보안과제( ), 일반과제(○) 과제번호 : 111112-1

발 간 등 록 번 호
11-1541000-001694-01

토사계 혼합 차수재를 이용한 가축 매몰지 침출수 대책공법 연구 (Leachate Prevention Method at Livestock Burial Site Using Soil Admixed Liner)

강원대학교

농 림 수 산 식 품 부

제 출 문

농림수산식품부 장관 귀하

이 보고서를 “토사계 혼합 차수재를 이용한 가축 매몰지 침출수 대책공법 연구”의 보고서로 제출합니다.

2012년 11월 22일

주관연구기관명 : 강원대학교
주관연구책임자 : 김 용 성
세부연구책임자 :
연 구 원 : 김 열 규
연 구 원 : 민 승 호
연 구 원 : 장 동 수
연 구 원 : 승 인 배
연 구 원 : 하 선 효

요 약 문

Ⅰ. 제목 : 토사계 혼합 차수재를 이용한 가축 매몰지 침출수 대책공법 연구에 관한 연구

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

본 연구에서는 토사계 혼합 차수재를 이용한 가축 매몰지 침출수 대책공법으로 시멘트-벤토나이트 혼합토를 활용하는 방안을 검토하기 위하여, 토목섬유 및 메타카올린 첨가 시멘트-벤토나이트 혼합토의 강도 및 내구 특성을 비교분석 하고, 이를 가축 매몰지 및 폐기물 매립장의 차수재로 활용하는데 필요한 기초 자료를 제공하고자 한다.

Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

○ 토사계 혼합 차수재의 공학적 특성 분석
  - 압축 및 인장강도 특성 분석
  - 투수특성 검토

○ 토사계 혼합 차수재의 내구성 및 미세구조 분석
  - 동결융해, 건조습윤 후 강도변화 특성 검토
  - 혼합토의 미세구조 특성 검토
  - 최적 배합비 도출

Ⅳ. 연구개발결과

시멘트 및 벤토나이트 10%, 풍화토 80%의 혼합토에 시멘트 중량의 10%에 해당하는 메타카올린을 첨가한 경우 및 시멘트 및 벤토나이트 10%, 풍화토 80%의 혼합토에 혼합토 총 중량의 1%에 해당하는 토목섬유를 첨가한 경우에 대한 투수시험 결과, 폐기물관리법에서 지정하는 투수계수를 만족하고 차수재의 두께도 얇아 경제적이므로 현장에서도 이러한 배합비를 준용하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

Ⅴ. 연구성과 및 성과활용 계획

본 연구를 통하여 국내논문 2편 게재, 국외논문(SCIE) 1편 투고, 특허 출원 1건의 성과를 거두었으며, 본 연구를 통하여 도출된 혼합토 연구 결과는 가축 매몰지 침출수 유출을 방지할 수 있는 가축 매몰지 방지대책 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

SUMMARY

I. Title

A study on countermeasure against leachate produced by buried animal carcasses using soil-cement-bentonite mixture

II. Objective

As the countermeasure against leachate produced by buried animal carcasses, the application of soil-cement-bentonite mixture is investigated. For this study, the strength characteristics and the durability of this mixture with the mixing rates of geotextile and metakaolin, and the age are examined.

III. Contents

○ Engineering properties of soil-cement-bentonite mixture
- Compressive strength and tensile strength
- Permeability

○ Durability and microstructure of soil-cement-bentonite mixture
- Strength degradation with freezing-thawing and drying-wetting
- Microstructure
- Optimal combination ratio

IV. Summary

Results of permeability test suggest that the mixture with cement of 10%, bentonite of 10%, weathered soil of 80% and metakaolin of 10% of cement weight, and the mixture with cement of 10%, bentonite of 10%, weathered soil of 80% and geotextile of 1% of overall weight satisfy the permeability criteria designated by Waste Disposal Law. Hence, these combination ratios of mixture are desirable to use practically.

V. Conclusion

Two domestic papers and one international paper are submitted in this study. In addition, one patent application is also made. This study will contribute to provide proper countermeasure against leachate produced by buried animal carcasses.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction

Section 1. Importance of the study ····· 1
Section 2. Objectives and contents of this study ····· 9
Section 3. Promotion Strategies ····· 10
Section 4. Domestic and international trends ····· 13

Chapter 2. Durability characteristics and strength properties of cement-bentonite soil mixtures

Section 1. Overview ····· 28
Section 2. Materials and method ····· 35
Section 3. Results and Discussion ····· 41
Section 4. Conclusion ····· 103

Chapter 3. Strength characteristics of soil mixture blocks prepared CSG reinforced by geosynthetics

Section 1. Overview ····· 105
Section 2. Materials and method ····· 107
Section 3. Results and Discussion ····· 113
Section 4. Conclusion ····· 120

Chapter 4. Outcomes of this study

Section 1. Utilization of the results and outcomes of this study ····· 121
Section 2. Market analysis ····· 122
Section 3. Economics analysis ····· 124
Section 4. Future work ····· 126

References

목 차

제1장 개요

제1절 연구개발의 필요성 ····· 1
제2절 연구개발의 목표 및 내용 ····· 9
제3절 연구개발의 추진전략·방법 ····· 10
제4절 국내·외 연구 동향 ····· 13

제2장 시멘트-벤토나이트 혼합토의 강도 및 내구 특성

제1절 개요 ····· 28
제2절 재료 및 방법 ····· 35
제3절 결과 및 고찰 ····· 41
제4절 결론 ····· 103

제3장 섬유 보강 CSG 혼합토 블록의 강도 특성 연구

제1절 개요 ····· 105
제2절 재료 및 방법 ····· 107
제3절 결과 및 고찰 ····· 113
제4절 결론 ····· 120

제4장 연구개발 성과 및 성과활용 계획

제1절 연구개발 결과의 활용방안 및 기대 성과 ····· 121
제2절 제품 및 시장 분석 ····· 122
제3절 경제성 분석 ····· 124
제4절 향후 연구계획 ····· 126

참고문헌

제1장 개요

제1절 연구개발의 필요성

1. 기존 가축매몰지의 문제점

2010년 11월 경북 안동에서 처음 발생한 구제역은 경기도 연천을 거쳐 강원도 등 9개 시·도 76개 시·군으로 확대 되었으며, 이로 인해 살처분 된 소와 돼지가 약 292만두에 이르고 매몰지는 4,054개에 달하고 있다. 이 가운데 전북 익산군 등 5개 시·도 18개 시·군에서는 조류 인플루엔자로 인해 닭·오리 500만두가 197개 매몰지에 매몰되었으나, 최근 침출수 유출 등으로 토양 및 지하수 오염 문제가 심각히 대두되고 있다. <그림 1>~<그림 3>은 침출수 유출 사례를 보여준다.

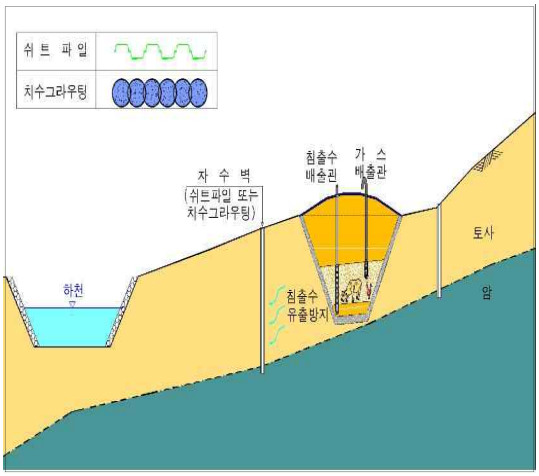
<그림 1> 매몰지 침출수 유출

〈그림 2〉 침출수 유출 현장

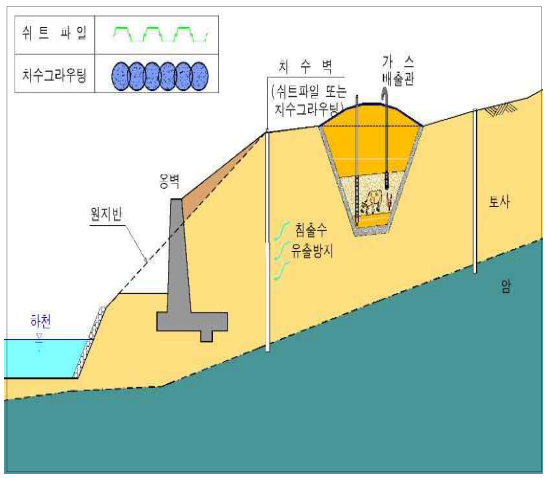
〈그림 3〉 침출수로 인한 토양오염

또한 정부는 경상북도 993개 매몰지 (11년 1월 24일 기준) 중 경상북도의 요청에 따라 정비가 필요한 89개 매몰지에 대하여 전문가가 참여하는 실태 조사를 2011년 1월 24일부터 28일까지 진행한 결과, 차수벽, 우수차단시설 등의 조치가 필요한 곳이 45개소, 우수 배제 등의 부분 보완이 필요한 매몰지가 16개소이며, 한강상류지역 2,926개소 (2011년 2월 10일 기준)에 대한 지방자치단체의 1차 조사시 상수원 상류로서 문제 우려가 있다고 합동조사를 요청한 99개 매몰지에 대한 전문가 조사 결과 27개 매몰지가 차수시설, 빗물차단시설 등의 조치가 필요한 것으로 밝혔다 (중앙재난안전대책본부, 2011).

한강 상류지역 가축 매몰지 조사 결과에 따르면, 정비 대상 매몰지의 정비사유 로서는 거리지침 위반(30m)이 12개소, 사면안정성 부족 4개소, 빗물배제 필요 11개소로 나타났으며, 정비 방법으로 차수+배수 2개소, 차수 10개소, 옹벽+배수 2개소, 옹벽 2개소, 빗물배제 시설 11개소로 조사되었다. 여기서 정비 대상 매몰지 보강방법인 차수벽 공법 및 차수벽+옹벽 공법의 경우 매몰지 상부 및 하부 지반에 설치하는 것으로 설계되어 있다 (<그림 4>~<그림 5> 참조).



<그림 4> 가축매몰지 차수벽 공법 개요



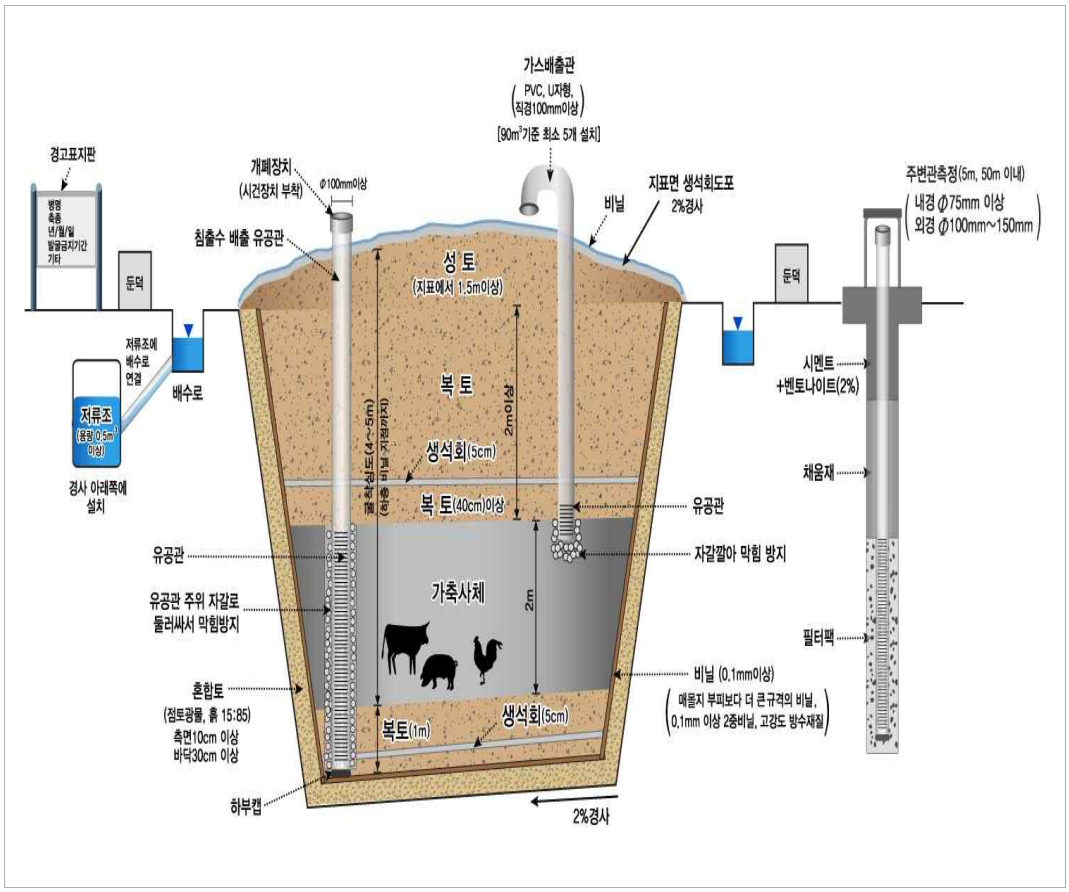
<그림 5> 가축매몰지 차수벽+옹벽 공법 개요

가축 매몰지 환경관리지침 (환경부, 2010)에 따르면, AI·구제역 긴급행동지침의 매몰절차는 지하수 (지하수위와 1m 이상), 하천, 수원지, 집단가옥으로부터 이격한 (하천, 수원지 등과 30m 이상) 곳으로 선정하고, 매몰 수량을 고려하여 매몰지 크기를 결정하되, 매몰지별 크기는 가급적 바닥 폭 4~5m, 깊이 5m를 넘지 않도록 하며, 지하수위·관정·하천·주거지 등 주변 환경 등을 고려하여 적정한 깊이 및 크기로 설정하도록 되어 있다.

매몰 절차 및 방법을 보면 ① 매몰 구덩이 (바닥면 2% 이상 경사도 유지, 매몰사체량

및 매몰지 내 흙 투입량을 감안한 크기)를 설치하고 ② 매몰 구덩이 바닥과 측면에 벤토나이트 등 점토광물 혼합토 (벤토나이트:흙의 비율 15:85 권장)를 바닥 30cm 이상, 측면 10cm 이상 포설하며 ③ 매몰 구덩이에 2중 비닐, 고강도의 불침투성 차수재질 (매몰처리 작업시 2중 비닐 등 차수재의 훼손 방지 조치)로 설치하고 ④ 매몰 구덩이 경사진 바닥면 하단에 침출수 배출용 유공관을 설치하며 ⑤ 구덩이 바닥에는 차수재로부터 1m의 흙을 투입하되, 흙의 중간부위 (약 50~60cm 구간)에 생석회(5cm)를 투입하고 ⑥ 매몰 대상 사체를 2m 높이로 투입한 후 사체 상부에 가스배출관을 설치하며 사체 위에 0.4m 높이로 흙을 투입하고 5cm 두께로 생석회를 포설한 후 지면까지 복토 및 지표면에서 상부 1.5m 이상 성토하도록 하고 있다.

가축매몰지의 설치 모식도를 <그림 6>에, 매몰지 시공현장을 <그림 7>에 나타내었다.



<그림 6> 가축 매몰지 설치 모식도

<그림 7> 매몰지 시공 현장

그러나 가축 매몰지 현장에서는 매몰 작업시 차수재가 사체의 하중을 받아 찢어지거나 암석의 돌출된 부분에 훼손될 가능성이 있고, 가축 안락사에 필요한 약품 공급이 끊겨 생매장으로 인한 가축의 발버둥으로 차수매트가 찢어지기도 한다(한국경제신문, 2011). <그림 8>~<그림 11>은 매몰지의 차수매트 훼손사례를 보여 준다.

<그림 8> 차수매트의 훼손사례

<그림 9> 생매장으로 인한 차수매트의 훼손

<그림 10> 매몰지의 차수재 찢김 (1)

<그림 11> 매몰지의 차수재 찢김 (2)

차선책으로 혼합토의 차수성을 기대하고 있으나 불량한 다짐시공 및 계절적인 요인으로 인해 혼합토의 동결과 융해의 반복, 건조와 습윤의 반복에 대한 내구성이 문제로 대두된다. 따라서 혼합토의 동결-융해 특성, 건조-습윤 특성 및 동결-융해와 건조-습윤을 받은 혼합토에 대한 강도의 변동 특성 등을 검토 할 필요가 있다.

또한, 현장 여건상 매몰지를 자연사면에 조성할 경우 상재하중 및 측압을 받게 되는데 혼합토의 경우 매몰된 가축의 사체가 시간이 경과함에 따라 부패현상으로 공동 현상이 생기게 되고, 사면 상부 측으로부터 토압을 받게 될 경우 변형으로 인한 균열이 발생하게 되며 이 균열은 시간이 경과함에 따라 전단대로 작용하게 될 가능성이 높아지게 된다. 또한 최근 동절기에 가축 매몰지를 시공한 바 있는데 해빙기가 도래하면서 지반의 융해현상으로 인한 부등침하 가능성이 있으며 이 경우에도 혼합토에 균열이 발생할 가능성이 있다. 이러한 균열은 침출수 누수의 원인이 되며 이 균열을 따라 침출수, 우수 및 지하수의 유입 및 유출이 발생하게 되므로 혼합토는 차수성만을 가진 재료가 아닌 압축 및 인장력에도 저항력을 가진 재료가 되어야 할 것이다.

2. 연구의 목적

본 연구는 가축 매몰지 침출수 방지를 위해 매몰 신공법을 개발을 위한 사전 연구로서 토사계 차수재의 강도 및 투수 특성 등의 고찰을 통해 신공법 개발에 필요

한 기초적 자료를 제공하고자 하며, 보다 구체적으로는 현재의 매몰공법에 사용되는 혼합토의 단점을 보완하여 차수매트가 제 역할을 하지 못하는 경우에도 보조 차수재로서 차수 역할을 충분히 수행하고 상재하중 및 측압에 저항하도록 하여 균열이나 전단대 발생을 억제할 수 있도록 하는 토사계 혼합 차수재 개발에 필요한 기초적 연구를 수행하도록 한다.

제2절 연구개발 목표 및 내용

1. 연구개발의 목표 및 내용

연구개발의 목표	연구개발 내용 및 범위
가축 매몰지 침출수 방지를 위한 토사계 혼합 차수재 개발	○ 토사계 혼합 차수재의 공학적 특성 분석 – 압축 및 인장강도 특성 분석 – 투수특성 검토 ○ 토사계 혼합 차수재의 내구성 및 미세구조 분석 – 동결융해, 건조습윤 후 강도변화 특성 검토 – 혼합토의 미세구조 특성 검토 – 최적 배합비 도출

2. 연차별 연구개발의 목표 및 내용

가. 1차년도(2011)

연구 목표: 토사계 혼합 차수재를 이용한 가축 매몰지 침출수 대책 공법 연구

세부 목표	연구 내용	연구 범위
기존 연구결과의 조사 및 분석	○ 토사계 혼합 차수재 현황 파악 – 선진국의 토사계 혼합 차수재 기술수준 조사 – 국내의 토사계 혼합 차수재 연구사례 분석	• 문헌연구 • 국내외 전문기관 연구정보 수집
가축 매몰지 침출수 방지를 위한 토사계 혼합 차수재 개발	○ 토사계 혼합 차수재의 공학적 특성 분석 – 압축 및 인장강도 특성 분석 – 투수특성 검토 ○ 토사계 혼합 차수재의 내구성 및 미세구조 분석 – 동결융해, 건조습윤 후 강도변화 특성 검토 – 혼합토의 미세구조 특성 검토 – 최적 배합비 도출	• 차수재의 강도 특성 및 내구 특성 고찰 • 실내시험을 통한 차수재의 성능 검증

제3절 연구개발의 추진전략 · 방법

1. 연구 추진전략

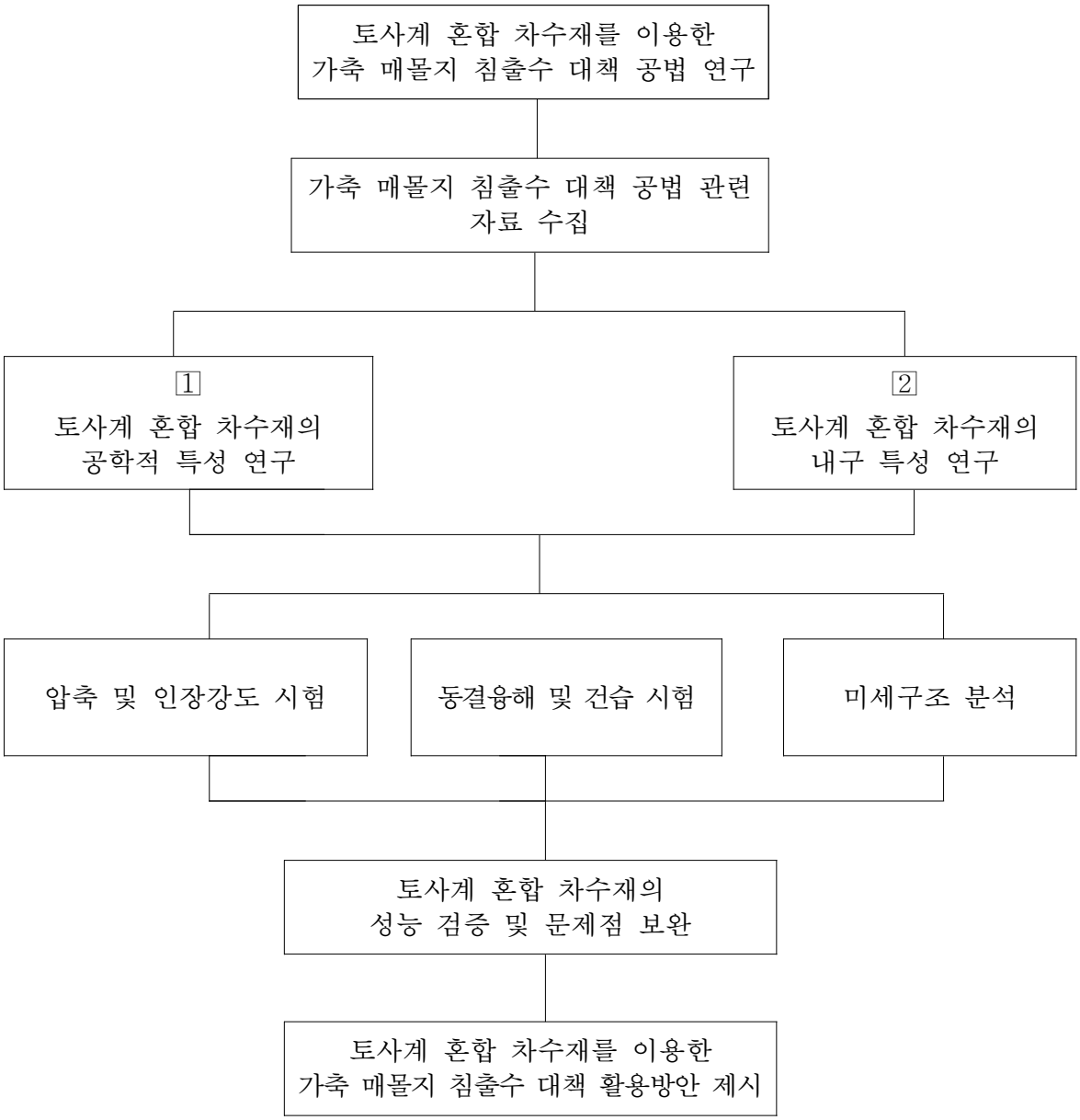
2. 연구 방법

가축 매몰지 시공 시 차수재 하부에 위치하는 혼합토를 보조적 차수재로 활용하기 위해 토사계 혼합 차수재에 대한 기초적 연구를 수행하도록 한다. 현재의 매몰공법에 사용되는 혼합토의 단점을 보완하여 보조 차수재로서 차수 역할과 더불어 상재하중 및 측압에 저항하도록 하여 균열이나 전단대 발생을 억제할 수 있도록 하는 재료에 대한 연구를 수행하고자 한다.

혼합토는 지금까지 널리 활용되어 온 건설재료인데, 흙의 결합력과 강도를 증진시키기 위하여 흙에 시멘트를 혼입한 시멘트 혼합토는 도로, 주차장 및 광장 등의 포장 뿐만 아니라 사면보호공 및 연약지반 개량 등 다양한 분야에 활용되고 있다 (Sung and Kim, 2003; Sung, 2004). 일반 흙을 주원료로 하여 강도 개선을 목적으로 흙의 일부를 시멘트 또는 시멘트계 고화재 등을 사용하기 때문에 콘크리트에 비하여 경제적인 동시에 환경친화적 건설재료로 인식되고 있다 (Kim and Kim, 2010; Yeon et al., 2010). 그러나 시멘트 혼합토는 취성적인 파괴 형태를 나타내기 때문에 폴리플로필렌 섬유, 폴리비닐알코올 섬유 및 나일론 섬유 등을 혼합토에 랜덤 분포시켜 강도 뿐만 아니라 연성파괴를 유도하는 섬유보강 혼합토에 대한 연구가 최근 주목을 받고 있다 (Chang et al., 1999; Park et al., 2008; Kim et al., 2010; Park, 2011). 실제로 섬유혼합 보강토는 혼합이 용이하고 강도의 지속성이 우수하며, 토목섬유공법의 단점인 보강재를 따라 파괴가 진전되는 잠재적인 취약점이 없는 등의 장점을 가지고 있어 최근 선진외국에서는 이에 관한 연구가 활발한 실정이다 (Kumar et al., 2006; Tang et al., 2007; Conosli et al., 2009; Tang et al., 2010; Conosli et al., 2010; Zaimoglu, 2010).

본 연구에서는 토목섬유, 시멘트, 메타카올린 등을 각각 흙과 혼합하여 다진 다양한 혼합토 재료를 압축 및 인장강도시험, 동결융해 및 건조습윤시험, 투수시험, 미세구조 분석 등을 통해 가축 매몰지 시공에 적합한 재료를 고찰하고자 한다.

3. 연구 추진체계


토사계 혼합 차수재를 이용한
가축 매몰지 침출수 대책 공법 연구
가축 매몰지 침출수 대책 공법 관련
자료 수집
1
토사계 혼합 차수재의
공학적 특성 연구
2
토사계 혼합 차수재의
내구 특성 연구
압축 및 인장강도 시험
동결융해 및 건습 시험
미세구조 분석
토사계 혼합 차수재의
성능 검증 및 문제점 보완
토사계 혼합 차수재를 이용한
가축 매몰지 침출수 대책 활용방안 제시

제4절 국내·외 연구 동향

1. 연구 동향

가축 사체의 매립시 매몰 구덩이는 매몰수량을 고려하여 사체를 넣은 후 당해 사체의 상부부터 지표까지의 간격이 2m 이상 되도록 파야 하며, 바닥면은 2%이상의 경사를 이루도록 한다. 매몰 구덩이의 바닥과 측면에 점토광물과 흙을 섞은 혼합토(권장비율 15:85)로 충분하게 도포(권장 : 바닥 30cm 이상, 측면 10㎝이상)한 후 비닐(환경 친화성 제품 권장, 매몰지 부피보다 큰 규격의 비닐[두께 0.1㎜ 이상으로 2중 비닐, 고강도 방수재질]) 등 불투성 재료를 덮는다. 경사진 바닥면의 하단에는 침출수 배출관(유공관, 상부에는 개폐장치 설치)의 설치를 통해, 집수된 침출수를 뽑아내도록 구제역긴급행동지침에 의해 지정되어 있다. 위와 같은 설치기준 중 혼합토에 대한 기준을 만족하기 위해 여러 연구가 진행되었으며, 혼합토의 최소 투수계수는 쓰레기 매립장에 사용되는 차수재 혼합토의 투수계수를 기준으로 고찰하였다.

1970년대에 쓰레기 매립장의 차수재를 개발하기 시작한 이후 점토차수재에 관한 역구가 진행되었고(Auvinet와 Hiriart 1980), 1981년 에는 흙-벤토나이트 차수재에 관한 연구로 인공혼합차수재 개발대한 연구가 진행되었다(Lundgren(1981)과 Chapuis 1981). 또한 일반적으로 체적 팽창율과 비표면 면적이 큰 벤토나이트를 사용하는 방법에 대한 연구가 이루어 졌고(Maden외 1인1994), 벤토나이트와 시멘트가 매립장 차수층의 투수성과 압축강도에 미치는 영향(Kim et al. 2000) 및 화강풍화토-벤토나이트 혼합토의 공학적 특성에 대하여 연구하였다(Kim et al. 2006).

시멘트 혼합토에 관한 연구는 시멘트 혼합토의 강도 및 섬유 보강효과(Conosli et al. 2010) 및 단섬유를 사용한 시멘트 혼합토의 일축압축강도 특성(Park et al. 2008)을 구명하였다. 또한 메타카올린을 사용한 콘크리트의 공극구조와 압축강도의 관계에 관한 연구(Yeo et al. 2006)와 메타카올린을 보조재로서 사용했을 때 시멘트의 강도와 콘크리트의 내구성의 영향에 대하여 연구하였다(Ramezanianpour et al. 2012).

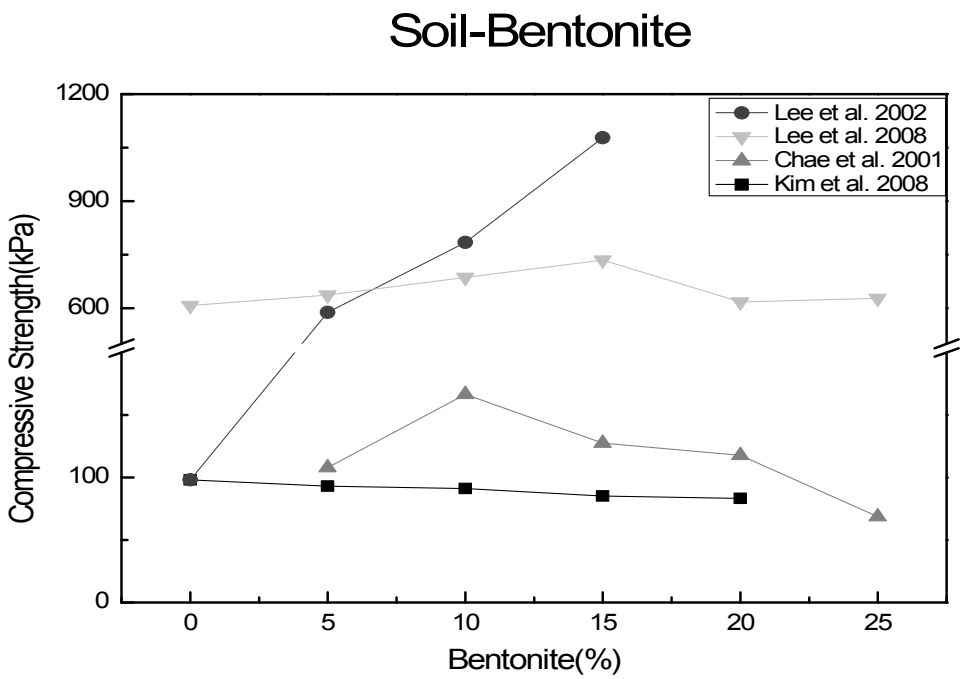
그리고 섬유를 무작위로 배열시킨 경우에 대하여 5%의 석고를 흙에 첨가할 경우 흙의 인장강도가 2배 이상, 그리고 대마(Hemp) 혹은 셀로판 섬유가 흙속에 무작위로 배열될 경우 인장강도가 크게 증가된다는 것을 발견하였다(Hibibagahi와 Mostaghel 1974).

섬유혼합토의 전단강도에 영향을 미치는 인자로는 혼합되는 흙의 입도분포와 흙입자의 형상 등과 같은 흙의 공학적 특성과 섬유의 형상, 길이, 직경, 인장강도, 탄성계수, 마찰계수, 섬유혼합률 등과 같은 섬유의 물리적/역학적 특성 및 구속응력,

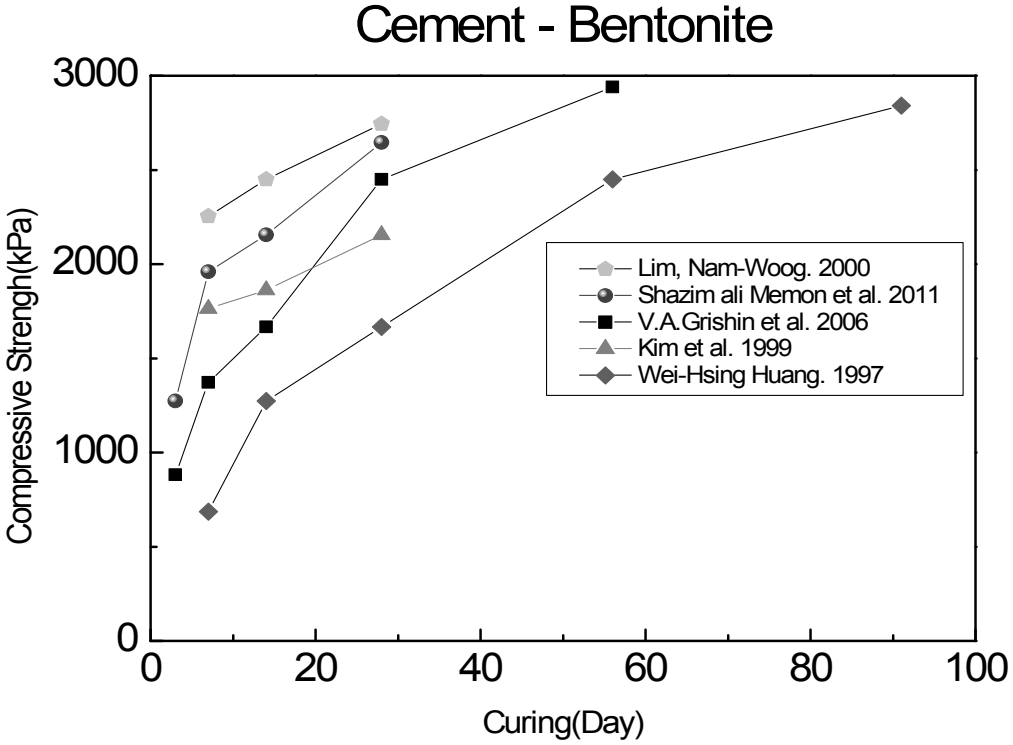
다짐상태 등의 외적 인자 등을 들 수 있다고 설명하였다(Jo 1993).

기존의 연구에 의한 벤토나이트 혼합비율, 양생기간, 섬유혼합비율, 메타카올린의 혼합비율과 압축강도의 관계를 <그림12>~<그림15>에 도시하였다

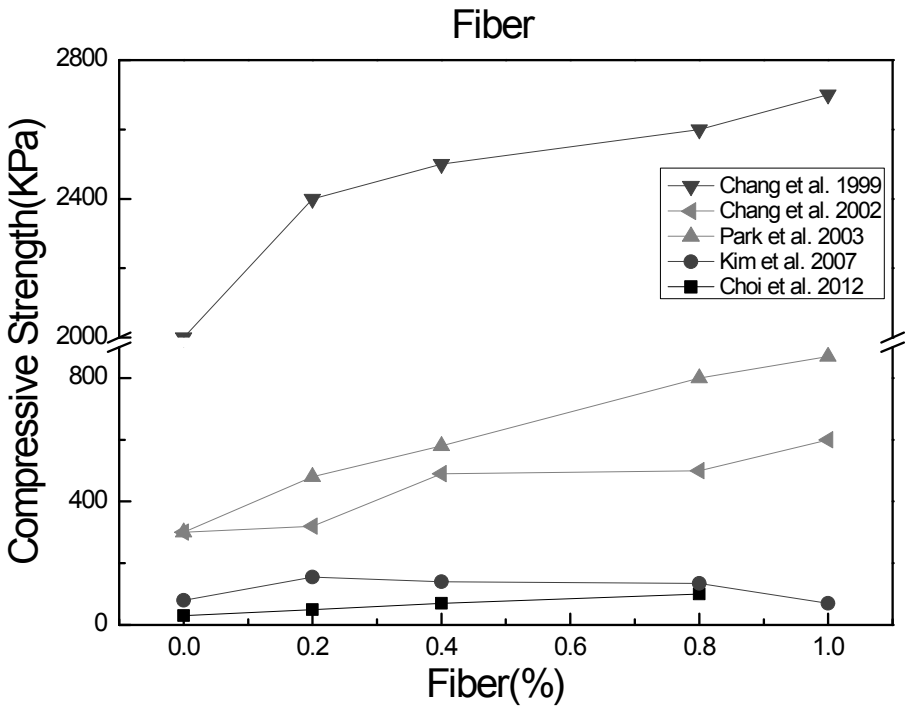
<그림 12>의 벤토나이트에 따른 강도의 관계는 주로 10~15%이상 벤토나이트가 혼합 되었을 때 강도가 감소하는 모습을 보이고 있으며, <그림 13>의 시멘트-벤토나이트 혼합토에서는 재령일에 따라 혼합토의 강도가 증가하고 있다. <그림 14>에서 섬유의 혼합비에 따른 강도의 경향이 섬유 1%까지 혼합하였을 때 강도가 지속적으로 증가하였으며, <그림 15>에서도 메타카올린 20%를 첨가하여도 강도가 증가하는 경향을 보여주고 있다.



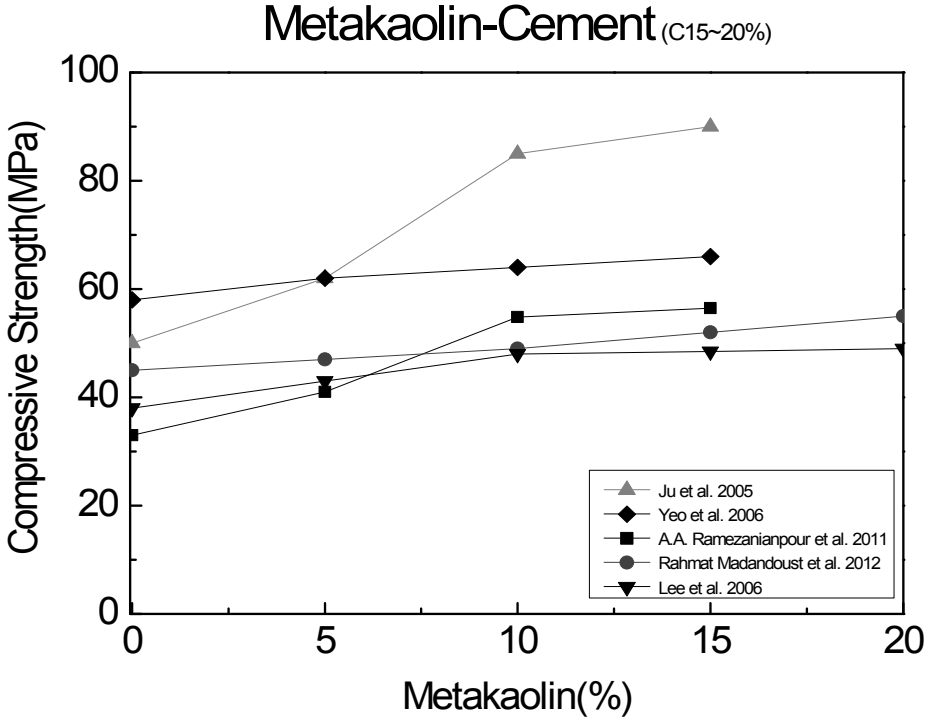
<그림 12> 흙에 대한 벤토나이트 혼합비율과 압축강도의 관계



<그림 13> 시멘트 벤토나이트 혼합토의 양생기간과 압축강도와의 관계



<그림 14> 섬유 혼합비율과 압축강도와의 관계



<그림 15> 메타카올린 혼합비율과 압축강도의 관계

2. 문헌 연구

논문명	실험 방법	실험결과
흙-벤토나이트 혼합차수재의 품질관리 사례연구 (정하익 등, 1999, 99봄 학술발표회 논문집 학술저널 497-504)	다짐시험 투수시험 현장투수시험 (PVC파이프를 이용한 투수시험, 시험장비를 이용한 투수시험)	○ 일반물에서 다짐도90%는 벤토나이트혼합비15%이후, 다짐도95%는 벤토나이트10%에서 투수계수를 만족함. ○ 침출수에서 다짐도90, 95%에서 벤토나이트 혼합비가 10%이후에 투수계수를 만족함.
폐석회를 이용한 매립지 차수재로의 이용방안 (김준섭 등, 2009, 대한환경공학회 1998:355-356)	기본물성시험 다짐A시험 변수두시험 일축압축강도시험 톨루엔과 에틸벤젠에 대하여 등온흡착시험	○ 기본물성 시험결과 비중은 벤토나이트의 함량이 증가함에 따라 작아지고 소성지수도 USEPA의 기준을 만족함. ○ 다짐시험결과 최적함수비는 폐석회와 벤토나이트 혼합물 모두 비슷하고 최대건조밀도는 폐석회가 벤토나이트 혼합보다 조금 큰 값을 보임. ○ 흡착은 에틸벤젠의 경우 폐석회보다 벤토나이트 혼합물에 좀더 잘 흡착됨.
폐석회를 이용한 매립지 차수재 개발 (김준섭 등, 1999, 한국지반공학회 1999년봄 학술발표회 논문집 1999:521-528)	기본물성시험 다짐시험 변수두 시험 흡착평형시험 등온흡착시험	○ 벤토나이트를 폐석회의 중량에 20% 첨가하고 최적함수비보다 습윤측에서 A-1다짐에너지로 다질경우 폐석회와 벤토나이트 혼합물로 매립지의 차수재로 적용이 가능. ○ 톨루엔과 에틸벤젠에 대한 흡착평형시험결과 두 물질 모두에 대해 24시간 이내로 모두 흡착평형에 도달 함.
석분 혼합토의 차수재 활용에 관한연구 (김찬기 등, 2008, 대한토목학회 2008(10):2211-2214)	투수시험 일축압축시험 전단시험	○ 석분 함유량이 증가되면 최대건조밀도는 감소하는 경향을 보이며, 벤토나이트 함유량이 증가 할수록 최적함수비는 증가하고 최대 건조밀도는 감소. ○ 석분함유량의 증가 할수록 일축압축강도는 감소하지만 점착력과 내부마찰각은 증가. ○ 벤토나이트 함유량의 증가하면 일축압축강도와 점착력, 내부마찰각이 증가.

논문명	실험 방법	실험결과
매립지 차수재로서 플래이 애쉬 재활용을 위한 기본연구 (이용수 등, 1997, 대한토목학회 학술발표회 논문집 1997(3):513-516)	물리 · 역학적 실험 입도분석시험 비중시험 다짐시험 투수시험 용출시험 (폐기물 공정법)	○ 일반물에서 다짐도90%는 벤토나이트혼합비15%이후, 다짐도 95%는 벤토나이트10%에서 투수계수를 만족함. ○ 침출수에서 다짐도90, 95%에서 벤토나이트 혼합비가 10%이후에 투수계수를 만족함.
Rowcell 실험에 의한 점토-벤토나이트 차수재의 투수계수 측정 (류권, 채교익, 2000, 대한토목학회 학술발표회 논문집 2000(2):277-280)	Rowcell변수위투수시험 양방향 압밀시험	○ 양방향 압밀시험에서 상재하중과 벤토나이트 혼합비가 증가할수록 투수계수는 감소 ○ 차수재 투수계수기준을 만족시키는 혼합비는 동일 상재하중이 200kpa 일때 4.6%이다. ○ 압밀 정·변 수위 투수시험과 양방향 압밀 시험 전·후 의 함수비를 비교하여 벤토나이트 혼합비가 20%일때 함수비가 최대임. ○ 압밀시험으로도 점토-벤토나이트 라이너의 신뢰성 있는 투수계수 산정이 가능하며 벤토나이트의 최대 혼합비는 10%로 나옴.
벤토나이트 함량이 폐기물 매립장 차수특성에 미치는 영향 (조원진 등, 2001, 한국폐기물 학회 2001 추계학술연구회발표논문집 학술저널 341-344)	수정 정수위시험법 (중력수두외에 저수탱크 상부에 정압 헬름기체를 이용하여 가압)	○ 흙-벤토나이트 혼합재에서 벤토나이트 함량이 증가 할수록 수리전도도는 감소하였으나, 그 감소 경향은 다짐밀도에 크게 의존함. ○ 벤토나이트를 혼합하지 않은 흙의 경우 다짐밀도를 1.4Mg/㎥에서 1.6Mg/㎥로 증가시켜도 수리전도도는 감소하지 않음.

논문명	실험 방법	실험결과
혼합반응 차수재의 투수특성 연구 (김학문, 2003, 한국폐기물학회지 20(8):800-806.)	변수위 투수시험 압력식 정수위 투수시험 혼합비에 따른 투수특성	○ 벤토나이트의 최적 혼합비는 15%로 판단됨. ○ 폐기물 매립장 차수재의 투수실험에서 침출수가 일반수에 비해 투수계수가 낮게 나오므로 일반수에 의한 실험이 더 안전측 으로 설계될수 있을것. ○ Zeolie가 침출수의 정화특성 재료로 효과적임을 알수 있음.
생활쓰레기 소각 비산재를 활용한 차수재 특성 (허열, 2011, 건설기술논문집, 30(1):75-81)	기본물성시험 다짐시험 투수시험 변수위시험	○ 채분석 결과 통일분류법으로 ML로 비교적 세립질의 흙으로 파악됨. ○ 벤토나이트 혼합시 25%이상에서 차수재로서의 기준을 만족하며 생석회의 경우는 30%이상 소석회의 경우는 35%이상 첨가시 차수재로서 기준을 만족
폐기물 매립장의 차수재 및 복토재로서 하수 슬러지 재활용 (이용수, 정하익, 1997, 한국지반공학회지 13(4):5-12)	다짐시험 강도시험 투수시험 화학반응성시험 용출시험	○ 하수슬러지 혼합재에서 벤토나이트의 첨가량이 증가함에 따라 최대건조밀도는 증가하고 최적 함수비는 감소. ○ 벤토나이트의 첨가량과 시간이 경과함에 따라 투수계수는 감소. ○ 매립장의 차수재 또는 복토재로 사용이 가능할 것.
플라이애쉬의 차수 및 오염물 차단 능력 평가 연구 (정문경 등, 1998, 한국지반공학회지 14(5):191-203)	포화 및 불포화 상태에서의 물 흐름 특성 비교 회분실험	○ 기존과 대용 차수재의 물 차단능력은 포화흐름 에서는 같지만 실제 상태인 불포화 대에서는 대용 차수재가 더큼. ○ 포화 및 불포화 해석에서 대용 차수재의 페놀 차단 능력이 기존 차수재에 비해 더 양호함.
광산슬러지를 이용한 차수재 개발에 관한 연구 (이대용, 2010, 서울시립대학교 석사학위논문)	투수계수시험 압축강도시험 동결/융해실험 물리/화학실험 컬럼식 실험	○ CMDS는 토양에 가까운 성질을 지님. ○ 배합비 산정에서 CMDS의 OMC는 47.9%, 최대 건조단위중량 은 1.11g/㎤을 나타냈으며, 혼합비 1: 0.3: 0.5이상일 경우 OMC가 35% 이하로 차수재 조건을 만족. ○ 동결/융해 실험에서는 습윤 양생을 실시한 차수층은 강도 증진과 투수율 감소가 이루어진 반면, 동결·융해 노출경우 강도감소와 투수율 증가현상.

논문명	실험 방법	실험결과
폐기물 매립지의 흙-벤토나이트 혼합차수층 특성에 관한 연구 (홍성길, 2004, 동국대학교 대학원 석사학위논문)	물성 시험 일축압축강도시험 삼축압축강도시험 투수시험	○ 원지반토의 경우 벤토나이트 혼합비 12%이상으로 제작된 시료는 모두 투수계수를 만족. ○ 황토의 경우 4%의 벤토나이트 혼합비에서 투수계수를 만족.
토목섬유로 보강한 모래-벤토나이트 차수재의 장기적 투수특성 (권무남, 남효석, 1998, 한국관개배수학회논문집 5(2):9-19)	강성벽 투수시험기를 이용한 투수시험 모형탱크에 의한 투수시험 다짐시험	○ 모래- 벤토나이트 차수재의 최대 건조밀도와 최적 함수비는 벤토나이트 함량이 증가함에 따라 각각 증가. ○ 토목섬유로 보강한 모래-벤토나이트 차수재의 투수계수는 벤토나이트 함량이 증가함에 따라 감소하는 경향. ○ 모래-벤토나이트 차수재의 차수성 확보를 위한 벤토나이트 함량은 12%이상이 좋을 것.
흙-벤토나이트 혼합반응 차수재의 투수특성 (김학문, 2003, 한국폐기물학회지 20(8):800-806)	변수위 투수시험 압력식 정수위 투수시험	○ 벤토나이트가 증가함에 따라 혼합차수재의 투수계수가 감소하였고 혼합비 15% 이상부터 벤토나이트 혼합비가 커질수록 투수계수의 감소효과가 작게 나타남. ○ 혼합반응 차수재에 벤토매트와 반응매트를 설치한 경우 40%이상 투수계수의 감소현상이 나타남. ○ 최적의 벤토나이트 15%에 제올라이트 혼합비 5, 10%를 첨가한 혼합반응차수재의 일반수 및 침출수를 이용한 투수실험결과 제올라이트 혼합비 5, 10%에서는 차수재의 투수특성에 영향을 미치지 않음.
난지도 매립지 안정화 공사계획과 Cement Bentonite Slurry 차수벽의 적합성 검증 (이봉호, 1998, 준설매립위원회 학술발표회 논문집 1998(1):119-159)	점성시험 일축압축강도시험 투수시험 비중시험 pH시험	○ 침출수는 시멘트 벤토나이트 슬러리의 양생되는 과정에서 물리적 특성변화에 큰 영향을 미치지 못함. ○ 시방기준을 만족하는 시멘트 벤토나이트 슬러리의 배합비는 시멘트 250kg, 벤토나이트 45kg, 배합용수 900 l , 벤토나이트 제품 중 외산 벤토나이트의 경우, 어떤 시멘트 제품과 결합하여도 시방기준을 만족하지 못하였고 시멘트 배합량이 210 kg/㎥ 이하인 경우 압축강도를 기준에 만족하지 못함.

논문명	실험 방법	실험결과
폐기물 매립지 토사계 혼합 차수재의 공학적 특성에 대한 실험적 연구 (장용채 등, 2007, 한국지반환경공학회논문집 8(1):13-20)	다짐시험 일축압축시험 변수위 투수시험 동결융해저항성시험 균열저항성실험	○ MCG고화토의 압축강도는 MCG고화재 혼합비가 증가하고, 습윤양생기간이 증가할수록 수화물형성에 의하여 강도가 증가하는 경향. ○ 벤토나이트와 MCG고화재의 혼합비가 증가 할수록 투수계수는 감소. ○ MCG고화토는 동결·융해작용을 받은 후에도 압축강도가 향상되고 투수계수가 낮아짐. ○ MCG고화재가 갖고있는 섬유상의 광물이나 수화물에 의해서 수축균열이 억제됨.
폐기물 매립장 침출수방지 차수시설에 관한 연구 (김영균, 2002, 조선대학교 산업대학원 석사학위논문)	입도분석시험 비중시험 다짐시험 일축압축시험 투수시험	○ 최대 일축압축강도는 벤토나이트 15%, 폐석회 20%에서 발현. ○ 혼합비에 따른 투수계수의 변화는 20~30%에서 최소의 투수계수를 나타 냄.
점토-벤토나이트 차수재의 강도특성에 관한 연구 (배장식, 2000, 상주대학교 산업대학원 석사학위논문)	입도분석시험 다짐시험 직접전단시험 강도시험 비중시험 액·소성한계시험 함수량시험	○ 점착력은 벤토나이트 함량이 10%에서 가장 컸으며 이후부터 감소함. ○ 전단저항각은 벤토나이트의 함량이 높아질수록 일정한 기울기로 감소. ○ 점토-벤토나이트 혼합물의 일축압축강도는 변형율이 1.5~ 2.5%에서 발생하고, 벤토나이트의 함량이 10%정도 일때 최대 강도가 나타나며, 10% 초과후 부터 감소.

논문명	실험 방법	실험결과
여러조건에 따른 인공점토재의 투수특성 (이승철, 이진수, 2003, 대한토목학회 학술대회 2003(10):3229-3233)	다짐시험 강도시험 투수시험 일축압축강도 압밀시험	○ 칼슘계 혼합토에 비해 나트륨계 혼합토가 10배정도 투수계수가 작아지는 경향을 보이며, 나트륨계 벤토나이트의 차수능력이 더 뛰어남. ○ 포화도가 클수록 투수계수가 크게 나타남. ○ 동일한 벤토나이트혼합비에서 수층의 두께가 작아지면 투수계수가 매우 커짐.
비위생 매립지의 침출수 방지용 차수벽에 관한 연구 (최성철, 2000, 한양대학교 산업대학원 석사학위논문)	비중시험 pH시험 점성시험 일축압축강도시험 투수시험	○ 벤토나이트의 종류에 따라 조기강도 발현이 틀리게 나타남. ○ 벤토나이트의 함량에 따른 투수계수의 변동은 배합설계범위 내에서는 매우 미소함. ○ 침출수 양생의 경우가 강도가 크게 나왔는데 이는 침출수의 성분과 차수재료의 화학적 작용에 의한것으로 판단됨.
슬래그와 폐콘크리트분말을 이용한 폐기물 매립지의 차수재에 관한 연구 (이성호 등, 2004, 환경과학논집 9(1):123-132)	기초실험 X-회절분석 주사전자현미경 분석 다짐시험 변수위투수시험 일축압축강도시험	○ 슬래그 32% 폐콘크리트분말 55% 시멘트13%가 슬래그 40% 폐콘크리트분말 47%시멘트13%보다 강도가 높고 투수계수가 낮은것은 공학적으로 우수한 성질을 가진 슬래그의 잠재수경성, 내화학성, 수밀성, 및 내열성 등이 슬래그의 큰 내부마찰력과 흡수성, 부착강도가 높은 관계로 시멘트의 수화작용시 강도와 투수계수에 우수한 재료로서 가장 적합한 배합비로 판단.

논문명	실험 방법	실험결과
석분슬러지를 이용한 쓰레기매립장 차수재의 적용성에 관한 연구 (조재형 등, 2005, 한국지반공학회 2005년도 춘계 학술발표회 논문집 2005 Mar. 25:483-490)	물리적시험 다짐시험 투수시험	○ 습윤 양생 후 강도는 사질토의 양이 증가할수록 강도도 증가함. ○ 시멘트의 첨가량이 많은 배합에서 시멘트의 수화반응에 의한 수화생성물 겔이 생성되어 혼합재의 조직이 치밀화 됨에따라 강도증진에 기여한 것으로 판단. ○ 석분슬러지는 입자가 작아 초기 투수성이 적고, 시간의 흐름에 따라 입자의 연결성이 약화되어 장기투수성이 점점 커졌으나, 고로슬래그를 첨가 함으로서 slaking현상을 방지하므로 투수계수의 저감효과를 보임.
Fly Ash 및 PVA 섬유를 사용한 CFRD 표면차수벽 콘크리트의 동결융해 및 투수성능 분석 (우상균 등, 2007, 대한토목학회 2007(10):2399-2402)	동결융해 실험 투수시험	○ Fly Ash의 치환율이 증가 할수록동결·융해저항성은 감소하는 경향을 나타내었고, PVA섬유를 첨가한콘크리트가 첨가하지 않은 콘크리트에 비하여 동결융해에 대한 저항성이 더 좋음. ○ 염소이온 침투 실험결과 PVA섬유를 혼입한 콘크리트가 보통 콘크리트에 비해 투수 저항성이 더 좋게 나옴.
차수벽 콘크리트의 섬유보강에 따른 품질향상 방안연구 (김완영, 정우성, 2005, 대한토목학회 학술대회 2005(10):1137-1140)	건조수축실험 동결융해실험 염소이온투과실험 마모성실험	○ 폴리비닐 알콜섬유를 혼입한 콘크리트와 플라이애시 치환율이 20%인 콘크리트에서 가장 우수한 균열 제어성능을 보여줌. ○ 공기노출된 상태의 양생을 제외하고는 안정된 건조수축변화를 보여줌. ○ Fly Ash치환율과 섬유를 혼입한 콘크리트는 보통 콘크리트보다 균열폭이 감소하는 경향.

논문명	실험 방법	실험결과
매립지 차수재로서의 준설점토 활용에 관한 연구 (조재범 등, 2002, 대한 환경 공학 회지 24(5):869-877)	다짐시험 액성·소성 시험 투수계수시험 내산성시험 용출시험 평형도달/제거능 시험	○ 혼합시료의 압축강도는 탄소세라믹과 시멘트의 비율이 증가함에 따라 급격하게 증가. ○ 준설점토와 혼화재가 80 : 20의 경우 투수계수가 매립지 차수재 기준 이하로 나타남. ○ 혼합시료의 중금속 제거능이 높게 나타남. ○ 혼합시료의 압축강도는 탄소세라믹과 시멘트의 비율이 증가함에 따라 급격하게 증가하는 경향.
슬래그와 폐콘크리트분말을 이용한 폐기물 매립지의 차수재에 관한 연구 (이성호 등, 2004, 환경과학논집 9(1):123-132)	기초실험 X-회절분석 주사전자현미경 분석 다짐시험 변수위투수시험 일축압축강도시험	○ 슬래그분말의 아주 작은 입자는 시멘트와 같은 수경성을 갖음. ○ 슬래그 분말량이 증가 할 수록 투수계수가 낮게 나타났으며 슬래그 배합량이 적정치 이상 이면 슬래그분말의 수분흡수로 시멘트의 경화가 지장을 받아 투수성이 높아질 것으로 보임. ○ 슬래그 32% 폐콘크리트분말 55% 시멘트13%의 배합비가 수화작용시 강도와 투수계수에 우수한 재료로서 가장 적합한 배합비로 판단.
차수재 및 복토재로서 석분토의 효과 (이홍길, 2002, 산업과학논문집 10:227-232)	다짐시험 투수시험 강도시험	○ 시멘트 함유량이 많을 수록 일축압축강도와 인장강도가 높고, 석분토가 많은 경우 투수계수가 적어짐. ○ 석분토와 시멘트 중량비 1:1 배합시 강도가 가장 크게 나왔으며 석분토의 특성이 강도를 증진시키는 효과가 있는 것으로 보여짐.

논문명	실험 방법	실험결과
현무암 석분 슬러지를 이용한 차수재의 적합성에 관한 연구 (남정만 등, 2005, 한국폐기물학회지 22(5):464-471)	물성실험 다짐시험 직접전단시험	○ 석분슬러지의 상대밀도가 증가할수록 파괴강도는 증가. ○ 수중 양생된 고화체의 압축강도는 양생기간에 비례하여 지속적으로 증가하지만 공기중에서 양생된 고화체는 현무암 석분 슬러지 함유량이 80% 이상이 되면 압축강도는 양생기간이 증가할수록 감소. ○ 석분슬러지와 시멘트의 배합비를 4: 1, 석분슬러지 함유량을 80% 이하로 하면 차수재의 투수계수 및 품질 기준을 만족함.
고화토를 이용한 폐기물 매립지 바닥층의 동결/ 융해 현상에 관한 실험적 연구 (이송, 1999, 산업기술연구소논문집 7)	대형 Lysimeter를 제작하여 실험 표준다짐실험 들밀도 시험.	○ 혹한기 매립지의 시공에서 기온의 급격한 하강으로 인하여 시공중지 상태에 으르면 적어도 바닥층에 양생포와 PVC를 포설한다면 동결에 의한 바닥층의 동상과 균열을 최소화 할수 있음. ○ 모래를 사용한 설계에서 쇄석과 이상적으로 배합하여 사용한다면 동결 깊이나 동상현상을 방지하는데 효과적.
폐기물 매립장 침출수 방지용 차수벽 설치공법 (도덕현 등, 1995, 한국지반공학회 1995년도 연약지반 안정처리 시공관리 세미나 01:88-116)	일축압축강도, 휨강도 동결융해 투수계수시험	○ 해성토와 산토는 공시체의 제작이 간편한 함수비로 제작 하였고, 낮은 단위중량의 공시체를 제작하였기 때문에 일축압축강도가 타 시험 값 보다 낮게 나타남. ○ 동결융해 시험결과 차수 및 증강제를 적량 혼합하여 일축압축강도를 30Kg/㎠ 이상을 유지시킬 경우 동상을 받은 후에도 팽창 균열 등의 특이사항을 발견할 수 없음.

논문명	실험 방법	실험결과
오염지역 차폐용 슬리리월 재료와 침출수 반응 특성 (이용수, 정하익, 1996, 한국지반공학회 2011, 10(2):29-34)	침강특성 균열특성 변수위 투수	○ 차폐재와 침출수의 접촉에 의한 투수계수 증가가 있으나 슬러리재료에 대한 침출수의 영향은 미소. ○ 침출수와의 반응에 의한 투수성이 증가. ○ 침출수의 농도가 클수록 시료 표면에 균열이 많이 발생.
플라이애시-벤토나이트 혼합 점토차수재의 공학적 특성에 관한 연구 (이창환, 김명균, 2008, 한국지반환경공학회 논문집 9(6):21-29)	기본물성실험 다짐시험 압밀시험 일축압축실험	○ 벤토나이트의 혼합비가 증가함에 따라 보유되는 물의 양도 많아지며 수화반응의 증가로 비중이 감소하는데 이로 인해 최대건조단위중량이 감소하고 최적함수비가 증가. ○ 벤토나이트의 혼합비가 증가함에 따라 투수계수는 감소, 벤토나이트 함량이 15%일때 플라이애쉬 20%미만 일때 매립지 차수재 조건을 만족하는 최적임.
차수재로의 광산 슬러지 재활용 적용성 평가 : 동결 융해에 의한 광산 슬러지 혼합 차수재의 거동 (이재영 등, 2011, 한국토목섬유학회 논문집 10(2):73-79)	동결융해 일축압축강도 투수시험 건조습윤시험 (인공강우) 용출시험	○ 동결·융해 실험결과 일축압축강도는 EPA 규정에 의한 값인 5kg/㎠이상을 나타내어 내구성은 양호함. ○ 광산배수슬러지 차수층은 약 1.5배 투수계수의 증가. ○ 함수비의 안정 및 오염물질을 배출하지 않음.
제철소에서 발생된 수재슬래그를 이용한 최종복토 차단층에 관한 연구 (정철후, 2008, 서울시립대학교 도시과학대학원 석사학위논문)	물성시험 삼축 투수시험 다짐시험 건조수축 동결·융해 실험	○ 각각의 배합에 대한 다짐시험 결과 혼합재료에 대한 벤토나이트의 첨가량이 증가함에 따라 최대건조밀도는 감소하고 최적함수비는 증가함. ○ 매립지 복토재의 설계 및 작업 시 일반적으로 건설기계의 주행이 가능한 강도인 0.5kgf/㎠이상으로 모든 배합 안에서 만족. ○ 슬레그에서 벤토나이트의 혼합율이 증가함에 따라 투수계수가 점차 감소함.

3. 기존 연구의 시사점

국내 연구를 조사하며 기존의 혼합토의 연구가 폐석회, 석분, 플라이애쉬 등 기타 여러 산업폐기물을 활용한 연구가 많이 진행되어 왔으며, 차수층에 적합한 혼합토의 혼합비를 다양하게 제시하였다. 플라이 애쉬를 사용할 경우 벤토나이트 10~15%, 쓰레기 소각비산재에서는 25%이상, 황토의 경우 4%, 모래의 경우 12% 폐석회 20%일 때 15% 등의 혼합비에서 차수층에 적합한 투수계수를 얻을 수 있었다.

이와 같이 재료의 종류에 따라 벤토나이트 혼합량을 조절하여 차수층에 적합한 혼합토의 개발이 이루어져 왔으며, 차수층을 형성할 때 벤토나이트가 큰 역할을 하였다. 그렇지만 벤토나이트의 함량이 최적 배합비 이상이 되었을 때 투수성은 만족하지만, 내구성을 만족하기 힘들며, 강도 또한 감소하는 경향을 보여주었다. 이것은 벤토나이트의 팽창하는 성질에 의한 것으로 판단된다.

혼합토의 연구에서 다짐방법 또한 내구성 및 수리전도도에 크게 영향을 주고 있으며, 벤토나이트를 혼합하지 않은 흙의 경우 다짐밀도를 1.4Mg/㎥에서 1.6Mg/㎥로 증가시켜도 수리전도도는 감소하지 않는다고 하는 연구결과가 있었다(Jo et al 2001). 또한 다짐도에 따라 혼합토에 첨가하는 벤토나이트의 함량을 줄일 수 있었으며, 일반 물에 비하여 침출수를 사용하는 경우 침출수에 포함된 유기물 등에 의해 일반 물에서 보다 적은량의 벤토나이트로 폐기물관리법에서 지정하는 투수계수를 만족하였다.

차수재의 동결융해 내구성에 대한 EPA규정에 따르면 일축압축강도가 5kg/㎠이상일 때 내구성이 양호한 것으로 판단하고 있다.

문헌연구 결과, 혼합토의 다짐 및 재료의 종류에 따라 벤토나이트의 함량 결정이 차수재의 수리전도도 및 강도에 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있었다.

제2장 시멘트-벤토나이트 혼합토의 강도 및 내구 특성

제1절 개요

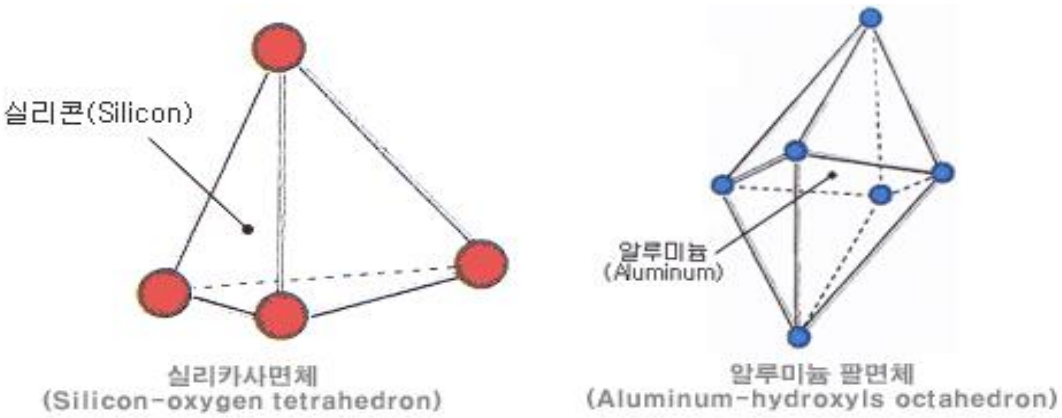
1. 사용재료

가. 벤토나이트

벤토나이트(Bentonite)의 광물학적 명칭은 몬모릴로나이트(Montmorillnite)라고 하며 처음 프랑스에서 발견 되었으나 포토 벤톤 지방의 근처에서 광맥이 처음 발견 되어 이 지방의 명칭을 붙여 벤토나이트라고 불리워 지고 있다.

이러한 벤토나이트는 지각의 화산활동에 의해 분출된 화산재물질로 화산재나 응회암이 바람이나 물에 의해 이동하여 물이 있는 장소에 퇴적된 후 물속 그 자리에서 변질되어 생성(수하에서 속성변질)된다. 특히 다량의 마그네슘(Magnesium)이 용해된 물(해양수)은 Smectite 생성을 촉진한다. 여기서 smectite는 규산염점토광물의 1종으로 CEC(Commodity Exchange Commission)가 높고 층간 팽창성이 큰 물질인데 벤토나이트의 주 성분이 Smectite 광물의 특성에 지배를 받는 점토류이다.

벤토나이트의 색상은 회색 노란색, 초록색, 적색 등으로 다양하나 벤토나이트의 색상이 품질에 영향을 주는 인자는 아니다. 그리고 벤토나이트는 그 다양한 특성으로 인하여 방수 용도 이외에 화장품, 페인트, 주물, 천공작업 시 윤활류, 오폐수 처리제 등으로 그 용도가 다양하다.



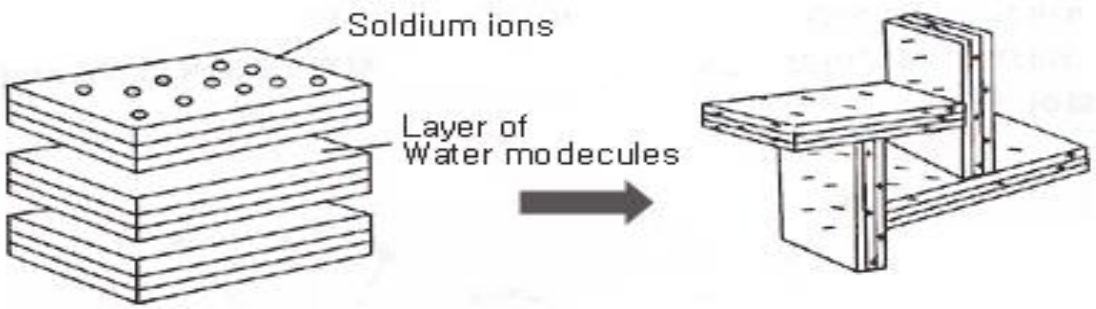
<그림 16> 몬모릴로나이트의 결정구조

<그림 16>은 벤토나이트의 화학구조를 나타낸 것으로 벤토나이트는 몬모릴로나이트 계통의 팽창성 3층판(Si-Al-Si)으로 이루어진 점토이며 납석 화학구조인 $Al_2Si_4(OH)$로 형성되어 있다. 또한, 마그네슘 또는 철에 의해 치환된 깁사이트(Gibbsite)의 알루미늄으로 인해 벤토나이트는 표면에 교환성 이온을 갖게 된다.

다음의 화학식은 칼슘계 → 나트륨계 벤토나이트로의 치환 화학식이다.

Ca-Bentonite $+Na_2CO_3 \rightarrow 2Na\text{-Bentonite} + CaCO_3$

몬모릴로나이트는 8면체 쉬트의 알루미늄 6개당 1개의 마그네슘과 철로 동형 치환되는데 여기서 동형치환이란 결정체의 형태를 바꾸지 아니하고 한 원소가 다른 원소에 치환되는 경우를 말한다. 이러한 동형치환으로 말미암아 점토광물의 결정은 음(-)의 전하를 가지게 되므로 Na^{+}, Ca^{+2}와 같은 양이온을 끌어들여 평형을 이룬다. 이 구조 단위사이에는 이와 같은 양이온과 인력이 약한 분자간 인력으로 결합되어 종이처럼 쌓여진다. 이 구조 단위 사이에 물이 들어가면 쉽게 팽창을 하며 그 결정체를 10A의 두께로 분리시키는 것도 어렵지 않다. 벤토나이트는 Aluminum oxide 중간층인 Gibbsite layer에서 +3 가인 Aluminum(알루미늄)이 +3 가인 마그네슘으로 대체되고 -1가 만큼의 부족한 전하를 Na로 만족시킨 형태가 나트륨 벤토나이트 이고 Ca로 만족시킨 형태가 칼슘 벤토나이트이다.



<그림 17> 벤토나이트의 화학구조 변화 형태

벤토나이트의 팽창 원리는 벤토나이트의 중간층인 Gibbsite 층에서 발생하는 전하의 불균형으로 인하여 벤토나이트 각층의 모서리는 양성(+), 표면은 음성(-)이 존재하는 양극성이 띄게되며 이 양극성으로 인하여 물 분자를 끌어당겨 흡착하게 되며 이 물 분자는 다시 더욱더 많은 물 분자를 끌어 당기게 되어 벤토나이트 층간의 공간으로 물 분자가 흡착, 판구조로 되어 있는 벤토나이트 구조가 하우스 구조(House of Cards 구조)로 변화하게 되어 부피가 증가하게 된다<그림 17>.

우리나라에서 사용되는 벤토나이트는 원석을 기준으로 미국 Wyoming주에서 자연적으로 생산되는 Na(Sodium)계 벤토나이트의 수입품과 국내에서 채광한 Ca(Calcium)계 벤토나이트가 있다. 국산칼슘계 벤토나이트는 원광 채취 후 공장에서 나트륨계 벤토나이트로 치환한 제품이 여러종류가 생산된다.

나트륨계 벤토나이트의 팽창성은 물과 반응시 원래의 채적보다 13~16배 팽창하며

무게의 5배 까지 물을 흡수한다. 이 특성으로 인해 벤토나이트는 차수재로 많이 이용되고 있다.

표 1. 벤토나이트의 화학적 특성

성분	Na 형 Bentonite	Na 형 Bentonite	Ca 형 Bentonite	Ca 형 Bentonite	Zeolitic Bentonite	Na 형 Bentonite
SiO_2	61.3-64	65.66	55.2	53.43	65.69	59.1
Al_2O_3	19.8	11.26	13.7	20.13	15.18	17.7
Fe_2O_3	3.9	1.31	8.1	9.56	2.59	7.32
CaO	0.6	1.18	6.3	3.77	1.76	2.89
MgO	1.3	1.94	3.3	1.48	1.74	2.03
Na_2O	2.2-2.7	2.81	trace	1.34	1.39	-
K_2O	0.4	0.24	0.6	1.14	2.53	1.85
TiO_2	0.1	0.09	0.7	1.52	0.33	-
MnO	-	0.05	-	0.07	0.17	-
P_2O_3	-	0.01	-	0.76	0.08	-
lg_Loss	7.2	15.4	9.9	7.53	8.24	9.1
비고	미국Wyoming 산 벤토나이트	중국 구태광산	영국 Ca벤토나이트	한국 모포벤토나이트	동해화학 (YB-1시료)	대명케미칼 (IS-Super)

나. 메타카올린

최근 새로운 혼화재로 관심의 대상이 되고 있는 것이 카올린족 광물인 메타카올린(Metakaolan)이다. 메타카올린이란 균질하게 성분 조합한 카올린(Kaolin)을 특수한 전처리를 거친 후 이를 소정의 조건으로 소성하여 활성화 시킨 후 일정한 입도로 미분화 한 것으로써 시멘트의 혼화재료로 약 10% 전후를 시멘트에 혼합 사용함으로써 콘크리트의 각종 물성을 개선시키는 효과가 있다고 보고되고 있다. 또한 단기적으로 에트린자이트(Ettringite)의 생성과, 시멘트 중의 주요 광물인 알라이트(Alite)의 활성화로 인한 반응속도의 증가로 초기강도를 증가시키고 중장기적으로는 시멘트의 수산화칼슘과의 포졸란 반응으로 콘크리트 조직이 치밀화 되어 강도 및 내구성을 향상시키며 특히 고강도용 콘크리트에 큰 효과를 발휘한다.

메타카올린의 구성물질은 실리카퓸과 같은 반응성의 SiO_2 및 Al_2O_3를 포함하고 있다. 반응성의 SiO_2는 수산화칼슘과의 포졸란반응에 의해 강도 및 내구성이 우수한 C-S-H겔을 형성한다. 포졸란 반응에 의하여 생성된 C-S-H는 CaO/SiO_2의 물비가 시멘트의 수화반응으로 생성된 C-S-H 보다 낮은 특성을 가지고 있으며, C-S-H의 생성으로 경화체 내부의 큰 공극을 모두 메우지 못하지만 공극들을 서서히 매워나가면서 공극의 연속성을 억제하여 투과성(Permeability)을 감소시키며 반응이 진행됨에

따라 투과성이 감소하게 되어 강도 및 내구성, 개선을 크게 향상하는 효과를 나타낸다.

화학반응식은 아래와 식과 같다.

시멘트 수화반응

$OPC + H_2O \rightarrow C\text{-}S\text{-}H + Ca(OH)_2$

포졸란 반응 과정

$Ca(OH)_2+(SiO_2,\ Al_2O_3) \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O,\ 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$

메타카올린 반응과정

$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow (H_2O) + C_2SH_8 + C\text{-}S\text{-}H$

(C : CaO, S : SiO_2, H : H_2O)

이와 더불어 Al_2O_3를 포함하고 있어 규산과 반응을 통하여 새로운 화합물을 형성하게 되는데 Fly-Ash나 메타카올린 등에 포함된 Alumino-Silicate Oxide는 규산과 반응하여 Si-O-Al의 결합을 이루게 되며, 이는 C-S-H겔과 다른 고분자화합물을 생성하게 된다.

이러한 메타카올린은 고강도 콘크리트 제조시 사용하는 실리카 퓸의 대체제 및 콘크리트의 물성 개선용으로 널리 사용되고 있는 추세이다.

메타카올린의 원료인 카올린(Kaolin)의 어원은 중국의 유명한 도자기 산지인 경덕진 부근에서 산출된 고령토에서 유래되었 다고 하며 도토 또는 자토(磁土)라고도 불리며, 백도토(白陶土)라고도 한다. 이중 순백(純白)한 것은 도자기의 주원료이며 카올린의 기본 화학식은 $Al_2O_3 \bullet 2SiO_2 \bullet 2H_2O$로 사용되고 있다.

표 2. 각국의 메타카올린의 화학성분 비교

구성	미국 MK1	미국 MK2	프랑스	한국MK1	한국 MK2
SiO_2	56.14	59.34	54.12	52	48
Al_2O_3	41.67	37.68	40.28	40	34
Fe_2O_3	-	1.86	2.05	3	3.2
MgO	-	-	0.27	0.5	0.3
CaO	-	-	0.17	1.2	0.6
Tio_2	2.16	1.12	1.72	-	-
Na_2O+K_2O	0	-	1.42	1	0.6
ig-Loss	1.25	0.64	0.57	2.2	

표 3. 포졸란 재료의 화학적 성질

구분	고로슬래그 미분말	플라이애쉬	실리카흄	메타카올린	메타카올린 (MK-100)
SiO_2	34.0	49.1	92.0	52.1	52.0
Al_2O_3	16.0	26.4	0.7	41.0	40.0
Fe_2O_3	0.32	9.3	1.2	4.32	3.0
CaO	36.92	1.4	0.2	0.07	1.2
MgO	8.83	1.4	0.2	0.19	0.5
Na_2O+K_2O	0.87	5.0	2.0	0.89	1.0
SO_3	2.67	0.8	-	-	-
LOI	0	4.9	3.0	0.6	2.2

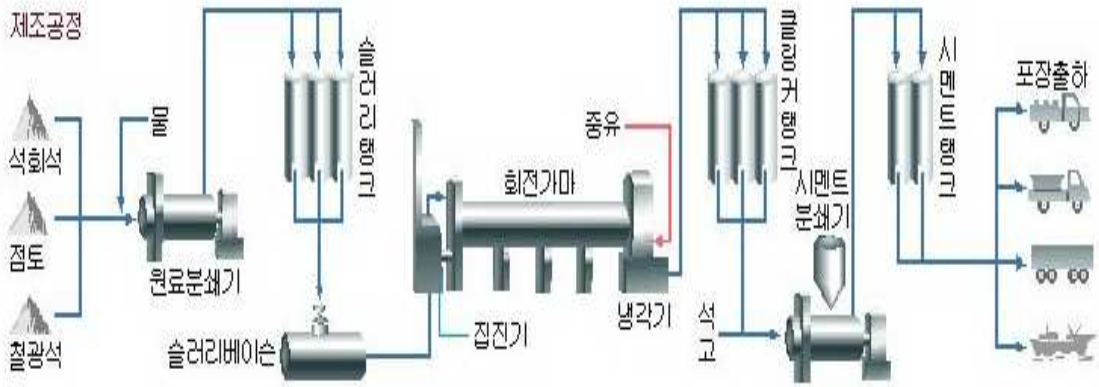
다. 시멘트

오늘날 흔히 시멘트로 불리는 것은 포틀랜드 시멘트이다. 포틀랜드 시멘트의 주 성분은 석회/실리카/알루미나/산화철 등이다, 주로 석회질 원료와 점토질 원료를 적당한 비율로 혼합하여(성분을 조절하기 위하여 규산질 원료와 산화철 원료를 첨가하기도 한다) 미분쇄한다. 그런 후 그 일부가 용융할 때까지(약 1,450℃) 소성하여 얻어지는 클링커에, 응결조절제로서 약간의 석고를 가하여 미분쇄하여 만든다.

제조방법에는 건식법・습식법・반 건식법이 있다. 건식법은 원료를 건조 상태에서 분쇄・혼합 소성하는 방법이며, 습식법은 원료에 35～40%의 물을 가하여 분쇄・혼합・소성하는 방법이다. 습식법은 원료조합물에 함유된 많은 수분을 증발시키기 위하여 많은 열량이 필요하므로, 습식법에 의한 시멘트의 제조는 줄어들고 있다.

소성가마로는 선가마와 회전가마가 있는데, 회전가마가 많이 쓰인다. 회전가마는 보통 지름이 3～5m, 길이가 50～200m인 원통형 가마다. 이는 3～5° 의 경사를 이루고 천천히(1분에 1～2회 정도) 회전한다. 원료는 위쪽에서 연속적으로 들어가고 아래쪽에서는 연료(기름 또는 미분탄)를 연소시킨다. 원료는 가마의 회전에 따라 아래쪽으로 이동하면서 점차로 소성되어, 아래쪽에서 클링커가 연속적으로 흘러나와 냉각기에서 급랭된다. 또 서스펜션 예열기를 설치하여 고온의 배기가스를 원료의 예열과 하소에 이용하여, 열효율과 소성효율을 높이기도 한다.

이렇게 얻어진 클링커에 약 3%의 석고를 첨가하여 미분쇄(비표면적 2,800～4,200 ㎠/g)하여 시멘트를 만든다. 시멘트는 주요 건설자재로서 콘크리트 또는 시멘트를 주 원료로 한 2차 제품용으로 사용한다.



<그림 18> 시멘트 제조 흐름

화학성분

포틀랜드 시멘트의 주성분은 석회 CaO, 실리카 SiO_2, 알루미나 Al_2O_3 및 산화철 Fe_2O_3 등이다. 포틀랜드 시멘트 클링커의 구성화합물은 규산삼석회 $3CaO \cdot SiO_2$, 규산이석회 $2CaO \cdot SiO_2$, 알루민산삼석회 $3CaO \cdot Al_2O_3$ 및 철화합물 $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$이다. $3CaO \cdot SiO_2$를 주로 하고 약간의 $Al_2O_3 \cdot MgO$ 등을 고용한 고용체를 앨라이트(alite), $2CaO \cdot SiO_2$ 중 β형의 것을 주로 한 고용체를 벨라이트(belite)라 한다.

라. 섬유

Geosynthetics란 용어는 제3 국제 Geotextil 학회에서 토목섬유를 총칭하고 그 외의 용어는 관련 제품별로 구분하는 직포와 부직포 형태의 Geotextile, Geogrid, Geomembrane, Geoweb, Geopipe, Geostrip, Geocomposite 등으로 여러 종류의 다양한 제품이나 복합제품의 특성별로 호칭하도록 용어를 정리하였다.

Geosynthetics의 5가지 주요기능에는 배수기능, 여과기능, 보강기능, 분리기능, 기타 차수, 지수, 방호 등으로 구분하였다.

일반적으로 토목섬유 소재로서 요구되는 특성은 우수한 인장특성, 신도, 적절한 creep성, 최종용도에 맞는 투수성, 토양미생물에 대한 내부식성, 빛과 열에 대한 안정성이 요구된다.

Geosynthetics는 특히 토목 건축공사의 특성상 공사비용과 인건비 절감, 시공기술의 신뢰성, 새로운 토목공법의 적요, 시공의 편리성, 단기간에 시공 가능에 적합한 재료로 인식되어 왔다.

오늘날의 Geosynthetics의 주된 사용용도는 연약지반안정, 하천경사면의 토사유출방지 및 하상침하방지, 제방구축, 스포츠 complex의 관리보호, 교량 배수로 등의 사

면보호, 토사흐트러짐을 방지하여 씨앗보호, 구조물의 안정을 위해 사용되는 모래, 자갈, 토사를 담는 포대나 콘크리트 양생 sheet, 호안의 토사흡출에 의한 세굴방지, 성토의 보강, 매립, 매립지, 하천, 해안공사 등에 주로 사용되어 왔으며 제방을 합성섬유의 직물로서 보강하는 보강재로까지 사용하고 있다.

표 4. Geotexile 제품의 분류

분류			소재	제조방법
Geotextile	a	편물 (Knited Fabric)	Monofilament Multifilament yarn	Interlock and loop
	b	직물 (Woven Fabric)	Monofilament Stretch Film Multifilament yarn Span fabric yarn	직기
	c	부직포 (Nonwoven Fabric)	섬유	1. 기계적 결합 (1~5mm두께): 니들펀칭 2. 열적결합 (0.5~1mm두께) 3. 화학적 결합
	d	복합재료 (Composite Fabric)	a~c의 조합	봉제 또는 니들펀칭
관련제품	e	끈 (Web. Webbing)	Strip	황목제직 (Coarse woven) 5~10mm폭
	f	Mats	황목 경목의 Filament	접점에 결합 (1~2cm두께)
	g	Nets	압출한 플라스틱 줄 (직경 1~5mm)	압출기 망목크기 수 nn~수cm
	h	Grids, Polymer Grids	폴리에틸렌 또는 폴리프로필렌에 구멍이 뚤린 Sheet	일축 또는 이축 연신 1~10cm
	i	발포 Sheet	다공질 재료	압출기, 사출기, 프레스 성형
	j	복합 (Composite Geotextile)	a~i의 조합	

제2절 재료 및 방법

1. 시험 목적

국내 폐기물 발생량의 대부분이 매립에 의존하고 있기 때문에 2차적인 환경문제를 일으키지 않기 위해서는 차수재의 역할이 매우 중요하다. 또한 구제역에 의한 처리방법으로 소각, 랜더링, 매립의 방법이 있다. 구제역 초기에는 소각, 랜더링의 방법을 사용할 수 있으나 확산범위가 넓어짐에 따라 이러한 방법을 모든 지역에 사용할 수 없는 문제점으로 인해 국내·외적으로 매립을 할 수밖에 없는 상황에 직면하게 된다.

한국에서는 1934년 처음 발생했으며, 이후 66년 만인 2000년 경기도 파주 지역에서 발생해 충청도 지역까지 확산되어 큰 피해를 입혔다. 2001년에는 영국에서 발생하여 유럽·동남아·남미 등지로 번졌다. 2011년 한국에서 구제역이 발생하여 전국적으로 확산되었으며 약 300만 마리의 가축이 매장되었다.

이와 같은 구제역의 발병에 의해 조성된 매립지의 수 또한 무시할수 없을 정도이며, 구제역 매몰지의 조성 또한 수원지 또는 지하수가 흐르는 곳에서 일정 거리이상 떨어져 있는 곳에 조성하는 것을 원칙으로 하고 있으나, 그렇지 못한 매몰지가 다수 발생하였다. 또한 매립시 차수매트의 훼손 등으로 인한 차수매트의 차수기능 상실을 고려하지 않을수 없기 때문에 혼합토를 이용한 보조 차수재의 차수기능이 중요하다. 차수매트의 훼손 또는 보조차수재가 기능을 다하지 못하면 지하수 오염, 토양오염 또는 만약 강과 인접한 곳에 매립지가 조성될 경우 식수원의 오염등 심각한 문제를 초래하게 된다.

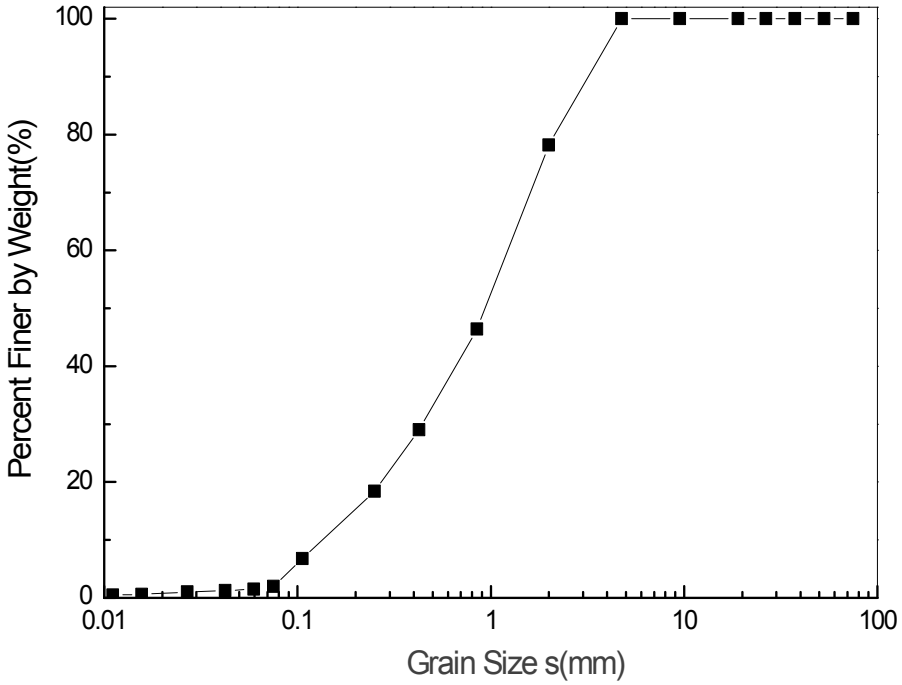
상기와 같은 이유로 인하여 차수재에 관한 연구가 다수 진행되어 왔으며 차수매트 또한 많은 발전을 이루었고, 본 연구에서도 차수매트가 기능을 상실할 시 이를 대체할수 있는 보조차수재를 개발하고자 한다. 본 연구에서는 계절적 요인에 의한 동결/융해, 건조습윤, 전단대 형성에 저항할수 있는 혼합토의 개발을 목적으로 하고 있다.

2. 시험 개요

시멘트-벤토나이트 혼합토는 시멘트를 첨가함으로써 일반 혼합토에 비해 높은 강도를 갖을 수 있으며, 벤토나이트-풍화토 혼합토가 점성토를 이용한 차수재를 대체할 수 있는지 검토하기 위하여 변수위 투수 및 압축·인장·동결융해·건조습윤·SEM·X선 회절분석 시험을 수행하였다.

가. 풍화토의 역학적 특성

본 연구에 사용된 혼합토는 OO대학교 인근 산지에서 채취한 풍화토를 사용하였으며, <그림 19>는 풍화토의 입도분포 곡선으로 통일분류법(USCS)으로 분류 하였을 시 SM으로 나타났다.



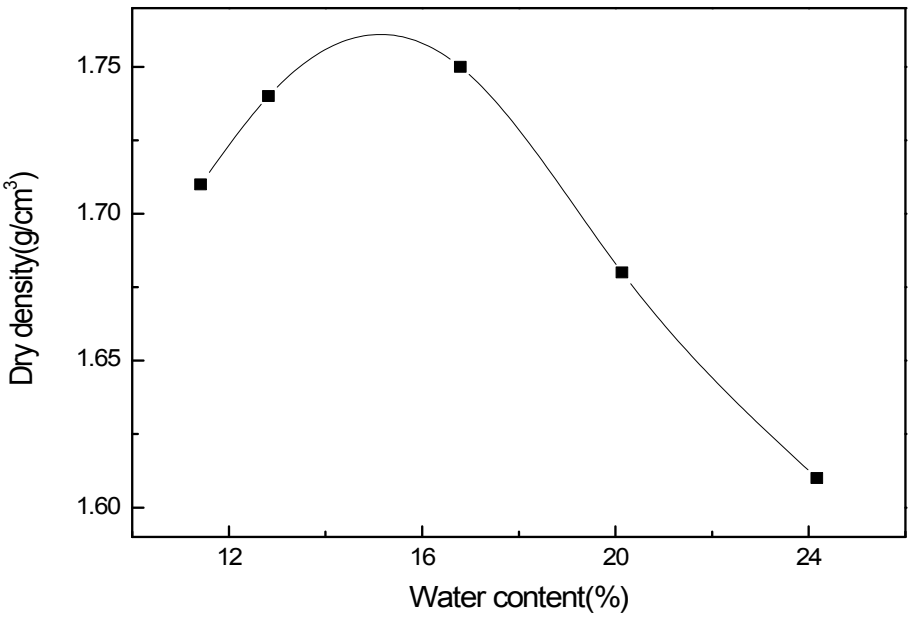
<그림 19> 풍화토의 입도시험 그래프

표 5. 풍화토의 비중 실험

구 분	측 정 값	
병무게 Wf(g)	71.55	73.37
건조시료무게 Ws(g)	30.62	31.36
(병+건조시료)무게 Wc(g)	102.17	104.73
(병+증류수)무게 Wa′ (g)	144.12	172.89
(병+건조시료+증류수)무게 Wb(g)	163.23	192.71
처음 온도 T′	19℃	19℃
가열후 온도 T	21℃	21℃
시험 전 온도의 물의 비중	0.998435	0.998435
시험 후 온도의 물의 비중	0.998022	0.998022
시험 후 온도의 보정계수 K	0.9989	0.9989
보정 후 Wa′ (g)	144.15	172.93
흙의 비중	2.651	2.705

나. 다짐시험

각 시료의 최적함수비 및 최대건조밀도 산출을 위한 다짐은 KS F 2312의 A다짐에 준하여 실시하였으며, ø50 x 100 mm 몰드를 사용하였다. 강도측정을 위한 공시체 제작 시에도 A다짐 방법에 의하여 다짐에너지를 계산하여 3층 25회 다짐으로 다짐에너지가 일정하도록 조절하였다. <그림 20>은 다짐시험에 의해 얻은 다짐 그래프 이다.



<그림 20> 풍화토의 다짐시험

다. 시험체 제작

시멘트-벤토나이트 혼합토의 배합설계는 기존 연구(Park et al,. 2003; Choi et al., 2012; Chae et al., 2001; Kim et al. 2000)를 참고하여 최적 배합조건을 찾기 위해 토질역학 분야에서 주로 사용되는 혼합토의 전체 중량에 대한 중량비로 결정하여 최적 함수비를 구하였다.

다짐시험에서 산출된 최적함수비와 최대건조단위중량을 기준으로 하여 수량 및 물량을 산정한 후 다짐 시험과 동일한 수준의 다짐에너지를 나타낼 수 있도록 ø50 x 100 mm 몰드에 재료를 투입하고 3층으로 나누어 다짐을 실시하였다. 재령에 따른 강도특성을 구명하기 위하여 재령 0, 3, 7일 및 28일 동안 양생을 실시하였다.

시멘트(0, 10%), 벤토나이트(0, 5, 10, 15, 20%) 및 풍화토(100, 95, 90, 85, 80%)를 섞은 혼합토에 메타카올린(시멘트 중량비 0, 5, 10, 15, 20%) 및 토목섬유(0, 0.5, 1, 1.5, 2%)를 혼입하여 실험 하였으며, 이때 사용된 토목섬유는 19mm의 단사를 사용하였다. 시멘트-벤토나이트 혼합토에 사용된 재료의 특성은 표 6 ~ 표 9 이며, 배합설계는 표 10과 같다.

표 6. 풍화토의 특성

USCS	Liquid limit(%)	Plastic limit(%)	Specific gravity	OMC(%)	Dry unit weight(g/cm^2)
SM	33.9	NP	2.678	16%	1.81

표 7. 포틀랜드 시멘트의 특성

S.G	Setting time		Compressive strength (MPa)		Fineness
	Initial(M)	Final(H:M)	7 days	28 days	(cm^2/g)
3.17	>60	<10	44.4	59.3	3745

표 8. 섬유의 특성

Length (mm)	Diameter	Regain of allowance(%)	Specific gravity	Melt point	Tensile strength(MPa)	Modulus of elasticity(GPa)
19	23~36 micron	Dry 4.5	1.14~1.16	210℃ over	800	3.5

표 9. 시멘트, 벤토나이트, 메타카올린의 화학적 특성(%)

Sample	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	Fe_2O_3	K_2O	Surface Area (cm^2/g)	Specific gravity
Cement	20.5	5.0	62.3	3.6	2.1	–	3.4	–	3,475	3.17
Bentonite	59.1	17.7	2.89	2.03	–	–	–	1.85	<4,800	2.34
Metakaolin	52.0	40.0	1.2	0.5	–	1.0	3.0		10,000	1.53

표 10. 시멘트-벤토나이트 혼합토의 혼합비(%)

Cement-soil-bentonite mixture (100%)			Nycon fiber (N) N/(C+S+B)	Metakaolin (M) M/C_{10}
Cement (C)	Soil (S)	Bentonite (B)		
0	100	0	0	0
	95	5	0.5	5
	90	10	1	10
	85	15	1.5	15
	80	20	2	20
10	90	0	0	0
	85	5	0.5	5
	80	10	1	10
	75	15	1.5	15
	70	20	2	20

라. 일축압축 강도특성

일축압축강도시험은 KS F 2314 (흙의 일축 압축 시험 방법)에 준하여 재령 0, 3, 7일 및 28일에 ø50 x 100 mm인 공시체를 Instron사의 만능시험기를 사용하여 1 mm/min의 속도로 하중을 재하 하여 측정하였다.

마. 인장강도 특성

인장강도 시험은 KS F 2423 (콘크리트의 쪼갬 인장강도 시험 방법)에 준하여 재령 0, 3, 7일 및 28일에 ø50 x 100 mm인 공시체를 ㈜연엔지니어링사의 일축압축시험기를 사용하여 1 mm/min의 속도로 하중을 재하 하여 측정하였다.

바. 건조/습윤 시험

건습 시험은 KS F 2330 (다져진 흙 시멘트 혼합물의 습윤 및 건조 시험방법)에 준하여 공시체를 성형한 후에 습윤 양생실에서 7일간 양생한 후 5시간의 수침과 42시간 동안 71℃의 건조로에서 건조하기를 12주기 반복하였으며, 건조습윤시험 후 압축강도를 측정하였다.

사. 동결융해 시험

동결융해 시험은 KS F2332 (다져진 흙 시멘트 혼합물의 동결 융해 시험방법)에 준하여 공시체를 성형한 후에 습윤 양생실에서 7일간 양생한 후 -23℃보다 높아지지 않는 동결캐비닛에 24시간의 동결과 온도 21℃, 상대습도 100%인 습윤 양생실에서 24시간동안 융해하기를 12주기 반복하였으며, 동결융해시험 후 압축강도를 측정을 하였다.

아. 변수위 투수시험

변수위 투수시험은 KS F 2322 (흙의 투수시험 방법)에 준하여 공시체를 성형한 후에 28일간 습윤 양생실에서 양생한 후에 각 시료별로 투수시험을 진행 하였다.

자. SEM

시멘트 혼입에 따른 시멘트-벤토나이트 혼합토의 수화특성을 분석하기 위하여 재령 3, 7, 28일된 공시체에서 시료를 추출하여 전계 방사형 주사전자 현미경(FESEM : Field Emission Scaning electronic microscope)을 이용하여 측정하였다. 사용된 기기는 일본 Hitachi사의 S-4300으로 일반 주사전자현미경과 달리 W-hair pin type이나 LaB6보다 휘도가 높으며 저가속 전압에서 고배율 관찰이 가능하며 시료의 radiation damage가 적은 장점이 있어 보다 정확한 실험이 가능하다.

차. XRD(X-Ray Diffractometry)

사용된 기기는 네덜란드 PANalytical사의 X'pert-pro MPD으로 시료의 기본상과 미량상 분석 및 박막분석, 고온/저온 변성분석, 잔류응력의 해석과 편향분석, 미소부위측정 등 광범위한 제반 분석들을 빠르게 비파괴적으로 수행할 수 있다. 혼합토 시료 속에 있는 결정상들의 정성 및 정량분석을 위하여 사용하였다.

<그림 21> FESEM

<그림 22> XRD

제3절 결과 및 고찰

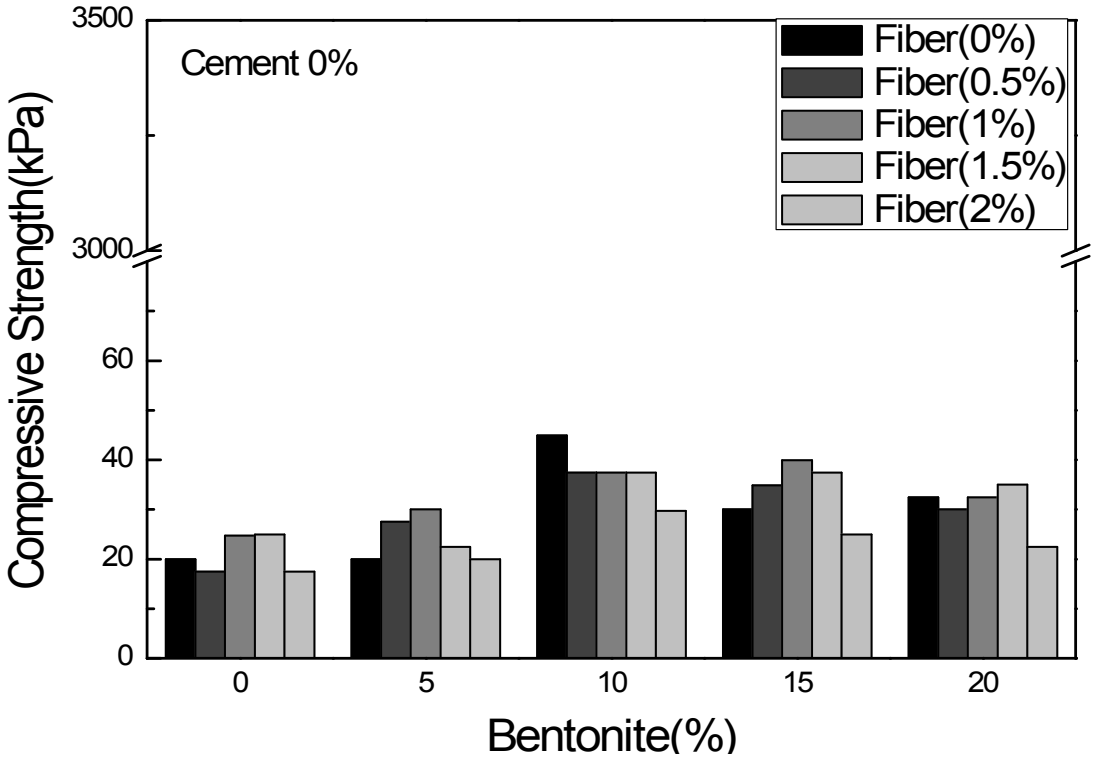
1. 일축압축 시험 결과

가. 벤토나이트-섬유 혼합토의 강도특성

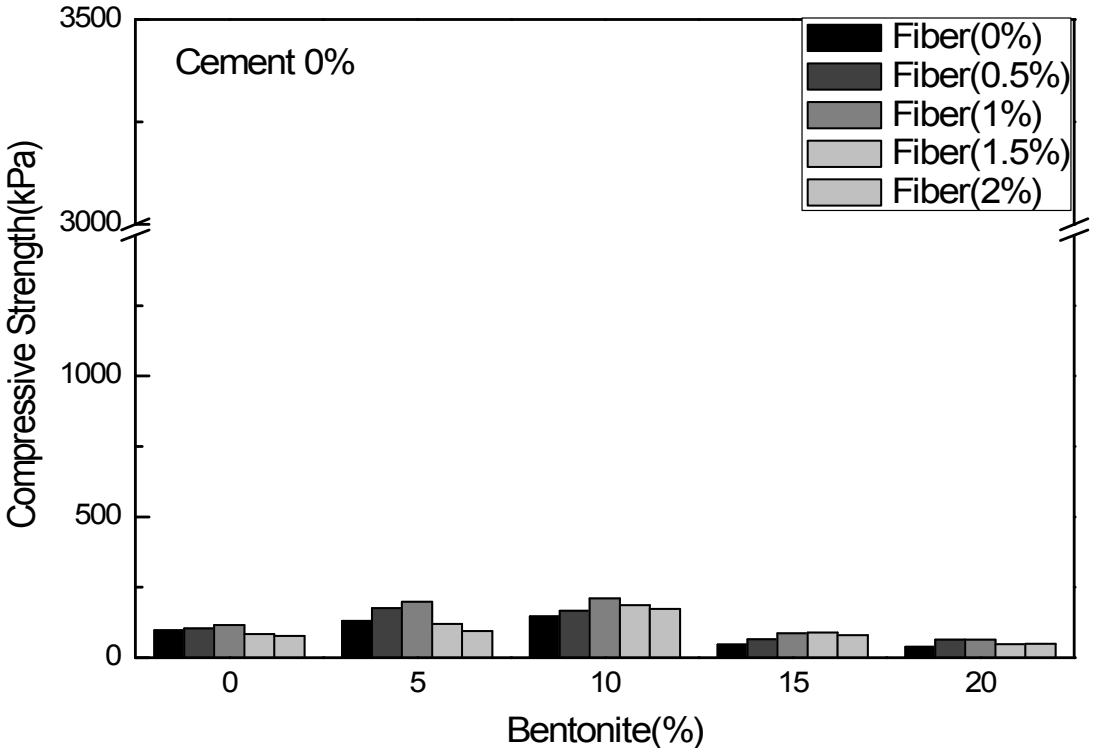
시멘트 및 벤토나이트, 토목섬유의 혼합률에 따른 일축압축 강도의 영향을 분석하기 위하여 시멘트-벤토나이트 혼합토의 공시체를 제작한 후 일축압축시험을 실시하였다. <그림 23>~<그림 27>은 토목섬유 혼입에 따른 벤토나이트 혼합토의 재령 0, 3, 7, 28 및 91일 강도를 나타내며, <그림 28>~<그림 32>는 토목섬유 혼입에 따른 시멘트-벤토나이트 혼합토의 재령 0, 3, 7, 28 및 91일 강도를 나타낸다.

시멘트를 혼합하지 않은 경우 3일 강도 대비 7일 및 28일 강도는 3.78, 8.8배 및 10.95배로 나타났으며 혼합토의 강도 증진이 재령 28일까지는 급격히 증가하고 이후에도 91일까지 지속적으로 증가하였다. 시멘트-벤토나이트 혼합토의 경우는 3일 강도를 기준으로 하여 재령 7, 28일 및 91일강도는 1.29, 1.85배 및 1.91배증가 하였고 시멘트를 혼합하지 않은 경우에 비해 2～3배 이상의 높은 강도를 갖고 있었다. 이와 같은 강도의 증가는 시멘트의 포졸란 반응과 벤토나이트의 팽창성으로 혼합토가 보다 밀실해져 강도가 증가한 것으로 보이며, 재령 91일 까지도 이러한 반응이 지속되어 강도가 증가하는 것을 볼수 있다.

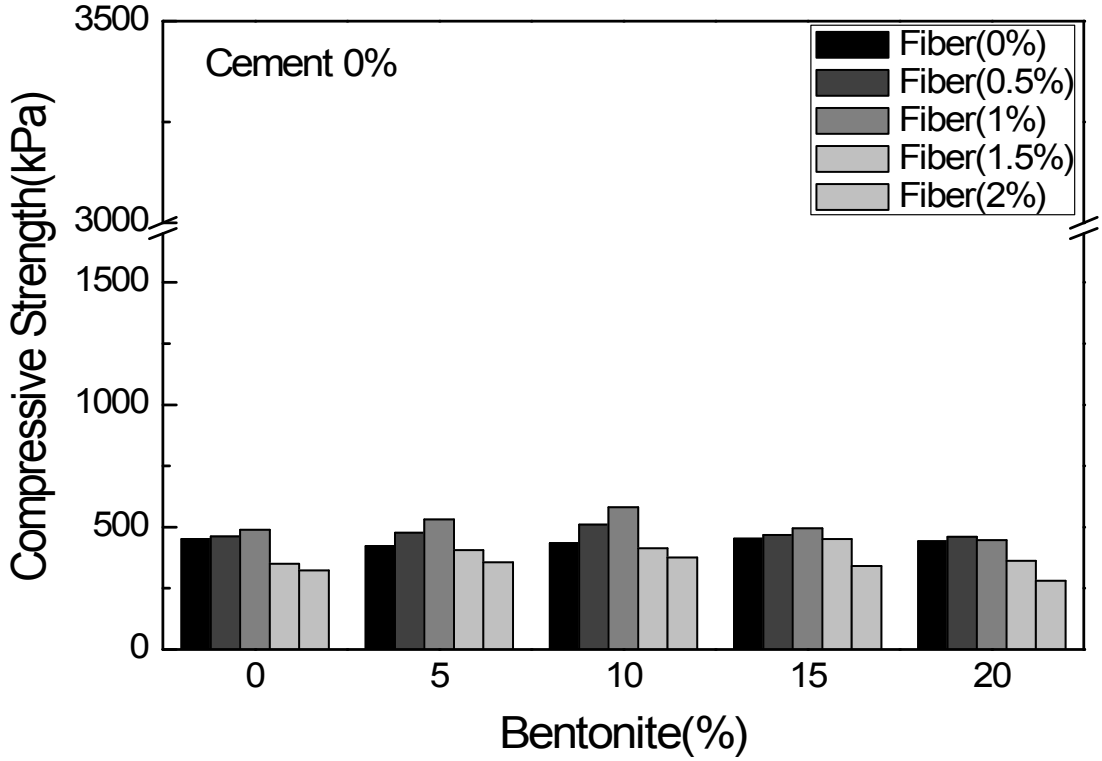
일축압축시험에서 벤토나이트 함유량이 증가할수록 강도의 증가를 보이고 있으며, 재령 0일의 벤토나이트 0%와 비교하면 벤토나이트 5～20%를 첨가하였을 때 강도값이 1.15～1.79배 증가되는 경향을 나타내었다. 재령 3일, 7일 및 28일에서도 벤토나이트 함량이 증가함에 따라 강도가 증가하고 있으나 혼입률이 10%를 초과하면서부터는 강도가 감소하였다. 이러한 경향은 특히 시멘트를 첨가하였을 때 뚜렷이 나타났고 시멘트 벤토나이트 혼합토의 재령 28일 및 91일에서 벤토나이트 15%이상 혼합시 강도가 크게 감소하였다. 벤토나이트 혼합토가 압축강도가 높게 나타나는 원인은 혼합토에 많은 모래질이 함유되어 있고 여기에 벤토나이트가 첨가됨으로서 사질토의 간극을 채워 높은 점성이 이들 간의 점착력 증가로 이어져서 강도가 증가하는 것으로 보인다.



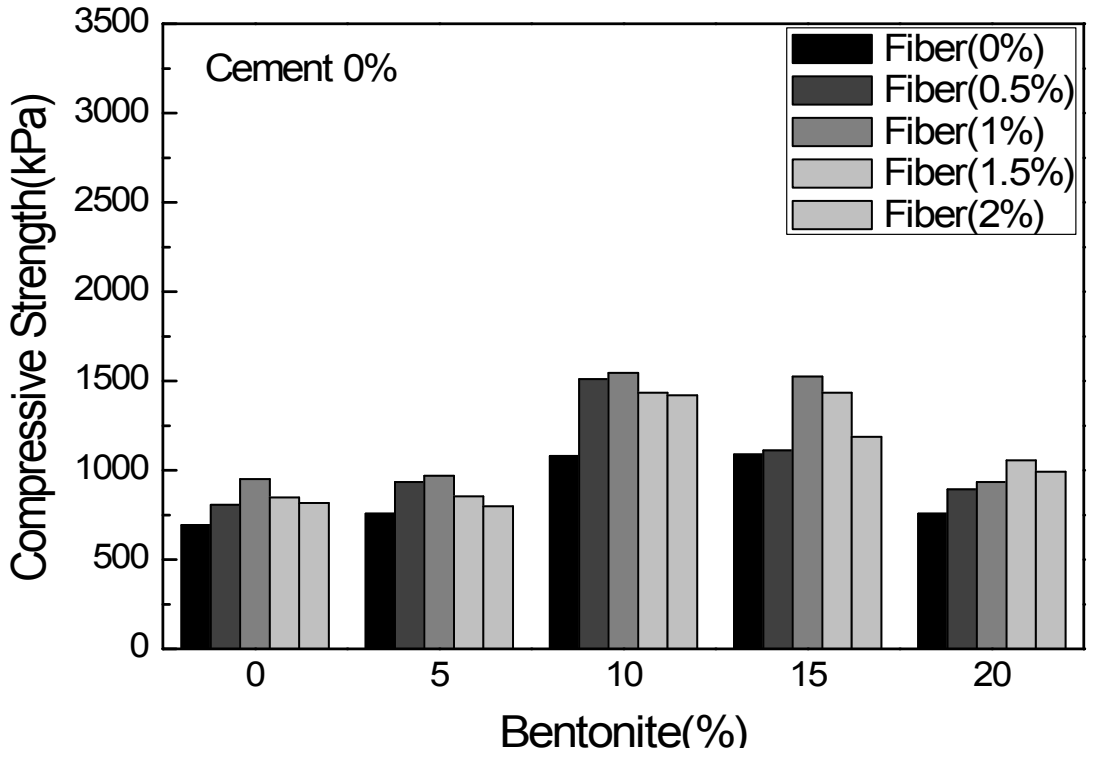
<그림 23> 재령 0일



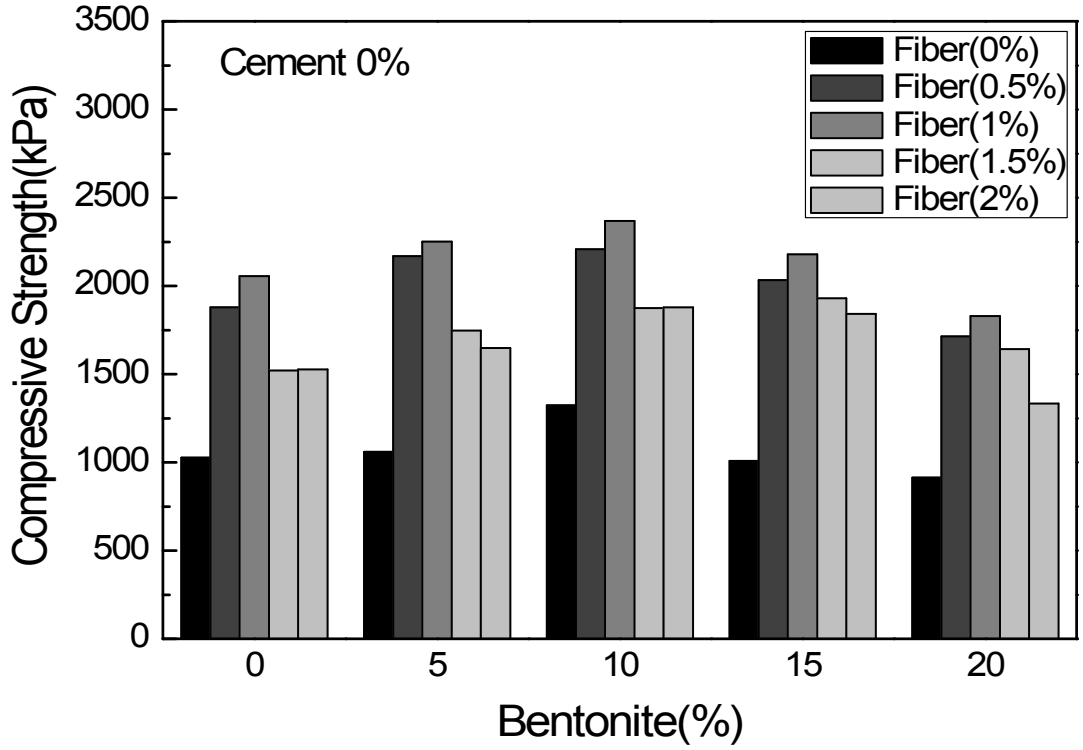
<그림 24> 재령 3일



<그림 25> 재령 7일

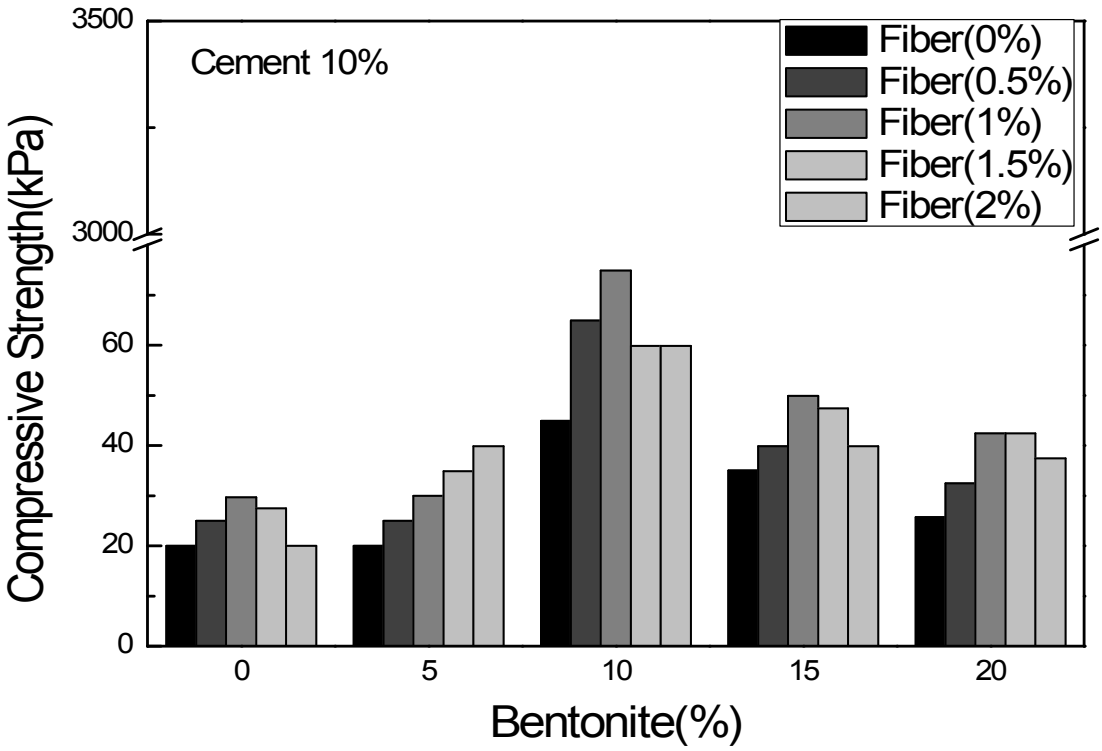


<그림 26> 재령 28일

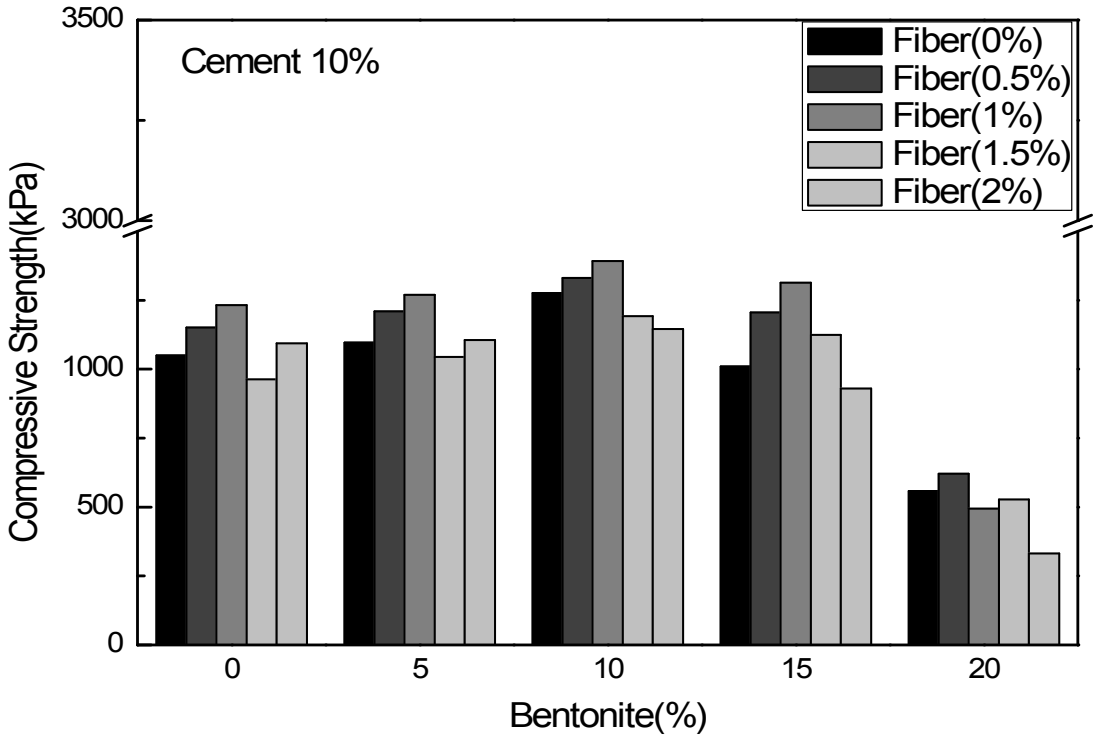


<그림 27> 재령 91일

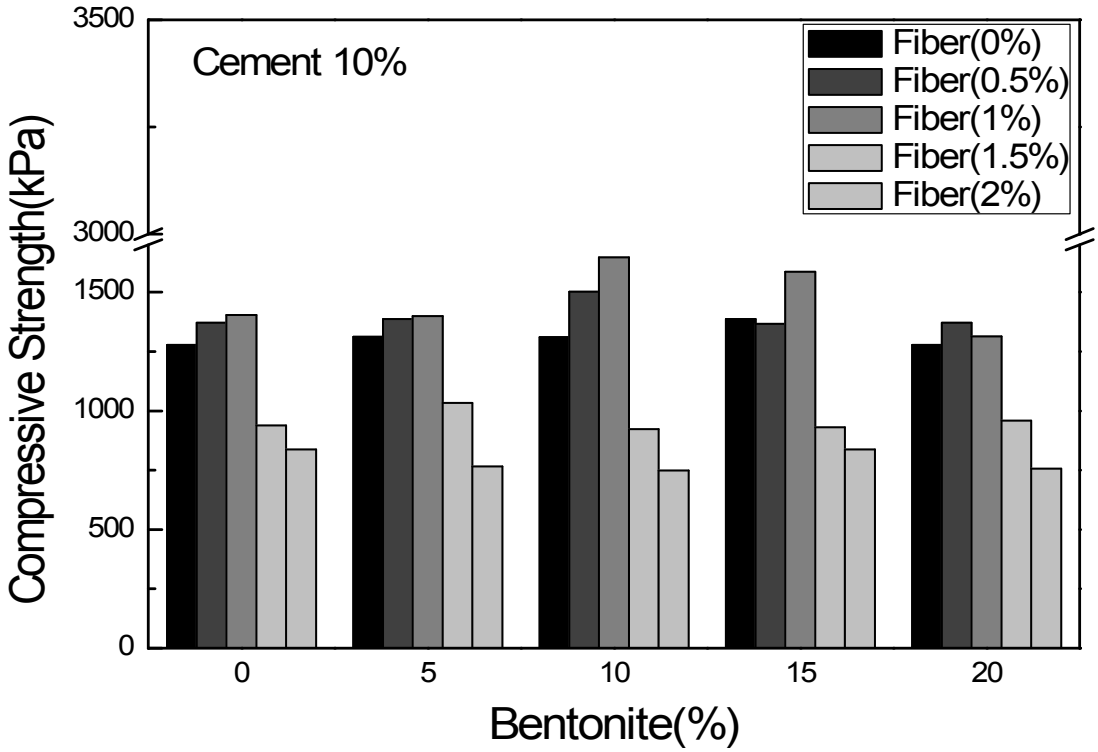
나. 벤토나이트-시멘트-섬유 혼합토



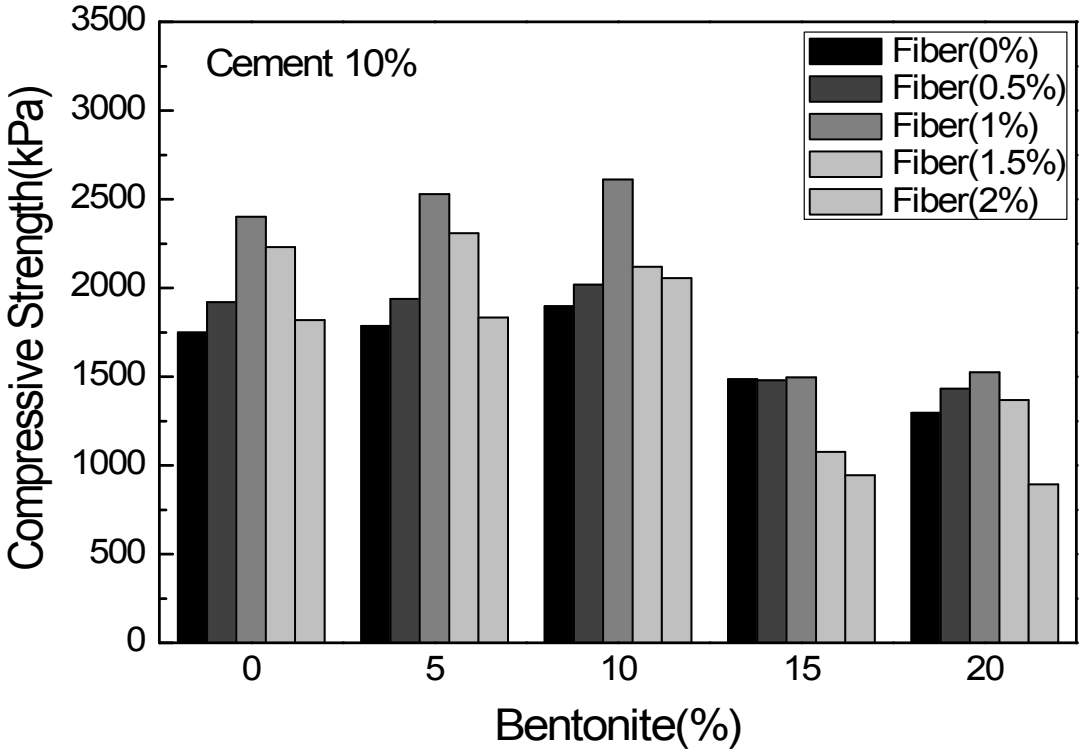
<그림 28> 재령 0일



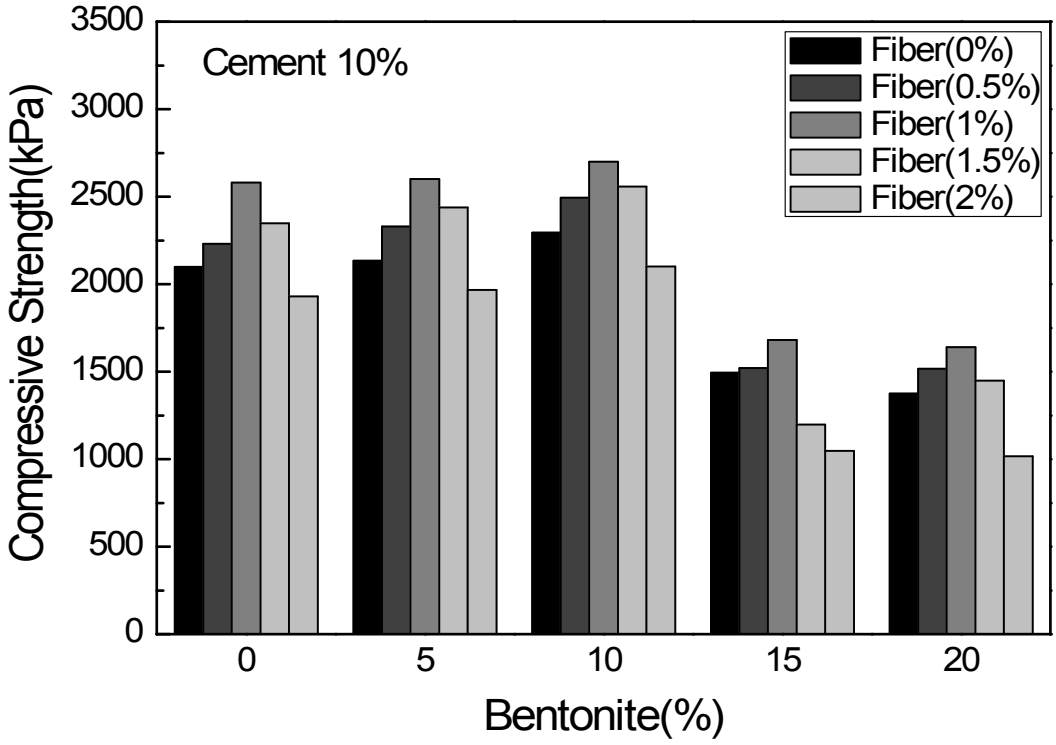
<그림 29> 재령 3일



<그림 30> 재령 7일



<그림 31> 재령 28일



<그림 32> 재령 91일

벤토나이트 혼합토가 압축강도가 높게 나타나는 원인은 혼합토에 많은 모래질이 함유되어 있고 여기에 벤토나이트가 첨가됨으로서 사질토의 간극을 채우고 높은 점성이 이들 간의 점착력의 증가로 이어져서 강도가 증가하는 것으로 보인다(Kim et al., 2000; Kim et al., 2000).

<그림 28>~<그림 32>에서 섬유 혼입율이 증가함에 따라 강도가 일정수준까지 증가하다 감소하는 경향을 나타냈으며, 섬유 1% 첨가시 전반적으로 가장 높은 강도 값을 기록하였다. 시멘트를 넣지 않은 경우보다 시멘트 10% 혼합시 섬유 혼합에 따른 강도 증진 효과는 탁월하였는데, 섬유 1% 혼합비에서 압축강도는 1.7배정도 차이를 나타내었다.

최대 강도를 기록한 벤토나이트 10%, 섬유 1%에서 0일 강도를 기준으로 3, 7, 28일 및 91일 강도는 5.5배, 14.8배, 40.5배 및 63.2배의 강도 증가를 나타내었다. 또한 재령 28일에서는 토목섬유를 첨가하지 않은 경우에 비해 토목섬유 0.5, 1, 1.5, 2% 첨가한 경우 강도 증진 효과는 1.06, 1.38. 1.12, 1.08배를 기록하여 토목섬유 1% 첨가시 강도 증진 효과가 탁월하였다.

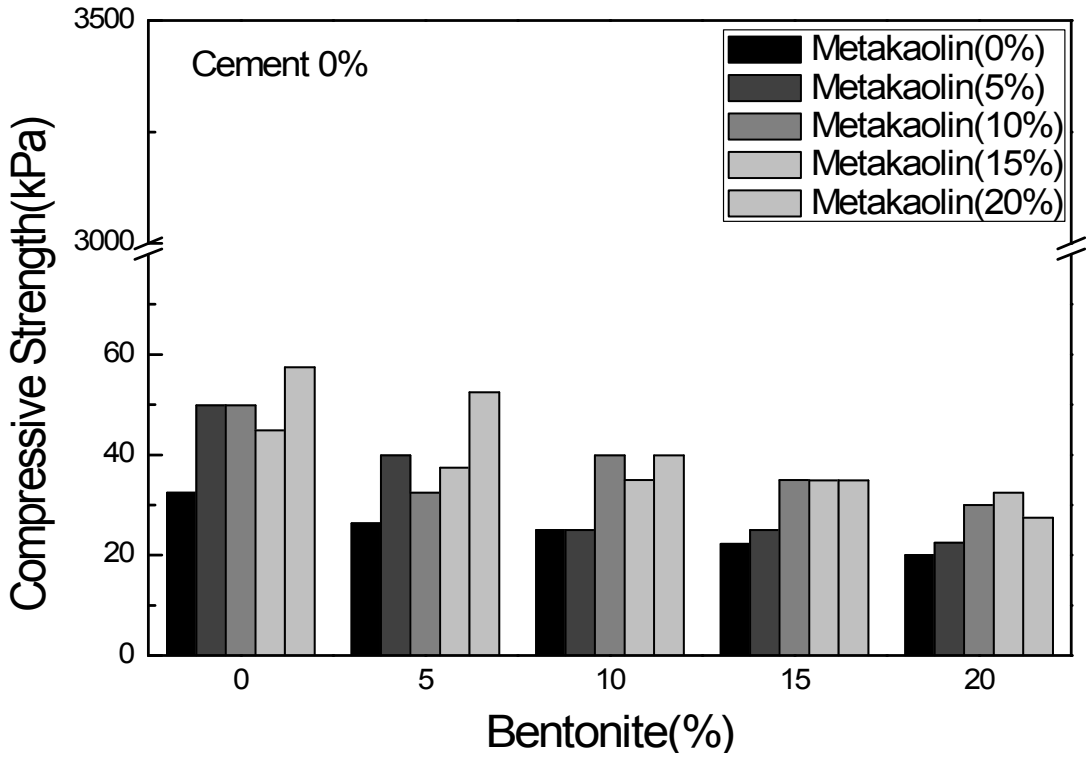
시멘트-벤토나이트 혼합토에 토목섬유 추가에 따른 연구 결과는 국내·외에서 찾기 힘들지만 섬유 혼합토에 대한 연구는 많은 편으로 Prabaker et al. (2002) 및 Park et al. (2003)에 따르면 섬유 보강은 모래질 흙의 압축강도 개선에 탁월하나, 섬유재의 함유량이 어느 적정 값을 넘어서게 되면 내부마찰각의 감소로 인해 흙과 섬유재의 interlocking이 감소하여 강도가 저하하게 된다. Cho and Kim (1995)은 섬유혼합 보강토에서 섬유함량이 증가될수록 일축압축강도는 지속적으로 증가되나 섬유함량이 1~2%이상이 되면 혼합된 섬유의 양이 많아 섬유의 엉킴 현상이 점점 심해지며, 섬유와 흙의 마찰력에 의한 전단특성 보다는 흙을 포함한 섬유들의 엉켜진 형태의 전단특성이 나타나기 때문에 강조 증가율이 점차 감소하는 경향을 보인다고 하였다. 본 연구는 시멘트-벤토나이트 혼합토에 토목섬유를 추가한 경우로서 Prabaker et al. (2002), Park et al. (2003), Cho and Kim (1995)의 연구와는 재료적 측면에서 차이가 있다. 토목섬유를 보강재로 활용한 측면은 유사한 것으로 볼 수 있으며 압축강도 시험에서도 섬유 혼합비가 1%이상일 때 섬유의 엉킴 현상으로 인하여 강도 저하 현상이 발생하여 유사한 결과를 얻었다. 따라서 현장에서 섬유 혼합토를 활용할 경우 1%이하로 적용하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

다. 벤토나이트-메타카올린 혼합토의 강도특성

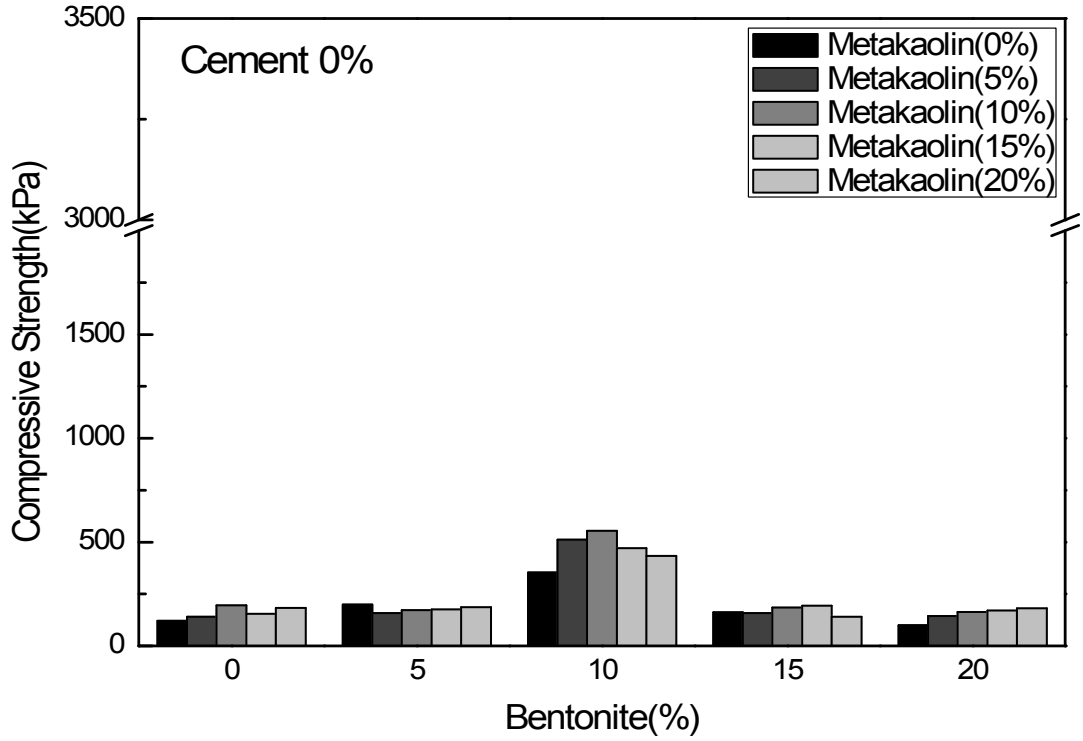
<그림 33>~<그림 42>은 메타카올린 혼입에 따른 벤토나이트 혼합토 및 벤토나이트-시멘트 혼합토의 0, 3, 7, 28 및 91일 강도를 나타낸다. 시멘트를 혼합하지 않은 혼합토의 재령 3일 강도를 기준으로 7, 28일 및 91일 강도는 3.78~8.8배 증가한데 비해 시멘트를 혼합한 재령 3일 강도일 때 7, 28일 및 91일 강도는 1.37~1.97배를 기록하였다.

<그림 33>~<그림 42>에서 보는 바와 같이 벤토나이트 혼합토의 강도는 시멘트를 첨가 하였을 때 시멘트와 메타카올린의 화학반응으로 인해 강도가 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. 재령 초기의 압축강도는 메타카올린을 혼합함으로써 시멘트량이 상대적으로 감소하고 메타카올린의 활성반응이 진행되지 않았기 때문에 강도는 크지 않으나, 재령 3일 이후의 압축강도는 메타카올린의 잠재수경성과 포졸란 반응에 의해 강도발현이 크게 증가되었고(Moon et al., 2005), 28일 이후 강도의 증가폭이 작아지고 91일에 이르면 강도증가가 거의 없는데, 이는 재령28일 까지 메타카올린의 활성반응이 초기에 대부분 일어났기 때문에 강도증가폭이 감소한 것으로 보인다.

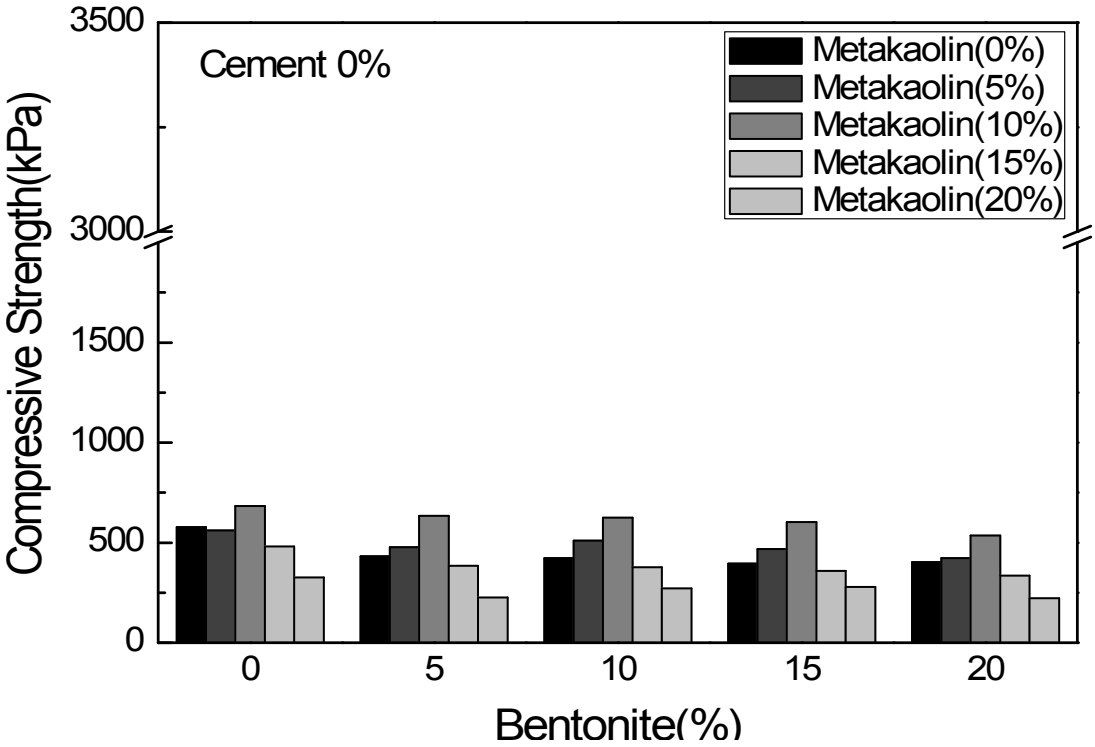
벤토나이트 혼입량 증가에 따른 경향은 섬유 혼입에 따른 결과와 비슷한 것으로 판단된다. 재령 0일의 경우 메타카올린 및 시멘트의 포졸란 반응이 일어나지 않아 강도 변화가 없는 것으로 보이나 재령 3일이 되면 벤토나이트 혼합비 10%에서 강도가 크게 증가되고, 전체적으로 높은 강도의 증진을 나타내며, 시멘트-벤토나이트 혼합토는 벤토나이트 혼합토 보다 약 2.5～4.7배 높게 나타났다. 벤토나이트 혼합토 및 시멘트-벤토나이트에서 토목섬유 및 메타카올린 보다 벤토나이트의 함량이 강도에 큰 영향을 주었으며, 혼합토에서 강도증가의 주된 요소는 시멘트이며, 시멘트를 첨가함으로써 보다 큰 강도의 증진이 이루어 진 것으로 보인다.



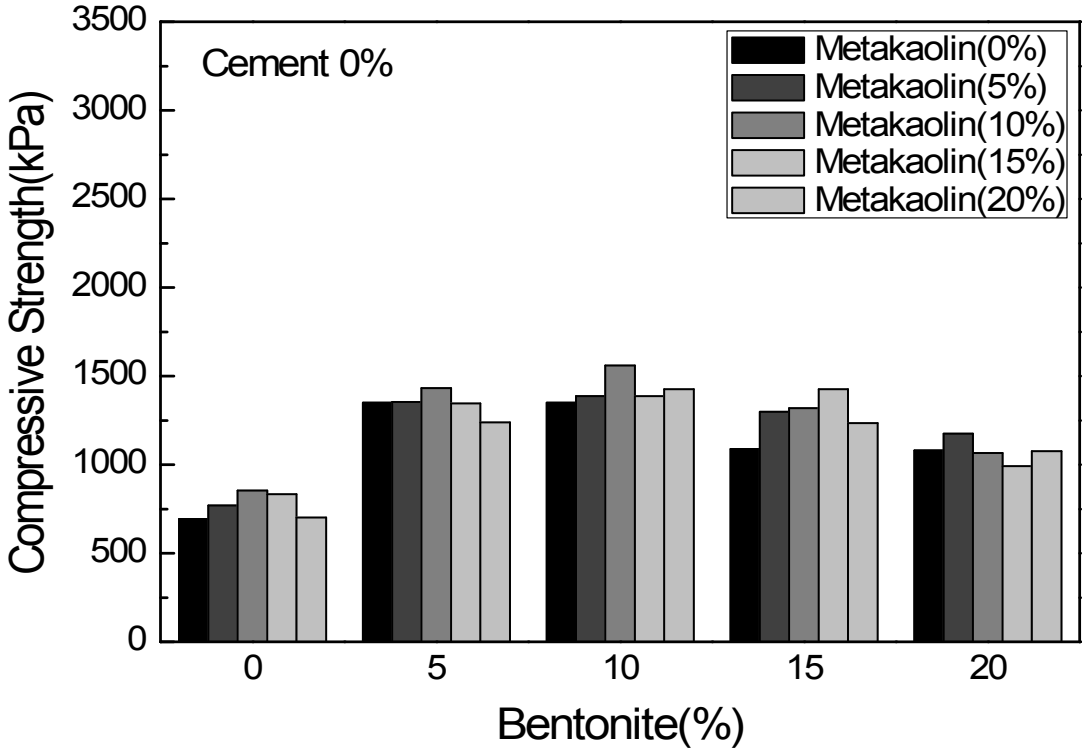
<그림 33> 재령 0일



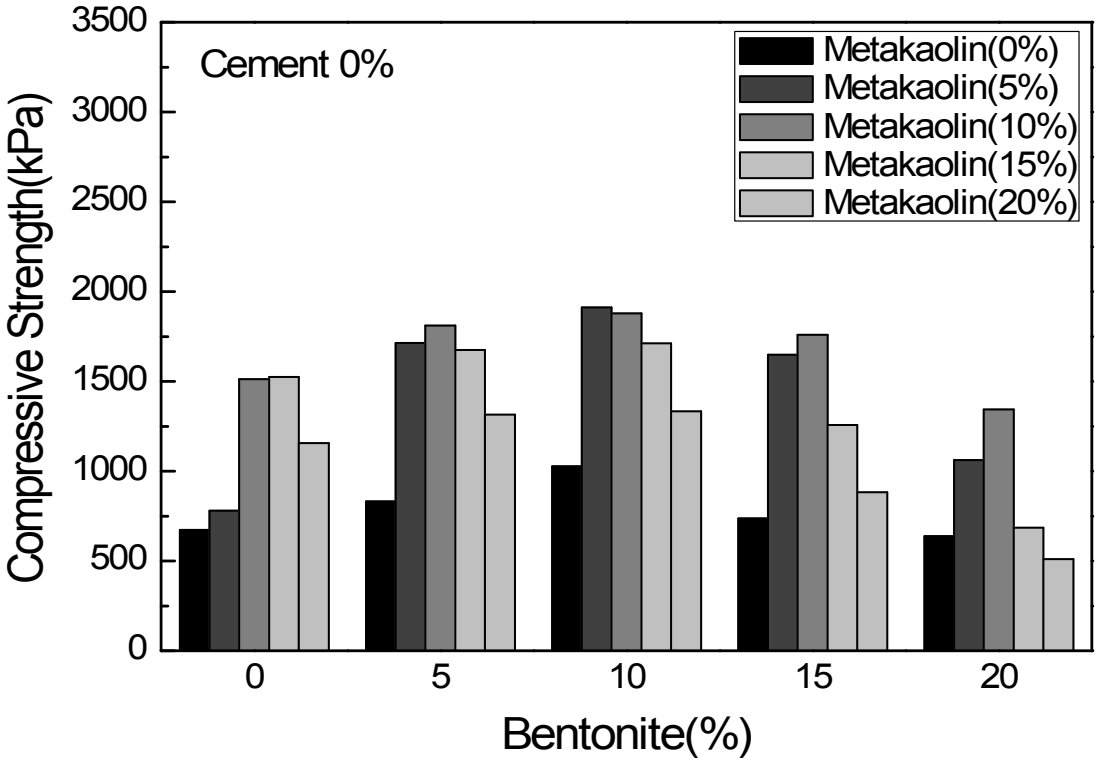
<그림 34> 재령 3일



<그림 35> 재령 7일

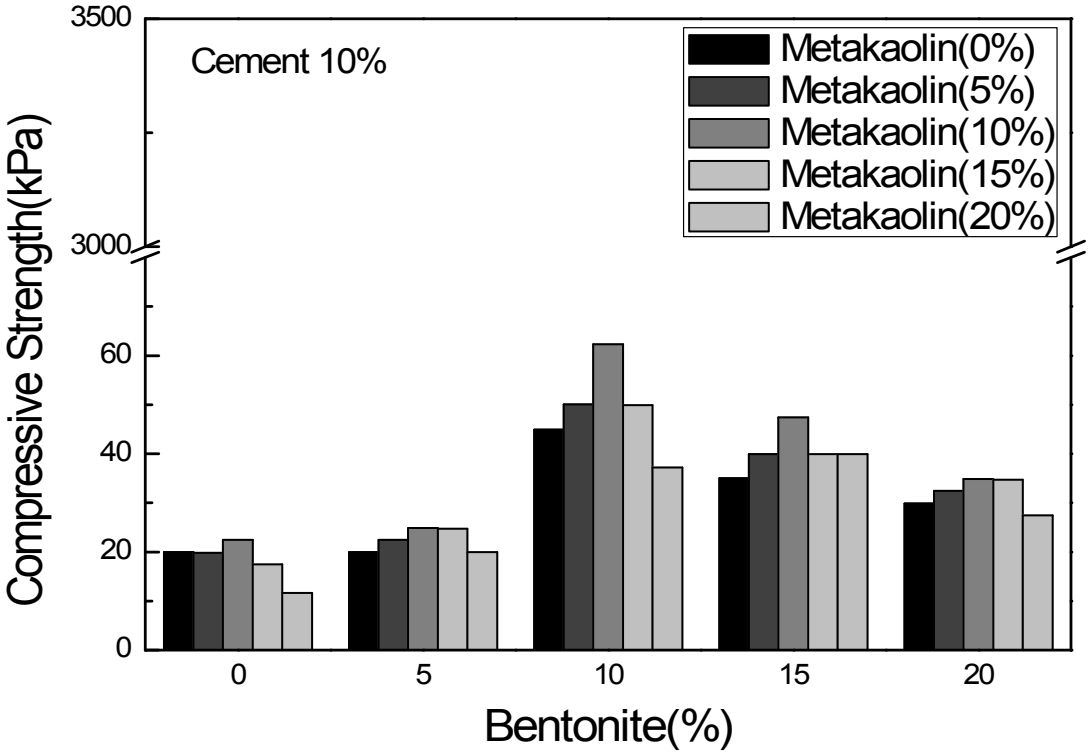


<그림 36> 재령 28일

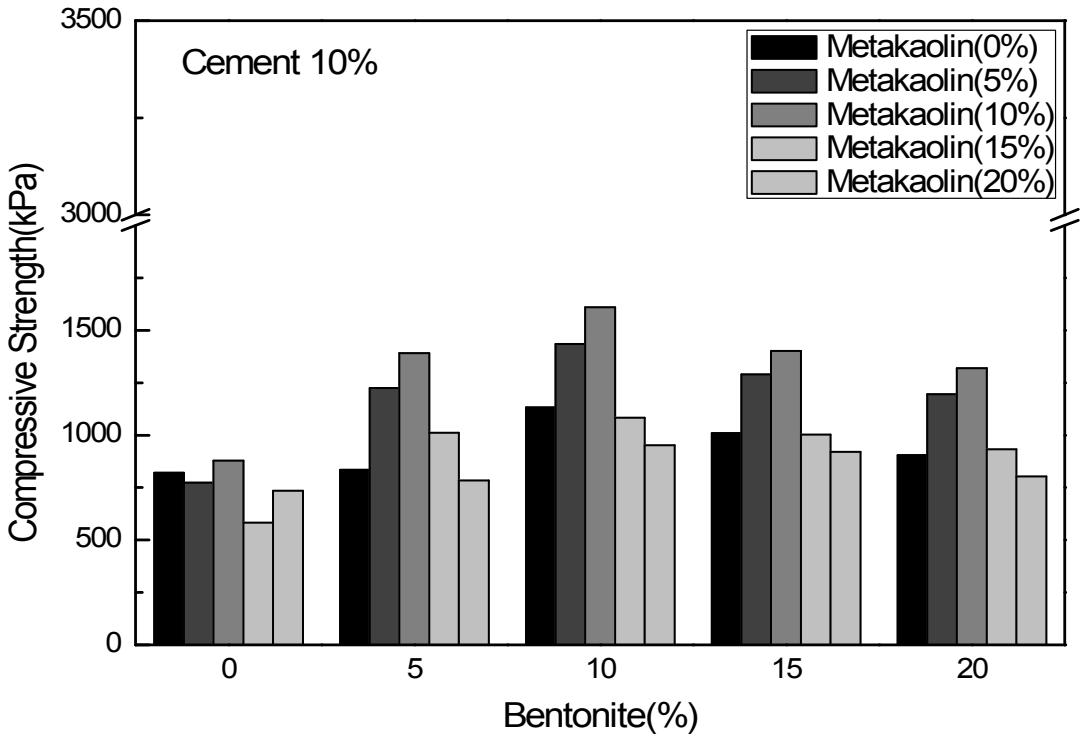


<그림 37> 재령 91일

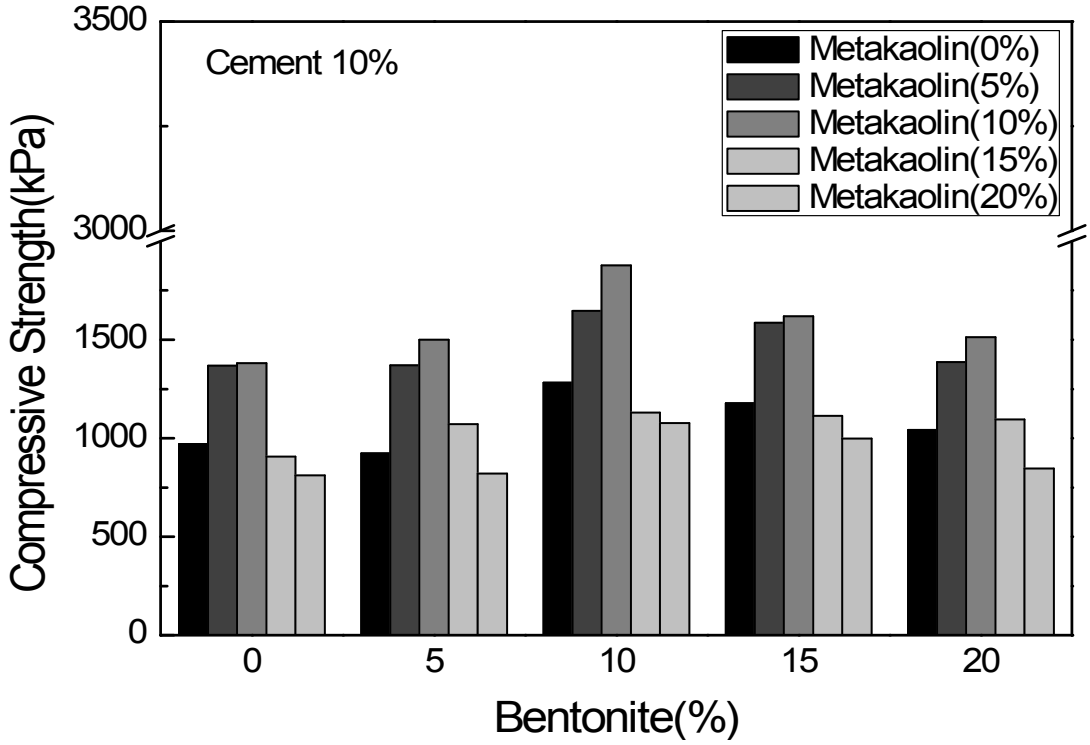
라. 벤토나이트-시멘트-메타카올린 혼합토



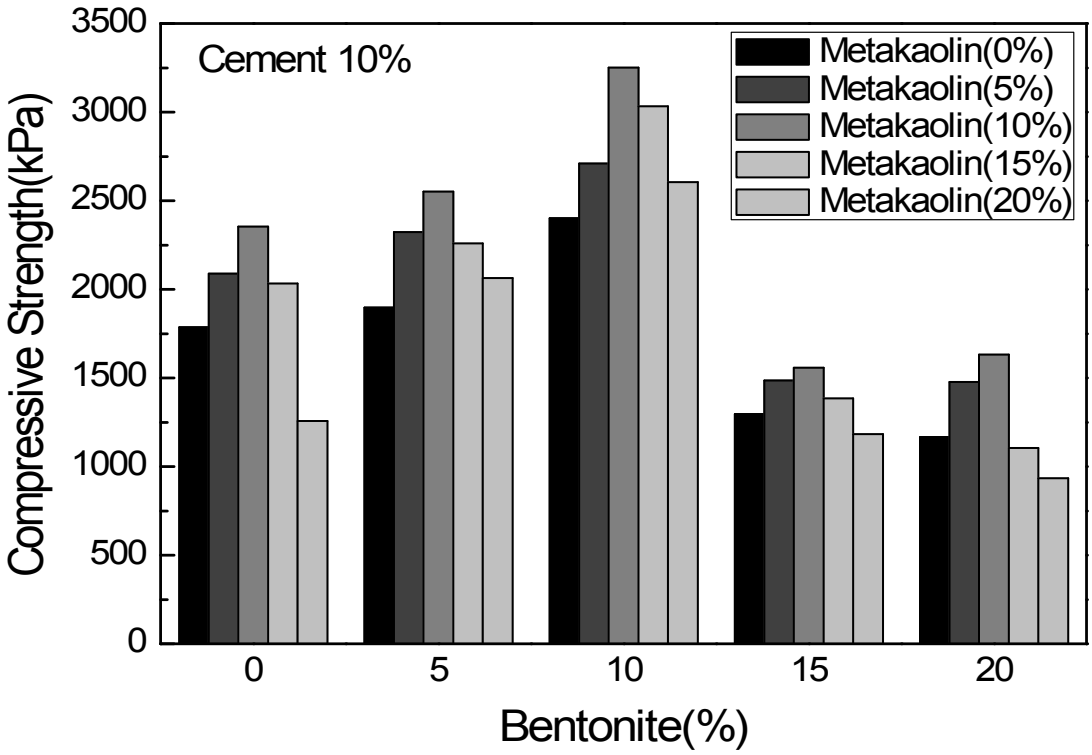
<그림 38> 재령 0일



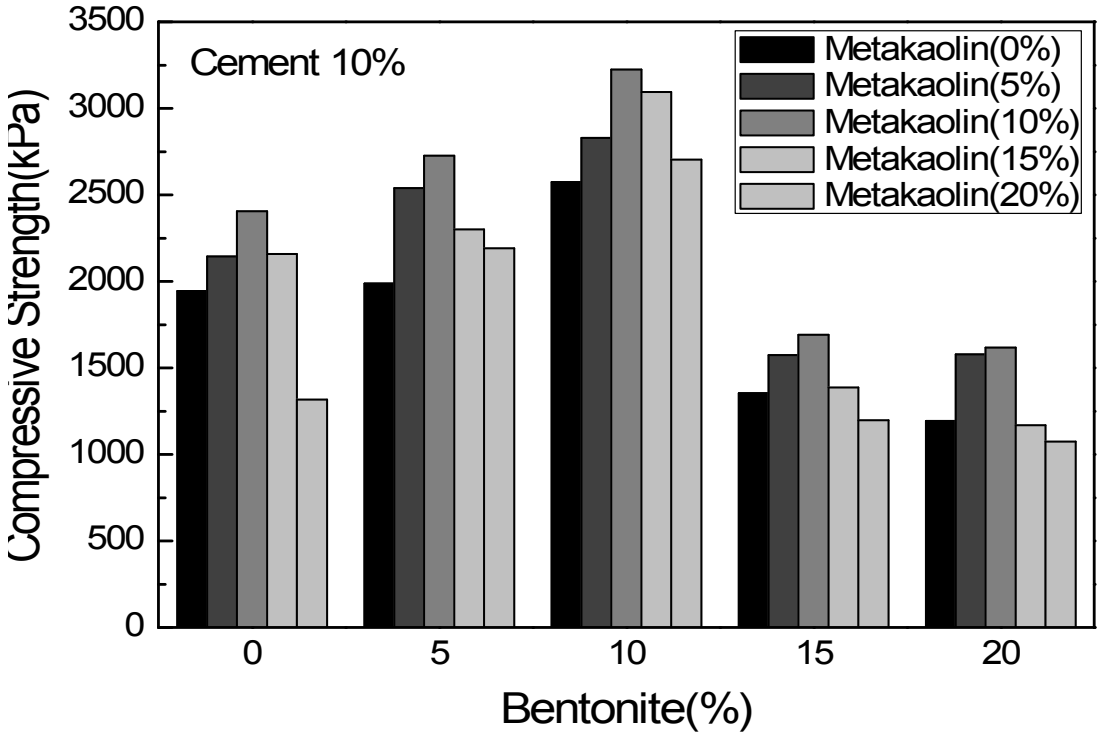
<그림 39> 재령 3일



<그림 40> 재령 7일



<그림 41> 재령 28일



<그림 42> 재령 91일

메타카올린의 혼입량에 따른 변화는 재령 3일 이후 모든 배합에서 메타카올린 10%를 혼입하였을 때 최대의 강도를 보여 주었다. <그림 38>~<그림 42>에서 살펴보면 메타카올린 첨가로 인한 강도의 증진을 확인할 수 있는데, 특히 재령 28일에서 메타카올린을 첨가하지 않은 혼합비 0%에 비해 혼합비 5, 10, 15, 20%의 강도 증가는 각각 1.13, 1.36, 1.26, 1.09배를 나타내었다. 이것은 메타카올린과 시멘트가 서로 반응하여 포졸란 반응이 활발히 일어난 결과로 보여진다.

벤토나이트-시멘트-메타카올린 혼합토에서 메타카올린의 첨가로 인한 강도의 증진이 크게 일어났는데, 메타카올린이 시멘트에 비하여 CaO가 적고 SiO_2+Al_2O_3가 주성분으로 시멘트 수화생성물인 수산화칼슘과 반응하여 칼슘실리케이트 및 칼슘알루미네이트 수화물을 생성시키는데, 메타카올린의 분말도가 시멘트에 비해 큰 값이므로 시멘트 입자사이를 채워주는 마이크로 필러 효과로 인해 강도가 증진한 것으로 사료된다. 특히 <그림 38>에서 나타난 강도는 <그림 34>의 강도에 비해 2.1~2.56배 큰 값을 기록하였다.

<그림 23>~<그림 42>에서 토목섬유 및 메타카올린 보다 벤토나이트의 함량이 강도에 큰 영향을 주었으며, 시멘트를 첨가함으로써 보다 큰 강도의 증진이 이루어 진 것으로 보인다.

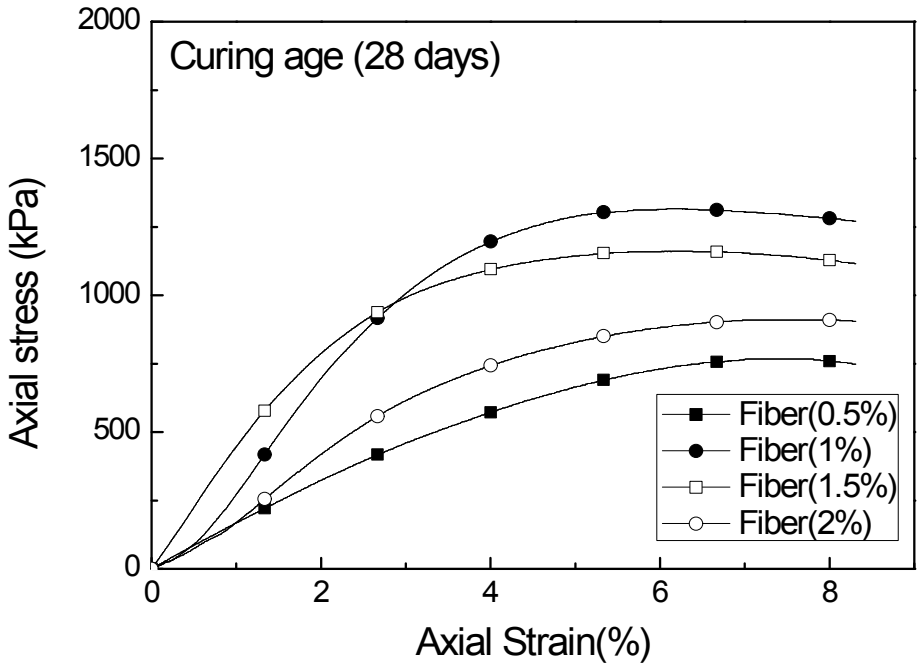
토목섬유 첨가시와 메타카올린 첨가시의 시멘트-벤토나이트 혼합토의 강도를 비

교했을 때 메타카올린 첨가시 강도가 조금 크게 나타나는데, 이는 메타카올린의 분말도가 풍화토 및 벤토나이트에 비해 큰 값이므로 혼합토의 입자사이를 밀실하게 하여 토목섬유 첨가시에 비해 강도가 크게 나타난 것으로 보인다.

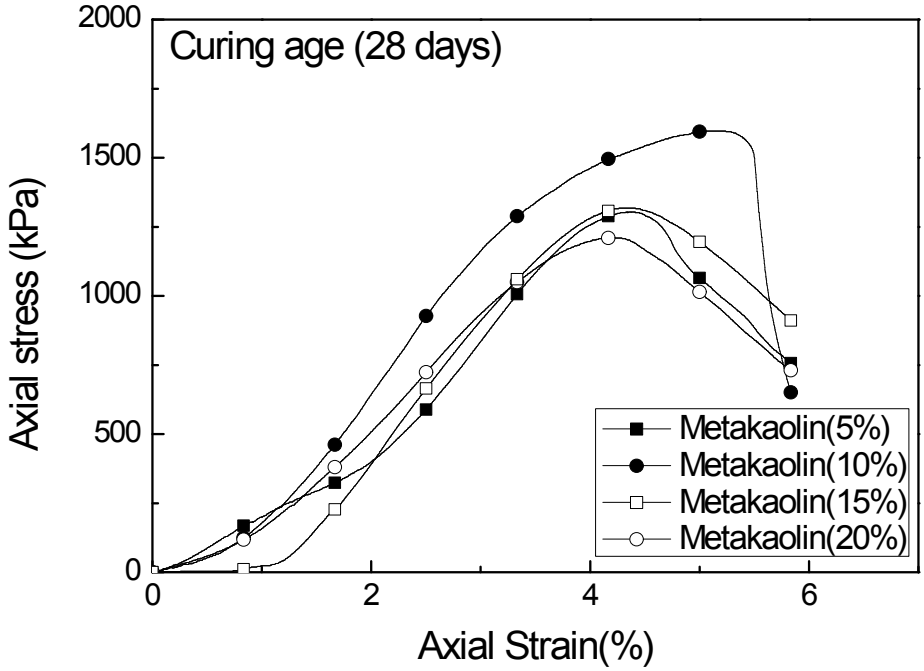
마. 파괴특성

<그림 43>은 토목섬유 첨가시 시멘트-벤토나이트 혼합토의 강도특성을 나타내며, 토목섬유 보강으로 인해 공시체의 연성이 증가하여 최대강도 이후의 거동특성이 취성적인 파괴거동을 감소시키며 연성파괴 양상을 보였고, 파괴점 또한 명확히 나타나지 않았다.

<그림 44>는 메타카올린 첨가시 시멘트-벤토나이트 혼합토의 메타카올린 혼입율에 따른 강도특성을 보여주며, 메타카올린 혼합시 강도증진 및 파괴점은 토목섬유 첨가시에 비해 높으며, 뚜렷이 나타났다. <그림 44>에서 보는 바와 같이 메타카올린 첨가 시멘트-벤토나이트 혼합토는 최대 일축압축 강도를 넘었을 때 취성파괴 경향을 보였다.



<그림 43> 시멘트-벤토나이트-섬유 혼합토의 압축강도 특성



<그림 44> 시멘트-벤토나이트 메타카올린 혼합토의 압축강도 특성

<그림 45>~<그림 46>은 토목섬유 혼합 시와 메타카올린 혼합 시 시멘트-벤토나이트 혼합토의 파괴 형상을 보여준다. <그림 45>은 섬유의 혼입으로 인하여 미세균열의 수가 많아져 강도의 분산이 나타났고 파단면 또한 섬유의 혼입으로 인하여 공시체 내부에서 변형 및 압축강도 등에 대한 개선효과가 있는 것으로 판단된다. <그림 46>은 강도에 큰 영향을 미칠 수 있는 균열이 상단부터 하단까지 직선형으로 발생하면서 파괴되었으며, 이는 그림 68의 취성파괴 결과와도 직접적으로 관련된다.

<그림 43>~<그림 46>에서 보는 바와 같이 토목섬유 보강으로 인해 최대 일축압축 강도에서의 변형률이 증가하였으며, 단섬유가 파괴과정에서 변형 및 압축강도의 증가에 기여하는 효과가 있음을 알 수 있다. 또한, 상·하단 직선형의 일정 크기 이상의 종방향 균열은 취성파괴와 관련이 있는 것으로 판단된다.

<그림 45> 시멘트-벤토나이트-섬유 혼합토의 파괴양상

<그림 46> 시멘트-벤토나이트-메타카올린 혼합토의 파괴양상

2. 인장시험 결과

가. 벤토나이트-섬유 혼합토

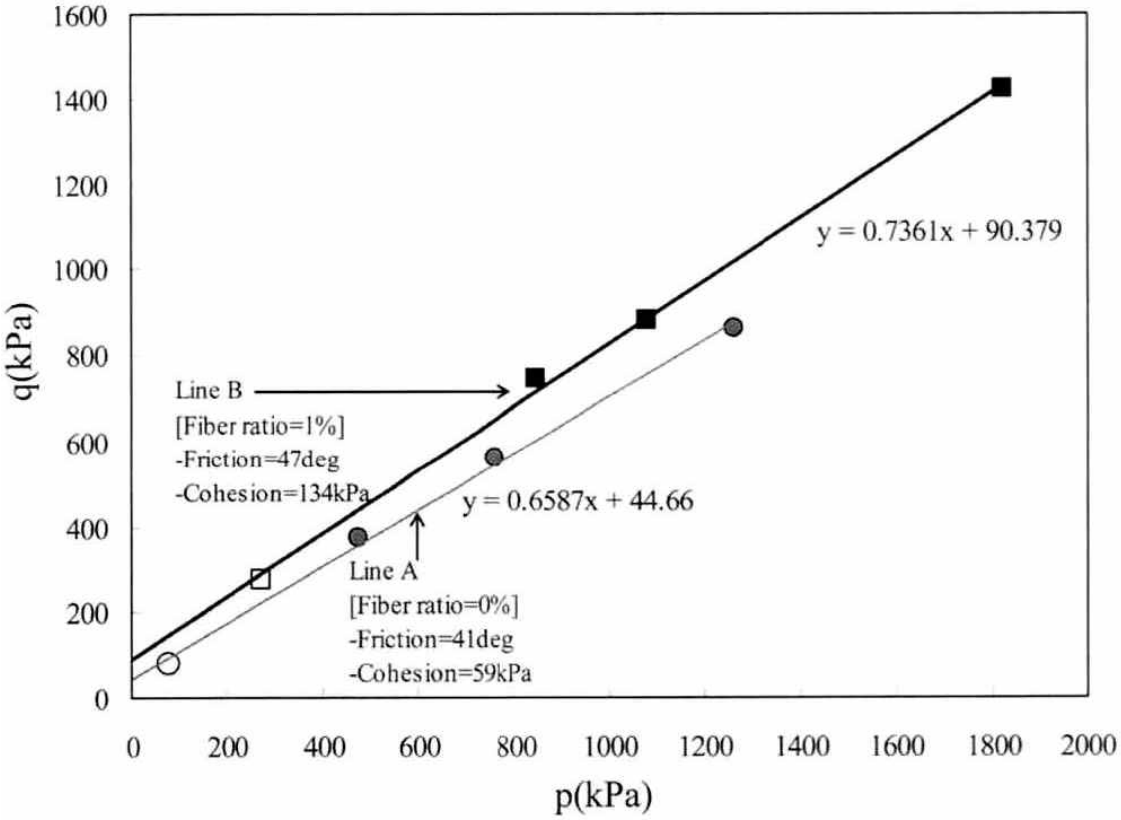
시멘트 및 벤토나이트, 토목섬유의 혼합률에 따른 인장강도의 영향을 분석하기 위하여 시멘트-벤토나이트 혼합토의 공시체를 제작한 후 인장시험을 실시하였다. <그림 48>~<그림 52>은 섬유 혼입에 따른 혼합토의 재령 0, 3, 7, 28일 및 91일 강도를 나타내

며, <그림 53>~<그림 57>은 섬유 혼입에 따른 시멘트-벤토나이트 혼합토의 재령 0, 3, 7, 28일 및 91일 강도를 나타낸다.

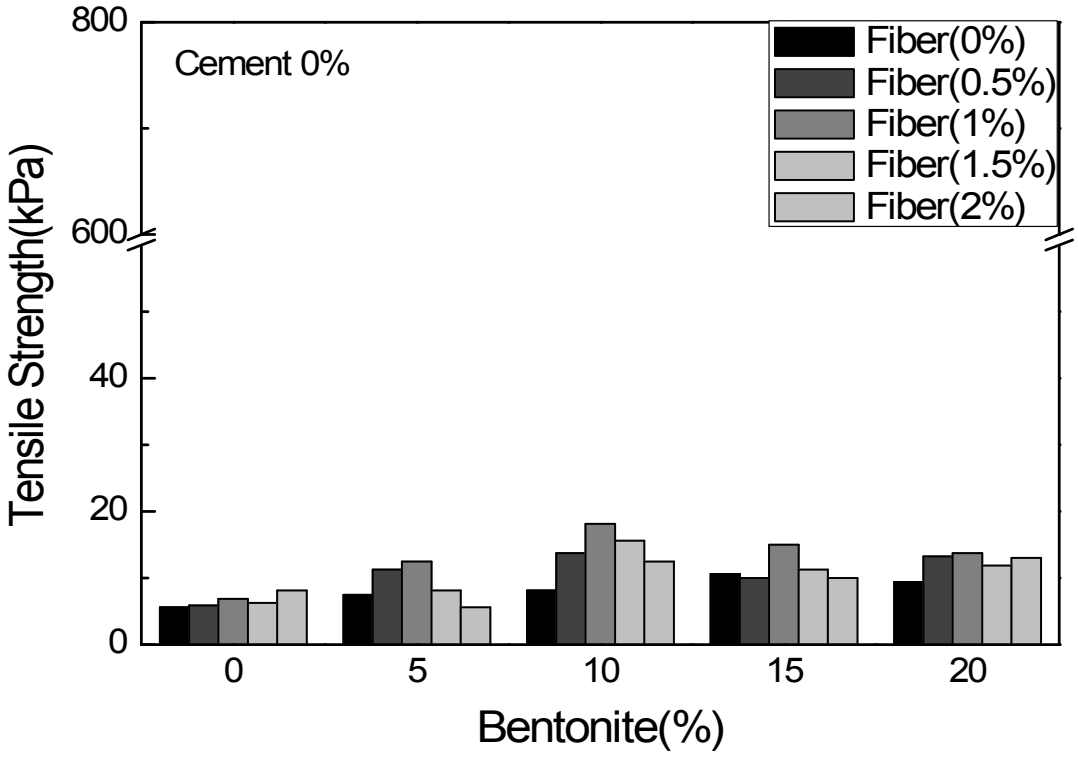
시멘트가 혼합되지 않은 경우 3일강도 대비 7일 및 28일 강도는 145% 및 330%로 인장강도가 증가하였다. 또한 동일한 벤토나이트 비를 가진 공시체에서 섬유를 혼합하지 않은 경우와 1%를 혼합한 경우의 인장강도를 비교한 결과 섬유 혼합시 3, 7일 및 28일의 강도가 120%, 159% 및 211%의 증가를 기록하였다.

Gray와 Ohashi(1983), Hausmann(1976), Scholosser와 Long(1974) 그리고 Yang(1972)과 같은 몇몇 연구자가 <그림 47>와 같은 섬유로 인한 보강효과를 이론적으로 설명하고자 하였다. Iogold(1982)는 이와 같은 이론을 잘 정리하여 다음과 같이 크게 세 가지로 설명하였다 a) 마찰각 증가 이론과 b) 점착력 증가 이론은 보강토체 내의 수평응력 감소 효과를 마찰각 및 점착력의 증가로 간주하는 방식이다. Hausmann은 결과적으로 유사한 Sigma모델과 Tau모델을 토대로, Scholosser와 Long는 각각 독자적으로 점착력 이론을 발표하였다. c) 구속응력 증가 이론(Yang, 1972)은 수평방향으로 삽입된 보강재가 받는 인장력이 결국 흙으로 전달되는데 이 힘을 구속응력으로 간주하는 방식이다. 이와 같은 이론의 기초가 된 실험은 사질토로 만든 원형 공시체에 수평방향으로 삽입된 판 형태의 보강재를 사용한 삼축시험이다. 하지만 본 연구는 점착력이 없는 사질토와 다르며, 무작위로 단섬유를 사용하였으므로 위의 이론을 적용하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 앞서 설명된 이론에 의해 도출된 식을 적용하기 보다는, 수평응력이 감소하여 마찰각과 점착력이 증가한다는 기본 이론을 바탕으로 벤토나이트-섬유 혼합토의 강도 증가에 대한 결과를 뒷받침 하고자 한다.

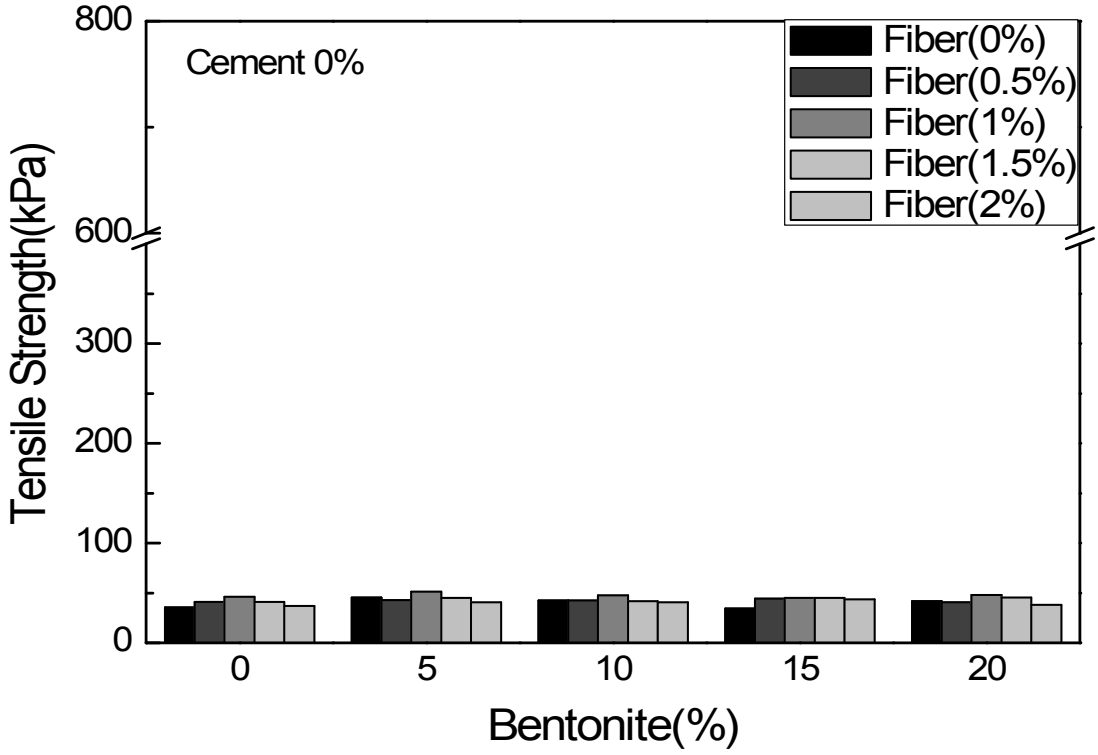
벤토나이트 혼합토에서 벤토나이트 혼입량의 증가로 혼합토 내의 점착력이 증가하였고, 증가한 점착력으로 인하여 혼합토와 섬유와의 점착 및 공극이 밀실하게 되어 마찰응력의 증가로 인해 인장강도가 섬유를 혼입 하였을 시 2배 가까이 증가한 것으로 보인다.



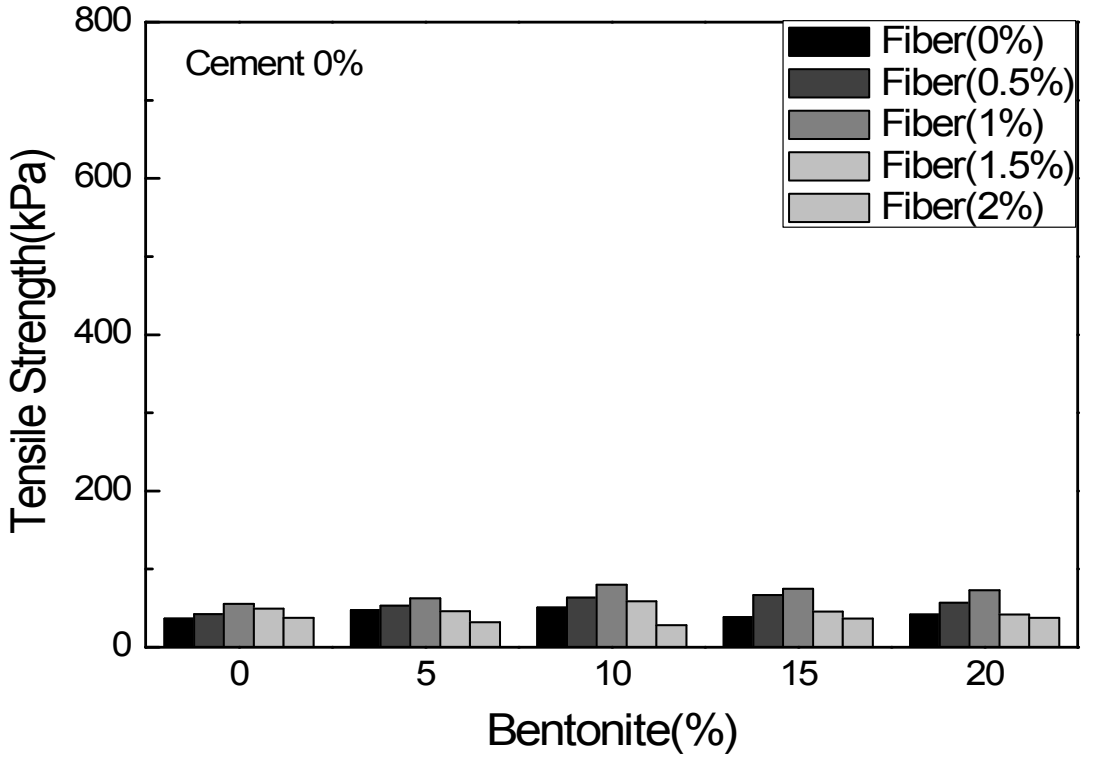
<그림 47> 시멘트 비가 2% 일 때 섬유 보강으로 인한 마찰각 및 점착력 증가



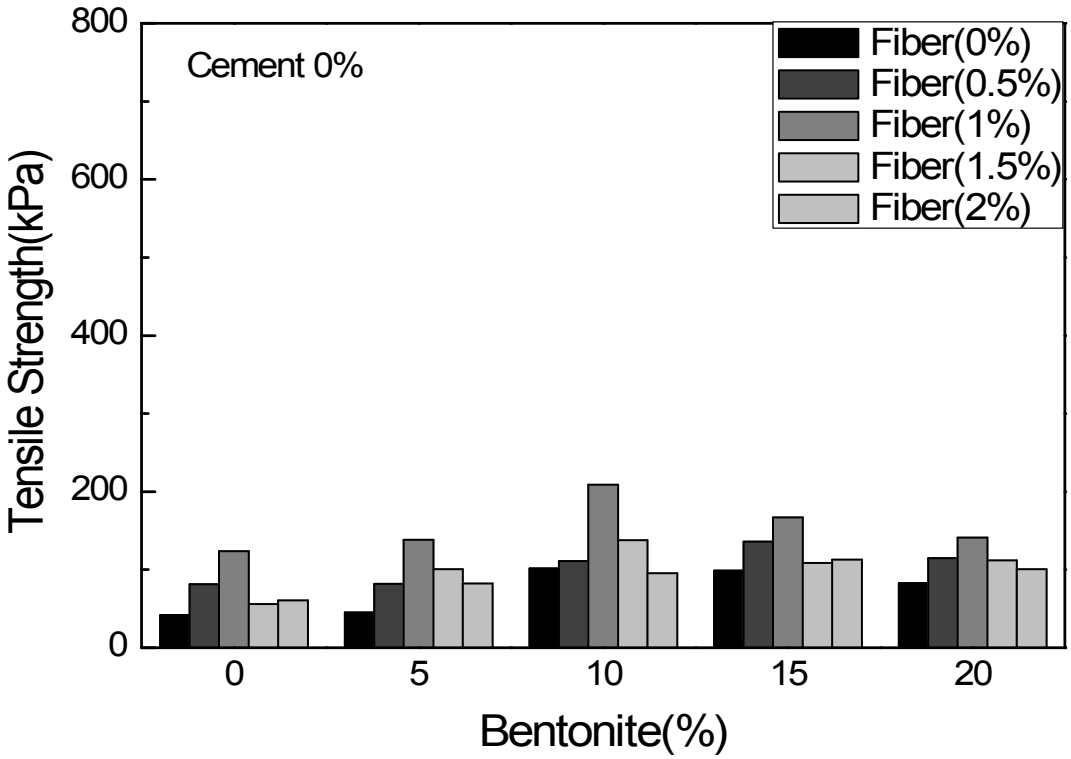
<그림 48> 재령 0일



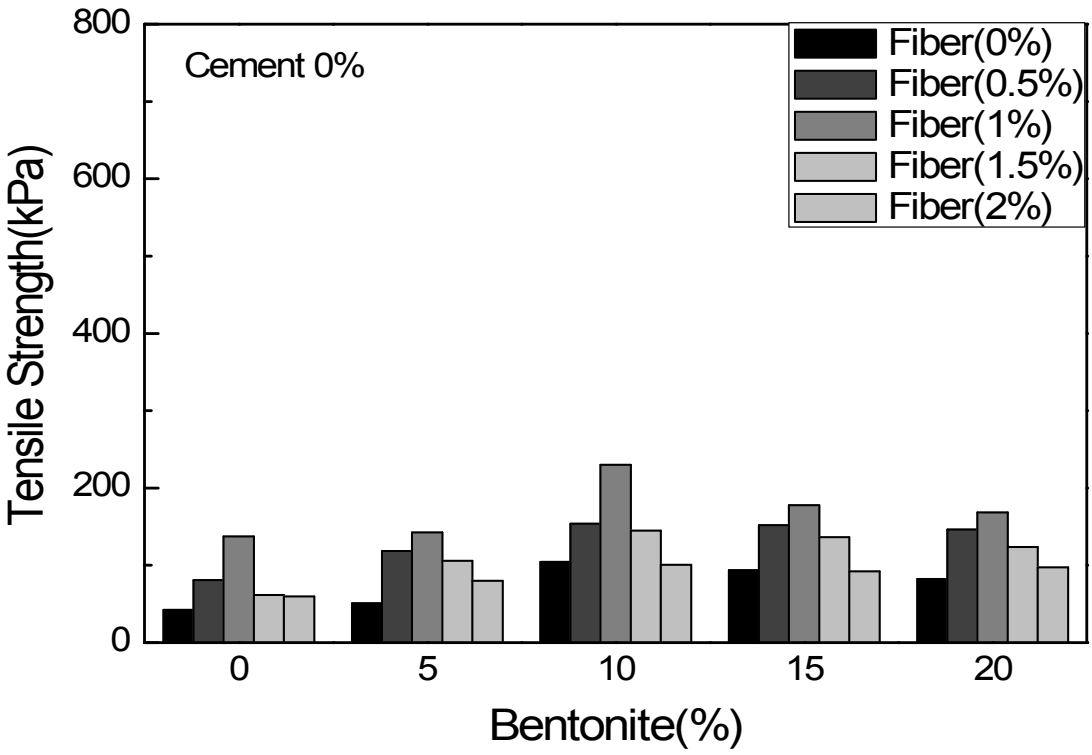
<그림 49> 재령 3일



<그림 50> 재령 7일



<그림 51> 재령 28일

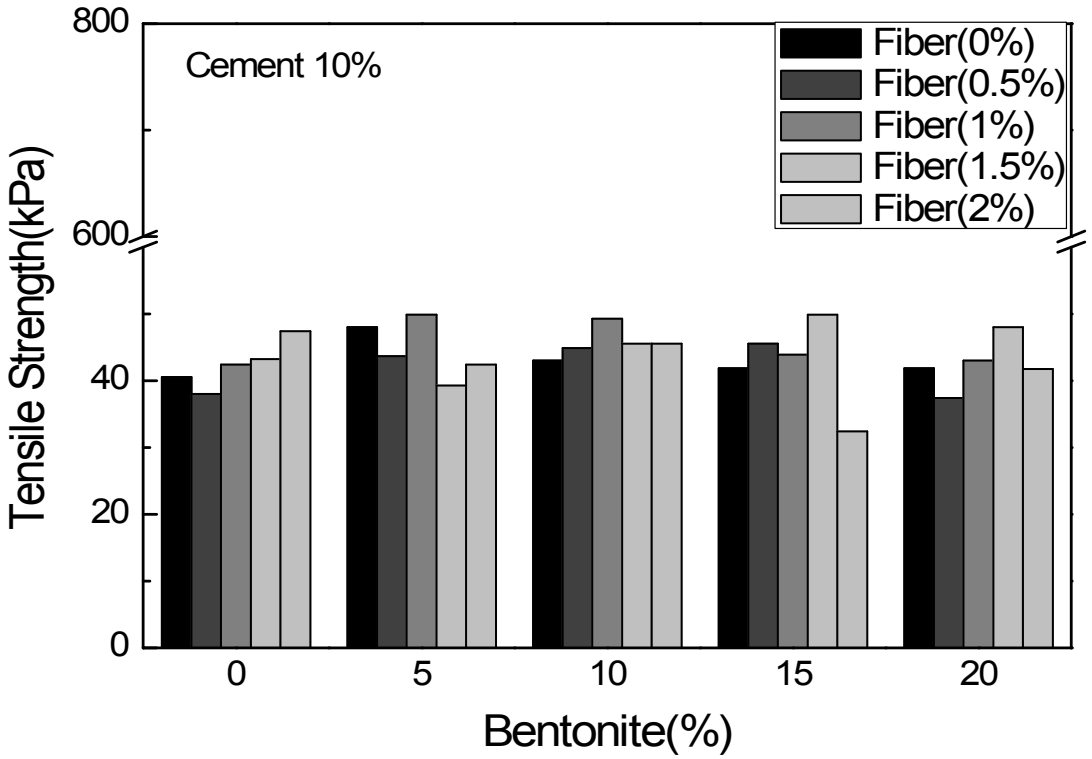


<그림 52> 재령 91일

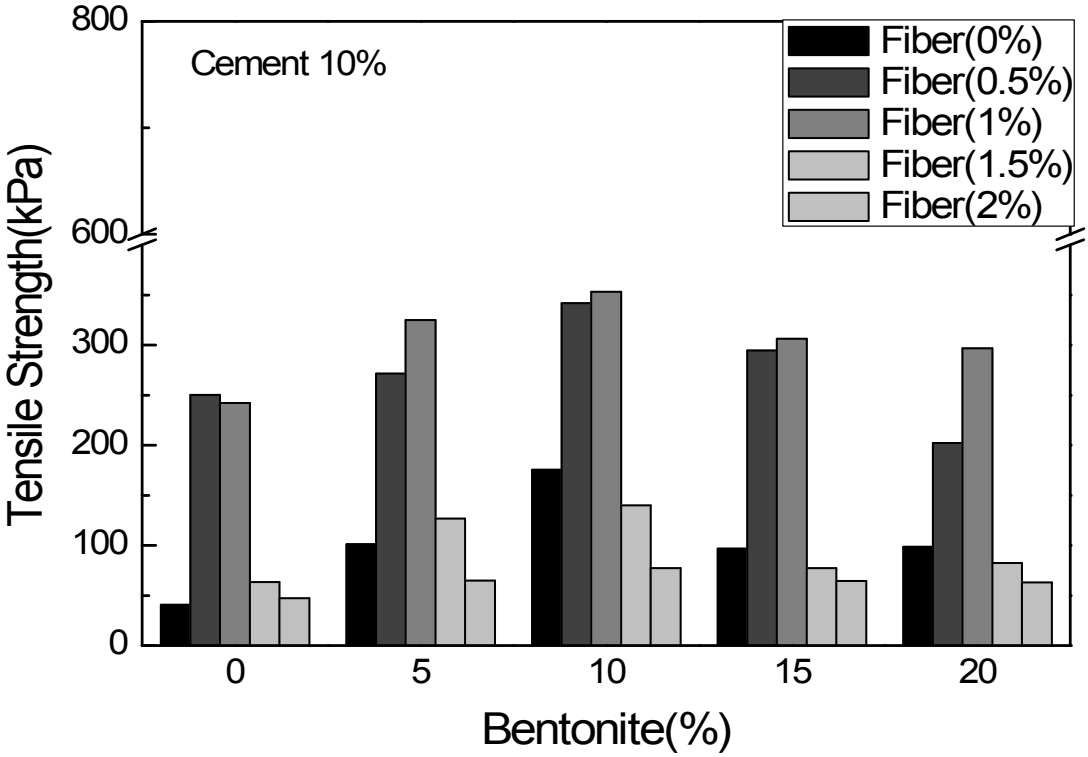
나. 벤토나이트-시멘트-섬유 혼합토

<그림 53>~<그림 57>에서 시멘트가 혼합된 경우 3일 강도 대비 7일 및 28일 강도는 131% 및 140%로 인장강도가 증가하였다. 또한 동일한 벤토나이트 비를 가진 공시체에서 섬유를 혼합하지 않은 경우와 1%를 혼합한 경우의 인장강도를 비교한 결과 3, 7일 및 28일의 강도가 섬유 혼합시 298%, 251% 및 136%의 증가를 하였다. 재령일이 길어질수록 인장강도 증가 비율이 감소하였으나 재령91일 까지 강도를 측정한 결과 강도가 크게 감소하거나 증가하지 않고, 조금씩 지속적으로 증가하였다. 섬유 혼입에 따른 강도 값은 섬유 1%를 혼입하였을 때 최대의 값을 나타내고 있다.

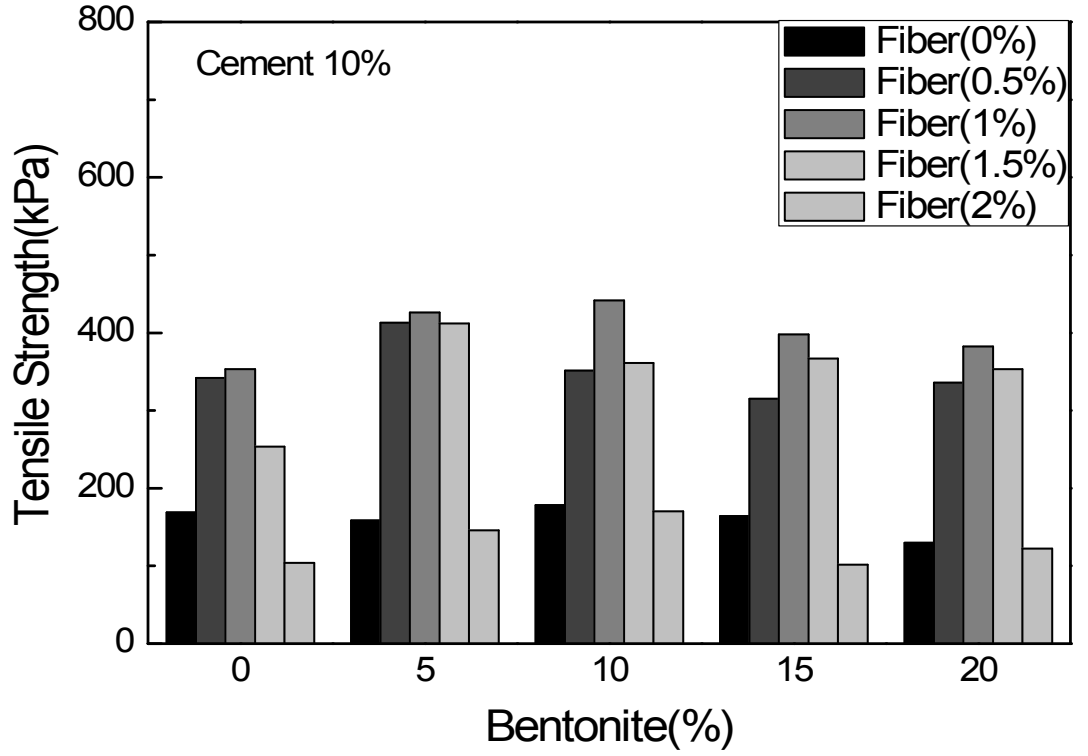
섬유 혼입량 1%이상이 되면 강도가 감소하는데 이는 섬유의 엉킴 현상으로 인한 것으로 보이며 이는 혼합토와 섬유의 최적 상태를 초과함에 따라 다량의 섬유 사이를 메우지 못하고 다량의 공극을 갖은 상태가 되어 이것으로 인해 강도 감소에 영향을 미친 것으로 판단된다.



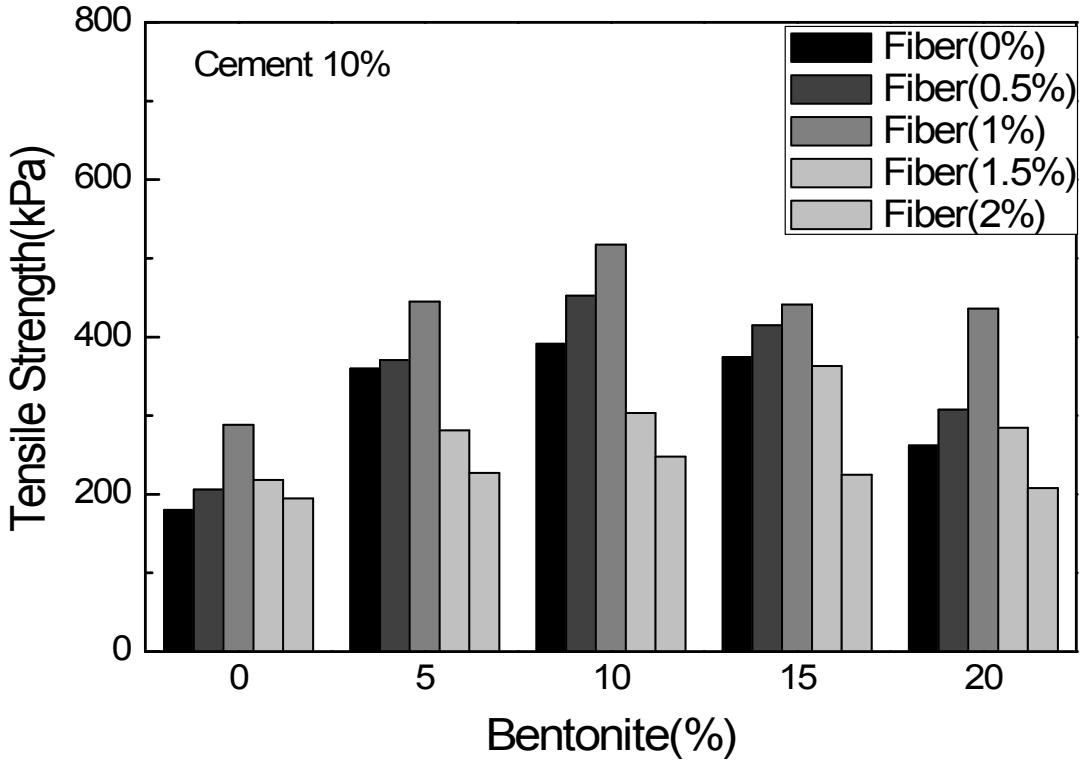
<그림 53> 재령 0일



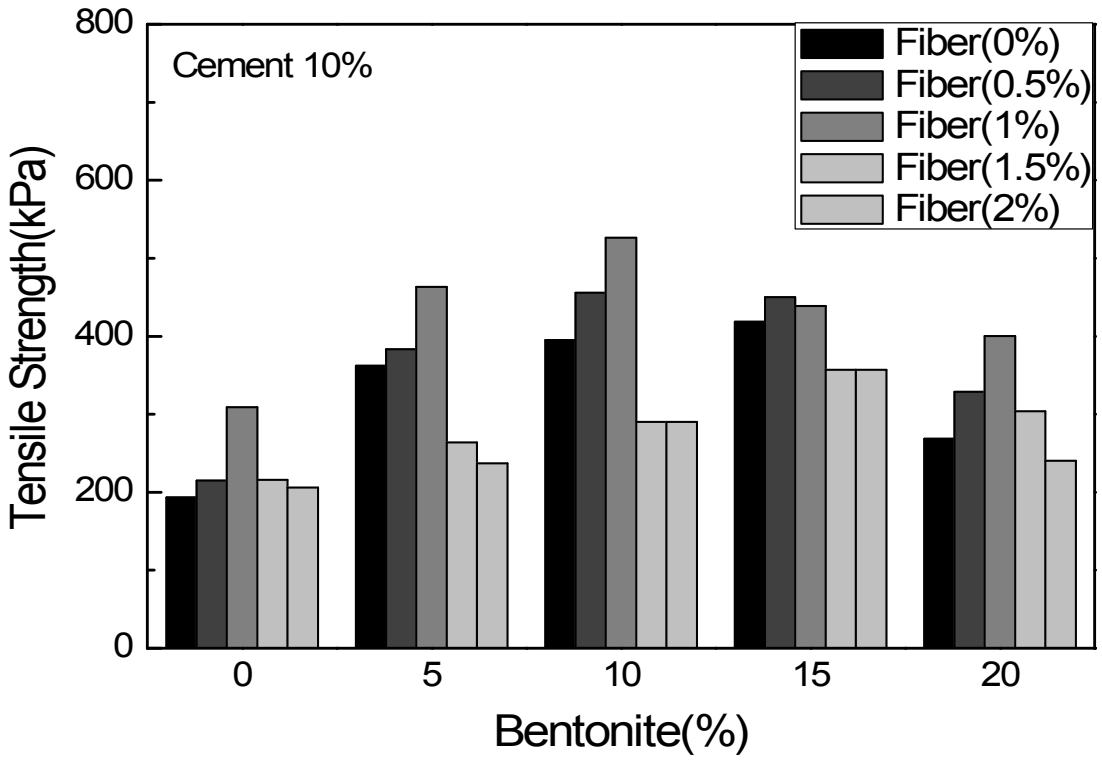
<그림 54> 재령 3일



<그림 55> 재령 7일



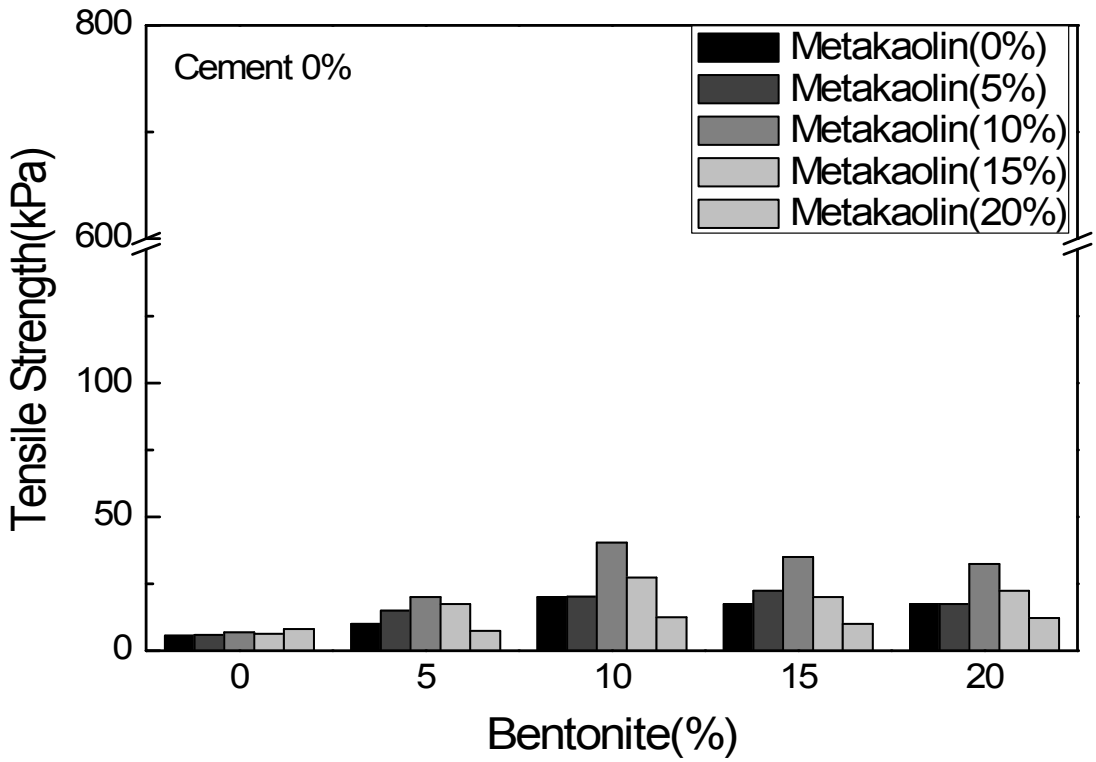
<그림 56> 재령 28일



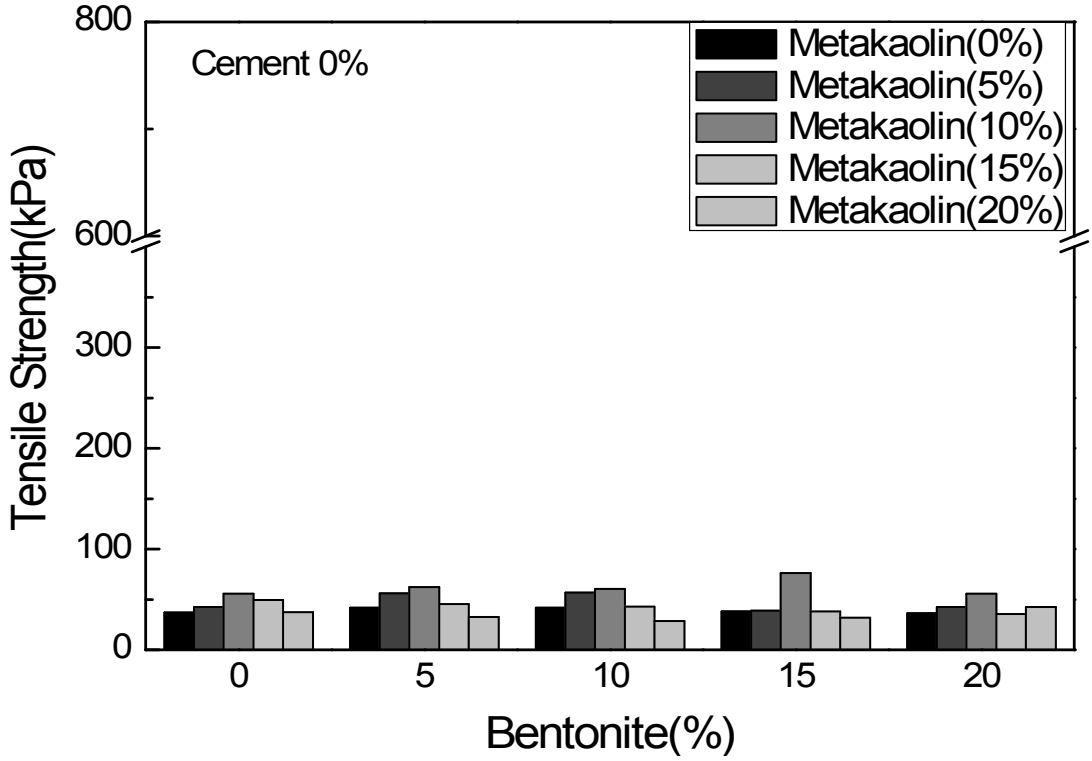
<그림 57> 재령 91일

다. 벤토나이트-메타카올린 혼합토

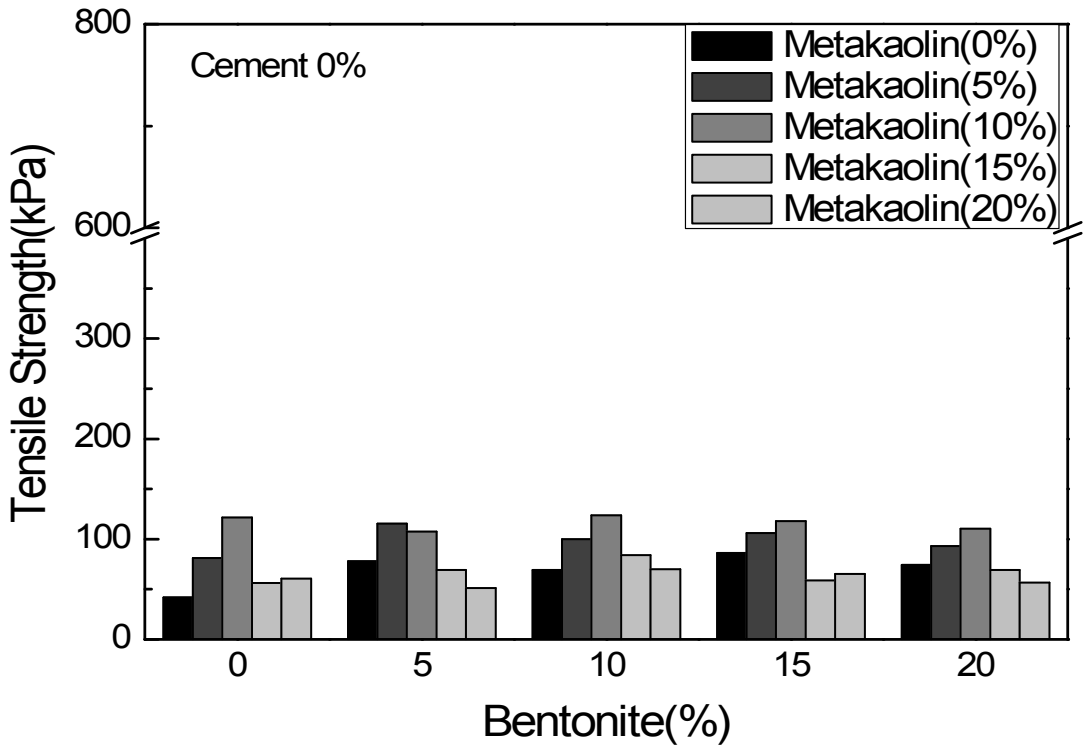
<그림 58>~<그림 62>은 메타카올린의 혼입에 따른 벤토나이트 혼합토 및 벤토나이트 시멘트 혼합토의 0, 3, 7, 28 및 91일 인장강도이다. 메타카올린의 혼입으로 인한 강도는 첨가량 1%까지 지속적으로 증가하나, 그 이상 첨가 하였을 시 강도는 감소하였다. 이것은 메타카올린의 분말도가 다른 재료에 비해 큰 값 이므로 혼합토를 보다 밀실하게 만들어 강도가 증가한 것으로 판단된다. 위의 섬유 혼합토와 비교했을 때 조기에는 시멘트와 메타카올린의 활성반응으로 인해 섬유 혼합토보다 인장강도가 높았으나, 섬유혼합토가 강도를 발현하는 7일 이후부터는 섬유 혼합토가 보다 높은 인장력을 나타내었다.



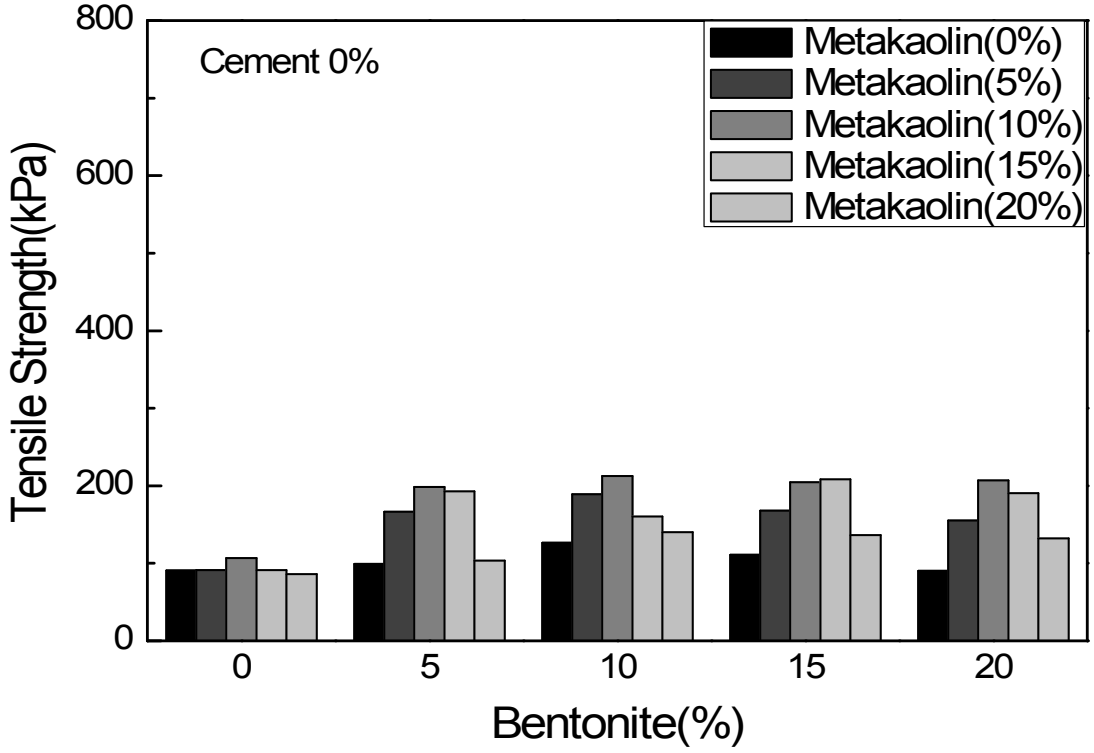
<그림 58> 재령 0일



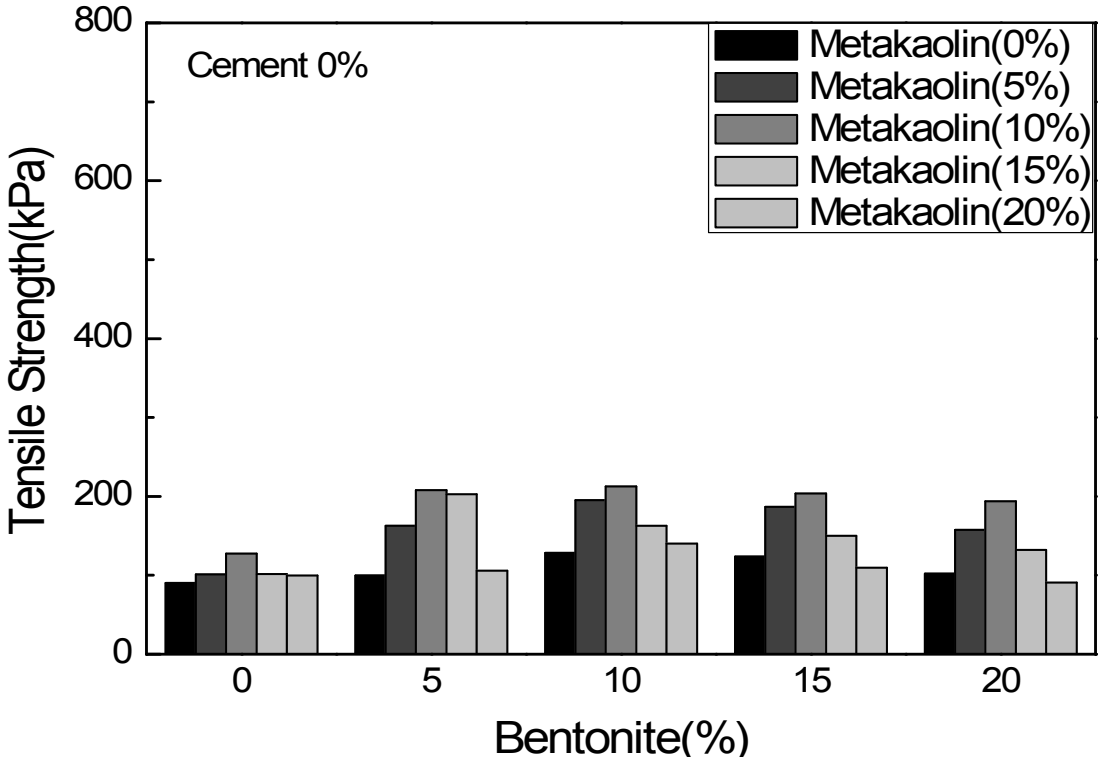
<그림 59> 재령 3일



<그림 60> 재령 7일



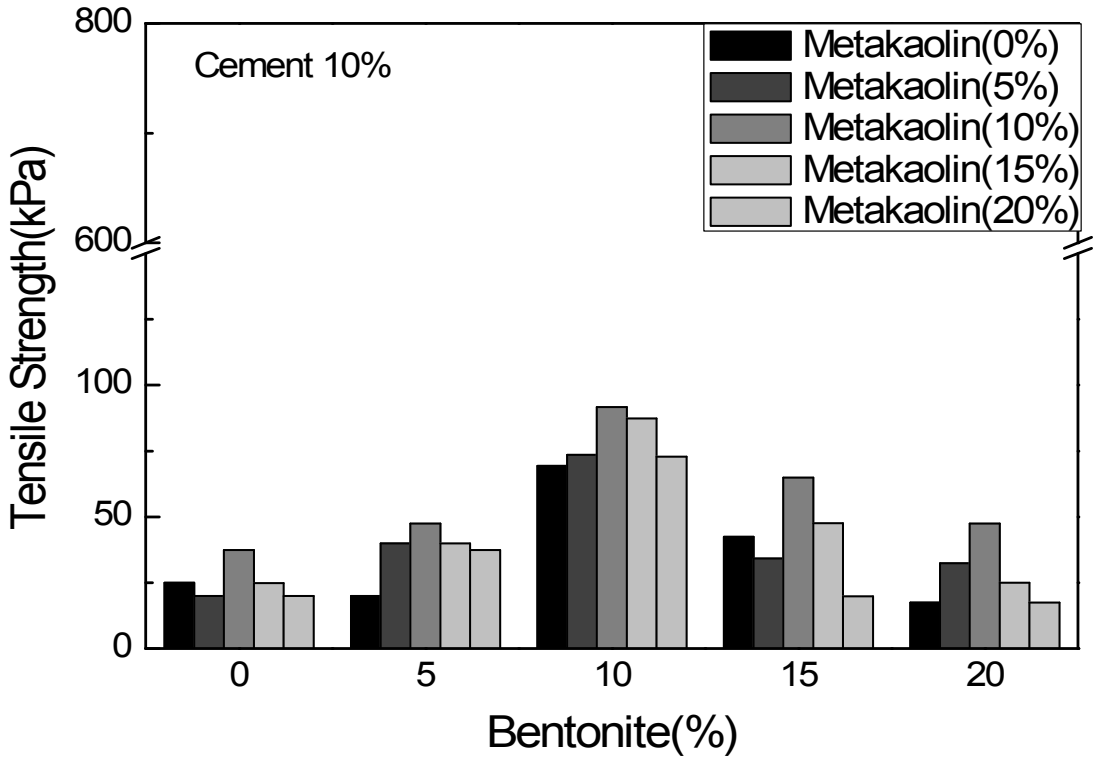
<그림 61> 재령 28일



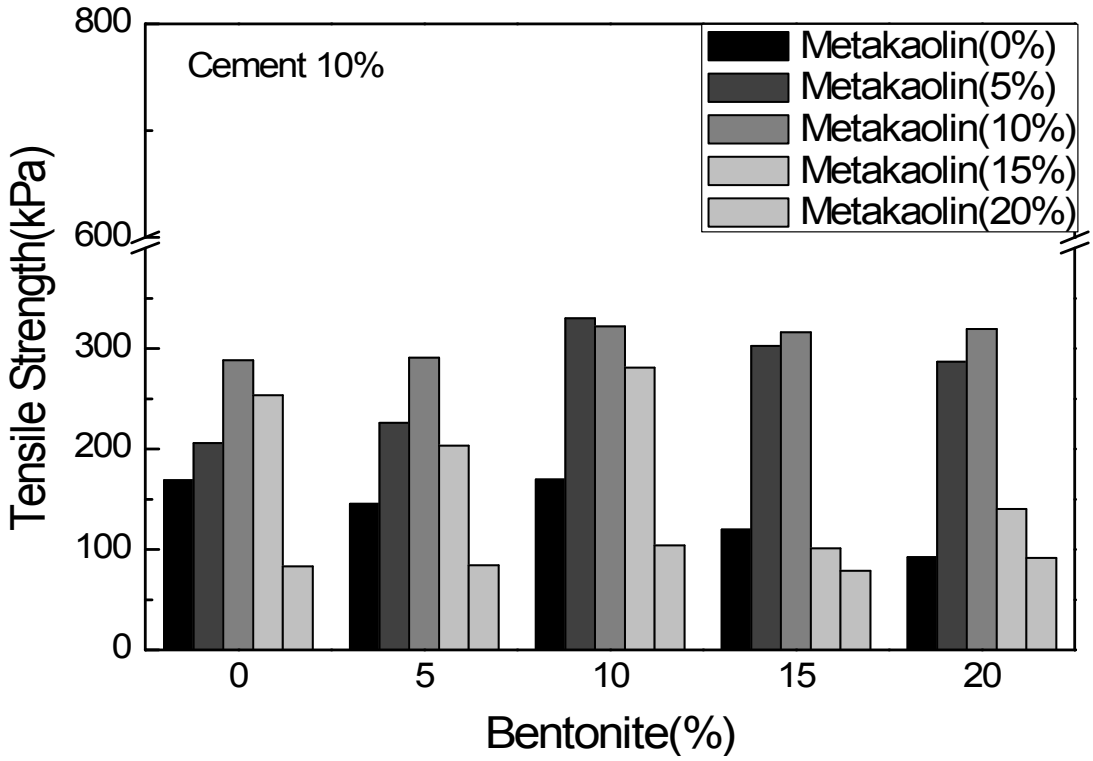
<그림 62> 재령 91일

라. 벤토나이트-시멘트-메타카올린 혼합토

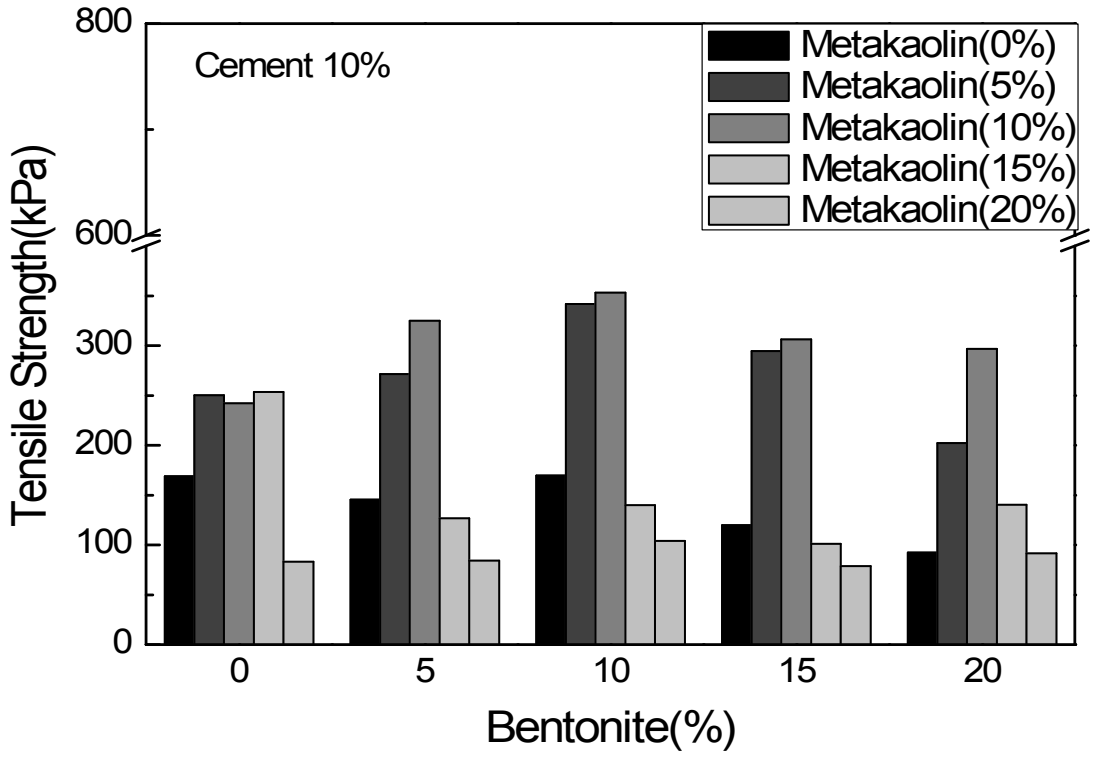
<그림 63>~<그림 67>의 벤토나이트-시멘트-메타카올린 혼합토 또한 압축강도 에서와 마찬가지의 경향을 갖고 있다. 재령 0일에 비해 재령 3일의 강도는 약 3배 이상의 강도증가를 보였다. 인장강도 에서도 시멘트와 메타카올린의 활성반응이 일어나는 3일 이후부터 강도가 증가하였다. 분말도가 상대적으로 작으며 조기강도 발현에 우수한 메타카올린을 활용함으로써 조기에 큰 강도를 발현함으로 혼합토가 충분히 가축사체의 하중과 매몰지내의 측압에 저항할 수 있을 것으로 보인다. 또한 겨울철 동결토에서 매몰지를 조성한 후 해동되는 시기가 되면 인장강도가 발현되므로 충분히 매몰지의 공동현상으로 인한 측면 토압에 저항할 수 있을 것으로 판단된다.



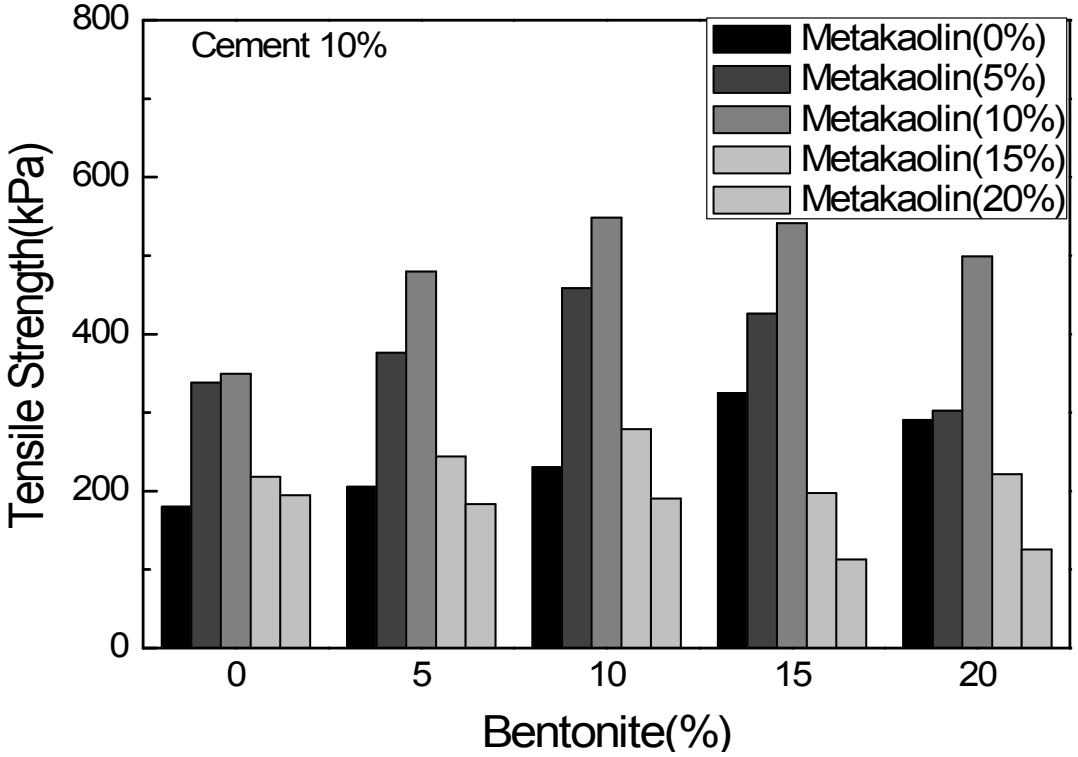
<그림 63> 재령 0일



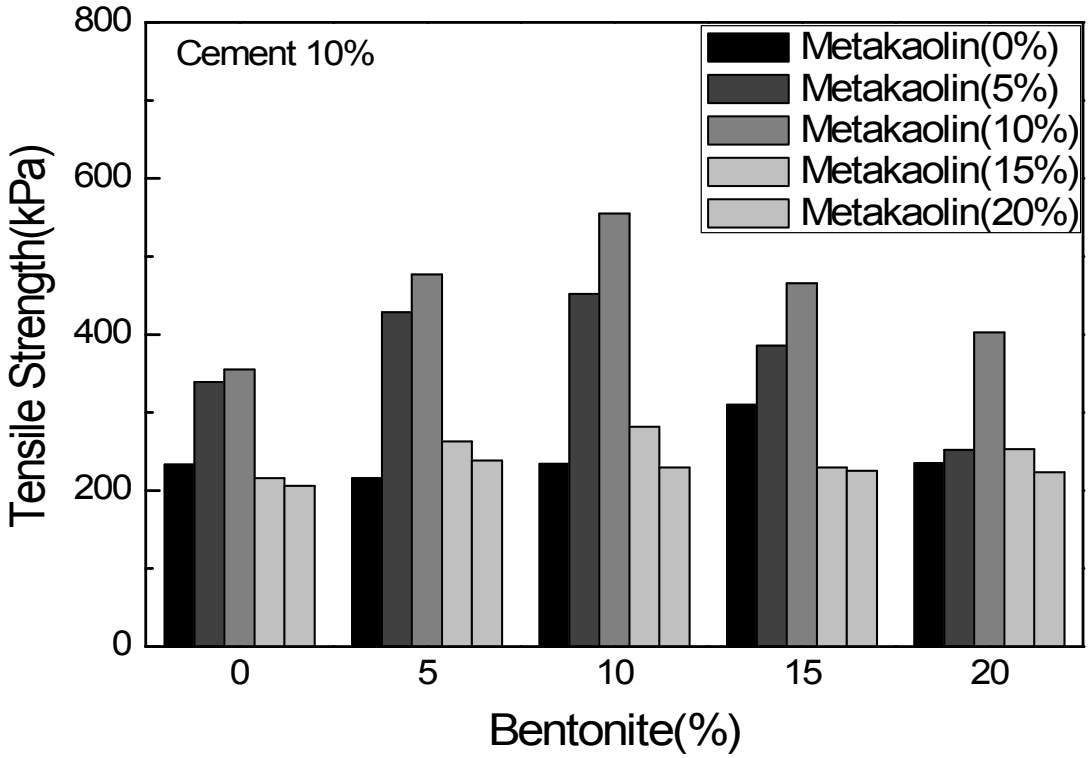
<그림 64> 재령 3일



<그림 65> 재령 7일



<그림 66> 재령 28일



<그림 67> 재령 91일

3. 건조/습윤시험 후 압축강도 특성

건습시험은 습윤 양생실에서 7일간 양생한 후 5시간의 수침과 42시간 동안 71℃의 건조로에서 건조하기를 12주기 반복하였다. <그림 68>은 시료의 수중양생 모습이다. 시멘트가 혼입되지 않은 벤토나이트 혼합토의 경우 수중 양생시 시료의 형상을 유지하지 못할 것으로 판단되어 형상 유지를 위해 폴리에틸렌 비닐 랩을 씌워 성형하였으나, 제 형상을 유지하지 못하고 실험도중 파손되었다<그림 69>.

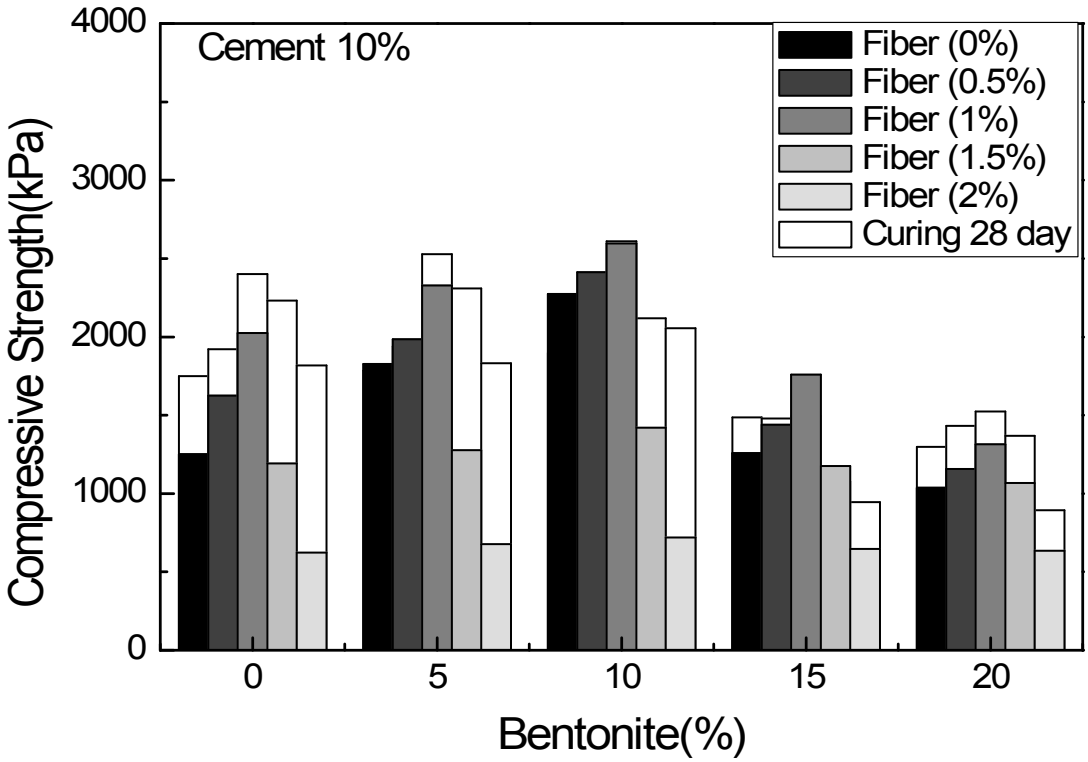
<그림 70>~<그림 71>은 각각 토목섬유 및 메타카올린 첨가 시멘트 벤토나이트 혼합토의 건조습윤시험 후 압축강도 결과를 나타낸 것이다. 본 연구진은 선행연구를 통하여 토목섬유 및 메타카올린 첨가 시멘트 벤토나이트 혼합토의 압축강도 및 투수특성에 대해 고찰한 바 있는데, <그림 70>~<그림 71>에 재령 28일의 압축강도와 건조습윤시험 후 압축강도 특성을 함께 도시하였다. 토목섬유 및 메타카올린 첨가 시멘트 벤토나이트 혼합토의 재령 28일 압축강도는 무색의 막대그래프로 건조습윤시험 후 압축강도는 회색 및 검정색 계열의 막대그래프로 나타내었다.

<그림 70>에서 두 시험 결과를 비교하였을 때 섬유 1%에서는 28일 강도의 84~99%수준, 섬유 2%에서는 34% ~71%수준의 강도 값을 나타내어 섬유 혼합비 1%의 경우가 건조습윤 저항성이 큰 것으로 판단된다.

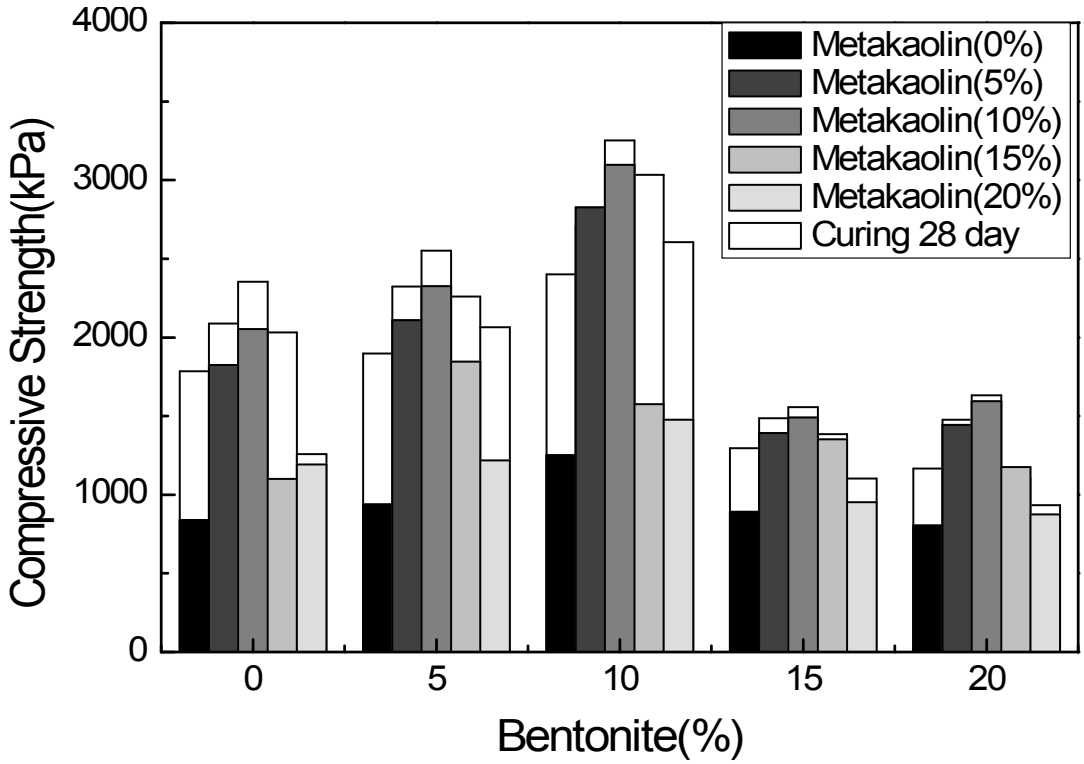
<그림 71>에서 메타카올린 첨가 시멘트 벤토나이트 혼합토의 경우 메타카올린 10%에서 87~97%수준, 20%에서는 56~94%수준의 강도를 나타내었다. 메타카올린 혼합비 10%에서 건조습윤 저항성이 가장 크며, 강도 역시 가장 높은 강도 값을 나타내었는데, 이는 시멘트 벤토나이트 혼합토의 팽창 및 수화반응이 혼합토 내에서 최적의 상태를 이루었고 이로 인하여 물과 접촉 시 가장 영향을 적게 받은 것으로 판단된다.

<그림 68> 시료의 수중양생

〈그림 69〉 벤토나이트 혼합토의 수중양생 후 시료의 모습



〈그림 70〉 벤토나이트-시멘트-섬유 혼합토의 건조습윤 후 강도



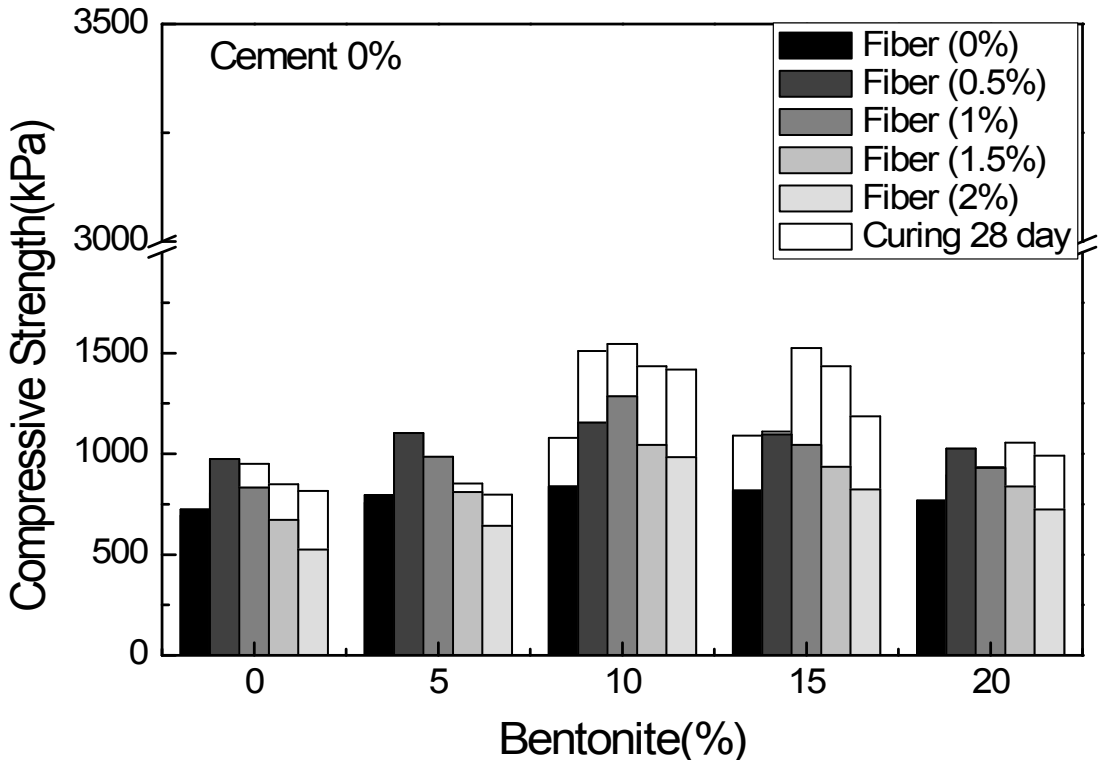
<그림 71> 벤토나이트-시멘트-메타카올린 혼합토의 건조습윤 시험 후 강도

4. 동결융해 시험 결과

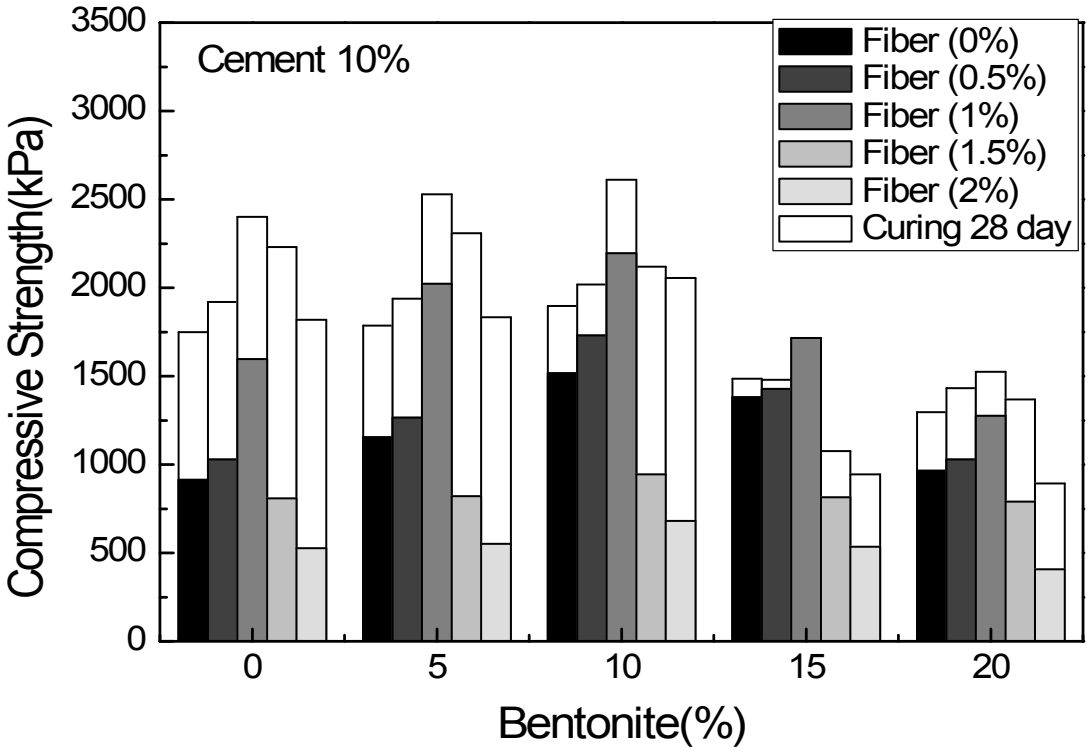
동결융해 시험은 공시체 성형 후 습윤 양생실에서 7일간 양생한 후 -23℃보다 높아지지 않는 동결캐비닛에 24시간의 동결과 온도 21℃, 상대습도 100%인 습윤 양생실에서 24시간동안 융해하기를 12주기 반복하였다. <그림 72>~<그림 75>는 각각 토목섬유 및 메타카올린 첨가 시멘트 벤토나이트 혼합토의 동결융해시험 후 압축강도 결과를 나타낸 것이다. <그림 72>~<그림 75>에 재령 28일의 압축강도와 동결융해시험 후 압축강도 특성을 함께 도시하였다. 토목섬유 및 메타카올린 첨가 시멘트 벤토나이트 혼합토의 재령 28일 압축강도는 무색의 막대그래프로 동결융해시험 후 압축강도는 회색 및 검정색 계열의 막대그래프로 나타내었다.

동결융해를 거친 후 시료의 강도와 재령 28일 후의 강도를 비교하였을 시 28일 강도를 기준으로 섬유 벤토나이트 혼합토는 68～99%, 벤토나이트-시멘트-섬유 혼합토는 57～96%, 벤토나이트 메타카올린 혼합토에서는 69～98%, 벤토나이트-시멘트-메타카올린 혼합토는 21～96%수준의 강도를 나타내었다. 벤토나이트 혼합토가 동결융해에 대하여 4～79%의 강도 손실을 나타내었는데 이는 벤토나이트가 물을 끌어당기는 성질에 의해 수분이 시료 내부에 존재하게 되고 모세공극 속의 물이 온도의 변화에 의해 동결하면 이것은 차수층의 팽창을 야기하게 되며, 이후 융해현상이 반

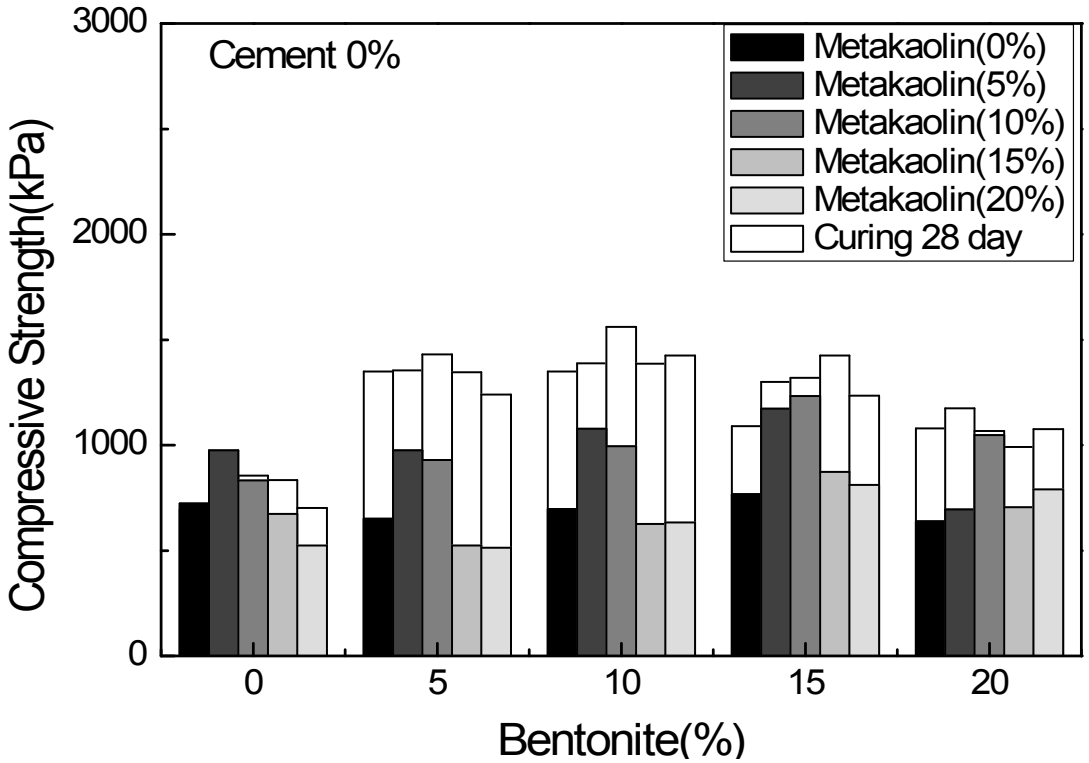
복됨에 따라 마치 콘크리트의 피로파괴와 유사하게 팽창현상이 더욱 증가하기 때문에 동결융해 현상이 진행되면서 강도가 감소한 것으로 판단된다. 그러나 혼합토의 동상현상은 발생하였으나 균열은 나타나지 않았는데, 이는 시료에 사용된 재료가 SiO_2의 성분이 주성분을 이루는 실리카겔 무기물로 구성되어 있어 함수비가 증가하더라도 시료의 소성상태가 유발되어 이완은 되지만 갈라짐은 발생하지 않아 육안으로 식별한다면 동결융해 저항성은 확보한 것으로 판단된다. 다만 메타카올린10% 첨가 시멘트 벤토나이트 혼합토는 동결융해 후 강도 저하가 뚜렷하므로 현장에서 이 배합을 사용할 경우에는 동결융해 대책을 마련하는 것이 좋을 것으로 사료된다.



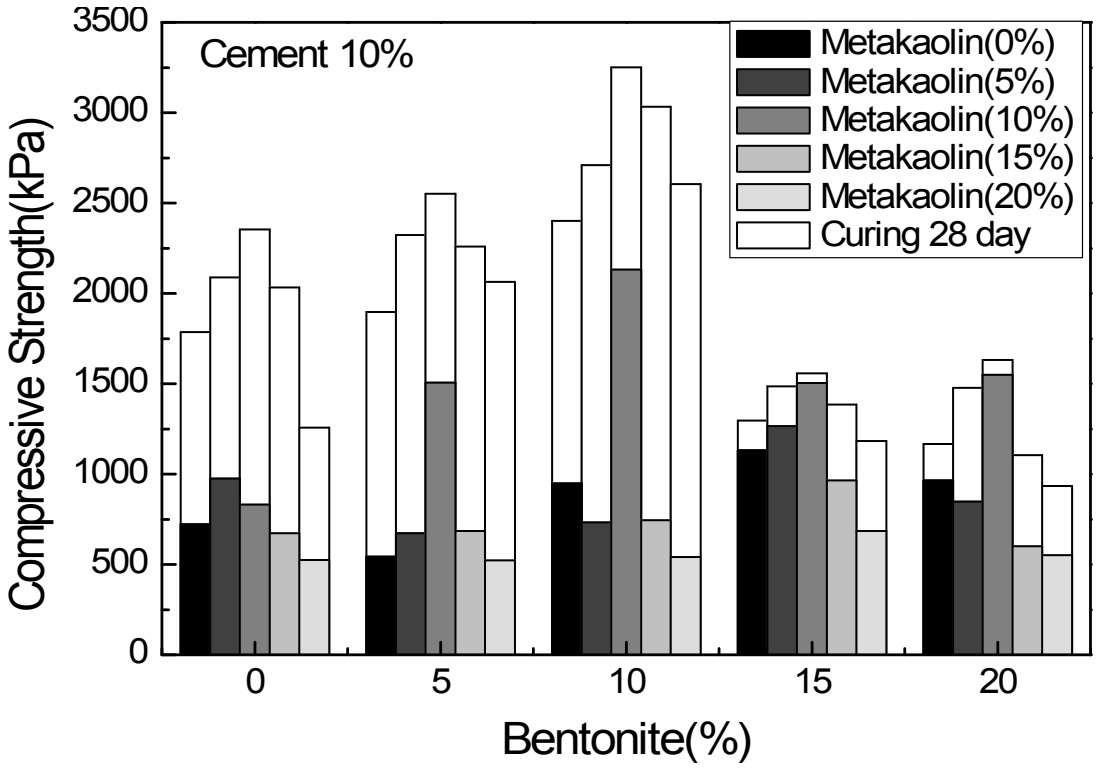
<그림 72> 벤토나이트-섬유 혼합토의 동결융해 후 강도



<그림 73> 벤토나이트-시멘트-섬유 혼합토의 동결융해 후 강도



<그림 74> 벤토나이트-메타카올린 혼합토의 동결융해 후 강도



<그림 75> 벤토나이트-시멘트-메타카올린 혼합토의 동결융해 후 강도

5. 투수특성

일축압축강도 시험 결과를 토대로 최적의 배합비로 판단되는 벤토나이트 10%, 시멘트 10%, 풍화토 80%의 혼합토에 시멘트 중량의 10%에 해당하는 만큼 메타카올린을 첨가하여 메타카올린 첨가 시멘트-벤토나이트 혼합토에 대한 투수시험을 수행하였다. 또한 벤토나이트 10%, 시멘트 10%, 풍화토 80%의 혼합토에 혼합토 총 중량의 1%에 해당하는 토목섬유를 첨가하여 토목섬유 첨가 시멘트-벤토나이트 혼합토에 대한 투수시험을 수행하였다. 표 11은 토목섬유 첨가 시멘트-벤토나이트 혼합토 및 메타카올린 첨가 시멘트-벤토나이트 혼합토의 28일 후의 투수계수를 나타낸 것이다.

국내 폐기물관리법 시행규칙 제 35조 (폐기물 처리시설의 설치기준)에 의하면, 고밀도폴리에틸렌이나 이에 준하는 재질의 토목합성수지 라이너를 사용하는 경우 토목합성수지 라이너 하부에는 점토 및 점토광물 혼합토 등을 다져 투수계수가 1×10^{-7} cm/sec가 되도록 점토 및 벤토나이트 등의 차수재를 두께가 50 cm 이상 (지정폐기물을 매립하는 경우에는 1미터 이상)인 라이너를 설치할 것으로 규정하고 있다.

본 연구에서의 변수위 투수시험 결과에 따르면 메타카올린 첨가 시멘트-벤토나이트 혼합토는 폐기물 관리법에서 지정하는 투수계수를 만족하였으며 특히 KS F 2322 (변수위 투수시험)에 준하여 시험을 수행하였으므로 차수재의 두께가 12.7 cm이며,

이는 폐기물 처리시설의 설치기준인 차수재의 두께 50 cm보다 작아 경제성을 확보할 수 있는 것으로 판단된다. 다만, 적용 가능성 등에 대해서는 현장시험 등 추가적인 연구를 수행한 후 최종적인 판단을 내릴 수 있을 것으로 사료된다.

토목섬유 첨가 시멘트-벤토나이트 혼합토는 시멘트 혼합비 10%일 때에는 폐기물 관리법에서 지정하는 투수계수를 만족하였으며, 시멘트를 혼합하지 않은 경우도 실험오차를 고려할 때 폐기물 처리시설의 설치기준을 거의 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 현장에서 벤토나이트 혼합토를 차수재로 사용할 경우에는 토사 중량의 10% 내외의 시멘트를 적정량을 혼합하여 사용하는 것이 차수성 개선에 도움이 될 것으로 판단된다.

본 투수시험 결과 메타카올린 첨가 시멘트-벤토나이트 혼합토는 메타카올린 첨가 시멘트-벤토나이트 혼합토 보다 투수계수가 낮아 시멘트-벤토나이트 혼합토에 메타카올린을 첨가하는 경우 차수성 증진 효과를 기대할 수 있는 것으로 판단된다.

표 11. 투수특성

Case	Weathered-Bentonite-Cement-Fiber		Weathered-Bentonite-Cement-Metakaolin	
Cement(%)	0	10	0	10
Permeability (cm/sec)	1.14E-7	9.93E-8	7.8E-8	6.32E-8

6. 미세구조 분석

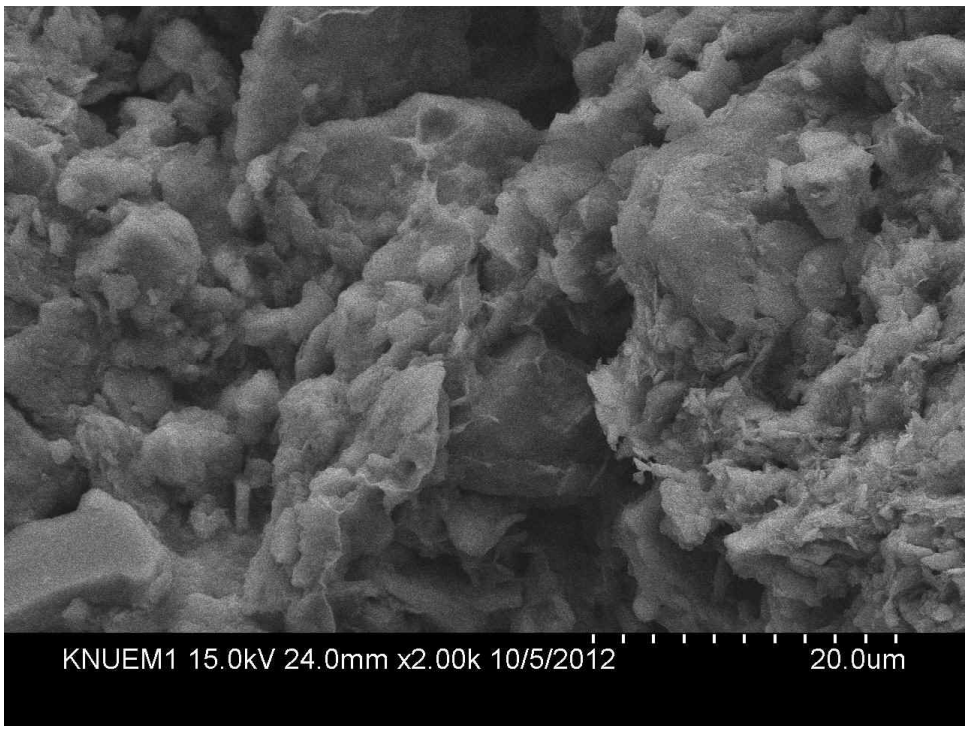
가. 재령일에 따른 최적 배합비 에서의 SEM 분석

본 연구에서는 SEM (S-4300, Hitachi)을 사용하여 시료 표면의 수화생성물의 형태 및 분포를 비교하였으며, 주요 생성물에 대해서는 에너지 분산법(E-Max, Horiba)을 통하여 구성 성분을 확인하였다. 에너지 분산법(Energy Dispersive Spectroscopy)은 액체질소로 냉각된 반도체 검출기로서 특성 X선의 에너지를 분광하는 방법으로 나트륨에서 우라늄에 이르는 모든 원소를 동시에 분광할 수 있는 장점이 있고, 조사 전류가 적어도 되는 장점이 있다.

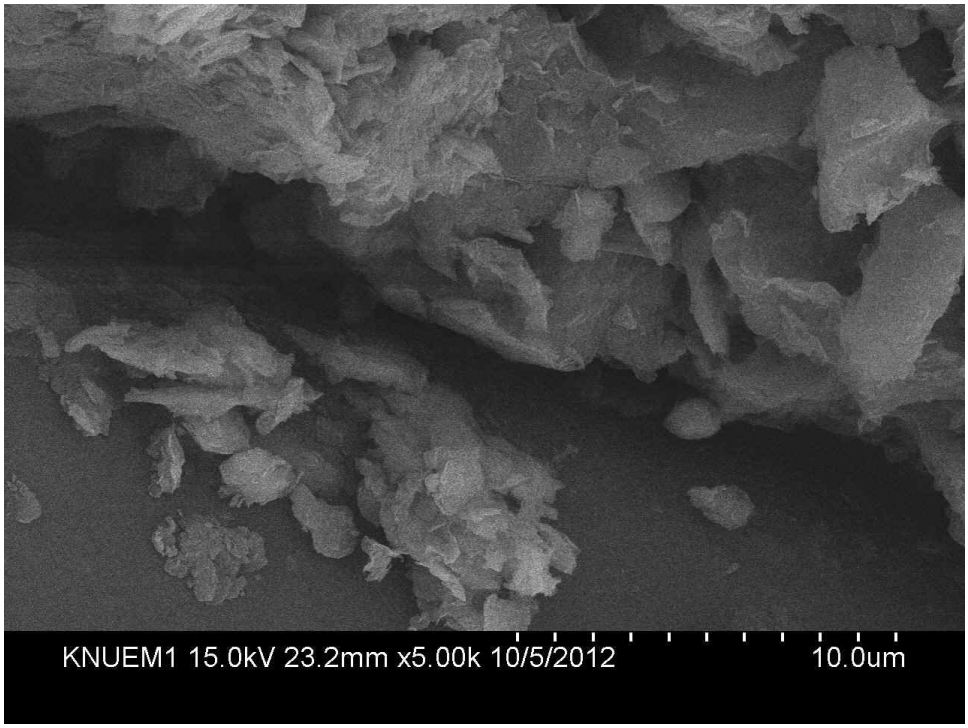
<그림 76>~<그림 87>은 재령일에 따라 3, 7 및 28일에 채취된 시료에 대하여 주사전자현미경에 의한 미세구조를 나타낸다. 시멘트가 혼입되지 않은 <그림 76> 및 <그림 82>의 배합에서는 수화생성물이 거의 나타나지 않지만 <그림 79> 및 <그림 87>에서는 시멘트에 의한 침상의 결합물질인 에트린자이트(ettringite)와 육각판상 모양인 모노설페이트(monosulfate), 섬유상인 C-S-H가 발견된다. 에트린자이트는 미수화 C_3A

와 반응하여 모노설페이트로 변화하기 때문에 에트린자이트와 모노설페이트를 함께 볼 수 있다. 미세구조 분석결과 시멘트 및 메타카올린의 배합에서 수화생성물이 관찰되었으며, 이러한 결과는 강도특성을 설명할 수 있는 인자로서 수화생성물이 일정부분 기여하는 것으로 판단된다.

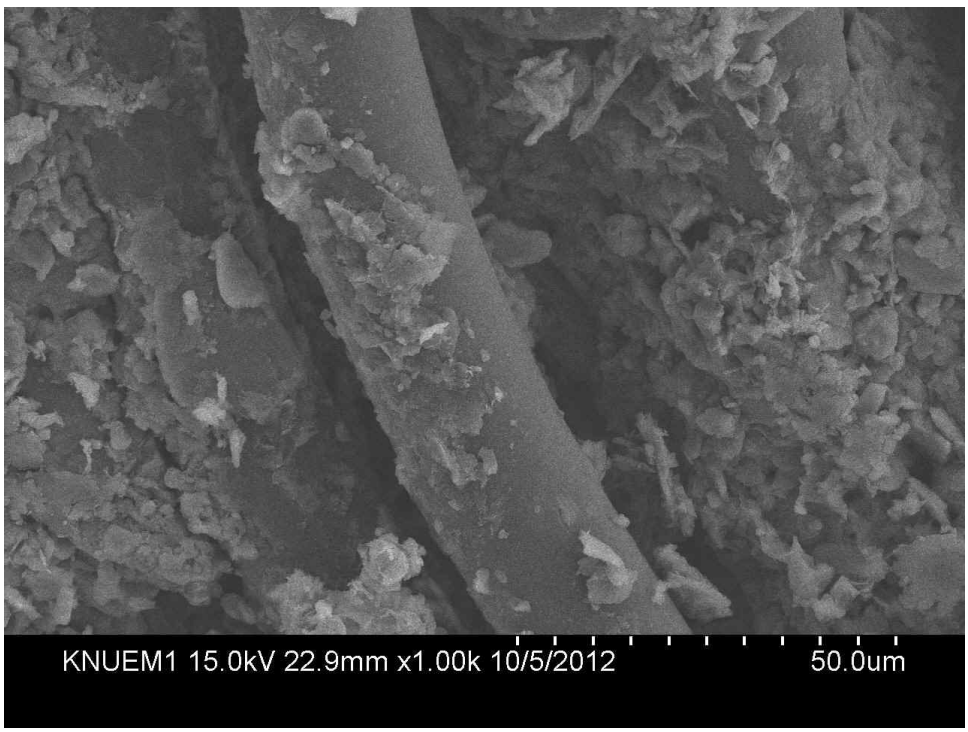
1) 벤토나이트 10%, 섬유 1%



<그림 76> 재령 3일

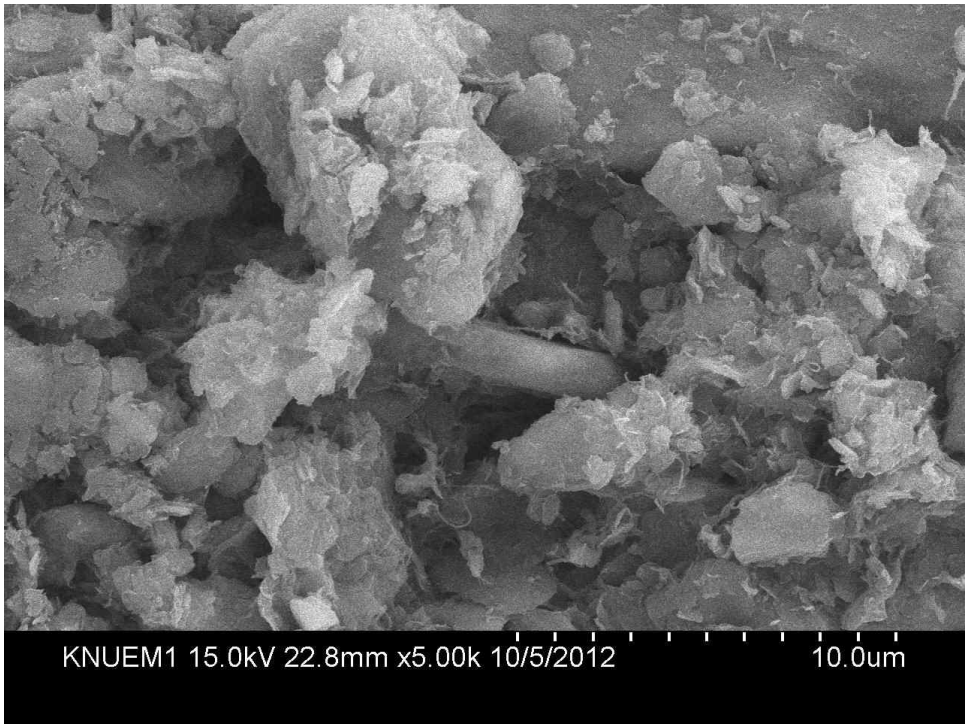


<그림 77> 재령 7일

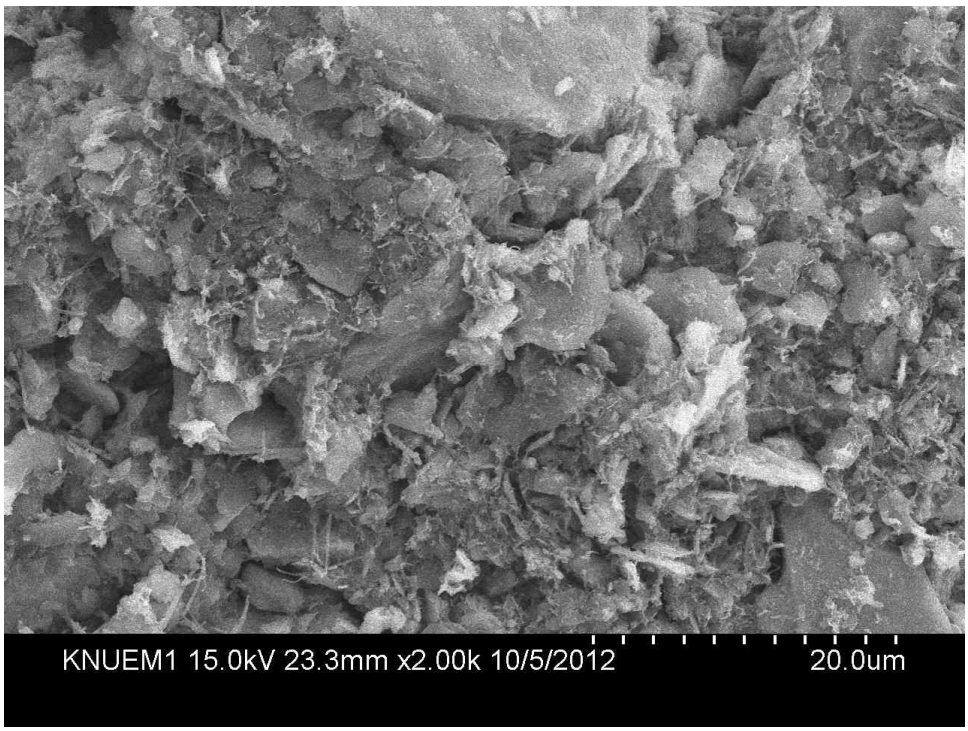


<그림 78> 재령 28일

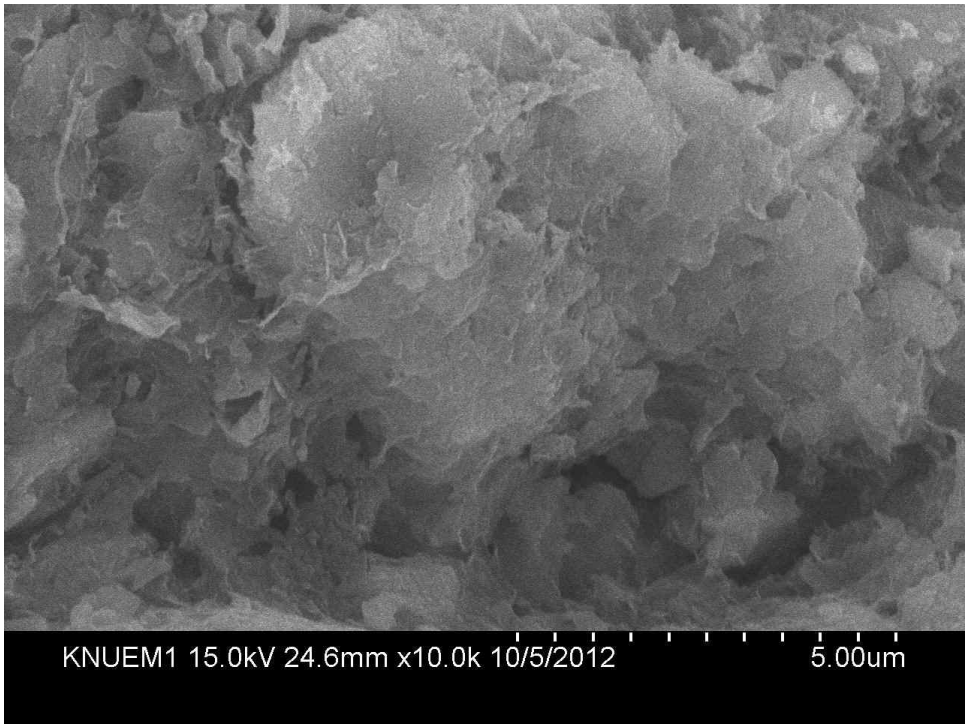
2) 벤토나이트 10%, 시멘트 10%, 섬유 1%



<그림 79> 재령 3일

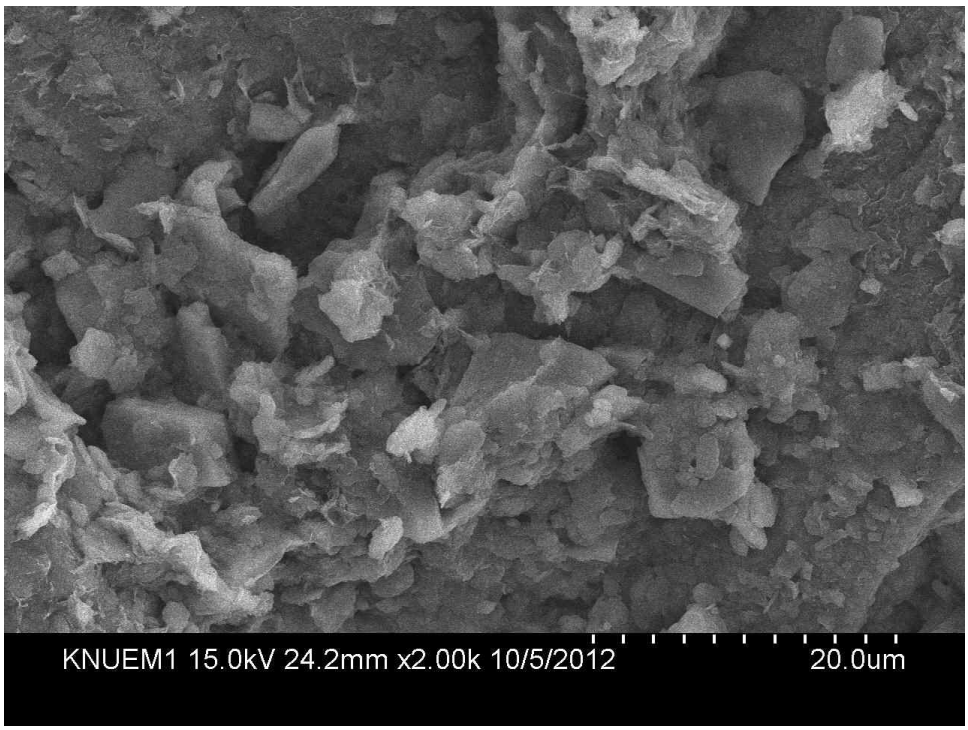


<그림 80> 재령 7일

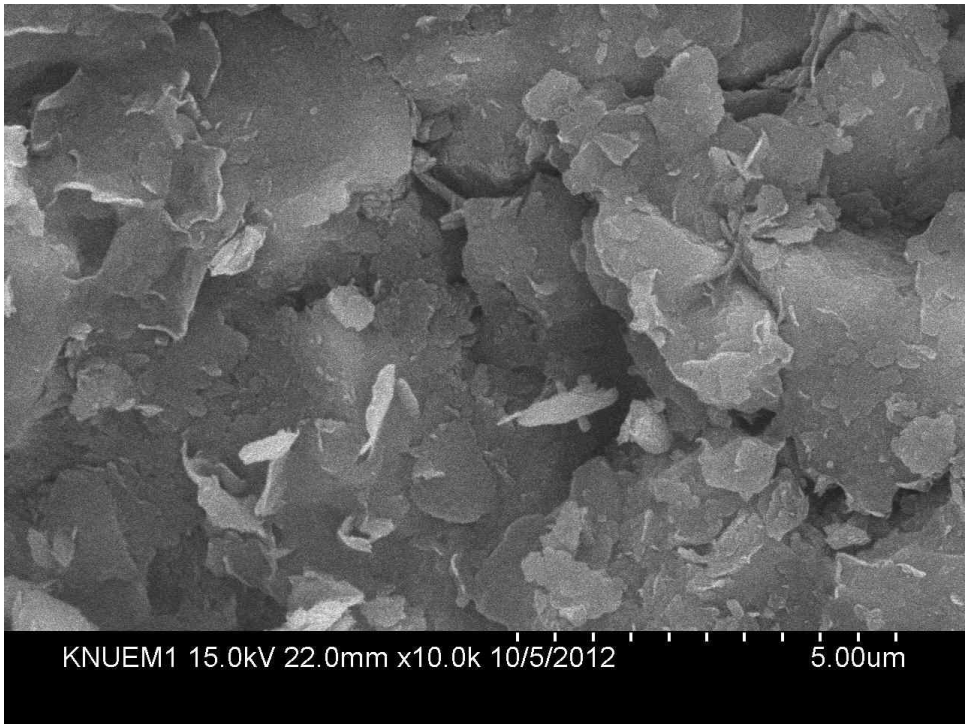


<그림 81> 재령 28일

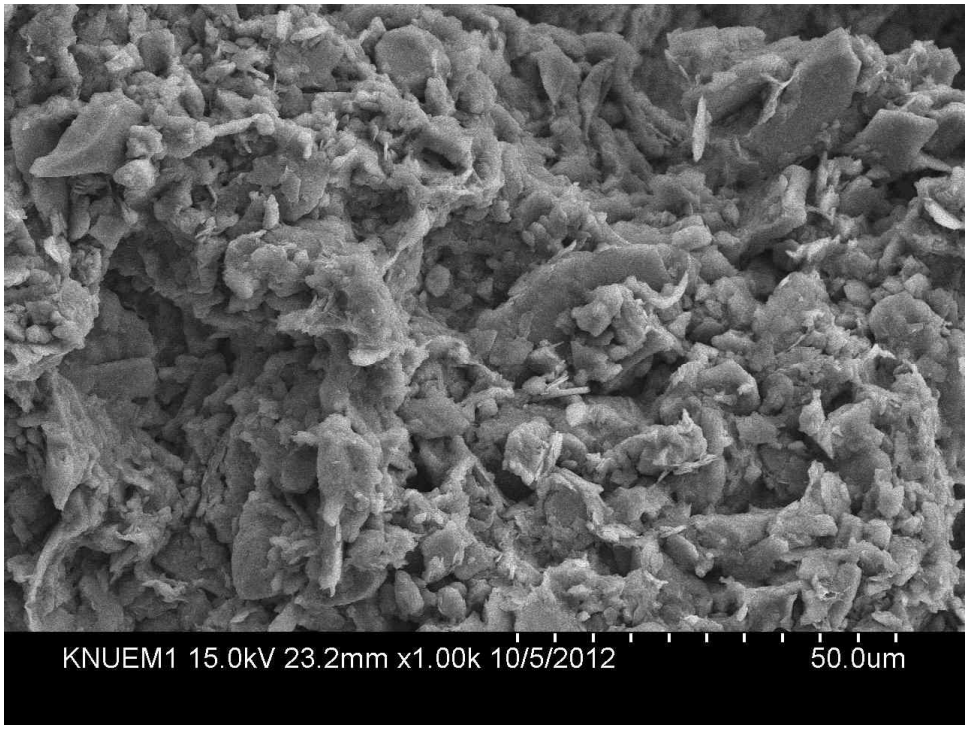
3) 벤토나이트 10%, 메타카올린 10%



<그림 82> 재령 3일



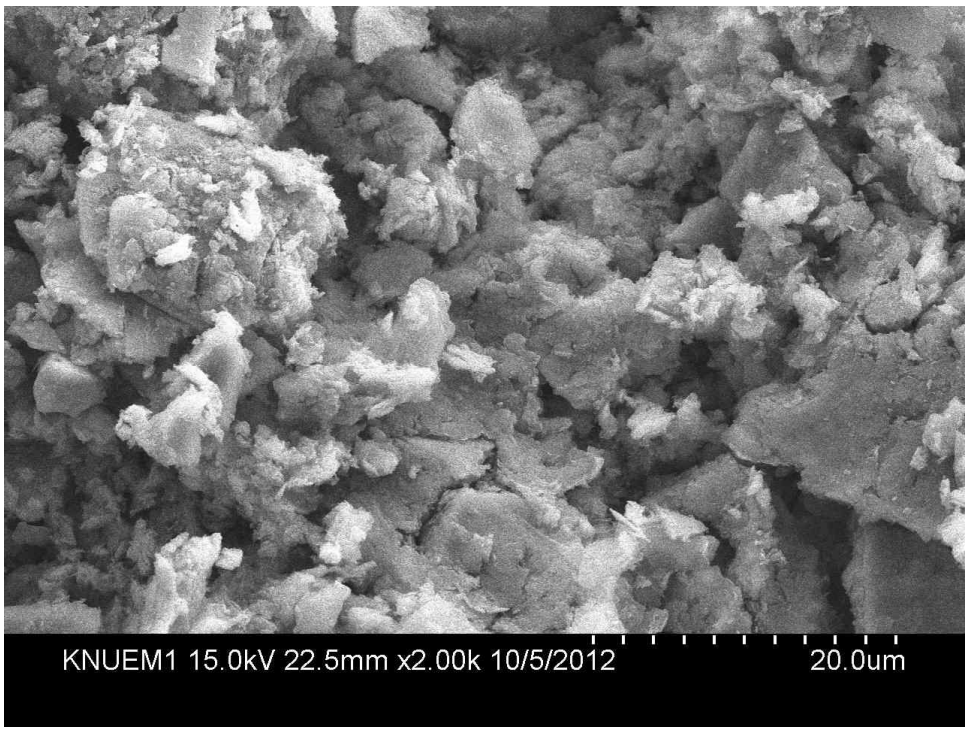
<그림 83> 재령 7일



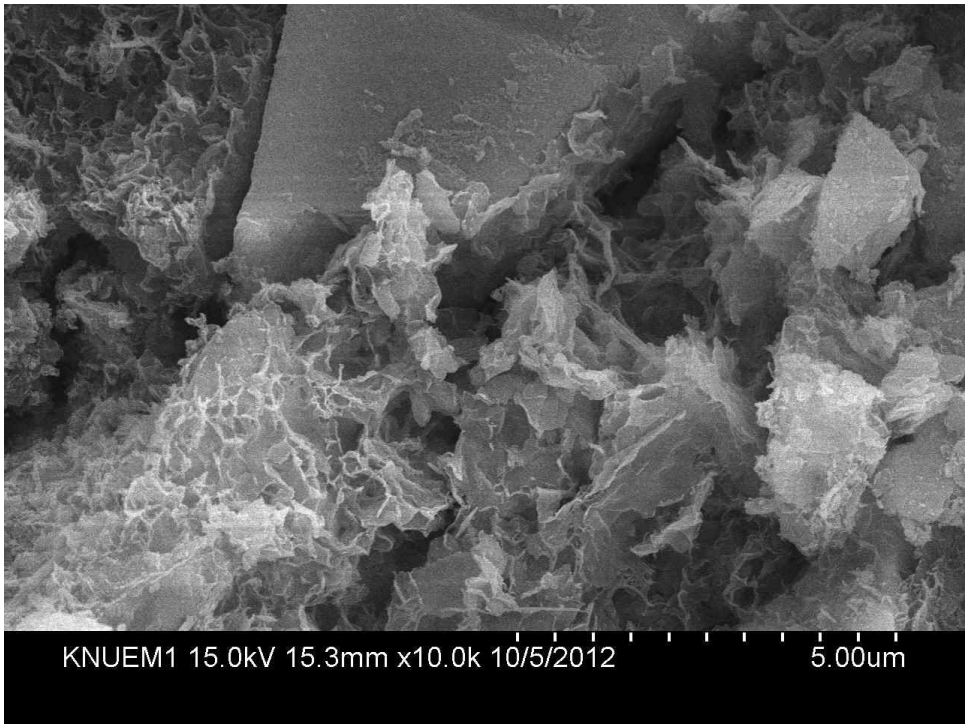
<그림 84> 재령 28일

4) 벤토나이트 10%, 시멘트 10%, 메타카올린 10%

<그림 85> 재령 3일



<그림 86> 재령 7일



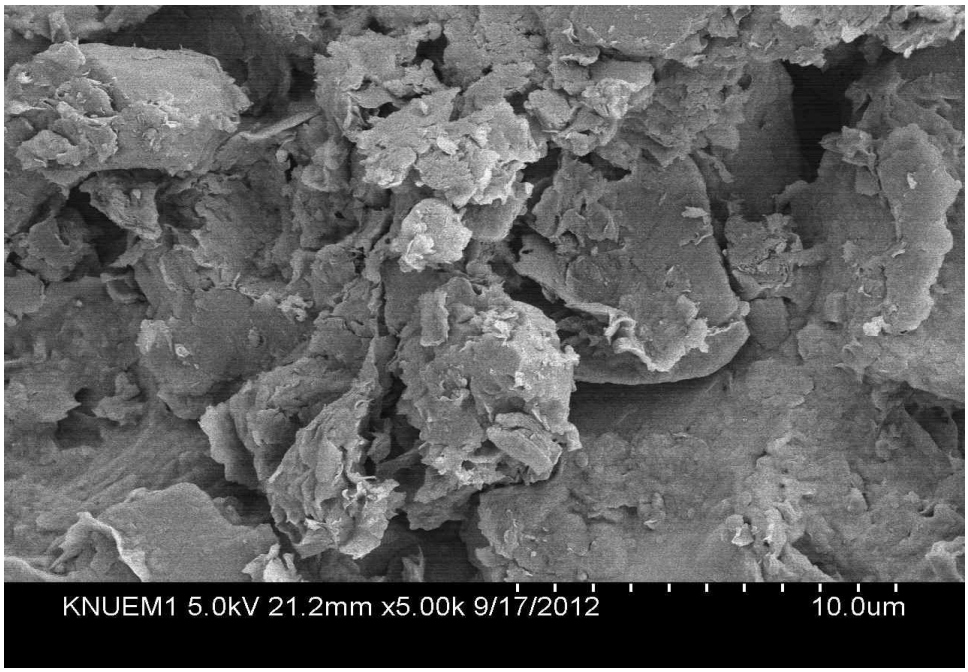
<그림 87> 재령 28일

나. 동결융해 후의 SEM분석

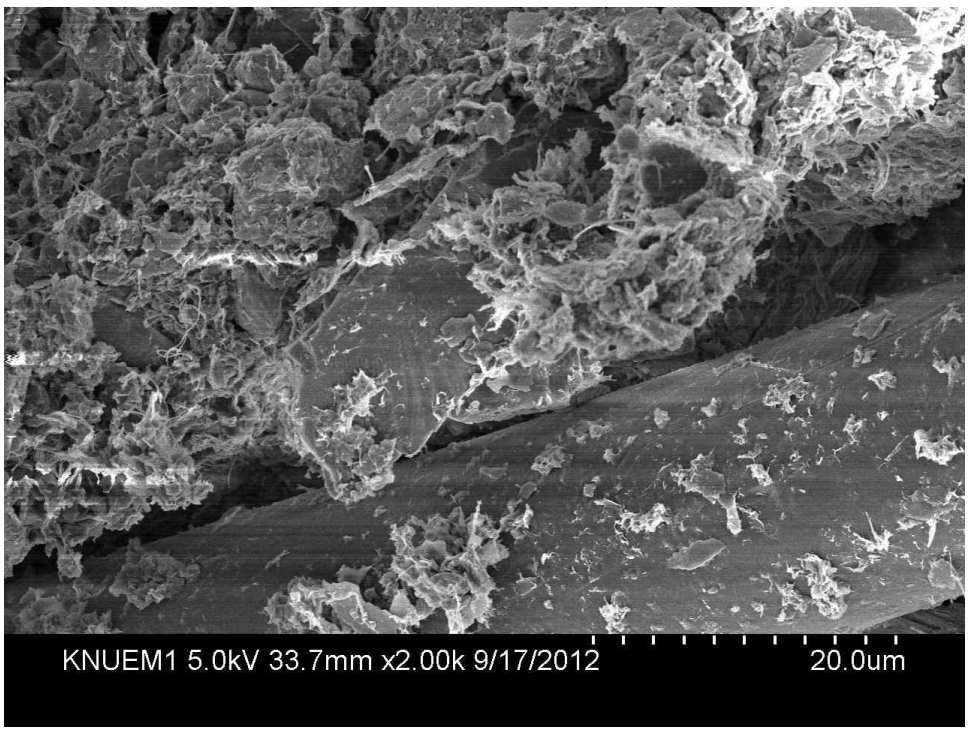
동결융해 후의 미세구조를 보면 벤토나이트 혼합토는 판상 구조의 입자가 대부분을 차지하고 있으며 이것은 벤토나이트가 팽창하여 표면을 밀실하게 하였으나, 벤토나이트가 함유하고 있는 수분이 동결융해에 의해 수축 팽창하여 밀실한 판의 형상이 깨져 나타난 것으로 보인다.

시멘트-벤토나이트 혼합토에서 섬유 혼합토는 시멘트 수화물인 에트린자이트가 혼합토 내의 거의 대부분을 차지하고 있으나, 침상의 입자들이 다수 존재하는 것으로 볼 때 수화반응 및 벤토나이트 입자가 팽창하는 과정에서 동결융해를 통해 반응중이던 입자들이 시멘트의 박리현상처럼 떨어져 나간 표면을 볼 수 있다. 팽창하여 간극을 메우던 입자들이 떨어져 나가 간극이 메워지지 않았고, 시멘트의 수화생성물인 에트린자이트의 생성도 동결융해에 의해 저감하였을 것으로 판단된다. 그러나 시멘트-벤토나이트 혼합토에 메타카올린을 혼합한 경우 섬유 혼합토에서와 같은 침상의 입자가 거의 보이지 않는 것으로 보아 동결융해에 노출되기 전에 시멘트-메타카올린에 의한 칼슘설페이트 수화물과 모노설페이트 수화물이 상당부분 생성되어 동결융해에 큰 손상을 입지 않은 것으로 보인다. 그러나 시멘트-벤토나이트-메타카올린 혼합토를 제외한 혼합토는 강도 발현에 직접적으로 관련이 있는 칼슘실리케이트상의 수화가 제대로 이루어지지 못하여, 시료의 강도 시험 시 강도저하에 영향을

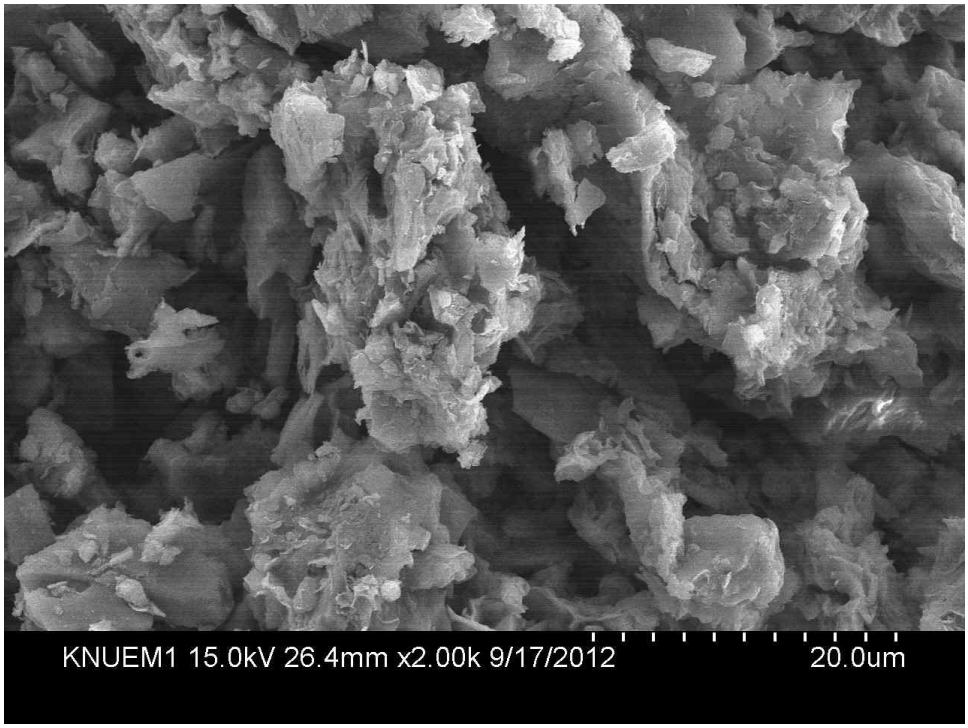
미친 것으로 사료된다. 또한 동결융해로 인해 발생된 혼합토 사이의 미세한 간극으로 인해 섬유와의 부착강도가 떨어져 혼합토의 간극이 보다 커질 것으로 판단된다.



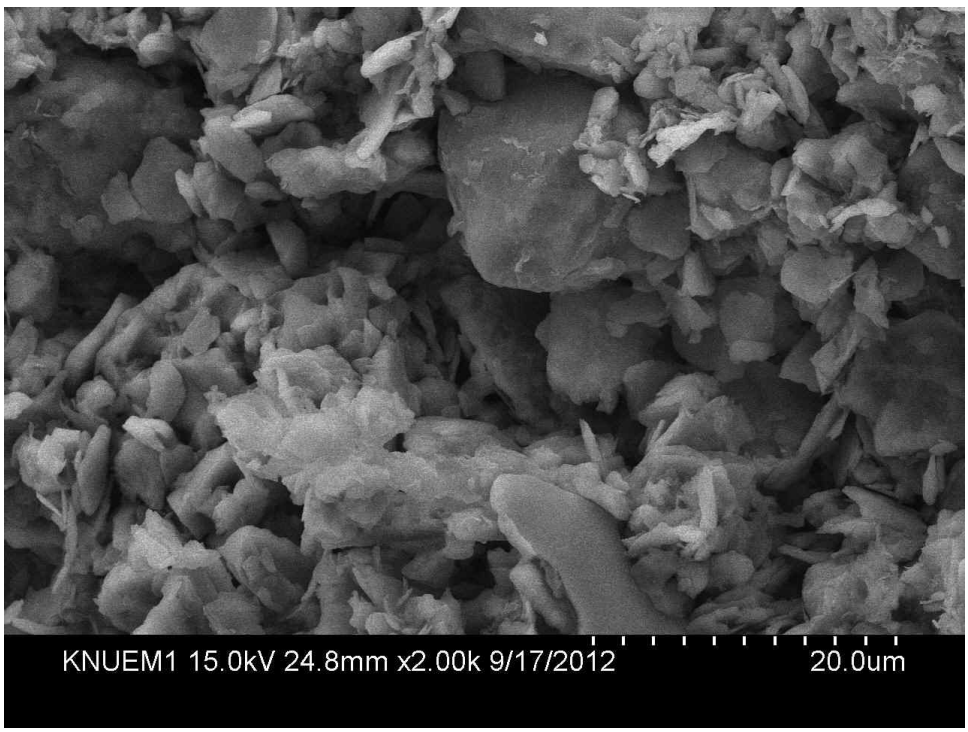
<그림 88> 벤토나이트 10%, 섬유 1%



<그림 89> 벤토나이트 10%, 시멘트 10%, 섬유 1%



<그림 90> 벤토나이트 10%, 메타카올린 10%

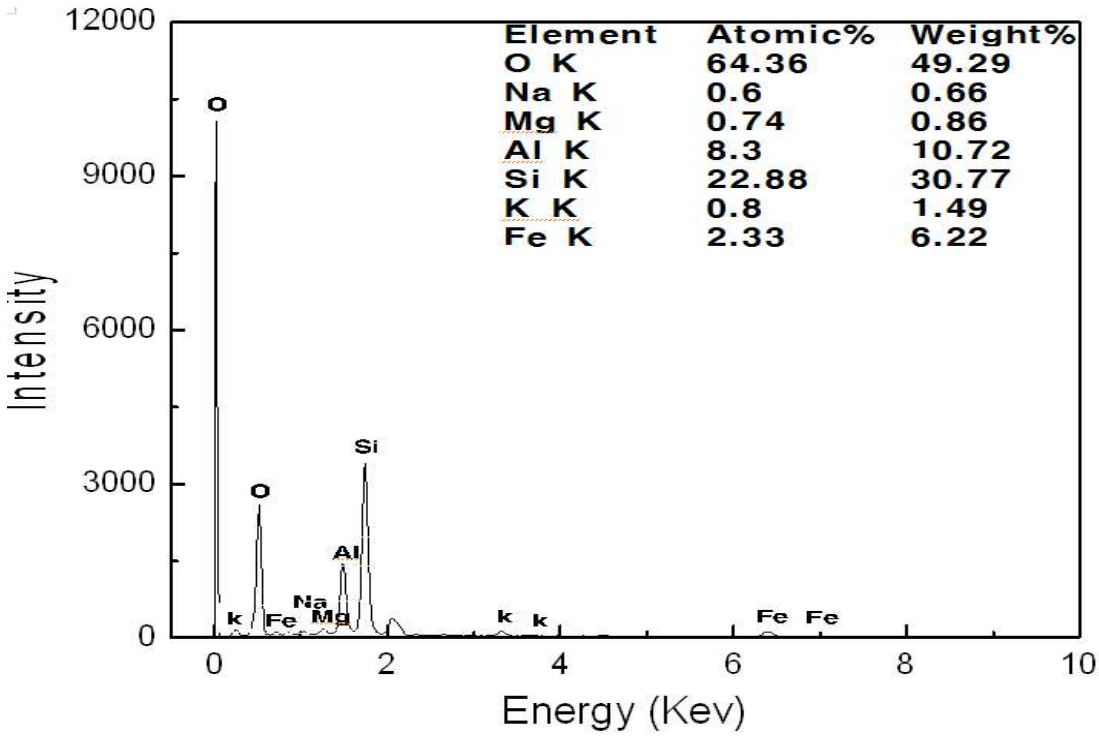


<그림 91> 벤토나이트 10%, 시멘트 10%, 메타카올린 10%

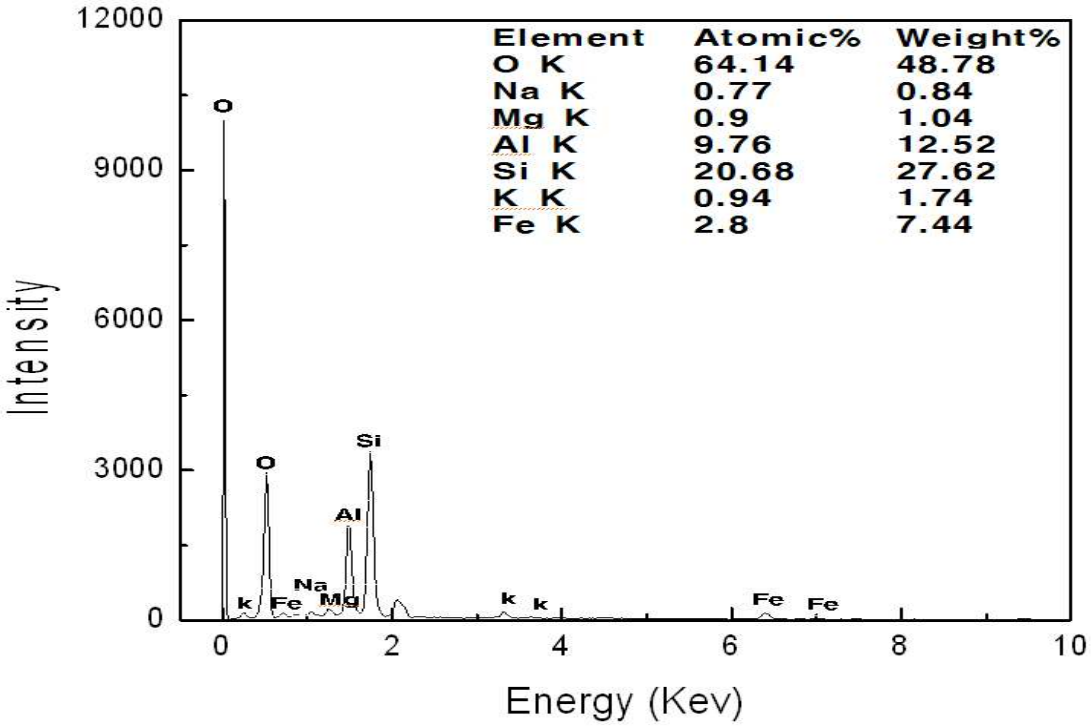
다. EDS

SEM 분석을 수행한 시료에 대하여 <그림 92>~<그림 107>에서 보는 바와 같이 에너지 분산법에 의해 시편의 미세 성분요소의 중량을 측정하였다. <그림 92> 및 <그림 95>은 토목섬유 첨가 벤토나이트 혼합토 및 시멘트 벤토나이트 혼합토에 대한 EDS 분석 결과를 나타내며, O, Si의 성분이 주를 이루고 있고 Al이 소량 검출되었는데 이는 침상주위의 수화물에 의해 검출된 것으로 판단된다. <그림 98> 및 <그림 101>은 메타카올린 첨가 벤토나이트 혼합토 및 시멘트 벤토나이트 혼합토에 대한 EDS 분석 결과를 나타내며, O, Si, Al의 성분이 주를 이루고 있고 그 외 소량의 K, Fe 등이 분포하고 있다.

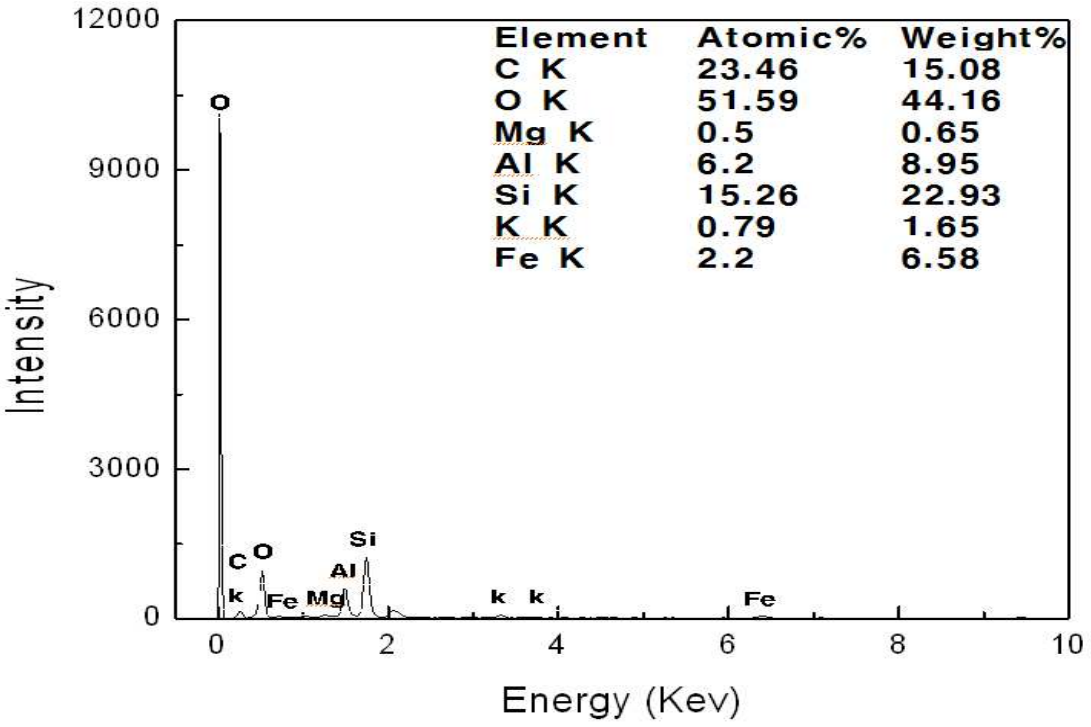
1) 벤토나이트 10%, 섬유 1%



<그림 92> 재령 3일

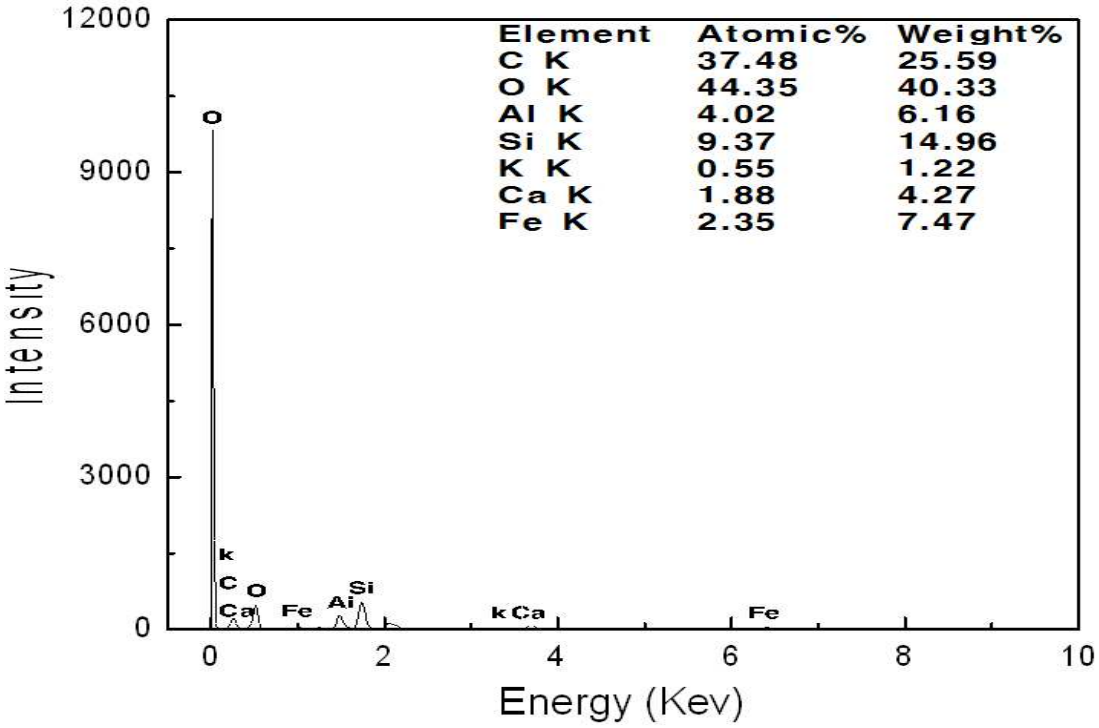


<그림 93> 재령 7일

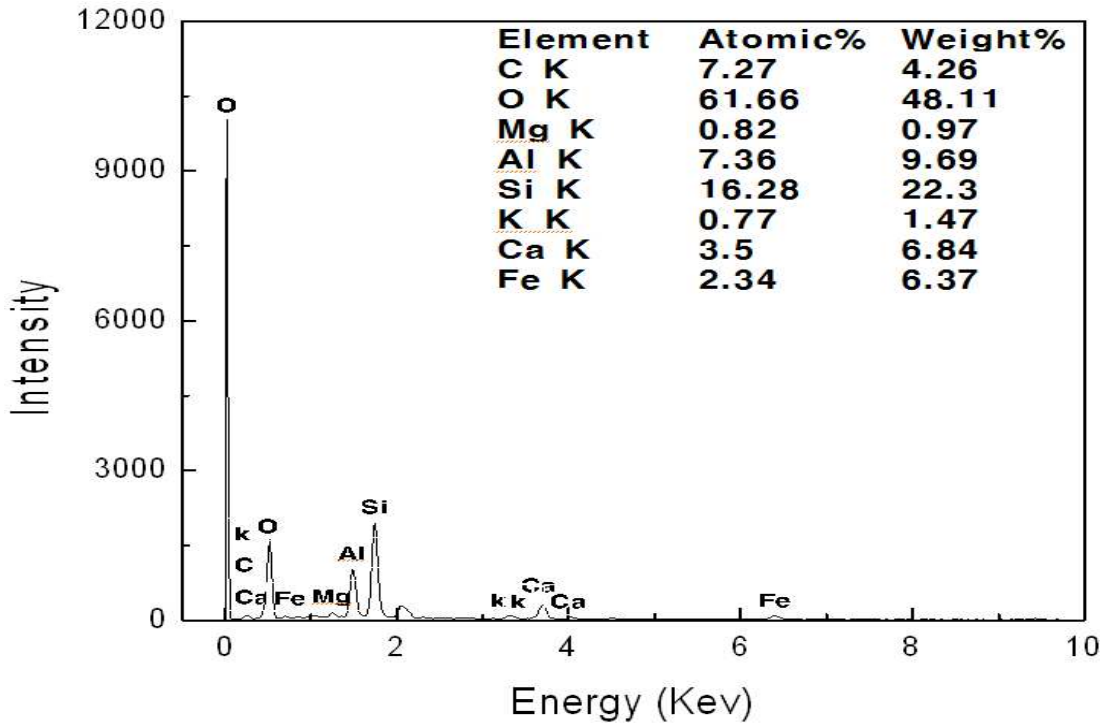


<그림 94> 재령 28일

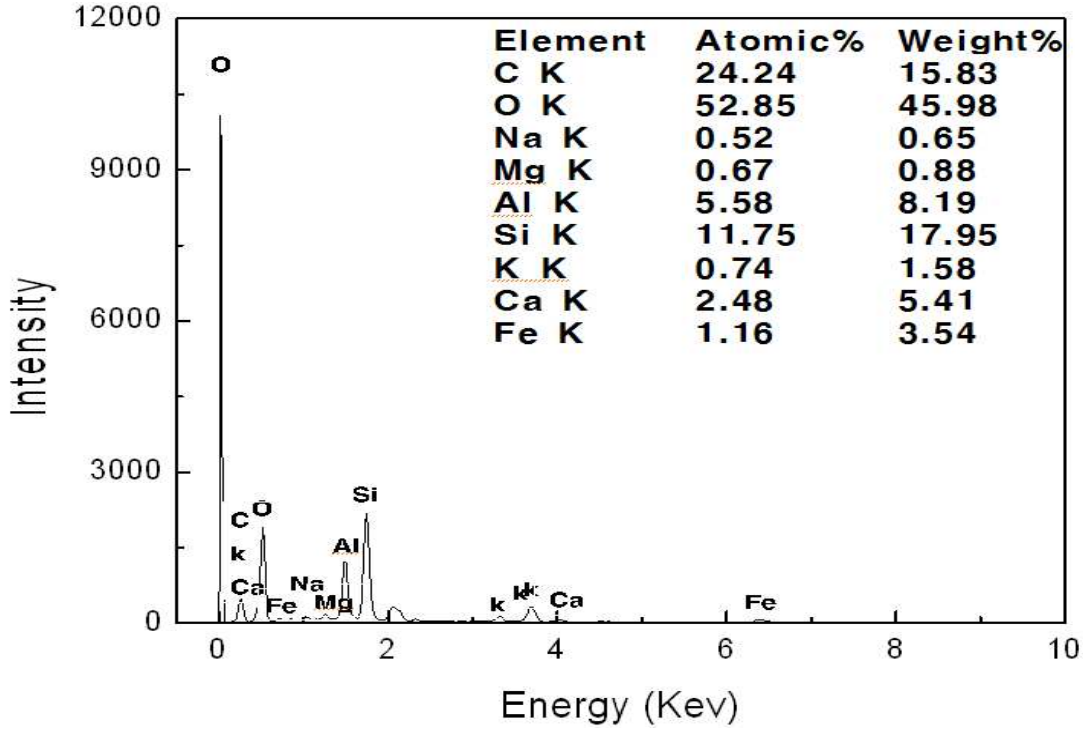
2) 벤토나이트 10%, 시멘트 10%, 섬유 1%



<그림 95> 재령 3일

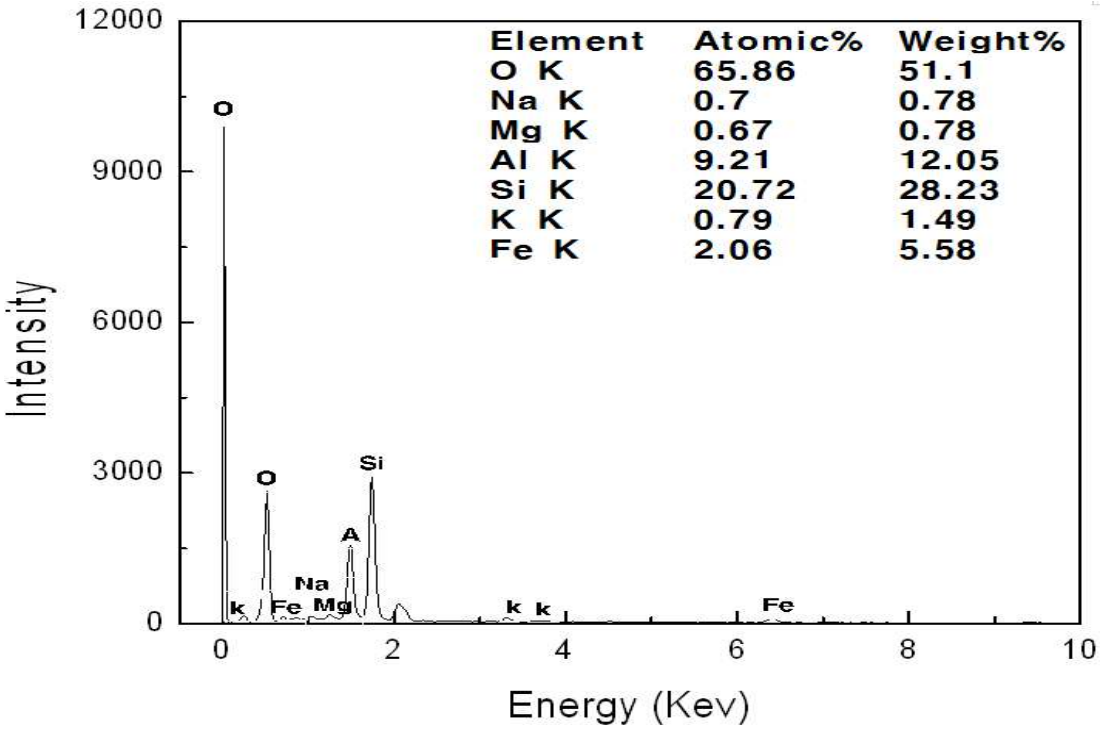


<그림 96> 재령 7일

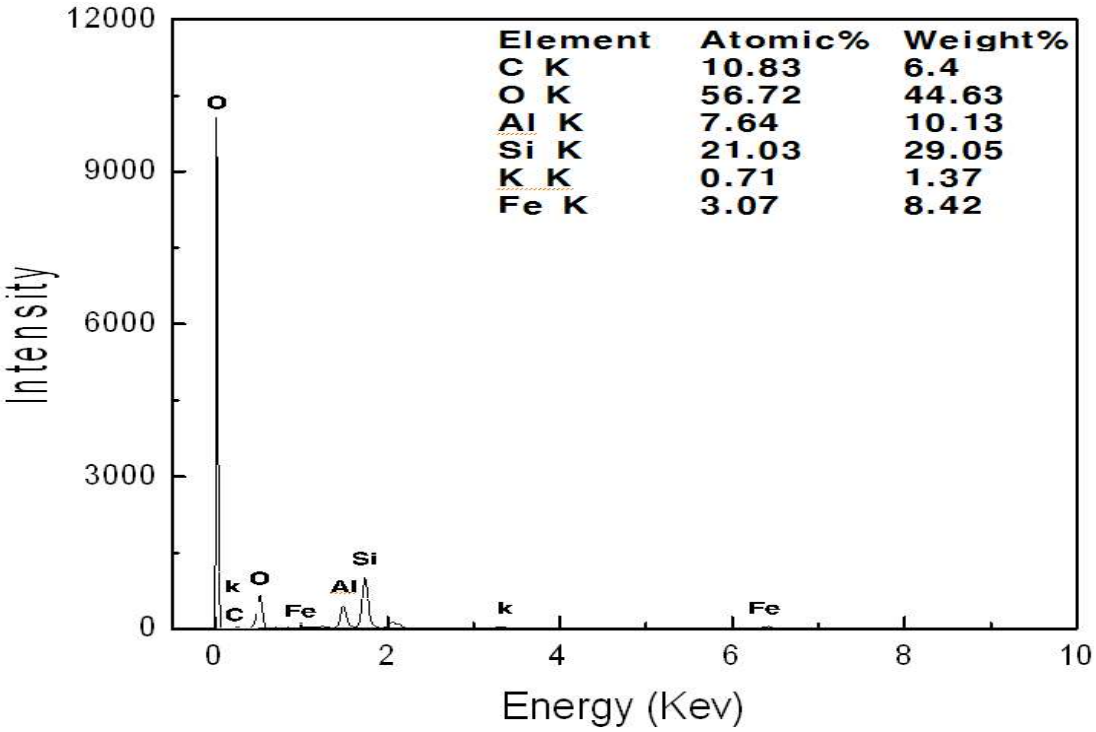


<그림 97> 재령 28일

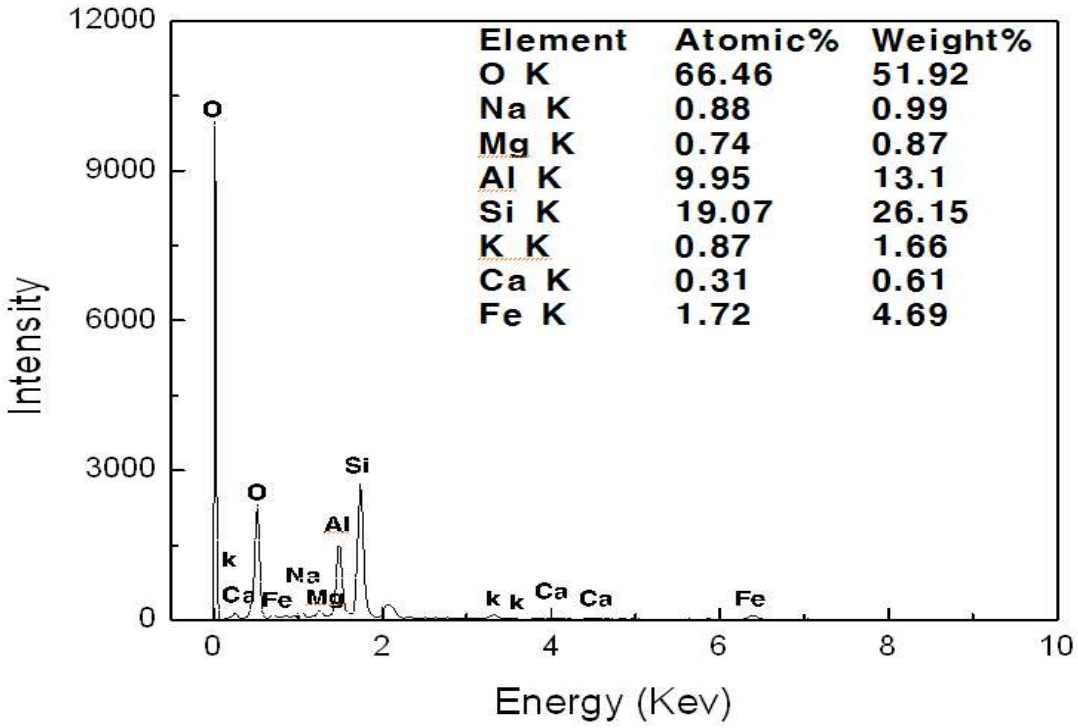
3) 벤토나이트 10%, 메타카올린 10%



<그림 98> 재령 3일

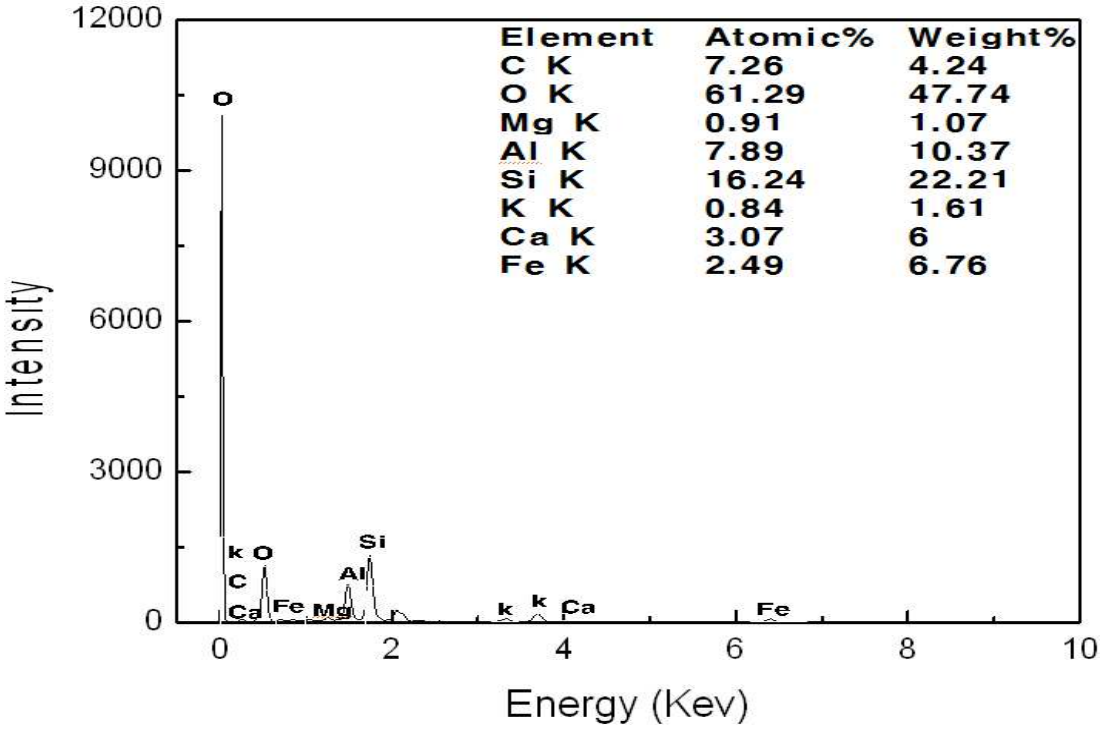


<그림 99> 재령 7일

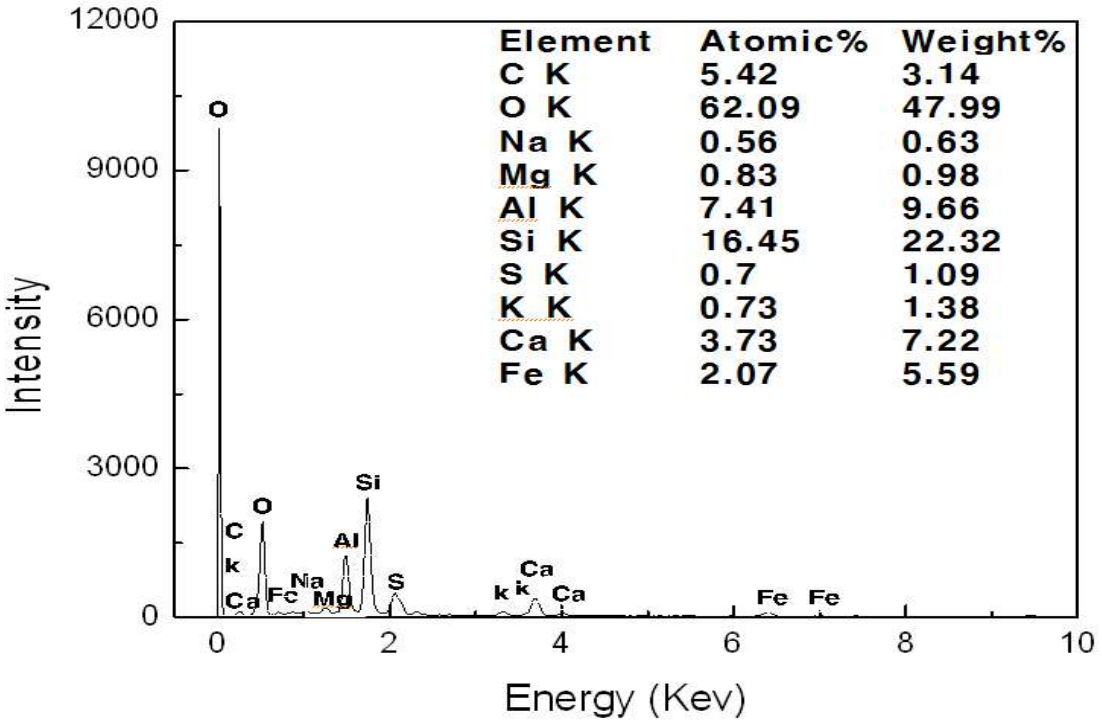


<그림 100> 재령 28일

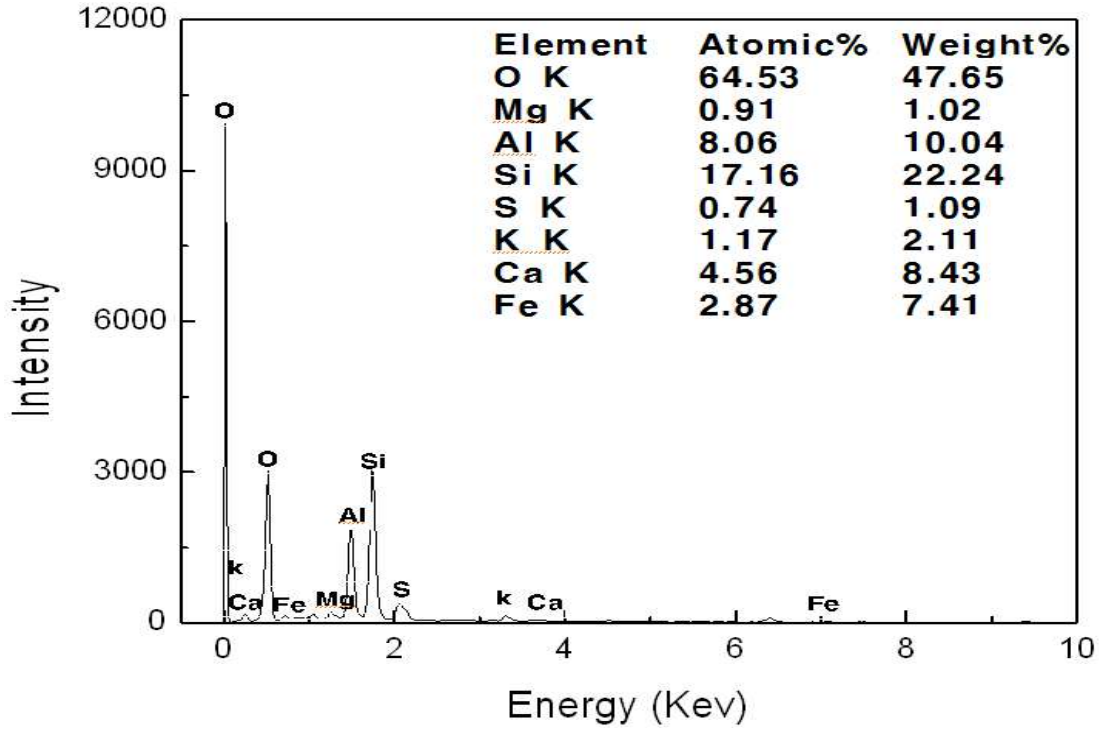
4) 벤토나이트 10%, 시멘트 10%, 메타카올린 10%



<그림 101> 재령 3일

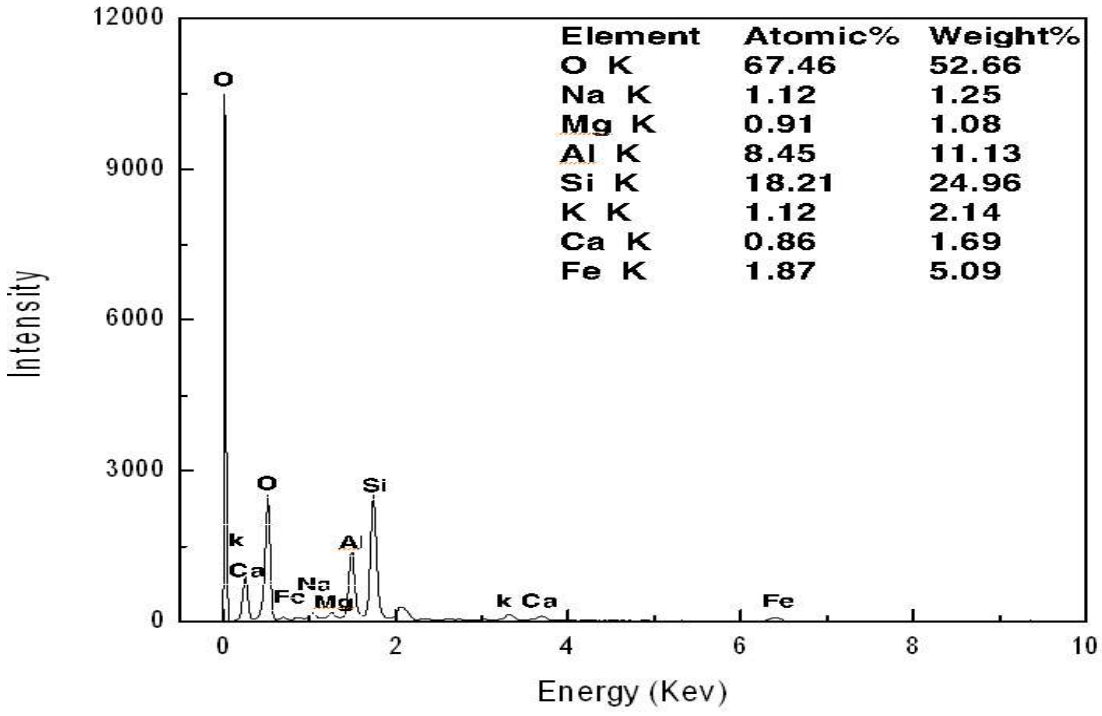


<그림 102> 재령 7일

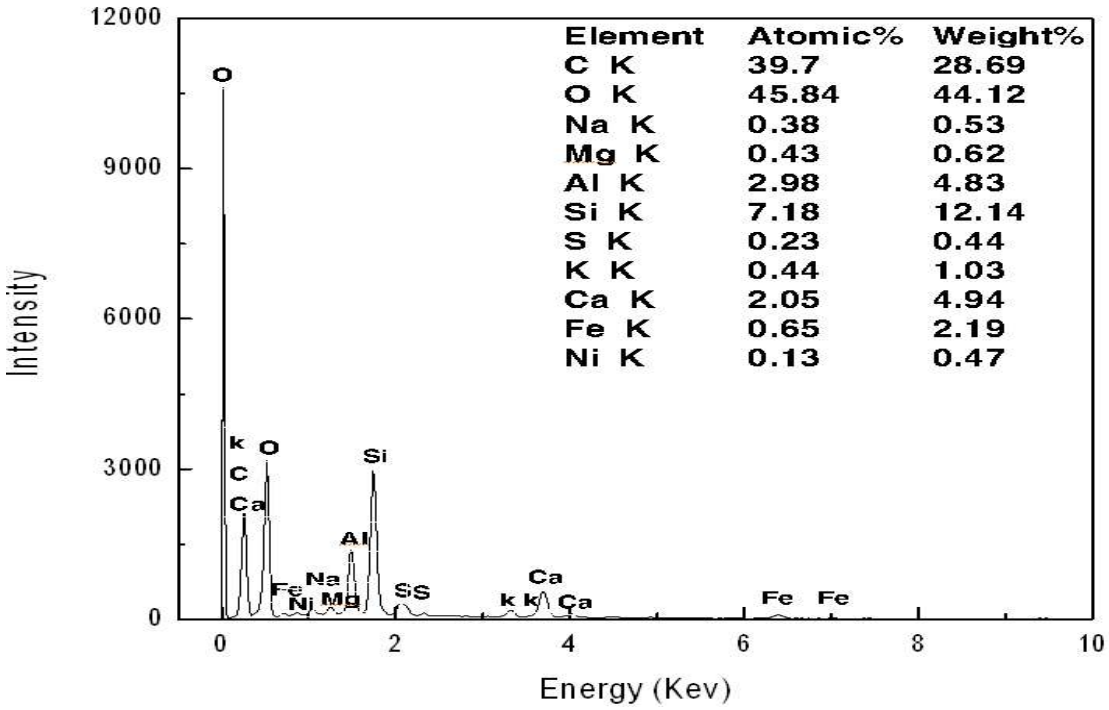


<그림 103> 재령 28일

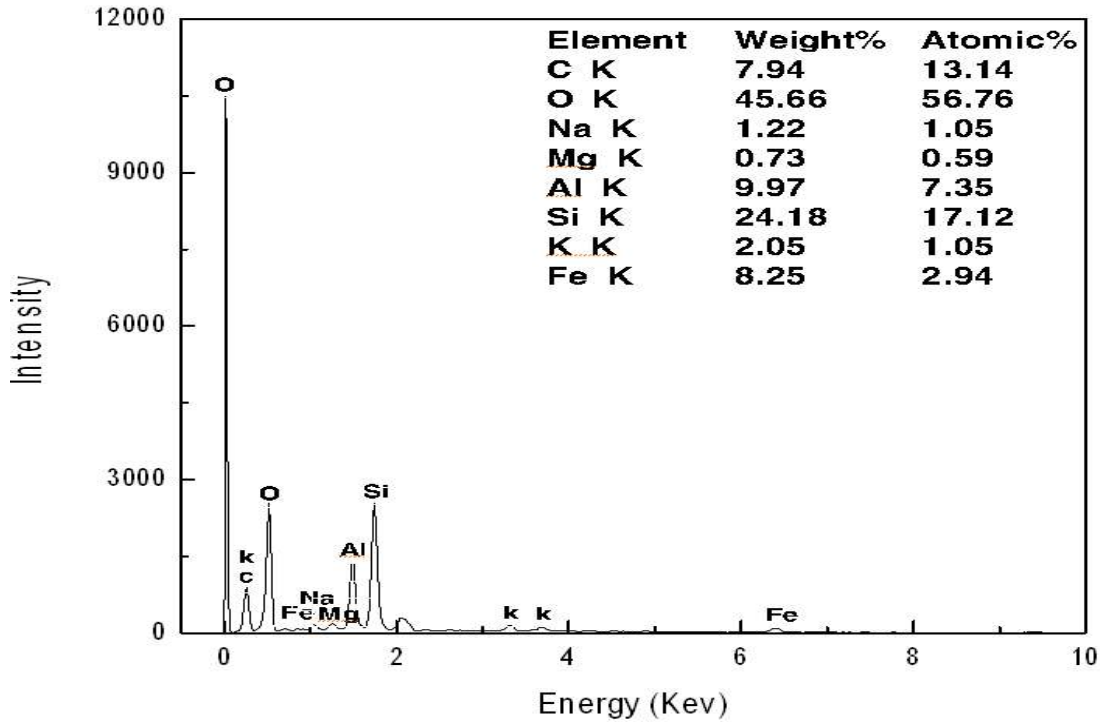
5) 동결융해



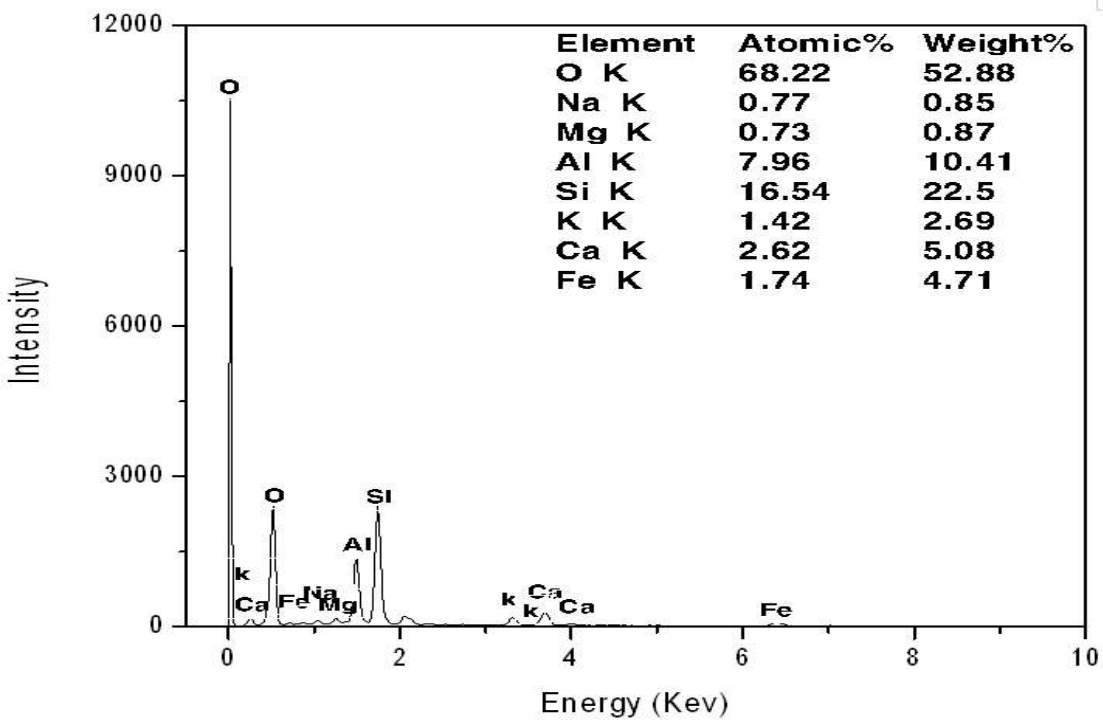
<그림 104> 벤토나이트 10%, 섬유 1%



<그림 105> 벤토나이트 10%, 시멘트 10%, 섬유 1%



<그림 106> 벤토나이트 10%, 메타카올린 10%



<그림 107> 벤토나이트 10%, 시멘트 10%, 메타카올린 10%

7. XRD분석

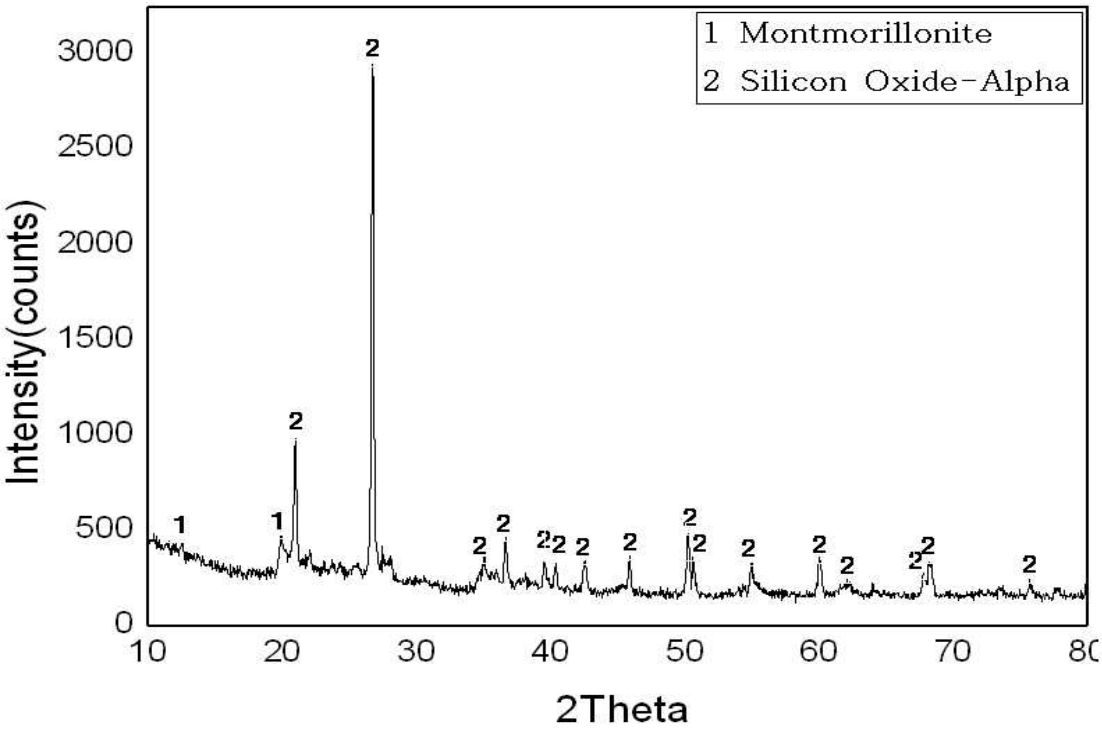
재령 3, 7일 및 28일의 시멘트 혼합토 시편 재료의 수화생성물과 광물의 결정을 분석하기 위해 XRD 분석법(X-Ray Diffraction Analysis Method)을 실시하였다. 회절도형의 peak 상태로부터 결정발달의 정도를 알 수 있는데 예리한 peak는 충분히 발달된 결정을 의미한다.

<그림 108>~<그림 123>는 혼합토의 재령일에 따른 XRD 분석결과를 나타내며, XRD 분석결과 모든 혼합토에서 가장 높은 peak를 나타내는 Silicon Oxide와 Quartz가 혼합토에서 주요 구성광물임을 알 수 있으며 주로 회절각 27~28°일 때 가장 큰 피크를 보이고 있다. Quartz은 실리카 또는 이산화규소로 주로 구성되어 있으며 많은 변종이 존재 하는데 본 실험에서 사용한 벤토나이트(59.1%) 및 메타카올린(52%)이 이산화규소를 다량 포함하고 있어 혼합토에서 반응을 할 때 Quartz가 생성된 것으로 보인다. 또한 대부분의 혼합토에서 관찰되는데 이는 벤토나이트가 응회암과 유리질 유문암이 변질되어 생성된 것이 주요한 원인으로 판단된다.

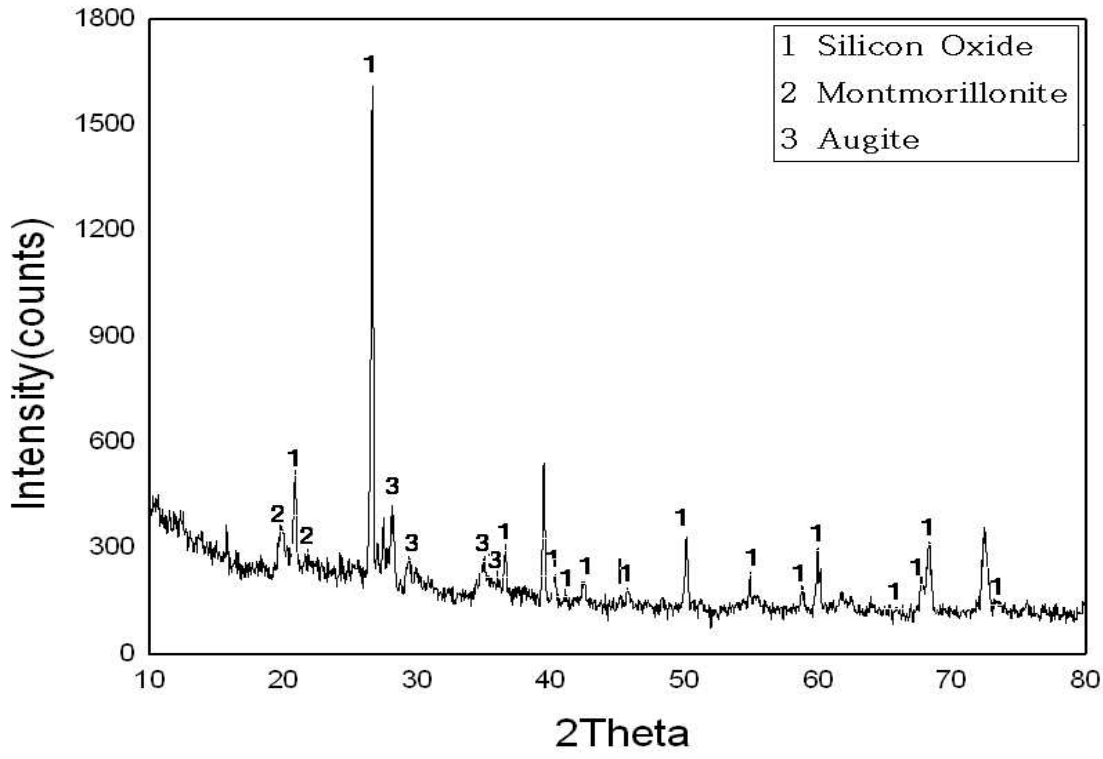
Quartz와 Silicon Oxide는 벤토나이트 혼합토에서 주요 구성 물질로 볼 수 있다. 그 외에 Calcite 및 Muscovite 등은 벤토나이트가 콜로이드성 함수실리콘알루미늄이고, 몬모릴로나이트가 주성분을 이루고 있으며 석영, 크리스토바라이트, 장석, 운모, 비석, 방해석, 드로마이트 등을 함유하고 있어서 검출된 것으로 판단된다. 또한 시

멘트의 수화반응으로 Alite ($3CaOSiO_2$)가 생성된 것을 확인할 수 있다.

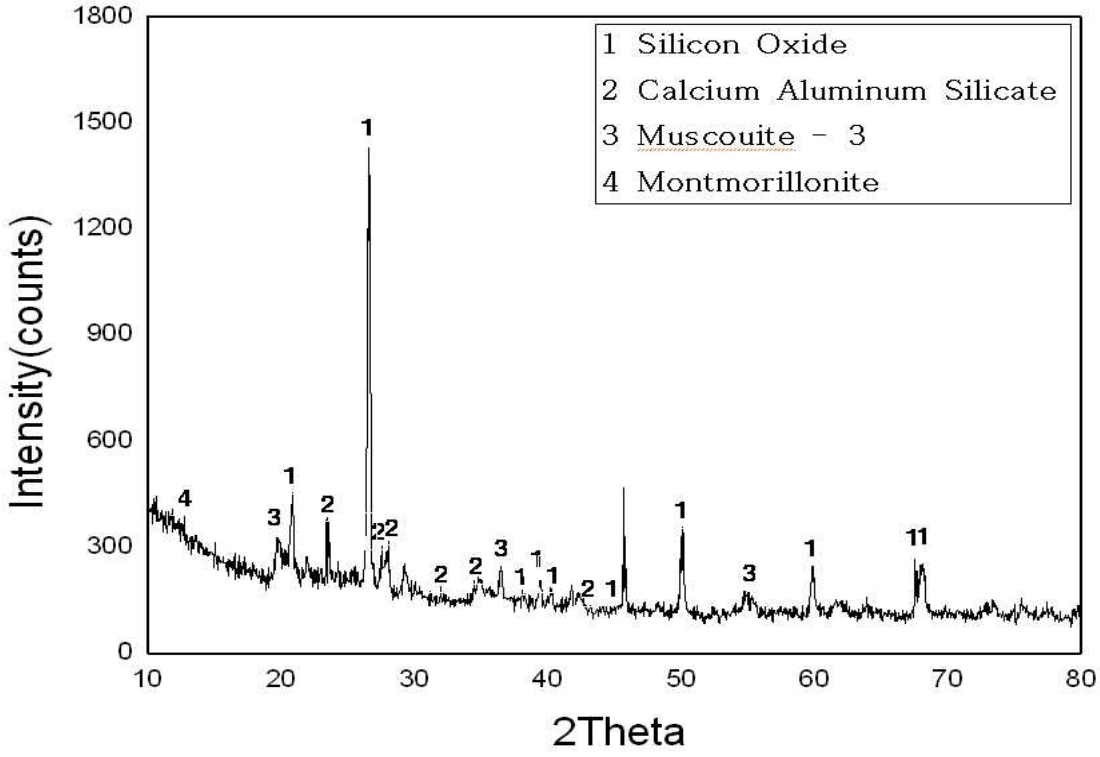
1) 벤토나이트 10%, 섬유 1%



<그림 108> 재령 3일

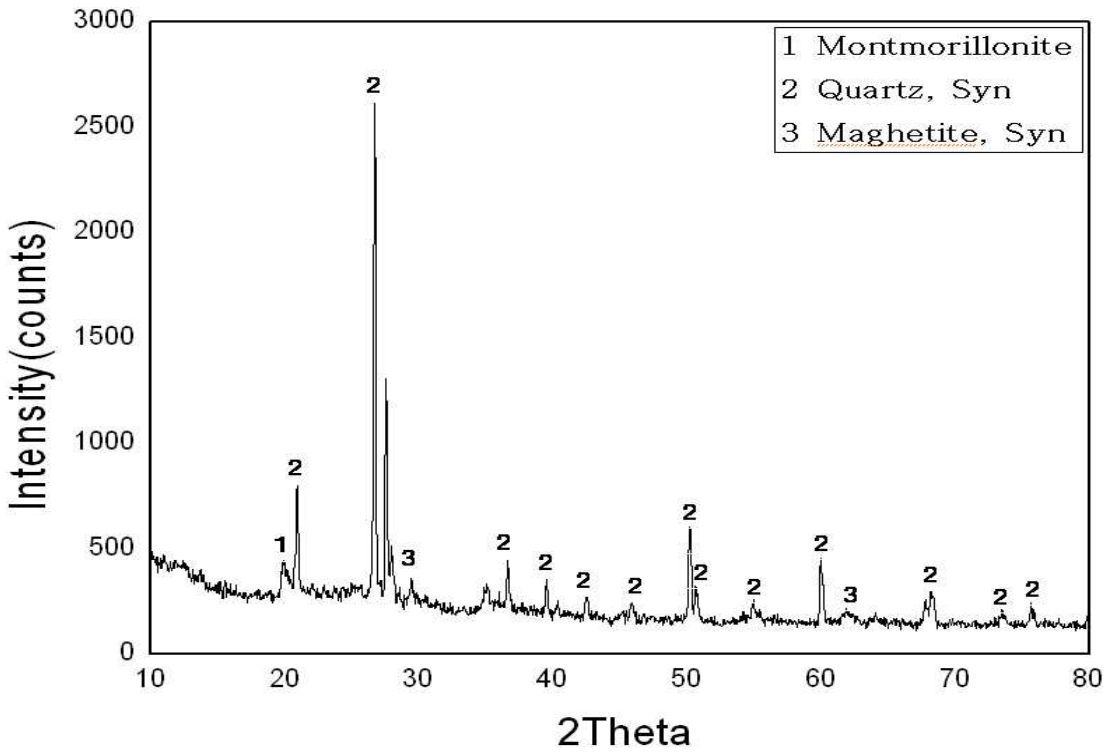


<그림 109> 재령 7일

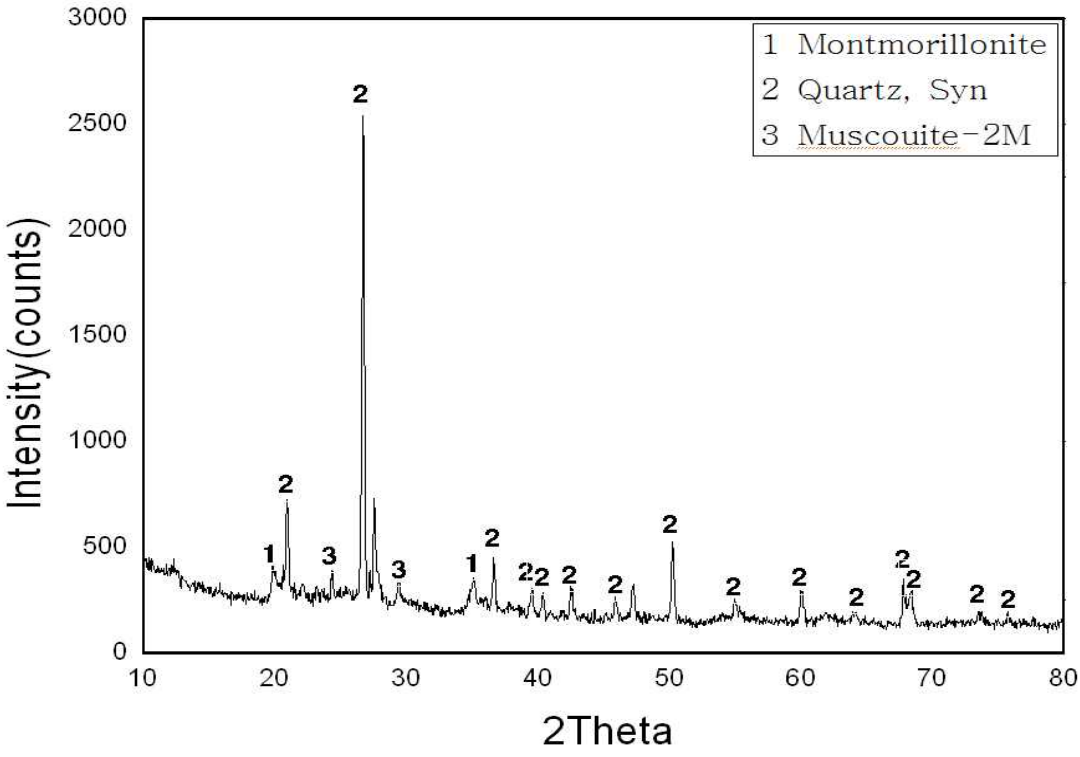


<그림 110> 재령 28일

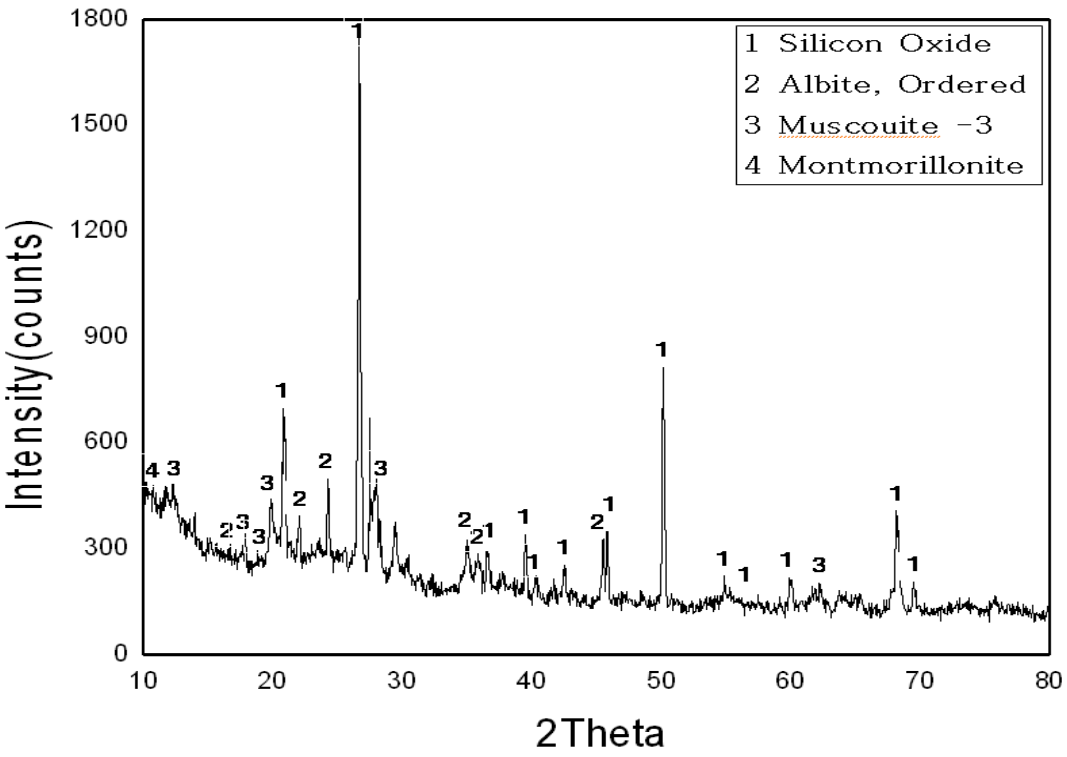
2) 벤토나이트 10%, 시멘트 10% 섬유 1%



<그림 111> 재령 3일

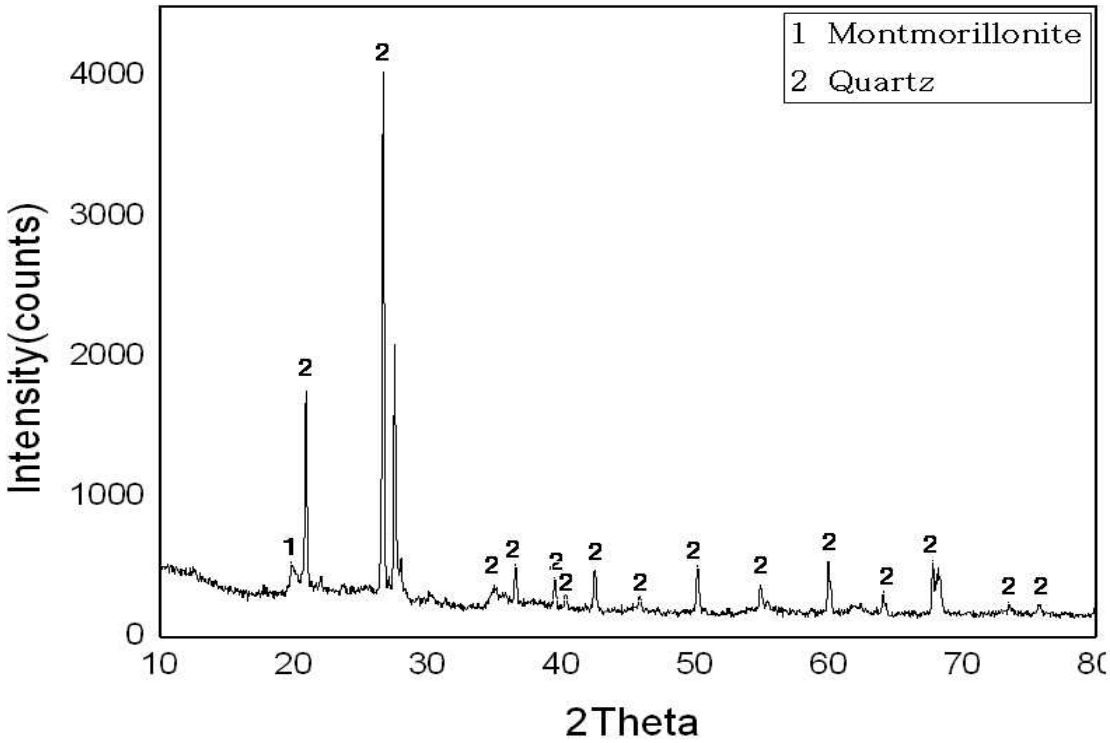


<그림 112> 재령 7일

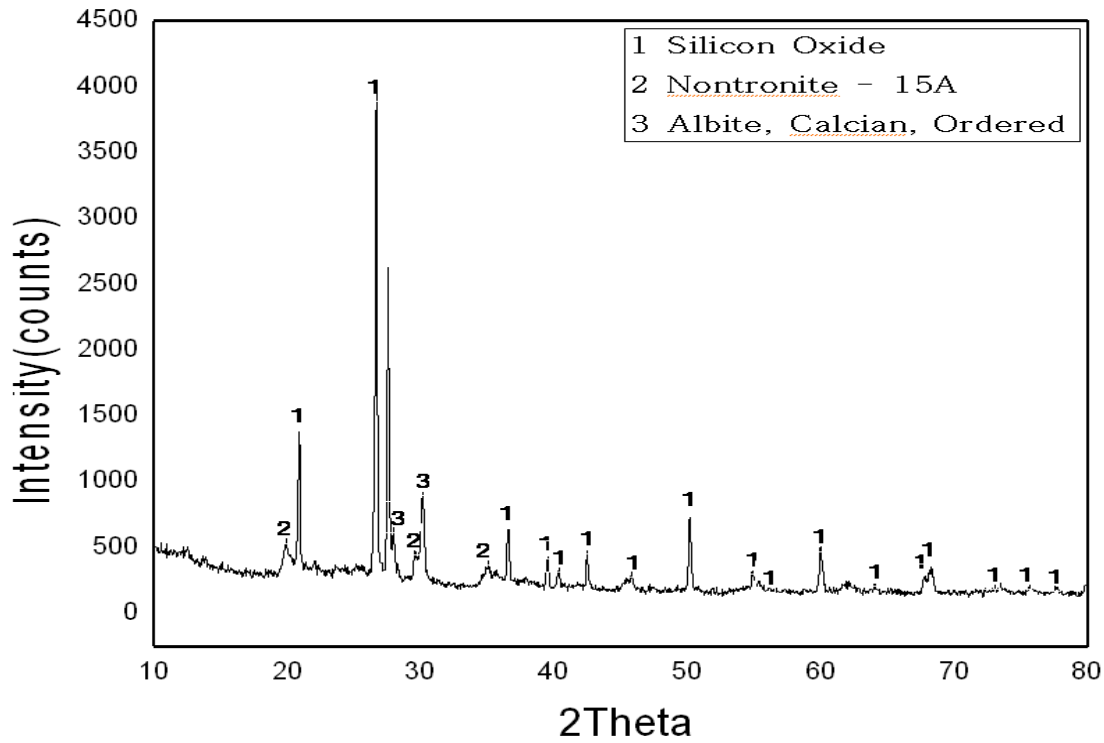


<그림 113> 재령 28일

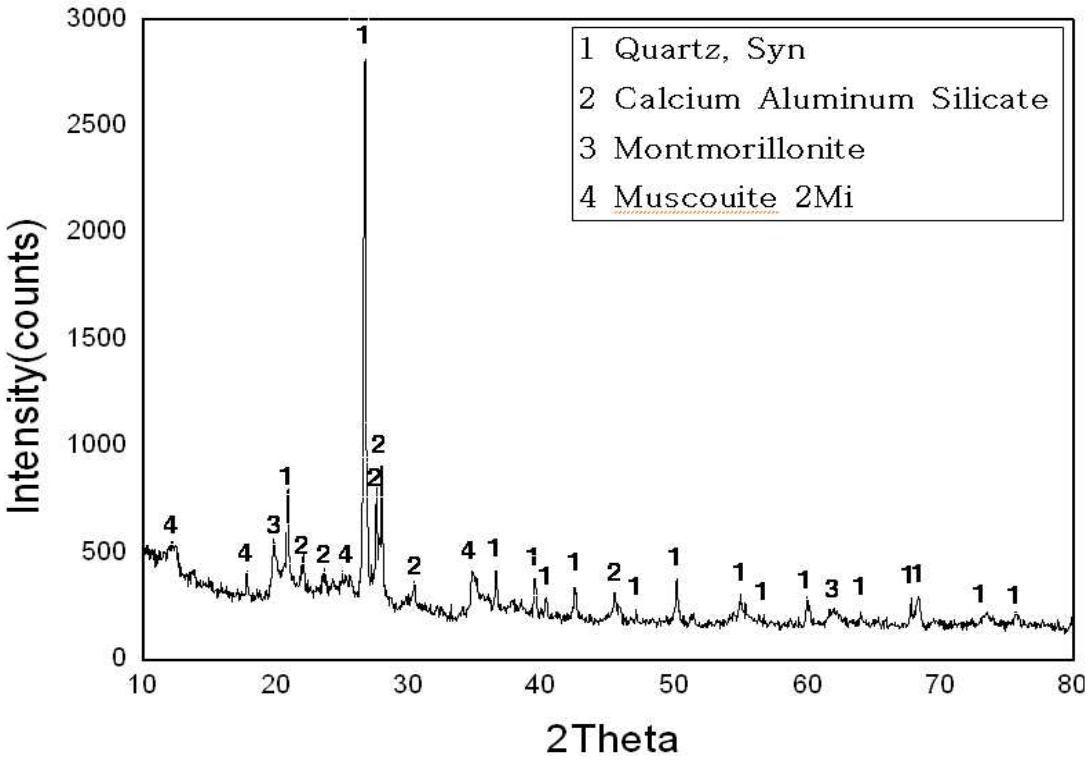
3) 벤토나이트 10%, 메타카올린 10%



<그림 114> 재령 3일

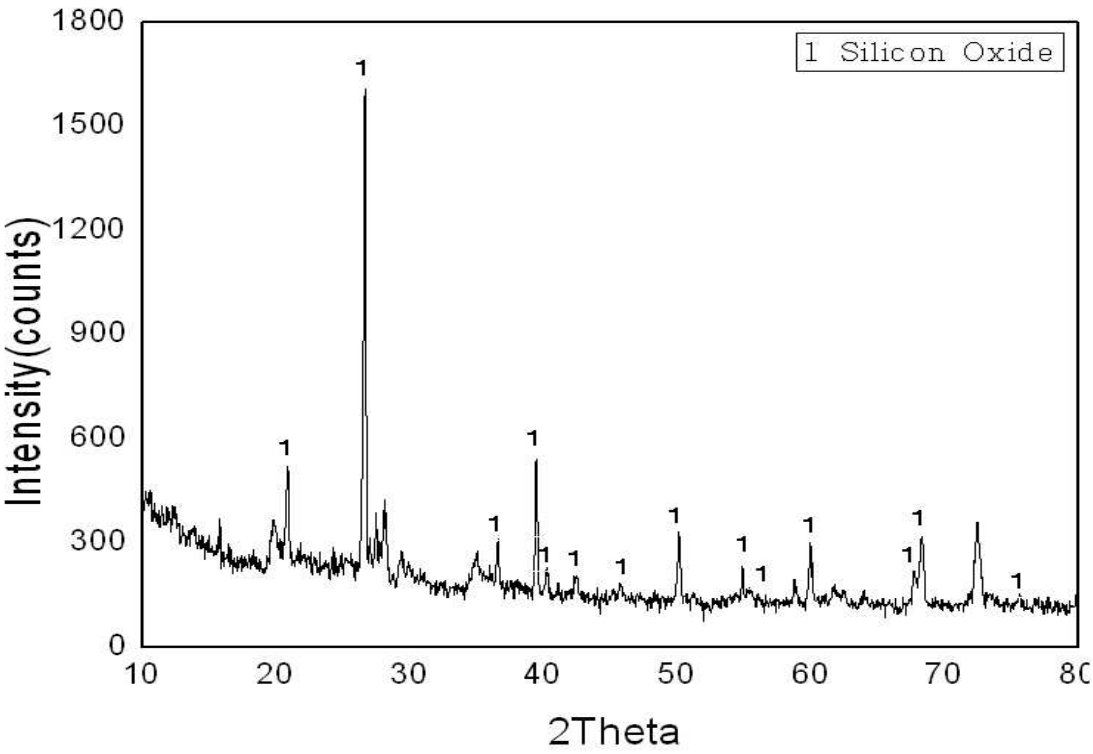


<그림 115> 재령 7일

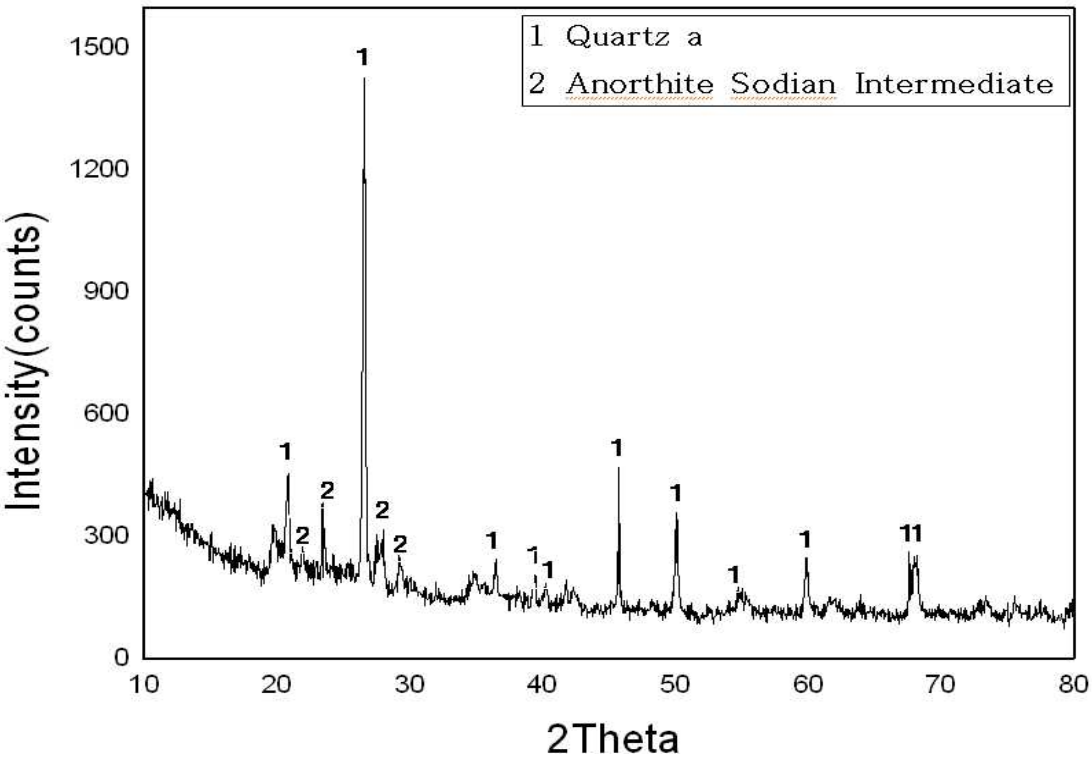


<그림 116> 재령 28일

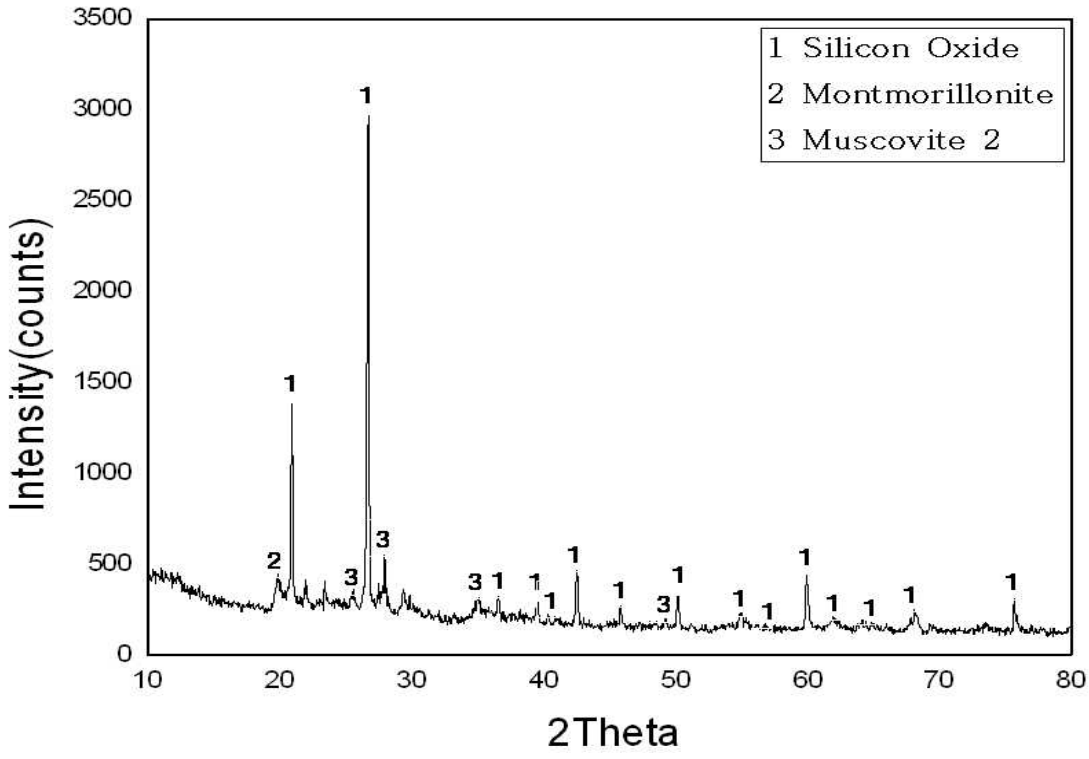
4) 벤토나이트 10%, 시멘트 10% 메타카올린 10%



<그림 117> 재령 3일

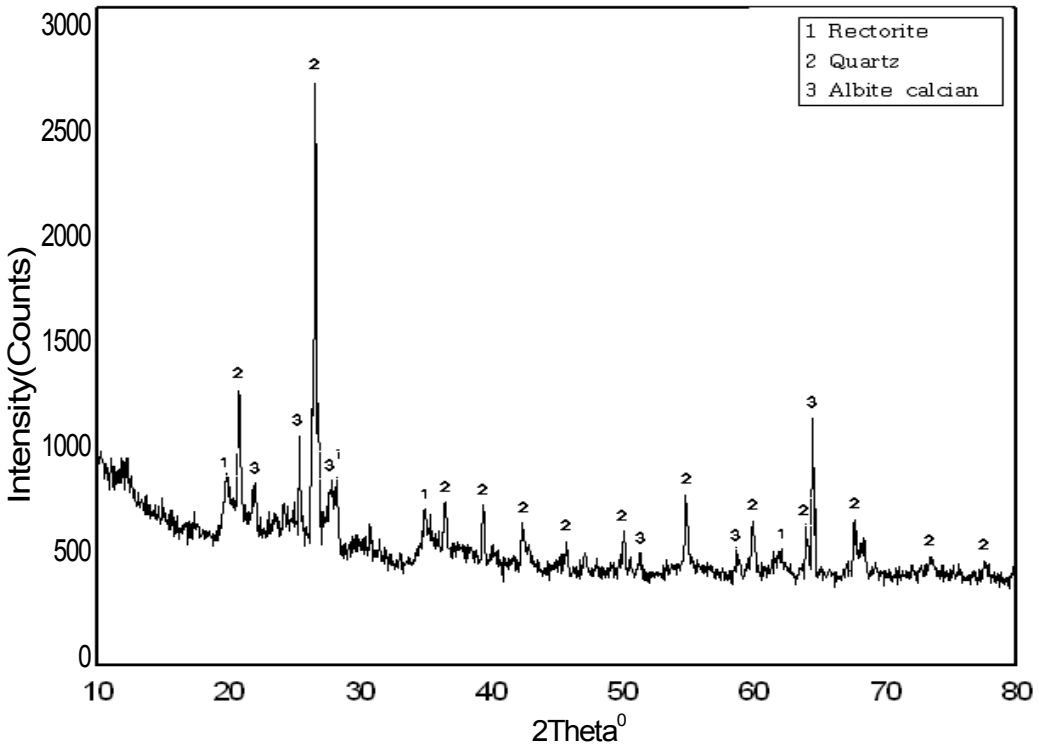


<그림 118> 재령 7일

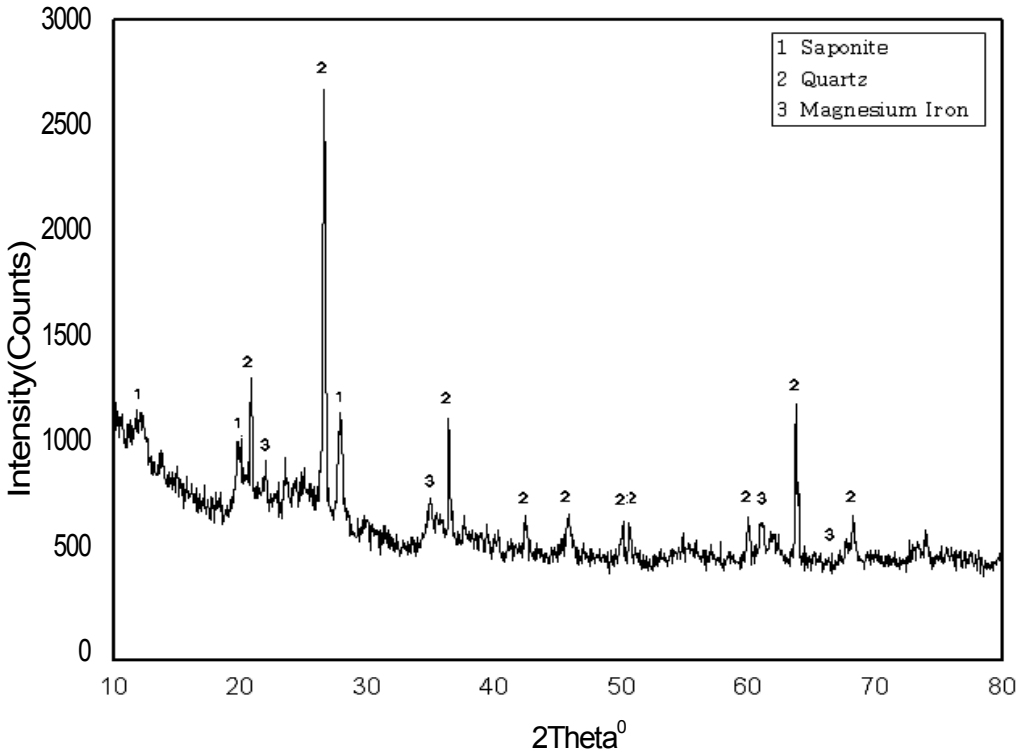


<그림 119> 재령 28일

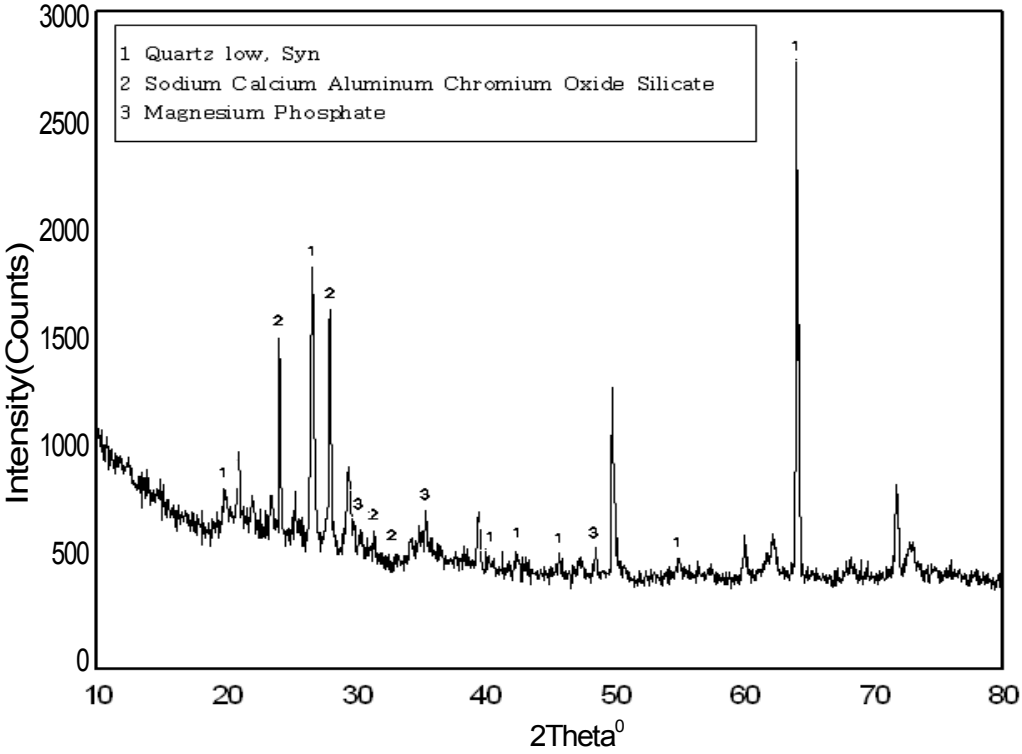
5) 동결융해 실험 후 XED 분석



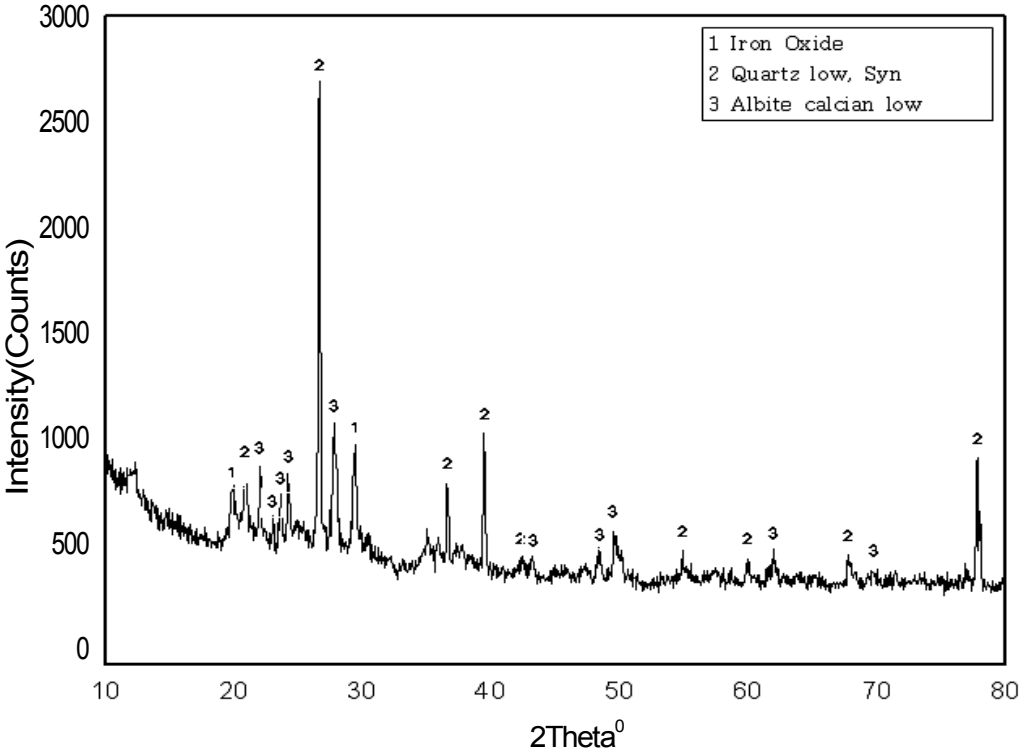
<그림 120> 벤토나이트10%, 섬유 1%



<그림 121> 벤토나이트10%, 시멘트 10%, 섬유 1%



<그림 122> 벤토나이트10%, 메타카올린 10%



<그림 123> 벤토나이트10%, 시멘트 10%, 메타카올린10%

제4절 결론

본 연구는 토사계 혼합 차수재를 이용한 가축매몰지 침출수 대책공법으로 시멘트-벤토나이트 혼합토를 활용하기 위해 일축압축강도 및 투수 특성을 고찰하였으며, 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 시멘트-벤토나이트 혼합토에 혼합토 총 중량의 0, 0.5, 1, 1.5, 2%에 해당하는 만큼 토목섬유를 첨가하여 압축강도를 측정한 결과, 토목섬유를 첨가하지 않은 0%에 비해 1.06, 1.38, 1.12, 1.08배 강도 증진 효과를 나타내었고, 토목섬유 혼합비 1%에서 최대강도를 나타내어 시멘트-벤토나이트 혼합토에 토목섬유를 첨가할 경우 혼합토 총 중량의 1%가 적정한 혼합비로 판단된다.
2. 벤토나이트-시멘트 혼합토에서 시멘트의 첨가에 따라 시멘트의 포졸란 반응에 의한 압축강도의 증가하였고, 시멘트의 포졸란 반응은 혼합토의 강도 증가에 가장 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.
3. 섬유 혼합에 따른 인장강도는 혼합토가 초기에 갖는 점성으로 마찰력이 증가하여 섬유에 대한 구속응력이 증가해 섬유보강시 인장강도가 증가하였으나, 섬유 혼합 시 혼합토가 섬유 사이의 간극을 채우는 것은 한계가 있으며, 간극을 채우고 구속응력을 최대로 발휘할 수 있는 비율을 강도의 면에서 본다면 섬유 1%를 혼합할 때가 최적이라 판단된다.
4. 시멘트-벤토나이트 혼합토는 섬유 혼합에 따라 취성적인 파괴거동이 연성적으로 바뀌었으며, 섬유혼입으로 인해 공시체 내부의 변형에 대한 개선효과가 있는 것으로 판단된다.
5. 메타카올린 혼합에 따른 강도의 증가는 분말도가 서로 다른 풍화토-벤토나이트-시멘트-메타카올린이 서로의 간극을 채워줄수 있는 최적의 배합이 메타카올린 10%일 때로 판단되며 강도역시 메타카올린이 10%일 때 5%나 15%를 혼합하였을 때보다 높은 강도를 나타내었다.
6. 건조습윤 시험 결과 시료가 물과 접촉하여도 최대한 형상을 유지하게 하였으나, 시멘트가 첨가되지 않은 혼합토는 건조습윤 시험 5~6Cycle이후에 급격히 물에 풀어지며 형상을 유지하지 못한 것으로 보아 고화제가 들어가지 않은 혼합토 자체의 고화는 액체에 장시간 노출될 경우 그 내구성이 급격히 떨어진다.
7. 시멘트-벤토나이트 혼합토의 건습시험 후 강도는 섬유 1% 및 메타카올린 10%에서 28일 강도 대비 90%의 강도를 발현하였고 섬유 2%에서는 44%, 메타카올린 20%에서는 80%의 강도를 발현한 것으로 볼 때 메타카올린 혼합토가 섬유 혼합

토에 비해 시멘트와 보다 높은 활성반응이 일어나 건조습윤에 대해 내구성이 높아진 것으로 판단된다.

8. 동결융해 및 건조습윤 시험법에 의해 제작된 시멘트-벤토나이트 혼합토의 강도는 재령 28일 시료에 비해 강도가 최대 90%이상 발현되어, 동결융해 및 건조습윤에 대한 저항력이 있음을 알 수 있다.
9. SEM 및 에너지 분산법에 의한 벤토나이트 혼합토 및 시멘트 벤토나이트 혼합토 시료의 미세구조 분석 결과 시멘트와 메타카올린의 첨가에 따라 침상의 에트린자이트 및 모노설페이트, C-S-H의 생성이 뚜렷하였다.
10. XRD 분석 결과 혼합토의 주요 물질은 Silicon Oxide와 Quartz이며 주로 회절각 27～28°일 때 가장 큰 피크를 보이고 있는데 이는 사용된 재료에 이산화 규소가 주요 원소로서 이것이 반응하여 생성된 것으로 판단된다.
11. 벤토나이트 혼합토 및 시멘트 벤토나이트 혼합토에서 토목섬유 1%, 메타카올린 10%까지 함유량을 증가시킴에 따라 압축 및 인장강도, 동결융해 저항성, 건조습윤 저항성이 증가하였으며, 투수시험 결과 폐기물관리법에서 지정하는 투수계수를 만족하므로, 현장에서도 이러한 배합비를 적용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

제3장 섬유 보강 CSG 혼합토 블록의 강도 특성

제1절 개요

1. 연구 목적

최근 친환경적인 하천관리를 위해 호안 설계 시에도 친수성을 고려한 자연형호안, 생태계보전을 고려한 자연형호안, 경관보전 호안 등으로 구분하여 윗가지덮기, 섶단, 나무말뚝・녹색마대, 돌바구니, 나무말뚝・사석쌓기, 사석・야자섬유두루마리, 녹색마대・돌망태, 돌망태・거석놓기 호안 등이 시공되고 있다.

소방방재청에 따르면 최근 10년간 해마다 자연재난으로 약 1조 9,642억원의 재산피해를 입고 있으며 이 중 태풍으로 1조 427억원, 호우로 5,747억원 등 대부분의 피해가 풍수해로 조사되었다. 풍수해 중에서 많은 부분을 차지하는 것이 중・소하천의 제방 붕괴 등과 같은 피해인데 수충부에서의 많은 피해가 발생하고 있다. 특히 하천 상류유역에서 식생으로 보호된 제방 및 돌망태, 사석쌓기 등 홍수류에 취약한 자연형 호안 제방에서 이러한 피해 양상이 두드러지고 있다. 따라서 하천관리기관에서는 수충부 등 취약구간에 콘크리트 구조물을 이용한 제방 보강공법을 적용하고 있으나 친환경적이지 못한 단점이 있다.

흙의 결합력과 강도를 증진시키기 위하여 흙에 시멘트를 혼입한 시멘트 혼합토는 도로, 주차장 및 광장 등의 포장 뿐만 아니라 사면보호공 및 연약지반 개량 등 다양한 분야에 활용되고 있다(성찬용 등, 2003 ; 성찬용, 2004). 일반 흙을 주원료로 하여 강도 개선을 목적으로 흙의 일부를 시멘트 또는 시멘트계 고화재 등을 사용하기 때문에 콘크리트에 비하여 경제적인 동시에 환경친화적 건설재료로 인식되고 있다(연규석 등, 2010). 그러나 시멘트 혼합토는 취성적인 파괴 형태를 나타내기 때문에 폴리플로필렌 섬유, 폴리비닐알코올 (Polyvinyl alcohol, 이하 ‘PVA’라 약칭 한다) 섬유 및 나일론 섬유 등을 혼합토에 랜덤 분포시켜 강도 뿐만 아니라 연성파괴를 유도하는 섬유보강 혼합토에 대한 연구가 최근 주목을 받고 있다(장병욱 등, 1999; 박성식 등, 2008; Park, 2011).

실제로 섬유혼합 보강토는 혼합이 용이하고 강도의 지속성이 우수하며, 토목섬유 공법의 단점인 보강재를 따라 진전되는 잠재적인 취약점이 없는 등의 장점을 가지고 있어 최근 선진외국에서는 이에 관한 연구가 활발한 실정이다 (Kumar et al., 2006 ; Tang et al., 2007, 2010 ; Consoli et al., 2009, 2010 ; Zaimoglu, 2010).

단섬유를 무작위로 혼합한 토목섬유 혼합토에 대한 기존 연구는 주로 사질토에 자연섬유 또는 폴리프로필렌과 같은 알칼리성에 약한 인공섬유를 이용한 연구가 주

를 이루었으나 본 연구에서는 시멘트와 친화성이 좋은 폴리비닐알코올섬유를 사용하였으며, 시멘트와 모래, 자갈의 혼합토(Cemented sand and Gravel, 이하 ‘CSG’라 한다)재료에 PVA를 혼합하여 CSG 식생블록을 제작하고 강도 및 식생 특성에 주목하였다. CSG 재료는 하상자갈 등의 토사를 물, 시멘트와 함께 혼합한 재료를 총칭하며 주로 댐 분야에서 사용되는 용어로서 가령, 가물막이 댐을 축조할 경우 CSG 공법으로 축조하게 되는데 이 때 이러한 CSG재료를 사용하게 된다.

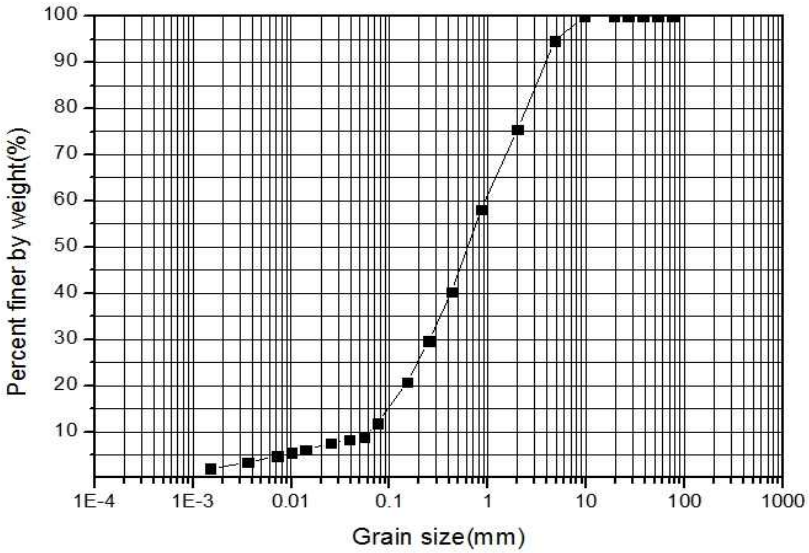
보다 구체적으로, 본 연구는 호안보호 또는 사면보호용으로 활용하기 위한 강도 및 내구성이 우수하고 친환경적이며 경제적인 식생블록을 개발하기 위한 사전 연구로써, CSG 식생블록의 파괴강도 및 식생 특성을 분석하였다. CSG재료를 기본으로 PVA를 혼합한 후 잔디를 식재하여 CSG식생블록을 제조하였으며, 식생블록에 식재된 식생의 생장 특성 분석 및 식생블록의 휨강도 실험을 통한 파괴강도 특성을 고찰하였다.

본 연구를 통해 기존에 수행된 많은 PVA 관련 연구 성과들을 CSG공법에 접목할 수 있는 계기를 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

제2절 재료 및 방법

1. 재료의 특성

본 연구에 사용된 토사는 OO대학교 인근 현장의 터파기시 발생된 굴착토를 사용하였으며, 표 12 및 <그림 124>은 본 연구에 사용된 토사의 기본 물성 및 입도분포 곡선을 나타낸다.



<그림 124> Grain size distribution curve

표 12. Physical properties of coarse aggregates

Type	Size (mm)	Specific gravity	Absorption (%)	Fineness Modulus	Bulk density (kg/m^3)
Coarse	4.75~40	2.73	1.36	6.77	1,592
	0.15~4.75	2.66	1.62	6.54	1,559

표 13. Mechanical properties of normal portland cement (After Yeon et al., 2010)

S.G	Setting time (h-min)		Compressive strength (MPa)		
	Initial	Final	3 days	7 days	28 days
3.15	5-7	7-20	19.4	21.6	32.3

표 14. Chemical compositions of Ordinary Portland cement (After Yeon et al., 2010)

SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	Fe_2O_3
21.09 %	4.84 %	63.85 %	3.32 %	3.09 %	1.13 %	0.29 %	2.39 %

시멘트는 국내 H사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 표 13~표 14은 각각 사용된 골재 및 시멘트의 역학적 특성과 화학적 성분을 나타낸다. 식생블록의 인장강도 증대를 위하여 사용된 섬유는 PVA(RECS100L)를 사용하였고 식생은 광범위한 토양 조건에 잘 적응하는 한지형 잔디로서 톨훼스큐(Tall fescue), 페레니얼 레이그라스(Perennial ryegrass), 켄터키 블루그라스(Kentucky bluegrass)를 혼합하여 적용하였다.

2. 배합설계

CSG 재료에 대한 배합설계는 CSG 재료가 목표설계기준강도와 경제성을 만족하는 합리적인 단위재료량을 결정하는 것이 중요하다. 즉 다짐 및 강도시험과 같은 실내시험을 통하여 설계기준강도를 확보할 수 있는 시멘트량, 물량 및 골재량을 결정하고 시험배합을 통하여 이를 확인하여 최적배합을 도출해야 한다. 일반적으로 CSG 배합설계에 대한 명확한 기준이 제시되고 있지 않으나 크게 다짐시험을 활용한 토질역학적인 방법과 콘크리트 배합설계방법으로 분류된다. 본 연구에서는 토질역학적인 방법으로서 CSG재료의 배합은 총 재료의 중량에 4% 및 6, 8, 10%의 시멘트를 혼합하여 일축압축강도 특성을 분석하였다.

3. 공시체 제작

시멘트량 및 재령에 따른 CSG 재료의 일축압축강도 특성을 분석하기 위하여 다짐시험에서 산출된 최적함수비와 최대건조단위중량을 기준으로 하여 토질역학적 삼상관계를 이용하여 수량 및 물량을 산정한 후 다짐시험과 동일한 수준의 다짐에너지를 나타낼 수 있도록 $\phi 100 \times 200$㎜ 몰드에 CSG 재료를 투입하고 재료분리가 발생하지 않도록 5층으로 나누어 다짐을 실시하여 공시체를 제작하였다. 또한, 재령에 따른 강도 특성을 구명하기 위하여 재령 3일 및 7, 28일 동안 양생을 실시하였다. 양생방법에는 대기 중 양생, 밀봉 양생, 습윤 양생, 수중 양생 등의 방법이 있으나 본 연구에서는 대기 중 양생 방법을 적용하였다.

4. CSG 블록의 배합설계 및 제작

가. 배합설계

CSG 재료의 배합은 시멘트의 사용량에 따른 파괴강도 특성을 분석하기 위하여 총 중량의 4%, 6%, 8%, 10%의 시멘트량을 혼입한 4종류로 하였으며, PVA는 총 중량의 0.6%, 0.8%, 1.0% 등의 3종류로 하였다. 표 15는 본 연구에 사용된 재료의 배합비를 나타낸 것이다.

나. 공시체 제작

식생 블록의 단면은 식생 후 발아율, 피복도 및 식물의 성장 특성 등의 평가가 용이하도록 20×20cm의 크기로 하였으며, 블록의 높이는 식생 후 식물의 뿌리가 고착되어 성장할 수 있는 공간을 확보할 수 있도록 5cm로 하였다. 식생 블록의 제작을 위한 재료의 혼합은 가경식 믹서기를 사용하여 1분간의 예비혼합을 실시하고 가수한 후 3분간 재혼합을 실시하였다. 블록 제작은 혼합된 CSG 재료를 블록용 몰드에 투입하여 재료분리가 발생하지 않도록 3층으로 나누어 수정 E 다짐시험과 동일한 다짐에너지가 발현될 수 있도록 다짐을 실시하였다. <그림 125>는 CSG 블록 제작에 사용된 HILTI TE805 브레이커 및 CSG 블록 몰드를 나타낸다.

식생블록에 대한 휨시험 공시체에 대한 양생방법에는 대기 중 양생, 밀봉 양생, 습윤 양생, 수중 양생 등의 방법이 있으나 본 연구에서는 CSG 재료의 일축압축강도 공시체와 동일하게 대기 중 양생 방법을 적용하였다.

표 15. Mix designs of PVA materials with cement contents (unit: g)

Cement content	Aggregate			cement	PVA	water
	sand	9.5㎜>	4.75㎜>			
4%	1900	1292	711	168.3	15.2	304
					22.8	304
					30.4	304
6%	1900	1292	711	252.4	15.2	304
					22.8	304
					30.4	304
8%	1900	1292	711	336.5	15.2	304
					22.8	304
					30.4	304
10%	1900	1292	711	420.7	15.2	304
					22.8	304
					30.4	304

<그림 125> Hilti vibrating machine and CSG block mould

5. 시험 방법

가. CSG 재료 특성 시험

1) 다짐

국내의 경우 CSG 재료에 대한 다짐시험 방법은 명확한 기준은 제시되어 있지 않으며, 기존의 토질역학적 다짐시험 방법을 그대로 채택하고 있다. 미국의 경우에도 CSG 재료에 대한 다짐 기준이 제시되어 있지 않으며, 본 공법과 유사한 RCC (Roller compacted concrete) 공법의 경우 배합설계에 사용되는 다짐기준을 표준다짐 (ASTM D 698)과 수정다짐 (ASTM D 1557)으로 규정하고 있다. 따라서 본 연구에서는 CSG 재료에 대한 다짐 시험 방법 및 시공법에 관한 명확한 기준이 아직까지 제시되어 있지 않기 때문에 A다짐 방법 (ϕ100×200 ㎜)에 의하여 다짐에너지가 일정하도록 다짐횟수를 조정하여 다짐시험을 실시하였다.

2) 일축압축강도

일축압축강도시험(Unconfined compressive strength, 이하 'UCS'라 한다)은 KS F 2405 (콘크리트의 압축강도 시험방법)에 준하여 재령 3, 7일 및 28일에 ⌀100×200 ㎜인 공시체를 Instron사의 만능시험기를 사용하여 1 ㎜/min의 속도로 하중을 재하하여 측정하였다.

3) CSG 블록의 식생 특성 실험

식생을 위한 블록 위에 배양토를 1cm로 포설하여 씨앗 파종시 씨앗의 유실을 방지하고 발아가 원활히 진행될 수 있도록 하였다. 파종량은 발아율 및 식물의 성장에 따른 피복도를 고려하여 블록 한 개당 톨훼스큐(Tall fescue), 페레니얼 레이그라스(Perennial ryegrass), 켄터키 블루그라스(Kentucky bluegrass)를 각각 0.8g씩 혼합하여 적용하였다.

식생 적용 후 온도 및 외부 환경 조절을 위하여 비닐 하우스내에서 생육이 진행될 수 있도록 하였으며, 씨앗의 발아 및 생육을 촉진하기 위하여 충분한 수분을 공급하였다. 씨앗의 발아 및 초기 생육 상태를 육안으로 매일 관찰하여 초기 발아율, 생장량 및 피복도를 측정하였으며, 파종 후 4주가 경과한 시점에는 뿌리길이를 측정하였다.

식생특성은 재령 28일에 따른 각각의 피복도, 생장량, 뿌리 길이 측정 및 근계력 실험 등을 통하여 분석하였다. CSG 재료를 이용한 식생 블록 내 식물의 성장 특성을 분석하기 위하여 발아율, 피복도, 생장량 및 뿌리길이 등을 파종 후 4주 동안 측

정하였다. 발아율 및 피복도는 육안으로 관찰하여 시멘트의 혼입 유무 및 식물의 종류에 따른 생육 특성을 분석하였으며, 특히 피복도는 시각적 평가방법(visual rating system)을 이용하여 생장 후기(파종 후 4주)에 조사하였다. <그림 126> (a)는 근계력 측정을 위해 근계력 측정용 케이스가 장착된 완성된 식생블록을 나타내며, <그림 126> (b)는 근계력 측정 후 식생블록과 탈락된 케이스 및 식생을 보여준다.

시각적 평가방법에 의한 가시적 피복도 평가 시 점수는 발아 직전 피복이 전혀 되지 않은 나지 상태를 1점, 피복이 가장 양호한 상태를 9점으로 하여 1~9점 사이에서 피복도를 평가하였다(김경남 등, 2003). 또한, 생장량 및 뿌리길이는 식물의 성장에 따른 초장의 길이와 뿌리길이를 직접 측정하여 정성적 평가를 실시하였다.

한편 CSG 재료를 활용한 식생블록에서 단위시멘트량 및 식생 종류에 따라 식물 뿌리의 원지반과의 고착 및 근입에 따른 근계력을 정량적으로 분석하기 위하여 1.96MPa 및 4.90MPa 용량의 인장력 시험기를 이용하였다.

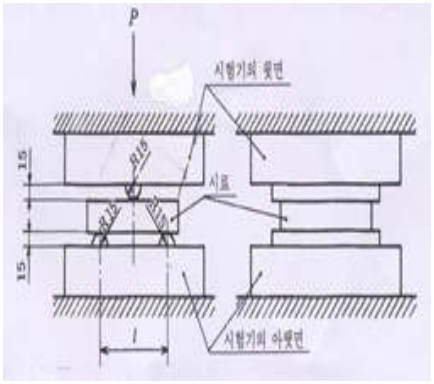
(a) Cover view

(b) Root potential testing view

<그림 126> Cover view and root potential testing view

4) CSG 블록의 휨강도 시험

시료를 <그림 127>와 같이 놓고 지점간 거리를 170mm로 취하여 지점 간 중앙에 하중을 가하여 휨 강도를 측정하였으며 KS F 2408 (콘크리트의 휨강도 시험방법)에 준하여 20×20×5cm인 공시체를 압축강도 시험기로 0.1mm/min의 속도로 하중을 재하하여 측정하였다 <그림 128>참조.



<그림 127> Schematic diagram of testing method

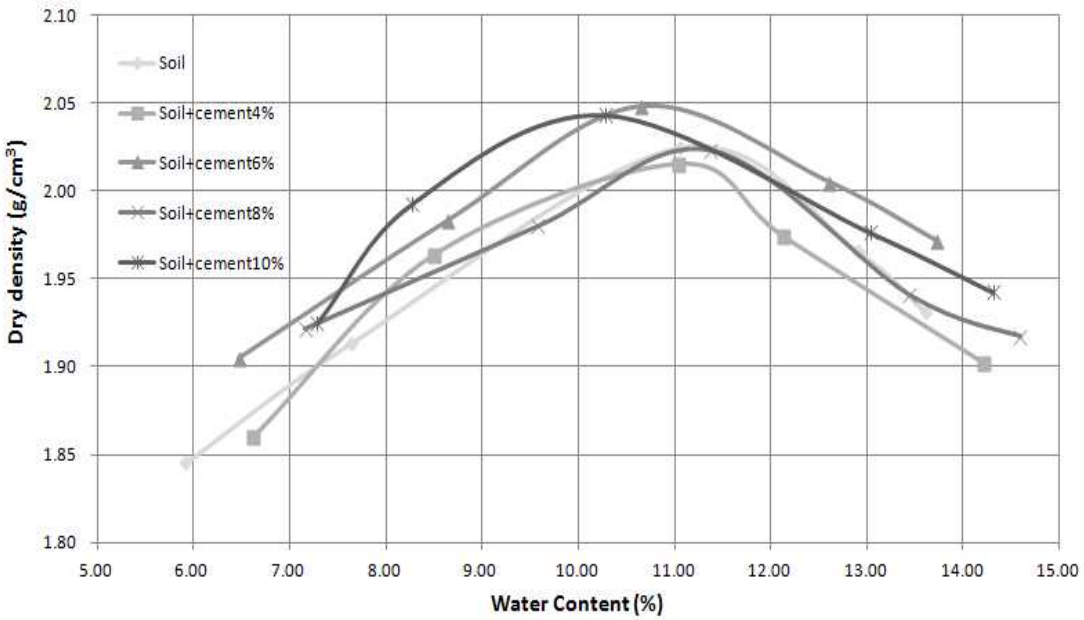
<그림 128> Testing view

제3절 결과 및 고찰

1. CSG 재료 특성

가. 다짐

시멘트량에 따른 CSG재료의 다짐 특성에 의한 최적함수비 및 최대건조단위중량을 분석하기 위하여 시멘트량을 0, 4, 6, 8, 10 %로 달리하여 A 다짐에 의한 다짐시험을 실시하고 각 단위시멘트량에 따른 최대건조단위중량 및 최적함수비를 도출하였다. <그림 129>은 시멘트량에 따른 최적함수비 및 최대건조단위중량을 나타낸다.



<그림 129> Optimum water content curve by A compaction

시멘트량에 따른 A다짐시험 결과 시멘트량 0, 4, 6, 8, 10%에 대한 최대건조밀도 및 최적함수비는 각각 2.14, 2.05, 2.05, 2.02, 2.04g/cm^3 및 8, 10, 10.65, 11.38, 10.29%로 나타나 시멘트량에 따른 최대건조밀도 및 최적함수비는 근소한 차이를 보이는 등 전반적으로 유사한 경향을 나타내었다. Watanabe et al. (2003)은 2.5%의 시멘트를 사용한 CSG 재료에서 최적함수비는 다짐방법에 따라 차이가 있으나 대략 5 ~ 8.7%, 최대건조단위중량은 2.15 ~ 2.2g/cm^{3}정도 인 것으로 발표한 바 있는데, 본 연구 결과는 10~11.38% 및 2.02 ~ 2.05g/cm^{3}정도를 나타내어 시멘트 혼합비 등을 고려한다면 거의 유사한 결과를 나타내고 있다.

나. 일축압축강도

CSG재료에서 시멘트량은 강도 특성과 밀접한 관계가 있으며, 일반적으로 시멘트량이 많을수록 강도는 증가하지만 경제성 및 설계기준강도 등을 고려하여 시멘트량에 대한 최적배합비를 도출하는 것이 중요하다. <그림 130>은 CSG 재료의 재령 및 시멘트량에 따른 일축압축강도를 나타낸다.

<그림 130>(a)은 재령 3일, 7일, 28일에서의 압축강도를 나타낸 것으로 재령 3일에서 급격한 강도 발현을 볼 수 있고 7일 이후부터는 강도의 증가율은 둔화되는 것을 볼 수 있다. 재령 7일 강도는 재령 28일 강도의 70% 수준 이상으로 나타나고 있다. 김창우(2010)는 대기 중 3일간 양생한 시멘트 혼합비 4, 8, 12, 16%의 시멘트 혼합토의 일축압축강도시험 결과 각각 0.54 MPa, 2.04 MPa, 3.91 MPa, 6.49 MPa로 나타났다고 보고한 바 있다. 본 연구 결과에서는 대기 중 3일간 양생한 시멘트 혼합비 4, 6, 8, 10%의 시멘트 혼합토의 일축압축강도시험 결과 각각 1.84 MPa, 2.58 MPa, 2.99 MPa, 3.71 MPa로 나타났다. 동일한 혼합비인 4%와 8%에서 본 연구결과와 김창우(2010)의 연구결과를 비교해 보면 4%에서는 본 연구결과가 약간 높은 결과를 나타냈고 8%에서는 거의 유사한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

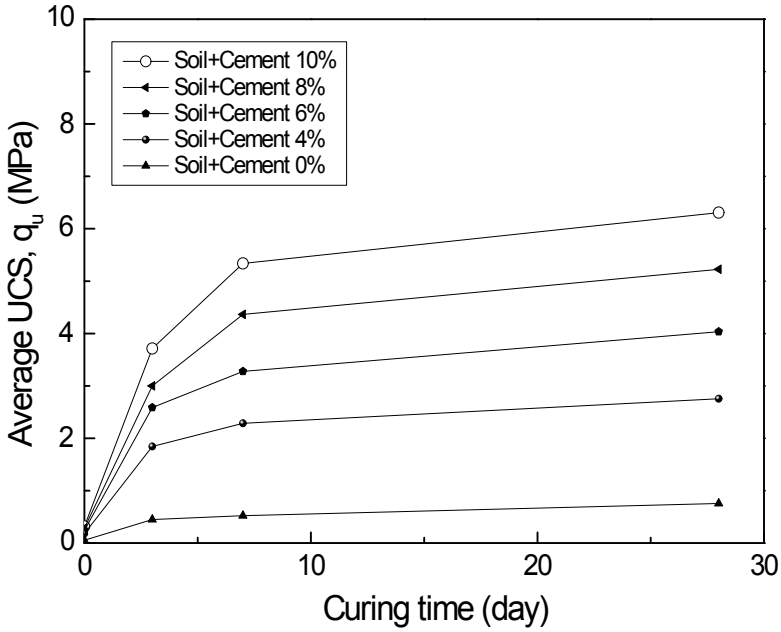
<그림 130>(b)는 시멘트 함유량에 따른 일축압축강도의 관계 나타낸 것으로 0.997 이상의 높은 상관성을 갖는 것을 알 수 있다. 시멘트의 함유량이 많을수록 일축압축강도는 커지며 소량의 시멘트량이라 하더라도 시멘트가 강도특성에 미치는 주요 인자임을 알 수 있다.

시멘트 함유량 10%에서 28일 강도는 6.3 MPa, 7일 강도로는 5.2 MPa에 이르고 있는데, 영국 및 미국에서 고속도로 기능으로 Soil cement를 사용할 때 압축강도의 기준으로 7일 양생하여 1.75 MPa의 압축강도를 취하고 있으며 미국공병단의 연구에 의하면 σ=1.4～2.1 MPa만 있으면 파괴는 일어나지 않고 P.A.C에 의하면 σ=2.1 MPa이상의 Soil cement는 항상 각종 내구성 시험에 합격한다고 한다(조진구, 1974). 건축 자재로 사용한다면 우리나라의 시멘트 벽돌을 기준으로 하여 28일 강도 5.0 MPa정도이면 충분하므로 8%이상의 시멘트를 혼합하면 소요 강도의 CSG 호안블록 등 CSG 재료를 이용한 블록 제품을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

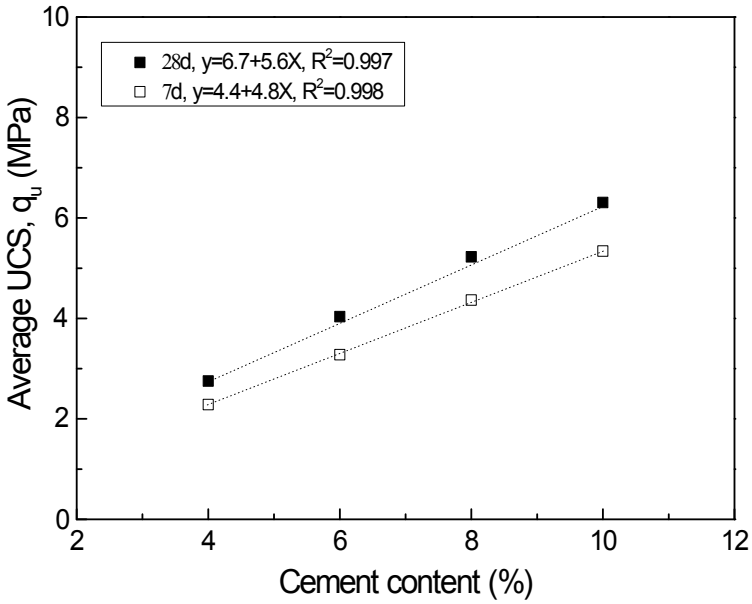
표 16는 28일 강도에 대한 각 시료 크기별 강도비를 나타낸 것으로 3일 강도의 경우 28일 강도의 약 57～67%, 7일 강도의 경우 28일 강도의 약 69～85%수준의 강도를 나타내고 있다.

표 16. Average UCS ratio of the specimens

Curing time	Cement 0 %	Cement 4 %	Cement 6 %	Cement 8 %	Cement 10 %
3 days	0.60	0.67	0.64	0.57	0.59
7 days	0.69	0.83	0.81	0.84	0.85
28 days	1	1	1	1	1



(a) Curing time vs. average UCS



(b) Cement content vs. average UCS

<그림 130> Variation of average UCS due to curing time and cement content

2. 식생 특성

표 17은 PVA를 혼합한 CSG 식생블록 내 생장량, 피복도, 근계력 등 식생 특성을 나타낸다. 식생 실험에서 시멘트량에 따른 배합에 관계없이 모든 식생블록에서 약 4~7일 사이에 초기발아가 시작되었으며, 초기발아율은 약 60~65%를 나타내었다. 이와 같이 초기발아율이 높게 나타난 것은 잔디를 혼파하였기 때문으로 판단되는데, 김경남 등(2003)은 켄터키 블루그라스, 페레니얼 레이그라스 및 톨훼스큐 중 페레니얼 레이그라스가 가장 빠른 발아속도를 나타내며, 켄터키 블루그라스가 가장 발아속도가 느리다고 발표한 바 있다.

표 17. Growth properties within CSG planting block after mixed seeding

Cement content	PVA(%)	Growth length (cm)		Cover view		Root length (cm)	
		No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2
4%	0.6	8.5	7	8	8	3.5	1.5
	0.8	8	8	8	7.5	3	2
	1.0	7.5	8	9.5	8	3.3	2
6%	0.6	8	7	7	8	3	3
	0.8	10	6	8	8	5.5	5
	1.0	9	5.5	9.5	7.5	4.5	3
8%	0.6	10	7.5	8	8.5	3.5	1.5
	0.8	9.5	6	8	8.5	4.5	2
	1.0	9	5.5	9	7.5	4	1.5
10%	0.6	10	6.5	9.5	7.5	3.5	3
	0.8	9	6.5	9.5	8.5	3.5	1.2
	1.0	9	6.5	8.5	7.5	3.5	2.5

한편, 시멘트량에 관계없이 모든 식생블록에서 모두 높은 초기발아율을 나타낸 것은 CSG 식생블록 제작 시 블록 위에 배양토를 포설함으로서 식생의 발아 조건을 개선하였을 뿐만 아니라 초기 발아가 파종 후 1주일 이전에 진행되어 CSG 지반이 완전하게 경화하지 않은 상태였기 때문으로 판단된다. 따라서 시멘트를 혼입한 모든 CSG 배합에서도 식물의 종류에 관계없이 발아가 이루어지는 것을 고려할 때 초기발아 측면에서 시멘트의 혼입량에 관계없이 CSG 재료의 식생 적용이 가능한 것으로 판단된다.

표 17에서 보는 바와 같이 파종 후 4주가 경과한 시점에서 잔디 3종을 파종한 식생블록에서 식물의 지상부 생장량은 CSG 배합에 관계없이 모든 블록에서 6~10cm를 나타내었다. CSG 배합에 따른 지상부 생장량의 차이는 거의 없는 것으로 나타나 시멘트의 혼입이 CSG 식생블록에 식재된 식물의 생장특성에는 크게 영향을 미치지

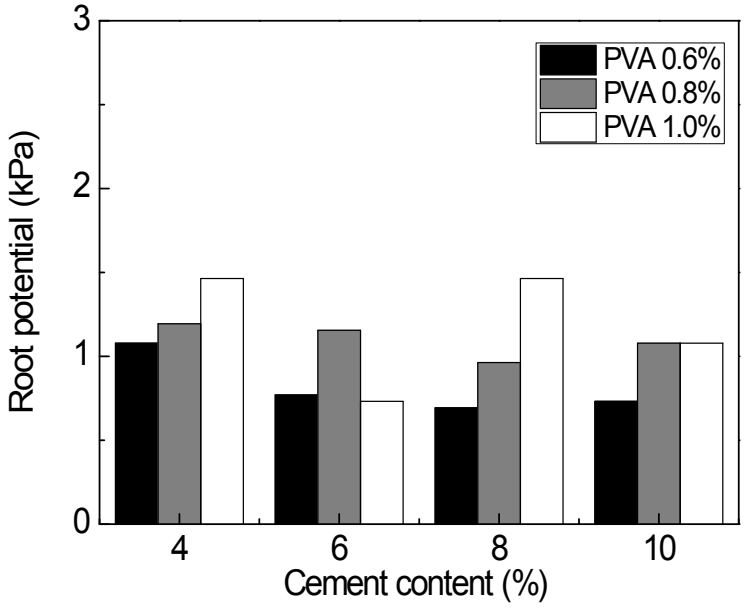
않는 것으로 판단된다. 한편, 잔디계열과 초본식물을 혼합 파종할 경우 잔디계열의 높은 초기 생장속도와 초기 생장속도는 늦지만 생장기간이 길어짐에 따라 줄기와 잎에 의한 피복 면적을 증가시킬 수 있는 초본식물의 상호작용에 의해 녹화공법에 유리할 것으로 판단된다.

또한 시멘트량에 관계없이 파종 후 4주가 경과한 시점에서 잔디 3종을 파종한 식생블록에서 피복도 7.5점 이상의 높은 피복도를 나타내었다. 상기의 결과를 비추어 볼 때 초기성장 속도가 우수한 잔디계열을 혼합 파종 할 경우 녹화 공법 적용시 매우 유리할 것으로 판단된다.

3. 근계력 특성

<그림 131>은 PVA가 혼입된 CSG 식생블록 내에서 파종 후 4주가 경과한 시점에서 근계력 측정 결과를 나타낸다.

본 연구 결과 28일 재령의 시멘트 함유량 4%, 6%, 8%, 10%의 CSG 식생블록에 대한 PVA (0.6%, 0.8%, 1.0%) 혼합 비율에 따른 각각의 근계력은 1.08 ~ 1.46 kPa, 0.77 ~ 1.16 kPa, 0.69 ~ 1.46 kPa 및 0.78 ~ 1.08 kPa의 범위를 나타내었으며, 시멘트 4%를 배합한 식생블록에서 대체적으로 높은 근계력을 나타내었는데, 식생블록을 절단하여 유관 관찰한 결과 시멘트를 적게 혼입한 식생블록은 식물의 뿌리가 상대적으로 조금 더 깊게 관입하는 것을 볼 수 있었으며 이러한 현상이 부착력을 높이는 결과를 초래하여 근계력도 높게 나타나는 것으로 판단된다. 또한 PVA 혼합 비율이 높을수록 근계력도 높아지는 것을 알 수 있어 섬유는 식생블록의 인장력을 증진시켜 근계력을 높이는데 일조하는 것으로 사료된다.



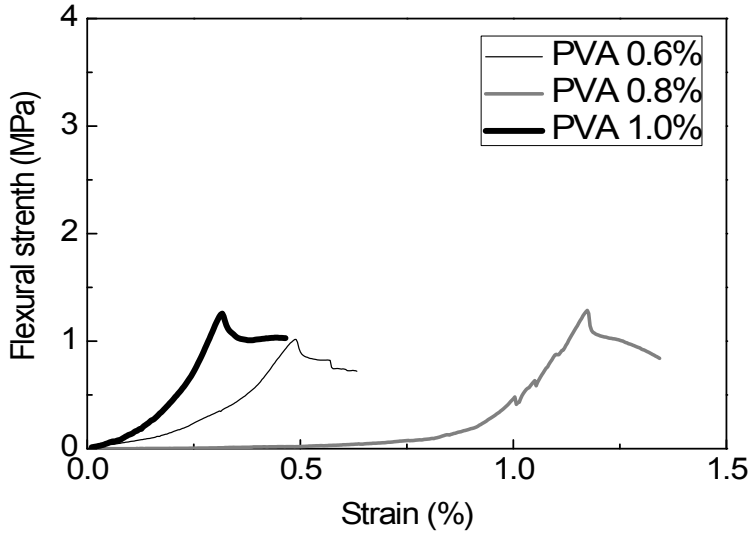
<그림 131> Root potential vs. cement content with PVA

4. CSG 블록의 휨강도 특성

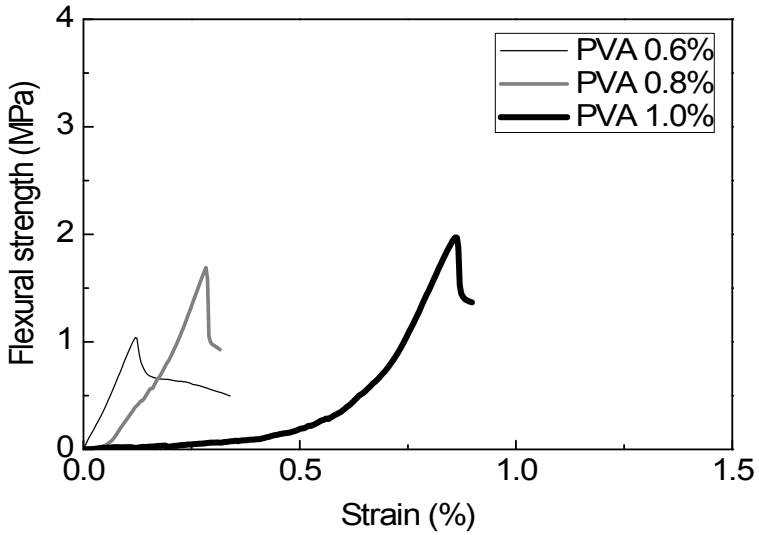
일반적으로 시멘트량은 강도 특성과 밀접한 관계가 있으며 일반적으로 시멘트량이 많을수록 강도는 증가하지만 경제성 및 설계 기준 강도 등을 고려하여 시멘트량에 대한 최적 배합비를 도출하는 것이 중요하다.

<그림 132>~<그림 135>는 재령 28일의 토목 섬유 및 시멘트 함유량에 따른 CSG 블록의 휨강도를 나타낸다. <그림 132>에서 PVA 0.6%, 0.8%, 1.0일 때의 휨강도는 각각 1.02 MPa, 1.29 MPa, 1.26 MPa이며, <그림 133>에서 PVA 0.6%, 0.8%, 1.0일 때의 휨강도는 각각 1.04 MPa, 1.69 MPa, 1.97 MPa로 나타났다. 또한 시멘트 혼합비 8%인 <그림 134>의 경우 PVA 0.6%, 0.8%, 1.0일 때의 일축압축강도는 각각 2.17 MPa, 2.40 MPa, 2.54 MPa이며, <그림 135>에서 PVA 0.6%, 0.8%, 1.0일 때의 일축압축강도는 각각 3.14 MPa, 3.25 MPa, 3.76 MPa로 나타났다.

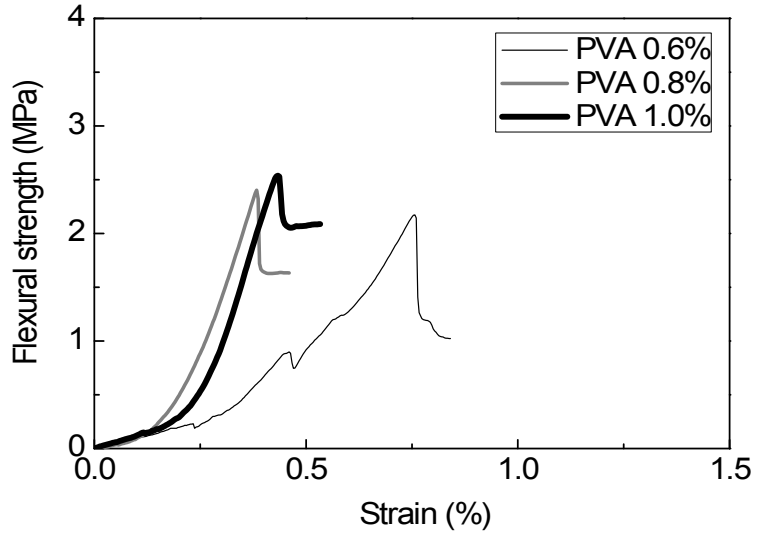
시멘트 함유량이 많아질수록 파괴강도가 증가하며 특히 시멘트 함유량 10%에서 급격하게 파괴강도가 증가하며, 응력-변형률 거동이 최대 강도에 도달한 후 급작스럽게 응력이 떨어지는 취성적인 파괴현상을 보임을 알 수 있다. 또한, 시멘트비가 증가할수록 강도는 증가하고 섬유비가 클수록 강도도 크나 섬유비 보다는 시멘트비에 영향을 더 많이 받음을 알 수 있다. 이는 시멘트에 의하여 생성된 수화생성물은 흙과의 결합력을 증가시킬 뿐만 아니라 혼입된 PVA 섬유와의 부착력 향상에도 기여하여 섬유 보강 혼합토 재료의 파괴강도 증진에 효과적일 것으로 판단된다.



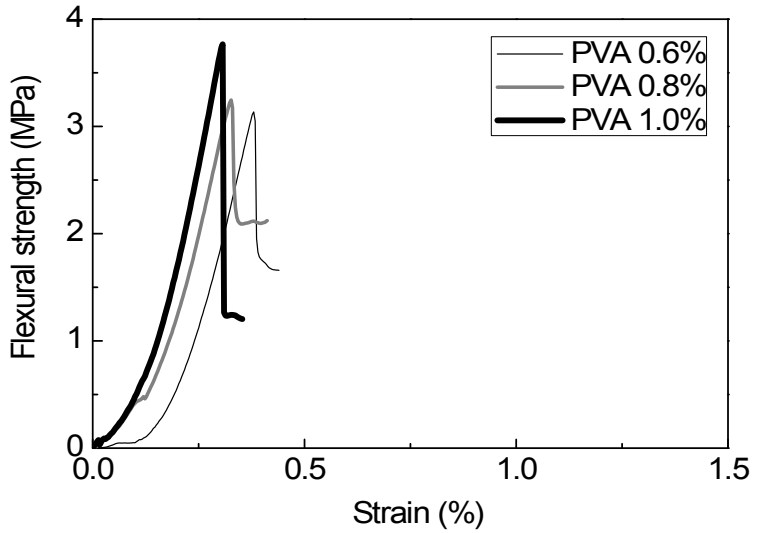
<그림 132> Flexural strength of CSG blocks with PVA (Cement content 4%)



<그림 133> Flexural strength of CSG blocks with PVA (Cement content 6%)



<그림 134> Flexural strength of CSG blocks with PVA (Cement content 8%)



<그림 135> Flexural strength of CSG blocks with PVA (Cement content 10%)

제4절 결론

본 연구에서는 섬유 보강 CSG 블록에 식재된 식생의 생장 특성 분석 및 식생블록의 휨강도 실험을 통한 파괴강도 특성을 고찰하였으며, 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 파종 후 4주가 경과한 시점의 CSG 식생블록에서 시멘트 배합에 관계없이 식재된 잔디의 생장량 차이는 거의 없는 것으로 나타나 시멘트의 혼입이 CSG 식생블록에 식재된 식물의 지상부 생장 특성에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.
2. CSG 식생블록에서 초기성장 속도가 우수한 잔디계열을 혼합 파종 할 경우 녹화공법 적용시 매우 유리할 것으로 판단된다.
3. CSG 식생블록에서 PVA를 0.6～1.0% 혼합한 경우 PVA 비율이 높을수록 근계력도 높아져, PVA는 식생블록의 인장력을 증진시켜 근계력을 높이는데 일조하는 것으로 판단된다.
4. CSG 식생블록에서 시멘트 혼합비를 4%, 6%, 8%, 10%로 하고 PVA를 0.6～1.0% 혼합한 경우 최대 휨강도는 시멘트 혼합비 10%, PVA 1.0%일 때 3.76 MPa를 기록하였으며, 시멘트비가 증가할수록 휨강도는 증가하고 섬유비가 클수록 휨강도도 크나 섬유비 보다는 시멘트비에 영향을 더 많이 받는 것으로 판단된다.
5. CSG 식생블록에서 PVA를 혼합한 경우 시멘트에 의하여 생성된 수화생성물은 흙과의 결합력을 증가시킬 뿐만 아니라 혼입된 PVA 섬유와의 부착력 향상에도 기여하여 섬유 보강 혼합토 재료의 파괴강도 증진에 효과적일 것으로 판단된다.

제4장 연구개발 성과 및 성과 활용계획

제1절 연구개발결과의 활용방안 및 기대성과

1. 연구개발결과의 활용방안

○ 활용 대상 분야 ;

- 가축 매몰지 조성
- 폐기물 매립지 조성

○ 활용을 위한 후속 조치

- 연구 개발된 핵심기술에 대한 특허 출원 및 등록을 통해 지식재산권 확보
- 산업체에 기술 이전을 통한 기술경쟁력 제고 및 사업화를 위한 원천기술 제공

2. 기대성과

가. 학문적, 인력양성 측면

○ 신기술 개발로 친환경 건설 구조물 분야의 인재 양성

○ 연구개발 과정에서 획득한 각종 자료를 학생들에 대한 교육자료로 활용

○ 연구 개발된 결과를 국내·외 저명 전문학술지에 발표를 하여 과학기술 및 학문수준 향상에 기여

나. 기술적, 경제·산업적 측면

○ 토사계 혼합 차수재를 이용한 가축 매몰지 침출수 유출 방지로 생태환경 개선

○ 현장에서 간편하게 시공 가능한 가축 매몰지 건설 공법 마련

○ 내구성이 강한 차수재 적용으로 계절적 영향을 받지 않는 안정한 가축 매몰지 구축

○ 홍수로 인한 침출수 유출을 방지할 수 있는 가축 매몰지 방재대책 수립에 기여

○ 개발된 기술을 시공업체 이전으로 연간 50억원 이상의 시장 확보가 가능한 원천기술 제공

○ 연구결과의 사업화로 연평균 10여명의 생산현장 직접고용 효과 기대

○ 2중 침출수 대책 수립으로 주민들의 만족도 제고

제2절 제품 및 시장 분석

1. 생산 및 시장현황

가. 국내 제품생산 및 시장 현황

□ 제품 양산계획

○ 중앙 및 지방행정기관과 협력시스템 구축

- 가축 전염병 발생 시 즉시 투입 가능하도록 시스템 구축
- 가축 전연병 관련기관 및 설계·시공업체 간 MOU 체결

□ 판로확보 및 마케팅 계획

○ 공공기관에서 추진 중인 신기술 인증 제도 적극 참여

○ 논문 및 학술발표대회를 통한 적극 홍보

○ 학술지 기술기사를 통한 적극 홍보

□ 국내·외 주요 판매처 현황

판매처	국가 명	판매 단가 (천원)	예상 연간 판매량(개)	예상 판매기간(년)	예상 총판매금 (천원)	관련제품
한영토건	한국	50 / m^2	10,000 m^2	10	5,000,000	설계 및 시공법

□ 사업화 계획

구 분		사업화 년도		
		(2013)년 (개발종료 해당년)	(2014)년 (개발종료 후 1년)	(2015)년 (개발종료 후 2년)
사업화 제품		토사계 혼합 차수재	토사계 혼합 차수재	토사계 혼합 차수재
투자계획(백만원)		100	100	100
판매 계획 (백만원)	내 수	1,000	1,000	1,000
	수 출	-	1,000	2,000
	계	1,000	2,000	3,000
수입대체효과(백만원)		1,000	2,000	3,000
고용 창출(명)		3	5	7

□ 기술이전 희망 업체

○ 업체명 ; 강원도 춘천시 소재 한영토건

○ 업체의 요구사항 ; 특허가 등록되는 대로 기술이전 희망

○ 기술이전비 ; 추후 협의

나. 국외 제품생산 및 시장 현황

○ 동남아에서도 최근 가축 전염병이 자주 발생되고 있어 가축 사체 매몰 시 침출수 유출로 인한 여러 문제점들이 발생하고 있다. 따라서 본 연구에 의해 현재의 매몰공법에 사용되는 혼합토의 단점을 보완하여 차수매트가 제 역할을 하지 못하는 경우에도 보조 차수재로서 차수 역할을 충분히 수행하고 상재하중 및 측압에 저항하도록 하여 균열이나 전단대 발생을 억제할 수 있도록 하는 토사계 혼합 차수재 공법을 우리나라 농촌지역에 적용하는 것을 우선적으로 추진하며, 시장 확보에 적극 나선다면 동남 아시아 국가에 기술이전도 가능할 것으로 예상된다.

2. 개발기술의 산업화 방향 및 기대효과

가. 산업화 방향(제품의 특징, 대상 등)

○ 토사계 혼합 차수재 개발 후 연구 결과물을 특허 및 신기술로 등록 한 후 건설회사에 기술이전하여 이들로 하여금 개발된 기술을 실시케 할 계획이다.

○ 특허 및 신기술 획득과 더불어 농림수산식품부와의 사전 협력 등을 통해 기술이 개발될 경우 즉시 적용이 가능할 수 있도록 대책을 강구할 것이다.

나. 산업화를 통한 기대효과

(단위 : 백만원)

산업화 기준 / 항 목	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	계
직접 경제효과	200	300	400	500	600	2,000
경제적 파급효과	100	150	200	250	300	1,000
부가가치 창출액	100	200	300	400	500	1,500
합 계	400	650	900	1,150	1,400	4,500

제3절 경제성 분석

1. 목적

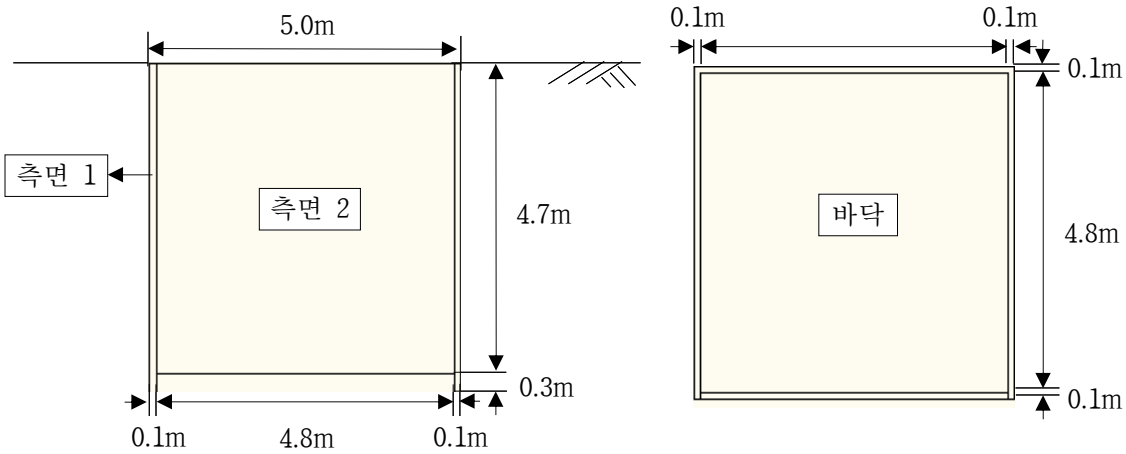
본 검토는 금회 연구결과로부터 제시된 배합비로 차수재를 시공하는 경우의 경제성을 평가하는 것을 목적으로 한다.

○ 최적배합비 1 : 시멘트 10% + 벤토나이트 10% + 흙 80%
토목섬유를 총 중량비의 1%첨가
- 매몰지내에서 흙의 전단거동이 크게 나타날 것으로 예상되는 지점에 사용

○ 최적배합비 2 : 시멘트 10% + 벤토나이트 10% + 흙 80%
메타카올린을 시멘트 중량의 10% 첨가
- 동절기 혼합토의 반응이 늦게 나타날 것으로 예상될 때 사용

2. 배합비별 경제성 검토

가. 매몰지 시공 예시



(a) 측면도 (b) 평면도

그림 136. 매몰지 시공 개념도
(측면 및 바닥의 보조차수재 두께는 구제역긴급행동지침에 근거함)

나. 혼합토 수량산출

1) 혼합토량

	가로(m)	세로(m)	두께(m)	면수	토량환산계수 (L)	체 적 (m^3)	단위중량 (t/m^3)	중 량 (kg)
바닥	5.0	5.0	0.3	1	1.2	9.00	1.8	16,200
측면1	5.0	4.7	0.1	2		5.64		10,152
측면2	4.8	4.7	0.1	2		5.42		9,756
계(A)								36,108

다. 혼합토 재료비 산출

2) 단가

재료	단 가(원/kg)
나이콘 화이버	8,300
메타카올린	1,000
벤토나이트	600
시멘트	100
흙(현장토 집토)	1,036

3) 재료비 산출

가) Case 1: 구제역 긴급행동지침(점토광물 15% + 흙 85%)

재료	산출근거	중 량(kg)	단 가(원)	재료비(원)	비율	절감율(%)
벤토나이트	0.15A	5,416.2	600	3,249,720		
흙	0.85A	30,691.8	1,036	31,796,705		
계				35,046,425	1	-

나) Case 2: 시멘트 10% + 벤토나이트 10% + 흙 80% 및 토목섬유를 총 중량비의 1%첨가

재료	산출근거	중 량(kg)	단 가(원)	재료비(원)	비율	절감율(%)
시멘트	0.10A	3,610.8	100	361,080		
벤토나이트	0.10A	3,610.8	600	2,166,480		
흙	0.80A	28,886.4	1,036	29,926,311		
토목섬유	첨가재로서 0.01A	361.08	8,300	2,996,964		
계				35,450,835	1.01	-1

다) Case 3: 시멘트 0% + 벤토나이트 10% + 흙 80% 및 메타카올린을 시멘트 중량의 10% 첨가

재료	산출근거	중 량(kg)	단 가(원)	재료비(원)	비율	절감율(%)
시멘트	0.10A(=B)	3,610.8	100	361,080		
벤토나이트	0.10A	3,610.8	600	2,166,480		
흙	0.80A	28,886.4	1,036	29,926,311		
메타카올린	첨가재로서 0.10B	361.08	1,000	361,080		
계				32,814,951	0.94	6

3. 결론

○ 메타카올린 혼합토를 사용하는 경우 재료비 6%를 절감할 수 있을 것으로 예상된다.
○ 토목섬유 혼합토를 사용하는 경우 재료비 1% 증가할 것으로 예상됨.
○ 보조차수재를 시공함으로써 침출수 유출시 발생하는 토양 오염 및 지하수, 하천 오염을 방지하여, 구제역으로 인한 2차 피해보상(용지보상, 하천오염으로 인한 피해 등) 비용을 절감할 수 있을 것으로 판단된다.

제4절 향후 연구 계획

1. 특허분석 측면

기존 특허의 분석결과, 토사에 용액형 활성 실리카를 혼합시켜 구성하여 반복재하하중 등에 대한 취성적인 파괴를 방지하며 연성적인 변형성능을 겸비하고, 혼합재 밀도나 함수비의 변동에 의한 리스크를 회피 저감하는 것을 특징으로 하는 공법으로서 본 연구에서 추진하고자 하는 현재의 매몰공법에 사용되는 혼합토의 단점을 보완하여 차수매트가 제 역할을 하지 못하는 경우에도 보조 차수재로서 차수 역할을 충분히 수행하고 상재하중 및 동결융해, 건습, 측압에 저항하도록 하여 균열이나 전단대 발생을 억제할 수 있도록 하는 토사계 혼합 차수 공법과는 큰 차이가 있는 것으로, 본 연구를 통해 도출된 결과가 실용화의 필수요건인 특허와 신기술 획득이 가능하도록 최선의 노력을 다할 것이다.

2. 논문분석 측면

기존의 논문은 화강풍화토와 벤토나이트, 제올라이트, 벤토매트 등을 소재로 혼합반응 차수재에 대한 연구를 수행하여 일반수와 침출수를 사용하여 혼합차수층에 제올라이

트 및 벤토매트 적용에 따른 투수특성에 대한 영향을 검토 한 바 있으며, 본 연구에서는 매몰공법에 사용되는 혼합토의 단점을 보완하여 차수매트가 제 역할을 하지 못하는 경우에도 보조 차수재로서 차수 역할을 충분히 수행하고 상재하중 및 동결융해, 건습, 측압에 저항하도록 하여 균열이나 전단대 발생을 억제할 수 있도록 하는 토사계 혼합 차수재를 개발하고자 하며 추가 연구를 통해 재료개발 및 공법 연구를 수행하여 국내 및 국외의 저명 학술지에 발표할 계획이다.

3. 제품 및 시장분석 측면

가축 매몰지 관련 사업은 농림수산식품부의 예산책정에 의해 자치단체에서 사업을 시행하며, 가축 전염병 발생시 본 기술은 사업화가 가능하다. 이에 대비하여 본 연구진은 연구개발 기간 동안 특허, 신기술 등 지적재산권의 획득을 통해 사업화 기반을 구축할 것이며, 개발된 기술이 국내에서 범용화 될 경우 동남아시아 같이 가축을 사육하고 있는 국가의 전염병 발생시 가축 매몰지 침출수 방지 공법 및 폐기물 매립지 침출수 방지 공법으로 기술을 수출할 계획이다.

참고문헌

권무남, 남효석, 1998, 토목섬유로 보강한 모래-벤토나이트 차수재의 장기적 투수특성, 한국관개배수학회논문집 KCID journal 5(2):9-19.

김미정, 2002, 폐기물 매립장에서 차수벽으로 사용되는 토양첨가제의 중금속 차단능력, 2002 서울산업대학교 논문집 53(1):111-120.

김성필, 2007, 폐석분과 슬레그미분말 혼합차수재의 투수성 분석 및 차수재 특성에 관한 연구, 2007 계명대학교(박사).

김영균, 2002, 폐기물 매립장 침출수방지 차수시설에 관한 연구, 2002 조선대학교 산업대학원(석사).

김완영, 정우성, 2005, 차수벽 콘크리트의 섬유보강에 따른 품질향상 방안연구, 대한토목학회 학술대회 2005(10):1137-1140.

김준섭, 박준범, 2009, 폐석회를 이용한 매립지 차수재로의 이용방안, 대한환경공학회 1998:355-356.

김준섭, 이승학, 박준범, 1999, 폐석회를 이용한 매립지 차수재 개발, 한국지반공학회 1999년봄 학술발표회 논문집 1999:521-528.

김찬기, 정수훈, 김중철, 박욱근, 조원범, 2008, 석분 혼합토의 차수재 활용에 관한연구, 대한토목학회 2008(10):2211-2214.

김학문, 2003, 흙-벤토나이트 혼합반응 차수재의 투수특성, 한국폐기물학회지 20(8):800-806.

김홍관, 2000, 폐기물 매립지 적용 토목용 고분자 재료의 특성평가, 전남대학교 대학원(석사).

남경민, 임남응, 황대규, 2002, 아타풀가이트를 이용한 매립지 차수재로의 방안, 한국폐기물학회 2002:65-68.

남정만, 윤중만, 김기영, 김광일, 2005, 현무암 석분 슬러지를 이용한 차수재의 적합성에 관한 연구, 한국폐기물학회지 22(5):464-471.

도덕현, 윤춘경, 공길용, 1995, 폐기물 매립장 침출수 방지용 차수벽 설치공법, 한국지반공학회 1995년도 연약지반 안정처리 시공관리 세미나 01:88-116

류권, 채교익, 2000, Rowcell 실험에 의한 점토-벤토나이트 차수재의 투수계수 측정, 대한토목학회 학술발표회 논문집 2000(2):277-280

배장식, 2000, 점토-벤토나이트 차수재의 강도특성에 관한 연구, 상주대학교 산업대학원(석사).

백남진, 이처근, 허열, 2000, 안정화시킨 제지슬러지의 매립지 차수재 및 복토재로서

의 활용가능성, 충북대학교 건설기술논문집 19(1):117-128.
복장민, 2007, 해성점토지역 매립지 차수시스템을 위한 MCG고화재 적용, 충남대학교 대학원(석사).
서민우, 김동진, 박준범, 박인준, 2002, 토목섬유 점토 차수재(GCL)와 지오멤브레인(GM)의 접촉 전단강도 평가, 한국지반공학회논문집 18(4):137-146.
손준익, 정하익, 장연수, 1992, 폐기물 매립장을 위한 혼합 차수재의 물성에 관한 연구, 한국지반공학회지 8(3):51-60.
송영우, 정상훈, 1997, 제지공장 슬러지의 지반공학적 활용, 대한토목학회 학술발표회 논문집 1997(3):475-478.
신은철, 강현희, 박정준, 김성환, 2010, 인공지반동결시스템을 이용한 오염지반차수벽 형성에 관한 실험적 연구, 한국지반환경공학회 학술발표회논문집 2010(5):127-132.
신은철, 김성환, 1998, 폐석회의 점토차수재로서 활용에 관한 연구, 한국지반공학회지 14(5):29-37.
신은철, 김성환, 정하익, 이용수, 1997, 폐석회를 재활용한 인공차수재 및 복토재 개발, 한국지반공학회 1997(1):153-160.
신은철, 김진수, 오염물질 이동 차단을 위한 동결차수벽 형성에 관한 실험적 연구, 한국토목섬유학회 10(2)29-34.
신은철, 김태환, 박정준, 강현희, 2009, 친환경 동결시스템을 이용한 보강 차수벽의 실험적 연구, 한국지반환경공학회 학술발표회논문집 2009(9):488-496.
안진선, 2007, 준설토와 해양폐기물을 이용한 폐기물 매립지 차수층에 관한 연구, 중앙대학교 대학원(박사).
오세광, 2011, 광산슬러지를 이용한 연탄 첨가제 및 차수재 개발에 관한연구, 서울시립대학교(박사).
우상균, 송영철, 원종필, 2007, Fly Ash 및 PVA 섬유를 사용한 CFRD 표면차수벽 콘크리트의 동결융해 및 투수성능 분석, 대한토목학회 2007(10):2399-2402.
이강원, 황의석, 안기봉, 2002, 혼합반응 차수재의 투수특성 연구, 2002년도 가을 학술발표회 논문집 01: 545 - 552
이규홍, 2000, 원심모형실험을 통한 쓰레기 매립장의 사면안정성 평가에 관한 연구, 인천대학교 일반대학원(석사).
이남출, 일반-특정폐기물 매립장 조성 침출수 방지용 차수벽설치 신공법, 대한토목학회 43(12):51-58.
이대용, 2010, 광산슬러지를 이용한 차수재 개발에 관한 연구, 서울시립대학교(석사).
이동건, 2010, Soil-Cement 연직차수벽에 의한 사용종료 매립지 침출수 차단효과 평

가, 한양대학교 상업경영디자인대학원(석사).
이봉호, 1998, 난지도 매립지 안정화 공사계획과 Cement Bentonite Slurry 차수벽의 적합성 검증, 준설매립위원회 학술발표회 논문집 1998(1):119-159.
이성호, 장수일, 김성필, 2004, 슬래그와 폐콘크리트분말을 이용한 폐기물 매립지의 차수재에 관한 연구, 환경과학논집 9(1):123-132.
이송, 김홍석, 이재영, 1999, 고화토를 이용한 폐기물 매립지 바닥층의 동결융해 현상에 관한 실험적 연구, 산업기술연구소논문집 7
이승철, 이진수, 2003, 여러조건에 따른 인공점토재의 투수특성, 대한토목학회 학술대회 2003(10):3229-3233.
이용수, 정문경, 정하익, 우제윤, 1997, 매립지 차수재로서 플래이애쉬 재활용을 위한 기본연구, 1997(3):513-516.
이용수, 정하익, 1996, 오염지역 차폐용 슬리리월 재료와 침출수 반응 특성, 한국지반공학회 2011, 10(2):29-34.
이용수, 정하익, 1997, 폐기물 매립장의 차수재 및 복토재로서 하수 슬러지 재활용, 한국지반공학회지 13(4):5-12.
이원영, 1998, 폐기물 매립지 침출수 누출방지용 벤토나이트 복합라이너 개발에 관한 연구, 수원대학교(석사).
이재영, 배선영, 우승현, 2011, 차수재로의 광산슬러지 재활용 적용성 평가 : Part Ⅰ : 광산배수슬러지 및 혼합차수재의 물리 · 화학적 성질, 한국토목섬유학회 논문집 10(2):67-72.
이재영, 배선영, 박경주, 2011, 차수재로의 광산슬러지 재활용 적용성 평가 : Part Ⅱ : 동결/융해에 의한 광산슬러지 혼합 차수재의 거동, 한국토목섬유학회 논문집 10(2):73-79.
이종호, 1999, 연약지반 위에 포설된 고화차수재의 응력-변형특성에 관한 연구, 동국대학교 대학원(석사).
이창환, 김명균, 2008, 플라이애시-벤토나이트 혼합 점토차수재의 공학적 특성에 관한 연구, 한국지반환경공학회논문집 9(6):21-29.
이홍길, 2002, 차수재 및 복토재로서 석분토의 효과, 산업과학논문집 10:227-232.
임건식, 2011, 폐기물매립장 바닥차수층의 설계 및 시공사례 연구, 순천대학교 대학원(석사).
장연서, 문준석, 2002, 매립지 차수재로서 자가치유재의 투수 및 강도특성, 한국지하수토양환경학회지 7(1):41-51.
장연수, 임학수, 권강오, 2000, 폐기물 매립지 인공합성 차수재 강도와 침하영향에

관한 연구, 한국지하수 토양환경학회 200(1):241-245.
장용채, 김진춘, 정옥기, 2007, 폐기물 매립지 토사계 혼합 차수재의 공학적 특성에 대한 실험적 연구, 한국지반환경공학회논문집 8(1):13-20.
정광옥, 2003, 인공점토재의 공학적 특성 연구, 동신대학교 학위논문(석사).
정문경, 현재혁, 김승현, 1998, 플라이애쉬의 차수 및 오염물 차단 능력 평가 연구, 한국지반공학회지 14(5):191-203.
정철후, 2008, 제철소에서 발생된 수재슬래그를 이용한 최종복토 차단층에 관한 연구, 서울시립대학교 도시과학대학원 학위논문(석사).
정하익, 이용수, 1996, 폐기물 매립장에서의 GCL차수재 적용, 한국지반공학회논문집 1996(1):37-46.
정하익, 이용수, 홍승서, 정길수, 이희준, 1999, 흙-벤토나이트 혼합 차수재의 품질관리 사례연구, 99봄 학술발표회 논문집 학술저널 497-504
조대호, 한상재, 김종윤, 김수삼, 2007, 현장발생토를 활용한 토류구조물 뒷채움용 유동화처리토의 최적배합비 산정과 재료거동에 관한 실험적 연구, 대한토목학회 논문집 27(3):175-184.
조원진, 이재완, 김정란, 강철형, 2001, 벤토나이트 함량이 폐기물 매립장 차수재의 투수특성에 미치는 영향, 한국 폐기물 학회 2001 추계학술연구회발표논문집 학술저널 341-344
조재범, 현재혁, 최경훈, 박호식, 서경아, 2002, 매립장 차수재로서의 MCG (Muscovite - Carbon - Gypsum)와 Fly Ash, Geocrete 의 역학적 특성 비교 평가 연구, 충남대 환경공학과 한국폐기물학회 추계학술연구회발표논문집 학술저널 178-181
조재범, 현재혁, 조성택, 최경훈, 2002, 매립지 차수재로서의 준설점토 활용에 관한 연구, 대한 환경 공학 회지 24(5):869-877.
조재형, 윤태국, 여병철, 안상로, 천병식, 2005, 석분슬러지를 이용한 쓰레기매립장 차수재의 적용성에 관한 연구, 한국지반공학회 2005년도 춘계 학술발표회 논문집 2005 Mar. 25:483-490.
채수권, 박수영, 김건홍, 2002, 폐기물 매립장 차수재로서의 Biofilm 적용성에 관한 연구, 환경관리학회지 8(2):167-178.
초성택, 2002, 동결융해, 건조수축 작용을 받은 매립지 차수층의 물리적 특성 변화, 충남대학교 대학원 학위논문(석사).
최성철, 2000, 비위생 매립지의 침출수 방지용 차수벽에 관한 연구, 한양대학교 산업대학원 학위논문(석사).

한상재, 김수삼, 조진우, 김지용, 2001, 도시 고형폐기물 소각 비산재의 매립지 차수재 활용을 위한 재료 특성연구, 한국폐기물학회지, 18(4):326-335.

허열, 박성훈, 정유진, 김은지, 2011, 생활쓰레기 소각 비산재를 활용한 차수재 특성, 건설기술논문집, 30(1):75-81.

홍성길, 2004, 폐기물 매립지의 흙-벤토나이트 혼합차수층 특성에 관한 연구, 동국대학교 대학원 학위논문(석사).

Al-Tabbaa, A., T. Aravinthan, 1998. Natural clay-shredded tire mixtures as landfill barrier materials. Waste Management 18: 9-16.

Abdellllah, Bezzar, Denis Franc , ois, Fouad Ghomari, 2010. Geochemical study of clays used as barriers in landfills. C. R. Geoscience 342: 695–700.

Auvinet, G. Y., and Hiriart, G., 1980. An Artificial Cooling Pond for the Rio Escondido Coal Fired Power Plant, Proceedings. ASCE Symposium on Surface Water Impoundments, Minneapolis, 2:1089-1098.

Bezerra, E. M., A. P. Joaquim, H. Savastano Jr, V.M. John, V. Agopyan, 2006. The effect of different mineral additions and synthetic fiber contents on properties of cement based composites. Cement & Concrete Composites 28: 555–563.

Basha, E. A. R. Hashim, H.B. Mahmud, A.S. Muntohar, 2005. Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. Construction and Building Materials 19: 448–453.

Chapuis, R. P., 1981. Permeability Testing of Soil-Bentonite Mixtures, Proceedings. 10th International Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm 4:744-745.

Consoli, N. C., Vendruscolo, M. A., and F. D. Rosa, 2009. Fiber Reinforced Effects on Sand Considering a Wide Cementation Range. Geotexiles and Geomembranes 27:196-203.

Cui, Su-Li, Hu-Yuan Zhang, Ming Zhang, 2012. Swelling characteristics of compacted GMZ bentonite–sand mixtures as a buffer/backfill material in China. Engineering Geology 141–142: 65–73.

Ekrem Kalkan, 2006. Utilization of red mud as a stabilization material for the preparation of clay liners. Engineering Geology 87: 220–229.

Erhan Guneyisi, Mehmet Gesog ˘ lu, Seda Karaog ˘ lu, Kas ı m Mermerdas, 2012. Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes. Construction and Building Materials 34: 120–130.

Estabragh, A. R., A. T. Bordbar, A. A. Javadi, 2011. Mechanical Behavior of a Clay Soil Reinforced with Nylon Fibers. Geotech Geol Eng (2011) 29:899-908.

Ferdi Cihangir, Bayram Ercikdi, Ayhan Kesimal, Alp Turan, Haci Deveci, 2012. Utilisation of alkali-activated blast furnace slag in paste backfill of high-sulphide mill tailings: Effect of binder type and dosage. Minerals Engineering 30: 33-43.

Franz-Georg Simon, Werner W. Müller, 2004. Standard and alternative landfill capping design in Germany. Environmental Science & Policy 7: 277-290.

Gerald A. Miller, Shahriar Azad, 2000. Influence of soil type on tabilization with cement kiln dust. Construction and Building Materials 14: 89-97.

Grishin, V. A., L. M. Deryugin. 2006. EXPERIENCE IN THE USE OF BENTONITE-CEMENT CONCRETE FOR REPAIRING THE CORE OF THE EARTHFILL DAM OF KUREISKAYA HPP. Translated from Gidrotekhnicheskoe Stroitel' stvo, 2006(2): 2 - 8.

Gutie"Lrrez, R.M., L.N. D ı az, S. Delvasto, 2005. Effect of pozzolans on the performance of fiber-reinforced mortars. Cement & Concrete Composites 27: 593 -598.

Haluk Akgün, 2010. Geotechnical characterization and performance assessment of bentonite/sand mixtures for underground waste repository sealing. Applied Clay Science 49: 394-399.

Katsioti, M., N. Katsiotis, G. Rouni, D. Bakirtzis, M. Loizidou, The effect of bentonite/cement mortar for the stabilization/solidification of sewage sludge containing heavy metals. Cement & Concrete Composites 30: 1013-1019.

Laura Sánchez, Jaime Cuevas, Susana Ramírez, David Riuiz De León, Raúl Fernández, Raquel Vigil Dela Villa, Santiago Leguey, 2006. Reaction kinetics of FEBEX bentonite in hyperalkaline conditions resembling the cement-bentonite interface. Applied Clay Science 33: 125-141.

Lundgren, T. A., 1981. Some Bentonite Sealants in Soil Mixed Blankets, Proceedings. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm 2:349-354.

Makhloufi, Z., E.H. Kadri, M. Bouhicha, A. Benaissa, R. Bennacer, 2012. The strength of limestone mortars with quaternary binders: Leaching effect by demineralized water. Construction and Building Materials 36: 171-181.

Mukesh Kumar, S.K. Singh, N.P. Singh, N.B. Singh, 2012. Hydration of multicomponent composite cement: OPC-FA-SF-MK. Construction and Building Materials 36: 681-686.

Necmi Yarbaş ı , Ekrem Kalkan, Suat Akbulut, 2007. Modification of the geotechnical properties, as influenced by freeze-thaw, of granular soils with waste additives. Cold Regions Science and Technology 48: 44-54.

Nilo Cesar Consoli, Karla Salvagni Heineck, J. Antonio H. Carraro, 2010. Portland Cement Stabilization of Soil-Bentonite for Vertical Cutoff Walls Against Diesel Oil Contaminant. Geotech Geol Eng (2010) 28:361-371.

Nilo Cesar Consoli, Marcel Anto^nio Arcari Bassani, Lucas Festugato, 2010. Effect of fiber-reinforcement on the strength of cemented soils. Geotextiles and Geomembranes 28: 344-351.

Othmane Boukendakdji, El-Hadj Kadri, Said Kenai, 2012. Effects of granulated blast furnace slag and super plasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete. Cement & Concrete Composites 34: 583-590.

Prabaker, J. R., and Sridhar, 2002. Effect of random inclusion of sisal fiber on strength behaviour of soil. Construction and building materials 16:123-131.

Rahmat Madandoust, S. Yasin Mousavi. 2012. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin. Construction and Building Materials 35: 752-760.

Ramezanianpour and B. Jovein, 2012. Influence of Metakaolin as Supplementary Cementing Material on Strength and Durability of Concretes. Construction and Building Materials 30:470-479.

Sahin Zaimoglu, 2010. Freezing-thawing behavior of fine-grained soils reinforced with polypropylene fibers. Cold Regions Science and Technology 60:63-65.

Shazim Ali Memon, Rao Arsalan, Sardar Khan, Tommy Yiu Lo, 2012. Utilization of Pakistani bentonite as partial replacement of cement in concrete. Construction and Building Materials 30: 237-242.

Shirazi, S. M., H. Kazama, Firas A. Salman, F. Othman1 and Shatirah Akib, 2010. Permeability and swelling characteristics of bentonite. International Journal of the Physical Sciences Vol. 5(11): 1647-1659.

Sahin Zaimoglu, A. 2010. Freezing-thawing behavior of fine-grained soils reinforced

with polypropylene fibers. Cold Regions Science and Technology 60 : 63-65.

Seco, A. F. Ramrez, L. Miqueleiz, B. García, 2011. Stabilization of expansive soils for use in construction. Applied Clay Science 51: 348-352.

Susan A. Bernal, Ruby Mejia de Gutierrez, John L. Provis, 2012. Engineering and durability properties of concretes based on lkali-activated

granulated blast furnace slag/metakaolin blends. Construction and Building Materials 33: 99-108.

Targan, S., A. Olgunb, Y. Erdogan, V. Sevinc, 2002. Effects of supplementary cementing materials on the properties of cement and concrete. Cement and Concrete Research 32: 1551-1558.

Tumadhir Merawi Borhan, 2012. Properties of glass concrete reinforced with short basalt fibre. Materials and Design 42: 265-271.

Wei-Hsing Huang, 1997. PROPERTIES OF CEMENT-FLY ASH GROUT ADMIXED WITH BENTONITE, SILICA FUME, OR ORGANIC FIBER. Cement and Concrete Research, 27(3): 395-406.

Xianming Shi, Zhengxian Yang, Yajun Liu, Doug Cross, 2011. Strength and corrosion properties of Portland cement mortar and concrete with mineral admixtures. Construction and Building Materials 25: 3245-3256.

주 의

1. 이 보고서는 농림수산식품부에서 시행한 생명산업기술개발사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림수산식품부에서 시행한 생명산업기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.