제 출 문

국토교통부장관(한국건설교통기술평가원장) 귀하

이 보고서를 "산업부산물(고로슬래그 등)을 사용한 무시멘트 건식경량 건축용 패널 개발"의 보고서로 제출합니다.

2016. 02. 03

주관연구기관명 : 한밭대학교
주관연구책임자 : 이 상 수
연 구 원 : 이 승 호
〃 : 임 정 근
〃 : 유 용 진
〃 : 손 준 호
〃 : 권 오 한
협동연구기관명 : 목원대학교
협동연구책임자 : 박 선 규

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>12첨단도시 D01</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2012.11.19.~
2015.11.18.</td><td>단 계 구 분</td><td>3/3</td></tr>
<tr><td>연 구 사 업 명</td><td colspan="5">건설교통기술촉진연구사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>최 상 위
과 제 명</td><td colspan="4">산업부산물(고로슬래그 등)을 사용한 무시멘트 건식 경량 건축용 패널 개발</td></tr>
<tr><td>단위과제명</td><td colspan="4">친환경 고강도 경량 복합패널의 시제품 설계 및 제조/생산시스템 구축</td></tr>
<tr><td>연 구 책 임 자</td><td>이 상 수</td><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 18명
내부 : 18명
외부 : 0명</td><td>총연구
비</td><td>정부 : 269,000천원
기업 : 0 천원
계 : 269,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">한밭대학교 건축공학과</td><td>참여기업명</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="5">상대국명 : 상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td>196</td></tr>
</table>

1. 목표성능에 만족하기 위한 재료선정/재료설계기법 및 메카니즘 성립

1) 각종 산업부산물과 자극제 종류 및 첨가율에 따른 적정 배합 선정
2) 자극제의 종류 및 첨가율에 따른 제지애시의 발포성능 검증
3) 산업부산물과 자극제의 종류에 따른 반응특성 분석

2. 건식화 바인딩 시스템의 목표성능 만족을 위한 적정배합 선정

1) 산업부산물과 촉진제 첨가율에 따른 경화체의 발포성능 및 기초물성 분석
2) 목표물성을 만족시키기 위한 경량 경화체의 경화촉진제 최적비율 선정
3) 건식 경량벽체에 적용하기 위한 심재의 최적배합 선정 및 성능 검증

3. 친환경 고강도 경량 복합패널의 시제품 설계 및 제조/생산시스템 구축

1) 저탄소 경량 경화체를 적용한 시제품의 최적설계방안 구축
2) 저탄소 경량 바인더의 성상 및 양생 조건을 고려한 복합패널의 제조

4. 내화 단열/단열복합패널 제조시스템의 친환경적 성능평가

1) 시제품의 각종물성 평가
2) 친환경 건식벽체시스템의 환경적 성능평가

색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	산업부산물, 알칼리 자극제, 고로슬래그, 제지애시, 경량 복합패널
	영 어	Industrial by-products, Alkali Activator, Blast furnace slag, Paper ash, Lightweight composite panel

요 약 문

Ⅰ. 제 목

산업부산물(고로슬래그 등)을 사용한 무시멘트 건식경량 건축용 패널 개발

Ⅱ. 연구개발과제 목적 및 필요성

콘크리트는 전 세계의 도시가 고층 건축물로 정글을 이루고 있을 정도로 많은 수요가 있는 재료이다. 하지만 시멘트는 제조하는 과정에서 다량의 이산화탄소를 발생시키며, 그 과정에서 발생하는 이산화탄소는 1톤 생산 시 약 0.95톤이 발생하고 있다. 따라서 건축 재료에서 시멘트는 온실가스인 제조과정에서 이산화탄소를 발생하기 때문에 이의 사용을 줄이기 위한 대체 재료의 개발이 필요하다.

한편, 우리나라 정부는 주택부족 문제를 해결하기 위해 1972년 주택건설촉진법을 제정한 이후 아파트를 중심으로 한 공동주택을 공급하여 왔으며, 현 정부는 서민과 중산층의 주거 안정만이 아니라 저소득 독거노인, 대학생 등 주거취약 계층 지원을 강화하기 위해 노후주택의 리모델링 임대를 통해 '16년에 2천호를 공급할 예정이다. 하지만, 대부분의 공동주택은 건축구조상 천장과 바닥, 벽이 일체화되어 있는 벽식 구조이기 때문에 리모델링 시 공간 구획의 변경이 어려울 뿐만 아니라 소음의 발생이 쉽기 때문에 벽을 사이에 둔 이웃 및 층간의 분쟁으로 인한 민원건수가 매년 증가하고 있는 추세이다. 이에 정부는 벽식 구조에서 기둥식 구조의 공동주택을 건설할 것을 유도하고 있으며, 기둥식 구조의 공동주택에 사용하는 칸막이벽의 수요가 증가할 것이라고 전망된다.

현 칸막이벽으로 시판되고 있는 것은 샌드위치 패널 등의 EPS를 사용한 칸막이벽과 그 밖에 경량성 또는 강도를 갖는 ALC 패널과 압출성형시멘트패널, 중공형 패널 등이 있다. 이들 패널은 경량성 위주의 성능 또는 강도, 내구성 위주의 성능으로 각각의 장점을 도드라지게 나타내어서, 그 특색에 맞는 현장에 적용하여 사용하고 있다. 하지만, EPS를 사용한 패널의 경우, 화재에 매우 취약한 단점이 있다. 이는 EPS를 주재료로 한 패널을 사용한 창고 등의 시설의 화재에서 미루어 볼 때 화재 발생 시 인명피해와 큰 재산피해를 초래할 수 있다. 또한, ALC 패널은 고온·고압의 오토클레이브 양생을 실시하기 때문에 양생과정으로 인해 단가가 높으며, 시멘트를 사용한 패널의 경우는 상기 설명한 시멘트의 사용으로 환경 친화적이지 못하며, 매우 중량인 단점이 있다.

이에 본 연구개발에서는 기존의 시멘트를 기반 및 오토클레이브 양생을 필요로 하는 건축용 패널을 대체하여 산업활동의 부산물로 발생하는 고로슬래그, 제지애시, 플라이애시 등과 소량의 알칼리 자극제를 만을 사용하여 상온에서 제조가 가능한 건식 경량 무시멘트 패널의 개발을 목적으로 하고 있다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구개발에서는 상온에서 제조가 가능한 건식 경량 무기패널의 개발을 위하여 패널의 목표성능을 선정하고 그 성능을 만족하기 위하여 패널 심재의 재료를 선정하기 위해 사용되는 재료의 반응성과 성능을 확인하고, 성능에 적합한 재료의 적정 배합을 도출하고 이의 성능을 검증하였다. 마지막으로 패널의 제조를 위한 시스템을 구축하고 패널의 성능을 평가하였다. 세부 연구개발의 내용은 다음과 같다.

1. 건식 경량 무기패널의 목표성능에 만족하기 위한 재료를 선정하기 위하여, 재료설계기법에 근거한 적정 배합 선정 실험과 무시멘트 경화체의 반응성을 분석하였고, 반응성 영향인자의 검증으로 전 용촉진제에 대한 성능을 검토하였다.

2. 건식화 바인딩 시스템 경화체의 반응성 검토 및 적정 배합을 선정하기 위하여, 산업부산물을 사용한 경화체의 수화반응과 그 생성물을 검토하였고 목표물성을 만족시키기 위한 최종배합을 선정하는 실험을 실시하였다.

3. 저탄소 친환경 바인더의 자기발포성능과 미세독립기포를 활용한 건식화 패널 경화체의 경량화 기술개발을 위해서, 패널 심재의 상온에서의 자기발포 성능을 검증하고 최적화를 위한 기술을 위해 실험을 실시하였으며, 적합한 기포제를 선정하는 실험을 실시하였다.

4. 패널 심재의 최적배합 선정을 위해서 적정 배합의 수준을 달리하여 경량 경화체를 제조하고, 각종 성능을 검증하는 실험을 실시하였다.

5. 친환경 고강도 경량 복합패널의 설계 및 제조와 생산시스템을 구축하기 위해서, 패널 구성간의 접합방법 및 양생조건 등을 고려한 시제품 제작을 하였다.

6. 내화/단열복합패널 제조시스템의 친환경적 성능평가를 위해서, 완성된 패널의 각종 물성 평가 실험 및 건식 경량벽체로서의 적용실험을 통한 친환경성 검증을 위한 시험을 실시하였다.

Ⅳ. 연구개발 수행내용 및 결과

고로슬래그와 제지애시 등의 산업부산물을 사용하여 친환경 경량 복합패널을 제조하기 위하여, 패널 심재의 특성과 패널의 여러 가지 특성을 검토하기 위한 실험을 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 현재까지 시판되고 있는 국내·외 건축용 패널은 보통 1.2~1.3 g/㎤의 밀도를 갖으며, EPS등의 경량 골재를 사용하거나 오토클레이브 등의 양생을 통해 제조한 패널의 경우는 0.75 g/㎤ 수준의 밀도를 갖는다. 본 연구에서 사용한 재료는 발포성을 갖는 산업부산물로써 발포성능이 촉진될 경우 결합재 내에 많은 공극을 형성하기 때문에 EPS 사용 패널 및 오토클레이브 동등의 경량성을 나타낼 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서는 산업부산물을 활성화하여 시험적으로 제작한 경화체의 시멘트 페이스트와 유사한 강도를 발현하였기 때문에 본 연구에서는 경량 경화체의 목표 성능을 패널 심재의 압축강도를 3 MPa 이상, 밀도 0.8 g/cm^3 이하로 설정하였다.

2. 패널 심재의 주된 재료로써 목표성능에 만족할 수 있도록 재료선정 실험을 실시한 결과 결합재로써 고로슬래그는 NaOH 또는 KOH의 사용이 비교적 높은 강도발현과 안정적인 내구성을 나타내어 패널 심재의 재료로써 적합한 것으로 나타났다. 또한, 제지애시의 경우 OH^-를 갖는 재료와 반응하여 다량의 기체를 발생하여 패널의 경량성을 확보할 수 있는 재료인 것으로 판단된다.

3. 제지애시의 사용은 소량으로도 많은 공극을 형성시키기 때문에 경화체의 목표성능에 만족시키기 위해 실험을 통해 사용재료의 비율을 도출하였다. 그 결과 고로슬래그와 제지애시의 사용비율은 95:5의 비율로 알칼리 자극제는 NaOH의 사용량 12.5%이었을 때 우수한 성능을 나타내었다.

4. 건식화 바인딩 시스템의 목표성능 만족을 위한 적정배합 선정실험에서는 패널 심재로써 목표물성을 만족시키기 위한 경량 경화체의 사용재료는 고로슬래그와 제지애시이며, 이들의 비율은 95:5가 가장 적합한 것으로 나타났다.

알칼리 자극제의 사용저감을 위한 재료는 별도의 산업부산물을 사용하기 보다는 제지애시의 미반응 Si를 고려하여 수소기체를 최대로 발생시킬 수 있는 양을 정량적으로 계산하여 NaOH의 양을 감소시키는 방법이 가장 합리적인 것으로 나타났다. 밀도 및 강도보완을 위한 재료는 무기재료인 펄라이트를 사용하는 것으로 재료 자체의 밀도가 0.1~0.2 g/cm^{3}로 단위용적질량을 감소시킬 수 있어, 이를 6~9 %정도 사용할 경우 경량이면서 높은 강도를 나타내는 경량 경화체를 제조할 수 있을 것으로 나타났다.

5. 건식 경량벽체에 적용하기 위한 심재의 최적배합을 선정하였으며, 최적배합의 성능검증을 하기 위하여 내수성, 단열성, 내화성, 내구성의 실험을 진행하였다. 그 결과 내수성, 단열성 등의 모든 실험 항목에 대해서 만족하는 결과를 확인하였다.

6. 친환경 고강도 경량 복합패널의 시제품 설계 및 제조/생산시스템 구축을 위해 기존의 친환경 고강도 경량 복합패널의 제조를 위한 규정과 양생조건에 대한 정보를 수집하였으며, 제조를 위한 규정은 없으며 기존 제품의 경우 무기질 시멘트계 경량 판넬 및 시멘트 복합패널은 시멘트로 주로 사용하였다. 또한, 미네랄울, 글라스 울, 세라믹 울 등의 무기질 섬유재를 이용하여 제조하였다.
이에 본 연구에서는 양생조건을 확립하였으며, 시제품의 최적설계방안을 구축하기 위해 표면재의 종류 및 접합방법에 따라 실험을 진행하였다.

7. 본 연구에서의 완성된 제품을 역학 및 내수성 단열성, 경량성을 확인하였으며, 친환경 벽체시스템의 환경적 성능을 확인하기 위해 포름알데히드 및 탈취율 원적외선을 측정하였다.

Ⅴ. 연구계발결과의 활용계획

1) 본 연구의 친환경 경량복합패널은 경량, 내화성(불연성), 내수성 및 내구성 등이 우수하여 건축물의 모든 비내력벽체(내벽 및 외벽), 지하이중벽, 공장시설물의 방화벽, 조립식 구조물 등 다방면에 활용이 가능하다.

2) 본 기술은 복합기능성을 가지면서 기존 기술에 비해 원료 및 생산단가의 저감이 가능하여 기존시장으로의 진입이 용이하고 파급효과가 매우 높은 것으로 판단된다. 이에 따라 기존 패널업체 및 대기업과의 MOU협약체결 등을 통해 기존시장으로 진출이 가능할 것으로 판단된다.

3) 최근 건축물의 화재안전기준 강화, 에너지효율의 향상 등으로 기존 시설물의 리모델링 공사가 활발히 진행되고 있어 본 기술의 수요증대가 크게 기대되며, 기업의 매출증대에 크게 기여할 것으로 판단된다.

4) 최근 새집증후군과 같은 도시형 질병의 확대에 관하여 친환경적인 측면을 부각시켜 국내 판로 영업망을 확보한다. 특히 국내의 친환경 제품 인식도를 고려하여 실내 내장재 관련 업체나 실내 인테리어 회사 등과의 연계를 통하여 제품을 출시할 수 있을 것으로 판단된다.

5) 경제적 효과분석

최근 전 세계적으로 탄소배출권(탄소세)이 문제되고 있는 시점에서 건설산업 분야에서 시멘트 사용량의 저감에 일조할 수 있을 뿐만 아니라, 탄소세가 적용되는 해외시장의 공격적 마케팅이 가능하다.

6) 정책적 효과분석

신축 공동주택을 건설할 경우, 용적률 상향, 주택성능 등급표지제도에 의한 점수 부여 등의 조건으로 기둥식 구조(라멘구조)의 공동주택을 건설을 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

Summary

Ⅰ. Subject

Development of non-portland cement dry lightweight construction-purpose panel using industrial by-products(blast furnace slag, etc.)

Ⅱ. Objectives & Need for R&D Project

Concrete is the most important material to make SOC(Social Overhead Capital) structures and residence building. However, cement generates a large amount of carbon dioxide during its production process in which approximately 0.95 tons of CO_2 are created per ton of cement. Thus, it is necessary to develop alternative materials to reduce the use of cement which generates carbon dioxide during the production process in building materials.

Meanwhile, Korean government has focused on apartments for supply of multi-unit houses/apartments since enactment of Housing Construction Promotion Act in 1972 to resolve housing shortage. Current government plans to supply 2,000 houses in 2016 through renovation-based lease of old houses in a bid to mitigate housing shortage facing the socially disadvantaged such as low-income elderly people living alone, university students, etc., as well as promote housing stability for middle class and common people. However, most existing multi-unit houses/apartments have wall-type structure which integrates the ceiling, floor, and wall from the aspect of architectural structure, making it difficult to change the spatial section in case of remodeling, and furthermore, have noise-prone structure resulting in dispute with neighbors which has increased every year in relation to noise transmission through shared walls and inter-floor noise.

In response to that, the government is inducing construction of multi-unit houses/apartments that adopt pillar-type structure. As a result, there will be an upturn in the demand for partition walls used in construction of multi-unit houses/apartments with pillar-type structure.

Partition walls currently available in the market are the partition wall using EPS such as sandwich panel, along with ALC panel, extruded cement panel, hollow panels which have lightweight properties or strength. These panels have clear advantages of lightweightness-centric performance or strength, and durability and have found application to sites in a way that suits their unique features. However, panels using EPS has disadvantage that they are very

vulnerable to fire. Fire on facilities, such as warehouses built using EPS as primary material, can cause causalities and significant property damage.

Furthermore, ALC panels which undergo high temperature and high-pressure autoclave curing has drawback of high cost. Panels using the cement are not eco-friendly due to problems involved in use of cement as mentioned above, along with weight disadvantage.

Thus, this study was intended to develop dry lightweight inorganic panel which could be manufactured at room temperatures by using only blast furnace slag, paper ash, fly ash which are generated as industrial by-products and activators, replacing the existing cement-based panels or construction-purpose panels requiring autoclave curing.

Ⅲ. Details & Scope of R&D

In this study, we selected the target performance of panel to develop dry lightweight inorganic panel that could be manufactured at room temperatures, verified reactivity and performance of each material to select panel core materials meeting the targeted performance, derived optimal blending of materials conforming to performance requirements and validated the performance.

Finally, we built a system for panel production and evaluated performance of panel. Details related to specific research and development are as follows:

1. We conducted an experiment to select optimal blending based on material design method and analyzed reactivity of matrix in order to select materials meeting the requirements of targeted performance of dry lightweight inorganic panel, and examined performance of dedicated accelerator through verification of reactive influential factors.

2. We examined hydration reaction of matrix used to produce industrial by-products and substances created from such process in order to investigate reactivity of matrix of dry binding system and select optimal blending, and furthermore, carried out an experiment designed to determine final blending to satisfy the targeted properties.

3. We verified self-foaming performance of panel core at room temperatures and carried out an experiment designed to attain optimization technology, followed by another experiment for selecting suitable foaming agent, in order

to develop technology for achieving lightweight properties of dry panel matrix using the self-foaming performance of low-carbon eco-friendly binder and fine independent pore.

4. To determine optimal blending of panel core, we prepared lightweight matrix by varying optimal blending level and conducted an experiment validating various performance.

5. To design and manufacture eco-friendly high-strength lightweight composite panel and build concerned production system, we made a prototype by taking the bonding method, curing conditions, etc., into consideration among panel configurations.

6. For evaluation of eco-friendly performance of flame retardant/thermal insulation composite panel manufacturing system, we conducted a test to validate eco-friendliness based on the experiment designed to assess respective physical properties of finished panels and apply the dry lightweight wall.

Ⅳ. Details & Results of R&D

In order to produce eco-friendly light-weight composite panel using industrial by-products such as blast furnace slag and paper ash, etc., we conducted an experiment to verify various properties of panel core and panel. The results of experiment were as follows:

1. Domestic and overseas panels for construction applications, which are available in the market, have a density ranging between 1.2 g/㎤ and 1.3 g/㎤. Panels, which are produced through curing method such as autoclave, etc., or produced by using lightweight aggregate such as EPS, etc., have a density of approximately 0.75 g/㎤.

The material used in this study was industrial by-product having the foaming properties and were considered to exhibit lightweight properties equivalent to those of autoclave and panels using EPS because many pores were formed inside binder when foaming performance was accelerated.

As strength was similar to that of cement paste of matrix produced experimentally by stimulating the industrial by-product, the targeted performance of lightweight matrix was set to 3 MPa or higher in compressive

strength of panel core and to 0.8/cm^3 or less in density.

2. The material selection experiment was conducted in such a way that the targeted performance of primary material for panel core could be met. The results showed that relatively higher strength and stable durability were achieved with NaOH or KOH when blast furnace slag was used as binder, and therefore blast furnace slag was found to be suitable for panel core application. In addition, paper ash was found to be a material that could help achieve lightweight properties of panel by reacting with materials containing OH^- and creating a large amount of gas as a result.

3. As pores can be created even with small amount of paper ash, the ratio of used materials was derived through experiment in order to meet the targeted performance of matrix. The results showed that the ratio of blast furnace slag and paper ash was 95:5 and that excellent performance was exhibited with alkaline activator containing 12.5% NaOH.

2. R&D process in the 2nd year

1) Selection of optimal blending to meet the targeted performance of dry binding system

Based on the results of this study, blast furnace slag and paper ash were used in lightweight matrix to meet the targeted properties of panel core while optimal ratio of blast furnace slag and paper ash was found to be 95:5. For the materials to reduce the use of alkali activator, it would be the most reasonable to slash the amount of NaOH through quantitative calculation of the amount that can lead to maximum generation of hydrogen gas in consideration of unreacted Si in paper ash, rather than using industrial by-products separately. Regarding the materials for improving density and strength, lightweight matrix with lightweight properties and high strength can be manufactured if 6-9% perlite, an inorganic material, is used, considering that density of perlite itself is in the range from 0.1 g/cm^3 to 0.2 g/cm^3 and therefore can reduce unit volume weight.

2) Selection of optimal blending of lightweight matrix and performance verification

Optimal blending of core was selected for application to dry lightweight wall. To validate performance based on optimal blending, we conducted experiments on water-resistance, thermal insulation, fire-resistance, and durability. The

results suggested that all experiment items, such as water-resistance, thermal insulation, etc., met the standards satisfactorily.

3. R&D process in the 3rd year

1) Establishing design, manufacturing/production system for eco-friendly high-strength lightweight composite panel

We collected information and data related to curing conditions and regulations related to manufacture of existing eco-friendly high-strength lightweight composite panels. There were no separate regulations. For existing products, inorganic cementitious lightweight panels and cement composite panel were used mainly as cement. The production was made using inorganic fibrous materials, such as mineral wool, glass wool, ceramic wool, etc. In this study, we established the curing conditions while experiments were carried out based on type of surface materials and bonding method to derive optimal design plans for prototype.

2) Preparing the manual for evaluation of eco-friendly performance, manufacture/construction of flame-resistant/ thermal insulation composite panel manufacturing system

The products completed in this study were verified for dynamics, water-resistance, thermal insulation, and lightweight properties. To verify environmental performance of eco-friendly wall system, we measured the formaldehyde emission, deodorization rate, and far-infrared radiation.

Ⅴ. Plan for applying the results of R&D

1) The eco-friendly lightweight composite panel in this study has excellent lightweight, fire-resistant(non-flammable), water-resistant properties, excellent durability, etc., and therefore can find wide-ranging applications such as all non-load-bearing wall (inner wall and outer wall), underground double wall, firewall of factory facilities, prefabricated structures, etc.

2) This technology enables composite functionalities and reduction of raw material and manufacturing costs, compared to existing materials, and therefore is considered to ease entry into existing market and have very far-reaching spill-over effect.

3) This technology is expected to be in great demand and contribute significantly to sales growth of companies, considering that remodeling of

existing facilities has been carried out actively amid the enforcement of stringent fire safety standards for buildings, energy efficiency improvement, etc.

4) Analysis of economic effects

This technology can help reduce cement consumption in construction industry and furthermore can facilitate aggressive marketing in overseas markets where carbon tax is applied, given that the issue of carbon credit(carbon tax) has come to the fore worldwide.

5) Analysis of policy-related effects

This technology will be able to induce construction of multi-unit houses/apartments adopting pillar-type structure(ramen structure) based on upward adjustment of floor area ratio, scoring under the Housing Performance Grade Indication System, etc., when new multi-unit houses/apartments are built.

CONTENTS

Chapter 1 Introduction to the Research and Development project···· 1

Section 1 The Need for R&D ····· 1

Section 2 The Level of R&D ····· 6

Section 3 Reseach objective and contents ····· 11

Chapter 2 Research summaries and results ····· 17

Section 1 Research perform strategy and methodology ····· 17

Section 2 Research perform process and contents ····· 19

Section 3 Research perform results and results of the verification ····· 160

Chapter 3 Research results and application actual results ····· 161

Section 1 Non cement binding materials design developments using Industiral by-products ····· 161

Section 2 Based performance review utilizing a low carbon eco - friendly binders ····· 164

Section 3 Non-cement light-weight composite panel development and create manual ····· 168

Chapter 4 Research objective and effect ····· 178

Section 1 Achievement of research objective ····· 178

Section 2 Effect analysis of R&D ····· 180

Chapter 5 Need of additional research and application of research results ····· 182

Section 1 Need of additional research and application of research reults ····· 182

목 차

제 1장 연구개발과제 개요 ····· 1

제 1절 연구개발의 배경 및 필요성 ····· 1

제 2절 연구개발의 수준 ····· 6

제 3절 연구개발 목표 및 내용 ····· 11

제 2장 연구개발 수행내용 및 결과····· 17

제 1절 연구수행 전략 및 방법론 ····· 17

제 2절 연구수행과정 및 내용 ····· 19

제 3절 연구수행 결과 및 결과의 검증방법 ····· 164

제 3장 최종연구실적 및 적용실적····· 165

제 1절. 산업부산물을 사용한 무시멘트 바인딩 재료설계 개발····· 165

제 2절 저탄소 친환경 바인더를 활용한 패널심재의 기초 성능 검토 ··· 168

제 3절 무시멘트 건식 경량 건축용 패널 개발 및 매뉴얼 작성····· 173

제 4장 연구목표 달성 및 효과 ····· 183

제 1절 연구개발 최종목표의 달성도 ····· 183

제 2절 연구개발 성과의 효과분석 ····· 185

제 5장 연구성과의 활용 및 추가연구의 필요성 ····· 187

제 1절 연구성과 활용방안 및 기대효과 ····· 187

제 1 장 연구개발과제 개요

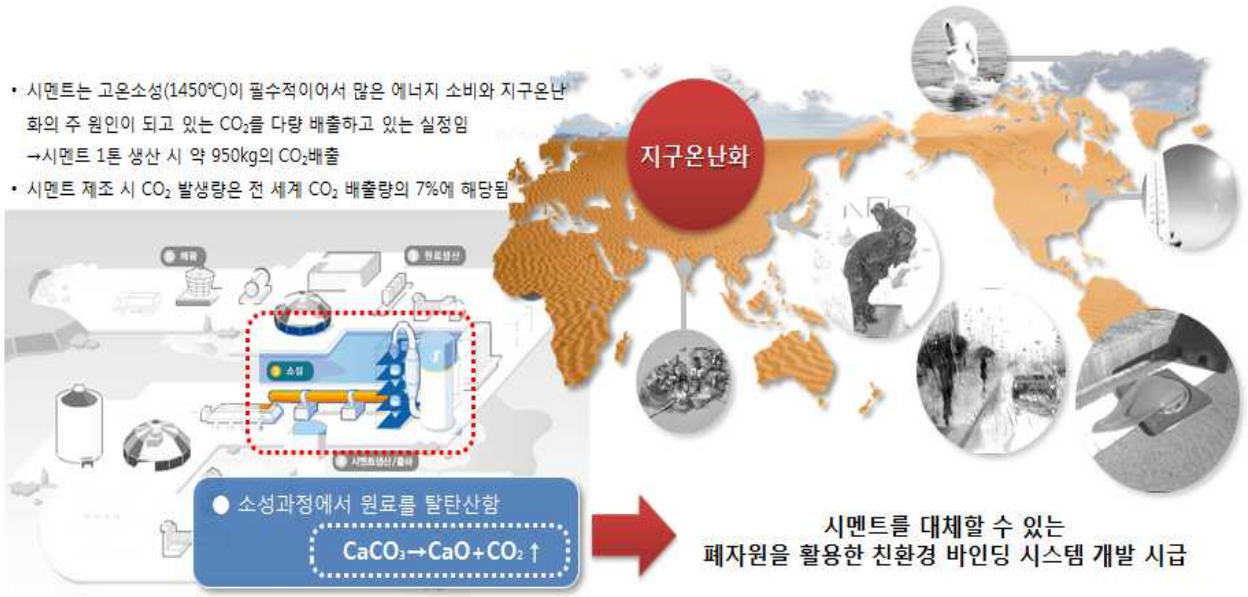
제 1 절 연구개발의 배경 및 필요성

1. 연구개발의 배경

가. 시멘트와 이산화탄소

시멘트는 1824년 J.Aspdin에 의해 발명된 이후 현재까지 우리들의 주거시설을 비롯한 각종 건축물에 꾸준히 사용되어지고 있는 건설재료이다. 특히, 시멘트가 주된 재료인 콘크리트는 사회간접자본(SOC, Social Overhead Capital) 시설물을 구축하는데 있어 가장 중요한 재료라 할 수 있다. 하지만 시멘트는 제조하는 과정 중 다량의 CO_2를 발생시키며, 시멘트를 제조하기 위한 클링커를 1 톤 생산할 경우 CO_2는 약 0.55 톤이 발생하는 것으로 알려져 있다.[1] 또한, 클링커를 생산하기 위해 사용되는 화석연료의 연소에 의해 약 0.40 톤의 CO_2가 발생되어 시멘트 1 톤 생산 시 총 0.95 톤의 CO_2가 발생하는 것이다.[2] 따라서 건설 산업에서는 시멘트 사용을 줄이기 위해 이를 대체할 수 있는 재료의 개발이 시급한 실정이다. 현재까지 시멘트의 사용 저감을 위한 방안으로 건설현장에서는 고로슬래그와 플라이애시 등의 혼화재료를 시멘트에 치환하여 사용하는 방법을 선택하고 있다. 이는 시멘트의 생산과정에서 발생하는 CO_2 보다 낮은 발생량을 갖는 재료이기 때문에 CO_2 발생량을 10~15 %까지 감소시킬 수 있다. 하지만 이러한 감소량으로는 시멘트 산업에 의하여 발생하는 CO_2를 감소시키기에는 매우 부족한 감소량이기에 계속해서 추진할 수는 없는 실정이다.[3]

특히, 시멘트 산업은 [그림 1-1]에 나타낸 바와 같이 우리나라의 온실가스 주 배출원을 분야별로 구분하였을 때 가장 큰 비중을 차지하고 있어서 이에 따라 시멘트 산업은 철강, 반도체·전기전자, 석유화학에 이어 전체 산업부문에 대해 약 11%의 CO_2를 감축해야 한다.[4] 따라서 시멘트 사용량 저감방안 및 대체재 개발이 시급한 실정이다.



[그림 1-1] 시멘트 제조과정에 따른 CO_2 발생 및 지구온난화

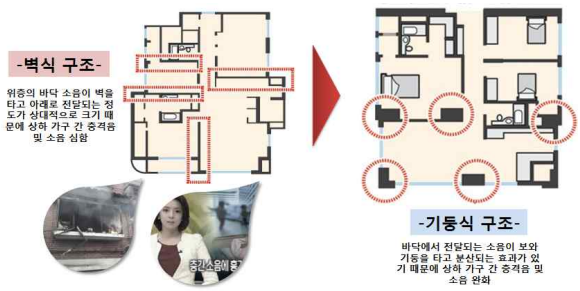
나. 경량벽체 패널의 필요성 증대

(1) 공동주택의 층간소음 저감 필요

우리나라 정부는 주택공급 부족을 해결하기 위해 1972년 주택건설촉진법을 제정한 이후, 지속적으로 공동주택을 보급하고 있으며, 현 정부 주택공급계획은 연 520,000 세대에 달하고 있다.[5] 실제 통계청에서 실시한 '인구주택 총 조사'의 통계자료에 의하면, 우리나라 인구 중 약 65%가 공동주택에 거주하고 있는 것으로 조사되었다. 공동주택은 건축구조상 천장과 바닥, 벽을 사이에 두고, 이웃과 밀접하게 생활하기 때문에 많은 문제점이 도출되고 있고, 그 중에서도 층간소음이 이웃과의 분쟁과 민원건수가 매년 증가하고 있는 추세이다. 심지어 이웃 간의 다툼, 폭력, 살인 및 방화 등 강력 범죄로 이어지고 있어, 사회적 이슈로 크게 대두되고 있다.

이에 정부는 신축 공동주택을 건설할 경우, [그림 1-2, 3]에 나타낸 바와 같이 용적률 상향, 주택성능 등급표시제도에 의한 점수 부여 등의 조건으로 기둥식 구조의 공동주택을 건설할 것을 유도하고 있다. 또한 국가 정책 및 리모델링 시장의 급속한 성장, 라멘식 아파트 및 주상복합 건축시장의 지속적성장 등으로 기둥식 구조에 필요한 건식 경량벽체패널(조립식 패널, 건식 벽체, 내화보드 포함) 시장의 점유율이 크게 증대될 것으로 예상되고 있다.





[그림 1-2] 층간 소음의 해결을 위한 국토부의 대책 [그림 1-3] 구조형식에 다른 층간소음의 정도

(2) 건축물의 화재안전기준 강화

최근 국내에서는 [그림 1-4]에 나타낸 바와 같이 대형화재사례가 빈번히 발생함에 따라 국토해양부는 건축법 및 시행령 개정을 통해 건축물의 화재안전기준을 2010년 상반기부터 시행하였으며, 2010년 12월 29일부터는 건축물의 내부마감재뿐만 아니라 외벽 마감재료까지 방화재료의 사용을 의무화하는 건축법 시행 안이 시행되어 건축물의 대부분을 차지하고 있는 벽체시스템에서도 불연성 및 내화성능의 향상이 요구되고 있다.



[그림 1-4] 건축물의 화재사례 및 친환경 건설자재의 요구

(3) 현 건식 경량벽체의 현황 및 문제점

1980년대와 1990년대에 있어서 가변형 벽체의 분포는 전체 건축형식 중 0.2%도 못 미치는 수준이었으나 2000년부터 공사기간의 단축, 구조물의 경량화, 전문시공인력의 부족과 층간소음으로 인하여 증가하게 되었다. 이러한 가변형 벽식구조에서 기둥식구조로 공동주택을 건설함에 따라서 경량벽체패널의 활용이 증가하고 있는 추세이다.

[표 1-1]에 나타낸 바와 같이 현재까지 경량벽체패널은 경량기포콘크리트패널, 경량복합콘크리트패널, 압출성형콘크리트패널, 석고보드복합패널, 압출성형시멘트패널 등이 사용되고 있으며, 세대간 칸막이벽, 경계벽, 지하이중벽체 등에 사용되는 비내력 벽체로서 유기계재료나 시멘트를 주원료로 사용하였다. 또한 패널의 경량화를 위해 EPS, 그라스울 등을 사용하기도 하는데, 이러한 가연재료의 사용으로 기존 경량벽체는 고열에 취약하고, 화재 발생시 유독가스가 발생하는 등의 문제를 가지고 있다.

[표 1-1] 건식 경량 벽체의 장·단점

건식 경량벽체	장점 및 단점
샌드위치 패널 EPS 시멘트 복합패널	• EPS를 사용하여 초경량이며, 단열성이 우수하고 작업이 용이함 • 가연재료를 사용하기 때문에 화재에 취약하고 화재 진압이 어려움 • 화재시 유기재에서 발생하는 유독가스에 의해 인명피해가 큼
ALC패널 석고보드 복합패널	• 무기재료로 구성되어 불연재료이고 내화성능이 우수함 • 비교적 경량이므로 작업이 양호함 • 강도가 매우 약하여 운반 · 설치 시 충격에 파손 우려가 높음 • 내수성이 약해 누수에 의한 손상 발생이 우려됨
압출성형시멘트패널 중공형패널	• 시멘트 기반으로 강도 및 내수성이 매우 우수하고 불연재임 • 화재시 유해가스를 발생하지 않음 • 중량이어서 핸들링이 어려우며, 특수양생이 필요하고, 매우 고가임 • 불연재료이나 화재시 고열에 의한 손상을 받기 쉬움

다. 산업동향

공동주택에 있어서 가장 문제시 되는 층간소음 대책은 건축물의 형식의 변경, 즉 기존 벽식구조 시스템에서 라멘식 구조 시스템으로 변경하는 것이 가장 큰 대안으로 제시되어지고 있어, 가변형 벽체 시장의 규모는 커질 것으로 판단된다. 이러한 가변형 벽체(경량벽체패널)는 세대간 경계벽, 세대내 칸막이벽, 외벽 등 다양하게 사용되고 있으며, [표 2]에 나타낸 바와 같이 안전성, 거주성, 프라이버시 확보, 내화, 차음, 내수 등 사용부위별 다양한 제반 성능이 요구되고 있는 실정이다.

2. 연구개발의 목적

일반적으로 건축현장에서 사용되고 있는 건축 내장재는 크게, 콘크리트 2차 제품이라 할 수 있으며, 시멘트 결합재를 바탕으로 한 패널, 보드, 벽돌 등의 주류를 이루고 있다. 이러한 콘크리트 2차 제품은 대부분 제품 성형 후 목표성능 획득, 빠른 초기강도 발현, 생산성 향상, 용이한 작업성 획득 등의 목적으로 상온양생 후 2차. 3차 양생을 실시하고 있는 실정이다.

특히, 콘크리트 제품에 가장 범용적인 결합재로 사용되는 시멘트는 물과 반응하는 수화반응

[표 1-2] 사용부위별 요구 성능의 중요도

구분	항목	세대간 경계벽	세대내 칸막이벽					외벽	
			침실	욕실	주방	대피공간	AD/PD	발코니	외기에 면하는 벽
법적 성능	차음성	●	○	○	△	△	○	○	○
	내화성	●	△	△	△	●	●	△	●
필요 성능	수평하중저항성	○	○	○	○	○	△	○	○
	내충격성	○	○	○	○	○	△	○	○
	내수성	△	△	○	○	△	△	○	○
	견고성	△	○	△	○	△	△	△	△
	기밀성	△	△	△	△	△	△	△	○
	온습도저항성	△	△	△	△	△	△	△	○
	내동결융해성	△	△	△	△	△	△	△	○
	압축강도	△	△	△	△	△	△	△	○

● : 법적성능, ○ : 반드시 필요한 요구성능, △ : 중요도가 낮은 요구성능

을 거쳐 규산칼슘수화물(C-S-H겔)과 수산화칼슘, 알루미네이트나 페라이트 등의 수화물로 생성되어 경화하게 된다. 시멘트가 수화반응 하여 경화할 때 초기 수화속도에 가장 큰 영향을 주는 요인은 온도이며 초기 재령에 온도를 상승 시키면 수화속도가 증가하여 원하는 강도를 초기에 얻을 수 있다. 이에 대부분의 콘크리트 2차 제품 생산 업체에서 2차, 3차 양생을 실시하고 있으며 그 대표적인 양생 방법은 상압증기양생방법이다. 상압증기양생은 고온의 수증기를 이용하는 콘크리트, 모르타르 등의 촉진양생으로 보통의 습윤 양생 보다 빠른 강도 향상으로 양생일수의 감소, 보관 공간의 축소 등의 이점이 있지만 가온, 등온, 감온의 양생 사이클 조건에 따라 제품의 성능이 떨어지는 문제와 고유가에 다른 경제성 저하, 화석연료 사용에 따른 CO_2 배출의 문제점이 있어 그 대책이 필요한 실정이다.

따라서, 본 연구개발은 이러한 문제점을 해결하기 위하여 고안된 것으로, 시멘트를 전혀 사용하지 않고 제지애시, 고로슬래그 등의 산업부산물만을 사용하여 고온고압의 증기양생을 거치지 않고 상온에서 제조가 가능함으로써 경제성이 우수한 건식 경량 무기패널의 개발을 목적으로 하고 있다.

3. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구에서 시멘트를 대체할 수 있는 산업부산물인 고로슬래그, 제지애시, 레드머드 등의 폐자원을 활용하여 건식 경량벽체패널을 개발함으로써, [표 1-3]에 나타낸 바와 같이 기존 제품 경쟁력을 가진 제품을 개발하고자 한다.

[표 1-3] 기존 건식 경량벽체시스템의 문제점 및 본 연구의 특징

종 류	장 점	문 제 점	본 연구의 특징
샌드위치패널 EPS시멘트 복합패널	• EPS를 사용하여 초경량임 • 단열성능이 매우 우수함 • 초경량이어서 작업이 용이함	• 가연재이므로 화재에 취약하며, 화재 진압이 거의 불가능함 • 화재시 유기재에서 발생하는 유독가스에 의해 인명피해가 큼	• 순수 무기재료로만 이루어져 불연성 및 내화성이 우수하며, 화재시 유독가스를 전혀 발생하지 않음
ALC패널 석고보드 복합패널 석고보드부착	• 무기재료로 구성되어 불연재료이며, 내화성능이 우수함 • 비교적 경량이므로 작업효율이 양호함	• 강도가 매우 취약하여 운반/설치시 충격에 파손 우려가 높음 • 내수성에 약해 누수에 의한 손상발생이 우려됨	• 폴리시알레이트구조로 강도 및 내수성이 우수하여 파손이나 누수에 의한 손상이 문제 없음
압출성형시멘트패널 중공형콘크리트패널	• 시멘트 기반이므로 강도 및 내수성이 매우 우수함 • 무기재료로 불연재이며, 화재시 유해가스를 발생하지 않음	• 중량이어서 핸들링이 어려우며, 특수양생이 필요하고, 매우 고가임 • 불연재료이나 화재시 고열에 의한 손상을 받기 쉬움	• 경량(0.8g/cm^3 이하)이면서 특수고온양생이 불필요하고, 원자재 및 생산원가가 비교적 저렴함
경량기포콘크리트패널	• 경량성이 우수하여 시공이 비교적 용이함 • 내수성 및 내구성이 우수함	• 강도가 낮아 파손우려가 높음 • 생산성 향상을 위해 고온양생공정이 반드시 필요함	• 경량이면서 강도가 높으며(8MPa 이상), 양생공정이 단축되어 생산성 향상

본 연구에서 개발하고자 하는 경량 벽체 시스템은 친환경적 재료의 사용으로 환경오염 감소와 이산화탄소 발생을 저감시키고, 자기발포 및 독립기포에 의해 오토클레이브양생이나 고온양생을 생략하여 에너지 소비의 절감으로 단가를 줄일 수 있다. 따라서 기술의 독창성 및 혁신성의 우수함을 확인할 수 있을 것이라 생각된다. 이를 위해 본 연구에 있어서의 내용 및 범위는 다음과 같다.

가. 본 연구는 시멘트를 전혀 사용하지 않고 각종 산업부산물을 이용한 저탄소 친환경 경량 경화체(폴리시알레이트구조, 밀도 0.8 g/cm^3 이하)이며, 이를 활용하여 불연성, 내화성, 내구성, 경량성, 작업성 및 단열성을 겸비한 건축물의 건식벽체용 친환경 내화·단열 복합패널을 개발하는 것을 목적으로 한다.

나. 친환경 복합패널은 신축 및 리모델링 공사에 있어서 비내력벽체(세대간 칸막이벽, 경계벽, 지하이중벽 등)에 사용되는 다기능성 건식벽체시스템이다. 또한, 기존 샌드위치패널, ALC패널, 중공형패널, EPS복합시멘트패널 등을 대체할 수 있는 신개념의 친환경 복합패널 이라 할 수 있다.

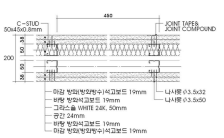
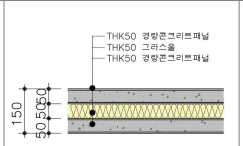
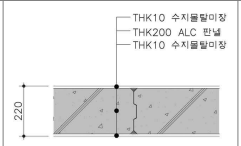
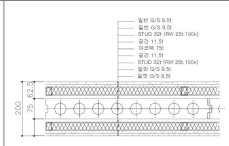
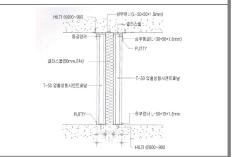
제 2 절 연구개발의 수준

1. 국내·외 기술개발 현황

가. 국내의 기술개발 현황

국내의 경량벽체패널의 종류에는 [표 1-4]에 나타낸 바와 같이 경량기포콘크리트패널, 압출성형콘크리트패널, 석고보드복합패널, 압출성형시멘트패널 등이 있다. 이중 연간 생산량이 가장 많은 강판 복합 석고 패널의 경우 차음성, 시공성이 우수하지만 습기에 약하고 충격에 의해 쉽게 파손이 되는 단점이 있다. 또한 시멘트를 기초로 한 패널은 친환경적이지 못하고 고온고압에 의한 제조로 가격이 고가인 단점이 있으며, EPS시멘트복합패널의 경우 고열에 취약하며 화재시 인체에 해로운 유독가스가 발생하여 인명피해를 줄 수 있는 요소가 될 수 있다.

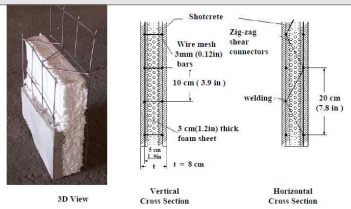
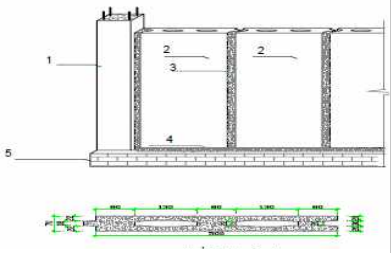
[표 1-4] 국내 관련 기술개발 현황

구분	강판복합석고패널	EPS시멘트복합패널	ALC패널	중공형콘크리트패널	압출성형시멘트패널
제품 대표 사진					
제품 상세					
	Y.S.P 13T(석고보드+Color sheet)+Glass Wool +Y.S.P 13T(석고보드+Color sheet)	DRYTEC PANEL + GLASS WOOL + 공간 + DRYTEC PANEL	미장용모르타르(10T) + ALC패널(200T) + 미장용 모르타르(10T)	아코텍패널 + 공간층 + 아코텍패널 + 벽지마감	CPG압출성형패널 + 공간층 + 글라스울 + CPG압출성형패널
제품 개요	다양한 재질과 색깔을 연출할 수 있어 디자인적인 성능이 요구되는 곳에 활용됨	일반적인 건식 복합패널(시멘트복합체에 EPS혼입)형식으로 공간층과 글라스울을 복합시킨 공법	경량기포모르타르를 이용한 제품으로, 오토클레이브양생을 통해 제작됨	인공경량골재, 시멘트, 모래, 물, 무기첨가재를 혼합하여 압출성형의 공정으로 제조	시멘트, 규사, 석고, 유무기섬유로 구성된 혼합물을 진공압출 성형하고 고온양생하여 제조
제조 방법	외부 석고보드와 내부 유리면으로 구성	무석면 섬유보강시멘트보드와 EPS 경량콘크리트를 접착, 고온양생하여 제조	고온(약180℃), 고압(약 10기압)에서 15 ~ 16시간 양생	기계에 의한 압출성형으로 제조(벽체 중심부 원형중공생성)	10,000톤으로 가압하여 압출성형
장점	• 복합판으로 차음성이 우수 • 패널의 분리시공으로 현장적응성이 우수	• 콘크리트 무게의 1/3 ~ 1/4, 벽돌블록조의 1/3.5로 경량화 가능 • EPS혼입으로 단열성이 비교적 우수	• 내부에 공극이 많아 항균, 탈취효과, 차음성능 우수 • 무기질 소재로 불연재이며 내화성 우수 • 매우 경량임	• 중공형으로 경량화 도모 • 흡수율이 낮고, 내수성이 우수 • 불연재이며, 내구성이 우수	• 강도, 내구성 및 내충격성이 매우 우수 • 불연재료이며, 흡수율이 낮고, 내수성이 우수
단점	• 물이나 습기에 약해 관리가 어려움 • 충격에 약하여 모서리의 파손에 주의	• 가격이 고가임 • 가연재인 EPS가 다량으로 혼입 • 시멘트를 주원료로 사용하며 친환경적이지 못함	• 가격이 고가임 • 흡수율이 높으며, 내수성이 취약함 • 강도가 낮아 파손 우려가 높음	• 중량이 커서 설치작업이 어려움 • 생산성 향상을 위해 고온양생이 반드시 필요 • 시멘트제품임	• 매우 중량이어서 설치작업이 어려움 • 생산시 고온양생이 반드시 필요함 • 시멘트를 대량 사용한 제품임
주요 용도	모든 건축물의 내부 칸막이나 기둥커버에 적용	내부 비내력벽체, 방화구획 벽체, 지하이중벽 등에 적용	지하주차장, 터널, 지하철 등 외장벽에 주로 적용	주상복합, 무량판 아파트의 세대간경계벽, 공장시설의 방화벽에 적용	세대간경계벽, 자음성능이 요구되는 벽체, 지하이중벽 등
비중	약 1.2~1.3 g/cm^2	약 0.70~0.78 g/cm^2	약 0.8 g/cm^2	약 1.8 g/cm^2	약 1.8 g/cm^2
생산량	연간 300,000,000m^2	연간 3,200,000m^2	연간 3,300,000m^2	연간 1,100,000m^2	연간 550,000m^2

나. 국외의 기술개발 현황

국외의 경량벽체패널은 [표 1-5]에 나타낸 바와 같이 경량프리훼브패널, 경량기포콘크리트패널, 경량골재콘크리트패널 등 시멘트를 기반으로 하여 친환경적이지 못하는 국내의 기술과 유사한 제품들이 개발되어 있는 실정이다. 특히, ALC패널은 경량패널의 종류로 대기업 중심의 생산이 이뤄지고 있고, ALC패널은 제조설비 등의 초기투자 비용이 크고 대기업 중심의 시장이 형성되어 있다.

[표 1-5] 국외 관련 기술개발 현황

구분	Lightweight Prefabricated Panel	Lightweight Foamed Concrete Panel	경량골재 콘크리트패널
제품 대표 사진			
제품 상세	쇼크리트 + 와이어메시 + 알루미늄바 + EPS패널 + Foam sheet	Lightweight foam concrete panels + Joining gap + Filling grout	경량골재 콘크리트패널 + 공간층 + 경량골재 콘크리트패널
제품 개요	표면에 쇼크리트와 폼시트를 접합하여 복합화시킨 패널로서 내부에 100㎜의 스티로폼이 들어감	경량기포콘크리트 패널에 중공층을 두어 경량화시킨 패널로서 조립시공이 간단함	시멘트, 인공경량골재, 혼화재 및 각종 첨가재로 구성된 경량콘크리트를 압출성형하여 제조한 제품
장점	• 낮은 흡수율(12%)로 내수성이 강하고, 수축 및 팽창율이 적음 • 내부에 보강재가 삽입되어 내충격성이 우수하고, 차음성능이 우수 • 경량이어서 작업이 용이함	• 내수성 및 내화성능이 우수 • 제품의 규격화로 공기단축 및 인건비 절감	• 강도가 높고, 내구성, 내수성이 우수 • 무기질 소재로서 불연성이며, 내화성능이 우수 • 중공형으로 경량화를 도모함
단점	• 화재시 EPS가 쉽게 용융되어 유해가스를 발생함 (내화성 부족) • 제작공정이 복잡 (생산성이 낮음)	• 강도가 비교적 낮아 운반/설치시 파손우려가 높음 • 시멘트를 베이스로 한 제품으로 친환경적이지 못하며, 비교적 중량임	• 비교적 중량이어서 설치작업이 어려움 • 고온양생이 반드시 필요하여 생산과정에서 에너지 소모가 큼
주요 용도	내부칸막이벽, 지하이중벽 등에 적용	주상복합, 무량판 아파트의 세대간경계벽, 공장시설의 방화벽에 적용	지하주차장, 지하철, 터널 등의 외장벽에 적용
비중	약 0.70~0.78 g/㎤	약 0.8~1.2 g/㎤	약 1.2 g/㎤

다. 국내·외 특허 현황

국내 경량패널과 관련된 주요 특허 현황은 [표 1-6]에 나타낸 바와 같이, 경량패널의 제조에 사용된 소재로는 무기질 재료를 활용한 특허가 많은 것을 알 수 있다. 특히 폐자원과 천연소재를 활용하여 개발한 사례가 많으며, 경량패널의 취약점인 내화성능을 향상시키기 위한 개발과 내·외벽에 활용할 수 있는 내수성 및 내구성을 갖춘 경량패널을 개발한 사례가 많은 것을 알 수 있다.

[표 1-6] 국내 특허 현황

명 칭	출원번호	출원인
무기질 경량패널을 이용한 건축물의 시공방법	10-1999-0029719	한국재난연구원
건축물 내외벽용 경량패널 및 그 제조방법	10-2007-0100207	(주)콘솔베르
환경친화형 내화경량패널의 제조방법 및 이로써 제조된 내화 경량패널	10-2004-0012921	(주)지플러스
폐필림통을 이용한 경량패널	20-2000-0023217	이지언
백시멘트와 난석을 이용한 경량패널의 제조방법	10-2007-0114734	한국세라믹기술원
불연성 경량 패널 조성물 및 이를 이용한 불연성 경량 패널	10-2009-0133587	(주)한양엔티

국외 경량패널과 관련된 주요현황은 [표 1-7]에 나타낸 바와 같이, 국내 패널의 개발방향과 유사한 형태를 보이고 있으며, 내화성능, 경량성능을 향상과 시공방법에 대한 특허가 많은 것을 알 수 있다.

[표 1-7] 국외 특허 현황

명 칭	출원번호	출원인
Lightweight concrete compositions (경량 콘크리트 조성물)	12612097	미국
A Light weight wall structure for use in buildings (빌딩에 사용된 경량화 벽면 구조)	94303645.9	유럽
LIGHTWEIGHT CONCRETE COMPOSITION (경량콘크리트 조성물)	2011103874	일본
LIGHTWEIGHT COMPOSITIONS AND ARTICLES CONTAINING SUCH	13103354	미국
REFRACTORY HEAT-INSULATING PANEL (내화성 단열 패널)	93913526.5	유럽
LIGHT-WEIGHT STEEL PARTITION WALL (경량철골칸막이벽)	2009088798	일본

라. 기존 경량벽체패널의 문제점

국내・외에서 사용되고 있는 건식 경량벽체패널을 종합해 보면, 생산과정 시 지구온난화의 주요인인 CO_2 발생량이 많은 시멘트를 기반으로 하는 제품이 대부분이어서 친환경적이지 못하고, 패널의 생산성 향상을 위해 생산과정에서 고온양생이 필요하여 경제성에 부합하지 않는다. 특히, ALC(Autoclaved Lightweight Concrete)패널은 고온, 고압(180℃, 10기압)의 오토클레이브양생으로 에너지 소모가 매우 크기 때문에 다른 경량벽체패널보다 높은 단가를 가지고 있고, 강판복합석고패널과 ALC패널은 흡수성이 높으며 내수성이 취약하고, 강도가 낮아 파손의 우려가 높아 사용상 제약을 크게 받을 수 있다. EPS시멘트복합패널은 화재 발생시 EPS가 쉽게 용융되어 내화성이 부족하고 인체에 유해한 가스를 발생하여 건축물 화재안전 기준이 강화됨에 따라 사용이 제한 될 우려가 높다. 즉 국내·외의 경량벽체패널은 생산과정시 CO_2 발생량이 많은 시멘트를 기반으로 하는 제품이 대부분이어서 친환경적이지 못하고, 패널의 생산성 향상을 위해 고온양생이 필요하여 단가가 높아 경제성에 부합하지 않는 실정이다. 또한, EPS시멘트복합패널의 경우 화재 발생시 EPS가 쉽게 용융되어 내화성이 부족하고 인체에 유해한 가스를 발생하여 건축물 화재안전 기준이 강화됨에 따라 사용이 제한 될 우려가 높다.

2. 연구개발의 우수성 및 차별성

[표 1-8]은 기존 건식 경량벽체시스템과 본 연구개발의 차별성을 나타낸 것이다. [표 1-7]에서 알 수 있는 바와 같이 산업부산물을 이용하여 시멘트를 대체할 수 있는 건식 경량벽체패널을 개발함으로써, 친환경적인 건축자재의 개발이 가능할 것으로 판단된다. 또한 친환경적 재료의 사용으로 환경오염 감소와 이산화탄소 발생을 저감시키고, 자기발포 및 독립기포에 의해 오토클레이브양생이나 고온양생을 생략하여 에너지 소비의 절감으로 단가를 줄일 수 있어 기술의 독창성 및 혁신성이 우수함을 확인할 수 있다.

따라서, 본 연구개발은 기존 건식 벽체패널의 불연성(내화성), 내수성, 친환경성, 경량성, 생산성 등의 문제점을 동시에 해결할 수 있는 혁신적인 기술로서, 그 기술개발의 필요성이 매우 중요하며, 본 기술개발을 성공함으로서 건축물의 화재안전기준 강화, 친환경 저탄소 건설자재의 요구, 수요자의 경제성 요구 등에 적극 대응할 수 있을 것으로 판단된다.

[표 1-8] 기존 건식 경량벽체시스템의 문제점 및 본 연구의 차별성

종 류	장 점	문 제 점	본 연구의 특징
샌드위치패널 EPS시멘트 복합패널	• EPS를 사용하여 초경량임 • 단열성능이 매우 우수함 • 초경량이어서 작업이 용이함	• 가연재이므로 화재에 취약하며, 화재 진압이 거의 불가능함 • 화재시 유기재에서 발생하는 유독가스에 의해 인명피해가 큼	순수 무기재료로만 이루어져 불연성 및 내화성이 우수하며, 화재시 유독가스를 전혀 발생하지 않음
ALC패널 석고보드 복합패널 석고보드	• 무기재료로 구성되어 불연재료이며, 내화성능이 우수함 • 비교적 경량이므로 작업효율이 양호함	• 강도가 매우 취약하여 운반/설치시 충격에 파손 우려가 높음 • 내수성에 약해 누수에 의한 손상발생이 우려됨	폴리시알레이트구조로 강도 및 내수성이 우수하여 파손이나 누수에 의한 손상이 문제 없음
압출성형시멘트패널 중공형콘크리트패널	• 시멘트 기반이므로 강도 및 내수성이 매우 우수함 • 무기재료로 불연재이며, 화재시 유해가스를 발생하지 않음	• 중량이어서 핸들링이 어려우며, 특수양생이 필요하고, 매우 고가임 • 불연재료이나 화재시 고열에 의한 손상을 받기 쉬움	경량(0.8g/㎤ 이하)이면서 특수고온양생이 불필요하고, 원자재 및 생산원가가 비교적 저렴함
경량기포 콘크리트패널	• 경량성이 우수하여 시공이 비교적 용이함 • 내수성 및 내구성이 우수함	• 강도가 낮아 파손우려가 높음 • 생산성 향상을 위해 고온양생공정이 반드시 필요함	경량이면서 강도가 높으며(8MPa 이상), 양생공정이 단축되어 생산성 향상

제 3 절 연구개발 목표 및 내용

1. 연구개발의 최종목표

가. 최종목표

본 연구개발의 최종목표는 시멘트를 사용하지 않고 산업부산물인 제지애시와 고로슬래그 등을 사용하여 저탄소 무기 패널을 개발하는 것이다. 즉 본 연구에서는 내화성(불연재), 내구성 및 단열성 등을 겸비하고, 별도의 발포제를 사용하지 않으면서 제지애시와 히드록시기(OH^-)의 반응으로 형성되는 기포로 벽체를 경량화 시킨 건식벽체용 내화·단열 복합패널을 개발하는 것이다. 본 연구에 있어서 건식화 방식에 따른 제조 단계별 연구목표는 다음과 같다.

(1) 산업부산물 및 전용촉진제를 사용한 무시멘트계 건식화 바인딩시스템의 재료설계법 개발
(2) 저탄소 친환경 바인더를 활용한 건식화 패널 기술 구축 및 기초 성능 평가
(3) 저탄소 무기패널을 활용한 경량 내화/단열복합패널의 건식화 제조시스템 구축 및 시공 매뉴얼 작성

나. 최종목표의 성격 및 설정 근거

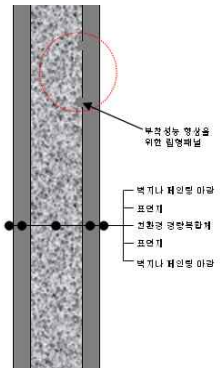
(1) 최종 연구개발 성과물

본 연구를 바탕으로 제지애시를 사용한 저탄소 무기패널의 건식화 방식에 따른 제조 방법에 관한 작성으로 4편 이상의 국내논문 및 1편 이상의 국외저명학술지(SCI(E), SCOPUS)급 논문을 기대하고 있다. 또한, 특허 출원 및 등록을 1건씩 할 예정이다.

[표 1-9] 주요 연구목표 및 최종성과물

주요 연구목표	최종성과물	기술수요처
Ⅰ.산업부산물 및 전용촉진제를 사용한 무시멘트계 건식화 바인딩시스템의 재료설계법 개발	• KCI 논문 1편 이상 게재	• 한국건축시공학회
Ⅱ.저탄소 친환경 바인더를 활용한 건식화 패널 기술 구축 및 기초 성능 평가	• KCI 논문 2편 이상 게재 • 특허 출원 1건	• 대한건축학회 • 한국건축시공학회 • 특허청
Ⅲ.저탄소 무기패널을 활용한 경량 내화/단열복합패널의 건식화 제조시스템 구축 및 시공 매뉴얼 작성저탄소 친환경 바인더를 활용한 건식화 패널 기술 구축 및 기초 성능 평가	• 국외 저명학술지 논문 1편 이상 게재 • KCI 논문 2편 이상 게재 • 특허 등록 1건	• 한국건축시공학회 • 콘크리트학회 • 특허청

[표 1-10] 최종 연구개발의 성과물

구분	본 연구의 단면일례	주 요 기 능	규격 및 용도
내용		• 친환경 경량 복합패널로서 건식 벽체시스템에 사용되며, 내수성, 내화성(불연성), 경량성 및 단열성을 겸비함. • 건축물의 화재안전성능 및 에너지효율의 향상에 기여함. • 폐자원인 산업부산물만을 사용함으로서 친환경적이며, 환경부하를 저감시킴.	<규격> • 두께 : 30~100㎜ • 넓이 및 길이는 별도의 제한 없음 <용도> • 신축 및 리모델링공사의 비내력벽 • 방화구획벽체, 지하이중벽 • 내부칸막이, 기둥커버 등

(2) 최종목표 설정 근거

(가) 연구결과 성과물의 성격

ALC(Autoclaved Lightweight Concrete) 제조과정은 시멘트와 발포제를 혼합한 후 형틀 속에 타설하여 사전 양생실에서 미세한 기포를 발생시킨 후 고온고압 증기양생을 거치는 오토클레이브 양생을 실시하여 많은 에너지를 사용할 뿐 아니라 시멘트의 사용으로 친환경적이지 못하다는 단점을 가지고 있다. 하지만, 본 연구개발에서는 시멘트를 전혀 사용하지 않고 고로슬래그, 플라이애쉬, 제지애시 등 산업부산물만을 사용한 친환경 경량경화체이며, 고온고압 증기양생을 거치지 않고 상온에서 제조가 가능하여 경제성이 우수한 건식경량무기패널 개발을 목표로 하고 있다.

(나) 설정 근거

① 내부에 사용되는 비내력 벽체는 대부분 현장 시공 습식공법으로 이루어져 왔으며, 최근에는 석고보드를 이용하는 현장 건식공법이 일부 적용되고 있는 상황이다.

② 제재애쉬와 히드록시기(OH^-)의 반응으로 부품 현상과 내부에 기포가 형성되지만 적정 온도와 습도가 충족되어야 기포가 일정하고 균일한 기포를 얻을 수 있다.

③ 또한, 습식방법으로 타설시 먼저 타설한 기포는 위에 있는 기포의 하중에 의해 터지거나 찌그러지게 형성될 수 있다.

④ 따라서 적정 온도와 습도를 이용하여 균일한 기포형성의 최대조건을 맞춰주는 동시에 높은 효율성 및 실용화 요구에 대응할 수 있을 것으로 판단된다.

[표 1-11] 습식과 건식 공법 비교

습식공법	개선	건식공법(Anchoring system)
  • 하중분담이 안되므로 붙임 면적, 붙임 높이가 큰 건물에는 부적합 • 장기공사에 부적합함 • 수분이 침투될 우려가 있어 백화 현상 발생 • 모르타르 경화시간으로 인해 시공 능률 저하 • 자원의 재활용 및 환경적 측면에서 활용성 저하 • 부재의 자중이 무겁고 횡력에 약해 균열발생이 많음		  • 고층건물에 용이함 • 양생시키는 시간이 불필요하므로 인력의 증감만으로 공기를 자유롭게 조절 • 공종이 대폭 줄어들어 단일공정으로 벽체 완성 • 기능공의 노령화와 기능도 저하로 품질 저하우려 감소 • 차음성능 우수와 낮은 흡수율로 건축하자 감소

2. 연구목표 및 내용

가. 총괄 연구목표

(1) 주요 연구목표 I

산업부산물 및 전용촉진제를 사용한 무시멘트계 건식화 바인딩시스템의 재료설계법 개발

(가) 내용 및 범위

① 목표성능에 만족하기 위한 재료선정/재료설계기법 및 메카니즘에 관한 조사 연구

㉮ 재료설계기법에 근거한 적정 배합 선정 및 경화체의 반응성 분석/평가

㉯ 경화체의 반응성 영향인자 검증 및 이를 고려한 전용촉진제 성능 검토

② 건식화 바인딩 시스템 경화체의 반응성 검토 및 적정 배합선정

㉮ 저탄소 친환경 경화체의 수화반응 및 생성물 검토

㉯ 목표물성을 만족시키기 위한 친환경 고강도 바인딩시스템의 최종배합 선정 실험

(나) 연구내용 및 수행방법

[표 1-12] 1차년도 연구내용 및 수행방법

연 차	주요 연구내용	수행방법
1차년도	▪목표성능에 만족하기 위한 재료선정/재료설계기법 및 메카니즘에 관한 조사 연구	▪제지애시 및 각종 산업부산물에 대한 국내·외 기술정보 수집 및 자료조사 ▪제지애시 및 각종 산업부산물을 사용한 경화체의 목표성능 설정 ▪목표성능에 만족하기 위한 재료선정 및 화학성분 분석 ▪제지애시 및 각종 산업부산물과 경화촉진제의 적합성 평가시험 ▪제지애시 및 각종 산업부산물과 경화촉진제의 최적 혼합비율 선정 ▪반응 메커니즘 분석을 위한 SEM촬영 및 XRD촬영
	▪건식화 바인딩 시스템 경화체의 적정 배합선정 및 경화체의 성능평가	▪목표물성을 만족시키기 위한 경화체의 기초성능평가(압축/휨강도, 유동성, 응결시험) ▪무시멘트계 친환경 바인딩시스템의 최적배합 ▪친환경 바인딩시스템의 최적배합 성능 평가(역학 및 작업성능)

(2) 주요 연구목표 Ⅱ

저탄소 친환경 바인더를 활용한 건식화 패널 기술 구축 및 기초 성능 평가

(가) 내용 및 범위

① 저탄소 친환경 바인더의 자기발포성능과 미세독립기포를 활용한 건식화 패널 경화체의 경량화 기술개발

㉮ 저탄소 친환경 바인더가 상온에서의 자기발포 성능 검증 및 최적화 기술개발

㉯ 저탄소 친환경 바인더가 상온에서 적합한 기포제의 선정 실험

② 경량 경화체의 최적배합 선정 및 성능 검증

㉮ 건식 경량벽체에 적용하기 위한 친환경 경량 경화체의 최적배합 선정 및 제조

㉯ 제조된 친환경 경량 경화체의 각종 성능 검증

(나) 연구내용 및 수행방법

[표 1-13] 2차년도 연구내용 및 수행방법

연 차	주요 연구내용	수행방법
2차년도	▪저탄소 친환경 바인더의 자기발포성능과 미세독립기포를 활용한 건식화 패널 경화체의 경량화 기술개발	▪무시멘트계 친환경 바인더의 자기발포성능 및 경량화 기술정보 조사와 수집 ▪무시멘트계 친환경 바인더에 적합한 기포제의 선정 ▪기포제 첨가율 변화에 따른 적정 첨가율 선정 ▪무시멘트계 친환경 바인더에 적합한 기포제의 팽창율 측정 ▪기포제의 적용에 의한 팽창 메커니즘 분석
	▪경량 경화체의 최적배합 선정 및 성능 검증	▪건식 경량벽체에 적용하기 위한 경화체의 최적배합 선정 ▪건식 경량벽체에 적용하기 위한 경화체의 성능 검증(내수성, 단열성, 내화성, 내구성) ▪건식 경량벽체에 적용하기 위한 경화체의 성능 검증 분석

(3) 주요 연구목표Ⅲ

저탄소 무기패널을 활용한 경량 내화/단열복합패널의 건식화 제조시스템 구축 및 시공 매뉴얼 작성저탄소 친환경 바인더를 활용한 건식화 패널 기술 구축 및 기초 성능 평가

(나) 내용 및 범위

① 친환경 고강도 경량 복합패널의 시제품 설계 및 제조/생산시스템 구축

㉮ 친환경 경량 경화체를 적용한 시제품의 최적설계방안 구축

㉯ 친환경 바인더에 적합한 성상 및 건식화를 고려한 복합패널의 제조/생산시스템을 고려한 시제품 제작실험

② 내화/단열복합패널 제조시스템의 친환경적 성능평가 및 제조/시공 매뉴얼 작성

㉮ 완성된 패널의 각종 물성 평가 실험

㉯ 건식 경량벽체로서의 적용실험을 통한 친환경성 검증

(다) 연구내용 및 수행방법

[표 1-14] 3차년도 연구내용 및 수행방법

연 차	주요 연구내용	수행방법
3차년도	▪친환경 고강도 경량 복합패널의 시제품 설계 및 제조/생산시스템 구축	▪저탄소 무기패널 시제품 설계 및 제조를 위한 규정 및 정보수집 ▪저탄소 경량 경화체를 적용한 시제품의 최적설계방안 구축(표면제의 종류 및 접합방법) ▪저탄소 경량 바인더의 성상 및 양생 조건을 고려한 복합패널의 제조 ▪저탄소 경량 복합패널의 제조 확인 후 생산시스템 구축 ▪최적설계안 및 제조/생산시스템을 고려한 시제품 제작 실험
	▪내화/단열복합패널 제조시스템의 친환경적 성능평가 및 제조/시공 매뉴얼 작성	▪완성된 시제품의 각종물성 평가 실험(역학 및 내수성, 단열성, 경량성) ▪친환경 건식벽체시스템의 환경적 성능 평가(포름알데히드, 탈취율, 원적외선) ▪친환경 건식벽체시스템 구축정립과 최정보고서 작성

제 2 장 연구개발 수행내용 및 결과

제 1 절 연구개발의 추진전략

1. 연구수행 전략

[표 2-1] 연구수행 전략

구 분	1차년도	2차년도	3차년도
개발 목표	산업부산물 및 전용촉진제르 사용한 무시멘트 건식화 바인딩시스템의 재료설계법 개발	저탄소 친환경 바인더를 활용한 건식화 패널 기술 구축 및 기초 성능 평가	저탄소 무기패널을 활용한 경량 내화/단열복합패널 건식화 패널 제조시스템 구축 및 시공 매뉴얼 작성
추진 방법/ 전략	제지애시 및 각종 산업부산물에 대한 국내·외 기술정보 수집 및 자료조사 ⬇ 제지애시 및 각종 산업부산물을 사용한 사용한 경화체의 목표성능 설정 ⬇ 목표성능에 마족하기 위한 재료선정 및 화학성분 분석 ⬇ 제지애시 및 각종 산업부산물과 경화촉진제의 적합성 평가시험 및 최적 혼합비율 선정 ⬇ 반응 메커니즘 분석을 위한 SEM 촬영 및 XRD 촬영 ⬇ 목표물성을 만족시키기 위한 경화체의 기초성능평가, 무시멘트계 친환경 바인딩 시스템의 최적배합 성능 평가 ⬇ 친환경 바인딩시스템의 최적배합 성능 평가	무시멘트계 친환경 바인더의 자기발포성능 및 경량화 기술정보 조사와 수집 ⬇ 무시멘트게 친환경 바인더에 적합한 기포제의 선정 ⬇ 기포제 첨가율 변화에 따른 적정 첨가율 선정 ⬇ 무시멘트계 첨가율 변화에 따른 적정 첨가율 선정 ⬇ 무시멘트계 친환경 바인더에 적합한 기포제의 팽창율 측정 ⬇ 기포제의 적용에 의한 팽창 메커니즘 분석 ⬇ 건식 경량벽체에 적용하기 위한 경화체의 최적배합 선정 ⬇ 건식 경량벽체에 적용하기 위한 경화체의 성능 검증 및 성능 검증 분석	저탄소 무기패널 시제품 설계 및 제조를 위한 규정 및 정보수집 ⬇ 저탄소 경량 경화체를 저공한 시제품의 최적설계방안 구축 (표면제의 종류 및 접합방법) ⬇ 저탄소 경량 바인더의 성상 및 양생 조건을 고려한 복합패널의 제조 ⬇ 저탄소 경량 복합패널의 제조 확인 후 생산시스템 구축, 최적 설계안 및 제조/생산시트템을 고려한 시제품 제작 실험 ⬇ 완성된 시제품의 각종 물성 평가 실험, 친환경 건식벽체시스템의 환경적 성능 평가 ⬇ 친환경 건식벽체시스템 시방서(안) 작성 ⬇ 친환경 건식벽체시스템의 구축정립과 최종보고서 작성

2. 연구수행 세부 추진계획 및 방법

[표 2-2] 연구수행 세부 추진계획 및 방법

구분	연구내용	세부추진 계획 및 방법	해당기관
1차 년도	■기술정보 조사 -산업부산물의 연구 내용 및 기술현황 -경량화에 대한 기술정보	제지애시 및 기타 산업부산물에 대한 국내·외 기술 정보를 조사	-한밭대
	■바인더 개발 -재료선정 및 화학분석 -자기발포 및 경화촉진제 첨가에 따른 메커니즘 분석 -경화체의 기초성능평가	목표성능을 만족시키기 위한 재료(산업부산물)선정하여 화학분석 을 한 후, 이를 토대로 자기발포 및 경화촉진제를 첨가하여 기초성능검사 및 SEM, XRD 분석	-한밭대 -목원대
	■보고서 작성 -바인딩시스템의 메커니즘 분석 -바인딩시스템의 역학 및 작업 성능 평가	실험에서 도출된 결과를 토대로 바인딩 시스템의 메커니즘을 분석하고 경화체의 역학 및 작업성능 평가 후 보고서 작성	-한밭대
2차 년도	■바인더의 경량화 -자기발포 촉진제의 첨가율 선정 -메커니즘 분석	바인더의 안정된 자기발포성능 및 경량화를 위해 메커니즘을 분석하여 기포제의 적정 첨가율을 선정	-한밭대
	■바인더의 경화 -경화촉진재의 첨가율 선정 -메커니즘 분석 -경화체의 성능 검증 -건식패널의 기술 구축	건식벽체의 심재에 적합한 경화촉진제를 선정실험을 실시하여 경화체의 강도와 내수성, 단열성, 내화성, 및 내구성을 검증하여 건식패널의 기술 구축	-한밭대 -목원대
	■보고서 작성 -경화체의 성능 분석	실험결과를 토대로 기포제의 적정 첨가율과 건식 경량벽체의 심재에 적용하기 위한 경화체의 성능을 분석 후 보고서 작성	-한밭대
3차 년도	■기술정보 조사 -무기패널 설계 및 제조, 규정	패널의 시제품 설계 및 제조를 위한 규정 및 정보수집	-한밭대
	■생산시스템 구축 -표면제 종류 및 접합방법 -바인더의 성상 -양생조건 확립 -시제품 제작	시제품의 최적설계방안을 구축 후 패널을 제조하여 생산시스템을 구축 후 시제품 제작	-목원대
	■성능 평가 -패널의 물성평가 -패널의 친환경 성능 평가	완성된 시제품의 역학 및 내수·단열·경량성 등의 물성평가와 포름알데히드 배출량실험 및 패널에 의한 2차 오염방지방안 확립	-한밭대
	■최종보고서 작성 -친환경 건식벽체시스템의 구축 정립	친환경 건식벽체시스템의 제조시스템구축 및 시공매뉴얼 작성	-한밭대

제 2 절 연구개발 수행내용 및 결과

1. 연구수행 내용

가. 기반 재료 선정

1) 산업부산물의 화학성분 및 반응특성 분석

(가) 국내에서 발생되는 산업부산물의 문헌 조사 및 화학성분 분석

(1) 고로슬래그

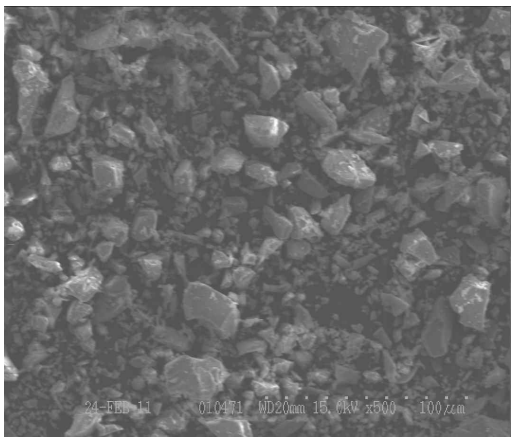
1862년 독일의 Langer이 산업부산물인 슬래그에 소석회를 첨가하여 고로슬래그의 재활용을 하기 시작하여, 이후 1953년 현재의 고로슬래그와 매우 유사한 건조 슬래그를 제조하여 사용하였고 지금의 고로슬래그 미분말까지 개발되었다. 현대의 고로슬래그 미분말은 고온의 용융상태인 슬래그에 물을 분사하여 급랭시킨 고로수쇄슬래그를 롤러밀(Roller Mill)에서 일정 분말도로 분쇄한 것을 말하며, 고로슬래그 미분말의 비표면적에 따라 1, 2, 3종으로 나뉜다. 고로슬래그는 제철소 고로에서 철을 제조하는 과정에서 선철 1톤당 500~1000 kg 정도가 발생하고, 연간 900만톤이 발생한고 있으며 매년 발생량이 증가하고 있는 추세이다. 또한 고로슬래그 미분말은 시멘트의 혼화재로 사용하게 될 경우 시멘트의 대체에 의한 경제성을 확보할 수 있으며, 낮은 수화열과 장기강도 확보, 우수한 투수성 및 작업성, 내구성, 방수성 등의 장점이 있어 소요품질의 콘크리트를 용이하게 얻을 수 있다. 하지만 콘크리트 품질의 불균질하고 초기강도 저하 등과 같은 단점이 있으며, 단독으로 사용할 경우 잠재수경성에 의해 알칼리 환경에서 시멘트와 같이 수화하는 특성을 가지고 있다. 고로슬래그의 주요 화학성분은 SiO_2, Al_2O_3, CaO 및 MgO가 94~97 %를 차지하고 있다. 이중 MgO는 포틀랜드 시멘트에 5 %를 초과하면 유리마그네시아가 생성되어 이상팽창의 원인이 되지만 고로슬래그 미분말의 경우에는 15 % 정도 포함하고 있어도 해가 없다고 알려져 있으며 대체로 9 % 이하의 함유율을 가지고 있다. 고로슬래그의 염기도[$(CaO+MgO+Al_2O_3) / SiO_2$]는 평균 1.86으로 높을수록 반응성이 크게 되는 경향이 있으며, 유리질화율 또한 높을수록 반응성이 크게 되는 경향이 있다. 일반적인 고로슬래그의 화학성분은 [표 2-3]과 같다.

[표 2-3] 고로슬래그 미분말의 화학성분

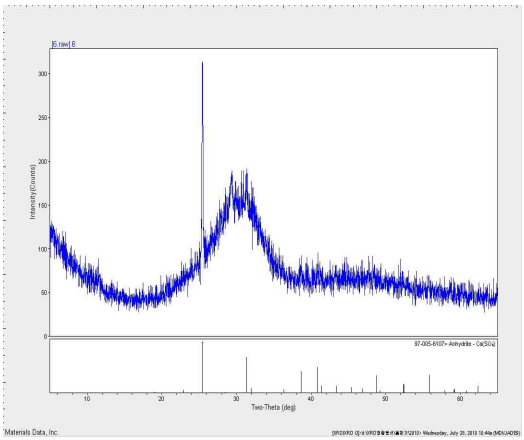
구분	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Fe_2O_3	MnO	P_2O_3	TiO_2	T.S	S	SO_3	Na_2O	K_2O	Cl-
최소	30.7	12.6	40.5	4.2	0.02	0.19	0.000	0.42	-	0.41	-	0.11	0.18	0.001
평균	33.1	13.8	42.4	6.1	0.29	0.40	0.008	0.96	-	0.66	-	0.23	0.31	0.004
최대	34.9	15.2	43.9	9.2	0.64	0.55	0.016	1.73	-	1.02	-	0.40	0.45	0.007

구분	염기도	R_2O(%)	L.O.I(%)	insol(%)	유리질화율(%)	비중	습분(%)
최소	1.73	0.29	-1.40	0.01	95.0	2.88	0.00
평균	1.86	0.40	+0.08	0.08	99.0	2.91	0.14
최대	1.99	0.61	+1.10	0.36	99.9	2.95	0.50

본 연구에서 사용한 고로슬래그는 밀도 2.91 g/㎤, 분말도 4,464 ㎠/g인 국내 G사의 제품으로 염기도는 1.64, SEM 사진은 [사진 2-1], XRD 분석은 [그림 2-1]과 같으며, XRF 분석은 [표 2-4]과 같다.



[사진 2-1] 고로슬래그의 SEM 촬영

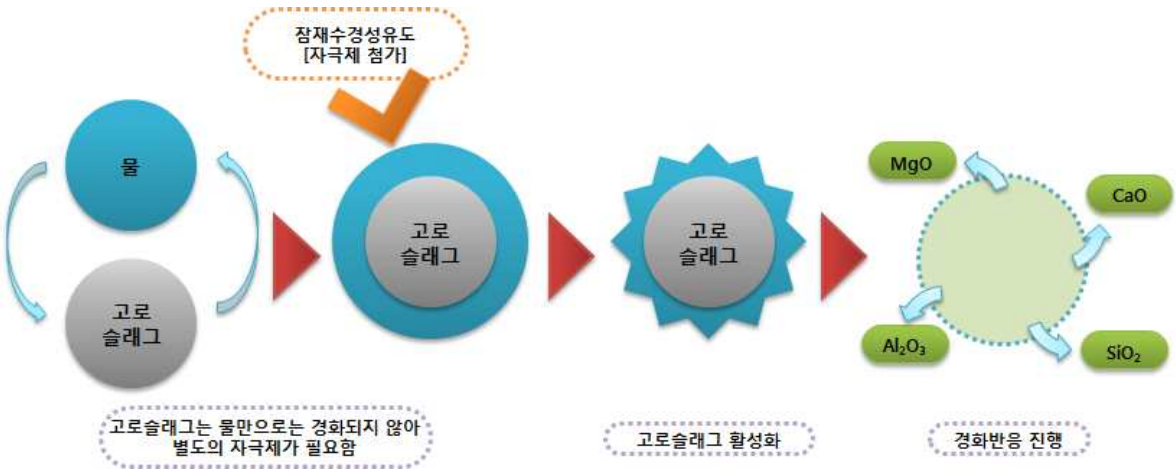


[그림 2-1] 고로슬래그의 XRD 분석

[표 2-4] 고로슬래그의 화학성분

구분	화학성분(%)								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	MnO	P_2O_3	TiO_2
함량	35.80	13.87	0.52	41.10	3.60	2.36	0.33	0.02	1.20

본 연구에서 사용하는 고로슬래그는 물만으로 경화되지 않아 별도의 자극제가 필요한 잠재수경성의 특성을 가지고 있다. 이로 인해 알칼리 자극제는 고로슬래그의 수화반응에 필수불가결한 첨가제이다. 알칼리 자극제로 고로슬래그를 둘러싸고 있는 피막을 파괴되어 고로슬래그 안에 물질들이 밖으로 용출되어 고로슬래그가 활성화되어 경화반응이 계속적으로 진행되는 반응특성을 가지고 있다.



[그림 2-2] 고로슬래그와 알칼리 자극제의 반응 특성

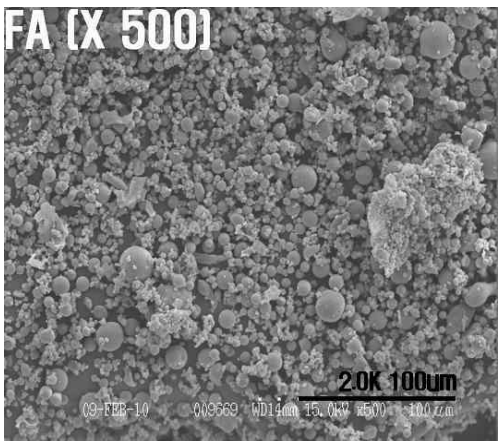
(2) 플라이애시

화력발전소에서 발생되는 부산물인 플라이애시는 공기 중으로 흩어지기 전에 전기적 침전제를 이용하거나 기계적으로 먼지 수진시스템에 의해 수집된 것들이다. 이렇게 포집된 플라이애시의 입자는 일반적으로 구형이며 일반 OPC보다 분말도가 높거나 비슷하고 크기는 1~150 ㎛로 구성되어진다.

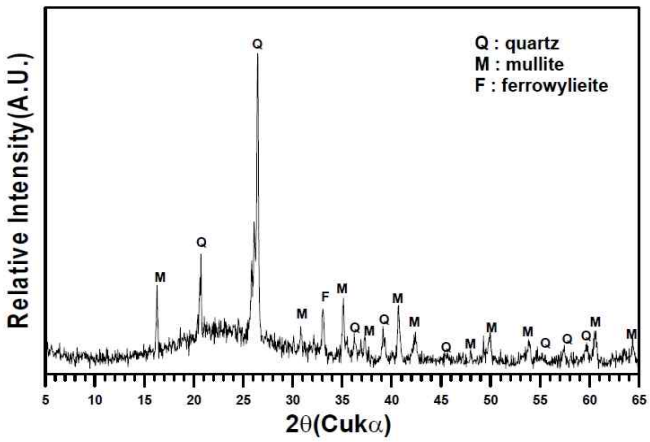
플라이애시는 구상의 미립자로서 콘크리트 중에서 입자 상호간의 엉킴을 방지하는 볼 베어링과 같은 역할을 함으로서 작업성을 개선하며, 필요한 반죽질기를 얻기 위한 단위수량을 감소시킬 수 있으며, 콘크리트 강도는 비교적 초기의 재령에서는 약간 감소하지만 장기강도는 증진된다.

플라이애시는 많은 산화물이 존재하며 이들의 대부분은 SiO_2, Al_2O_3 및 Fe_2O_3 등의 유리상으로 구성되며, 그 양에 따라 C급 및 F급의 플라이애시로 분류된다(ASTM C 618). C급 플라이애시는 SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 50%인 플라이애시로 갈탄 또는 아역청탄의 연소 시에 생성되는 비결정질의 유리구로 되어있으며, 석영, 석회, 경석고 및 C_3A, C_2S 등의 성분을 함유하여 결합성을 가지고 있다. F급 플라이애시는 SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 70%인 무연탄 또는 유연탄의 연소 시 생성되는 플라이애시로 석영, 적철광, 자철광 등을 함유하고 비결정질의 유리구조로 되어 있으며 포졸란 활성반응을 한다.

본 연구에서 사용된 플라이애시는 밀도 2.22 g/㎤, 분말도 4,125 ㎠/g인 국내 D지역에서 생산된 것으로 SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 81.01 %, SEM 사진은 [사진 2-2], XRD 분석은 [그림 2-3]과 같으며, XRF 분석은 [표 2-5]과 같다.



[사진 2-2] 플라이애시의 SEM촬영



[그림 2-3] 플라이애시의 XRD

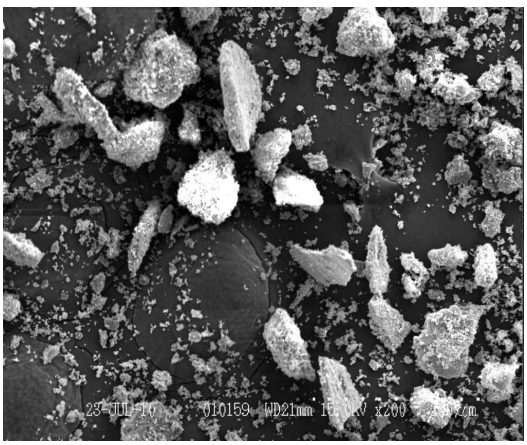
[표 2-5] 플라이애시의 화학성분

구분	화학성분(%)								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	MnO	P_2O_3	TiO_2
함량	54.38	21.50	5.16	10.83	1.89	1.29	-	-	0.62

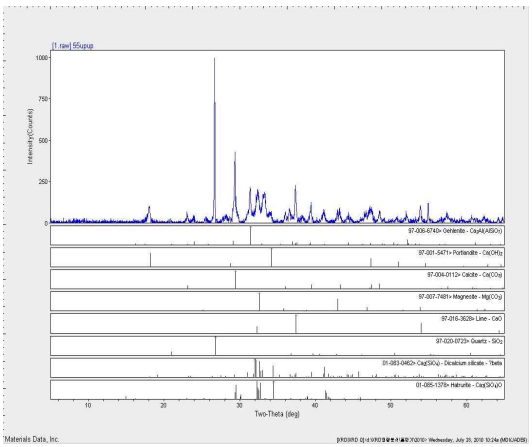
(3) 제지애시

제지애시는 종이를 만드는 제조공정에서 발생하는 것으로, 1, 2차 정선 처리 과정 중 원료 내의 이물질을 제거함에 따라 제지슬러지가 발생하며, 제지슬러지를 소각 처리하는 과정에서 제지애시가 발생하게 된다. 이러한 제지애시의 발생량은 지폭향상, 초지지의 고속화, 각종 제지용 약품 등의 발달로 인하여 제지의 생산량이 증가함에 따라 그 발생량도 매년 증가하고 있는 추세이다. 제지애시의 발생량은 1990년대 이후 급격히 증가하여 현재는 약 150만 톤 정도가 발생하고 있다. 이러한 부산물은 시멘트의 원료 등으로 사용되어 왔고 일부는 소각이나 매립 등의 방법으로 처리되어 왔다. 제지 공정에서 발생하는 제지슬러지의 함수율 및 화학성분은 종이의 종류에 따라 달라지는데 백상지 공장에서 발생되는 슬러지의 함수율은 60% 정도로 슬러지 내에는 다량의 수분이 존재하고 무기물질의 양이 65%, 유기물질의 양은 약 35% 정도, 기타 물질이 약 5% 정도를 나타내고 있다. 이중 유기물은 제지 공정상에서 손실되는 미세섬유나 각종 유기물을 비롯한 이물질 등이며, 무기물질의 대부분은 제지용 충전제라고 할 수 있다. 이러한 슬러지는 여러 방식의 열처리 공정을 통해 처리할 수 있는데, 이중 소각처리 방법은 소각 시 유기물이 거의 대부분 제거된다.

본 연구에서 사용되는 제지애시는 국내 제지공장에서 부산물로 발생하는 제지슬러지를 소각처리한 후 폐기되는 제지애시를 사용하였으며, SEM 사진은 [사진 2-3]과 같으며, XRD분석은 [그림 2-4], XRF분석은 [표 2-6]와 같다.



[사진 2-3] 제지애시의 SEM 촬영



[그림 2-4] 제지애시의 XRD 분석

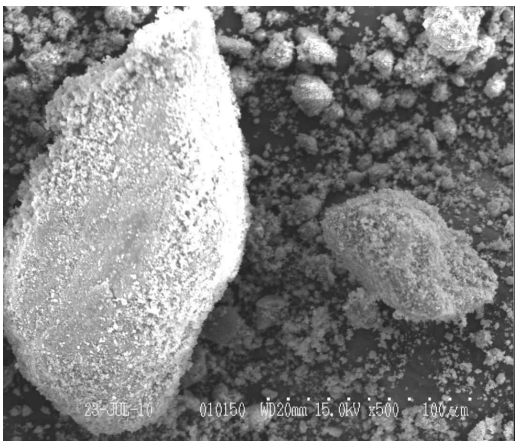
[표 2-6] 제지애시의 화학성분

구분	화학성분(%)								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Cl	P_2O_3	TiO_2
함량	13.0	10.1	0.94	65.71	4.40	1.74	2.39	0.58	0.44

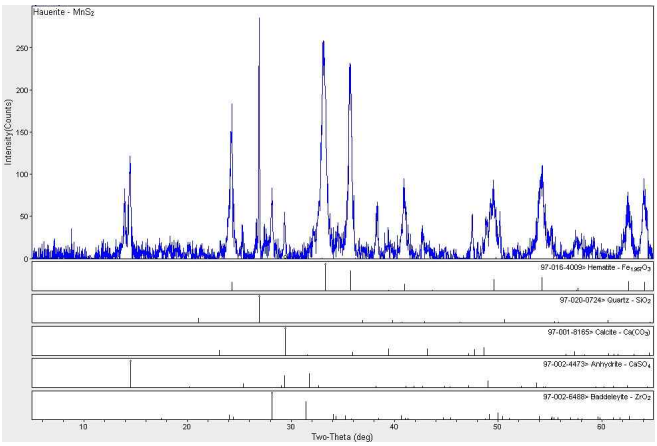
(4) 레드머드

레드머드는 보크사이트로부터 수산화알루미늄/알루미나($Al(OH)_3/Al_2O_3$) 제조과정에서 발생하는 산업부산물이다. 자체적으로 pH 11 이상의 매우 높은 알칼리성 무기질로써 주성분인 산화철(Fe_2O_3)과 알루미나(Al_2O_3), 규소(SiO_2)가 주를 이루고 있으며, 알칼리 성분인 Na_2O성분을 약 10 %정도 함유하고 있다.

본 연구에서 사용한 레드머드는 밀도는 3.37 g/㎤, 분말도는 3,483 ㎠/g인 국내 K사의 제품으로 SEM 사진은 [사진 2-4]와 같으며, XRD분석은 [그림 2-5], XRF분석은 [표 2-7]과 같다.



[사진 2-4] 레드머드의 SEM촬영



[그림 2-5] 레드머드의 XRD 분석

[표 2-7] 레드머드의 화학성분

구분	화학성분(%)								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Cl	Na_2O	TiO_2
함량	14.20	29.12	25.12	13.99	0.40	0.43	-	9.60	-

2) 산업부산물과 알칼리 자극제의 종류에 따른 반응특성 검토

가) 실험개요

본 실험은 산업부산물의 종류와 알칼리 자극제의 종류에 따른 무시멘트 경화체의 강도 및 반응 특성을 검토하기 위한 것으로, 산업부산물 기반의 결합재에 시중에 유통되고 있는 5종류의 자극제를 첨가율을 달리하여 실험을 실시하였다.

나) 실험계획 및 방법

본 실험에서 사용된 산업부산물은 고로슬래그, 플라이애시, 제지애시, 레드머드를 사용하였으며, 알칼리 자극제는 시중에서 유통되고 있는 NaOH, KOH, $Ca(OH)_2$, Na_2SiO_3, K_2SiO_3 등 총 5종류를 사용하였다. 알칼리 자극제는 산업부산물의 중량에 5, 15 (%)로 첨가하였고, W/B는 유동성을 고려하여 55% 고정하였다. 시험항목으로 플로우 콘 플로우는 결합재의 유동성을 검토하기 위해 측정하였으며, 압축강도 경화체의 굳은 성상을 검토하기 위해 재령 3일에 측정한 후 시료를 채취하여 미세조직 관찰 및 생성 물질 확인을 위해 SEM-EDS 분석을 실시하였다.

[표 2-8] 실험수준 및 요인

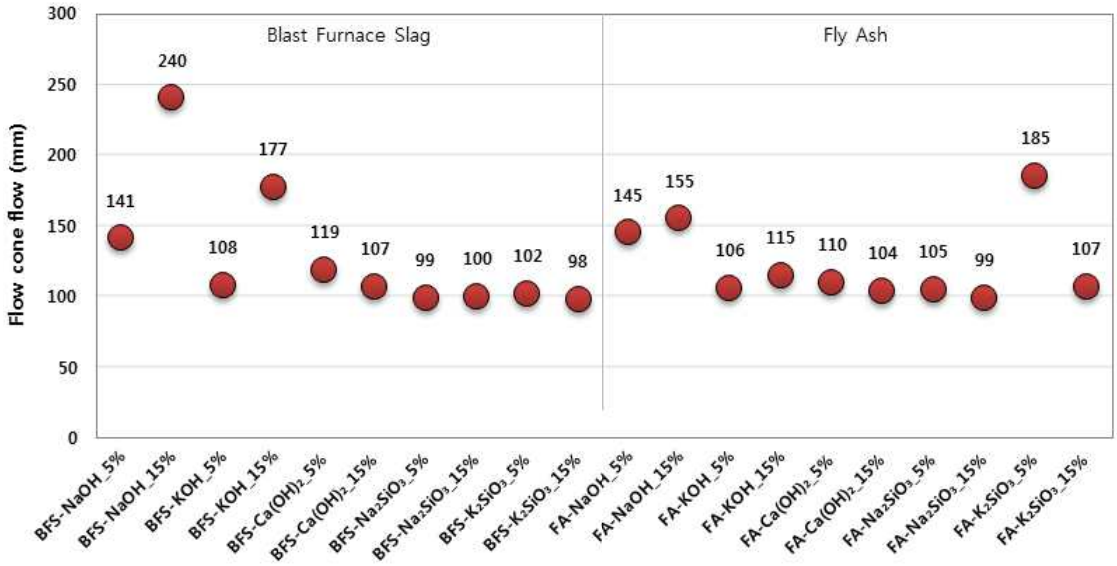
실험요인	실험수준
결합재	• BFS[a], FA[b], PA[c], RM[d]
알칼리 자극제	• NaOH, KOH, $Ca(OH)_2$, Na_2SiO_3, K_2SiO_3
알칼리 자극제 첨가율	• 5, 15 (wt.%)
W/B	• 55 %
양생조건	• 상대습도(80±5)%, 온도(20±2)℃
시험항목	• 플로우 콘 플로우, 압축강도, SEM-EDS, XRD

a) BFS : 고로슬래그, b) FA : 플라이 애시, c) PA : 제지애시, d) RM : 레드머드

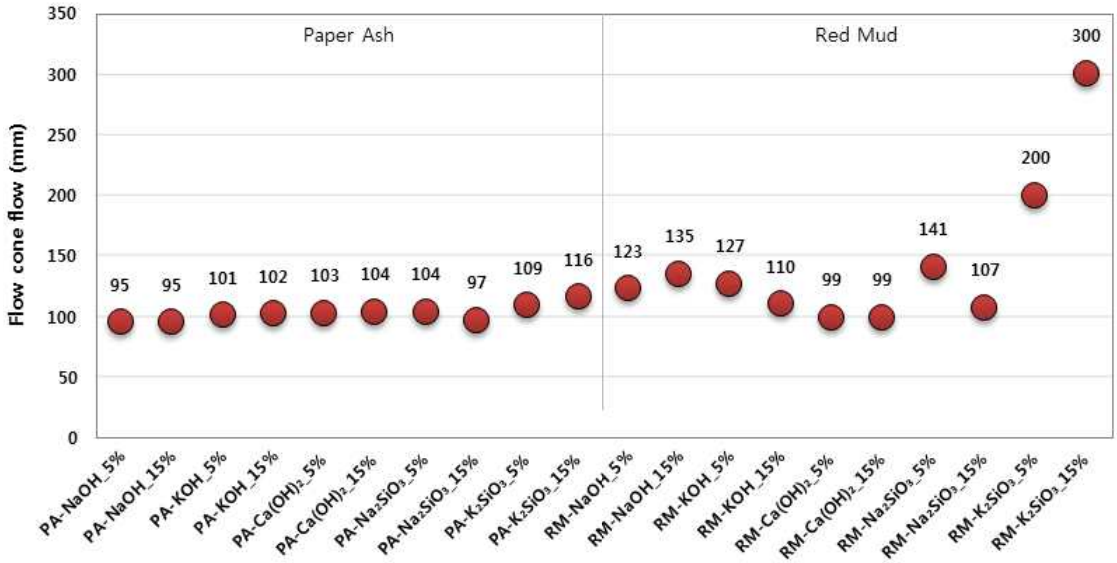
다) 실험결과

(1) 플로우 콘 플로우 및 압축강도

플로우 콘 플로우 시험 결과, 고로슬래그를 사용한 경우 NaOH를 사용한 결합재의 플로우가 가장 큰 플로우 값을 나타내었으며, NaOH와 KOH는 첨가율에 따라 플로우가 커지는 경향을 나타내었다. 플라이애시는 KOH, $Ca(OH)_2$, Na_2SiO_3를 사용한 경우 매우 미미한 차이를 나타내었으며, K_2SiO_3를 5% 첨가한 결합재의 플로우가 가장 큰 값을 나타내었다. 제지애시는 자극제에 의한 플로우 모두 120 mm 이하의 값을 나타내었다. 레드머드는 K_2SiO_3를 사용한 결합재의 플로우 값이 가장 컸으며, 다음으로 Na_2SiO_3를 5% 사용한 결합재의 플로우 값이 높은 것으로 나타났다.



[그림 2-6] 산업부산물과 알칼리 자극제의 종류 및 첨가량에 따른 플로우 콘 플로우

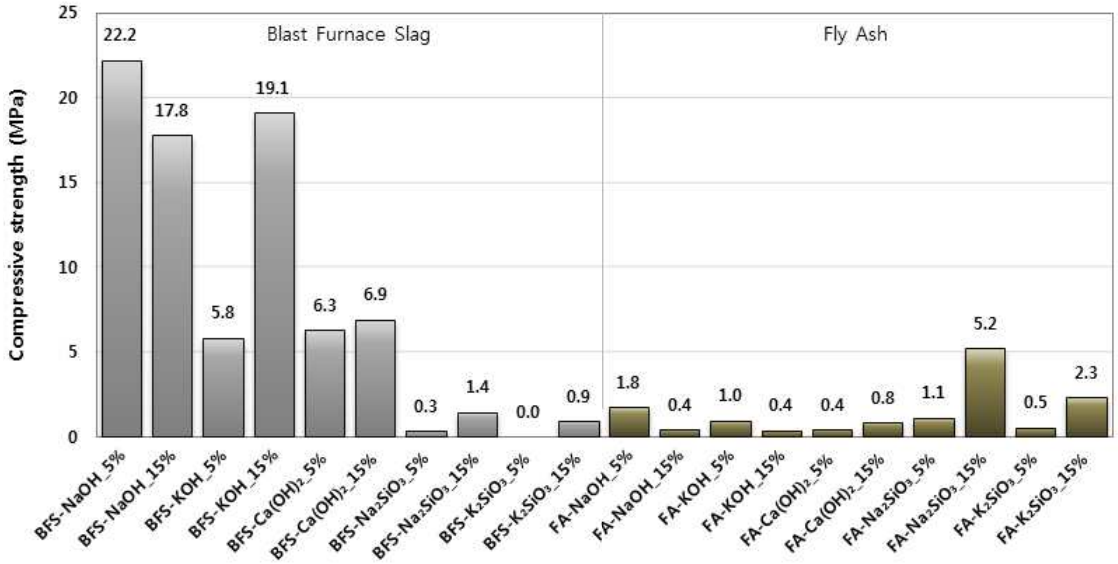


[그림 2-7] 산업부산물과 알칼리 자극제의 종류 및 첨가량에 따른 플로우 콘 플로우

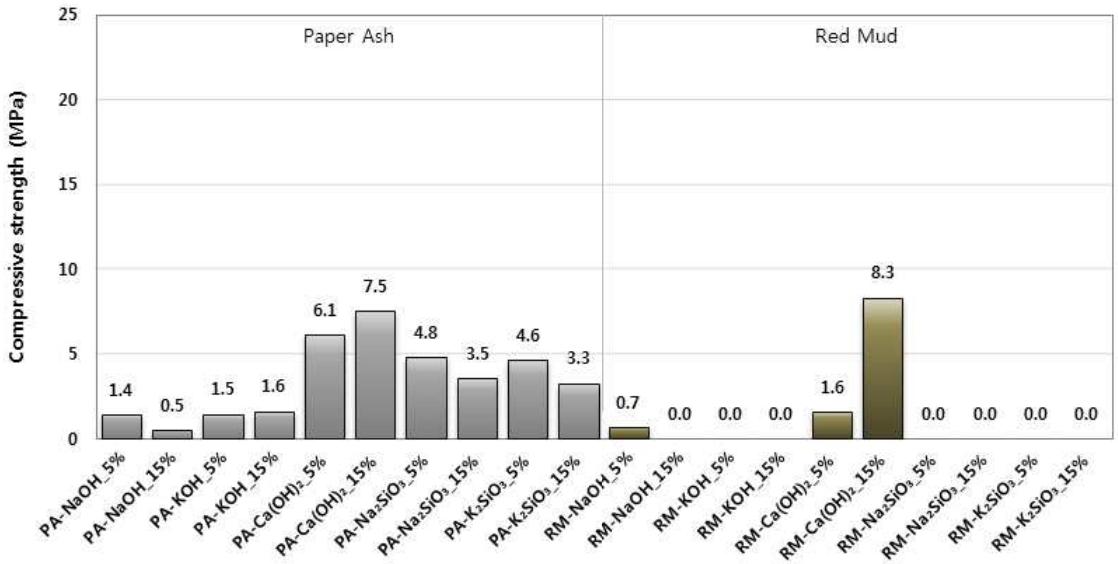
(2) 압축강도

재령 3일의 압축강도 측정 결과, 고로슬래그와 NaOH를 사용한 경화체의 압축강도가 가장 높은 것으로 나타났으며, 이후 KOH를 사용한 경화체의 압축강도가 높은 것으로 나타났다. 반면 Na_2SiO_3와 K_2SiO_3를 사용한 경화체는 1.5 MPa 이하의 강도를 나타내었다. 한편, 플라이애시는 자극제의 첨가에 의한 강도발현은 매우 저조한 것으로 나타났다.

제지애시는 NaOH와 KOH를 사용한 경화체의 압축강도가 매우 낮은 것으로 나타나는데, 이는 비빔과정 중에 자극제의 OH^-에 의해 다량의 기체가 발생하며, 배합수 대부분이 증발하여 경화에 필요한 배합수가 부족하여 나타난 결과인 것으로 판단되며, 레드머드의 경우 $Ca(OH)_2$를 제외한 나머지 알칼리 자극제의 사용효과가 없는 것으로 나타났다.



[그림 2-8] 산업부산물과 알칼리 자극제의 종류 및 첨가량에 따른 재령 3일의 압축강도



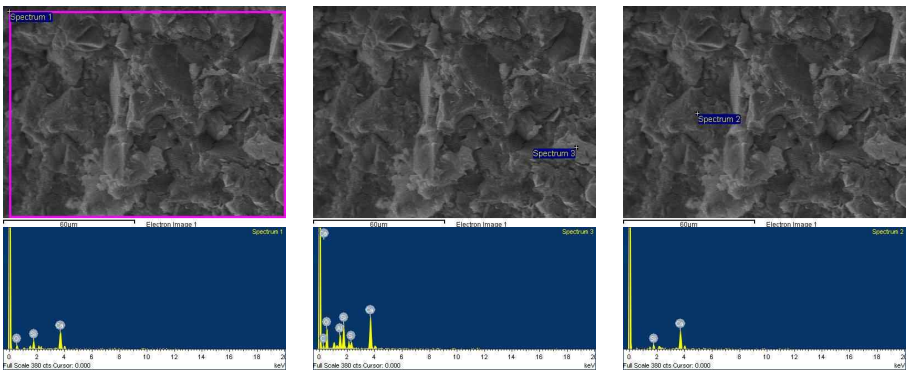
[그림 2-9] 산업부산물과 알칼리 자극제의 종류 및 첨가량에 따른 재령 3일의 압축강도

(3) SEM-EDS

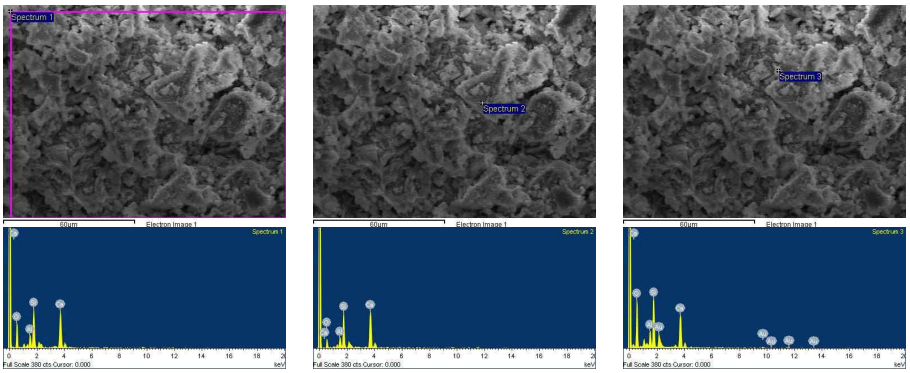
SEM-EDS 분석결과, 고로슬래그를 사용한 시험체는 CaO, SiO_2 및 Al 성분이 주로 관찰되었으며, 플라이애시는 SiO_2와 CaO 성분이 주로 관찰되었다. 이는 고로슬래그의 경우 알칼리 자극제에 의하여 고로슬래그의 피막이 파괴되어 칼슘실리케이트 및 칼슘알루미네이트 수화물을 생성하는 수화반응이 일어났기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 고로슬래그와 알칼리 자극제가 반응하여 새로운 물질이 생성된 것을 확인할 수 있었다. 그러나 OH^-계가 아닌 Na_2SiO_3을 사용한 경우에는 치밀한 조직이 형성되지 않는 것으로 나타났다. 플라이애시의 경우 알칼리 자극제에 의하여 플라이애시가 축중합 반응을 일으켜 경화하였기 때문인 것으로 판단된다.

제지애시를 사용한 시험체의 EDS 분석결과, SiO_2, CaO 및 C 성분이 주로 관찰되었으며, SEM 촬영결과, 제지애시와 알칼리 자극제가 반응하여 매우 미세한 기포를 발생시켜 공극이 형성되었으며, 경화체 내에 미세한 균열이 발생한 것으로 관찰되었다. 레드머드를 사용한 시험체의 EDS 분석결과, Al_2O_3, CaO 및 Fe 성분이 주로 관찰되었다. SEM 촬영결과, 레드머드와 알칼리 자극제가 반응하여 새로운 물질이 생성된 것을 확인할 수 있었으나 많은 물질은 생성되지 않는 것을 확인할 수 있었다.

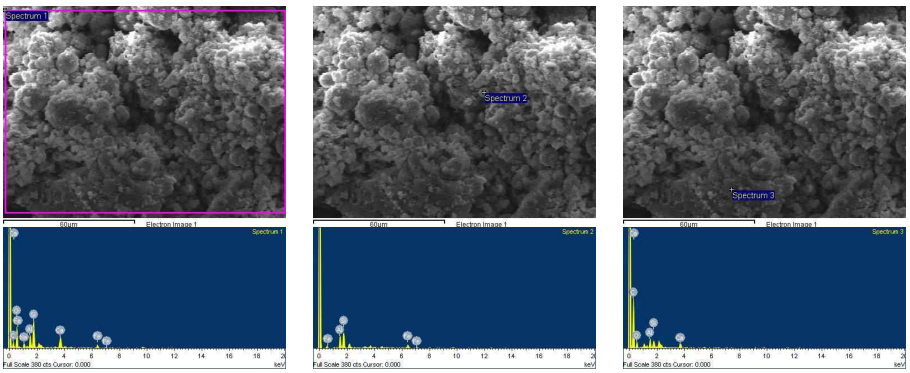
[표 2-9] BFS-NaOH-5% 시험체의 EDS 분석



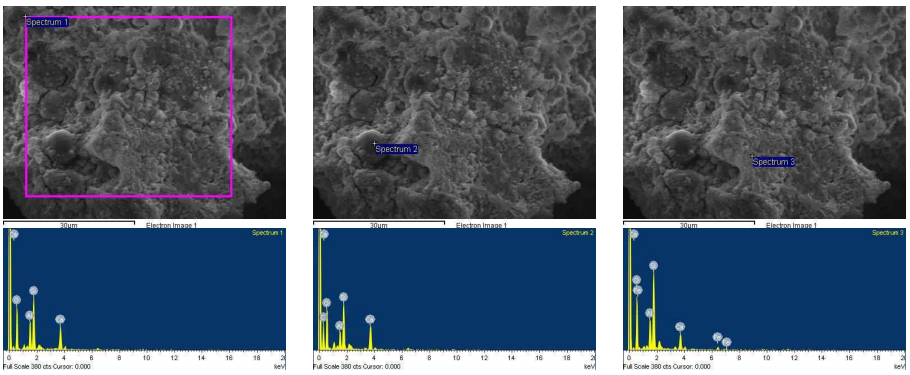
[표 2-10] BFS-Na_2SiO_3-10% 시험체의 EDS 분석



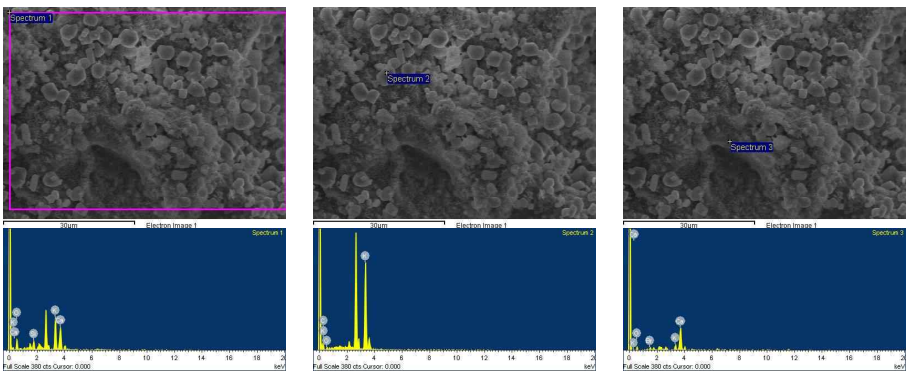
[표 2-11] FA-NaOH-5% 시험체의 EDS 분석



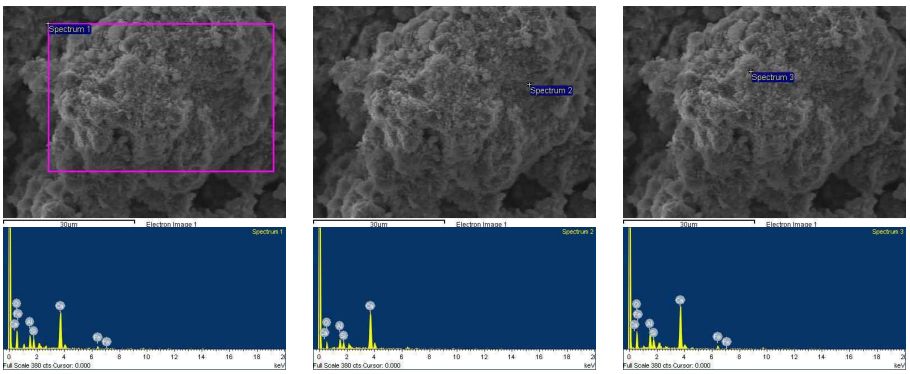
[표 2-12] FA-Na_2SiO_3-10% 시험체의 EDS 분석



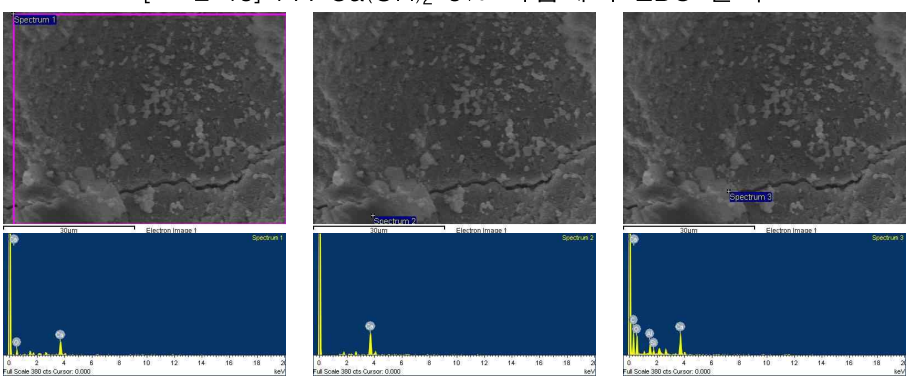
[표 2-13] PA-KOH-5% 시험체의 EDS 분석



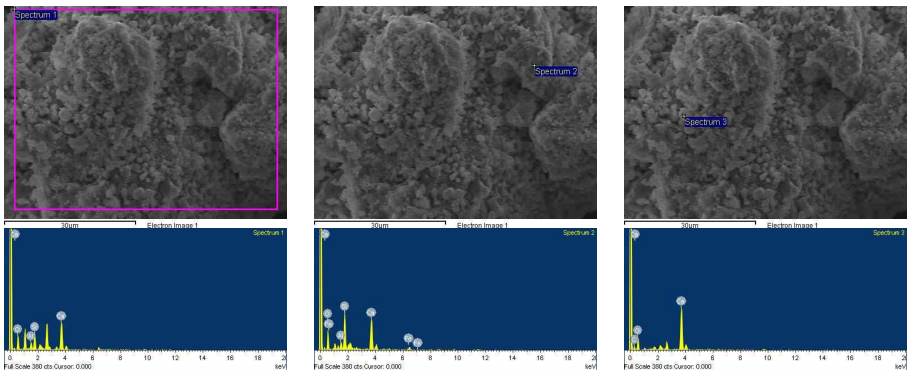
[표 2-14] PA-NaOH-5% 시험체의 EDS 분석



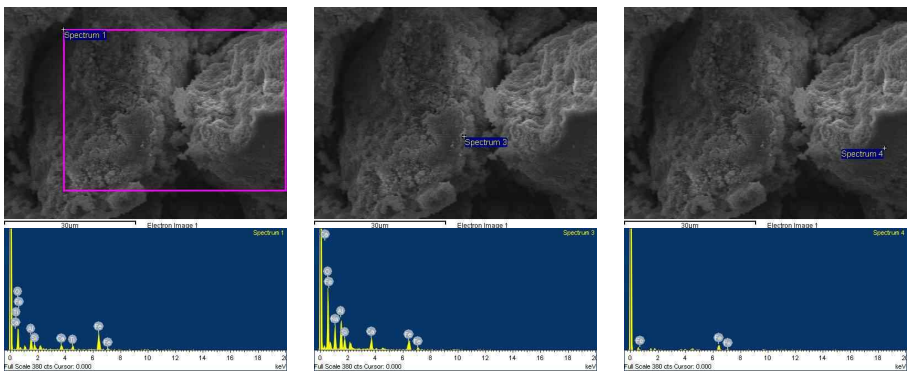
[표 2-15] PA-$Ca(OH)_2$-5% 시험체의 EDS 분석



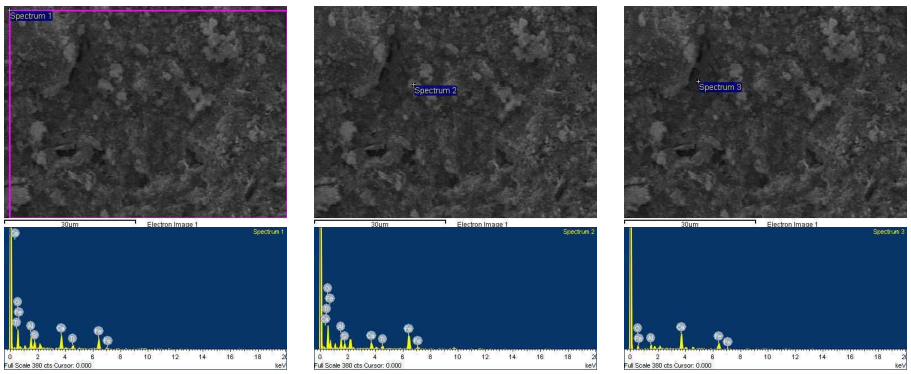
[표 2-16] PA-Na_2SiO_3-10% 시험체의 EDS 분석



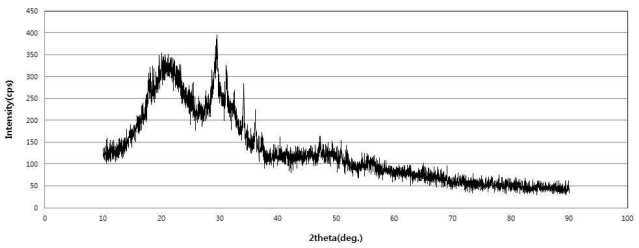
[표 2-17] RM-NaOH-5% 시험체의 EDS 분석



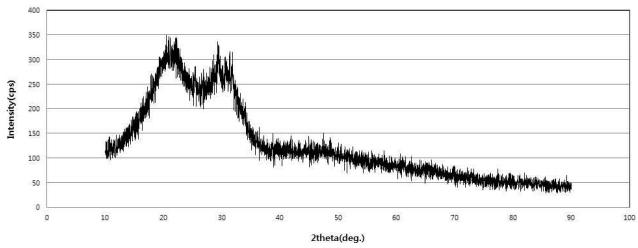
[표 2-18] RM-$Ca(OH)_2$-10% 시험체의 EDS 분석



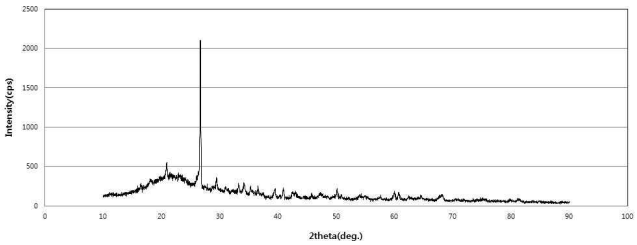
(4) XRD



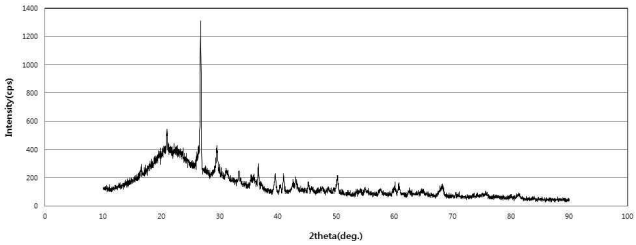
[그림 2-10] BFS-NaOH-5% 시험체의 XRD 분석



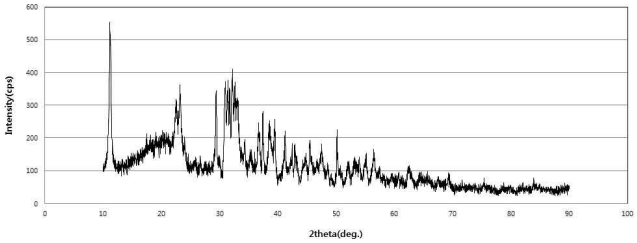
[그림 2-11] BFS-Na_2SiO_3-10% 시험체의 XRD 분석



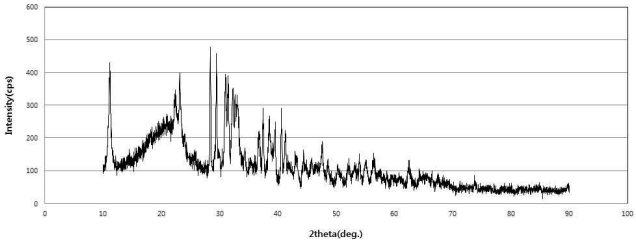
[그림 2-12] FA-NaOH-5% 시험체의 XRD 분석



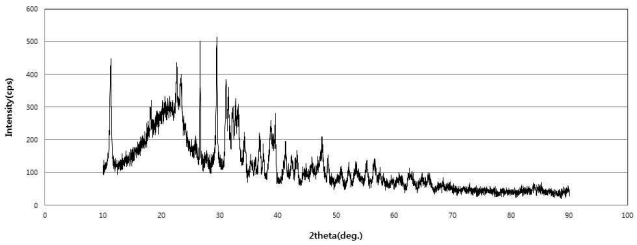
[그림 2-13] FA-Na_2SiO_3-10% 시험체의 XRD 분석



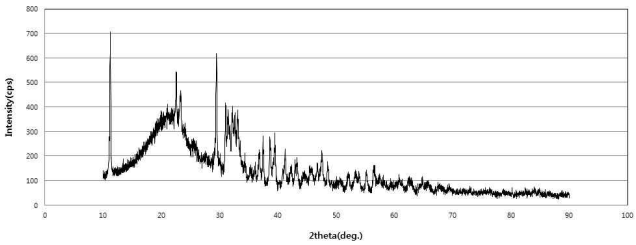
[그림 2-14] PA-NaOH-5% 시험체의 XRD 분석



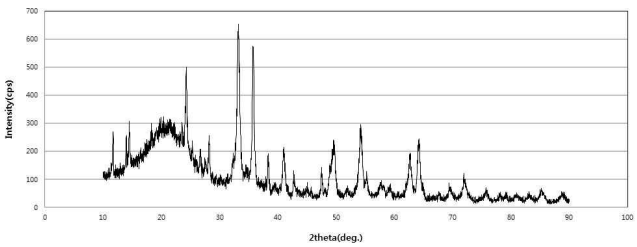
[그림 2-15] PA-KOH-5% 시험체의 XRD 분석



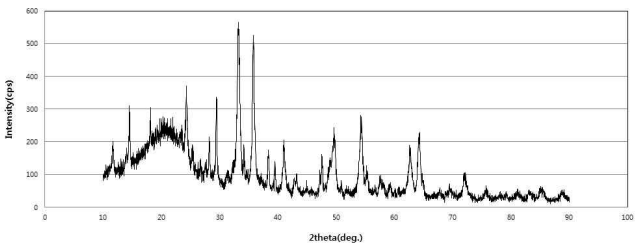
[그림 2-16] PA-$Ca(OH)_2$-5% 시험체의 XRD 분석



[그림 2-17] PA-Na_2SiO_3-10% 시험체의 XRD 분석



[그림 2-18] RM-NaOH-5% 시험체의 XRD 분석



[그림 2-19] RM-$Ca(OH)_2$-10% 시험체의 XRD 분석

실험 결과, 산업부산물의 성분 및 자극제의 종류에 따라서 경화체의 압축강도는 다르다는 것을 확인 할 수 있었으며, 특히 고로슬래그의 경우 NaOH와 KOH의 자극제가 강도발현에 유리하였고, 제지애시의 경우 OH^-에 의해 다량의 기체 발생으로 결합재 내에 기포를 형성할 수 있는 재료인 것을 확인하였다. 한편, 레드머드는 자극제의 강도발현은 저조하나 레드머드의 성분 중 Na_2O에 의해 알칼리 자극제의 사용량을 저감하면서 고로슬래그의 피막을 파괴하여 강도를 증진시킬 수 있는 요소가 될 수 있는 것을 확인하였다.

이에 고로슬래그를 기반으로 하여 제지애시의 발포 특성을 이용하여 경량의 경화체 제조하고 레드머드를 일부 사용함으로써 고가의 알칼리 자극제의 사용을 줄여 산업부산물을 사용한 친환경 경량 경화체의 제조 가능성을 확인하였다.

3) 알칼리 자극제의 종류 및 첨가율에 따른 무시멘트 경화체의 특성 검토

가) 고로슬래그 기반 경화체의 자극제의 종류 및 첨가율에 따른 실험 및 적정 배합 선정(1)

(1) 실험개요

제지애시를 사용하여 경량의 경화체를 제조하기 앞서 선행실험을 통해 선정된 고로슬래그 기반 경화체의 특성 및 알칼리 자극제의 적정사용량을 검토하기 위한 실험으로, 고로슬래그의 강도 발현 및 제지애시와 반응하여 기포를 발생시킬 수 있는 OH^-를 포함한 알칼리 자극제를 사용하였다.

(2) 실험계획 및 방법

본 실험은 결합재로써 고로슬래그와 레드머드를 사용하였으며, 결합재 조건으로써 고로슬래그만을 사용한 경우는 알칼리 자극제를 10, 20, 30 (%) 첨가하였고, 고로슬래그에 레드머드를 치환한 경우는 고로슬래그 중량을 기준으로 레드머드를 10, 20, 30 (%) 치환하여 알칼리 자극제를 결합재 중량에 10% 첨가하였다. W/B는 0.55로 고정하였으며, 양생조건은 상대습도 80±5%, 온도 20±2 ℃의 항온항습에서 양생을 실시하였다. 시험항목은 결합재의 유동특성을 검토하기 위해 플로우 콘 플로우를 측정하였고, 경화성상을 검토하기 위해 압축강도를 측정하였다[표-23].

[표 2-19] 실험수준 및 요인

요인	수준
결합재 조건	• BFS[a], BFS+RM[b]
결합재 조건별 레드머드 치환율	• BFS : 0%
	• BFS+RM : 10, 20, 30 (%)
알칼리 자극제	• KOH, $Ca(OH)_2$, NaOH
결합재 조건별 알칼리 자극제 첨가율	• BFS : 10, 20, 30 (%)
	• BFS+RM : 10%
W/B	• 55%
양생조건	• 상대습도 80±5%, 온도 20±2℃
시험항목	• 플로우 콘 플로우, 압축강도

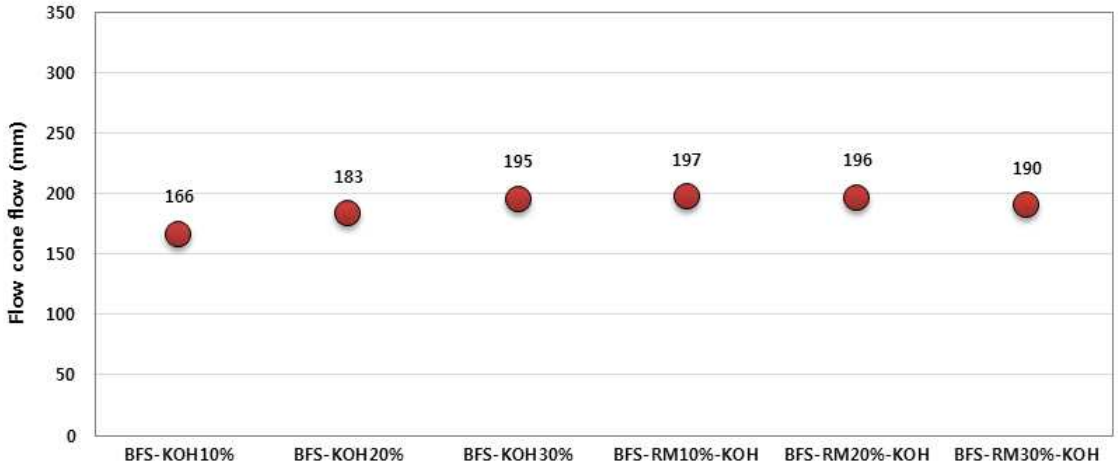
a) BFS : 고로슬래그, b) RM : 레드머드

(3) 실험결과

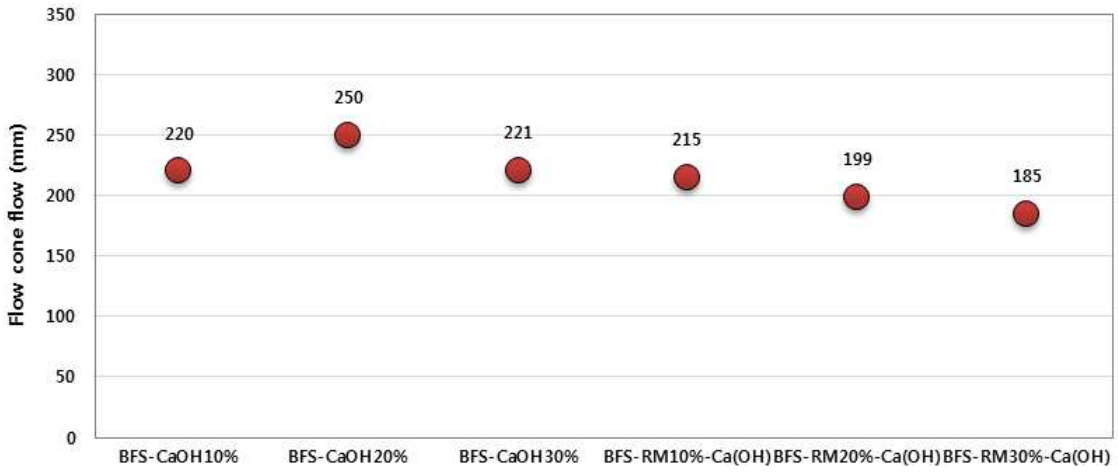
(가) 플로우 콘 플로우

플로우 콘 플로우 시험 결과, 모든 결합재에서 150mm 이상의 플로우를 나타내었으며, KOH를 사용한 결합재는 고로슬래그만 사용하였을 경우 KOH 첨가율에 따라 플로우가 증가되는 경향을 나타내었으나 레드머드를 치환하였을 경우 레드머드의 치환율에 따라 플로우가 저하되는 경향을 나타내었다. $Ca(OH)_2$를 사용한 결합재는 고로슬래그만을 사용하였을 경우 20%까지 플로우 값이 증가되나 30% 첨가하였을 경우 플로우가 저하되었다. 또한 레드머드를 치환하였을 경우 치환율에 따라 플로우가 저하되었다. NaOH를 사용한 경우 고로슬래그만을 사용한 결합

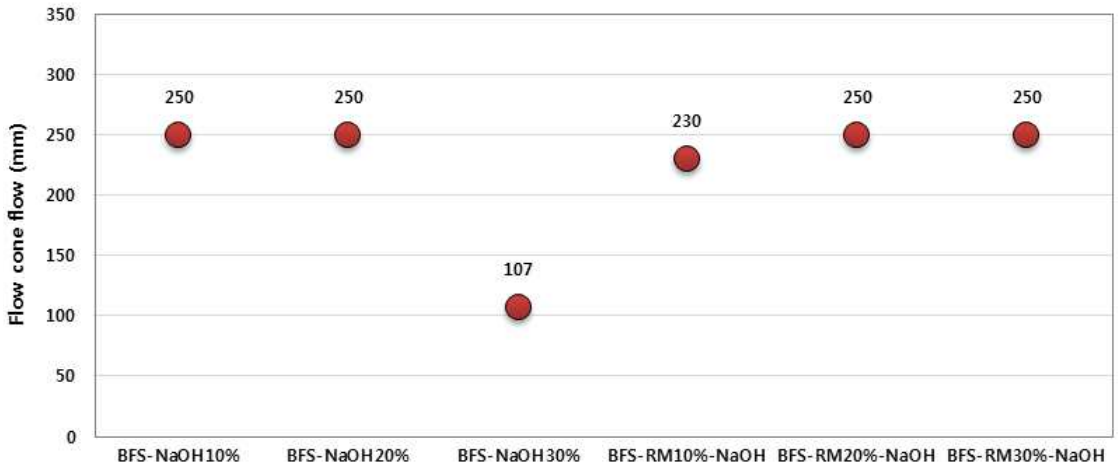
재는 첨가율에 따라 플로우가 저하되었으며, 레드머드를 치환하였을 경우 치환율에 따라 플로우가 증가되었다.



[그림 2-20] 고로슬래그 기반 결합재의 KOH 첨가량에 따른 플로우 콘 플로우



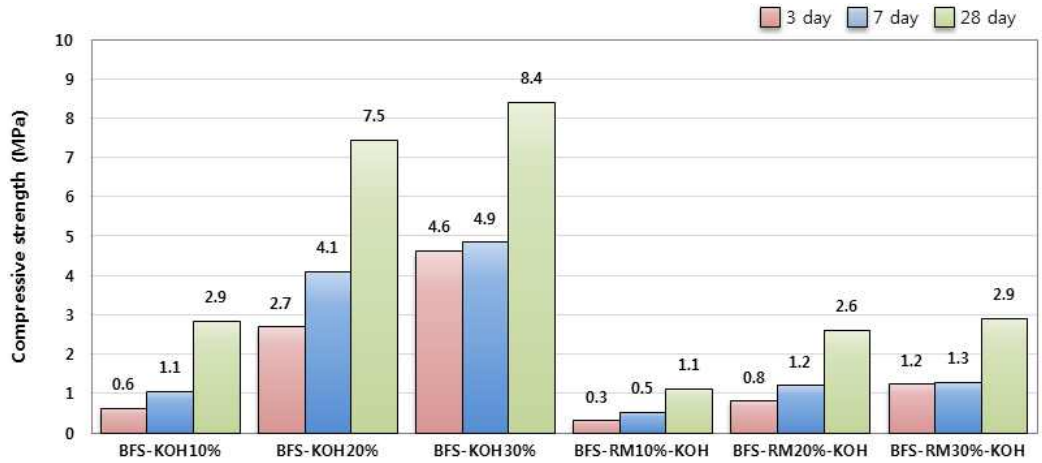
[그림 2-21] 고로슬래그 기반 결합재의 $Ca(OH)_2$ 첨가량에 따른 플로우 콘 플로우



[그림 2-22] 고로슬래그 기반 결합재의 NaOH 첨가량에 따른 플로우 콘 플로우

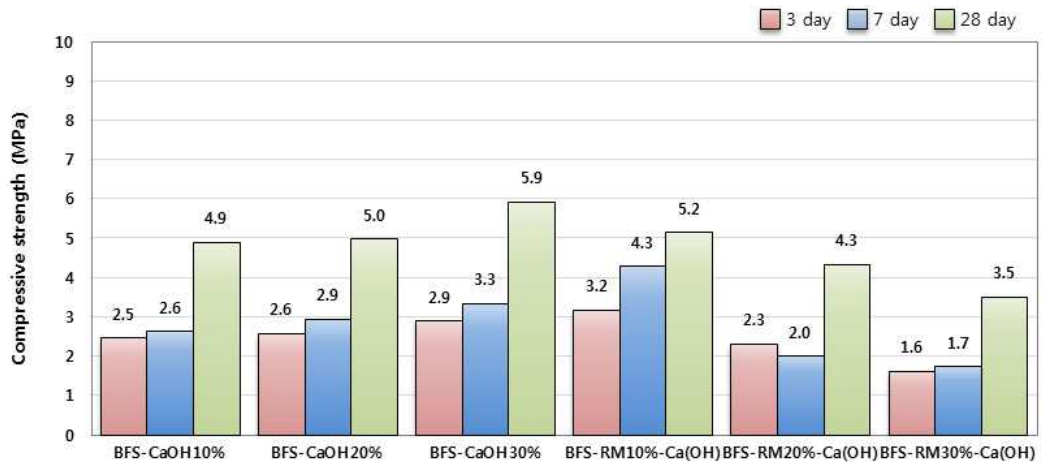
(나) 압축강도

압축강도 측정결과, KOH를 첨가한 경화체의 경우 레드머드를 치환하지 않은 경화체의 강도보다 레드머드를 치환한 경화체의 강도가 낮은 것으로 나타났으나 치환율이 높아짐에 따라 강도가 증진된 것으로 나타났다. 이는 강도 발현의 중축이 되는 고로슬래그의 사용량이 레드머드의 치환에 따라 강도발현을 저하시키는데, 레드머드의 Na_2O에 의한 고로슬래그의 활성화에 의해 미처 활성화되지 않은 고로슬래그의 피막을 레드머드의 Na_2O에 의해 피막이 파괴되어 강도를 증진시키고 레드머드를 30%까지 치환하였을 때 KOH만을 사용하였을 경우와 매우 유사한 강도로 발현한 것으로 보아 레드머드를 적정량 사용하였을 경우 고로슬래그 사용량 대비 강도를 보상할 수 있을 것으로 판단된다.



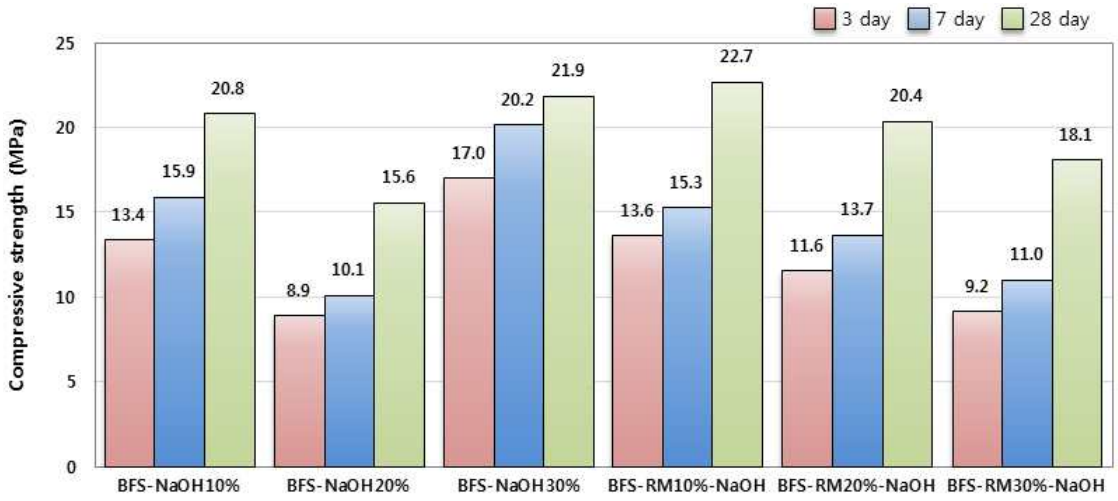
[그림 2-23] 고로슬래그 기반 결합재의 KOH 첨가량에 따른 압축강도

$Ca(OH)_2$를 사용한 경화체의 압축강도는 레드머드를 10% 치환한 경화체의 압축강도가 가장 높은 것으로 나타났으며, 레드머드의 치환율에 따라 강도가 저하되는 경향을 나타내었다. 또한, KOH를 첨가한 경화체의 압축강도보다 약간 높은 강도를 나타내고 NaOH를 첨가한 경화체의 압축강도보다 낮은 강도를 나타내었다. 이는 NaOH가 물에 대한 이온화도가 높고 결합재와 반응이 빠르기 때문에 수화반응이 빨리 진행되어 초기강도가 높기 때문이며, KOH는 NaOH보다 이온화도가 낮기 때문에 초기에 결합재와 반응하는 양보다 배합수와 함께 떠오르기 때문인 것으로 판단된다.



[그림 2-24] 고로슬래그 기반 결합재의 $Ca(OH)_2$ 첨가량에 따른 압축강도

NaOH를 사용한 모든 경화체의 압축강도는 재령 3일에서 7일까지 매우 미미한 강도증진을 보였고, 재령 28일에서 강도가 대폭 증진되었다. 이중 레드머드를 10% 치환한 경화체의 재령 28일의 강도 증진이 가장 크고, 매우 우수한 강도발현을 하였다. 이는 KOH와 $Ca(OH)_2$를 첨가한 경화체보다 높은 강도를 나타내는 것으로 보아 NaOH의 빠른 반응으로 고로슬래그를 활성화시켜 나타난 결과인 것으로 판단되며, 앞서 언급한 것과 같이 레드머드의 Na_2O에 의한 고로슬래그 피막파괴가 2차적으로 나타나 레드머드를 사용한 경화체의 재령 28일의 강도증진이 높은 것으로 판단된다. 또한, 레드머드의 치환율이 증가할수록 강도는 낮아지는 경향을 나타내는데, 이는 레드머드의 치환으로 고로슬래그의 사용량이 줄어들었을 뿐만 아니라 수화반응에 참여하지 않는 Na^+이 경화체 내에 잔존하여 강도를 저하시킨 것으로 판단된다.



[그림 2-25] 고로슬래그 기반 결합재의 NaOH 첨가량에 따른 압축강도

실험결과, 플로우 콘 플로우는 모든 결합재에서 100㎜ 이상의 플로우 값을 나타내었으며, NaOH를 사용한 경화체의 압축강도만이 재령 28일에서 20MPa 이상의 강도를 나타내었다. 이는 높은 W/B에 의해 나타난 결과인 것으로 판단되어 W/B를 55%보다 낮추어 실험을 실시해야 할 것으로 판단되었다. 또한 반응성이 빠른 알칼리 자극제인 NaOH와 KOH의 사용량을 줄이고 적정량의 레드머드를 치환하여 사용한다면 높은 강도의 고로슬래그 기반의 무시멘트 경화체를 제조할 수 있을 것으로 판단된다.

나) 고로슬래그 기반 경화체의 자극제의 종류 및 첨가율에 따른 실험 및 적정 배합 선정(2)

(1) 실험개요

본 실험은 앞선 실험에서 도출된 플로우와 압축강도를 개선하기 위한 목적으로 고로슬래그를 기반으로 한 고강도의 경화체를 제조하기 위한 것으로 W/B를 다소 낮춘 45%로 실험을 실시하였다. 또한, 경화체의 미세구조를 분석하기 위해 SEM 촬영 및 EDS 분석을 하였다.

(2) 실험계획 및 방법

본 실험은 고로슬래그를 기반으로 한 무시멘트 경화체를 제조하기 위한 실험으로, W/B는 45%로 고정하였고, 알칼리 자극제는 KOH, $Ca(OH)_2$, NaOH를 사용하였으며, 바인더의 중량에 10%를 첨가하였다. 또한, 알칼리 자극제의 사용량을 저감하고자 고로슬래그에 0, 10, 20, 30 (%)로 치환하여, 습도 80±5%, 온도 20±2℃에서 양생을 하였다. 시험항목으로는 플로우 콘 플로우와 압축강도, SEM 촬영, EDS 분석 및 XRD 분석을 측정하였다.

[표 2-20] 실험요인 및 수준

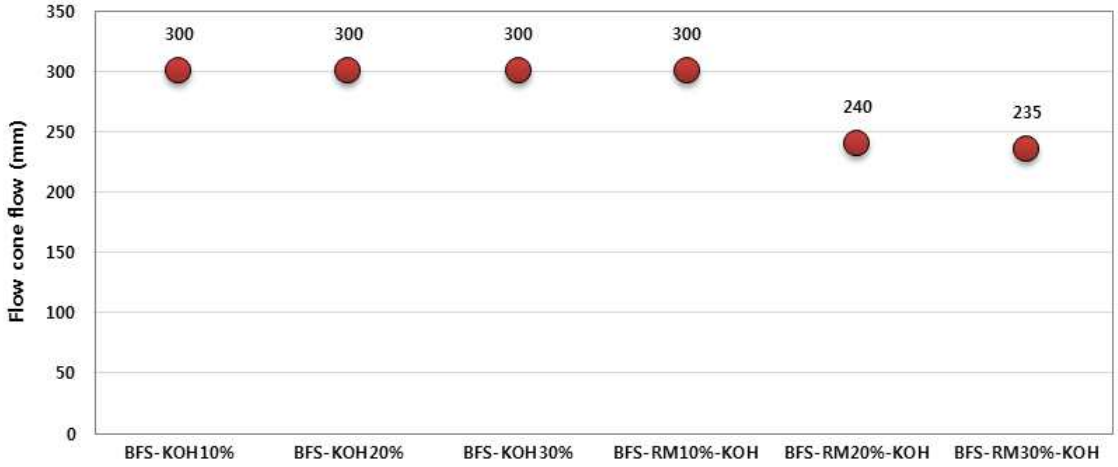
실험요인	실험수준
결합재 조건	• BFS[a], BFS+RM[b]
레드머드 치환율	• 0, 10, 20, 30 (wt.%)
알칼리 자극제	• NaOH, KOH, $Ca(OH)_2$
결합재 조건별 알칼리 자극제 첨가율	• BFS : 10, 20, 30 (wt.%)
	• BFS+RM : 10 (wt.%)
W/B	• 45 %
양생조건	• 상대습도(80±5)%, 온도(20±2)℃
시험항목	• 플로우 콘 플로우, 압축 및 휨강도, SEM-EDS, XRD

a) BFS : 고로슬래그, b) RM : 레드머드

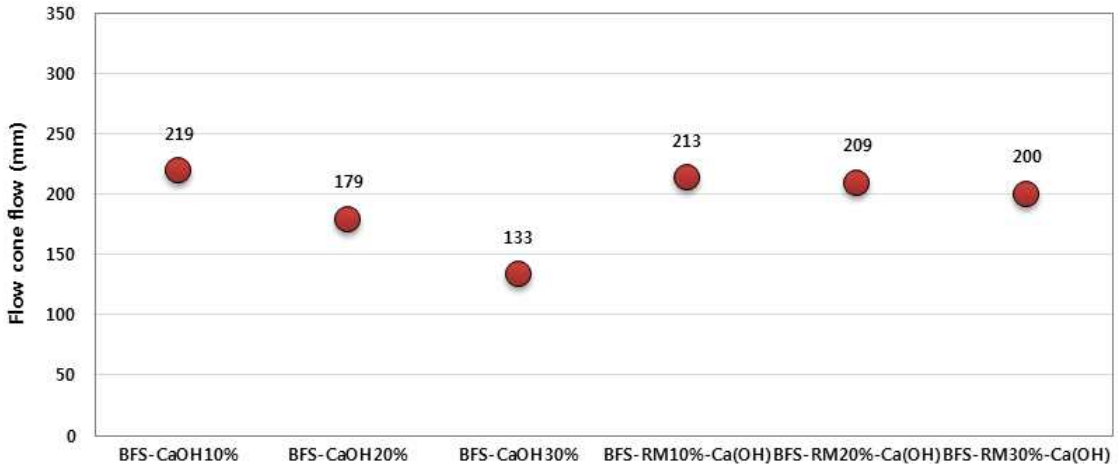
(3) 실험결과

(가) 플로우 콘 플로우

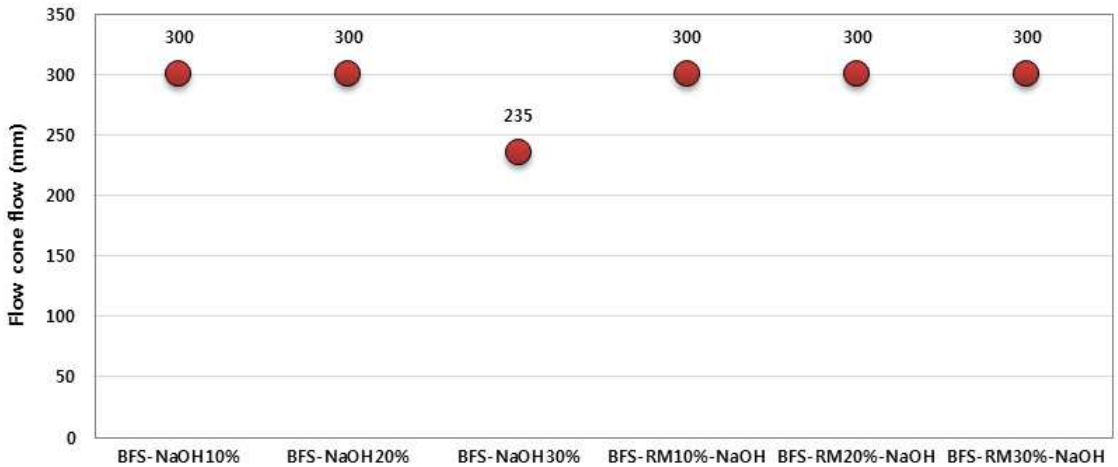
플로우 콘 플로우 시험 결과, KOH를 사용한 결합재는 고로슬래그만을 사용하였을 경우 첨가율에 따라 플로우 값이 커지는 경향을 나타내었으며, 레드머드를 치환하였을 경우 플로우 값이 저하되었다. $Ca(OH)_2$를 사용한 결합재는 110㎜ 이하의 플로우 값을 나타내었다. NaOH를 사용한 결합재는 고로슬래그만을 사용하였을 경우 W/B 55%와 유사한 경향을 나타내었으며, 레드머드의 치환율에 따라 플로우 값이 저하되는 경향을 나타내었다.



[그림 2-26] 고로슬래그 기반 결합재의 KOH 첨가량에 따른 플로우 콘 플로우



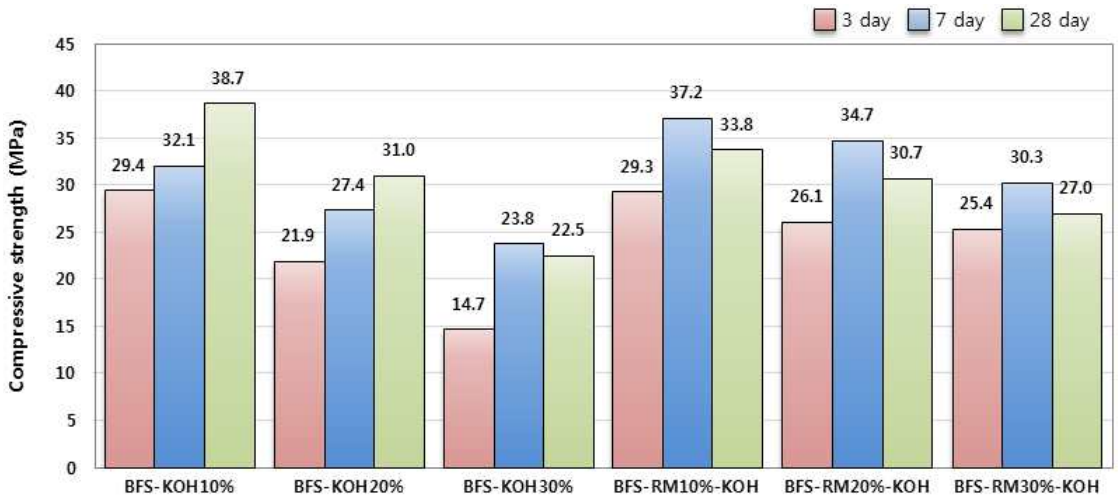
[그림 2-27] 고로슬래그 기반 결합재의 $Ca(OH)_2$ 첨가량에 따른 플로우 콘 플로우



[그림 2-28] 고로슬래그 기반 결합재의 NaOH 첨가량에 따른 플로우 콘 플로우

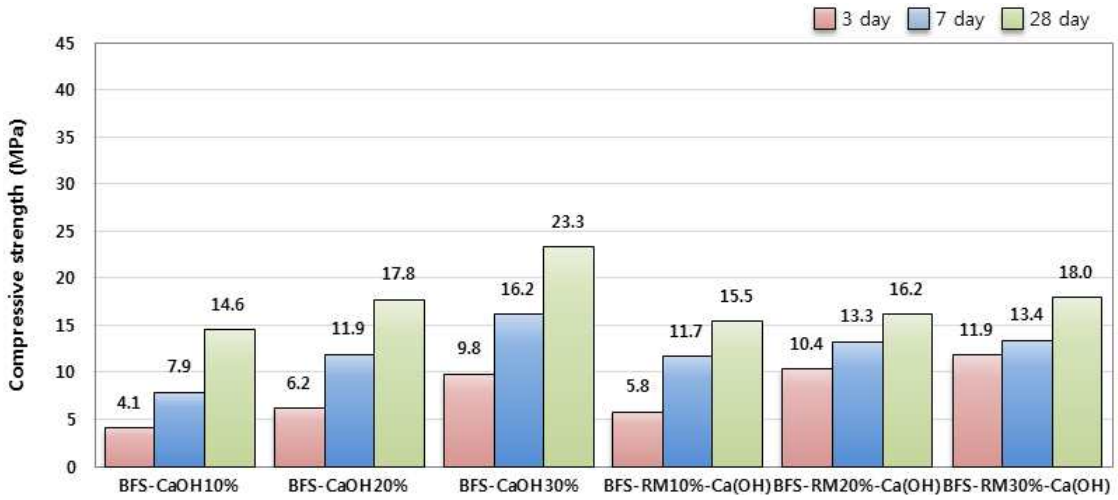
(나) 압축강도

압축강도 측정결과, 알칼리 자극제로써 KOH를 사용한 경화체는 고로슬래그만을 사용하였을 경우 알칼리 자극제의 첨가율 및 레드머드를 치환율에 따라 재령 28일 강도가 감소하였다. 이는 경화체 내에 수화반응에 참여하지 않은 알칼리 이온이 강도발현에 방해가 되어 강도를 저하시킨 것으로 판단되며, 레드머드 내에 함유되어 있는 Na_2O에 의해 필요 이상의 K^+ 뿐만 아니라 Na^+이 잔존하여 강도를 저하 시킨 것으로 판단된다. 또한, 레드머드를 치환한 경화체는 재령 3일에서 재령 7일까지의 강도증진에 의한 강도차이와 재령 7일의 강도가 KOH를 10% 첨가한 경화체 보다 높은 강도 발현을 하였는데, 이는 1차적으로 KOH에 의해 고로슬래그의 피막이 파괴되고 고로슬래그 입자 내부에 함유되어 있던 성분들이 용출된 후 2차적으로 KOH에 의해 레드머드 내에 있던 Na_2O가 용출되어 Na_2O의 Na^+과 미처 파괴되지 않은 고로슬래그의 피막을 파괴하여 고로슬래그 내부에 남아 있던 성분들이 지속적으로 용출되어 수경성 반응을 가속화시켜 나타난 결과인 것으로 판단된다. 하지만 재령 28일의 강도는 재령 7일 보다 낮은 강도를 나타나는데, 이는 SEM 촬영 결과에서 보여지는 것처럼 경화체 조직 내에 발생한 미세한 균열에 의한 것으로 판단된다. 또한, 레드머드가 경화체의 강도발현에 도움이 되는 역할 보다 고로슬래그의 피막을 파괴하기 위해 사용된 재료이기 때문에 치환율이 높아지면 강도발현의 주 재료인 고로슬래그의 양이 줄어들어 나타난 결과인 것으로 판단된다.



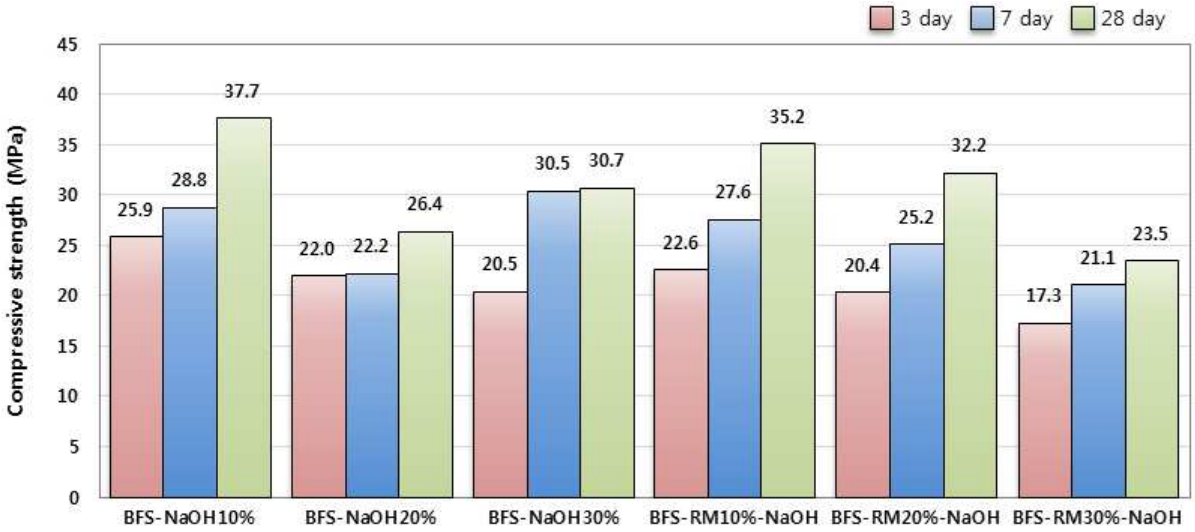
[그림 2-29] 고로슬래그 기반 결합재의 KOH 첨가량에 따른 압축강도

$Ca(OH)_2$를 첨가한 경화체의 압축강도는 KOH과 NaOH를 첨가한 경화체의 압축강도 보다 매우 낮은 강도를 나타내었다. 이는 $Ca(OH)_2$ 자체의 반응성이 낮아 나타난 결과인 것으로 판단된다. 또한, 레드머드를 치환하였을 경우 레드머드의 치환율에 따라 강도가 증진되었다.



[그림 2-30] 고로슬래그 기반 결합재의 $Ca(OH)_2$ 첨가량에 따른 압축강도

NaOH를 첨가한 경화체의 압축강도는 레드머드의 치환율에 따라 강도는 저하되는 경향을 나타내었다. 이는 KOH를 첨가한 경화체의 재령 28일과 매우 유사한 경향을 나타내는데, 마찬가지로 레드머드의 치환으로 고로슬래그의 사용량이 줄어들었을 뿐만 아니라 경화체내에 잔존하는 Na^+에 의한 것으로 판단된다. 또한, KOH를 첨가한 경화체와 다르게 재령 7일 보다 28일의 강도가 높은 것으로 나타났다.



[그림 2-31] 고로슬래그 기반 결합재의 NaOH 첨가량에 따른 압축강도

(다) SEM-EDS

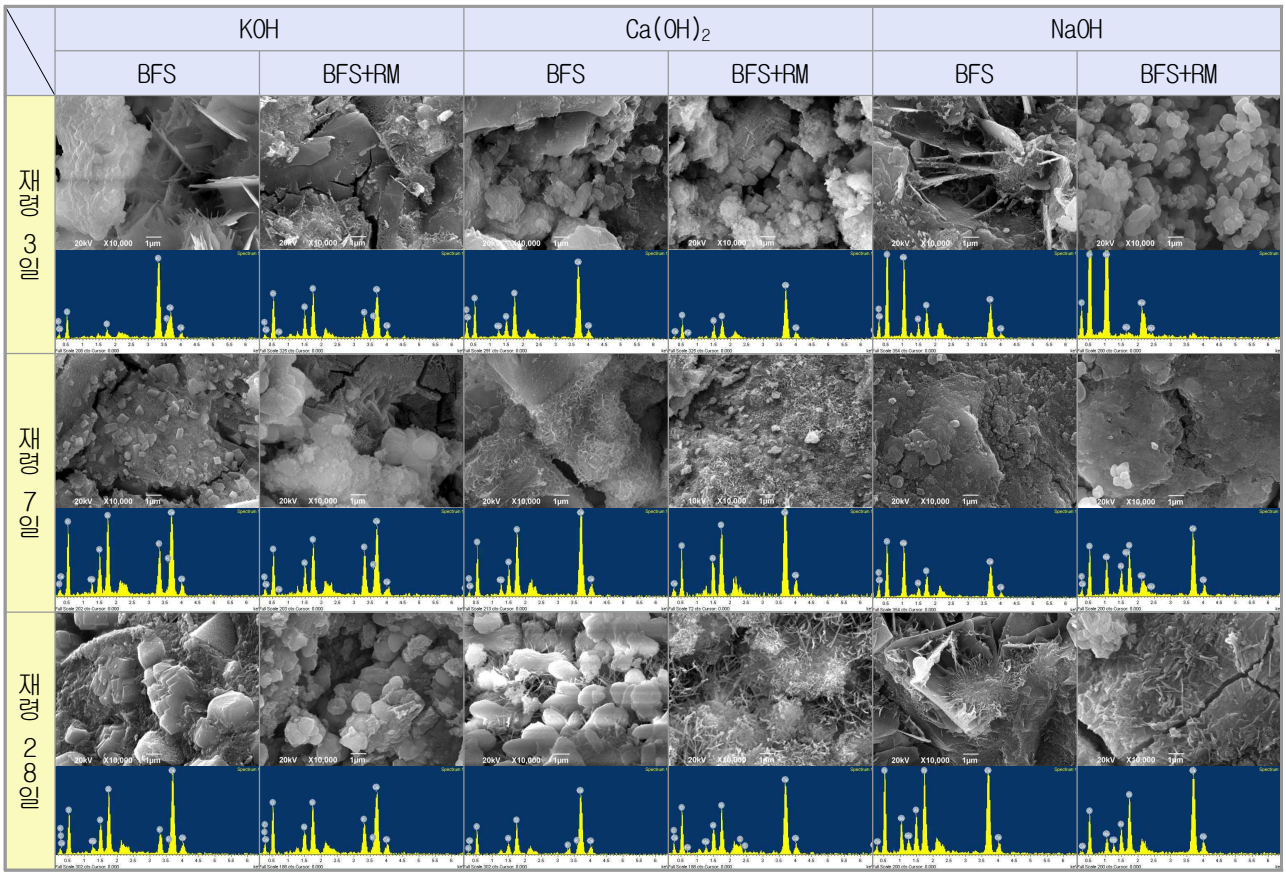
[표 34]는 알칼리 자극제의 종류 및 레드머드 치환유무에 따른 SEM-EDS 분석결과를 나타낸 것으로, KOH를 첨가한 경화체의 EDS분석 결과, 경화체에서 검출된 성분은 K, Ca, Si, Al 등이며, 함유량의 차이는 미미한 정도로 나타났다. 또한, 레드머드를 치환하지 않은 경화체의 재령 3일에서 K이 가장 높게 검출되었으며, 이후 Ca이 높게 검출되었다. 반면, 재령 7, 28일에서 K보다 Ca이 더 높게 나타났으며, Si가 다량 검출되었고, 산소의 양이 증가 되었다. 이는 재령 3일에서 검출되지 않은 성분들이 재령일에 따라서 고로슬래그 내부에 함유되어 있던 성분이 지속적으로 용출되어 나타난 결과로 판단된다.

SEM 촬영 결과, 재령 3일에서 판상의 형태를 나타내고 있는데, 이는 EDS분석 결과에서 K이 높은 함유율을 나타내고 있는 것으로 보아 반응에 참여하지 못하고 잉여로 남은 KOH가 잔존하였기 때문에 나타난 것으로 판단된다. 또한, 재령 7일에서 약 1㎛의 겔상 형태가 치밀한 조직에 융합된 형태로 존재하고 있으며, 재령 28일에서는 보다 큰 1~3㎛의 겔상이 관찰되었다. 레드머드를 치환한 경화체의 SEM 촬영 결과, 레드머드의 치환율 및 재령일이 길어질수록 보다 밀실한 조직이 관찰되었다. 하지만, 레드머드를 20% 치환한 경화체에서 매우 밀실한 괴상이 관찰되었으나, 약 0.5㎛의 균열을 나타내고 있는데, 이는 레드머드에 함유되어 있던 Na_2O의 용출로 알칼리 성분이 과다하여 결합재 간 결합력 부족으로 나타난 결과로 강도 저하의 요소가 된 것으로 판단되다. 또한, 재령 7, 28일에서 적층형의 결정상이 관찰되었다. 레드머드 치환율 30% 경화체의 SEM 촬영 결과 재령 3일에서는 2차원 망상의 C-S-H(Calcium Silicate) 수화물이 관찰 되었으며, 재령 7일에서 밀실한 조직과 균열이 관찰되었다. 반면, 재령 28일에서는 균열이 관찰되진 않지만 매우 작은 입자들이 응집되어 있는 형태를 이루고 있어, 이 또한 강도 저하의 요소가 될 것으로 판단된다.

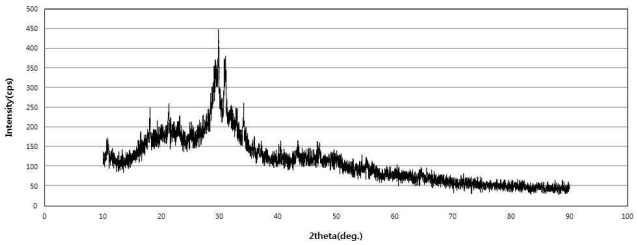
$Ca(OH)_2$를 첨가한 경화체의 SEM-EDS 분석 결과, 레드머드를 치환하지 않은 경화체의 재령 3일의 경우 특정 형태를 띤 수화물은 볼 수 없었으나 괴상의 형태와 이들이 응집되어 있는 형태를 보였다. 재령 7일에서의 경화체는 망상의 형태를 나타내었으며, 재령 3일 보다 치밀한 조직을 나타내었다. 하지만 재령 28일의 경화체는 약간 타원형에 가까운 판상의 입자가 관찰되었으며, 이는 KOH를 첨가한 시험체 중 레드머드를 20% 치환한 시험체에서 관찰된 것과 매우 유사한 형태를 나타내었다. 또한, 판상의 사이사이 토버모라이트와 같은 바늘 형태의 입자가 관찰되었다. 이는 EDS 분석 결과에서 Ca, Si 등의 성분들이 검출된 것으로 보아 고로슬래그 입자 내부에 함유되어 있는 칼슘(Ca)과 실리카(Si)가 결합하여 토버모라이트의 결정을 형성한 것으로 판단된다. 레드머드를 치환한 경화체의 SEM 촬영 결과, 레드머드를 치환하지 않은 경화체보다 다소 치밀한 조직이었으나, 입자와 입자가 응집되어 있는 형태가 관찰되었으며 이들 사이에 많은 공극이 관찰되었다. 이는 서로의 결합력이 매우 낮을 뿐만 아니라 공극으로 인한 강도 저하를 일으킬 수 있는 요소인 것으로 판단된다.

NaOH를 사용한 경화체의 SEM-EDS 분석 결과, 레드머드를 치환하지 않은 경화체의 재령 3일에서 판상의 형태와 그물망 형태의 초기 C-S-H 생성물이 관찰되었다. 또한, 재령 7일에서 매우 밀실한 겔의 집합 형태인 후기 C-S-H 생성물이 관찰되었으나, 일부 매우 미세한 균열이 관찰되었다. 또한, 재령 28일에서 재령 3일과 같은 형태가 관찰되었다. 이는 고로슬래그와 NaOH의 반응 속도는 빠르나 NaOH의 분포가 고르지 못해 고로슬래그의 피막을 파괴하지 못한 부분들을 이후에 생성된 $Ca(OH)_2$의 Ca^+에 의해 파괴되어 다소 늦은 반응을 하였기 때문에 나타난 결과인 것으로 판단된다. 레드머드를 치환한 경화체의 SEM 촬영 결과 재령 3일에서 겔상의 입자가 관찰되는데, 이는 EDS 분석 결과에서 Na와 O의 함유량이 대부분을 차지하고 있는 것으로 보아 단지 촉매 역할로써 사용된 NaOH가 고로슬래그의 피막파괴에 참여하지 못하여 경화체 내부에 잔존한 것으로 판단된다. 또한, 레드머드의 치환율별 잔존하고 있는 NaOH의 입자의 형태는 다르나 EDS 분석결과에서 Na의 함유율이 치환율이 증가함에 따라 증가하는 것으로 보아 레드머드에서 용출되어진 Na_2O의 Na가 부가적으로 포함된 것으로 판단된다. 또한, 재령 7일의 SEM 촬영 결과 레드머드를 치환하지 않은 경화체 보다 매우 치밀한 조직을 보이고 있으며, 재령 3일에서와 같이 많은 Na상은 볼 수 없으나 레드머드의 치환율이 높아질수록 더 많은 균열을 보여주고 있다. 또한, 재령 28일에서 좀 더 도드라진 균열을 보여주고 있으며, 조직 표면에 적층형식의 상이 보여 지고 있다.

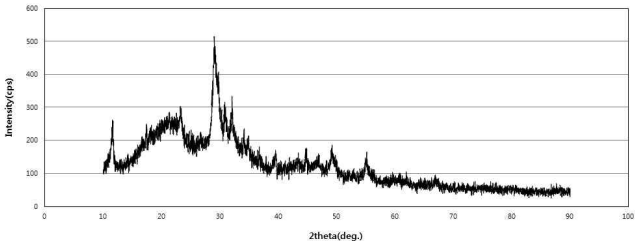
[표 2-21] 고로슬래그 기반 결합재의 SEM-EDS



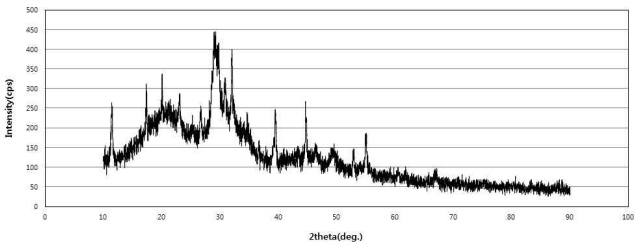
(라) XRD



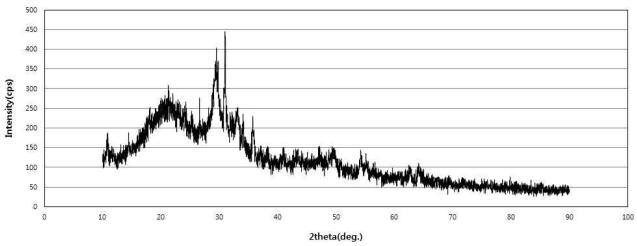
[그림 2-32] BFS-KOH-10% 시험체의 재령 28일 XRD



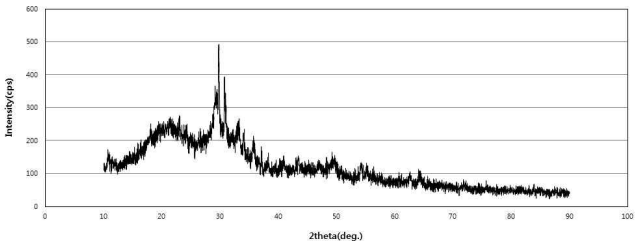
[그림 2-33] BFS-KOH-20% 시험체의 재령 28일 XRD



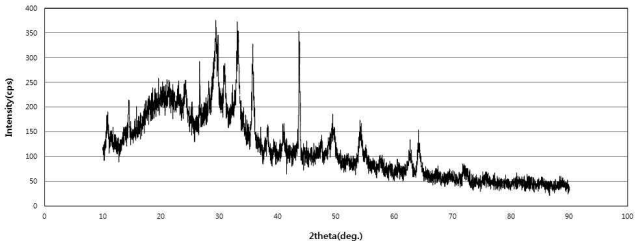
[그림 2-34] BFS-KOH-30% 시험체의 재령 28일 XRD



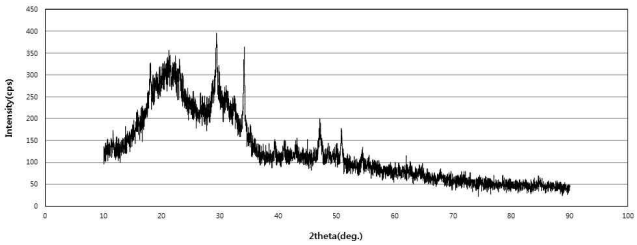
[그림 2-35] BFS-RM10%-KOH 시험체의 재령 28일 XRD



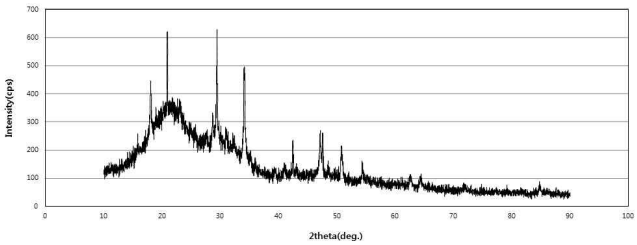
[그림 2-36] BFS-RM20%-KOH 시험체의 재령 28일 XRD



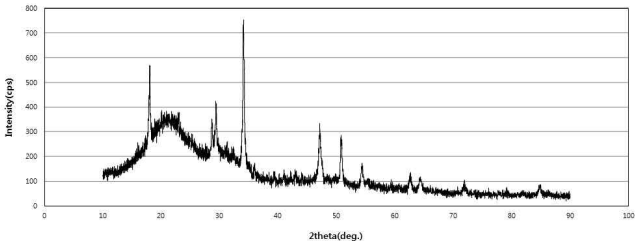
[그림 2-37] BFS-RM30%-KOH 시험체의 재령 28일 XRD



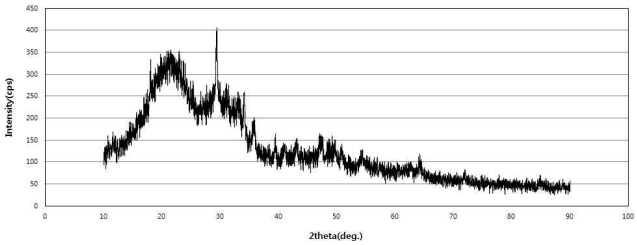
[그림 2-38] BFS-$Ca(OH)_2$-10% 시험체의 재령 28일 XRD



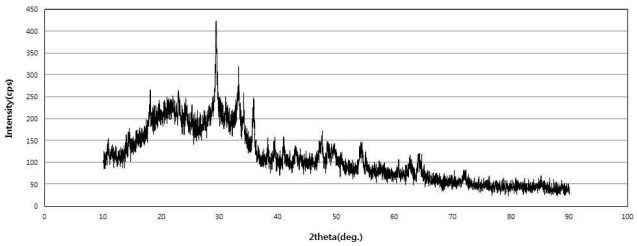
[그림 2-39] BFS-$Ca(OH)_2$-20% 시험체의 재령 28일 XRD



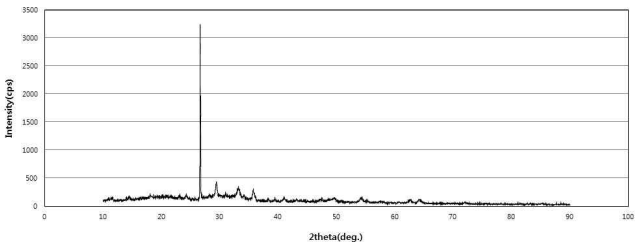
[그림 2-40] BFS-$Ca(OH)_2$-30% 시험체의 재령 28일 XRD



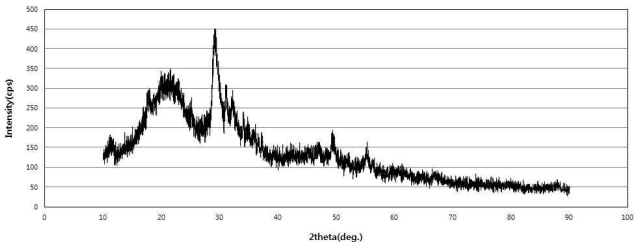
[그림 2-41] BFS-RM10%-$Ca(OH)_2$ 시험체의 재령 28일 XRD



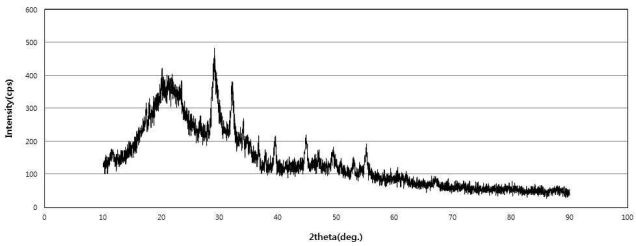
[그림 2-42] BFS-RM20%-$Ca(OH)_2$ 시험체의 재령 28일 XRD



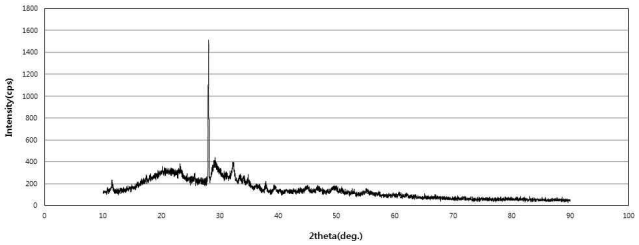
[그림 2-43] BFS-RM30%-$Ca(OH)_2$ 시험체의 재령 28일 XRD



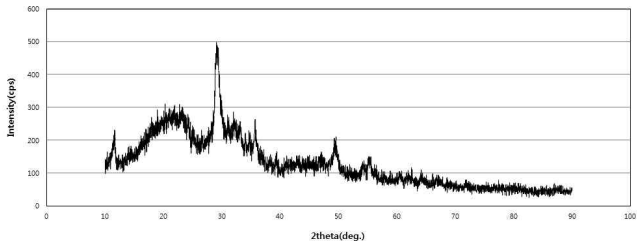
[그림 2-44] BFS-NaOH-10% 시험체의 재령 28일 XRD



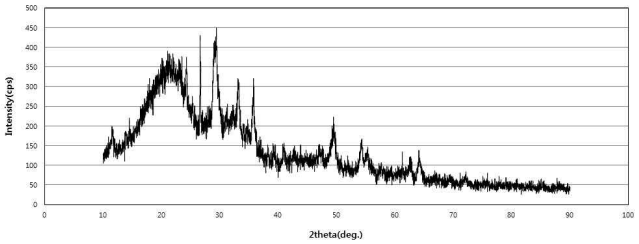
[그림 2-45] BFS-NaOH-20% 시험체의 재령 28일 XRD



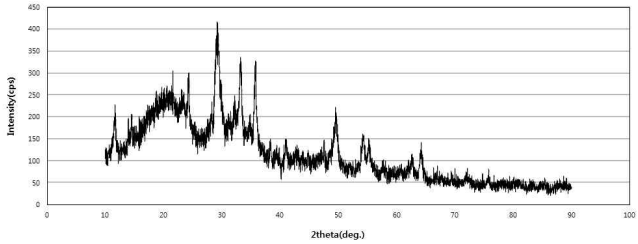
[그림 2-46] BFS-NaOH-30% 시험체의 재령 28일 XRD



[그림 2-47] BFS-RM10%-NaOH 시험체의 재령 28일 XRD



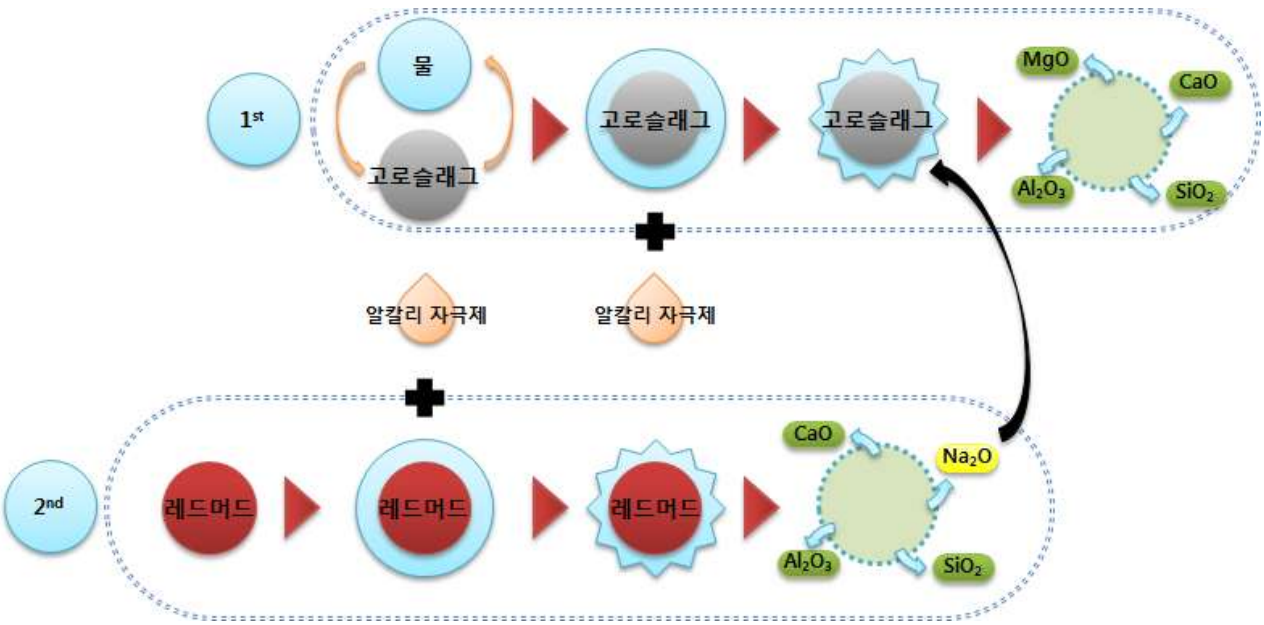
[그림 2-48] BFS-RM20%-NaOH 시험체의 재령 28일 XRD



[그림 2-49] BFS-RM30%-NaOH 시험체의 재령 28일 XRD

실험결과, KOH와 NaOH의 첨가율이 10% 일 때 안정적인 강도 발현 및 매우 높은 압축강도를 나타내었고, 플로우 콘 플로우 시험 결과에서도 100㎜ 이상의 값을 나타내었다. 또한, 본 실험을 통해 고로슬래그와 레드머드를 사용하였을 경우의 반응 메커니즘을 도출할 수 있었다.

고로슬래그와 레드머드를 사용한 결합재의 메커니즘은 알칼리 자극제에 의한 고로슬래그의 활성화가 1차로 일어난 후 레드머드에 함유되어 있는 Na_2O에 의해 2차로 미처 활성화 되지 않은 고로슬래그의 입자피막을 파괴하여 활성화 시켜 강도를 증진 시키나 KOH와 NaOH는 비빔 초기에 매우 빠른 반응을 하여 레드머드의 효과를 알수 없으나 $Ca(OH)_2$를 사용하였을 경우, 그 효과는 큰 것으로 판단된다.



[그림 2-50] 고로슬래그와 레드머드를 사용한 결합재의 메커니즘

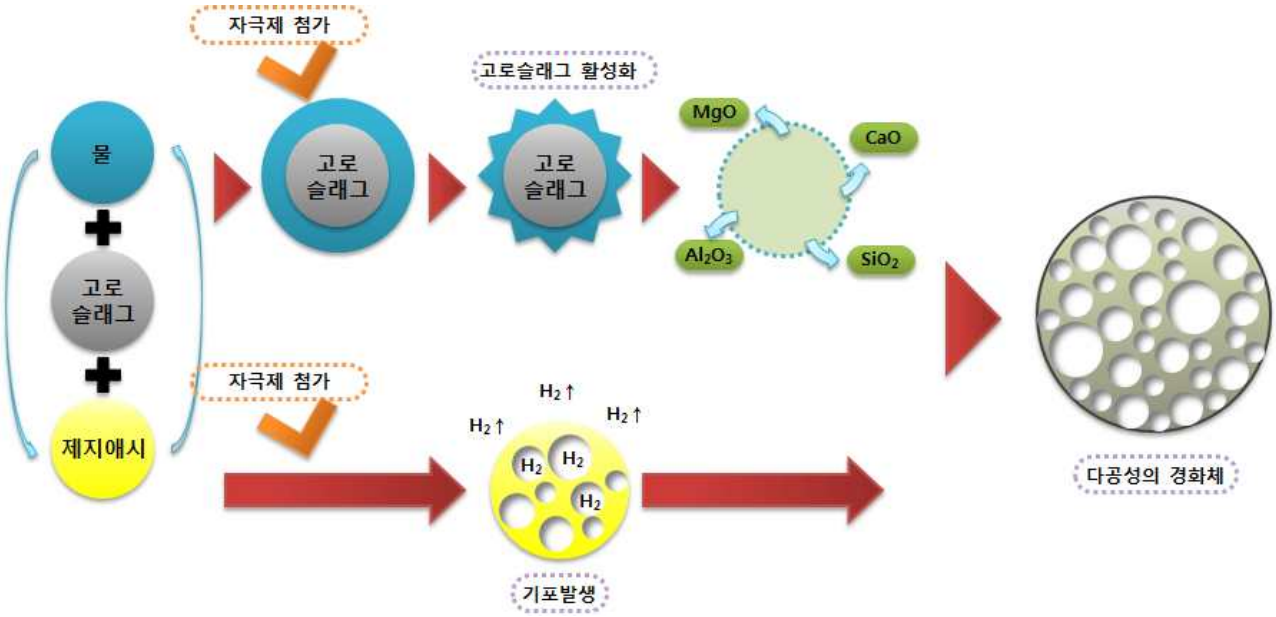
나. 제지애시를 사용한 경량 경화체

1) 자기발포성능 검증과 자극제의 종류 및 첨가율 선정

가) 실험개요

본 실험은 고로슬래그 기반의 결합재의 제지애시 치환에 따른 결합재의 발포성능을 검토하여 고로슬래그와 제지애시의 적정비율을 선정하기 위한 실험으로 본 연구에 앞서 연구된 결과를 토대로 실험을 계획하였다.

본 실험의 기본 개념은 제지애시와 알칼리 자극제의 반응으로 수소기체가 발생하고, 고로슬래그 기반 결합재의 점성으로 결합재 내에 수소기체를 가두어 기포를 형성하여 경량의 경화체를 제조하는 것이다.



[그림 2-51] 경량 경화체 제조 방법

나) 실험계획 및 방법

본 실험은 고로슬래그 기반에 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 (%)로 제지애시 치환율을 달리하여 알칼리 자극제로써 NaOH를 사용하였으며, 결합재 중량의 17.3%를 첨가하였다. W/B는 선행연구에서 통해 도출된 W/B 39%로 고정하였으며, 상대습도 80±5%, 온도 20±2℃의 항온항습에서 양생을 실시하였다. 시험항목으로는 결합재의 유동성을 검토하기 위해 플로우 콘 플로우를 측정하였으며, 경화체의 굳은 성상을 검토하기 위해 압축강도를 측정하였다. 또한, 제지애시의 발포성능에 의한 경량화 척도로써 경화체의 밀도와 배합에 의한 밀도를 계산하여 비교분석 하였다.

[표 2-22] 실험수준 및 요인

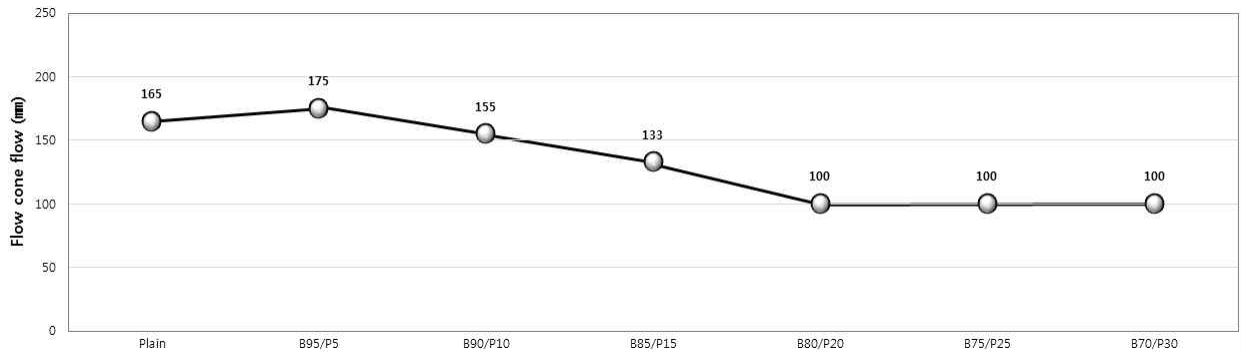
요인	수준
결합재 조건	• BFS[a)]+PA[b)]
제지애시 치환율	• 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 (%)
알칼리 자극제	• NaOH
알칼리 자극제 첨가율	• 17.3 (%)
W/B	• 39%
양생조건	• 상대습도 80±5%, 온도 20±2℃
시험항목	• 플로우 콘 플로우, 압축강도, 밀도

a) BFS : 고로슬래그, b) PA : 제지애시

다) 실험결과

(1) 플로우 콘 플로우

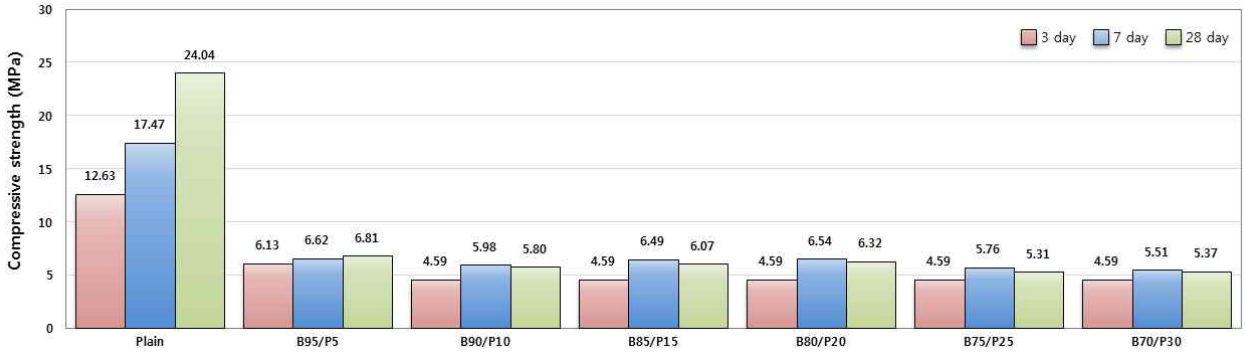
플로우 콘 플로우 시험결과, 제지애시를 5% 치환한 결합재의 플로우가 가장 큰 값을 나타내었으며, 제지애시의 비율이 높아질수록 낮은 플로우 값을 나타내었다. 하지만 제지애시에 의해 기포가 발생되면서 결합재가 부풀어 올라 압축몰드에 타설시 별도의 다짐 및 진동 없이도 고르게 타설되었다.



[그림 2-52] 고로슬래그 기반 결합재의 제지애시 치환율에 따른 플로우 콘 플로우

(2) 압축강도

압축강도 측정결과, 제지애시를 치환한 경화체의 압축강도는 Plain의 재령 3일 강도의 절반에 가까우며, 모든 수준에서 7MPa 이하의 강도를 나타내었다. 이중 고로슬래그와 제지애시의 비율이 95:5인 경화체의 재령 28일 강도가 제지애시를 사용한 경화체 중 가장 큰 강도를 나타내었다. 이는 경화제 내에 기포의 발생으로 낮은 강도를 나타낸 것이며, Plain과 비교할 때 매우 낮은 강도이나 본 연구개발의 목표인 3MPa보다 높은 압축강도를 나타내었다.



[그림 2-53] 고로슬래그 기반 결합재의 제지애시 치환율에 따른 압축강도

(3) 밀도

고로슬래그만을 사용한 Plain의 배합 밀도는 2.00 g/㎤로 밀도 감소율은 4.09 %로 나타났으며, 제지애시를 치환하였을 경우 제지애시를 10 % 치환한 경화체의 밀도가 1.12 g/㎤로 가장 낮으며, 배합 밀도보다 41.66 % 감소되었다. 하지만 압축강도와 함께 비교하였을 때 제지애시를 5 % 치환한 경화체가 압축강도가 가장 클 뿐만 아니라 경화체의 밀도도 10 % 치환한 경화체 다음으로 가벼운 것으로 나타났다.

[표 2-23] 고로슬래그 기반 결합재의 제지애시 치환율에 따른 밀도

구분	Plain	B95/P5	B90/P10	B85/P15	B80/P20	B75/P25	B70/P30
배합 밀도[a] (g/㎤)	2.00	1.91	1.91	1.91	1.91	1.90	1.90
경화체 밀도[b] (g/㎤)	1.92	1.16	1.12	1.21	1.23	1.17	1.17
감소율[c] (%)	4.09	39.37	41.66	36.72	35.26	38.31	38.31

a) 배합 밀도 : 사용재료의 밀도와 사용된 양(g)을 기준으로 도출한 값
b) 경화체 밀도 : 경화체의 부피와 무게를 측정하여 계산한 값을 나타냄
C) 감소율 : {(배합 밀도)-(경화체 밀도)}/(배합 밀도)×100



[사진 2-5] 제지애시 사용에 따른 공극 발생

실험결과, 고로슬래그와 제지애시의 비율이 95:5인 경화체의 압축강도와 경화체의 밀도 및 배합밀도에 대한 감소율이 가장 우수한 것으로 판단되며, 이후 알칼리 자극제의 종류(OH^-를 포함한 자극제) 및 첨가율에 따른 검토가 필요한 것으로 판단된다.

2) 제지애시에 적합한 알칼리 자극제 선정

가) 실험개요

본 실험은 고로슬래그와 제지애시를 사용한 결합재에 알칼리 자극제의 종류 및 첨가율에 따른 강도 및 반응특성을 검토를 위한 것으로 OH^-를 포함하고 있는 3종류의 알칼리 자극제를 사용하여 밀도 감소율과 경화체의 단면형상을 검토하고 본 연구개발에서 사용할 알칼리 자극제 및 첨가율을 선정하기 위한 실험이다.

나) 실험계획 및 방법

본 실험은 선행실험을 통해 도출된 제지애시의 치환율을 5%로 고정하여 알칼리 자극제는 OH^-를 포함하고 있는 KOH, $Ca(OH)_2$, NaOH를 사용하여 결합재 중량의 2.5, 7.5, 12.5, 17.5, 22.5, 27.5, 32.5, 37.5 (%) 총 8수준으로 첨가하여 실험을 실시하였다. W/B는 선행실험 보다 다소 높은 40%로 고정하였다. 시험항목으로는 경화체의 굳은 성상을 검토하기 위해 압축강도를 측정하였으며, 제지애시의 발포성능에 의한 경량화 척도로써 배합밀도와 경화체의 밀도를 비교분석 하였다. 또한, 미세조직의 관찰 및 분석을 위해 SEM 촬영과 EDS 분석을 하였다.

[표 2-24] 실험요인 및 수준

실험요인	실험수준
결합재 조건	• BFS[a)]+PA[b)]
제지애시 치환율	• 5 (wt.%)
알칼리 자극제	• KOH, $Ca(OH)_2$, NaOH
알칼리 자극제 첨가율	• 2.5, 7.5, 12.5, 17.5, 22.5, 27.5, 32.5, 37.5 (wt.%)
W/B	• 40 %
양생조건	• 상대습도(80±5)%, 온도(20±2)℃
시험항목	• 압축 및 휨강도, 밀도, SEM, EDS

a) BFS : 고로슬래그, b) PA : 제지애시

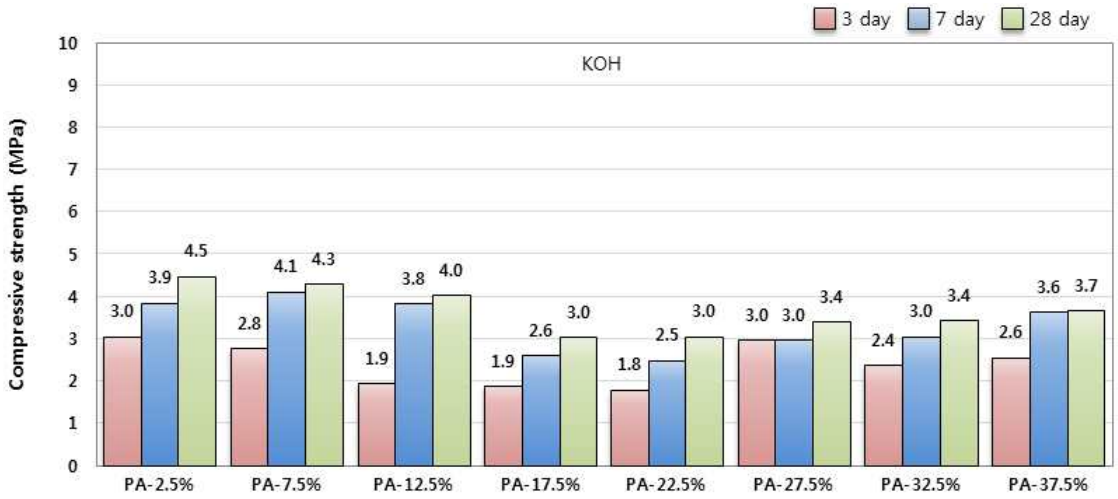
다) 실험결과

(1) 압축강도

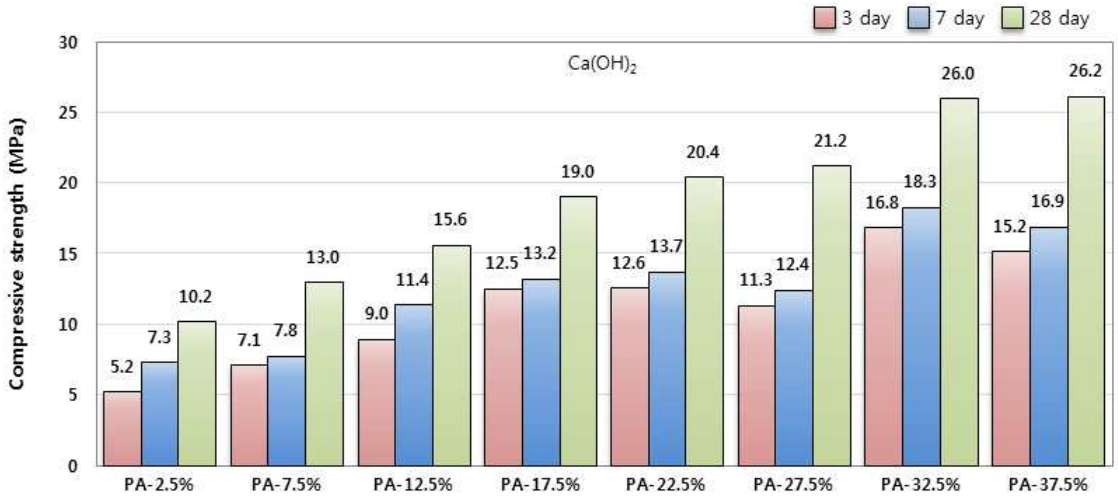
압축강도 측정결과, KOH와 NaOH를 첨가한 경화체는 10 MPa이하의 압축강도를 나타내었으며, KOH는 17.5%까지 참가율이 증가함에 따라 강도가 저하되는 경향을 나타내나 이후 첨가율에 따라 강도가 증진되는 경향을 나타내었다. 또한, NaOH는 2.5%를 첨가한 경화체의 강도가 가장 높았으며, 7.5~17.5%는 유사한 강도를 나타내고 이후 자극제의 첨가율에 따라 강도가 높아지는 경향을 나타내었다. 이는 비빔과정 KOH와 NaOH의 사용량이 많이짐에 따라 비빔초기에 기포가 다량 발생하는데, 이때 일정시간을 유지하여 비빔을 지속하기 때문에 발생된 기포가 결합재 외부로 방출되어 나타난 결과인 것으로 판단된다.

반면, $Ca(OH)_2$를 사용한 경화체는 모든 수준에서 KOH와 NaOH를 사용한 경화체의 압축

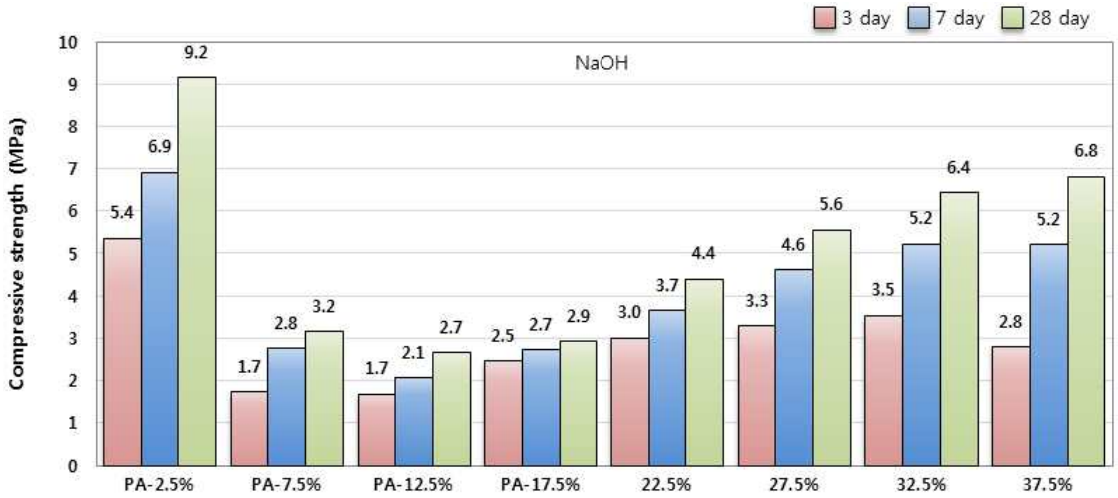
강도보다 높은 강도를 나타내고, 첨가율에 따라 강도가 커지는 경향을 나타내었다.



[그림 2-54] 고로슬래그 기반 경량 경화체의 KOH 첨가율에 따른 압축강도



[그림 2-55] 고로슬래그 기반 경량 경화체의 $Ca(OH)_2$ 첨가율에 따른 압축강도



[그림 2-56] 고로슬래그 기반 경량 경화체의 NaOH 첨가율에 따른 압축강도

(2) 밀도

밀도 측정결과, KOH를 첨가한 경화체의 밀도는 17.5%와 22.5% 첨가하였을 경우가 가장 낮은 밀도를 나타내었으며, $Ca(OH)_2$는 2.5%를 첨가한 경화체의 밀도가 가장 낮으며 밀도 감소율은 7.74%로 KOH와 NaOH와 달리 매우 낮은 감소율을 나타내었다. NaOH는 12.5%를 첨가한 경화체의 밀도가 가장 낮으며 KOH를 17.5% 첨가한 경화체와 유사한 밀도를 나타내었다. 또한, NaOH를 첨가한 경화체를 건조 후 밀도를 측정한 결과, 7.5%를 첨가한 경화체의 밀도가 0.84g/㎤로 가장 낮으며, 이후 12.5%가 0.88g/㎤을 나타내었다.

[표 2-25] 고로슬래그 기반 결합재의 알칼리 자극제의 종류 및 첨가율에 따른 밀도

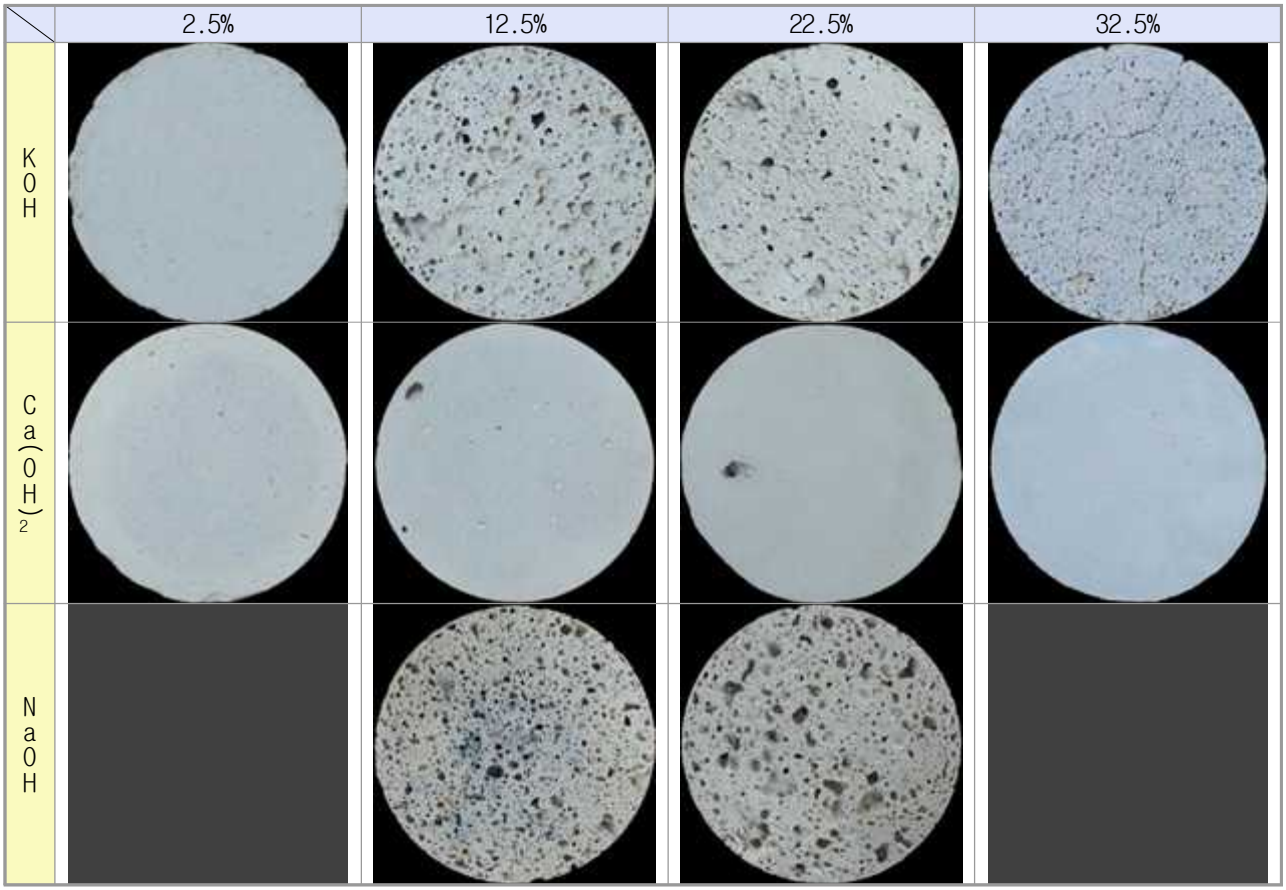
구분	KOH(항온항습)							
	2.5%	7.5%	12.5%	17.5%	22.5%	27.5%	32.5%	37.5%
배합 밀도[a] (g/㎤)	1.88	1.89	1.89	1.90	1.90	1.90	1.91	1.91
경화체 밀도[b] (g/㎤)	1.59	1.25	1.21	1.13	1.13	1.19	1.17	1.26
감소율c) (%)	15.62	33.97	35.84	40.61	40.45	37.47	38.57	34.15
구분	$Ca(OH)_2$(항온항습)							
배합 밀도 (g/㎤)	1.88	1.89	1.90	1.91	1.92	1.93	1.94	1.95
경화체 밀도 (g/㎤)	1.74	1.76	1.78	1.80	1.81	1.83	1.87	1.87
감소율 (%)	7.74	6.92	6.38	5.80	5.87	4.95	3.68	3.98
구분	NaOH(항온항습)							
배합 밀도 (g/㎤)	1.88	1.89	1.90	1.90	1.91	1.92	1.92	1.93
경화체 밀도 (g/㎤)	-	1.16	1.13	1.22	-	-	-	-
감소율 (%)	-	38.64	40.45	35.93	-	-	-	-
구분	NaOH(건조)							
경화체 밀도 (g/㎤)	-	0.84	0.88	0.95	1.12	-	-	-
감소율 (%)	-	55.57	53.62	50.11	41.37	-	-	-

a) 배합 밀도 : 사용재료의 밀도와 사용된 양(g)을 기준으로 도출한 값

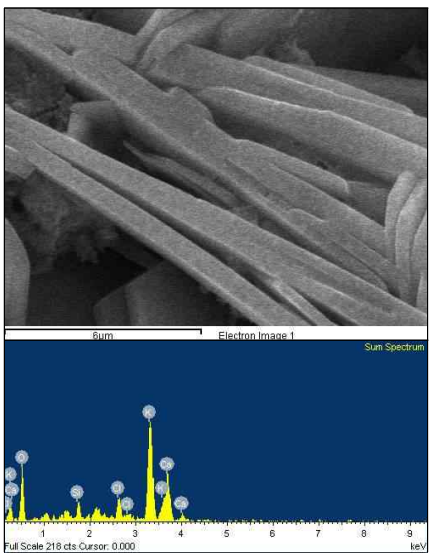
b) 경화체 밀도 : 경화체의 부피와 무게를 측정하여 계산한 값을 나타냄

C) 감소율 : {(배합 밀도)-(경화체 밀도)}/(배합 밀도)×100

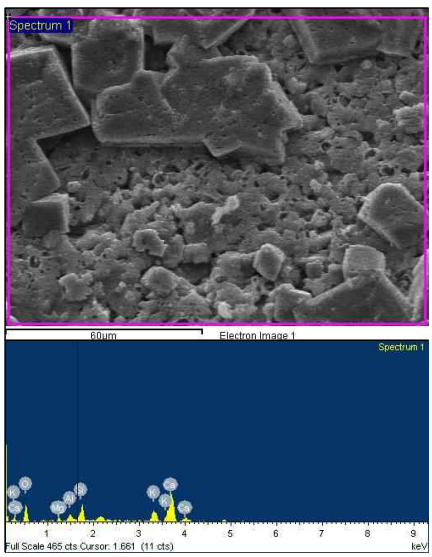
[표 2-26] 고로슬래그 기반 결합재의 알칼리 자극제의 종류 및 첨가율에 따른 단면형상



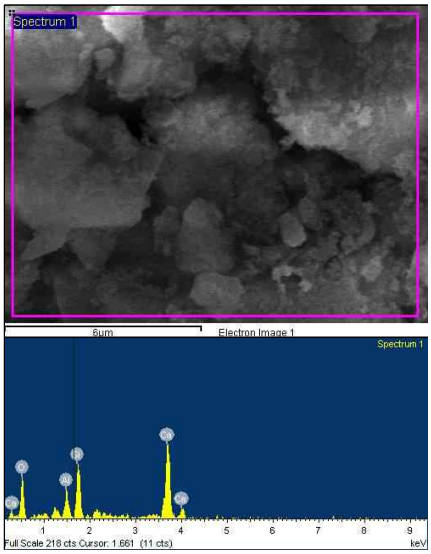
(3) EDS



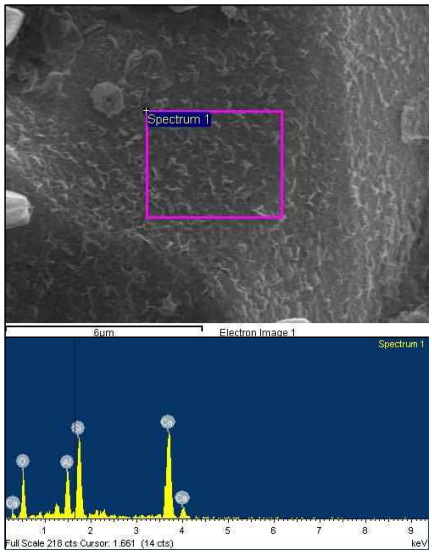
[표 2-27] 재령 28일의 KOH를 12.5%첨가한 경량 경화체의 EDS 분석



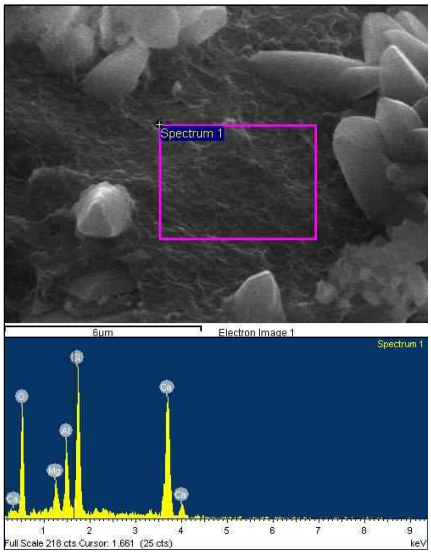
[표 2-28] 재령 7일의 KOH를 17.5%첨가한 경량 경화체의 EDS 분석



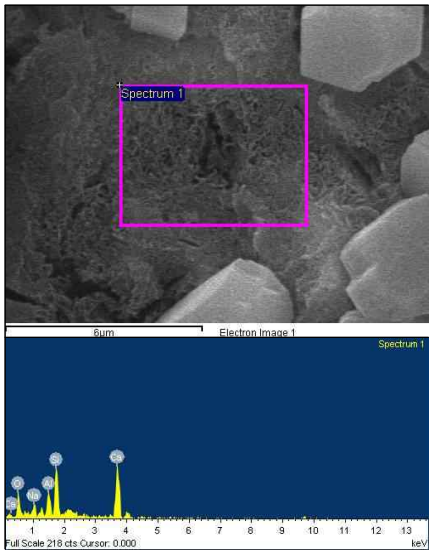
[표 2-29] 재령 7일의 $Ca(OH)_2$를 2.5%첨가한 경량 경화체의 EDS 분석



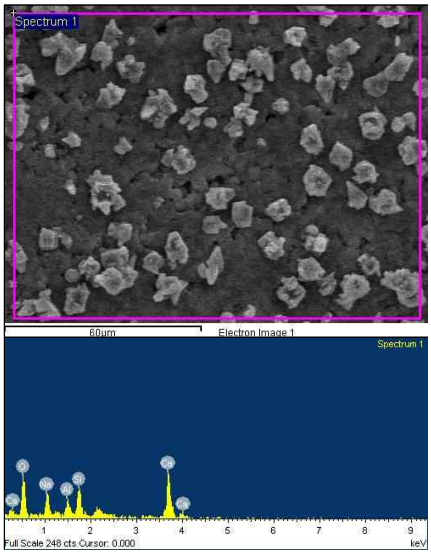
[표 2-30] 재령 7일의 $Ca(OH)_2$를 12.5%첨가한 경량 경화체의 EDS 분석



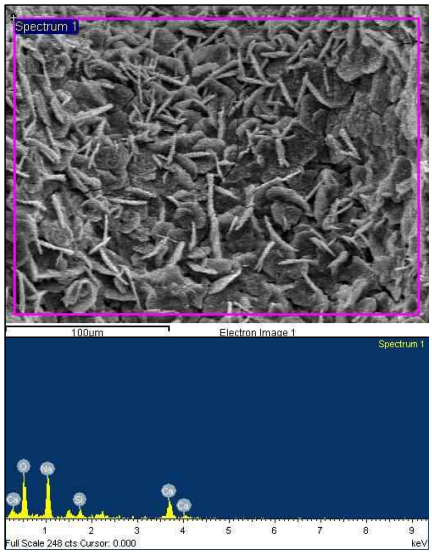
[표 2-31] 재령 7일의 $Ca(OH)_2$를 2.5%첨가한 경량 경화체의 EDS 분석



[표 2-32] 재령 3일의 NaOH를 2.5%첨가한 경량 경화체의 EDS 분석



[표 2-33] 재령 3일의 NaOH를 12.5%첨가한 경량 경화체의 EDS 분석



[표 2-34] 재령 3일의 NaOH를 22.5%첨가한 경량 경화체의 EDS 분석

실험 결과, KOH와 NaOH를 사용한 경화체의 밀도가 현저하게 감소율이 증가하였다. 또한, KOH 보다 NaOH의 사용량이 적었을 때 가장 낮은 밀도를 나타내었다. 따라서 본 연구 개발에서는 결합재로써 고로슬래그와 제지애시를 95:5 비율로, 알칼리 자극제는 NaOH를 12.5%로 선정하였다.

3) 제지애시에 적합한 알칼리 자극제의 팽창률 측정

가) 실험개요

본 실험은 무시멘트계 친환경 바인더에 적합한 알칼리 자극제를 선정하기 위해 알칼리 자극제의 종류와 치환율에 따른 팽창률을 측정하기 위한 실험이며 주 결합재로는 고로슬래그와 제지애시를 사용하였다. 알칼리 자극제를 KOH, $Ca(OH)_2$, NaOH, K_2SiO_3, Na_2SO_4 총 5가지로 고정하였다. 시험 항목은 알칼리 자극제 종류에 따른 팽창율을 측정하였다.

[표 2-35] 실험요인 및 수준

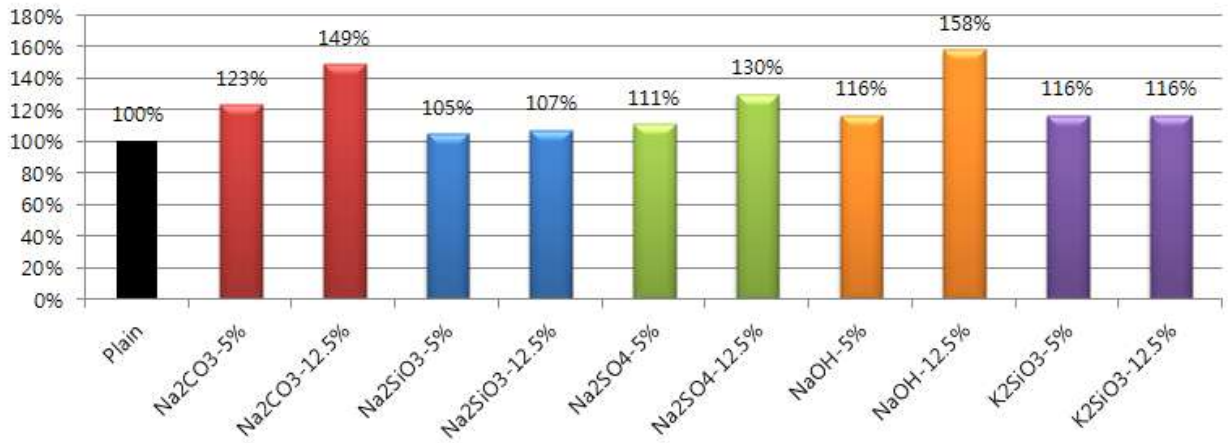
실험요인	실험수준
결합재 조건	• BFS[a)]+PA[b)]
제지애시 치환율	• 5 (wt.%)
알칼리 자극제	• KOH, $Ca(OH)_2$, NaOH, K_2SiO_3, Na_2SO_4
알칼리 자극제 첨가율	• 5, 12.5 (wt.%)
W/B	• 40 %
양생조건	• 상대습도(80±5)%, 온도(20±2)℃
시험항목	• 팽창율

a) BFS : 고로슬래그, b) PA : 제지애시

나) 실험결과

(1) 팽창률 측정

제지애시 발포에 적합한 알칼리 자극제를 선정하기 위해 알칼리 자극제의 종류별 치환율에 따른 팽창율을 나타낸 것으로, 전체적으로 Plain에 비해 높은 팽창율을 나타냈다. NaOH-12.5%가 158 %로 가장 높은 팽창율을 나타냈으며, 이는 NaOH의 반응성이 활발하여 많은 기포를 발생시켜 높은 팽창율을 나타낸 것으로 판단된다. 또한 Na_2SiO_3-5%가 가장 낮은 105 %를 나타내었다.



[그림 2-57] 알칼리 자극제 종류와 치환율에 따른 팽창율

다. 경량 경화체의 형상보완

1) 경량 경화체의 형상유지에 적합한 재료 선정

가) 실험개요

본 실험은 알칼리 자극제의 종류 및 첨가율에 따른 제지애시의 발포성능과 강도특성을 검토하고 제지애시와 알칼리 자극제의 반응성을 조절하기 위한 실험으로 주 결합재로는 고로슬래그와 제지애시를 사용하였다. 고로슬래그와 제지애시의 비율은 95:5로 고정하였고, 알칼리 자극제로써 결합재 100 g 기준으로 NaOH를 12.5 % 첨가하여 Plain을 설정하였다. 그리고 Na_2SiO_3, Na_2SO_4, Na_2CO_3 등의 알칼리 자극제를 NaOH에 5, 10, 15 (%) 등 3수준으로 첨가하였다.

나) 실험계획 및 방법

본 실험의 수준은 [표 2-36]에 나타내었다. 주 재료는 산업부산물인 고로슬래그이며, 경량성을 부여하기 위하여 사용한 재료로 제지애시를 사용하였다. 결합재인 고로슬래그와 제지애시의 비율은 95:5로 고정하였고, 알칼리 자극제로써 결합재 100 g을 기준으로 NaOH를 12.5 % 첨가하여 Plain으로 설정하였다. 그리고 Na_2SiO_3, Na_2SO_4, Na_2CO_3 등의 알칼리 자극제를 NaOH에 5, 10, 15 (%) 등 3수준으로 첨가하였다. W/B는 0.40이고, 양생조건은 온도 20±2 ℃, 상대습도 80±5 %의 항온항습에서 양생을 실시하였다.

[표 2-36] 실험수준 및 요인

실험요인	실험수준
결합재 조건	• BFS[a)]+PA[b)]
제지애시 치환율	• 5 (wt.%)
알칼리 자극제	• NaOH, Na_2SiO_3, Na_2SO_4, Na_2CO_3, K_2SiO_3
알칼리 자극제 첨가율	• NaOH : 12.5 (wt.%) • Na_2SiO_3, Na_2SO_4, Na_2CO_3, K_2SiO_3 : 0, 5, 10, 15 (wt.%)
W/B	• 40 %
양생조건	• 상대습도(80±5)%, 온도(20±2)℃
시험항목	• 압축 및 휨강도, 밀도

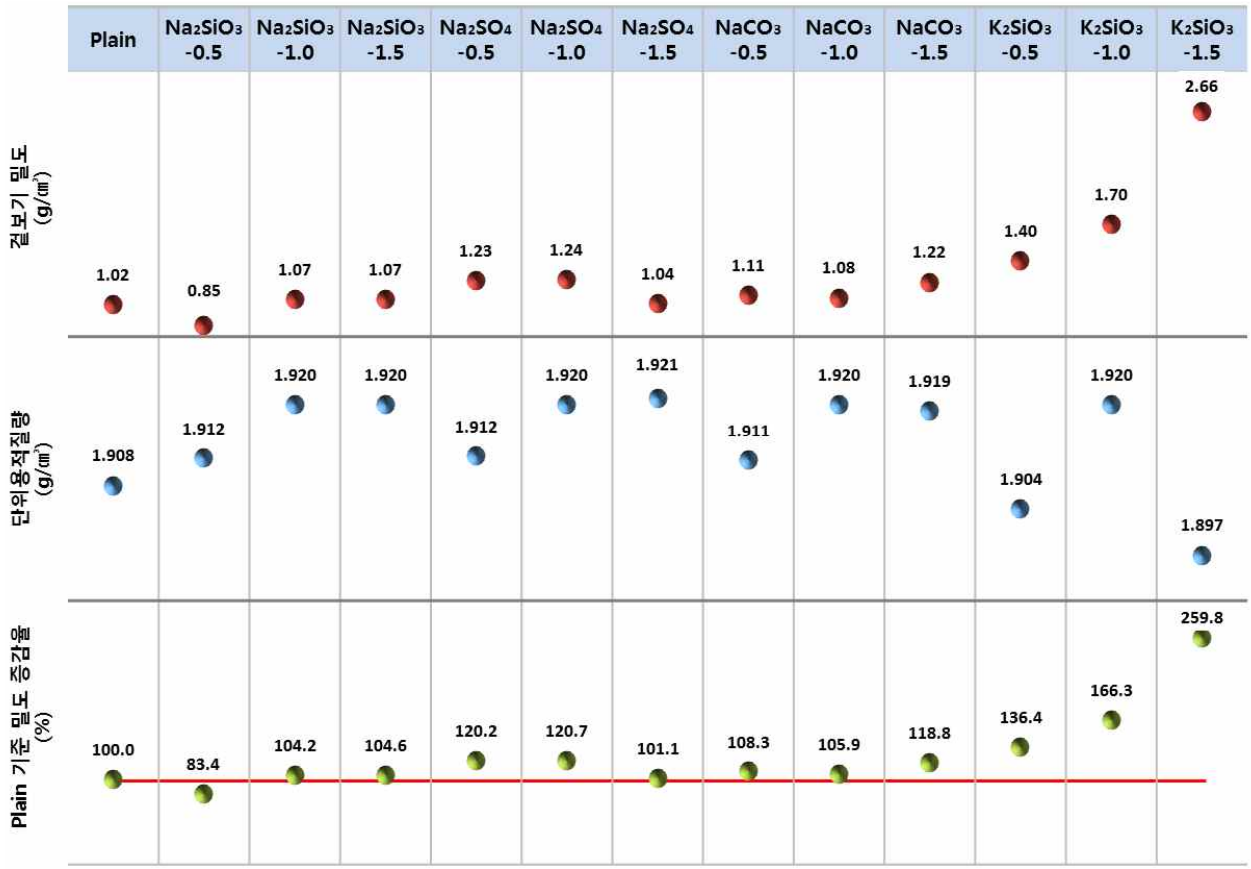
a) BFS : 고로슬래그, b) : 제지애시

다) 실험결과

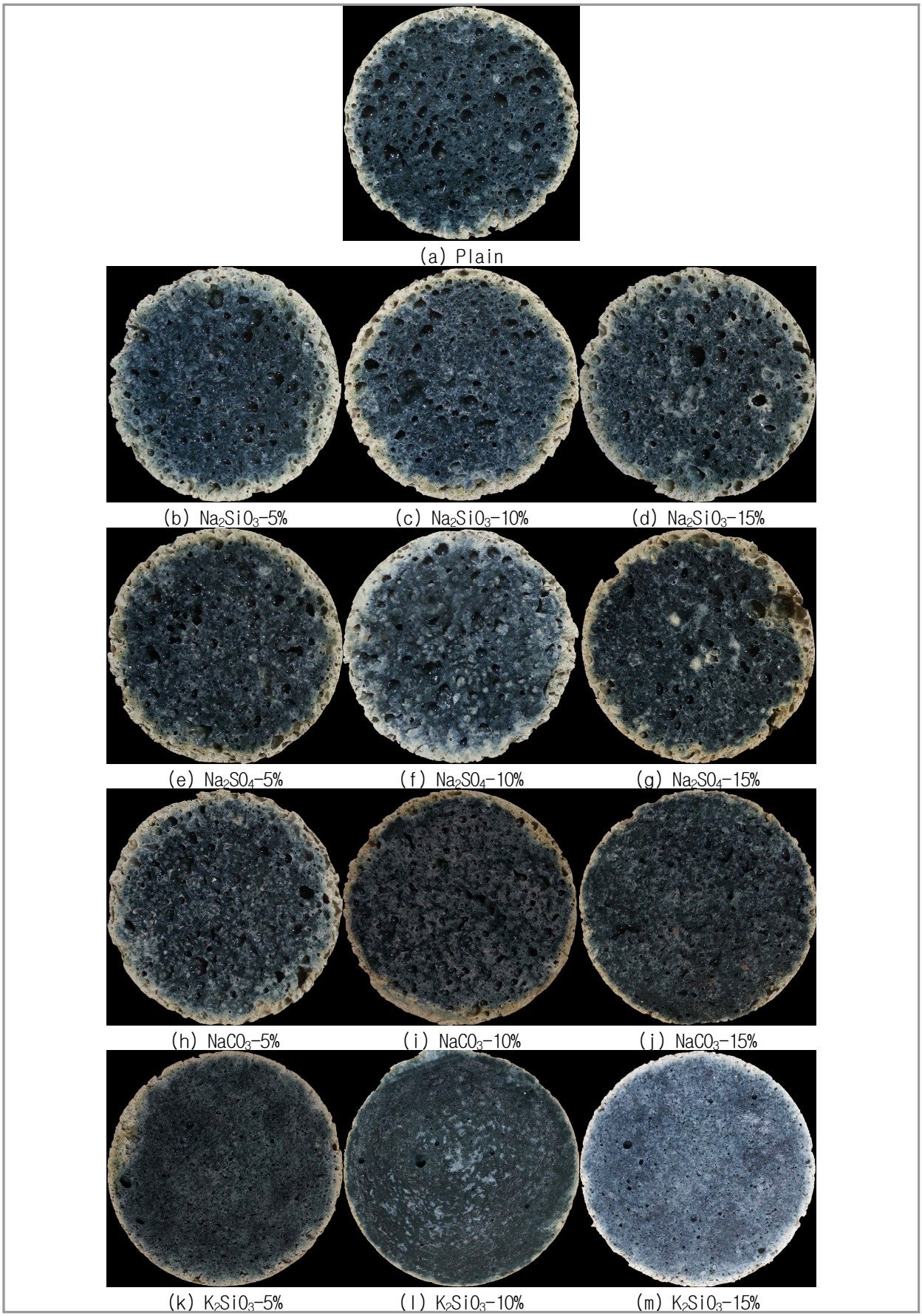
(1) 밀도

[그림 2-58]은 겉보기 밀도 시험결과를 나타낸 것으로, 제지애시와 알칼리 자극제의 반응으로 수소기체가 발생하여 시험체의 겉보기 밀도가 감소된 것을 확인 할 수 있었다. 사용재료의 밀도와 사용량으로 단위용적질량을 계산하였을 때에 Plain이 2.0 g/㎤으로 나타낸 것에 비해 Plain의 겉보기 밀도가 1.0 g/㎤으로 단위용적질량에서 약 50 % 밀도가 감소하였다. 한편, Plain보다 낮은 밀도를 나타낸 경화체는 Na_2SiO_3-0.5이며, Na_2SO_4-0.5의 겉보기밀도가 가장 큰 것으로 나타났다.

한편 [그림 2-59]에 나타낸 경화체의 단면형상을 살펴보면 Plain과 Na_2SiO_3, Na_2SO_4, $NaCO_3$를 사용한 경화체의 단면형상에는 크고 작은 공극이 형성되어 있는 것을 확인할 수 있으나, K_2SiO_3는 5 % 사용한 경화체에서부터 15 % 사용한 경화체까지 형성된 공극의 양은 다소 다르지만, 육안으로 살펴보았을 때 전체적으로 공극의 분포가 불규칙하고, 매우 적은 공극을 형성한 것을 알 수 있었다.



[그림 2-58] 경량 경화체의 알칼리 자극제 종류 및 첨가율에 따른 겉보기 밀도

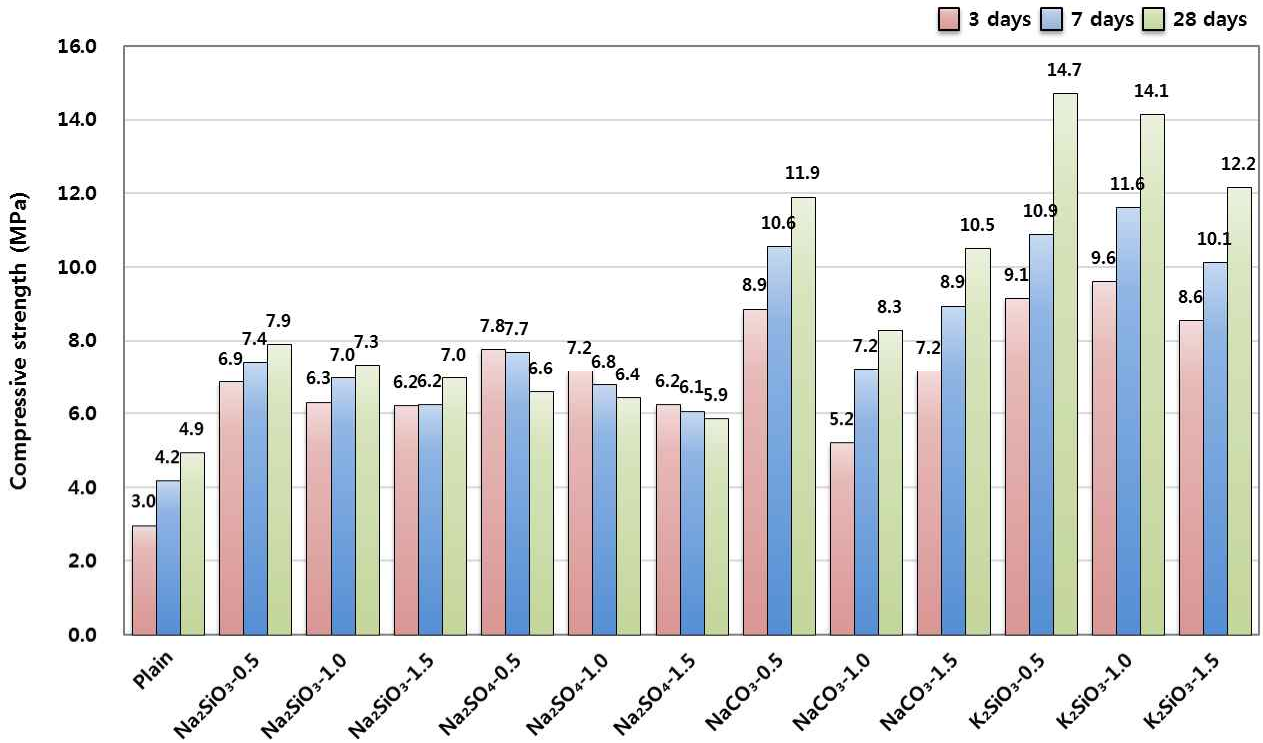


[그림 2-59] 경량 경화체의 알칼리 자극제 종류 및 첨가율에 따른 공시체의 단면형상

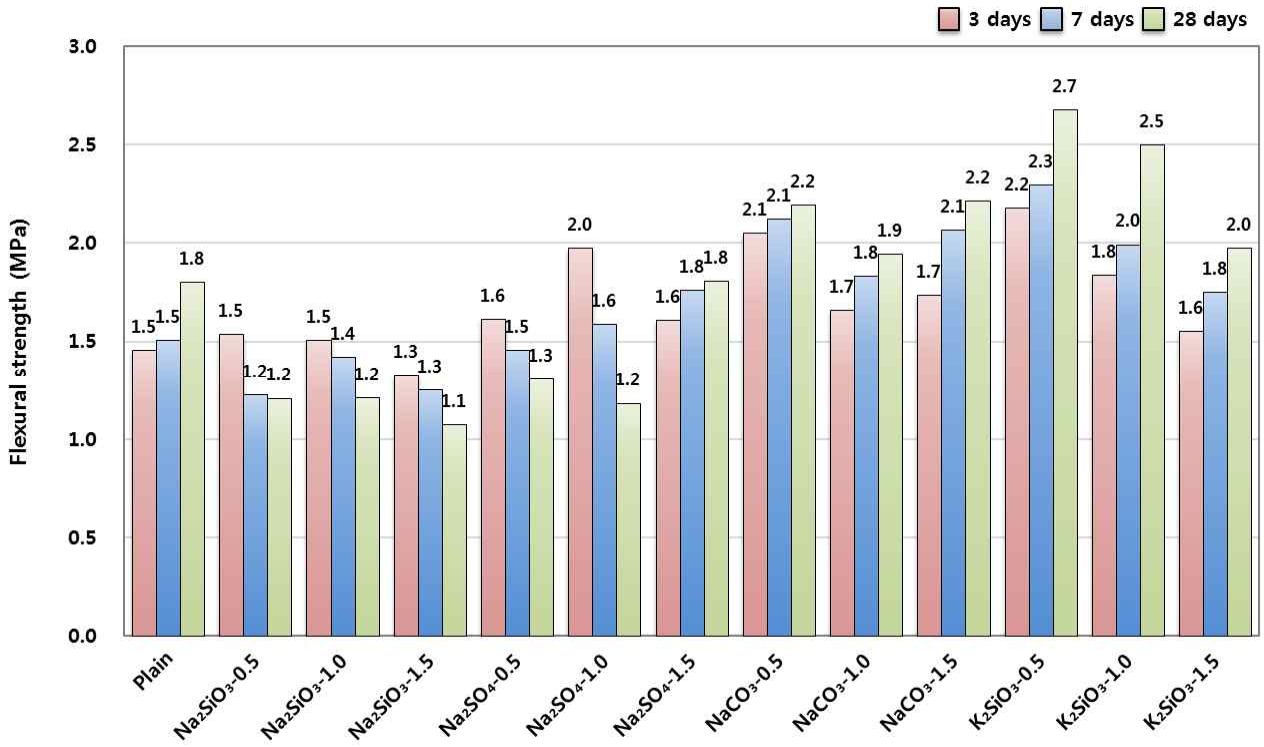
(2) 압축 및 휨 강도

[그림 2-60]은 압축강도 시험결과를 나타낸 것으로 Plain의 경우 재령 28일의 강도가 약 5MPa 수준이었고, 알칼리 자극제를 추가로 첨가하였을 경우 첨가율에 따라 강도가 저하되는 경향을 나타내었으며, 재령 3일에서 6 MPa 이상의 강도 발현을 하였다. 특히, K_2SiO_3를 사용한 경화체의 강도발현이 매우 우수하였는데, 첨가량 증가에 따른 강도는 저하되는 경향을 나타내었다. 한편, Na_2SiO_3와 Na_2SO_4를 사용한 경화체는 첨가량에 따라 강도가 저하되는 경향을 나타내었으나 Plain보다 높은 강도를 나타내었으며, Na_2SO_4를 사용한 경화체와 $NaCO_3$-1.5는 재령에 따라 강도가 저하되는 경향을 나타내었다.

휨 강도 시험결과는 [그림 2-61]에 나타내었는데, 압축강도의 경향과 매우 유사하였으며, 목표 휨 강도 2 MPa에 만족하는 경화체는 K_2SiO_3를 사용한 경화체와 Na_2CO_3를 사용한 경화체 뿐이었다. 또한, Na_2SiO_3를 사용한 경화체는 재령일에 따라 강도가 저하되는 경향을 나타내었는데, 이는 제지애시와 알칼리 자극제의 반응으로 수소기체가 발생하는데, 종결 이후 강도를 발현함에 따라 온도의 영향을 크게 받는 수소의 팽창압에 의해서 경화체 내에 미소 균열이 발생하여 나타난 결과인 것으로 판단된다.



[그림 2-60] 경량 경화체의 알칼리 자극제 종류 및 첨가율에 따른 압축강도



[그림 2-61] 경량 경화체의 알칼리 자극제 종류 및 첨가율에 따른 휨 강도

2) 형상유지에 적합한 재료의 사용량 선정

가) 실험개요

Na_2SiO_3를 사용한 경량 경화체의 형상유지의 정도에 따른 사용량을 선정하기 위한 실험으로 겉보기 밀도가 Plain보다 낮고 비교적 안정적인 강도와 강도증진을 나타낸 Na_2SiO_3를 추가로 분석하기 위해 고로슬래그 기반 경량 경화체의 알칼리 자극제로써 NaOH에 Na_2SiO_3를 치환하여 경량 경화체의 강도증진과 기포형성의 검토를 통해 NaOH와 Na_2SiO_3의 비율을 선정하기 위해 실시하였다.

나) 실험계획 및 방법

본 실험의 수준 및 요인은 고로슬래그와 제지애시의 사용량을 95 : 5으로 고정하였고, 알칼리 자극제의 첨가율을 결합재 중량 100 g을 기준으로 12.5 %를 고정하였다. NaOH와 Na_2SiO_3는 분말형태를 사용하여 이들의 비율은 NaOH : Na_2SiO_3 = 9 : 1, 8 : 2, 7 : 3, 6 : 4, 5 : 5, 4 : 6 등 총 6수준으로 중량비로써 Na_2SiO_3의 치환율을 달리하였다. W/B는 0.40이고, 양생조건은 온도 20±2 ℃, 상대습도 80±5 %의 항온항습조건에서 양생을 실시하였다. 시험항목은 pH 농도와 겉보기 밀도, 압축 및 휨 강도 등으로 4가지 실험을 실시하였고, pH 농도의 경우 배합수와 알칼리 자극제를 첨가한 후 20 ℃로 안정된 뒤에 측정하였다.

[표 2-37] 실험수준 및 요인

실험요인	실험수준
결합재 조건	• BFS[a)]+PA[b)]
제지애시 치환율	• 5 (wt.%)
알칼리 자극제	• NaOH, Na_2SiO_3
알칼리 자극제 첨가율	• 12.5 (wt.%)
Na_2SiO_3 치환율	• 1, 2, 3, 4, 5, 6 (wt.%)
W/B	• 40 %
양생조건	• 상대습도(80±5)%, 온도(20±2)℃
시험항목	• pH, 압축 및 휨강도, 밀도

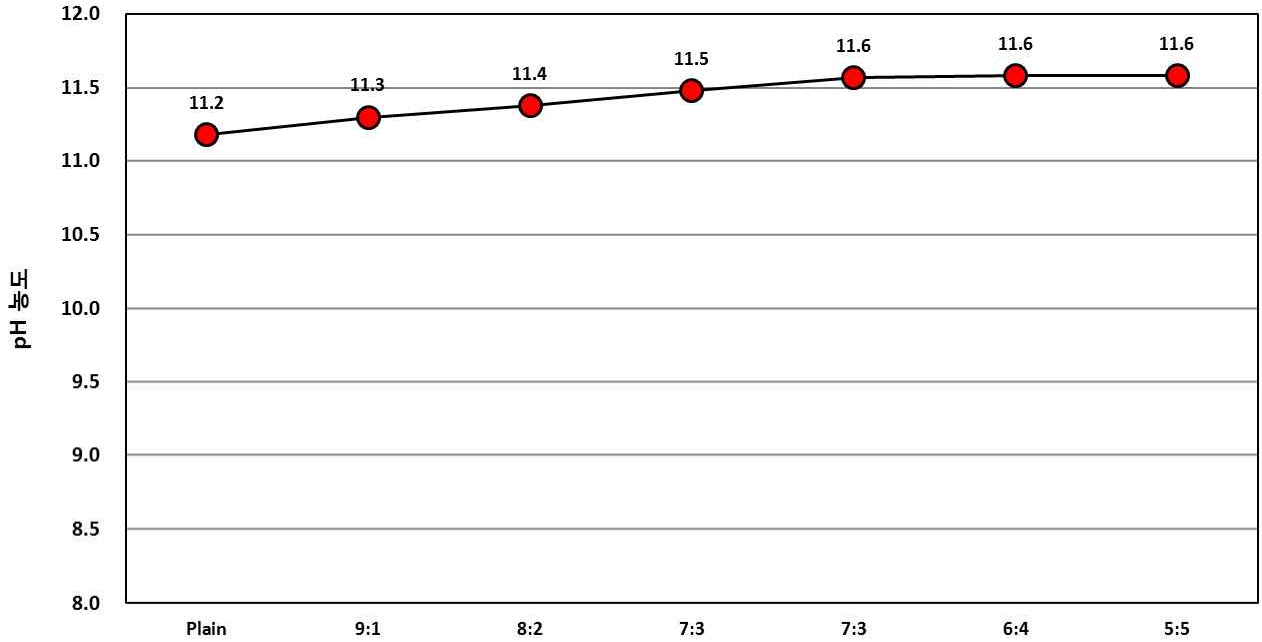
a) BFS : 고로슬래그, b) PA : 제지애시

다) 실험결과

(1) pH 농도

알칼리 자극제의 비율에 따른 배합수의 pH 농도를 측정한 결과는 [그림 2-62]에 나타낸 것과 같이 배합수 모두 pH 11 이상의 높은 알칼리성을 나타내었다. 그 값은 또한, Na_2SiO_3의 사용량이 증가함에 따라 pH 농도 또한 증가하는 경향을 나타내었는데, Plain이 11.2로 가장 낮은 농도이고, Na_2SiO_3의 사용량이 증가함에 따른 pH 농도는 각각 11.3, 11.4, 11.5, 11.6, 11.6, 11.6으로 Na_2SiO_3의 이온화로 나트륨이온이 증가하여 높은 pH 농도를 나타낸 것으로 판단된다.

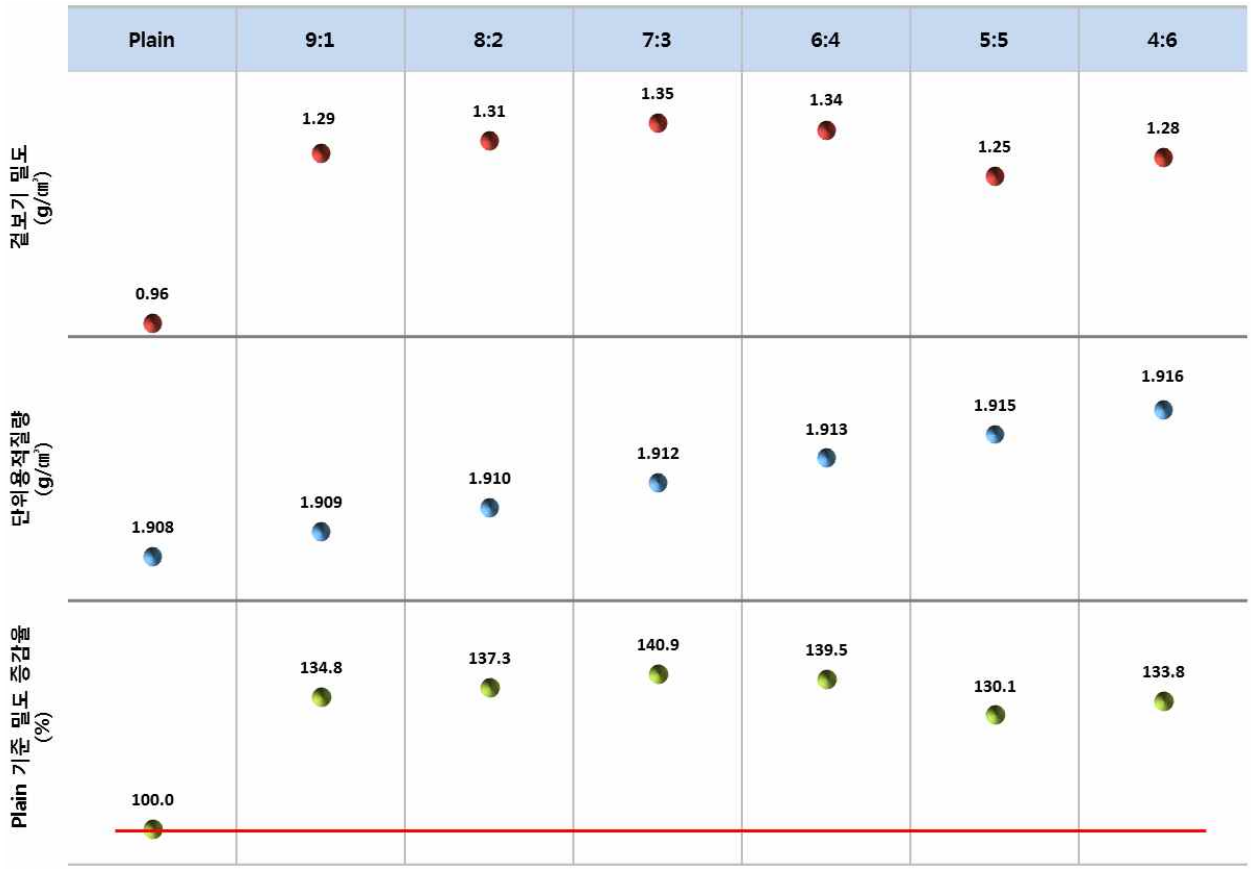
따라서, NaOH뿐만 아니라 Na_2SiO_3의 사용은 고로슬래그가 활성화할 수 있는 조건을 만족할 수 있을 것으로 판단된다.



[그림 2-62] 알칼리 자극제의 비율(NaOH : Na_2SiO_3)에 따른 pH 농도

(2) 밀도

밀도 시험결과는 [그림 2-63]에 나타낸 것과 같이 단위용적질량을 살펴보았을 때 Na_2SiO_3의 높은 밀도로 Na_2SiO_3의 사용량이 증가함에 따라 단위용적질량도 증가하는 경향을 나타내었으며, Plain의 단위용적질량은 1.908 g/㎤이며, Na_2SiO_3의 사용량이 증가함에 따라 1.909, 1.910, 1.912, 1.913, 1.915, 1.916 (g/㎤)로 매우 미미하게 단위용적질량이 증가하는 것을 알 수 있었다. 겉보기 밀도는 Plain의 밀도가 0.96 g/㎤으로 가장 경량인 것으로 나타났으며, Na_2SiO_3의 사용량이 증가함에 따라 NaOH와 Na_2SiO_3의 비율이 7 : 3까지는 단위용적질량과 마찬가지로 겉보기 밀도가 증가하는 경향을 나타내었지만, 이후 사용량의 증가로 겉보기 밀도가 다소 감소하는 것으로 나타났다. 이는 NaOH의 사용량으로 수소 발생량이 다소 감소하였지만, 제지애시와 NaOH의 반응으로 발생하는 열이 감소하여 응결이 늦어지고 결합재가 굳지 않고 유지되면서 그 시간동안 수소가 지속적으로 발생되어 밀도가 감소된 것으로 판단된다.

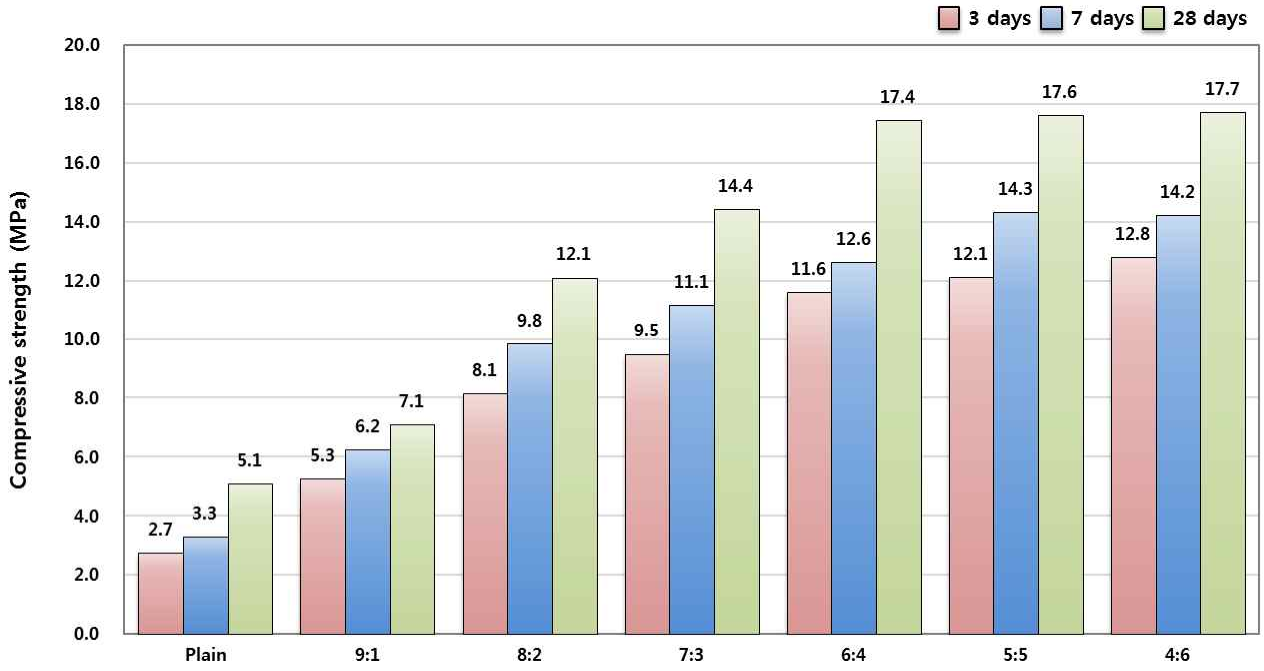


[그림 2-63] 알칼리 자극제의 비율(NaOH : Na_2SiO_3)에 따른 겉보기 밀도

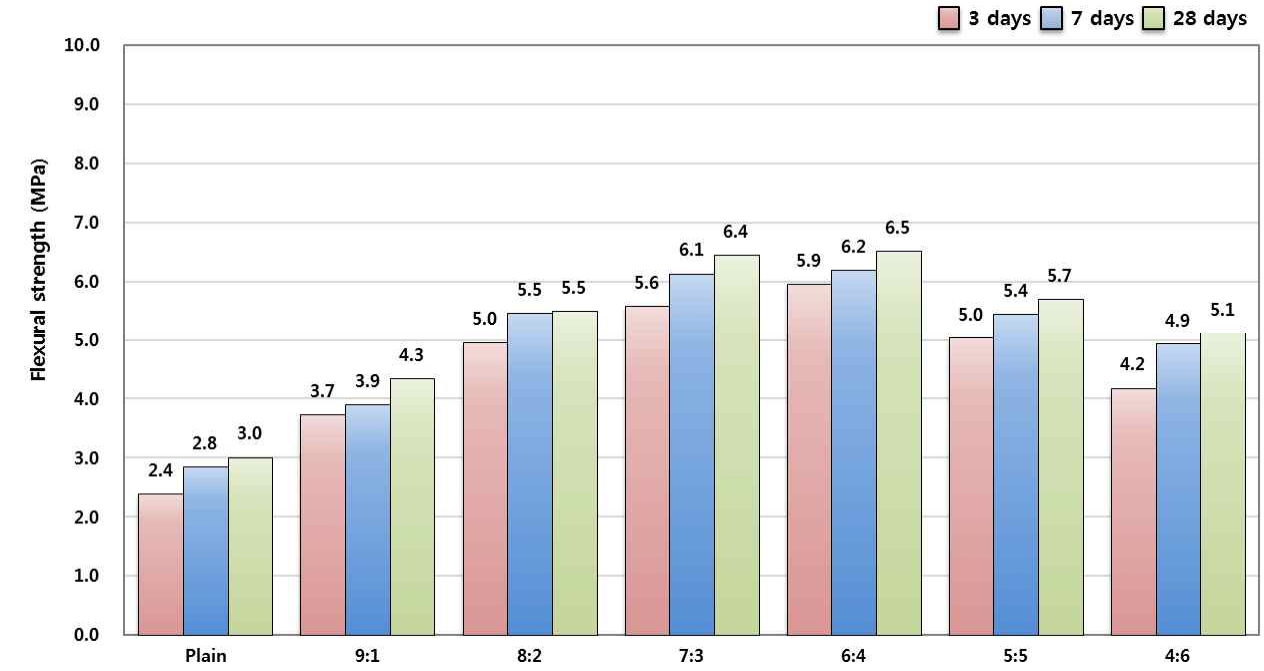
(3) 압축 및 휨 강도

압축 및 휨 강도 시험결과는 [그림 2-64, 65]에 나타내었다. 압축강도의 경우 Na_2SiO_3의 사용량이 증가함에 따라 강도가 증가하는 경향을 나타내었는데, Plain의 재령 28일 압축강도가 5.1 MPa이었고, Na_2SiO_3의 사용량이 증가함에 따라 재령 28일의 압축강도는 7.1, 12.1, 14.4, 17.4, 17.6, 17.7 (MPa)로 Na_2SiO_3의 사용량이 40 % 이상일 경우 압축강도의 증진이 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 겉보기 밀도의 증가로 강도가 증가한 것뿐만 아니라, pH 농도 측정에서 높은 알칼리성을 나타내는 Na_2SiO_3의 사용으로 고로슬래그를 활성화하고 경화에 참여하여 NaOH만을 사용하였을 때와 달리 SiO_3를 공급해 줌으로써 강도가 증가한 것이며, Na_2SiO_3를 40 % 초과 할 경우 더 이상의 강도발현은 없는 것으로 판단된다.

휨 강도 시험결과는 [그림 2-65]에 나타낸 것과 같이 압축강도의 경향과 다소 다르게 Na_2SiO_3를 50, 60 (%) 사용한 경화체의 휨 강도가 저하되는 경향을 나타내었는데, 이는 Na_2SiO_3의 사용이 압축강도는 증가시킬 수 있지만 SiO_3의 함량이 많을 경우 균열이 발생하여 휨 강도가 저하된다는 연구결과에서도 볼 수 있듯이 알칼리 자극제로써 사용한 Na_2SiO_3가 휨 강도를 저하시킨 것으로 판단된다.



[그림 2-64] 알칼리 자극제의 비율(NaOH : Na_2SiO_3)에 따른 압축강도



[그림 2-65] 알칼리 자극제의 비율(NaOH : Na_2SiO_3)에 따른 휨 강도

라. 제지애시의 발포 메커니즘

1) 재지애시의 미반응 Si에 의한 메커니즘 가정

제지애시의 화학성분 중 하나인 Si는 SiO_2로 존재할 경우 CaO 등과 함께 결합하여 시멘트를 사용한 콘크리트와 동등 이상의 강도를 발현 할 수 있지만, 미반응 Si로 존재할 경우, 알칼리 자극제와 반응하여 수소기체를 발생시킬 수 있다. 이 미반응 Si에 의한 수소발생 반응식은 (식 2-1)과 같이 나타낼 수 있는데, 수소뿐만 아니라 Na_2SiO_3와 많은 열을 발생시키기도 한다.

$$Si + 2NaOH + H_2O \rightarrow Na_2SiO_3 + 2H_2 + 423.8\ (kJ/mol)\cdots\cdots(식\ 2\text{-}1)$$

이는 제지애시가 시멘트, 물과 결합하여 결합재의 부피가 팽창되는 현상과 NaOH, KOH, $Ca(OH)_2$ 등 MOH계열의 알칼리 자극제와 물을 함께 혼합할 경우 많은 열과 기체가 발생한다는 점, 기체를 포집하여 불을 접근시켰을 때 연소반응을 하는 점 등을 기반으로 제지애시의 수소발생이 (식 2-1)과 같은 반응에 의해 발생한다고 가정할 수 있다. 이에 고로슬래그를 기반으로 하는 알칼리 활성 무기결합재의 적정 알칼리 자극제 사용량을 도출하게 되면 제지애시로 인한 수소발생량을 제어할 수 있을 것으로 판단된다.



[사진 2-6] 반응에 의해 발생된 기체의 반응

이에 본 실험에서는 제지애시에 필요한 알칼리 자극제의 양을 선정하기 위하여 고로슬래그 기반 경화체에 필요한 적정 알칼리 자극제의 첨가량을 도출하기 위해 알칼리 자극제의 종류 및 첨가율을 달리한 실험을 하였고, 제지애시의 미반응 Si의 양을 계산하여 수소기체를 최대로 발생시킬 수 있는 NaOH의 양을 도출하여 이를 검증하기 위해 NaOH의 첨가량을 달리 한 실험을 실시하였다.

2) 고로슬래그에 필요한 알칼리 자극제의 종류 및 사용량 산정

가) 실험계획 및 방법

고로슬래그 기반 경화체에 필요한 NaOH 및 NaOH 이외에 고로슬래그를 활성화 하여 경화할 수 있는 알칼리 자극제의 종류 및 첨가량을 선정하기 위한 방법은 [표 51]와 같은 실험을 실시하여 도출하였다. 먼저, 결합재는 고로슬래그의 중량을 100 g으로 하여 배합수의 양을 35 g 즉, W/B는 0.35로 고정하였고 NaOH, Na_2SO_4, Na_2SiO_3 등의 첨가량은 배합수 35 g을 기준으로 1, 3, 6, 9, 12 (M) 등 총 5수준으로 설정하여 실험을 실시하였다. 시험항목으로는 배합수의 pH 농도와 굳지 않은 페이스트의 플로우 콘 플로우 및 테이블 플로우, 응결시간, 굳은 페이스트의 압축 및 휨 강도를 측정하였다. 또한, 시험체가 대기 중에 노출되었을 때 알칼리 성분이 표면에 하얗게 뜨는 백화현상을 관찰하여 알칼리 자극제의 종류 및 첨가량을 설정하였다.

[표 2-38] 실험수준 및 요인

요인	수준
결합재 조건	• BFS[a)]
알칼리 자극제	• NaOH, Na_2SO_4, Na_2SiO_3
알칼리 자극제 첨가량	• 1, 3, 6, 9, 12 (M)
W/B	• 0.35 %
양생조건	• 습도 80±5 %, 온도 20±2 ℃
시험항목	• pH 농도, 플로우 콘 플로우, 테이블 플로우, 응결시간, 압축 및 휨 강도

a) BFS : 고로슬래그

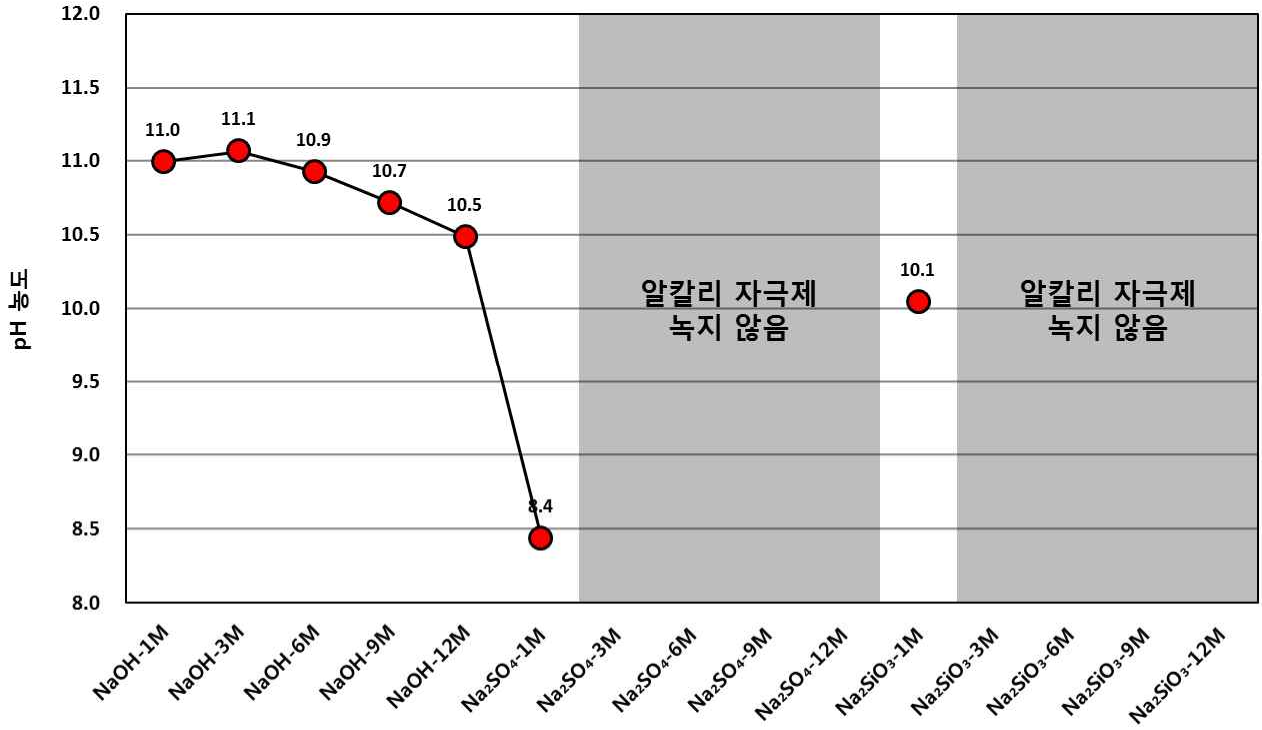
나) 실험결과

(1) pH 농도

배합수의 pH를 측정하기 위해서 알칼리 자극제의 종류 및 첨가율에 따라 계량을 한 뒤, 배합수에 첨가하여 배합수의 증발이 없도록 밀폐를 시킨 뒤에 항온항습기에서 온도가 20 ℃가 될 때까지 안정시켰다.

그 결과, [그림 2-66]에 나타낸 것과 같이 NaOH를 첨가한 배합수의 pH는 1M의 경우 11.0을 나타내었고, 3M은 11.1, 6M 10.9, 9M 10.7, 12M 10.5로 3M을 사용한 배합수의 농도가 가장 높았으며, 이후 첨가량이 증가함에 따라 pH는 저하되어 NaOH-12M 인 결합재의 pH 농도가 다소 낮은 농도를 나타내었다. 이는 pH 측정기의 정확도가 불확실한 점도 있지만, 측정시간이 길어질수록 pH 농도가 높아지는 점을 감안하였을 때 NaOH를 사용한 배합수의 pH 농도는 11 이상의 높은 알칼리를 띠고 있는 것으로 판단된다.

한편, Na_2SO_4를 1M 첨가한 배합수는 가장 낮은 pH 농도로 8.4를 나타내었고, Na_2SiO_3를 1M 첨가한 배합수는 10.1로 NaOH를 사용한 배합수보다 다소 낮은 농도를 나타내었다. 또한, Na_2SO_4의 경우 1M을 초과하여 배합수와 혼합할 경우 배합수 내에서 결정상태로 굳어버려 사용할 수 없었으며, Na_2SiO_3는 1M을 초과할 경우 실리콘과 같은 형태로 응고가 되어 사용할 수 없었다.

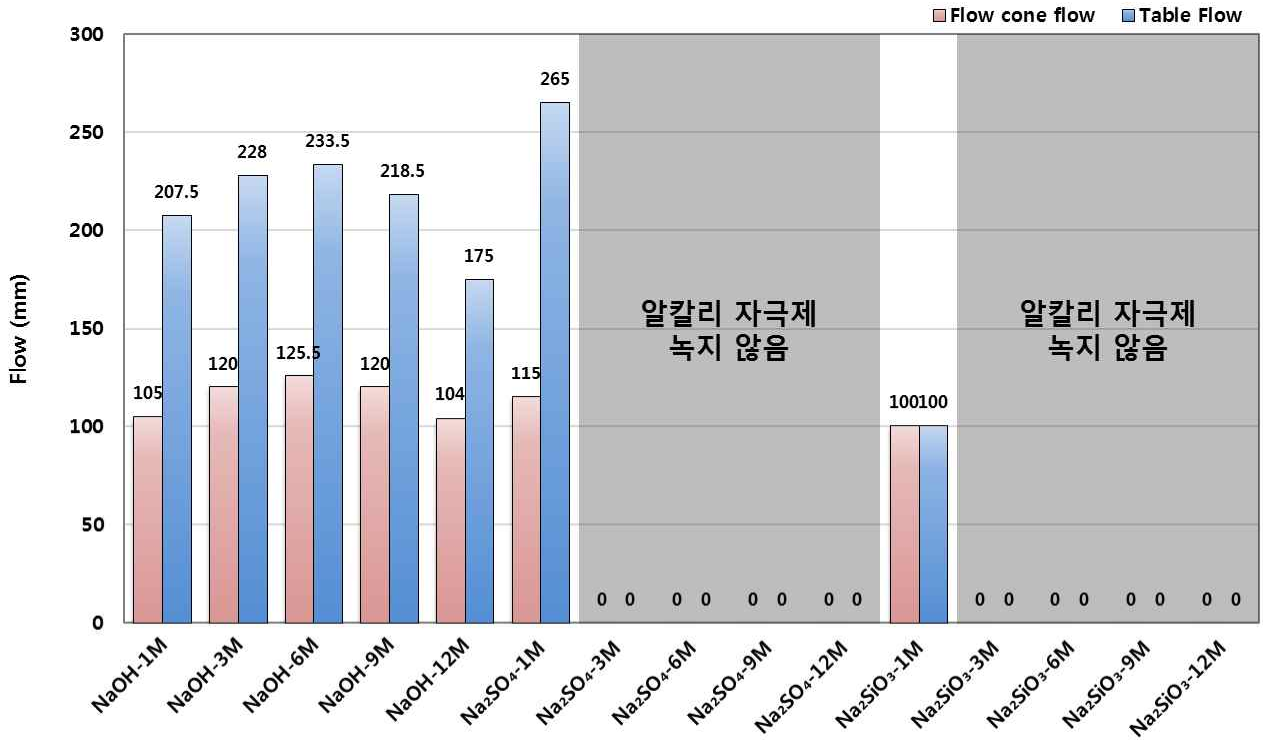


[그림 2-66] 알칼리 자극제 종류 및 mole 농도에 따른 pH 농도

(2) 플로우 콘 플로우 및 테이블 플로우

플로우 콘 플로우 및 테이블 플로우 시험결과는 [그림 2-67]에 나타내었다. 그 결과, NaOH를 사용하였을 경우 NaOH-1M이 105 mm, NaOH-3M 120 mm, NaOH-6M 125.5 mm, NaOH-9M 120 mm, NaOH-12M 104 mm로 6M을 첨가한 결합재의 플로우가 가장 유동성이 좋은 것으로 나타났으며, 6M을 초과하여 첨가하였을 경우 플로우 값이 감소되는 경향을 나타내었고, NaOH-12M이 가장 낮은 플로우 값을 나타내었다. 이는 분말형태의 NaOH를 사용할 경우 반응성이 높은 NaOH가 대기 중의 수분을 흡수하는 특성 때문에 결합재에 사용되는 물의 양이 증가되어 플로우가 증가되는 것이며, NaOH의 사용량이 많아질 경우, 고로슬래그와 빠르게 반응할 수 있는 조건이 되어 일부 고로슬래그가 반응하여 유동성을 상실한 것으로 판단된다.

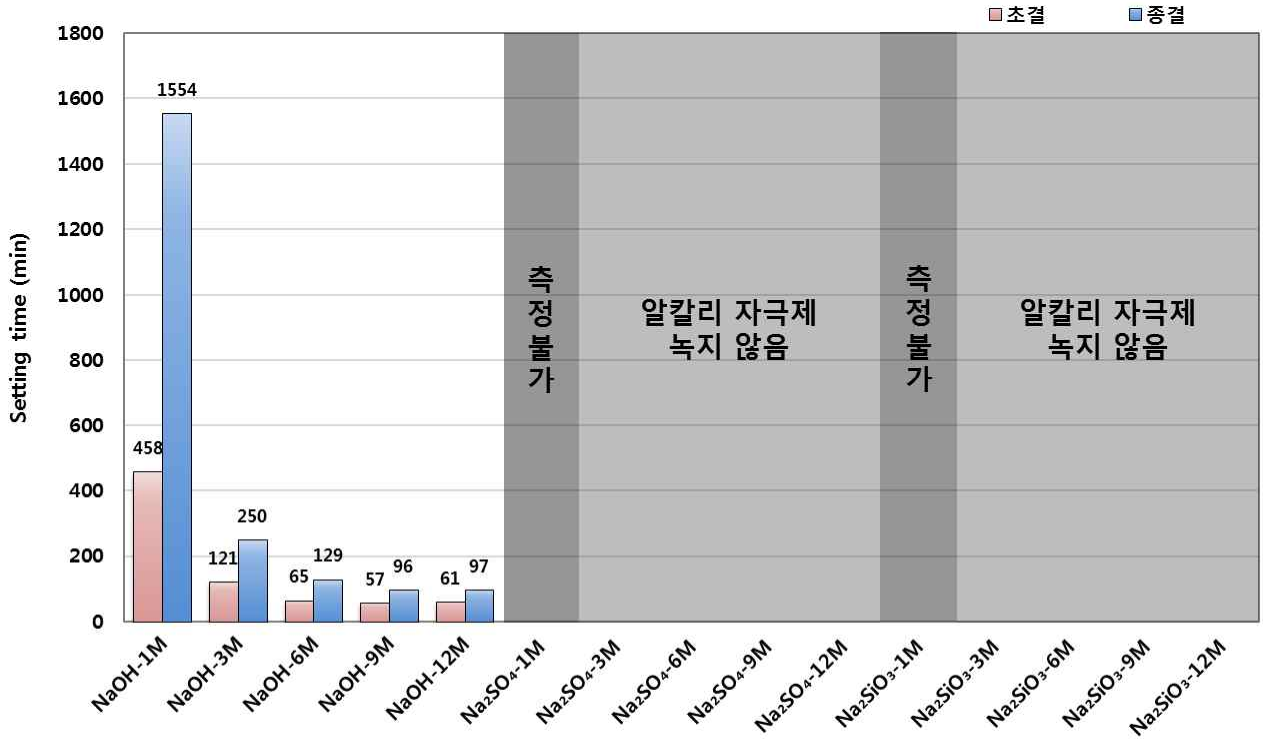
테이블 플로우는 NaOH-1M이 207.5 mm를 나타내었고, mole량이 증가함에 따라 228, 233.5, 218.5, 175 (mm)를 나타내었다. 한편, Na_2SO_4를 1M 사용한 결합재는 265 mm로 가장 유동성이 좋은 것으로 나타났으며, Na_2SiO_3를 사용하였을 경우는 유동성이 거의 없는 것으로 나타났다.



[그림 2-67] 알칼리 자극제 종류 및 mole 농도에 따른 플로우 콘 플로우 및 테이블 플로우

(3) 응결시간

응결시간을 측정한 결과는 [그림 2-68]에 나타내었다. 그 결과 Na_2SO_4-1M과 Na_2SiO_3-1M은 반응성이 매우 낮아 초결 및 종결시간을 측정할 수 없었다. NaOH를 사용하였을 경우는 NaOH의 첨가량에 따라 초결 및 종결시간이 매우 단축되는 것을 알 수 있었는데, NaOH-1M의 초결이 458분, 종결 1554분으로 가장 늦은 시간이 나타났고, NaOH-3M의 경우 초결 121분, 종결 250분으로 NaOH-1M과 종결 시간의 차이는 약 22시간을 나타내었다. 이는 고로슬래그가 활성화하는데 매우 적은 알칼리 자극제를 사용하여 나타난 결과인 것으로 판단되며, 고로슬래그는 알칼리 자극제로 활성화하여 사용함으로써 빠른 응결시간을 나타내는 것이 특징인데, 그러기 위해서는 알칼리 자극제인 NaOH의 사용량은 최소 3M이상 되어야 한다는 것을 알 수 있었다. 한편, NaOH-6M의 초결시간은 65분이었으며, 종결은 129분을 나타내었고, 9 M은 초결 57분, 종결 96분, 12 M은 초결 61분, 종결 97분으로 NaOH의 첨가율이 증가함에 따라 응결시간이 단축되었다.



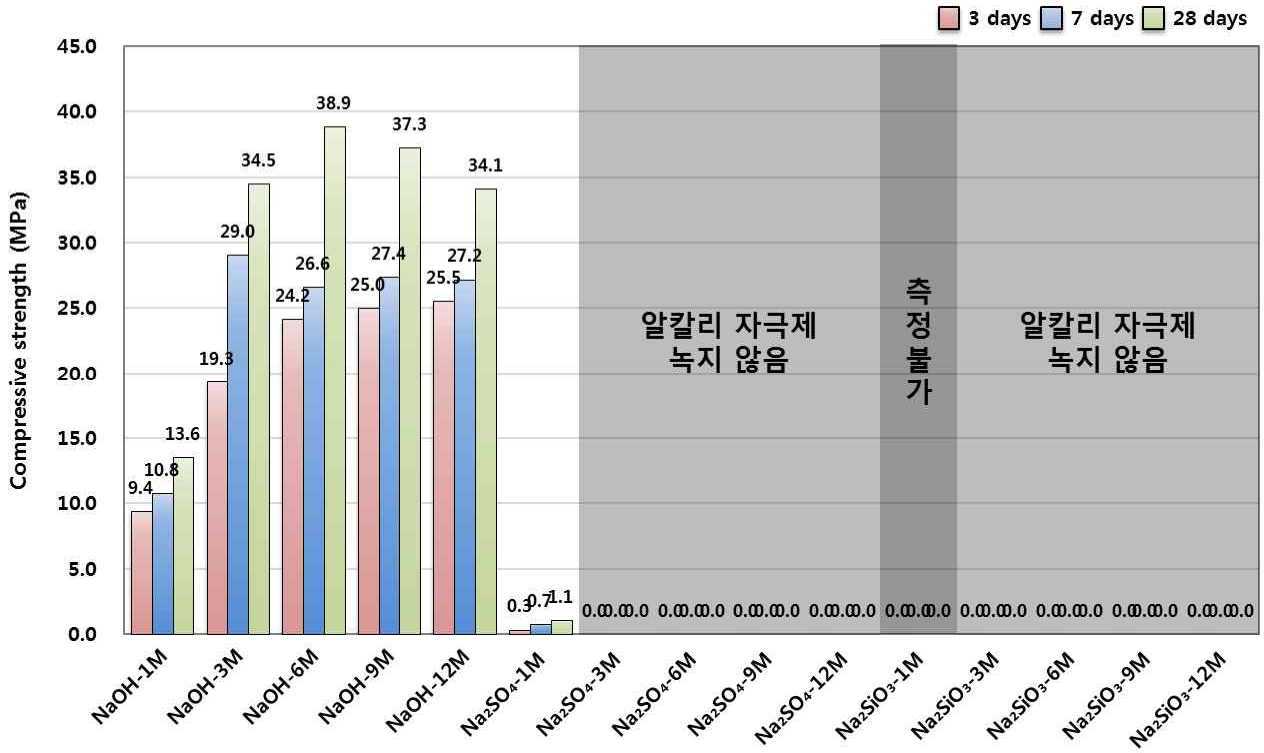
[그림 2-68] 알칼리 자극제 종류 및 mole 농도에 따른 응결시간

(4) 압축 및 휨 강도

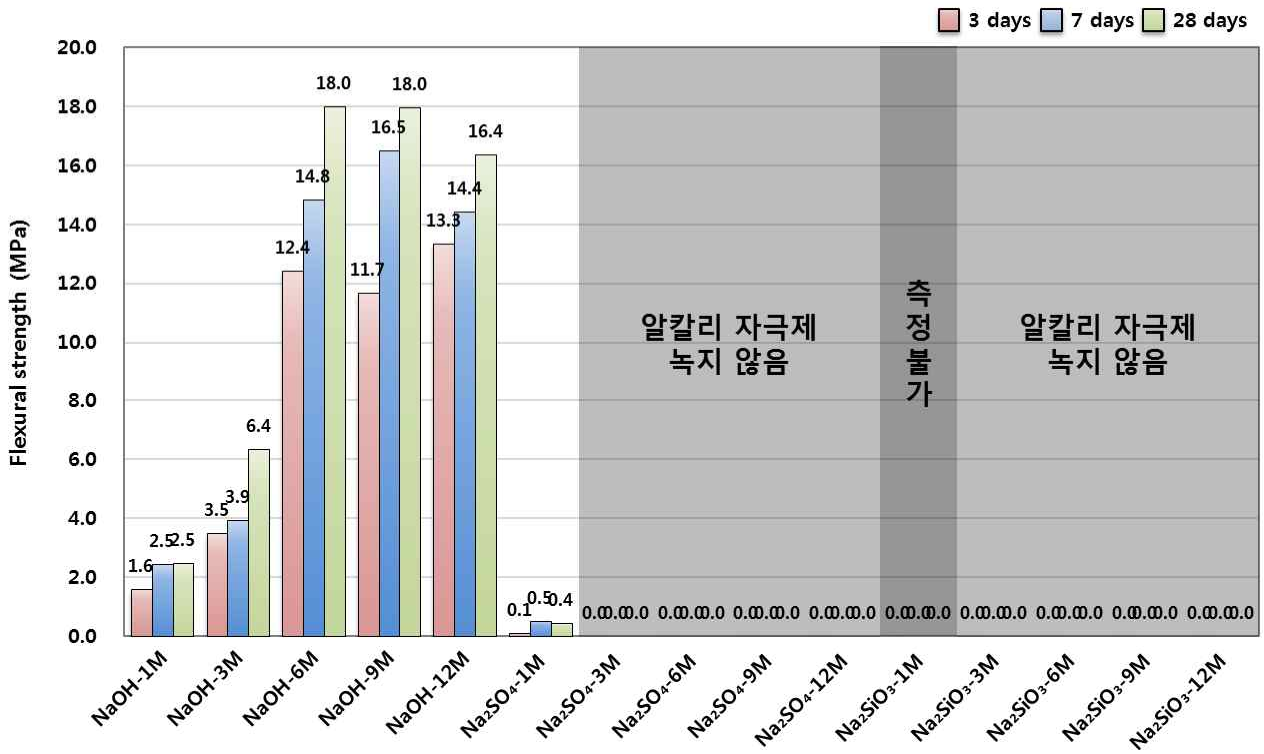
압축강도는 [그림 2-69]와 같이 재령 28일의 강도에서 NaOH를 6M 첨가한 시험체의 압축강도가 38.9 MPa로 가장 높은 강도를 나타내었으며, 6M을 초과하여 NaOH를 첨가한 경화체는 첨가량이 증가할수록 강도가 저하하는 경향을 나타내었다. 이는 일정량 이상의 알칼리 자극제를 사용하여도 강도는 증가하지 않으며, 강도를 저하시키는 요소가 된다는 것을 알 수 있었으며, NaOH의 적정 사용량은 6M인 것으로 판단된다. 또한 시험체의 표면을 살펴보았을 때, 1, 3, 6 (M)의 시험체 표면에는 알칼리 성분이 보이지 않았지만, 9, 12 (M)의 경우 알칼리 성분이 표면을 하얗게 두르고 있는 것을 볼 수 있었다. 한편, Na_2SO_3-1M의 경우 재령 28일에서 1.1 MPa을 나타내었고, 경화체 표면에 알칼리 성분으로 뒤덮여 있는 것을 관찰할 수 있었다.

휨 강도의 경우 [그림 2-70]과 같이 압축강도와 유사한 경향을 나타내었는데, NaOH-1M의 재령 28일 휨 강도는 2.5 MPa로 NaOH를 사용한 경화체 중에서 가장 낮은 강도를 나타내었고, NaOH를 6 M 사용한 경화체의 휨 강도가 18.0 MPa로 가장 높은 휨 강도를 나타내었다.

따라서, 고로슬래그 기반 경화체에 필요한 알칼리 자극제는 NaOH이며, 그의 첨가량은 물 35 g 기준 6 M인 것으로 판단된다.



[그림 2-69] 알칼리 자극제 종류 및 mole 농도에 따른 압축강도



[그림 2-70] 알칼리 자극제 종류 및 mole 농도에 따른 휨 강도

3) H_2를 발생시키기 위한 NaOH 사용량 산정

제지애시 100 g에 포함되어 있는 미반응 Si의 함량을 가정하기 위해서 [표 2-39, 40]에 나타낸 XRF 분석 중 분자상태로 검출되는 SiO_2의 함량과 원소상태로 검출되는 Si의 함량의 차이를 미반응 Si라고 설정하고, 식1-1을 이용하여 수소발생을 최대로 할 수 있는 NaOH 양을 도출하였다.

[표 2-39] 제지애시의 화학성분 (분자)

질량백분율 (%)

분자	CaO	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	Cl	MgO	SO_3	TiO_2	P_2O_5	CuO	ZnO	etc.
함유량	58.7	12.4	8.52	6.91	3.99	3.38	1.76	1.35	0.783	0.62	0.62	0.97

[표 2-40] 제지애시의 화학성분 (원소)

질량백분율 (%)

원소	Ca	Si	Fe	Al	Ti	Cu	Pb	Ba	Mn	Co	Sb	etc.
함유량	46.6	25.6	13.3	7.09	3.15	1.3	0.89	0.684	0.219	0.188	0.111	0.87

[표 2-39]의 SiO_2의 질량백분율은 12.4 %이므로 2.07M 이 되며, [표 2-40]의 Si의 질량백분율은 25.6 %로 9.14M이 된다. 따라서, 이들의 차는 7.07M이 되며, 미반응 Si의 mole량이 된다. 이를 식.1에 대입할 경우 수소기체를 최대로 발생시킬 수 있는 NaOH의 첨가량은 다음에서와 같이 56.6 g이 된다.

반응식 :	$\underset{(paper\ ash)}{Si}$	+ 2NaOH	+ H_2O	→ Na_2SiO_3	+	$2H_2$
필요 mole량 :	7.07M	14.14M	7.07M	7.07M		14.14M
필요 질량 :	(100g)	56.6g	12.7g	86.3g		2.8g

제지애시 100 g 기준

따라서 필요한 NaOH의 첨가량은 제지애시 100 g을 기준으로 56.6 g이 되며, 물의 양은 12.7 g이 된다. 이때 실험결과를 바탕으로 무시멘트 경량 경화체를 제조하기 위해서 고로슬래그의 사용에 따른 W/B와 NaOH를 고려하여 제지애시의 사용량을 5 g으로 설정할 경우 W/B는 0.40이며, NaOH는 10.8 g으로 할 수 있다. 이때의 배합은 [표 2-41]과 같다.

[표 2-41] 고로슬래그 기반 경량 경화체의 배합

단위 : g

W/B	Water	Blast Furnace Slag	Paper Ash	NaOH
0.40	40	95	5	10.8

4) 제지애시를 사용한 경량 경화체의 NaOH 사용량 검증

가) 실험개요

NaOH의 첨가율을 검증하기 위한 실험은 결합재는 고로슬래그와 제지애시이며, 이것의 치환율은 5 %이다. NaOH의 첨가율은 결합재 중량에 2.5, 7.5, 10.8(미반응 Si 에 의해 도출된 첨가율), 12.5, 17.5, 22.5, 27.5, 32.5, 37.5 (%) 등 총 9수준이며, W/B는 [표 2-42]과 동일한 0.40으로 고정하였다. 양생조건은 습도 80±5 %, 온도 20±2 ℃이며, 시험 항목은 발포성능에 의한 경량화의 척도로써 겉보기 밀도를 측정하고, 이에 따른 압축강도를 측정하였다.

나) 실험계획 및 방법

NaOH 사용량을 확인하기 위한 실험으로써, 결합재로는 고로슬래그, 제지애시를 사용하였다. 알칼리자극제로는 NaOH, Na_2SiO_3를 사용하였고, NaOH의 첨가율은 7.8, 9.8, 10.8, 11.8, 12.8 (%) 총 5수준으로 고정하였다. 시험항목으로는 밀도 및 압축강도를 측정하였다.

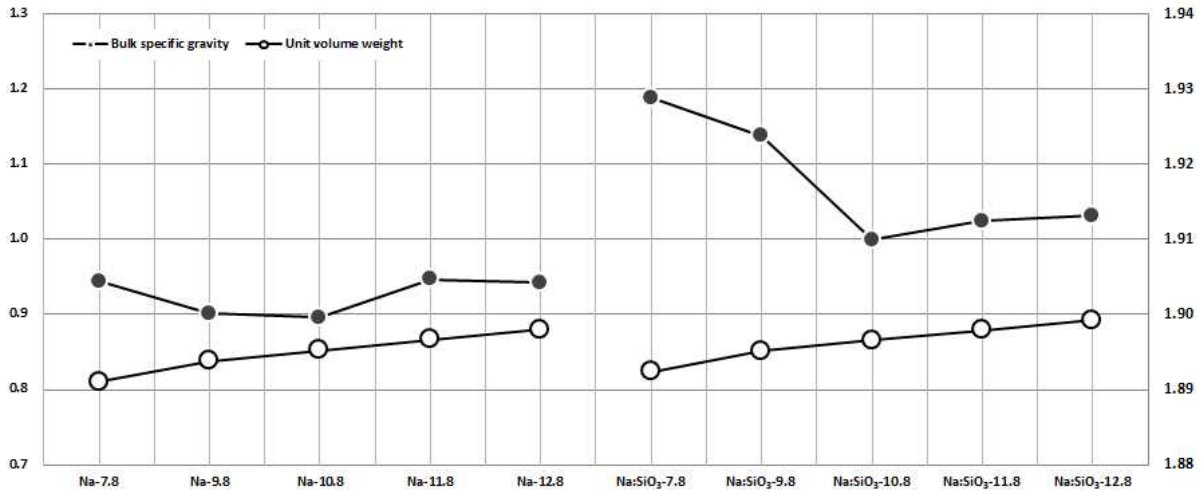
[표 2-42] 실험수준 및 요인

실험요인	실험수준
결합재	• 고로슬래그(BFS), 제지애시(PA)
제지애시 치환율	• 5%
알칼리 자극제	• NaOH, Na_2SiO_3
NaOH첨가율	• 7.8, 9.8, 10.8, 11.8, 12.8 (%)
Na_2SiO_3	• 0, 0.5 (%)
W/B	• 40 %
양생조건	• 상대습도(80±5)%, 온도(20±2)℃
시험항목	• 밀도, 압축강도

다) 실험결과

(1) 경량 경화체의 NaOH 사용량 검증을 위한 경량 경화체의 밀도

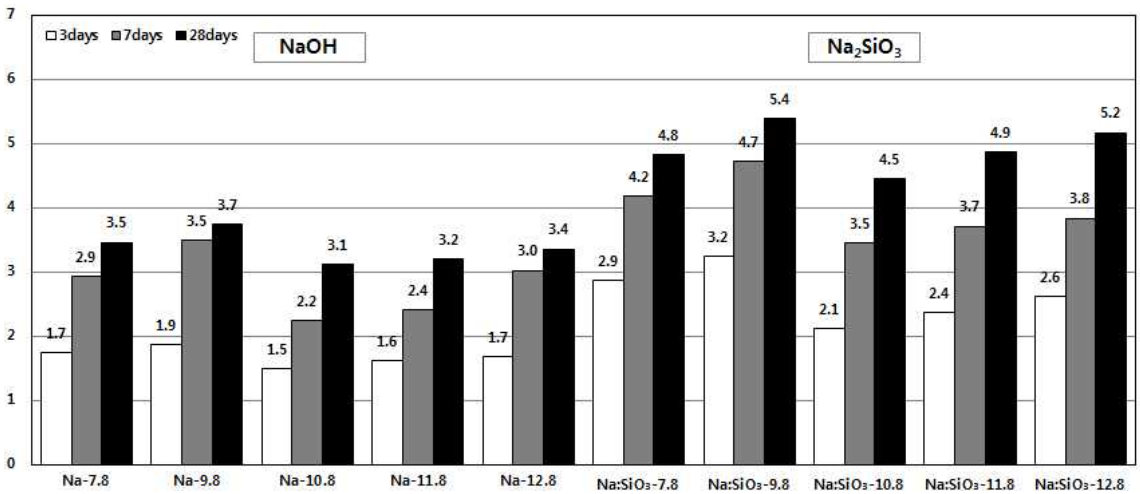
NaOH의 첨가량에 따른 겉보기 밀도와 단위용적질량은 NaOH의 첨가량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타났지만, 겉보기 밀도는 미반응 Si를 기준으로 도출한 첨가율 10.8 %인 경화체의 겉보기 밀도가 가장 낮은 것으로 나타났다. 이는 NaOH의 첨가량이 10.8 % 미만으로 첨가될 경우 수소의 발생량이 다소 감소되는 경향을 나타내었고, 초과하여 첨가될 경우 미반응 Si와 NaOH의 반응시간이 단축되어 비빔과정에서 수소기체가 일부 소실되어 밀도가 증가한 것으로 판단된다.



[그림 2-71] 경량 경화체의 NaOH 사용량 검증을 위한 경량 경화체의 밀도

(2) 경량 경화체의 NaOH 사용량 검증을 위한 경량 경화체의 압축강도

압축강도 시험결과는 겉보기 밀도와 마찬가지로 NaOH 첨가율 10.8 %를 기준으로 증감을 나타내었다.



[그림 2-72] 경량 경화체의 NaOH 사용량 검증을 위한 경량 경화체의 압축강도

실험결과, 고로슬래그 기반 무시멘트 경량 경화체의 제조에 있어서, 가장 적절한 NaOH의 첨가율 및 제지애시의 첨가량을 확인할 수 있었으며, 제지애시의 사용이 10 % 이하에서도 충분히 발포성능을 발휘할 수 있었다.

마. 경량 경화체의 강도보완

1) 알칼리 자극제의 종류 및 비율 선정

가) 실험개요

본 실험은 Na_2SiO_3와 Na_2SO_4의 비율을 선정하기 위한 실험으로 NaOH의 mole 농도를 토대로 고로슬래그 기반 경화체의 강도개선을 위해 알칼리 자극제인 Na_2SO_4와 Na_2SiO_3를 추가로 첨가하여 이들의 특성 검토 및 경량 경화체의 강도를 보완하기 위한 일환으로 기초 실험을 계획하였다.

나) 실험계획 및 방법

본 실험의 수준 및 요인은 결합재는 고로슬래그만을 사용하여 NaOH의 첨가율은 결합재 중량에 6M이며, 알칼리 자극체의 종류는 NaOH 및 Na_2SO_4, Na_2SiO_3이며, 이들의 치환율은 NaOH의 중량에 0, 10, 30, 50 (%) 등 4수준으로 설정하였다. W/B는 0.35이며, 양생조건은 습도 80±5 %, 온도 20±2 ℃로 항온항습 조건으로 고정하였고, 시험 항목은 유동성을 검토하기 위한 플로우 콘 플로우와 테이블 플로우이며, 응결시간과 압축 및 휨 강도 등 5수준으로 설정하였다.

[표 2-43] 실험수준 및 요인

실험요인	실험수준
결합재 조건	• BFS[a)]
알칼리 자극제	• NaOH, Na_2SiO_3, Na_2SO_4
알칼리 자극제 첨가율	• 8.4 (wt.%)
Na_2SiO_3, Na_2SO_4치환율	• 0, 10, 30, 50 (wt.%)
W/B	• 35 %
양생조건	• 상대습도(80±5)%, 온도(20±2)℃
시험항목	• 플로우 콘 플로우 및 테이블 플로우, 응결시간, 압축 및 휨강도

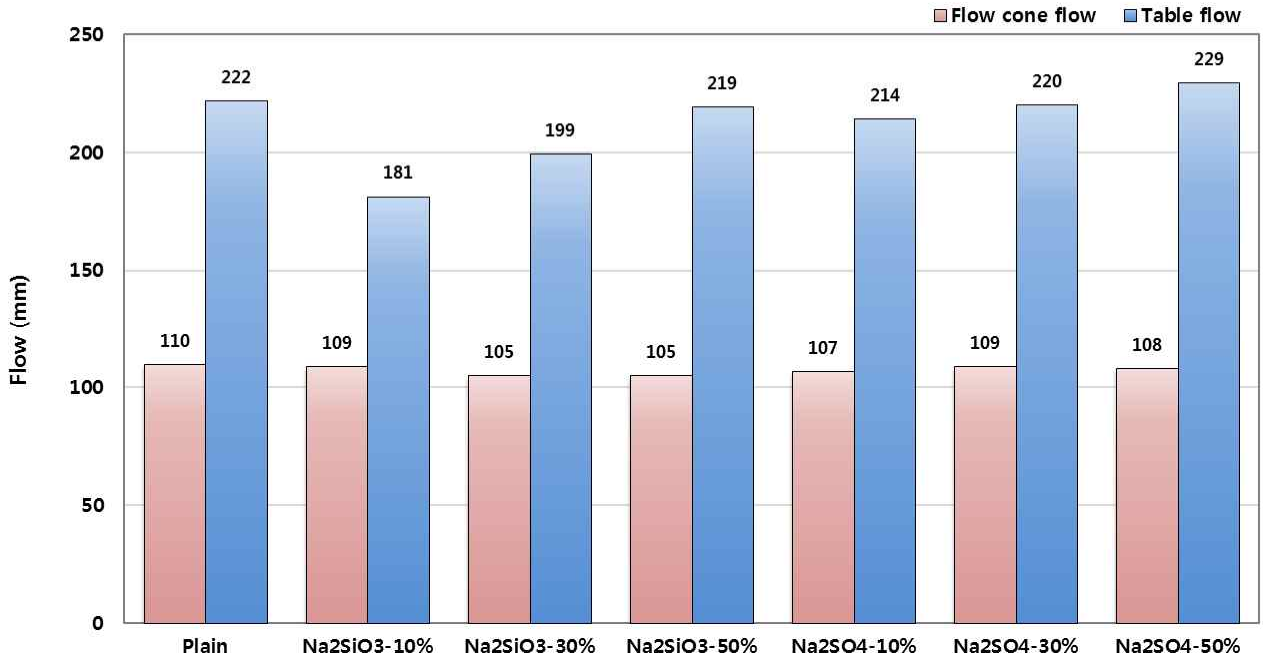
a) BFS : 고로슬래그

다) 실험결과

(1) 플로우 콘 플로우 및 테이블 플로우

플로우 콘 플로우 및 테이블 플로우 실험결과는 [그림 2-73]에 나타내었다. 그 결과, 플로우 콘 플로우 시험결과는 Plain이 110 mm, Na_2SiO_3의 치환율에 따른 플로우는 109, 105, 105 (mm)이었으며, Na_2SO_4의 치환율에 따른 플로우는 107, 109, 108 (mm)로 모든 결합재가 플로우의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 한편, 이를 타격한 테이블 플로우는 모든 결합재가 플로우 콘 플로우의 2배의 변화를 보였으며, Plain의 경우 222 mm이었으며, Na_2SiO_3와 Na_2SO_4를 사용한 결합재는치환율에 따라 181, 199, 219 (mm)로 50 %를 치한환 결합재는 Plain과 유사한 플로우를 나타내었다. Na_2SO_4를 사용한 결합재도 Na_2SiO_3를 사용한 결합재와 마찬가지로 치환율이 증가함에 따라 플로우도 증가하는 경향을 나타내었는데, 그 값은 각각 214, 220, 229 (mm)로 Na_2SO_4를 50 % 치환한 결합재가 가장 큰 변화를 보인 것으로 나타났

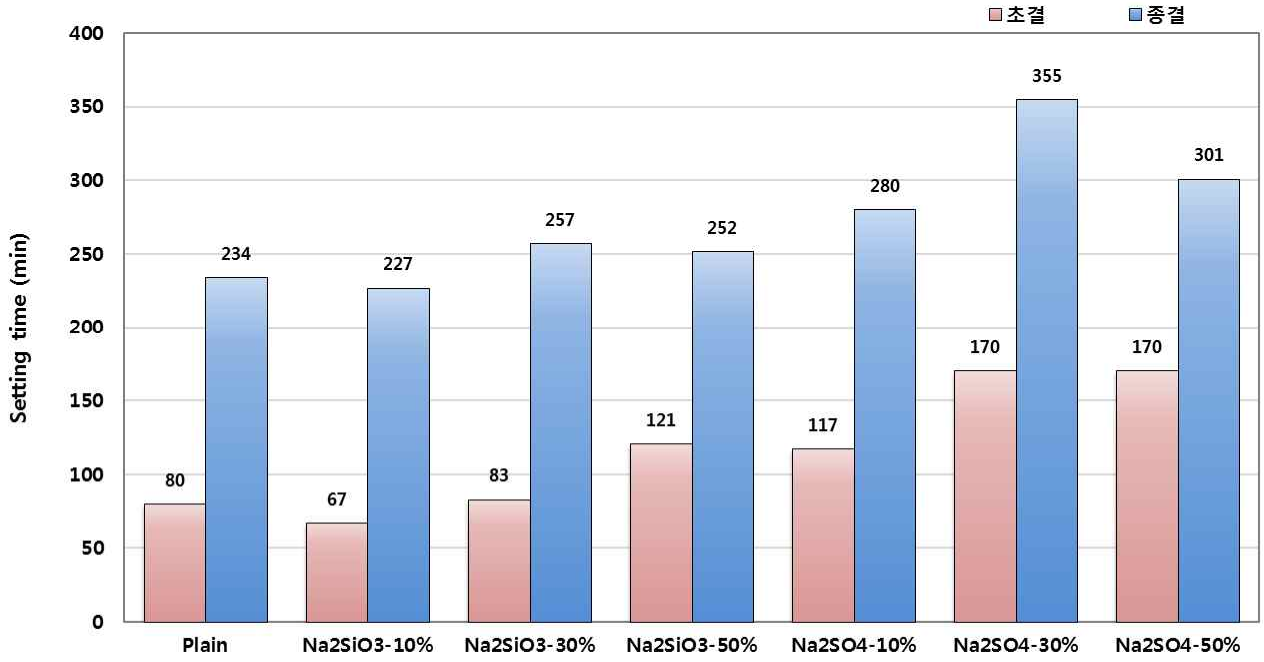
다. 이는 NaOH 만을 사용하였을 경우 분말형태인 NaOH에 흡수되는 대기중의 수분이 포함되기 때문에 결합재의 플로우가 높은 것으로 나타난 것이며, Na_2SiO_3의 경우 NaOH의 사용량이 감소함에도 치환율에 따라 증가하는 것은 Na_2SiO_3를 사용하게 되면 점성이 증가하여 플로우가 다소 감소하지만, 결합재의 단위용적질량은 증가하게 된다. 이에 테이블을 타격할 경우 치환율이 증가함에 따라 변화되는 양도 증가하게 되어 나타난 결과인 것으로 판단된다.



[그림 2-73] Na_2SO_4, Na_2SiO_3의 치환율에 따른 플로우 콘 플로우 및 테이블 플로우

(2) 응결시간

Na_2SO_4, Na_2SiO_3의 치환율에 따른 응결시간은 [그림 2-74]에 나타내었다. 그 결과, Plain의 경우 초결이 80분, 종결이 234분으로 4시간 안에 경화체를 탈형할 수 있을 정도로 응결이 빠르게 나타났다. Na_2SiO_3를 사용한 결합재는 10% 치환하였을 경우 초결 67분, 종결 227분으로 가장 빠른 응결시간을 나타내었고, 이후 치환율이 증가함에 따라 응결시간이 늦어지는 경향을 나타내었다. 그 시간은 치환율 30 %는 초결 83분, 종결 257분이며, 치환율 50 %는 초결 121분, 종결 252분이다. 이는 Na_2SiO_3의 경우 알칼리 자극제 자체의 점도가 높고 대기 중에 노출될 경우 점성을 잃고 빠르게 굳기 때문에 Na_2SiO_3를 사용한 결합재가 비교적 빠른 응결시간을 나타낸 것으로 판단된다. 한편, Na_2SO_4를 사용한 결합재의 응결시간은 Na_2SO_4-10%인 경우 초결 117분, 종결 280분으로 Plain과 Na_2SiO_3를 사용한 결합재보다 다소 빠른 응결시간을 나타내었고, Na_2SO_4-30%는 초결 170분, 종결 355분으로 가장 늦은 응결시간을 나타내었다. Na_2SO_4-50%는 초결 170분, 종결 301분으로 치환율 30 %와 초결 시간은 같으나, 종결시간은 보다 빠른 시간을 나타내었다. 이는 Na_2SO_4가 이온화 되는 시간이 길어지면서 응결시간이 늦어진 것으로 판단된다.

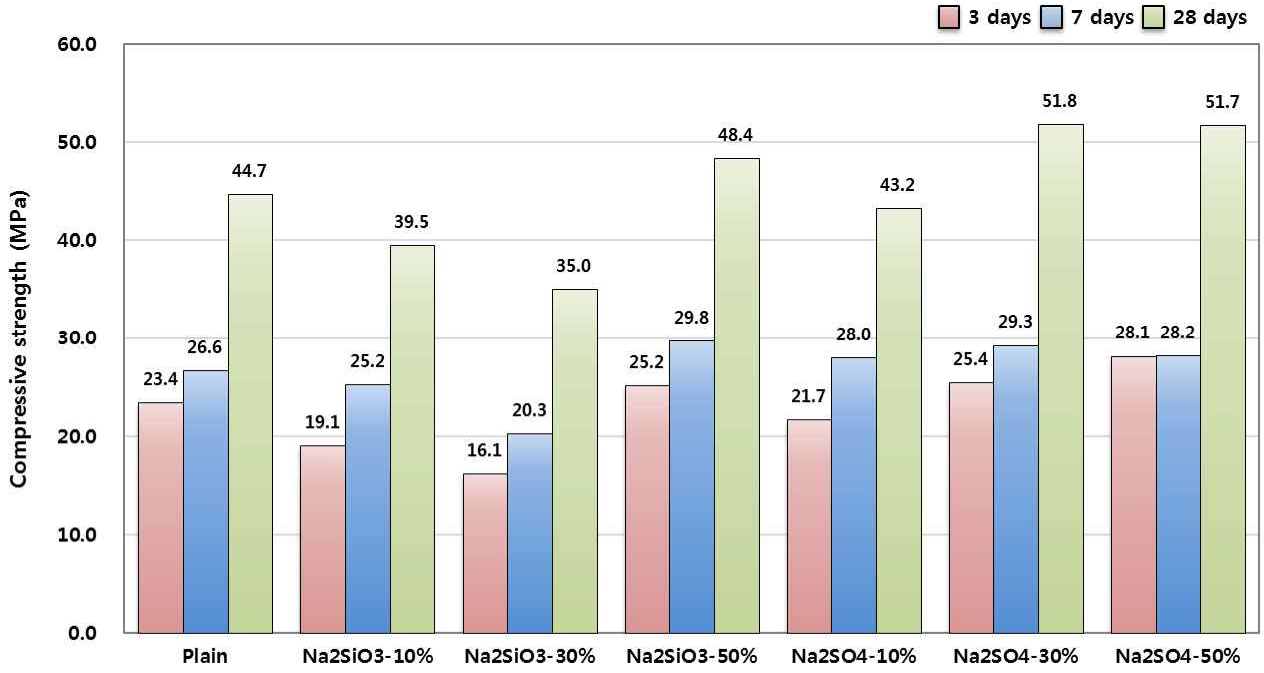


[그림 2-74] Na_2SO_4, Na_2SiO_3의 치환율에 따른 응결시간

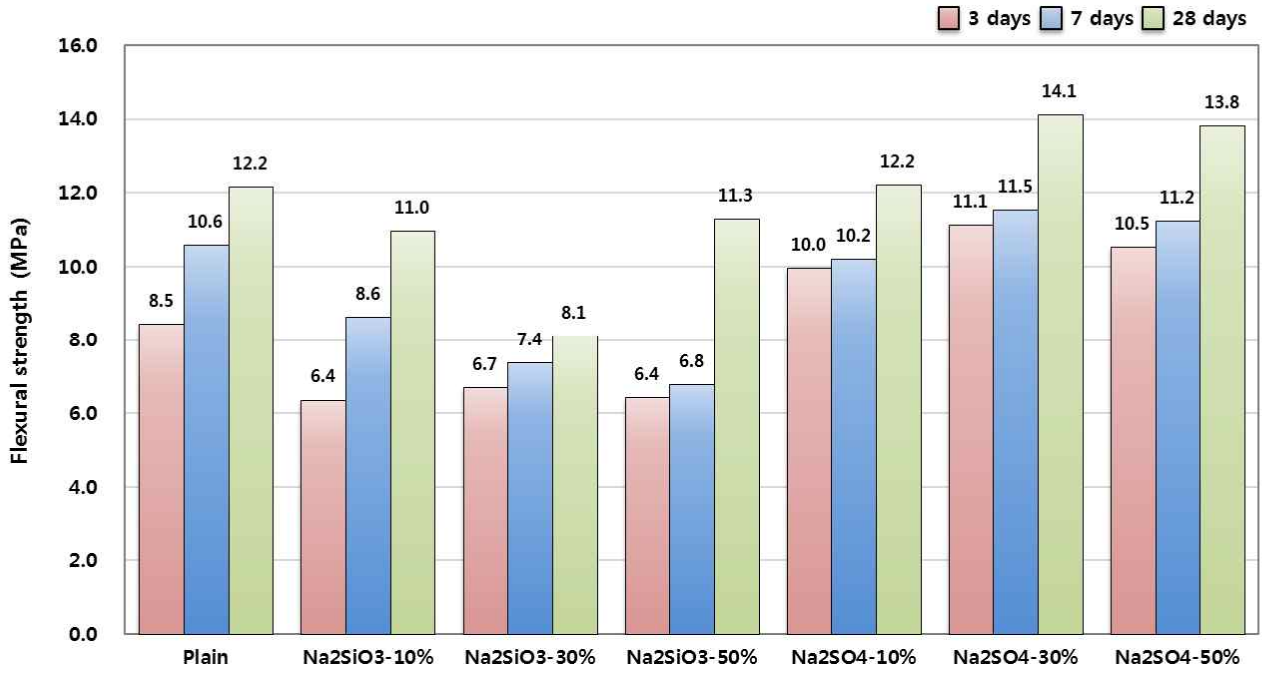
(3) 압축 및 휨강도

Na_2SO_4, Na_2SiO_3의 치환율에 따른 압축강도는 [그림 2-75]에 나타내었다. 그 결과 Plain의 강도재령 3일에서 23.4 MPa를 나타내었고, 재령 7일에서 26.6 MPa로 재령 3일에서 7일로의 강도 증진은 거의 없었다. 하지만 재령 7일에서 28일로의 강도증진은 약 2배 정도 강도발현을 하였는데, 그 압축강도는 44.7 MPa를 나타내었다. Na_2SiO_3를 사용한 경화체의 재령 28일 압축강도는 Na_2SiO_3-10% 39.5 MPa, Na_2SiO_3-30% 35.0 MPa, Na_2SiO_3-50% 48.4 MPa로 치환율 30 %까지 강도 증진을 나타낸 뒤 50 %로 치환율을 증가 시킬 경우 30 %보다 높은 강도를 나타내었다. 또한, Na_2SiO_3의 강도는 Plain 보다 높은 강도발현을 하였는데, 이는 고로슬래그를 주결합재로 사용한 연구들에서 발표되었듯이 NaOH와 Na_2SiO_3의 비율이 50 : 50일 경우 이들이 고로슬래그를 활성화하면서 경화에 영향을 주어 강도가 더 높아지는 것이다. Na_2SO_4를 사용한 경화체의 경우 치환율 10 %의 경우 재령 28일에서 43.2 MPa, 30 %는 51.8 MPa, 50 %는 51.7 MPa로 Na_2SO_4-30%와 Na_2SO_4-50%를 사용한 경화체가 가장 높은 강도를 발현하였다.

휨 강도 시험결과는 [그림 2-76]에 나타내었는데, 압축강도와 매우 유사한 경향을 나타내었다. Plain의 경우는 재령 28일에서 12.2 MPa 이었고, Na_2SiO_3-10%는 11 MPa로 Plain보다 다소 낮은 강도를 발현하였으며, Na_2SiO_3-30%는 재령 28일에서 8.1 MPa를 나타내었고, Na_2SiO_3-50%는 11.3 MPa로 압축강도의 강도발현율보다 다소 낮은 것으로 나타났다.



[그림 2-75] Na_2SO_4, Na_2SiO_3의 치환율에 따른 압축강도



[그림 2-76] Na_2SO_4, Na_2SiO_3의 치환율에 따른 휨 강도

2) Na_2SiO_3의 치환 및 첨가율 선정

가) 실험개요

본 실험은 Na_2SiO_3의 치환 및 첨가율에 의해서 경량 경화체의 강도 증진을 검토하기 위한 실험을 실시하였다. NaOH의 적정 첨가율 10.8 %을 토대로 제지애시를 사용하여 경량 경화체를 제조하고자 실시한 것으로 Na_2SiO_3의 치환 및 첨가율에 의해서 경량 경화체의 강도 증진을 검토하고자 하였다.

나) 실험계획 및 방법

결합재는 고로슬래그와 제지애시를 사용하여 NaOH의 첨가율을 결합재 중량에 10.8 % 첨가하였다. 강도를 보강하고자 사용한 알칼리 자극제는 Na_2SiO_3이며, Na_2SiO_3의 치환율 및 첨가율은 NaOH의 중량에 10, 30, 50 (%) 등으로 설정하였다. W/B는 0.40이며, 양생조건은 습도 80±5 %, 온도 20±2 ℃로 항온항습 조건으로 고정하였고, 시험 항목은 경량성을 검토하기 위한 겉보기 밀도와 압축 및 휨 강도 등으로 설정하였다.

[표 2-44] 실험수준 및 요인

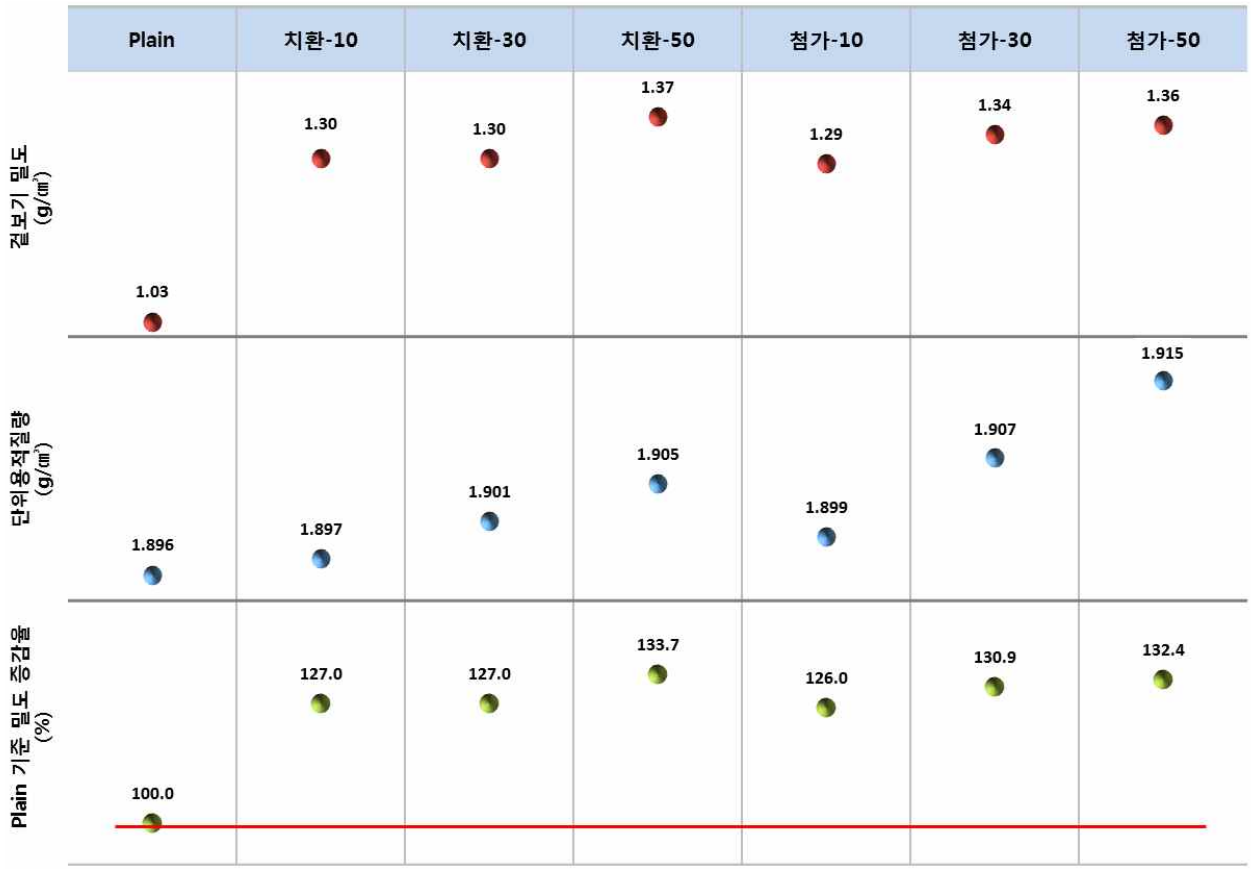
실험요인	실험수준
결합재 조건	• BFS[a], PA[b]
알칼리 자극제	• NaOH, Na_2SiO_3
알칼리 자극제 첨가율	• 10.8 (wt.%)
Na2SiO3의 치환 / 첨가율	• 10, 30, 50 (wt.%)
W/B	• 40 %
양생조건	• 상대습도(80±5)%, 온도(20±2)℃
시험항목	• 플로우 콘 플로우 및 테이블 플로우, 응결시간, 압축 및 휨강도

a) BFS : 고로슬래그, b) PA : 제지애시

다) 실험결과

(1) 밀도

Na_2SiO_3의 치환율 및 첨가율에 따른 겉보기 밀도는 [그림 2-77]에 나타내었다. 그 결과, 단위용적 질량은 Na_2SiO_3의 치환율 및 첨가율에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 이에 Plain 기준 밀도 증감율은 경화체의 겉보기 밀도에 따라 감소하는 경향을 보였고, Plain의 겉보기 밀도는 1.03 g/㎤로 가장 낮은 밀도를 나타내었고, Na_2SiO_3의 치환율에 따른 겉보기 밀도는 10 % 치환한 경화체가 가장 낮았으나, Plain 보다는 높은 밀도를 나타내었으며, 치환율 30 %의 겉보기 밀도가 1.30 g/㎤, 50 %는 1.37 g/㎤로 치환율에 따라 겉보기 밀도는 증가되는 경향을 나타내었다. Na_2SiO_3의 첨가율에 따른 겉보기 밀도는 첨가율 10 %인 경화체의 밀도가 1.29 g/㎤로 Na_2SiO_3를 10 % 치환한 경화체보다 다소 낮은 겉보기 밀도를 나타내었고 첨가율 30 %인 경화체는 1.34 g/㎤, 50 %는 1.36 g/㎤으로 Na_2SiO_3를 첨가하였을 때와 마찬가지로 첨가율에 따라 겉보기 밀도는 증가하는 경향을 나타내었다.



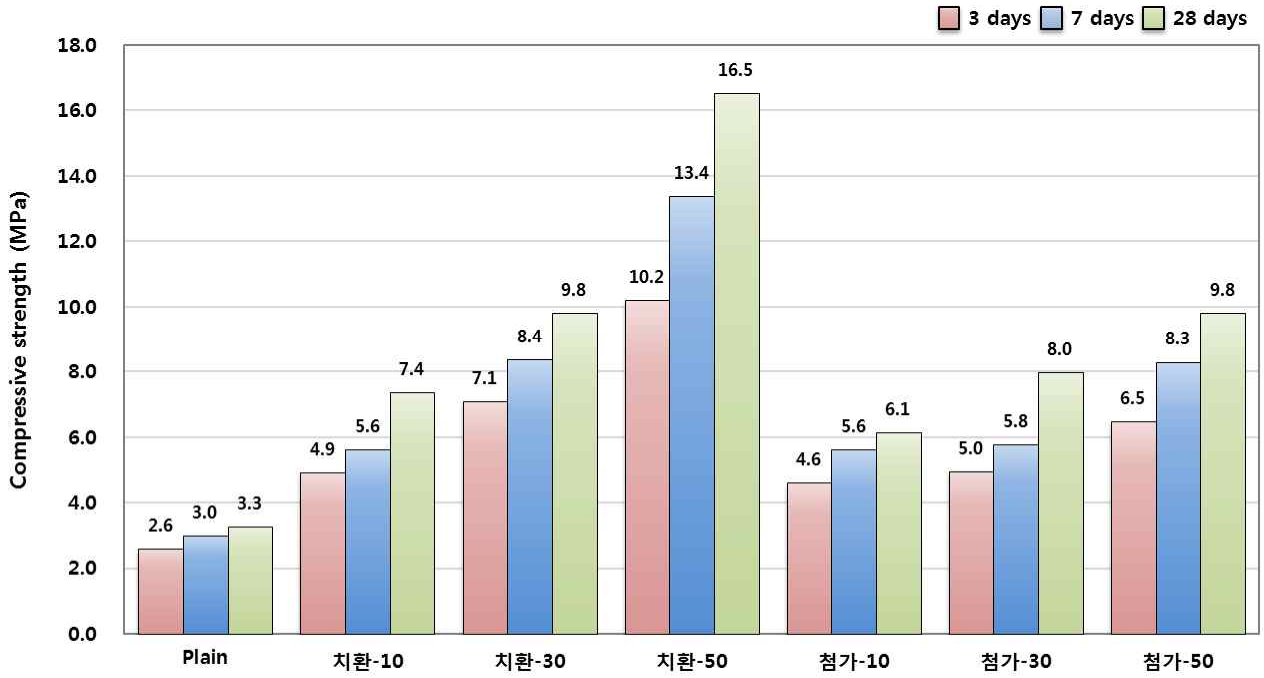
[그림 2-77] Na_2SiO_3의 치환율 및 첨가율에 따른 겉보기 밀도

(2) 압축 및 휨 강도

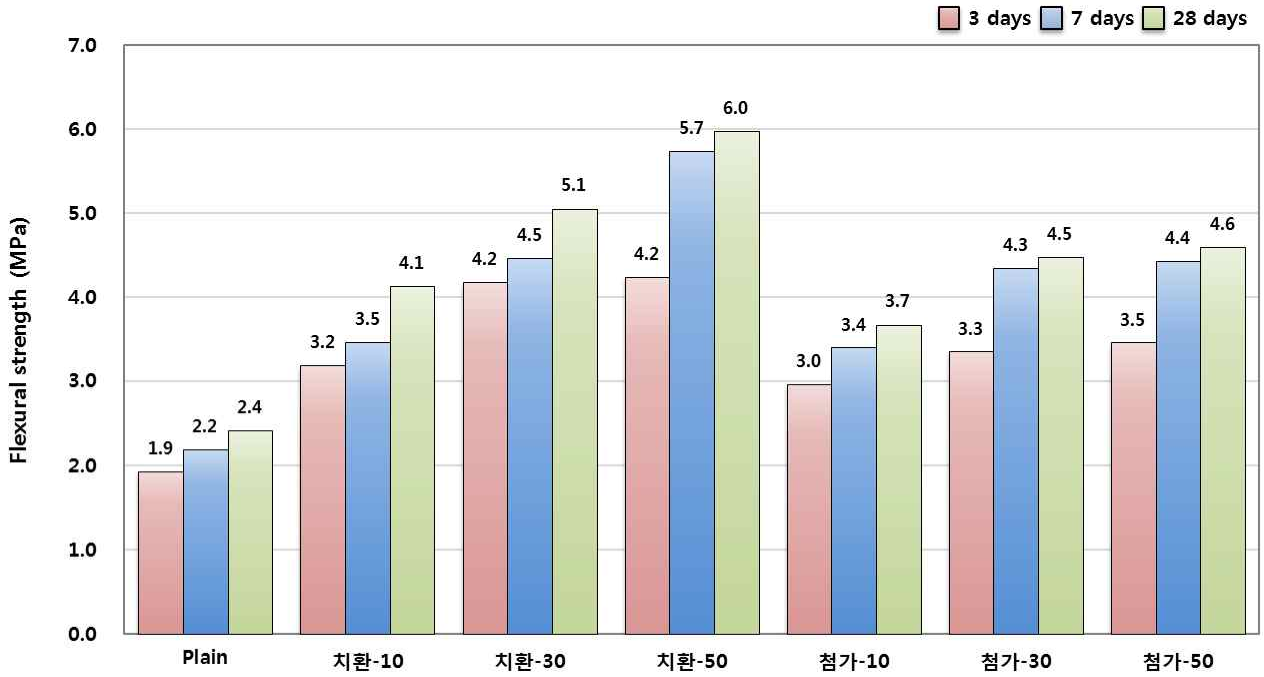
Na_2SiO_3의 치환율 및 첨가율에 따른 압축강도는 [그림 2-78]에 나타내었다. 그 결과, Plain의 압축강도가 3.3 MPa로 가장 낮은 강도발현을 하였고, 치환율 10 %인 경화체는 7.4 MPa, 치환율 30 %는 9.8 MPa, 50 %는 16.5 MPa로 겉보기 밀도의 경향과 마찬가지로 치환율에 따라 강도는 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, 첨가율에 따른 압축강도도 증가하는 경향을 나타내었는데, 첨가율 10 %는 6.1 MPa, 30 %는 8.0 MPa, 50 %는 9.8 MPa로 Na_2SiO_3를 치환한 경화체 보다는 낮은 강도발현을 하였다.

휨 강도는 [그림 2-79]와 같으며, 압축강도와 마찬가지로 Plain의 재령 28일 휨 강도가 2.4 MPa로 가장 낮은 강도발현을 하였으며, 치환율 10 %인 경화체는 4.1 MPa, 치환율 30 %는 5.1 MPa, 50 %는 6.0 MPa로 치환율에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 한편, Na_2SiO_3의 첨가율에 따른 휨 강도는 첨가율 10 %가 3.7 MPa, 30 % 4.5 MPa, 50 % 4.6 MPa로 나타났다.

따라서, 알칼리 자극제는 NaOH 이외에 추가로 사용하는 것은 강도를 발현하는데 있어서 강도를 개선할 수 있지만, 겉보기 밀도를 증가시키는 요소가 되기 때문에 10 %이상 사용하는 것은 정당하지 않은 것으로 판단되며, 10 %미만으로 소량 사용해야 할 것으로 보인다.



[그림 2-78] Na_2SiO_3의 치환율 및 첨가율에 따른 압축강도



[그림 2-79] Na_2SiO_3의 치환율 및 첨가율에 따른 휨 강도

바. 알칼리 자극제의 사용량 저감

1) 석고를 사용한 알칼리 자극제 사용저감 검토 (1)

가) 실험개요

본 실험은 고로슬래그를 기반으로 한 경화체의 응결 및 강도 보완을 위한 실험으로 시멘트 제조시 응결조절용으로 사용되는 석고를 사용하였다. 석고는 일반 시멘트 응결조절용인 천연석고와 건설폐기물 중 하나인 폐석고보드를 분말화한 폐석고보드 미분말과 부산인산석고를 사용하였다.

나) 실험계획 및 방법

본 실험은 결합재로써 고로슬래그와 천연석고, 폐석고보드 미분말, 부산인산석고를 사용하였으며, 고로슬래그에 석고의 SO_3 함유량을 기준으로 1, 2, 3, 4, 5 (%)로 치환하였다. 알칼리 자극제로써 NaOH를 결합재의 중량에 10% 첨가하였으며, W/B는 선행 실험을 고려하여 45%로 고정하였다. 시험항목으로는 플로우 콘 플로우와 경화체의 응결특성을 검토하기 위한 응결시험, 경화체의 굳은 성상을 검토하기 위한 압축강도를 측정하였으며, SEM 촬영과 EDS 분석을 하였다.

[표 2-45] 실험수준 및 요인

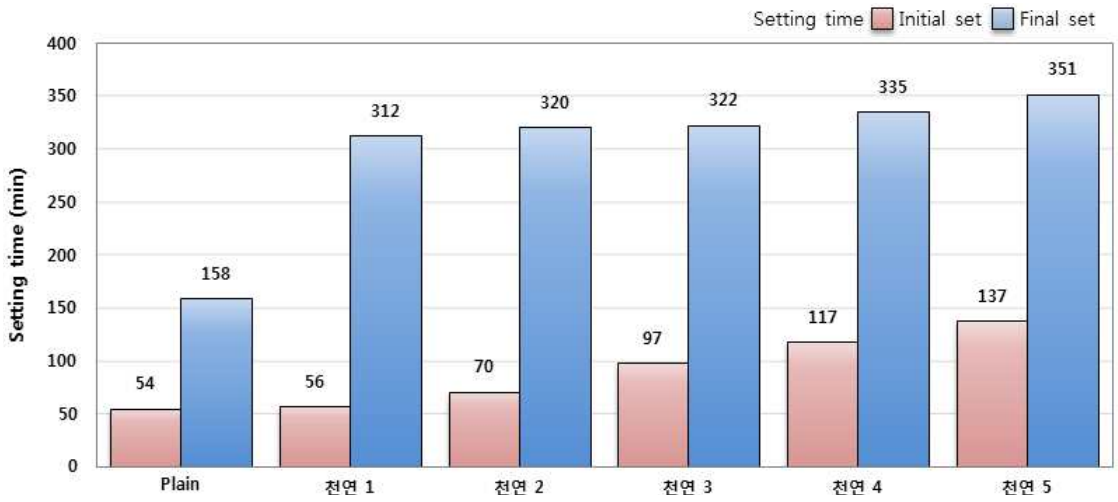
요인	수준
결합재 조건	• BFSa), BFS+G[b)]
석고의 종류	• NG[c)], GB[d)], PG[e)]
결합재 조건별 석고의 치환율	• Plain : 0%
	• BFS+G : 1, 2, 3, 4, 5 (%)
알칼리 자극제	• NaOH
알칼리 자극제 첨가율	• 10 (wt.%)
W/B	• 45%
양생조건	• 상대습도 80±5%, 온도 20±2℃
시험항목	• 테이블 플로우, 응결시험, 압축강도, SEM-EDS

a) BFS : 고로슬래그, b) G : 석고, c) NG : 천연석고, d) GB : 폐석고보드 미분말, e) PG : 부산인산석고

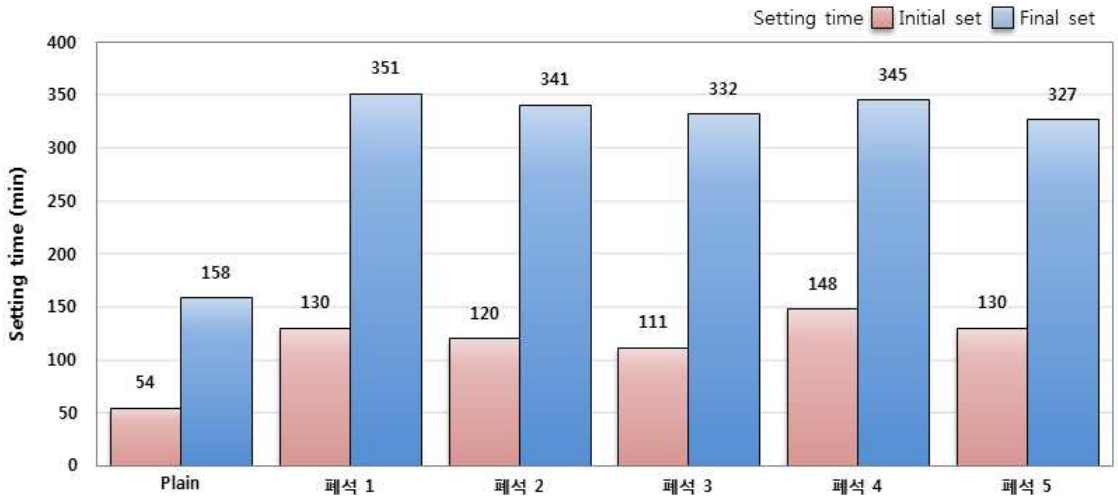
다) 실험결과

(1) 응결

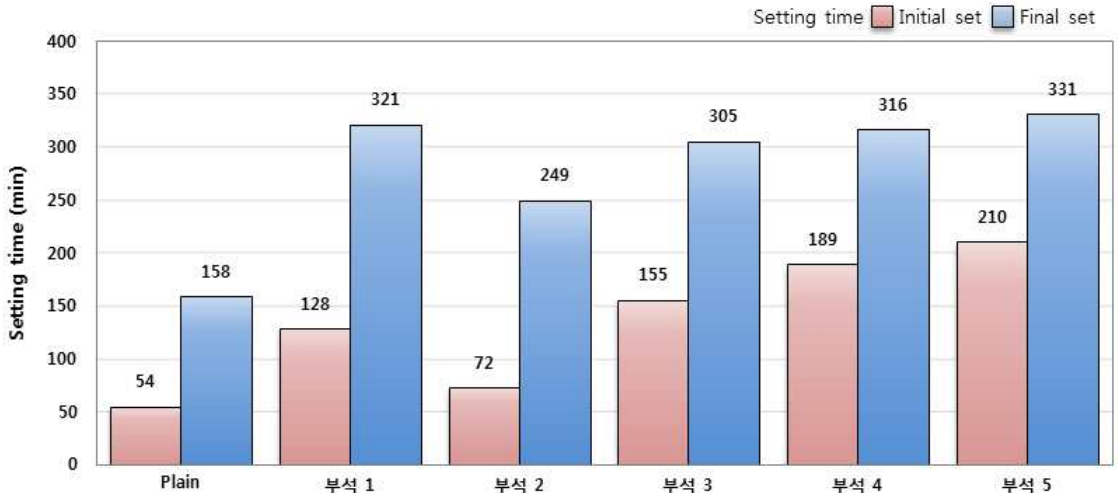
응결시험 결과, Plain의 종결시간 158분이 가장 빠른 시간을 나타내었으며, 천연석고는 치환율이 증가할수록 응결 시간이 늦어지는 경향을 나타내었다. 반면 폐석고보드 미분말은 치환율이 증가할수록 응결시간은 짧아지는 경향을 나타내었으며, 폐석고보드 미분말을 1% 치환하였을 경우와 천연석고를 5% 치환하였을 때 유사한 응결시간을 나타내었다. 부산인산석고는 2% 치환한 결합재부터 치환율이 증가할수록 응결시간이 늦어지는 경향을 나타내었다.



[그림 2-80] 천연석고의 치환율에 따른 응결시험



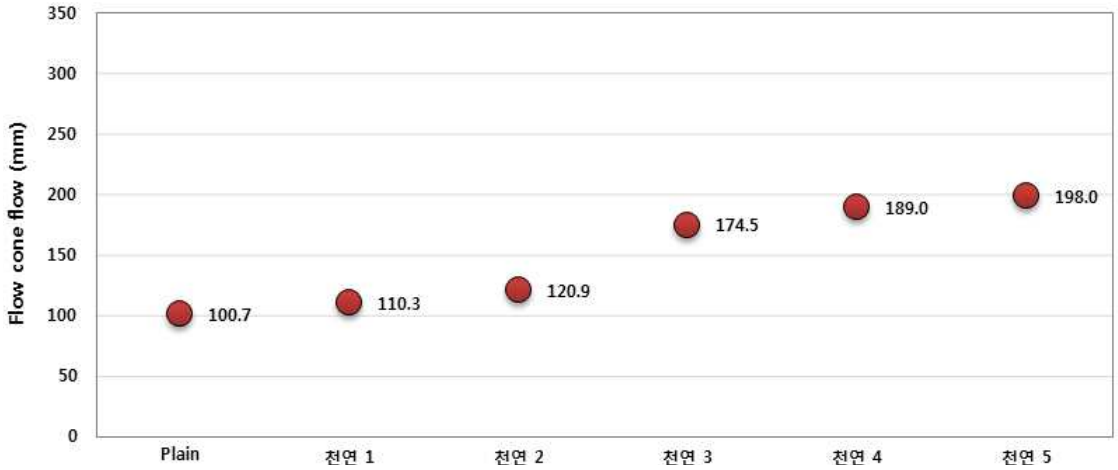
[그림 2-81] 폐석고보드 미분말의 치환율에 따른 응결시험



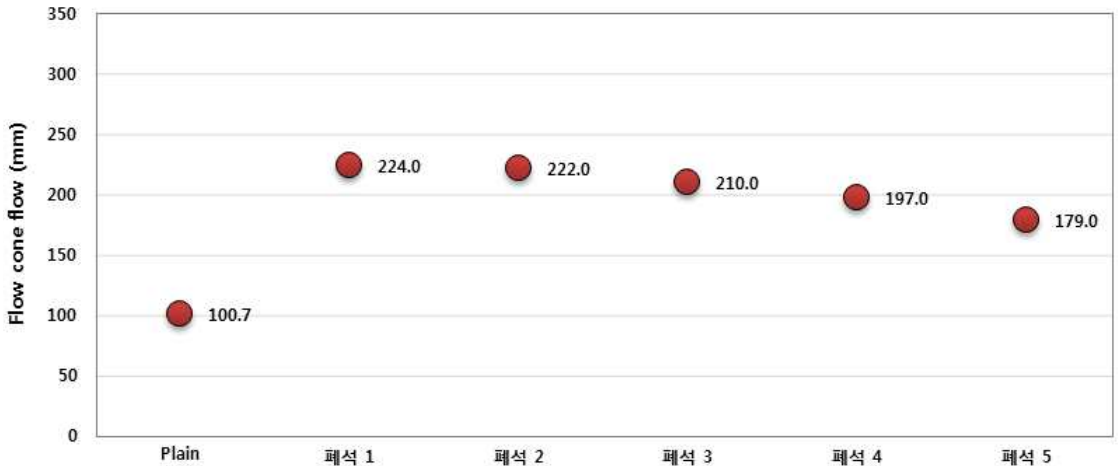
[그림 2-82] 부산인산석고의 치환율에 따른 응결시험

(2) 테이블 플로우

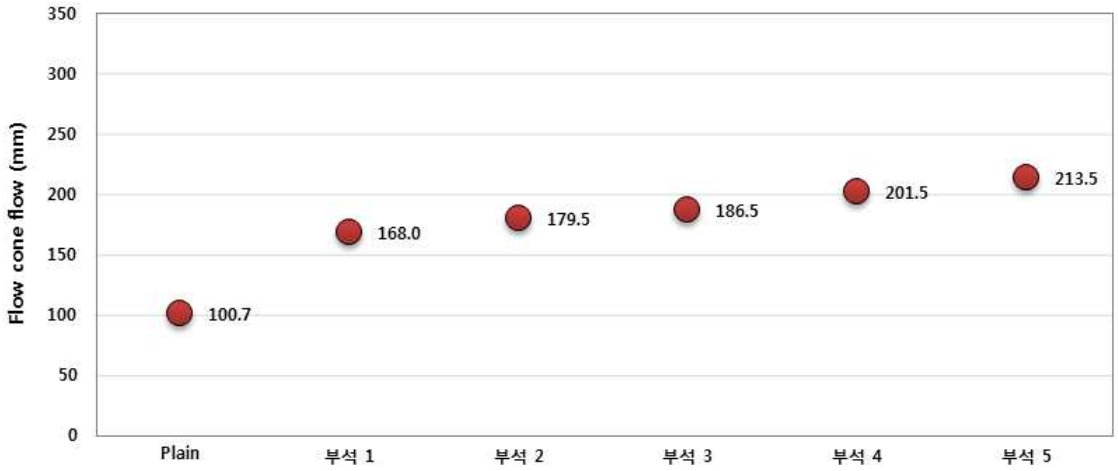
테이블 플로우 시험결과, Plain의 플로우가 가장 작았으며, 천연석고와 부산인산석고는 치환율에 따라 플로우가 커지는 경향을 나타내었다. 반면 폐석고보드 미분말은 치환율에 따라 플로우가 작아지는 경향을 나타내는데, 이는 폐석고보드 미분말 자체에 소량 함유되어 있는 석고보드의 보드류(종이)가 배합수를 흡수하여 나타난 결과인 것으로 판단된다.



[그림 2-83] 천연석고의 치환율에 플로우 콘 플로우



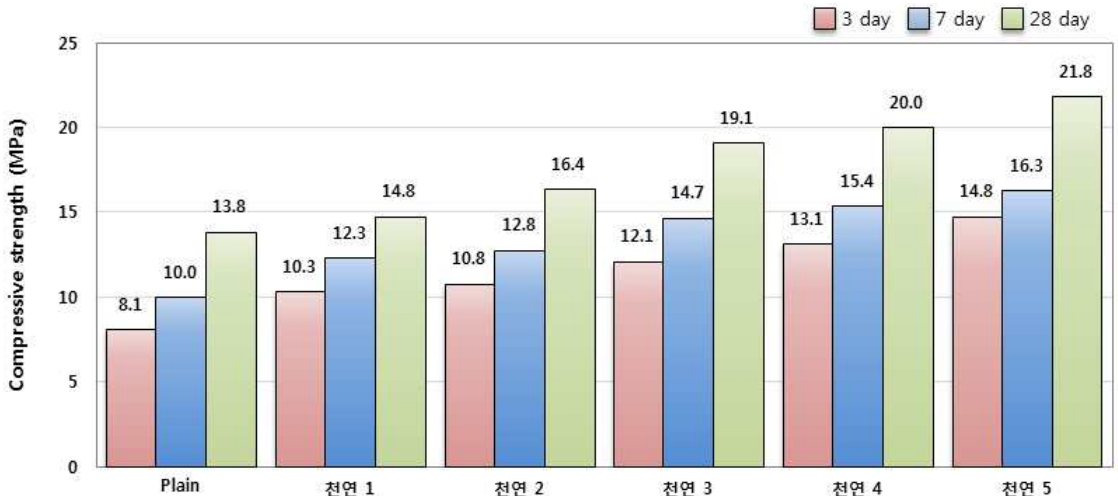
[그림 2-84] 폐석고보드 미분말의 치환율에 플로우 콘 플로우



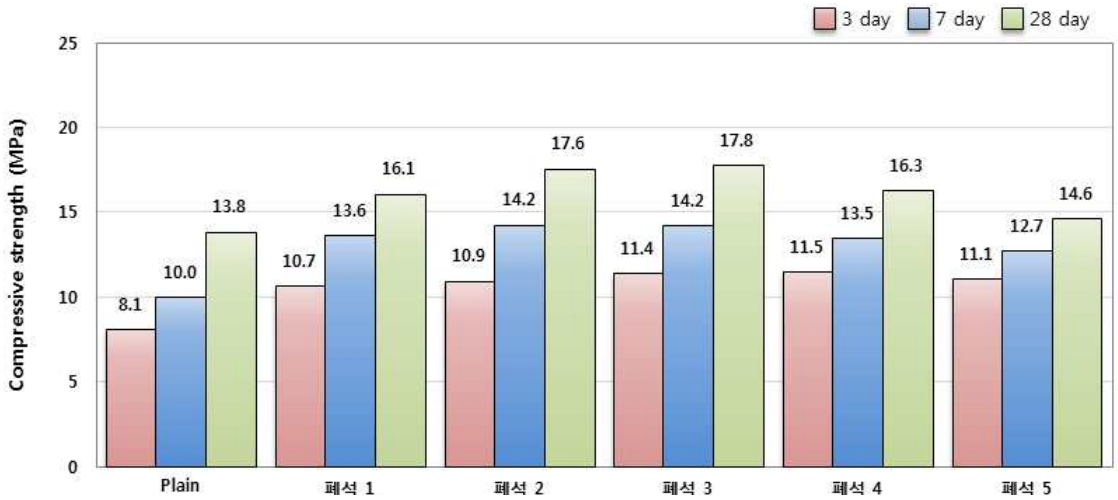
[그림 2-85] 부산인산석고의 치환율에 플로우 콘 플로우

(3) 압축강도

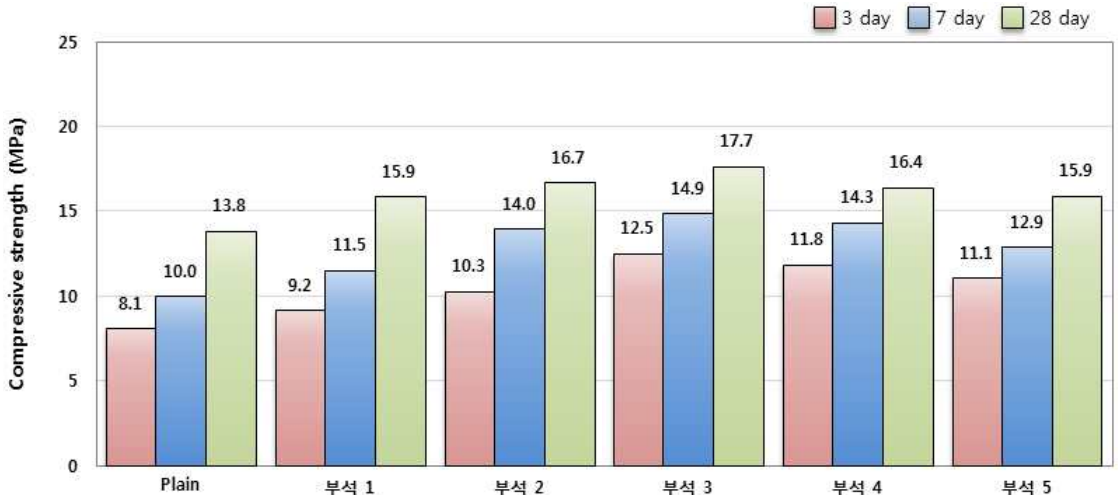
압축강도 측정 결과, Plain보다 석고를 치환한 경화체의 압축강도가 다소 높았으며, 천연석고를 5% 치환한 경화체의 압축강도가 가장 높은 것으로 나타났다. 또한, 천연석고는 치환율에 따라 높은 강도를 나타내었으며, 폐석고보드 미분말과 부산인산석고는 치환율 1%에서 3%까지 치환율이 증가됨에 따라 강도 또한 증진되는 경향을 나타내었으나, 치환율 3% 이후 치환율에 따라 강도가 저하되는 경향을 나타내었다.



[그림 2-86] 천연석고의 치환율에 압축강도



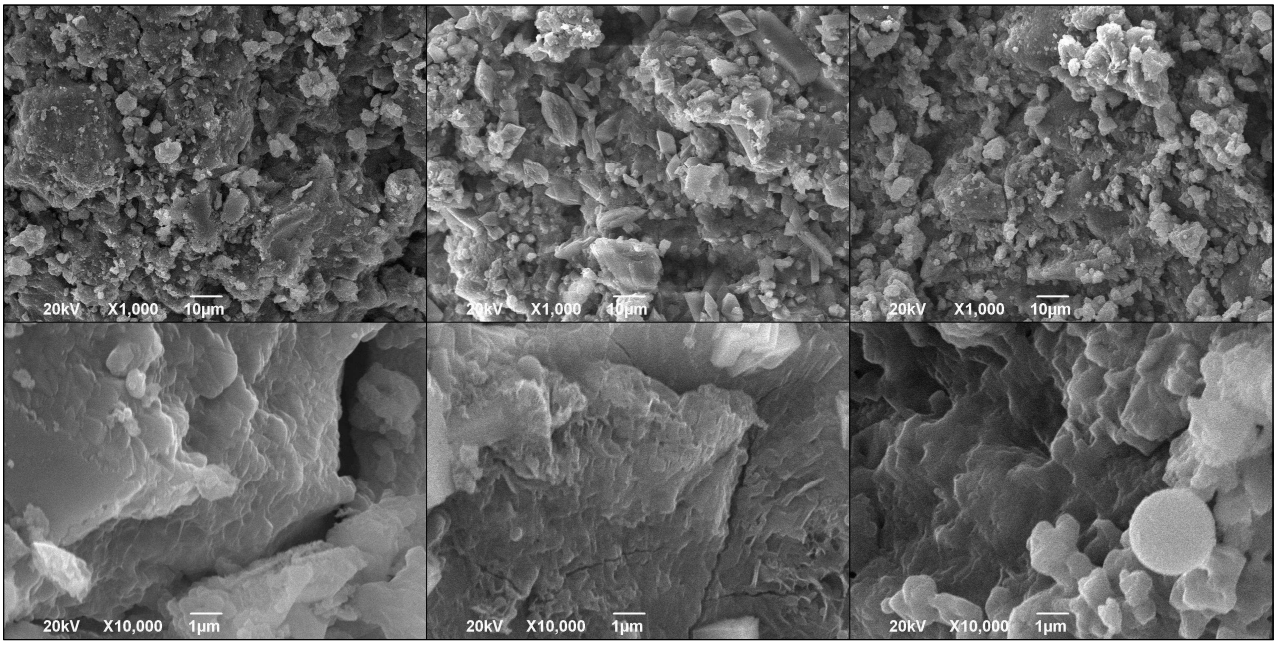
[그림 2-87] 폐석고보드 미분말의 치환율에 플로우 콘 플로우



[그림 2-88] 부산인산석고의 치환율에 플로우 콘 플로우

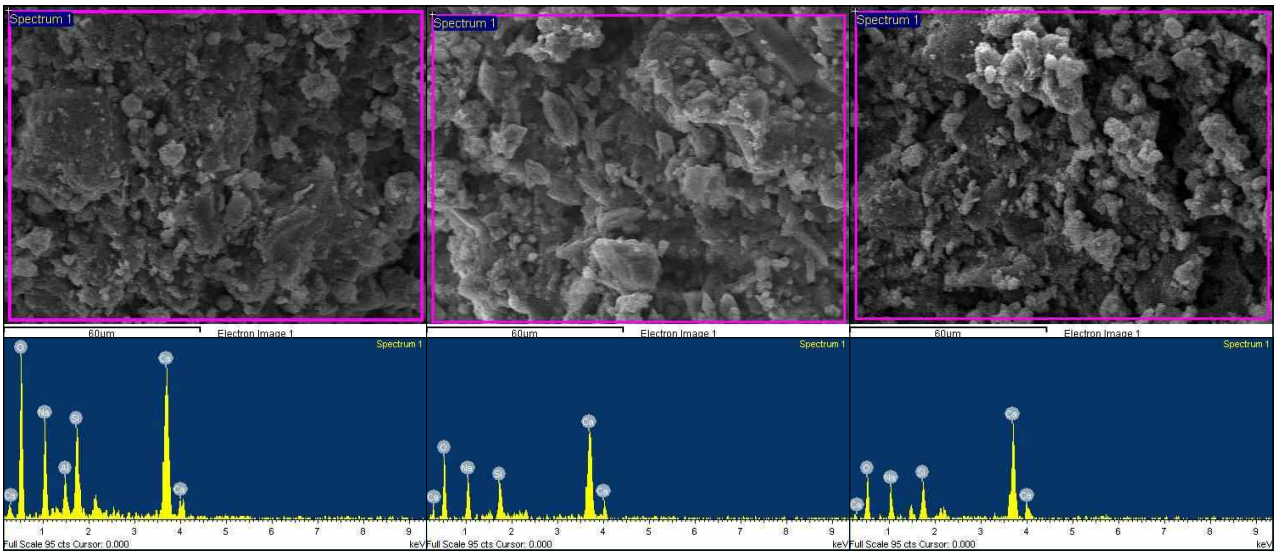
(4) SEM-EDS

석고를 치환하지 않은 Plain의 EDS 분석결과, 모든 재령에서 O, Ca, Na, Si, Al 성분이 검출된 것을 확인할 수 있었다. 또한, 성분의 함유량 차이가 미미하게 나타나지만 재령 3일의 경화체는 O 성분 70%이상 검출되었고 재령 7, 28일에서 Ca의 검출량이 미미하게 증가되었다. SEM 촬영 결과 재령 3일에서 일정한 형태가 없는 괴상이 관찰되었으나 재령일에 따라 좀 더 치밀한 형태를 보여주었으며, 재령 7일의 경화체에서 미세한 균열이 관찰된 것으로 보아 휨 및 압축강도의 저하원인이 될 것으로 판단된다.



(a) 재령 3일 (b) 재령 7일 (c) 재령 28일

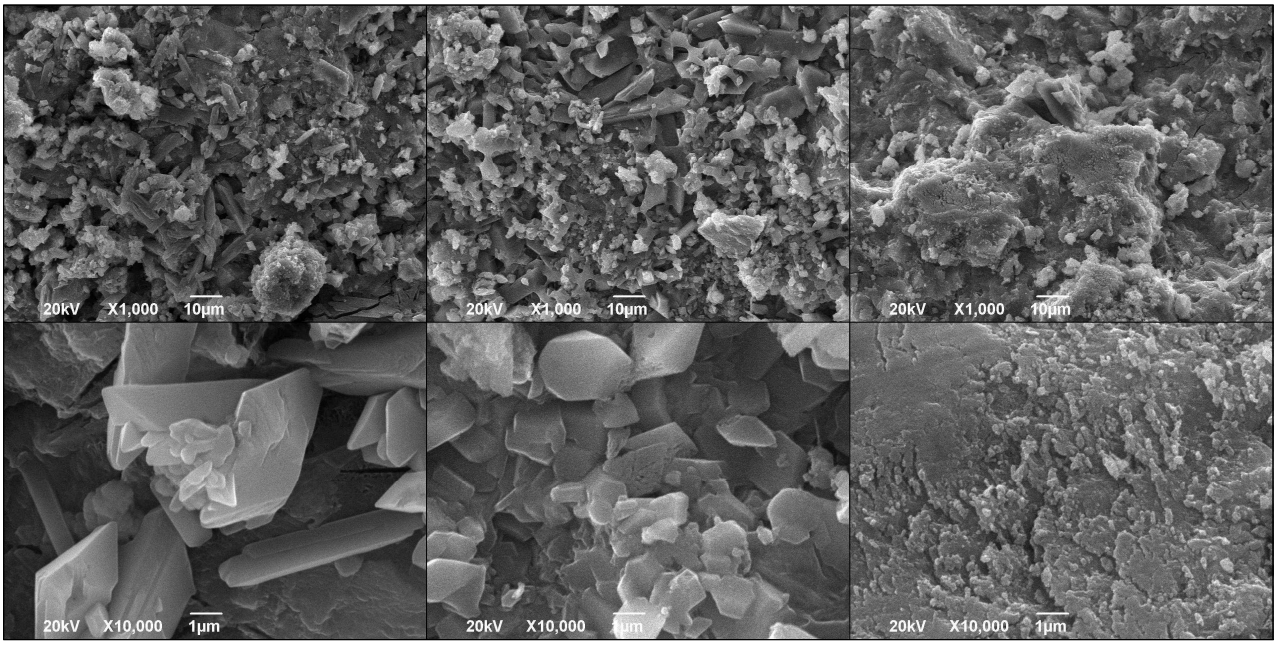
[사진 2-7] Plain의 재령별 SEM 사진



(a) 재령 3일 (b) 재령 7일 (c) 재령 28일

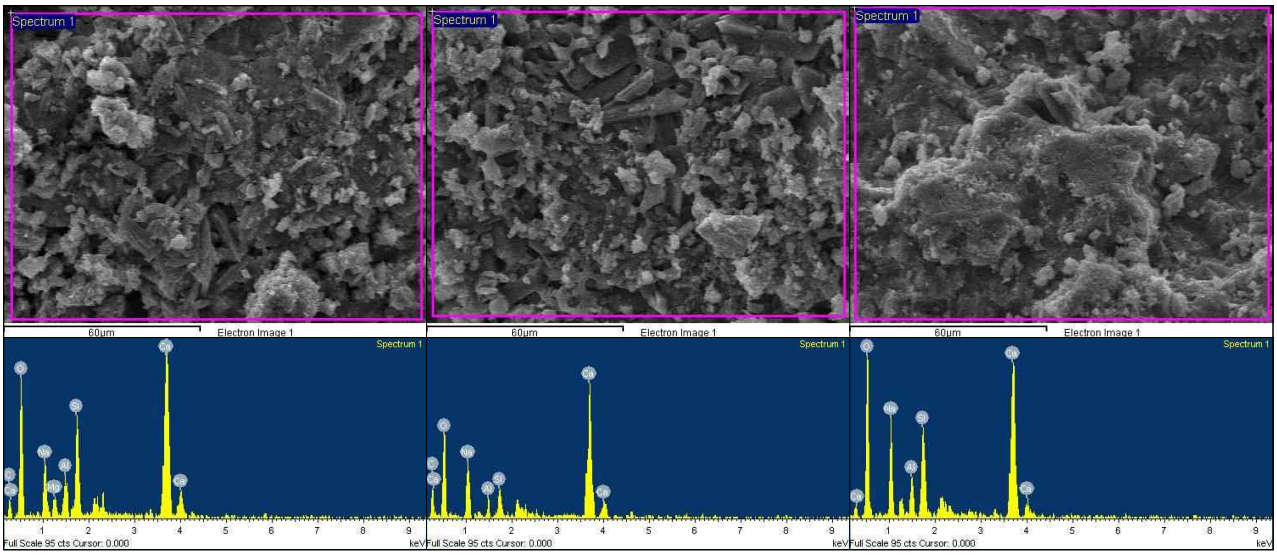
[표 2-46] Plain의 재령별 EDS 분석

천연석고를 치환한 경화체의 EDS 분석결과 Plain과 유사한 성분과 함유량을 나타내었으며, O 성분이 주를 이루었다. SEM 촬영결과, Plain과 달리 10,000배율에서 결정형상의 관찰되었으며, 재령일에 따라 결정의 크기는 다소 작아지고 결정과 결정사이가 치밀해지고 뭉쳐있는 상이 관찰되었다. 또한, 재령 28일의 경화체에서는 결정형상은 관찰되지 않았지만 매우 치밀한 조직이 관찰되었다. 이는 천연석고에 의한 압축강도의 강도발현이 다른 경화체와 달리 높은 것으로 보아 천연석고는 응결조절과 강도발현에 도움이 되는 것으로 판단된다.



(a) 재령 3일 (b) 재령 7일 (c) 재령 28일

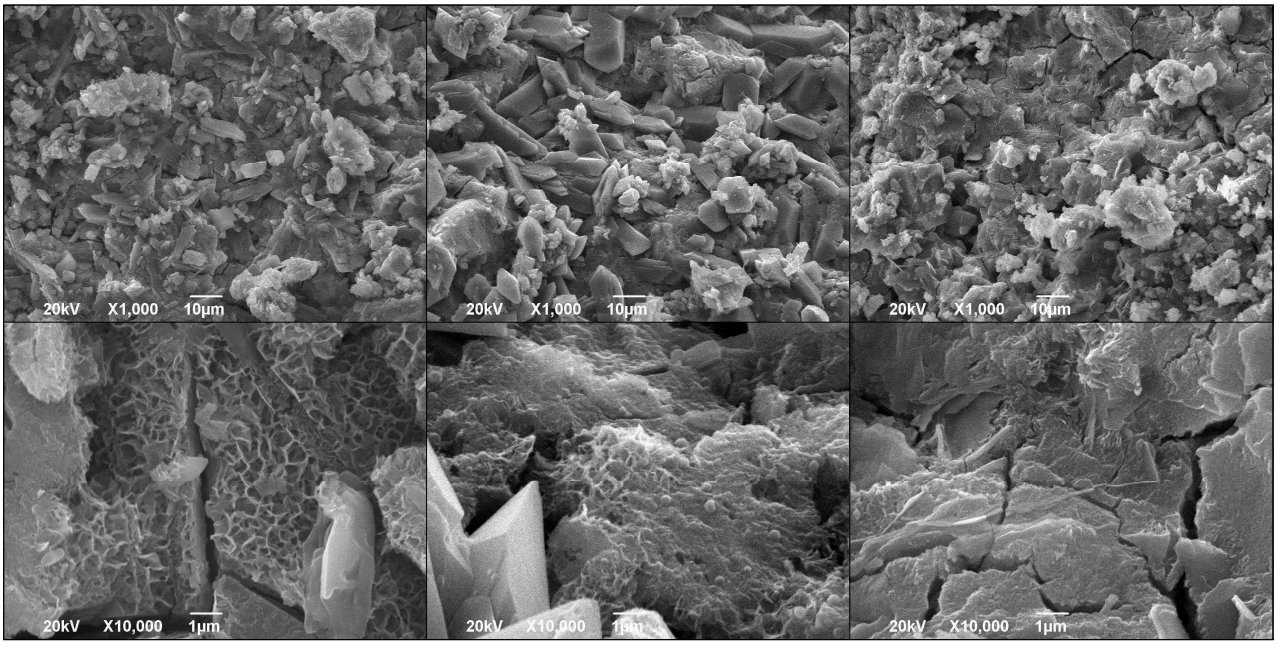
[사진 2-8] 천연석고를 치환한 경화체의 재령별 SEM 사진



(a) 재령 3일 (b) 재령 7일 (c) 재령 28일

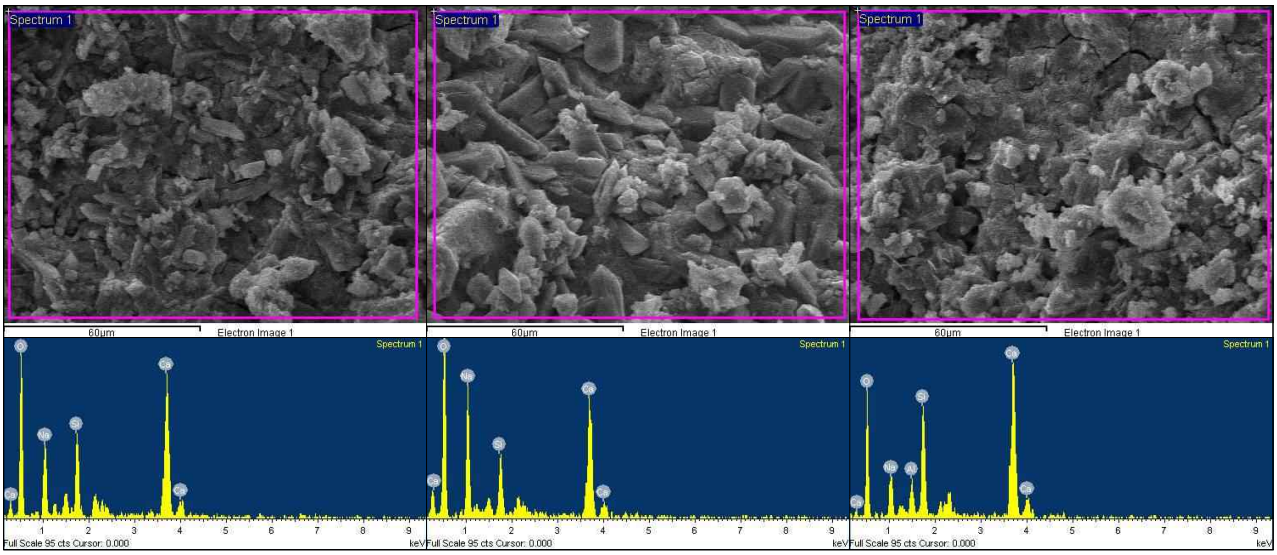
[표 2-47] 천연석고를 치환한 경화체의 재령별 EDS 분석

폐석고보드 미분말을 치환한 경화체의 EDS 분석결과 Plain과 같은 성분이 검출되었다. SEM 촬영결과 모든 재령의 경화체에서 미세한 균열이 관찰되었으며, 재령 28일의 경화체의 균열이 깊고 긴 균열이 발생되었다. 또한, 천연석고와 마찬가지로 결정이 관찰되었으나 재령일에 따라 결정과 결정이 결합되는 형태가 아닌 망상의 형태가 결합된 조직을 형성하였다.



(a) 재령 3일 (b) 재령 7일 (c) 재령 28일

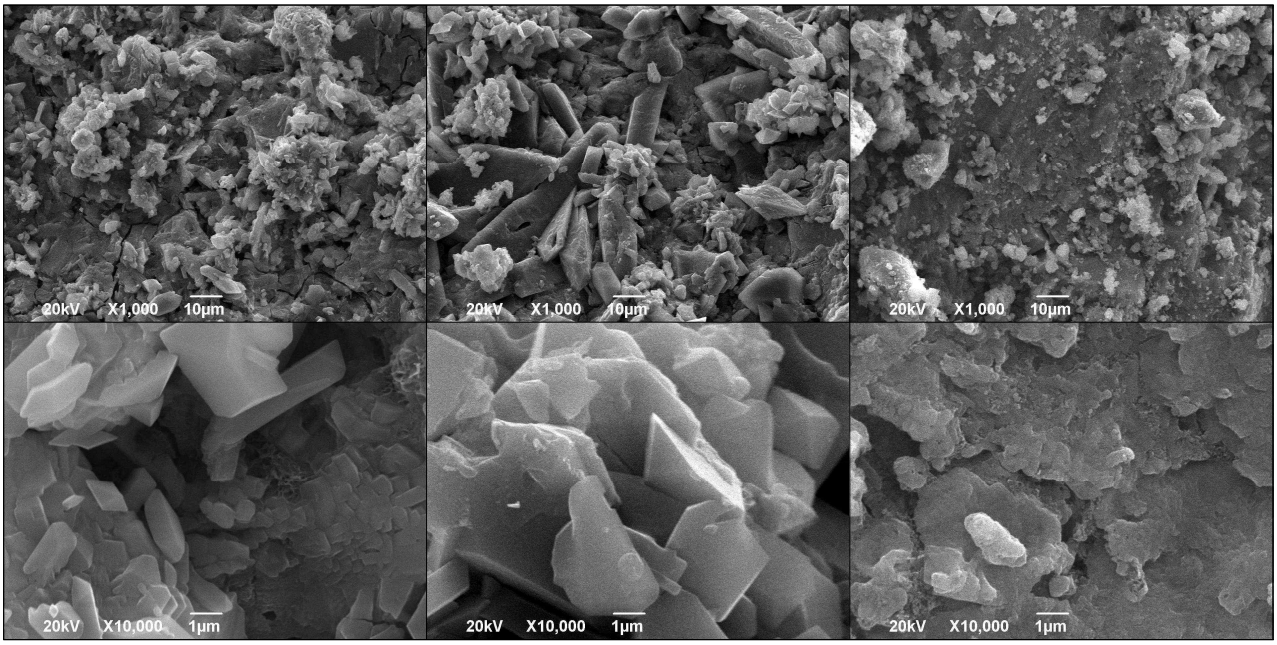
[사진 2-9] 폐석고보드 미분말을 치환한 경화체의 재령별 SEM 사진



(a) 재령 3일 (b) 재령 7일 (c) 재령 28일

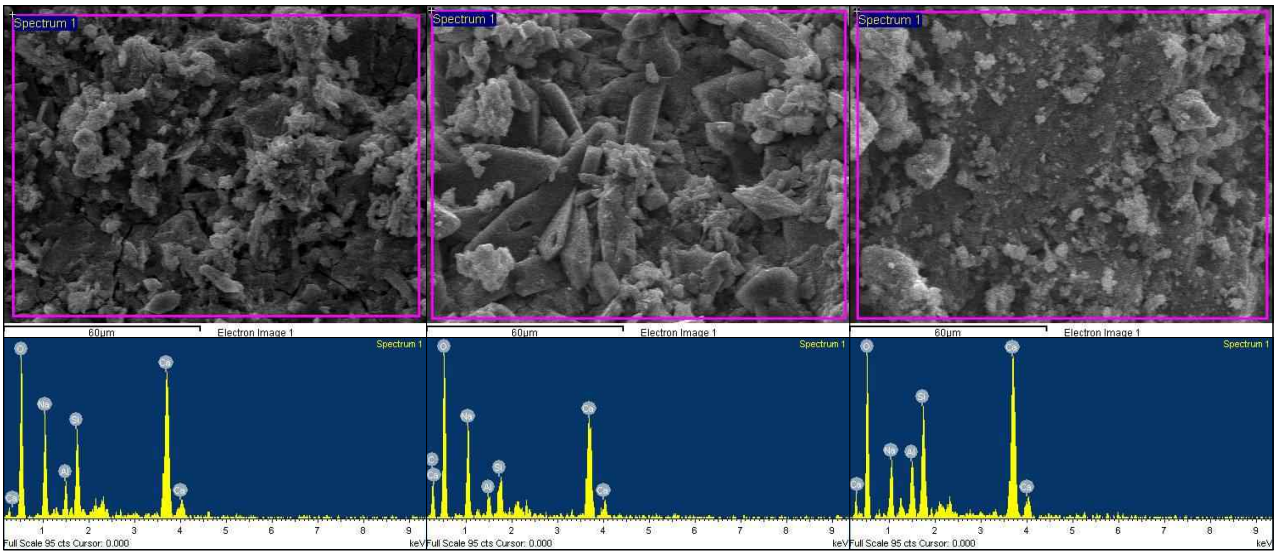
[표 2-48] 폐석고보드 미분말을 치환한 경화체의 재령별 EDS 분석

부산인산석고를 치환한 경화체의 EDS 분석결과 Plain, 천연석고, 폐석고보드 미분말과 같은 성분과 유사한 함유율을 나타내었다. SEM 촬영결과 천연석고에서 관찰된 결정과 폐석고보드 미분말을 치환한 경화체의 망상의 조직이 관찰되었다. 또한, 재령 28일의 경화체는 매우 치밀한 조직이 관찰되었다.



(a) 재령 3일 (b) 재령 7일 (c) 재령 28일

[사진 2-10] 부산인산석고를 치환한 경화체의 재령별 SEM 사진



(a) 재령 3일 (b) 재령 7일 (c) 재령 28일

[표 2-49] 부산인산석고를 치환한 경화체의 재령별 EDS 분석

실험 결과, 석고의 사용은 경화체의 강도증진 및 응결시간을 늦출 수 있는 요소 인 것으로 판단되며, 폐석고보드 미분말은 다량 사용할 경우 유동성 저하 및 강도저하의 요소가 될 수 있으나 폐기물을 재활용 한다는 점에서 본 연구개발에 사용할 경우 산업부산물의 재활용 뿐만 아니라 건설폐기물의 재활용까지 영역을 넓힐 수 있을 것으로 판단된다.

2) 석고를 사용한 알칼리 자극제 사용저감 검토 (1)

가) 실험개요

본 실험은 알칼리 자극제의 사용량을 줄이기 위하여 α형 반수석고를 사용하고 경화체의 특성 검토를 한 것으로 α형 반수석고를 알칼리 자극제에 치환하여 실험을 실시하였다.

나) 실험계획 및 방법

[표 2-50]에 나타낸 것 같이, 결합재는 고로슬래그를 사용하였고, 알칼리 자극제로는 NaOH, α형 반수석고를 사용하였고, 알칼리 자극제의 첨가율은 8.4%를 치환하였고, α형 반수석고의 치환율은 0, 3, 6, 13, 25, 50, 100 (%)로 총 7수준으로 고정하였다. W/B는 35%로 고정하였고, 시험항목으로는 압축 및 휨강도를 측정하였다.

[표 2-50] 실험수준 및 요인

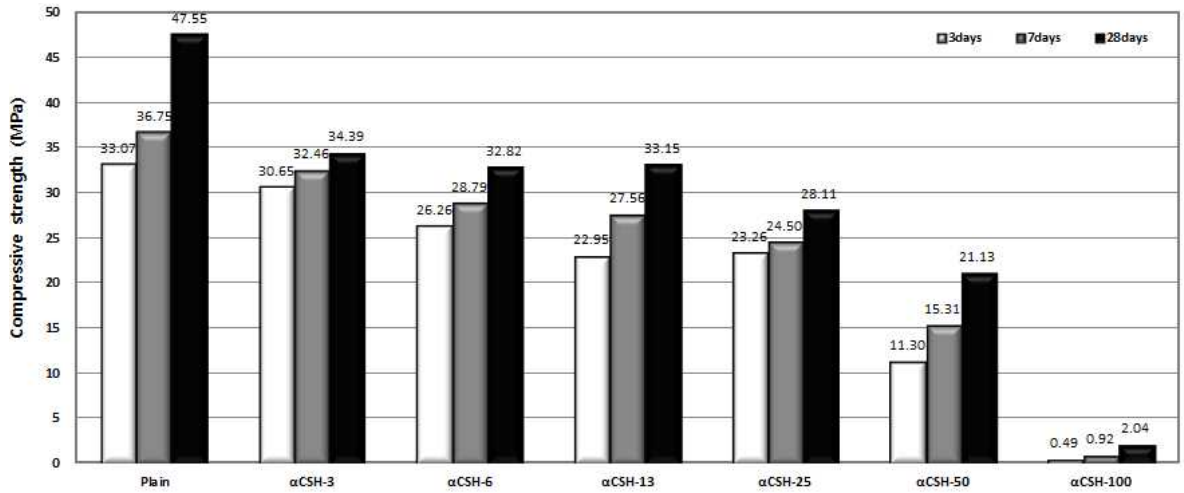
실험요인	실험수준
결합재 조건	• BFS[a)]
알칼리 자극제	• NaOH, αCSH[b)]
알칼리 자극제 첨가율	• 8.4 (wt.%)
αCSH 치환율	• 0, 3, 6, 13, 25, 50, 100 (wt.%)
W/B	• 35 %
양생조건	• 상대습도(80±5)%, 온도(20±2)℃
시험항목	• 압축 및 휨강도

a) BFS : 고로슬래그, b) αCSH : 알파형 석고

다) 실험결과

(1) 압축강도

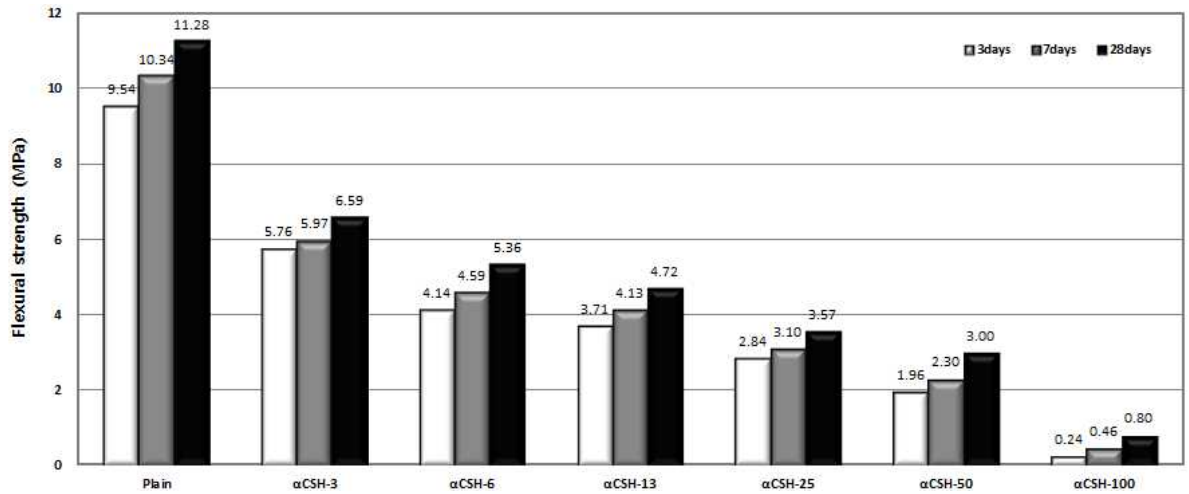
[그림 2-89]은 α형 반수석고의 치환율에 따른 압축강도를 나타낸 것으로, Plain이 47 MPa로 가장 높은 강도를 발현하였으며, αCSH-100 시험체가 가장 낮은 2.04 MPa를 나타냈다. 치환율에 따라 강도가 저하되는 것을 확인할 수 있었다.



[그림 2-89] α형 반수석고의 치환율에 따른 압축강도

(2) 휨강도

[그림 2-90]은 α형 반수석고의 치환율에 따른 휨강도를 나타낸 것으로, Plain이 11.28 MPa를 나타냈으며, αCSH-100 시험체가 0.80 MPa를 가장 낮게 발현하였다. 반수석고의 치환율이 증가할수록 강도가 저하되는 경향을 보였으며 압축강도와 유사한 경향을 보였으며, α형 반수석고의 사용은 강도발현에 도움을 주지 못하는 것으로 판단된다.



[그림 2-90] α형 반수석고 치환율에 따른 휨강도

3) 석고를 사용한 알칼리 자극제 사용저감 검토 (2)

가) 실험개요

본 실험은 고가의 알칼리 자극제의 사용량을 저감하기 위해 실시한 것으로 일반 시멘트의 구성 재료인 천연석고를 알칼리 자극제로 사용하였고, 실험에서 사용한 천연석고의 화학성분은 [표 2-51]에 나타낸 것과 같이 CaO를 38 %, SO_3를 53.5 % 함유하고 있다.

[표 2-51] 천연석고의 화학성분

질량백분율 (%)

분자	CaO	SO_3	etc.
함유량	38.00	53.50	8.50

나) 실험계획 및 방법

본 실험의 수준 및 요인은 [표 2-52]에 나타낸 것과 같이 결합재로써 고로슬래그와 제지애시를 사용하였으며, 그 비율은 95 : 5로 고정하였다. 고로슬래그의 활성화와 제지애시의 수소기체 발생을 위해 사용한 알칼리 자극제는 NaOH이며, 결합재 중량에 12.5 %를 첨가하여 사용하였으며, 천연석고는 NaOH의 중량에 0, 5, 10, 15, 25, 35, 45 (%) 등으로 총 7수준 치환하였다. 시험항목으로는 경화체의 경량성을 검토하기 위해 겉보기 밀도 및 단위용적질량을 분석하였으며, 그에 따른 압축 및 휨 강도를 측정하였다.

[표 2-52] 실험수준 및 요인

요인	수준
결합재 조건	• BFSa)+PAb)
제지애시 치환율	• 5 %
NaOH 첨가율	• 12.5 %
천연석고 치환율	• 0, 5, 10, 15, 25, 35, 45 (%)
W/B	• 0.40
양생조건	• 습도 80±5 %, 온도 20±2 ℃
시험항목	• 겉보기 밀도, 압축 및 휨 강도

a) BFS : 고로슬래그, b) PA : 제지애시

다) 실험결과

(1) 밀도

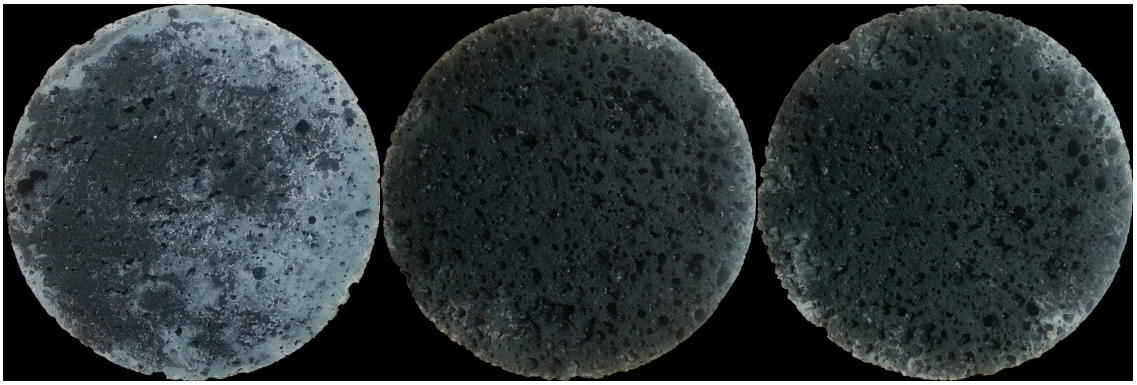
[그림 2-91]는 경량 경화체의 경량성을 확인하기 위한 밀도 시험결과를 나타낸 것으로, 단위용적질량은 Plain 1.908 g/㎤로 가장 작은 값을 나타내었으며, NG-5%는 1.908 g/㎤, NG-10% 1.909 g/㎤, NG-15% 1.910 g/㎤, NG-25% 1.911 g/㎤, NG-35% 1.912 g/㎤, NG-45% 1.914 g/㎤로 석고의 치환율에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 겉보기 밀도는 전체적인 경향이 단위용적질량과 유사하게 나타났으며, Plain의 겉보기 밀도가 1.03 g/㎤, NG-5% 1.11 g/㎤, NG-10% 1.11 g/㎤, NG-15% 1.07 g/㎤, NG-25% 1.18 g/㎤, NG-35% 1.17 g/㎤, NG-45% 1.31 g/㎤로 Plain의 겉보기 밀도가 가장 경량이었으며, 치환율에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 단위용적질량의 증가뿐만 아니라 제지애시와 반응하여야 하는 NaOH의 양이 감소하여 수소 기체의 발생량도 저하되었기 때문이다.



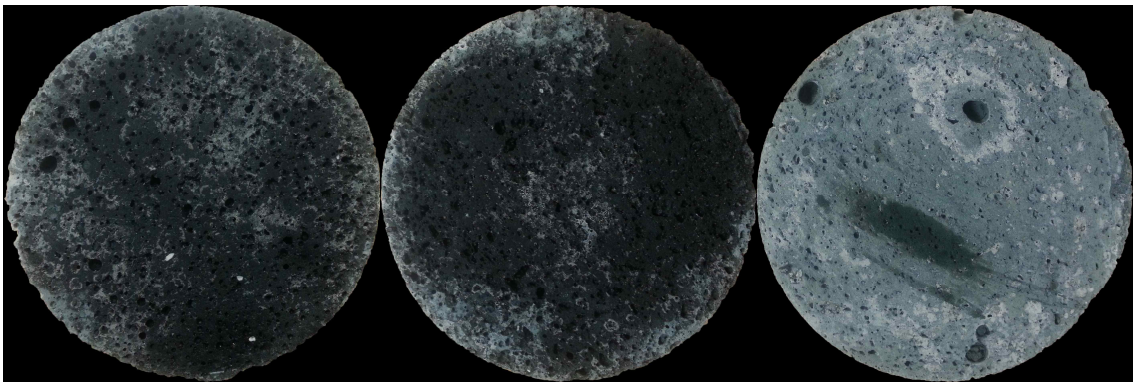
[그림 2-91] 천연석고의 치환율에 따른 겉보기 밀도



(a) Plain



(b) NG-5% (c) NG-10% (d) NG-15%



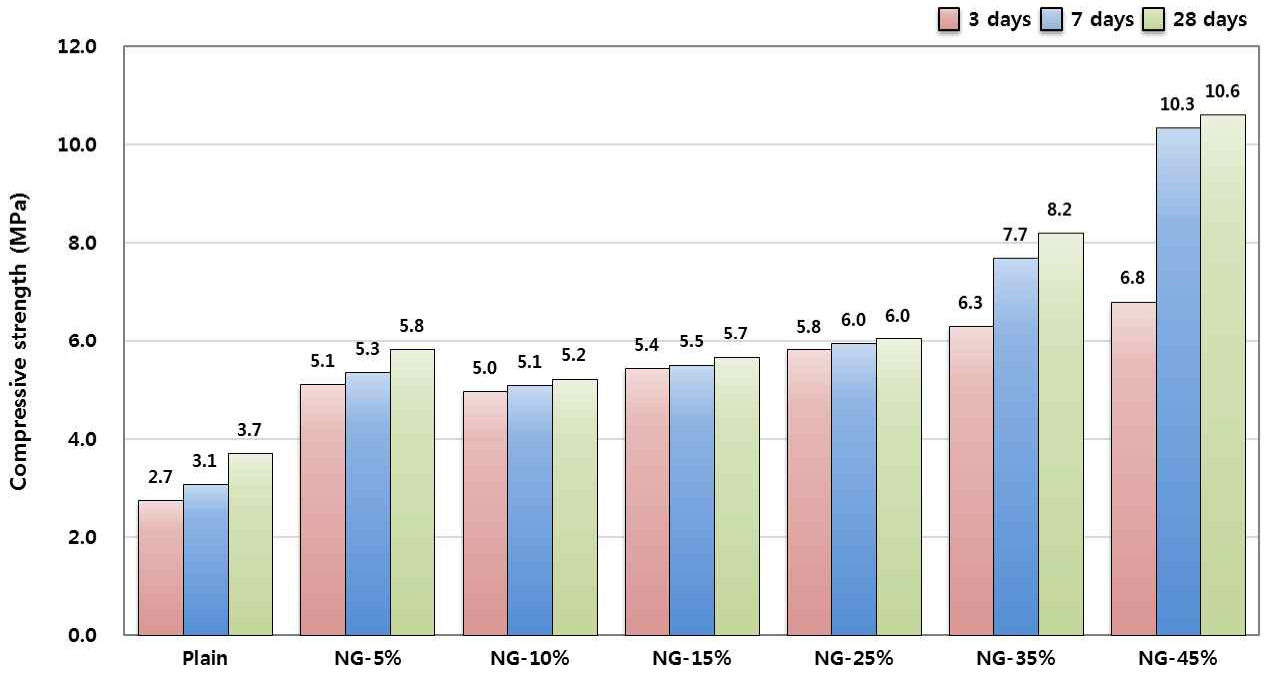
(e) NG-25% (f) NG-35% (g) NG-45%

[그림 2-92] 천연석고의 치환율에 따른 경화체의 단면형상

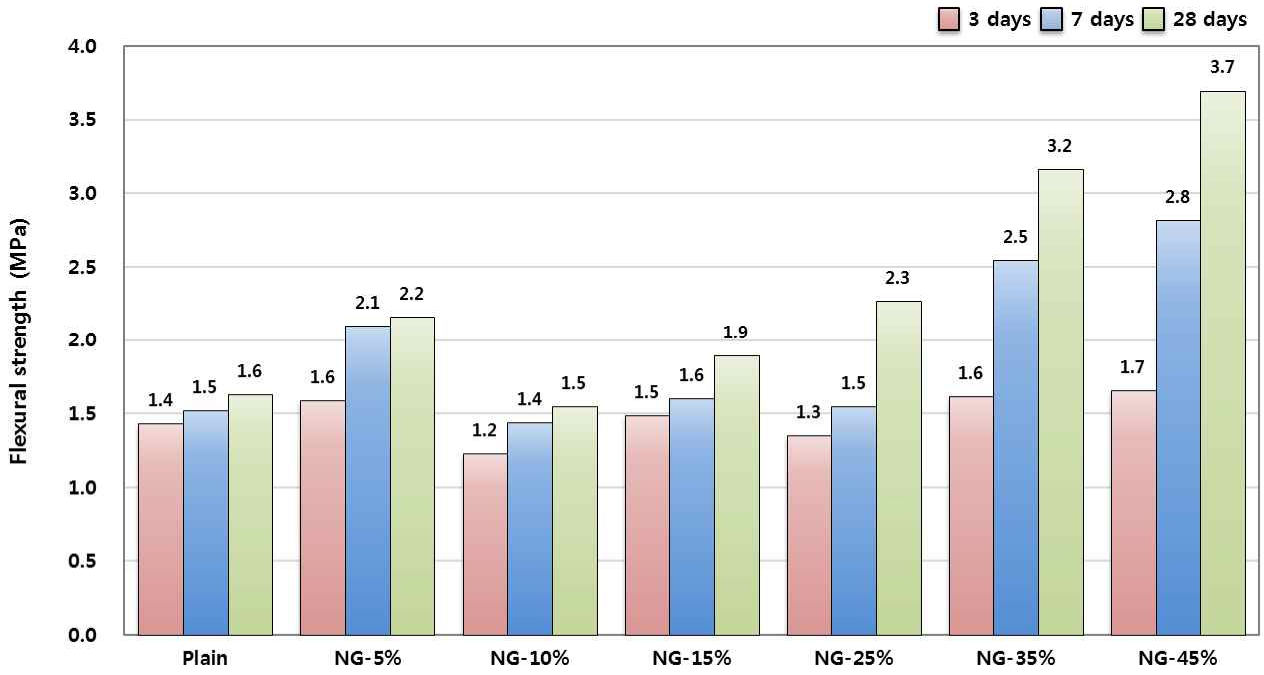
(2) 압축 및 휨 강도

[그림 2-93]은 압축강도를 나타낸 것으로, 재령 3일의 경우 Plain이 2.7 MPa로 가장 낮은 강도를 나타내었으며, NG-5% 5.1 MPa, NG-10% 5 MPa, NG-15% 5.4 MPa, NG-25% 5.8MPa, NG-35% 6.3 MPa NG-45% 6.8 MPa로 치환율에 따라 강도가 증가하는 경향을 나타내었다. 한편 NG-10%와 NG-15%, NG-25%는 Plain과 NG-35%, NG-45%의 강도증진율보다 현저히 낮게 나타났는데, 재령 3, 7, 28일의 강도 증진이 NG-10%의 경우 0.1, 0.1 MPa이었고, NG-15%는 0.1, 0.2 MPa, NG-25%는 0.2, 0.0 MPa로 나타났다.

휨 강도 시험결과는 [그림 2-94]에 나타내었는데, 전체적인 경향은 압축강도와 유사게 천연석고의 치환율 10 %부터 재령일에 따라 강도가 증진되는 경향을 나타내었고, 재령 28일 경화체의 휨 강도는 NG-5% 1.6 MPa, NG-10% 2.2 MPa, NG-15% 1.5 MPa, NG-25% 2.3 MPa, NG-35% 3.2 MPa NG-45% 3.7 MPa로 나타내었다.



[그림 2-93] 천연석고의 치환율에 따른 압축강도



[그림 2-94] 천연석고의 치환율에 따른 휨 강도

4) 석고를 사용한 알칼리 자극제 사용저감 검토 (3)

가) 실험개요

본 실험은 알칼리 자극제의 사용량을 저감하기위해 폐석고보드 미분말을 알칼리 자극제에 치환하여 실시한 것으로, 폐석고보드 미분말은 건설현장에서 발생하는 폐석고보드를 분말화하여 유해물질을 제거한 것으로 SO_3, CaO 성분을 다량함유하고 있다. 또한, 시멘트의 혼화재료로 사용할 경우 고강도성, 팽창성의 특성을 나타낼 수 있는 재료이며, Na_2O 및 K_2O를 소량 함유하고 있어 알칼리성을 나타내고 있다. 폐석고보드 미분말의 화학성분은 [표 2-5]에 나타내다.

[표 2-53] 폐석고보드 미분말의 화학성분

질량백분율 (%)

분자	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2
함유량	1.60	0.69	0.22	54.32	0.23	41.47	0.1	0.46	0.49

나) 실험계획 및 방법

본 실험의 수준 및 요인은 [표 2-54]에 나타낸 것과 같이 고로슬래그와 제지애시의 비율을 95 : 5로 고정하여 알칼리 자극제는 NaOH를 사용하였고, 결합재 중량에 12.5 %를 첨가하여 사용하였다. 폐석고보드 미분말은 NaOH의 중량에 0, 5, 10, 15, 25, 35, 45 (%) 등으로 총 7수준으로 치환하였다.

[표 2-54] 실험수준 및 요인

요인	수준
결합재 조건	▪ BFS[a)]+PA[b)]
제지애시 치환율	▪ 5 %
NaOH 첨가율	▪ 12.5 %
폐석고보드 미분말 치환율	▪ 0, 5, 10, 15, 25, 35, 45 (%)
W/B	▪ 0.40
양생조건	▪ 습도 80±5 %, 온도 20±2 ℃
시험항목	▪ 밀도, 압축 및 휨 강도

a) BFS : 고로슬래그, b) PA : 제지애시

다) 실험결과

(1) 밀도

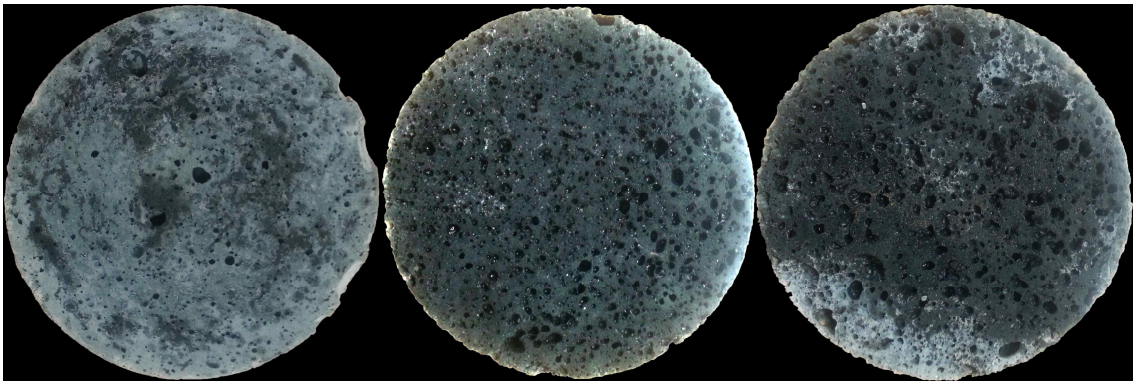
폐석고보드 미분말의 치환율에 따른 겉보기 밀도는 [그림 2-95]에 나타내었다. 그 결과, 폐석고보드 미분말의 치환율에 따른 단위용적질량은 1.908 g/㎤에서 1.909 g/㎤로 큰 차이는 없었으며, 겉보기 밀도는 Plain의 경우 1.05 g/㎤로 나타났다. BG-5%는 1.29 g/㎤, BG-10%는 1.20 g/㎤, BG-15%는 1.03 g/㎤, BG-25%는 1.06 g/㎤, BG-35%는 1.09 g/㎤, BG-45%는 1.27 g/㎤로 폐석고보드 미분말의 치환율이 15 %까지 겉보기 밀도가 감소하는 경향을 나타내었고, 이후 치환율에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 [그림 2-96]에 나타낸 경화체의 단면형상에서 볼 수 있듯이 겉보기 밀도의 경향과 마찬가지로 경화체 단면의 공극의 감소와 증가를 나타낸 것으로 확인할 수 있는데, 제지애시와 NaOH의 사용으로 발생하는 수소가 NaOH의 사용량이 감소되어 결합재의 응결시간이 늘어나 수소발생 시간동안 페이스트 내에 공극량이 증가하여 치환율 15 %까지 밀도가 감소되는 것이며, 이후 치환율이 증가할수록 NaOH 자체의 사용량이 감소하여 수소발생량도 감소함으로써 나타난 결과인 것으로 판단된다.



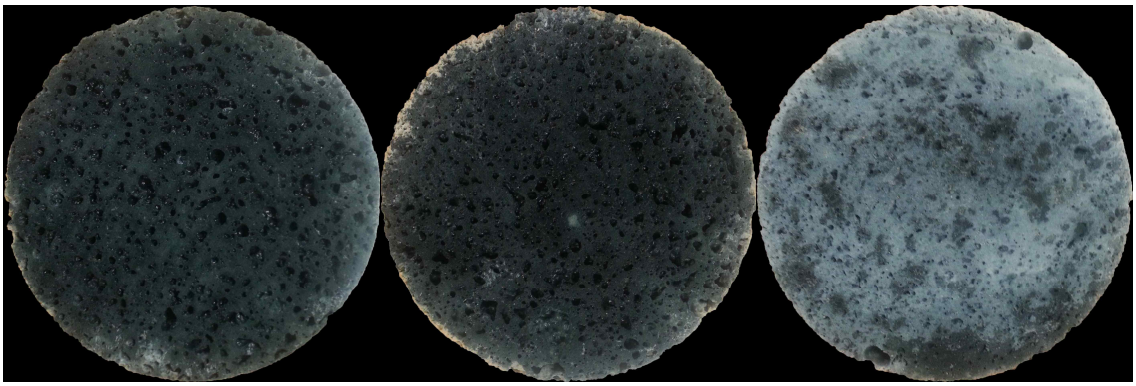
[그림 2-95] 폐석고보드 미분말의 치환율에 따른 겉보기 밀도



(a) Plain



(b) BG-5% (c) BG-10% (d) BG-15%



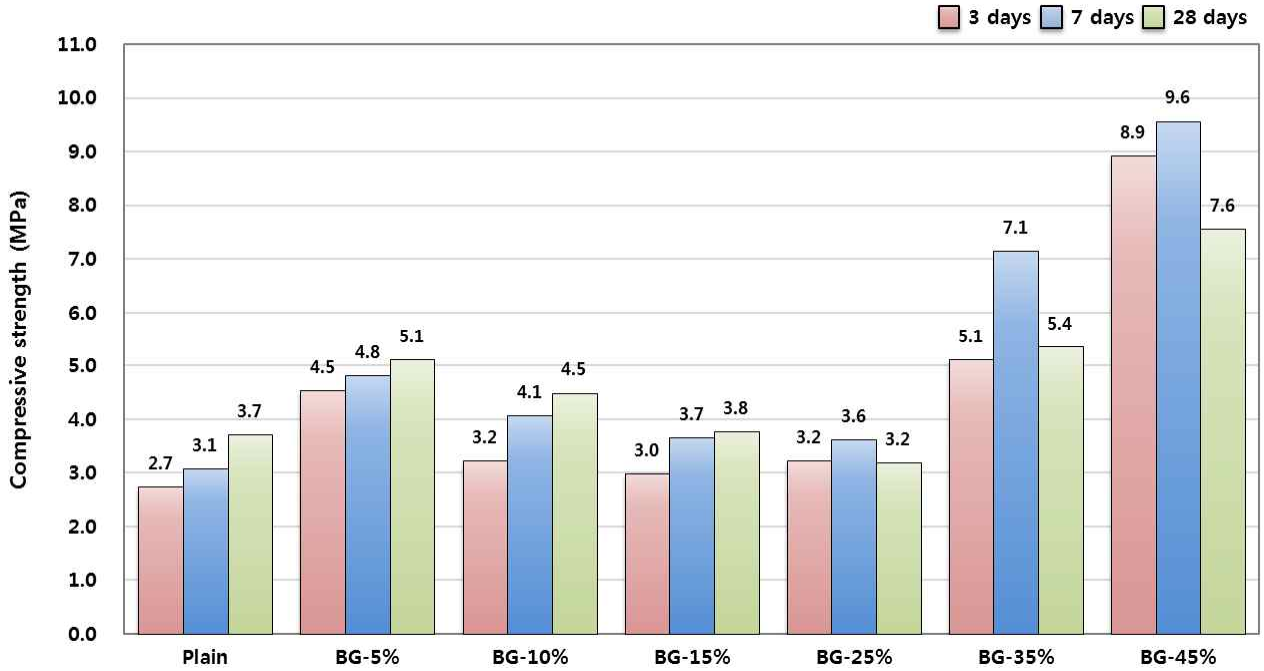
(e) BG-25% (f) BG-35% (g) BG-45%

[그림 2-96] 폐석고보드 미분말의 치환율에 따른 경화체의 단면형상

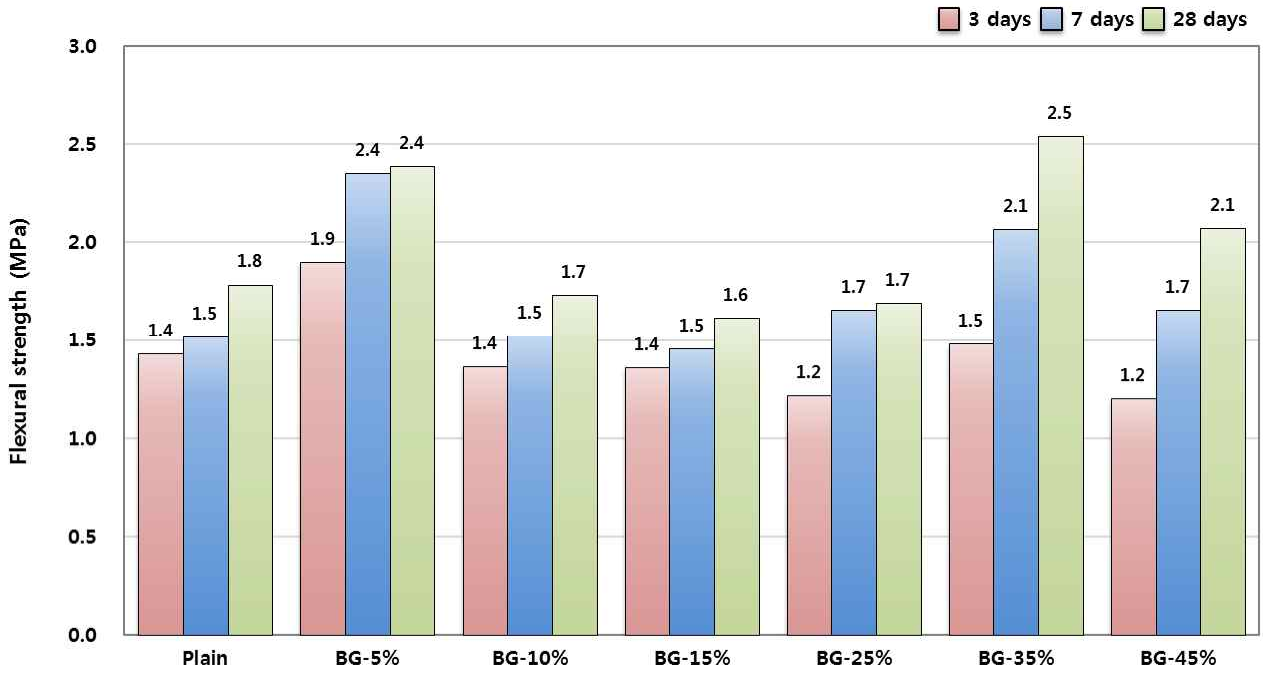
(2) 압축 및 휨 강도

[그림 2-97]는 폐석고보드 미분말의 치환율에 따른 압축강도를 나타낸 것으로, 경화체의 겉보기 밀도와 유사한 경향을 나타내었는데, Plain의 경우 재령 28일의 압축강도가 3.7 MPa를 나타내었고, BG-5%는 5.1 MPa, BG-10%는 4.5 MPa, BG-15%는 3.8 MPa, BG-25%는 3.2 MPa, BG-35%는 5.4 MPa, BG-45%는 7.6 MPa로 BG-25%와 BG-35%, BG-45%는 재령 7일보다 28일의 강도가 저하되었다. 이는 폐석고보드 미분말의 함유되어 있는 소량의 이물질이 폐석고보드 미분말의 사용량이 많아지면서 강도발현을 저하시켜 나타난 결과인 것으로 판단된다.

휨 강도 시험결과는 [그림 2-98]에 나타내었는데, Plain의 재령 28일 휨 강도는 1.8 MPa, BG-5%는 2.4 MPa, BG-10%는 1.7 MPa, BG-15%는 1.6 MPa, BG-25%는 1.7 MPa, BG-35%는 2.5 MPa, BG-45%는 2.1 MPa로 나타났다. 한편, BG-35%의 휨 강도가 2.5 MPa로 가장 높은 강도를 나타내었다.



[그림 2-97] 폐석고보드 미분말의 치환율에 따른 압축강도



[그림 2-98] 폐석고보드 미분말의 치환율에 따른 휨 강도

5) 폐알칼리를 사용한 알칼리 자극제 사용저감 검토

가) 실험개요

본 실험은 고로슬래그 기반 경량 경화체를 제조하기 위해 사용되는 고가의 알칼리 자극제의 사용을 일부 저감하기 위해 산업부산물인 폐 알칼리를 사용하여 강도 및 경량 특성을 검토하고자 하였다.

나) 실험계획 및 방법

본 실험은 고로슬래그와 제지애시의 비율은 95 : 5이며, 알칼리 자극제를 결합재 100 g을 기준으로 12.5 % 첨가하였다. 또한, 고가의 NaOH의 사용량을 저감하기 위해 사용한 폐 알칼리(농도 3 % 의 용액)는 0, 5, 10, 15, 25, 35, 45 (%) 등 총 7 수준으로 NaOH에 치환하였으며, W/B는 0.40으로 고정하였다. 양생조건은 상대습도 80±5 %, 온도 20±2 ℃의 항온항습 조건에서 실시하였으며, 시험항목으로는 경화체의 겉보기 밀도와 단위용적질량, 압축 및 휨 강도를 측정하였다. 본 실험의 수준 및 요인은 [표 2-55]에 나타내었다.

[표 2-55] 실험수준 및 요인

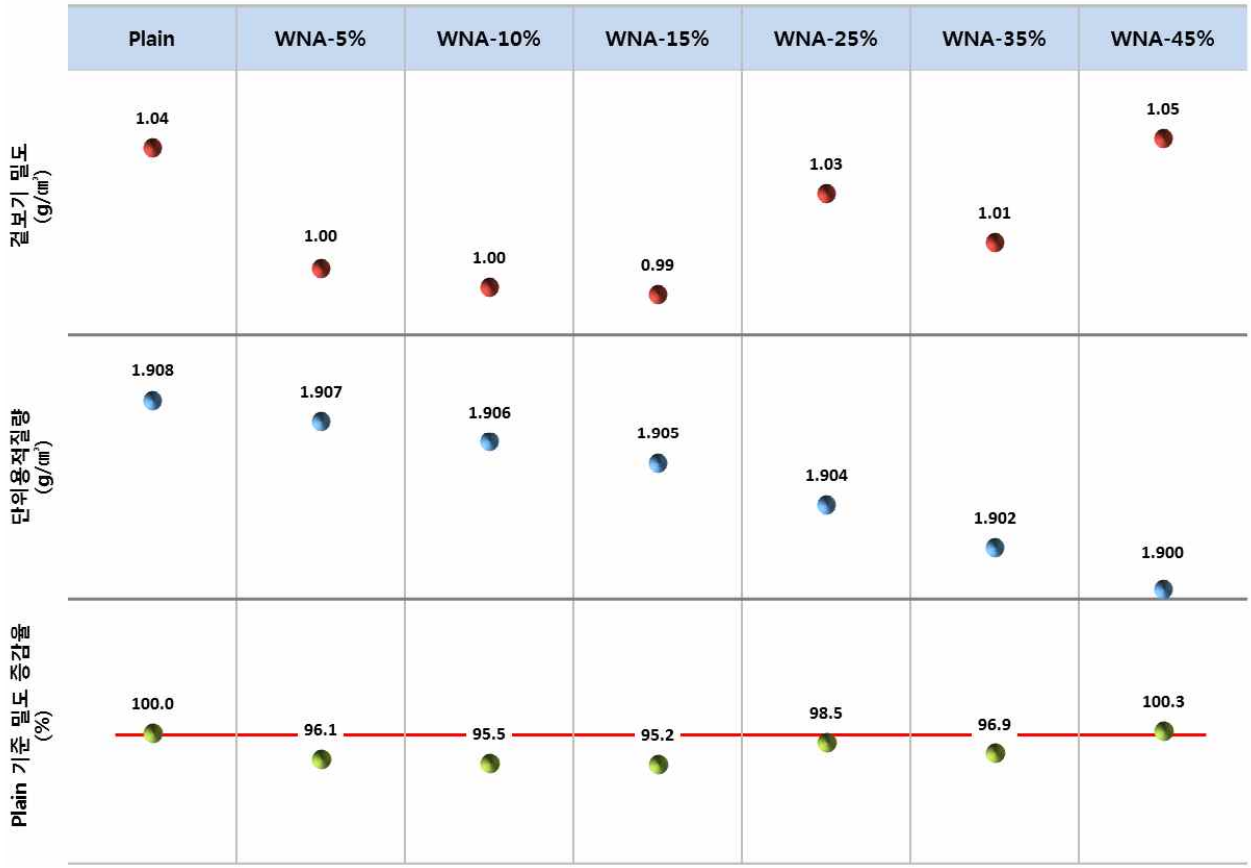
요인	수준
결합재 조건	▪ BFS[a)]+PA[b)]
제지애시 치환율	▪ 5 %
NaOH 첨가율	▪ 12.5 %
폐 알칼리 치환율	▪ 0, 5, 10, 15, 25, 35, 45 (%)
W/B	▪ 40 %
양생조건	▪ 습도 80±5 %, 온도 20±2 ℃
시험항목	▪ 밀도, 압축 및 휨 강도

a) BFS : 고로슬래그, b) PA : 제지애시

다) 실험결과

(1) 밀도

무시멘트 경량 경화체의 밀도측정 결과는 [그림 2-99]에 나타내었으며, 경화체의 단면형상은 [그림 2-100]에 나타내었다. 단위용적질량의 경우 폐 알칼리의 치환율에 따라 미미한 차이로 밀도가 감소하는 경향을 나타내었는데, 겉보기 밀도의 경우 치환율 5, 10, 15 (%)의 경화체가 Plain의 겉보기 밀도보다 큰 폭으로 저하되었으나, 치환율 15 %를 초과한 경우 치환율이 증가함에 따라 겉보기 밀도가 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 제지애시와 알칼리 자극제의 반응으로 수소기체를 발생시키는데, 소량의 폐 알칼리가 사용될 경우 NaOH의 사용량 저감으로 인한 농도 저하에 의해 기포 발생 시간이 늦춰졌기 때문에 비빔과정 중 발생한 기포의 양과 소실되는 기포의 양이 감소하여 치환율 15 % 까지 밀도가 감소하는 것으로 판단된다. 반면, 폐 알칼리의 사용량이 일정량 초과하게 되는 경우 위와 반대로 기체 발생시간이 빨라져 비빔 도중에 기체가 대기 중으로 방출되어 밀도가 증가한 것으로 판단된다. 한편, 폐 알칼리를 45 % 치환한 경화체는 Plain과 유사한 밀도를 나타내었다.



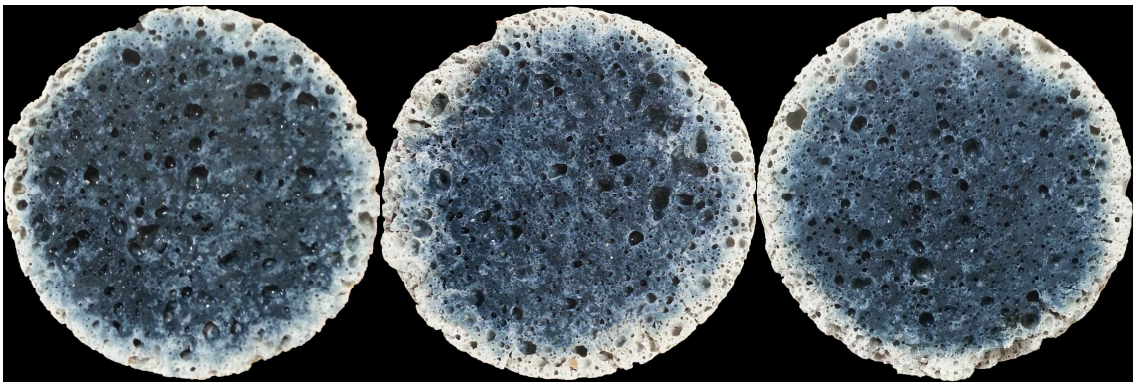
[그림 2-99] 폐 알칼리의 치환율에 따른 겉보기 밀도



(a) Plain



(b) WNA-5% (c) WNA-10% (d) WNA-15%



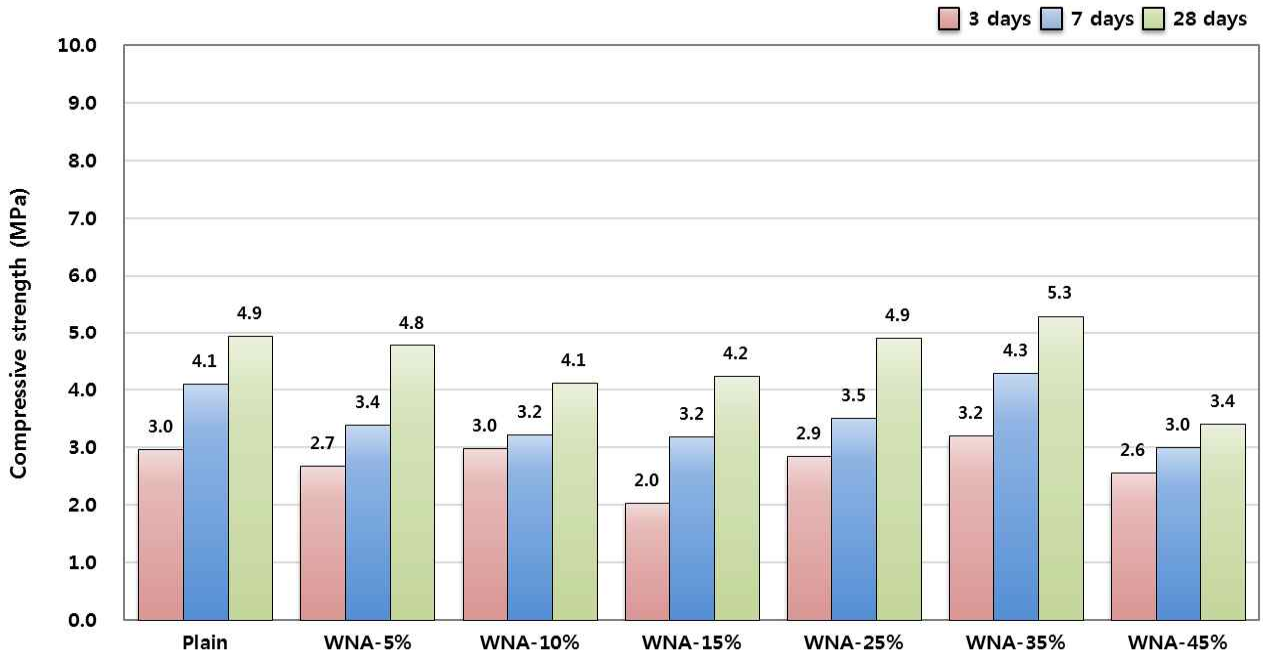
(e) WNA-25% (f) WNA-35% (g) WNA-45%

[그림 2-100] 폐 알칼리의 치환율에 따른 경화체의 단면형상

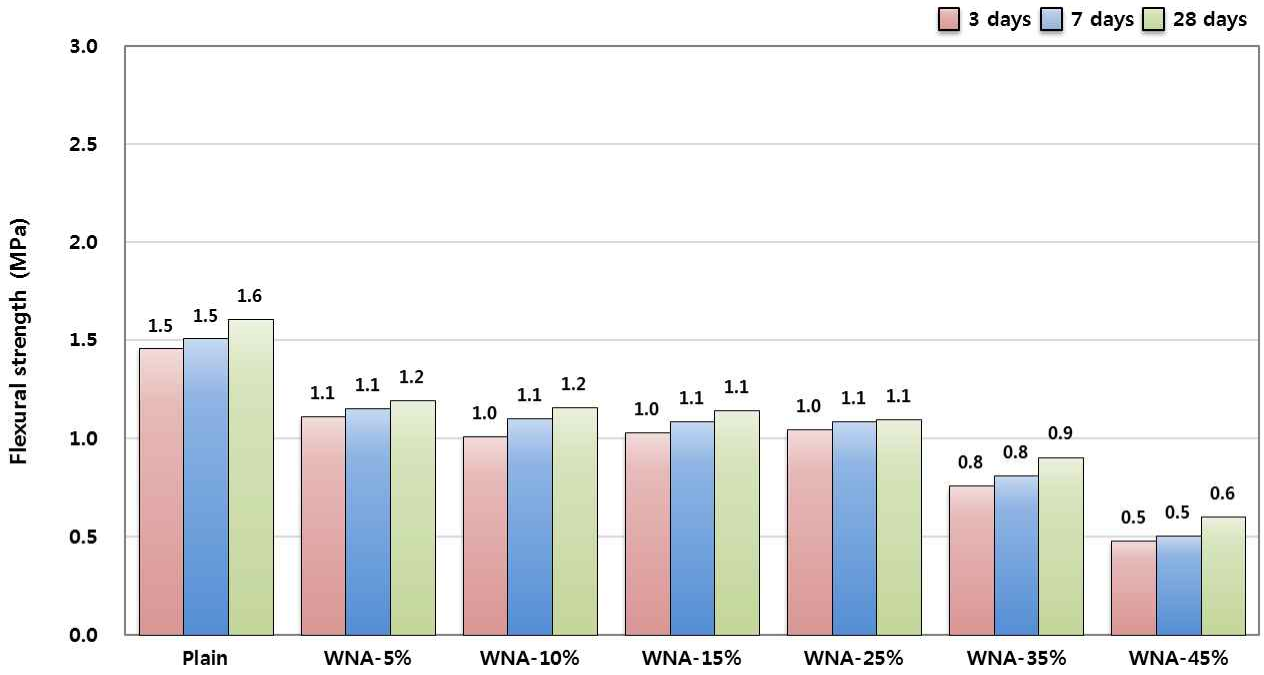
(2) 압축 및 휨 강도

압축강도 시험결과는 [그림 2-101]에 나타내었다. 그 결과, 겉보기 밀도와 유사한 경향을 나타내는데 치환율 15 %까지 강도가 저하되는 경향을 나타내다가 이후 치환율 25 %는 Plain과 유사한 강도를 나타내었고, 35 %는 Plain 보다 높은 강도를 나타내었다. 이는 밀도의 크고 작음이 경화체의 강도발현에 큰 영향을 주어 나타난 결과인 것으로 판단된다. 반면, 치환율 45 %는 밀도가 Plain과 유사한 것과 달리 가장 낮은 강도를 나타내었는데, 이는 폐 알칼리의 사용량이 일정량 이상 사용될 경우 폐 알칼리 내에 있는 이물질에 의해 경화체의 결합력이 저하되어 나타난 결과인 것으로 판단되며, [그림 2-100]의 경화체 단면형상에서 폐 알칼리의 사용량이 증가됨에 따라 절단면이 매끄럽지 못하고 경화체의 원 둘레가 뜯겨져 나간 듯한 형태로 결합력 부족을 나타내어 준다.

폐 알칼리의 치환율에 따른 휨 강도 시험결과는 [그림 2-102]에 나타낸 것과 같이 폐 알칼리의 치환율이 증가됨에 따라 강도가 저하되는 경향을 나타내었는데, 이는 압축강도와 마찬가지로 폐 알칼리에 있는 이물질에 의해 결합력이 저하되어 나타난 결과인 것으로 판단된다.



[그림 2-101] 폐 알칼리의 치환율에 따른 압축강도



[그림 2-102] 폐 알칼리의 치환율에 따른 휨 강도

6) 레드머드의 사용방법에 따른 검토(1)

가) 실험계획 및 방법

본 실험의 요인 및 수준은 [표 2-56]에 나타낸 바와 같이 결합재로써 고로슬래그와 제지애시를 중량 비율 95 : 5로 고정하였으며 알칼리 자극제는 NaOH를 결합재 100 g에 12.5 g 첨가하였다. 레드머드는 NaOH에 중량으로 0, 5, 10, 15, 25, 35, 45 (%) 등 총 7수준 치환하였으며, W/B는 0.40으로 고정하였다. 양생조건은 상대습도 80±5 %, 온도 20±2 ℃이며, 시험항목은 경량성의 척도인 밀도로써 겉보기 밀도와 단위용적질량을 비교분석하였다. 또한, 레드머드가 알칼리 자극제를 대체할 수 있는지에 대한 가능성의 척도로 pH 농도와 압축강도와 휨 강도를 측정하였다.

[표 2-56] 실험수준 및 요인

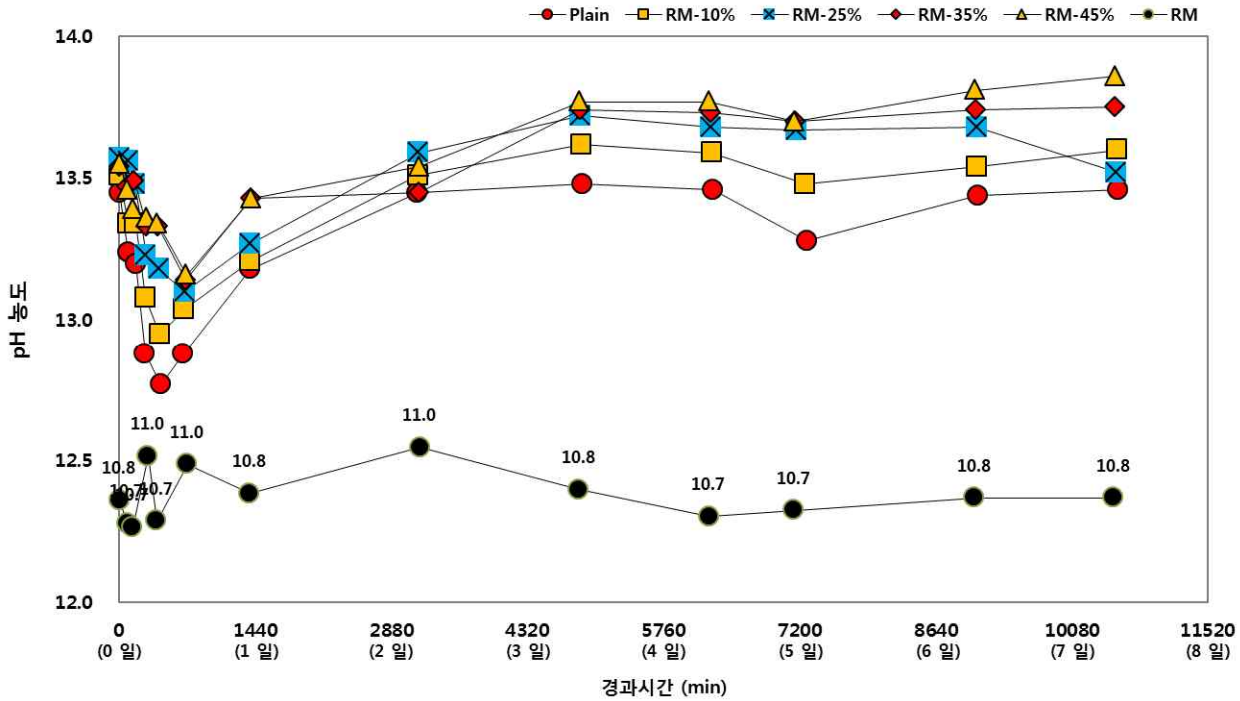
요인	수준
결합재 조건	▪ BFS[a)]+PA[b)]
제지애시 치환율	▪ 5 %
NaOH 첨가율	▪ 12.5 %
레드머드 치환율	▪ 0, 5, 10, 15, 25, 35, 45 (%)
W/B	▪ 0.40
양생조건	▪ 습도 80±5 %, 온도 20±2 ℃
시험항목	▪ 밀도, 압축 및 휨 강도

a) BFS : 고로슬래그, b) PA : 제지애시

나) 실험결과

(1) pH 농도

레드머드의 치환율에 따른 pH 농도는 실험에 사용된 배합수와 같은 조건으로 측정하여 [그림 2-103]에 나타내었다. 그 결과, 레드머드 자체의 pH는 약 11을 나타내었다. 또한, Plain의 pH 농도가 13.3 수준으로 실험에 사용한 용액 중 가장 낮은 것으로 나타났고, 레드머드의 치환율이 높을수록 pH 농도도 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 레드머드를 알칼리 용액에 침지시킬 경우 시간이 지남에 따라 농도도 높아졌다.



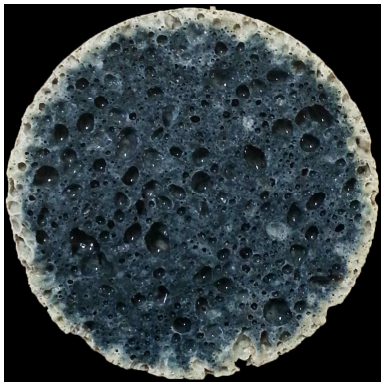
[그림 2-103] 레드머드의 치환율에 따른 pH 농도

(2) 밀도

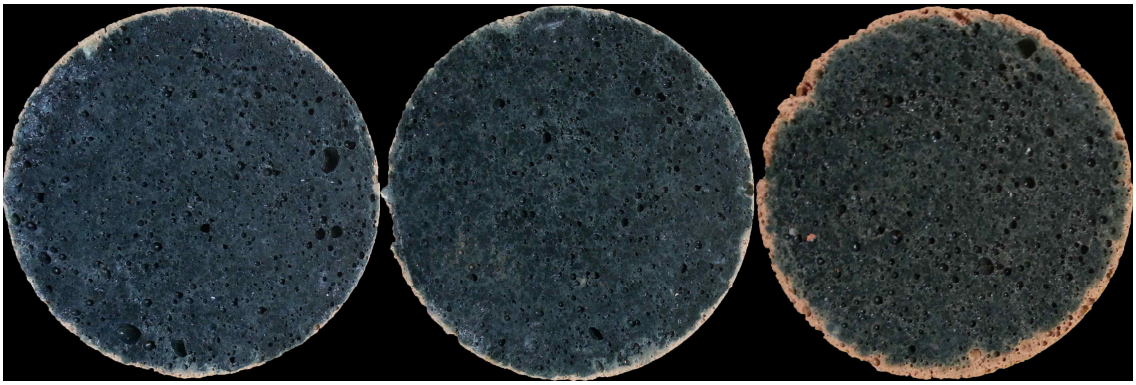
[그림 2-104]는 경량성의 척도인 겉보기 밀도와 단위용적질량을 측정한 그래프를 나타낸 것이다. 단위용적질량의 경우 Plain 1.908 g/㎤로 가장 낮은 값을 나타내었으며, RM-5%는 1.910 g/㎤, RM-10%는 1.912 g/㎤, RM-15%는 1.914 g/㎤, RM-25%는 1.919 g/㎤, RM-35%는 1.923 g/㎤, RM-45%는 1.928 g/㎤로 밀도가 높은 레드머드에 의해서 치환율이 높아짐에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 겉보기 밀도는 Plain의 밀도가 1.03 g/㎤ 수준으로 가장 낮은 밀도를 나타내었고, RM-5%는 1.28 g/㎤, RM-10%는 1.18 g/㎤, RM-15%는 1.21 g/㎤, RM-25%는 1.08 g/㎤, RM-35%는 1.08 g/㎤, RM-45%는 1.04 g/㎤로 레드머드의 치환율이 높아질수록 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 단위용적질량의 경향과 달리 겉보기 밀도는 레드머드 치환율이 증가함에 따라 밀도가 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 고로슬래그와 NaOH는 빠른 반응을 나타내는데, 레드머드의 사용량이 많아짐에 따라 NaOH의 양이 감소하여 Plain을 기준으로 종결 이후에도 발생하는 수소기체가 경화체 내에 지속적으로 공극을 형성하여 나타난 결과인 것으로 판단된다.



[그림 2-104] 레드머드의 치환율에 따른 겉보기 밀도



(a) Plain



(b) RM-5% (c) RM-10% (d) RM-15%



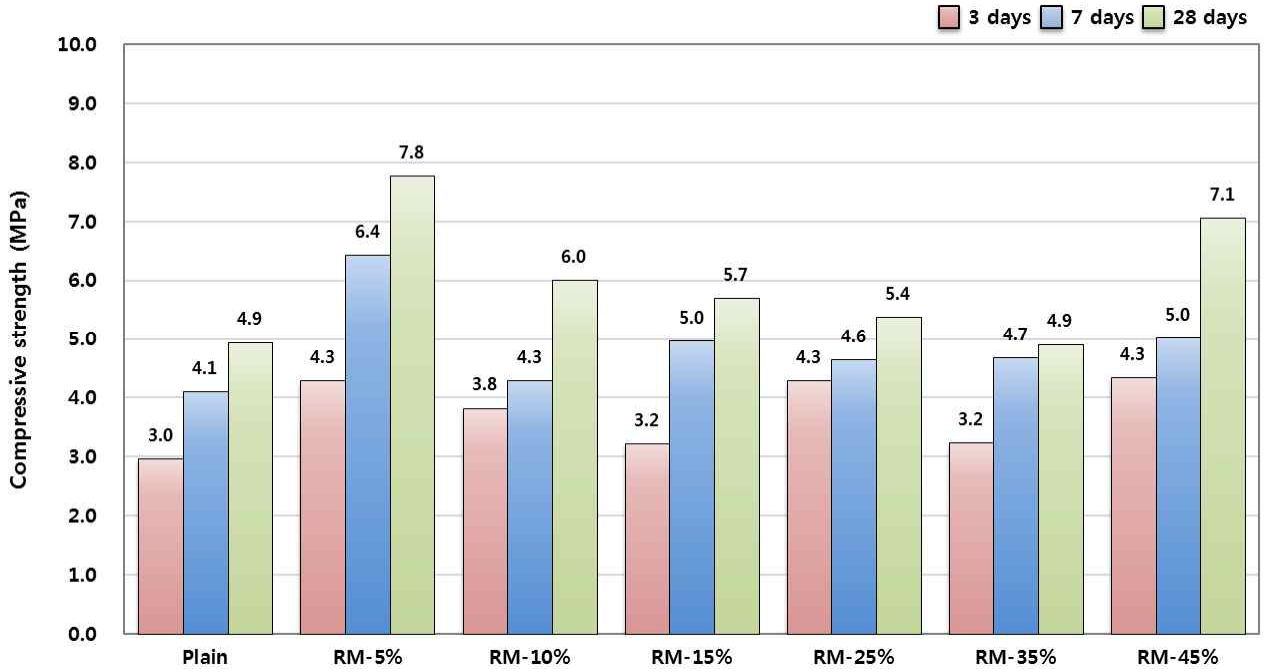
(e) RM-25% (f) RM-35% (g) RM-45%

[그림 2-105] 레드머드의 치환율에 따른 경화체의 단면형상

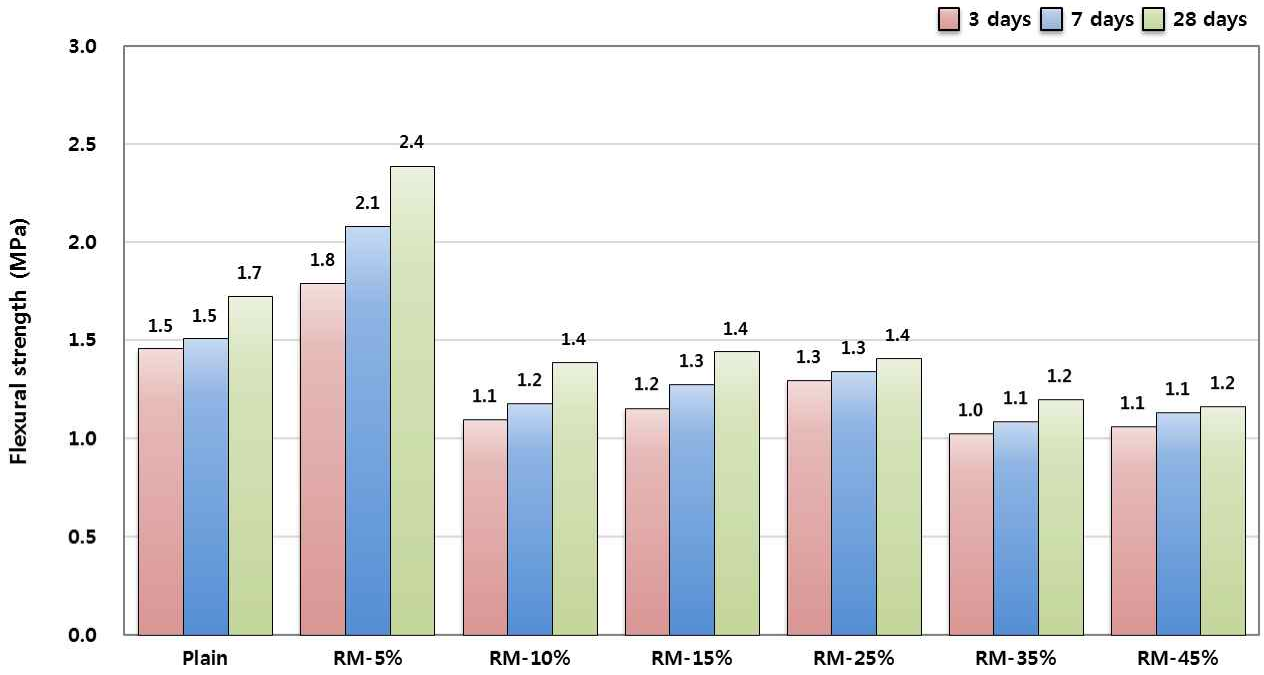
(3) 압축 및 휨 강도

레드머드의 치환율에 다른 압축강도는 [그림 2-106]에 나타내었다. 그 결과, Plain의 재령 28일 압축강도는 4.9 MPa로 가장 낮은 강도를 나타내었으며, RM-5%는 7.8 MPa, RM-10%는 6.0 MPa, RM-15%는 5.7 MPa, RM-25%는 5.4 MPa, RM-35%는 4.9 MPa, RM-45%는 7.1 MPa로 겉보기 밀도와 유사한 경향을 나타내었다. 또한, RM-45%는 겉보기 밀도보다 비교적 높은 강도를 나타내었다.

휨 강도 시험결과는 [그림 2-107]에 나타내었다. 그 결과, 휨 강도는 압축강도와 유사한 경향을 나타내는데, Plain의 경우 재령 28일의 휨 강도가 1.7 MPa로 나타났으며, RM-10%는 2.4 MPa, RM-15%는 1.4 MPa, RM-25%는 1.4 MPa, RM-35%는 1.2 MPa, RM-45%는 1.2 MPa로 Plain과 RM-5%를 제외한 경화체의 휨 강도의 차이는 미미하였다.



[그림 2-106] 레드머드의 치환율에 따른 압축강도



[그림 2-107] 레드머드의 치환율에 따른 휨 강도

7) 레드머드의 사용방법에 따른 검토(2)

가) 실험개요

본 실험은 레드머드의 활성화를 위해 고로슬래그 및 제지애시에 레드머드를 결합재로써 함께 혼합하지 않고, 배합수에 침지하여 레드머드에 함유되어 있는 알칼리 성분인 Na_2O를 용출시키기 위해 NaOH 및 Na_2SiO_3, Na_2SO_4를 추가로 사용하였다.

나) 실험계획 및 방법

본 실험의 요인 및 수준은 [표 2-57]에 나타낸 바와 같이 결합재로써 고로슬래그만을 사용하여 알칼리 자극제로써 NaOH를 결합재 100 g에 8.4 g 첨가하였다. 또한, 레드머드는 NaOH의 중량에 0, 10, 20, 30, 40, 50 (%) 등 총 6수준으로 치환하였고, Na_2SiO_3와 Na_2SO_4는 레드머드의 치환율을 20 %로 고정하여 NaOH의 중량으로 20, 40, 60 (%) 등 총 3수준으로 치환하였다. W/B는 0.35이며, 양생조건은 상대습도 80±5 %, 온도 20±2 ℃로 설정하였다. 시험항목은 레드머드의 용출을 확인 하기위해 레드머드를 침지시킨 배합수를 1주일 정도 안정시킨 뒤 pH를 측정하였으며, 플로우 콘 플로우와 테이블 플로우, 압축 및 휨 강도를 측정하였다.

[표 2-57] 실험수준 및 요인

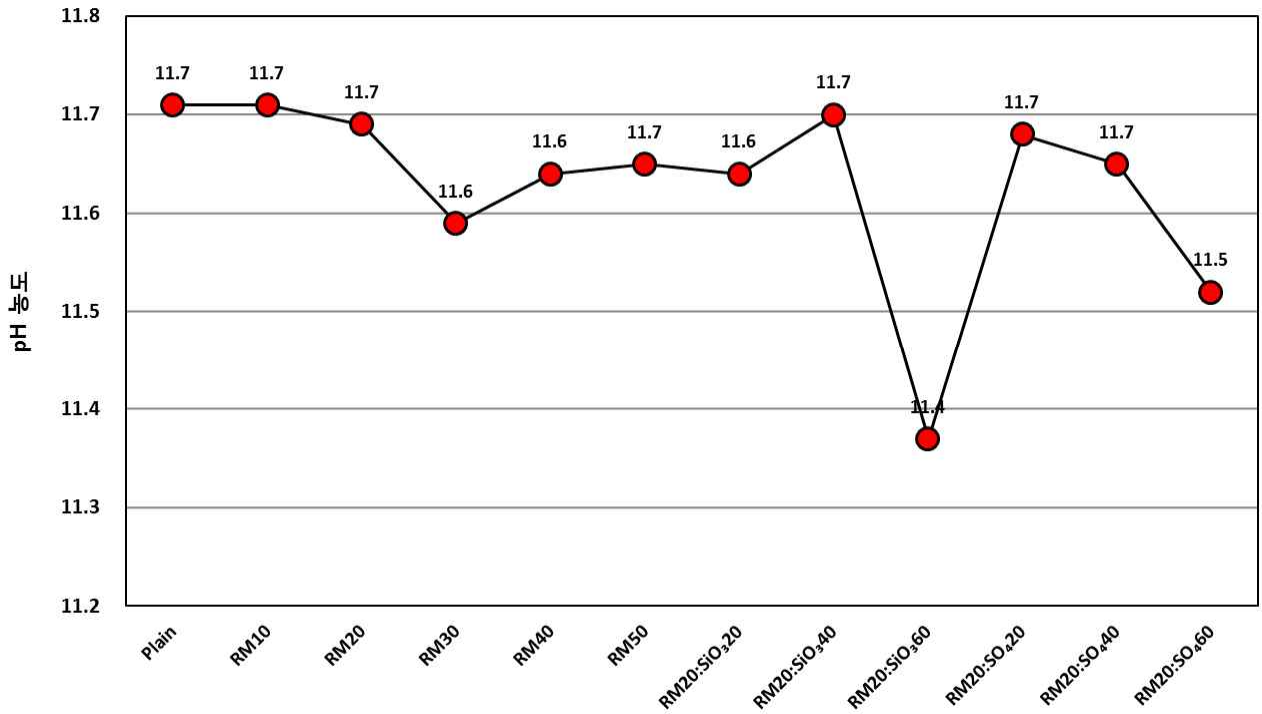
요인	수준
결합재 조건	▪ BFS[a)]
NaOH 첨가율	▪ 8.4 %
레드머드 치환율	▪ 0, 10, 20, 30, 40, 50 (%)
알칼리 자극제	▪ Na_2SiO_3 ▪ Na_2SO_4
알칼리 자극제 치환율	▪ 20, 40, 60 (%)
W/B	▪ 0.35
양생조건	▪ 습도 80±5%, 온도 20±2℃
시험항목	▪ pH 농도, 플로우 콘 플로우 및 테이블 플로우, 압축 및 휨 강도

a) BFS : 고로슬래그

다) 실험결과

(1) pH 농도

레드머드의 치환율과 알칼리 자극제의 종류 및 첨가율에 따른 pH 농도는 [그림 2-108]에 나타내었다. 그 결과, Plain과 RM10은 11.7을 나타내었으며, 레드머드의 치환율이 증가할수록 pH 농도는 저하되는 경향을 나타내었다. 이는 레드머드의 치환으로 NaOH의 사용량이 감소하여 농도가 저하되는데, RM10의 경우 NaOH의 감소로 인한 나트륨 이온을 레드머드의 사용으로 pH 농도를 유지한 것이며, 레드머드는 사용량은 NaOH의 10 %이하로 사용할 경우 나트륨 이온의 양을 보상할 수 있는 것으로 판단된다. Na_2SiO_3를 사용한 경우는 RM20:$SiO_3$20이 11.6, RM20:$SiO_3$40은 11.7, RM20:$SiO_3$60이 11.4로 나타났으며, Na_2SO_4를 사용하였을 경우는 RM20:$SO_4$20이 11.7, RM20:$SO_4$40은 11.7, RM20:$SO_4$60이 11.5를 나타내었다.

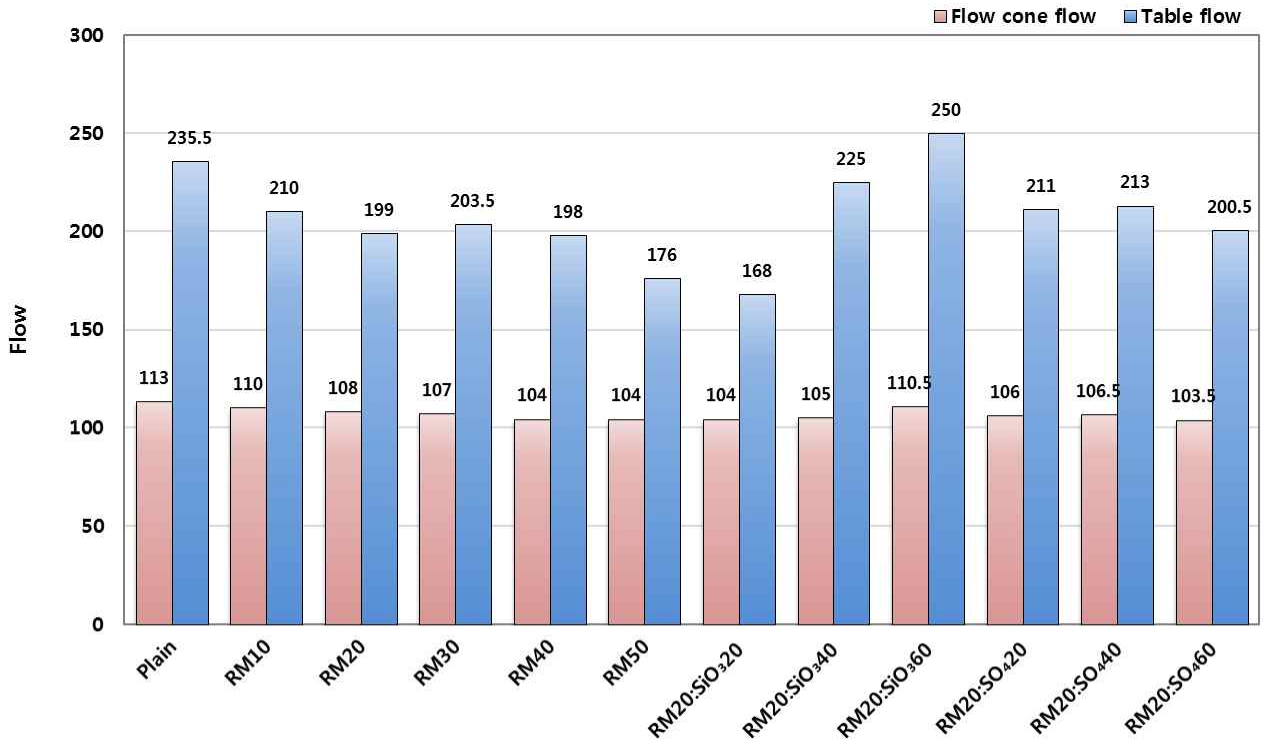


[그림 2-108] 레드머드의 치환율과 알칼리 자극제의 종류 및 첨가율에 따른 pH 농도

(2) 플로우 콘 플로우 및 테이블 플로우

레드머드의 치환율과 알칼리 자극제의 종류 및 첨가율에 따른 플로우 콘 플로우 및 테이블 플로우는 [그림 2-109]에 나타내었다. 그 결과, 플로우 콘 플로우는 Plain의 플로우가 113 mm로 가장 많이 퍼졌으며, 레드머드만을 치환하였을 경우 RM10 110 mm, RM20 108 mm, RM30 107 mm, RM40 104 mm, RM50 104 mm로 치환율에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 레드머드의 사용이 증가함으로써 NaOH가 대기 중의 수분을 흡수하는 양이 감소하는 것과 레드머드가 배합수를 흡수하여 플로우가 감소한 것으로 판단된다. Na_2SiO_3를 사용한 결합재의 플로우는 RM20:$SiO_3$20이 168 mm, RM20:$SiO_3$40은 225 mm, RM20:$SiO_3$60이 250 mm로 Na_2SiO_3의 치환율이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. Na_2SO_4를 사용한 결합재의 플로우는 RM20:$SO_4$20이 211 mm, RM20:$SO_4$40이 213 mm, RM20:$SO_4$60은 200.5 mm로 치환율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다.

테이블 플로우는 플로우 콘 플로우와 유사한 경향을 나타내었으며, Plain이 235.5 mm를 나타내었고, RM20:$SiO_3$60의 플로우가 250 mm로 가장 유동성이 좋은 것으로 나타났다.

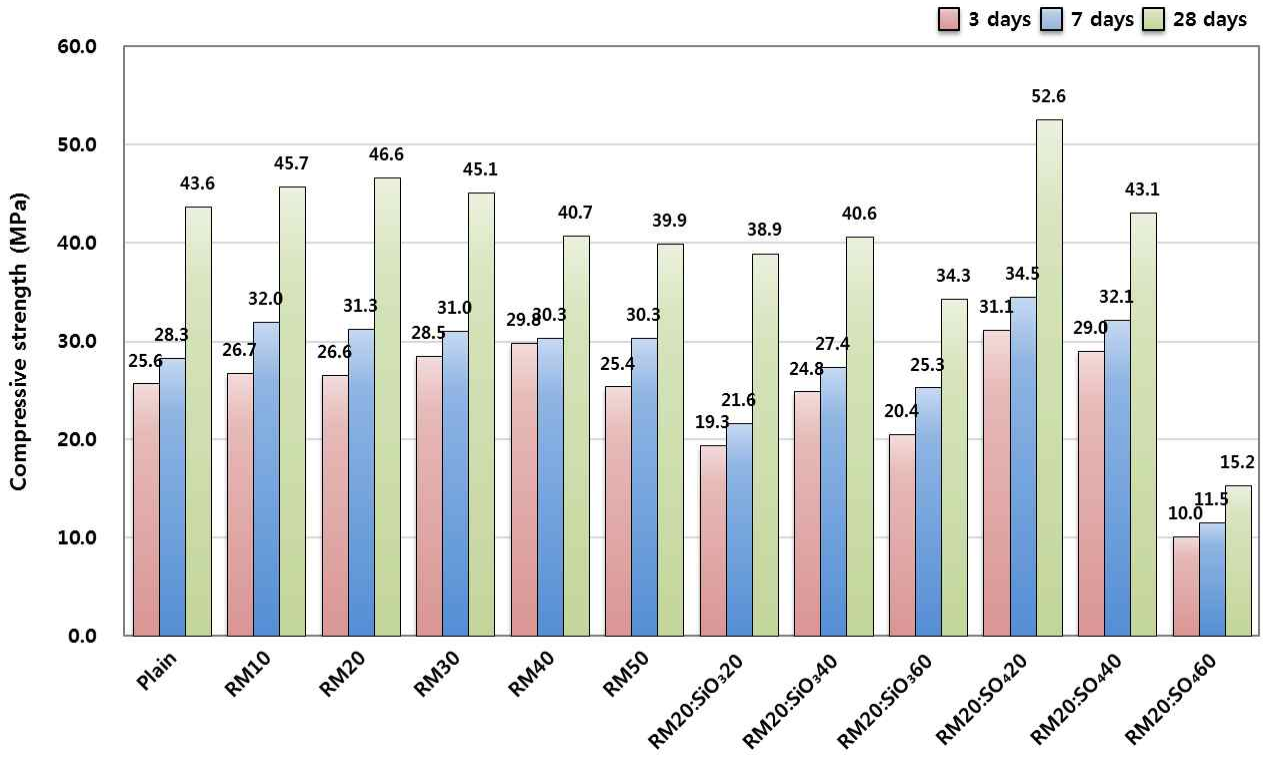


[그림 2-109] 레드머드의 치환율과 알칼리 자극제의 종류 및 첨가율에 따른 플로우 콘 플로우 및 테이블 플로우

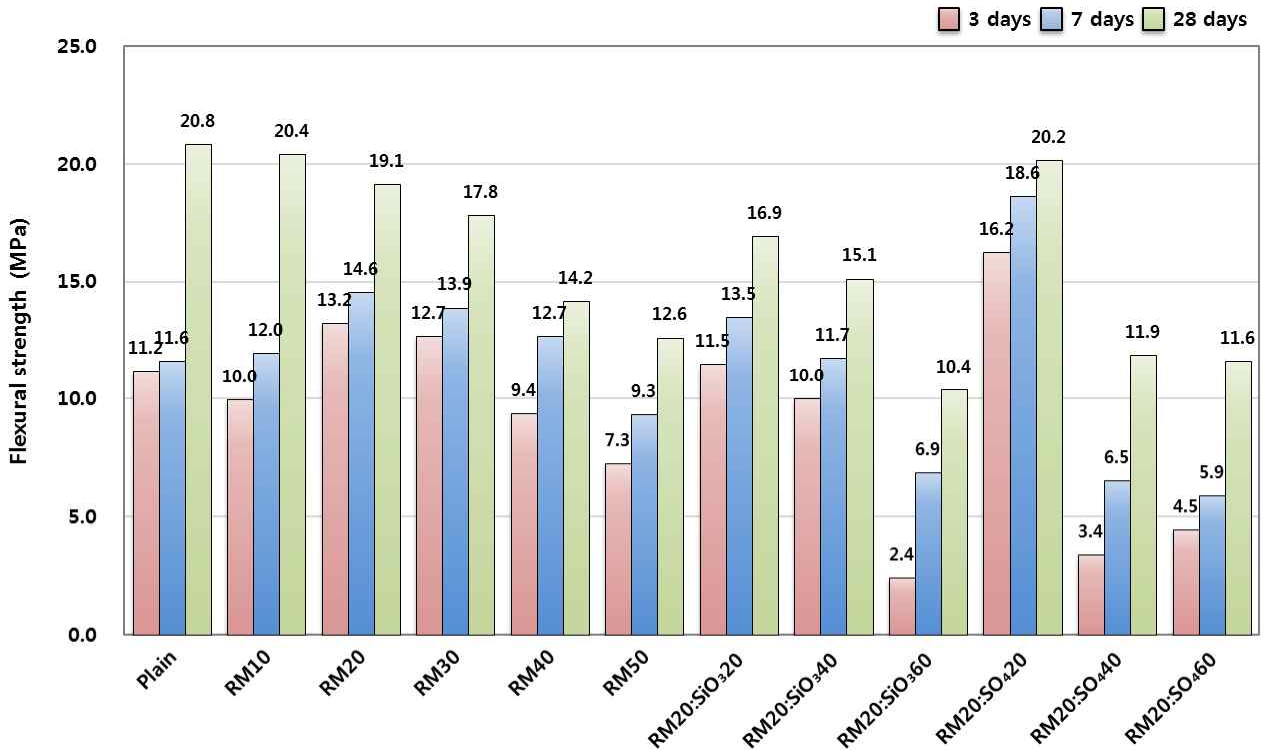
(3) 압축 및 휨 강도

레드머드의 치환율과 알칼리 자극제의 종류 및 첨가율에 따른 압축강도는 [그림 2-110]에 나타내었다. 그 결과, Plain의 압축강도가 43.6 MPa를 나타내었고 RM10 45.7 MPa, RM20 46.6 MPa, RM30 45.1 MPa, RM40 40.7 MPa, RM50 39.9 MPa로 레드머드를 20 % 치환한 경화체의 강도가 다른 경화체들 보다 높은 강도를 나타내었다. Na_2SiO_3를 사용한 경화체는 RM20:$SiO_3$20이 38.9 MPa, RM20:$SiO_3$40이 40.6 MPa, RM20:$SiO_3$60이 34.3 MPa로 Na2SiO_3를 40 % 치환한 경화체가 다소 높은 강도발현을 하였다. Na_2SO_4를 사용한 경화체는 RM20:$SO_4$20이 52.6 MPa로 가장 높은 강도발현을 하였으며, RM20:$SO_4$40이 43.1 MPa, RM20:$SO_4$60이 15.2 MPa로 나타났다. 휨 강도의 경우 [그림 2-111]에 나타내었으며, Plain의 휨 강도가 20.8 MPa로 높은 강도발현을 하였으며, 레드머드의 치환율에 따라 강도가 저하하는 경향을 나타내었고, Na_2SiO_3와 Na_2SO_4를 사용한 경화체는 압축강도와 유사한 경향을 나타내었다.

따라서, 레드머드의 Na_2O를 용출시키기 위한 알칼리 자극제는 Na_2SO_4인 것으로 판단되며, 이를 적정량 사용할 경우 높은 강도를 발현할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만, 레드머드를 활성화하기 위해서 NaOH 이외에 별도의 알칼리 자극제를 추가로 사용하는 것이기 때문에 경제적이지 못한 것으로 판단된다.



[그림 2-110] 레드머드의 치환율과 알칼리 자극제의 종류 및 첨가율에 따른 압축강도



[그림 2-111] 레드머드의 치환율과 알칼리 자극제의 종류 및 첨가율에 따른 휨 강도

8) 레드머드의 사용방법에 따른 검토(3)

가) 실험개요

본 실험은 선행 실험을 보완하기 위한 실험으로 선행 실험과 같은 조건으로 레드머드의 사용을 배합수와 혼합하여 Na_2O를 용출시킨 뒤 사용하였다.

나) 실험계획 및 방법

실험의 요인 및 수준은 결합재로써 고로슬래그와 제지애시를 중량 비율 95 : 5로 고정하여 알칼리 자극제로써 NaOH를 결합재 100 g에 12.5 g 첨가하였다. 레드머드는 NaOH에 중량으로 0, 5, 10, 15, 25, 35, 45 (%) 등 총 7수준 치환하였으며, 배합수와 혼합하여 Na_2O를 용출 시켰다. W/B는 0.40이며, 양생조건은 상대습도 80±5 %, 온도 20±2 ℃으로 설정하였다. 시험항목은 겉보기 밀도와 단위용적질량을 분석하였으며, pH 농도와 압축 및 휨 강도를 측정하였다.

[표 2-58] 실험수준 및 요인

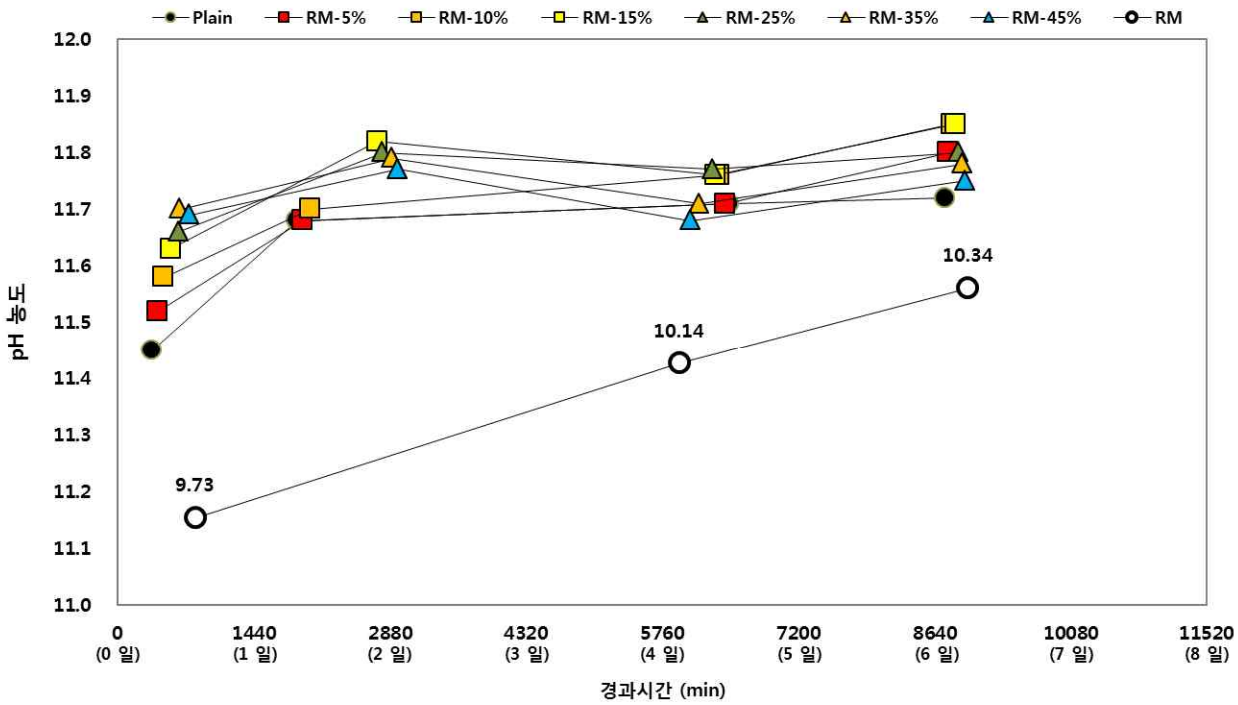
실험요인	실험수준
결합재 조건	• BFS[a)]+PA[b)]
제지애시 치환율	• 5 %
알칼리 자극제	• NaOH, extRM[c)]
알칼리 자극제 첨가율	• 12.5 (wt.%)
레드머드 치환율	• 0, 5, 10, 15, 25, 35, 45 (wt.%)
W/B	• 40 %
양생조건	• 상대습도(80±5)%, 온도(20±2)℃
시험항목	• pH, 압축 및 휨강도, 밀도

a) BFS : 고로슬래그, b) PA : 제지애시, c) extRM : 알칼리를 용출시킨 레드머드

다) 실험결과

(1) pH

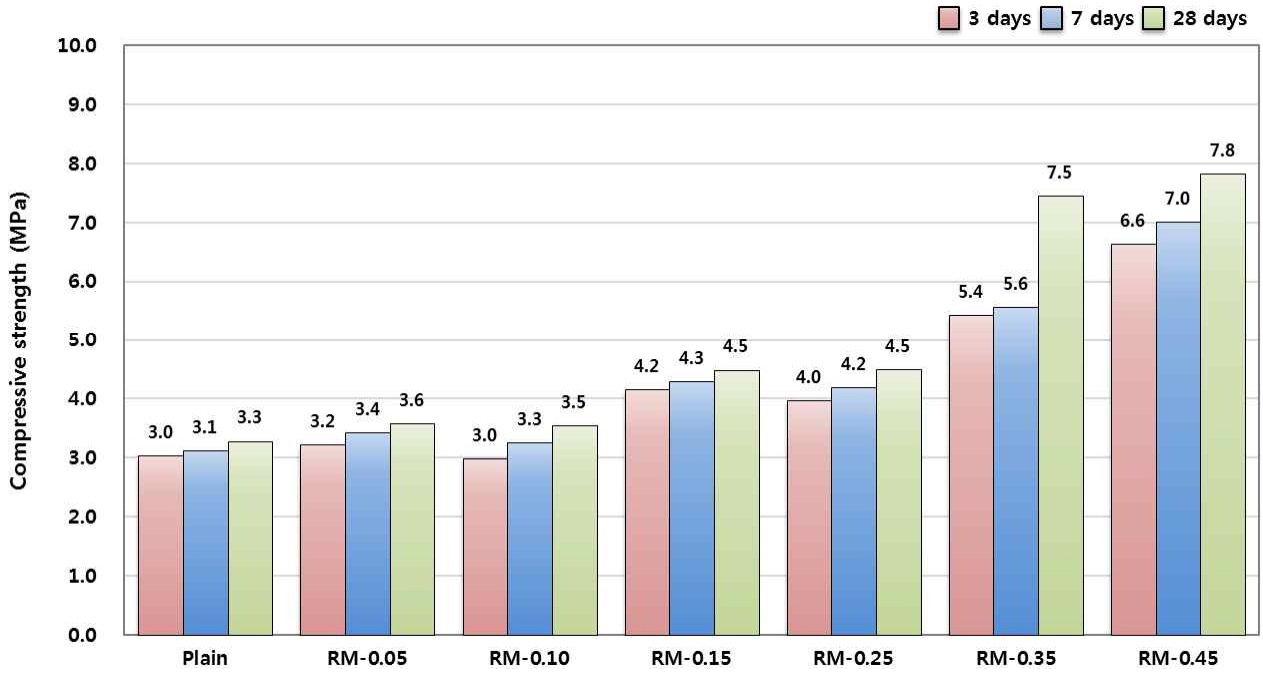
알칼리 자극제를 혼합한 배합수에 레드머드를 침지시켜 Na_2O를 용출시킨 배합수의 pH 농도 측정 결과, Plain의 pH 농도가 가장 낮은 것으로 나타났으며, 레드머드를 침지시키는 기간이 길어질수록 pH 농도가 증가하는 경향을 나타내었다.



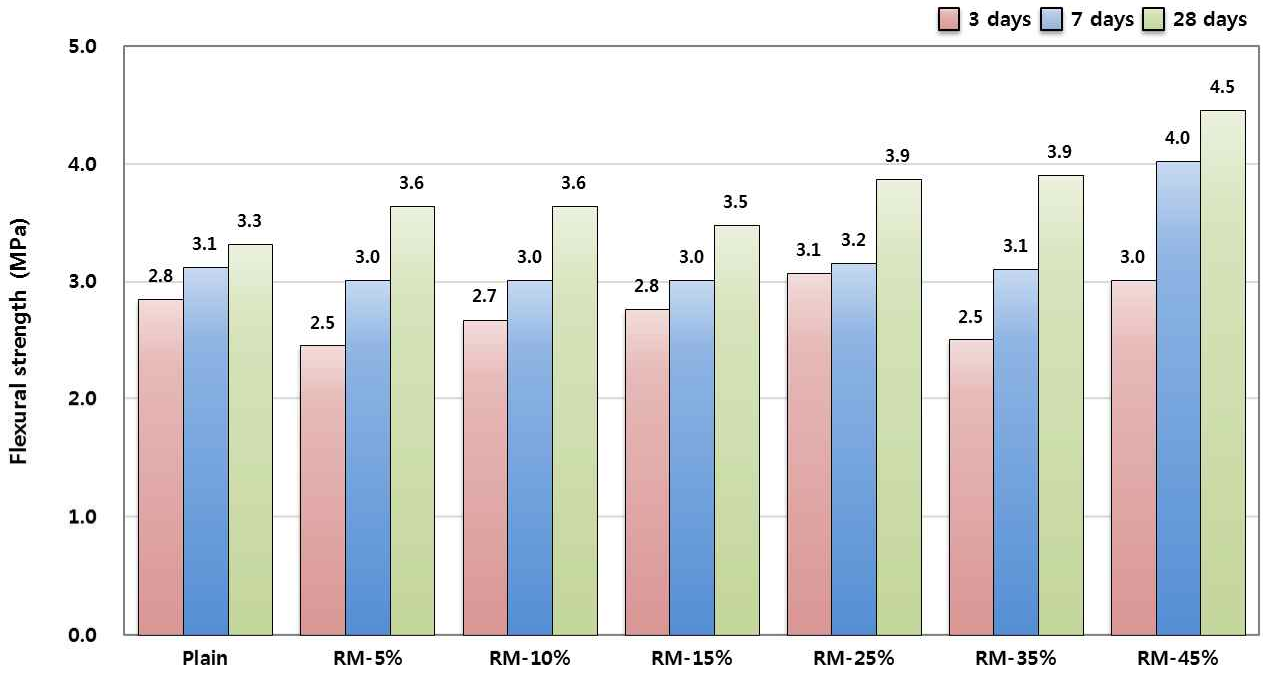
[그림 2-112] 알칼리 용출 레드머드의 치환율에 따른 pH 농도

(2) 압축강도

레드머드의 치환율에 따른 경화체의 압축강도 측정결과, Plain의 재령 28일 압축강도가 3.3 MPa로 가장 낮은 강도를 나타내었으며, RM-5%는 3.6 MPa, RM-10%는 3.5 MPa, RM-15%는 4.5 MPa, RM-25%는 4.5 MPa, RM-35%는 7.5 MPa, RM-45%는 7.8 MPa로 치환율에 따라 강도가 증가하는 경향을 나타내었다. 휨 강도 시험결과는 압축강도와 유사한 경향을 나타내었다.



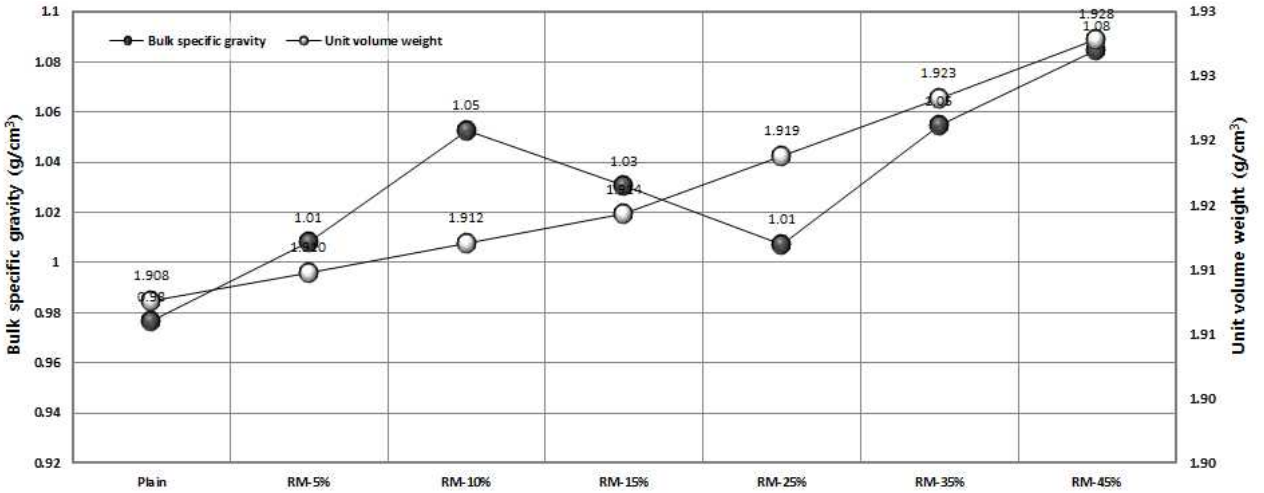
[그림 2-113] 알칼리 용출 레드머드의 치환율에 따른 압축강도



[그림 2-114] 알칼리 용출 레드머드의 치환율에 따른 휨강도

(3) 밀도

단위용적질량의 경우 Plain 1.908 g/㎤로 가장 낮은 값을 나타내었으며, RM-5%는 1.910 g/㎤, RM-10%는 1.912 g/㎤, RM-15%는 1.914 g/㎤, RM-25%는 1.919 g/㎤, RM-35%는 1.923 g/㎤, RM-45%는 1.928 g/㎤로 밀도가 높은 레드머드에 의해서 치환율에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 겉보기 밀도는 Plain의 밀도가 0.98 g/㎤로 가장 낮은 밀도를 나타내었고, RM-5%는 1.01 g/㎤, RM-10%는 1.05 g/㎤, RM-15%는 1.03 g/㎤, RM-25%는 1.01 g/㎤, RM-35%는 1.05 g/㎤, RM-45%는 1.08 g/㎤로 RM-10%까지 겉보기 밀도는 증가하였으나, RM-25%까지는 다소 감소하는 경향을 나타내다가 RM-45%까지 증가하는 경향을 나타내었다.



[그림 2-115] 알칼리 용출 레드머드의 치환율에 따른 밀도

사. 경화체의 경량성 보완

1) 낮은 밀도를 갖는 재료의 사용 (1)

가) 실험개요

본 실험은 경량 경화체의 겉보기 밀도의 감소와 강도 보완의 일환으로 플라이애시를 고로슬래그의 일부에 치환하여 실험을 실시한 것으로, 플라이애시는 SiO_2, Al_2O_3가 주요성분이고, 밀도 2.18 g/㎤, 분말도 4,125 ㎠/g인 것을 사용하였다. 플라이애시의 화학성분은 [표 2-59]과 같다.

[표 2-59] 플라이애시의 화학성분

질량백분율 (%)

분자	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	TiO_2
함유량	54.3	21.5	5.1	10.8	1.8	1.2	-	-

나) 실험계획 및 방법

본 실험의 수준 및 요인은 [표 2-60]에 나타낸 바와 같이 결합재 조건으로써 고로슬래그와 제지애시, 플라이애시를 치환하여 실험을 실시하였다. 제지애시의 치환율은 고로슬래그 중량에 5% 치환하여 사용하였고, 플라이애시는 제지애시를 치환한 고로슬래그의 중량에 1, 3, 5, 10, 15, 20 (%) 등 6수준으로 치환하였다. 알칼리 자극제는 결합재의 중량 100 g을 기준으로 12.5 % 첨가하였다. W/B는 40 %이며, 항온항습 조건에서 양생을 실시하였다. 측정항목은 경화체의 경량성을 검토하기 위한 밀도(겉보기 밀도와 단위용적질량)와 압축 및 휨 강도이다.

[표 2-60] 실험수준 및 요인

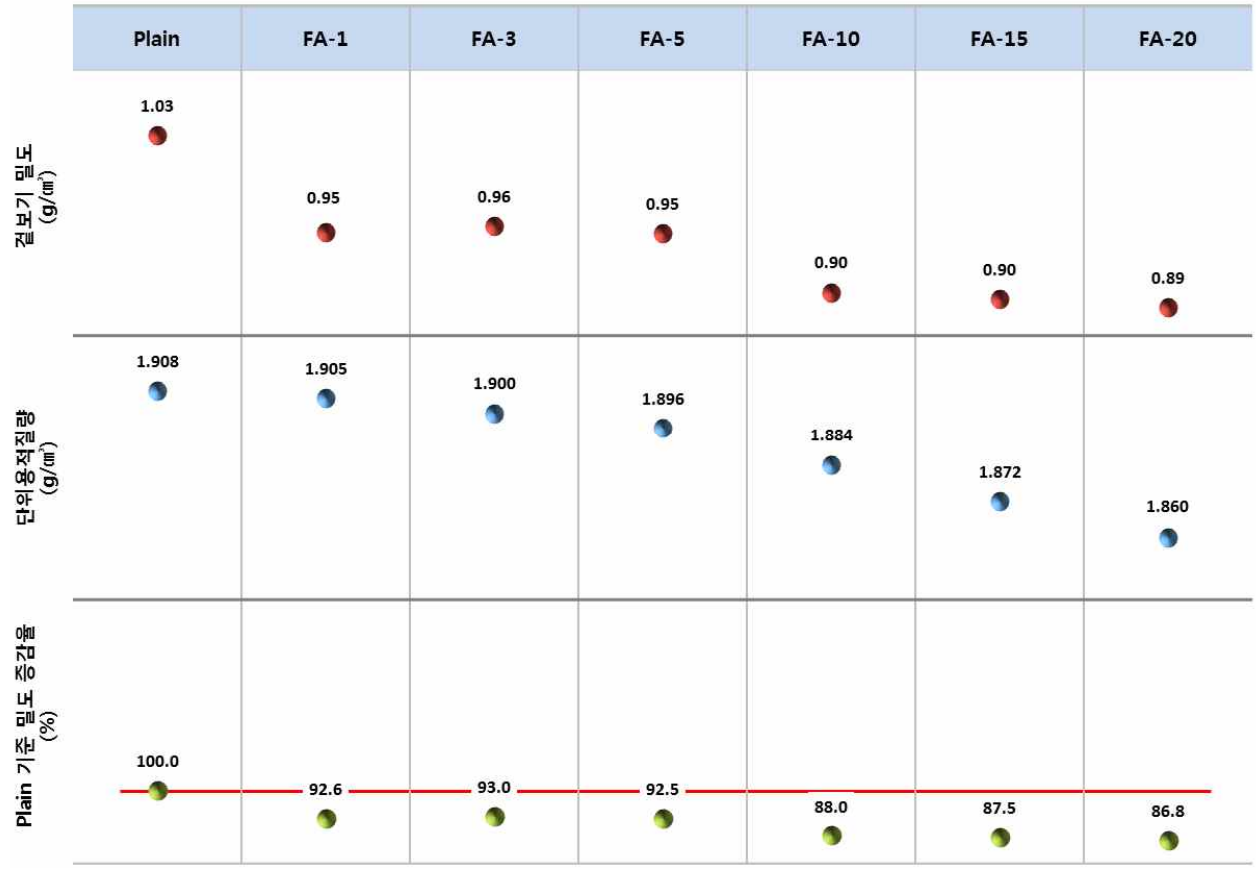
요인	수준
결합재 조건	▪ BFS[a)]+PA[b)]+FA[c)]
제지애시 치환율	▪ 5 %
플라이애시 치환율	▪ 0, 1, 3, 5, 10, 15, 20 (%)
NaOH 첨가율	▪ 12.5 %
W/B	▪ 0.40
양생조건	▪ 습도 80±5 %, 온도 20±2 ℃
시험항목	▪ 밀도, 압축 및 휨 강도

a) BFS : 고로슬래그, b) PA : 제지애시, c) FA : 플라이애시

다) 실험결과

(1) 밀도

[그림 2-116]는 플라이애시의 치환율에 따른 겉보기 밀도와 단위용적질량을 나타낸 것으로, 플라이애시의 사용량이 증가함에 따라 겉보기 밀도는 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 단위용적질량이 치환율에 따라 감소하는 경향을 나타낸 것으로 보아 플라이애시의 사용으로 경화체의 중량이 감소되어 나타난 것으로 판단된다. 또한, 플라이애시의 사용량이 증가하면서 부피가 커지고 배합수와 접촉하는 면이 넓어져 페이스트의 점도가 높아지는 결과를 나타내어 제지애시와 NaOH의 반응으로 발생하는 수소기체를 페이스트 내에 구속하여 겉보기 밀도가 단위용적질량에서 감소한 차이보다 감소폭이 큰 것으로 나타났으며, [그림 2-117]의 경화체 단면형상을 살펴보았을 때 (a) Plain과 (b)~(d)의 단면은 발생된 공극이 독립적인 형상으로 보여지지만, 이후 플라이애시의 사용량이 많아지면서 기포끼리 결합되어 타원형상의 공극이 불규칙한 형상으로 나타났다.



[그림 2-116] 플라이애시 치환에 따른 겉보기 밀도



(a) Plain



(b) FA-1% (c) FA-3% (d) FA-5%



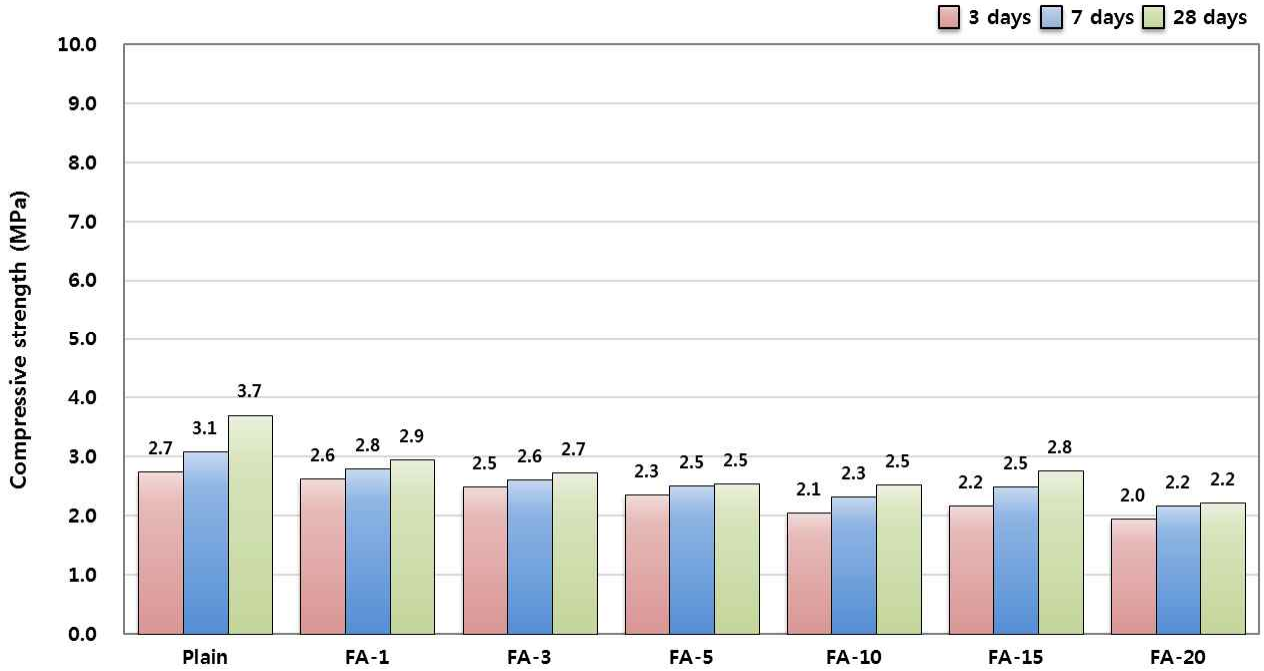
(e) FA-10% (f) FA-15% (g) FA-20%

[그림 2-117] 플라이애시 치환에 따른 경화체의 단면형상

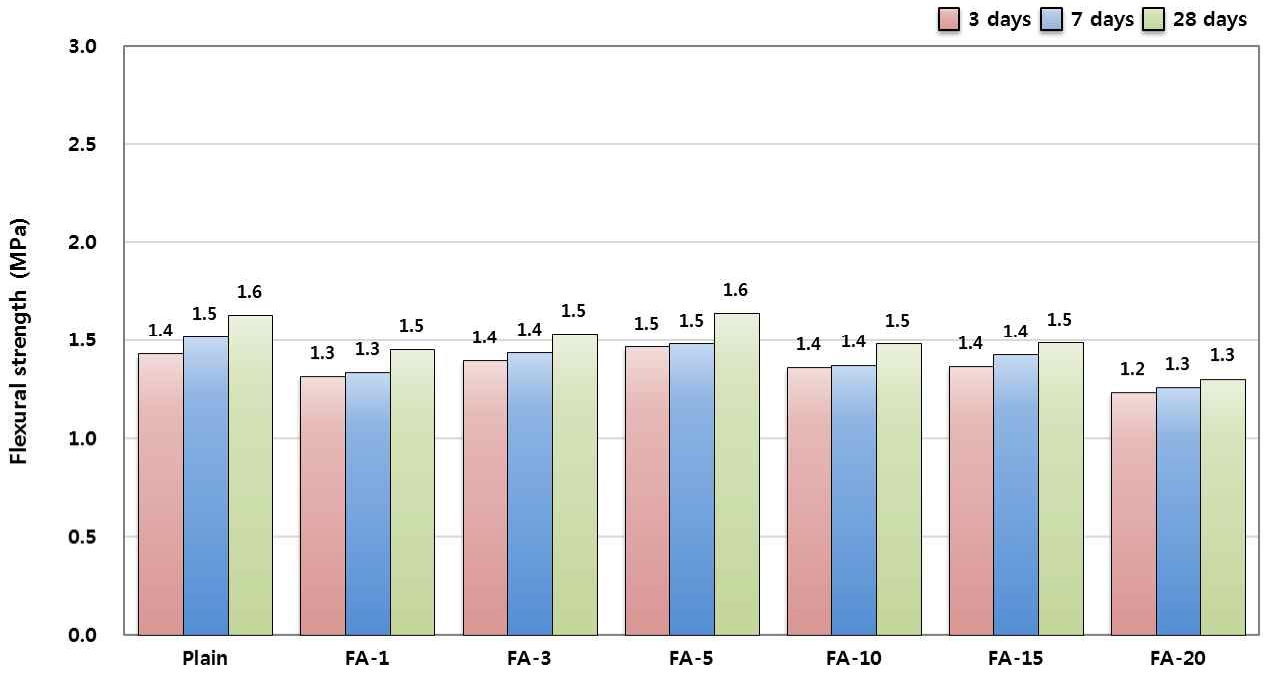
(2) 압축 및 휨 강도

[그림 2-118]은 플라이애시의 치환율에 따른 경량 경화체의 압축강도를 나타낸 것으로 Plain의 압축강도가 가장 높은 것으로 나타났으며, 플라이애시의 치환율에 따라 강도가 저하되는 경향을 나타내었다. 이는 밀도 특성과 같이 플라이애시의 사용량이 많아지면서 경화체 내에 가둬진 수소기체의 양이 증가한 것뿐만 아니라 플라이애시의 경화특성상 고온과 $Ca(OH)_2$를 필요하기 때문에 이를 충족하지 못한 본 연구에서는 강도발현에 큰 영향을 주지 못한 것으로 판단되다.

플라이애시의 치환율에 따른 휨 강도 시험결과는 [그림 2-119]에 나타낸 것과 같이 Plain은 재령 28일에서 1.6 MPa를 나타내었고 플라이애시 치환율 1 %의 경우 1.5 MPa에 미치지 못하였으며, 3 %는 1.5 MPa를 나타내었다. 5%는 1.6 MPa로 가장 높은 휨 강도를 나타내었고, 이후 치환율에 따라 강도는 저하하는 경향을 나타내었다.



[그림 2-118] 플라이애시 치환에 따른 압축강도



[그림 2-119] 플라이애시 치환에 따른 휨 강도

2) 낮은 밀도를 갖는 재료의 사용 (2)

가) 실험개요

본 실험은 경량 경화체의 겉보기 밀도의 감소와 강도 보완의 일환으로 폴리실리콘 슬러지를 고로슬래그의 일부에 치환하여 실험을 실시한 것으로, 폴리실리콘 슬러지는 태양광 발전 시 사용되는 집광판의 주원료로 사용되는 폴리실리콘의 생산과정에서 발생하는 산업부산물로 밀도 1.95 g/㎤, 분말도 7,122 ㎠/g인 것을 사용하였다. 폴리실리콘 슬러지의 화학성분은 [표 2-61]과 같다.

[표 2-61] 폴리실리콘 슬러지의 화학성분

질량백분율 (%)

분자	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	TiO_2
함유량	54.3	21.5	5.1	10.8	1.8	1.2	-	-

나) 실험계획 및 방법

본 실험의 수준 및 요인은 [표 2-62]에 나타낸 바와 같이 결합재 조건으로써 고로슬래그와 제지애시, 폴리실리콘 슬러지를 치환하여 실험을 실시하였다. 제지애시의 치환율은 고로슬래그 중량에 5% 치환하여 사용하였고, 폴리실리콘 슬러지는 제지애시를 치환한 고로슬래그의 중량에 1, 3, 5, 10, 15, 20 (%) 등 6수준으로 치환하였다. 알칼리 자극제는 결합재의 중량 100 g을 기준으로 12.5 % 첨가하였다. W/B는 40 %이며, 항온항습 조건에서 양생을 실시하였다. 측정항목은 경화체의 경량성을 검토하기 위한 밀도(겉보기 밀도와 단위용적질량)와 압축 및 휨 강도이다.

[표 2-62] 실험수준 및 요인

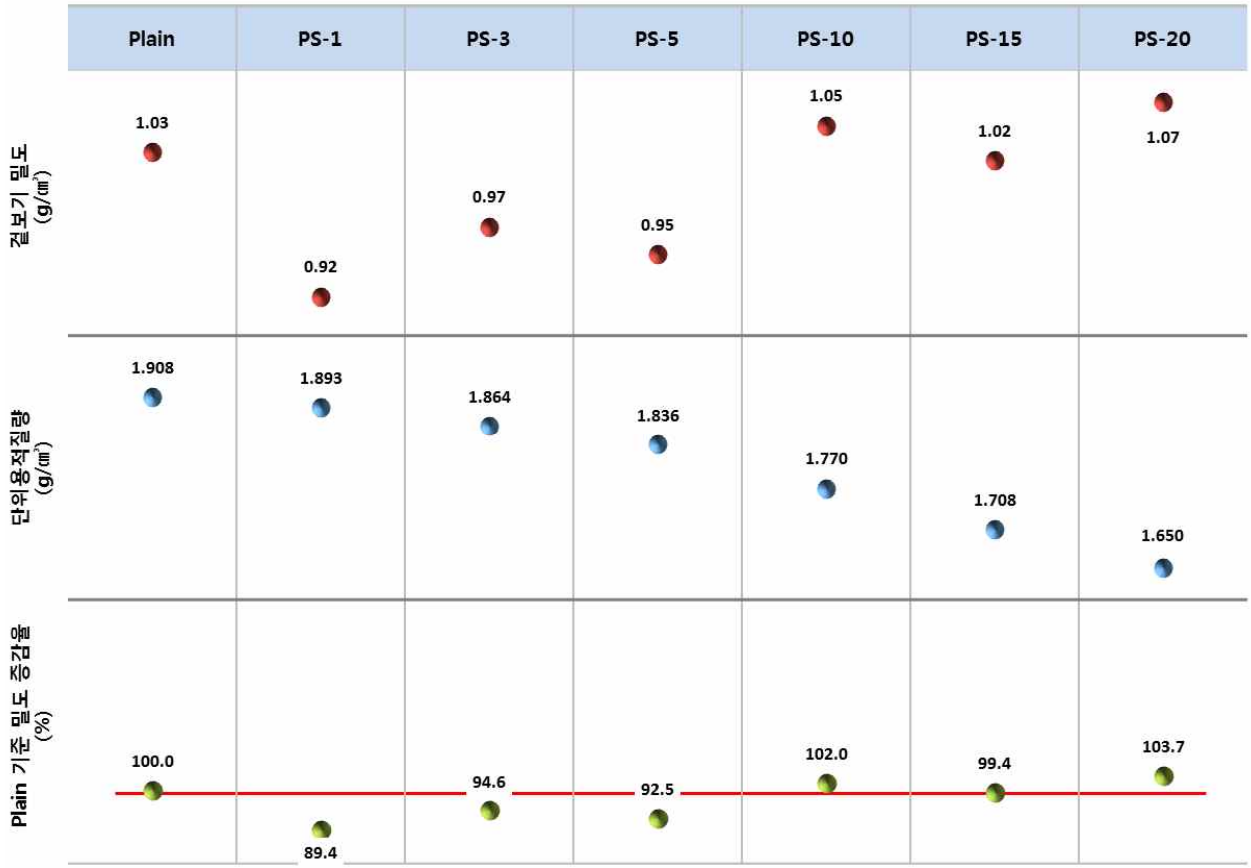
요인	수준
결합재 조건	▪ BFS[a)]+PA[b)]+PS[c)]
제지애시 치환율	▪ 5 %
폴리실리콘 슬러지 치환율	▪ 0, 1, 3, 5, 10, 15, 20 (%)
NaOH 첨가율	▪ 12.5 %
W/B	▪ 0.40
양생조건	▪ 습도 80±5 %, 온도 20±2 ℃
시험항목	▪ 밀도, 압축 및 휨 강도

a) BFS : 고로슬래그, b) PA : 제지애시, c) PS : 폴리실리콘 슬러지

다) 실험결과

(1) 밀도

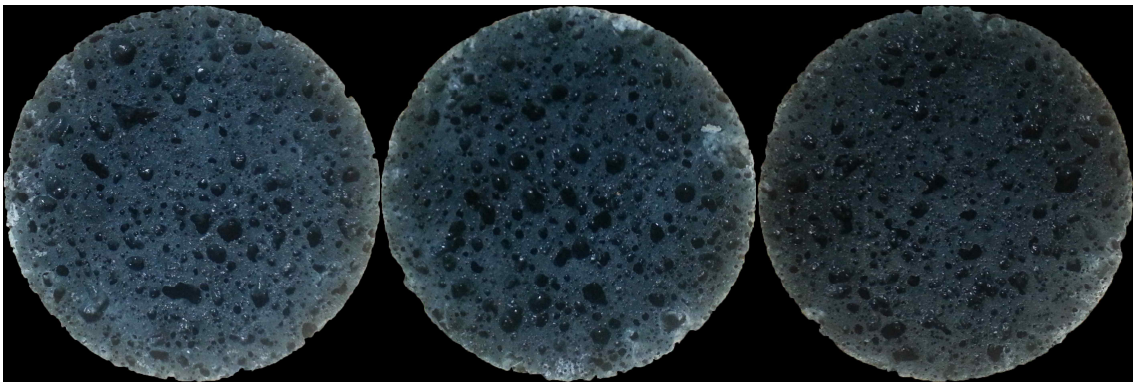
폴리실리콘 슬러지를 사용한 경화체의 밀도는 [그림 2-120]에 나타낸 것과 같이 플라이애시보다 단위용적질량이 급격히 감소하는 것에 비하여 겉보기 밀도는 증가하는 경향을 나타내었고, PS-1과 PS-3, PS-5 경화체의 경우만 Plain보다 낮은 겉보기 밀도를 나타내었다. 이는 비표면적이 넓은 폴리실리콘 슬러지의 높은 흡수율에 의해 결합재가 흡수하는 배합수의 양이 증가하면서 페이스트의 점도는 커지나 기포발생에 필요한 수분이 감소하여 [그림 2-121]에서 보여지는 경화체의 단면형상과 같이 치환율에 따라 공극이 점차 감소하여 나타난 결과인 것으로 판단된다.



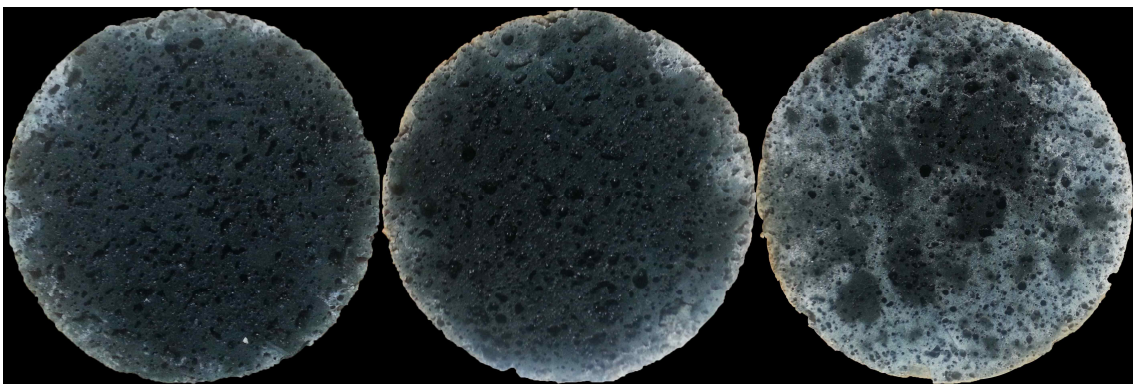
[그림 2-120] 폴리실리콘 슬러지의 치환에 따른 겉보기 밀도



(a) Plain



(b) PS-1% (c) PS-3% (d) PS-5%



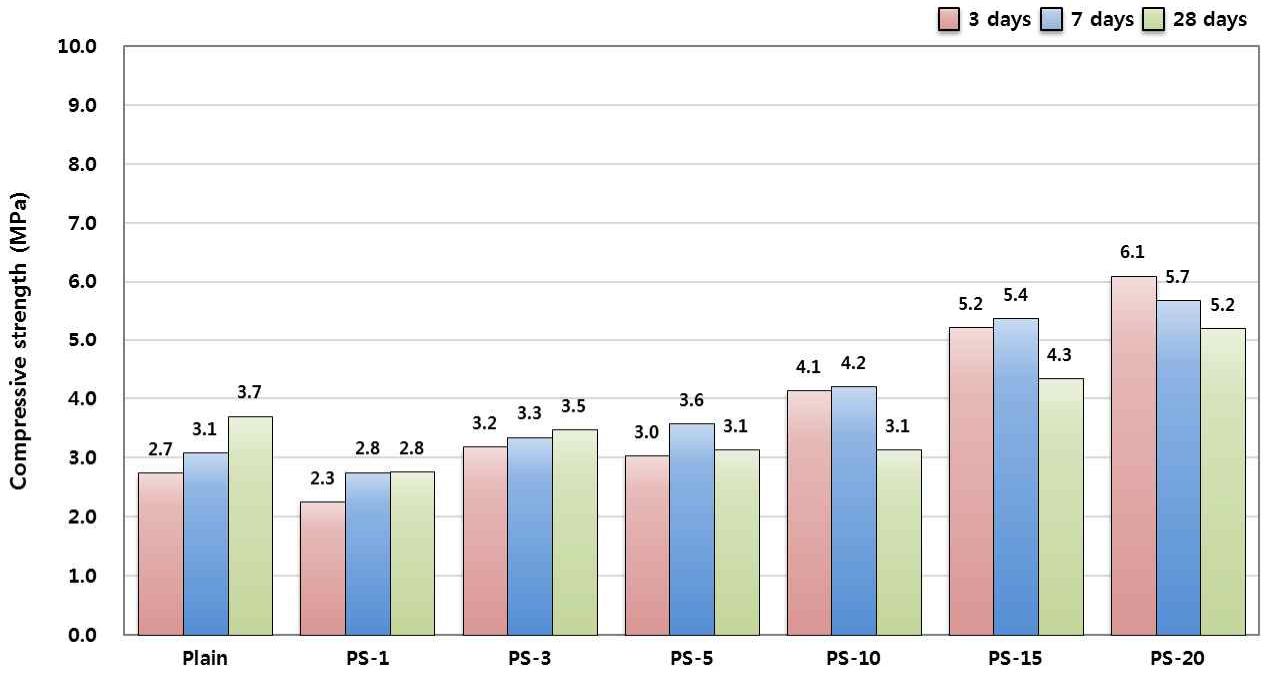
(e) PS-10% (f) PS-15% (g) PS-20%

[그림 2-121] 폴리실리콘 슬러지 치환에 따른 경화체의 단면형상

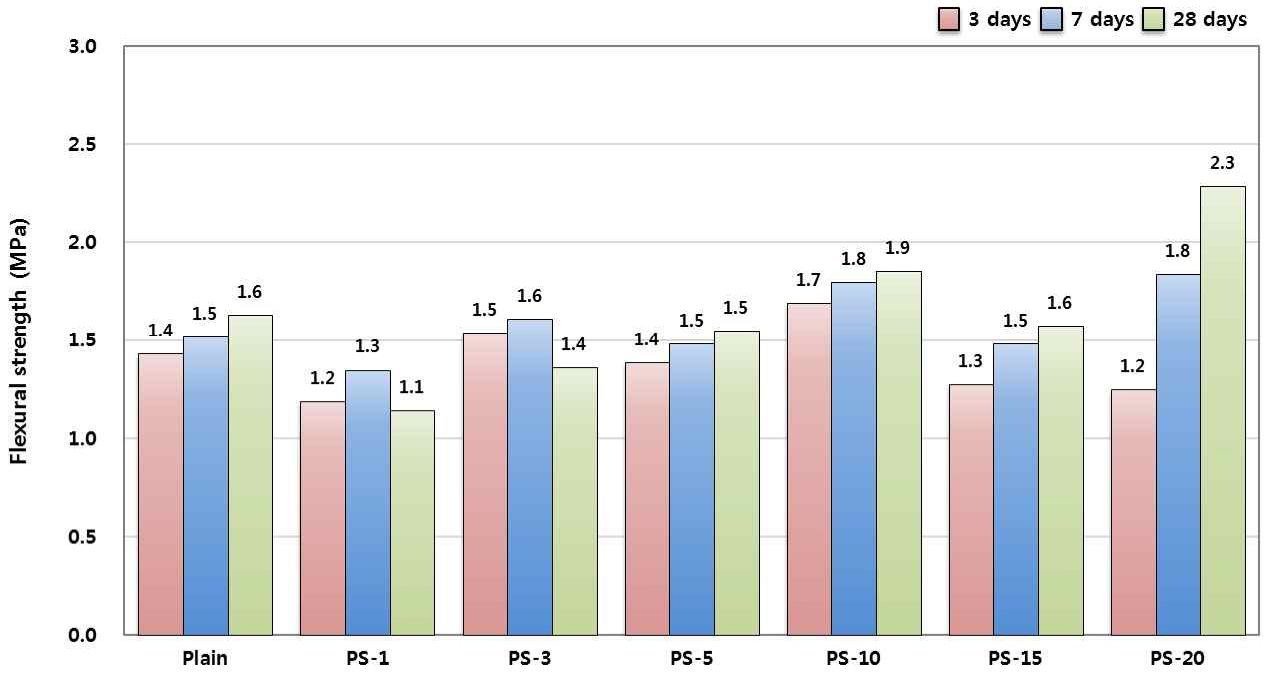
(2) 압축 및 휨 강도

[그림 2-122]은 폴리실리콘 슬러지의 치환율에 따른 경량 경화체의 압축강도를 나타낸 것으로 Plain의 재령 28일 강도는 3.7 MPa이며, 겉보기 밀도와 마찬가지로 폴리실리콘 슬러지의 치환율에 따라 압축강도는 증가하는 경향을 나타내었으나 재령 28일의 강도는 재령 7일보다 낮은 강도를 발현하였다. 또한, PS-20은 재령일에 따라 강도가 저하되는 경향을 나타내었다. 이는 Plain과 PS-1, PS-3의 경우 온도에 의한 팽창율이 큰 수소기체의 영향을 크게 받지 않았으나, 폴리실리콘 슬러지를 5 % 이상 치환하여 사용하였을 경우 경화체 내에 존재하는 수소기체의 발생과 팽창압의 증가로 고로슬래그의 사용량이 감소한 결합재의 결합력이 부족하여 나타난 결과인 것으로 판단된다.

휨 강도 시험결과는 [그림 2-123]에 나타내었는데, 전체적인 경향은 압축강도와 유사하지만 폴리실리콘 슬러지를 1, 3 (%) 치환한 경화체도 재령 7일보다 28일의 강도가 낮은 것으로 나타났다. 폴리실리콘 슬러지의 치환율 5, 10, 15, 20 (%)인 경화체는 재령일 따라 강도 증진을 나타내었다.



[그림 2-122] 폴리실리콘 슬러지 치환에 따른 압축강도



[그림 2-123] 폴리실리콘 슬러지 치환에 따른 휨 강도

3) 낮은 밀도를 갖는 재료의 사용 (3)

가) 실험개요

본 실험은 경량 경화체의 밀도 및 강도를 보완하기 위해 무기재료인 펄라이트를 경량 골재로 사용한 것으로 펄라이트의 밀도는 0.1에서 0.2 g/㎤ 정도로 매우 경량인 것을 사용하였다. 그리고 앞에서 진행되었던 Na_2SiO_3를 액상형태로 소량 첨가하였으며, NaOH 첨가량을 mole량으로 계산을 바탕으로 실험을 계획하였다.

나) 실험계획 및 방법

본 실험의 수준 및 요인은 [표 2-63]에 나타낸 바와 같이 결합재로써 고로슬래그와 제지애시를 사용하였으며, 제지애시의 치환율은 고로슬래그 중량에 5% 치환하여 사용하였고, 알칼리 자극제는 결합재의 중량 100 g을 기준으로 10.8 % 첨가하였다. 펄라이트는 결합재의 중량에 3, 6, 9 (%) 첨가하였으며, W/B는 펄라이트의 흡수율을 고려하여 0.55로 고정하였다. 양생조건은 습도 80±5 %, 온도 20±2 ℃ 항온항습에서 양생을 실시하였다. 측정항목은 경화체의 경량성을 검토하기 위한 밀도와 압축 및 휨 강도이다.

[표 2-63] 실험수준 및 요인

요인	수준	
결합재 조건	▪ BFS[a)]+PA[b)]	1
제지애시 치환율	▪ 5 %	1
NaOH 첨가율	▪ 10.8 %	1
Na_2SiO_3 첨가율	▪ 5 % (액상)	1
펄라이트 첨가율	▪ 3, 6, 9 (%)	3
W/B	▪ 0.55	1
양생조건	▪ 습도 80±5 %, 온도 20±2 ℃	1
시험항목	▪ 밀도, 압축 및 휨 강도	3

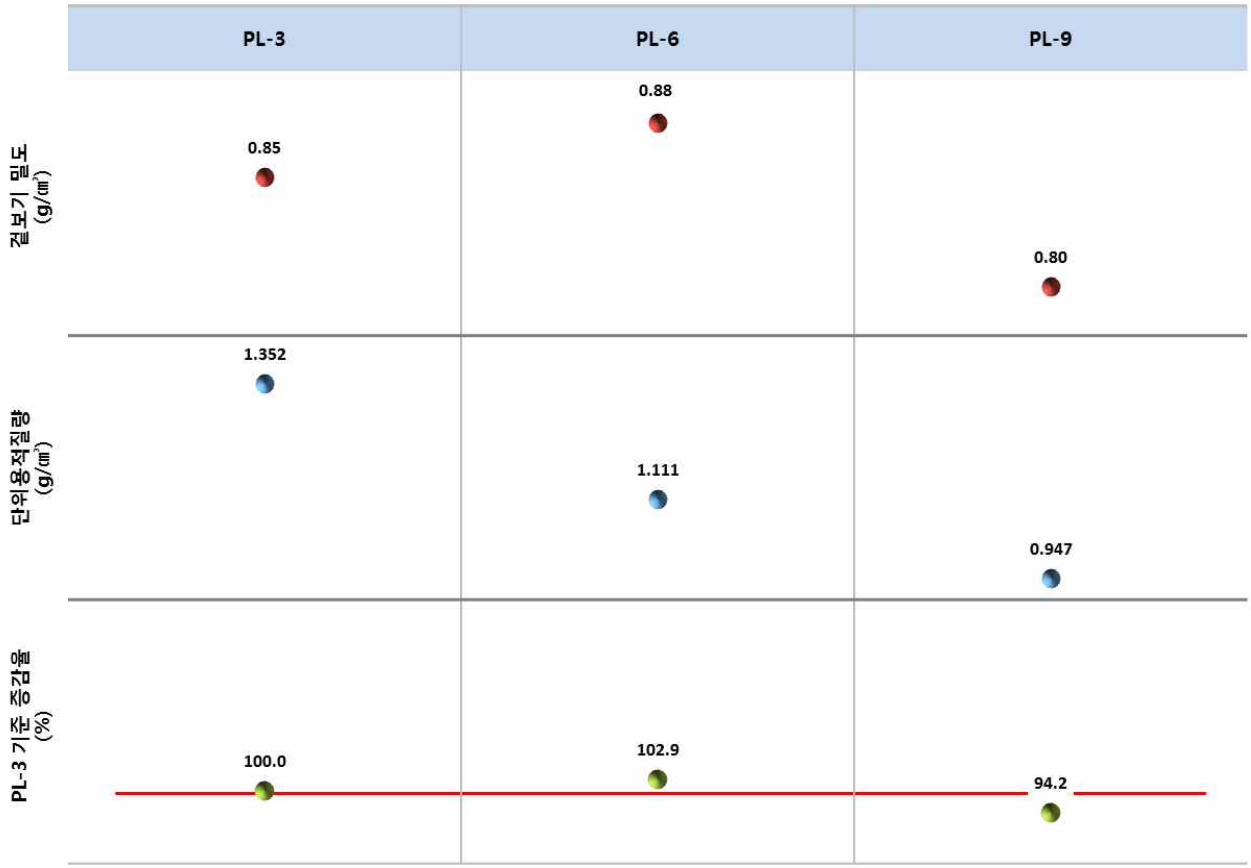
a) BFS : 고로슬래그, b) PA : 제지애시, c) PS : 폴리실리콘 슬러지

다) 실험결과

(1) 밀도

펄라이트 첨가율에 따른 밀도시험결과는 [그림 2-124]에 나타낸 것과 같이 단위용적질량의 경우 PL-3이 1.352 g/㎤로 가장 높고, PL-6, 9는 각각 1.111, 0.947 g/㎤로 고로슬래그와 제지애시만을 사용한 경화체의 단위용적질량(약 2.000 g/㎤)과 비교하여 매우 경량이 된 것을 알 수 있었다. 겉보기 밀도의 경우 펄라이트를 3 % 첨가한 경화체의 경우 0.85 g/㎤를 나타내었고, PL-6이 0.88 g/㎤, PL-9가 0.80 g/㎤으로 펄라이트를 9 % 첨가한 경화체가 본 연구의 목표성능(밀도)의 만족하는 것으로 나타났다.

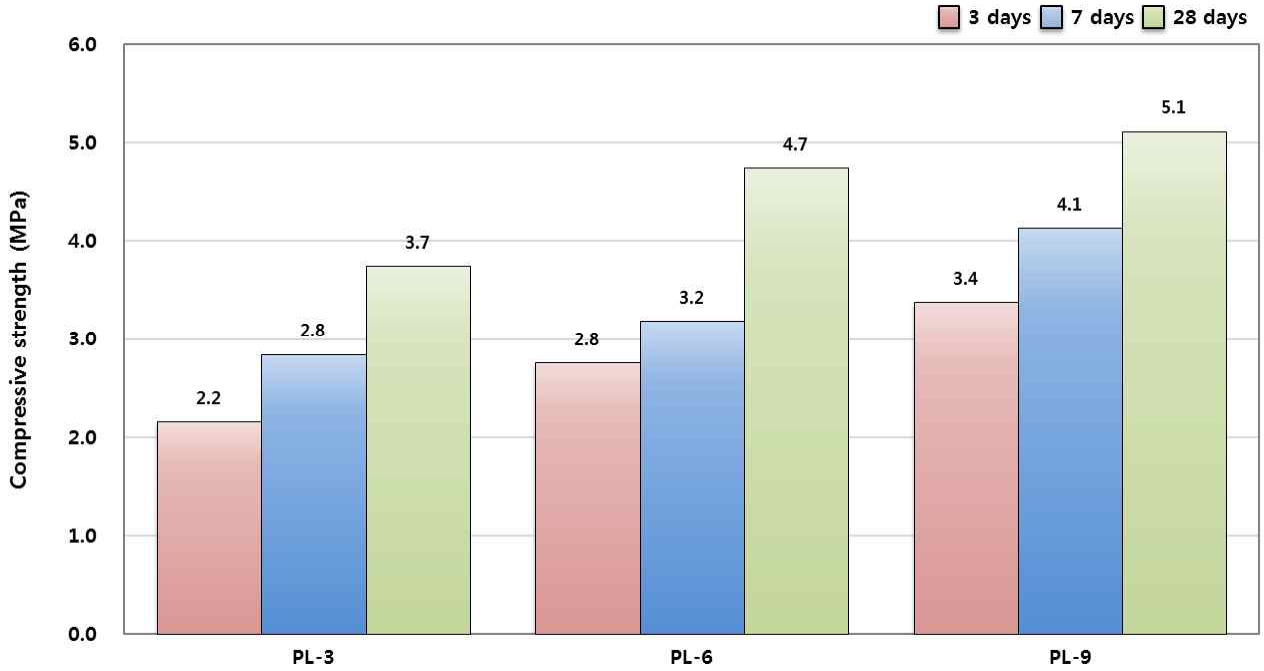
한편, 본 실험에서는 액상의 Na_2SiO_3를 소량 첨가하였는데, Na_2SiO_3의 사용량을 감소시키게 되면 보다 경량의 경화체를 제조할 수 있을 것으로 판단된다.



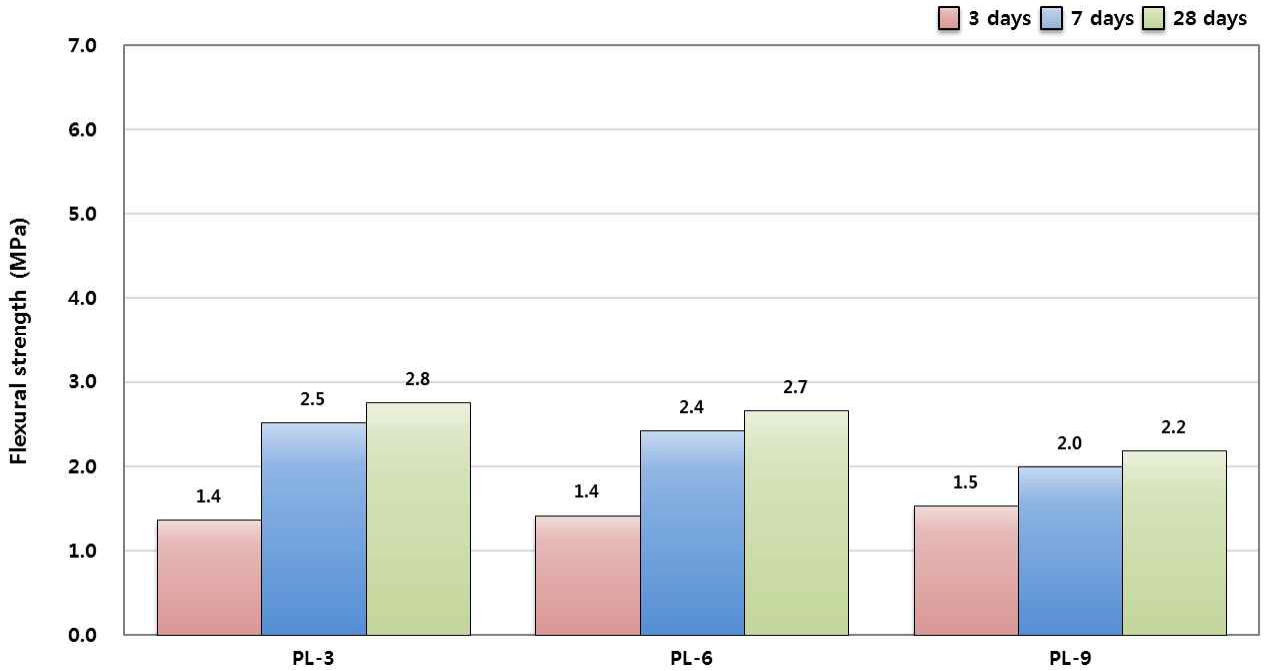
[그림 2-124] 펄라이트 첨가에 따른 겉보기 밀도

(2) 압축 및 휨 강도

펄라이트 첨가에 따른 경화체의 압축 및 휨강도는 [그림 2-125, 126]에 나타내었는데, 펄라이트의 첨가량이 증가할수록 겉보기 밀도는 감소하지만 압축강도는 증가하는 경향을 나타내었고, 휨 강도의 경우 저하되는 것으로 나타났다. 하지만 압축강도뿐만 아니라 휨 강도도 목표성능에 만족하는 것으로 나타났다.



[그림 2-125] 펄라이트 첨가에 따른 압축강도



[그림 2-126] 펄라이트 첨가에 따른 휨 강도

4) 발포성능을 갖는 재료의 검토 (1)

가) 실험개요

본 실험은 앞에서 사용한 폴리실리콘 슬러지와 다른 타 업체의 폴리실리콘 제조 공장에서 수급한 것을 사용하여 실험을 실시하였다. 이 폴리실리콘 슬러지는 NaOH와 반응할 경우 제지애시와 마찬가지로 수소를 발생시키는 특성을 갖고 있기 때문에 겉보기 밀도를 보다 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 폴리실리콘 슬러지의 화학성분은 [표 2-64]와 같다.

[표 2-64] 폴리실리콘 슬러지의 화학성분

질량백분율 (%)

분자	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	TiO_2
함유량	46.6	0.57	45.16	0.69	0.16	0.08	2.16	-

나) 실험계획 및 방법

본 실험의 수준 및 요인은 [표 2-65]에 나타낸 바와 같이 결합재 조건으로써 고로슬래그와 제지애시, 폴리실리콘 슬러지를 치환하여 실험을 실시하였다. 제지애시의 치환율은 고로슬래그 중량에 5% 치환하여 사용하였고, 폴리실리콘 슬러지는 제지애시를 치환한 고로슬래그의 중량에 0, 1, 3, 5 (%) 등 총 4수준으로 치환하였다. 알칼리 자극제는 결합재의 중량 100 g을 기준으로 12.5 % 첨가하였다. W/B는 0.40, 0.43이며, 항온항습 조건에서 양생을 실시하였다. 측정항목은 경화체의 경량성을 검토하기 위한 밀도와 압축 및 휨 강도이다.

[표 2-65] 실험수준 및 요인

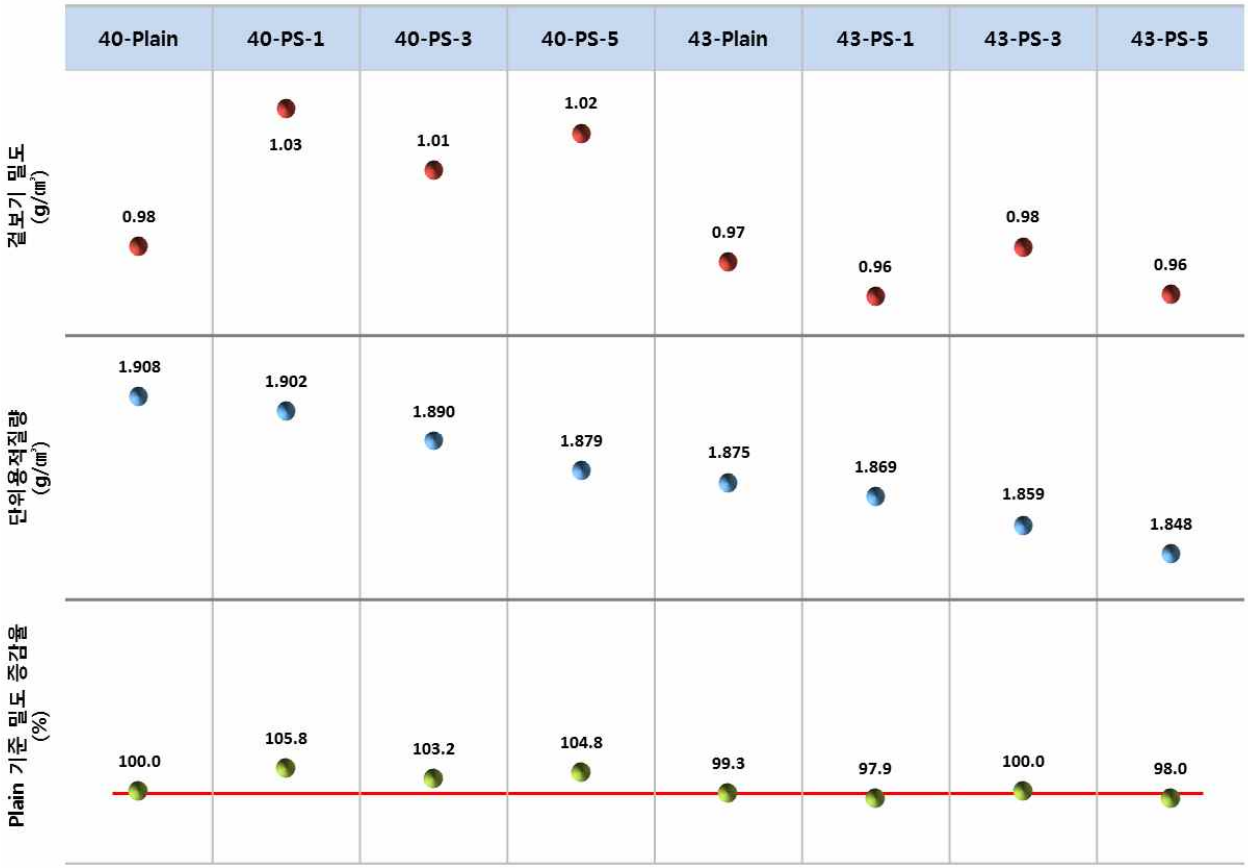
요인	수준	
결합재 조건	▪ BFS[a)]+PA[b)]+PS[c)]	1
제지애시 치환율	▪ 5 %	1
폴리실리콘 슬러지 치환율	▪ 0, 1, 3, 5 (%)	4
NaOH 첨가율	▪ 12.5 %	1
W/B	▪ 0.40, 0.43	2
양생조건	▪ 습도 80±5 %, 온도 20±2 ℃	1
시험항목	▪ 밀도, 압축 및 휨 강도	3

a) BFS : 고로슬래그, b) PA : 제지애시, c) PS : 폴리실리콘 슬러지

다) 실험결과

(1) 밀도

[그림 2-127]는 W/B 및 폴리실리콘 슬러지의 치환에 따른 겉보기 밀도를 나타낸 것으로, 단위용적질량은 W/B 0.43으로 실시한 결합재가 W/B 0.40보다 낮은 값을 나타내었고, 폴리실리콘 슬러지의 치환율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 겉보기 밀도는 40-Plain이 0.98 g/㎤를 나타내었고, 40-PS-1의 겉보기 밀도가 1.03 g/㎤, 40-PS-3은 1.01 g/㎤, 40-PS-5는 1.02 g/㎤를 나타내었다. W/B 0.43인 경화체는 43-Plain이 0.97 g/㎤이고, 43-PS-1은 0.96 g/㎤로 가장 가벼운 것으로 나타났으며, 43-PS-3은 0.98 g/㎤이며, 43-PS-5는 0.96 g/㎤이다.

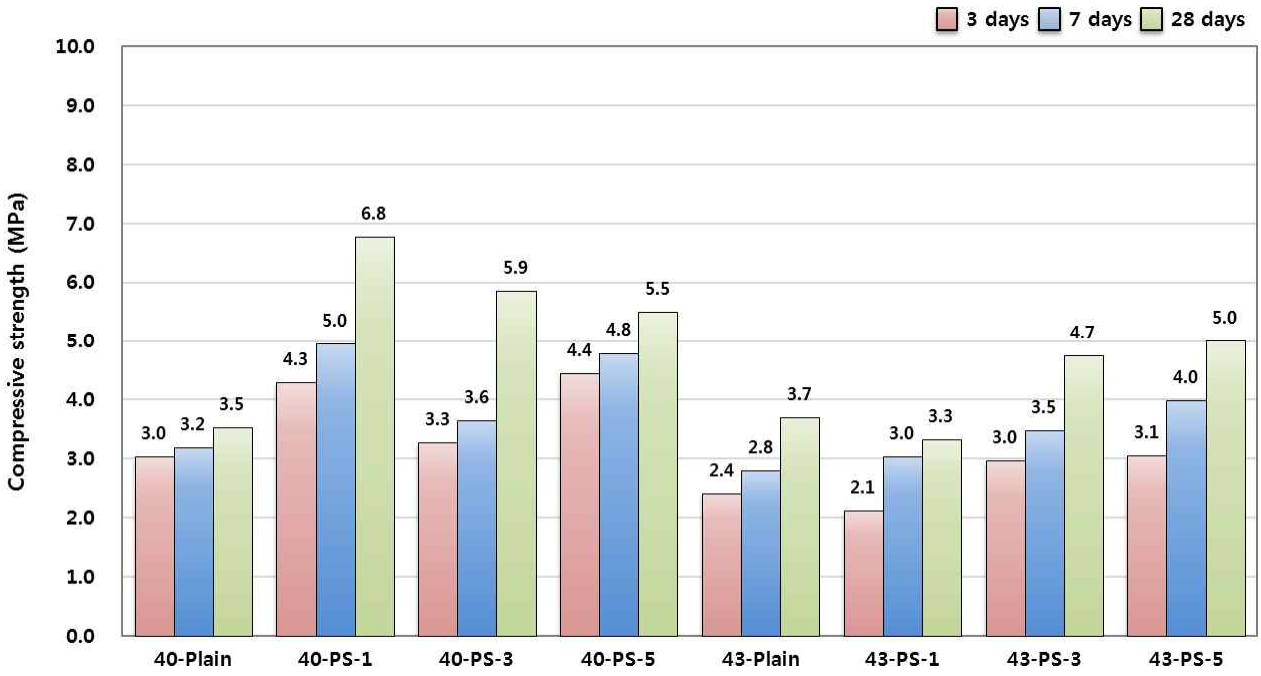


[그림 2-127] W/B 및 폴리실리콘 슬러지의 치환에 따른 겉보기 밀도

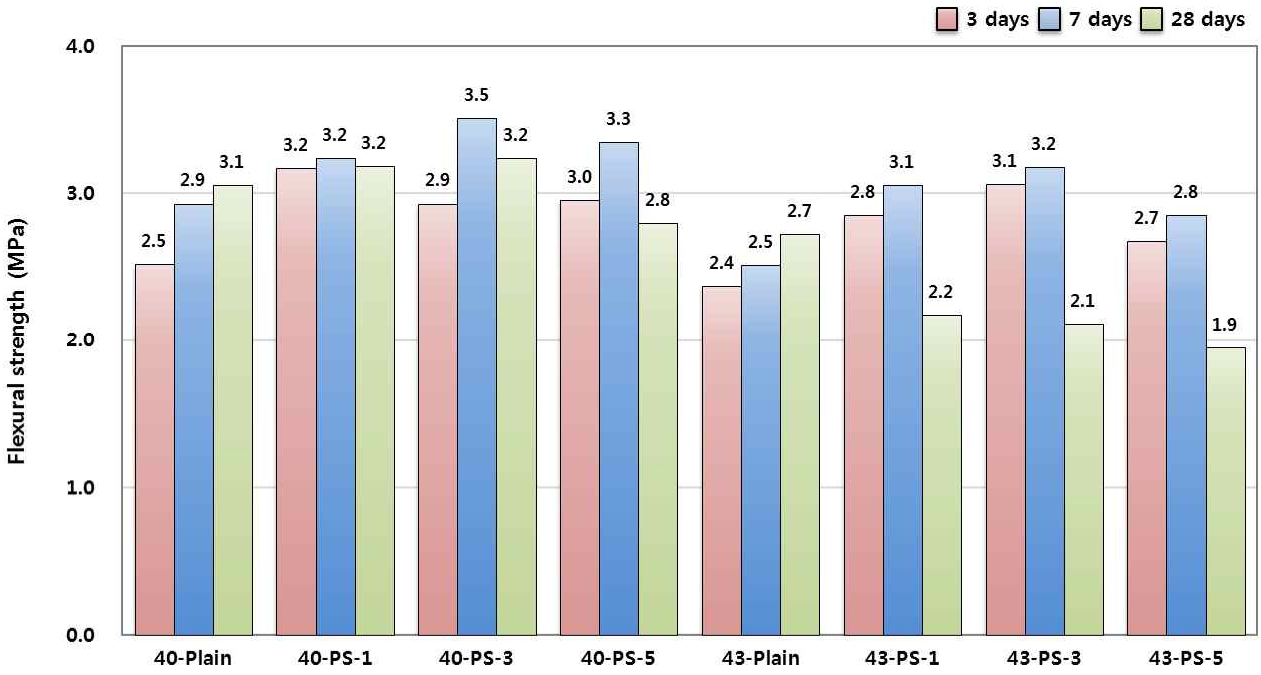
(2) 압축 및 휨 강도

W/B 및 폴리실리콘 슬러지의 치환에 따른 압축강도는 [그림 2-128]에 나타내었는데, 모든 경화체가 재령일에 따라 강도증진을 나타내었다. 40-Plain의 경우는 재령 3, 7, 28일의 강도가 3.0, 3.2, 3.5 (MPa)를 나타내었고, 40-PS-1의 압축강도는 재령 28일에서 6.8 MPa로 강도발현이 가장 우수하였다. 40-PS-3은 5.9 MPa, 40-PS-5는 5.5 MPa로 폴리실리콘 슬러지의 치환율에 따라 강도는 저하하는 경향을 나타내었다. 이는 제지애시 뿐만 아니라 폴리실리콘 슬러지와 NaOH의 반응으로 발생하는 소량의 수소기체가 경화체 내부에 미세한 공극을 형성함으로써 치환율에 따라 강도가 저하된 것으로 판단된다. W/B 0.43인 경화체는 43-Plain이 3.7 MPa이고, 43-PS-1은 3.3 MPa로 가장 낮은 압축강도를 나타내었으며, 43-PS-3은 4.7 MPa, 43-PS-5는 5.0 MPa로 폴리실리콘 슬러지의 치환율에 따라 강도가 증진되었다. 이는 W/B 0.40과 다른 결과를 나타내었다.

휨 강도 시험결과는 [그림 2-129]에 나타낸 것과 같이, 폴리실리콘 슬러지를 치환하여 사용한 경화체의 강도는 재령 7일의 강도보다 28일의 강도가 다소 낮은 것으로 나타났는데, 그 차이는 W/B 0.43이 큰 것으로 나타났다. 이는 배합수의 양이 증가함으로써 유동성 및 수소발생량은 증가하지만, 그만큼 여분의 물이 증가함에 따라 강도가 감소한 것으로 판단된다.



[그림 2-128] W/B 및 폴리실리콘 슬러지의 치환에 따른 압축강도



[그림 2-129] W/B 및 폴리실리콘 슬러지의 치환에 따른 휨 강도

아. 비빔시간 및 양생조건

1) 비빔시간에 따른 경화체의 특성검토

가) 실험개요

본 실험은 적정의 발포 특성 및 강도를 발현할 수 있는 비빔시간을 확립하기 위한 실험을 실시하였으며, 제지애시와 알칼리 자극제제의 반응이 최적화되는 비빔시간을 확인하여 강도 및 밀도를 확인하고자 하였다.

나) 실험계획 및 방법

본 실험의 수준 및 요인은 [표 2-66]에 나타난 바와 같이 결합재 조건으로써 고로슬래그, 제지애시를 사용하였고, 알칼리 자극제는 NaOH, Na_2SiO_3를 사용하였으며 W/B는 0.54로 선정하였다. 또한 비빔시간은 기본 건비빔 시간은 40초를 고정하였고, 배합수 투입 후 30rpm으로 40, 60, 80 (초), 펄라이트 투입 후 40, 60, 80, 120 (초)로 총 5 수준으로 실시하였다.

[표 2-66] 실험수준 및 요인

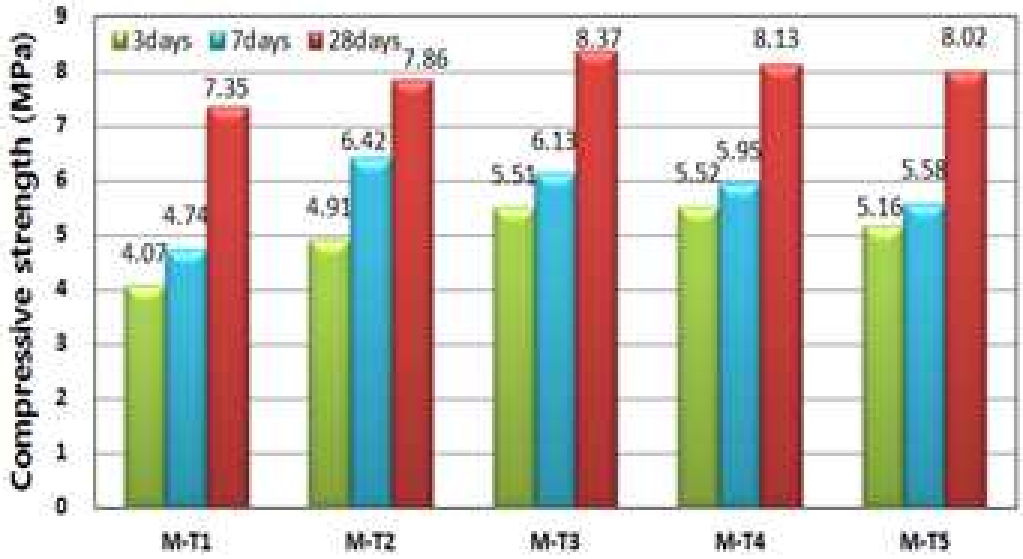
실험요인	실험수준
결합재 조건	• BFS[a)]+PA[b)]
제지애시 치환율	• 5 %
알칼리 자극제	• NaOH, Na_2SiO_3
알칼리 자극제 첨가율	• 10.8 (wt.%)
펄라이트첨가율	• 0.9 %
W/B	• 54 %
양생조건	• 상대습도(80±5)%, 온도(20±2)℃
비빔조건 (저속/중속/고속)	• ① 40s / 40s / 40s • ② 40s / 40s / 80s • ③ 40s / 60s / 60s • ④ 40s / 60s / 120s • ⑤ 40s / 80s / 80s
시험항목	• 압축 및 휨강도, 밀도

a) BFS : 고로슬래그, b) PA : 제지애시

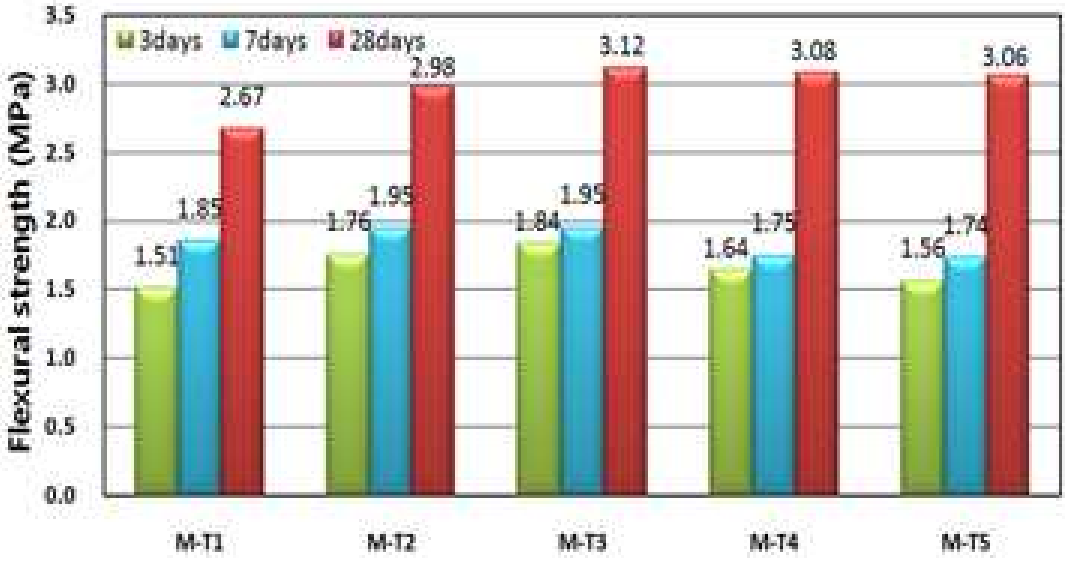
다) 실험결과

(1) 압축강도 및 휨강도

[그림 2-130]은 경량 경화체의 비빔시간에 따른 압축강도를 나타낸 것으로, M-T1 경화체가 가장 낮은 7.49 MPa를 발현하였으며, M-T3의 경화체가 가장 높은 8.58 MPa를 나타냈다. 비빔시간에 따라 강도는 미미한 차이를 보였지만 비빔시간이 길어질수록 미미하게 강도를 발현하는 것을 알 수 있다. 이는 비빔시간이 길어질수록 경화체내에 채워질 수소가 공기중으로 확산되어 경화체내에 강도를 발현하는 페이스트로 채워져 높은 강도를 발현하는 것으로 판단된다. [그림 2-131]는 휨강도를 나타낸 것으로, 전체적으로 압축강도와 마찬가지로 강도의 차이가 미미한 것으로 판단된다.



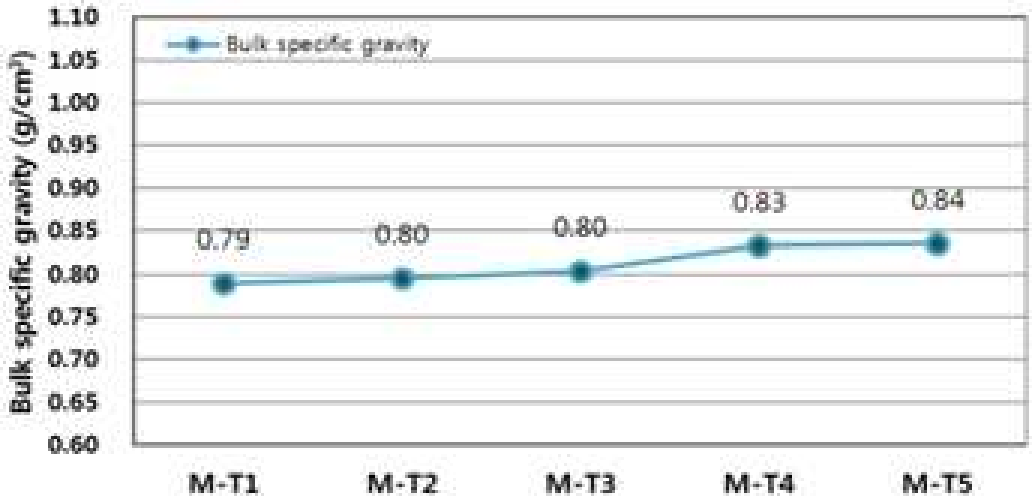
[그림 2-130] 경량 경화체의 비빔시간에 따른 압축강도



[그림 2-131] 경량 경화체의 비빔시간에 따른 휨강도

(2) 밀도

[그림 2-132]은 경량 경화체의 비빔시간에 따른 밀도를 나타낸 것으로, M-T1 경화체가 0.79 g/cm^{3}로 가장 낮은 밀도를 나타냈으며, 전체적으로 밀도의 차이가 미미한 것으로 판단되며 비빔시간이 길어질수록 밀도가 높아지는 것을 확인할 수 있으며 이는 시간이 길어질수록 경화체 내에 채워질 수소가 공기 중으로 확산되어 높아지는 것으로 판단된다.



[그림 2-132] 경량 경화체의 비빔시간에 따른 밀도

2) 양생조건에 따른 경화체의 특성검토

가) 실험개요

본 실험은 고로슬래그와 제지애시가 적정의 밀도 및 강도를 갖는 양생조건을 확인하기 위한 실험을 실시하였다.

나) 실험계획 및 방법

본 실험의 수준 및 요인은 [표 2-67]에 나타난 바와 같이 결합재 조건으로써 고로슬래그, 제지애시를 사용하였고, 알칼리 자극제는 NaOH, Na_2SiO_3를 사용하였으며 W/B는 0.54로 선정하였다. 또한 양생조건을 20, 40, 60 (℃)에서 기건양생과 수중양생을 실시하여 총 6수준으로 고정하였다.

[표 2-67] 실험요인 및 수준

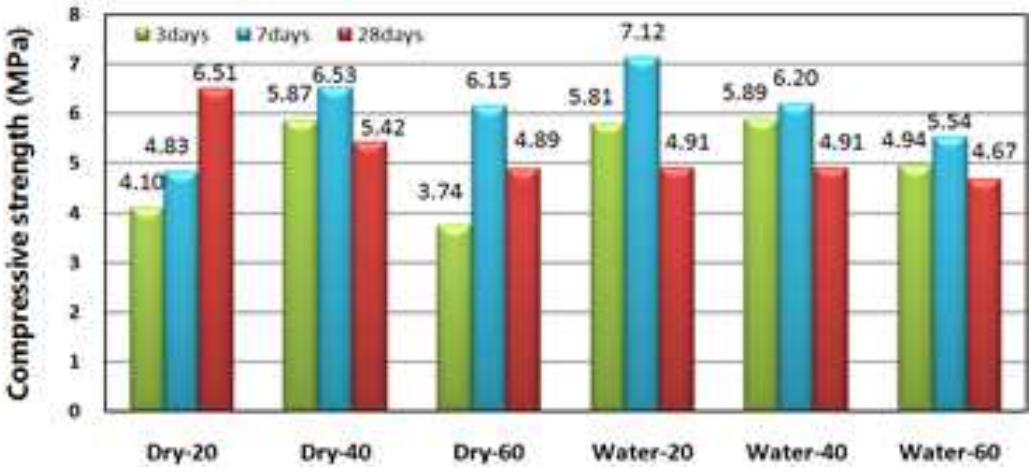
실험요인	실험수준
결합재 조건	• BFS[a)]+PA[b)]
제지애시 치환율	• 5 %
알칼리 자극제	• NaOH, Na_2SiO_3
알칼리 자극제 첨가율	• 10.8 (wt.%)
펄라이트첨가율	• 0.9 %
W/B	• 54 %
양생조건	• 기건(20, 40, 60 ℃), 수중(20, 40, 60 ℃)
시험항목	• 압축 및 휨강도

a) BFS : 고로슬래그, b) PA : 제지애시

다) 실험결과

(1) 압축강도

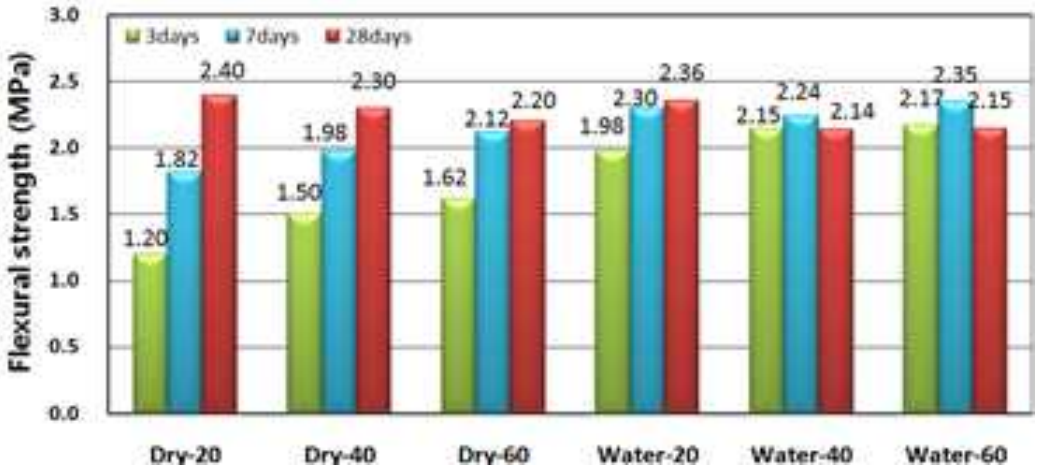
기건-20 경화체가 가장 높은 6.51 MPa를 나타냈고, Water-60 경화체가 가장 낮은 4.67 MPa를 발현하였다. Dry-20 경화체만이 재령이 지남에 따라 안정적으로 강도가 증진되었다. 수중 양생의 경우 경화체내에서 알칼리 자극제가 수중으로 용출되어 강도의 증진이 어려운 것으로 판단되며, 전체적으로 목표성능 5 MPa 가까운 강도를 발현하였으며, 40, 60 (℃)에서 양생을 한 경화체의 경우 공시체가 박리되거나 강도발현이 현저히 떨어지는 것을 확인되었다. 이는 양생할 때 고온으로 인한 수분증발로 인하여 수화가 충분히 이뤄지지 않아 강도 발현이 저해된 것으로 판단된다.



[그림 2-133] 경량 경화체의 양생조건에 따른 압축강도

(2) 휨강도

Water-60 경화체가 가장 낮은 2.66 MPa를 나타냈고, Dry-20 경화체가 가장 높은 2.40 MPa를 나타냈으며, Water-40, 60 경화체는 28일 재령일에 강도가 저하되는 경향을 보였으며, 수중의 경우 경화체 내에서 알칼리 자극제가 수중으로 용출되어 강도의 증진이 어려운 문제를 가지고 있는 것으로 판단된다. 전체적으로 목표성능 2 MPa보다 높은 강도를 발현하였다.



[그림 2-134] 경량 경화체의 양생조건에 따른 휨강도

자. 표면재의 종류 및 접합방법에 대한 특성 검토

1) 표면재의 종류에 따른 특성 검토

가) 실험개요

본 연구에서는 고로슬래그와 제지애시를 사용한 경량 패널로 표면재의 종류에 따른 휨강도 특성을 확인하고자 하는 실험이다.

나) 실험계획 및 방법

본 연구는 표면재의 종류에 따른 경량 패널의 휨강도 특성을 확인하는 실험으로써 [표 2-68]에 나타낸 것과 같이 표면재의 종류는 MgO 보드, CRC보드, 제지애시 보드, 마그네시아 보드 총 4수준으로 고정하였다. 시험항목으로는 휨강도를 확인하였다.

[표 2-68] 실험요인 및 수준

실험요인	실험수준
결합재 조건	• BFS[a)]+PA[b)]
제지애시 치환율	• 5 %
알칼리 자극제	• NaOH, Na_2SiO_3
알칼리 자극제 첨가율	• 10.8 (wt.%)
패널의 종류	• MgO보드, CRC보드, 제지애시 보드, 마그네시아 보드
W/B	• 54 %
양생조건	• 상대습도(80±5)%, 온도(20±2)℃
시험항목	• 휨강도

a) BFS : 고로슬래그, b) PA : 제지애시

다) 실험결과

표면재의 종류에 따른 휨강도 실험결과, 마그네시아 보드 시험체의 경우 10.18 MPa로 가장 높은 강도를 발현하였으며, 제지애시 보드 패널의 경우 5.19 MPa로 가장 낮은 강도를 발현하였다. 제지애시 보드의 경우 보드 표면에 많은 공극으로 인하여 강도발현이 어려웠던 것으로 판단되며, MgO보드, CRC보드에 비해 낮은 강도를 발현하였으며 마그네시아 보드가 패널 제작 시 가장 적절할 것으로 판단된다.



[그림 2-135] 패널 종류에 따른 휨강도

2) 표면재의 접합방법에 따른 특성 검토

가) 실험개요

본 연구에서는 고로슬래그와 제지애시를 사용한 경량 패널로 표면재의 접합방법에 따른 휨강도 특성을 확인하고자 하는 실험이다.

나) 시험계획 및 방법

패널의 심재와 표면재의 접합방법을 심재 타설 시 심재의 결합력으로 표면재와 접합하는 방법, 고로슬래그 페이스트로 접합하는 방법 및 콘크리트 본드로 접합하는 방법 총 3수준으로 실험을 진행하였다.

[표 2-69] 실험요인 및 수준

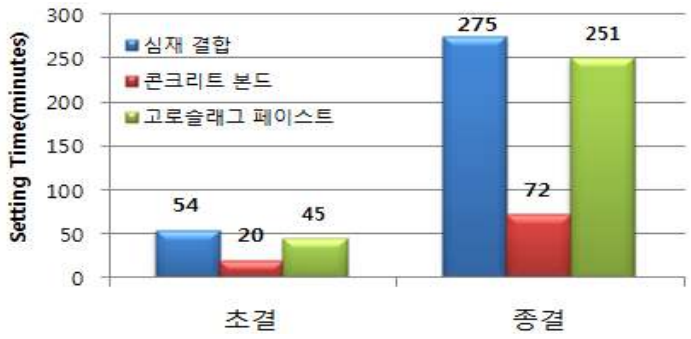
실험요인	실험수준
결합재 조건	• BFS[a)]+PA[b)]
제지애시 치환율	• 5 %
알칼리 자극제	• NaOH, Na_2SiO_3
알칼리 자극제 첨가율	• 10.8 (wt.%)
패널의 접합방법	• 심재 결합력, 고로슬래그 페이스트, 콘크리트 본드
W/B	• 54 %
양생조건	• 상대습도(80±5)%, 온도(20±2)℃
시험항목	• 응결, 휨강도

a) BFS : 고로슬래그, b) PA : 제지애시

다) 실험결과

(1) 응결

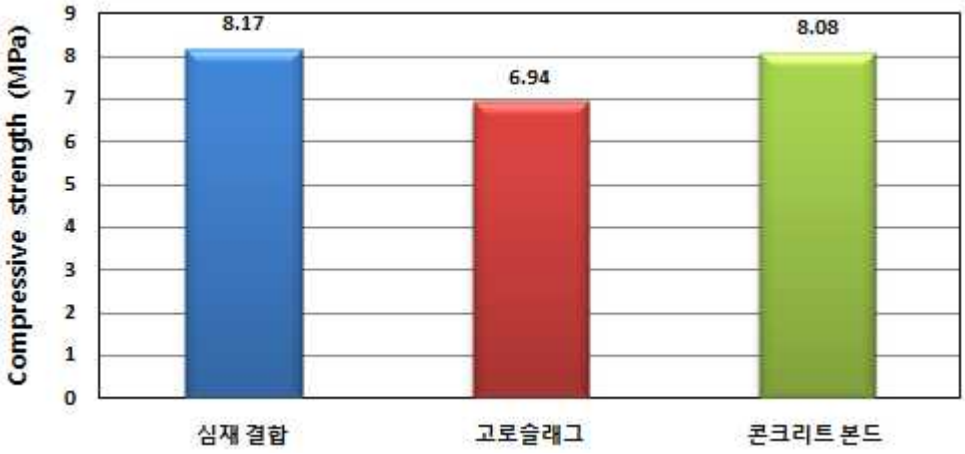
접합방법에 따른 응결시험의 경우, 콘크리트 본드가 가장 빠른 응결시험을 보였으며, 심재 및 고로슬래그 페이스트의 경우 응결시간이 비슷한 경향이었다. 이는 결합재로 고로슬래그를 사용하였기 때문이라고 판단된다. 콘크리트 본드의 경우 본드의 속성상 초반의 빠른 응결을 보였으며 그 이후 강도가 증진이 되지 않는 것으로 판단된다.



[그림 2-136] 접합방법에 따른 응결시간

(2) 휨강도

[그림 2-137]은 접합방법에 따른 휨강도 실험결과를 나타낸 것으로, 심재의 결합력으로 부착한 시험체가 8.17 MPa로 가장 높은 강도를 발현하였으며, 고로슬래그 페이스트로 결합한 시험체의 경우 8.08 MPa의 강도를 발현하였다. 이는 접합하는 과정에서 페이스트의 두께가 얇고 기타 이물질 등으로 인하여 강도가 낮게 발현된 것으로 판단된다. 또한, 응결시간 자체로 휨강도에 큰 영향을 끼치지 않는다고 판단된다.



[그림 2-137] 표면재 접합방법에 따른 휨강도

차. 내화·내구성 평가

1) 내화성 평가

가) 실험개요

심재의 내화성 및 내열성을 평가하기 위한 실험으로 비내력 벽체에 대한 내화성능은 KS F 2257-8:2004 기준으로 2시간 내화성능 갖는 것으로 규정되어 있다.

나) 실험계획 및 방법

본 실험수준 및 요인은 [표 2-70]에 나타내었으며, KS F 2257-8:2004 기준으로 표준 시간 가열곡선에 맞춰 2시간 동안 가열하는 방법으로 실험을 실시하였다. 시험항목은 전기로 실험, 내화성의 척도인 차염성 및 차열성을 측정하였다.

[표 2-70] 실험수준 및 요인

실험요인	실험수준
결합재 조건	• BFS[a)]+PA[b)]
제지애시 치환율	• 5 %
알칼리 자극제	• NaOH, Na_2SiO_3
알칼리 자극제 첨가율	• 10.8 (wt.%)
펄라이트 첨가율	• 0.9 %
실험체 크기	• 1.5 m × 1.5 m × 0.1m
시험 환경	• 24~25 (℃), 습도 : 42~48 (%)
W/B	• 54 %
양생조건	• 상대습도(80±5)%, 온도(20±2)℃
시험항목	• 전기로 실험, 내화성(차열성 및 차염성)

a) BFS : 고로슬래그, b) PA : 제지애시

다) 실험결과

① 전기로 실험

[사진 2-11]은 고로슬래그 기반 경량 경화체의 전기로 시험 결과를 나타낸 것으로, 고로슬래그 기반 경량 경화체의 전기로 실험은 전기로 시험기를 1000℃까지 올려 2시간동안 측정하는 방법으로 실험을 진행하였고, 내화시험 전 간이 시험으로 진행하였다. 본 실험 결과, 전기로 시험기를 1000℃까지 올려서 2시간 동안 가열하였을 때 전체적으로 시험체가 파괴되지 않았으며, B100 : P0 시험체의 경우 표면의 공극은 펄라이트가 높은 열에 녹으면서 발생한 공극으로 판단되며, 차이가 미비하지만 표면에 공극이 많을수록 쉽게 으스러지는 현상이 발생하였다. 이는 공극사이로 열이 침투하여 시험체 내부까지 열이 보다 많이 전달되어 쉽게 으스러지는 것으로 판단된다.


B100 : P0 시험체


B95 : P5 시험체


전기로 시험기


B90 : P10 시험체


B95 : P5 패널 시험체

[사진 2-11] 고로슬래그 기반 경량 경화체의 전기로 시험사진

② 차열성 및 차염성 실험결과

[표 2-71]은 경량 경화체의 차열성 및 차염성 시험 결과를 나타낸 것으로, 고로슬래그 기반 경량 경화체의 내화성 시험결과를 나타낸 것으로, KS F 2257에 의하여 시험을 실시하였다. 차열성의 경우 평균 상승온도가 13.8℃로 성능기준인 140℃를 크게 만족하였으며, 최고 상승온도가 17.8℃로 성능기준인 180℃를 만족하였다. 또한 차염성의 경우 2시간 동안 관통, 착화 및 화염이 발생하지 않았다. 이는 순수 무기재료로 구성되어 있는 경량 경화체이기 때문인 것으로 판단된다.

[표 2-71] 차열성 및 차염성 시험 결과

시험항목		시험결과	성능기준	시험방법
차열성	평균 상승온도(℃)	13.8	평균 상승온도 140℃ 이하일것	KS F 2257-8:2004
	최고 상승온도(℃)	17.8	최고 상승온도 180℃ 이하일것	
차염성 (120 min)	6㎜ 균열게이지	관통되지 않음	시험체를 관통한 경우, 150㎜ 이상 수평 이동 되지 않을 것	
	25㎜ 균열게이지	관통되지 않음	관통되지 않을 것	
	화염 발생 유무	화염발생 없음	10초 이상 지속되는 화염 발생이 없을 것	
	면패드 착화 유무	착화되지 않음	착화되지 않을 것	

a) BFS : 고로슬래그, b) PA : 제지애시

2) 내구성 평가

가) 실험개요

최적배합으로 제작된 심재의 내구성을 평가하기 실험으로 실질적으로 고로슬래그 기반 경량 경화체가 적용될 수 있도록 내황산성 및 내염산성을 확인하여 기존 시멘트 모르타르와 비교 실험을 진행하였다.

나) 실험계획 및 방법

본 연구는 고로슬래그와 제지애시를 사용한 경량 경화체의 내황산성 및 내염산성을 확인하고자 하는 실험으로 결합재로써 고로슬래그 및 제지애시를 사용하였고, 고로슬래그와 제지애시의 비율은 95:5로 고정하였다. 황산침지시험은 JSTM C 7401에 따라 시험하였으며, 시멘트 모르타르와 비교 실험을 진행하였다. 실험 항목으로는 강도잔존율를 측정하였다.

[표 2-72] 실험수준 및 요인

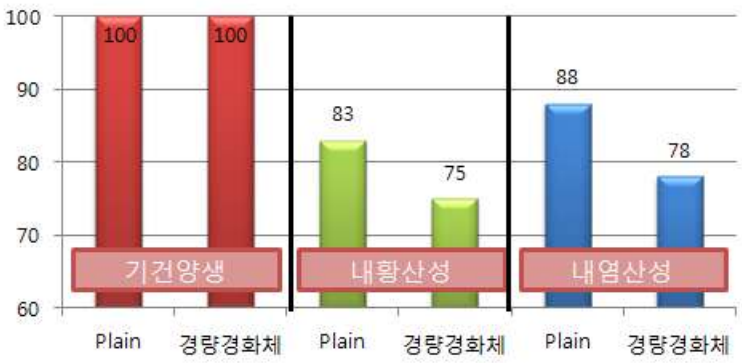
실험요인	실험수준
결합재 조건	• BFS[a)]+PA[b)]
제지애시 치환율	• 5 %
알칼리 자극제	• NaOH, Na_2SiO_3
W/B	• 54 %
양생조건	• 상대습도(80±5)%, 온도(20±2)℃
시험항목	• 강도잔존율

a) BFS : 고로슬래그, b) PA : 제지애시

다) 실험결과

① 강도잔존율

[그림 2-138]는 황산 및 염산 침지에 따른 강도잔존율을 나타낸 것으로, 일반적인 기반 양생에 비해 낮은 강도잔존율을 나타냈고, Plain에 비해 전체적으로 낮은 강도잔존율을 보였다. 이는 경량 경화체의 표면에 있는 공극사이로 염산 및 황산이 시험체 내부까지 침투하여 시험체의 낮은 강도잔존율을 나타낸 것으로 판단된다. 본 연구에서 개발한 심재는 기존 시멘트와 비슷한 경향을 나타내는 것으로 판단된다.



[그림 2-138] 황산 및 염산 침지에 따른 강도잔존율

차. 포름알데히드 및 휘발성 유기화합물 방출 특성

1) 실험개요

본 연구는 고로슬래그와 제지애시를 기반으로 한 경량 경화체의 친환경적인 특성를 알아보기 위한 실험을 진행하였으며, 친환경적인 특성인 포름알데히드 및 휘발성 유기화합물을 측정하였다.

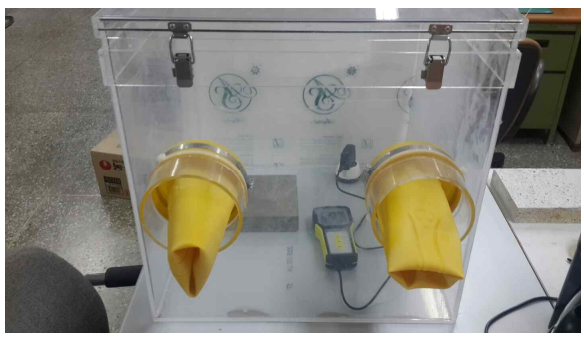
2) 실험계획 및 방법

본 연구는 경량 경화체의 친환경적인 특성을 알아보기 위한 실험으로 결합재로는 고로슬래그와 제지애시를 사용하였으며, 결합재의 비율은 B95 : P5로 고정하였다. 알칼리 자극제는 NaOH, Na_2SiO_3를 사용하였으며, W/B는 54 %로 고정하였다. 시험항목으로는 포름알데히드, 휘발성 유기화합물를 측정하였다. 실험방법으로는 50×50×50(cm)의 밀폐함에 시험체를 넣고 48시간동안 측정하였으며, 시멘트 페이스트와 비교실험을 진행하였다.

[표 2-73] 실험수준 및 요인

실험요인	실험수준
결합재 조건	• BFS[a)]+PA[b)]
제지애시 치환율	• 5 %
알칼리 자극제	• NaOH, Na_2SiO_3
W/B	• 54 %
양생조건	• 상대습도(80±5)%, 온도(20±2)℃
시험항목	• 포름알데히드, 휘발성 유기화합물 방출량

a) BFS : 고로슬래그, b) PA : 제지애시

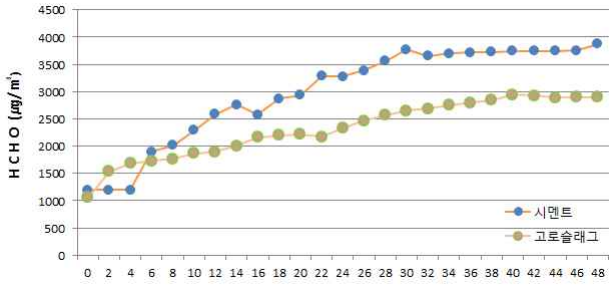


[사진 2-12] 포름알데히드 및 휘발성 유기화합물 측정사진

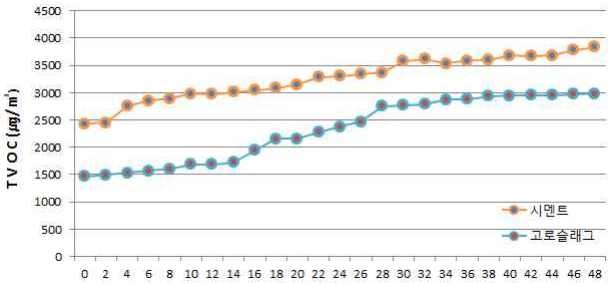
3) 실험 결과

[그림 2-139, 140]은 포름알데히드 및 휘발헝 유기화합물을 측정 결과를 나타낸 것으로, 포름알데히드를 측정한 결과, 시멘트 페이스트와 거의 유사한 경향을 보였으며, 포름알데히드 방출량이 계속적으로 증가하는 경향은 밀폐함 내부에서 방출되는 포름알데히드로 인하여 방출량이 증가하는 것으로 판단된다. 휘발성 유기화합물 측정결과, 포름알데히드와 유사한 경향을 보

였으며, 방출량 수치가 계속 증가하는 경향은 밀폐함의 자체적인 내부수치가 증가함에 따라 방출량이 증가한 것으로 판단된다.



[그림 2-139] 포름알데히드 측정 결과



[그림 2-140] 휘발성유기화합물 측정결과

제 3 절 연구수행 결과 및 검증방법

1. 연구수행 결과

가. 1차년도 연구개발 결과

1) 유동특성 및 압축강도, 밀도

가) 실험개요

본 실험은 산업부산물인 고로슬래그 기반에 제지애시를 혼입한 무시멘트 결합재의 유동특성, 압축강도 및 밀도를 검토하기 위한 실험이다.

나) 실험계획 및 방법

본 실험은 고로슬래그 기반에 제지애시 치환율을 0, 5%로 하였으며, 알칼리 자극제는 NaOH를 사용하였고, 결합재 중량의 12.5%를 첨가하였다. 시험항목으로는 결합재의 유동성을 검토하기 위한 플로우 콘 플로우와 경화체의 굳은 성상을 검토하기 위해 압축강도를 측정하였으며, 제지애시의 발포성능에 의한 경량화 척도로써 배합밀도와 경화체 밀도를 비교·분석 하였다.

요인	수준
결합재 조건	▪ BFS[a)]+PA[b)]
제지애시 치환율	▪ 0, 5 (%)
알칼리 자극제	▪ NaOH
알칼리 자극제 첨가율	▪ 12.5%
W/B	▪ 40%
양생조건	▪ 상대습도 80±5%, 온도 20±2℃
시험항목	▪ 플로우 콘 플로우, 압축강도, 밀도

a) BFS : 고로슬래그, b) PA : 제지애시

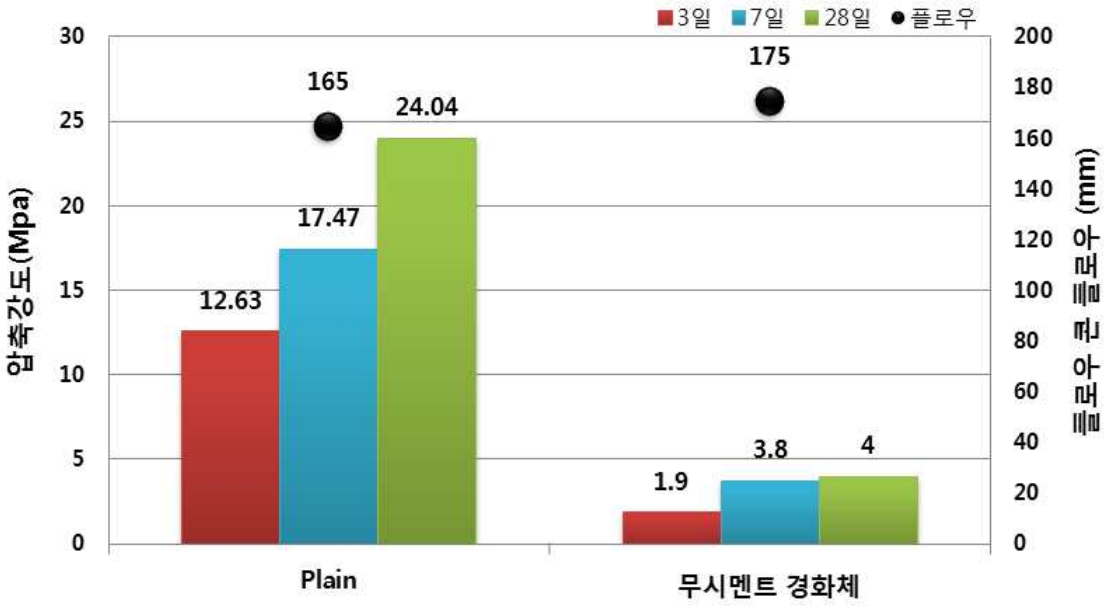
다) 실험결과

(1) 플로우 콘 플로우

플로우 콘 플로우 시험결과, 175mm로 본 연구의 성과지표인 100mm 보다 큰 값을 나타내었으며, 제지애시에 의해 기포가 발생되면서 결합재가 부풀어 올라 압축몰드에 타설시 별도의 다짐 및 진동 없이도 고루게 채워지는 것을 확인 할 수 있었다.

(2) 압축강도

결합재의 압축강도 측정결과, Plain과 비교할 때 매우 낮은 강도이나 이는 경화체에 분포된 공극에 의한 강도 저하이며, 본 연구개발의 목표인 3MPa보다 높은 압축강도를 나타내었다.



(3) 밀도

고로슬래그만을 사용한 Plain의 배합 밀도는 2.00g/㎤로 밀도 감소율은 4.09%로 나타났으며, 제지애시를 치환한 무시멘트 경화체의 경우, 밀도 감소율은 55.57%, 밀도는 0.88g/㎤로 본 연구개발의 목표인 0.80g/㎤보다 다소 미치지 못하는 결과를 나타났다.

구분	Plain	무시멘트 경화체
배합 밀도a) (g/㎤)	2.00	1.89
경화체 밀도b) (g/㎤)	1.92	0.88
감소율c) (%)	4.09	55.57

a) 배합 밀도 : 사용재료의 밀도와 사용된 양(g)을 기준으로 도출한 값

b) 경화체 밀도 : 경화체의 부피와 무게를 측정하여 계산한 값을 나타냄

C) 감소율 : {(배합 밀도)-(경화체 밀도)}/(배합 밀도)×100

라) 1차년도 최적배합

W/B (%)	Binder (g)		Water (g)	Alkali Activator(%)
	BFS	PA		NaOH (powder)
40	95	5	40	12.5

나. 2차년도 연구개발 결과

1) 심재의 최적배합

가) 실험개요

본 연구의 목표성능을 만족하기 위한 경량 경화체의 최적배합은 연구진행에 의해 도출된 실험을 분석하여 도출하였다. 이에 건식 경량벽체에 적용하기 위한 심재의 최적배합은 [표 88]과 같다.

W/B (%)	Binder		Water (g)	Alkali Activator (%)		Lightweight aggregate (%)
	BFS	PA		NaOH (powder)	Na_2SiO_3 (liquefied)	Pearlite
53	95	5	52.3	10.8	4	9

나) 실험결과

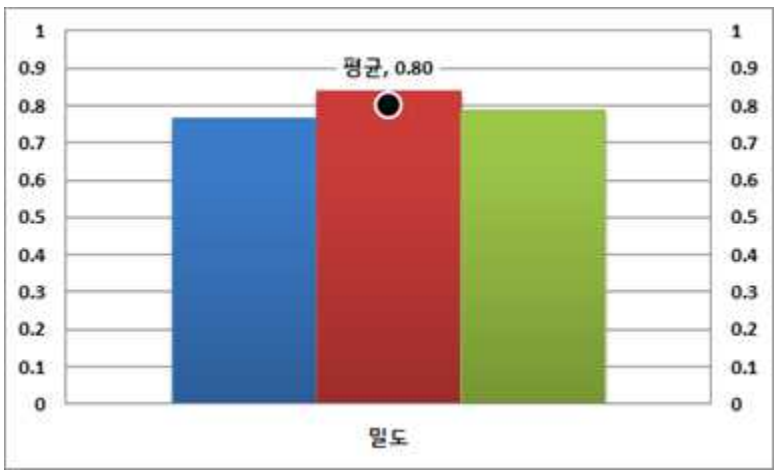
(1) 심재의 밀도

① 목표치 : 0.80 g/㎤ 이하

② 측정방법 : KS F 2459

[기포 콘크리트의 겉보기 밀도, 함수율, 흡수율 및 압축 강도 시험 방법]

③ 결과 : 평균 0.80 g/㎤로 목표성능에 만족함



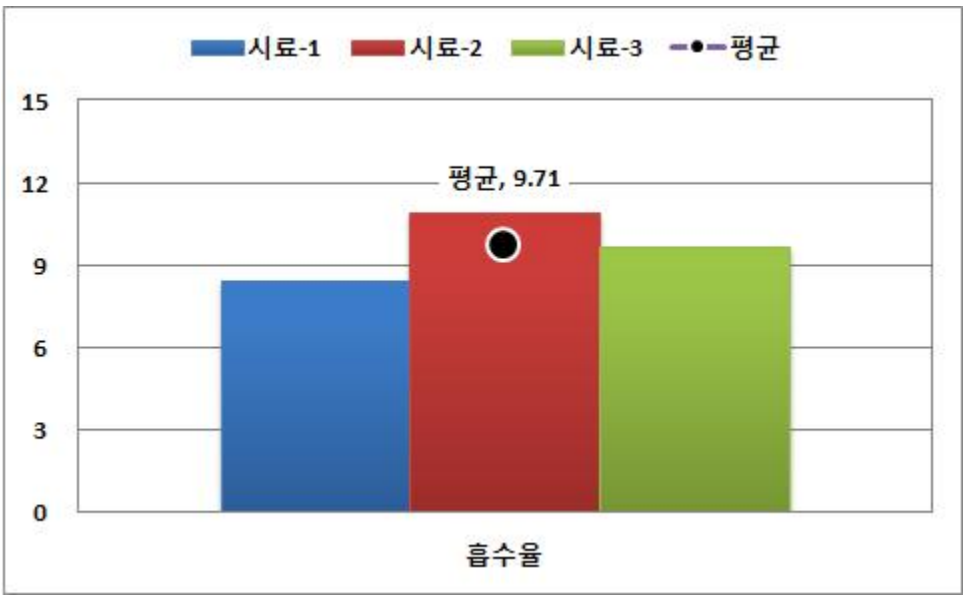
(2) 심재의 흡수율

① 목표치 : 10 % 이하

② 측정방법 : KS F 2459

[기포 콘크리트의 겉보기 밀도, 함수율, 흡수율 및 압축 강도 시험 방법]

③ 결과 : 평균 9.71 %로 목표성능에 만족함.



(3) 심재의 강도특성

① 목표치 : 5 MPa 이상

② 측정방법 : KS F 2459

[기포 콘크리트의 겉보기 밀도, 함수율, 흡수율 및 압축 강도 시험 방법]

③ 결과 : 재령 28일 강도 5.24 MPa로 목표성능에 만족함

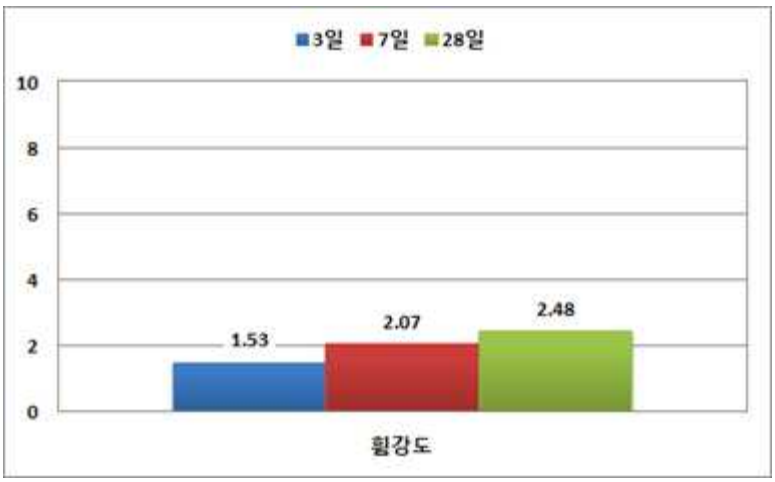


① 목표치 : 2 MPa 이상

② 측정방법 : KS L ISO 679

[시멘트의 강도 시험 방법]

③ 결과 : 재령 28일 강도 2.48 MPa로 목표성능에 만족함



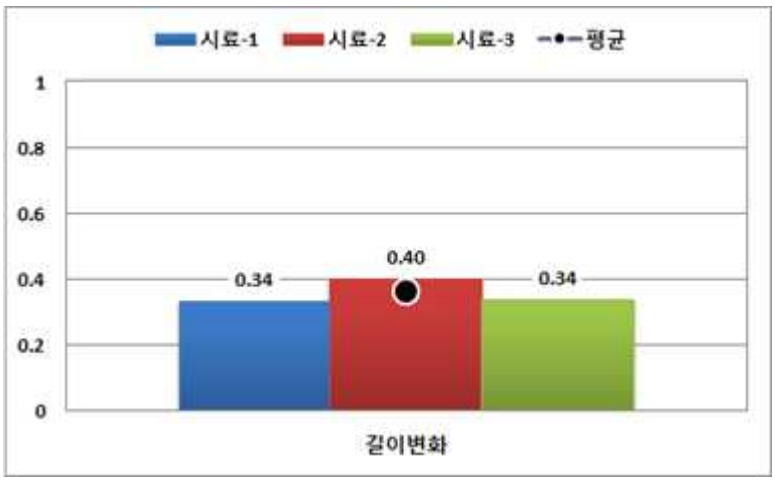
(4) 심재의 길이변화 특성

① 목표치 : 0.40 % 이하

② 측정방법 : KS F 2460

[기포 콘크리트의 길이 변화 시험 방법]

③ 결과 : 평균 0.36 %로 목표성능에 만족함.



(5) 심재의 중금속 용출

① 목표치 : Cr6+:20mg/L, 기타중금속:0mg/L이하

② 측정방법 : 환경부고시(제 2011-3)

③ 결과 : 지정폐기물 유해물질 암유기준에 만족

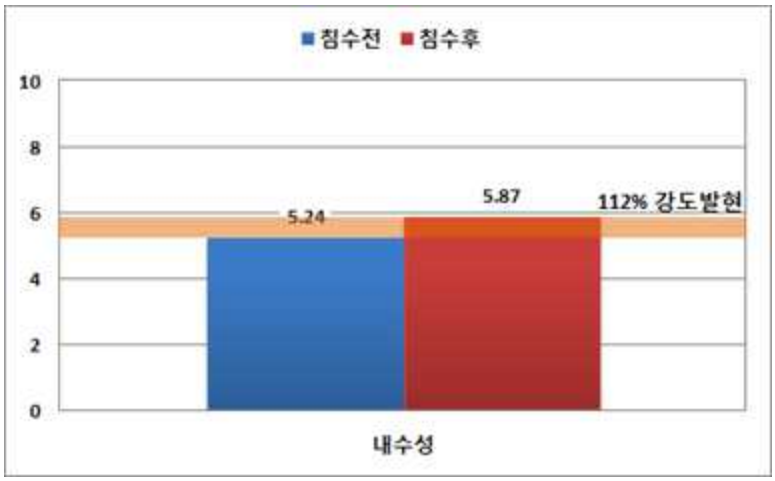

시험성적서

(6) 심재의 내수성

① 목표치 : 80 % 이상 강도발현

② 측정방법 : 침수 후 압축강도 비교 실험

③ 결과 : 침수 전·후 압축강도비가 112 %로 목표성능에 만족함.



(7) 심재의 내열성

① 목표치 : 0.42 W/mK 이하 (0.36 W/㎡ 이하 단위환산시)

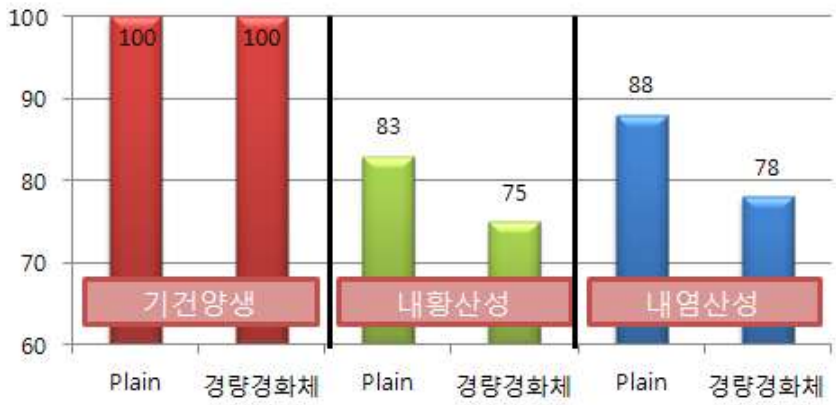
② 측정방법 : KS L 9016

[보온재의 열 전도율 측정 방법](KS F 2277 : 건축용 구성재의 단열성 측정 방법－교정 열상자법 및 보호 열상자법)



시험성적서

(8) 심재의 내구성



다. 3차년도 연구개발 결과

1) 심재의 내화성

the way to trust KCL

7415-4634-1802-1097

시험성적서

1. 성 적 서 번 호 : CT15-062987
2. 의 뢰 자
   ○ 업 체 명 : 한밭대학교산학협력단
   ○ 주 소 : 대전광역시 유성구 동서대로 125 (덕명동)
   ○ 의뢰일자 : 2015년 06월 03일
   ○ 시험기간 : 2015년 06월 03일 ~ 2015년 07월 07일
3. 시험성적서의 용도 : 연구과제용
4. 시 료 명 : 비내력 벽체 [복합패널 (심재 100 ㎜)]
5. 시험방법
   (1) KS F 2257-8

확인	작성자 성 명	윤준수	기술책임자 성 명	이상권

비고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

2015년 07월 07일
한국건설생활환경시험연구원장

에너지환경사업본부 : 363-883 충청북도 청주시 청원구 오창읍 양청3길 [illegible]8990
결과문의 : 방재기술평가센터 ☎ (043)210-8993

총 9페이지 중 1페이지 양식QP-20-01-05(3)

the way to trust KCL

성적서번호 : CT15-062987

시험성적서

시 험 결 과

시험항목		시험결과	성능기준	시험방법
차열성 (120 min)	평균 상승온도 (℃)	13.8	평균 상승온도 140℃ 이하일것	KS F 2257-8:2004
	최고 상승온도 (℃)	17.8	최고 상승온도 180℃ 이하일것	
차열성 (120 min)	6 ㎜ 균열게이지	관통되지 않음	시험체를 관통한 경우, 150㎜ 이상 수평 이동 되지 않을 것	
	25 ㎜ 균열게이지	관통되지 않음	관통되지 않을 것	
	화염 발생 유무	화염발생 없음	10초 이상 지속되는 화염 발생이 없을 것	
	면패드 착화 유무	착화되지 않음	착화되지 않을 것	

※ 시험체의 구성 및 재질 (의뢰자 제시) : 다음 페이지 표 참조
※ 시험체의 크기 : (1500 × 1500 × 100) ㎜

총 9 페이지 중 2 페이지 QP-20-01-06(3)

the way to trust KCL

성적서번호 : CT15-062987

시험성적서

5) 비가열면 온도 (℃) - 계속

시간 (min)	CH1 (℃)	CH2 (℃)	CH3 (℃)	CH4 (℃)	CH5 (℃)	평균 온도(℃) (CH1-CH5)	최고 온도(℃) (CH1-CH9)
82	24.6	27.0	27.0	30.0	25.4	26.8	30.0
83	24.6	27.2	27.2	29.6	25.6	26.8	29.6
84	24.8	27.4	29.1	28.5	25.9	27.1	29.1
85	25.0	27.5	28.1	30.7	26.1	27.5	30.7
86	24.3	27.8	28.8	29.0	26.3	27.2	29.0
87	25.4	28.0	29.0	29.9	26.5	27.8	29.9
88	25.9	28.2	30.0	29.5	26.7	28.1	30.0
89	25.5	28.3	29.0	30.2	27.0	28.0	30.2
90	24.9	28.7	29.5	29.9	27.3	28.1	29.9
91	26.0	28.9	28.9	32.1	27.5	28.7	32.1
92	25.3	29.1	30.1	31.8	27.7	28.8	31.8
93	26.8	29.2	28.8	30.5	27.9	28.6	30.5
94	25.6	29.6	30.6	32.8	28.2	29.4	32.8
95	27.2	29.8	30.8	33.1	28.5	29.9	33.1
96	26.8	30.0	31.7	33.3	28.7	30.1	33.3
97	26.6	30.0	32.0	32.3	28.9	30.0	32.3
98	27.2	30.3	30.7	32.0	29.2	29.9	32.0
99	27.4	30.6	31.7	33.0	29.4	30.4	33.0
100	26.7	30.6	32.1	34.4	29.7	30.7	34.4
101	26.9	30.9	32.3	33.5	29.9	30.7	33.5
102	27.9	31.6	31.7	34.5	30.1	31.2	34.5
103	28.1	31.5	32.5	34.0	30.4	31.3	34.0
104	28.0	31.6	33.0	34.2	30.7	31.5	34.2
105	28.5	31.9	33.2	35.8	31.0	32.1	35.8
106	29.3	32.1	32.6	35.6	31.3	32.2	35.6
107	29.0	32.9	33.0	36.4	31.5	32.6	36.4
108	28.2	32.5	33.2	34.6	31.8	32.1	34.6
109	28.4	33.3	34.3	36.4	32.1	32.9	36.4
110	29.5	33.5	33.7	36.1	32.4	33.0	36.1
111	30.3	33.6	33.3	36.9	32.7	33.4	36.9
112	30.0	34.0	34.3	37.8	32.9	33.8	37.8
113	30.1	33.7	34.4	37.4	33.1	33.7	37.4
114	30.8	34.5	34.7	37.7	33.4	34.2	37.7
115	30.5	34.8	35.0	37.9	33.8	34.4	37.9
116	30.8	35.0	35.2	38.1	34.0	34.6	38.1
117	30.1	35.3	36.3	39.1	34.2	35.0	39.1
118	31.1	35.5	35.7	39.5	34.4	35.2	39.5
119	32.0	35.9	35.5	39.1	34.6	35.4	39.1
120	30.6	35.8	36.9	39.3	34.9	35.5	39.3

※ 평균 상승 온도 (℃) : 13.8
※ 최고 상승 온도 (℃) : 17.8
※ 초기 온도 (℃) : 21.7 (1~5번 열전대)

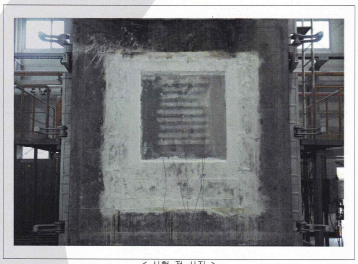
총 9 페이지 중 8 페이지 QP-20-01-06(3)

the way to trust KCL

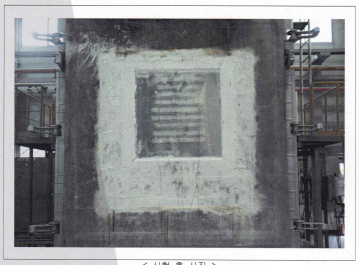
성적서번호 : CT15-062987

시험성적서

6) 내화시험 사진



< 시험 전 사진 >



< 시험 후 사진 >

----- 이 하 여 백 -----

총 9 페이지 중 9 페이지 QP-20-01-06(3)

2) 심재의 단열성

the way to trust KCL

시험성적서

2771-4818-1744-0521

1. 성 적 서 번 호 : CT15-063005
2. 의 뢰 자
   - ○ 업 체 명 : 한밭대학교산학협력단
   - ○ 주 소 : 대전광역시 유성구 동서대로 125 (덕명동)
   - ○ 의뢰일자 : 2015년 06월 03일
   - ○ 시험기간 : 2015년 06월 03일 ~ 2015년 10월 01일
3. 시험성적서의 용도 : 품질관리
4. 시 료 명 : 패널의 심재
5. 시험방법
   (1) KS F 2277:2002

6. 시험결과

1) 패널의 심재

시험항목	단위	시험방법	시험결과	시험환경
열관류율	W/㎡·K	(1)	1.88	(23 ± 1) ℃, (48 ± 5) % R.H.

※ 첨부 1. 열관류율 RAW DATA
첨부 2. 시험체 도면
첨부 3. 시험체 사진

확인	작성자 성 명	이강영	기술책임자 성 명	조병영

비고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로써 전체 제품에 대한 증명을 보증하지는 않습니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용할 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

2015년 10월 01일

한국인정기구 인정 한국건설생활환경시험연구원장

위 성적서는 국제시험기관인정협력체(International Laboratory Accreditation Cooperation)의 상호인정협정(Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구(KOLAS)로부터 공인받은 분야에 대한 시험결과입니다.

에너지환경사업본부 : 281-15 충청북도 청주시 청원구 오창읍 양청3길 73 043-210-8990
결과문의 : 에너지환경기술센터 ☎ (043)210-8912

the way to trust KCL

시험성적서

성적서번호 : CT14-108287

첨부 1. 열관류율 RAW DATA

시험일자	2015. 09. 18. ~ 09. 21.

구분	항온실 [m]	자온실 [m]	가열상자 [m]	시험체 전열 개구부 [m]
시험장치 내부치수	3.6 × 3.0 × 3.6 (W×D×H)	3.6 × 3.0 × 3.6 (W×D×H)	2.5 × 0.7 × 2.0 (W×D×H)	1.5 × 0.32 × 1.5 (W×D×H)

		1회	2회	3회
공기온도 [℃]	항온실	19.74	19.77	19.80
	가열상자	20.25	20.25	20.25
	자온실	-0.22	-0.21	-0.19
	온도차※1	20.46	20.46	20.44
열량 [W]	총공급열량※2	30.96	31.04	30.93
	교정열량※3	18.75	18.60	19.03
	시험체 통과열량	12.21	12.43	11.89
시험체 양표면 열전달저항 [㎡·K/W]	내표면 열전달 저항	0.15	0.15	0.15
	외표면 열전달 저항	0.04	0.03	0.04
	보정값	-0.03	-0.02	-0.03
열관류율 [W/(㎡·K)]		0.27	0.27	0.26
열관류 저항 [㎡·K/W]		3.74	3.68	3.84
특기사항		1. 항온실 및 가열상자 설정조건 : (20±1) ℃, 상대습도 50 % R.H. 2. 자온실 설정조건 : 실내온도 0 ℃, 기류속도 1.2 m/s 3. 기류방향 : 수평 4. 본 시험은 고객이 제공한 시료에 대한 시험결과임.		

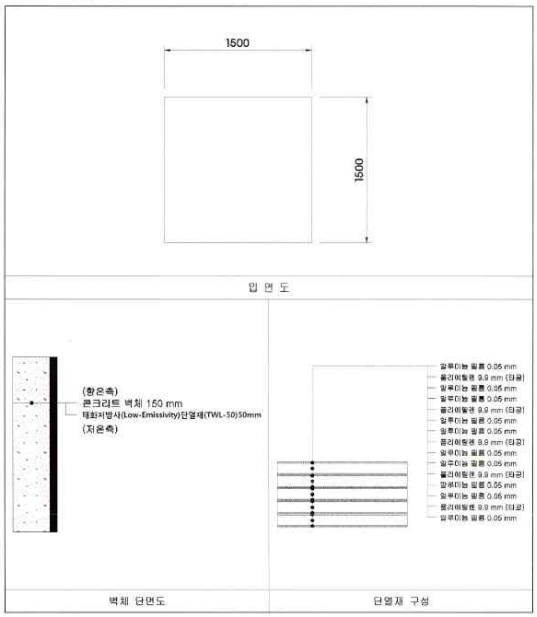
※1 온도차 : 가열상자내 9지점(시료표면으로부터 10cm 지점)의 평균공기온도와 자온실내 9지점(시료표면으로부터 10cm 지점)의 평균공기온도와 온도차
※2 총공급열량 : 가열상자내 팬 및 히터에 의한 총공급열량
※3 교정열량 : 가열상자 둘레벽과 시험체 부착틀의 교정열량

the way to trust KCL

시험성적서

성적서번호 : CT14-108287

첨부 2. 시험체 도면



the way to trust KCL

시험성적서

성적서번호 : CT14-108287

첨부 3. 시험체 사진



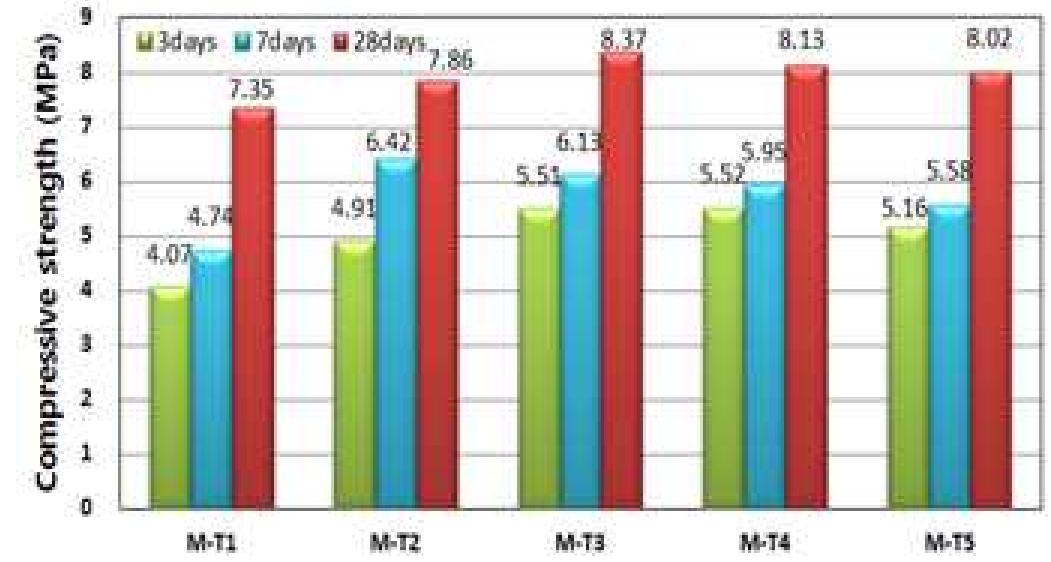
<사진 1> 항온측 시험체 모습

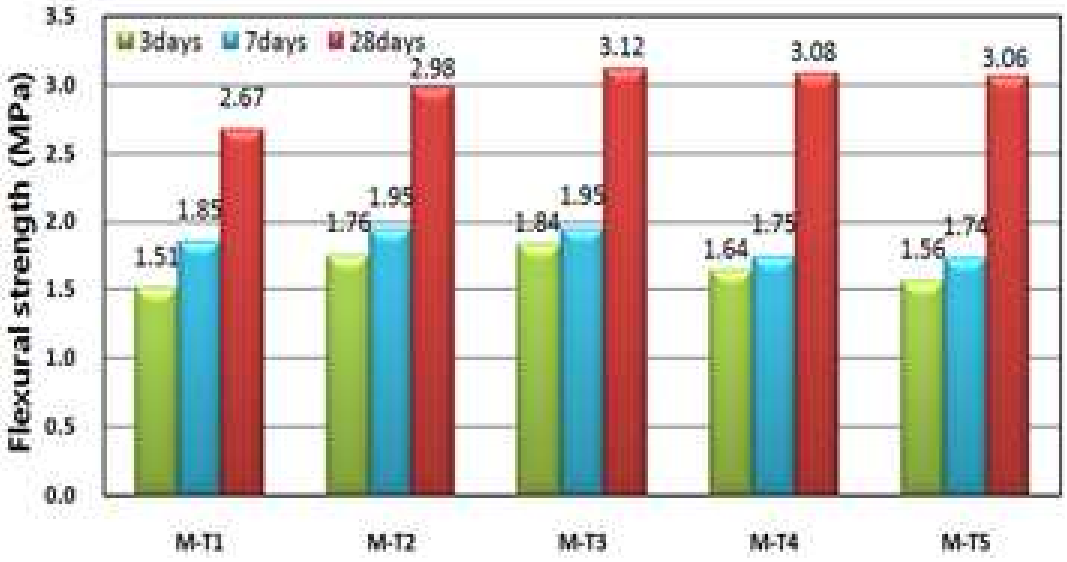


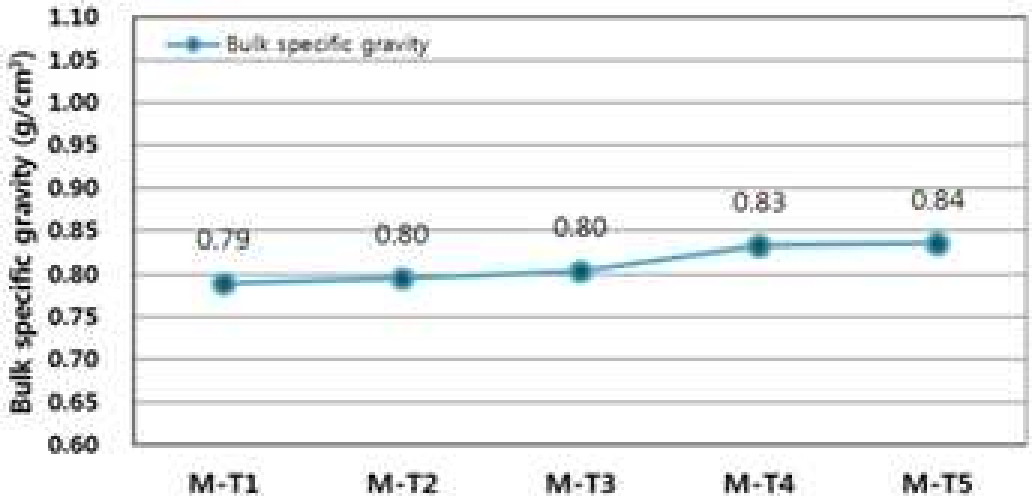
<사진 2> 자온측 시험체 모습

3) 심재의 양생조건 확립

가) 양생조건

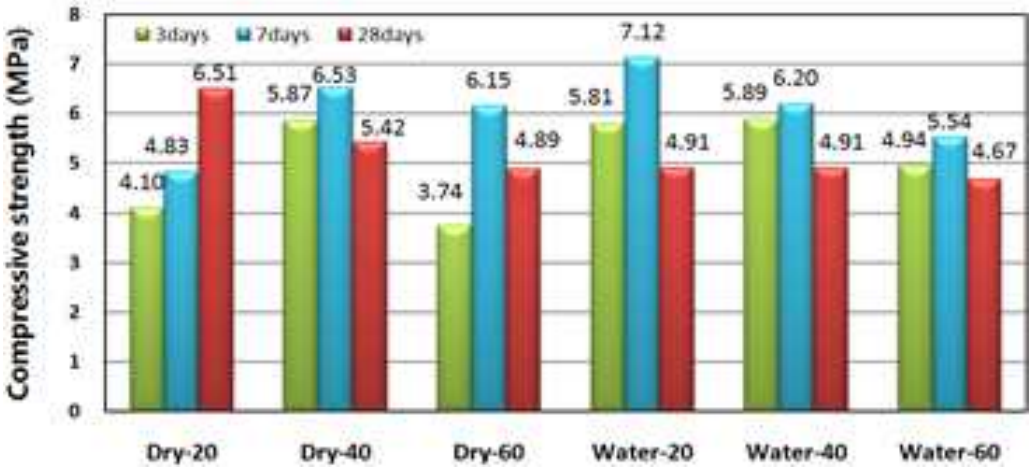


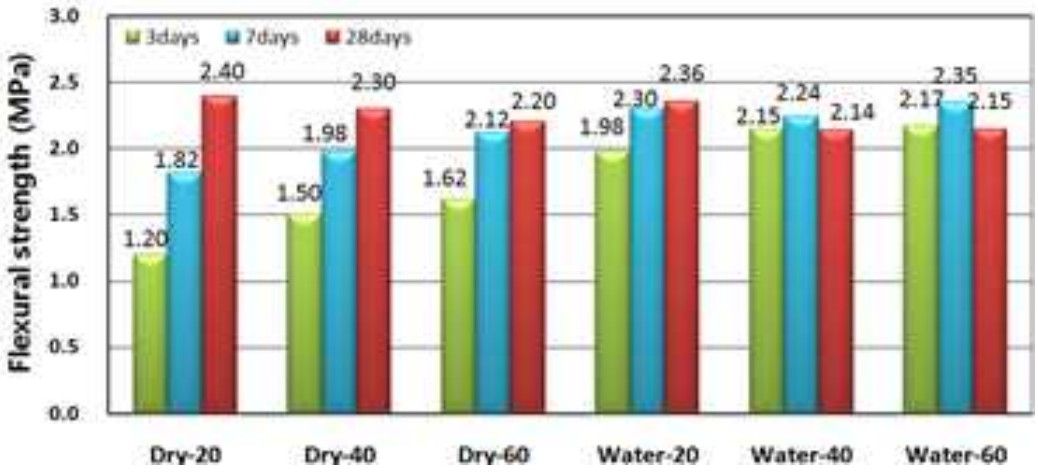




양생조건으로써 기건양생 20 ℃ 즉, 상온에서 양생 시 가장 우수한 강도발현.

나) 비빔시간

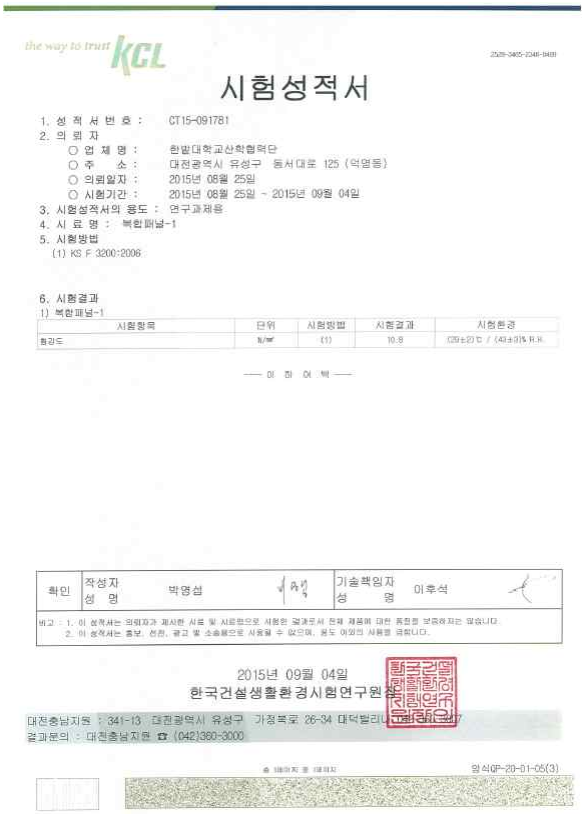




비빔조건은 비빔조건 3인 건비빔 40s, 배합수 투입 후 60s, 펄라이트 투입 후 60s가 가장 적절한 비빔조건 판단.

4) 완성된 시제품의 각종물성 평가

가) 복합패널의 휨강도 측정 결과



the way to trust KCL

시험성적서

1. 성 적 서 번 호 : CT15-091781
2. 의 뢰 자
   ○ 업 체 명 : 한밭대학교산학협력단
   ○ 주 소 : 대전광역시 유성구 동서대로 125 (덕명동)
   ○ 의뢰일자 : 2015년 08월 25일
   ○ 시험기간 : 2015년 08월 25일 ~ 2015년 09월 04일
3. 시험성적서의 용도 : 연구과제용
4. 시 료 명 : 복합패널-1
5. 시험방법
   (1) KS F 3200:2006

6. 시험결과
1) 복합패널-1

시험항목	단위	시험방법	시험결과	시험환경
휨강도	N/㎟	(1)	10.8	(23±2)℃ / (40±3)% R.H.

— 이 하 여 백 —

확인	작성자 성 명	박명섭	기술책임자 성 명	이후석

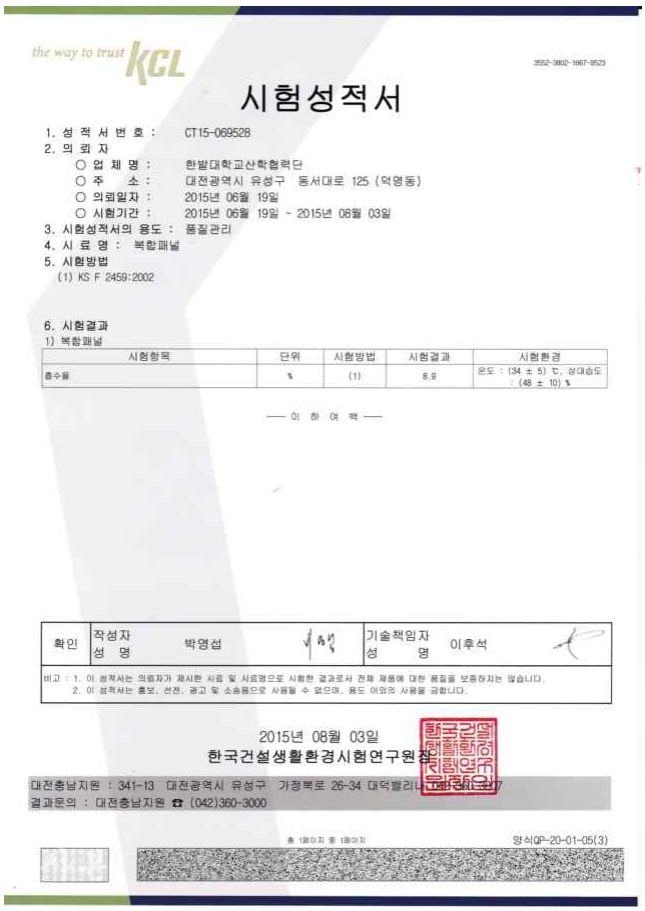
비고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

2015년 09월 04일
한국건설생활환경시험연구원장

대전충남지원 : 341-13 대전광역시 유성구 가정북로 26-34 대덕밸리
결과문의 : 대전충남지원 ☎ (042)360-3000

양식QP-20-01-05(3)

나) 복합패널의 흡수성 측정 결과



the way to trust KCL

시험성적서

1. 성 적 서 번 호 : CT15-069528
2. 의 뢰 자
   ○ 업 체 명 : 한밭대학교산학협력단
   ○ 주 소 : 대전광역시 유성구 동서대로 125 (덕명동)
   ○ 의뢰일자 : 2015년 06월 19일
   ○ 시험기간 : 2015년 06월 19일 ~ 2015년 08월 03일
3. 시험성적서의 용도 : 품질관리
4. 시 료 명 : 복합패널
5. 시험방법
   (1) KS F 2459:2002

6. 시험결과
1) 복합패널

시험항목	단위	시험방법	시험결과	시험환경
흡수율	%	(1)	8.9	온도 : (34 ± 5) ℃, 상대습도 : (48 ± 10) %

— 이 하 여 백 —

확인	작성자 성 명	박명섭	기술책임자 성 명	이후석

비고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

2015년 08월 03일
한국건설생활환경시험연구원장

대전충남지원 : 341-13 대전광역시 유성구 가정북로 26-34 대덕밸리
결과문의 : 대전충남지원 ☎ (042)360-3000

양식QP-20-01-05(3)

다) 내수성

① 측정방법 : 침수 후 압축강도 비교 실험

② 측정결과 : 침수 전·후 압축강도비가 103 %로 목표성능에 만족함.



라) 단열성

the way to trust KCL

시험성적서

2771-4818-1744-0521

1. 성 적 서 번 호 : CT15-063005
2. 의 뢰 자
   ○ 업 체 명 : 한밭대학교산학협력단
   ○ 주 소 : 대전광역시 유성구 동서대로 125 (덕명동)
   ○ 의뢰일자 : 2015년 06월 03일
   ○ 시험기간 : 2015년 06월 03일 ~ 2015년 10월 01일
3. 시험성적서의 용도 : 품질관리
4. 시 료 명 : 패널의 심재
5. 시험방법
   (1) KS F 2277:2002

6. 시험결과
1) 패널의 심재

시험항목	단위	시험방법	시험결과	시험환경
열관류율	W/㎡·K	(1)	1.88	(23 ± 1) ℃, (48 ± 5) % R.H.

※ 첨부 1. 열관류율 RAW DATA
첨부 2. 시험체 도면
첨부 3. 시험체 사진

확인	작성자 성 명	이강영	기술책임자 성 명	조병영

비고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 증빙을 보증하지는 않습니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용할 수 없으며, 무단 이외의 사용을 금합니다.

2015년 10월 01일

한국인정기구 인정 한국건설생활환경시험연구원장

위 성적서는 국제시험기관인정협력체(International Laboratory Accreditation Cooperation)의 상호인정협정(Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구(KOLAS)로부터 공인받은 분야에 대한 시험결과입니다.

에너지환경사업본부 : 281-15 충청북도 청주시 청원구 오창읍 양청3길 73 043-210-8990
결과문의 : 에너지환경기술센터 ☎ (043)210-8912

the way to trust KCL

시험성적서

성적서번호 : CT14-108287

첨부 1. 열관류율 RAW DATA

시험일자	2015. 09. 18. ~ 09. 21.

구분	항온실 [m]	자온실 [m]	가열상자 [m]	시험체 전열 개구부 [m]
시험장치 내부치수	3.6 × 3.0 × 3.6 (W×D×H)	3.6 × 3.0 × 3.6 (W×D×H)	2.5 × 0.7 × 2.0 (W×D×H)	1.5 × 0.32 × 1.5 (W×D×H)

		1회	2회	3회
공기온도 [℃]	항온실	19.74	19.77	19.80
	가열상자	20.25	20.25	20.25
	자온실	-0.22	-0.21	-0.19
	온도차※1	20.46	20.46	20.44
열량 [W]	총공급열량※2	30.96	31.04	30.93
	교정열량※3	18.75	18.60	19.03
	시험체 통과열량	12.21	12.43	11.89
시험체 양표면 열전달저항 [㎡·K/W]	내표면 열전달 저항	0.15	0.15	0.15
	외표면 열전달 저항	0.04	0.03	0.04
	보정값	-0.03	-0.02	-0.03
열관류율 [W/(㎡·K)]		0.27	0.27	0.26
열관류 저항 [㎡·K/W]		3.74	3.68	3.84
특기사항		1. 항온실 및 가열상자 설정조건 : (20±1) ℃, 상대습도 50 % R.H. 2. 자온실 설정조건 : 실내온도 0 ℃, 기류속도 1.2 m/s 3. 기류방향 : 수평 4. 본 시험은 고객이 제공한 시료에 대한 시험결과임.		

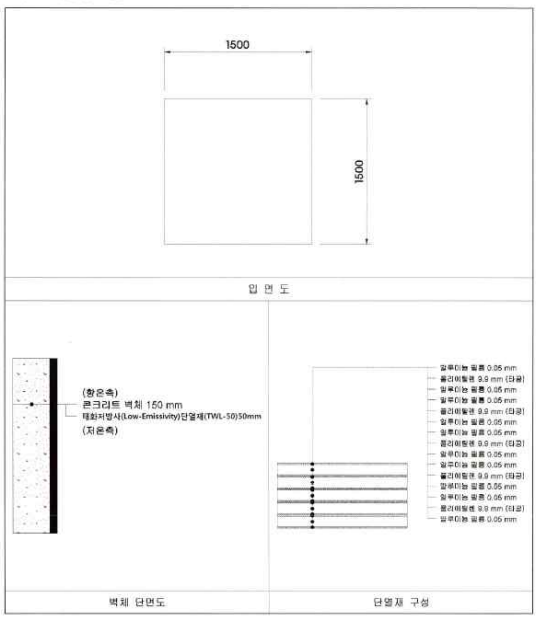
※1 온도차 : 가열상자내 9지점(시료표면으로부터 10cm 지점)의 평균공기온도와 자온실내 9지점(시료표면으로부터 10cm 지점)의 평균공기온도와 온도차
※2 총공급열량 : 가열상자내 팬 및 히터에 의한 총공급열량
※3 교정열량 : 가열상자 둘레벽과 시험체 부착틀의 교정열량

the way to trust KCL

시험성적서

성적서번호 : CT14-108287

첨부 2. 시험체 도면



the way to trust KCL

시험성적서

성적서번호 : CT14-108287

첨부 3. 시험체 사진



<사진 1> 항온측 시험체 모습

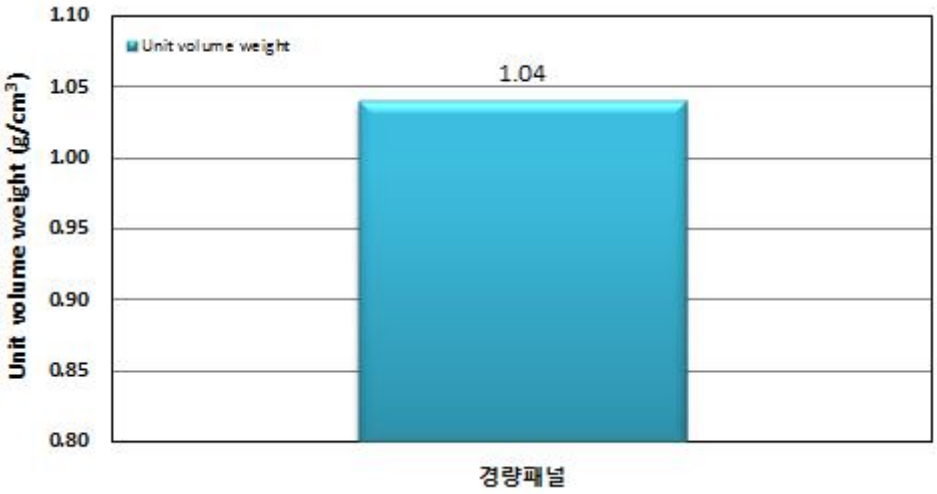


<사진 2> 자온측 시험체 모습

마) 경량성

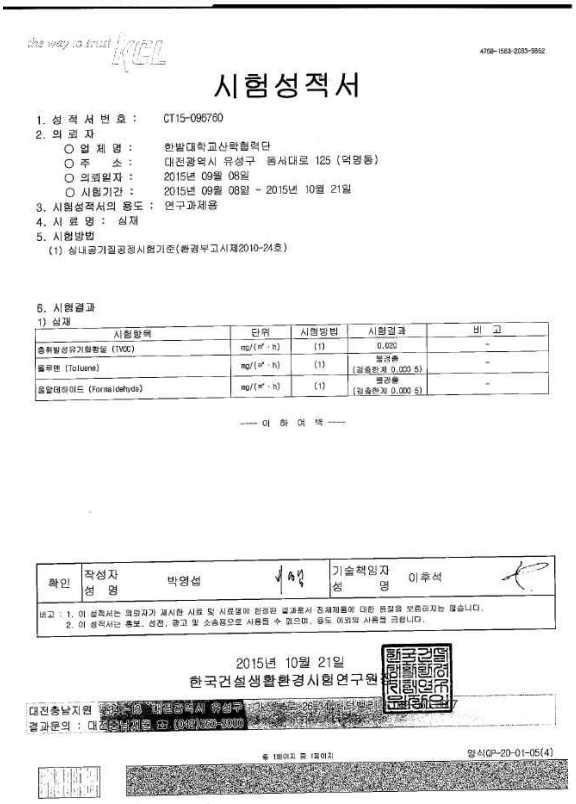
① 측정방법 : 단위용적질량 측정

① 측정결과 : 1.04 g/cm^{3}의 성능을 나타냄



6) 친환경 벽체시스템의 환경적 성능 평가

가) 포름알데히드 및 휘발성 유기화합물 측정 결과



this way is trust KTR

4769-1563-2033-9952

시험성적서

1. 성 적 서 번 호 : CT15-096760
2. 의 뢰 자
   - ○ 업 체 명 : 한발대학교산학협력단
   - ○ 주 소 : 대전광역시 유성구 동서대로 125 (덕명동)
   - ○ 의뢰일자 : 2015년 09월 08일
   - ○ 시험기간 : 2015년 09월 08일 ~ 2015년 10월 21일
3. 시험성적서의 용도 : 연구과제용
4. 시 료 명 : 실재
5. 시험방법
   (1) 실내공기질공정시험기준(환경부고시제2010-24호)

6. 시험결과
1) 실재

시험항목	단위	시험방법	시험결과	비 고
총휘발성유기화합물 (TVOC)	mg/(㎡ · h)	(1)	0.020	-
톨루엔 (Toluene)	mg/(㎡ · h)	(1)	불검출 (검출한계 0.003 S)	-
폼알데하이드 (Formaldehyde)	mg/(㎡ · h)	(1)	불검출 (검출한계 0.005 S)	-

—— 이 하 여 백 ——

확인	작성자 성 명	박영섭	기술책임자 성 명	이후석

비고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명에 한정된 결과로서 전체제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용할 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

2015년 10월 21일
한국건설생활환경시험연구원

대전충남지원 [illegible]
결과문의 : 대전충남지원 ☎ (042) 825-3000

총 1페이지 중 1페이지 양식(QP-20-01-05(4)

나) 탈취율 측정 결과



KIFA 사단법인 한국원적외선협회
부설 한국원적외선응용평가연구원

우05616 서울특별시 송파구 송파대로 441 http://www.kfir.or.kr TEL(02)2203-6037 FAX:(02)2203-6061

시험성적서

이재홍 2015/10/22 09:35:17 KST 한국원적외선협회

발급번호 : KFIG-273
의 뢰 인 : 이 재 홍 [한발대학교산학협력단]
주 소 : 대전광역시 유성구 동서대로 125 (덕명동)
접수일자 : 2015년 10월 20일
시 료 명 : 폐널의 실재

시험결과

시험항목	경과시간 (분)	Blank농도(ppm)	시료농도(ppm)	탈취율(%)
탈취시험	초 기	500	500	-
	30	480	185	61
	60	460	160	65
	90	450	150	67
	120	440	140	68

(주) Blank : 시료를 넣지 않은 상태에서 측정한 것임. 끝.

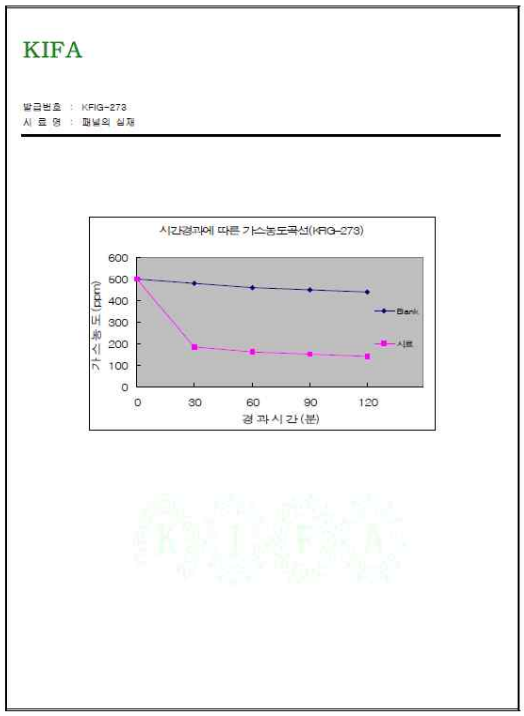
1) 시험방법 : KFIA-FI-1004
2) 시험가스명 : 암모니아
3) 가스농도측정 : 가스검지관
4) 불 임 : 없음
5) 용 도 : 품질관리

2015년 10월 22일

※ 1. 이 성적서는 의뢰인이 제공한 시료에 대한 결과이며, 시료명은 의뢰인이 제시한 것임.
2. 이 성적서는 용도 이외에 사용할 수 없습니다.

담당자 : 김 경 미 02) 2203-6084

한국원적외선응용평가연구원장



KIFA

발급번호 : KFIG-273
시 료 명 : 폐널의 실재

다) 원적외선 방사율 측정 결과

KIFA 사단법인 한국원적외선협회
부설 한국원적외선응용평가연구원

우 05616 서울특별시 송파구 송파대로 441 http://www.kfir.or.kr TEL(02)2203-6037 FAX (02)2203-6061

시험성적서

미검증
2015/10/22
15:20:15
KST

발급번호 : KFI-861
의 뢰 인 : 이 재 흥 [한밭대학교산학협력단]
주 소 : 대전광역시 유성구 동서대로 125(덕명동)
접수일자 : 2015년 10월 20일
시 료 명 : 패널의 실재

시험결과

방 사 율 (5 ~ 20 ㎛)	방 사 에 너 지 (W/㎡·㎛, 40℃)
0.921	3.71×10^2

1) 시 험 방 법 : KFIA-FI-1005
2) 본 시험은 의뢰자의 요구에 의하여 40℃에서 시험하였으며
FT-IR Spectrometer를 이용한 BLACK BODY대비 측정결과임.
3) 불 임 : 별첨
4) 용 도 : 품질관리

2015년 10월 22일

※ 1. 이 성적서는 의뢰인이 제공한 시료에 대한 결과이며, 시료명은 의뢰인이 제시한 것임.
2. 이 성적서는 용도 이외에 사용할 수 없습니다.

담당자 : 서 승 원 02) 2203-6084

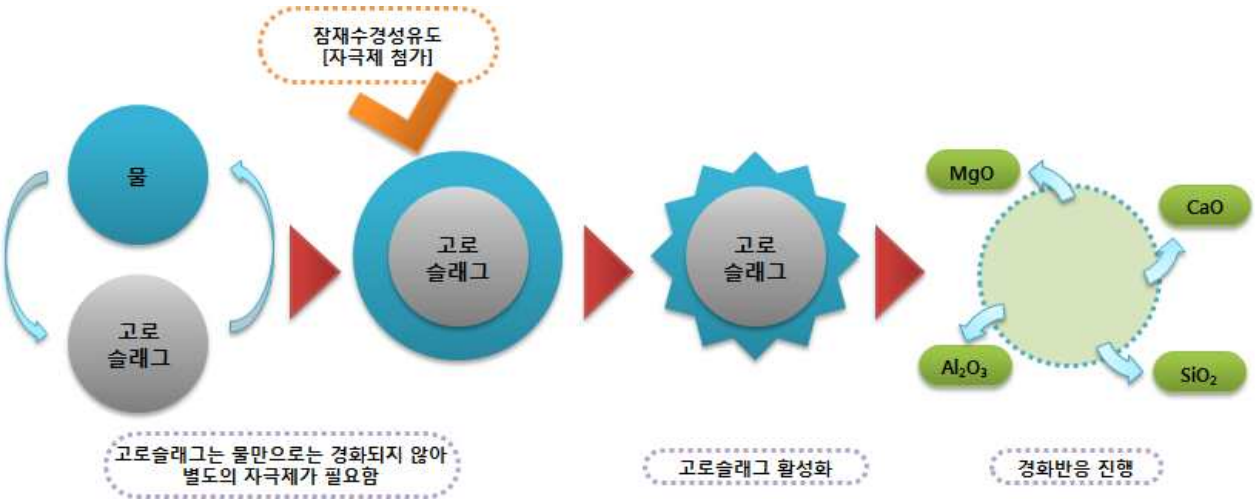
한국원적외선응용평가연구원장

제 3 장 최종 연구성과 및 적용실적

제 1 절 산업부산물를 사용한 무시멘트계 재료설계 개발

1. 연구성과의 개요

본 연구는 산업부산물 및 전용촉진제를 사용한 무시멘트계 건식화 바인딩시스템의 재료설계법을 개발하기 위한 것으로, 산업부산물인 고로슬래그와 레드머드, 제지애시 등과 전용촉진제의 적합성 및 반응성을 분석·평가하여 본 연구개발의 최종목표인 복합패널 심재의 사용재료를 선정하기 위한 실험적 연구이다. 이를 위해, 산업부산물과 자극제의 종류에 따른 경화체의 강도 및 반응특성을 분석을 통해 재료를 선정하였고, 고로슬래그 기반 경화체의 자극제 종류 및 첨가율에 따른 실험을 실시하였으며, 발포성능을 가지고 있는 제지애지를 자극제의 종류와 첨가율에 따라 반응 특성을 확인함에 따라 산업부산물을 사용한 적정의 기초배합을 선정하였다.



2. 핵심요소기술

가 .양적성과

		성과지표	목표치	가중치	해당 기관
양적 목표	사업연계지표	KCI 논문 게재	1건	100%	한국콘텐츠학회
	계			100%	

나 . 질적성과

	과제명		성과목표		성과지표		성과검증 기준			가중치	해당 기관
							목표치	측정방법	검증방법		
질적 목표	1	산업부산물 및 전용촉진제를 사용한 바인딩시스템의 재료설계법 개발	1-1	복합패널 심재의 바인더 재료선정 및 메카니즘 성립	①	유동특성	100㎜이상	KS L ISO 679	보고서	13	-
					②	경화체의 밀도	0.8g/㎤ 이하	KS F 2459 (겉보기 밀도)	보고서	20	-
					③	경화체의 강도특성	3MPa이상	KS L ISO 679	보고서	67	-
	계									100%	

3. 주요 연구성과

가. 연구성과

1) 논문게재 성과

게재연도	논문명	저자			학술지명	Vol.(No.)	국내외 구분	SCI구분
		주저자	교신저자	공동저자				
2013	고로슬래그 미분말을 사용한 무시멘트 경화체의 반응 특성	박선규	이상수	권성준, 김윤미	한국콘텐츠학회	Vol.13 (No.9)	국내	비SCI

2) 학술대회 발표 성과

발표일	발표명	저자	학술대회명	국내외 구분
2013.4.27	알칼리 자극제 및 고로슬래그를 사용한 무시멘트 경화체의 반응 특성에 관한 연구	김윤미, 박선규, 이상수, 송하영	2013 대한건축학회 춘계학술발표대회	국내
2013.5.10	알칼리 자극제를 사용한 고로슬래그 경화체의 반응 및 강도특성	김윤미, 박선규, 이상수, 송하영	2013 한국건축시공학회 춘계학술발표대회	국내
2013.5.15	알칼리 자극제의 종류에 따른 무시멘트 결합재의 유동 및 강도특성	김윤미, 박선규, 이상수, 송하영	2013 한국콘크리트학회 봄 학술대회	국내
2013.4.19	산업부산물을 사용한 무시멘트 경화체의 강도특성	김윤미, 박선규, 이상수, 송하영	2013 한국건설순환자원학회 봄 학술대회	국내
2013.4.12	고로슬래그를 사용한 무시멘트 결합재의 강도특성	박선규, 김윤미, 이상수, 송하영	2013 한국구조물진단유지관리공학회 봄 학술대회	국내
2013.6.26	Study on the Strength Properties of Non-Cement Matrix Mixed with Waste Resources	박선규, 송하영, 이상수	ISGMA 2013(International Symposium on Green Manufacturing and Applications)	국외

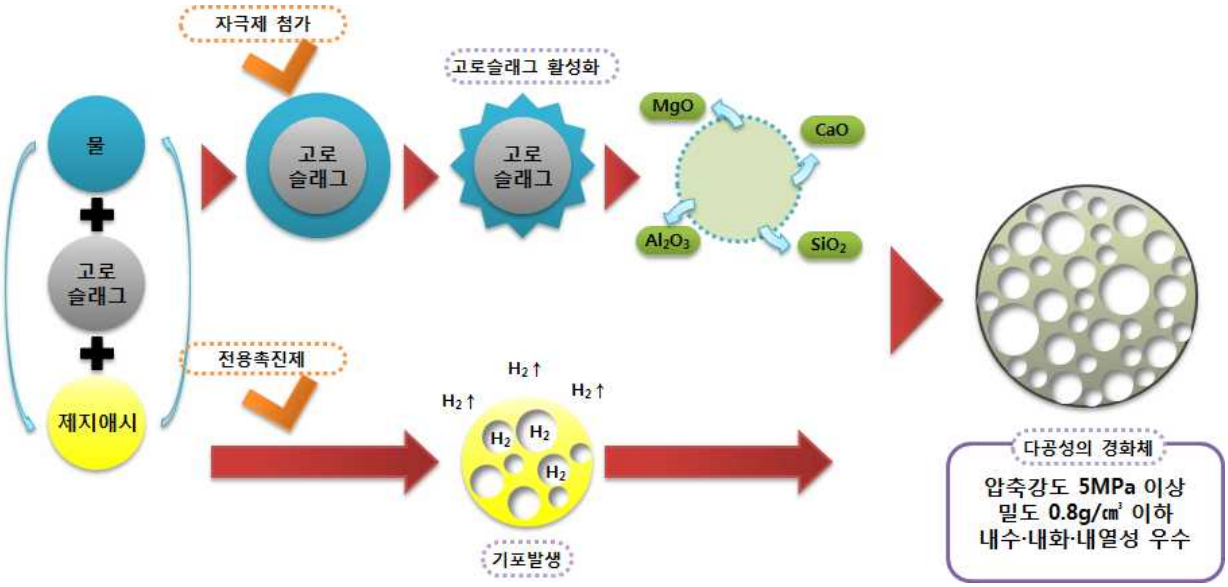
4. 기술개발 성과의 국내·외 시장 전망

본 연구는 산업부산물을 사용한 경량의 경화체 제조를 목표로 각종 산업부산물의 특성과 자극제 종류별 반응특성을 분석함으로써, 시멘트 기반 위주인 현 건설 산업에 친환경적인 재료를 보급할 수 있어 매우 우수한 연구개발이라 판단되며, 본 연구는 복합기능성을 가지면서 기존 기술에 비해 원료 및 생산단가 저감이 가능하여 기존 시장으로의 진입이 용이하기에 파급효과가 매우 높을 것이라 판단된다. 또한 최근 건축물의 화재안전기준 강화, 에너지효율의 향상 등으로 기존 시설물의 리모델링 공사가 활발히 진행되고 있어 본 기술의 수요증대가 크게 기대되며, 기업의 매출증대에 크게 기여할 것으로 판단된다.

제 2 절 저탄소 친환경 바인더를 활용한 패널심재의 기초 성능 검토

1. 연구성과의 개요

본 연구의 핵심성과는 1차년도의 연구결과에서 산업부산물인 고로슬래그를 기반으로 한 경화체에서 제지애시 사용에 의한 기포발생을 확인하였으며, 추후 압축강도 5 MPa 이상, 밀도 0.8 g/cm^3 이하의 무시멘트 경화체를 제조할 결합재 배합의 개선이 이루어진다면 본 성과를 이룰 수 있다고 판단된다. 또한 산업부산물만을 사용하기 때문에 기존 시멘트 기반의 결합재보다 경제성에 유리하며, 현재까지 산업부산물을 기반으로 한 경량 경화체의 연구개발 및 제품이 없으므로 본 성과를 통해 무시멘트 기반의 발포제를 개발하고자 하였다.



2. 핵심요소기술

가. 양적성과 총괄

구분	양적성과		주관 (한밭대)		공동 (목원대)		-		-		합계	
			계획	실적	계획	실적	계획	실적	계획	실적	계획	실적
공공적 성과	법 제정 및 개선											
	설계기준, 시방서, 지침에 제안											
	설계기준, 시방서, 지침에 반영											
	정책제안											
	정책채택											
기술적 성과	특허	출원	1건								1건	
		등록										
	실용신안	출원										
		등록										
	디자인	출원										
		등록										
	소프트웨어(S/W)											
	기타 성과(상표, 서비스 등)											
	신기술 지정											
학술적 성과	국내외 학술지 게재	일반학술지	2건								2건	
		SCI(E)학술지			1건						1건	
	국내외 학술회의 발표		4건		2건						6건	

나. 질적성과 총괄

질적 목표	과제명		성과목표		성과지표		성과검증 기준			가중치	해당 기관
							목표치	측정방법	검증방법		
	2	저탄소 친환경 바인더를 활용한 건식화 패널 기술 구축 및 기초 성능 검증	2-1	심재의 목표성능 만족을 위한 최적 배합 선정	①	심재의 밀도	0.8g/㎤ 이하	KS F 2459 (겉보기 밀도)	보고서	10	
					②	심재의 강도특성	5MPa이상	KS F 4914 (경량기포패널)	보고서	25	
					③	심재의 양생 조건 확립	97%	양생 조건별 비교실험	보고서	5	
			2-2	복합패널 심재의 성능 검증	①	심재의 내수성	80%이상 강도발현	KS F 4914 (침수 후 압축강도)	보고서	20	
					②	심재의 내화성	가열면 2시간유지	KS F 2257, ISO 834	보고서	20	
					③	심재의 내열성	0.36W/㎡ 이하	KS F 2277 (단열성시험)	보고서	20	
	계									100%	

3. 주요 연구성과

가. 연구성과

1) 논문게재 성과

.

게재 연도	논문명	저자			학술지명	Vol. (No.)	국내외 구분	SCI 구분
		주저자	교신 저자	공동 저자				
2014	Reaction Characteristics of Blast Furnace Slag-Based Non-Cement Paste Using Alkali Accelerator and Red Mud	Sungyu Park	Sangsoo Lee	Yunmi Kim	Asian Journal of Chemistry	Vol.26 (No.5)	국외	SCIE
2014	W/B 및 레드머드 치환율에 따른 고로슬래그 기반 무시멘트 경화체의 강도 및 반응특성에 관한 연구	박선규	이상수	김윤미	대한건축학회논문집 구조계	Vol.30 (No.5)	국내	비SCI
2014	플라이애시 및 폴리실리콘 슬러지 혼입율에 따른 제지애시 경화체의 경량 특성	박선규	이상수	김윤미	한국건설순환자원학회 논문집	Vol.9 (No.2)	국내	비SCI
2014	알칼리 자극제의 종류 및 첨가율에 따른 무시멘트 경량 경화체의 강도특성	이상수	박선규	김윤미	한국건축시공학회	Vol.14(No.4)	국내	비SCI

2) 학술대회 발표 성과

발표일	발표명	저자	학술대회명	국내외 구분
2013. 11.23	Reaction Characteristics of Blast Furnace Slag-Based Non-Cement Paste Using Alkali Accelerator and Red Mud	Sungyu Park, Yunmi Kim, Sangsoo Lee	The 7th International Conference on Multi-functional Materials and Applications	국외
2014. 04.11	경량 경화체의 알칼리 자극제의 사용저감을 위한 석고 치환에 따른 강도특성	김윤미, 이상수, 박선규	2014 한국구조물진단유지관리공학회 봄 학술대회	국내
2014. 04.18	산업부산물을 사용한 무시멘트 경량 경화체의 밀도 특성	박선규, 김윤미, 이상수	2014년도 한국건설순환자원학회 봄 학술발표대회	국내
2014. 04.26	폐 알칼리를 사용한 무시멘트 경량 경화체의 강도특성	김윤미, 김원종, 박선규, 이상수	2014년도 대한건축학회 춘계학술발표대회	국내
2014. 05.15	플라이애시 치환에 따른 무시멘트 경량 경화체의 강도 및 밀도특성	김윤미, 김원종, 박선규, 이상수	2014 한국콘크리트학회 봄 학술대회	국내
2014. 05.15	폴리슬리콘 슬러지의 치환율에 따른 무시멘트 경량 경화체의 강도특성	임정근, 김윤미, 박선규, 이상수	2014 한국콘크리트학회 봄 학술대회	국내
2014. 05.15	폐석고보드 미분말을 활용한 무시멘트 경량 경화체의 역학적 특성	유용진, 김윤미, 이상수, 송하영	2014 한국콘크리트학회 봄 학술대회	국내
2014. 05.30	고로슬래그 기반 경량 경화체의 레드머드 치환에 따른 강도특성	김윤미, 김원종, 박선규, 이상수	2014 한국건축시공학회 춘계 학술논문 발표대회 (우수학술상)	국내
2014. 06.28	Strength Properties of Non-Portland Cement Lightweight Matrix with Types and Addition Ratios of Alkali Activator	Sungyu Park	International Conference on Convergence Content 2014	국외
2014. 09.14	Density and Strength Characteristics of Non-cement Lightweight Matrix based on the use rate of Blast Furnace Slag and Paper Ash	Yunmi Kim, Sangsoo Lee, Sungyu Park	2014년도 일본건축학회 학술발표대회	국외

3) 특허 성과

출원된 특허의 경우					등록된 특허의 경우				
출원연도	특허명	출원인	출원국	출원번호	등록 연도	특허명	등록인	등록국	등록번호
2014	산업부산물을 이용한 무시멘트 경량패널용 심재 조성물 및 제조방법	한밭대학교 산학협력단 , 목원대학교 산학협력단	대한민국	10-2014-0077551					

4. 기술개발 성과의 국내·외 시장 전망

본 연구의 목적은 친환경 경량복합패널 심재를 개발하기 위함에 있다. 개발하고자 하는 심재는 경량성을 갖는 경화체로써 건축물의 비내력 벽체(내벽 및 외벽), 지하이중벽, 공장시설물의 방화벽, 조립식 구조물 등 다방면에 사용이 가능하다. 또한, 이 기술은 복합기능성을 가지면서 기존 기술에 비해 원료 및 생산단가의 저감이 가능하여 기존 시장으로의 진입이 용이하고, 그 파급효과가 매우 높을 것으로 보인다. 그리고 최근 건축물의 화재안전기준 강화, 에너지효율의 향상 등으로 기존 시설물의 리모델링 공사가 활발히 진행되고 있어 본 기술의 수요증대가 크게 기대되며, 기업의 매출증대에 크게 기여할 것이라고 판단된다. 따라서, 본 기술의 원천기술을 확보함으로써 각종 콘크리트 2차 제품(블럭, 내화벽돌 등), 방통모르터, 지반보강그라우팅재, 배면충전재 등으로 확대 적용할 수 있어 다방면의 사업영역에 접목시킬 수 있을 것이라 판단된다.

제 3 절 무시멘트 건식 경량 건축용 패널 개발 및 매뉴얼 작성

1. 연구성과의 개요

본 연구의 핵심성과는 2차년도 연구결과에서 제지애시의 미반응 Si와 알칼리 자극제의 반응으로 기포가 형성되는 것을 확인 하였고, 패널 심재로 사용하기 위한 최적배합을 도출하여 무시멘트 건식 경량 건축용 패널로 제조할 수 있을 것으로 판단되며, 추후 이를 이용하여 경량 경화체의 성능을 검증한 결과를 통해 내화·단열·환경성 등을 겸비한 친환경 건식경량 복합패널을 제조할 수 있을 것으로 판단된다.



- 시멘트를 사용하지 않는 **산업부산물 기반의 경량의 경화체 제조**
- 내화성(불연재), 내구성 및 단열성 등을 겸비한 경량 복합패널
- 별도의 발포제를 사용하지 않고 제지애시의 미반응 Si와 알칼리 자극제의 반응으로 형성되는 기포로 벽체를 경량화시킨 건식벽체용 내화·단열 복합패널을 개발

2. 핵심요소기술

가. 양적 성과

		성과지표	목표치	가중치	해당 기관
양적 목표	사업연계지표	특허등록	1건	20%	특허청
		시제품제작	1건	10%	한밭대
		KCI 논문 게재	2건	40%	대한건축학회
		SCI 논문 게재	1건	30%	IJER
	계			100%	

나. 질적 성과

	과제명		성과목표		성과지표		성과검증 기준			가중치	해당 기관
							목표치	측정방법	검증방법		
질적 목표	3	저탄소 무기패널을 활용한 경량 내화/단열 복합패널의 건식화 제조시스템 구축 및 시공 매뉴얼 작성	3-1	복합패널의 제조 및 생산시스템 구축과 시제품의 각종물성 평가 및 친환경성 검증	①	복합패널의 휨강도	8MPa이상	KS F 4914 (경량기포패널)	보고서	35	
					②	복합패널의 흡수성	10%이하	KS F 2459	보고서	35	
					③	포름알데히드 배출량	0.1ppm	시험편의 방산량	보고서	30	
					④	심재의 내화성	가열면 2시간유지	KS F 2257, ISO 834	보고서	20	
					⑤	심재의 내열성	0.36W/㎡이하	KS F 2277 (단열성시험)	보고서	20	
	계									100%	

3. 주요 연구성과

가. 연구성과

1) 논문게재 성과

게재 연도	논문명	저자			학술지명	Vol. (No.)	국내외 구분	SCI 구분
		주저자	교신 저자	공동 저자				
2015	산업부산물을 사용한 경화체의 알칼리 자극제 혼합 비율에 따른 밀도 및 강도특성	이승호	이상수		청운대학교 건설환경 연구소	V.10 (n.1)	국내	비SCI
2015	레드머드 및 알칼리 자극제를 사용한 고로슬래기기반 무기결합재의 알칼리 활성을 위한 특성 평가	이상수	박선규	김윤미 이승호	대한건축 학회논문집 (구조계)	V.31 (n.4)	국내	비SCI
2015	Foaming Properties of Lightweight Matrix Based with Non-Reacted Si Blast Furnace Slag	박선규	이상수	김윤미	Asian Journal of Chemistry	V.27 (n.11)	국외	SCOPUS
2015	Study on Properties of Lightweight Composites based Industrial Wastes with NaOH Alkaline Activators(제출)	이상수	박선규	김윤미 Thomas Neitzer	Int. Jour. of ENVIRONME-NTAL RESEARCH		국외	SCIE

2) 학술대회 발표 성과

발표일	발표명	저자	학술대회명	국내외 구분
2014.09	수산화나트륨과 규산나트륨 비율에 따른 경량경화체의 강도 및 밀도 특성	박선규, 김윤미, 이상수	2014 구조물진단유지관리공학회 추계 학술대회	국내
2014.10	레드머드의 용출시간에 따른 무기결합재의 역학적 특성	김윤미, 박선규, 이상수	2014 한국콘크리트학회 추계 학술대회	국내
2014.10	W/B 및 폴리실리콘 슬러지의 첨가율에 따른 경량 경화체의 발포 특성	김윤미, 김원종, 박선규, 이상수	2014 한국건축시공학회 추계 학술대회	국내
2014.11	레드머드와 용출된 레드머드의 역학적 성질 비교 연구	이승호, 김윤미, 박선규, 이상수	2015 한국건설순환자원학회 춘계 학술대회	국내
2015.04	고로슬래그 기반 펄라이트를 사용한 경화체의 역학적 특성	김원종, 이승호, 박선규, 이상수	2015 한국건설순환자원학회 춘계 학술대회	국내
2015.04	제지애시를 사용한 경량 경화체의 양생조건에 따른 밀도 및 강도 특성	이승호, 박선규, 이상수	2015 한국건설순환자원학회 춘계 학술대회	국내
2015.05	제지애시를 사용한 경량 경화체의 비빔시간에 따른 밀도 및 강도 특성	김원종, 이승호, 박선규, 이상수	2015 한국콘크리트학회 춘계 학술대회	국내
2015.05	고로슬래그 기반 석고를 사용한 경량 경화체의 밀도 및 강도 특성	김원종, 이승호, 박선규, 이상수	2015 한국건축시공학회 춘계 학술대회	국내
2015.05	제지애시의 치환율에 따른 경량 경화체의 밀도 및 강도특성	이승호, 최세진, 박선규, 이상수	2015 한국건축시공학회 춘계 학술대회	국내

3) 특허 성과

출원된 특허의 경우					등록된 특허의 경우				
출원연도	특허명	출원인	출원국	출원번호	등록연도	특허명	등록인	등록국	등록번호
2015	산업부산물을 이용한 경량 경화체용 조성물 및 이의 제조방법	한밭대학교 산학협력단, 목원대학교 산학협력단	대한민국	10-2015-0028458	2016	산업부산물을 이용한 무시멘트 경량패널용 심재 조성물 및 제조방법	한밭대학교 산학협력단, 목원대학교 산학협력단	대한민국	등록비용 제출

5. 기술개발 성과의 국내·외 시장 전망

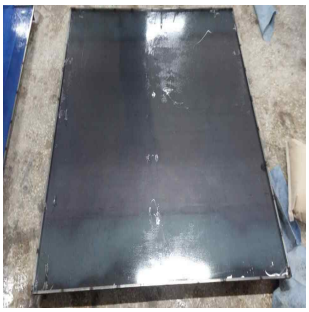
아래의 표는 한국건설기술연구원의 자료를 근거로 국내 경량패널의 시장현황과 향후 예상시장규모 및 본 기술의 상용화를 대상으로 예상연도별 시장점유액을 나타낸 것이다. 국내의 경우, 현재 콘크리트조 또는 조적조가 내화벽체 시장의 약 70% 정도를 차지하고 있으며, 이는 국내 건축시장의 대부분을 아파트가 점유하고 있고, 또한 아파트는 대부분 벽식구조로 되어 있기 때문인 것으로 판단된다. 그러나, 향후에는 리모델링 시장의 급속한 성장, 라멘식 아파트 및 주상복합 건축시장의 지속적 성장 등으로 경량패널 시장의 점유율이 크게 증대될 것으로 예상되고 있어 본 기술관련 시장의 확대가 유력하다.

[표 3-1] 경량패널의 시장현황 및 예상연도별 시장점유액

(단위 : 억원)

구 분	2012년	2013년	2014년
세계 시장 규모	177,6004	183,2835	189,1446
한국 시장 규모	12,0001	12,3842	12,7803
산출 근거	1) 2010년도 한국소방산업기술원 연구성과 보고서 2) 국내 건축패널시장의 년간 평균 성장률 3.2% X 국내시장규모 (건축자재시장분석 및 전망 보고서, 화학경제연구원, 2008.07) 3) 국내 건축패널시장의 년간 평균 성장률 3.2% X 국내시장규모 (건축자재시장분석 및 전망 보고서, 화학경제연구원, 2008.07) 4) 국내 현재 시장규모 × 14.8(우리나라 GDP 대비 미국의 GDP 격차비율) 5) 국내 현재 시장규모 × 14.8(우리나라 GDP 대비 미국의 GDP 격차비율) 6) 국내 현재 시장규모 × 14.8(우리나라 GDP 대비 미국의 GDP 격차비율)		

6. 최적 설계안 및 제조시스템을 고려한 시제품 제작



비빔과정





바닥판 및 벽면 거푸집 조립



타설과정



시제품 제작(패널)



시제품 제작(심재)

제조·시공 매뉴얼

1. 산업부산물(고로슬래그 등)을 사용한 무시멘트 건식 경량 건축용 패널 일반사항

1-1 적용범위

- 본 매뉴얼은 건축물의 내벽에 사용되는 무시멘트 건식 경량 건축용 패널(이하 무시멘트 건식 경량 패널)을 건축물 또는 공작물의 칸막이벽 등으로 사용하는 공사 및 부속 재료에 관한 품질, 보관 및 시공 기준 등에 대해 적용한다. 다만, 본 매뉴얼에 기재 되지 아니한 사항에 대해서는 감독원의 지시에 따른다.

1-2 용어의 정의

- 제조업자 : 패널을 생산, 공급하는 자
- 감 독 원 : 공사발주자 또는 원도급자가 지정하는 공사감독이나 감리를 하는 자
- 담 당 원 : 건설현장의 전체공사의 수행이나 시공에 대한 책임을 맡고 있는 자
- 시 공 자 : 패널 공사를 수행하는 공사 책임자 또는 담당자
- 시 공 도 : 패널의 종류, 수량, 설치위치와 방법 등의 포함된 패널의 시공에 필요한 도면

2. 산업부산물(고로슬래그 등)을 사용한 무시멘트 건식 경량 건축용 패널 사용 재료

2-1 일반사항

- 이 절은 패널의 설치에 사용되는 재료 및 품질에 관하여 적용한다. 단, 이절에 규정되지 않은 재료의 사용 시에는 공인기관의 시험을 통해 본 매뉴얼의 재료와 동등 이상의 성능이 인정된 경우에 한하여 감독원의 승인을 얻어 사용할 수 있다.

2-2 무시멘트 건식 경량 패널

- 구성 성분 : MgO 보드 + 무시멘트 건식 경량 패널 혼합물 + MgO 보드

① MgO 보드 : 산화마그네슘, 염화마그네슘, 무기질 섬유

- 두께 : 10mm
- 휨강도 : 8N/mm^{2}이상

② 무시멘트 건식 경량 패널 혼합물 : 고로슬래그, 제지애시, 수산화나트륨, 규산나트륨, 물, 펄라이트

- 고로슬래그 : 3종 고로슬래그
- 펄라이트 : 1mm 채에 미분을 거른 2.5mm ~ 3mm의 펄라이트 사용
- 패널의 흡수성 : 10% 이하
- 포름알데히드 방산량 : 0.1ppm 이하

구분	열관류율 (W/m^2·K)	포름알데히드 [mg/(m^2·h)]	휨강도 (N/mm^2)	흡수율 (%)	내 화 성
무시멘트 건식 경량 패널	1.88	0.001	10.8	8.9	2시간

2-3 철물

- 패널 설치에 사용하는 철물의 재질, 형상, 치수는 특기시방 또는 도면에 따른다.

2-4 모르타르

- 모르타르의 배합은 JOINT용 레미탈을 표준으로 하고 이에 적합한 유동성을 갖는 것으로 한다.
- 물은 철재 및 모르타르에 악영향을 미치는 유해량의 불순물을 함유하지 않은 것으로 한다.

3. 산업부산물(고로슬래그 등)을 사용한 무시멘트 건식 경량 건축용 패널 시공

3-1 공통사항

1) 일반사항

① 시공자는 공사에 앞서 시공도 및 시공계획서를 작성하여 감독원의 승인을 받는다.
② 시공자는 불량부위가 발생되지 않도록 타 공정과의 업무분장을 사전에 명확히 한다.
③ 시공자는 공사 완료 후, 담당원의 검사 및 승인을 받는다.

2) 가설공사

① 시공자는 공사에 앞서 필요한 가설공사를 하며 4m 이상 패널 설치공사에서는 원칙적으로 틀비계를 설치한다.
② 패널의 양중, 철물용접, 설치작업 등에 필요한 적정의 공사용 전력 및 용수를 확보한다.

3) 운반

① 패널은 변형이 생기지 않도록 주의하여 운반한다.
② 패널은 공장에서 운반한 차가 직접 시공 장소에 하역함을 원칙으로 하고 부득이 야적을 할 경우 가능한 한 운반거리가 짧도록 한다.

4) 현장가공

① 패널의 홈파기는 가능한 패널 1매당 1개소에 한하고 또한 폭 30㎜이내 깊이 10~30㎜ 이내로 한다.
② 위의 범위를 넘어 절단, 홈파기를 하는 경우에는 부재의 강도 등을 확인하고 담당원의 승인을 받는다.

5) 보수

① 패널의 보수는 설치 완료 후 규정에 적합한 품질의 재료로 한다.
② 설치 완료 후에 보수할 수 없는 부분은 담당원의 지시에 따라 설치 전에 할 수 있도록 한다.

6) 설치 완료후의 보호

① 시공자는 설치가 완료된 패널이 방수공사 및 내장공사 시작 전까지 기상악화 및 기타의 원인에 의해 흔들림, 파손, 오염 등이 없도록 적절한 방법으로 보호 양생하여야 한다.

3-2 칸막이 벽

1) 일반사항
- 내부가 고온 다습하거나 약품 등에 의해 유해한 환경일 경우에는 감독원의 승인을 받아 보호 조치 후 사용할 수 있다.

2) 설치바탕
① 패널을 지지하는 바닥, 보 등의 면이 고르지 못할 경우에는 패널의 설치에 앞서 확인한다.
② 패널 고정절물을 설치하기에 앞서 먹매김을 정확히 한다.
③ 창 및 출입구 등의 개구부 주변에는 유효한 개구부 보강재를 설치한다.

3) 설치
① 패널 설치 전 시공도를 확인한다.
② 패널과 기둥이 접하는 부위, 패널과 이질재가 접하는 부위에는 씰란트로 마감 설치하여야 한다.
③ 모서리 등의 파손이나 마모의 우려가 있는 부위에는 유효한 보강처리를 한다.
④ 패널설치 후 상부 찬넬 속 틈새에 우레탄폼을 밀실하게 채워 단열 및 소음을 차단해야 한다.
⑤ 세대내의 150T 이상 복합판넬 내부의 단열/차음용 GLASS WOOL은 규정된 제품을 사용하여 설치한다.
⑥ 문틀 및 창틀 개구부에는 상부의 하중을 보강할 수 있도록 하여야 하며, 이를 고정할 수 있도록 철물로 보강 한다

4) 마감 (JOINT 퍼티)
① 마감재의 종류는 특기시방에 따른다.
② 패널의 JOINT는 퍼티로 마감을 한다.
③ 패널 표면을 충분히 건조시키고, 이물질을 완전히 제거한 후 마감을 한다.

7. 시제품의 경제성 평가 및 기존 제품과의 성능 비교

본 연구개발 제품은 기존 건축자재 시장에서 판매되고 있는 시멘트 벽돌, 석고보드 패널 등과 성능적 측면을 비교하여 비중 및 중량 측면에서는 우수한 측면을 나타내고 있는 반면, 휨강도의 경우 낮은 밀도를 가지고 있기 때문에 높은 휨강도를 발현하지는 못하는 것으로 판단되며, 내화성능, 열전도율의 측면에서는 기존 건축자재 시장에서 판매되고 있는 패널과 견줄만한 성능을 갖추고 있는 것으로 판단된다. 또한 본 연구개발 제품은 건물의 내벽에 설치되기 때문에 친환경적 측면이 중요하다고 볼 수 있는데, 본 연구개발 제품은 포름알데히드 성분 등의 유해 성분이 검출되지 않았다. 이에 따라 본 연구에서 개발된 심재는 기존 시제품과 유사하거나 우수한 성능을 가지고 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서 개발된 심재가 적용될 건식경량 패널의 경우, 시제품에 있어서 표면재를 제외하면 24,000원의 가격대를 형성하는 것으로 예상된다. 따라서 생산원가가 저렴한 표면재를 개발하면 건축 자재 시장에 낮은 원가의 제품을 공급할 수 있을 것이라 판단된다. 본 연구개발 제품은 알칼리 자극제에서 다소 높은 원가비용이 발생할 것으로 예상되나, 그 이외는 산업부산물을 사용하였기 때문에 단가 측면에서 기존 제품에 비하여 경제성을 확보하고 있는 것으로 판단된다. 또한 본 연구개발 제품의 경우 특수양생이 불필요하여 에너지 소비를 줄일 수 있고, 생산 공정의 저탄소화 및 생산효율을 향상시킬 수 있다는 장점을 가지고 있는 것으로 판단되는 바, [표 3-2]에 나타낸 바와 같이 본 연구개발 제품이 패널 시장으로 진입할 경우 기존 제품에 비해 높은 관심을 받을 수 있을 것이라 판단된다.

[표 3-2] 기존 시제품과 경제성 및 성능 비교

구 분		시멘트벽돌 (1.0B+양면 미장15T)	석고보드복합패널 (200T)	압출성형콘크리트 패널 (200T)	경량복합콘크리트 패널 (150T 이상)	경량기포콘크리트 (200T)	산업부산물 패널 (100T)
이미지							
비 중	g/㎤	1.9	-	1.3	0.75	0.5	0.8
중 량	kg/m²	373	65	155	75	100	150
흡수율	%	40	35	15	21	35	25
압축강도	kg/cm²	80	-	200	-	40	-
휨 강 도	kg/cm²	-	51	24	34	10	11.22
차음성능	dB	50~55(2~3등급)	62(1등급)	54(2등급)	60(1등급)	49(3등급)	-
내화성능	시간(H)	2	2	2	2	2	2
열전도율	Kcal/mh ℃	0.72	-	0.25	0.14	0.1	0.18
열관류율	W/m²K	3.99	0.49	-	0.37	0.46	-
HCHO배출	Ppm	-	-	-	-	-	불검출
공급단가	원/m²	43,600(패널)	53,900(패널)	77,000(패널)	59,000(패널)	51,200(패널)	23,515(패널의 심 재)

제 4 장 연구목표 달성 및 효과

제 1 절 연구개발 최종목표의 달성도

1. 연구개발 수행 진도율

연차	연구목표	연구내용	추 진 일 정(월별)											
			1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
1차년도	산업부산물 및 전용촉진제를 사용한 무시멘트계 건식화 바인딩 시스템의 재료설계법 개발	제지애시 및 산업부산물에 대한 국내·외 기술정보 수집 및 자료조사	■	■	■									
		목표성능에 만족하기 위한 재료선정 및 화학성분 분석	■	■	■	■	■							
		제지애시 및 산업부산물과 경화촉진제의 적합성 평가 시험				■	■	■	■	■	■			
		제지애시 및 산업부산물과 경화촉진제의 최적 혼합비율 선정				■	■	■	■	■	■			
		목표물성을 만족시키기 위한 경화체의 기초성능평가 (압축/휨강도, 유동성, 응결)				■	■	■	■	■	■			
		친환경 바인딩시스템의 최적배합 성능 평가 (역학 및 작업성능)							■	■	■	■	■	■
		1차년도 보고서 작성										■	■	■
2차년도	저탄소 친환경 바인더를 활용한 건식화 패널 기술 구축 및 기초 성능 평가	무시멘트계 친환경 바인더의 자기발표성능 및 경량화 기술정보 조사와 수집	■	■	■									
		기포제 첨가율 변화에 따른 적정 첨가율 선정	■	■	■	■	■	■						
		무시멘트계 친환경 바인더에 적합한 기포제의 팽창율 측정				■	■	■	■	■	■			
		건식 경량벽체에 적용하기 위한 경화체의 최적배합 선정							■	■	■			
		건식 경량벽체에 적용하기 위한 경화체의 성능 검증 (내수성, 단열성, 내구성)							■	■	■	■	■	■
		2차년도 보고서 작성										■	■	■
3차년도	저탄소 무기패널을 활용한 경량 내화/단열복합패널 건식화 패널 제조시스템 구축 및 시공 매뉴얼 작성	저탄소 무기패널 시제품 설계 및 제조를 위한 규정 및 정보수집	■	■	■									
		저탄소 경량 바인더의 성상 및 양생 조건을 고려한 복합패널의 제조	■	■	■	■	■	■						
		저탄소 경량 복합패널의 제조 확인 후 생산시스템 구축				■	■	■						
		최적설계안 및 제조/생산시스템을 고려한 시제품 제작실험				■	■	■	■	■	■			
		완성된 시제품의 각종물성 평가 실험 (역학 및 내수성, 단열성, 내화성)				■	■	■	■	■	■			
		친환경 건식벽체시스템의 환경적 성능 평가 (포름알데히드, 탈취, 원적외선)							■	■	■	■	■	■
		친환경 건식벽체시스템 최종보고서 작성										■	■	■

2. 연구개발 정량성과목표

연차 (단계)	연차별 성과목표	성과지표	측정방법	목표치	달성치
1차 (1단계)	복합패널 심재의 바인더 재료선정 및 메카니즘 조사 연구	유동특성	KS L ISO 679	100㎜ 이상	175mm
		경화체의 밀도	KS F 2459 (겉보기 밀도)	0.8g/㎤ 이하	0.88g/cm^3 (2차년도달성)
		강도특성	KS L ISO 679	3MPa 이상	4MPa
		KCI 논문 게재	KCI 게재 논문건수	1건	1건
	소 계				
2차 (2단계)	심재의 목표성능 만족을 위한 최적 배합 선정	심재의 밀도	KS F 2459 (겉보기 밀도)	0.8g/㎤ 이하	0.8g/cm^3
		심재의 흡수율	KS F 2459 (흡수율)	10% 이하	9.71%
		심재의 강도특성(1)	KS F 2459 (압축강도)	5MPa 이상	5.24MPa
		심재의 강도특성(2)	KS L ISO 679 (휨강도)	2MPa 이상	2.48MPa
		심재의 길이변화특성	KS F 2460 (길이변화율)	0.40% 이하	0.36%
		심재의 중금속 용출	환경부고시(제 2011-3)	Cr6+:20mg/L 기타중금속:0mg/L이하	만족
		KCI 논문 게재	KCI 게재 논문건수	1건	1건
	복합패널 심재의 성능 검증	심재의 내수성	KS F 4914 (침수 후 압축강도)	80%이상 강도발현	112%
		심재의 내화성	KS F 2257, ISO 834	가열면 2시간유지	2시간 유지
		심재의 내열성	KS F 2277 (단열성시험)	0.36W/㎡ 이하	0.18W/m^2
		SCI 논문 게재	SCI 게재 논문건수	1건	1건
		특허출원	특허출원 건수	1건	1건
	소 계				
3차 (3단계)	복합패널의 제조 및 생산시스템 구축과 시제품의 각종물성 평가 및 친환경성 검증	심재의 양생 조건 확립	양생 조건별 비교실험	강도발현 100%	강도발현 100%
		복합패널의 휨강도	KS F 4914 (경량기포패널)	8MPa 이상	10.8MPa
		복합패널의 흡수성	KS F 2459	10%이하	8.9%
		포름알데히드 배출량	시험편의 방산량	0.1ppm 이하	불검출
		특허등록	특허등록 건수	1건	등록
		시제품제작	시제품제작 건수	1건	1건
		KCI 논문 게재	KCI 게재 논문건수	2건	2건
		SCI 논문 게재	SCI 게재 논문건수	1건	1건 게재, 1건(심사중)
	소 계				100% 완료
※ 연구개발의 목표치는 기존 시제품의 성능 및 KS기준에 준하여 설정					

제 2 절 연구개발 성과의 효과분석

1. 기술적 효과분석

가. 기존 유기계 경량패널(샌드위치 패널, EPS복합패널 등)과는 달리 불연성이면서 내화성능이 우수한 건축용 건식 경량복합패널을 개발·적용함으로서 건물 화재시 화염의 확산을 방지할 수 있을 뿐만 아니라, 인체에 유해한 유독가스를 전혀 발생시키지 않아 화재에 의한 인명 및 재산피해를 최소화 할 수 있음

나. 기존 무기계 경량패널(ALC 패널, 경량기포모르타르)과는 달리 오토클레이브양생이나 고온양생(110℃ 이상) 등 특수양생공정이 생략되어 생산과정에서의 에너지 소비를 대폭 절감시키고, 이에 따라 생산공정의 저탄소화 및 생산효율(생산성) 향상시킬 수 있음

다. 기존 시멘트계 건식패널과는 달리 CO_2 발생원인인 시멘트를 전혀 사용하지 않고 순수 산업부산물만을 사용함으로서 생산원료의 저탄소화가 가능함

라. 건축물의 비내력 벽체를 경량복합패널로 대체함으로서 구조물의 가중을 경감(경량화)시키고 작업효율이 증대되며, 건자재의 프리훼브화에 의해 공기단축이 가능함

2. 경제적 효과분석

가. 본 연구는 저가의 산업부산물을 주원료로 사용하고, 더욱이 생산 공정 중 특수양생공정의 생략에 따른 에너지 소비 절감이 가능하여 기존 제품에 비해 경제적인 복합기능성 경량패널의 생산이 가능함

나. 건식 경량벽체에 대한 기술력 부족으로 중국 및 유럽 등에서 기술력과 제품을 수입하고 있는 실정에서 본 기술개발을 통해 중저가의 복합기능성 건식패널을 개발함으로서 수입대체 및 해외시장 창출이 가능함

다. 최근 전 세계적으로 탄소배출권(탄소세)이 문제되고 있는 시점에서 건설산업분야에서 시멘트 사용량의 저감에 일조할 수 있을 뿐만 아니라, 탄소세가 적용되는 해외시장의 공격적 마케팅이 가능함

라. 건축물의 신축공사 및 리모델링 공사에 본 연구를 적용함으로서 건축물의 에너지 효율 향상(특히, 냉난방효율)에 크게 기여하며, 화재 시 재산 및 인명피해를 최소화 할 수 있음

3. 정책적 효과분석

가. 신축 공동주택을 건설할 경우, 용적률 상향, 주택성능 등급표시제도에 의한 점수 부여 등의 조건으로 기둥식구조(라멘구조)의 공동주택을 건설을 유도할 수 있음

나. 친환경적인 건식 경량 비내력 벽체를 시장에 보급을 하며, 산업부산물로 활용한 경량 벽체 관련법 등의 제조 기술 등을 제공할 수 있음

다. 내화·단열·친환경성을 겸비한 비내력 벽체로서 국민의 안전 및 보건에 대한 기술을 제공할 수 있음

라. 친환경 기준 강화 보금자리주택 건설은 저탄소 녹색성장 전략으로 신규 그린 홈 100만호 건설 프로젝트 추진에 따라, 2025년까지 제로에너지 주택을 공공에서 선도하는 것을 목표를 하고 있는 정책에 대하여 도모하는 기술을 제공

라. 친환경 건축물 인증제도로 인하여 자원절약형이고 자연친화적인 건축물의 건축을 유도를 할 수 있음

마. 지식경제부의 '2012년 온실가스 감축목표'에서 시멘트산업은 전산업부문 CO_2 감축량에 대하여 지원할 수 있음

제 5 장 연구성과의 활용계획

제 1 절 연구성과의 활용방안 및 기대효과

1. 최종성과물의 활용방안

가. 개발 제품의 상업화를 통화여 국내의 친환경 제품 인식도를 고려하여 실내 내장재 관련 업체 및 실내 건축관련 업체와의 연계를 통하여 영업망을 확보

나. 전 세계적으로 탄소배출권 문제에 관련하여 탄소세가 적용되는 해외 시장 판로 확장하여 중저가의 기능성 패널로 해외 시장 개척

다. 본 연구의 친환경 경량복합패널은 경량성, 내화성(불연성), 내수성 및 내구성 등이 우수하여 건축물의 모든 비내력 벽체(내벽 및 외벽), 지하이중벽, 공장시설물의 방화벽, 조립식 구조물 등 다방면에 사용이 가능함

라. 본 기술은 복합기능성을 가지면서 기존 기술에 비해 원료 및 생산단가의 저감이 가능하여 기존 시장으로의 진입이 용이하고, 그 파급효과가 매우 높음

마. 최근 건축물의 화재안전기준 강화, 에너지효율의 향상 등으로 기존 시설물의 리모델링 공사가 활발히 진행되고 있어 본 기술의 수요증대가 크게 기대되며, 기업의 매출증대에 크게 기여할 것으로 판단됨

바. 본 기술의 원천기술을 확보함으로서 각종 콘크리트 2차 제품(블럭, 내화벽돌 등), 방통모르터, 지반보강 그라우팅재, 배면충전재 등으로 확대 적용할 수 있어 사업영역의 다각화가 기대됨

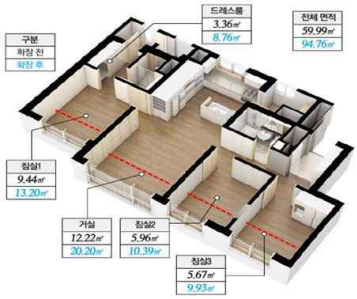
사. 신축 공동주택을 건설할 경우 정부에서도 용적률 상향, 주택성능 등급표시제도에 의한 점수 부여 등의 조건으로 기둥식구조(라멘구조)의 공동주택을 건설할 것을 유도하고 있으며, 국가 정책 및 리모델링 시장의 급속한 성장, 라멘식 아파트 및 주상복합 건축시장의 지속적성장 등으로 기둥식구조에 필요한 건식 경량벽체패널(조립식 패널, 건식벽체, 내화보드 포함) 시장의 점유율이 크게 증대될 것으로 예상되고 있어 본 연구관련 시장의 확대가 유력함

아. 본 연구의 목적은 친환경 경량복합패널 심재를 개발하기 위함에 있다. 개발하고자 하는 심재는 경량성을 갖는 경화체로써 건축물의 비내력 벽체(내벽 및 외벽), 지하이중벽, 공장시설물의 방화벽, 조립식 구조물 등 다방면에 사용이 가능하다. 또한, 이 기술은 복합기능성을 가지면서 기존 기술에 비해 원료 및 생산단가의 저감이 가능하여 기존 시장으로의 진입이 용이하고 파급효과가 매우 높을 것으로 보인다. 그리고 최근 건축물의 화재안전기준 강화, 에너지효율의 향상 등으로 기존 시설물의 리모델링 공사가 활발히 진행되고 있

어 본 기술의 수요증대가 크게 기대되며, 기업의 매출증대에 크게 기여할 것이라고 판단된다.

자. 본 기술의 원천기술을 확보함으로써 각종 콘크리트 2차 제품(블럭, 내화벽돌 등), 방통모르터, 지반보강그라우팅재, 배면충전재 등으로 확대 적용할 수 있어 다방면의 사업영역에 접목시킬 수 있을 것이라 판단된다.

[표 5-1] 국내 시장환경 변화

구분	1) 사회적 구조의 변화	2) 환경 · 에너지 변화	3) 주택관련 기술 및 제도의 변화
모식도			
특징	▶ 저출산과 고령화 → 독신자, 고령자 거주 증가	▶ 지속 가능한 건축 및 환경 → 친환경 자재 및 부품 개발	▶ 발코니 확장 합법화 → 발코니 확장 및 활용 요구
	▶ 1인당 필요면적 → 방의 면적 증가	▶ 에너지 절감 → 온 · 냉방 에너지 절약 필요	▶ 장수명 주택 활성화 유도 → 리모델링시 인센티브 반영
	▶ 주 5일 근무 → 여가 생활 증가	▶ 리모델링 → 자원절약, 건설폐기물 최소화	▶ 기둥식 구조 권장

2. 사업화 추진방안

가. 본 연구기술 제품이 적용되어질 시장은 건축자재 분야로 정의되어질 수 있으며, 주 수요처는 크게 민간과 공공 부문의 2개 부문으로 나누어질 수 있을 것이다. 공공부문은 대한토지주택공사에서 발주하는 공동주택 공사가 대부분을 차지할 것으로 판단되며, 민간부분의 경우는 대기업을 비롯한 중소 건축시공업체가 시공하는 공사가 주된 시장이 될 것으로 판단된다. 이러한 시장구조에 있어서, 본 연구에서 개발된 제품은 기존 제품 대비 가격경쟁력 및 환경성을 확보할 수 있어 수요전망 양호한 것으로 판단되며, 관련 시장에서 경쟁력을 가지고 있으며, 건설 산업에 있어서 경제성, 환경성을 강조하는 정부의 기술개발 방향과도 일치한다고 할 수 있다. [표 5-2]은 한국건설기술연구원의 자료를 근거로 국내 경량패널의 시장현황과 향후 예상시장규모 및 본 기술의 상용화를 대상으로 예상연도별 시장규모를 나타낸 것이다.

[표 5-2] 건축 자재 시장 규모

(단위 : 억원)

구 분	2012년	2013년	2014년
세계 시장 규모	177,6004	183,2835	189,1446
한국 시장 규모	12,0001	12,3842	12,7803
산출 근거	1) 2010년도 한국소방산업기술원 연구성과 보고서 2) 국내 건축패널시장의 년간 평균 성장률 3.2% X 국내시장규모 (건축자재시장분석 및 전망 보고서, 화학경제연구원, 2008.07) 3) 국내 건축패널시장의 년간 평균 성장률 3.2% X 국내시장규모 (건축자재시장분석 및 전망 보고서, 화학경제연구원, 2008.07) 4) 국내 현재 시장규모 × 14.8(우리나라 GDP 대비 미국의 GDP 격차비율) 5) 국내 현재 시장규모 × 14.8(우리나라 GDP 대비 미국의 GDP 격차비율) 6) 국내 현재 시장규모 × 14.8(우리나라 GDP 대비 미국의 GDP 격차비율)		

나. 경량 복합패널 임가공 업체 및 대기업과의 MOU 체결을 통하여 기존 시장으로의 진입이 용이할 것으로 판단된다.

나. 국내의 경우, 현재 콘크리트조 또는 조적조가 내화벽체 시장의 약 70% 정도를 차지하고 있으며, 이는 국내 건축시장의 대부분을 아파트가 점유하고 있고, 또한 아파트는 대부분 벽식구조로 되어 있기 때문인 것으로 파악된다.

다. 향후에는 리모델링 시장의 급속한 성장, 라멘식 아파트 및 주상복합 건축시장의 지속적 성장 등으로 경량패널 시장의 점유율이 크게 증대될 것으로 예상되고 있어 본 기술관련 시장의 확대가 가능할 것으로 판단되는바 본 연구개발 제품의 사업화 추진 비교적 무난할 것으로 판단된다.

라. 향후 건축물에 적용될 공법을 비롯한 모든 건설 공사에 영향을 줄 또 하나의 큰 변수는 환경성 문제라 예상된다. 건축물 시장은 에너지, 경제, 건설동향 등 전체적인 지구환경

(global environment)의 상황에 따른 새로운 변화를 포함 할 것으로 예상되는바 본 연구 개발 제품과 같이 환경성을 확보한 제품의 적용이 증가할 것으로 예상된다.

마. 본 기술은 복합기능성을 가지면서 기존 기술에 비해 원료 및 생산단가의 저감이 가능하여 기존 시장으로의 진입이 용이하고, 그 파급효과가 매우 높음

바. 또한, 최근 건축물의 화재안전기준 강화, 에너지효율의 향상 등으로 기존 시설물의 리모델링 공사가 활발히 진행되고 있어 본 기술의 수요증대가 크게 기대되며, 기업의 매출증대에 크게 기여할 것으로 판단됨

사. 이상에서 살펴본 바와 같이 본 연구 개발을 바탕으로 [그림 5-1]에 나타낸 바와 같이 패널의 심재 물성특성을 확보하여 2차 제품에 대한 추가적인 연구를 진행하고 이와 관련된 기업과 제품제작 및 현장 적용성을 검토하여 국내 패널시장에 참여할 계획이다. 또한, 실질적인 실용화를 위해 타설 및 시공법을 개발을 통하여 현장 적용성을 검토하고 원자재에 대한 안정적인 수급처 등을 확인할 계획이다.



[그림 5-1] 사업화 추진방안 모식도

기술도입의향서

기술명				
기업명	(주)에스아이판	책임자	정갑철	
연락처	주소	경기도 화성시 장안면 수정로 299번길 6		
	전화	02)586-3682	휴대폰	010-3373-3682
	E-Mail	kcsound2050@gmail.com		
출원인	한발대학교 산학협력단, 목원대 산학협력단	발명자		

지식 재산권 (특허)	특허명	특허번호
	산업부산물을 이용한 경량 경화체용 조성물 및 이의 제조방법	10-2015-002-8458

(주)에스아이판은 한발대학교 산학협력단의 「산업부산물을 이용한 경량 경화체용 조성물 및 이의 제조방법」에 대해 기술을 도입할 의사가 있음을 확인합니다.

2015년 11월 2일

대표이사 안 언무 (인)

한발대학교 산학협력단장 귀하

[사진 5-1] ㈜에스아이판과 기술도입의향서(MOU) 협약 체결

3. 기존 연구와의 연계 및 추가 연구의 필요성

가. 최근 전 세계적으로 탄소배출권(탄소세)이 문제되고 있어, 제조과정에서 CO_2를 다량 배출하는 시멘트를 대체할 수 있는 연구가 활발히 진행되어지고 있는 점을 감안하면, 건축 자재 분야에서 기존 시멘트를 대체하기 위한 재료 개발 연구와 연계 가능할 것으로 판단된다. 특히, 경량패널 시장에 연계 협력이 가능할 것이다.

나. 우리나라 인구 중 약 65%가 공동주택에 거주하고 있으며, 이웃과 밀접하게 생활하기 때문에 많은 문제점이 발생하고 있는데 그 중 층간소음과 관련하여 경량벽체패널과 관련한 연구와 연계가 충분히 가능할 것으로 판단된다.

라. 현재 벽체시스템에서도 불연성 및 내화성이 떨어지는 제품들이 상당히 존재하고 있다. 이에 따라 불연성 및 내화성에 관련하여 불연 재료에 관한 연구와의 연계가 기대된다.

마. 제지애시를 활용한 건설 소재 연구가 아직 미비한 실정이므로 제지애시의 특성을 잘 살릴 수 있는 연구가 진행되어야 되며, 특히 기존 발포제가 적용되고 있는 기술을 대체할 수 있는 기술 개발 등이 필요하다.

바. 제지애시의 발포를 적정 수준으로 미세 조절할 수 있는 기술 등에 대한 추가적인 연구가 필요하며 대량 생산하는 과정에서 발포를 제어할 수 있도록 하는 연구가 필요하다.

사. 본 연구개발 제품을 실용화하기 위해서 본 연구팀은 지속적인 연구를 수행할 예정이며, 특히 현재 본 연구팀에서 수행하고 있는 패널용 표면재 개발 연구와 연계하여 높은 강도 및 적정의 밀도를 형성하는 표면재 개발 및 심재의 미비한 사항을 보완할 계획이다. 또한, 실질적인 대량생산 및 실용화를 위해서 건축 현장 여건에 맞는 다양한 시공법의 개발이 필요할 것으로 판단되며, 고로슬래그 및 제지애시 등에 대한 안정적인 원료확보 대책이 강구되어야 할 것으로 판단된다.

아. 제지애시의 기포발생량 컨트롤 방안은 이미 본 연구를 통하여 어느 정도는 확보한 것으로 판단되나, 본 연구개발 제품을 대량 생산하는 공정에 적용하기 위해서는 기포발생량의 차이 등에 의하여 발생하는 심재의 품질변동 대책이 필요할 것으로 판단된다. 이를 위하여 공장 제조 과정에 있어서 전체적인 품질변동이 발생하였을 경우, 제지애시의 Si 함량 기준, 알칼리 자극제의 종류 및 첨가량, 비빔시간 및 방법 등에 대한 다양한 조건에서의 배합비 도출 및 변경을 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

[참고문헌]

1. 콘크리트와 환경, 콘크리트학회(친환경콘크리트위원회), 2010. 12

2. 규조토, 견운모를 활용한 친환경 목모 세라믹 패널 개발 및 상용화, 산업자원부, 2008. 6

3. 송태협 외 2명, CSA 및 제지애쉬를 혼합재로 사용한 플라이애쉬 시멘트 모르타르의 수화 및 강도 특성에 관한연구, 한국건설 순환자원학회지, 2005. 12.

4. 정정조, 제지 폐수슬러지 소각재와 페플라틱 혼합체의 공학적 특성, 대한토목학회지, 2004. 3

5. 송태협 외 2명, 플라이애쉬와 제지애쉬를 혼합 사용한 모르타르의 특성에 관한 실험적 연구, 대한건축학회지, 2004. 4

6. 이시우, 제지애쉬를 혼입한 모르타의 특성에 관한 실험적 연구, 한국건축시공학회, 2002. 8.

7. 소병현, 제지 슬러지 애쉬 고로슬래그 미분말로 혼합치환한 시멘트가 모르타르에 미치는 영향, 콘크리트학회지, 2002. 11

8. 문경주외 2명, 제지 슬러지 소각재를 이용한 소성 경량골재의 제조, 콘크리트학회지, 2001. 1
9. 김재신, 플라이애시 및 제지슬러지 애시를 혼입한 도시 쓰레기 소각재 경화체의 강도적 특성, 콘크리트학회지, 2000. 11

10. 김재진, 제지 슬러지 소각회의 시멘트 혼화 재료로서의 이용 가능성에 관한 연구, 콘크리트학회지, 1999. 11

11. 문경주, 제지 슬러지 소각회의 인공골재의 콘크리트에의 적용, 콘크리트학회지, 1998. 11

12. 최정호 외 1명, 슬래그 플라이애쉬, 제지슬러지애쉬 치환율에 따른 콘크리트의 강도특성, 건설기술논문집, 1997. 7.

13. 송여우 외 1명, 제지공장 슬러지의 지반공학적 활용, 대한토목학회지, 1997. 10

14. 문소현 외 2명, 제지 슬러지애쉬를 사용한 폴리프로필렌섬유보강 경량시멘트 복합체의물리적 특성에 관한 연구, 1994. 10

15. 김윤미, 고로슬래그를 기반으로한 제지애시 사용 경량 경화체의 발포 특성, 2015

16. 김성한 외 1명, 제지애시를 이용한 다기능성 결합재 조성물, 특허

17. 김재신 외 3명, 플라이애시 및 제지슬러지 애시를 혼입한 도시 쓰레기 소각재 경화체의 강

도, 한국콘크리트학회지, 2000년

18. 송태협 외 2명, CSA 및 제지애쉬를 혼합재로 사용한 플라이애쉬 시멘트 모르타르의 수화 및 강도 특성에 관한 연구, 한국건설순환자원학회지, 2005

19. 유용진 외 3명, 폐석고보드 미분말을 활용한 무시멘트 경량 경화체의 역학적 특성, 한국콘크리트학회, 2014

20. 이영원 외 2명, 비소성 시멘트를 사용한 레드머드의 양생온도 및 물시멘트비의 변화에 따른 백화 특성 분석, 콘크리트학회논문집, 2014

21. 이영우, 알칼리활성 무시멘트 결합재로서 레드머드의 재활용에 관한 연구, 우석대학교, 2013

22. 강석표, 알칼리활성화 무시멘트 결합재의 촉진제로서 레드머드 활용에 관한 연구, 대한건축학회지, 2012

23. 강신현, 인산염 비료 및 레드머드를 이용한 중금속 오염 광미의 안정화, 한국지하수토양환경학회, 2011

24. 이승훈, 레드머드를 혼입한 3성분계 콘크리트의 물리적 특성, 대한건축학회지연합회, 학술발표대회논문집, 2013

25. 한민철, 알칼리 자극제로서 미분시멘트와 순환골재가 고로슬래그 다량치환 콘크리트의 공학적 특성 및 미세구조에 미치는 영향, 한국건축시공학회 논문집, 2013

26. 김래환 외 4명, 알칼리 자극제의 종류 및 치환율이 고로슬래그 미분말의 압축강도에 미치는 영향, 한국건설순환자원학회 논문집, 2014

27. 김종희, 알칼리 자극제 種類에 의한 高爐슬래그 微粉末 모르타르의 强度特性, 충남대학교, 2012

28. 백철우 외 5명, 알칼리자극제 종류에 따른 고강도 HVMA콘크리트용 고성능 혼화제 특성, 콘크리트학회논문집, 2013

29. 홍기남 외 2명, 유황 알칼리 자극제를 첨가한 고로슬래그 콘크리트의 초기강도 및 탄산화에 대한 영향, 충북대학교 건설기술논문집, 2014

30. 소형석 외 2명, 알칼리 자극제의 종류 및 양생조건이 메타카올린을 이용한 무기결합재 모르타르의 강도발현 특성에 미치는 영향

31. 이병재 외 3명, 유황폴리머를 활용한 콘크리트 표면보호재의 양생조건에 따른 강도 평가 및 유황폴리머의 유해성 평가, 한국구조물진단유지관리공학회지, 2015

32. 김재연 외 1명, 다양한 양생조건에서의 콘크리트 강도 특성 연구, 콘크리트학회논문집, 2014

33. 김용로 외 5명, 양생조건에 따른 저발열 콘크리트의 강도발현 특성, 콘크리트학회논문집, 2014

주 의

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