제 출 문

국토교통부장관 귀하

이 보고서를 “Smart 고로슬래그미분말을 혼입한 저탄소콘크리트의 초기재령 압축강도 향상기술개발“에 관한 연구의 최종보고서로 제출합니다.

2014. 09. 29.

주관연구기관명 : 영진글로벌(주)
주관연구책임자 : 이 강 진
연 구 원 : 김 진 형
〃 : 박 현 영
〃 : 추 상 화
〃 : 최 지 성
〃 : 조 용 휘
〃 : 김 주 환
〃 : 이 상 규
〃 : 허 윤 무
위탁연구기관명 : 제이엔티아이엔씨(주)
두산건설(주) 렉스콘
위탁연구책임자 : 한 진 규
〃 : 이 재 삼

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>11 C06</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2011. 09. 30~
2014. 09. 29</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>연 구 과 제 명</td><td colspan="5">Smart 고로슬래그미분말을 혼입한 저탄소콘크리트의 초기재령 압축강도 향상기술개발</td></tr>
<tr><td>연 구 책 임 자</td><td>이 강 진</td><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 19명
내부: 11명
외부: 8명</td><td>총연구비</td><td>정부 : 776,500천원
기업 : 259,000천원
계 :1,035,500천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">영진글로벌(주)/
기술연구소</td><td>위탁기업명</td><td colspan="2">* 제이엔티아이엔씨(주)
* 두산건설(주) 렉스콘</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></td></tr>
<tr><td colspan="6">○ 본 연구는 일반적인 레미콘사에서 사용 중인 보통포틀랜드시멘트(OPC)의 대체 혼화재인 고로슬래그미분말(GBFS)을 혼입한 경우 발생하는 콘크리트의 초기재령(1일, 3일) 저하 및 저온환경(5~20℃)에서 압축 강도 저하를 OPC 100% 사용과 동등이상의 압축강도 재령확보을 위하여 혼화재의 원천소재 개발을 목표로 경제성을 고려한 산업부산물 및 산업폐기물의 혼합 조성을 통한 소성과정(500~1,150℃까지)을 걸쳐 물리적 화학적 검증실험을 하였으며 조기 압축강도 발현성능과 저온 환경 하에서도 초기재령 압축강도향상의 성능을 가지는 시멘트자극제, 고로슬래그미분말 자극제, 저온환경 증진재의 Smart 고로슬래그미분말(SBFS)을 개발하였다. 이에 소성에 필요한 시작품인 실험용 KILN(1,350℃까지 소성)을 자체 설계 및 제작을 완료하였으며, 원천소재 소성 온도별 SBFS 시제품에 대한 화학분석 및 미세 성분분석을 통하여 실험검증을 하였다. 또한 레미콘 실용화 단계를 위하여 기존 레미콘 단가 동등 이하의 경제성을 고려한 Smart 고로슬래그미분말의 치환율을 10~30% 범위, 콘크리트 28일 압축강도 21~30MPa 범위, 콘크리트 기중 양생온도 5~20℃ 환경조건으로 설정하여 저탄소 콘크리트 배합설계를 통한 SBFS 혼입 저탄소 콘크리트로 제작된 구조체 콘크리트 코어 초기재령 압축강도 실험평가를 실시한 결과 OPC 100% 사용 콘크리트 대비 1일, 3일의 압축강도 동등이상의 결과로 저탄소 콘크리트를 개발하였으며, 이에 Smart 고로슬래그미분말을 적용한 저탄소 레디믹스트 콘크리트 경제성 및 CO_2 원단위 산정을 실시한 결과 기존 레미콘 단가 이하의 경제성을 확보하였고 OPC 100% 사용 콘크리트 대비 레미콘 CO_2 배출량 약 7% 저감효과를 정량적 평가하였으며 국내 최초로 고로슬래그미분말 생산단위 공장의 CO_2 평가도 이루어졌다. 따라서 본 연구 결과는 국내자체 건설재료 원천소재 상용화를 통한 고로슬래그 산업의 고부가치화 및 산업부산물 등을 활용한 CO_2 저감형 건설재료의 활용에 의한 직접적 경제효과 창출하는 연구결과로 이루어졌다.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한글</td><td>저탄소</td><td>조기강도</td><td>공기단축</td><td>고로슬래그
미분말</td><td>저온환경</td></tr>
<tr><td>영어</td><td>Low Carbon</td><td>Early Stength</td><td>Reduction of Working Period</td><td>Blast furnace Slag</td><td>Cold Environment</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제 목

Smart 고로슬래그미분말을 혼입한 저탄소콘크리트의 초기재령 압축강도 향상기술개발

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

최근지구온난화 대책을 위하여 2010년 4월 저탄소 녹색성장 기본법을 제정하고 모든 산업에 걸쳐 저탄소 기술개발의 범위가 확대되고 있으며 이에 국토교통부에서도 국토교통 R&D Green Up 30 프로젝트를 진행하고 있다.

이러한 저감, 저탄소 건설재료 사용, 산업부산물/폐기물 재활용 등의 범위 중 특히, 고로슬래그미분말(GBFS)의 주원료인 고로슬래그는 CO_2 배출 원단위가 작은 소재로 그 생산량은 2011년 이후 당진 현대제철 제철소 준공이후 생산량이 급증하여 2014년 현재 약 1,500만톤의 고로슬래그가 생산되고 있으며 이중 시멘트 건설재료로 사용되는 양은 약 70%로 그 사용량이 증가되는 추세이다.

그러나 그 사용 범위가 시멘트 결합재의 필러 기능으로만 사용되고 있다. 이에 창의적인 전환으로, 기존 고로슬래그미분말(GBFS)의 물리적 문제점을 분석한 결과 보통 콘크리트의 혼화재로 고로슬래그미분말(GBFS)을 혼입한 경우 보통 콘크리트의 초기재령 압축강도(1일, 3일)는 OPC 100%만을 사용한 콘크리트의 압축강도에 비해 초기재령이 낮고, 특히, 저온환경하에서 강도발현이 부족하여 건축공사에서 매우 중요한 거푸집 탈형시기 지연으로 인한 철근콘크리트 구조체공사 공기지연, 동결융해 등이 발생해 친환경 건설재료인 고로슬래그미분말(GBFS)을 적극 활용하기 위해서는 이를 반드시 해결해 하여야 하다.

따라서, 본 연구에서는 조기강도 발현성능과 저온환경하 초기재령 강도향상 성능을 가지는 시멘트자극제, 고로슬래그미분말(GBFS) 자극제, 저온환경 강도 증진재를 동시에 만족하는 원천소재 개발로 이를 고로슬래그미분말(GBFS)과 혼입한 Smart 고로슬래그미분말을 개발하고 경제성을 확보하면서 대량생산 할 수 있는 원천소재 기술을 개발함과 동시에 이를 활용한 저탄소 콘크리트를 개발로 철근콘크리트 구조체 공사에 적용한 경우의 공사비 저감과 공기단축 및 CO_2 저감효과를 정량적으로 평가하는데 목적이 있다. 그리고 실용화를 위하여 레미콘 공장을 대상으로 하여 Smart 고로슬래그미분말의 치환율을 10～30%범위, 콘크리트 28일 압축강도 21～30MPa 범위, 콘크리트 기중 양생온도 5～20℃ 환경조건으로 설정하여, OPC 100% 사용 콘크리트 대비 1일, 3일의 압축강도 동등이상, OPC 100% 사용 콘크리트 대비 레미콘단가 동등이하로서 경제성을 확보하고, OPC 100% 사용 콘크리트 대비 레미콘 CO_2 배출량 약 7% 저감을 목적으로 하였다. 본 연구를 통하여 실용적인 Smart 고로슬래그미분말을 개발함으로써 OPC 100% 사용 콘크리트의 압축강도 및 동등이상의 제품을 확보함으로써 고부가가치의 상품이 될 수 있다고 사료되며 국가시책, 시장동향, 인프라수준, 국제 경쟁력 등을 종합하여 평가하면 매우 시기 적절하고 국내 시멘트・콘크리트 산업 활성화뿐만 아니라 건설산업의 저탄소 녹색성장에 크게 기여할 것으로 판단된다.

Ⅲ. 연구개발 수행내용

본 연구에서는 산업부산물 및 산업폐기물을 이용한 원천소재 개발을 통하여 실용화 할 수 있는 저탄소 콘크리트 개발의 제반 성능에 미치는 영향을 분석하여 최적 제조 조건을 도출하였다. 또한 제조된 원천소재를 모르타르 및 콘크리트의 결합재로 활용하기 위한 방안을 검토하고자 각종 실험을 진행하였으며 기존 개발된 혼합 결합재가 아닌 고용체에 의한 대량 생산이 가능한 원천소재의 활용 계획이 진행되었다.

1. 각 종류별 무기계 자극제의 첨가에 따른 화학적 분석 및 물리적 성능 평가를 통하여 고로슬래그미분말과 보통포틀랜드시멘트를 동시에 자극하는 요소에 관한 연구를 수행하였다.

2. 본 연구의 중요한 핵심인 원천소재 소성방법에 대한 선택과정에서 시멘트 사에서 사용하는 간이적 실험방법인 전기로 소성방법을 통하여 원천소재의 소성전후의 화학적 분석을 평가 수행하였으며, 고로슬래그미분말과 보통포틀랜드시멘트를 동시에 자극하는 적정 혼합비율을 찾아 수화 생성물을 정성・정량적으로 분석하였으며 원천소재를 이용한 혼합별 모르타르 압축강도 특성에 미치는 영향을 평가하여 최적 배합을 도출하였다.

3. 저온환경하의 원천소재 평가에 있어 고로슬래그미분말 혼입 모르타르에 따른 물리적 평가를 수행하였으며 원천소재 중 산지별 정수오니의 품질특성 및 인체 유해성에 대하여서도 보통포틀랜드시멘트, 플라이애쉬, 고로슬래그미분말에 대하여 평가하였다.

4. 원천소재 생산 Pilot Plant 제작에 따른 최적 제조 운전조건을 도출하였으며 시제품 개발에 따른 운전 조건별 모르타르 물리적 성능평가 및 콘크리트의 활용성 평가하기 위해 건조수축 길이변화실험, 소성수축 균열실험, 탄산화 촉진실험, 단열온도 상승실험 등 각종 적용성 테스트를 수행하였으며 미세분석을 통하여 원천소재의 메커니즘을 규명 하였다.

5. 원천소재를 이용한 Smart 고로슬래그미분말을 혼합한 저탄소 콘크리트의 전 과정 CO_2 배출량 및 경제성 평가/시험 및 고로슬래그미분말 단위공장, RC구조체 공사기간평가, 저탄소 콘크리트의 경제성을 평가/시험 , 녹색기술평가 수행하였다.

이러한 과정을 통하여 원천소재 개발에 따른 실용화에 있어 물리적 특성분석, 화학적 분석, 미세분석을 통한 메커니즘 규명 및 SBFS 혼입 레미콘 적용 Mock-up 구조체의 압축강도 평가를 통한 기존 연구와의 차별화된 고용체 결합재인 시제품에 대한 활용 기술확보 등을 통하여 개발 기술의 상용화를 촉진하도록 하였다.

Ⅳ. 연구개발결과

산업부산물인 티탄석고와 산업폐기물인 정수오니 등을 이용하여 환경부하를 큰 폭으로 감소시킬 수 있는 고용체인 클링커 개발로 기존 연구의 산업부산물 혼합 결합재와 다른 원천소재 개발을 위해 수화반응 메커니즘, 모르타르강도 및 콘크리트 내구성 등 물리적·화학적 특성을 연구한 결과 다음과 같이 결론을 얻을 수 있었다.

1. 각 종류별 무기계 자극제의 물리적·화학적 특성분석을 통하여 각 자극제의 역할에서 고로슬래그미분말에서는 알칼리자극제인 NaOH인 혼입율 5%, 보통포틀랜드시멘트에서는 이온계인 NaSCN 2% 혼입, TEA 0.02% 혼입이 가장 우수한 결과로 도출되었으며, 동시 자극제 역할에서는 NaOH과 NaSCN 선정되었다. 따라서 고로슬래그미분말 및 보통포틀랜드시멘트를 동시에 자극할 수 있는 인자의 공통점은 pH 10이상, SO_3, Al_2O_3, CaO의 함유량이 일정량 포함한 분체로 판명되었다.

2. 각종 무기계 자극제의 실험결과로 동시 자극이 가능한 산업부산물인 티탄석고, 석회석 산업폐기물인 정수오니를 선정하였으며, 선정과정을 통하여 원천소재(이하 “티탄석고, 정수오니, 석회석”라고 함)의 실험 인자수준에 따라 혼합하여 간이식 전기 소성로(600～1,050℃)를 통하여 각각의 첨가재를 혼합비율로 소성한 후 인자별 모르타르 실험 레벨 결과 모르타르 OPC 100% 대비 시멘트자극제, 고로슬래그미분말자극제, 저온환경 강도증진재에 있어 모르타르 압축강도 초기재령 (1일, 3일) 각각 100%이상의 고로슬래그미분말(GBFS)과 혼입한 Smart 고로슬래그미분말(이하 “SBFS”라고함)을 개발하였으며 국내에서 개발된 지극제와 차별화된 제품개발이다.

3. 원천소재의 고로슬래그미분말과 보통포틀랜드시멘트를 동시에 자극하는 적정 혼합비율을 찾아 수화 생성물을 정성·정량적으로 분석한 결과 OPC 자극에서는 SO_4^{2-} 이온 다량 석출로 GBFS 중의 Al_2O_3 활성 성분에 흡착하여 초기수화 반응이 가속화 되며, GBFS에서는 CA,$C_{12}A_7$은 급결 시멘트의 주성분으로 GBFS의 초기수화 반응을 촉진하고 공통적으로 CaO의 수화 시 $Ca(OH)_2$의 강알칼리에 의하여 GBFS 입자표면에 형성된 산성피막이 수화초기부터 파괴되어 Si 이온, Al이온을 용출시키므로 초기수화 역할을 촉진 하는 것으로 규명되었다.

4. 개발된 원천소재와 기존 알칼리자극제(NaOH)와 콘크리트 물리적 성능 평가에서 OPC 대비 1일에서 28일 재령까지 우수한 압축강도를 발현하였으며, 특히 OPC가 포함되지 않은 순수 고로슬래그미분말 실험에서는 1일에서 7일까지는 알칼리자극제가 우수 하였으나 14일 이후 원천소재 치환 고로슬래그미분말이 우수한 강도발현으로 단일제품으로 상용화 가능이 확인되었다.

5. SBFS 혼입 콘크리트의 양생온도에 따른 성능평가를 위하여 즉, SBFS 성능 비교를 위한 대상으로는 보통포틀랜드시멘트(이하 OPC) 100%를 사용한 Plain 배합과 OPC 70% + 고로슬래그미분말(이하 GBFS) 30%를 치환한 S/C 배합으로 설정하였으며, SBFS 치환율은 최적 치환율인 7%로 설정하고 양생온도의 경우 (20, 10, 5)℃ 3수준으로 설정하여 시험한 압축강도 측정결과 재령 1, 3일의 경우 양생온도에 따라 102.3～105.6%로 나타났으며, 특히 재령이 경과함에 따라 강도가 지속적으로 증가하여 매우 우수한 역학적 특성을 발휘 한 것으로 나타났다.

6. 원천소재의 대량생산이 가능한 Pilot Plant 제작으로 국내 유일한 고용체 결합재 개발의 범 실험용 장비 확보에 따른 기존의 혼합 믹싱 방법을 탈피한 각종 원천소재 개발에 촉매 역할을 수행할 것이다.

7. 실용화를 위하여 레미콘 공장에서 실 생산을 통한 Smart 고로슬래그미분말(SBFS) 혼입 콘크리트의 내구성 평가 결과 단열온도 상승실험 결과 초기 수화에 따른 온도상승이 OPC 대비 없는 것으로 판명되었으며 건조수축 길이변화실험에서도 장기재령 경과에 따라 감소로 나타났고, 탄산화 저항성에서는 우수 결과로 도출되어 철근 콘크리트 구물에서도 적용이 가능한 것으로 판명되었다.

8. 원천소재 소성온도에 따른 안정성검토(Free-lime)를 진행한 결과, Free-lime이 OPC 대비 50～85.5%의 감소 효과를 나타내어 팽창성 및 균열에 대한 안정성이 확인되었으며 SILO장기 보관에 인출과정에서도 문제점이 없었다.

9. Smart 고로슬래그미분말(SBFS) 원천 소재 개발과정을 토대로 국내 최초로 단위 고로슬래그 공장 CO_2 평가를 완료하였으며, SBFS 전 과정 CO_2 배출 원단위 평가/시험 완료 및 RC조 아파트 골조공사 기간 및 SBFS 혼입 콘크리트 건축물의 경제성 평가/시험을 완료를 통하여 적용 가능한 학술적 가치가 높다고 할 수 있다.

10. Smart 고로슬래그미분말(SBFS) 적용 녹색기술은 저탄소 콘크리트 제조기술에 대한 녹색기술인증에 필요한 신청기술에 부합하는 저탄소 콘크리트를 철근콘크리트 구조체 공사에 적용한 경우의 공사비용 저감, 공기단축 및 CO_2 저감 효과를 정량적으로 평가하여 성숙단계로 판단되었다.

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

본 연구 개발을 통하여 신개념의 원천소재 개발로 건설재료 상용화를 통한 고로슬래그 산업의 고부가가치화 및 국가 정책에 부흥하는 산업부산물 및 산업폐기물을 재활용한 CO_2저감형 건설재료의 활용에 의한 직접적인 경제효과를 창출할 수 있는 연구 결과물이다.

이에 Smart 고로슬래그미분말 원천소재 개발로 시멘트 및 레미콘 산업에서 고가의 조강형 초기 강도 증진제의 대체 효과를 기대 할 수 있고 특히 고로슬래그 공장에서 일부 자극제로 사용 중인 천연무수석고(태국산, 중국산)의 대체제로 가능하며 최근 자원고갈에 따른 전 세계적으로 각광 받고 있는 무기 폴리모에 대한 대응기술력도 확보가 가능하다고 판단되며, 기존 조강성 혼화재가 수입에 의존하는 각종 특수시멘트 및 콘크리트 2차 제품 산업에 본 Smart 고로슬래그미분말 원천소재를 적용함으로써 독자적인 원천소재 브랜드를 창출하고 건설 기초소재의 경쟁력을 확보 할 수 있을 것으로 사료 된다.

또한 본 연구에서 개발되는 시작품 Pilot Plant 제조 장치는 혼합 믹싱의 제조장치와 다른 소성온도에 따른 고용체 결합재의 실험장비로서 국내 기초분야 연구활동에 다목적으로 활용이 기대되며, Smart 고로슬래그미분말의 대량 생산의 방법을 제시하여 향후 시멘트회사의 잉여 킬른을 활용한 방안이 제안 될 것으로 판단된다.

그리고 CO_2평가는 국내 최초로 고로슬래그 단위공장의 원재료 수급부터 생산, 출하에 이르기까지 CO_2 배출량을 측정함으로써 학계 연구에 기초가 될 것으로 사료되며 향후 지속적인 Smart 고로슬래그미분말 사용에 따른 저탄소 콘크리트 CO_2 평가가 논의와 연구가 더 많아질 것으로 기대한다.

실용화 분야에서는 기존 고로슬래그미분말 및 고로슬래그시멘트 보다 초기재령 및 장기강도가 매우 우수하기 때문에 건축용 및 토목용 건설현장 및 특수시멘트 콘크리트 2차 제품 공장에 범용성을 갖춘 Smart 고로슬래그미분말로 대량 활용도 기대할 수 있으며 특히 기존 레미콘 사업에 보통포틀랜드시멘트 사용량 절감을 통한 동일 재령확보에 따라 대폭적인 원가절감이 예상되고 향후 본격적인 상용화를 위한 대량생산 제조라인의 상용설비 추진이 요구된다.

Summary

Ⅰ. Title

Technological Development of an Improvement in the Early-age Compressive Strength of Low-carbon Concrete Mixed with Smart Ground-granulated Blast-furnace Slag

Ⅱ. Purpose and Rationale for Research and Development (R & D)

Since South Korea passed the Framework Act on Low Carbon, Green Growth in April 2010, the scope of low-carbon technological development has been expanding in all industries in response to global warming issues. In addition, in accordance with this Act, the Ministry of Land, Infrastructure and Transport has been implementing the R&D Green Up 30 project for land and maritime affairs.

In the domain of energy consumption reduction, the use of low-carbon construction materials and the recycling of industrial by-products and waste has reduced CO_2 emissions. Of these materials, blast furnace slag, which is a main raw material of ground-granulated blast-furnace slag (GBFS), has a low CO_2 emission intensity. Since the completion of the Dangjin steelworks (Hyundai Steel) in 2011, the production of blast furnace slag has soared, and as of mid-2014, approximately 15 million tons has been produced. About 70% of this amount is currently used as cement construction materials, and the trend for use is increasing.

However, the current scope of GBFS application is limited to its function as a filler for cement binders. Therefore, to explore innovative technology and thus enable a more profitable use of GBFS, we analyzed its physical properties in relation to how these would affect its use for other purposes. Results of analysis showed that the early-age (1-day and 3-day) compression strength of ordinary concrete mixed with GBFS (mixed as an admixture) was lower than that of concrete using only OPC (100%). It was also found that an insufficient strength development in a low temperature environment delayed the timing of form removal, which is crucial in construction work, thus leading to a delay in developing a concrete structure. It was also shown to possess insufficient freezing and thawing resistance. To expand the scope of the application of GBFS as an eco-friendly construction material, it is considered that these problems need to be solved, and this study therefore aimed to develop a source material with the following criteria. First, that it satisfies requirements as a cement stimulant for early-strength development and earlyage strength improvement in a low-temperature environment; second, that it acts as

a GBFS stimulant; and third, that it acts as a strength improvement agent in a low-temperature environment where smart GBFS (SBFS) is being produced. After development, such a material would then be mixed with GBFS to develop a technology creating a source material able to ensure economic feasibility and mass production. The study also aimed to determine a methodology of quantitatively evaluating a reduction in construction cost and time, as well as CO_2 emissions, where reinforced concrete structures are built with low-carbon concrete using the newly developed source material. In addition, to ensure the practicability of SBFS in terms of strength performance, cost-effectiveness, and eco-friendliness, the following aims were targeted: 1- and 3-day compressive strengths equal or superior to those of 100% OPC concrete; the same or lower RMC unit cost; a 7% reduction in CO_2 emissions compared to 100% OPC concrete under the conditions of the SBFS replacement ratios between 10% and 30%; a 28-day compressive strength of between 21 and 30 MPa; and an aerial curing temperature the same as concrete of between 5℃ and 20℃ in RMC factories. The SBFS developed in this study is suitable for practical use to produce cement that has the same, or a superior, compressive strength and quality of 100% OPC concrete. It therefore creates a high added value and greatly contributes to low carbon, green growth in the construction industry (as well as the timely vitalization of Korean cement and concrete industries), judging from an integrated evaluation in terms of national policies, market trends, infrastructure levels, and international competitiveness.

Ⅲ. Performance Content of Research & Development

In this study, An influence that takes to a general performance of development of low-carbon concrete was analyzed and optimal production condition was deducted. this low-carbon concrete is a concrete which can be practically used through the development of source material using industrial by-products and wastes. Also, All sorts of experiment was conducted to examine the plan that activates a produced raw materials to a binder of mortar and concrete. In addition, the activation plan of raw material which mass-production is possible by solid solution (not by previously developed mixed binder) was proceeded.

1. Through all sorts of chemical analysis and physical performance evaluation in accordance with addition of inorganic stimulus agent, A Study about the element which concurrently stimulates GBFS and OPC was carried out.

2. In the stage of selecting firing method of raw materials which is important core in this

study, 3 evaluations were carried out. first, chemical analysis of before and after firing of raw materials was conducted through electric furnace firing method which is a simplified experiment method from cement company. second, qualitative and quantitative analysis of hydration products was conducted by finding proper mixing ratio which stimulates GBFS and OPC simultaneously. lastly, optimal mix was deducted by evaluation of influence on the compressive strength property of mortar in accordance with mixing status used by raw materials.

3. In terms of evaluation of raw materials under low temperature environment, physical evaluation of mortar in accordance with GBFS mixing status was carried out. among raw materials, quality property and harmfulness to human of DWTS by production site was evaluated through OPC, fly ash and GFBS.

4. Optimal driving condition in accordance with manufacture of raw material production Pilot plant was deducted. all sorts of applicative test such as drying shrinkage length variation test, firing shrinkage cracking test, carbonation acceleration test, adiabatic temperature rise test was carried out to evaluate physical performance of mortar and usability of concrete in accordance with driving condition by development of prototype. mechanism of raw materials were established through microscopic analysis.

5. CO_2 emission amount and economic evaluation/test of whole process, GBFS unit plant, RC structure construction period evaluation, green technology evaluation of SBFS using raw material was carried out.

Through this process, in terms of commercialization according to development of raw material, physical property analysis, chemical analysis, mechanism establishment by microscopic analysis, Mock-up of application of SBFS mixed remicon, compressive strength evaluation of structure, utilization technology securement about prototype which is solid solution binder that is distinctive to previous study was carried out to accelerate commercialization of developed technology.

Ⅳ. Result of Research & Development

Development of Solid solution clinker which can decrease environment load at a high level by using Titan-gypsum and DWTS was carried out to develop raw materials which is different from previously studied industrial by-product mix binder. as a result of research

on the physical, chemical property such as hydration reaction mechanism, strength of mortar and durability of concrete, it came to a conclusion as follows.

1. Physical, chemical property analysis of all sorts of inorganic stimulus agent was conducted. through this result, in case of GBFS, 5% mixing ratio of NaOH which is alkali stimulant showed the best result. in case of OPC, 2% mix of NaSCN which is ionic and 0.02% mix of TEA showed the best result. NaOH and NaSCN was selected as a role of simultaneous stimulant. Thus, common ground of element which can stimulates GBFS and OPC at the same time was found to be a particulate material which is above pH 10 and contains certain amount of SO_3, Al_2O_3, CaO.

2. As a simultaneous stimulative materials, Titan-gypsum, limestone as industrial by-products and DWTS as industrial waste was selected as a result of all sorts of inorganic stimulus agent. The three raw materials selected for the source material to be developed (Titan-gypsum, DWTS and limestone) were repeatedly mixed according to their respective levels of experimental factor and fired in a simplified electric furnace (600℃～1,050℃), as per the mixing ratio of each admixture. As a result of the experimental testing depending on the factor level, a source material was developed that can be mixed with GBFS to achieve the early-age (1-day and 3-day) of mortar and a compressive strength of 100% when used as cement stimulant, GBFS stimulant, and strength improvement agent in a low-temperature environment compared to mortar using 100% OPC. This newly developed material was then named as smart GBFS (SBFS). Is is a differentiated product development to a domestically developed stimulus agent.

3. Appropriate mixing ratio of raw material which stimulates GBFS and OPC at the same time was found, qualitative and quantitative analysis of hydration products was conducted. As a result, It was established that in case of OPC stimulation, a quantity of SO_4^{2-} precipitation accelerated early hydration by adsorbing to Al_2O_3 active component out of GBFS. It was also established that in case of GBFS, CA,$C_{12}A_7$ catalyze early hydration by follows; CA,$C_{12}A_7$ is a main component of quick-setting cement and it catalyze early hydration of GBFS and commonly when the hydration of CaO it precipitate Si, Al ion by destroying oxide film on the surface of GBFS particle from early hydration step by a strong alkali of $Ca(OH)_2$.

4. In the physical performance evaluation of developed source material, existing alkali stimulant and concrete, it showed excellent compressive strength during 1 day to 28 days in comparision with OPC. Especially, In the experiment of pure GBFS which OPC is not included,

alkali stimulant was excellent during 1 day to 7 day but source material mixed GBFS showed better compressive strength after 14 days. It was found to be possible to commercialize as single product.

5. For the performance evaluation of SBFS mixed concrete in accordance with curing temperature, comparative target was set as Plain specimen which 100% OPC was used and OPC 70% + GBFS 30% specimen. SBFS replacement ratio was 7% as an optimal and curing temperature was set up as (20, 10, 5)℃. As a result of Compressive strength measurement, in case of age 1 and 3, it showed 102.3%～105.6% according to curing temprature. Especially, as aging period passes, strength was continuously increased so it was found to demonstrate very excellent mechanical property.

6. By manufacture of Pilot Plant which mass production of raw material is possible, it will carry out a role as catalyst to all sorts of source material development, which is out of existing mixing method in accordance with securement of equipment for experiment for the solid solution development.

7. Durability evaluation of smart GBFS (SBFS) concrete through real production at remicon plant for commercialization was conducted. As a result, in case of adiabatic temperature rise test, it was found that there was no temperature rise according to early hydration in comparison with OPC. In case of drying shrinkage variation test, it showed decrease according to long age progress. In case of carbonation resistance, it showed excellent result so it was confirmed to be applicable to reinforced concrete structure.

8. As a result of proceeding safety examination (Free-lime) according to firing temperature of source material, it showed 50%～85.5% reduction effect of Free-lime in comparison with OPC. By this result, safety on the expansion property and cracking was confirmed and there was no problem on drawing process at SILO long-term storage.

9. Based on the development process of source material of Smart GBFS (SBFS), unit blast furnace slag plant CO_2 evaluation was completed firstly in Korea. CO_2 emission evaluation/test of SBFS at whole process, economic evaluation/test of RC structure apartment construction period and SBFS mixed concrete structure was completed. Through this result, It can be regarded to have applicable high academic value.

10. Smart GBFS (SBFS) application green technology is judged to be on a mature stage by following quantitative evaluation; construction expense reduction, shortening of construction

time, CO_2 reduction effect. This evaluation was conducted in case of applying low-carbon concrete, which is matchable for application technology that is necessary for green technology certification about low-carbon concrete manufacture technology, to a construction of reinforced concrete structure.

Ⅴ. Utilization Plan of R&D result

It is expected that these R&D results can contribute to the following fields: the creation of direct economic effects through an increase in added value of blast furnace slag by commercializing construction materials in relation to the development of advanced source materials; alternative effects of a high-price early strength improvement agent and a high early strength type in cement and the RMC industries; the use of natural anhydrite as an alternative material (Thai, Chinese), which can be partially used as a stimulant in blast furnace slag factories (through the development of source materials of SBFS); ensuring corresponding technology with that of inorganic polymer that is receiving global attention in response to resource exhaustion; and the creation of brands of unique source materials, ensuring competitiveness of basic construction materials by applying the source materials of SBFS that were proposed in this study to various secondary concrete product industries that rely on import to obtain existing high early strength type admixtures.

It is also anticipated that a pilot manufacturing device (the trial product developed in this study and needed for research and development in relation to high value added source materials) will serve as a basic research material for producing special cement and developing repair and reinforcement materials. Furthermore, a method for the mass production of SBFS will be proposed, based on a method using surplus kilns from cement companies.

In addition, it is expected that the results of the CO_2 evaluation, which measured the CO_2emissions from all processes (from supply and demand of raw materials of unit factories producing blast furnace slag to production and shipment in Korea), will serve as the basis for academic research, and that more discussions and studies on CO_2 evaluation of low-carbon concrete according to the constant use of SBFS will be conducted.

In the field of commercialization, because it is very excellent in early-age and long age strength than GBFS and blast furnage slag cement, it is expectable to mass-utilize Smart GBFS at construction site for architecture and civil, special cement concrete secondary

products. Especially, according to same age securement through OPC usage amount reduction at existing remicon industry, swingeing cost reduction is expected and forwarding of commercial facility of mass production manufacturing line for commercialization is needed.

Table of Contents

Chapter 1 Introduction to the Research and Development (R&D) project ····· 1

Section 1. The Need for R & D ····· 3

Section 2. Research contents and scope ····· 6

1. Research contents ····· 6

2. Research scope ····· 7

Chapter 2 Current status of domestic and international technological development ····· 8

Section 1. Relevant domestic and international technological and industrial trends ····· 8

1. Domestic Blast furnace slag and industrial trends ····· 8

2. International technological development ····· 10

3. Domestic technological development ····· 12

Section 2. Difference between the domestic and foreign similar technology ····· 14

1. Improvement of early compressive strength of cement concrete mixed with Granulated Blast Furnace Slag powder ····· 14

5. Difference between the domestic and international technology ····· 15

Chapter 3 Details and results of R&D ····· 16

Section 1. Strategies and methods used for R&D promotion ····· 16

1. Strategies of R&D promotion ····· 16

2. Methods of R&D promotion ····· 17

Section 2. Mortar characterization using inorganic stimulant ····· 18

1. Overview ····· 18

2. Experimental plan ····· 18

3. Characteristic Analysis and Consideration of the inorganic stimulant ····· 21

4. A Study on the sintering ····· 40

Section 3. Source material production development ····· 41

1. Overview ····· 41

2. Experimental plan ····· 41

3. Source material production Characterization ····· 44

4. Experimental results and considerations of source material ····· 49

5. Human organism toxicity of residential environment ····· 77

6. Smart blast furnace slag mixed mortar Performance evaluation ····· 80

7. Smart blast furnace slag mixed concrete performance evaluation ····· 105
8. Smart blast furnace slag mixed concrete evaluation of the economic feasibility(Mock- up Test) ····· 129
9. Development of technology for an evaluation of the economic feasibility of SBFS-mixed low-carbon concrete and a quantitative evaluation of CO_2 emission intensity ····· 155

Section 4. Source material for manufacturing Pilot Plant Production ····· 185
1. Overview ····· 185
2. Source material for specifications Pilot Plant Performance ····· 186
3. Chemical analysis and micro analysis by firing of pilot plant ····· 193
Section 5. A comprehensive conclusions ····· 199

Chapter 4 Research summaries and expected effects ····· 204
Section 1. Individual research results ····· 204
Section 2. The main research results and External the contribution ····· 215
Section 3. Analysis of impact on R&D achievements ····· 219

Chapter 5 Future research achievement application plans ····· 226
Section 1. Individual research results achievement application plans ····· 226

Reference ····· 229
supplement ····· 237

목 차

제1장 연구개발 개요 ····· 1
제 1절 연구개발의 필요성 ····· 3
제 2절 연구목표 및 범위 ····· 6
1. 연구내용 ····· 6
2. 연구 범위 ····· 7

제2장 국내외 기술개발 현황 ····· 8
제 1절 국내외 관련기술 및 산업동향 ····· 8
1. 국내 고로슬래그 산업동향 ····· 8
2. 국외 기술개발 현황 ····· 10
3. 국내 기술개발 현황 ····· 12
제 2절 국내외 기존 기술과의 차별성 ····· 14
1. 고로슬래그미분말 혼입 콘크리트의 조기강도 발현 기술 ····· 14
2. 국내외 기술과의 차별성 ····· 15

제3장 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 16
제 1절 연구개발 추진 전략 및 방법 ····· 16
1. 연구개발 추진전략 ····· 16
2. 연구개발 추진방법 ····· 17
제 2절 종류별 무기계 자극제 첨가에 따른 모르타르의 특성 분석 ····· 18
1. 개 요 ····· 18
2. 실험계획 ····· 18
3. 종류별 무기계 자극제의 물리적 특성 분석 ····· 21
4. 결 론 ····· 40
제 3절 알칼리성 무기계 자극제의 개발 및 수화 특성 ····· 41
1. 개 요 ····· 41
2. 실험계획 ····· 41
3. 원천소재 재료의 특성 ····· 44
4. 원천소재의 물리적 성능 및 화학적 특성 분석 ····· 49
5. 주거환경에서의 인체 유해성 검토 ····· 77
6. 알칼리성 무기계 자극제를 이용한 SBFS 모르타르 성능평가 ····· 80
7. 알칼리성 무기계 자극제를 이용한 SBFS 콘크리트 성능평가 ····· 105
8. SBFS 저탄소 콘크리트의 실용화 검증 Mock-up Test ····· 129
9. 알칼리성 무기계 자극제를 이용한 sbfs 저탄소 콘크리트의 CO_2 배출량 및

경제성 평가 ····· 155
제 4절 원천소재 제조용 Pilot Plant 제작 ····· 185
1. 개 요 ····· 185
2. 원천소재 제조용 Pilot Plant 제원 및 성능 ····· 186
3. Pilot Plant 소성에 의한 화학적 분석 및 미세분석 ····· 193
제 5절 종합 결론 ····· 199

제4장 연구성과 요약 및 기대효과 ····· 204
제 1절 개별 연구성과 ····· 204
제 2절 주요 연구성과 및 대외기여도 ····· 215
제 3절 기술개발성과의 기대효과 ····· 219

제5장 연구개발 결과의 활용계획 ····· 226
제 1절 연구성과의 활용 계획 ····· 226

참고문헌 ····· 229
부 록 ····· 237

- LIST OF TABLE -

Table 1.2.1 GBFS 치환에 따른 경제성 및 CO_2 저감효과 ····· 5
Table 1.2.2 콘크리트 구조체 공사기간의 예 ····· 5
Table 2.1.1 권역별 고로 슬래그 미분말 생산능력 (업체 내부자료) ····· 9
Table 3.2.1 시멘트의 물리적 특성 ····· 19
Table 3.2.2 고로슬래그미분말의 물리·화학적 특성 ····· 19
Table 3.2.3 실험 항목 ····· 19
Table 3.2.4 주요 실험 내용 ····· 20
Table 3.2.5 모르타르 배합표 ····· 22
Table 3.2.6 사용자극제의 화학적 특성 ····· 23
Table 3.2.7 모르타르 배합 및 압축강도와 활성도 지수 표 ····· 24
Table 3.2.8 TG-DTA분석을 통한 $Ca(OH)_2$ 질량 함유율(%) ····· 27
Table 3.2.9 알칼리 활성화 자극제의 종류 및 성상 ····· 31
Table 3.2.10 Series Ⅰ-고로슬래그미분말(GBFS) 자극제 선정 실험 배합표 ····· 31
Table 3.2.11 Series Ⅱ-시멘트(OPC) 자극제 선정 실험 배합표 ····· 32
Table 3.2.12 Series Ⅲ-고로슬래그미분말 혼입 시멘트 모르타르 실험 배합표 ····· 32
Table 3.2.13 각 Series의 재령별 압축강도 실험 결과 ····· 33
Table 3.2.14 SO_3 함량에 따른 실험 배합표 ····· 38
Table 3.2.15 태국산 무수석고 화학분석(wt.%) ····· 38
Table 3.2.16 SO_3 함유량에 따른 압축강도 값 ····· 39
Table 3.3.1 원천소재 적용 주요 실험 내용 ····· 41
Table 3.3.2 티탄석고의 화학 성분 ····· 44
Table 3.3.3 사업장 발생 오니의 종류 ····· 45
Table 3.3.4 정수오니의 화학 성분 ····· 45
Table 3.3.5 석회석의 화학성분 ····· 46
Table 3.3.6 클링커 소성과정 반응 ····· 48
Table 3.3.7 티탄석고의 소성 전과 후의 화학성분 ····· 49
Table 3.3.8 정수오니의 소성 전과 후의 화학성분 ····· 49
Table 3.3.9 시료의 혼입 비율(소성) ····· 51
Table 3.3.10 시멘트 자극제 선정 실험 배합표 (알칼리성 무기계 자극제 : 소성 후) ····· 52
Table 3.3.11 모르타르 배합표 및 압축강도와 활성도 지수 (알칼리성 무기계 자극제 : 소성 후) ····· 52
Table 3.3.12 시멘트(OPC) 자극제 선정 실험계획 ····· 53
Table 3.3.13 시멘트 조기강도 발현 첨가재의 최적 혼합 비율 선정 실험결과 ····· 54
Table 3.3.14 GBFS 자극제 선정 실험 배합표 (알칼리성 무기계 자극제 : 소성 후) ····· 55
Table 3.3.15 모르타르 배합표 및 압축강도와 활성도 지수 (알칼리성 무기계 자극제 : 소성 후) ····· 55

Table 3.3.16 GBFS 자극제 최적 혼합 비율 선정 실험계획 ····· 57
Table 3.3.17 GBFS 자극제 최적 혼합 비율 압축강도 실험결과 ····· 57
Table 3.3.18 저온환경(5℃)의 모르타르 실험배합표 (분말형 첨가재 : 소성 후) ····· 58
Table 3.3.19 저온환경(5℃) 압축강도와 활성도 지수 (분말형 첨가재 : 소성 후) ····· 59
Table 3.3.20 저온환경 자극제 최적 혼합 비율 선정 실험계획 ····· 59
Table 3.3.21 저온환경 조기강도 발현 첨가재의 최적 혼합 비율 선정 실험결과 ····· 60
Table 3.3.22 산지별 정수오니의 화학성분 ····· 61
Table 3.3.23 SBFS 원천소재의 산지별 선정실험 배합표 (소성 후) ····· 61
Table 3.3.24 SBFS 원천소재의 산지별 혼합 비율의 따른 압축강도 측정결과 ····· 62
Table 3.3.25 실험계획 ····· 63
Table 3.3.26 주요 연구내용 ····· 66
Table 3.3.27 실험계획 ····· 67
Table 3.3.28 배합표 1m^3 (25-24-150) ····· 67
Table 3.3.29 슬럼프 및 공기량 실험 결과 ····· 68
Table 3.3.30 SBFS 원천소재의 혼합 비율에 따른 재령별 압축강도 결과 ····· 68
Table 3.3.31 실험계획 ····· 69
Table 3.3.32 배합표 1m^3 (25-24-150) ····· 70
Table 3.3.33 슬럼프 및 공기량 시험 결과 ····· 70
Table 3.3.34 SBFS 원천소재의 혼합 비율에 따른 재령별 압축강도 결과 ····· 71
Table 3.3.35 실험계획 ····· 72
Table 3.3.36 배합표 1m^3 (25-24-150) ····· 73
Table 3.3.37 슬럼프 및 공기량 시험 결과 ····· 73
Table 3.3.38 SBFS 원천소재의 치환율에 따른 재령별 압축강도 결과 ····· 74
Table 3.3.39 실험계획 ····· 75
Table 3.3.40 배합표 1m^3 (25-24-150) ····· 75
Table 3.3.41 슬럼프 및 공기량 시험 결과 ····· 75
Table 3.3.42 재령별 압축강도 결과 ····· 76
Table 3.3.43 시료별 화학적 조성 성분 ····· 78
Table 3.3.44 수용성 및 산가용성의 농도를 측정값((단위 : mg/kg) ····· 78
Table 3.3.45 주요 실험 내용 ····· 80
Table 3.3.46 실험 항목 ····· 82
Table 3.3.47 Pilot 소성 장비를 통한 소성온도별 모르타르 배합표 ····· 83
Table 3.3.48 소성온도별(4:3:3) 압축강도 측정결과 ····· 84
Table 3.3.49 Pilot 소성 장비를 통한 소성온도별 모르타르 배합표 ····· 84
Table 3.3.50 소성온도별(4:4:2) 압축강도 측정결과 ····· 85
Table 3.3.51 기능성 분쇄조제 치환율별 모르타르 배합표 ····· 86
Table 3.3.52 기능성 분쇄조제 적용 압축강도 결과 ····· 86
Table 3.3.53 SBFS 적용 모르타르 배합표 ····· 87
Table 3.3.54 SBFS 적용 압축강도 결과 ····· 88
Table 3.3.55 SBFS 적용 플로우 측정결과 ····· 89

Table 3.3.56 SBFS 적용 모르타르 배합표 (5℃) ····· 89
Table 3.3.57 SBFS 적용 모르타르 압축강도 (5℃) ····· 90
Table 3.3.58 혼화제 선정 실험계획 ····· 91
Table 3.3.59 각 혼화제 종류에 따른 SBFS 적용 모르타르 배합표 ····· 91
Table 3.3.60 각 혼화제 종류에 따른 SBFS 적용 모르타르의 Flow값 (mm) ····· 92
Table 3.3.61 각 혼화제 종류에 따른 SBFS 적용 모르타르의 압축강도 측정결과 ····· 92
Table 3.3.62 원재료 화학조성(%) ····· 95
Table 3.3.63 소성 온도에 따른 원재료의 화학조성 변화(%) ····· 95
Table 3.3.64 원천소재의 소성온도별 화학조성 변화(%) ····· 95
Table 3.3.65 SBFS의 화학조성 변화(%) ····· 96
Table 3.3.66 모르타르 배합 및 압축강도와 활성도 지수 ····· 97
Table 3.3.67 소성온도에 따른 SBFS의 Free- lime 측정 ····· 101
Table 3.3.68 원천소재의 메커니즘 ····· 103
Table 3.3.69 연구의 최종 목표 ····· 106
Table 3.3.70 주요 실험 내용 ····· 106
Table 3.3.71 실험 항목 ····· 107
Table 3.3.72 실험계획 ····· 108
Table 3.3.73 실험 배합사항 ····· 109
Table 3.3.74 실험 목표성능 ····· 109
Table 3.3.75 슬럼프 및 공기량 시험결과 - Ⅰ ····· 110
Table 3.3.76 슬럼프 및 공기량 시험결과 - Ⅱ ····· 110
Table 3.3.77 소성온도별(4:3:3) 압축강도 측정결과 ····· 111
Table 3.3.78 실험계획 ····· 112
Table 3.3.79 실험 배합사항 ····· 112
Table 3.3.80 실험 방법 및 목표성능 ····· 113
Table 3.3.81 굳지않은 콘크리트 실험결과- Ⅰ ····· 113
Table 3.3.82 굳지않은 콘크리트 실험결과- Ⅱ ····· 114
Table 3.3.83 재령별 압축강도 시험결과 ····· 115
Table 3.3.84 실험 계획 ····· 116
Table 3.3.85 실험 배합사항 ····· 117
Table 3.3.86 실험 방법 및 수준 ····· 117
Table 3.3.87 굳지않은 콘크리트 실험결과- Ⅰ ····· 118
Table 3.3.88 굳지않은 콘크리트 실험결과- Ⅱ ····· 118
Table 3.3.89 굳지않은 콘크리트 실험결과- Ⅲ ····· 118
Table 3.3.90 굳지않은 콘크리트 실험결과- Ⅳ ····· 119
Table 3.3.91 재령별 압축강도 시험결과 ····· 120
Table 3.3.92 도출된 최적 배합사항 ····· 124
Table 3.3.93 규격별 검증실험 계획 ····· 124
Table 3.3.94 규격별 검증실험 배합사항 ····· 125
Table 3.3.95 검증실험 방법 ····· 125

Table 3.3.96 굳지않은 콘크리트 실험결과 ····· 126
Table 3.3.97 압축강도 시험결과 ····· 126
Table 3.3.98 M레미콘 B/P을 통한 Mock-up 실험계획 ····· 129
Table 3.3.99 레미콘 B/P을 통한 Mock-up 배합사항 ····· 130
Table 3.3.100 Rotary Kiln Pilot 실험 계획 ····· 130
Table 3.3.101 Rotary Kiln Pilot 실험 배합사항 ····· 130
Table 3.3.102 Mock-up 실험 방법 및 내용 ····· 131
Table 3.3.103 굳지않은 콘크리트 실험결과 ····· 134
Table 3.3.104 측정구간별 최고온도 및 도달시간 ····· 135
Table 3.3.105 Mock-up 압축강도 시험결과 (몰드) ····· 136
Table 3.3.106 Mock-up 압축강도 시험결과 (코어) ····· 138
Table 3.3.107 소성수축균열의 총 길이 및 최대균열 폭 ····· 139
Table 3.3.108 탄산화 촉진시험 깊이 결과 ····· 140
Table 3.3.109 전기로 소성 후 강열감량 ····· 146
Table 3.3.110 소성로 운전 및 수행내역 ····· 146
Table 3.3.111 Rotary Kiln에서 생산된 원천소재 XRD분석 ····· 149
Table 3.3.112 실험 방법 ····· 151
Table 3.3.113 굳지않은 콘크리트 실험결과 ····· 152
Table 3.3.114 압축강도 시험결과 ····· 153
Table 3.3.115 GBFS의 생산단계 CO_2 배출량 데이터조사내용 ····· 155
Table 3.3.116 GBFS의 운송단계 CO_2 배출량 평가 ····· 156
Table 3.3.117 GBFS 제조단계 CO_2 배출량 평가 ····· 157
Table 3.3.118 고로슬래그의 CO_2 배출량 평가결과 ····· 158
Table 3.3.119 원천소재의 CO_2 배출량 평가 데이터 조사 ····· 159
Table 3.3.120 원천소재 전 과정 CO_2 배출량 평가결과 ····· 159
Table 3.3.121 SBFS 원재료 생산단계 CO_2 배출량 평가 ····· 159
Table 3.3.122 SBFS 수송단계 CO_2 배출량 데이터 조사 ····· 160
Table 3.3.123 SBFS 제조단계 CO_2 배출량 데이터 조사 ····· 161
Table 3.3.124 SBFS 전 과정 CO_2 배출량 평가결과 ····· 161
Table 3.3.125 GBFS시멘트, SBFS시멘트의 제조 전 단계 CO_2 배출량 평가 결과 ····· 162
Table 3.3.126 GBFS시멘트, SBFS시멘트의 제조단계 CO_2 배출량 평가 결과 ····· 162
Table 3.3.127 GBFS시멘트, SBFS시멘트의 전 과정 CO_2 배출량 평가/시험 결과 ····· 163
Table 3.3.128 CO_2 배출 원단위 및 근거 ····· 164
Table 3.3.129 운송수단 종류 및 유류 Database ····· 165
Table 3.3.130 에너지원 CO_2 배출 원단위 및 근거 ····· 166
Table 3.3.131 SBFS 혼입 콘크리트 CO_2 배출량 및 경제성 평가/시험 대상 선정 ····· 167
Table 3.3.132 평가대상 콘크리트 원재료 생산단계 CO_2 배출량 및 경제성 평가결과 ····· 168
Table 3.3.133 평가대상 콘크리트 원재료 운송단계 CO_2 배출량 및 경제성 평가결과 ····· 169
Table 3.3.134 SBFS 혼입 콘크리트 전 과정 CO_2 배출량 및 경제성 평가결과 ····· 169
Table 3.3.135 평가대상 콘크리트 원재료 생산단계 CO_2 배출량 및 경제성 평가결과 ····· 171

Table 3.3.136 SBFS 혼입 콘크리트 전 과정 CO_2 배출량 및 경제성 평가결과 ····· 174
Table 3.3.137 평가/시험대상 재료 Case별 분류 ····· 176
Table 3.3.138 평가/시험대상 재료 ····· 178
Table 3.3.139 평가/시험 대상 건축물 개요 ····· 179
Table 3.3.140 평가대상 건축물 물량산출 결과 ····· 179
Table 3.3.141 주요자재 CO_2 배출 원단위 ····· 181
Table 3.4.1 원천소재 제조용 Pilot 제원 ····· 186
Table 3.4.2 원천소재 제조용 Pilot 시작품 추진내용 ····· 186
Table 3.4.3 티탄석고의 화학 성분 ····· 193
Table 3.4.4 정수오니의 화학 성분 ····· 194
Table 3.4.5 석회석의 화학 성분 ····· 194
Table 3.4.6 클링커 소성과정 ····· 194
Table 3.4.7 원천소재 배합별(1:1:1) 소성후 클링커 화학성분(XRF분석)····· 196
Table 3.4.8 원천소재 배합별(4:3:3) 소성후 클링커 화학성분(XRF분석) ····· 196

- LIST OF FIGURE -

Fig. 1.1.1 저탄소 건설재료 개발 필요성 ····· 1
Fig. 1.1.2 압축강도비교 ····· 2
Fig. 1.1.3 중성화 침투깊이 ····· 3
Fig. 2.1.1 2011년 고로슬래그발생량(철강협회) ····· 8
Fig. 3.2.1 사용재료에 따른 분체의 혼합비율(%) ····· 22
Fig. 3.2.2 CSA계 사용재료에 따른 압축강도 (1일, 3일) ····· 24
Fig. 3.2.3 CSA계 사용재료 따른 활성도 지수 (1일, 3일) ····· 24
Fig. 3.2.4 CSA계 분체 종류 및 재령 변화에 따른 SEM 관측 사진 (× 3,000배) ····· 25
Fig. 3.2.5 CSA계 분체 종류에 따른 XRD 측정결과 (1일) ····· 26
Fig. 3.2.6 CSA계 분체 종류에 따른 XRD 측정결과 (3일) ····· 26
Fig. 3.2.7 CSA계 분체에 따른 TG-DTA 측정결과 (1일) ····· 28
Fig. 3.2.8 CSA계 분체에 따른 TG-DTA 측정결과 (3일) ····· 28
Fig. 3.2.9 CSA계 분체종류에 따른 재령별 수산화칼슘의 질량함유율(%) ····· 31
Fig. 3.2.10 Series Ⅰ 재령 1, 3일 압축강도 (GBFS 자극) ····· 33
Fig. 3.2.11 SeriesⅡ재령 1, 3일 압축강도 (OPC 자극) ····· 34
Fig. 3.2.12 SeriesⅢ 재령 1, 3일 압축강도 및 활성도지수 (OPC+GBFS 자극) ····· 35
Fig. 3.2.13 각 배합별 모르타르의 타격 Flow값 (mm) SeriesⅢ ····· 36
Fig. 3.2.14 SO_3 함유량에 따른 압축강도 및 활성도지수 결과 ····· 39
Fig. 3.3.1 이산화티타늄 제조공정 과정 ····· 44
Fig. 3.3.2 티탄석고의 저장현황 광경 ····· 45
Fig. 3.3.3 정수오니 발생 과정 ····· 45
Fig. 3.3.4 시멘트 제조의 따른 석회석의 화학조성 변화 ····· 47
Fig. 3.3.5 클링커 소성과정 ····· 47
Fig. 3.3.6 티탄석고 단독 시료 XRD (소성 후) ····· 49
Fig. 3.3.7 정수오니 단독 시료 XRD (소성 후) ····· 50
Fig. 3.3.8 원천소재(SBFS)의 혼합시료의 XRD (소성 후) ····· 51
Fig. 3.3.9 소성된 알칼리성 무기계 자극제의 혼입율에 따른 재령별 압축강도 ····· 53
Fig. 3.3.10 소성된 알칼리성 무기계 자극제의 혼입율에 따른 재령별 압축강도 ····· 54
Fig .3.3.11 소성된 알칼리성 무기계 자극제의 혼입율에 따른 재령별 압축강도 ····· 56
Fig. 3.3.12 소성된 알칼리성 무기계 자극제의 혼입율에 따른 재령별 압축강도 ····· 58
Fig. 3.3.13 재령별 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일) ····· 59
Fig. 3.3.14 재령별 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일) ····· 60
Fig. 3.3.15 실험진행 과정 ····· 62
Fig. 3.3.16 재령별 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일) ····· 63
Fig. 3.3.17 실험진행 과정 ····· 63
Fig. 3.3.18 OPC 및 SBFS 적용 1.3,7일 재령별 XRD 측정결과 ····· 64

Fig. 3.3.19 시멘트페이스별 $Ca(OH)_2$ C_3S 1,3일 XRD 측정결과 ····· 64
Fig. 3.3.20 SBFS 시멘트 페이스트의 SEM 측정결과 (1일, 3일) x 10,000배 ····· 65
Fig. 3.3.21 슬럼프 및 공기량 시험 결과 ····· 68
Fig. 3.3.22 재령별 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일) ····· 69
Fig. 3.3.23 슬럼프 및 공기량 시험 결과 ····· 70
Fig. 3.3.24 그룹1,2 재령별 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일, 14일, 28일) ····· 71
Fig. 3.3.25 그룹3 재령별 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일, 14일, 28일)····· 72
Fig. 3.3.26 슬럼프 및 공기량 시험 결과 ····· 73
Fig. 3.3.27 재령별 압축강도 및 활성도 지수 (1일, 3일, 7일) ····· 74
Fig. 3.3.28 슬럼프 및 공기량 시험 결과 ····· 75
Fig. 3.3.29 재령별 압축강도 및 활성도 지수 (1일, 3일, 7일) ····· 76
Fig. 3.3.30 수용성 Cr(VI)이온의 농도 실험 결과 ····· 78
Fig. 3.3.31 Pilot 소성온도별 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일) ····· 84
Fig. 3.3.32 Pilot 소성온도별 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일) ····· 85
Fig. 3.3.33 Pilot 소성온도별 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일) ····· 87
Fig. 3.3.34 SBFS 적용 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일, 14일, 28일) ····· 88
Fig. 3.3.35 SBFS 적용 플로우 측정결과 그래프 ····· 89
Fig. 3.3.36 SBFS 적용 압축강도 (5℃) 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일) ····· 90
Fig. 3.3.37 각 혼화제 종류에 따른 SBFS 적용 압축강도 및 활성도지수 (1일) ····· 92
Fig. 3.3.38 각 혼화제 종류에 따른 SBFS 적용 압축강도 및 활성도지수 (3일) ····· 93
Fig. 3.3.39 각 혼화제 종류에 따른 SBFS 적용 압축강도 및 활성도지수 (7일) ····· 93
Fig. 3.3.40 소성온도에 따른 원천소재의 화학조성 변화(%) ····· 96
Fig. 3.3.41 소성온도에 따른 SBFS의 화학조성 변화(%) ····· 96
Fig. 3.3.42 소성온도에 따른 SBFS의 재령별 압축강도(MPa) ····· 97
Fig. 3.3.43 원천소재의 소성온도에 따른 Flow 측정값(mm) ····· 98
Fig. 3.3.44 SBFS의 소성온도에 따른 SBFS의 활성도 지수(%) ····· 98
Fig. 3.3.45 소성온도에 따른 원재료의 결정구조 정량분석(티탄석고, 정수오니, 석회석) ····· 99
Fig. 3.3.46 소성온도에 따른 원천소재의 결정구조 정량분석 ····· 99
Fig. 3.3.47 소성온도에 따른 SBFS의 재령별 결정구조 정량분석(1일) ····· 100
Fig. 3.3.48 소성온도에 따른 SBFS의 재령별 결정구조 정량분석(3일) ····· 100
Fig. 3.3.49 소성온도에 따른 SBFS의 Free-lime 측정 값 ····· 101
Fig. 3.3.50 소성온도에 따른 SBFS의 재령별 측정결과 (× 2,000배) ····· 102
Fig. 3.3.51 SBFS의 수화반응 모식도 ····· 103
Fig. 3.3.52 실험 전경 ····· 109
Fig. 3.3.53 혼화제 첨가에 따른 슬럼프 및 공기량 시험결과 ····· 110
Fig. 3.3.54 재령별 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일) ····· 111
Fig. 3.3.55 굳지않은 콘크리트 실험결과 ····· 114
Fig. 3.3.56 재령별 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일) ····· 115
Fig. 3.3.57 슬럼프 및 공기량 시험결과 ····· 119
Fig. 3.3.58 재령별 압축강도 (1일, 3일, 7일, 28일) ····· 120

Fig. 3.3.59 설계강도 21 MPa의 회귀분석 결과 ····· 122
Fig. 3.3.60 설계강도 24 MPa의 회귀분석 결과 ····· 123
Fig. 3.3.61 설계강도 27 MPa의 회귀분석 결과 ····· 123
Fig. 3.3.62 설계강도 30 MPa의 회귀분석 결과 ····· 123
Fig. 3.3.63 슬럼프 및 공기량 시험결과 ····· 126
Fig. 3.3.64 재령별 압축강도 (1일, 3일, 7일, 28일) ····· 127
Fig. 3.3.65 Mock-up 실험 및 내구성 실험 전경 사진 ····· 132
Fig. 3.3.66 Mock-up 부재 형상 및 부재 ····· 132
Fig. 3.3.67 슬럼프 및 공기량 시험결과 ····· 134
Fig. 3.3.68 구간별 단열온도상승 시험결과 (Mock-up부재) ····· 136
Fig. 3.3.69 재령별 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일, 28일) ····· 137
Fig. 3.3.70 Mock-up 부재 코어채취 전경 ····· 137
Fig. 3.3.71 재령별 Mock-up 부재의 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일, 28일) ····· 138
Fig. 3.3.72 소성수축균열 시험결과 ····· 139
Fig. 3.3.73 소성수축균열 시험 전경 ····· 139
Fig. 3.3.74 건조수축 길이변화 시험결과 ····· 140
Fig. 3.3.75 탄산화 촉진시험 결과 ····· 141
Fig. 3.3.76 탄산화 촉진시험 측정사진 ····· 141
Fig. 3.3.77 한국석회석신소재연구소 시험생산용 rotary kiln ····· 144
Fig. 3.3.78 전기로 소성 XRD분석 ····· 145
Fig. 3.3.79 소성로 온도별 추이도 ····· 146
Fig. 3.3.80 양산조건 운영 로내 환경 및 원료성상 (Bulk and Powder 형태) ····· 148
Fig. 3.3.81 소성 차수별 XRD ····· 149
Fig. 3.3.82 Mock-up 부재의 형상 크기 및 실부재 ····· 150
Fig. 3.3.83 실험전경 ····· 151
Fig. 3.3.84 굳지않은 콘크리트 실험결과 ····· 152
Fig. 3.3.85 압축강도 시험결과 (1일, 3일, 7일, 28일) ····· 153
Fig. 3.3.86 SBFS 혼입 콘크리트 평가업체 및 대상제품 ····· 168
Fig. 3.3.87 Case별 CO_2 배출량 평가결과 비교 ····· 170
Fig. 3.3.88 Case별 경제성 평가결과 비교 ····· 170
Fig. 3.3.89 Smart 고로슬래그미분말(SBFS) 생산공정 흐름도 ····· 178
Fig. 3.4.1소성을 통한 광물조성의 변화 ····· 185
Fig. 3.4.2시멘트 생산 원리를 이용한 시작품으로 소성로 부문을 이용한 장치 ····· 187
Fig. 3.4.3 원천소재Pilot 킬른 시작품 및 클링커 사진 ····· 195
Fig. 3.4.4 SBFS 최적 조성 연구 (SEM) X 10,000배 ····· 196
Fig. 3.4.5 수산화칼슘 EDAX ····· 197
Fig. 3.4.6 OPC 및 GBFS 수화 모식도 ····· 198
Fig. 5.1.1 Smart 고로슬래그미분말 제조 과정 ····· 228

제 1장 연구개발 개요

최근 이산화탄소로 대표되는 온실효과 가스가 지구온난화의 주요한 원인으로 지적되고 있다. 이와 관련하여 매년 발표되는 '전 세계 이산화탄소 배출경향(Trends in global CO_2 emissions)'에서는 전 세계의 이산화탄소 배출량이 약 340억톤으로 2011년에 3%가 증가하였으며 이는 지난 10년간의 평균 증가량인 2.7%를 초과한 것으로 보고되고 있다. 특히 시멘트 클링커 생산공정으로부터 기인한 이산화탄소의 배출량은 6% 증가하였다고 발표하였다. 즉 세계 시멘트 산업은 현재 최대 규모의 이산화탄소 배출분야 중 하나로써 매년 시멘트 생산량이 증가함에 따라 사람이 만들어 내는 전체 배출량의 5~6%를 차지하고 있다. 우리나라에서도 범 정부차원에서 기후변화 대응 및 환경오염 저감을 위한 '저탄소 녹색성장'을 국가 아젠다로 추진하기 위하여 대통령 직속 '녹색성장위원회'를 설립하고, 2010년 4월 '저탄소 녹색성장기본법'을 제정, 운용하고 있으며 전 산업의 약 42%에 해당되는 건설산업분야의 이산화탄소 배출량을 저감하기 위하여 국토교통부에서는 2011년 건설기술혁신 사업으로 「탄소저감형 건설재료 기술개발 연구단」을 발족하여 탄소저감형 건설산업을 위한 기반구축과 R&D에 역점을 두고 있다.

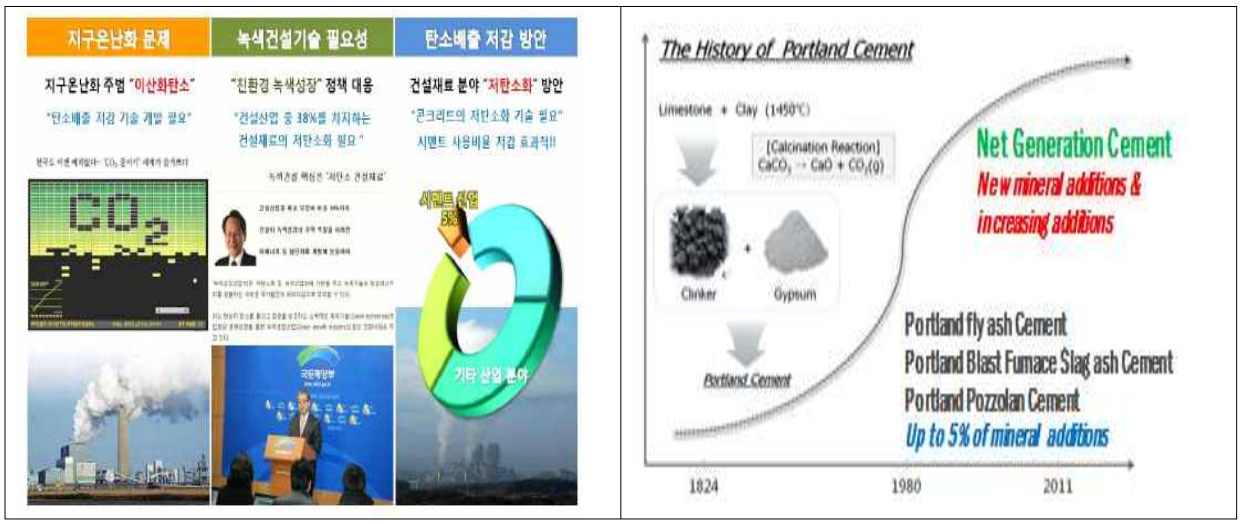


Fig. 1.1.1 저탄소 건설재료 개발 필요성

한편 시멘트 제조에서의 이산화탄소 발생은 원료인 석회석의 탈탄산과 화석연료의 연소에 의해 대부분으로 발생되고 있으며 이러한 이산화탄소의 발생을 감소시키기 위해서 소성온도를 낮추거나 소성의 열효율을 높이는 방안과 함께 산업부산물을 적극 이용함으로써 결과적으로 시멘트(클링커)의 양을 줄이는 방안이 가장 실효적인 방안으로 제시되고 있다. 콘크리트용 혼화재로 주로 이용되는 고로슬래그(ground granulated blast-furnace) 및 플라이애쉬(fly ash)는 소성과정을 거친 산업부산물로써 원자재 생산에서 화학적 반응에 의한 이산화탄소의 배출양은 없으며 분말화 공정 및 포집과정에서 소요되는 에너지 사용에 의한 이산화

탄소의 양은 매우 낮은 것으로 보고되고 있다. 정부에서도 「자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률」에 의거 「철강슬래그 및 석탄재 배출사업자의 재활용지침(환경부, 지식경제부 고시)」에서 슬래그의 목표 재활용은 95%, 석탄재는 75%로 규정하여 슬래그와 석탄재의 재활용 촉진 의무화를 추진하고 있다. 이러한 콘크리트용 혼화재료에 대한 연구는 1980년부터 국내외에서 활발히 진행되어져 왔으며 최근에는 지구온난화 문제와 맞물려 그 사용량 또한 날로 증가하고 있다. 또한 이산화탄소의 발생량을 획기적으로 저감시킨 비소성 무기계 결합재, carbon negative cement 등이 속속 개발되고 있다.

이와 같이 혼화재를 개발하여 사용함으로 인한 시멘트 사용량을 저감한 콘크리트는 수화열 저감, 수축저감, 장기강도 확보 및 염해저항성 향상 등이 가능하지만, 시멘트 사용량이 감소함에 따라 Fig 1.1.2 Fig 1.1.3 에 나타낸 바와 같이 초기강도가 저하하고, 알칼리성이 낮아 중성화 저항성이 저하된다는 문제점이 있어 현장 실용화에 제약이 있는 것으로 보고되고 있다.

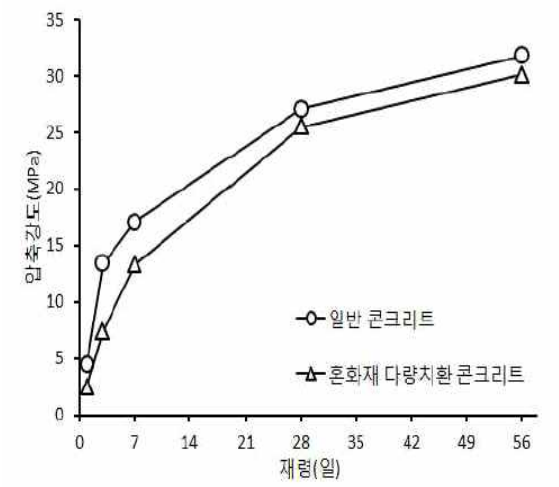


Fig. 1.1.2 압축강도비교

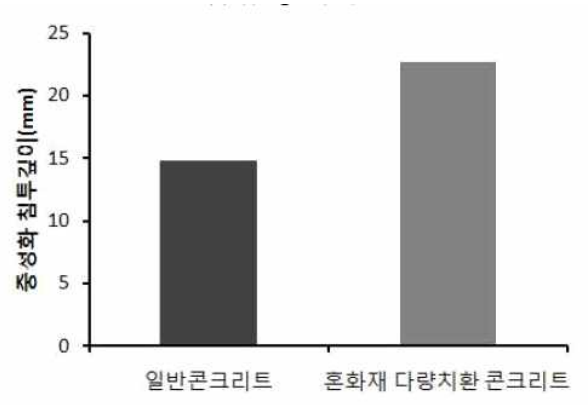


Fig.1.1.3 중성화 침투깊이

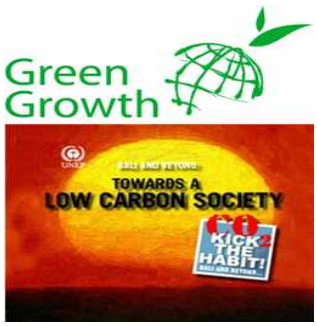
이에 따라 탄소배출 저감 녹색건설기술로써 혼화재를 다량 사용한 저탄소 콘크리트의 현장 실용화를 위해서는 초기강도 및 중성화 저항성을 개선할 수 있는 기술 개발이 필요한 상황에서 초기강도를 개선시킨 탄소배출 저감형 콘크리트의 개발을 통하여 원가절감 및 이산화탄소 배출에 의한 환경오염 문제를 동시에 해결할 수 있을 것으로 예상된다.

이에 대한 대응방안으로 고로슬래그미분말을 활용한 저탄소 콘크리트 개발을 통한 사회적 요구에 부합되는 친환경 건설재료 개발을 통하여 건설현장에서 시멘트 사용량 저감에 대한 막연한 불안감 및 불신을 기술적 데이터 등을 통해 해소하고 녹색건설 기술로 활용이 증대될 수 있을 것으로 기대된다.

제 1절 연구개발의 필요성

■ 지구온난화와 전 세계의 『저탄소 녹색성장』 체재 돌입

21세기는 산업전반에 걸쳐 이산화탄소 저감을 목표로 하는 국가 차원의 지속가능기술 개발 (Sustainable Development) 확립 및 대처가 모든 산업의 전제가 되고 있음. 특히, 세계는 개발을 지속하면서도 생태적 수용력을 확대시키기 위해 경제·사회와 환경을 동시에 추구하는 지속가능개발의 개념에 근거한 저탄소, 녹색성장으로 산업을 개편하고 국가 성장 동력으로 발전시키고 있음.



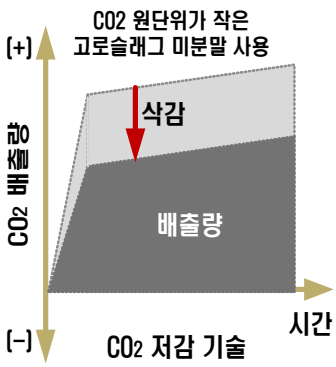
■ 우리나라 정부의『저탄소 녹색성장』대책

우리나라는 '녹색기술(Green Technology)' 개발을 국가 경제의 새로운 성장 패러다임으로 설정하고, 녹색기술, 그린에너지, 지속가능 산업에 막대한 R&D비용 투자. 특히, 우리나라는 CO_2 감축잠재량 분석 결과와 국제사회 요구수준 등을 감안하여 3개의 시나리오를 제시하고, 이중 EU에서 요구하는 개도국 최대 감축수준인 BAU 대비 30% 감축으로 중기 목표 설정. 이에 따라, 2010년 4월 저탄소 녹색성장기본법을 제정하고 온실가스 감축목표를 핵심지표로 한 저탄소 녹색성장 추진에 "09~13" 년간 총 107조원 수준(GDP 2%)을 투입 계획.



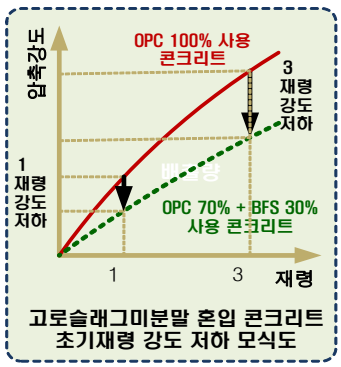
■ 고로슬래그미분말과 같은 CO_2 원단위가 작은 원재료 사용에 의한 CO_2 저감 기술 개발 필요

철강 산업에서 발생하는 고로슬래그를 급냉시켜 미분말화한 고로슬래그미분말은 CO_2 배출원단위가 약 450 CO_2-kg/ton으로서 보통포틀랜드시멘트(OPC)의 CO_2 배출원단위가 약 800 CO_2-kg/ton인 점을 감안하면, 약 1/2의 CO_2 배출량이 적은 재료이므로 고로슬래그미분말을 콘크리트용 혼화재로서 사용하거나 고로슬래그시멘트로 사용한다면 시멘트·콘크리트산업에서 발생하는 CO_2를 대폭 저감시킬 수 있음.



■ 고로슬래그미분말 혼입 콘크리트의 초기재령 압축강도 향상 기술 개발 중요성

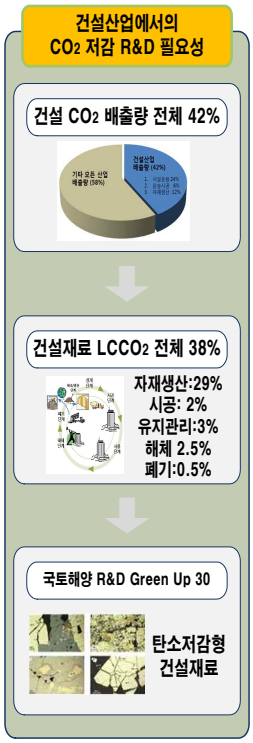
고로슬래그미분말 혼입 콘크리트(GBFS 10~30% 질량 치환)는 보통포틀랜드시멘트만을 사용한 콘크리트(OPC 100% 사용)와 비교하여 재령 28일 이후에서는 GBFS의 포졸란 반응에 의하여 압축강도가 커지게 되나 재령 1일 및 3일의 초기재령에서는 압축강도가 OPC만을 사용한 콘크리트와 비교하여 약 10~40% 저하되기 때문에 거푸집 탈형 등 초기재령 압축강도가 중요한 건축공사에서는 GBFS를 사용하기에 어려움이 많음.



■ 저탄소 녹색성장을 선도할 녹색 건설재료 개발 중요성

건설 산업은 국내 GDP의 17%를 차지하는 국가 기간산업이나 전체 재료소비의 약 48%, 에너지소비의 40%를 점유하고 있는 대량소비 산업이며, 건설 산업은 모든 CO_2 배출량의 42%, 전 산업폐기물의 30%, 불법 폐기물의 60%를 발생하는 환경 저해 산업으로서 CO_2 저감을 목표한 환경부하 저감 기술개발이 반드시 필요함. 특히, 우리나라는 2030년에 BAU대비 30% CO_2 저감을 위해서는 건설 산업에서의 CO_2 저감 기술 개발이 중요.

건설 산업에서의 탄소저감은 건축물의 라이프사이클에서 40%의 CO_2 발생을 담당하는 건설재료의 CO_2 감축기술 개발이 매우 중요. 이러한, 탄소저감형 건설재료를 개발하기 위해서는 창조적인 아이디어와 함께 건설재료의 전 생애주기에 걸쳐 발생하는 이산화탄소의 발생량을 정량적으로 평가하는 건설재료의 $LCCO_2$ 평가기술이 중요. 특히, $LCCO_2$ 관점에서 대량생산과 경제성을 고려한 건설재료의 개발이 중요. 또한, CO_2 원단위가 적은 건설폐기물, 산업부산물 등의 재사용, 재활용은 CO_2 저감형 건설재료 활용에 의한 직접적 경제효과를 창출할 수 있음.



■ 철근콘크리트 구조체공사의 비용저감 및 공기단축을 위한 고로슬래그미분말 혼입 콘크리트 초기재령 강도 향상 필요

건축공사의 철근콘크리트 구조체 공사에서 콘크리트의 조기강도 확보를 통한 거푸집 탈형시기의 결정은 공기단축 및 경제성 측면에서 매우 중요한 기술임. 특히, 계절별 평균기온을 감안해 볼 때 10월 하순~4월말 까지는 콘크리트의 조기강도발현에 가장 큰 영향을 미치는 것이 양생온도이며, 고로슬래그미분말을 혼입한 경우 양생온도 10도 이하에서는 초기재령(1일, 3일) 압축강도가 OPC 100%를 사용한 콘크리트에 비하여 매우 낮기 때문에 고로슬래그미분말을 혼입한 콘크리트를 사용하기가 매우 어려움.

또한, 현재 건축공사에서는 시방서상에서 측면거푸집 제거시기가 5MPa를 발현한 경우이며, 동해방지를 위해서도 5MPa를 규정하고 있으며, 이문제점을 해결하기 위해 주로 OPC 100%를 사용한 경우, 혼화제(약품)를 활용한 조기강도 향상 연구가 주로 이루어지고 있으나, 고로슬래그미분말과 같은 혼화재료를 사용한 경우에 있어 재령 1일 및 3일의 압축강도 향상을 위한 연구는 거의 전무함. 따라서, 고로슬래그미분말을 건축공사(레미콘 사용량의 70% 차지)에 적극 사용하기 위해서는 재령 1일 및 3일에서의 압축강도가 OPC 100%를 사용한 콘크리트의 압축강도와 비교하여 동등 이상이 되는 연구개발이 매우 절실함.

○ 고로슬래그미분말 치환에 따른 경제성 및 CO_2 저감 효과

▪ 보통포틀랜드시멘트(OPC)만을 사용한 콘크리트에 비해 고로슬래그미분말(GBFS)를 30% 치환한 경우, 2010년 레미콘 출하량으로 산정하면 레미콘 금액으로 약 2047억원 원가저감 효과가 있으며, CO_2 저감량은 약 273만 CO_2-ton/년으로, 1 CO_2-ton을 2만원으로 산정 하면 546억원/년 저감 효과가 있다고 산정됨.

Table 1.2.1 GBFS 치환에 따른 경제성 및 CO_2 저감효과

기호	OPC 100		OPC 90 + BFS 10		OPC 80 + BFS 20		OPC 70 + BFS 30	
BFS 치환율	0%		10%		20%		30%	
Binder 종류	Cement	BFS	Cement	BFS	Cement	BFS	Cement	BFS
사용량 (kg/m³)	350	0	315	35	280	70	245	105
분체 단가(원)	23625	0	21263	1838	18900	3675	16538	5513
Binder 단가(원)	23625		23100		22575		22050	
경제성(%)	100.0		97.8		95.6		93.3	
콘크리트 1m³당 원가 절감(원)	0.0		525.0		1050.0		1575.0	
2010년 레미콘 출하량 대비 원가 절감(원)	0.0 **0원/년**		68,250,000,000 **682억원/년**		136,500,000,000 **1365억원/년**		204,750,000,000 **2047억원/년**	
분체 CO_2 배출량 (CO_2-kg/m³)	280	0	252	21	224	42	196	63
Binder CO_2 배출량 (CO_2-kg/m³)	280		273		266		259	
Binder CO_2 저감량 (%)	100.0		97.5		95.0		92.5	
콘크리트 1m³당 CO_2 저감량(CO_2-kg)	0		7		14		21	
2010년 레미콘 출하량 대비 CO_2 저감량 (CO_2-kg)	0 **0 CO_2-ton/년**		910,000,000 **91만 CO_2-ton/년**		1,820,000,000 **182만 CO_2-ton/년**		2,730,000,000 **273만 CO_2-ton/년**	

- 콘크리트 1m³ 당 시멘트 사용량 : 350kg/m³, 시멘트 1 ton 단가 : 67,500원, BFS 1 ton 단가 : 52,500원
- 2010년 레미콘 출하량 : 1억3000만 m³, 시멘트 1kg당 CO_2 배출량 : 0.8 CO_2-kg, BFS 1kg당 CO_2 배출량 : 0.6 CO_2-kg

○ 아파트 철근콘크리트 구조체 공사기간 단축

■ 아파트 RC 구조체 1층 공사기간은 현재 층당 6일 공정으로 콘크리트 타설 후, Slab 거푸집 까지는 보통 3일이 걸리나, 층당 5일 공정의 경우 2.5일, 층당 4일의 경우 1.5일로서 공기단축을 위해서는 콘크리트의 조기강도 발현(벽체 거푸집 5Mpa 이상, Slab 거푸집 14Mpa 이상)이 가장 중요. 따라서, GBFS 혼입 콘크리트의 경우, 재령 1일, 3일에서 OPC 100%를 사용한 콘크리트 보다 조기강도가 발현되지 않으므로 아파트 RC 구조체 공기단축을 위해서는 GBFS 혼입 콘크리트의 재령 1일, 3일 강도를 OPC 100%이상으로 하는 것이 필수적임.

Table 1.2.2 콘크리트 구조체 공사기간의 예

6D/ cycle	오전	양생/먹메김	WALL철근	WALL 거푸집	SLAB 거푸집	SLAB철근	CON’C 타설	Slab 거푸집 제거 콘크리트 타설 후 3일
	오후	WALL철근	WALL 거푸집	SLAB 거푸집	SLAB 철근	전기/설비 /검측		
5D/ cycle	오전	양생/먹메김	WALL철근	SLAB 거푸집	SLAB 철근	전기/설비/ 검측	Slab 거푸집 제거 콘크리트 타설 후 2.5일	
	오후	WALL철근	WALL 거푸집	SLAB 거푸집	SLAB 철근	CON’C 타설		
4D/ cycle	오전	양생/먹메김	SLAB 거푸집	SLAB 철근	전기/설비/ 검측	Slab 거푸집 제거 콘크리트 타설 후 1.5일		
	오후	WALL철근/ 거푸집	SLAB 거푸집	SLAB 철근	CON’C 타설			

제 2절 연구목표 및 범위

본 기술개발의 목표는 시멘트 자극재, 고로슬래그미분말 자극재 및 저온 환경하 조기강도 발현 첨가재를 개발하여 이를 고로슬래그미분말에 혼입함으로써 조기강도 발현성능과 저온 환경하 초기재령 강도향상 성능을 가지는 『Smart 고로슬래그미분말』의 경제성을 확보하면서 대량생산 할 수 있는 원천소재 기술을 개발함과 동시에 이를 활용한 저탄소 콘크리트를 개발하여 철근콘크리트 구조체 공사에 적용한 경우의 공사비용 저감, 공기단축 및 CO_2 저감 효과를 정량적으로 평가하는 것이다.

1. 연구 목표

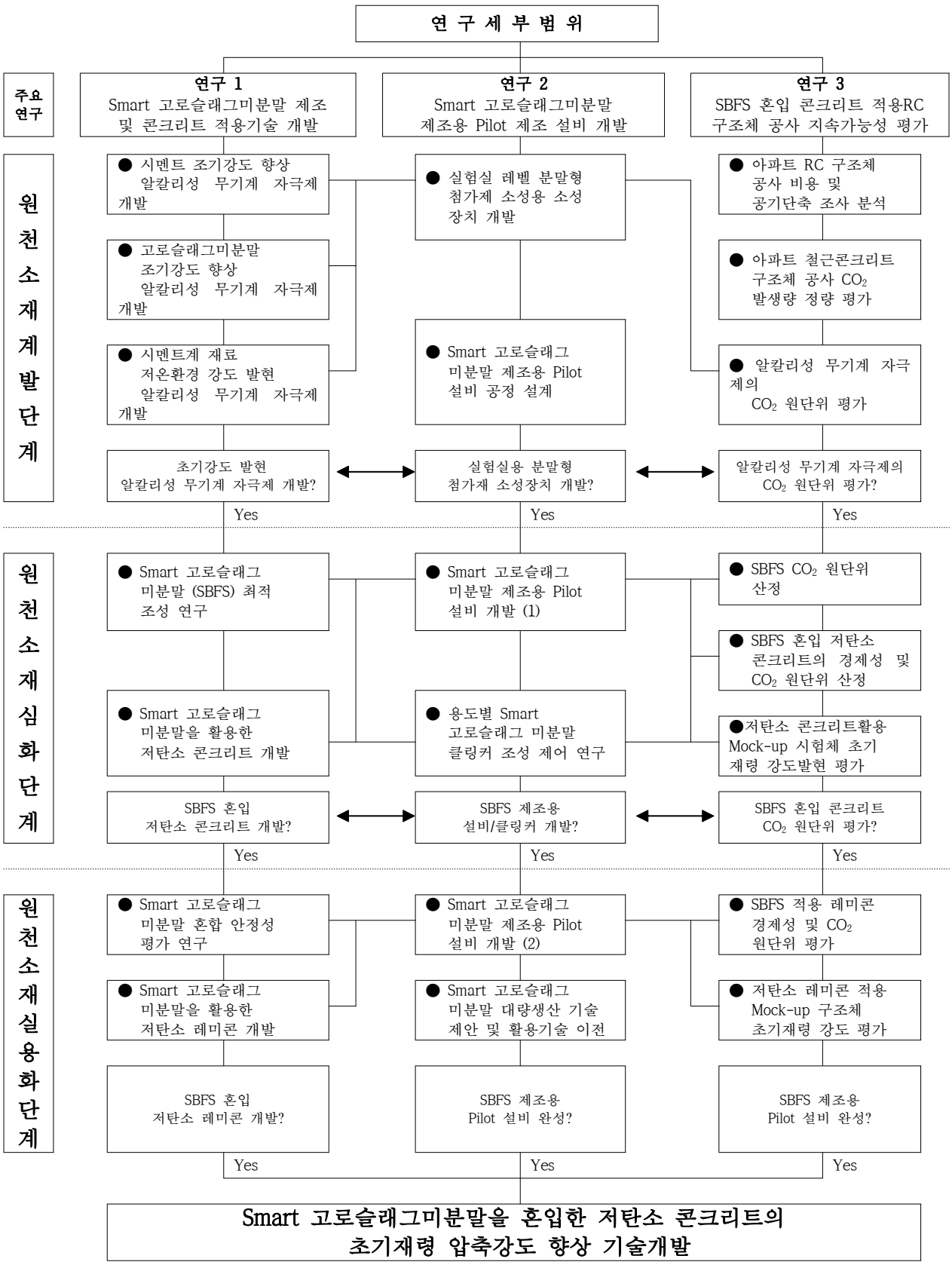
【레미콘 공장 대상 Smart 고로슬래그미분말 치환율 10～30% 범위, 콘크리트 28일 압축강도 21～30MPa 범위, 콘크리트 기중 양생온도 5～20℃ 환경 조건

- OPC 100% 사용 콘크리트 대비 1일, 3일 압축강도 동등 이상
- OPC 100% 사용 콘크리트 대비 레미콘 단가 동등 이하 (경제성 확보)
- OPC 100% 사용 콘크리트 대비 레미콘 CO_2 배출량 약 7% 저감

Smart 고로슬래그미분말 혼입 저탄소 콘크리트를 적용한 철근콘크리트 구조체 공사를 대상으로 공사비용 저감, 공기단축 및 CO_2 저감 효과 정량 평가】

과제명	목표 구분	최종목표	세부목표
Smart 고로슬래그미분말을 혼입한 저탄소콘크리트의 초기재령 압축강도 향상기술 개발	기술 개발	콘크리트의 초기재령(1일, 3일) 및 저온 환경(5～20℃) 강도 향상을 목표로 하는 Smart 고로슬래그미분말(SBFS) 원천소재 개발 및 이를 활용한 저탄소 콘크리트 개발과 레미콘 실용화	▪ 시멘트 및 고로슬래그미분말 조기강도 향상용 알칼리성 무기계 자극제 제조 원천 기술 ▪ 시멘트계 재료 저온 환경 강도발현용 알칼리성 무기계 자극제 제조 원천 기술 ▪ Smart 고로슬래그미분말을 활용한 저탄소 콘크리트 제조 기술 및 레미콘 활용 기술 (특허 및 기술 이전)
	기업 지원	Smart 고로슬래그미분말(SBFS) 제조용 Pilot 설비 개발 및 SBFS 대량 생산을 위한 기반 구축	▪ Smart 고로슬래그미분말 제조용 Pilot 장치 ▪ Smart 고로슬래그미분말 대량생산을 위한 기술 제안 및 SBFS 활용 기술 이전
	파급 효과	Smart 고로슬래그미분말 혼입 저탄소 콘크리트를 적용한 철근콘크리트 아파트 구조체 공사의 지속가능성 정량 평가	▪ Smart 고로슬래그미분말의 CO_2 원단위 산정 ▪ Smart 고로슬래그미분말 적용 저탄소 콘크리트 및 레디 믹스트 콘크리트의 경제성 및 CO_2 원단위 산정 ▪ Smart 고로슬래그미분말 혼 입 저탄소 콘크리트 적용 아파트 철근콘크리트 구조체 공사의 비용 저감, 공기 단축 및 CO_2 저감 효과 정량 평가

2. 연구 범위


연 구 세 부 범 위
주요 연구
연구 1
Smart 고로슬래그미분말 제조 및 콘크리트 적용기술 개발
연구 2
Smart 고로슬래그미분말 제조용 Pilot 제조 설비 개발
연구 3
SBFS 혼입 콘크리트 적용RC 구조체 공사 지속가능성 평가
원천소재계발단계
● 시멘트 조기강도 향상 알칼리성 무기계 자극제 개발
● 고로슬래그미분말 조기강도 향상 알칼리성 무기계 자극제 개발
● 시멘트계 재료 저온환경 강도 발현 알칼리성 무기계 자극제 개발
초기강도 발현 알칼리성 무기계 자극제 개발?
● 실험실 레벨 분말형 첨가제 소성용 소성 장치 개발
● Smart 고로슬래그 미분말 제조용 Pilot 설비 공정 설계
실험실용 분말형 첨가재 소성장치 개발?
● 아파트 RC 구조체 공사 비용 및 공기단축 조사 분석
● 아파트 철근콘크리트 구조체 공사 CO_2 발생량 정량 평가
● 알칼리성 무기계 자극제의 CO_2 원단위 평가
알칼리성 무기계 자극제의 CO_2 원단위 평가?
Yes
Yes
Yes
원천소재심화단계
● Smart 고로슬래그 미분말 (SBFS) 최적 조성 연구
● Smart 고로슬래그 미분말을 활용한 저탄소 콘크리트 개발
SBFS 혼입 저탄소 콘크리트 개발?
● Smart 고로슬래그 미분말 제조용 Pilot 설비 개발 (1)
● 용도별 Smart 고로슬래그 미분말 클링커 조성 제어 연구
SBFS 제조용 설비/클링커 개발?
● SBFS CO_2 원단위 산정
● SBFS 혼입 저탄소 콘크리트의 경제성 및 CO_2 원단위 산정
●저탄소 콘크리트활용 Mock-up 시험체 초기 재령 강도발현 평가
SBFS 혼입 콘크리트 CO_2 원단위 평가?
Yes
Yes
Yes
원천소재실용화단계
● Smart 고로슬래그 미분말 혼합 안정성 평가 연구
● Smart 고로슬래그 미분말을 활용한 저탄소 레미콘 개발
SBFS 혼입 저탄소 레미콘 개발?
● Smart 고로슬래그 미분말 제조용 Pilot 설비 개발 (2)
● Smart 고로슬래그 미분말 대량생산 기술 제안 및 활용기술 이전
SBFS 제조용 Pilot 설비 완성?
● SBFS 적용 레미콘 경제성 및 CO_2 원단위 평가
● 저탄소 레미콘 적용 Mock-up 구조체 초기재령 강도 평가
SBFS 제조용 Pilot 설비 완성?
Yes
Yes
Yes
Smart 고로슬래그미분말을 혼입한 저탄소 콘크리트의 초기재령 압축강도 향상 기술개발

제 2장 국내외 기술개발 현황

제 1절 국내외 관련기술 및 산업동향

1. 국내 고로슬래그 산업동향

최근 온실가스에 의한 지구온난화 및 천연자원 고갈 등의 환경문제가 활발히 논의 되고 있는 가운데 CO_2 발생의 주범인 시멘트 제조 및 콘크리트 제조, 콘크리트 타설까지의 CO_2 배출량이 전체 우리나라 산업의 약 10% 정도 발생된다는 점을 감안한 현실에서 최근 시멘트 업계에서는 산업 부산물인 고로슬래그의 재활용이 크게 부각되고 있으며, 이중 고로슬래그 미분말은 시멘트 대비 가격이 매우 저렴하여 시멘트 콘크리트용 혼화재로 확대 적용되고 있고 콘크리트 생산업체는 원가를 크게 절감 할 수 있어 최근 수도권의 고로슬래그 미분말 사용량이 증가되고 있는 추세임. 이는 향후 고로슬래그미분말을 콘크리트 1, 2차 제품 제조용 시멘트 대체제로의 활용성의 가치가 점진적으로 확대 요구됨에 따라 최근 업계·학계에서는 활발히 연구과제로 진행되고 있음.

가. 국내 고로슬래그 생산 현황

고로슬래그는 철강공정에서 발생되는 대표적인 부산물로 우리나라의 고로슬래그 발생량은 연간 1,390만톤 수준이며 70% 정도가 시멘트 재료로 활용되고 있다. 고로슬래그의 발생량은 점차 증가되는 추세에 있으며, 이에 발생량 증대에 맞추어 신규 용도를 개발하는 한편 고로슬래그의 장점을 극대화하여 부가가치를 높이기 위한 연구개발이 꾸준히 진행되었다. 최근에는 알칼리 자극재를 이용하여 시멘트 내 고로슬래그의 활용량을 증가시키고 무 시멘트 콘크리트를 제조하는 연구가 진행되는 한편 콘크리트용 골재로 활용하기 위한 시도도 꾸준히 이어지고 있다. 고로슬래그는 고온의 용광로에서 형성되어 환경호르몬, 다이옥신과 같은 유해물질이 없고 크롬, 납 등 유해중금속이 용출되지 않는 자원 순환형 재료라 할 수 있다. 또한 천연자원을 보전하는 동시에 에너지, CO_2를 저감할 수 있는 환경친화형 재료로써 2010년 이후 당진 제철소 준공이후 서평택을 중심으로 고로슬래그미분말, 고로슬래그시멘트 준공으로 향후 증가 할 것으로 나타남.

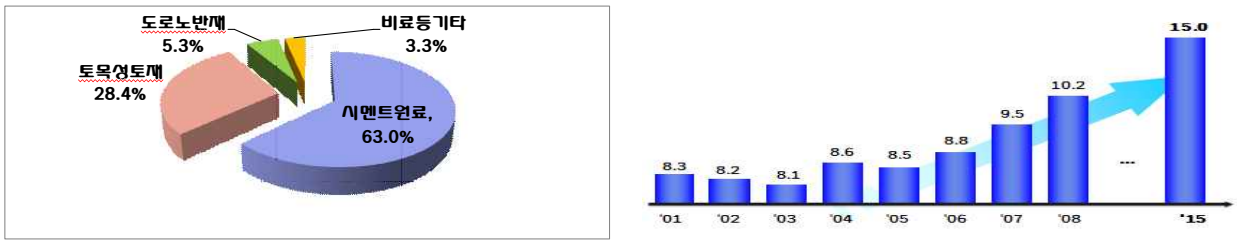


Fig. 2.1.1 2011년 고로슬래그발생량(철강협회)

나. 고로슬래그미분말, 고로슬래그시멘트 생산 업체 현황

■ 한국표준협회 제품인증 현황을 기준으로 2014년 7월 현재 KS F 2563 (콘크리트용 고로슬래그미분말)인증 획득 업체는 28개 업체로 전체 연간 총 생산능력으로는 1,200만톤으로 추정되며, KS L 5210 (고로슬래그시멘트) 인증 업체는 24개 업체로 연간 총 생산능력은 2,500만톤으로 추정 할 수 있음.(일부 중소기업 생산능력 제외)

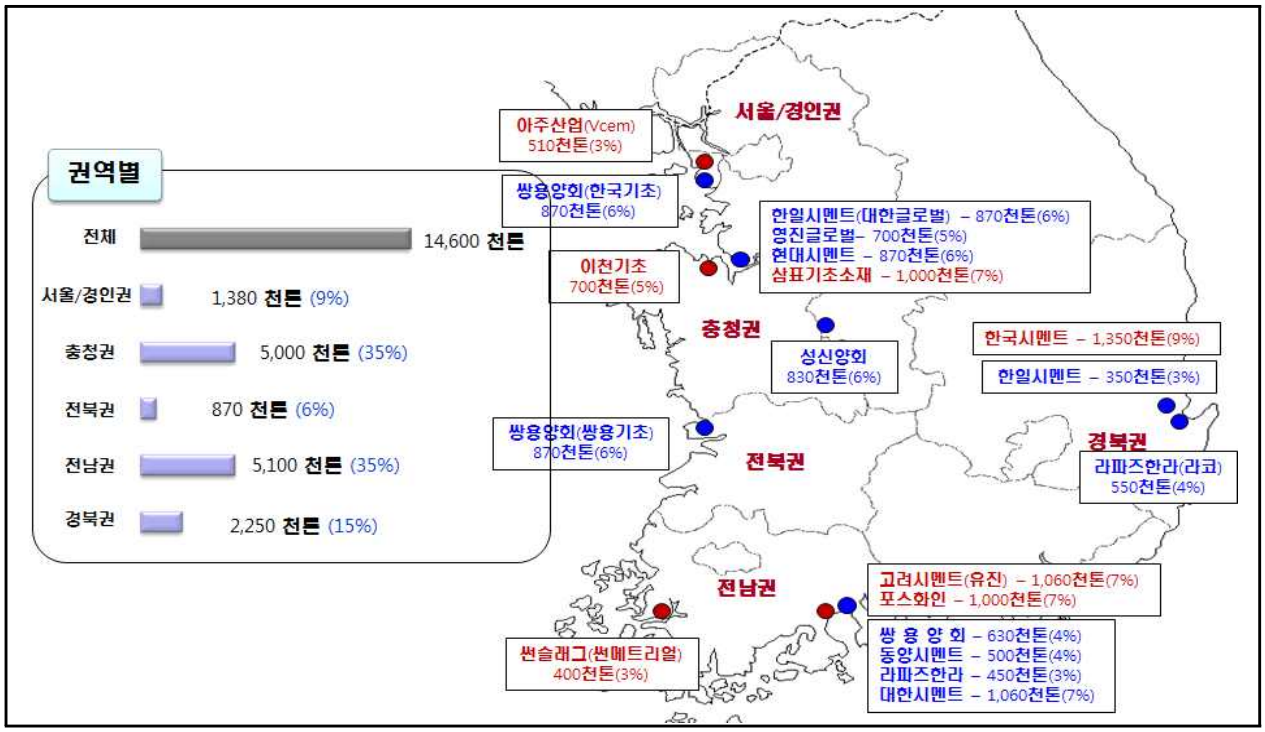


Table. 2.1.1 권역별 고로슬래그미분말 생산능력 (업체 내부자료)

권역별	광양	포항	군산,전남	인천	부강	당진	계
업체수	6	3	2	2	1	5	
천톤	4,700	2,250	1,270	1,380	830	4,140	14,570
비율(%)	32	15	9	9	6	28	

다. 고로슬래그미분말, 고로슬래그시멘트 사용에 따른 경제성 검토

■ 일반적으로 고로슬래그시멘트 생산 원가가 일반 시멘트에 비해 약 10% 저렴해 가격 경쟁력이 있고 연간 20만㎥의 레미콘을 생산하는 업체가 슬래그시멘트를 40~60% 치환할 경우 약 1억5천만원~2억2천만원의 원가 절감할 수 있으며 산업 폐기물을 재활용하므로 친환경적이고, 제조과정에서 이산화탄소 발생량이 일반 시멘트보다 40%이상 줄어드는 효과가 있으며, 원료 조달이 용이해진 것도 슬래그시멘트의 생산 증가의 주요 요인임.

2. 국외 기술개발 현황

최근 무기계 결합재의 신기술 동향에서는 크게 ① 대체연료 활용방안, ② 에너지 효율향상을 위한 고효율 설비도입, ③ 혼합시멘트의 사용 증대, ④ 첨가제 및 혼합재 사용량의 증대 기술 등으로 구분할 수 있으며 저탄소 녹색환경의 화두로 자주 이야기 되고 있는 환경 친화형 제품인 알칼리 활성화제를 사용한 비소성 무기결합재인 지오폴리머의 최근의 동향에 대하여 이야기 해 보려고 한다. 지오폴리머 결합재는 1957년 우크라이나의 토목공학회에서 개발한 알칼리 활성 슬래그시멘트에 기원을 두고 있고, 1970년대말 프랑스의 다비도비치에 의해 지오폴리머라는 용어가 처음 사용되기 시작했다. 알칼리 활성 무기결합재(Alkali-activated inorganic binder)의 정의이다. Alkali-activated inorganic binder는 원래는 결합능력이 없던 재료에 대해서 Alkali-activating 용액을 첨가했을 때, 시멘트처럼 결합능력을 가지게 되는 모든 종류의 결합시스템을 말하며, 현재 지오폴리머는 한국을 비롯한 아시아, 유럽, 아메리카, 오세아니아 지역에서 열심히 연구가 진행되고 잇으며 보통시멘트를 대체하기 위해 지오폴리머에 대한 기초연구를 넘어 응용연구나 제품개발의 단계에 있으며 성능이나 수명향상을 위한 노력이 지금도 계속되고 있어 조만간 실용화를 기대해 본다.

APP 시멘트 TF 의장국인 일본은 APP 활동을 통해 시멘트산업에서의 에너지 절감 및 자원절약기술을 정리하여 배포하였다. 이 문서에 수록된 기술은 이미 상업화되어 판매하고 있는 기술들로 각 기업별 상황 및 경제성 여부에 따라 도입 여부가 결정될 수 있을 것이다.

이러한 에너지 절감 기술은 독일, 프랑스 등 유럽 국가들이 원천 기술을 보유하고 있는 경우가 많으며, 일부분은 일본이 강세를 보이고 있다. 이에 따라 국내 시멘트 제조시설의 많은 부분이 유럽이나 일본 모델을 도입하여 운영하고 있는 실정이다.

특히 미국 등의 선진국에서 적극적으로 활용하는 기술 중의 하나는 EMC (energetically modified mechanism)를 도입한 산업부산물(슬래그, 플라이애쉬 등) 분쇄기술이다. 이는 좀 더 새로운 분쇄기법(crack, dislocation 발생 등)을 적용하여 슬래그 및 플라이애쉬를 분쇄하고, 이를 새로운 기술을 활용한 혼합재로 사용하는 것이다. 미국의 EMC라는 업체에서는 텍사스에 공장(Texas EMC Products, Inc.)을 세워 ‘CemPozz-EMC Highly Reactive Pozzolan’이라는 상품명으로 제품을 판매하고 있다. 이 제품의 사용에 따라 동일 배합비 조건에서 1일 재령 압축강도 값이 약 250% 수준으로 향상되었다고 발표하고 있다. 또한 혼합재 함량을 최대 70%까지 사용한다 하더라도 OPC와 동등의 압축강도 특성을 발현한다고 보고하고 있다.

또한 국가 규격의 차이에 따라 유럽 및 캐나다 등에서는 혼합재 함량을 최대95%(EN197-1 등)까지 허용하고 있을 뿐만 아니라 포졸란 및 석회석 혼합시멘트 등 다양한 혼합시멘트가 규정되어 있다. 더불어 일본 등에서는 1종 보통 포틀랜드 시멘트의 첨가제 함량을 5%에서 그 이상으로 증량하기 위한 연구가 시도되고 있다.

이러한 세계적으로 급격히 변화하는 그린기술(Green Technology)과 기하급수적으로 증가하는 시장(2020년 3,000조)으로 고로슬래그미분말 적용 확대가 예상되며, 세계 주요국의 건설업체의 친환경프로젝트를 수행하는 비율은 약 60%수준(2008년)이나, 2013년에는 90%이상의

업체가 친환경프로젝트를 수행할 것으로 분석되어, 건설시장이 친환경으로 일반화될 것으로 예상되고 있다. 현재 일본은 전체 시멘트 총생산량 중 고로슬래그시멘트가 25% 정도를 제조하여 사용하고 있으며, 우리나라는 현재 11% 정도 사용하고 있으나 지리적인 여건과 에너지 및 환경 친화적인 고로슬래그 시멘트는 점차적으로 증진될 것으로 사료된다.

가. 해외 CO_2 배출저감형 건설재료 기술개발동향

구분	기관 또는 업체	기술개발	주요내용	비고 (본 개발 기술과의 차별성)
일본	Yamaguchi 대학	상온에서 지오폴리머, 제조기술(2000~현재)	플라이애시+석영+산화철+쇼둠실리케이트 등으로 중합반응 온습도 조절 건설자재 개발 상온에서 20~30MPa	본 기술 개발은 상온 OPC 100% 사용 콘크리트 대비 1일(102.5%), 3일(103.8%), 저온5℃에서 1일(136.4%), 3일(103.5%)로 월등한 압축강도 및 탄산화 저항성능이 OPC 대비 91%로 우수함
	태평양시멘트	저열 포틀랜드 시멘트	플라이애시와 고로슬래그 등 광물질 혼화재를 포함하지 않음	선행 연구에서는 저발열 포틀랜드 시멘트의 제조로서 본 연구와의 목적이 상이함
	후지마쓰(주)	생석회계 고화제	생석회를 주성분으로 사용	생석회(40,000원/톤)의 사용보다 본 연구에서 사용한 원천소재(30,000원/톤)의 가격 경쟁력이 우수함
호주	Curtin 대학	저칼슘 플라이애시 기반 Geoploymer 콘크리트 (2000~현재)	배합 및 제조기술 장기거동 평가 구조부재 활용성 평가 고온에서 50MPa	프리케스트의 적용으로서 고온양생에 의한 강도발현 성능을 제시하여 본 연구목적과 상이함
	Wopfinger 사	고로슬래그-황산염계 무(저)시멘트 콘크리트 제조기술	황산염 활성화제와 고로슬래그 이용한 기술 압축강도 50MPa, 높은 화학저항성	본 연구에서 개발된 원천소재(30,000원/톤)의 가격 경쟁력이 우수하며, 무 시멘트의 사용으로 인한 현장 적용에 대한 적용성이 저하되는 것을 해결 가능함
프랑스	Geoploymer institute	석탄회 무(저)시멘트 콘크리트 제조기술	고온에서 석탄회 활성화 압축강도 30MPa	시멘트를 대체하여 탄소저감 목적으로 구조체 적용성이 저하되어 본 연구에서와의 목적이 상이함

나. CO_2 저감을 위한 시멘트 첨가제 및 혼합재 동향

국가	현황
일본	- 온실가스 저감 등을 목적으로 첨가제 사용량 확대를 추진하고자 시멘트 규격 재정 ▶ 강열감량(loss of ignition, 석회석 첨가제 사용에 대한 특정치)을 3%에서 5%로 상향 ▶ 이 경우 석회석을 첨가제로 5%에서 10%로 확대사용가능
중국	- 세계 시멘트 생산량의 약 1/2을 차지함 - 2001년 4월 EN 규격과 유사하게 표준을 제정하여 석회석 첨가제 함량을 15%까지 사용하도록 규정
호주	- 2009년 아세아-태평양 파트너쉽 시멘트 Task Force 회의에서 석회석 첨가제를 현행 5%에서 10%로 상향・사용하는 것을 시멘트 업계의 주요 현안으로 제시
캐나다	- 2009년에 포틀랜드시멘트의 석회석 표준을 15%로 변경
미국	- 2009년 PCA 건의에 의한 ASTM C 150 개정 ▶ 포틀랜드 시멘트에 석회석을 포함한 혼합재를 5%에서 10%로 확대사용

3. 국내 기술개발동향

먼저 슬래그 시멘트 생산증대 방안에 대해서는 국내 시멘트 소비량을 보면 보통 포틀랜드 시멘트가 80% 정도를 차지하고 있고, 슬래그시멘트의 소비량은 전체 시멘트 소비량의 20% 정도 이어서 슬래그시멘트의 사용의 확대 없이는 획기적인 CO_2 저감 효과를 기대하기 어려운 실정이다.

국내에서는 대표적인 CO_2 저감 효과 혼화재 개발은 에코멘트, 무 시멘트로 말할 수 있으며 이는 분말도가 높거나 증기양생에 의한 방법으로 현실적으로 실용화에는 애로사항이 많고 특히 지오폴리머 콘크리트는 산업체의 부산물인 플라이애쉬(Fly ash) 또는 지층에서 풍부하게 재료를 구할 수 있는 알미늄과 규소(Al-Si)를 무기질 점결제(inorganic binder)와 중합반응시켜서 만드는 건설재료이다.

가. 국내 CO_2 배출저감형 건설재료동향

기관 또는 업체	기술개발	주요내용	비고 (본 개발 기술과의 차별성)
한국건설 기술 연구원	시멘트 제로 콘크리트	무(저)시멘트 콘크리트용 결합재 개발 무(저)시멘트 콘크리트용 활성화제 개발	시멘트를 사용하지 않은 콘크리트로서 탄소저감을 목적으로 결합재를 사용한 콘크리트 개발로서, 본 연구와의 목적이 상이하며 차별성으로 저온 환경에서의 초기재령(1일, 3일) OPC와 압축강도 동등이상 확보기술이 본 연구에서 가능함
요업기술원	플라이애쉬를 사용한 친환경 무기결합재의 제조기술 개발	황산염계의 자극제를 활용한 고화 메커니즘	기존 알칼리 활성화제를 사용함에 따라 경제성이 결여되어 본 연구에서의 산업부산물 및 산업폐기물을 자극제로 사용하여 원천소재의 경제성과 자원 재활용에 따른 환경적 보존 측면이 우수함
전북대학교	무기계 산업폐기물을 활용한 CO_2 무배출형 비소성 시멘트 제조기술 개발	GBFS에 인산석고 폐석회를 황산염 및 알칼리자극제로 이용하여 시멘트제조	선행 기술로서 비소성 시멘트의 제조에 있어 제조 공정에서의 복잡한 공정 과정에 따른 생산 원가 상승에 따른 경제성이 결여 됨 본 연구의 생산공정의 단순화 작업(원천소재 클링커: 천연무수석고 대체)으로 고로슬래그 분쇄 시, 치환에 따른 추가공정이 불필요 하게 되어 제품생산에 따른 추가제조원가 상승 방지

제 2절 국내외 기존 기술과의 차별성

1. 고로슬래그미분말 혼입 콘크리트의 조기강도 발현 기술

콘크리트의 조기강도 향상을 위한 연구는 주로 조강형 혼화제(폴리카르본산계)를 사용한 것이 있으며, 콘크리트의 조기강도 향상을 통한 철근콘크리트공사의 공기단축에 관한 연구는 조강형 혼화제의 사용, 부배합의 고강도콘크리트 적용, 조강시멘트의 적용에 관한 연구로 본 연구개발 기술과는 고로슬래그미분말을 혼화재로 사용한 콘크리트 연구와 전혀 다른 개념의 연구 차별성이 있다고 할 수 있으며, 상기와 같이 국내외 CO_2 배출저감형 건설재료동향을 보면 일부 원천기술개발이 아닌 산업부산물 산업폐기물을 이용한 혼합 믹싱 및 혼화제 첨가형식으로 각 원료에 대한 자극제 역할만으로 모르타르 물성과 콘크리트의 물성 비교한 결과로서 본 연구에서 개발하려는 신소재 개발과의 차이점 및 기존 기술보다 우수성이 높다고 사료된다.

강도발현 방법	강도발현 원리	문제점	비고 (본 개발 기술과의 차별성)
양생온도 촉진방법	• 고로슬래그미분말의 특성으로 온도조건에 따른 압축강도 발현이 달라짐에 착안 • 고로슬래그미분말의 초기수화반응을 촉진하기 위하여 양생온도 관리 실시(가열 보온양생, 표면 가열 양생, 단열 보온 양생 등)	• 양생온도 유지를 위한 비용발생 • 일산화탄소 및 이산화탄소 발생으로 인한 콘크리트으 내구성저하 발생(탄산화반응) • 동절기 사용에 국한됨	• 초기재령(1일, 3일)압축강도 확보를 위하여 알칼리성 무기계 자극제 개발을 통하여 양생온도(5~20℃)에 관계없이 고로슬래그미분말 혼입 콘크리트의 조기강도 발현 가능(1일,3일,7일) • 양생온도 유지를 위한 비용발생 없음 • 이산화탄소의 발생이 없기 때문에 탄산화 반응 우려 없음
고로슬래그미분말의 고분말화 방법	• 고로슬래그미분말의 분말도를 높여 슬래그의 잠재 수경성 반응을 촉진시킴 • 분말도 7,000이상 높일 시 초기강도 발현 가능함	• 고로슬래그미분말의 분말도를 높이는 과정에서의 제조비용 상승 • 특수제품인 고강도 콘크리트 배합에 적합	• 분말도를 높이지 않고 조기강도 압축강도 확보가 가능함 • 특수제품 뿐만 아니라 일반적인 KS 고로슬래그미분말 3종 적용에 가능하여 일반적인 고로슬래그미분말 제조업체 및 고로슬래그 시멘트 제조업체의 적용성이 높음
화학 혼화제에 의한 조기강도 발현 밥법	• 조강 혼화제 사용에 따른 압축강도 증진 및 작업성능 확보 • 시멘트 초기의 Ca이온 용출로 인하여 수화반응 촉진함	• 알칼리 자극제 첨가에 따른 경제성 결여 • 염화칼슘과 같은 알칼리 자극은 콘크리트의 내구성 문제를 야기함 • 알칼리 자극제의 사용에 따라 조기강도 증진효과 있으나 장기강도 저하 현상 발생	• 고로슬래그미분말의 수화 반응 메커니즘은 유사하나 기존 알칼리자극제의 경제성 측면을 고려하여 산업부산물 및 폐기물 활용함에 따라 경제적 이익에 따른 효과 발생 • 초기강도 증진 뿐만아니라 28일 이후의 지속적인 압축강도 확보를 통한 장기강도 우수성 확보

2. 국내외 기술과의 차별성

탄소저감형 건설재료를 개발하기 위해서는 기존의 연구개발과 차별화되는 혁신적인 방안은 반드시 탄소저감형 건설재료의 원천기술개발이다. 탄소저감형 건설재료는 시멘트·콘크리트 분야에서 상당한 연구가 진척됐으나 아직 경제성 미비로 실용화되지는 않고 있다. 이렇게 된 이유는 탄소저감을 위한 원천기술개발이 적기 때문인 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서 개발하고자 하는 원천소재 개발을 통한 저탄소 콘크리트는 산업부산물 및 산업폐기물을 이용한 자원 재활용의 측면과 원천소재기술 확보 및 경제성을 포함한 기술개발로서 기존 연구와 다른 차별성이 있으며 최근 지오폴리머, ASS, 고황산염 시멘트의 방식과 에코멘트, 무 시멘트방식과 전혀 다른 고로슬래그미분말과 OPC를 동시에 자극할 수 있는 방법으로 초기재령의 문제점을 해결할 수 있는 연구를 수행하였다. 또한 본 기술개발에 의한 제품은 클링커에 일부 포졸란 물질을 혼합하여 사용하는 혼합시멘트 개념이 아닌 국내에서 전혀 활용되지 못하고 대량으로 적치되어 있는 산업폐기물인 정수오니를 원천소재의 부재료로 이용하는 클링커 소성을 통한 새로운 신기술로서 선진국에서도 선행기술이 없는 국내고유기술이며 부원료인 정수오니는 무기성 오니에 따른 매립이 약 일 195톤 매립 및 매립비용이 약 톤당 3만원 발생되는 것으로 조사되었으며 티탄석고는 저가의 산업부산물로서 그 활용가치를 극대화할 수 있는 부원료로서 본 과제가 성공적으로 수행될 경우 이들의 고부가성 건설재료로의 재활용은 물론 본 개발제품의 부재료로서 안정적인 공급원이 될 수 있다.

국내외 해당기술	내용 및 특징	비고 (본 개발 기술과의 차별성)
에코멘트	• 에코시멘트는 기존 시멘트보다 소성 온도가 낮고 도시 쓰레기가 원료여서 염소 성분 함량이 높기 때문에 철근 콘크리트에는 사용할 수는 없지만 해수 접촉 구조물이나 토목 고화재 용도나 블록 제조용으로 사용됨.	• 일부 건설 무기계 재료에만 한정되지 않고 광 범위한 기초소재 적용이 가능한 소재로 활용가능 (그라우트 지반주입제, PC계, 블록업체, 일반 RC조 구조체 적용가능)
그린콘크리트	• F/A 및 GBFS 대량 치환을 위해서 시멘트량을 결합재의 15~25%만 사용한 결과로 재령28일 콘크리트 압축강도는 OPC 배합의 약 55.2~115% 수준임. • PC계 고성능감수제 사용	• 실용화측면에서 본 개발품은 OPC 70% GBFS 23% 원천소재 7% 적용시 1일 이후 모든 재령에서 호칭강도 이상 강도 발현됨.
3성분계 무기 혼화재 개발	• 높은 시멘트분말도와 액상 혼화제를 이용한 무기 혼화재로서 일반 모르타르에 비해 약 20%정도 조기강도 증진효과인 제품	• 원천소재를 혼입한 모르타르 평가 실험 시 OPC 100% 사용 대비 (102~103%)이상 발현됨.

제 3장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1절 연구개발 추진 전략 및 방법

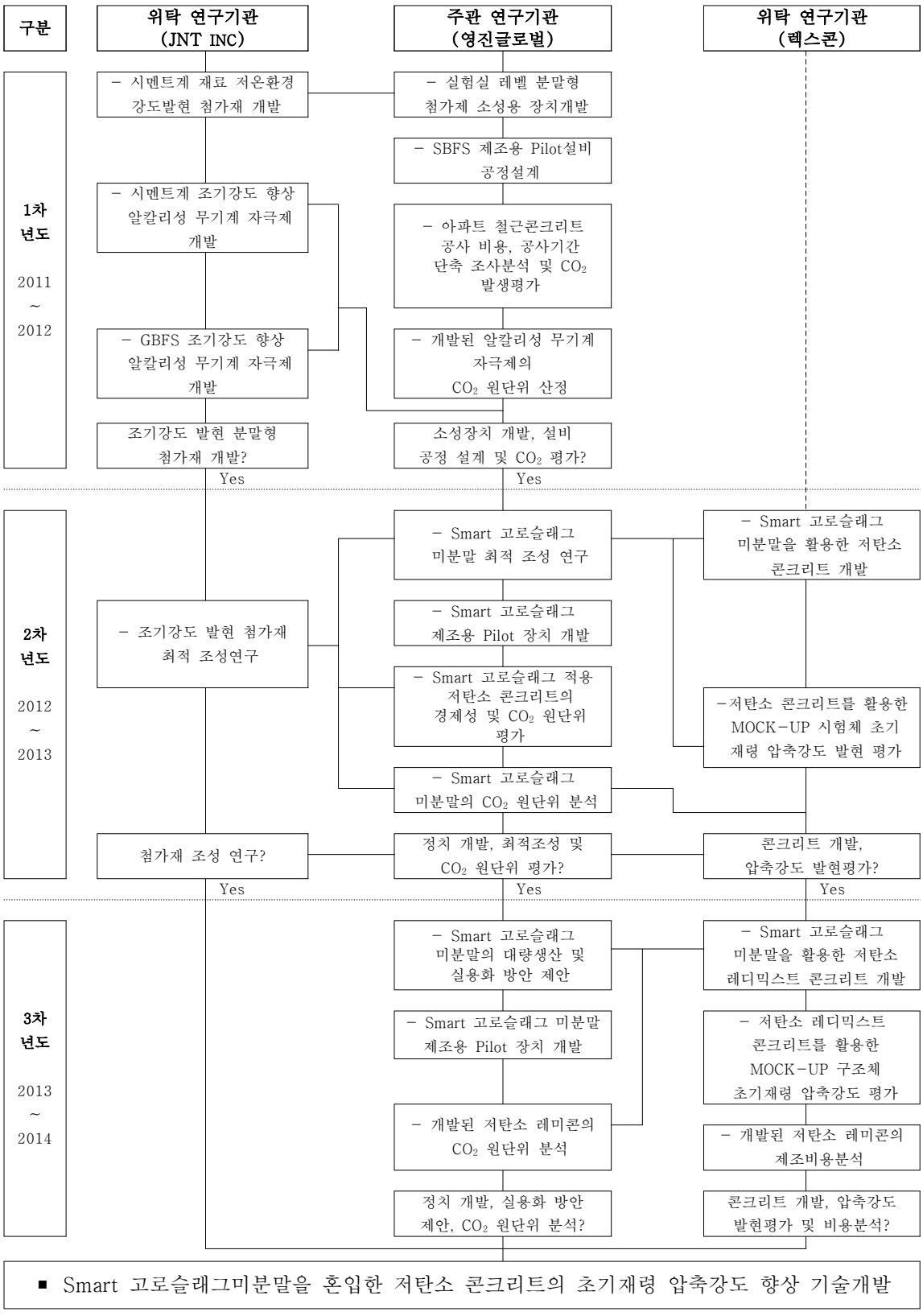
본 기술의 최종목표는 조기강도 발현성능과 저온환경하 초기재령 강도향상 성능을 가지는 『Smart 고로슬래그미분말』의 경제성을 확보하면서 대량생산 할 수 있는 원천소재 기술을 개발함과 동시에 이를 활용한 저탄소 콘크리트를 개발하여 철근콘크리트 구조체 공사에 적용한 경우의 공사비 저감, 공기단축 및 CO_2 저감효과를 정량적으로 평가하는 것이다.

레미콘 공장 대상 Smart 고로슬래그미분말 치환율 10～30% 범위, 콘크리트 28일 압축강도 21～30MPa 범위, 콘크리트 기중 양생온도 5～20℃ 환경 조건으로 연구범위를 설정하였다. 또한, Smart 고로슬래그미분말 혼입 저탄소 콘크리트를 적용한 철근콘크리트 구조체 공사를 대상으로 공사비용 저감, 공기단축 및 CO_2 저감 효과를 정량 평가하는 것이다.

1. 연구개발 추진전략

연차	연구내용	세부추진 계획 및 방법
1차년도	■ SBFS 원천소재 개발	- 시멘트 조기강도 향상 첨가재 개발 - GBFS 조기강도 향상 첨가재 개발 - 저온환경 강도발현 첨가재 개발
	■ 소성장치 개발 및 Pilot 설비 공정 설계	- 첨가재 소성장치 개발 - SBFS 제조용 Pilot 설비 공정 설계
	■ RC 구조체 공기단축 평가 및 첨가재 CO_2 원단위 평가	- 아파트 RC구조체 공사기간, 비용조사 - RC구조체 CO_2 발생량 평가
2차년도	■ SBFS 혼입 콘크리트 조기강도 평가	- SBFS 최적 조성 연구 - SBFS 활용 저탄소 콘크리트 개발
	■ SBFS 제조용 Pilot 장치 개발 및 클링커 조성 제어	- SBFS 제조용 Pilot 장치 개발 - 용도별 SBFS 클링커 조성 제어
	■ SBFS 혼입 콘크리트 경제성, CO_2 평가 및 구조체 콘크리트 강도 평가	- SBFS의 CO_2 원단위 산정 - SBFS 혼입 저탄소 콘크리트 경제성 및 CO_2 원단위 평가 - SBFS 혼입 구조체 콘크리트 초기재령 강도 평가
3차년도	■ SBFS 혼입 저탄소 레미콘 실용화 및 검증	- 개발 SBFS의 혼합 안전성 평가 - SBFS 혼입 저탄소 레미콘 개발 - 실물시험체에 의한 혼합콘크리트 성능검증
	■ SBFS 제조용 Pilot 장치 완성 및 대량생산 방안 제시	- SBFS 제조용 pilot 장치 보완 완성 - SBFS 대량생산 기술 제안 및 활용
	■ SBFS 혼입 레미콘의 경제성, CO_2, 구조체 초기재량 압축강도 평가	- SBFS 혼입 레미콘 경제성 및 CO_2 평가 - SBFS 혼입 저탄소 레미콘 활용 구조체 Mock-up 실험

2. 연구 개발 추진방법


구분
위탁 연구기관 (JNT INC)
주관 연구기관 (영진글로벌)
위탁 연구기관 (렉스콘)
1차 년도 2011 ~ 2012
- 시멘트계 재료 저온환경 강도발현 첨가재 개발
- 실험실 레벨 분말형 첨가제 소성용 장치개발
- SBFS 제조용 Pilot설비 공정설계
- 시멘트계 조기강도 향상 알칼리성 무기계 자극제 개발
- 아파트 철근콘크리트 공사 비용, 공사기간 단축 조사분석 및 CO_2 발생평가
- GBFS 조기강도 향상 알칼리성 무기계 자극제 개발
- 개발된 알칼리성 무기계 자극제의 CO_2 원단위 산정
조기강도 발현 분말형 첨가재 개발?
소성장치 개발, 설비 공정 설계 및 CO_2 평가?
Yes
Yes
2차 년도 2012 ~ 2013
- Smart 고로슬래그 미분말 최적 조성 연구
- Smart 고로슬래그 미분말을 활용한 저탄소 콘크리트 개발
- 조기강도 발현 첨가재 최적 조성연구
- Smart 고로슬래그 제조용 Pilot 장치 개발
- Smart 고로슬래그 적용 저탄소 콘크리트의 경제성 및 CO_2 원단위 평가
-저탄소 콘크리트를 활용한 MOCK-UP 시험체 초기 재령 압축강도 발현 평가
- Smart 고로슬래그 미분말의 CO_2 원단위 분석
첨가재 조성 연구?
정치 개발, 최적조성 및 CO_2 원단위 평가?
콘크리트 개발, 압축강도 발현평가?
Yes
Yes
Yes
3차 년도 2013 ~ 2014
- Smart 고로슬래그 미분말의 대량생산 및 실용화 방안 제안
- Smart 고로슬래그 미분말을 활용한 저탄소 레디믹스트 콘크리트 개발
- Smart 고로슬래그 미분말 제조용 Pilot 장치 개발
- 저탄소 레디믹스트 콘크리트를 활용한 MOCK-UP 구조체 초기재령 압축강도 평가
- 개발된 저탄소 레미콘의 CO_2 원단위 분석
- 개발된 저탄소 레미콘의 제조비용분석
정치 개발, 실용화 방안 제안, CO_2 원단위 분석?
콘크리트 개발, 압축강도 발현평가 및 비용분석?
■ Smart 고로슬래그미분말을 혼입한 저탄소 콘크리트의 초기재령 압축강도 향상 기술개발

제 2절 종류별 무기계 자극제 첨가에 따른 모르타르의 특성 분석

1. 개요

고로수쇄슬래그는 고석회 Alumina Silicate Glass질이기 때문에 강한 잠재수경성을 가지고 있지만, 물 주입직후 Ca^{2+}가 용출되어 표면에 투과성이 나쁜 부정형의 ASH6 막을 형성한다. 고로수쇄슬래그 입자로의 물 투수 및 입자에서의 이온용출을 억제하기 때문에 수화는 진행되지 않는다. 이 막이 수산화칼슘과 수산화나트륨과 같은 알칼리성 자극제는 고로수쇄슬래그의 OH^-를 흡수시켜, Glass 구조를 파괴함으로써 SiO_3, Al_2O_3, CaO, MgO의 용출을 촉진하게 됨으로써, 이것 때문에 액상중의 각 이온농도를 높이며 수화물 반응을 진행시켜 석출시키는 작용을 한다. GBFS를 활용한 조기강도 향상 방법으로는 조강성 혼화제 사용, 분체의 분말도 증가, 알칼리 활성 슬래그시멘트(Alkali activated blast furnace slag cement) 등에 관한 연구들이 진행되고 있다.

또한 고로슬래그미분말의 강도 증진의 역할을 하는 인자로서 천연무수석고를 혼합 분쇄하여 적용하는데 이는 SO_3 함량에 따라 초기재령에서의 고로슬래그미분말 혼입 콘크리트의 압축강도 향상을 도모할 수 있다. 칼슘설포알루미네이트(Calcium Sulfo Aluminate, 이하 CSA라 함)는 특히, 제조하는 과정에서 소성온도가(1,300℃ 내외) OPC보다(1,450℃) 낮아 에너지 절약 및 CO_2를 저감하는 친환경적인 재료이다. 또한 Ettringite의 생성 및 수산화칼슘의 수화물 생성으로 팽창성과 강도발현 효과를 나타내기 때문에 OPC의 단점인 건조수축에 의한 경화체의 균열을 저감할 수 있는 장점이 있다. 많은 연구자들이 이러한 이점으로 OPC의 결합재로서 조기강도 향상 연구가 실시되고 있다. 하지만 초기재령인 1일이 아닌 주로, 재령 3일 및 7일을 대상으로 하고 있으며, 고가의 CSA는 경제성이 결여되는 단점 또한 배제할 수 없다. 이러한 배경으로서 CSA, 알칼리 활성화제, SO_3 함량에 따른 고로슬래그미분말 초기재령에서의 물리·화학적 시험 평가를 실시하여, 조기강도 향상의 효과적인 요소를 찾아 검증하여 본 연구 목적에 기초자료로서 활용하고자 한다.

2. 실험계획

가. 실험개요

본 연구에서는 GBFS혼입 콘크리트의 초기재령(1일, 3일)에서의 압축강도를 증진하여 건축현장에서의 사용성을 높이기 위한 방안으로서, GBFS의 수화반응을 초기에 촉진 시킬 수 있도록 예상되어지는 CSA계 분체적용실험, 알칼리자극 선정실험, 무수석고를 사용하여 SO_3 첨가에 따른 자극 실험을 3가지로 구분하여 진행하였다. 또한 GBFS의 사용범위는 자극제를 포함하여 30%내외로 사용하였으며, 초기재령(1일, 3일)에서의 압축강도 특성을 집중적으로 모르타르레벨에서 검토하였다.

나. 사용재료

(1) 시멘트

(OPC)는 국내 S사의 1종 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 물리적 특성은 Table 3.2.1과 같다.

Table 3.2.1 시멘트의 물리적 특성

구분	(cm^2/g)	초 결 (분)	종 결 (시간)	안정도 (%)	압축강도(MPa)		
					3일	7일	28일
KS규격	2,800 이상	60 이상	10 이하	0.8 이하	12.5 이상	22.5 이상	42.5 이상
실험값	3,300	200	5.5	0.08	30	42	58

(2) 고로슬래그미분말

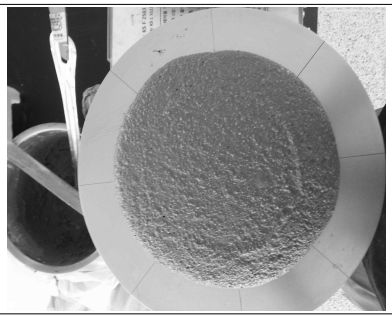
고로슬래그미분말은 KS F 2563 콘크리트용 고로슬래그미분말 규정을 만족하는 당사의 고로슬래그미분말 3종을 사용하였다. 고로슬래그미분말의 분말도는 4,241(cm^2/g) 이였으며, 밀도는 2.90(g/cm^2), 염기도는 1.80 이었고, 그 물리·화학 특성은 Table 3.2.2과 같다.

Table 3.2.2 고로슬래그미분말의 물리·화학적 특성

항목 / 시료	화학성분				(g/cm^2)	비표면적 (cm^2/g)
	MgO	SO_3	강열감량	염화물 이온		
KS F 2563 GBFS 3종 규격	10.0% 이하	4.0%	3.0 % 이하	0.02% 이하	2.80 이상	4,000 ~ 6,000
실험 사용 GBFS 특성 값	5.37	1.01	0.43	0.004	2.90	4,241

다. 실험 항목

Table 3.2.3 항목

	측정항목	규격	실험전경
굳지 않은 시멘트 모르타르	타격 플로우	KS L 5111	

경화 모르타르	압축강도	KS L ISO 679	
	TG/DTA (Thermo Gravimetric Differential Temperature Analysis)	-	
	SEM (Scanning Electron Microscope)	-	
	XRD	-	

라. 실험내용

Table 3.2.4 주요 실험 내용

연구개발	주요 실험 내용
무기계 자극제를 이용한 고로슬래그미분말 특성 분석	■ CSA계 자극제를 활용한 GBFS 혼입 모르타르실험
	■ 알칼리계 자극제를 활용한 GBFS 혼입 모르타르실험
	■ 무수석고를 활용한 GBFS 혼입 모르타르실험

3. 종류별 무기계 자극제의 물리적 특성 분석

가. CSA계 자극제를 활용한 GBFS 혼입 모르타르실험

(1) 사용재료

(가) CSA(Calcium Sulpho Aluminate)특성

CSA 1970년대 중국에서 개발되었다. 중국 건축 자재 연구소에서 설계되었으며 스스로 팽창하는 특성을 가지고 있기 때문에 수축보상 콘크리트 흄관의 제조를 위한 것이었다. Ettringite의 미세 구조는 석회의 유무에 강하게 의존하는데, CSA의 주성분은 CaO이며, 화학식은 $4CaO \cdot 3Al_2O_3 \cdot (SO_3)$이다.

특성을 가지는 CSA계 시멘트는 물과의 수화 반응에 의하여 침상 및 주상의 Ettringite 및 $Ca(OH)_2$ 등의 수화물의 생성으로 팽창효과 및 강도발현 효과와 OPC의 단점인 건조수축에 의한 경화체의 균열을 방지하고, 낮은 인장강도 등을 개선할 수 있다.

(나) DENKA CSA

DENKA CSA는 시멘트 및 콘크리트의 성능개선을 위한 콘크리트용 팽창성 혼합재로서 초기 팽창력을 활성화한 CSA(Calcium Sulfur Aluminate)계 팽창 매커니즘을 이용하고 화학적 팽창력을 도입하여 콘크리트의 건조수축균열 방지 및 수밀성을 증대시켜 고성능 콘크리트를 제조할 수 있는 무기질계 팽창재이다. 또한 DENKA CSA는 석회, 석고, 보크사이트를 주성분으로 하는 소성화합물(Calcium Sulfo Aluminate)을 적정 입도로 공정에서 분쇄한 것으로 아우인(Hauyne, $3CaO$, $3Al_2O_3$, $CaSO_4$), 유리석회(CaO), 유리석고($CaSO_4$)란 광물로 구성되어 있다. 이러한 수화 반응에 의해 생성되는 에트링자이트($3CaO$, Al_2O_3, $32H_2O$)는 수 마이크로의 매우 작은 결정으로, 시멘트 페이스트의 경화 과정에서 콜로이드상으로, 겔간의 미세한 공극에 밤송이 모양의 침상으로 발포되어 겔의 경화에 따른 수축과 건조수축을 저감시키고, 아울러 팽창시키는 작용을 한다. 이러한 팽창은 강도증진에 따라 발생되는 팽창변형으로서 강도발현 전에 팽창되는 알루미늄 분말에 의한 수소가스 발생이나 생석회의 수화에 의한 체적증가와는 본질적으로 다르다.

(다) CSA 5000

CSA 5000은 포틀랜드시멘트에 미분쇄한 칼슘설포알루미네이트(CSA) 성분을 배합하여 콘크리트 타설 후 3시간 만에 200～300kgf/㎠의 압축강도를 발현시켜 주는 시멘트이다.

(2) 실험계획

본 실험에서는 OPC, Slag시멘트, CSA단독사용 및 D-CSA와 SO_3를 다량 함유한 CSA를 비교·검토하였다. 실험계획 및 모르타르 배합은 Fig. 3.2.1 과 Table 3.2.5의 모르타르 배합표에서 나타낸 것처럼 실험을 계획하였다.

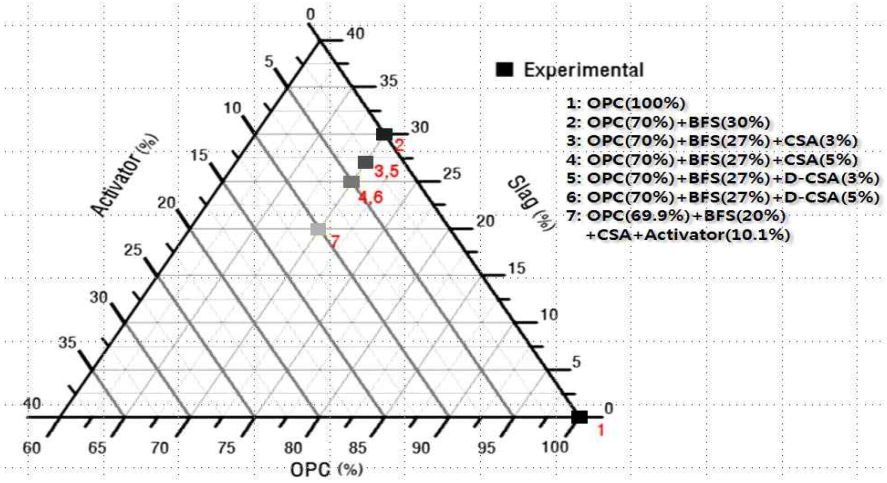


Fig. 3.2.1 사용재료에 따른 분체의 혼합비율(%)

Table 3.2.5 모르타르 배합표

NO	기호	W/B (%)	단위질량(g)									
			OPC	GBFS	CSA 5000	D-CSA	Na_2SO_4	Gypsum	응결 조절제	지연제	S	W
1	OPC	50	450	-	-	-	-	-	-	-	1,350	225
2	OB	50	315	135.0	-	-	-	-	-	-		
3	OBC1	50	315	121.5	13.5	-	-	-	-	-		
4	OBC2	50	315	112.5	22.5	-	-	-	-	-		
5	OBD1	50	315	121.5	-	13.5	-	-	-	-		
6	OBD2	50	315	112.5	-	22.5	-	-	-	-		
7	OBC3	50	314	90.0	-	-	11.25	11.25	0.39	0.056		

* 응결 조절제 : TTA 지연제 : 리튬계

(3) 화학적 특성

Table 3.2.6 알칼리 자극제의 화학적 특성을 내타낸다. 자극제로서는 CSA (5,000 cm^2/g)과 D-CSA, Gypsum (5,000 cm^2/g)을, 촉진제 역할로서는 Na_2SO_4를 사용하였다. CSA 수화물은 팽창성, 속경성, 고강도의 성능을 나타내는 특성이 있으며, CaO의 양이 증가하면 팽창성이 강하게 나타나게 되며, Al_2O_3의 양이 증가하면, 속경성, SO_3의 양이 증가하면 강도 발현성이 증가한다.

Table 3.2.6 사용자극제의 화학적 특성

항목 / 시료	화학성분(%)								
	강열 감량	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	생산국
CSA5000	0.53	8.87	33.0	2.44	42.9	1.64	8.82	0.10	중국
D-CSA	3.52	1.36	11.9	0.33	51.2	1.59	29.6	0.12	일본
Gypsum	2.81	1.32	0.50	0.09	39.2	0.43	55.1	0.32	한국
Na_2SO_4	-	0.02	0.02	-	0.09	0.45	51.6	45.6	한국

(4) 실험 결과

(가) CSA계 분체 종류에 따른 압축강도 변화

Table 3.2.7에 재령별 압축강도 시험 결과를 종합하여 나타낸다. 또한, Fig. 3.2.2～3까지 CSA계 분체 종류에 따른 압축강도를 나타낸다. OPC 100% 사용과 비교하여, 본 연구에서 다량의 SO_3를 사용한 CSA를 사용한 OBC3 시험체는 재령 1일에서 130.7%, 재령 3일에서는 93.4%의 압축강도 발현을 나타내어 고가의 D-CSA의 재령 1일에서 79.2%, 재령 3일에서 76.1% 보다 높은 압축강도를 나타내는 것을 확인 할 수 있었다.

그러나, 기존 CSA를 사용한 OBC2 시험체는 OPC를 100% 사용한 콘크리트 대비 6.9~18.9%의 저조한 강도발현을 나타내었다. CSA(5,000)는 주요 화학성분인 Al_2O_3의 함유량이 많아 급결성으로서 Ettringite를 생성하나, OPC의 수화반응촉진과 무수석고가 포함되지 않은 GBFS의 자극에 있어서 SO_3 공급이 차단되기 때문에 압축강도 개선에 있어서 효과가 저조하며, 오히려 급결성의 Al_2O_3의 함유량이 수화반응을 지연시키는 역효과를 나타내는 것으로 사료 된다.

따라서, 이러한 문제점 해결 방법으로, D-CSA의 높은 SO_3함량을 착안하여 GBFS의 자극을 위한 방안으로서 석고 및 알칼리 자극제인 Na_2SO_4을 혼합사용하고, CSA의 응결조절제로 사용되는 TTA와 리튬계 지연제를 소량으로 혼합 적용하였다. 그 결과로서, GBFS의 수화 및 CSA(5,000)의 수화를 원활하게 이루어지게 하여 압축강도의 발현에 기여하는 것으로 판단된다. OPC 100%와 비교하여, GBFS의 치환율이 낮고, 알칼리 자극제의 사용량이 큰 시험체에서 높은 압축강도를 나타내는 것을 알 수 있다. 그러나, 3일에서의 압축강도를 살펴보면, OBC2에서의 수화반응 및 강도발현이 저조하기 때문에 오히려, GBFS의 사용량이 높은 비율보다 낮은 압축강도를 나타내는 것을 알 수 있었다. CSA(5,000)의 단독사용은 바람직하지 않는 것으로 사료된다.

Table 3.2.7. 모르타르 배합 및 압축강도와 활성도 지수 표

NO	기호	W/B (%)	질량비율(%)								압축강도(MPa) 및 활성도 지수			
			OPC	GBFS	CSA (5000)	D-CSA	Na_2SO_4	Gypsum	응결 조절제	지연제	1일 압축강도 (MPa)	3일 압축강도 (MPa)	1일 활성도 지수(%)	3일 활성도 지수(%)
1	OPC	50	100	-	-	-	-	-	-	-	10.1	24.3	100	100
2	OB	50	70	30	-	-	-	-	-	-	5.5	16.2	54.5	66.7
3	OBC1	50	70	27	3	-	-	-	-	-	3.0	14.2	29.7	58.4
4	OBC2	50	70	25	5	-	-	-	-	-	0.7	4.6	6.9	18.9
5	OBD1	50	70	27	-	3	-	-	-	-	7.0	17.8	69.3	73.3
6	OBD2	50	70	25	-	5		-	-	-	8.0	18.5	79.2	76.1
7	OBC3	50	69.9	20	5		2.5	2.5	0.0875	0.0125	13.2	22.7	130.7	93.4

* 응결 조절제 : TTA 지연제 : 리튬계

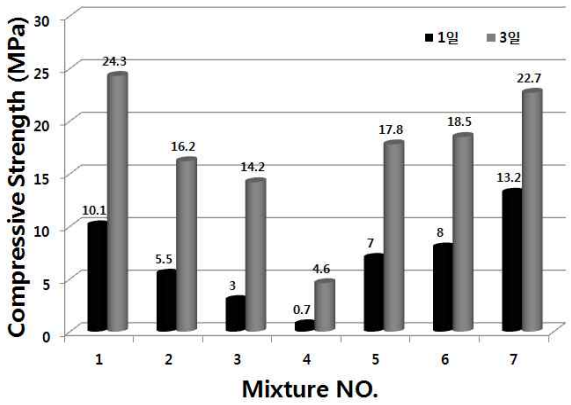


Fig. 3.2.2 CSA계 사용재료에 따른 압축강도(1일, 3일)

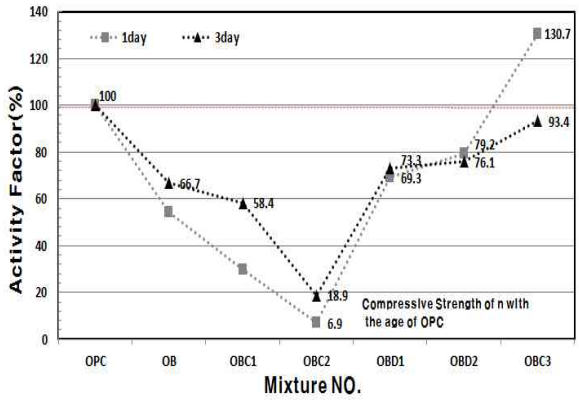


Fig. 3.2.3 CSA계 사용재료 따른 활성도 지수 (1일, 3일)

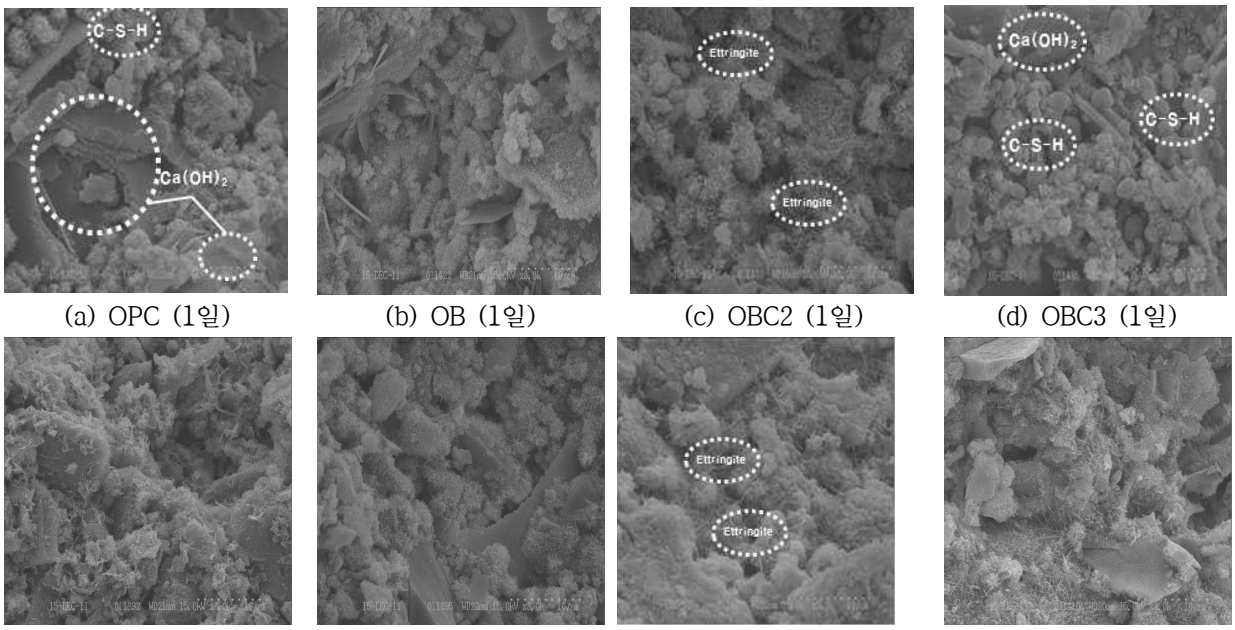
(나) CSA 계 분체 종류에 따른 SEM 분석결과

모르타르 시험체의 성분 및 미세조직 구조를 분석하기 위하여 SEM(S-4700)촬영을 실시하였다. Fig.3.2.4은 OPC, OB(GBFS30% 혼입), OBC2 및 OBC3 시험체의 재령 1일 및 3일에서 SEM (3,000 배율) 사진을 나타낸 것이다.

OPC를 100% 사용한 OPC 시험체의 시멘트 화합물 중에는 물과 반응하여 생성된 수산화칼슘과 규산칼슘 수화물형태의(C-S-H)의 생성이 관측되었다. 이것은, C_3S가 물과 반응하면 곧 Ca^{2+}가 용출되고, 높은 알칼리성이 되며, 과포화상태에 이르게 되면 수산화칼슘 결정이 석출되기 때문이다. 재령 1일에서 가장 강도발현이 우수한 OBC3는 GGBFS의 자극을 고려하여 SO_3의 공급으로서 사용된 무수석고와 Na_2SO_4 적용으로 수산화칼슘과 규산칼슘수화물형태인 (C-S-H) 수화물이 관측되었다.

한편, 압축강도 발현이 적었던, OBC2에서는 CSA반응에 의한 Ettringite가 생성됨을 확인하였지

만 압축강도 저하 요인으로서 CSA에 높은 Al_2O_3와, 무수석고가 포함되지 않은 GGBFS를 사용함으로써, SO_3의 공급이 차단됨에 따라 C_3A의 초기의 급속응결이 일어나 유도기간의 수화반응을 방해하며, 압축강도 발현도 저하 되는 것으로 사료된다. 3일 재령에서 OPC를 단독 사용한 경우 1일과 비교하였을 때, 수산화칼슘의 수화반응이 보다 활발히 이루어져 지는 것을 확인하였으며, OBC2는 Ettringite의 침상의 형상이 증가하는 것을 확인하였다. OBC3는 OPC에 상대적으로 SO_3의 성분이 많아 후기생성물(Monosulfate)의 비중은 상대적으로 낮게 관측되었다.



(a) OPC (1일) (b) OB (1일) (c) OBC2 (1일) (d) OBC3 (1일)

(e) OPC (3일) (f) OB (3일) (g) OBC2 (3일) (h) OBC3 (3일)

Fig. 3.2.4 CSA계 분체 종류 및 재령 변화에 따른 SEM 관측 사진 (× 3,000배)

(다) CSA 계 분체 종류에 따른 결정구조 분석 (XRD)

XRD 는 X 선을 회절 시켜, 물질의 미세구조를 연구하는 기기로서 시료와 시료 형태에 대한 제한이 적고 비파괴 검사가 가능하다. 이에 따라, 각 알칼리 자극제와 혼합한 시멘트와 고로슬래그미분말의 페이스트의 특성이 수화작용에 미치는 영향과 화학적 특성을 알아보기 위해 페이스트 시편을 채취하여 아세톤에 24 시간이상 침지시켜 수화물의 변동이 생기지 않도록 수화정지 시킨 후 X-선 회절분석기(D/MAX RINT 2000)를 이용하여 분석을 실시하였다.

재령 1일에서, Ettringite는 OBC3와 OBD2에서 각각 8°, 15°, 19°, 23° 에서 나타냈다. 또한, OBC2는 수산화칼슘 및 미수화생성물인 C_3S가 높은 피크 점을 보였고, 1일 재령의 압축강도에서 2번째로 강도가 높은 OPC는 수산화칼슘의 Intensity 피크가 다른 시료보다 월등히 높으며 미수화생성물인 C_3S도 높은 피크 점을 나타냈다.

XRD의 분석으로 보면 CSA를 단독 사용한 OBC2는 CSA의 수화 반응에 필요한 SO_3의 공급이 원활하지 못하여, 수화물 생성이 활발하게 이루어지지 못하는 것을 알 수 있었다. OBC3는 재령 1일의 조기강도 개선에 효과적으로 작용하는 초기수화 생성물인 Ettringite가 생성됨으로써, 조기강도 발현에 우수한 역할로 작용하였으며, 이는 수산화칼슘의 양이 많은 OPC의 압축강도 보다 높게 나타내는 것을 알 수 있었다. 3일 재령의 XRD분석 결과를 보면, 미수화생성물 즉, C_3S의 피크는 상대적으로 줄어들고 수산화칼슘의 생성물이 전반적으로 증가하는 것을 볼 수 있었다.

시멘트의 수화생성 반응에서 석고의 존재 여부에 따라 석고의 양이 많으면 고황산염형(Ettringite)의 수화생성물들이 많고, 석고가 소진되면서 저황산염형(Monosulfate)의 안정된 수화물로 바뀌게 되므로, 이에 따라 석고가 다량 함유되어 있는 OBC3와 OBD2는 3일 이후에서도 Ettringite의 피크 점을 나타내 강도향상을 나타내는 것으로 사료된다.

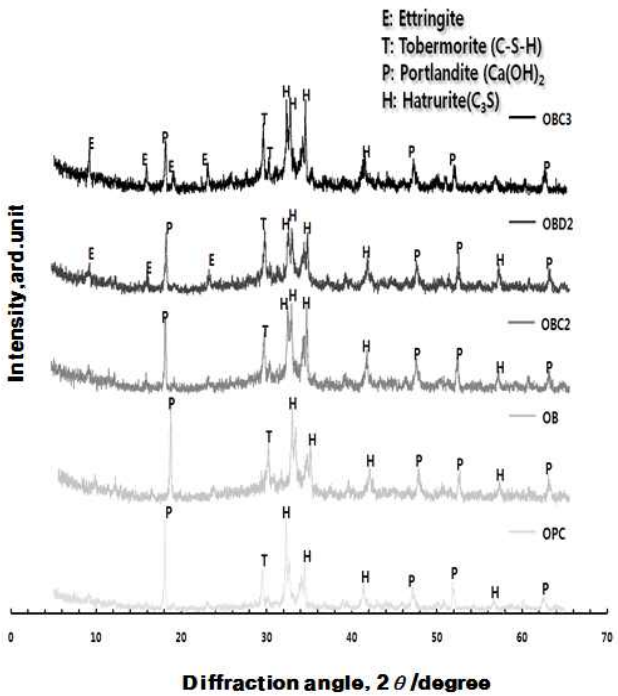


Fig. 3.2.5 CSA계 분체 종류에 따른 XRD 측정결과(1일)

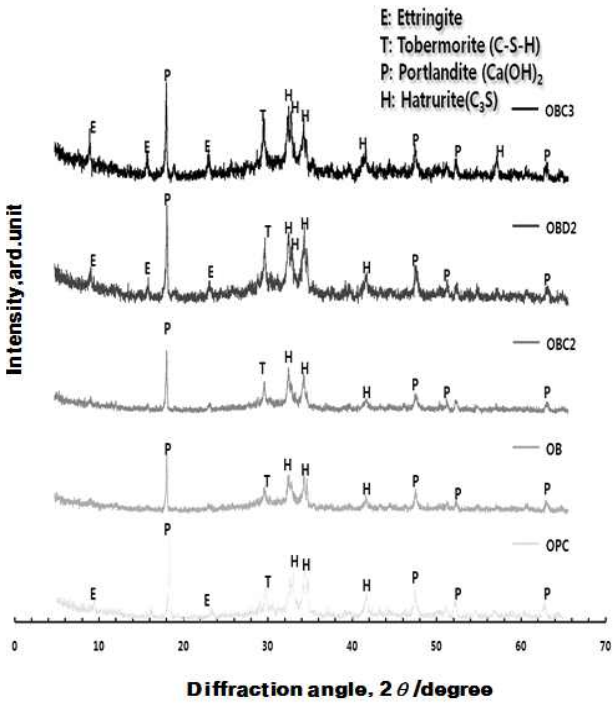


Fig. 3.2.6 CSA계 분체 종류에 따른 XRD 측정결과 (3일)

(라) CSA 계 분체 종류에 따른 TG-DTA 분석

Table 3.2.8과 Fig. 3.2.7~9은 CSA계 분체 종류에 따른 TG-DTA(열중량- 시차열 분석기)를 사용하여 수산화칼슘을 측정한 결과 값을 나타낸다. 일반적으로 수산화칼슘은 450~500℃로 열 분해되고 아래의 식에 따라 산화칼슘과 물로 된다.

$Ca(OH)_2 \rightarrow CaO+H_2O$ (1)

계산은, DTA의 탈수반응시작점을 구하고, 보통은 변곡점 전후 접선의 외삽선 교점으로 하는 것이 많으며, 탈수반응의 종료점을 구하여, 2점간의 질량감소를 TG곡선으로부터 구하였다. 수산화칼슘 및 물분자량은 각각 74.09, 18.02 이고 수산화칼슘과 물이 1mol 대 1mol의 비율로 생성되기 때문에 탈수에 의한 감량으로부터 수산화칼슘의 양을 계산하기 위하여 74.09/18.02=4.11을 환산 계수하여 이것을 탈수에 의한 감량에 곱하며, 계산식은 다음과 같다.

$Ca(OH)_2$ 의 함유량 = 450~500℃ 사이의 감량 × 4.11 (2)

즉, 탈수에 의한 감량 × 4.11= x (mg), 초기의 시료질량이 28mg이므로, x mg/28 × 100=수산화칼슘의 질량함유율(%)이 된다.

Table 3.2.8 TG-DTA분석을 통한 $Ca(OH)_2$ 질량 함유율(%)

기호	시료무게 (mg)	탈수에 의한 감량 (mg)	$Ca(OH)_2$ 질량 함유율(%)
1일			
OPC	28.00	0.33	4.84
OB		0.27	3.96
OBC2		0.28	4.11
OBC3		0.23	3.38
3일			
OPC	28.00	0.47	6.90
OB		0.39	5.28
OBC2		0.41	6.02
OBC3		0.34	4.99

OPC 및 CSA계 분체를 혼입 사용한 페이스트의 수화물을 TG- DTA를 사용하여 수산화칼슘 양을 측정하고 그 양을 계산식을 이용하여 정량화 하였다. 전체적으로, 450~ 500℃ 부근에서 수산화칼슘의 열분해로 인한 질량감소가 나타났다. 재령 1일보다는 재령 3일에서의 수산화칼슘 생성 질량이 수화진전에 따라 증가하는 것을 알 수 있었고 이에 따라 압축강도도 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한, CSA계 분체 종류에 따른 수화 생성물도 시간과 비례하게 증가 하였으며, 수산화칼슘의 질량 함유율 측정결과, 1일과 3일 동일하게 OBC3< OB< OBC2< OPC 순으로 나타났다. 또한 XRD의 성분분석결과에서 마찬가지로 시료별 수산화칼슘의 Intensity 피크 값의 순위와 동일하게 나타내고 있었다.

그러나, 재령 1일에서, OBC3는 OPC의 압축강도 보다 높게 나타났지만 오히려 수산화칼슘 질량 함유율은 작게 나타났다. 이것은, OBC3의 높은 강도발현은 수산화칼슘 양만 가지고서는 설명할 수 없으며, 시멘트의 화합물도 순수한 화합물로서 존재하지 않고, 다른 성분을 함유할 경우 수화반응은 복잡해지며, 수산화칼슘 이외의 초기수화 생성물인 Ettringite 등 다른 경화체의 작용에 의해서도 강도변화를 나타내는 것으로 사료된다.

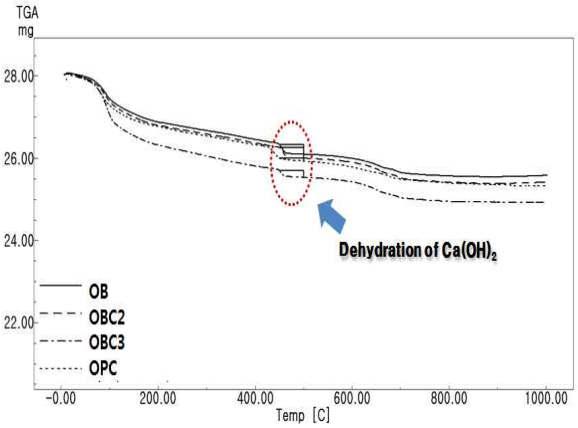


Fig. 3.2.7 CSA계 분체에 따른 TG-DTA 측정결과 (1일)

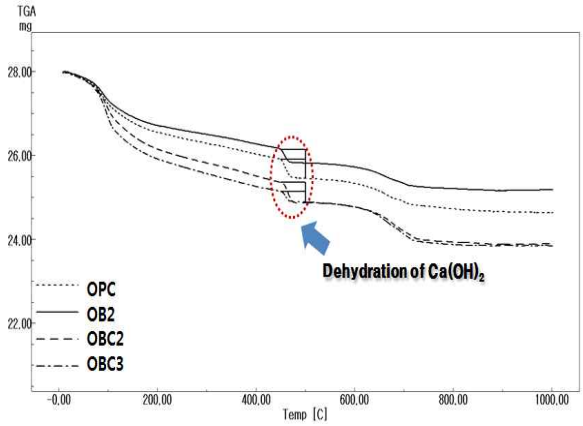


Fig. 3.2.8 CSA계 분체에 따른 TG-DTA 측정결과 (3일)

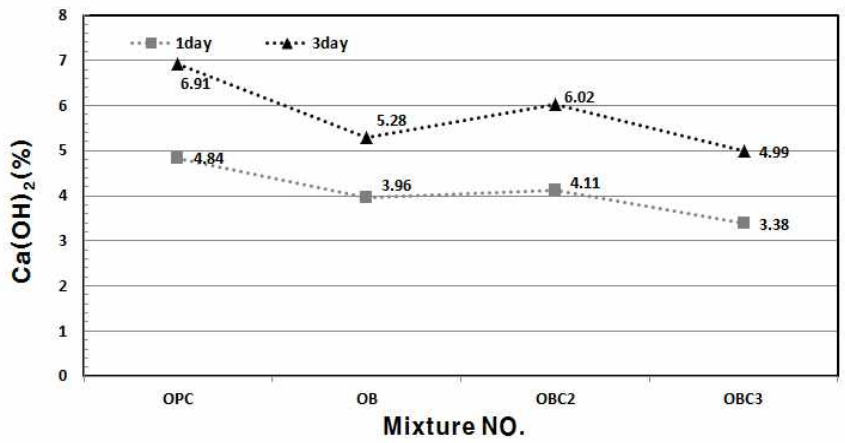


Fig. 3.2.9 CSA계 분체종류에 따른 재령별 수산화칼슘의 질량함유율(%)

(5) 소 결

본 연구에서는 GBFS 혼입 콘크리트의 재령 1일 및 3일 압축강도를 OPC 100% 사용 콘크리트의 압축강도와 동등 이상으로 확보하기 위하여, 모르타르 레벨에서 조강재로서 국내외 CSA계 및 신규 개발된 CSA를 사용하여 재령별 압축강도 발현을 시험적으로 규명하여, 다음

과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

본 연구에서 적용한 CSA를 사용한 OBC3 시험체는 석고와 알칼리 자극제인 Na_2SO_4를 각각 2.5%씩 혼합사용한 결과 OPC 100% 사용 시험체와 비교하여, 재령 1일에서 130.7%, 재령 3일에서는 93.4%의 압축강도 발현을 나타내어 CSA(5,000)의 급격한 수화로 인한 강도 저하 현상을 개선할 수 있었다.

재령별 SEM분석결과, 초기재령에서 수산화칼슘 및 규산칼슘 수화물의 생성을 확인하였으며, CSA계 시험체에서 Ettrigite 생성을 확인 할 수 있었다.

재령 1일에서의 Ettringite 피크는 OBD2와 OBC3에서 나타났으며 OPC는 수산화칼슘의 Intensity 피크가 다른 시료보다 월등히 높았다. 3일 재령의 XRD분석 결과를 보면 미수화생성물 즉, C_3S의 피크는 상대적으로 줄어들고 수산화칼슘의 생성물이 전 시료에서 전반적으로 증가하여 압축강도가 증가하는 것으로 판단된다.

시멘트 수화물을 TG-DTA를 사용하여 측정하여, 시멘트 페이스트의 수산화칼슘의 질량 함유율을 재령별로 측정하였다. 압축강도의 발현은 재령에 따라 수산화칼슘의 질량 함유율과 비례하여 나타나지만 Ettringite와 같은 다른 경화체의 작용에 의해서도 강도변화를 나타나는 것을 알 수 있었다.

이상의 결과를 종합한 결과, GBFS를 혼입한 콘크리트의 조기강도를 개선하기 위한 방법으로서 CSA계의 분체에 SO_3공급과 알칼리자극을 활용하여 모르타르 레벨에서의 압축강도를 개선할 수 있었다. 한편, 기존 선행 연구자들의 의하여 CSA를 활용한 고로슬래그미분말 혼입 콘크리트의 압축강도 향상을 위한 연구를 진행하였는데, 선행연구에서 대체로 CSA의 치환율에 따른 초기재령에서의 압축강도 검증 실험들이 이루어졌으며, 기존 고로슬래그미분말 혼입 모르타르 및 콘크리트 보다 압축강도를 개선할 수 있었지만, 초기재령에서의 OPC의 동등이상의 강도발현을 나타내는 것이 본 연구와의 차별성으로 나타난다.
또한, CSA의 주목적인 건조수축 균열에 대한 저감 연구들을 진행하고 있다. 본 연구에서는 고로슬래그미분말 혼입 콘크리트의 초기재령 향상 기술개발의 목적으로 본 연구를 통하여 얻은 결론으로서 다량의 Al_2O_3 함유하는 CSA에서 초기에 급결현상이 나타나 오히려 수화반응을 저하되며, 이를 개선하기 위한 요인으로서 SO_3의 공급과 응결조절제를 통하여 시멘트의 반응성을 조절하여 압축강도의 지속적인 발현을 나타낼 수 있었다.
한편, CSA와 같이 높은 제조비용은 실용화에 있어 또 다른 한계점을 나타내기 때문에 경제성을 고려한 제품개발이 이루어져야 한다.

나. 알칼리계 자극제를 활용한 GBFS 혼입 모르타르실험

(1) 사용재료

모르타르내의 OH- 농도가 높으면 고로슬래그미분말의 잠재수경성 및 시멘트수화반응을 촉진하기 때문에 각 시리즈 별로 기존 문헌을 참고하여 알칼리 자극제를 종류 및 사용량을 선정하였으며, TEA를 제외하고는 전부 분말형 자극제를 사용하였다.

(2) 실험계획

기존 연구와 달리 GBFS를 자극시키는 알칼리성 무기계 자극제의 선정 실험(Series Ⅰ), OPC를 자극시키는 알칼리성 무기계 자극제의 선정 실험(Series Ⅱ)을 실시 한 후에, 최적의 알칼리성 무기계 자극제를 선정하고 이를 활용하여 GBFS혼입 모르타르의 조기강도 향상을 위한 알칼리성 무기계 자극제 선정실험(Series Ⅲ)을 실시하였다. Table 3.2.9은 본 실험에서 사용된 알칼리 자극제의 종류 및 성상에 대하여 나타내었으며, Table 3.2.10, 3.2.11, 3.2.12에 각 Series별로 배합표를 나타낸다.

Series Ⅰ의 조기강도 혼화재로서 GBFS에 조기강도 향상에 유효한 NaOH, $Ca(OH)_2$, 소석회, Na_2SiO_3, Na_2CO_3을 일정비율로 치환하였다. Series Ⅰ에서 GBFS 100% 치환한 모르타르와 GBFS에 대한 알칼리성 무기계 자극제의 치환율을 달리하여 강도 발현이 좋은 자극제를 찾기 위해 NaOH과 $Ca(OH)_2$은 각각 5%, 10%, 20%로 설정하였고, 소석회는 5%, 10%, 20%, Na_2SiO_3는 5%, 7%, 10%, Na_2CO_3는 3%, 7%, 10%로 치환하였다. Series Ⅱ에서는 OPC의 조기강도 향상에 효과가 있는 NaSCN, $Ca(N0_3)_2$, $Na_2S_2O_3$, TEA, $CaCl_2$을 일정비율로 치환하여 실험을 실시하였다.

Series Ⅱ는 OPC 100% 기준으로 NaSCN은 2%, 6%, 10% 치환하고, $Ca(N0_3)_2$는 1%, 3%, 5%, $Na_2S_2O_3$는 2%, 6%, 10%, TEA은 0.02%, 0.05%, 0.1% 마지막으로 $CaCl_2$는 0.5%, 1%, 2%로 하여 OPC에 강도 발현이 좋은 첨가재와 함유율을 찾기 위해 치환율을 달리하였다.

Series Ⅲ에서는 Series Ⅰ과 Series Ⅱ를 먼저 실험을 실시하여 GBFS와 OPC에 대하여 조기강도 발현율이 가장 좋은 알칼리성 무기계 자극제를 선정하여 실험을 실시하였으며, 최적의 배합을 찾기 위해 OPC 100%와 OPC(80%)+GBFS(20%)를 기준으로 하여 $CaCl_2$와 NaSCN, TEA는 OPC에 대하여 치환하고, $Ca(OH)_2$, NaOH, 소석회는 GBFS 20%에 대하여 치환하여 실험하였다.

(3) 실험방법 및 측정방법

Series Ⅰ(GBFS 100% 질량), Series Ⅱ(OPC 100% 질량) 및 Series Ⅲ(OPC 80% 질량, GBFS 20% 질량) 배합에서 각 바인더(GBFS, OPC, OPC+GBFS)와 잔골재의 질량비율은 1:3으로 하였으며, 물 바인더비(W/B)는 50%로 고정하였다.

모르타르 배합용량은 40mm×40mm×160mm 각주 3개에 맞추어 바인더 450g, 잔골재 1,350g, 물 225g을 사용하였다. 또한, 모르타르 믹싱은 KS L ISO 679에 따라 같은 방법으로 실시하였다.

Table 3.2.9 알칼리 활성화 자극제의 종류 및 성상

항목	사용 자극제	성상
Series Ⅰ (GBFS 자극제)	$Na(OH)_2$	White powoder
	$Ca(OH)_2$	
	Calcium Hydroxide	
	Na_2SiO_3	
	Na_2CO_3	
Series Ⅱ (OPC 자극제)	NaSCN	White powoder
	$Ca(N0_3)_2$	
	$Na_2S_2O_3$	
	$CaCl_2$	
	TEA (Tri Ethanol Amine)	Liquefied
Series Ⅲ (GBFS+OPC 자극제)	NaOH	White powoder
	$Ca(OH)_2$	
	Calcium Hydroxide	
	NaSCN	
	$CaCl_2$	
	TEA	Liquefied

Table 3.2.10 Series Ⅰ - 고로슬래그미분말(GBFS) 자극제 선정 실험 배합표

NO	기호	W/B (%)	질량비율(%)						단위질량(g)							
			GBFS	NaOH	$Ca(OH)_2$	소석회	Na_2SiO_3	Na_2CO_3	GBFS	NaOH	$Ca(OH)_2$	소석회	Na_2SiO_3	Na_2CO_3	S	W
1	BN1	50	95	5	-	-	-	-	427.5	22.5	-	-	-	-	1,350	225
			90	10	-	-	-	-	405	45	-	-	-	-		
			80	20	-	-	-	-	360	90	-	-	-	-		
2	BC1		95	-	5	-	-	-	427.5	-	22.5	-	-	-		
			90	-	10	-	-	-	405	-	45	-	-	-		
			80	-	20	-	-	-	360	-	90	-	-	-		
3	BC2		95	-	-	5	-	-	427.5	-	-	22.5	-	-		
			90	-	-	10	-	-	405	-	-	45	-	-		
			80	-	-	20	-	-	360	-	-	90	-	-		
4	BN2		95	-	-	-	5	-	427.5	-	-	-	22.5	-		
			93	-	-	-	7	-	418.5	-	-	-	31.5	-		
			90	-	-	-	10	-	405	-	-	-	45	-		
5	BN3		97	-	-	-	-	3	436.5	-	-	-	-	13.5		
			93	-	-	-	-	7	418.5	-	-	-	-	31.5		
			90	-	-	-	-	10	405	-	-	-	-	45		

Table 3.2.11 Series II - 시멘트(OPC) 자극제 선정 실험 배합표

NO	기호	W/B (%)	질량비율(%)						단위질량(g)							
			OPC	NaSCN	$Ca(NO_3)_2$	$Na_2S_2O_3$	TEA	$CaCl_2$	OPC	NaSCN	$Ca(NO_3)_2$	$Na_2S_2O_3$	TEA	$CaCl_2$	S	W
1	OPC	50	100	-	-	-	-	-	450	-	-	-	-	-	1,350	225
2	ON1		98	2	-	-	-	-	441	9	-	-	-	-		
			94	6	-	-	-	-	423	27	-	-	-	-		
			90	10	-	-	-	-	405	45	-	-	-	-		
3	OC1		99	-	1	-	-	-	445.5	-	4.5	-	-	-		
			97	-	3	-	-	-	436.5	-	13.5	-	-	-		
			95	-	5	-	-	-	427.5	-	22.5	-	-	-		
4	ON2		98	-	-	2	-	-	441	-	-	9	-	-		
			94	-	-	6	-	-	423	-	-	27	-	-		
			90	-	-	10	-	-	405	-	-	45	-	-		
5	OT		99.98	-	-	-	0.02	-	449.91	-	-	-	0.09	-		
			99.95	-	-	-	0.05	-	449.775	-	-	-	0.225	-		
			99	-	-	-	1	-	445.5	-	-	-	4.5	-		
6	OC2		99.5	-	-	-	-	0.5	447.75	-	-	-	-	2.25		
			99	-	-	-	-	1	445.5	-	-	-	-	4.5		
			98	-	-	-	-	2	441	-	-	-	-	9		

Table 3.2.12 Series III - 고로슬래그미분말 혼입 시멘트 모르타르 실험 배합표

NO	기호	W/B (%)	질량비율(%)								단위질량(g)									
			OPC	GBFS	NaOH	$Ca(OH)_2$	소석회	NaSCN	TEA	$CaCl_2$	OPC	GBFS	NaOH	$Ca(OH)_2$	소석회	NaSCN	TEA	$CaCl_2$	S	W
1	OPC	50	100	-	-	-	-	-	-	-	450	-	-	-	-	-	-	-	1,350	225
2	OB		80	20	-	-	-	-	-	-	360	90	-	-	-	-	-	-		
3	OBNN		78.4	19	1	-	-	1.6	-	-	352.8	85.5	4.5	-	-	7.2	-	-		
4	OBCN1		78.4	19	-	1	-	1.6	-	-	352.8	85.5	-	4.5	-	7.2	-	-		
5	OBCN2		78.4	16	-	-	4	1.6	-	-	352.8	72	-	-	18	7.2	-	-		
6	OBNT		79.9	19	1	-	-	-	0.016	-	359.9	85.5	4.5	-	-	-	0.072	-		
7	OBCT1		79.9	19	-	1	-	-	0.016	-	359.9	85.5	-	4.5	-	-	0.072	-		
8	OBCT2		79.9	16	-	-	4	-	0.016	-	359.9	72	-	-	18	-	0.072	-		
9	OBNC		79.92	19	1	-	-	-	-	0.08	356.4	85.5	4.5	-	-	-	-	3.6		
10	OBCC1		79.92	19	-	1	-	-	-	0.08	356.4	85.5	-	4.5	-	-	-	3.6		
11	OBCC2		79.92	16	-	-	4	-	-	0.08	356.4	72	-	-	18	-	-	3.6		

(4) 실험 결과

Table 3.2.13 각 Series의 재령별 압축강도 실험 결과

Series I (GBFS 자극)			Series II (OPC 자극)			Series III (OPC+GBFS 자극)		
Compressive Strength (MPa)								
GBFS	1day	3day	OPC	1day	3day	OPC+GBFS	1day	3day
BN1-5%	4.6	12.2	OPC-100%	3.5	21.3	OPC(100%)	10.4	25.6
BN1-10%	4.3	9.8	ON1-2%	4.3	24.3	OB(OPC80%+ GBFS20%)	8.2	21.7
BN1-20%	3.6	6.3	ON1-6%	2.3	18.3	OBNN	7.3	15.1
BC1-5%	1.1	3.5	ON1-10%	0.8	10.9	OBCN1	10	27.9
BC1-10%	0.9	3.1	OC1-1%	3.6	18.1	OBCN2	9.9	25.5
BC1-20%	0.6	3.1	OC1-3%	1.8	17.6	OBNT	8.6	16.3
BC2-5%	1.1	3.4	OC1-5%	2.2	21	OBCT1	9.4	23.6
BC2-10%	1.2	3.4	ON2-2%	3.1	19.8	OBCT2	9.7	20.2
BC2-20%	1.2	3.6	ON2-6%	3.3	15.1	OBNC	10.4	23.8
BN2-5%	0.5	0.6	ON2-10%	2.2	9.9	OBCC1	10.1	28.6
BN2-7%	0.4	0.6	OT-0.02%	4.2	23.1	OBCC2	9.1	25.5
BN2-10%	0.7	1.1	OT-0.05%	2.9	19.8			
BN3-3%	0	0.4	OT-1%	1.5	20			
BN3-7%	0	0.6	OC2-0.5%	3.8	19.4			
BN3-10%	0.2	0.8	OC2-1%	4.4	21.5			
			OC2-2%	6.8	16.5			

(가) Series I (GBFS 조기강도 향상 실험)

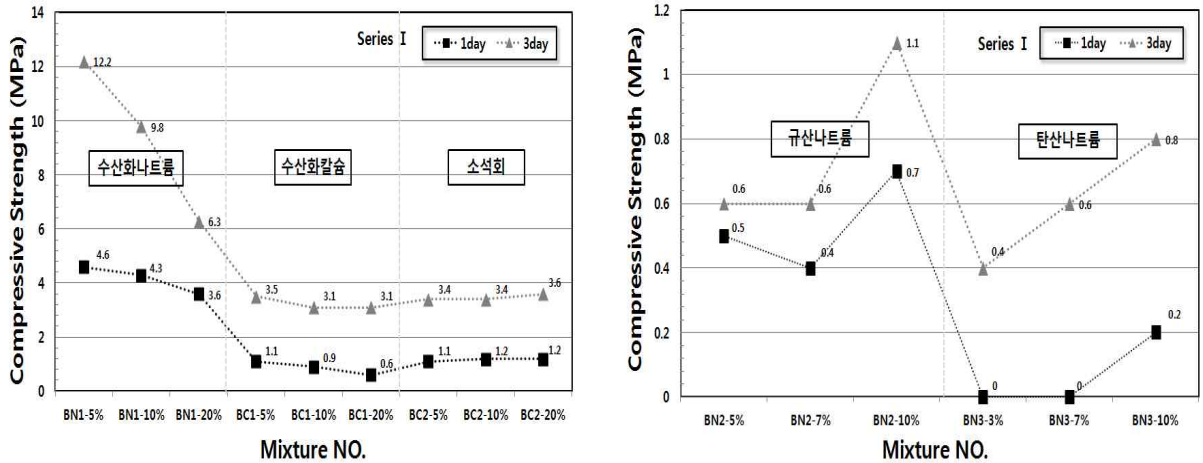


Fig. 3.2.10 Series I 재령 1, 3일 압축강도 (GBFS 자극)

Fig. 3.2.10은 바인더로서 GBFS 100%를 사용하고 자극제로서 NaOH, $Ca(OH)_2$, 소석회(Calcium Hydroxide)를 사용한 모르타르의 재령 1일과 3일의 압축강도를 나타낸 것이다. 재령 1일 및 3일 강도가 가장 높게 나타난 것은 NaOH이며 혼입율에 따라 차이가 나지만 $Ca(OH)_2$나 소석회와 비교하여 약 2~4배의 높은 강도를 나타냈다. 이것은 NaOH가 용해도가 높아 pH가 상대적으로 매우 높기 때문에 GBFS 첨

가재로서의 효율이 더 높기 때문이라고 판단된다. 또한, NaOH의 혼입율이 증가할수록 재령에 관계없이 압축강도가 저하하는 현상이 나타나는데 이는 혼입율 증가로 인한 높은 발열반응으로 강도가 감소하는 것으로 사료된다.

따라서, GBFS 첨가재로서는 NaOH가 가장 적합하였으며, 혼입율은 약 5%가 적당한 것으로 사료된다. 또한, 강도발현 성능은 낮지만 $Ca(OH)_2$ 5%, 소석회 20%의 경우도 GBFS 첨가재로 사용이 가능하다고 판단된다. 한편, Na_2SiO_3와 Na_2CO_3의 강도발현은 거의 없는 것으로 나타났다.

이는 기존 연구에서 알칼리 활성화 슬래그 수화 과정에서 ASH_6피막을 알칼리 자극제인 OH^-이온이 고로슬래그 입자표면에 흡착되면서 ASH_6 피막을 파괴시켜, 입자내부에 포위되어 있던 Ca^{2+}, Mg^{2+}, Al^{3+}등과 같은 수경성이온이 용출됨으로써 그 반응으로 인한 수화반응이 확산되어 GBFS에 첨가재로서의 역할을 할 수 있을 거라는 기대와 달리 재령 1일과 3일에서 강도발현이 진행되지 않은 것은 본 실험의 양생방법이 밀봉양생으로 수중양생과 비교하여 OH^-이온 용출이 적었기 때문으로 판단된다.

(나) Series II (OPC 조기강도 향상 실험)

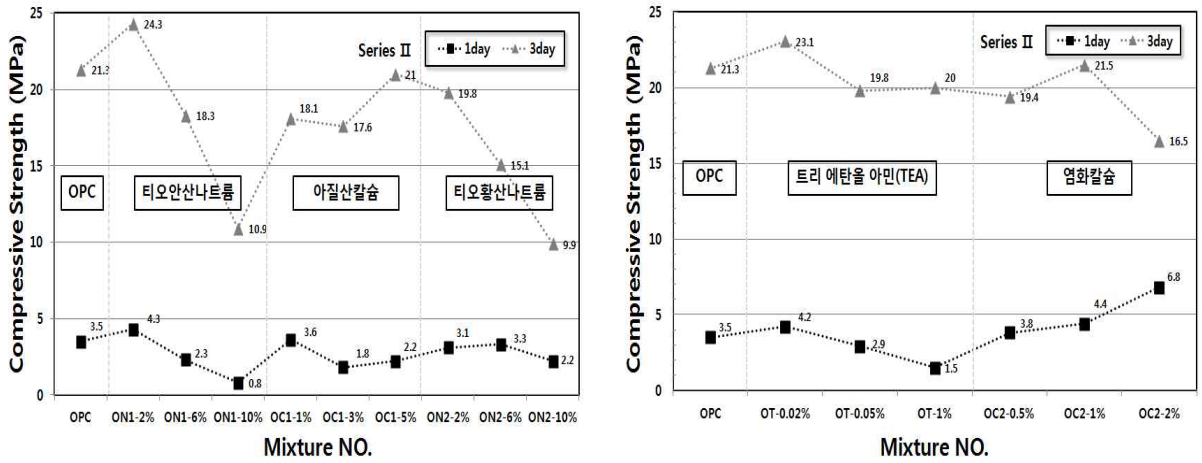


Fig. 3.2.11 Series II 재령 1, 3일 압축강도 (OPC 자극)

Fig. 3.2.11은 바인더로서 OPC 100%를 사용하고 첨가재로서 티오안산나트륨(NaSCN), 아질산칼슘($Ca(N0_3)_2$), 티오황산나트륨($Na_2S_2O_3$), 트리에탄올아민(TEA) 및 염화칼슘($CaCl_2$)을 사용한 모르타르의 재령 1일과 3일의 압축강도를 나타낸 것이다. OPC 100%를 사용한 경우의 압축강도와 비교하여 재령 1일 및 3일에서 동등 이상의 압축강도를 나타낸 것은 OPC 질량비율로 NaSCN 2% 혼입, TEA 0.02% 혼입, $CaCl_2$ 1% 혼입으로 나타났다. 특히, 재령 1일의 압축강도를 향상시키기 위해서는 NaSCN, TEA, $CaCl_2$가 매우 유효한 자극제로 나타났다.

(다) Series Ⅲ (OPC+GBFS 조기강도 향상 실험)

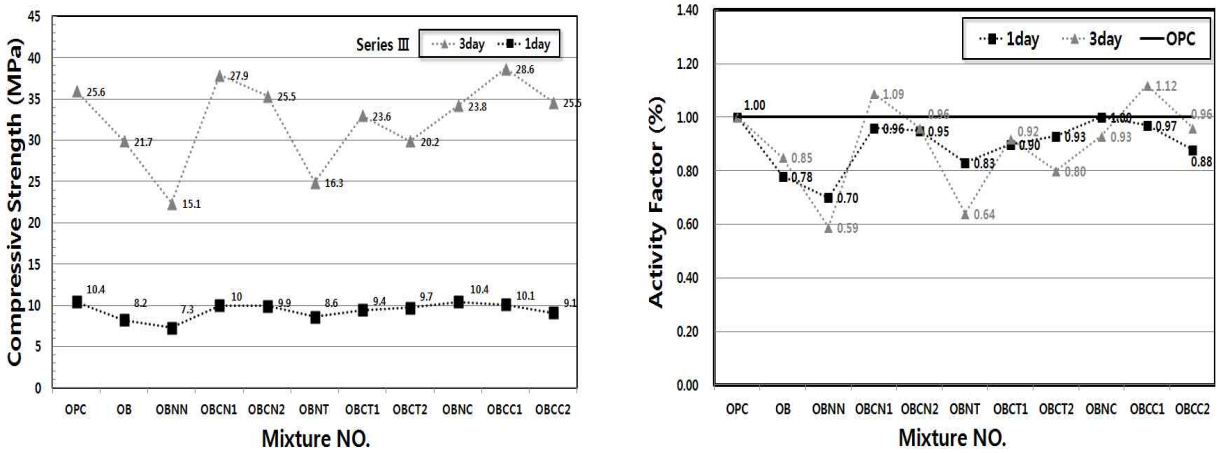


Fig. 3.2.12 Series Ⅲ 재령 1, 3일 압축강도 및 활성도지수 (OPC+GBFS 자극)

Fig. 3.2.12은 OPC를 질량으로 80%, GBFS를 질량으로 20% 혼합한 바인더에 대하여, Series Ⅰ의 GBFS 알칼리성 무기계 자극제로서 선정한 NaOH, $Ca(OH)_2$, 소석회(Calcium Hydroxide)를 GBFS 질량비율로 각각 5%, 5%, 20% 혼입하고, Series Ⅱ의 OPC 알칼리성 무기계 자극제로서 선정한 NaSCN, TEA 및 $CaCl_2$를 각각 OPC 질량의 2%, 0.02%, 1% 혼입한 경우의 시멘트모르타르 재령 1일과 3일의 압축강도를 나타낸 것이다.

OPC 100%를 사용한 경우와 비교하여 GBFS를 20% 치환한 경우 재령 1일에서는 약 21.2% 강도 저하, 재령 3일에서는 15.3% 강도 저하가 발생되었으며 특히 GBFS 혼입에 의하여 재령1일에서의 압축강도 저하가 크게 나타나 재령1일에서의 압축강도 향상이 매우 중요한 것을 알 수 있었다.

한편, 재령 1일 및 3일에서 OPC 100%를 사용한 경우의 압축강도와 동등 이상으로 압축강도가 발현되는 배합은 OBCN1(OPC 78.4%+GBFS 19%+$Ca(OH)_2$ 1%+NaSCN 1.6%), OBNC(OPC 79.92%+GBFS 19%+NaOH 1%+$CaCl_2$ 0.08%), OBCC1(OPC 79.92%+GBFS 19%+$Ca(OH)_2$ 1%+$CaCl_2$ 0.08%)으로 나타났다. 따라서, GBFS를 혼입한 시멘트 모르타르의 경우에도, GBFS를 자극시켜 압축강도를 향상하기 위해서는 NaOH의 사용이 매우 유효하다고 판단되며, OPC를 자극시키기 위해서는 NaSCN과 $CaCl_2$의 사용이 매우 유효하다고 판단된다. 특히, $CaCl_2$와 같이 사용한 배합에서는 $Ca(OH)_2$, NaOH, 소석회 모두 OPC 100%를 사용한 것보다 재령 1일 및 3일강도가 높게 나타났다. 이는 $CaCl_2$가 시멘트를 자극하여 조기강도가 향상되는 효과가 크기 때문으로 판단되나 $CaCl_2$사용에 따른 과다한 염소이온은 철근부식의 원인으로 되기 때문에 그 사용량에 있어 주의 할 필요가 있다고 판단된다.

또한, $Ca(OH)_2$를 사용한 경우도 조기 압축강도 발현이 높게 나와 초기재령에서 모르타르의 pH를 높여 수화반응을 촉진시킨 것으로 판단된다.

OPC만을 사용한 시험체의 압축강도를 각 재령에서 1로 한 경우, 각 배합에서 압축강도를 활성도지수로 표현한 것이다. GBFS 20% 혼입으로 압축강도 활성도지수는 약 0.78～0.85로 저하되는 것을 알 수 있다. 그러나, OBCN1, OBNC, OBCC1의 배합에서의 압축강도 활성도지수는 0.93～1.12로 나타나 OPC만을 사용한 것과 비교하여 동등 이상 압축강도를 나타내는 것을 알 수 있다. 특히, 재령 1일과 3일에서의 활성도지수가 동일 배합에서도 차이가 나는 것을 고려해 보면 재령 1일에서의 압축강도 향상에 초점을 맞추는 연구가 GBFS 치환율 변화에 따라 중점적으로 추진되어야 한다고 판단된다.

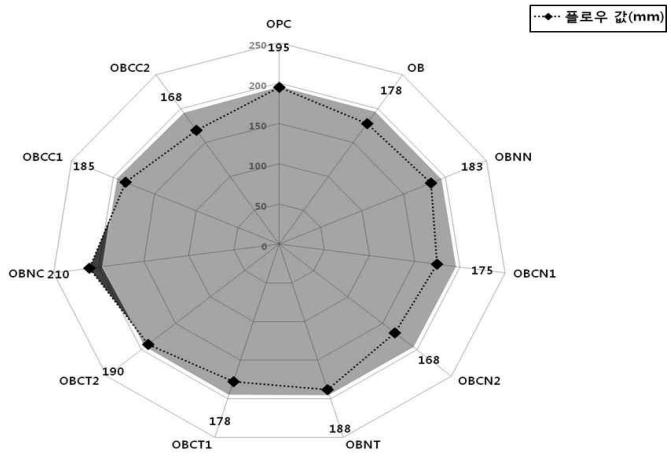


Fig. 3.2.13 각 배합별 모르타르의 타격 Flow값 (mm) SeriesⅢ

Fig. 3.2.13는 SeriesⅢ 실험에서 각 배합별 시멘트모르타르의 타격 Flow값을 나타낸 것이다. OPC 100%를 사용한 경우의 Flow값은 195mm를 나타내었으며, OBNC (OPC 79.92% +GBFS 19%+NaOH 1%+$CaCl_2$ 0.08%)이 210mm로 OPC 100% 보다 큰 Flow를 나타낸 것 이외에 모든 타 배합에서는 Flow가 168～190mm로 OPC 100%와 비교하여 약 3～14%로 저하되었다. 이러한 원인은 알칼리자극제에 의한 발열반응으로 모르타르의 유동성이 저하되었기 때문으로 판단된다.

따라서, GBFS 혼입 시멘트모르타르의 조기강도 향상을 위해서는 재령 1일 및 3일의 압축강도 향상뿐만이 아니라 금후, 응결 및 Flow값의 경시변화 등 Fresh상태에서의 시공성을 고려한 연구가 추가되어야 할 것으로 판단된다.

(5) 소 결

고로슬래그미분말 혼입 콘크리트의 재령 1일 및 3 일의 조기재령 압축강도를 높여 아파트와 같은 건축구조물 골조의 거푸집공사 조기 탈형을 통한 공사기간 단축은 건설생산성향상을 위하여 매우 중요한 과제이다. 본 연구에서는 모르타르레벨에서의 알칼리 자극제를 사용하여 분말형 조강혼화재를 선정하기 위하여 기존 연구와 달리 각각 고로슬래그미분말 및 시멘트를 자극시켜 강도를 발현하는 분말형 자극제 선정 실험을 실시하였다. 그 후, 앞선 실험에서 자극제로서 최적 분말형 혼화제를 활용하여 고로슬래그미분말 혼입 시멘트모르타르의 압축강도 발현 실험을 실시하여 고로슬래그미분말 혼입 시멘트모르타르의 재령 1일 및 3일

압축강도가 OPC 100%를 사용한 시멘트모르타르와 동등이상의 압축강도를 발현하도록 하는 분말형 조강혼화재 개발에 관한 기초적 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

고로슬래그미분말 조기강도향상을 위한 분말형 자극제 선정 실험(Series Ⅰ) 결과, 재령 1일 및 3일 강도가 가장 높게 나타난 것은 NaOH로서 혼입율을 5% 이며, 이는 NaOH가 용해도가 우수하며 pH가 상대적으로 매우 높아 고로슬래그미분말 자극 효율이 더 높기 때문이라고 판단된다.

보통포틀랜드시멘트 조기강도향상을 위한 분말형 자극제 선정 실험(Series Ⅱ) 결과, OPC 100%를 사용한 경우의 압축강도와 비교하여 재령 1일 및 3일에서 동등 이상의 압축강도를 나타낸 것은 시멘트 질량비율로 NaSCN 2% 혼입, TEA 0.02% 혼입, $CaCl_2$ 1% 혼입으로 나타났다.

고로슬래그미분말 혼입 시멘트모르타르의 조기강도 향상 실험(Series Ⅲ) 결과, GBFS를 혼입한 시멘트모르타르의 경우에도, GBFS를 자극시켜 압축강도를 향상하기 위해서는 NaOH의 사용이 매우 유효하다고 판단되며, 보통포틀랜드시멘트를 자극시키기 위해서는 NaSCN과 $CaCl_2$의 사용이 매우 유효하다고 판단된다.

GBFS 20% 혼입으로 압축강도 활성도지수는 약 0.78～0.85로 저하되나, OBCN1, OBNC, OBCC1의 활성도지수는 0.93～1.12로 나타나 OPC만을 사용한 것과 비교하여 동등 이상 압축강도를 나타내는 것을 알 수 있었다. 특히, 재령 1일과 3일에서의 활성도지수가 동일 배합에서도 차이가 나는 것을 감안하면 재령 1일에서의 압축강도 향상에 초점을 맞추는 연구가 금후, GBFS 치환율 변화에 따라 추진되어야 한다고 판단된다.

각 배합별 시멘트모르타르의 타격 Flow값은 OPC 100%와 비교하여 약 3～14% 저하되었으며, 이러한 원인은 알칼리자극제에 의한 발열반응으로 모르타르의 유동성이 저하되었기 때문으로 판단되므로, 금후, GBFS 혼입 시멘트모르타르의 조기강도 향상을 위해서는 재령 1일 및 3일의 압축강도 향상뿐만이 아니라 금후, 응결 및 Flow값의 경시변화 등 Fresh상태에서의 시공성을 고려한 연구가 추가되어야 할 것으로 판단된다.

고로슬래그미분말은 잠재수경성으로서 직접적인 수화반응이 진행되지 않는 점을 감안하여 강 알칼리성의 자극제를 사용함으로써, 초기수화반응을 촉진하는 연구들이 많은 연구자에 의해 연구되고 있으며, 이와 같이 혼화재의 반응을 촉진시키는 재료들을 알칼리 활성화제라고 하며, 대표적으로 이온화 촉진제, 알칼리 활성화제 등이 있다. 본 연구와 기존 실험연구들과의 차별성으로서 GBFS자극, OPC자극, GBFS + OPC동시자극 시험을 진행하여 각 실험 인자에 유효한 알칼리 자극제를 선별하였으며, 특히 기존연구들의 3일, 7일 이후의 재령에 대한 연구진행에 비하여, 고로슬래그미분말을 혼입하여 기존의 OPC 100%를 사용한 콘크리트와 동등한 수준의 조기강도를 확보할 수 있는 연구를 진행하고자 하였으며, 원천소재 개발에 있어 높은 pH를 나타낼 수 있는 원재료의 사용에 대한 기초적인 접근을 본 연구를 통하여 알 수 있었다.

다. 무수석고 첨가량 따른 GBFS 모르타르 실험

시멘트에 첨가되는 무수석고의 주 역할은 C_3A의 급결을 방지하여 시멘트의 응결을 조절하며, 그 외에도 초기에 C_3S의 수화를 촉진시켜 단기 강도의 향상, 또한 C_3A와 반응하여 생성된 에트링자이트 결정의 성장함으로 인한 건조수축의 저감 및 내화학성 향상 등의 목적으로 사용되고 있으며 이에 따라 고로슬래그시멘트에 SO_3함량에 따른 압축강도 추이를 확인코자 실험하게 되었다.

(1) 사용재료

본 실험에서 사용한 재료는 국내 S사의 1종 보통 포틀랜드시멘트와 고로슬래그는 H 사의 미분쇄 고로슬래그를 사용하였다. 볼밀에 고로슬래그와 분쇄조제를 혼입하여 분말도 4,400 cm^2/g급으로 제조하였으며, 무수석고는 태국산 천연 무수석고를 사용하였으며, 모르타르 압축강도 실험은 KS L ISO 679에 의거하여 실험하였다.

(2) 실험계획

GBFS의 화학성분중 SO_3의 함량의 따른 조기강도의 성능평가를 확인하기 위하여 무수석고를 첨가하여 0~4%의 SO_3의 함량을 CS분석기를 사용하여 Table 3.2.14와 같이 실험하였다.

Table 3.2.14 SO_3 함량에 따른 실험 배합표

NO	OPC(%)	GBFS(%)	SO_3함량	단위질량(g)				시험항목
				OPC	GBFS	S	W	
1	70	30	0%	315	135	1,350	225	■ 재령별 압축강도 (1, 3일) - KS L ISO 679 기준
2			1%					
3			2%					
4			3%					
5			4%					

Table 3.2.15 태국산 무수석고 화학분석(wt.%)

강열감량	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3
0.90	0.54	0.23	0.06	40.35	0.25	56.98

(3) 실험결과

Table 3.2.15와 Fig. 3.2.14는 압축강도 측정 결과를 나타내었다. 재령 1일에서는 SO_3 함량비 (2%, 1%, 4%, 3%, 0%)에 따라서 압축강도가 증가하였으나, 수화가 진행 재령 28일에서는 SO_3 함량비(3%, 4%)가 클수록 강도 발현율은 저하되었다. 이는 시멘트 내 석고 함량비가 과다하면 에트링자이트를 많이 생성시키고 수화생성물의 치밀한 구조를 와해시켜

강도 발현이 저하되고, 적으면 에트링자이트의 모노설페이트화가 급속하게 진행되어 액상 중 $Ca(OH)_2$의 농도를 저하시킨다. 이러한 액상중의 SO_4^{2-}의 부족과 $Ca(OH)_2$의 감소는 C_3S와 C_3A의 수화를 활발하게 하여 준안정상의 C-S-H 상이나 C-A-H 상을 많이 생성시키고 안정한 C-S-H 상의 핵생성을 지연시킨다는 기존 문헌과 유사한 경향을 나타났으며 SO_3 함량비 2%가 강도발현에 우수한 결과로 나타났다.

Table 3.2.16 SO_3 함유량에 따른 압축강도 값

SO_3 함유량	재령별 압축강도(MPa)측정값			
	1일	3일	7일	28일
0 %	7.1	23	37.6	55.7
1 %	8	23.2	39	56.1
2 %	8.2	25	36.3	56.9
3 %	7.3	24.1	36.5	51.6
4 %	7.6	23.2	33.8	51.5

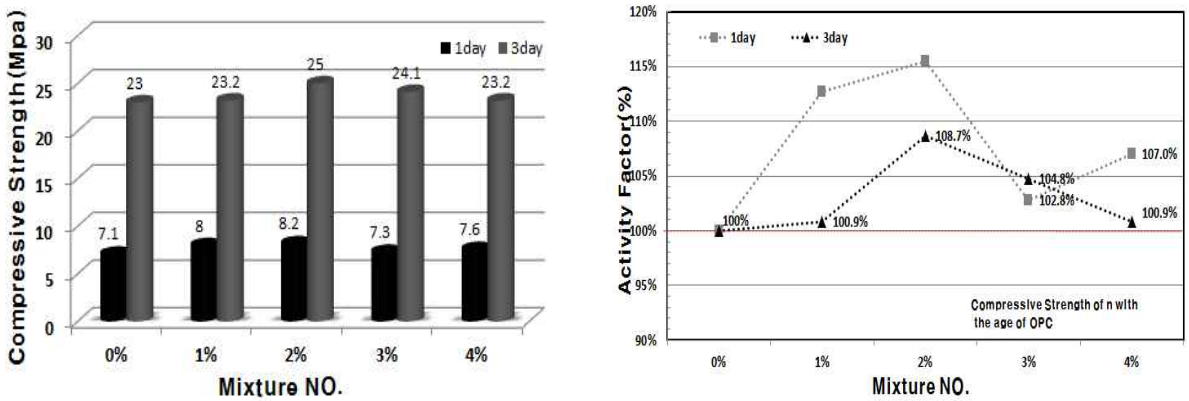


Fig. 3.2.14 SO_3 함유량에 따른 압축강도 및 활성도지수 결과

(4) 소 결

압축강도 측정결과, CS 분석기를 사용하여 무수석고를 첨가하여 SO_3의 함량에 따른 기초적인 실험으로서 모르타르 레벨에서의 고로슬래그미분말 혼입 시멘트의 압축강도 평가를 진행한 결과, SO_3 함량에서는 초기재령 1일에서 장기재령인 28일까지의 측정결과 SO_3 함량 2%의 사용에서 가장 우수한 강도발현을 나타내어, SO_3의 혼입량에 따라 안정된 수화반응의 진행여부를 본 연구를 통하여 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구의 범위는 고로슬래그미분말의 초기재령의 압축강도를 향상시키기 위한 방법 중, 선행연구의 대표적인 연구방법에 대하여 고찰 및 비교 분석하였으며 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

◎ CSA의 수화반응을 유도하기 위하여 다량의 Al_2O_3의 성분이 물과 반응으로 인한 급결현상을 방지하기 위하여, 응결조절제 및 SO_3 공급을 통해 안정적인 수화반응을 지속하는 결과를 도출 하였으며, 기존 논문들과의 차별성으로서 여러 배합에 대한 차이는 있지만, OPC 100% 사용과 비교하여 초기재령(1일, 3일)에서 동등이상의 압축강도를 확보할 수 방법을 제안하였으며, 우수한 결과를 얻을 수 있었다.

◎ 알칼리 자극제 시약을 사용하여 기존 연구와의 차별성으로 각각의 인자를 고려하여 개별적 실험을 진행하여, 고로슬래그미분말 자극에서 알칼리활성화제인 NaOH 5%, 시멘트 자극에서 이온화 촉진계인 NaSCN 2% 혼입, TEA 0.02% 혼입, $CaCl_2$ 1%, 동시자극에서 알칼리 활성화제와 이온화 촉진제를 혼용으로 사용하는 것이 OPC 동등이상의 압축강도를 나타내는 것을 실험을 통하여 도출하였으며, 원천소재의 적용에 있어 높은 pH를 갖는 인자를 확보해야 고로슬래그미분말에 대한 자극을 나타내야 할 것으로 사료된다.

◎ 일반적인 고로슬래그미분말에 소량의 무수석고를 활용하는 방법으로서 본 연구를 통하여 SO_3의 함량이 2%일 때, 우수한 압축강도를 나타내는 것을 확인하였으며, 이는 기존 논문과 유사한 경향성을 나타내어, 원천소재에 적용에 고려해야 할 사항이다.

◎ 기존 알칼리 자극에 관한 연구의 고찰로서 연구목표인 OPC 100%의 초기재령(1일, 3일) 압축강도 동등이상의 확보에 대한 가능성을 확인하였다. 천연자원의 고갈 및 탄소저감형 건설 재료를 구축하기 위한 노력들이 다방면으로 진행되고 있으나, 기본적인 경제성 결여 부분과 같은 문제점으로 나타나 실용화 측면에서 한계성을 나타낸다. 이에 대하여 대응방안으로서 고로슬래그미분말 자극 및 시멘트 자극에 유효한 Al2O3, SiO2, SO_3 및 강 알칼리성의 반응을 유도하는 CaO의 화학적 성분을 함유하는 산업부산물 및 산업폐기물을 활용하여 경제성 및 대량 확보가 가능한 원천소재 원재료를 선정하여, 모르타르레벨 및 콘크리트레벨에서의 메커니즘 규명 및 물성과 내구성 평가, 탄소절감의 건설 재료로서의 CO_2 원단위 평가 및 경제성 평가를 진행하여 건설현장에서의 실용화를 목표로 연구를 진행하였으며, 사회적으로 문제되고 있는 천연자원 및 에너지 고갈 문제와 이산화탄소 배출에 의한 환경오염 문제를 동시에 해결할 수 있는 방안으로 예상된다.

제 3절 알칼리성 무기계 자극제의 개발 및 수화 특성

1. 개요

상기 기존에 유통되고 있는 알칼리 자극제의 실험 결과를 종합하여 볼 때 수경성과 잠재수경성을 동시에 자극 할 수 있는 원천소재 개발의 원재료가 요구되어 찾아 본 결과 하수처리 종말장의 정수오니와 티탄을 정제한 후 발생된 산업부산물과 시멘트 주원료인 석회석을 주원료로 하여 시멘트생산 과정 중 소성온도에 따라 성분 메커니즘의 변화에 착상하여 원천소재를 만들기로 하였으며 자극제라는 것은 잠재되어 있는 성질을 부르는 말로서 촉매적인 작용을 가지고 있는 첨가제이며, 반응을 일으키기에 필요한 양만을 의미하는 것이 아니고, 이후의 반응을 지속적으로 진행시키는 것을 의미한다.

2. 실험 계획

가. 실험계획 및 방법

Table 3.3.1 원천소재 적용 주요 실험 내용

단계	내용	시험항목
모르타르 적용실험	• 시멘트 자극 최적혼합비율 선정실험 • GBFS 자극 최적혼합비율 선정실험 • 저온환경 자극제 검증실험 • 각 산지별 정수오니 적용실험 • SBFS 미세분석	• 압축강도 측정 (KS L ISO 679) • 타격 플로우 (KS L 5111) • XRF 성분분석 • XRD 정량 결정분석 • SEM 촬영
콘크리트 적용실험 및 Mock-up Test (내구성 평가)	• SBFS 원천소재의 혼합 비율에 따른 콘크리트 검증실험 • GBFS 강도 발현 검증실험 • SBFS 원천소재 치환율에 따른 콘크리트 성능 평가 실험 • SBFS 혼인 저탄소 콘크리트 규격별 최적 배합 성능 평가 실험 • 현장 B/P 생산을 통한 실 부재 적용실험	• 슬럼프 및 공기량 (KS F 2402) (KS F 2421) • 재령별 압축강도 측정 (KS F 2405) • 간이 단열온도 상승시험 • 건조수축 길이변화 시험 • 소성수축 균열 실험 • 탄산화 촉진 실험
SBFS 저탄소 콘크리트의 CO_2 배출량 및 경제성 평가	• SBFS 및 SBFS시멘트 전 과정 CO_2 배출 원단위 평가 • SBFS 혼입 콘크리트의 CO_2배출량 평가 • SBFS 혼입 콘크리트의 건축물의 CO_2배출량 및 경제성 평가	• 산업연관분석방식 • 국가 LCI DB • 개별적산 방식 • 구조해석프로그램 (MIDAS) • BIM 이용

나. 원천소재 소성과정 및 실험방법(모르타르 레벨)



1. 주원료(티탄석고)



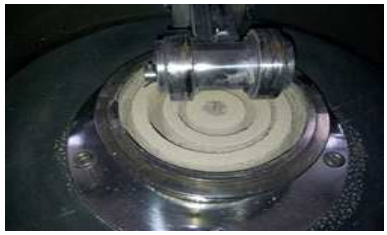
2. 주원료(석회석)



3. 주원료(정수오니)



4. 건조기에 100℃ 시료건조



5. 디스크밀에서 시료 분쇄



6. 물과 시료의 혼합



7. 시료를 환의 형태로 제작



8. 100℃에서 환의 형태를 건조



9. 간이소성전기로 (1050℃)



10. 소성전기로 시료투입



11. 600℃~1050℃ 소성



12. 소성 후, 급냉 시료 클링커



13. 클링커 시료 분쇄



14. 모르타르 혼합



15. 플로우 실험



16. 모르타르 시험체 제작



17. 항온항습기 공시체 양생



18. 모르타르 압축강도시험

다. 원천소재 소성과정 및 실험방법(콘크리트 레벨)



1. 주원료(티탄석고)



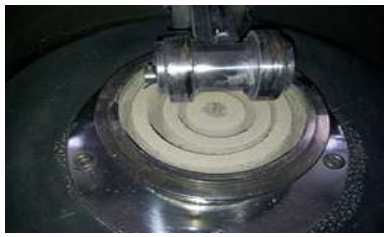
2. 주원료(석회석)



3. 주원료(정수오니)



4. 건조기에 100℃ 시료건조



5. 디스크밀에서 시료 분쇄



6. 물과 시료의 혼합



7. 시료를 환의 형태로 제작



8. 100℃에서 환의 형태를 건조



9. 간이소성전기로 (1050℃)



10. 소성전기로 시료투입



11. 600℃~1050℃ 소성



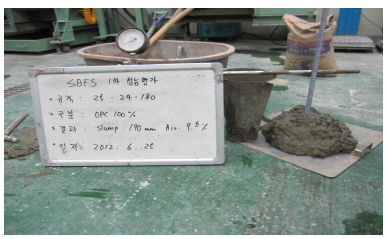
12. 소성 후, 급냉 시료 클링커



13. 클링커 시료 분쇄



14. 재료 믹싱



15. 슬럼프 및 공기량 측정



16. 재령별 압축강도 측정



17. 간이 단열온도 상승시험



18. 건조수축 길이변화 시험

3. 원천소재 재료의 특성

가. 원천소재 종류

(1) 티탄석고

국내의 대표적인 배연탈황석고는 화력발전소에서 화석연료(석탄, 기름)의 연소 시 발생되어지는 대기오염의 원인이 되는 아황산가스(SO_2)를 제거하기 위하여 흡수제인 분말 석회석($CaCO_3$)을 반응시키면 부산물로 석고가 생산되어 일부 시멘트 회사 및 2차제품의 필러 첨가재로 사용하고 있으나, 본 연구에서 사용한 티탄석고는 이산화티타늄 제조과정에서 발생되는 부산물로서 황의 산성을 석회로 중화시키는 화학반응 공정에서 발생되는 부산물이며 화학식은 $CaSO_4+2H_2O$이다. 티탄석고는 다량의 CaO(39.2%)와 SO_3(54.3%)를 함유하며, 티탄석고는 건조 후 물과 접촉하면 발열반응과 함께 응결이 나타나며, 석회석과 혼합 시 소성전,(pH 6)에서 소성 후(pH 7.5)로 변화하게 되며, 이는 고로슬래그미분말의 알칼리자극제의 역할뿐만 아니라 시멘트의 자극제의 역할도 담당한다. 또한 산업부산물로서 월 4,000톤이 발생되어지며 Table 3.3.2와 Fig. 3.3.2, Fig. 3.3.3은 티탄석고의 화학 성분 및 티탄석고의 제조과정, 저장현황 광경을 나타낸다.

Table 3.3.2 티탄석고의 화학 성분

구분	화 학 성 분 (%)									합계	비중
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	TiO_2	P_2O_5		
티탄석고	1.49	0.54	0.80	35.83	0.44	51.23	0.09	1.55	0.02	91.9	2.62

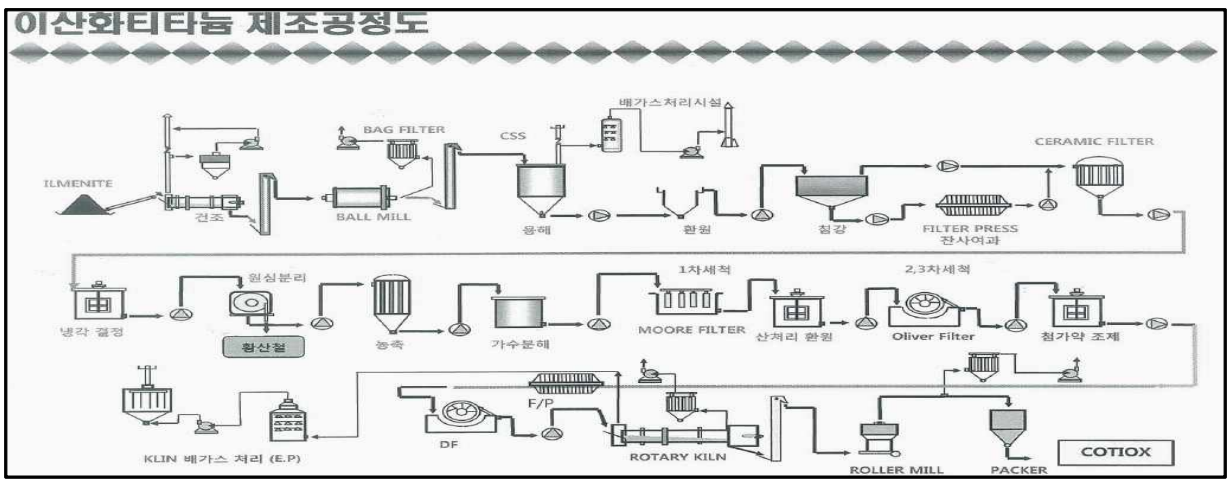


Fig. 3.3.1 이산화티타늄 제조공정 과정



Fig. 3.3.2 티탄석고의 저장현황 광경

(2) 정수오니

정수오니는 원수중의 탁도 물질과 응집제의 수산화물이 응집 농축된 액상의 물질이며, 응집·침전공정에서 탁도 물질을 제거시키기 위해 주로 알루미늄 응집제를 사용하는데, 이 때문에 정수슬러지를 alum 슬러지라고도 한다.

Table 3.3.3 사업장 발생 오니의 종류

오니의 종류	특 성
정수처리오니	정수처리과정에서 발생되는 오니
하수처리오니	하수처리과정에서 발생되는 오니
공정오니	사업장에서 발생된 폐수 중 폐수처리장으로 유입전 분리 처리되는 오니
폐수처리오니	폐수처리과정에서 발생되는 오니

(가) 정수오니 발생과정



Fig. 3.3.3 정수오니 발생 과정

(나) 정수오니의 화학조성

탈수된 슬러지 케잌의 화학적 성분을 분석하는 목적은 슬러지를 취급하거나, 처분 및 재이용하는 측면에서 찾아볼 수 있다. 슬러지의 화학적 조성은 원수자체의 성분과 응집제 및 탈수제의 성분으로 구성되는 주로 실리카분, 알루미나분, 강열감량 등으로 구분되고 일반적인 조성비율은 Table 3.3.4는 정수오니의 화학 성분을 나타낸다.

Table 3.3.4 정수오니의 화학 성분

구분	화 학 성 분 (%)									합계	비중
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	TiO_2	P_2O_5		
오니	34.97	27.34	4.44	0.79	1.14	1.07	1.77	0.47	0.73	72.72	1.84

여기서 강열감량은 유기물, 탄소, 화학적결합수 등으로 이루어져 있으며 200~400℃ 사이에서 급격한 감량을 나타내고 500℃ 정도에서 90%이상, 600~800℃ 에서 거의 전량이 감량된다. 이 감량변화는 미세점토 및 $Al_2(OH)_3{\cdot}3H_2O$의 탈수에 의한 영향을 받고 있다.

본 연구에서 분석된 정수장 슬러지의 화학적 성분조성은 대부분의 정수장에서 실리카분(SiO_2)이 35~50%의 범위로서 가장 많은 구성요소가 되고 있다. 그밖에 미량금속인 K, Mg, Na, Ca, Ti, S, P 등의 산화물이 검출되었다. 이것은 지구의 지표 구성물질과 비교하여 알루미나분과 강열감량이 다소 많은 것을 제외하면 지각의 구성성분과 아주 유사한 구성성분으로 되어 있다. 이에 따라 시멘트 원료로 활용을 보면 정수슬러지의 성분에 시멘트 원료인 SiO_2(규소), 알루미나(Al_2O_3), CaO, Fe_2O_3 중 규소와 알루미나 성분이 80% 이상 포함되어 있어 시멘트원료로 활용이 가능하다. 정수슬러지의 성상이 시멘트 원료인 점토성분과 비슷하여 시멘트의 품질에 영향이 거의 없는 것으로 보고되고 있다.

(3) 석회석

석회석은 $CaCO_3$ 를 주성분으로 하는 수성암이며 CaO 성분의 공급원료 중에서 가장 널리 쓰이는 광물이다. Cambrian기로부터 제 3기까지의 각 지질시대에 걸쳐서 널리 분포되어 중요한 지층의 일원으로 되어 있는데 그 중에서도 고생대의 석회석이 가장 많고, 이용가치도 크며, 우리나라의 석회석은 지질시대로 보아 Oldvisian기 또는 Cambrian기에 속하는 석회석 광상이 두꺼운 지층을 형성하여, 강원도를 중심으로 거의 전국에 널리 분포되어 있고, 그 매장량 또한 막대하고 석회석의 무기재료공업에서의 이용을 보면 시멘트공업, 플라스틱공업, 유리공업, 도자기공업 등 거의 모든 공업과 관계가 있으며, 무기재료공업 이외에도 제철, 카바이드공업, 소다공업, 석회질소공업, 침강성 탄산칼슘공업 등 헤아릴 수 없을 정도로 용도가 넓으며, 특히 포틀랜드 시멘트의 주원료인 클링커를 만드는데 있어서 가장 큰 비율을 차지하는 재료가 바로 석회($CaCO_3$)이다.

이러한 석회는 산화칼슘 (CaO)이 주성분이며 이외에 실리카(SiO_2), 알루미나 (Al_2O_3), 산화철 (Fe_2O_3)의 4성분으로 구성되어 있으며, 이와 같은 4성분이 소성반응을 거쳐 알라이트(alite), 벨라이트(belite), 알루미네이트(Aluminate), 페라이트(Ferrite)등의 4가지 클링커 광물을 생성한다. 이와 같은 각각의 클링커 광물은 성분의 함유량에 있어서 시멘트로서의 특성이 다르게 나타나기 때문에 사용되는 원료의 적절한 화학조성의 배합을 통하여 본 연구에서도 클링커 자극제로서 석회가 사용할 수 있다는 점을 착안하여 일부 소량을 Smart 고로슬래그미분말에 치환을 하여 자극제로서의 성능을 평가 하기위해 노력하였다. Table 3.2.5와 Fig. 3.3.4는 석회석의 화학분석과 시멘트 제조에 따른 석회석의 화학조성 변화를 나타낸다.

Table 3.3.5 석회석의 화학성분

구분	화 학 성 분 (%)									합계	비중
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	TiO_2	P_2O_5		
석회석	0.5	0.3	0.2	96.7	1.9	0.1	0.0	0.0	0.0	99.7	2.76

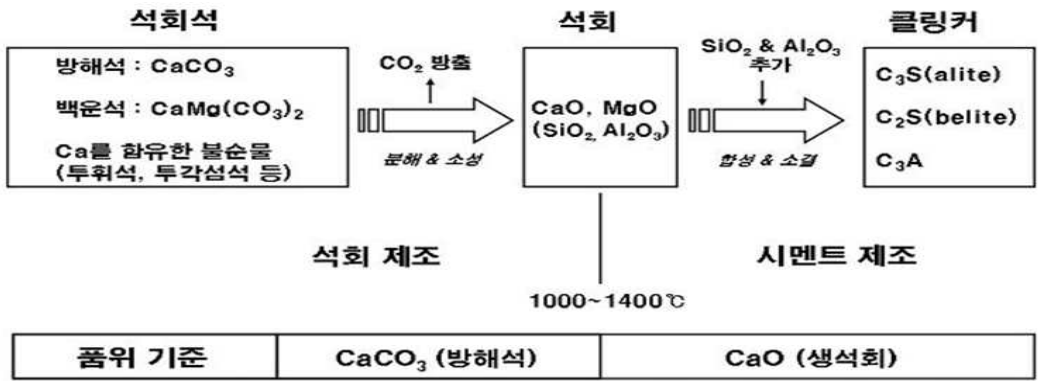


Fig. 3.3.4 시멘트 제조의 따른 석회석의 화학조성 변화

나. 원천소재 소성의 착안점

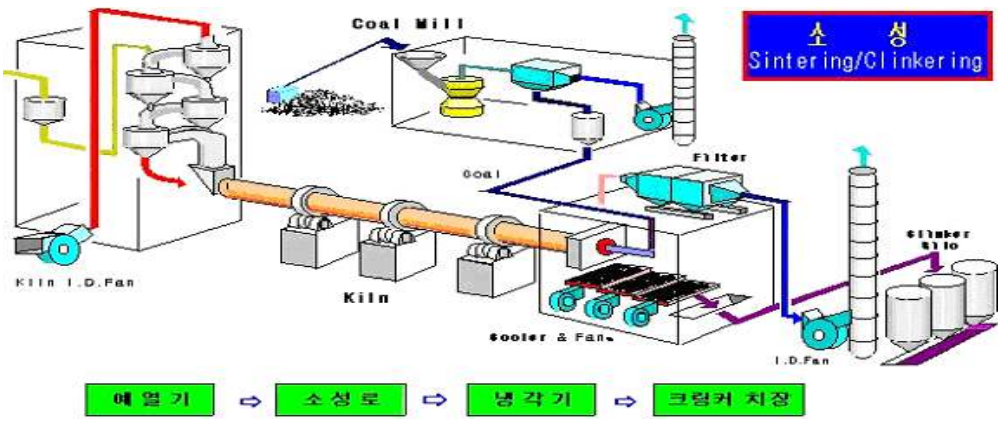


Fig. 3.3.5 클링커 소성과정

Table. 3.3.6 클링커 소성과정 반응

온도℃	반응	반응과정
20~100 100~300 400~900	건조 및 예열 Drying, preheating	원료중의 부착수분 증발 결정수 증발 결합수(화합수)증발
600℃		
600~900	하소 Calcination	원료중의 CO_2 분해 벨라이트, 알루미네이트, 펠라이트 불안정 액상 생성
1,100℃		
>1250	소성 Sintering, clinkering	액상 생성 엘라이트생성 안정된 엘라이트, 벨라이트 생성
1,450℃		
1000~1240	냉각	알루미네이트, 페라이트액상의 결정화, 안정화

Table 3.3.6 클링커 소성과정 반응의 광물 양적변화를 나타낸다. 포틀랜드시멘트를 만드는 방법은 석회($CaCO_3$, 탄산칼슘)가 63% 정도를 차지하고, 미세한 점토 규사(모래)에 많이 들어 있는 실리카($Si0_2$) 23% 정도이며, 미세한 점토 규사에 많이 들어있는 알루미나(Al_2O_3) 6% 정도이다. 또한 산화철 Fe_2O_3 소량, 무수황산(SO_3) 극소량 산화마그네슘(MgO) 극소량의 성분들을 섞어서 굽는데, 석회석 가루와 점토 가루(점토 속에 실리카와 알루미나가 들어 있음)를 혼합하고 산화철, 무수황산, 산화마그네슘 가루를 조금씩 첨가하여 석회석의 이산화탄소가 날아가는 825℃보다 훨씬 높은 온도인 1,400～1,500℃ 정도의 온도에서 도자기 굽는 것처럼 충분히 구우면 일부 성분들이 녹아서 그 가루들이 뭉쳐지면서 클링커라고 하는 새로운 광물질 덩어리(단괴, 구슬)들로 소성된다. 소성이란 구워서 새로운 형태를 만드는 것을 말한다. 이때, 시멘트를 만들 때 새롭게 생기는 광물질을 세라믹이라고 하지 않고 클링커라고 하는 것은 그 클링커의 성분이 물에 녹는 성분이 있기 때문이다. 반면에 세라믹은 화학적인 결합이 되면 더 이상 성질변화가 없다. 클링커는 ‘한번 구우면 자연 상태에서는 더 이상 화학적인 변화가 없는 세라믹’과 구분하기 위해 비교적 근래에 만들어진 이름인 것이다.

이렇게 만들어진 클링커는 규산삼석회 $3CaO \cdot SiO_2$, 규산이석회 $2CaO \cdot SiO_2$, 알루민산삼석회 $3CaO \cdot Al_2O_3$ 및 알루미노아 철산사석회 (철화합물) $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$과 같은 혼합물질들이 주성분을 이루게 된다. 기존의 재료들이 열에 녹아 합쳐져서 새롭게 ‘일정한 화학적인 비율로 결합된 고체 혼합 결정물인 고용체’들을 만들어낸 것이다.

이에 착안점을 두어 기존 시멘트 회사에서 제조할 때 사전에 각각의 원료를 조합 및 혼합하여 환 모양으로 만들어 제조하고, 그 후, 전기로에 간이 소성을 시행한 후 환으로 만들어진 시료를 분쇄하여 화학조성 및 물성실험을 통하여 기존 클링커의 물성과 비교분석하는 방법을 채택하여 본 연구에 적용하였다.

4. 원천소재의 물리적 성능 및 화학적 특성 분석

가. 원천소재 소성 후 클링커의 화학 조성 변화

(1) 티탄석고

Table 3.3.7 티탄석고의 소성 전과 후의 화학성분

구분	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	Cl	TiO_2	P_2O_5
소성 전	1.49	0.54	0.80	35.83	0.44	51.23	0.09	0.10	0.019	1.55	0.02
소성 후	2.13	0.73	1.02	39.15	0.47	54.31	0.13	0.10	0.015	1.71	0.03

Table 3.3.7은 티탄석고를 전기로에서 소성하기 전과 후를 비교한 표이다. 시멘트 및 고로슬래그의 초기 수화 반응에 필요한 SiO_2와 Al_2O_3, CaO의 성분이 소성전과 비교하였을 때 증가하였다. 또한 SO_3의 성분이 51.23%에서 54.31%로 증가 하였는데, 이는 고로슬래그를 자극하기 위해 사용되는 자극제의 성분으로 이용된다. 또한 Fig. 3.3.6에서의 단일 소성시료의 XRD분석 결과로, 티탄석고에서는 전형적인 무수석고의 Anhydrite($CaSO_4$)의 성분으로 나타났으며, 따라서 이러한 티탄석고를 이용함으로써 시멘트의 자극제와 고로슬래그 미분말의 초기자극제의 역할을 수행 할 것으로 예상되어 원천소재(SBFS) 개발에서 중요한 시료로 선정하게 되었다.

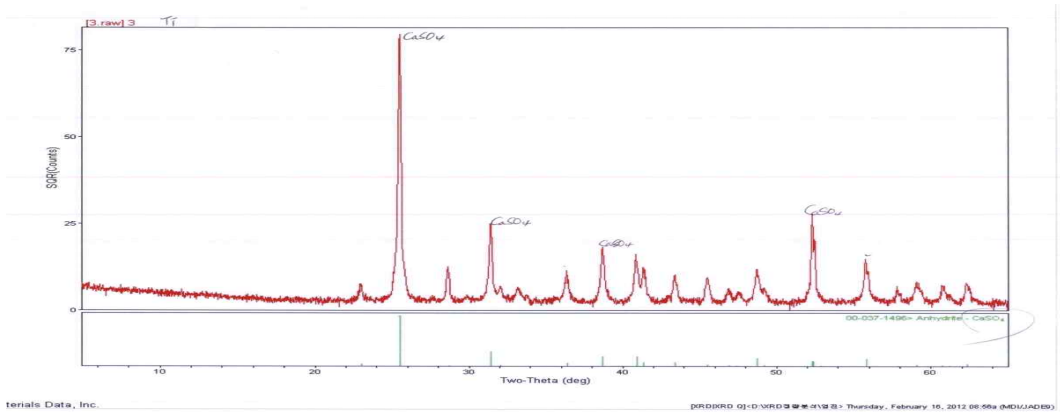


Fig. 3.3.6 티탄석고 단독 시료 XRD (소성 후)

(2) 정수오니

Table 3.3.8 정수오니의 소성 전과 후의 화학성분

구분	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	Cl	TiO_2	P_2O_5
소성 전	34.97	27.34	4.44	0.79	1.14	1.07	1.77	0.55	0.203	0.47	0.73
소성 후	46.63	39.69	5.39	1.03	1.61	0.63	2.18	0.81	0.039	0.58	0.95

Table 3.3.8는 정수오니를 전기로에서 소성하기 전과 후를 비교한 표이다. 정수오니의 화학조성은 소성전과 후의 성분비교를 통하여 SiO_2와 Al_2O_3가 증가하였음을 알 수 있었다. 이는 시멘트의 초기강도 증진에 큰 기여하는 Al_2O_3의 성분이 27.34%에서 39.69%로 증가하였으며, 또한 소성전과 비교하였을 때 티탄석고의 증가율보다 더 많이 증가하였다.

하지만 슬래그의 반응을 촉진하기 위해 필요한 성분인 SO_3는 오히려 감소하는 경향을 보였다. 또한 Fig. 3.3.7은 소성후 XRD 분석결과 SiO_2와 Al_2O_3의 화합물인 Mulite($Al_6Si_2O_{13}$)의 성분으로 나타났다. 따라서 정수오니와 티탄 석고를 함께 배합을 할 경우 조기강도 증진효과 뿐만 아니라 슬래그 자극을 위한 자극제로 작용효과가 클 것으로 기대되었다.

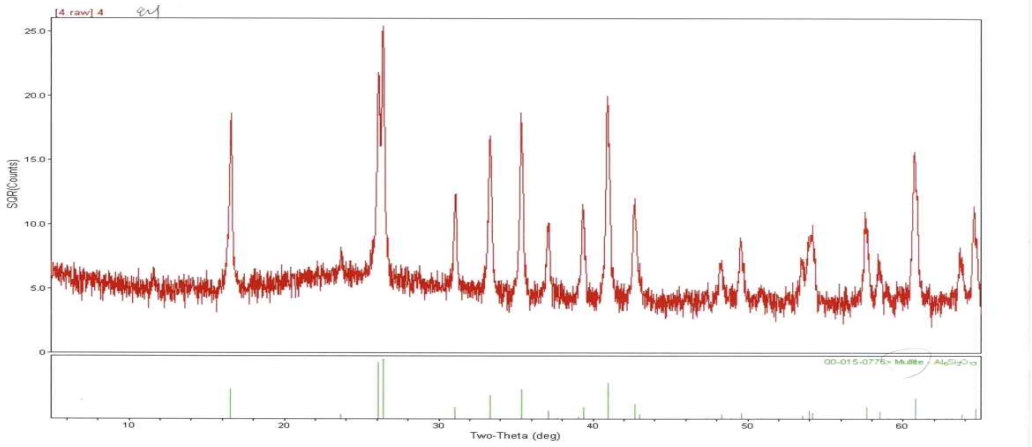


Fig. 3.3.7 정수오니 단독 시료 XRD (소성 후)

(3) 원천소재 혼입 비율별 화학성분 분석결과

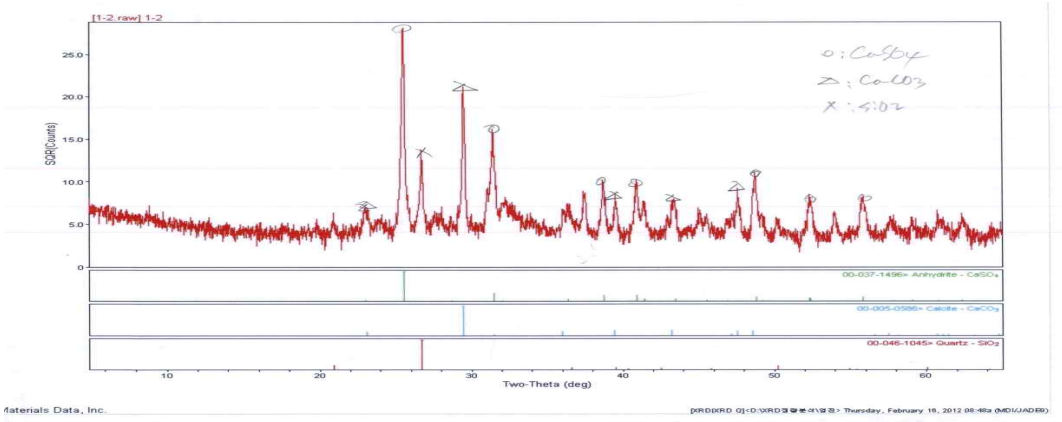
Table 3.3.9와 Fig. 3.3.8은 각각 시료별 혼입 비율에 따른 소성 후, 화학성분과 주요 원천재료인 티탄 석고와 오니를 XRD 분석결과로, NO.1 기준으로 하여 시료혼합 비율에 따른 화학성분을 나타내었다. 그 결과 조기강도 발현에 영향을 미치는 Al_2O_3와 장기강도에 영향을 미치는 SiO_2, CaO 및 GBFS 자극제 역할을 수행하는 SO_3의 함량이 No.5에서 가장 많이 함유되어 있으며, 본 시험에서 혼합물질 1:1:1배합 및 4:3:3으로 배합한 자극제를 첨가 시 SO_3성분 증가로 Ettringite 생성 후, 강도증진효과가 크게 나타난 것으로 사료된다. 또한 C_3S 의 수화를 촉진시킴으로 초기강도가 상승되었다고 판단된다.

아울러 Al_2O_3 상승효과로는 자극제 제조 시, 소성과정에서 $C_{12}A_7$ 생성물이 초기강도상승에 영향을 미친다고 판단되며, 소성과정에서 생성된 CaO는 물과 접촉 시 $Ca(OH)_2$의 신속한 생성으로 pH 상승에 따른 수화촉진으로 초기강도가 상승되었다고 판단되어, 이를 기초로 원천소재의 기본배합이 조성 되었다.

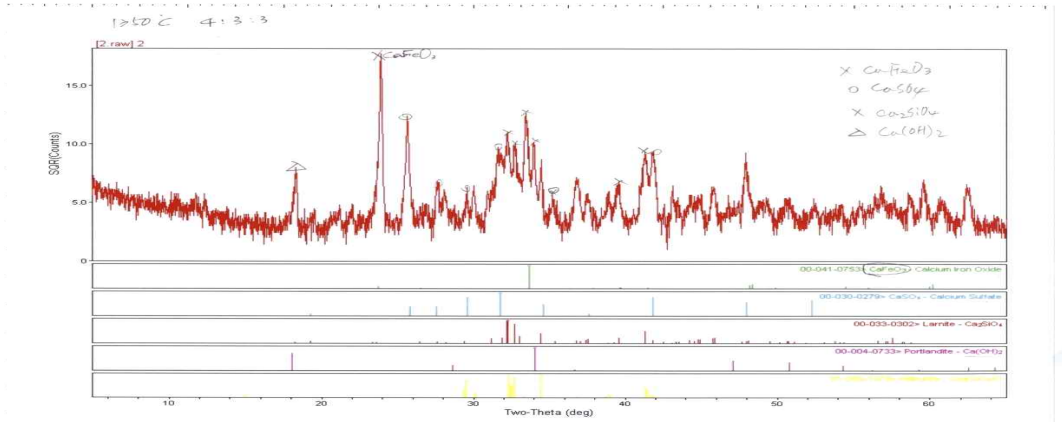
Table 3.3.9 시료의 혼입 비율(소성)

구분	시료의 혼입 비율(%)			화학 성분(%)					
	티탄	석회석	오니	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3
1	33.3	33.3	33.3	8.0	7.2	2.4	51.7	3.7	23.2
2	47.1	31.4	21.5	11.2	8.2	2.7	40.6	2.7	32.6
3	50	25	25	12.2	10.4	2.0	40.4	2.0	30.5
4	25	50	25	11.7	10.0	3.3	54.2	3.3	16.4
5	40	30	30	12.9	11.8	2.4	44.6	1.2	24.8

Fig. 3.3.8은 혼합 소성시료의 XRD분석 결과로, 혼합 소성시료의 비율(1:1:1)에서 Anhydrite($CaSO_4$), Calcite($CaCO_3$), Quartz($Si0_2$)의 성분을 나타내었으며, 혼합 소성시료의 비율(4:3:3)에서 Calcium Iron Oxide($CaFeO_3$), Calcium Sulfate($CaSO_4$), Ca_2SiO_4(larnite), $Ca(OH)_2$의 성분으로 나타났다.



1:1:1(혼합시료 비율 %)



4:3:3 (혼합시료 비율 %)

Fig. 3.3.8 원천소재(SBFS)의 혼합시료의 XRD (소성 후)

나. 전기로 소성에 의한 모르타르 적용 실험

(1) 시멘트(OPC) 자극제 개발 과정 및 결과

(가) 실험개요

각각의 산업부산물 및 산업폐기물을 단일(티탄, 석회석, 정수오니)물질로 전기로 소성(600~1,050℃)된 알칼리성 무기계 자극제와, 원천소재 배합(1:1:1)의 비율로 혼합 소성된 알칼리성 무기계 자극제를 전체질량(OPC)의 7% 치환율로 혼합하여 모르타르를 제작하였다. Table 3.3.10과 Table 3.3.11는 시멘트 자극제 선정 실험의 배합표와 압축강도와 활성도지수표를 나타내며, Fig. 3.3.9은 압축강도와 활성도 지수를 나타냈다.

Table 3.3.10 시멘트 자극제 선정 실험 배합표 (알칼리성 무기계 자극제 : 소성 후)

NO	기호	W/B (%)	질량비율(%)					단위질량(g)						
			OPC	티탄석고	석회석	정수오니	1:1:1*	OPC	티탄석고	석회석	정수오니	1:1:1*	S	W
1	OPC	50	100	-	-	-	-	450	-	-	-	-	1,350	225
2	OPC1		93	7	-	-	-	418.5	31.5	-	-	-		
3	OPC2		93	-	7	-	-	418.5	-	31.5	-	-		
4	OPC3		93	-	-	7	-	418.5	-	-	31.5	-		
5	OPC4		93	-	-	-	7	418.5	-	-	-	31.5		

* 티탄석고, 정수오니, 석회석 혼합 비율

Table 3.3.11 모르타르 배합표 및 압축강도와 활성도 지수
(알칼리성 무기계 자극제 : 소성 후)

NO	기호	W/B (%)	질량비율(%)					압축강도(MPa)			활성도 지수(%)		
			OPC	티탄석고	석회석	정수오니	1:1:1*	1일	3일	7일	1일	3일	7일
1	OPC	50	100	-	-	-	-	11.3	25.2	35.9	100	100	100
2	OPC1		93	7	-	-	-	11.5	21.1	28.5	101.8	83.7	79.4
3	OPC2		93	-	7	-	-	12.3	26.1	36.8	108.8	103.6	102.6
4	OPC3		93	-	-	7	-	8.6	24	34.3	76.1	95.2	95.5
5	OPC4		93	-	-	-	7	14.6	30.1	36.7	129.2	119.4	102.2

* 티탄석고, 정수오니, 석회석 혼합 비율

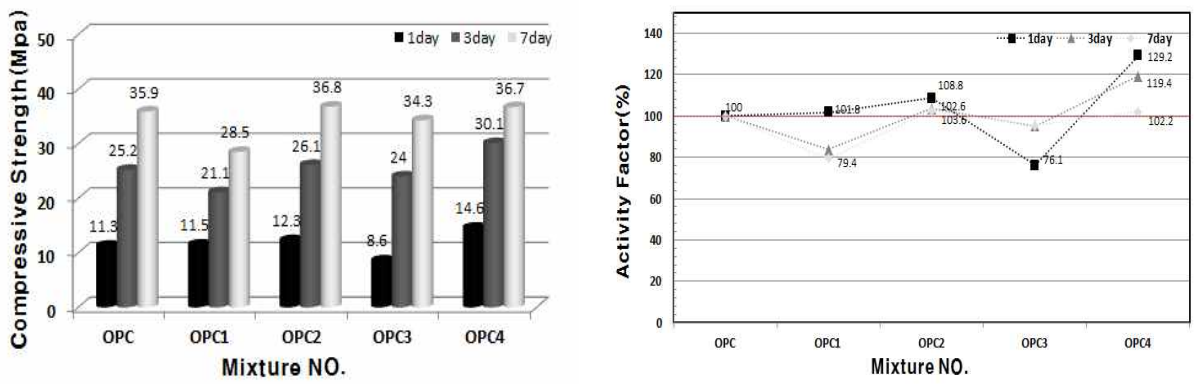


Fig. 3.3.9 알칼리성 무기계 자극제의 혼입율에 따른 재령별 압축강도 (1일, 3일, 7일)

(나) 실험결과

실험결과 티탄석고 단독의 경우는 재령 1일에서 OPC 100%를 사용한 모르타르와 동등한 압축강도를 나타냈지만 재령 3일과 7일에서의 압축강도 저하현상을 나타냈으며, CaO를 주성분으로 하는 석회석에서 OPC 100%를 사용한 모르타르보다 높은 압축강도를 재령 1일, 3일, 7일에서 나타냈다. 또한 오니는 OPC 100%를 사용한 모르타르보다 초기재령일 1일에서 압축강도 저하현상을 나타냈지만, 후기인 재령 3일과 7일에서 압축강도가 OPC에 근접하게 나타내는 것으로 보아 오니의 자극제의 역할로서 늦게 강도 발현이 진행되는 것을 알 수 있었다. 그러나 각각의 원천소재를 조합한 비율로 실험한 압축강도 값은 OPC 100% 사용 값보다 우수한 결과를 나타나 원천소재 혼합비율의 조합 시, OPC를 자극한다는 결과를 도출하였다.

(2) 시멘트 자극제 최적 혼합 비율 선정실험

(가) 실험개요

시멘트의 조기강도 발현 첨가재의 최적 혼합 비율 설정을 위한 실험계획으로서, Table 3.3.12와 같다. 소성된 결합재의 혼합 비율을 선정하여 5종류로 선정하여 시멘트 질량 대비 7%로 고정하였다. 이는 수많은 실험결과의 연구개발 성과를 적용하였으며, 물리적인 성능평가를 비교하기 위하여 유동성, 재령에 따른 압축강도 실험을 진행하였다.

Table 3.3.12 시멘트(OPC) 자극제 선정 실험계획

No.	OPC (%)	원천소재		W/B (%)	단위질량(g)				시험항목
		배합비	치환율 (%)		OPC	소성 결합재	S	W	
1	100	-	0	50	450	0	1,350	225	■ 타격 플로우 - KS F 2563 기준 ■ 재령별 압축강도 (1,3,7일) - KS L ISO 679 기준
2	93	1:1:1	7		418.5	31.5			
3		4:3:3							
4		3:4:3							
5		5:3:2							
6		3:1:6							

(나) 실험방법

소성된 결합재의 소성방법은 전기로에서 1,050℃ 소성한 후 디스크 밀로 분쇄하였다. 모르타르 제작 방법은 KS L ISO 679에 의거하여 실시하였고, 표준사를 사용하였다. KS L 5111에 규정하는 플로테이블, 플로우 콘 및 다짐봉을 사용하여 타격 플로우 실험을 실시하였으며, 20℃ ±1℃의 항온항습기에서 양생 후, 압축강도 측정을 실시하였다.

(다) 실험결과

Table 3.3.13 및 Fig. 3.3.10은 시멘트 조기강도 발현 첨가재의 최적 혼합 비율 선정의 물성 시험결과이다. 기준 Flow값인 No.1의 경우 192mm를 나타났으며 각 원천소재별 Flow 실험결과, 육안 판정에 있어서는 모두 유동성에 필요한 점성을 가지고 경시변화에서 No.1과 유사한 결과를 나타내었다. 또한 압축강도 발현율에서는 OPC 100% 사용한 No.1을 기준으로 활성도지수 비교 시 No.2 (원천소재 배합 1:1:1)의 결과가 104.5~112.2%로 모두 1일, 3일, 7일 압축강도 발현율을 만족한 결과로 나타났으며 또한 No.3 (원천소재 배합 4:3:3)는 97.7%~102.4%로 압축강도 발현율에서는 1일과 7일은 만족되어지나 3일 재령에도 목표대비 미달된 결과를 나타났으며 No.2의 경우 원천소재 배합에 따른 소성 화학성분 결과로 볼 때 초기재령에서 소성 과정 중, 발생한 $C_{12}A_7$ 생성물 및 소성과정에서 생성된 CaO가 물과 접촉하면서 $Ca(OH)_2$의 신속한 생성으로 pH 상승에 따른 수화촉진으로 초기강도가 상승된 것으로 판단되어져 원천소재 배합 1:1:1이 시멘트 조기강도 발현 첨가재의 최적 혼입 비율로 판단되었다.

Table 3.3.13 시멘트 조기강도 발현 첨가재의 최적 혼합 비율 선정 실험결과

No	Flow (mm)	재령별 측정값					
		1일		3일		7일	
		압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)
1	192	12.3	100	26.4	100	38.9	100
2	190	13.8	112.2	27.6	104.5	43.2	111.1
3	193	12.6	102.4	25.8	97.7	39.3	101.0
4	190	11.7	95.1	26.5	100.4	38.4	98.7
5	189	12.1	98.4	24.7	93.6	37.2	95.6
6	191	10.6	86.2	25.1	95.1	34.7	89.2

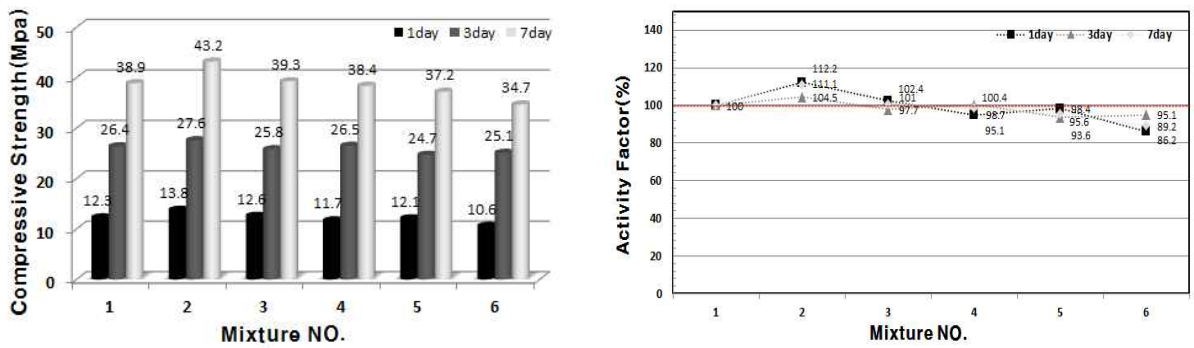


Fig. 3.3.10 알칼리성 무기계 자극제의 혼입율에 따른 재령별 압축강도 (1일, 3일, 7일)

(3) GBFS 자극제 개발과정 및 결과

(가) 실험개요 및 방법

각각의 산업부산물 및 산업폐기물을 단일(티탄, 석회석, 정수오니)물질로 전기로 소성(600~1,050℃)된 알칼리성 무기계 자극제와, 기본배합(4:3:3)의 비율로 혼합 소성된 알칼리성 무기계 자극제를 전체질량(GBFS)의 7% 치환율로 혼합하여 모르타르를 제작하였다. GBFS자체로는 수화반응이 일어나지 않기 때문에 일반적인 알칼리 자극제인 NaOH를 GBFS에 7% 치환한 것을 기준으로 삼았다. Table 3.3.14과 Table 3.3.15는 GBFS 자극제 선정 실험의 배합표 이다.

Table 3.3.14 GBFS 자극제 선정 실험 배합표 (알칼리성 무기계 자극제 : 소성 후)

NO	기호	W/B (%)	질량비율(%)						단위질량(g)							
			GBFS	NaOH	티탄석고	석회석	정수오니	4:3:3	GBFS	NaOH	티탄석고	석회석	정수오니	4:3:3	S	W
1	GBFS	50	93	7	-	-	-	-	418.5	31.5	-	-	-	-	1,350	225
2	GBFS1		93		7	-	-	-	418.5	-	31.5	-	-	-		
3	GBFS2		93	-	-	7	-	-	418.5	-	-	31.5	-	-		
4	GBFS3		93	-	-	-	7	-	418.5	-	-	-	31.5	-		
5	GBFS4		93	-	-	-	-	7	418.5	-	-	-	-	31.5		

* 티탄석고, 정수오니, 석회석 혼합 비율

Table 3.3.15 모르타르 배합표 및 압축강도와 활성도 지수
(알칼리성 무기계 자극제 : 소성 후)

NO	기호	W/B (%)	질량비율(%)						압축강도(MPa)			활성도 지수(%)		
			GBFS	NaOH	티탄석고	석회석	정수오니	4:3:3	1일	3일	7일	1일	3일	7일
1	GBFS	50	93	7	-	-	-	-	6	9.2	10.7	100	100	100
2	GBFS1		93	-	7	-	-	-	0	0	10.3	0	0	96.3
3	GBFS2		93	-	-	7	-	-	0.9	1.8	4.5	15	19.6	42.1
4	GBFS3		93	-	-	-	7	-	0	0	0	0	0	0
5	GBFS4		93	-	-	-	-	7	3.9	6.6	8.9	65.0	71.7	83.2

* 티탄석고, 정수오니, 석회석 혼합 비율

(나) 실험결과

Fig. 3.3.11는 기준 바인더로서 GBFS(93%)+ NaOH(7%)를 사용하고 각각의 GBFS자극제인 티탄석고, 오니, 석회석, 소성된 혼합 알칼리성 무기계 자극제의 비율(4:3:3)을 사용한 모르타르의 재령 1일, 3일, 7일의 압축강도를 나타낸 것이다. 그 결과 GBFS(93%) + NaOH(7%)를 사용한 경우의 압축강도와 각각의 GBFS자극제, 소성된 알칼리성 무기계 자극제(4:3:3)의 압축강도를 비교한 결과, 재령 1일, 3일, 7일에서의 GBFS(93%) + NaOH(7%)의 압축 강도 발현이 우수한 것으로 나타났다. 이는 정수오니의 경우 SiO_2 의 함유량이(46.6%)이 높아 단독으로서는 GBFS에 대한 자극제의 역할을 하지 못하고(응결이 일어나지 않았음), 티탄석고의 경우 초기 재령 1, 3일에서는 과량의 SO_3 함유량으로 인해 응결지연작용이 발생된 것으로 나타났으며, 압축강도 7일에서는 지속적인 SO_3의 공급으로 기준바인더의 압축강도 결과 값과 유사한 결과를 나타내었다. 본 실험으로 통해 단일물질로 제조된 첨가재는 GBFS의 자극제로서의 역할은 미미하지만, 고로슬래그미분말 중요 자극제인 강알칼리성이 요구되는 선행연구 결과와 유사하게 기본 배합(4:3:3)으로 조성된 알칼리성 무기계 자극제의 혼합 비율이 GBFS에서도 초기 강도발현이 가능한 자극제로 나타났다.

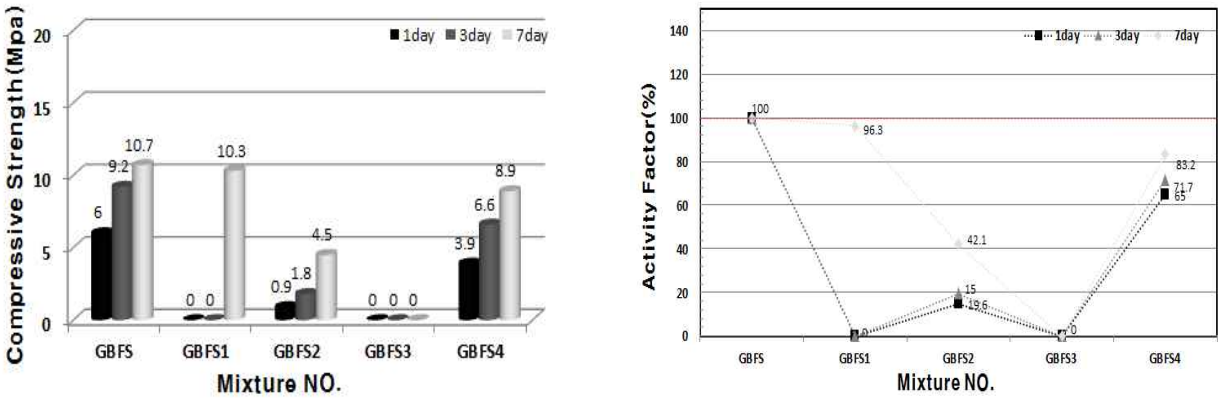


Fig.3.3.11 알칼리성 무기계 자극제의 혼입율에 따른 재령별 압축강도 (1일, 3일, 7일)

(4) GBFS 자극 최적 혼합 비율 선정실험

(가) 실험개요

GBFS의 조기강도 발현 첨가재의 최적 혼합 비율 설정을 위한 실험계획으로서, Table 3.3.16과 같다. 소성된 결합재의 혼합 비율을 선정하여 5종류로 선정하여 OPC질량 대비 7%로 고정하였다. 이는 기존 연구개발 성과를 적용하였으며, 물리적인 성능평가를 비교하기 위하여 유동성, 재령에 따른 압축강도 실험을 진행하였다.

Table 3.3.16 GBFS 자극제 최적 혼합 비율 선정 실험계획

NO	OPC (%)	GBFS (%)	원천소재		W/B (%)	단위질량(g)					시험항목
			배합비	치환율 (%)		OPC	GBFS	소성 결합재	S	W	
1	100	-	-	0	50	450	-	-	1,350	225	■ 타격 플로우 - KS F 2563 기준 ■ 재령별 압축강도 (1,3,7일) - KS L ISO 679 기준
2	70	23	1:1:1	7		315	103.5	31.5			
3			4:3:3								
4			3:4:3								
5			5:3:2								
6			3:1:6								

(나) 실험방법

GBFS는 무수석고가 포함되지 않은 분말도 4,435(cm^2/g)를 사용하였으며, 실험 방법은 시멘트 (OPC) 자극제의 최적 혼합 비율 선정 실험과 동일하게 실험하였다.

(다) 실험결과

Table 3.3.17 및 Fig. 3.3.12은 GBFS 자극제의 최적 혼합 비율 선정의 물성시험 결과이다. 기준 Flow값은 시멘트 조기강도 향상 첨가재와 유사한 Flow결과 값을 얻었으며, 모두 OPC 100% 대비 양호한 유동성을 확보한 것으로 나타난다. 향상된 원인으로는 GBFS의 높은 분말도에 비롯된 작업성 개선 효과로 판단되어진다. 압축강도 발현율에서는 OPC 100% 사용한 No.1을 기준으로 활성도지수 비교 시 No.3 (원천소재 배합 4:3:3)의 결과가 97.4~101.6% 로 1일 압축강도에서는 목표대비 미달 되었으며, 3일, 7일 압축강도 발현율에서는 만족한 결과를 나타내었다. 이는 GBFS의 주요 자극제역할을 수행하는 SO_3 함유량이 혼합비율 No.3(원천소재 배합 4:3:3)에서 가장 많이 함유되어있는 것으로 나타나 에트링자이트 생성 후 강도증진 효과가 크게 나타날 것으로 판단되어져 GBFS 자극제의 최적 혼입 비율로 선정하였다.

Table 3.3.17 GBFS 자극제 최적 혼합 비율 압축강도 실험결과

No	Flow (mm)	재령별 측정값					
		1일		3일		7일	
		압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)
1	190	11.6	100	24.5	100	39.3	100
2	191	10.7	92.2	24.1	98.4	37.6	95.7
3	193	11.3	97.4	24.9	101.6	39.6	100.8
4	192	10.9	94.0	23.8	97.1	38.8	98.7
5	192	10.4	89.7	22.1	90.2	39.1	99.5
6	194	9.8	84.5	21.5	87.8	37.8	96.2

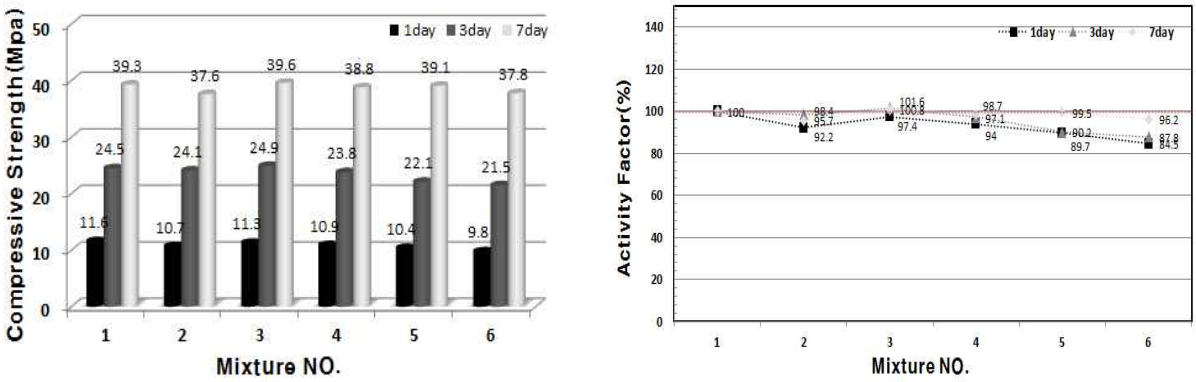


Fig.3.3.12 알칼리성 무기계 자극제의 혼입율에 따른 재령별 압축강도 (1일, 3일, 7일)

(5) 저온환경의 자극제 개발과정 및 결과

(가) 실험개요

저온환경 실험(5~20℃)에서 기준 바인더 OPC 100% 대비 소성된 시멘트 자극제 알칼리성 무기계 자극제를 OPC 93% + 원천소재 7%(1:1:1)와 GBFS자극제 알칼리성 무기계 자극제를 OPC 70% + GBFS 23% + 원천소재 7%(4:3:3)을 적용하여 저온환경(5~20℃)에 양생 조건을 두어 실험을 실시한 결과로 Table 3.3.18과 Table 3.3.19은 각각 실험 배합표와 압축강도 및 활성도 지수 표를 나타내며, Fig. 3.3.13은 소성된 분말의 혼입율에 따른 재령별 압축강도 및 활성도지수를 나타냈다.

Table 3.3.18 저온환경(5℃)의 모르타르 실험배합표 (알칼리성 무기계 자극제 : 소성 후)

NO	기호	W/B (%)	질량비율(%)				단위질량(g)					
			OPC	GBFS	1:1:1	4:3:3	OPC	GBFS	1:1:1	4:3:3	S	W
1	OPC	50	100	-	-	-	450	-	-	-	1,350	225
2	OB		70	30	-	-	315	135	-	-		
3	SBFS (1:1:1)		93	-	7	-	418.5	-	31.5	-		
4	SBFS (4:3:3)		70	23	-	7	315	103.5	-	31.5		

* 티탄석고, 정수오니, 석회석 혼합 비율

(나) 실험결과

Table 3.3.19의 결과에 의하면 저온환경하의 NO.1 시료 대비 NO.3 의 경우, 압축강도는 1일 재령부터 OPC와 동등이상의 결과를 보였으며, 활성도 지수 또한 1일에 126%로 나타났으므로 저온환경에서도 가능한 원천소재 재료임이 밝혀졌다. 또한 NO.1과 NO.4의 비교 실험에서도 1일 압축강도 및 활성도지수도 동등이상의 결과가 나타났으나, 3일, 7일 압축강도 및 활성도 지수에서는 OPC보다 낮게 나타났으며, 이는 선행연구에 의해 저온 환경 하에서 고로슬래그미분말의 포졸란 반응에 의하여 압축강도 증진이 저하되는 결과로 판단되었으며 또한 NO.2 고로슬래그 시멘트(무수석고 무 첨가)와 NO.3 NO.4 첨가재를 비교할 경우 모두 양호한 시험 결과를 도출하여 원천소재의 기능을 충분히 발현할 수 있을 것이라고 예상된다.

Table 3.3.19 저온환경(5℃) 압축강도와 활성도 지수 (알칼리성 무기계 자극제 : 소성 후)

NO	기호	W/B (%)	질량비율(%)				압축강도(MPa)			활성도 지수(%)		
			OPC	GBFS	1:1:1	4:3:3	1일	3일	7일	1일	3일	7일
1	OPC	50	100	-	-	-	3	13.2	23.5	100	100	100
2	OB		70	30	-	-	2.1	10.3	19	70	78	80.8
3	SBFS (1:1:1)		93	-	7	-	3.8	15.5	29.9	126.7	117.4	127.2
4	SBFS (4:3:3)		70	23	-	7	3	11	20.8	100	83.3	88.5

* 티탄석고, 정수오니, 석회석 혼합 비율

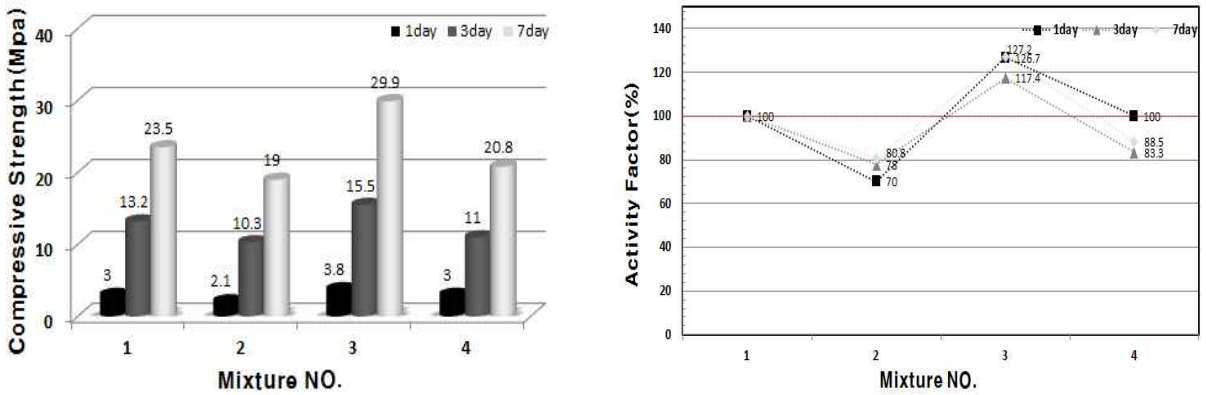


Fig. 3.3.13 재령별 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일)

(6) 저온환경 자극제 최적 혼합 비율 선정 실험

(가) 실험개요

저온환경에서의 조기강도 발현 첨가재의 최적 혼합 비율 설정을 위한 실험계획으로서, Table 3.3.20과 같다. 소성된 결합재의 혼합 비율을 선정하여 5종류로 선정하여 OPC 70%, GBFS 23%, 원천소재 7%로 고정하여 물리적인 성능평가를 비교하기 위하여 유동성, 재령에 따른 압축강도 실험을 진행하였다.

Table 3.3.20 저온환경 자극제 최적 혼합 비율 선정 실험계획

No.	OPC (%)	GBFS (%)	원천소재		W/B (%)	단위질량(g)					시험항목
			배합비	치환율 (%)		OPC	GBFS	소성 결합재	S	W	
1	100	-	-	0	50	450	0	0	1350	225	■ 양생온도 5℃ ■ 타격 플로우 - KS F 2563 기준 ■ 재령별 압축강도 (1,3,7일) - KS L ISO 679 기준
2	70	23	1:1:1	7		315	103.5	31.5			
3			4:3:3								
4			3:4:3								
5			5:3:2								
6			3:1:6								

(나) 실험방법

고로슬래그미분말은 분말도 4,475(cm^2/g)를 사용하였으며, 실험방법은 시멘트(OPC) 자극제의 최적 혼합 비율 선정 실험과 동일하게 실험하였다.

(다) 실험결과

Table 3.3.21 및 Fig. 3.3.14은 저온환경의 자극제 최적 혼합 비율 선정의 물성시험결과 값이다. 플로우 값 상온(20℃)에서 실시하여 GBFS의 조기강도 향상 첨가재 개발과 유사한 플로우 결과 값을 얻었으며 모두 OPC 100 % 대비 양호한 유동성을 확보 한 것으로 나타난다. 이 향상된 원인으로는 GBFS의 높은 분말의 원인으로 모르타르의 유동성이 증가되었기 때문으로 판단되어 진다. 또한 재령별 압축강도 발현율에서는 OPC 100% 사용한 No.1을 기준으로 활성도지수 비교 시 모든 시료에서 저하되었으며, 이는 소성 결합재가 초기에 고로슬래그미분말의 충분한 수화반응이 이루어지지 못한 것으로 사료된다. 하지만 No.3(4:3:3)의 배합에서 소성 결합재의 비율 중에서 가장 높은 압축강도 발현율을 나타내었으며, 온도반응에 민감한 고로슬래그미분말을 감안할 때 향후 Pilot 소성로 시작품 생산 시 적용할 최적 혼입 비율로서 판단되었다.

Table 3.3.21 저온환경 조기강도 발현 첨가재의 최적 혼합 비율 선정 실험결과

No	Flow (mm)	재령별 측정값					
		1일		3일		7일	
		압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)
1	191	5.2	100	14.1	100	24.3	100
2	191	3.8	73.1	12.5	88.7	22.1	90.9
3	193	4.8	92.8	13.7	97.2	23.7	97.5
4	191	3.2	61.5	12.8	90.8	20.8	85.6
5	194	3.3	63.5	13.3	94.3	23.1	95.1
6	194	3.0	57.7	12.2	86.5	21.4	88.1

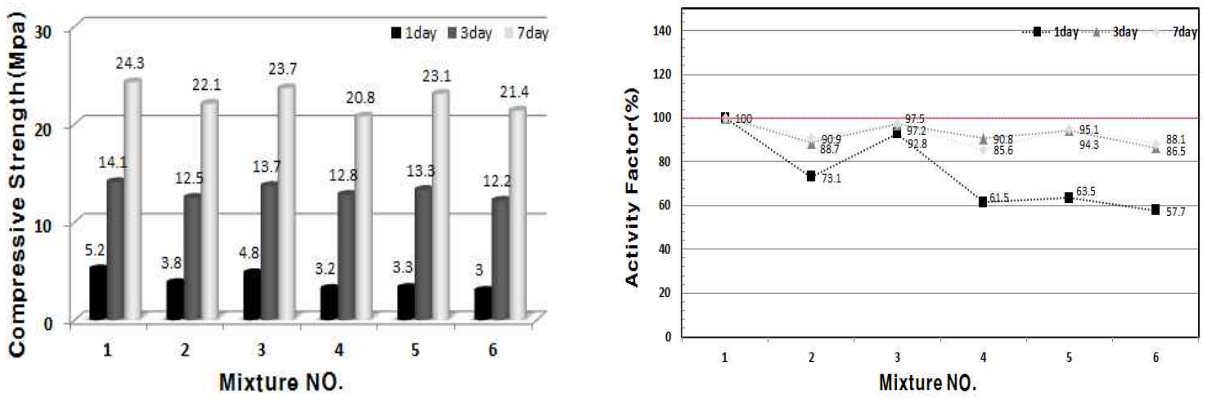


Fig. 3.3.14 재령별 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일)

(7) 각 산지별 정수오니 화학분석 및 기초 물성실험

(가) 실험개요

초기재령 압축강도 향상을 위한 SBFS의 원천소재 중 정수오니에 사용에 있어 산지별 유기물 등의 성분차이가 압축강도 실험 및 결합재의 조성에 있어 차이점을 나타내는 지에 대한 성능평가 실험을 산지별 4곳 (영등포, 광암, 암사, 안산)을 선정하여 기존 방식으로 전기로에 소성하여 실험을 진행하였다. Table 3.3.22는 산지별 정수오니의 화학성분을 나타낸다.

Table 3.3.22 산지별 정수오니의 화학성분

성분 / 시료명	화학성분 (%)											
	강열감량	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	TiO_2	P_2O_5	Total
오니 (영등포)	36.59	25.08	28.98	3.13	0.66	0.70	0.97	0.21	1.75	0.29	0.75	99.11
오니 (광암)	32.89	25.02	31.75	3.53	0.70	0.78	1.04	0.23	2.35	0.30	0.95	99.54
오니 (암사)	32.04	25.48	33.19	3.37	0.71	0.78	1.10	0.26	1.30	0.33	0.79	99.35
오니 (안산)	35.51	17.97	36.69	2.79	1.29	0.67	0.77	0.21	1.72	0.23	1.21	99.06

Table 3.3.23 SBFS 원천소재의 산지별 선정실험 배합표 (소성 후)

NO	구분	W/B (%)	단위질량(g)							
			OPC	GBFS*	소성결합재				S	W
					영등포	광암	암사	안산		
1	OPC	50	450	-	-	-	-	-	1,350	225
2	SBFS(영등포)**		315	103.5	31.5	-	-	-		
3	SBFS(광암)**				-	31.5	-	-		
4	SBFS(암사)**				-	-	31.5	-		
5	SBFS(안산)**				-	-	-	31.5		

* GBFS : 무수석고 미포함, ** SBFS : 정수오니가 포함된 4:3:3 배합

(나) 실험방법

소성된 결합재의 소성방법은 Fig. 3.3.15와 같이 전기로에서 1,050℃ 소성한 후 디스크 밀로 분쇄하였다. 모르타르 제작 방법은 KS L ISO 679에 의거하여 실시하였고, 표준사를 사용하였다. KS L 5111에 규정하는 플로테이블, 플로우 콘 및 다짐봉을 사용하여 타격 플로우 실험을 실시하였으며, 20℃ ±1℃ 의 항온 항습기에서 양생 후, 압축강도 측정을 실시하였다.



1. 산지별 정수오니 채취(20kg)



2. 시료건조



3. 소성 및 모르타르혼합



4. 플로우 실험



5. 항온 항습기 공시체 양생



6. 압축강도 측정

Fig. 3.3.15 실험진행 과정

(다) 실험결과

산지별 각 배합별 시멘트 모르타르의 압축강도 및 타격 Flow 값을 나타낸 것으로 OPC 100% 대비 유사한 Flow 값이 나타내었으며, 각 산지별 정수오니의 유동성은 유사한 것으로 판단되었음.

Table 3.3.24 SBFS 원천소재의 산지별 혼합 비율의 따른 압축강도 측정결과

No	Flow (mm)	재령별 측정값					
		1일		3일		7일	
		압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)
1	191	12.1	100	25.9	100	37.1	100
2	192	12.3	101.6	27.0	104.2	38.8	104.6
3	193	11.8	97.5	26.2	101.2	41.0	110.5
4	191	11.2	92.5	25.1	96.9	38.4	103.5
5	192	10.6	87.6	25.6	98.8	37.8	101.9

또한 Table 3.3.24은 SBFS 원천소재 중 산지별(정수오니) 혼합 비율을 동일하게 적용한 압축강도 측정결과는 산지별 재령 1일 압축강도에서 OPC 100% 대비 87.63~101.61%의 활성도 지수로 나타났으며, 산지별 재령 3일에서는 98.8~104.2%의 활성도 지수를 재령 7일에서 101.9~110.5%의 압축강도를 나타내었다. 산지별 화학조성에서 알 수 있듯이 서울정수 오니센터는 한강의 물로서 같은 알칼리성분의 약품으로 정수처리를 진행하므로 영등포, 암사, 광암 정수오니의 화학조성의 변화에서는 차이점이 없는 것으로 판단되며 아울러 SBFS 원천소재 중 하나인 정수오니의 항목에 있어서도 산지별 차이점이 없다는 것이 판단되었다.

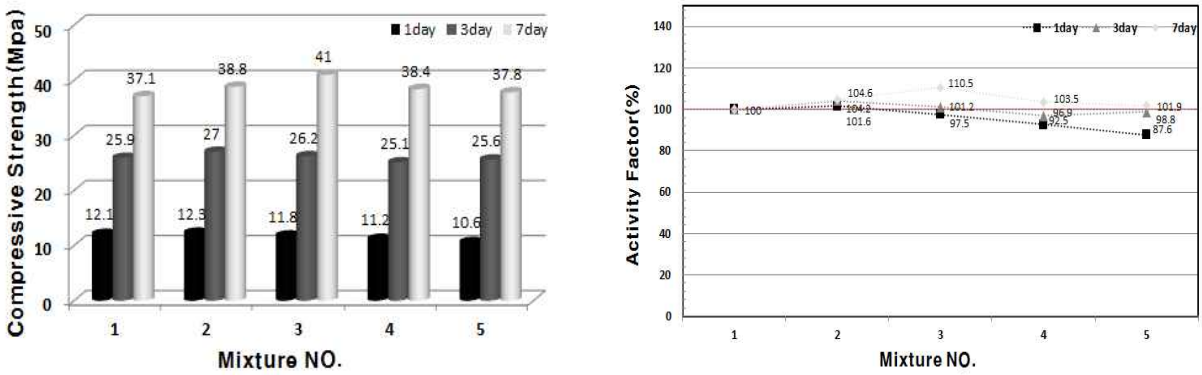


Fig. 3.3.16 재령별 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일)

(8) 원천소재 혼합 비율별 미세 분석 실험

(가) 실험개요

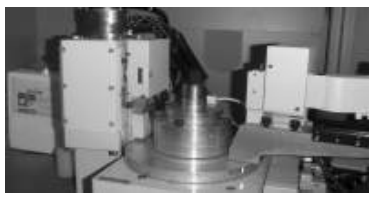
XRD는 각 사용자극제와 혼합한 시멘트와 고로슬래그미분말의 페이스트의 특성이 수화작용에 미치는 영향과 화학적 특성을 알아보기 위해 페이스트 시편을 채취하여 아세톤에 24시간이상 침지시켜 수화물의 변동이 생기지 않도록 수화정지 시킨 후 X-선 회절분석기(D/MAX RINT 2000)를 이용하여 분석을 실시하였다. 또한 기능성 분쇄조제 적용에 따른 미세분석 시험체의 성분 및 미세조직 구조를 분석하기 위하여 SEM(NOVA NANO 200)촬영을 실시하였다. Table 3.3.25는 실험계획을 나타내며, Fig. 3.3.17은 미세분석 실험진행 과정을 나타낸다.

Table 3.3.25 실험계획

NO	구분	OPC 치환율(%)	GBFS 치환율(%)	소성결합재 치환율(%)	시험항목
1	Plain	100	-	-	■ 시멘트 페이스트 ■ XRD 성분분석(1일, 3일, 7일) ■ SEM 촬영(1일, 3일)
2	SBFS(4:3:3)	70	23	7	
3	SBFS(4:3:3)	70	23	7(기능)	



1. 시료 준비(XRD)



2. 시료 코팅(XRD)



3. XRD 분석 실험(XRD)



1. 시료 준비(SEM)



2. 시료 코팅(SEM)



3. 시료 촬영(SEM)

Fig. 3.3.17 실험진행 과정

(나) XRD 실험결과

Fig. 3.3.18은 각각 OPC, SBFS(기존), SBFS(기능) 1, 3, 7일 재령별 X선 회절에 의한 수화생성물의 분석을 실시한 결과를 나타낸다. OPC 100% 사용한 시료를 포함하여 모든 시료에서의 성분은 수산화칼슘$(CaOH)_2$ 과 미수화생성물인 C_3S의 성분이 측정되었다. 그래프에서 보는 바와 같이 OPC의 수산화칼슘의 양이 가장 높은 피크점을 확인할 수 있었으며, 원천소재 클링커 분쇄 시 기능성 분쇄조제를 사용한 SBFS(기능)과, 기능성 분쇄조제를 사용하지 않은 SBFS(기존)의 순으로 C_3S의 피크 점을 확인 할 수 있었다. 재령 별 측정에서는 3일에서 수산화칼슘$(CaOH)_2$이 1일 보다 다량 생성되며, 미수화 생성물은 그와 반대로 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

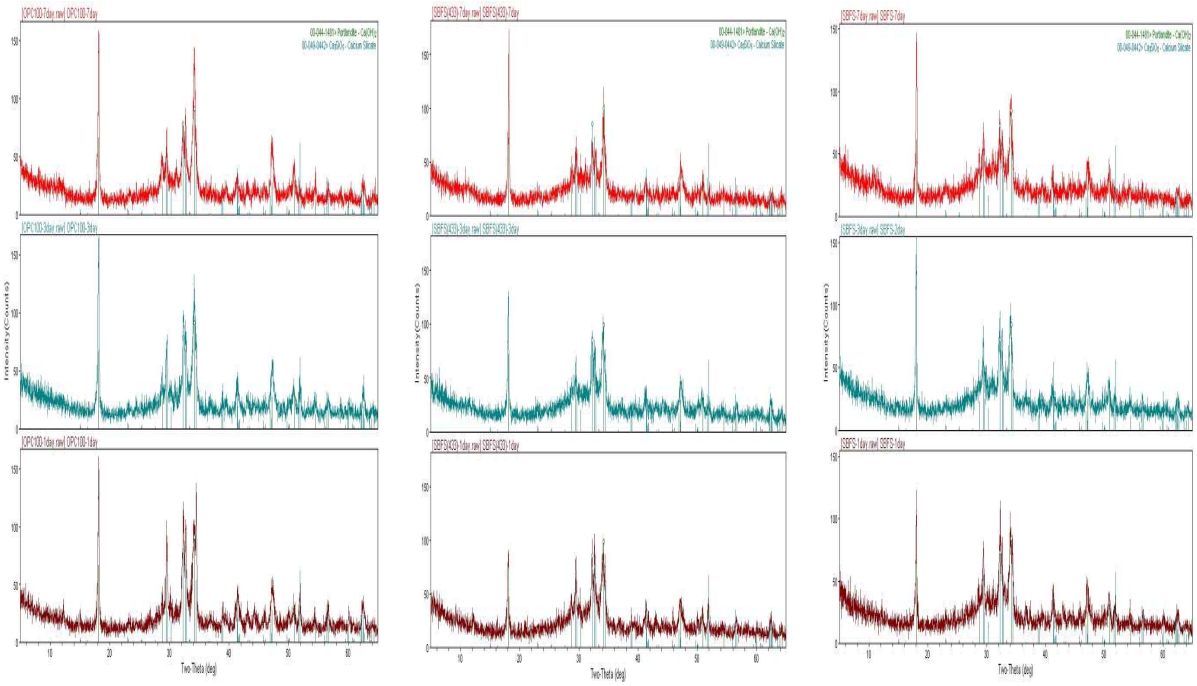


Fig. 3.3.18 OPC 및 SBFS 적용 1, 3, 7일 재령별 XRD 측정결과

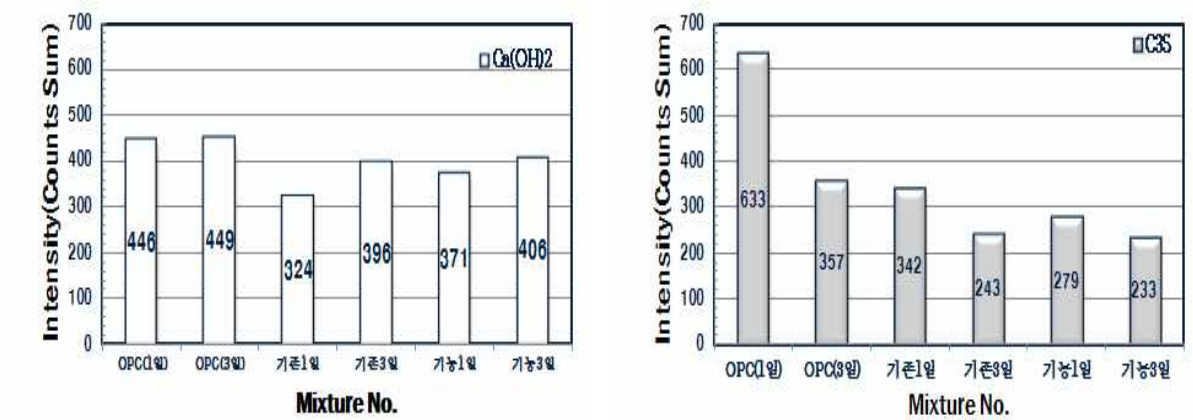
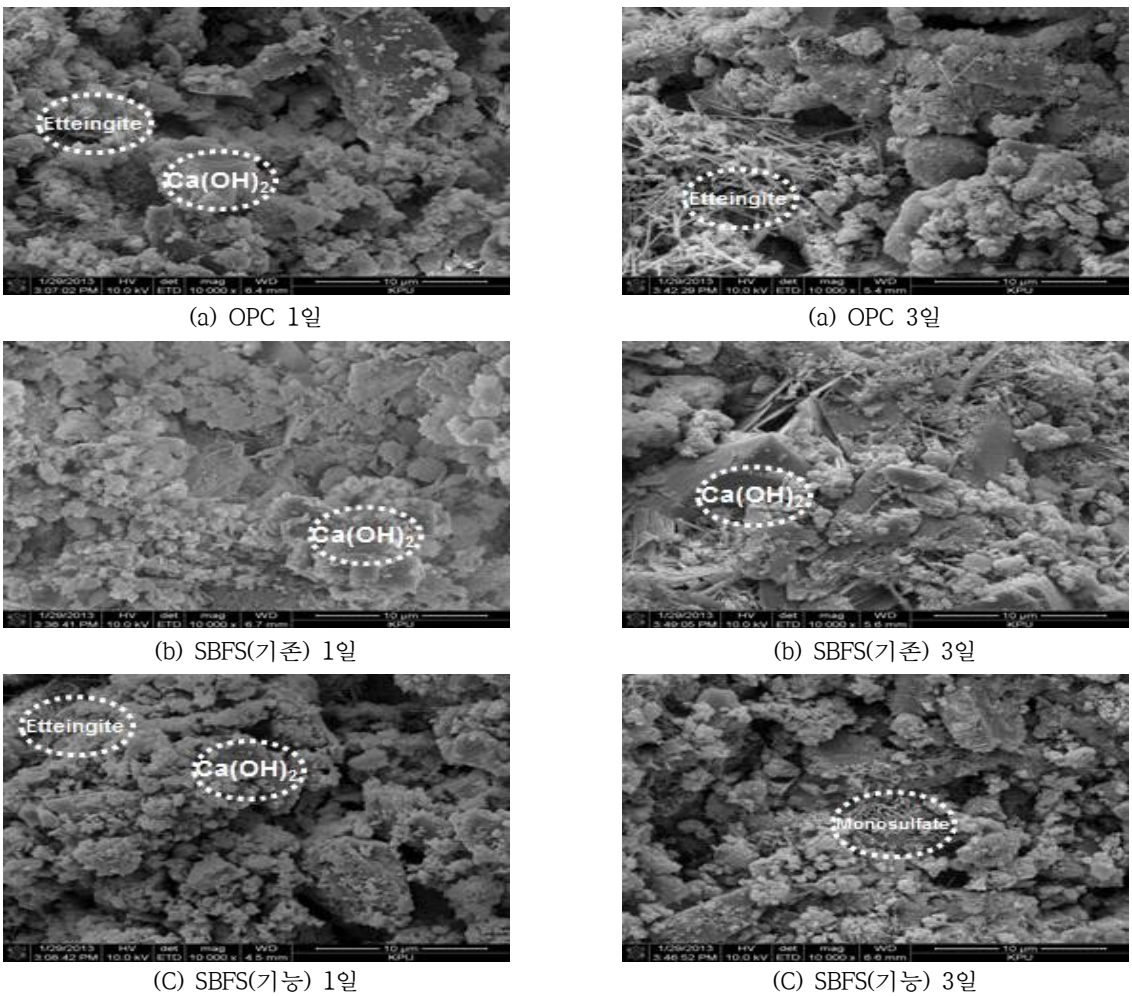


Fig. 3.3.19 시멘트페이스별 $Ca(OH)_2$ C_3S 1, 3일 XRD 측정결과

(다) SEM 실험결과

Fig. 3.3.20는 기능성 분쇄조제의 따른 SBFS 시멘트 페이스트의 SEM 촬영을 나타낸다. 재령 1일에서의 OPC 수화생성물은 초기수화 생성물인 에트링자이트와 수산화칼슘이 생성되었으며, SBFS의 기존에서는 수산화칼슘$(CaOH)_2$이 생성되는 것을 확인할 수 있었다. 기능성 분쇄조제를 사용한 SBFS는 에트링자이트와 수산화칼슘이 생성되었다. 재령 3일의 수화생성물로 OPC는 에트링자이트의 침상이 증가하는 양상을 나타내었으며, SBFS의 기존에서도 수산화칼슘$(CaOH)_2$이 다량으로 생성되는 것을 확인할 수 있었다. 기능성 분쇄조제는 에트링자이트에서 석고를 소비하여 저황산염의 모노설페이트 형태를 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

또한 시멘트 페이스트의 내부미세구조를 관찰한 결과를 종합하면 수화반응에 따른 초기 재령에서의 강도발현은 다량의 에트링자이트를 골격으로 이와 동시에 생성된 C-S-H겔에 의해 이루어진다. 또한 C-S-H겔은 에트링자이트를 감싸며 재령이 경과함에 따라 생성량이 지속적으로 증가하고 C-S-H겔이 경화된 페이스트의 공극을 밀실하게 채우게 되어 에트링자이트와 치밀한 네트워크식 망상구조를 형성하면서 지속적으로 높은 강도발현을 한다.



(a) OPC 1일 (a) OPC 3일

(b) SBFS(기존) 1일 (b) SBFS(기존) 3일

(C) SBFS(기능) 1일 (C) SBFS(기능) 3일

Fig. 3.3.20 SBFS 시멘트 페이스트의 SEM 측정결과 (1일, 3일) x 10,000배

다. 전기로 소성에 의한 콘크리트 적용 실험

(1) 개요

고로슬래그미분말을 건설재료로서 사용하기 위한 용도는 시멘트 대채재료로 고로슬래그시멘트를 사용하는 방법과 콘크리트용 혼화재료로 고로슬래그미분말을 사용하는 방법으로 구분할 수 있다. 그러나 수화진행 메커니즘으로 인해 고로슬래그의 잠재수경성은 보통포틀랜드시멘트의 수화반응보다 수화진행 속도가 지연되고 고로슬래그 혼입 경화체의 초기강도가 지연을 가져오게 된다. 따라서 본 연구는 Smart 고로슬래그미분말을 활용한 저탄소 콘크리트 개발에 있어 상기 단점을 보완한 콘크리트를 시험한 결과이다.

Table 3.3.26 주요 연구내용

● SBFS 원천소재의 혼합 비율에 따른 콘크리트 성능 검증 시험
● 주재료(OPC, GBFS) 강도 발현 검증 실험
● SBFS 원천소재 치환율에 따른 콘크리트 성능평가 실험
● SBFS 혼입 저탄소 콘크리트의 성능평가 실험

(2) 실험방법

본 실험에서 실시한 콘크리트의 시험항목 및 방법으로 유동특성을 평가하기 위해 굳지 않은 성상에서의 슬럼프 시험은 KS F 2402 “콘크리트의 슬럼프 시험방법”에 준하여 실시하였으며, 공기량 시험은 KS F 2421 “압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험방법“에 준하여 실시함으로서 유동특성의 변화를 알아보았다. 또한, 압축강도 발현율 특성을 알아보기 위한 경화 콘크리트 성상에서 압축강도시험용 공시체는 KS F 2403 “콘크리트 강도 시험용 제작방법”에 따라 (∅100×200)mm 시험체를 제작한 후 재령 1일, 3일, 7일에 UTM(Universal Testing Machine)을 이용하여 KS F 2405 “콘크리트 압축 강도 시험방법”에 준하여 Table 3.2.66에 의거 측정을 실시하였다.

(3) SBFS 원천소재의 혼합 비율에 따른 콘크리트 성능 검증 시험

(가) 실험개요

SBFS 원천소재의 혼합 비율에 따른 콘크리트 성능 검증 실험계획으로서, Table 3.3.27과 같다. 모르타르 레벨에서의 최적 혼합 비율 선정 실험과 연계하여 SBFS 원천소재의 혼합 비율, 5종류로 선정하여 시멘트 질량 대비 7%를 고정하여 치환하였다. SBFS 원천소재의 분말도는 볼밀로 20분간 분쇄하여 4,300~4,500cm^2/g이며, 비중은 2.88g/cm^3,물리적인 성능평가를 위하여 슬럼프 및 공기량, 재령별 압축강도를 평가하였으며, 혼화제는 모르타르레벨에서 압축강도 평가를 진행하여 선정된 고성능감수제(폴리카본산계)를 사용하였다.

Table 3.3.27 실험계획

No.	OPC 치환율(%)	GBFS 치환율(%)	원천소재 치환율(%)	원천소재 혼합비율	시험항목 및 방법
1	100	-	-	혼화제	■ 슬럼프, 공기량 ■ 재령별 압축강도(1, 3, 7일) ■ GBFS (무수석고 무첨가) ■ 혼화제 : 고성능감수제 (폴리카본산계) 0.98%
2	70	23	7	1:1:1	
3	70	23	7	4:3:3	
4	70	23	7	3:4:3	
5	70	23	7	5:3:2	
6	70	23	7	3;1:6	

Table 3.3.28 배합표 1m^3 (25-24-150)

No.	W/C (%)	S/a (%)	단 위 재 료 량 (kg/m^3)						AD (%)
			W	C	GBFS	원천 소재	S	G	
1	49.4	48.9	175	354	-	-	868	914	0.98
2				247.8	81.4	24.8			
3				247.8	81.4	24.8			
4				247.8	81.4	24.8			
5				247.8	81.4	24.8			
6				247.8	81.4	24.8			

(나) 실험결과

① 슬럼프 및 공기량 실험 결과

Table 3.3.29 및 Fig. 3.3.21은 슬럼프 및 공기량 시험결과를 나타낸 것이다. 슬럼프 목표값인 (150±25mm)를 만족하기 위하여 고성능감수제(폴리카본산계)의 첨가량은 Plain을 기준으로 0.98%를 투입하였다. 그에 따라 SBFS 배합에서도 동일 수량과 동일 혼화제량을 첨가하여 슬럼프 값을 확인한 결과 (150±25mm)의 범위를 나타내어 목표로 설정한 슬럼프 값에 만족하는 결과를 나타내었으며, Plain에 비해 SBFS 배합에서 슬럼프가 소폭 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 공기량 시험 결과에서 Plain은 4.2%를 나타내었으며, SBFS 배합에서도 (4.5±1.5%)의 범위를 나타내었으며, 유동성 측면에서 양호한 콘크리트의 점성이 육안 판단되었으며, 경시 변화에 있어서도 Plain 대비 슬럼프와 공기량의 변화의 정도는 거의 변하지 않는다는 결과를 얻었다.

Table 3.3.29 슬럼프 및 공기량 실험 결과

구분	굳지 않은 콘크리트 실험	
	슬럼프(mm)	공기량(%)
1	155	4.2
2	170	3.8
3	165	4.1
4	165	3.5
5	175	4.5
6	160	4.0

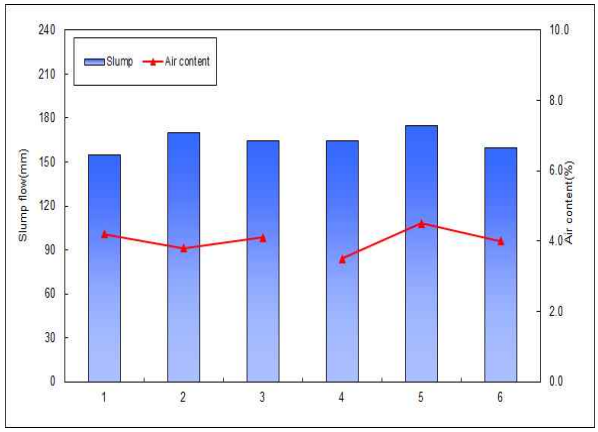


Fig. 3.3.21 슬럼프 및 공기량 시험 결과

② 재령별 압축강도 측정결과

Table 3.3.30 및 Fig. 3.3.22는 SBFS 원천소재 혼합비율에 따른 재령별 압축강도를 나타낸다. SBFS를 혼입한 콘크리트의 강도 발현에서는 고로슬래그의 수경성이 큰 역할을 한다. 하지만 시멘트에서 슬래그의 함유량의 변화가 있으면, 이들 시멘트를 사용하여 제조한 콘크리트 강도특성에 당연히 변화하게 된다. 그리하여 OPC 70%, GBFS 23%, 원천소재를 7%의 함유량을 고정시켜 콘크리트 강도 특성에 대하여 고찰한 것이다. 압축강도 측정결과, SBFS의 최적 혼합비율 선정실험의 결과로서, Plain 9.0MPa 대비 재령 1일에서는 6.9~7.8MPa (72.2~86.7%), 재령 3일에서는 13.4~15.3MPa (81.2~92.7%), 재령 7일에서는 22.2~23.9MPa (93.7~100.8%)의 압축강도를 나타내었으며, No.3의 SBFS의 최적 혼합비율은 (4:3:3)이 우수한 것으로 기존 모르타르 실험의 결과와 동일한 것을 확인할 수 있었다.

Table 3.3.30 SBFS 원천소재의 혼합 비율에 따른 재령별 압축강도 결과

No	재령별 측정값					
	1일		3일		7일	
	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)
1	9.0	100	16.5	100	23.7	100
2	7.1	78.9	14.2	86.1	23.2	97.9
3	7.8	86.7	15.3	92.7	23.9	100.8
4	7.0	77.8	14.2	86.1	23.0	97.0
5	6.9	76.7	13.9	84.2	22.6	95.4
6	6.5	72.2	13.4	81.2	22.2	93.7

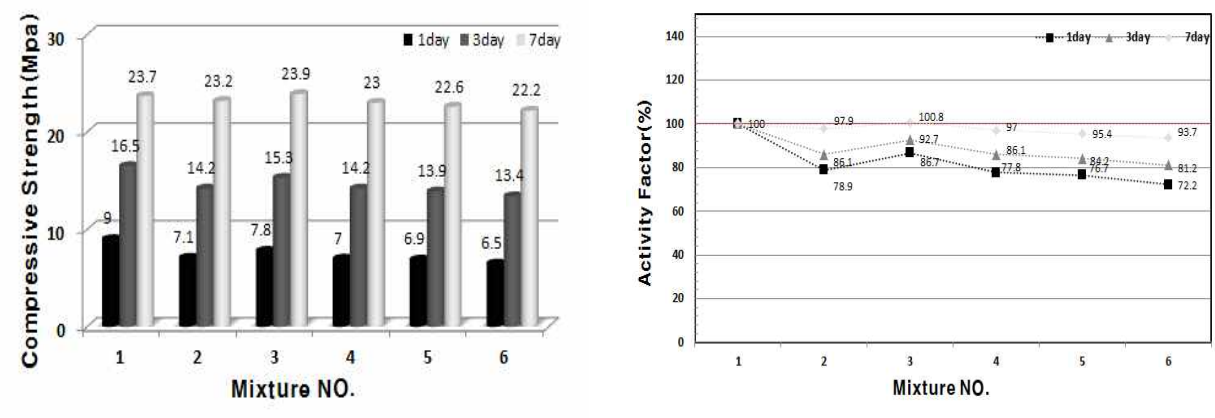


Fig. 3.3.22 재령별 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일)

(4) 주재료(OPC, GBFS) 강도 발현 검증 실험

(가) 실험개요

SBFS 원천소재의 혼합 비율선정 실험에서 재령 1일, 3일의 압축강도가 저하되는 것이 확인됨에 따라서, SBFS 원천소재가 OPC 100%사용에서의 압축강도 발현율 향상과 GBFS 100%사용에서의 압축강도 발현율 향상에 관한 자극제의 역할을 확인하는 실험이다. GBFS를 100% 사용한 콘크리트에서는 경화가 일어나지 않기 때문에 Plain으로 알칼리 자극제를 9%를 혼합하여 SBFS와의 비교실험을 진행하였으며 특이사항으로 모르타르레벨 성능평가 시 원천소재 분쇄 시 분쇄조제 사용한(0.04%) 시험이며, 실험계획으로는 Table 3.3.31와 같다. 시험항목으로 슬럼프 및 공기량, 재령별 압축강도를 평가하였으며, GBFS에서는 압축강도만을 확인하였다. 혼화제는 동일한 고성능감수제(폴리카본산계)계를 사용하였다.

Table 3.3.31 실험계획

구분		OPC 치환율 (%)	GBFS 치환율 (%)	NaOH	원천소재 치환율 (%)	분쇄조제 첨가(%)	시험항목 및 방법
그룹1	1	100	-	-	-	-	■ 슬럼프, 공기량 ■ 재령별 압축강도 (1, 3, 7, 14, 28일) ■ GBFS (무수석고 무첨가) ■ 혼화제:고성능감수제 (폴리카본산계) 0.98% ■ 원천소재비율(4:3:3)
그룹2	2	93	-	-	7	-	
	3	93	-	-	7	0.04	
	4	91	-	-	9		
	5	91	-	-	9	0.04	
그룹3	6	-	91	9	-	-	
	7	-	91	-	9	-	
	8	-	91	-	9	0.04	

*분쇄조제 : 원천소재의 질량비로 0.35% 첨가 후, 볼밀로 30분 분쇄

Table 3.3.32 배합표 1m^3 (25-24-150)

구분		W/C (%)	S/a (%)	단 위 재 료 량 (kg/m^3)							AD (%)
				W	C	GBFS	NaOH	원천 소재	S	G	
그룹1	1	49.4	48.9	168	340	-	-	-	866.2	949.3	0.98
그룹2	2				316.2	-	-	23.8			
	3				316.2	-	-	23.8			
	4				309.4	-	-	30.6			
	5				309.4	-	-	30.6			
그룹3	6				-	309.4	30.6	-			
	7				-	309.4	-	30.6			
	8				-	309.4	-	30.6			

(나) 실험결과

① 슬럼프 및 공기량 실험 결과

Table 3.3.33 및 Fig. 3.3.23은 슬럼프 및 공기량 시험결과를 나타낸 것이다. 슬럼프 목표 값인 (150±25mm)를 만족하기 위하여 혼화제의 첨가량은 Plain을 기준으로 0.98%를 투입하였다. 그에 따라 SBFS배합(그룹2)에서도 동일 수량과 동일 혼화제량을 첨가하여 슬럼프 값을 확인한 결과 (150±25mm)의 범위를 나타내어 목표로 설정한 슬럼프 값에 만족하는 결과를 나타냈다. 한편 공기량 시험 결과에서 Plain은 4.1%를 나타내었으며, SBFS배합(그룹2)에서는 공기량이 감소하는 경향으로 나타났으며 또한 SBFS배합(그룹3)은GBFS에 적용에 따라 슬럼프 및 공기량시험에 있어서는 SBFS배합(그룹2)과 동일 조건에서 시험한 결과로 큰 의미는 없으며 특이사항으로 NO.6의 시료는 고로슬래그 미분말의 자극제인 수산화나트륨을 직접 적용한 결과로 슬럼프 측면에서는 유동성이 확연히 나타났다.

Table 3.3.33 슬럼프 및 공기량 시험 결과

구분		굳지 않은 콘크리트 실험	
		슬럼프 (mm)	공기량(%)
그룹1	1	150	4.1
그룹2	2	160	3.8
	3	160	3.5
	4	150	3.1
	5	165	3.2
그룹3	6	185	-
	7	150	-
	8	155	-

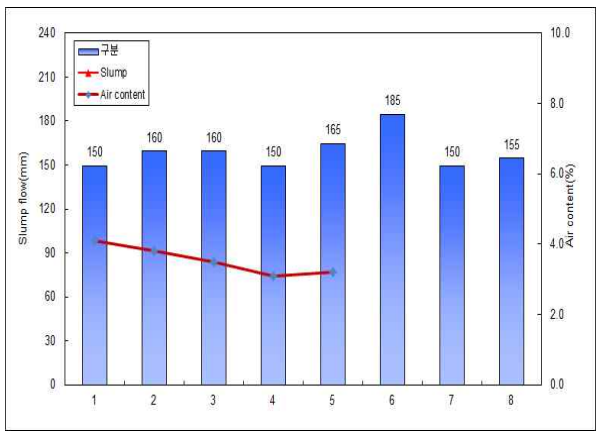


Fig. 3.3.23 슬럼프 및 공기량 시험 결과

② 재령별 압축강도 측정결과

Table 3.3.34 및 Fig. 3.3.24 ~ Fig. 3.3.25는 재령별 압축강도 측정결과를 나타낸 것이다. SBFS 원천소재는 Plain 대비 그룹2는 재령 1일(121.8～147.4%), 재령 3일(91.1～103.9%), 재령 7일(97.0～104.1%), 재령 14일(97.9～111.7%), 재령 28일(100.3～109.4%)로 활성도 지수의 경향을 나타냈으며, 특히 1일 초기재령에서 높은 압축강도 발현을 나타내는 것을 확인하였다. 이는 OPC 자극재로서 모르타르 성능평가와 동일한 성능을 나타냈으며 그룹2의 NO.3의 분쇄조제를 사용한 원천소재 7% 사용에서 가장 높은 압축강도를 나타냈다.

이후 그룹2는 28일 재령이후 에서도 강도발현이 지속적으로 이루어지는 것을 확인하였다. 한편 그룹3의 No.6은 GBFS 91% + NaOH 9%를 Plain으로 설정한 시료대비 SBFS의 원천소재는 재령1일(55.9～61.8%), 재령 3일(60.8～66.7%), 재령 7일(55.9～83.9%), 재령 14일(100~106.8%), 재령 28일(124.1～138.6%)로 초기재령에서는 GBFS의 주요 자극재인 수산화나트륨과 비교 시 강도발현이 낮게 나타났으나 재령 7일 이후부터 유사한 강도 발현을 확인할 수 있었다. 이에 모르타르 레벨 성능레벨 평가와 유사한 시험결과를 나타내었다.

Table 3.3.34 SBFS 원천소재의 혼합 비율에 따른 재령별 압축강도 결과

No		재령별 측정값									
		1일		3일		7일		14일		28일	
		압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)
그룹1	1	7.8	100	20.3	100	24.5	100	28.1	100	30.8	100
그룹2	2	9.5	121.8	18.5	91.1	23.8	97.1	27.5	97.9	31.0	100.6
	3	11.5	147.4	21.1	103.9	25.5	104.1	31.4	111.7	33.7	109.4
	4	10.7	137.2	20.7	100	24.1	98.4	27.4	97.5	30.9	100.3
	5	11.1	142.3	20.3	102	24.7	100.8	29.7	104.1	31.5	102.3
그룹3	6	3.4	100	5.1	100	6.2	100	7.3	100	8.3	100
	7	2.1	61.8	3.4	66.7	5.2	83.9	7.6	104.1	10.3	124.1
	8	1.9	55.9	3.1	60.8	4.9	79.0	7.8	106.8	11.5	138.6

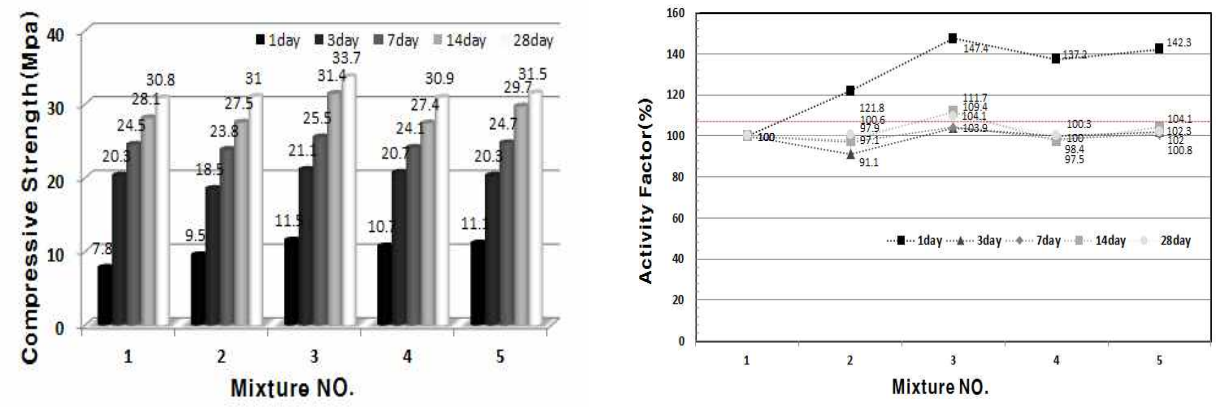


Fig. 3.3.24 그룹1,2 재령별 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일, 14일, 28일)

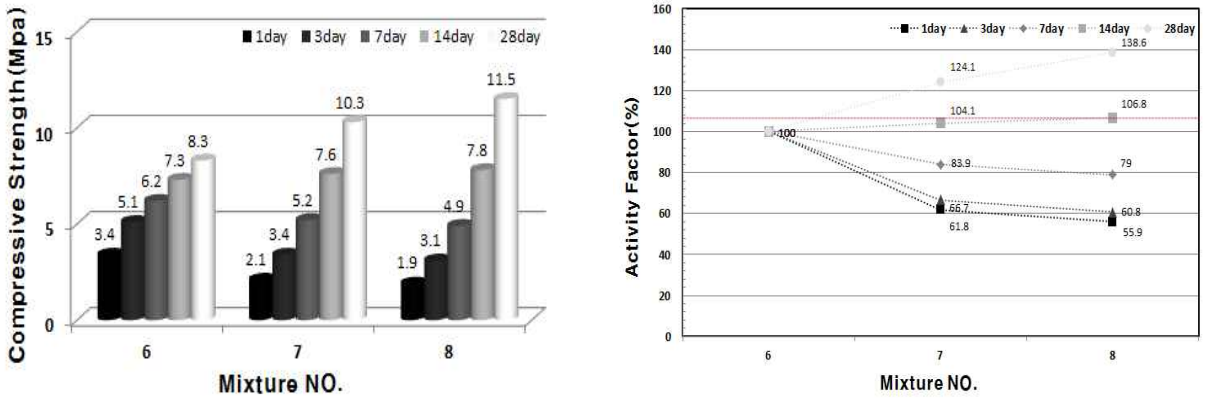


Fig. 3.3.25 그룹3 재령별 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일, 14일, 28일)

(5) SBFS 원천소재 치환율에 따른 콘크리트 성능 평가 실험

(가) 실험개요

SBFS 원천소재 치환율에 따른 콘크리트 성능 평가 실험으로서 실험계획은 Table 3.3.35와 같다. 즉, 원천소재의 종류는 SBFS 원천소재(4:3:3), 분쇄조제를 0.04% 첨가한 SBFS 원천소재(4:3:3) 2수준으로 설정하였으며 볼밀에 20분 분쇄하여 분말도를 4,350cm^2/g 정도로 분쇄하였다. SBFS 치환율을 30%로 고정한 상태에서 원천소재 치환율을 (5%, 7%, 9%) 3수준으로 설정하였다. 또한, 시험항목으로는 슬럼프, 공기량, 재령별 압축강도 측정을 실시하였다.

Table 3.3.35 실험계획

구분	OPC 치환율(%)	GBFS 치환율(%)	원천소재 치환율(%)	분쇄조제 첨가(%)	시험항목 및 방법
1	100	-	-	-	■ 슬럼프, 공기량 ■ 재령별 압축강도(1, 3, 7일) ■ GBFS (무수석고 무첨가) ■ 혼화제 : 고성능감수제 (폴리카본산계) 0.85%
2	70	25	5	-	
3		23	7	-	
4		21	9	-	
5		25	5	0.04	
6		23	7	0.04	
7		21	9	0.04	

*분쇄조제 : 원천소재의 질량비로 0.35% 첨가 후, 볼밀로 30분 분쇄

Table 3.3.36 배합표 1m^3 (25-24-150)

구분	W/C (%)	S/a (%)	단 위 재 료 량 (kg/m^3)							AD (%)
			W	C	GBFS	원천소재(4:3:3)		S	G	
						4:3:3	4:3:3 (분쇄조제첨가)			
1	49.4	48.9	175	354	-	-	-	868	914	0.85
2				248	88.5	17.5	-			
3					81.4	24.6	-			
4					74.3	31.7	-			
5					88.5	-	17.5			
6					81.4	-	24.6			
7					74.3	-	31.7			

(다) 실험결과

① 슬럼프 및 공기량 시험 결과

Table 3.3.37 및 Fig. 3.3.26은 슬럼프 및 공기량 시험결과를 나타낸 것으로서, 슬럼프 시험결과 Plain의 목표 값인 (150 ± 25mm)를 만족하기 위하여 동일 W/C 및 혼화제를 적용한 결과 모든 항목에 있어서 Plain에 비해 소폭 증가하는 경향을 나타내었다.

Table 3.3.37 슬럼프 및 공기량 시험 결과

구분	굳지 않은 콘크리트 실험	
	슬럼프 (mm)	공기량(%)
1	145	4.1
2	155	4.3
3	165	4.5
4	170	4.9
5	170	5.0
6	175	5.2
7	165	5.2
8	155	-

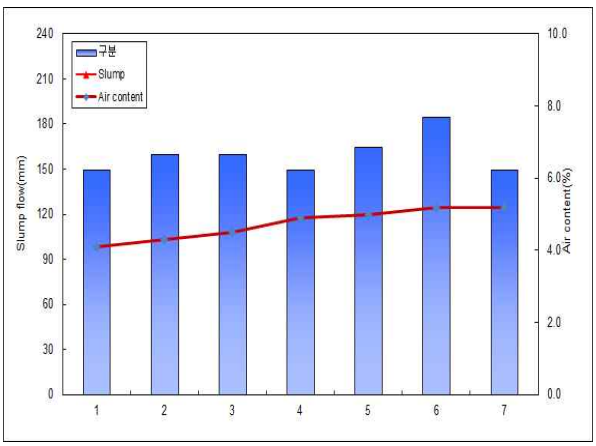


Fig. 3.3.26 슬럼프 및 공기량 시험 결과

② 재령별 압축강도 측정결과

Table 3.3.38 및 Fig. 3.3.27은 SBFS 원천소재 치환율에 따른 콘크리트 성능 평가 실험을 위하여 압축강도를 측정한 결과를 나타낸 것이다. 본 실험계획에서 Table 3.3.35에서 나타난 것과 같이 각각의 OPC, GBFS, 원천소재 치환율 변화와 분쇄조제 첨가율에 따른 압축강도 발현율에 대한 평가로서 그중 원천소재 분쇄 시 첨가된 분쇄조제를 사용한 No.5~7이 분쇄조제를 사용하지 않는 No.2~4 보다 압축강도가 높게 나타났으며 그중 원천소재 치환율 7%를 적용한 No.6이 Plain 대비 재령 1일, 7일에 거의 100%이상의 강도 발현율이 나타내었으나,

재령 3일 강도에서는 94.2%로 목표 연구에 미달된 결과로 나타났다.

Table 3.3.38 SBFS 원천소재의 치환율에 따른 재령별 압축강도 결과

No	재령별 측정값					
	1일		3일		7일	
	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)
1	6.3	100	12.0	100	17.3	100
2	4.9	77.8	9.9	82.5	15.2	87.9
3	5.2	82.5	10.8	90.0	17.5	101.2
4	5.0	79.4	10.0	83.3	16.8	97.1
5	6.1	96.8	11.2	93.3	17.0	98.3
6	7.4	117.5	11.3	94.2	17.5	101.2
7	7.6	120.6	10.3	85.8	16.5	95.4

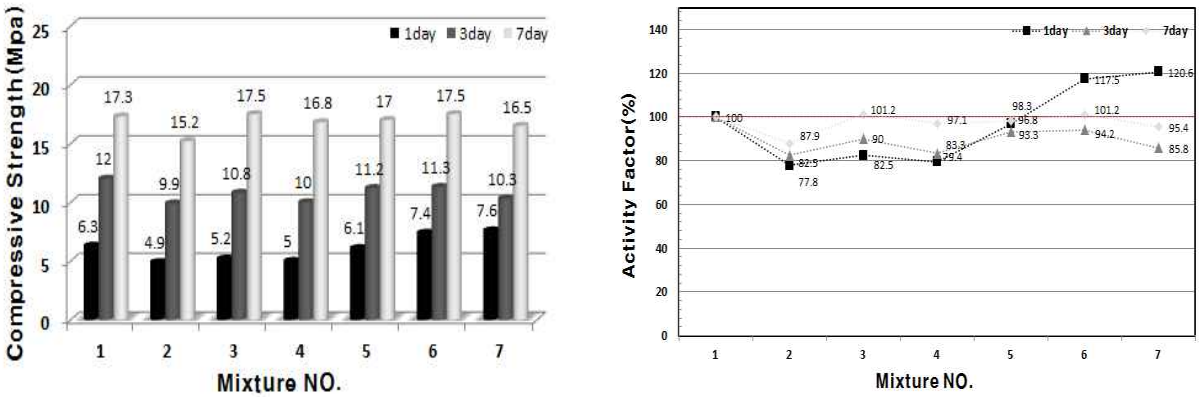


Fig. 3.3.27 재령별 압축강도 및 활성도 지수 (1일, 3일, 7일)

(6) SBFS 혼입 저탄소 콘크리트의 성능평가 실험

(가) 실험개요

SBFS 원천소재 치환율에 따른 콘크리트 성능 평가 실험결과의 분석을 토대로 재령 1일의 압축강도가 필요이상으로 높게 나타나는 것을 방지하기 위하여 포졸란 반응을 유도하기 위한 실험계획이며, 그 소재 중 플라이애쉬를 활용하여 실험계획을 준비하였으며, 플라이애쉬는 Plain 대비 1%, 2%, 3%의 수준으로 설정하였다. 한편, SBFS 원천소재는 7%로 고정하고 분쇄조제를 0.04% 첨가 시, 초기 빠른 수화반응을 야기 하므로 그 수준을 낮추어 0.03%를 적용하여 볼밀에 20분 분쇄하여 분말도를 4,420cm^2/g 정도로 분쇄하였다. 또한, 시험항목으로는 슬럼프, 공기량, 재령별 압축강도 측정을 실시하였다. 실험계획은 Table 3.3.39와 같다.

Table 3.3.39 실험계획

구분	OPC 치환율(%)	GBFS 치환율(%)	원천소재 치환율(%)	F/A 치환율(%)	시험항목 및 방법
1	100	-	-	-	■ 슬럼프, 공기량 ■ 재령별 압축강도(1, 3, 7일) ■ GBFS (무수석고 무첨가) ■ 혼화제 : 준PC 0.85%
2	69	23	7	1	
3	68	23	7	2	
4	67	23	7	3	

*분쇄조제 : 원천소재의 질량비로 0.1% 첨가 후, 볼밀로 30분 분쇄

**F/A : OPC 질량 대비 1%, 2%, 3% 적용

Table 3.3.40 배합표 1m^3 (25-24-150)

구분	W/C (%)	S/a (%)	단 위 재 료 량 (kg/m^3)						AD (%)
			W	C	GBFS	원천 소재	F/A	S	G	
1	49.4	48.9	169	340	-	-	-	866.2	949.3	0.98
2				234.6	78.2	23.8	3.4			
3				231.2	78.2	23.8	6.8			
4				227.8	78.2	23.8	10.2			

(다) 실험결과

① 슬럼프 및 공기량 시험 결과

Table 3.3.41 및 Fig. 3.3.28은 슬럼프 및 공기량 시험결과를 나타낸 것으로서, 슬럼프 시험결과 Plain의 목표 값인 슬럼프(150 ± 25mm) 및 공기량(4.5 ± 1.5%)을 만족하였으며 OPC 100% 사용한 것과 유사한 유동성을 나타내는 것을 확인하였다.

Table 3.3.41 슬럼프 및 공기량 시험결과

구분	굳지 않은 콘크리트 실험	
	슬럼프(mm)	공기량(%)
1	160	4.3
2	155	4.1
3	155	3.8
4	160	3.8

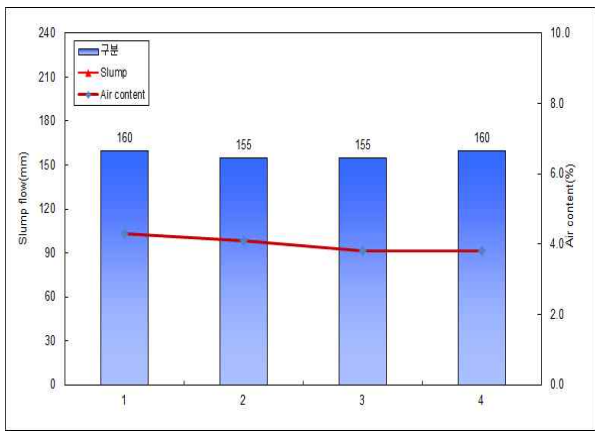


Fig. 3.3.28 슬럼프 및 공기량 시험 결과

② 재령별 압축강도 측정결과

Table 3.3.42의 재령별 압축강도 측정결과 초기 포졸란 반응을 유도하기 위한 압축강도 실험 결과로 Plain 대비 재령 1일(98.4~101.6%), 재령 3일(95.9~101.4%), 재령 7일(101.1~102.8%)의 활성도를 나타냈으며, 플라이애쉬 치환율 중 OPC 질량대비 2% 치환이 가장 적정한 사용범위를 나타내 OPC의 수화반응과 동등한 압축강도를 나타내는 것을 실험을 통하여 확인 하였다.

Table 3.3.42 재령별 압축강도 결과

No	재령별 측정값					
	1일		3일		7일	
	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)
1	6.1	100	14.6	100	17.8	100
2	6.0	98.4	14.0	95.9	18.0	101.1
3	6.2	101.6	14.8	101.4	18.3	102.8
4	5.8	95.1	14.5	99.3	18.1	101.7

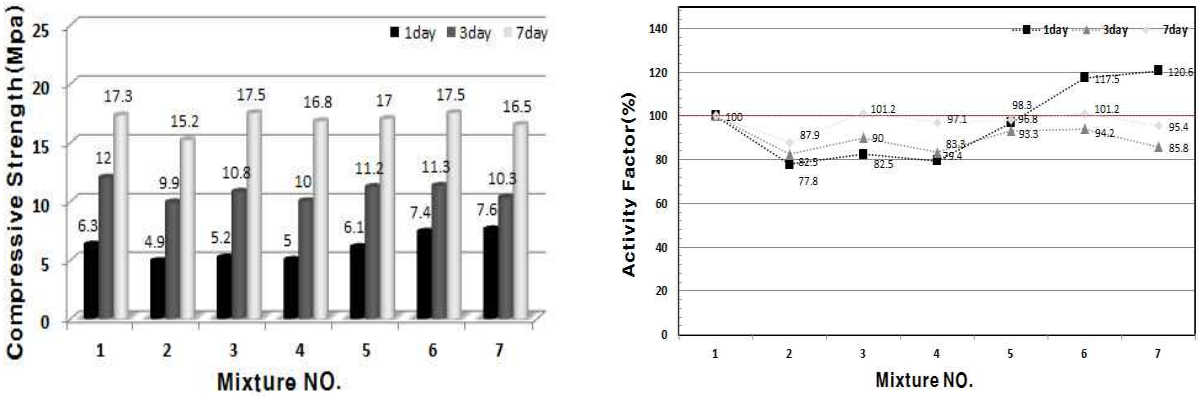


Fig. 3.3.29 재령별 압축강도 및 활성도 지수 (1일, 3일, 7일)

5. 주거환경에서의 인체 유해성 검토

가. 서론

Smart 고로슬래그미분말의 레미콘 실용화 단계에서의 인체 유해성 검토에 앞서 최근 건설산업은 자원의 절약과 환경보전이라는 거대한 시대적 흐름 속에서 많은 변화에 직면하고 있으며, '건설순환자원'이라함은 인간이 일상적인 건설활동 과정에서 어쩔 수 없이 발생되는 효용가치가 없거나 경제성이 없어서 버려진 폐기물이나, 산업활동 과정에서 필수 불가결하게 발생하는 부산물을 과학적인 방법 등을 동원하여 건설산업에 재이용할 수 있도록 한 재료 등을 총칭한다.

이러한 폐기물 및 부산물을 재이용하지 못하고 단순 매립 등에 의한 처리가 지속될 경우 국토의 효율적인 이용과 환경훼손이 심각해지는 문제를 야기할 수 있다. 따라서 재활용이 가능한 폐기물 및 산업부산물의 활용은 경제 산업적인 측면뿐만 아니라 환경적으로 매우 유익한 일이라 할 수 있다.
최근 인체 유해성이 대두되는 아파트 현장에서의 문제점은 각종 자재에서 불거진 일이라 판단되어지며 이중 시멘트와 혼입한 콘크리트의 경우는 반제품인 레미콘의 사례로서 본 연구의 실용화에 앞서 레미콘의 구성 성분의 안정성을 기반으로 시멘트원료, 콘크리트용 혼화재, 골재등으로 이용되고 있다 특히 고로슬래그를 미분말 형태의 시멘트 대체제로 사용 할 경우 콘크리트에 존재하는 여러 중금속중 가장 유해하는 6가크롬(Hexavalent chromium : Cr (VI))의 용출량을 측정하여 환경성을 평가하고자 한다.

나. 실험방법

본 연구에서는 시멘트 중의 중금속이온을 측정하고자 보통 포틀랜드시멘트 (Ordinary Portland cement : OPC)3종 과 Smart 고로슬래그미분말 (Ground granulated blast furnace slag : GGBS), 플라이애쉬 (Pulverised fuel ash : PFA), 실리카퓸(Silica fume : SF)을 이용하여 수화하지 않은 상태에서의 결합재 내 존재하는 6가크롬의 농도를 측정하였다.
실험방법으로는 결합재 내의 정량적인 6가크롬의 농도를 측정하고자 분광광도법을 이용하였으며, 분광광도법에 사용될 표준용액은 중크롬산칼륨 (K2Cr2O7)을 이용하여 0.0에서 1.0 ppm 범위의 농도로 제작하고 중크롬산칼륨 1.420g을 계량하여 증류수1000ml에 용해하여 0.50mg Cr/ml의 크롬 용액을 제조한 후, 다시 0.50mg Cr/ml의 크롬 용액 10ml를 1,000ml로 희석하여 5μg Cr/ml 농도의 표준용액을 제조하였다. 5μgCr/ml의 크롬 표준용액을 50ml 메스플라스크에 0-10ml를 단계적으로 취하여 황산 (1:1) 0.6ml를 넣어 흔들어 섞은 후 냉각시킨다. 여기에 디페닐카바지드 용액 (1 w/v %) 1.0ml를 넣어 즉시 흔들어 섞고 물을 표선까지 채운다. 5분후 분광광도계를 이용하여 6가크롬의 고유파장 영역인 파장 540nm에서 6가크롬 이온에 대한 흡광도를 측정하였다.

다. 실험결과

본 연구에서는 국내에서 생산되는 시멘트와 혼화재료를 사용하여 시멘트 및 시멘트 경화체에 존재하는 수용성 및 산가용성 6가크롬의 농도를 측정하였으며 결론은 다음과 같다.

Table 3.3.43 시료별 화학적 조성 성분

품 명	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	SO_3
OPC-A	62.3	21.2	4.8	2.8	2.1
OPC-B	61.2	20.5	5.3	3.5	2.5
OPC-C	62.1	21.7	5.0	3.5	2.4
PFA	6.3	47.8	27.5	8.3	0.3
GGBS	43.7	35.5	14.7	0.51.4	1.5
SF	0.3	94.9	0.2	0.1	0.2

Table 3.3.44 수용성 및 산가용성의 농도를 측정값((단위 : mg/kg)

구분	Cr^{6+}	As	Cd	Cu	Hg	Pb
티탄석고	N.D	N.D	2.2	11	N.D	26
정수오니	N.D	N.D	0.9	25	N.D	20

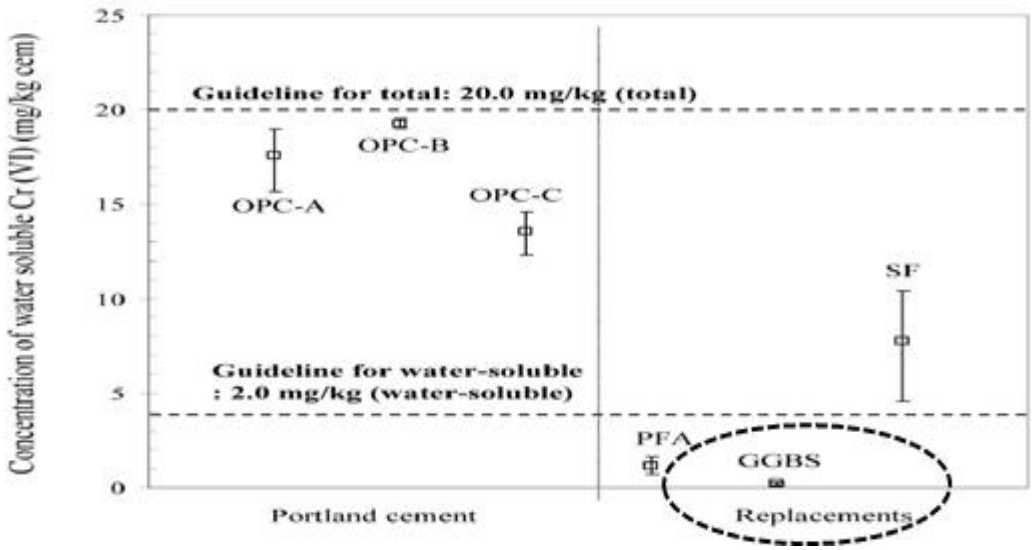


Fig. 3.3.30 수용성 Cr(VI)이온의 농도 실험 결과

수용성인 6가크롬 (Hexavalent chromium : Cr(VI) ion)은 피부에 자극을 유발하여 접촉성 피부염을 발생시키며 심할 경우 피부암까지 일으킬 수 있는 인류 건강에 매우 위해한 이온으로서 작업현장의 건설 근로자들이 굳지 않은 콘크리트를 취급 시 피부 염증을 유발한다고 보고되고 있다. 일반적으로 포틀랜드시멘트나 클링커는 6가크롬으로 쉽게 변환하는 수용성 크롬을 함유하고 있으며, 이는 5-20mg/kg-cement 정도로 보고되고 있으며 현재 유럽에서 제조되거나 수입되는 모든 시멘트 제품은 6가크롬의 함량이 Directive 2003/53/EC의 규정에 의해 2.0mg/kg-cement를 넘지 못하도록 엄격하게 규제하고 있으며(Directive 2003/53/EC, 2003), 우리나라에서는 시멘트 내 6가크롬 이온이 20.0mg/kg-cement를 한계치로 하는 자율 규제를 택하고 있다.

라. 소 결

본 실험 연구결과 시멘트 내 존재하는 수용성 6가크롬의 양은 10.5-18.9mg/kg-cement 범위였으며 플라이애쉬는 1.1mg/kg, Smart 고로슬래그미분말은 0.4mg/kg, 실리카퓸은 7.7 mg/kg의 6가크롬을 함유하며 Smart 고로슬래그미분말의 실용화에 따른 6가크롬의 양은 매우 적은 양으로 판단되며 인체 유해성은 없을 것으로 판단된다.

또한 기존 문헌을 통하여 시멘트 소성로에서 폐기물을 동시에 처리할 경우에 다이옥신, 중금속등 대기오염물질은 인체와 환경에 무해하다는 것이 많은 연구로 확인되었으며 국내 시멘트회사는 충분한 관리가 가능하므로 민원해결은 물론 자료를 확보, 이용하고 새로운 기술을 개발해서 선진국과 경쟁하면서 선도역할을 할 수 있도록 정부의 지원과 노력이 절실한 것으로 판단된다.

6. 알칼리성 무기계 자극제를 이용한 SBFS 모르타르 성능평가

가. 개요

본 연구의 당위성으로서 많은 연구자들에 의하여 다양한 무기계 결합재를 사용하여 GBFS 혼입의 성능평가 위한 연구가 진행되고 있으며, 시멘트 및 콘크리트 적용에 관련하며 학술적으로 발표가 되고 있다. 그 중, 대표적으로 알칼리 자극, 비소성 시멘트 등의 개발에 관련된 사항이며, 제품화되기까지의 제조공정의 과정 및 경제적인 측면에서 단점으로 나타나 현장 적용의 어려움을 나타낸다.

본 연구는 기존 연구의 한계성을 극복하기 위하여 기존문헌 고찰 및 무기계 자극제를 이용한 고로슬래그미분말 특성을 분석하여 강도 증진에 효과적인 화학적 요소를 찾고, 그에 따른 경제성을 고려하여 산업부산물과 산업폐기물을 결합재로 하여 소성과정을 통하여 하나의 고용체를 만들어 기존 연구와의 차별적인 원천소재를 개발하였다.

따라서 본 장에서는 이러한 배경을 통하여 모르타르 역학적 특성을 검토하여 최종적인 실용화 단계에서의 콘크리트레벨 성능평가에 기초자료를 제시하고자 하였다.

나. 실험계획

(1) 실험개요

원천소재를 시험용 전기로(1,050℃)에 의한 소성 후 실험한 결과는 모두 만족 하였으나 레미콘 레벨의 성능평가에 있어서는 원천소재 대량생산에 의한 평가가 이루어지기 때문에 pilot 시작품에서 생산된 원천소재를 소성 온도별 인자를 통하여 모르타르 레벨 성능 평가가 실시되었으며, 원천소재에 의한 메커니즘에 대하여 기술 하였다.

전기로 소성에 의한 모르타르 및 콘크리트 실험에서 검증된 최적 혼합 비율에 의거하여 Pilot 소성 온도별 모르타르 실험계획으로서, Table 3.3.45와 같다. Pilot 소성온도는 700℃, 800℃, 900℃, 1,000℃, 1,100℃로 선정하고 원천소재 소성비율은 동일하게 4:3:3 비율로 소성 후, 볼밀에 원천소재 클링커 20Kg에 30분 분쇄하여 분말도 4,400～4,600㎠/g 밀도 2.85g/㎤ 으로 기준 설정하고 시멘트(OPC) 70% + GBFS23% + 원천소재 7%를 고정하고 압축강도 실험을 진행하였다.

Table 3.3.45주요 실험 내용

연구개발	주요 실험 내용
Pilot 소성로에 의한 Smart 고로슬래그미분말 특성 분석	• 소성온도별 SBFS 혼입 모르타르실험
	• 기능성 분쇄조제 적용 SBFS 혼입 모르타르실험
	• 소성온도별 SBFS 혼입 저온환경 모르타르 실험
	• 콘크리트 혼화제 선정에 따른 SBFS 혼입 모르타르실험

(2) 실험항목

실험항목으로 Table 3.3.46에서 나타낸바와 같이 모르타르의 유동성 측정을 위한 타격 플로우 측정(KS L 5111), 경화 모르타르의 압축강도 및 미세분석을 위한 실험을 진행하였다.

(가) 타격 플로우 및 압축강도 측정

본 실험은 (OPC 70% 질량, GBFS 23% 질량, ESA 7% 질량)배합에서 각 바인더와 잔골재의 질량비율은 1:3으로 하였으며, 물 바인더비(W/B)는 50%로 고정하였다. 모르타르 배합의 용량은 40mm×40mm×160mm 각주 3개에 맞추어 바인더 450g±2g, 잔골재 1350g±5g, 물 225g±1g을 사용하였다. 또한, 모르타르 믹싱은 KS L ISO 679의 방법에 의거하여 실시하였다. 양생방법은 항온 항습실에서 양생온도 20℃ ±2℃로 상대습도 95% 이상으로 실시하며, 1일 재령이후, 수중양생을 실시하였다. 압축강도 시험 재령은 각각 재령 1일, 3일, 7일, 14일, 28일로 실시하였으며, 각 재령별 3개의 압축강도를 평균값으로 하였다. 플로우 측정을 하여 기본적인 물성을 비교 검토하였다.

(나) SEM

OPC 및 SBFS의 페이스트의 성분 및 미세조직 구조를 분석하기 위하여 SEM(S-4700)촬영을 실시하였다.

(다) XRD

원재료의 화학적 정량분석을 위하여 재령별(1일, 3일)로 OPC 및 SBFS의 페이스트의 특성이 수화작용에 미치는 영향과 화학적 특성을 알아보기 위해 페이스트 시편을 채취하여 아세톤에 24시간이상 침지시켜 수화물의 변동이 생기지 않도록 수화정지 시킨 후 X-선 회절분석기(D/MAX RINT 2000)를 이용하여 분석을 실시하였다.

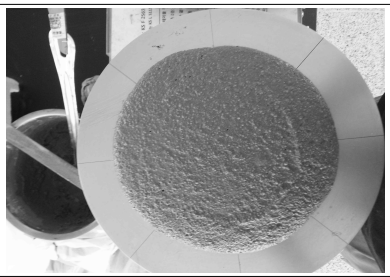
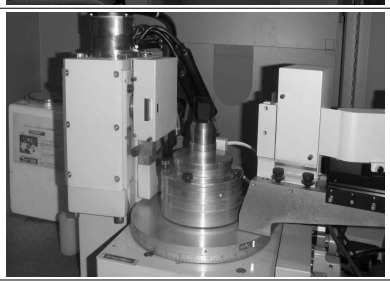
(라) 안정성 시험(Free-lime 정량분석)

콘크리트사용에 있어 내구성 측면에서의 안정성 검토는 중요한 문제로 작용하기 때문에 개발된 SBFS의 안정성 검토(Free-lime 정량분석)을 실시하여, 팽창성 및 균열의 정도를 OPC와 비교하여 정량적으로 실시하기 위하여 실험을 진행하였다.

(마) XRF

OPC 및 SBFS의 화학성분분석을 측정하기 위하여 XRF 성분분석을 원재료별, 소성온도별, SBFS의 성분분석을 실시하였다.

Table 3.3.46 항목

	실험항목	규격	실험전경
굳지 않은 시멘트 모르타르	타격 플로우	KS L 5111	
경화 모르타르	압축강도	KS L ISO 679	
	SEM (Scanning Electron Microscope)	-	
	XRD	-	
	Free lime 측정	-	
	XRF		

다. SBFS 모르타르 물리적 성능 평가

(1) 원천소재 Pilot 소성온도별 (4:3:3) 모르타르 실험

(가) 실험개요

원천소재 Pilot 소성온도별 원천소재 혼합비율을 4:3:3에서 소성 온도별 모르타르 실험계획은 Table 3.3.47과 같다. Pilot 소성온도는 700℃, 800℃, 900℃, 1,000℃, 1,100℃, 1,200℃로 선정하고 소성 후, 시멘트(OPC) 70% + GBFS23% + 원천소재 7%를 고정하고 압축강도 실험을 진행하였다.

Table 3.3.47 Pilot 소성 장비를 통한 소성온도별 모르타르 배합표

NO	기호	W/B (%)	질량비율(%)			단위질량(g)				
			OPC	GBFS	원천 소재	OPC	GBFS	원천 소재	S	W
1	OPC	50	100	-	-	450	-	-	1,350	225
2	700℃		70	23	7	315	103.5	31.5		
3	800℃									
4	900℃									
5	1000℃									
6	1100℃									
7	1100℃(물급냉)									
8	SC(65:35)[1)]		65	35	-	292.5	157.5	-		

1) 일반적인 고로슬래그시멘트 2종

(나) 실험결과

원천소재 개발 단계에서는 전기로 소성 1,050℃가 가장 우수한 압축강도 값의 결과를 나타냈지만 Table 3.3.48과 같이 Pilot 장비를 통한 소성온도별 실험에서는 NO 2, 3번인 700~800℃에서의 압축강도 결과 값이 OPC 100% 유사한 값으로 나타났으며 이는 소성 과정 중 발생되는 탈탄산으로 추정되며 일반적인 고로슬래그시멘트 2종 보다는 모두 우수한 결과를 나타내었다.

Table 3.3.48 소성온도별(4:3:3) 압축강도 측정결과

No	재령별 측정값					
	1일		3일		7일	
	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)
1	11.6	100	28.2	100	44.1	100
2	11.3	97.4	27.9	98.9	43.1	97.7
3	11.5	99.1	27.8	98.6	42.3	95.9
4	10.8	93.1	26.5	94.0	40.5	91.8
5	10.2	87.9	26.1	92.6	40.1	90.9
6	9.6	82.8	19.8	70.2	31.3	71.0
7	9.2	79.3	20.3	72.0	32.1	72.8
8	6.8	58.6	20.0	70.9	32.9	74.6

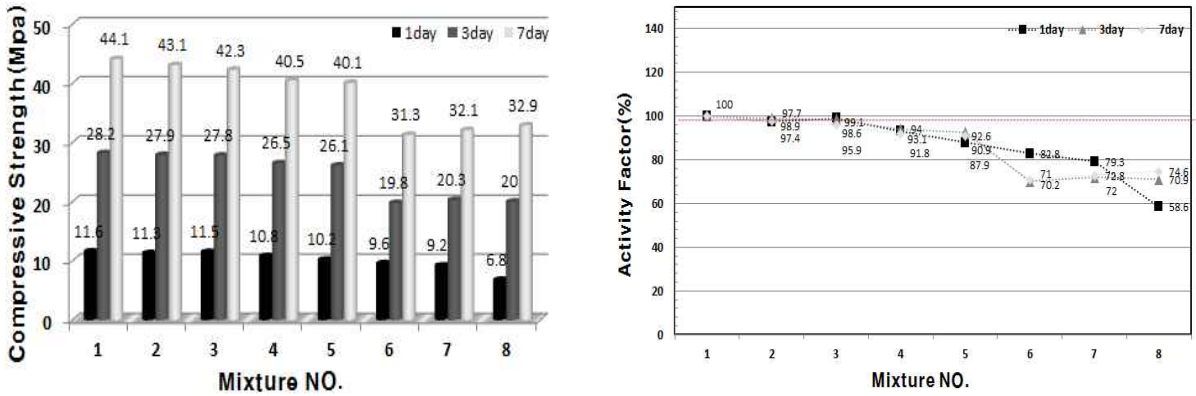


Fig. 3.3.31 Pilot 소성온도별 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일)

(2) 원천소재 Pilot 소성온도별(4:4:2) 모르타르 실험 및 결과

(가) 실험개요

원천소재 Pilot 소성온도별 모르타르 실험 및 결과(1)을 토대로 원천소재 혼합비율을 4:3:3에서 4:4:2로 변경하여 동일한 Pilot 소성 온도별 모르타르 실험계획으로서, Table 3.3.49와 같다. Pilot 소성온도는 700℃, 800℃, 900℃, 1,000℃, 1,100℃, 1,200℃로 선정하고 소성 후, 시멘트(OPC) 70% + GBFS23% + 원천소재 7%를 고정하고 압축강도 실험을 진행하였다.

Table 3.3.49 Pilot 소성 장비를 통한 소성온도별 모르타르 배합표

NO	기호	W/B (%)	질량비율(%)			단위질량(g)				
			OPC	GBFS	원천 소재	OPC	GBFS	원천 소재	S	W
1	OPC	50	100	-	-	450	-	-	1,350	225
2	700℃		70	23	7	315	103.5	31.5		
3	800℃									
4	900℃									
5	1000℃									
6	1100℃									
7	1200℃									
8	SC(70:30)[1)]		70	30	-	315	135	-		

1) 무수석고 0% 사용

(나) 실험결과

원천소재 혼합비율을 4:3:3에서 4:4:2로 변경하여 동일한 Pilot 소성 온도별 모르타르 실험결과 Table 3.3.50과 Fig. 3.3.32와 같으며 원천소재 혼합비율 변경에서도 소성온도별 실험 압축강도 결과는 NO 2, 3번인 700~800℃에서 OPC 100% 유사한 값으로 나타났으며 900℃이상에서는 강도가 저하되는 결과를 얻었다. 또한 고로슬래그시멘트 배합을 변경한 실험에서는 모두 우수한 결과를 나타내었다.

Table 3.3.50 소성온도별(4:4:2) 압축강도 측정결과

No	재령별 측정값					
	1일		3일		7일	
	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)
1	11.1	100	26.1	100	42.3	100
2	11.4	102.7	25.4	97.3	41.2	97.4
3	12.5	112.6	25.8	98.9	41.8	98.8
4	10.9	98.2	24.1	92.3	35.4	83.7
5	10.5	94.6	22.5	86.2	34.9	82.5
6	8.6	77.5	20.5	78.5	33.8	79.9
7	6.8	61.3	19.3	73.9	32.7	77.3
8	5.6	50.5	17.3	66.3	30.8	72.8

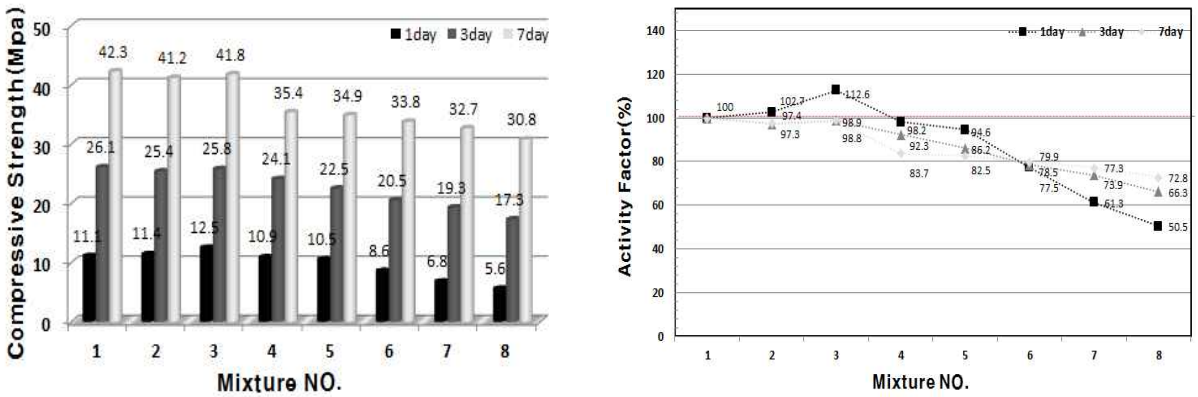


Fig. 3.3.32 Pilot 소성온도별 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일)

(3) 기능성 분쇄조제 적용실험 (0.02%, 0.04%, 0.1% 볼밀분쇄)

(가) 실험개요

원천소재 Pilot 소성온도별 모르타르 실험 및 결과를 토대로 원천소재 혼합비율 4:3:3의 800℃에서 소성된 클링커를 볼밀 분쇄 시, 분쇄효율을 높이기 위하여 시중에 판매되고 있는 기능성 분쇄조제를 각각 질량대비 0.02%, 0.04%, 0.1% 투입하고 볼밀에 원천소재 클링커 20Kg에 20분 분쇄하여 분말도 4,400~4,600㎠/g, 밀도 2.85g/㎤ 으로 기준 설정 하였으며 시멘트(OPC) 70% + GBFS23% + 원천소재 7%를 고정하고 Table 3.3.51, Table 3.3.52와 같이 압축강도 실험을 진행하였다.

Table 3.3.51 기능성 분쇄조제 치환율별 모르타르 배합표

NO	기호	W/B (%)	질량비율(%)			단위질량(g)				
			OPC	GBFS	원천소재	OPC	GBFS	원천소재	S	W
1	OPC	50	100	-	-	450	-	-	1,350	225
2	4:3:3		70	23	7	315	103.5	31.5		
3	0.02%(4:3:3)									
4	0.04%(4:3:3)									
5	0.10%(4:3:3)									

(나) 실험결과

Pilot에서 소성된 클링커 원천소재의 분쇄 효율을 높이기 위하여 실험한 결과 재령 1일에서는 모두 OPC 100% 이상의 값이 나타났으나 재령 3, 7일의 압축강도 평가에서는 0.04%가 우수한 결과로 나타났으며 분쇄조제 적용이 높을 수로 후기 재령에서 강도 저하현상이 발생되는 것으로 나타났으며 향후 콘크리트 레벨 성능 평가 시 적용할 것이다.

Table 3.3.52 기능성 분쇄조제 적용 압축강도 결과

No	재령별 측정값					
	1일		3일		7일	
	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)
1	11.2	100	26.5	100	44.4	100
2	12.2	108.9	25.9	97.7	40.4	90.9
3	12.5	111.6	26.1	98.4	40.5	91.2
4	12.8	114.3	27.6	104.1	42.8	96.3
5	13.2	117.9	25.2	95.0	37.6	84.7

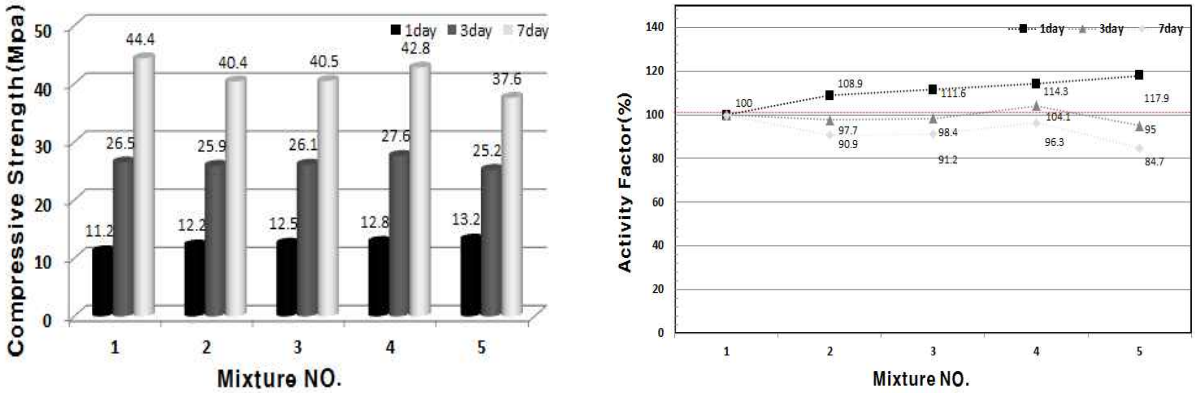


Fig. 3.3.33 Pilot 소성온도별 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일)

(4) 원천소재 Pilot 소성온도별 모르타르 재현 실험

(가) 실험개요

원천소재 Pilot 소성 온도별 모르타르 실험 및 기능성 분쇄조제 사용에 따른 실험 결과 값에 대하여 종합 재현성 실험을 Table 3.3.53과 같이 실시하였으며 특히 800℃에서 소성된 원천소재에 기능성 분쇄조제 전, 후 비교를 통하여 중점적으로 고찰하고자 하며 기존 시멘트(OPC) 70% + GBFS23% + 원천소재 7%를 고정하고 압축강도 실험을 진행하였다.

Table 3.3.53 SBFS 적용 모르타르 배합표

NO	기호	W/B (%)	질량비율(%)			단위질량(g)				
			OPC	GBFS	원천 소재	OPC	GBFS	원천 소재	S	W
1	OPC	50	100	-	-	450	-	-	1,350	225
2	SC(61:39)[1)]		70	23	7	315	103.5	31.5		
3	SC(70:30)[2)]									
4	700℃									
5	800℃									
6	900℃									
7	1,000℃									
8	1,100℃									
9	800℃(조제)									

1) 슬래그시멘트 2종
2) 고로슬래그미분말 0%

(나) 실험결과

Pilot에서 소성된 클링커 원천소재 재현성 실험결과 800℃에서 소성된 원천소재는 기능성 분쇄 전, 후 사용에 있어서 비교 시, 압축강도 재령 1, 3, 7, 14, 28일 모두 OPC 100% 사용대비 99.6~112.9%로 우수한 결과 값이 도출되었으며 Fig. 3.3.35와 같이 플로우 측정결과 OPC 대비 고로슬래그미분말을 사용한 SC 배합에서 높은 플로우를 나타내었으며, 다른 시료들은 OPC와 유사하며 특히 압축강도 실험결과 SC 배합과의 비교에서는 월등한 결과 값을 Table 3.3.54, Fig. 3.3.34에 나타내었다. 이에 향후 콘크리트 레벨 성능 평가 시, 적용할 것이다.

Table 3.3.54 SBFS적용 압축강도 결과

No	재령별 측정값									
	1일		3일		7일		14일		28일	
	압축강도 (MPa)	활성도지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도지수 (%)
1	11.0	100	26.3	100	38.0	100	48.2	100	53.0	100
2[1)]	6.5	59.1	20.7	78.7	27.8	73.2	42.6	88.4	56.1	105.8
3[2)]	6.1	55.5	20.3	77.2	34.2	90.0	47.1	97.7	58.7	110.8
4	9.4	85.5	25.1	95.4	38.6	101.6	52.0	107.9	56.5	106.6
5	10.5	95.5	26.9	102.3	40.7	107.1	48.0	99.6	59.1	111.5
6	9.1	82.7	25.7	97.7	37.0	97.4	47.5	98.5	57.8	109.1
7	9.3	84.5	23.2	88.2	36.1	95.0	45.1	93.6	52.7	99.4
8	9.7	88.2	22.9	87.1	34.7	91.3	45.6	94.6	58.1	109.6
9	11.5	104.5	27.8	105.7	39.9	105.0	47.5	98.5	58.9	111.1

1) 고로슬래그시멘트 2종,
2) 고로슬래그미분말 0%

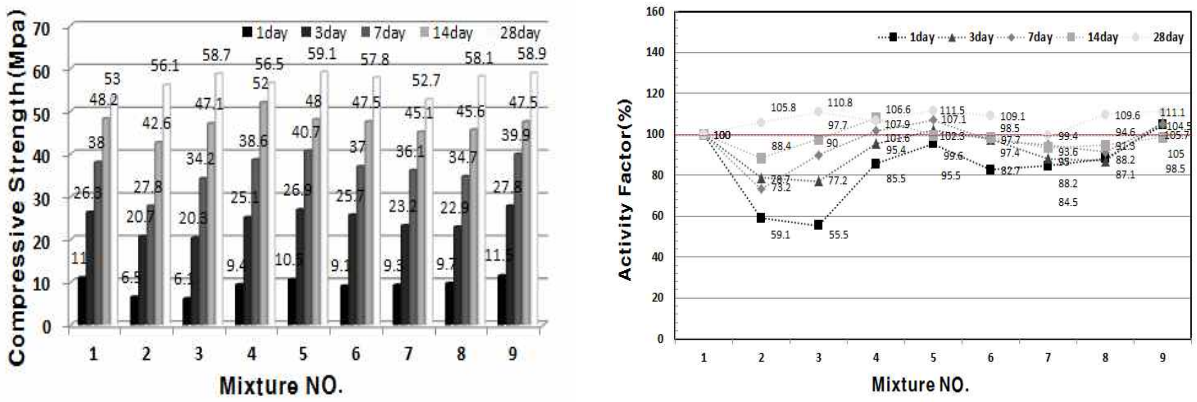


Fig. 3.3.34 SBFS 적용 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일, 14일, 28일)

Table 3.3.55 SBFS 적용 플로우 측정결과

NO	구분	플로우 (mm)
1	OPC	174
2	SC(61:39)[1)]	191
3	SC(70:30)[2)]	193
4	700℃	176
5	800℃	170
6	900℃	175
7	1000℃	179
8	1100℃	180
9	800℃(조제)	176

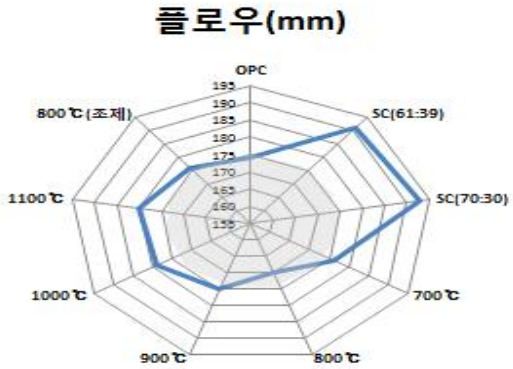


Fig. 3.3.35 SBFS 적용 플로우 측정결과 그래프

(5) 원천소재 Pilot 소성온도별 저온환경(5℃) 모르타르 실험

(가) 실험개요

원천소재 Pilot 소성 온도별 모르타르 재현성 실험 결과에 따라 800℃에서 소성된 원천소재를 가지고 저온환경(5℃)에서 Table 3.3.56과 같이 실시하였으며 기존 시멘트(OPC) 70% + GBFS23% + 원천소재 7%를 고정하고 압축강도 실험을 진행하였다.

Table 3.3.56 SBFS 적용 모르타르 배합표 (5℃)

NO	기호	W/B (%)	질량비율(%)			단위질량(g)				
			OPC	GBFS	원천 소재	OPC	GBFS	원천 소재	S	W
1	OPC	50	100	-	-	450	-	-	1,350	225
2	SC(70:30)[1)]		70	30	-	315	135	-		
3	700℃		70	23	7	315	103.5	31.5		
4	800℃									
5	900℃									
6	1000℃									
7	1100℃									
8	800℃(조제)									

1) 슬래그시멘트 2종

(2) 실험결과

소성 온도별 원천소재의 모르타르 저온환경(5℃) 압축강도 결과는 Table 3.3.57, Fig. 3.3.36과 같으며 기존 재현성 실험의 값과 유사한 경향으로 나타났고 특히 SC 배합보다는 1일, 3일, 7일 모두 저온환경에서 강도 증진 효과가 있는 것으로 도출되었으며 향후 콘크리트 레벨 성능 평가 시, 적용할 것이다.

Table 3.3.57 SBFS 적용 모르타르 압축강도 (5℃)

No	재령별 측정값					
	1일		3일		7일	
	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)
1	2.7	100	16.9	100	22.4	100
2	1.9	70.4	6.4	37.9	7.9	35.3
3	2.0	74.1	14.1	83.4	20.8	92.9
4	2.4	88.9	15.7	92.9	20.8	92.9
5	2.1	77.8	12.8	75.7	19.3	86.2
6	1.9	70.4	10.1	59.8	17.5	78.1
7	1.4	51.9	10.4	61.5	14.9	66.5
8	2.6	96.3	16.1	95.3	21.3	95.1

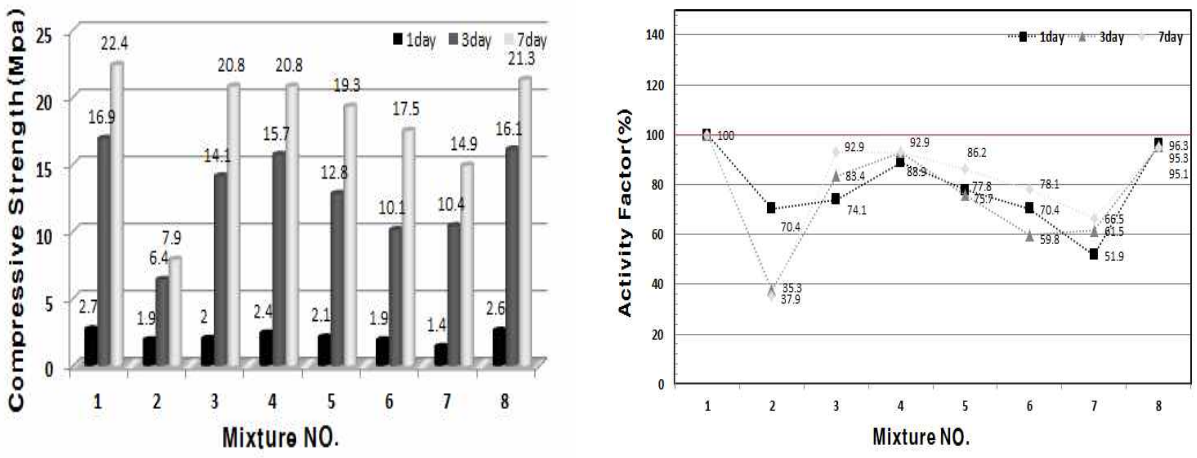


Fig. 3.3.36 SBFS 적용 압축강도 (5℃) 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일)

(6) 콘크리트 혼화제 선정에 따른 원천소재 적용 모르타르 실험

(가) 실험개요

본 실험은 Smart 고로슬래그미분말을 혼입한 저탄소 콘크리트의 상용화를 위해 적용 가능한 최적 혼화제 검토를 위해 모르타르 실험을 진행하였다. 일반적으로 사용되어지는 AE감수제(리그닌계), 고성능감수제(나프탈렌계), 고성능감수제(폴리카본산계) 혼화제를 비교 시험하였다. 또한 Smart 고로슬래그 미분말의 자극을 위한 개발된 SBFS 소성결합재를 분말도 4,400～4,600(cm^2/g) 으로 디스크 밀을 사용하여 분쇄하였다.

Table 3.3.58 혼화제 선정 실험계획

NO	구분	OPC 치환율(%)	GBFS 치환율(%)	소성결합재 치환율(%)	혼화제 적용	시험항목
1	OPC	100	-	-	X	■ 시멘트의 강도 시험 방법 (KS L ISO 679) ■ 시멘트 시험용 플로 테이블 (KS L 5111)
2	OPC	100	-	-	O	
3	S/C	70	30	-	O	
4	SBFS(1:1:1)	93	-	7	O	
5	SBFS(4:3:3)	70	23	7	O	

[실험용 혼화제 제조]

- AE감수제(리그닌계) 일반혼화제의 경우 리그닌계+나프탈렌계 적정 비율로 혼합하여 유동성을 갖도록 조합한 혼화제를 제조하였다.
- 고성능감수제(나프탈렌계)의 경우 폴리카르본산계와 리그닌을 고성능감수제(폴리카본산계)와 유사한 정도의 유동성을 갖도록 조합한 혼화제를 제조하였다.
- 고성능감수제(폴리카본산계)의 경우 현재 일반적으로 레미콘 회사에서 생산 시 적용하는 혼화제이다.
- 각각의 혼화제는 공기량 차이에 의한 강도발현 영향을 줄이기 위해 별도의 AE제는 첨가하지 않고 소포제만 기존 혼화제 사용량의 0.2%를 첨가하였다.

Table 3.3.59 각 혼화제 종류에 따른 SBFS적용 모르타르 배합표

NO	구분	W/B (%)	질량비율(%)			단위질량(g)					
			OPC	GBFS	원천소재	OPC	GBFS	원천소재	S	W	AD
1	OPC	50	100	-	-	450	-	-	1,350	225	0
2	OPC		100	-	-	450	-	-			2.7
3	S/C		70	30	-	315	135	-			
4	SBFS(1:1:1)*		93	-	7	415.5	-	31.5			
5	SBFS(4:3:3)*		70	23	7	315	103.5	31.5			

* GBFS: 무수석고 미포함

(나) 실험결과

Table 3.3.60은 각 혼화제별 사용에 따른 시멘트 시험용 플로 테이블(KS L 5111)을 기준으로 플로우(mm)를 각각 측정한 결과 값 및 Table 3.3.61은 모르타르 압축강도 값으로, 고성능감수제(폴리카본산계)가 유동성측면과 압축강도에서도 가장 양호한 것으로 나타났다.

Table 3.3.60 각 혼화제 종류에 따른 SBFS적용 모르타르의 Flow값 (mm)

NO		1	2	3	4	5
Flow (mm)	AE감수제(리그닌계)	145	180	185	155	190
	고성능감수제(나프탈렌계)		190	225	182	212
	고성능감수제(폴리카본산계)		185	234	142	218

Table 3.3.61 각 혼화제 종류에 따른 SBFS적용 모르타르의 압축강도 측정결과

구분	압축강도(MPa)								
	1일			3일			7일		
	A*	B*	C*	A*	B*	C*	A*	B*	C*
1	10.9	10.9	10.9	29.8	29.8	29.8	37.9	37.9	37.9
2	7.1	9.6	16.0	24.6	31.4	38.4	31.6	38.5	46.6
3	4.1	6.4	10.1	17.1	22.6	30.7	27.6	33.1	45.3
4	8.4	9.3	16.6	28.8	33.1	40.0	36.7	39.7	46.8
5	6.8	9.3	10.8	21.2	30.5	32.6	31.9	36.6	43.5

*A : AE감수제(리그닌계), B : 고성능감수제(나프탈렌계), C : 고성능감수제(폴리카본산계)

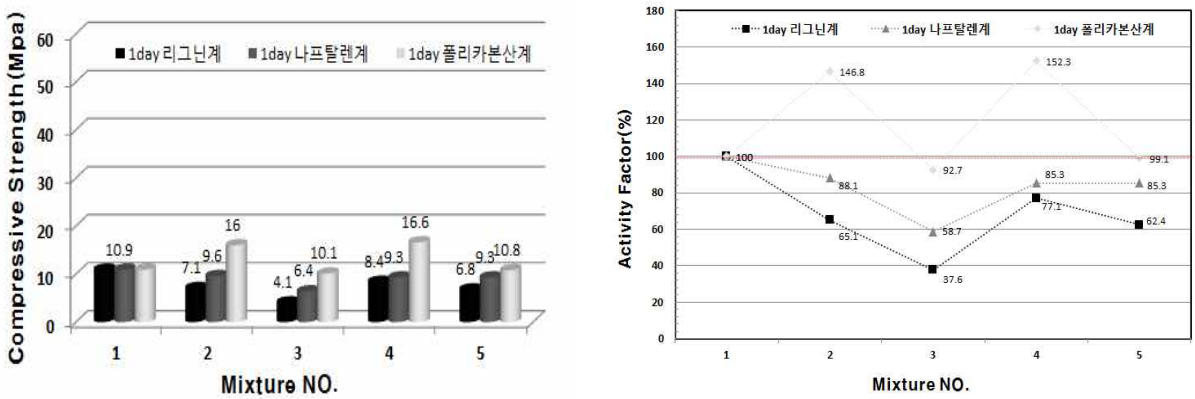


Fig. 3.3.37 각 혼화제 종류에 따른 SBFS 적용 압축강도 및 활성도지수 (1일)

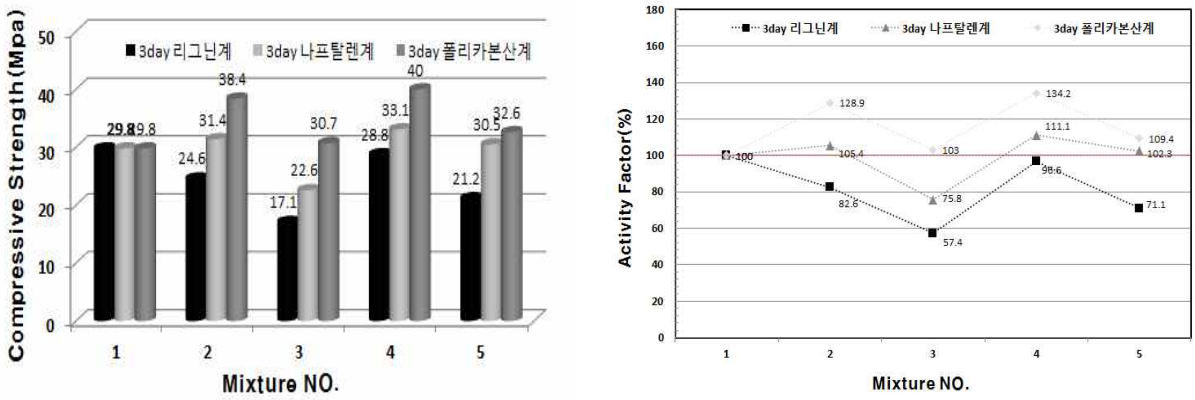


Fig. 3.3.38 각 혼화제 종류에 따른 SBFS 적용 압축강도 및 활성도지수 (3일)

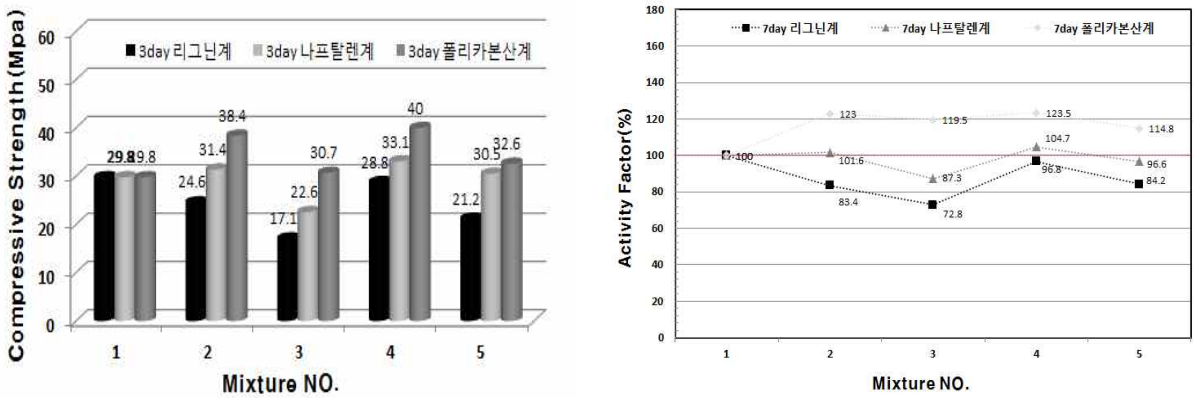


Fig. 3.3.39 각 혼화제 종류에 따른 SBFS 적용 압축강도 및 활성도지수 (7일)

Table 3.3.60에서 나타낸 바와 같이 OPC 100% 사용 모르타르보다 고로슬래그미분말이 30% 혼합된 슬래그시멘트가 유동성면에서 우수하게 나타나고 SBFS가 첨가된 결합재의 경우 OPC 자극제가 7% 첨가된 BINDER의 유동성이 AE감수제(리그닌계), 고성능감수제(나프탈렌계) 및 고성능감수제(폴리카본산계) 3종의 콘크리트 화학혼화제에서 전체적으로 낮게 나타났다. 이는 SBFS의 OPC자극이 초기에 극도로 발현함에 따른 현상으로 콘크리트 적용에 있어 반듯이 고려해야 할 것이다. SBSF 자극제의 경우는 고성능감수제(나프탈렌계) 혼화제에서 가장 우수하게 나타났고, 고성능감수제(폴리카본산계)에서는 슬래그시멘트 대비 유동성이 약간 낮게 발현하는 것으로 파악되었지만 OPC 대비 유동성에서는 우수하게 나타났다. 그러나 모르타르 압축강도 발현율에 있어서는 고성능감수제(폴리카본산계), 고성능감수제(나프탈렌계), AE감수제(리그닌계)순으로 전체적인 시멘트 종류와 관계없이 강도발현 높은 것으로 나타났다.

OPC 100% 대비 슬래그시멘트(70:30)의 경우 1일, 3일, 7일에서 전체적으로 낮게 나타났다. 그러나 SBFS(4:3:3)의 첨가한 결합재에서는 고성능감수제(폴리카본산계) 혼화제 모두 전체적으로 가장 우수하게 나타났지만 초기 유동성 저하의 한계점은 있는 것으로 판단된다. 따라서 본 실험을 통한 결과는 현재 사용되고 있는 일반적인 결합재인 OPC와 슬래그시멘트에서

콘크리트 화학 혼화제의 특성 경향과 동일하게 AE감수제(리그닌계), 고성능감수제(나프탈렌계), 고성능감수제(폴리카본산계)에 따른 유동성과 강도특성을 확인할 수 있었으며 결과적으로 현재 레미콘 공장에서 일반적으로 사용하는 고성능 감수제(폴리카본산계)를 선정하게 되었다.

라. SBFS 화학적 및 수화 특성 분석

(1) 실험개요

(가) 실험계획 및 모르타르 배합

본 실험에서는 OPC 100% 사용 시멘트, SC(OPC 70% + GBFS 30%)를 비교실험 하였다. 한편, 실험용 Pilot 소성로를 통하여 개발한 원천소재를 질량비로 혼합하여 SBFS(OPC 70% + GBFS 23% + 원천소재 7%)를 소성온도별로 OPC와 비교・검토하였다. 단, SBFS는 경제성을 고려하여 천연무수석고를 사용하지 않았다.

(나) 사용재료(원재료)

OPC는 KS L 5201 규정에 만족하는 S사의 1종 OPC를 사용하였으며, 분말도는 3,450cm^2/g이다. 슬래그시멘트는 KS F 2563 규정을 만족하는 분말도 3,820cm^2/g이며, GBFS 3종으로 30% 혼합 사용하였다.(천연무수석고가 3.7% 함유) GBFS 염기도는[b=(CaO + MgO + Al_2O_3)/SiO_2] 1.79이며, 분말도는 4,330cm^2/g 이다. 한편, SBFS(OPC 70% + GBFS23%+ 원천소재7%)는 경제성을 고려하여 천연무수석고가 혼합되지 않은 것을 사용하였으며, 화학조성은 Table 3.3.62~Table 3.3.65와 같다.

(2) 시험결과 및 고찰

(가) 소성온도에 따른 원천소재 및 SBFS의 화학조성 변화(XRF)

실험용 Pilot 소성로를 활용한 원천소재 개발을 통한 원천소재와 SBFS의 화학 성분분석의 과정들을 나타낸다. 초기재령에서의 유효한 주요성분들을 비교하였다. 원천소재 화학성분분석에서 소성온도가 높아질수록 SO_3의 함량은 줄어들며, CaO, SiO_2 함량은 증가하는 것을 알 수 있다. 한편 OPC와 비교하여 SC 및 SBFS의 화학조성의 변화는 일반적인 SC에 비해 SO_3의 함량이 2%정도 높게 존재하는 것을 알 수 있으며, 소성온도에 관계없이 유사한 화학조성을 갖는 것을 알 수 있다. 이는 원천소재의 전체 질량의 7%의 적용에 따는 미미한 변화이기 때문으로 사료된다.

Table 3.3.62원재료 화학조성(%)

원재료	blaine (cm^2/g)	Ig. loss	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3
OPC	3,450	1.54	21.58	4.77	3.43	62.59	2.59	0.11	0.85	2.22
GBFS1*	4,330	0.13	34.56	15.30	0.33	42.71	3.90	0.19	0.36	1.98
GBFS2**	4,325	0.12	36.1	15.24	0.45	43.33	4.16	0.21	0.49	0.01

* GBFS1 : 천연무수석고 혼입 3.7%
** GBFS2 : 천연무수석고 혼입 0.0%

Table 3.3.63 소성 온도에 따른 원재료의 화학조성 변화(%)

재료		Ig. loss	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	pH
정수 오니	105℃	19.42	43.16	23.92	6.07	0.85	1.60	0.58	2.27	0.55	7.6
	600℃	4.25	50.72	29.71	6.76	0.96	1.96	0.80	2.61	0.51	7.7
	900℃	1.29	52.35	31.22	6.72	0.94	2.02	0.76	2.65	0.33	7.7
	1,100℃	0.00	53.38	30.73	7.20	1.03	2.06	1.00	2.76	0.10	7.7
티탄 석고	105℃	11.66	1.89	0.49	0.84	31.72	1.33	0.11	0.38	47.84	7.1
	600℃	4.14	2.20	0.60	0.92	34.28	1.64	0.13	0.42	51.69	7.4
	900℃	1.09	2.51	0.66	0.99	35.57	2.04	0.15	0.55	52.12	8.4
	1,100℃	0.00	2.34	0.56	1.01	37.40	1.84	0.14	0.51	51.95	7.9
석회석	105℃	40.68	2.15	0.34	0.24	55.31	1.02	0.00	0.06	0.03	7.2
	600℃	40.86	2.16	0.35	0.23	55.12	1.02	0.01	0.06	0.04	8.1
	900℃	34.00	2.39	0.39	0.26	61.19	1.37	0.02	0.08	0.15	12.3
	1,100℃	0.00	4.49	0.49	0.37	91.04	2.55	0.03	0.05	0.77	12.3

* 원재료를 단독소성

Table 3.3.64 원천소재의 소성온도별 화학조성 변화(%)

원천소재	Ig. loss	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	pH
700℃	12.11	13.23	7.79	2.50	33.08	0.90	0.24	0.73	25.87	11.7
800℃	6.86	14.00	8.41	2.65	35.06	0.95	0.25	0.78	27.20	12.3
900℃	2.04	13.65	8.07	2.86	38.78	1.02	0.23	0.74	28.63	12.4
1,000℃	0.00	16.86	9.86	3.06	39.82	1.25	0.30	0.81	24.17	11.8
1,100℃	0.00	16.98	9.30	3.28	44.42	1.24	0.33	0.91	19.48	11.2

Table 3.3.65 SBFS의 화학조성 변화(%)

구분	Ig. loss	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3
SC(70:30)*	1.07	24.67	7.49	2.12	56.59	3.69	0.18	0.86	2.15
SBFS 700℃**	1.59	22.81	6.73	2.27	57.07	3.14	0.16	0.94	3.89
SBFS 800℃**	1.19	23.05	6.76	2.27	57.49	3.19	0.15	0.93	3.87
SBFS 900℃**	0.73	22.99	6.79	2.27	57.58	3.18	0.15	0.94	3.90
SBFS 1,000℃**	0.00	23.26	7.01	2.32	57.63	3.17	0.17	0.96	3.92
SBFS 1,100℃**	0.00	23.42	6.95	2.33	58.10	3.21	0.15	0.95	3.82

*SC (OPC + 70% + GBFS1 30%)
*SBFS (OPC + 70% + GBFS2 23% + 원천소재7%)

Fig. 3.5.40~ Fig.3.3.41과 같이 원천소재 소성에서는 소성온도가 높아짐에 따라 SO_3, CaO Al_2O_3 함유량이 높아지는 것을 알 수 있었으며, SiO_2는 900℃ 기점으로 하향하는 화학조성을 나타내었다 또한 SBFS 화학조성의 변화에서는 소성온도별 차이는 미미하게 나타났으며 이는 단순 화학 조성만으로 판단하기 어려운 요소가 잠재하는 것으로 보이며 향후 미세분석을 통한 메커니즘 규명이 필요하다고 판단한다.

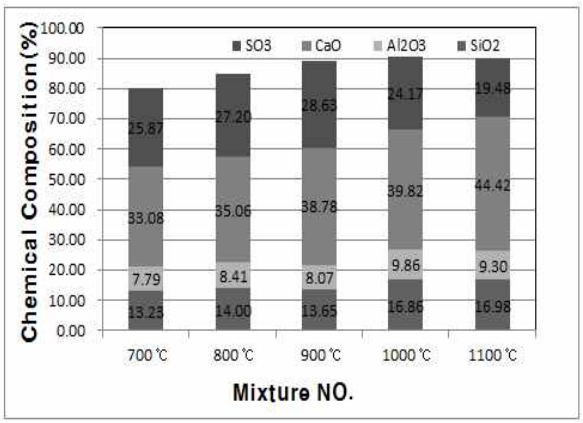


Fig. 3.3.40
따른 원천소재의 화학조성 변화(%)

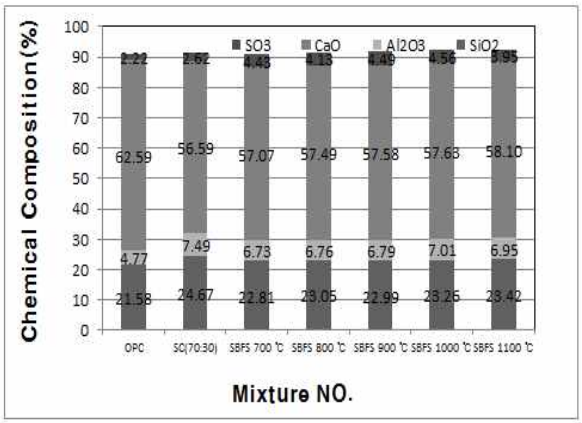


Fig. 3.3.41
소성온도에 따른 SBFS의 화학조성 변화(%)

(나) 소성온도에 따른 SBFS의 Flow값 및 압축강도 측정 결과

Table 3.3.66은 재령별 압축강도 시험 결과를 종합하여 나타낸다. 또한, Fig. 3.5.12~ Fig. 3.5.13까지 SBFS의 소성온도별 Flow 값 및 압축강도와 활성도지수를 나타낸다.

Flow 측정결과 OPC 100%사용 모르타르는 174mm로 실험인자 중에 가장 낮은 유동성으로 보였으며, 유동성에서 가장 우수한 것은 SC로 OPC 100%와 비교하여 7.2%이상 증가 하였다. 이러한 원인은 GBFS의 높은 분말도의 영향에 의하여 유동성이 증가하였기 때문으로 판단된다. 원천소재를 혼입 사용한 SBFS의 실험인자들은 OPC보다 1.1~6.1%정도 증가하여, OPC와 유사한 Flow를 나타냈다. 추후, 콘크리트 실험에서와 같이 Flow값의 경시변화 등의 Fresh

상태에서의 시공성을 고려한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단한다.
압축강도 측정결과 OPC 100% 사용과 비교하여, SC는 재령 1일에서 3일까지 활성도 지수로 56.1~73.4%로 초기재령에서 저조한 압축강도를 나타내며, 이는 건설 산업에서 공기단축이 제한되는 중요한 문제점으로 작용한다.

그러나, 원천소재를 사용한 SBFS는 소성온도 900~1,100℃에서 초기재령 1일과 3일의 압축강도에서 86.9~95.3%로 SC보다는 높은 압축강도를 나타내지만, 목표로 설정한 OPC 100% 사용대비 동등이상의 압축강도는 만족하지 못하였으나, SBFS의 소성온도 800℃에서는 초기재령(1일, 3일) 압축강도를 모두 만족한 102.6~104.7%의 활성도 지수로 나타났다. 특히, 장기재령의 28일의 압축강도 또한 우수한 결과로 도출되었다. 이에, GBFS의 반응을 초기에 자극시킬 뿐만 아니라 장기에도 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Table 3.3.66 모르타르 배합 및 압축강도와 활성도 지수

번호	구분	W/B (%)	질량비율(%)			Flow (mm)	압축강도(MPa)				
			OPC	GBFS	소재		1일 (MPa)	3일 (MPa)	7일 (MPa)	14일 (MPa)	28일 (MPa)
1	OPC	50	100	0	0	180	10.7	27.4	39.7	48.9	52.8
2	SC(70:30)	50	70	30	0	193	6.0	20.1	35.0	47.8	58.3
3	SBFS 700℃	50	70	23	7	182	9.8	25.6	40.0	48.7	56.3
4	SBFS 800℃	50	70	23	7	183	11.2	28.1	41.1	51.3	58.4
5	SBFS 900℃	50	70	23	7	186	9.3	26.1	38.0	48.9	57.5
6	SBFS 1,000℃	50	70	23	7	189	9.3	23.9	36.5	45.6	52.1
7	SBFS 1,100℃	50	70	23	7	191	9.8	22.3	34.0	45.2	58.3

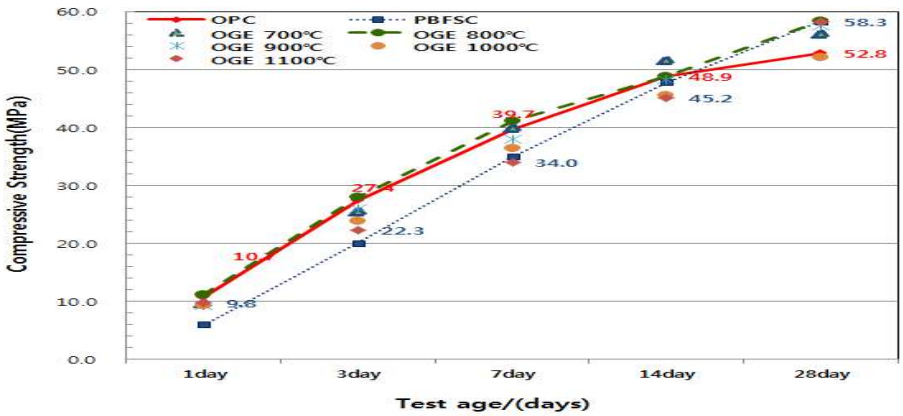


Fig. 3.3.42 따른 SBFS의 재령별 압축강도(MPa)

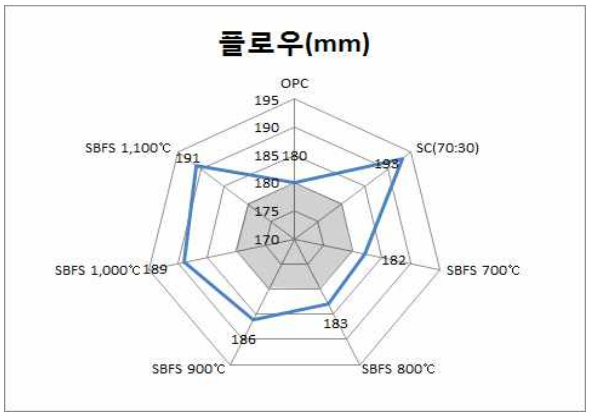


Fig. 3.3.43
소성온도에 따른 Flow 측정값(mm)

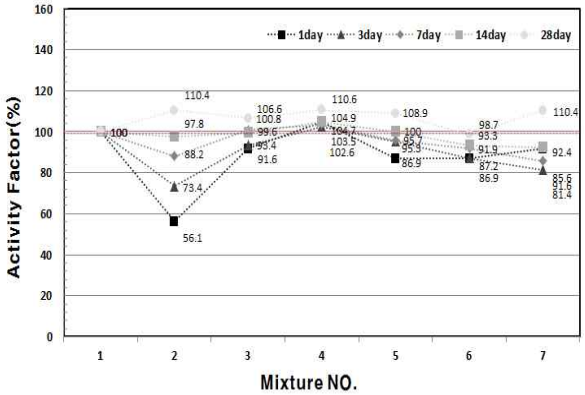


Fig. 3.3.44
소성온도에 따른 SBFS의 활성도 지수(%)

(다) 원천소재 사용에 따른 결정구조 분석 (XRD)

원재료의 화학적 정량분석을 위하여 재령별(1일, 3일)로 OPC 및 SBFS의 페이스트의 특성이 수화작용에 미치는 영향과 화학적 특성을 알아보기 위하여 XRD 결정 구조 분석을 실시하였다. 우선 원천소재의 원재료인 티탄석고와 정수오니, 석회석을 단독으로 소성하여 분석한 결과 Fig. 3.5.15와 같이 티탄석고는 105℃에서는 탈수되어 반수석고의 피크점이 나타나며, 500℃이후의 소성온도에서 무수석고로 존재하는 것을 확인할 수 있었다.

정수오니는 SiO_2의 피크점이 높은 것으로 나타났으며, 정수오니의 화학조성과 유사하다. 또한 석회석은 800℃에서는 $CaCO_3$로 존재하며 900℃에서 탈탄산 되어 CaO로 조성이 변화가 이루어진다. Fig. 3.5.16의 원천소재 소성온도별의 결정구조에는 전체적으로 무수석고의 피크점이 높으며, 700~800℃에 $CaCO_3$와 900℃이후 CaO 피크점으로 변화되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 3.5.17~ Fig. 3.5.18은 원천소재를 적용한 SBFS는 초기재령인 1일과 3일을 수화정지 시켜 재령별에 따른 수화물 측정하였다. OPC에서 가장 높은 $Ca(OH)_2$ 피크를 나타냈으며, OPC를 제외한 SBFS에서 Ettringite를 생성하는 것을 알 수 있었다. 3일 재령에서 전반적으로 미수화생성물인 C_3S는 줄어들면 $Ca(OH)_2$ 피크가 올라가는 것을 확인 하였으며, Ettringite는 3일 재령에서 전반적으로 낮아지는 것을 알 수 있다.

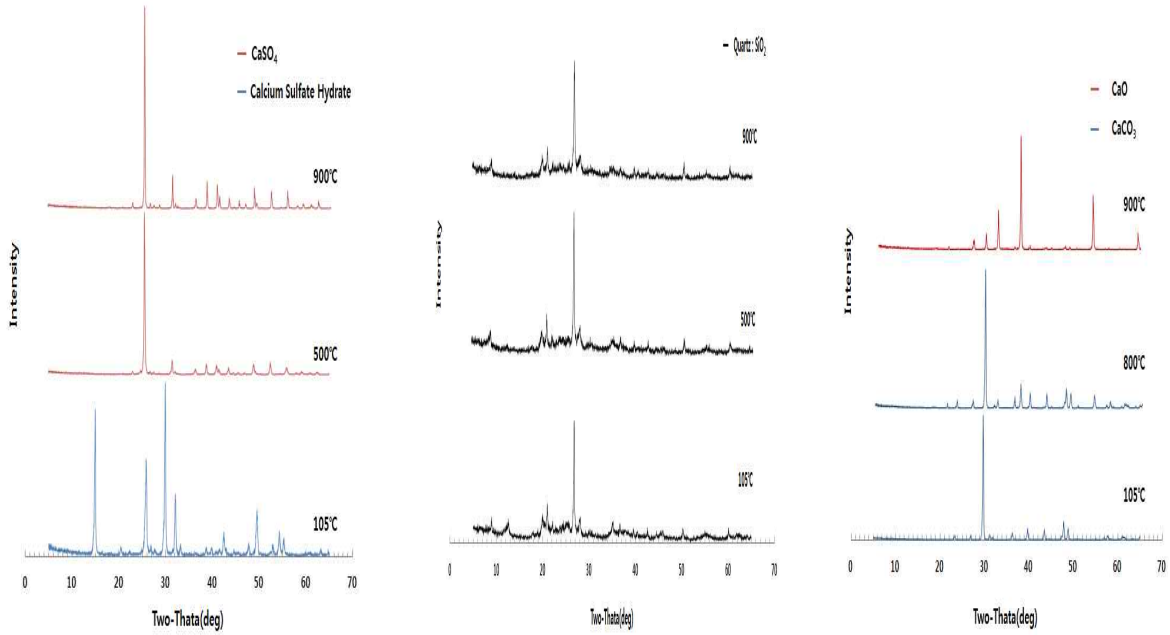


Fig. 3.3.45 소성온도에 따른 원재료의 결정구조 정량분석(티탄석고, 정수오니, 석회석)

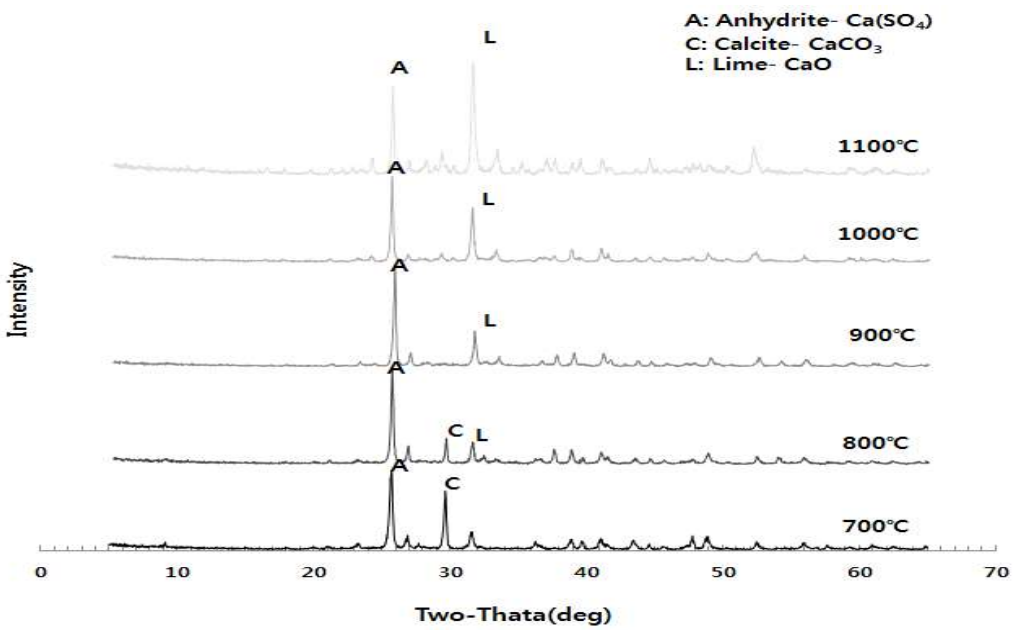


Fig. 3.3.46 소성온도에 따른 원천소재의 결정구조 정량분석

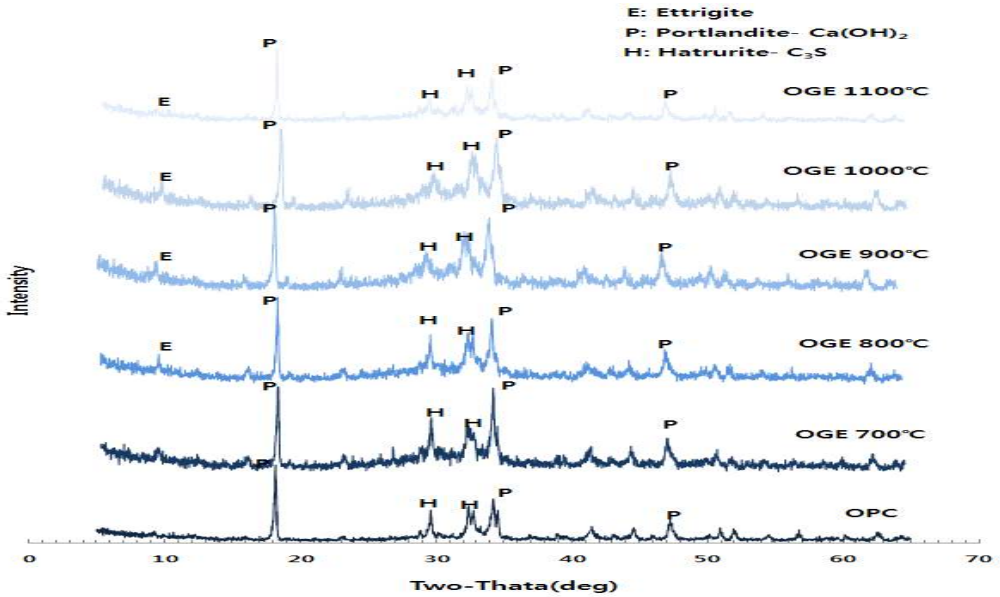


Fig. 3.3.47 따른 SBFS의 재령별 결정구조 정량분석(1일)

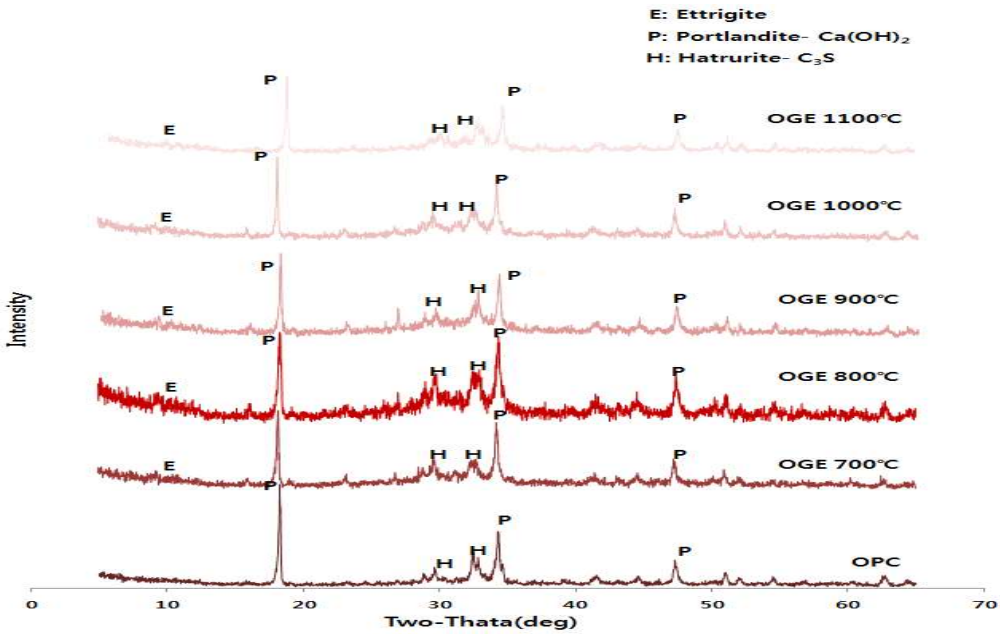


Fig. 3.3.48 소성온도에 따른 SBFS의 재령별 결정구조 정량분석(3일)

(라) 안정성 시험(Free-lime 정량분석)

개발된 원천소재를 적용한 SBFS의 안정성 검토(Free-lime)를 진행하였다. 안정선 시험 방법은 Ethylene Glycol 법을 이용하여 아래의 식에 따라 실험을 진행 하였으며, Table 3.3.67, Fig. 3.3.49와 같이 팽창성과 균열의 정도를 OPC와 비교하여 분석하였다. 측정결과 OPC에서 가장 많은 Free-lime이 존재하는 것을 알 수 있으며, 전반적으로 SBFS의 Free-lime의 양은 유사한 것으로 나타났다.

(1)

$$\text{Free Lime(5)} = \frac{V \times F \times K}{mple\,weight(g)} \times 100$$

(2)

V: 0.1 N HCl Consumption(㎖)

F: 0.1 N HCl Factor

K: 0.1 N HCl 1㎖

An amount corresponding to CaO (1㎖ = 0.002804g CaO)

Table 3.3.67

소성온도에 따른 SBFS의 Free- lime 측정

NO	0.1N HCl Consumption (㎖)	Free lime(%)
OPC	2.20	0.62
SC(70:30)	1.15	0.32
SBFS 700℃	1.20	0.34
SBFS 800℃	1.90	0.53
SBFS 900℃	1.80	0.50
SBFS 1,000℃	1.20	0.34
SBFS 1,100℃	1.20	0.31

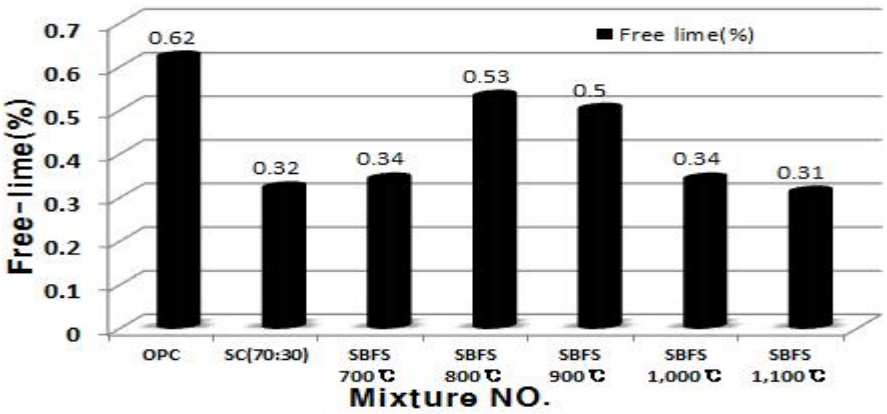
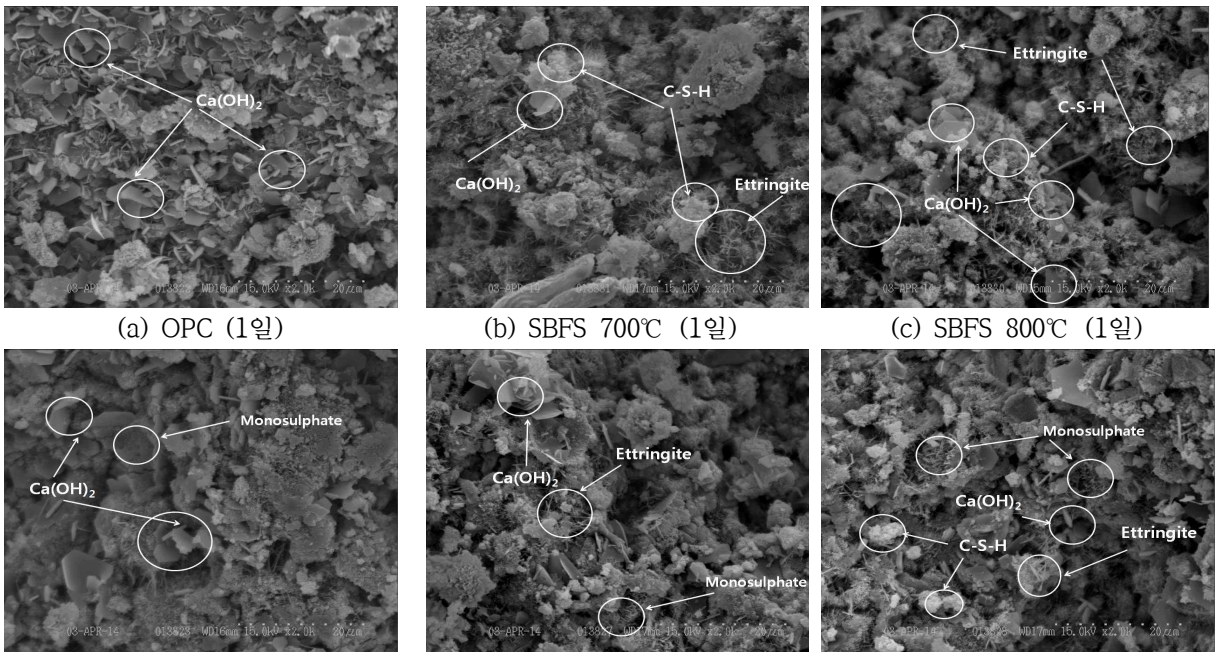


Fig. 3.3.49 따른 SBFS의 Free-lime 측정 값

(마) 소성온도의 따른 SBFS의 SEM측정 결과

Fig. 3.3.50은 OPC, 원천소재를 사용한 OGE 700℃, OGE 800℃ 시료의 재령 1일 및 3일에서 SEM (2,000 배율) 사진을 나타낸 것이다. OPC를 100% 사용한 경우는, C_3S가 물과 반응하여 생성된 $Ca(OH)_2$의 결정이 다량으로 생성되었으며, 이는 XRD 분석에서의 피크와도 상관관계를 나타낸다. OGE 700℃, OGE 800℃에서는 $Ca(OH)_2$와 C-S-H의 생성이 관측되었다. 이것은, C_3S입자 주위에 Ca^{2+}와 결합하여 생성된다. OPC는 3일에서 Monosulphate를 관찰할 수 있는데 보통 하루가 지나면 석고가 소비되어 저황산염으로 변하게 된다. SBFS 700℃, SBFS 800℃에서는 SO_3 함량이 화학분석에도 알 수 있듯이 OPC보다 많아 3일 재령에서도 관측된다. 또한 압축강도에서 OPC와 동등 이상의 압축강도를 나타낸 것은 OPC보다 높은 분말도의 GBFS의 영향과 높은 pH를 나타내는 원천소재의 영향으로 수화의 반응속도가 빨라진 것으로 판단된다. OPC를 단독 사용한 경우 1일과 비교하였을 때, 다량의 $Ca(OH)_2$ 생성보다 Ettringite 및 압축강도에 영향력이 높은 C-S-H의 수화반응이 보다 활발히 이루어진 요인으로 사료된다.



(a) OPC (1일) (b) SBFS 700℃ (1일) (c) SBFS 800℃ (1일)

(d) OPC (3일) (e) SBFS 700℃ (3일) (f) SBFS 800℃ (3일)

Fig. 3.3.50 따른 SBFS의 재령별 측정결과 (× 2,000배)

(바) 원천소재의 메커니즘

본 연구에서의 원천소재로 선정된 알칼리성 무기계 원재료들은 각각의 시멘트와 고로슬래그미분말의 수화반응을 촉진하는 역할을 한다. 티탄석고는 소성 전 이수석고의 상태로 존재하다 700℃~1,000℃의 소성의 과정을 거치면 용해도가 높은 무수석고로 바뀌게 된다. 이는 시멘트의 자극으로서 $SO4^{2-}$ 이온이 다량 석출되면서 시멘트 입자중의 Al_2O_3 활성 성분에 흡착하여 초기수화 반응을 가속화시키며, 고로슬래그미분말의 C-S-H 및 C-A-H의 생성을 유도하여 초기강도 발현을 가능하게 한다.

정수오니는 소성 후, 유기불순물과 수분이 제거 되면서 주성분은 SiO_2, Al_2O_3 의 함량이 증가하여, 시멘트에서 칼슘알루미네이트의 반응으로 인한 초기수화 증진이 되며, 수화물 내 pH 10.7 이상이 되면, Al_2O_3 의 농도는 증가하게 된다. 또한 고로슬래그미분말의 산화피막이 제거 후, 포졸란 반응을 촉진하는 역할을 하게 되며, 석회석은 시멘트의 자극으로 소성 후, CaO와 탈 탄산이 되지 못한 $CaCO_3$는 수화반응에 안정한 형태로 공극사이를 충전하여 강도를 향상시킨다. 또한 GGBFS 수화반응 특성인 산화피막을 초기부터 pH12 이상의 강 알칼리성으로 파괴하여 C-S-H 및 6각 판상의 칼슘알루미네이트 수화물 C_4AH_{13}을 생성한다. Table 3.3.68은 알칼리성 무기계 자극제의 각각의 시멘트 및 고로슬래그미분말의 수화 작용 메커니즘 및 Fig.3.3.51은 SBFS의 수화반응의 모식도를 나타낸다.

Table 3.5.24 원천소재의 메커니즘

원재료	주성분	역할	
	소성 (700℃~1,100℃)	OPC 자극	GBFS 자극
티탄석고 $CaSO_4$	CaO, SO_3 $CaSO_4$ (무수석고)	$SO4^{2-}$ 이온 다량 석출로 GBFS 중의 Al_2O_3 활성 성분에 흡착하여 초기수화 반응을 가속화 시킴.	C-S-H 및 C-A-H의 생성유도
정수오니 SiO_2 Al_2O_3	SiO_2, Al_2O_3 (CA, $C1_2A_7$)	칼슘알루미네이트의 반응으로 인한 초기수화 증진 pH가 10.7 이상 시, $Al2O_3$ 농도 증가	CA,$C1_2A_7$은 급결시멘트의 주성분으로 GBFS의 초기수화 반응 촉진
석회석 $CaCO_3$	CaO, $CaCO_3$ pH(11~12)	탈탄산 되지 않은 $CaCO_3$는 반응하지 않고 안정한 형태로 공극사이를 충전하여 강도를 향상시킴	CaO의 수화시 $Ca(OH)_2$의 강알칼리에 의하여 GBFS 입자표면에 형성된 산성피막이 수화초기부터 파괴되어 Si이온, Al이온을 용출시킴 초기수화 생성 시, 활발히 이루어짐

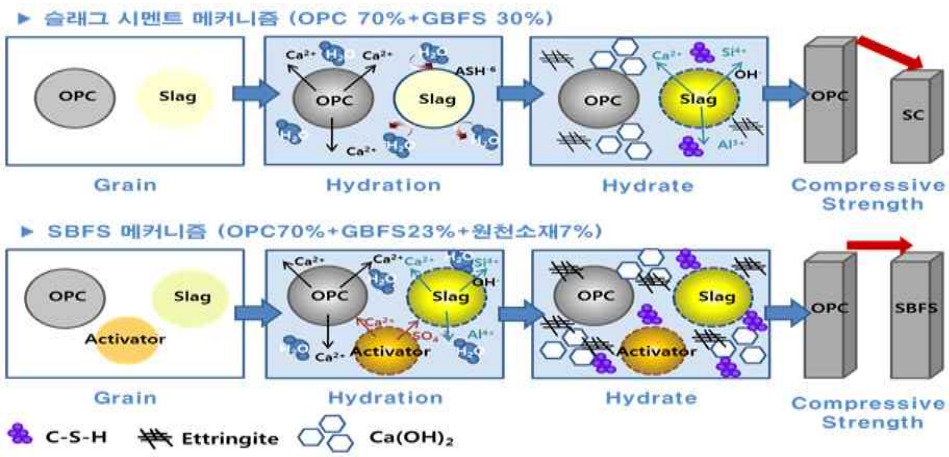


Fig.3.3.51 SBFS의 수화반응 모식도

마. 소 결

본 연구에서 연구목표로 설정된 OPC 100% 사용 콘크리트 초기재령(1일, 3일)압축강도 동등이상의 목표를 달성하기 위한 방법으로서 산업부산물 및 산업 폐기물을 활용한 원천소재를 개발하였으며, Pilot 소성로를 통하여 기존 전기로 방식에서 보다 대량으로 원천소재를 생산할 수 있는 장비를 갖추어 환원방식에서 산화방식의 킬른으로 소성방법이 변경됨에 따라서 최적소성온도를 선정하기 위한 압축강도를 평가하였다. Pilot 소성로를 통한 원천소재 모르타르 레벨 및 미세분석을 통하여 얻은 결과는 아래와 같다.

◎ 원천소재의 소성온도는 700~1,100℃로 설정하였으며, 우수한 압축강도 발현 소성온도는 700~800℃에서 우수한 결과를 나타냈다. 시멘트 생산에 필요한 소성온도가 1,450℃의 높은 에너지 소모에 비해 원천소재와 고로슬래그미분말을 사용하여 30%의 시멘트의 비용을 줄이고, 원천소재의 소성에 필요한 에너지의 절감이 사회적, 경제적의 이점으로 저탄소 친환경 기술로서 우수성을 나타낸다.

◎원천소재 혼합비율을 4:3:3에서 4:4:2로 변경하여 동일한 Pilot 소성 온도별 모르타르 실험결과 700~800℃에서 우수한 결과로 나타나 배합의 변경에 상관없이 동일한 결과를 얻었다.

◎ 기능성 분쇄조제의 적용은 기존 원천소재의 클링커 분쇄과정에서 발생되어진 응집현상의 방지로서 0.02~0.1%의 범위로 실험일자를 4가지 수준으로 압축강도 실시를 진행하였으며, 그 결과 0.04%에서 가장 우수한 강도발현 효과를 나타내어 추후 콘크리트 실험에 적용될 것이다.

◎ 저온환경에서의 압축강도 확보는 건축공사의 공사의 기간을 결정짓는 중요한 요소로서 작용하기 때문에 반드시 해결해야할 사항이며, 본 실험을 통한 기존 고로슬래그 시멘트는 OPC 대비 35.3~70.4%의 활성도를 나타내어 현저하게 압축강도가 저하되는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 분쇄조제를 사용한 800℃ 소성온도의 원천소재에서 OPC 대비 95.1~96.3%의 활성도를 나타내어 기존 고로슬래그시멘트의 단점을 개선할 수 있어, 현장적용에 근접할 수 있는 재료로서 활용가치가 높다고 할 수 있다.

◎ 최종 목표인 콘크리트 적용에 있어, 고성능 감수제와 같은 혼화제의 사용이 필요하다. 각 혼화제별 사용에 따른 시멘트 시험용 플로 테이블 (KS L 5111)을 기준으로 플로우(mm)를 각각 측정한 결과로, 고성능감수제(폴리카본산계)가 유동성측면에서 가장 양호한 것으로 나타났으며, 압축강도 또한 폴리카본산계에서 우수하게 나타나 결과적으로 현재 레미콘 공장에서 일반적으로 사용하는 고성능 감수제(폴리카본산계)를 선정하게 되었다.

◎ 원천소재를 SBFS에 적용한 화학조성은 소성온도에 관계없이 OPC와 비교하여 유사하여 일반적인 슬래그시멘트에 비해 SO_3의 함량이 2%정도 높게 존재하는 것을 알 수 있었다.

◎ Flow 측정결과, SC에서 가장 높은 유동성(193mm)을 보였으며, SBFS는 OPC와 유사하게 나타났다. 추후 실험에서 시공성을 고려하여 Fresh 상태의 경시변화 등을 고려한 연구를 진행 할 필요성이 있다. 또한 모르타르 압축강도 측정결과, 원천소재 800℃에서 초기재령(1일, 3일)에서 102.6～104.7%의 활성도 지수를 보여 가장 높은 압축강도를 나타냈을 뿐만 아니라 장기재령의 28일 압축강도 또한 우수한 결과로 나타나, 기존 슬래그시멘트의 단점을 개선하는 것으로 나타났다.

◎ 재령별 SEM분석결과, OPC의 초기재령에서 $Ca(OH)_2$을 대량으로 생성되었고, SBFS에서 $Ca(OH)_2$ 및 규산칼슘 수화물의 생성을 확인 하였으며, SO_3의 공급으로 Ettrigite 생성을 확인

할 수 있었다.

◎ 재령 1일에서의 Ettringite 피크는 SBFS에서 나타났으며 OPC는 $Ca(OH)_2$의 Intensity 피크가 다른 시료보다 월등히 높았다. 3일 재령의 XRD분석 결과를 보면 미수화생성물 즉, C_3S의 피크는 상대적으로 줄어들고 $Ca(OH)_2$의 생성물이 전 시료에서 전반적으로 증가하여 압축강도가 증가하는 것으로 판단된다.

◎ 소성온도에 따른 SBFS의 안정성검토(Free-lime)를 진행한 결과, Free-lime이 OPC 대비 50~85.5%의 감소 효과를 나타내어 팽창성 및 균열에 대한 안정성을 나타내었다.

◎ 재령별 SEM분석결과, OPC는 다량의 $Ca(OH)_2$를 생성하였으며, SBFS는 초기재령에서 $Ca(OH)_2$ 및 C-S-H와 Ettrigite 생성이 확인되어 초기재령에서의 압축강도 향상에 영향을 미치는 것으로 확인 되었다.

이상의 결과를 종합한 결과, GBFS를 혼입한 콘크리트의 단점인 조기강도를 개선하기 위한 방법으로서 산업부산물과 폐기물을 활용하여 개발된 원천소재의 사용하여 GBFS SO_3공급과 알칼리자극을 활용하여 모르타르 레벨에서의 압축강도를 개선할 수 있었으며, 실험을 통한 결과를 기초로 하여 Pilot 소성로를 통한 콘크리트레벨 적용 및 Mock-up test를 시험평가를 추후 시행 할 것이다.

7. 알칼리성 무기계 자극제를 이용한 SBFS 콘크리트 성능평가

가. 개요

본 연구는 “Smart 고로슬래그미분말(이하 SBFS)을 혼입한 저탄소콘크리트의 초기재령 압축강도 향상기술개발” 을 위한 연구의 일환으로서, 고로슬래그미분말 혼입 콘크리트의 제조원가 및 콘크리트의 성능을 개선하며 레미콘 단가를 낮출 수 있는 방법으로, 산업부산물 및 산업폐기물을 활용하여 Pilot 소성로를 통하여 원천소재를 개발하고, 모르타르 레벨에서 기초적인 성능 실험을 실시하였다.

따라서 본 연구의 최종 목표는 Table 3.3.69과 같으며, 최종 목표를 만족시키기 위한 본 절에서의 주요 실험 내용은 Table 3.3.70로 나타낸 바와 같다. Pilot 소성로를 통한, 본 콘크리트 실험에서는 소성온도 및 혼합비율에 따른 성능평가, SBFS 치환율 및 양생온도별 성능평가, SBFS 혼입 콘크리트의 규격별 최적배합 설계를 실시하여 저탄소 레미콘 실용화를 위한 굳지 않은 콘크리트의 물성 및 경화 콘크리트의 역학적 특성을 검토하여 Smart 고로슬래그미분말을 이용한 콘크리트의 현장적용을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

Table 3.3.69 연구의 최종 목표

최종목표	○ Smart 고로슬래그미분말을 혼입한 저탄소콘크리트의 초기재령 압축강도 향상기술 개발 ■ OPC 100 % 사용 콘크리트 대비 1일, 3일 압축강도 동등 이상 ■ OPC 100 % 사용 콘크리트 대비 레미콘 단가 동등 이하 (경제성 확보) ■ OPC 100 % 사용 콘크리트 대비 레미콘 CO_2 배출량 약 7 % 저감

나. SBFS 적용 콘크리트 실험 계획

Table 3.3.70 주요 실험 내용

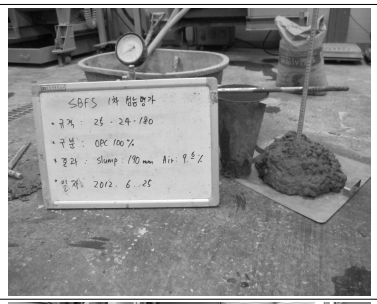
연구개발	주요 실험 내용
Pilot 소성로에 의한 Smart고로슬래그미분말 혼입 콘크리트의 적용성 평가	• 소성온도 및 혼합비율별 원천소재(SM) 성능평가
	• SBFS 치환율 및 양생온도별 성능평가
	• SBFS 혼입 콘크리트의 규격별 최적배합 설계 실시

(1) 실험방법

본 실험에서 실시한 콘크리트의 시험항목 및 방법으로 유동특성을 평가하기 위해 굳지 않은 성상에서의 슬럼프 시험은 KS F 2402 “콘크리트의 슬럼프 시험방법”에 따라 실시하였으며, 공기량 시험은 KS F 2421 “압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험방법“에 따라 실시함으로서 유동특성의 변화를 알아보았다.

또한, 조기강도 특성을 알아보기 위한 경화 콘크리트 성상에서 압축강도시험용 공시체는 KS F 2403 “콘크리트 강도시험용 제작방법”에 따라 (∅100×200)mm 시험체를 제작한 후 재령 1, 3, 28일에 UTM(Universal Testing Machine)을 이용하여 KS F 2405 “콘크리트 압축강도 시험방법”에 따라 측정을 실시하였다. 한편, 목표 성능은 슬럼프의 경우 (150±25 mm)로 설정하였으며, 공기량의 경우 (4.5±1.5) %로 설정하였다. 또한 유동성을 만족시키기 위한 방안으로 압축강도에 큰 영향을 줄 수 있는 단위수량은 고정한 상태에서 화학 혼화제 사용량의 변화를 통해 유동성능을 만족시켰다. Table 3.6.3은 본 실험에 대한 측정 항목을 나타낸다.

Table 3.3.71 항목

	측정항목	규격	실험전경
굳지 않은 콘크리트	슬럼프 플로우 및 공기량 측정	KS F 2402 KS F 2421	
경화 콘크리트	콘크리트 압축강도 측정	KS F 2405	

다. SBFS 적용 콘크리트 성능평가

(1) 소성온도 및 혼합 비율에 따른 원천소재의 선정실험

(가) 실험개요

본 실험은 가장 우수한 성능을 나타내는 Smart 고로슬래그미분말(이하 SBFS)의 원천소재(이하 SM)를 선정하기 위한 실험으로서, 고로슬래그미분말(이하 GBFS)과 소성온도 및 혼합비율별 SM을 혼입한 콘크리트의 조기강도 성능 발휘 여부 및 발현 정도를 파악하여 SM의 성능검토를 실시하고자 한다.

(나) 실험계획

SBFS 혼합비율 및 소성온도별 콘크리트의 성능평가를 위한 실험계획은 Table 3.3.72와 같다. 즉, SBFS의 원재료인 SM은 티탄석고, 석회석, 정수오니를 4:3:3과 4:4:2의 혼합비율과 소성온도 (700, 800)℃의 총 4 수준으로 생산하였으며, 모르타르 레벨에서 얻은 SM 최적 치환율 7%, GBFS는 23%의 고정으로 시멘트(이하 OPC) 대비 치환하여 실험을 실시하였다.

한편, 실험항목으로는 슬럼프, 공기량, 재령별 압축강도 측정을 실시하여, OPC 100 %를 사용한 배합 Plain 및 슬래그시멘트(이하 S/C)를 사용한 배합과의 성능비교를 하고자 하였으며, 그에 따른 배합사항은 Table 3.3.73에 나타낸 바와 같으며, Fig. 3.3.52는 실험광경을 나타낸다.

Table 3.3.72 실험계획

구분		GBFS[1] 치환율(%)	SM 치환율(%)[2]	SM 혼합비율[3]	소성온도(℃)	실험항목
1	Plain	-	-	-	-	•슬럼프 •공기량 •압축강도 (1, 3, 28 day)
2	S/C	30	-	-	-	
3	SBFS-A-700	23	7	4:3:3 (A Type)	700	
4	SBFS-A-800				800	
5	SBFS-B-700			4:4:2 (B Type)	700	
6	SBFS-B-800				800	

1) GBFS : 고로슬래그미분말

2) SM : Smart Material(원천소재)

3) 티탄석고 : 석회석 : 정수오니

Table 3.3.73 실험 배합사항

구분	W/B (%)	S/a (%)	단위재료량(kg/m^3)						AD (%)	비고
			W	C	GBFS	SM	S	G		
1	58.8	49.9	168	286	-	-	900	910	0.70	
2				200	86	-	897	907	0.65	
3				200	66	20	897	907		
4										
5										
6										

* 적용 분체비중 - C : 3.15, GBFS : 2.9, SBFS : 2.9

* 적용 골재밀도 - S : 2.59, G : 2.61

Table 3.3.74 실험 목표성능

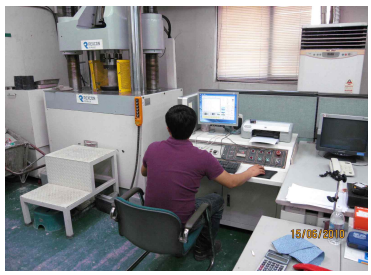
규격	구분	목표성능	비고
25-21-150	슬럼프	(150±25) mm	
	공기량	(4.5±1.5) %	



(a) 슬럼프 및 공기량



(b) 시험체 제작



(c) 재령별 압축강도 측정

Fig. 3.3.52 실험 전경

(다) 실험 결과

① 굳지 않은 콘크리트

Table 3.3.75 및 Table 3.3.3.76, 그리고 Fig. 3.3.53은 슬럼프 및 공기량 시험 결과를 나타낸 것으로서, Plain 배합의 경우 슬럼프 목표 값인 (150±25mm)을 만족하기 위하여 약 0.70%의 화학혼화제가 투입되는 것으로 나타난 반면, S/C 배합 및 SBFS 혼입 배합의 경우 0.65%의 화학혼화제가 투입되는 것으로 나타났다. 이는, GBFS 및 SM의 표면성상과 비표면적, 시멘트와의 비중 차에 따른 페이스트 용적의 증가 및 페이스트 점도의 변화 등 여러 요인이 슬럼프 값에 영향을 미친 것으로 판단되며, 특히 표면이 시멘트 입자의 표면에 비해서 치밀하고, 유동성 증가에 유리한 형상이므로 페이스트와 골재계면의 마찰이 작아짐에 따른 것으로 판단된다. 또한, 혼합비율 및 소성온도에 따른 SM 혼입 시, 유동성능에 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 한편, 공기량의 경우 Plain 배합에 비해 S/C 및 SBFS 배합이 소폭 저하하는 경향을 나타내었으나, 목표 수준은 모두 만족하는 결과를 나타내었다.

Table 3.3.75 슬럼프 및 공기량 시험결과 - I

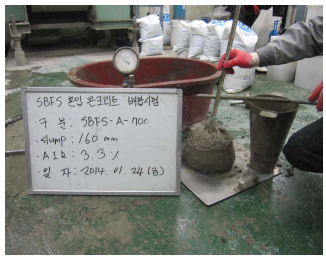
구분	Plain	S/C	SBFS-A-700
슬럼프(mm)	150	160	160
공기량(%)	5.0	3.7	3.3
혼화제첨가량(%)	0.70	0.65	0.65
비고			

Table 3.3.76슬럼프 및 공기량 시험결과 - II

구분	SBFS-A-800	SBFS-B-700	SBFS-B-800
슬럼프(mm)	170	175	175
공기량(%)	3.7	4.5	3.8
혼화제첨가량(%)	0.65	0.65	0.65
비고			

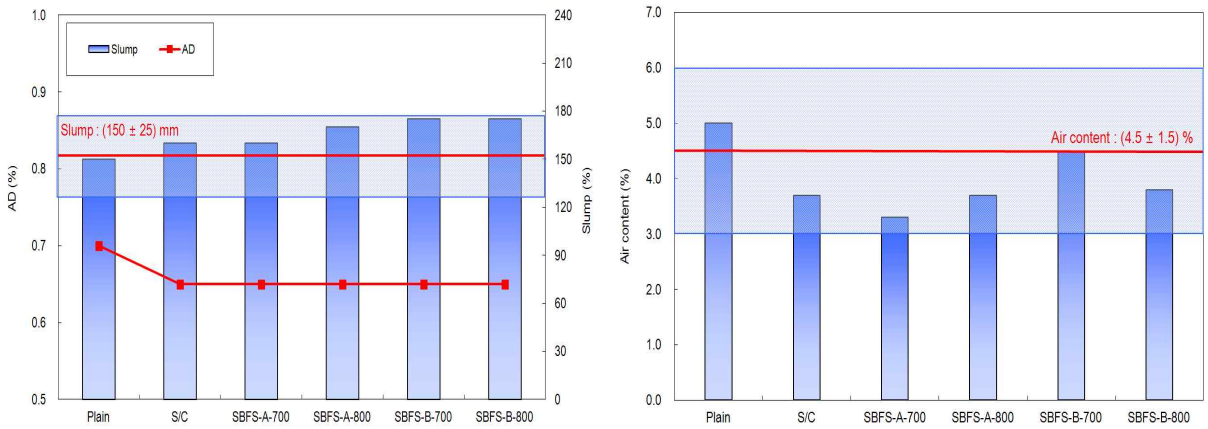


Fig. 3.3.53 혼화제 첨가에 따른 슬럼프 및 공기량 시험결과

② 경화 콘크리트

Table 3.3.77 및 Fig. 3.3.54는 압축강도 측정결과를 나타낸 것으로서, 재령 1일의 경우 SBFS를 혼입함에 따라 S/C 배합에 비해 (1.57~1.75)MPa 정도의 강도 증진 효과를 확인할 수 있었으며, Plain 배합과도 유사한 수준으로 조기강도를 발현하는 것으로 나타났다. 또한 재령 3일 역시 S/C 배합에 비해 (1.93~2.23)MPa 정도의 강도 증진 효과를 확인할 수 있었으며, Plain 배합과도 유사한 수준을 나타내어, SBFS에 대한 조기강도 발현 성능을 확인 할 수 있었다.

한편, 재령 1, 3일 강도 측정을 실시한 결과 SM의 생산 혼합비율에 따른 강도 차이는 크지 않은 것으로 나타났으나, 소성온도의 경우 700℃에 비해 800℃로 소성한 SM이 콘크리트의 조기강도를 나타내는데 있어 더욱 우수할 것으로 판단된다.

재령 28일에는 SM의 생산 혼합비율과 소성온도에 따른 차이가 약간 나타났지만, (1.3~2.4)MPa의 범위로 큰 차이를 나타내지 않았다고 사료된다. 따라서 우수한 SBFS를 생산하기 위해서는 800℃로 소성한 A Type의 SM을 혼입하는 것이 적절할 것으로 사료된다.

Table 3.3.77 소성온도별(4:3:3) 압축강도 측정결과

No	재령별 측정값					
	1일		3일		7일	
	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)
1	3.77	100	11.7	100	23.6	100
2	2.18	57.8	9.17	78.4	23.9	101.3
3	3.75	99.5	11.2	95.7	27.6	116.9
4	3.93	104.2	11.4	97.4	26.5	112.3
5	3.77	100	11.1	94.9	25.2	106.8
6	3.87	102.7	11.3	96.6	26.7	113.1

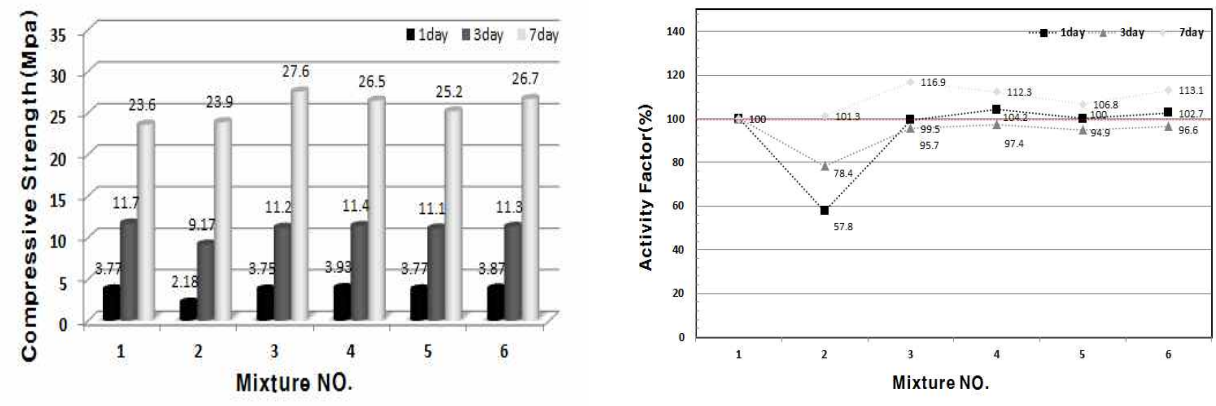


Fig. 3.3.54 재령별 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일)

(2) SBFS 치환율 및 양생온도 조건에 따른 압축강도 실험

(가) 실험개요

본 실험은 이전 실험에서 선정된 SM을 사용한 SBFS의 최적 치환율을 도출하는 것이 가장 큰 목적으로, SBFS의 치환율 및 양생온도 조건별 성능평가를 통해 콘크리트의 조기강도 성능 발휘 여부 및 발현 정도를 파악하여 SBFS의 최적 치환율을 도출하고자 한다.

(나) 실험계획

SBFS 치환율 및 양생온도 조건에 따른 콘크리트의 성능평가를 위한 실험계획은 Table 3.3.78과 같다.

여기서, SBFS의 SM은 소성온도 800℃에서 티탄석고, 석회석, 정수오니의 혼합비율이 4:3:3으로 생산된 제품을 사용하였으며, SBFS의 치환량은 시멘트 대비 치환율 30%를 기준으로 하여 (0, 10, 20, 30)% 4수준으로 설정하였다.

한편, SBFS 내 포함 비율은 GBFS 23%와 SM 7%이며, SBFS의 치환율에 따라 GBFS와 SM의 비율을 76% : 24% 질량비로 혼입하였다. 실험 항목으로는 슬럼프, 공기량, 재령별 압축강도 측정을 실시하였으며, 본 실험에서 사용한 배합사항은 Table 3.3.79과 같다.

Table 3.3.78 실험계획

규 격	구 분[1)]	SBFS 치환율[2)] (%)	양생온도 (℃)	실험항목	비고
25-30-150	Plain	0	5, 10, 20	슬럼프, 공기량, 압축강도 (1, 3, 7, 28day)	
	A-10	10			
	A-20	20			
	A-30	30			

주 1) 표기명 : A - SBFS 치환율(%)

2) SBFS의 치환율 중 GBFS와 SM의 비율은 질량비로 76 % : 24 % 혼합

Table 3.3.79 실험 배합사항

구분	W/B (%)	S/a (%)	단위재료량(kg/m^3)						AD (%)	비고
			W	C	SBFS		S	G		
					GBFS	SM				
A-Plain	52.5	48.6	172	328	-	-	868	925	0.8	
A-10				295	25	8	866	923	0.75	
A-20				262	50	16	865	922		
A-30				230	75	23	864	921		

* 적용 분체비중 - C : 3.15, GBFS : 2.9, SBFS : 2.9

* 적용 골재밀도 - S : 2.59, G : 2.61

Table 3.3.80 실험 방법 및 목표성능

구분	시험항목	기준	목표성능	비고
굳지 않은 콘크리트	공기량 시험	KS F 2421	(4.5±1.5)%	
	슬럼프 시험	KS F 2402	(150±25)mm	
경화 콘크리트	압축강도 시험	KS F 2405	1, 3, 7, 28일 측정	

(다) 실험결과

① 굳지 않은 콘크리트

Table 3.3.81 및 Table 3.3.82, 그리고 Fig. 3.3.55는 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 및 공기량 시험 결과를 나타낸 것으로서, Plain 배합의 경우 슬럼프 목표 값인 (150±25)mm를 만족하기 위하여 약 0.75%의 화학혼화제가 투입되는 것으로 나타난 반면, 치환율과 관계없이 SBFS 혼입 배합의 경우 0.70%의 화학혼화제가 투입되었다.

이는, 소성온도에 따른 혼합비율 실험과 동일한 상관관계를 나타내었으며, SBFS의 표면성상과 분말도, 시멘트와의 비중 차에 따른 페이스트 용적의 증가 및 페이스트 점도의 변화 등 여러 요인이 슬럼프 값에 영향을 미친 것으로 판단된다.

한편, 동일양의 화학혼화제의 투입 시, SBFS의 혼입양이 증가할수록 유동성은 감소하는 경향을 나타내었다. 이는, SBFS의 빠른 촉진작용으로 인하여 나타나는 현상으로 사료된다.

Table 3.3.81 굳지 않은 콘크리트 실험결과- I

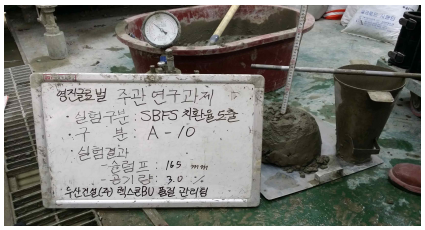
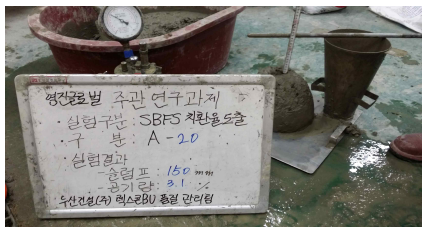
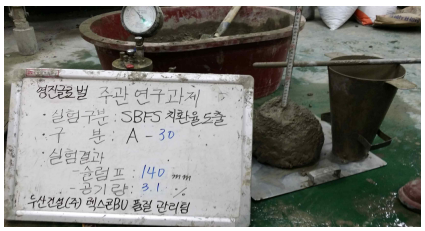
구 분	Plain	A-10
슬럼프(mm)	160	165
공기량(%)	3.2	3.0
혼화제 첨가량(%)	0.75	0.70
비 고		

Table 3.3.82굳지 않은 콘크리트 실험결과-II

구 분	A-20	A-30
슬럼프(mm)	150	140
공기량(%)	3.1	3.1
혼화제 첨가량(%)	0.70	0.70
비 고		

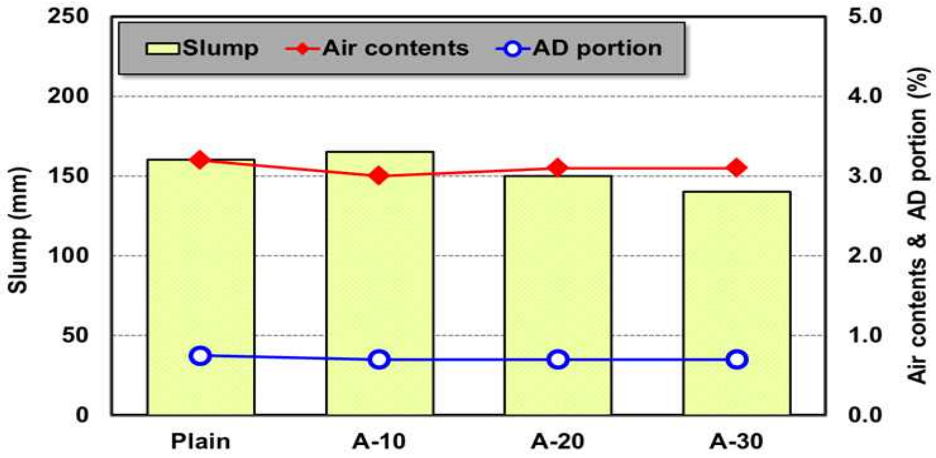


Fig. 3.3.55 굳지 않은 콘크리트 실험결과

② 경화 콘크리트

Table 3.3.83 및 Fig. 3.3.56는 압축강도 측정결과를 나타낸 것으로서, 재령 1, 3, 7일의 경우 SBFS를 치환양에 관계없이 Plain 대비 100%이상의 강도 발현 여부를 확인할 수 있었다. 또한, SBFS 혼입율별 차이는 크게 나타나지는 않았지만, SBFS 혼입 콘크리트는 Plain 대비 110% 이상의 강도 발현을 나타내어 장기강도 면에서도 우수한 것으로 나타났다.

한편, 양생온도 조건과 관계없이 Plain 대비 100% 이상의 강도 발현을 나타내어 SBFS의 우수한 성능을 확인 할 수 있었으며, 빠른 촉진작용으로 반응으로 인하여 온도에 영향을 크게 받지 않는 것으로 사료된다. 한편, 모든 배합은 재령과 관계없이 Plain 대비 100%의 강도 발현을 나타내었기 때문에 경제성 및 환경적 문제를 고려한다면, SBFS의 치환율은 30%로 하여도 초기재령에서 우수한 강도 발현을 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 3.3.83 재령별 압축강도 시험결과

구 분		재령(일)								비고
		1		3		7		28		
		압축강도 (MPa)	활성도지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도지수 (%)	
Plain	20 ℃	8.16	100	21.2	100	28.2	100	36.1	100	
	10 ℃	1.43	100	14.2	100	24.1	100	35.1	100	
	5 ℃	1.18	100	14.2	100	22.6	100	34.7	100	
A-10	20 ℃	10.2	125.0	24.6	116.0	30.7	108.9	40.0	110.8	
	10 ℃	2.72	190.2	16.9	119.0	26.8	111.2	41.0	116.8	
	5 ℃	1.73	146.6	16.9	119.0	26.9	119.0	40.2	115.9	
A-20	20 ℃	9.73	119.2	22.0	103.8	30.2	107.1	42.2	116.9	
	10 ℃	1.69	118.2	15.9	112.0	25.8	107.1	40.1	114.2	
	5 ℃	1.47	124.6	16.6	116.9	26.3	116.4	38.6	111.2	
A-30	20 ℃	8.35	102.3	22.0	103.8	30.0	106.4	41.3	114.4	
	10 ℃	1.89	132.2	15.0	105.6	24.7	102.5	38.7	110.3	
	5	1.58	133.9	14.7	103.5	22.8	100.9	38.3	110.4	

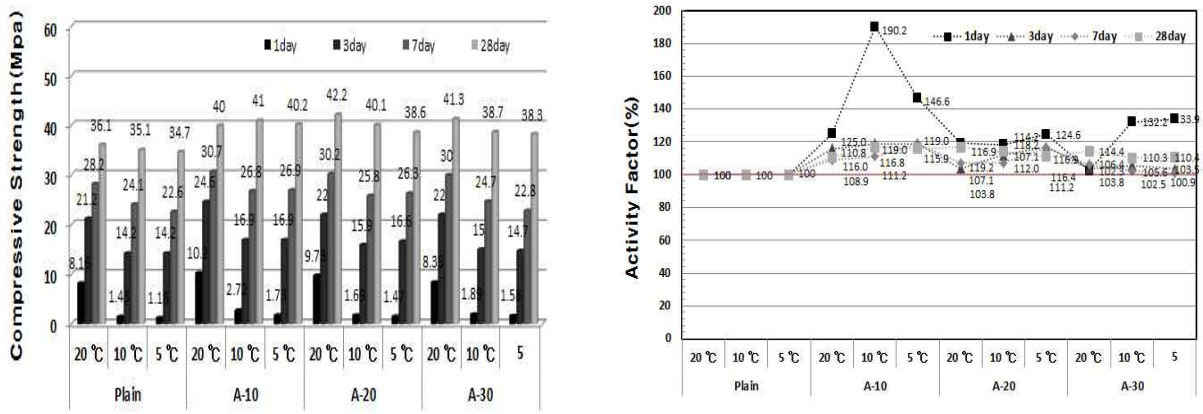


Fig. 3.3.3.56 재령별 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일)

(3) SBFS 혼입 콘크리트의 규격별 최적배합 설계

(가) 실험개요

본 실험에서는 SBFS 혼입 콘크리트의 강도 규격별 [(21, 24, 27, 30)MPa] 최적 배합을 도출하기 위하여 W/B에 따른 재령 28일까지의 강도를 확인하고, 회귀분석을 통하여 각각의 배합규격별 최적 W/B를 도출하고자 한다.

(나) 실험계획

Table 3.3.84는 본 실험의 실험계획을 나타낸 것으로서 단위수량은 170kg/m^3으로 고정하여 W/B는 (65, 60, 55, 50)%의 4 수준으로 설정하였으며, SBFS의 치환율은 OPC 100%를 사용한 배합과의 강도 비교를 위하여 (0, 30)%로 설정하였다.

여기서, SBFS의 치환량은 이전실험과 동일한 조건으로 시멘트 대비 GBFS 23%와 SM 7%를 합한 치환율 30%를 기준으로 하여 GBFS와 SM의 비율을 76% : 24%의 질량비로 혼합하여 사용하였으며, 이에 상기 방법으로 각 배합별 슬럼프 및 공기량 시험을 실시하였다. 또한, 최적 배합을 도출하고자 하는데 있어 재령별 압축강도를 측정하고, 재령 28일 압축강도 결과로 회귀분석을 통하여 (21~30)MPa의 규격별 최적 W/B를 도출한 후, 최적 배합을 도출하고자 하였다. 한편, 본 실험에서 사용한 배합사항은 Table 3.3.85에 나타내었다.

Table 3.3.84 실험 계획

구 분[1]	W/B (%)	SBFS 치환율[2] (%)	실험항목	비고
A-65-0	65.0	0	슬럼프, 공기량, 압축강도	배합도출과 무관
A-65-30		30.0		
A-60-0	60.0	0		배합도출과 무관
A-60-30		30.0		
A-55-0	55.0	0		배합도출과 무관
A-55-30		30.0		
A-50-0	50.0	0		배합도출과 무관
A-50-30		30.0		

1) A - W/B - SBFS 치환율(%)
2) SBFS의 GBFS와 SM의 비율은 질량비로 76% : 24% 혼합

Table 3.3.85 실험 배합사항

구분	W/B (%)	S/a (%)	단위재료량(kg/m^3)						AD (%)	비고
			W	C	SBFS		S	G		
					GBFS	SM				
A-65-0	65.0	49.4	170	262	-	-	908	937	0.7	
A-65-30				183	60	19	905	935	0.7	
A-60-0	60.0			284	-	-	899	928	0.7	
A-60-30				199	65	20	896	925	0.7	
A-55-0	55.0			309	-	-	889	918	0.7	
A-55-30				216	70	23	886	914	0.7	
A-50-0	50.0			340	-	-	877	905	0.7	
A-50-30				238	78	24	873	901	0.7	

* 적용 분체비중 - C : 3.15, GBFS : 2.9, SBFS : 2.9
* 적용 골재밀도 - S : 2.59, G : 2.61

Table 3.3.86 실험 방법 및 수준

구분	시험항목	기준	수준	비고
굳지 않은 콘크리트	공기량 시험	KS F 2421	(4.5±1.5)%	
	슬럼프 시험	KS F 2402	(150±25)mm	
경화 콘크리트	압축강도 시험	KS F 2405	1, 3, 7, 28일 측정	

(다) 실험결과

① 굳지 않은 콘크리트

Table 3.3.87~ Table 3.3.90 및 Fig. 3.3.57은 SBFS 혼입 콘크리트의 배합설계를 위한 W/B 및 SBFS의 치환율 별 슬럼프 및 공기량 시험 결과를 나타낸 것으로서, W/B 및 SBFS의 치환율과 관계없이 목표 슬럼프(150±25)mm와 목표 공기량(4.5±1.5)을 만족하기 위한 감수제 및 AE제는 W/B에 관계없이 각각 0.85%와 0.1%의 동일양이 첨가되었다. 또한, 콘크리트의 상태는 재료분리 없이 매우 양호한 상태를 나타내었다.

따라서, SBFS를 혼입함에 따른 슬럼프 및 공기량은 OPC 100% 배합과 큰 차이를 나타내지 않음에 구조물의 타설에 있어서 유동성능은 양호할 것으로 사료된다.

Table 3.3.87 굳지 않은 콘크리트 실험결과- I

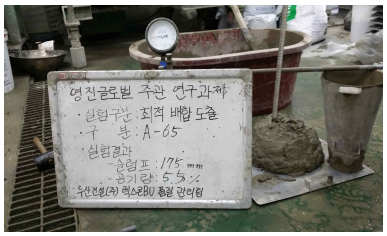
구 분	A-65-0	A-60-30
슬럼프(mm)	175	175
공기량(%)	5.6	5.5
혼화제 첨가량(%)	0.85	0.85
비 고		

Table 3.3.88 굳지 않은 콘크리트 실험결과- II

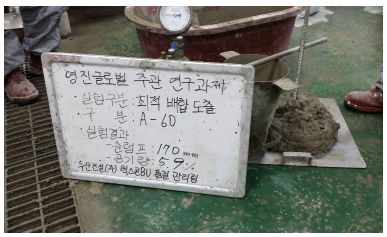
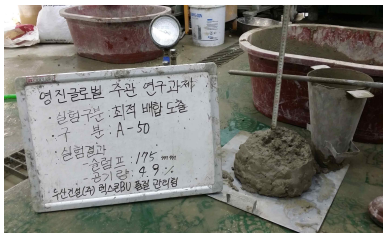
구 분	A-60-0	A-60-30
슬럼프(mm)	165	170
공기량(%)	5.4	5.9
혼화제 첨가량(%)	0.85	0.85
비 고		

Table 3.3.89 굳지 않은 콘크리트 실험결과- III

구 분	A-55-0	A-55-30
슬럼프(mm)	170	175
공기량(%)	5.5	5.3
혼화제 첨가량(%)	0.85	0.85
비 고		

Table 3.3.90 굳지 않은 콘크리트 실험결과-Ⅳ

구 분	A-50-0	A-50-30
슬럼프(mm)	170	175
공기량(%)	5.2	4.9
혼화제 첨가량(%)	0.85	0.85
비 고		

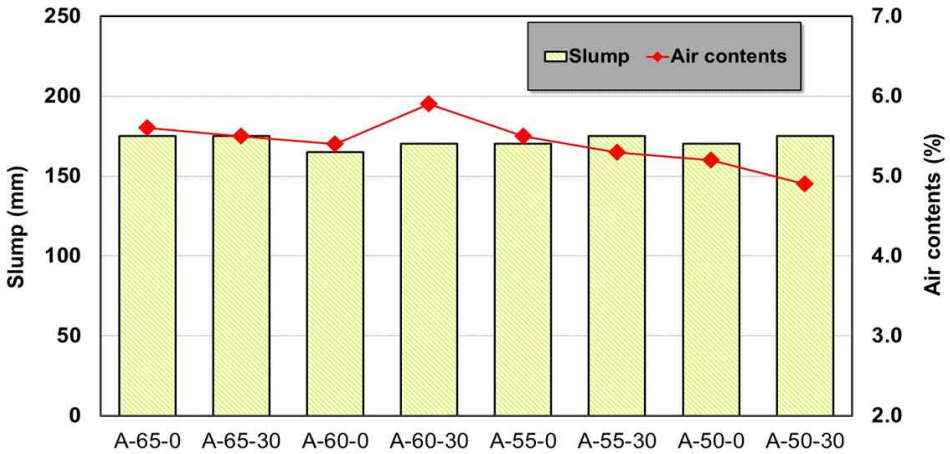


Fig. 3.3.57 슬럼프 및 공기량 시험결과

② 경화 콘크리트

㉮ 재령별 압축강도

Table 3.3.91 및 Fig. 3.3.58은 SBFS 혼입 콘크리트의 배합설계를 위한 W/B 및 재령에 따른 압축강도 측정결과를 나타낸 것으로서, SBFS의 치환율과 관계없이 각 조건에 따른 W/B별 배합은 일정한 간격을 나타내며 강도차이를 확연하게 나타내었다. 또한, SBFS를 혼입한 배합은 W/B와 관계없이 각 재령별 OPC 100% 배합보다 우수한 강도 발현을 나타내었다. 특히, 초기재령 1, 3일의 강도가 OPC 100% 배합보다 높게 나타난 것으로 보아 조기강도를 발현하는데 있어 SBFS의 우수한 성능을 확인할 수 있었으며, 현장의 구조물에 사용 시 공기단축에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 3.3.91 재령별 압축강도 시험결과

구분	재령(일)				비고
	1	3	7	28	
	압축 강도 (MPa)	압축 강도 (MPa)	압축 강도 (MPa)	압축 강도 (MPa)	
A-65-0	3.07	9.86	15.1	20.9	
A-65-30	3.60	10.4	15.8	22.6	
A-60-0	4.05	11.6	17.9	25.5	
A-60-30	4.49	12.3	18.7	26.4	
A-55-0	5.25	14.1	21.6	27.9	
A-55-30	5.65	15.4	22.6	29.4	
A-50-0	6.71	17.0	25.5	32.9	
A-50-30	6.95	18.0	26.8	34.8	

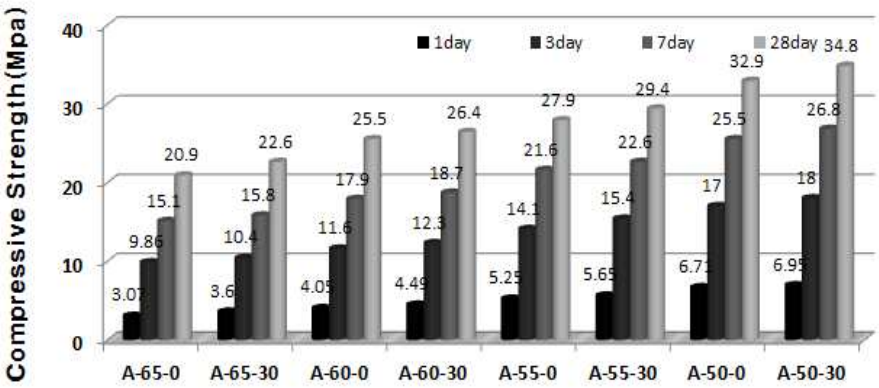


Fig. 3.3.58 재령별 압축강도 (1일, 3일, 7일, 28일)

㉯ 적정 W/B 추정

SBFS 혼입 콘크리트의 규격별 W/B 선정을 위하여 각각의 배합강도는 [식 1] 및 [식 2]를 통해 구한 값 중 큰 값으로 산정하였으며, 압축강도의 표준편차는 기존 실험결과를 바탕으로 3.3으로 설정하였다.

$_r = f_{ck} + 1.34s(\ \ Pa)$ [식 1]

$f_{cr} = (f_{ck} - 3.5) + 2.33s(MPa)$ [식 2]

여기서, f_{cr} : 배합강도

f_{ck} : 설계기준강도

s : 3.3 MPa(압축강도의 표준편차)

③ 배합강도의 결정

㉮ 21 MPa

설계강도 21MPa의 SBFS 혼입 콘크리트는 배합강도를 산출하기 위하여 [식 3~4]에 나타낸 바와 같으며, 구한 값 중 큰 값으로 산정하였다.
따라서, 배합강도는 25.4MPa로 산정 하였다.

$f_{cr} = f_{ck} + 1.34s(MPa) = 25.4\ MPa$ [식 3]

$f_{cr} = (f_{ck} - 3.5) + 2.33s(MPa) = 25.2\ MPa$ [식 4]

㉯ 24 MPa

설계강도 24MPa의 SBFS 혼입 콘크리트는 배합강도를 산출하기 위하여 [식 5~6]에 나타낸 바와 같으며, 구한 값 중 큰 값으로 산정하였다.
따라서, 배합강도는 28.4MPa로 산정 하였다.

$f_{cr} = f_{ck} + 1.34s(MPa) = 28.4\ MPa$ [식 5]

$f_{cr} = (f_{ck} - 3.5) + 2.33s(MPa) = 28.2\ MPa$ [식 6]

㉰ 27 MPa

설계강도 27MPa의 SBFS 혼입 콘크리트는 배합강도를 산출하기 위하여 [식 7~8]에 나타낸 바와 같으며, 구한 값 중 큰 값으로 산정하였다.
따라서, 배합강도는 31.4MPa로 산정 하였다.

$f_{cr} = f_{ck} + 1.34s(MPa) = 31.4\ MPa$ [식 7]

$f_{cr} = (f_{ck} - 3.5) + 2.33s(MPa) = 31.2\ MPa$ [식 8]

㉮ 30 MPa

설계강도 30MPa의 SBFS 혼입 콘크리트는 배합강도를 산출하기 위하여 [식 9~10]에 나타낸 바와 같으며, 구한 값 중 큰 값으로 산정하였다.
따라서, 배합강도는 34.4MPa로 산정 하였다.

$$_{r} = f_{ck} + 1.34s(\quad Pa) = 34.4\ MPa \qquad [식\ 9]$$

$$f_{cr} = (f_{ck} - 3.5) + 2.33s(MPa) = 34.2\ MPa \qquad [식\ 10]$$

④ 적정 W/B 추정을 위한 회귀분석

규격별 최적의 W/B를 산정하기 위하여 W/B별 재령 28일 압축강도의 측정결과를 통하여 회귀분석 결과를 실시하였으며, 압축강도와 W/B의 상관관계는 0.9846로 도출되어 나타낸 [식 11]을 이용하여 규격별 최적의 W/B를 산정하였다.

$$y = -0.93x + 88.267 \qquad [식\ 11]$$

㉯ 21 MPa

Fig. 3.63.59는 설계강도 21MPa의 회귀분석을 실시한 결과로써, 적정 W/B는 60.9%로 산정되었다.

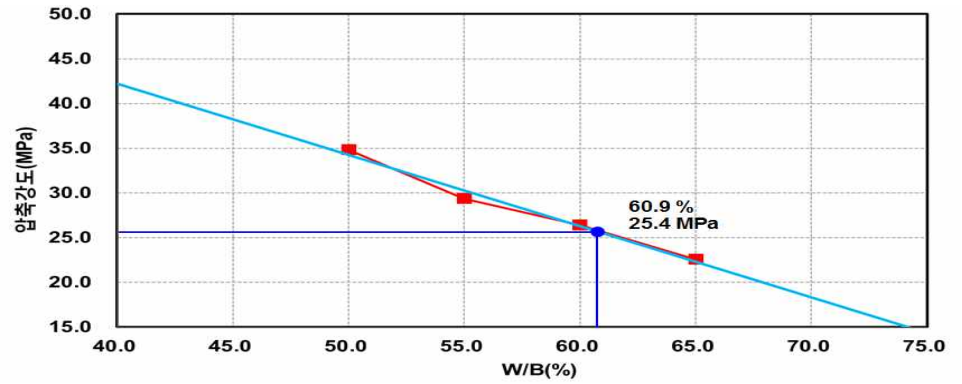


Fig. 3.3.59 설계강도 21MPa의 회귀분석 결과

㉰ 24MPa

Fig. 3.3.60은 설계강도 24MPa의 회귀분석을 실시한 결과로써, 적정 W/B는 57.2%로 산정되었다.

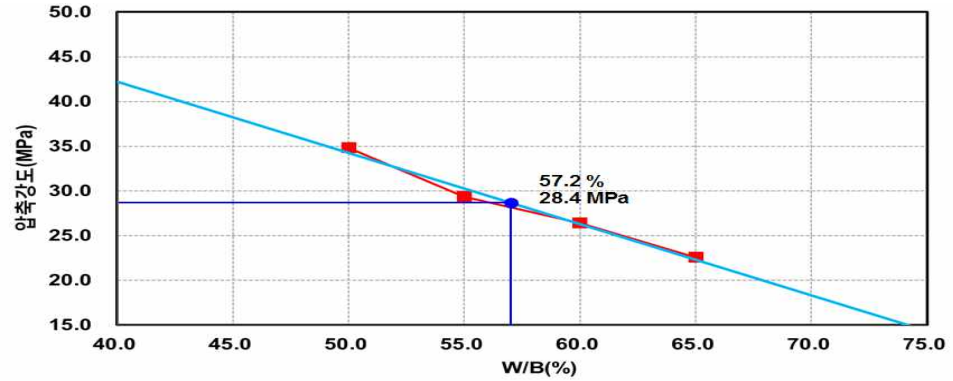


Fig. 3.3.60 설계강도 24MPa의 회귀분석 결과

㉮ 27MPa

Fig. 3.3.61은 설계강도 27MPa의 회귀분석을 실시한 결과로써, 적정 W/B는 53.3%로 산정되었다.

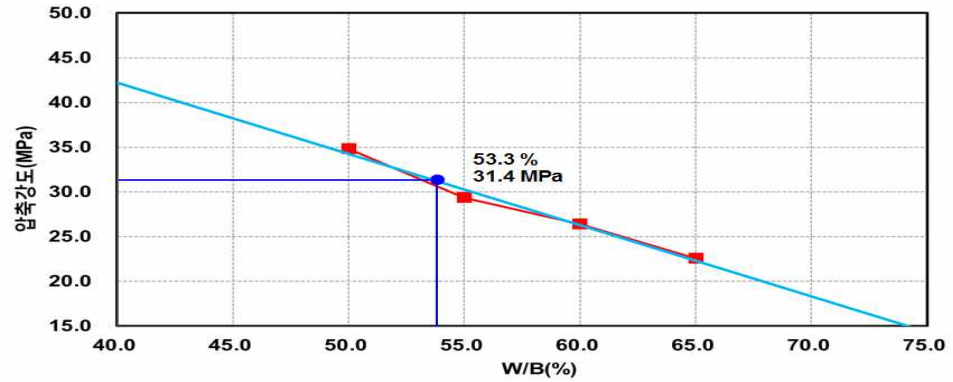


Fig. 3.3.61 설계강도 27MPa의 회귀분석 결과

㉯ 30MPa

Fig. 3.3.62는 설계강도 30MPa의 회귀분석을 실시한 결과로서, 적정 W/B는 49.7%로 산정되었다.

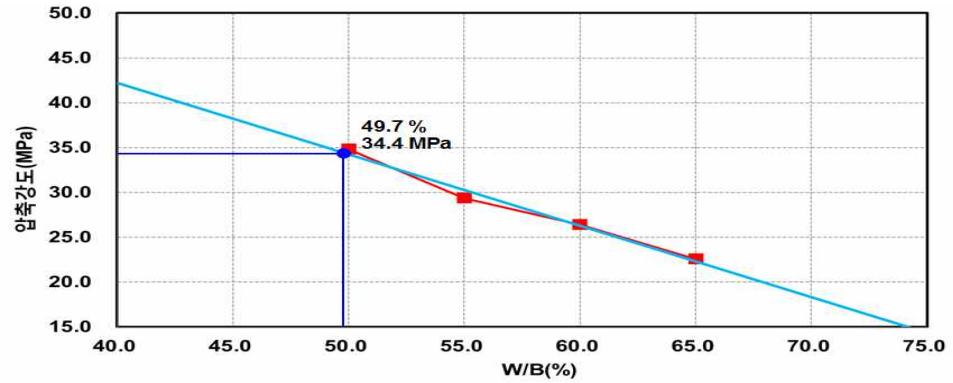


Fig. 3.3.62 설계강도 30MPa의 회귀분석 결과

⑤ 최적배합설정

Table 3.3.92는 배합설계를 통하여 각 규격별 SBFS 혼입 콘크리트의 도출된 최적배합을 나타낸 것이다.

Table 3.3.92 도출된 최적 배합사항

규 격	W/B (%)	S/a (%)	단위재료량(kg/m^3)						AD (%)	AE (%)
			W	C	SBFS		S	G		
					GBFS	SM				
25-21-150	60.9	50.3	170	195	64	20	911	907	0.85	0.1
25-24-150	57.2	50.1		208	68	21	900	903		
25-27-150	53.3	49.7		223	73	23	883	901		
25-30-150	49.7	49.4		239	78	25	868	896		

* 적용 분체비중 - C : 3.15, GBFS : 2.9, SBFS : 2.9

* 적용 골재밀도 - S : 2.59, G : 2.61

(4) SBFS 혼입 콘크리트의 규격별 최적배합 검증실험

(가) 실험개요

본 실험은 최적배합설계 실험에서 도출된 SBFS 혼입 콘크리트의 규격별[(21, 24, 27, 30)MPa] 배합에 있어 재령별 강도 확인하고자 한다.

(나) 실험계획

Table 3.3.93은 이전 실험에서 도출된 규격별 최적배합의 검증을 위한 실험계획을 나타낸 것으로서, 각 규격별 도출 된 W/B와, 30%의 SBFS의 치환율을 고정하여 설정하였다.

여기서, SBFS의 혼입은 이전 실험과 동일한 조건으로 시멘트 대비 GBFS 23%와 SM 7%로 치환하였으며, 슬럼프 및 공기량 시험을 실시하고, 재령별 압축강도를 측정한 후, 검증을 실시하고자 하였다.

한편, 본 실험에서 사용 될 규격별 배합사항은 Table 3.3.94에 나타내었다.

Table 3.3.93 규격별 검증실험 계획

구 분[1)]	W/B (%)	SBFS 치환율[2)] (%)	실험항목	비고
25-21-150	60.9	30.0	슬럼프, 공기량, 압축강도	
25-24-150	57.2			
25-27-150	53.3			
25-30-150	49.7			

주 1) 호칭강도

2) SBFS의 GBFS와 SM의 비율은 질량비로 76% : 24% 혼합

Table 3.3.94 규격별 검증실험 배합사항

구분	W/B (%)	S/a (%)	단위재료량(kg/m^3)						AD (%)	비고
			W	C	SBFS		S	G		
					GBFS	SM				
25-21-150	60.9	50.3	170	195	64	20	911	907	0.85	
25-24-150	57.2	50.1		208	68	21	900	903	0.85	
25-27-150	53.3	49.7		223	73	23	883	901	0.85	
25-30-150	49.7	49.4		239	78	25	868	896	0.85	

* 적용 분체비중 - C : 3.15, GBFS : 2.9, SBFS : 2.9
* 적용 골재밀도 - S : 2.59, G : 2.61

Table 3.3.95 검증실험 방법

구분	시험항목	기준	내 용	비고
굳지 않은 콘크리트	공기량 시험	KS F 2421	(4.5±1.5) %	
	슬럼프 시험	KS F 2402	(150±25) mm	
경화 콘크리트	압축강도 시험	KS F 2405	1, 3, 7, 28일 측정	

(다) 실험결과

① 굳지 않은 콘크리트

Table 3.3.96 및 Fig. 3.3.63은 SBFS 혼입 콘크리트의 도출된 규격별 슬럼프 및 공기량 시험결과를 나타낸 것으로서, 각 규격에 관계없이 목표 슬럼프와 공기량은 각 기준에 만족하였으며, 목표 슬럼프(150±25)mm와 목표 공기량(4.5±1.5)을 만족하기 위한 감수제 및 AE제는 규격에 관계없이 각각 0.80%와 0.2%로 나타났다. 또한, 콘크리트의 상태는 재료분리 없이 매우 양호한 상태를 나타내었다.

여기서, 목표성능을 만족시키기 위하여 이전 실험과는 약간의 차이로 감수제 첨가량은 감소하고, AE제의 양은 증가하였지만, 큰 차이를 나타내지 않은 것으로 온도 및 그 외의 실험환경에 따른 오차라 판단된다.

Table 3.3.96 굳지 않은 콘크리트 실험결과

구 분	슬럼프 (mm)	공기량 (%)	혼화제 첨가량 (%)	비고
25-21-150	165	5.4	0.80	AE제 0.2 %
25-24-150	160	5.7	0.80	AE제 0.2 %
25-27-150	165	5.2	0.80	AE제 0.2 %
25-30-150	165	5.3	0.80	AE제 0.2 %

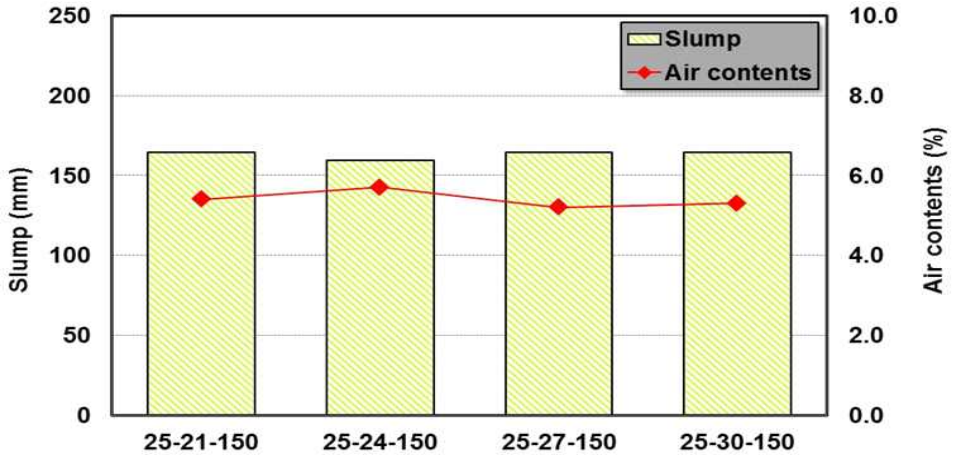


Fig. 3.3.63 슬럼프 및 공기량 시험결과

② 경화 콘크리트

Table 3.3.97 및 Fig. 3.3.64는 SBFS 혼입 콘크리트의 도출된 최적 배합의 검증을 위한 압축강도 시험결과를 나타낸 것으로서, 각 규격별 강도차이를 확연하게 나타내었으며, 재령 28일까지 재령별 압축강도 발현정도는 이전 실험 결과와 유사한 정도를 나타내었다. 또한, 재령 28일의 압축강도 시험결과는 규격에 관계없이 만족하고자 하는 설계 강도를 상회하였기 때문에 각 규격별 최적배합으로 적절할 것으로 판단된다.

하지만, 도출된 배합은 실내에서 도출 된 배합이기 때문에 실 부재 타설을 위한 적절한 W/B가 산출되어야 할 것으로 사료된다.

Table 3.3.97 압축강도 시험결과

구 분	압축강도(MPa)				비고
	1일	3일	7일	28일	
25-21-150	4.37	11.9	18.1	25.9	
25-24-150	5.46	14.9	24.6	29.4	
25-27-150	6.09	17.0	24.6	31.8	
25-30-150	7.01	18.6	27.2	34.8	

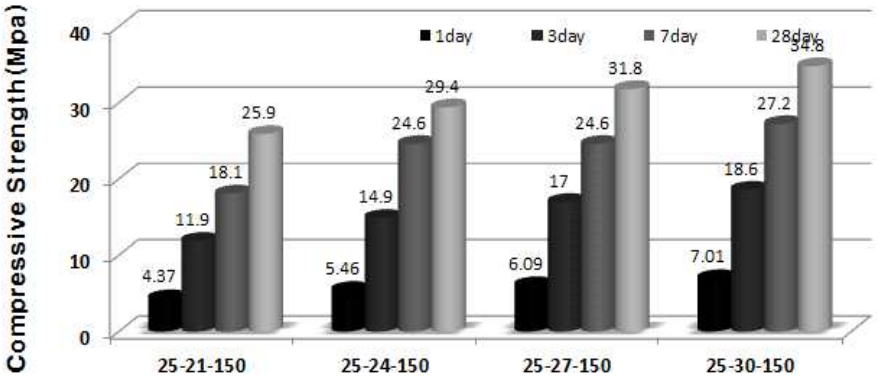


Fig. 3.3.64 재령별 압축강도 (1일, 3일, 7일, 28일)

라. 소 결

본 연구는 “Smart 고로슬래그미분말을 혼입한 저탄소 콘크리트의 초기재령 압축강도 향상기술개발” 을 위한 연구의 일환으로서, 각 실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

◎ SBFS를 혼입함에 따라 유동성능이 개선되었으며, 이에 화학혼화제 사용량이 감소하는 것으로 나타났다.

◎ SBFS를 혼입함에 따라 재령 1, 3일에 Plain 배합과 유사한 조기강도 발현성능을 나타났다. 또한, SM의 생산 혼합비율은 조기강도에 큰 영향을 미치지 않으며, 소성온도의 경우 800℃가 적합한 것으로 나타났다.

◎ SBFS를 혼입함에 따라 화학혼화제 사용량을 감소시킬 수 있다. SBFS를 혼입한 모든 배합이 재령 1, 3, 7, 28일 모두 각 Plain 배합보다 우수한 강도 발현성능을 나타내었다. 또한, SBFS의 치환율 및 양생온도 조건과 관계없이 100% 이상의 조기강도 발현성을 나타내었기 때문에 경제성 및 환경적 측면을 고려하여 SBFS의 최적 치환율은 30%가 적정하다고 판단된다.

◎ SBFS를 혼입함에 유동성능은 OPC 100%과 유사하거나 보다 우수한 결과를 나타낸다. SBFS를 혼입한 배합은 W/B 및 재령에 관계없이 OPC 100보다 우수한 결과를 확인하였으며, SBFS의 조기강도 발현에 있어 우수한 영향성을 확인할 수 있었다. 재령 28일 압축강도의 회귀분석 결과, 압축강도와 W/B의 상관관계는 0.9846로 도출되었으며, 규격별 최적 배합을 도출되었다.

◎ SBFS 혼입 콘크리트의 규격별 최적배합 검증 실험에서 슬럼프 및 공기량은 목표를 만족하고 재령 28일에 도출된 모든 배합은 각 규격별 설계 강도를 만족하였지만, 실 생산 즉, B/P 생산에 있어 적절한 배합 조정이 필요할 것으로 사료된다.

따라서, 상기에 나타난 규격별 배합은 SBFS를 사용한 최적 배합으로 판단된다.

8. SBFS 저탄소 콘크리트의 실용화 검증 Mock-up Test

가. 개요

본 실험은 최적배합설계에 의하여 돌출 된 배합에서 한 규격을 선정하여 Batch Plant(이하 B/P)를 이용한 실 부재 타설 즉, 레미콘 B/P를 통한 Mock-up 실험을 진행할 것이며, 동시에 SBFS를 혼입한 콘크리트의 내구성능을 OPC 100% 배합과 S/C를 사용한 배합과 비교하여 확인하고자 한다. 또한 당사 Pilot 소성로에서 생산된 원천소재의 실용화에 가능성을 더 높이기 위하여 한국석회석신소재연구소에서 보유중인 실험용 Rotary kiln에 대량 생산을 통하여 향후 시멘트 회사의 잉여 킬른에 적용할 수 있는 기틀을 마련코자 Mock-up 실험을 하였다.

나. 실험 계획

(1) 레미콘 B/P를 통한 Mock-up 실험

Table 3.3.98과 Table 3.3.99는 SBFS를 혼입한 콘크리트의 Mock-up 실험계획 및 배합사항을 각각 나타낸 것으로서 도출된 25-27-150의 배합을 사용하여 B/P 생산을 하였다. 또한, 비교 대상으로 OPC 100% 배합 및 S/C 100% 배합과 동일 규격으로 생산하여 초기재령 압축강도 및 내구특성을 비교하고자 하였다.
여기서, SBFS의 혼입량은 이전 실험과 동일한 조건으로 OPC 대비 23%와 SM 7%를 합한 치환율 30%로 하여 GBFS와 SM의 비율을 76% : 24%의 질량비로 계산하여 혼합할 것이다.
한편, 굳지 않은 콘크리트에서는 슬럼프, 공기량 시험을 실시하였으며, 경화 콘크리트에서는 건조수축 길이변화 시험, 소성수축균열 시험, 탄산화(중성화)촉진 시험, 재령별 압축강도 시험을 실시하여 비교검토 하였다.

Table 3.3.98 레미콘 B/P를 통한 Mock-up 실험계획

규 격	구 분	SBFS 치환율[1] (%)	실험항목	비고
25-27-150	OPC100	0	• 슬럼프 및 공기량 • 압축강도 • 탄산화 시험 • 소성수축 균열시험 • 건조수축 길이변화 시험 • 단열온도상승시험 -Mock up 부재	2 m^3 생산
	S/C			2 m^3 생산
	SBFS30	30.0		2 m^3 생산

주 1) SBFS의 GBFS와 SM의 비율은 질량비로 76% : 24% 혼합

Table 3.3.99 레미콘 B/P를 통한 Mock-up 배합사항

구분	W/B (%)	S/a (%)	단위재료량(kg/m^3)						AD (%)	비고
			W	C	SBFS		S	G		
					GBFS	SM				
OPC100	53.3	49.7	170	319	-	-	887	904	0.8	
S/C				319	-	-	883	901	0.8	
SBFS30				223	73	23	883	901	0.8	

* 적용 분체비중 - C : 3.15, GBFS : 2.9, SBFS : 2.9 , S/C 2.9

* 적용 골재밀도 - S : 2.59, G : 2.61

(2) 대용량 Rotary Kiln Pilot Mock-up 실험

Table 3.3.100과 Table 3.101은 대용량 Rotary Kiln Pilot에서 생산된 SBFS를 혼입한 콘크리트 Mock-up시험의 계획 및 배합사항을 각각 나타낸 것으로서, GBFS를 30% 치환한 동일규격으로 생산하여 물성 및 강도 발현상태를 비교하고자 하였다.

여기서, SBFS의 혼입량은 이전 실험과 동일한 조건으로 시멘트 대비 GBFS 23%와 SM(Smart Material) 7%를 합한 치환율 30%로 하여 GBFS와 SM의 비율을 76% : 24%의 질량비로 계산하여 혼합할 것이다.

한편, Mock-up 부재는 벽체로 제작하였으며 부재에 타설 전 굳지 않은 콘크리트에서는 슬럼프, 공기량 시험을 실시하고자 하였다. 또한, 경화 콘크리트에서는 재령별 압축강도 시험을 실시하고자 하였다.

Table 3.3.100 Rotary Kiln Pilot 실험 계획

규격	구분	GBFS 치환율(%)	SBFS 치환율[1](%)	실험항목	비고
25-27-150	GBFS30	30.0	-	◎ 슬럼프 및 공기량 ◎ 압축강도 - 1, 3, 7, 28day	
	SBFS30	-	30.0		

주 1) SBFS의 GBFS와 SM의 비율은 질량비로 76 % : 24 % 혼합

Table 3.3.101 Rotary Kiln Pilot 실험 배합사항

구분	W/C (%)	S/a (%)	단위재료량(kg/m^3)						AD (%)	비고
			W	C	GBFS	SBFS	S	G		
GBFS30	45.9	47.8	169	258	110	0	841	925	0.9	
SBFS30				258	0	110	841	925	0.9	

* 적용 분체비중 - C : 3.15, GBFS : 2.9, SBFS : 2.9

* 적용 골재밀도 - S : 2.59, G : 2.61

다. SBFS 혼입 콘크리트의 실용성 및 내구성 평가

(1) SBFS 혼입 콘크리트의 내구성 평가

(가) 실험방법

본 실험에서 실시한 콘크리트 실험 각 항목의 방법 및 내용은 Table 3.3.102에 나타내었으며, 본 실험의 전경은 Fig. 3.7.1과 Mock-up 부재의 형상은 3.7.2에 나타낸 바와 같다. 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 시험은 KS F 2402 “콘크리트의 슬럼프 시험방법”에 준하여 실시하여 (150±25)mm 범위를 만족시키고자 하였으며, 범위를 만족시키기 위하여 화학혼화제의 사용량을 조정하도록 할 것이다. 공기량 시험은 KS F 2421 “압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험방법”에 따라 실시하여 (4.5±1.5)% 범위를 만족시키고자 하였다.

경화 콘크리트의 건조수축 길이변화 시험은 KS F 2424 “모르타르 및 콘크리트의 길이변화 시험방법”에 준하여 재령 91일까지 측정하고자 하였다. 소성수축균열 시험은 ASTM C 1581의 기준에 준하여 생산된 판상-링형 몰드를 사용할 것이며, 초기에 발생하는 수축균열을 확인하고자 (40±2)℃의 온도조건에서 1~2일 동안 강제 양생을 시켜 최대 폭 및 총 길이를 Crack게이지로 측정하여 비교하였다.

또한, 탄산화 촉진 시험은 KS F 2584 “콘크리트의 촉진 탄산화 시험방법”에 의거하여 제작된 시험체를 온도 (20±2)℃, 습도 (60±5)%, CO_2 발생량 (5.0±0.5)%의 환경조건에서 촉진시켜 1, 2, 4, 8, 12주에 측정하고자 하였다.

단열온도상승 시험은 Fig. 3.7.1에 나타낸 바와 같이 부재 내부에 단열성이 우수한 스티로폼을 부착하여 콘크리트의 내부 온도를 T-type 센서로 측정할 것이며, 최고온도 및 최고온도 도달시간을 확인하였으며, 압축강도의 발현성능을 파악하기 위하여 KS F 2403 “콘크리트 강도시험용 공시체 제작방법”에 준하여 (∅100×200)mm의 시험체를 제작한 후 KS F 2405 “콘크리트 압축강도 시험방법”에 따라 UTM(Universal Testing Machine)을 이용하여 재령 1, 3, 7, 28일에 측정하고자 한다.

Table 3.3.102 Mock-up 실험 방법 및 내용

실험구분	실험기준	실험 목표	측정일	비고
슬럼프	KS F 2402	(150±25) mm	-	굳지않은 콘크리트
공기량	KS F 2421	(4.5±1.5) %	-	
건조수축 길이변화 시험	KS F 2424	-	12 Week	경화 콘크리트
소성수축균열 시험	ASTM C 1581	-	0 ~ 1 day	
탄산화 촉진 시험	KS F 2584	-	1, 2, 4, 8, 12Week	
단열온도상승 시험	-	-	0 ~ 10 day	
압축강도	KS F 2403	재령 1, 3일 OPC 100% 배합 대비 100% 이상	1, 3, 7, 28 day	
	KS F 2405			



(a) 슬럼프 및 공기량 시험



(b) 건조수축 길이변화시험



(c) 소성수축균열 시험



(d) 탄산화 촉진 시험



(e) 단열온도상승 시험



(f) 압축강도 시험

Fig. 3.3.65 Mock-up 실험 및 내구성 실험 전경 사진

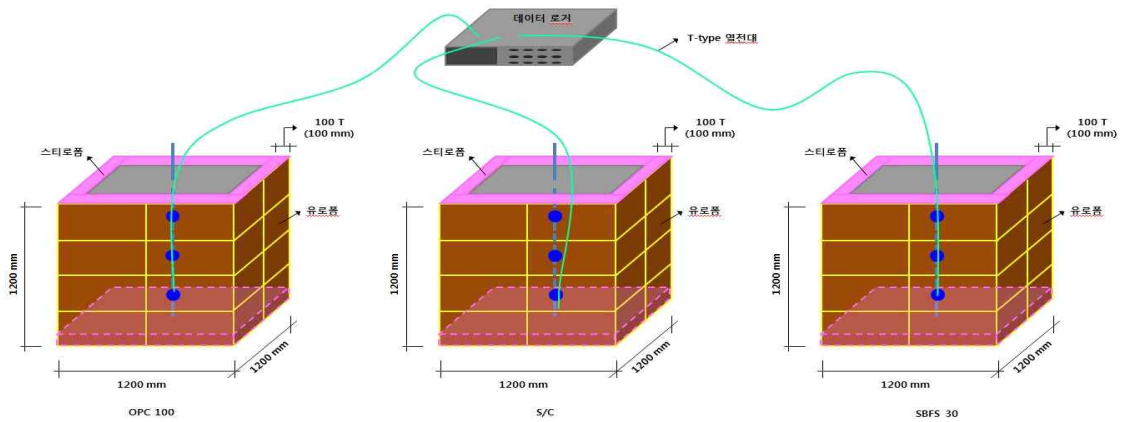
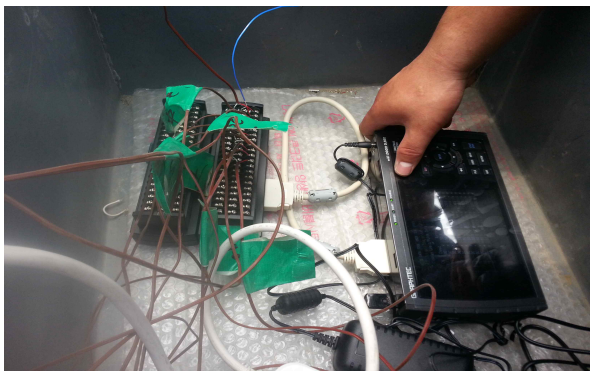




Fig. 3.3.66 Mock-up 부재 형상 및 부재



1. 수화열 측정기



2. Mock-up 내부



3. SBFS 원소소재



4. 콘크리트 타설



5. 물성시험



6. Mock-up 상부마감



7. 내구성검토 공시체 제작완료



8. Mock-up 전경사진

(나) 실험결과

① 굳지 않은 콘크리트

Table 3.3.103과 Fig. 3.3.67은 SBFS 혼입 콘크리트 Mock-up 실험의 굳지 않은 콘크리트 실험 결과를 나타낸 것이다. 슬럼프는 이전 실험의 결과를 토대로 화학혼화제의 사용량을 (0.85~0.90)% 범위로 조절하여 목표 슬럼프 (150±25)mm를 모두 만족시킬 수 있었다. 이는, GBFS 및 SBFS의 표면성상과 비표면적, 시멘트와의 비중 차에 따른 여러 요인이 슬럼프 값에 영향을 미친 것으로 판단된다. 특히, GBFS 및 SBFS의 표면이 시멘트 입자 표면에 비해서 치밀하고, 유동성 증가에 유리한 형상이므로 페이스트와 골재계면의 마찰이 작아짐에 따른 것으로 사료된다. 또한, 공기량은 (4.0~5.5)% 범위를 나타내며, 목표 공기량 (4.5±1.5)%를 만족하였다.

Table 3.3.103 굳지 않은 콘크리트 실험결과

구분	OPC100	S/C	SBFS30
슬럼프(mm)	170	170	160
공기량(%)	5.5	4.5	4.0
혼화제첨가량(%)	0.90	0.85	0.85
비고			

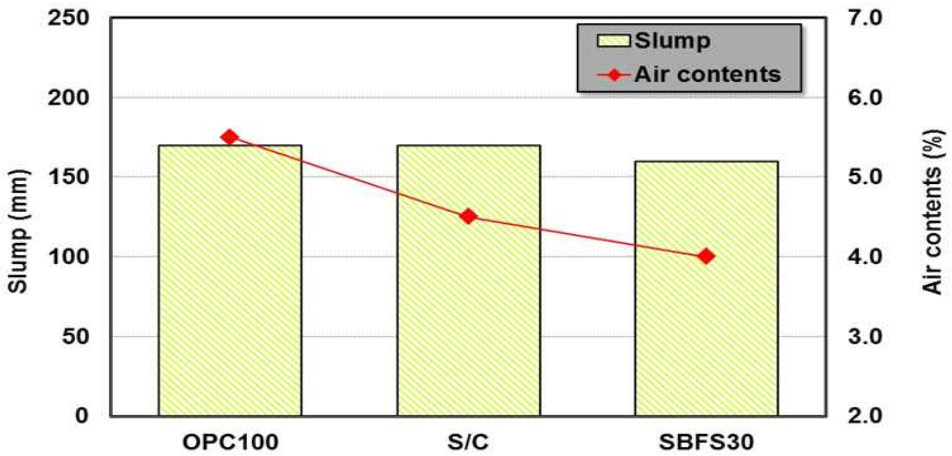


Fig. 3.3.67 슬럼프 및 공기량 시험결과

② 경화 콘크리트

㉮ 단열온도 상승시험

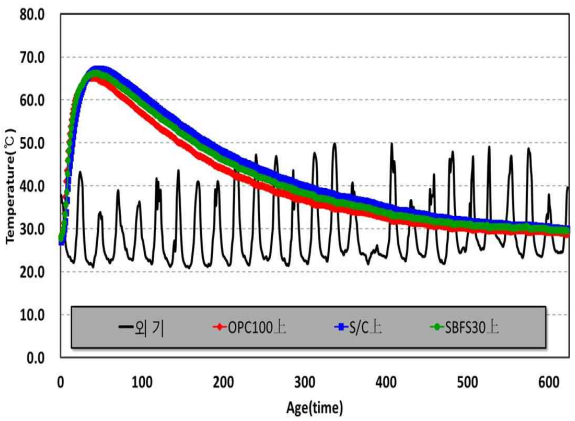
Table 3.3.104은 Mock-up 부재를 통하여 배합 종류 및 측정구간별의 최고온도와 최고온도 도달시간이며, Fig. 3.3.68는 측정구간별 단열온도상승시험의 결과를 나타내었다. 배합의 종류와 관계없이 각 배합의 측정 구간에 따른 약간의 차이를 보이며, OPC100은 30~39시간에 (64.0~65.6)℃, S/C는 43~48시간에 (64.9~67.2)℃를 나타내었다.

또한, SBFS30은 구간별 가장 적은 차이를 보이며, 38~40시간에 (65.4~67.0)℃를 나타내었다. 중심부 온도만을 통해 비교를 하면, OPC100은 S/C 보다 13시간, SBFS30보다는 3시간 빠르게 최고온도를 나타내었으며, 이는, 기존 문헌과 유사한 결과로 GBFS가 혼입됨에 따라 수화반응이 늦어지는 것으로 판단된다.

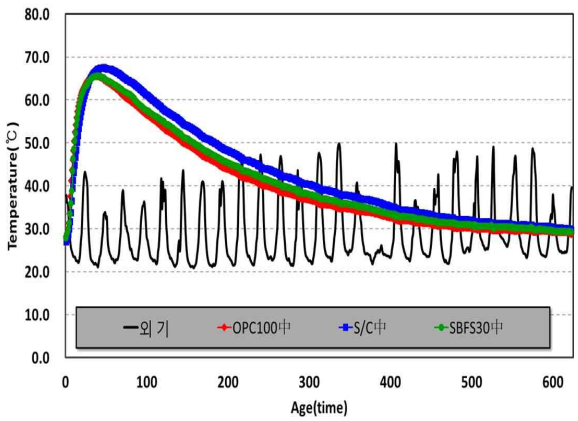
한편, SBFS30은 S/C보다 약 10시간 빠르게 최고온도를 나타내었는데 이는, SBFS 내 포함되어있는 원천소재(SM)가 GBFS의 반응성을 활성화시킴으로서 나타낸 결과라 사료된다.

Table 3.3.104 측정구간별 최고온도 및 도달시간

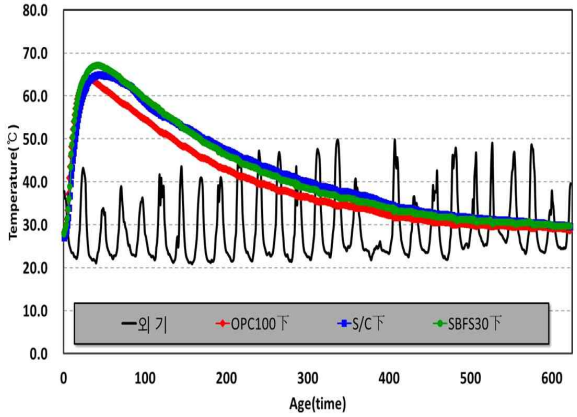
구분		최고온도 (℃)	최고온도 도달시간 (hour)	비고
OPC100	上	65.2	39	
	中	65.6	35	
	下	64.0	30	
S/C	上	67.2	44	
	中	67.5	48	
	下	64.9	43	
SBFS30	上	66.1	40	
	中	65.4	38	
	下	67.0	40	



(a) 상부 측정



(b) 중심부 측정



(c) 하부 측정

Fig. 3.3.68 구간별 단열온도상승 시험결과(Mock-up부재)

㉰ 압축강도 시험

Table 3.3.105 및 Fig. 3.3.69는 압축강도 시험의 결과를 나타낸 것으로서, 단열온도상승시험의 결과와 비추어 볼 때 기존 문헌과 약간 상이한 결과를 나타내었다. 재령에 관계없이 SBFS30은 OPC 100% 및 S/C 대비 100% 이상의 강도 발현을 나타내며, 우수한 강도 발현을 나타내었다.

특히, 초기재령 1, 3일에 있어 본 연구의 목표인 OPC100, S/C 대비 100% 이상을 나타내어 SBFS를 사용한 배합을 건축현장 적용한다면, 공기단축 및 원가절감을 통해 경제성 확보를 할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 재령 28일의 S/C 강도를 확인하였을 때, OPC 100% 사용 콘크리트보다 상회하는 결과를 나타내어 GBFS가 혼입된 S/C와 SBFS30은 더 나아가 장기재령에서 우수할 것으로 판단된다.

한편, 배합의 종류와 관계없이 설계기준강도 27MPa를 (79~85)%의 범위로 밖에 만족하지 못하였다. 따라서 본 연구에서 도출된 규격별 W/B에 있어 적절한 수준으로 낮추는 방안 등이 필요할 것으로 사료된다.

Table 3.3.105 Mock-up 압축강도 시험결과 (몰드)

No	재령별 측정값							
	1일		3일		7일		28일	
	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)
OPC100	5.91	100	11.1	100	16.5	100	21.4	100
S/C	4.85	82.1	9.4	84.7	15.7	95.2	22.1	103.3
SBFS30	6.18	104.6	11.9	107.2	16.6	100.6	22.9	103.6

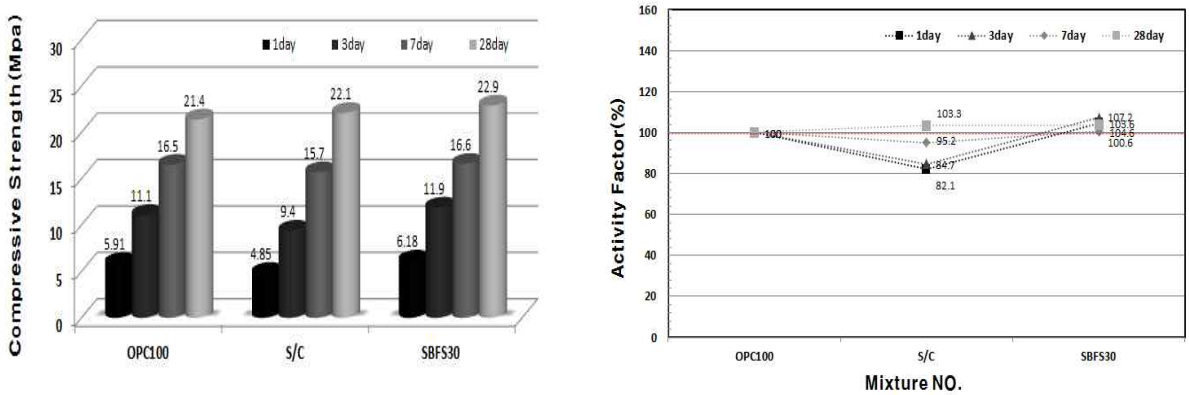


Fig. 3.3.69 재령별 압축강도 및 활성도지수 (1일, 3일, 7일, 28일)

㈐ 코어 샘플 압축강도 시험

Mock-up 부재의 코어채취는 Fig. 3.3.70과 같이 실시하였으며, Table 3.7.9 및 Fig. 3.3.71은 Mock 부재의 코어 시험체 압축강도 시험의 결과를 나타낸 것으로서, 초기재령 1일에는 모든 배합의 코어채취가 불가하여 재령 3일부터의 측정이 가능하였다.

시험결과, 일반 공시체를 사용한 압축강도 시험결과와는 약간의 강도 차이가 있었지만, 각 배합별 강도발현 특성은 유사하게 나타났다. 특히, 초기재령 3일에 있어 본 연구의 목표인 OPC100, S/C 대비 100% 이상을 나타내며, 우수한 초기재령 압축강도를 나타내었으며, 장기강도에서도 우수한 강도 발현을 나타내었다.



Fig. 3.3.70 Mock-up 부재 코어채취 전경

Table 3.106 Mock-up 압축강도 시험결과 (코어)

No	재령별 측정값							
	1일		3일		7일		28일	
	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)	압축강도 (MPa)	활성도 지수 (%)
OPC100	측정불가	-	12.3	100	16.5	100	22.9	100
S/C	측정불가	-	11.0	89.4	15.7	95.2	23.5	102.6
SBFS30	측정불가	-	12.9	104.9	16.6	100.6	25.1	106.8

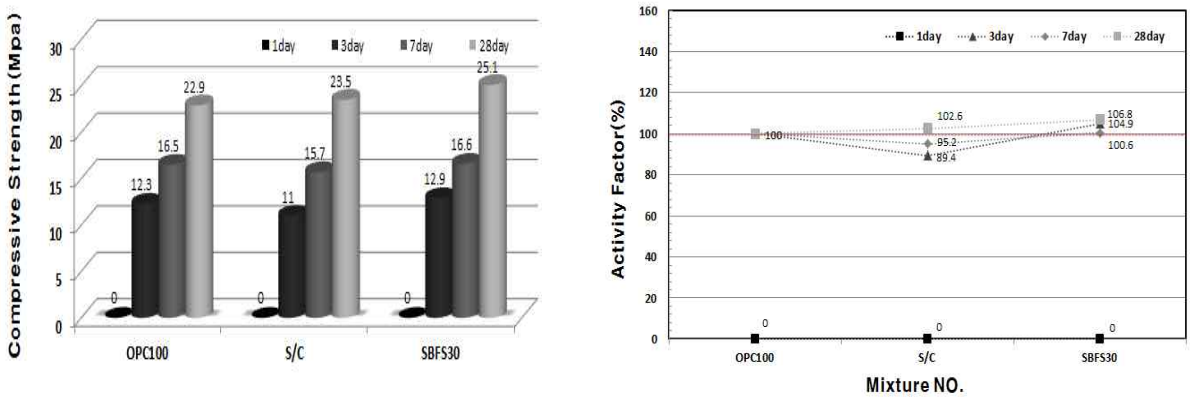


Fig. 3.3.71 재령별 Mock-up 부재의 압축강도 및 활성도지수(1일, 3일, 7일, 28일)

㉮ 소성수축균열 시험

소성수축균열 시험의 결과의 균열 총 길이와 최대균열 폭은 Table 3.3107과 Fig. 3.3.72에 나타내었으며, Fig. 3.3.73은 측정 결과의 사진이다.

OPC100, S/C, SBFS30의 균열 총 길이는 각각 259.7mm, 145.3mm, 138.8mm이며, 최대 균열 폭은 0.08mm로 동일하게 측정되었다. 여기서, 균열의 폭은 차이가 없지만, 균열의 총 길이로 확인한 결과, OPC100은 가혹한 환경조건에서 증발이 가장 높게 나타난 것으로 사료된다. 한편, GBFS가 혼입된 S/C와 SBFS30은 균열이 적게 나타나는 것을 확인하였다. 특히, SBFS30은 SM이 혼입됨에 따라 빠른 수화 반응을 나타내어 수분의 증발이 적게 나타난 것이라 사료된다. 따라서 SM을 포함한 SBFS를 혼입함에 따라 초기에 발생하는 소성수축 균열 발생을 억제할 수 있는 것으로 판단된다. 하지만, 추후 지속적인 확인을 위한 시험이 진행되어야 한다고 사료된다.

Table 3.3.107 소성수축균열의 총 길이 및 최대균열 폭

구분	균열 총 길이(mm)	최대균열 폭(mm)	비고
OPC100	259.7	0.08	
S/C	145.3	0.08	
SBFS30	138.8	0.08	

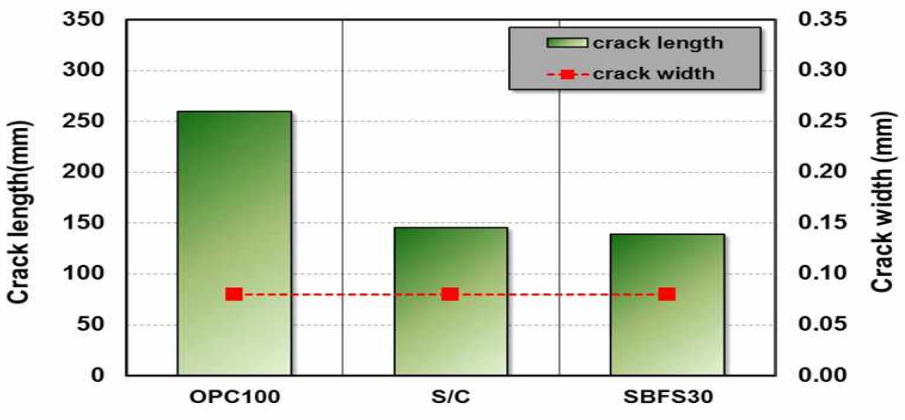


Fig. 3.3.72 소성수축균열 시험결과



(a) OPC100 (b) S/C (c) SBFS30

Fig. 3.3.73소성수축균열 시험 전경

㈐ 건조수축 길이변화 시험

Fig. 3.3.74는 수축특성을 알아보기 위하여 부착형 스트레인 게이지를 사용하여 재령 2,184시간(약 91일)까지의 건조수축 길이변화 시험결과를 나타낸 것이다. 건조수축 길이변화 시험결과, 최대 수축율이 약 (-869×10^{-6})로 OPC100이 가장 큰 수축율이 나타났으며, GBFS가 혼입된 S/C는 최대 수축율이 약 (-825×10^{-6})으로 나타났고, 가장 적은 최대 수축율을 보인 SBFS30은 약 (-802×10^{-6})을 나타내었다.

여기서, GBFS를 혼입함에 수축이 OPC100보다 감소하는 것을 확인하였으며, 이러한 결과는, GBFS와 OPC의 비표면적 및 표면형상에 따른 차이로 GBFS를 혼입함에 수축율을 감소시

킬 수 있을 것으로 사료된다. 또한, SM이 포함된 SBFS30은 초기에 급격한 수축을 나타냈지만, 재령이 지남에 따라 수축율이 감소하는 것으로 확인하였을 때, 수축을 감소시키는데 있어 영향을 받은 것이라 사료된다. 하지만, 배합에 관계없이 수축이 심한 것으로 보여 수축에 있어 추가적인 재료를 사용해야 할 것으로 판단된다.

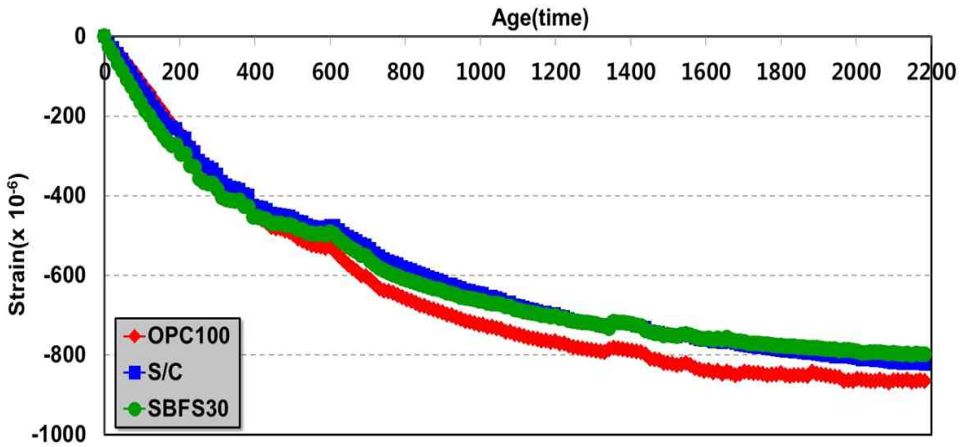


Fig. 3.3.74 건조수축 길이변화 시험결과

㈅ 탄산화 촉진시험

Table 3.3.108 및 Fig. 3.3.75은 재령에 따른 탄산화 침투 깊이의 결과를 나타낸 것이며, Fig. 3.7.12는 측정 시험체의 사진이다.

배합의 종류와 관계없이 재령이 경과함에 따라 탄산화 침투 깊이는 깊어지는 것을 확인 하였다. OPC100은 1주에 10.86mm를 시작으로 12주째는 26.14mm로 가장 높은 침투 결과를 나타내었다. S/C의 탄산화 침투깊이는 재령 1, 2주까지 SBFS30보다 약간 낮게 나타났지만, 재령이 지남에 따라 재령 4주부터는 SBFS30이 가장 적은 침투 깊이를 나타내며, OPC100 및 S/C보다 우수한 탄산화저항성을 나타내었다.

여기서, S/C 및 SBFS30과 같이 BFS를 혼입함에 탄산화 침투의 깊이는 감소하였고, SBFS30은 빠른 시간의 경화로 미세공극이 채워짐에 탄산화 저항성을 나타내는 것으로 사료된다.

Table 3.3.108 탄산화 촉진시험 깊이 결과

구분	탄산화 침투 깊이(mm)					비고
	1주	2주	4주	8주	12주	
OPC100	10.86	18.09	21.14	22.37	26.14	
S/C	8.68	17.21	19.62	21.28	25.49	
SBFS30	9.01	17.25	19.25	21.16	23.84	

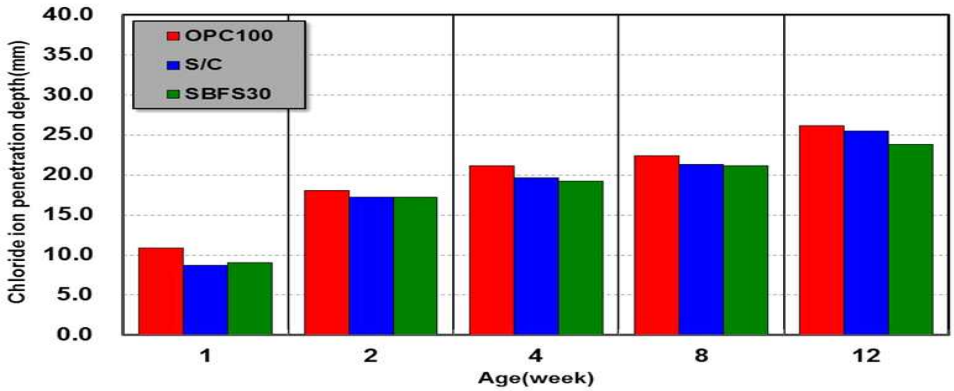


Fig. 3.3.75 탄산화 촉진시험 결과

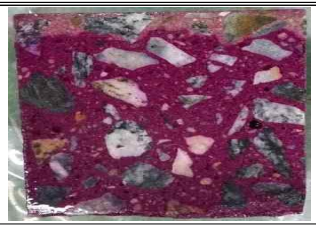
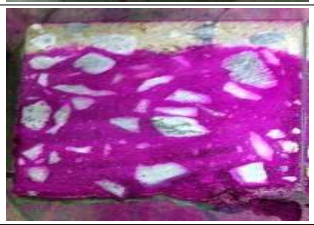
구분	OPC100	S/C	SBFS30
1주			
2주			
4주			
8주			
12주			

Fig. 3.3.76 탄산화 촉진시험 측정사진

◈ 첨　부 1- 단열온도상승시험 측정결과

측정일 (hour)	측정결과(℃)										비고
	외기	OPC100			S/C			SBFS30			
		上	中	下	上	中	下	上	中	下	
0	37.8	28.2	28.3	28.2	27.0	27.0	26.9	27.6	27.7	27.7	
1	36.1	28.8	28.9	28.8	27.5	27.5	27.5	28.5	28.5	28.6	
2	35.8	29.8	29.9	29.9	28.1	28.1	28.1	29.0	29.1	29.2	
3	32.4	31.2	31.3	31.2	28.8	28.7	28.7	29.8	29.8	29.9	
4	29.4	33.4	33.5	33.3	29.9	29.9	29.9	31.3	31.3	31.4	
5	26.8	37.3	37.5	37.1	31.6	31.6	31.6	33.2	33.3	33.5	
6	25.4	41.0	41.1	40.9	33.7	33.7	33.8	35.6	35.8	35.9	
7	24.7	43.5	43.6	43.5	36.6	36.5	36.7	38.4	38.7	38.8	
8	24.0	45.8	46.0	45.9	39.4	39.4	39.6	42.7	43.3	43.4	
9	23.5	48.0	48.2	48.2	41.3	41.3	41.5	45.8	46.2	46.3	
10	23.5	50.1	50.4	50.3	43.1	43.1	43.2	48.0	48.4	48.5	
11	23.3	52.0	52.4	52.2	44.8	44.8	45.0	49.9	50.4	50.4	
12	22.6	53.7	54.2	54.0	46.5	46.6	46.7	51.7	52.2	52.2	
13	22.6	55.3	55.8	55.6	48.2	48.3	48.4	53.4	54.0	54.1	
14	22.4	56.7	57.2	57.0	49.9	50.1	50.1	54.9	55.5	55.6	
15	22.1	57.8	58.4	58.2	51.5	51.7	51.6	56.2	56.8	57.0	
16	22.7	58.8	59.4	59.2	53.0	53.3	53.1	57.4	57.9	58.2	
17	24.1	59.7	60.3	60.0	54.5	54.8	54.5	58.5	59.0	59.3	
18	27.1	60.4	61.0	60.7	55.7	56.1	55.7	59.3	59.8	60.2	
19	29.1	61.0	61.7	61.3	56.9	57.3	56.8	60.2	60.6	61.0	
20	34.4	61.4	62.2	61.7	57.9	58.3	57.7	60.9	61.3	61.8	
21	39.3	61.9	62.6	62.1	58.9	59.3	58.6	61.5	61.8	62.5	
22	42.1	62.3	63.0	62.5	59.8	60.2	59.3	62.1	62.3	63.0	
23	43.2	62.7	63.4	62.8	60.6	61.0	60.0	62.5	62.7	63.4	
24	42.5	63.0	63.8	63.0	61.4	61.8	60.6	63.0	63.1	63.9	
25	41.5	63.3	64.1	63.3	62.0	62.4	61.1	63.3	63.4	64.2	
26	39.8	63.6	64.3	63.4	62.6	63.0	61.6	63.4	63.4	64.3	
27	32.1	63.9	64.6	63.6	63.1	63.5	62.0	63.8	63.8	64.7	
28	27.7	64.1	64.8	63.8	63.6	64.0	62.5	64.1	64.1	65.0	
29	25.2	64.3	65.0	63.9	64.1	64.5	63.0	64.5	64.3	65.4	
30	23.2	64.5	65.2	**64.0**	64.5	65.0	63.3	64.7	64.6	65.7	
31	22.7	64.7	65.3	63.9	64.9	65.3	63.6	65.0	64.8	65.9	
32	22.4	64.8	65.4	63.9	65.2	65.7	63.8	65.2	65.0	66.2	
33	22.2	64.9	65.5	63.9	65.5	66.0	63.9	65.4	65.1	66.3	
34	21.8	65.0	65.5	63.7	65.8	66.2	64.1	65.5	65.2	66.5	
35	21.8	65.1	**65.6**	63.6	66.0	66.4	64.2	65.7	65.3	66.6	
36	22.0	65.1	65.6	63.5	66.3	66.6	64.4	65.8	65.3	66.7	
37	21.7	65.1	65.6	63.4	66.4	66.8	64.5	65.9	65.3	66.8	
38	21.6	65.1	65.5	63.2	66.6	67.0	64.6	65.9	**65.4**	66.9	
39	21.1	**65.2**	65.5	63.1	66.7	67.1	64.7	66.0	65.4	66.9	
40	22.2	65.1	65.4	62.9	66.9	67.2	64.8	**66.1**	65.4	**67.0**	
41	23.4	65.1	65.3	62.7	67.0	67.3	64.8	66.1	65.4	67.0	

중략

◈ 첨 부 2- 건조수축 길이변화시험 측정결과

측정일 (hour)	측정결과($\times 10^{-6}$)			비고
	OPC100	S/C	SBFS30	
0	0	0	0	
6	-11	-13	-16	
12	-19	-21	-27	
18	-25	-27	-39	
24	-28	-30	-46	
30	-33	-35	-56	
36	-42	-44	-69	
42	-49	-53	-79	
48	-54	-58	-88	
54	-60	-68	-99	
60	-68	-76	-109	
66	-75	-84	-119	
72	-81	-91	-128	
78	-89	-99	-138	
84	-97	-109	-148	
90	-105	-118	-159	
96	-113	-125	-167	
102	-121	-133	-176	
108	-129	-142	-186	
114	-136	-151	-195	
120	-142	-157	-200	
126	-152	-168	-211	
132	-160	-176	-221	
138	-168	-184	-227	
144	-176	-190	-235	
150	-183	-198	-242	
156	-192	-207	-251	
162	-199	-214	-258	
168	-207	-221	-264	
174	-210	-225	-268	
180	-219	-229	-274	
186	-232	-237	-273	
192	-236	-233	-273	
198	-233	-240	-285	
204	-246	-252	-295	
210	-260	-259	-295	
216	-263	-256	-296	
222	-265	-263	-312	
228	-279	-280	-326	
234	-298	-287	-325	
240	-304	-290	-329	

중 략

(2) 대용량 생산(Rotary kiln)에 의한 원천소재 소성

(가) Rotary kiln 소성개요

실험용 Rotary kiln는 실제 시멘트회사에서 사용하고 있는 킬른을 축소한 Pilot로서 각종 무기질 원료물질을 고온에서 열처리 하여 배출가스 성분 등을 실시간으로 모니터랑 할 수 있고, 원료 및 사용연료 형태별 열처리 시험을 할 수 있는 열처리 소성시스템으로 에너지 저감형 특수시멘트 클링커 소성, 각종 무기질폐기물을 활용한 2차 제품 제조, 소성시스템에서의 온실가스 저감 모니터링 시험, 소성과정에서 발생되는 온실가수 활용가능성 사전검토 연구, 기타 소성에 필요한 시제품 생산 등을 목적으로 구축하였으며, 열처리(소성)공정을 통해 제품을 생산하는 제조회사의 온실가스 발생 모니터링 및 이를 통한 온실가스 저감·활용을 위한 기업 및 시멘트 부분에서 저온소성용 특수시멘트 시제품 제조, 무기질 폐기물을 활용한 각종 세라믹 2차 제품 생산 기술개발을 희망하는 국내 시멘트 기업 및 생석회 제조업체 등 다수의 업체에서 활용 되고 있다.

(나) 실험계획

당사에 제공하는 원천소재(티탄석고, 정수오니, 석회석)를 비율별 혼합 후 건조 단계를 통한 powder 약 1ton 제공하였으며, 한국석회석신소재연구소는 전기로 시험테스트, 열처리 소성을 통한 원천소재 클링커 제조 및 생산시점별 화학분석결과를 도출하기로 하였다.

(다) 실험방법

① 활용장비



Fig. 3.3.77 한국석회석신소재연구소 시험생산용 rotary kiln

◎ 주요사양

* 소성시설 : Rotary Kiln (길이 15M, ∅ 750mm)
* 생산량 : 100kg/hr(±50Kg)(최대 3.5ton/day)

* 최대온도 : 1,450℃
* 목표온도 : 850±50℃
* Heating Type : 버너 타입(직접가열 방식)
* 사용원료 : 석회석, 백운석 등 광물질, 시멘트(Pellet type), 각종 세라믹 원료물질의 열처리, 무기질 폐기물의 열처리
* 원료 및 연료형태(무정형, 구형, 봉상 등)
* 연료 : LPG, 경유 등
* Kiln 가동시간 : 연속식으로 최소 8시간 이상 (24시간이상 연속운전이 가능)
* Kiln slope : 3%기준
* 로 회전RPM : 인버터 장착으로 조정가능 0~3.5RPM
* 설비 및 최종 배출 가스는 환경관련 규정을 만족

(라) 실험결과

① 원천소재 클링커 시험생산 전기로 예비실험

전기로 소성(800℃, 850℃, 900℃)을 통하여 예비실험 결과 원료의 전기로 소성을 통한 $CaSO_4$ 생성량은 Fig. 3.7.14와 같이 원료를 각각의 온도별로 소성하여 $CaSO_4$ 69.1~75.1% 생성되었으며, 평균 약 72% 내외의 $CaSO_4$ 생성을 확인할 수 있었으며 또한 Table 3.7.12와 같이 강열감량 검토 결과 각각의 온도별로 소성한 결과 30.7%, 34.2%, 38.0%의 감량 발생된 것으로 확인되었다. (시멘트 생산 시 평균 35~37% 강열감량)

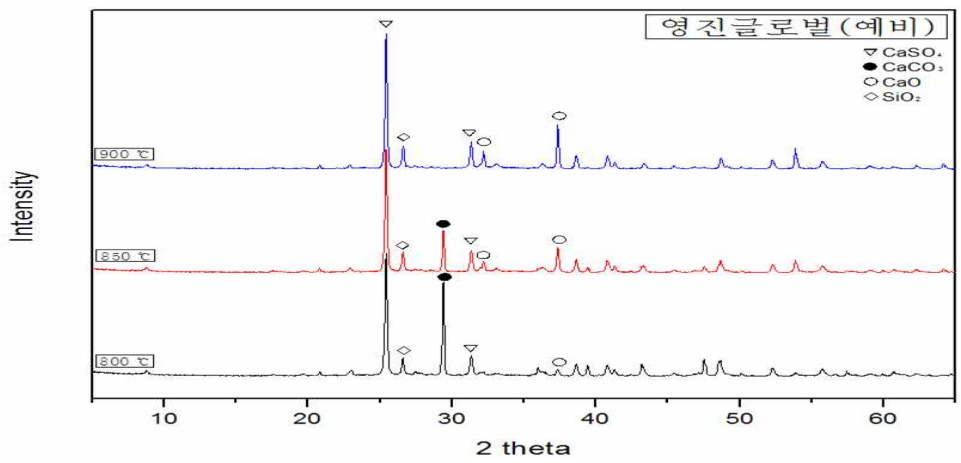


Fig. 3.3.78 전기로 소성 XRD분석

Table 3.3.109 전기로 소성 후 강열감량

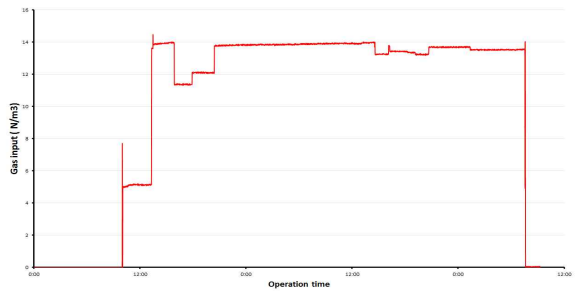
	소성 전 시료무게	소성 후 시료무게	강열감량(%)
1(800℃)	50.2	34.8	30.7
2(850℃)	50.3	33.1	34.2
3(900℃)	50.3	31.2	38.0

② Rotary Kiln 예열 및 시험투입

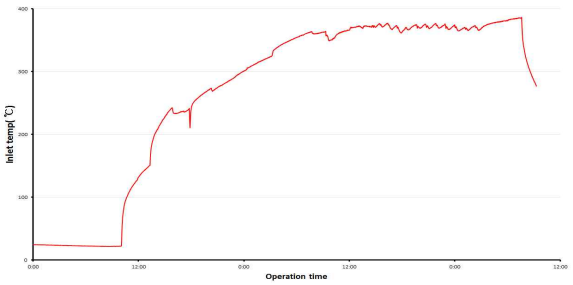
Pilot 시작품 생산 시 적용된 최대 800~900℃ 내외로 예열단계에서는 500℃까지는 급속 승온을 목표온도까지는 시간당 30℃ 가량 증가하도록 계획하여 운전을 실시하였으며 목표온도 도달시점부터는 Table 3.3.110과 같이 과량의 연소공기를 투입하여 로내 온도상승을 억제하였다.

Table 3.3.110 소성로 운전 및 수행내역

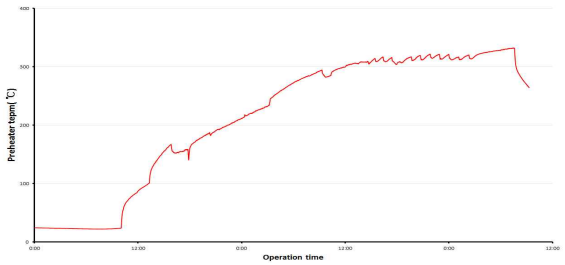
운전항목			수행내역
분류	CODE	측정방법	
Gas Input (℃)	KFI_05	자동제어벨브 계측	· LPG 5 ㎥/hr : 3 hr (건조) · LPG 12 ㎥/hr : 7 hr (예열, 급속승온) · LPG 13.8 ㎥/hr : 16 hr (로내 온도조건 확보 및 시험투입) · LPG 13.3 ㎥/hr : 18 hr (양산조건 확보 원료 투입)



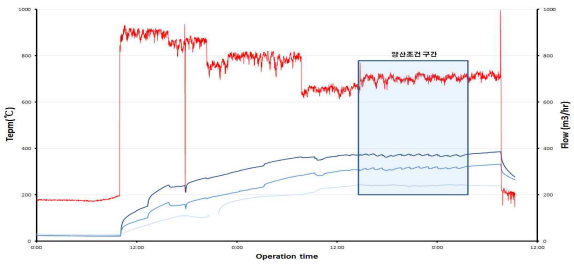
1. 운전시간별 투입연료량



2. 킬른내 연소공기의 온도변화량(Inlet)



3. 킬른 내 연소공기의 온도변화량(Preheater)



4. 종합 운전표

Fig. 3.3.79 소성로 온도별 추이도

③ 공정부분 모니터링 포인트

항목			운영특징
분류	CODE	측정위치	
Temp (℃)	TEMP#03	Cyclone	· 예열기와 사이클론 배관에서 측정 · Center Line 배관(분상용)이 닫힌 경우 온도오차 발생
	TEMP#04	Inlet	· 예열기 하단부와 Kiln 연결부 상단지점에서 측정 · 원료투입시 순간온도 저하
	TEMP#05~08	Preheater	· 예열기의 4개의 격실의 온도측정
	TEMP#09	Outlet	· 버너 후단에서 측정 · 압력 (+) 조건시 온도상승 (버너존 온도예측가능)
	TEMP#10~12	Cooler	· 쿨러내부 온도 측정 · 2차연소공기 투입용으로 공유 (고온조건시)
	TEMP#13	Bagfilter in	· 백필터 전단의 온도측정 · 고온시 필터 파손제어, 저온시 수분관리 요구
	TEMP#14	Bagfilter out	· 백필터 후단의 온도측정 · 고온시 필터 파손제어, 저온시 수분관리 요구
Pressure (mmH2O)	LPI_01_PV	Outlet	· 버너존 후단에서 압력측정 · 승온조건 및 화염제어
	LPI_02_PV	Inlet	· 킬른 후단에서 압력측정 · 승온조건 및 원료투입시 킬른 내부 모니터링
	LPI_03_PV	Cyclone	· 예열기와 사이클론 배관에서 측정 · 고압력시 분진의 집진기 과다 이송
	LPI_04_PV	bagfilter out	· 백필터 후단 배관에서 압력측정 · 백필터 막힘현상 모니터링 (펄스 충격을 통한 분진제거)
Flow (㎥/hr)	KFL_01_PV	Heat Changer	· 수직형 롤러밀 이송 가스 유량 측정
	KFL_02_PV	bagfilter Out	· 백필터 후단 배관에서 유량측정 · 백필터 막힘현상 모니터링 (펄스 충격을 통한 분진제거)
	KFL_03_PV	Cyclone out	· 사이클론과 열교환기 배관에서 유량측정 · Kiln 내부 압력관리와 연계운영
	KFL_04_PV	Cooler FAN	· 쿨러내부 냉각공기 배관에서 유량 측정 · 2차 연소공기 공급량 제어와 연동
	KFL_01_PV	GAS (LPG)	· 투입연료 (LPG 또는 경우)의 유량 측정 · LPG 15N㎥/hr 까지 1차 연소공기 비례제어 공급 (LPG 대비 산소비율 1:1.2)

- 원료투입 : 수동투입
- 원료량 : 1,000kg 내외
- 예상 생산량 : 470kg 내외 (탈수에 의한 감소 및 집진과정에서의 손실)
- Kiln 위치별 온도 : 자동측정형 K type 온도계 (Outlet, Inlet)
- Kiln 위치별 압력 : 자동측정형 압력계 (Outlet, Inlet)
- Kiln 위치별 유량 : 자동측정형 유량계 (Cyclone 후단 및 연료투입 유량)
- 예열실 및 사이클론형 분진회수기 온도 : 자동측정형 K type 온도계
  → 해당항목은 시험운전과정에서 현장측정 후 담당자 제공 (전산기록지)

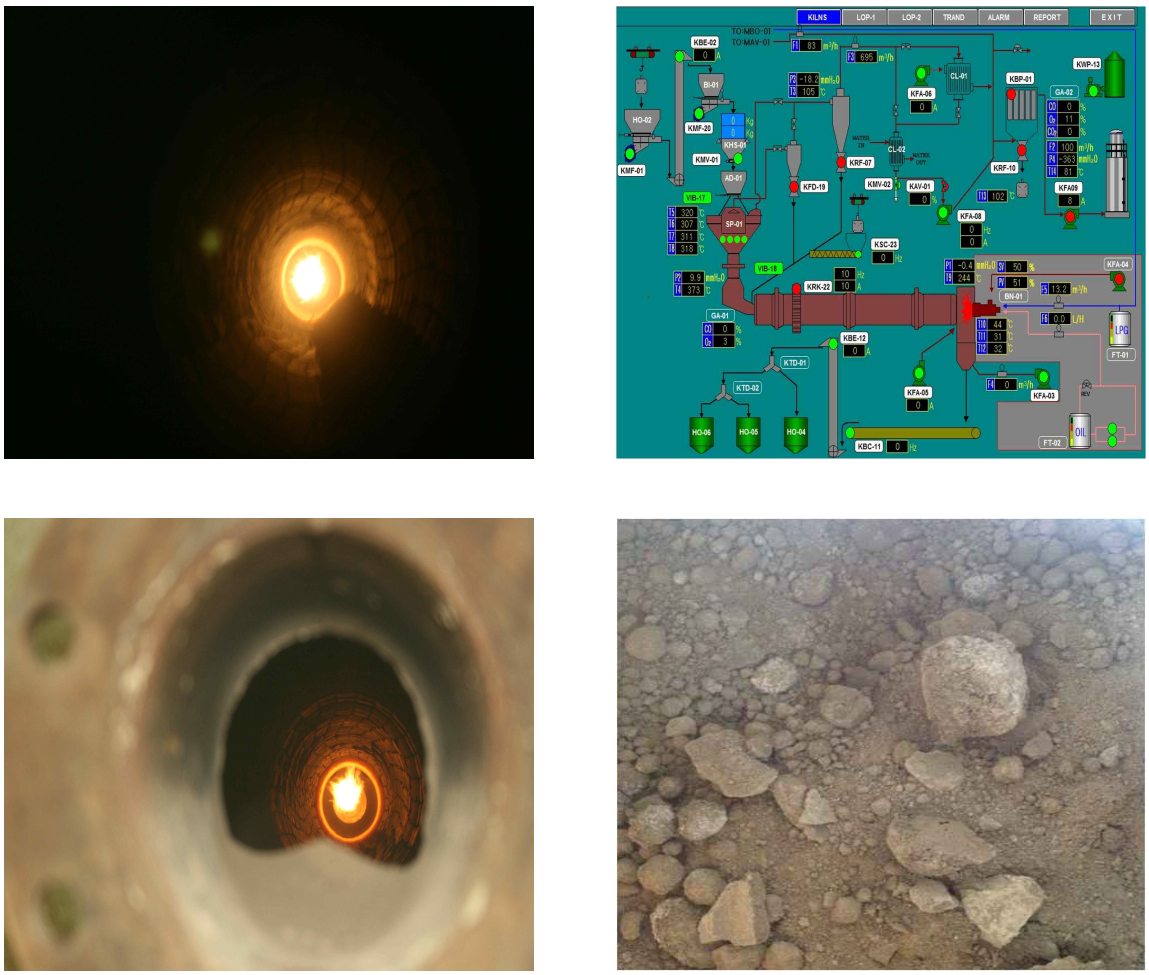


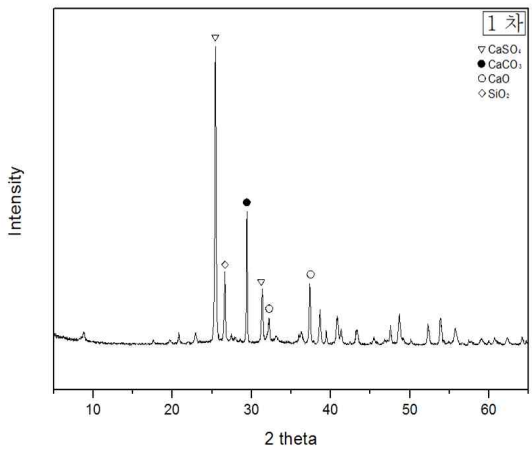
Fig. 3.3.80 양산조건 운영 로내 환경 및 원료성상(Bulk and Powder 형태)

④ Rotary Kiln에서 생산 원천소재 XRD분석

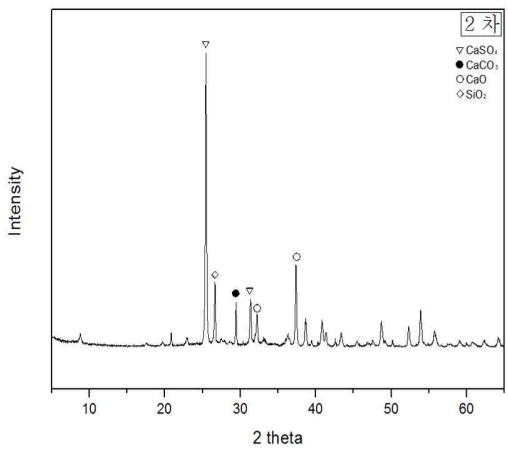
생산 과정 중 클링커 화합물의 생성확인을 위해 연구소 보유 XRD 분석장치를 통해 분석을 실시하여 결과 값은 차수별 Table 3.3.111와 Fig. 3.3.81과 같이 확인되었으며 당사 Pilot 시작품에서 생산 된 원천소와 비교 시 유사하게 $CaSO_4$가 가장 높게 나타난 것을 확인하였다.

Table 3.3.111 Rotary Kiln에서 생산된 원천소재 XRD분석

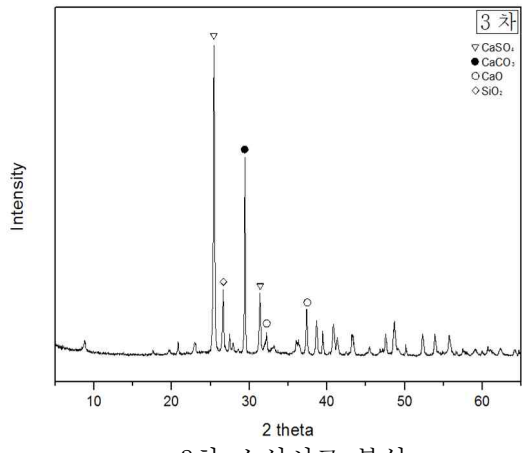
차수	생성물		생성량
1차	Anhydrite	$CaSO_4$	71.4
	Calcite	$CaCO_3$	12.1
	Lime	CaO	6.9
	Quartz	SiO_2	9.7
2차	Anhydrite	$CaSO_4$	75.1
	Calcite	$CaCO_3$	5.1
	Lime	CaO	10.5
	Quartz	SiO_2	9.3
3차	Anhydrite	$CaSO_4$	69.1
	Calcite	$CaCO_3$	16.8
	Lime	CaO	5.2
	Quartz	SiO_2	8.9
4차	Anhydrite	$CaSO_4$	72.7
	Calcite	$CaCO_3$	14.2
	Lime	CaO	6.0
	Quartz	SiO_2	7.1



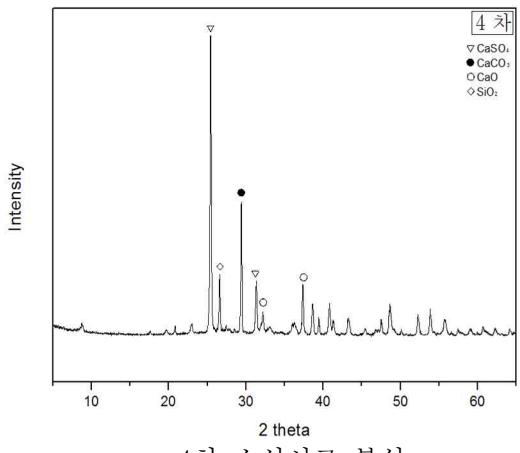
1차 소성시료 분석



2차 소성시료 분석



3차 소성시료 분석



4차 소성시료 분석

Fig. 3.3.81 소성 차수별 XRD

(3) 대용량 Pilot 생산 SBFS 콘크리트 성능검토

(가) 개 요

본 연구는 SBFS를 혼입한 저탄소콘크리트의 초기재령 압축강도 향상기술개발을 위한 연구의 일환으로 현재까지 소량으로 생산한 SBFS를 사용하여 실험을 실시하였다. 이에, 본 실험에서는 Rotary Kiln Pilot에서 생산된 SBFS를 사용하여 Mock-up시험을 실시하였다.
한편, Mock-up시험을 위한 SBFS의 사용은 이전 실험을 통하여 도출 된 30%를 치환하였고, 일반 GBFS를 30% 치환한 배합과 물성 및 강도 발현상태를 비교하였다. 또한, 배합규격은 이전 실험으로 도출 된 배합이 있지만, 레미콘 생산으로는 적당치 않은 관계로 레미콘 공장에서 일반 현장에 타설되는 호칭강도 25-27-150을 사용하여 Fig. 3.7.18과 같이 Mock-up 시험을 실시하였다.

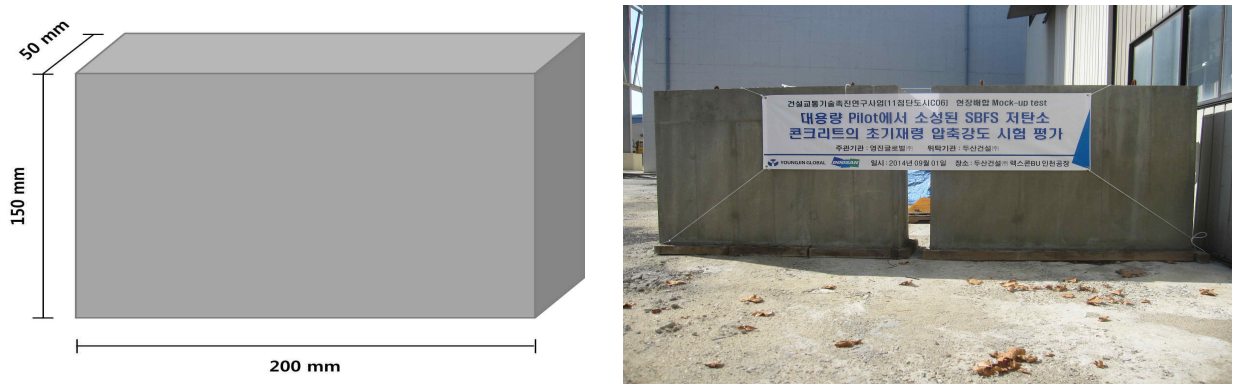


Fig. 3.3.82 Mock-up 부재의 형상 크기 및 실부재

(나) 실험방법

본 실험에서 실시한 콘크리트 실험 각 항목의 방법은 Table 3.3.112 에 나타낸 것으로서, 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 시험은 KS F 2402 “콘크리트의 슬럼프 시험방법”에 준하여 (150±25)mm 범위를 만족시키고자 화학혼화제의 사용량을 조정하였다. 공기량 시험은 KS F 2421 “압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험방법”에 따라 실시하여 (4.5±1.5)% 범위를 만족시키도록 하였다. 경화 콘크리트의 압축강도 발현성능을 파악하기 위하여 KS F 2403 “콘크리트 강도시험용 공시체 제작방법”에 준하여 (∅ 100×200)mm의 시험체를 제작한 후, KS F 2405 “콘크리트 압축강도 시험방법”에 따라 UTM(Universal Testing Machine)을 이용하여 재령 1, 3, 7, 28일에 측정하였다. 또한, 코어채취기를 사용하여 Mock-up 부재에서 Core Sample을 통한 압축강도를 비교하였다. 한편, Fig. 3.3.83는 본 실험의 전경을 나타낸 것이다.

Table 3.3.112 실험 방법

실험구분		실험기준	실험 목표	측정일	비고
굳지 않은 콘크리트	슬럼프	KS F 2402	(150±25)mm	-	
	공기량	KS F 2421	(4.5±1.5)%	-	
경화 콘크리트	압축강도	KS F 2403	재령 1, 3일 OPC 100% 배합 대비 100% 이상	1, 3, 7, 28 day	Core Sampling
		KS F 2405			



(a) 슬럼프 및 공기량시험



(b) 압축강도 시험



(c) Core Sample 강도 시험

Fig. 3.3.83 실험전경

(다) 실험결과

① 굳지 않은 콘크리트

Table 3.3.113과 Fig. 3.3.84는 SBFS 혼입 콘크리트의 Mock-up 시험의 슬럼프 및 공기량 시험결과를 나타낸 것이다. 슬럼프는 이전 시험의 결과를 토대로 0.8%를 두 배합 모두 동일량을 사용하여 GBFS30은 170mm, SBFS30는 165mm로 목표 슬럼프 (150±25)mm를 모두 만족시킬 수 있었다. 또한, 공기량 시험결과는 (3.9~4.1)%의 범위로 목표 공기량 (4.5±1.5)%를 만족하였다.

여기서, 동일량 혼화제를 투입하였을 때, SBFS30은 GBFS30보다 슬럼프 및 공기량이 감소하였다. 하지만, 그 차이는 크지 않고, 강도나 기타 큰 영향을 나타낼 수 있는 차이가 아닌 것으로 사료된다.

한편, 이전 소량으로 생산한 SBFS를 사용한 배합과 유사한 슬럼프 및 공기량 시험 결과를 나타내었기에 비중 및 비표면적 등의 차이는 크지 않은 것으로 사료된다.

Table 3.3.113 굳지 않은 콘크리트 실험결과

구 분	GBFS30	SBFS30
슬럼프(mm)	170	165
공기량(%)	4.1	3.9
혼화제 첨가량(%)	0.8	0.8
비 고		

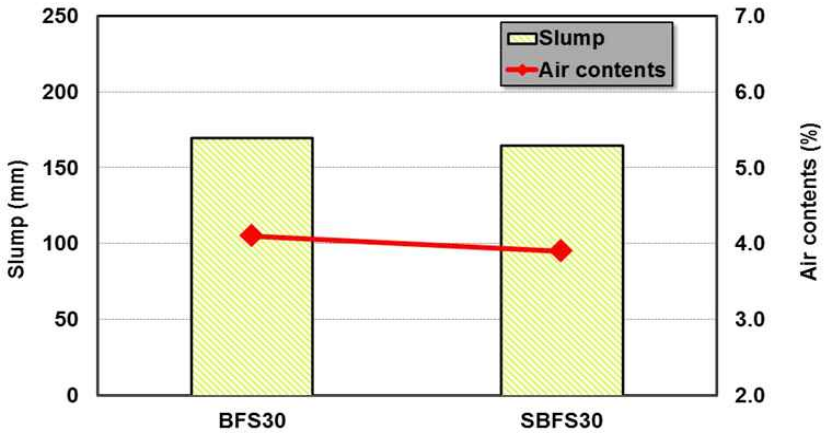


Fig. 3.3.84 굳지 않은 콘크리트 실험결과

② 경화 콘크리트

Table 3.3.114와 Fig. 3.3.85는 압축강도의 실험결과를 나타낸 것으로 GBFS30과 SBFS30은 설정한 설계기준강도를 모두 상회하였다.

초기재령 1일과 3일에는 두 배합 간의 강도발현 상태 차이가 큰 것으로 나타났고, 재령 7일부터 유사해지는 경향을 나타내며, 재령 28일에는 강도 차이가 크게 나타나지 않았다. 이는, 잠재수경성 물질인 GBFS가 초기에 반응이 느림으로 초기강도발현에 영향을 받은 것으로 판단되며, 반면, SM이 포함된 SBFS는 초기의 GBFS반응을 활성화시킴으로 빠른 초기강도발현을 나타낼 수 있는 것이라 사료된다.

한편, 각 배합별 Core Sample은 일반적인 공시체와 유사한 강도를 나타내었다.

Table 3.3.114 압축강도 시험결과

구분	재령(일)				비고
	1	3	7	28	
	압축강도 (MPa)	압축강도 (MPa)	압축강도 (MPa)	압축강도 (MPa)	
GBFS30	3.72	11.7	21.5	33.9	
SBFS30	7.88	18.5	23.8	34.7	
GBFS30 (Core)	3.99	12.1	22.9	36.1	
SBFS30 (Core)	8.00	19.9	24.2	36.2	

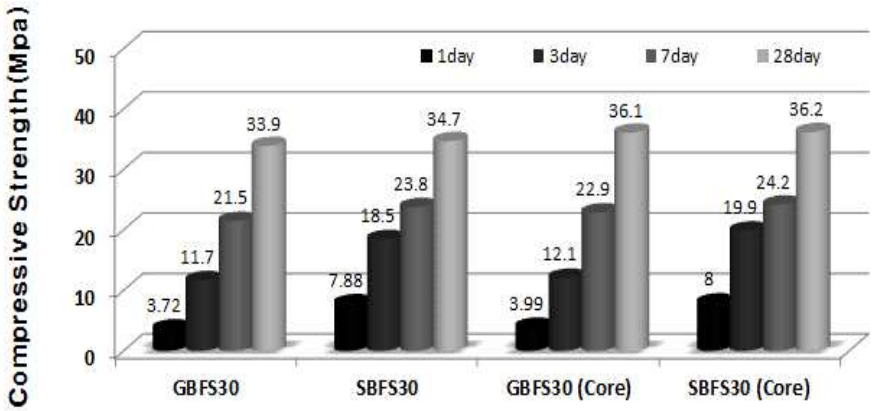


Fig. 3.3.85 압축강도 시험결과 (1일, 3일, 7일, 28일)

라. 소 결

본 연구는 “Smart 고로슬래그미분말을 혼입한 저탄소 콘크리트의 초기재령 압축강도 향상기술개발” 을 위한 연구의 일환으로서, 레미콘 B/P를 통하여 실제 Mock-up test 및 압축강도 및 내구성 실험, 대량 소성을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

◎ SBFS를 혼입한 콘크리트의 B/P 생산에 있어서도 슬럼프 및 공기량을 만족시키기 위한 화학혼화제의 양은 큰 차이를 나타내지 않는다.

◎ OPC100이 가장 빠르게 최고온도를 나타내었으며, SBFS30의 최고온도 도달시간은 S/C보다 10시간 빠르게 나타났다. 이는, SBFS30은 SBFS 내 포함된 SM이 GBFS를 촉진하여 나타난 결과라 사료된다.

◎ 압축강도 시험결과, SBFS30은 재령에 관계없이 OPC100 및 S/C 대비 100%이상의 발현을 나타내었지만, 배합 종류와 관계없이 설계기준강도를 만족하지 못하였기 때문에 B/P 생산에 적절한 W/B를 도출이 필요할 것으로 사료된다.

◎ OPC100, S/C 및 SBFS30의 소성수축균열 최대 폭에 대한 차이는 나타나지 않았지만, 균열 총 길이에 따른 차이를 확인하였을 때, OPC100이 가장 높은 결과를 나타내었고, SBFS30가 가장 적은 균열 상태를 나타내었다.

◎ 건조수축 길이변화 시험결과, 최대 수축율이 약 (-797×10^{-6}))로 OPC100이 가장 큰 수축율이 나타났으며, BFS가 혼입된 S/C와 SBFS30은 최대 수축율이 약 (-733×10^{-6})과 약 (-731×10^{-6})로 유사한 결과를 나타내었다. 한편, SBFS30은 수축율이 OPC100 및 S/C 보다 감소하고 있는 것을 확인하였다.

◎ 탄산화 촉진 시험의 결과는 재령에 관계없이 OPC100가 탄산화의 촉진이 가장 높게 나타났으며, S/C와 SBFS는 재령이 지남에 따라 유사해지는 것을 확인하였으며, 재령 4주후부터 SBFS30이 가장 적은 탄산화 침투깊이를 나타내었다.

◎ 당사 Pilot 시작품에서 생산된 원천소재의 XRD 분석과 (재)한국석회석신소재연구소의 Rotary Kiln에서 생산된 원천소재 XRD 분석결과 $CaSO_4$ 피크점이 모두 높게 나타났으며 다음으로 $CaCO_3$, CaO, SiO_2 순으로 유사한 결과로 확인되었다. 이에 향후 기술이전에 따른 대량생산 가이드라인을 제시할 수 있는 기술적 동기와 잉여 킬른을 이용한 대량 생산 가능성을 확인 하였다.

◎ Rotary Kiln Pilot에서 생산된 SBFS를 혼입하였을 때, 이전 소량으로 생산된 SBFS와의 성능과 유사한 결과를 나타내었으며, GBFS와의 차이는 크지 않게 나타났다.

◎ 배합에 관계없이 설계기준강도를 상회하였다, 또한, SBFS를 혼입함에 있어 GBFS를 혼입한 배합에 비해 초기재령 1, 3일 큰 발현상태를 보이며, 초기재령 강도발현에 있어 SBFS 영향성이 우수함을 확인할 수 있었다.

9. 알칼리성 무기계 자극제를 이용한 SBFS 저탄소 콘크리트의 CO_2 배출량 및 경제성 평가

가. 고로슬래그미분말(GBFS) 전 과정 CO_2 배출 원단위 평가 및 시험

(1) GBFS 원재료 생산단계

(가) 고로슬래그

전 과정평가기법을 고로슬래그의 생산시스템에 적용하여 산업부산물의 재활용처리의 평가기법을 참고하였다. 즉, 부산물형태로 배출된 이후부터의 공정만을 고려하여 생산단계의 탄소배출원단위를 계산하게 된다. 따라서 제철소의 용광로에서 슬래그형태로 배출되어 냉각, 조쇄, 하역의 과정동안 소요되는 에너지원을 조사하여 각 항목에 대한 에너지원의 탄소배출원단위를 적용하여 발생하는 CO_2 배출량을 단계별로 합산하였다. 에너지원의 탄소배출원단위는 국가 LCI DB를 사용하였다.

로슬래그생산단계 O 배출량
(고로슬래그냉각, 조쇄, 하역단계소요에너지 × 탄소배출계수) - - - - - 식 (9-1)

(나) 천연석고

석고제품에 대한 전 과정평가기법을 참고하여 천연석고의 생산시스템을 채광, 분쇄, 저장, 검사, 하역에 해당하는 각 단계별 에너지사용량을 조사하였다. 각 항목에 대한 에너지원의 탄소배출원단위를 적용하여 발생하는 CO_2 배출량을 계산하였다.

천연석고생산단계 CO_2 배출량
= 천연석고채광, 분쇄, 저장, 검사, 하역단계소요에너지 × 탄소배출계수) - - - 식 (9-2)

Table 3.3.115 GBFS의 생산단계 CO_2 배출량 데이터조사내용

항 목		연간 사용량 [kg]	단위제품당 재료 사용량 [kg]	CO_2 배출량 [kgCO_2/kg]
제 품	재 료			
GBFS	고로슬래그	730,000,000	1.03800	0.0010539
	천연석고	20,000,000	0.02845	0.0788172

(2) GBFS 원재료 수송단계

(가) 재료별 운송방식

① 고로슬래그

제철소에서 채집과정을 통해 얻어진 고로슬래그물질을 차량을 이용해 당 제조공장으로 운반해오는 단계의 차량장비에 대한 정보를 조사한다. 국내의 경우 육로수송을 통해 고로슬래그를 운반하게 되며 사용된 차량에 대한 정보는 국가 LCI DB의 트럭수송항목을 설정하였다. 국가 LCI DB에는 해당차량별 연비, 유류소비량 등에 대한 정보를 CO_2 배출원단위 형식으로 환산하여 데이터베이스를 제공하고 있다.

② 천연석고

천연석고가 채광공장에서 제품형태로 가공공장으로 차량을 통해 운반해오는 단계의 차량장비에 대한 정보를 조사한다. 해당 제조시스템의 경우 태국에서 컨테이너선을 통해 해상으로 수입해오며 제조공장내의 항구로 직접 하역하게 된다. 따라서 해상운송과정에서의 선박에 관한 정보를 국가 LCI DB에서 선정하였다.

(나) 재료별 운송거리

① 고로슬래그

본 평가시스템의 경우 현장공장에서 당진의 제철소까지의 거리는 40km 이며 해당공장과 동일한 공업단지내의 제철소까지의 거리는 0.5km이다. 각각의 제철소에서 운송해오는 고로슬래그재료의 거래량에 관한 정보를 적용하여 계산하게 된다.

② 천연석고

본 평가시스템의 경우 국내항구에서 태국까지의 해상운송거리는 3408km 이다. 또한 재료의 하역항구가 공장내에 속하므로 항구에서의 하역 이후 육상에서의 운송거리는 제외하여 계산하게 된다.

Table 3.3.116 GBFS의 운송단계 CO_2 배출량 평가

항 목		단위제품당 재료 사용량 [kg]	운송장비	수송 거리 [km]	내 용			CO_2 배출량 [$kgCO_2/kg$]
제품	재료		장비명					
GBFS	고로슬래그	1.03800	트럭	0.5	공장옆	비율 [%]	70	0.003198
				40	당진		30	
	천연석고	0.02845	외항선	3408	태국	-		0.000205

(3) GBFS 제조단계

(가) 재료 혼합/가공과정

① 소요에너지량

고로슬래그와 천연석고를 각각 계량하여 대형 슬래그밀에 투입하여 혼합 가공하는 과정이다. 해당제품의 제조과정에서 82% 이상의 에너지가 소요되는 과정으로서 실질적으로 본 과정을 통해 GBFS이 제품형태로 생산된다. 이를 조사하기 위하여 당 공장에서 연간 사용되는 에너지량과 연간 생산하는 GBFS 제품의 질량비를 단위제품을 생산하는데 필요한 에너지량으로 환산하여 데이터를 산출하였다.

$$BFS \text{ 조과정 } CO \text{ 배출량 소요에너지)} = (\text{전력, 공업용수, } LNG\text{, 경유사용량} \times \text{탄소배출계수}) \quad \text{- - - - - - - - - -식 (9-3)}$$

② 부산물 배출량

혼합/가공과정에서 잡철형태의 부산물이 배출된다. 일반적으로 잡철의 부산물을 재활용과정을 통해 다른 산업재료로 환원과정을 거치게 되므로 국가 LCI DB의 잡철에 대한 재활용 항목을 적용하여 평가를 진행하였다.

$$GBFS\text{제조과정 } CO_2 \text{ 배출량(배출물처리)} = \sum(\text{배출물질량} \times \text{탄소배출계수}) \quad \text{- - - - - -- - - - - - - - - - - - - 식 (9-4)}$$

Table 3.3.117 GBFS 제조단계 CO_2 배출량 평가

항 목		단위제품당 수집데이터	에너지원 / 단위	CO_2 배출량 [$kgCO_2/kg$]	기여도 [%]
GBFS	전 력	0.03595	$kgCO_2/kWh$	0.01780	57.47
	공업용수	0.02304	$kgCO_2/kg$	0.00000235	0.008
	LNG	0.004737	$kgCO_2/kg$	0.01317	42.52
	부산물	0.0004210	$kgCO_2/kg$	0.000001596	0.005
	계			0.030974	100

나. Smart 고로슬래그미분말(SBFS) 전 과정 CO_2 배출 원단위 평가 및 시험

SBFS 생산공정의 따른 평가요소를 전 과정 목록 분석의 데이터범주를 참고하여 선정하였다. 또한, 각 항목에 대한 CO_2 원단위를 조사하고 이를 해당항목의 실측 조사 값에 적용하여 전 과정 단계별 CO_2 배출량을 합산 하였다.

(1) 원재료 생산단계

(가) 고로슬래그

고로슬래그는 제철소에서 선철을 제조할 때 발생되는 용융슬래그를 용광로에서 꺼내어 물로 급냉시킨 재료이다. 고로슬래그의 생산과정을 살펴보면 제철소의 용광로에서 철광석을 주원료로 사용하여 이루어지는 선철의 제조 시 배출되는 부산물임을 알 수 있다. 즉, 고로슬래그는 산업부산물로서 타제품으로 재활용되기 이전에는 선철의 제조과정에서 발생하는 산업폐기물에 해당한다. 이와 같이 선철의 생산과정에서 에너지가 사용되고 이에 따른 CO_2가 배출되었지만 고로슬래그는 부산물형태이므로 이전의 산업공정은 CO_2 배출량 평가범위에 포함되지 않는다. 따라서 철광석에서 고로슬래그가 얻어지는 과정은 원재료 생산의 평가범위 제외하였다. Table 3.3.118와 같이 현재 국내 LCI DB 중 고로슬래그는 구축되어 있지 않기 때문에 국외 스위스의 LCI DB인 ecoinvent를 적용하여 고로슬래그 1kg의 CO_2 배출량을 평가하였다.

Table 3.3.118 고로슬래그의 CO_2 배출량 평가결과

	기능단위당 재료사용량[kg/kg]	LCI DB 및 출처		CO_2 배출량 (kg-CO_2eq./kg)
고로슬래그	1	국내외 LCI DB	ecoinvent	0.010584
합계				0.010584

(나) 원천소재

원천소재는 석회석과 티탄석고, 오니가 주원료로 사용되는 것으로 나타났으며 이 재료들 생산 및 운송, 제조하는데 에너지원 및 사용량을 대상으로 CO_2 배출량을 평가하였다. 원천소재 1kg 생산 시 석회석과 티탄석고, 오니가 각각 0.3kg, 0.4kg, 0.3kg 투입되는 것으로 조사되었으며, 각 재료의 화학성분을 조사하여 CO_2 배출량을 평가하였다. 또한, 석회석과 티탄석고, 오니의 생산업체와의 조달거리와 운송수단 등을 조사하여 원천소재의 운송단계 CO_2 배출량을 평가하였다. 원천소재의 제조는 SBFS 공장 내에서 이루어졌으며, 원천소재 제조설비의 에너지 사용량을 조사하였다. Table 3.3.119와 같이 조사된 SBFS 원재료들인 고로슬래그와 원천소재의 CO_2 배출량을 합하여 SBFS 원재료 생산 시 CO_2 배출량을 도출하였다.

Table 3.3.119 원천소재의 CO_2 배출량 평가 데이터 조사

	원재료 생산단계	운송단계		제조단계		
	투입량	업체위치	거리	LNG사용량	전력사용량	원천소재 생산량
석회석	0.3kg/kg	충북단양	184km	$12m^3$/hr	23kwh/hr	400kg/hr
티탄석고	0.4kg/kg	인천	78km			
오니	0.3kg/kg	경기광명	65km			

* SBFS 생산업체 위치 : 충청남도 당진

Table 3.3.120 원천소재 전 과정 CO_2 배출량 평가결과

	투입물질 및 투입량		LCI DB 및 출처		CO_2 배출량(kg-CO_2eq./kg)
원재료 생산단계	석회석	0.3kg/kg	국외 LCI DB	ecoinvent	0.0001214
	티탄석고	0.4kg/kg	국내외 LCI DB	ecoinvent	0.0001023
	오니	0.3kg/kg	국내외 LCI DB	ecoinvent	0.0009147
운송단계	석회석	184km	국가 LCI DB	환경부	0.001019
	티탄석고	78km	국가 LCI DB	환경부	0.000397
	오니	65km	국가 LCI DB	환경부	0.000405
제조단계	LNG사용량	$0.03m^3$/kg	국가 LCI DB	환경부	0.0064
	전력사용량	0.058kwh/kg	국가 LCI DB	산업통상부	0.0282
합계					0.0376

Table 3.3.121 SBFS 원재료 생산단계 CO_2 배출량 평가

재료	SBFS 기능단위당 재료투입량 [kg/kg]	LCI DB 및 출처		CO_2 배출량(kg-CO_2eq./kg)
고로슬래그	0.65	ecoinvent	스위스	0.00687
원천소재(SM)	0.35	개별적산법	한양대	0.01316
합계				0.02003

(2) 원재료 수송단계

(가) 재료별 운송방식

제철소에서 채집과정을 통해 얻어진 고로슬래그를 트럭을 이용해 평가대상 제조공장으로 수송하는 단계의 차량에 대한 정보를 조사하였다. 국내의 경우 육로수송을 통해 고로슬래그를 운반하게 되며 사용된 차량에 대한 정보는 국내 LCI DB의 트럭수송 항목으로 선정하였다. 국가 LCI DB는 해당 차량별 연비, 유류소비량 등에 대한 정보를 CO_2 배출 원단위 형식으로 환산하여 데이터베이스를 제공하고 있다. 하지만, 원천소재의 경우 SBFS생산 공장 내에서 제조하기 때문에 SBFS가 채광공장에서 제품형태로 제조공장으로 수송하는 단계의 차량장비에 대한 정보를 조사하였다.

(나) 재료별 운송거리

고로슬래그의 경우 현장공장에서 당진의 A제철소까지의 거리는 0.5km 이다. A제철소에서 트럭으로 조달하는 고로슬래그의 거래량에 관한 정보를 적용하여 평가하였다. 원천소재의 경우는 SBFS 제조업체 내에서 직접 생산하므로 운송거리는 제외하였다.

Table 3.3.122 SBFS 수송단계 CO_2 배출량 데이터 조사

재료	SBFS 기능단위당 재료투입량 [kg/kg]	조달처	수송거리 [km]	운송장비	CO_2 배출량 (kg-CO_2eq./kg)
고로슬래그	0.65	A제철소	0.5	트럭	0.0136
원천소재	0.35	직접생산		-	-
계					0.0136

(3) SBFS 제조단계

SBFS의 제조공정에서 소요되는 전력, LNG, 공업용수 등 에너지원 사용에 의한 CO_2 배출량을 평가하기 위하여 에너지원별 소비량을 조사하였다. 본 평가시험의 경우 제조과정 시 화학물질에 의한 직접적인 화학반응작용이 발생하는 과정은 없기 때문에 에너지원들의 자체적인 사용량에 따른 CO_2 배출량만을 평가 하였다. 각각의 에너지원 CO_2 배출 원단위는 국가 LCI DB를 적용하였다. SBFS 제조단계의 포함된 평가범위는 운송해온 고로슬래그를 silo에 적재, 대형 슬래그밀에 투입 및 분쇄, 슬래그밀 냉각, SBFS 제품 Silo 저장하는 과정이다. 해당제품의 제조과정에서 대부분의 에너지가 소요되는 과정은 슬래그밀 투입 및 분쇄로서 실질적으로 본 과정을 통해 SBFS 제품이 생산된다. Table 3.9.9와 같이 해당 공장에서 연간 사용되는 에너지량과 연간 SBFS 생산량 자료를 이용하여 기능단위 1kg 제품을 생산하는데 필요한 에너지량을 도출하고, 이를 이용하여 CO_2 배출량을 평가하였다.

Table 3.3.123 SBFS 제조단계 CO_2 배출량 데이터 조사

항목	SBFS 기능단위당 에너지사용량	LCI DB	CO_2 배출량 (kg-CO_2eq./kg)	비율[%]
전력	0.03595 kwh/kg	0.4950 [kgCO_2/kwh]	0.01780	95.9
공업용수	0.02304 L/kg	0.000102 [kgCO_2/kg]	0.00000235	0.11
LNG	0.004737 m^3/kg	486 [kgCO_2/kg]	0.0007696	4.14
폐수	0.0004210 kg/kg	적용대상 아님	0	0
계			0.01857	100

SBFS에 대한 CO_2 배출량을 평가하여 아래의 Table 3.3.124에 나타내었다. SBFS의 기능단위를 1kg으로 선정하여 수행하였기 때문에 산출된 CO_2 배출량에 대한 수치 값은 해당 제품별 CO_2 배출 원단위와 같다. SBFS의 CO_2 배출량은 0.052[kg-CO_2eq/kg]로 평가되었다. SBFS 생산 시 원재료단계의 CO_2 배출량은 0.0199[kg-CO_2eq/kg]이 배출되는 것으로 평가되었으며 전체 CO_2 배출량 중 가장 많은 부분을 차지하였다. 또한, 원재료인 고로슬래그와 원천소재를 SBFS 제조공장으로 수송 시 CO_2 배출량은 0.0136[kg-CO_2eq/kg]으로 평가 되었으며, 제조단계의 CO_2 배출량은 0.0186[kg-CO_2eq/kg]로서 나타났다. SBFS의 전 과정 CO_2 배출량 중 전력사용량에 따른 CO_2 배출량이 약 34%로서 가장 많이 영향을 미치는 것으로 나타났으며, LNG사용량에 따른 CO_2 배출량은 약 1.5%로 분석되었다. 제조단계 시 공업용수 사용량은 CO_2 배출량에 거의 영향이 없는 것으로 분석되었으며, 폐수는 공장 내에서 정수처리 후 배출함에 따라 폐수에 대한 영향은 적용하지 않았다.

Table 3.3.124 SBFS 전 과정 CO_2 배출량 평가결과

항목		조사내용		CO_2 배출량(kg-CO_2eq./kg)	기여도[%]
원재료 단계	고로슬래그	0.65 kg		6.87E-03	13.2
	원천소재	0.35 kg		1.31E-02	25.1
수송 단계	고로슬래그 (육상수송)	A제철소	0.5km	1.36E-02	26.1
	원천소재	공장 내	0km	0	0
제조 단계	전력사용량	0.03595 kWh		1.78E-02	34
	공업용수	0.02304 L		2.35E-06	0.1
	LNG사용량	0.004737 kg		7.69E-04	1.5
	폐수	0.000421 kg		0	0
계				5.21E-02	100

다. GBFS시멘트 및 SBFS시멘트 전 과정 CO_2 배출량 평가 및 시험

(1) 제조 전 단계 (재료 생산과정)

GBFS, SBFS의 CO_2 배출원단위와 국가 LCI DB에서 제공하고 있는 포틀랜드 시멘트에 대한 탄소배출원단위를 GBFS시멘트 1종, 2종, 3종, SBFS시멘트의 재료별 질량비에 적용하여 재료 생산과정에서의 CO_2 배출량을 평가하였다.

Table 3.3.125 GBFS시멘트, SBFS시멘트의 제조 전 단계 CO_2 배출량 평가 결과

구 분	GBFS시멘트 1종, 2종, 3종			SBFS 시멘트
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
OPC : GBFS : 원천소재	80 : 20 : 0	55 : 45 : 0	35 : 65 : 0	70 : 23 : 7
재료 생산과정의 CO_2 배출량 [$kgCO_2/kg$]	0.762741	0.53616788	0.354909167	0.671234

※ OPC : 0.944 $kgCO_2/kg$, GBFS : 0.1142 $kgCO_2/kg$, 원천소재 : 0.0376 $kgCO_2/kg$

(2) 제조 단계 (재료 혼합과정)

SBFS 포틀랜드시멘트가 계량과정을 통해 믹서로 투입되어 혼합되어지는 과정에서 소요되는 에너지량을 조사하여 에너지원에 대한 CO_2 배출원단위를 적용하였다. 이를 위해 믹서 및 해당 장비들의 공장내부에서 소요된 연간 전력사용량을 GBFS시멘트 생산량으로 나누어서 SBFS시멘트 1kg의 제조단계에 대한 전력소모량을 산출하였다. 해당 공장의 경우 GBFS만을 제조하는 전용 공장이므로 소요된 모든 전력을 해당 제품을 제조하는데 사용된 것으로 가정하여 평가를 진행하였다. 이를 통해 GBFS시멘트, SBFS시멘트의 제조단계에 대한 CO_2 배출원단위를 도출하였으며 Case 1, 2, 3, 4의 경우 동일한 장비를 통해 혼합과정이 이루어지는 것에 기인하여 동일한 계산과정과 결과를 적용할 수 있다.

Table 3.3.126 GBFS시멘트, SBFS시멘트의 제조단계 CO_2 배출량 평가 결과

구분	Case 1, Case 2, Case 3, Case 4		
	장비 전력사용량 [kWh/kg]	전력 CO_2배출원단위 [$kgCO_2/kWh$]	혼합과정의 CO_2 배출량 [$kgCO_2/kg$]
평가결과	0.004385	0.0495	**0.000217**

※ 데이터 조사 장비 대상
- 혼합 믹서 : 시멘트, 고로슬래그 혼합 장비
- 컨베이어벨트 : 공장내 재료 운송 장비
- 계량기, 저장 silo 등

(3) 평가결과

GBFS시멘트 및 SBFS시멘트 제품 1kg에 대한 탄소배출량은 Table 3.3.127과 같다. Case 1, Case 2, Case 3에 대한 GBFS시멘트 1종, 2종, 3종의 CO_2 배출량은 각각 0.7629 $kgCO_2/kg$, 0.5364 $kgCO_2/kg$, 0.3551 $kgCO_2/kg$으로 평가되었다. Case 4에 대한 SBFS시멘트의 경우 0.6715 $kgCO_2/kg$으로 평가되었다. OPC 에 의한 CO_2 발생량이 가장 크게 나타났으며 GBFS/SBFS의 제조과정에 의한 CO_2 배출량은 상대적으로 매우 미비한 수준으로 평가되었다. 하지만 혼화재의 사용량이 늘어날수록 OPC의 사용량은 줄어들게 되며 전체적으로 저감되는 CO_2 배출량은 Case 1 대비 Case 2, 3는 29.7%, 53.5%의 저감효과가 있는 것으로 나타났으며 SBFS시멘트인 Case 4의 경우 11.99%의 저감효과가 나타났다.

Table 3.3.127 GBFS시멘트, SBFS시멘트의 전 과정 CO_2 배출량 평가/시험 결과

구분			GBFS			SBFS
			Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
OPC : GBFS : 원천소재			80 : 20 : 0	55 : 45 : 0	35 : 65 : 0	70 : 23 : 7
CO_2 배출량 [$kgCO_2/kg$]	GBFS / SBFS	재료생산	0.000667	0.001501	0.002169	0.000771
		재료운송	0.000681	0.001531	0.002212	0.001828
		제품제조	0.006193	0.013935	0.020129	0.007836
	시멘트		0.7552	0.5192	0.3304	0.6608
	혼합단계		0.000217	0.000217	0.000217	0.000217
	계		0.762958	0.536384	0.355127	0.671452
Case 1 대비 CO_2 배출량 비율 [%]			100	70.30	46.55	88.01
Case 1 대비 CO_2 배출량 저감율 [%]			0	29.70	53.45	11.99

라. Smart고로슬래그미분말(SBFS) 혼입 콘크리트 CO_2 배출량 및 경제성 평가

(1) Smart 고로슬래그미분말(SBFS) 혼입 콘크리트 CO_2 배출량 및 경제성 평가 방법

(가) 원재료 생산단계

콘크리트 생산에 따른 CO_2 배출량은 콘크리트 배합에 사용되는 각 구성 재료를 생산할 때 배출되는 CO_2 원단위를 이용하여, 1m^3당 콘크리트 생산에 포함되는 각 구성 재료의 양(kg)과 원단위 곱의 누적으로 산정된다. 이렇게 산출된 콘크리트의 단위 체적 당(1m^3) CO_2 배출량을 이용하여 평가하려는 총 콘크리트 물량에 대한 CO_2 배출량의 정량적 평가가 가능하다. 한편 콘크리트를 구성하는 각 재료별 CO_2 배출 원단위는 국가 LCI DB, 개별적산법 데이터베이스를 활용한다. 보통시멘트, 슬래그시멘트, 골재, 혼합수는 국내 CO_2 배출 원단위를 적용하였으며, SBFS의 CO_2 배출 원단위는 “Smart 고로슬래그 CO_2 배출량 평가” 연구결과를 적용하였다. 또한, 국내에 CO_2 배출량 원단위가 구축되어 있지 않은 혼화제는 국외 LCI DB를 이용하였다.

$$CO_{M} \quad (M(i) \times \text{단위} M, CO_2) \quad \text{----------식 (9-5)}$$

(i = 1 : 시멘트, 2 : 굵은골재, 3 : 잔골재, 4 : 혼화재료, 5 : 혼입수)

여기서 CO_{2M}은 단위 콘크리트 생산에 따른 자재단계의 CO_2 배출량[kg-CO_2/m^3], M(i)은 콘크리트 1m^3당 각 재료의 사용량[kg], 원단위M,CO_2는 각 재료의 CO_2 원단위[kg-CO_2/kg]이다.

Table 3.3.128 CO_2 배출 원단위 및 근거

콘크리트 혼입재료	CO_2 배출량 및 경제성	단위	근거
보통시멘트	0.944kg-CO_2eq	kg	국가 LCI DB
	3,410원	40kg	국가 물가정보(2014년 6월)
슬래그시멘트	0.192kg-CO_2eq	m^3	국가 LCI DB
	2,650원	40kg	국가 물가정보(2014년 6월)
굵은골재	0.0014kg-CO_2eq	m^3	건축자재 LCI DB*
	15,000원	m^3	국가 물가정보(2014년 6월)
잔골재	0.0001kg-CO_2eq	m^3	건축자재 LCI DB*
	13,000원	m^3	국가 물가정보(2014년 6월)
Smart 고로슬래그미분말(SBFS)	0.052kg-CO_2eq	kg	개별적산법**
	41,700원	ton	생산업체 문의
고로슬래그미분말	0.0051kg-CO_2eq	kg	국외 LCI DB***
	50,000원	ton	생산업체 문의
혼합수	0.0001kg-CO_2eq	kg	국가 LCI DB
	520원	m^3	국가 물가정보(2014년 6월)
혼화제(감수제)	0.25kg-CO_2eq	kg	국외 LCI DB***
	650	kg	국가 물가정보(2014년 6월)

(나) 운송단계

일반적으로 콘크리트 자재 중 시멘트는 생산공장에서 생산된 시멘트를 전국철도망을 통해 수요처 인근 출하기지에 운송한다. 출하기지로 옮겨진 시멘트는 BCT(시멘트 벌크트럭)를 이용해 레미콘 공장이나, 건설현장에 운반되어 사용된다. 또한 공장이 해안에 위치해 있는 업체의 경우 철도운송 비율이 전체 시멘트 수송물량의 약 25 %를 차지하는 것으로 나타났으며, 내륙에 공장이 위치한 업체의 경우 철도운송 비율이 약 60 ~ 70 %까지 차지한다. 운송단계의 CO_2 배출량 평가를 위해서는 콘크리트 각 구성 재료의 총 물량과 운송수단의 적재량으로 각 재료의 운송장비 대수를 산출하며 이 산출된 운송장비 대수에 운송거리와 연비를 고려하여 운송단계의 CO_2 배출량을 평가한다. 운송단계에서의 CO_2 배출량 산출식은 식 9-6과 같으며, 표 17에 콘크리트 자재 운송수단 별 적재량 및 연비를 나타낸다.

$$CO_T = (M(i)/L_t) \times (d/e) \times \text{단위T, } CO_2 \quad \text{----------식 (9-6)}$$

(i = 1 : 시멘트, 2 : 굵은골재, 3 : 잔골재, 4 : 혼화재료)

여기서 CO_{2T} 는 단위 콘크리트 생산에 따른 운송단계의 CO_2 배출량[kg-CO_2/m^3], M(i)은 콘크리트 1 m^3 당 각 재료[ton], L_t는 (i)재료별 운송장비의 적재량[ton], d는 운송거리[km], e는 연비[km/L] 원단위T,CO_2는 운송장비의 에너지원 CO_2 배출량 원단위[kg-CO_2/L]이다.

Table 3.3.129 운송수단 종류 및 유류 Database

종류	운송수단분류	적재량[ton]	연비[km/L]	CO_2 배출량 및 경제성		
				경유	단위	근거
육상운송	1 ton 트럭	1	11	0.068kg-CO_2eq	kg	국가 LCI DB
	1.5 ton 트럭	1.5	9.6			
	3.5 ton 트럭	3.5	8			
	5 ton 트럭	5	7			
	8 ton 트럭	8	6			
	15 ton 트럭	15	6			
	16 ton 트럭	16	5	1700원	L	국가 물가정보 (2014년 6월)
	22 ton 트럭	22	4			
	24 ton 트럭	24	3			
	25.5 ton 트럭	25.5	3			
	BCT(벌크트럭)	21.5	4			
철도운송	시멘트 화물 열차	14	2.5			

(다) 제조단계

콘크리트 제조단계의 CO_2 배출량은 콘크리트 $1\,m^3$ 생산 시 각 제조설비에서 사용되는 에너지 소비량을 산출하고 이를 CO_2로 환산하여 도출 할 수 있다. 이를 위해 콘크리트 제조공정을 구분하고 각 단계에 따른 에너지 소비량의 도출이 우선시 되어야 한다. 즉, 콘크리트의 제조공정은 각 자재업체로부터 조달된 자재들의 하역, 각 자재별로 저장, 혼합기로의 운반, 혼합을 위한 계량, 혼합 공정의 5단계로 구분될 수 있으며 각 공정별로 전력과 유류 에너지와 용수가 사용되는 설비종류 및 설비제원을 조사한 후 해당되는 설비의 각 용량과 일간 사용된 배처플랜트의 전체 전력사용량과의 비율 분석을 통해 각 설비의 콘크리트 $1\,m^3$를 제조할 때 에너지 소비량을 도출할 수 있다. 또한, 제조과정 시 배출된 고형폐기물 및 폐수처리에 따른 CO_2 배출량을 포함한다. 제조단계에서의 CO_2 배출량 산출식은 식 9-7과 같다.

$$CO_F \quad [(E_{(i)}/R) \times \text{단위F}, CO_2] \qquad \text{----------식 (9-7)}$$

(i = 1 : 전력사용량, 2 : 유류사용량, 3 : 용수사용량, 4 : 폐기물배출량)

여기서 CO_{2F} 는 단위 콘크리트 제조단계의 CO_2 배출량[kg-CO_2/m^3], R는 연간 레미콘 생산량[m^3/year], $E_{(i)}$ 는 연간 에너지원별 사용량[단위/year], 원단위F,CO_2는 각 에너지원의 CO_2 배출량 원단위[kg-CO_2/단위]이다.

Table 3.3.130 에너지원 CO_2 배출 원단위 및 근거

에너지원 종류	CO_2 배출량 및 경제성		단위	근거
전력	0.495kg-CO_2eq		kwh	국가 LCI DB
	110원		kwh	국가 물가정보(2014년 6월)
LNG	생산	0.595kg-CO_2eq	kg	국가 LCI DB
	연소	2.78kg-CO_2eq	L	
	1040		kg	국가 물가정보(2014년 6월)
경유	생산	0.0682kg-CO_2eq	kg	국가 LCI DB
	연소	2.6kg-CO_2eq	L	
	1700원		L	국가 물가정보(2014년 6월)
등유	생산	0.253kg-CO_2eq	kg	국가 LCI DB
	연소	2.45kg-CO_2eq	L	
	1400원		L	국가 물가정보(2014년 6월)
공업용수	0.0001kg-CO_2eq		m^3	국가 LCI DB
	520원		m^3	국가 물가정보(2014년 6월)

(2) Smart 고로슬래그미분말(SBFS) 혼입 콘크리트 CO_2 배출량 및 경제성 평가 사례 분석

(가) 평가대상 및 방법 선정

SBFS 혼입 콘크리트의 CO_2 배출량 및 경제성 평가를 실시함에 있어 본 연구에서는 인천광역시에 위치한 레미콘 생산공장을 대상으로 평가를 실시하였다. 먼저, Table 3.3.131과 같이 평가대상을 선정하고, 선정된 대상의 기능단위 및 시스템 경계를 설정하였다. 이후 SBFS 혼입 콘크리트 생산 시 공정별로 투입물과 산출물의 데이터를 연구기관(한양대학교)에서 개발한 콘크리트 전 과정 평가 프로그램(CLAS)에 적용하여 CO_2 배출량 및 경제성을 평가하였다.

Table 3.3.131 SBFS 혼입 콘크리트 CO_2 배출량 및 경제성 평가/시험 대상 선정

강도	구분	배합량[kg/m^3]							
		OPC	S/C	SBFS		G	S	W	AE
				GBFS	S				
30MPa	Case 1	342	0	0	0	900	872	170	2.7
	Case 2	0	342	0	0	888	860	170	2.7
	Case 3	239	0	78	25	901	883	170	2.7

* OPC: 보통시멘트 S/C: 슬래그시멘트 W: 혼합수 AE: 혼화제(고성능감수제)
SBFS: Smart 고로슬래그미분말 G: 굵은골재 S: 잔골재

(나) 단위공정의 투입물 및 산출물

SBFS 혼입 콘크리트 생산단계는 크게 원재료 생산, 수송, 제조의 3단계로 구분된다. 원재료 생산단계에서는 콘크리트 배합 시 투입되는 재료들의 종류(시멘트, 골재, 혼화재료, 혼합수)와 배합량(kg/m^3)을 조사하였다. 각각의 콘크리트 원재료들은 레미콘 생산공장(인천)에 철도 및 육상(트럭) 운송수단을 통해 운송되어 저장 사이로 및 야적장에 저장된다. 저장된 각각의 원재료들은 컨베이어벨트을 통해 배처플랜트로 운반 및 계량되어 콘크리트 혼합 믹서에 투입되어 혼합공정을 거쳐 SBFS혼입 콘크리트로 생산된다. 이를 위해 레미콘 생산공장의 실제 공정을 조사하여 데이터를 수집하였으며, 데이터 수집 내용은 콘크리트 배합보고서 및 조달업체, 공장 전체의 연간 콘크리트 총 생산량과 에너지사용량(전력, 유류, 용수)을 조사하였다.





평가대상 업체 제조설비 Case별 평가대상 콘크리트

Fig.3.3.86 SBFS 혼입 콘크리트 평가업체 및 대상제품

(3) Smart 고로슬래그미분말(SBFS) 혼입 콘크리트 CO_2 배출량 및 경제성 평가

(가) 원재료 단계

콘크리트 전 과정 CO_2 배출량 평가 기법을 이용하여 S/C 및 SBFS가 혼입된 보통 콘크리트 배합 비의 $1m^3$ 당 CO_2 배출량을 평가/시험 하였다. 30MPa 강도의 콘크리트를 대상으로 Plain 및 슬래그시멘트, SBFS(30%) 혼입 배합설계에 따른 원재료 생산단계의 CO_2 배출량 및 경제성 평가를 실시하였으며 표 21과 같은 평가 결과를 도출하였다. Case별 원재료 단계의 CO_2 배출량은 각각 324.3[kg-CO_2eq/m^3], 285.1[kg-CO_2eq/m^3], 228.8[kg-CO_2eq/m^3]로 나타났다. Plain 배합인 Case 1 대비 Case 2와 Case 3는 약 12%, 29% 저감되는 것으로 평가되었다. 또한, Case별 원재료 단계의 경제성은 각각 108,535[원/m^3,] 105,055[원/m^3,] 100,010[원/m^3]으로 나타났다. Plain 배합인 Case 1 대비 Case 2와 Case 3는 약 4%, 7% 저감되는 것으로 평가되었다. 모든 Case에서 콘크리트의 구성재료인 OPC를 생산할 경우 CO_2 배출량과 경제성이 원재료 생산단계에서 차지하는 비율이 약 85 %를 차지하는 것으로 나타났다.

Table 3.3.132 평가대상 콘크리트 원재료 생산단계 CO_2 배출량 및 경제성 평가결과

강도 [MPa]	구분	배합량[kg/m^3]								CO_2배출량 [kg-CO_2eq/m^3]	경제성 [원/m^3]
		OPC	S/C	SBFS		G	S	W	AE		
				GBFS	SM						
30	Case 1	342	0	0	0	900	872	170	2.7	324.3	108,535
	Case 2	0	342	0	0	888	860			285.1	105,055
	Case 3	239	0	78	25	901	883			228.8	100,010

* OPC: 보통시멘트, S/C: 슬래그시멘트, GBFS: 고로슬래그미분말, SM: 원천소재, SBFS: Smart 고로슬래그미분말, G: 굵은골재, S: 잔골재, W: 혼입수, AE: 혼화제

(나) 운송단계

콘크리트 1m^{3}의 배합재료들을 인천에 위치한 레미콘 생산업체로 운송 시 배출되는 CO_2 량을 평가하였다. 보통시멘트는 단양(200km), 굵은골재와 잔골재는 경기도 안산(30km)와 인천(35km), S/C와 SBFS는 충청남도 당진(70km), 혼화제는 경기도 평택(90km)에서 레미콘 업체(인천)까지 운송되는 거리를 산출하여 평가하였으며, 혼합수는 레미콘 생산업체 내의 상수도를 통해 조달함에 따라 평가는 제외하였다. Case별 운송단계의 CO_2 배출량은 각각 17.4[kg-CO_2eq/m^3], 19.6[kg-CO_2eq/m^3], 19.6[kg-CO_2eq/m^3]로 나타났다. 또한, Case별 운송단계의 경제성은 각각 38,860[원/m^3], 40,590[원/m^3], 40,590[원/m^3]으로 나타났다.

Table 3.3.133 평가대상 콘크리트 원재료 운송단계 CO_2 배출량 및 경제성 평가결과

강도 [MPa]	구분	운송거리[km]							CO_2배출량 [kg-CO_2eq/m^3]	경제성 [원/m^3]
		OPC	S/C	SBFS	G	S	W	AE		
30	Case 1	200	0	0	30	35	-	90	17.4	38,860
	Case 2	200	70	0	30	35		90	19.6	40,590
	Case 3	200	0	70	30	35		90	19.6	40,590

* OPC: 보통시멘트, S/C: 슬래그시멘트, GBFS: 고로슬래그미분말, SM: 원천소재, SBFS: Smart 고로슬래그미분말, G: 굵은골재, S: 잔골재, W: 혼입수, AE: 혼화제

(다) 제조단계

콘크리트 생산업체의 제조설비에서 사용된 에너지량 및 폐기물량(고형폐기물/폐수)을 적용하여 CO_2 배출량을 평가하였다. 콘크리트 제조단계에서 사용된 전력과 유류에너지 사용량, 폐기물에 대한 CO_2 배출량은 3.16[kg-CO_2eq/m^3]로 평가되었으며 본 단계의 CO_2 배출량은 Case별로 동일하게 적용하였다. 그러나 폐수는 공장 내에서 정수처리 후 배출함에 따라 폐수에 대한 영향은 적용하지 않았다.

Table 3.30.134 SBFS 혼입 콘크리트 전 과정 CO_2 배출량 및 경제성 평가결과

강도 [MPa]	구분	배합량[kg/m^3]								CO_2배출량[kg-CO_2eq/m^3]				경제성 [원/m^3]
		OPC	S/C	SBFS		G	S	W	AE	원재료 생산	운송	제조	합계	
				GBFS	SM									
30	Case1	342	0	0	0	900	872	170	2.7	324.3	17.4	3.2	344.9	151,175
	Case2	0	342	0	0	888	860			285.1	19.6	3.2	307.8	149,425
	Case3	239	0	78	25	901	883			228.8	19.6	3.2	251.6	144,380

* OPC: 보통시멘트, S/C: 슬래그시멘트, GBFS: 고로슬래그미분말, SM: 원천소재, SBFS: Smart 고로슬래그미분말, G: 굵은골재, S: 잔골재, W: 혼입수, AE: 혼화제

(라) 전 과정 평가결과 분석

Fig.3.3.87과 같이 Case별 전 과정 CO_2 배출량은 각각 344.9[kg-CO_2eq/m^3], 307.8[kg-CO_2eq/m^3] 251.6[kg-CO_2eq/m^3]로 나타났다. Plain 배합인 Case 1 대비 Case 2와 Case 3는 약 11%, 27% 저감되는 것으로 평가되었다. 또한, Fig.3.388과 같이 Case별 경제성은 각각 151,175[원/m^3], 149,425[원/m^3], 144,380[원/m^3]으로 나타났다. Plain 배합인 Case 1 대비 Case 2와 Case 3는 약 2%, 5% 저감되는 것으로 평가되었다. Case1(Plain)과 Case3(SBFS혼입)의 CO_2 배출량과 경제성 비교결과 운송단계와 제조단계는 큰 차이가 없었지만 원재료 단계에서 많은 차이가 있었다. 이는 콘크리트의 구성재료인 보통시멘트와 슬래그시멘트. 스마트고로슬래그미분말 등의 혼입량이 CO_2 배출량과 경제성을 저감하는 주요인으로 분석되었다. 특히, 보통시멘트에 비해 Smart 고로슬래그미분말의 CO_2 배출 원단위와 비용이 매우 낮았기 때문으로 사료된다.

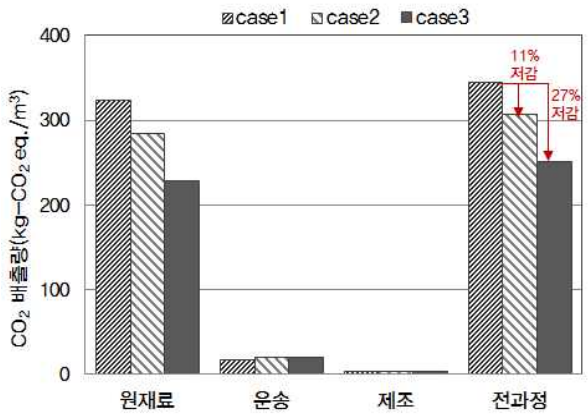


Fig.33.87 Case별 CO_2 배출량 평가결과 비교

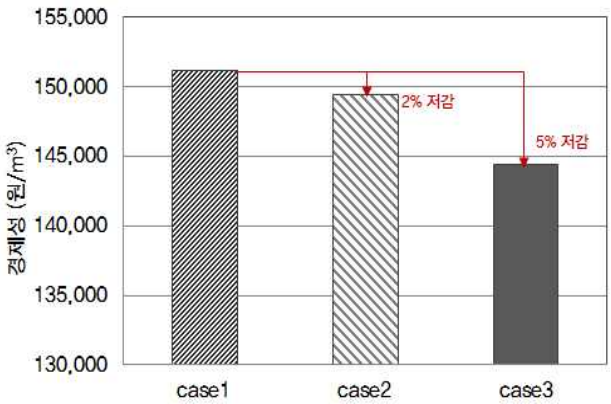


Fig.3.3.88 Case별 경제성 평가결과 비교

마. SBFS 혼입 콘크리트 절기별 CO_2 배출량 및 경제성 평가

(1) 원재료 생산단계

콘크리트 전 과정 CO_2 배출량 평가 기법을 이용하여 강도별/절기별로 SBFS가 혼입된 보통콘크리트 배합 비의 $1m^3$ 당 CO_2 배출량을 평가/시험 하였다. 21, 24, 27, 30MPa 강도의 콘크리트를 대상으로 춘추기와 하절기, 동절기 배합설계에 따른 원재료 생산단계의 CO_2 배출량 및 경제성 평가를 실시하였으며 표 5.4와 같은 평가 결과를 도출 하였다. 모든 강도의 콘크리트에서 Smart 고로슬래그미분말(SBFS) 또는 슬래그미분말(S/P)이 혼입되지 않은 콘크리트 배합이 CO_2 배출량이 가장 많았으며, 가격도 높은 것으로 평가되었다. 모든 강도의 콘크리트 평가 시 보통시멘트를 생산할 경우 CO_2 배출량과 경제성이 원재료 생산단계에서 차지하는 비율이 89 %를 차지하는 것으로 나타났다.

Table 3.3.135 평가대상 콘크리트 원재료 생산단계 CO_2 배출량 및 경제성 평가결과

강도 [MPa]	절기	배합량[kg/m³]									CO_2배출량 [kg-CO_2/m³]	경제성 [원/m³]
		OPC	SBFS		S/P	F/A	G	S	W	AE		
			GBFS	S								
25-21-150	춘추기	315	0	0	0	0	922	890	170	1.8	302.67	106,850
		236	0	0	32	47					229.87	101,960
		220	86	9	0	0					215.27	101,992
		220	79	16	0	0					215.09	101,908
		220	73	22	0	0					214.94	101,836
	하절기	315	0	0	0	0	921	888	170	1.8	302.67	106,730
		229	0	0	32	54					223.39	101,350
		220	86	9	0	0					215.27	101,872
		220	79	16	0	0					215.09	101,788
		220	73	22	0	0					214.93	101,716
	동절기	315	0	0	0	0	923	891	170	1.8	302.68	106,930
		242	0	0	32	41					235.42	102,460
		220	86	9	0	0					215.28	102,072
		220	79	16	0	0					215.10	101,988
		220	73	22	0	0					214.94	101,916
25-24-150	춘추기	340	0	0	0	0	938	856	168	2.28	326.41	108,922
		255	0	0	34	51					248.07	103,652
		238	92	10	0	0					232.57	103,702
		238	85	17	0	0					232.38	103,618
		238	78	24	0	0					232.20	103,534
	하절기	340	0	0	0	0	937	855	168	2.28	326.41	108,842
		248	0	0	34	58					241.60	103,082
		238	92	10	0	0					232.56	103,622
		238	85	17	0	0					232.38	103,538
		238	78	24	0	0					232.20	103,454
	동절기	340	0	0	0	0	940	858	168	2.28	326.42	109,082
		262	0	0	34	44					254.55	104,302
		238	92	10	0	0					232.58	103,862
		238	85	17	0	0					232.39	103,778
		238	78	24	0	0					232.21	103,694
25-27-150	춘추기	368	0	0	0	0	927	840	169	2.83	352.92	111,010
		276	0	0	37	55					268.13	105,310
		258	99	11	0	0					251.70	105,378
		258	91	19	0	0					251.50	105,282
		258	84	26	0	0					251.31	105,198

	하절기	368	0	0	0	0	926	838	169	2.83	352.91	110,890
		268	0	0	37	63					260.73	104,630
		258	99	11	0	0					251.70	105,258
		258	91	19	0	0					251.49	105,162
		258	84	26	0	0					251.31	105,078
	동절기	368	0	0	0	0	929	841	169	2.83	352.93	111,130
		283	0	0	37	48					274.61	105,920
		258	99	11	0	0					251.71	105,498
		258	91	19	0	0					251.51	105,402
		258	84	26	0	0					251.32	105,318
25 - 30 - 150	춘추기	400	0	0	0	0	926	802	172	3.28	383.18	112,972
		292	0	0	40	68					283.62	106,212
		280	108	12	0	0					272.77	106,828
		280	100	20	0	0					272.56	106,732
		280	92	28	0	0					272.35	106,636
	하절기	400	0	0	0	0	924	800	172	3.28	383.17	112,812
		280	0	0	40	80					272.52	105,212
		280	108	12	0	0					272.76	106,668
		280	100	20	0	0					272.55	106,572
		280	92	28	0	0					272.34	106,476
	동절기	400	0	0	0	0	928	803	172	3.28	383.19	113,092
		300	0	0	40	60					291.03	106,892
		280	108	12	0	0					272.78	106,948
		280	100	20	0	0					272.57	106,852
		280	92	28	0	0					272.36	106,756

* OPC: 보통시멘트 S/P: 슬래그미분말 F/A: 플라이애쉬 W: 물 AE: 혼화제
SBFS: Smart 고로슬래그미분말 G: 굵은골재 S: 잔골재

(2) 운송단계

콘크리트 전 과정 CO_2 배출량 평가/시험 기법을 이용하여 평가대상 콘크리트의 운송단계 평가/시험을 하였다. 본 평가의 사용된 보통콘크리트 $1m^3$의 배합재료들을 인천에 위치한 A 콘크리트 생산업체로 운송 시 배출되는 CO_2 량을 평가 하였다. 보통시멘트는 담양(312km), 굵은골재와 잔골재는 경기도 광주(61km)와 인천(13km), S/P와 SBFS는 충청남도 당진(63km), 플라이애쉬는 충청남도 태안(146km), 혼화제는 경기도 평택(78km)에서 레미콘 업체(인천)까지 운송되는 거리를 산출하여 평가하였으며, 배합재료 중 물은 레미콘 생산업체 내의 상수도를 통해 조달함에 따라 운송수단을 통한 평가는 제외 하였다. 운송단계에서 가장 원거리에서 조달되는 시멘트의 운송 시 CO_2 배출량이 최대2.44kg-CO_2/m^3로서 운송단계에서 차지하는 비율이 약45%를 차지하는 것으로 나타났다.

(3) 제조단계

콘크리트 전 과정 CO_2 배출량 평가/시험 기법을 이용하여 평가대상 콘크리트의 제조단계 평가/시험를 하였다. 실제 콘크리트 생산업체의 콘크리트 $1m^3$ 제조 시 배출되는 CO_2 량을 공정별 사용된 제조설비의 에너지량을 적용하였다. 각 공정별 제조설비에서 사용된 전력과 유류에너지 사용량에 대한 CO_2 배출량 11.11kg-CO_2/m^3로 도출되었으며 본 단계의 CO_2 배출량은 Case별로 동일하게 적용하였다.

(4) 평가결과 분석

(가) 강도별 콘크리트 CO_2 배출량 분석

Table 3.9.22와 같이 강도가 점차 높아짐에 따라 선형적으로 CO_2 배출량이 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 콘크리트 배합설계 중 시멘트의 증가율과 매우 유사한 거동을 보였으며, 콘크리트의 압축강도, 시멘트의 사용량 그리고 CO_2 배출량은 서로 밀접한 상관성이 있음을 알 수 있다. 즉, 콘크리트의 호칭강도가 높아짐에 따라 21MPa에서 최대값(동절기) 321.3[kg-CO_2/m^3] 및 149,100[원/m^3]에 불과하던 CO_2 배출량과 경제성이 30MPa에 이르러서는 최대값(동절기) 403.1[kg-CO_2/m^3] 및 161,400[원/m^3]까지 증가 하였다. 또한, 동일강도별 콘크리트의 최대, 평균, 최소 CO_2 배출량을 비교 및 분석하였으며, 분석결과 가장 많이 사용되고 있는 24MPa 콘크리트 경우 최대 CO_2 배출량과 경제성은 345.5[kg-CO_2/m^3] 및 153,200[원/m^3]이고, 최소 CO_2 배출량은 250.1[kg-CO_2/m^3] 및 140,300[원/m^3]으로 나타났다. 최대값과 최소값의 비교결과 콘크리트 전 과정 CO_2 배출량과 경제성 평가단계 중 운송단계와 제조단계에서는 큰 차이가 없었지만 원자재 생산단계에서 많은 차이가 있었다. 이는 CO_2 배출 최대값과 최소값에 해당되는 콘크리트의 보통시멘트와 Smart 고로슬래그미분말, 고로슬래그미분말, 플라이애쉬 혼입량이 CO_2 배출량 과 경제성을 저감하는 주요인으로 분석되었다. 보통시멘트에 비해 Smart 고로슬래그미분말, 고로슬래그미분말, 플라이애쉬의 CO_2 배출량과 경제성이 작기 때문인 것으로 사료된다.

(나) 절기별 콘크리트 CO_2 배출량 분석

콘크리트 배합설계는 현장출하 시기에 따라 춘추기와 하절기, 동절기로 구분되어 있으며, 절기에 따른 CO_2 배출량과 경제성 차이에 대하여 분석하였다. 표 5.5와 같이 하절기와 동절기의 CO_2 배출량과 경제성의 차이를 뚜렷하게 알 수 있는데 강도가 증가함에 따라 CO_2 배출량이 증가함은 물론이고 모든 강도에서 하절기와 동절기의 차이가 거의 균일하게 나타났다. 즉, 콘크리트 호칭강도가 21MPa에서 30MPa에 이르기까지 CO_2 배출량은 거의 일정하게 약 4~5%만큼 동절기의 CO_2 배출량이 하절기에 비해 높게 평가되었다. 이는 콘크리트가 동절기에 양생이 제대로 이루어 지지 않기 때문에 배합설계에서 초기수화반응을 완화시키는 플라이애쉬와 고로슬래그미분말과 같은 혼화재의 양을 줄이고 보통시멘트의 배합량을 증가시켰기 때문으로 판단된다.

Table 3.3.136 SBFS 혼입 콘크리트 전 과정 CO_2 배출량 및 경제성 평가결과

강도 [MPa]	절기	배합량[kg/m³]									CO_2배출량[kg-CO_2/m³]				경제성 [원/m³]
		OPC	SBFS		S/P	F/A	G	S	W	AE	원재료 생산	운송	제조	합계	
			GBFS	S											
21	춘추기	315	0	0	0	0	922	890	170	1.8	302.67	7.30	11.1	321.38	149,014
		236	0	0	32	47					229.87	6.37		247.86	140,829
		220	86	9	0	0					215.27	6.37		232.91	137,168
		220	79	16	0	0					215.09	6.37		232.72	137,191
		220	73	22	0	0					214.94	6.37		232.57	137,210
	하절기	315	0	0	0	0	921	888	170	1.8	302.67	7.19		321.37	148,873
		229	0	0	32	54					223.39	6.30		241.32	139,920
		220	86	9	0	0					215.27	6.30		232.90	137,027
		220	79	16	0	0					215.09	6.30		232.71	137,050
		220	73	22	0	0					214.93	6.30		232.56	137,069
	동절기	315	0	0	0	0	923	891	170	1.8	302.68	7.29		321.39	149,112
		242	0	0	32	41					235.42	6.36		253.46	141,586
		220	86	9	0	0					215.28	6.36		232.91	137,266
		220	79	16	0	0					215.10	6.36		232.73	137,289
		220	73	22	0	0					214.94	6.36		232.58	137,308
24	춘추기	340	0	0	0	0	938	856	168	2.28	326.41	7.59		345.50	153,099
		255	0	0	34	51					248.07	6.61		266.39	144,286
		238	92	10	0	0					232.57	6.61		250.50	140,382
		238	85	17	0	0					232.38	6.61		250.32	140,404
		238	78	24	0	0					232.20	6.61		250.13	140,427
	하절기	340	0	0	0	0	937	855	168	2.28	326.41	7.54		345.49	153,001
		248	0	0	34	58					241.60	6.58		259.86	143,420
		238	92	10	0	0					232.56	6.58		250.49	140,284
		238	85	17	0	0					232.38	6.58		250.31	140,306
		238	78	24	0	0					232.20	6.58		250.13	140,329
	동절기	340	0	0	0	0	940	858	168	2.28	326.42	7.65		345.52	153,295
		262	0	0	34	44					254.55	6.50		272.93	145,250
		238	92	10	0	0					232.58	6.50		250.52	140,578
		238	85	17	0	0					232.39	6.50		250.33	140,600
		238	78	24	0	0					232.21	6.50		250.15	140,623
27	춘추기	368	0	0	0	0	927	840	169	2.83	352.92	7.92		372.36	157,083
		276	0	0	37	55					268.13	6.86		286.74	147,548
		258	99	11	0	0					251.70	6.86		269.91	143,369

		258	91	19	0	0					251.50	6.86		269.70	143,395
		258	84	26	0	0					251.31	6.86		269.52	143,418
	하절기	368	0	0	0	0	926	838	169	2.83	352.91	7.84		372.35	156,942
		268	0	0	37	63					260.73	6.81		279.28	146,529
		258	99	11	0	0					251.70	6.81		269.90	143,228
		258	91	19	0	0					251.49	6.81		269.69	143,254
		258	84	26	0	0					251.31	6.81		269.50	143,277
	동절기	368	0	0	0	0	929	841	169	2.83	352.93	7.98		372.38	157,236
		283	0	0	37	48					274.61	6.90		293.28	148,469
		258	99	11	0	0					251.71	6.90		269.92	143,522
		258	91	19	0	0					251.51	6.90		269.71	143,548
		258	84	26	0	0					251.32	6.90		269.53	143,571
30	춘추기	400	0	0	0	0	926	802	172	3.28	383.18	8.26		403.06	161,319
		292	0	0	40	68					283.62	7.12		302.54	150,074
		280	108	12	0	0					272.77	7.12		291.29	146,359
		280	100	20	0	0					272.56	7.12		291.08	146,385
		280	92	28	0	0					272.35	7.12		290.87	146,410
	하절기	400	0	0	0	0	924	800	172	3.28	383.17	8.16		403.05	161,123
		280	0	0	40	80					272.52	7.07		291.34	148,560
		280	108	12	0	0					272.76	7.07		291.27	146,163
		280	100	20	0	0					272.55	7.07		291.06	146,189
		280	92	28	0	0					272.34	7.07		290.86	146,214
	동절기	400	0	0	0	0	928	803	172	3.28	383.19	8.32		403.08	161,472
		300	0	0	40	60					291.03	7.17		310.01	151,104
		280	108	12	0	0					272.78	7.17		291.31	146,512
		280	100	20	0	0					272.57	7.17		291.10	146,537
		280	92	28	0	0					272.36	7.17		290.89	146,563

* OPC: 보통시멘트 S/P: 슬래그미분말 F/A: 플라이애쉬 W: 물 AE: 혼화제
SBFS: Smart 고로슬래그미분말 G: 굵은골재 S: 잔골재

바. SBFS 및 RC 아파트 적용 골조공사 CO_2 평가 및 시험

(1) 개요

본 평가/시험에서는 SBFS 혼입 콘크리트의 CO_2배출량 평가/시험은 GBFS와 SM을 혼합하여 개발한 SBFS가 혼입된 콘크리트를 평가대상 재료로 선정하였으며 건축물의 CO_2배출량 및 경제성 평가를 실시함에 있어 일반적으로 건설되는 콘크리트 벽식구조를 평가대상 건축물(공동주택)로 선정하였다. 또한, SBFS의 CO_2 배출 원단위 연구결과를 이용하여 평가대상 콘크리트의 CO_2 배출량을 평가하였으며 평가대상 건축물을 대상으로 CO_2 배출량의 80% 이상을 차지하는 이산화탄소 배출 주요건설자재를 선정하고 CO_2 배출 원단위 데이터베이스를 구축하였다. CO_2 배출 원단위는 산업연관분석방식과 국가 LCI DB, 개별적산방식을 활용하였으며, 구조해석 프로그램(MIDAS)과 BIM(Building Information Method)을 이용하여 평가대상 건축물의 구조체와 마감재의 물량을 산출하였다.

(2) 평가/시험대상 재료

현재 건설현장에서 가장 많이 사용되고 있는 강도 24MPa 콘크리트를 대상으로 고로슬래그미분말(GBFS) 또는 Smart 고로슬래그미분말(SBFS)이 혼입된 콘크리트를 평가/시험대상으로 하였다. 콘크리트 배합에 사용된 GBFS 및 SBFS의 혼입량에 따라 Table 3.3.137과 같이 7가지 Case로 분류하였으며, OPC 및 GBFS, SBFS, 골재 등과 같은 평가/시험대상인 SBFS콘크리트의 구성요소에 대하여 분석하였다.

Table 3.3.137 평가/시험대상 재료 Case별 분류

구분	혼입율 (%)	배합량[kg/m^3]						
		OPC	GBFS	SBFS	G	S	W	AE
Case1	0	350	0	0	895	875	176	1.74
Case2	10	315	35	0				
Case3	20	280	70	0				
Case4	30	245	105	0				
Case5	10	315	0	35				
Case6	20	280	0	70				
Case7	30	245	0	105				

* OPC : 보통시멘트, GBFS : 고로슬래그미분말. SBFS : Smart고로슬래그미분말.
G : 굵은골재. S : 잔골재, W : 물, AE : 혼화제

(3) 평가/시험대상 재료의 구성요소 및 CO_2 배출 원단위

(가) 보통포틀랜드시멘트(OPC)

OPC는 주성분이 실리카, 알루미늄, 산화철 및 석회를 포함한 원료를 적당한 비율로 혼합하고 그것을 소성하여 얻은 클링커에 적량의 석고를 가하여 미분쇄를 통해 만든 제품이다. 본 평가/시험대상 재료의 구성요소로 쓰인 보통포틀랜드시멘트는 전라남도 담양의 A업체에서 생산되었으며 밀도는 3.15이다.

(나) 고로슬래그미분말(GBFS)

GBFS는 고온의 용융상태인 슬래그에 물을 분사하여 급냉시킨 고로수재 슬래그를 밀에서 일정 분말도로 분쇄한 것을 지칭한다. SiO_2, Al_2O_3, CaO, MgO의 4성분이 95~99%정도 함유되어 있기 때문에 시멘트와 거의 유사한 화학성분을 지니고 있다. 이 성분들은 시멘트의 수화반응과 유사한 반응을 하는데 OPC는 수경성반응인 반면 고로슬래그는 잠재수경성 반응형태를 지닌다. 즉, 수경성은 물분자와 만나면 시멘트의 성분들이 용출되면서 수화물을 형성 경화하는데 비해 고로슬래그는 단순히 물 분자와 접촉만으로는 성분들이 용출되지 않고 자극제인 알칼리성 또는 황산염을 첨가함으로서 반응이 일어난다. 이러한 반응의 근거로 콘크리트의 제조 산업에서 혼화재료로서 사용하고 있으며 고로슬래그미분말의 치환율과 분말도를 자유로이 선택함으로써 소요품질의 콘크리트를 효과적으로 얻을 수 있다. 본 평가/시험대상 재료의 구성요소로 쓰인 3종 GBFS는 충청남도 당진의 B업체에서 생산되었으며 밀도는 2.90이다.

(다) Smart 고로슬래그미분말(SBFS)

SBFS는 Fig. 3.3.89과 같이 SM과 GBFS의 혼합을 통해 기존의 S/C제품의 성능을 개선시키기 위해 만든 혼화재료를 지칭한다. 현재 국내의 B업체에서 개발 중에 있으며 이는 조기강도의 증진과, 환경부하량의 저감기능이 있다. SM은 타 산업제품의 생산 공정 시스템에서 배출되는 산업부산물의 수거 및 가공과정을 통해 생산된다. 본 평가/시험대상 재료의 구성요소로 쓰인 SBFS는 충청남도 당진의 B업체에서 생산되었으며 밀도는 2.89이다.

(라) 굵은 골재/잔골재

굵은 골재 및 잔골재는 모르타르 또는 콘크리트의 뼈대가 되는 재료로, 견고하고 화학적으로 안정된 것이어야 하며 주로 모래와 자갈을 사용하는데, 낱알의 지름에 따라 5mm 이상인 조골재, 5mm 이하의 세골재로 나눈다. 본 평가/시험대상 재료의 구성요소로 쓰인 굵은 골재 및 잔골재는 각각 경기광주와 경기인천의 C업체와 D업체에서 생산되었으며 밀도는 2.63, 2.61이다.

(마) 혼화제(AE감수제)

AE감수제는 화학혼화제의 일종으로서 콘크리트에 혼입하여 소정의 슬럼프를 얻는데 필요한 단위수량을 감소시키는 동시에 무수한 미세공기거품을 넣어 워커빌리티 및 내구성, 내동결 융해성을 향상시키며 본 평가/시험대상 재료의 구성요소로 쓰인 표준형 AE감수제는 경

기평택의 E업체에서 생산되었다.

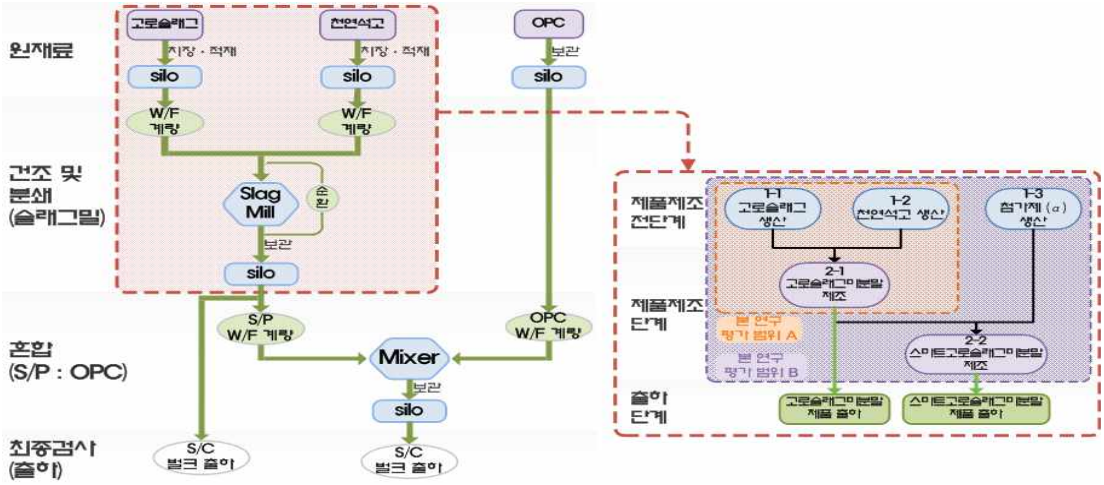


Fig. 3.3.89 Smart 고로슬래그미분말(SBFS) 생산공정 흐름도

Table 3.3.138 평가/시험대상 재료

재료	종류	산지	조립율	밀도 [절건]	CO_2 배출 원단위 [kg-CO_2/단위]	단위	CO_2 배출 원단위 근거
OPC	1종	전남담양	-	3.15	0.951	kg	국토해양부*
G	부순골재	경기광주	6.8	2.63	0.262	m^3	국토해양부*
S	세척사	경기인천	2.8	2.61	0.004	m^3	국토해양부*
GBFS	3종	충남당진	-	2.90	0.038	kg	개별적산법**
SBFS	-	충남당진	-	2.89	0.035	kg	개별적산법**
W	상수도	-	-	-	0.000332	kg	국토해양부*
AE	표준형	경기평택	-	-	0.25	kg	일본토목학회

* 시설물별 탄소배출량 산정 가이드라인, 국토해양부, 2011

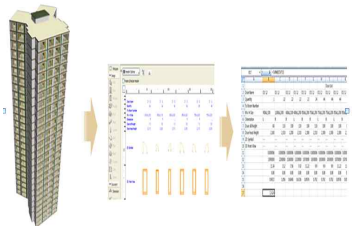
** Smart 고로슬래그미분말(SBFS) CO_2 원단위 평가/시험, 국토해양부, 2012

(4) 평가/시험 대상 건축물

(가) 개요

일반적으로 건설되는 공동주택의 구조인 콘크리트 벽식구조를 평가/시험 대상 건축물로 선정하였다. 평가/시험 대상 건축물 개요는 Table 3.3.139와 같으며 서울지역에 위치하는 판상형 공동주택 건축물로 현재 국내에서 주로 건설 되고 있는 33평형(공급면적 111.33m^2)으로 지상 25층, 4호 조합으로 구성되어 있다.

Table 3.3.139 평가/시험 대상 건축물 개요

개 요		
▪ 건물Type : 판상형 ▪ 건물용도 : 공동주택 ▪ 전용면적 : 84.95m^2 ▪ 공급면적 : 33평형(111.33m^2) ▪ 주거공용면적 : 26.43m^2	▪ 주호조합 : 4호 조합 ▪ 구조형식 : 콘크리트 벽식구조 ▪ 층수 : 지상 25층 ▪ 강도 : 전층 24Mpa ▪ 레미콘규격 : 25-24-150	

(나) 물량산출 및 CO_2배출 원단위

평가/시험 대상 건축물의 구조체와 마감재 물량을 Table 3.3.140과 같이 산출하였으며, 산업연관분석방식과 국가 LCI DB, 개별적산방식을 활용하여 구축한 주요 건설자재의 CO_2 배출 원단위는 Table 3.3.141과 같다.

Table 3.3.140 평가대상 건축물 물량산출 결과

사 용 자 재			단위	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7
구분	품 명			물량 (단위/m^2)						
1	콘크리트		m^3	0.84						
2	이형철근		kg	37.31						
3	합판 거푸집 3회 (목재)	내수합판	kg	3.38						
		각재(角材)	kg	10.32						
		소철선	kg	0.16						
		못	kg	0.11						
		박리제	kg	0.11						
	합판 거푸집 (유로폼)	금속제 거푸집(유로폼)	kg	13.70						
		합판	kg	11.79						
		금속제 거푸집 (내벽코너패널)	kg	0.37						
		합판	kg	7.86						
		거푸집 부속철물(990mm)	kg	1.22						
		거푸집 부속철(200mm)	kg	1.67						
		강관비계	kg	0.38						
		박리제	kg	0.21						
	GANG FORM(ELEV./PT)		kg	0.14						

	GANG FORM(요철 측벽)	kg	0.12
4	무근CON'C	kg	13.59
	시멘트벽돌(0.5B)	개	14.35
	시멘트벽돌(1.0B)	개	74.51
	시멘트	kg	24.44
	모래	m^3	0.05
5	발포폴리스티렌판	kg	0.34
	초산비닐계접착제	kg	0.07
	발포폴리스티렌판	kg	0.08
	초산비닐계접착제	kg	0.01
	압출발포 폴리스티렌 판	kg	0.02
	비닐시트	kg	6.67
	초산비닐계접착제	kg	0.11
	PVC 천정재	kg	1.09
	염화비닐파이프	kg	0.14
6	수성 페인트	kg	0.24
	수성 페인트(비닐페인트)	kg	0.02
	아크릴수지 페인트	kg	0.00
	방청 페인트	kg	0.01
	신너	kg	0.00
	프라이머	kg	0.04
	무늬코트	kg	0.12
	알칼리 삼출방지프라이머	kg	0.03
	알칼리 삼출방지 신너	kg	0.01
7	석고보드(9.5T)	kg	12.98
	석고보드(12.5T)	kg	3.31
	C-스터드	kg	0.30
	C-런너	kg	0.10
	유리면	kg	0.13

Table 3.3.141 주요자재 CO_2 배출 원단위

품 명	규 격	단위	CO_2 배출 원단위 [kg-CO_2/단위]		근거		
					DB	부분명칭	세부항목
콘크리트	25-240-15	m^3	Case1	376.84	개별적산*		
			Case2	344.58	개별적산*		
			Case3	312.33	개별적산*		
			Case4	280.08	개별적산*		
			Case5	344.48	개별적산*		
			Case6	312.11	개별적산*		
			Case7	279.75	개별적산*		
이형철근	H10	kg	0.39		국가 LCI DB		
내수합판	1급, 12×1220×2440mm(m^2)	kg	0.26		산업연관분석	합판	보통합판
각재(角材)	외송(m^3)	kg	0.34		산업연관분석	제재목	가공목재
소철선	어니일링, 4.0mm	kg	0.14		산업연관분석	철선제품	철선제품(기타)
못	일반 못 N 75	kg	0.005		산업연관분석	철선제품	쇠못
박리제	목재용(수성)	kg	5.03		산업연관분석	합성수지	폴리우레탄수지
금속제 거푸집 (유로폼)	600×1200×63.5mm	kg	1.42		산업연관분석	냉간압연강재	냉연박판
금속제 거푸집 (유로폼)	내벽코너패널, (200+200)1200	kg	1.42		산업연관분석	냉간압연강재	냉연박판
거푸집 부속철물	웨지핀, 90mm	kg	13.66		산업연관분석	부착용금속제품	건물용철물
거푸집 부속철물	플랫타이, L=200mm	kg	13.66		산업연관분석	부착용금속제품	건물용철물
강관비계	비계파이프, 48.6*2.3mm	kg	2.30		산업연관분석	강관(주철강관 제외)	용접강관
박리제	목재용(수성)	kg	5.03		산업연관분석	합성수지	폴리우레탄수지
GANG FORM	ELEV. / PIT	kg	1.42		산업연관분석	냉간압연강재	냉연박판
GANG FORM	요철 측벽	kg	1.42		산업연관분석	냉간압연강재	냉연박판

* SBFS 혼입 콘크리트 전 과정 CO_2 배출량 평가결과 활용

무근CON'C	0	kg	0.07	산업연관분석	시멘트	보통시멘트
시멘트벽돌	0.5B	개	0.05	산업연관분석	콘크리트제품	콘크리트벽돌
시멘트벽돌	1.0B	개	0.05	산업연관분석	콘크리트제품	콘크리트벽돌
시멘트	0	kg	0.07	산업연관분석	시멘트	보통시멘트
모래	0	m^3	0.002	산업연관분석	모래 및 자갈	모래
발포폴리스티렌판	비중0.03,50mm	kg	2.29	산업연관분석	합성수지	발포성폴리스티렌수지
초산비닐계접착제	스치로폴,암면	kg	1.97	산업연관분석	합성수지	에틸렌-초산비닐공중합체
발포폴리스티렌판	비중0.03,70mm	kg	2.29	산업연관분석	합성수지	발포성폴리스티렌수지
초산비닐계접착제	스치로폴,암면	kg	1.97	산업연관분석	합성수지	에틸렌-초산비닐공중합체
압출발포 폴리스티렌 판	압출,비중 0.03,9mm	kg	2.29	산업연관분석	합성수지	발포성폴리스티렌수지
못	일반 못 N 50	kg	0.005	산업연관분석	철선제품	쇠못
비닐시트	모노륨, 1.8mm	kg	1.74	산업연관분석	합성수지	폴리염화비닐(PVC)
초산비닐계접착제	비닐타일용	kg	1.97	산업연관분석	합성수지	에틸렌-초산비닐공중합체
PVC 천정재	욕실 천정	kg	1.74	산업연관분석	합성수지	폴리염화비닐(PVC)
염화비닐파이프	Φ150mm	kg	28.82	산업연관분석	플라스틱1차제품	플라스틱파이프-관호스
수성페인트	내벽 3회	kg	11.64	산업연관분석	도료	수성페인트
수성페인트	내천정 3회	kg	11.64	산업연관분석	도료	수성페인트
아크릴수지 페인트	세라민A, DAC-3108, 흑색	kg	3.74	산업연관분석	도료	아크릴도료
신너	KSM6060,1종	kg	0.94	산업연관분석	도료	신너
공업용휘발유	무연	l	2.60	산업연관분석	휘발유	휘발유
방청 페인트	KSM6030 (1종 1류), 광명단페인트	kg	3.99	산업연관분석	도료	유성페인트
신너	KSM6060,2종	kg	0.94	산업연관분석	도료	신너
프 라 이 머	0	kg	11.64	산업연관분석	도료	수성페인트
무 늬 코 트	0	kg	11.64	산업연관분석	도료	수성페인트
알칼리 삼출방지프라이머	0	kg	11.64	산업연관분석	도료	수성페인트
알칼리 삼출방지 신너	0	kg	11.64	산업연관분석	도료	수성페인트
석고보드	9.5T, 12.5T	kg	0.21	국가 LCI DB		
C-스터드	50X45X0.8T	kg	2.30	산업연관분석	표면처리강재	아연도강판
C-런너	52X40X0.8T	kg	2.30	산업연관분석	표면처리강재	아연도강판
유리면	24K 50T	kg	0.19	국가 LCI DB		

* SBFS 혼입 콘크리트 전 과정 CO_2 배출량 평가결과 활용

사. 소 결

GBFS, SM, SBFS에 대한 전 과정 CO_2 배출량 평가결과 각각 0.1142 $kgCO_2/kg$, 0.0376 $kgCO_2/kg$, 0.0521$kgCO_2/kg$으로 나타났다.

◎ SBFS의 CO_2 배출량은 0.052[$kg-CO_2eq/kg$]로 평가되었다. SBFS 생산 시 원재료단계의 CO_2 배출량은 0.0199[$kg-CO_2eq/kg$]이 배출되는 것으로 평가되었으며 전체 CO_2 배출량 중 가장 많은 부분을 차지하였다. 또한, 원재료인 고로슬래그와 원천소재를 SBFS 제조공장으로 수송 시 CO_2 배출량은 0.0136[$kg-CO_2eq/kg$]으로 평가 되었으며, 제조단계의 CO_2 배출량은 0.0186[$kg-CO_2eq/kg$]로서 나타났다. SBFS의 전 과정 CO_2 배출량 중 전력사용량에 따른 CO_2 배출량이 약 34%로서 가장 많이 영향을 미치는 것으로 나타났으며, LNG사용량에 따른 CO_2 배출량은 약 1.5%로 분석되었다.

◎ 국내의 GBFS시멘트제품의 제조규격(KSL 5210)을 참고하여 GBFS의 혼합비율에 따라 일반 GBFS시멘트(1종 GBFS시멘트) 평가기준을 Case 1(GBFS 20%)로 설정하였다. 또한 GBFS의 혼합비율을 증가시킴에 따라 2종 GBFS시멘트, 3종 GBFS시멘트를 대상으로 하여 각각 Case 2(GBFS 45%), Case 3(GBFS 60%)으로 설정하였으며 SBFS을 혼합한 경우에 대하여 Case 4(SBFS 30%)로 설정하였다.

◎ 평가/시험 결과 Case 1에서 발생하는 CO_2 배출량은 0.7630 $kgCO_2/kg$ 으로 평가되었다. Case 2, Case 3의 경우 각각 0.5364 $kgCO_2/kg$, 0.3551 kgCO2/kg 으로 평가되었으며 평가결과 Case 1 대비 Case 2, 3는 29.7%, 53.5%의 CO_2 배출저감효과가 있는 것으로 나타났다. 이는 보통포틀랜드시멘트의 CO_2 배출원단위보다 낮은 GBFS, SBFS의 혼합비율이 늘어남에 따라 보통포틀랜드시멘트의 함유량이 감소하는 것에 기인하여 전체의 탄소배출량이 저감되기 때문이다. 또한, Case 4는 Case 1 대비 11.99%의 저감효과가 있는 것으로 평가되었다.

◎ Plain 배합(Case1)과 고로슬래그시멘트 혼입(Case2), SBFS 혼입(Case3)된 레미콘의 CO_2 배출량 비교결과 각각 344.9[$kg-CO_2eq/m^3$], 307.8[$kg-CO_2eq/m^3$], 251.6[$kg-CO_2eq/m^3$]로 나타났다. Plain 배합인 Case 1 대비 Case 2와 Case 3는 약 11%, 27% 저감되는 것으로 평가되었다. 또한, Case별 경제성은 각각 151,175[원/m^3], 149,425[원/m^3], 144,380[원/m^3]으로 나타났다. Plain 배합인 Case 1 대비 Case 2와 Case 3는 약 2%, 5% 저감되는 것으로 평가되었다.

◎ SBFS 혼입 콘크리트의 강도별 전 과정 CO_2 배출량 평가/시험결과 콘크리트의 호칭강도가 높아짐에 따라 21MPa에서 최대값(동절기) 321.3[$kg-CO_2/m^3$] 및 149,100[원/m^3]에 불과하던 CO_2 배출량과 경제성이 30MPa에 이르러서는 최대값(동절기) 403.1[$kg-CO_2/m^3$] 및 161,400[원/m^3]까지 증가 하였다.

◎ 동일강도별 콘크리트의 최대, 평균, 최소 CO_2 배출량을 비교 및 분석하였으며, 분석결과 가장 많이 사용되고 있는 24MPa 콘크리트 경우 최대 CO_2 배출량과 경제성은 345.5[kg-CO_2/m^3] 및 153,200[원/m^3]이고, 최소 CO_2 배출량은 250.1[kg-CO_2/m^3] 및 140,300[원/m^3]으로 나타났다.
◎ 최대값과 최소값의 비교결과 콘크리트 전 과정 CO_2 배출량과 경제성 평가단계 중 운송단계와 제조단계에서는 큰 차이가 없었지만 원자재 생산단계에서 많은 차이가 있었다. 이는 CO_2 배출 최대값과 최소값에 해당되는 콘크리트의 보통시멘트와 Samrt 고로슬래그미분말, 고로슬래그미분말, 플라이애쉬 혼입량이 CO_2 배출량 과 경제성을 저감하는 주요인으로 분석되었다.

◎ 하절기와 동절기의 콘크리트 배합설계에 따라 CO_2 배출량과 경제성의 차이를 뚜렷하게 알 수 있는데 강도가 증가함에 따라 CO_2 배출량이 증가함은 물론이고 모든 강도에서 하절기와 동절기의 차이가 거의 균일하게 나타났다.

◎ 콘크리트 호칭강도가 21MPa에서 30MPa에 이르기까지 CO_2 배출량은 거의 일정하게 약 4~5%만큼 동절기의 CO_2 배출량이 하절기에 비해 높게 평가되었다. 이는 콘크리트가 동절기에 양생이 제대로 이루어 지지 않기 때문에 배합설계에서 초기수화반응을 완화시키는 플라아애쉬와 고로슬래그미분말과 같은 혼화재의 양을 줄이고 보통시멘트의 배합량을 증가시켰기 때문으로 판단된다.

제 4절 원천소재 제조용 Pilot Plant 제작

1. 개요

로터리 킬른(rotary kiln)이란 시멘트・석회・점토・알루미늄 등의 공업에서 많이 사용되는 원통회전식의 연속소성로, 길이 10m 정도의 것에서부터 시멘트 공장에서 쓰는 백 수십 m에 이르는 것도 있다. 지름 2~4m의 원통 안쪽에 내화벽돌을 붙이고, 원통은 약간(3~5°) 경사지게 하여 롤러로 지지하며, 천천히 회전시킨다. 원료는 가마 윗부분으로부터 연속적으로 공급되며, 회전함에 따라 내벽을 미끄러져 떨어져 고온부로 이동한다. 연료는 가마의 아래쪽으로부터 미분탄・중유가스 등을 버너로 뿜어 넣어, 원료를 직접 가열하는 방식이 보통이며, 가열된 것은 차례로 연속적으로 배출된다.
제조의 경우에는 1,400℃ 이상까지 가열되며, 원료인 석회석・점토 등이 반응・소결(燒結)하여 1~2cm 정도의 클링커(clinker:燒塊)로 된다. 특징은 대량의 분립체(粉粒體)를 연속적으로 소성(燒成) 또는 하소(煆燒)할 수 있다는 점으로 시멘트의 제조설비로서 가장 진보된 것이다. 최근에는 가마를 될수록 길게 하여 열의 이용효과를 높이려는 경향이 있으나, 반대로 독일에서 고안된 레포르 킬른과 같이 20~30m 정도로 짧게 하고, 입구에 단립화(團粒化)한 원료를 가열하는 특수한 예열장치를 하여 설비의 경감과 열의 이용을 꾀하고 있는 것도 있다. 본 시작품 제조용 Pilot 장치 개발의 원리는 시멘트 제조 과정을 이용한 방법으로 수분과 만나면 굳게 되는(수경성) 무기물 결합재와 잠재 수경성인 원료를 열을 가하여 고온소성을 통해 광물구조의 결합・해체하는 과정을 돕는 장치로서 Fig.3.4.1과 같이 소성을 통한 광물조성의 변화를 요구하는 시작품 장치이다.

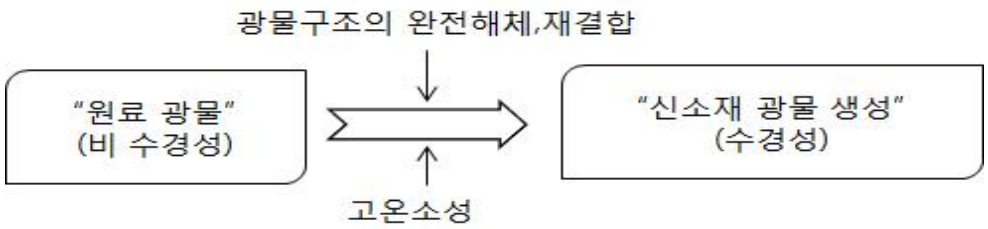


Fig. 3.4.1 소성을 통한 광물조성의 변화

본 시작품 개발에 의해 시공된 회전체 로터리 킬른은 회전로라고도 하며, 수평 원통형의 경미한 경사를 가지고 있으며, 투입된 원료를 천천히 회전에 의해 교반・이동하면서 연소한다. 산업 폐기물 처리에서는 가스화가 빠른 폐기물에 최적이며 효율적인 연소에 장점이 있으며, 이는 수평형 로타리 킬른 방식의 건조로로 원료 공급부, 열풍 주입부, 건조로 제어부, 온도측정 및 냉각부로 구성되어 있다. 원료 공급부는 원료 주입장치와 이송 스크류 피더로 구성되어있다. 원료 주입장치는 원료가 뭉쳐 막히는 현상과 이송 스크류 피더 위로 터널링 현상을 방지하기 위해 주입호퍼 내 하단부에 3개의 판이 서로 반대방향으로 회전하게 하여 원료를 밀어 연속적으로 주입하게 하는 방법을 채택하였으며, 본 제원은 1차도 과제 수행

시 Pilot 소성장치 설계 후 시공사 선정과정에서 시작품의 개요의 사전 협의를 통하여 개발한 실험용 간이 Pilot설비이며, 기본제원은 아래 Table 3.4.1과 같다.

2. 원천소재 제조용 Pilot Plant 제원 및 성능

Table 3.4.1 원천소재 제조용 Pilot 제원

형식	Pilot 시작품 장치 제원
소성용 킬른 길이	5,300mm
소성온도 (전기로)	최대 1,350℃
원료 Hopper	1개 이상
냉각장치	에어방식
Dryer Size	외경 1,100mm, 내경 600mm
총 구동중량	11ton
소성로 내부 재료	케스타블
전기 제어방식	중앙집중판넬식 제어
MATERIAL	Lime stone
시간당	20kg/hr

Table 3.4.2 원천소재 제조용 Pilot 시작품 추진내용

분야	내 용
시공전문업체	동원엔지니어링(기계), 메카트로닉스 코리아(전기), 서언건설(토목)
project Name	Calciner Pilot Plant 시작품
공사기간	2012. 10 ~2013. 1.14
총 공사비용	2억 1천 7백 만원
주요설비목록	1. ROTARY KILN 2. DRIVE PART 3. RING TIRE & ROLLER PART 4. ROTARY KILN SHELL 5. IN/OUTLET HOOD PARTS 6. DOUBLE FLAP DAMPER 7. INFEED SCREW CONVEYOR 8. HOTAIR FURNACE 9. BURNER & GASTRAIN 10.CASTABLE & CASTABLE 시공 11.CONTROL PANEL & 전기공사 12.GAS COOLER 13.CYCLONE 14.ID FAN 등
특 징	1. 대량소성이 가능 2. 분말, 세립 재료의 소성이 가능 3. 대량 소성이면서 운전요원이 적다 4. 품질의 컨트롤러가 용이 5. 로내에서 교반되므로 제품이 비교적 균질

가. SBFS 제조용 Pilot 장치 시작품 착안점

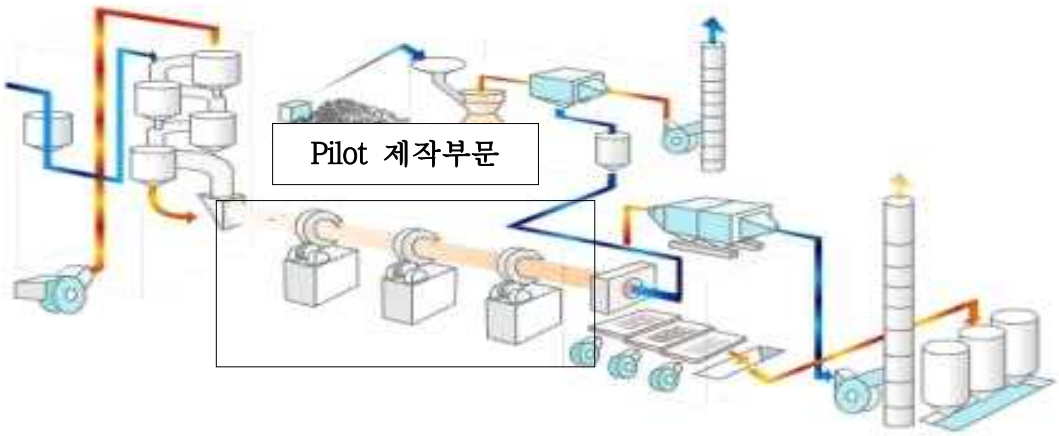


Fig. 3.4.2 시멘트 생산 원리를 이용한 시작품으로 소성로 부문을 이용한 장치

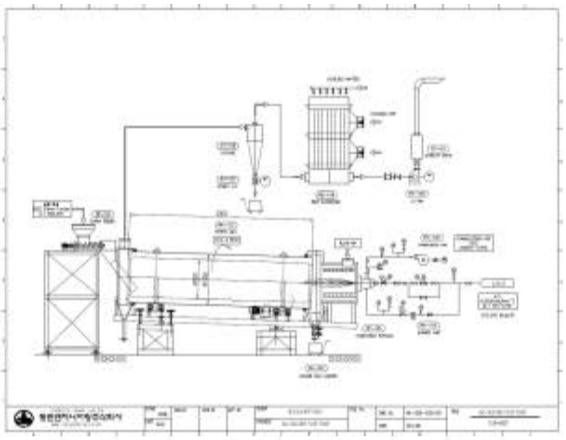
포틀랜드 시멘트의 제조 방식에는 습식과 건식이 있으며, 과거에는 습식이 주류를 이루었다. 이 방식은 원료를 분쇄할 때 적당량의 물을 가하여 분쇄, 혼합하여 슬러리로 한 후 큰 탱크에 넣어서 저장하여 성분 조정을 행한 후 물의 일부를 여과하고 킬른으로 보내는 것이다. 그러나 습식은 품질의 안정화는 기할 수 있지만 수분의 증발을 위해서 다량의 열을 필요로 하기 때문에 연료의 소모가 크다. 현재에는 물을 전혀 사용하지 않고 원료를 분해, 혼합하는 건식으로 거의 바뀌었다.

이외에도 원료의 소성방법은 에너지 절약 측면에서 여러가지로 검토되어 왔다. 수십 년 전만 해도 로터리 킬른(Rotary Kiln) 만으로 900℃ 이하에서 행하여지는 석회석과 점토의 열분해와 900℃ 이상에서 행해지는 분해 생성물의 고상반응과에 필요한 전열량을 능률이 낮은 연소가스와의 열교환에 따라 수열하고 있었다.

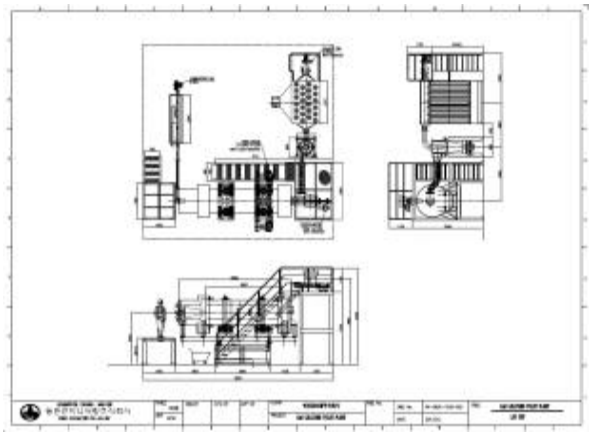
기술발전에 따라 SP(Suspension Preheater) 킬른을 채용함에 따라 상당히 열효율이 좋은 사이클론식 프리히터로 킬른에서 연소가스를 유도, 열분해(흡열반응)의 약 40%를 종료시키고 로타리 킬른 내에 보내 넣기 때문에 필요열량은 60%로 줄게 되어 킬른의 소성효율을 현저히 높이는 것이 가능해 졌다. 이 프리히터에 있어 열분해를 더욱 촉진시키기 위해서 프리히터 중에 별도의 열원이나 소성로를 마련한 것이 NSP(New Suspension Preheater)이다. 포틀랜드시멘트의 제조는 원료공정, 소성공정, 제품화공정의 3공정으로 대별할 수 있으며 원료가 킬른에 들어가면 열분해 반응은 거의 완료되기 때문에 킬른내의 고상반응과 소결반응을 위해서 원료에 주는 열량은 900~1,450℃까지 원료의 온도를 올리기에 필요한 것이다.

킬른 출구의 반응생성물의 온도는 약 1,450℃가 되어 충분히 소결되어 직경 1cm 정도 크기의 둥근 괴상으로 되어 1,200℃ 정도의 온도로 킬른 출구로 나와 즉시 냉각장치로 들어간다. 이것이 시멘트 클링커이다. 이에 본 시작품의 착안점으로 소성부문만을 이용한 개발품이다.

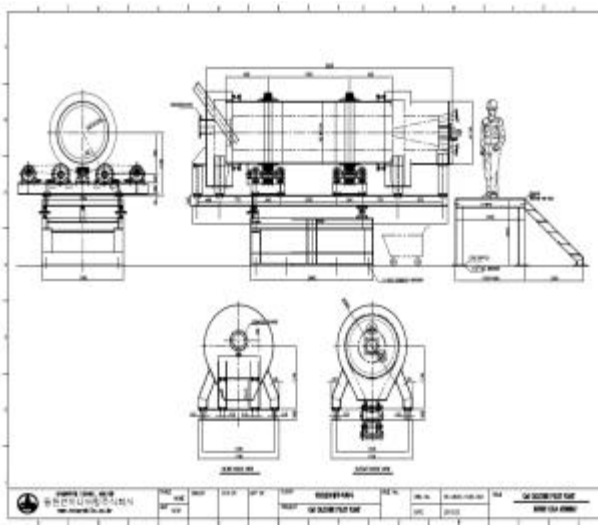
나. SBFS 제조용 Pilot 장치 시작품 주요 도면



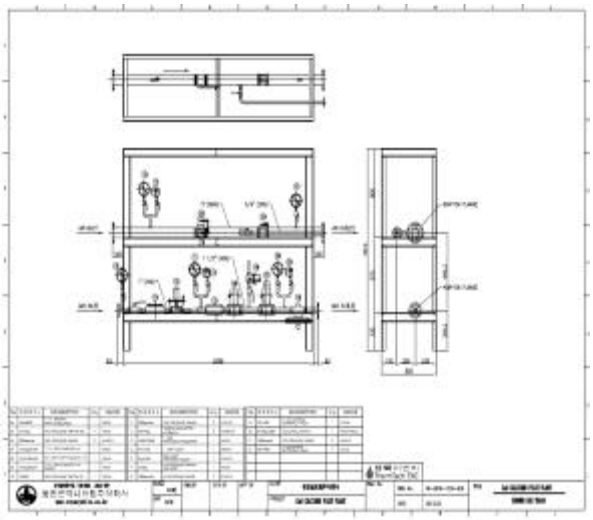
• Pilot 킬른 시작품 FLOW SHEET



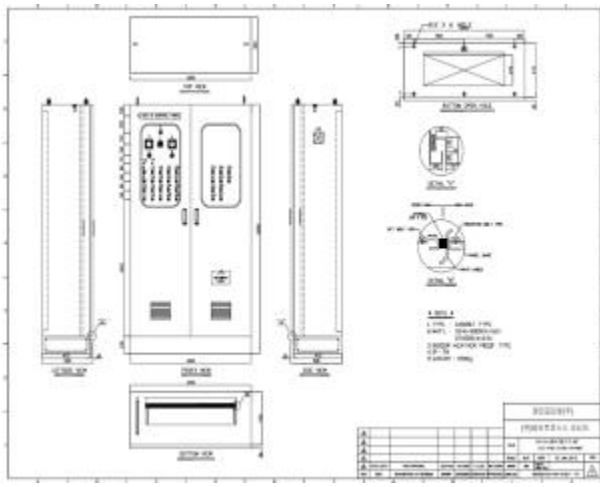
• Pilot 킬른 시작품 평면도



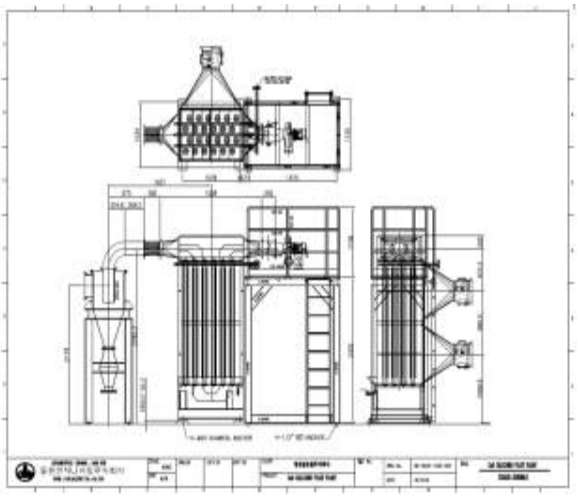
• Pilot 킬른 시작품 입면도



• Pilot 킬른 시작품 LNG 배관 입면도



• Pilot 킬른 시작품 전기 배전반



• Pilot 킬른 시작품 COOLER 배치도

다. SBFS 제조용 Pilot 시작품 공사



• 소성로 설치 장소(토목공사)



• 소성로 킬른



• 소성로 부대설비 공사



• 소성로 설치 완료



• 소성로 측면도



• 소성로 LNG라인

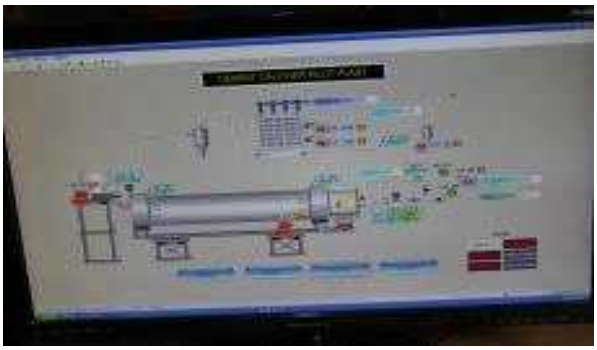


• 소성로 제어실



• 소성로 설비 상부

라. SBFS 제조용 Pilot 시작품 시운전



• 소성로 Pilot control 제어판



• 소성로 온도 제어라인



• 소성로 시운전 중



• SBFS 원천소재 클링커 소성



• 소성로 제어판 설명회



• 소성로 설명회 참석자

마. SBFS 제조용 Pilot (Heat-Up Temperature Curve)운전 개요

본 시작품의 운전 매뉴얼은 MAIN CONTROL PANEL 의 NFB, CP, 각각의 토글 스위치, EOCR등이 운전가능 상태이며, 각각의 모터는 PANEL에서 LOCAL제어가 가능하고 PC에서 자동·수동 모드는 PANEL상의 SELECT S/W가 REMOTE상태일 때 가능하도록 설계되었으며 이에 따른 수동 운전 및 자동 운전도 가능한 조건으로 제작되었다. 특히 온도별 운전 구간을 총 12구간으로 나누어 설정되어 있어 소성과정의 온도 제어를 자유롭게 할 수 있는 것이 특징이다.

예) 자동운전 0℃ 에서 버너가동 → 1시간 동안 서서히 500℃ 까지 상승, 인버터 10HZ기동
→ 2시간 동안 500℃ 유지, 인버터 50HZ기동
→ 1시간 동안 서서히 150℃ 까지 감온, 인버터 10HZ기동
→ 버너OFF 온도 +40℃, 버너ON 온도 -40℃



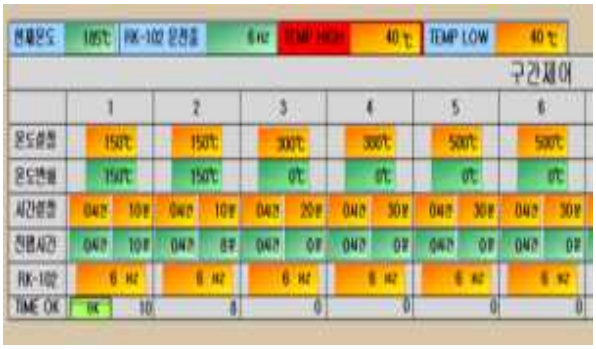
1. “CIMON X“ 제어프로그램을 실행



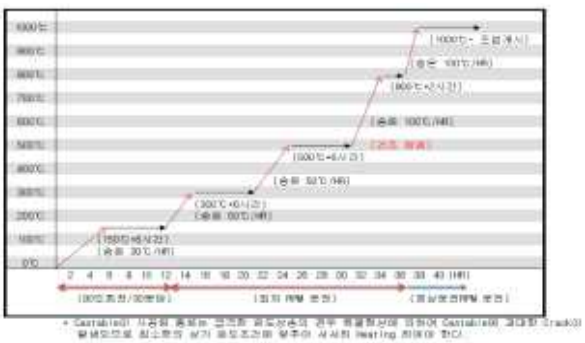
2. 자동운전에서는 구간제어표 각각의 구간에 할당된 인버터HZ란에 설정



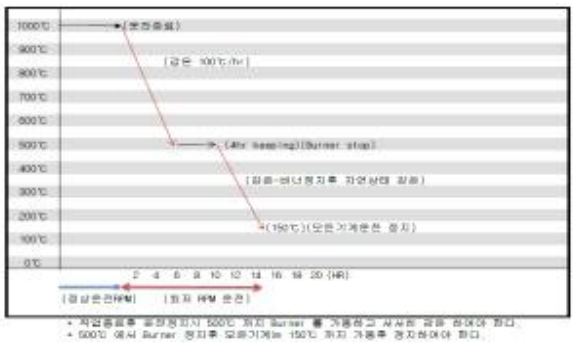
3. 불꽃이 점화되어 DETECTOR가 불꽃을 감지하면 FIRE TR1이 OFF되며 온도, 시간, 인버터값 설정에 따라 장비 가동시작



4. 자동운전시 버너 ON/OFF의 온도편차(TEMP HIGH, TEMP LOW) 값은 “온도변화“ 값에 맞추어 작동



5. Castable 건조・승온 곡선 for Rotary Kiln



6. Castable감온곡선 for Rotary Kiln

바. 시작품 공사완료보고서

Project Name : CaO Calciner Pilot Plant

01. Completion Photograph

REV.	DATE	DESCRIPTION	DRWN	CHKD	APPD	PE	PM
2							
1							
0	2013.03.18	AS BUILT	Jeong J.S	Lee S.N	Park J.H		

Item : CaO Calciner Pilot Plant

Customer : YoungJin Global Co., Ltd.

Manufacture : Dongwon Engineering Co., Ltd.
www.rotarykiln.co.k

Project No.	-	Item No.	-
DWG. No. or Doc No.	DOC-DW-001	Rev.	0

영진글로벌(주) | Photograph | 동원엔지니어링주식회사 Dongwon Engineering Co., Ltd.

Project No.	-	Supplier	Dongwon Engineering co., Ltd
Project	CaO Calciner Pilot Plant	Drawing No.	RK-0836-1030-002
Item / Part No.	-	Process	Completion Photograph



Project No.	-	Supplier	Dongwon Engineering co., Ltd
Project	CaO Calciner Pilot Plant	Drawing No.	RK-0836-1030-002
Item / Part No.	-	Process	Completion Photograph



3. Pilot Plant 소성에 의한 화학분석 및 미세분석

(1) 개요

원천소재 Pilot 제조공정은 티탄석고와 정수오니, 석회석을 조합 분쇄하여 이 조합원료(Raw mix)를 소성로(Kiln)에서 소성하여 만든 SBFS Clinker를 재분쇄하여 만드는 과정에 따른 원천소재 클링커 조성 최적화 실험 및 화학분석 및 미세분석을 진행하였다.

(가) 재료 조합 및 분쇄

Smart 고로슬래그미분말(SBFS) 주요 원천소재 원료공정은 티탄석고와 정수오니, 석회석 정확히 평량 조합하여 저장 홉퍼에 투입하면 정량 속도에 의해 Smart 고로슬래그미분말 제조용 Pilot 장치인 Kiln에 투입되어 온도 제어에 의한 자동시스템에 의한 온도별 SBFS Clinker 생성 결과물을 분쇄기(볼밀)에서 비표면적(Blain) 4,300～4,500㎠/g, 44㎛잔사는 5±1% 정도로 조정 관리 한다.

(나) 원료의 배합 및 조정

SBFS Clinker 제조하려면 사용하는 원료의 화학성분에 따라 원료의 조합지를 결정하여야 한다. 따라서 Smart 고로슬래그미분말 원천소재인 티탄석고, 정수오니, 석회석의 인수검사부터 SBFS Clinker까지의 화학성분 변화를 조사하였다.

(다) 인수검사 화학성분

① 티탄석고

티탄석고는 황의 산성을 석회로 중화시키는 화학반응 공정에서 발생되는 부산물이며 화학식은 $CaSO_4$ + $2H_20$이다. 티탄석고는 다량의 CaO(39.2%)와 SO_3(54.3%)를 함유하며, 티탄석고는 건조 후 물과 접촉 하면 발열반응과 함께 응결이 나타난다.

Table 3.4.3 티탄석고의 화학 성분

구분	화 학 성 분 (%)									합계
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	TiO_2	P_2O_5	
티탄석고	1.49	0.54	0.80	35.83	0.44	51.23	0.09	1.55	0.02	99.1

② 정수오니

화학성분으로서 시멘트의 제조광물과 같은 대량의 SiO_2(46.6%)와 Al_2O_3(39.7%), 소량의 Fe_20_3(5.4%)를 함유하고 있어, 산업폐기물의 활용성과 시멘트의 첨가제품으로서의 활용 가능성이 우수하다고 판단된다.

Table 3.4.4 정수오니의 화학 성분

구분	화 학 성 분 (%)									합계
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	TiO_2	P_2O_5	
오니	34.97	27.34	4.44	0.79	1.14	1.07	1.77	0.47	0.73	99.7

③ 석회석

포틀랜드 시멘트의 주원료인 클링커를 만드는데 있어서 가장 큰 비율을 차지하는 재료가 바로 석회($CaCO_3$)이다. 이러한 석회는 산화칼슘(CaO)이 주성분이며 이외에 실리카(SiO_2), 알루미나(Al_2O_3), 산화철(Fe_2O_3)의 4성분으로 구성되어 있다.

Table 3.4.5 석회석의 화학 성분

구분	화 학 성 분 (%)									합계
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	TiO_2	P_2O_5	
석회석	0.5	0.3	0.2	96.7	1.9	0.1	0.0	0.0	0.0	99.8

④ Pilot 킬른 시작품에 의하여 소성된 원천소재 화학성분

인수검사 및 Pilot 킬른에 적용 시 Table 3.4.6과 같은 반응과정과 배합별 혼합물질 1(티탄):1(정수오니):1(석회석)배합 및 4(티탄):3(정수오니):3(석회석)으로 배합을 설정 후 소성한 클링커 화학분석으로서 Table 3.4.7, Table 3.4.8과 같은 결과로 나타났다.

Table 3.4.6 클링커 소성과정

온도℃	반응	반응과정
0~500	건조 및 예열 Drying, preheating	원료중의 부착수분 증발 결정수 증발 결합수(화합수)증발
500~800	하소 Calcination	원료중의 CO_2 분해 불안정 액상 생성
800~1,050	소성 Sintering, clinkering	액상 생성 알라이트, 벨라이트 생성
1,050	자연냉각	액상의 결정화



소성 출구



원천소재 클링커출구



원천소재 클링커



Fig. 3.4.3 원천소재Pilot 킬른 시작품 및 클링커 사진

클링커 소성과정은 Pilot 킬른 시작품의 소성과정으로 원료 투입에서 클링커 소성까지의 소요시간은 킬른의 회전 속도에 따라 조정한 결과 24Hz을 기준(약 30분)을 기준으로 투입에서 온도 500℃까지는 부착수분의 증발, 화학수의 증발, 탈탄산반응 등이 일어나며 통상적으로 약 25 ~ 30%의 질량 감량이 일어나며 소성로 중간부위 500~800℃에서는 일부 고체상끼리 간단한 반응을 걸쳐 몇 가지 중간생성물을 생성하는데 이때 화학성분으로는 전기로 소성보다 서서히 SiO_2, Al_2O_3, CaO, SO_3 가 각각 증가하는 것으로 나타났으며 이후 탄산칼슘($CaCO_3$)은 900℃에서 증기압이760㎜hg이나 실제로는 이보다 낮은 800℃ 전후에서 분해가 시작된다. 특히 석회석이 분해될 때 실리카나 알루미나가 함께 있으면 이보다 낮은 온도에서도 분해가 촉진된다. 온도가 더욱 상승되면 생성된 산화칼슘이 산성물질과 반응하기 시작하여 유리산화 칼슘의 양은 점점 줄어들게 된다.

본 Pilot 킬른 시작품 소성과정에서는 CaO-SiO_2-Fe_2O_3-Al_2O_3-MgO-Na_2O계의 최저용융온도는 1,050℃이나 실제로 소성 중의 액상 생성 온도는 이보다 약간 낮다.

티탄석고 1,050℃에서 30분 소성 시 유기불순물이 제거되고, 이수석고가 무수석고($CaSO_4$)로 되어, 물과 반응 시 SO_3 이온과 Ca 이온의 수화에 의해 에트링자이트의 생성으로 수화반응성이 향상되었다고 본다.(모르타르시험결과)

정수오니 1,050℃에서 30분 소성하므로 유기불순물 및 염소성분이 제거되며, 흙 성분이 아

닌 화산회 같은 성분으로 가용성실리카 성분이 수산화칼슘과 반응하여 불용성으로 경화하는 포졸란 반응성이 향상되었다고 본다.

석회석 1,050℃에서 30분 소성 시 $CaCO_3$성분이 탈탄산반응에 의해 CaO로 되어 물과 반응 시 급격한 $Ca(OH)_2$생성으로 pH를 상승시켜 수화반응을 향상시킨다.

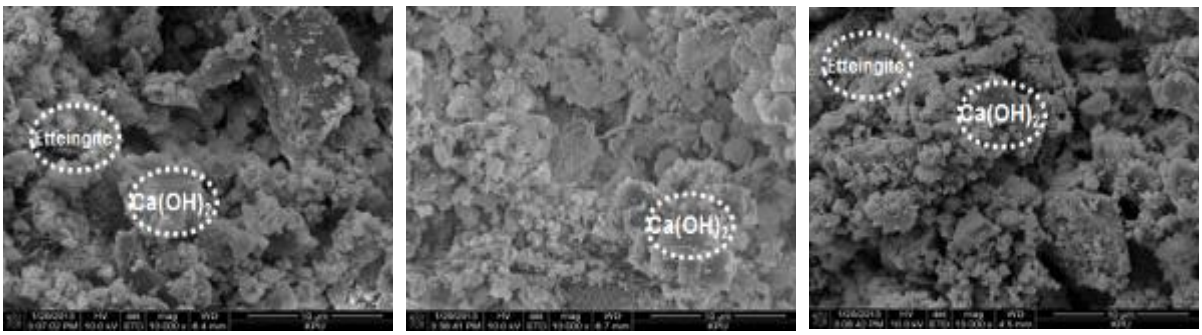
$Ca(OH)_2$및 $CaSO_4$는 슬래그 자극작용뿐만 아니라 반응제로 사용된다.

Table 3.4.7 원천소재 배합별(1:1:1) 소성후 클링커 화학성분(XRF분석)

구분	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3
전기로 (1050℃)	8.0	7.2	2.4	51.7	3.7	23.2
킬른(800℃)	6.98	8.12	1.73	48.51	2.05	32.41
킬른(900℃)	6.78	8.45	1.40	49.13	2.34	33.58
킬른(1050℃)	6.55	9.03	1.87	46.52	2.01	31.37

Table 3.4.8 원천소재 배합별(4:3:3) 소성후 클링커 화학성분(XRF분석)

구분	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3
전기로 (1050℃)	12.9	11.8	2.4	44.6	1.2	24.8
킬른(800℃)	5.65	8.99	1.72	43.59	1.02	34.45
킬른(900℃)	5.34	8.38	1.50	44.64	1.02	35.49
킬른(1050℃)	6.55	9.71	1.67	46.50	1.20	30.37

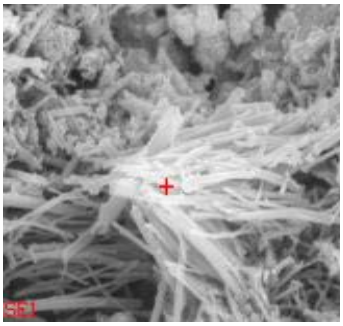


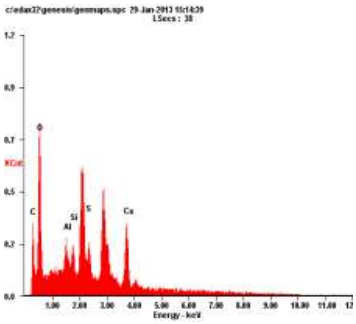
OPC 전기로 소성 클링커 PILOT 소성 클링커

Fig. 3.4.4 SBFS 최적 조성 연구 (SEM) X 10,000배

- EDAX (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) : 시료에 방사된 electron Beam(1차 전자)이 에너지를 발생시키고 이때 방출되는 특성 x-ray의 파장이나 에너지로써 시료의 표면분석 및 공정과정에서 생산된 불순물 분석에 빠르고 보편적으로 활용할 수 있음.

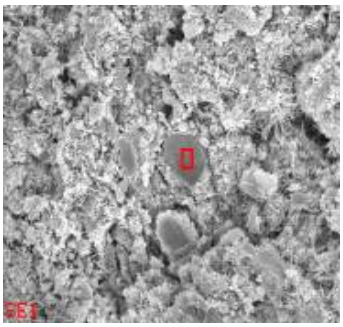
SEM에서 관찰된 수산화칼슘과 에트린자이트를 확대 하여 EDAX를 통해 시료의 표면에 X-RAY 파장을 가하여 성분을 분석하였다.

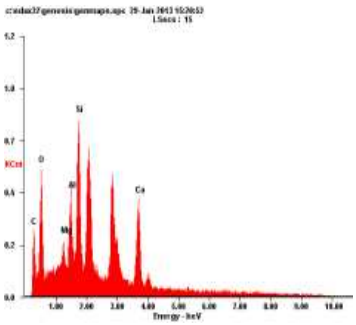




Element	Wt%	At%
CK	20.32	32.15
OK	38.72	46.01
AlK	04.19	02.95
SiK	03.77	02.55
SK	05.80	03.44
CaK	27.20	12.90

에트린자이트 EDAX





Element	Wt%	At%
CK	19.53	33.33
OK	25.55	32.72
MgK	01.55	01.31
AlK	06.86	05.21
SiK	16.72	12.20
CaK	29.79	15.23

Fig. 3.4.5 수산화칼슘 EDAX

⑤ 원천소재의 수화반응

본 연구에서 개발한 Smart 고로슬래그미분말은 현행 레미콘 공장에서 사용 가능한 치환 범위(10~30%)내에서 사용 시, OPC를 100% 사용 대비, 동일 강도 이상의 발현을 할 수 있도록 자체 개발한 제품으로 주요 인자로 고로슬래그의 단점인 산화피막을 파괴할 수 있는 것에 주안점을 두고 개발된 제품으로 수쇄슬래그의 glass를 구성하는 망상구조체를 형성하는 SiO_2의 사슬결합이 강알칼리에 의해 절단되면 이 망상구조체내에 있는 CaO, MgO, Al_2O_3 등이 용출된다. 일단 반응이 시작되면 수쇄슬래그 자신이 용출하는 성분에 의해 높은 pH를 유지함으로써 슬래그 중에 함유되어 있는 CaO와 SiO_2가 용출되어, 액상에서 포틀랜드시멘트의 수화와 같은 수화반응이 일어나, $CaO-SiO_2-H_2O$계의 수화물을 생성하기 때문에 경화현상이 일어난다. 이에 본 제품은 시멘트 및 슬래그를 동시에 수화반응이 나타나도록 화학성분의 조성을 통하여 개발한 제품으로 시멘트의 화학조성과 슬래그의 조성은 크게 다르기 때문에 수화생성물의 광물학적 측면에서 중요한 차이점이 생긴다.

슬래그와 시멘트의 주요 화학적 차이점은 다양한 슬래그 혼합 시멘트의 반응 생성물이 정리되어 있으며, 시멘트와 슬래그 사이의 유사성 가운데 중요한 한가지는 슬래그와 시멘트 중 많은 Ca성분이 결과적으로 C-S-H로 된다는 것이다. 따라서 사용되어지는 활성화제의 특성은 얻어지는 생성물의 특성에 큰 영향을 준다. 예로서, 슬래그가 NaOH, Na_2CO_3가 알칼리 촉진제로 사용되어지면 그 결과로 brucite, $Mg(OH)_2$이 Mg를 포함하는 주상으로 관찰되어진다. 포틀랜드시멘트가 활성화제로 사용되어지면, brucite는 일반적으로 관찰되어지지 않으며, 대신 조성에 대해서는 hydrotalcite와 비슷한 상들이 얻어지게 된다. 표는 OPC와

고로슬래그를 동시에 자극할 수 있는 수화 Mechanism의 화학성분의 인자로 본 개발된 제품의 소성과정에서 얻을 수 있는 화학조성물로 각각의 수화반응시 필요한 화학인자를 포함하고 있어 응결 및 슬럼프 시험에서 조기 수화반응 없이 OPC와 유사한 물성을 가지면서 수화반응 하는 것이 특징으로 나타났다.

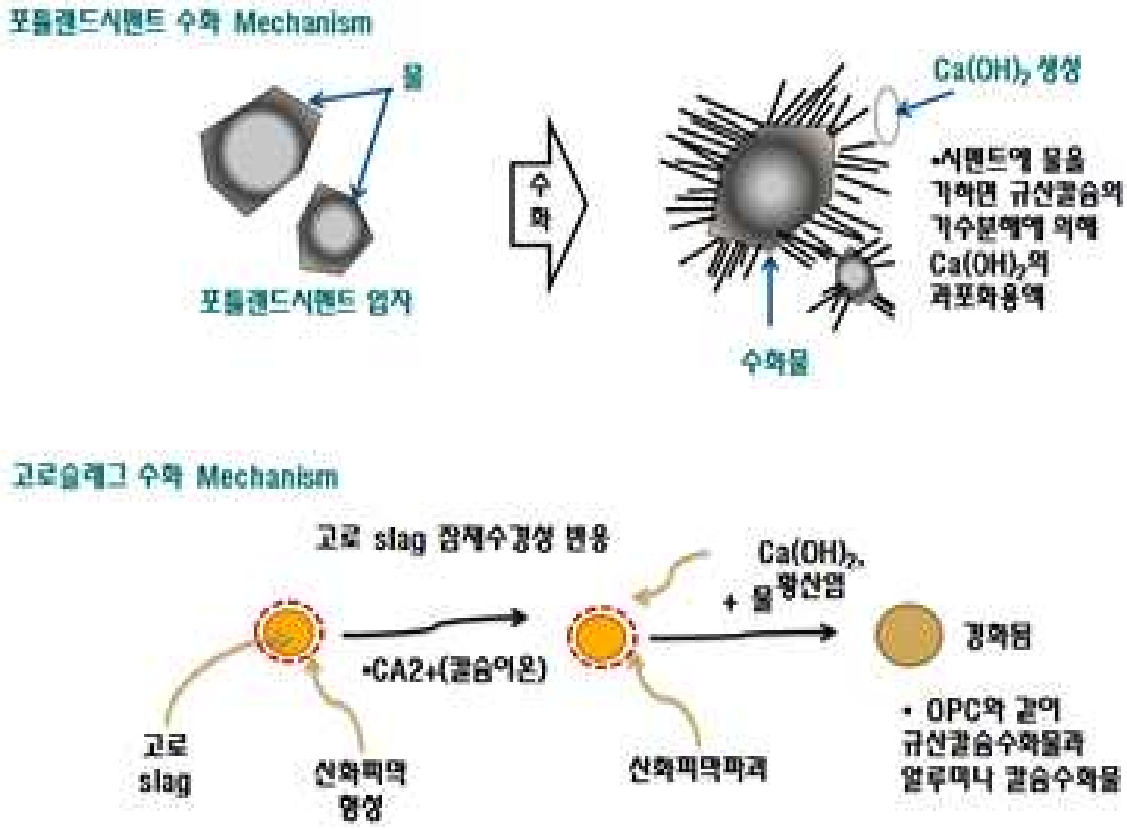


Fig. 3.4.6 OPC 및 GBFS 수화 모식도

제 5절 종합 결론

본 연구는 SBFS 혼입 저탄소 콘크리트의 초기재령에서의 압축강도 향상 기술개발로서 탄소저감형 건설재료를 개발하기 위하여 기존 연구기술의 문제점인 경제성 결여를 해결하기 위해 혁신적인 방안으로서 무기계 산업부산물 및 산업폐기물을 활용하여 소성을 통한 원천소재기술 개발을 목적으로 수행되었다.

원천소재 기술개발을 위하여 상기 기존에 유통되고 있는 알칼리 자극제의 실험 결과를 종합하여 볼 때 수경성과 잠재 수경성을 동시에 자극 할 수 있는 원천소재 개발의 원재료로서 티탄석고, 정수오니, 석회석을 선정하였으며, 이에 따라 재료배합 및 최적소성온도 조건을 도출하여, 미세분석을 통한 수화반응 메커니즘 및 모르타르레벨과 콘크리트레벨에서 결합재로서 활용하기 위한 실험을 실시하였다.

또한 실용화 단계를 위하여 자체 기술이전 및 원천소재의 영업 이익을 위한 MOU체결, 대용량 소성 킬른의 적용성 및 레미콘 B/P를 통한 현장 타설과 함께 내구성 검토를 진행하여 검토한 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 원천소재 개발을 위한 선행 연구로서 무기계 자극제를 이용한 GBFS의 강도발현특성을 분석한 결과, CSA의 수화반응을 유도하기 위하여 다량의 Al_2O_3의 성분이 물과 반응으로 인한 급결 현상을 방지하기 위하여, 응결조절제 및 SO_3 공급을 통해 안정적인 수화반응을 지속하는 결과를 도출 하였으며, 알칼리 시약을 사용하여 원천소재의 적용에 있어 높은 pH를 갖는 인자를 확보해야 강도 발현을 기대할 수 있다. 천연무수석고를 활용한 방안에서 SO_3 첨가량이 2%내외를 사용하는 것이 압축강도 발현에 우수한 작용으로 나타났다.
GBFS와 OPC 동시에 자극 할 수 있는 화학적 요소로서 pH 12이상, SO_3, Al_2O_3, CaO, 포졸란 반응을 유도할 수 있는 SiO_2의 성분을 갖는 산업 부산물과 산업폐기물에서 활용하고자 하였으며, 이는 경제성 및 대량 확보와 균일 품질을 갖는 요소로 작용한다.

2. 원천소재의 자극제로서 전기로 소성을 통하여 티탄석고 및 정수오니의 특성 분석결과, 티탄석고의 SO_3의 성분이 51.23%에서 54.31%로 증가를 하였는데, 이는 고로슬래그를 자극하기 위해 사용되는 자극제의 성분으로 이용되며, 전형적인 무수석고의 성분으로 나타났다.
정수오니는 시멘트의 초기강도 증진에 큰 기여하는 Al_2O_3의 성분이 27.34%에서 39.69%로 증가하였으며, 또한 소성전과 비교하였을 때 티탄석고의 증가율보다 더 많이 증가하였다.
또한 티탄석고는 연간 12만톤 발생하며, 정수오니는 매립 발생량이 일일 195톤이다. 이에 천연자원 보존과 환경문제를 동시에 해결 할 수 있는 탄소저감형 건설재료로서 활용가치가 높다고 할 수 있다.

3. 전기로소성을 통한 원천소재를 활용하여 SBFS 혼입 모르타르의 특성 연구를 진행한 결과 원천소재의 최적소성온도 1,050℃이며, 시멘트 자극에서 치환율 7%, 1:1:1배합 비율에서 OPC 100% 대비 104.5~112.2%로 모두 1일, 3일, 7일 압축강도 발현율을 만족한 결과로 나타났으며, 이를 통하여 국외에서 수입되는 특수 분체를 대체할 수 있는 조강제로서의 역할을 수행할 것으로 사료된다.

GBFS 자극에서는 치환율 7%, 4:3:3배합 비율에서 GBFS의 자극을 받아 단독으로 소성된 티탄석고와 정수오니는 강도발현이 나타낼 수 없었으며, 강알칼리성의 pH 즉, 석회석의 존재여부가 GBFS의 산화피막을 제거하여 에트링자이트와 C-S-H를 초기에 생성하여 중요한 강도발현 자극제로 요구되는 것으로 나타났다.

저온환경 자극 개발과정에서, 기존 슬래그시멘트는 70~80.8%의 강도발현에 미쳐 건설현장에서의 동절기 시공시에 거푸집의 탈형시기가 저하되는 것을 실험을 통해 알 수 있었으며, 치환율 7%, 4:3:3 배합 비율에서, 기존 슬래그시멘트의 압축강도 발현율을 비교하여, 1일 180.9%, 3일 106.7%, 109.5%의 강도 증진율을 보여, 저온환경에서의 압축강도를 개선할 수 있는 효과를 본 실험을 통하여 알 수 있었다.

4. 원천소재 미세분석을 실시하여 XRD 실험 결과로서 1, 3, 7일 재령별 X선 회절에 의한 수화생성물의 분석을 실시한 결과로 재령이 경과 할수록 수산화칼슘의 생성이 증대되며, 미수화생성물인 C_3S는 점차 줄어드는 것으로 나타났다. 수산화칼슘의 생성이 가장 많은 것은 OPC, 기능성분쇄조제를 사용한 원천소재, 기존 원천소재의 순으로 확인 되었다.

SEM 촬영 분석결과 기능성분쇄조제를 사용한 시료에서 에트링자이트 및 수산화칼슘이 다량 생성되는 것을 확인할 수 있어 기능성 분쇄조제를 통한 응집현상을 제거함으로써, 수화반응을 촉진하는 결과를 나타냈다.

5. 전기로 소성을 통한 원천소재 적용에 있어, SBFS 치환율에 따른 성능검토를 실시한 결과 SBFS 치환율이 증가할수록 유동성은 증가하는 것으로 나타났으며, 공기량은 감소하는 경향을 나타내어 적절한 혼화제 사용이 필요할 것으로 판단된다. 압축강도 측정결과 재령 1, 3일에서 SBFS 7% 배합이 Plain 배합의 약 102.3~105.6%의 압축강도 발현율을 나타내어 기존 연구결과와 마찬가지로 SBFS 치환율의 경우 7%가 적정한 것으로 판단된다. SBFS 치환율별 간이단열온도 상승시험 결과 SBFS를 치환함에 따라 Plain 배합에 비해 중심부 최고온도 도달시간은 지연되는 것으로 나타났으며, 중심부 최고 온도는 SBFS 치환율이 증가할수록 높아지는 경향을 나타내었다. 따라서 본 실험결과 SBFS의 우수한 성능을 확인 할 수 있었으며, SBFS 적정 치환율은 7%인 것으로 나타났다.

6. Pilot 소성로를 통하여 기존 전기로 방식에서 보다 대량으로 원천소재를 생산할 수 있는 장비를 갖추어 환원방식에서 산화방식의 킬른으로 소성방법이 변경됨에 따라서 최적소성온도를 선정하기 위한 압축강도를 평가하였다. 모르타르 레벨 및 미세분석을 통하여 얻은 결과로서 소성온도별 실험을 실시한 결과 원천소재 배합에 상관없이 800℃에서 가장 높은 압축강도를 발현하였다. 이는 시멘트 생산에 필요한 소성온도가 1,450℃의 높은 에너지 소모에 비해 원천소재와 고로슬래그미분말을 사용하여 30%의 시멘트의 비용을 줄이고, 원천소재의 소성에 필요한 에너지의 절감이 사회적, 경제적의 이점으로 저탄소 친환경 기술로서 우수성을 나타낸다. 원천소재의 대량생산이 가능한 Pilot Plant 제작으로 국내 유일한 고용체 결합재 개발의 범 실험용 장비 확보에 따른 기존의 혼합 믹싱 방법을 탈피한 각 종 원천소재 개발에 촉매 역할을 수행할 것이다.

7. 기능성 분쇄조제의 적용은 기존 원천소재의 클링커 분쇄과정에서 발생되어진 응집현상의

방지로서 0.02~0.1%의 범위로 실험일자를 4가지 수준으로 압축강도 실시를 진행하였으며, 그 결과 0.04%에서 가장 우수한 강도발현 효과를 나타났다.

8. 저온환경에서의 압축강도 확보는 건축공사의 공사의 기간을 결정짓는 중요한 요소로서 작용하기 때문에 반드시 해결해야할 사항이며, 본 실험을 통한 기존 고로슬래그 시멘트는 OPC 대비 35.3~70.4%의 활성도를 나타내어 현저하게 압축강도가 저하되는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 분쇄조제를 사용한 800℃ 소성온도의 원천소재에서 OPC 대비 95.1~96.3%의 활성도를 나타내어 기존 고로슬래그시멘트의 단점을 개선할 수 있어, 현장적용에 따른 공기단축의 기술적 효과로서 활용가치가 높다고 할 수 있다.

9. 최종 목표인 콘크리트 적용에 있어, 고성능 감수제와 같은 혼화제의 사용이 필요하다. 각 혼화제별 사용에 따른 시멘트 시험용 플로 테이블 (KS L 5111)를 기준으로 플로우(mm)를 각각 측정한 결과로, 고성능감수제(폴리카본산계)가 유동성측면에서 가장 양호한 것으로 나타났으며, 압축강도 또한 폴리카본산계에서 우수하게 나타나 결과적으로 현재 레미콘 공장에서 일반적으로 사용하는 고성능감수제(폴리카본산계)를 선정하게 되었다.

10. 원천소재를 사용한 SBFS의 Flow 측정결과, SC에서 가장 높은 유동성(193mm)을 보였으며, SBFS는 OPC와 유사하게 나타났다. 추후 실험에서 시공성을 고려하여 Fresh 상태의 경시변화 등을 고려한 연구를 진행 할 필요성이 있다. 또한 모르타르 압축강도 측정결과, 원천소재 800℃에서 초기재령(1일, 3일)에서 102.6～104.7%의 활성도 지수를 보여 가장 높은 압축강도를 나타냈을 뿐만 아니라 장기재령의 28일 압축강도 또한 우수한 결과로 나타나, 조기강도 개선에 관한 GBFS 혼입 연구들의 인용지수에 상당한 영향력을 발휘 할 것으로 사료된다.

11. 재령별 SEM 분석결과, OPC의 초기재령에서 $Ca(OH)_2$을 대량으로 생성되었고, SBFS에서 $Ca(OH)_2$ 및 규산칼슘 수화물의 생성을 확인 하였으며, SO_3의 공급으로 Ettrigite 생성을 확인할 수 있었다.

12. 재령별 XRD분석 결과, 재령 1일에서의 Ettringite 피크는 SBFS에서 나타났으며 OPC는 $Ca(OH)_2$의 Intensity 피크가 다른 시료보다 월등히 높았다. 3일 재령의 XRD분석 결과를 보면 미수화생성물 즉, C_3S의 피크는 상대적으로 줄어들고 $Ca(OH)_2$의 생성물이 전 시료에서 전반적으로 증가하여 압축강도가 증가하는 것으로 판단된다.

13. 소성온도에 따른 SBFS의 안정성검토(Free-lime)를 진행한 결과, Free-lime이 OPC 대비 50~85.5%의 감소 효과를 나타내어 팽창성 및 균열에 대한 안정성을 나타내었다. 또한 SILO 장기 보관 및 인출과정에서도 문제점이 나타나지 않았다. 본 실험을 통하여 GBFS를 활용한 프리케스트와 같이 증기양생 공법 및 특수 제품에 관하여도 원천소재의 활용 가치가 높다고 할 수 있다.

14. Pilot 소성로를 통한 SBFS의 콘크리트 실험 결과, 굳지 않은 콘크리트의 역학성능에서

SBFS를 혼입함에 따라 유동성능이 개선되었으며, 이에 화학혼화제 사용량이 감소하는 것으로 나타나 혼화제의 사용을 저감하는 효과를 나타냈다.

15. 기존 모르타르 실험과 동일하게 콘크리트 압축강도 개선을 위한 원천소재의 최적 소성온도는 800℃가 가장 적합한 것으로 나타냈다. SBFS 치환율은 10~30%사용 모두 OPC 대비 동등이상의 압축강도를 나타내어 SBFS 최적 치환율은 30%가 적정하다고 판단된다.

16. SBFS 혼입 콘크리트의 재령 28일 압축강도의 회귀분석 결과, 압축강도와 W/B의 상관관계는 0.9846로 도출되었으며, 규격별 최적 배합을 도출되었다. 이를 기초로 하여 배합 조정 후, 현장 레미콘 B/P 양산이 가능하며, SBFS 혼합 콘크리트의 계절별, 규격별의 CO_2 원단위 및 경제성 평가를 도출 할 수 있었다.

17. SBFS를 혼입한 콘크리트의 B/P 생산에 있어서도 슬럼프 및 공기량을 만족시키기 위한 화학혼화제의 양은 큰 차이를 나타내지 않는다. 압축강도 시험결과, SBFS30은 재령에 관계없이 OPC100 및 S/C 대비 100%이상의 발현을 나타내어, B/P 양산에 대한 배합 조정이 이루어지면 실제 현장적용에 대한 가능성이 높아 질 것으로 판단된다.

18. OPC100, S/C 및 SBFS30의 소성수축균열 최대 폭에 대한 차이는 나타나지 않았지만, 균열 총 길이에 따른 차이를 확인하였을 때, OPC100이 가장 높은 결과를 나타내었고, SBFS30가 가장 적은 균열 상태를 나타내었다.
건조수축 길이변화 시험결과, SBFS 혼입 콘크리트의 수축율이 OPC 및 기존 S/C 보다 감소하고 있는 것을 확인하였다. 건조수축 및 균열에 대한 우수성을 확인하여 기존 OPC 보다 기술적으로 좋은 결과를 얻게 되었다.

19. 산화 촉진 시험의 결과는 재령에 관계없이 OPC가 탄산화의 촉진이 가장 높게 나타났으며, S/C와 SBFS는 재령이 지남에 따라 유사해지는 것을 확인하였으며, 재령 4주후부터 SBFS30이 가장 적은 탄산화 침투깊이를 나타내었다.
이를 통하여 SBFS 혼입 콘크리트는 초기재령의 압축강도뿐만 아니라 해양구조물 및 내화학성의 GBFS의 이점 또한 동시에 만족하는 결과를 얻었다.

20. 당사 Pilot 시작품에서 생산된 원천소재의 XRD 분석과 (재)한국석회석신소재연구소의 Rotary Kiln에서 생산된 원천소재 XRD 분석결과 $CaSO_4$ 피크점이 모두 높게 나타났으며 다음으로 $CaCO_3$, CaO, SiO_2 순으로 유사한 결과로 확인되었다. 이에 향후 기술이전에 따른 대량생산 가이드라인을 제시할 수 있는 기술적 동기와 잉여 킬른을 이용한 대량 생산 가능성을 확인하였다.

21. Rotary Kiln Pilot에서 생산된 SBFS를 혼입하였을 때, 이전 소량으로 생산된 SBFS와의 성능과 유사한 결과를 나타내었으며, GBFS와의 차이는 크지 않게 나타났다. 배합에 관계없이 설계기준강도를 상회하였다, 또한, SBFS를 혼입함에 있어 GBFS를 혼입한 배합에 비해 초기재령 1, 3일 큰 발현상태를 보이며, 초기재령 강도발현에 있어 SBFS 영향성이 우수함을 확

인할 수 있었다.

22. GBFS, SM, SBFS에 대한 전 과정 CO_2 배출량 평가결과 각각 0.1142 kgCO_2/kg, 0.0376 kgCO_2/kg, 0.0521kgCO_2/kg으로 나타났다.
SBFS의 CO_2 배출량은 0.052[kg-CO_2eq/kg]로 평가되었다. SBFS 생산 시 원재료단계의 CO_2 배출량은 0.0199[kg-CO_2eq/kg]이 배출되는 것으로 평가되었으며 전체 CO_2 배출량 중 가장 많은 부분을 차지하였다.

23. Plain 배합(Case1)과 고로슬래그시멘트 혼입(Case2), SBFS 혼입(Case3)된 레미콘의 CO_2 배출량 비교결과 각각 344.9[kg-CO_2eq/m^3], 307.8[kg-CO_2eq/m^3], 251.6[kg-CO_2eq/m^3]로 나타났다. Plain 배합인 Case 1 대비 Case 2와 Case 3는 약 11%, 27% 저감되는 것으로 평가되었다. 또한, Case별 경제성은 각각 151,175[원/m^3], 149,425[원/m^3], 144,380[원/m^3]으로 나타났다. Plain 배합인 Case 1 대비 Case 2와 Case 3는 약 2%, 5% 저감되는 것으로 평가되었다.

24. 콘크리트 전 과정 CO_2 배출량과 경제성 평가단계 중 운송단계와 제조단계에서는 큰 차이가 없었지만 원자재 생산단계에서 많은 차이가 있었다. 이는 CO_2 배출 최대값과 최소값에 해당되는 콘크리트의 보통시멘트와 Smart고로슬래그미분말, 고로슬래그미분말, 플라이애쉬 혼입량이 CO_2 배출량 과 경제성을 저감하는 주요인으로 분석되었다.

본 연구에서 개발되는 시작품 Pilot 제조 장치는 고부가가치의 원천소재 개발 연구에 필요한 장비로써 특수시멘트 제조, 보수/보강재의 개발에 기초 연구자재로 활용 될 수 있을 뿐만이 아니라, Smart 고로슬래그미분말의 대량 생산의 방법을 제시하여 향후 시멘트회사의 잉여 킬른을 활용 방안이 제안 될 것으로 판단된다.
그리고 산업부산물 및 산업 폐기물의 재활용함으로써 에너지 자원화에 큰 파장을 가져왔다. SBFS 원천소재 개발을 통하여 국외 수입 조강제의 대체효과를 가져오며, 2차제품의 특수성에 만족할 수 있는 제품으로 기술적인 성과를 이루었으며 국내 최초로 고로슬래그 단위공장의 원재료 수급부터 생산, 출하에 이르기까지 CO_2 배출량을 측정함으로써 학계 연구에 기초가 될 것으로 사료되며 향후 지속적인 Smart 고로슬래그미분말 사용에 따른 저탄소 콘크리트 CO_2 평가가 논의와 연구가 더 많아질 것으로 기대된다,
이상의 종합으로 본 연구 개발로 소성을 통한 신개념의 원천소재를 개발함으로써 상용화를 통한 고로슬래그 산업의 고부가 가치화 및 국가 정책에 부합하는 건설산업에서의 탄소저감형 기술 개발과, 철근콘크리트 구조물의 공기단축을 통한 시공단계의 경제적 이익과 더불어 에너지 저감기술을 실현 하였으며, 실용화 분야에서는 기존 고로슬래그미분말 및 고로슬래그시멘트 보다 초기재령 및 장기강도가 매우 우수하기 때문에 건축용 및 토목용 건설현장 및 특수시멘트 콘크리트 2차 제품 공장에 범용성을 갖춘 Smart 고로슬래그미분말로 대량 활용도 기대할 수 있으며 특히 기존 레미콘 사업에 보통 포틀랜드 시멘트 사용량 절감을 통한 동일 재령확보에 따라 대폭적인 원가절감이 예상되고 향후 본격적인 상용화를 위한 대량 생산 제조라인의 상용설비 추진이 요구된다.

제 4장 연구성과 요약 및 기대효과

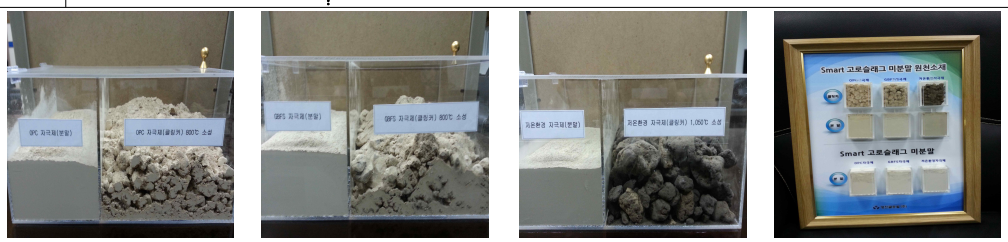
제 1절 개별 연구성과

본 연구의 목적은 보통포틀랜드시멘트(OPC)의 결합재인 고로슬래그미분말(GBFS)의 혼입 사용에 따른 초기재령(1일, 3일)에서의 압축강도 저하 및 동결융해의의 문제점 및 원천소재 개발을 주목적으로 실시한 연구결과로서 OPC 100% 사용 대비 동등이상의 압축강도를 위한 기술 실용화를 목표로 하고 있다. 기존 많은 연구에 의한 알칼리 활성화제 및 유통되고 있는 강도 증진재는 고단가의 원재료임에 따라 콘크리트의 단가에 미치는 영향 및 실용성에 제한적이기 때문에 본 연구에 의해 개발된 산업부산물 및 산업폐기물을 활용한 원천소재를 제조 및 사용함으로써 시멘트 클링커 소성에 필요한 에너지 사용 및 CO_2 발생 원단위를 줄임으로서 환경부하 저감 및 환경오염 문제를 해소 할 수 있으며, 산업폐기물의 매립에 따른 경제적 손실의 절감, 이산화탄소 절감에 따른 부가적 효과를 가져 올 수 있다. 본 연구에서 개발된 원천소재의 원재료 정수오니는 일일 460톤의 매립과 소각, 해양 투기에 소모되고 있어, 이들의 제품의 부원재료로서 안정적인 공급원이 될 수 있다.

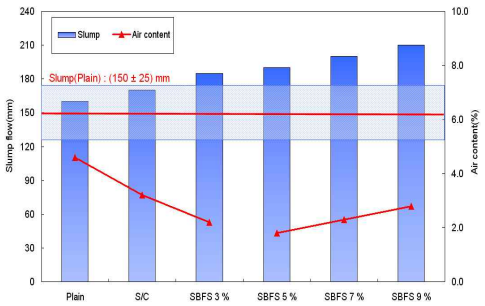
또한 최근의 건설경기 침체 및 원자재 상승으로 인한 공사의 기간 단축에 의한 절감 요구가 대두되고 있으며, 이는 고로슬래그미분말 혼입 콘크리트의 조기강도 저하로서 거푸집 탈형시기의 해체 작업이 진행되지 못하는 것에 기인하고 있다. 이에 건설현장에서는 거푸집 탈형시기의 공사기간을 단축시키기 위한 방법으로 시스템 거푸집, 프리케스트 콘크리트 적용 및 철근 선조립 공법과 같은 방법들이 제시되고 있다. 하지만 현장에서의 운용방법 및 원가상승을 감안한다면, 본 연구에서 목표로 하는 콘크리트 타설 후 압축강도를 조기에 발현하여 거푸집의 해체를 단축하는 것이 골조 공사의 기간을 줄이는 효과적인 기술로 각광받고 있어, 본 연구의 목적에 부합할 수 있다.

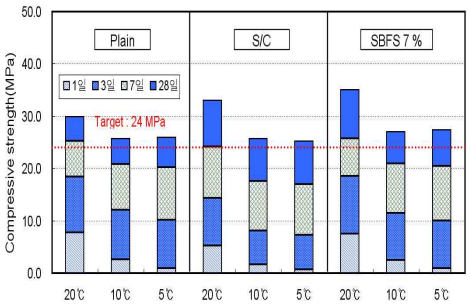
따라서 본 연구개발에서는 시멘트 산업에서의 발생되고 있는 환경부하를 저감하며, 공기단축 및 건설현장에서의 요구되어지는 고로슬래그미분말 혼입 저탄소콘크리트의 초기재령 압축강도 향상의 기술 개발을 위하여 고로슬래그미분말과 원천소재의 사용에 따른 수화반응 메커니즘, 압축강도 및 내구성 등의 물리적·화학적 특성의 영향을 고려하여 모르타르레벨, 콘크리트레벨 평가와 최적배합 도출을 통하여 실용화 가능한 저탄소 레디믹스트 콘크리트 개발 및 활용성에 대한 검토를 진행하였다. 연구개발 계획에서의 설정한 연구목표는 연차별로서 계획대로 진행되었으며, 개별 연구성과에 대하여 항목별로 핵심 요소기술 및 내용을 정리하면 다음과 같다.

가. Smart 고로슬래그미분말(SBFS) 원천소재 개발

<table>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td colspan="3">본 연구에서는 Smart 고로슬래그미분말의 치환율을 10~30%범위, 콘크리트 28일 압축강도 21~30MPa 범위, 콘크리트 기중 양생온도 5~20℃ 환경조건으로 설정하고 OPC 100% 사용 콘크리트 대비 1일, 3일의 압축강도 동등이상이 요구되는 OPC, 고로슬래그미분말, 저온환경을 동시에 만족하는 원천소재 개발에 있다.</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td colspan="3">● 보통 OPC 조기강도 향상 첨가재 개발
● 고로슬래그미분말(GBFS) 조기강도 향상 첨가재 개발
● 저온환경 (5~20℃)강도발현 첨가재 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="3">핵심 요소 기술</td><td>구성</td><td colspan="3">소성온도에 따라 메커니즘의 변화에 착상하여 Pilot 시작품 소성로를 제작하고 원천소재를 혼합 후 일정온도(800℃~1,150℃)에 따른 소성 클링커를 생성하여 분쇄 후 원천소재 개발이 탄생되었으며 실용화 측면에서는 콘크리트에서의 유동성 및 경제성에서 우수하고 고로슬래그미분말의 치환율에 따른 초기재령 문제를 해결 할 수 있는 원천소재임.</td></tr>
<tr><td>특징</td><td>선행기술</td><td>* 초기재령이 취약한 단점이 있음.(1일,3일 OPC 100% 사용 동등값 없음.)</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>본개발품</td><td>* OPC, GBSF 를 동시 자극을 통한 OPC 100% 사용대비 1일,3일 동일 압축강도발현</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>결과물 (시제품)</td><td colspan="3"> 
OPC 자극제 GBFS자극제 저온환경자극제 원천소재</td></tr>
<tr><td colspan="2">우수성 및 차별성</td><td colspan="3">기존 에코멘트 및 무시멘트등은 산업부산물 및 산업폐기물의 포집분 활용 및 순수 시약인 알칼리 자극제를 이용하였으나 본 연구는 고용체의 대량 생산이 가능한 원천소개발품으로 무기계 자극제로서 기존 탄소절감형 결합재 와 다른 신소재 개념의 원천소재개발로 경제성 및 균일한 품질, 대량생산이 가능한 제품임.</td></tr>
</table>

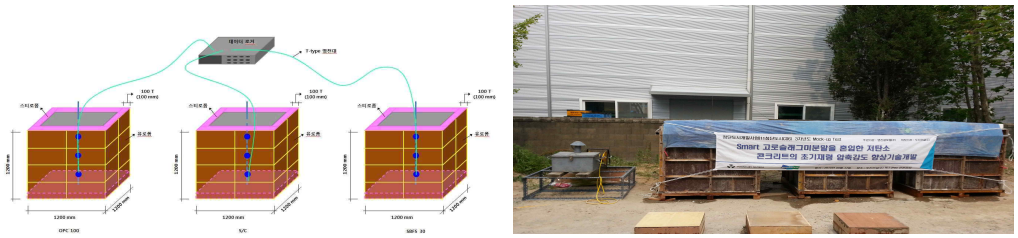
나. 원천소재를 활용한 콘크리트 성능평가

<table>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td colspan="2">고로슬래그미분말을 건설재료로서 사용하기 위한 용도는 시멘트 대체 재료로 고로슬래그시멘트를 사용하는 방법과 콘크리트용 혼화재료로 고로슬래그미분말을 사용하는 방법으로 구분할 수 있다. 그러나 수화진행 메커니즘으로 인해 고로슬래그의 잠재수경성은 보통포틀랜드 시멘트의 수화반응보다 수화진행 속도가 지연되고 고로슬래그 혼입 경화체의 초기 강도 지연을 가져오게 된다. 따라서 본 연구는 원천소재 개발에 따른 Smart 고로슬래그미분말을 활용한 저탄소 콘크리트 개발에 있어 상기 단점을 보완하여 개발한 것이다.</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td colspan="2">● 원천소재 혼합비율에 따른 콘크리트의 성능평가 실험
● 원천소재 치환율에 따른 콘크리트 레벨 평가
● 원천소재 저온 환경 하에서 의 콘크리트 성능평가</td></tr>
<tr><td rowspan="3">평가
기술
요소</td><td>구성</td><td colspan="2">1. 원천소재 혼합비율, 치환율, 저온화경에서는 OPC 100% 사용 콘크리트 대비 1일, 3일의 압축강도 동등이상의 결과를 도출하였으며, 특히 기존 유통되고 있는 고로슬래그시멘트보다 매우 우수한 결과 값이 나타났다.
2. 콘크리트의 유동성 및 공기량, 슬럼프 측면에서도 OPC 100% 사용 콘크리트 대비 양호한 결과로 나타났다.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">특징</td><td>기
술</td><td>1. 순수 알칼리 시약 혼합물 이용에 따른 품질변화가 심함.
2. F/A, GBFS 의 대량 치환에 따른 1일, 3일 초기재령 취약
3. 산업부산물 및 산업폐기물의 혼합믹싱으로 균질의 대량생산이 곤란하며, 경제성이 결여됨.
4. 고온양생방법을 통한 초기재령 확보</td></tr>
<tr><td>본
기
술</td><td>1. 신소재 무기계 결합재 원천소재로 대량 생산 및 품질확보 가능
2. 레미콘 배합시 OPC 사용 저감을 통한 원가절감 및 초기재령확보
3. 현장 타설에 따른 품질 Loss 저하
4. 저탄소 건설재료인 고로슬래그 사용량 확대 및 2차 콘크리트 제품 적용 가능함.
5. 현 레미콘 단가대비 동등 이하의 경제성 확보</td></tr>
<tr><td>결
과
물</td><td colspan="2"> 

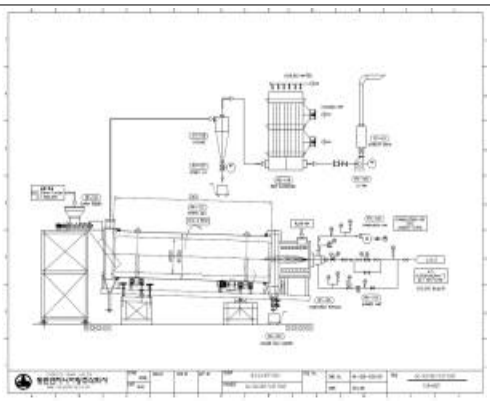
슬럼프 및 공기량 결과
 

압축 강도 값</td></tr>
<tr><td colspan="2">우수성 및
차별성</td><td colspan="2">국내에서 개발된 그린콘크리트 및 에코멘트 콘크리트의 혼합재별 호칭강도 비교시 W/C, 혼화제 사용에 따른 강도증진방법이나 본 기술은 OPC 100% 사용대비 동등이상의 성능을 발현하는 원천소재 적용 콘크리트의 강도값으로 국내 기존 문헌에서 없는 1일, 3일 호칭강도이상의 발현(경제성고려 판단)이 가능한 Smart 고로슬래그시멘트로서 레미콘 경제성에서도 우수함.</td></tr>
</table>

다. SBSF 활용한 레디믹스트 콘크리트 Mock-up 구조체 초기재령 압축강도 평가

<table>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td>본 실험은 Smart 고로슬래그미분말을 혼입한 저탄소콘크리트의 초기재령 압축강도 향상기술개발을 위한 연구의 일환으로서, 이전 실험에서 SBFS 최적치환율 30 %를 사용한 규격별 배합이 도출되었다. 따라서, 본 실험은 상기 30 %의 SBFS를 사용한 배합을 사용하여 Mock-up 시험과 동시에 내구성 시험을 실시하고 부재의 콘크리트 내부 온도를 측정할 것이며, 그 외의 실험항목으로 굳지 않은 콘크리트에서는 슬럼프, 공기량 시험을 실시하고자 하였으며, 경화 콘크리트에서는 자기수축 및 건조수축 길이변화 시험, 소성수축균열 시험, 재령별 압축강도 시험을 실시하고자 하였다.</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td>• 레디믹스트 콘크리트 Mock-up 구조체 초기재령 압축강도 평가
• 자기수축 및 건조수축 길이변화 실험
• 소성수축균열 시험</td></tr>
<tr><td rowspan="4">평가 기술 요소</td><td>개념</td><td>실험동 레벨에서의 콘크리트 성능 평가 결과에 따라 레미콘 실용화을 위하여 직접 레미콘 배차에서의 실 생산된 레디믹스트 SBFS 혼입 콘크리트의 종합 평가.</td></tr>
<tr><td>계획</td><td>
<table>
<tr><th>실험구분</th><th>실험기준</th><th>실험목표</th><th>측정일</th><th>비고</th></tr>
<tr><td>슬럼프</td><td>KS F 2402</td><td>(150±25) mm</td><td>-</td><td rowspan="2">굳지않은
콘크리트</td></tr>
<tr><td>공기량</td><td>KS F 2421</td><td>(4.5±1.5) %</td><td>-</td></tr>
<tr><td>자기수축 길이변화 시험</td><td>KS F 2424</td><td>-</td><td>0~10 day</td><td rowspan="6">경화
콘크리트</td></tr>
<tr><td>건조수축 길이변화 시험</td><td>KS F 2424</td><td>-</td><td>12 Week</td></tr>
<tr><td>소성수축균열 시험</td><td>ASTM C 1581</td><td>-</td><td>0~1 day</td></tr>
<tr><td>단열온도상승 시험</td><td>-</td><td>-</td><td>0~10 day</td></tr>
<tr><td rowspan="2">압축강도</td><td>KS F 2403</td><td rowspan="2">재령 1, 3일
OPC 100% 배합
대비 100% 이상</td><td rowspan="2">1,3,7,28 day</td></tr>
<tr><td>KS F 2405</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>특징</td><td>• SBFS를 혼입한 모든 배합이 재령 1, 3, 7, 28일 모두 각 OPC 100%대비 배합보다 우수한 강도 발현성능
• 단열온도상승시험에서 OPC 100% 이 가장 빠르게 최고온도를 나타내었으며, SBFS30의 최고온도 도달시간은 S/C보다 10시간 빠르게 나타났다.
• 조수축 길이변화 시험결과 OPC 100% 및 S/C 보다 감소하고 있는 것을 확인
• 소성수축균열 시험결과 OPC 100% 가 가장 높은 결과
• 탄산화 촉진 시험의 결과 OPC 100%가 탄산화의 촉진이 가장 높게 나타났음</td></tr>
<tr><td>결 과 물</td><td> 
Mock up 부재 형상</td></tr>
<tr><td colspan="2">우수성 및 차별성</td><td>실용화에 따른 선행기술의 저탄소 콘크리트개발은 초기재령의 취약점이 있으나 본 원천소재를 이용한 콘크리트개발은 초기재령의 취약점을 해결하였고 내구성 실험결과 기존 일반 콘크리트 유사한 결과를 도출하여 실용화에 문제점이 없는 것으로 판단되었다. 특히 초기재령에서의 일정부분 압축강도 확보로 레미콘 배합시 OPC 결합재량의 저감을 통한 원가절감 및 기초소재 응용부분 적용시 큰 범용성이 기대됨.</td></tr>
</table>

라. SBFS 원천소재 제조용 Pilot Plant 제작

<table>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td>실험실 전기로에 의한 원천소재 개발에 따른 생산량 및 실용화 단계의 한계점을 개선코자 원천소재 대량생산을 위하여 Pilot 생산 설비 장치를 개발하게 되었다. 이에 Pilot에서 생산된 원천소재을 가지고 레디믹스트 콘크리트의 실용화 단계 의 연구 목표를 달성한 것이다.</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td>원천소재 제조용 Pilot 시작품 장치 개발
• 시멘트 소성로 원리 이용 설계
• 원천소재 제조용 Pilot 시작품 제작 설치 및 생산</td></tr>
<tr><td rowspan="4">평가
기술
요소</td><td>개념</td><td>원천소재 Pilot 소성원리는 소성과정중 원천소재가 수분과 만나면 굳게 되는(수경성) 무기물 결합재와 잠재 수경성인 원료를 열을 가하여 고온소성을 통해 광물구조의 결합/해체하는 과정을 돕는 장치를 말한다.</td></tr>
<tr><td>제원</td><td>
<table>
<tr><td>형 식</td><td>Pilot 제원</td></tr>
<tr><td>소성용 킬른 길이</td><td>5M</td></tr>
<tr><td>소성온도 (전기로)</td><td>최대 1350℃</td></tr>
<tr><td>원료 Hopper</td><td>1개 이상</td></tr>
<tr><td>냉각장치</td><td>에어방식</td></tr>
<tr><td>Dryer Size</td><td>외경 1,100mm, 내경 600mm</td></tr>
<tr><td>소성로 내부 재료</td><td>케스타블</td></tr>
<tr><td>전기 제어방식</td><td>중앙집중판넬식 제어</td></tr>
<tr><td>1시간당 생산량</td><td>20kg</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>특징</td><td>1. 대량소성이 가능
2. 분말, 세립 재료의 소성이 가능
3. 대량 소성이면서 운전요원이 적음.
4. 품질의 컨트롤러가 용이
5. 로내에서 교반되므로 제품이 비교적 균질
6. 국내 유일한 무기질계 소성 Pilot시작품으로 다목적 연구설비임.</td></tr>
<tr><td>결
과
물</td><td> 
Pilot 킬른 시작품 FLOW SHEET
 
Pilot 킬른 시작품</td></tr>
<tr><td colspan="2">우수성 및
차별성</td><td>무기계 고용체 클링커 형태의 소성로로서 국내 실험장비가 전무한 상태로써 국가장비 활용가 높을 것으로 예상되며 일부 제품생산을 통한 판매도 가능하며 향후 새로운 무기계 결합재의 원천소재 개발에 필수적인 장비로 학회 및 각 연구기관의 활용도가 높을것으로 판단됨.</td></tr>
</table>

마. SBFS 및 RC 아파트 적용콘크리트 CO_2원단위 평가기술 개발

<table>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td>국내의 일반적인 GBFS의 CO_2 배출량의 평가/시험을 통해 국내 표준적인 GBFS의 CO_2 배출량에 대한 기초적인 평가/시험 데이터베이스를 구축 및 SBFS의 CO_2 배출 원단위를 산출한다. 이를 통해 국내 건설재료산업에서 SBFS의 친환경기술관련 역량 강화와 산업부문의 저탄소 녹색성장 기술력을 확보할 수 있으며 SBFS 제품에 대하여 제품 종류별 탄소배출원단위를 산정하여 국내 건설재료의 온실가스인벤토리 구축을 위한 기초 연구 자료가 될 것이다.</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td>• SBFS CO_2 원단위 평가
• RC조 아파트 골조공사기간 및 CO_2 평가</td></tr>
<tr><td rowspan="4">평가기술요소</td><td>개념</td><td>본 평가/시험에서는 SBFS의 생산에 의해 야기되는 전 과정에서의 CO_2 배출량을 평가하기 위해 탄소성적표지제도의 산업제품부문 탄소배출량평가지침을 참고하여 제품제조전단계, 제품제조단계, 포장 및 수송단계를 고려하여 평가/시험을 진행하였으며 국제 표준기준인 ISO 14000 Series에 기술적 근간을 두어 작성지침의 제작을 통해 수행되고 있다.</td></tr>
<tr><td>구성</td><td>1. 탄소성적표지제도
2. 탄소성적표지제도 소프트웨어 (COOL Program)
3. 기능단위 및 시스템 경계 설정</td></tr>
<tr><td>특징</td><td>국내 최초로 고로슬래그미분말 생산공장을 대상으로 GBFS CO_2 원단위 평가를 실시하였으며 탄소성적표지프로그램(COOL)을 활용하여 GBFS, 원천소재에 대한 전과정목록분석을 실시하여 각각 0.0377 $kgCO_2/kg$, 0.0252 $kgCO_2/kg$으로 평가되었다. SBFS의 경우 GBFS와 원천소재의 혼합비에 각각의 탄소배출원단위를 적용하여 CO_2 배출량 0.0348 $kgCO_2/kg$로 평가되었다.</td></tr>
<tr><td>결과물</td><td>
<table>
<tr><th colspan="2">구분</th><th>GBFS</th><th>원천소재</th><th>SBFS</th></tr>
<tr><td rowspan="2">제조 전 단계</td><td>재료 생산단계</td><td>0.003336</td><td>0.000049</td><td>0.002569</td></tr>
<tr><td>재료 수송단계</td><td>0.003403</td><td>0.014942</td><td>0.006094</td></tr>
<tr><td>제조 단계</td><td>제품 생산단계</td><td>0.030968</td><td>0.010191</td><td>0.026120</td></tr>
<tr><td colspan="2">CO_2 배출량 [$kgCO_2/kg$]</td><td>0.037706</td><td>0.025166</td><td>0.034781</td></tr>
<tr><td colspan="2">GBFS 대비 CO_2 배출량 저감율 [%]</td><td>0</td><td>33.26</td><td>7.76</td></tr>
</table>
* GBFS, 원천소재, SBFS의 CO_2 배출 원단위 결과
<table>
<tr><th>구분</th><th>일반 콘크리트</th><th>SBFS 10%</th><th>SBFS 20%</th><th>SBFS 30%</th></tr>
<tr><td>전체공사비 (천원)</td><td>5,375,441</td><td>5,375,441</td><td>5,375,441</td><td>5,375,441</td></tr>
<tr><td>공사비 절감액 (원)</td><td>-</td><td>-</td><td>106,654</td><td>159,982</td></tr>
<tr><td>절감액 공제 후 전체공사비(천원)</td><td>5,375,441</td><td>5,375,441</td><td>5,268,786</td><td>5,215,459</td></tr>
<tr><td>절감액 공제 후 단위면적비용 (원/m^2)</td><td>632</td><td>632</td><td>620,222</td><td>613</td></tr>
<tr><td>Case 1 대비 공사비 비율(%)</td><td>100%</td><td>100%</td><td>98.02%</td><td>97.02%</td></tr>
</table>
* 평가/시험 대상 건축물의 Case별 경제성 평가/시험결과
</td></tr>
<tr><td colspan="2">우수성 및 차별성</td><td>국내 최초로 고로슬래그미분말 단위 생산공장을 대상으로 GBFS CO_2 원단위 평가를 실시한 결과로 이 평가자료는 각 연구기관의 건설재료 CO_2 평가에 중요한 기초 문헌을 되며 특히 고로슬래그미분말 CO_2 평가에 기여할 것으로 예상됨.</td></tr>
</table>

바. SBFS 전 과정 CO_2 배출량 및 경제성 평가/시험

<table>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td>현재 국내에서는 고로슬래그미분말(이하 GBFS라 함)과 같이 CO_2 배출 원단위가 작은 소재를 콘크리트용 혼화재로서 적극 사용함으로서 시멘트・콘크리트 산업에서의 CO_2배출 저감 연구를 활발히 진행하고 있으며, 기존의 포스코 뿐만이 아니라 현대제철 준공 이후로 GGBS 생산량이 급증하여 약 1,500만톤(2014년)의 GGBS가 생산된 것으로 추측되며 추후 발생량은 증가 할 것으로 예상되어짐에 따라 사용 용도별 CO_2 배출 원단위의 기초 연구 자료가 될 것이다.</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td>• SBFS 전 과정 CO_2 배출량 평가/시험
• SBFS 혼입 콘크리트 CO_2 배출량 및 경제성평가/시험</td></tr>
<tr><td rowspan="3">평가기술요소</td><td>개념</td><td>SBFS에 대해서 CO_2 배출량(6대 온실가스) 및 경제성을 평가/시험하고 CO_2 배출 원단위 데이터베이스를 구축하는 것이며 건설현장에서 주로 사용되는 강도 21, 24, 27, 30MPa 콘크리트를 대상으로 SBFS가 혼입된 콘크리트를 평가/시험대상으로 하였다. 이를 위해 국제 ISO 14044 LCA 평가기법에 준하여 SBFS의 전 과정 CO_2 배출량 및 경제성을 평가/시험한다.</td></tr>
<tr><td>구성</td><td>1. SBFS 혼입 콘크리트 CO_2 배출 평가/시험
2. SBFS 전 과정 CO_2 배출량 및 경제성 평가/시험</td></tr>
<tr><td>특징</td><td>GBFS, 원천소재, SBFS을 대상으로 하여 전 과정 CO_2 배출 원단위 평가/시험을 실시하였다. 이를 위하여 제품이 생산되기까지의 제조과정을 원재료생산단계, 원재료 운송단계, 제품제조단계로 구분하여 각 단계별 단위공정에 투입된 에너지량과 소요자원들에 대한 데이터를 수집하였다. 수집된 데이터를 대상으로 탄소성적표지프로그램(COOL)을 활용하여 전 과정 목록분석을 실시하였다.</td></tr>
<tr><td>결과물</td><td colspan="2">
<table>
<tr><th colspan="2">항목</th><th colspan="2">조사내용</th><th>CO_2 배출량 [$kgCO_2/kg$]</th><th>기여도[%]</th></tr>
<tr><td rowspan="2">원재료 단계</td><td>고로슬래그</td><td colspan="2">1.038 kg</td><td>3.09E-04</td><td>2.90</td></tr>
<tr><td>SBFS 원천소재</td><td colspan="2">0.028 kg</td><td>1.24E-03</td><td>5.95</td></tr>
<tr><td rowspan="3">수송 단계</td><td rowspan="2">고로슬래그 (육상수송)</td><td>거리A</td><td>0.5km</td><td rowspan="2">3.19E-03</td><td rowspan="2">8.48</td></tr>
<tr><td>거리B</td><td>40km</td></tr>
<tr><td>SBFS 원천소재</td><td>공장 내</td><td>0km</td><td>0</td><td>0</td></tr>
<tr><td rowspan="4">제조 단계</td><td>전력사용량</td><td colspan="2">0.03595 kWh</td><td>1.77E-02</td><td>47.19</td></tr>
<tr><td>공업용수</td><td colspan="2">0.02304 L</td><td>2.35E-06</td><td>0.01</td></tr>
<tr><td>LNG사용량</td><td colspan="2">0.004737 kg</td><td>1.31E-02</td><td>34.92</td></tr>
<tr><td>부산물처리</td><td colspan="2">0.000421 kg</td><td>1.59E-06</td><td>0.01</td></tr>
<tr><td colspan="2">계</td><td colspan="2"></td><td>0.034017</td><td>100</td></tr>
</table>
* SBFS 전 과정 CO_2 배출량 평가결과
<table>
<tr><th rowspan="2">강도 [MPa]</th><th colspan="3">배합량[kg/m^3]</th><th colspan="4">CO_2배출량[$kg-CO_2/m^3$]</th><th rowspan="2">경제성 [원/m^3]</th></tr>
<tr><th>OPC</th><th colspan="2">SBFS</th><th>원재료 생산</th><th>운송</th><th>제조</th><th>합계</th></tr>
<tr><th></th><th></th><th>GBFS</th><th>S</th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th></tr>
<tr><td>25-24</td><td>340</td><td>-</td><td>-</td><td>326.41</td><td>7.59</td><td></td><td>345.50</td><td>153,099</td></tr>
<tr><td>-150</td><td>238</td><td>78</td><td>24</td><td>232.20</td><td>6.61</td><td></td><td>250.13</td><td>140,427</td></tr>
</table>
* SBFS 혼입 콘크리트 전 과정 CO_2 배출량 및 경제성 평가결과
</td></tr>
<tr><td colspan="2">우수성 및 차별성</td><td>국내 CO_2 평가는 특정 건설재료 원단위의 CO_2 평가로 본 평가방법은 레미콘 생산 전과정의 CO_2 평가이며 특히 결합재 투입량에 따른 레미콘 규격별 CO_2 평가 및 경제성 평가로서 향후 연구기초자료가 될 것임.</td></tr>
</table>

사. SBFS 혼입 콘크리트 CO_2 배출량 및 경제성 평가/시험

정의(설명)

○ 본 평가/시험은 현재 건설현장에서 주로 사용되는 강도 중 30MPa 콘크리트를 대상으로 SBFS가 혼입된 콘크리트를 평가/시험대상으로 하였다.
평가대상을 Plain(OPC 100%) 및 슬래그시멘트(SC 13%), Smart 고로슬래그미분말(SBFS 30%)과 같이 3가지 Case로 분류하여 콘크리트 CO_2 배출량(6대 온실가스) 및 경제성을 평가/시험 한다

목 표

• Smart 고로슬래그미분말(SBFS) 혼입 콘크리트 CO_2 배출량 및 경제성 평가/시험

평가 기술 요소

개념

기존의 개발된 콘크리트 전 과정 CO_2 배출량 평가의 구성요소와 평가 방법론을 이용하여 Smart 고로슬래그미분말(이하 SBFS)이 혼입된 콘크리트의 CO_2 배출량을 평가/시험하였다. 콘크리트 배합에 사용된 SBFS의 혼입량에 따라 3가지 Case로 분류하였으며, SBFS의 CO_2 배출량 원단위는 국내 생산업체(영진글로벌)를 대상으로 분석된 결과를 적용하였다

구성

1. 원재료 생산단계 2. 운송단계 3. 제조단계 4. 전과정 평가결과 분석

특징 및 결과물

원재료 단계

강도 [MPa]	구분	배합량[kg/m³]								CO_2배출량 [kg-CO_2eq/m³]	경제성 [원/m³]
		OPC	S/C	SBFS		G	S	W	AE		
				GBFS	SM						
27	Case 1	319	0	0	0	904	887	170	2.87	324.3	108,535
	Case 2	0	319	0	0	901	883		2.71	285.1	105,055
	Case 3	223	0	73	23	901	883		2.71	228.8	100,010

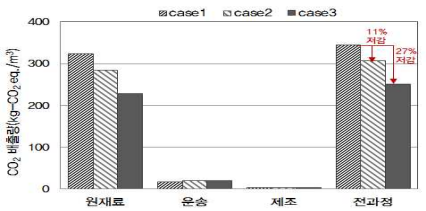
* OPC : 보통시멘트, S/C : 슬래그시멘트, BFS : 고로슬래그미분말, SM : 원천소재, SBFS : Smart 고로슬래그미분말, G : 굵은골재, S : 잔골재, W : 혼입수, AE : 혼화제

운송단계

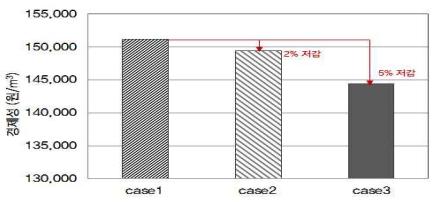
강도 [MPa]	구분	운송거리[km]							CO_2배출량 [kg-CO_2eq/m³]	경제성 [원/m³]
		OPC	S/C	SBFS	G	S	W	AE		
27	Case 1	200	0	0	30	35	-	90	17.4	38,860
	Case 2	200	70	0	30	35		90	19.6	40,590
	Case 3	200	0	70	30	35		90	19.6	40,590

제조단계

강도 MPa	구분	배합량[kg/m³]								CO_2배출량[kg-CO_2eq/m³]				경제성 [원/m³]
		OPC	S/C	SBFS		G	S	W	AE	원재료 생산	운송	제조	합계	
				GBFS	SM									
27	Case1	319	0	0	0	904	887	170	2.87	324.3	17.4	3.2	344.9	151,175
	Case2	0	319	0	0	901	883		2.71	285.1	19.6	3.2	307.8	149,425
	Case3	223	0	73	23	901	883		2.71	228.8	19.6	3.2	251.6	144,380



Case별 CO_2 배출량 평가결과 비교



Case별 경제성 평가결과 비교

* SBFS 혼입 콘크리트 전과정 CO_2 배출량 및 경제성 평가결과

우수성 및 차별성

현재 국내에서는 콘크리트의 CO_2 배출량 산정시 콘크리트의 생산단계까지만 고려되고 있어 콘크리트의 CO_2 배출량이 과소평가 되고 있는 실정이다 본 연구에서는 원재료 생산단계, 운송단계, 제조단계등 전과정 평가결과 분석을 통한 CO_2 배출량의 정량적 평가방법 개발을 목적으로 레미콘 치환재별 배합별 CO_2 평가로 향후 연구기초자료가 될 것임.

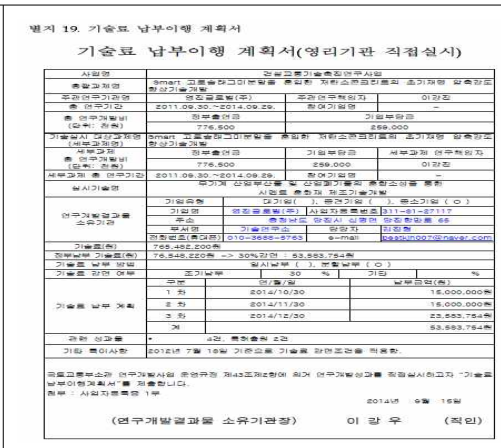
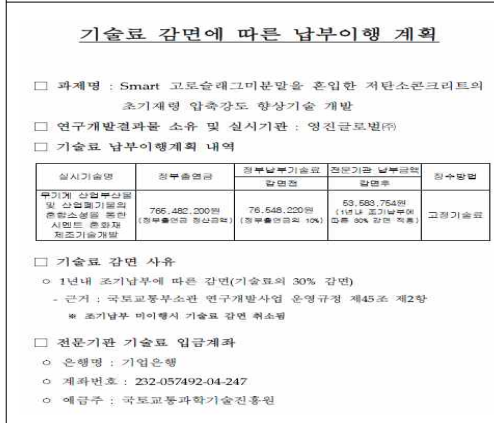
아. Smart 혼입한 저탄소 콘크리트 제조기술 (녹색기술)

<table>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td>녹색기술은 녹색성장 정책의 실효성을 제고하기 위해 ‘저탄소 녹색성장 기본법’ 제 32조 녹색기술 녹색산업의 표준화 및 인증(2010.01.13.)에 따라 「녹색인증제 운영요령」에 의한 녹색기술은 온실가스 감축기술, 에너지 이용 효율화 기술, 청정생산기술, 청정에너지 기술, 자원순환 및 친환경 기술(관련 융합기술 포함) 등 사회·경제 활동의 전 과정에 걸쳐 에너지와 자원을 절약하고 효율적으로 사용하여 온실가스와 오염물질의 배출을 최소화하는 기술을 말한다.</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td>• SBFS를 사용한 건물사용단계에서 기존기술대비 연간 CO_2 배출량 20% 이상 저감 [성숙단계 탄소배출 저감]</td></tr>
<tr><td rowspan="4">녹색기술</td><td>개념</td><td>본 녹색기술인증 시험 보고서에서는 Smart 고로슬래그미분말을 혼입한 저탄소 친환경 건축자재인 저탄소 콘크리트를 제조하여 철근콘크리트 구조체 공사에 적용한 경우, 기술수준을 실제 건물 사용단계에서 기존기술대비 연간 CO_2 배출량을 20% 이상 저감함과 동시에 공사비용 저감 및 공기단축 효과 최종목표로 진행한 녹색기술이다.</td></tr>
<tr><td>구성</td><td>1. 녹색기술인증 시험보고서
2. 기술수준 [성숙단계 탄소배출 저감, 건물 사용단계에서 기존기술대비 연간 CO_2 배출량을 20% 이상 저감]</td></tr>
<tr><td>우수성</td><td>1. OPC 100% 사용 콘크리트 대비 1일, 3일 압축강도 동등 이상.
2. OPC 100% 사용 콘크리트 대비 레미콘 단가 동등 이하 (경제성 확보).
3. OPC 100% 사용 콘크리트 대비 레미콘 CO_2 배출량 약 20% 저감시킴.
4. Smart 고로슬래그미분말을 혼입한 저탄소 콘크리트 제조기술로 사용단계에서 저탄소 친환경 건축자재로서 탄소배출을 효과적으로 저감시킨 핵심적인 녹색기술이다.</td></tr>
<tr><td>녹색성</td><td>본 신청기술과 같이 시멘트 자극재, 고로슬래그미분말 자극재 및 저온 환경하 조기강도 발현 첨가재를 개발하였다. 개발한 첨가재를 고로슬래그미분말을 혼입함으로서 조기강도 발현성능과 저온 환경하 초기재령 강도향상 성능을 가지는 Smart 고로슬래그미분말을 경제성을 확보하면서 대량생산 할 수 있는 원천소재 기술을 적용하여 저탄소 콘크리트를 제조하여 철근콘크리트 구조체 공사에 적용한 경우, 콘크리트의 CO_2 배출량 평가/시험을 통하여 사용단계별 전 과정 CO_2 배출량 약 20% 저감시킴.
 

- 녹색기술인증 세부 평가 절차 -</td></tr>
<tr><td colspan="2">우수성 및 차별성</td><td>기술수준 평가가 성숙단계의 평가로서 상용화 단계의 재 평가 추진중인 사항임.</td></tr>
</table>

자. 기술이전

<table>
<tr><td colspan="2">정의(설명)</td><td colspan="2">연구원이 국가연구개발 사업으로 개발한 결과물(기술, 지식, 정보)을 산업체에 적용하고 응용하는 과정으로 정부는 연구개발사업을 기획·발주하고, 연구원은 선도개발을 통하여 기술을 산업체에 확산하며, 산업체는 개발된 연구결과물을 상용화함으로써 긍정적으로 정부 연구개발사업이 국민경제에 이바지하는 것을 목적으로 하고 있으며. '기술이전'이란, 연구개발의 결과로 취득한 권리 또는 기술을 양도, 실시권 허락, 기술지도, 공동연구, 합작투자 등의 방법으로 기술을 보유하지 않은 자에게 이전하는 것을 말함.</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 표</td><td colspan="2">Smart 고로슬래그미분말을 혼입한 저탄소 콘크리트 실용화를 위하여 개발된 원천소재의 연구결과물을 기술이전 함.</td></tr>
<tr><td rowspan="3">평가 기술 요소</td><td>개념</td><td colspan="2">Smart 고로슬래그미분말의 원천소재 대량생산을 위한 투자비가 요구되는 사항에서 단계적으로 사전 영업 마케팅을 통한 시장 조사 후 당사의 제조업을 감안한 향후 미래 산업으로 선정함에 따라 당사에서는 연구 개발물에 대한 단독소유가 바람직하다고 결정되어 고정 기술료를 납부함으로서 기술이전이 완료되었음.</td></tr>
<tr><td>구성</td><td colspan="2">1. 기술이전 기술실시계약체결공문
2. 기술료 납부이행 계획서
3. 기술료 감면신청서</td></tr>
<tr><td>특징 및 결과물</td><td colspan="2">

생활을 편리하게! 삶을 풍요롭게!
KAIA 국토교통과학기술진흥원
수신자 영진글로벌(주) 대표이사 (귀중)
제목 기술료 감면 신청 및 납부이행 계획 승인(영진글로벌㈜)
1. 귀 사 제2014-26호(2014.9.15.) 관련입니다.
2. 건설교통기술촉진연구사업 "Smart 고로슬래그미분말을 혼입한 저탄소콘크리트의 초기재령 압축강도 향상기술 개발" 과제의 연구개발결과 활용을 위해 귀 사에서 제출한 기술료 감면 신청 및 기술료 납부이행 계획을 승인하며, 기술료 납부이행 계획에 따라 아래의 계좌로 납부하여 주시기 바랍니다.
○ 전문기관 납부 계좌
- 기업은행 232-057492-04-247(예금주 : 국토교통과학기술진흥원)
3. 향후 기술료 납부 및 사용실적 보고시 「국토교통부소관 연구개발사업 운영규정」 제46조(기술료의 사용) 및 「국토교통기술 연구개발사업 관리지침」 제52조(기술료의 징수 및 사용)의 규정을 성실히 준수하여 주시기 바랍니다.
붙 임 기술료 감면에 따른 납부이행 계획. 1부. 끝.
국토교통과학기술진흥원장
주소 431-060 경기도 안양시 동안구 시민대로 286 (평안동 1600) 송백빌딩 6층 /http://www.kaia.re.kr
전화 (031)478-4600 팩스 /rech1900@kaia.re.kr /공개

별지 19. 기술료 납부이행 계획서
기술료 납부이행 계획서(영리기관 직접실시)
(연구개발결과물 소유기관장) 이 강 우 (직인)

기술료 감면에 따른 납부이행 계획
□ 과제명 : Smart 고로슬래그미분말을 혼입한 저탄소콘크리트의 초기재령 압축강도 향상기술 개발
□ 연구개발결과물 소유 및 실시기관 : 영진글로벌㈜
□ 기술료 납부이행계획 내역
실시기술명 / 정부출연금 / 정부납부기술료 감면전 / 정부납부기술료 감면후 / 징수방법
무기계 산업부산물 및 산업폐기물의 혼합소성을 통한 시멘트 혼화재 제조기술개발 / 765,482,200원 (정부출연금 징산금액) / 76,548,220원 (1년내 조기납부에 따른 30% 감면 적용) / 68,583,754원 (1년내 조기납부에 따른 30% 감면 적용) / 고정기술료
□ 기술료 감면 사유
○ 1년내 조기납부에 따른 감면(기술료의 30% 감면)
- 근거 : 국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제45조 제2항
※ 조기납부 미이행시 기술료 감면 취소됨
□ 전문기관 기술료 입금계좌
○ 은행명 : 기업은행
○ 계좌번호 : 232-057492-04-247
○ 예금주 : 국토교통과학기술진흥원

별지 24. 기술료 감면 신청서
기술료 감면 신청서
(연구개발결과물 소유기관장) 이 강 우 (직인)
</td></tr>
<tr><td colspan="2">우수성 및 차별성</td><td colspan="2">직접 기술이전을 통한 원천소재 기술확보 및 당사 미래 전략산업으로 추진예정임.</td></tr>
</table>

연구계획 단계에서 설정한 이러한 연구목표는 계획대로 진행되었으며 항목별 목표달성 내용을 정리하면 다음과 같다.

번호	세부 연구 목표	달성 내용	달성도(%)
1	콘크리트의 초기재령(1일, 3일) 및 저온 환경(5~20℃) 강도 향상을 목표로 하는 Smart 고로슬래그미분말(SBFS) 원천 소재 개발	▪ 시멘트 조기강도 향상 알칼리성 무기계 자극제 개발 ▪ GBFS 조기강도 향상 알칼리성 무기계 자극제 개발 ▪ 저온환경(5 ~ 20℃) 강도발현 첨가재 개발 ▪ 알칼리 자극제에 의한 강도향상 기법 개발	100
2	Smart 고로슬래그미분말 원천소재 제조용 Pilot Plant 개발 및 제작	▪ 원천소재 제조용 Pilot 장치 개발 및 설치완료 - 최적운전조건 도출 - 중앙 집중식판넬 제작 완료	100
3	Smart 고로슬래그미분말(시멘트 및 GBFS 조기강도 향상 첨가재, 저온 환경 강도발현 첨가재와 고로슬래그미분말 혼입)을 혼입한 콘크리트의 조기강도(1일, 3일) 발현 성능 평가	▪ 모르타르 레벨에서의 성능평가 - OPC 100% 사용대비 1일, 3일 압축강도 이상 - 원천소재 화학조성 및 수화 메커니즘 분석 ▪ 콘크리트 레벨에서의 성능평가완료 - SBFS 혼입 저탄소 콘크리트의 성능 평가 - OPC 100% 사용대비 1일, 3일 압축강도 이상 - 저온환경 양생온도별 압축강도 콘크리트 역학성능 평가완료	100
4	Smart 고로슬래그미분말을 활용한 저탄소 레미콘의 내구성 평가	▪ 레미콘 배합 및 레미콘 공장 생산 평가 - SBFS 치환율 10~30%, 28일 압축강도 21~30MPa, 기중 양생(5~20℃) 조건에서 보통포틀랜드시멘트 100% 대비 압축강도 이상 결과 - SBFS 혼입 저탄소 레미콘의 성능 평가 (Fresh 성상, 재령별 역학성상, 장기 내구성 평가) ▪ Smart 고로슬래그미분말 혼합 안전성 평가 - 개발된 SBFS의 분말 저장시의 장기 보존성	100
5	Smart 고로슬래그미분말(SBFS) 혼입 레미콘의 경제성 및 CO_2 원단위 산정	▪ 국내 최초 고로슬래그공장 CO_2 평가 ▪ RC조 아파트 골조공사기간 및 CO_2 평가 ▪ SBFS 전과정 CO_2 배출량 평가/시험 완료 ▪ Smart 고로슬래그미분말 적용 저탄소 레디믹스트 콘크리트 경제성 및 CO_2 원단위 산정완료	100
6	SBFS 혼입 레미콘 적용 Mock-up 구조체의 초기재령 압축강도 평가	▪ 저탄소 레미콘의 공시체 레벨 초기재령 압축강도 발현 평가 완료 (1일, 3일, 7일, 28일 우수) ▪ Mock-up 구조체 코아의 초기재령 압축강도 발현 평가 완료 (1일, 3일, 7일, 28일 우수)	100
7	Smart 고로슬래그미분말 활용 기술 이전	▪ 기술이전완료(직접기술이전)	100

제 2절 주요 연구성과 및 대외기여도

전 세계적으로 지구온난화와 환경오염 및 천연자원의 고갈과 같은 문제가 대두됨에 따라서 국내 모든 산업분야에서 탄소저감형 건설재료를 개발하기 위한 노력들이 대두 되고 있다. 이러한 배경으로 인하여 각 연구기관에서의 노력들이 이루어져 시멘트 및 콘크리트 분야에서 연구들이 진행이 이루어지고 있으나, 경제성에 대한 결여 및 제조공정에 대한 어려움으로 인하여 실용화 가능성에 극히 제한적이다.

본 연구에서 개발된 원천소재는 산업부산물 및 산업폐기물을 활용한 방안으로서, 저온소성을(800℃) 통하여 시멘트 생산의 제조비용을 절감하며, 에너지 사용 및 시멘트 사용을 줄임으로서 이산화탄소를 절감하는 친환경 건설재료라고 할 수 있다. 이에 따라 실용화에 있어 향후 당사뿐만 아니라 시멘트 제조 업체등과 같은 플랜트 시장에서 모두 적용이 가능하며, 완성된 원천소재의 검증은 본 연구에서 모르타르 레벨, 콘크리트 레벨, 실제 레미콘 B/P를 통한 Mock-up 구조체 부재에 적용함과 동시에 내구성에 대한 평가를 진행하여 우수한 결과를 도출하였다.

원천소재의 사용으로 인하여 고로슬래그 혼입 콘크리트의 문제점인 초기재령에서의(1일, 3일) 압축강도 증진과 동절기 저온환경(5℃)에서의 압축강도 향상뿐만 아니라, 장기재령까지의 압축강도 증진을 실험적으로 규명하여, 실용화에 있어 적극적으로 활용될 수 있는 기술이라고 사료된다. 그러므로 2차제품의 생산적용에 있어 경제적인 단가의 이점뿐만 아니라 우수한 강도발현 특성 때문에, 특수시멘트 및 그라우트 등과 같은 고부가가치의 재료로 활용이 기대됨에 따라 이에 대한 지속적인 연구 또한 필요할 것으로 판단된다.

또한 당사는 시멘트 수출 및 수입에 적합한 항만에 위치하기 때문에, 원천소재의 실용화 가능성에 따라서 특화된 고로슬래그미분말을 전 세계적으로 수출할 수 있는 유리한 구조로서 우리나라의 고로슬래미분말 분야의 선도로서 자리 매김할 수 있을 것으로 사료된다.

특히, 본 기술개발로서 가장 큰 장점인 초기재령 및 내구성, 내 화학성 등을 내세워 고로슬래그미분말의 차별화된 제품으로 중동지역 및 싱가포르 시장 등에 수출이 용이하며, 원천소재 클링커 자체만으로도 국내에 수입되어지는 천연무수석고(태국석고, 중국석고)의 대체 제품으로서 그 활용성이 높을 것으로 판단한다.

본 연구를 진행과정 중 원천소재 기술이전 관련하여 당사에서 직접기술이전으로써 1건 이전 하였으며, 특수 분체 관련 사적 영업권의 MOU 체결을 1건을 실시하였으며, 관련 특허 등록 6건 등의 연구성과 및 국외 1건 국내 11건의 학술발표 및 5건의 학술지 게재, SCI논문 게재 1건 등을 제출 하였으며, 그에 대한 자료로서 내용은 다음과 같다.

1. 특허등록/출원

No.		등록/출원번호	등록/출원일	출원인 (등록권리자)
1	강도증진용 시멘트 혼합제를 이용한 시멘트 조성물(등록)	10-1324548	20131028	영진글로벌(주)
2	강도증진용 시멘트 혼합제 및 이를 이용한 시멘트 조성물(등록)	10-1392271	20140429	영진글로벌(주)
3	슬래그 미분말, 슬래그 미분말 제조방법 및 슬래그 미분말을 이용한 슬래그 시멘트 조성물(등록)	10-1392270	20140429	영진글로벌(주)
4	슬래그 시멘트 조성물 및 이를 이용한 슬래그 시멘트 혼입 모르타르(등록)	10-1352401	20140110	영진글로벌(주)
5	초속경 시멘트 조성물 및 콘크리트 조성물(등록)	10-201468898	20141128	영진글로벌(주)
6	시멘트 조성물 및 콘크리트 조성물(등록)	10-201468899	20141128	영진글로벌(주)

2. 학술지 게재

No.	SCI/ 일반	논문명	학술지명	ISBN ISSN	주저자명	Vol. (No)	시작 페이지	끝 페이지	게재 일자
1	일반	분말형 자극제를 이용한 고로슬래그미분말 혼입 시멘트 모르타르의 조기 압축강도 향상에 관한 실험적 연구	한국생태환경 건축학회	1598-3730 ; 2288-4823 ; 2288-968x ;	이강진	12 (3)	115	122	2012.06
2	일반	산업부산물을 활용한 조기강도 촉진제 기술 개발을 위한 연구	한국건설순환자원학회	1975-5201	이지환	8 (1)	1	10	2013.03
3	일반	스마트 고로슬래그 미분말을 첨가한 시멘트 모르타르의 초기 압축강도 향상에 관한 연구	한국구조물진단유지관리공학회	pISSN 2234-6937 eISSN 2287-6979	이성태	17 (2)	1	7	2013.03
4	일반	CSA계 분체를 사용한 고로슬래그미분말 혼입 모르타르의 조기강도 향상에 관한 실험적 연구	대한건축학회	1226-9107	김진형	29 (10)	51	58	2013.10
5	일반	순환골재가 혼입된 콘크리트의 탄소배출영향 분석에 관한연구	한국폐기물자원순환학회	pISSN 2093-2332 eISSN 2287-5638	김태형	31 (1)	96	104	2014.01
6	SCI	Environmental Performance Analysis of Concrete mixing Ground Granulated Blast Furnace Slag	Journal of Cleaner Production	-	김태형	-	-	-	2014.10

3. 학술대회 발표 성과

No.	SCI/	논문명	학술대회명/ 학술지명	주저자 명	Vol. (No)	시작 페이 지	끝 페이 지	게재 일자
1	일반	고로슬래그미분말 혼입에 따른 콘크리트 CO_2 배출량 저감에 관한 연구	한국콘크리 트학회	김태형	24 (1)	191	192	2012.04
2	일반	고로슬래그미분말의 CO_2 배출 원단위 산출에 관한 연구	대한건축학 회	박정훈	32 (1)	131	132	2012.04
3	일반	분쇄조제를 이용한 고로슬래그 미분말의 조기강도 개선에 관한 연구	한국콘크리 트학회	노재호	24 (1)	295	296	2012.04
4	일반	소성분말을 이용한 고로슬래그미분말 혼입 모르타르의 초기재령 압축강도 향상에 관한 연구	한국콘크리 트학회	곽복환	24 (1)	265	266	2012.04
5	일반	A Study on the Early Compressive Strength of Mortar with Ground Granulated Blast Furnace Slag Using the Plastic Deformation of Industrial Byproducts	ISAIA 국제학술발 표	김진형	C-1-3	-	-	2013.10
6	일반	산업부산물을 활용한 조강형 촉진제의 양생온도에 따른 조기강도 특성에 관한 연구	대한건축학 회	이지환	33 (1)	491	492	2013.04
7	일반	스마트 고로슬래그 미분말을 첨가한 콘크리트의 초기 압축강도 향상에 관한 연구	한국구조물 진단유지관 리 공학회	이성태	17 (1)	1	2	2013.04
8	일반	저온환경에서의 소성 분말을 이용한 고로슬래그미분말 혼입 모르타르의 초기재령 압축강도 향상에 관한 연구	한국구조물 진단유지관 리공학회	김진형	17 (1)	508	509	2013.04
9	일반	Mock-up 소성로에서 개발된 산업부산물을 활용한 고로슬래그미분말 혼입 시멘트 모르타르의 조기 압축강도향상에 관한 실험적 연구	대한건축학 회	김진형	33 (2)	585	586	2013.10
10	일반	산업부산물을 활용한 조강형 촉진제 혼입 콘크리트의 조기강도 및 온도특성에 관한 연구	한국콘크리 트학회	이지환	25 (2)	285	286	2013.10
11	일반	산업부산물을 활용한 조강형 결합재의 치환율에 따른 조기강도 특성에 관한연구	한국건축시 공학회	전우철	14 (1)	254	255	2014.04
12	일반	석고계와 정수오니계 산업부산물의 소성온도가 콘크리트 압축강도 발현에 미치는 영향 연구	한국콘크리 트학회	권해원	26 (1)	445	446	2014.04

4. 보고서 성과

No.		보고서명	주관	의뢰기관	완료일자
1	보고서	SBFS CO_2 원단위 평가 보고서	영진글로벌	한양대	2012.04
2	보고서	RC조 아파트 골조공사 기간 및 CO_2 평가 보고서	영진글로벌	한양대	2012.04
3	보고서	SBFS 및 SBFS 혼입 콘크리트 경제성 및 CO_2 평가 기술 보고서 건수	영진글로벌	한양대	2013.04
4	보고서	SBFS 및 레미콘 경제성 및 CO_2 평가 기술 보고서 건수	영진글로벌	한양대	2014.08
5	보고서	SBFS 혼입 레미콘 구조체 강도발현 보고서 건수	영진글로벌	렉스콘	2014.08
6	보고서	SBFS 혼입 레미콘 녹색 인증 기술 보고서	영진글로벌	한양이앤씨	2014.08

5. 시제품 및 시작품 성과

No.	구분	보고서명	주관	협력기관	완료일자
1	시제품	OPC 강도발현 첨가재	영진글로벌	동원엔지니어링(주)	2013..03
2	시제품	GBFS 강도발현 첨가재	영진글로벌	-	2013.03
3	시제픔	저온환경 강도발현 첨가재	영진글로벌	-	2013.03
4	시작품	SBFS 원천소재 제조 소성 Pilot 장치 개발 및 설치	영진글로벌	동원엔지니어링(주)	2013.12

바. 기술이전완료

No.	구분	실시기술명	주관	협력기관	완료일자
1	기술이전 (직접실시)	무기계 산업부산물 및 산업폐기물의 혼합소성을 통한 시멘트 혼화재 제조기술개발	영진글로벌	국토교통 과학기술 진흥원	2014..09

제 3절 기술개발성과의 기대 효과

현재 보통 포틀랜드 시멘트에 고로슬래그 미분말과 플라이애쉬를 동시에 혼합한 삼성분계 혼합시멘트는 일반 보통 콘크리트로 이루어지고 있으나, 이 시멘트를 범용화시키기 위해서는 초기재령 및 동절기 사용량 증대를 위하여 각각의 결합재 성능을 향상 시킬 수 있는 알칼리 자극제의 원천소재가 어느 정도 확보하고 있어야 한다. 따라서 본 연구에서 산업부산물 및 산업폐기물을 이용 개발한 원천소재 및 고로슬래그미분말을 활용한 혁신적인 무기계 결합재 개발로 레디믹스 콘크리트 및 2차 콘크리트 제품, 특수시멘트, 지반계량제등 적용 가능한 제품으로서 1종 보통 포틀랜드시멘트를 대체할 수 있는 결합재로서 다 기능성 결합재로도 사용이 가능하며 그 상업적 경쟁력 및 가치 매우 크다고 할 수 있다.
또한 고로슬래그미분말과 OPC을 동시에 자극할 수 있는 알칼리 물질을 수화 활성재로 혼입하여 시멘트을 혼입한 고로슬래그미분말 모르타르의 강도적 특성을 증진시킴으로써, 건축용 시멘트 건자재로의 이용 가능성을 높이고자 하였다. 이러한 산업 부산물을 이용한 혼합시멘트는 건축현장의 콘크리트 조기 압축강도 발현 기술개발의 필요성에 따라 가격대비 성능이 월등한 혁신적인 조기강도 발현의 무기계 결합재 개발이며 이를 통한 시멘트 사용량 절감을 통한 경제성 확보 및 탄소저감형 무기결합재의 원천소재로 천연자원 및 에너지 고갈 문제와 이산화탄소 배출에 의한 환경오염 문제의 해결에 일조하고자 하는 본 기술개발의 기대효과는 다음과 같다.

가. 현존 기술의 취약점(문제점)

국내에서는 시멘트 대체 무기계 결합재를 기본으로 한 원천소재 개발의 연구가 진행되고 있으나 국내에서 발표된 논문 등의 자료를 확보하기 어려운 상태이다. 이는 원천소재 개발이 아닌 산업부산물 및 화학제품에 의한 단순 결합재 치환의 물성결과의 적용한 사례로 말할 수 있다. 또한 국외 연구의 대부분은 고로슬래그, 플라이애쉬 무기계 결합재 제조시 대부분의 연구가 기건 양생이나 증기 양생 방법을 선택하고 있으나, 이는 대량 사용을 목적으로 하는 방법이다 다행히 고로슬래그에 대한 연구는 다수 진행되어 참고자료로 사용할 수 있으나, 이는 잠재 수경성(칼슘실리케이트 겔을 형성)을 도출하는 연구로, 정확한 의미에서는 알루미노실리케이트 겔을 형성하기 위한 무기계 결합재로 언급하기 어려운 형편이다. 따라서 본 연구의 특성은 현존기술의 취약점을 보완한 원천소재 개발이라 할 것 이다.

나. 기대효과

(1) 기술적 측면

국외의 경우 고로슬래그미분말 및 기타 산업폐기물, 산업부산물을 활용한 무기계 결합재에

대한 연구는 1970년부터 시작되었으며, 1990년부터는 체계적으로 생산적인 연구 및 제품으로 판매할 수 있는 수준의 무기계 결합재가 있으나 아직까지는 포틀랜드시멘트를 대체하여 범용으로 사용되지 않으며 이는 포틀랜드 시멘트를 혼합 대체하여 동등기능을 갖는지의 여부가 완벽히 검토되지 않았기 때문이다. 따라서 최근에는 사용원료 및 자극제의 종류에 따른 무기계 결합재의 생성 메커니즘을 규명하고 물리·화학적 특성을 개발하여 제품화 하는데 주력하고 있으나 1종 보통 포틀랜드시멘트 100% 사용대비 고로슬래그미분의 결합재을 이용한 동등이상의 선행기술이 없는 사항으로 기 개발된 제품과의 차별적·우수성의 기술적 효과 측면은 다음과 같다.

◦ 탄소저감형 무기결합재 제조기술 확립.
(고로슬래그미분말을 이용한 원천소재 결합재가 OPC 100% 사용 압축강도 값 동등이상)
◦ 친환경 결합재의 신기술 적용 및 선진화.
◦ 원천기술의 국산화를 통한 녹색기술 선두적 입지확립.
◦ 친환경 녹색성장 정책에 요구되는 기술로 기존 처리기술의 대체 가능.
◦ 타 분야로의 확장성이 용이하여 무기성 폐기물의 처리방안으로 제안 가능.
◦ 일반 레미콘 적용시 기존 가격 대비 경제성 확보.

(2) 경제적/산업적 측면

국내에서 년간 1,000만톤 정도의 고로슬래그 시멘트를 생산하고 있으며 이에 따른 레미콘 생산량은 2012년 19,653천㎥로 그 시장 규모가 약 매우 크다고 할 수 있다 따라서 포틀랜드 시멘트를 저감 사용에 따른 전체 레미콘 단가 절감금액은 약 800억 정도를 절감할 수 있는 규모이며 또한 시멘트 생산시 본 기술의 개발을 적용시 현재 시멘트에서 사용하고 있는 수입 천연무수석고 약 800,000톤(5만원/톤) 대체 효과를 기대할 수 있고 정수오니의 산업폐기물 재활용에 따른 처리비용(3만원/톤) 및 2차 콘크리트 제품활용시 부가가치는 더욱 상승될 것으로 판단된다.

◦ 시멘트 무기결합재의 시멘트 대비 저가 생산으로 제품의 경쟁력 상승효과.
◦ 순환자원의 적극적 활용으로 시멘트 사용량 절감에 의한 탄소세 절감 효과 기대.
◦ 일반 레미콘 적용시 기존 가격 대비 경제성 확보.
◦ 천연무수석고, CSA, CAC 등의 특수 시멘트 원료 수입대체 효과 발생.
◦ FA 및 GBFS를 대량 활용한 무기결합재를 활용한 건설재료 및 유사 기술도입이 기대됨(성토용 블록, 어도·소 블록, 각종 콘크리트 2차 제품, 특수시멘트, 중·저강도용 콘크리트 혼합재 등).
◦ 원천소재 개발 지적 재산권 확보로 기술이전에 따른 경제효과 기대.
◦ 신개념 건설재료를 통한 고로슬래그 산업 고부가가치화.

(3) 환경적 측면

◦ 탄소배출 거래량 기준에 따라 거량탄소배출 거래제 적용 가능

◦ 산업 부산물 및 산업폐기물 처리에 따른 환경부하 감소 및 제2의 부존자원의 확보.

◦ 시멘트 클링커 생산에 필요한 석회석, 점토, 화석연료 등의 광물자원 고갈 방지, 환경부하 감소.

◦ Smart 고로슬래그미분말의 대량 생산을 위하여 시멘트 회사의 잉여 킬른을 활용할 수 있음.(시멘트 공급과다 대체 설비 유용)

(4)시장현황 측면

국내 보통 포틀랜드시멘트 시장은 2013년 생산량 45,174천 톤이 생산되고 있으며 일반 모르타르/자기수평 조절 모르타르 등은 2,100천톤, 내화 관련 시멘트/모르타르의 생산·수 입양은 40,000톤, 천연 무수석고 수입량 270,000톤, 조강/초속경시멘트 12,000톤 정도가 소요되는 것으로 추산하고 있다. 이외의 건축자재의 응용품인 레미콘, 흄관, 파일, 벽동 등 매우 다양하다고 판단된다.

이러한 생산 및 수요량은 향후 국내 경제상황에 따라 차이가 발생할 수 있으나 그 수용은 계속적으로 증가 될 것으로 전망된다. 그러므로 고로슬래그미분말을 이용한 혼입 무기계 결합재는 1종 보통 시멘트와 비슷한 수준의 기능 과 각 제품의 용도에 적절하게 개발될 경우 시장의 규모 및 소비처 확보에는 무리가 없으라 판단된다.

◎ Smart 고로슬래그미분말 대량 활용한 콘크리트의 원가분석

→ 기존 기술 단위결합재 원가비용은 시멘트 100% 사용할 경우 결합재량 평균 330kg/㎥에서는 24,750원/㎥ (OPC 톤당 75,000원적용)

→ 본 기술개발 단위결합재 원가비용은 시멘트 절감율 9%의 경우 결합재량 330kg/㎥에서 24,750원/m3 → 2,227원/㎥ 줄어들어 9.8% 절감효과

◎ 현재 사용되는 레미콘 규격(25-24-15)에 적용시 결합재 원가분석

강도[MPa]	No	배합량[kg/m^3]				합계
		OPC	GBFS	F/A	SBFS	
24	1	272	0.034	0.034		0.34
	2	238	0.078	-	0.024	0.34

강도[MPa]	No	적용단가[원/m^3]				합계
		OPC	GBFS	F/A	SBFS	
24	1	20,400	1,870	1,088		23,358
	2	17,820	4,290	-	672	22,812

적용단가(톤당) : OPC 75,000원, GBFS 55,000원, F/A 32,000원, SBFS 28,000원

→ 기존 사용 레미콘 원가절감액은 ㎥당 540원으로 추정시 2012년 레미콘 생산량 19,653천㎥에 따른 이익창출 약 100억

◎ 고로슬래그시멘트 → Smart 고로슬래그시멘트 적용 시 원가차이(톤당/원)

기존 SC 단가					SBFS (SP) 적용비율에 따른 원가 차이			
항목	내용	단가	사용%	금액	사용%	금액	사용%	금액
단가	OPC	75,000	63%	47,250	70%	52,500	70%	52,500
	GBFS	55,000	37%	21,460	23%	12,650	21%	11,550
	SBFS	28,000			7%	1,960	9%	2,520
합계				67,600		67,110		66,570
차이	톤당 절감액(원)					490		1,030

→ 2013년 고로슬래그 시멘트 사용량 1,000만톤 기준으로 Smart 고로슬래그 시멘트 전환 사용시 치환율에 따라 약 49억～100억 경제이익 창출

→ 천연무수석고 대체효과 : 기존 고로슬래그시멘트 생산시 3～5% 혼합 사용함. 연간 27만톤사용에 따른 금액은 톤당 50,000원으로 연간 135억 절감.

다. 기술개발의 성과 우수성

(1) 기술개발의 우수성 및 차별성

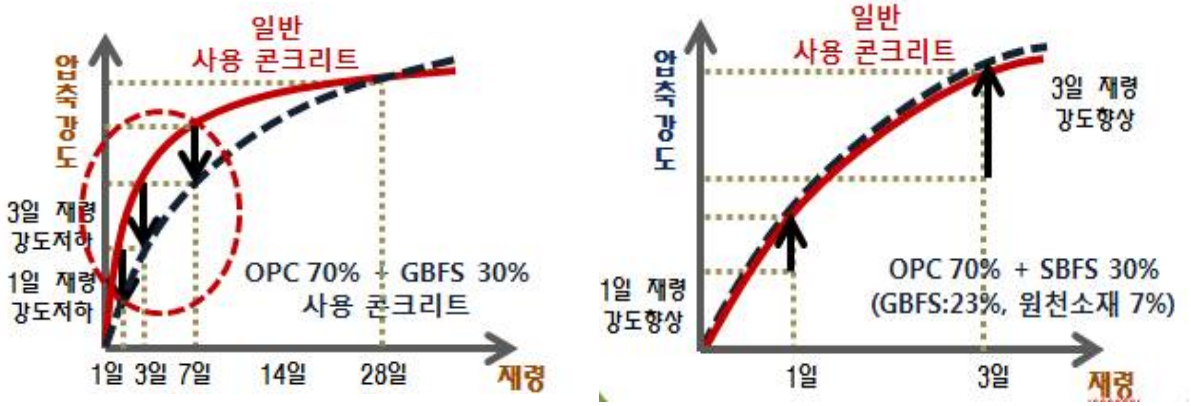
최근 건설구조물의 복잡화, 대형화, 초고층화, 고기능화됨에 따라 주요 건설재료인 콘크리트 품질, 제조 및 시공기술 등에 관한 고품질화가 요구되고 있으며 천연자원의 고갈 및 각종 환경규제의 강화에 의해 경제적인 어려움을 겪고 있는 실정으로 레미콘 업계에서는 콘크리트의 품질 및 성능을 개선시키면서 동시에 경제성 문제를 해결할 수 있도록 고로슬래그미분말을 콘크리트용 혼화재로 주로 사용하고 있다.
그러나 고로슬래그미분말을 시멘트 대체재로 활용할 경우 초기강도 발현수준이 낮아 거푸집 제거시기가 늦어질 수 있으며 특히 동절기에는 강도발현이 지연되고 양생이 불충분시 균열 발생과 동해가 우려되고 중성화가 촉진되는 등 콘크리트 품질 저하와 현장 품질관리가 곤란하다는 문제점이 제기되어 기존 고로슬래그미분말과의 차별화된 연구가 진행되었다.

(가) 기존 알칼리 활성화제(순수시약) 비교 우수성

종류	대표화합물	반 응	단가	원천소재
규산염계	Na_2SiO_3	-.반응성 높음 -.콘크리트 장기강도 증가	중가	▪ 대표적인 알칼리자극 기능 함유 ▪ 저가의 신소재 ▪ OPC 사용량 감소효과
수산화계	NaOH	-.반응성 높음 -.콘크리트 초기유동성 저하	저가	
특징		1일～7일만 자극 발현 화학제품 고가임.	-	▪ 1일～28일 자극발현 (신개념)

현재 개발된 알칼리 활성제는 산업부산물 및 산업폐기물을 그대로 혼합형태의 자극제라고 할 수 있으나 본 연구개발에서는 대량확보 및 경제성 및 균일한 품질을 제공 할 수 있는 원천소재을 통한 Smart 고로슬래그분말이라 할 수 있다.

(나) 압축강도 비교 우수성(고로슬래그시멘트 혼합사용 콘크리트)



기존 고로슬래그미분말과 Smart 고로슬래그분말과의 차별성 및 우수성은 콘크리트 조기 압축강도 발현기술개발의 필요성에 따라 종래기술의 한계성을 벗어나 21~30MPa급 콘크리트 거푸집 탈형 기술개발과 연계한 원천소재 개발로 실질적인 레미콘 현장의 다양화에 따른 OPC 사용 범위을 현장에 맞게 적용할 수 Smart 고로슬래그분말 이라고 할 수 있다

(다) 선행기술과의 본 연구개발의 기술적 성과

선 행 기 술	본 연구 개발
▪ F/A, GBFS 치환율이 증가함에 따른 초기재령에서 압축강도는 저하됨.	▪ SBFS치환율 7~9% 사용량에 따라 OPC 100% 사용 대비 동일 재령에서 압축강도 확보
▪ 선행 무기계 결합재의 개발품은 3일 재령 이후 결과물과 포졸란 반응으로 활성도지수가 약 100%를 넘는 재령은 GBFS 치환율 10~30% 범위에서는 재령 14일 이후의 결과물임.	▪ GBFS의 최대 약점인 호칭강도 초기재령 (1일, 3일) 확보 (탈형시기 확보)함과 동시에 다른 소재의 무기계 결합재와도 전목이 가능한 제품임.
▪ 선행 연구중 GBFS혼입한 경우, 저온(5℃)환경에서 초기재령을 확보한 무기계 결합재는 없음.	▪ SBFS 혼입의 경우, 저온(5℃)에서도 초기재령(1일, 3일)의 압축강도를 확보 가능함.
▪ 산업부산물 및 산업폐기물의 가공 및 믹싱과 순수 알칼리 시약 혼합물로서 경제성 결여 및 대량생산이 어려움.	▪ 대량의 산업부산물 및 산업폐기물을 단순 소성을 통한 현존하고 있는 고로슬래그미분말 생산공정에 직투입 하므로써 대량생산 및 균일한 품질이 확보되는 제품.
▪ 일반 레디믹스트 콘크리트 규격에 적용성이 다소 미흡하며 적용시 레미콘 생산단가 상승요인이 됨.	▪ SBFS 적용은 일반 레디믹스트 콘크리트 규격 전체 적용이 가능한 제품으로서 레미콘 제조원가 절감에 큰 기여를 할 것으로 사료됨.

◎ 선진기술수준 과 본연구의 차이점

구분	기관 또는 업체	기술개발	주요내용	비고 (본 개발 기술과의 차별성)
일본	Yamaguchi 대학	상온에서 지오폴리머, 제조기술(2000~현재)	플라이애시+석영+산화철+쇼둠실리케이트 등으로 중합반응 온습도 조절 건설자재 개발 상온에서 20~30MPa	본 기술 개발은 상온 OPC 100% 사용 콘크리트 대비 1일(102.5%), 3일(103.8%), 저온5℃에서 1일(136.4%), 3일(103.5%)로 월등한 압축강도 및 탄산화 저항성능이 OPC 대비 91%로 우수함
	태평양시멘트	저열 포틀랜드 시멘트	플라이애시와 고로슬래그 등 광물질 혼화재를 포함하지 않음	선행 연구에서는 저발열 포틀랜드 시멘트의 제조로서 본 연구와의 목적이 상이함
	후지마쓰(주)	생석회계 고화제	생석회를 주성분으로 사용	생석회(40,000원/톤)의 사용보다 본 연구에서 사용한 원천소재(30,000원/톤)의 가격 경쟁력이 우수함
호주	Curtin 대학	저칼슘 플라이애시 기반 Geoploymer 콘크리트 (2000~현재)	배합 및 제조기술 장기거동 평가 구조부재 활용성 평가 고온에서 50MPa	프리케스트의 적용으로서 고온양생에 의한 강도발현 성능을 제시하여 본 연구목적과 상이함
	Wopfinger 사	고로슬래그-황산염계 무(저)시멘트 콘크리트 제조기술	황산염 활성화제와 고로슬래그 이용한 기술 압축강도 50MPa, 높은 화학저항성	본 연구에서 개발된 원천소재(30,000원/톤)의 가격 경쟁력이 우수하며, 무 시멘트의 사용으로 인한 현장 적용에 대한 적용성이 저하되는 것을 해결 가능함
프랑스	Geoploymer institute	석탄회 무(저)시멘트 콘크리트 제조기술	고온에서 석탄회 활성화 압축강도 30MPa	시멘트를 대체하여 탄소저감 목적으로 구조체 적용성이 저하되어 본 연구에서와의 목적이 상이함

(라) 연구성과의 기술수준 및 효과 비교

No.	성과명	성과유형	성과설명		활용대상자
			특징/우수성	국내외 기술수준과의 비교	
1	SBFS 원천 소재 개발(시멘트, 고로슬래그미분말, 저온환경 강도발현 첨가재)	재료·자재	산업부산물과 산업폐기물을 일정한 화학성분 비율로 혼합하여 Pilot 장비(킬른)을 통하여 저온(800℃)에서 소성된 강도발현 첨가재이며, 일반적인 OPC대비 초기재령(1일, 3일)에서 압축강도를 동등이상 확보하며 환경부하(CO_2)발생량을 저감시키는 기술임.	고로슬래그미분말 생산업체에서 강도 발현 목적으로 천연무수석고를 3~5% 혼합해서 사용하는데 전량 중국 및 태국에서 수입하며, 연간 27만톤정도 사용됨. 금액은 톤당 50,000원으로 연간 135억이 소비되는데 개발된 원천소재를 통해 수입대체 효과 발생.	연구자 일반 수요자
2	SBFS를 활용한 저탄소 콘크리트 개발	재료·자재	OPC 100% 사용대비 상온(20℃)에서 동등이상 압축강도 발현효과를 나타내는 콘크리트 및 저온환경(5~10℃)에서의 콘크리트 초기재령(1일, 3일) 압축강도 발현 성능을 나타냄. 기존 S/C에 비해 초기재령에서 우수한 압축강도 발현을 나타내며, 장기압축강도 성능 평가 또한 우수함. 특히 저온환경(동절기)에서의 기존 S/C 대비 우수성을 확보.	국내 S/C 생산 및 배합 기술 수준으로 동절기 사용에 따른 문제 발생 가능성이 높아 현장에서 S/C사용이 현저히 저하되며, 사용을 기피함. 개발된 SBFS를 활용한 콘크리트 개발을 통해 문제점을 해결 가능.	연구자 일반 수요자
3	SBFS를 활용한 레디믹스트 콘크리트 Mock-up 구조체 초기재령 압축강도 평가	재료·자재	개발된 SBFS 혼입 레미콘의 강도별 배합설계를 진행하여 실제 레미콘 B/P를 이용하여 Mock-up 구조체 타설을 진행, 구조체의 수화열 측정 및 코어 체취를 통하여 현장 적용가능성 검토(진행중) 및 내구성 평가. 현재 초기재령(1일, 3일, 7일) OPC 100% 대비 압축강도 동등이상 확보.	개발된 SBFS 혼입 레디믹스트 콘크리트를 통하여 기존 S/C 단점을 보안 및 개선하여, 환경부하(CO_2)가 높은 OPC의 사용량 줄임으로서 공사비의 저감, 공기단축 확보 및 CO_2 저감효가 기대.	연구자 일반 수요자
4	고로슬래그미분말의 CO_2 배량찰 평가 및 DB 구축 SBFS의 CO_2 원단위 평가	기타	고로슬래그 미분말과 SBFS의 CO_2 배출량을 평가하기 위한 DB 구축을 진행하였으며, SBFS 제조공정에 대한 CO_2 배출 DB 구축 진행. (LCI 데이터베이스 구축 연구 평가 기법 참조)	고로슬래그미분말, 원천소재, SBFS의 각각의 CO_2 배출 원단위 평가결과 CO_2 배출원단위는 고로슬래그미분말 대비 약 8%만큼 저감되는 것으로 나타났으며 이는 고로슬래그미분말보다 CO_2 배출원단위가 작은 원천소재를 혼합함으로써 전체의 CO_2 배출량이 저감 국내외 고로슬래그미분말 생산업체 및 SBFS사용에 따른 저탄소 콘크리트 적용기대.	연구자
5	SBFS 제조용 Pilot 장치 개발	장비·장치	SBFS를 생산하기 위한 Pilot 장비로 클링서 제조 장치, 소성장치, 냉각장치와 설비 제어장치인 S/W 프로그램을 개발하여, 재료 합성 및 조성 연구에 활용 가능	국내 기술수준으로 연구용으로 개량한 Pilot 장비는 극히 적으며, 기존 연구용 장비사용에 비해 적은 비용으로 시작품을 제작하였으며, 다양한 형태의 재료 합성 사용 가능.	연구자 장치 개발자 장치 설계자

제 5장 연구개발 결과의 활용 계획

제 1절 연구성과의 활용 계획

최근 들어 EU, 일본 등 주요 선진국을 중심으로 유한한 자원을 효율적으로 이용하기 위한 '자원 효율성 향상 정책'이 활발히 추진되고 있으며 단순한 경제적 이윤 획득을 넘어 새로운 시장을 창출하고, 산업과 환경의 상생 발전을 도모하는 핵심 요인으로 기능하고 있다. 이에 최근 세계적으로 관심이 집중되고 있는 연구·생산분야는 천연자원 사용량을 줄이고 새로운 개념의 무기계 바인더 개발하고자 하는 것이다 현재 무기바인더의 역할을 수행할 수 있는 물질로서는 산업부산물/폐기물인 고로슬래그, 플라이애쉬, 하소 kaolin등이 있다. 이중 본 연구 결과에 사용된 부원료인 고로슬래그와 정수오니는 산업부산물/폐기물로서 각각 매립, 소각, 재활용, 해역 배출등으로 지속적인 발생하고 있으며 고부가성 건설재료로의 재활용이 높다.
따라서 이를 재활용한 연구 성과물의 활용계획으로는 보통 포틀랜드 시멘트의 사용량을 저감하면서 고로슬래그미분말의 사용 확대를 통한 무기계 결합재로서 국내 저탄소 건설재료의 매김자리를 할 것이며, 그 사용분야는 특수시멘트 및 그라우트 등의 고부가가치 콘크리트 2차제품으로의 활용과 건축분야, 환경분야 및 알루미나 시멘트와 같은 내화/단열 특성을 갖는 캐스타블 분양등에도 대체할 수 있는 다기능성 무기계 결합재로 활용될 계획이다. 또한 향후 시멘트산업의 과잉공급에 따른 생산성을 고려하여 잉여 킬른을 활용하고자 별도의 추가 설비없이 기존 설비을 이용한 대량생산을 통해 레미콘의 경제성 확보및 해외 수출도 고려하고 있으며 이 모든 일련의 사항은 국내의 최근 상황을 고려하여 분석과 결과 다음과 같은 중단기 계획이 수립되었다.

▶ 단기계획(2014년～2015년)

○ 제품의 특화(직접기술이전완료)
-. SBFS 원천소재 사전 영업권 MOU 체결
: 특수시멘트 전문 업체 판매을 통한 사전 품질확인
-. 초기투자비 최소화
: Pilot 시작품을 통한 판매용 제품 생산(1.2톤/일)
-. 운영비 최소화
: 수요처와 유기적 관계로 주문생산 방식 선택
-. 국토교통부 R&D 사업연계
: 해양 숏크리트 공법에 Smart 고로슬래그미분말 적용 검토
-. 각종 기술 인증 획득(NT, GR마크, 조달청지정품목 등)

○ 판매 방안

-. 1차 : 그라우트시장 공략

≫ 유사제품 대비 가격 및 품질경쟁력 시장 확대

: 속경시멘트, 그라우트사용 OPC저감

≫ 소량으로 고수익 제품 영업

: 특수시멘트 대비 가격 판매(약 80,000원/톤)(자사 : 영진탱크터미널)

≫ 지반 그라우팅 공략

: 초미립자 공법에서 Smart 고로슬래그시멘트

≫ PC, 블록업체 공략

: 사용량 OPC 저감 제시

-. 2차 : 잠재수용처와 공동연구를 통한 제품용도 개발

▶ 중기계획 (2016년～2017년)

○ 판매 방안

-. 가격형성 : 원천소재(70,000원/톤)

Smart 고로슬래그미분말(기존 단가 동일적용 제품 차별화)

-. 본 제품개발의 일반 건설시장 공략

: 일반건축용 및 토목용 건설현장 레미콘 적용

-. 콘크리트 2차 제품 (경계석, 흡관 블록 그라우팅, 벽돌, 파일 등)공장의 공급가능

-. 지반그라우팅 공법에 Smart 고로슬래그시멘트 사용 Spce 적용

-. 2차제품의 제조기술 다변화 기술 확립

-. 해외수출 타진(기존 수출지역 : 싱가폴)

-. 연약지반고화제 공략(가격대비 성능평가)

▶ 장기계획⇒ R&D 중심의 고부가가치 창출 및 해외진출(2018년～)

○ 기술 집약적인 대량생산 킬른 구축 (전략사업 연계)

-. 향후 시멘트 감소에 따른 잉여킬른 활용

-. 자체 제작 가동 (설비투자)

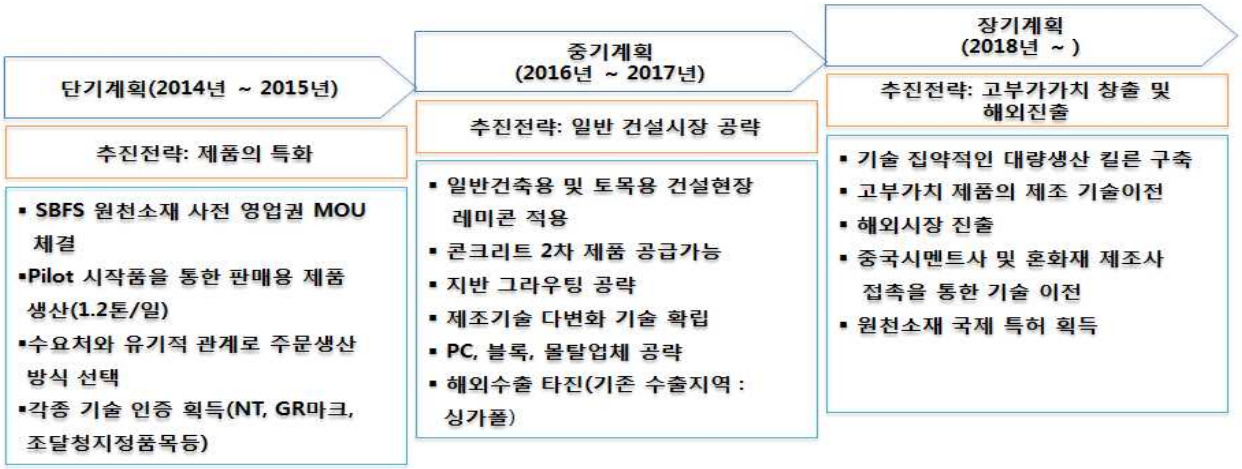
-. 고부가가치 제품의 제조 기술이전 (특허계약 : 시멘트판매사)

○ 해외시장 진출

-. 기존 고로슬래그미분말과 차별된 Smart 고로슬래그미분말 수출(싱가폴)

-. 중국시멘트사 및 혼화재 제조사 접촉을 통한 기술 이전

-. 원천소재 국제 특허 획득



본 연구는 건설 소재 산업, 건설 산업에 관련된 연구로서, 주로 시멘트회사, 고로슬래그미분말 제조 회사, 레미콘 회사의 연구로 진행되었으며, 특히 콘크리트의 정기 내구성에 대하여 지속적인 관찰과 후속과제 연계 필요성도 있으며, 특히, 개발된 시제품은 레미콘 공장에서 콘크리트로서 실용화 되어야 하므로 레미콘회사 및 건설회사와의 공동연구를 추진하여 개발된 Smart 고로슬래그미분말의 사용을 극대화 할 계획이다.

본 개발기술은 주로 국내에서 사용되는 저탄소 콘크리트 적용에 활용되지만, 최근의 시멘트 회사의 다국적 기업 합병 및 물류시스템의 진전으로 인하여 언제든지 시멘트, 고로슬래그미분말 등의 수입이 가능하기 때문에 관련 연구의 선진국 연구개발 현황을 면밀히 조사하여 연구에 반영하는 것이 중요하다.

이에 따라, 본 연구진과 교류가 있는 일본 시멘트 협회, 신일본제철슬래그 회사와의 정기 교류에 의하여 개발된 기술의 국제경쟁력 향상을 면밀하게 검토하고 이를 해외에 수출 할 수 있는 기반을 구축함으로써 창조적인 신개념의 연구로, 산업계뿐만이 아니라 학계와의 연계를 통하여, 기존 콘크리트관련 연구와의 연계를 통하여 시너지를 창출하자 한다.



Fig. 5.1.1 Smart 고로슬래그미분말 제조 과정

참고문헌

1. 이상수 외 2명 “사용재료 및 양생조건에 따른 콘크리트의 조기강도발현 특성에 관한 실험적 연구” 한국 콘크리트학회 논문집 제20권 제6호 통권108호, (2008)
2. 김무한 외 4명 “고로슬래그미분말을 대량 활용한 콘크리트의 공학적 특성 및 내구특성에 관한 실험적 연구” 대한건축학회논문집 구조계 제23권 제3호, (2007)
3. 오병환 “고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 특성 및 사용시 유의사항” 한국 시멘트협회, (2003)
4. 박응모 외 2명 “무기계 자극제의 첨가가 고로슬래그 시멘트의 압축강도 및 세공구조에 미치는 영향” 대한건축학회지 제17권 제9호, (2001)
5. 임남기 “서냉고로슬래그 고미분말을 사용한 콘크리트의 압축강도 발현특성에 관한 연구” 대한건축학회논문집 구조계, (2004)
6. 한천구 외 3명 “CSA에 의한 혼화재 사용 콘크리트의 초기품질 향상” 대한건축학회논문집 구조계, (2006)
7. 이종석 외 5명 “40℃ 온수양생을 이용한 초고강도 콘크리트의 조기 강도 예측에 관한 연구” 대한건축학회 춘계학술발표대회논문집 구조계, (2011)
8. 최성우 외 3명 “배합설계 조건에 따른 고성능 콘크리트의 조기강도 발현특성에 관한 연구” 한국콘크리트학회 춘계학술대회 제21권 1호, (2009)
9. 송진규 외 3명 “고로슬래그와 나트륨계열 활성화제를 이용한 무시멘트 모르타르의 특성” 대한건축학회논문집 구조계 제26권 제 6호, (2010)
10. 조민철 외 4명 “알칼리 자극에 의한 고로슬래그 경화체의 기초 특성” 대한건축학회 학술발표 논문집 제22권 제1호, (2002)
11. 이화영 외 4명 “알칼리 자극제를 이용한 비소성 시멘트 모르타르의 압축강도 개선” 대한 건축학회 학술발표대회 논문집 제 26권 제 1호, (2006)
12. 안양진 외 3명 “규산나트륨(Sodium Silicate)을 자극제로 사용한 알칼리 활성화 슬래그 경화체의 특성” 대한건축학회 학술 발표대회 논문집 제26권 제1호, (2006)
13. 이상수 “알칼리 자극제를 사용한 무시멘트계 친환경 무기복합체의 유동특성 및 강도특성 연구” 대한건축학회논문집 구조계 제26권 제5호, (2010)
14. 이종규 외 4명 “시멘트의 고강도 발현을 위한 수화 제어형 혼화재 개발” 요업(세라믹) 기술원, (2007)
15. 소양섭 외 3명 “자극제 종류에 따른 고로슬래그 시멘트 모르타르의 특성” 대한건축학회 논문집 구조계 18권 5호, (2002)
16. 임명관 외 2명 “고로슬래그의 분말도 및 재생 잔골재 치환율에 따른 모르타르의 강도 및 내구적 특성에 관한 연구” 대한건축학회논문집 구조계 제23권 제10호, (2007)
17. 유장원 외 5명 “콘크리트 초기강도 향상을 위한 고로슬래그 미분말의 사용에 관한 실험적 연구” 춘계학술발표대회 논문집 통권 제16호, (2009)
18. 허권 외 2명 “급결제를 혼합한 시멘트페이스트의 응결시간에 관한 실험적 연구” 한국콘크리트학회 논문집 제17권 6호, (2005)
19. 천병식 외 3명 “시멘트 수화지연제가 규산나트륨-시멘트 그라우트 초기강도에 미치는 영향에 관한 연구” 한국지반공학회, (2005)

20. 배장춘 외4명 “CSA에 의한 콘크리트의 초기품질향상에 관한 연구”, 한국건축시공학회 춘계학술발표대회 논문집, (2005)
21. “최신콘크리트공학, 한국콘크리트학회, (2011)
22. 문한영 외 1명 “고로슬래그 모르타르의 초기강도에 대한 알칼리자극제의 영향”. 한국구조물 진단학회 학회지, (2005)
23. 김태완, “가성알칼리와 탄산나트륨을 혼합한 활성화제를 사용한 알칼리 활성화 고로슬래그 모르타르의 강도 특성”, 한국콘크리트학회 논문집, (2012)
24. 송금일 외 3명, 알칼리활성 고로슬래그 모르타르의 탄산화 특성, 한국콘크리트학회, (2012)
25. 서창우 외 4명, 제강 2차 정련 슬래그를 재활용한 칼슘설포알루미네이트(CSA) 합성 및 수화 특성, 대한금속・재료학회지, (2008)
26. 이강진 외 3명, 분말형 자극제를 이용한 고로슬래그미분말 혼입 시멘트 모르타르의 조기 압축강도 향상에 관한 실험적연구, 한국생태환경건축학회, (2012)
27. 문정호 외 2명, 산업 부산물을 이용한 칼슘설포알루미네이트의 합성, (1998)
28. 나철성 외 5명, 고로슬래그미분말의 분말도 및 대체율에 따른 콘크리트 공학적 특성에 관한 실험적 연구, 한국콘크리트학회 추계학술발표회, (2004)
29. 김병권 외 2명, CSA 팽창재를 사용한 무수축 콘크리트 현장적용사례 연구, 한국콘크리트학회, (1997)
30. 유영환, CSA 수화특성에 미치는 Langbenite의 영향, 명지대학교 대학원 석사학위 논문, (2003)
31. 송태협 외 2명, 칼슐설포알루미네이트를 사용한 모르타르의 초기강도 특성에 관한 연구, 한국콘크리트학회, (2005)
31. 장지한, 시멘트 수화반응의 Dormant period에서 콘크리트 물성변화에 대한 고찰, 한양대학교 공학대학원 석사학위논문, (2012)
32. 이준철 외 3명, 시멘트 페이스트의 압축강도에 있어서 미생물의 영향, 대한건축학회 논문집. (2013)
33. 송종택 외 2명, 산업부산물을 이용한 CSA계 팽창시멘트의 제조 및 특성, Journal of the Korean Ceramic Society, (2001)
34. 이민웅, 무수석고를 혼입한 모르타르의 내구특성 분석에 관한 실험적 연구, 건국대학교 대학원 석사학위논문, (2011)
35. 변승호 외 2명 “분쇄조제가 시멘트 클링커의 분쇄와 물성에 미치는 영향, 신소재연구 논문집, 제 15집, (2007)
36. 김동진 외 3명 “슬래그 시멘트 조기강도 향상 방안에 대한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회, (2011)
37. 곽복환 외 3명 “소성 분말을 이용한 고로슬래그미분말 혼입 모르타르의 초기재령 압축강도 향상에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 (2012)
38. 이상현 외 4명 “탄소배출 저감형 시멘트 에코멘트 개발 및 현장 적용”, 대한건축학회 학술 발표대회 논문집, (2010)
39. 이지환 외 5명 “산업부산물을 활용한 조강형 촉진제의 양생온도에 따른 조기강도 특성에 관한 연구”, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, (2013)
40. 김진형 외 2명 “Mock-up 소성로에서 개발된 산업부산물을 활용한 고로슬래그미분말 혼입

시멘트 모르타르의 조기 압축강도 향상에 관한 실험적 연구” 대한건축학회 추계학술발표대회 논문집, (2013)
41. 한국환경산업기술원, 국가 LCI 데이터베이스 정보망, http://www.edp.or.kr.
42. 문한영 외 2명 “열수양생법에 의한 고로슬래그미분말 혼합 콘크리트의 강도 추정”, 한국콘크리트학회논문집, (2004)
43. 김종엽, 건축물 LCA를 위한 건설자재의 환경부하 원단위 산출 연구 : 산업연관표에 의한 에너지소비량 및 이산화탄소 배출량을 중심으로, 대한건축학회지, 20권 7호, (2004)
44. 환경부, 국가온실가스 부문별 감축목표, (2011)
45. 김태형, 태성호, 콘크리트 생산에 의한 CO_2 배출량 평가 시스템 개발에 관한 연구, 콘크리트학회논문집, 22권 6호, (2010)
46. 백철우 외 5명 “고로슬래그미분말을 대량 활용한 콘크리트의 내구특성”, 한국콘크리트학회
학술대회, (2011)
47. 이강희 외 1명 “주요 건축자재의 에너지 소비와 이산화탄소 배출 원단위 산정 연구, 대한건축학회, (2009)
48. 태성호 외 3인 “공동주택의 전 생애주기 이산화탄소($LCCO_2$) 간이평가 기법에 관한 연구”, 대한건축학회논문집, (2010)
49. 김운용 외 3명 “고로슬래그미분말이 혼입된 ECC(Engineered Cementitious Composite)의 개발”, 한국콘크리트학회논문집, (2006)
50. 김영재 “SOC 건설사업의 총사업비 관리체계 개선방안”, 한국건설관리학회 논문집, 제 11권 제3호, (2010)
51. 대한건설협회, 2010 종합건설적산, 대한건설협회, (2010)
52. (구)대한주택공사, 국내 공동주택 모델 및 구조시스템의 변화와 전망, 대한주택공사, (2005)
53. 손영진 “국내 골조공사 공기단축의 기술개발 방향에 관한 연구”, 건설관리 기술과 동향, 한국건설관리학회, (2009)
54. 윤우성 외, 실적공사비 분석을 통한 공동주택 공사비 추정에 관한 연구, 한국건설관리학회 논문집, (2009)
55. 이현수 외, 공기단축형 공동주택 구조평면제안, 건설관리학회 전국 대학생 학술발표대회 논문집, (2008)
56. 조문영 외, 실적공사비 적용 및 축적방안 연구보고서, (구)건설교통부, (1999)
57. 최석인 외, 실적공사비제도의 평가와 개선방안, 한국건설산업연구원, (2006)
58. 한충희 외, 동절기 골조공사 시행이 마감공사 주공정선에 미치는 영향 한국건설관리학회 논문집, 제 7권 제1호, (2006)
59. 권석현, 환경비용을 고려한 공공시설물의 환경경제성 평가, 한국건설 관리학회 논문집, 제 8권, 제3호, (2007)
60. 김용수, LCC 기법을 이용한 신기술 냉·난방 공조설비 시스템의 경제성 분석에 관한 사례연구, 한국건설관리학회논문집, 제 6권, 제2호, (2005)
61. 김성욱 외, 공동주택의 에너지 절감형 설비 적용에 따른 LCC 분석 및 경제성 평가, 한국 건설관리학회 학술발표대회 논문집, (2009)
62. 염윤숙 외, LCC 분석법을 이용한 친환경 건축 요소기술의 경제성 평가방법에 관한 연구,

대한건축학회 학술발표대회 논문집, 제28권 제1호, (2009)
63. 국토해양부, 시설물별 탄소배출량 산정 가이드라인(건축물), (2011)
64. 건설교통부(현 국토해양부), 건축자재 환경성정보 국가D/B구축사업 중간보고서, (2007)
65. 한양대 친환경건축연구센터, 한국라파즈 석고보드를 이용한 건축물의 환경부하 및 경제성 평가연구, (2011)
66. 한국환경산업기술원, 국가 LCI 데이터베이스 정보망, http://www.edp.or.kr.
67. 환경부, 탄소성적표지인증업무 등에 관한 규정, 환경부고시 제 2009-10호, (2009)
68. , 건축물의 LCA를 위한 원단위 작성 및 프로그램 개발 연구, 한국건설기술연구원, (2004)
69. 한국건자재시험연구원, 고로슬래그미분말을 활용한 시멘트·콘크리트 생산기술 개발, (2001)
70. 산업자원부, 건물의 에너지원단위 기준(안)연구에 관한 최종보고서, 한국에너지기술연구소, (1999)
71. 김종엽, 이승우, 손장열, 건축물 건설단계에서의 에너지소비량 및 CO_2 배출량 원단위 산출, (2004)
72. 안광원, 시멘트 업계 기후변화 대응방안, 에너지관리공단 기후변화협약대책반, (2000)
73. 한국산업 규격 KS L 5210, 고로슬래그시멘트 (Blast furnace slag cement), 한국표준협회, (2006)
74. 유동헌, 산업공정부문 온실가스 배출전망 기본연구보고서, 에너지경제연구원, (2004)
75. 산업자원부, 기후변화협약 대응을 위한 중장기정책 및 전략에 관한 연구, 에너지경제연구원, (2004)
76. 이건모, 환경전과정 평가의 이론과 지침, 한국환경품질인증협회, (1998)
77. 이강희, 건축자재와 재료의 환경친화성 평가 프로세스, 대한건축학회, (2003)
78. 강혜진, 공동주택 건축자재의 친환경성능평가에 관한 연구, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, (2007)
79. 플라이애쉬를 사용한 비소성 무기결합재 제조기술개발, 요업기술원, (2006)
80. 정민선외3명시멘트 수화에 따른 6가 크롬의 고정화 특성 한국구조물진단유지관리공학회 논문집 제17권 제6호(2013. 11)
81. 박환서 시멘트 소성로에서 폐기물을 동시에처리할 경우의 생태학적 효율분석, 한국과학기술정보연구원
82. 무기계 산업폐기물을 활용한 CO_2 무배출형 비소성 시멘트 제조기술 개발, 전북대학교, 환경부
83. Marie Michel, The influence of gypsum ratio on the mechanical performance of slag cement accelerated by Calcium sulfoaluminate cement, Construction and Building Materials 25, (2011)
84. J. Pėra, New applications of calcium sulfoaluminate cement, Cement and Concrete Research 34 (2004)
85. M. Regourd, J. H. Thomassin, P. Ballif and J. C. Touray: Cem. Concr. Res. 13 1983년
86. S.J. Barnett, Strngth development of mortars containing ground granulated blast-furnace slag: Effect of curing temperature and determination of apparent activation energies, Cement and Concrete Research 36, (2006)
87. Damtoft, J S., Lukasik, J., Herfort, D., Sorrentino, D., and Gartner, E. M., Sustainable Development and Climate Change Initiatives, Cement and Concrete Research, 2008년
88. Malhotra, V. M., Introduction: Sustainable Development and Concrete Technology, Concrete International, (2001)
89. Hyung-Seok kim. "Activation of Ground Granulated Blast Furnace Slag Cement by Calcined Alunite" Materials Transactions, Vol. 52, No.2, (2011)

90. Fathollah Saiedi, “The effect of chemical activators on early strength of ordinary Portland cement-slag mortars” Construction and Building Materials 24 (2010)

91. F.Bellmann, “Acrivation of balast furnace slag by a new method” Cement and Concrete Research 39, (2009)
92. A. Darquennes, “Early age deformations of concrete with high content of mineral additions” Construction and Building Materials 25 (2011)
93. Cahit Bilim, Cengiz Duran Atiş, Alkali activation of mortars containing different replacement levels of ground granulated blast furnace slag, Construction and Building Materials, 28(2012)
94. Guð mundur Hannesson, Katherine Kuder, Rob Shogren, Dawn Lehman, The influence of high volume of fly ash and slag on the compressive strength of self-consolidating concrete, Construction and Building Materials, 30(2012)
95. Aylin Özodabaş, Kemalettin Y ı lmaz,Improvement of the performance of alkali activated blast furnace slagmortars with very finely ground pumice, Construction and Building Materials, 48(2013)
96. Alaa M. Rashad, A comprehensive overview about the influence of different additives on the properties of alkali-activated slag –A guide for Civil Engineer, Construction and Building Materials, 47(2013)
97. İsa YüN ksel, Turhan Bilir, Ömer Özkan, Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate, Building and Environment, 42(2007)
98. How-Ji Chen, Shao-Siang Huang, Chao-Wei Tang, M.A. Malek, Lee-Woen Ean, Effect of curing environments on strength, porosity and chloride ingress resistance of blast furnace slag cement concretes: A construction site study, Construction and Building Materials, 35(2012)
100. Mridul Garg, Neeraj Jain, Waste gypsum from intermediate dye industries for production of building materials, Construction and Building Materials, 24(2010)
101. Martin Bohác ˇ ,Martin Palou, Radoslav Novotný, Jiří Másilko, Dalibor Všianský, Theodor Stane ˇ k, Investigation on early hydration of ternary Portland cement-blast-furnace slag-metakaolin blends, Construction and Building Materials, 64(2014)
102. S.J. Barnett, M.N. Soutsos, S.G. Millard, J.H. Bungey, Strength development of martars containing ground blast-furnace slag: Effect of curing temperature and determination of apparent activation energies, Cement and Concrete Research, 36(2006)
103. How-Ji Chen, Shao-Siang Huang, Chao-Wei Tang, M.A. Malek, Lee-Woen Ean, Effect of curing environments on strength, porosity and chloride ingress resistance of blast furnace slag cement concretes: A construction site study, Construction and Building Materials, 35(2012)
104. Sanjay Kumar, Rakesh Kumar, A. Bandopadhyay, T.C. Alex, B. Ravi Kumar, S.K. Das, S.P. Mehrotra, Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on theproperties and structure of portland slag cement, Cement & Concrete Composites,

30(2008)
105. Shingo Miyazawa, Takashi Yokomuro, Etsuo Sakai, Atsushi Yatagai, Nobukazu Nito, Kiyoshi Koibuchi, Properties of concrete using high C3S cement with ground granulated blast-furnace slag, Construction and Building Materials, 61(2014)
106. F. Bellmann, J.Stark, Activation of blast furnace slag by a new method, Cement and Concrete Research, 39(2009)
107. Jianping Zhu, Qifang Zhong, Gaige Chen, Dongxu Li, Effect of particlesize of blast furnace slag on properties of portland cement, Procedia Engineering, 27(2012)
108. K.J. Mun a, S.Y. So, Y.S. Soh, The effect of slaked lime, anhydrous gypsum and limestone powder on properties of blast furnace slag cement mortar and concrete, Construction and Building Materials, 21(2007)
109. Hanifi Binici, Hüseyin Temiz, Mehmet M. KÖse, The effect of fineness on the properties of the blended cements incorporating ground granulated blast furnace slag and ground basaltic pumice, Construction and Building Materials, 21(2007)
110. Nam-Gi Lim, Jae-Won her, A Foundational Study on Properties of High-Strength Concrete using Nanoslag by Silica Fume Replacement, Architectural Institute of Korea, v.52 n.12(2008)
111. Keun-Hyeok Yang, Ah-Ram Cho, Jin-Kyu Song, Sang-Ho Nam, Hydration products and strength development of calcium hydroxide-based alkali-activated slag mortars, Construction and Building Materials, 29(2012)
112. Aylin Özodabaş, Kemalettin Y ı lmaz, Improvement of the performance of alkali activated blast furnace slag mortars with very finely ground pumice, Construction and Building Materials, 48(2013)
113. Jeffrey J. Thomas, Andrew J. Allen, Hamlin M. Jennings, Density and water content of nanoscale solid C–S–H formed in alkali-activated slag (AAS) paste and implications for chemical shrinkage, Cement and Concrete Research, 42(2012)
114. Hui Xu, Weiliang Gong, Larry Syltebo, Kevin Izzo, Werner Lutze, Ian L. Pegg, Effect of blast furnace slag grades on fly ash based geopolymer waste forms, Fuel, 133(2014)
115. Jin-Hyoung Kim, Han-Seung Lee, Kang-Jin Lee, An experimental study on the early compressive strength improvement of cement mortar mixing Ground Granulated Blast Furnace Slag using Industrial byproducts developed in Mock-up rotary kiln, Architectural Institute of Korea, v.33 n.2(2013)
116. Shiyun Zhong, Kun Ni, Jinmei Li, Properties of mortars made by uncalcined FGD gypsum-fly ash-ground granulated blast furnace slag composite binder, Waste Management 32(2012)
117. Marie Michel, Jean-FranÇois Georgin, Jean Ambroise, Jean Péra, The influence of gypsum ratio on the mechanical performance of slag cement accelerated by calcium sulfoaluminate cement, Construction and Building Materials 25(2011)
118. G. Menéndez, V. Bonavetti, E.F. Irassar, Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag, Cement & Concrete Composites

25(2003)
119. Chao Li, Henghu Sun, Longtu Li, A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin(Si+Al) cements, Cement and Concrete Research 40(2010)
120. International Energy Agency, World Energy Outlook; (2009)
121. Baek CW, Kim HS, Park JB, Jun JY, Suh CW. Durability of concrete using large amounts of ground granulated blast furnace slag. Korea Concrete Institute Conference (2011)
122. Moon Hy, Choi HW, Kim YJ. Estimation of Strength of Ground Granulated Blast Furnace Slag Mix Concrete Using Hydrothermal Curing Method. Korea Concrete Institute Journal (2004)
123. Kim WY, Kim JS, Ha GJ, Kim JG. Development of Engineered Cementitious Composite(ECC) with Ground Granulated Blast-Furnace Slag. Korea Concrete Institute Journal (2006)
124. Park JH, Tae SH, Kim TH, Life Cycle CO_2 Assessment of Concrete by compressive strength on Construction site in Korea. Renewable and Sustainable Energy Reviews Sustainable Energy Reviews (2012)
125. TH Hong, CYJi, HSPark. Integrated model for assessing the cost and CO_2 emission (IMACC) for sustainable structural design in ready-mixconcrete. Journal of Environmental Management. (2012)
126. TH Hong, CG Koo, HJ Kim . A decision support model for improving a multi-family housing complex based on CO_2 emission from electricity consumption, Journal of Environmental Management. (2012)
127. Kim TH, Tae SH, Lee JS. A Study on Development of a CO_2 assessment Program of Concrete. International Conference on Sustainable Building Asia (2010)
128. Kim TH, Tae SH, Roh SJ.Assessment of the CO_2 emission and cost reduction performance of a low-carbon-emission concrete mix design using an optimal mix design system.Renewable andSustainable Energy Reviews (2013)
129. Tae SH, S. W. Shin, G. H. Lee, The Environmental Load Reduction Effect of the Reinforced Concrete Structure Using High-Strength Concrete, Korea Institute of Ecological Architecture and Environment. (2008)
130. Tae SH, Shin SW, Kim HI, Ha SK, Lee JS, Han SH, Rhee JW. Life Cycle Environmental Loads and Economic Efficiencies of Apartment Buildings with Plaster Board Drywall, Renewable and Sustainable Energy Reviews (2011)
131. Kjellsen KO, Guimaraes M, Nilsson A. The CO_2 balance of concrete in a life cycle 430 perspective. Nordic Innovation Centre (2005)
132. Li. Z. A new life cycle impact assessment approach for building, Building and Environment (2006)
133. Shin SW, Tae SH, Woo JH, Roh SJ. The Development of Environmental Load Assessment System of a Standard Korean Apartment House. Renewable and Sustainable Energy Reviews (2011)

134. Sharma A, Saxena A, Sethi M, Varun V. Life cycle assessment of buildings: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews (2011)

135. Min Zhao, Zheng-hong Kong, Francisco J. Escobedo, Jun Gao. Impacts of urban forests on offsetting carbon emissions from industrial energy use in Hangzhou, China. Journal of Environmental Management. (2010)
136. Joana M. Dias, Maria C.M. Alvim-Ferraz, Manuel F. Almeida, Jose Rivera-Utrilla, Manuel Sanchez-Polo. Waste materials for activated carbon preparation and its use in aqueous-phase treatment: A review. Journal of Environmental Management. (2007)
137. Hirotaka Maeda, Haruki Imaizumi, Emile Hideki Ishida. Utilization of calcite and waste glass for preparing construction materials with a low environmental load. Journal of Environmental Management. (2011)
138. Sakai, K., and Kawai, K., "JSCE Guidelines for Concrete No. 7; Recommendation of Environmental Performance Verification for Concrete Structures," JSCE, (2006)
139. G. Habert, N. Roussel, Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives, Cement and Concrete Composites. 31, (2009)
140. コンクリト構造物の 環境性能照査指針(試案),日本土木學會, (2005)
141. Hironori Nagai, Takafumi Noguchi, Resource-flow Simulation in Concrete Related Industries by using "ecoMA", the International Conference(SB07 SEOUL), (2007)
142. S. W. Shin, S. H. Tae, J. H. Woo, S. J. Roh, The Development of Environmental Load Evaluation System of a Standard Korean Apartment House, Renewable & Sustainable Energy Reviews. (2011)
143. Li Z, A new life cycle impact assessment approach for building, Building and Environment, (2006)
144. A. Sharma, A. Saxena, M. Sethi, V, Varun, Life cycle assessment of buildings: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 15, (2011)
145. The CO_2 Balance of Concrete in a LifeCycle Perspective, Nordic Innovation Centre, (2005)
146. Stephen J. Kirk, Alphonse J. Dell'Isola, Life Cycle Costing for Design Professionals, McGraw-Hill, (1995)
147. Douglas J. Ferry, Peter S. Brandon, Jonathan D. Ferry, Cost planning of buildings, seven edition, Blackwell Science, (1995)
148. Kirk, "Life Cycle Costing for Design Professionals", McGraw-Hill Inc.A. M. Neville, Property of Concrete, London, Pitman, (1982)
149. ISO, ISO 14040 : 2006 Environmental Management - Life cycle assessment - Principles and framework, (2006)

[부록] 정량적 성과목표

연차	성과목표	성과지표	측정방법	목표치	달성치	가중치
1차년도	Smart 고로슬래그미분말(SBFS) 원천소재 개발	국내외 학술발표 논문 게재 건수	(국내 학술발표 논문 게재 건수×0.5)	3건	4건	10
		국내외 학술지 논문 게재 건수	(국내 학술지 게재 논문 건수×1.0)	1건	1건	20
		국내외 지적 재산권 확보 건수	(특허 출원 및 등록건수×1.0)	2건	3건	30
	SBFS 제조용 Pilot 제조장치 개발	Pilot 제조장치 공정 설계 확보 건수	SBFS 제조용 Pilot 장치 공정 설계 도면	1건	1건	20
	SBFS 및 RC 아파트 적용 콘크리트 CO_2 원단위 평가기술 개발	SBFS CO_2 원단위 평가 보고서	CO_2 원단위 평가 보고서	1건	1건	10
		RC조 아파트 골조공사 기간 및 CO_2 평가 보고서	골조공사 기간 및 CO_2 평가 보고서	1건	1건	10
	소 계					100%
2차년도	Smart 고로슬래그미분말(SBFS) 활용 저탄소 콘크리트 개발	국내외 학술발표 논문 게재 건수	(국내 학술발표 논문 게재 건수×0.5)+(국외 학술발표 논문 게재 건수×1.0)	2건	4건	10
		국내외 학술지 논문 게재 건수	(국내 학술지 게재 논문 건수×1.0)	1건	2건	10
		첨가재 시제품 건수	시제품 건수	3건	3건	20
	SBFS 제조용 Pilot 제조장치 개발	국내외 지적 재산권 확보 건수	(특허 출원 및 등록건수×1.0)	2건	2건	20
		Pilot 제조장치 시작품 개발 건수	시작품 개발 건수	1건	1건	30
	SBFS 및 SBFS 혼입 콘크리트 경제성 및 CO_2 평가기술 개발	SBFS 및 SBFS 혼입 콘크리트 경제성 및 CO_2 평가 기술 보고서 건수	경제성 및 CO_2 평가 기술 보고서 건수	1건	1건	10
	소 계					100%
3차년도	Smart 고로슬래그미분말(SBFS) 활용 저탄소 레미콘 개발	국내외 학술발표 논문 게재 건수	(국내 학술발표 논문 게재 건수×0.5)	3건	4건	10
		국내 학술지 논문 게재 건수	(국내 학술지 게재 논문 건수×2.0)	2건	2건	10
		국외 학술지 논문 게재 건수	(국외 학술지 게재 논문 건수×1.0)	1건	1건	10
		SBFS 혼입 레미콘 녹색 인증 건수	녹색제품 보고서 건수	1건	1건	10
	SBFS 제조용 Pilot 제조장치 개발	SBFS 활용 기술 이전 건수	기술 이전 건수	1건	1건	40
	SBFS 혼입 레미콘 기술 평가	SBFS 혼입 레미콘 경제성 및 CO_2 평가 기술 보고서 건수	경제성 및 CO_2 평가 기술 보고서 건수	1건	1건	10
		SBFS 혼입 레미콘 구조체 강도발현 보고서 건수	보고서 건수	1건	1건	10
	소 계					100%

1. 정량적 성과

가. 특허등록/출원

No.		등록/출원번호	등록/출원일	출원인 (등록권리자)
1	강도증진용 시멘트 혼합제를 이용한 시멘트 조성물(등록)	10-1324548	20131028	영진글로벌(주)
2	강도증진용 시멘트 혼합제 및 이를 이용한 시멘트 조성물(등록)	10-1392271	20140429	영진글로벌(주)
3	슬래그 미분말, 슬래그 미분말 제조방법 및 슬래그 미분말을 이용한 슬래그 시멘트 조성물(등록)	10-1392270	20140429	영진글로벌(주)
4	슬래그 시멘트 조성물 및 이를 이용한 슬래그 시멘트 혼입 모르타르(등록)	10-1352401	20140110	영진글로벌(주)
5	초속경 시멘트 조성물 및 콘크리트 조성물	10-1468898	20141128	영진글로벌(주)
6	시멘트 조성물 및 콘크리트 조성물	10-1468899	20141128	영진글로벌(주)

나. 학술지 게재

No.	SCI/ 일반	논문명	학술지명	ISBN ISSN	주저자명	Vol. (No)	시작 페이지	끝 페이지	게재 일자
1	일반	분말형 자극제를 이용한 고로슬래그미분말 혼입 시멘트 모르타르의 조기 압축강도 향상에 관한 실험적 연구	한국생태환경 건축학회	1598-3730 ; 2288-4823 ; 2288-968x ;	이강진	12 (3)	115	122	2012.06
2	일반	산업부산물을 활용한 조기강도 촉진제 기술 개발을 위한 연구	한국건설순환 자원학회	1975-5201	이지환	8 (1)	1	10	2013.03
3	일반	스마트 고로슬래그 미분말을 첨가한 시멘트 모르타르의 초기 압축강도 향상에 관한 연구	한국구조물 진단유지관리 공학회	pISSN 2234-6937 eISSN 2287-6979	이성태	17 (2)	1	7	2013.03
4	일반	CSA계 분체를 사용한 고로슬래그미분말 혼입 모르타르의 조기강도 향상에 관한 실험적 연구	대한건축학회	1226-9107	김진형	29 (10)	51	58	2013.10
5	일반	순환골재가 혼입된 콘크리트의 탄소배출영향 분석에 관한연구	한국폐기물 자원순환학회	pISSN 2093-2332 eISSN 2287-5638	김태형	31 (1)	96	104	2014.01
6	SCI	Environmental Performance Analysis of Concrete mixing Ground Granulated Blast Furnace Slag	Journal of Cleaner Production	-	김태형	-	-	-	2014.10

다. 학술대회 발표 성과

No.	SCI/	논문명	학술대회명/ 학술지명	주저자명	Vol. (No)	시작 페이지	끝 페이지	게재 일자
1	일반	고로슬래그미분말 혼입에 따른 콘크리트 CO_2 배출량 저감에 관한 연구	한국콘크리트학회	김태형	24 (1)	191	192	2012.04
2	일반	고로슬래그미분말의 CO_2 배출 원단위 산출에 관한 연구	대한건축학회	박정훈	32 (1)	131	132	2012.04
3	일반	분쇄조제를 이용한 고로슬래그 미분말의 조기강도 개선에 관한 연구	한국콘크리트학회	노재호	24 (1)	295	296	2012.04
4	일반	소성분말을 이용한 고로슬래그미분말 혼입 모르타르의 초기재령 압축강도 향상에 관한 연구	한국콘크리트학회	곽복환	24 (1)	265	266	2012.04
5	일반	A Study on the Early Compressive Strength of Mortar with Ground Granulated Blast Furnace Slag Using the Plastic Deformation of Industrial Byproducts	ISAIA 국제학술발표	김진형	C-1-3	-	-	2013.10
6	일반	산업부산물을 활용한 조강형 촉진제의 양생온도에 따른 조기강도 특성에 관한 연구	대한건축학회	이지환	33 (1)	491	492	2013.04
7	일반	스마트 고로슬래그 미분말을 첨가한 콘크리트의 초기 압축강도 향상에 관한 연구	한국구조물진단유지관리 공학회	이성태	17 (1)	1	2	2013.04
8	일반	저온환경에서의 소성 분말을 이용한 고로슬래그미분말 혼입 모르타르의 초기재령 압축강도 향상에 관한 연구	한국구조물진단유지관리공학회	김진형	17 (1)	508	509	2013.04
9	일반	Mock-up 소성로에서 개발된 산업부산물을 활용한 고로슬래그미분말 혼입 시멘트 모르타르의 조기 압축강도향상에 관한 실험적 연구	대한건축학회	김진형	33 (2)	585	586	2013.10
10	일반	산업부산물을 활용한 조강형 촉진제 혼입 콘크리트의 조기강도 및 온도특성에 관한 연구	한국콘크리트학회	이지환	25 (2)	285	286	2013.10
11	일반	산업부산물을 활용한 조강형 결합재의 치환율에 따른 조기강도 특성에 관한연구	한국건축시공학회	전우철	14 (1)	254	255	2014.04
12	일반	석고계와 정수오니계 산업부산물의 소성온도가 콘크리트 압축강도 발현에 미치는 영향 연구	한국콘크리트학회	권해원	26 (1)	445	446	2014.04

라. 보고서 성과

No.	구분	보고서명	주관	의뢰기관	완료일자
1	보고서	SBFS CO_2 원단위 평가 보고서	영진글로벌	한양대	2012.04
2	보고서	RC조 아파트 골조공사 기간 및 CO_2 평가 보고서	영진글로벌	한양대	2012.04
3	보고서	SBFS 및 SBFS 혼입 콘크리트 경제성 및 CO_2 평가 기술 보고서 건수	영진글로벌	한양대	2013.04
4	보고서	SBFS 및 레미콘 경제성 및 CO_2 평가 기술 보고서 건수	영진글로벌	한양대	2014.08
5	보고서	SBFS 혼입 레미콘 구조체 강도발현 보고서 건수	영진글로벌	렉스콘	2014.08
6	보고서	SBFS 혼입 레미콘 녹색 인증 기술 보고서	영진글로벌	한양이앤씨	2014.08

마. 시제품 및 시작품 성과

No.	구분		주관	협력기관	완료일자
1	시제품	OPC 강도발현 첨가재	영진글로벌	동원엔지니어링(주)	2013..03
2	시제품	GBFS 강도발현 첨가재	영진글로벌	-	2013.03
3	시제품	저온환경 강도발현 첨가재	영진글로벌	-	2013.03
4	시작품	SBFS 원천소재 제조 소성 Pilot 장치 개발 및 설치	영진글로벌	-	2013.12

바. 기술이전완료

No.	구분	실시기술명	주관	협력기관	완료일자
1	기술이전 (직접실시)	무기계 산업부산물 및 산업폐기물의 혼합소성을 통한 시멘트 혼화재 제조기술개발	영진글로벌	국토교통과학기술진흥원	2014.09

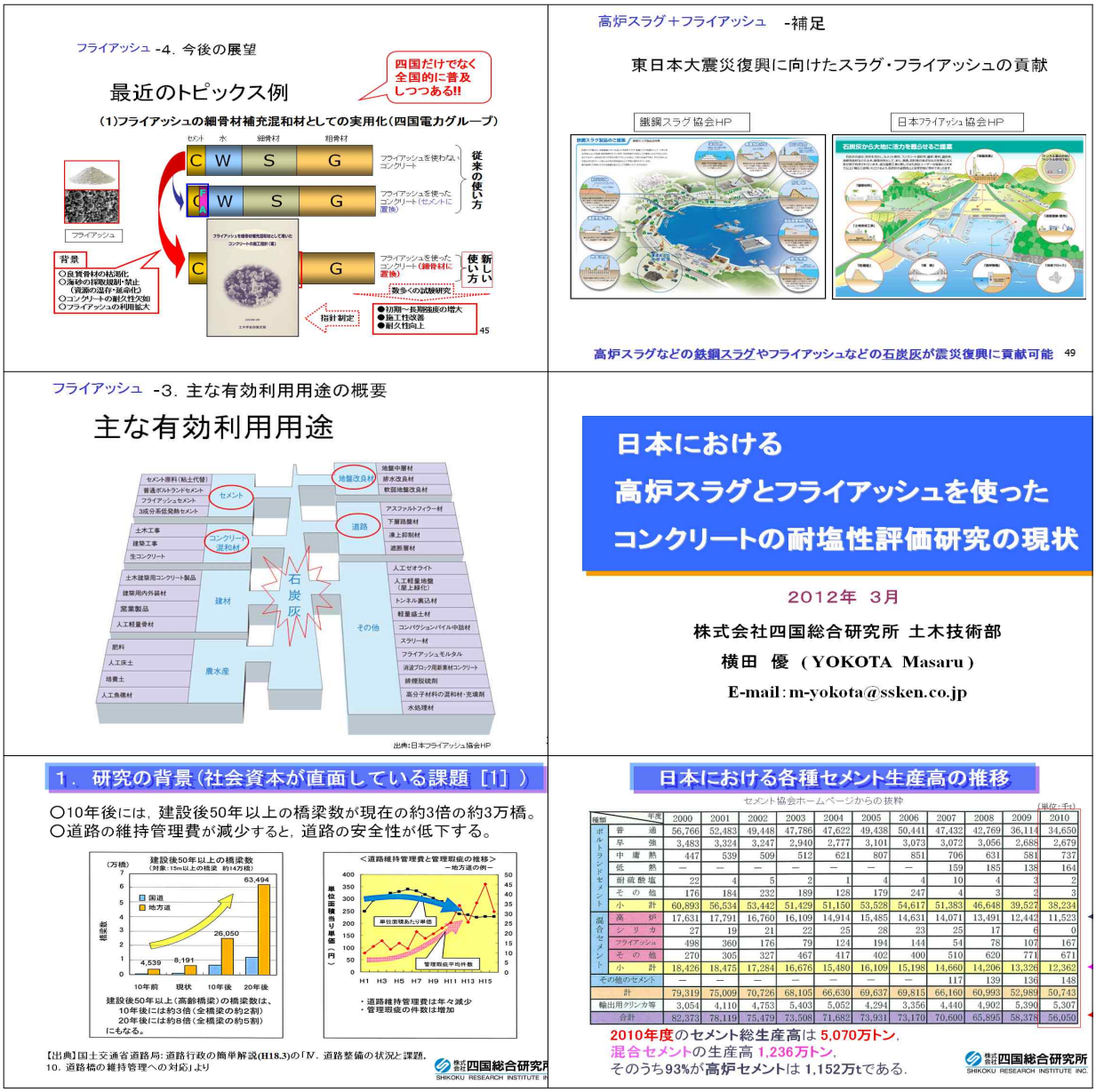
2. 정성적 성과

No.	성과명	성과유형	성과설명		활용대상자
			특징/우수성	국내외 기술수준과의 비교	
1	SBFS 원천 소재 개발 (시멘트, 고로슬래그미분말, 저온환경 강도발현 첨가제)	재료·자재	산업부산물과 산업폐기물을 일정한 화학성분 비율로 혼합하여 Pilot 장비(킬른)을 통하여 저온(800℃)에서 소성된 강도발현 첨가재이며, 일반적인 OPC대비 초기재령(1일,3일)에서 압축강도를 동등이상 확보하며 환경부하(CO_2)발생량을 저감시키는 기술임.	고로슬래그미분말 생산업체에서 강도 발현 목적으로 천연무수석고를 3~5% 혼합해서 사용하는데 전량 중국 및 태국에서 수입하며, 연간 27만톤정도 사용됨. 금액은 톤당 50,000원으로 연간 135억이 소비되는데 개발된 원천소재를 통해 수입대체 효과 발생.	연구자 일반 수요자
2	SBFS를 활용한 저탄소 콘크리트 개발	재료·자재	OPC 100% 사용대비 상온(20℃)에서 동등이상 압축강도 발현효과를 나타내는 콘크리트 및 저온환경(5~10℃)에서의 콘크리트 초기재령(1일, 3일) 압축강도 발현 성능을 나타냄. 기존 S/C에 비해 초기재령에서 우수한 압축강도 발현을 나타내며, 장기압축강도 성능 평가 또한 우수함. 특히 저온환경(동절기)에서의 기존 S/C 대비 우수성을 확보.	국내 S/C 생산 및 배합 기술 수준으로 동절기 사용에 따른 문제 발생 가능성이 높아 현장에서 S/C사용이 현저히 저하되며, 사용을 기피함. 개발된 SBFS를 활용한 콘크리트 개발을 통해 문제점을 해결 가능.	연구자 일반 수요자
3	SBFS를 활용한 레디믹스트 콘크리트 Mock-up 구조체 초기재령 압축강도 평가	재료·자재	개발된 SBFS 혼입 레미콘의 강도별 배합설계를 진행하여 실제 레미콘 B/P를 이용하여 Mock-up 구조체 타설을 진행, 구조체의 수화열 측정 및 코어 체취를 통하여 현장 적용가능성 검토(진행 중) 및 내구성 평가. 현재 초기재령(1일, 3일, 7일) OPC 100% 대비 압축강도 동등이상 확보.	개발된 SBFS 혼입 레디믹스트 콘크리트를 통하여 기존 S/C 단점을 보안 및 개선하여, 환경부하(CO_2)가 높은 OPC의 사용량 줄임으로서 공사비의 저감, 공기단축 확보 및 CO_2 저감효가 기대.	연구자 일반 수요자
4	고로슬래그미분말의 CO_2 배출량 평가 및 DB 구축 SBFS의 CO_2 원단위 평가	기타	고로슬래그 미분말과 SBFS의 CO_2 배출량을 평가하기 위한 DB 구축을 진행하였으며, SBFS 제조공정에 대한 CO_2 배출 DB 구축 진행. (LCI 데이터베이스 구축 연구 평가 기법 참조)	고로슬래그미분말, 원천소재, SBFS의 각각의 CO_2 배출 원단위 평가결과 CO_2 배출원단위는 고로슬래그미분말 대비 약 8%만큼 저감되는 것으로 나타났으며 이는 고로슬래그미분말보다 CO_2 배출원단위가 작은 원천소재를 혼합함으로써 전체의 CO_2 배출량이 저감 국내외 고로슬래그미분말 생산업체 및 SBFS사용에 따른 저탄소 콘크리트 적용기대.	연구자

No.	성과명	성과유형	성과설명		활용대상자
			특징/우수성	국내외 기술수준과의 비교	
5	SBFS 제조용 Pilot 장치 개발 (시작품제작, 시제품 생산)	장비 · 장치	SBFS를 생산하기 위한 Pilot 장비로 클링서 제조 장치, 소성장치, 냉각장치와 설비 제어장치인 S/W 프로그램을 개발하여, 재료 합성 및 조성 연구에 활용 가능.	국내 기술수준으로 연구용으로 개량한 Pilot 장비는 극히 적으며, 기존 연구용 장비사용에 비해 적은 비용으로 시작품을 제작하였으며, 다양한 형태의 재료 합성 사용 가능.	연구자 장치 개발자 장치 설계자
6	SBFS 및 RC 아파트 적용 콘크리트 CO_2 원단위 평가 (RC조 아파트 골조공사 기간 및 CO_2 평가) Elemental Unit Quantity 방법이용하여 건설표준품셈에 근거한 단가 적용	기타	SBFS 혼입 콘크리트의 CO_2 배출량 평가 완료 (현재 건설현장에서 가장 많이 사용되고 있는 강도 24 MPa 콘크리트를 대상) SBFS 혼입 콘크리트 건축물의 CO_2 배출량 평가 (25층의 판상형 공동주택에 고로슬래그미분말 또는 SBFS를 혼입한 콘크리트 CO_2 배출량 원단위를 Case1부터 Case7까지 구분 및 적용하여 평가대상 건축물의 CO_2 배출량 평가) SBFS 혼입 콘크리트 건축물의 경제성 평가(SBFS치환비율에 따라 평가대상 건축물 Case 1, 2, 3, 4를 설정)	SBFS 혼입 콘크리트의 CO_2 배출량 평가 결과, 기존 OPC 100% 사용대비 8.6%, 17.2%, 25.8% 저감됨. SBFS 혼입 콘크리트 건축물의 CO_2 배출량 평가 결과, Case 별로 6%,11%,17% 저감, SBFS를 혼입한 콘크리트 CO_2 배출량 원단위 평가 결과, 콘크리트 자재단계에서 95% CO_2발생하며, 운송단계 및 제조단계에서 1.6%, 3%를 차지함. SBFS를 혼입한 콘크리트 건축물의 경제성 평가, 일반 OPC 사용 건축물 대비 1.98%, 2.97% 저감효과를 나타냄. SBFS를 적용한 콘크리트만 건축물의 CO_2평가 및 경제성 평가 부분을 실시한 결과 기존 OPC 100% 사용대비 저감효과가 나타났다.	연구자 일반 수요자

3. 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

가. 일　정 : 2012년 3월23일(금) ~ 3월25일(토) 2박3일
나. 방문자 : 이시이, 요코타 박사 2명
다. 주　관 : 영진글로벌(주) 기술연구소
라. 제　목 : 한일 고로슬래그미분말 기술세미나
마. 초청국 : 일본 시코쿠종합연구소



4. 기타사항(중요 연구변경사항)

	차수	중요사항 및 변경사항
연구원 변경사항	1차	1. 외부 참여연구원 고용계약(계약직) 완료 가. 기간 : 2011년 10월 30일 ~ 2012년 5월29일 나. 업무 : 주관기관 첨단도시산업개발 참여 연구원 다. 채용자 : 2명 1) 양현민(남) : 남서울대학교 졸업 2) 박소정(여) : 동아대학교 졸업 2. 외부 참여연구원 고용계약(계약직)직 해지 및 변경채용(1/4분기) 가. 일 자 :2012년 03월01일자 나. 해지 및 변경채용자 1명 . 양형민(남)→ 이형민 (남) (한양대학교대학원 건축환경공학과 박사과정)
	2차	1. 외부 참여 연구원 변경 : 2012년 09월 01일 가. 이형민 → 김진홍 (한양대학교 석사졸업) 2. 외부 연구원 변경사항 - 변경 연구원 : 김진홍 2012년 09월 01일~ 2012년 11월 30일 강찬수 2013년 01월 10일~ 2013년 05월 29일
	3차	1. 외부 연구원 변경사항 - 외부 연구원 : 배지훈 퇴사(2013.05.30.~ 2013.11.30. 6개월) - 내부 연구원 : 김정선 선임연구원 퇴사(2013.05.30.~ 2013.11.30.) ※ 내부 연구원 충원 : 박현영 연구원 입사(2013.12.09.공주대학교 화학과) 2. 연구원 변경사항 - 내부 연구원 : 곽복환 책임연구원 퇴사(2014.02.28.) →이상규 연구원 충원 3 위탁기관 기업합병 : 2014.01.14(렉스콘→두산건설) ※ 렉스콘의 연구진, 연구내용은 동일하게 추진(공문 첨부 참조)

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 『건설교통기술촉진연구사업 (과제번호:11 첨단도시C06)』의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.