



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

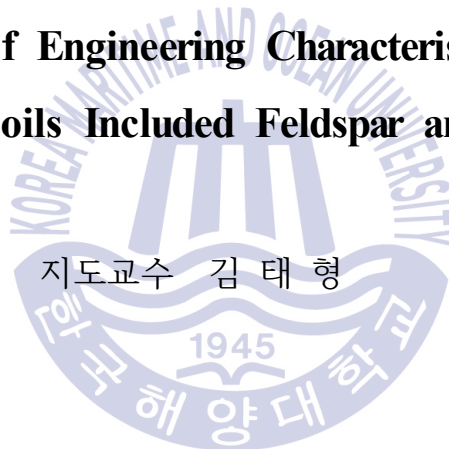
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

장석과 제올라이트를 혼합한
경량기포토의 공학적 특성 연구

**A Study of Engineering Characteristics of
Air-trapped Soils Included Feldspar and Zeolite**



지도교수 김 태 형

2019년 2월

한국해양대학교 대학원

토목환경공학과

최 호 성

본 논문을 최호성의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 서 영 교



위 원 강 기 천



위 원 김 태 형



2019년 2월

한국해양대학교 대학원

토목환경공학과

최 호 성

목 차

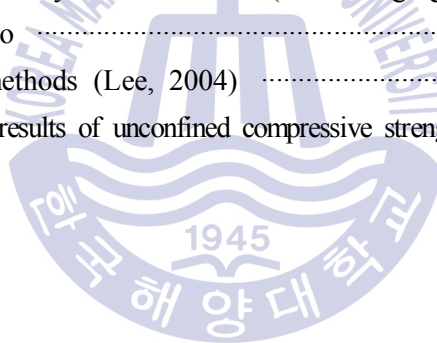
List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi
 제 1 장 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적	2
 제 2 장 기존 연구	3
2.1 경량기포토	3
2.1.1 정의	3
2.1.2 특징	4
2.2 장식	6
2.2.1 장식의 성질	6
2.2.2 중금속 제거 특성	7
2.2.3 장식의 항균 특성	8
2.3 제올라이트	10
2.3.1 제올라이트의 성질	10
2.3.2 제올라이트의 항균 특성	12
 제 3 장 시험	13
3.1 재료원	13
3.1.1 시멘트	13
3.1.2 모래	13
3.1.3 장식	14
3.1.4 제올라이트	14
3.1.5 기포제	15
3.1.6 용수	17

3.1.7 배합계획	17
3.1.8 장치 및 공시체의 제작	20
3.2 시험 내용 및 방법	23
3.2.1 일축압축시험	23
3.2.2 열전도시험	26
제 4 장 시험 결과 및 분석	31
4.1 일축압축강도	31
4.2 실 모형을 사용한 열전도	47
제 5 장 결 론	52
참고문헌	54
감사의 글	57



List of Tables

Table 2.1 Characteristics of lightweight air-trapped soil	4
Table 2.2 Results of antibacterial test on feldspar	9
Table 2.3 Results of antibacterial test on zeolite	12
Table 3.1 Physical properties of portland cement	13
Table 3.2 Chemical component of portland cement	13
Table 3.3 Physical properties of sand	14
Table 3.4 Chemical constituents of animal foam agent(Unit : %)	16
Table 3.5 Physical properties of animal foam agent(H company)	16
Table 3.6 Results of heavy metal detection(Unit : mg/kg)	17
Table 3.7 Mixing ratio	19
Table 3.8 Shooting methods (Lee, 2004)	21
Table 4.1 Comparison results of unconfined compressive strength (28 days cured) ...	31



List of Figures

Fig. 2.1 Material of air-trapped soils	3
Fig. 2.2 Relation between unit weight and unconfined compressive strength of fills(古谷俊明, 山内豊聡, 浜田英治, 1988)	5
Fig. 2.3 SEM image of a cavity of weathered feldspar	7
Fig. 2.4 Metal removal capacity of porous feldspar	8
Fig. 2.5 Crystal structure of zeolite	10
Fig. 2.6 Skeletal structures and crystal shapes of representative zeolite(Yoon, 2004)	11
Fig. 3.1 Grain size distribution curve of sand	14
Fig. 3.2 Vegetable foam agent	15
Fig. 3.3 Foam generation equipment	20
Fig. 3.4 Making process of lightweight air-trapped soil	22
Fig. 3.5 Equipment of unconfined compression test	23
Fig. 3.6 Failure shape of specimen	25
Fig. 3.7 Photo of buildings constructed for heat storage experiment	26
Fig. 3.8 Construction standard of the bottom storage layer	28
Fig. 3.9 Construction of the bottom storage layer	28
Fig. 3.10 Mixing ratio of mortar materials for heat storage layer	29
Fig. 3.11 Photo of infrared thermal imaging camera	30
Fig. 4.1 Results of unconfined compressive tests on specimens cured(CS and CP1)	33
Fig. 4.2 Unconfined compressive strength with curing days(CS and CP1) ..	34
Fig. 4.3 Strength difference to cement content(CP1 and CP2)	36
Fig. 4.4 Unconfined compressive strength with curing days(CP1 and CP2) ..	37
Fig. 4.5 Strength difference to content of No.6 feldspar and feldspar powder(CP2 and CP3)	39
Fig. 4.6 Unconfined compressive strength with curing days(CP2 and CP3) ..	40

Fig. 4.7 Strength difference between specimens made with sand and zeolite(CS and CZ1)	42
Fig. 4.8 Strength difference with curing days of specimens made with sand and zeolite(CS and CZ1)	43
Fig. 4.9 Strength difference to zeolite content	45
Fig. 4.10 Unconfined compressive strength with curing days(CZ1 and CZ2) ..	46
Fig. 4.11 Temperature changes during heating and cooling cycles of the heat storage layer under supplying 55℃ hot water	48
Fig. 4.12 Temperature changes during heating and cooling cycles of the heat storage layer under supplying 45℃ hot water	49
Fig. 4.13 Temperature differences during heating and cooling cycles of the heat storage layer	50
Fig. 4.14 Temperature difference between inlet and outlet of boiler	51



A Study of Engineering Characteristics of Air-trapped Soils Included Feldspar and Zeolite

by
Hoseong Choi

Department of Civil and Environment Engineering
Graduate School
Korea Maritime University

Abstract

This study is focused on feldspar and zeolite which have recently been attracting attention as an extension research of air-trapped soil, which has been studied extensively. Feldspar and zeolite are environmentally friendly minerals such as heat storage, antibacterial function and heavy metal filtration. In addition, two different tests have been carried out for the air-trapped soil by using feldspar and zeolite as aggregate instead of sand.

First, the unconfined compressive strength of the specimens prepared using feldspar and

zeolite were analyzed and were compared with the results of the unconfined compressive strength of the specimens prepared using sand based on axial strain and curing days.

Second, the thermal conductivity and heat storage performance were analyzed by fabricating the bottom layer as the air-trapped soil with feldspar in actual size.

In the first test, the unconfined compressive strengths of the three specimens using the feldspar, two specimens using the zeolite and standard specimen using sand were measured at curing 7 days, 14 days, 21 days, and 28 days. The measured strength characteristics of specimens were analyzed and compared with sand - feldspar, cement - feldspar mixture ratio, No.6 feldspar(particle size 1mm) - feldspar powder (particle size 40 μ m) mixing ratio, sand - zeolite and cement - zeolite mixing ratios.

In the second test, three types of full-scale models were fabricated by using two types of the air-trapped soil using feldspar and one standard sand. Each model was analyzed and compared to the thermal conductivity and heat storage.



제 1 장 서 론

1.1 연구배경

오늘날 공학과 산업기술의 급속한 발전은 재료특성의 세분화와 혁신적인 개선을 요구하고 있다. 이에 따라 경량기포혼합토 분야에서도 많은 연구개발 및 투자가 이루어지고 있으며, 기존의 경량기포혼합토의 성능 보다 뛰어난, 획기적인 신제품 개발에 주력하고 있다. 경량기포혼합토는 기존의 흙이 가지고 있는 단점을 보완하고 개선함과 동시에 우수한 복합성능을 가지는 것을 목적으로 개발이 이루어지고 있다. 이에 대한 연구는 이미 여러 나라에서 시작되어 상당한 성과를 거두었으며 다양한 형태로 경량기포혼합토가 만들어지고 사용되고 있다.

경량기포혼합토는 경량으로 인한 하중경감과 시공성, 유동성 등의 장점으로 일반적인 흙으로는 시공이 곤란한 장소에서의 시공에 적합하다(일본도로공단, 1996; 土田孝 등, 1996). 하지만 윤길림 등(2004)과 송준호(2009), 황중호 등(2010)은 경량기포혼합토가 초기함수비 및 점토, 모래, 실트 등 현장에서 발생하는 다양한 원료토에 따라 기포의 형성 정도가 다르게 되어 품질관리에 어려움이 있는 것을 밝혀냈다. 따라서 이러한 경량기포혼합토의 단점이 보완된 품질이 균질한 대체 경량기포재료의 개발이 요구되었다.

황중호(2010)는 원료토로 준설토를 사용하는 경량기포혼합토의 단점을 보완하기 위하여 공장에서 생산된 균질한 품질의 모래를 사용하였으며 이를 통해 만들어진 경량재료를 경량기포토라 명명하였다. 즉, 경량기포토란 공장에서 생산된 균일한 품질의 모래와 시멘트와 같은 고화재, 그리고 물을 혼합하여 슬러리화 시킨 후 기포를 주입하여 만든 것을 말하며, 기초적인 연구로 균질한 품질의 경량기포토의 압축, 투수, 변형계수 등의 특성을 검토하였다. 하지만 최근 주목받고 있는 친환경적 요소들은 고려하지 못하였다.

보통 콘크리트의 주재료인 시멘트는 대표적인 건설재료로서 활용범위가 매우 높지만, 중금속 용출, 높은 pH로 인한 주변 토양 및 지하수 오염, 새집증후군 등으로 인한 유해성이 커 많은 문제들을 야기하며, 추가적으로 많은 양의 이산화탄소를 배출 하여 지구 온난화의 원인 중 하나로 꼽힌다.

이에 대한 대책으로 순환자원의 활용 측면에서 산업부산물을 이용한 건설재료 개발에 대한 연구가 시도되고 있고, 그 중 친환경적인 자원 활용을 위한 연구 또한 시도 되고 있다. 친환경적인 자원 활용은 황토 등의 규산염계 점토광물을 이용한 사례가 대표적이

며, 탄산염계 시멘트에 비해 낮은 압축강도와 표면경도를 보완하기 위한 재료의 처리기술에 집중되어 있다(최희용, 2002; 황혜주&강남이, 2008; 강연구, 2015).

친환경적인 재료 중 국내에 풍부하게 매장되어 있으며 비교적 가격이 저렴한 재료인 장석의 경우 현재 유리제조, 각종 도기류 및 세라믹스 제조 등 요업산업의 재료로만 사용되고 있다. 이러한 유리 도료 등의 제한적인 이용을 제외하면 지반 매립등의 저급한 용도로 사용되고 있다. 하지만 장석에 대한 물질적 특성과 용도 개발에 대한 연구는 아직까지 거의 이루어지지 않고 있다.

국내에서 산출되는 장석의 표면에서 0.5~10 μ m 크기의 간극이 관찰된다. 이러한 간극은 비표면적과 양이온교환능력에 관계되며 친환경적인 기능성을 나타낸다. 특히 간극의 빈도는 반응면적에 관계되는 비표면적을 높이고 이온의 용출과 흡착에 관계되는 것으로 알려져 있다(Bansal and Goya, 2005; Cecen, 2014; Park et al., 2016). 이런 특성을 이용하여 기존 경량기포토가 가진 특성에 친환경적인 특성이 결합된 재료 연구가 가능하다.

1.2 연구목적

본 논문은 경량기포토를 제작 시 모래 대신 친환경적인 재료들을 사용하였을 때 강도 및 변형 특성을 파악하여 기존의 경량기포토와 비교, 분석하는 것이 연구의 주 목적이며, 추가적으로 열전도에 대한 특성도 파악하고자 한다.

이를 위해 모래 대신 친환경적인 재료인 장석과 제올라이트를 사용 하였으며, 각각의 재료에 대한 친환경성 분석을 하였다. 장석과 제올라이트의 친환경성 분석을 위해 중금속 여과 분석과 항균 분석을 실시하였고, 그에 대한 만족할만한 수치들을 확인하였고, 모래를 대체하는 골재로 사용 여부를 확인하고자 한다.

장석과 제올라이트를 사용하여 만든 경량기포토에 대한 기초 설계 자료들을 확보하여 제시하고, 향후 친환경적 재료를 사용한 재료들을 사용 시 요구되는 양생일수에 따른 일축압축강도의 값과 열전도율에 대한 특성을 분석하고자 한다.

제 2 장 기존 연구

2.1 경량기포토

2.1.1 정의

경량기포혼합토는 일반적인 흙의 구조와는 달리 재료의 경량화와 강도증대를 위하여 추가적인 재료를 원료토와 혼합하여 제작되는 것으로 액성한계 이상으로 조정하여 슬러리화 시킨 준설토나 건설발생토 등의 원료토와 시멘트와 같은 고화재 및 경량화 재료를 첨가, 혼합해서 매립과 뒤채움용의 지반재료로서 사용하고 경량화로 안정한 지반을 만들어 내는 것을 의미한다(Fig. 2.1). 여기서 원료토란 준설토 또는 현장발생토로서 경량기포혼합토의 재료로 이용 가능한 것을 말한다. 고화재는 원료토나 기포를 화학적으로 안정 처리하여 소정의 강도나 강성을 가지도록 하기 위해 첨가하는 시멘트계 재료를 말한다.

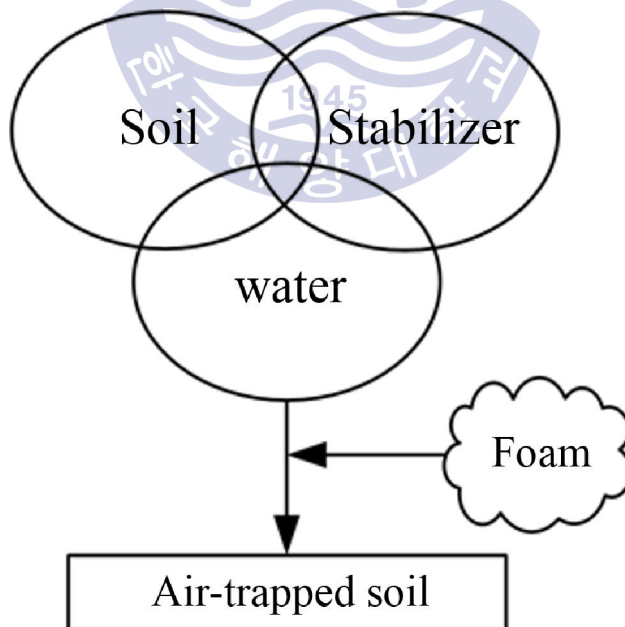


Fig. 2.1 Material of Air-trapped Soils

그리고 필요에 따라 특수한 고화재로 사용할 수 있다. 경량화재는 재료의 경량화를 위해 혼합하는 재료로서 일본에서는 주로 기포나 발포비즈를 대상으로 하고 있다. 기포제는 혼합한 재료의 경량화와 유동성을 가지게 하기 위해 기포를 발생시키는 재료를 말하며, 기포제를 물에 희석하여 발포하며, 주로 사전발포(Pre-foam) 방식을 사용한다(송준호, 2009).

2.1.2 특징

경량기포혼합토는 건설발생토 등의 원료토에 물과 시멘트 등의 고화재를 혼합하여 유동화 시킨 것에 기포를 혼합하여 제작한다. 단위중량은 조절이 가능하고 제작 직후에는 유동성을 나타내나 고화재의 반응에 따라 최종적으로는 양질의 토양재료와 같거나 그 이상의 강도특성을 가지는 고화처리토가 된다.

경량기포혼합토는 일반적인 토사에 비해 가벼우며 지반 등에 미치는 하중을 경감할 수 있다. 또한 유동성이 높으므로 펌프를 이용하여 압송에 의한 타설이 가능하므로 시공이 용이하다. 게다가 진흙 등의 저품질 토양을 유효하게 활용할 수 있다(Table 2.1). Fig. 2.2는 각 성토재료에 따른 일축압축강도와 단위중량의 관계를 나타낸다.

Table 2.1 Characteristics of lightweight air trapped soil(하이그레이드 연구컨소시엄, 2005)

항 목	특 징
Unit weight	단위중량을 6~12kN/m ³ 사이에서 임의로 설정 가능 (경량화재의 혼합량에 따라 단위중량을 조정)
Strength	일축압축강도를 1,000kPa 정도까지 설정 가능 (고화재의 첨가량으로 일축압축강도를 조정)
유동성	공동충진, 협소부 되메우기 등의 펌프압송에 의한 시공이 가능 (유동성이 크고 셀프레벨링을 유지)
시공성	전압, 조임 및 고정, 균일화 작업이 필요 없으므로 시공인력의 절감
유효성	각종 발생토를 유효하게 활용 가능

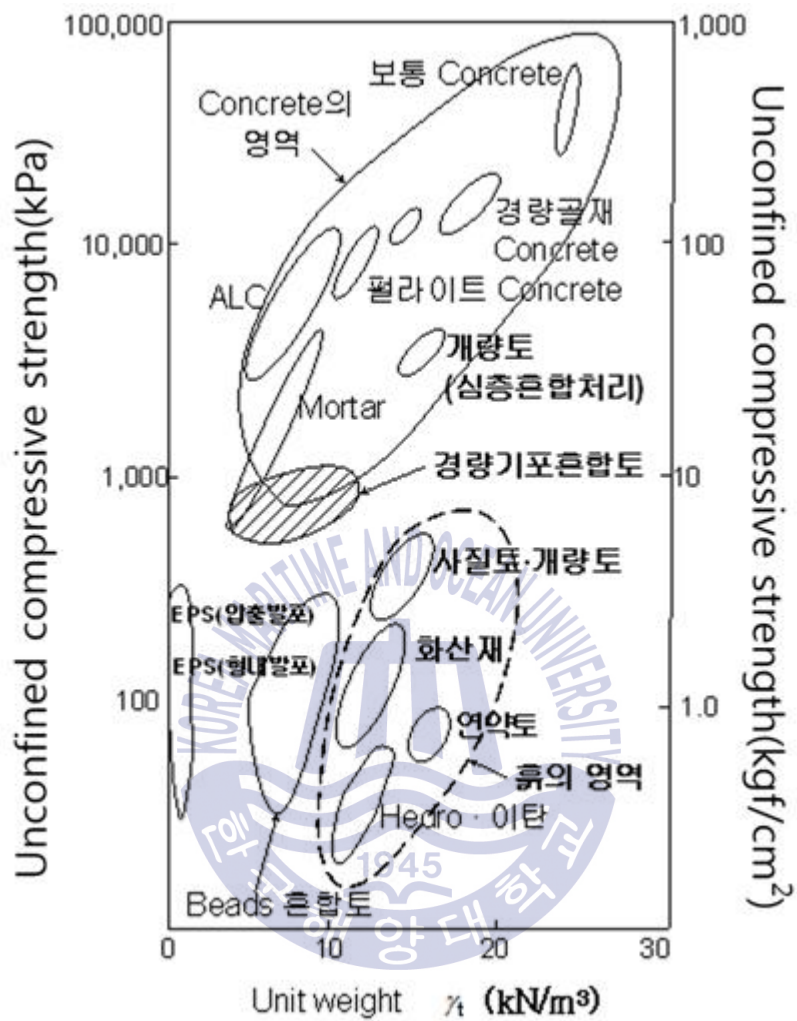


Fig. 2.2 Relation between unit weight and unconfined compressive strength of fills

(古谷俊明, 山内豊聡, 浜田英治, 1988)

2.2 장석

2.2.1 장석의 성질

장석은 석영, 운모 등과 같이 암석을 구성하는 가장 대표적인 광물로서, 대륙 지각을 구성하는 광물의 약 60%를 차지한다(Kauffman and Van Dyk, 1994). 장석은 많은 화성암, 변성암 및 퇴적암의 필수 광물로, 풍화를 받아 분해되더라도, 넓은 범위의 온도와 압력에 걸쳐 안정된 상태로 존재한다(Park, 2004). 국내에서 생산된 장석은 주로 내수에 충당하고 있으며, 잉여물량은 수출하고 있다(KOMIS의 광종정보; 지식경제부, 2011-2016 광업.광산물 통계연보). 장석의 주요 산출광물로는 정장석(Orthoclase), 조장석(Albite), 회장석(Anorthite) 등이 있다. 장석의 용도는 유리, 도자기, 법랑, 유약, 충전제, 용접봉의 용착, 결합제, 연마제, 골재 등에 사용된다.

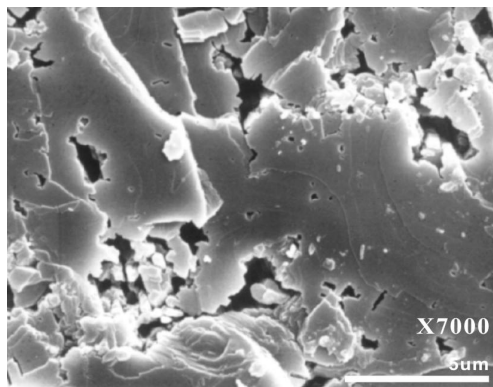
천연으로 산출되는 장석은 대부분 칼륨장석(KAlSi_3O_8), 나트륨장석($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), 칼슘장석($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) 세 가지 단성분(端成分) 계열에 속한다. 칼륨장석과 칼슘장석은 거의 고용체를 이루지 않지만, 칼륨장석과 나트륨장석 및 나트륨장석과 칼슘장석은 연속고용체(連續固溶體)를 이루며, 각각의 계열을 알칼리장석 및 사장석이라 총칭한다.

장석은 풍화나 열수변질을 통해 고령토화, 불석화, 녹염석화, 또는 몬모릴로나이트화하는 경우가 일반적이며, 풍화에 수반된 변질작용은 광물 조성은 물론이고 표면 조직의 변화를 수반한다. 암석의 풍화면에서 소규모 간극이 관찰되며 경우에 따라 점토광물을 충전시킨다. 이러한 간극은 이 연구에서 대상으로 하는 흡착과 밀접한 관계가 있다. 간극의 밀도는 반응면적에 관계되는 비표면적을 높이고 이온의 용출과 흡착에 관계되는 것으로 알려져 있다(Bansal and Goya, 2005; Cecen, 2014; Park et al., 2016).

풍화된 장석반암의 표면에서 $0.5\sim 10\mu\text{m}$ 크기의 간극이 불규칙하게 산재하며 특히 장석반정(phenocryst)의 표면에서 빈도가 증가하여 다공성의 구조가 관찰된다. 간극의 수는 석영반정 1 cm^2 의 면적에서 수백 개 정도지만 장석 반정에서는 20,000에서 수십만 개의 간극이 관찰되며 풍화작용에 의해 생성된 변질광물이 충전되기도 한다. Fig. 2.3은 전자현미경(SEM) 사진으로 수 μm 크기의 간극이 불규칙한 형태로 산재해 있다. 미세 간극의 수는 일반적으로 입방 cm당 수 만개 내지 수 십만개로 알려져 있다. 이러한 간극은 비어있는 경우도 있지만 대부분은 암석의 변질작용 또는 풍화작용에 의해 생성되는 2차 광물 즉 점토광물이 생성되어 있다. 그림에서 풍화 정도에 따라서 약간풍화상태(Fig. 2.3 (a))보다 보통풍화상태의 장석표면에서 간극의 밀도는 증가한다(Fig. 2.3 (b)).



(a) Slight weathered feldspar



(b) Moderate weathered feldspar

Fig. 2.3 SEM image of a cavity of weathered feldspar

2.2.2 중금속 제거 특성

다공성 재료의 흡착 반응은 주로 넓은 비표면적에 의한 양이온의 교환에 의해 이루어진다. 다공성 장석은 입경에 따라 양이온교환능력의 차이를 나타내게 되는데 점토 입자에 가까운 입경인 10 μm 의 경우 대략 100 meq/100g으로 뛰어난 양이온교환능력을 나타낸다. Fig. 2.4는 지역별로 산출되는 장석반암 분말과 대표적인 중금속 흡착재료인 제올라이트 시료의 중금속 흡착능력을 보여주고 있다. 장석반암 분말은 전남 무안, 충북 충주, 전남 남원 지역에서 채취한 장석 반암 시료를 분쇄하여 평균 입도 10 μm 로 조정하였으며, 제올라이트는 흡착재로 사용되고 있는 상용제품을 사용하였다. 중금속 시료는 광산 산성배수(Acid Mine Drainage : AMD)를 사용하였으며, 구리(Cu), 아연(Zn), 납(Pb), 카드뮴(Cd) 등 4종류의 중금속 농도를 분석하였다.

납(Pb)과 카드뮴(Cd)의 경우 중금속 원시료인 광산산성배수의 초기 농도가 너무 낮아 흡착재료의 종류에 따른 의미있는 결과를 얻을 수 없었다. 그러나 구리(Cu)와 아연(Zn)의 경우 흡착재료에 의해 광산산성배수의 중금속 농도가 현저하게 감소되는 것을 확인할 수 있으며, 특히 다공성 장석 분말을 사용한 경우에 대표적인 흡착재료인 제올라이트 보다 높은 중금속 제거율을 나타내고 있다. 이러한 실험 결과는 다공성 장석의 흡착재료로의 활용 가능성을 보여준다.

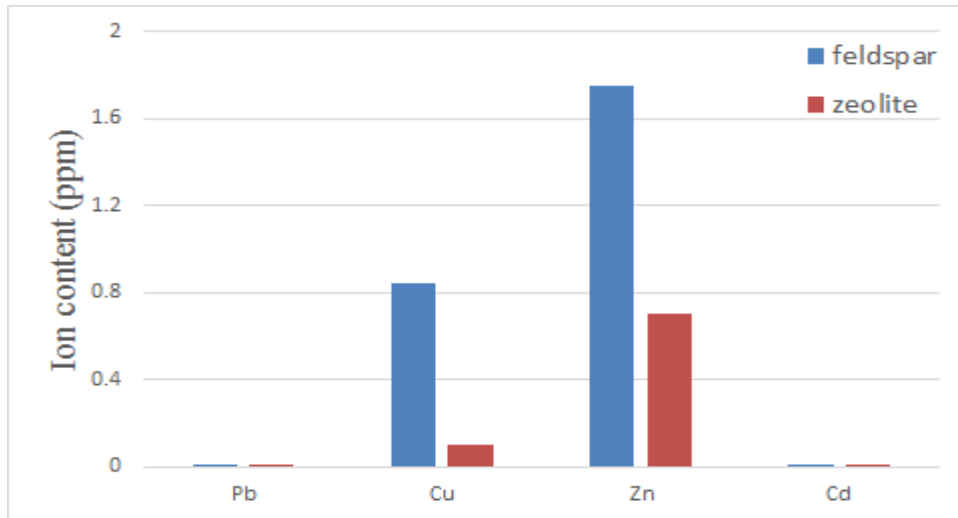


Fig. 2.4 Metal removal capacity of porous feldspar

2.2.3 장식의 항균 특성

다공성 장식의 항균성을 측정하기 위해 억제대법(halo test, agar plate method)를 사용하였다. 이 방법은 공시균을 접종한 한천배지 위에 시험편을 올려 두고 배양한 후 시험편 주위에 세균의 성장이 억제되어 생긴 세균 저지대의 크기를 측정하여 평가하는 방법으로, 시험편은 105°C에서 10분간 습열멸균 처리한 직경 28mm의 원형시험대를 사용하였다. 항균성(W)는 주입한 균주를 37°C에서 24시간 배양한 후 페트리디쉬 바닥 부분으로 시험편 주위의 저지대의 크기를 측정하여 식(2.1)을 이용하여 항균성을 파악하였다.

$$W = (T - D) / 2 \quad (2.1)$$

여기서 W는 세균 저지대의 폭(mm)으로 항균성, T는 시료와 세균저지대의 전체 지름(mm), D는 시험편의 지름(mm)에 해당한다.

항균도 실험은 shake flask 법을 이용하였고 시험편과 대조편을 공시균으로 접종 및 배양시킨 후 일정량의 액체 속에 진탕시켜 배양된 세균을 추출한 후 액체 속에 존재하는 세균의 수가 측정되면, 항균성이 있는 시험편에서의 세균감소율이 계산하였다.

시험균액은 멸균 완충액으로 전배양액에 희석하여 균수를 $1.5-30 \times 10^8/\text{mL}$ 로 조정하고 희석한 균액을 인산 완충용액으로 1,000배 희석하여 제작하였다. 멸균한 shake flask에 시험편을 넣고, 계면활성제(Tween 80) 0.05%를 첨가한 후 조정한 시험균액을 $1-2 \times 10^4/\text{mL}$ 가 되도록 접종하였다. 접종 직 후 초기 생균수(A)를 측정하고 접종한 shake flask를 37°C, 24시간 배양 후 감소된 균수(B)를 측정하여 식(2.2)에 따라 항균도(감균율)을 계산하였다.

$$\text{항균도(감균율, \%)} = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad (2.2)$$

항균성과 항균도 실험에 사용한 공시균주는 Gram 양성균(positive bacteria : *Staphylococcus aureus* ATCC 6538)과 Gram 음성균(negative bacteria : *Klebsiella pneumoniae* ATCC 4352)를 사용하였다. 항균도의 전배양액은 공시균을 육즙배지에 이식하여 35-37°C 조건에서, *Staphylococcus aureus*(Gram 양성균)는 6-10시간, *Klebsiella pneumoniae*(Gram 음성균)은 16-20시간 진탕 배양하였다. 항균실험은 부산대학교 생산기술연구소 시설을 이용하여 수행하였고, 다공질 장석의 항균도 측정은 KSTR(한국표준시험연구원)에 의뢰한 결과를 제시하였고, 그 결과는 Table 2.2와 같다.

Table 2.2 Results of antibacterial test on feldspar

Item		Result(%)
<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 6538	Bacteria decreasing ratio(%)	34.3
Concentration of inoculation bacteria	$1.1 \times 10^5 \text{CFU/mL}$	
<i>Klebsiella pneumoniae</i> ATCC 4352	Bacteria decreasing ratio(%)	27.1
Concentration of inoculation bacteria	$1.5 \times 10^5 \text{CFU/mL}$	

Table 2.2 의 결과와 같이 *Staphylococcus aureus* ATCC 6538 (황색포도상구균)은 기존의 경우보다 34.3% 감소하였고, *Klebsiella pneumoniae* ATCC 4352 (폐렴간균)은 27.1% 감소하는 것으로 나타났다.

2.3 제올라이트

2.3.1 제올라이트의 성질

제올라이트는 1756년 스웨덴의 광물학자인 크론스테그에 의해 처음 발견되고 명명되어진 광물로 지금까지 많은 광물학자들의 노력에 의해 약 35종이 알려져 있다. 제올라이트의 결정 내부에 존재하는 간극은 보통 물로 채워져 있으며, 열을 가하면 간극 내부의 물 분자들이 대기 중으로 빠져나와 간극 내부는 완전히 비게 된다(Fig. 2.5). 제올라이트는 광물 중에서 뛰어난 양이온 교환능력을 가지고 있으며, 제올라이트의 골격구조에 따라 양이온의 선호도가 다른 특성을 가지고 있어 선택적인 양이온 교환이 가능하다는 장점이 있다.(Breck, 1974)



Fig. 2.5 Crystal structure of zeolite

제올라이트를 이용한 다양한 흡착 반응은 주로 양이온의 교환에 의해 이루어지고 있으며, 천연상태의 제올라이트의 경우 일반적으로 단일 광물상이 아닌 광석의 형태로 채굴되어 2가지 이상의 광물이 공존하는 경우가 대부분이며 또한 낮은 순도와 다량의 불순물이 포함되어 있다(Ames, 1960; Misaelides et al., 1994; Shanableh et al., 1996; Noh, 2003; Peric et al., 2004). 이러한 원인들이 제올라이트의 양이온 교환특성은 물론 흡착 특

성에 다양한 변화를 유발시키기 때문에 실질적으로 천연 제올라이트를 중금속 제거제로 이용하기 위해서는 이들의 물리·화학적 특성을 분석하는 것이 무엇보다 필요하다고 할 수 있다(Kim et al., 2015 b).

Fig. 2.5는 제올라이트 A, ZSM-5, Zeolite-X 또는 Y, 제올라이트-L의 구조를 나타내고 있다. 제올라이트 A는 입구 크기가 교환된 양이온에 따라 3~5 Å이며 내부에 지름 11 Å 정도의 큰 간극이 있다. 실리콘과 알루미늄의 비율(Si/Al)에 따라 X (Si/Al = 1~1.5) 또는 Y (Si/Al= 1.6~3)라 불리는 제올라이트는 입구 크기가 7.4 Å이며 내부에는 13 Å 크기의 지름을 갖는 supercage가 있다. 이러한 형태의 제올라이트를 케이지형 제올라이트라 부르기도 한다. 이에 반해서 ZSM-5와 제올라이트-L과 같은 채널형 제올라이트도 있다. ZSM-5의 경우 5.5 × 5.1 Å 크기의 채널과 5.3 × 5.6 Å 크기의 채널이 직교하고 있으며 제올라이트-L의 경우에는 직경이 7.1 Å 크기의 채널이 한 방향으로만 흐르고 있다. 이러한 나노 간극속으로는 물분자는 물론이며 커다란 양이온들의 내부간극 출입이 자유롭게 일어난다. 이러한 성질들이 제올라이트를 장석으로부터 구별 짓게 하는 것이다. 사실 표면에 위치한 원자들은 내부에 위치한 원자들보다 높은 에너지를 가지고 있다. 따라서 열역학적인 면에서 보면 내부에 커다란 간극이 많이 존재하는 제올라이트들은 장석류보다 넓은 표면적을 가지고 있으므로 결국 장석류보다 불안정한 광물들이다. 실제로 제올라이트들은 오랜 세월 동안 지층 속으로 지열과 압력을 받으면 장석으로 변모한다. 이러한 관점에서 “제올라이트들은 장석류 중에서 분자들의 출입이 가능한 크기의 간극을 지니고 있는 다소 불안정한 장석류의 특수 계열”이라 정의할 수 있다(윤경병, 2004).

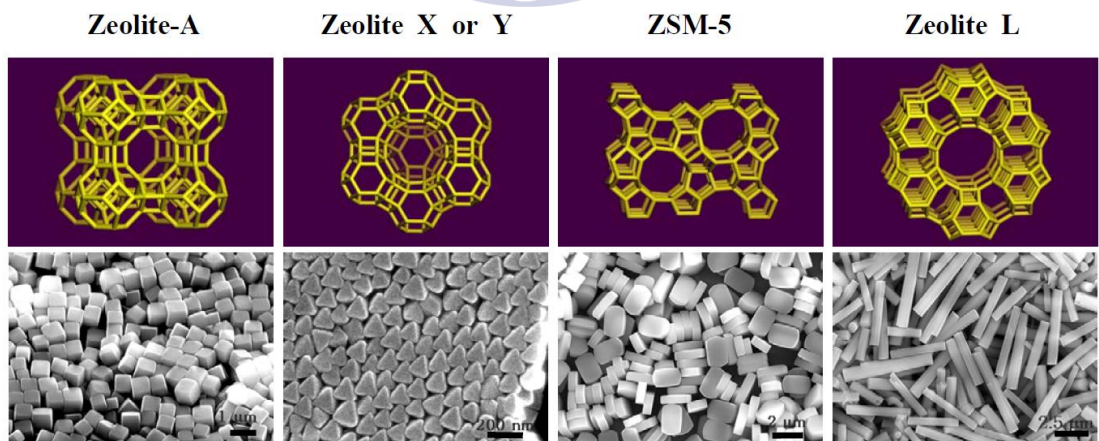


Fig. 2.6 Skeletal structures and crystal shapes of representative zeolite(Yoon, 2004)

2.2.3 제올라이트의 항균 특성

제올라이트의 항균성을 측정하기 위해 장석의 항균 특성을 조사하기 위한 것과 동일한 항균 실험을 실시하였고 그 결과는 Table 2.3과 같다

Table 2.3 Results of antibacterial test on zeolite

Item		Result(%)
Staphylococcus aureus ATCC 6538	Bacteria decreasing ratio(%)	29.4
Concentration of inoculation bacteria	$1.1 \times 10^5 \text{CFU/mL}$	
Klebsiella pneumoniae ATCC 4352	Bacteria decreasing ratio(%)	27.1
Concentration of inoculation bacteria	$1.5 \times 10^5 \text{CFU/mL}$	

Table 2.3 의 결과와 같이 Staphylococcus aureus ATCC 6538 (황색포도상구균)은 기존의 경우보다 29.4% 감소하였고, Klebsiella pneumoniae ATCC 4352 (폐렴간균)은 27.1% 감소하는 것으로 나타났다.

제 3 장 기능성에 대한 분석

3.1 재료원

3.1.1 시멘트

본 연구에서는 KS L 5201 의 규정에 적합한 H사 제품인 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 물리적 성질과 화학적 성분은 각각 Table 3.1, Table 3.2와 같다.

Table 3.1 Physical properties of portland cement

Specific gravity	Fineness (cm ² /g)	Setting		Stability (%)	compressive strength(MPa)		
		Initial (min)	Final (min)		3day	7days	28days
3.15	3,354	205	275	0.09	28.8	39.1	52.2

Table 3.2 Chemical component of portland cement

Ingredient	CaO	SiO ₂	AlO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Ignition loss	Free CaO	Insolubleness
Content(%)	61.3	21.1	5.2	2.73	2.8	1.81	1.62	0.6	0.2

3.1.2 모래

본 연구에서는 품질이 비교적 균일한 경량기포토의 제작을 위해 균질하게 생산되는 모래를 사용하였으며, 입도분포곡선은 Fig. 3.1과 같으며 유효입경 (D_{10})은 약 0.15mm 이다. 모래의 물리적 특성은 Table 3.3 과 같다.

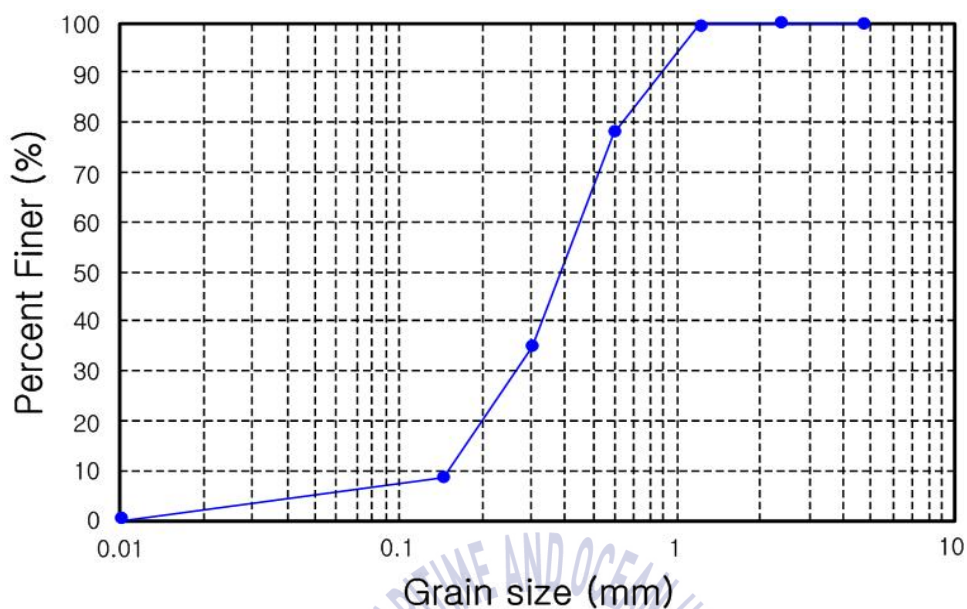


Fig. 3.1 Grain size distribution curve of sand

Table 3.3 Physical properties of sand

Particle size(mm)	Water absorption(%)	Unit weight(kN/m^3)	Specific gravity
0.6 below	1.18	16.86	2.65

3.1.3 장석

본 연구에서 사용된 장석은 실제 타설되는 모르타르의 기준에 맞추어 제작하였다. 다공질 장석의 골재를 1mm(장석6호), 44 μm (장석분체)의 재료로 사용하였다.

3.1.4 제올라이트

본 연구에서 사용된 제올라이트는 실제 타설되는 모르타르의 기준에 맞추어 제작하였다. 제올라이트의 골재를 10 μm 크기로 사용하였다.

3.1.5 기포제

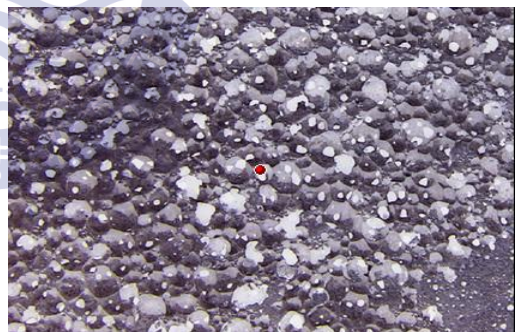
현재 국내에서 사용되는 기포제는 식물성 기포제, 동물성 기포제, 고분자 기포제 등이 있으며 콘크리트의 양생과 장기적인 사용에 악영향을 주지 않는 것을 사용해야 한다. 본 연구에서는 환경적으로 무해하며 물의 영향을 배제시킬 수 있는 동물성 기포제를 사용하였다.

식물성 기포제

합성계면활성제의 일종으로 실생활에서 쉽게 접할 수 있는 주방세제와 비슷한 종류로써 투명한 액체의 성상을 나타낸다. 동관이나 강관에 직접 달아도 부식의 위험이 없으며, 동물성 기포제를 사용하는 것 보다 유동성이 뛰어나 형성된 면의 평활성이 우수한 반면에 투수성이 높다고 알려져 있다. 그러나 식물성 기포제가 사용된 기포토의 Fig. 3.2 의 (a), (b)를 보면 다소 불규칙한 기포의 형태를 유지하고 있으며, 기포의 형태도 각각의 기포가 연결된 형태의 거미줄 포말형태의 기포 상태를 유지하고 있음을 볼 수 있다.



(a) Vegetable foaming using



(b) Vegetable foaming using
(reverse image)

Fig. 3.2 Vegetable foaming

고분자 기포제

고분자 기포제는 폴리아크릴레이트 성분의 고분자 중합체로서 담황색으로 pH 7 로 중성이고 발포시 백색크림 같은 상태이며 내부에는 0.1~0.4mm 크기의 기포군이 형성되고

항산염이나 염화물 등이 들어있지 않아 부식되지 않는다는 장점을 가지고 있다. 시멘트 입자는 보통 혼합을 하여도 시멘트 입자간의 응집작용이 물의 습윤작용보다 크기 때문에 10~30% 정도는 응집된 상태로 남아 있는데, 고분자 기포제의 경우 시멘트 입자의 분산 효과가 있어 작업성을 증대시키는 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 고분자 기포제는 이 온수에 폴리머를 서서히 투입한 다음 80~90 °C 로 가열하여 3시간 동안 교반하여 용해시킨 후에 계면활성제와 기포 안정제를 차례로 투입하여 교반하고 숙성시키는 과정을 통하여 제조한다.

동물성 기포제

단백질계 기포제로서 단백질의 원료로는 동물의 혈액, 유제성분인 카세인, 동물의 뼈, 뿔의 분말인 젤라틴 등이 있다. 이들은 여러 종류의 아미노산으로 구성되어 있고 이것을 알칼리로 가수분해하여 중화 후 여과한 것을 철염이나 방부제를 첨가한 기포제이다. 동물성 기포제의 일반적인 화학적 성분은 Table 3.4와 같다(이수영, 2004).

Table 3.4 Chemical constituents of animal foam agent(Unit : %)

H ₂ O	Protein	NaCl	NH ₄ Cl	CaCl ₂	MgCl ₂	FeSO ₄
36	32	10	1	6	5	2

본 연구에서는 동물성 단백질계 기포제를 사용하였으며, 식물성 기포제는 비교를 위하여 부분적으로 사용되었다. 본 시험에 사용된 H사의 동물성 단백질계 기포제는 동물의 잔재물인 뿔, 발톱, 털 등을 가수분해한 후 단백질을 추출하여 제조한 제품이며, 이 폐기물은 처리하는데 막대한 연료비와 발생되는 유해물로 인하여 매연과 지하수 오염을 유발하므로 매우 친환경적인 기포제로서 물리적 특성은 Table 3.5와 같다.

Table 3.5 Physical properties of animal foam agent(H company)

Specific gravity	Viscosity(cP)	Soild content(%)	pH	Unit weight of a Foaming agent (kN/m ³)
1.18	37.3	39.1	6.29	0.541

본 시험에 사용된 기포제는 검출시험에서 표 3.6과 같이 만족하는 결과를 나타내었다.

Table 3.6 Results of heavy metal detection(Unit : mg/kg)

Component	Detection limit	Result	Test method	Device
Pb	5	Not-detected	EPA 3050B	ICP-AES
Cd	1	Not-detected	EPA 3050B	
Hg	1	Not-detected	EPA 3052	
Cr ⁶⁺	1	Not-detected	USEPA 3060A	UV-VIS. Spectrophotometer

3.1.6 용수

경량기포토에 사용되는 물은 유해한 불순물인 기름, 산, 알칼리, 염류, 유기물 등을 포함하지 않은 청정한 것이어야 한다. 해수는 철근 또는 PC강선을 부식시킬 염려가 있으므로 철근 콘크리트의 혼합수로 사용해서는 안된다. 콘크리트 용수로서는 수돗물, 하천수, 호소수 등을 이용할 수 있으나 만약 공장 폐수 등으로 오염된 하천수, 호소수, 저장수 등을 이용하게 되면 황산염, 유화물, 붕산염, 탄산염, 아연, 구리, 주석, 망간 등의 화합물이나 알칼리 등의 무기물 및 당류, 펄프폐액, 부식물질 등의 유기물이 함유되어 있을 수가 있으므로 적은 양이라도 이와 같은 물질을 함유하는 물을 혼합수로 사용하면 시멘트의 경화강도의 발현, 체적변화, 백화(effloresence), 워커빌리티 등에 나쁜 영향을 미치는 수가 있다. 따라서 이와 같은 오염의 염려가 있는 물을 사용 할 경우에는 물을 화학적으로 분석하여 유해물의 함유량을 조사하여 사용여부를 판정하는 것이 좋다. 따라서 본 실험에서 사용된 물은 KASS 05010.2.1.3 의 규정에 따라 상수도를 사용하였다.

3.1.7 배합계획

경량기포토의 특성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 첫 번째로 물-시멘트 비이고, 두 번째로는 경량기포의 기포양이다. 경량기포토를 사용할 때 는 KS F 4039(현장 타설용 기포 콘크리트)의 기준을 만족해야 한다. 따라서 본 연구에서 장식과 제올라이트를 이용한 경량기포토의 물리적 특성에 따른 역학적 특성 및 강도발현에 영향을 미치는 요인들을

분석하고, 추후 제품 생산에 적용을 위한 최적의 배합을 도출하기 위해 기준이 되는 시멘트와 모래를 사용한 배합 한가지와 비교를 위한 5가지 배합비를 설정하였다. 첫 번째로 기준이 되는 배합비(CS)는 시멘트 25%와 모래 75%의 배합을 하였고, 장석을 사용한 배합비와 제올라이트를 사용한 배합비는 Table 3.7 과 같다



Table 3.7 Mixing ratio

구분												
No.	Cement		Sand		장석분체		장석6호		Zeolite		Water	Foam
	Content (%)	Weight (g)	Content (%)	Weight (g)	Content (%)	Weight (g)	Content (%)	Weight (g)	Content (%)	Weight (g)	Weight (g)	Content (ml)
CS	25	708.8	75	1788.8	-	-	-	-	-	-	524	200
CP1	25	748.1	-	-	40	1014.6	35	491.6	-	-	676	200
CP2	20	535.5	-	-	40	907.8	40	901.0	-	-	610	200
CP3	20	504.0	-	-	50	1068.0	30	636.0	-	-	663	200
CZ1	25	394.0	-	-	-	-	-	-	75	825	853	200
CZ2	10	167.0	-	-	-	-	-	-	90	1050	851	200

3.1.8 장치 및 공시체의 제작

기포는 소정의 희석비율이 되도록 물로 희석한 기포제를 압축공기와 함께 발포장치에 불어 넣고 소정의 발포비율이 되도록 공기압을 조절하여 제조한다(하이그레이드소일 연구컨소시엄, 1996). 본 연구에서는 실내 실험용 공시체의 제작을 위해 Fig. 3.3 같은 소규모의 기포발생장치를 제작하여 사용하였다.

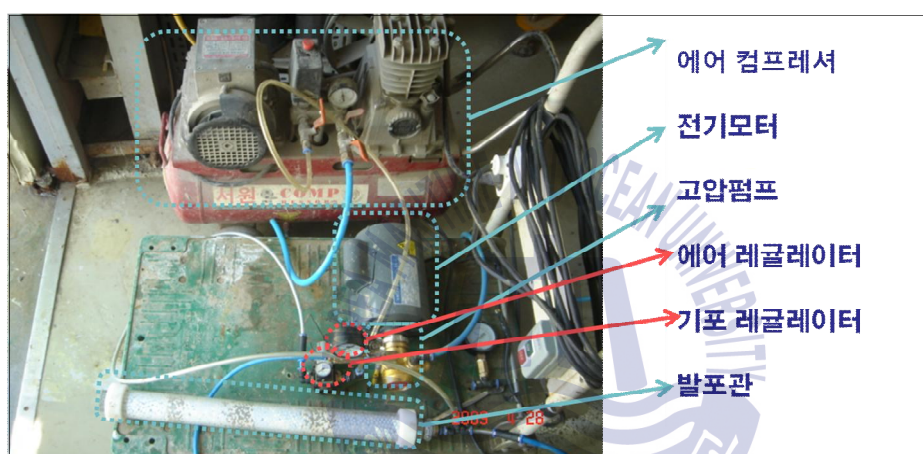


Fig. 3.3 Foam generation equipment

기포를 경량기포토에 포함시키는 방법은 Table 3.8 과 같이 세 가지가 있다. 본 연구에서는 기포발생장치를 통해 발생된 기포를 시멘트 슬러리에 혼합하는 선기포 방식을 사용하였다.

Table 3.8 Shooting methods (Lee, 2004)

Component	Kind of foam agent	Characteristic
선기포 방식	동물성 단백질 아미노 황산염 알코올 에스테르 폴리아크릴레이드	기포기의 압축공기로 미리 발포시킨 기포를 시멘트 슬러리에 혼합하는 방법으로 기포의 양을 조절하기가 쉽고 현장발포가 용이한 것이 장점
후기포 방식	금속분말 (Al, Zn 등)	ALC와 같이 시멘트 슬러리 내에 처음부터 알루미늄 분말이나 아연분말 등 발포제를 혼합하여 적정온도에서 화학반응에 의해 가스가 발생되며, 이 가스에 부피팽창을 시키는 방법
혼합기포 방식	계면활성제(AE제)	계면활성제(AE제)등을 슬러리 중에 첨가하여 혼합과정에서 발포시키는 방법

공시체는 Fig. 3.4와 같이 시멘트와 모래 등의 원료토사와 물을 핸드믹서를 사용하여 혼합한 슬러리와 물로 희석된 기포제를 기포발생장치를 통해 기포를 발생 시킨 후 시멘트 슬러리와 다시 혼합하는 과정으로 제작한다. 발생된 기포는 경량기포토의 강도에 매우 큰 영향을 주므로 기포제에 따라 적절한 압력으로 발포한 후 단위중량을 확인하여야 한다. 본 시험에 사용된 동물성 기포제는 400~450 kPa의 압력으로 발포하였고 기포군의 단위중량은 $0.5 \pm 0.05 \text{ kN/m}^3$ 으로 공시체를 제작하였다.



(a) Mixing cement slurry



(b) Shooting foaming agent



(c) Mixing foam and cement slurry



(d) Completion

Fig. 3.4 Making process of lightweight air-trapped soil

3.2 시험 내용 및 방법

3.2.1 일축압축시험

본 연구에서는 장석과 제올라이트를 사용한 각각의 배합조건에 따른 경량기포토의 응력-변형 특성과 단위중량과 일축압축강도와와의 관계를 조사하기 위해 일축압축시험을 실시하였다. 일축압축시험은 축압이 없는 상태에서 상하로 축하중을 주어 시료를 간접전단-파괴시키는 방법으로 비배수 삼축압축시험에서 구속압력이 0인 경우의 시험에 해당한다. 시험 방법은 KS F 2314에 따라 Fig. 3.5 와 같은 일축압축시험기(UH-F1000kNI)를 이용하여 실시하였고, 공시체는 내경 5cm, 길이 10cm인 몰드를 이용하여 제작하였다.

Fig. 3.6 는 일축압축시험을 한 후 공시체의 파괴형상이다.



Fig. 3.5 Equipment of unconfined compression test

공시체의 일축압축강도와 변형계수 E_{50} 은 식 (3.1)을 이용하여 계산하였다.

$$q_u = \frac{P}{A} \times \left(1 - \frac{\epsilon_c}{100}\right) \quad (3.1)$$

$$A_0 = \frac{\pi D_0^2}{4}$$

여기서, q_u : 일축압축응력(kPa, $1\text{kgf/cm}^2=98.0665\text{kPa}$)

P : 압축변형이 ϵ_c 일 때 공시체에 가해진 압축력(kN)

A_0 : 압축하기 전의 단면적(m^2)

ϵ_c : 공시체의 압축변형(%)

D_0 : 압축하기 전의 공시체의 지름(m)

$$E_{50} = \frac{\frac{q_u}{2}}{\epsilon_{50}} \times 100 \quad (3.2)$$

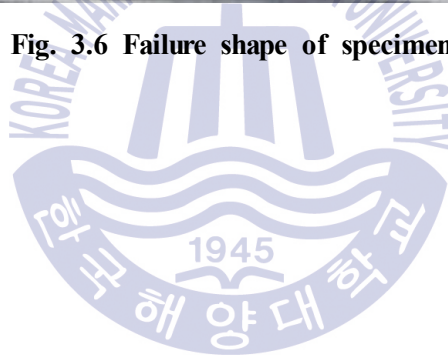
여기서, E_{50} : 변형계수(kPa)

q_u : 일축압축강도(kPa)

ϵ_{50} : 일축압축응력이 $\frac{q_u}{2}$ 일 때의 압축변형율(%)



Fig. 3.6 Failure shape of specimen



3.2.2 열전도시험

(1) 실험 모형 제작

다공질 장석의 축열성의 정량적 평가를 위해 실대형 모형 2동을 무량판구조로 설치하였다(Fig. 3.7). 일반적으로 건축물의 구조의 종류로는 벽식구조, 라멘구조, 무량판구조를 가장 많이 사용하고 있지만 그 사용 목적에 따라 방법을 달리 사용하고 있고, 단층 건물의 바닥, 벽체, 천장의 시험이 필요한 실대형 모형의 특수성을 고려하여 기둥+슬래브 구조로 되어있는 무량판구조를 사용하여 시공하였으며, 라즈베리파이와 아두이노로 온도의 정밀 관측을 가능하도록 제작하였다. 건물의 하부에는 기초지반의 온도 영향을 줄이기 위하여 지면으로부터 50 cm 높이로 이격하였다. 두 개의 실대형 모형 중 하나의 모형은 주택시공기준의 배합비에 따라 축열층을 시공하였고(기준동), 다른 하나는 다공성 장석을 이용한 축열층을 제작하였다(시험동). 축열층이 완전히 건조된 후 온수관을 통한 가열과 냉각실험을 실시하였고 시간적, 공간적 온도변화를 토대로 축열 뿐만 아니라 열전도율, 단열효과를 검증하였다.



Fig. 3.7 Photograph of buildings constructed for heat storage experiment

열전도 특성과 에너지 사용량을 평가하기 위한 실대형 모형은 외부온도의 영향을 줄이기 위해 높이 3.5m², 면적 80m² 넓이의 경량 단열패널 컨테이너를 시공하였고, 내부에 3m×4m×3m로 무량판구조의 철근콘크리트 모형 2개동(기준동, 시험동)을 제작하였다.

(2) 바닥층 시공

보통포틀랜드시멘트를 이용한 모르타르 축열층(기준동)과 다공성 장석을 이용한 축열층(시험동)의 성능을 비교하기 위해 2개의 실대형 모형의 바닥면에 “소음방지를 위한 바닥 충격음 차단구조기준(국토교통부 고시제2015-319호)”의 바닥 상세단면도 Fig. 3.8 를 기준으로 하여 30 mm 완충단열재를 시설하고 상부에 경량기포토 50mm를 시공하였다 Fig. 3.9(a). 재령 2주가 지난후 축열과 열전도 실험을 위해 250 mm 간격으로 온수관을 설치하고 축열을 위한 모르타르를 시공하였다 Fig. 3.9(b). 온수 공급을 위한 보일러는 2 kW 용량의 전기보일러를 기준동과 시험동에 독립적으로 설치하였고 소비전력을 파악하기 위해 단상 2선식 적산전력계를 보일러와 직접 연결하였다.

슬래브 상부에 단열재와 경량기포토를 시공하고 14일 후 온수 배관을 설치하였다. 1, 2차 모두 기준동은 모래와 보통포틀랜드시멘트를 3:1 비율로 배합한 모르타르(No. CS)를 제작하고 두께 50 mm로 시공하였다. 시험동은 평균 입경 1.0 mm 크기로 제작한 다공성 장석(장석6호)와 40 μm 입경의 다공성 장석(장석분체)를 배합한 모르타르(No. CP3)를 제작한 후 온수관이 설치된 부분에 50 mm 두께로 시공하였다. 동일 실험 조건을 위해 기준동과 시험동은 동시에 시공하였고 재령 28일이 지난 후 축열 및 열전도 특성에 관한 측정을 수행하였다. 축열층은 재료의 배합비를 달리하여 2회에 걸쳐 제작하였고 회차별로 열전도실험을 수행하였다. 다공성 장석의 최적 배합비 산정을 위해 1차 실험에 사용한 축열층(단열재+경량기포+바닥 모르타르)을 제거한 후 다른 배합비의 모르타르를 제작하고 1차와 같은 방법으로 축열층을 재시공하였다.

Fig. 3.10는 1차, 2차 모형실험에서 사용한 축열층 모르타르의 배합비를 나타낸 것으로 기준동의 배합비는 같고, 시험동은 1 mm크기의 장석6호의 비율을 10% 줄이고 40 μm 입경의 장석분체 비율을 10% 증가시켰다.

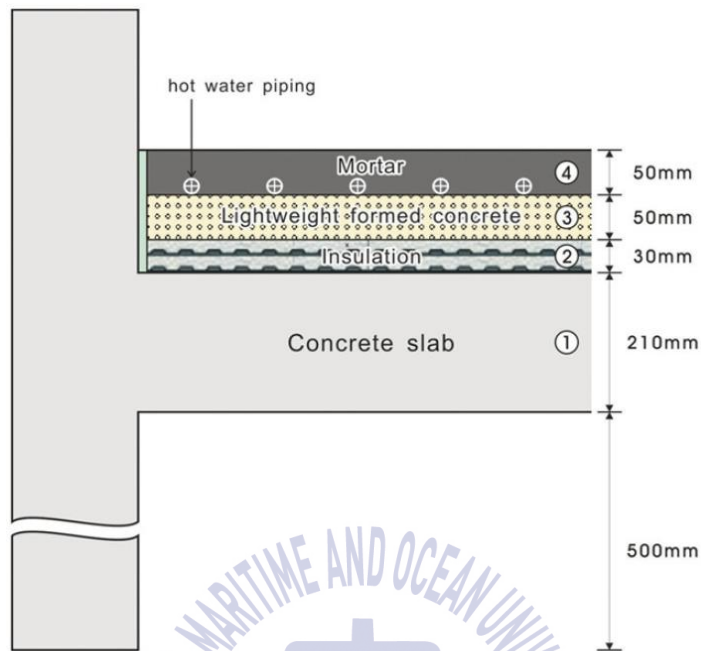


Fig. 3.8 Construction standard of the bottom storage layer



(a) Construction of air-trapped soils

(b) Construction of hot water pipes

Fig. 3.9 Construction of the bottom storage layer

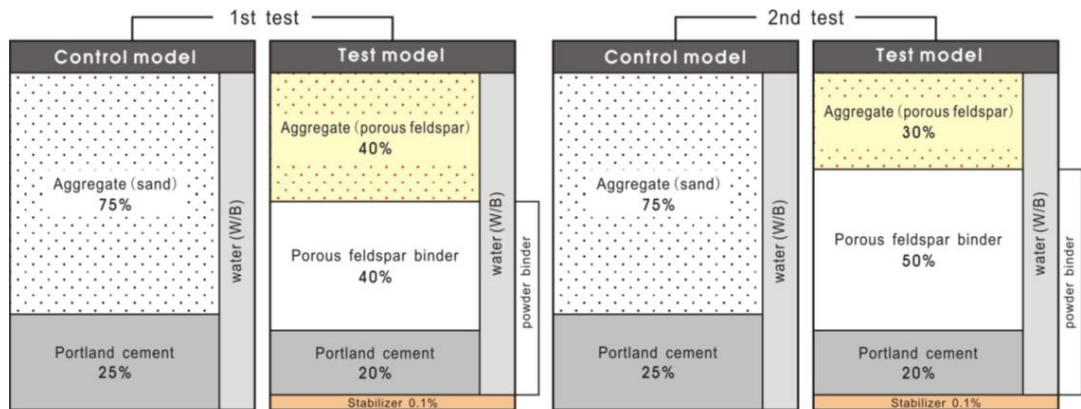


Fig. 3.10 Mixing ratio of mortar materials for heat storage layer



(3) 모니터링

축열층의 표면 온도 관찰을 위하여 적외선 열화상 카메라를 이용하였다. 일반 모르타르로 시공한 기준동과 다공성 장석을 이용한 시험동 모두에 적외선 열화상 카메라를 설치한 후 축열층의 가열과 냉각과정의 온도변화를 모니터링 하였다. 외적 요인을 최소화하기 위해 카메라와 바닥까지의 거리를 일정하게 유지하였고 초점거리와 시야각을 동일하게 적용하였다. 1차 모형실험에서 열화상 측정은 IR 분해능 320×240픽셀을 가지는 FLIR(미)의 T335 모델을 사용하였고 2차 실험은 IR 분해능 640×480픽셀의 FLIR A615 모델을 사용하였다(Fig. 3.11). 측정 온도의 범위와 오차는 각각 20~150℃와 0.1℃ 이하로 열전달 실험에 맞도록 구성하였다.

보일러의 운전에 따른 온도변화와 전력사용량을 파악하기 위해 축열층에 80 cm 간격으로 천공한 후 온도계를 설치하고 2주에 걸쳐 가열과 냉각의 반복 과정 중의 온도변화와 소비전력을 실시간 원격으로 측정하였다. 원격계측을 위해서는 라즈베리파이(Raspberry

PI)의 확장 GPIO(General Purpose IO) 포트를 이용하여 온도 센서를 부착하였고, 측정된 자료는 무선공유기를 사용하여 인터넷망에 전송하여 클라우드 서비스에 데이터를 저장하였다(Ferdoush and Li, 2014; Choi et al., 2016). 라즈베리파이의 무선 인터넷 환경접속은 USB 타입의 무선랜 카드를 이용하였다. 적외선 열화상 분석을 위한 가열과 냉각 동안 사용된 전력사용량은 적산전력계를 통해 확인하였다.



(a) Thermal imaging camera(FLIR A615) (b) Real-time shooting scenes(FLIR Tools)

Fig. 3.11 Photo of Infrared thermal imaging camera

제 4 장 시험 결과 및 분석

3장에서 소개된 시험방법을 이용하여 장석과 제올라이트를 이용한 경량기포토에 대해 실시한 실험 결과를 분석하였다.

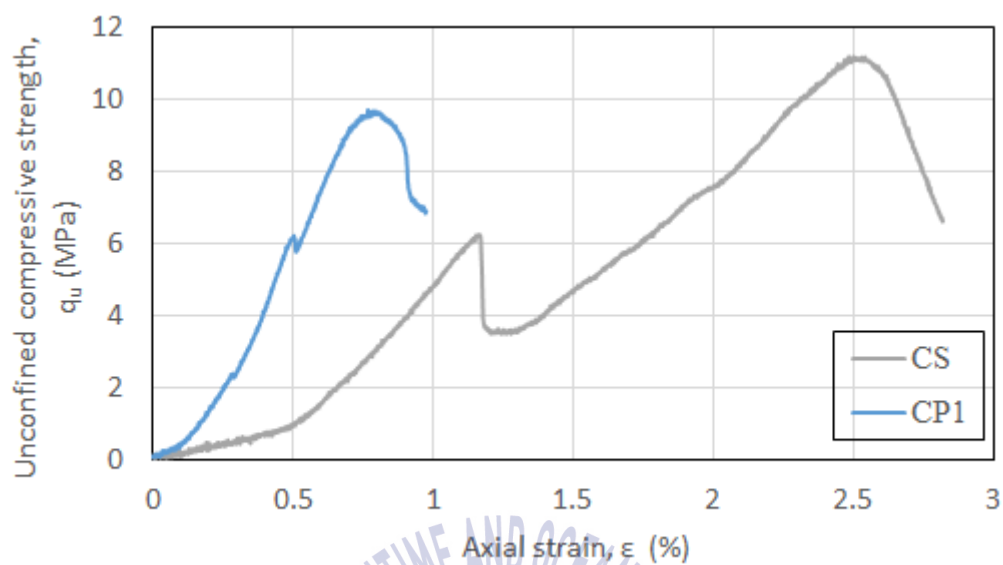
4.1 일축압축강도

일축압축시험은 샘플링 된 공시체(5cm×10cm)에 대해 실시하였고, 각각의 배합비로 제작된 공시체를 양생기간으로 분류하여 각각 3회씩 일축압축시험 하여 얻어진 평균값을 요약한 결과는 Table 4.1 과 같이 나타났다.

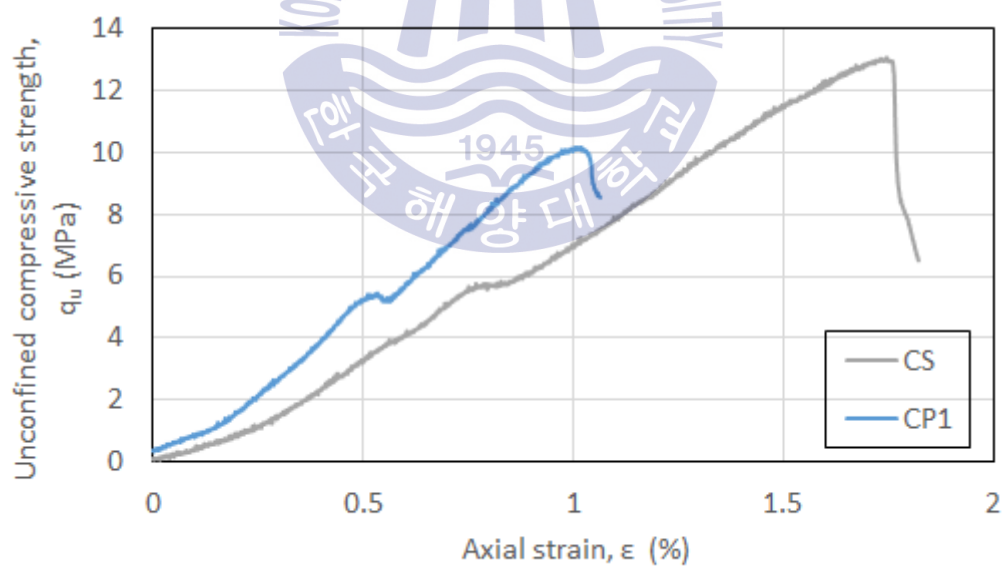
Table 4.1 Comparison results of unconfined compressive strength (28days cured)

Component	Curing days(MPa)			
	7days	14days	21days	28days
No.				
CS	11.17	13.07	13.34	13.72
CP1	9.6	10.17	10.42	12.30
CP2	8.07	8.53	10.68	11.82
CP3	8.56	10.20	10.91	11.61
CZ1	2.38	4.00	5.71	6.24
CZ2	0.59	1.10	1.19	1.23

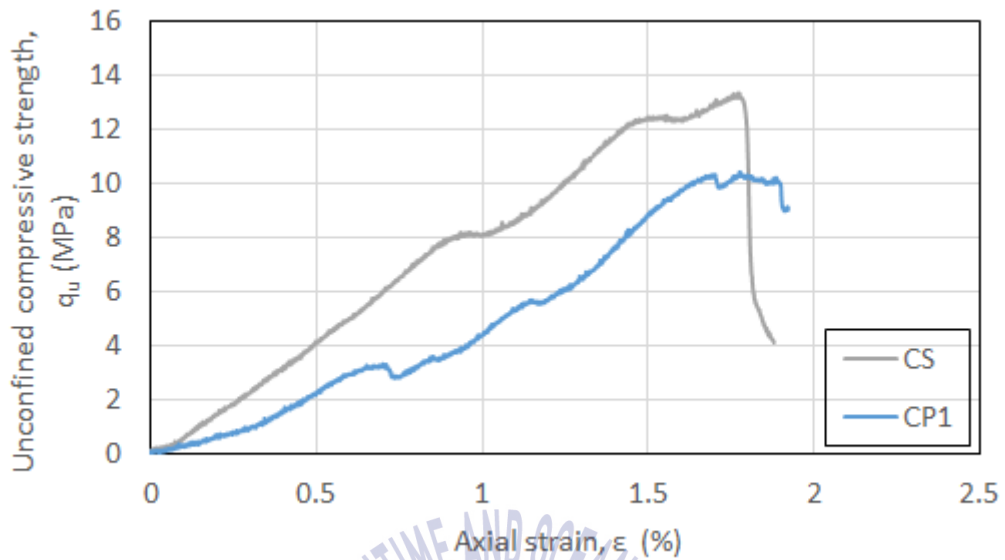
Table 4.1 에서 나온 결과와 같이 시멘트 함량이 높고 모래를 사용한 CS 공시체가 장석과 제올라이트를 사용하여 제작한 다른 공시체 보다 모든 재령기간동안 가장 높은 강도를 나타내며, Fig. 4.1 과 같이 모든 재령기간 동안, 같은 비율의 시멘트를 사용하고, 모래대신 장석을 사용한 공시체(CP1) 보다 응력-변형 거동의 피크 값이 뚜렷하며, 변형률이 크게 나타난다.



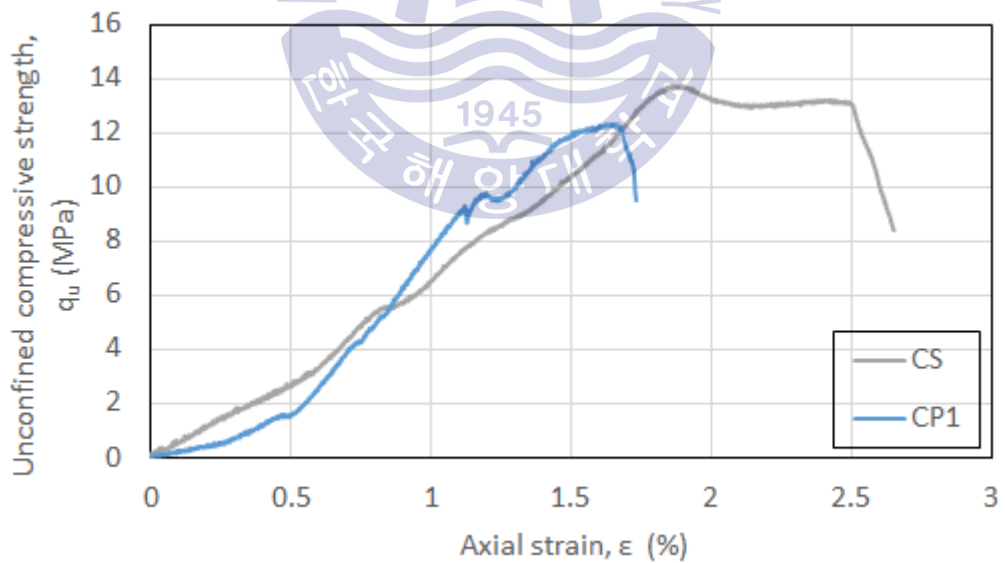
(a) 7 days cured(CS and CP1)



(b) 14 days cured(CS and CP1)



(c) 21 days cured(CS and CP1)



(d) 28 days cured(CS and CP1)

Fig. 4.1 Results of unconfined compressive tests on specimens cured(CS and CP1)

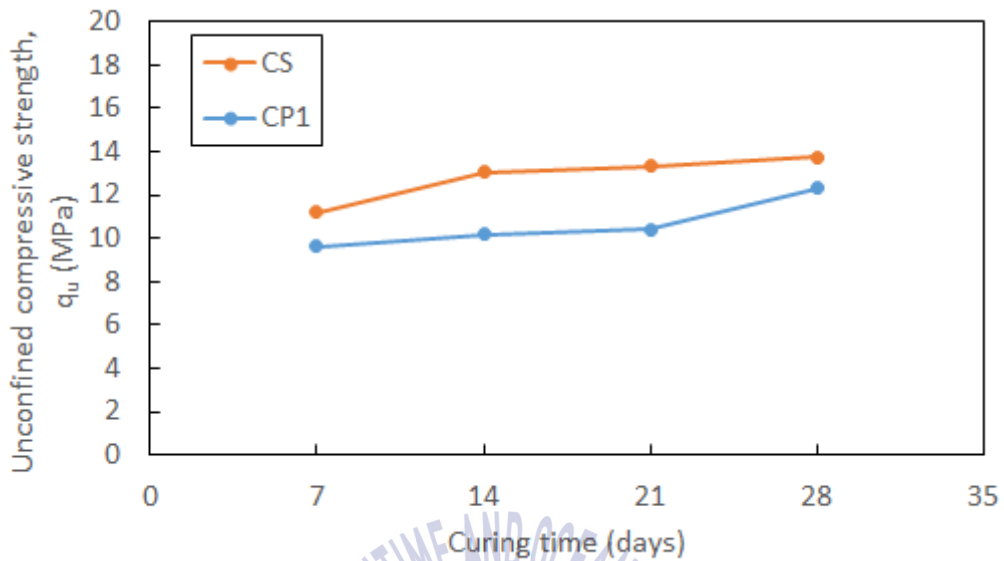
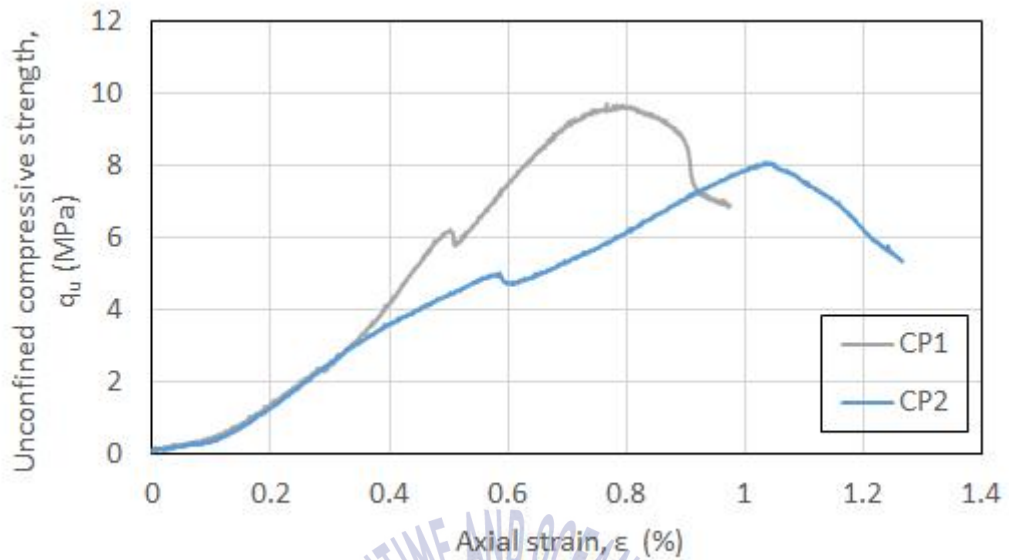
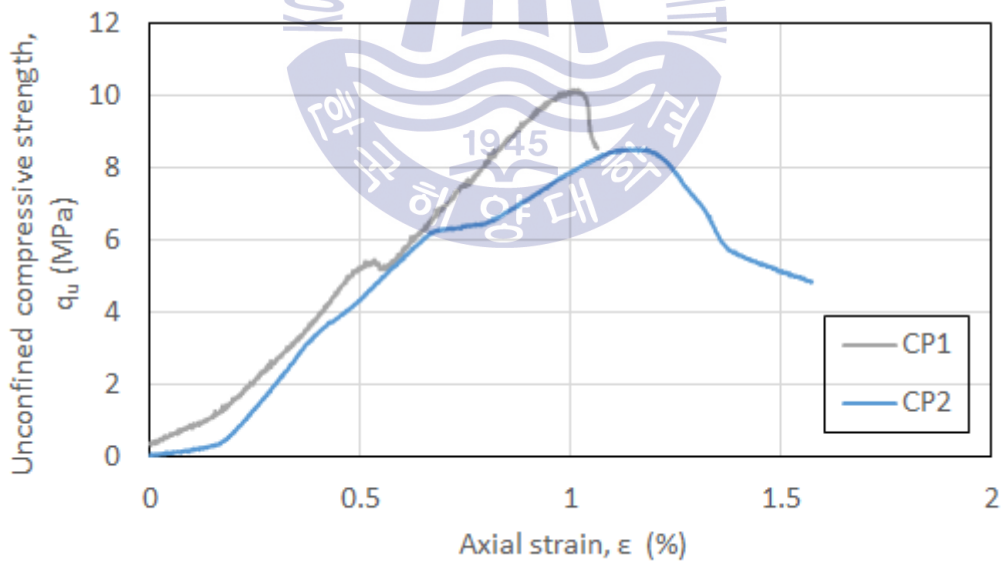


Fig. 4.2 Unconfined compressive strength with curing days(CS and CP1)

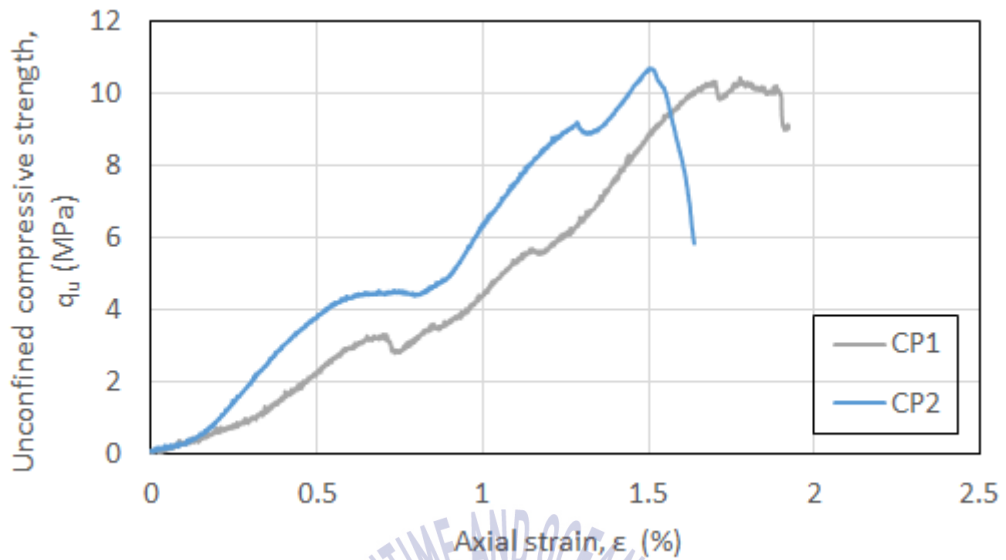
Fig. 4.1과 Fig. 4.2는 기준이 되는 모래를 사용한 공시체 No. CS와, 같은 함량의 장석을 사용한 CP1을 양생기간에 따라 분석한 것으로, 재령 7일부터 28일까지 지속적으로 모래가 포함된 CS의 강도가 더 높게 나타났다. 모래가 포함된 CS의 경우 재령 7일에서 14일 사이에 강도가 비약적으로 상승했으나, 장석이 포함된 CP1의 경우에는 재령 21일에서 28일 사이에 강도가 크게 상승하였다.



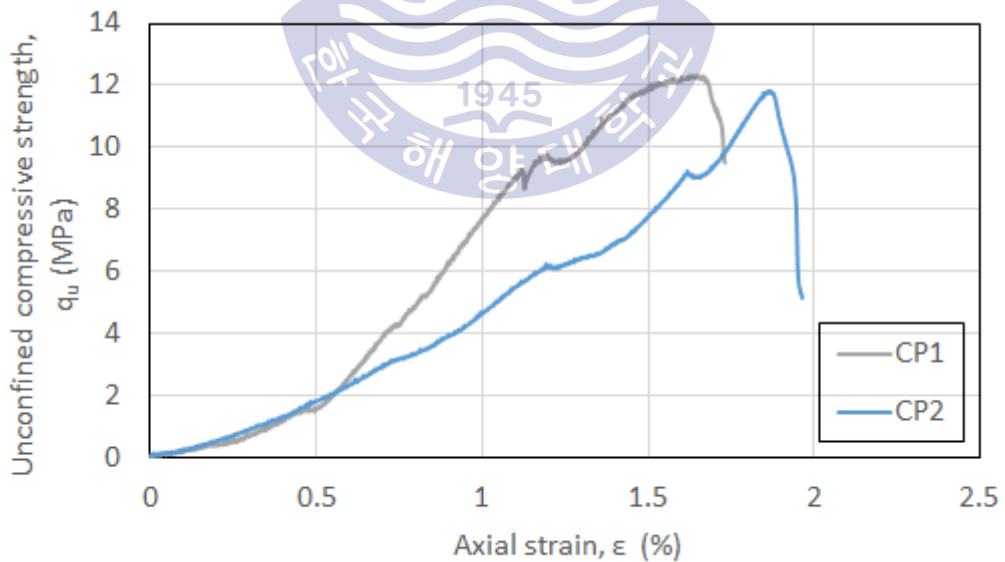
(a) 7 days cured(CP1 and CP2)



(b) 14 days cured(CP1 and CP2)



(c) 21 days cured(CP1 and CP2)



(d) 28 days cured(CP1 and CP2)

Fig. 4.3 Strength difference to cement content(CP1 and CP2)

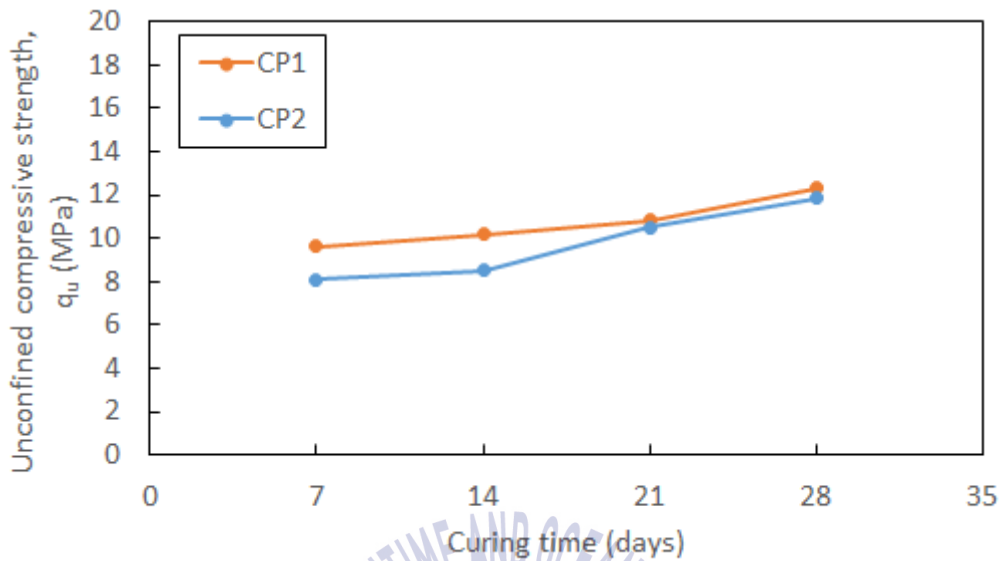
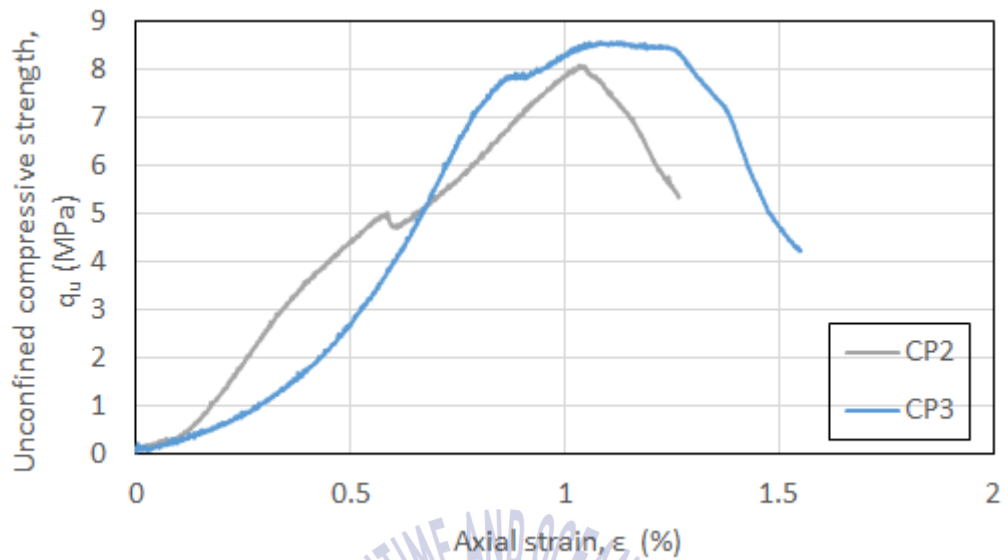
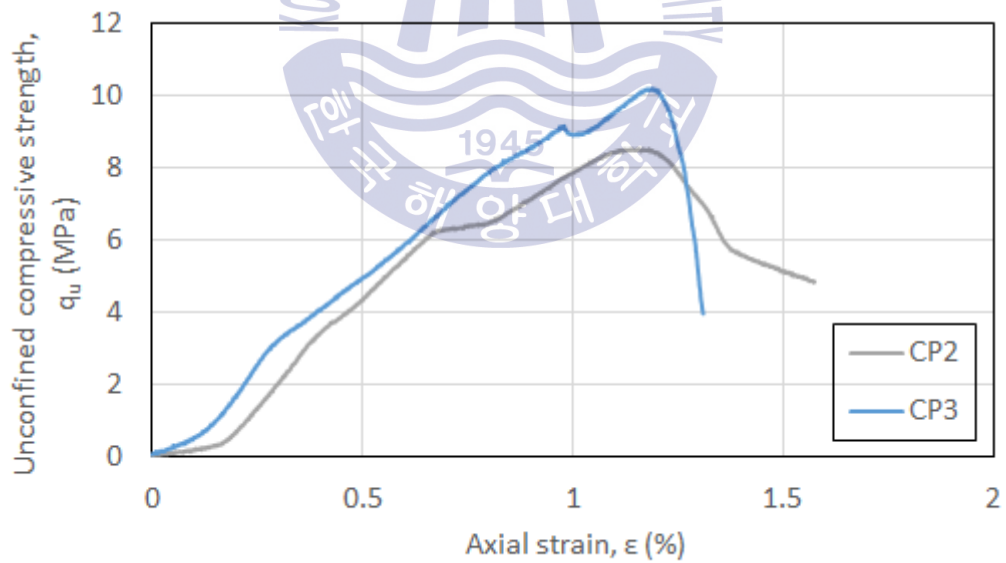


Fig. 4.4 Unconfined compressive strength with curing days(CP1 and CP2)

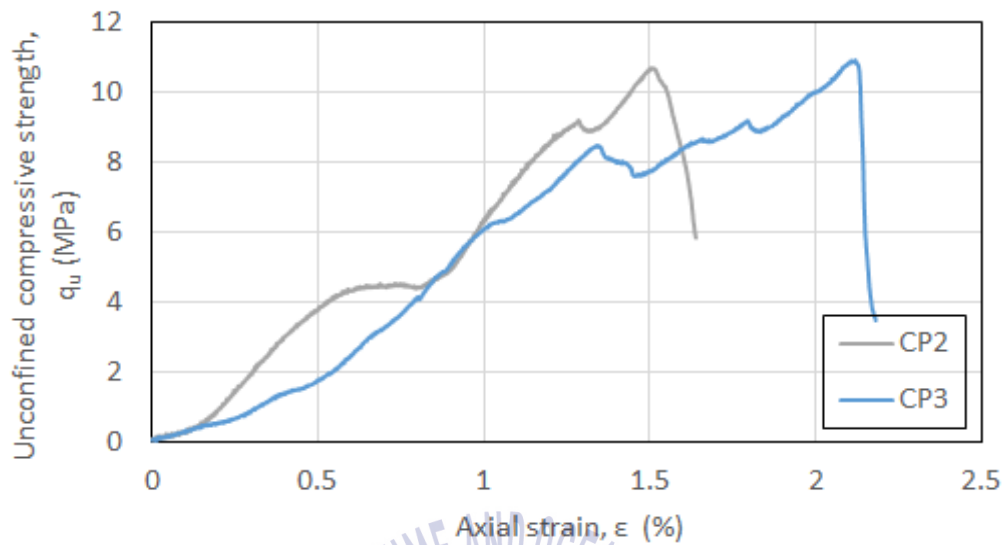
시멘트와 장석의 함량에 따른 강도의 변화는 Fig. 4.3 와 Fig. 4.4에서 보는 바와 같이 나타난다. 재령 초기 7일부터 28일까지 시멘트 함량이 5% 더 많은 CP1이 강도가 높게 나타난다. 하지만 재령 14일부터 21일에는 장석의 함량이 더 높은 CP2의 강도향상율이 더 높게 나타난다.



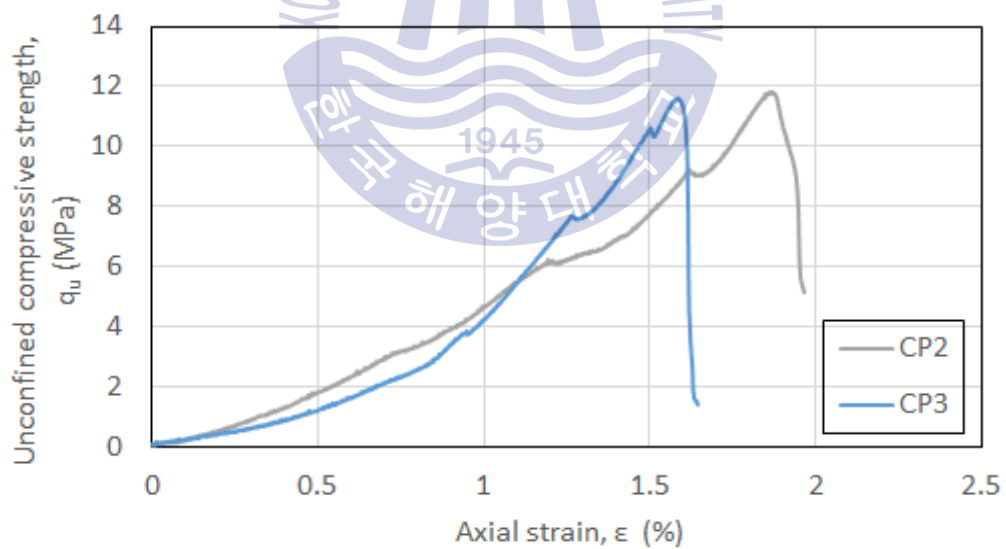
(a) 7 days cured(CP2 and CP3)



(b) 14 days cured(CP2 and CP3)



(c) 21 days cured(CP2 and CP3)



(d) 28 days cured(CP2 and CP3)

Fig. 4.5 Strength difference to content of No.6 feldspar
and feldspar powder(CP2 and CP3)

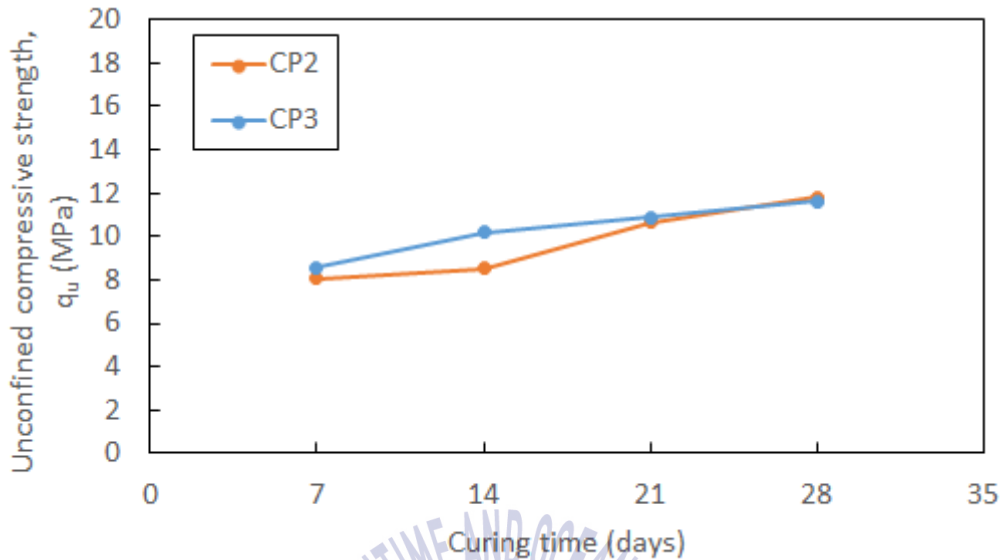
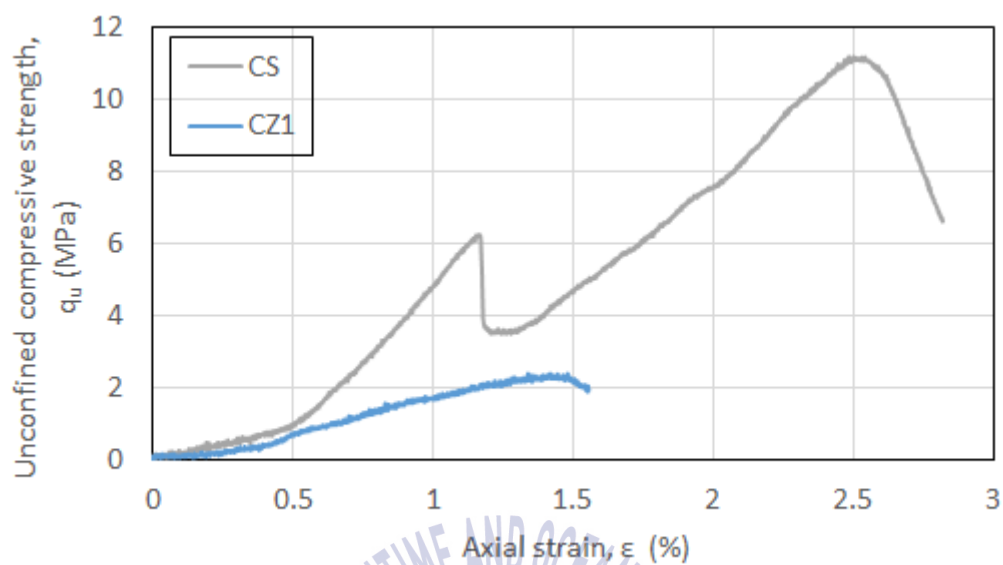
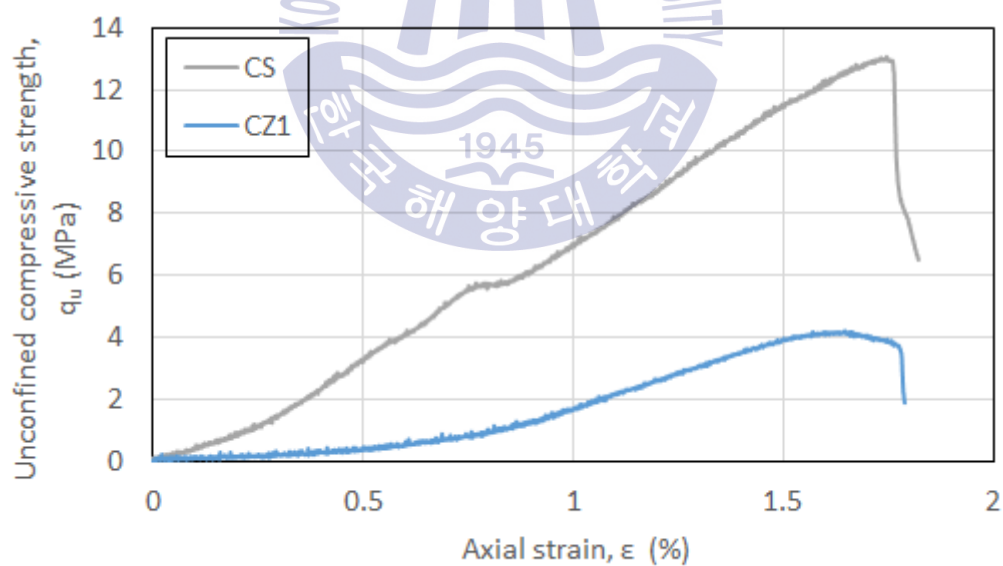


Fig. 4.6 Unconfined compressive strength with curing days(CP2 and CP3)

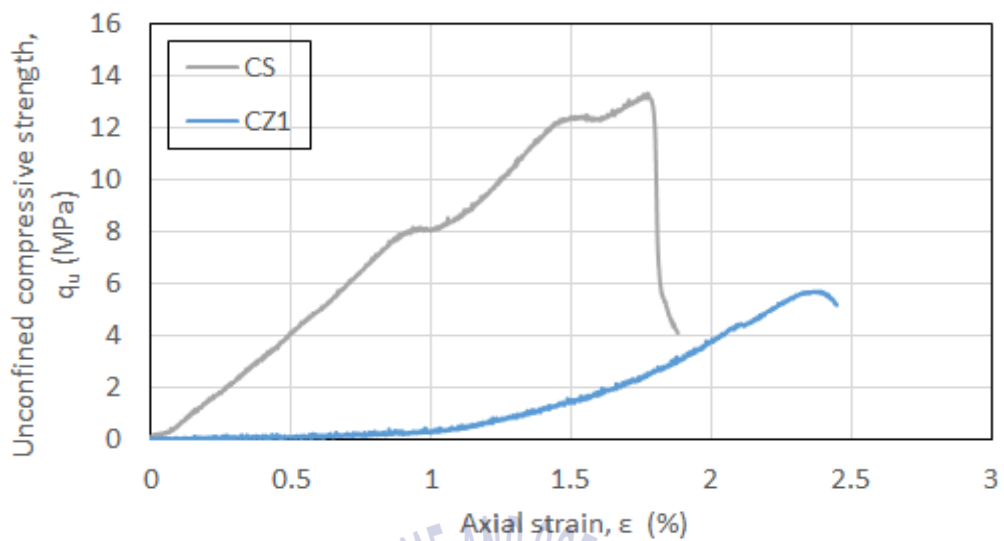
Fig. 4.5 와 Fig. 4.6의 시멘트 함량은 같으나 장식6호와 장식분체의 함량의 차이를 둔 CP2와 CP3를 비교한 것으로, 입도가 더 낮은 장식분체의 함량이 높은 CP3의 강도가 재령 7일, 14일, 21일에는 더 크게 나타났다. 특히 재령 14일의 경우 비교적 큰 차이를 보이고 있다. 하지만 재령 28일에는 입도가 더 큰 장식6호의 함량이 높은 CP2의 강도가 크게 나타났다. 이 결과로 보아 입도가 낮은 장식분체의 함량이 높으면 초기 강도 값이 크게 나왔으며, 입도가 큰 장식6호의 함량이 높은 경우 초기 강도 값은 비교적 낮게 나오지만, 최종적으로 재령 28일의 강도가 더 크게 나왔다.



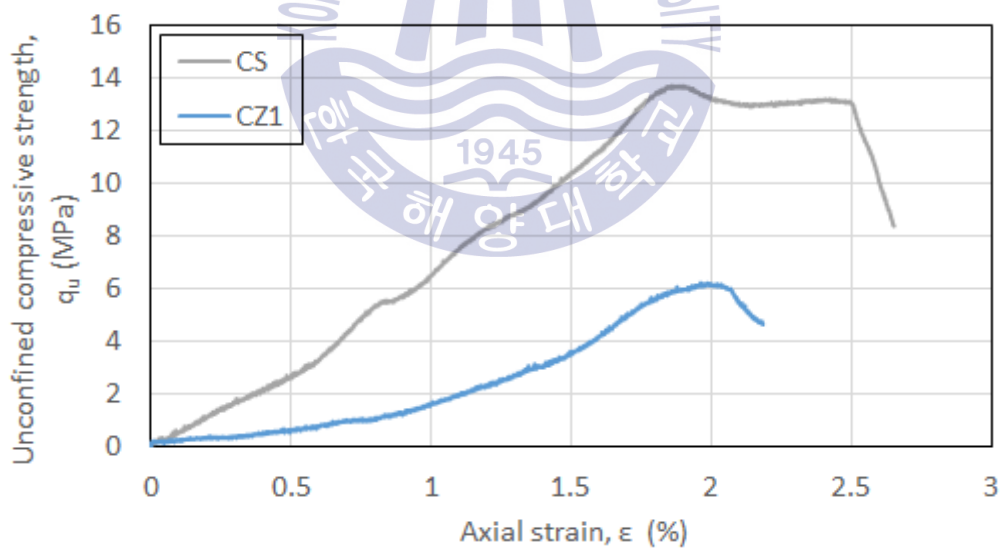
(a) 7 days cured(CS and CZ1)



(b) 14 days cured(CS and CZ1)



(c) 21 days cured(CS and CZ1)



(d) 21 days cured(CS and CZ1)

Fig. 4.7 Strength difference between specimens made with sand and zeolite(CS and CZ1)

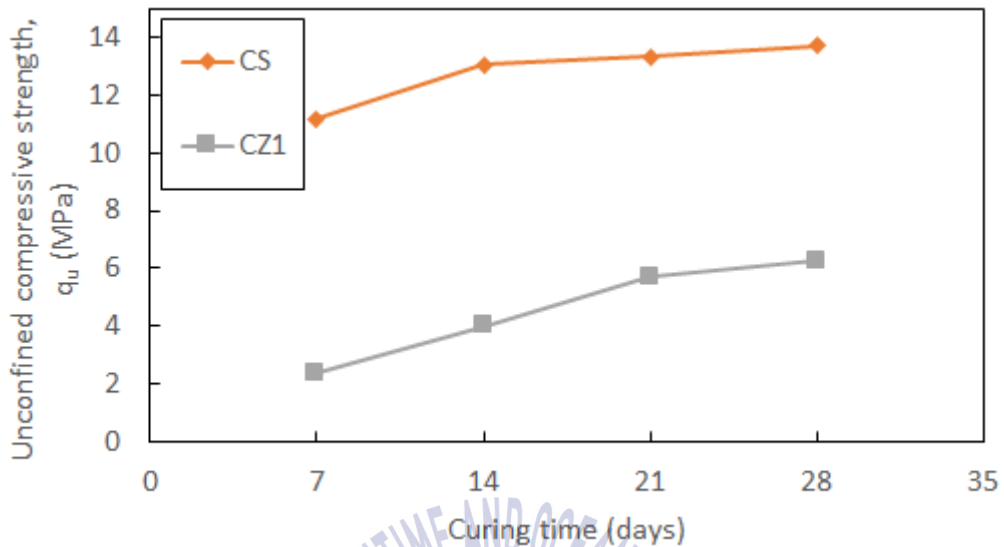
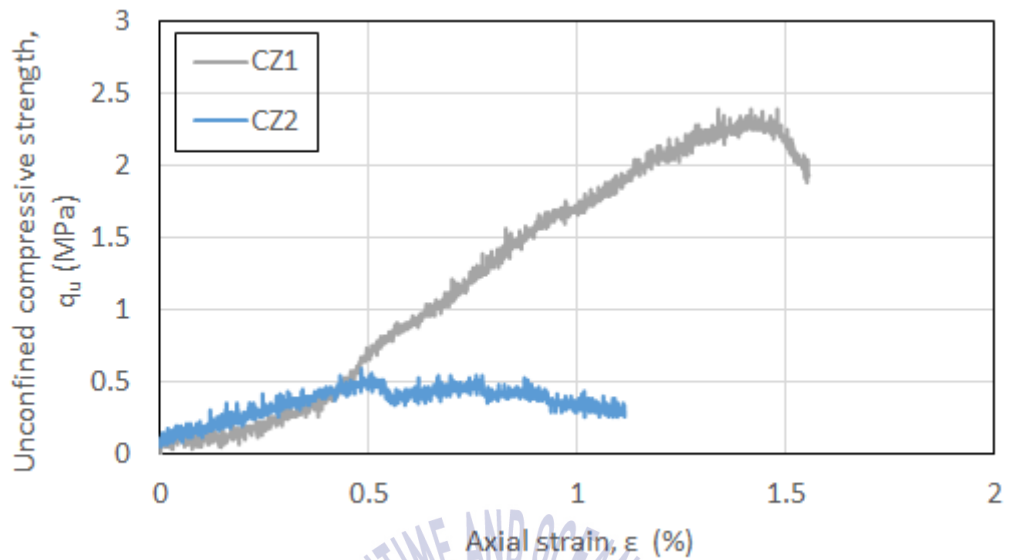
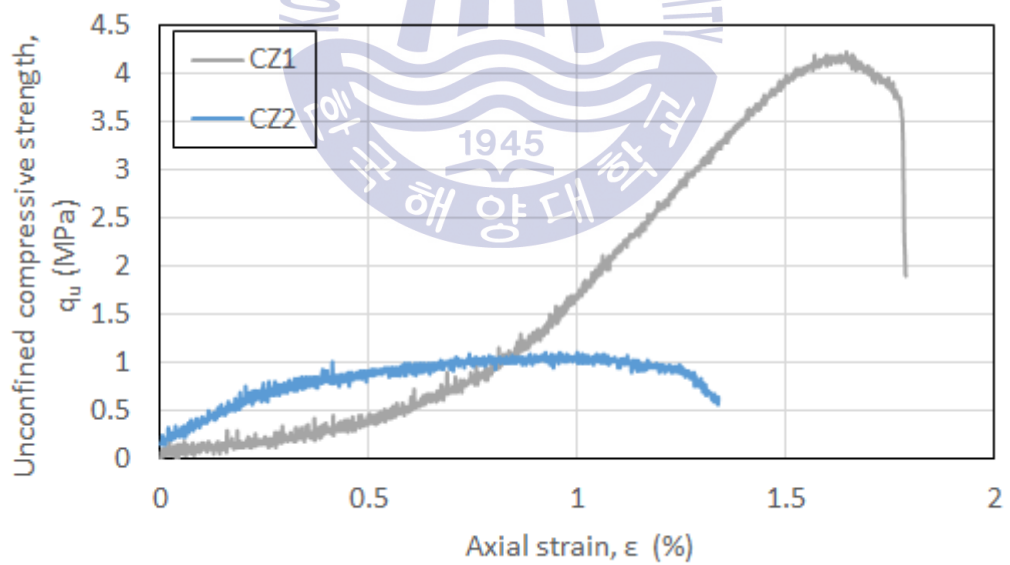


Fig. 4.8 Strength difference with curing days of specimens made with sand and zeolite(CS and CZ1)

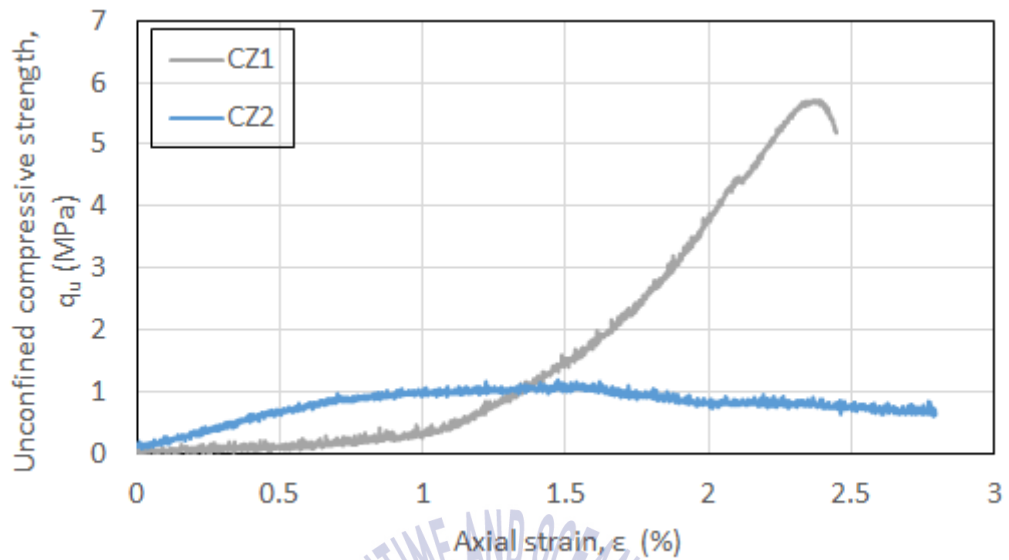
Fig. 4.7 과 Fig. 4.8의 시멘트 함량은 같으나 각각 모래와 제올라이트를 사용했다는 점의 차이가 있고, 강도의 차이 또한 크며, 응력-변형 곡선의 기울기 차이가 매우 크다. 재령 7일의 초기 강도 값에서는 두 공시체의 강도 값이 약 5.5배의 차이가 났지만, 재령 28일의 강도 값은 약 2배의 차이가 났음을 확인 할 수 있었다. 이러한 결과로 제올라이트의 경우 초기 강도 값이 모래를 사용한 경우보다 많이 낮다는 것을 확인 할 수 있었다.



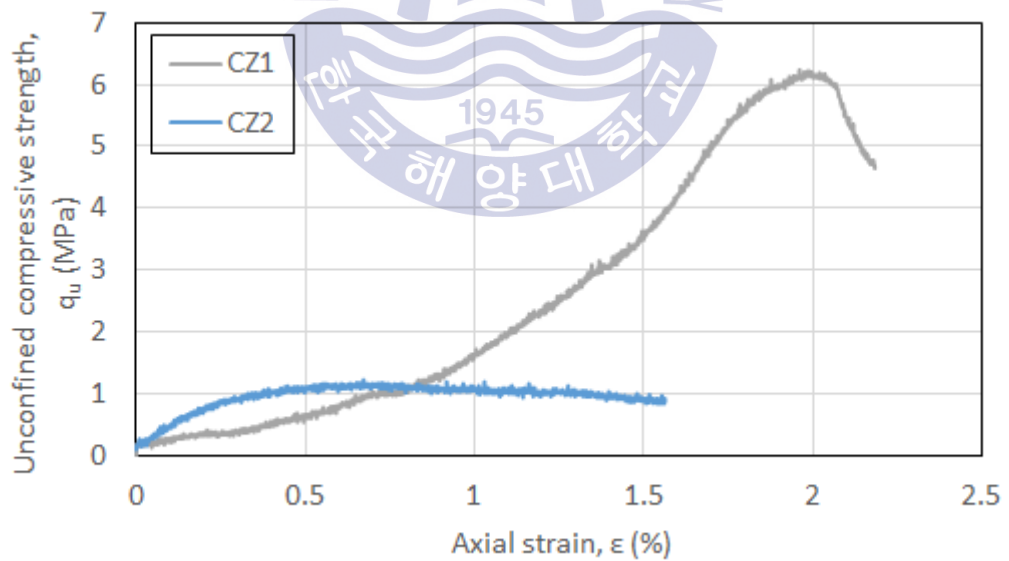
(a) 7 days cured(CZ1 and CZ2)



(b) 14 days cured(CZ1 and CZ2)



(c) 21 days cured(CZ1 and CZ2)



(d) 28 days cured(CZ1 and CZ2)

Fig. 4.9 Strength difference to zeolite content

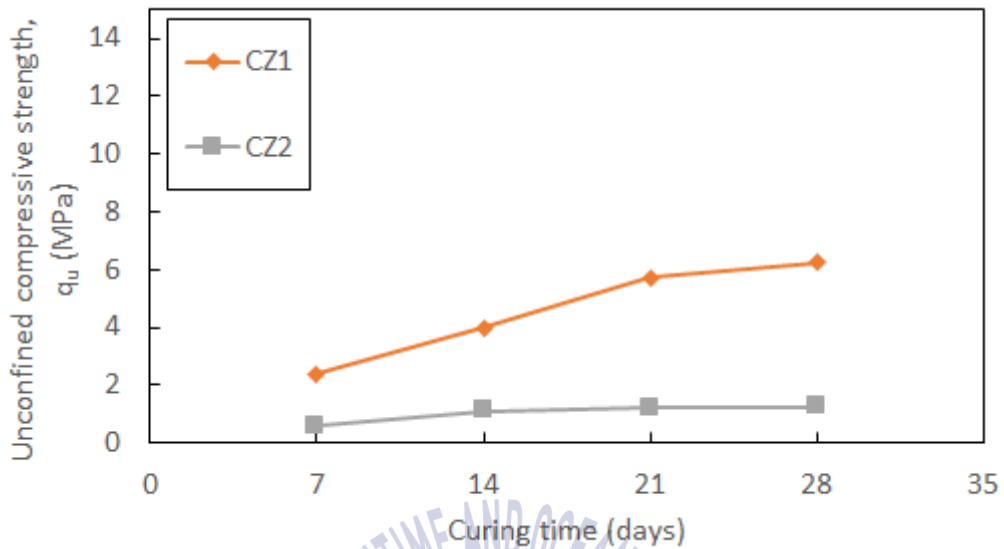


Fig. 4.10 Unconfined compressive strength with curing days(CZ1 and CZ2)

Fig. 4.9와 Fig. 4.10은 CZ1에서 시멘트의 함량이 20% 줄이고, 같은 양 만큼 제올라이트의 함량을 증가시킨 CZ2의 강도를 양생일수에 따라 분석한 것이다. CZ2의 경우 시멘트의 함유량을 최소화 시키고, 다공성 재료로서 제올라이트가 가진 중금속 제거, 항균 능력을 극대화시키기 위해 제작한 공시체로서, 일축압축강도가 미약하여 사용에 제한이 많을 것으로 판단된다.

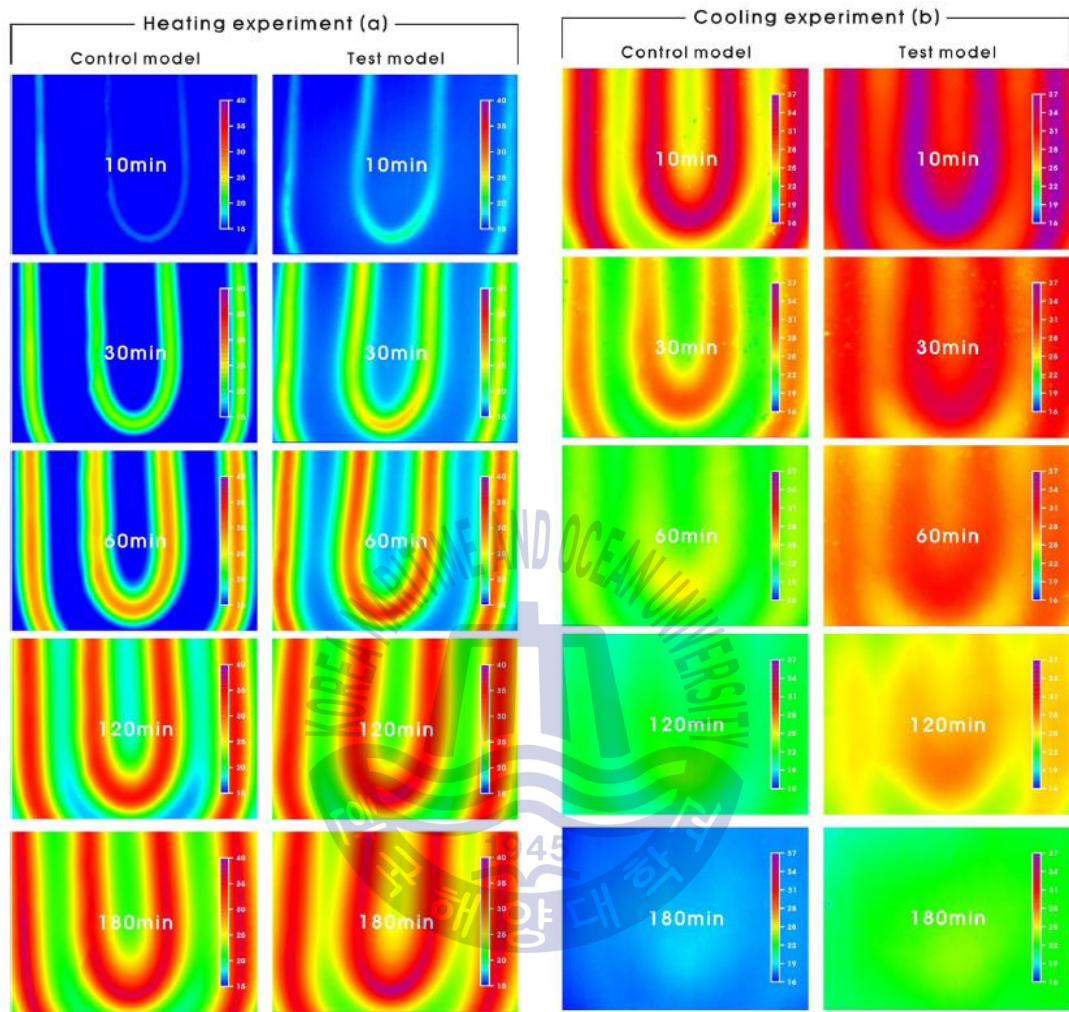
4.2 실 모형을 사용한 열전도

(1) 열화상 카메라를 이용한 바닥층 분석

Fig. 4.11(a) 는 1차 실험의 가열 기간 동안 바닥층의 온도 분포를 나타내고 있다. 가열 후 2분 이내에 관로 주변으로 온도가 상승함에 따라 축열층 내부에 시설된 배관의 실제 규격과 같은 크기의 열화상을 볼 수 있으며 가열 10 분 후 다공성 장석을 적용한 모형에서 관로에 인접한 부분의 온도가 2 °C 정도 온도가 높아진다. 30 분과 60 분 후는 관로 사이의 축열제 부분의 온도가 기준동에 비해 증가하는 것을 관찰할 수 있고 가열 2시간 영상에서 기준동과 시험동의 최대온도는 3 °C 차이가 발생한다. 기준동의 경우 관로에서 거리가 가장 먼 곡선 부분의 온도는 17.5 °C 인 것에 반해 시험동은 22.3 °C로 4.8 °C의 차이가 나며 3시간의 가열에서 관로 인접부의 최대온도는 거의 동일하나 관로에서 가장 떨어져 있는 12.5 cm 지점의 온도는 4 °C 이상의 차이를 보인다. 만약 지속적으로 온수를 공급한다면 축열제의 온도는 열적 평형 상태에 도달하겠으나 상당한 시간 차이를 예상할 수 있다.

Fig. 4.11(b) 는 냉각기간 동안 바닥층의 온도 분포를 나타내고 있다. 가열 실험에서 축열층의 최대온도는 37 °C에 도달하였고, 온수 공급을 중단한 채 창호(단열)를 개방하고 냉각과정의 온도를 관찰하였다. 기준동은 온수관에서 거리가 먼 곳부터 냉각되며 60 분 후에는 관로 인접부와 관로의 온도가 거의 같아져 관로가 배열된 모양이 불분명해졌다. 냉각 2시간과 3시간 후 축열제의 온도는 평균 21 °C와 18 °C로 가열 실험 이전 상태에 근접하였다. 다공성 장석을 적용한 시험동은 축열에 의해 관로 주변의 온도가 기준동에 비해 2 °C 이상 높았고, 3시간의 냉각 후에도 23 °C 이상의 온도를 유지하고 있다.

시간에 따른 온도변화를 살펴보면 가열 180 분의 기준동 축열층의 온도는 시험동 130 분과 유사하며 50 분의 차이를 보여지며 한편 180 분 냉각 시 시험동의 온도는 기준동 100 분과 유사하며 80 분 정도 냉각이 지연되는 효과를 나타낸다.



(a) Heating cycles

(b) Cooling cycles

Fig. 4.11 Temperature changes during heating and cooling cycles of the heat storage layer under supplying 55°C hot water

Fig. 4.12 는 2차 실험 기간 동안 바닥층의 온도 분포를 나타내고 있다. 2차 실험은 평균 입경이 $40\mu\text{m}$ 크기의 장식분체 함량을 10% 증가시킨 배합비로 제작한 시험동의 축열층과 기준동에 대한 온도변화를 관찰하였고, 2회에 걸쳐 45°C 와 65°C 온수를 공급하였다. 45°C 온수의 공급과정과 냉각과정의 온도변화는 1차 실험과 같이 다공성 장석을 사용한 시험동이 같은 조건의 가열과정에서 온도의 상승 속도가 빠르고 온수 배관을 중심으로 열전달 범위가 넓게 나타난다. 기준동의 냉각은 축열층의 냉각으로 배관의 모습이 뚜렷해지며 100 분 이후로는 축열층의 냉각으로 배관의 모습을 볼 수 없으며 반면 시험동은 축열로 인해 배관 주변의 온도가 기준동에 비해 3.5°C 이상 높고 열화상 카메라의 영상에서 배관의 흔적을 분명하게 관찰할 수 있다. 65°C 의 온수를 공급한 실험의 가열과정은 45°C 와 유사하였고 냉각과정 중 실대형 모형 외부의 경량패널 건축물의 단열이 개방되어 냉각과정의 온도변화는 분석하지 않았다. 동일한 시간대의 1차 시험동 축열층의 온도와 비교하면 가열과정은 장식모래 함량이 높은 1차의 시험동 축열층에서 온도가 빨리 상승하여 축열효과가 뛰어난 것으로 판단되며 냉각과정은 유사한 것으로 판단된다.

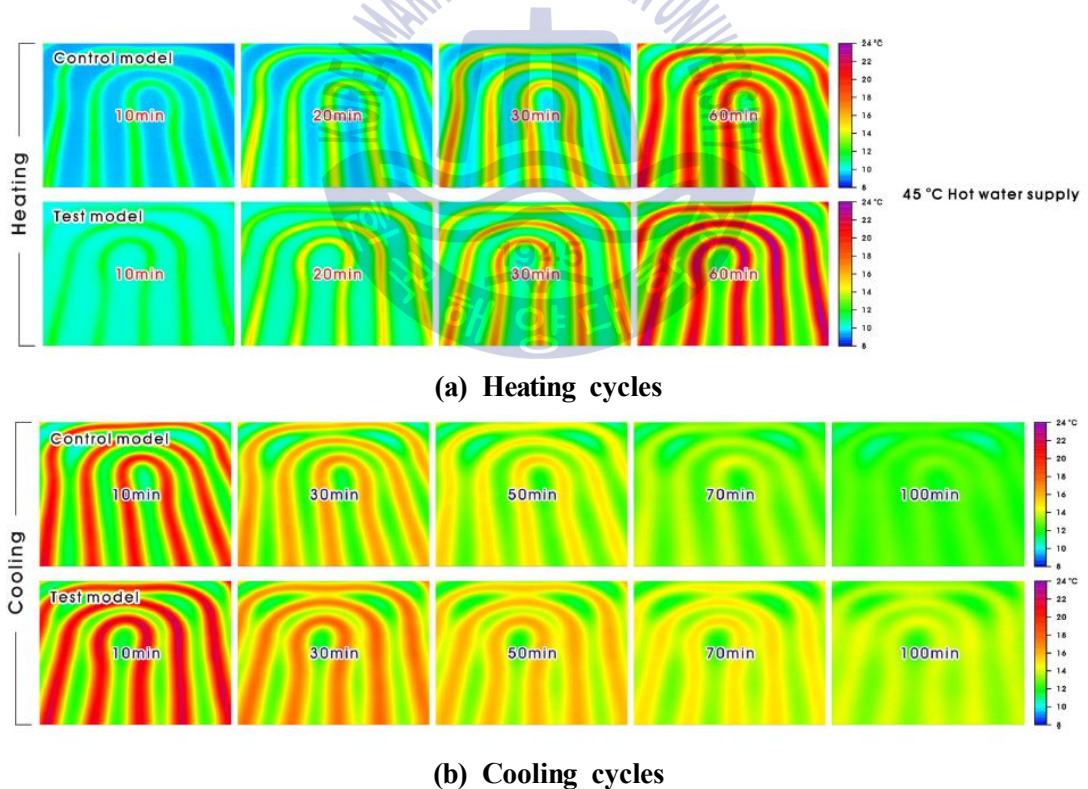


Fig. 4.12 Temperature changes during heating and cooling cycles of the heat storage layer under supplying 45°C hot water

(2) 온도센서를 이용한 바닥층 분석

열화상 카메라에 의한 온도 분석은 바닥층의 전체적인 온도변화를 파악하기 편리하며, 온도센서를 이용하여 바닥층의 축열성능을 다른 시각에서 분석하였다.

Fig. 4.13 은 3일간의 보일러 온수온도 75°C에 맞추어 가열 7시간 냉각 14시간 하여 바닥 온도변화를 나타내고 있다. 열화상카메라로 분석한 결과와 마찬가지로 다공성 장석의 높은 열전도율 및 축열 성능으로 인하여 시험동의 온도가 일반 시멘트를 사용한 기준동에 비해 약 2°C 높은 온도를 유지하며 가열되고 냉각이 된다.

Fig. 4.14 는 보일러 내부 물통의 가열된 물의 Input 부분과 Output 부분에서 의 손실 되는 온도를 나타내고 있다. 실험은 보일러 가동온도 55°C에 맞추어 약 한 달간 진행되었으며, 최대온도가 도달하면 자동으로 보일러가 꺼지고 켜지고를 반복하였다. 두 개체군의 그래프 데이터는 Input온도-Output 온도의 차이 값으로 일반 시멘트를 사용한 기준동의 비교군의 경우 온도의 변화가 관찰되나(Fig. 4.14(a)), 다공성 장석을 사용한 시험동의 경우 기준동과 비교시 상당히 안정적으로 온도를 유지하고 있는 것을 알 수 있다(Fig. 4.14(b)).

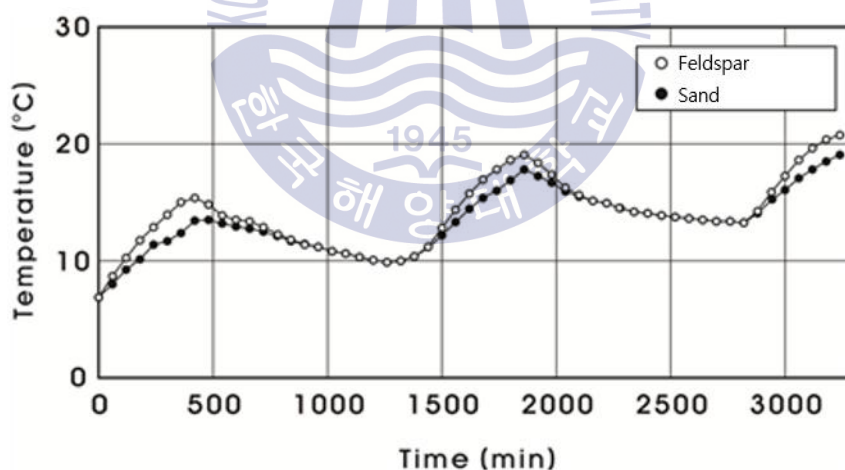
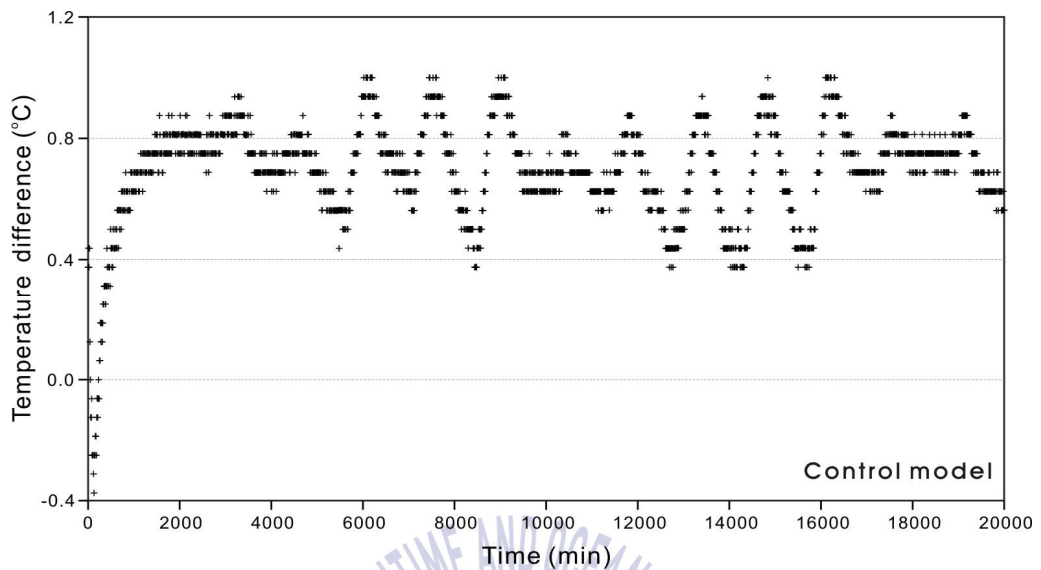
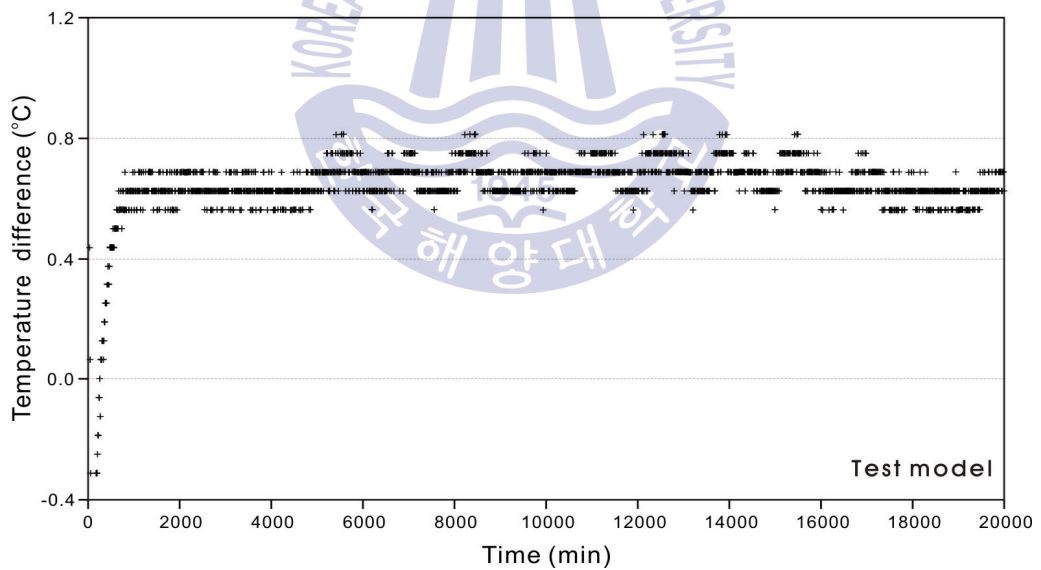


Fig. 4.13 Temperature differences during heating and cooling cycles of the heat storage layer



(a) Control model(sand)



(b) Test model(feldspar)

Fig. 4.14 Temperature difference between inlet and outlet of boiler

제 5 장 결론

본 연구에서는 많은 연구가 이루어지고 있는 경량기포토를 균일한 품질 확보와 관리의 편리성을 위해 공장에서 생산되는 모래를 사용하여 제작한 하였고, 추가로 최근 주목받는 친환경적 요소들을 고려하여, 축열, 항균, 중금속 여과능력이 탁월하며 가격도 저렴한 다공질 장식과 제올라이트를 모래 대신 사용한 경량기포토를 다양한 배합비로 제작하여 재령일수에 따른 일축압축강도를 측정하였고, 실제 크기로 모형을 제작하여 열전도율과 축열성능을 분석하였다.

(1) 기준이 되는 모래를 사용하여 제작한 경량기포토 공시체와 장식과 제올라이트를 사용하여 제작한 모든 경량기포토 공시체의 일축압축강도는 양생기간, 단위중량, 시멘트 함량이 증가함에 따라 강도가 증가하는 경향을 나타냈다. 강도가 크게 나오는 공시체는 파괴 시 취성적인 거동을 하며, 강도가 작은 공시체는 파괴 시 깨짐 현상이 확연하게 나타나지 않고 스펀지처럼 압축되는 거동을 보였다. 또한 장석을 사용한 경우, 입도가 작은 장식분체를 더 많이 혼합한 CP3 공시체가 입도가 큰 장식6호를 사용한 CP2 공시체에 비해 재령 7일부터 재령 21일까지 강도는 더 높게 나왔으나, 재령28일 강도는 CP2 공시체가 더 높게 측정되었다. 이러한 점은 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

(2) 제올라이트를 사용한 공시체 CZ1과 CZ2의 경우는 모래나 장석을 사용한 다른 공시체들에 비해 매우 낮은 강도를 보였다. 특히 시멘트의 함량을 10%로 낮추고 제올라이트의 함량을 90%로 높인 CP3 공시체의 경우 재령 7일의 강도는 매우 약한 충격에도 파괴되는 경향을 보였다.

(3) 첫 번째 열전도시험에서 기준동(모래를 사용하여 제작한 경량기포토로 제작) 보다 시험동(장석을 사용하여 제작한 경량기포토로 제작)이 가열 30분 후부터 확연하게 온도 차이를 파악할 수 있었고, 냉각기간 동안에도 30분 후부터 온도 유지 능력의 차이를 확연하게 파악할 수 있었다. 두 번째 열전도시험에서는 첫 번째 시험과 같은 기준의 기준동과 장식분체의 함량을 더 높인 시험동으로 시험을 실시하였고, 그 결과는 첫 번째 시험과 거의 동일하게 나타났다. (장석을 사용한 시험동의 온도상승과 열 유지 능력이 모래를 사용한 기준동에 비해 높게 나타났다.)

(4) 온도센서를 이용한 분석에서는 시험동이 기준동에 비해 더 짧은 시간에 높은 온도에 도달하고 온도유지 또한 비교적 고르게 나타나는 것을 확연하게 파악할 수 있었다.

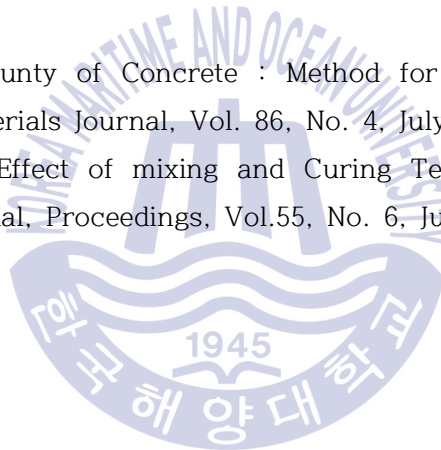


참고문헌

1. 윤길림, 김병탁(2004), 경량기포혼합토의 압축 및 강도특성 연구. 한국지반공학회논문집, 한국지반공학회, 제20권, 4호, pp.5-13.
2. 송준호, 임종철, 홍석우(2008), 원료토의 특성에 따른 경량기포혼합토의 압축강도 영향인자 분석. 한국지반공학회논문집, 한국지반공학회, 제24권, 11호, pp.1-10.
3. 하이그레이드소일 연구컨소시엄(2005), “기포혼합토공법 기술자료”
4. 일본도로공단(1996), “기포혼합경량토를 이용한 경량 성토공법의 설계.시공 지침서”
5. 임종철, 장지건, 이성우(2007), 경량기포혼합토공법의 적용성. 2007년 한국지반공학회가 학술발표회.
6. 박건태(2001), “경량기포혼합 준설토의 강도 특성”, 석사학위논문, 단국대학교
7. 권기오, 공경록, 이명규, 강헌찬(1997), “경량기포콘크리트의 압축강도에서 메타카올린의 효과”, 한국지구시스템공학회지, Vol.45, No.6, 2008, pp.673-679.
8. 송준호, 임종철, 홍석우(2008), 원료토의 특성에 따른 경량기포혼합토의 압축강도 영향인자 분석. 한국지반공학회 논문집, 제24권, 11호, pp.1-10.
9. 송준호(2009), “원료토의 특성에 따른 경량기포혼합토의 압축강도 영향인자 분석”, 석사학위논문, 부산대학교.
10. 이영준, 김성원, 박이근, 김태형(2010), “경량기포토의 압축 및 인장 특성”, 한국지반공학회 논문집, 제 29권, 9호, pp.59-69.
11. 황중호(2010), “경량기포토의 역학적 특성”, 석사학위논문, 한국해양대학교
12. 이영준(2011), “진동이 경량기포토의 강도에 미치는 영향”, 석사학위논문, 한국해양대학교
13. 김성원(2011), “온도가 경량기포토의 강도특성에 미치는 경향”, 석사학위논문, 한국해양대학교
14. 고상모, 송민섭 (2004) 국내산 장석의 부존현황 및 자원잠재성, 산업광물은행 2004 symposium, Feldspar and its application, 21-29.
15. 박영록 (2004) 장석의 생성환경과 산출양상, 산업광물은행 2004 symposium, Feldspar and its application, 13-20.

16. 조진우(2018), “친환경 건설재료로서 풍화알루미나규산염 광물의 공학적 특성”, 박사학위논문, 중앙대학교
17. 古谷俊明, 山内豊聡, 浜田英治 : 氣泡シメントモルタルの力學特性(기포시멘트모르타의 역학특성) : 土木學會西部支部研究發表會講演概要集, P. 406~407, 1988. 3
18. Bansal, R.P. and Goya, M. 2005. Activated Carbon Adsorption, CRC Press, Taylor & Francis Group
19. Casey W.H., Westrich, H.R., Massis, T., Banfield, J.F. and Arnold, G.W. (1989) The surface of labradorite feldspar after acid hydrolysis. Chem. Geology, 78, 205-218
20. Lee, S.Y., Kim S. and Cho, W.J. (2006) Laboratory Weathering Experiment on Mica and Feldspar and Their Mineralogical Characteristics, J. Miner. Soc. Korea, 19(2), 63-69.
21. Park, B.J., Do, S.H., Kim, T.Y. and Hong, S.H. 2016. Evaluation on Filter/Adsorber Granular Activated Carbon using in Advanced Drinking Water Treatment: Abrasion number, Floater, Water-soluble ash, and Adsorption characteristics, Journal of the Korean Society of Water and Wastewater. 30, 77-85 (in Korean).
22. 青山憲明, 黒山英伸, 千田昌平, 安在六男, 草刈太一, 新坂孝志, 入島文雄, 古原正博 (1992), “氣泡混合補強土の特性についてその1, 配合試験”, 第27回土質工學研究發表會, pp.2483-2484.
23. 青山憲明, 新舍博, 高橋勇, 久保博, 笠タ壽太郎, 佐藤常明, 古谷俊明(1992), “氣泡混合補強土の特性についてその2, 力學特性”, 第27回土質工學A研究發表會, pp.2485-2486.
24. 土田孝(1999), “港灣空港事業としての輕量混合處理土工法の開發と適用事例”, 運輸省 港灣技術研究所 港灣技研資料 第38卷 第2号.
25. 이수영(2004), “석분을 혼입한 경량기포혼합토의 역학적 특성에 관한 연구”, 석사학위논문, 건국대학교.
26. K. H. Head(1986), “Manual of Soil Laboratory Testing(Vol.3: Effective Stress Tests)”
27. 이규섭, “경량기포콘크리트의 균열방지를 위한 무수축 식물성 기포제의 개발”, 석사학위논문, 배재대학교.

28. 건설교통부(1997), “경량기포콘크리트 재료개발연구”
29. Muni Budhu(1999), “Soil Mechanics and Foundations”, John Wiley & Sons.
30. Tank, R. C., and Carino, N. J.(1991), "Rate Constant Functions for Strength Development of Concrete,"ACI Journal, Vol. 88, No. 1, p.p74~83
31. Gardner, N. J.(1991), "Effect of Temperature on the Early-Age Properties of Type I, Type III, and Type I/Fly ash Concretes," ACI Journal, Vol. 87, No. 1, p.p68-78
32. Bickley. J. A.(1982), "Concrete Optimization, "Concrete International, Vol. 4, No. 6, pp.38-41
33. Saul, A. G. A.(1951), "Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure," Magazine of Concrete Research, Vol. 2, No. 6, pp.127-140
34. Guo C.(1989), "Matunty of Concrete : Method for Predicting Early Stage Strength," ACI Materials Journal, Vol. 86, No. 4, July-Aug., pp.341-353
35. Klieger, p.(1958), "Effect of mixing and Curing Temperature on Concrete Stength, "ACI Journal, Proceedings, Vol.55, No. 6, June, pp1063-1081



감사의 글

대학원에 입학하여 벌써 2년이 지나 졸업을 앞두고 논문을 마무리 한 지금, 2년 동안 더 열심히 하지 못한 것들이 떠오르며 더 노력하지 못한 아쉬움과 후회가 많이 남아있습니다. 하지만 대학원에서 보낸 2년여의 시간은 학부기간에서는 다 채우지 못한 지식과 경험을 쌓는 값진 시간이었고, 앞으로 사회에 나가 더 많은 것을 배우기 위한 첫 걸음이었다고 생각합니다.

학부시절부터 대학원2년 동안 큰 가르침을 주시고, 이끌어주신 김태형 교수님께 감사드립니다. 교수님의 지도 덕분에 제가 무사히 논문을 끝마치게 되었습니다. 교수님께 부끄럽지 않은 제자가 되도록 항상 노력하겠습니다. 그리고 학부시절부터 많은 관심과 가르침을 주신 김태곤 교수님, 이종우 교수님, 경갑수 교수님, 김도삼 교수님, 이재하 교수님, 오재홍 교수님께 감사드립니다. 부족한 논문이지만 열과 성을 다해 논문심사를 해주시고 지도해주신 서영교 교수님과 강기천 교수님께도 감사의 마음을 전합니다.

국토교통기술촉진연구사업을 진행하며 많은 도움을 주시고 본 논문이 완성되기까지 많은 도움을 주신 지아이의 김성욱 박사님, 최은경 박사님께 진심으로 감사드립니다.

약 3년의 연구실 생활동안 제가 힘들 때 마다 도움을 주시고 이끌어주신 황웅기 형님께 감사의 마음을 전합니다. 그리고 항상 연구실에서 제 푸념을 들어주던 대영이와 윤성이, 내년이면 혼자 남게 되는 학주에게 미안함과 고마움을 같이 전합니다. 그리고 여러 가지로 제게 많은 도움을 준 해안방의 주현이, 준형이 GIS방의 영재, 경동이 에게 고마움을 전합니다.

마지막으로, 뒤늦게 공부를 계속하고 있는 무뚝뚝한 아들에게 아낌없는 응원을 보내주는 부모님께 감사한 마음을 전합니다.

그리고, 미처 언급하지 못했던 모든 분들에게 죄송하고 감사드립니다.

2019년 2월
최호성 드림