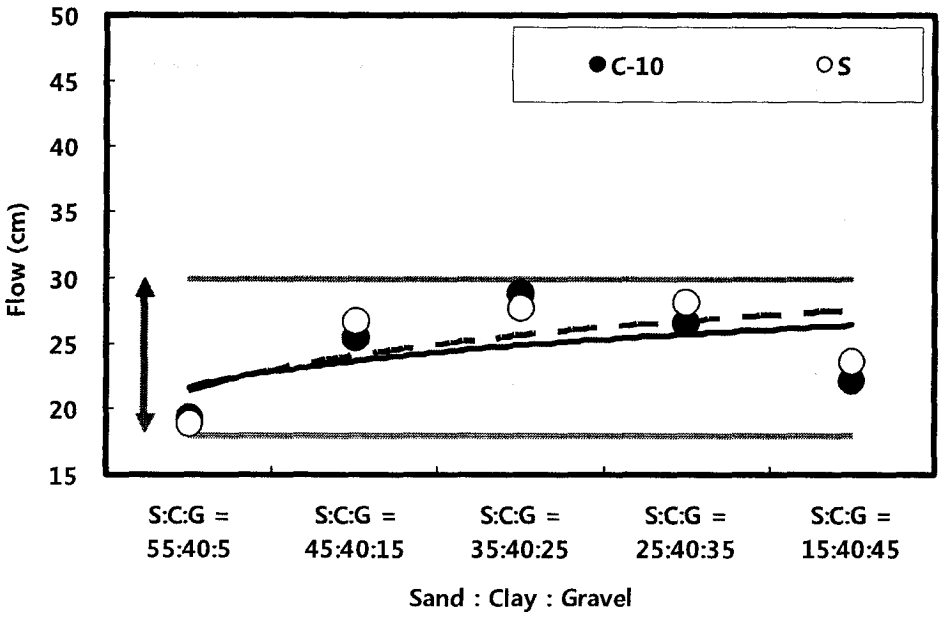


Fig. 3.3.74 Soil=60%, W/C=233.33% 조건에서의 JHS에 의한 유동성

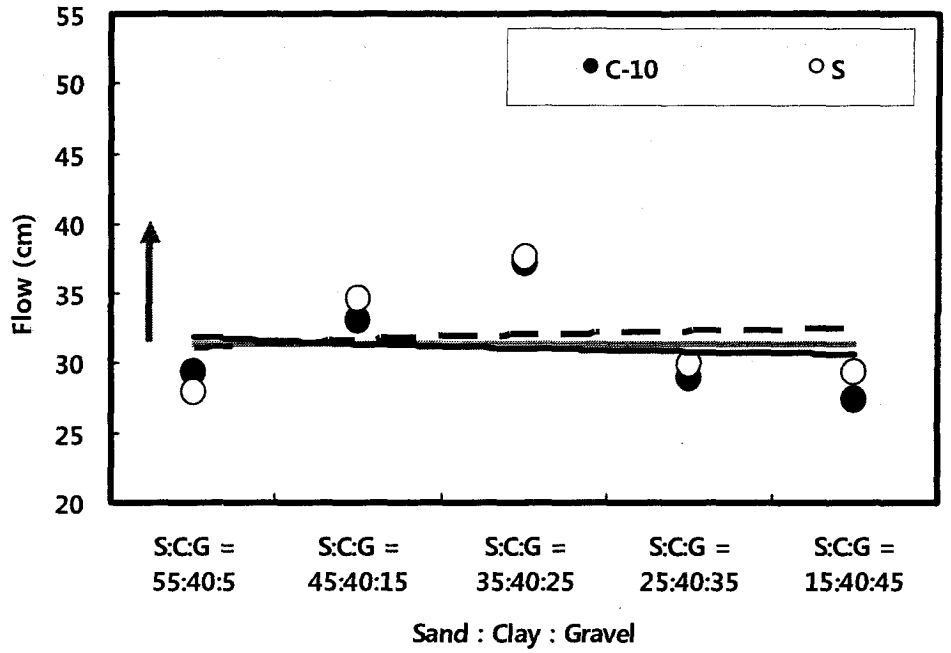


Fig. 3.3.75 Soil=60%, W/C=233.33% 조건에서의 ASTM에 의한 유동성

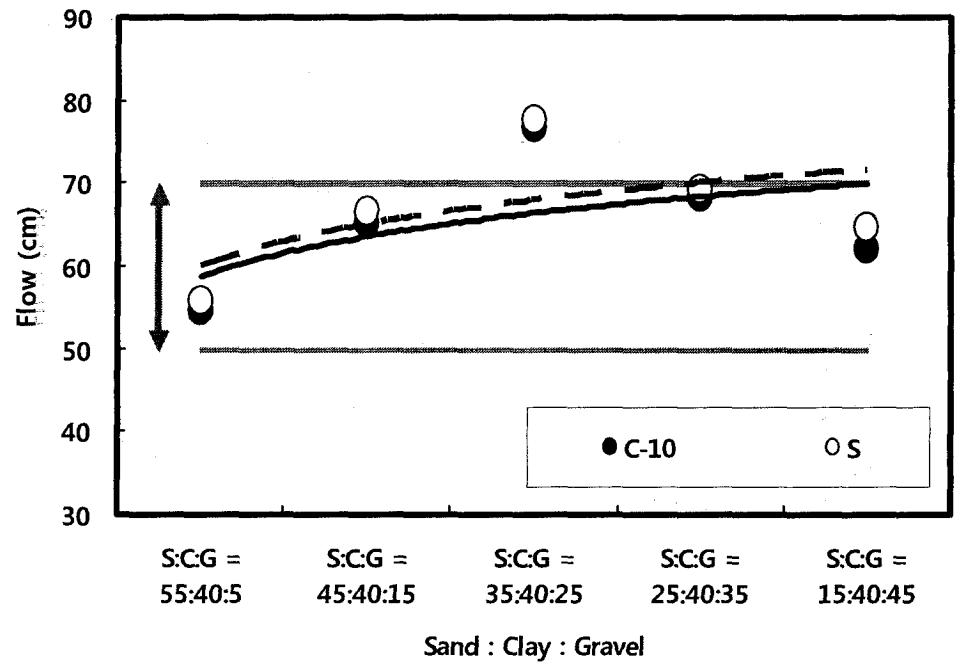


Fig. 3.3.76 Soil=60%, W/C=233.33% 조건에서의 Slump Flow에 의한 유동성

(5) 자갈 함유량에 따른 유동성 관계

Fig. 3.3.77에 시료비율이 50%이고, W/C가 194.12%일 때의 자갈 함유량에 따른 JHS, ASTM, Slump Flow의 유동성 관계를 그림으로 나타냈다. C-10 고화재를 사용한 경우, 자갈 함유량이 5%, 15%인 실험조건에서 3가지 기준의 유동성을 모두 만족했다. S 고화재를 사용한 경우, C-10 고화재를 사용한 결과와 같이 5%, 15%의 실험조건에서 JHS, ASTM, Slump Flow의 유동성을 모두 만족하는 결과를 나타냈다.

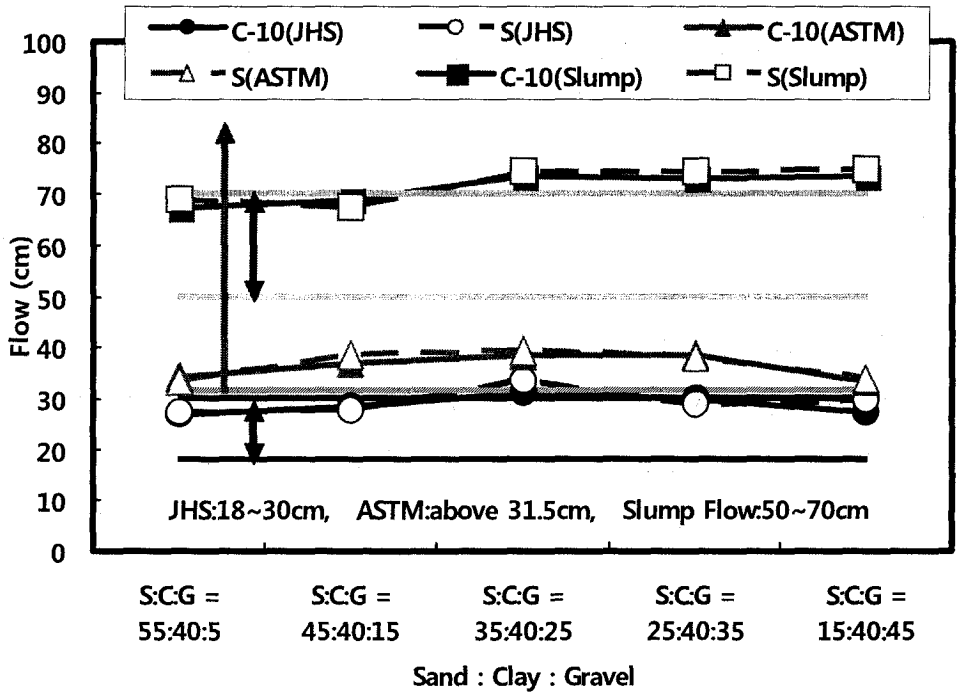


Fig. 3.3.77 Soil=50%, W/C=194.12% 조건의 자갈 함유량에 따른 유동성 관계

Fig. 3.3.78에 시료비율이 50%이고, W/C가 233.33%일 때의 자갈 함유량에 따른 JHS, ASTM, Slump Flow의 유동성 관계를 종합하여 나타냈다. C-10 고화재와 S 고화재를 사용한 모든 실험조건에서 목표 기준의 유동성을 초과하였다.

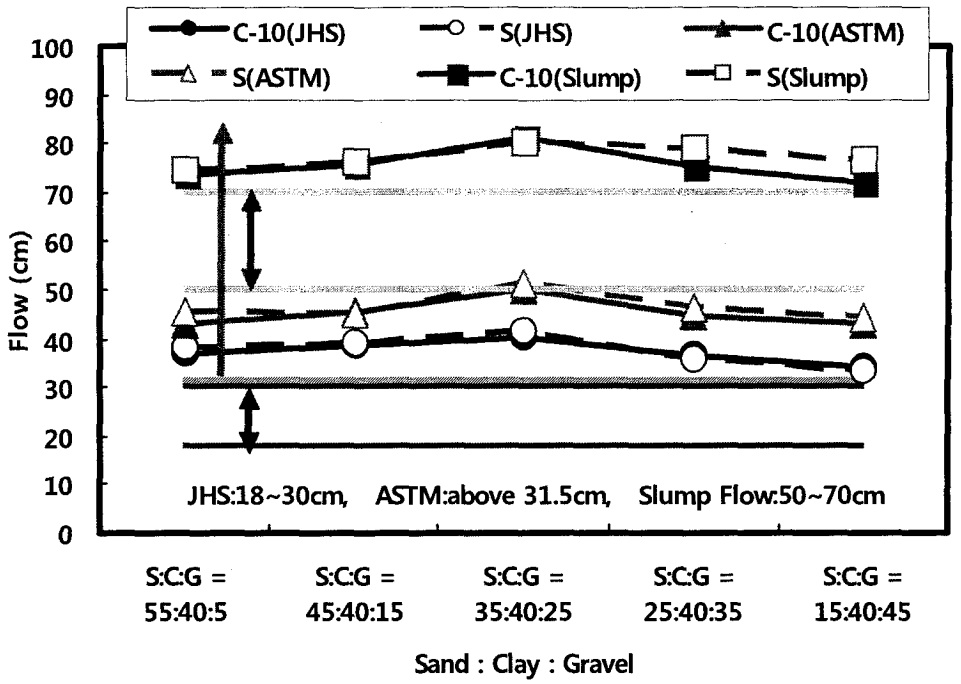


Fig. 3.3.78 Soil=50%, W/C=233.33% 조건의 자갈 함유량에 따른 유동성 관계

Fig. 3.3.79는 시료비율이 60%이고, W/C가 185.71%일 때의 자갈 함유량에 따른 JHS, ASTM, Slump Flow의 유동성 관계를 종합하여 나타낸 것이다. C-10 고화재를 사용한 경우, 자갈 함유량이 5%~45%인 실험조건에서 JHS와 Slump Flow의 목표 기준은 만족하였지만, ASTM의 목표 기준보다 모든 실험조건에서 자갈 함유량에 관계없이 작은 유동성을 나타냈다. S 고화재를 사용한 경우, C-10 고화재를 사용한 결과와 동일한 경향을 나타냈다.

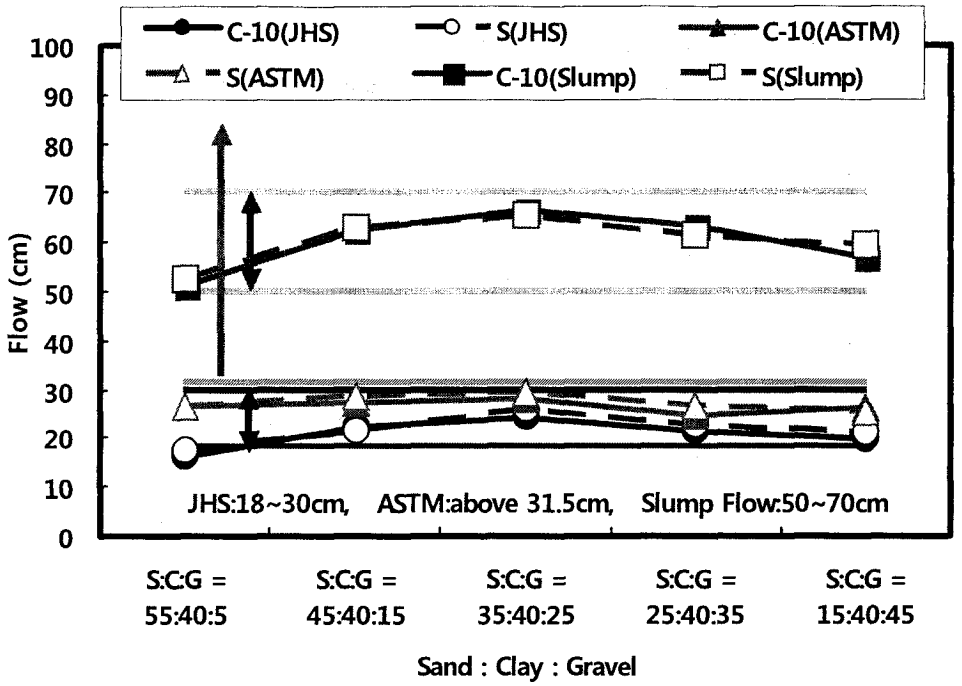


Fig. 3.3.79 Soil=60%, W/C=185.71% 조건의 자갈 함유량에 따른 유동성 관계

Fig. 3.3.80에 시료비율이 60%이고, W/C가 233.33%일 때의 자갈 함유량에 따른 JHS, ASTM, Slump Flow의 유동성 관계를 종합하여 나타냈다. C-10 고화재와 S 고화재를 사용한 경우, 자갈 함유량이 15%인 실험조건에서 JHS, ASTM, Slump Flow의 목표 기준을 모두 만족하는 동일한 결과를 나타냈다.

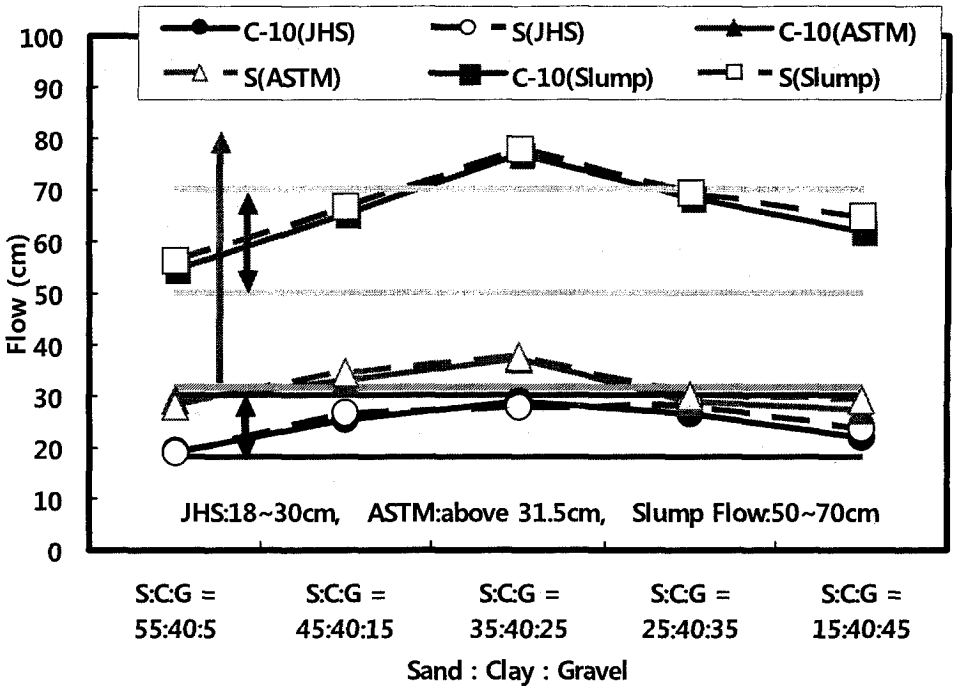


Fig. 3.3.80 Soil=60%, W/C=233.33% 조건의 자갈 함유량에 따른 유동성 관계

(6) 고화재의 종류에 따른 유동성

Fig. 3.3.81~Fig. 3.3.84에 실험에 사용된 고화재의 종류에 따른 유동성을 평가하기 위해 C-10 고화재를 사용하였을 때의 유동성을 S 고화재를 사용하였을 때의 유동성으로 정규화하여 나타냈다. Soil=50%, W/C=194.12% 조건, Soil=50%, W/C=233.33% 조건, Soil=60%, W/C=185.71% 조건, Soil=60%, W/C=233.33% 조건에서 JHS, ASTM, Slump Flow 모두 93%~105% 사이의 값을 나타냈다. 고화재의 종류에 따른 유동성의 차이는 거의 발생하지 않은 것을 확인할 수 있었다.

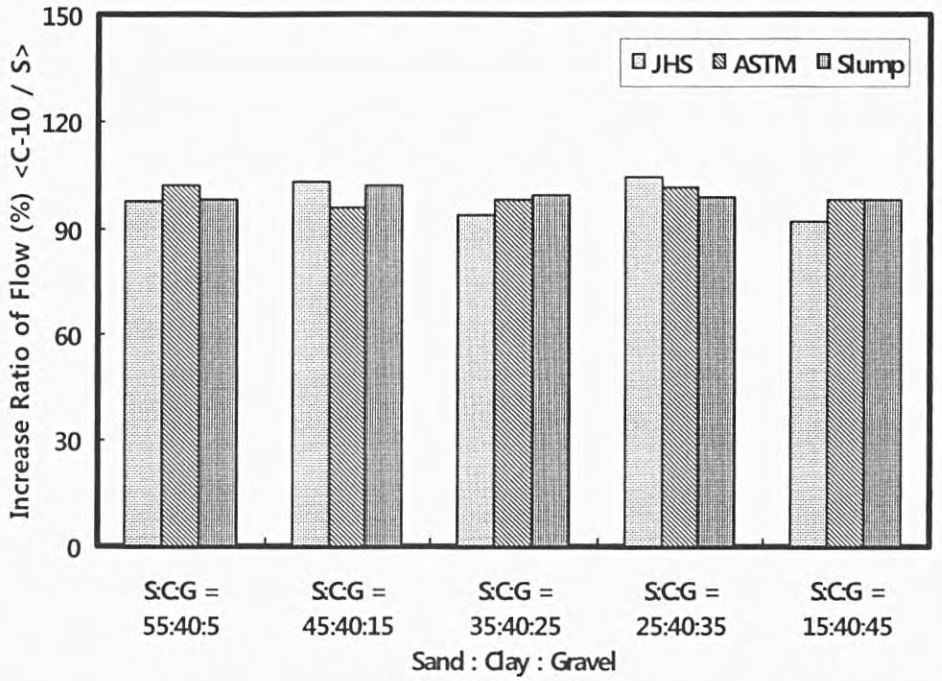


Fig. 3.3.81 Soil=50%, W/C=194.12% 조건의 고화재에 따른 유동성 (C-10/S)

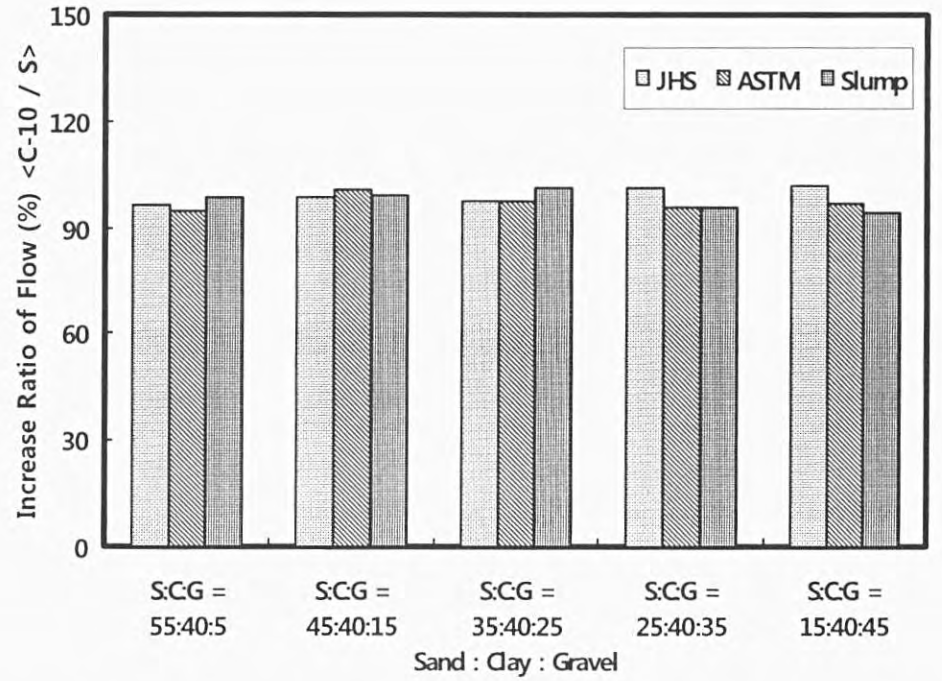


Fig. 3.3.82 Soil=50%, W/C=233.33% 조건의 고화재에 따른 유동성 (C-10/S)

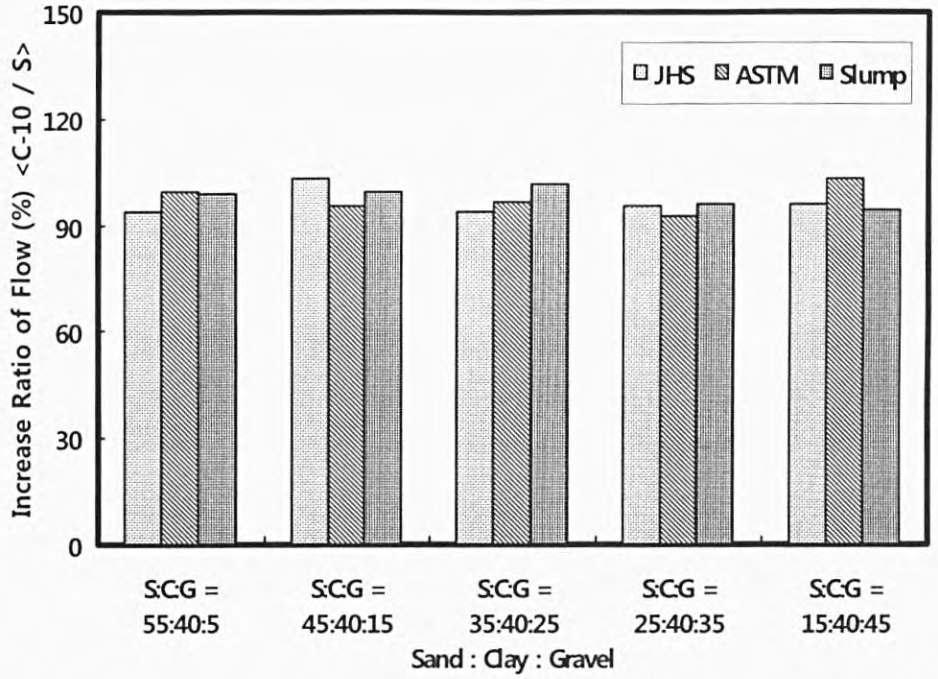


Fig. 3.3.83 Soil=60%, W/C=185.71% 조건의 고화재에 따른 유동성 (C-10/S)

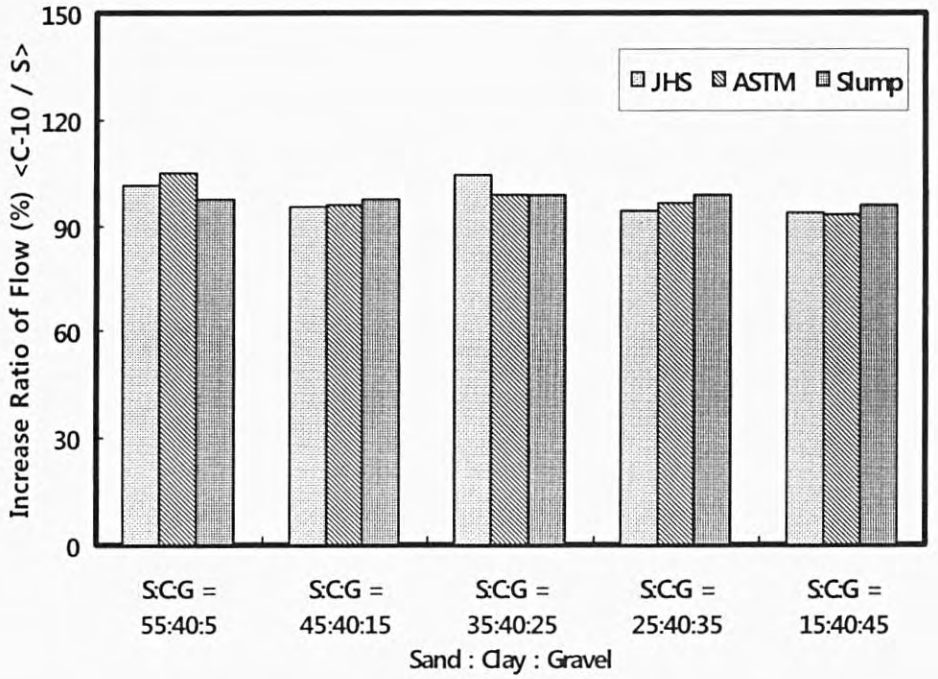


Fig. 3.3.84 Soil=60%, W/C=233.33% 조건의 고화재에 따른 유동성 (C-10/S)

다. 강도특성

(1) 자갈 함유량에 따른 강도특성

(가) Soil=50%, W/C=194.12%

Fig. 3.3.85~Fig. 3.3.88은 Soil=50%, W/C=194.12%의 실험조건일 때, 자갈 함유량에 따른 일축압축강도를 나타냈다. 재령 4시간 일축압축강도는 자갈 함유량이 5%, 15%, 25%인 실험조건에서 측정이 가능했지만, 1kg/cm^2 이하의 낮은 값을 나타냈다. 재령 1일 일축압축강도의 경우, 고화재의 종류에 따른 차이는 매우 미미하였고, 자갈 함유량이 증가할수록 일축압축강도는 점차 감소하는 경향을 나타냈다. 재령 7일 일축압축강도는 C-10 고화재를 사용한 실험의 일축압축강도가 다소 크게 나타났고, 자갈 함유량의 증가에 따른 일축압축강도 감소 경향도 뚜렷하게 나타났다. 재령 28일 일축압축강도의 경우, S 고화재를 사용한 실험의 일축압축강도가 C-10을 사용한 일축압축강도에 비해 모든 실험조건에서 큰 값을 보였다.

Table 3.3.30 강도특성(Soil=50%, W/C=194.12%)

No.	자갈함유량 (%)	고화재 종류	4시간 (kg/cm^2)	1일 (kg/cm^2)	7일 (kg/cm^2)	28일 (kg/cm^2)
T1-C1-a	5	C-10	0.782	2.919	9.143	12.443
T1-C2-a	15		0.894	3.098	6.882	13.451
T1-C3-a	25		0.489	2.551	5.625	9.887
T1-C4-a	35		-	1.623	4.552	6.445
T1-C5-a	45		-	1.194	4.231	6.341
T1-C6-a	5	S	0.654	2.452	9.332	16.775
T1-C7-a	15		0.982	2.776	5.334	14.543
T1-C8-a	25		0.333	2.675	5.129	11.332
T1-C9-a	35		-	1.786	3.645	9.872
T1-C10-a	45		-	0.556	4.123	8.99

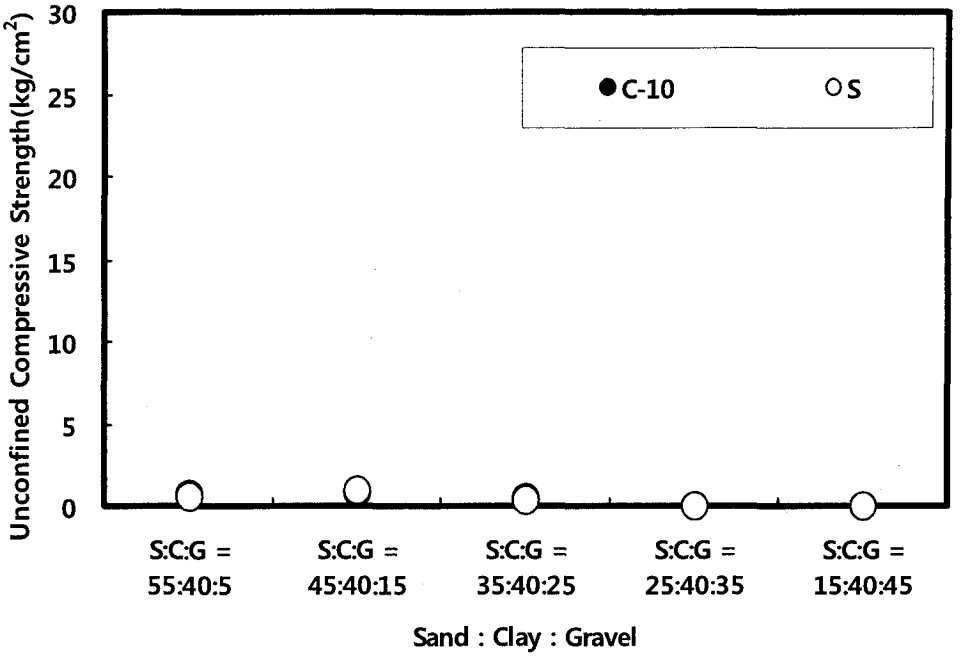


Fig. 3.3.85 재령 4시간 일축압축강도 (Soil=50%, W/C=194.12%)

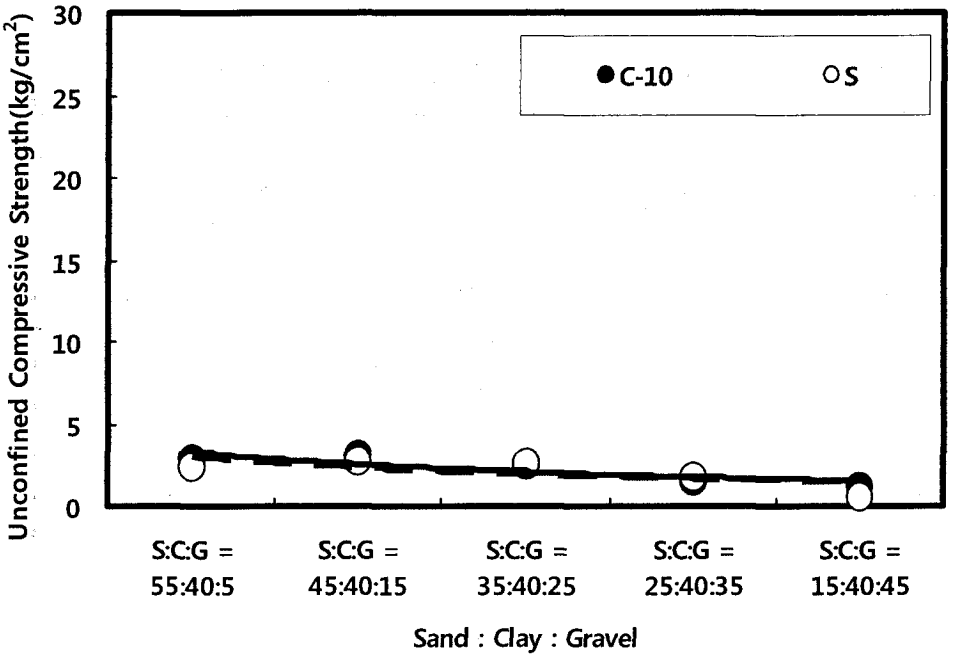


Fig. 3.3.86 재령 1일 일축압축강도 (Soil=50%, W/C=194.12%)

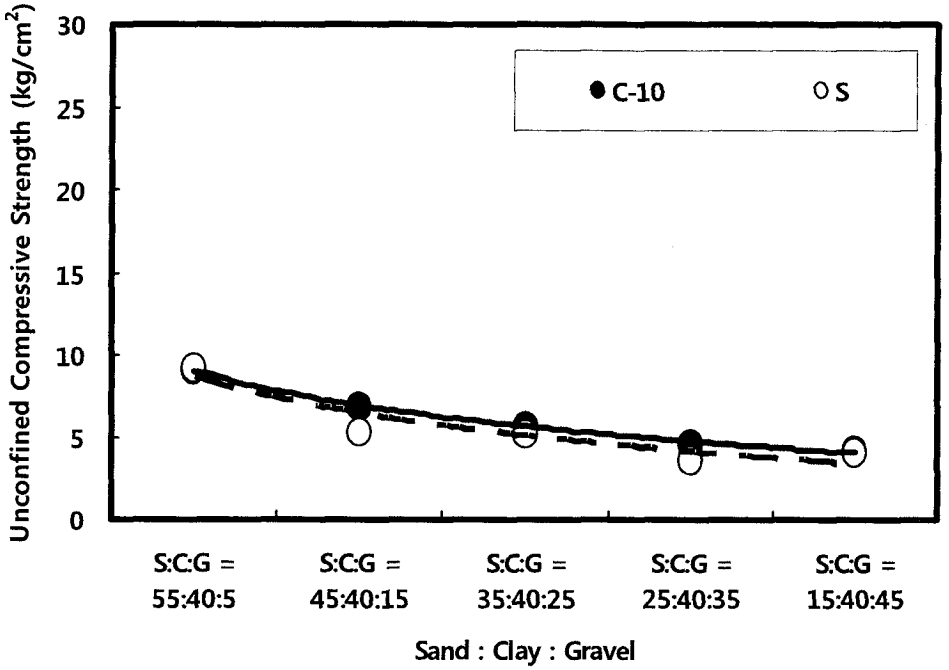


Fig. 3.3.87 재령 7일 일축압축강도 (Soil=50%, W/C=194.12%)

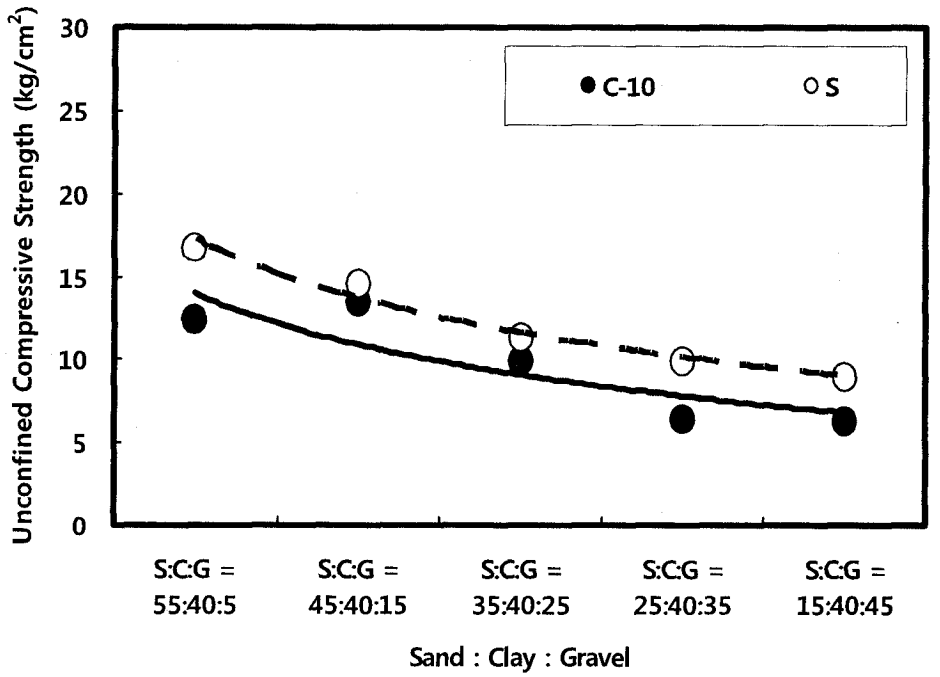


Fig. 3.3.88 재령 28일 일축압축강도 (Soil=50%, W/C=194.12%)

(나) Soil=50%, W/C=233.33%

Fig. 3.3.89~Fig. 3.3.92는 Soil=50%, W/C=233.33%의 실험조건일 때, 자갈 함유량에 따른 일축압축강도를 나타냈다. 재령 4시간 일축압축강도는 자갈 함유량이 5%, 15%, 25%인 실험조건에서만 측정이 가능했고, 35%, 45%의 자갈 함유량일 경우에는 공시체의 자립이 불가능하여 측정할 수 없었다. 재령 1일 일축압축강도의 경우, Soil=50%, W/C=194.12%일 실험 결과와 같이 고화재의 종류에 따른 차이는 매우 미미하였고, 자갈 함유량이 증가할수록 일축압축강도는 점차 감소하는 경향이 나타났다. 재령 7일 일축압축강도는 C-10 고화재를 사용한 경우의 일축압축강도가 S 고화재를 사용한 경우보다 전반적으로 크게 나타났다. 재령 28일 일축압축강도의 경우, 자갈 함유량이 작을수록 일축압축강도가 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

Table 3.3.31 강도특성 결과 (Soil=50%, W/C=233.33%)

No.	자갈함유량 (%)	고화재 종류	4시간 (kg/cm^2)	1일 (kg/cm^2)	7일 (kg/cm^2)	28일 (kg/cm^2)
T1-C1-b	5	C-10	0.982	2.059	6.433	9.084
T1-C2-b	15		0.884	2.887	4.498	11.839
T1-C3-b	25		0.193	2.33	3.452	6.345
T1-C4-b	35		-	1.702	3.823	4.664
T1-C5-b	45		-	1.232	2.225	5.662
T1-C6-b	5	S	0.887	2.121	5.673	13.443
T1-C7-b	15		0.778	2.563	4.563	9.087
T1-C8-b	25		0.232	2.432	2.453	8.432
T1-C9-b	35		-	1.332	2.909	6.542
T1-C10-b	45		-	0.921	1.762	4.346

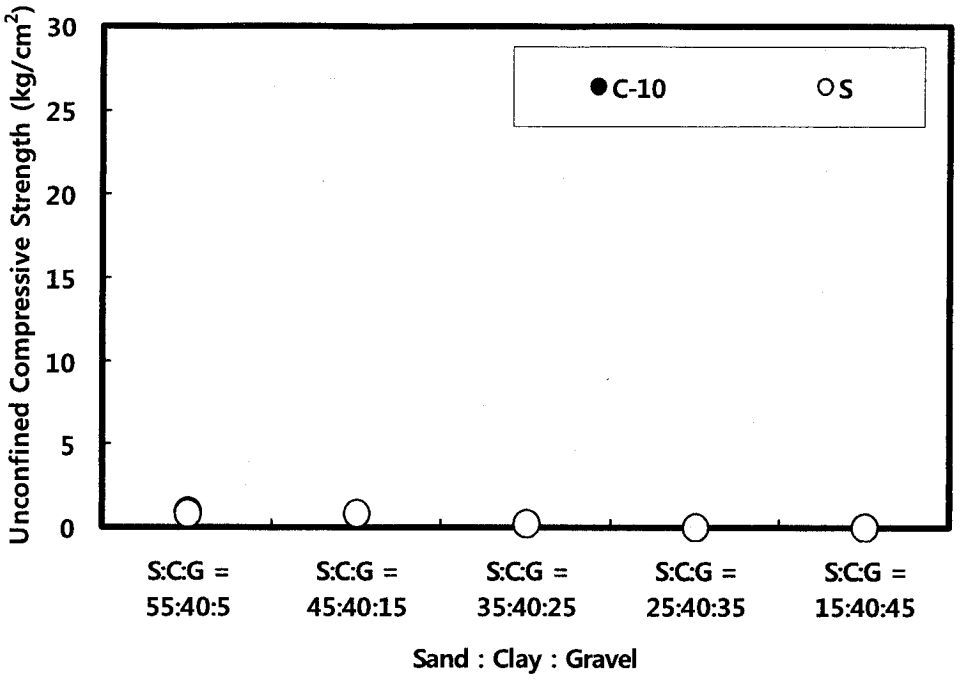


Fig. 3.3.89 재령 4시간 일축압축강도 (Soil=50%, W/C=233.33%)

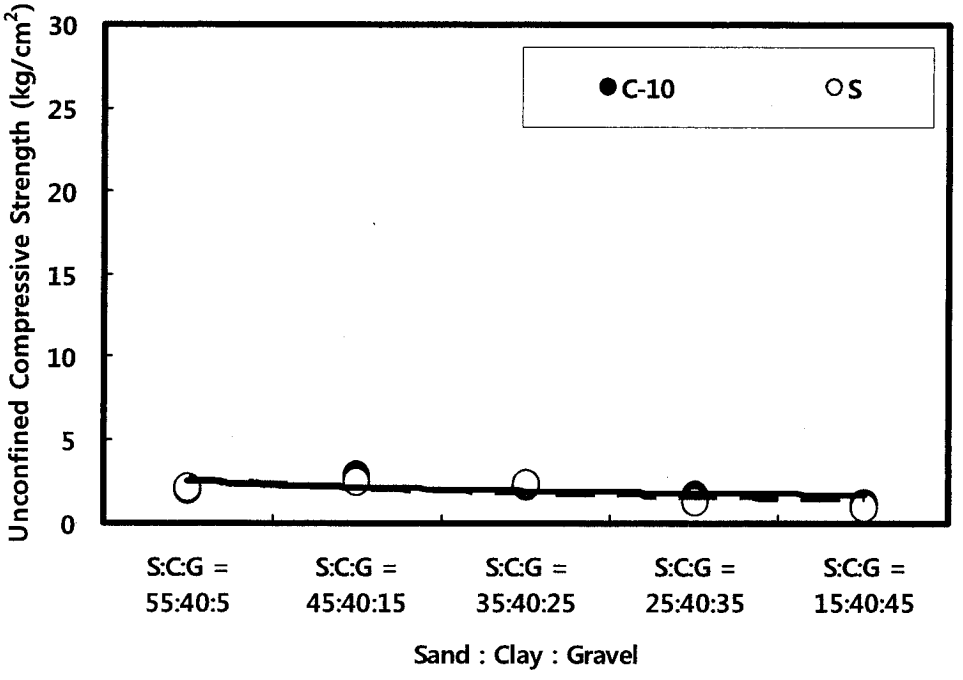


Fig. 3.3.90 재령 1일 일축압축강도 (Soil=50%, W/C=233.33%)

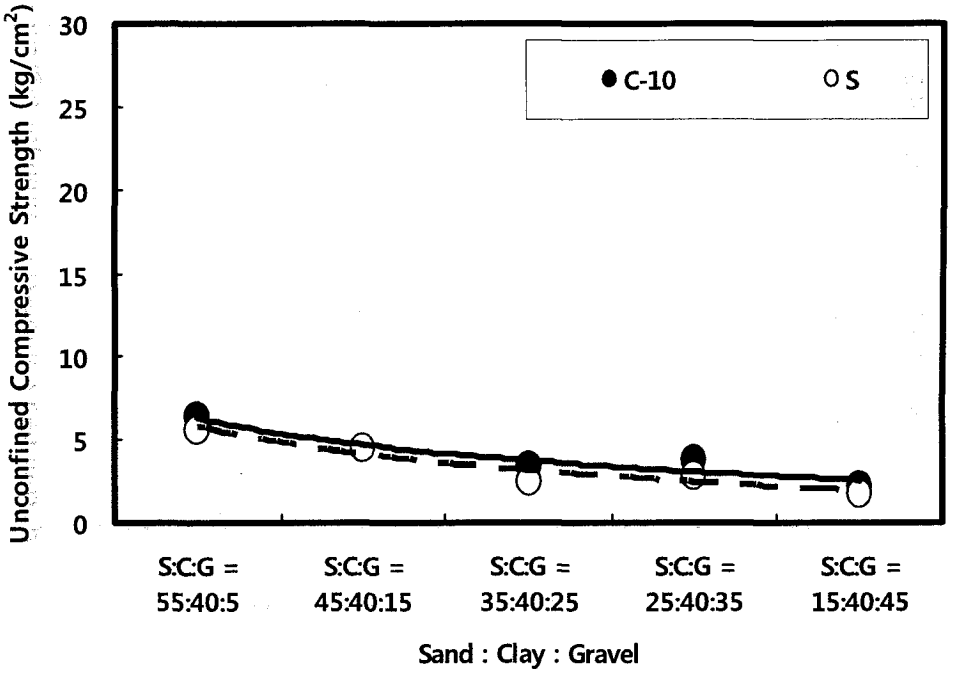


Fig. 3.3.91 재령 7일 일축압축강도 (Soil=50%, W/C=233.33%)

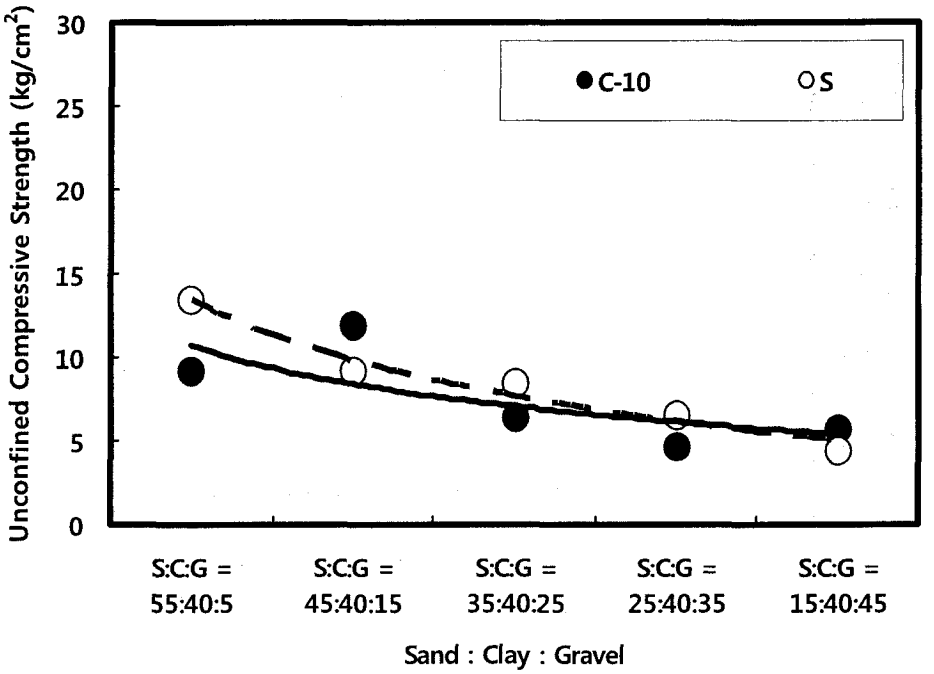


Fig. 3.3.92 재령 28일 일축압축강도 (Soil=50%, W/C=233.33%)

(다) Soil=60%, W/C=185.71%

Fig. 3.3.93~Fig. 3.3.94는 Soil=60%, W/C=185.71%의 실험조건일 때, 자갈 함유량에 따른 일축압축강도를 나타냈다. 재령 4시간 일축압축강도는 공시체가 자립할 수 있었던 자갈 함유량 5%, 15%, 25%의 실험조건에서 측정할 수 있었고, 고화재의 종류에 상관없이 모두 일본의 유동화 처리토 4시간 기준강도인 1.3kg/cm^{2}보다 낮게 나타냈다. 재령 1일 일축압축강도의 경우, 고화재의 종류에 따른 차이는 파악할 수 없었고, 모든 실험조건에서 일축압축강도를 측정할 수 있었다. 자갈 함유량이 45%인 조건을 제외하고 2.0kg/cm^2 이상의 일축압축강도를 나타냈다. 재령 7일 일축압축강도는 C-10 고화재를 사용한 유동화 처리토의 일축압축강도가 전반적으로 다소 크게 나타났고, 자갈 함유량의 증가에 따른 일축압축강도 감소 경향을 확인할 수 있었다. 재령 28일 일축압축강도의 경우, 자갈 함유량이 증가할수록 일축압축강도가 감소하는 것을 알 수 있었다.

Table 3.3.32 강도특성 결과 (Soil=60%, W/C=185.71%)

No.	자갈함유량 (%)	고화재 종류	4시간 (kg/cm^2)	1일 (kg/cm^2)	7일 (kg/cm^2)	28일 (kg/cm^2)
T1-C1-c	5	C-10	1.133	3.494	12.79	14.774
T1-C2-c	15		0.982	3.562	8.542	16.987
T1-C3-c	25		0.887	2.988	7.656	9.888
T1-C4-c	35		-	2.14	5.667	6.994
T1-C5-c	45		-	1.387	4.621	5.231
T1-C6-c	5	S	1.232	2.982	10.452	22.453
T1-C7-c	15		0.832	3.435	8.126	14.339
T1-C8-c	25		0.679	3.102	6.545	14.324
T1-C9-c	35		-	2.093	4.656	9.887
T1-C10-c	45		-	0.875	3.098	6.943

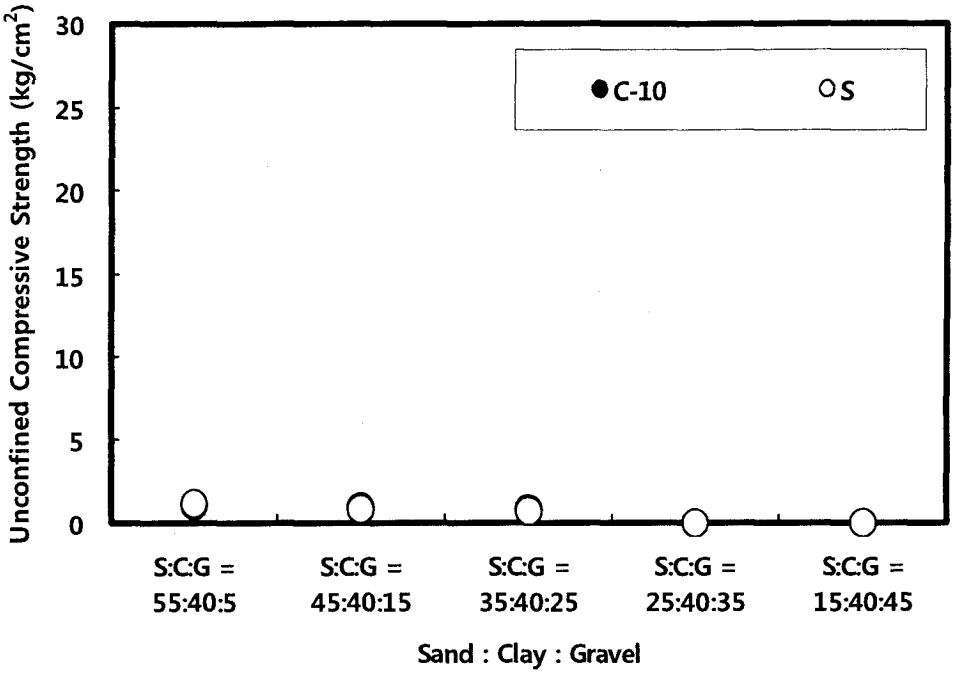


Fig. 3.3.93 재령 4시간 일축압축강도 (Soil=60%, W/C=185.71%)

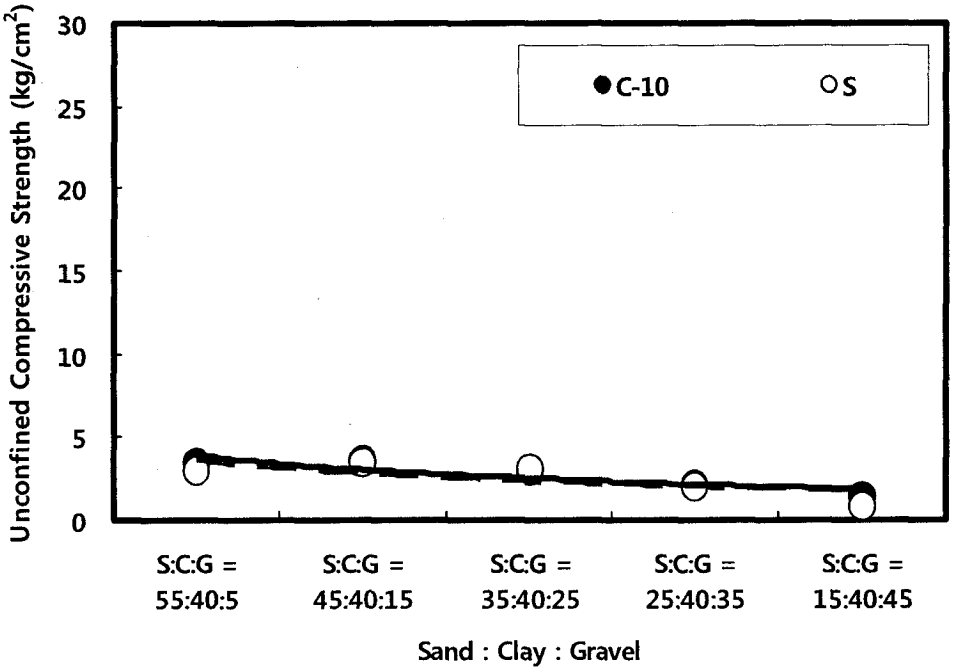


Fig. 3.3.94 재령 1일 일축압축강도 (Soil=60%, W/C=185.71%)

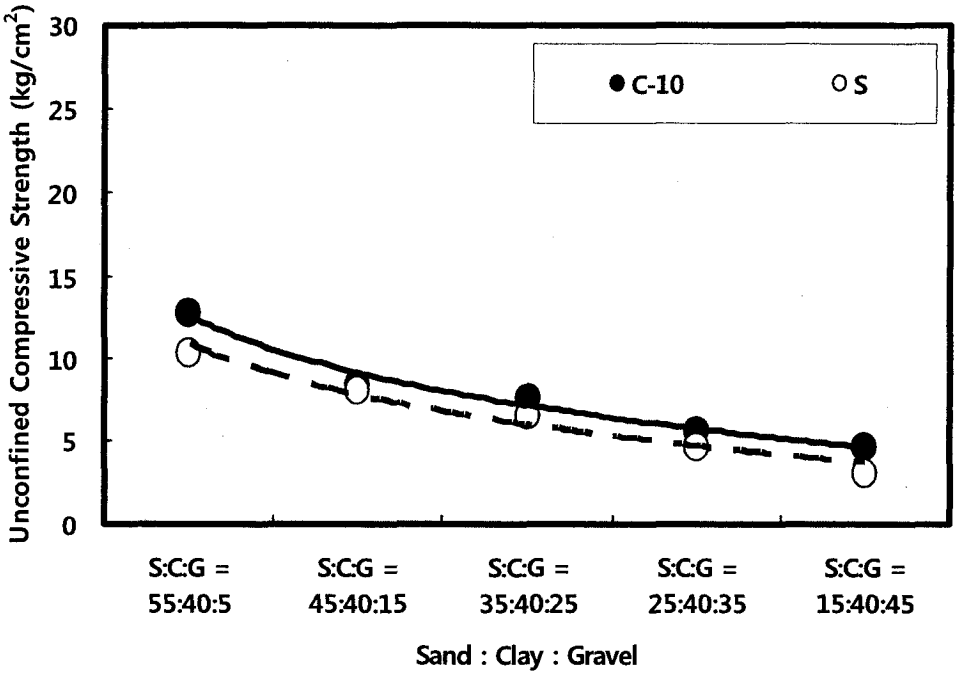


Fig. 3.3.95 재령 7일 일축압축강도 (Soil=60%, W/C=185.71%)

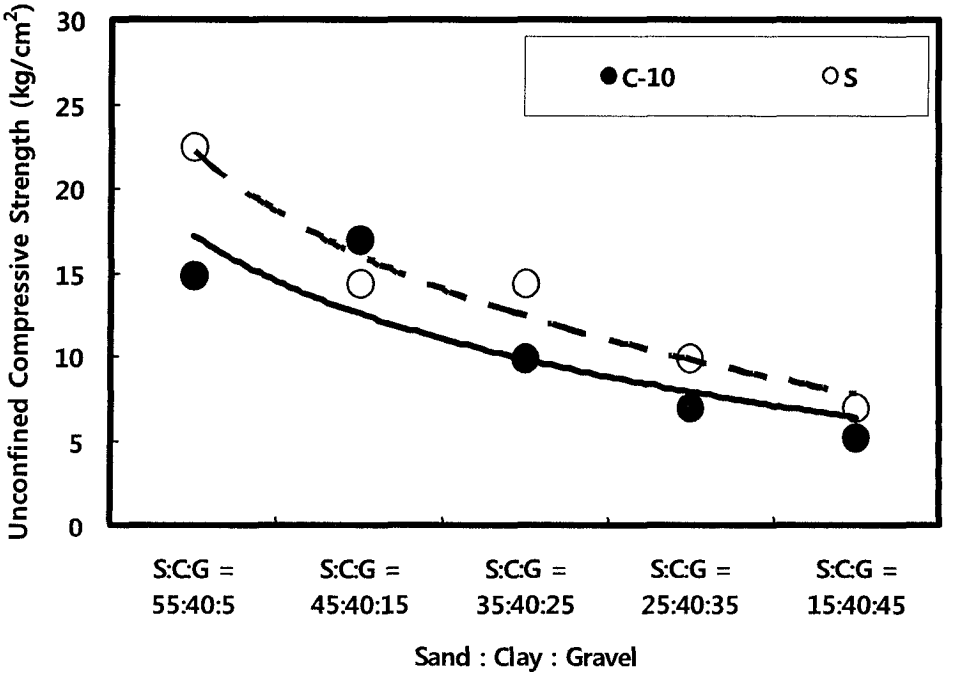


Fig. 3.3.96 재령 28일 일축압축강도 (Soil=60%, W/C=185.71%)

(라) Soil=60%, W/C=233.33%

Fig. 3.397~Fig. 3.3.100은 Soil=60%, W/C=233.33%의 실험조건일 때, 자갈 함유량에 따른 일축압축강도를 나타냈다. 재령 4시간 일축압축강도는 자갈 함유량이 5%, 15%, 25%인 실험조건에서 측정이 가능할 수 있었지만, 일본의 유동화 처리토 4시간 기준강도인 1.3kg/cm^2 이상의 일축압축강도를 모두 만족하지 못했다. 재령 1일 일축압축강도의 경우, 모든 실험조건에서 0.5kg/cm^2~2.8kg/cm^{2}의 일축압축강도를 나타냈다. 재령 7일 일축압축강도는 모든 실험조건에서 C-10 고화재를 사용한 유동화 처리토의 일축압축강도가 0.8kg/cm^2 이상 크게 나타났고, 자갈 함유량의 증가에 따른 일축압축강도 감소 경향도 확인할 수 있었다. 재령 28일 일축압축강도의 경우, S 고화재를 사용한 유동화 처리토의 일축압축강도가 크게 나타났고, 이러한 현상은 자갈의 함유량이 낮은 실험조건에서 뚜렷하게 나타났다.

Table 3.3.33 강도특성 결과 (Soil=60%, W/C=233.33%)

No.	자갈함유량 (%)	고화재 종류	4시간 (kg/cm^2)	1일 (kg/cm^2)	7일 (kg/cm^2)	28일 (kg/cm^2)
T1-C1-d	5	C-10	1.092	2.396	8.227	12.632
T1-C2-d	15		0.772	2.443	5.762	13.224
T1-C3-d	25		0.506	2.299	4.562	8.231
T1-C4-d	35		-	1.734	4.665	5.768
T1-C5-d	45		-	1.166	3.012	4.009
T1-C6-d	5	S	1.223	2.542	6.776	22.542
T1-C7-d	15		0.782	2.776	4.002	12.31
T1-C8-d	25		0.342	2.332	3.455	11.32
T1-C9-d	35		-	1.443	3.003	8.443
T1-C10-d	45		-	0.452	2.237	5.032

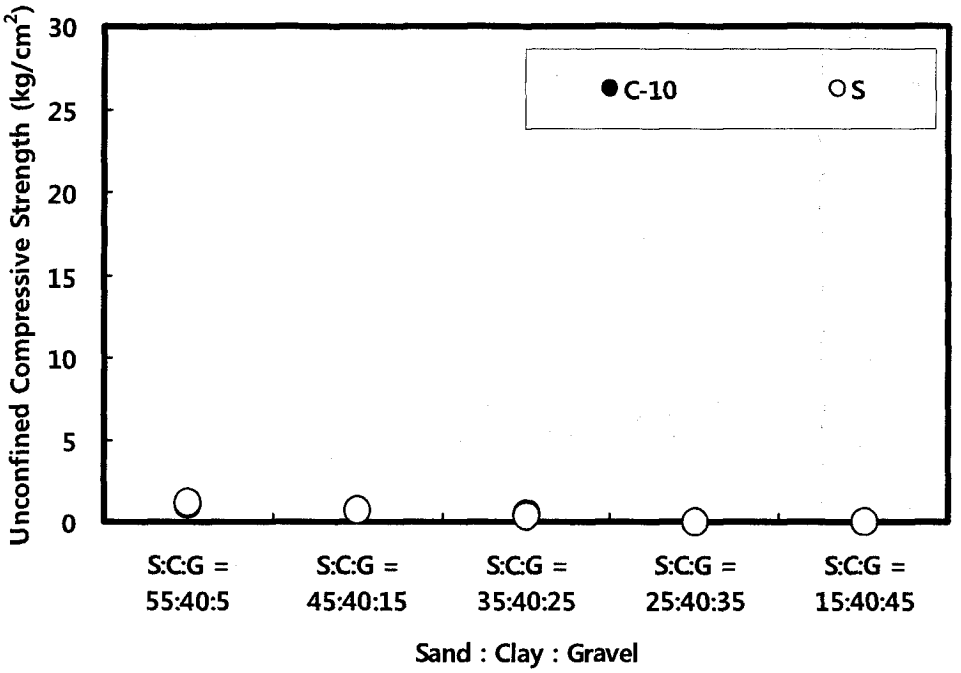


Fig. 3.3.97 재령 4시간 일축압축강도 (Soil=60%, W/C=233.33%)

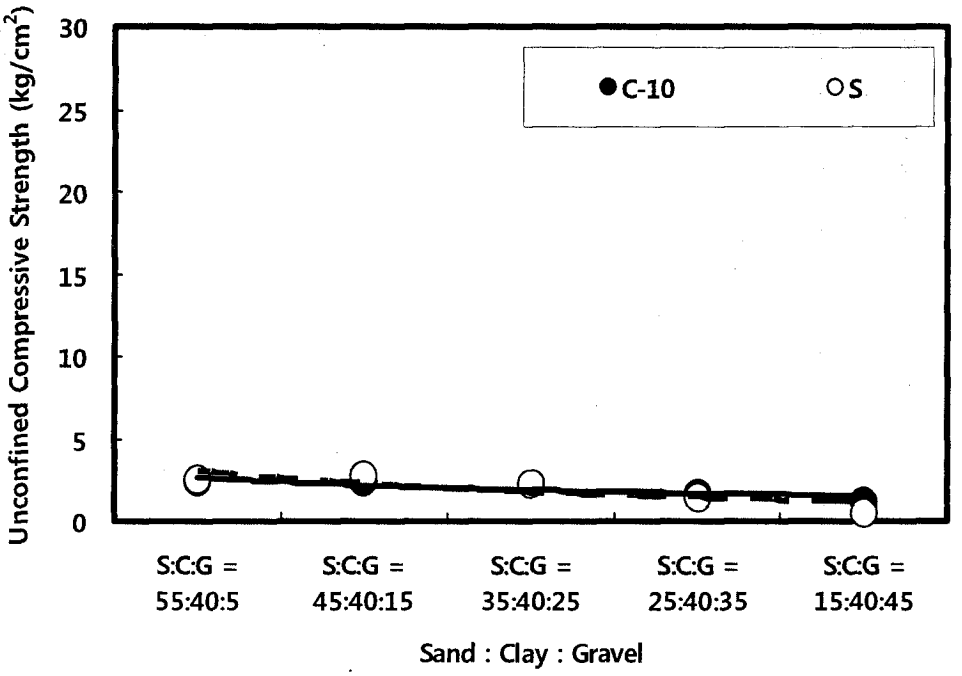


Fig. 3.3.98 재령 1일 일축압축강도 (Soil=60%, W/C=233.33%)

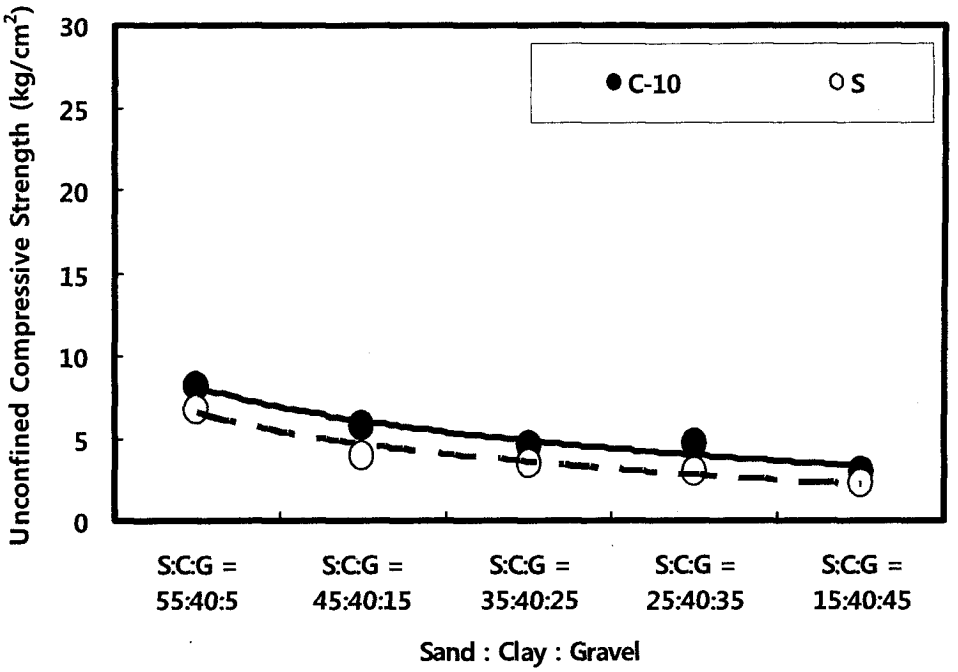


Fig. 3.3.99 재령 7일 일축압축강도 (Soil=60%, W/C=233.33%)

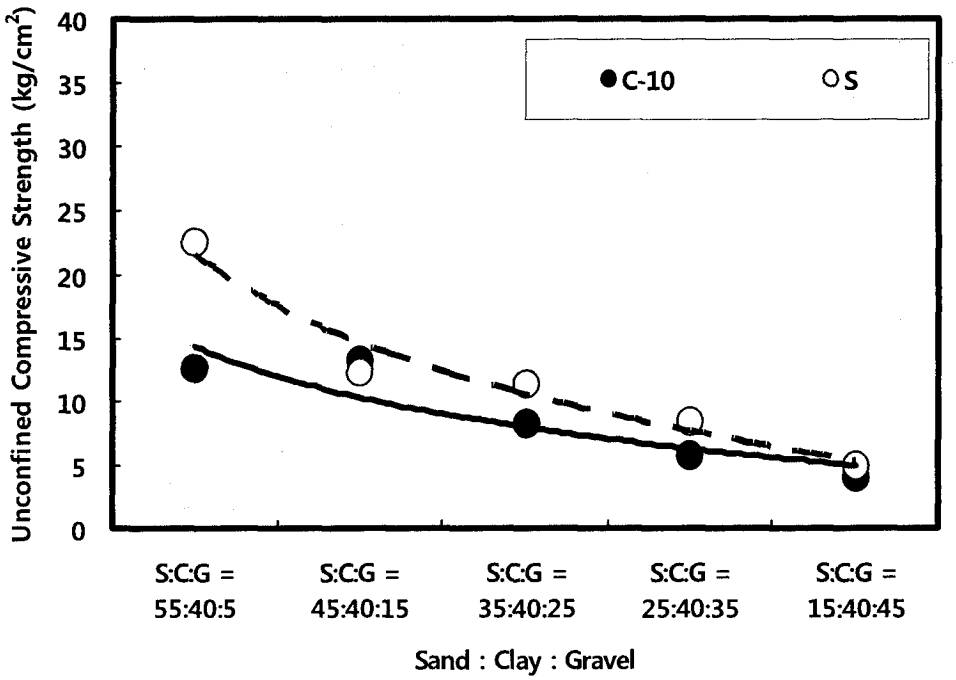


Fig. 3.3.100 재령 28일 일축압축강도 (Soil=60%, W/C=233.33%)

(2) 시료비율과 배합비에 따른 강도특성

(가) Soil=50%, W/C=194.12%

Fig. 3.3.101은 Soil=50%, W/C=194.12%일 때의 C-10 고화재를 사용하여 제조한 유동화 처리토의 양생시간에 따른 일축압축강도를 나타낸 결과이다. 자갈 비율이 35%이상에서는 양생 4시간 후 자립이 불가능하여 재령 4시간 일축압축강도의 측정이 불가능하였다. 양생시간의 경과에 따라 일축압축강도는 증가하였고, 자갈 함유량에 따라 재령 28일 강도는 차이를 보였다.

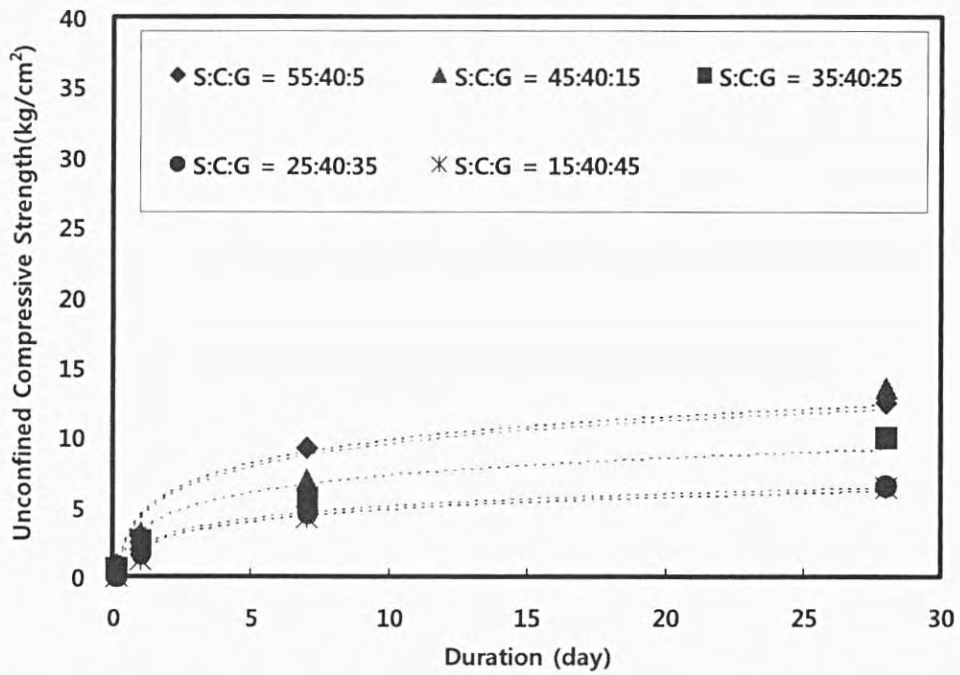


Fig. 3.3.101 Soil=50%, W/C=194.12% 조건의 양생기간에 따른 일축압축강도(C-10)

Fig. 3.3.102는 Soil=50%, W/C=194.12%일 때의 S 고화재를 사용하여 제조한 유동화 처리토의 양생시간에 따른 일축압축강도를 나타낸 결과이다. 재령 4시간 일축압축강도는 자갈 함유량이 25% 이하인 실험조건에서만 측정이 가능하였다. 자갈 함유량이 5%에서 재령 28일 일축압축강도가 가장 크게 나타났고, 자갈 함유량이 감소할수록 재령 28일 일축압축강도가 점차 감소하는 것을 알 수 있었다.

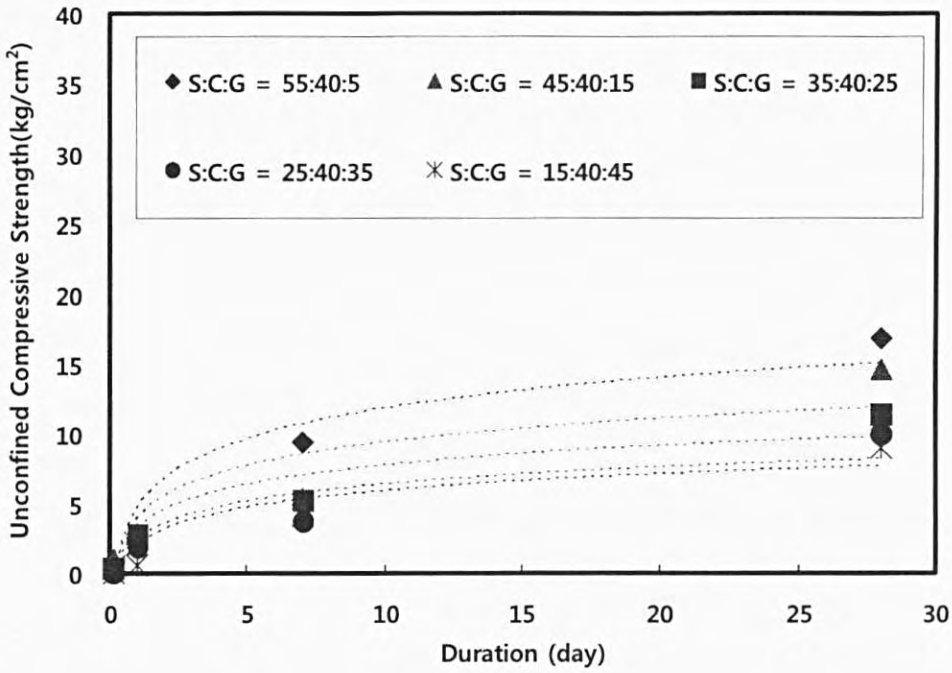


Fig. 3.3.102 Soil=50%, W/C=194.12% 양생기간에 따른 일축압축강도(S)

(나) Soil=50%, W/C=233.33%

Fig. 3.3.103은 Soil=50%, W/C=233.33%일 때의 C-10 고화재를 사용하여 제조한 유동화 처리토의 양생시간에 따른 일축압축강도를 나타낸 결과이다. 양생 4시간 후 자갈 함유량이 35%이상인 실험 조건에서는 공시체가 자립이 되지 못하여 재령 4시간 일축압축강도를 측정할 수 없었다. 양생시간의 경과에 따라 일축압축강도는 증가하는 경향을 나타냈고, 자갈 함유량이 낮은 5%, 15%의 실험 조건에서 장기강도가 크게 발현되었다.

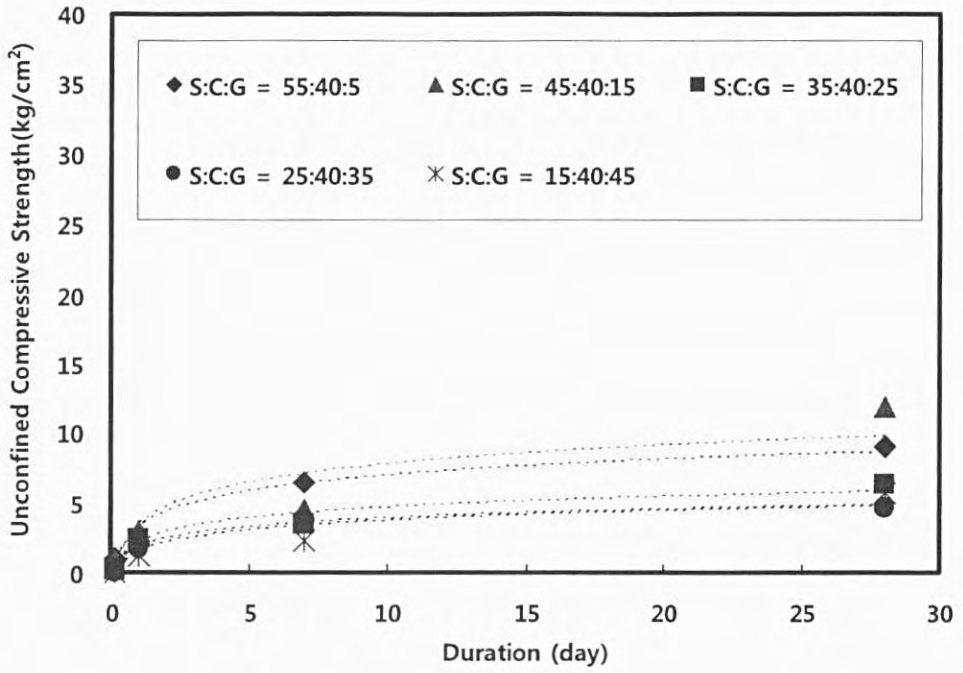


Fig. 3.3.103 Soil=50%, W/C=233.33% 조건의 양생기간에 따른 일축압축강도(C-10)

Fig. 3.3.104는 Soil=50%, W/C=233.33%일 때의 S 고화재를 사용한 유동화 처리토의 양생시간에 따른 일축압축강도를 나타낸 결과이다. 양생 4시간 후 자립이 가능한 자갈 함유량 25% 이하의 공시체에서만 재령 4시간 일축압축강도를 측정하였다. 일축압축강도는 양생시간이 경과함에 따라 증가하였고, 자갈 함유량이 가장 낮은 5%의 자갈 함유량에서 가장 큰 강도를 나타냈다.

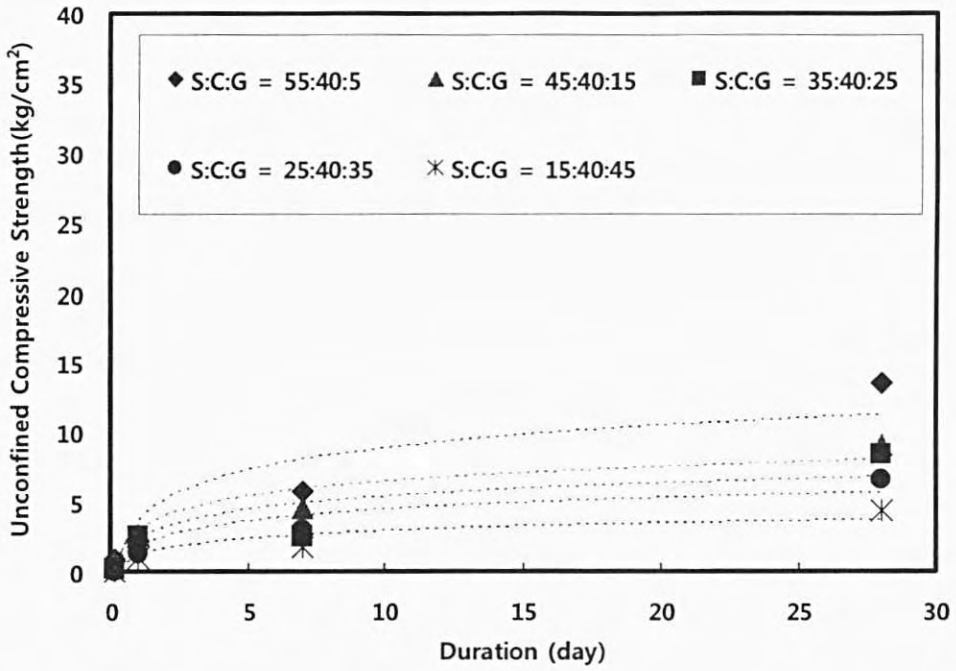


Fig. 3.3.104 Soil=50%, W/C=233.33% 조건의 양생기간에 따른 일축압축강도(S)

(다) Soil=60%, W/C=185.71%

Fig. 3.3.105에 Soil=60%, W/C=185.71%일 때의 C-10 고화재를 사용하여 제조한 유동화 처리토의 양생시간에 따른 일축압축강도 결과를 나타냈다. 재령 4시간 강도는 양생 4시간 후 자립이 되었던 자갈 함유량 25% 이하의 실험 조건에서만 측정 가능하였다. 일축압축강도는 양생시간이 증가할수록 증가하는 결과를 보였고, 자갈 함유량이 작은 경우 더 큰 강도값을 나타냈다.

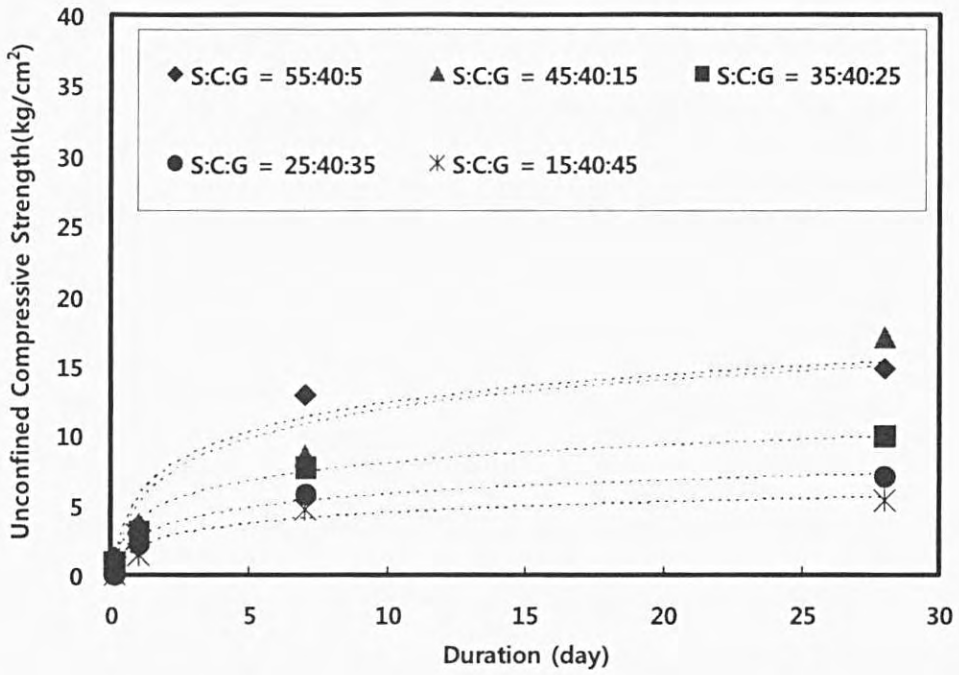


Fig. 3.3.105 Soil=60%, W/C=185.71% 조건의 양생기간에 따른 일축압축강도(C-10)

Fig. 3.3.106은 Soil=60%, W/C=185.71%일 때의 S 고화재를 사용한 유동화 처리토의 양생시간에 따른 일축압축강도를 나타낸 결과이다. 자갈 함유량이 증가할수록 조기강도의 발현이 크지 않았고, 양생 4시간 후 자갈 함유량 25% 이하의 실험조건만 공시체의 자립이 가능하였다. 자갈 함유량이 5%인 경우의 재령 28일 일축압축강도는 20kg/cm^2 이상의 높은 강도를 나타냈다. 양생시간이 경과함에 따라 일축압축강도는 증가하는 경향을 나타냈다.

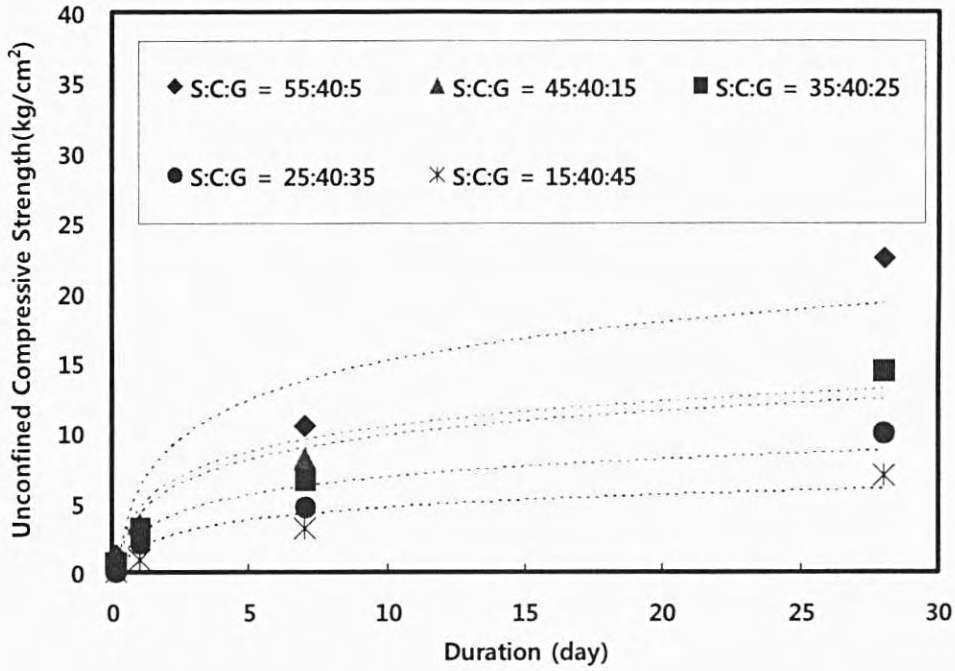


Fig. 3.3.106 Soil=60%, W/C=185.71% 조건의 양생기간에 따른 일축압축강도(S)

(라) Soil=60%, W/C=233.33%

Fig. 3.3.107에 Soil=60%, W/C=233.33%일 때의 C-10 고화재를 사용하여 제조한 유동화 처리토의 양생시간에 따른 일축압축강도 결과를 나타냈다. 자갈 함유량 25% 이하의 실험 조건에서만 재령 4시간 일축압축강도의 측정이 가능하였고, 재령 1일의 목표 강도 기준을 만족하는 경우에는 재령 28일의 목표 강도 기준을 만족하지 못하는 결과를 보였다.

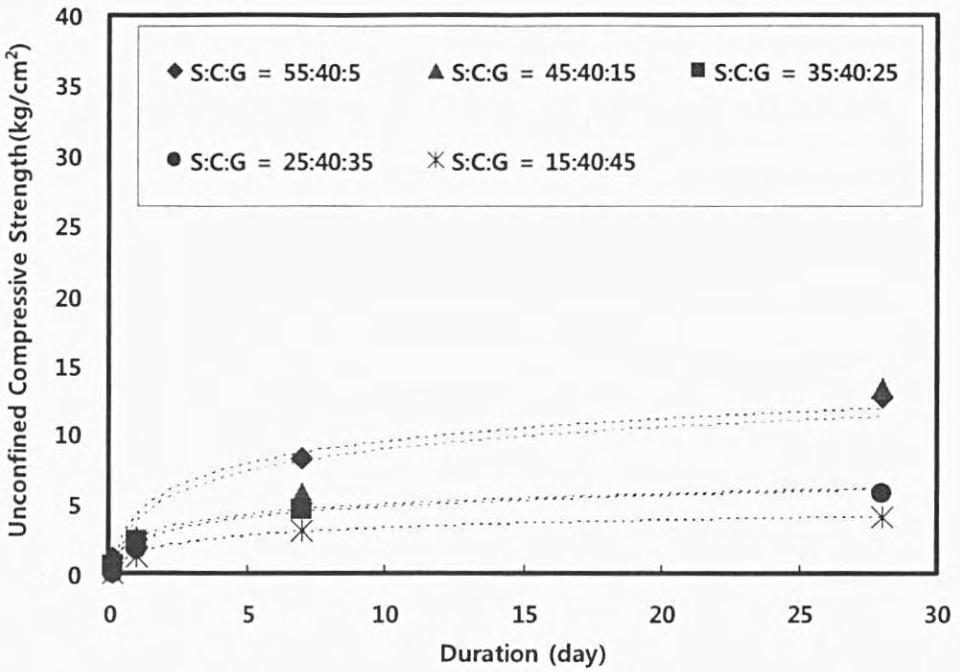


Fig. 3.3.107 Soil=60%, W/C=233.33% 조건의 양생기간에 따른 일축압축강도(C-10)

Fig. 3.3.108은 Soil=60%, W/C=233.33%일 때의 S 고화재를 사용한 유동화 처리토의 양생시간에 따른 일축압축강도를 나타낸 결과이다. 자갈 함유량이 35%, 45%인 실험조건은 조기강도 기준을 만족하지 못하였고, 자갈 함유량이 5%, 15%, 25%인 실험조건에서는 장기강도 기준을 만족하지 못하였다.

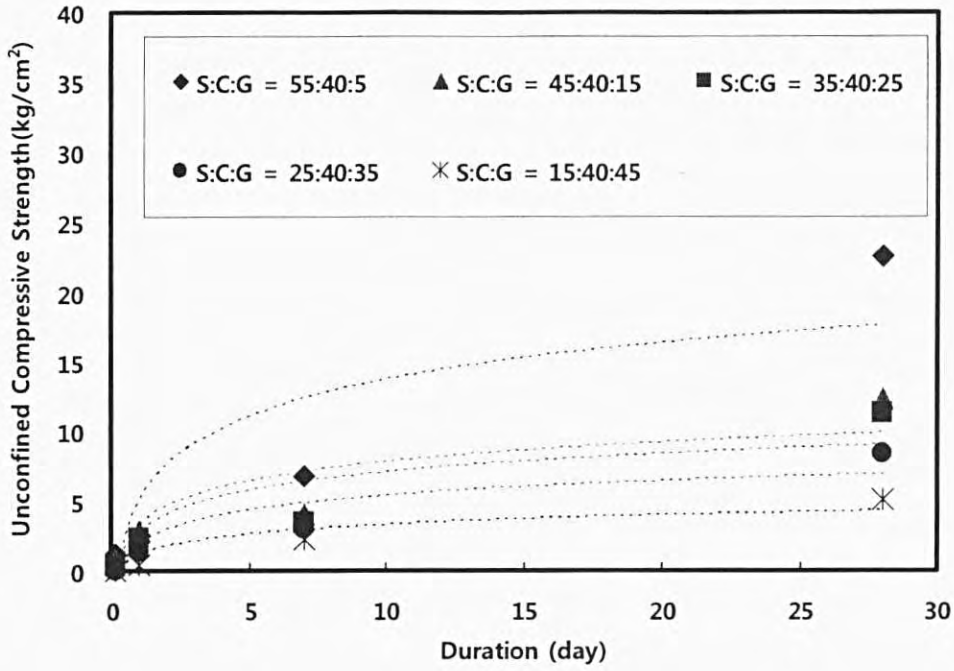


Fig. 3.3.108 Soil=60%, W/C=233.33% 조건의 양생기간에 따른 일축압축강도(S)

(3) 고화재의 종류에 따른 강도특성

Fig. 3.3.109~Fig. 3.3.112에 실험에 사용된 고화재의 종류에 따른 강도특성을 평가하기 위해 C-10 고화재를 사용하였을 때의 재령 1일과 재령 28일의 일축압축강도를 S 고화재를 사용하였을 때의 각각의 재령 1일과 재령 28일의 일축압축강도로 정규화하여 나타냈다.

Soil=50%, W/C=194.12% 조건의 경우, 재령 1일 일축압축강도 증가율은 100% 이상으로 C-10 고화재를 사용한 경우가 더 크게 나타났고, 재령 28일 일축압축강도 증가율은 100% 이하로 S 고화재를 사용한 경우가 더 크게 나타났다.

Soil=50%, W/C=233.33% 조건의 경우, 재령 1일의 일축압축강도 증가율은 95%~133%의 값을 나타냈으며, 이를 통해 C-10 고화재와 S 고화재에 의한 강도특성의 차이는 크지 않다는 것을 알 수 있었다. 하지만 재령 28일의 일축압축강도 증가율은 전반적은 100% 이하로 S 고화재를 사용하여 제조한 유동화 처리토의 일축압축강도가 더 크게 나타났다.

Soil=60%, W/C=185.71% 조건의 경우, 재령 1일의 일축압축강도 증가율은 96%~

158%로 C-10 고화재를 사용한 경우 일축압축강도가 비교적 크게 나타났지만, 재령 28일 일축압축강도 증가율은 65%~118%로 S 고화재를 사용한 경우가 더 크게 나타났다.

Soil=60%, W/C=233.33% 조건의 경우도 재령 1일 일축압축강도는 C-10 고화재를 사용한 경우가 S 고화재를 사용한 경우보다 비슷하거나 큰 일축압축강도를 나타내는 것을 파악할 수 있었고, 재령 28일 일축압축강도는 S 고화재를 사용했을 경우 강도발현이 크다는 것을 알 수 있었다.

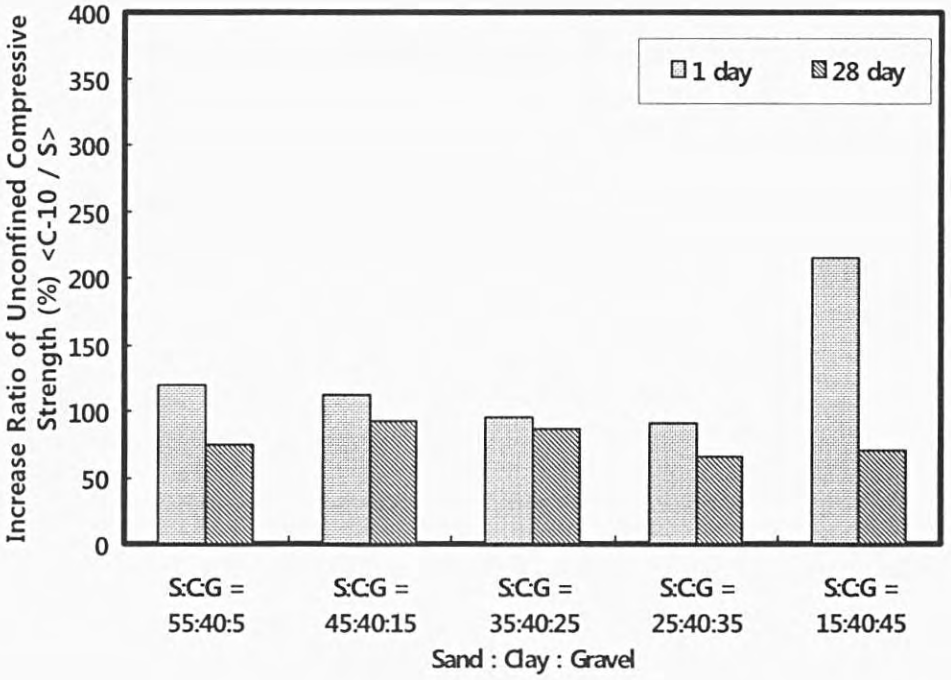


Fig. 3.3.109 Soil=50%, W/C=194.12% 조건의 고화재에 따른 강도특성 (C-10/S)

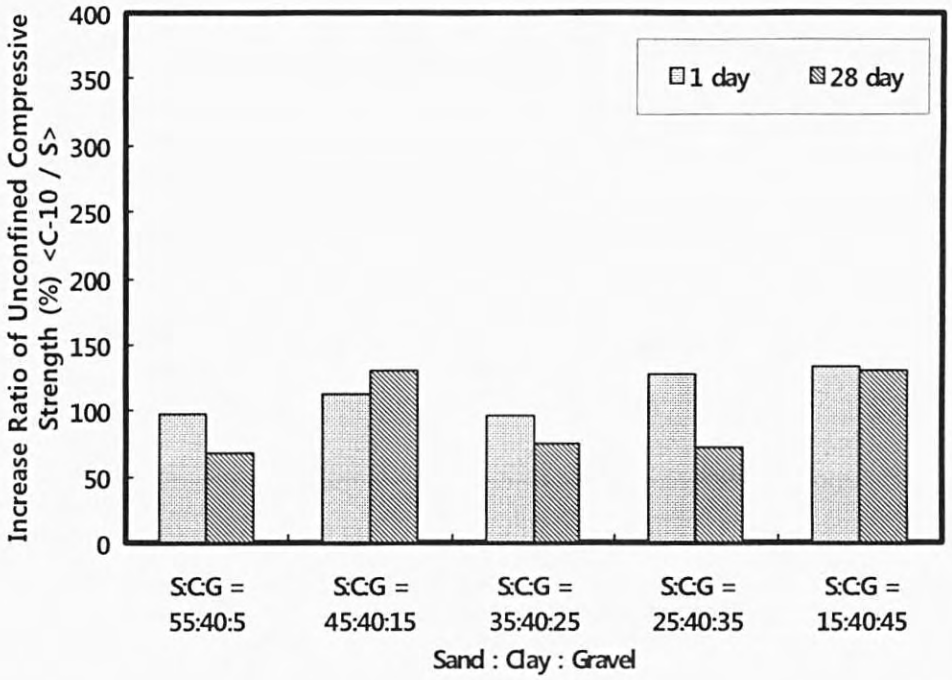


Fig. 3.3.110 Soil=50%, W/C=233.33% 조건의 고화재에 따른 강도특성 (C-10/S)

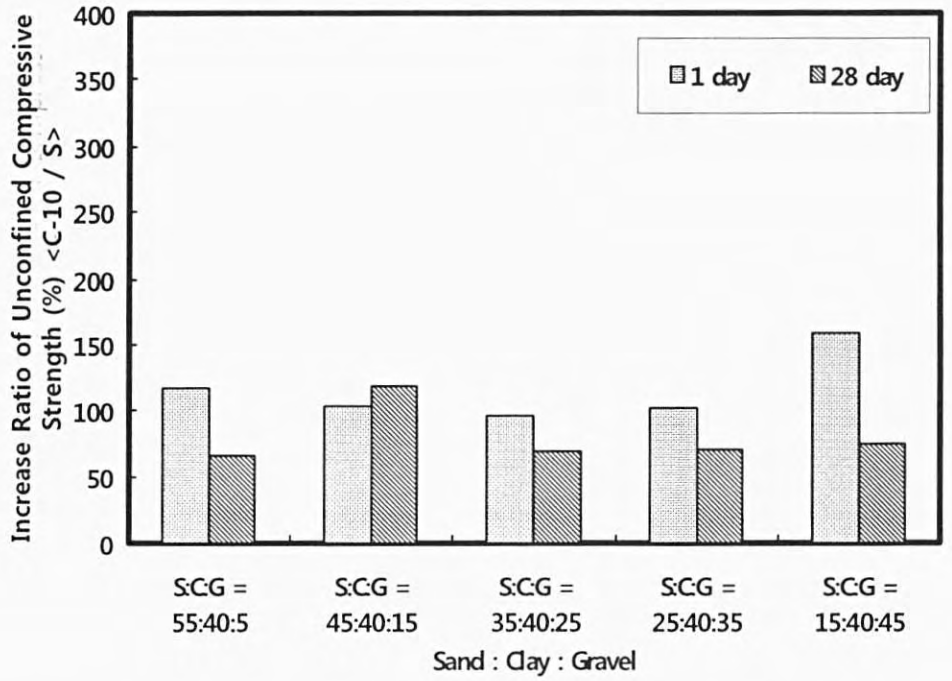


Fig. 3.3.111 Soil=60%, W/C=185.71% 조건의 고화재에 따른 강도특성 (C-10/S)

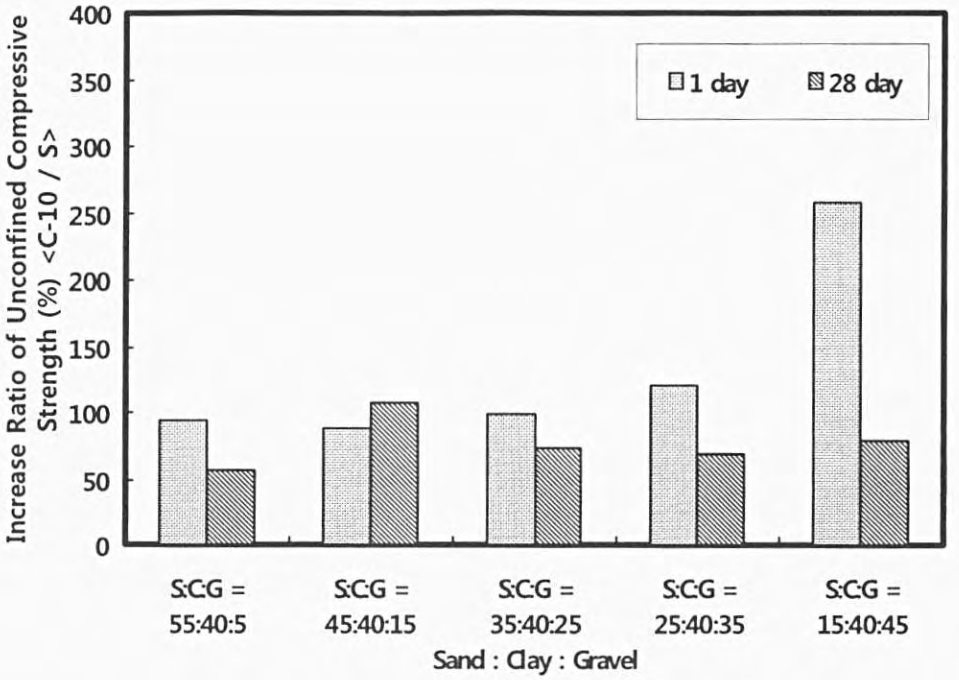


Fig. 3.3.112 Soil=60%, W/C=233.33% 조건의 고화재에 따른 강도특성 (C-10/S)

라. 투수특성

C-10 고화재 및 S 고화재를 대상으로 변수위 투수실험을 한 결과를 Table 3.3.34에 제시하였고, Fig. 3.3.113과 Fig. 3.3.114에 각각 나타냈다. 투수계수는 자갈 함유량이 증가하거나 W/C에 상관없이 3.19×10^{-6}~4.85×10^{-6}cm/sec의 범위를 나타내었으며, 일반적인 유동화 처리토의 투수계수 10^{-6}~10^{-7}cm/sec의 범위에도 적합한 결과를 보였다. 이를 통해, 자갈 함유량이 유동화 처리토 투수특성의 영향인자가 아니라는 것을 파악할 수 있었다.

Table 3.3.34 자갈 함유량에 따른 유동화 처리토의 변수위 투수계수(cm/sec)

No.		투수계수	No.		투수계수	No.		투수계수	No.		투수계수	No.		투수계수
T1 -C1	a	3.45×10^{-6}	T1 -C3	a	3.57×10^{-6}	T1 -C5	a	3.91×10^{-6}	T1 -C7	a	3.98×10^{-6}	T1 -C9	a	4.00×10^{-6}
	b	4.46×10^{-6}		b	3.36×10^{-6}		b	4.56×10^{-6}		b	3.67×10^{-6}		b	4.98×10^{-6}
	c	4.35×10^{-6}		c	4.85×10^{-6}		c	4.65×10^{-6}		c	3.19×10^{-6}		c	3.88×10^{-6}
	d	4.57×10^{-6}		d	4.15×10^{-6}		d	4.18×10^{-6}		d	3.43×10^{-6}		d	4.15×10^{-6}
T1 -C2	a	4.46×10^{-6}	T1 -C4	a	4.22×10^{-6}	T1 -C6	a	4.57×10^{-6}	T1 -C8	a	4.97×10^{-6}	T1 -C10	a	4.54×10^{-6}
	b	4.69×10^{-6}		b	4.10×10^{-6}		b	3.67×10^{-6}		b	4.18×10^{-6}		b	3.35×10^{-6}
	c	4.78×10^{-6}		c	4.67×10^{-6}		c	4.10×10^{-6}		c	3.35×10^{-6}		c	3.67×10^{-6}
	d	3.35×10^{-6}		d	3.45×10^{-6}		d	4.20×10^{-6}		d	3.91×10^{-6}		d	4.21×10^{-6}

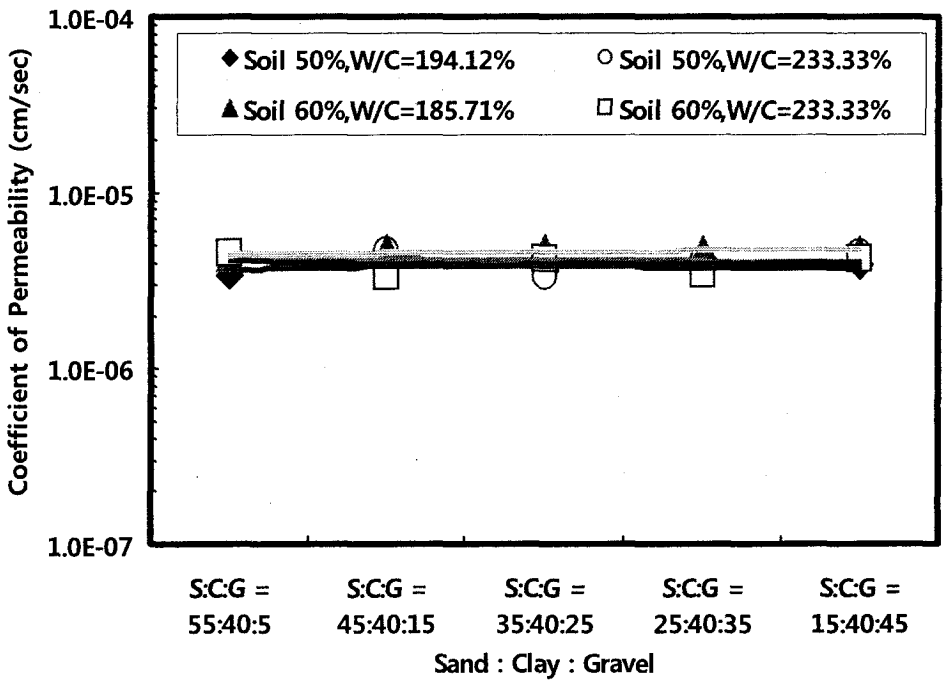


Fig. 3.3.113 자갈 함유량에 따른 변수위 투수계수 (C-10)

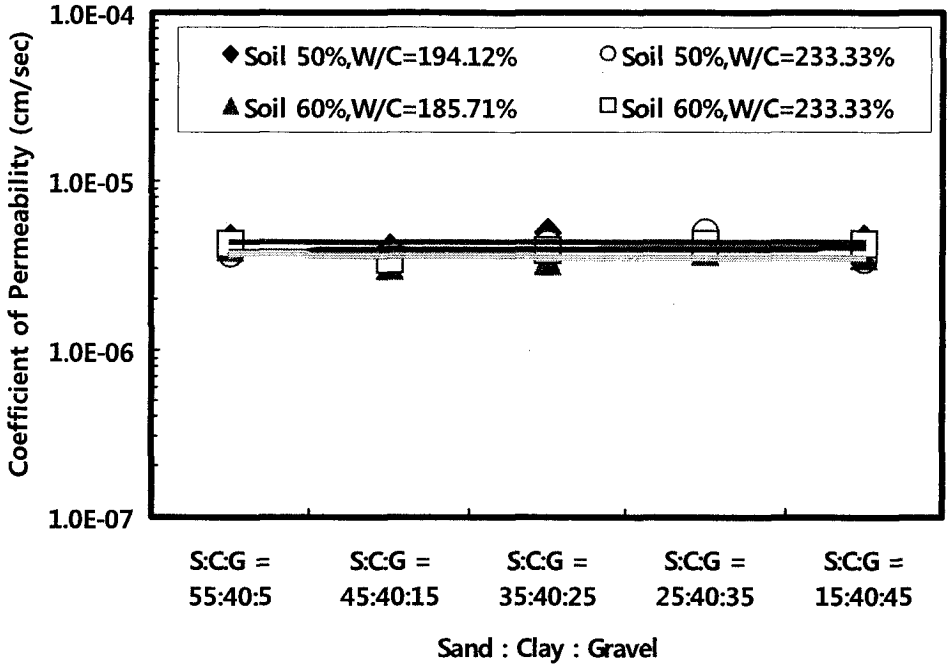


Fig. 3.3.114 자갈 함유량에 따른 변수위 투수계수 (S)

5. 유기질 함유량에 따른 유동화 처리토의 배합 특성

가. 재료분리 특성

유기물 함유량에 따른 재료분리 특성을 파악하고자 블리딩율을 측정하였고, 그 결과를 Table 3.3.35에 제시하였다. 유기물 함유량이 10% 이하인 실험조건에서는 시료의 비율, W/C의 영향, 고화재의 종류에 상관없이 블리딩율은 목표 기준인 1% 이하를 만족하였다. 유기물 함유량이 증가함에 따라 블리딩율이 증가하는 것을 파악할 수 있었다. 이러한 현상은 C-10과 S 고화재 모두에서 동일하게 나타났다. 그러므로 유기물 함유량이 유동화 처리토의 재료분리 특성에 영향을 미친다는 것을 파악할 수 있었다. Fig. 3.3.115에 유기질 함유량에 따른 재료분리 특성을 나타냈다.

Table 3.3.35 재료분리 특성 실험 결과

No.		블리딩율	No.		블리딩율	No.		블리딩율	No.		블리딩율	No.		블리딩율
T2-C1	a	1% 이하	T2-C3	a	1.8%	T2-C5	a	7.4%	T2-C7	a	1% 이하	T2-C9	a	3.2%
	b	1% 이하		b	3.2%		b	8.8%		b	1% 이하		b	4.5%
	c	1% 이하		c	1% 이하		c	6.2%		c	1% 이하		c	2.4%
	d	1% 이하		d	1% 이하		d	7.9%		d	1% 이하		d	3.9%
T2-C2	a	1% 이하	T2-C4	a	2.3%	T2-C6	a	1% 이하	T2-C8	a	1.5%	T2-C10	a	8.6%
	b	1% 이하		b	3.9%		b	1% 이하		b	3.6%		b	10.2%
	c	1% 이하		c	1.6%		c	1% 이하		c	1.4%		c	7.4%
	d	1% 이하		d	2.4%		d	1% 이하		d	2.9%		d	9.7%

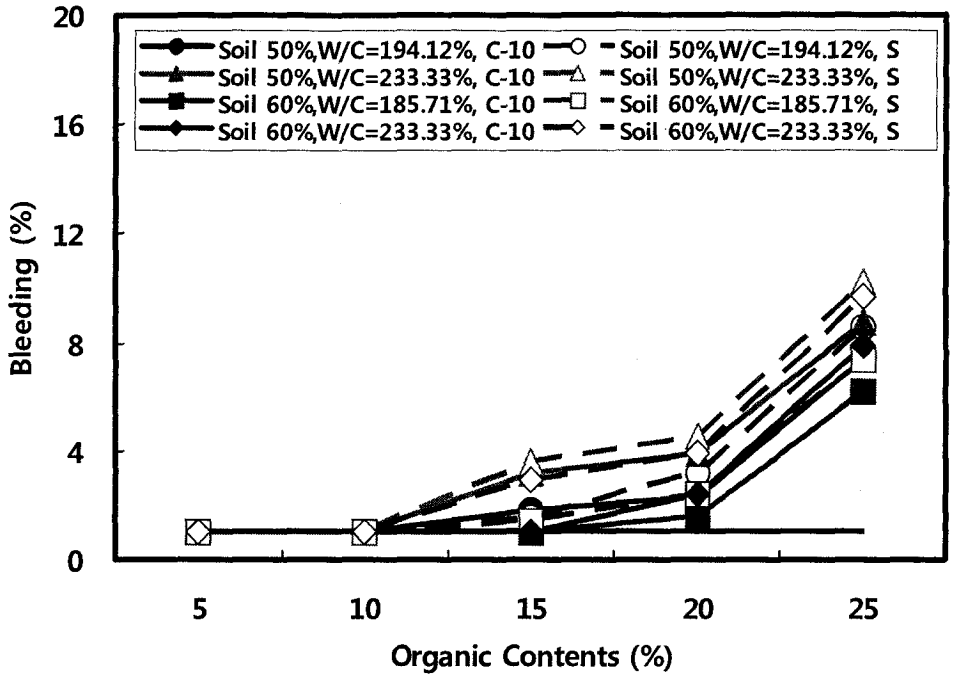


Fig. 3.3.115 유기물 함유량에 따른 재료분리 특성

나. 유동성

(1) Soil=50%, W/C=194.12%

유동화 처리토의 시료비율이 50%이고, W/C가 194.12%인 조건의 유동성을 JHS, ASTM, Slump Flow의 3가지 기준으로 파악하였다. Table 3.3.36에 유동성 결과(Soil=50%, W/C=194.12%)를 제시하였다. 유기물의 비율이 5%~25% 까지 증가할수록 유동성은 증가했고, 이러한 경향은 JHS, ASTM, Slump Flow 3가지에서 공통적으로 나타났다. JHS에 의한 유동성을 측정한 결과, 유기물 함유량이 15% 이하에서 고화재의 종류에 상관없이 목표 기준을 만족하였다. ASTM에 의해 유동성을 측정한 결과, 유기물 함유량이 10%일 때 C-10 고화재를 사용하여 제조한 유동화 처리토를 제외하고 모든 조건에서 목표 기준을 만족하였다. Slump Flow 결과, 유기물 함유량이 10% 이하의 실험 조건에서 C-10 고화재와 S 고화재를 사용한 조건 모두에서 유동성을 만족하였다. Fig. 3.3.116~Fig. 3.3.118에 각각 JHS, ASTM, Slump Flow에 의한 유동성 결과를 제시하였다.

Table 3.3.36 유동성 결과 (Soil=50%, W/C=194.12%)

No.	유기물 함유량 (%)	고화재 종류	JHS (cm)	ASTM (cm)	Slump Flow (cm)
T2-C1-a	5	C-10	25.8	33.1	66.9
T2-C2-a	10		26.3	30.1	68.5
T2-C3-a	15		28.9	36.2	71.5
T2-C4-a	20		32.8	39.1	73.2
T2-C5-a	25		34.5	42.6	77.2
T2-C6-a	5	S	26.8	34.2	68.2
T2-C7-a	10		29.2	33.6	69.8
T2-C8-a	15		30.1	37.5	72.1
T2-C9-a	20		32.6	40.2	73.8
T2-C10-a	25		35.8	41.5	78.4

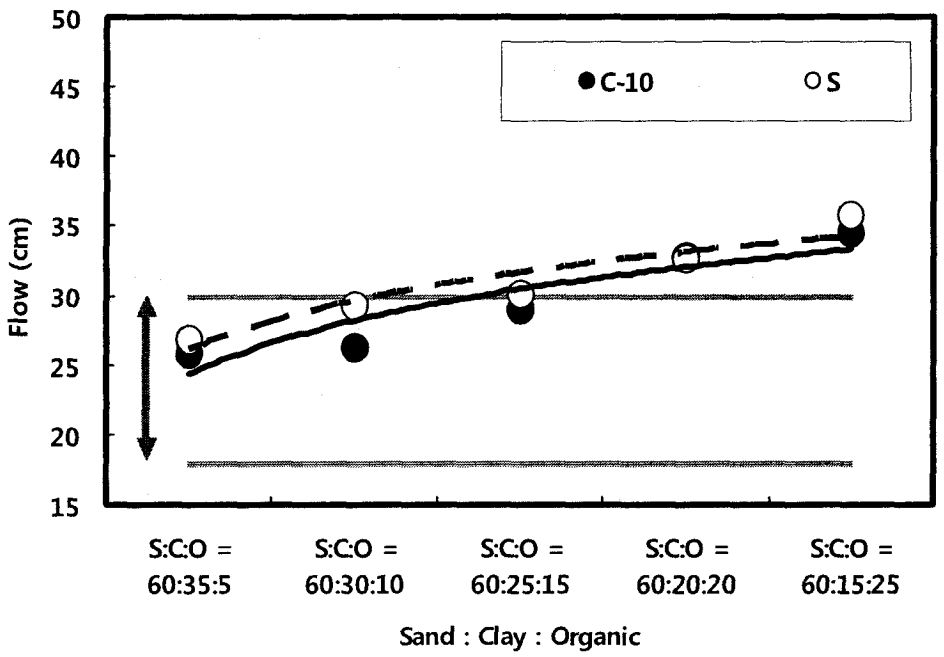


Fig. 3.3.116 Soil=50%, W/C=194.12% 조건에서의 JHS에 의한 유동성

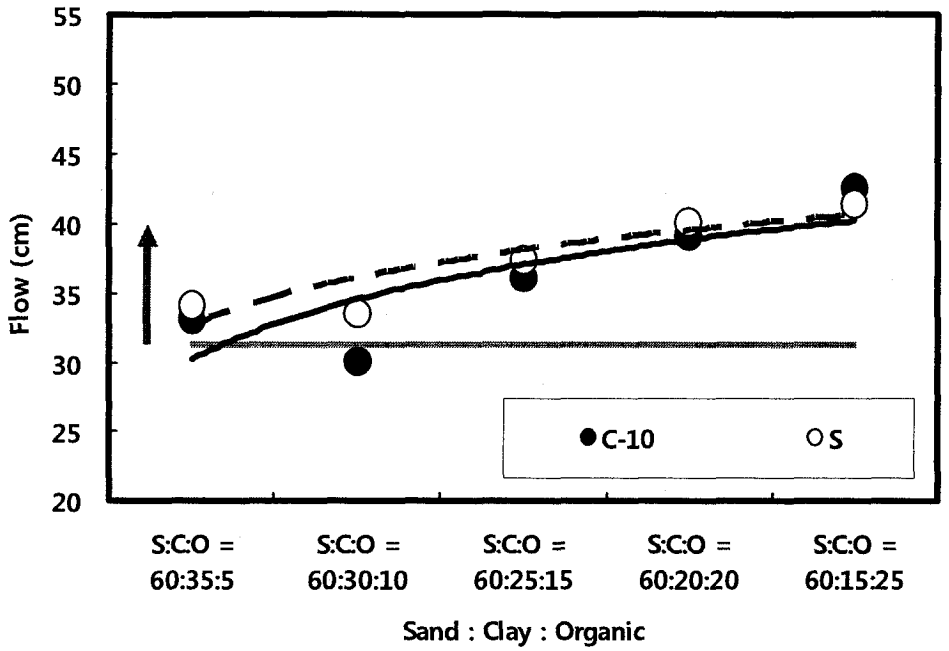


Fig. 3.3.117 Soil=50%, W/C=194.12% 조건에서의 ASTM에 의한 유동성

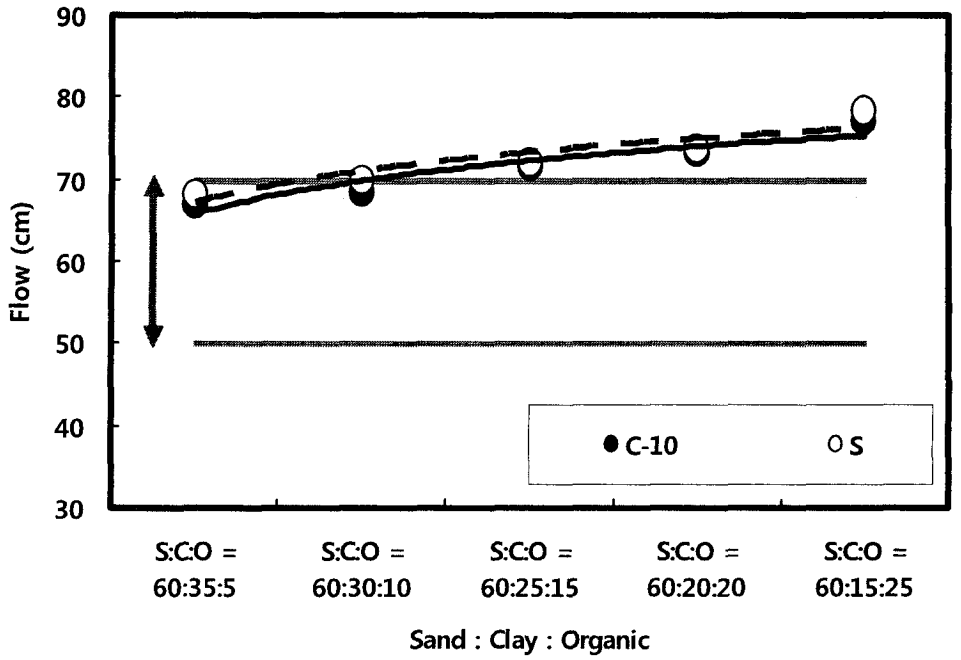


Fig. 3.3.118 Soil=50%, W/C=194.12% 조건에서의 Slump Flow에 의한 유동성

(2) Soil=50%, W/C=233.33%

유동화 처리토의 시료비율이 50%이고, W/C가 233.33%인 조건의 유동성을 JHS, ASTM, Slump Flow의 3가지 기준으로 파악하였다. Table 3.3.37에 유동성 결과(Soil=50%, W/C=233.33%)를 제시하였다. JHS에 의한 실험 결과, 고화재의 종류와 유기물 함유량에 상관없이 모든 실험 조건에서 목표 기준을 초과하는 유동성을 나타냈다. ASTM에 의해 유동성을 측정한 결과, C-10 고화재와 S 고화재를 사용한 조건에서 모두 목표 기준인 31.5cm 이상의 유동성을 나타냈으나, 목표 기준보다 평균 약 12cm 이상 큰 유동성을 보였다. Slump Flow의 결과, 모든 실험 조건에서 2cm~10cm 큰 값의 유동성을 나타냈다. Fig. 3.3.119~Fig. 3.3.121에 각각 JHS, ASTM, Slump Flow에 의한 유동성 결과를 제시하였다.

Table 3.3.37 유동성 결과 (Soil=50%, W/C=233.33%)

No.	유기물 함유량 (%)	고화재 종류	JHS (cm)	ASTM (cm)	Slump Flow (cm)
T2-C1-b	5	C-10	35.2	44.5	72.4
T2-C2-b	10		34.6	44.5	72.4
T2-C3-b	15		38.9	46.3	75.4
T2-C4-b	20		41.4	48.4	77.6
T2-C5-b	25		42.6	46.8	79.6
T2-C6-b	5	S	34.1	43.2	72.6
T2-C7-b	10		34.5	44.6	73.5
T2-C8-b	15		37.7	47.5	76.2
T2-C9-b	20		38.6	48.2	76.4
T2-C10-b	25		41.6	49.3	80.2

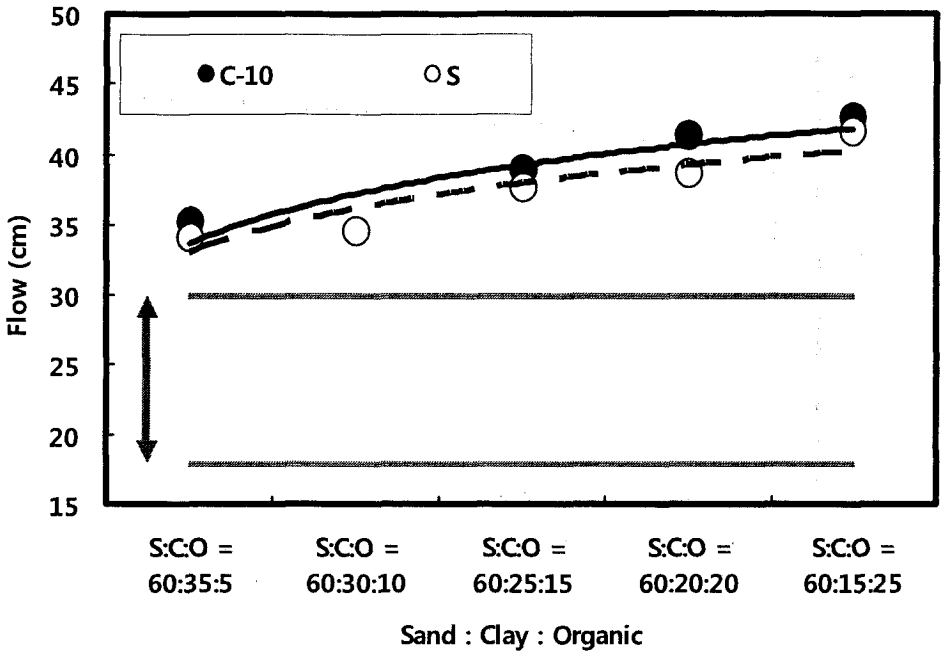


Fig. 3.3.119 Soil=50%, W/C=233.33% 조건의 JHS에 의한 유동성

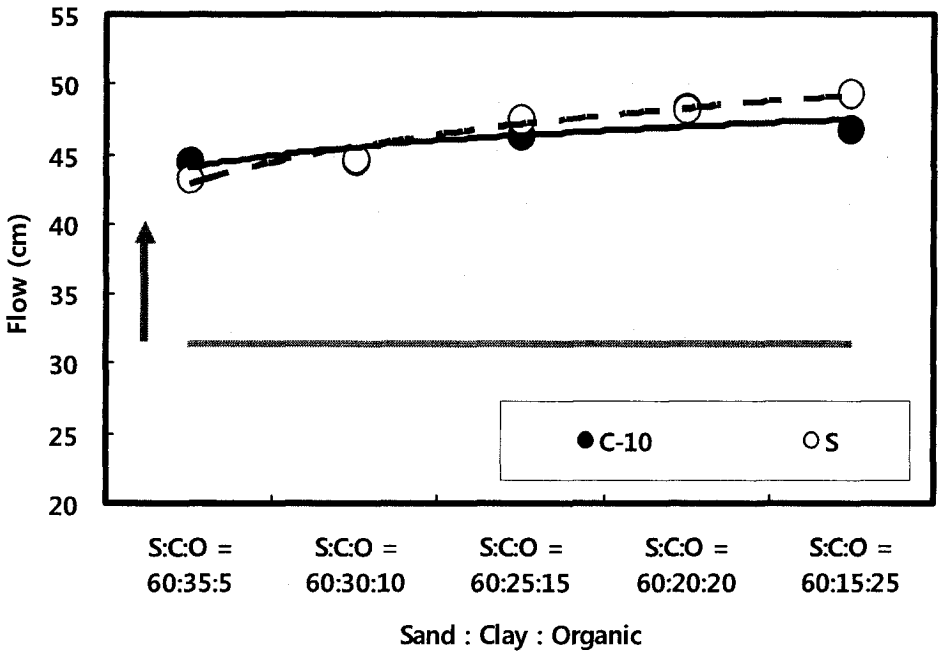


Fig. 3.3.120 Soil=50%, W/C=233.33% 조건의 ASTM에 의한 유동성

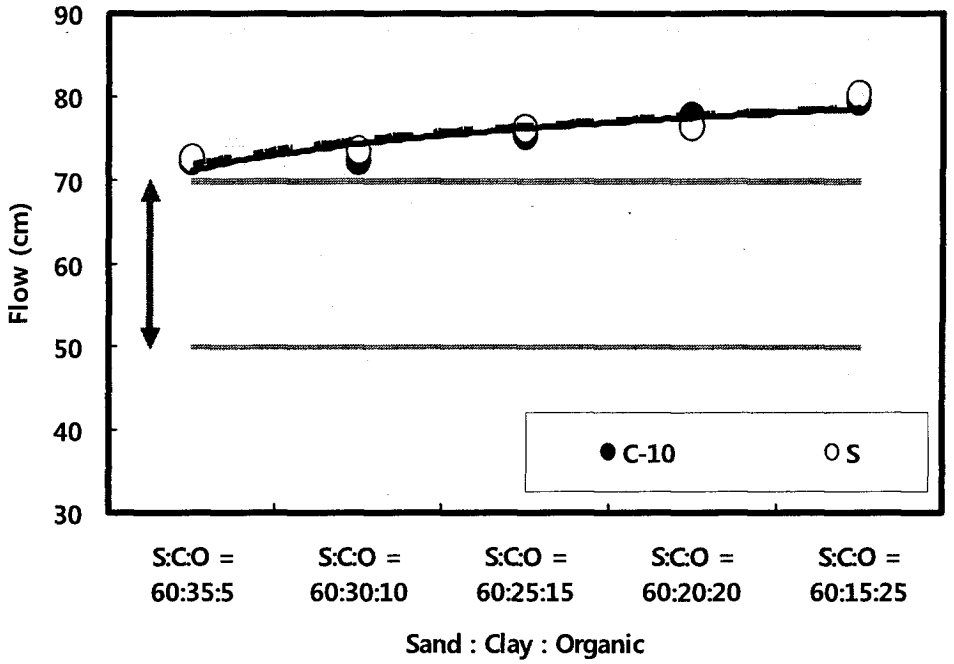


Fig. 3.3.121 Soil=50%, W/C=233.33% 조건의 Slump Flow에 의한 유동성

(3) Soil=60%, W/C=185.71%

유동화 처리토의 시료비율이 60%이고, W/C가 185.71%인 조건의 유동성을 JHS, ASTM, Slump Flow의 3가지 기준으로 파악하였다. Table 3.3.38에 유동성 결과(Soil=60%, W/C=185.71%)를 제시하였다. JHS에 의해 유동성을 측정한 결과, S 고화재를 사용하여 유기물을 5% 첨가한 실험조건을 제외한 모든 실험 조건에서 목표 기준인 18cm 이상의 흐름값을 나타냈다. ASTM에 의해 유동성을 측정한 결과, C-10 고화재와 S 고화재를 사용한 조건에서 모두 목표 기준인 31.5cm보다 낮은 유동성을 나타냈다. Slump Flow를 통해 측정한 유동성 결과, C-10 고화재를 사용하고 유기물 첨가량이 5%인 조건을 제외한 모든 실험조건에서 목표 기준에 만족하는 유동성을 나타냈다. Fig. 3.3.122~Fig. 3.3.124에 각각 JHS, ASTM, Slump Flow에 의한 유동성 결과를 나타냈다.

Table 3.3.38 유동성 결과 (Soil=60%, W/C=185.71%)

No.	유기물 함유량 (%)	고화재 종류	JHS (cm)	ASTM (cm)	Slump Flow (cm)
T2-C1-c	5	C-10	16.8	23.4	48.7
T2-C2-c	10		18.7	24.7	61.2
T2-C3-c	15		19.7	25.7	61.9
T2-C4-c	20		19.8	27.7	58.9
T2-C5-c	25		22.5	26.2	60.8
T2-C6-c	5	S	18.3	22.4	51.3
T2-C7-c	10		19.4	24.1	59.4
T2-C8-c	15		21.3	25.3	63.3
T2-C9-c	20		22.3	26.8	66.3
T2-C10-c	25		24.5	29.5	67.6

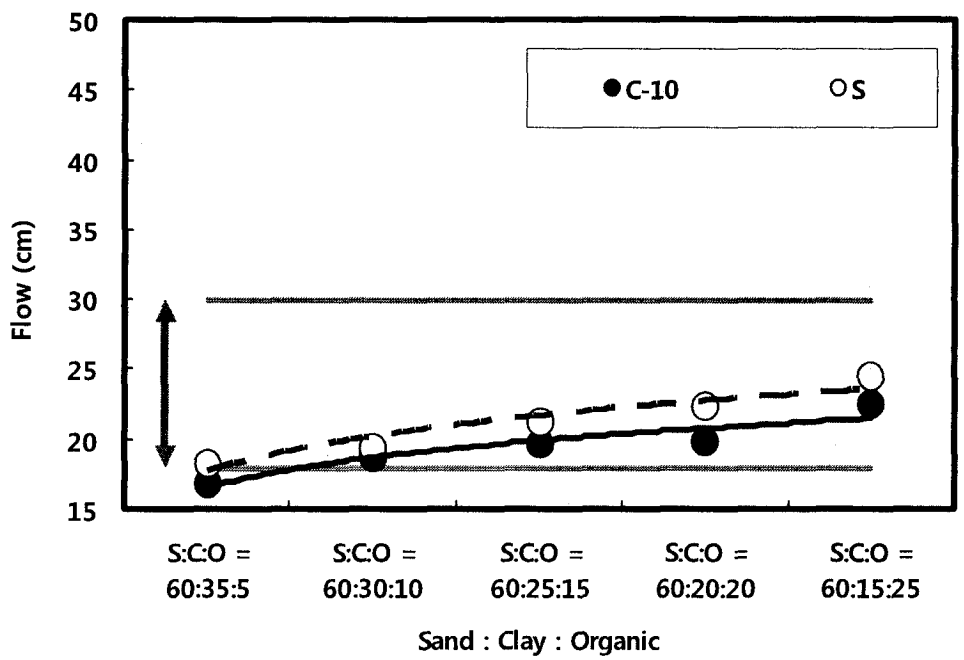


Fig. 3.3.122 Soil=60%, W/C=185.71% 조건의 JHS에 의한 유동성

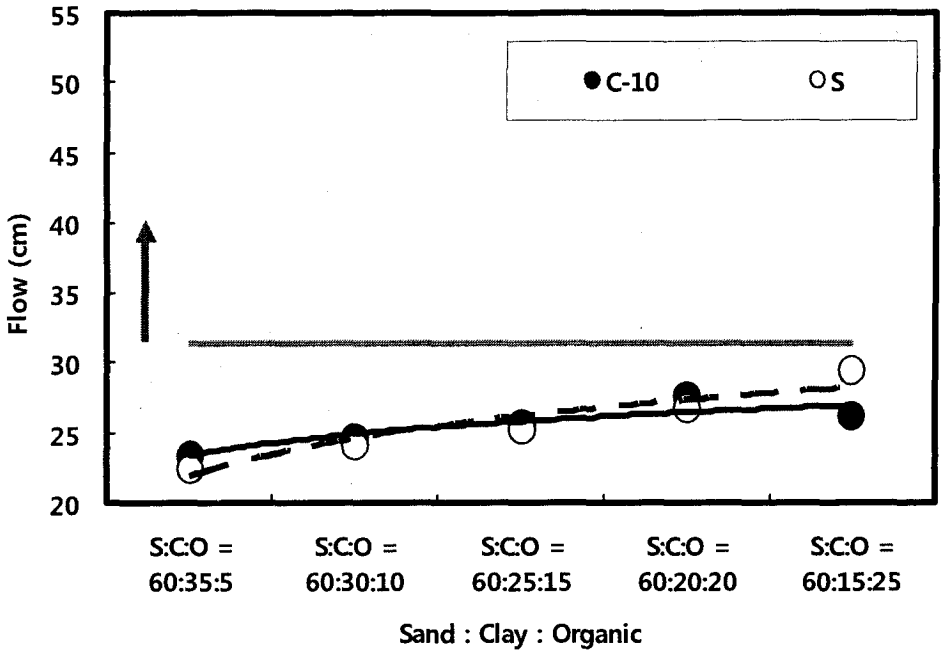


Fig. 3.3.123 Soil=60%, W/C=185.71% 조건의 ASTM에 의한 유동성

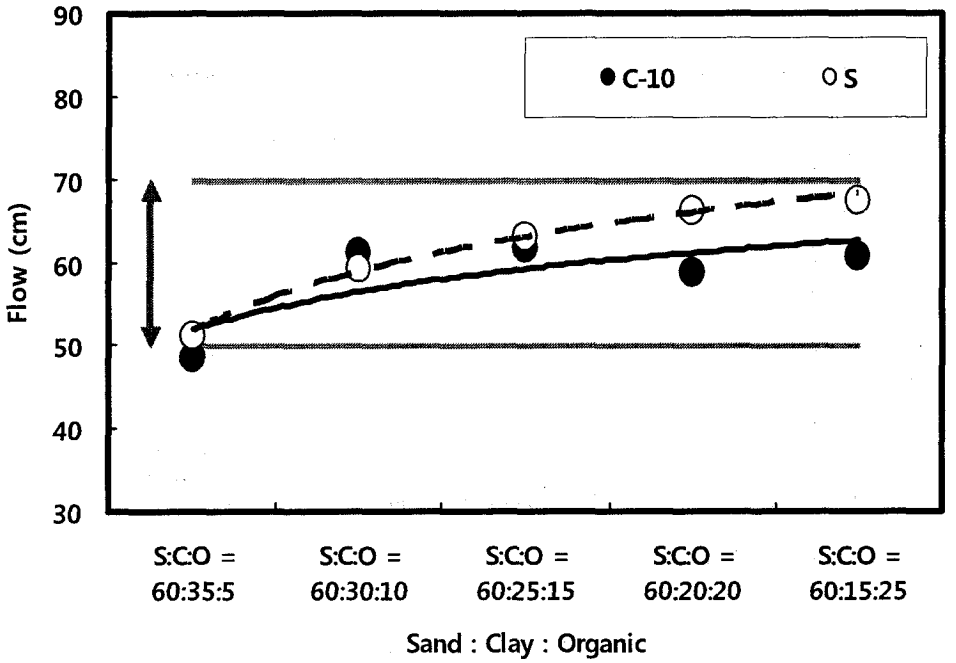


Fig. 3.3.124 Soil=60%, W/C=185.71% 조건의 Slump Flow에 의한 유동성

(4) Soil=60%, W/C=233.33%

유동화 처리토의 시료비율이 60%이고, W/C가 233.33%인 실험조건의 유동성을 JHS, ASTM, Slump Flow의 3가지 기준으로 파악하였다. Table 3.3.39에 유동성 결과 (Soil=60%, W/C=233.33%)를 제시하였다. JHS, ASTM, Slump Flow의 3가지 실험에서 모두 유기물 함유량이 5%~25% 까지 증가할수록 유동성은 증가했다. JHS에 의해 유동성을 측정한 결과, 모든 실험조건에서 목표 기준에 만족하는 유동성을 보였다. ASTM의 경우, 유기물 함유량이 15% 이상인 실험조건에서 목표 기준을 만족하였고, 유기물 함유량이 5%, 10%인 실험조건에서는 목표 기준보다 낮은 유동성을 나타냈다. Slump Flow를 통해 측정한 유동성 결과, 유기물 함유량이 15% 이하인 실험조건에서만 목표 기준을 만족하였고, 20%, 25%의 유기물이 함유된 경우에는 목표 기준을 초과하는 유동성을 나타냈다. Fig. 3.3.125~Fig. 3.3.127에 각각 JHS, ASTM, Slump Flow에 의한 유동성 결과를 제시하였다.

Table 3.3.39 유동성 결과 (Soil=60%, W/C=233.33%)

No.	유기물 함유량 (%)	고화재 종류	JHS (cm)	ASTM (cm)	Slump Flow (cm)
T2-C1-d	5	C-10	18.9	25.5	52.4
T2-C2-d	10		21.4	27.8	64.7
T2-C3-d	15		25.3	32.7	66.3
T2-C4-d	20		27.7	31.1	70.5
T2-C5-d	25		28.6	36.2	69.1
T2-C6-d	5	S	19.9	26.7	55.6
T2-C7-d	10		22.3	28.4	62.2
T2-C8-d	15		25.3	33.3	67.4
T2-C9-d	20		26.7	32.6	73.5
T2-C10-d	25		29.1	36.1	77.8

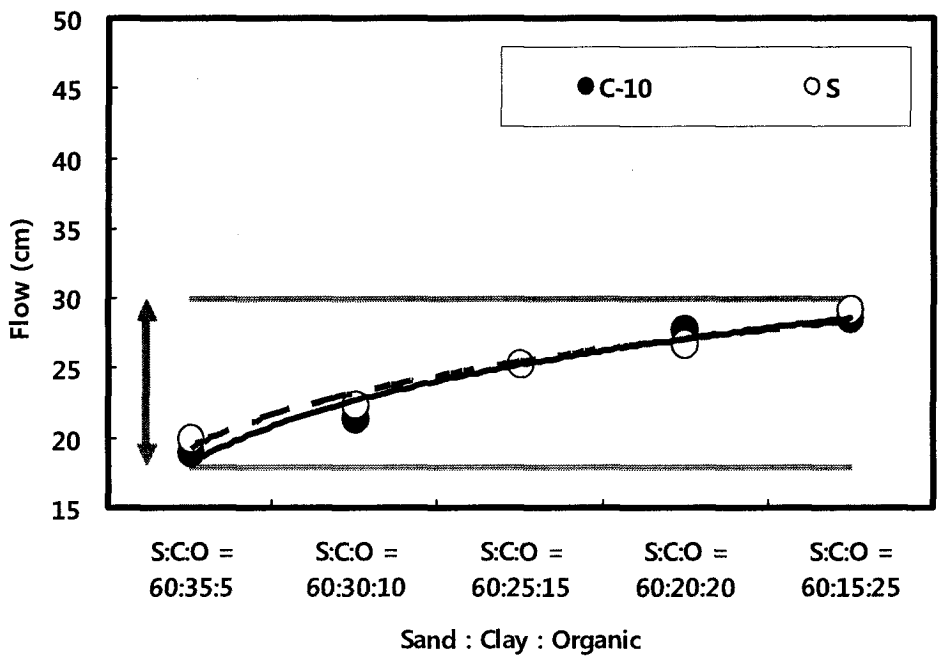


Fig. 3.3.125 Soil=60%, W/C=233.33% 조건의 JHS에 의한 유동성

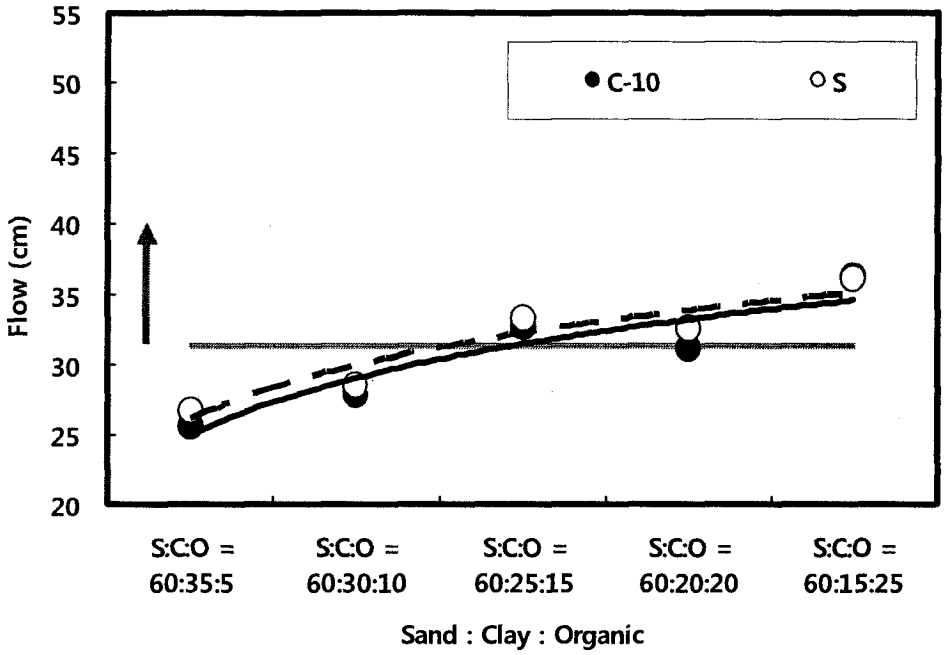


Fig. 3.3.126 Soil=60%, W/C=233.33% 조건의 ASTM에 의한 유동성

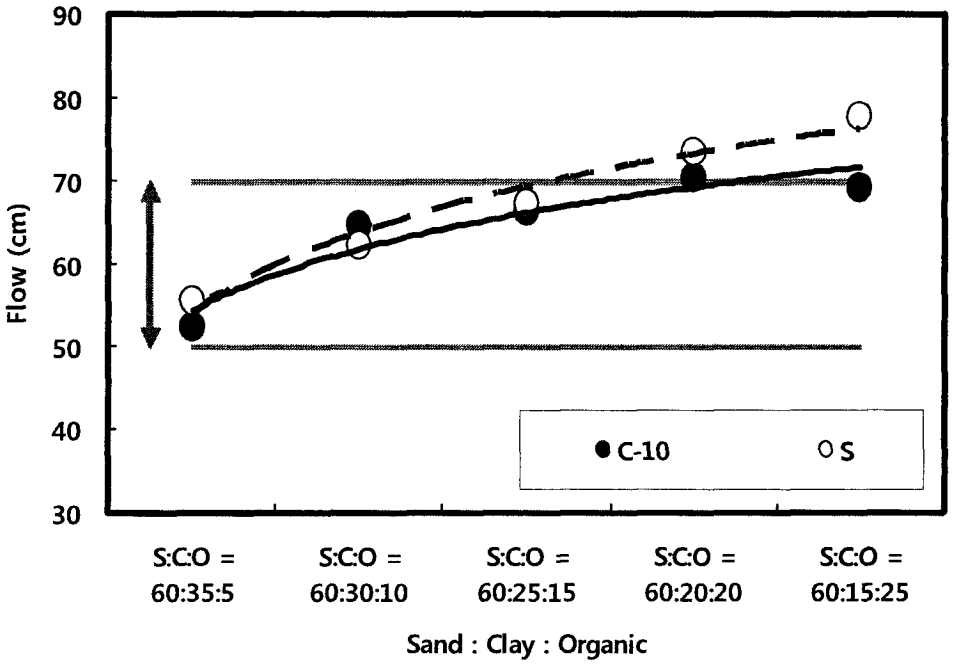


Fig. 3.3.127 Soil=60%, W/C=233.33% 조건의 Slump Flow에 의한 유동성

(5) 유동성 종합

유기질 함유량을 5~25% 까지 변화시켜 유기질 함유량에 따른 유동성을 JHS, ASTM, Slump Flow의 3가지 목표 기준으로 비교한 결과, Fig. 3.3.128~Fig. 3.3.131과 같이 나타났다. 실험결과 고화재의 종류(C-10과 S)에 따른 유동성의 영향은 거의 나타나지 않았다. 또한 유기질 함유량의 증가에 따라 JHS, ASTM, 슬럼프 콘에 의한 유동성 측정결과도 함께 증가하는 것으로 나타났다.

시료비율이 50%인 경우 W/C가 194.12%로 낮은 실험 조건(Fig. 3.3.128)에서는 유기질 함유량이 약 15% 정도까지 3가지의 목표 유동성을 모두 만족하였으며, 유기질 함유량이 15% 이상인 경우에는 JHS와 슬럼프 콘의 목표 유동성보다 큰 값을 나타냈다. 시료비율이 50%이고 W/C가 233.33%인 조건에서는 31.5cm 이상이면 유동성을 만족하는 ASTM의 목표 유동성에는 유기질의 함유량에 상관없이 모든 실험 조건에서 만족하였으나, JHS와 슬럼프 콘의 목표 유동성보다는 모든 실험 조건에서 큰 값을 나타냈다.

Fig. 3.3.130와 Fig. 3.3.131은 시료비율이 60%인 실험조건의 결과이다. Fig. 3.3.130에 나타난 것과 같이 W/C가 185.71%로 낮은 조건에서는 JHS와 슬럼프 콘의 목표 유동성에는 유기질 함유량에 상관없이 모든 실험조건에서 만족하였지만, ASTM의 실험조건보다 낮은 유동성을 나타냈다. W/C가 233.33%인 조건에서는 유기질 함유량 5%와 10%의 실험 조건에서는 JHS와 슬럼프 콘의 유동성은 목표 기준값에 만족하는 결과를 나타냈지만, ASTM의 목표 기준값에는 못 미치는 유동성을 나타냈다. 유기질 함유량이 15%와 20%인 경우에는 3가지의 유동성 기준값을 모두 만족하였으며, 25%인 경우에는 S고화재로 슬럼프 콘을 측정한 경우만 목표 기준값보다 약 10cm 상회하였다.

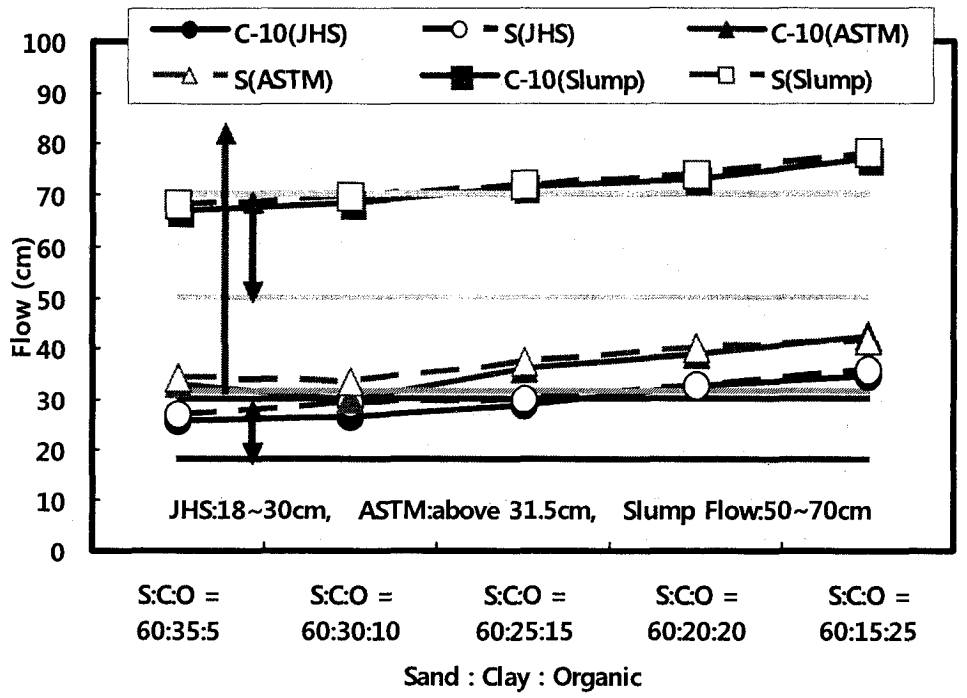


Fig. 3.3.128 Soil=50%, W/C=194.12% 조건의 유기질 함유량에 따른 유동성 관계

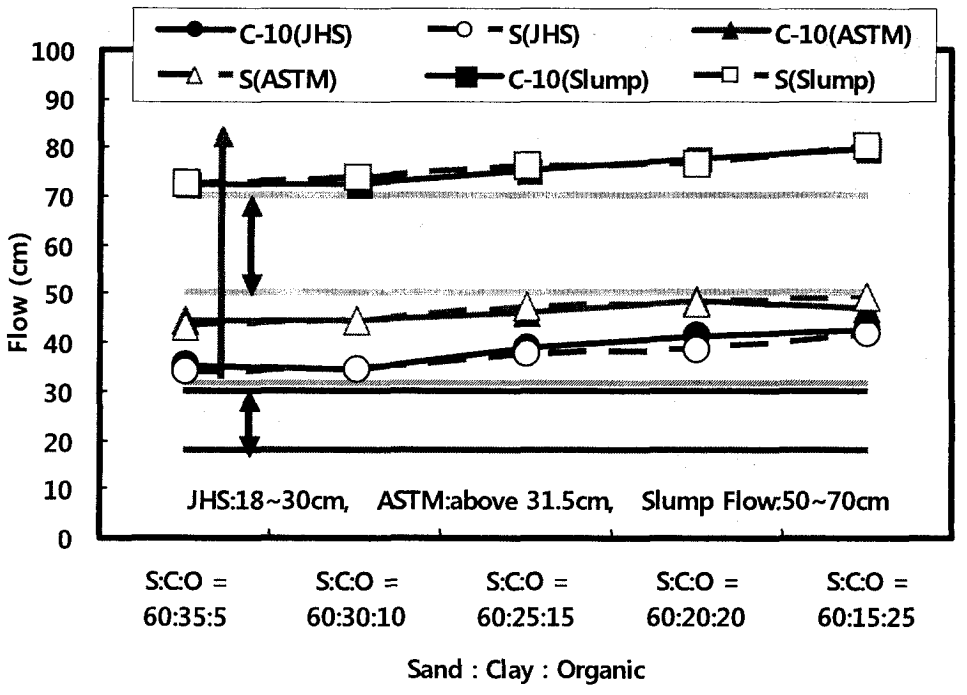


Fig. 3.3.129 Soil=50%, W/C=233.33% 조건의 유기질 함유량에 따른 유동성 관계

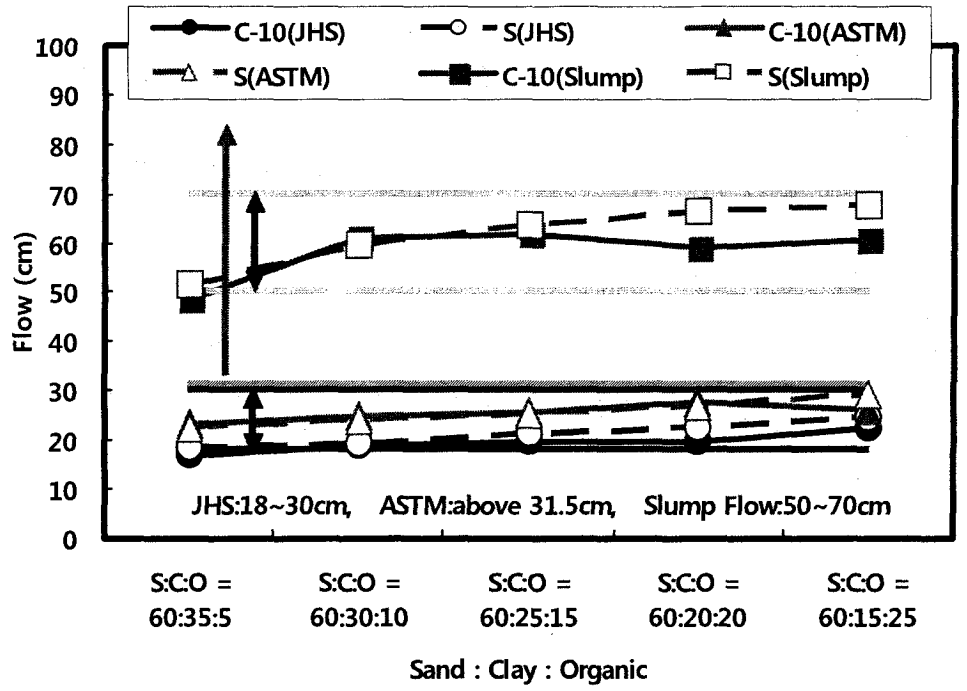


Fig. 3.3.130 Soil=60%, W/C=185.71% 조건의 유기질 함유량에 따른 유동성 관계

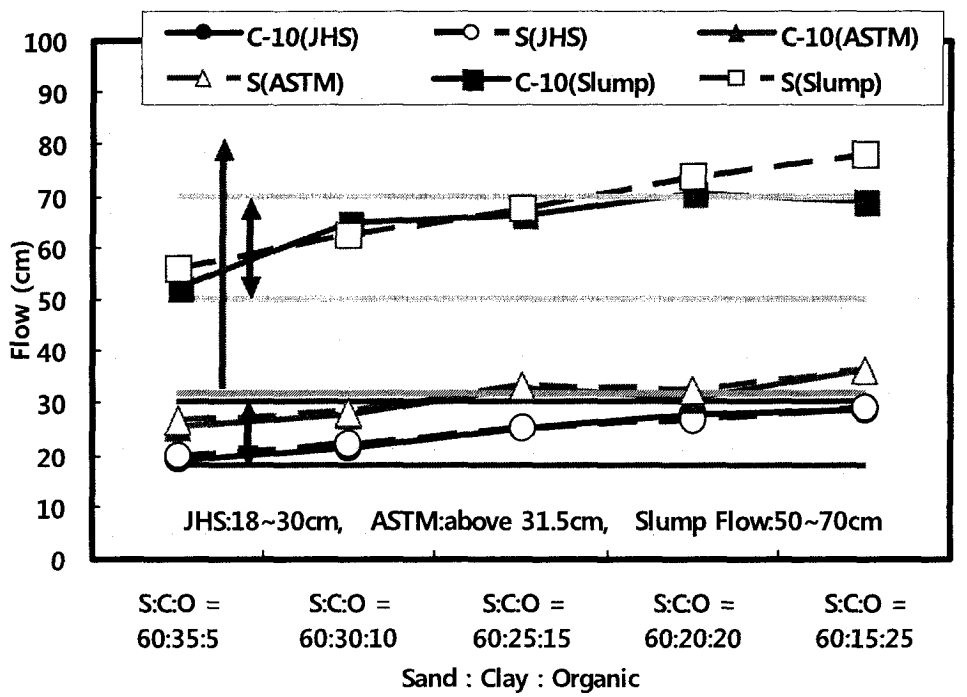


Fig. 3.3.131 Soil=60%, W/C=233.33% 조건의 유기질 함유량에 따른 유동성 관계

(6) 고화재의 종류에 따른 유동성

Fig. 3.3.132~Fig. 3.3.135에 실험에 사용된 고화재의 종류에 따른 유동성을 평가하기 위해 C-10 고화재를 사용하였을 때의 유동성을 S 고화재를 사용하였을 때의 유동성으로 정규화하여 나타냈다. Soil=50%, W/C=194.12% 조건, Soil=50%, W/C=233.33% 조건, Soil=60%, W/C=185.71% 조건, Soil=60%, W/C=233.33% 조건에서 JHS, ASTM, Slump Flow 모두 88%~107% 사이의 값을 나타냈고, 이를 통해 고화재의 종류에 따른 유동성의 차이는 거의 발생하지 않는다고 판단하였다.

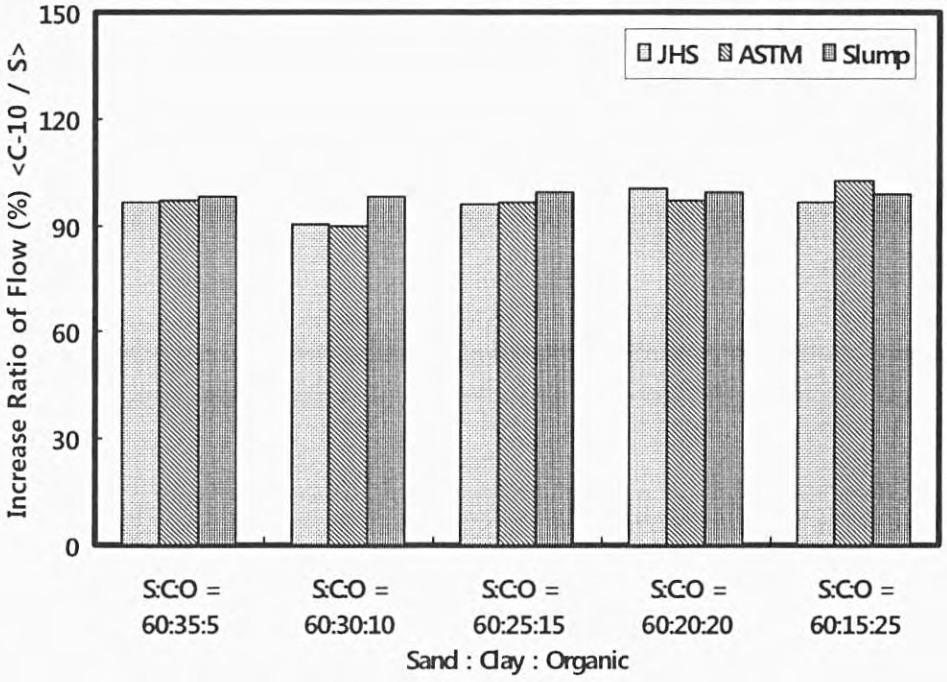


Fig. 3.3.132 Soil=50%, W/C=194.12% 조건의 고화재에 따른 강도특성 (C-10/S)

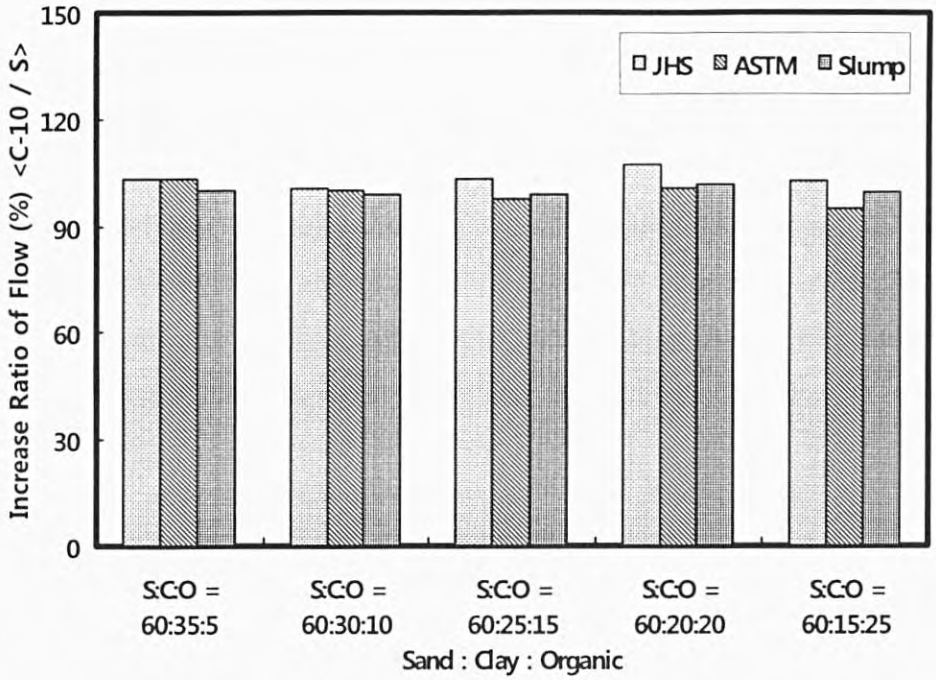


Fig. 3.3.133 Soil=50%, W/C=233.33% 조건의 고화재에 따른 강도특성 (C-10/S)

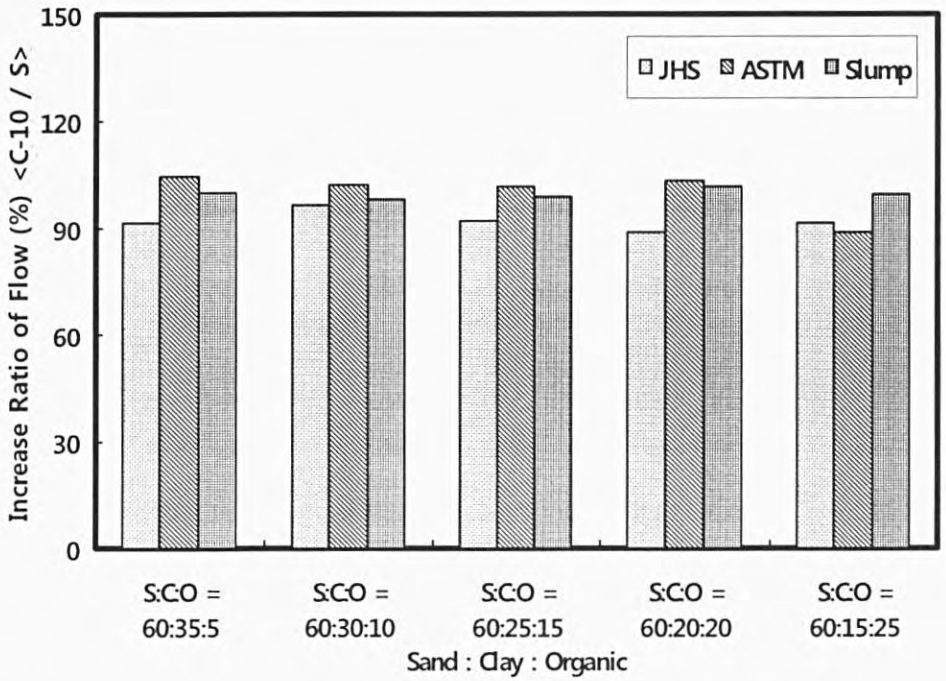


Fig. 3.3.134 Soil=60%, W/C=185.71% 조건의 고화재에 따른 강도특성 (C-10/S)

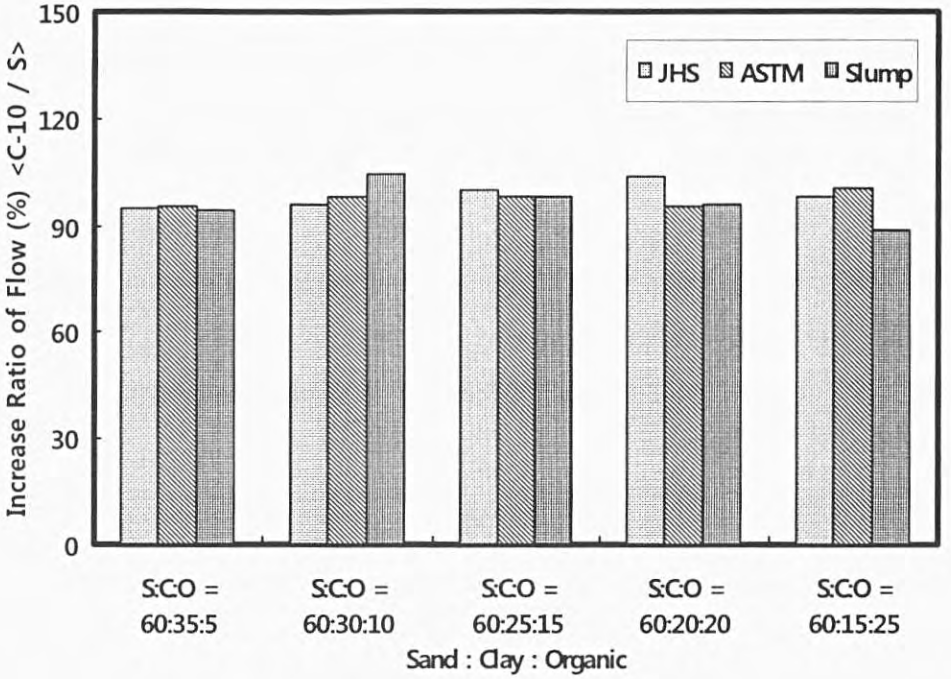


Fig. 3.3.135 Soil=60%, W/C=233.33% 조건의 고화재에 따른 강도특성 (C-10/S)

다. 강도특성

(1) 유기물 함유량에 따른 강도특성

(가) Soil=50%, W/C=194.12%

Fig. 3.3.136~Fig. 3.3.137은 Soil=50%, W/C=194.12%의 실험조건일 때, 유기물 함유량에 따른 일축압축강도를 나타냈다. 재령 4시간 일축압축강도는 유기물 함유량이 5%인 실험조건에서 측정이 가능했지만, 1.3kg/cm^2 이하의 값을 나타냈다. 재령 1일 일축압축강도의 경우, 고화재의 종류에 따른 차이는 거의 나타나지 않았고, 유기물 함유량이 증가할수록 일축압축강도는 점차 감소하는 경향을 나타냈다. 유기물 함유량이 20% 이상인 경우의 재령 1일 일축압축강도를 측정할 수 없었다. 재령 7일 일축압축강도는 S 고화재를 사용한 실험의 일축압축강도가 크게 나타났고, 모든 실험조건에서 일축압축강도를 측정할 수 있었다. 하지만 유기물 함유량 증가에 따른 일축압축강도의 변화 경향이 뚜렷하게 나타나지 않았다. 재령 28일 일축압축강

도의 경우, S 고화재를 사용한 실험의 일축압축강도가 C-10을 사용한 일축압축강도에 비해 모든 실험조건에서 큰 값을 보였다. S 고화재의 경우, 유기물 함유량 증가에 따른 일축압축강도 감소 경향이 뚜렷하게 나타났다. C 고화재의 경우, 재령 28일 강도는 유기물 함유량에 상관없이 7.3kg/cm^2~8.5kg/cm^{2}의 거의 일정한 값을 나타냈다.

Table 3.3.40 강도특성(Soil=50%, W/C=194.12%)

No.	유기물함유량(%)	고화재 종류	4시간 (kg/cm^2)	1일 (kg/cm^2)	7일 (kg/cm^2)	28일 (kg/cm^2)
T2-C1-a	5	C-10	1.132	2.419	4.543	7.622
T2-C2-a	10		-	2.365	7.981	8.564
T2-C3-a	15		-	2.232	7.554	7.643
T2-C4-a	20		-	-	2.432	7.432
T2-C5-a	25		-	-	2.354	7.321
T2-C6-a	5	S	0.997	2.153	9.345	16.453
T2-C7-a	10		-	2.102	9.884	14.849
T2-C8-a	15		-	2.091	9.881	13.654
T2-C9-a	20		-	-	4.566	9.438
T2-C10-a	25		-	-	3.891	9.458

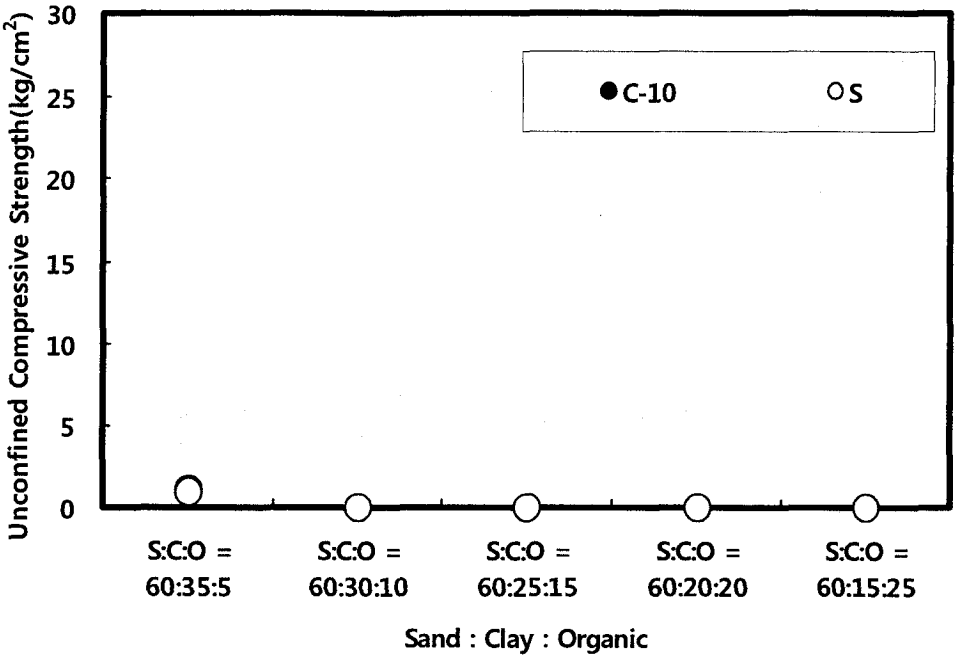


Fig. 3.3.136 재령 4시간 일축압축강도 (Soil=50%, W/C=194.12%)

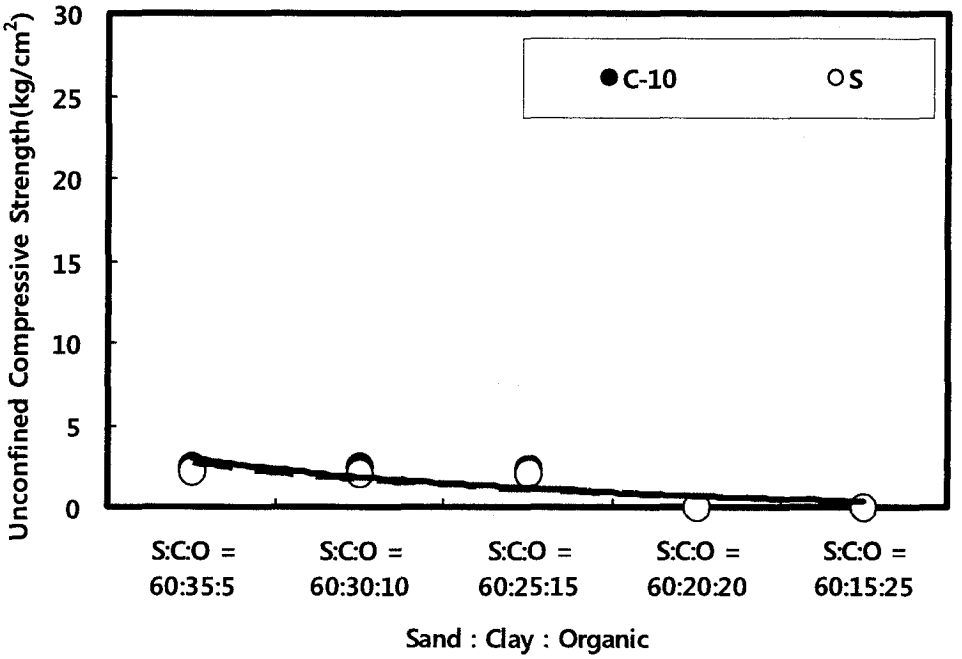


Fig. 3.3.137 재령 1일 일축압축강도 (Soil=50%, W/C=194.12%)

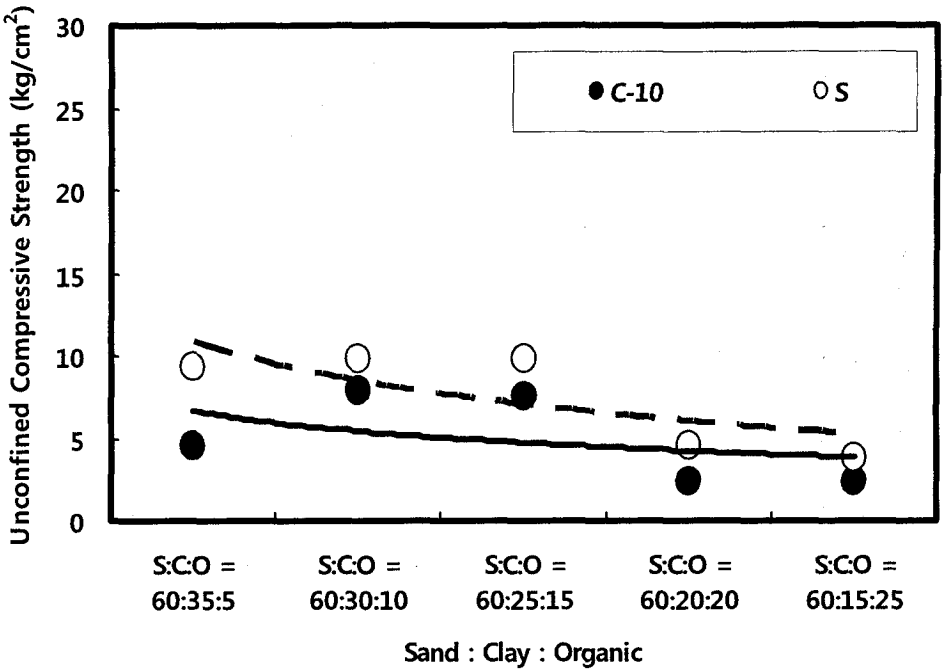


Fig. 3.3.138 재령 7일 일축압축강도 (Soil=50%, W/C=194.12%)

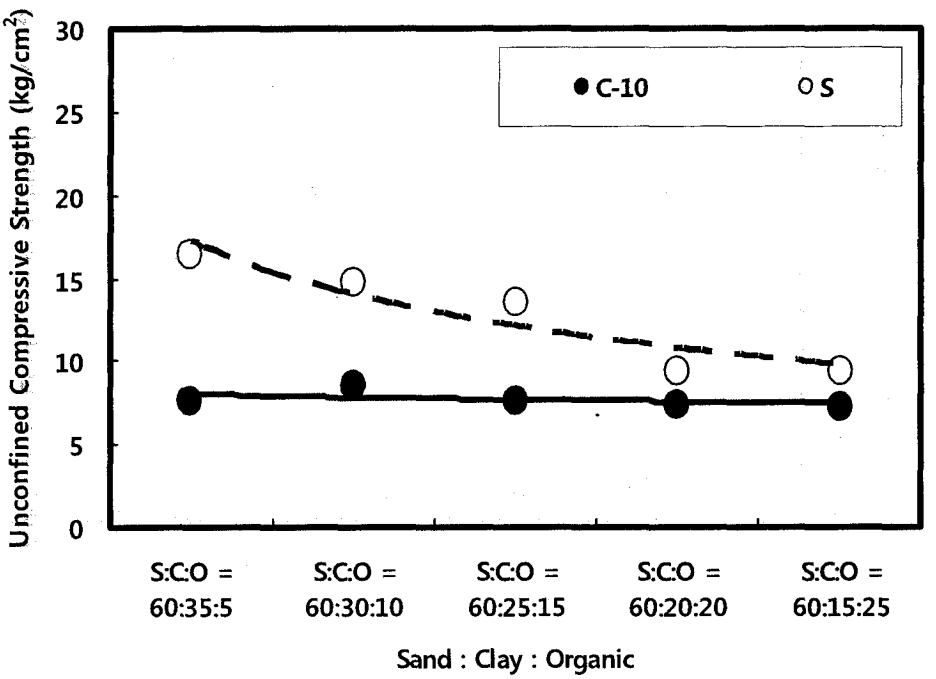


Fig. 3.3.139 재령 28일 일축압축강도 (Soil=50%, W/C=194.12%)

(나) Soil=50%, W/C=233.33%

Fig. 3.3.140~Fig. 3.3.143은 Soil=50%, W/C=233.33%의 실험조건일 때, 유기물 함유량에 따른 일축압축강도를 나타냈다. 재령 4시간 일축압축강도는 유기물 함유량이 5%인 실험조건에서 측정이 가능했고, 재령 1일 일축압축강도는 유기물 함유량이 15% 이하인 실험조건에서만 측정할 수 있었다. 재령 4시간과 재령 1일의 일축압축강도는 고화재의 종류에 따른 차이는 거의 나타나지 않았고, 강도발현이 거의 되지 않았다. 재령 7일 일축압축강도는 C-10 고화재를 사용한 것에 비해 S 고화재를 사용했을 때의 일축압축강도가 크게 나타났다. 또한 유기물 함유량 증가에 따른 일축압축강도의 감소 경향을 파악할 수 있었다. 재령 28일 일축압축강도 역시, S 고화재를 사용한 실험의 일축압축강도가 C-10을 사용한 일축압축강도에 비해 모든 실험조건에서 큰 값을 보였다. C 고화재의 경우, 재령 28일 강도는 유기물 함유량에 상관없이 5.2kg/cm^2~7.6kg/cm^{2}의 거의 일정한 값을 나타냈다. S 고화재의 경우, 유기물 함유량 증가에 따른 일축압축강도 감소 경향이 뚜렷하게 나타났고, 유기물 함유량의 증가에 따라 13.1kg/cm^{2}에서 6.7kg/cm^{2}까지 일축압축강도가 감소하였다.

Table 3.3.41 강도특성 결과 (Soil=50%, W/C=233.33%)

No.	유기물함유량(%)	고화재 종류	4시간 (kg/cm^2)	1일 (kg/cm^2)	7일 (kg/cm^2)	28일 (kg/cm^2)
T2-C1-b	5	C-10	0.974	1.559	3.924	6.642
T2-C2-b	10		-	1.442	5.676	7.643
T2-C3-b	15		-	1.332	5.132	6.342
T2-C4-b	20		-	-	1.674	5.852
T2-C5-b	25		-	-	1.442	5.231
T2-C6-b	5	S	0.769	1.445	6.234	13.116
T2-C7-b	10		-	1.442	6.805	12.342
T2-C8-b	15		-	1.172	7.659	11.232
T2-C9-b	20		-	-	2.651	7.921
T2-C10-b	25		-	-	3.567	6.693

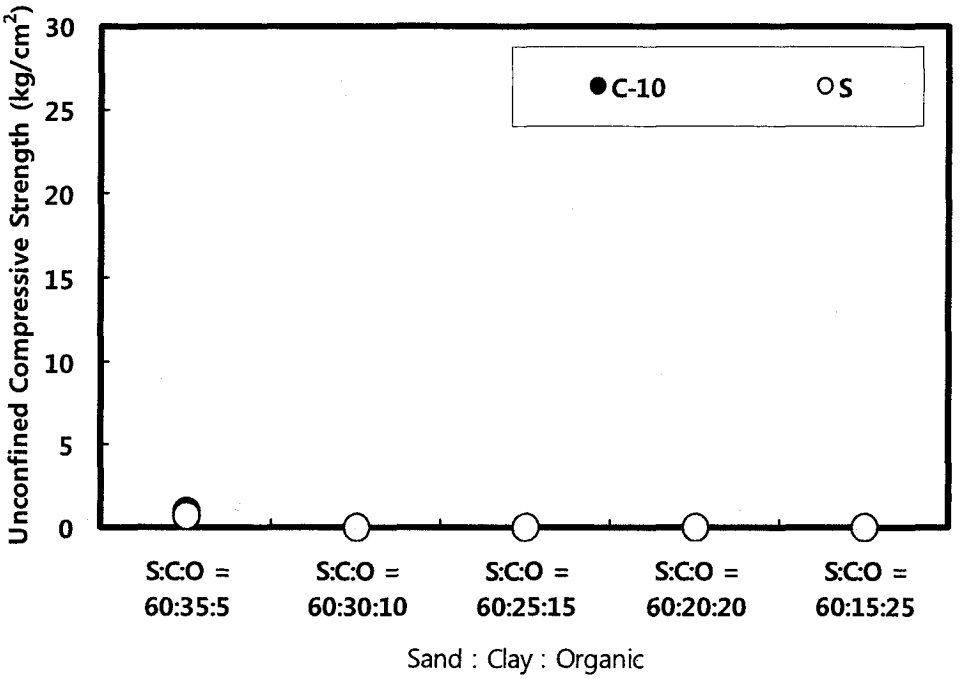


Fig. 3.3.140 재령 4시간 일축압축강도 (Soil=50%, W/C=233.33%)

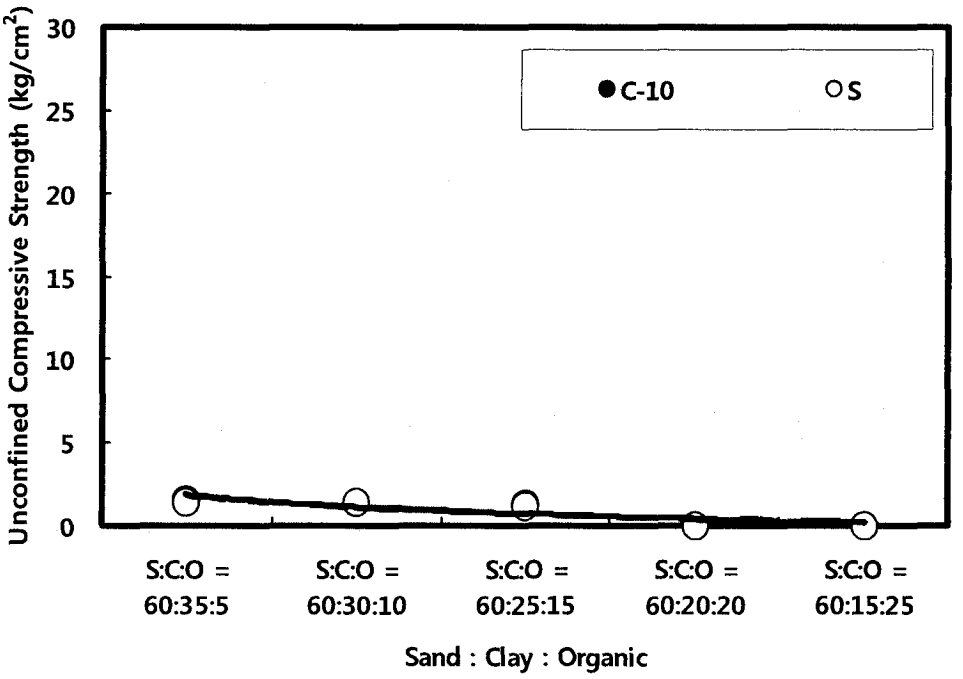


Fig. 3.3.141 재령 1일 일축압축강도 (Soil=50%, W/C=233.33%)

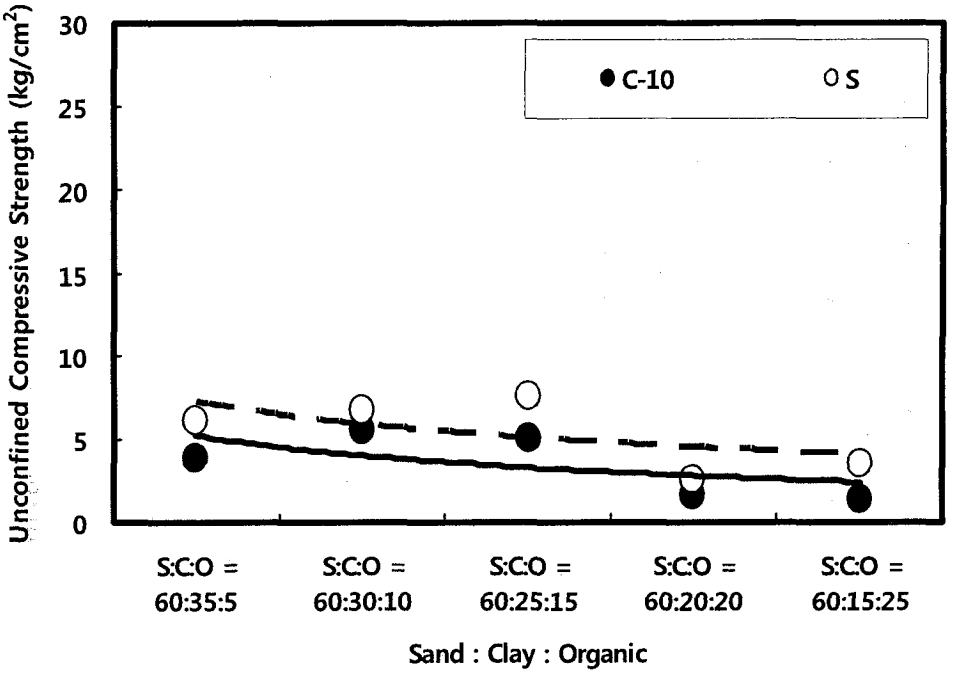


Fig. 3.3.142 재령 7일 일축압축강도 (Soil=50%, W/C=233.33%)

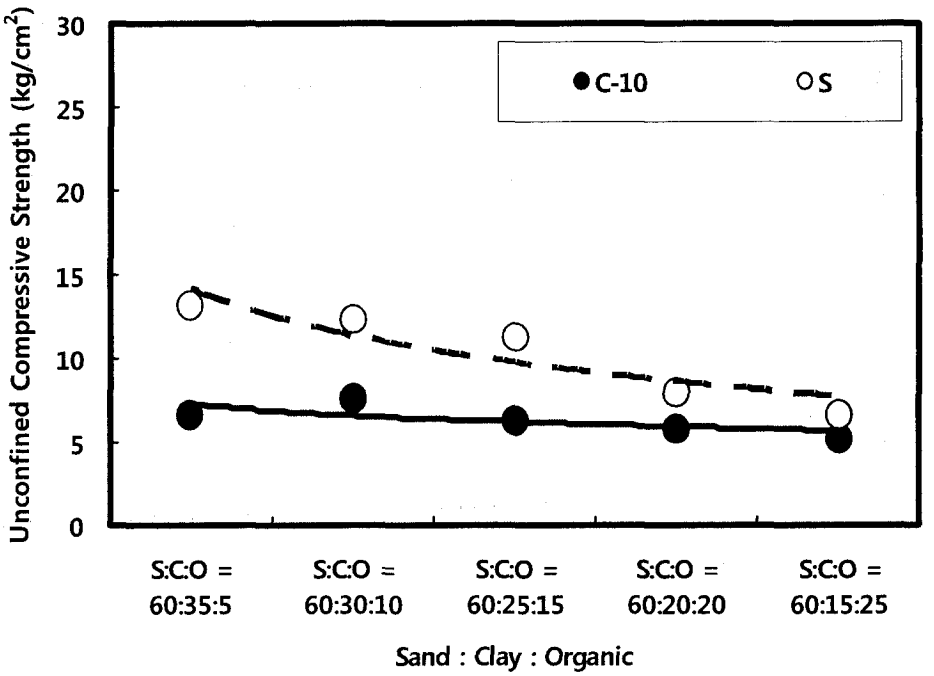


Fig. 3.3.143 재령 28일 일축압축강도 (Soil=50%, W/C=233.33%)

(다) Soil=60%, W/C=185.71%

Fig. 3.3.144~Fig. 3.3.147은 Soil=60%, W/C=185.71%의 실험조건일 때, 유기물 함유량에 따른 일축압축강도를 나타냈다. 재령 4시간 일축압축강도의 경우, C-10 고화재를 사용한 실험조건에서는 유기물 함유량이 5%~15%일 때 일축압축강도를 측정할 수 있었지만, S 고화재를 사용한 실험조건에서는 5%의 유기물을 함유한 조건에서 밖에 일축압축강도를 측정할 수 없었다. 재령 1일 일축압축강도는 C-10 고화재를 사용한 경우, 유기물 함유량이 25%인 실험의 일축압축강도를 측정하지 못하였고, S 고화재를 사용한 경우, 20%~25%의 유기물을 함유한 실험에서의 일축압축강도를 측정할 수 없었다. 재령 7일 일축압축강도는 S 고화재를 사용한 유동화처리토의 일축압축강도가 전반적으로 크게 나타났고, 유기물 함유량의 증가에 따른 일축압축강도 감소 경향을 확인할 수 있었다. 재령 28일 일축압축강도의 경우, S 고화재를 사용한 실험의 일축압축강도가 C-10을 사용한 일축압축강도에 비해 모든 실험조건에서 큰 값을 보였고, 이러한 강도의 차이는 유기물 함유량이 적은 조건에서 더 크게 나타났다. C 고화재를 사용한 경우, 재령 28일 강도는 유기물 함유량의 증가에 큰 영향을 받지 않았지만, S 고화재의 경우, 유기물 함유량 증가에 따른 일축압축강도 감소 경향이 뚜렷하게 나타났고, 유기물 함유량의 증가에 따라 21.1kg/cm^{2}에서 9.9kg/cm^{2}까지 일축압축강도가 감소하였다.

Table 3.3.42 강도특성 결과 (Soil=60%, W/C=185.71%)

No.	유기물함유량(%)	고화재 종류	4시간 (kg/cm^2)	1일 (kg/cm^2)	7일 (kg/cm^2)	28일 (kg/cm^2)
T2-C1-c	5	C-10	1.321	2.994	9.266	11.241
T2-C2-c	10		1.227	2.764	9.554	11.884
T2-C3-c	15		0.956	2.665	7.632	9.093
T2-C4-c	20		-	0.98	3.553	8.195
T2-C5-c	25		-	-	2.345	7.843
T2-C6-c	5	S	1.093	2.879	13.442	21.094
T2-C7-c	10		-	2.123	14.549	20.991
T2-C8-c	15		-	2.194	12.54	18.772
T2-C9-c	20		-	-	4.889	11.548
T2-C10-c	25		-	-	3.662	9.879

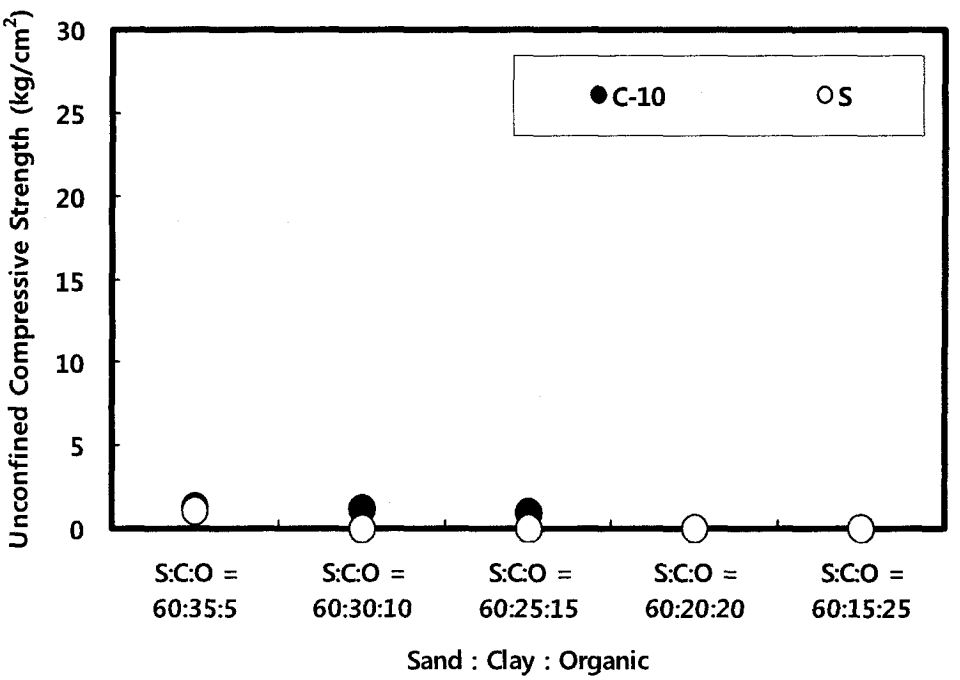


Fig. 3.3.144 재령 4시간 일축압축강도 (Soil=60%, W/C=185.71%)

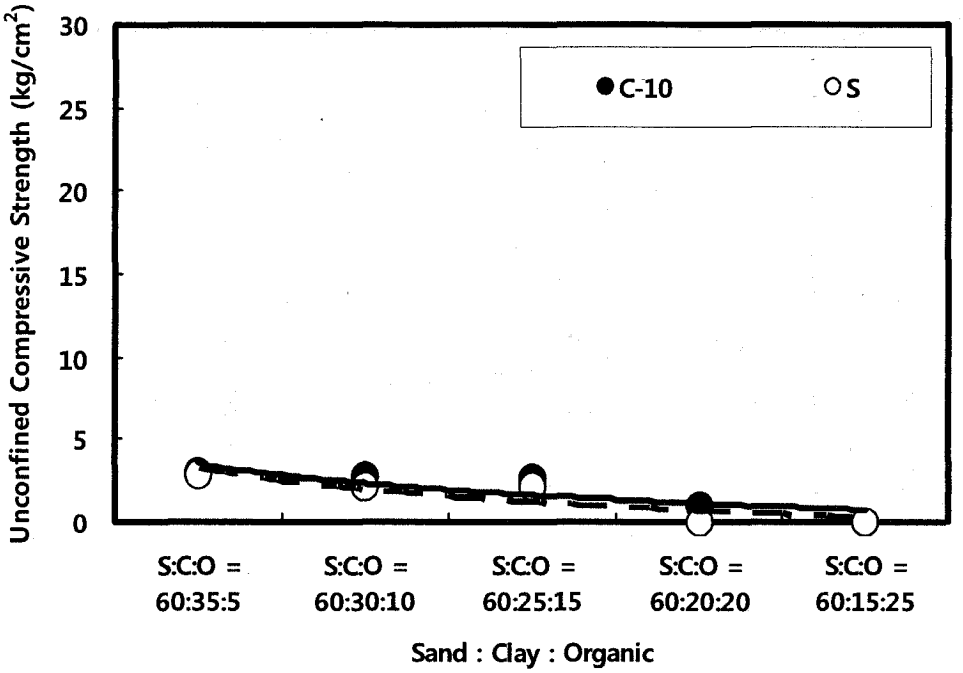


Fig. 3.3.145 재령 1일 일축압축강도 (Soil=60%, W/C=185.71%)

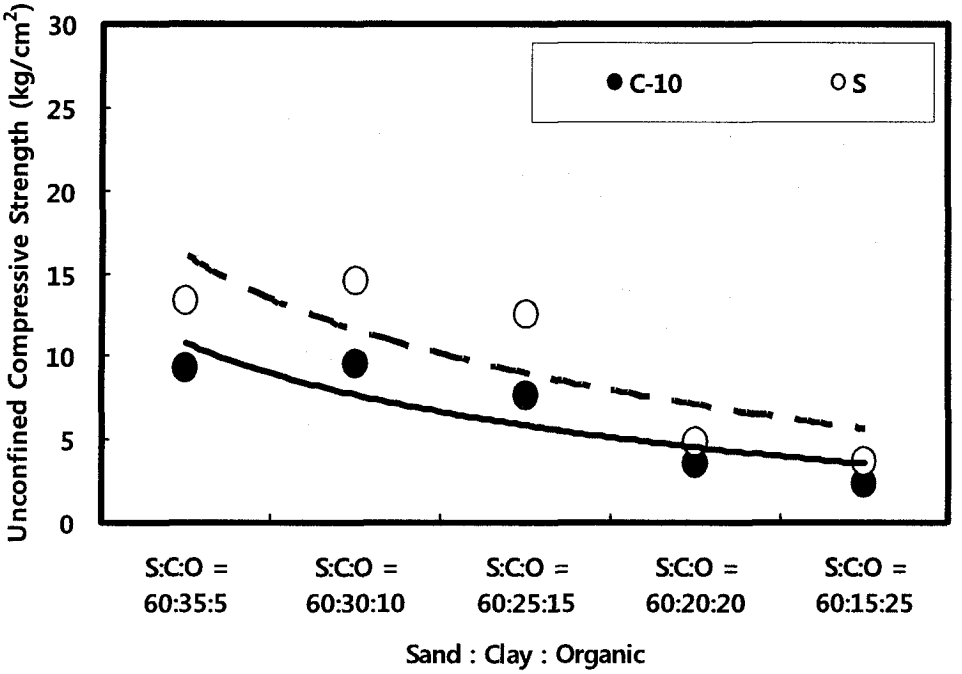


Fig. 3.3.146 재령 7일 일축압축강도 (Soil=60%, W/C=185.71%)

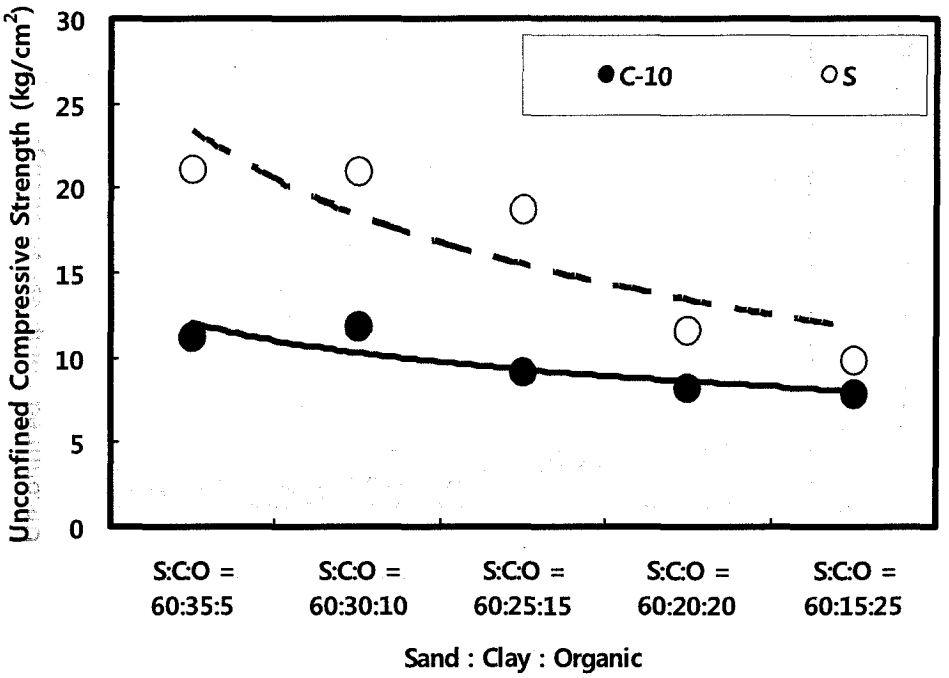


Fig. 3.3.147 재령 28일 일축압축강도 (Soil=60%, W/C=185.71%)

(라) Soil=60%, W/C=233.33%

Fig. 3.3.148~Fig. 3.3.151은 Soil=60%, W/C=233.33%의 실험조건일 때, 유기질 함유량에 따른 일축압축강도를 나타냈다. 재령 4시간 일축압축강도의 경우, Soil=60%, W/C=233.33% 조건의 유기물 함유량에 따른 강도특성과 유사한 결과를 나타냈다. C-10 고화재를 사용한 실험조건에서는 유기물 함유량이 5%~15%일 때 일축압축강도를 측정할 수 있었고, S 고화재를 사용한 실험조건에서는 5%의 유기물을 함유한 조건에서 일축압축강도를 측정할 수 있었다. 재령 4시간일 때는 전반적으로 큰 강도발현을 보이지 못 하였다. 재령 1일 일축압축강도는 C-10 고화재를 사용한 경우, 유기물 함유량이 25%인 실험의 일축압축강도를 측정하지 못하였고, S 고화재를 사용한 경우, 20%~25%의 유기물을 함유한 실험에서의 일축압축강도를 측정할 수 없었다. 재령 7일 일축압축강도는 모든 실험조건에서 S 고화재를 사용한 유동화 처리토의 일축압축강도가 크게 나타났고, 유기물 함유량의 증가에 따른 일축압축강도 감소 경향도 확인할 수 있었다. 재령 28일 일축압축강도의 경우, S 고화재를 사용한 유동화 처리토의 일축압축강도가 크게 나타났고, 이러한 현상은

자갈의 함유량이 낮은 실험조건에서 뚜렷하게 나타났다. 재령 28일 일축압축강도의 경우, S 고화재를 사용한 실험의 일축압축강도가 C-10을 사용한 일축압축강도에 비해 모든 실험조건에서 큰 값을 보였고, 이러한 강도의 차이는 유기물 함유량이 적은 조건에서 더 크게 나타났다. C 고화재를 사용한 경우의 재령 28일 강도는 유기물 함유량의 증가에 큰 영향을 받지 않았지만, S 고화재를 사용한 경우의 유기물 함유량 증가에 따른 일축압축강도 감소 경향이 뚜렷하게 나타났다.

Table 3.3.43 강도특성 결과 (Soil=60%, W/C=233.33%)

No.	유기물함유량 (%)	고화재 종류	4시간 (kg/cm^2)	1일 (kg/cm^2)	7일 (kg/cm^2)	28일 (kg/cm^2)
T2-C1-d	5	C-10	1.009	1.896	7.727	9.821
T2-C2-d	10		0.765	1.534	6.483	9.403
T2-C3-d	15		0.543	2.632	6.998	8.443
T2-C4-d	20		-	0.654	2.089	6.234
T2-C5-d	25		-	-	1.754	5.775
T2-C6-d	5	S	0.852	1.973	9.047	18.885
T2-C7-d	10		-	1.872	8.972	19.436
T2-C8-d	15		-	2.233	8.714	14.657
T2-C9-d	20		-	-	4.095	8.715
T2-C10-d	25		-	-	2.099	7.452

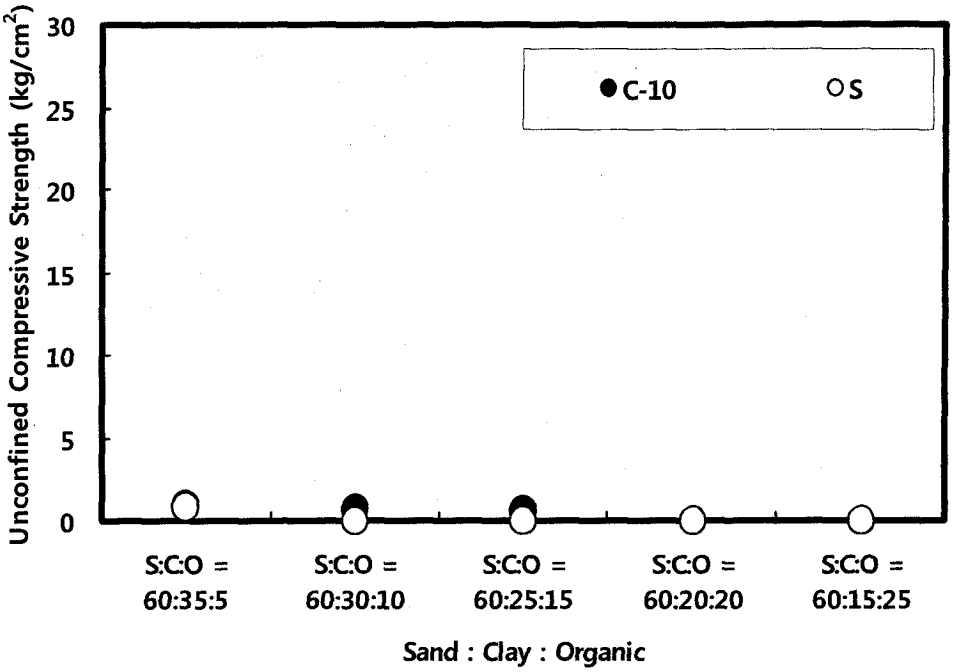


Fig. 3.3.148 재령 4시간 일축압축강도 (Soil=60%, W/C=233.33%)

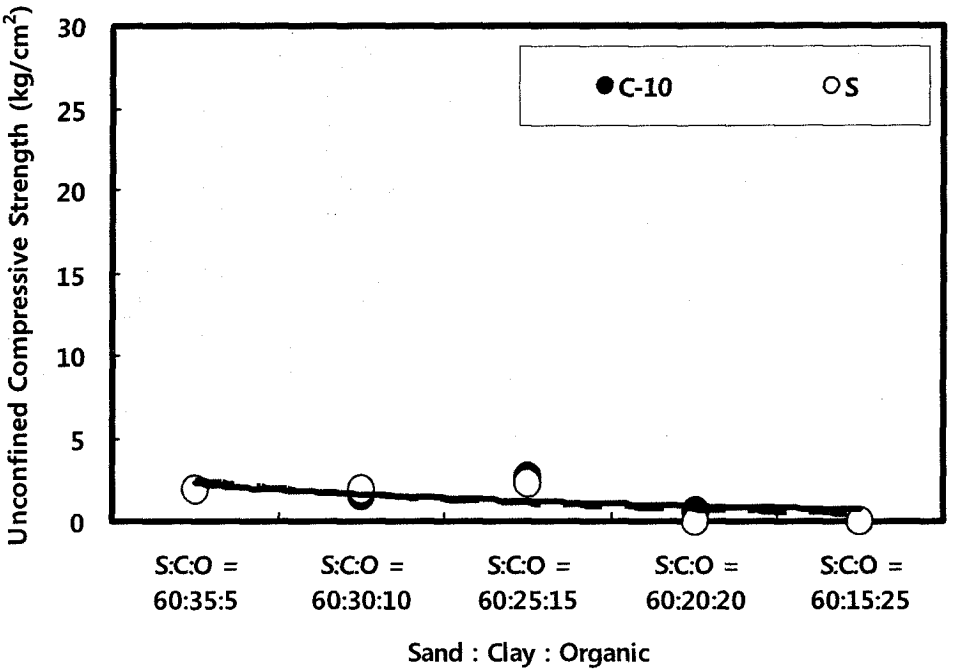


Fig. 3.3.149 재령 1일 일축압축강도 (Soil=60%, W/C=233.33%)

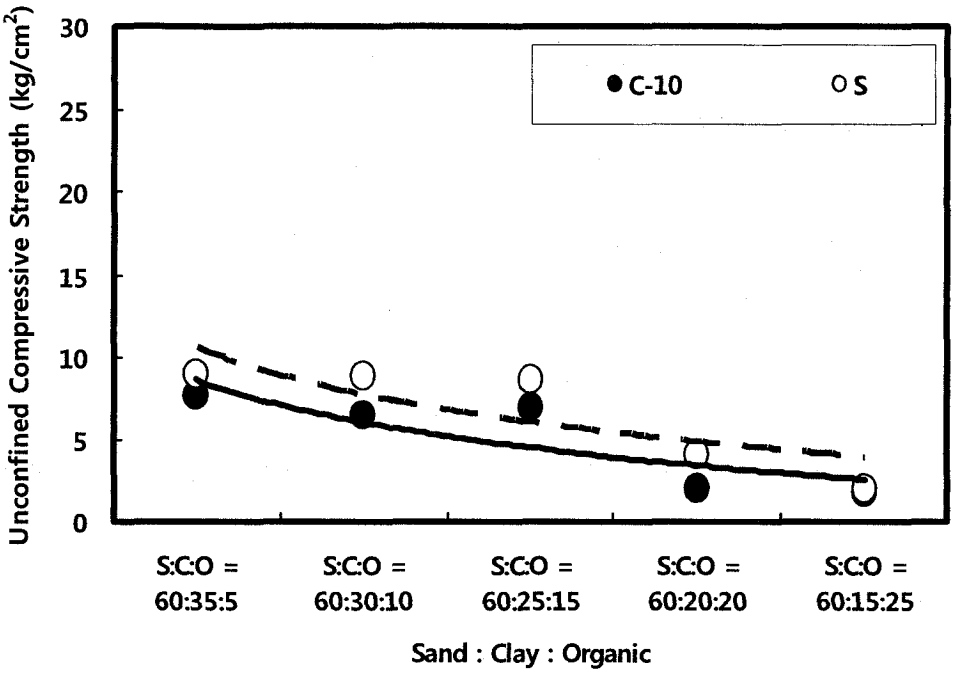


Fig. 3.3.150 재령 7일 일축압축강도 (Soil=60%, W/C=233.33%)

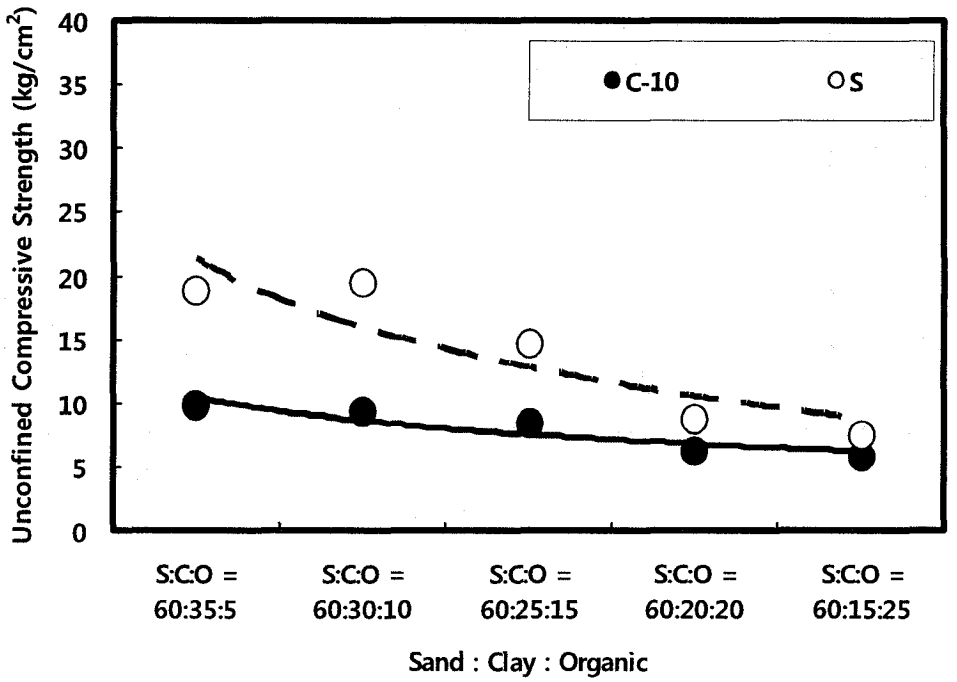


Fig. 3.3.151 재령 28일 일축압축강도 (Soil=60%, W/C=233.33%)

(2) 시료비율과 배합비에 따른 강도특성

(가) Soil=50%, W/C=194.12%

Fig. 3.3.152는 Soil=50%, W/C=194.12%일 때의 C-10 고화재를 사용하여 제조한 유동화 처리토의 양생시간에 따른 일축압축강도를 나타낸 결과이다. 유기물 함유량이 5%인 경우를 제외하고, 양생 4시간 후 자립이 불가능하여 재령 4시간 일축압축강도의 측정이 불가능하였다. 양생 1일 후에도 유기물 함유량이 20%, 25%인 실험조건은 일축압축강도를 측정할 수 없었다. 양생시간의 경과에 따라 일축압축강도는 증가하였고, 재령 28일 강도는 유기물 함유량의 차이와 상관없이 거의 동일한 값을 나타냈다.

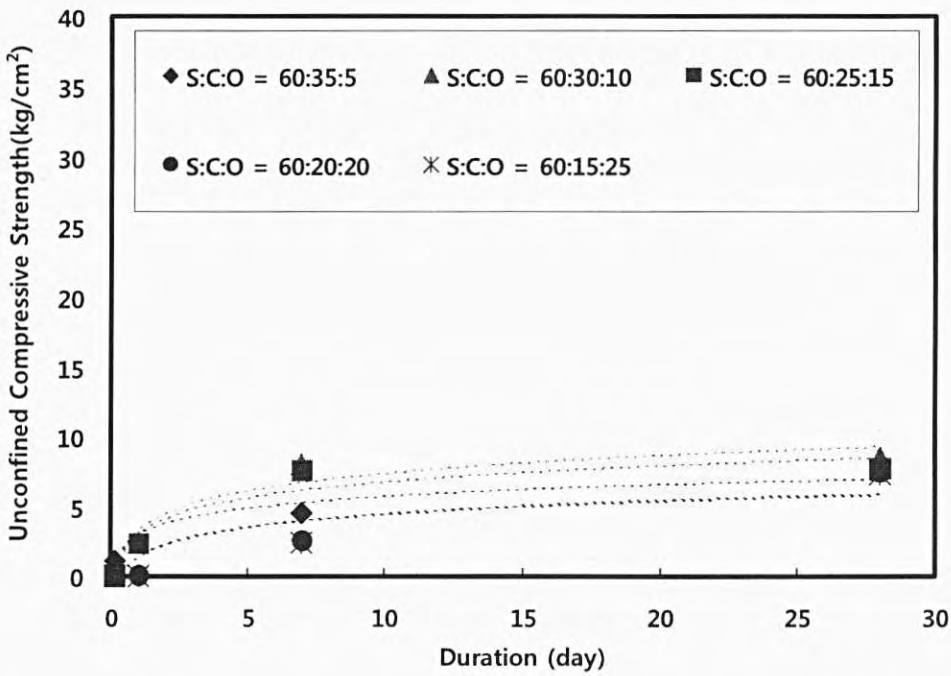


Fig. 3.3.152 Soil=50%, W/C=194.12% 조건의 양생기간에 따른 일축압축강도(C-10)

Fig. 3.3.153은 Soil=50%, W/C=194.12%일 때의 S 고화재를 사용하여 제조한 유동화 처리토의 양생시간에 따른 일축압축강도를 나타낸 결과이다. 유기물 함유량 10%~25%의 재령 4시간 일축압축강도와 유기물 함유량 20%~25%의 재령 1일 일

축압축강도는 공시체의 자립이 불가능하여 일축압축강도를 측정할 수 없었다. 유기물 함유량이 5%에서 재령 28일 일축압축강도가 가장 크게 나타났고, 유기물 함유량이 감소할수록 재령 28일 일축압축강도가 점차 감소하는 것을 알 수 있었다.

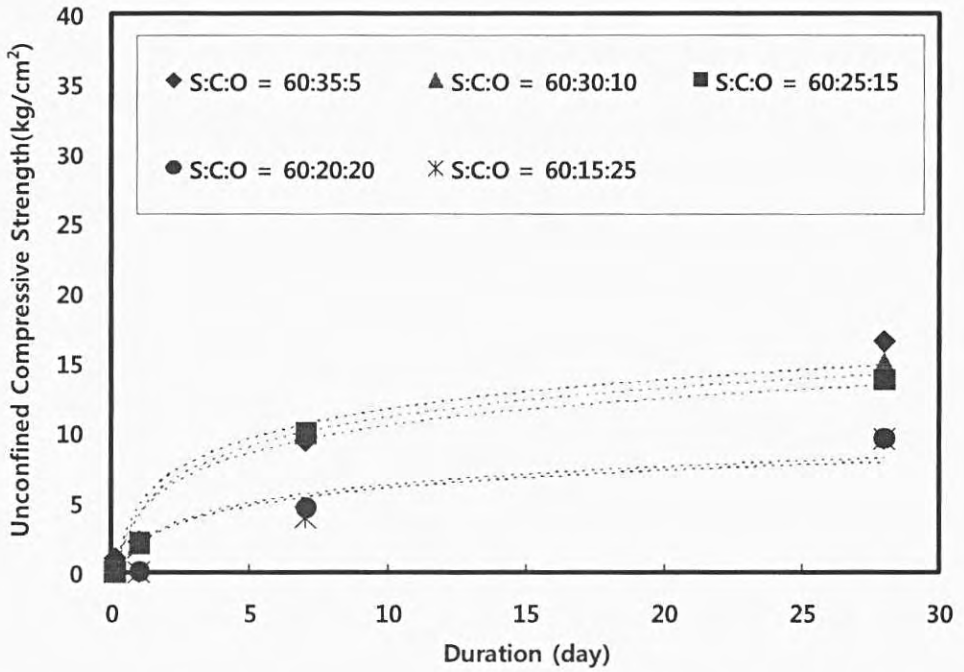


Fig. 3.3.153 Soil=50%, W/C=194.12% 조건의 양생기간에 따른 일축압축강도(S)

(나) Soil=50%, W/C=233.33%

Fig. 3.3.154는 Soil=50%, W/C=233.33%일 때의 C-10 고화재를 사용하여 제조한 유동화 처리토의 양생시간에 따른 일축압축강도를 나타낸 결과이다. 유기물 함유량이 5%인 경우를 제외하고, 양생 4시간 후 자립이 불가능하여 재령 4시간 일축압축강도의 측정이 불가능하였다. 양생 1일 후에도 유기물 함유량이 20%, 25%인 실험 조건은 일축압축강도를 측정할 수 없었다. 양생시간의 경과에 따라 일축압축강도는 증가하는 경향을 나타냈고, 유기물 함유량이 낮은 5%, 15%의 실험 조건에서 장기강도가 크게 발현되었지만, 큰 값의 차이를 보이진 않았다.

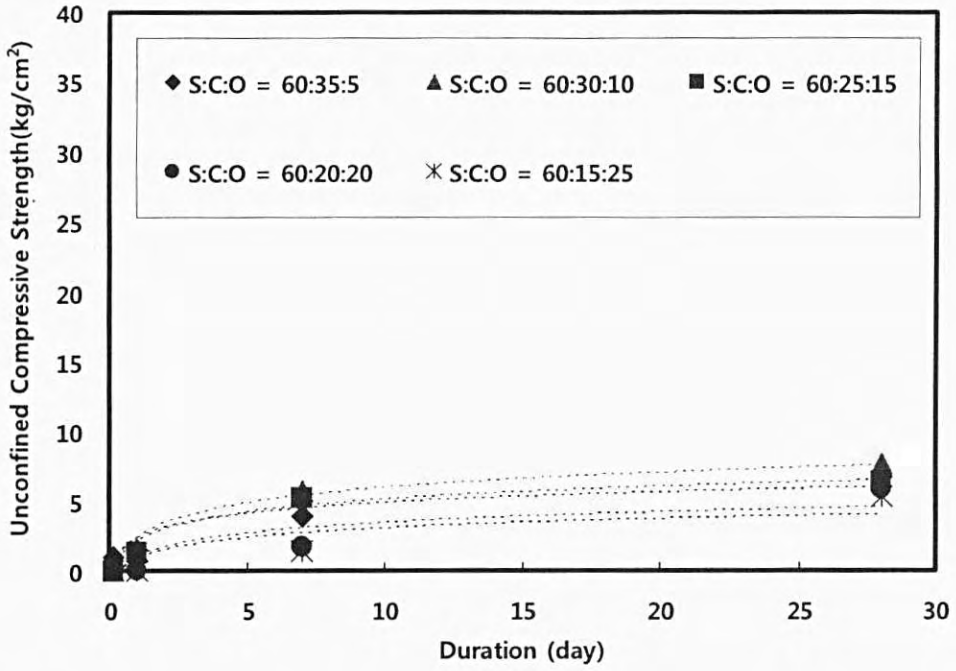


Fig. 3.3.154 Soil=50%, W/C=233.33% 조건의 양생기간에 따른 일축압축강도(C-10)

Fig. 3.3.155는 Soil=50%, W/C=233.33%일 때의 S 고화재를 사용한 유동화 처리토의 양생시간에 따른 일축압축강도를 나타낸 결과이다. 양생 4시간 후 유기물 함유량이 5%인 경우와 양생 1일 후 유기물 함유량이 5%~15%인 경우에서만 일축압축강도를 측정할 수 있었다. 유기물 함유량이 가장 낮을수록 장기강도의 발현이 크게 나타났다.

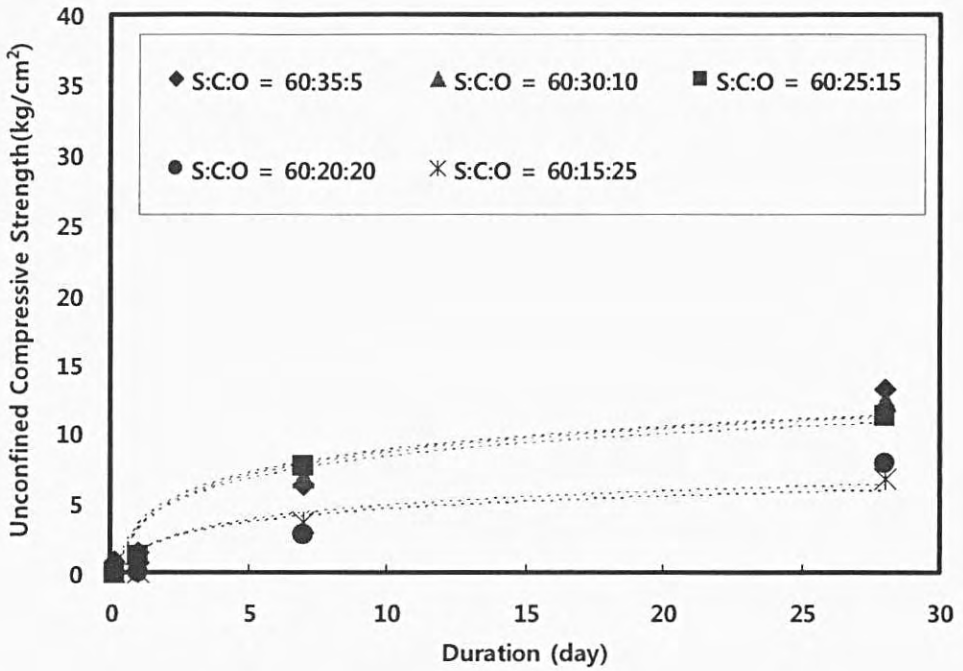


Fig. 3.3.155 Soil=50%, W/C=233.33% 조건의 양생기간에 따른 일축압축강도(S)

(다) Soil=60%, W/C=185.71%

Fig. 3.3.156에 Soil=60%, W/C=185.71%일 때의 C-10 고화재를 사용하여 제조한 유동화 처리토의 양생시간에 따른 일축압축강도 결과를 나타냈다. 재령 4시간 강도는 양생 4시간 후 자립이 되었던 유기물 함유량 5%~15%의 실험 조건에서 측정하였다. 재령 1일 강도도 유기물 함유량 5%~20%의 실험 조건에서 측정할 수 있었다. 일축압축강도는 양생시간이 증가할수록 증가하는 결과를 보였고, 유기물 함유량이 작은 경우 더 큰 강도값을 나타냈다.

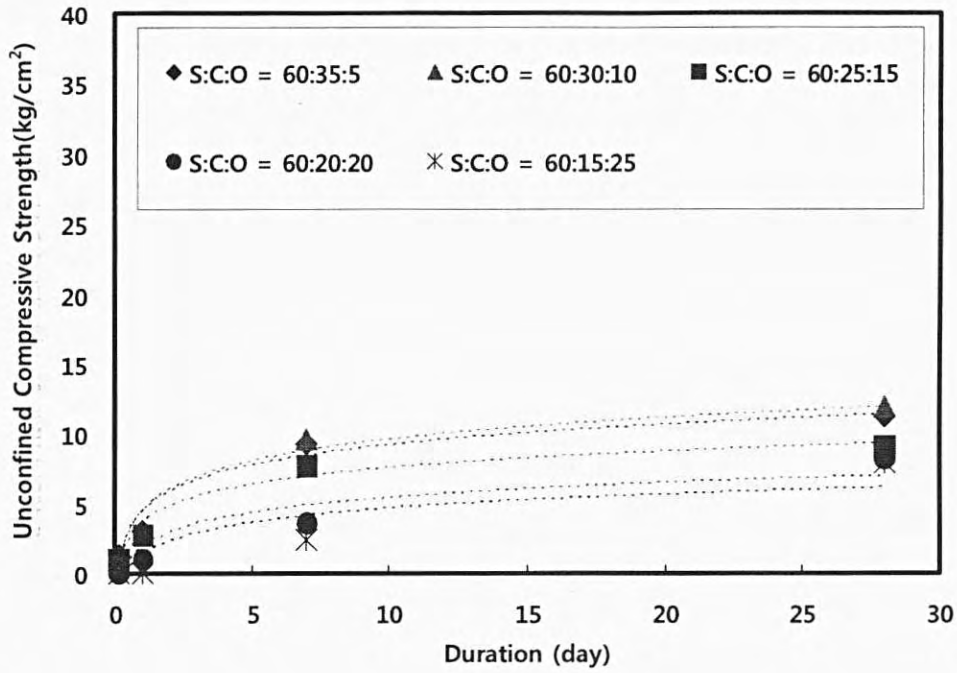


Fig. 3.3.156 Soil=60%, W/C=185.71% 조건의 양생기간에 따른 일축압축강도(C-10)

Fig. 3.3.157은 Soil=60%, W/C=185.71%일 때의 S 고화재를 사용한 유동화 처리토의 양생시간에 따른 일축압축강도를 나타낸 결과이다. 재령 4시간 강도는 양생 4시간 후 자립이 되었던 유기물 함유량 5%의 실험 조건에서만 측정할 수 있었고, 재령 1일 강도도 유기물 함유량 5%~15%의 실험 조건에서 측정할 수 있었다. 유기물 함유량이 증가할수록 양생기간에 따른 일축압축강도는 감소하는 경향을 보였고, 유기물 함유량이 20% 이상인 경우 이러한 감소 현상은 뚜렷하게 나타났다.

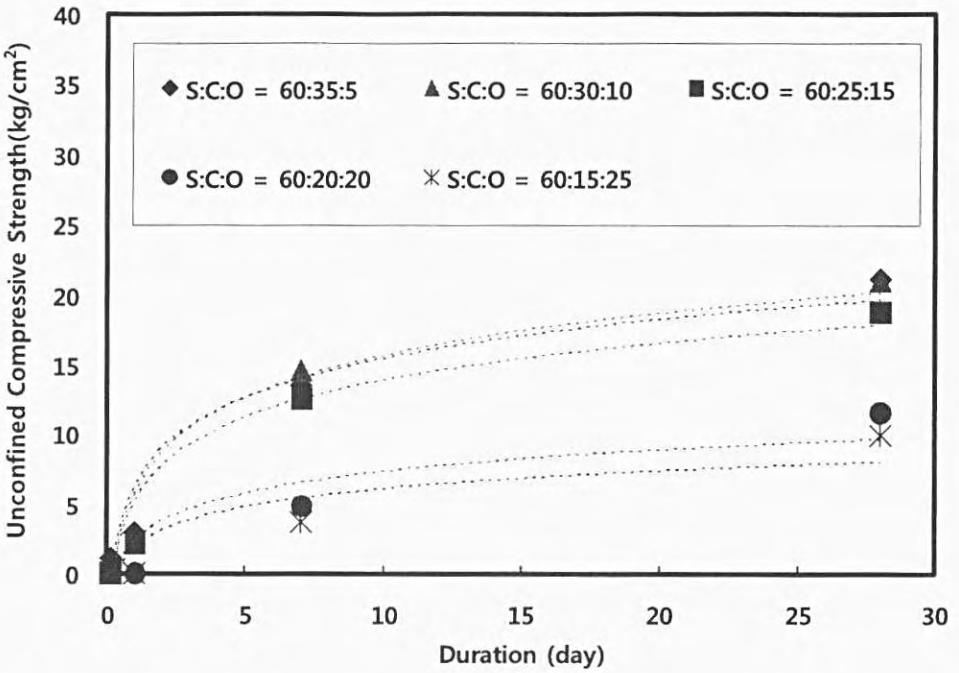


Fig. 3.3.157 Soil=60%, W/C=185.71% 조건의 양생기간에 따른 일축압축강도(S)

(라) Soil=60%, W/C=233.33%

Fig. 3.3.158에 Soil=60%, W/C=233.33%일 때의 C-10 고화재를 사용하여 제조한 유동화 처리토의 양생시간에 따른 일축압축강도 결과를 나타냈다. 유기물 함유량이 20%~25%인 경우의 재령 4시간 일축압축강도, 유기물 함유량이 25%인 경우의 재령 1일 강도는 시료의 자립이 불가능하여 측정할 수 없었다. 유기물 함유량이 증가할수록 강도는 감소하는 경향을 나타냈지만, 값의 차이는 미미하였다.

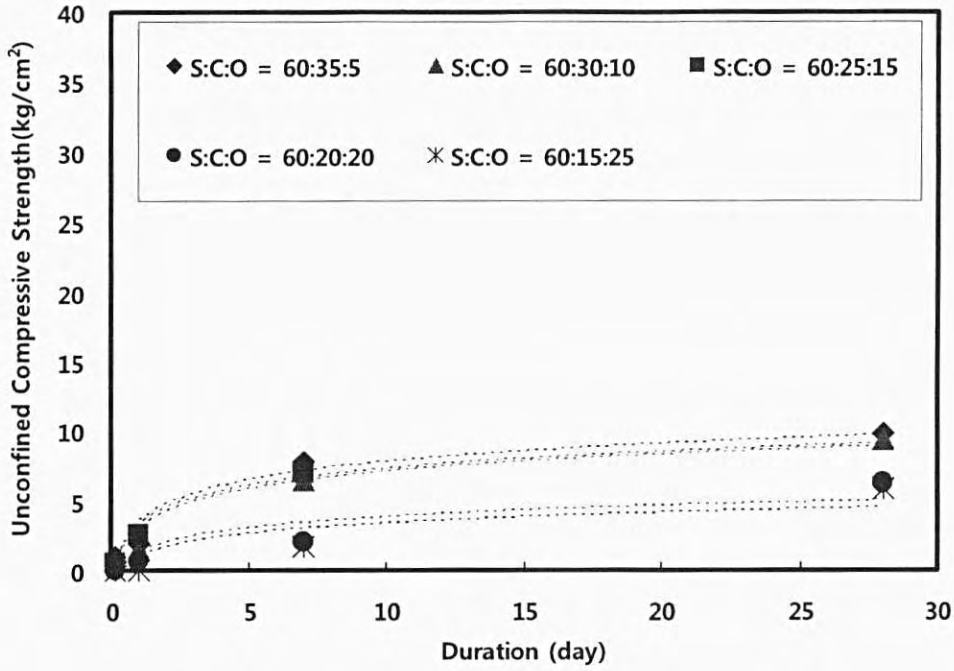


Fig. 3.3.158 Soil=60%, W/C=233.33% 조건의 양생기간에 따른 일축압축강도(C-10)

Fig. 3.3.159는 Soil=60%, W/C=233.33%일 때의 S 고화재를 사용한 유동화 처리토의 양생시간에 따른 일축압축강도를 나타낸 결과이다. 유기물 함유량이 10%~25%인 경우의 재령 4시간 일축압축강도, 유기물 함유량이 20%~25%인 경우의 재령 1일 강도는 시료의 자립이 불가능하여 측정할 수 없었다. 유기물 함유량이 증가할수록 강도는 감소하였고, 특히 유기물 함유량이 20% 이상인 유동화 처리토의 강도는 현저히 감소하는 것으로 나타났다.

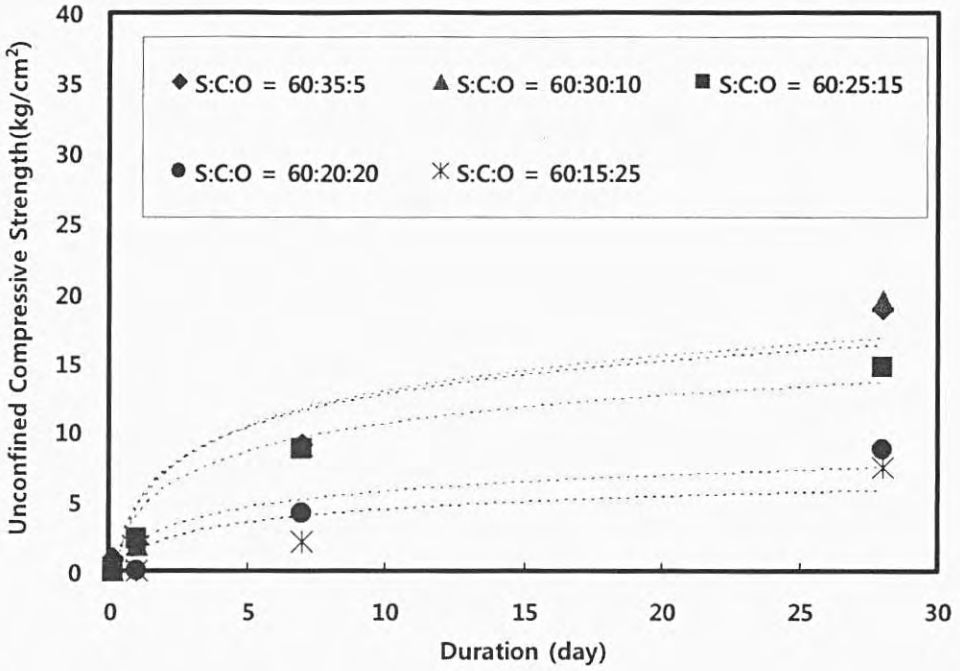


Fig. 3.3.159 Soil=60%, W/C=233.33% 조건의 양생기간에 따른 일축압축강도(S)

(3) 고화재의 종류에 따른 강도특성

Fig. 3.3.160~Fig. 3.3.163에 실험에 사용된 고화재의 종류에 따른 강도특성을 평가하기 위해 C-10 고화재를 사용하였을 때의 재령 1일과 재령 28일의 일축압축강도를 S 고화재를 사용하였을 때의 각각의 재령 1일과 재령 28일의 일축압축강도로 정규화하여 나타냈다. 유기물 함유량 20%와 25%의 재령 1일 일축압축강도는 고화재의 자립이 불가능하여 측정할 수 없었기 때문에, 정규화하지 못했다.

Soil=50%, W/C=194.12% 조건의 경우, 재령 1일 일축압축강도 증가율은 100% 이상으로 C-10 고화재를 사용한 경우가 더 크게 나타났고, 재령 28일 일축압축강도 증가율은 100% 이하로 S 고화재를 사용한 경우가 더 크게 나타났다. 재령 28일의 고화재의 종류에 따른 강도 차이는 유기물 함유량이 증가할수록 뚜렷하게 나타났다.

Soil=50%, W/C=233.33% 조건의 경우, 재령 1일의 일축압축강도 증가율이 100%~133%의 값을 나타낸 것을 통해 C-10 고화재에 의한 강도 발현 효과가 더 좋다는 것을 파악할 수 있었지만, 고화재에 의한 강도특성의 차이는 미미하였다. 하

지만 재령 28일의 일축압축강도 증가율은 50%~78%의 값을 나타냈고, 장기강도의 발현 효과가 C-10에 비해 S 고화재가 크다는 것을 알 수 있었다. 이러한 경향은 유기물 함유량에 비례하여 나타났다.

Soil=60%, W/C=185.71% 조건의 경우, 재령 1일의 일축압축강도 증가율은 103%~130%로 C-10 고화재를 사용한 경우 일축압축강도가 비교적 크게 나타났지만 그 차이는 크지 않았고, 재령 28일 일축압축강도 증가율은 48%~79%로 S 고화재를 사용한 경우가 더 크게 나타났다.

Soil=60%, W/C=233.33% 조건의 경우, 재령 1일 일축압축강도는 C-10 고화재를 사용한 경우가 S 고화재를 사용한 경우보다 비슷하거나 다소 큰 일축압축강도를 나타내는 것을 파악할 수 있었고, 재령 28일 일축압축강도는 S 고화재를 사용했을 때의 강도발현이 크다는 것을 알 수 있었다.

고화재의 종류에 의한 강도특성의 변화를 측정한 결과, C-10 고화재와 S 고화재의 조기강도는 큰 차이가 없었지만, 장기강도의 발현은 S 고화재를 사용하여 제조한 유동화 처리토에서 높게 나타났고, 이러한 현상은 유기질 함유량이 증가함에 따라 더 뚜렷하게 나타나는 것을 파악할 수 있었다.

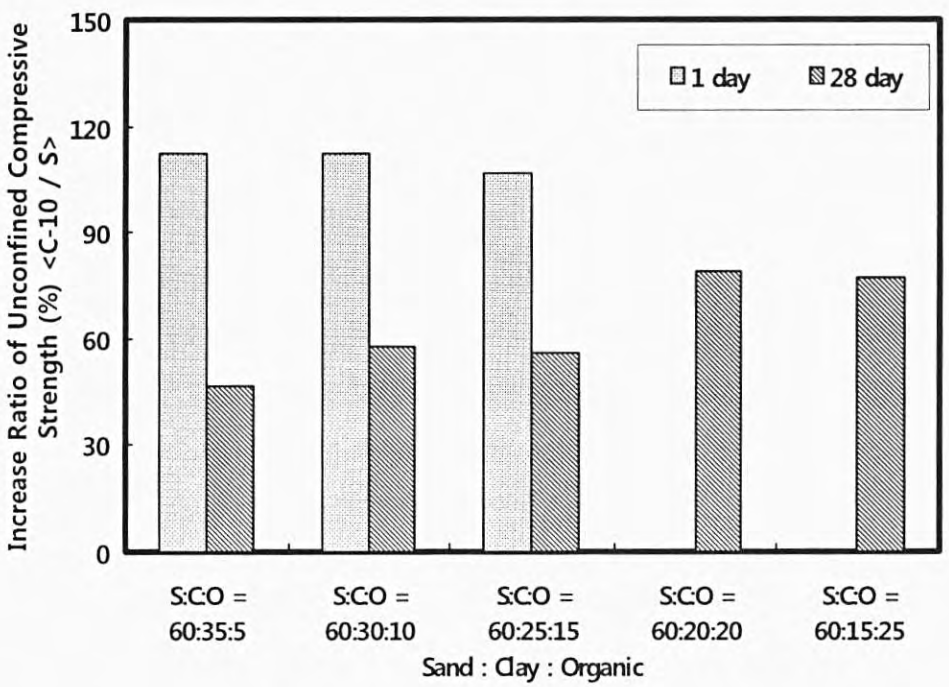


Fig. 3.3.160 Soil=50%, W/C=194.12% 조건의 고화재에 따른 강도특성 (C-10/S)

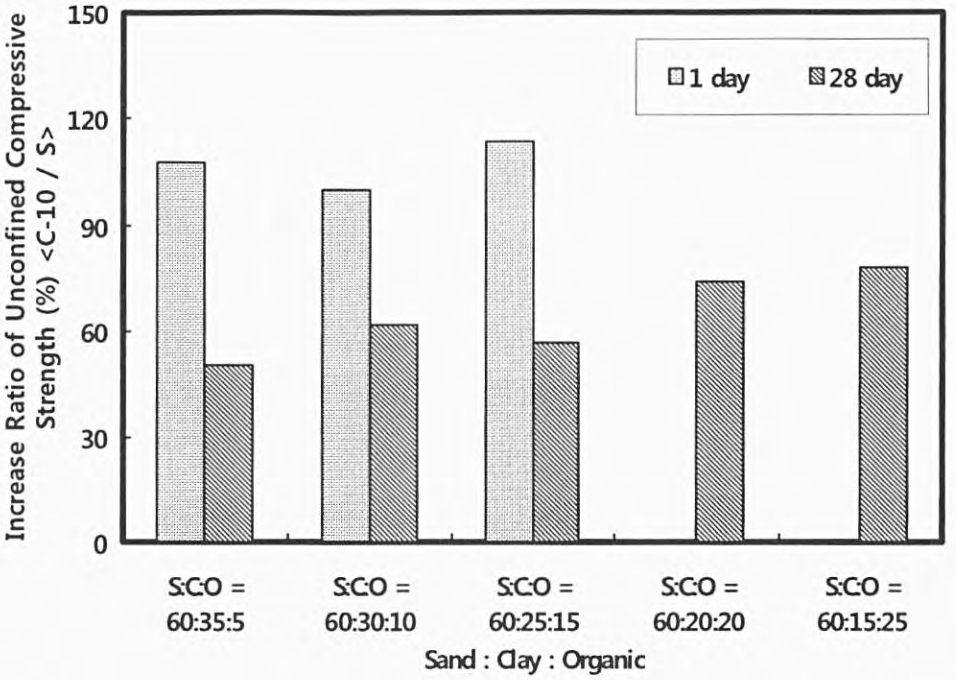


Fig. 3.3.161 Soil=50%, W/C=233.33% 조건의 고화재에 따른 강도특성 (C-10/S)

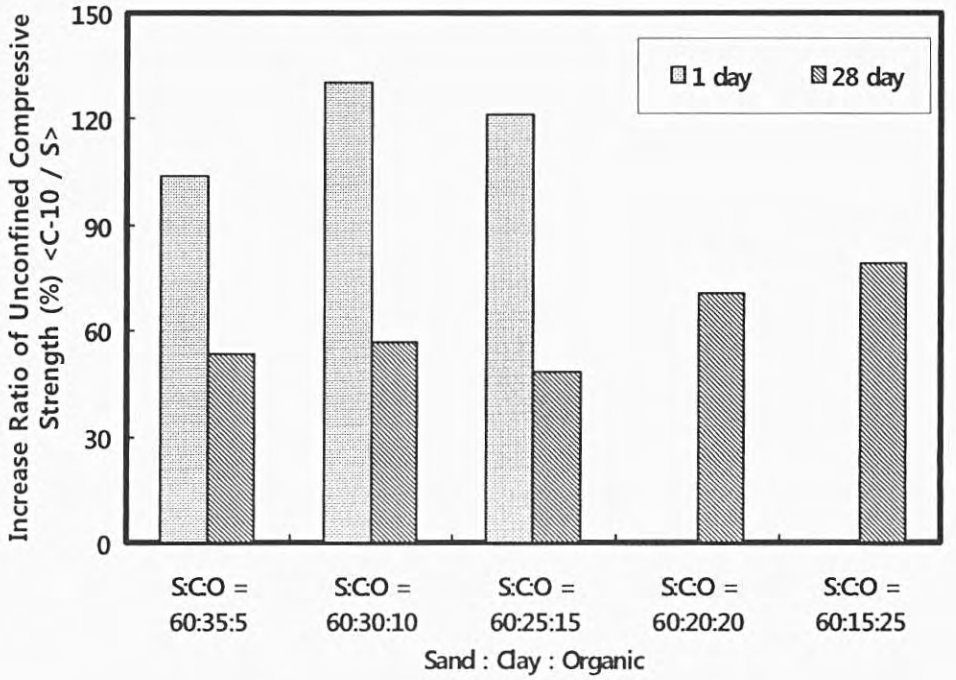


Fig. 3.3.162 Soil=60%, W/C=185.71% 조건의 고화재에 따른 강도특성 (C-10/S)

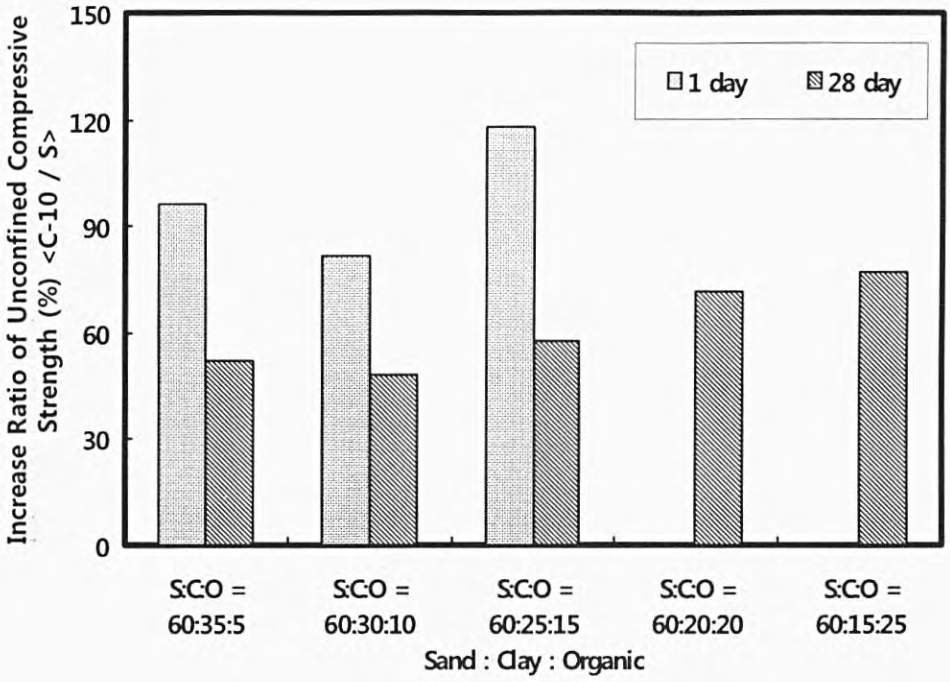


Fig. 3.3.163 Soil=60%, W/C=233.33% 조건의 고화재에 따른 강도특성 (C-10/S)

라. 투수특성

Table 3.3.44에 유기질 함유량에 따른 투수특성의 변화를 파악하고자 28일 경화 후 유동화 처리토의 변수위 투수계수를 제시하였다. Fig. 3.3.164와 Fig. 3.3.165에는 각각 C-10 고화재와 S 고화재를 사용하여 제조한 유동화 처리토의 28일 후의 변수위 투수실험 결과를 나타냈다. 고화재의 종류, 유기물의 함유량, 시료의 비율, W/C에 영향을 받지 않고 모든 실험조건에서 일반적인 유동화 처리토의 투수계수 범위(10^{-6}~10^{-7}cm/sec)에 적합한 3.13×10^{-6}~4.98×10^{-6}cm/sec의 범위를 나타냈다. 이를 통해, 유기물 함유량이 유동화 처리토의 투수특성에는 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 파악할 수 있었다.

Table 3.3.44 유기물 함유량에 따른 유동화 처리토의 변수위 투수계수(cm/sec)

No.		투수계수	No.		투수계수	No.		투수계수	No.		투수계수	No.		투수계수
T2-C1	a	3.48×10^{-6}	T2-C3	a	3.98×10^{-6}	T2-C5	a	3.54×10^{-6}	T2-C7	a	3.98×10^{-6}	T2-C9	a	4.00×10^{-6}
	b	3.96×10^{-6}		b	3.13×10^{-6}		b	4.32×10^{-6}		b	3.67×10^{-6}		b	4.98×10^{-6}
	c	4.73×10^{-6}		c	4.64×10^{-6}		c	3.35×10^{-6}		c	3.19×10^{-6}		c	3.88×10^{-6}
	d	4.08×10^{-6}		d	3.75×10^{-6}		d	3.76×10^{-6}		d	3.43×10^{-6}		d	4.15×10^{-6}
T2-C2	a	3.22×10^{-6}	T2-C4	a	4.52×10^{-6}	T2-C6	a	4.57×10^{-6}	T2-C8	a	4.97×10^{-6}	T2-C10	a	4.54×10^{-6}
	b	3.23×10^{-6}		b	4.12×10^{-6}		b	3.67×10^{-6}		b	4.18×10^{-6}		b	3.35×10^{-6}
	c	4.86×10^{-6}		c	4.65×10^{-6}		c	4.10×10^{-6}		c	3.35×10^{-6}		c	3.67×10^{-6}
	d	4.23×10^{-6}		d	3.76×10^{-6}		d	4.20×10^{-6}		d	3.91×10^{-6}		d	4.21×10^{-6}

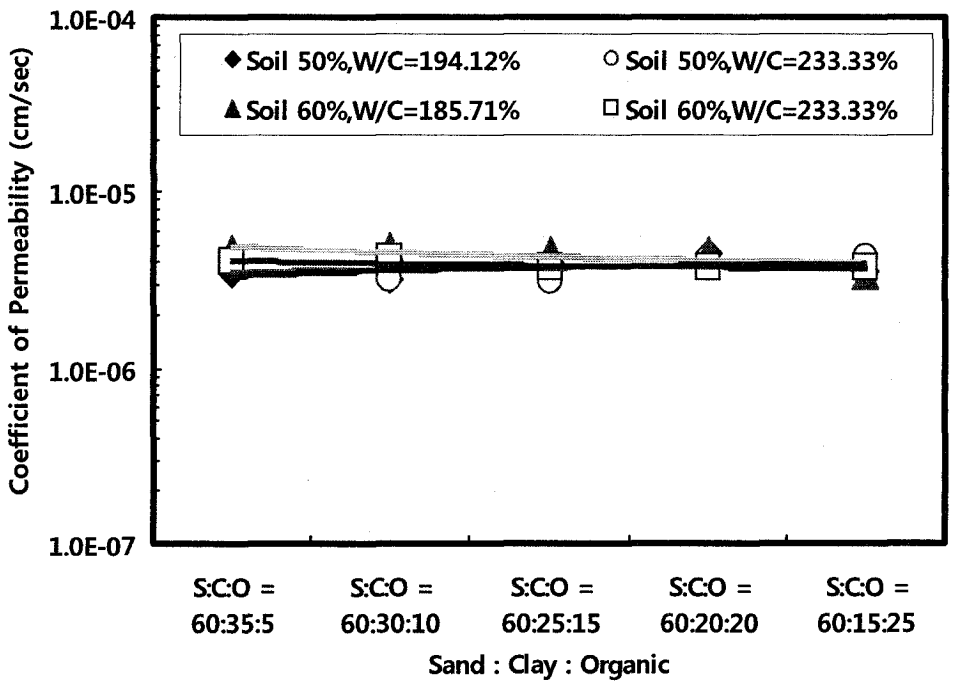


Fig. 3.3.164 유기물 함유량에 따른 변수위 투수계수 (C-10)

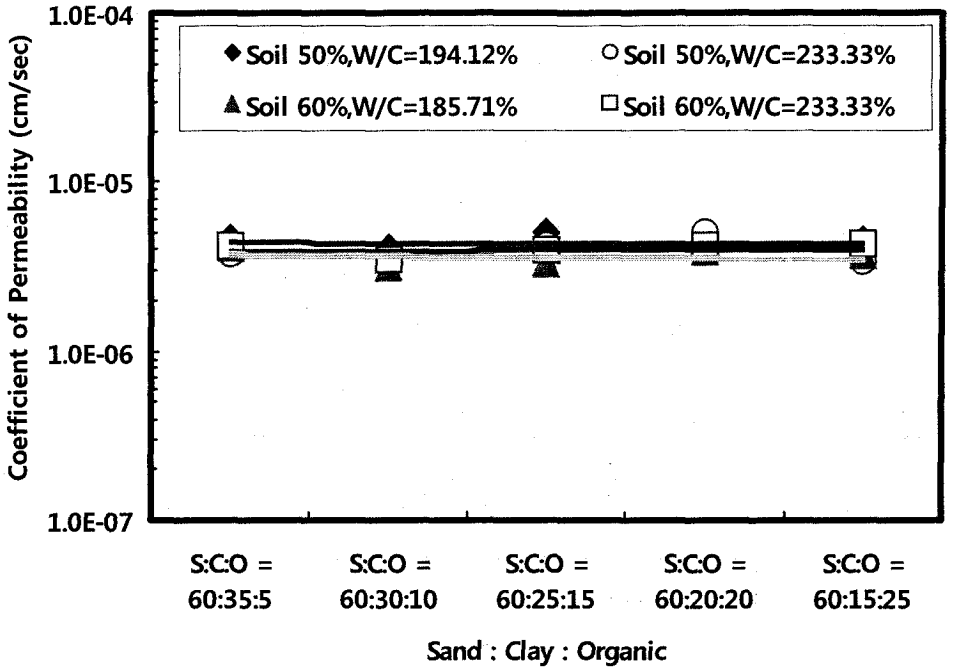


Fig. 3.3.165 유기물 함유량에 따른 변수위 투수계수 (S)

6. 석탄회를 첨가한 유동화 처리토의 배합 특성

가. 석탄회를 첨가한 유동화 처리토의 시료비율에 따른 배합 특성

(1) 재료분리 특성

시료(현장발생토:석탄회=50:50)의 비율에 따른 재료분리 특성을 파악하기 위해 블리딩율을 측정하였고, 그 결과를 Table 3.3.45와 Fig. 3.3.166에 제시하였다. 블리딩율을 통해 석탄회를 첨가한 유동화 처리토의 재료분리 특성을 측정한 결과, 시료비율이 30%~60%인 실험조건에서는 목표기준에 만족하지 못하였으나, 시료비율이 증가할수록 재료분리 현상은 감소하는 것으로 나타났고, 시료비율이 70%, 80%인 조건에서는 목표기준인 1% 이하의 블리딩율을 나타냈다.

Table 3.3.45 석탄회 첨가시 시료의 양에 따른 재료분리 특성 실험 결과

No.	블리딩율	No.	블리딩율	No.	블리딩율
T5-C1	15.5%	T5-C3	10.5%	T5-C5	1% 이하
T5-C2	13.6%	T5-C4	2.4%	T5-C6	1% 이하

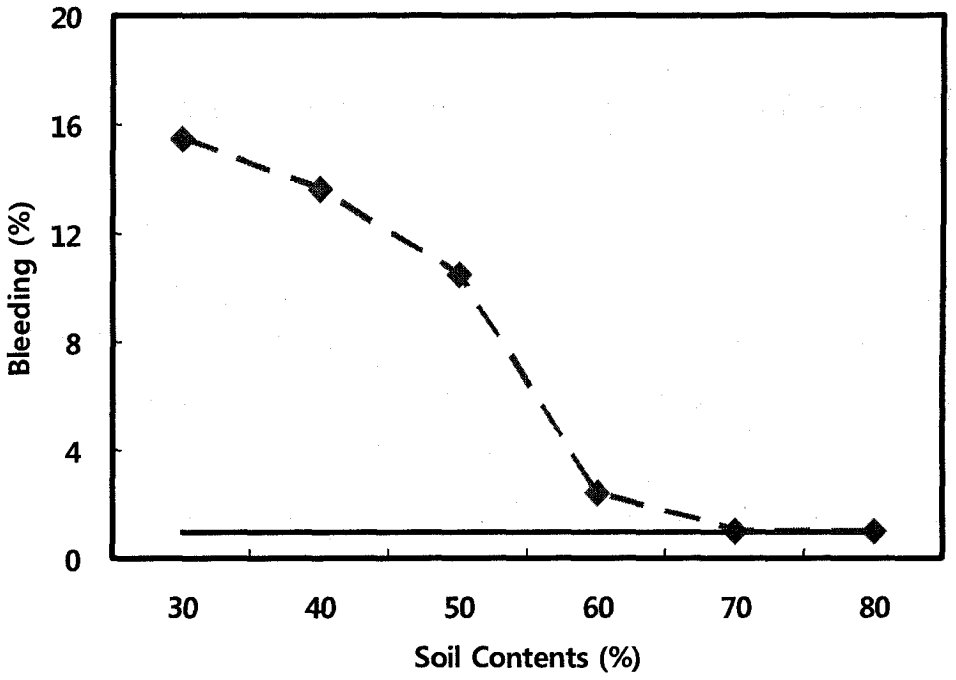


Fig. 3.3.166 석탄회 첨가시 시료의 양에 따른 블리딩율

(2) 유동성

시료(현장발생토:석탄회=50:50)의 비율에 따른 유동성을 JHS, ASTM, Slump Flow의 3가지 기준으로 파악하였다. Table 3.3.46에 시료(현장발생토:석탄회=50:50)의 비율에 따른 유동성 결과를 제시하였고, Fig. 3.3.167~Fig. 3.3.169에 각각 JHS, ASTM, Slump Flow에 의한 유동성 결과를 나타냈다. 시료비율이 증가할수록 유동성은 점차 감소하는 경향을 보였고, 이러한 경향은 JHS, ASTM, Slump Flow 3가지에서 공통적으로 나타났다. JHS에 의한 유동성 측정 결과, 시료비율이 60%~70% 사이에서 목표기준을 만족할 것으로 판단되고, ASTM의 결과 시료비율이 65%의 이하일 때에 목표 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 마지막으로 Slump Flow를 통해 측정한 유동성 결과 역시, JHS의 결과와 같이 시료비율 60%~70%에서 목표기준을 만족하는 것을 알 수 있었다.

Table 3.3.46 석탄회 첨가시 석탄회의 양에 따른 유동성 실험 결과

No.	석탄회 (%)	고화재 종류	JHS (cm)	ASTM (cm)	Slump Flow (cm)
T5-C1	15	C-10	48.6	56.8	89.6
T5-C2	20		41.4	48.4	77.6
T5-C3	25		38.8	41.4	78.6
T5-C4	30		32.5	39.4	69.7
T5-C5	35		16.7	25.3	43.6
T5-C6	40		11.3	20.1	45.8

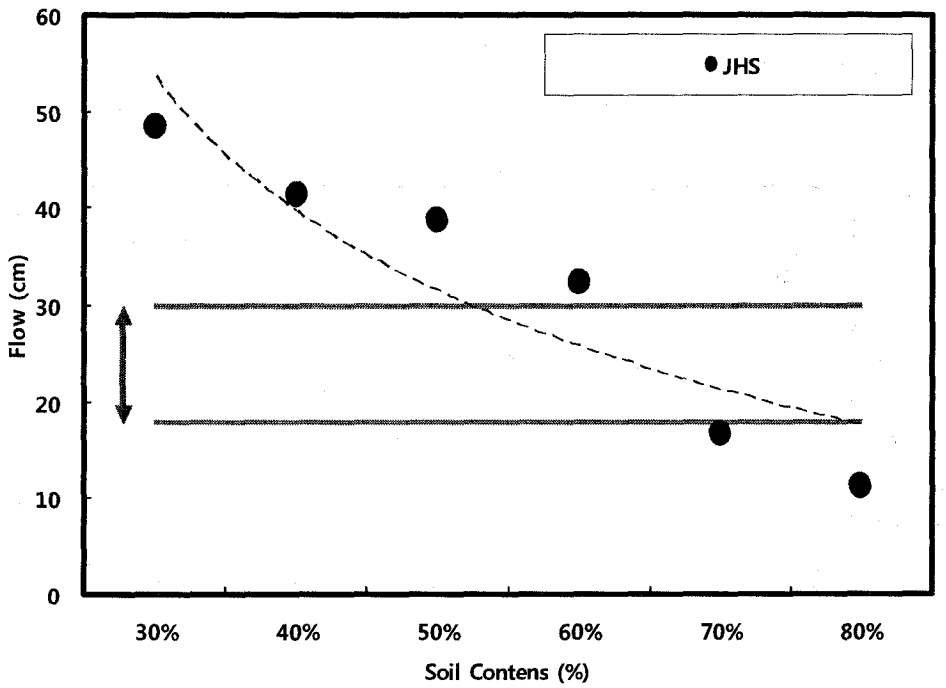


Fig. 3.3.167 석탄회 첨가시 석탄회의 양에 따른 JHS 결과

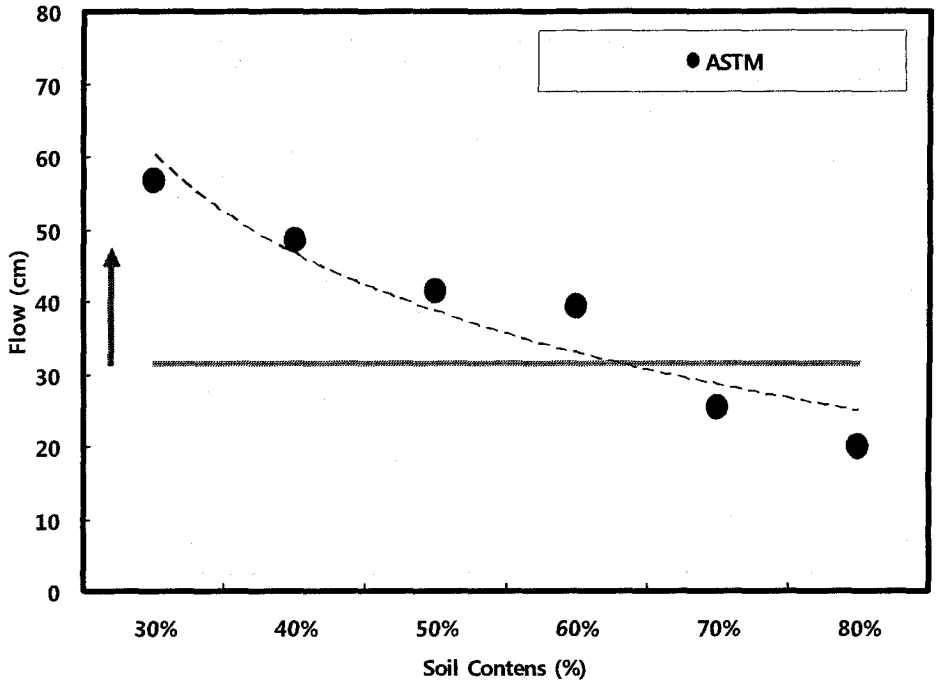


Fig. 3.3.168 석탄회 첨가시 석탄회의 양에 따른 ASTM 결과

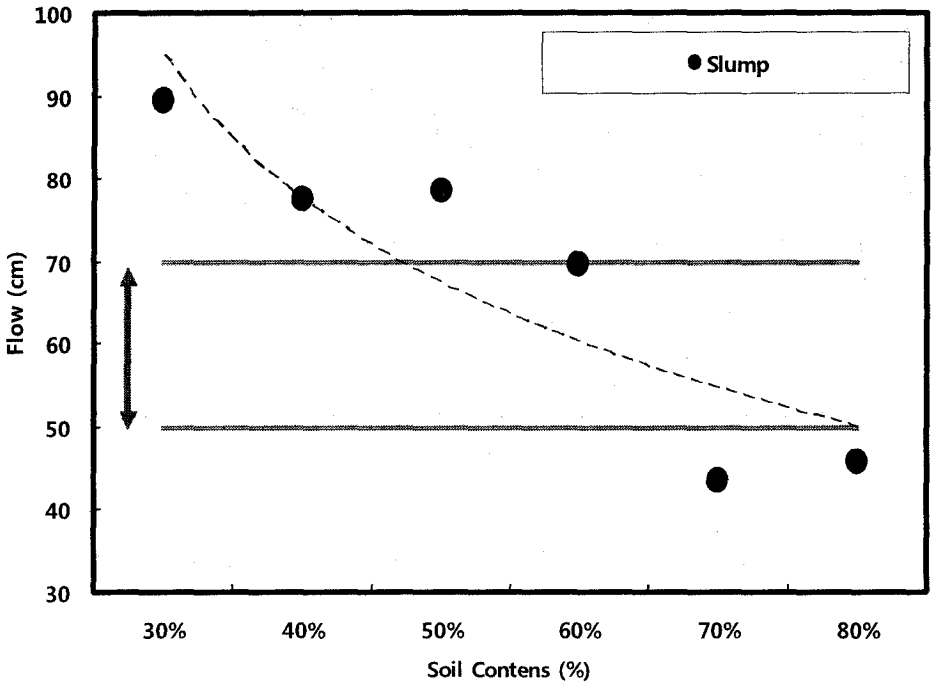


Fig. 3.3.169 석탄회 첨가시 석탄회의 양에 따른 Slump Flow 결과

Fig. 3.3.170에 석탄회 첨가시 석탄회의 양에 따른 최적 배합비를 도출하기 위해 JHS, ASTM, Slump Flow의 유동성 관계를 하나의 그림으로 나타냈다. W/C가 210%로 동일할 때, JHS, ASTM, Slump Flow 3가지의 유동성을 모두 만족하는 시료비율을 파악한 결과, 시료비율이 60%~65%일 때 3가지의 유동성 평가기준을 모두 만족하였다.

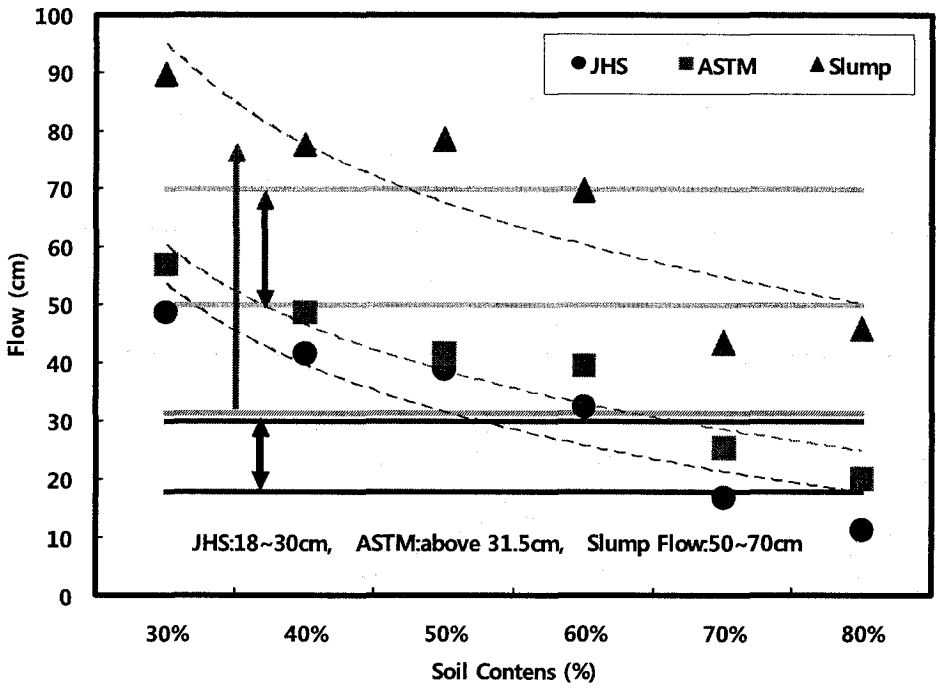


Fig. 3.3.170 석탄회 첨가시 석탄회의 양에 따른 유동성 관계

(3) 강도특성

시료 함유량에 따른 일축압축강도 변화를 Table 3.3.47과 Fig. 3.3.171에 나타냈다. 시료비율이 30%~50%로 낮은 실험에서는 재령 4시간 일축압축강도를 측정할 수 없을 만큼, 강도 발현이 되지 않았다. 재령 1일 강도는 시료비율이 60% 이상인 조건에서만 목표기준 이상을 나타냈고, 재령 28일 강도는 시료비율이 70% 이상인 조건에서 목표기준 이하의 일축압축강도를 나타냈다.

Table 3.3.47 시료 함유량에 따른 일축압축강도 측정 결과

No.	시료(%)	고화재 종류	4시간 (kg/cm^2)	1일 (kg/cm^2)	7일 (kg/cm^2)	28일 (kg/cm^2)
T5-C1	30	C-10	-	0.912	3.447	5.673
T5-C2	40		-	1.332	3.672	9.884
T5-C3	50		-	1.435	4.115	10.983
T5-C4	60		0.887	4.556	7.775	8.998
T5-C5	70		1.432	3.421	6.124	6.783
T5-C6	80		1.324	4.352	5.672	6.092

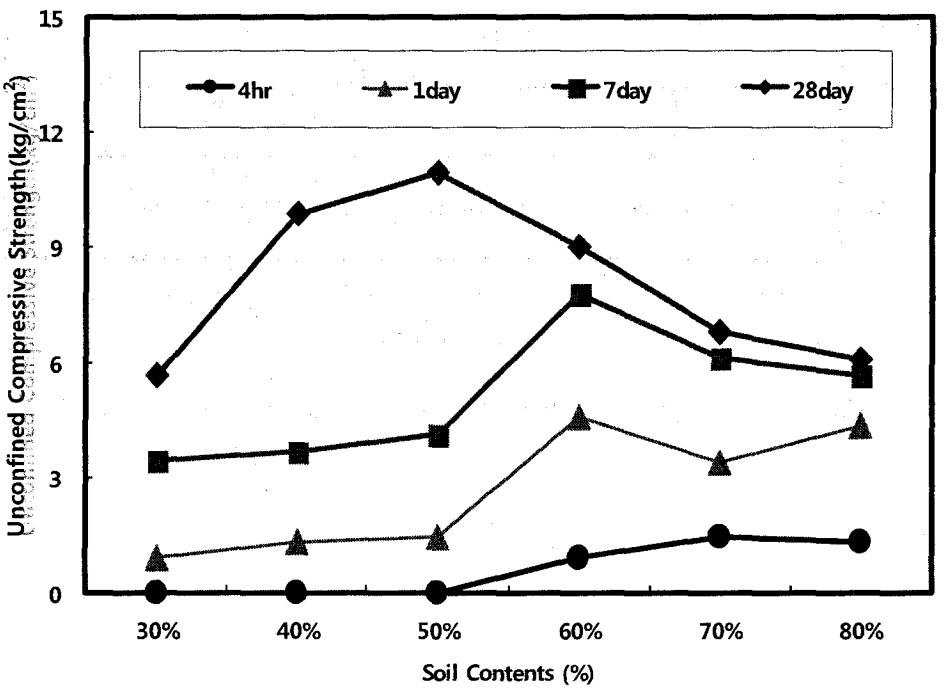


Fig. 3.3.171 시료 함유량에 따른 일축압축강도 변화

Fig. 3.3.172는 석탄회 첨가 시 양생기간에 따른 강도특성을 파악하고자 일축압축 실험을 실시하여 그 결과를 그림으로 나타낸 것이다. 시료비율에 상관없이 양생기간이 증가할수록 일축압축강도는 증가하였다.

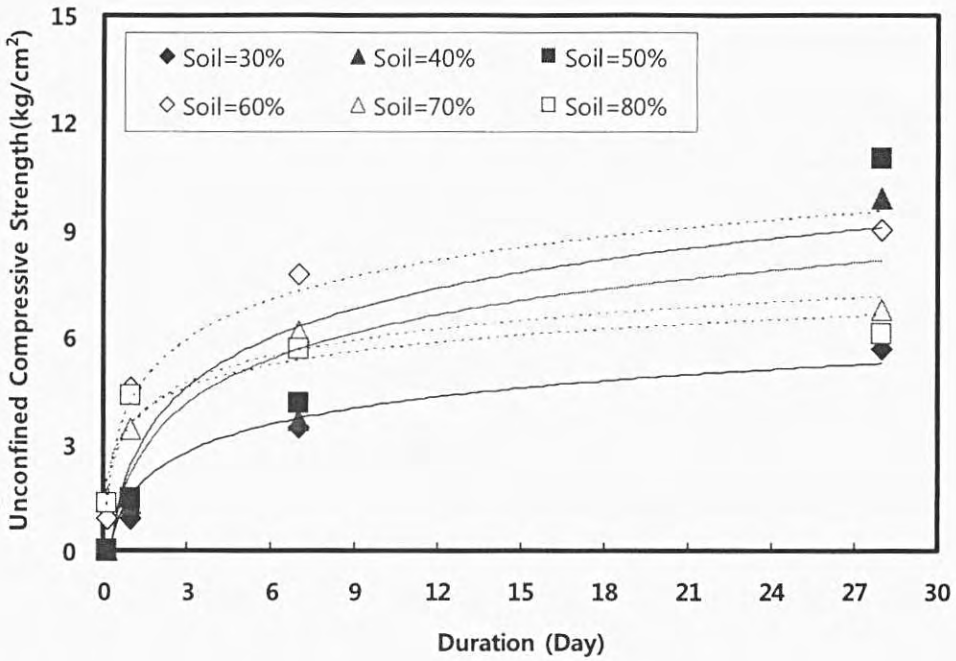


Fig. 3.3.172 양생기간에 따른 일축압축강도 변화

(4) 투수특성

Table 3.3.48과 Fig. 3.3.173에 시료비율에 따른 변수위 투수계수를 나타냈다. 변수위 투수계수는 현장발생토 비율과 석탄회의 비율에 영향을 받지 않고, 3.34×10^{-6} ~ 5.62×10^{-6}cm/sec의 범위를 나타내었으며, 일반적인 유동화 처리토의 투수계수 10^{-6}~10^{-7}cm/sec의 범위에도 적합한 결과를 보였다.

Table 3.3.48 시료 함유량에 따른 변수위 투수계수 결과(cm/sec)

No.	투수계수	No.	투수계수	No.	투수계수
T5-C1	4.53×10^{-6}	T5-C3	4.86×10^{-6}	T5-C5	4.35×10^{-6}
T5-C2	5.62×10^{-6}	T5-C4	3.34×10^{-6}	T5-C6	5.52×10^{-6}

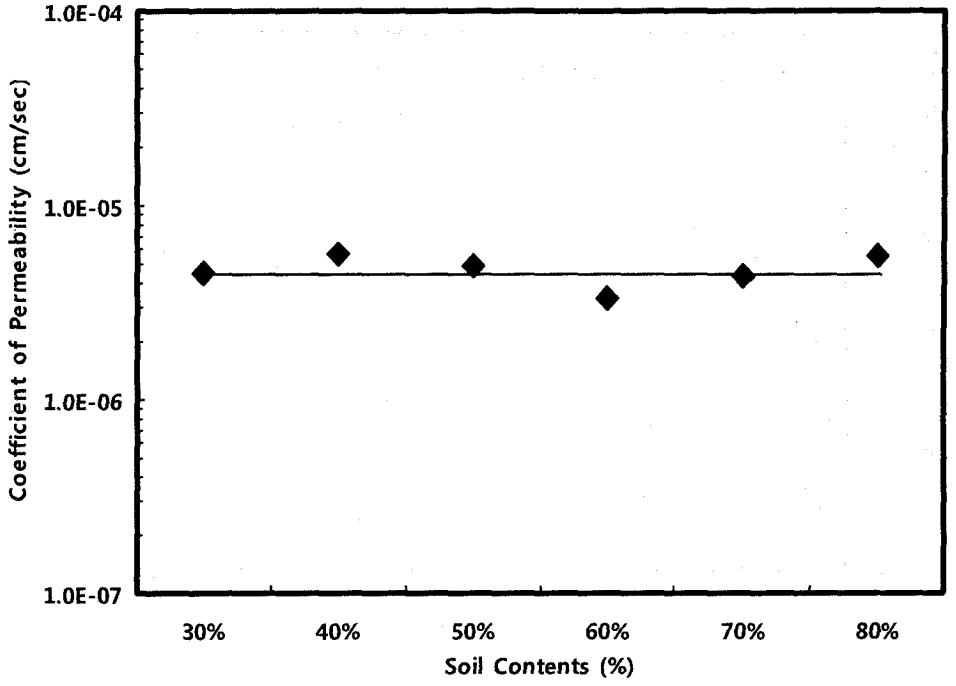


Fig. 3.3.173 시료 함유량에 따른 변수위 투수계수

나. 석탄회를 첨가한 유동화 처리토의 W/C에 따른 배합 특성

(1) 재료분리 특성

시료비율이 65%(현장발생토:석탄회=32.5%:32.5%)일 때의 W/C에 따른 재료분리 특성을 파악하기 위해 블리딩율을 측정하였고, 그 결과를 Table 3.3.49와 Fig. 3.3.174에 제시하였다. 블리딩율은 W/C가 210% 이상인 실험조건에서 목표기준을 만족하지 못하였고, W/C가 증가함에 따라 유동화 처리토의 재료분리도 크게 나타났다. W/C가 190% ~ 200%의 실험조건에서 목표기준인 1% 이하의 블리딩율을 만족하였다.

Table 3.3.49 석탄회 첨가시 W/C에 따른 재료분리 특성 실험 결과

No.	블리딩율
T6-C1	1% 이하
T6-C2	1% 이하
T6-C3	1.4
T6-C4	1.9
T6-C5	1.8

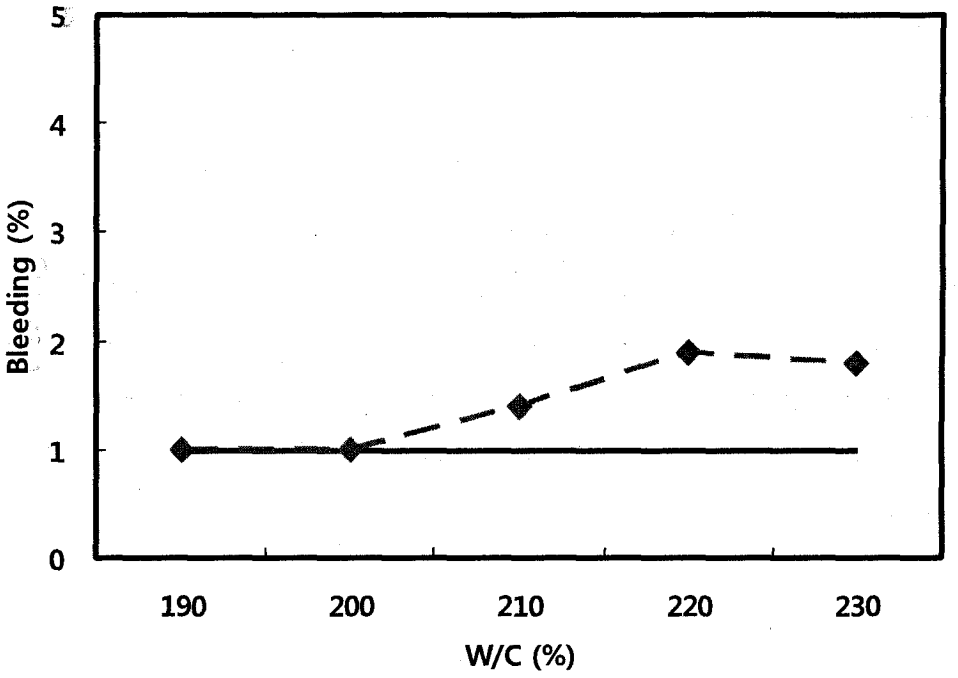


Fig. 3.3.174 석탄회 첨가시 W/C에 따른 블리딩율

(2) 유동성

시료비율이 65%(현장발생토:석탄회=32.5%:32.5%)일 때의 W/C에 따른 유동성을 JHS, ASTM, Slump Flow의 3가지 기준으로 파악하였다. Table 3.3.50에 W/C에 따른 유동성 결과를 제시하였고, Fig. 3.3.175~Fig. 3.3.177에 각각 JHS, ASTM, Slump Flow에 의한 유동성 결과를 나타냈다. W/C가 증가할수록 유동성은 점차 증가하는 경향을 보였고, 이러한 경향은 JHS, ASTM, Slump Flow 3가지에서 공통적으로 나타났다. JHS에 의한 유동성 측정 결과, W/C가 230% 인 실험조건을 제외하고 모든 실험조건에서 목표기준을 만족하였다. ASTM에 의한 유동성 측정 결과, W/C가 200% 이상인 실험조건에서 목표기준인 31.5cm 이상의 유동성을 나타냈다. Slump Flow를 통해 측정한 유동성는 모든 실험조건에서 목표기준을 만족하는 유동성 결과를 얻을 수 있었다.

Table 3.3.50 석탄회 첨가시 W/C에 따른 유동성 실험 결과

No.	W/C (%)	고화재 종류	JHS (cm)	ASTM (cm)	Slump Flow (cm)
T6-C1	190	C-10	19.8	30.6	49.7
T6-C2	200		22.3	32.1	52.8
T6-C3	210		24.6	34.9	56.7
T6-C4	220		27.9	38.5	61.2
T6-C5	230		30.7	42.3	65.4

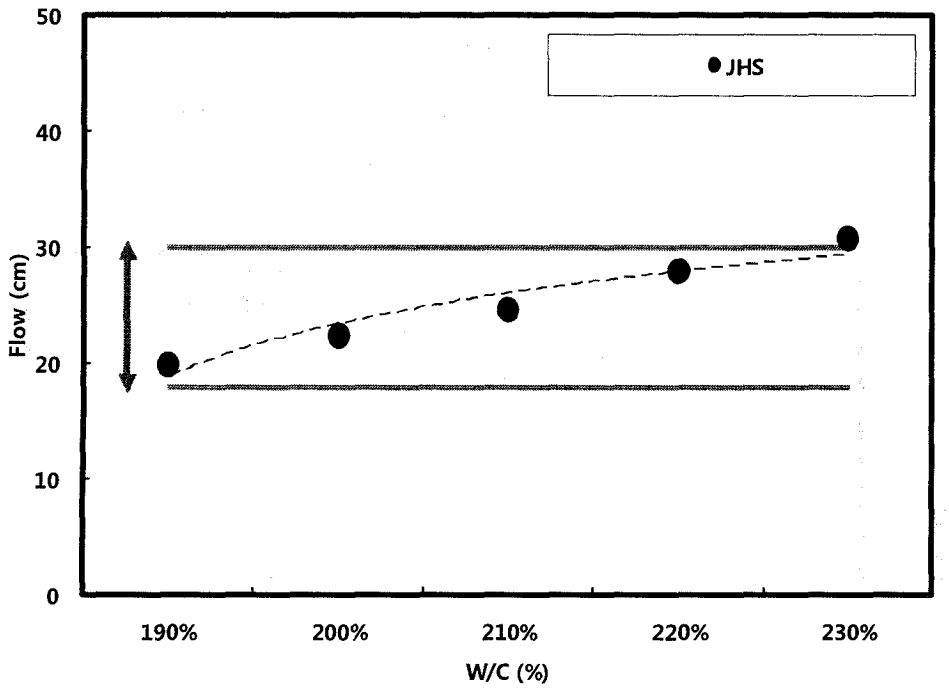


Fig. 3.3.175 석탄회 첨가시 W/C에 따른 JHS 결과

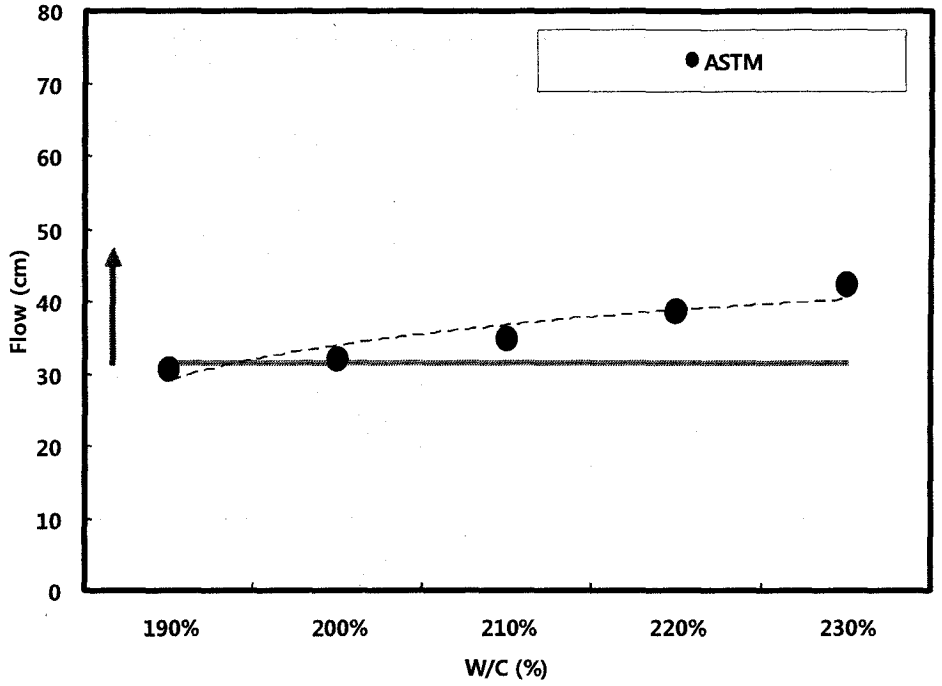


Fig. 3.3.176 석탄회 첨가시 W/C에 따른 ASTM 결과

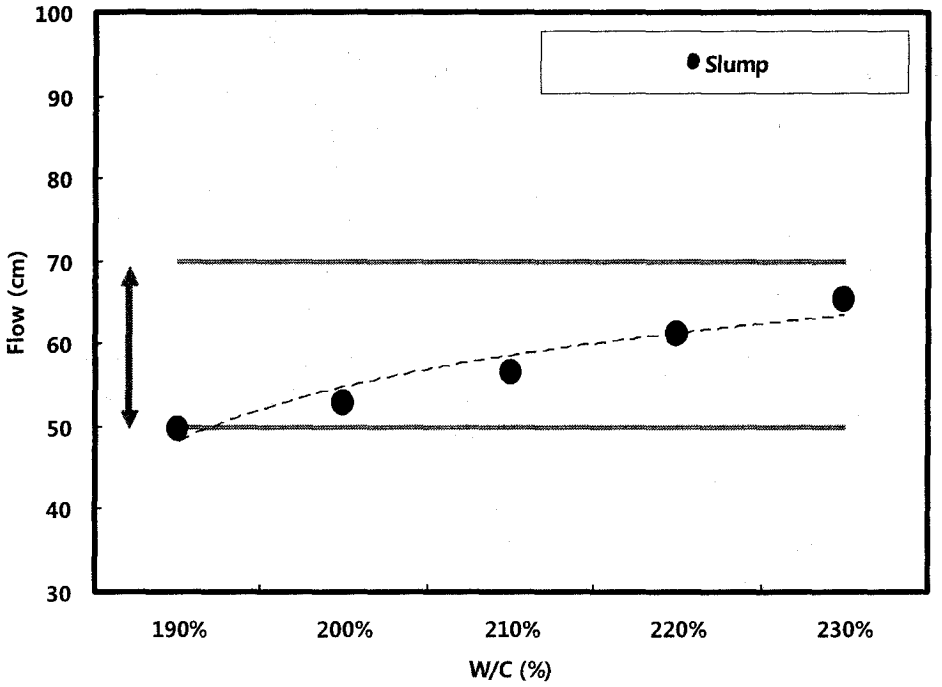


Fig. 3.3.177 석탄회 첨가시 W/C에 따른 Slump Flow 결과

Fig. 3.3.178에 석탄회 첨가시 W/C에 따른 최적 배합비를 도출하기 위해 JHS, ASTM, Slump Flow의 유동성 관계를 하나의 그림으로 나타냈다. 시료비율이 65%(현장발생토:석탄회=32.5%:32.5%)로 동일할 때, JHS, ASTM, Slump Flow 3가지의 유동성을 모두 만족하는 W/C를 파악한 결과, W/C가 195.4%~227.3%일 때, 3가지의 유동성 평가기준을 모두 만족하였다.

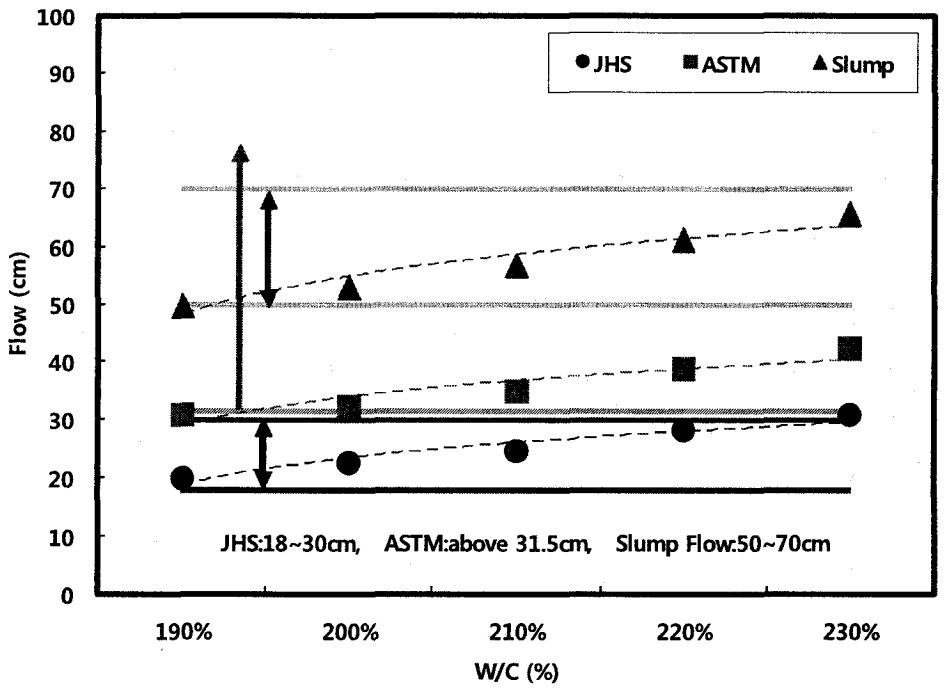


Fig. 3.3.178 석탄회 첨가시 W/C에 따른 유동성 관계

(3) 강도특성

W/C에 따른 일축압축강도 변화를 Table 3.3.51과 Fig. 3.3.179에 나타냈다. W/C가 낮을수록 장기강도가 크게 발현되는 것을 알 수 있었고, 재령 1일 일축압축강도는 모든 실험조건에서 만족하였다. 재령 28일 강도는 W/C가 210% 이상인 실험조건에서 목표기준 이하의 일축압축강도를 나타냈다.

Table 3.3.51 W/C에 따른 일축압축강도 측정 결과

No.	W/C (%)	고화재 종류	4시간 (kg/cm^2)	1일 (kg/cm^2)	7일 (kg/cm^2)	28일 (kg/cm^2)
T6-C1	190	C-10	1.516	5.592	8.425	10.184
T6-C2	200		1.462	4.562	6.623	7.541
T6-C3	210		1.160	3.989	5.950	6.872
T6-C4	220		0.782	3.563	4.620	6.361
T6-C5	230		0.667	3.214	3.982	5.443

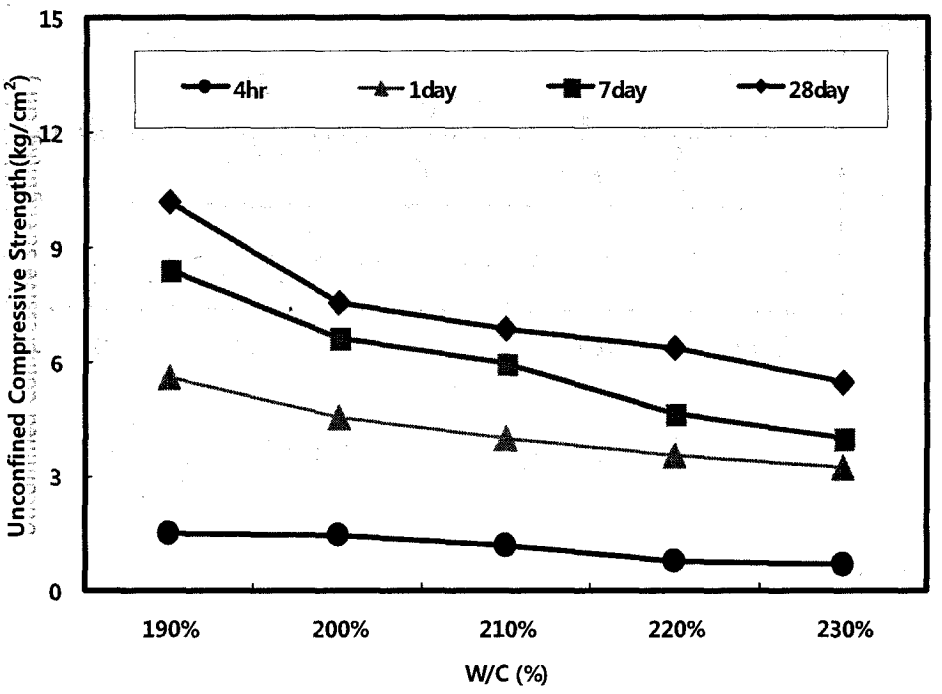


Fig. 3.3.179 W/C에 따른 일축압축강도 변화

Fig. 3.3.180에 석탄회 첨가시 W/C에 따른 강도특성을 파악하고자 일축압축 실험을 실시한 후, 결과를 그림으로 나타냈다. W/C에 상관없이 양생기간이 증가할수록 일축압축강도는 증가하였다.

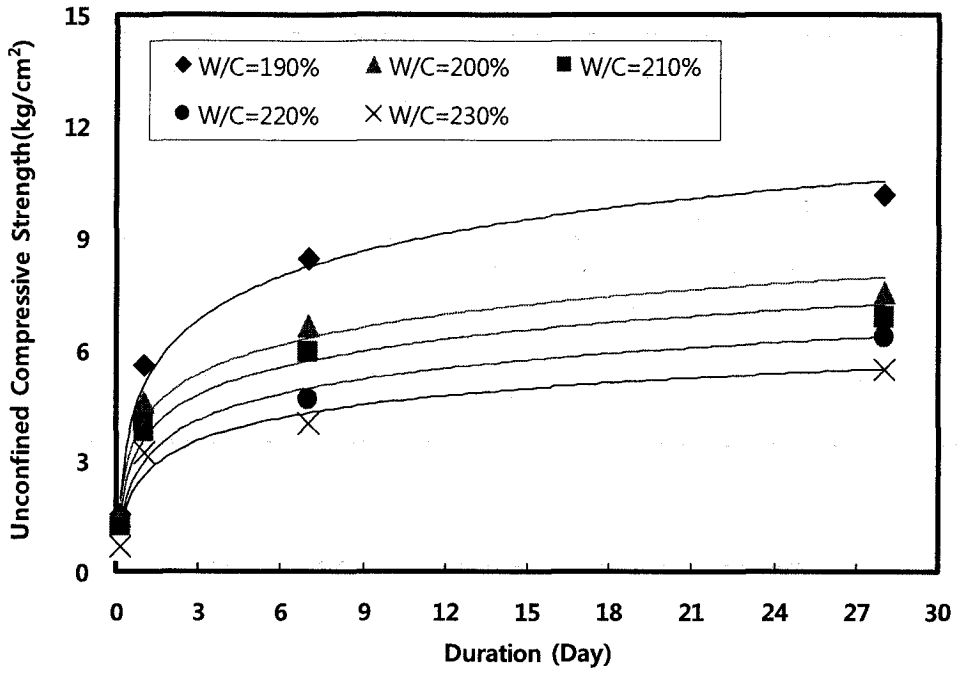


Fig. 3.3.180 양생기간에 따른 일축압축강도 변화

(4) 투수특성

Table 3.3.52와 Fig. 3.3.181은 시료비율이 65%(현장발생토:석탄회=32.5%:32.5%)일 때의 W/C에 따른 변수위 투수계수를 나타냈다. 변수위 투수계수는 W/C의 영향을 받지 않고, 일반적인 유동화 처리토의 투수계수 10^{-6}~10^{-7}cm/sec의 범위에 적합한 4.53×10^{-6} ~5.92×10^{-6}cm/sec의 범위를 나타냈다.

Table 3.3.52 W/C에 따른 변수위 투수계수 결과

No.	투수계수 (cm/sec)
T6-C1	5.67×10^{-6}
T6-C2	5.92×10^{-6}
T6-C3	4.68×10^{-6}
T6-C4	4.53×10^{-6}
T6-C5	4.87×10^{-6}

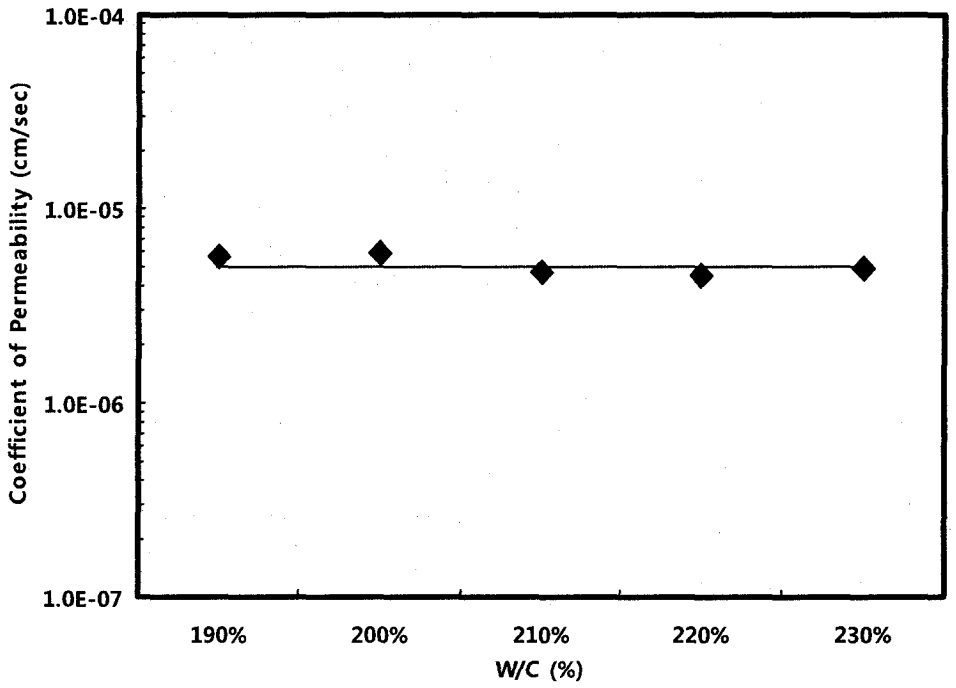


Fig. 3.3.181 W/C에 따른 변수위 투수계수

다. 석탄회를 첨가한 유동화 처리토의 혼합비에 따른 배합특성

(1) 재료분리 특성

Table 3.3.53과 Fig. 3.3.182에 시료비율이 65% 일 때, 현장발생토와 석탄회의 혼합비에 따른 재료분리 특성을 파악하기 위해 블리딩율을 측정하여, 그 결과를 제시하였다. 실험결과, 현장발생토와 석탄회의 혼합비가 20%:45%, 15%:50%인 실험조건에서 목표기준에 만족하는 블리딩율을 나타냈고, 현장발생토와 석탄회의 혼합비가 30%:35%, 25%:40%인 실험조건에서는 목표기준인 1% 이상의 블리딩율을 나타냈으나, 그 값이 1.6% 이하로 목표기준과의 차이가 미미했다.

Table 3.3.53 석탄회 첨가시 현장발생토와 석탄회의 혼합비에 따른 재료분리 실험 결과

No.	블리딩율
T7-C1	3.1%
T7-C2	2.6%
T7-C3	2.2%
T7-C4	2.1%
T7-C5	1.6%
T7-C6	1.3%
T7-C7	1% 이하
T7-C8	1% 이하

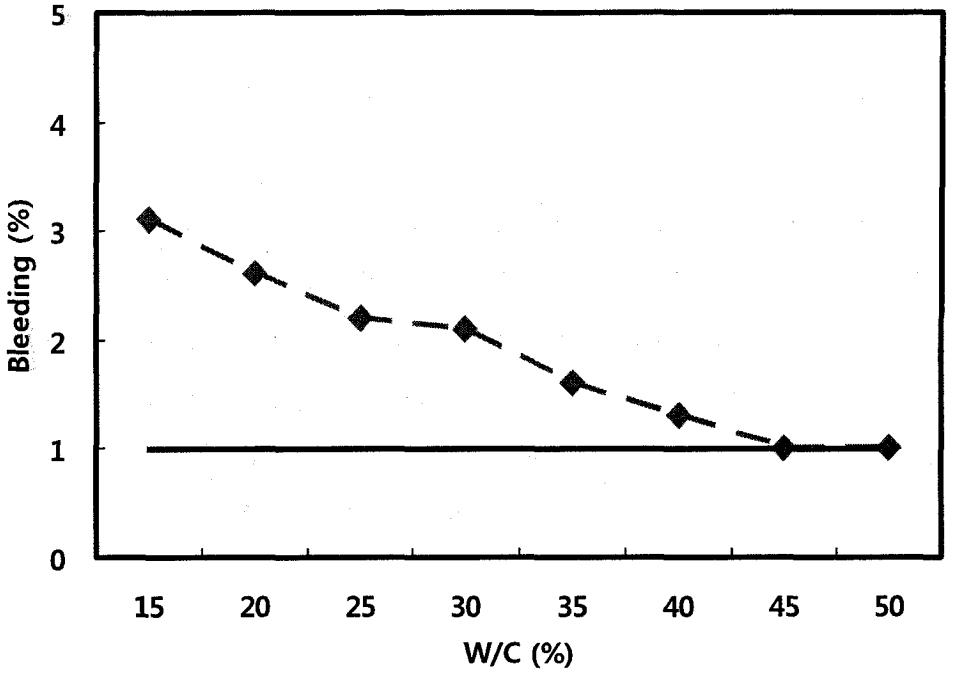


Fig. 3.3.182 석탄회 첨가시 현장발생토와 석탄회의 혼합비에 따른 블리딩율

(2) 유동성

석탄회 첨가시 현장발생토와 석탄회의 혼합비에 따른 유동성을 JHS, ASTM, Slump Flow의 3가지 기준으로 파악하였다. Table 3.3.54에 현장발생토와 석탄회의 혼합비에 따른 유동성 결과를 제시하였고, Fig. 3.3.183~Fig. 3.3.185에 각각 JHS, ASTM, Slump Flow에 의한 유동성 결과를 나타냈다. JHS에 의한 유동성 측정 결과, 시료 중 석탄회의 비율이 증가함에 따라 미미하지만 유동성도 증가하였고, 모든실험조건에서 목표기준에 만족하는 결과를 얻었다. ASTM에 의한 유동성 측정 결과, 시료 중의 석탄회 비율은 유동성에 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었고, 모든 실험조건에서 목표기준을 만족하였다. Slump Flow를 통해 측정한 유동성 결과 역시, 시료 중의 석탄회 비율에 영향을 받지 않았고, JHS와 ASTM 기준과 같이 모든 실험조건에서 목표기준의 유동성을 만족하였다.

Table 3.3.54 석탄회 첨가시 현장발생토와 석탄회의 혼합비에 따른 유동성 실험 결과

No.	현장발생토 : 석탄회	고화재 종류	JHS (cm)	ASTM (cm)	Slump Flow (cm)
T7-C1	50% : 15%	C-10	24	34.7	66.5
T7-C2	45% : 20%		23.6	35.4	68.3
T7-C3	40% : 25%		26.3	36.5	67.5
T7-C4	35% : 30%		25.5	34.1	66.9
T7-C5	30% : 35%		27.7	35.5	68.5
T7-C6	25% : 40%		28.5	36.7	69.1
T7-C7	20% : 45%		29.3	38.5	68.2
T7-C8	15% : 50%		28	38	69.0

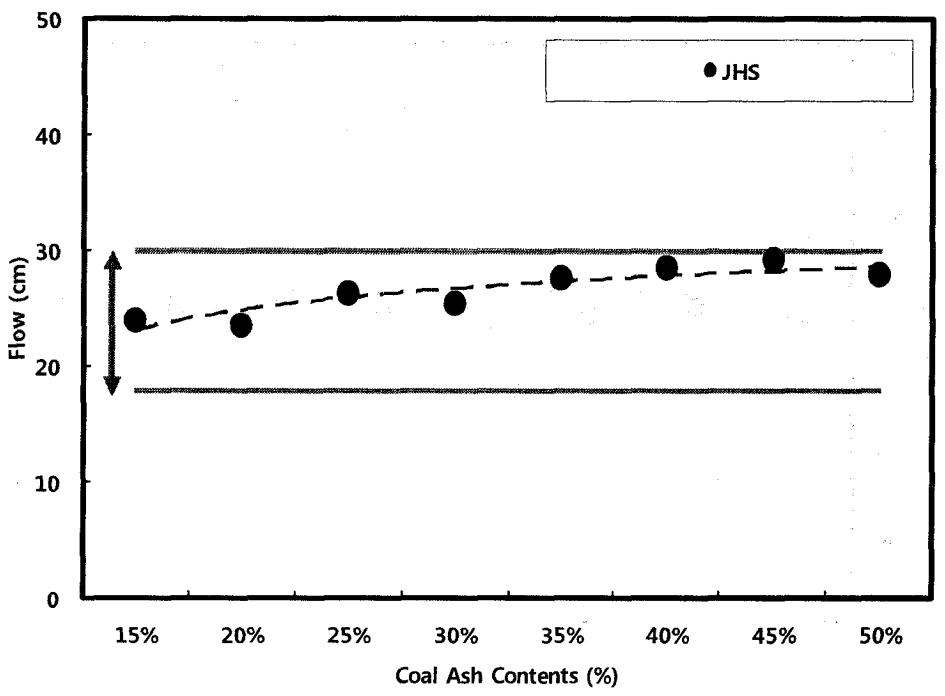


Fig. 3.3.183 석탄회 첨가시 현장발생토와 석탄회의 혼합비에 따른 JHS 결과

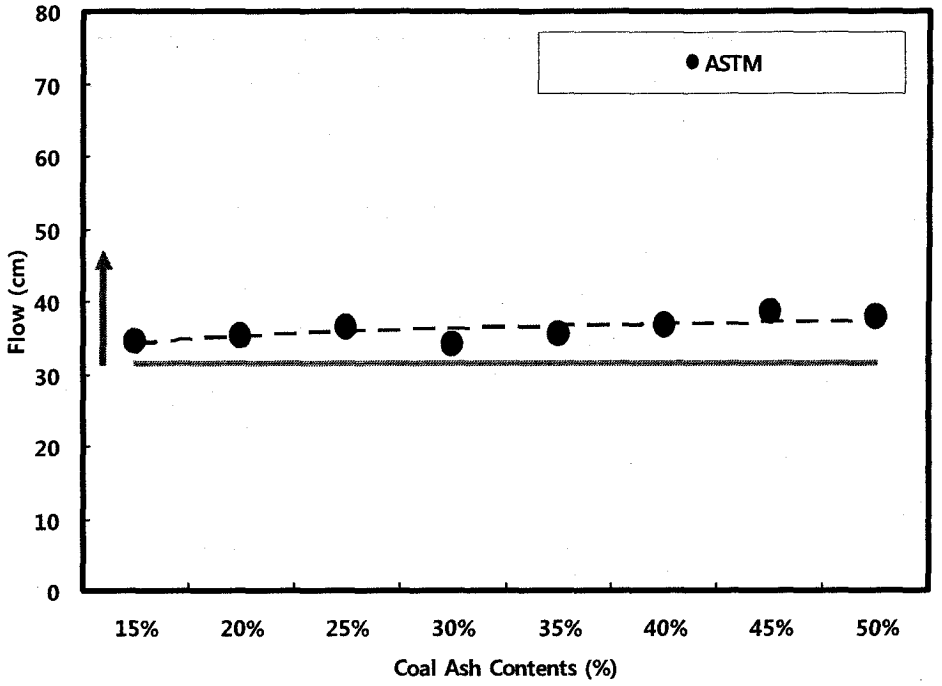


Fig. 3.3.184 석탄회 첨가시 현장발생토와 석탄회의 혼합비에 따른 ASTM 결과

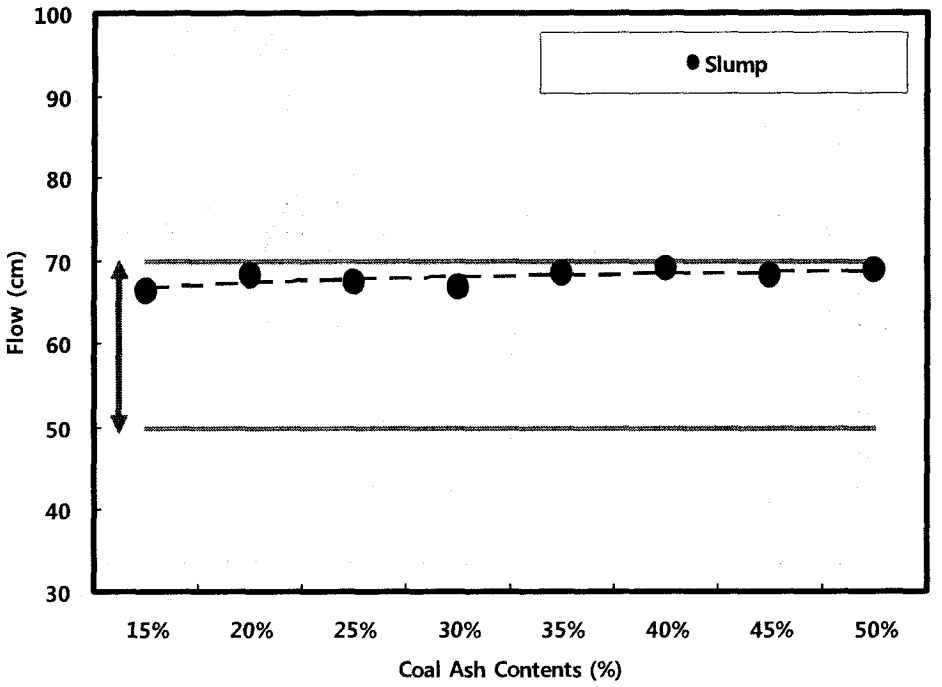


Fig. 3.3.185 석탄회 첨가시 현장발생토와 석탄회의 혼합비에 따른 Slump Flow 결과

Fig. 3.3.186은 석탄회 첨가 시 현장발생토와 석탄회의 혼합비에 따른 최적 배합비를 도출하기 위해 JHS, ASTM, Slump Flow의 유동성 관계를 하나의 그림으로 나타낸 것이다. 시료비율(65%)과 W/C(200%)가 동일할 때, JHS, ASTM, Slump Flow 3가지의 유동성을 모두 만족하는 현장발생토와 석탄회의 혼합비를 파악한 결과, 실험을 실시한 모든 실험조건인 50%:15% ~ 15%:50%에서 3가지의 유동성 평가기준을 모두 만족하였다.

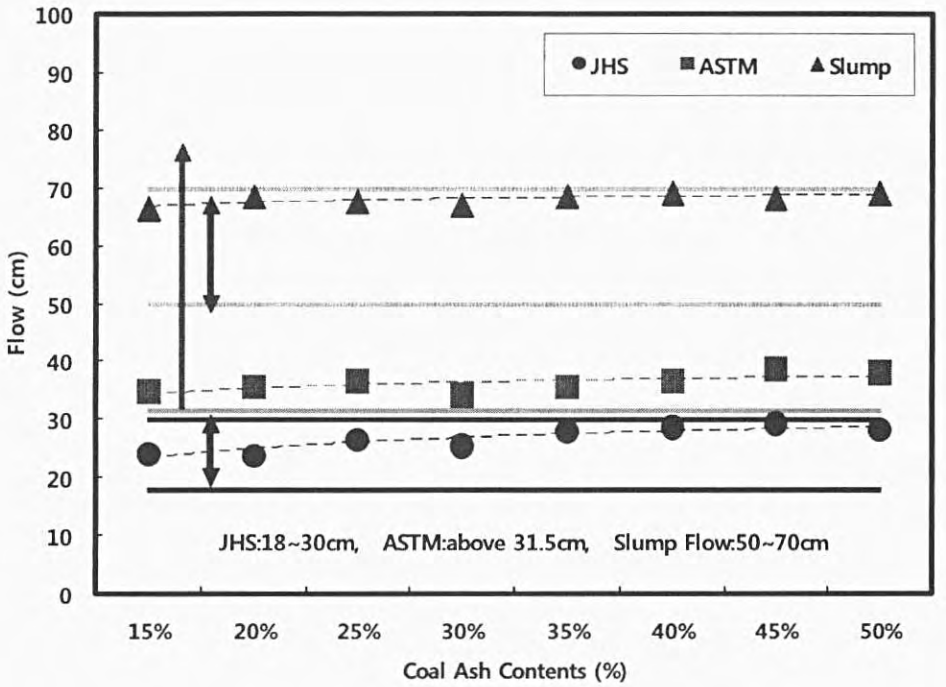


Fig. 3.3.186 석탄회 첨가시 현장발생토와 석탄회의 혼합비에 따른 유동성 관계

(3) 강도특성

시료 함유량이 65%일 때 현장발생토와 석탄회의 혼합비에 따른 일축압축강도 변화를 Table 3.3.55와 Fig. 3.3.187에 나타냈다. 시료 중 석탄회의 함유량이 증가함에 따라 일축압축강도가 증가하는 경향을 나타냈고, 특히 재령 7일 이상의 장기강도가 석탄회의 첨가로 인해 증가하는 것을 파악할 수 있었다. 재령 1일과 재령 28일의 목표기준인 2.0kg/cm^2 이상과 7.0kg/cm^2 이하의 목표기준을 동시에 만족하는 현장발생토와 석탄회의 혼합비는 50%:15%의 조건이 유일하였으나, 그 외의 실험조건에

서도 목표기준과 큰 차이를 보이지 않았기 때문에, W/C의 조절이나 시료 함유량의 조절 등으로 장기강도를 조절하여 목표기준에 만족하는 배합비를 도출할 수 있을 것이라고 판단된다.

Fig. 3.3.188에 석탄회 첨가시 현장발생토와 석탄회의 혼합비에 따른 강도특성을 파악하고자 일축압축실험을 결과를 양생기간을 나타냈다. 시료에서 석탄회의 비율이 증가할수록 강도는 크게 나타났고, 양생기간이 증가할수록 일축압축강도는 증가하는 경향을 나타냈다.

Table 3.3.55 현장발생토와 석탄회의 혼합비에 따른 일축압축강도 결과

No.	현장발생토 : 석탄회	고화재 종류	4시간 (kg/cm^2)	1일 (kg/cm^2)	7일 (kg/cm^2)	28일 (kg/cm^2)
T7-C1	50% : 15%	C-10	1.277	3.109	4.619	7.021
T7-C2	45% : 20%		0.868	3.426	5.764	8.232
T7-C3	40% : 25%		1.254	3.029	5.457	7.856
T7-C4	35% : 30%		1.132	3.984	6.636	9.443
T7-C5	30% : 35%		1.562	4.667	7.792	8.998
T7-C6	25% : 40%		1.142	3.438	9.882	10.662
T7-C7	20% : 45%		1.649	3.775	11.832	14.562
T7-C8	15% : 50%		2.223	4.407	12.432	18.657

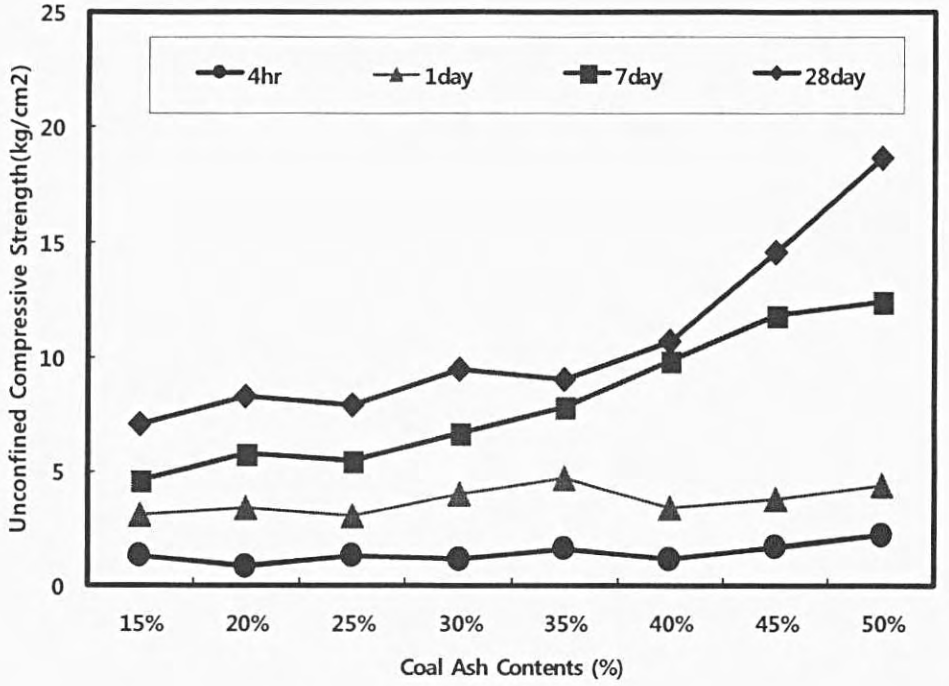


Fig. 3.3.187 현장발생토와 석탄회의 혼합비에 따른 일축압축강도 변화

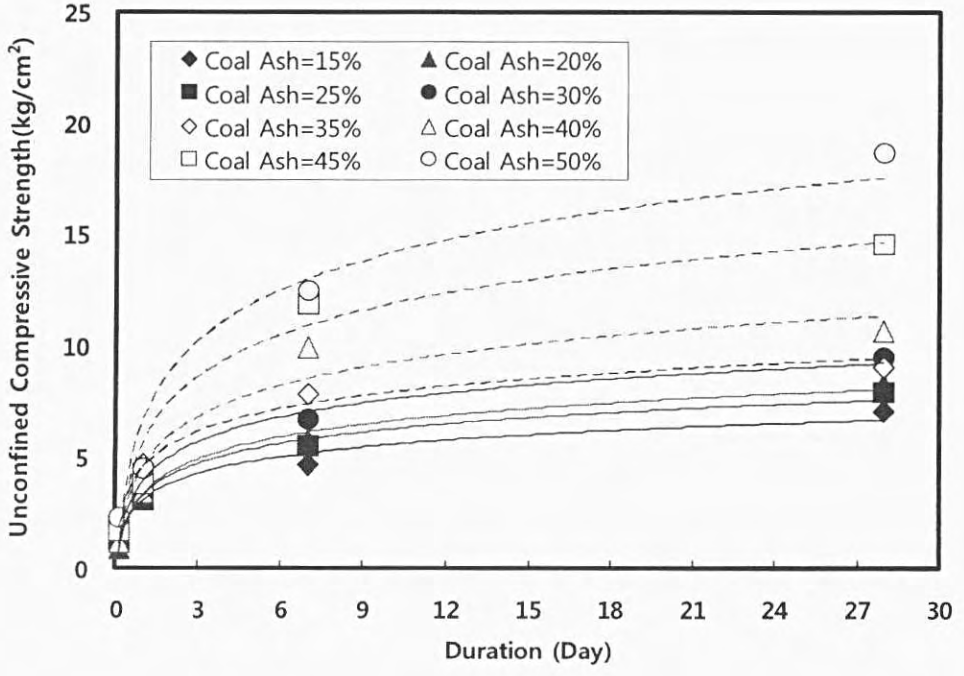


Fig. 3.3.188 양생기간에 따른 일축압축강도 변화

(4) 투수특성

Table 3.3.56과 Fig. 3.3.189에 현장발생토와 석탄회의 혼합비에 따른 변수위 투수계수를 나타냈다. 변수위 투수계수는 현장발생토와 석탄회의 혼합비에 영향을 받지 않고, 3.45×10^{-6} ~4.89×10^{-6}cm/sec의 범위를 나타내었으며, 일반적인 유동화 처리토의 투수계수 10^{-6}~10^{-7}cm/sec의 범위에도 적합한 결과를 보였다.

Table 3.3.56 현장발생토와 석탄회의 혼합비에 따른 변수위 투수계수 결과

No.	투수계수 (cm/sec)
T7-C1	3.45×10^{-6}
T7-C2	4.46×10^{-6}
T7-C3	4.61×10^{-6}
T7-C4	4.34×10^{-6}
T7-C5	4.89×10^{-6}
T7-C6	4.52×10^{-6}
T7-C7	4.13×10^{-6}
T7-C8	4.47×10^{-6}

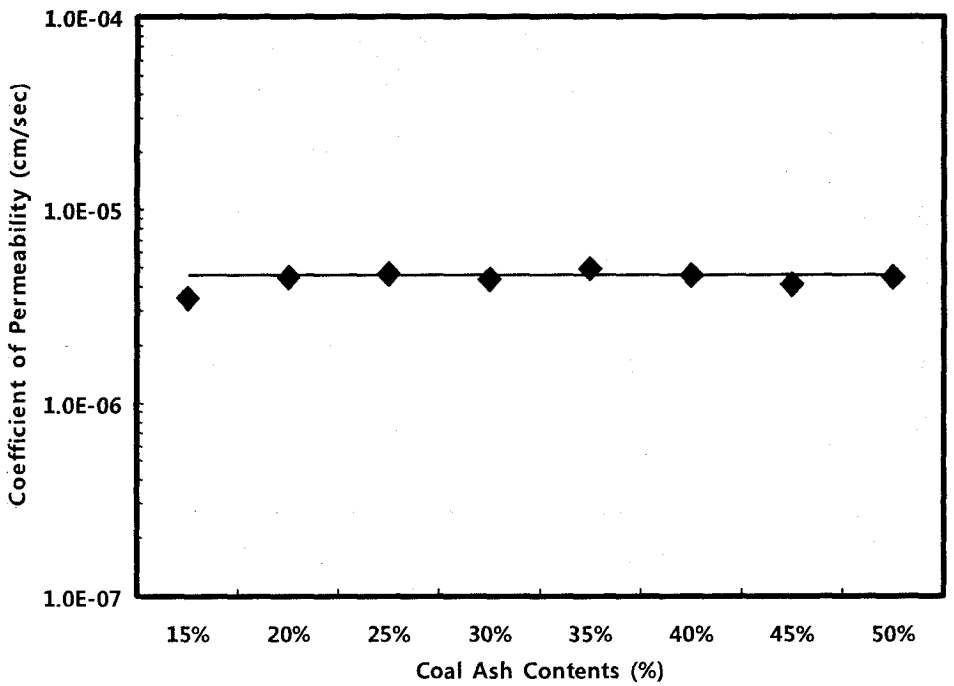


Fig. 3.3.189 현장발생토와 석탄회의 혼합비에 따른 변수위 투수계수

7. 급결성 유동화 처리토 특성 파악 실험 결과

가. 경화전의 특성실험 결과

(1) 응결성

관입 저항침에 의하여 혼합물의 응결시간을 결정하는 시험으로 관입저항치가 일정해 질 때를 안정된 상태로 판단하고 그때를 종결시간으로 결정하였다. 일축압축시험을 통해 각 기준치(유동성, 블리딩, 일축압축강도)에 부합되는 각 시료별 배합비 SW-1, SM-2, SC-2, ML-2, CL-4를 사용하여 시험을 실시하였다.

본 시험에서 SW-1의 경우, 대략 20시간이 지나면 관입 저항치 28kg/cm^2 정도에서 경화시간이 형성되었다(Fig. 3.3.190). 이는 이용수(2002)의 관입저항시험에서 제시한 기준치 결과인 28kg/cm^{2}에 부합되었다. SW를 제외한 다른 시료들은 미립분(실트, 점토)의 영향으로 SW보다 비교적 작은 값인 약 8~10kg/cm^2 정도에서 일정한 값으로 수렴됨을 알 수 있었다.

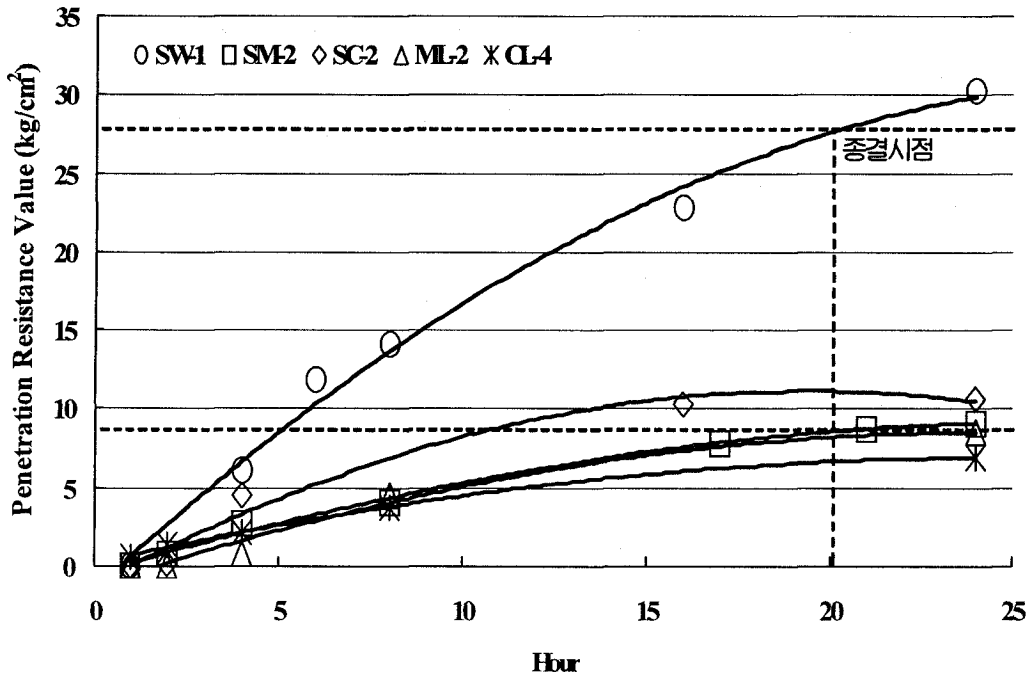


Fig. 3.3.190 응결시간 시험결과

(2) 유동성, 재료분리 저항성

유동성 시험결과 모든 현장토 조건에 있어서 대부분 일본 도로공단규격(JHS)의 기준(약 18~30cm)에 만족하는 것으로 나타났으며, 블리딩의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

(가) SW와 고화재 혼합시험 결과

Table 3.3.57에는 배합비에 따른 유동성, 슬럼프 플로우, 블리딩 시험의 결과를 나타냈다. 그 결과 유동성 시험과 블리딩 시험의 경우, 기준에 대부분 만족하는 것으로 나타났다. 블리딩은 거의 발생하지 않았다.

Table 3.3.57 배합비에 따른 유동성, 슬럼프 플로우, 블리딩 시험 결과(SW)

	W/C (%)	고화재비 (%)	현장토비 (%)	유동성시험		슬럼프 플로우 (cm)	블리딩율 (%)
				JHS(cm)	ASTM (cm)		
SW-1	212	14.0	53.3	22.8	32.1	67.0	0.00
SW-2	186	16.0	53.3	19.7	27.7	64.5	0.00
SW-3	165	18.0	53.3	18.8	27.6	42.7	0.00
SW-4	149	20.0	53.3	18.1	26.7	45.0	0.00

Fig. 3.3.191에는 SW 시료의 유동성 시험결과를 나타냈다. 오차를 고려해 볼 때, 전 범위에서 기준치에 만족하는 결과를 얻을 수 있었다.

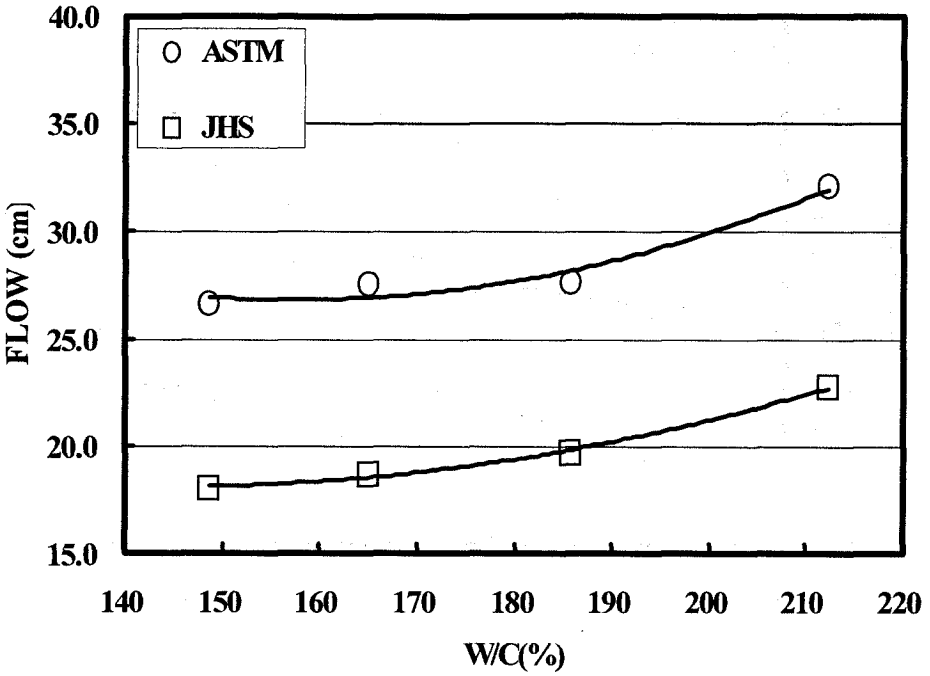


Fig. 3.3.191 유동성 시험 결과(SW)

(나) SM과 고화재 혼합시험 결과

Table 3.3.58에는 SM 시료에서 배합비에 따른 유동성, 슬럼프 플로우, 블리딩 시험의 결과를 나타냈다. 그 결과 유동성 시험의 경우, W/C 207%를 제외하고는 모두 만족하는 것으로 나타났다. 블리딩 시험의 경우, 전 범위에서 기준치에 만족하는 결과가 나타났다.

Table 3.3.58 배합비에 따른 유동성, 슬럼프 플로우, 블리딩 시험 결과(SM)

	W/C (%)	고화재비 (%)	현장토비 (%)	유동성 시험		슬럼프 플로우 (cm)	블리딩율 (%)
				JHS (cm)	ASTM (cm)		
SM-1	207	13.5	60.6	22.1	35.7	70.8	0.028
SM-2	192	14.3	60.0	21.3	29.2	80.0	0.035
SM-3	168	16.0	58.8	21.5	28.8	52.3	0.025
SM-4	150	17.7	58.1	17.5	25.5	48.3	0.011

Fig. 3.3.192에는 SM시료의 유동성 시험 결과를 나타냈다. 오차를 고려해 볼 때, W/C 약 192% 이하에서 기준치에 부합되는 결과가 나타났다.

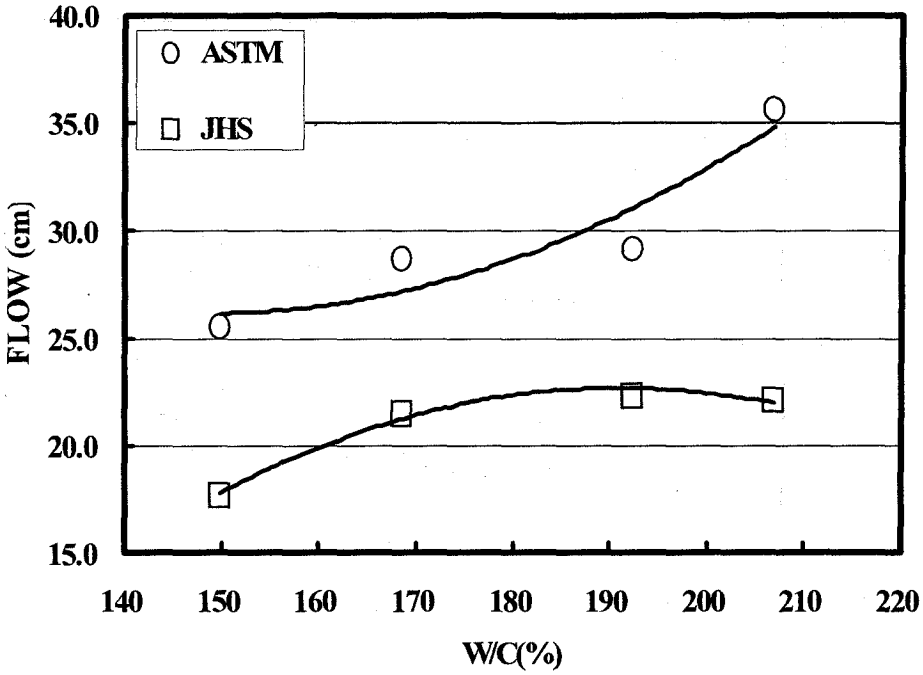


Fig. 3.3.192 유동성 시험 결과(SM)

(다) SC와 고화재 혼합시험 결과

Table 3.3.59에는 SC 시료에서의 배합비에 따른 유동성, 슬럼프, 블리딩 시험의 결과를 나타냈다. 그 결과 유동성 시험의 경우, W/C 231%를 제외하고 182~207% 범위에서 모두 만족하는 것으로 나타났다. 블리딩시험의 경우, 전 범위에서 기준치에 만족하는 결과가 나타났다.

Table 3.3.59 배합비에 따른 유동성, 슬럼프 플로우, 블리딩 시험 결과(SC)

	W/C (%)	고화재비 (%)	현장토비 (%)	유동성시험		슬럼프 플로우 (cm)	블리딩 (%)
				JHS(cm)	ASTM (cm)		
SC-1	231	17.0	43.5	22.1	36.5	79.0	0.00
SC-2	207	18.4	43.5	21.0	28.5	68.2	0.00
SC-3	195	19.2	43.5	18.1	24.4	70.3	0.00
SC-4	182	20.0	43.5	14.8	21.8	48.1	0.00

Fig. 3.3.193에는 SC시료의 유동성 시험결과를 나타냈다. 오차를 고려해 볼 때, W/C 약 215% 이하에서 기준치에 부합되는 결과가 나타났다.

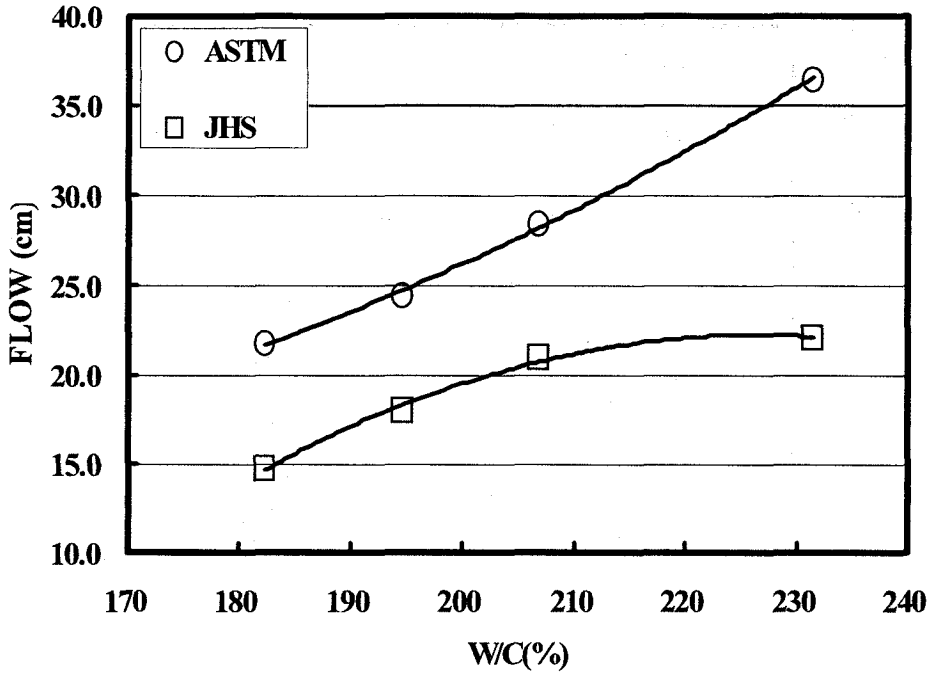


Fig. 3.3.193 유동성 시험 결과(SC)

(라) ML과 고화재 혼합시험 결과

Table 3.3.60에는 ML 시료에서의 배합비에 따른 유동성, 슬럼프 플로우, 블리딩 시험의 결과를 나타냈다. 그 결과 유동성 시험의 경우, 약간의 오차를 감안할 때, 전 범위에서 모두 기준치에 부합되는 결과가 나타났다. 블리딩 시험의 경우, 전 범위에서 기준치에 만족하는 결과가 나타났다.

Table 3.3.60 배합비에 따른 유동성, 슬럼프 플로우, 블리딩 시험 결과(ML)

	W/C (%)	고화재비 (%)	현장토비 (%)	유동성시험		슬럼프 플로우 (cm)	블리딩율 (%)
				JHS(cm)	ASTM (cm)		
ML-1	263	16.9	38.8	23.8	33.6	85.3	0.000
ML-2	241	18.0	38.8	21.1	31.9	79.0	0.000
ML-3	208	19.9	38.8	15.8	22.4	49.3	0.000
ML-4	191	21.0	38.8	15.3	19.9	44.3	0.000

Fig. 3.3.194에는 ML시료의 유동성 시험 결과를 나타냈다. 오차를 고려해 볼 때, 전 범위에서 기준치에 부합되는 결과가 나타났다.

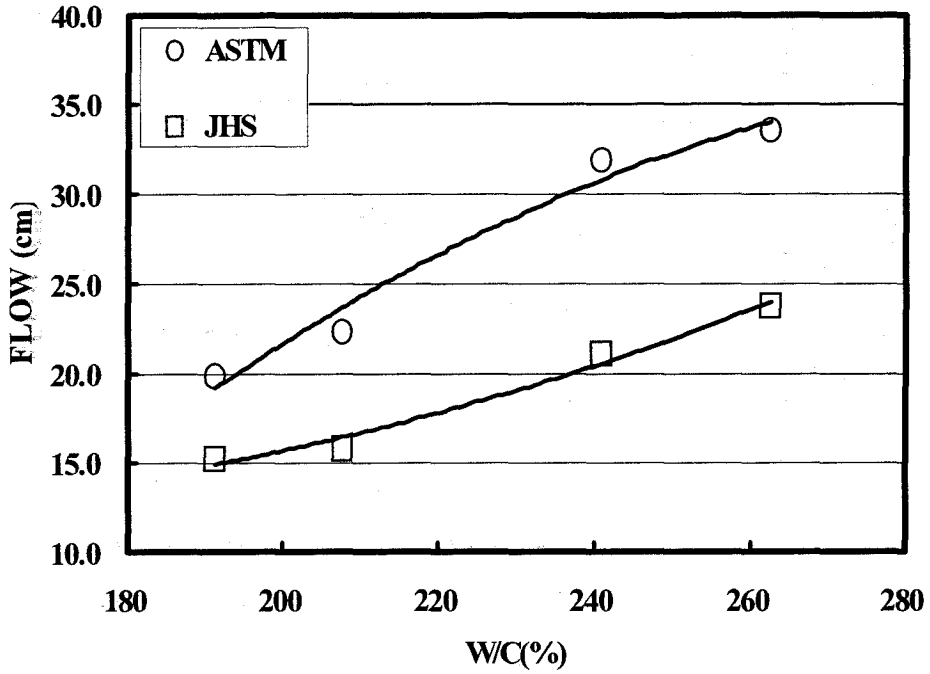


Fig. 3.3.194 유동성 시험 결과(ML)

(마) CL과 고화재 혼합시험결과

Table 3.3.61에는 CL 시료에서의 배합비에 따른 유동성, 슬럼프 플로우, 블리딩 시험의 결과를 나타냈다. 본 시험에서는 강도를 증진시키기 위해서 촉진제를 각 배합비의 고화재량에 따라 14~16g을 첨가하였다. 시험 결과 유동성과 슬럼프 플로우, 블리딩 사험에서 약간의 오차를 감안할 때, 전 범위에서 기준치에 모두 만족하는 것으로 나타났다. Fig. 3.3.195에는 CL시료의 유동성 시험결과를 나타냈다.

Table 3.3.61 배합비에 따른 유동성, 슬럼프 플로우, 블리딩 시험 결과(CL)

	W/C (%)	고화재비 (%)	현장토비 (%)	촉진제 (g)	유동성시험		슬럼프 플로우 (cm)	블리딩율 (%)
					JHS (cm)	ASTM (cm)		
CL-1	251	19.3	32.4	13.78	17.8	26.3	63.3	0.00
CL-2	238	20.0	32.4	14.30	16.8	25.3	60.5	0.00
CL-3	225	20.8	32.4	14.86	17.8	24.3	57.0	0.00
CL-4	212	21.6	32.4	15.47	18.2	26.5	65.5	0.00

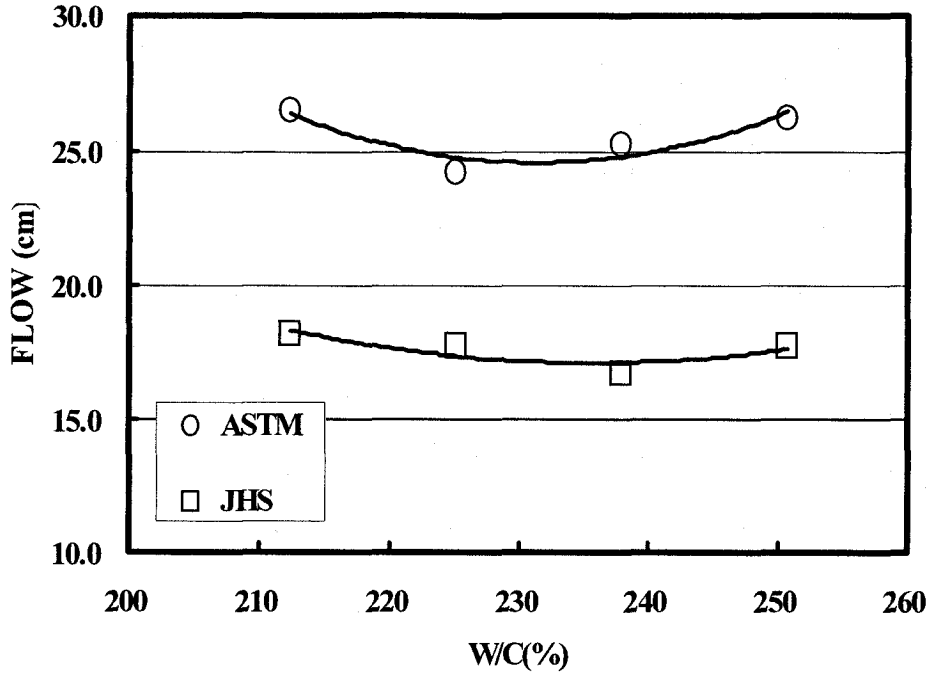


Fig. 3.3.195 유동성 시험결과(CL)

(바) 시험방법에 따른 유동성 및 재료분리 실험 결과

SW, SM, SC, ML, CL의 시료에 대해 고화재와의 배합비에 따른 유동성, 슬럼프, 블리딩실험의 결과를 나타냈다. Fig. 3.3.196과 Fig. 3.3.197에는 각각 일본(JHS)과 미국(ASTM)의 기준몰드를 이용한 각 시료 별 유동성과 물배합비의 관계를 나타냈다. 실험결과, 유동성실험과 블리딩실험의 경우, 기준치에 모두 만족하는 것으로 나타났다(ACI 229R-94 기준, 31.5mm이상 : 이하 A-S, Tokyo Electric Power Company R&D Center 기준, 180~300mm : 이하 J-S). 슬럼프콘을 이용한 유동성실험(KS F 2402)에서는 W/C비 165~207%에서 유동성 기준치(500~700mm)에 부합되는 결과가 나타났다(Fig. 3.3.198).

SM시료에서의 배합비에 따른 유동성, 슬럼프 플로우, 블리딩실험의 결과, J-S유동성기준에서는 W/C비 150%를 제외한 모든 조건에서 기준치에 부합되는 결과가 나타났으며(Fig. 3.3.198), A-S기준에서는 전 범위에서 기준치에 부합되었다(Fig. 3.3.197). 슬럼프콘을 이용한 유동성실험에서는 W/C비 158~194% 범위에서 기준치에 부합되는 결과가 나타났다(Fig. 3.3.198). 블리딩실험의 경우, 전 범위에서 기준치에 만족하는 결과가 나타났다.

SC시료의 경우, J-S유동성 기준에서는 W/C비 195~231%를 조건에서 기준치에 부합되는 결과가 나타났으며(Fig. 3.3.196), A-S기준에서는 전 범위에서 기준치에 부합되었다(Fig. 3.3.197). 슬럼프콘을 이용한 유동성실험에서는 W/C비 182~208%에서 기준치에 부합되는 결과가 나타났다(Fig. 3.3.198). 블리딩실험의 경우에는 전 범위에서 기준치에 만족하는 결과가 나타났다.

ML시료의 경우, J-S유동성 기준에서는 W/C비 222~263% 조건에서 기준치에 부합되는 결과가 나타났으며(Fig. 3.3.198), A-S 기준에서는 전 범위에서 기준치에 부합되었다(Fig. 3.3.197). 슬럼프콘을 이용한 유동성실험에서는 전 범위에서 기준치(500~700mm)에 부합되지 못하는 결과가 나타났다. 그러나 슬럼프유동성 범위를 통해 기준치에 부합되는 W/C비 범위를 유추해보면, 대략 206%~234% 임을 간접적으로 파악할 수 있다(Fig. 3.3.198). 블리딩실험의 경우, 전 범위에서 기준치에 만족하는 결과가 나타났다.

CL시료의 실험결과, 본 실험에서는 강도를 증진시키기 위해서 촉진제를 각 배합비의 고화재량에 따라 14~16g(0.1~0.2%)을 첨가하였다. 실험결과 J-S유동성, A-S유동성, 슬럼프 플로우, 블리딩실험의 기준치에 모든 W/C비 범위가 기준치에 모두 만족하는 것으로 나타났다(Fig. 3.3.169, Fig. 3.3.197, Fig. 3.3.198). 그러나 CL-4(W/C비 212%)의 경우 다른 시료와는 다르게 오히려 유동성이 증가되는 결과(JHS, ASTM, 슬럼프콘)가 나타났는데, 모든 유동성결과가 비슷한 경향을 나타내는 것으로 보아, 이 배합비에서 실험적인 오차가 발생했을 것으로 판단된다. 따라서 CL의 경우 W/C비 212%의 유동성결과는 반영하지 않았다.

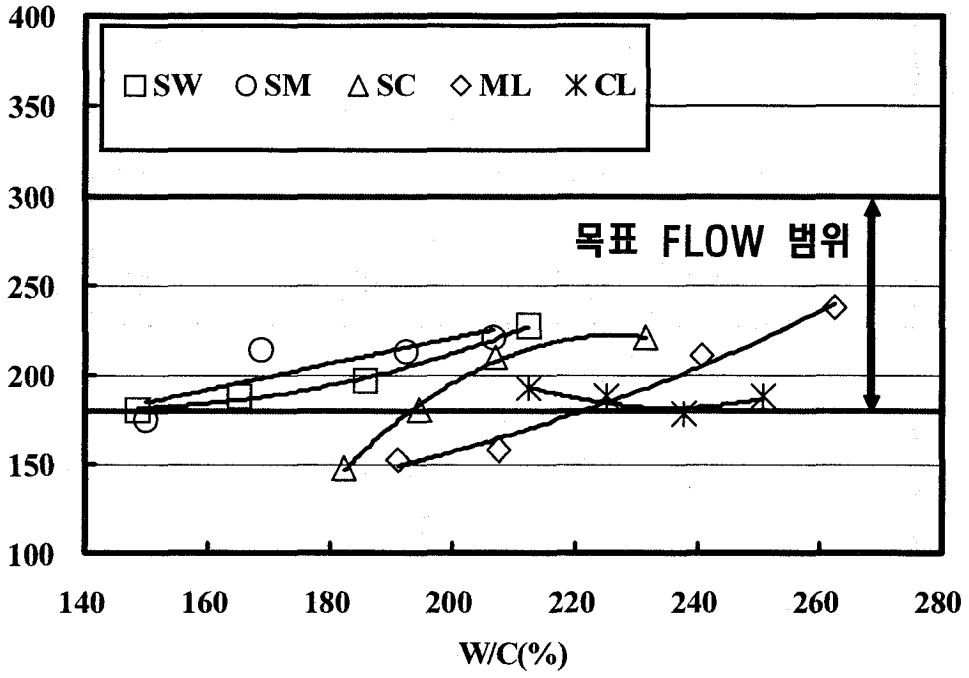


Fig. 3.3.196 JHS 기준몰드를 이용한 각 시료의 유동성과 물배합비의 관계

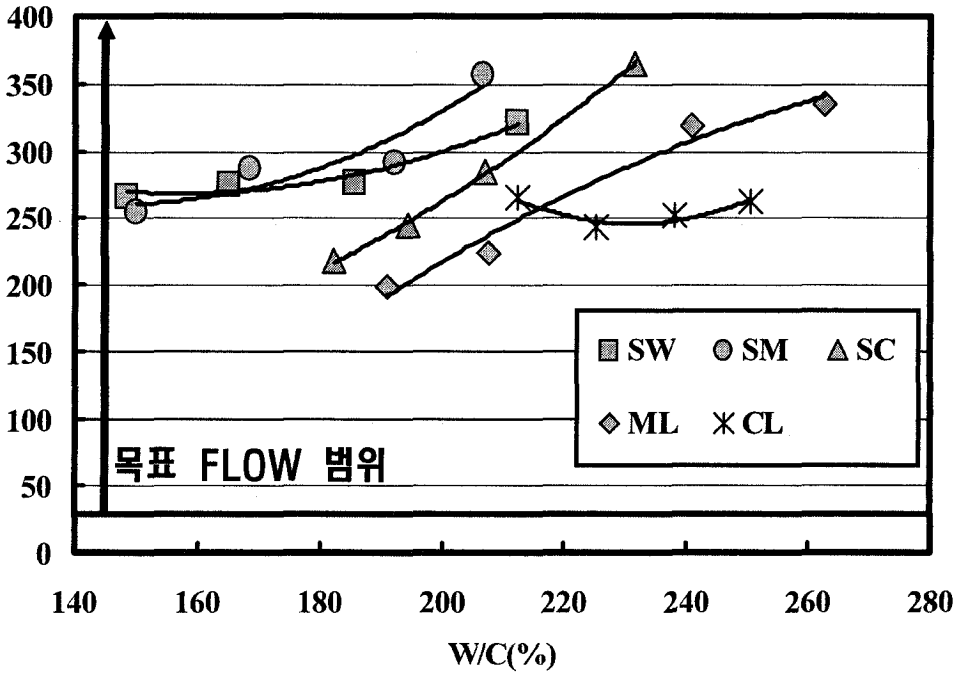


Fig. 3.3.197 ASTM 기준몰드를 이용한 각 시료의 유동성과 물배합비의 관계

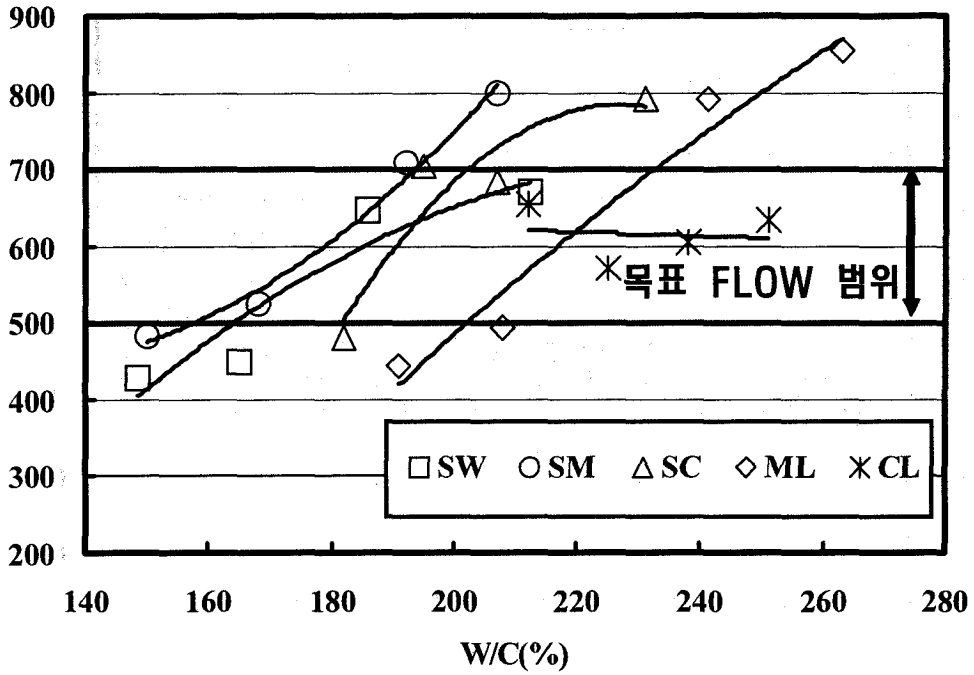


Fig. 3.3.198 슬럼프콘을 이용한 각 시료의 유동성과 물배합비의 관계

(사) 시간경과에 따른 유동성 변화

급결성 유동화 처리토의 고화반응이 시작되면 점성이 증가하고 유동성은 시간이 지남에 따라 감소된다. Fig. 3.3.199는 시간경과에 따른 유동성 감소 경향을 나타내고 있는 데, 30분이 지나면서 초기 흐름 값보다 13.5%, 60분 후에는 25.3%, 90분 후에는 35.4%의 감소효과가 나타났다. 따라서 혼합에서 타설까지의 유동성 확보를 위해서는 유동화 처리토 조성 후 비교적 빠른 시간 내에 타설이 이루어져야 한다.

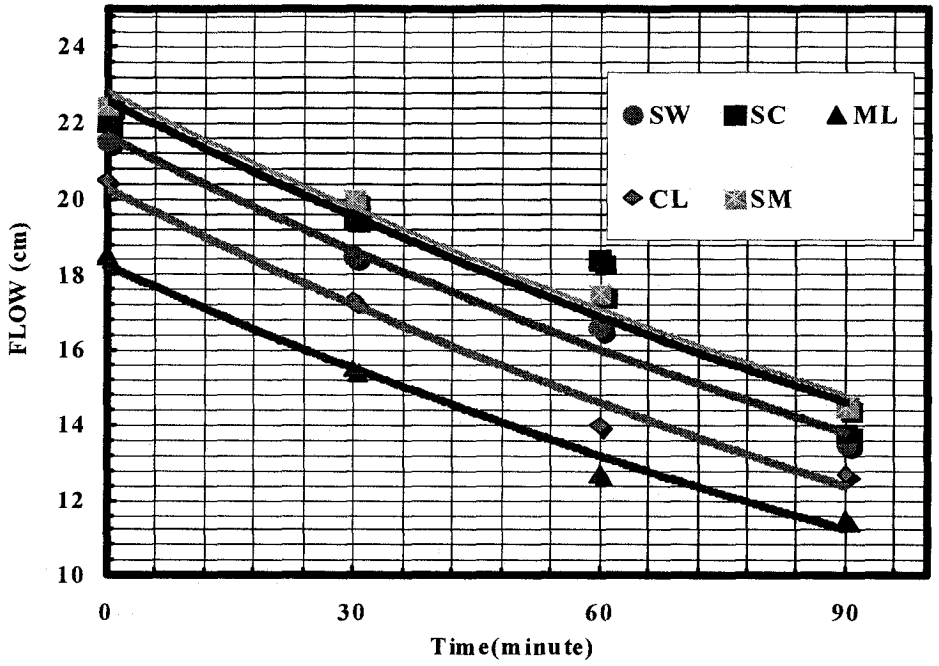


Fig. 3.3.199 시간경과에 따른 유동성의 변화

(아) 유동성 측정방법의 상관관계

현재 널리 사용되고 있는 유동화 처리토에 대한 유동성 측정방법은 실린더몰드를 이용한 미국 ASTM D 6103방법과 일본도로공단규격 JHS A313방법, 그리고 고유동 콘크리트의 워커빌리티를 측정하는 데 사용하는 슬럼프콘을 이용한 슬럼프 흐름시험 등이다. 유동화 처리토의 국내 적용을 위해서는 표준화된 유동성 시험방법이 필요하다. 따라서 Fig. 3.3.200과 같이 ASTM, JHS, 슬럼프 흐름 시험방법에 따른 유동성 결과치의 상호관계를 파악하였다.

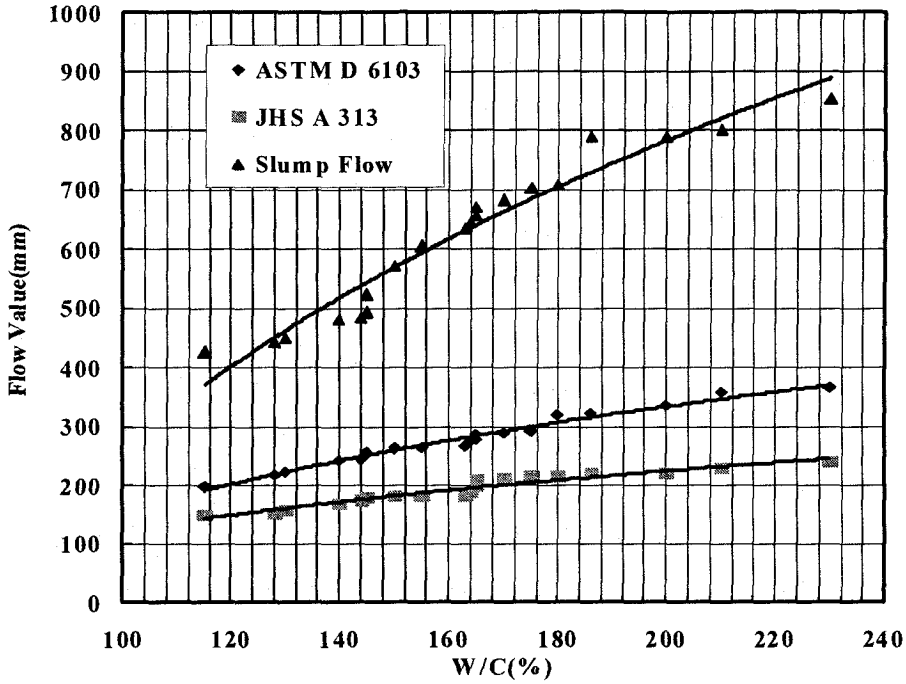


Fig. 3.3.200 유동성 측정방법에 따른 흐름값 비교

- Slump Flow시험치: $y = 746.68Ln(x) - 3172.6$, $R^2 = 0.945$
- ASTM D 6103시험치: $y = 256.77Ln(x) - 1026.9$, $R^2 = 0.9782$
- JHS A 313시험치: $y = 147.18Ln(x) - 555.38$, $R^2 = 0.9327$

$115 \leq W/C \leq 230$ 범위에서 JHS A 313방법의 실린더(∅8×8cm)로 유동성시험을 할 경우, 다음과 같은 관계식으로 슬럼프 흐름값과 ASTM D 6103 실린더 몰드방법에 의한 흐름값을 유추할 수 있다.

- Slump Flow $y = y_{JHS} + 599.5Ln(x) - 2617.22$
- ASTM D 6103 $y = y_{JHS} + 109.59Ln(x) - 471.52$

(3) 공기량

고화재를 혼합한 시료의 공기 함유량을 압력의 감소에 의하여 시험하는 방법으로 시료 내 존재하는 공기가 유동화 처리토에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

본 실험에서는 일축압축시험을 통해 각 기준치(유동성, 블리딩, 일축압축강도)에 부합되는 각 시료별 배합비 SW-1, SM-2, SC-2, ML-2, CL-4에서 시험을 실시하였다. 배합한 후 혼합물을 용기에 넣고 표면을 잘 다듬고 뚜껑을 덮은 후 초기압력을 영점을 잡고 작동밸브를 눌러 시험을 실시하였다. Table 3.3.62는 공기량 시험결과를 나타내었으며, 시험결과 공기량은 0.5~0.85%의 범위를 나타냈다.

기존의 보통 시멘트는 3~6%, 경량 콘크리트는 3.5~6.5%를 나타내며, 폐석탄회를 사용한 CLSM이 공기량은 3.0~5.0%로 나타남(이용수, 2002)을 고려해 볼 때, 본 연구에서 사용된 고성능 유동화 처리토에서는 공기량이 1%이하로서 공기량에 따른 블리딩 및 재료분리를 감소시키고 유동화 처리토의 내구성을 증대시키는 효과는 무시할 수 있음을 알 수 있다.

Table 3.3.62 공기량시험 결과

시료목록	공기량 (%)
SW-1	0.85
SM-2	0.70
SC-2	0.55
ML-2	0.70
CL-4	0.50

(4) 단위용적중량

굳지 않은 유동화 처리토의 단위용적중량 시험의 결과는 Table 3.3.63과 같이 1.47~1.84g/cm^{3}으로 일본 토목연구소에서 제시한 품질기준(1.5g/cm^{3}이상)에 비교하였을 때 CL을 현장토로 사용한 경우를 제외하고, 다른 시험의 경우 모두 기준치에 부합되는 결과가 나타났다. 시험결과는 경화한 유동화 처리토의 단위용적중량을 아는 지표로서 사용되는 데, 흙의 종류, 배합, W/C 등에 의하여 크게 변화하므로 실제 사용하는 유동화 처리토로 시험하여야 한다.

Table 3.3.63 단위용적중량시험 결과

	SW-1	SM-2	SC-2	ML-2	CL-4
단위용적중량 (g/㎤)	1.84	1.82	1.63	1.54	1.47

나. 경화 후 상태 유동화 처리토의 개량 특성

(1) 일축압축강도

배합비 산정 시험을 통해 선정된 배합비로 공시체를 조성하고 4시간, 1일, 7일 그리고 28일의 양생기간을 설정하고 강도시험을 실시하였다. 공시체 조성시, 자립이 가능해 질 때까지 상·하부를 그리스(grease)로 최대한의 기밀성이 유지되도록 하였으며, 4시간 양생 후 진공포장기를 이용하여 진공포장을 한 후에 항온(23±2℃)에서 양생시켰다.

일본 동경전력에서 제시한 급결성 유동화 처리토의 일축압축강도 기준치에 의하면 타설 1시간 뒤에 사람이 서있을 수 있는 정도의 강도가 발현되어야 한다고 제시하고 있다. 또한 굴착 후 굴착 저면에서 발생하는 히빙(heaving) 등의 영향을 고려한 강도가 0.3kg/cm^{2}이상, 4시간 뒤에는 1.3kg/cm^{2}이상, 28일 강도는 인력굴착이 가능한 강도인 3.5~5.6kg/cm^{2}으로 제시되어 있다. 이는 3.5~5.6kg/cm^{2}의 강도가 허용지지력의 개념에서 토질의 하중 지지력을 측정하는 표준이며, 이때의 값이 잘 다져진 흙의 강도와 동일하기 때문이다. 또한 미국 플로리다에서는 인력굴착이 가능한 최대 강도를 7kg/cm^2, 백호(back hoe)와 같은 장비를 이용하여 굴착할 수 있는 강도를 7~21kg/cm^2, 굴착이 어려운 강도를 21kg/cm^{2}이상으로 제시하고 있다. 본 연구에서는 일축압축강도를 기준으로 하여 4시간 뒤에는 1.3kg/cm^{2}이상, 28일 후에는 5.6kg/cm^{2}이하로 설정하고 시험결과가 기준치에 잘 부합되는지를 파악하였다.

(가) SW에서의 일축압축시험 결과

Fig. 3.3.201에는 SW 시료에서 양생기간(4시간, 1일, 7일, 28일)과 W/C에 따른 일축압축강도의 변화를 나타냈다. W/C비가 작을수록 양생기간이 길어질수록 강도가 커졌으며, 28일 양생 후 인력으로 재굴착이 가능한 최대 강도인 7.0kg/cm^{2}를 만족시키는 W/C비는 200%정도로 나타났으며, 28일 강도 기준치인 5.6kg/cm^{2}의 W/C비는 찾을 수 없었다. 그러나 28일 양생 후 나타난 강도값들 이용하여 추세선(Trend

Line)을 도시해 보면, 대략 W/C비 220% 부근에서 기준강도에 부합됨을 파악할 수 있었다.

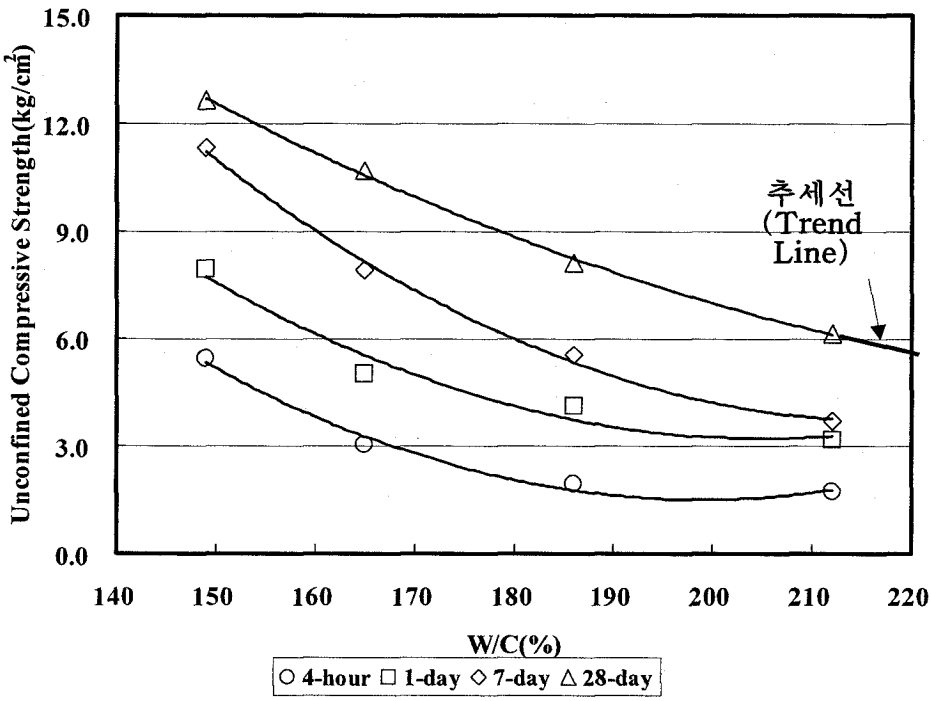


Fig. 3.3.201 W/C에 따른 시간별 강도 변화(SW)

(나) SM에서의 일축압축시험 결과

Fig. 3.3.202에는 양생기간(4시간, 1일, 7일, 28일)과 W/C에 따른 일축압축강도의 변화를 나타냈다. 시험 결과 28일 양생 후 인력으로 재굴착 가능한 최대 강도인 7.0 kg/cm^{2}를 만족시키는 W/C는 200% 정도로 나타났으며, 28일 기준치인 5.6kg/cm^{2}의 W/C는 찾을 수 없었다. 그러나 역시 강도 추세선(Trend Line)을 이용하면, 대략 W/C 220% 부근에서 기준치에 부합되는 강도값이 나타남을 파악할 수 있다.

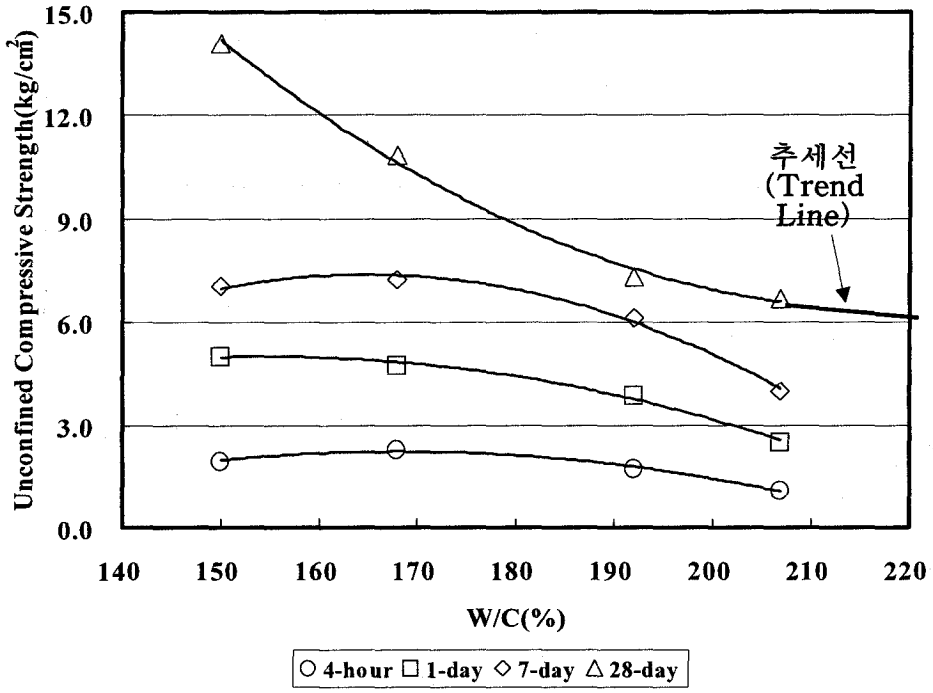


Fig. 3.3.202 W/C에 따른 시간별 강도 변화(SM)

(다) SC에서의 일축압축시험 결과

Fig. 3.3.203에는 SC 시료의 양생기간(4시간, 1일, 7일, 28일)과 W/C에 따른 일축압축강도의 변화를 나타냈다. 시험 결과로 28일 양생 후 인력으로 재굴착 가능한 최대 강도인 7.0kg/cm^{2}를 만족시키는 W/C는 195% 정도로 나타났으며, 28일 기준치인 5.6kg/cm^{2}의 W/C는 220%로 나타났다.

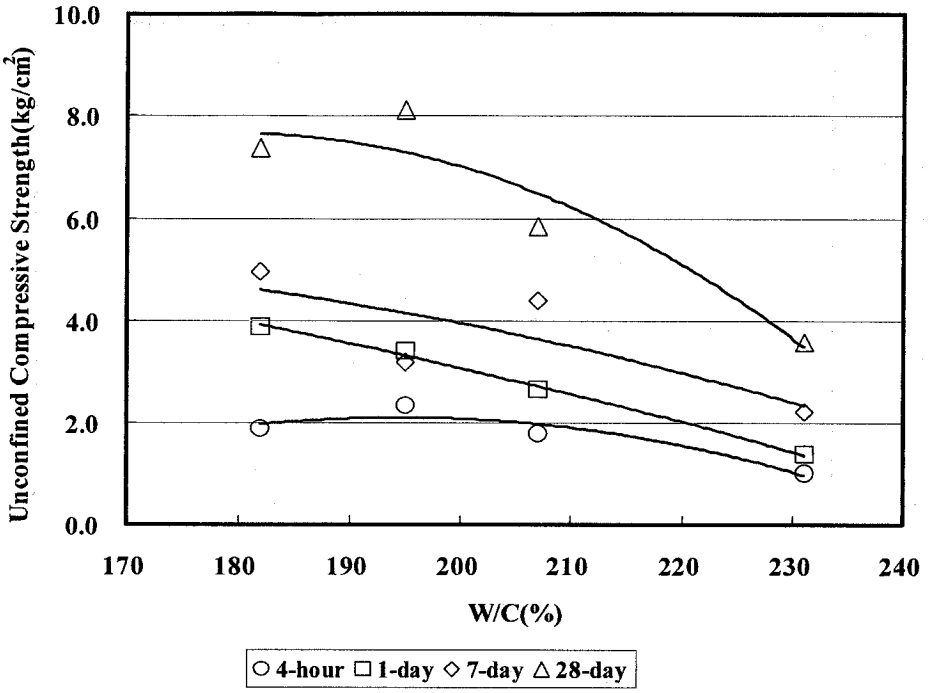


Fig. 3.3.203 W/C에 따른 시간별 강도 변화(SC)

(라) ML에서의 일축압축시험 결과

Fig. 3.3.204에는 4시간, 1일, 7일, 28일의 양생시간과 W/C에 따른 일축압축강도의 변화를 나타냈다. 시험 결과 28일 양생 후 인력으로 재굴착이 가능한 최대 강도인 7.0kg/cm^{2}를 만족시키는 W/C는 모든 배합비에서 만족하는 것으로 나타났으며, 28일 기준치인 5.6kg/cm^{2}의 조건을 만족시키는 W/C는 210%로 나타났다. ML의 경우, 28일 양생 후의 압축 강도가 7일 양생 후 강도보다 다소 작게 나타났다.

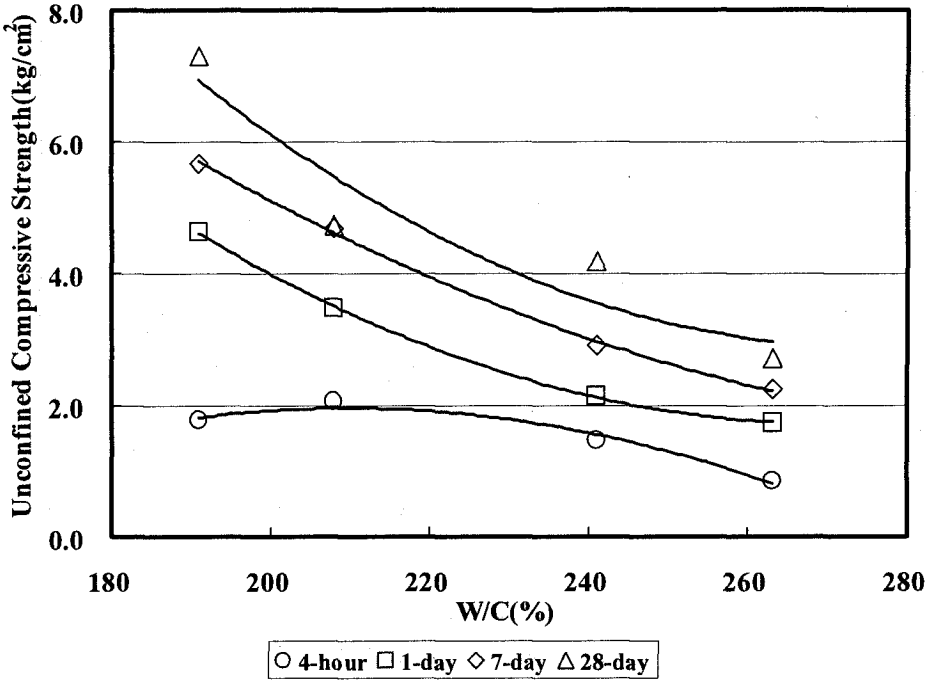


Fig. 3.3.204 W/C에 따른 시간별 강도 변화(ML)

(마) CL에서의 일축압축시험 결과

Fig. 3.3.205에는 양생기간(4시간, 1일, 7일, 28일)과 W/C에 따른 일축압축강도의 변화를 나타냈다. 시험 결과로 28일 양생 후 인력으로 재굴착 가능한 최대 강도인 7.0kg/cm^{2}를 만족시키는 W/C는 모든 배합비에서 만족하는 것으로 나타났으며, 모든 배합비에서 28일 기준치인 5.6kg/cm^{2}를 만족하였다. CL의 경우, 28일 양생 후의 압축 강도와 7일 양생 후 강도가 비슷한 것으로 나타났다.

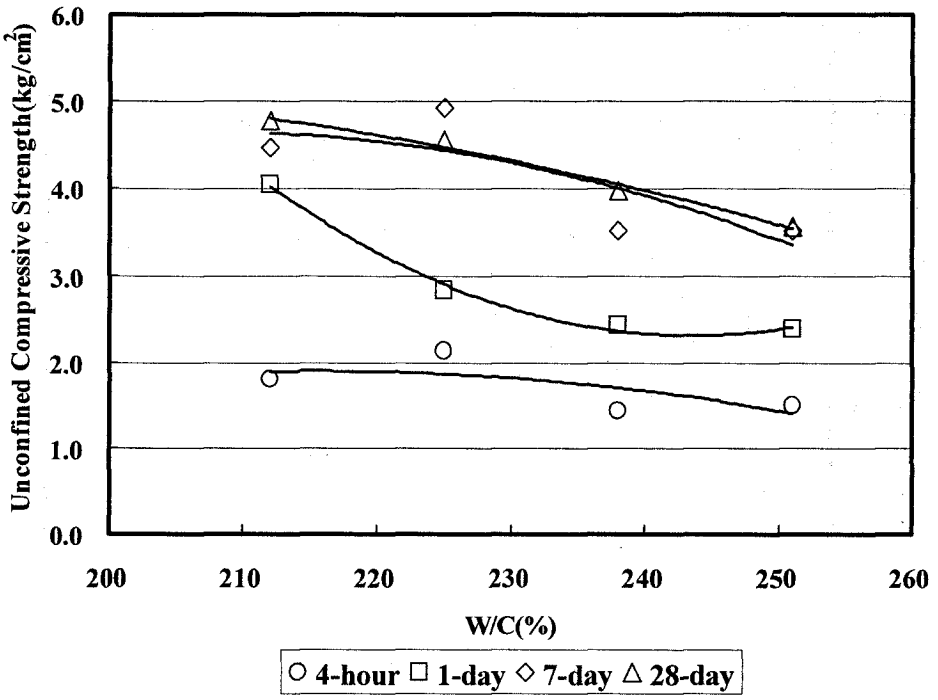


Fig. 3.3.205 W/C에 따른 시간별 강도 변화(CL)

(바) 7일 강도와 28일 강도의 관계

시료 조건 별 7일 강도와 28일 강도의 관계를 규명할 수 있다면, 7일 강도만으로도 실제 28일 강도를 예측할 수 있다. 따라서 SW, SM, ML 시료의 결과를 통해 7일 강도와 28일 강도를 나타내면 Fig. 3.3.206과 같다.

그림에 나타난 바와 같이, 7일 강도와 28일 강도는 매우 높은 상관성을 가지고 있으며(상관도(R^2)=0.94, 1에 가까울수록 상관도가 높음), 이를 통해 실제 지반에서의 7일 강도를 통해 28일 강도를 예측할 경우, 공기단축을 통한 시공비의 절감을 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

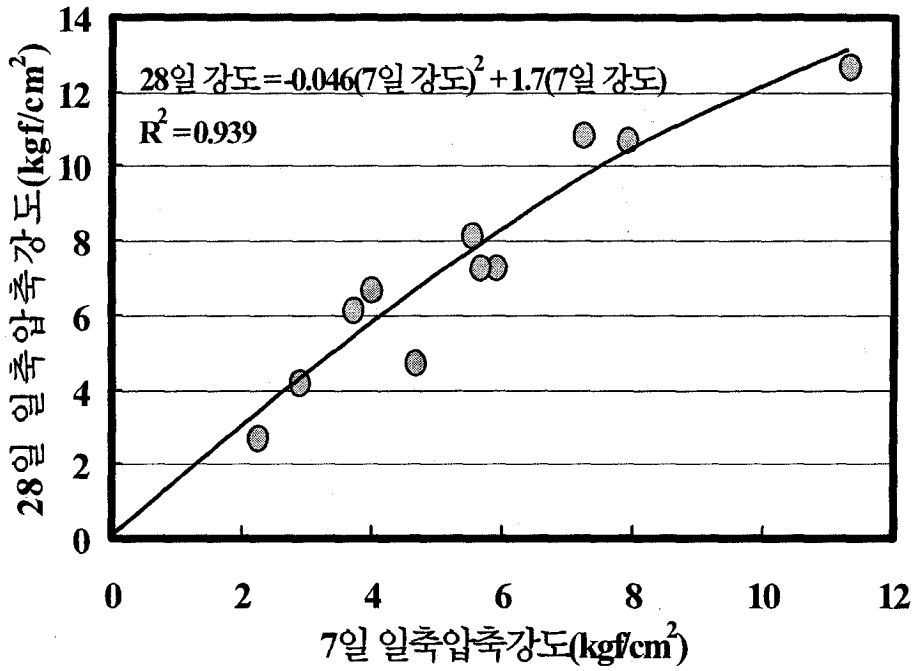


Fig. 3.3.206 7일 압축강도와 28일 압축강도의 관계(SW, SM, ML 시료의 경우)

(2) 비배수 삼축압축시험

본 연구에서는 개량지반의 단기간 안정해석을 위해 비압밀 비배수시험(UU-test)을 이용하여 각 시료별 배합조건에서 강도정수를 구하였다. 이때, 일축압축시험의 경우와 동일하게 4시간, 1일, 7일, 28일 양생 후 실험을 실시하였다.

(가) SW에서의 삼축압축시험 결과

Fig. 3.3.207은 양생기간과 배합비에 따른 점착력의 변화를 나타내고 있다. 시험결과, 점착력은 대체적으로 W/C의 증가와 함께 감소하는 경향을 나타냈다. 점착력은 약 1.0~4.0kg/cm^{2}의 범위에서 형성되었다.

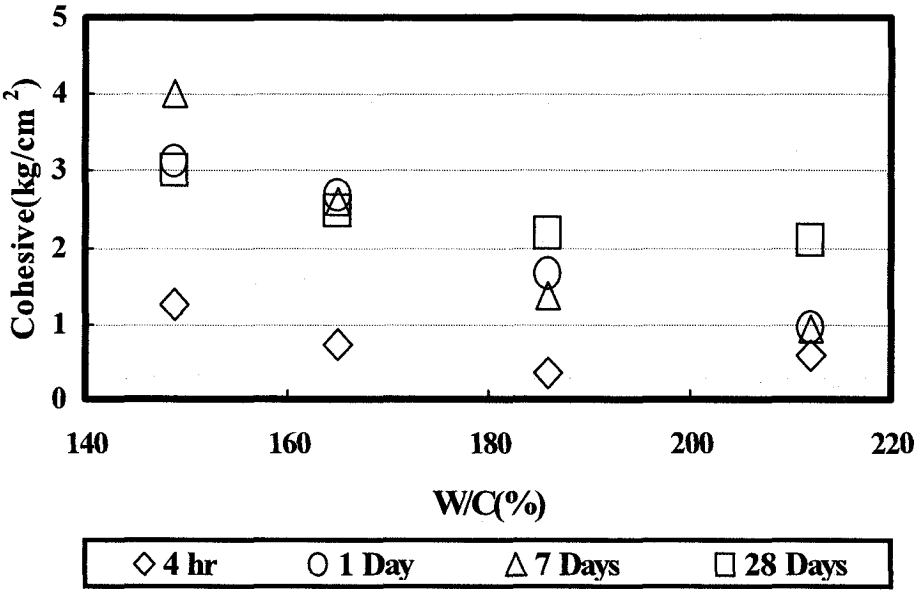


Fig. 3.3.207 양생기간과 배합비에 따른 점착력의 변화(SW)

Fig. 3.3.208에는 양생기간과 배합비에 따른 내부마찰각의 변화를 나타냈다. 시험결과 28일 양생 후의 값을 제외하고는 각 양생기간 별로 비슷한 값이 나타났다. 28일에서의 내부마찰각은 W/C의 증가와 함께 감소하는 경향으로 10~35°의 범위에서 값이 형성되었다.

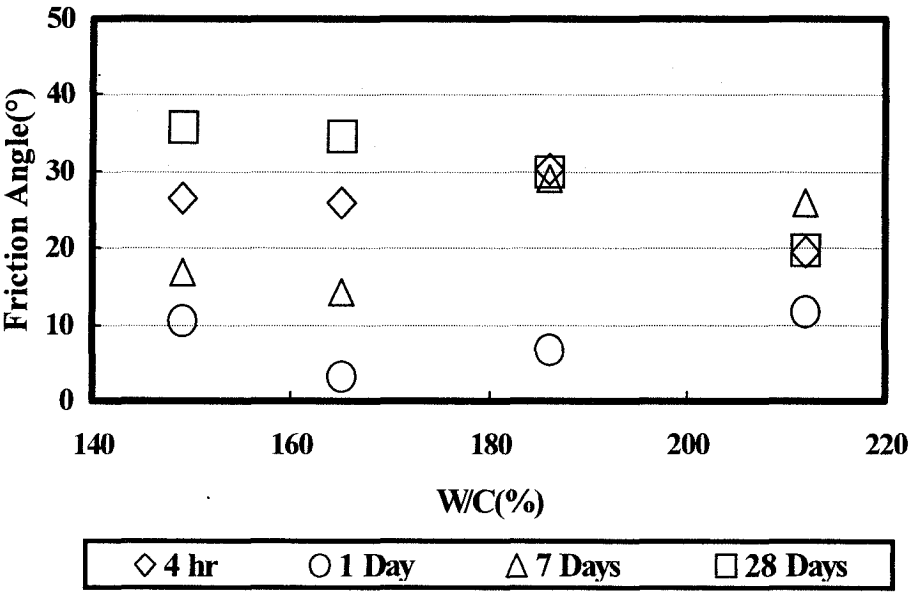


Fig. 3.3.208 양생기간과 배합비에 따른 내부마찰각의 변화(SW)

(나) SM에서의 삼축압축시험 결과

Fig. 3.3.209는 SM 시료의 양생기간과 배합비에 따른 점착력의 변화를 나타내고 있다. 점착력은 0.5~3.5kg/cm^{2}로 나타났고 대체적으로 양생기간이 증가하면서 점착력이 커지는 양상이 나타났으며, W/C의 증가는 점착력의 변화에 큰 영향을 미치지 않았다.

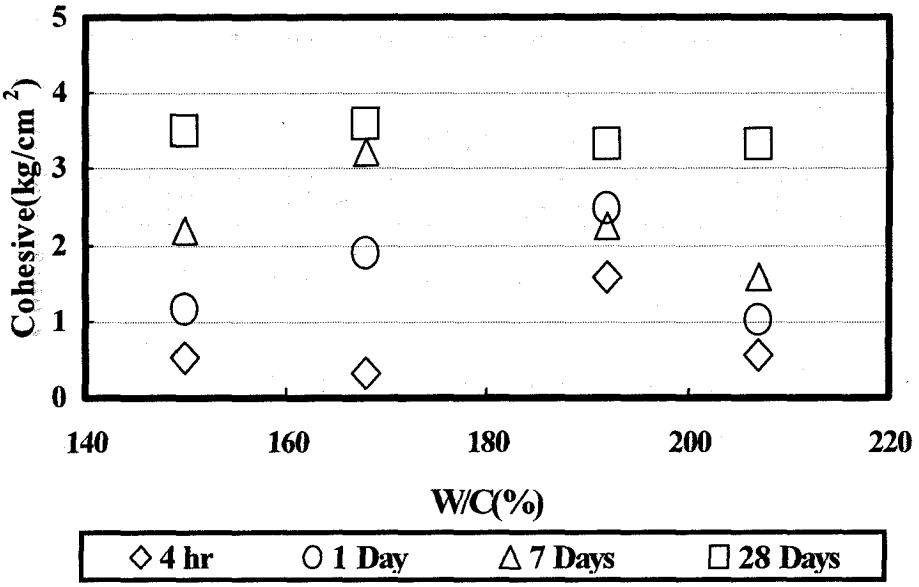


Fig. 3.3.209 양생기간과 배합비에 따른 점착력의 변화(SM)

Fig. 3.3.210에는 양생기간과 배합비에 따른 내부마찰각의 변화를 나타냈다. 대부분의 경우, 약 10~30°의 범위에서 값이 형성되었다.

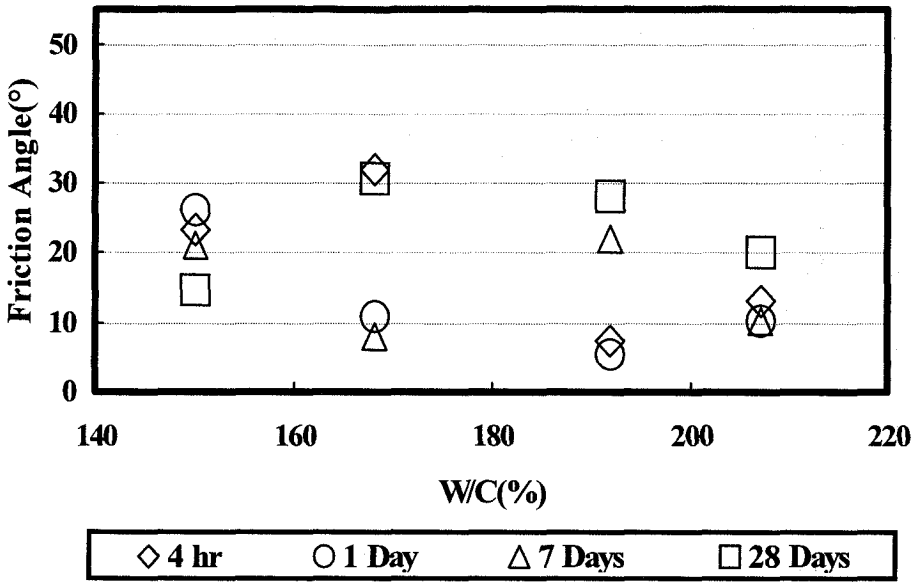


Fig. 3.3.210 양생기간과 배합비에 따른 내부마찰각의 변화(SM)

(다) SC에서의 삼축압축시험 결과

Fig. 3.3.211은 SC 시료의 양생기간과 배합비에 따른 점착력의 변화를 나타내고 있다. 점착력은 1.5~3.5kg/cm^{2}로 나타났고, 대체적으로 시간의 증가와 함께 증가하는 양상이 나타났으며, W/C가 증가할수록 감소하는 경향이 나타났다.

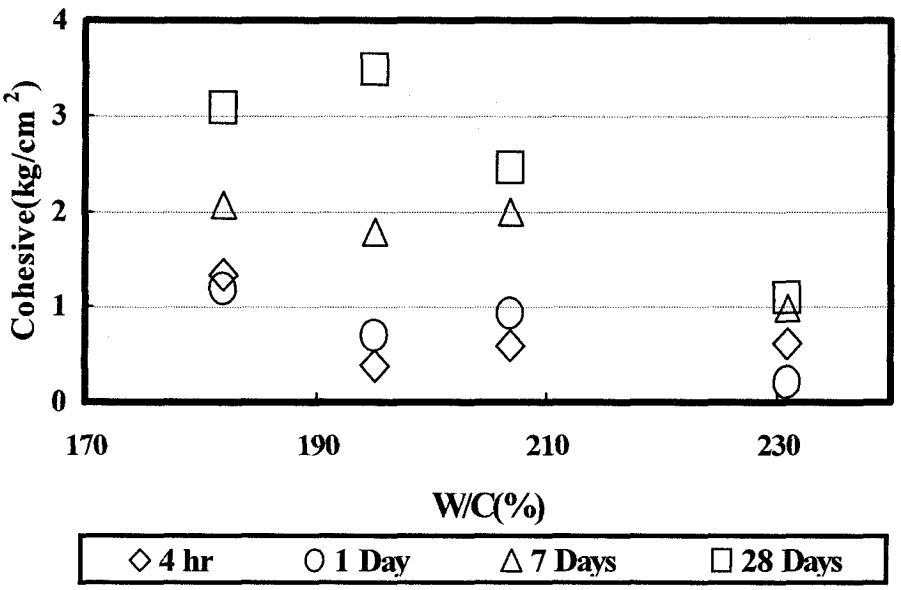


Fig. 3.3.211 양생기간과 배합비에 따른 점착력의 변화(SC)

Fig. 3.3.212에는 양생기간과 배합비에 따른 내부마찰각의 변화를 나타냈다. 시험 결과 약 10~30°의 범위에서 값이 형성되었다.

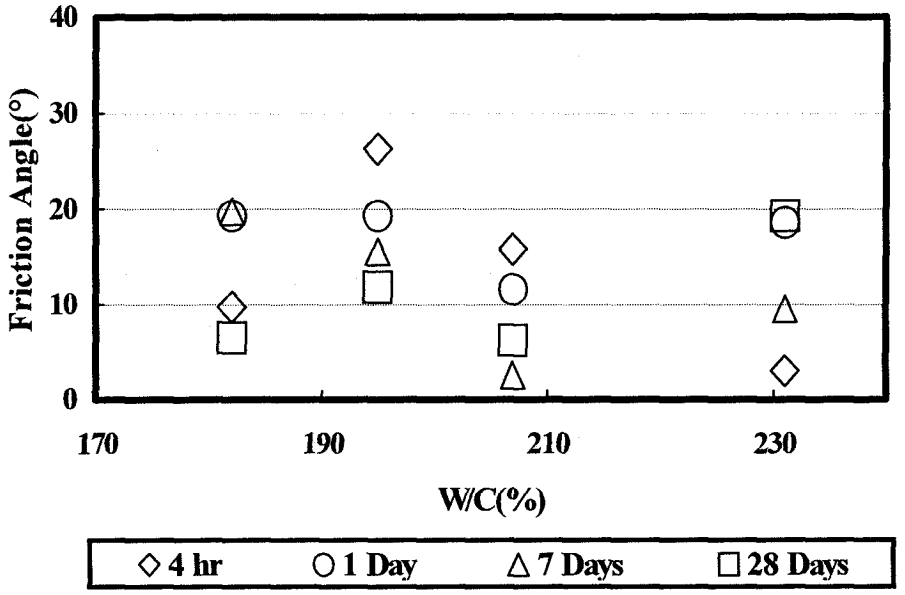


Fig. 3.3.212 양생기간과 배합비에 따른 내부마찰각의 변화(SC)

(라) ML에서의 삼축압축시험 결과

Fig. 3.3.213은 ML 시료의 양생기간과 배합비에 따른 점착력의 변화를 나타내고 있다. 시험 결과 양생기간의 증가와 함께 점착력이 증가하는 양상을 띠었다. 또한 W/C 208% 이상에서는 일정한 값(약 1.5kg/cm^2)에 수렴하는 양상이 나타났으며, 0.5~2.5kg/cm^{2}정도의 범위에서 값이 형성되었다.

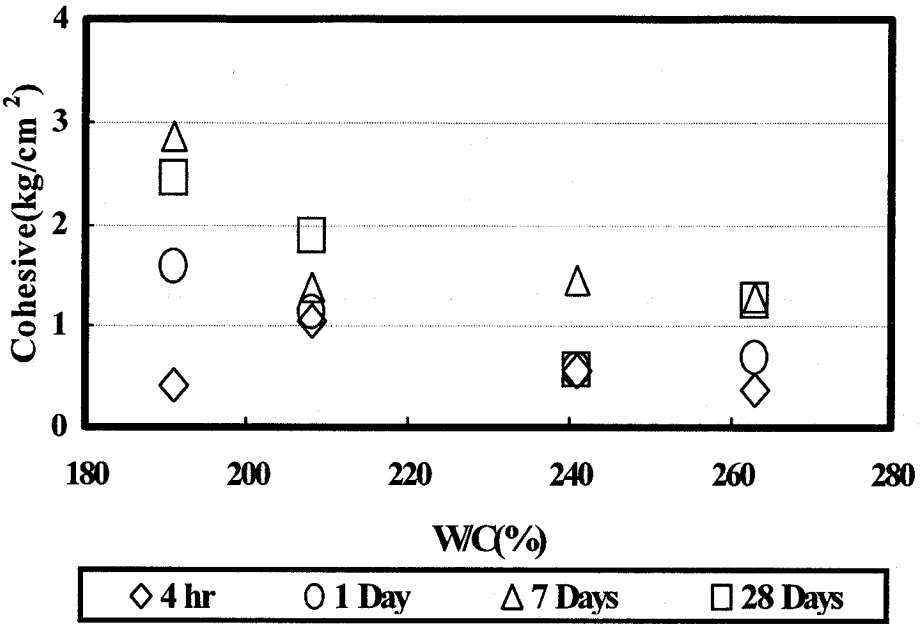


Fig. 3.3.213 양생기간과 배합비에 따른 점착력의 변화(ML)

Fig. 3.3.214에는 양생기간과 배합비에 따른 내부마찰각의 변화를 나타냈다. 시험결과 약 5~30°의 범위에서 값이 형성되었다. 또한 W/C 263%에서 급격한 내부마찰각의 저하가 나타났다.

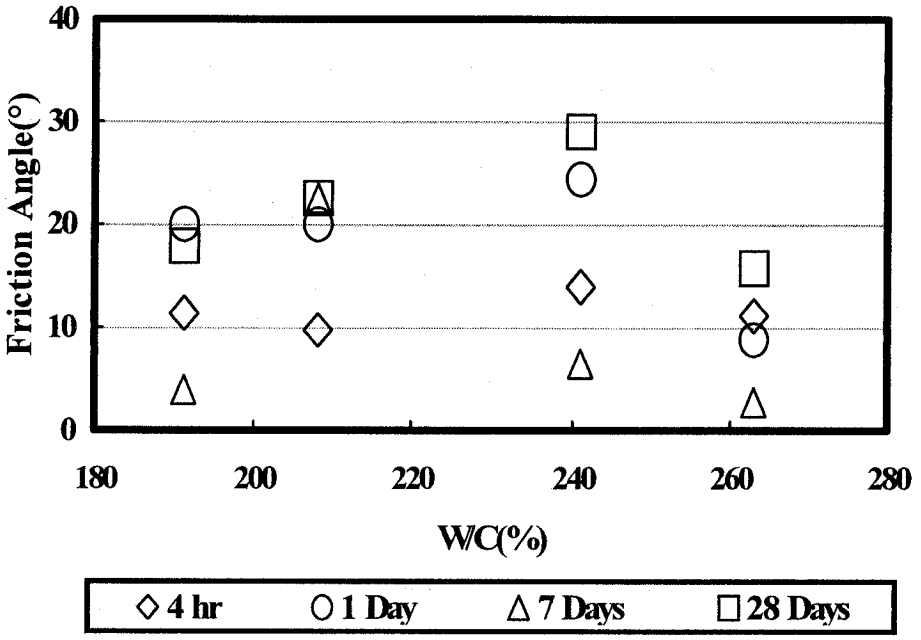


Fig. 3.3.214 양생기간과 배합비에 따른 내부마찰각의 변화(ML)

(바) CL에서의 삼축압축시험 결과

Fig. 3.3.215에는 CL 시료의 양생기간과 배합비에 따른 점착력의 변화를 나타내고 있다. 시험결과 약 0.5~1.5kg/cm^{2}의 범위에서 점착력의 값이 형성되었다. 또한 앞서 제시한 시료(SW, SC, SM, ML)와 비교해 보았을 때 가장 작은 값이 나타났다.

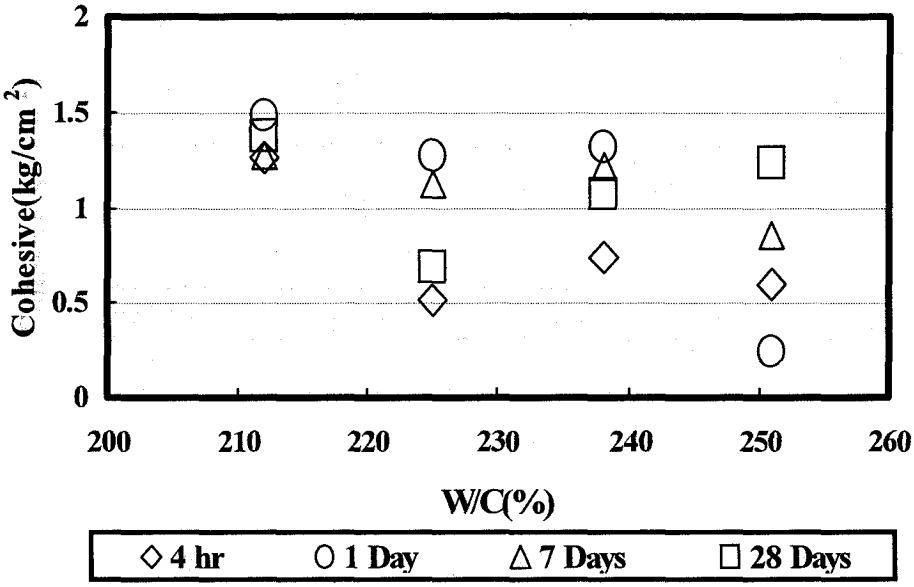


Fig. 3.3.215 양생기간과 배합비에 따른 점착력의 변화(CL)

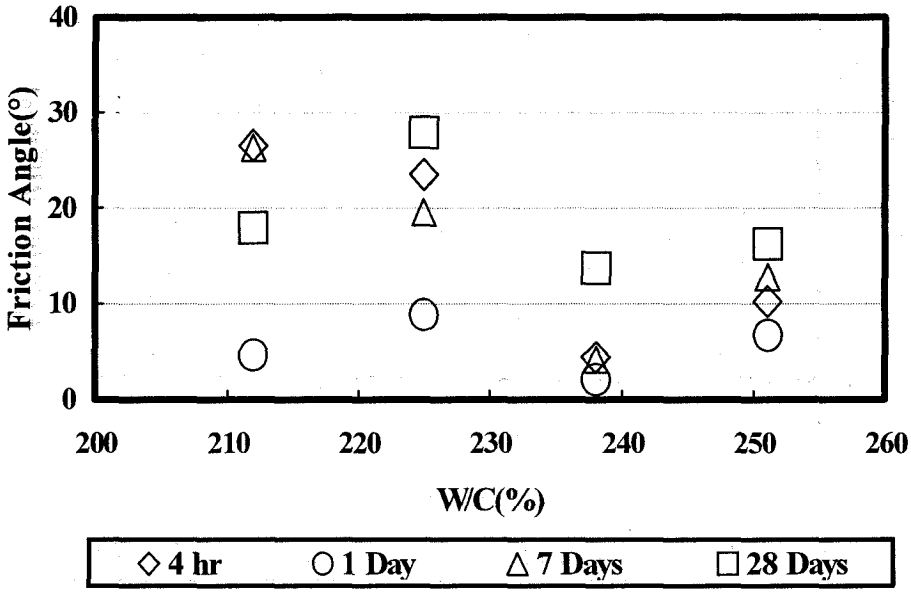


Fig. 3.3.216 양생기간과 배합비에 따른 내부마찰각의 변화(CL)

Fig. 3.3.216에는 양생기간과 배합비에 따른 내부마찰각의 변화를 나타냈다. 대부분 W/C 238% 이하에서 W/C 증가에 따라 내부마찰각이 감소하는 경향을 보이다가 W/C 251%에서 급격한 증가가 나타났다. 양생기간을 28일로 설정한 경우에서는, W/C가 증가함에 따라 내부마찰각이 감소하는 경향이 나타났다. 5~28°의 범위에서 내부마찰각이 형성되었다.

(사) 재령 28일 후의 시료의 종류에 따른 점착력과 내부마찰각의 변화

Fig. 3.3.217에 재령 28일 후 시료의 종류에 따른 점착력을 W/C의 변화에 따라 나타냈다. 장기적으로 W/C가 210% 이하일 경우에는 1.9~3.6kg/cm^{2}의 점착력을 나타냈고, 210% 이상일 경우에는 1.4kg/cm^{2}보다 점착력이 작게 나타났다. 이러한 경향이 주재료가 모래질인 SW, SM, SC와 실트질인 ML, 점토질인 CL에서 공통적으로 나타난 것을 통해, 유동화 처리토 제조 후의 점착력은 주재료의 영향보다는 각각의 배합비가 점착력의 영향인자라는 것을 파악할 수 있었다.

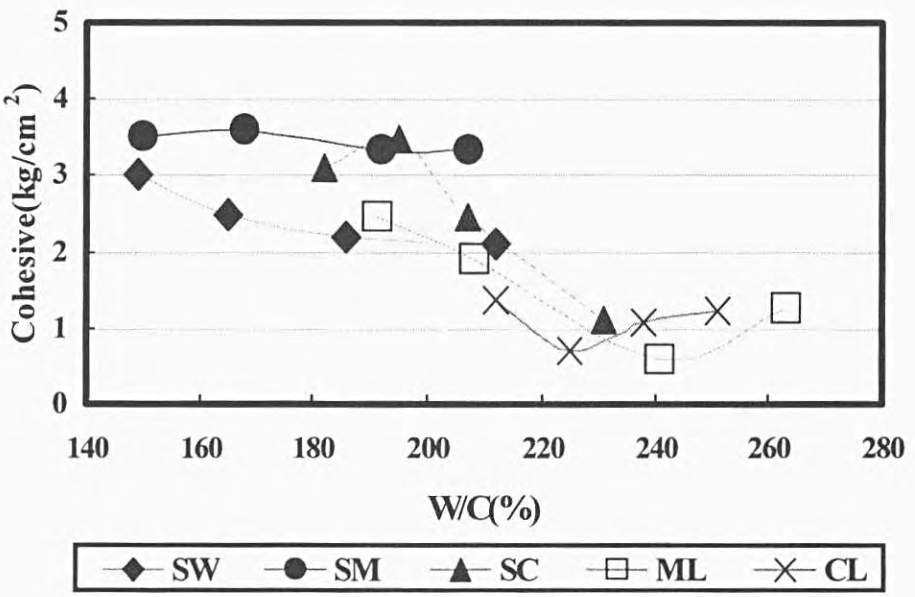


Fig. 3.3.217 재령 28일 후 각각의 시료에 대한 W/C 변화에 따른 점착력

Fig. 3.3.218에는 재령 28일 후 각각의 시료의 종류에 따른 내부마찰각을 W/C 변화에 대해 나타냈다. 기존의 뒷채움 공법인 모래다짐공법의 경우, 주재료가 모래질인 경우의 내부마찰각의 범위는 35~46°이다(김용필 등, 2002). 유동화 처리토는 기

존의 모래다짐공법을 대체할 수 있는 공법으로 제안되었기 때문에 재령 28일 후의 내부마찰각을 파악하여, 모래다짐공법과 서로 비교하였다. 그 결과, 주재료가 모래질인 SW, SM, SC의 경우 모래질 지반의 35~46°의 내부마찰각 범위를 만족하는 배합비는 각각 W/C가 148~192%, 164~198%, 170~202%로 나타났다. 주재료가 실트질인 ML의 경우 35~46°를 만족하는 W/C의 범위는 없었지만, W/C가 210% 이하인 경우에는 35°에 근접한 내부마찰각을 나타났다. 주재료가 점토질인 CL일 경우의 내부마찰각은 모든 배합조건에서 20° 이하로 나타났다. 이를 통해 각각의 재료에 대해 최적 배합비에 의해 제조한 유동화 처리토는 내부마찰각을 기준으로 판단할 때, 기존의 모래다짐공법을 대체할 수 있다고 사료된다.

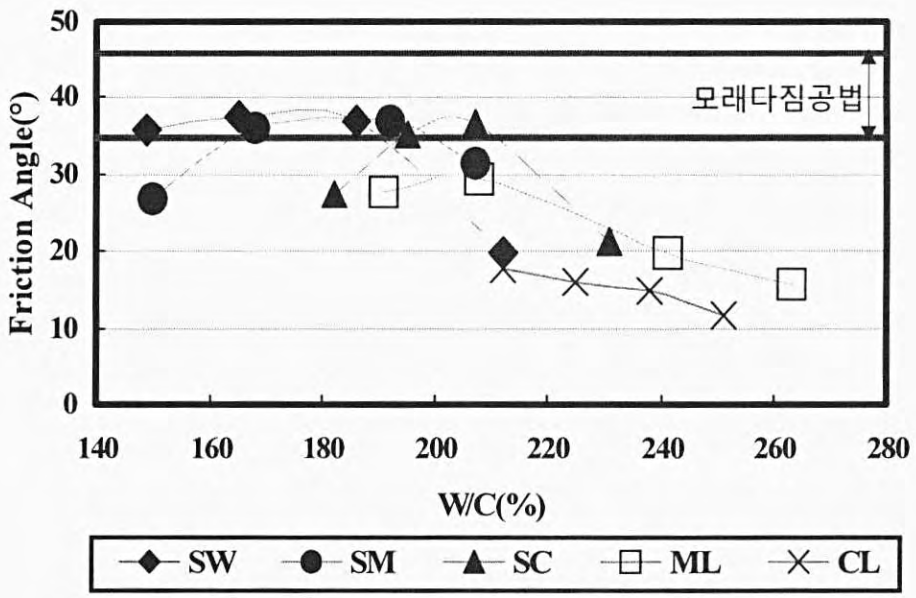


Fig. 3.3.218 재령 28일 후 각각의 시료에 대한 W/C 변화에 따른 내부마찰각

(3) 투수성

5가지 시료(SW, SM, SC, ML, CL)의 투수시험을 위해 배합비의 공시체를 일축압축시험과 동일한 조건으로 조성한 후, 4시간, 28일 양생하여 투수시험을 실시하였다. 시험결과, 투수계수는 2.12×10^{-6}~8.49×10^{-6}cm/sec의 범위를 나타내었으며 그 차이는 크지 않았다. 따라서 양생기간, 시료의 특성과 그다지 큰 차이는 보이지 않을 것으로 판단된다. 또한, 일반적인 유동화 처리토의 투수계수인 10^{-6}~10^{-7}cm/sec의 범위에도 부합되는 결과를 보였다. 5가지 원시료의 투수계수는 큰 차이를 나타내지만 유동화 처리토 제조 후의 투수계수는 모두 유사한 결과를 나타내는 현상은 CSA 시멘트는 수화과정 초기에 미수화 입자간에 형성된 에트린자이트 구조내의 간극을 C_3S가 활발히 수화하며 생성하는 tobermorite gel(C-S-H gel)가 충진시켜 주기 때문이라고 판단된다.

Table 3.3.64 투수시험 결과

	SW-1	SM-2	SC-2	ML-2	CL-4
투수계수 (cm/sec) 4시간 양생	2.12×10^{-6}	2.02×10^{-6}	4.19×10^{-6}	3.78×10^{-6}	2.55×10^{-6}
투수계수 (cm/sec) 28일 양생	3.49×10^{-6}	5.02×10^{-6}	7.42×10^{-6}	6.47×10^{-6}	8.49×10^{-6}

(4) 지지력비(CBR)

일축강도결과를 바탕으로 SW-1, SM-2, SC-2, ML-2, CL-4로 시료를 조성하고 시험을 실시하였다. 초기 유동화 처리토의 지지력을 측정하기 위하여 교반 후 2일간 공기양생 후, 4일 동안 수침을 시키고 그에 따른 팽창량을 측정하였으며, 관입량에 따른 지지력을 측정하였다. 따라서 이러한 결과가 국내 도로공사 표준시방서 등에서 하부 뒤채움재의 CBR기준이 5.0%이상의 기준에 부합되는 지를 파악하였다.

시험결과, Table 3.3.65와 같이 CBR값은 7~11%로 나타났으며 기준 목표치 5% 이상에 만족하는 것으로 나타났다. 또한 4일 수침 후 CBR 공시체의 팽창량은 대략 0.01~0.02mm정도로 나타났다.

Table 3.3.65 CBR시험 결과

	SW-1	SM-2	SC-2	ML-2	CL-4
CBR값(%)	11	10	11	8	7

(5) pH시험

선정된 각각의 배합비 SW-1, SM-2, SC-2, ML-2, CL-4에 대해 pH시험을 실시하였다. 초기 시료의 pH는 7~8 부근에서 형성되었으며, 고화재 자체의 pH는 11.1로 측정되었다. 또한 배합 직후와 28일 양생시킨 후 측정한 pH는 7.3~8.9 범위로 중성으로 나타났다. 이는 유동화 처리토가 시료의 pH에 미치는 영향이 거의 없음을 파악할 수 있었다. 시멘트에 의해 고화된 처리지반의 pH가 대략 9~12의 범위에서 형성됨을 고려해 볼 때, 본 연구에서 선정한 CSA계 고화재가 기존의 시멘트계 고화재보다 친환경적인 고화재임을 알 수 있다.

Table 3.3.66 pH시험 결과

	pH (초기 시료)	pH (배합 직후)	pH (28일후)
SW-1	7.18	8.33	8.36
SM-2	7.63	8.41	8.50
SC-2	7.74	8.35	8.74
ML-2	7.86	8.40	8.75
CL-4	7.61	8.35	8.96

(6) 어독성 시험

선정된 각각의 배합비 SW-1, SM-2, SC-2, ML-2, CL-4에 대해 환경영향을 평가하기 위한 방법으로 어독성 시험을 실시하였다. 어독성 시험에 사용된 유동화 처리토의 용출수는 각각의 시료에 따라 28일 고화된 유동화 처리토 공시체를 90일간 수조에 넣어서 제조하였다. 이 용출수에 금붕어를 넣고 12시간, 1일, 2일, 4일, 7일, 14일, 28일 동안 금붕어의 생존률을 확인한 결과, Table 3.3.67과 같이 28일 동안 15마리의 금붕어가 모두 생존하였다. 이를 통해 본 연구에서 사용된 CSA계 고화재인 C-10 고화재가 친환경적인 고화재임을 알 수 있었다.

Table 3.3.67 어독성 시험결과

	12시간		1일		2일		4일		7일		14일		28일	
	생존	사망	생존	사망	생존	사망	생존	사망	생존	사망	생존	사망	생존	사망
SW-1	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0
SM-2	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0
SC-2	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0
ML-2	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0
CL-4	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0

8. 실험결과 및 요약

본 연구는 친환경적인 급결성 유동화 처리토의 적용을 위하여 국내의 대표적인 흙과 혼합하여 경화 전과 경화 후의 급결성 유동화 처리토에 관한 물리적 특성을 실험을 통해 파악하였다. 그리고 실험결과를 바탕으로 요구되는 유동화 처리토의 사양에 따라 현장발생토, 고화재 및 물의 최적 배합비를 제시하였다. 현장발생토의 입경, 유기물 함유량에 따른 배합특성 실험을 실시하고, 고화재로서 고로슬래그 시멘트의 적용성을 평가하였다. 또한 현장발생토의 대체 재료로서의 석탄회의 적용성을 검토하고자 실내실험을 실시하였다.

(가) 급결성 유동화 처리토의 특성실험 결과

급결성 유동화 처리토의 특성실험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 본 실험에 적합한 고화재를 선정하고자, 12가지의 고화재에 대해 슬럼프 플로우 값과 재령 4시간 일축압축강도와 재령 28일 일축압축강도를 측정하여 유동성과 강도특성을 파악하였다. 그 결과 위의 3가지 목표 값을 만족하는 C-10(CSA계 시멘트)을 본 연구의 적합 고화재라 판단하여 선정하였다.

2. 선정된 고화재로 통일분류법에 의해 분류된 대상토(SW, SM, SC, ML, CL, 자갈 함유토, 유기물 함유토) 중 SW, SM, SC, ML, CL를 재활용한 급결성 유동화 뒷채움재는 유동성과 재굴착성 등을 고려해 볼 때, 기존의 모래로 다짐된 뒷채움재를 대체할 수 있음을 파악할 수 있었다.

3. CSA계 급결성 고화재를 사용한 유동성시험(흐름값, 18~30cm), 슬럼프 플로우(60±10cm), 블리딩율(1%이하)과 일축압축 강도시험(4시간 : 1.3kg/cm^{2}이상, 1일 : 2.0kg/cm^{2}이상, 28일 : 7.0kg/cm^{2}이하)의 결과를 바탕으로, 배합비 중 각 기준에 최대한 만족하는 배합비를 각 시료 별로 다음과 같이 최적 배합비를 선정하였다.

	SW	SM	SC	ML	CL
W/C비(%)	212	192	207	241	212
현장토비(%)	53.3	60.0	43.5	38.8	32.4
촉진제 (g)	-	-	-	-	15.5

4. 자갈 함유량에 따른 재료분리 특성 실험 결과, 자갈 함유량이 증가할수록 블리딩율이 증가하였고, W/C가 증가함에 따라 블리딩율은 증가하는 경향을 나타냈다.

5. 자갈 함유량이 증가할수록, 유동성은 점차적으로 증가하다가 다시 감소하는 경향을 나타냈고, 일축압축강도는 자갈 함유량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타냈다.

6. 자갈 함유량에 따른 투수특성 결과, 자갈 함유량에 상관없이 일반적인 유동화 처리토의 투수특성을 모두 만족하였다.

7. 유기물 함유량에 따른 재료분리 특성을 파악하기 위해 블리딩 실험을 실시한 결과, 유기물 함유량이 10% 이하인 실험 조건에서는 목표 기준값을 만족했다. 유기물 함유량이 증가할수록 재료분리 특성이 크게 나타나는 것을 통해 유기물 함유량이 유동화 처리토의 재료분리 특성에 영향을 미친다는 것을 파악할 수 있었다.

8. 유기물 함유량에 따른 강도 증가율과 유동성 증가율을 파악한 결과, 유기물 함유량이 클수록 유동성은 증가하지만, 강도발현은 잘 이루어지지 않는 것을 알 수 있었다.

9. 유기물 함유량에 따른 투수특성을 파악하기 위해 변수위 투수실험을 실시한 결과, 일반적인 유동화 처리토의 투수특성을 모두 만족하였고, 유기물이 유동화 처리토의 투수특성에는 직접적인 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다.

10. 블리딩율을 통해 석탄회를 첨가한 유동화 처리토의 재료분리 특성을 측정한 결

과, 시료의 첨가양이 적고, W/C가 높은 조건에서 목표기준보다 높은 재료분리 특성을 나타냈다.

11. 유동성과 강도특성의 목표기준을 모두 만족하는 배합비를 도출한 결과, 현장발생토:석탄회=32.5%:32.5%, 시료비율=65%, W/C=203.2%~208.6%를 최적 배합비로 산정하였다.

12. 석탄회를 첨가한 유동화 처리토의 배합실험결과, 모든 실험조건의 유동화 처리토에서 변수위 투수계수가 일반적인 유동화 처리토의 투수계수의 범위를 모두 만족하였다.

13. 공기량 실험 결과 공기량에 따른 블리딩 및 재료분리 효과는 무시할 수 있었으며, 투수성의 경우 모든 조건에서 10^{-6}cm/sec의 범위에 존재하였고, 양생기간과 시료의 특성에 따른 차이는 크게 나타나지 않았다. 또한 CBR 실험 결과 고화된 시료의 팽창은 대략 0.01~0.02mm 정도로 고화가 된 후에 유동화 처리토의 흡수 팽창은 무시할 수 있을 정도로 작게 나타났다.

14. 비압밀 비배수 조건에서의 삼축압축시험 결과, 토질별로 다음과 같은 내부마찰각과 점착력 값의 범위를 얻을 수 있었다.

	SW	SM	SC	ML	CL
점착력(C), kg/cm^2	4.0이하	3.5이하	3.5이하	2.5이하	1.5이하
내부마찰각 (∅)(°)	40이하	40이하	40이하	30이하	30이하

15. 급결형 유동화 처리토의 양생 후 pH 측정시험을 실시한 결과, 배합직후와 28일 양생시킨 후 측정한 pH는 7.3~8.9범위로 나타났다. 또한 28일 고화된 유동화 처리토를 28일간 용출한 물에 금붕어를 대상으로 어독성 시험을 실시한 결과, 28일 동안 모든 금붕어가 생존하였다. 따라서 본 연구에서 사용된 CSA계 급결형 유동화 처리토의 경우 친환경적인 재료임을 파악할 수 있었다.

이상의 결론을 바탕으로 각 시료 별 시험결과를 요약하면 다음과 같다.

구 분		시료 종류				
		SW-1	SM-2	SC-2	ML-2	CL-4
W/C(%)		206~212	190~194	205~209	236~244	208~215
흐름값(cm)		22.8~32.1	21.4~29.2	21.0~28.5	21.1~31.9	18.2~26.5
슬럼프 플로우(cm)		67.0	80.0	68.2	79.0	65.5
블리딩율(%)		0.000	0.035	0.000	0.000	0.000
투수성(cm/sec) (28일 고결 후)		3.29×10^{-6}	5.02×10^{-6}	7.42×10^{-6}	6.47×10^{-6}	8.49×10^{-6}
응결시간(Hour) 및 관입 저항치(kg/cm^2)		18Hour 25kg/cm^2	18Hour 12kg/cm^2	18Hour 8kg/cm^2	18Hour 8kg/cm^2	18Hour 6kg/cm^2
CBR(%) (6일 양생 후)		11	10	11	8	7
pH (28일 고결 후)		7.36	8.50	8.74	8.75	8.96
(28일 고결 후 28일간 용출수 생성)		15마리 생존	15마리 생존	15마리 생존	15마리 생존	15마리 생존
공기량(%)		0.85	0.70	0.55	0.70	0.50
단위용적중량(g/cm^3)		1.84	1.82	1.63	1.54	1.47
일축압축강도 (kg/cm^2)	4시간	1.74	1.72	1.77	1.47	1.81
	28일	6.15	7.30	5.85	4.18	4.78
삼축압축강도 (C)(kg/cm^2)	4시간	0.58	1.59	0.59	0.56	1.26
	28일	4.0	3.5	3.5	2.5	1.5
내부마찰각(Ø)(°)		40이하	40이하	40이하	30이하	30이하

제 4 절 배합설계 프로그램 개발(CLSM-Mixer)

1. 개요

본 연구를 수행하는데 있어서 프로그램 개발의 목적은 다음과 같다.

- 현장 토사 특성(SW, SM, SC, ML, CL)에 따른 적합 배합비 산정
- 현장 목표 강도 범위에 따른 배합비 산정

본 연구에서 개발된 프로그램은 유동화 처리토를 활용한 최적 배합비 산출을 위한 전용 프로그램으로 배합설계에 필요한 기본 조건 입력 후, 그에 따른 최적 배합비를 산출, 검토하여 유동화 처리토를 활용한 배합설계를 위한 실무 적용 오차를 줄이고자하는데 그 목적이 있다. 이를 위하여, 다양한 조건별 설계 배합강도 조건을 통해 각 배합 조건에 따른 물-고화재비(W/C)를 추정하고 배합관련 이론식을 기반으로 최적 배합비를 도출하여 개발 프로그램의 신뢰성을 확인하였다.

가. 프로그램의 특징 및 구성

본 연구에서 개발된 프로그램(이하 CLSM-Mixer : 유동화 처리토 배합 프로그램)은 기존의 상용 프로그램이 가지고 있는 모든 기능의 수행은 물론, 다음과 같은 기능을 가지고 있다.

(1) 파일 입·출력 기능
(2) 설계기준강도 결정 기능
(3) 배합강도 결정 기능
(4) 현장토 결정
(5) 추정 W/C
(6) 배합비율
(7) 보고서 작성 및 출력 기능

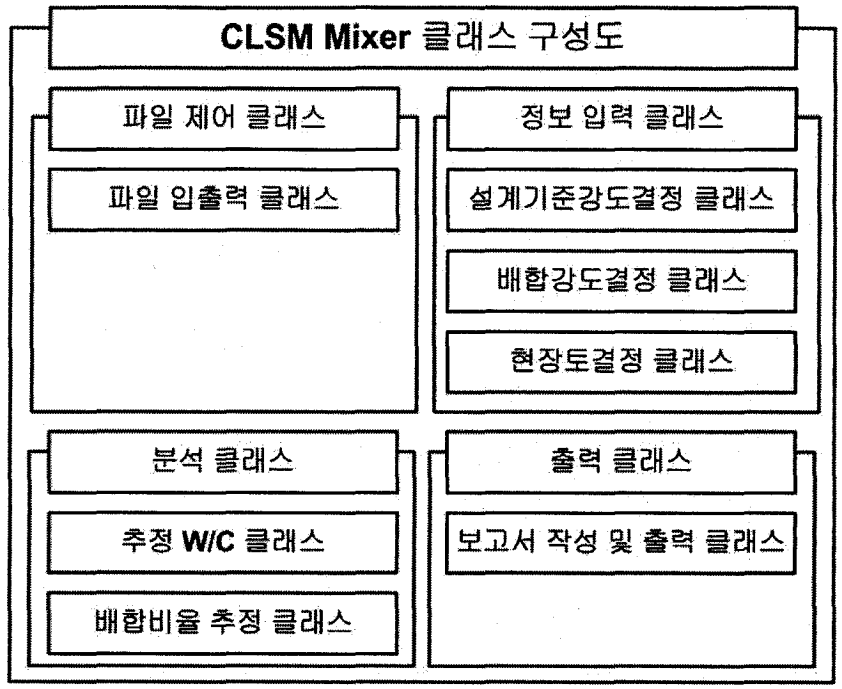


Fig. 3.4.1 CLSM-Mixer 프로그램 클래스 구성도

나. 프로그램 순서도

CLSM-mixer 프로그램은 Fig. 3.4.2와 같이 파일 생성, 설계기준강도 입력, 배합강도 입력, 현장토 결정, 물고화재비 결정, 배합비 산출, 보고서 출력의 순서로 최적 배합비를 도출하게 되며, 각 단계에서의 입력 조건을 만족하지 않을 경우 에러가 발생할 수 있다.

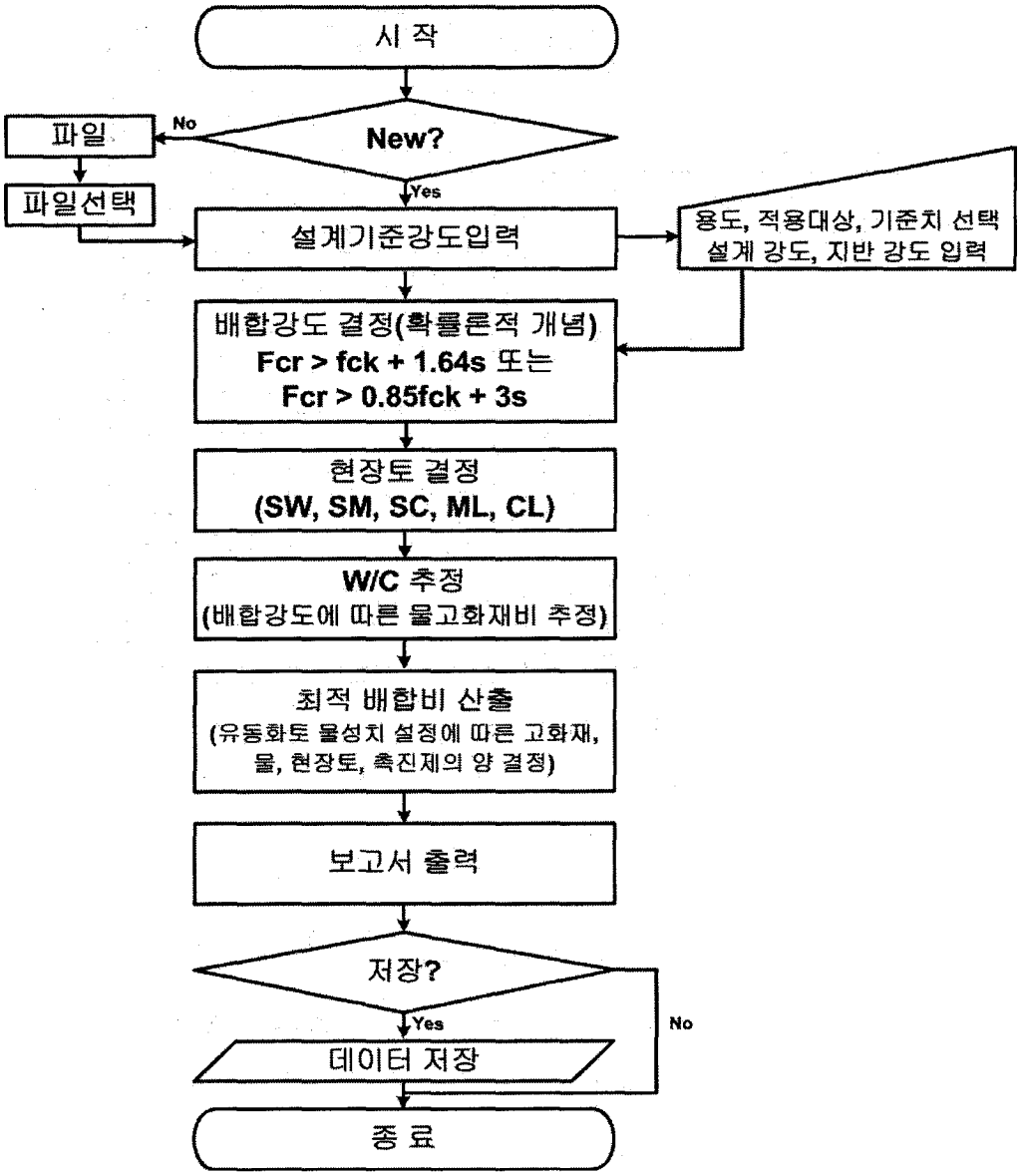


Fig. 3.4.2 프로그램 순서도

다. 유동화 처리토 최적 배합비 도출을 위한 정의

CLSM-mixer 프로그램은 일반적인 배합설계이론에 기반을 두고 개발되었으며, 실내시험을 통해 도출된 영향인자별 반응변수의 압축강도 변화량을 반영하였다.

배합설계 모델에 사용되는 파라미터는 식 (3.4.1)과 같다. 본 프로그램은 고화재, 물, 현장토 촉진제의 양 및 최적 배합비를 구하기 위해 다음과 같은 정의를 사용하였다.

$$S + W + C = T \tag{3.4.1}$$

여기서, T : 총 중량, W : 물 중량, S : 현장토 중량, C : 고화재 중량

현장토의 건조단위 중량은 전체 중량과 현장토에 비례하며 식 (3.4.2)와 같이 정의될 수 있다.

$$\alpha \cdot T = \gamma_d \tag{3.4.2}$$

여기서, γ_d : 현장토 건조단위 중량, α : 현장토 비(건조상태)

함수비(w)는 식 (3.4.3)과 같이 현장토 건조단위 중량에 반비례하며 현장토에 포함된 물의 중량에 비례한다. 프로그램에서 함수비는 현장 조건에 따라 사용자가 직접 입력하는 변수 이다.

$$w = \frac{Sw}{Ss} \tag{3.4.3}$$

여기서, Sw : 현장토에 포함된 물의 중량, w : 함수비, Ss : 현장토 중량

물고화재비(K)는 식 (3.4.4)와 같이 정의되며 고화재의 중량에 반비례하고 현장토의 중량과 물의 중량에 비례한다.

$$K = \frac{W + Sw}{C} \tag{3.4.4}$$

식 (3.4.2), (3.4.3), (3.4.4)을 통해 도출된 식 (3.4.5)로 물의 총 중량을 정의할 수 있다.

$$W = KC - w\alpha T \tag{3.4.5}$$

또한, 식 (3.4.1)을 (3.4.2), (3.4.3), (3.4.4), (3.4.5)를 통해 재정의 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & wSs + Ss + W + C = T \qquad (3.4.6) \\ & \leftrightarrow w\alpha T + \alpha T + W + C = T \\ & \leftrightarrow (1+w)\alpha T + KC - Sw + C = T \\ & \leftrightarrow (1+w)\alpha T - KC - w\alpha T + C = T \end{aligned}$$

도출된 유도식 (3.4.5)와 (3.4.1), (3.4.2), (3.4.3), (3.4.4)를 조합하여 정의된 식 (3.4.6)을 통해 고화재의 중량 C를 정의할 수 있다.

$$C = \frac{T - (1+w)\alpha T + w\alpha T}{1+K} \cdot T = \frac{T - \alpha T - w\alpha T + w\alpha T}{1+K}$$

$$C = \frac{1-\alpha}{1+K} \cdot T \tag{3.4.7}$$

다시 식 (3.4.5), (3.4.6)을 이용하여 식 (3.4.8)로 물의 총 중량을 정의할 수 있다.

$$W = \frac{K(1-\alpha)}{1+K} \cdot T - w\alpha T \tag{3.4.8}$$

유도된 식 (3.4.5), (3.4.6), (3.4.7), (3.4.8)은 도출 되었으나 각각의 변수가 미지수이므로 원하는 값을 유도해 낼 수 없다. 따라서 이를 프로그램에서 사용자에 의해 입

력된 변수로 변환할 필요가 있다. 이를 위해 총 중량을 식 (3.4.9)와 같이 변형하면 다음과 같이 정의될 수 있으며 이 중 현장토(γ_s), 물(γ_w), 고화재(γ_c)의 단위중량은 사용자에 의해 입력될 수 있는 변수가 된다.

$$C+W=(1-\alpha)T-w\alpha T \qquad (3.4.9)$$
$$=T(1-\alpha-w\alpha)$$

$$T=Sv\cdot\gamma s+Wv\cdot\gamma w+Cv\cdot\gamma c \qquad (3.4.10)$$

여기서, Sv : 현장토(건조상태)의 체적, γ_s : 현장토의(건조상태) 단위중량,
Wv : 물의 체적, γ_w : 물의단위중량, Cv : 고화재의 체적,
γ_c : 고화재의 단위중량

유도된 식 (3.4.10)의 각 체적을 구하기 위해 알고 있는 값 (Known Value)인 유동화 처리토의 총 체적 V는 식 (3.4.11)과 같이 정의될 수 있다.

$$S_v+W_v+C_v=V \qquad (3.4.11)$$

여기서, V : 유동화토의 총 체적

여기서 W_v를 0으로 가정하면,

$$Sv-Cv=V$$

$$(V-Cv)\gamma s+Wv\cdot\gamma w+Cv\cdot\gamma c=T$$

$$W/C=\frac{W+Sw}{\gamma cCv}=K=\frac{W+w\alpha T}{\gamma cCv}$$

$$Cv=\frac{W+w\alpha T}{\gamma cK}$$

$$(V-\frac{W+w\alpha T}{\gamma cK})\gamma s+W+\frac{W+w\alpha T}{\gamma cK}\gamma c=T$$

$$\leftrightarrow(\gamma c\cdot KV-W-w\alpha T)\gamma s+\gamma cKW+W\gamma c+w\alpha T\gamma c=\gamma cKT$$

$$\gamma c\cdot KV\gamma s-W\gamma s-w\alpha T\cdot\gamma s+\gamma cKW+W\gamma c+w\alpha T\gamma c=\gamma cKT$$

$$-w\alpha T\cdot\gamma s+w\alpha T\gamma c+\gamma c\cdot KT=-\gamma cKV\gamma s+W\gamma s-\gamma cKW-W\gamma c$$

$$T=\frac{-\gamma cKV\cdot\gamma s+W\gamma s-\gamma cKW-W\gamma c}{-w\alpha\cdot\gamma s+w\alpha\gamma c+\gamma cK}$$

따라서, 총 중량 T는 식 (3.4.12)과 같이 유도된다.

$$(V-Cv)\gamma s+W+Cv\cdot\gamma c=\frac{K\cdot\gamma c\cdot Cv-W}{w\alpha}$$

$$W=KC-w\alpha T$$

$$C=\frac{1-\alpha}{1+K}\cdot T\leftrightarrow T=(\frac{1+K}{1-\alpha})\cdot C$$

$$Cv=\frac{w\alpha T+W}{K\gamma c}=\frac{KC}{K\gamma c}=\frac{C}{\gamma c}$$

$$(V-Cv)\cdot\gamma s+W+C=T$$

$$(V-Cv)\cdot\gamma s+T(1-\alpha-w\alpha)=T$$

$$T(-\alpha-w\alpha)=(Cv-V)\cdot\gamma s$$

$$T=\frac{V-Cv}{\alpha(1+w)}\gamma s$$

여기서, $Cv \cdot \gamma c = C = \frac{(1-\alpha)}{(1+K)} T$

$$\leftrightarrow Cv = \frac{(1-\alpha)}{\gamma c(1+K)} T$$

$$(V - \frac{(1-\alpha)}{\gamma c(1+K)} T)\gamma s - \alpha(1+w)T = 0$$

$$\gamma s \cdot V \cdot \gamma c(1+K) - (1-\alpha)T \cdot \gamma s - \alpha(1+w)T\gamma c(1+K) = 0$$

$$(1-\alpha)T\gamma s + \alpha(1+w)\gamma c(1+K)T = \gamma s V \gamma c(1+K)$$

$$T = \frac{\gamma s \cdot \gamma c \cdot V(1+K)}{(1-\alpha) \cdot \gamma s + \alpha(1+w)(1+K) \cdot \gamma c} \qquad (3.4.12)$$

식 (3.4.12), (3.4.7)을 조합하여 고화재의 중량 C를 식 (3.4.13)으로 정의할 수 있다.

$$C = \frac{(1-\alpha)}{(1+K)} \cdot \frac{\gamma s \cdot \gamma c \cdot V(1+K)}{(1-\alpha) \cdot \gamma s + \alpha(1+w)(1+K) \cdot \gamma c} \qquad (3.4.13)$$

식 (3.4.5), (3.4.13), (3.4.12)을 조합하여 고화재의 중량 C를 식 (3.4.14)으로 정의할 수 있다. 또한 도출된 식을 통해 S 및 W는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$W = KC - Sw = KC - w\alpha T \qquad (3.4.14)$$

$$S = T - C - W \qquad (3.4.15)$$

2. 프로그램 환경

가. 개발 및 사용자 환경

본 프로그램은 추후 개발이 예상되는 다양한 응용도구에서의 적용이 용이하도록 확장성과 표준화 그리고, 대용량 데이터 처리의 경우를 고려하여, 운영체제와 개발 도구를 선정하였으며, 이러한 요건과 함께, 향후 코드의 재사용과 보완 작업을 고려한 패턴화, 클래스화 등의 요건들을 충분히 고려하여 다음의 개발 환경을 선정하였다. CLSM-mixer는 Windows 2000, XP를 기반으로 구축되었으며, 개발 Tool은 MS Visual Basic 6.0과 컴포넌트를 기반으로 개발되었다. 이러한 개발 Tool은 윈도우라는 GUI 환경에서 구동되며, 도스기반의 프로그램에서는 구동되지 않는다. CLSM-mixer의 프로그램은 고사양의 하드웨어 사양을 요구하지 않으나 최소 Pentium 2 이상의 CPU와 64MB 이상의 메인 메모리를 요구 하며 하드디스크는 최소 100MB 이상 확보된 환경에서 최적의 프로그램 환경이 구성될 수 있다.

Table 3.4.1 유동화 처리토 배합설계 프로그램 개발환경

구분	프로그램 개발 환경
OS	Windows 2000, XP
개발 언어	Visual Basic 6.0
Component	ChartFX, Measurement Studio
배포 프로그램	Install Shield 9.0

Table 3.4.2 유동화 처리토 배합설계 프로그램 구동을 위한 하드웨어 환경

하드웨어 구분	사양
CPU	Intel Pentium 2 이상
OS	Windows 2000, XP 이상
Clock Speed	100MHz 이상
Main Memory	64MB 이상
Cache Memory	256KB 이상
Hard Disk	100MB 이상
Resolution	1024 * 768 이상

나. 개발 범위

유동화 처리토를 사용한 배합설계 프로그램은 기본적으로 설계기준강도를 만족하는 배합비율을 산정하는 것에 그 목적이 있으며, 이를 위해 본 프로그램에서 적용가능한 범위는 설계기준강도, 현장배합 강도, 현장토의 수량 및 범위를 입력할 수 있다. 최종적으로 물-고화재비(W/C)를 추정하고, 이를 기반으로 최적화된 배합비율을 도출하는 것이 본 프로그램의 범위에 속한다.

다. 기능 구성 및 사용자 매뉴얼

본 프로그램에서 포함하고 있는 기능은 크게 파일 입출력, 기본 정보 입력, W/C 결정, 분석, 보고서 등으로 구성되어 있으며 앞서 서술한 바와 같이 배합설계 정보를 담고 있는 파일 입출력 기능과 설계기준강도(fck)의 결정, 배합강도(fcr)의 결정, 현장토의 결정을 위한 기본정보 입력기능, W/C의 추정, 배합비율의 분석, 보고서 작성 등으로 구성되어 있으며 각 기능의 역할은 다음과 같다.

(1) 파일 입·출력 기능
(2) 설계기준강도 결정 기능
(3) 배합강도 결정 기능
(4) 현장토 결정
(5) 추정 W/C
(6) 배합비율
(7) 보고서 작성 및 출력 기능

Table 3.4.3 프로그램 폼 일람표

번호	프로그램ID	프로그램명	처리형태	언어
1	frmmain.frm	메인 화면 폼	Local	VB
1	frm_fck.frm	설계기준강도 결정 폼	Local	VB
2	frm_fcr.frm	배합강도 결정 폼	Local	VB
3	frm_selectsoil.frm	현장토 결정 폼	Local	VB
4	frm_WC.frm	추정 W/C 폼	Local	VB
5	frmSearch.frm	배합비율 추정 폼	Local	VB
6	frm_보고서.frm	보고서 폼	Local	VB
7	frm_추가입력.frm	추가정보 입력 폼	Local	VB

3. 배합설계 프로그램(CLSM-Mixer)의 적용성

가. 입력상수 결정

CLSM-Mixer는 총 3가지의 입력 파라메타로 형성되었는데, 기준 설계기준강도 파라메타와 배합강도 및 현장토 조건 파라메타로 나뉠 수 있다.

나. 프로그램의 적용

Table 3.4.4에는 CLSM-Mixer 프로그램을 통해 예측 가능한 각 시료 별 강도 범위를 나타냈다. 이러한 범위 내에서 프로그램을 통해 W/C 비를 예측하면, Fig. 3.4.3~3.4.7과 같다. 그림에 나타난 바와 같이, 본 프로그램을 통해 각 시료의 목표 강도를 제시하면, W/C 비를 예측할 수 있으며, 이를 통해 고화재, 현장토, 첨가될 물의 양을 알 수 있다(Fig. 3.4.8).

Table 3.4.4 CLSM-Mixer 프로그램을 통해 예측 가능한 각 시료 별 강도범위

시료	4시간(kg/cm^2)	1일(kg/cm^2)	7일(kg/cm^2)	28일(kg/cm^2)
SW	0.30 < fck <6.64	2.38 < fck <8.75	3.71 < fck <12.07	3.17 < fck <12.83
SM	0.06 < fck <1.21	1.18 < fck <3.36	0.77 < fck <4.58	4.71 < fck <8.88
SC	0.01 < fck <0.83	1.15 < fck <3.19	2.93 < fck <3.91	3.17 < fck <5.14
ML	0.57 < fck <1.39	2.17 < fck <4.10	2.79 < fck <5.85	3.83 < fck <6.81
CL	0.17< fck <2.03	0.55 < fck <2.44	1.31 < fck <2.77	1.77 < fck <3.48

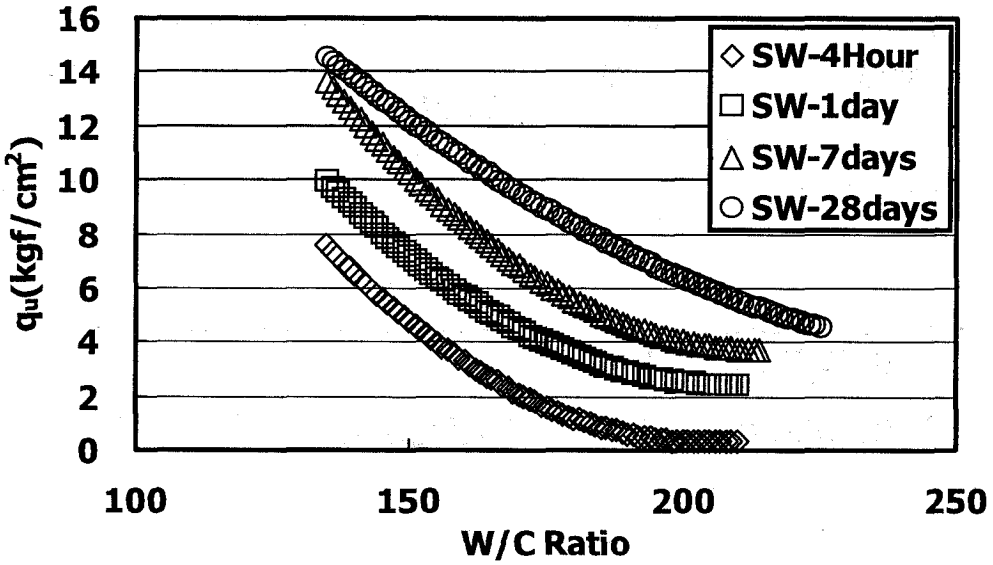


Fig. 3.4.3 CLSM-Mixer 프로그램으로 예측된 설계기준강도에 따른 W/C 비(SW)

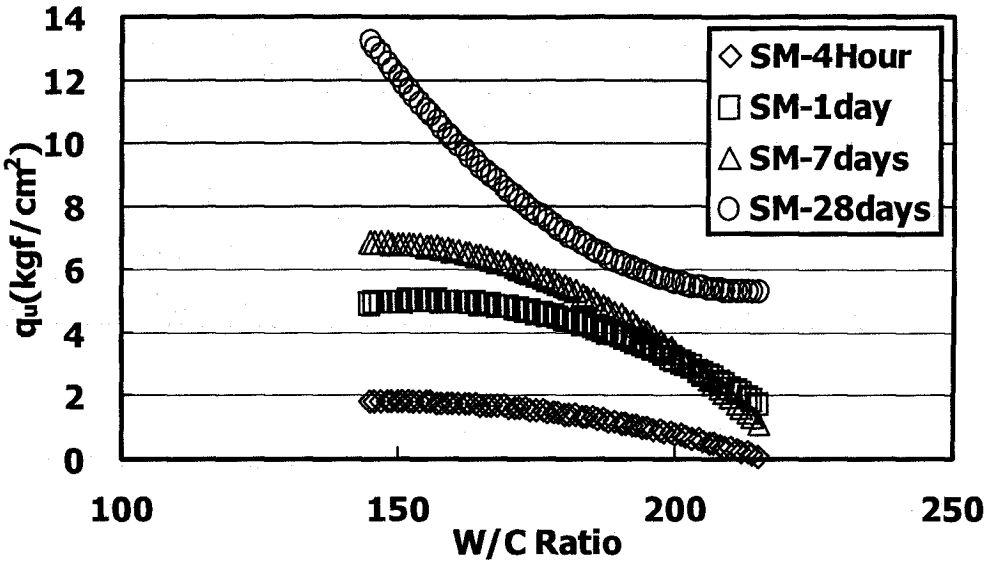


Fig. 3.4.4 CLSM-Mixer 프로그램으로 예측된 설계기준강도에 따른 W/C 비(SM)

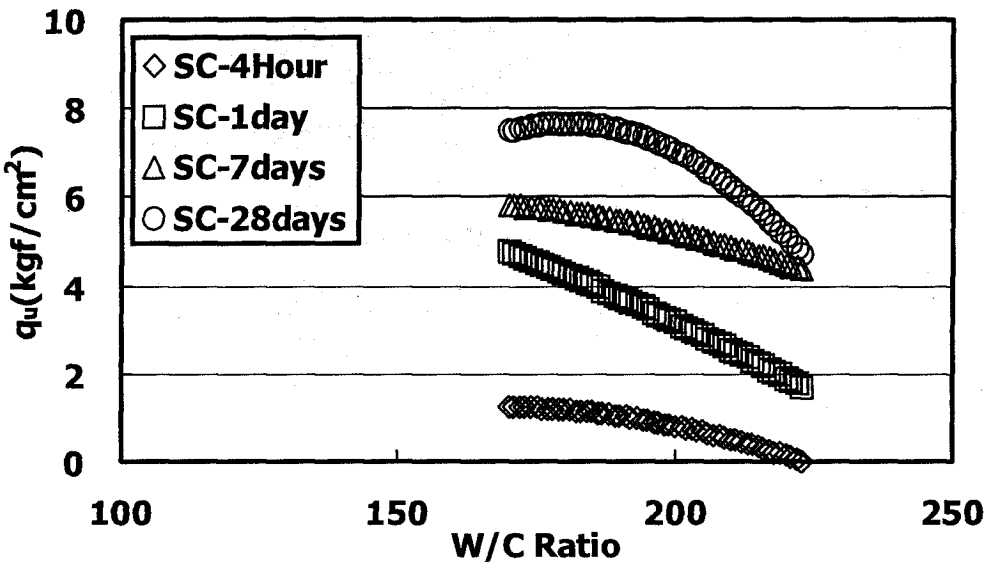


Fig. 3.4.5 CLSM-Mixer 프로그램으로 예측된 설계기준강도에 따른 W/C 비(SC)

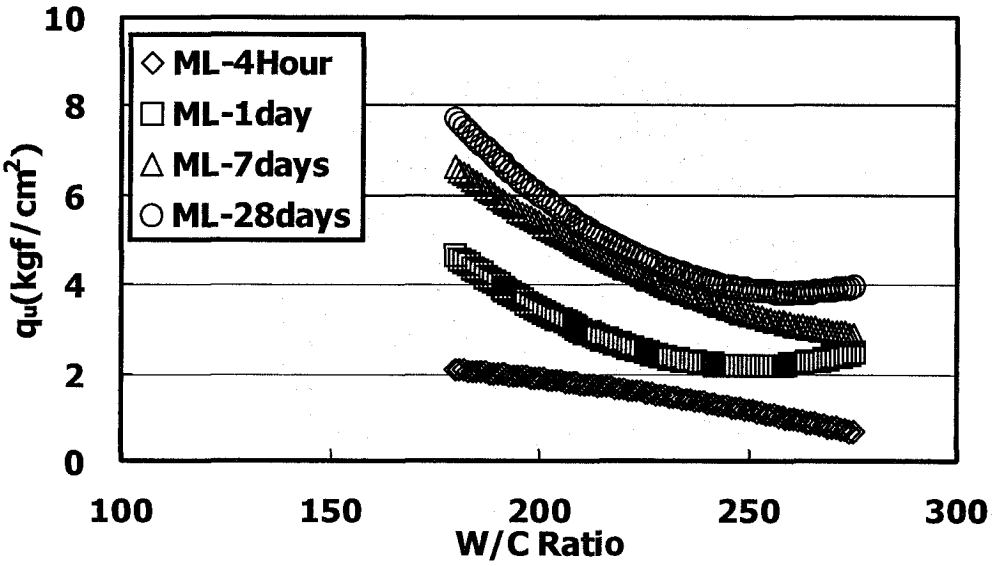


Fig. 3.4.6 CLSM-Mixer 프로그램으로 예측된 설계기준강도에 따른 W/C 비(ML)

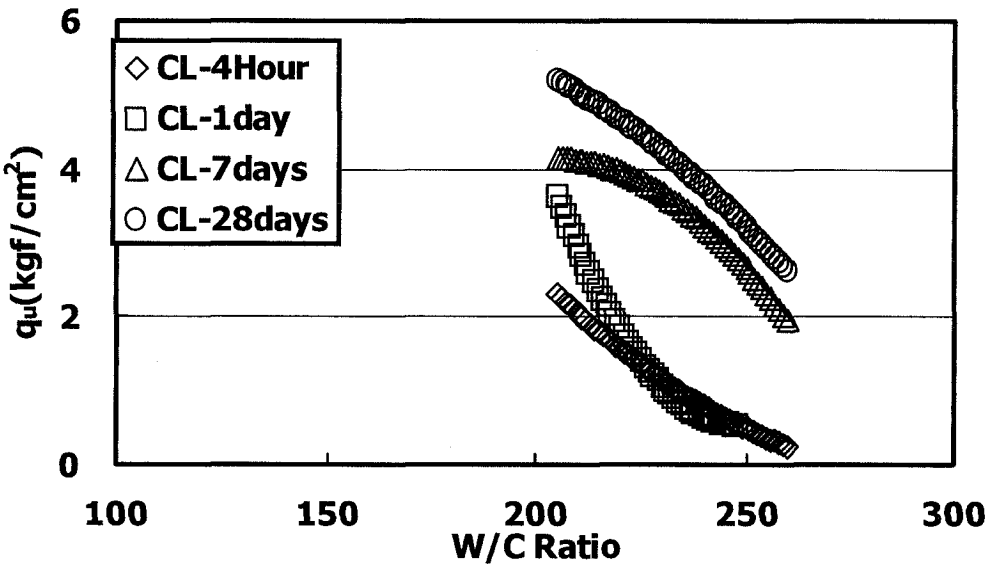


Fig. 3.4.7 CLSM-Mixer 프로그램으로 예측된 설계기준강도에 따른 W/C 비(CL)

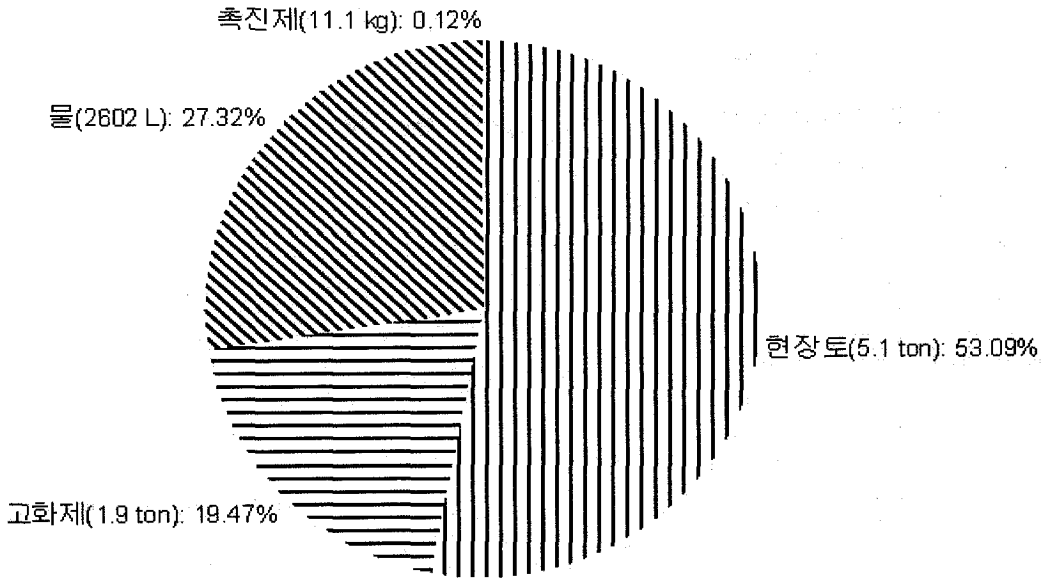


Fig. 3.4.8 CLSM-Mixer 프로그램으로 예측된 각 재료의 양

4. CLSM-Mixer 사용 설명

가. Program Screen-Shot 및 구성 설명

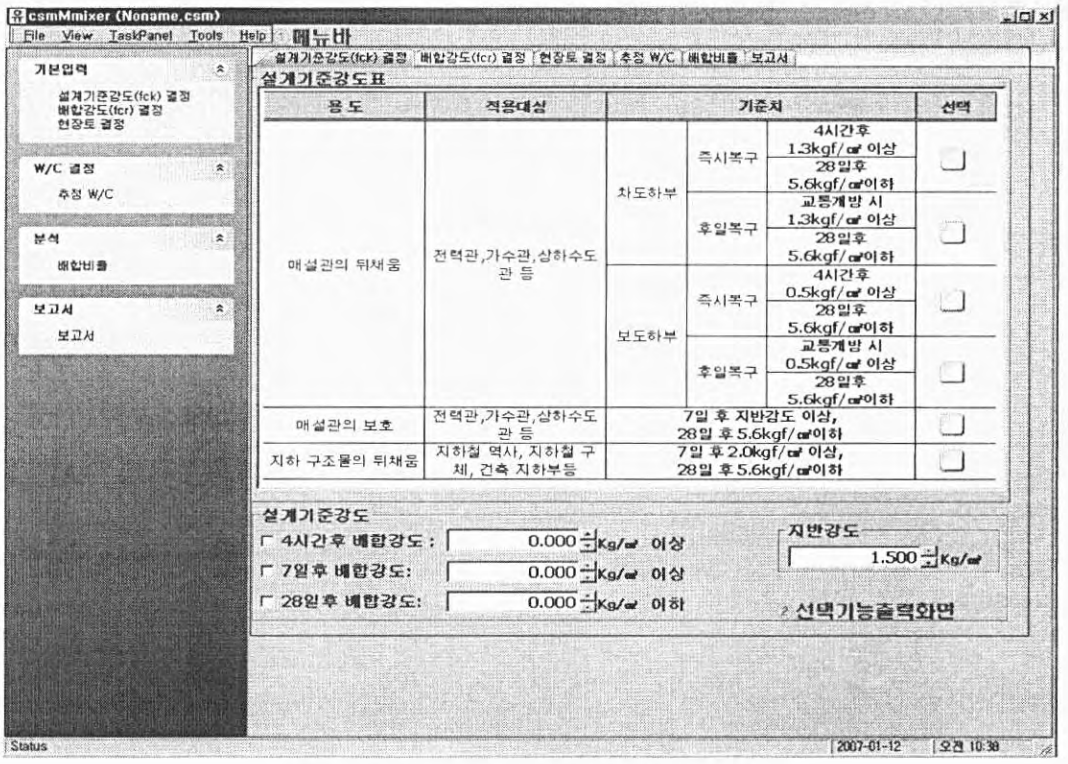


Fig. 3.4.9 프로그램 기본화면 구성

CLSM-mixer 프로그램의 기본 화면에서는 csm 파일의 저장 및 불러오기, 각종 컨트롤의 로드 등 각 세부 기능을 화면에 나타내며 각 기능은 Fig. 3.4.9와 같이 설계기준 강도, 배합설계 강도, 파일입출력, W/C 추정 등 관련 프로그램을 구성하게 된다.

나. 각 입력 탭에 대한 설명

본 프로그램은 설계기준 강도 결정, 배합강도 결정, 현장토 결정, 추정 W/C 결정, 배합비율, 보고서 탭으로 구성되어 있으며, 현장 상황에 따라 선택할 수 있다.

파일 입출력 기능은 고유의 *.csm(clsmr file) 확장자를 갖는 배합 파일의 저장 및

불러오기 기능을 포함하고 있다.

(1) 신규 : 새로운 배합보고서를 작성한다.

(2) 가져오기 : 기존 작성된 배합 파일을 불러온다.

(3) 저장기능 : 신규 및 로드된 데이터를 저장한다.

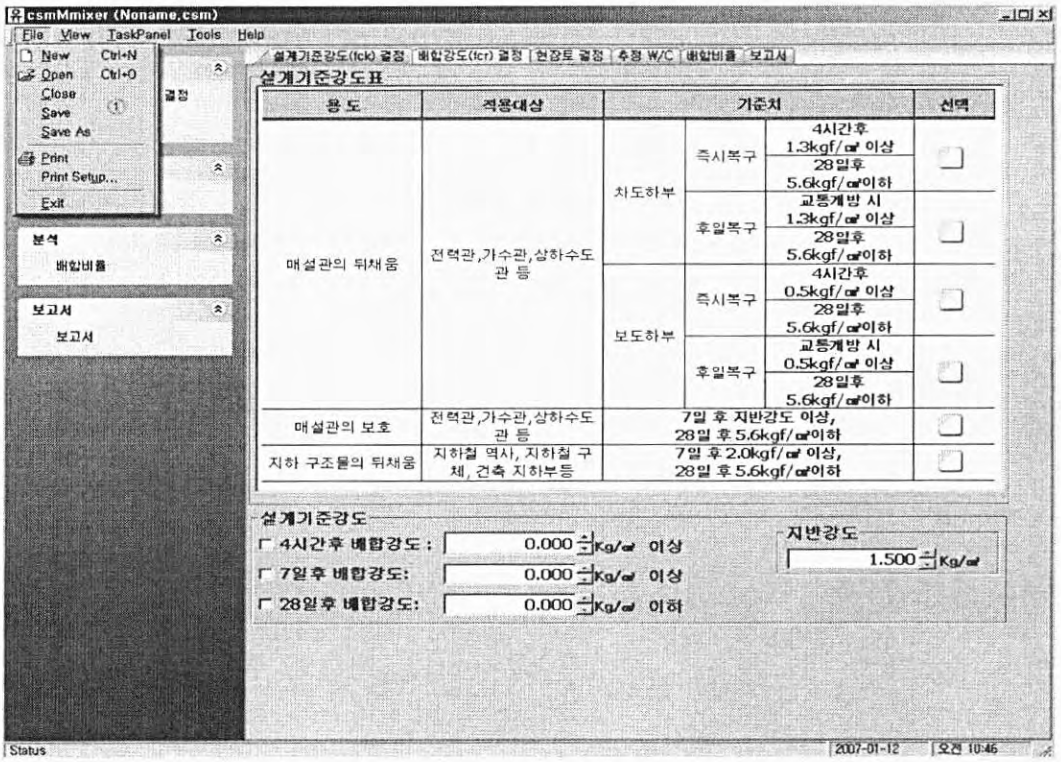


Fig. 3.4.10 프로그램 실행 시 기준 강도 입력화면(설계기준강도 결정 탭)

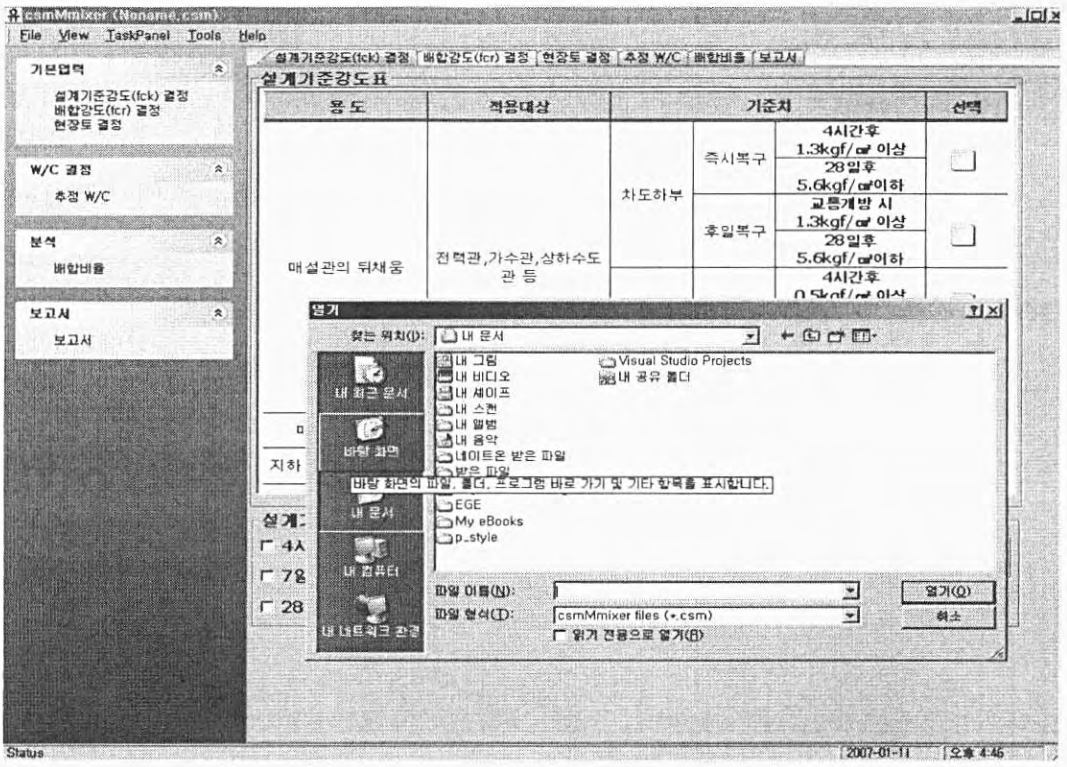


Fig. 3.4.11 불러오기 기능

Table 3.4.5 입출력 파일 속성 정보

	구분	속성명	설명	형태
1	설계 기준 강도 결정	frm_fck.CheckBox1.Value	설계기준강도 조건 1	BOOLEAN
2		frm_fck.CheckBox2.Value	설계기준강도 조건 2	BOOLEAN
3		frm_fck.CheckBox3.Value	설계기준강도 조건 3	BOOLEAN
4		frm_fck.CheckBox4.Value	설계기준강도 조건 4	BOOLEAN
5		frm_fck.CheckBox5.Value	설계기준강도 조건 5	BOOLEAN
6		frm_fck.CheckBox6.Value	설계기준강도 조건 6	BOOLEAN
7		frm_fck.chk4h.Value	4시간뒤 압축강도 선택	BOOLEAN
8		frm_fck.chk7d.Value	7일뒤 압축강도 선택	BOOLEAN
9		frm_fck.chk28d.Value	28일뒤 압축강도 선택	BOOLEAN
10		frm_fck.nb4h.Value	4시간뒤 압축강도	Float
11		frm_fck.nb7d.Value	7일뒤 압축강도	Float
12		frm_fck.nb28d.Value	28일뒤 압축강도	Float
13		frm_fck.nb지반강도.value	지반강도	Float
14	배합 강도 결정	frm_fcr.nb4h.Value	4시간뒤 압축강도 표준편차	Float
15		frm_fcr.nb7d.Value	7일뒤 압축강도 표준편차	Float
16		frm_fcr.nb28d.Value	28일뒤 압축강도 표준편차	Float
17	대상토 결정	frm_selectsoil.CheckBox1.Value	대상토 결정(SW) 선택	BOOLEAN
18		frm_selectsoil.CheckBox2.Value	대상토 결정(SM) 선택	BOOLEAN
19		frm_selectsoil.CheckBox3.Value	대상토 결정(SC) 선택	BOOLEAN
20		frm_selectsoil.CheckBox4.Value	대상토 결정(ML) 선택	BOOLEAN
21		frm_selectsoil.CheckBox5.Value	대상토 결정(CL) 선택	BOOLEAN
22		frm_selectsoil.SoilName	선택된 대상토 명	CHAR
23	물성치 입력	frm_추가입력.nb고화처리토의총량.Value	고화처리토의 총량	Float
24		frm_추가입력.nb고화재의단위중량.Value	고화재의단위중량	Float
25		frm_추가입력.nb현장습윤단위중량.Value	현장습윤단위중량	Float
26		frm_추가입력.nb함수비.Value	함수비	Float
27	보고서	frm_보고서.txt현장명.Text	현장명	CHAR
28		frm_보고서.txt작성자.Text	작성자	CHAR
29		frm_보고서.txt비고.Text	비고	CHAR
30		frm_보고서.lbl날짜.Caption	날짜	CHAR

(1) 설계기준 강도의 결정 기능

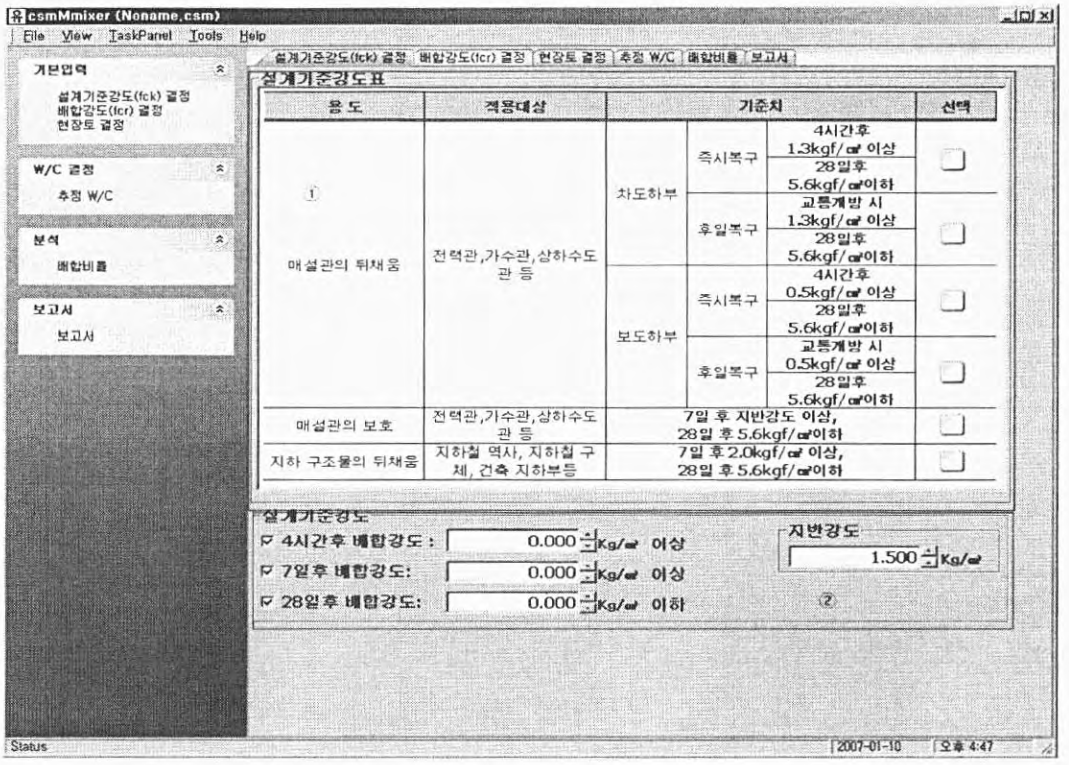


Fig. 3.4.12 설계기준강도(fck) 결정화면

(가) 설계 기준 강도 산정 기준 설정

유동화 처리토의 설계 기준 강도는 Table 3.4.6과 같이 유동화토의 매설관의 뒤채움, 매설관의 보호, 지하구조물의 뒤채움 등 적용 대상에 따라 구분된다.

(나) 설계기준 강도 설정

설계기준 강도는 4시간 후, 7일 후, 28일 후 배합강도로 입력 가능하다. 설계기준 강도표에서 특정 기준치를 선택하게 되면 자동적으로 설계 기준 강도가 설정되며 사용자는 설정된 값을 임의로 변경 가능하다.

Table 3.4.6 적용 대상 구조물에 따른 설계기준강도

<table>
<tr><th>용도</th><th>적용대상</th><th colspan="3">기준치</th></tr>
<tr><td rowspan="8">매설관의
뒤채움</td><td rowspan="8">전력관,
가스관,
상하수도관
등</td><td rowspan="4">차도하부</td><td rowspan="2">즉시복구</td><td>4시간 후
1.3kgf/㎠ 이상</td></tr>
<tr><td>28일 후
5.6kgf/㎠ 이하</td></tr>
<tr><td rowspan="2">후일복구</td><td>교통개방 시 1.3kgf/㎠ 이상</td></tr>
<tr><td>28일 후
5.6kgf/㎠ 이하</td></tr>
<tr><td rowspan="4">보도하부</td><td rowspan="2">즉시복구</td><td>4시간 후
0.5kgf/㎠ 이상</td></tr>
<tr><td>28일 후
5.6kgf/㎠ 이하</td></tr>
<tr><td rowspan="2">후일복구</td><td>교통개방 시 0.5kgf/㎠ 이상</td></tr>
<tr><td>28일 후
5.6kgf/㎠ 이하</td></tr>
<tr><td>매설관의 보호</td><td>전력관,
가스관,
상하수도관
등</td><td colspan="3">7일 후 지반강도 이상,
28일 후 5.6kgf/㎠ 이하</td></tr>
<tr><td>지하 구조물의
뒤채움</td><td>지하철 역사,
지하철 구체,
건축 지하부
등</td><td colspan="3">7일 후 2.0kgf/㎠ 이상,
28일 후 5.6kgf/㎠ 이하</td></tr>
</table>

(2) 배합강도의 결정기능

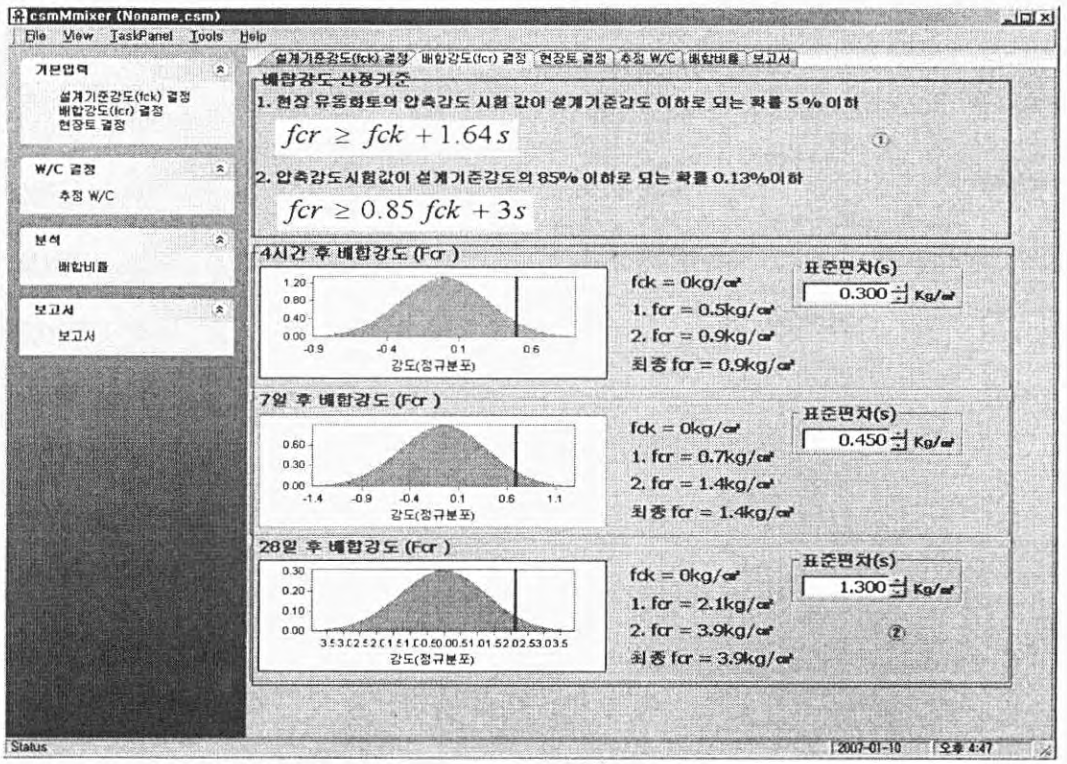


Fig. 3.4.13 배합강도(fcr) 결정

(가) 배합강도 산정기준

배합강도의 결정은 28일 공시체의 압축강도를 기준으로 하였으며 배합강도 산정을 위해 적용된 이론식은 다음과 같다. 즉, 콘크리트 표준 시방서에서의 설계 기준강도를 보면 현장 콘크리트의 압축강도 시험 값이 설계기준강도 이하로 되는 확률이 5%이하일 경우와 85%이하로 될 확률이 0.13%이하일 경우의 이론식을 구분하여 사용하고 있으며 이중 큰 값을 사용하게 되어있다.

- $fcr \geq fck + 1.64s$: 압축강도 시험 값이 설계기준강도 이하로 되는 확률 5 % 이하
- $fcr \geq fck + 0.85s$: 압축강도 시험 값이 설계기준강도의 85% 이하로 되는 확률 0.13%이하

여기서, fck : 설계기준강도

fcr : 배합강도

s : 표준편차

(나) 배합강도의 산정

설계기준강도의 결정에 따른 각 시간별 배합강도를 산정하게 되는데 사용자가 입력한 표준편차(S)에 의해 최종 배합강도(fcr)이 결정된다.

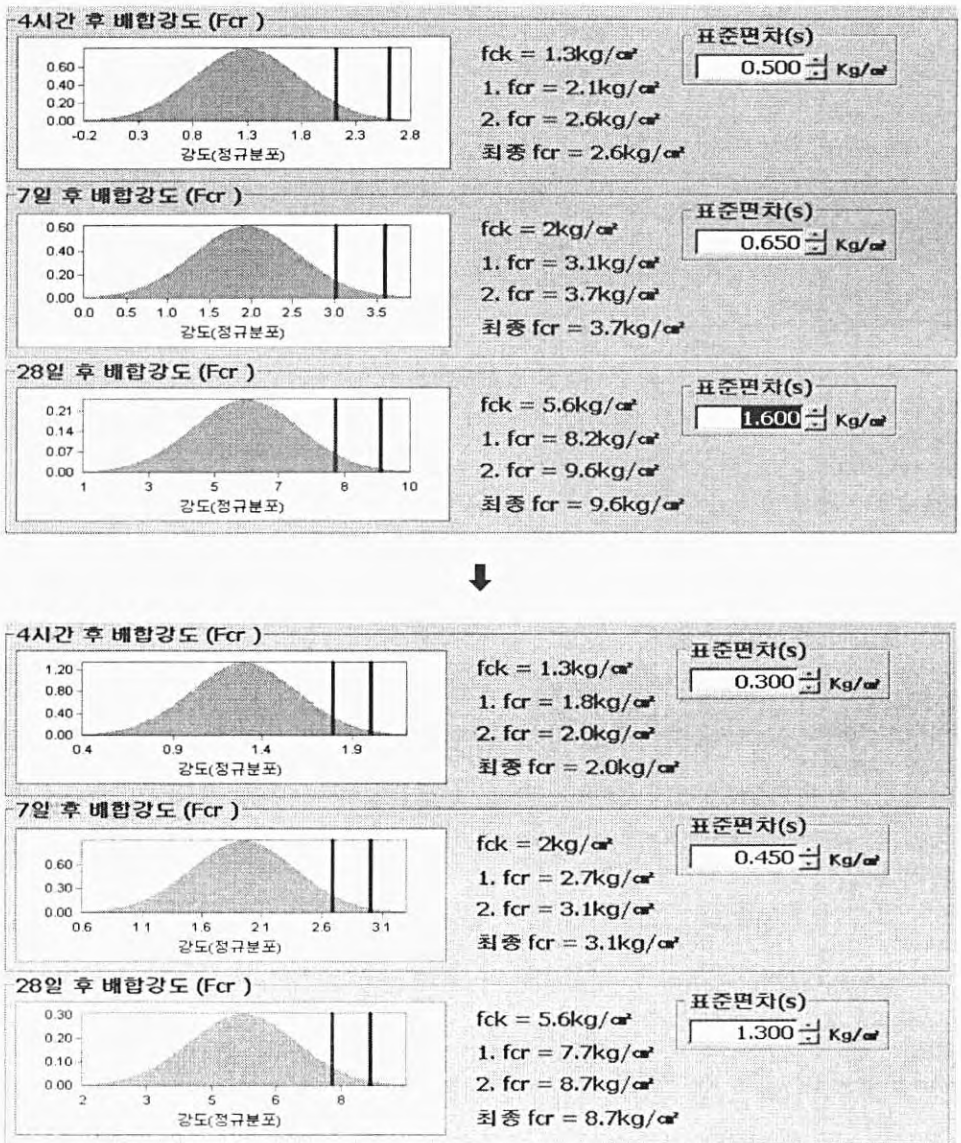


Fig. 3.4.14 설계기준강도 및 표준편차 변화에 따른 배합강도의 변화

(3) 현장토 결정기능

현장토 결정 기능은 유동성 처리토의 배합에 사용되는 현장발생토의 대표적인 흙을 결정하는 것으로 이를 통해 배합에 사용되는 흙의 물리적 성질을 결정하게 된다.

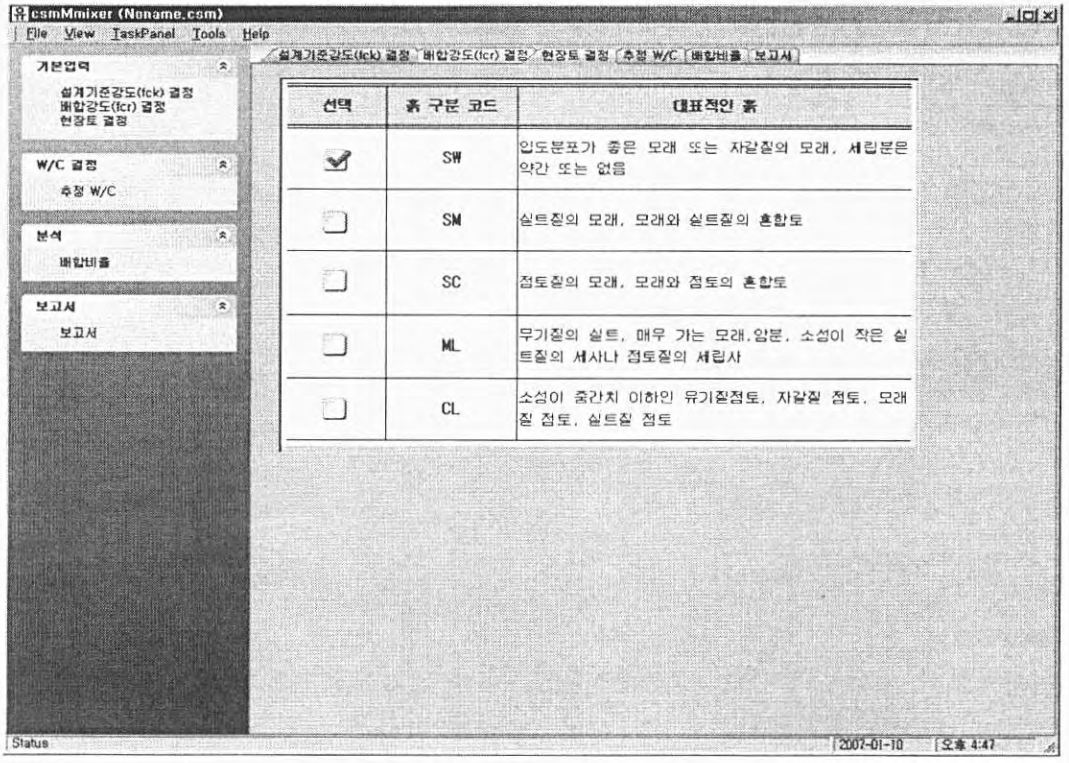


Fig. 3.4.15 현장토 결정

현장 배합토를 선택하지 않았을 경우 에러가 발생하여 W/C를 추정할 수 없으므로 반드시 5가지 시료 중 하나를 선택해야 한다. Fig. 3.4.16은 현장토를 선택하지 않았을 경우 발생하는 에러를 나타낸다.

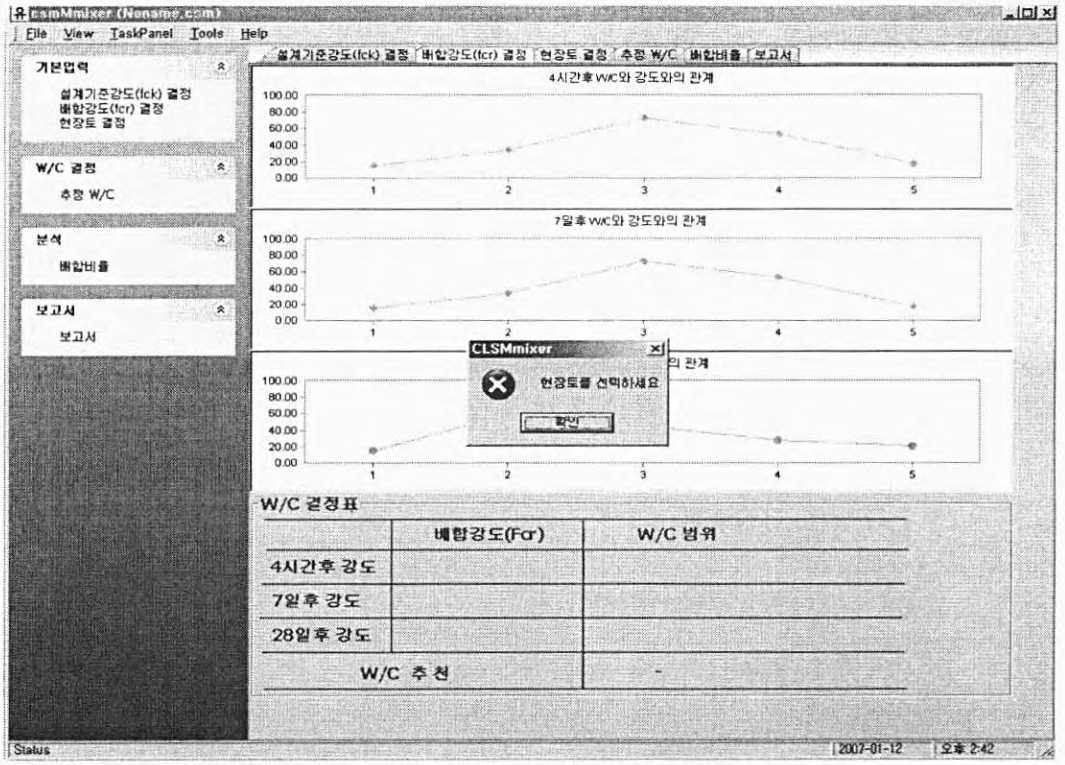


Fig. 3.4.16 현장토를 결정하지 않았을 경우 발생하는 에러

(4) 추정 기능

대상 유동화 처리토 및 현장토에 대하여 W/C와 일축압축강도의 관계를 시험비빔에 의하여 그래프로 나타내고 사용자가 입력한 배합강도에 적절한 W/C를 산출한다.

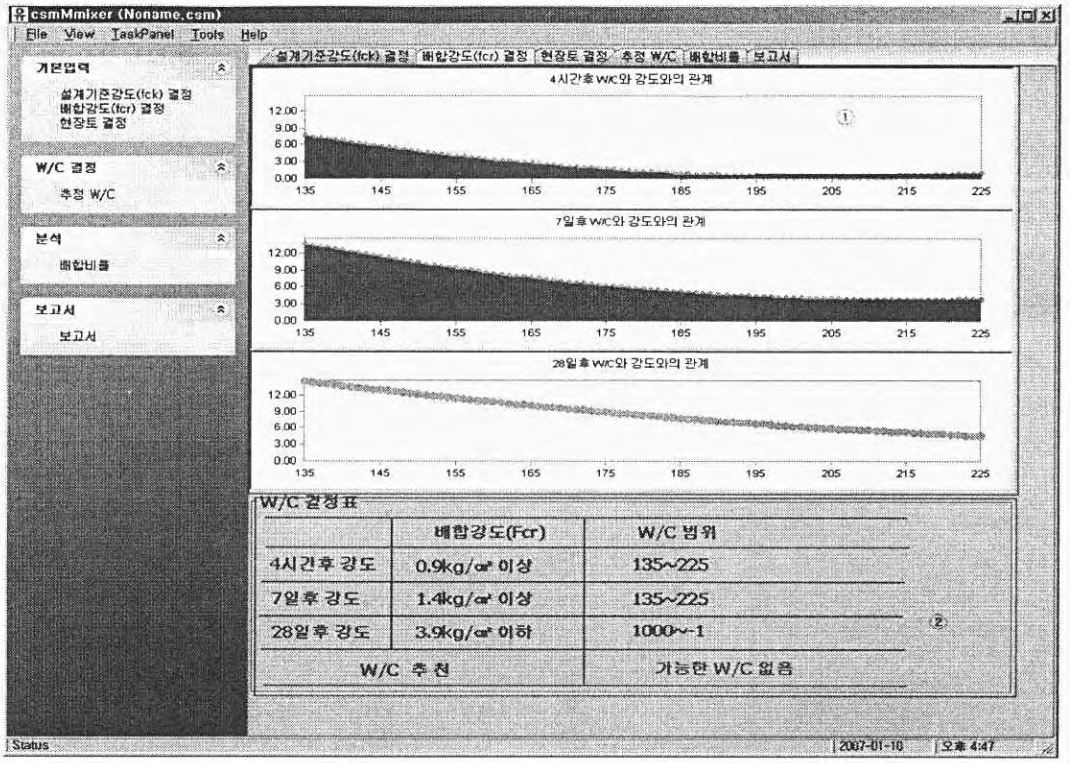


Fig. 3.4.17 W/C의 추정

(가) 대상토 선택에 따른 압축강도 그래프 출력

물고화재비(W/C)는 결정된 현장토에 따라 그 결과가 다르게 나타나는데 이 값은 연구에서 수행된 각 시료의 일축압축시험 결과에 따른다. 시험 결과는 툴바의 Tools 메뉴에서 각 시료별 시험 결과를 엑셀 시트로 확인 가능하다.

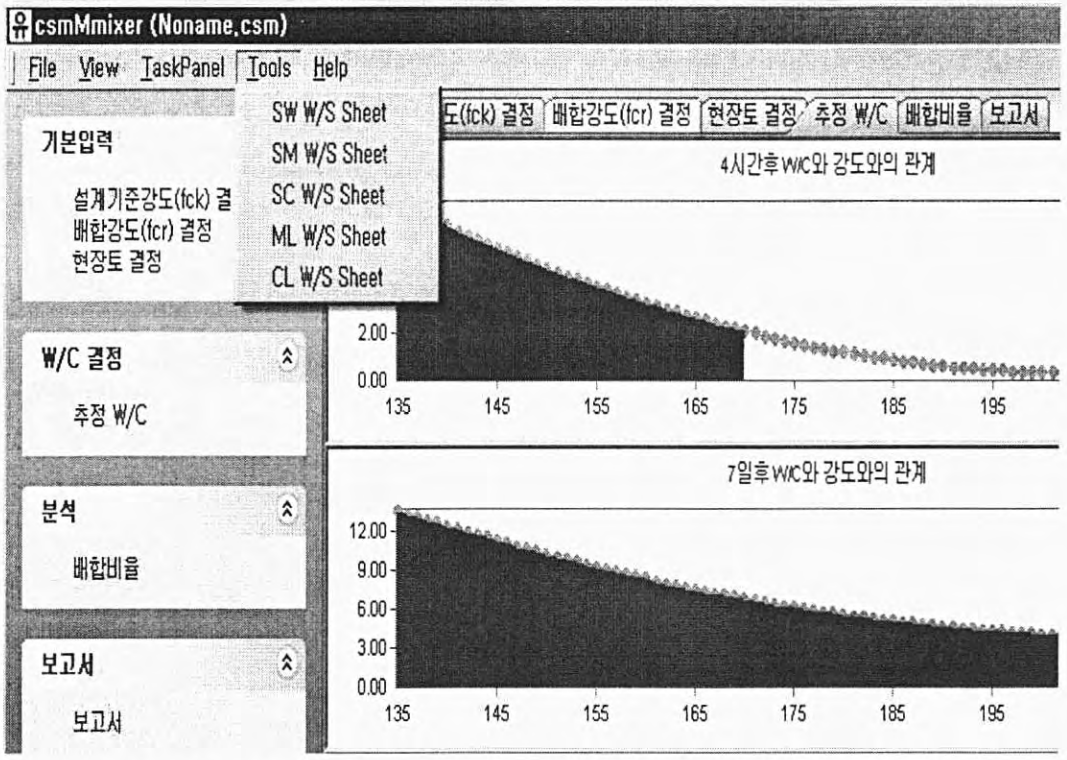


Fig. 3.4.18 각 시료별 압축강도 결과 확인을 위한 Tools 메뉴 선택

SW W/C List

	A	B	C	D	E
1	고화제 물비(W/C)에 따른 각 시료 별 예측강도표				
2	SW(전체 유동화 처리토 대비 현장토 60%인 경우)				
3	W/C	4hour qu (kgf/cm2)	1day qu (kgf/cm2)	7days qu (kgf/cm2)	28days q (kgf/cm2
4	135	7.5105	9.8990	13.6505	14.5060
5	136	7.3040	9.6952	13.3998	14.3416
6	137	7.1005	9.4942	13.1523	14.1784
7	138	6.9000	9.2960	12.9080	14.0164
8	139	6.7025	9.1006	12.6669	13.8556
9	140	6.5080	8.9080	12.4290	13.6960
10	141	6.3165	8.7182	12.1943	13.5376
11	142	6.1280	8.5312	11.9628	13.3804
12	143	5.9425	8.3470	11.7345	13.2244
13	144	5.7600	8.1656	11.5094	13.0696
14	145	5.5805	7.9870	11.2875	12.9160
15	146	5.4040	7.8112	11.0688	12.7636
16	147	5.2305	7.6382	10.8533	12.6124
17	148	5.0600	7.4680	10.6410	12.4624
18	149	4.8925	7.3006	10.4319	12.3136
19	150	4.7280	7.1360	10.2260	12.1660

Fig. 3.4.19 선택된 시료의 일축압축시험 결과예시(SW)

SM W/C List

	A	B	C	D	E
1	고화제 물비(W/C)에 따른 각 시료 별 예측강도표				
2	SM(전체 유동화 처리토 대비 현장토 60%인 경우)				
3	W/C	4hour qu (kgf/cm2)	1day qu (kgf/cm2)	7days qu (kgf/cm2)	28days qu (kgf/cm2)
4	145	1.7989	4.9265	6.8315	13.2350
5	146	1.8020	4.9432	6.8330	13.0046
6	147	1.8043	4.9581	6.8321	12.7776
7	148	1.8058	4.9712	6.8288	12.5540
8	149	1.8065	4.9825	6.8231	12.3338
9	150	1.8064	4.9920	6.8150	12.1170
10	151	1.8055	4.9997	6.8045	11.9036
11	152	1.8038	5.0056	6.7916	11.6936
12	153	1.8013	5.0097	6.7763	11.4870
13	154	1.7980	5.0120	6.7586	11.2838
14	155	1.7939	5.0125	6.7385	11.0840
15	156	1.7890	5.0112	6.7160	10.8876
16	157	1.7833	5.0081	6.6911	10.6946
17	158	1.7768	5.0032	6.6638	10.5050
18	159	1.7695	4.9965	6.6341	10.3188
19	160	1.7614	4.9880	6.6020	10.1360
20	161	1.7525	4.9777	6.5675	9.9566
21	162	1.7428	4.9656	6.5306	9.7806
22	163	1.7323	4.9517	6.4913	9.6080
23	164	1.7210	4.9360	6.4496	9.4388
24	165	1.7089	4.9185	6.4055	9.2730
25	166	1.6960	4.8992	6.3590	9.1106
26	167	1.6823	4.8781	6.3101	8.9516
27	168	1.6678	4.8552	6.2588	8.7960
28	169	1.6525	4.8305	6.2051	8.6438
29	170	1.6364	4.8040	6.1490	8.4950
30	171	1.6195	4.7757	6.0905	8.3496

Fig. 3.4.20 선택된 시료의 일축압축시험 결과예시(SM)

SC W/C List

	A	B	C	D	E
1	고화제 물비(W/C)에 따른 각 시료 별 예측강도표				
2	SC(전체 유동화 처리토 대비 현장토 54%인 경우)				
3	W/C	4hour qu (kgf/cm2)	1day qu (kgf/cm2)	7days qu (kgf/cm2)	28days qu (kgf/cm2)
4	0.000	1.2429	4.7606	5.8278	7.5040
5	1.000	1.2404	4.7133	5.8158	7.5346
6	2.000	1.2371	4.6656	5.8032	7.5620
7	3.000	1.2330	4.6175	5.7900	7.5862
8	4.000	1.2281	4.5690	5.7762	7.6072
9	5.000	1.2224	4.5201	5.7618	7.6250
10	6.000	1.2159	4.4708	5.7468	7.6396
11	7.000	1.2086	4.4211	5.7312	7.6510
12	8.000	1.2005	4.3710	5.7150	7.6592
13	9.000	1.1916	4.3205	5.6982	7.6642
14	0.000	1.1819	4.2696	5.6808	7.6660
15	1.000	1.1714	4.2183	5.6628	7.6646
16	2.000	1.1601	4.1666	5.6442	7.6600
17	3.000	1.1480	4.1145	5.6250	7.6522
18	4.000	1.1351	4.0620	5.6052	7.6412
19	5.000	1.1214	4.0091	5.5848	7.6270
20	6.000	1.1069	3.9558	5.5638	7.6096
21	7.000	1.0916	3.9021	5.5422	7.5890
22	8.000	1.0755	3.8480	5.5200	7.5652
23	9.000	1.0586	3.7935	5.4972	7.5382
24	0.000	1.0409	3.7386	5.4738	7.5080
25	1.000	1.0224	3.6833	5.4498	7.4746
26	2.000	1.0031	3.6276	5.4252	7.4380
27	3.000	0.9830	3.5715	5.4000	7.3982
28	4.000	0.9621	3.5150	5.3742	7.3552
29	5.000	0.9404	3.4581	5.3478	7.3090
30	6.000	0.9179	3.4008	5.3208	7.2596

Fig. 3.4.21 선택된 시료의 일축압축시험 결과예시(SC)

CL W/C List

	A	B	C	D	E
1	고화제 물비(W/C)에 따른 각 시료 별 예측강도표				
2	(5) CL(전체 유동				
3	W/C	4hour qu (kgf/cm2)	1day qu (kgf/cm2)	7days qu (kgf/cm2)	28days qu (kgf/cm2)
4	5.000	2.3025	3.6420	4.1380	5.1952
5	6.000	2.2490	3.4986	4.1358	5.1647
6	7.000	2.1961	3.3586	4.1322	5.1336
7	8.000	2.1438	3.2220	4.1272	5.1019
8	9.000	2.0921	3.0888	4.1208	5.0696
9	0.000	2.0410	2.9590	4.1130	5.0367
10	1.000	1.9905	2.8326	4.1038	5.0032
11	2.000	1.9406	2.7096	4.0932	4.9691
12	3.000	1.8913	2.5900	4.0812	4.9344
13	4.000	1.8426	2.4738	4.0678	4.8991
14	5.000	1.7945	2.3610	4.0530	4.8632
15	6.000	1.7470	2.2516	4.0368	4.8267
16	7.000	1.7001	2.1456	4.0192	4.7896
17	8.000	1.6538	2.0430	4.0002	4.7519
18	9.000	1.6081	1.9438	3.9798	4.7136
19	0.000	1.5630	1.8480	3.9580	4.6747
20	1.000	1.5185	1.7556	3.9348	4.6352
21	2.000	1.4746	1.6666	3.9102	4.5951
22	3.000	1.4313	1.5810	3.8842	4.5544
23	4.000	1.3886	1.4988	3.8568	4.5131
24	5.000	1.3465	1.4200	3.8280	4.4712
25	6.000	1.3050	1.3446	3.7978	4.4287
26	7.000	1.2641	1.2726	3.7662	4.3856
27	8.000	1.2238	1.2040	3.7332	4.3419

Fig. 3.4.22 선택된 시료의 일축압축시험 결과예시(CL)

ML W/C List

	A	B	C	D	E
1	고화제 물비(W/C)에 따른 각 시료 별 예측강도표				
2	ML(전체 유동화 처리토 대비 현장토 44.3%인 경우)				
3	W/C	4hour qu (kgf/cm2)	1day qu (kgf/cm2)	7days qu (kgf/cm2)	28days q (kgf/cm2
4	180	2.0724	4.6410	6.6130	7.7010
5	181	2.0638	4.5711	6.5455	7.6051
6	182	2.0551	4.5022	6.4786	7.5104
7	183	2.0463	4.4343	6.4123	7.4169
8	184	2.0373	4.3674	6.3466	7.3246
9	185	2.0282	4.3015	6.2815	7.2335
10	186	2.0189	4.2366	6.2170	7.1436
11	187	2.0095	4.1727	6.1531	7.0549
12	188	1.9999	4.1098	6.0898	6.9674
13	189	1.9902	4.0479	6.0271	6.8811
14	190	1.9804	3.9870	5.9650	6.7960
15	191	1.9704	3.9271	5.9035	6.7121
16	192	1.9603	3.8682	5.8426	6.6294
17	193	1.9501	3.8103	5.7823	6.5479
18	194	1.9397	3.7534	5.7226	6.4676
19	195	1.9292	3.6975	5.6635	6.3885
20	196	1.9185	3.6426	5.6050	6.3106
21	197	1.9077	3.5887	5.5471	6.2339
22	198	1.8967	3.5358	5.4898	6.1584
23	199	1.8856	3.4839	5.4331	6.0841
24	200	1.8744	3.4330	5.3770	6.0110

Fig. 3.4.23 선택된 시료의 일축압축시험 결과예시(ML)

(나) W/C 결정표

선택된 대상토 및 배합강도(fcr)에 따른 가능 W/C의 범위가 산정되면 시간에 따른 압축강도를 모두 만족하는 W/C를 자동으로 계산하여 출력한다.

W/C 결정표

	배합강도(Fcr)	W/C 범위
4시간후 강도	2.0kg/㎠ 이상	180~187
7일후 강도	기준없음	-
28일후 강도	8.7kg/㎠ 이하	180~275
W/C 추천		187

Fig. 3.4.24 시험결과에 따른 W/C의 추천

(5) 배합비율 분석 기능

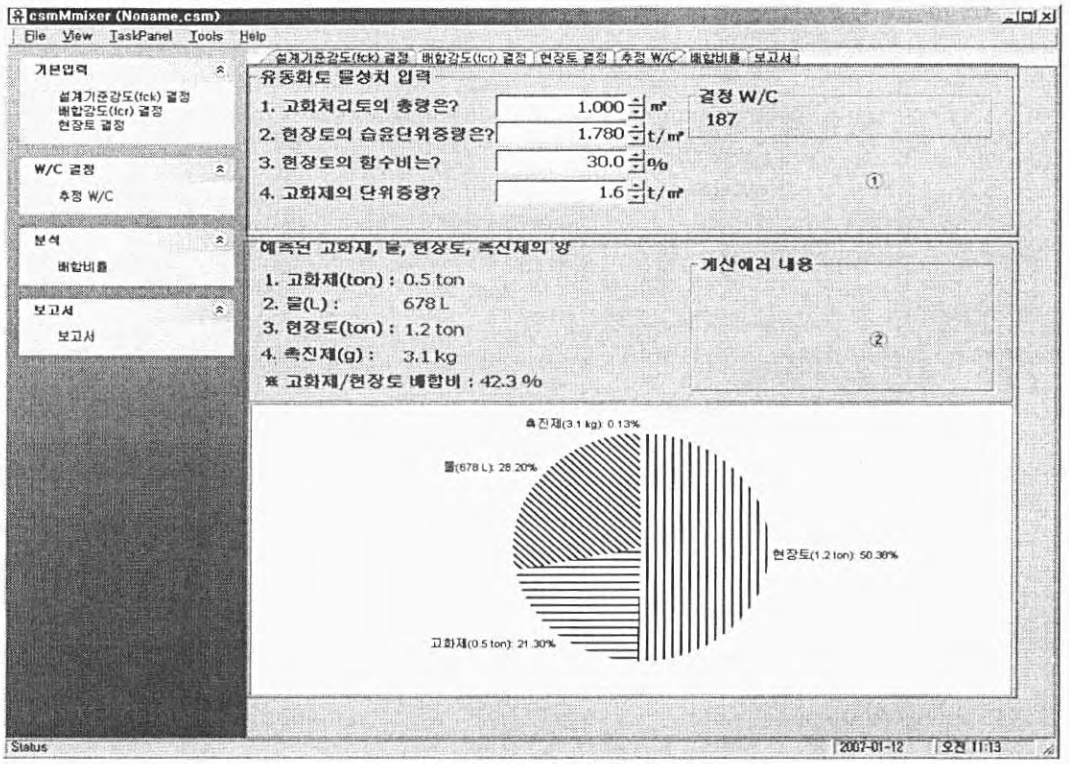


Fig. 3.4.25 최적 배합비 산출

(가) 유동화토 물성치 입력

· 물고화재비(W/C)의 결정

- 물고화재비는 설계기준강도, 배합강도, 현장토의 결정에 따라 자동으로 산출된 W/C의 추정값으로 결정되며 각 독립변수를 변경하게 되면 자동으로 물고화재비가 결정된다.

· 물성치 입력

(나) 물, 고화재, 촉진제, 현장토 및 고화재 양의 결정

- 고화재의 단위 중량은 사용자에 의해 입력된 물성치에 의해 결정되며 5장에서 유도된 정의를 통해 얻어진다.

· 계산 에러내용

- CLSMmixer에 입력된 변수에 따른 배합비 산출 과정에서 발생하는 계산 에러에 대한 내용을 표시한다.

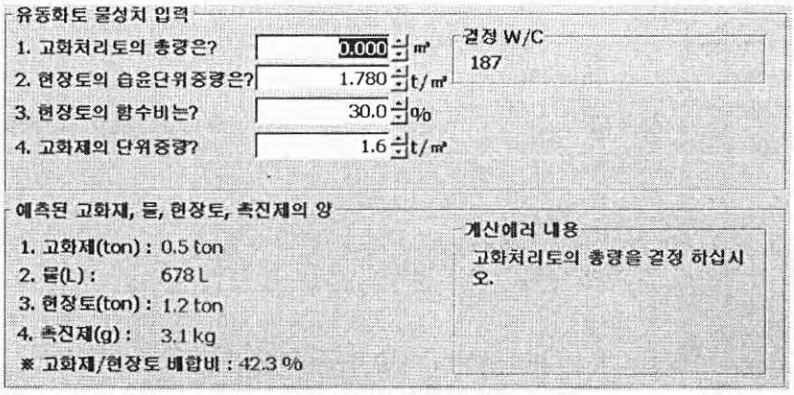


Fig. 3.4.26 최적 배합시 산출시 발생 에러의
출력예시(고화토 미입력)

· 각 시료의 배합비 출력

입력된 유동화토 물성치에 따라 결정된 각 시료(고화재, 물, 현장토, 촉진제)의 양에 따른 배합비를 그래프를 통해 출력한다.

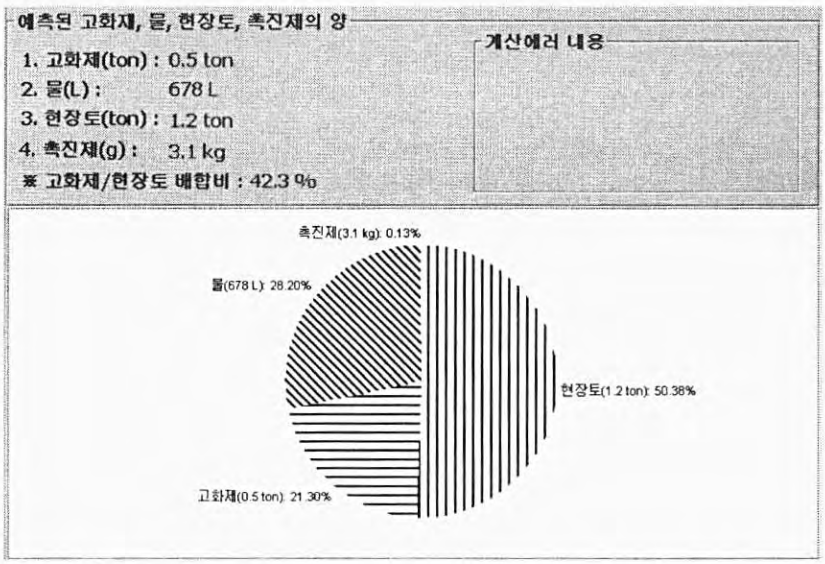


Fig. 3.4.27 예측된 고화재, 물, 현장토, 촉진제 양에 따른 비율 산정

(6) 보고서 출력 기능

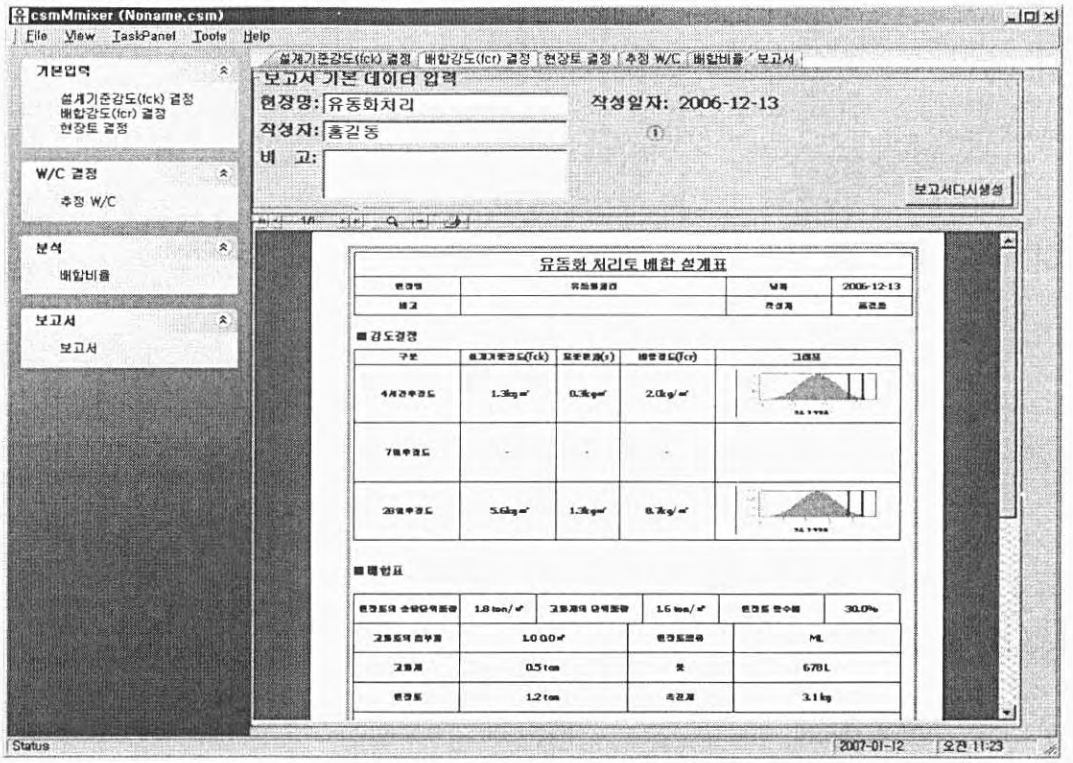
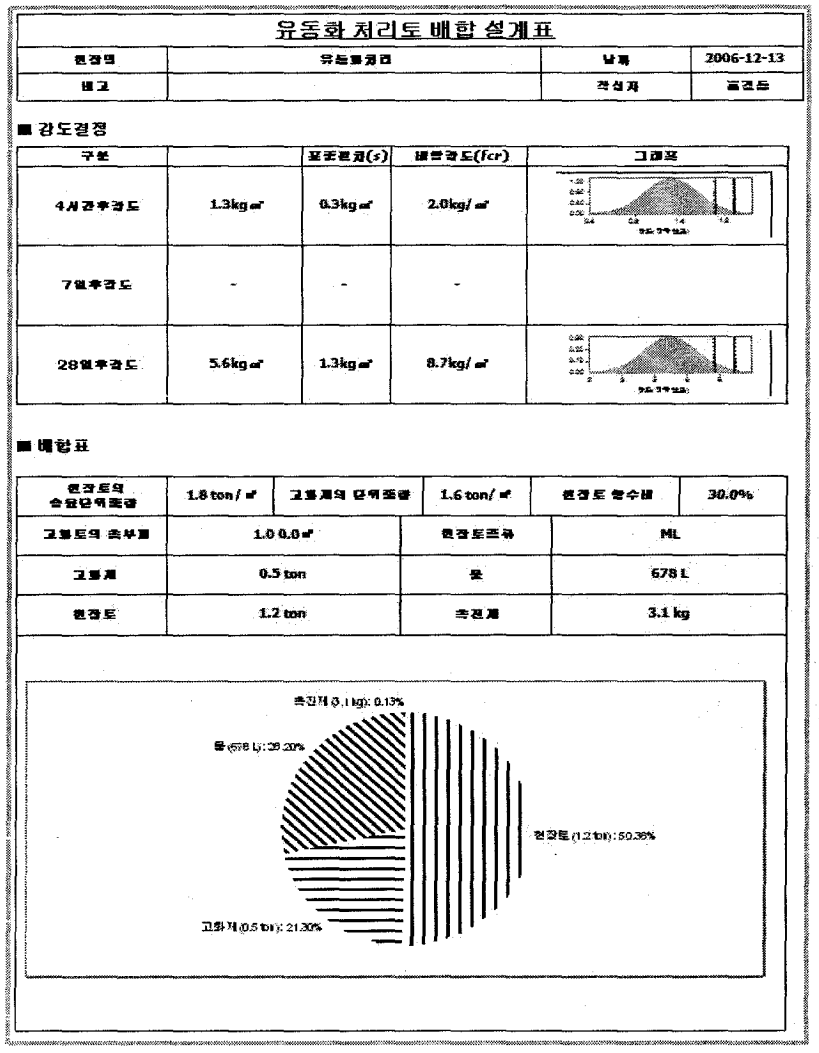


Fig. 3.4.28 보고서 출력 창

(가) 보고서 기본데이터 입력

- 산정된 배합비율을 기반으로 보고서에 입력될 기본 데이터를 사용자가 입력한다. 사용자는 현장명, 작성자, 비고를 작성하며 이는 보고서의 각 항목에 자동으로 반영된다.

(나) 배합 보고서 출력



유동화 처리토 배합 설계표

현장명	유동화현장	날짜	2006-12-13
비고		작성자	홍길동

■ 강도결정

구분		표준편차(s)	배합강도(fcr)	그래프
4일강도	1.3kg/㎠	0.3kg/㎠	2.0kg/㎠	
7일강도	-	-	-	
28일강도	5.6kg/㎠	1.3kg/㎠	8.7kg/㎠	

■ 배합표

현장토의 습윤단위중량	1.8 ton/㎥	고형재의 단위중량	1.6 ton/㎥	현장토 함수비	30.0%
고형토의 초부피	1.0 0.0㎥		현장토조성	ML	
고형재	0.5 ton		물	678 L	
현장토	1.2 ton		초전재	3.1 kg	

Fig. 3.4.29 배합보고서 출력화면

5. 배합설계 프로그램 개발의 결과 및 요약

본 연구에서 개발된 프로그램은 유동화 처리토를 활용한 최적 배합비 산출을 위한 전용 프로그램으로 배합설계에 필요한 기본 조건 입력 후, 그에 따른 최적 배합비를 산출, 검토하여 유동화 처리토를 활용한 배합설계를 위한 실무 적용 오차를 줄이고자하는데 그 목적이 있다. 프로그램의 해석을 통해 다음과 같은 성과를 달성할 수 있다.

1. CLSM-Mixer 프로그램에 의해 각 시료 종류에 따른 고화재-물 비율을 산정할 수 있다.

2. 산정한 고화재-물 비율을 바탕으로 고화재, 현장토, 물의 총량을 유추할 수 있다.

3. 이러한 결과를 통해, 개발된 프로그램을 이용하여, 실제적인 배합비를 산정할 수 있다.

제 5 절 현장 시험 시공

1. 현장발생토를 이용한 유동화 처리토의 배합설계 (현장 시험 시공)

유동화 처리토 공법은 현장발생토를 이용하므로 쉽게 생산이 가능하고 시공속도가 빠르므로 건설 시공절차가 단순화 되어 품질관리를 용이하게 할 수 있다. 또한 유동성, 자기 수평 능력에 의해 추가적인 기계적 다짐 작업이 필요 없기 때문에 안전하며 굴착 폭을 줄일 수 있을 뿐 아니라 소음이나 분진, 진동이 발생하지 않아 주변 환경에 영향을 주지 않는 것으로 알려져 있다.

현장 시험 시공을 통해 유동화 처리토의 현장 적용성을 평가하기 위하여, 1차년도 및 2차년도 추가 연구를 통해 도출된 연구 결과를 활용하여 선진국의 품질 기준을 만족하는 동시에 기존의 시공 방법이 갖는 문제점을 해결하고자 하였다.

가. 태안 화력발전소 석탄회의 시료 특성

본 연구에서는 유동화 처리토의 주재료로서 석탄회의 활용성을 파악하고자, 석탄회를 사용한 조건으로 현장 시험 시공을 실시하였다. 석탄회는 태안 화력 발전소에서 발생한 것을 사용하였고, 입도분석결과를 Table 3.5.1에 나타내었으며, Fig. 3.5.1에 입도분포곡선을 나타냈다.

Table 3.5.1 태안 화력발전소 석탄회의 분류

D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	Cu	Cc	W/P	통일분류법
0.1954	0.5668	1.3749	7.036	1.196	W	SW

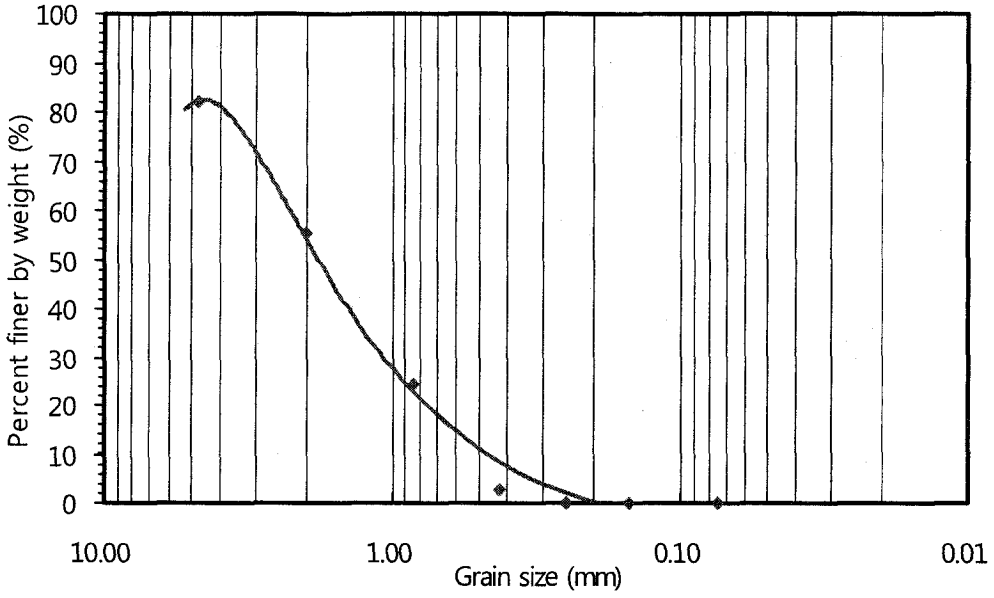


Fig. 3.5.1 태안 화력발전소 석탄회의 입도분포곡선

나. 배합비 산정

(1) 현장 시험 시공 부지 현장발생토의 배합비 산정 실험

본 연구에서는 시료를 통일 분류법에 따라 5종류(SW, SM, SC, ML, CL)로 분류하고, 토양 특성에 대한 실내 시험을 통해 각 발생토의 토질 특성에 따른 최적 배합비를 도출하였다. 또한 프로그램을 개발하여 현장 토사 특성(SW, SM, SC, ML, CL)에 따른 최적 배합비를 산정하고 현장 목표 강도의 범위에 따른 배합비를 산정할 수 있도록 하였다. 본 실험에서는 현장 시험 시공 부지 선정 후, 현장발생토를 채취하여 통일분류법으로 분류한 후 현장 적용을 위한 최적 배합비를 산정하고자 하였다. 본 연구에 사용되는 현장발생토를 통일 분류법에 의해 분류한 결과 SM으로 나타났다. 현장발생토의 비율과 W/C를 조절하여 최적의 배합조건을 도출하고자 하였다. Table 3.5.2에 현장발생토의 최적 배합비 도출 실험 조건을 제시하였다.

Table 3.5.2 현장발생토의 최적 배합비 도출 실험 조건

No.	고화재 종류	현장 발생토 (SM)	비율			W/C (%)
			현장 발생토 (%)	물 (%)	고화재 (%)	
T4-C1	C-10	100	50	32	18	177.78
T4-C2			50	33	17	194.12
T4-C3			50	34	16	212.50
T4-C4			50	35	15	233.33
T4-C5			60	25	15	166.67
T4-C6			60	26	14	185.71
T4-C7			60	27	13	207.69
T4-C8			60	28	12	233.33

본 연구에 사용된 현장발생토를 통일 분류법에 의해 분류한 결과 SM으로 나타났다. 재령 1일 일축압축강도 2.0kg/cm^2 이상, 재령 28일 일축압축강도 7.0kg/cm^2 이하, JHS에 의한 유동성 18cm~30cm의 3가지 기준을 모두 만족하는 실내 실험을 통한 SM의 최적 배합비 산정결과는 Fig. 3.5.2와 같이 나타났고, 물-고화재비가 207로 산정되었다. Table 3.5.3에 현장발생토의 배합비를 제시하였다.

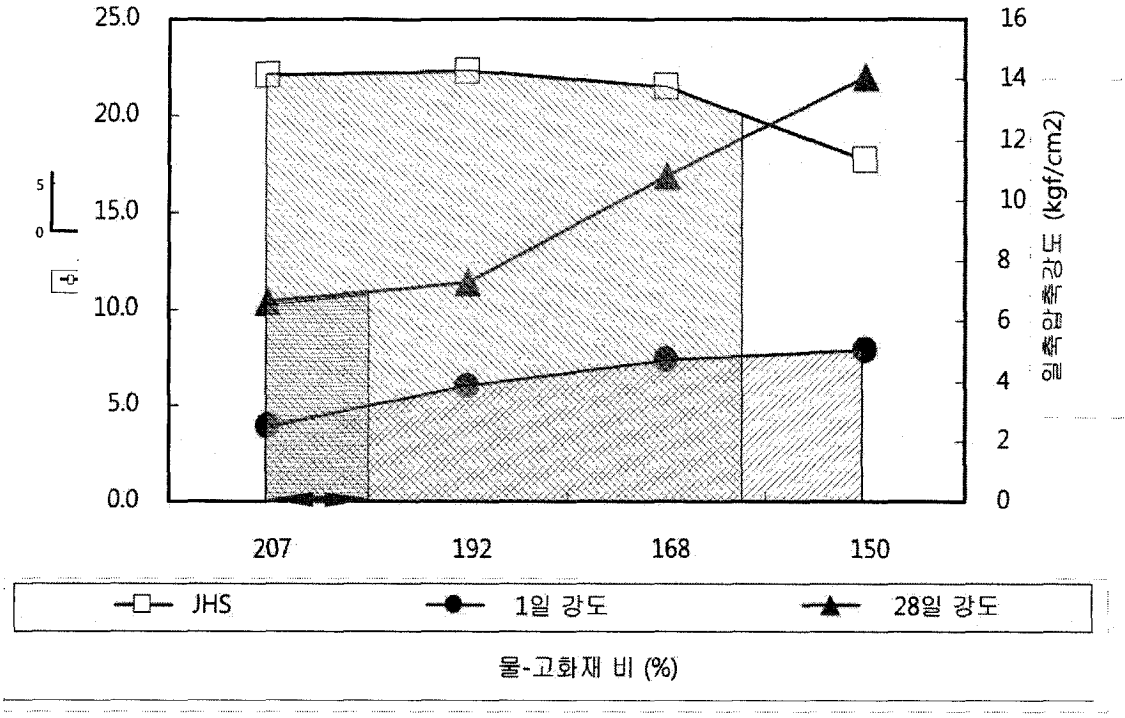


Fig. 3.5.2 현장발생토 SM의 배합비 산정

Table 3.5.3 유동화 처리토의 배합비 (현장발생토)

고화재(%)	현장발생토(%)	물(%)	합계(%)
13.2	60	26.8	100

2. 현장발생토 배합실험

가. 재료분리 특성

블리딩율을 통해 현장발생토의 배합비에 따른 재료분리 특성을 측정한 결과를 Table 3.5.4에 제시하였다. 현장발생토 비율이 50%인 조건과 현장발생토 비율이 60%인 조건에서 모두 W/C에 영향을 받지 않고 목표기준인 1% 이하의 블리딩율을 나타냈다.

Table 3.5.4 현장발생토의 최적 배합비 도출을 위한 재료분리 특성 실험 결과

No.	블리딩율	No.	블리딩율	No.	블리딩율	No.	블리딩율
T4-C1	1% 이하	T4-C3	1% 이하	T4-C5	1% 이하	T4-C7	1% 이하
T4-C2	1% 이하	T4-C4	1% 이하	T4-C6	1% 이하	T4-C8	1% 이하

나. 유동성

현장발생토의 배합비에 따른 유동성을 JHS, ASTM, Slump Flow의 3가지 기준으로 파악하였다. Table 3.3.5에 현장발생토의 배합비에 따른 유동성 결과를 제시하였고, Fig. 3.5.3~Fig. 3.5.4에 각각 JHS, ASTM, Slump Flow에 의한 유동성 결과를 나타냈다. W/C가 증가할수록 유동성은 증가했고, 이러한 경향은 JHS, ASTM, Slump Flow 3가지에서 공통적으로 나타났다. JHS에 의한 유동성 측정 결과, 현장발생토 비율이 50%일 때에는 W/C가 177.78%부터 233.33%까지 모두 목표 기준을 만족하였고, 현장발생토 비율이 60%일 때에는 W/C가 207.69%, 233.33%인 조건에서 목표기준을 만족하였다. ASTM에 의해 유동성을 측정한 결과, 현장발생토 비율이 50%인 경우에는 212.50%와 233.33%에서 목표기준을 만족하였고, 현장발생토 비율이 60%일 때의 유동성은 모두 목표기준보다 작은 값을 나타냈다. Slump Flow를 통해 측정한 유동성 결과, 현장발생토 비율이 50%일 때에는 모든 실험 조건에서 목표 기준을 만족하였고, 현장발생토 비율이 60%일 때에는 W/C가 207.69%, 233.33%인 조건에서만 목표기준을 만족하였다.

Table 3.3.5 현장발생토의 최적 배합비 도출을 위한 유동성 실험 결과

No.	W/C (%)	고화재 종류	JHS (cm)	ASTM (cm)	Slump Flow (cm)
T4-C1	177.78	C-10	16.6	25.4	44.6
T4-C2	194.12		25.8	32.5	66.6
T4-C3	212.50		40.6	48.3	77.8
T4-C4	233.33		30.2	37.8	73.5
T4-C5	166.67		25.8	32.5	66.6
T4-C6	185.71		40.6	48.3	77.8
T4-C7	207.69		30.2	37.8	73.5
T4-C8	233.33		35.6	42.6	77.2

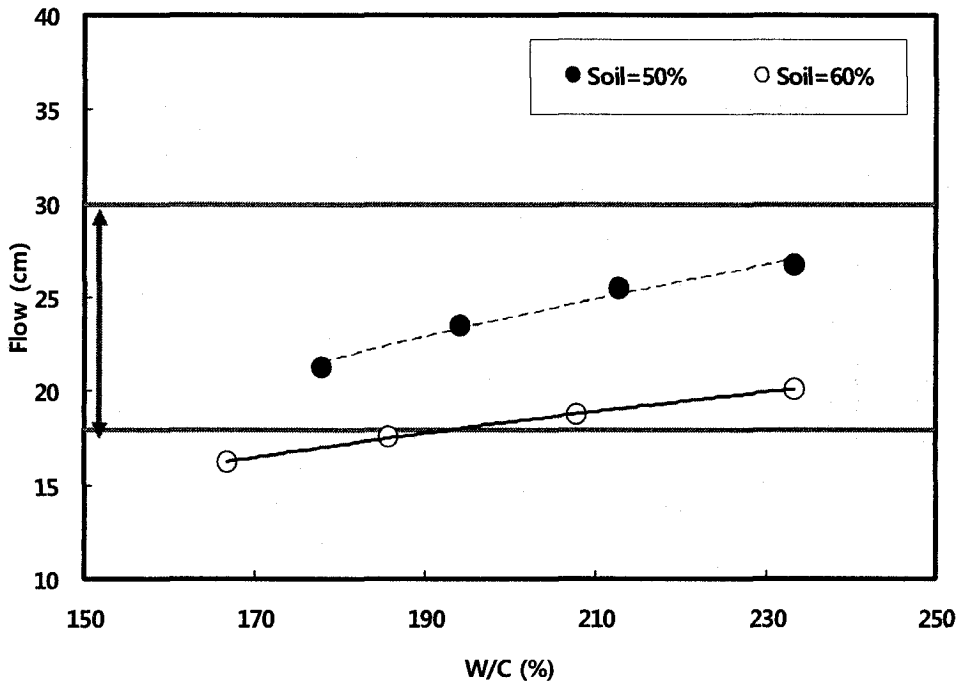


Fig. 3.5.3 현장발생토의 최적 배합비 도출을 위한 유동성 실험 결과 (JHS)

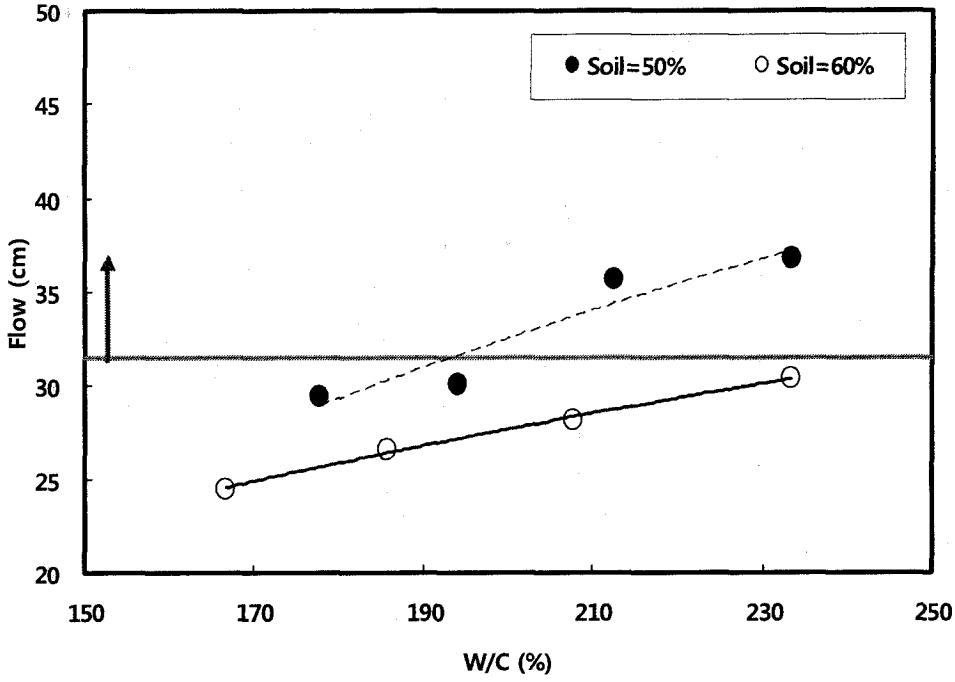


Fig. 3.5.4 현장발생토의 최적 배합비 도출을 위한 유동성 실험 결과 (ASTM)

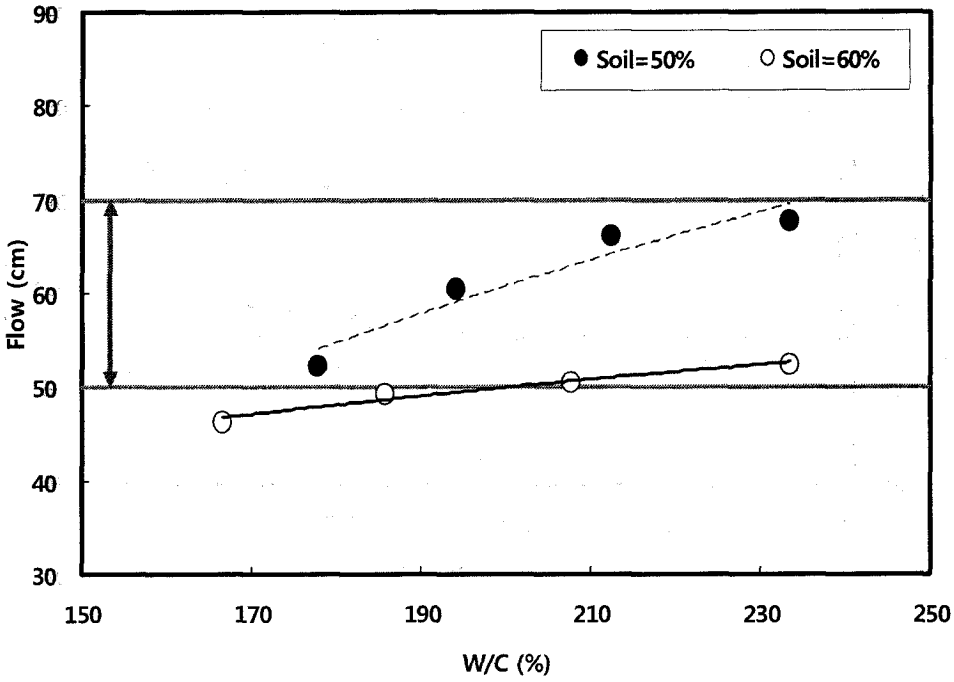


Fig. 3.5.5 현장발생토의 최적 배합비 도출을 위한 유동성 실험 결과 (Slump)

Fig. 3.5.6에 현장발생토의 최적 배합비 도출을 위해 JHS, ASTM, Slump Flow의 유동성 관계를 그림으로 나타냈다. JHS, ASTM, Slump Flow 3가지의 유동성을 모두 만족하는 W/C는 파악한 결과, 현장발생토 비율이 50%인 실험 조건에서는 3가지의 유동성 평가기준을 모두 만족하는 W/C를 찾을 수 없었고, 현장발생토 비율이 60%인 경우에는 약 193.2%~233.4%에서 평가기준에 만족하는 W/C 값을 보였다.

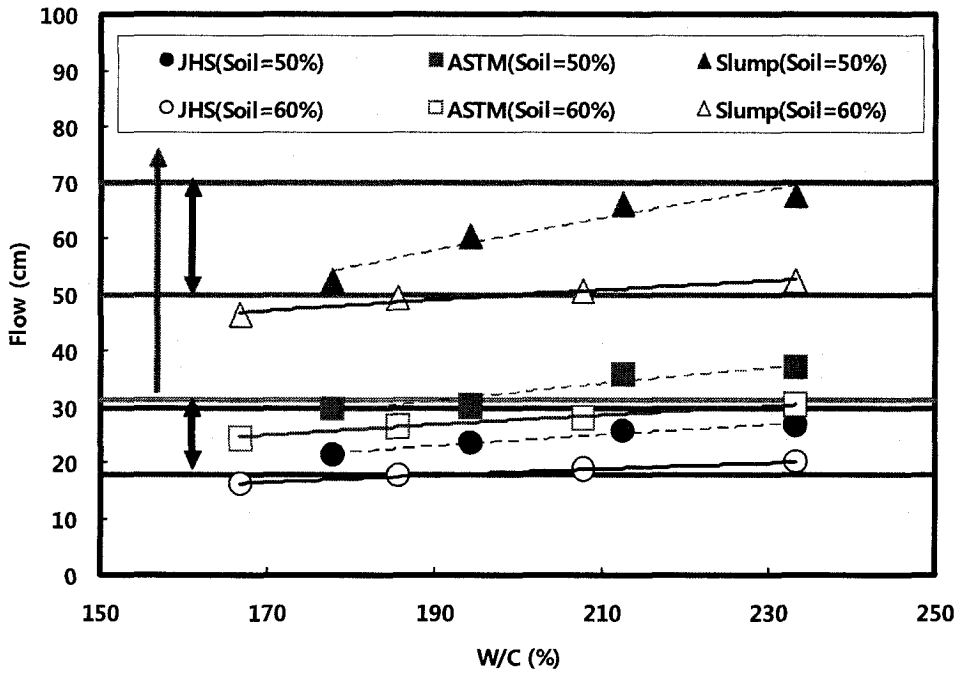


Fig. 3.5.6 현장발생토의 최적 배합비 산정을 위한 유동성 관계

다. 강도특성

(1) 현장발생토 비율에 따른 강도특성

Table 3.3.6과 Fig. 3.5.7~Fig. 3.5.10에 현장발생토의 최적 배합비 산정을 위해 현장발생토 비율에 따른 각 W/C의 일축압축강도를 나타냈다. 재령 4시간 일축압축강도는 현장발생토 비율이 50%인 조건에서 더 큰 일축압축강도를 나타냈고, 현장발생토 비율이 50%인 경우에는 모든 조건, 현장발생토 비율이 60% 경우에는 W/C가

233.33%인 조건을 제외하고 일본 유동화 처리토의 강도기준인 1.3kg/cm^2 이상의 강도기준을 만족하였다. 재령 1일 일축압축강도는 현장발생토 비율은 50%와 60%로 다르지만, W/C가 증가함에 따라 일축압축강도 차이는 거의 점차 줄어들어 233.33%인 조건에서는 동일한 일축압축강도를 나타냈다. 모든 실험조건에서 본 연구의 재령 1일 목표강도인 2.0kg/cm^2 이상의 일축압축강도를 나타냈다. 재령 7일 일축압축강도의 경우, 현장발생토 비율이 50%인 조건에서 더 큰 일축압축강도를 나타냈으며, 현장발생토 비율 50%와 60%인 조건에서W/C가 증가할수록 일축압축강도는 감소하였다. 재령 28일 일축압축강도는 현장발생토 비율이 50%일 때에는 W/C에 상관없이 모든 실험조건에서 목표기준인 7.0kg/cm^2 이하의 일축압축강도를 초과하였고, 현장발생토 비율이 60%일 때에는 W/C가 233.33%인 경우에만 강도기준을 만족하는 결과를 나타냈다.

Table 3.3.6 현장발생토의 최적 배합비 산정을 위한 일축압축강도 실험 결과

No.	W/C (%)	고화재 종류	4시간 (kg/cm^2)	1일 (kg/cm^2)	7일 (kg/cm^2)	28일 (kg/cm^2)
T4-C1	177.78	C-10	3.563	5.825	8.567	12.564
T4-C2	194.12		3.024	4.787	8.124	12.289
T4-C3	212.50		2.883	3.568	8.097	10.882
T4-C4	233.33		2.156	3.485	7.223	11.259
T4-C5	166.67		2.462	4.475	7.986	10.527
T4-C6	185.71		2.006	4.567	7.125	8.524
T4-C7	207.69		1.856	4.013	6.813	7.562
T4-C8	233.33		1.054	3.566	6.225	6.731

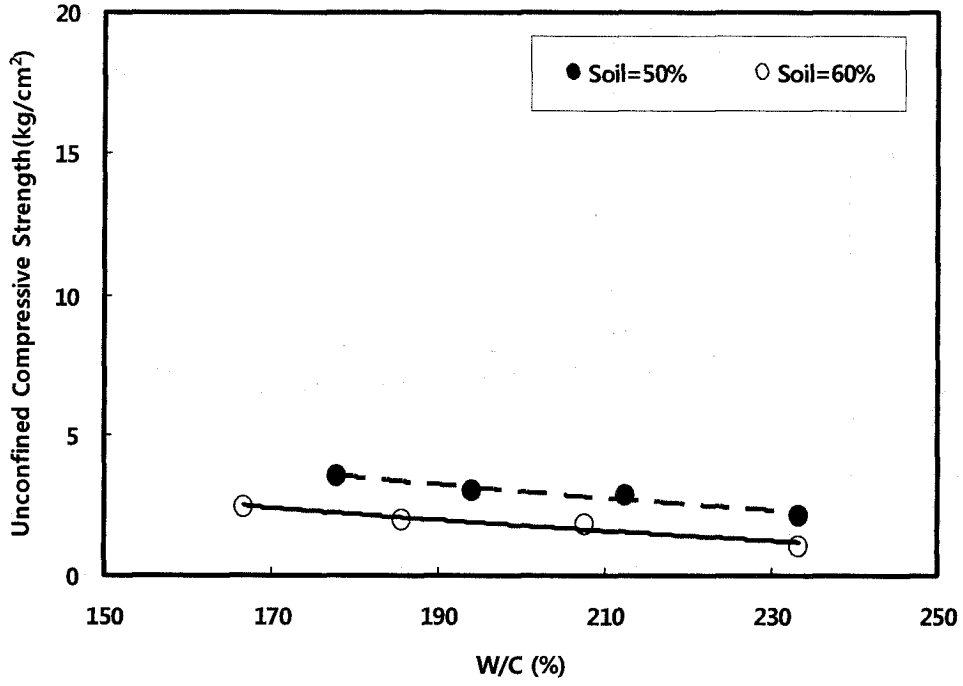


Fig. 3.5.7 W/C에 따른 재령 4시간 일축압축강도

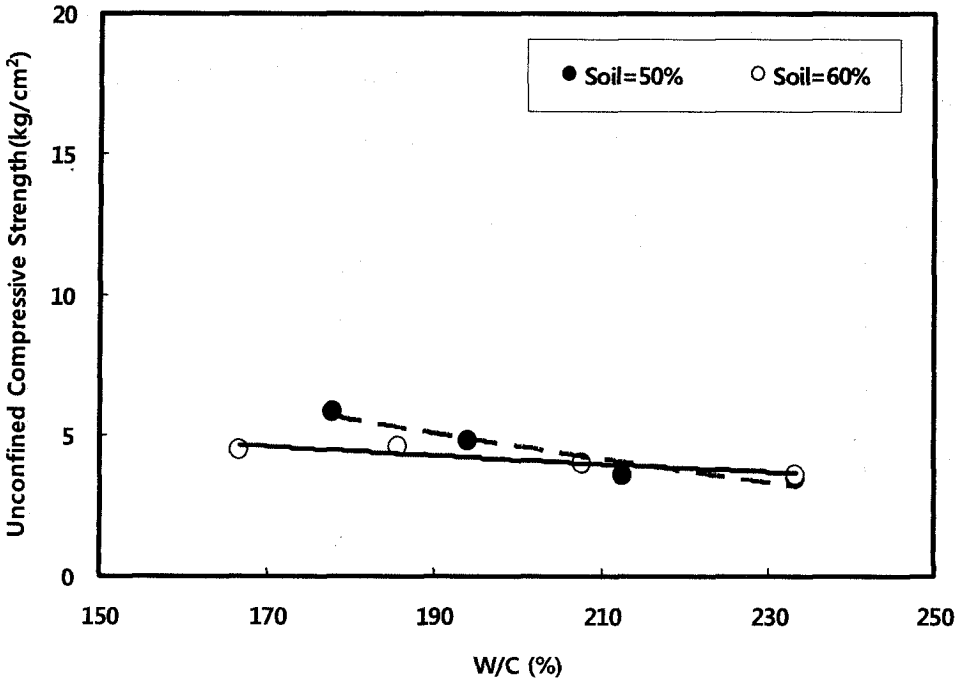


Fig. 3.5.8 W/C에 따른 재령 1일 일축압축강도

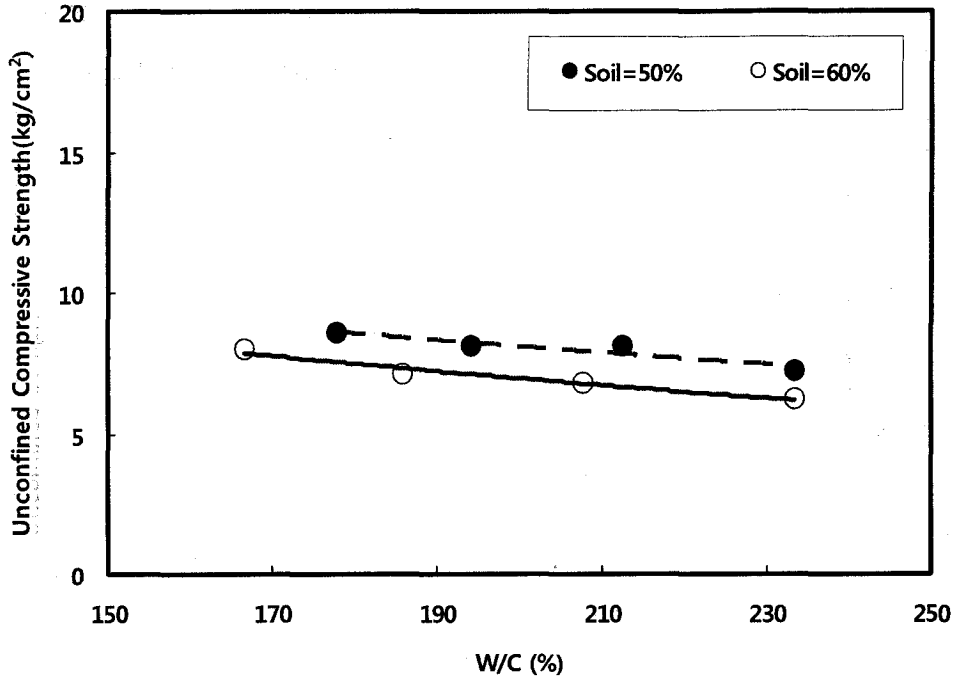


Fig. 3.5.9 W/C에 따른 재령 7일 일축압축강도

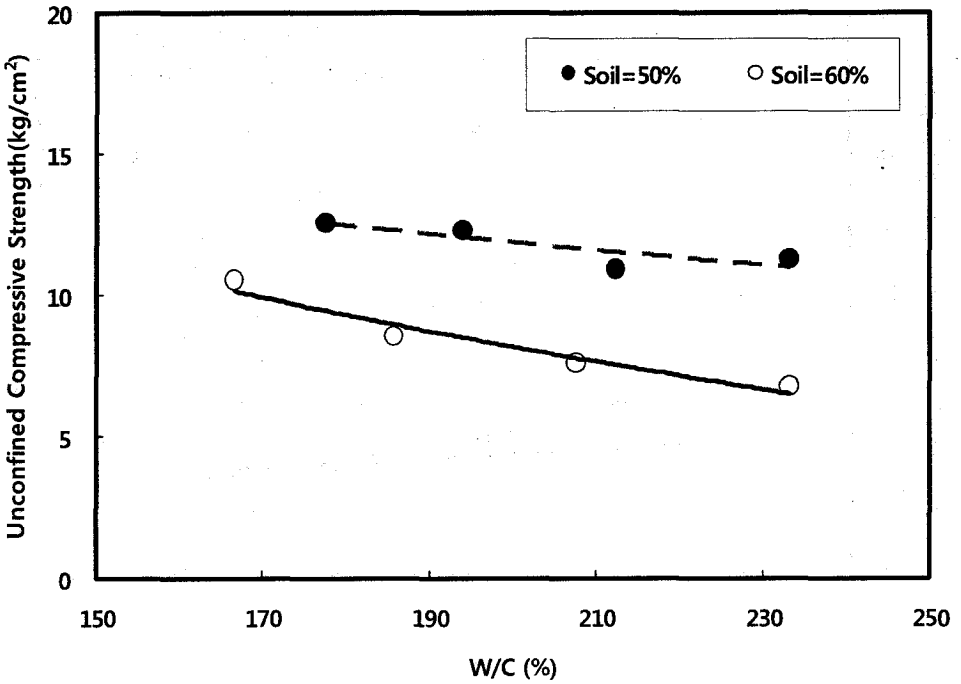


Fig. 3.5.10 W/C에 따른 재령 28일 일축압축강도

(2) 현장발생토의 양생기간에 따른 강도특성

Fig. 3.5.11과 Fig. 3.5.12는 현장발생토 비율 50%와 60%일 때의 양생기간에 따른 일축압축강도를 각각 나타낸 결과이다. 두 가지 조건에서 실험결과에서 양생시간의 경과에 따라 일축압축강도가 증가하고, W/C가 낮을수록 강도발현이 더 큰 것을 공통적으로 확인할 수 있었다.

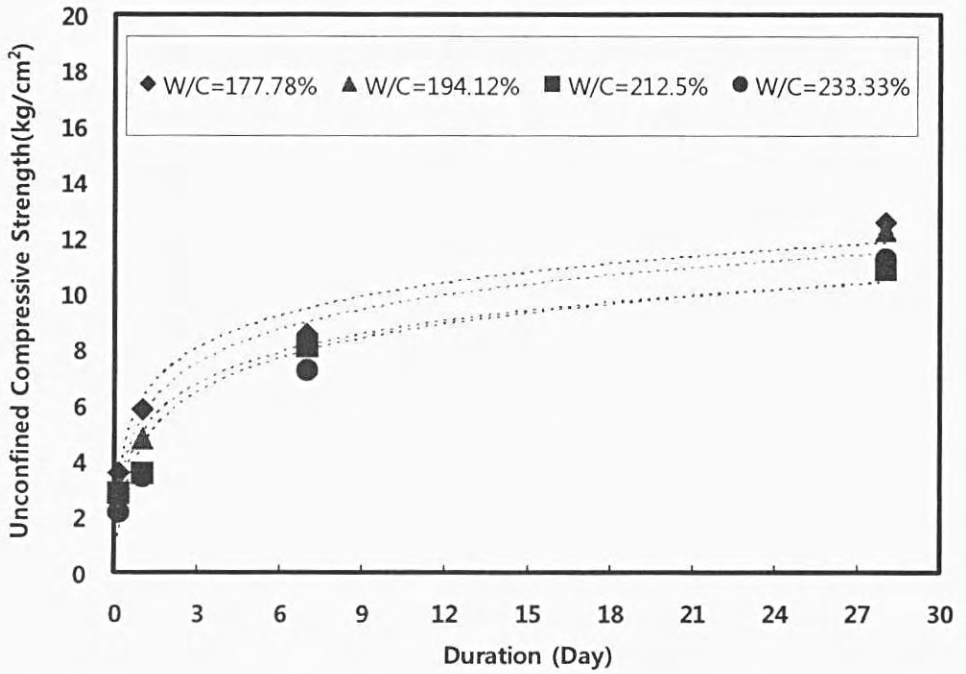


Fig. 3.5.11 현장발생토 비율이 50%일 때의 양생기간에 따른 일축압축강도

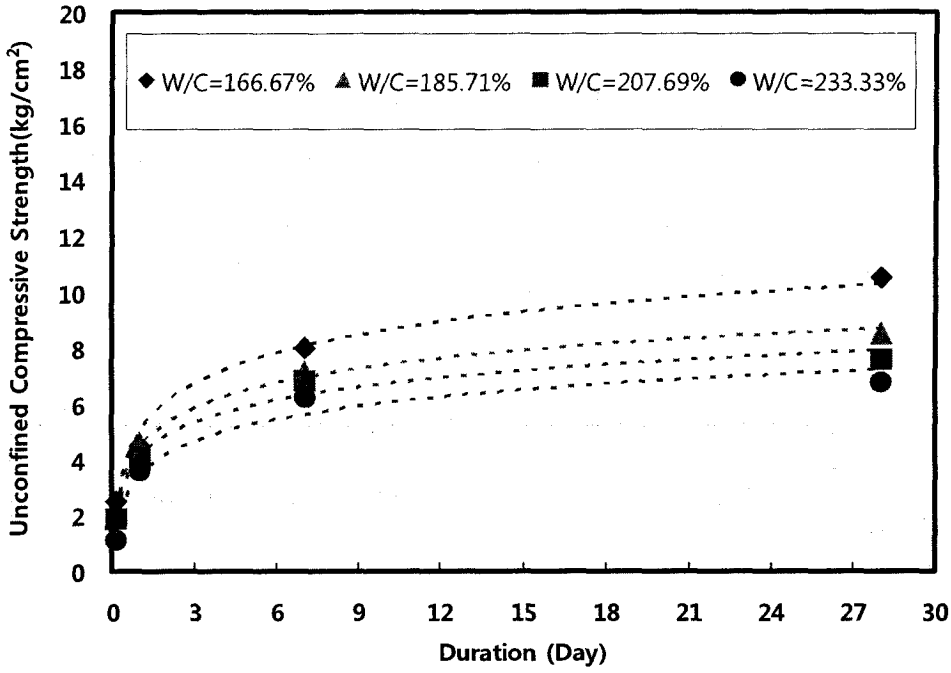


Fig. 3.5.12 현장발생토 비율이 60%일 때의 양생기간에 따른 일축압축강도

라. 현장발생토의 최적 배합비 산정

Fig. 3.5.13에 재령 1일 일축압축강도와 JHS 기준에 의한 적합 W/C, Fig. 3.5.14에 재령 28일 일축압축강도와 Slump Flow 기준에 의한 적합 W/C를 나타냈다. 재령 1일 일축압축강도와 JHS 기준을 통해 적합 W/C를 파악한 결과, 현장발생토 비율이 50%인 경우에는 177.78%~233.33%, 현장발생토 비율이 60% 경우에는 166.67%~193.2%의 W/C에서 강도기준과 유동성 기준을 모두 만족하였다. 재령 28일 일축압축강도와 Slump Flow 기준을 통해 적합 W/C를 파악한 결과, 현장발생토 비율이 50%인 경우에는 강도기준과 유동성 기준을 만족하는 W/C의 범위를 산정할 수 없었고, 현장발생토 비율이 60% 경우에는 227.8%~233.33%의 W/C에서 강도기준과 유동성 기준을 모두 만족하였다. 위의 결과를 종합하여 시료비율=60%, W/C=227.8%~233.33%를 최적 배합비로 산정하였다.

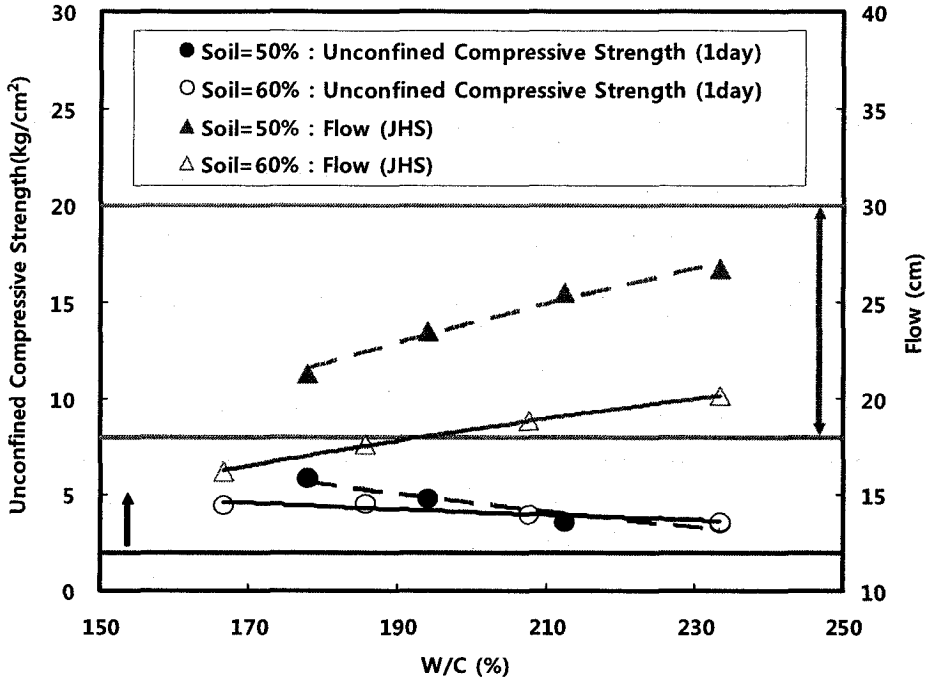


Fig. 3.5.13 재령 1일 일축압축강도와 JHS 기준에 의한 적합 W/C 산정

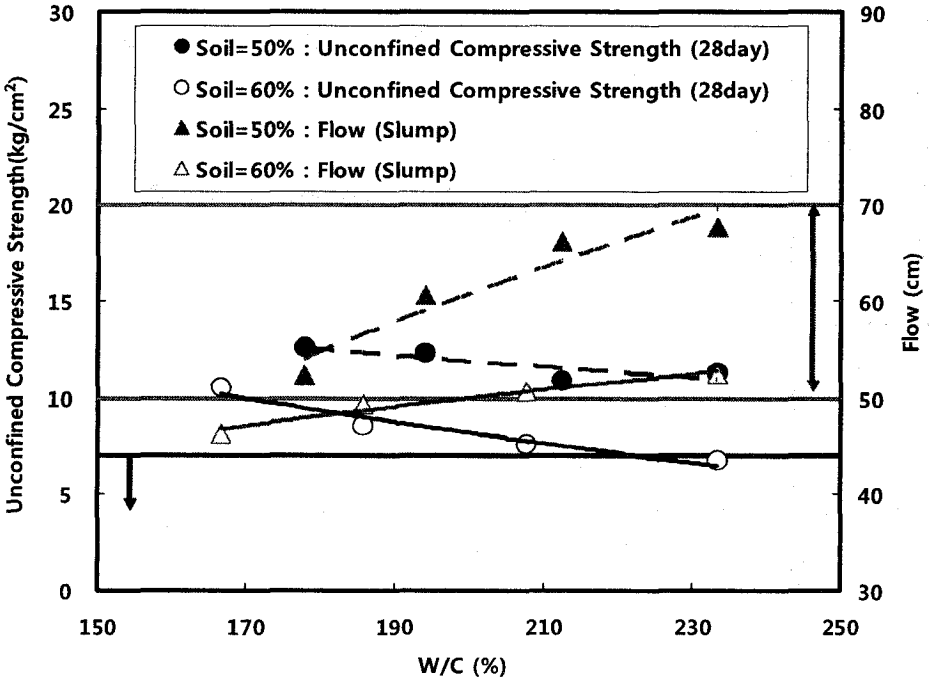


Fig. 3.5.14 재령 28일 일축압축강도와 Slump Flow 기준에 의한 적합 W/C 산정

마. 투수특성

Table 3.3.7과 Fig. 3.5.15에 각각의 현장발생토 비율에 대해 W/C의 변화에 따른 변수위 투수계수를 나타냈다. 변수위 투수계수는 현장발생토 비율과 W/C에 영향을 받지 않고, 4.12×10^{-6}~5.66×10^{-6}cm/sec의 범위를 나타내었으며, 일반적인 유동화 처리토의 투수계수 10^{-6}~10^{-7}cm/sec의 범위에도 적합한 결과를 보였다.

Table 3.3.7 현장발생토의 비율과 W/C에 따른 변수위 투수계수 실험 결과(cm/sec)

No.	투수계수	No.	투수계수	No.	투수계수	No.	투수계수
T4-C1	4.45×10^{-6}	T4-C3	5.21×10^{-6}	T4-C5	4.78×10^{-6}	T4-C7	5.13×10^{-6}
T4-C2	5.66×10^{-6}	T4-C4	4.84×10^{-6}	T4-C6	4.12×10^{-6}	T4-C8	5.47×10^{-6}

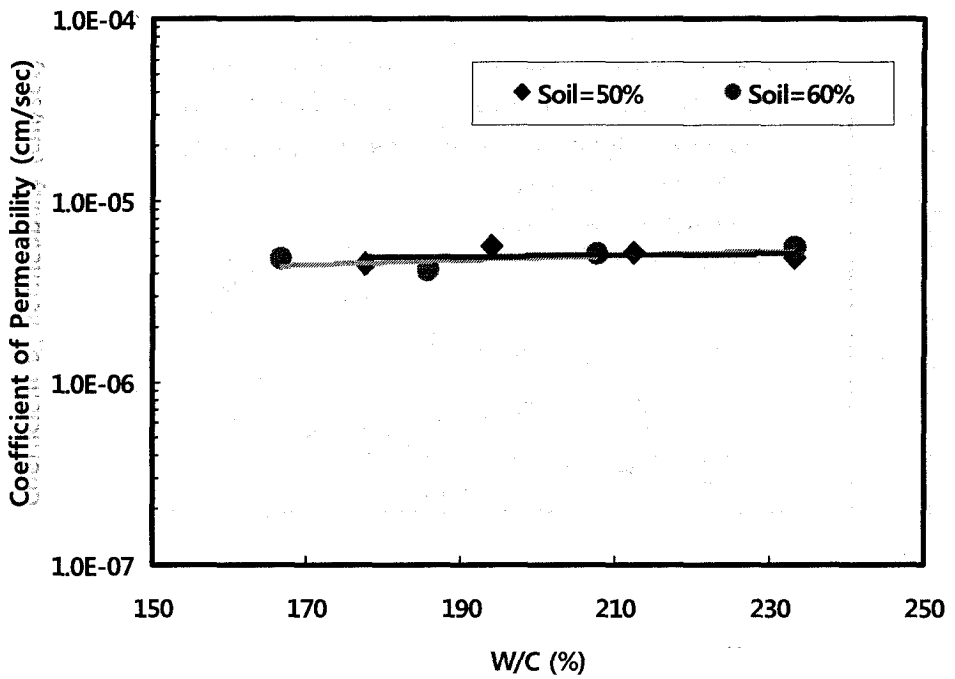


Fig. 3.5.15 현장발생토의 비율과 W/C에 따른 변수위 투수계수

(2) 현장발생토 + 태안 화력발전소 석탄회

본 연구에서는 현장발생토와 태안 화력발전소에서 발생하는 석탄회를 50:50로 혼합하여 유동화 처리토에 적용하였다. 양질의 현장발생토 공급이 원활하지 못할 경우, 현장발생토의 대체재료로서 석탄회의 적용성을 파악하고자 현장발생토와 석탄회를 혼합하여 사용하였다. 현장발생토와 석탄회의 통일분류법에 의한 분류 결과 각각 SM과 SW로 나타났고, 두 시료를 50:50로 혼합한 시료는 SW로 나타났다. 재령 1일 일축압축강도 2.0kg/cm^2 이상, 재령 28일 일축압축강도 7.0kg/cm^2 이하, JHS에 의한 유동성 18cm~30cm의 3가지 기준을 모두 만족하는 실내 실험을 통한 SW의 최적 배합비 산정결과 Fig. 3.5.16과 같이 나타났고, 그 결과 물-고화재비가 212일 때의 배합비로 결정하였다. Table 3.5.8에 현장발생토+태안 화력발전소 석탄회(50:50)의 배합비를 제시하였다.

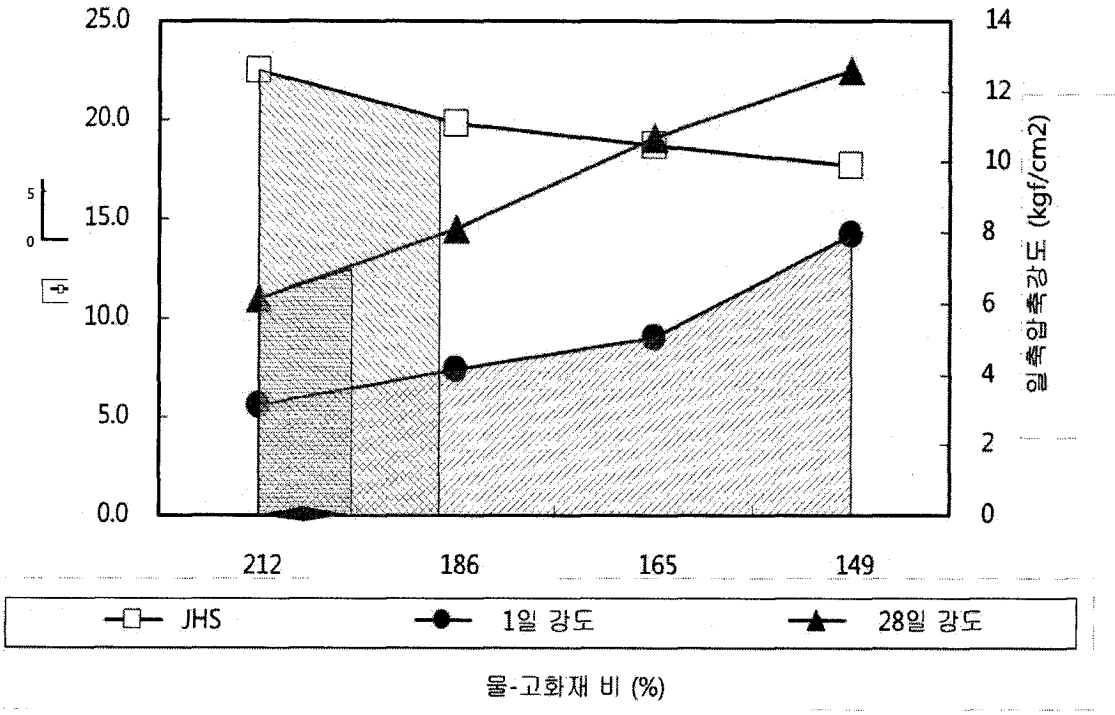


Fig. 3.5.16 현장발생토+태안 화력발전소 석탄회(5:5) SW의 배합비 산정

Table 3.5.8 유동화 처리토의 배합비 (현장발생토+태안 화력발전소 석탄회(5:5))

고화재(%)	현장발생토(%)	석탄회(%)	물(%)	합계(%)
11.7	32.5	32.5	23.3	100

3. 유동화 처리토의 현장 적용

가. 주재료의 관리 방법

(1) 현장발생토의 유의점

유동화 처리토에서 주재료인 현장발생토의 관리는 무엇보다 중요하기 때문에 아래와 같은 점에 유의할 필요가 있다.

(가) 목편·철선 등의 이물질의 혼입

유동화 처리토는 현장발생토를 체가름 외에 별도의 처리 없이 그대로 사용하기 때문에 이물질이 혼입되어 있기 쉽다. 이물질이 혼입되어 있으면 플랜트 장비의 고장을 유발하거나 매설 구조물에 녹이 스는 등 유동화 처리토의 효율을 저감시킬 수 있다. 따라서 현장발생토에 목편이나 철선 등의 이물질의 혼입을 최소화하도록 충분히 유의할 필요가 있다.

(나) 보관 장소의 현장발생토

현장발생토의 보관 장소는 충분한 면적을 확보하는 것이 바람직하다. 유동화 처리토는 흙의 종류마다 배합비가 다르므로 가능하면 보관 장소에 충분한 면적을 확보하여 흙의 종류마다 나누어 보관하는 것이 바람직하다. 그러나 도심지 등의 경우는 보관 장소에 필요한 면적을 확보하는 것이 어렵기 때문에 충분한 면적을 확보하기 힘들다. 보관 장소를 충분이 확보하지 못한 경우에는 흙을 분별해 보관하는 것이 곤란하기 때문에 다른 종류의 흙과 함께 보관하는 경우가 발생하게 되고, 이로 인해 서로 다른 현장발생토가 혼합되게 된다. 이러한 현장발생토의 혼합은 처리 플랜트의 배합에 영향을 미쳐 목표로 했던 유동화 처리토를 제조하기 위한 작업 효율과 품질의 안정성을 저하시킬 수 있다. 따라서 제조시에 신속하게 현장발생토의 변화에 대응할 수 있도록 유의할 필요가 있다.

또한 보관된 현장발생토의 함수비는 강우 등에 의해 영향을 받는다. 일반적으로

점성토의 경우는 함수비의 변동이 적다. 굴착한 점성토를 장기간 임시로 방치하는 경우에는 방치 직후로부터 6개월 정도는 함수비가 계속 저하하는 경우도 있는데, 이렇게 되면 점차 용해하기 어려워지는 것은 물론 결과적으로 유동화 처리토의 품질에 영향을 줄 수 있다. 이러한 경우에는 정기적으로 점성토의 함수비를 측정하면서 용해의 용이성의 정도를 추측하는 것이 중요하다.

한편 모래질흙이나 실트 등의 경우에는 강우시 및 강우 후의 함수비의 측정·관리가 반드시 필요하다. 또 반입되는 현장발생토에 대해서는 발생 장소, 발주자, 공종, 굴착토 상태 등을 기록해 둘 필요가 있다. 이러한 정보는 현장발생토에 이물질 등의 혼입을 예측하는 중요한 정보가 된다.

이동식 플랜트의 경우, 어느 정도 원재료를 그대로 사용할 수 있는지의 여부를 판단하고 이 결과에 따라 현장발생토의 관리를 실시하지 않는 경우도 많다.

(다) 현장발생토의 토질

주재료로 사용되는 현장발생토의 토질이 변하면 고화재, 현장발생토, 물 등의 첨가량도 그때마다 변경되어야 하기 때문에 플랜트의 가동 효율이 저하되거나 제조되는 유동화 처리토 품질도 불안정하게 되기 쉽다. 따라서 가능한 동일 종류의 현장발생토를 안정적으로 확보하는 것이 중요하다. 이 때, 발생토의 상태를 파악하기 위한 주된 관리 항목으로서는 흙의 종류, 함수비, 현장발생토의 채취 장소나 굴착 공법 등이 있다. 흙의 종류는 세립분의 양으로 보통 판단할 수 있다. 현장에서 간단하고 쉽게 세립분의 양을 판정하는 방법으로서는 흙을 물로 해니한 후 P로트 시험기로 그 점성을 조사하는 방법이나 사분측정기에 의한 방법 등이 있다.

4. 현장 적용성 평가 조건

가. 현장 플랜트의 제작

본 연구에서는 현장에서 유동화 처리토를 원활하게 제조하기 위해 유동화 처리토 현장 플랜트를 제작하였다. 현장 플랜트는 현장발생토와 고화재를 교반하는 믹서 부분과 안정된 품질의 현장발생토를 선별하는 선별기로 구분된다. 현장플랜트는 도심지에서 이동 가능한 일체식 플랜트로 현장에 반입과 반출이 용이하며, 안정된 품질의 유동화 처리토를 $10m^3/hr$ 제조할 수 있다.

(1) 토사 저장 및 공급 장치

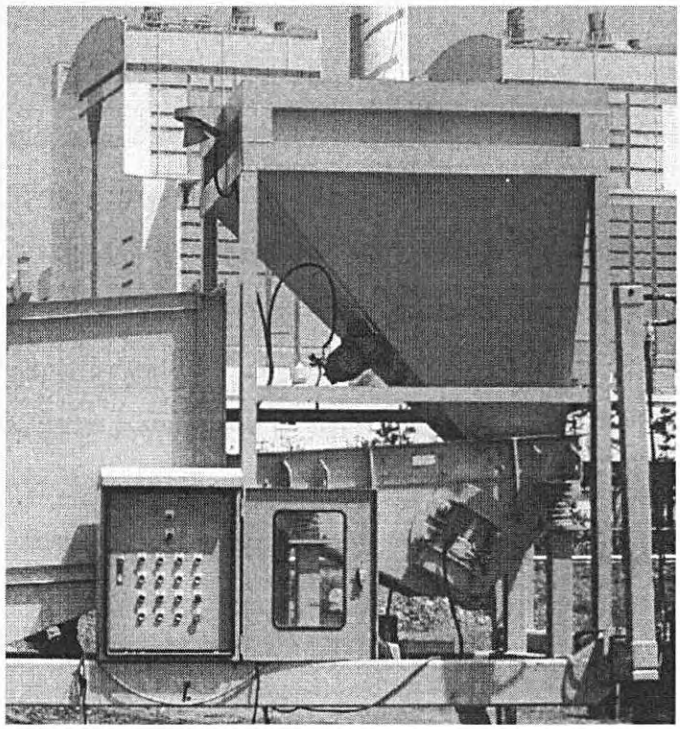


Fig. 3.5.17 토사 저장 및 공급 장치

토사 저장 및 공급 장치는 $2.5m^3$의 용량을 갖추었고 상부에는 체가름 스크린을 설치하여, 암반 및 큰 돌의 반입을 거름으로서 후속 공정의 파손을 방지 하였으며, Vibrator를 이용하여 토사의 적체 현상을 방지 하였다.

(2) 선별장치

선별 장치는 Fig. 3.5.18과 같으며, 원통형 스크린으로 투입된 토사를 회전시켜 토사를 선별한다. 스크린의 메쉬는 Ø16mm이고 하부 및 뒤쪽으로 분류 배출하며, 하부에 장착된 Vibrator를 이용하여 토사의 적체현상을 방지 하였다.

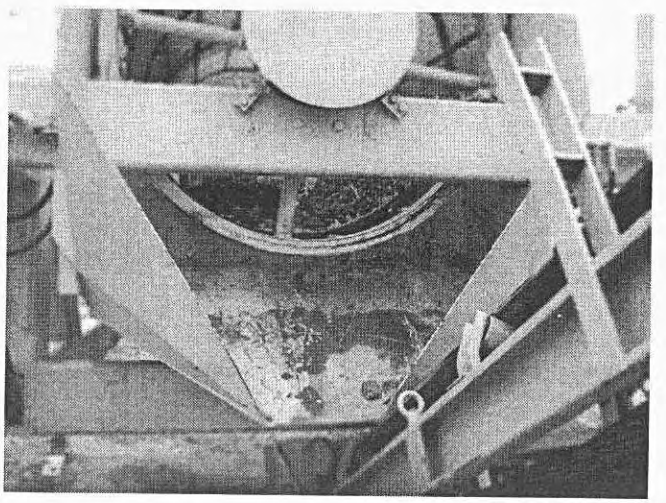
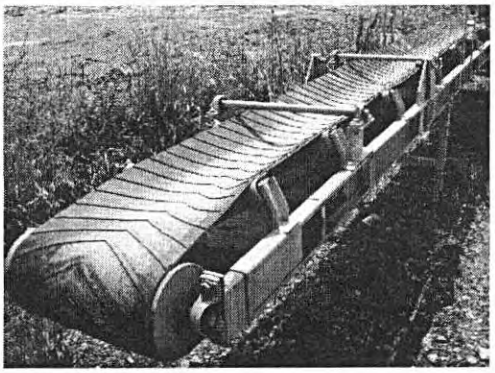


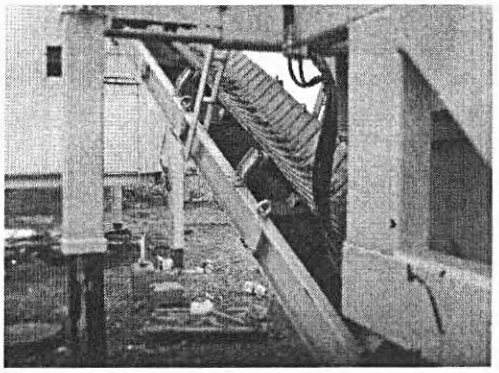
Fig. 3.5.18 선별장치

(3) 이송장치

이송장치는 Fig. 3.5.19에서 제시한 바와 같이 두 종류가 있다. 선별된 토사를 후속 공정인 배치 플랜트로 이송하는 이송장치1과, 선별 후 버려지는 자갈을 이송하는 이송장치 2로 2개 1조로 이루어졌으며, 컨베어 벨트 구동으로, 높은 경사 및 운송효율을 극대화 하기위해 콘센트 타입의 밸트를 적용하였다. 이송장치 1은 후속 공정인 배치 플랜트에 거치함으로서 고정을 하고, 이송장치 2는 자체 스텐드에 의해 위치를 고정한다. 이송장치 1, 2의 효율은 각각 $6m^3/hr$을 만족하도록 제작하였다.



(a) 이송장치1



(b) 이송장치2

Fig. 3.5.19 토사 이동 장치

(4) 제어반

제어반은 각 부분의 작동을 제어할 수 있는 구조이며, 현장의 외부 인입전원을 연결할 수 있는 단자와, 이송장치 1, 2의 연결을 쉽게 해주는 콘넥터 타입의 단자, 아웃트리거 조작박스 연결단자 등이 구성되어 있다. 모든 구성의 오작동을 방지하기 위하여 ON/OFF의 버튼을 분리하여 구성하였으며, 전원은 380V로 범용적인 사용이 가능하도록 제작하였다.

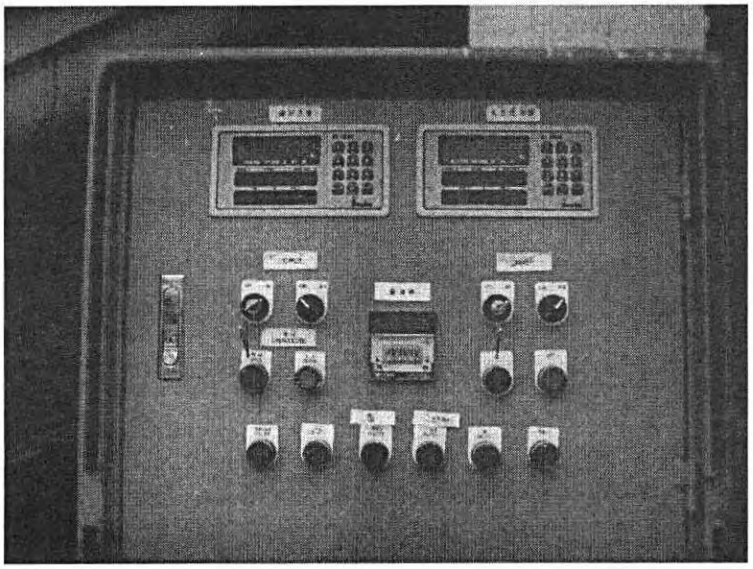


Fig. 3.5.20 제어반

(5) 믹서

믹서의 경우 2축 Pan Type으로 교반조 내부에서 2축이 자전 및 공전하는 구조로 되어있다. 상부에 구동력을 발생하는 모타와 2축의 자전 및 공전을 발생하는 Reducing part 및 Inner liner 및 Tip part로 구성되어 있다. 초기 구동력이 크고 고체 혼합물의 교반이 용이한 장점을 갖고 있다. 믹서의 교반성능은 $10m^3/hr$이다.

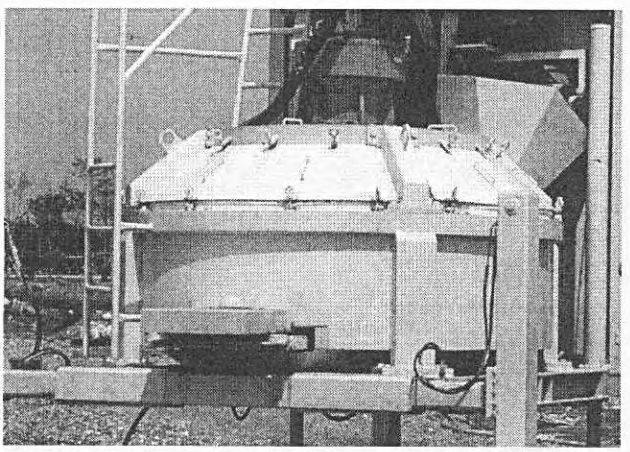


Fig. 3.5.21 믹서

Table 3.5.9와 3.5.5에서는 앞서 설명한 현장플랜트와 현장발생토 설별기의 사양을 정리 하였다.

Table 3.5.9 현장플랜트의 주요 사양

주요 장치	항목	사양
토사 저장 및 계량장치	용적	1.5m^3
	배출방식	베트 콘베이어
	1차 채가름	진동채
	계량방식	감산식 로드셀
고화재 저장 및 계량장치	용량	1,000kg
	배출방식	회전식 스크루
	계량방식	감산식 로드셀
물저장 및 계량장치	용량	1,400kg
	배출방식	물펌프
	계량방식	Flow meter
믹서	용적	1.0m^3
	형태	Fan type(2축 믹서)
	교반 성능	10m^3/hr
	사용 전원	220/380V

Table 3.5.10 현장발생토 선별기의 주요 사양

주요 장치	항목	사양
토사 저장 및 공급 장치	용 적	2.5m^3
	배출방식	자유낙하/Vibrator
정량 공급 저장	용 량	6m^3/hr
	배출방식	Vibro-Feeder
선별장치	사 양	메쉬경 Ø16mm
	선별방식	원통 스크린
이송장치	능 력	각 6m^3/hr
	배출방식	벨트 컨베어
	사용 전원	220/380V

나. 대상 구조물 선정

유동화 처리토는 다짐채움재로써 뒤채움, 시설물 베딩(bedding), 공동충전, 교량의 접속부에 적용 가능하다. 뒤채움은 벽의 뒤채움, 하수관거 트렌치, 교량 교대, 관로 트렌치, 파이프 굴착 그리고 옹벽과 같은 곳에 적용할 수 있으며, 공동충전의 적용으로 하수관, 터널 축, 기초 또는 도로 기층, 진흙 압출, 하부 기초 그리고 건물 바닥기초와 같은 다른 지하 구조물의 채움에 적용할 경우 그 효과를 기대할 수 있다고 판단된다. 이에 본 연구에서는 다음의 2가지 구조물을 선정하여 유동화 처리토의 현장 적용성 평가를 실시하였다.

(1) 1연 암거

배수로 암거(우수, 오수), 도로 암거(인도, 차도), 전신 전화용 암거(전기, 통신), 지하공동구(온·냉관로, 전기, 전화), 방공호 및 교통호(방폭, 방탄), 저장창고(농·수산물 기타) 등 용도가 매우 폭 넓은 지중 매설 구조물이다. 일반적인 1연암거는 Fig. 3.5.22에서 사진과 상세도로 보여준다. P.C 공법으로 조인트 개소의 최적화와 제품의 고품질을 실현할 수 있고, 기본 단면을 일체화하고 내·외부의 하중을 받을 수 있도록 처리하여 내적·외적 안정성을 확보할 수 있다. 제작과 조립을 병행 시공하여 전체 공사기간이 단축되고 현장관리비 및 가설비가 절감되고, 규격화된 제품의 대량생산과 시공으로 경제성이 양호하다. Table 3.5.11에 1연 암거의 규격을 제시하였다. 본 현장 시험 시공에서는 B600xH600의 1연 암거를 사용하였다.

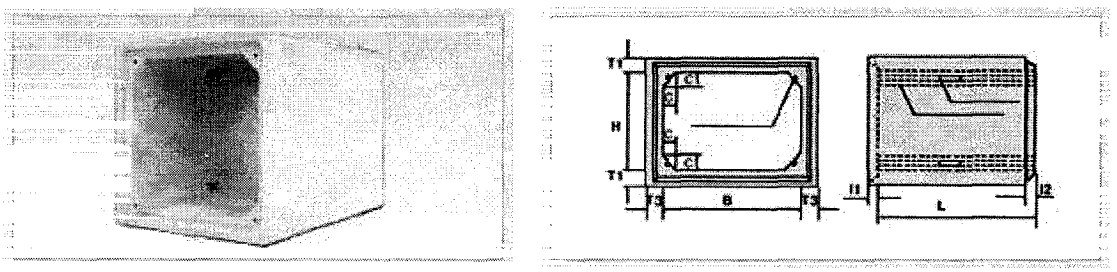


Fig. 3.5.22 1연 암거의 사진 및 상세도

Table 3.5.11 1연 암거의 규격

호칭치수	바깥나비 (mm)	바깥높이 (mm)	유효길이 (mm)	두께 (mm)			헌치높이 (mm)	삽입구 (mm)	수구 (mm)	참고중량 (kg/본)
BxH	B0	H0	L	T1	T2	T3	C	L1	L2	
600x600	680	860	2000	130	130	130	100	60	40	2000
700x700	960	960	2000	130	130	130	100	60	40	2260
800x800	1060	1060	2000	130	130	130	100	60	40	2520
900x600	1160	860	2000	130	130	130	100	60	40	2390
900x900	1160	1160	2000	130	130	130	100	60	40	2780
1000x800	1260	1060	2000	130	130	130	150	60	60	2900
1000x1000	1260	1260	2000	130	130	130	150	60	60	3160
1000x1500	1260	1260	2000	130	130	130	150	60	60	3810
1100x1100	1360	1360	2000	130	130	130	150	60	60	3420
1200x800	1460	1060	2000	130	130	130	150	60	60	3160
1200x1000	1460	1260	2000	130	130	130	150	60	60	3420
1200x1200	1460	1460	2000	130	130	130	150	60	60	3680
1200x1500	1460	1760	2000	130	130	130	150	60	60	4070
1300x1300	1560	1580	2000	140	140	130	150	60	60	4100
1400x1400	1660	1700	2000	150	150	130	150	60	60	4540
1500x1000	1780	1320	2000	160	160	130	150	60	60	4470
1500x1200	1780	1520	2000	160	160	140	150	60	80	4750
1500x1500	1780	1820	2000	160	160	140	150	60	80	5170
1800x1200	2100	1540	2000	170	170	140	150	80	80	5600
1800x1500	2100	1840	2000	170	170	150	150	80	80	6050
1800x1800	2100	2140	2000	170	170	150	150	80	80	6500
2000x1500	2320	1860	2000	180	180	150	200	80	80	6980
2000x1800	2320	2160	2000	180	180	160	200	80	80	7460
2000x2000	2320	2360	2000	180	180	160	200	80	80	7780

(2) 파형강관

파형강관은 하중 및 반력이 관둘레에 균등하게 분포되어 내하력이 커서 수로, 통로, 기타 각종 구조물에 사용된다. 파형강관은 경량으로 취급이 용이하므로 조립과 시공 모두 간단하며 경제적이다. 또한 용융아연도금 강판을 사용하기 때문에 부식에 강하고 수명이 긴 장점이 있다. Table 3.5.12에서 제시된 규격으로 제조 되며, 본 현장 시험 시공에서는 ϕ300의 파형강관을 사용하였다.

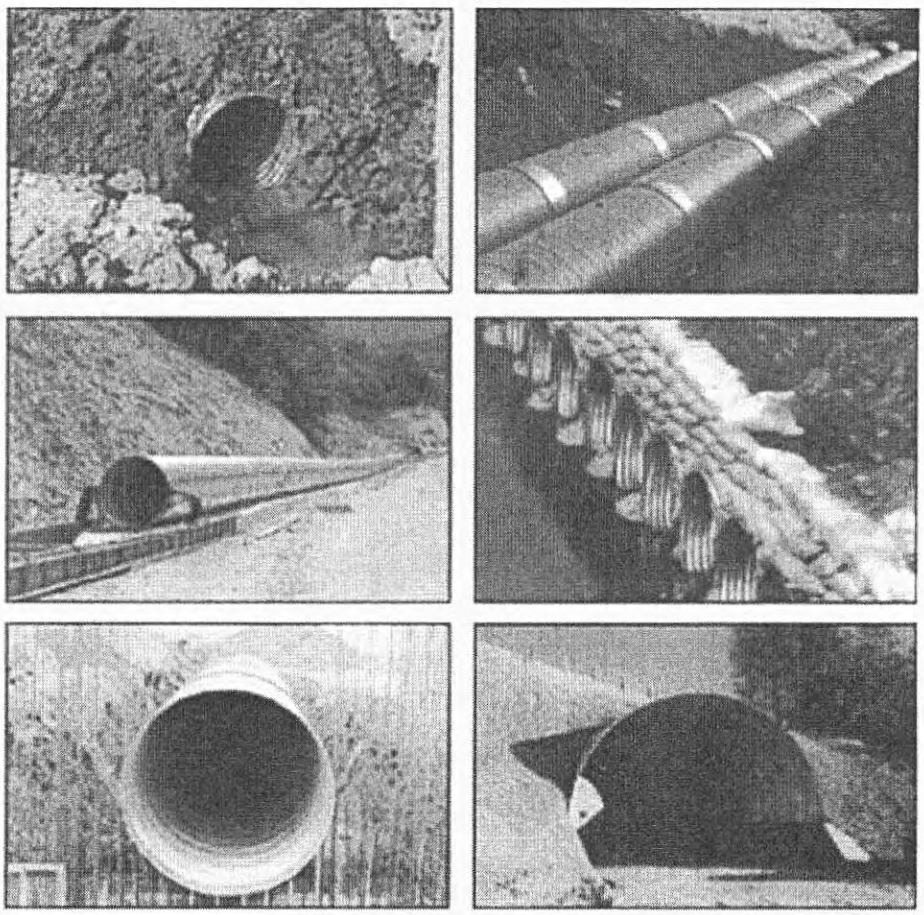


Fig. 3.5.23 파형강관의 사진

Table 3.5.12 파형강관의 규격 및 단위중량 (kg/cm)

두께 / 직경	1.6	2.0	2.7	3.2	4.2
ϕ200	9.7				
ϕ250	11.9				
ϕ300	17.0				
ϕ350	18.7	23.0			
ϕ400	21.4	26.3			
ϕ450	23.1	29.3			
ϕ500	26.4	32.3			
ϕ600	30.8	38.5	50.5		
ϕ700	34.5	43.2	56.9		
ϕ800	39.4	49.3	65.0	75.5	
ϕ900	44.7	55.5	72.8	85.0	
ϕ1000	49.9	62.1	80.7	94.0	123.3
ϕ1100	54.9	67.8	88.5	103.4	135.5
ϕ1200	58.6	74.0	96.6	112.4	147.6
ϕ1500	69.9	87.0	120.4	141.2	183.7

다. 평가 조건

본 연구에서는 현장 시험 시공 부지를 대상구조물과 토질 조건에 따라 3개의 Section으로 나누어 현장 시험 시공을 실시하였다. 현장 적용성 평가의 조건을 Table 3.5.13에 제시하였다. 대상구조물과 토질 조건에 따라 나뉘어진 3개의 Section에는 1차년도 실내 실험 결과 효율이 가장 좋았던 C-10 고화재를 사용하여 현장 시험 시공을 실시하였다. 본 실험을 통해 대상구조물의 차이에 따른 영향과 현장발생토와 석탄회의 차이에 따른 영향을 비교, 분석하였다.

Table 3.5.13 현장 적용성 평가 조건

	구조물	적용토	공법	고화재
Section A	1연 암거	현장발생토	유동화 처리공법	C-10(G사)
Section B	파형강관	현장발생토		
Section C		현장발생토+석탄회		

라. 현장 적용성 평가의 부지 배치

대상 현장 적용성 평가 부지는 3개의 Section으로 나누고 Section과 Section 사이의 거리를 5m로 하여 각각의 Section에 시공이 용이하도록 하였다. 또한 기존의 현장발생토를 적재할 수 있는 장소를 마련하여 현장발생토를 다른 곳으로 이동하지 않고 바로 현장에서 유동화 처리토에 적합한 시료만을 선별할 수 있도록 하였다. 현장 실험실을 설치하여 현장토와 배합된 유동화 처리토의 유동성, 블리딩율, 일축압축강도, 습윤밀도 등을 파악하여 현장 타설의 적합 여부를 판정하였다. Fig. 3.5.24는 본 현장 시험 시공의 부지 배치도를 나타낸 것이다. Fig. 3.5.25는 각 Section의 부지 상세도이다.

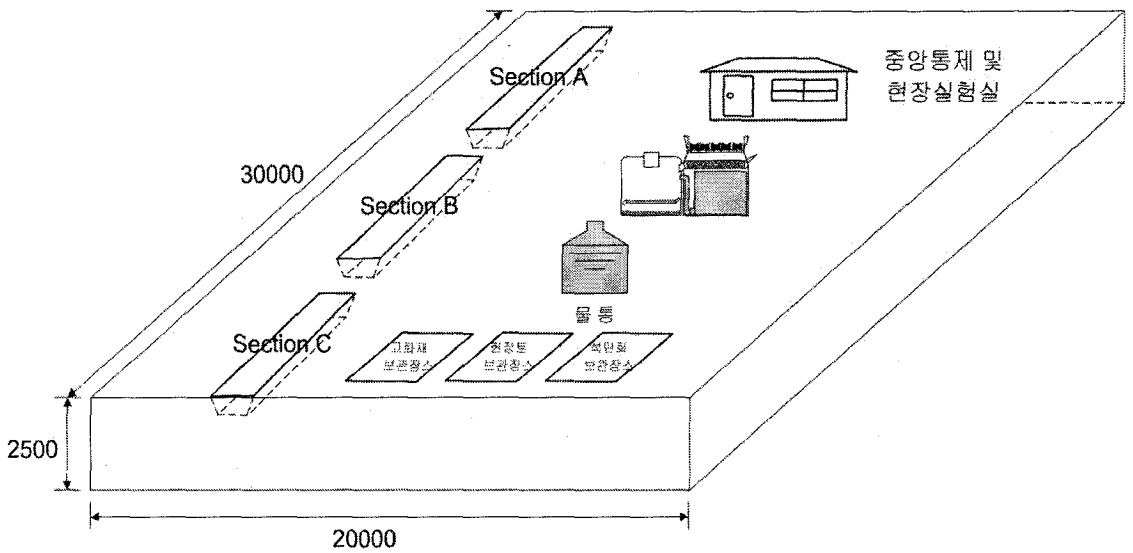


Fig. 3.5.24 본 현장 시험 시공의 부지 배치도 (단위 : mm)

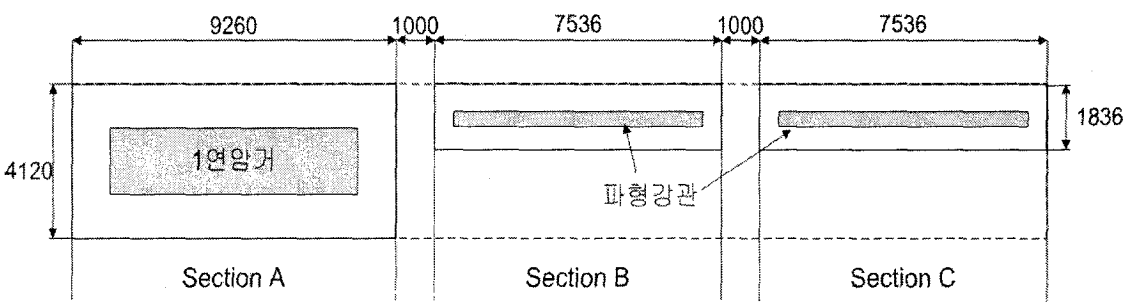


Fig. 3.5.25 각 Section의 부지 상세도 (단위 : mm)

마. 터파기

(1) 터파기의 기울기 및 여유폭 (주택건설전문시방서-토목공사, 2004)

터파기 공사의 비탈면 기울기 및 여유폭은 다음 기준 이상을 만족해야 하며, 토질과 지하수위 등 현지여건에 따라 안식각이 확보되도록 조정, 시행하여야 한다.

Table 3.5.14 중·소형 구조물 (맨홀, 관거 등)

구분	3m 미만		3~5m 미만		5m 이상	
	기울기	여유폭	기울기	여유폭	기울기	여유폭
암반	1 : 0.1	0.3	1 : 0.1	0.3	1 : 0.1	0.3
보통지반	1 : 0.3	0.3	1 : 0.3	0.3	1 : 0.3	0.3
무너지기 쉬운 지반	1 : 0.5	0.3	1 : 0.5	0.3	1 : 0.5	0.3

Table 3.5.15 대형 연속 구조물 (공동구, 암거, 옹벽 등)

구분	3m 미만		3~5m 미만		5m 이상	
	기울기	여유폭	기울기	여유폭	기울기	여유폭
암반	1 : 0.1	0.6	1 : 0.1	0.6	1 : 0.1	0.7
보통지반	1 : 0.5	0.6	1 : 0.5	0.6	1 : 0.5	0.7
무너지기 쉬운 지반	1 : 0.6	0.6	1 : 0.6	0.6	1 : 0.7	0.7

(2) 각종 관로의 매설심도 (주택건설전문시방서-토목공사, 2004)

각종 관로의 매설심도는 특별한 지시가 없는 한 다음 두께 이상의 토피를 가져야 한다.

Table 3.5.16 오수, 우수관의 토피

최소토피	동결심도 + 15cm 이상
도로부분	관상단 + 1.2m 이상
보도 및 녹지	관상단 + 1.0m 이상
연락관	관상단 + 0.6m 이상

Table 3.5.17 상수관의 토피

최소토피	동결심도 + 15cm 이상
도로 및 기타부분	관상단 + 1.0m 이상

(3) 기초공 (하수도 시설기준, 2005)

기초공의 종류는 관의 종류와 지반의 토질, 하중조건에 따라 달라지며, 관거의 부등침하는 하수의 정체, 부패 및 악취를 발생시키는 원인이 되므로 기초공은 특히 중요하다.

Table 3.5.18 관종에 따른 기초

관종		경질토 보통토	연약토	극연약토
강성관	철근콘크리트관	벼개동목기초 쇄석기초 모래기초	콘크리트기초	말뚝기초 철근콘크리트기초
	토관	벼개동목기초 쇄석기초 모래기초	쇄석기초 콘크리트기초	철근콘크리트기초
연성관	경질염화비닐관	모래기초	모래기초 베드토목섬유기초 쏘일시멘트기초	베드토목섬유기초 쏘일시멘트기초 사다리동목기초 말뚝기초 콘크리트+모래기초
	닥타일주철관, 강관	모래기초	모래기초	모래기초 사다리동목기초 콘크리트+모래기초

Table 3.5.19 지반의 구분 예

지반	대표적인 토질
경질토	경질점토, 역혼토 및 역혼사
보통토	모래, 롬(loam) 및 사질점토
연약토	실트 및 유기질토
극연약토	매우 연한 실트 및 유기질토

(4) 현장 적용성 평가에서의 터파기

(가) 1연 암거

현장 시험 시공에 사용하는 암거의 크기는 내부 폭과 내부 높이가 0.6m이다(바깥 폭과 바깥 높이는 0.86m). 상부 토층은 1m, 지반은 보통토로 가정하고, 유동화 처리토를 기초로 사용한다. 관 하부로부터 0.2m 깊이까지 기초를 포설하면, 전체 높이는 2.06m이다. 따라서 여유폭은 0.6m, 비탈면 기울기는 1 : 0.5가 된다. Fig. 3.5.26과 3.5.27에 1연 암거의 터파기 상세도를 나타냈다.

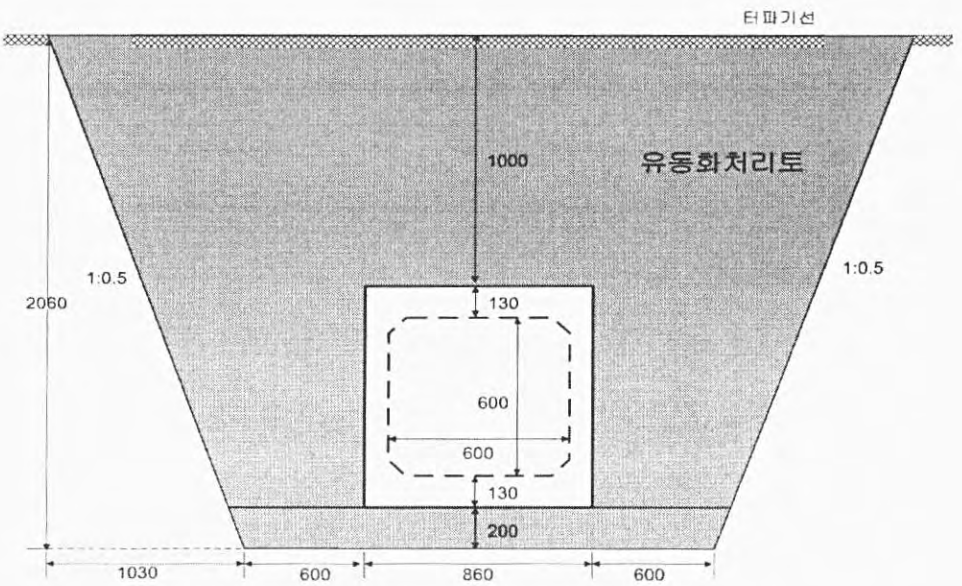


Fig. 3.5.26 1연 암거의 터파기 상세도 (정면도) (단위 : mm)

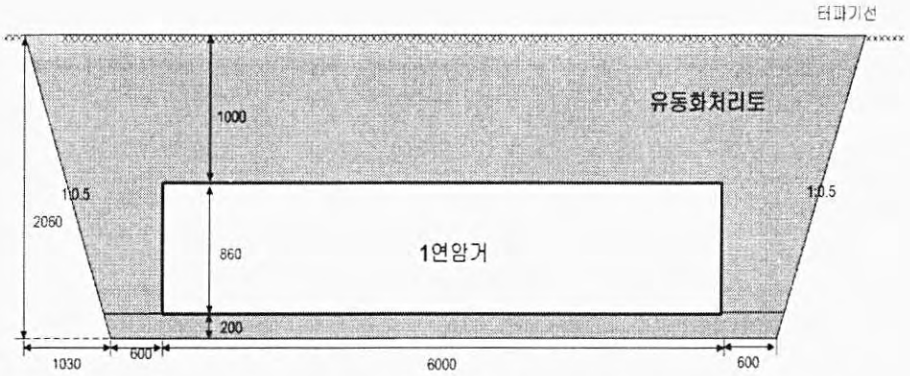


Fig. 3.5.27 1연 암거의 터파기 상세도 (측면도) (단위 : mm)

1연 암거를 사용하여 현장 적용성 평가를 실시하면서 발생한 터파기량, 기초량, 기초 상부 유동화 처리토량 등은 Table 3.5.20에 제시한 것과 같다.

Table 3.5.20 1연 암거에서의 물량 계산

항 목	단위	값
터파기 전체 단면적	m^2	6.365
암거 단면적	m^2	0.740
기초 단면적	m^2	0.432
기초 상부 유동화 처리토 단면적	m^2	5.194
터파기 전체부피	m^3	48.017
암거 부피	m^3	4.437
기초 부피	m^3	3.131
기초 상부 유동화 처리토 부피	m^3	40.448

(나) 파형강관

안지름 0.3m의 파형강관(외경 0.316m)을 사용하였다. 상부 토층은 1m, 지반은 보통토로 가정하고, 기초의 형태를 유동화 처리토 기초로 하였다. 관 하부로부터 0.2m 깊이까지 유동화 처리토 기초를 포설하면, 전체 높이는 1.56m이다. 따라서 여유폭은 0.3m, 비탈면 기울기는 1 : 0.3이 된다. Fig. 3.5.28과 3.5.29에 파형강관의 터파기 상세도를 나타냈다.

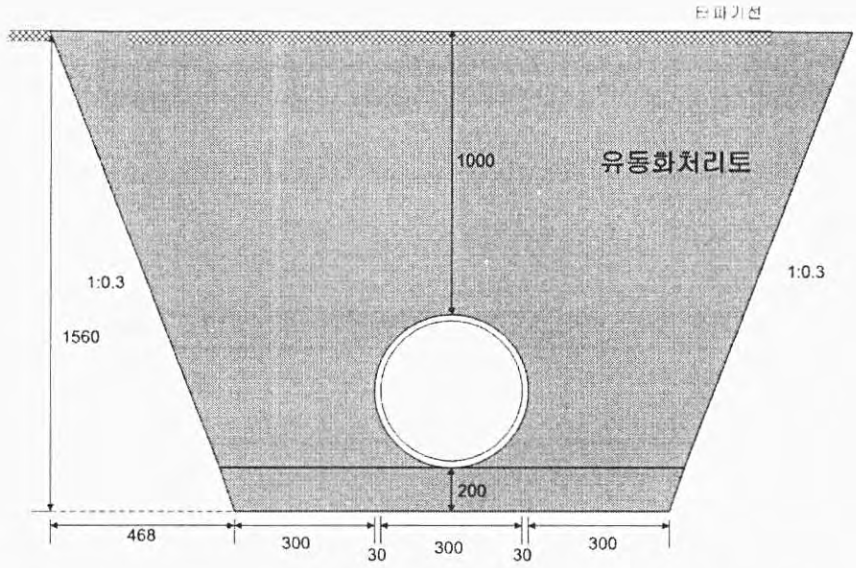


Fig. 3.5.28 파형강관의 터파기 상세도 (정면도) (단위 : mm)

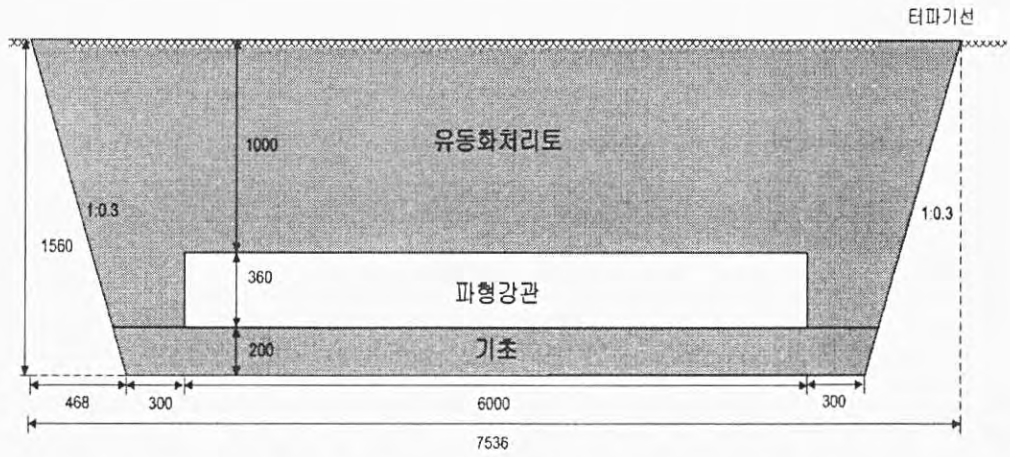


Fig. 3.5.29 파형강관의 터파기 상세도 (측면도) (단위 : mm)

파형강관을 사용하여 현장 시험 시공을 실시였으며, 발생한 터파기량, 기초량, 기초 상부 유동화 처리토량 등은 Table 3.5.21에 제시한 것과 같다.

Table 3.5.21 파형강관에서의 물량 계산

항 목	단위	값
터파기 전체 단면적	m^2	2.228
파형강관 단면적	m^2	0.102
기초 단면적	m^2	0.204
기초 상부 유동화 처리토 단면적	m^2	1.922
터파기 전체부피	m^3	15.40
파형강관 부피	m^3	0.612
기초 부피	m^3	1.364
기초 상부 유동화 처리토 부피	m^3	13.432

(다) 매설

위에서 제시한 단면으로 터파기를 행하였다. 터파기를 한 각각의 Section에 대상 구조물인 1연암거와 파형강관을 매설 하였다. 1연암거와 파형강관은 구조물의 양쪽 말단을 통해 타설한 유동화 처리토가 유입되는 것을 차단하기 위해 양쪽 끝은 밀봉하였다.

(5) 유동화 처리토 타설시의 부력에 대한 검토

유동화 처리토를 타설할 경우, 부력이 발생하여 구조물에 영향을 줄 수 있기 때문에 유동화 처리토의 타설 심도에 따른 부력의 영향을 고려해야 한다.

(가) 1연 암거

Fig. 3.5.30과 같이 모래 기초 위에 1연 암거를 올려놓은 후 유동화 처리토를 h 높이로 타설할 때의 부력과 1연 암거 자중과의 관계를 파악하여 부력에 대한 안정성을 검토하였다.

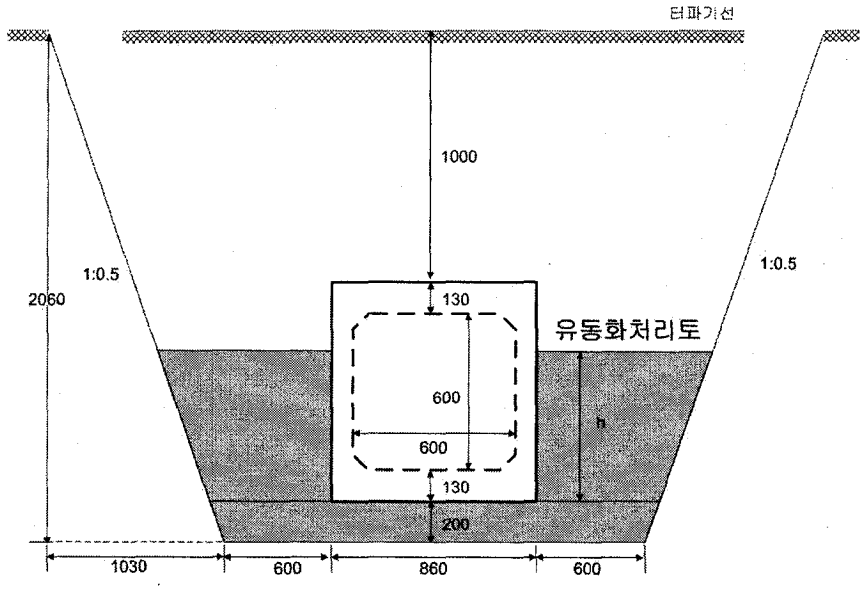


Fig. 3.5.30 1연 암거 설치 후 유동화 처리토 타설에 따른 부력 (단위 : mm)

$$f = \gamma_f \times A \times L = \gamma_f \times (B \times h) \times L \tag{4.1}$$

여기서, f = 부력

γ_f = 유동화 처리토의 단위중량($1.67g/cm^3$)

A = 유동화 처리토 타설 높이에 따른 암거 내부의 단면적

B = 암거의 폭

h = 타설높이 h

L = 암거의 전체 길이

위의 식(4.1)을 통해 1연 암거의 부력에 대한 안정성을 검토할 수 있다.

높이 h에서의 부력 : $f = 1.67 \times (0.6 \times 0.6) \times 6 = 3.406t$

암거의 전체 무게 : $2000kg \times 6m \div 2m = 6000kg = 6t$

유동화 처리토의 단위중량을 $1.67t/m^3$으로 하였을 때, 본 시공 계획도에서의 유동화 채움재를 채웠을 때 발생할 수 있는 최대 부력이 3406kg(약 3.4ton)이다.

1연 암거 1개의 무게는 2ton이고 길이는 2m이기 때문에 전체 6m 구간에 설치되

는 암거는 3개이고, 이에 해당하는 무게는 6ton이다. 따라서 부력에 대해 안전하기 위해서는 부력이 6ton을 초과해서는 안 된다. 1연 암거 전체의 무게가 최대 부력보다 크므로 부력에 대해서 안전하다고 판단된다. 타설 높이에 상관없이 부력에 대해 안전하다. Table 3.5.22는 타설높이에 따라 발생하는 부력이며, 최대 부력이 발생하는 높이는 0.73mm이다.

Table 3.5.22 유동화 처리토의 타설 높이에 따른 1연 암거의 부력

타설높이 (mm)	130	230	330	430	530	630	730
부력 (kg)	0	501	1,102	1,703	2,305	2,906	3,407

(나) 파형강관

Fig. 3.5.31과 같이 모래 기초 위에 파형강관을 올려놓은 후 유동화 처리토를 h 높이로 타설할 때의 부력과 파형강관의 자중과의 관계를 파악하여 부력에 대한 안정성을 검토하였다.

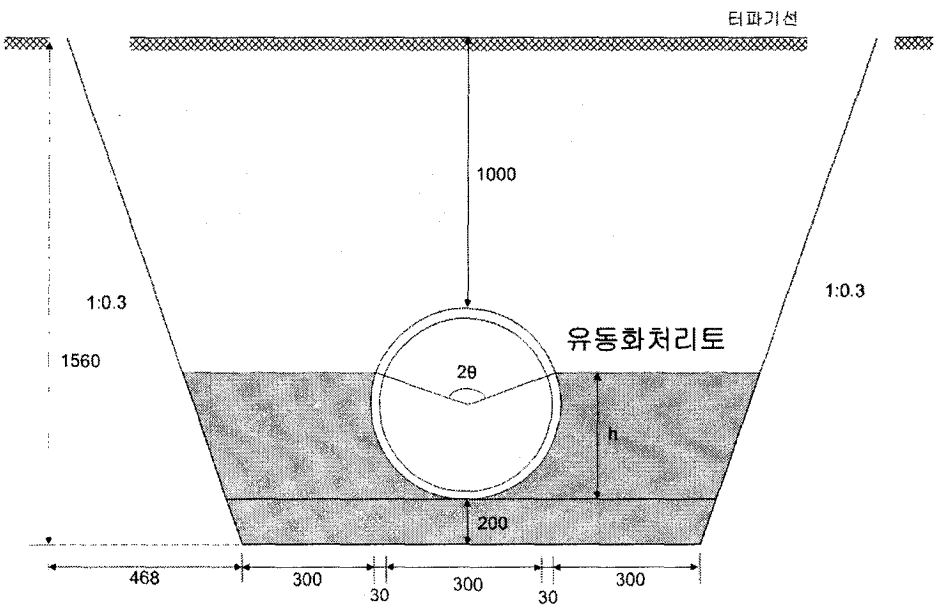


Fig. 3.5.31 파형강관 설치 후 유동화 처리토 타설에 따른 부력 (단위 : mm)

$$f = \gamma_f \times A \times L = \gamma_f \times (\pi r^2 \times \frac{360 - 2\theta}{360} + r\cos\theta \times r\sin\theta) \times L \quad (4.2)$$

여기서, f = 부력

γ_f = 유동화 처리토의 단위중량

A = 유동화 처리토 타설 높이에 따른 파형강관 내부의 단면적

r = 파형강관의 반경

θ = 타설높이 h에서의 사잇각

L = 파형강관의 전체 길이

위의 식(4.2)를 통해 파형강관의 부력에 대한 안정성을 검토할 수 있다.

높이 h에서의 θ : $\theta = \cos^{-1}(\frac{h + 0.175 - r}{r})$

발생할 수 있는 최대 부력은 파형강관의 첨단부까지 유동화 처리토를 채웠을 때 (h=360mm, θ가 0일 때)이다.

$$f = 1.67 \times (\pi \times 0.3^2 \times \frac{360 - 2 \times 0}{360} + 0.3 \times \cos\theta \times 0.3 \times \sin\theta) \times 10 = 1.180t$$

파형강관의 전체 무게 : $17kg/m \times 6m = 102kg$

파형강관 전체의 무게가 발생할 수 있는 최대 부력보다 작으므로 부력에 대해 파형강관은 안전하지 못하다. 따라서 타설 높이에 따라 발생하는 부력을 표로 작성하여 안정성을 고려한 타설 높이를 설정하였다.

파형강관의 단위길이당 무게는 17kg이고, 사용길이는 6m이다. 따라서 파형강관에 해당하는 전체 무게는 102kg이다. 파형강관이 안전하기 위해서 부력은 102kg을 초과해서는 안된다. 유동화 처리토의 단위중량을 1.67t/m^{3}으로 하였을 때, 본 시공 계획도에서의 부력은 유동화 처리토의 타설 높이에 따라 Table 3.5.23과 같다. 타설 높이가 90mm까지 부력에 대해 안전하다고 할 수 있으나, 안전을 고려하여 타설높

이를 80mm까지 1차 타설하고, 4시간 경과 후 160mm까지 2차 타설한 후 최종적으로 마무리 타설을 하였다.

Table 3.5.23 유동화 처리토의 타설 높이에 따른 부력

타설높이 (mm)	80	90	100	110	120	130
부력 (kg)	77.496	110.737	1235.485	151.501	178.576	206.527

바. 현장 시험 시공 절차

(1) 유동화 처리토 시험 시공 공정

유동화 처리토의 현장 시험 시공을 위해 Fig. 3.5.32와 같이 충청남도 태안 화력발전소 안에 시험시공 부지를 확보하였다.

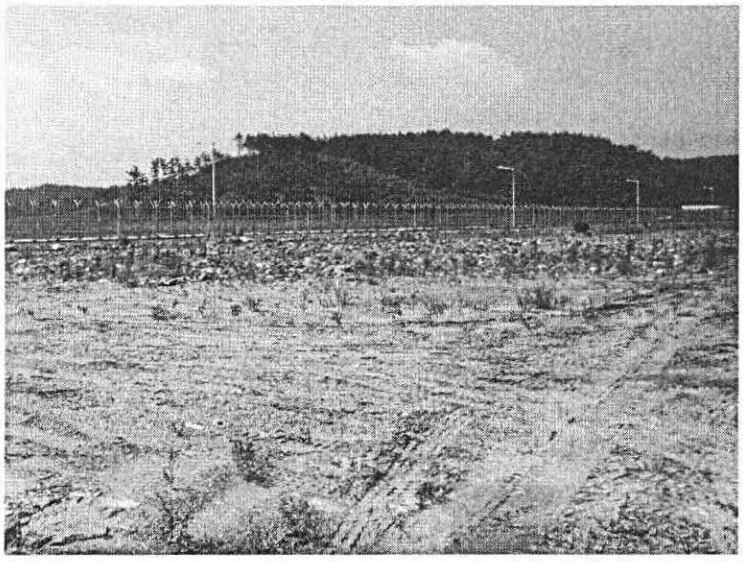
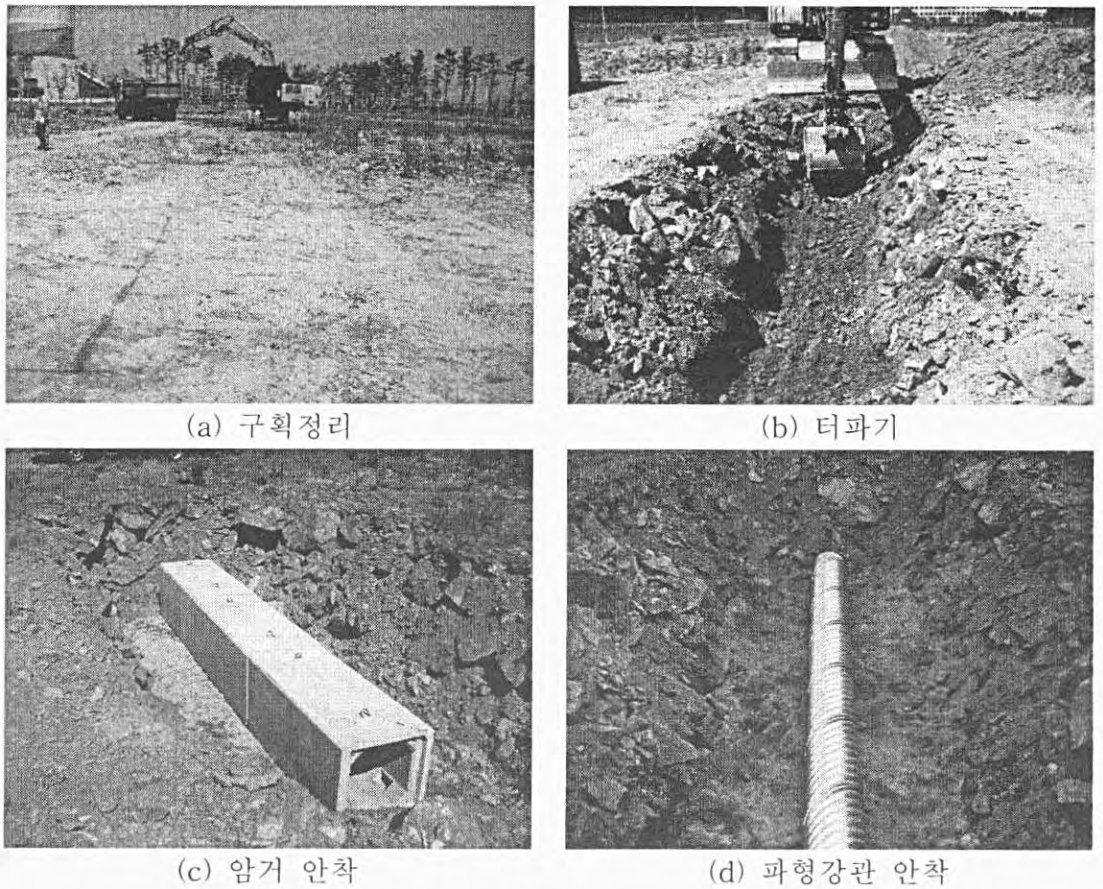


Fig. 3.5.32 현장 시험 시공 부지 전경

확보된 부지에 계획했던 도면을 따라 백호를 이용하여 구획정리 및 각 Section의 터파기를 시행하였다. 발생한 현장토를 덤프트럭을 이용하여 미리 정해두었던 발생

토 보관 장소에 이동, 보관하였다. 세구역의 터파기를 일괄적으로 시행하였으며 1연암거와 파형강관을 매설하기에 앞서 기초공을 행하였다. Fig. 3.5.33에서 터파기 및 구조물 안착의 과정을 단계별로 보여주고 있다.

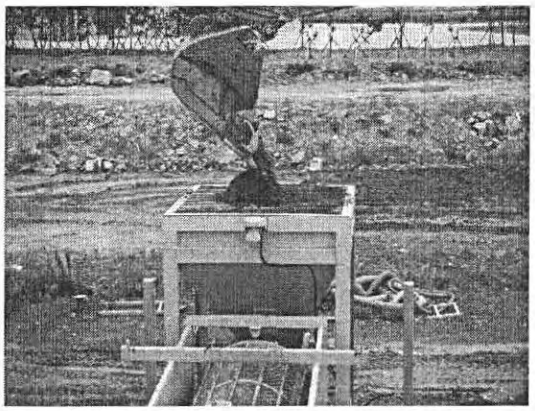


(a) 구획정리 (b) 터파기

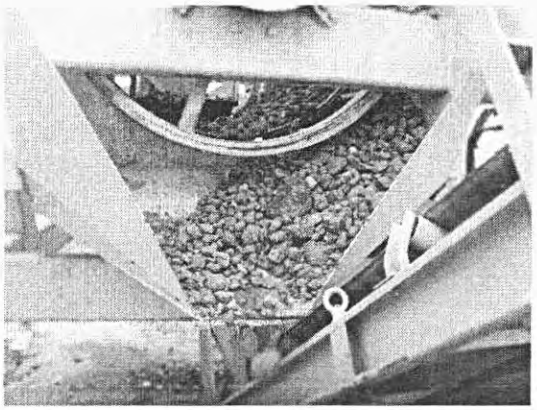
(c) 암거 안착 (d) 파형강관 안착

Fig. 3.5.33 터파기 및 구조물 안착

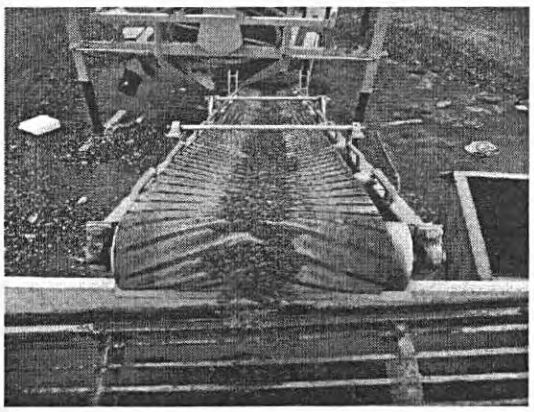
유동화 처리토를 제작하기 위해서는 우선적으로 현장발생토를 선별하여야 한다. 선별 장치의 원통형 스크린에서 투입된 토사를 회전시켜 토사를 선별하였다. 스크린의 메쉬는 Ø16mm로 선별을 하며, 하부 및 뒤쪽으로 분류 배출한다. 발생토에 이물질이 함유되지 않도록 제거 하였다. 선별된 발생토는 이송장치를 이용하여 배치플랜트에 저장하였다. Fig. 3.5.34는 현장발생토를 선별하고 이송하여 저장하는 일련의 과정을 보여주고 있다.



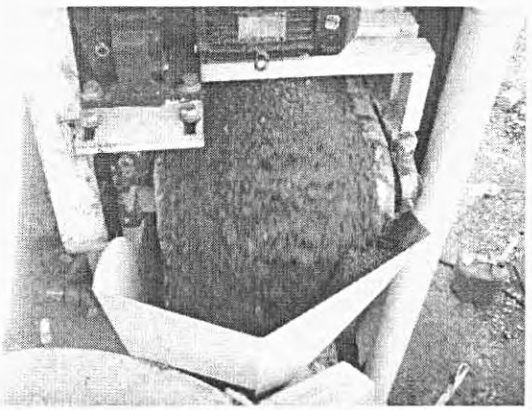
(a) 토사 투입



(b) 현장발생토 선별



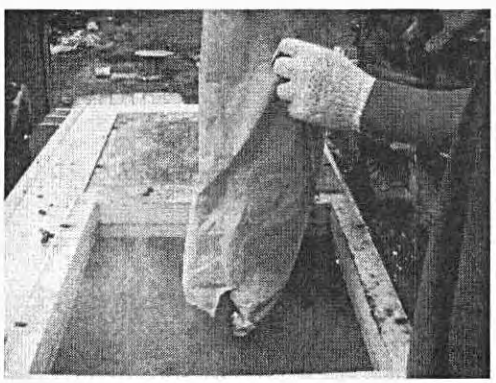
(c) 선별된 토사의 이동



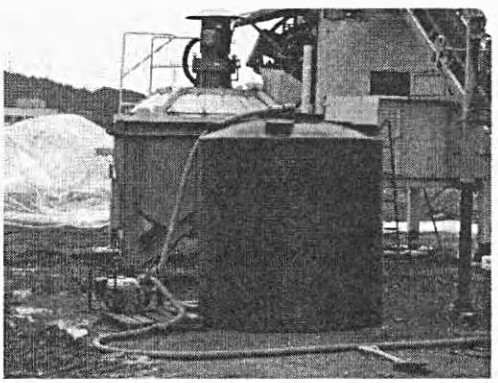
(d) 선별된 토사의 저장

Fig. 3.5.34 현장발생토의 선별과 저장

선별된 토사를 저장한 다음에 유동화 처리토 제작에 필요한 고화재와 물을 충분히 저장하여 믹서기를 작동시켜 유동화 처리토를 제작하는데 차질이 없도록 하였다.



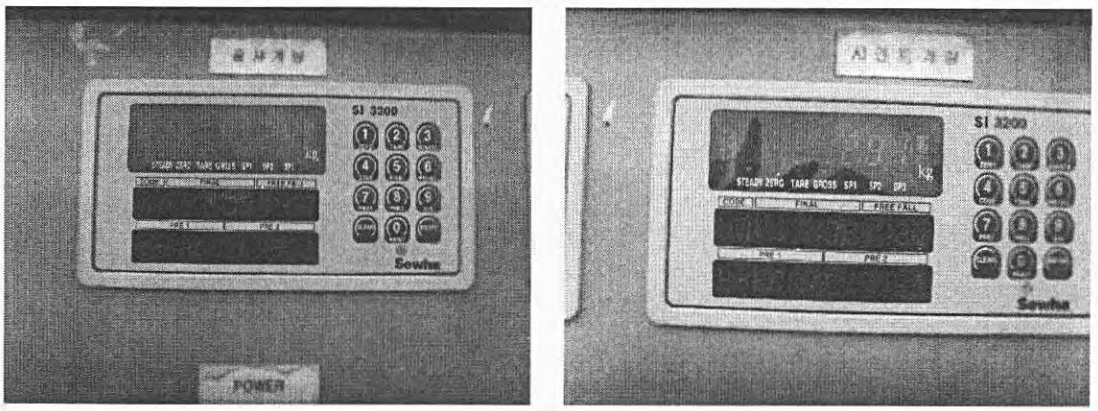
(a) 고화재 투입



(b) 급수

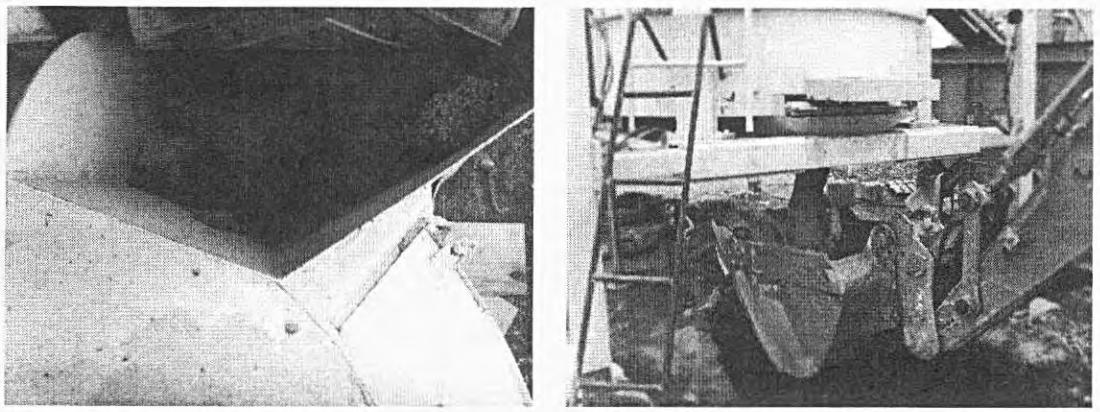
Fig. 3.5.35 고화재 및 물 저장

Section A와 B는 현장발생토만을 이용하여 유동화 처리토를 제작하였다. 이 구역의 시공에 사용될 유동화 처리토의 최적 배합비를 Fig. 3.5.36과 같이 제어반에 입력하였다. 제어반에 전체 발생토량과 고화재량을 확인하여 재료가 부족하지 않게 하였다. 입력된 배합비대로 Fig. 3.5.37(a)에서처럼 믹서에서는 교반이 진행이 되고, 제작된 유동화 처리토는 Fig. 3.5.37(b)와 같이 플랜트 하부로 배출되게 된다.



(a) 골재량 입력 (b) 고화재량 입력

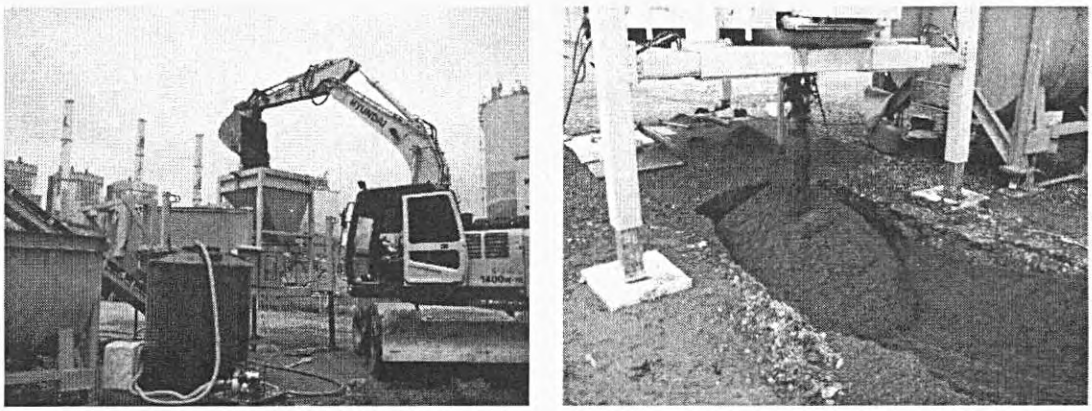
Fig. 3.5.36 제어반에 최적 배합비 입력



(a) 최적 배합비로 교반 (b) 유동화 처리토 생산

Fig. 3.5.37 유동화 처리토의 교반과 제작

Section C의 경우 현장발생토와 석탄회를 50:50 비율로 하여 유동화 처리토를 제작하였다. 석탄회가 첨가된 유동화 처리토를 제작하기 위해서 믹서의 1회 교반량 분량으로 현장발생토와 석탄회를 저장하여 제작하였다. 우선 현장발생토를 앞서 제시한 선별과정을 거쳐 저장을 한 후 석탄회를 선별장치에 투입하여 선별장치를 통하여 이송 시켰다. 저장된 현장발생토와 석탄회를 앞의 과정과 같이 제어반에 배합비를 입력하고 교반시켜 유동화 처리토를 제작하였다. Fig. 3.5.38에 석탄회를 투입하는 모습과 제작된 유동화 처리토를 제시하였다.



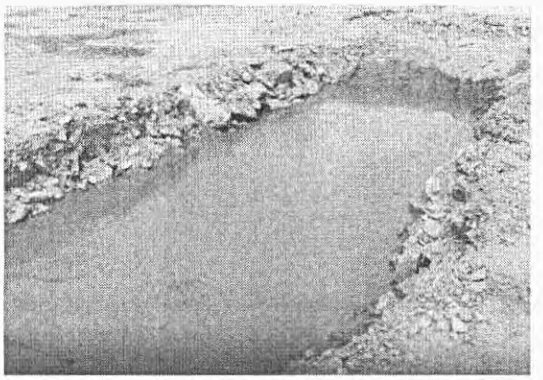
(a) 석탄회 투입　　(b) 석탄회를 이용한 유동화 처리토 제조

Fig. 3.5.38 Section C에 타설할 유동화 처리토 생산

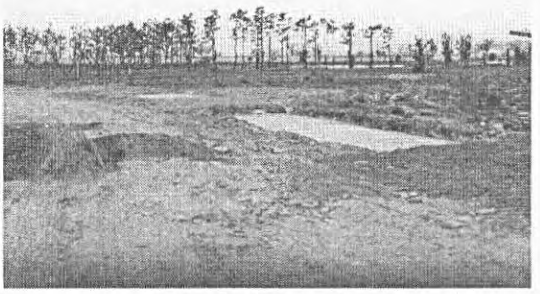
이렇게 제작된 유동화 처리토는 앞서 제시한 부력을 고려하여 Fig. 3.5.37(a)와 같이 최대부력이 발생하는 높이까지 타설하였고, 4시간 경과 후 재타설하였다. 타설을 완료한 이후 최상부 타설면을 마감정리를 하였다. 시공을 완료하고 주변 구역들을 정리 하였다. 타설 4시간의 후의 유동화 처리토는 Fig. 3.5.39(d)에서 보여주듯이 사람이 서있을 정도의 강도를 보여준다.



(a) 유동화 처리토 타설



(b) 타설완료



(c) 타설 후 전경



(d) 타설 4시간 후의 양생 상태

Fig. 3.5.39 유동화 처리토 타설과 마감정리

사. 현장 시험 시공 품질 검사

현장 적용시 유동화 처리토의 유동성에 대한 품질 검사를 실시하여 품질 기준에 만족하는 경우에만 시공을 한다. 유동화 처리토는 구조물의 뒷채움 및 충전재로서 사용되므로 그 품질은 안정되고 균질하게 관리되어야 한다. 유동화 처리토의 품질 관리는 대표적으로 다음의 4가지로 한다.

① 블리딩율
② 습윤밀도 (유동화 처리토의 밀도)
③ 유동성
④ 일축압축강도

4개의 품질관리를 지정된 횟수대로 실험을 실시하여 현장발생토, 고화재, 물의 양을 결정하여 유동화 처리공법의 배합설계를 한다. 일반적으로 고화 처리토 배합설계가 일축압축강도만을 품질 기준으로 규정하고 있는데, 이에 비해 습윤밀도 등 3개의 품질 실험을 추가로 실시하기 때문에 기존의 토질 안정 처리 방법보다 더 엄격한 기준이 적용된다고 할 수 있다. 또한 응결-관입저항침에 의한 응결시간 측정시험, 공기 함유량 측정시험, 변수위 투수 시험, pH 시험 등을 추가로 실시하여 유동화 처리토의 품질 특성 및 친환경성을 파악할 수 있다. Fig. 3.5.40에 유동화 처리토의 현장 시험 시공 프로세스를 나타냈다.

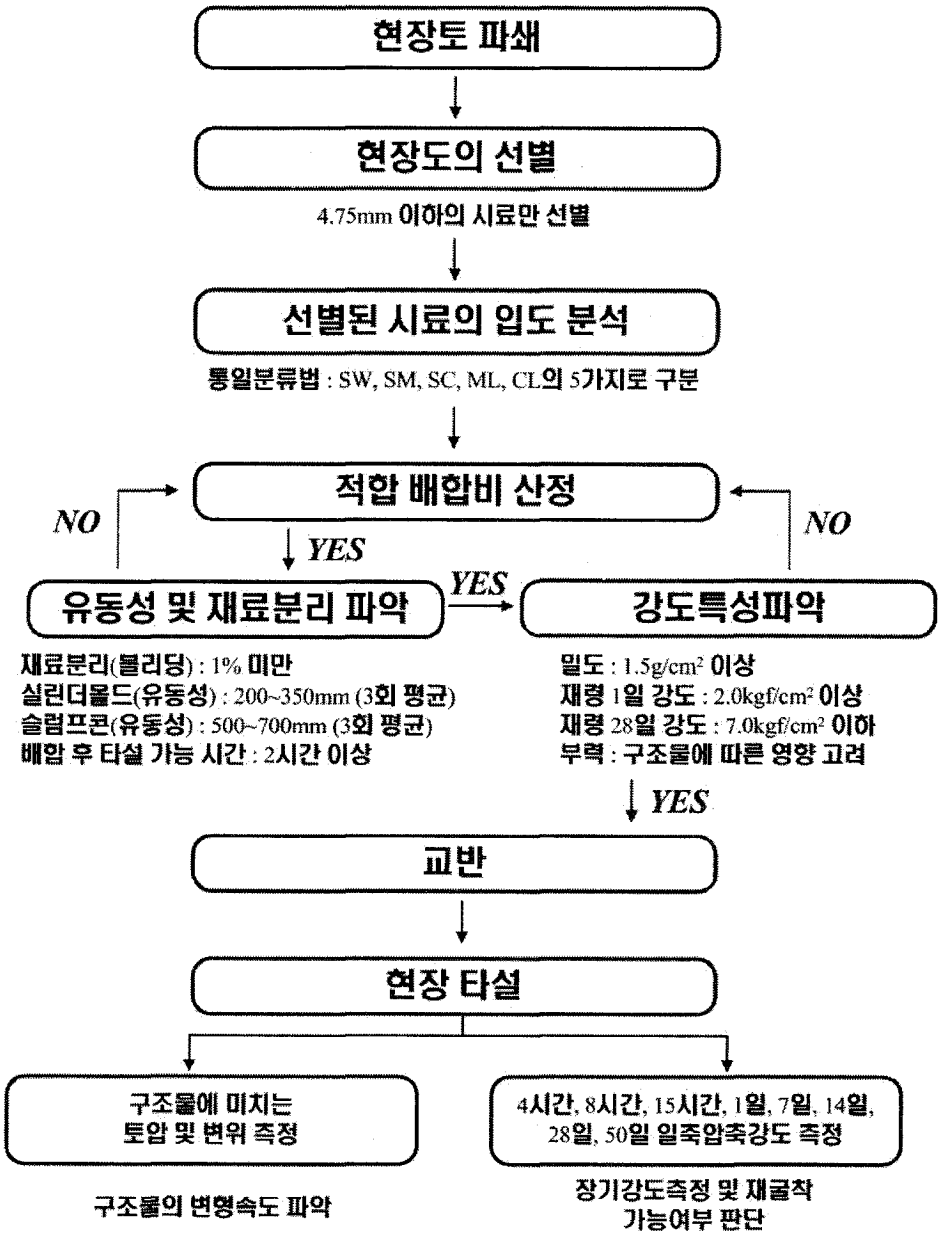


Fig. 3.5.40 유동화 처리토의 현장 시험 시공 프로세스

(1) 유동화 처리토 제조 직후 (현장 타설 전) 평가

유동화 처리토 제조 직후 품질 평가는 블리딩율, 습윤밀도, 유동성을 평가하여 현장 타설 여부를 결정한다.

(가) 블리딩율

블리딩은 교반 후 현장발생토와 고화재 등이 침하함으로써 물이 분리 상승되어 표면에 떠오르는 현상을 말한다. 이는 비중과 입경이 서로 다른 구성 재료로서 각 재료의 비중 및 입자크기의 차이에 의하여 분리가 발생하기 쉬우며, 거의 모든 시료에서 발생 된다. 일종의 재료분리이므로 블리딩이 크면 상부가 다공질이 되며 강도, 수밀성 및 내구성이 감소되고, 골재입자 등의 밑 부분에 수막을 만들고 시멘트풀과 부착을 저해하며 수밀성을 감소시킨다. 블리딩에 미치는 영향요인으로는 배합요인, 재료요인, 시공 및 환경요인 등이 있고, 이외에 대상재료의 특성, 유동성, 배합오차 등에 따라 영향을 받으며 이는 재료분리로 인해 강도 및 내구성 등에 영향을 미칠 수 있다. 블리딩율은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{블리딩율}(\%) = A/B \times 100 \qquad (4.3)$$

여기서, A : 시료의 블리딩된 물의 총량(kg), B : 시료에 포함된 물의 총량(kg)

본 연구에서는 일본 동경도 건설국과 국토 교통성에서 사용하고 있는 품질 기준에 근거하여, 블리딩율을 1% 이하로 설정하였다. 이에 유동화 처리토를 제작시 처리토를 채취하여 블리딩율을 측정하였고, 제시된 기준에 부합할 경우에 타설하였다.

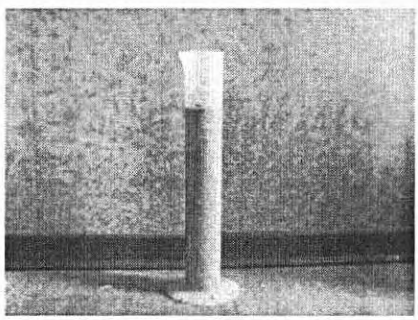


Fig. 3.5.41 블리딩율 측정

(나) 습윤밀도

경화 전 유동화 처리토의 습윤밀도를 측정하기 위해 원통형 용기(∅10cm × H15cm)에 물을 채워서 물의 중량과 온도를 측정하고 용기의 용적을 구한 후, 2회 이상 경화 전 유동화 처리토를 채워서 중량의 평균값을 측정하여 습윤밀도를 구한다. 실험시 유의 사항으로는 유동화 처리토를 채울 때 공기의 혼입을 차단하며 주입해야하고 유리판으로 덮고 질량을 측정한 후 밀도를 측정해야한다. 이 때 측정오차가 0.01g/cm3 이하인 것을 기준으로 측정 정도를 판단한다.

본 연구에서는 1차년도 연구결과, 밀도가 높은 유동화 처리토의 경우 지반의 구속응력에 의한 전단 파괴시의 일축압축강도 이상의 전단 저항을 나타내고, 밀도 효과에 의한 변형 특성이 개선되어 하중분산효과가 높아진다는 것을 확인할 수 있었다. 중요한 구조물의 관매설 등에 유동화 처리토를 이용하는 경우에는 장기적인 안정성이 중요하기 때문에 전단 파괴가 발생할 때, 강도 변형 특성이 우수한 간극비인 $e=1.5$이하의 유동화 처리토를 적용하는 것이 효율적이다. 그러므로 강도 변형 특성이 우수한 간극비를 습윤밀도로 환산하면 습윤밀도(ρ_t)는 1.5g/cm^{3}이상이므로 품질기준을 1.5g/cm^3 이상으로 설정하였다.

(다) 유동성

유동화 처리토는 충분한 유동성을 갖도록 해야 한다. 이로 인해 자기수평능력을 가지게 되고 뒤채움 공간을 간극 없이 채울 수 있으며, 다짐장비의 필요 없이 자기다짐의 성질을 갖는다. 이러한 특성은 유동화 처리토가 다짐장비의 이용과 많은 시험을 필요로 하는 다른 뒤채움재와 비교할 때 큰 장점 중의 하나이다.

유동화 처리토는 좁은 공간의 충전성이나 시공성이 용이하기 때문에 적용시 유동화 처리토의 밀도나 점성 및 마찰 저항, 관매설 공간의 주면 마찰이나 타설시의 낙하 높이 및 타설압에 의해 결정된다. 유동성의 품질 기준은 유동화 처리토를 적용하는 장소나 타설상황도 고려해야 하고, 무리하게 유동성만을 높인다면 경화 후의 간극비가 주변 지반에 비해 커지기 쉽고, 발생토의 이용률이 저하되는 등의 문제가 발생할 수 있으므로 이에 대한 충분한 고려가 필요하다. 관매설 또는 공동 충전 등

에 이용하는 경우의 유동성 기준은 펌프의 압송성이나 시공성, 공동의 형상 등을 고려하여 흐름값을 160mm 이상으로 한다. 다만 현장에서 장비 등을 이용하여 직접 타설하는 경우나 타설 장소의 형상이 협소하거나 복잡하지 않기 때문에 높은 유동성이 필요하게 되지 않는 경우에는 이보다 낮은 흐름값을 적용하여도 시공이 가능하다.

본 연구에서는 유동화 처리토의 유동성 품질 기준을 설정하기 위해, 일본 도로공단규격(JHS A 313)의 실린더법(∅8cm x H8cm)과 슬럼프 콘을 이용한 유동성 시험(KS F 2402)의 2가지 방법으로 1차년도 연구를 수행하였다. 그 결과, 실린더법에 의한 품질 기준을 200~350mm, 슬럼프 콘에 의한 품질 기준을 500~700mm로 설정하고, 각 3회씩 실험을 실시하여 평균값이 모두 만족하는 경우 현장에 적용하였다.

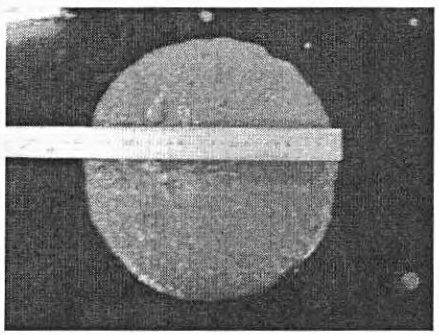


Fig. 3.5.42 유동화 처리토의 흐름값 측정

(라) 응결시간 측정 시험

몰탈의 관입 저항침에 의해 응결시간을 측정하는데 사용되는 실험을 유동화 처리토에 사용하여, 고화재가 유동화 처리토의 경화특성에 미치는 영향을 파악하고자 한다. 저강도 고유동성인 유동화 처리토는 물-고화재비가 매우 크고 단위고화재량이 소량 첨가되어지기 때문에 오랜 시간의 응결시간을 필요로 한다. 응결시간 측정은 KS F 2436에 제시된 방법을 따라 실험을 실시하며, 경화속도 시험의 결과는 관입저항과 경화시간과의 관계를 나타내는 곡선으로 표시할 수 있고, 응결의 종결은 경화속도 곡선에서 결정할 수 있다. 응결시간 측정 시험은 다음의 절차로 실시한다.

① 시험장비를 확인한다. 시험기구로는 스프링 반력식과 유압형 반력식의 관입저항 시험용 기구가 있으며 스프링 반력식 시험기구를 사용한다. 측정범위는 100kgf, 최소눈금은 1kg이다. 관입저항침은 0.125, 0.16, 0.25, 0.5, 1, 32, 64, 160, 320, 640mm^{2}이 있다. 또한 최소치수 15cm, 깊이 15cm까지의 직사각형 또는 원통형으로 되어있다.

② 유동화 처리토를 용기에 채운 후 다짐대로 다지며 시료 전체 단면에 균등히 분포시킨다. 관입직전 피펫으로 블리딩 현상으로 생기는 물을 제거한다.

③ 관입저항침의 사용은 시험초기에는 굵은 침에서부터 점점 가는 침으로 교환하여 사용하여 표면에 접촉시키고 천천히 균등하게 아래쪽으로 연직력을 작용시켜 25±5mm 까지 관입시킨다.

④ 관입하는데 소요된 하중과 양생한 후 부터의 경과시간을 기록한다. 다음경과시간에 관입시험을 할 때에는 먼저 시험에서의 흐트러진 면을 피해야 하며 침 관입간격은 사용하는 침 지름에서 최소 2mm이상이어야 한다. 임의의 침 관입위치와 용기 가장자리의 간격은 25mm이상이여야 한다.

⑤ 관입저항이 일정해 질 때까지 시험을 계속한다. 측정시간은 1시간, 2시간, 4시간, 8시간, 12시간, 1일로 실험을 실시한다.

응결시간 측정 시험은 유동화 처리토의 품질 특성을 파악하기 위한 것으로 품질기준으로 사용하지는 않는다.

(마) 공기 함유량 측정 시험

본 시험은 유동화 처리토의 공기함유량을 압력의 감소에 의하여 시험하는 방법으로 시료 내에 존재하는 공기의 함유량을 파악하고자 시험을 실시한다. 공기 함유량 측정의 시험 방법은 다음과 같다.

① 시험기구는 용기, 압력계, 검정용 기구, 다짐대로 구성되어 있다. 시험에 앞서 용기, 초기압력, 공기량 눈금판에 대한 검정을 해야 한다. 용기의 검정은 용기에 물을 가득 채우고 물의 중량을 단다. 중량은 용기와 물을 합한 중량의 0.1%이하의 감도의 저울로 단다.

② 초기 압력 검정은 용기에 물을 공기가 다 빠질 때까지 채우며, 뚜껑의 안팎으로 공기가 통하도록 하여 뚜껑을 덮는다. 모든 밸브를 잠그고 초기 압력보다 약간 크게 압력을 준 후, 약 5초 후에 조정밸브를 열어 압력계의 바늘을 초기 압력의 눈금과 일치시킨다.

③ 마지막으로 앞서 행한 검정을 한 후 용기내의 물을 적당량을 메스실린더에 넣고 물의 총량을 용기의 용적에 대한 백분율로 표시하며, 이를 몇 번 반복하여 꺼낸 물의 백분율로 공기량의 눈금을 비교한다. 이들 값이 각각 일치되어 있을 때 공기량의 눈금은 정확한 것이다.

④ 용기에 혼합물을 3층으로 나누어 채우고 다짐을 하지만 유동화 처리토일 경우 다짐을 하지 않았다. 용기 플랜지의 윗면과 뚜껑 플랜지의 밑면을 완전히 닦아낸 다음, 공기가 통하도록 뚜껑을 용기에 얹어 공기가 새지 않도록 잠근다. 주밸브는 잠그고 배기구와 주수구 밸브를 열어둔다. 배기구에서 물이 나올 때까지 주수구에 물을 넣고 잠근다.

⑤ 공기실에 기압을 초기 압력에 일치시키고 약 5초가 지난 뒤 주밸브를 연다. 충분히 바늘이 안정되었을 때 압력계의 눈금을 읽는다. 이때 측정치는 겉보기 공기량(A_1)이다.

이론적으로 콘크리트일 경우, 공기량이 1% 증가하면 슬럼프치는 2cm 정도 커지고 단위수량은 3% 감소한다. 다만 지나친 공기량의 증가(6% 이상)는 내구성을 저하시키며, 1% 증가 시 압축강도는 3~5% 감소한다. 일반적으로 저강도 고유동 재료는 내구성에 대해 고려하지 않고 배합설계를 하기 때문에 유동화 처리토의 배합설계시 공기량은 중요한 의미를 갖지 않기 때문에 품질 기준으로 사용하지는 않고 품질 특성을 파악하기 위한 것으로만 사용한다.

(2) 유동화 처리토 타설 중의 평가

(가) 타설 시간

유동화 처리토의 제조 후 타설 가능 시간을 파악하여, 시간 내에 현장에 타설한다. 유동화 처리토의 제조 직후, 10분, 20분, 40분, 60분, 90분, 120분 후에 유동성 실험을 실시하면 유동성 품질 기준에 만족하면 현장에 타설한다. 이때에 제조된 유동화 처리토를 그대로 공기 중에 방치시키게 되면 경화가 진행되기 때문에, 교반기로 일정한 속도를 유지하면서 교반을 한다. 이때의 교반기의 회전 속도는 약 18~20rpm으로 한다. 실내 실험을 통해 유동화 처리토의 타설 가능 시간을 예측할 수도 있다.

(나) 부력

유동화 처리토와 구조물의 밀도차에 의해 부력이 발생하여 구조물에 영향을 미칠 수 있기 때문에 부력에 의한 영향을 고려하여 타설을 해야한다. 단계적으로 타설을 실시하여 부력의 영향을 최소화할 수 있다. 구조물의 부피, 중량, 형상 등과 유동화 처리토의 습윤밀도를 정확하게 파악하는 것이 무엇보다 중요하겠다.

(다) 플랜트 소음 및 진동

플랜트를 가동할 때 소음·진동·분진에 대해 시험 시공마다 실측하여 영향을 평가해야하고 특히 도심지 공사일 경우에는 더욱 중요하다. 소음 레벨(dB)과 소음원과의 거리 관계를 통해 소음에 대한 영향을 평가한다. 플랜트를 가동했을 때의 소음이 플랜트를 가동하지 않을 때의 소음보다 10dB정도 큰 소음이 기록될 경우, 30m 떨어진 지점에 설치하면 평상시의 소음과 거의 동일해져 플랜트에 의한 소음의 영향을 고려하지 않을 수 있다. Table 3.5.24에 국내 소음 환경 기준을 제시하였다. 플랜트의 설치 지역을 잘 파악하여, 국내 소음 환경 기준을 만족하도록 플랜트를 설치하는 것이 바람직하다.

Table 3.5.24 국내 소음 환경 기준 (환경부, 2006)

지역구분	적용대상지역	기 준	
		낮(06:00 ~ 22:00)	밤(22:00 ~ 06:00)
일 반 지 역	"가" 지역	50	40
	"나" 지역	55	45
	"다" 지역	65	55
	"라" 지역	70	65
도 로 변 지 역	"가" 및 "나" 지역	65	55
	"다" 지역	70	60
	"라" 지역	75	70

"가" 지역 : 녹지, 전용주거, 자연환경보전지역 및 학교, 병원주변 50m 이내 지역

"나" 지역 : 일반주거, 준주거지역, 준도시지역중 시설용지외의 지구

"다" 지역 : 상업, 준공업지역

"라" 지역 : 일반공업, 전용공업지역, 도시지역 및 준도시지역중 시설용지 지구

소음 방지를 위한 대책으로 다음의 4가지를 고려할 수 있다.

① 방음형 기계 사용 : 소음 발생이 적은 방음형 기계(발전기나 백호)를 사용한다.

② 방음벽에 의한 소음 차단 : 벽에 부딪히면 소리를 반사하는 재료를 사용하여 소리의 투과를 막는다.

③ 흡음재에 의한 소음 감소 : 벽이나 시트 대신에 흡음재로 음원을 둘러싸서 소리의 투과를 감쇠한다.

④ 거리에 의한 소음 감소 : 음의 크기는 음원으로부터 거리가 멀어지면 멀어질수록 작아지기 때문에 경계선이나 주택지로부터 가능한 한 먼 장소에 플랜트를 설치한다.

소음과 같이 펌프 및 발전기의 설치 지점에서는 플랜트를 가동하였을 때 진동이 발생된다. 특정 건설 작업에 있어서 진동 기준을 만족한다면 문제는 없지만, 도심지나 주택지 등에서는 저진동형 기계를 선정하는 것이 바람직하다.

(3) 유동화 처리토 경화 후의 평가

(가) 강도특성

본 연구에서는 일축압축강도를 측정하여 강도특성을 파악하였다. 배합이 완료된 유동화 처리토를 사용하여 ∅5cm×10cm의 EP-mold에 타설하여 4시간, 8시간, 15시간, 1일, 7일, 14일, 28일, 50일의 일축압축강도를 측정하였다. 또한 1일, 7일, 28일, 50일 후에 현장에 타설한 유동화 처리토를 채취하여 공시체로 성형한 유동화 처리토의 강도와 현장에 타설한 유동화 처리토의 강도간의 상관관계를 파악하였다. 유동화 처리토의 강도 기준은 일반적으로 인력 굴착이 가능한 강도(7kg/cm^2 이하), 기계굴착이 가능한 강도(40kg/cm^2 이하), 장비굴착이 가능한 강도(83kg/cm^2 이하)로 분류된다(Ayers et al., 1997). 본 연구에서는 인력에 의한 재굴착이 가능한 유동화 처리토의 일축압축강도를 7kg/cm^2 이하로 선정하였다. 양생시킨 공시체는 KS F 2314에 의해 변형속도를 분당 1.0mm/min로 파괴하였다. 일축압축강도의 품질은 재령 1일 강도와 재령 28일강도를 기준으로 하고, 각각 2.0kg/cm^2과 7.0kg/cm^2으로 기준치를 설정하였다.

(나) 투수특성

유동화 처리토가 적용된 지반은 강우에 노출되어 있기 때문에 투수특성을 파악하는 것이 필요하다. 또한 지하수위가 높은 경우에는 지하수에 의한 침투의 영향을 받는 경우가 발생할 수도 있다. 이런 경우에 대비하고자 28일 동안 양생한 유동화 처리토에 변수위 투수시험을 실시하여 투수성을 파악하였다.

(4) 유동화 처리토의 평가 항목 및 평가 기준

유동화 처리토의 평가 항목 및 기준을 Table 3.5.25에 제시하였다.

Table 3.5.25 유동화 처리토의 품질 평가 항목 및 평가 기준

	평가 항목		평가 기준	비고
유동화 처리토 경화 전	블리딩율		블리딩율을 1% 이하	품질기준
	습윤밀도		1.5g/cm^{3}이상	품질기준
	유동성	실린더법	200~350mm	품질기준
		슬럼프 콘	500~700mm	품질기준
	응결시간 및 관입저항치		18시간 (5kg/cm^2 이상)	특성파악
	공기 함유량		1.0% 이하	특성파악
유동화 처리토 타설 중	타설 시간		2시간 이내	품질기준
	부력		단계 타설	품질기준
	플랜트 소음		85dB이하	특성파악
	플랜트 진동		75dB이하	특성파악
유동화 처리토 경화 후	강도특성	일축압축강도	재령 4시간 : 1.3kg/cm^2 이상	품질기준
			재령 1일 : 2.0kg/cm^2 이상	
			재령 7일 : 7.0kg/cm^2 이하	
	투수특성		10^{-6}~10^{-7}cm/sec	특성파악
	연직 변위 및 수평 변위		5mm 이하	특성파악

자. 현장 타설 강도 측정을 위한 Core 채취

재령 1일, 재령 7일, 재령 28일, 재령 50일 후 현장에 타설된 유동화 처리토의 강도를 측정하고자현장 코어기를 사용하여 총 7개의 지점에서 Core 채취를 하였다. 현장 코어기를 사용하여 채취한 공시체를 통해 측정한 현장 강도와 공시체 몰드를 통해 성형한 실내 강도와의 상관관계를 파악하였다. 이 때, Core 채취한 심도는 표면 10cm 아래이고, 샘플링된 코어의 크기는 EP-mold와 같은 ∅5cm×10cm이다. Fig. 3.5.43과 3.5.44에 1연 암거를 설치한 Section과 파형강관을 설치한 Section의 샘플링 위치 상세도를 제시하였고, Fig. 3.2.45에 현장 Core의 채취 전경을 나타냈다.

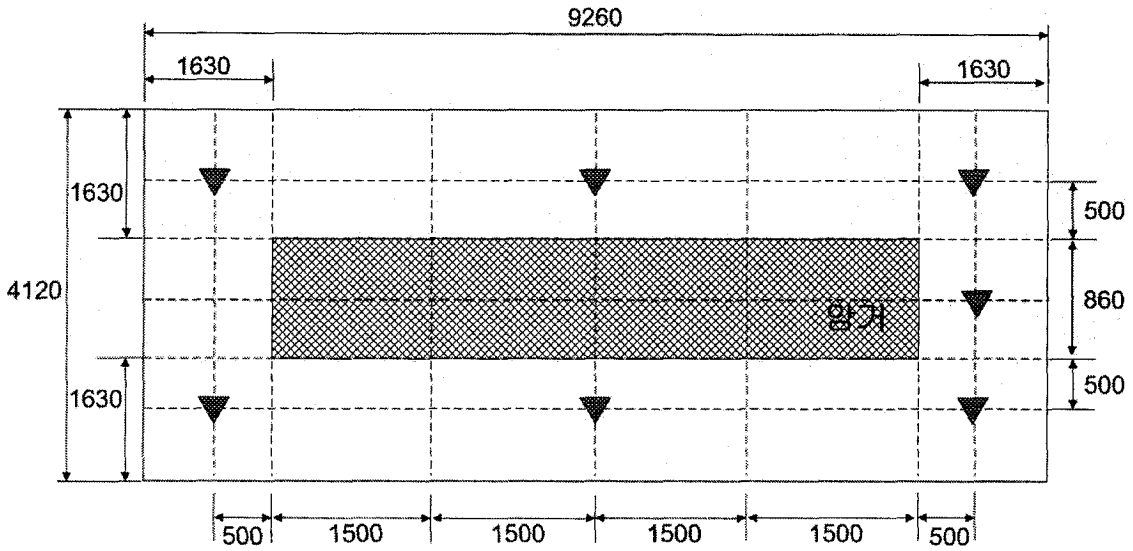


Fig. 3.5.43 1연 암거를 설치한 Section의 샘플링 위치 상세도 (단위 : mm)

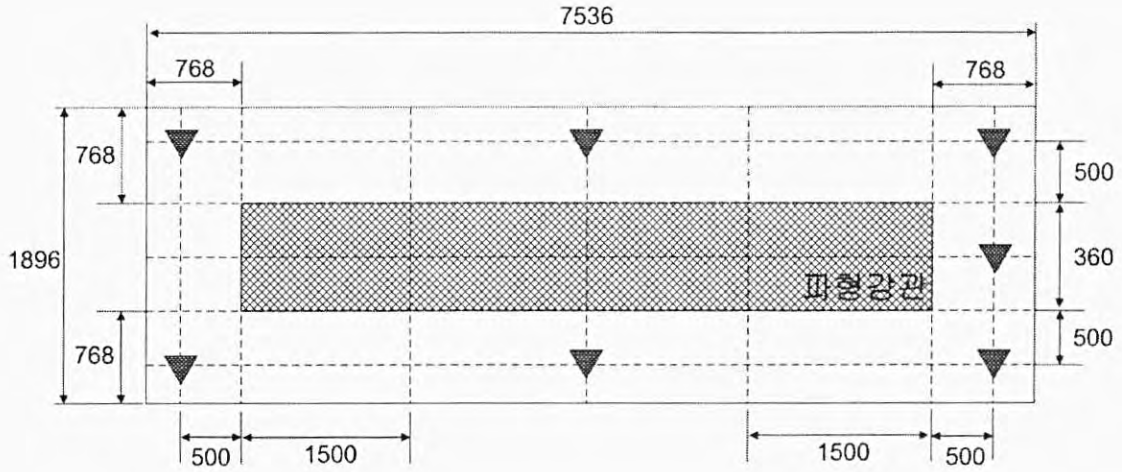
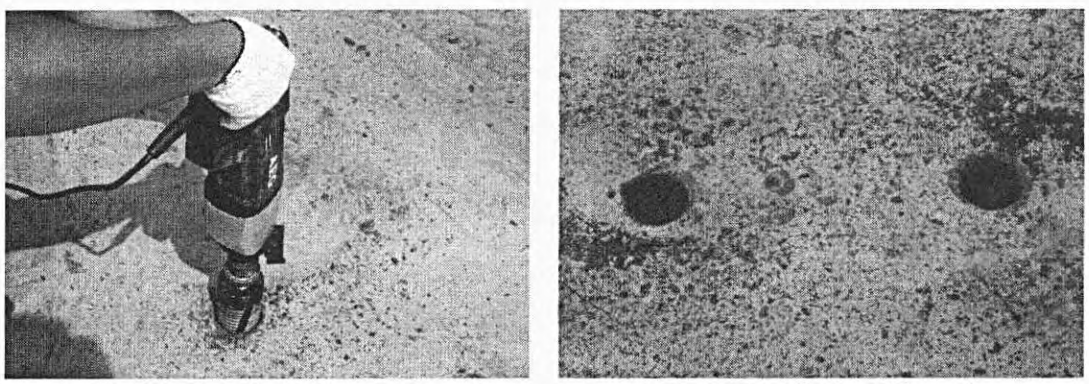


Fig. 3.5.44 파형강관을 설치한 Section의 샘플링 위치 상세도 (단위 : mm)



(a) Core 채취하는 모습 (b) Core 채취 후의 모습

Fig. 3.2.45 현장 Core 채취 전경

5. 현장 적용성 평가의 결과

가. Section A (현장발생토, 1연암거)

(1) 재료분리 특성

현장플랜트를 이용하여 유동화 처리토를 제조한 후 Section A에 타설하기 전, 유동화 처리토의 재료분리 특성이 목표기준에 만족하는지를 알아보기 위해 블리딩 실험을 실시하였다. Section A를 전부 타설하는데 총 7번의 배합을 하였고, 각각의 배합시에 유동화 처리토의 재료분리 특성을 측정한 결과, 모든 실험에서 목표기준인 1%이하를 만족하는 결과를 나타냈다.

(2) 유동성

현장플랜트를 이용하여 유동화 처리토를 제조한 후 Section A에 타설하기 전, 유동화 처리토의 유동성이 목표기준에 만족하는지를 알아보기 위해 JHS, ASTM Slump Flow의 3가지 유동성 실험을 실시하였고, 그 결과를 Table 3.5.26과 Fig. 3.5.46에 나타냈다. 총 7번의 유동화 처리토 배합에 대해 유동성을 측정한 결과, JHS는 22.5cm~27.5cm, ASTM은 34.5cm~39.0cm, Slump Flow는 55.6cm~62.8cm로 모두 목표기준을 만족하였다.

Table 3.5.26 Section A에 타설한 유동화 처리토의 유동성 측정 결과

No.	고화재 종류	JHS (cm)	ASTM (cm)	Slump Flow (cm)
T8-C1	C-10	25.6	36.5	60.5
T8-C2		24.3	34.5	55.6
T8-C3		23.5	37.0	58.7
T8-C4		22.5	38.5	62.8
T8-C5		24.0	34.6	56.7
T8-C6		26.4	39.0	61.1
T8-C7		27.5	37.8	62.4

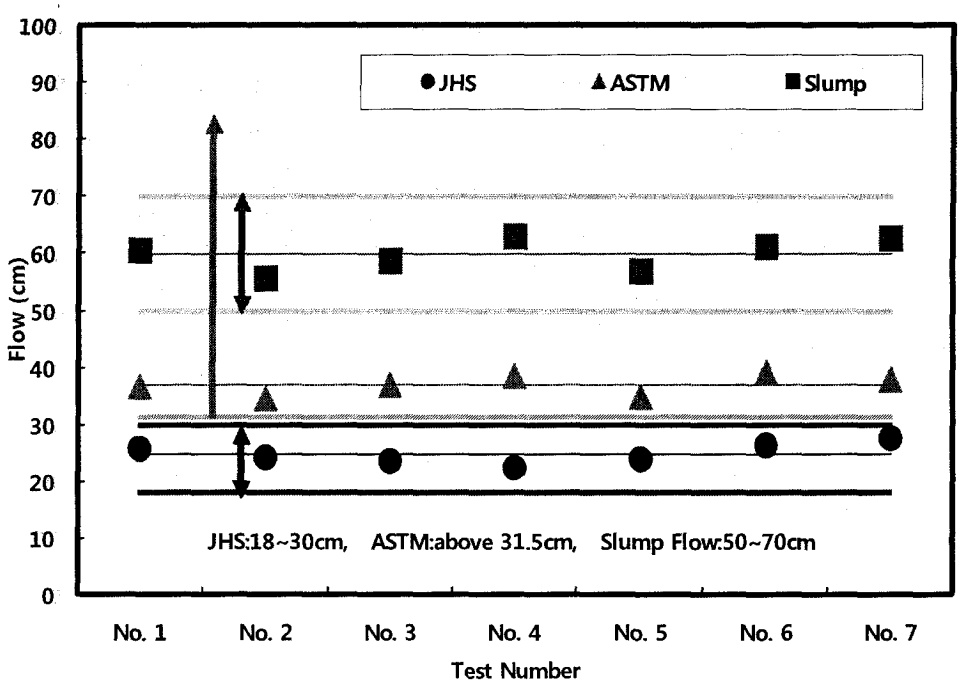


Fig. 3.5.46 Section A에 타설한 유동화 처리토의 유동성

(3) 강도특성

Section A에 타설하기 위해 현장플랜트를 사용하여 제조한 유동화 처리토의 강도특성을 파악하고자 공시체를 제작하여 양생기간에 따른 강도를 측정하였다. 1회 배합에 대해 재령 4시간, 재령 1일, 재령 4일, 재령 7일, 재령 14일, 재령 28일, 재령 50일의 일축압축강도를 측정하였고, 정확한 강도특성을 파악하고자 각각 2개의 평균으로 일축압축강도를 결정하였다. Table 3.5.27에 Section A에 타설한 유동화 처리토의 일축압축강도를 제시하였다.

Table 3.5.27 유동화 처리토의 현장 배합 일축압축강도 (Section A)

No.	4시간 (kg/cm^2)	1일 (kg/cm^2)	4일 (kg/cm^2)	7일 (kg/cm^2)	14일 (kg/cm^2)	28일 (kg/cm^2)	50일 (kg/cm^2)
T8-C1-a	1.558	1.838	3.074	5.617	7.564	9.368	13.117
T8-C1-b	1.653	2.562	3.784	6.324	9.223	12.254	14.213
T8-C1-Ave.	1.606	2.200	3.429	5.971	8.394	10.811	13.665
T8-C2-a	1.856	2.407	5.004	6.421	7.746	9.075	9.417
T8-C2-b	1.753	2.254	4.521	7.635	8.654	9.214	10.635
T8-C2-Ave.	1.805	2.331	4.763	7.028	8.200	9.145	10.026
T8-C3-a	1.026	1.605	4.159	4.896	6.522	7.414	8.562
T8-C3-b	1.425	2.354	4.875	5.663	7.456	8.542	9.332
T8-C3-Ave.	1.226	1.980	4.517	5.280	6.989	7.978	8.947
T8-C4-a	0.986	1.340	3.327	4.607	7.307	9.374	11.654
T8-C4-b	1.124	1.874	2.963	4.521	6.896	8.221	10.369
T8-C4-Ave.	1.055	1.607	3.145	4.564	7.102	8.798	11.012
T8-C5-a	1.774	1.998	3.591	4.799	6.383	8.317	9.993
T8-C5-b	1.563	2.214	3.478	5.693	7.721	9.365	11.248
T8-C5-Ave.	1.669	2.106	3.535	5.246	7.052	8.841	10.621
T8-C6-a	1.250	1.510	3.897	5.197	7.275	8.143	9.952
T8-C6-b	0.856	1.361	2.546	4.742	6.512	7.556	8.637
T8-C6-Ave.	1.053	1.436	3.222	4.970	6.894	7.850	9.295
T8-C7-a	1.158	2.098	4.357	5.110	7.616	9.691	11.598
T8-C7-b	1.512	3.214	5.674	6.538	8.965	12.224	13.096
T8-C7-Ave.	1.335	2.656	5.016	5.824	8.291	10.958	12.347

Fig. 3.5.47은 Section A에 타설한 유동화 처리토의 양생기간에 따른 강도특성을 파악하고자, 배합시 제작한 공시체를 통해 일축압축실험을 실시한 결과를 나타낸 것이다. 양생기간이 증가할수록 일축압축강도는 증가하는 것을 파악할 수 있었다. 현장 배합한 유동화 처리토의 각 배합 차수에 따른 강도특성을 파악하고, 재령기간에 따른 평균 일축압축강도를 파악하고자, Fig. 3.5.48에 유동화 처리토 제조시의 배합 차수에 따른 재령 강도를 나타냈다. 재령 1일 일축압축강도는 목표기준인 2.0kg/cm^{2}을 모두 만족하였지만, 재령 28일 일축압축강도는 목표기준인 7.0kg/cm^{2}을 약 2.0kg/cm^2 상회하는 값을 나타냈다. 재령 28일 후에도 지속적인 강도 발현 현상이 발생하여, 재령 50일 강도는 재령 28일 강도보다 약 1.6kg/cm^2 정도 큰 10.8445kg/cm^{2}을 나타냈다.

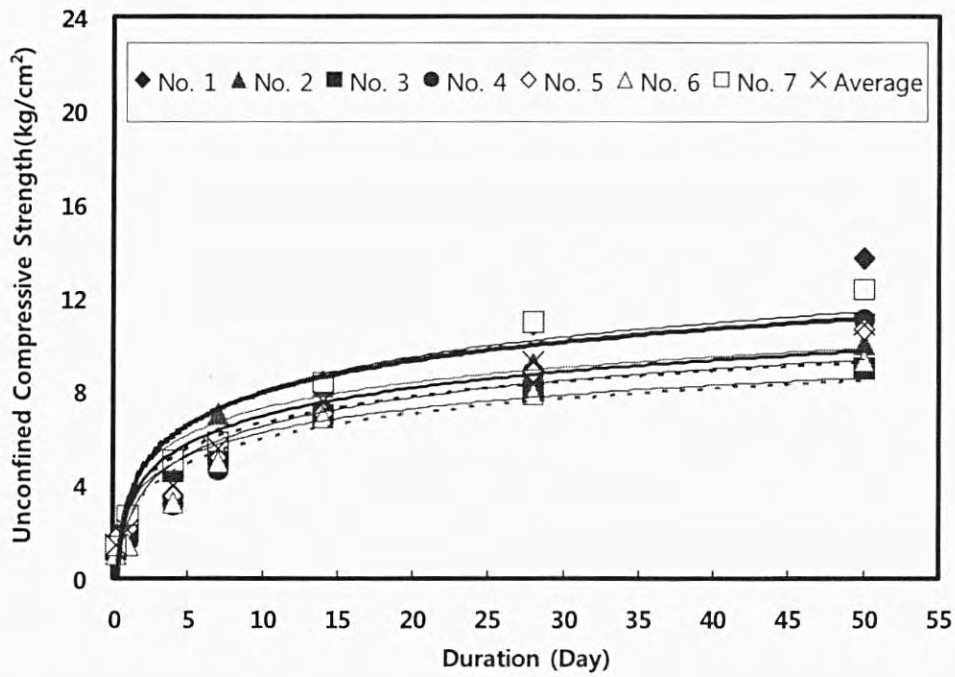


Fig. 3.5.47 현장 배합한 유동화 처리토의 양생기간에 따른 일축압축강도 (Section A)

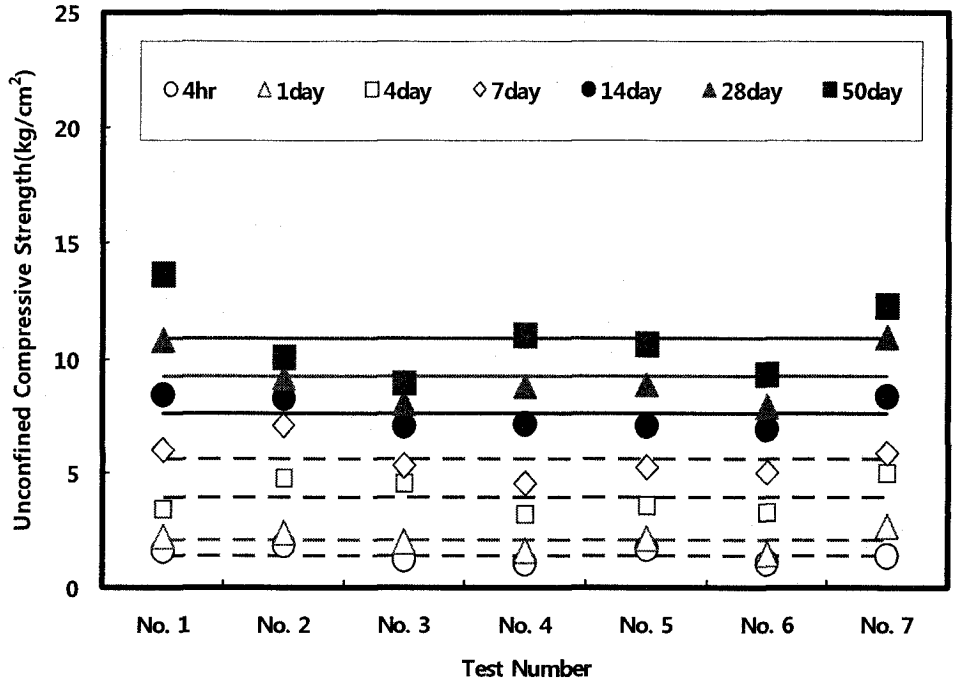


Fig. 3.5.48 현장 배합한 유동화 처리토의 배합 차수에 따른 일축압축강도 (Section A)

Section A에 현장플랜트를 사용하여 제조한 유동화 처리토를 타설한 후 재령 1일, 재령 4일, 재령 14일, 재령 28일, 재령 50일의 현장 강도를 측정하기 위해 현장 Core 채취를 실시하였다. Table 3.5.28에 Section A에서 현장 Core 채취한 시료의 일축압축강도를 제시하였다.

Table 3.5.28 현장 Core 채취 시료의 일축압축강도 결과 (Section A)

No.	1일 (kg/cm^2)	7일 (kg/cm^2)	28일 (kg/cm^2)	50일 (kg/cm^2)
T8-C1 (Core)	3.562	7.235	11.540	15.320
T8-C2 (Core)	2.843	8.654	10.964	15.875
T8-C3 (Core)	3.562	6.895	11.364	13.665
T8-C4 (Core)	3.568	7.635	10.562	16.652
T8-C5 (Core)	2.569	6.332	9.874	13.546
T8-C6 (Core)	4.364	7.541	11.637	14.326
T8-C7 (Core)	3.756	6.754	10.550	12.546

Fig. 3.5.49에 현장 Core 채취 시료의 일축압축강도 결과를 양생기간에 따라 나타내었었다. 양생기간이 증가할수록 일축압축강도는 증가하는 것을 파악할 수 있었다. 양생기간이 증가할수록 Core 채취 지점에 따른 강도 차이가 크게 나타났다. Fig. 3.5.50에는 현장 Core 채취 지점에 따른 일축압축실험 결과를 나타냈다. 현장 Core를 통해 채취한 재령 1일 일축압축강도는 목표기준인 2.0kg/cm^2 이상을 모두 만족하였지만, 재령 28일 일축압축강도는 목표기준인 7.0kg/cm^{2}을 2.8kg/cm^2~4.6kg/cm^2 상회하는 값을 나타냈다. 재령 28일 후에도 지속적인 강도 발현 현상이 발생하여, 재령 50일 강도는 재령 28일 강도보다 평균 약 3.6kg/cm^2 큰 일축압축강도를 나타냈다.

Fig. 3.5.51은 유동화 처리토의 제조시 공시체로 제작한 것과 현장 타설 후 Core 채취한 경우에 대해, 재령 1일, 재령 4일, 재령 28일, 재령 50일 일축압축강도를 비교한 것이다. Core 채취한 일축압축강도가 재령기간에 상관없이 더 크게 나타났고, 이를 통해 현장 타설한 유동화 처리토의 강도 발현이 더 크다는 것을 파악할 수 있었다.

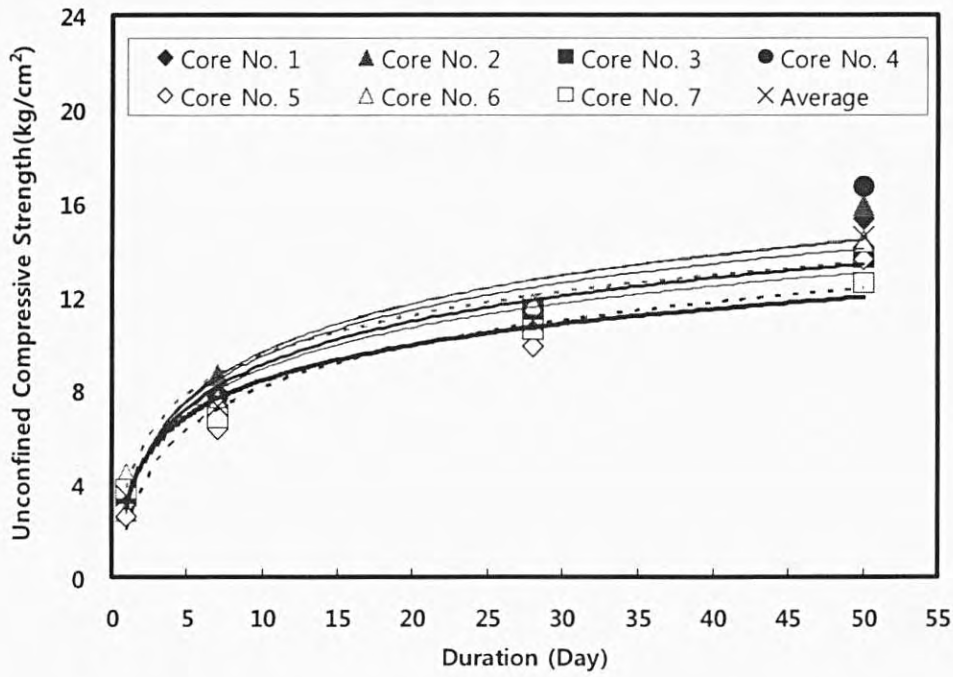


Fig. 3.5.49 현장 Core 채취 시료의 양생기간에 따른 일축압축강도 (Section A)

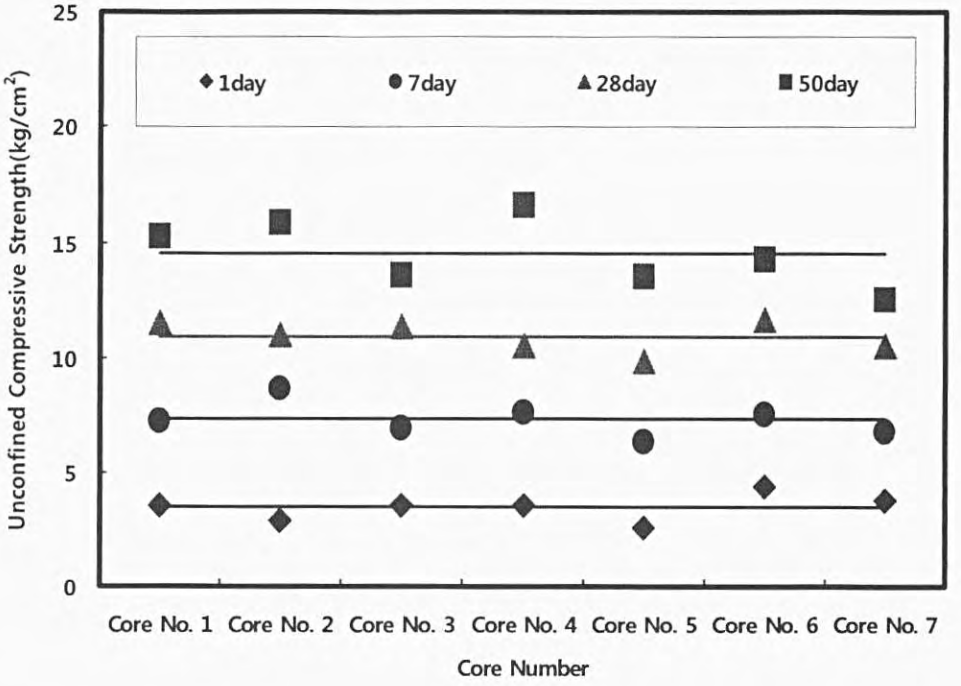


Fig. 3.5.50 현장 Core 채취 지점에 따른 일축압축강도 (Section A)

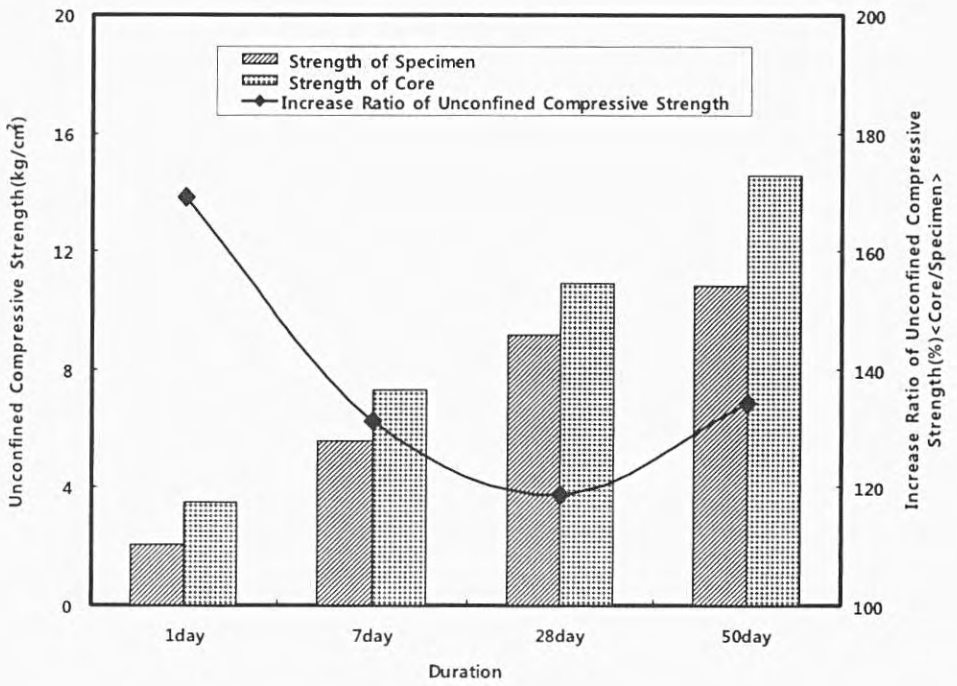


Fig. 3.5.51 유동화 처리토의 제조시 제작한 공시체와 Core 채취한 공시체의 일축압축강도 비교 (Section A)

(4) 투수특성

Table 3.5.29와 Fig. 3.5.52에 Section A에 타설한 유동화 처리토의 변수위 투수계수를 나타냈다. 변수위 투수계수는 4.38×10^{-6}~5.57×10^{-6}cm/sec의 범위로 고르게 나타났으며, 일반적인 유동화 처리토의 투수계수 10^{-6}~10^{-7}cm/sec의 범위에도 적합한 결과를 보였다.

Table 3.5.29 Section A에 타설한 유동화 처리토의 변수위 투수계수 실험 결과

No.	투수계수 (cm/sec)
T8-C1	5.35×10^{-6}
T8-C2	4.38×10^{-6}
T8-C3	5.22×10^{-6}
T8-C4	5.57×10^{-6}
T8-C5	4.75×10^{-6}
T8-C6	5.37×10^{-6}
T8-C7	4.67×10^{-6}

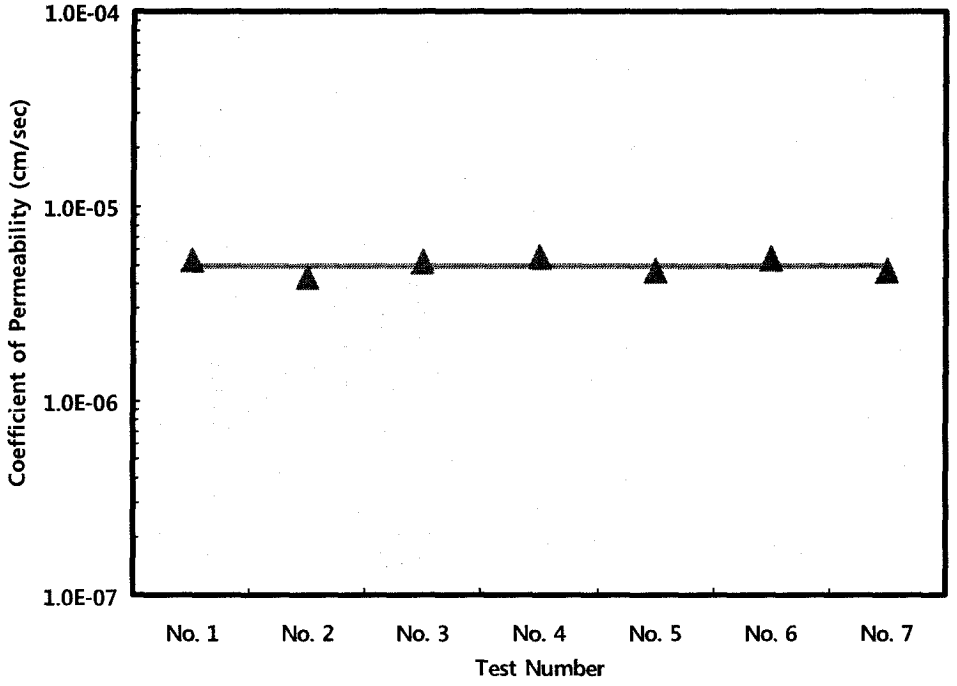


Fig. 3.5.52 Section A에 타설한 유동화 처리토의 변수위 투수계수

나. Section B (현장발생토, 파형강관)

(1) 재료분리특성

현장플랜트로 유동화 처리토를 제조한 후 Section B에 타설하기 전, 유동화 처리토의 재료분리 특성이 목표기준에 만족하는지를 알아보기 위해 블리딩 실험을 실시하였다. Section B를 전부 타설하는데 총 5번의 배합을 하였고, 각각의 배합시에 유동화 처리토의 재료분리 특성을 측정한 결과, 모든 실험에서 목표기준인 1%이하를 만족하는 결과를 나타냈다.

(2) 유동성

현장플랜트를 이용하여 유동화 처리토를 제조한 후 Section B에 타설하기 전, 유동화 처리토의 유동성이 목표기준에 만족하는지를 알아보기 위해 JHS, ASTM Slump Flow의 3가지 유동성 실험을 실시하였고, 그 결과를 Table 3.5.30과 Fig. 3.5.53에 나타냈다. 총 5번의 유동화 처리토 배합에 대해 유동성을 측정한 결과, JHS는 22.5cm~26.5cm, ASTM은 33.6cm~39.6cm, Slump Flow는 52.8cm~56.7cm로 모두 목표기준을 만족하였다.

Table 3.5.30 Section B에 타설한 유동화 처리토의 유동성 측정 결과

No.	고화재 종류	JHS (cm)	ASTM (cm)	Slump Flow (cm)
T9-C1	C-10	22.5	33.6	56.7
T9-C2		23.6	37.5	53.1
T9-C3		26.5	39.6	54.7
T9-C4		25.1	36.4	56.3
T9-C5		23.8	34.5	52.8

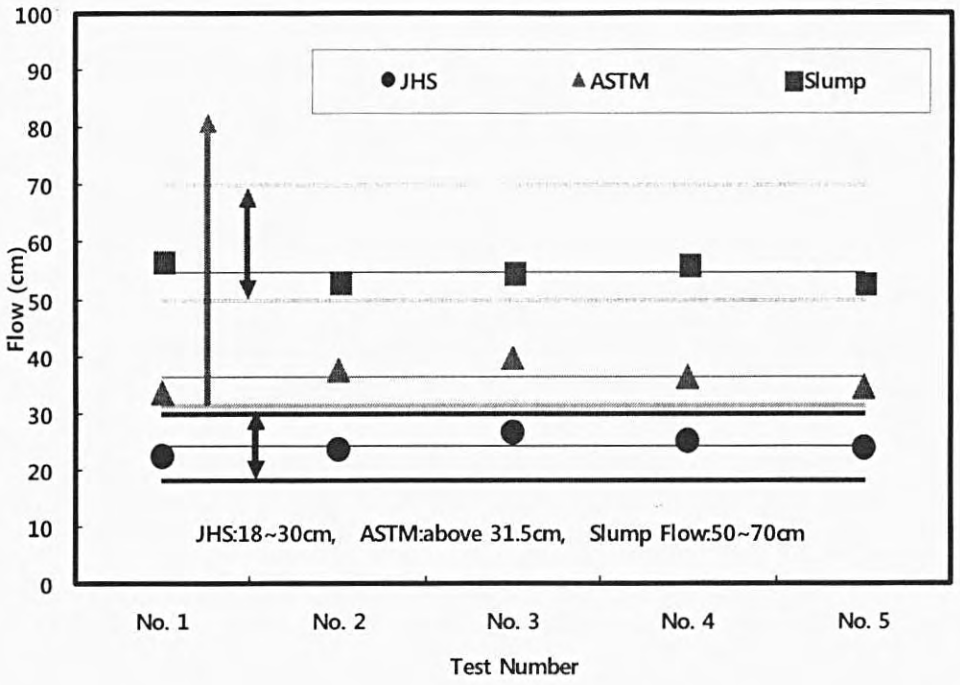


Fig. 3.5.53 Section B에 타설한 유동화 처리토의 유동성

(3) 강도특성

Section B에 타설하기 위해 현장플랜트를 사용하여 제조한 유동화 처리토의 강도특성을 파악하고자 공시체를 제작하여 양생기간에 따른 강도를 측정하였다. 1회 배합에 대해 재령 4시간, 재령 1일, 재령 4일, 재령 7일, 재령 14일, 재령 28일, 재령 50일의 일축압축강도를 측정하였고, 정확한 강도특성을 파악하고자 각각 2개의 평균으로 일축압축강도를 결정하였다. Table 3.5.31에 Section B에 타설한 유동화 처리토의 일축압축강도를 제시하였다.

Table 3.5.31 유동화 처리토의 현장 배합 일축압축강도 (Section B)

No.	4시간 (kg/cm^2)	1일 (kg/cm^2)	4일 (kg/cm^2)	7일 (kg/cm^2)	14일 (kg/cm^2)	28일 (kg/cm^2)	50일 (kg/cm^2)
T9-C1-a	0.758	3.335	4.238	5.668	6.214	9.336	11.254
T9-C1-b	1.625	2.478	3.657	5.239	7.023	8.214	10.689
T9-C1-Ave.	1.192	2.907	3.948	5.454	6.619	8.775	10.972
T9-C2-a	0.769	1.885	2.638	3.897	5.636	6.987	8.663
T9-C2-b	1.126	2.218	3.665	4.572	5.982	7.367	8.741
T9-C2-Ave.	0.948	2.052	3.152	4.235	5.809	7.177	8.702
T9-C3-a	1.623	1.896	3.265	6.324	8.226	10.326	12.895
T9-C3-b	1.561	2.551	3.457	6.754	9.657	11.204	13.245
T9-C3-Ave.	1.592	2.224	3.361	6.539	8.942	10.765	13.070
T9-C4-a	1.365	2.541	4.587	6.588	8.634	10.325	12.474
T9-C4-b	1.257	1.874	2.745	4.857	7.556	9.547	11.263
T9-C4-Ave.	1.311	2.208	3.666	5.723	8.095	9.936	11.869
T9-C5-a	1.684	2.556	4.256	7.526	10.326	12.256	15.226
T9-C5-b	2.324	3.675	5.362	8.632	11.552	13.365	15.547
T9-C5-Ave.	2.004	3.116	4.809	8.079	10.939	12.811	15.387

Fig. 3.5.54는 Section B에 타설한 유동화 처리토의 양생기간에 따른 강도특성을 파악하고자, 배합시 제작한 공시체를 통해 일축압축실험을 실시한 결과를 그림으로 나타낸 것이다. 양생기간이 증가할수록 일축압축강도는 증가하는 것을 파악할 수 있었다. Fig. 3.5.55는 현장 배합한 유동화 처리토의 각 배합 차수에 따른 강도특성을 파악하고, 재령기간에 따른 평균 일축압축강도를 파악하고자, 유동화 처리토 제조시의 배합 차수에 따른 재령 강도를 나타낸 것이다. 재령 1일 일축압축강도는 목표기준인 $2.0kg/cm^2$을 모두 만족하였지만, 재령 28일 일축압축강도는 목표기준인 $7.0kg/cm^2$을 상회하는 값을 나타냈다. 재령 28일 후에도 지속적인 강도 발현 현상이 발생하여, 재령 50일 강도는 재령 28일 강도보다 약 $2.1kg/cm^2$ 정도 큰 $11.9997kg/cm^2$을 나타냈다.

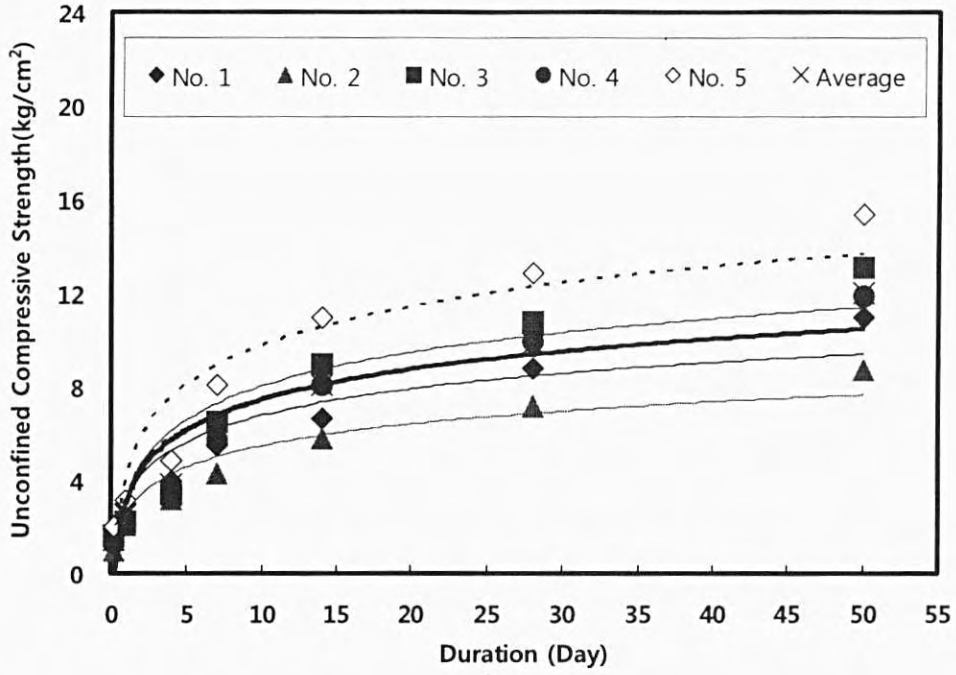


Fig. 3.5.54 현장 배합한 유동화 처리토의 양생기간에 따른 일축압축강도 (Section B)

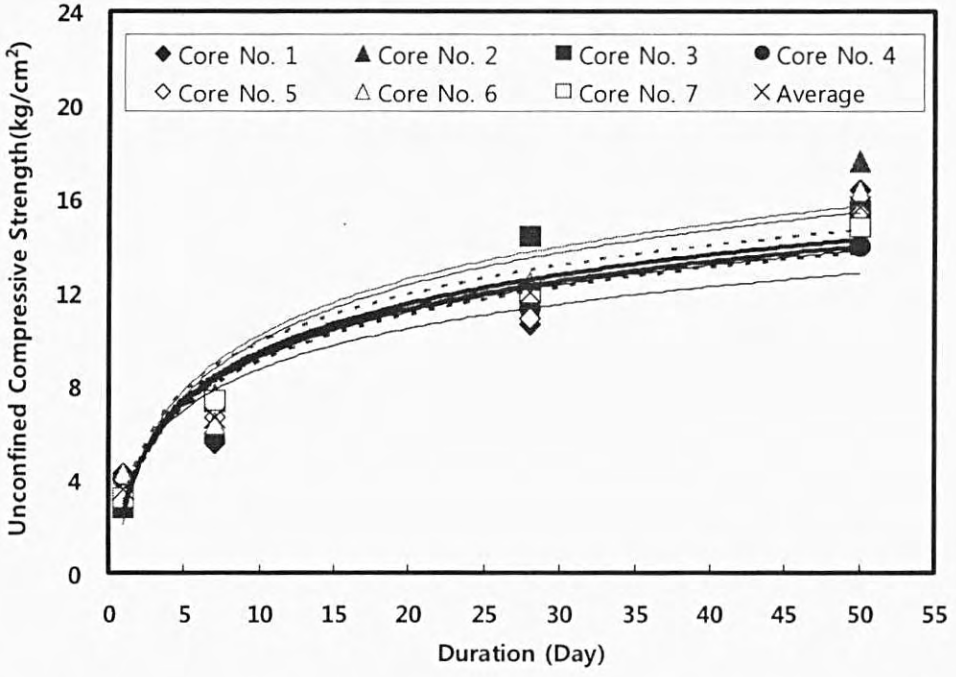


Fig. 3.5.55 현장 배합한 유동화 처리토의 배합 차수에 따른 일축압축강도 (Section B)

Section B에 현장플랜트를 사용하여 제조한 유동화 처리토를 타설한 후 재령 1일, 재령 4일, 재령 14일, 재령 28일, 재령 50일의 현장 강도를 측정하기 위해 현장 Core 채취를 실시하였다. Table 3.5.32에 Section B에서 현장 Core 채취한 시료의 일축압축강도를 제시하였다.

Table 3.5.32 현장 Core 채취 시료의 일축압축강도 결과 (Section B)

No.	1일 (kg/cm^2)	7일 (kg/cm^2)	28일 (kg/cm^2)	50일 (kg/cm^2)
T8-C1 (Core)	4.236	5.563	10.634	16.324
T8-C2 (Core)	3.224	7.562	12.256	17.589
T8-C3 (Core)	2.687	7.264	14.334	15.364
T8-C4 (Core)	3.967	5.687	11.246	13.874
T8-C5 (Core)	3.332	6.635	10.856	15.365
T8-C6 (Core)	4.256	6.367	12.364	16.336
T8-C7 (Core)	3.127	7.347	11.889	14.757

Fig. 3.5.56에 현장 Core 채취 시료의 일축압축강도 결과를 양생기간에 따라 나타내었었다. 양생기간이 증가할수록 일축압축강도는 증가하는 것을 파악할 수 있었다. 양생기간이 증가할수록 Core 채취 지점에 따른 강도 차이가 크게 나타났다. Fig. 3.5.57은 현장 Core 채취 지점에 따른 일축압축실험 결과를 나타냈다. 현장 Core를 통해 채취한 재령 1일 일축압축강도는 목표기준인 $2.0kg/cm^2$ 이상을 모두 만족하였지만, 재령 28일 일축압축강도는 목표기준인 $7.0kg/cm^2$을 값을 나타냈다. 재령 28일 후에도 지속적인 강도 발현 현상이 발생하여, 재령 50일 강도는 재령 28일 강도보다 평균 약 $3.7kg/cm^2$ 큰 일축압축강도를 나타냈다.

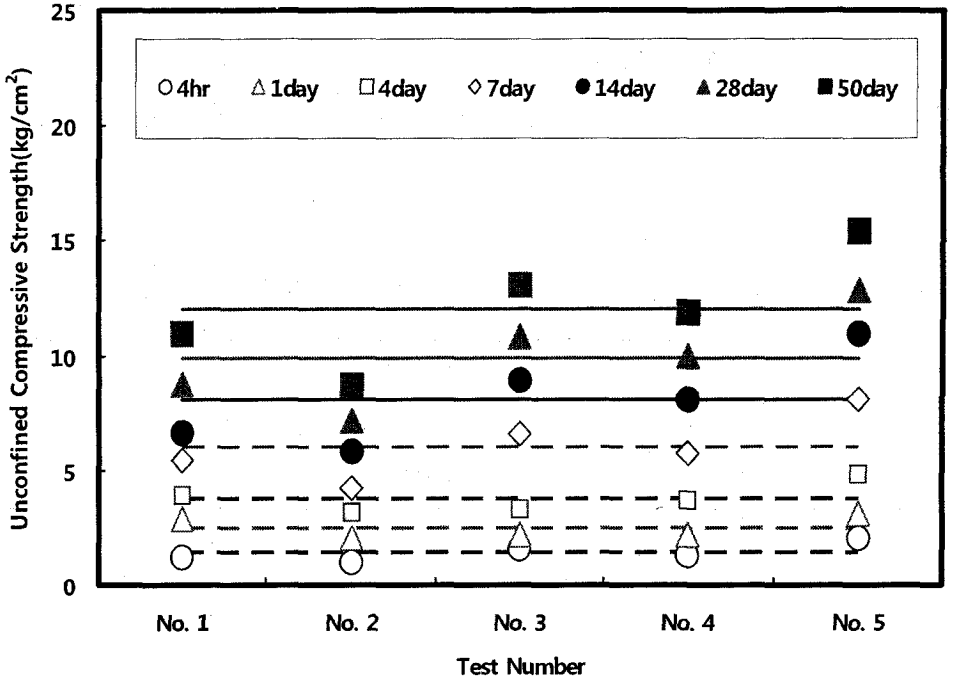


Fig. 3.5.56 현장 Core 채취 시료의 양생기간에 따른 일축압축강도 (Section B)

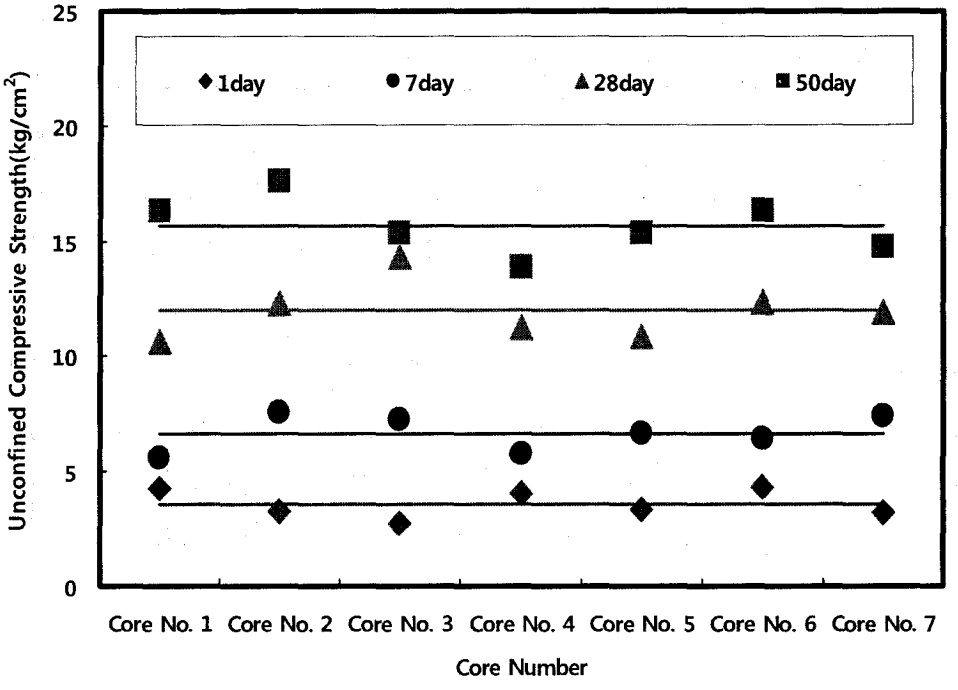


Fig. 3.5.57 현장 Core 채취 지점에 따른 일축압축강도 (Section B)

Fig. 3.5.58은 유동화 처리토의 제조시 공시체로 제작한 것과 현장 타설 후 Core 채취한 경우에 대해, 재령 1일, 재령 4일, 재령 28일, 재령 50일 일축압축강도를 비교한 것이다. Core 채취한 일축압축강도가 재령기간에 상관없이 더 크게 나타났고, 이를 통해 현장 타설한 유동화 처리토의 강도 발현이 더 크다는 것을 파악할 수 있었다.

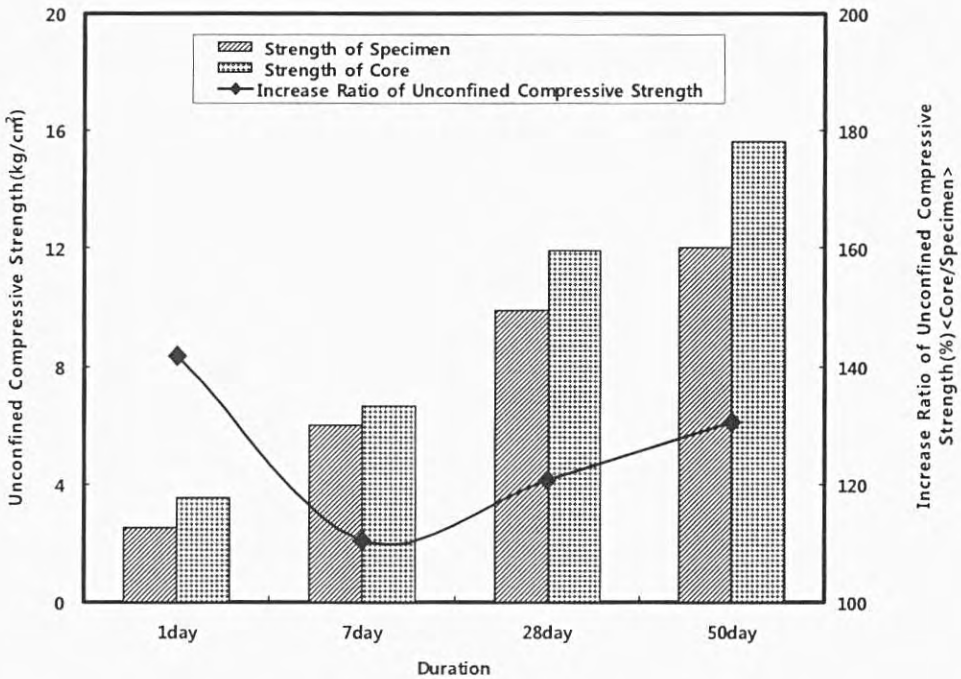


Fig. 3.5.58 유동화 처리토의 제조시 제작한 공시체와 Core 채취한 공시체의 일축압축강도 비교 (Section B)

(4) 투수특성

Table 3.5.33과 Fig. 3.5.59에 Section B에 타설한 유동화 처리토의 변수위 투수계수를 나타냈다. 변수위 투수계수는 3.21×10^{-6}~5.63×10^{-6}cm/sec의 범위로 고르게 나타났으며, 일반적인 유동화 처리토의 투수계수 10^{-6}~10^{-7}cm/sec의 범위에도 적합한 결과를 보였다.

Table 3.5.33 Section B에 타설한 유동화 처리토의 변수위 투수계수 실험 결과

No.	투수계수 (cm/sec)
T9-C1	5.63×10^{-6}
T9-C2	4.12×10^{-6}
T9-C3	4.24×10^{-6}
T9-C4	5.21×10^{-6}
T9-C5	3.21×10^{-6}

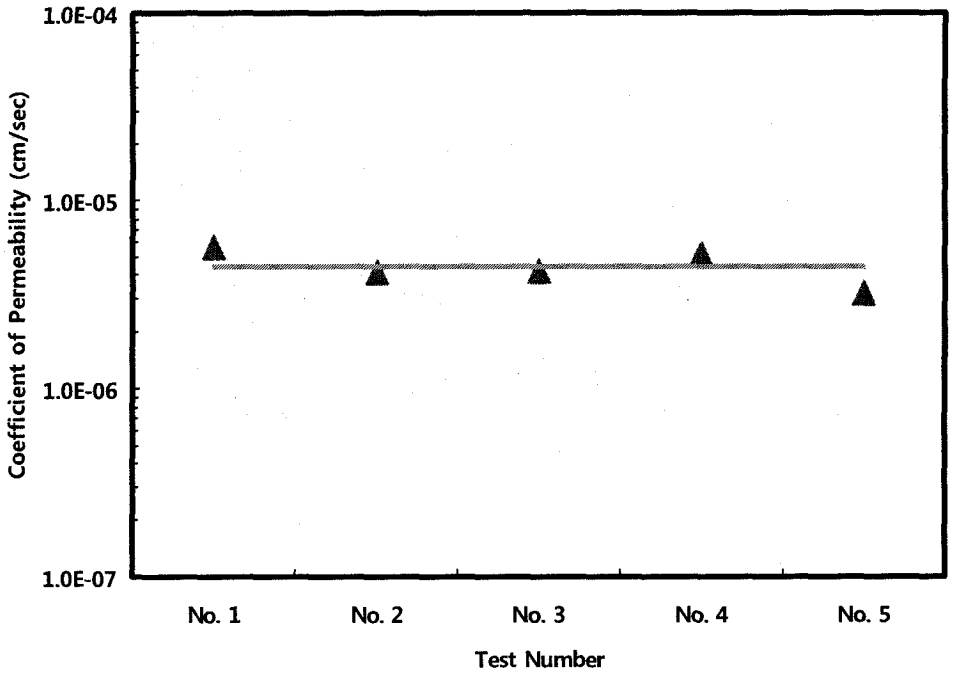


Fig. 3.5.59 Section B에 타설한 유동화 처리토의 변수위 투수계수

다. Section C (현장발생토+석탄회, 파형강관)

(1) 재료분리특성

현장플랜트로 유석탄회를 첨가한 유동화 처리토를 제조한 후 Section C에 타설하기 전, 유동화 처리토의 재료분리 특성이 목표기준에 만족하는지를 알아보기 위해 블리딩 실험을 실시하였다. Section C를 전부 타설하는데 총 5번의 배합을 하였고, 각각의 배합시에 유동화 처리토의 재료분리 특성을 측정한 결과, 모든 실험에서 목표기준인 1%이하를 만족하는 결과를 나타냈다.

(2) 유동성

현장플랜트를 이용하여 석탄회를 첨가한 유동화 처리토를 제조한 후 Section C에 타설하기 전, 유동화 처리토의 유동성이 목표기준에 만족하는지를 알아보기 위해 JHS, ASTM Slump Flow의 3가지 유동성 실험을 실시하였고, 그 결과를 Table 3.5.34와 Fig. 3.5.60에 나타냈다. 총 5번의 유동화 처리토 배합에 대해 유동성을 측정한 결과, JHS는 25.4cm~29.1cm, ASTM은 34.5cm~38.6cm, Slump Flow는 61.5cm~64.4cm로 모두 목표기준을 만족하였다.

Table 3.5.34 Section C에 타설한 유동화 처리토의 유동성 측정 결과

No.	고화재 종류	JHS (cm)	ASTM (cm)	Slump Flow (cm)
T10-C1	C-10	28.5	35.4	63.5
T10-C2		25.4	34.5	62.7
T10-C3		29.1	37.5	64.4
T10-C4		28.6	38.6	61.5
T10-C5		27.5	37.5	63.2

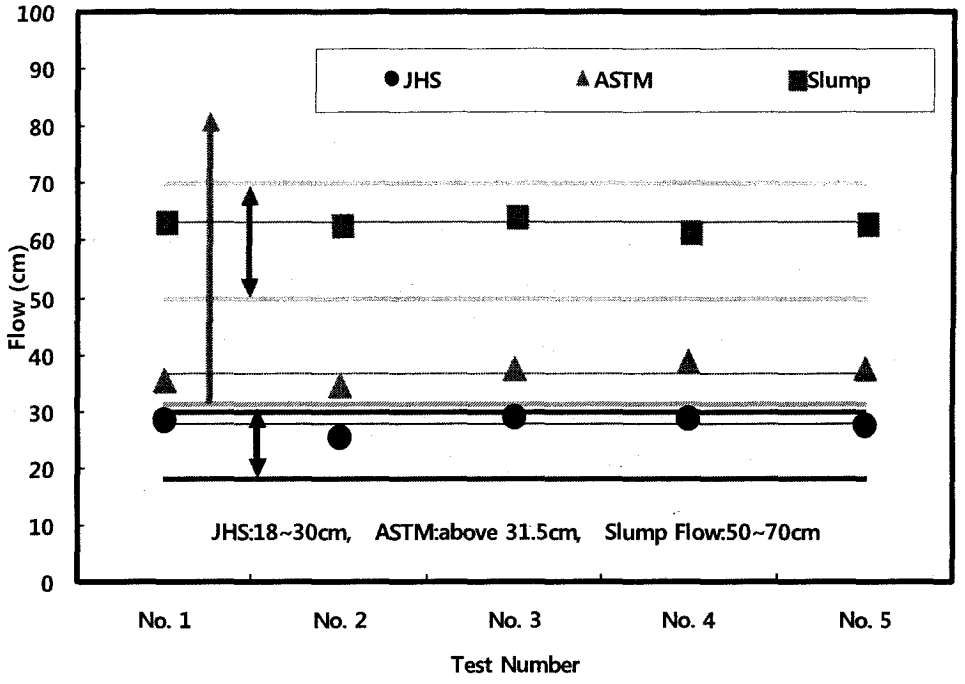


Fig. 3.5.60 Section C에 타설한 유동화 처리토의 유동성

(3) 강도특성

Section C에 타설하기 위해 현장플랜트를 사용하여 제조한 석탄회를 첨가한 유동화 처리토의 강도특성을 파악하고자 공시체를 제작하여 양생기간에 따른 강도를 측정하였다. 1회 배합에 대해 재령 4시간, 재령 1일, 재령 4일, 재령 7일, 재령 14일, 재령 28일, 재령 50일의 일축압축강도를 측정하였고, 정확한 강도특성을 파악하고자 각각 2개의 평균으로 일축압축강도를 결정하였다. Table 3.5.35에 Section C에 타설한 유동화 처리토의 일축압축강도를 제시하였다.

Table 3.5.35 유동화 처리토의 현장 배합 일축압축강도 (Section C)

No.	4시간 (kg/cm^2)	1일 (kg/cm^2)	4일 (kg/cm^2)	7일 (kg/cm^2)	14일 (kg/cm^2)	28일 (kg/cm^2)	50일 (kg/cm^2)
T10-C1-a	1.254	5.698	7.425	11.588	12.482	15.791	20.081
T10-C1-b	1.486	4.260	7.555	9.514	11.607	17.234	21.158
T10-C1-Ave.	1.370	4.979	7.490	10.551	12.045	16.513	20.620
T10-C2-a	1.579	3.665	4.795	7.885	9.857	11.214	14.554
T10-C2-b	2.315	4.574	5.697	8.336	10.257	12.653	13.576
T10-C2-Ave.	1.947	4.120	5.246	8.111	10.057	11.934	14.065
T10-C3-a	1.786	3.541	5.784	8.267	10.367	12.541	16.225
T10-C3-b	1.574	4.326	6.475	9.214	11.245	13.264	15.789
T10-C3-Ave.	1.680	3.934	6.130	8.741	10.806	12.903	16.007
T10-C4-a	1.223	4.407	6.996	12.432	13.548	18.657	20.514
T10-C4-b	1.425	3.687	5.663	11.478	13.024	13.225	17.245
T10-C4-Ave.	1.324	4.047	6.330	11.955	13.286	15.941	18.880
T10-C5-a	2.998	3.789	4.891	6.548	12.338	15.364	16.238
T10-C5-b	1.968	4.257	6.325	9.786	11.236	13.564	18.336
T10-C5-Ave.	2.483	4.023	5.608	8.167	11.787	14.464	17.287

Fig. 3.5.61은 Section C에 타설한 석탄회를 첨가한 유동화 처리토의 양생기간에 따른 강도특성을 파악하고자, 배합시 제작한 공시체를 통해 일축압축실험을 실시한 결과를 나타낸 것이다. 양생기간이 증가할수록 일축압축강도가 증가하는 경향을 나타냈다. Fig. 3.5.62에 석탄회를 첨가하여 현장 배합한 유동화 처리토의 각 배합 차수에 따른 재령기간에 따른 평균 일축압축강도를 파악하고자, 유동화 처리토 제조시의 배합 차수에 따른 재령 강도를 나타냈다. 재령 1일 일축압축강도는 목표기준인 $2.0kg/cm^2$을 모두 만족하였지만, 목표기준의 2배 이상의 큰 강도를 나타냈다. 재령 28일 일축압축강도는 목표기준인 $7.0kg/cm^2$을 만족하지 못 하였고, 역시 목표기준의 2배 이상의 큰 강도가 발현됐다. 재령 28일 후에도 지속적인 강도 발현 현상이 발생하여, 재령 50일 강도는 재령 28일 강도보다 약 $3.2kg/cm^2$ 정도 큰 $17.3716kg/cm^2$을 나타냈다.

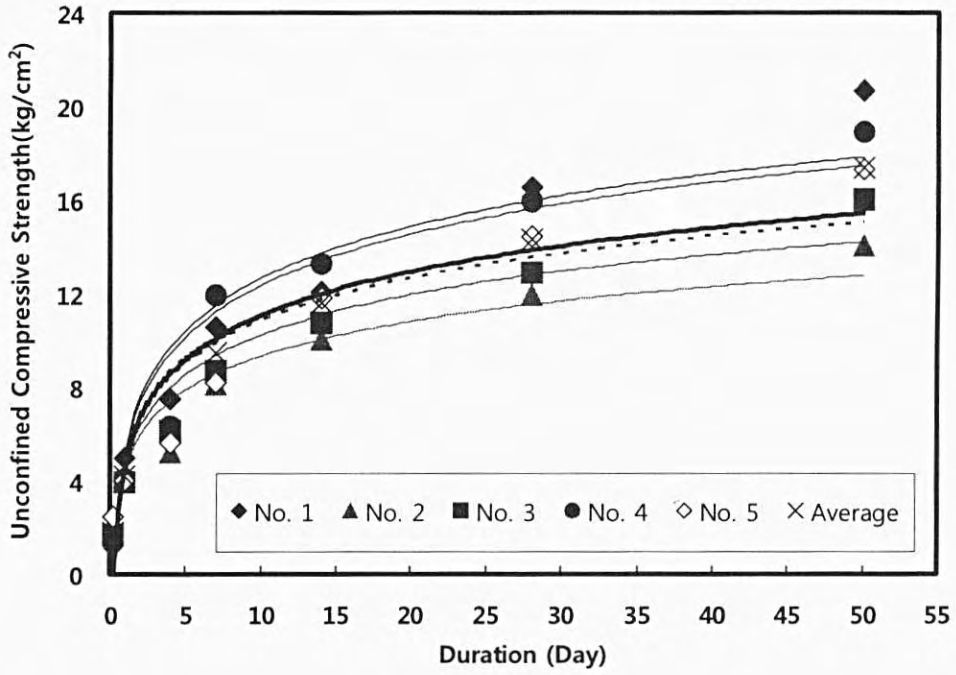


Fig. 3.5.61 현장 배합한 유동화 처리토의 양생기간에 따른 일축압축강도 (Section C)

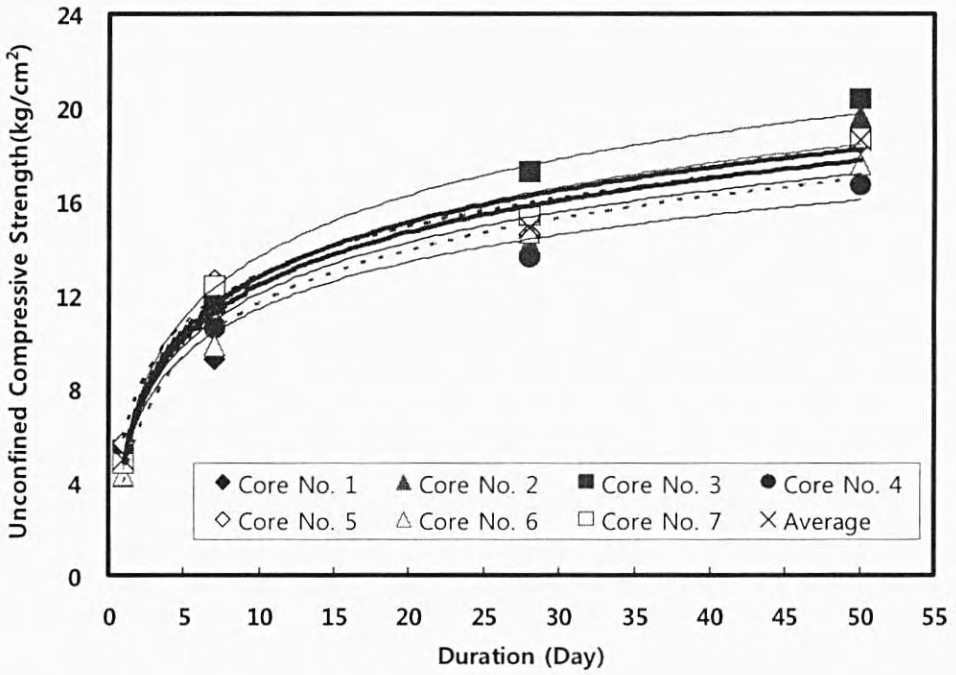


Fig. 3.5.62 현장 배합한 유동화 처리토의 배합 차수에 따른 일축압축강도 (Section C)

Section C에 현장플랜트를 사용하여 제조한 석탄회를 첨가한 유동화 처리토를 타설한 후 재령 1일, 재령 4일, 재령 14일, 재령 28일, 재령 50일의 현장 강도를 측정하기 위해 현장 Core 채취를 실시하였다. Table 3.5.36에 Section C에서 현장 Core 채취한 시료의 일축압축강도를 제시하였다.

Table 3.5.36 현장 Core 채취 시료의 일축압축강도 결과 (Section C)

No.	1일 (kg/cm^2)	7일 (kg/cm^2)	28일 (kg/cm^2)	50일 (kg/cm^2)
T10-C1 (Core)	5.678	9.261	14.562	18.632
T10-C2 (Core)	4.256	12.634	14.236	19.624
T10-C3 (Core)	5.336	11.575	17.217	20.364
T10-C4 (Core)	4.786	10.556	13.556	16.667
T10-C5 (Core)	5.651	12.634	14.578	18.456

Fig. 3.5.63에 현장 Core 채취 시료의 일축압축강도 결과를 양생기간에 따라 나타내었었다. 양생기간이 증가할수록 일축압축강도는 증가하는 것을 파악할 수 있었다. 양생기간이 증가할수록 Core 채취 지점에 따른 강도 차이가 크게 나타났다. Fig. 3.5.64는 현장 Core 채취 지점에 따른 일축압축실험 결과를 나타냈다. 현장 Core를 통해 채취한 재령 1일 일축압축강도는 만족했지만 재령 28일 일축압축강도는 목표기준을 상회하였다. 재령 50일 일축압축강도를 통해 재령 28일 이후에도 지속적인 강도 증가 현상이 발생하는 것을 알 수 있었지만, 강도 증가량은 크지 않았다.

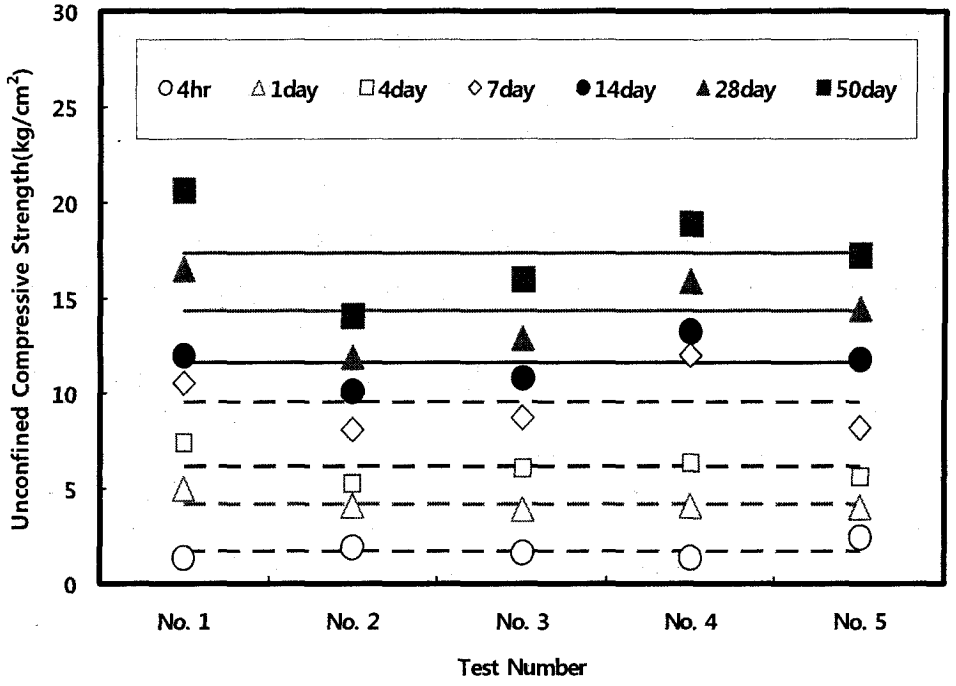


Fig. 3.5.63 현장 Core 채취 시료의 양생기간에 따른 일축압축강도 (Section C)

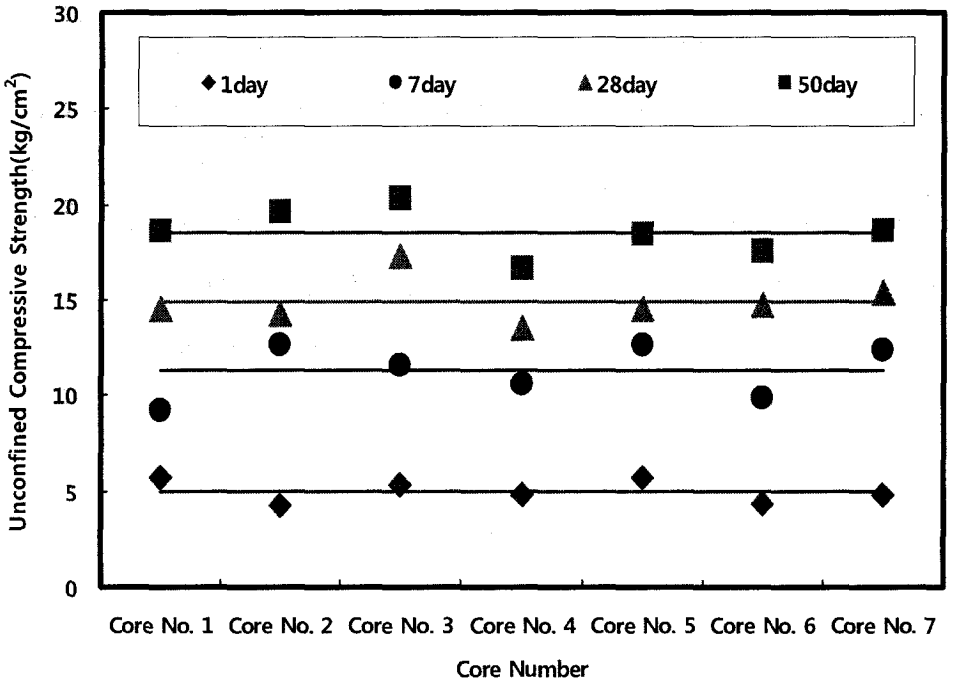


Fig. 3.5.64 현장 Core 채취 지점에 따른 일축압축강도 (Section C)

Fig. 3.5.65는 유동화 처리토의 제조시 공시체로 제작한 것과 현장 타설 후 Core 채취한 경우에 대해, 재령 1일, 재령 4일, 재령 28일, 재령 50일 일축압축강도를 비교한 것이다. Core 채취한 일축압축강도가 재령기간에 상관없이 더 크게 나타났고, 이를 통해 현장 타설한 유동화 처리토의 강도 발현이 더 크다는 것을 파악할 수 있었다.

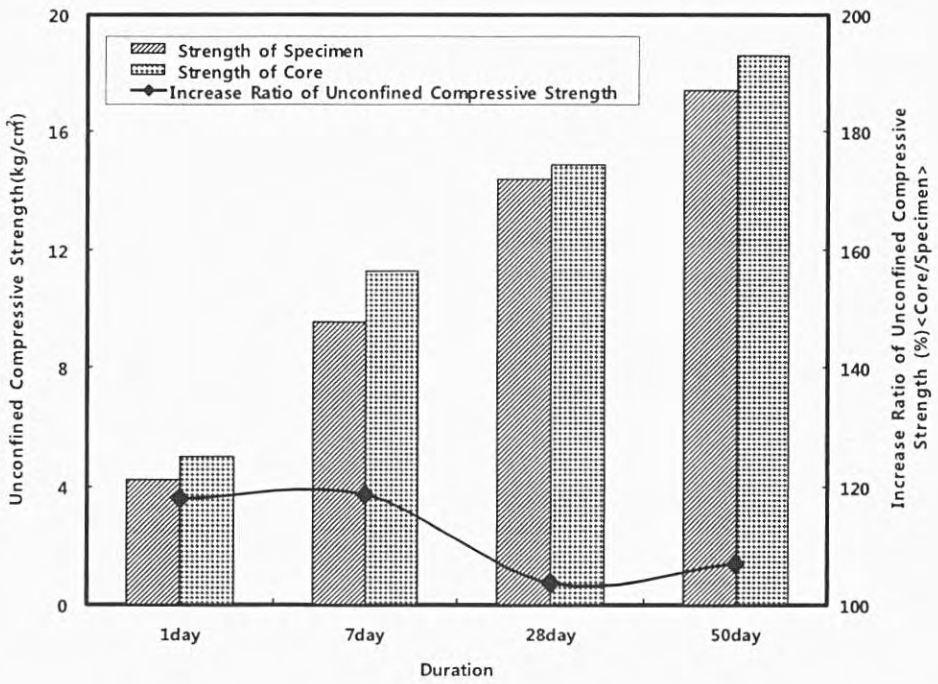


Fig. 3.5.65 유동화 처리토의 제조시 제작한 공시체와 Core 채취한 공시체의 일축압축강도 비교 (Section C)

(4) 투수특성

Table 3.5.37과 Fig. 3.5.66에 Section C에 타설한 유동화 처리토의 변수위 투수계수를 나타냈다. 변수위 투수계수는 4.12×10^{-6}~5.23×10^{-6}cm/sec의 범위로 고르게 나타났으며, 일반적인 유동화 처리토의 투수계수 10^{-6}~10^{-7}cm/sec의 범위에도 적합한 결과를 보였다.

Table 3.5.37 Section C에 타설한 유동화 처리토의 변수위 투수계수 실험 결과

No.	투수계수 (cm/sec)
T10-C1	5.63×10^{-6}
T10-C2	4.12×10^{-6}
T10-C3	4.24×10^{-6}
T10-C4	5.21×10^{-6}
T10-C5	3.21×10^{-6}

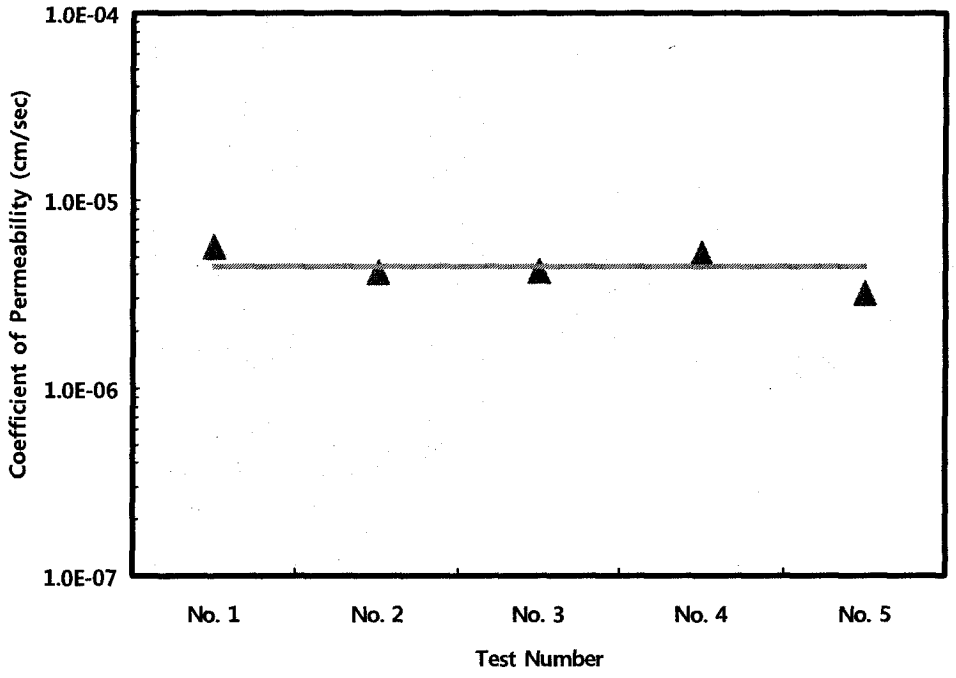


Fig. 3.5.66 Section C에 타설한 유동화 처리토의 변수위 투수계수

6. 현장 적용성 평가의 요약

현장 시험 시공을 통해 유동화 처리토의 현장 적용성을 평가하기 위하여, 실내 실험을 통해 도출된 연구 결과를 활용하여 선진국의 품질 기준을 만족하는 동시에 기존의 시공 방법이 갖는 문제점의 해결하고자 하였고, 그 결과는 다음과 같다.

1. 현장발생토만을 적용한 Section A와 B, 현장발생토와 석탄회를 혼합하여 적용한 Section C 모두 재료분리 특성은 목표 기준인 1% 이하의 값을 나타냈다.
2. 유동성 측정결과, JHS, ASTM, Slump Flow의 3가지 조건에서 모두 목표 기준을 만족하였고, 강도특성은 재령 4시간 강도와 재령 1일 강도 등의 조기강도는 목표기준에 만족하였지만, 장기강도는 목표 기준을 상회하는 값을 나타냈다. 이러한 현상은 현장발생토와 석탄회를 혼합하여 적용한 유동화 처리토에서 더 크게 나타났다.
3. 공시체로 제작한 유동화 처리토의 강도와 현장 Core 시료의 강도특성을 비교한 결과 현장에 타설한 후 Core 채취를 통해 측정한 시료의 일축압축강도가 전반적으로 크게 나타났다.
4. 현장 시험 시공에 사용된 모든 유동화 처리토의 변수위 투수계수는 3.21×10^{-6}~5.57×10^{-6}cm/sec의 범위로 고르게 나타났으며, 일반적인 유동화 처리토의 투수계수 10^{-6}~10^{-7}cm/sec의 범위에도 적합한 결과를 보였다.

제 6 절 유동화 처리토 공법의 경제성

1. 본 시험 시공에 사용된 시공비용

유동화 처리토 공법은 매설관의 하부와 좁은 공간의 뒤채움 작업 등에 적용할 수 있는 공법으로 본 연구에서 수행한 현장 시험 시공비를 자료로 하여 유동화 처리토 공법의 경제성을 파악하였다.

유동화 처리토 공법을 적용하여 현장플랜트를 설치하였고, 3개소(PC암거 매설 1개소, 파형강관 매설 2개소), 총 78.813m^{3}을 대상으로 시험시공을 수행하였다. 본 공법에 사용된 비용을 유동화 처리토의 현장 시험 시공 단계별 총 비용을 재료비, 노무비, 경비로 구분하여 Table 3.6.1에서 제시하였다. 각 단계는 시공 순서에 의해 부지 조성 및 터파기, 구조물 안착, 현장 발생토 선별, 선별된 현장발생토 이송, 고화재 및 물 저장, 유동화 처리토 교반, 유동화 처리토 타설로 구분하였다.

Table 3.6.1 유동화 처리토의 현장 시험 시공 단계별 총 비용

No.	품명	재료비(원)	노무비(원)	경비(원)	합계(원)	비고
제 1호표	부지조성(정리) 및 터파기	4,675,000	440,000	628,000	5,743,000	
제 2호표	구조물 안착	2,959,000	220,000	-	3,179,000	
제 3호표	현장발생토 선별	-	110,000	33,330,000	33,440,000	
제 4호표	선별된 현장발생토 이송	-	110,000	20,220,000	20,330,000	
제 5호표	고화재 투입 및 물 저장	-	110,000	232,700	342,700	
제 6호표	유동화 처리토 교반	1,497,500	-	17,330,000	18,827,500	
제 7호표	유동화 처리토 타설	550,000	220,000	-	770,000	
합계		9,681,500	1,210,000	71,740,700	82,632,200	

Table 3.6.2~3.6.8에 사용된 비용을 세부내용을 포함하여 나타내었다. Table 3.6.2에는 부지 조성 및 터파기에 소요된 비용을 제시하였고, 이 과정에 현장플랜트의 운반에 사용된 트레일러와 현장플랜트의 적절한 배치를 위한 지게차를 사용료를 포함하였다. 또한, 원활한 현장 시험시공을 위하여 컨테이너를 설치하여 유동화 처리토의 단위중량, 블리딩, 유동성, 강도 등의 측정을 용이하게 하였다. 덤프와 백호를 이용하여 현장 시험 시공 부지 조성과 3개 Section의 터파기를 실시하였다.

Table 3.6.2 제 1호표(부지 조성(정리) 및 터파기)

품명	내용	기본 단위	수량	단가 (원)	재료비 (원)	노무비 (원)	경비(원)	합계(원)	비고
부지 조성 및 터파기	트레일러	대	1	1,925,000	1,925,000	-	-	1,925,000	
	덤프	대	2	550,000	1,100,000	-	-	1,100,000	
	백호	대	3	550,000	1,650,000	-	-	1,650,000	
	컨테이너	동	1	551,000	-	-	551,000	551,000	
	지게차	대	1	77,000	-	-	77,000	77,000	
	인건비	인	4	110,000	-	440,000	-	220,000	
합계					4,675,000	440,000	628,000	5,743,000	

Table 3.6.3에서 구조물을 안착시키는데 소요된 비용을 나타내었다. 유동화 처리토의 현장 적용성 평가를 실시하기 위해 2개 section에 파형강관, 1개 section에 PC 암거 구조물을 선정하였으며, 백호를 이용하여 구조물을 안착시켰다.

Table 3.6.3 제 2호표(구조물 안착)

품명	내용	기본 단위	수량	단가 (원)	재료비 (원)	노무비 (원)	경비(원)	합계(원)	비고
구조물 안착	백호	대	1	550,000	550,000	-	-	550,000	
	파형강관	개	2	775,500	1,551,000	-	-	1,551,000	
	PC암거	개	1	858,000	858,000	-	-	858,000	
	인건비	인	2	110,000	-	220,000	-	220,000	
합계					2,959,000	220,000	-	3,179,000	

Table 3.6.4에는 유동화 처리토를 제조하기 위해 현장 발생토를 선별하는데 소요된 금액을 제시하였다. 골재분류스크린, 토사 저장 장치, 정량 공급 장치, Vibrator의 제작 비용을 제시하였다. 정량 공급 저장 장치를 이용하여 원통형 골재분류 스크린에 토사를 투입한 후 토사를 선별하고 선별된 토사는 토사 저장 장치에 저장된는데, 이때 토사의 적채 현상을 방지하기 위하여 Vibrator를 제작하였다. 플랜트를 운전시키기 위한 발전기 및 유류비를 포함하여 금액을 산정하였다.

Table 3.6.4 제 3호표(현장 발생토 선별)

품명	내용	기본 단위	수량	단가 (원)	재료비 (원)	노무비 (원)	경비(원)	합계(원)	비고
현장 발생토 선별	골재분류스크린	세트	1	10,450,000	-	-	10,450,000	10,450,000	
	토사 저장 장치	세트	1	8,000,000	-	-	8,000,000	8,000,000	
	정량 공급 장치	세트	1	7,000,000	-	-	7,000,000	7,000,000	
	Vibrator	세트	1	7,550,000	-	-	7,550,000	7,550,000	
	발전기	대	2	110,000	-	-	220,000	220,000	
	유류비(발전기)	회	1	110,000	-	-	110,000	110,000	
	인건비	인	1	110,000	-	110,000	-	110,000	
합계					-	110,000	33,330,000	33,440,000	

선별된 현장 발생토를 이송하는데 소요된 비용을 Table 3.6.5에 나타내었다. 현장 발생토를 선별하고, 선별된 현장발생토를 후속 공정인 배치 플랜트로 이송할 수 있도록 골재 컨베이어 분류 시스템과 모터 및 배전 컨트롤러의 제작비용을 포함하여 산정하였다. 또한 발전기, 유류비, 인건비를 추가하여 금액을 산정하였다.

Table 3.6.5 제 4호표(선별된 현장 발생토 이송)

품명	내용	기본 단위	수량	단가 (원)	재료비 (원)	노무비 (원)	경비(원)	합계(원)	비고
선별된 현장 발생토 이송	골재 컨베이어 분류 시스템	세트	1	8,000,000	-	-	8,000,000	8,000,000	
	모터 및 배전 컨트롤러	세트	1	12,000,000	-	-	12,000,000	12,000,000	
	발전기	대	1	110,000	-	-	110,000	110,000	
	유류비(발전기)	회	1	110,000	-	-	110,000	110,000	
	인건비	인	1	110,000	-	110,000	-	220,000	
합계					-	110,000	20,220,000	20,330,000	

Table 3.6.6에 고화재 투입 및 물 저장에 사용된 비용을 나타내었다. 유동화 처리토를 제조하기 위하여 사용된 고화재는 수동으로 계량 장비에 투입하였고, 소요되는 물은 별도의 저장 탱크에 보관하였다.

Table 3.6.6 제 5호표(고화재 투입 및 물 저장)

품명	내용	기본 단위	수량	단가 (원)	재료비 (원)	노무비 (원)	경비(원)	합계(원)	비고
고화재 투입 및 물 저장	고화재 투입	인	1	110,000	-	110,000	-	110,000	
	물 저장 탱크	개	1	232,700	-	-	232,700	232,700	
합계					-	110,000	309,000	342,700	

Table 3.6.7에 유동화 처리토 교반에 소요된 금액을 제시하였다. 고화처리 컨테이너, 재료 공급 제어기(계량기), 믹서 등의 플랜트 제작비용을 포함한 금액으로 산정하였고, 고화재와 물 등의 재료비도 포함하였다. 도한 현장 플랜트의 작동을 위한 발전기와 유류비를 포함하여 소요비용을 산정하였다.

Table 3.6.7 제 6호표(유동화 처리토 교반)

품명	내용	기본 단위	수량	단가 (원)	재료비 (원)	노무비 (원)	경비(원)	합계(원)	비고
유동화 처리토 교반	고화처리 컨테이너	세트	1	6,000,000	-	-	6,000,000	6,000,000	
	재료 공급 제어기	세트	1	3,000,000	-	-	3,000,000	3,000,000	
	믹서	세트	1	8,000,000	-	-	8,000,000	8,000,000	
	고화재	25kg	2,500	539	1,347,500	-	-	1,347,500	
	물	m^3	15	10,000	150,000	-	-	150,000	
	발전기	대	2	110,000	-	-	220,000	220,000	
	유류비(발전기)	회	1	110,000	-	-	110,000	110,000	
합계					1,497,500	-	17,330,000	18,827,500	

Table 3.6.8에는 제조된 유동화 처리토를 이용하여 타설하는데 소요된 금액을 나타내었다.

Table 3.6.8 제 7호표(유동화 처리토 타설)

품명	내용	기본 단위	수량	단가(원)	재료비(원)	노무비(원)	경비(원)	합계(원)	비고
유동화 처리토 타설	백호	대	1	550,000	550,000	-	-	550,000	
	인건비	인	2	110,000	-	220,000	-	220,000	
합계					550,000	220,000	-	770,000	

Table 3.6.9에는 유동화 처리토 m^3당 산정된 제조 단가를 시공 단계별로 나타내었다. 각 시공 단계에서 사용된 고화재, 물, 백호, 인건비, 발전기, 유류비는 각각의 현장 시험 시공 사용 금액에서 Section A, B, C의 총 시공량인 77.818m^3을 나누어 1m^3의 제조 단가를 산정하였다. 또한 현장발생토 선별(골재분류 스크린, 토사 저장 장치, 정량 공급 저장 장치, vibrator), 선별된 현장발생토 이송(골재 컨베어 분류 시스템, 모터 및 배전 컨트롤러), 유동화 처리토 교반(고화처리 컨테이너, 재료 공급 제어기, 믹서) 등의 현장 플랜트 제작에 대한 비용은 현장플랜트의 1일 평균 생산 가능한 유동화 처리토의 제조량(60m^3/day)과 현장 플랜트의 예상 최소 내구성(10년)을 기준으로 산정하였다. 현장플랜트의 가능한 총 제조량은 총 219,000m^3이며 이를 각각의 플랜트에 소요된 금액으로 나누어 1m^3의 제조 단가를 산정하였다.

Table 3.6.9 m^3당 유동화 처리토 제조 단가 산정

품명	재료비(원)	노무비(원)	경비(원)	합계(원)	비고
현장발생토 운반 및 설치	-	-	17,631	17,631	
현장발생토 선별	-	1,414	2,978	4,392	
선별된 현장발생토 이송	-	1,414	1,505	2,919	
고화재 투입 및 물 저장	-	-	1,542	1,542	
유동화 처리토 교반	10,280	-	2,905	13,185	
합계	10,280	2,828	26,561	39,669	

2. 본 공법과 타 공법의 제조단가 비교

본 공법과 기존에 주로 사용되어 온 뒤채움 공법과의 경제성을 비교하기 위해, 건설공사 실적공사비 적용 공종 및 단가(건설기술연구원) 및 토목 일위대가를 참고하여 모래다짐 공법을 사용하여 본 연구에서 수행한 현장 시험시공과 동일한 공사를 수행했을 때의 시공비용을 Table 3.6.10 ~ Table 3.6.12와 같이 산정하였다. 모래다짐공법은 유동화 처리토 공법과 같이 플랜트 설치비용은 소요되지 않지만, 굴착 후의 잔토처리 비용과 잔토 운반비용 및 채움재인 모래 구입 등의 추가 비용이 발생하게 된다.

Table 3.6.10 인건비 및 기타 (모래다짐공법 적용시)

구분	기본단위	단가(원)	수량	금액(원)
인건비	인	110,000	11	1,210,000
잔토처리	m^3	431	78.813	33,968
기타 잡비				309,700
합계	1,553,668			

Table 3.6.11 장비 및 시설비 (모래다짐공법 적용시)

구분	기본단위	단가(원)	수량	금액(원)
백호	대	550,000	6	3,300,000
덤프	대	550,000	8	4,400,000
유류비	회	110,000	1	110,000
뒤채움/부설 및 다짐	m^3	5,025	78.813	396,035
컨테이너	동	551,000	1	551,000
합계	8,757,035			

Table 3.6.12 재료비 (모래다짐공법 적용시)

구분	기본단위	단가(원)	수량	금액(원)
파형강관	개	775,500	2	1,551,000
PC암거	개	858,000	1	858,000
모래	m^3	20,000	78.813	1,576,260
물	m^3	10,000	15	150,000
합계	4,135,260			

유동화 처리토 공법과 모래다짐공법의 총시공비용을 비교한 결과, 유동화 처리토 공법은 82,632,200원, 모래다짐공법은 4,135,260원의 시공비가 산출되었다. 하지만 본 공법에서는 유동화 처리토를 제조하기 위한 현장 플랜트의 제작비용이 추가되어 순수한 시공비만으로 두 공법의 경제성을 비교하는 것에는 한계가 있었다. 그러므로 현장 플랜트의 감가상각을 고려하여 산정한 유동화 처리토의 m^3당 제조 단가(39,669원)와 비교하기 위해 모래다짐공법에 소요되는 m^3당 순수 재료비를 산정한 결과, 34,100원이었고, 구조물의 뒷채움 및 되메움에 사용할 수 있는 고화처리공법의 m^3당 제조단가는 (주)지오시스에서 산정한 현장잔토를 100% 재활용 할 때의 고화처리 공법의 비용인 29,242원을 기준으로 하였다.

Table 3.6.13에 유동화 처리토, 모래대짐공법, 고화처리공법의 m^3당 제조 단가를 제시하였다. 유동화 처리토는 Table 6.3.9에서 제시한 금액일 기준으로 하였고, 모래다짐 공법은 위의 방법과 마찬가지로 건설공사 실적공사비 적용 공종 및 단가(건설기술연구원) 및 토목 일위대가를 참고하였다. 또한 고화처리 공법은 (주)지오시스에서 제시한 잔토를 100% 재활용 할 때의 고화처리 공법의 비용 산정을 참고하여 비교하였다. 그 결과 유동화 처리토의 제조 단가는 모래다짐 공법에 비해 약 5,569원, 고화처리공법에 비해 약 10,427원의 추가비용이 소요되는 것으로 나타났다. 하지만 본 연구에서는 유동화 처리토의 현장 적용성을 위한 실험 시공 금액을 기준으로 산정한 것으로, 현장플랜트의 이동 및 배치에 소요된 비용이 컸기 때문에, 78.813m^3의 소규모 공사가 아닌 대규모 공사에 적용할 경우 현재 산정한 제조단가보다 저렴한 제조단가 절감 효과를 나타낼 것이라 판단된다.

Table 3.6.13 유동화 처리토 제조 단가 및 기존 공법의 제조 단가(m^3)

공법	재료비(원)	노무비(원)	경비(원)	합계(원)
유동화 처리토	10,280	2,827	26,560	39,669
모래다짐	23,023	4,214	6,863	34,100
고화처리	22,584	2,742	3,916	29,242

위에서 제시한 것과 같이 유동화 처리토 공법에는 현장발생토 운반 및 설치에 소요되는 고정 비용이 소요된다. 이러한 고정비용을 제외한 유동화 처리토의 m^3당 제조단가는 22,037원으로 모래다짐공법과 고화처리공법에 비해 각각 약 12,000원과 약 7,200원의 비용절감이 기대된다. 그러므로 현장 플랜트의 이동 및 설치비용을 고정한 후, 유동화 처리토의 시공량에 따른 제조단가를 모래다짐공법 및 고화처리 공법과 비교하고자 Fig. 3.6.1을 제시하였다. 본 시험 시공에서는 현장플랜트의 해체 비용이 산정되지 않았기 때문에, 현장 플랜트의 해체비를 추가하고, 현장 플랜트의 장거리 이동에 따른 비용 증가와 설치비응 고려하여, 그 비용을 1,000으로 가정한 후 Fig. 3.6.1에 나타냈다. 현장 플랜트의 이동 및 설치비용을 1,000만원으로 하고 가정한 경우, 약 1,320m^3 이상의 공사에 유동화 처리토 공법을 적용할 경우 경제적 이익을 기대할 수 있다.

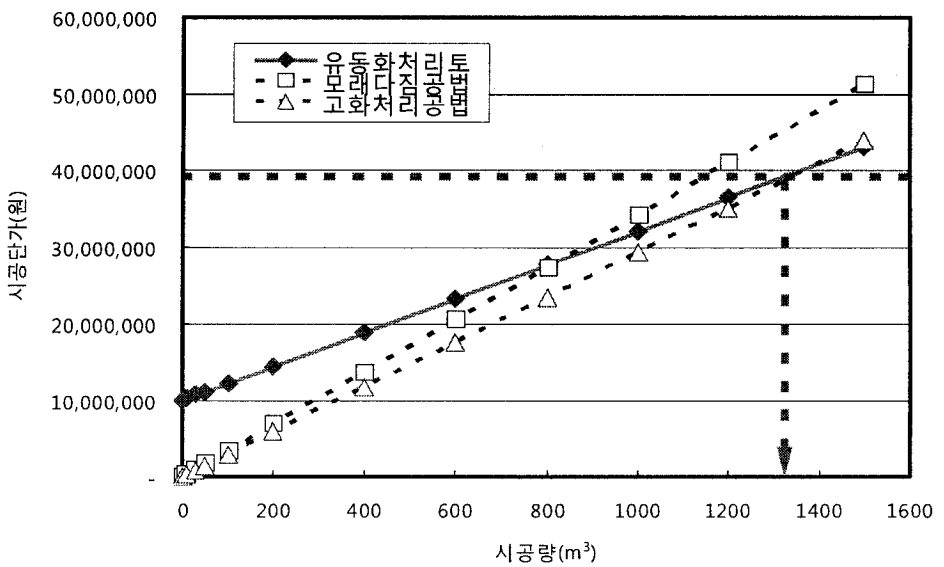


Fig. 6.3.1 현장 플랜트의 이동 및 설치비를 1,000만원으로 가정한 경우, 시공량에 따른 공법별 시공단가

제 7 절 유동화 처리토의 설계 프로세스 및 시방서 개발

1. 배합설계

가. 배합설계와 품질

유동화 처리토는 현장발생토(건설 발생토 및 건설니토)를 주재료로 사용한다. 이때 재활용의 관점에서 발생토의 종류를 선별하여 사용하거나, 흙의 성질에 따라 적합한 재료를 선정해야한다. 또한, 유동화 처리토는 구조물의 뒷채움 및 충전재로서 사용되므로 그 품질은 안정되고 균질하게 관리되어야 하므로 품질관리는 다음의 4가지로 하고 있다.

① 재료분리 특성
② 강도특성
③ 유동성
④ 투수특성

위의 4개의 품질을 지정된 횟수대로 실험을 실시하여 현장발생토, 물, 고화재의 양을 결정하여 유동화 처리공법의 배합설계를 실시한다. 일반적으로 고화 처리토의 배합설계가 일축압축강도만을 품질 기준으로 규정하고 있는 것에 비해 4개의 품질 실험을 추가로 하기 때문에 기존의 토질 안정 처리 방법보다 더 엄격한 기준이 적용된다고 할 수 있다.

(1) 재료분리 특성

유동화 처리토의 재료분리 특성은 블리딩율을 측정하여 파악할 수 있다. 유동화 처리토에 있어서, 블리딩은 교반 후 고화재와 현장발생토 등이 침하함으로써 물이 분리 상승되어 표면에 떠오르는 현상을 말한다. 이는 비중과 입경이 서로 다른 구성 재료로서 각 재료의 비중 및 입자크기의 차이에 의하여 분리가 발생하기 쉬우며, 거의 모든 시료에서 발생 된다. 일종의 재료분리이므로 블리딩율이 크면 상부

가 다공질이 되며 강도, 수밀성 및 내구성이 감소되고, 현장발생토 등의 밑 부분에 수막을 만들고 수밀성을 감소시킨다. 블리딩에 미치는 영향요인으로는 배합요인, 재료요인, 시공 및 환경요인 등이 있고, 이외에 대상재료의 특성, 유동성, 배합오차 등에 따라 영향을 받으며 이는 재료분리로 인해 강도 및 내구성 등에 영향을 미칠 수 있다.

블리딩이 발생하면 유동화 처리토의 표면 부분은 함수비가 높아져 표면 부분의 강도가 저하한다. 이러한 상태로 블리딩이 발생한 부분에 압축 하중이 가해지면, 부분적인 침하 또는 압축 변형이 일어날 수 있고, 전단 하중이 가해지면 부분적으로 충분한 전단 저항을 발휘할 수 없게 된다. 블리딩의 발생을 억제하기 위해서는 유동화 처리토의 점성을 늘리는 방법과 유동화 처리토 중의 세립토의 비율을 높이는 방법을 적용할 수 있다. 또한 유동화 처리토의 점성을 높이는 방법을 사용하면 조립토의 침강을 억제할 수 있다. 배합설계에서는 규정된 블리딩율 이하가 되도록 유동화 처리토의 밀도 등을 실내시험에 의해 파악해야 한다.

(2) 일축압축강도와 습윤 밀도

유동화 처리토는 뒷채움이 어려운 협소한 공간에 사용하기에 적합하다. 그 품질은 주변의 구조물의 부식을 초래하지 않고, 압축 하중이나 전단 하중을 받았을 때에 변형이나 파괴가 발생하지 않는 강도가 요구된다. 이 때 타설된 유동화 처리토에 균열이 발생하면, 강도가 강한 부분에 응력이 집중하는 경향이 있으므로, 유동화 처리토의 균열이 발생하지 않게 하고, 강도 발현이 가능한 균등하게 되도록 해야 한다. 유동화 처리토의 강도특성은 압축 강도와 전단 강도를 측정하여 파악할 수 있다.

유동화 처리토 강도 발현의 원리는 고화재에 의한 고화 강도와 현장발생토에 포함되는 모래에 의해 발현되는 강도가 있다. 전단 하중이 작용할 때 고화재의 Cementation에 의한 고화 강도에 의해 파괴가 발생된 후에, 모래에 의한 강도가 발휘되고, 고화 강도는 일축압축시험으로 측정할 수 있다. 압축 강도는 일축압축강도의 약 90% 정도, 전단 강도는 일축압축강도의 약 50%로 측정된다.

한편, 모래에 의한 강도는 삼축압축시험에 의해 파악할 수 있고, 유동화 처리토에 포함되는 모래분이 많아져 습윤 밀도 ρt가 1.6g/cm^{3}를 넘게 되면, Cementation에

의해 파괴가 발생된 후, 모래의 interlocking에 의해 전단 저항이 발휘된다. 유동화 처리토의 강도는 기본적으로 고화 강도를 기준으로 파악하며, 삼축압축시험을 배합 시험마다 실시하는 것이 어렵고 현실적으로 불가능하기 때문에, 모래에 의한 강도는 습윤 밀도를 통해 간접적으로 파악한다.

따라서 유동화 처리토의 강도특성은 일축압축강도와 습윤 밀도로 규정할 수 있다. 강도의 일반적인 기준치는 재굴착이 필요할 경우, 일축압축강도는 7.0kg/cm^2 이하, 현장 CBR치는 30% 이하가 되어야 재굴착이 가능하다. 배합설계는 이러한 목표치를 실내 시험을 통해 파악하는 단계라 할 수 있다.

(3) 유동성

유동성은 일본의 도로공단 규격 실린더몰드(JHS A 313, 직경80mm×높이80mm), 미국의 표준시험협회 실린더몰드(ASTM D 6133, 직경11.8mm×높이23.6mm), 한국의 슬럼프 콘(KS F 2402, 밑면안지름20cm×윗면안지름10cm×높이30cm)을 사용하여 평가한다. 각 시료별 유동성 시험은 간편한 장점이 있지만 개인의 숙련도에 의해 측정의 결과가 다르게 나타나는 단점이 있다.

유동성 평가는 유동화 처리토와 플로우판의 마찰이 플로우치에 많은 영향을 미치기 때문에, 유동화 처리토 본래의 물리적인 유동성이 정확하게 평가되고 있다고 보기는 어렵다. 하지만 현장에 유동화 처리토를 타설 했을 때의 유동화 처리토의 유동성과 플로우치에 대한 경험적인 예측이 어렵기 때문에 이러한 유동성 시험을 통해 상대적인 품질 변화를 파악하여 유동화 처리토의 유동성 품질을 규정하는데 사용해야한다.

유동화 처리토의 점성이 커지면 유동경사는 높아지고, 반대로 점성이 작아지면 유동경사는 낮아진다. 그러나 점성이 낮으면 물의 배합이 많아지기 때문에 밀도가 낮고 재료 분리가 큰 유동화 처리토가 된다. 이러한 상호 관계를 파악하여 플로우치는 블리딩율을 고려하여 상한치를 규정해야 한다. 하한치에 대해서는 점성이 높아도 시공이 허용 되는 유동성(플로우치)을 고려해서 결정할 수 있다. 플로우치가 120mm 이하로 나타나면 유동경사가 10%를 넘어 시공이 어려울 수 있지만, 이러한 경우 호퍼 등을 사용하여 타설 에너지를 증가시키는 등 시공방법의 다양화로 보완할 수 있다.

(4) 투수특성

일반적으로 유동화 처리토의 투수계수는 10^{-6}~10^{-7}cm/s의 범위에서 나타난다. 유동화 처리토의 투수계수를 측정하기 위해 양생기간에 따른 변수위 투수실험을 실시한다.

Table 3.7.1 유동화 처리토의 품질기준

목 록	목표기준치
블리딩율(bleeding)	1%이하
유동성(흐름값)	180 ~ 300mm (직경80mm×높이80mm 몰드), 31.5mm 이상 (직경11.8mm×높이23.6mm) 500~700mm (KS F 2402)
일축압축강도(qu)	타설 4시간 후 : 1.3kgf/cm^2 이상 (급속 조기 개방시 고려) 타설 1일 후 : 2.0kgf/cm^2 이상 (조기강도 기준) 타설 28일 후 : 7.0kgf/cm^2 이하 (장기강도 기준)
투수계수(cm/s)	10^{-6}~10^{-7}cm/s

나. 재료

유동화 처리토에 사용하는 재료로는 주재료가 되는 현장발생토와 물, 고화재로 구분할 수 있다.

(1) 주재료

유동화 처리토의 원료가 되는 것은 현장에서 발생된 토사이며, 건설 사업에 의해 발생하는 거의 모든 토질을 주재료로 적용할 수 있다. 하지만 현장발생토는 각 현장의 상황에 따라 그 토질의 특성이 상이하다. 따라서 대상토의 특성별로 뒤채움시 요구되는 강도를 표준화할 필요가 있다. 현장발생토를 통일 분류법에 따른 5종류(SW, SM, SC, ML, CL)로 분류하고 이에 따른 최적 배합비 및 배합설계법을 도출해야한다. Table 3.7.2에 통일 분류법에 의한 현장발생토의 분류 기준을 나타냈다.

양질의 현장발생토를 사용하려면 충분한 세립토를 확보할 필요가 있다. 세립토가 부족할 경우, 재료분리가 발생하여 고화 강도가 안정되지 않는 특징이 있다. 이 때 초기의 입경에 대해서는 최대 40mm 정도의 토립자까지 주재료로 이용할 수 있다. 니토를 사용하는 경우에는 폐기물 처리법에 근거해 산업 폐기물 처분업에 위배되지 않는 기준을 따를 필요가 있다.

관매설 공사 등에 이용된 후에 재굴착된 유동화 처리토는 건설 발생토로 취급하여, 유동화 처리토의 주재료로 다시 이용할 수도 있다. 다만, 재굴착된 처리토의 강도가 qu=7.0kg/cm^2 이하라면 별도의 처리과정 없이 그대로 이용할 수 있지만, 그 이상에서는 분쇄할 필요가 있다. 또한 1차 배합 처리토의 pH가 높은 것은 고화재 혼입 후의 응결 등이 염려되기 때문에, 물로 희석하는 등의 처리를 한 후, 재이용해야 한다.

Table 3.7.2 통일분류법에 의한 흙의 공학적 분류 방법 (KS F 2324)

<table>
<tr><th colspan="3">주 요 구 분</th><th>기호</th><th>대표적인 흙</th><th colspan="3">분 류 기 준</th></tr>
<tr><td rowspan="6">조립토
(Coarse Grained Soils)

200번체(0.075mm)에 50% 이상 남음</td><td rowspan="3">자갈
Gravel

4번체(4mm)에 50% 이상 남음</td><td>세립분이 약간 또는 거의 없는 자갈</td><td>GW</td><td>입도분포가 좋은 자갈 또는 자갈과 모래의 혼합토, 세립분이 약간 또는 없음</td><td rowspan="6">세립분의 함유율에 의한 분류:

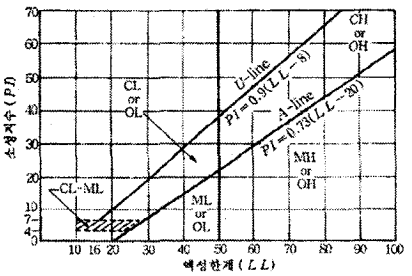
200번체 통과율이 5%이하인 경우 GW, GP, SW, SP

200번체 통과율이 12%이상인 경우 GM, GC, SM, SC

200번체 통과율이 5-12%인 경우 2중 문자로 표시</td><td colspan="2">Cu > 4 Cu=D_{60}/D_{10}
1<Cg<3 Cg=$(D_{30})^2/(D_{10}\times D_{60})$</td></tr>
<tr><td>GP</td><td>입도분포가 나쁜 자갈 또는 자갈과 모래의 혼합토, 세립분이 약간 또는 없음</td><td colspan="2">GW의 조건이 만족되지 않을 때</td></tr>
<tr><td rowspan="2">세립분을 함유한 자갈</td><td>GM</td><td>실트질의 자갈, 자갈·모래·실트의 혼합토</td><td>Atterberg 한계가 A선 밑 또는 소성지수가 4이하</td><td rowspan="2">소성지수가 4-7이면서 Atterberg한계가 A선 위에 존재할 때는 2중 문자 표시</td></tr>
<tr><td>GC</td><td>점토질의 자갈, 자갈·모래·점토의 혼합토</td><td>Atterberg 한계가 A선 위 또는 소성지수가 7이상</td></tr>
<tr><td rowspan="3">모 래
Sand

4번체(4mm)에 50%이상 통과</td><td rowspan="2">세립분이 약간 또는 거의 없는 모래</td><td>SW</td><td>입도분포가 좋은 모래 또는 자갈질의 모래, 세립분은 약간 또는 없음</td><td colspan="2">Cu > 6
1< Cg <3</td></tr>
<tr><td>SP</td><td>입도분포가 불량한 모래 또는 자갈질 모래</td><td colspan="2">SW의 조건이 만족되지 않을 때</td></tr>
<tr><td rowspan="2">세립분을 함유한 모래</td><td>SM</td><td>실트질의 모래, 모래와 실트의 혼합토</td><td>Atterberg 한계가 A선 밑에 있거나 소성지수가 5 이하</td><td rowspan="2">소성지수가 4-7이면서 Atterberg 한계가 A선 위에 존재 할 때는 2중 문자로 표시</td></tr>
<tr><td>SC</td><td>점토질의 모래, 모래와 점토의 혼합토</td><td>Atterberg 한계가 A선 밑에 있거나 소성지수가 7 이상</td></tr>
<tr><td rowspan="5">세립토
(Fine-Grained Soil)

200번체(0.075mm)에 50% 이상 통과</td><td colspan="2" rowspan="3">액성한계 50% 이하인 실트나 점토</td><td>ML</td><td>무기질의 실트, 매우 가는 모래, 암분, 소성이 작은 실트질의 세사나 점토질의 세립사</td><td rowspan="5">소성도(Plasticity chart)는 세립토에 함유된 세립분과 세립토를 분류하기 위해 사용된다. 소성도의 빗금친 곳은 2중 표기해야 하는 부분이다.
U선 위쪽에 점이 표시되면 시험이 잘못된 것을 의미함.

 
< 세립토의 분류를 위한 소성도표 ></td></tr>
<tr><td>CL</td><td>소성이 중간치 이하인 유기질 점토, 자갈질 점토, 모래질 점토, 실트질 점토</td></tr>
<tr><td>OL</td><td>소성이 작은 유기질 실트 및 점토</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="3">액성한계 50% 이상인 실트나 점토</td><td>MH</td><td>무기질 실트, 운모질 또는 규소의 세사 또는 실트질 흙, 탄성이 큰 실트</td></tr>
<tr><td>CH</td><td>소성이 큰 무기질 점토, 탄성이 큰 점토</td></tr>
<tr><td>OH</td><td>탄성이 중간치 이상인 유기질 점토</td></tr>
<tr><td colspan="3">고유기성 흙</td><td>Pt</td><td>이탄 및 그 밖의 유기질을 많이 함유한 흙</td></tr>
</table>

(2) 물

세립분을 많이 포함한 주재료에 물을 혼합하여 필요한 점성을 유지시키는 것은 목표 유동성을 확보하기 위해 중요하다. 현장발생토와 물을 배합한 후 배합설계시 결정된 고화재를 필요한 양만큼 첨가하고, 혼합하여 유동화 처리토를 제조한다. 이때 현장발생토와 물만을 혼합한 상태를 1차 배합 처리토라 한다.

주재료의 모래 성분이 부족하면 1차 배합 처리토의 밀도가 목표로 하는 수준에 미치지 못한다. 이러한 경우에는 세립토를 많이 포함한 1차 배합 처리토에 별도의 모래질의 흙을 첨가하여 밀도가 목표치 이상이 되는 1차 배합 처리토를 제조할 필요가 있다.

(3) 고화재

고화재는 보통 포틀랜드 시멘트, 고로슬래그 시멘트, 플라이애쉬 시멘트, 석회, 토질 안정 처리 등에 이용되는 시멘트계 고화재, 석회계 고화재 등을 강도, 내구성, 환경 등의 영향을 고려해야 선택한다.

배합설계에 의해 정해지는 고화재의 양을 고화재 첨가량이라고 한다. 이것은 1차 배합 처리토의 단위 체적 $1m^3$에 첨가하는 고화재의 첨가량으로 다음의 비율로 나타낸다.

고화재 첨가량 (고화재의 질량) kg : 1차 배합 처리토의 체적 m^3

(4) 혼화제

혼화제는 유동성이나 흐름시간 등의 조절이 필요한 경우 첨가한다. 유동화 처리토는 시간의 경과와 함께 고화재의 경화가 진행되므로 플랜트로부터 타설 현장까지 운반하는 동안에 유동성이 저하한다. 기온이 높은 여름이나 1시간 이상의 운반하거나 또는 고화가 진행된 유동화 처리토의 유동성을 회복하는 분산제가 이용된다.

매설관의 재굴착 등 복구가 시급한 상황에는 고화속도를 증진시키는 혼화제를 사용하여 조기강도발현을 촉진할 필요가 있다.

다. 제조 공정과 배합설계의 관계

유동화 처리토의 제조 플랜트를 현장에 설치하여, 현장발생토를 주재료로 하는 유동화 처리토의 제조 공정과 배합설계의 관계를 Fig. 3.7.1에 흐름도에 나타내었다. 주어진 주재료와 시공 조건에 대해서 요구되는 품질의 관매설·뒤채움·충전 재료를 제조하는 순서를 제시하였다. 주재료의 조건이나 시공 조건이 한정되면 관매설 재료의 품질도 제약을 받는다. 이동식 플랜트의 경우, 관매설·뒤채움·충전의 재료 품질이 현장발생토에 의해 결정되기 때문에, 주재료를 선택하는 것도 플랜트에서 고려해줘야 하기 때문에, 제조 공정을 품질에 맞추어 설비·계획할 필요가 있다. 따라서 이동식 플랜트의 유동화 처리토 제조 흐름은 Fig. 3.7.1에 나타내는 [공사 조건] 대신 [설비 조건]으로 변경된다. 그리고 공사 조건에 맞추어 설비를 결정하는 것이 아니라, 안정된 품질을 얻기 위해 필요한 제조능력을 확보할 수 있도록 조건을 수정해야 한다.

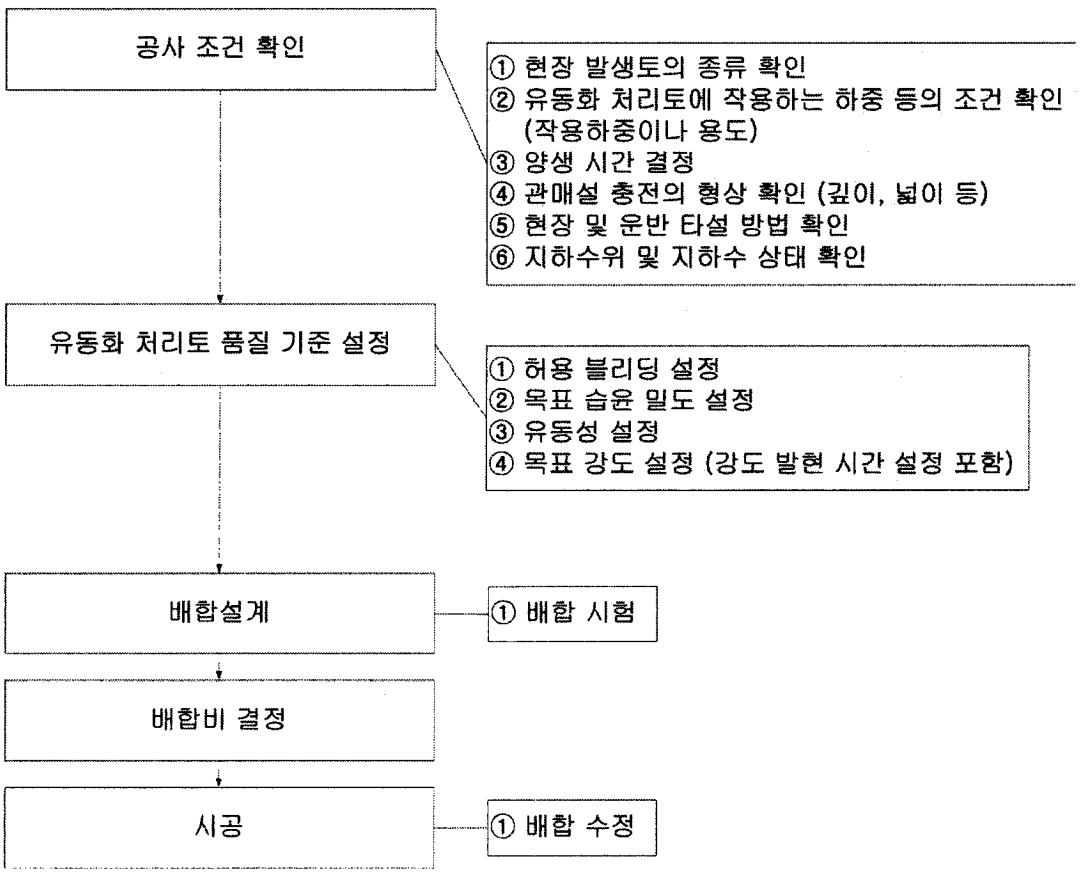


Fig. 3.7.1 제조 공정과 배합설계의 관계

(1) 공사 조건의 확인 / 설비 조건

①은 배합설계하는 대상토를 준비하여 흙의 종류를 판별하고, ②와 ③은 재료 품질 및 성능을 결정하는데 필요하다. ④~⑥은 유동화 처리토를 제조 및 시공하는데 필요한 플랜트의 능력이나 현장의 면적, 운반타설 등의 시공 계획에 필요한 조건을 선정한다.

유동화 처리토의 제조와 배합설계에 있어서 중요한 항목으로, 현장발생토의 종류와 배합설계는 항상 1대1의 관계가 이루어지도록 해야 한다. 전과 같은 배합을 이용하더라도 현장발생토가 변경되면 제조한 유동화 처리토의 품질은 달라진다. 따라서 배합설계가 유효하고, 어떤 목적으로 현장발생토를 사용할 것인지를 결정한 후, 이를 토대로 현장에서 대상토를 적절히 공급하고 관리하는 것이 중요하다.

(2) 현장발생토 양의 설정

유동화 처리공법은 배합설계에 따라 재료의 품질을 임의로 제어할 수 있다. 현장발생토의 양은 일반적으로 하한치 또는 상한치가 정해져 있지만, 제조된 유동화 처리토의 품질을 균질하게 조절하는 것은 어렵고, 유동화 처리토를 같은 배합으로 제조하더라도 플랜트의 허용 오차에 의해 배합의 목표치를 균질하게 확보하는 것은 어렵다. 따라서 배합설계의 목표치는 제조 플랜트의 허용 오차 또는 제조자의 능력을 고려하고, 각종 사양으로 나타난 하한치 또는 상한치에 대해서 약간 낮춰서 설정한다. 또, 제조 단계에서 현장발생토의 양을 조절할 수 있도록 배합 수정을 실시하는 것도 하나의 방법으로 제안되고 있다. 배합설계를 실시할 때의 유의점을 다음에 나타내었다.

(가) 강도 설정의 유의점

① 자중이나 재하중에 의해 압축 침하 또는 전단 파괴되지 않는 유동화 처리토의 강도를 결정해야 한다. 예를 들어, 단위 체적 중량 1.6kg/cm^{2}의 유동화 처리토를 10m의 두께로 타설한다고 하면 최하부의 유동화 처리토에는 1.6kg/cm^{2}의 압력이 작용하고, 수평방향의 변위가 구속된 조건 이내에서는 더 큰 압력이 작용

할 것이다. 이 응력 상태를 고려하여 일축압축강도는 편차 응력에 대해 충분히 안전한 전단강도가 확보되도록 설정하고, 동시에 압축 변형에 대해서도 충분히 안전한 압축강도가 확보되도록 설정한다. 이 경우, 일축압축강도를 2.0kg/cm^2 이상 확보해야할 필요가 있다.

② 노상, 노체로서의 요구 강도를 만족하는 노상부에 이용하는 경우에는 필요한 현장 CBR를 만족할 필요가 있다.

③ 매설관에서 재굴착이 있는 경우에는 강도가 너무 커져서 재굴착이 곤란해질 수 있기 때문에 주의할 필요가 있다.

(나) 밀도 설정의 유의점

밀도가 높은 유동화 처리토는 지반의 구속 응력에 의한 전단 파괴시의 일축압축강도 이상의 전단 저항을 나타내거나, 밀도 효과에 의한 변형 특성이 개선되어 하중분산효과가 높아진다는 것을 실험을 통해 확인할 수 있다. 다음의 사항에 유의하여 습윤 밀도를 결정해야 한다.

① 양질의 재료를 사용하고 있는 관매설부에 적용하는 경우에는 장기적인 압축 침하가 작다. 재하에 의해서 압축침하가 발생하지 않기 때문에 단기적으로는 고화강도를 크게 할 수 있다. 간극비가 작은 유동화 처리토와 간극비가 큰 유동화 처리토에 각각 재하 했을 때를 Fig. 3.7.2에 나타내었다. 중요한 구조물의 관매설등에 이용하는 경우에는 장기적인 안정성이 중요하기 때문에 전단 파괴가 발생할 때, 강도 변형 특성이 우수한 간극비인 $e=1.5$이하(밀도로 환산하면 보통 1.6g/cm^2 이상)의 유동화 처리토를 적용 한는 것이 효율적이다.

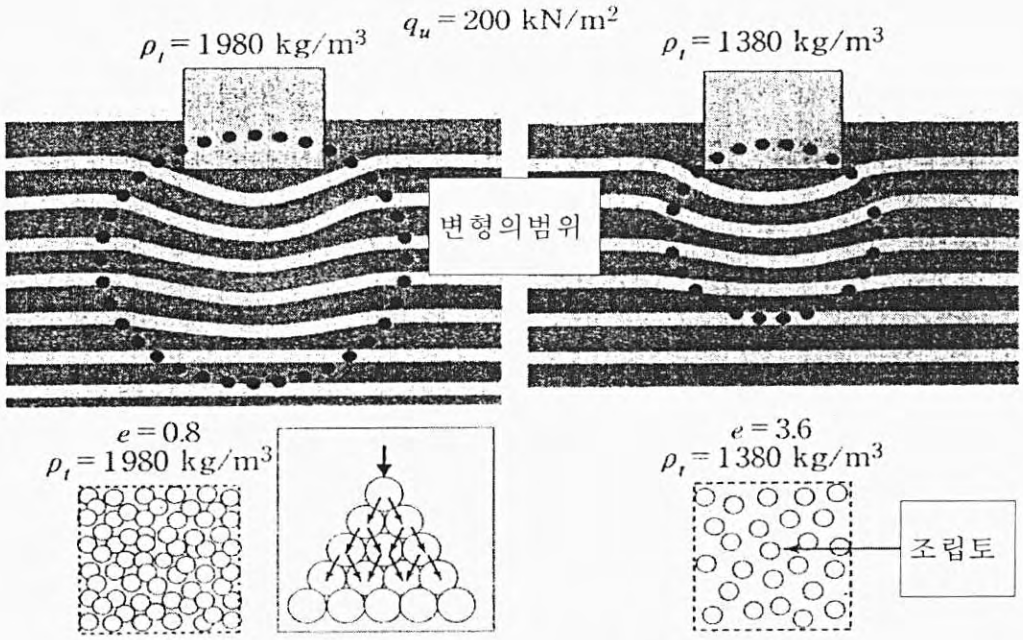


Fig. 3.7.2 밀도에 의한 하중 분산 효과

② 구조물의 관매설에 적용하는 경우에는 대상 구조물의 설계에 사용하고 있는 토질 정수를 사용한다. 주변 지반과 동등한 강도 변형 특성이 관매설을 할 때에 요구 된다. 특히, 구조물의 설계에 있어서 사용되는 주변 지반의 지반 반력 계수를 확보하는 것이 중요하다.

③ 작용하는 재하하중이 작은 범위 및 국부적인 범위에만 적용하는 경우, 정해진 고화 강도를 만족해야 한다. 소정의 고화 강도를 확보하면 작용 하중에 대해 고화 강도의 발현이 크다. 그러므로 장기적인 열화를 고려하더라도 안정성이 충분히 확보되므로, 화학적 안정만을 고려해도 무방하다. 또한, 밀도는 압축이나 전단 강도로서의 성능만이 아닌 내구성이나 투수계수, 열전도율 등에 관련되기 때문에, 투수시험, 열저항 시험 등으로 규정할 필요가 있다.

(다) 유동성 설정의 유의점

좁은 공간의 충전성이나 시공성이 용이하기 때문에 유동성의 적용 가능성은 유동화 처리토의 밀도나 점성·마찰 저항, 관매설 공간의 주면 마찰이나 타설시의 낙하 높이나 타설압에 의해서 결정된다. 유동성의 설정은 유동화 처리토를 적용하는 장소나 타설 상황을 고려하는 것이 바람직하다. 유동성만을 높이기 위해 시공을 할 경우, 고화 후의 간극비가 주변 지반에 비해 커지기 쉽고, 발생토의 이용률이 저하되는 등의 문제를 일으킬 수 있으므로 이에 대한 충분한 고려가 필요하다. 관매설 또는 공동 충전 등에 이용하는 경우의 유동성 기준은 펌프 압송성이나 시공성, 공동의 형상 등을 고려하여 플로우치를 160mm 이상으로 한다. 다만 현장에서 호퍼 등을 이용하여 직접 타설하는 경우나 타설 장소의 형상이 협소하거나 복잡하지 않기 때문에 높은 유동성이 필요하지 않은 경우에는 이보다 낮은 유동성에서도 시공이 가능하다.

라. 배합설계

주재료인 현장발생토가 결정되어 재료의 품질 사양을 결정할 수 있다면, 주재료를 유동화 처리토 공법에 의해 배합설계한다. 유동화 처리토의 배합설계의 과정을 Fig. 3.7.3에서 제시하였다.

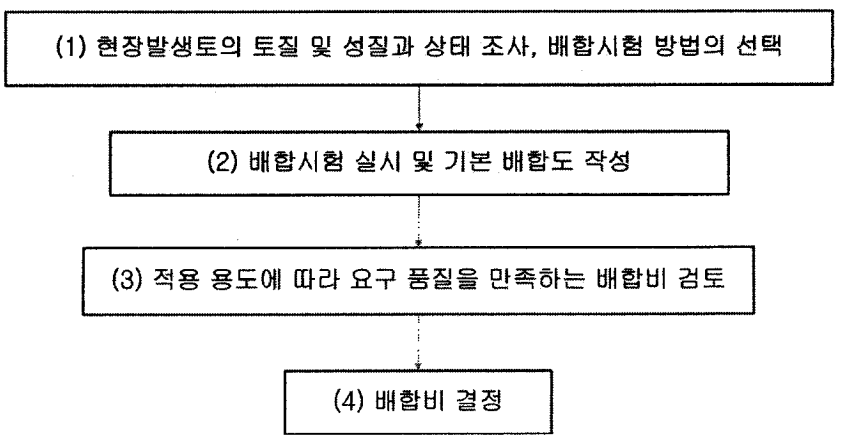


Fig. 3.7.3 배합설계 과정

(1) 현장발생토의 토질 및 성질과 상태 조사 및 배합 시험 방법의 선택

주재료가 세립토(점토·실트분 함유율이 40~60%이상)인가, 모래질흙인가에 따라 유동화 처리토의 제조 방법이 다르기 때문에, 현장발생토의 분류 시험을 실시해 주재료의 종류와 입도 분포를 파악해야 한다. 특히 세립분과 조립분의 질량 백분율은 주재료의 분류에 있어서 중요한 파라미터가 된다.

블리딩을 방지하는 목적으로 주재료에는 일정량의 세립분이 필요하고, 밀도를 확보하는 목적으로 일정량의 조립분이 필요하게 된다. 두 가지 조건이 모두 만족되는 현장발생토에 물을 첨가하면 필요한 성능을 만족하는 1차 배합 처리토가 조성된다. 한편, 조립토 또는 세립토가 부족하면 모래질이 많이 함유된 현장발생토 또는 세립토가 많이 함유된 현장발생토를 첨가하여 배합비를 결정할 필요가 있다.

또한 세립토와 조립토의 2종류의 주재료를 현장에서 확보하여, 현장에서 바로 혼합하여 입도를 조정하여 만들 수도 있다. 일반적으로 모래질이 많이 함유된 흙은 토질 안정 처리 과정을 거치지 않고 그대로 재이용하는 것이 용이하기 때문에 유동화 처리토의 주재료는 세립토의 함유량이 큰 현장발생토에 밀도 조정을 위해 모래질흙을 첨가할 수 있다. 세립분이 주재료라도 흙의 성질과 제조하는 위치에 따라 흙의 성질이 변할 때에는 안정된 1차 배합 처리토를 확보하여 이것에 주재료를 첨가하는 제조 공정을 선택하면 안정된 품질의 유동화 처리토를 제조할 수 있다. Table 3.7.3에 제조 공정 선택을 위한 주재료의 특징을 나타내었다.

Table 3.7.3 주재료에 따른 제조 공정의 특징

주재료	특징
세립토	제조가 용이, 현장발생토의 영향을 많이 받아 품질이 불안정하게 되기 쉬움
조립토	제조가 어려움, 1차 배합 처리토의 제조 후, 1차 배합 처리토와 혼합해야함

(2) 배합 시험의 실시

배합 시험은 주재료에 대해서 실시한다. 주재료가 여러 가지라면 배합 시험도 각각의 주재료에 실시한다. 여러 가지 성분이 복잡하게 섞인 주재료가 대상이 되어 배합 시험을 각각에 적용하기 어려운 경우는 대표적인 주재료의 입도 구성을 조사해 주재료를 분류한다.

마. 배합 시험

배합 시험의 순서를 Fig. 3.7.4에 나타내었다. 배합 시험의 순서는 다음의 3단계로 나눌 수 있다.

(1) 블리딩율 및 유동성에 의한 최소 밀도 설정
(2) 최저 강도의 고화재 첨가량 결정
(3) 배합 시험

(1) 블리딩율 및 유동성에 의한 최소 1차 배합 처리토의 밀도 설정

목표 블리딩율을 만족하는 최소 1차 배합 처리토의 밀도를 결정하기 위한 과정을 Fig. 3.7.5에 제시하였다. 처음에 주재료에 세립토를 포함한 현장발생토에 대해서 [현장발생토 분류 시험]을 실시하여 통일분류법으로 분류한다. 이 때 흙입자의 비중과 세립토와 조립토의 비율을 측정한다. 토질 시험을 실시하는 것이 바람직하지만, 간단하고 간편하게 세립토와 조립토의 체적의 비율을 구하고, 흙입자의 비중을 가정하여 구할 수 있다. 대상이 되는 발생토의 흙 입자 밀도는 문헌 등을 통해 파악할 수도 있다.

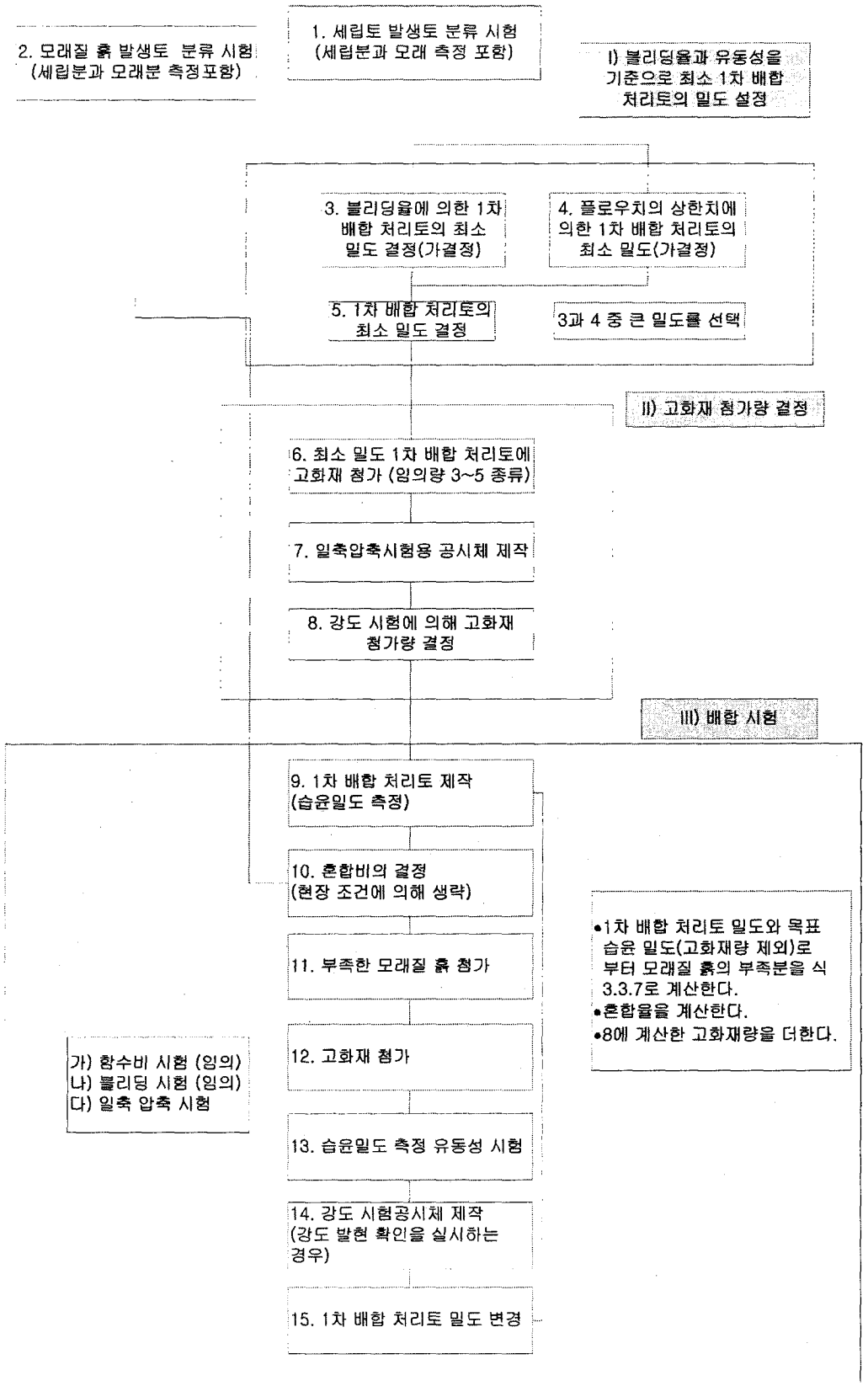


Fig. 3.7.4 배합 시험의 순서

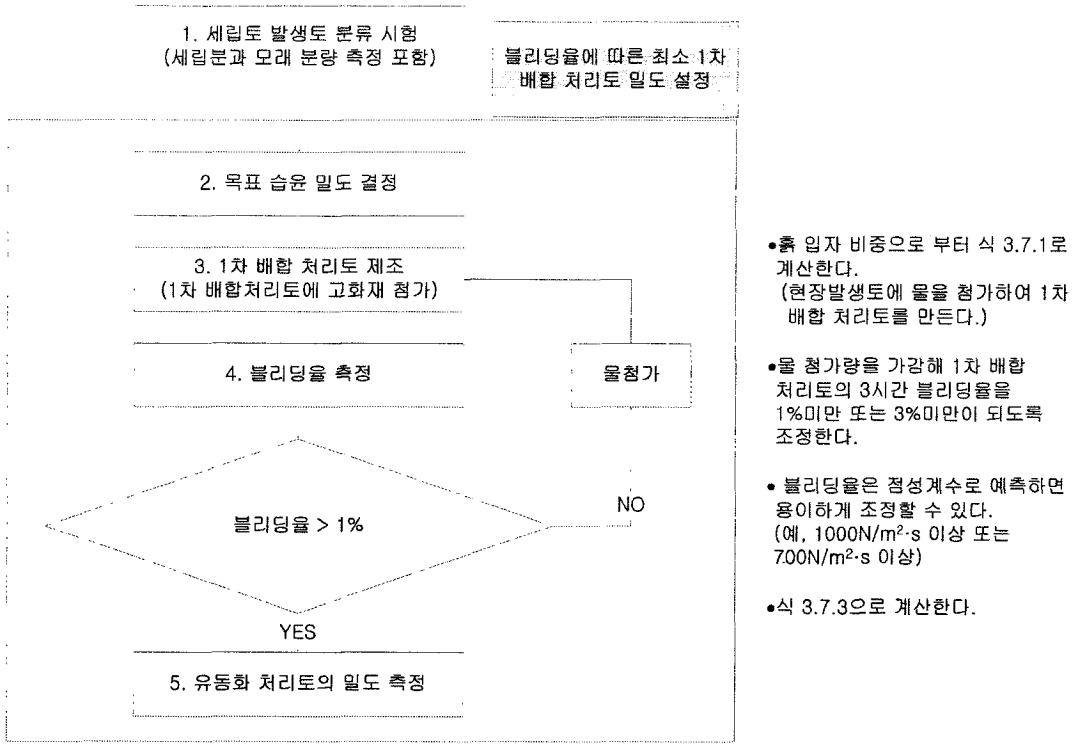


Fig. 3.7.5 블리딩율에 대한 최소 밀도의 가결정 순서

목표 습윤 밀도 결정은 유동화 처리토의 목표 밀도 ρ_t로부터 흙입자 비중 G_s과 고화재 첨가량 M_c를 가정한다. M_w의 값은 이하의 식에 의해 구해진다.

$$M_v(kg) = \left\{1000 \times G_s - M_c \times \frac{G_s}{G_c} - \rho_t + M_c\right\} \div (G_s - 1.0) \qquad (3.7.1)$$

여기서, M_w : $1m^3$당의 물의 질량

M_c : $1m^3$당의 고화재 첨가 질량 (예를 들면 100kg로 가정)

G_s : 토립자 비중 (2.5~2.8의 값으로 가정)

G_c : 고화재 입자의 비중 (3.0으로 가정)

ρ_t : 유동화 처리토의 목표 습윤 밀도 (예를 들면, 1500kg/1000L로 표기)

M_v를 구하면 목표 밀도를 기준으로 토립자의 질량도 구한다. 주재료의 함수비가 결정되었을 경우, 배합 시험으로 사용하는 주재료의 질량도 구할 수 있다.

[계산예]

1) 유동화 처리토의 목표 습윤 밀도 ρ_t=1650kg/1000L,

2) 1m^{3}의 고화재 첨가량 M_c=100 kg,

3) 주재료(현장발생토)의 입자 비중 G_s=2.757,

4) 고화재 입자의 비중 G_c=3.0

위의 조건과 같을 때, 목표 밀도에 대한 $1m^3$당의 물의 첨가량 M_w는 다음의 계산과 같이 약 634kg가 된다.

$$M_w(kg)=\left\{1000\times 2.757-100\times\frac{2.757}{3.0}-1650+100\right\}\div\{2.757-1.0\}=634(kg)$$

목표 밀도에 대한 현장발생토의 질량은 식 (3.7.2)에 의해 약 916kg가 된다.

$$M_s(kg)=(\rho_t\times 1000-M_w-M_c)=\left\{\frac{1650}{1000}\times 1000-634-100\right\}=916(kg) \qquad (3.7.2)$$

이 때, 목표 밀도에 대한 고화재를 제외한 1차 배합 처리토의 밀도 ρ_f^*는 이하의 식 (3.7.3)에서 구할 수 있다.

$$\rho_f^*=(M_w+M_s)\div\left(\frac{M_w}{\rho_w}+\frac{M_s}{G_s\times\rho_w}\right)=(634+916)\div\left\{\frac{634}{1}+\frac{916}{2.757\times 1}\right\}=1604/1000 \quad (3.7.3)$$

주재료의 함수비 w를 10%로 하면 배합 시험에 필요한 현장발생토의 질량은 다음의 식에 의해 1007kg가 된다.

$$M(kg)=M_s\times\left(1+\frac{w}{100}\right)=916\times\left(1+\frac{10}{100}\right)=1007(kg)$$

위의 물첨가량은 $1m^3$당의 질량이므로 배합 시험으로 이용하는 수량으로 환산할

필요가 있다. 배합 시험으로 제작하는 유동화 처리토의 체적을 5L로 하면 $1m^3$에 대해서 5/1000이 되어, 각각의 값을 5/1000하면 질량이 구해진다.

1차 배합 처리토는 위의 방법으로 구해진 물첨가량을 바탕으로 계산한다. 현장발생토의 함수비가 높을 때는 물을 첨가할 때, 현장발생토에 포함되는 물의 양 만큼을 제외한 양을 첨가한다.

블리딩율 측정 대신 점성 계수를 측정하여 블리딩율을 예측하는 방법을 사용할 수 있다. 점성계수 측정은 블리딩 시험이 3시간 이상 걸리는 것에 비해 몇 분만에 측정 가능하므로 편리하고 시간을 절약할 수 있다는 장점이 있다. 다만 1차 배합 처리토 중의 조립토는 점성의 변동에 기여하지 않기 때문에, 1차 배합 처리토 중에 조립토가 많이 포함된 경우, 250~480μm 이상의 조립토를 제외하고 사용할 수 있다. 측정한 결과에 관해서 블리딩율 1% 미만에 대한 점성 계수는 1000N/m^2·s이상이고, 블리딩율 3% 미만에 대한 점성 계수는 700N/m^2·s이상이라는 것을 실험 결과를 통해 파악할 수 있다.

블리딩 시험은 목표 밀도에 의해 계산된 물을 첨가하여 1차 배합 처리토를 제작하지만, 이 단계에서의 1차 배합 처리토 중의 수분량은 세립토 질량에 비해 매우 적고, 점성이 높을 경우 블리딩이 발생할 가능성은 낮다. 점차 물의 첨가량을 늘리면서 블리딩율이 1% 미만 또는 3% 미만이 되는 1차 배합 처리토의 밀도를 구한다. 이러한 반복된 과정에 의해 블리딩율의 기준을 만족하는 조건 중 가장 물의 첨가량이 많은 1차 배합 처리토의 밀도인 최소 밀도 $\rho_{\min}$를 측정한다. 최소 밀도 $\rho_{\min}$가 측정되면 아래의 식 (3.7.4)와 (3.7.5)를 사용하여, $1m^3$당의 물의 질량 $M_{w_{\min}}$와 현장발생토의 질량 $M_{s_{\min}}$이 구해지고, 마지막에 고화재를 포함하지 않는 1차 배합처리토의 최소 밀도 $\rho_{f_{\min}}$가 도출된다. 이때, 1차 배합 처리토의 최소 밀도는 시험의 마지막에 얻을 수 있는 수치로 이 상태에 대해서 배합 시험을 실시하므로 가장 중요한 값이 된다.

$$M_{w_{\min}}(kg)=\left\{1000\times G_s-M_c\times\frac{G_s}{G_c}-\rho_{\min}+M_c\right\}/\{G_s-1.0\} \tag{3.7.4}$$

$$M_{s_{\min}}(kg)=\left\{\rho_{\min}\times 1000-M_{w_{\min}}-M_c\right\} \tag{3.7.5}$$

$$\rho_{f_{\min}}=(M_{w_{\min}}+M_{s_{\min}})/\left(\frac{M_{w_{\min}}}{\rho_w}+\frac{M_{s_{\min}}}{G_s\times\rho_w}\right) \tag{3.7.6}$$

현장발생토에 포함되어 있는 세립토와 조립토의 비율은 토질 분류 시험에 의해 구할 수 있고, 1차 배합 처리토의 최소 밀도 $\rho_{f_{\min}}$의 $1m^3$당에 포함되는 세립토만의 질량 $M_{s_{\min}}$이 도출된다. 이 세립토와 물의 양은 고화재를 포함하지 않는 양이다. 한편, 조립토를 포함하지 않는 상태로의 1차 배합 처리토의 밀도 ρ가 다음과 같은 계산에 의해 구해진다.

$$M_{sc}(kg) = M_{s_{\min}} \times \theta/100$$

$$\rho = (M_{sc} + M_{w_{\min}})\Big\}/\left(\frac{M_{sc}}{G_s \times \rho_w} + \frac{M_{w_{\min}}}{\rho_w}\right)$$

θ(%)는 입도분포곡선에서 나타난 세립토의 질량 백분율이다. 모래의 함유량은 세립토와 조립토의 체적으로 구해지지만, 이 둘의 흙입자 비중이 같다고 가정하면 질량 백분율을 동일하게 고려할 수 있다. 블리딩율을 기준으로 결정된 1차 배합 처리토의 최소 밀도 $\rho_{f_{\min}}$와 같게 유동성의 상한치(허용되는 가장 유동성이 큰 상태)를 결정하면 이 값으로부터 유동성을 상한치로 한 최소 밀도 $\rho_{f_{\min}}$가 구해진다. 이 값들의 최소 밀도를 비교하여 큰 값을 최종적인 1차 배합 처리토의 최소 밀도$\rho_{f_{\min}}$로서 선택한다. Fig. 3.7.6에 유동성에 의한 최소 밀도의 가결정 순서를 제시하였다.

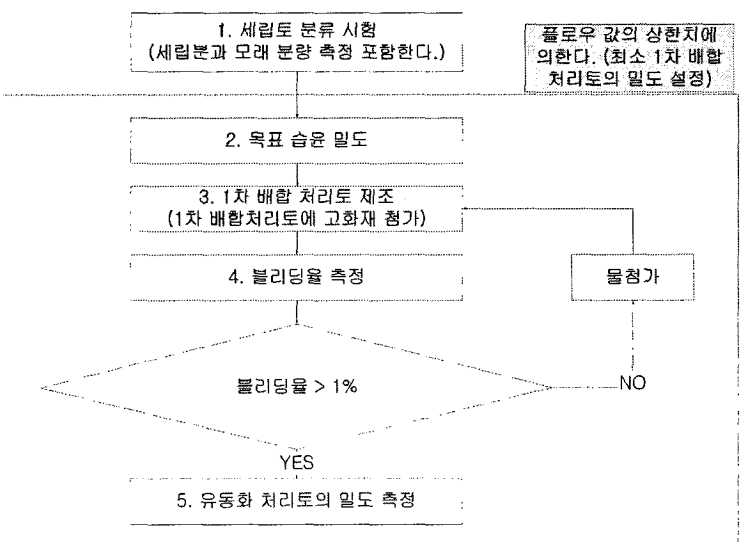


Fig. 3.7.6 유동성에 의한 최소 밀도의 가결정 순서

(2) 고화재 첨가량 결정

유동화 처리토의 고화 강도는 1차 배합 처리토 밀도 ρ_f와 고화재 첨가량의 관계에 의해 결정된다. 이러한 고화 강도는 품질 기준에서 하한치가 규정되어 있다. 고화재 첨가량은 블리딩율과 유동성으로부터 도출한 1차 배합 처리토의 최소 밀도 $\rho_{f_{min}}$를 기준으로 한다. 최소 밀도는 품질을 확보할 수 있는 조건 중 가장 많은 수분량을 포함하고 있는 상태로 고화재를 첨가했을 때 강도 발현이 가장 작다. 그 이상의 1차 배합 처리토 밀도 ρ_f는 물의 질량이 적게 되어 밀도가 높아지게 되는데, 강도 발현이 커져 규정된 강도 품질 이상의 값을 나타낸다. 최소 밀도 $\rho_{f_{min}}$로 고화재 첨가량을 결정하는 것이 가장 경제적이다. 다만, 이 단계의 고화재 첨가량은 배합설계로 결정한 1차 배합 처리토 밀도와 강도 시험의 결과를 바탕으로 수정할 수 있다.

고화재량의 결정 순서는 Fig. 3.7.6의 2번째 과정에 나타나 있다. 1차 배합 처리토의 최소 밀도 $\rho_{f_{min}}$에 대해서 고화재 첨가량을 1차 배합 처리토 $1m^3$당 60kg~80kg, 100kg~120kg의 범위에서 3~5 종류를 결정하고, 결정한 고화재를 혼합하여 유동화 처리토를 제조한다. 일축압축 시험용 몰드에 시료를 채취한 후 양생하여 일축압축 시험을 실시한다. 일축압축강도와 필요한 고화 강도의 발현을 정리하여 첨가될 고화재량을 결정한다.

(3) 배합 시험

배합 시험에 의해 유동화 처리토의 밀도를 결정하는 순서는 Fig. 3.7.6의 하단에 나타나있다. 1차 배합 처리토 제작에서는, 유동성의 하한치(허용 되는 가장 유동성이 낮은 상태)를 고려하여 물의 첨가량을 예상하고, 1차 배합 처리토를 만든다. 예를 들면 목표 플로우치를 140mm로 하여, 조금씩 현장발생토에 물을 첨가하여 1차 배합 처리토 상태로 유동성 시험을 실시한 후 1차 배합 처리토의 밀도를 측정한다.

혼합비의 결정에서는, 측정한 1차 배합 처리토의 밀도 ρ_f와 고화재를 제외한 1차 배합 처리토의 밀도 ρ_f^*(식 3.7.3 참조)를 통해 $1m^3$당의 현장발생토의 모래질흙 부족량을 아래의 식에 의해 계산한다.

$$\Delta M_s(kg) = \left(\rho_f^* - \rho_f\right) \times 1000 \qquad (3.7.7)$$

혼합율 P는 다음의 식을 통해 구할 수 있다. 모래질인 주재료의 함수비가 높을 때에는 보정을 해준다.

$$P = \frac{\rho_f \times 1000}{\Delta M_s + \rho_f \times 1000}$$

이 첨가량을 기준으로 모래질흙 첨가를 실시한다. 모래질 흙을 첨가할 필요가 없을 때는 이 공정은 생략한다.

고화재 첨가에서는, 강도 시험에 의해 고화재 첨가량 결정을 통해 도출한 고화재량을 첨가한다. 습윤 밀도 측정/플로우 시험에서는 유동화 처리토의 습윤 밀도와 유동성을 측정한다. 이 때에 함수비와 블리딩 시험을 임의로 실시한다.

강도 시험공시체 제작은 밀도가 가장 큰 유동화 처리토를 기준으로 일축압축시험용의 공시체를 제작하여 강도 시험을 실시한다. 실험을 통한 고화 강도와 강도 시험에 의해 고화재 첨가량 결정에서 결정된 고화재 첨가량으로 실시한 강도 시험을 비교하여, 고화재 첨가량의 수정이 가능하다. 일축압축강도의 차이는 밀도에 의한 영향이 크기 때문에 밀도 증가에 의한 일축압축강도의 증가를 정비례의 관계라고 가정하면, 고화재 첨가량과 강도 발현의 관계를 정리하여, 고화재 첨가량을 수정할 수 있다.

1차 배합 처리토 밀도 변경에서는 1차 배합 처리토 제작에서 물을 추가해 밀도를 저하시켜 앞의 과정을 반복한다.

(4) 시험 방법

유동화 처리토의 설계 기준을 Table 3.7.4에 정리하였다.

Table 3.7.4 유동화 처리토의 설계 기준

목 록	목표기준치
대상시료	통일분류법에 의해 분류
밀도	1.5g/cm^3 이상
유동성 (흐름값)	180 ~ 300mm(직경80mm×높이80mm 몰드), 31.5mm 이상(직경11.8mm×높이23.6mm)
슬럼프 플로우 (slump flow)	500~700mm(KS F 2402)
일축압축강도 (qu)	타설 4시간 후 : 1.3kgf/cm^2 이상 (급속 조기 개방시 고려) 타설 1일 후 : 2.0kgf/cm^2 이상 (조기강도 기준) 타설 28일 후 : 7.0kgf/cm^2 이하 (장기강도 기준)
블리딩율 (bleeding)	1%이하
투수계수	10^{-6}~10^{-7}cm/sec
환경 영향	토양환경보전법의 환경기준치 만족

(가) 시료 조정 및 필요량

배합 시험에 이용하는 토사는 사전에 5mm 이상의 이물질이나 돌을 제거하여 균일하게 조성한다. 일축압축시험, 플로우시험, 블리딩시험의 등의 실험을 실시하기 한다.

(나) 재료의 혼합 방법

1차 배합 처리토는 교반기 및 플랜트 등에 의해 약 5분 배합한 후, 고화재를 첨가하여 약 5분 혼합교반을 실시한다.

(다) 밀도 측정

용량이 일정한 기존의 용기에 유동화 처리토를 공기가 유입되지 않도록 주입한 후, 유리판으로 덮고, 그 질량을 측정하여 밀도를 측정한다. 이 때 측정 오차가 0.01g/cm^3 이하인 것으로 측정 정도의 판단 기준을 정한다.

(라) 일축압축 시험용의 공시체 제작

ϕ5cm×h10cm의 소형 몰드를 각각의 배합 조건마다 표준 3개 준비한다. 주재료의 최대 입경이 10mm 정도인 경우에는 ϕ10cm× h20cm의 몰드를 이용한다. 공시체의 유동화 처리토의 충전할 때에는 가능한 간극이 발생하지 않도록 가볍게 충격을 주어 제작한다.

(마) 공시체의 양생

공기와의 접촉을 차단한 습윤 상태에서 양생을 시키는 것을 원칙으로 하며, 양생 온도는 통상 20±2℃로 양생시키고, 양생기간은 28일을 표준으로 한다. 또 필요에 따라 시공시기가 하계, 동계의 경우는 실제 시공시의 온도에 가까운 30℃, 5℃ 등에서 양생하여, 4시간, 1일, 7일, 28일을 양생하여 시험을 실시한다.

(바) 일축압축시험

일축압축시험을 하기 전 공시체의 습윤 밀도를 측정한다. 시험 후에 시료의 함수비 측정을 실시한다. 양생중의 유동화 처리토의 물성의 변화를 관찰한다. 배합 시험으로 이용하는 일축압축강도는 조기강도는 재령 4시간 또는 재령 1일, 장기강도는 재령 28일의 값을 기준으로 한다.

바. 강도의 안전율

유동화 처리토를 이용하여 실내 배합 시험으로 얻을 수 있는 고화 강도와 현장에서 양생되어 발현되는 고화 강도의 차이가 다른 안정 처리 방법과 비교해서 작은 경향을 나타낸다. 구조재료로서 이용되는 등의 특수한 경우를 제외하면 실내 강도와 현장 강도의 비를 가지고 현장 강도를 확보하는 안전율 개념을 사용하지 않아도 무방하다. 안전율을 적용하지 않고 현장에서 제조된 유동화 처리토의 고화 강도가, 관매설재로서 요구되는 필요 강도를 확실히 만족한다고 판단할 수 있는 근거는 다음과 같다.

관매설재로서 구할 수 있는 필요 강도 F_c에 대해 용도별 품질 규정으로 나타나는 설계 기준 강도 F_c를 임의의 할증이라고 하여 개수로 결정하는 것이 있다. 예를 들면, 지하 10m에 되메움되는 유동화 처리토를 고려하면 설계기준 강도 F_c =2.0kg/cm^{2}로 설정할 경우, 정지토압의 조건을 가정하면 유동화 처리토에서 연직 방향으로 토피압($\sigma_v = \gamma_t \times z$)과 수평 방향으로 정지토압($K_0 \times \sigma_v$)이 작용한다. 이 상태로 평균 압축 응력은, 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_p = \frac{\{\gamma_t \times z + K_0 \times \gamma_t \times z\}}{3} = \frac{\{16 \times 10 + 2 \times 0.5 \times 16 \times 10\}}{3} = 107\,(kN/m^2)$$

한편, 유동화 처리토의 체적 압축 강도는 다음과 같다.

$$\sigma_c' = (0.9 \times q_{u28}) = 0.9 \times 200 = 180\ (kN/m^2)$$

즉 평균 압축 응력(1.07kg/cm^2) < 체적 압축 강도(1.8kg/cm^2)가 되어, 설계 기준 강도 F_c가 충분한 안전성을 확보하고 있게 된다. 전단 응력과 전단 강도에 대해서도 같은 관계를 만족하여 충분한 안전율이 확보된다.

2. 프로그램(CLSM-Mixer)에 의한 배합비 도출

현장 토사 특성(SW, SM, SC, ML, CL)에 따른 적합 배합비를 산정하고, 현장 목표 강도 범위에 따른 배합비를 산정하기 위해 배합설계 프로그램을 사용하여 최적 배합비를 도출할 수 있다.

배합설계 프로그램은 기본 조건 입력 후, 그에 따른 최적 배합비를 산출, 검토하여 유동화 처리토를 활용한 배합설계를 위한 실무 적용 오차를 줄이고자하는데 그 목적이 있다. 이를 위하여, 다양한 조건별 설계 배합강도 조건을 통해 각 배합 조건에 따른 물-고화재비(W/C)를 추정하고 배합관련 이론식을 기반으로 최적 배합비를 도출하여 개발 프로그램의 신뢰성을 확인하였다. Fig. 3.7.7에 배합설계 프로그램의 적용 순서를 제시하였다.

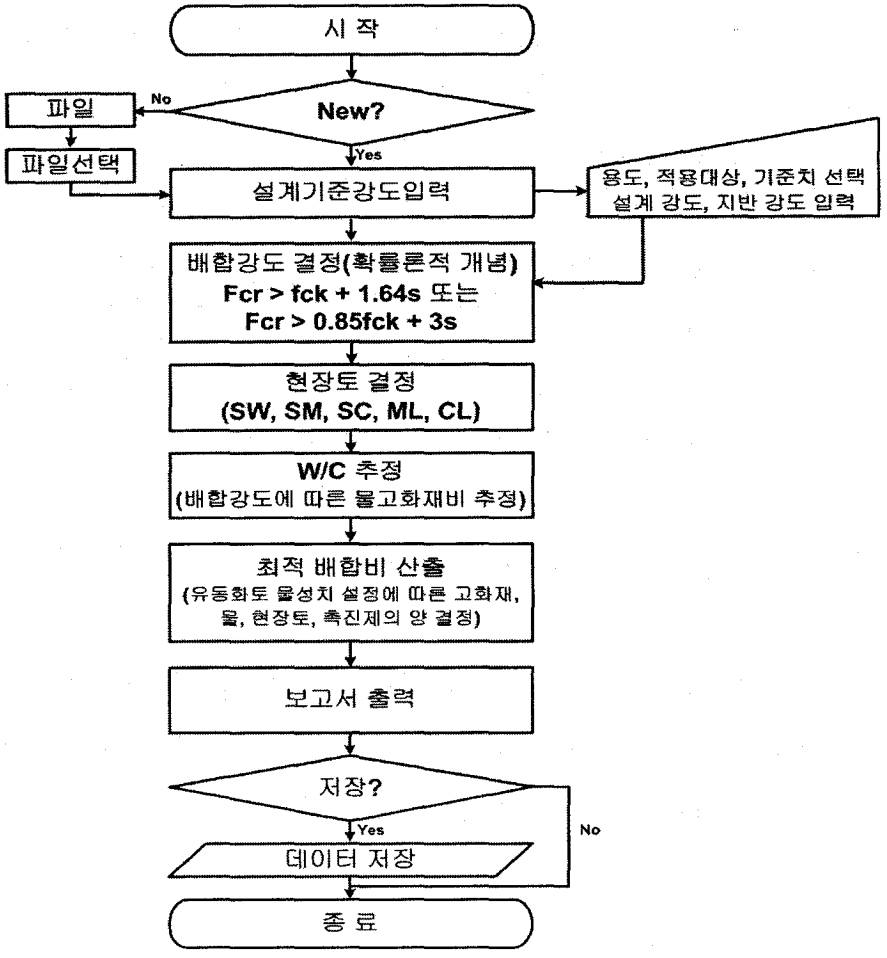
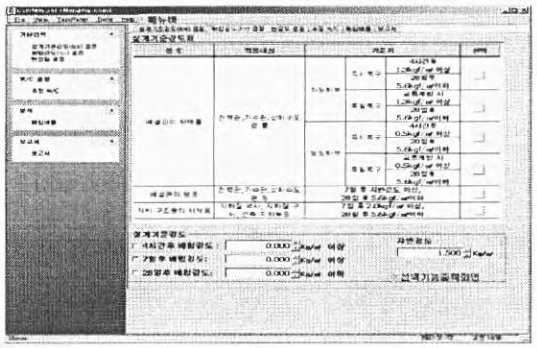
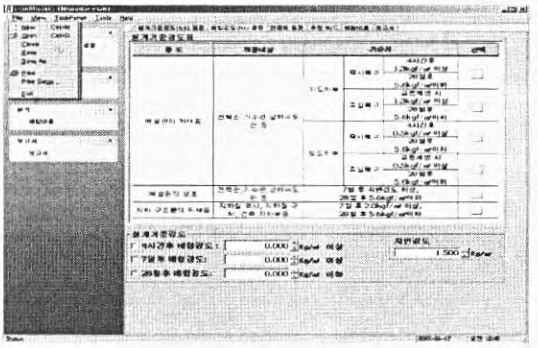


Fig. 3.7.7 배합설계 프로그램의 순서도

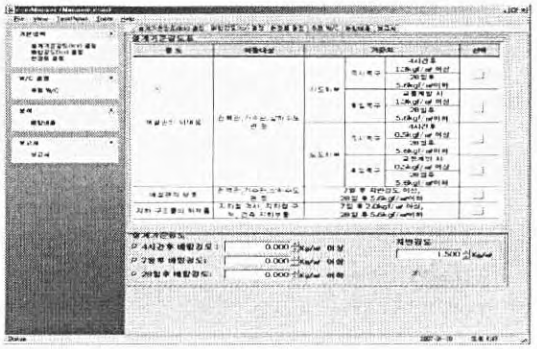
CLSM-mixer 프로그램의 기본 화면에서는 csm 파일의 저장 및 불러오기, 각종 컨트롤의 로드 등 각 세부 기능을 화면에 나타내며 각 기능은 Fig. 3.7.8과 같이 설계기준 강도, 배합설계 강도, 파일입출력, W/C 결정 등 관련 프로그램을 구성하게 된다.



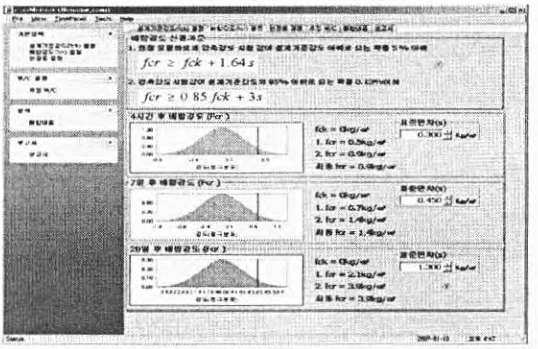
(a) 프로그램 기본화면 구성



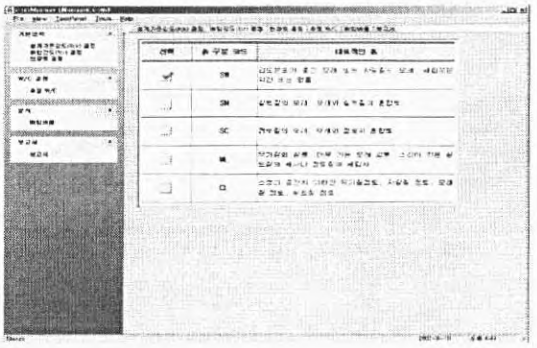
(b) 설계기준강도 결정



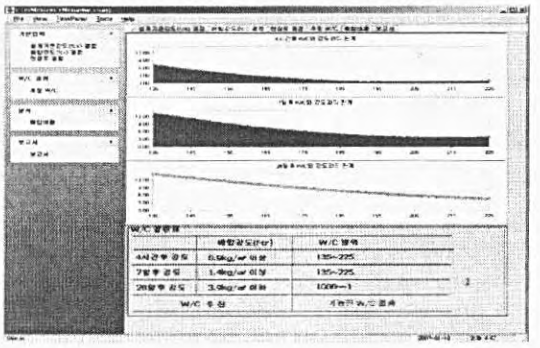
(c) 설계기준강도(fck) 결정



(d) 배합강도(fcr) 결정



(e) 현장토 결정



(f) W/C의 결정

Fig. 3.7.8 배합설계 프로그램(CLSM-Mixer)

3. 시공

가. 시공의 개요

유동화 처리 공법의 시공은 현장발생토를 이용하여 유동화 처리토를 제조해 관매설이나 구조물의 뒷채움 등의 빈공간을 충전하는 공사를 실시하는 것이다. 유동화 처리 플랜트를 현장에 설치하여 유동화 처리토를 제조하고, 직접 시공하는 현지 플랜트 방식을 중심으로 설명하였다.

(1) 시공 순서

현장플랜트 방식의 시공 순서를 Fig. 3.7.9에 나타내었다.

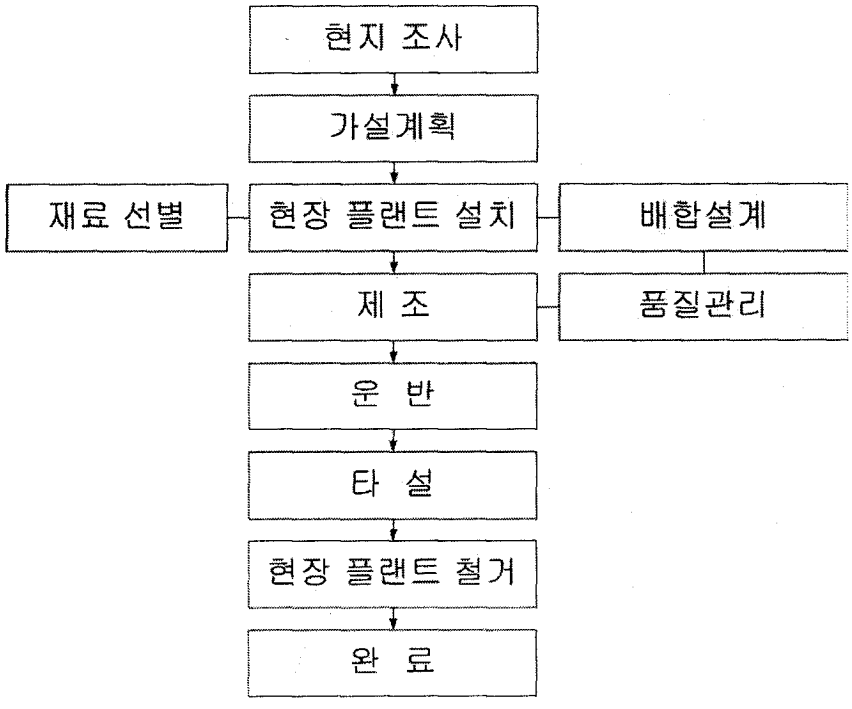


Fig. 3.7.9 현장플랜트 방식의 시공 순서

(2) 시공 계획

(가) 현지조사

현지조사는 주로 아래에 나타내는 항목에 대해 실시한다.

1) 관매설 시공 개소

관매설 시공 개소에 있어서의 현지조사는 관매설 대상물의 매설 위치나 주변 상황을 관찰하여 작업 공간을 확보할 수 있을지에 대한 확인 등을 실시한다. 또한 도로 점유 허가 시간이나 작업시간대등도 함께 조사한다.

2) 관매설 주변 지반

보링 자료 등에 의해, 주변 지반의 강도 등의 정보를 입수한다. 공사 설계도 등에서 지하 매설물 등을 확인하고, 현지 답사에 의해 주변의 지형, 지질, 지하수, 지하 매설물 등의 상황을 확인한다.

3) 현장플랜트

타설 현장 근처에 현장플랜트로 이용 가능한 면적을 조사한다. 필요한 면적을 타설 현장 근처에서 확보하기 힘든 경우 대체 장소를 준비할 필요가 있다. 그 경우에는 타설 현장과 플랜트 현장까지의 거리, 운반 시간, 교통 정체 등의 도로 사정에 대해 조사한다.

4) 현장발생토 및 사용물의 조사

현장발생토를 조사한다. 매립토의 경우는 매립의 경위를 조사하여 확인한다. 중금속 등의 유해물이 혼입되어 있을 우려가 있는 경우는 화학 분석 등의 조사를 실시한다. 용수에는 수도물, 공업용수, 하천수(해수), 지하수 등이 사용 가능하므로 사용수량의 확보가 용이한 용수를 선택한다. 하천수 등을 사용하는 경우에는 강도 발현에 영향을 주는가를 확인할 필요가 있다.

(나) 가설 계획

도시지역에 유동화 처리토를 적용하는 경우, 안전 여부를 확실히 하고 작업을 수행해야하고 주변 환경도 충분히 고려하면서 가설 계획을 실시한다.

1) 가울타리

작업중에 1차 배합 처리토나 유동화 처리토가 주변으로 튈 경우가 있으므로 제조현장나 타설 개소 주변에는 가울타리를 마련하고 주변에의 재료가 튀는 것을 방지한다.

2) 안전 요원

덤프 트럭에 의한 건설 발생토의 운반이나 레미콘에 의한 유동화 처리토의 운반을 실시하는 경우에는 공사용 운반차량의 출입이 많아지므로 출입구 등에 안전 요원을 적절히 배치하여 교통 재해 방지에 노력한다.

3) 관매설 구획

플랜트의 제조능력, 펌프나 레미콘에 의한 운반 능력 등을 고려하여 타설개소를 칸막이로 적절히 분할한다. 구분벽에는 유동화 처리토의 압력에 충분히 견딜 수 있는 구조의 거푸집 등을 이용하여 유동화 처리토가 빠져 나오지 않도록 유의한다.

4) 타설용 배관

콘크리트 펌프차 등을 이용해 유동화 처리토를 타설 개소에 압송하는 경우 관매설 작업전에 배관을 설치한다. 또한 갱도 등의 폐쇄된 공간을 매설 경우에는 천단에 바람구멍용의 배관 혹은 공기 구멍을 설치할 필요가 있다.

나. 주재료의 관리 방법

(1) 현장발생토 관리

유동화 처리토는 많은 종류의 현장발생토를 이용할 수 있지만, 현장발생토를 이용할 때에는 아래와 같은 점에 유의할 필요가 있다.

(가) 이물질의 혼입

유동화 처리토 속에 이물질이 혼입되어 있으면 파이프에 녹이 슬거나 플랜트 기계의 고장 등이 발생하기도 한다. 플랜트에서 발생하는 문제 중 가장 많은 것은 목편이나 철선 등의 가는 이물질의 혼입에 의해 일어난다.
따라서 발생토에 목편이나 철선 등의 이물질의 혼입을 최소화하도록 충분히 유의할 필요가 있다.

(나) 고화재를 이용한 지반 개량토의 혼입

고화재를 이용하여 지반을 개량한 곳으로부터 굴착토는 대다수의 경우 하나의 덩어리로 되어있어 플랜트에 문제를 유발하거나 파이프가 녹스는 것의 원인이 된다. 특히 강도가 qu=7.0kg/cm^2 이상의 것을 이용하는 경우에는 미리 입경을 40mm 정도 이하로 파쇄하여 사용할 필요가 있다. 한편, qu=7.0kg/cm^2 이하로 강도의 그다지 높지 않은 것에 대해서는 제조 과정에서 혼합기내에서 분쇄가 가능하고 그대로 사용해도 지장이 없다.

(다) 보관 장소의 현장발생토 관리

보관 장소는 충분한 면적을 확보하는 것이 바람직하다. 유동화 처리토는 흙의 종류마다 그 배합이 다르므로 가능하면 충분한 면적을 확보하여 흙의 종류마다 나누어 보관하는 것이 바람직하다. 그러나 시가지등 현지 여건이 허락되지 못해 충분한 면적을 확보하지 못한 경우에는 흙을 분별해 보관하는 것이 곤란하기 때문에 다른

종류의 흙과 함께 보관하는 경우가 발생한다. 이런 경우, 토질의 차이는 처리 플랜트의 배합에 영향을 미쳐 목표로 했던 유동화 처리토를 제조하기 위해 작업 효율과 품질의 안정성을 저하시킬 수 있다. 따라서 제조시에 신속하게 흙의 변화에 대응할 수 있도록 유의할 필요가 있다.

(2) 현장발생토의 토질

원료로서 이용되는 현장발생토의 토질이 변하면 플랜트로의 배합비도 그에 따라 변경할 필요해야 하므로, 플랜트의 가동 효율 저하 및 제조된 유동화 처리토 품질의 불안정을 초래할 수 있다. 따라서 가능한 동일 종류의 현장발생토를 안정적으로 확보하는 것이 중요하다. 이 때, 현장발생토의 현장상태를 파악하기 위한 주된 관리 항목으로서는 흙의 종류, 함수비, 현장발생토의 채취 장소나 굴착 공법 등이 있다. 흙의 종류는 세립분의 양으로 보통 판단할 수 있다.

보관된 현장발생토의 함수비는 강우 등에 의해 영향을 받는다. 일반적으로 점성토의 경우는 함수비의 변동이 적기 때문에 점성토로 유동화 처리토를 제조하는 경우에는 점성토의 함수비의 변화는 큰 문제가 되지 않는다. 그러나 굴착한 점성토를 장기간 임시로 방치하는 경우에는 방치 직후로 부터 6개월 정도는 함수비가 계속 저하하는 경우도 있는데, 이렇게 되면 점차 배합이 어려워지게 되고, 결과적으로 유동화 처리토의 품질 저하를 초래할 수 있다. 이러한 경우에는 정기적으로 점성토의 함수비를 측정하면서 배합의 용이성 정도를 예측하는 것이 중요하다.

한편 사질토나 실트 등의 경우에는 강우시 및 강우 후의 함수비의 측정·관리가 반드시 필요하다. 또 반입되는 현장발생토에 대해서는 발생 장소, 발주자, 공종, 굴착토 상태 등을 기록해 둘 필요가 있다. 이러한 정보는 현장발생토의 이물질 등의 혼입을 예측하는 중요한 정보가 된다.

다. 시공관리

(1) 품질관리

유동화 처리토는 콘크리트와 달리 일반적으로 원재료의 품질 변동이 큰 현장발생토를 이용하기 때문에 품질 변동의 영향을 받기 쉽다. 유동화 처리 공법에서는 일정한 품질을 확보하기 위해서 Fig. 3.7.10에 나타난 용도에 대한 적절한 품질과 원재료의 화학적 원인 및 물리적 원인으로 인한 품질관리를 실시해야 한다.

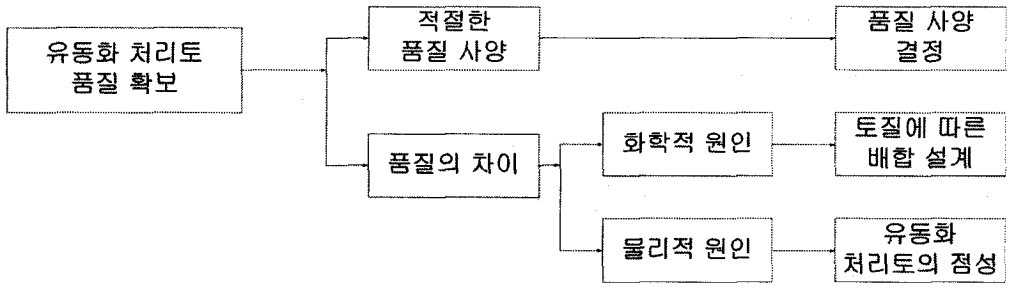


Fig. 3.7.10 제조 과정의 품질관리 방법

(가) 사용 현장발생토의 관리

사용하는 현장발생토의 함수비는 현장발생토의 성질과 상태가 변화했을 때 측정할 뿐만 아니라 중단한 공사를 재개할 경우에도 측정하여 추가 수량을 결정할 필요가 있다. 또한 장기간 저장중인 사질토를 사용하는 경우에는 강우에 대한 영향을 고려해주어야 하므로 강우 후의 함수비를 측정한다. 플랜트에서 1차 배합 처리토의 상태로 관리하는 경우, 현장발생토는 관리 대상에서 제외할 수 있다.

(나) 사용 재료의 관리

배합설계와 동일한 유동화 처리토가 제조되고 있는지 확인할 수 있도록 현장발생토, 고화재, 물의 사용량을 기록하여 제조 수량, 유량계에 의한 타설 수량을 조사한다.

(다) 1차 배합 처리토 상태의 관리

유동화 처리토는 1차 배합 처리토 상태의 품질과 유동화 처리토의 품질을 동일하게 관리할 수 있도록 제조 과정에서 1차 배합 처리토 상태의 관리가 중요하다. 1차 배합 처리토 상태는 배합설계와 동일한 밀도가 유지되는지를 확인하여 관리한다. 1차 배합 처리토 상태의 세립분함유율 F_c이 5-8%정도 차이가 나면 배합 시험으로 설정한 밀도로 조절하더라도 유동화 처리토의 품질을 확보하기가 힘들다. 이와 같이 토질의 물리적인 차이가 있는 경우에는 배합설계와 같은 밀도로 조절하더라도 소정의 품질을 얻을 수 없기 때문에, 유동화 처리토의 1차 배합 처리토 상태 관리는 토질의 변화에 대응하면서 적절한 품질을 얻을 수 있도록 1차 배합 처리토 상태를 조정할 필요가 있다.

(라) 유동화 처리토의 밀도, 유동성, 블리딩율의 관리

유동화 처리토의 제조 및 제조 후 1차 배합 처리토 상태에서 유동화 처리토의 습윤 밀도, 플로우치, 블리딩율에 대해 각각 시험을 실시해 품질을 관리한다. 표준적인 품질관리 방법을 Table 3.7.5에 나타낸다. 유동화 처리토는 1차 배합 처리토 상태의 품질이 처리토의 품질로 연결되므로 1차 배합 처리토 상태의 품질관리 방법은 매우 중요하다. 1차 배합 처리토 상태의 관리는 밀도에 의해 관리되어 왔지만, 원지반의 입도 구성이 다양해지는 경우에는 1차 배합 처리토 상태의 밀도를 적용하여 일정 품질의 유동화 처리토를 제조하는 것이 어려울 수 있다.

Table 3.7.5 유동화 처리토의 표준적인 품질관리 방법의 예

시험 대상	시험 항목	시험 방법	측정 빈도	허용 범위
1차 배합 처리토 상태	점성	콘크리트의 주입 모르타르의 유동성 시험 또는 로트 시험※1	1차 배합 처리토 저장량의 1/2에 대해 1회 (단, 1일에 최저 2회이상) 실시	배합설계 기준으로 결정한 1차 배합 처리토 상태 밀도의 상한값과 하한값의 범위 이내※2
	밀도	정량 용기로 시료의 용적 질량 측정		
	입도※3	입도 시험 또는 세립분함유율 시험		
유동화 처리토	밀도	정량 용기로, 시료의 용적 질량 측정	1일 1회 이상	용도별 품질 규정의 범위에서 1차 배합 처리토 상태의 상·하한값으로 나타낸 밀도값의 범위 이내
	플로우치	- 실린더(ϕ80mm, h80mm)에 시료를 충전해 실린더를 연직으로 끌어올림 - 1분이 경과한 후에 그 확대 측정 (JI-iS313-1992실린더법)		
	블리딩율	- 토목 학회 기준 주입 모르타르의 블리딩율 시험 방법 (JSCE-1992)에 의해 실시 - 측정에 대해서는 계측 개시부터 시간이 경과한 후의 것을 사용		
	일축압축강도	- 몰드(ϕ50mm, h100m)로 공시체를 3개 제작하여 원칙대로 20℃에서 밀봉 양생 실시 - 재령 28일에 시험을 실시하여 평균치를 구함		

※ 1 : 로트 시험을 이용해 점성을 평가하면 시험에 필요로 하는 시간도 단축할 수 있다. 유동화 처리토 공법용으로 개발된 개량형 P로트 시험기를 이용하면 필요한 점성에 대한 측정 감도가 높게 측정되어 오차가 적게 된다.

※ 2 : 상설 플랜트 등에서 장기간에 걸쳐 재료의 성질을 안정화 할 수 있을 때에는 허용범위에 대한 과거의 품질관리 실적을 고려하여 수립한다. 단, 원재료에 대해서 배합 시험을 실시했을 때 얻을 수 있는 배합설계 범위는 허용범위 이내여야 한다.

※ 3 : 점성을 대신해 밀도로 1차 배합 처리토를 관리할 때는 입도 시험을 병행한다.

(마) 강도의 관리

강도 시험은 타설시에 유동화 처리토를 채취해 몰드에 채워 공시체를 제작한 후 소정의 재령에 대해 일축압축시험을 실시한다. 또, 현장에 따라 불교란 시료를 채취하여 원위치에서의 강도를 확인한다.

(2) 용도별 품질 규정

유동화 처리토를 각종 용도에 적용하는 경우 용도별 요구 품질의 설정에 대해 시공 조건이나 적용 개소의 중요성 등도 충분히 고려한 후 결정할 필요가 있다. 장기적인 안정성은 습윤 밀도가 1.6g/cm^3 미만인 경우에는 화학적인 안정에 의해, 또 1.6g/cm^{3}을 넘는 경우에는 화학적 안정 외에 물리적인 안정을 도모 할 수 있도록 일축압축강도의 기준치를 별도로 수립해야 한다.

(3) 성과 관리

성토 등에 이용된 유동화 처리토 성과 관리는 재료의 납입 전표, 타설 형상으로부터 파악할 수 있다. 또한 충전 등 눈으로 확인할 수 없는 부분이 많을 경우에는 납입 전표, 유량계 등으로 파악한다.

(4) 배합 수정

유동화 처리토는 배합 시험에 의한 실내 배합과 플랜트에서 제조된 유동화 처리토의 품질에는 차이가 크지 않고 동등한 품질을 재현할 수 있지만, 현장토의 품질이 불규칙한 경우에는 품질이 불안정하게 된다. 따라서 유동화 처리토는 다양한 현장발생토에 대한 배합비를 사전에 도출하여, 품질의 안정을 도모하는 것이 바람직하다.

배합 수정을 할 때에는 고화재양이 일정할 때의 1차 배합 처리토 밀도를 변경하여 점성을 일정하게 유지하는 방법 고화재양을 변경하는 방법이 있다. 고화재양이 일정할 때 1차 배합 처리토의 밀도를 변경하여 점성을 일정하게 유지하는 방법에

서는 토질의 변화가 발생하지 않고, 1차 배합 처리토 밀도를 목표치로 조절하는 경우는 1차 배합 처리토의 점성이 허용치를 넘는 경우나 유동화 처리토의 특성이 목표치를 만족하더라도, 유동성이 허용치를 만족하지 않는 경우에는 소정의 1차 배합 처리토의 점성 혹은 유동화 처리토의 유동성을 얻을 수 있도록 1차 배합 처리토의 목표 밀도를 변경하여 유동화 처리토의 품질을 확보한다.

예를 들면 배합설계 기준의 경우1차 배합 처리토 밀도를 1.52~1.57g/cm^{3}으로 조절하면 유동화 처리토의 요구 품질을 만족하게 된다. 그러나 제조 과정에서 1차 배합 처리토 밀도를 1.57g/cm^{3}으로 조절하더라도 밀도 1.52g/cm^{3}에서 유동성이 250mm를 넘는 경우는 품질을 확보하는 것이 어렵다. 특히 입도 분포에 변화가 생기면 1차 배합 처리토 밀도와 유동성 및 일축압축강도의 관계를 예측할 수 있기 때문에 배합 시험을 실시하지 않아도 1차 배합 처리토의 점성이 일정하도록 1차 배합 처리토의 밀도를 조절하면 유동화 처리토의 품질을 안정시킬 수 있다. 고화재 량을 변경하여 품질을 확보하는 경우에는 고화재의 강도 발현에 영향을 미칠 정도로 현장발생토가 변화했을 때에 배합 시험을 다시 실시하여 적정 배합을 만족시키는 것이 좋다. 일반적으로 토질이 변화했다는 것을 사전에 알고 있는 경우에 적용된다.

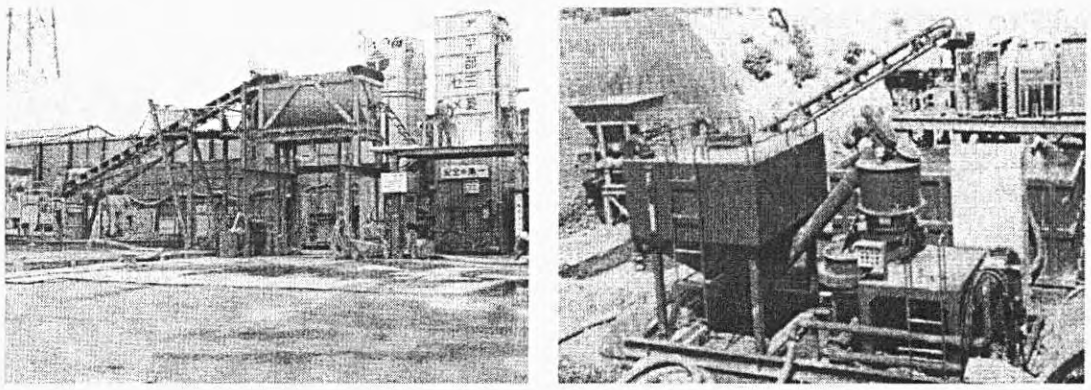
라. 현장 플랜트의 선정 및 배치

현장 플랜트는 현장 발생토의 수급 여건, 플랜트의 진출입 여건, 현장의 공사 규모 등에 따라 고정식 플랜트와 이동식 플랜트 중 효율적인 플랜트를 선정해야한다. Table 3.7.6에 고정식 플랜트와 이동식 플랜트의 선정 조건을 제시하였다.

Table 3.7.6 현장 플랜트의 선정 조건

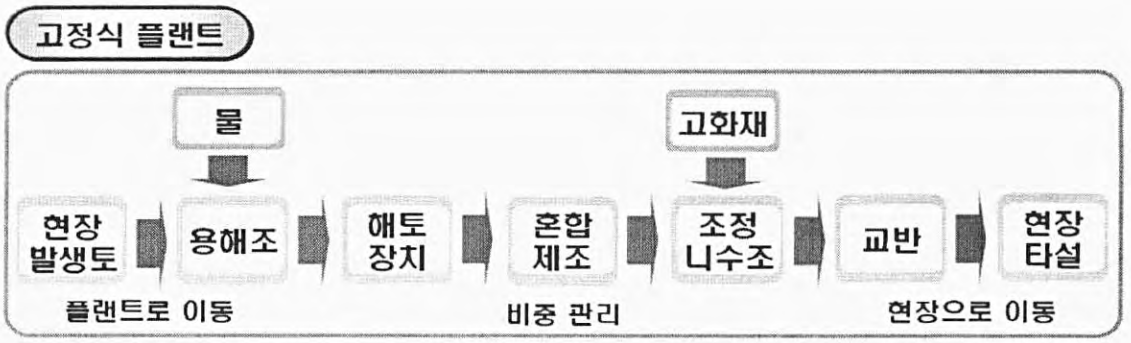
	고정식 플랜트	이동식 플랜트
현장발생토 수급	난해	수월
공사의 규모	소규모	대규모
현장 플랜트의 진출입	난해	수월
유동화 처리토의 운반시간	2시간 이내	고려하지 않음

Fig. 3.7.11에 고정식 플랜트와 이동식 플랜트의 모습을 나타내었고, Fig. 3.7.12에는 고정식 플랜트의 유동화 처리토 제조과정과 이동식 플랜트의 유동화 처리토 제조과정을 나타냈다.



(a) 고정식 플랜트 전경 (b) 이동식 플랜트 전경

Fig. 3.7.11 유동화 처리토의 플랜트 (일본)



(a) 고정식 플랜트의 유동화 처리토 제조과정



(b) 이동식 플랜트의 유동화 처리토 제조과정

Fig. 3.7.12 고정식과 이동식 플랜트의 유동화 처리토 제조과정

제 8 절 결론 및 요약

본 연구에서는 실내 실험(Column test, Pilot scale test)의 결과를 통해 유동화 처리토의 설계인자를 도출하고 현장 시험 시공을 실시하여, 유동화 처리토 공법의 현장 시공성 및 적용성을 파악하고자 하였다. 또한 유동화 처리토 공법에 최적화된 배합설계 프로그램(CLSM-Mixer)을 개발하여, 유동화 처리토를 활용한 배합설계시 실무 적용 오차를 줄이고자 하였다. 최종적으로는 연구를 통해 파악된 모든 영향인자를 통해 유동화 처리토 공법의 설계 프로세스를 제안하였다. 본 연구를 통해 도출된 결과를 각 프로세스 별로 정리하면 다음과 같다.

▶ 실내 실험 결과

1) 12가지의 고화재에 대해 적합 고화재로 C-10(CSA계 시멘트)을 선정하였고, 선정된 고화재로 실제 현장시료(SW, SM, SC, ML, CL)를 재활용한 급결성 유동화 뒷채움재는 유동성과 재굴착성 등을 고려해 볼 때, 기존의 모래로 다짐된 뒷채움재를 대체할 수 있음을 파악하였다.

	SW	SM	SC	ML	CL
W/C비(%)	212	192	207	241	212
현장토비(%)	53.3	60.0	43.5	38.8	32.4
촉진제 (g)	-	-	-	-	15.5

2) 공기량 실험, 투수실험, CBR 실험, pH 측정, 어독성 실험을 실시하여 유동화 처리토의 특성을 파악하였다.

3) 자갈 함유량과 유기물 함유량의 증가에 따른 재료분리 특성, 유동성, 강도특성, 투수특성을 파악하였고, 석탄회를 첨가한 유동화 처리토의 특성실험을 통해, 유동화 처리토의 주재료로서 유동화 처리토의 활용성을 검토하였다.

▶ 배합설계 프로그램(CLSM-Mixer) 개발 결과

1) CLSM-Mixer 프로그램에 의해 각 시료 종류에 따른 고화재-물 비율을 산정할 수 있었고, 산정된 고화재-물 비율을 바탕으로 고화재, 현장토, 물의 총량을 결정할 수 있었다.

2) 이러한 결과를 통해, 개발된 프로그램을 이용하여 실제적인 배합비를 산정할 수 있었다.

▶ 현장 시험 시공을 통한 현장 적용성 평가 결과

1) Section A, B, C에서 재료분리 특성을 파악한 결과, 블리딩율은 목표 기준치인 1% 이하의 값을 나타냈고, 유동성 측정결과 역시 JHS, ASTM, Slump Flow의 3가지 조건의 목표 기준치를 모두 만족하였다.

2) 강도특성은 재령 4시간 강도와 재령 1일 강도 등의 조기강도는 목표기준에 만족하였지만, 장기강도는 목표 기준을 상회하는 값을 나타냈고, 이러한 경향은 현장 발생토와 석탄회를 혼합하여 적용한 유동화 처리토에서 더 크게 나타났다. 또한 현장 Core 시료의 강도가 공시체로 제작한 유동화 처리토의 강도보다 더 크게 나타났다.

3) 현장 시험 시공에 사용된 모든 유동화 처리토의 변수위 투수계수는 일반적인 유동화 처리토의 투수계수 10^{-6}~10^{-7}cm/sec의 범위에 적합한 결과를 나타냈다.

4) 현장 시험 시공 결과를 통해 기존의 공법과 유동화 처리토의 경제성을 분석한 결과, 모래다짐 공법에 비해 약 25%(약 8,000원/m^3), 고화처리 공법에 비해 약 10%(약 3,000원/m^3)의 비용 절감 효과가 나타나는 것으로 평가되었다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 연구개발 수행 진도율

1. 1차년도 진도율

구 분 / 연구내용	추진일정 1	2	3	4	5	6	진도(%)
기초 문헌조사 및 분석	———	———	———				100
국내 토질조건에 적합한 친환경적인 고화재의 발굴	———	———					100
선정된 고화재 처리토의 특성파악을 위한 시험 및 분석		———	———	———	———		100
처리 전·후의 내구성 및 유동성 시험		———	———	———	———		100
시험 결과 분석 및 영향인자 도출			———	———	———		100
시험 결과로부터 대상토의 최적 배합비 및 배합설계법 도출			———	———	———		100
1차년도 보고서 작성					———	———	100
총 진도율	———	———	———	———	———	———	100

· 당초계획

——————————— 실 적

2. 2차년도 진도율

연구내용	구 분	추진일정 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	진도 (%)
실내 실험을 통한 유동화 처리토의 특성 분석 (15%)	자갈 함유토의 재료분리, 강도특성, 유동성을 평가하여 적합성 및 시공성 검토 (5%)																	100
	유기질토의 강도특성, 유동성을 평가하여 적합성 및 시공성 검토 (5%)																	100
	고로시멘트의 내구성, 유동성, 강도시험 등의 결과 분석 및 영향인자 파악 (5%)																	100
실내 모의 배합 실험을 통한 현장토의 최적 배합비 산출 (15%)	석탄회 첨가에 따른 유동화 처리토의 배합특성 파악 (5%)																	100
	현장발생토의 유기질 함유량 분석 (5%)																	100
	목표강도, 유동성, 슬럼프콘, 블리딩율을 모두 만족하는 현장발생토의 배합비 산출 (5%)																	100
유동화 처리 프로세스 개발 및 시공기법 검토 (15%)	배합설계법에 근거한 유동화 처리시스템 개발 (5%)																	100
	유동화 처리토 현장플랜트 제작 (10%)																	100
품질 기준 정립 (10%)	적용 대상 구조물의 제작 및 설계 기준 정립 (10%)																	100
현장 적용성 평가 (25%)	시험시공에 의한 현장 적용성 평가 및 검증 (25%)																	100
시공성 및 경제성 분석 (20%)	본 공법의 현장 시험 시공 결과와 기존 공법과의 경제성 비교 (10%)																	100
	일위대가표 / 표준품셈표 / 유지관리지침서 작성(10%)																	100
최종 보고서 작성	보고서 작성																	100
총진도율																		100

. . . . . 당초계획

——————— 실 적

제 2 절 연구개발 목표의 달성도

연구개발 목표	달성도 (%)	내 용
친환경 고화재 선정 및 특성검토	100	- 국내의 대표적인 토질과 고성능 친환경 고화재의 선정을 위해 해외 미국, 일본, 대만의 사례 조사 및 기초 문헌조사 완료 - 국내 토질 조건에 적합한 고화재 선정 완료
전용 배합설계법 개발 및 검증	100	- 5가지 배합토의 배합비를 선정하기 위해 실내 시험(유동성, 급결성, 투수성, 압축성, 내구성, 재굴착성 등)을 실시하여 최적 배합비를 도출 완료 - 실내 실험에서 나타난 유동화 처리에 영향을 주는 다양한 인자를 평가 및 분석 완료 - 환경 위해성 평가 완료 - 고화재와 흙의 적정혼합비를 산출하는 배합설계법 제안
실내 시험을 통한 유동화 처리토의 특성 분석	100	- 유기물 함유량에 따른 재료분리, 유동성, 강도특성, 투수특성 평가 완료 - 자갈 함유량에 따른 재료분리, 유동성, 강도특성, 투수특성 평가 완료 - 일본에서 유동화 처리공법에 사용되는 고로슬래그 시멘트의 내구성, 유동성, 강도시험 등의 결과 분석 및 영향인자 파악 완료 - 석탄회를 첨가한 유동화 처리토의 재료분리, 유동성, 강도특성, 투수특성 평가 완료
유동화 처리 프로세스 개발 및 시공기법 검토	100	- 시공기법 검토 완료 - 배합설계법에 근거한 유동화 처리시스템 개발 완료
품질기준 정립 및 품질시험법 표준화	100	- 품질 표준 시험법정립 완료 - 적용 구조물 별 품질기준 정립 완료
현장 적용성 평가	100	- 시험시공에 의한 현장 적용성 평가 및 검증 완료 - 지속가능한 적용 범위 확대 검토 완료
유동화 처리토 공법의 설계 기준 정립	100	- 선정된 고화재 특성에 따른 유동화 처리 공법의 설계 기준 정립 완료 - 적용 대상구조물의 시방기준 정립 완료
유동화 처리토 공법의 위험도 분석	100	- 위험도 분석 및 기존 다짐공법과의 비교 평가 완료
시공성 및 경제성 분석	100	- 유지관리 지침서 작성 완료 - 품셈 및 일위대가 작성 완료 - 기존 공법과의 경제성 비교 완료

제 3 절 관련분야의 기술발전에의 기여도

본 연구를 통해 획득한 연구 성과를 국내에 발표하고, 그 결과를 공유하여 관련 분야의 기술 향상 및 관련 학문의 질적 향상에 공헌하고 있는 바 그 결과를 다음에 제시하였다.

1. 국내 학술지

가. 조대호, 한상재, 김종윤, 김수삼(2007. 5), "현장발생토를 활용한 옹벽 뒷채움용 급결성 유동화 처리토의 최적 배합비 산정과 재료거동에 관한 실험적 연구", 대한토목학회 논문집, 제27권, 제3C호, pp. 175-184.

나. 한상재, 안동욱, 김수삼(2009), 휴믹산 함유량에 따른 유동화 처리토의 공학적 특성에 관한 실험적 연구, (준비중)

다. 한상재, 안동욱, 김수삼, 박용대(2009), 고로슬래그 시멘트를 이용한 유동화 처리토의 공학적 특성, (준비중)

라. 안동욱, 한상재, 김수삼, 정승용(2009), 석탄회를 첨가한 유동화 처리토의 공학적 특성, (준비중)

2. 국내 학술발표

가. 조대호, 김기년, 한상재, 김수삼, 박용대(2007. 3), "현장발생토의 유동화 처리 배합비 결정 프로그램의 개발과 적용성", 2007년 한국지반공학회 봄 학술발표회, pp. 1259-1264.

나. 안동욱, 한상재, 박용대, 김수삼, 김대라 (2007. 10), "급결성 유동화 처리토의 최적 고화재 선정에 대한 실험적 연구" 대한토목학회 정기학술대회, pp. 2765-2768.

다. 윤명석, 안동욱, 장남주, 한상재, 김수삼 (2008. 3. 28), "화력발전소 매립석탄회를 이용한 성토용 인공골재 개발 연구", 한국지반공학회, pp. 1051-1060.

라. 김종윤, 안동욱, 한상재, 임남웅, 김수삼 (2008.10), "버텀애쉬를 이용한 준설토의

안정처리에 관한 연구", 대한토목학회 정기학술대회, pp. 2127-2130.

마. 안동욱, 장남주, 조대호, 김수삼, 박용대 (2008.10), "고로슬래그 시멘트를 이용한 유동화 처리토의 배합특성", 대한토목학회 정기학술대회, pp. 2192-2195.

바. 조대호, 김성호, 김수삼 (2008.10), "유동화 처리토를 이용한 콘크리트 빔 하부 공간의 뒤채움", 대한토목학회 정기학술대회, pp. 2197-2200.

3. 국외 학술발표

가. Y. Y. Kim, M. S. Yoon, S. J. Han, S. S. Kim (2008. 6) "Behavior analysis of reinforced soil retaining wall under cyclic loading", Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics, pp. 639-644

나. M. S. Kang, S. S. Kim, S. J. Han, M. S. Yoon, (2008. 7) "Comparison and Strength Charactoeristics of Cements for Cement-Stavilization for Dredged Surface Soil" International Offshore and Polar Engineering Conference, pp590-597

4. 지적소유

가. 2008. 02. 14. 특허등록 : 건설현장 잔토의 재활용이 가능한 고유동성 무다짐 유동화 처리토 제조방법, 등록번호 : 10-0805676, 발명자 : 김수삼, 박용대, 한상재, 정승용, 특허권자 : 한양대학교 산학협력단, 대한민국 특허청

나. 2007. 05. 23. 특허출원 : 무다짐 유동화 처리토 공법의 최적 배합비 산정 방법, 출원번호 : 10-2007-0050065, 발명자 : 김수삼, 박용대, 한상재, 정승용, 출원자 : 한양대학교 산학협력단

다. 2008. 11. 28. 특허출원 : 석탄회를 첨가한 고유동성 유동화 처리토의 제조방법, 출원번호 : 10-2008-0119733, 발명자 : 박용대, 한상재, 안동욱, 출원자 : (주)삼안, 한양대학교 산학협력단

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 연구성과의 활용방안

본 연구에서 제안한 유동화 처리토 공법은 단기간에 경제적으로 시공이 가능한 기술이며 친환경적인 공법으로써, 통일분류법으로 구분된 5가지 시료(SW, SM, SC, ML, CL) 및 필요 발현강도에 따른 최적 배합비를 실내실험을 통해 선정하고자 하였다. 또한 자갈 함유량, 유기물 함유량, 석탄회 첨가량에 따른 유동화 처리토의 공학적 특성을 파악하였다. 실내 실험에서 나타난 유동화 처리토 공법에 영향을 주는 다양한 인자를 평가, 분석하여 고화재와 흙의 적정혼합비를 산출하는 배합설계법을 제안하며, pH 측정 및 어독성 실험을 통한 환경 위해성 조사를 실시하였다.

본 연구에서 제안된 유동화 처리토 공법의 연구결과의 활용 방안은 다음과 같다.

- 시공 깊이가 깊거나 복잡한 구조물의 공동 충전
- 라이프 라인(상하수도 배관, 전기 배관, 통신 배관 등) 지중화 공사의 되메움
- 폐기된 지하저장탱크, 우물, 버려진 지하시설물, 포장하부 공극 등의 되메움
- 터널 축, 기초 또는 도로 기층의 공동 충전
- 옹벽 및 교량 교대 등의 구조물의 뒷채움
- 교량 접속 슬래브의 보조기층

제 2 절 연구성과의 기대효과

1. 기술적 측면

본 연구에서 제안한 현장발생토를 이용한 유동화 처리토는 현장발생토를 이용하므로 쉽게 생산이 가능하고 시공속도가 빠르므로 건설 시공절차가 단순화 되어 품질관리를 용이하게 할 수 있다. 또한 유동성, 자기 수평 능력에 의해 추가적인 기계적 다짐 작업이 필요 없기 때문에 안전하며 굴착 폭을 줄일 수 있을 뿐 아니라 소음이나 분진, 진동이 발생하지 않아 주변 환경에 영향을 주지 않는다. 본 연구의 결과의 활용으로 인하여 선진국의 품질 기준을 만족하는 동시에 기존의 시공 방법이 갖는 문제점의 해결이 가능하다고 판단된다.

따라서, 이렇게 개발된 기술의 시공 매뉴얼을 작성하고, 관련 업체들에 기술의 보급을 꾀하여 관련 산업의 활성화에 선도적인 역할을 수행할 수 있으며, 신기술 및 국내외 특허를 취득하여 관련 기술의 국내 보급과 해외 수출 및 국제시장에서의 우위를 확보할 수 있을 것이라 기대된다.

2. 사회 · 경제적 측면

본 연구를 통해 얻을 수 있는 사회, 경제적 이익은 다음과 같이 정리할 수 있다.

첫째, 현장발생토를 재활용하여 잔토처리비 및 양질의 토사 구입비용 절감을 들 수 있다.

둘째, 양질의 토사로 다진 것 보다 더 큰 강도 및 내구성을 얻을 수 있다.

셋째, 급결성 고화재를 사용하면 단시간에 교통 개방이 가능하므로 시공에 따른 교통 체증 및 불편이 줄어들기 때문에 도시 내의 공사현장에 용이하여 기존의 시공방법을 대체할 수 있을 것이다.

넷째, 시공 시 굴착 폭을 줄여 굴착량을 감소시킬 수 있으므로 시공비가 절감되고, 지하수의 유출입이 불가능한 지반의 침하 및 붕괴사고에 따른 안전사고를 줄일 수 있다.

다섯째, 폐기물로 지정되어 매립되고 있는 석탄회를 유동화 처리토의 제조에 사용

하므로, 폐기물을 재활용하여 폐기물 처리비용 및 골재 구입비용을 절감할 수 있다.

여섯째, 우리나라의 경우 전기사용량의 증가로 인해 석탄회 배출량의 증가 추세에 따라 상당규모의 회(灰)처리장 건설이 요구되며, 이에 따른 투자비용의 증가, 환경오염 및 민원의 발생등 다양한 문제점이 야기되는 실정이지만, 석탄회의 재활용을 통해 이러한 문제의 해소를 기대할 수 있다.

일곱째, 석탄회의 재활용으로 인해 발전소 건설에 대한 부정적 인식을 개선할 수 있다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

급결성 유동화 채움재는 흙, 플라이애쉬, 또는 슬래그, 시멘트, 그리고 물의 혼합물에 급결성 혼화재를 첨가하여 물리적 역학적 특성을 만족하며 시공 기간을 최대로 줄여주기 위한 방법이다. 이러한 급결성 유동화 처리 공법의 연구는 주로 미국, 일본, 대만 등지에서 이루어지고 있으며, 이들은 사회적 요구에 따라 급결성 유동화 채움재의 재료 개발과 현장 적용에 관한 연구를 지속적으로 수행하고 있다. 관련 국외 동향을 정리해보면, 다음과 같다.

제 1 절 일본

건설성 주관 하에 "건설 부산물의 발생 억제· 재생 이용기술의 개발"이라는 프로젝트를 1992년도부터 5년간에 걸쳐 실시하였으며, 터널공사에서 발생하는 흙, 콘크리트 및 건축 폐자재 등을 포함하여 연구를 수행하였다. 이로부터 5년 뒤인 1997년 4월에는 민간 기업의 인원들로 구성된 "유동화 처리공법 연구기구"를 설립하여 현재 33개 업체가 연구 및 시공활동을 하고 있다. 연구기구의 자료에 따르면 건설 잔토에 고화제를 혼합한 후 유동화 처리하여 1993년부터 2003년까지 여러 분야에 272만m^3이 시공되었는데 개착식 지하철현장의 뒤채움에 52%가 적용되는 등 일반적으로 사용되는 공법이다. 또한,유동화 처리 공법을 실용화 하여 건설발생토 또는 슬러지를 재활용하여 고화재와 물의 혼합물인 유동화 채움재를 Ready Mixed Concrete로 생산하고 있다. 일본은 사회적 요구에 의하여 시공 시간을 최소하기 위하여 고화재, 굴착잔토, 물, 그리고 혼화제로 구성된 급결성 유동화 채움재를 현장에 적용하고 있다.

일본에서 수행되고 있는 유동성 뒤채움재에 관한 관련 연구동향을 제시하면 다음과 같다.

松田哲夫등(1993)은 시멘트혼합토로 뒤채움한 옹벽에 미치는 토압에 대한 연구를 통하여 토압의 감소효과를 제시하였다.

鬼塚克忠 등(1996)은 생석회와 포졸란 재료 첨가에 의한 강도발현 특성 연구에서 건설발생토와 포졸란 재료의 화학구성 성분(SiO_2+Al_2O_3)이 커지면 포졸란 반응에

으하여 처리토의 강도가 증가함을 밝혔다.

Kamon 과 Katsumi(1996)는 생석회와 시멘트로 안정화된 흙에 대하여 황산과 질산을 혼합한 인공산성비의 pH에 따른 영향을 관찰하여, pH 3 이하 조건에서 안정화된 흙의 공학적 특성에 악영향을 미치는 것을 밝혔다.

佐藤 厚子 등(2004)은 이탄(泥土)와 시멘트 고화재를 이용한 유동화 처리공법을 수행하여, 목표 강도, 습윤 밀도, 요구되는 플로우(Flow)치와 블리딩(Bleeding)율을 만족하였을 제시하였다.

秋重 博之 등(2004)은 유동화 처리공법을 이용한 초고층 빌딩의 기초지반의 개량에 관한 연구를 진행하였다. 그 결과 설계시에 목표로 한 강도 및 강성을 발현시킬 수 있음이 확인되었다.

제 2 절 대만

타이페이시 정부유지보수 공정처의 2002년도 고성능 저강도 재료 연구보고서에 따르면, 지중 매설관, 옹벽, 도로 노반 등에 유동화 처리토를 일반형과 조강형으로 구분 적용하여, 품질시험 방법 규정, 적용분야별 시방기준을 제시하였으며, 기존 다짐방법과 유동화 처리공법에 따른 공사비를 비교 분석하여 유동화 처리토공법에 의한 경제성을 확인하는 등 실용화 단계에 있다(台北市政府養護工程處, 2002).

Chang et al.(2006)은 CLSM 공법에 사용되는 많은 양의 골재와 모래, 시멘트로 인해 재굴착이 어려운 점을 들어, 현장 발생토를 이용한 뒤채움 물질을 이용(Ready-Mixed Soil Material)한 실내 실험을 실시하였다. 그 결과, 기존의 유동화 채움재 보다 일축압축강도가 2~30배 크며, 재굴착이 가능함을 제시하였다.

제 3 절 북미

북미에서는 주로 플라이애쉬의 재활용을 위한 유동성 뒤채움재에 관한 많은 연구가 수행되었는데, 최근에는 플라이애쉬와 시멘트 및 혼화제를 차별적으로 혼합하여 시공 목적에 적합한 유동성 및 강도발현을 나타내는 유동화 저강도 콘크리트에 대한 연구가 주로 진행되고 있다(Janardhauam et al., 1992; ACI 229R-94, 1994 ;

Tarun et al., 2001 ; FHWA-IF-03-019, 2003). CLSM은 1991년 버지니아주에서 유동성 뒤채움재에 관한 시방서가 공사에 적용이 된 이후, 현재는 레미콘 생산업체의 일반 상품 중의 하나로 널리 사용되고 있다. 주로 모래 또는 폐주물사에 플라이애쉬와 시멘트를 기본으로 사용하고, 유동성 확보를 위한 고성능 감수제, 급결을 위한 조강제, 촉진제 등의 혼화제를 첨가하고 있다. 북미에서 수행되고 있는 유동성 뒤채움재에 관한 관련 연구동향을 제시하면 다음과 같다.

Peindl et al.(1992)은 플라이 애쉬와 콘크리트 혼합체를 뒤채움재로 사용한 대규모 현장시험을 실시하여, 정적, 동적 하중에 의해 성토 중 매설된 파이프의 변위가 일반 토사보다 우수함을 제시하였다.

Janardhanam(1992)은 유동성 플라이 애쉬를 뒷채움재로 사용하기 위한 배합비를 제시하였다.

Javed(1994)는 폐주물사와 플라이 애쉬를 혼합한 재료를 성토재로 사용할 때 발생되는 다짐특성 및 강도, 밀도 등에 관한 연구를 진행하였다.

Xu(1994)는 재령에 따른 시멘트와 플라이 애쉬의 입자특성의 변화를 연구하였으며, 그 양상이 거의 동일함을 제시하였다.

Bhat(1996) 등은 플라이애쉬와 폐주물사를 혼합한 재료를 유동성 성토재로 사용하기 위한 배합비와 그 강도 특성에 관한 연구를 진행하였다.

Naik et al.(1997)은 플라이 애쉬가 대부분을 차지하는 유동성 슬러리와 플라이 애쉬의 85% 정도를 폐주물사로 대체한 강도시험을 실시하여 비교하였다. 90년 말에는 휴스턴대학교에서 수행한 흙에 포틀랜드시멘트, 물, 혼화제를 혼합한 흙-시멘트 슬러리의 특성연구와 미국 공병단에서 보고한 흙에 시멘트, 플라이애쉬를 혼합한 유동화 처리토에 관한 연구를 진행한 바 있다.

Pons et al.(1998)은 일반적인 유동화 채움재와 급결성 유동화 채움재의 역학적 특성을 평가하기 위하여 실내 및 현장 시험을 수행하였다. 그 결과 굴착가능한 유동화 채움재와 급결성 유동화 채움재의 재령 28일 최소 일축압축강도를 1.73kg/cm^2 재령 60일의 최대 일축압축강도로 7kg/cm^{2}을 제안하였다.

FDOT(2000)은 재굴착이 가능한 28일 강도로 100psi를 제안하고 시공시간을 단축하기 위해 급결화된 강도와 일반적인 강도를 시험을 통해 비교하였는데, 급결제 첨가 유무에 따른 비교결과 몇 몇 혼합물의 강도가 증진된 반면, 여러 가지 이유(물-시멘트비, 시멘트량, 고화제 량)에 기인하여 강도의 감소가 발생될 수 있음을

밝혀냈다.

Crouch et al.(2004)는 재굴착이 불가능한 고유동의 급결성 유동화 채움재(ZOOM ⓡ)를 개발하고, 6시간 이전에 응결 및 경화됨을 증명했다. 또한 모래의 입자와 각짐이 혼합물의 유동성, 공기함량, 블리딩 특성에 매우 큰 영향을 미치는 인자임을 파악하였다.

국외의 경우 현장 잔토를 재활용한 저강도 콘크리트에 대한 연구 대상 시료는 Ottawa sand, ASTM C 33, Foundry sand, Micro fine sand, 그리고 Blasting sands 등 서로 다른 입자크기와 입도분포를 갖는 현장토가 사용되며(Green. B. H.1999; Cho, 2003), 이는 대부분 대부분 통일 분류법상 SP 또는 SW등으로 분류되어 국내 표층의 70~80%를 차지하고 있는 화강 풍화토(SM)와 달라 외국의 기준을 국내에 적용하기에는 한계가 있다.

제 7 장 참고문헌

권영호, 이상수, 안재현, 박칠림(1996.11), "초유동 콘크리트의 배합설계에 관한 연구", 한국콘크리트학회 가을학술발표논문집 제 8권 2호, pp.283-289.

(주)지오시스, 정혁규(2003), "포장도로 굴착복구 방법", 특허 제 10-0378035호, 대한민국 특허청

김정길(2001), "고성능 콘크리트의 유동성 평가와 배합설계에 관한 연구", 동아대학교 대학원 건축공학과, 박사학위논문, pp.175.

김종면(2004), "현장발생토를 활용한 뒷채움 흙의 무다짐 공법에 관한 연구" 경기대학교 산업정보통신대학원 토목공학과, 석사학위논문, pp.69.

김화중, 정재동(1995), "고성능 콘크리트의 개념 및 배합설계", 한국콘크리트학회지 제 7권 5호, pp.5-14.

노호현(2001), "파괴에너지를 고려한 콘크리트 배합설계 자동화 프로그램", 동신대학교 대학원 토목공학과, 석사학위논문, pp.63.

박재헌(2004), "유동성 채움재를 이용한 지하 매설관의 변형특성 연구" 경성대학교 대학원, 석사학위논문, pp.30-34.

박재헌, 이관호, 조재윤, 김석남(2004), " 현장발생토 CLSM을 이용한 지하매설관의 변형특성", 한국지반공학회 논문집, Vol. 20, No.3, pp.129-139.

박천세(2003), "고유동 콘크리트의 배합설계 및 내구성에 관한 실험적 연구", 서울산업대학교 산업대학원 토목공학과, 석사학위논문, pp.59.

박칠림, 안재현, 권영호, 이상수(1998), "초유동 콘크리트용 모르터의 최적 배합설계", 한국콘크리트학회지 제 10권 3호, pp.135-142.

성상규(2001), "산업 폐자재 재활용을 위한 유동성재료(CLSM)의 지하매설물 뒷채움재 적용에 관한 고찰", 롯데건설기술보(2001. 12), pp.17-54.

송광섭(2003), "준설토의 고화처리공법", 대한토목학회지 제 51권 제 5호, pp. 31-43.

송창섭(2004), "현장발생토사 CLSM을 이용한 유리섬유 복합관의 거동특성 평가", 경성대학교 대학원 토목공학과, 석사학위논문, pp.78.

신방웅, 이종규, 안병철, 이용규(2001), "폐기물을 활용한 유동성 성토재의 공학적

특성 연구“, 대한토목학회 2001년 학술발표회 논문집, pp.1-4.

엄주용, 이형준, 한승환(1997), “전문가 시스템을 이용한 콘크리트 배합설계 기법 연구”, 한국도로공사 96년도 도로기술연구성과 발표회 논문집(콘크리트 포장분야), pp.77-98.

은충기, 채원규, 이명구, 조광현, 김광일, 손영현(2001), “콘크리트 배합설계 방법에 대한 고찰”, 2001년도 봄 학술발표회 논문집 pp.623-628.

이관호, 박재헌(2006), "파형강관을 이용한 지하매설물용 뒤채움재 설계 및 시공성 평가", *한국도로학회 논문집* 제 8권 2호 2006. 6, pp.63-74.

이관호, 송창섭(2006), "현장발생토사 재활용 유동성 채움재를 이용한 지하매설관의 거동평가", *한국도로학회 논문집* 제 8권 2호 2006. 6, pp.1-12.

이관호, 조재윤, 박재헌, 조윤호(2002), “폐주물사를 이용한 유동성채움재의 토압경감효과 연구”, 대한토목학회 2002년 학술발표회 논문집, pp.432-435.

이관호, 조재윤, 신현무, 김남호(2001), “폐주물사 및 방식사를 이용한 유동성 채움재의 최적 배합설계 및 다짐특성 연구”, 폐기물학회지, 제 18권 4호, pp.389-396.

이관호, 조재윤, 조윤호(2002), “폐주물사를 이용한 유동성 채움재의 절토구간 옹벽 뒤채움시 사일로 토압과 토압경감효과 연구”, 한국도로포장공학회 논문집, 제 4권 2호, 통권 12호, pp.19-32.

이상일, 조대호, 한상재, 김수삼(2006), “급결성 유동화 처리토의 특성에 관한 실험적 연구”*한국지반공학회 2006년 봄학술발표회 논문집.*

이용수(2002), “폐석회를 재활용한 저강도 고유동 충전재의 특성” 석사학위논문, 건국대학교

이인모, 이관호, 조재윤, 윤여준(1999), “유동성 뒷채움재로 사용하기 위한 플라이애쉬-폐주물사 혼합재료의 특성 연구”, 한국지반공학회 1999 봄 학술발표회 논문집, pp.489-496.

장승규, 권영호, 양은익, 조철근, 박칠림(1991), “콘크리트 배합설계를 위한 전문가 시스템 개발”, 한국콘크리트학회 논문집 제 3권 2호, pp.105-113.

정두영(1997), “건설잔토와 콘크리트 폐재의 처리대책”, 대한토목학회지 제 45권 제 3호, pp.61-65.

정용욱(2004), “ 고성능 콘크리트의 배합설계와 특성”, 박사학위논문, 계명대학교 대학원, 토목공학과, pp.195.

조대호(2005), "건설발생토를 이용한 유동화 처리공법의 개요와 적용", *대한토목학회지 기술기사*, 2005년 10월호., pp.119-125.

조재윤(2000), " 폐주물사 혼합재를 이용한 유동성 뒤채움재의 지반공학적 적용성 연구", 박사학위논문, 고려대학교 대학원, 토목환경공학과, pp.179.

조재윤, 이관호, 이인모(2000), " 유동특성을 이용한 폐주물사 혼합물의 옹벽뒷채움재 연구", 한국지반공학회, Vol. 16, No.4, pp.17-30.

천병식, 고경환, 김진춘(2002), "초연약 해성점토의 고화처리를 위한 최적 배합에 관한 연구", 한국지반공학회 논문집, Vol. 18, No.4, pp.33-43.

천병식, 임종윤(2000), "통계적방법에 의한 고화처리층의 최적 배합비 산정에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, Vol. 20, No.1-C, pp.79-90.

천선호(2006), "굴착 잔토를 재활용한 지중 전력구조물 뒷채움재의 거동 특성", 연세대학교 석사학위논문

최남훈(2004), "현장발생토사 CLSM을 이용한 지하매설관의 거동특성 분석", 한양대학교 공학대학원 석사학위논문, pp.59.

최재진, 김은겸(2002), "보통 콘크리트 및 고유동 콘크리트의 배합설계", 한국콘크리트학회지 제 14권 5호, pp.117-129.

농업기반공사 농어촌연구원(2005), "저수지 준설 환경기준 정립 및 준설토 활용방안 연구", 한국농촌공사 농어촌연구원, pp.69-73.

이창훈(2005), "Peat moss로부터 추출한 Humin의 특성 규명 및 중금속 흡착에 관한 연구", 서울산업대학교 석사학위논문, pp.4-12.

김무한(2001), "굵은골재의 최대치수 및 용적비에 따른 고유동콘크리트의 유동특성에 관한 연구", 한국건축학회, Vol17, No.1

문학용(2003), "콘크리트의 블리딩에 미치는 골재 조립률의 영향" 한국건축학회, Vol.23, No.1, pp.215-218

김현도(2002), "왕겨재를 이용한 토질 안정처리", 울산대학교 석사학위논문

박홍규, 구제민(2002), "유기질 혼합토의 토공재로서의 활용에 관한 연구", 한국지반환경공학회 논문집 제 3권 4호, pp.29-35.

American Concrete Institute Committee 229(2002), ACI 229R-94 Report-Controlled Low Strength Materials(CLSM), Vol. 16, No. 7, *Concrete International*

Brian H. Green(1999), "Development of Soil-Based Controlled Low-Strength Materials", *Technical Report INP-SL-2*, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC 20314-1000.

Brian H. Green(1999), "Development of Soil-Based Controlled Low-Strength Materials", *Technical Report INP-SL-2*, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC 20314-1000.

Chang C.F., Chen J.W.(2006), "Development and Production of Ready-Mixed Soil Material", *Journal of Material in Civil Engineering, ASCE*, pp.792-799.

Cho D.H., Kim S.S., Kim S.C., Byun G.J., Lee S.L.(2006), " Properties of a Rapid-Setting Controlled Low-Strength Marine Clay", *Proceedings of the 16th International Offshore and Polar Engineering Conference*, San Francisco, USA, pp.489-493.

Cho, Sung-Ro(2003), Behavior of Flexible Plastic Pipes with Flowable Backfill in Trench Conditions, Ph. D. Dissertation, Civil and Environmental Engineering, *University of Houston.*

Crouch, L. K., Dotson, V. J., Clouse L., Egan, B. and Hall, S. M.(2004), "Rapid Set, High-Early Strength, Non-Excavatable Flowable Fill," *Innovations in Controlled Low-Strength Material (Flowable Fill), ASTM STP 1459*, J. L. Hitch, A. K. Howard and Baas, W. P., Eds., American Society for Testing and Materials, pp.63-73.

Florida Concrete and Products Association, Inc., Flowable Fill Demonstration, RMC 2000, *Florida Concrete and Products Association, Inc.*, Orlando, Florida, 2003.

Green. B.H.(1999), Development of Soil-Based Controlled Low-Strength Materials, U.S. Army of Engineers, Technical Report INP-SL-2.

Hitch, J. L.(1998), "Test Methods for Controlled Low-Strength Material(CLSM): Past, Present, and Future", *The Design and Application of Controlled Low-Strength Materials (Flowable Fill), ASTM STP 1331*, A. K. Howard and J. L. Hitch, Eds., American Society for Testing and Materials, pp.3-10.

Howard, A.K. and Hitch, J.L., Eds.(1998), American Society for Testing and Materials: The Design and Application of Controlled Low-Strength Materials(Flowable Fill), *ASTM STP 1331.*

Howard, A.K., Hitch, J.L. and Baas, W.P., Eds.(2002), American Society for Testing and Materials: *Innovations in Controlled Low-Strength Material(Flowable Fill), ASTM STP 1459.*

Pierce, C. E., Ihekweazu, S.(2004), " A Rapid-Setting Controlled Low-Strength Material for Routine and Emergency Rehabilitation of Transportation Facilities," South Carolina State University, Final Report

Pierce, C. E., Ihekweazu, S. (2004), " A Rapid-Setting Controlled Low-Strength Material for Routine and Emergency Rehabilitation of Transportation Facilities," *South Carolina State University*, Final Report

Pons, F., Landwermeyer, J.S., and Kerns, L.(1998), "Development of Engineering Properties for Regular and Quick-Set Flowable Fill," *The Design and Application of Controlled Low-Strength Materials (Flowable Fill), ASTM STP 1331*, A. K. Howard and J. L. Hitch, Eds., American Society for Testing and Materials, pp.67-86.

R. R. Engebretson and R. von Wandruszka(1994), Microorganization in dissolved humic acids, Environ. Sci. Technol., 28(11).

www.sgreen.co.kr/chinhwan/1-ha%20definition.htm

嘉門 雅史(2004), 發生土の有效利用に伴う環境影響とその評價, 基礎工, pp. 2-7.

久野 梧郎 外 3人(1994), 流動化處理土の利用技術の開發, 土木技術, Vol. 49, No. 8, pp.80-87.

鬼塚克忠, 南里勝(1996), 生石灰とホソラン材料添加による建設發生土(有明粘土)の强度發現特性, 日本土木學會論文集No.547/ Ⅲ- 36, pp.97～106.

大下 角治(1994), 流動化處理土を用いた埋戻し工法, 道路, 日本道路協會, Vol. 636, pp.61-64.

流動化處理工法研究委員會(1997): 土の流動化處理工法 - 建設發生土 · 尼土の再生利用技術、技報堂.

松田哲夫, 前田良文, 五瀨伸吾(1993), "セメント安定處理土の土壓特性" 土と基礎, 41-8(427), pp. 17～21.

神田 政幸 外 3人(2004): 流動化處理土の 高性能化 技術, 基礎工, pp.57-60.

台北市政府養護工程處(2002): 控制性低强度材料於土木工程應用之研究.

獨立行政法人 土木研究所(2004), 建設發生土 利用技術マニュアル(第3版), 財團法人 土木研究センター.

별첨

자체평가의견서

1. 과제 현황

사업 명	건설기술혁신사업			
연구 과제	과 제 명	건설현장발생토를 이용한 무다짐 유동화 처리공법의 실용화 연구		
	주관연구기관	(주)삼안	주관연구책임자	박 용 대
연구 기간	2006년 12월 20일 ~ 2008년 12월 16일 (1년 10개월)			
협동연구기관	기 관 명		연 구 책 임 자	
	한양대학교 산학협력단		김 수 삼	
위탁연구기관	기 관 명		위탁연구책임자	
	(주)지구환경전문가그룹		정 승 용	
참여기업	기업체명		대 표 자	
	(주)삼안		임 종 아	
연 구 비 (천원)	연차	정부	민간	계
	1차년도	90,000	90,000	180,000
	2차년도	266,000	266,000	532,000
	3차년도			
	계	356,000	356,000	712,000

2. 평가일 : 2008. 12. 16.

3. 평가자(연구책임자) 확인

본인은 평가대상 연구과제의 연구결과에 대하여 객관적으로 기술하였으며, 공정하게 평가하였음을 확약합니다.

소 속	직 위	성 명	확약(서명, 인)
(주) 삼안	부사장	박 용 대	

Ⅰ. 연구개발 실적

평 가 항 목	가중치 (A)	평가척도(B) 수 5	우 4	미 3	양 2	가 1	득점 (A× B)	평 가 의 견
연구수행								
① 연구개발 결과의 우수성 및 창의성	2	5					10	건설현장발생토를 재활용하는 취지에서 매우 창의적인 아이디어라고 판단되며, 성공적인 기술 개발시 국내기술의 선진화를 유도할 수 있을 것으로 판단됨.
② 연구개발 수행노력의 성실도	2	5					10	연구계획서상의 과정에 부합되는 연구를 지속적으로 성실하게 수행함.
③ 연구개발 결과에 대한 활용가능성	2	5					10	본 연구 개발결과를 통해 건설현장발생토의 재활용이 가능하며, 총공사비를 절감할 수 있는 신공법의 개발이 가능할 것으로 판단됨.
④ 연구개발 결과의 파급효과	2	5					10	본 연구 결과를 추후 연구 진행의 지표로 사용할 수 있음.
⑤ 공개 발표된 연구개발성과 (논문 게재 또는 산업재산권 출원 및 심사 가능성, 발표회개최 등)	2	5					10	국내학회지 논문 4편, 국외학술발표 2회, 국내학술발표 발표 6회, 특허 등록 1건, 특허 출원 3건.
⑥ 유사 중복성 및 연계활용 방안 연구, 유동화 처리토 공법의 환경위해성 평가	2	5					10	국내외 문헌 검색과 관련 사례의 지속적 조사를 통해 유사 공법과의 중복성 및 차별성을 검토하였음. 유동화 처리토의 환경 위해성을 평가하기 위해 pH 실험과 어독성 실험을 실시함.
⑦ 실내 시험을 통한 유동화 처리토의 특성 분석	2	5					10	고화재 종류(12종)에 따른 배합 특성을 평가함. 자갈 함유량, 유기물 함유량, 석탄회 첨가량에 따른 유동화 처리토의 공학적 특성을 파악하였음.
⑧ 유동화 처리 프로세스 개발 및 시공기법 검토	2	5					10	유동화 처리토의 시공기법 검토 및 배합설계법에 근거한 유동화 처리시스템을 개발하였음.
⑨ 현장 적용성 평가 및 유동화 처리토 공법의 설계 기준 정립	2	5					10	시험시공에 의한 현장 적용성 평가와 검증 및 품질기준을 수립하였음. 선정된 고화재와 구조물의 특성에 따른 유동화 처리 공법의 설계 기준 정립하였음.
⑩ 시공성 및 경제성 분석 (기존 공법과의 비교 분석)	2	5					10	유지관리 지침서 작성과 품셈 및 일위대가를 작성하였음.
소계 / 전문가 평가점수 (100점 만점)							100	

Ⅱ. 종합의견

1. 연구개발결과에 대한 종합의견

본 연구는 환경친화적 고화재와 건설현장발생토를 재이용하여 고유동성 무다짐 처리토를 개발하고 다양한 시료에 대해 최적 배합비를 산정한 후 실제 시공에 적용 가능한 최적 설계기법을 개발함을 목표로 하고 있다. 1차년도 및 2차년도에 수행한 실내 배합 실험을 통해 시료의 특성에 따른 유동화 처리토의 최적 배합비를 도출하고, 2차년도 현장 시험 시공을 통해 본 공법의 현장적용성을 평가할 수 있었다. 또한, 유동화 처리토 공법의 적용을 위한 설계 매뉴얼을 제시하였고, 본 공법에 최적화된 설계 프로그램을 개발하여 범용적인 사용이 가능하도록 하였다. 그러므로 실내실험과 현장 시험 시공을 통해 검토를 완료한 유동화 처리토 공법을 이용하여, 시공 깊이가 깊거나 복잡한 구조물의 공동 충전, 라이프 라인 지중화 공사의 되메움, 폐기된 지하저장탱크·우물·버려진 지하시설물·포장하부 공극 등의 되메움, 터널 축·기초 또는 도로 기층의 공동 충전, 옹벽 및 교량 교대 등의 구조물의 뒷채움, 교량 접속 슬래브의 보조기층 등에 효과적인 적용이 가능할 것이라 판단된다.

2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

도시의 지하에 복잡하게 매설되어 있는 전기, 수도, 가스 등의 공급시설, 하수, 전신전화 등의 다수의 라이프 라인(life line)은 신설, 개보수, 유지보수 등을 위해서 굴착, 매설, 뒤채움 작업이 빈번히 반복되어 행하여지고 있는데, 일반적으로 모래로 뒤채움을 한 도로포장 하부에서 노후 관로의 누수나 장기변형 또는 다짐불량으로 인한 포장의 침하발생 및 함몰사고가 빈번하다. 또한 개착식 지하철 건설공사에서는 굴착 잔토의 처리를 위한 사토장이 필요하며 이 사토장의 확보에 어려움이 많으며 현장발생토를 폐기물로 처리하는 경우에는 처리비용이 추가로 발생하게 된다. 더구나 지하 구조물의 채움재로 사용되고 있는 모래는 환경파괴의 문제와 더불어 재료의 구입비용이 부담된다. 특히 관 하부와 좁은 공간의 뒤채움은 다짐작업이 어려우며 다짐을 하더라도 토사의 특성상 추가 침하가 발생하기 때문에 재포장 후에 굴착했던 부위를 따라 균열이 발생하고 수분이 침투하여 포장의 수명과 매설 관로의 수명을 단축하는 원인이 되고 있다. 또한 폐기물로 지정된 석탄회를 유동화 처리토의 재료로서 재활용하는 것을 평가하고자 실내실험을 통해 가능성을 판단하였으며, 현장 시험 시공으로 적용성을 파악하였다.

본 공법은 현장발생토의 재활용, 뒤채움의 품질향상, 협소한 부분의 다짐 곤란, 시공 상 안전 등의 문제를 해결하기 위한 방법으로, 선진 외국에서는 현장발생토를 재활용하여 잔토처리 비용을 줄이고, 충분한 유동성을 확보하여 고화되는 특성을 가진 친환경적인 슬러리 재료를 사용한 뒤채움 기술이 주목을 받고 있다. 그러므로 본 연구의 평가를 고려할 때, 선정된 고화재의 성능은 어떠한가?, 다양한 시료의 종류에 대해 실험을 실시하여 국내 현장 조건에 적합한 최적 설계 배합비를 도출하였는가?, 본 연구를 통해 개발된 프로그램은 유동성과 내구성을 만족시키는 배합비를 산정하였가?, 석탄회의 재활용으로 인한 장점은 무엇인가?, 제시된 시공메뉴얼이 타당한가? 등을 중심으로 파악해야할 것이다.

3. 연구결과의 활용방안 및 향후조치에 대한 의견

본 연구를 통해 개발된 유동화 처리토 공법은 현장발생토를 재활용하여 잔토처리비 및 양질의 토사 구입비용을 절감할 수 있고, 불량토의 사토비 및 모래 구입비 절감에 따른 경제적 이익이 발생하며, 양질의 토사로 다진 것 보다 강도, 내구성이 좋은 공법으로 시료 특성에 따른 배합비를 도출한다면 경제적이고 효율적으로 사용할 수 있는 공법이다. 그러므로 1차년도 및 2차년도 연구를 통해 규명된 시료 종류에 따른 최적 배합비, 자갈 및 유기물 함유량에 따른 유동화 처리토의 공학적 특성, 석탄회를 첨가하는 경우 유동화 처리토의 배합비 등 여러 가지 설계인자를 통해 도출한 설계 메뉴얼 및 설계프로그램을 이용하여 기존의 공법을 대체할 수 있도록 사업화/실용화를 통한 기술의 보급을 꾀하고자 한다.