

| 최종보고서(일반과제용)       |                     |                                                                                                        |                        |                               |          |                        |                   |                         |               | 보안등급              |         |         |   |
|--------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------------|----------|------------------------|-------------------|-------------------------|---------------|-------------------|---------|---------|---|
|                    |                     |                                                                                                        |                        |                               |          |                        |                   |                         |               | 일반[✓], 보안[ ]      |         |         |   |
| 중앙행정기관명            | 국토교통부               |                                                                                                        |                        |                               | 사업명      | 사업명                    |                   | 국토교통기술촉진연구사업            |               |                   |         |         |   |
| 전문기관명              | 국토교통과학기술진흥원         |                                                                                                        |                        |                               |          | 내역사업명                  |                   | 국토교통기술혁신연구<br>(기반연구 유형) |               |                   |         |         |   |
| 공고번호               | 공고-제05호             |                                                                                                        |                        |                               | 연구개발과제번호 |                        | 20CTAP-C157880-01 |                         |               |                   |         |         |   |
| 국가과학기술<br>표준분류     | EI0406              |                                                                                                        |                        | 70%                           | EI0499   |                        |                   | 30%                     |               |                   |         |         |   |
| 연구주제               | (대분류) 고부가가치 건설기술 창출 |                                                                                                        |                        | (중분류) 고부가가치 인프라               |          |                        | (소분류) 환경 대응형 구조물  |                         |               |                   |         |         |   |
| 연구개발과제명            | 국문                  | 무기계 상변환 콘크리트 수화열 저감재의 장기저장성 및 생산성 향상 기술 개발                                                             |                        |                               |          |                        |                   |                         |               |                   |         |         |   |
|                    | 영문                  | Development of long-term storage and productivity improvement technology of inorganic PCM for concrete |                        |                               |          |                        |                   |                         |               |                   |         |         |   |
| 주관연구개발기관           | 기관명                 | 충남대학교 산학협력단                                                                                            |                        |                               |          | 사업자등록번호                |                   | 314-82-09264            |               |                   |         |         |   |
|                    | 주소                  | (우 34134) 대전광역시 유성구 대학로 99                                                                             |                        |                               |          | 법인등록번호                 |                   | 160171-0004040          |               |                   |         |         |   |
| 연구책임자              | 성명                  |                                                                                                        | 김규용                    |                               |          |                        | 직위                |                         | 교수            |                   |         |         |   |
|                    | 연락처                 | 직장전화                                                                                                   | 042-821-5623           |                               |          |                        | 휴대전화              |                         | 010-2415-2258 |                   |         |         |   |
|                    |                     | 전자우편                                                                                                   | gyuyongkim@cnu.ac.kr   |                               |          |                        | 국가연구자번호           |                         | 10100359      |                   |         |         |   |
| 연구개발기간             | 전체                  | 2020. 04. 13 - 2021. 12. 31 (1년 9개월)                                                                   |                        |                               |          |                        |                   |                         |               |                   |         |         |   |
|                    | 1년차                 | 2020. 04. 13 - 2020. 12. 31 (9개월)                                                                      |                        |                               |          |                        |                   |                         |               |                   |         |         |   |
|                    | 2년차                 | 2021. 01. 01 - 2021. 12. 31 (12개월)                                                                     |                        |                               |          |                        |                   |                         |               |                   |         |         |   |
| 연구개발비<br>(단위 : 천원) | 정부지원<br>연구개발비       | 기관부담<br>연구개발비                                                                                          |                        | 그 외 기관 등의 지원금<br>지방자치단체 기타( ) |          |                        |                   | 합계                      |               | 연구개발비<br>외<br>지원금 |         |         |   |
|                    | 현금                  | 현금                                                                                                     | 현물                     | 현금                            | 현물       | 현금                     | 현물                | 현금                      | 현물            |                   | 합계      |         |   |
|                    | 총계                  | 370,000                                                                                                | 12,340                 | 111,060                       | -        | -                      | -                 | -                       | 382,340       |                   | 111,060 | 493,400 | - |
|                    | 1년차                 | 160,000                                                                                                | 5,340                  | 48,030                        | -        | -                      | -                 | -                       | 165,340       |                   | 48,030  | 213,370 | - |
|                    | 2년차                 | 210,000                                                                                                | 7,000                  | 63,030                        | -        | -                      | -                 | -                       | 217,000       |                   | 63,030  | 280,030 | - |
| 공동연구개발기관 등         | 기관명                 | 책임자                                                                                                    | 직위                     | 휴대전화                          |          | 전자우편                   |                   | 비고                      |               |                   |         |         |   |
|                    | 역할                  | 기관유형                                                                                                   |                        |                               |          |                        |                   |                         |               |                   |         |         |   |
| 공동연구개발기관           | (주)트라이포드            | 길배수                                                                                                    | 대표이사                   | 010-2417-0013                 |          | tripod2003@hanmail.net |                   | 참여 기관                   | 중소기업          |                   |         |         |   |
| 연구개발담당자<br>실무담당자   | 성명                  |                                                                                                        | 손민재                    |                               |          | 직위                     |                   | 박사                      |               |                   |         |         |   |
|                    | 연락처                 | 직장전화                                                                                                   | 042-821-7731           |                               |          | 휴대전화                   |                   | 010-3507-2986           |               |                   |         |         |   |
|                    |                     | 전자우편                                                                                                   | minjae931226@naver.com |                               |          | 국가연구자번호                |                   | 11510727                |               |                   |         |         |   |

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2022 년 03 월 18 일

연구책임자 :

김규용

주관연구개발기관의 장 : 충남대학교 산학협력단

정종률

공동연구개발기관의 장 : (주)트라이포드 길배수

## < 요약 문 >

|                           |                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                 |        |                                  |     |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------|----------------------------------|-----|
| 사업명                       |                                                                                                                                          | 국토교통기술촉진연구사업                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 연구개발과제번호        |        | 20CTAP-C157880-01                |     |
| 내역사업명                     |                                                                                                                                          | 국토교통기술혁신연구                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                 |        |                                  |     |
| 국가과학기술표준분류                |                                                                                                                                          | EI0406                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 70%             | EI0499 |                                  | 30% |
| 연구주제                      |                                                                                                                                          | (대분류) 고부가가치 건설기술 창출                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | (중분류) 고부가가치 인프라 |        | (소분류) 환경 대응형 구조물                 |     |
| 연구개발과제명                   |                                                                                                                                          | 무기계 상변환 콘크리트 수화열 저감재의 장기저장성 및 생산성 향상 기술 개발                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                 |        |                                  |     |
| 전체 연구개발기간                 |                                                                                                                                          | 2020. 04. 13 - 2021. 12. 31 (1년 9개월)                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                 |        |                                  |     |
| 총 연구개발비                   |                                                                                                                                          | 총 493,400 천원<br>(정부지원연구개발비 : 370,000 천원, 기관부담연구개발비 : 123,400 천원)                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                 |        |                                  |     |
| 연구개발단계                    |                                                                                                                                          | 기초[ ] 응용[ ] 개발[ √ ]                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 기술성숙도           |        | 착수시점 기준( 3단계 )<br>종료시점 목표( 6단계 ) |     |
| 연구개발과제 유형                 |                                                                                                                                          | 지정공모 [ ] 자유공모 [ ✓ ]                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                 |        |                                  |     |
| 연구개발과제 특성                 |                                                                                                                                          | 기반연구                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                 |        |                                  |     |
| 연구<br>개발<br>목표<br>및<br>내용 | 최종 목표                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                   | 소재의 조해성으로 인해 유발되는 무기계 상변환 수화열저감재의 저장기간 제약과 품질저하 개선 및 동남아시아 매스콘크리트 적용을 위한 무기계 상변환 콘크리트 수화열 저감재의 장기저장성 및 생산성 향상 기술 개발                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                 |        |                                  |     |
|                           | 전체 내용                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                   | <p>최근 대단위 규모의 초고층 건축물 시공 등이 아시아 지역 국가에서 시행되고 있으며, 고성능 및 고강도 콘크리트 성능이 요구됨에 따라 콘크리트 단위시멘트량이 증가하고 있다. 단위시멘트량이 증가하면서 콘크리트 구조체에서 초기 균열이 발생하고 있으며 이는 수화열에 의한 온도균열로 콘크리트 성능 저하의 주요 원인이다. 수화열에 의해 발생하는 콘크리트 온도균열을 제어하기 위한 기술이 다수 개발되었지만 아시아 극서지방 등의 건설현장에 적합한 시공기술 적용이 어려운 실정이다.</p> <p>따라서 본 연구에서는 국내 유일의 상변환형 수화열 저감재의 조해성으로 인한 품질관리 문제점을 개선하여 제품 안정성능을 확보하고, 매스콘크리트의 수화열 제어성능 평가 및 검증을 통해 해외 건설현장적용을 위한 기반을 구축하고자 한다.</p> |                 |        |                                  |     |
|                           | 1년차                                                                                                                                      | 목표                                                                                                                                                                                | 무기계 상변환소재의 내조해성 향상 기술 및 상변이 안정성 향상 기술                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                 |        |                                  |     |
|                           |                                                                                                                                          | 내용                                                                                                                                                                                | 표면처리를 통한 무기계 상변환소재 고정화 기술 검토<br>- 계면활성화제 교반을 통한 무기계 상변환소재 표면고정화 기술<br>- 미세유체소자기술을 이용한 상변환소재 표면고정화 기술                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                 |        |                                  |     |
|                           |                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                   | 다공성 재료 함침기술을 적용한 무기계 상변환소재의 고품제제화 기술 개발<br>- 무기계 상변환소재의 체적변화에 내력을 갖는 다공성 재료의 선정<br>- 최적 흡열성능을 갖는 재료구성 비율 및 상변환소재 형태의 검토                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                 |        |                                  |     |
|                           |                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                   | 환경조건에 따른 무기계 상변환소재의 화학적 안정성 검토<br>- 온도/습도 조건에 따른 무기계 상변환소재의 화학조성 및 함수량 변화<br>- 반복성 온도변화 조건에 따른 무기계 상변환소재의 화학조성 및 함수량 변화                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                 |        |                                  |     |
|                           | 고흡습성 소재 합성을 통한 분말형 무기계 상변환소재의 형태 안정성 향상 기술 개발<br>- 분말형 무기계 상변환소재의 내흡습성 향상을 위한 고흡습성 소재 검토<br>- 고흡습성 소재 합성 비율에 따른 분말형 상변환소재의 표면상태 및 분말도 평가 |                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                 |        |                                  |     |
|                           | 2년차                                                                                                                                      | 목표                                                                                                                                                                                | 장기저장형 수화열 저감재의 생산성 향상 및 실증화 연구 및 이를 적용한 콘크리트의 기초물성 평가                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                 |        |                                  |     |
| 내용                        |                                                                                                                                          | 장기저장형 수화열 저감재를 포함하는 콘크리트의 시공성 확보 기술<br>- 장기저장형 수화열 저감재의 형태 따른 콘크리트의 공기량 및 유동성 평가<br>- 장기저장형 수화열 저감재의 첨가량에 따른 공기량 및 유동성 평가                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                 |        |                                  |     |
|                           |                                                                                                                                          | 장기저장형 수화열 저감재를 포함하는 콘크리트의 품질 성능 확보 기술<br>- 장기저장형 수화열 저감재의 형태에 따른 콘크리트의 역학적 성능 평가<br>- 장기저장형 수화열 저감재의 첨가량에 따른 콘크리트의 역학적 성능 평가<br>- 수화열 저감재 적용 콘크리트의 단열온도 상승, 미소수화열, 배합조건에 따른 성능 평가 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                 |        |                                  |     |

|                       |     |    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |          |                                  |          |                          |           |                   |            |                     |     |     |    |
|-----------------------|-----|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------------------------------|----------|--------------------------|-----------|-------------------|------------|---------------------|-----|-----|----|
|                       | 2년차 | 내용 | 장기저장형 수화열 저감재를 사용한 매스콘크리트의 수화열 제어 성능 평가<br>- 시멘트 종류에 따른 장기저장형 수화열 저감재의 수화열 제어 성능 검토<br>- 타설온도에 따른 장기저장형 수화열 저감재의 콘크리트 수화열 제어 성능 검토<br><br>장기저장형 수화열 저감재의 생산품질 및 유통 관리 방법 검토<br>- 장기저장형 수화열 저감재의 생산품질 최적화를 위한 생산프로세스 개선<br>- 장기저장형 수화열 저감재의 생산원가 절감을 위한 최적화 공정기술 개발<br>- 보관기간에 따른 수화열 저감재의 품질변동성 검토                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |          |                                  |          |                          |           |                   |            |                     |     |     |    |
| 연구개발성과                |     |    | 정성적 성과<br>- 무기계 수화열 저감재의 내조해성 6개월 이상 달성<br>- 무기계 수화열 저감재를 사용한 콘크리트 압축강도 40MPa 이상 달성<br>- 무기계 수화열 저감재를 사용한 콘크리트 간이단열온도 상승량 70℃ 이하 달성<br>- 장기저장형 수화열 저감재를 사용한 콘크리트 : 슬럼프 145mm 이상 달성, 초결 280min, 종결 360min 이하 달성, 압축강도 40MPa 이상 달성, 간이단열온도 상승량 70℃ 이하 달성, 수화열 해석 유사도 90% 이상 달성<br>- 장기저장형 수화열 저감재 시제품의 장기저장성능 6개월 이상 달성<br>- 장기저장형 수화열 저감재 시제품의 기존 제품 대비 생산성 50% 이상 향상 달성<br>정량적 성과<br>- SCI 논문 1건 게재 및 국내전문화술지 2건 게재, 국내학술발표대회 5건 발표<br>- 국내 특허 출원 2건 및 등록 1건, 국외 특허(PCT) 출원 1건<br>- 보고서 4건, 기술 요약 정보(SMK) 1건, 인력양성 박사 3명, 석사 1명<br>- 시제품 성과 1건, 사업화 1건, 현장적용 3건                                                                                                                                                                              |          |                                  |          |                          |           |                   |            |                     |     |     |    |
| 연구개발성과 활용방안 및 기대효과    |     |    | <p>기존 수화열 기술은 혼화재 첨가, 냉각 설비 및 타설 공법 등과 같은 분야에만 집중되어 있으며, 무기계 상변환 수화열 저감재에 대한 해외 시공 실적은 전무한 상황이다. 따라서 무기계 상변환형 수화열 저감재의 품질 안정성능을 확보하여 해외 수출용 신제품을 출시할 경우, 새로운 시장의 개척 가능성이 매우 높을 것으로 기대한다.</p> <p>기존 수화열 저감 기술 중 혼화재 첨가법은 다량 혼합시 콘크리트의 품질 저하가 나타나며 타설 공법 및 파이프 쿨링 공법 등은 공정기간이 증가함에 따라 품질 저하가 발생하는 단점을 보완하기 위해 무기계 상변환형 수화열 저감재를 혼입하여 기존 수화열 저감 기술에 대한 새로운 방안을 제시하고 매스콘크리트의 성능개선에 기여할 수 있다. 현재까지 관련 기술이 발견되지 않아 국내·외 관련분야 기술 개발 촉진에 기여하며 선도적인 역할이 가능하다.</p> <p>현재 일본 법인 타케모토유지 주식회사와 조사계약을 체결하였으며 아시아 지역 국가에 기술 설명이 완료되어 매스콘크리트 수화열 저감 기술이 필요한 국가를 대상으로 홍보 및 영업 예정이다. 해외 시장 진출과 더불어 기술개발을 통한 연구개발인력의 직접적인 고용창출, 수화열 저감 분야의 최고 전문가 육성을 목표로 하여 직무 및 교양 교육 등 다양한 활동과 능력개발 지원이 가능하다. 또한 건축 토목분야의 새로운 활로 개척을 통해 관련 분야에 대한 해외 건설산업 활성화를 기대할 수 있다.</p> |          |                                  |          |                          |           |                   |            |                     |     |     |    |
| 연구개발성과의 비공개여부 및 사유    |     |    | 해당없음                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |          |                                  |          |                          |           |                   |            |                     |     |     |    |
| 연구개발성과의 등록·기탁 건수      |     |    | 논문                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 특허       | 보고서 원문                           | 연구 시설·장비 | 기술 요약 정보                 | 소프트웨어     | 표준                | 생명자원       |                     | 화합물 | 신품종 |    |
|                       |     |    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |          |                                  |          |                          |           |                   | 생명 정보      | 생물 자원               |     | 정보  | 실물 |
|                       |     |    | 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 3        | 4                                | 0        | 1                        | 0         | 0                 | 0          | 0                   | 0   | 0   | 0  |
| 연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황 |     |    | 구입기관                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 연구시설·장비명 | 규격 (모델명)                         | 수량       | 구입 연월일                   | 구입가격 (천원) | 구입처 (전화)          | 비고 (설치장소)  | ZEUS 등록번호           |     |     |    |
|                       |     |    | 충남대학교                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 만능재료 실험기 | UEH200A                          | 1        | 1982.09.01               | 41,187.87 | Shimadzu          | 건설재료시공학연구실 | NFEC-1999-06-027519 |     |     |    |
|                       |     |    | 충남대학교                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 응력시험기    | 자체개발                             | 1        | 2011.08.22               | 96,926.13 | 우진정밀              | 건설재료시공학연구실 | NFEC-2015-03-200251 |     |     |    |
| 국문핵심어 (5개 이내)         |     |    | 상변 환소재                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |          | 수화열저감재                           |          | 내 조해성                    |           | 장기저장성             |            | 매스콘크리트              |     |     |    |
| 영문핵심어 (5개 이내)         |     |    | PCM material                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |          | Hydration heat reducing material |          | Deliquescence resistance |           | Long-term storage |            | Mass concrete       |     |     |    |

## < 목 차 >

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 1. 연구개발과제의 개요 .....               | 1  |
| 1) 연구개발과제의 최종 목표 .....            | 1  |
| 2) 연구개발과제의 연차별 목표 .....           | 1  |
| 2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용 .....     | 4  |
| 3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도 ..... | 44 |
| 1) 연구수행 결과 .....                  | 44 |
| 2) 목표 달성 수준 .....                 | 48 |
| 4. 목표 미달 시 원인분석 .....             | 48 |
| 1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용 .....     | 48 |
| 2) 자체 보완활동 .....                  | 48 |
| 3) 연구개발 과정의 성실성 .....             | 49 |
| 5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도 ..... | 49 |
| 6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획 .....       | 51 |
| 7. 참고 문헌 .....                    | 52 |

별첨자료(성과 증빙자료 등)

# 1. 연구개발과제의 개요

## 1) 연구개발과제의 최종 목표

---

### ○ 최종 목표

- 소재의 조해성으로 인해 유발되는 무기계 상변환 수화열저감재의 저장기간 제약과 품질저하 개선 및 동남아시아 매스콘크리트 적용을 위한 **무기계 상변환 콘크리트 수화열 저감재의 장기저장성 및 생산성 향상 기술 개발**

### ○ 세부 목표

- 무기계 상변환소재의 내조해성 및 상변이 안정성 향상 기술 개발
    - 최종목표 달성을 위한 소재성능 향상 기술 개발 단계로써 무기계 상변환소재의 내조해성 및 형태 안정성 향상 기술을 개발
    - 표면처리를 통한 무기계 상변환소재 고정화 기술 검토
    - 다공성 재료 함침기술을 적용한 무기계 상변환소재의 고형제제화 기술 개발
    - 저장환경 조건에 따른 무기계 상변환소재의 화학적 안정성 검토
    - 고흡습성 소재 합성 분말형 무기계 상변환소재의 형태 안정성 향상 기술 개발
  - 상변환소재를 활용한 장기저장형 콘크리트 수화열 저감재 생산 기술 개발
    - 내조해성 및 상변이 안정성을 개선한 무기계 상변환소재의 건설재료화 단계로써 무기계 상변환 콘크리트 수화열 저감재의 장기저장성과 생산성 향상
    - 수화열 저감재를 포함하는 콘크리트의 기초성능 평가
    - 수화열 저감재를 포함하는 콘크리트의 기계적 성능 확보 기술
    - 장기저장형 수화열 저감재의 생산품질 및 유통관리 방안 검토
    - 장기저장형 수화열 저감재를 사용한 매스콘크리트의 수화열 제어성능 평가
- 

## 2) 연구개발과제의 연차별 목표

---

### ○ 1차 연도

#### ① 개발 목표

- 주관연구기관 (충남대학교) : 무기계 상변환소재의 내조해성 향상 기술
- 공동연구기관 ((주)트라이포드) : 무기계 상변환소재의 상변이 안정성 향상 기술

#### ② 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관 (충남대학교)
    - 표면처리를 통한 무기계 상변환소재 고정화 기술 검토
      - 계면활성화제 교반을 통한 무기계 상변환소재 표면고정화 기술
      - 미세유체소자기술을 이용한 상변환소재 표면고정화 기술
    - 다공성 재료 함침기술을 적용한 무기계 상변환소재의 고형제제화 기술 개발
      - 무기계 상변환소재의 체적변화에 내력을 갖는 다공성 재료의 선정
-

- 최적 흡열성능을 갖는 재료구성 비율 및 상변환소재 형태의 검토

- 공동연구기관 ((주)트라이포드)

■ 환경조건에 따른 무기계 상변환소재의 화학적 안정성 검토

- 온도/습도 조건에 따른 무기계 상변환소재의 화학조성 및 함수량 변화
- 반복성 온도변화 조건에 따른 무기계 상변환소재의 화학조성 및 함수량 변화

■ 고흡습성 소재 합성을 통한 분말형 무기계 상변환소재의 형태 안정성 향상 기술 개발

- 분말형 무기계 상변환소재의 내흡습성 향상을 위한 고흡습성 소재 검토
- 고흡습성 소재 합성 비율에 따른 분말형 상변환소재의 표면상태 및 분말도 평가

○ 2차 연도

① 개발 목표

- 주관연구기관 (충남대학교) : 장기저장형 수화열 저감재를 적용한 콘크리트의 기초물성 평가
- 공동연구기관 ((주)트라이포드) : 장기저장형 수화열 저감재의 생산성 향상 및 실증화 연구

② 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관 (충남대학교)

■ 장기저장형 수화열 저감재를 포함하는 콘크리트의 시공성 확보 기술

- 장기저장형 수화열 저감재의 형태 따른 콘크리트의 공기량 및 유동성 평가
- 장기저장형 수화열 저감재의 첨가량에 따른 공기량 및 유동성 평가

■ 장기저장형 수화열 저감재를 포함하는 콘크리트의 품질 성능 확보 기술

- 장기저장형 수화열 저감재의 형태에 따른 콘크리트의 역학적 성능 평가
- 장기저장형 수화열 저감재의 첨가량에 따른 콘크리트의 역학적 성능 평가
- 수화열 저감재 적용 콘크리트의 단일온도 상승, 미소수화열, 배합조건에 따른 성능 평가

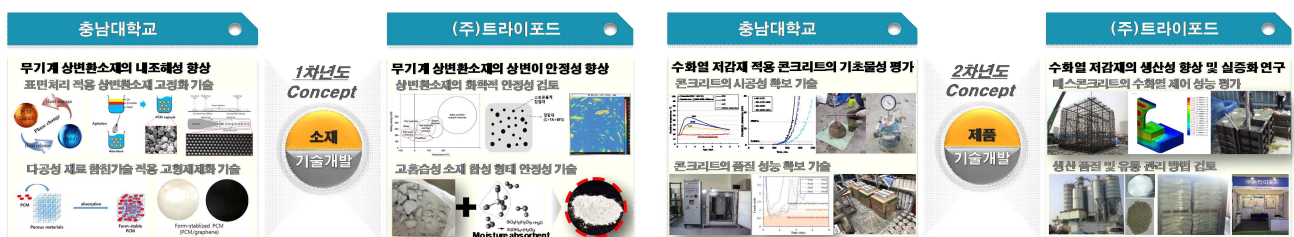
- 공동연구기관 ((주)트라이포드)

■ 장기저장형 수화열 저감재를 사용한 매스콘크리트의 수화열 제어 성능 평가

- 시멘트 종류에 따른 장기저장형 수화열 저감재의 수화열 제어 성능 검토
- 타설온도에 따른 장기저장형 수화열 저감재의 콘크리트 수화열 제어 성능 검토

■ 장기저장형 수화열 저감재의 생산품질 및 유통 관리 방법 검토

- 장기저장형 수화열 저감재의 생산품질 최적화를 위한 생산프로세스 개선
- 장기저장형 수화열 저감재의 생산원가 절감을 위한 최적화 공정기술 개발
- 보관기간에 따른 수화열 저감재의 품질변동성 검토



| 구분            | 연구개발목표                                              | 핵심 연구개발성과<br>(연구개발성과물)       | 현재 국내·외<br>기술수준                     | 연구개발<br>목표치                        | 목표치<br>설정 근거       | 가중치<br>(%) |
|---------------|-----------------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------|------------|
| 1년차<br>(2020) | 무기계<br>상변환소재의<br>내조해성 및<br>상변이 안정성<br>향상 기술 개발      | 내조해성                         | 2개월                                 | ≥ 6개월                              | 수출 선적기간<br>고려      | 40         |
|               |                                                     | 간이단열온도<br>상승량                | 70℃                                 | ≤ 70℃                              | 수화열 제어성능<br>차별성 고려 | 30         |
|               |                                                     | 압축강도                         | 30MPa                               | ≥ 40MPa                            | 콘크리트 성능<br>차별성 고려  | 30         |
| 2년차<br>(2021) | 상변환 소재를<br>활용한 장기저장형<br>콘크리트 수화열<br>저감재 생산 기술<br>개발 | 간이단열온도 상승량<br>(Mock-up test) | 80℃                                 | ≤ 70℃                              | 수화열 제어성능<br>차별성 고려 | 20         |
|               |                                                     | 굳지않은성상                       | 슬럼프 150mm<br>초결 280min<br>종결 360min | ≥ 120±25mm<br>≤ 280min<br>≤ 360min | 콘크리트 성능<br>차별성 고려  | 15         |
|               |                                                     | 압축강도                         | 30MPa                               | ≥ 40MPa                            | 콘크리트 성능<br>차별성 고려  | 20         |
|               |                                                     | 장기저장 성능                      | 3개월                                 | ≥ 6개월                              | 수출 선적기간<br>고려      | 25         |
|               |                                                     | 제품의 생산성                      | 3ton/day                            | ≥ 50% 향상                           | 사업화 성과<br>달성전략 고려* | 20         |

\* 제품의 생산성 향상(≥ 50% 향상)의 경우, 기존 수화열 저감재의 품질안정성과 장기보관성, 내조해성을 향상시켜 제품 생산 공정을 최적화하며, 생산성을 높이는 것이 목표이지만, 수화열 저감재의 내조해성 및 성능을 달성하기 위해서는 공정 추가로 인한 생산성 감소를 야기할 가능성이 있음. 하지만, 수화열 저감재의 내조해성 및 성능이 향상되면 생산 소요시간 감소, 품질안정성 및 장기 보관 성능 향상을 통한 보관·관리 비용 감소 등과 같은 지표들을 복합적으로 고려한 생산성을 50% 향상시키는 것으로 목표를 설정함

## 2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

○ 내조해성 향상 기술을 적용한 무기계 수화열 저감재의 장기저장성 평가

### ■ 내조해성 향상 무기계 수화열 저감재의 장기저장성 1차 평가

- 무기계 수화열 저감재의 내조해성을 향상시키기 위하여 다양한 방법을 검토하였으며, 안정화제를 혼입하여 수화열 저감재의 조해성을 제어하고자 하였음
- 실험 수준은 기존 제품 Hyper-HR(Plain), 안정화조제(SA) 1, 2, 3, 4를 Plain에 각기 다른 혼입률로 치환하는 방식으로 진행하였으며, 실험 계획은 표 1, SA 화학성분비는 표 2에 나타낸바와 같음
- 1차 평가는 공기가 통하지 않는 폴리에틸렌(PE) 소재의 포장용기에 제조한 수화열 저감재를 담아 상태변화를 평가하였으며, 수화열 저감재의 내조해성 상태변화를 구분하기 위하여 표 3과 같이 상태 판단기준을 자체적으로 설정하여 제품의 상태에 대하여 등급 산정 실시
- 1차 평가에서는 내조해성 향상 초기 단계이기 때문에 덩어리 뭉침 현상이 다소 극단적으로 발생하는 것을 확인, 또한 덩어리의 직경이 증가할수록 부서지지 않는 경화 현상이 나타났음
- 따라서 다수의 실험을 통해 뭉침 현상이 발생해도 쉽게 부서지는 덩어리 직경(10mm 이하), 쉽게 부서지지 않지만 분말 상태를 회복하는 덩어리 직경(10 ~ 20 mm), 압력을 가해도 분말 상태로 부서지지 않는 덩어리 직경(20mm 이상)을 파악하고, 이를 기반으로 4단계로 구분하였음
- 장기저장성 1차 평가 결과는 표 4에 나타낸바와 같음
- Plain의 경우, 제조 후 7일 경과부터 조해성으로 인한 뭉침 현상 발생, 28일까지는 뭉친 덩어리가 쉽게 부서졌으나 35일부터 경직도 증가
- HR95-SA1의 경우, 제조 후 14일부터 뭉침 현상이 발생하였으며, 덩어리가 비교적 쉽게 부서지나, 경과일이 증가할수록 덩어리 크기 증가, HR90-SA1의 경우, 제조 후 35일 경과까지 뭉침 현상 미관찰
- HR90-SA2의 경우, 제조 후 28일 경과부터 뭉침 현상이 발생하였으나, 덩어리의 크기가 증가하지 않고 쉽게 부서지는 경향 확인, 그러나 제조 후 35일 경과부터 덩어리 경화 시작

표 1. 무기계 수화열 저감재의 배합비

| 구분       | 배합비(g)   |     |       |       |       |       | 비고                                                                                                    |
|----------|----------|-----|-------|-------|-------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|          | Hyper-HR | SA1 | SA2   | SA3   | SA4   | 합계    |                                                                                                       |
| Plain    | 4,500    | -   | -     | -     | -     | 4,500 | - 환경조건(실내)<br>온도 : 20~25℃<br>습도 : 40~60%<br><br>- 1주 간격으로 육안 관찰<br><br>- 상태변화에 대하여 등급 선정 (Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ) |
| HR95-SA1 | 4,275    | 225 | -     | -     | -     | 4,500 |                                                                                                       |
| HR90-SA1 | 4,050    | 450 | -     | -     | -     | 4,500 |                                                                                                       |
| HR90-SA2 |          | -   | 450   | -     | -     | 4,500 |                                                                                                       |
| HR90-SA3 |          | -   | -     | 450   | -     | 4,500 |                                                                                                       |
| HR90-SA4 |          | -   | -     | -     | 450   | 4,500 |                                                                                                       |
| HR80-SA2 | 3,600    | -   | 900   | -     | -     | 4,500 |                                                                                                       |
| HR80-SA3 |          | -   | -     | 900   | -     | 4,500 |                                                                                                       |
| HR80-SA4 |          | -   | -     | -     | 900   | 4,500 |                                                                                                       |
| HR70-SA2 | 3,600    | -   | 1,350 | -     | -     | 4,500 |                                                                                                       |
| HR70-SA3 |          | -   | -     | 1,350 | -     | 4,500 |                                                                                                       |
| HR70-SA4 |          | -   | -     | -     | 1,350 | 4,500 |                                                                                                       |

표 2. 안정화조제 성분비

| 구분   | 성분비(%) |                  |                                |                                |       |
|------|--------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|
|      | CaO    | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 기타    |
| SA 1 | 100    | -                | -                              | -                              | -     |
| SA 2 | 1~5    | 90~95            | 1~5                            | 1~5                            | 1~5   |
| SA 3 | 1~5    | 60~70            | 10~20                          | 1~5                            | 5~10  |
| SA 4 | 30~40  | 30~40            | 5~10                           | 5~10                           | 10~15 |

표 3. 경과일에 따른 무기계 수화열 저감재의 상태 등급 산정

| 구분  | 형상                                                                                 | 상태 판단기준 내용                                                                                                            | 관리등급 기준            |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| I   |   | - 분말 상태<br>- 조해성으로 인해 뭉침 현상이 발생한 덩어리 미관찰                                                                              | 상태 양호<br>(사용가능)    |
| II  |   | - 조해성으로 인한 뭉침 현상으로 작은 덩어리 발생<br>- 덩어리 직경 10mm 미만<br>- 작은 충격에 덩어리가 쉽게 부서지며 분말상태 회복                                     | 상태 다소 양호<br>(사용가능) |
| III |   | - 조해성으로 인한 뭉침 현상으로 중간 덩어리 발생<br>- 덩어리 직경 10mm 이상 20mm 미만<br>- 작은 충격에 덩어리가 쉽게 부서지지 않음<br>- 압력을 가할 경우 덩어리가 부서지며 분말상태 회복 | 상태 다소 불량<br>(사용주의) |
| IV  |  | - 조해성으로 인한 뭉침 현상으로 큰 덩어리 발생<br>- 덩어리 직경 20mm 이상<br>- 압력을 가해도 덩어리가 쉽게 부서지지 않음<br>- 덩어리가 부서져도 작은 덩어리가 형성되며, 분말상태로 회복 불가 | 상태 불량<br>(사용불가)    |

- HR80-SA2 및 HR70-SA2의 경우, 제조 후 4개월 경과까지 뭉침 현상이 관찰되지 않음
- HR90-SA3의 경우, 제조 후 7일 경과부터 뭉침 현상이 발생하였으며, 시간이 경과할수록 덩어리의 경직도 증가
- HR80-SA3, HR70-SA3의 경우, HR90-SA3와 동일한 경향이 확인되었으며, 덩어리 크기 및 경직도 증가
- HR90-SA4의 경우, 제조 후 7일 경과부터 뭉침 현상이 발생하였으며, 덩어리가 쉽게 부서지나 시간이 경과할수록 크기 증가
- HR80-SA4, HR70-SA4의 경우, HR90-SA4와 동일한 경향이 확인되었으며, 덩어리 크기 및 경직도 약간 증가

#### ■ 내조해성 향상 무기계 수화열 저감재의 장기저장성 2차 평가

- 기존 무기계 수화열 저감재인 Plain 제조 시 초기 뭉침 현상으로 인하여 안정화조제의 영향을 명확히 평가하기가 어려운 부분이 있어, Plain의 초기 뭉침 현상을 배제하기 위하여 제조 후 7일이 경과한 시료를 분쇄기에 분쇄한 후, 안정화조제를 첨가하여 장기저장성을 평가하고자 하였음
- 1차 평가와 달리 2차, 3차 평가에서는 다양한 보관 조건에서 내조해성을 평가하기 위하여 실험실에서 주로 사용하는 플라스틱 용기와 실제 산업에서 사용되는 철캔을 보관 용기로 선정하였으며, 이러한 보관용기에 따라 외기 노출 정도도 다르고 국내 뿐만 아니라 국외 보관 상태도 대응이 가능하기 때문에 더욱 내조해성 평가에 신빙성을 높일 수 있을 것으로 판단되어 실험을 계획하였음
- 2차 평가는 폴리에틸렌(PE) 소재의 보관용기보다 더욱 외기조건을 차단할 수 있는 플라스틱 용기+고성능 테이프로 입구 부분을 밀봉하여 외기 환경 조건을 차단한 후, 장기저장성 2차 평가를 실시하였으며, 결과는 표 5에 나타낸바와 같음
- Plain의 경우, 분쇄 후 7일 경과부터 조해성으로 인한 뭉침 현상 발생, 그 후 작은 덩어리만 유지됨
- HR95-SA1 및 HR90-SA1의 경우, 분쇄 후 49일 경과부터 작은 덩어리가 형성됨
- HR90-SA2은 분쇄 후 42일 경과부터 작은 덩어리가 형성되었음
- HR80-SA2 및 HR70-SA2의 경우, 분쇄 후 4개월까지 뭉침 현상 미관찰
- HR90-SA3의 경우, 분쇄 후 7일 경과부터 뭉침 현상이 발생하였으며, 시간이 경과할수록 덩어리의 크기 증가, HR80-SA3, HR70-SA3의 경우 동일한 경향이나 SA3 함량이 증가할수록 덩어리 크기 감소
- HR90-SA4의 경우, 제조 후 7일 경과부터 약간의 뭉침 현상이 발생하였으나, 덩어리가 크지 않고 시간이 경과하여도 현상 유지, SA4의 함량이 증가할수록 덩어리 크기 감소

표 4. 무기계 수화열 저감제 Series 1의 상태 변화 (계속)

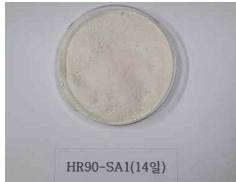
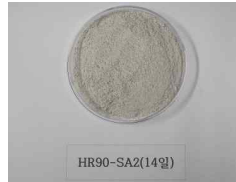
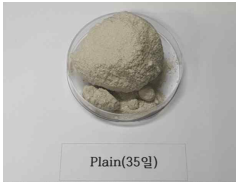
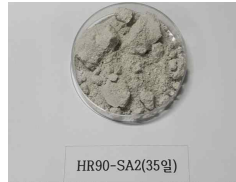
| 구분             | Plain                                                                                             | HR95-SA1                                                                                            | HR90-SA1                                                                                             | HR90-SA2                                                                                               | HR80-SA2                                                                                               | HR70-SA2                                                                                               |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 제조 후<br>7일 경과  | <br>Plain(7일)    | <br>HR95-SA1(7일)   | <br>HR90-SA1(7일)   | <br>HR90-SA2(7일)    | <br>HR80-SA2(7일)    | <br>HR70-SA2(7일)    |
| 등급             | II                                                                                                | I                                                                                                   | I                                                                                                    | I                                                                                                      | I                                                                                                      | I                                                                                                      |
| 제조 후<br>14일 경과 | <br>Plain(14일)   | <br>HR95-SA1(14일)  | <br>HR90-SA1(14일)  | <br>HR90-SA2(14일)   | <br>HR80-SA2(14일)   | <br>HR70-SA2(14일)   |
| 등급             | II                                                                                                | II                                                                                                  | I                                                                                                    | I                                                                                                      | I                                                                                                      | I                                                                                                      |
| 제조 후<br>21일 경과 | <br>Plain(21일)   | <br>HR95-SA1(21일)  | <br>HR90-SA1(21일)  | <br>HR90-SA2(21일)   | <br>HR80-SA2(21일)   | <br>HR70-SA2(21일)   |
| 등급             | II                                                                                                | II                                                                                                  | I                                                                                                    | I                                                                                                      | I                                                                                                      | I                                                                                                      |
| 제조 후<br>28일 경과 | <br>Plain(28일)  | <br>HR95-SA1(28일) | <br>HR90-SA1(28일) | <br>HR90-SA2(28일)  | <br>HR80-SA2(28일)  | <br>HR70-SA2(28일)  |
| 등급             | III                                                                                               | III                                                                                                 | I                                                                                                    | II                                                                                                     | I                                                                                                      | I                                                                                                      |
| 제조 후<br>35일 경과 | <br>Plain(35일) | 측정 중단                                                                                               |                                                                                                      | <br>HR90-SA2(35일) | <br>HR80-SA2(35일) | <br>HR70-SA2(35일) |
| 등급             | IV                                                                                                |                                                                                                     |                                                                                                      | II                                                                                                     | I                                                                                                      | I                                                                                                      |

표 4. 무기계 수화열 저감재 Series 1의 상태 변화 (계속)

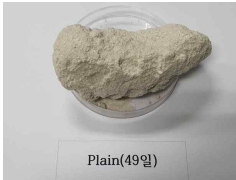
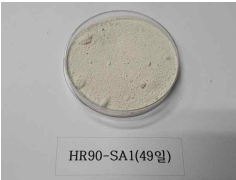
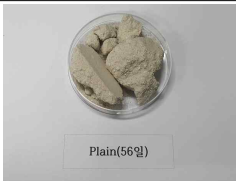
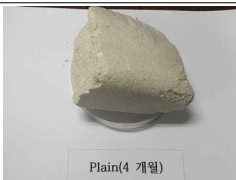
| 구분                 | Plain                                                                                              | HR95-SA1 | HR90-SA1                                                                                               | HR90-SA2 | HR80-SA2                                                                                                | HR70-SA2                                                                                                |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 제 조 후<br>42일<br>경과 | <br>Plain(42일)    | -        | <br>HR90-SA1(42일)    | 측정 중단    | <br>HR80-SA2(42일)    | <br>HR70-SA2(42일)    |
| 등급                 | IV                                                                                                 |          | I                                                                                                      |          | I                                                                                                       | I                                                                                                       |
| 제 조 후<br>49일<br>경과 | <br>Plain(49일)    | -        | <br>HR90-SA1(49일)    | -        | <br>HR80-SA2(49일)    | <br>HR70-SA2(49일)    |
| 등급                 | IV                                                                                                 |          | II                                                                                                     |          | I                                                                                                       | I                                                                                                       |
| 제 조 후<br>56일<br>경과 | <br>Plain(56일)    | -        | <br>HR90-SA1(56일)    | -        | <br>HR80-SA2(56일)    | <br>HR70-SA2(56일)    |
| 등급                 | IV                                                                                                 |          | II                                                                                                     |          | I                                                                                                       | I                                                                                                       |
| 제 조 후<br>3개월<br>경과 | <br>Plain(3 개월)  | -        | <br>HR90-SA1(3 개월)  | -        | <br>HR80-SA2(3 개월)  | <br>HR70-SA2(3 개월)  |
| 등급                 | IV                                                                                                 |          | III                                                                                                    |          | I                                                                                                       | I                                                                                                       |
| 제 조 후<br>4개월<br>경과 | <br>Plain(4 개월) | -        | <br>HR90-SA1(4 개월) | -        | <br>HR80-SA2(4 개월) | <br>HR70-SA2(4 개월) |
| 등급                 | IV                                                                                                 |          | III                                                                                                    |          | I                                                                                                       | I                                                                                                       |

표 4. 무기계 수화열 저감재 Series 1의 상태 변화

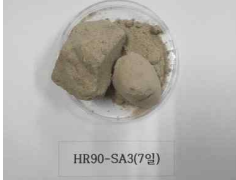
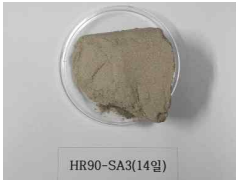
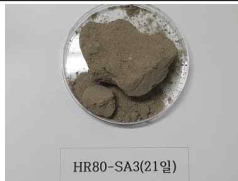
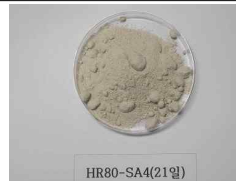
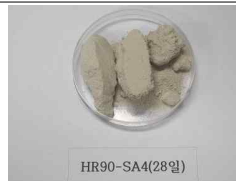
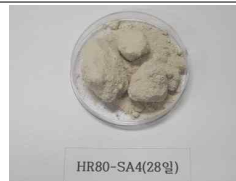
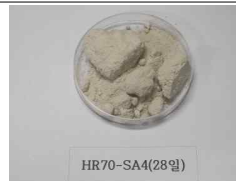
| 구분             | HR90-SA3                                                                                            | HR80-SA3                                                                                            | HR70-SA3                                                                                             | HR90-SA4                                                                                              | HR80-SA4                                                                                              | HR70-SA4                                                                                              |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 제조 후<br>7일 경과  | <br>HR90-SA3(7일)   | <br>HR80-SA3(7일)   | <br>HR70-SA3(7일)   | <br>HR90-SA4(7일)   | <br>HR80-SA4(7일)   | <br>HR70-SA4(7일)   |
| 등급             | III                                                                                                 | III                                                                                                 | III                                                                                                  | II                                                                                                    | II                                                                                                    | II                                                                                                    |
| 제조 후<br>14일 경과 | <br>HR90-SA3(14일)  | <br>HR80-SA3(14일)  | <br>HR70-SA3(14일)  | <br>HR90-SA4(14일)  | <br>HR80-SA4(14일)  | <br>HR70-SA4(14일)  |
| 등급             | IV                                                                                                  | IV                                                                                                  | IV                                                                                                   | III                                                                                                   | III                                                                                                   | III                                                                                                   |
| 제조 후<br>21일 경과 | <br>HR90-SA3(21일)  | <br>HR80-SA3(21일)  | <br>HR70-SA3(21일)  | <br>HR90-SA4(21일)  | <br>HR80-SA4(21일)  | <br>HR70-SA4(21일)  |
| 등급             | IV                                                                                                  | IV                                                                                                  | IV                                                                                                   | III                                                                                                   | III                                                                                                   | III                                                                                                   |
| 제조 후<br>28일 경과 | <br>HR90-SA3(28일) | <br>HR80-SA3(28일) | <br>HR70-SA3(28일) | <br>HR90-SA4(28일) | <br>HR80-SA4(28일) | <br>HR70-SA4(28일) |
| 등급             | IV                                                                                                  | IV                                                                                                  | IV                                                                                                   | IV                                                                                                    | IV                                                                                                    | IV                                                                                                    |
| 제조 후<br>35일 경과 | 측정 중단                                                                                               | 측정 중단                                                                                               | 측정 중단                                                                                                | 측정 중단                                                                                                 | 측정 중단                                                                                                 | 측정 중단                                                                                                 |
| 등급             |                                                                                                     |                                                                                                     |                                                                                                      |                                                                                                       |                                                                                                       |                                                                                                       |

표 5. 무기계 수화열 저감재 Series 2의 상태 변화

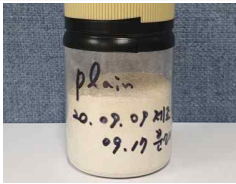
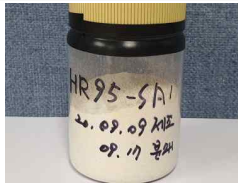
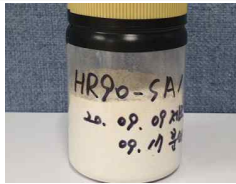
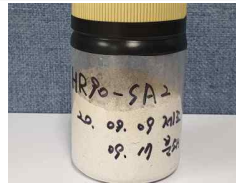
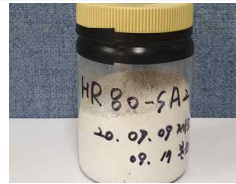
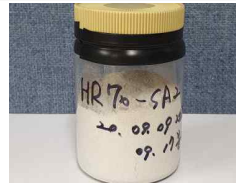
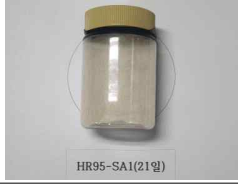
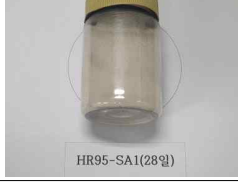
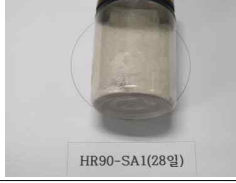
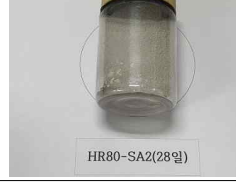
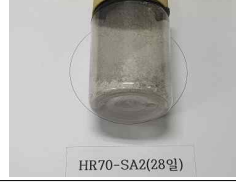
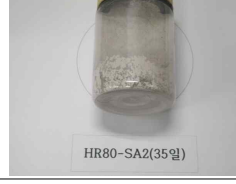
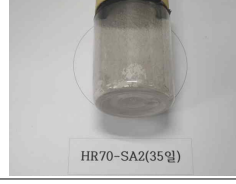
| 구분                              | Plain                                                                               | HR95-SA1                                                                            | HR90-SA1                                                                             | HR90-SA2                                                                              | HR80-SA2                                                                              | HR70-SA2                                                                              |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 제조 후<br>7일 경과<br>및 분쇄           |    |    |    |    |    |    |
| 등급                              | I                                                                                   | I                                                                                   | I                                                                                    | I                                                                                     | I                                                                                     | I                                                                                     |
| 7일<br>경과시료<br>분쇄 후<br>7일<br>경과  |    |    |    |    |    |    |
| 등급                              | II                                                                                  | I                                                                                   | I                                                                                    | I                                                                                     | I                                                                                     | I                                                                                     |
| 7일<br>경과시료<br>분쇄 후<br>14일<br>경과 |    |    |    |    |    |    |
| 등급                              | II                                                                                  | I                                                                                   | I                                                                                    | I                                                                                     | I                                                                                     | I                                                                                     |
| 7일<br>경과시료<br>분쇄 후<br>21일<br>경과 |  |  |  |  |  |  |
| 등급                              | II                                                                                  | I                                                                                   | I                                                                                    | I                                                                                     | I                                                                                     | I                                                                                     |
| 7일<br>경과시료<br>분쇄 후<br>28일<br>경과 |  | 측정 중단                                                                               |                                                                                      |  |  |  |
| 등급                              | II                                                                                  |                                                                                     | I                                                                                    | I                                                                                     | I                                                                                     | I                                                                                     |

표 5. 무기계 수화열 저감제 Series 2의 상태 변화 (계속)

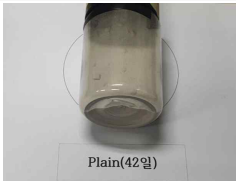
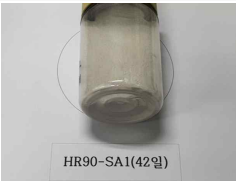
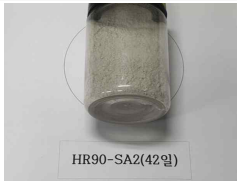
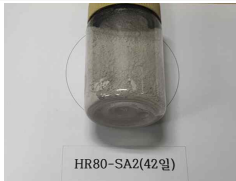
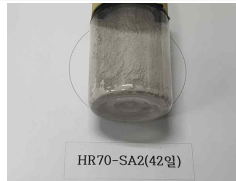
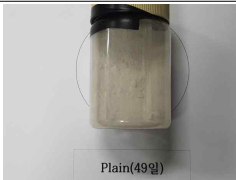
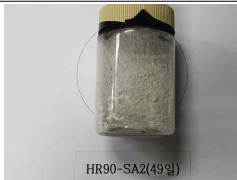
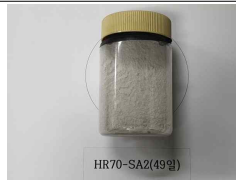
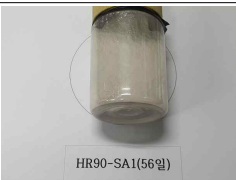
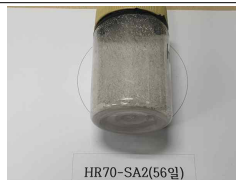
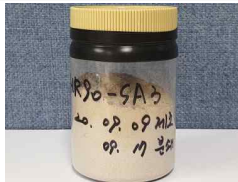
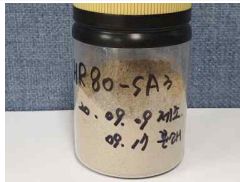
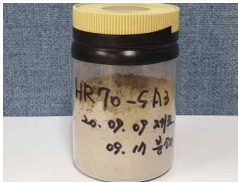
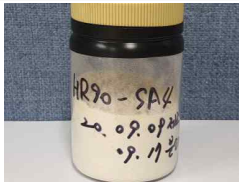
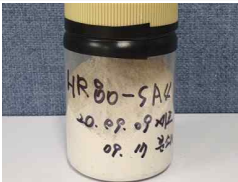
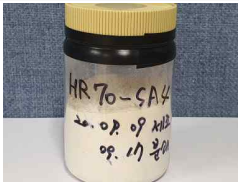
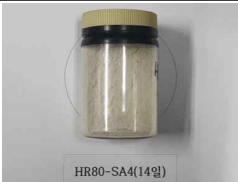
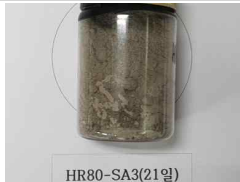
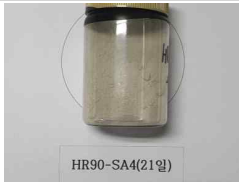
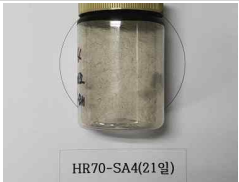
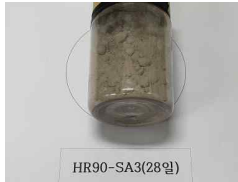
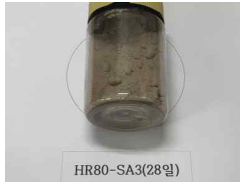
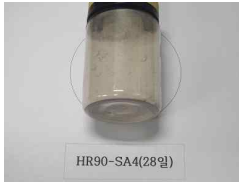
| 구분                              | Plain                                                                               | HR95-SA1 | HR90-SA1                                                                             | HR90-SA2                                                                            | HR80-SA2                                                                              | HR70-SA2                                                                              |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 7일<br>경과시료<br>분쇄 후<br>35일<br>경과 |    | -        |    |  |    |    |
| 등급                              | II                                                                                  |          | I                                                                                    | I                                                                                   | I                                                                                     | I                                                                                     |
| 7일<br>경과시료<br>분쇄 후<br>42일<br>경과 |    | -        |    |  |    |    |
| 등급                              | II                                                                                  |          | I                                                                                    | II                                                                                  | I                                                                                     | I                                                                                     |
| 7일<br>경과시료<br>분쇄 후<br>49일<br>경과 |    | -        |    | 측정 중단                                                                               |    |    |
| 등급                              | II                                                                                  |          | II                                                                                   |                                                                                     | I                                                                                     | I                                                                                     |
| 7일<br>경과시료<br>분쇄 후<br>3개월<br>경과 |   | -        |   | -                                                                                   |   |   |
| 등급                              | III                                                                                 |          | II                                                                                   |                                                                                     | I                                                                                     | I                                                                                     |
| 7일<br>경과시료<br>분쇄 후<br>4개월<br>경과 |  | -        |  | -                                                                                   |  |  |
| 등급                              | III                                                                                 |          | II                                                                                   |                                                                                     | I                                                                                     | I                                                                                     |

표 5. 무기계 수화열 저감재 Series 2의 상태 변화 (계속)

| 구분                              | HR90-SA3                                                                           | HR80-SA3                                                                           | HR70-SA3                                                                            | HR90-SA4                                                                             | HR80-SA4                                                                             | HR70-SA4                                                                             |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 제조 후<br>7일 경과<br>및 분쇄           |   |   |   |   |   |   |
| 등급                              | I                                                                                  | I                                                                                  | I                                                                                   | I                                                                                    | I                                                                                    | I                                                                                    |
| 7일<br>경과시료<br>분쇄 후<br>7일<br>경과  |   |   |   |   |   |   |
| 등급                              | II                                                                                 | II                                                                                 | II                                                                                  | II                                                                                   | I                                                                                    | I                                                                                    |
| 7일<br>경과시료<br>분쇄 후<br>14일<br>경과 |   |   |   |   |   |   |
| 등급                              | II                                                                                 | II                                                                                 | II                                                                                  | II                                                                                   | I                                                                                    | I                                                                                    |
| 7일<br>경과시료<br>분쇄 후<br>21일<br>경과 |  |  |  |  |  |  |
| 등급                              | III                                                                                | II                                                                                 | II                                                                                  | II                                                                                   | II                                                                                   | II                                                                                   |
| 7일<br>경과시료<br>분쇄 후<br>28일<br>경과 | 측정 중단                                                                              | 측정 중단                                                                              | 측정 중단                                                                               | 측정 중단                                                                                | 측정 중단                                                                                | 측정 중단                                                                                |
| 등급                              |                                                                                    |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                      |                                                                                      |

## ■ 내조해성 향상 무기계 수화열 저감재의 장기저장성 3차 평가

- 무기계 수화열 저감재의 장기저장성 평가 Series 1, 2의 결과를 기반으로, Series 3을 계획하였음
- 내조해성을 향상시킨 무기계 수화열 저감재를 대용량 샘플 제조 후 그림 1과 같이, 철칸에 2kg씩 보관하여 1달 간격으로 장기저장성을 평가하고자 하였음
- 시험체는 비교군으로써 Plain(Hyper-HR)을 설정하고, Series 1, 2에서 우수한 장기저장성을 나타내었던 HR90-SA1, HR80-SA2, HR70-SA2에 대하여 평가하고자 하였음
- Series 1에서 사용하였던 상태 등급 산정 기준(표 3)은 초기 내조해성 향상 제품을 대상으로 실시한 것이기 때문에, Series 3에 그대로 적용하기에는 다소 적합하지 않음
- 따라서 다수의 사전 실험을 통하여 표 6의 구분 I, II, III, IV을 분류하고, 내조해성 향상 무기계 수화열 저감재에 대한 새로운 상태 등급 산정 기준을 설정하였음



그림 1. 무기계 수화열 저감재의 대용량 샘플 저장 과정

표 6. 경과일에 따른 무기계 수화열 저감재의 상태 등급 산정을 위한 기준

| 구분  | 형상                                                                                  | 상태 판단기준 내용                                                                                                                                                                                                    | 관리등급 기준            |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| I   |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 분말 상태</li> <li>- 체눈 크기 1.18mm 체가름(No.16) 99 wt.% 통과</li> <li>- 조해성으로 인해 뭉침 현상이 발생한 덩어리 미관찰</li> </ul>                                                                | 상태 양호<br>(사용가능)    |
| II  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 조해성으로 인한 뭉침 현상으로 작은 덩어리 발생</li> <li>- 체눈 크기 2.36mm 체가름(No.8) 99 wt.% 통과</li> <li>- 덩어리 직경 2.36mm 미만</li> <li>- 작은 충격에 덩어리가 쉽게 부서지며 분말상태 회복</li> </ul>                | 상태 다소 양호<br>(사용가능) |
| III |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 조해성으로 인한 뭉침 현상으로 중간 덩어리 발생</li> <li>- 체눈 크기 4.75mm 체가름(No.4) 99 wt.% 통과</li> <li>- 작은 충격에 덩어리가 쉽게 부서지지 않음</li> <li>- 압력을 가할 경우 덩어리가 부서지며 분말상태 회복</li> </ul>          | 상태 다소 불량<br>(사용주의) |
| IV  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 조해성으로 인한 뭉침 현상으로 큰 덩어리 발생</li> <li>- 체눈 크기 4.75mm 체가름(No.4) 99 wt.% 미통과</li> <li>- 압력을 가해도 덩어리가 쉽게 부서지지 않음</li> <li>- 덩어리가 부서져도 작은 덩어리가 형성되며, 분말상태로 회복 불가</li> </ul> | 상태 불량<br>(사용불가)    |

- 새로운 상태 등급 산정을 위하여 제품의 보관 기간에 따라 제품을 표준망체를 사용하여 체가름을 실시하였음
- 표준망체를 사용한 체가름 과정은 뭉침 현상이 발생한 수화열 저감재에 인위적인 압력 없이 충격을 가할 수 있음
- 이러한 일련의 과정은 콘크리트 배합과정에서 골재들과 충돌하면서 부식질 가능성이 있는 수화열 저감재 덩어리와 유사한 환경을 구사할 수 있을 것으로 예상

표 7. 무기계 수화열 저감재 Series 3의 상태 변화 (계속)

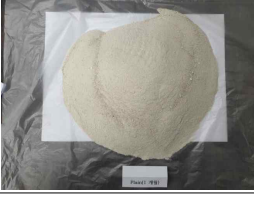
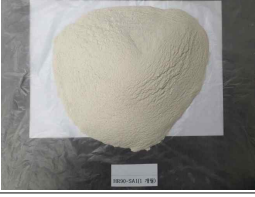
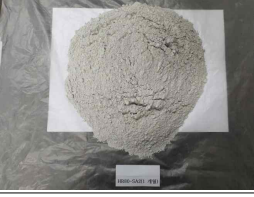
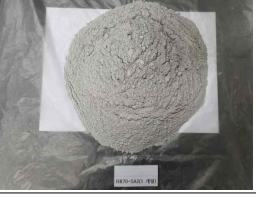
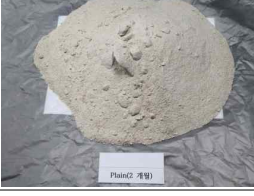
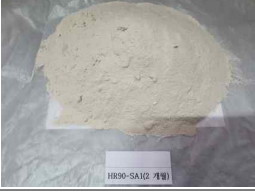
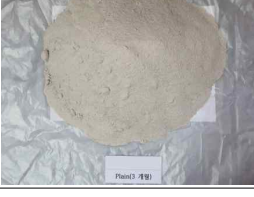
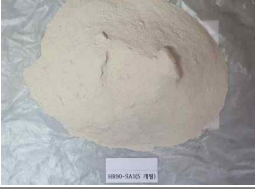
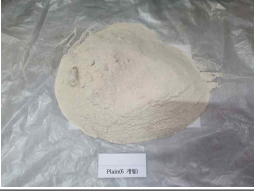
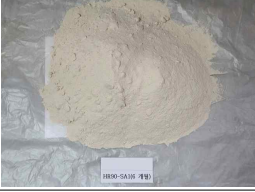
| 구분                | Plain                                                                               | HR90-SA1                                                                            | HR80-SA2                                                                             | HR70-SA2                                                                              |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 제조 후<br>1개월<br>경과 |    |    |    |    |
|                   |    |    |    |    |
| 등급                | I                                                                                   | I                                                                                   | I                                                                                    | I                                                                                     |
| 제조 후<br>2개월<br>경과 |   |   |   |   |
|                   |  |  |  |  |
| 등급                | II                                                                                  | I                                                                                   | I                                                                                    | I                                                                                     |
| 제조 후<br>3개월<br>경과 |  |  |  |  |
|                   |  |  |  |  |
| 등급                | II                                                                                  | II                                                                                  | I                                                                                    | I                                                                                     |
| 제조 후<br>4개월<br>경과 |  |  |  |  |
|                   |  |  |  |  |
| 등급                | II                                                                                  | II                                                                                  | I                                                                                    | I                                                                                     |

표 7. 무기계 수화열 저감재 Series 3의 상태 변화

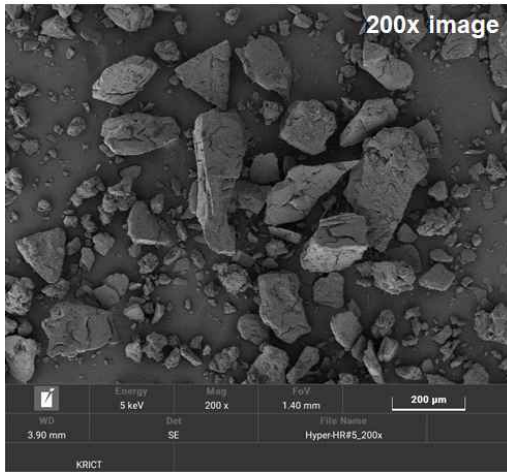
| 구분                | Plain                                                                              | HR90-SA1                                                                           | HR80-SA2                                                                            | HR70-SA2                                                                             |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 제조 후<br>5개월<br>경과 |   |   |   |   |
|                   |   |   |   |   |
| 등급                | III                                                                                | II                                                                                 | I                                                                                   | I                                                                                    |
| 제조 후<br>6개월<br>경과 |   |   |   |   |
|                   |  |  |  |  |
| 등급                | III                                                                                | II                                                                                 | I                                                                                   | I                                                                                    |

- 따라서 무기계 수화열 저감재에 대한 새로운 상태 등급 산정을 위하여 표준망체를 사용한 체기름을 실시하였으며, 배합과정에서 골재와 충돌하여 뭉친 수화열 저감재 덩어리가 부서지는 것을 감안하여 상태Ⅱ까지는 사용이 가능한 “상태 다소 양호”, 상태Ⅲ은 사용에 주의해야 하지만, 사용은 가능한 “상태 다소 불량”으로 구분하였으며, 상태Ⅳ의 덩어리는 압력을 가해도 분말상태를 회복하지 못하기 때문에 사용이 불가능한 “상태 불량”으로 최종 구분하였음
- 결과적으로, 수화열 저감재의 상태 등급 산정은 기존 Series 1, 2 산정 기준에서 보완을 실시하여 체가름 시험 내용을 추가하였으며, 표 6에 보완된 산정 기준을 나타냄
- 수화열 저감재의 장기저장성 평가 결과는 표 7에 나타낸바와 같으며, 제조 후 6달이 경과하였으나, 제품이 완전 밀봉되어, 외부 환경으로부터 차단되었기 때문에 Series 1, 2와 비교하여 다소 우수한 내조해성을 나타냄.
- Plain(Hyper-HR)은 제조 후 2개월부터 뭉침 현상이 발생하였으며, 제조 후 5개월이 경과한 시점부터는 사용에 주의가 필요한 수준까지 뭉침 현상이 발생하였음.
- HR90-SA1은 제조 후 3개월 경과 시점부터 작은 알갱이가 관찰되었으나, 제조 후 6개월까지 사용에 주의가 필요한 뭉침 현상까지는 진행되지 않음.
- HR80-SA2, HR70-SA2는 제조 후 6개월이 경과할 때까지 뭉침 현상이 관찰되지 않았음.
- 결과적으로, “공기가 통하지 않는 폴리에틸렌(PE) 소재의 포장용기”와 “플라스틱 용기+고성능 테이프로 입구 부분을 밀봉하여 외기 환경 조건을 차단”한 경우는 인적과정을 거치기 때문에 수화열 저감재의 내조해성이 다소 감소하는 것으로 나타났으나, 철캔 밀봉과 같이 완벽 수준의 밀봉이 가능한 경우에는 수화열 저감재의 내조해성이 증가하는 것으로 확인됨.
- 1차년도에 수행한 HR80-SA2 및 HR70-SA2의 수화열 저감 성능 및 압축 성능 평가 결과를 기반으로 실제 제품 포장지를 사용한 수화열 저감재의 내조해성 평가는 HR70-SA2 제품군을 사용하는 것으로 선정하였음.

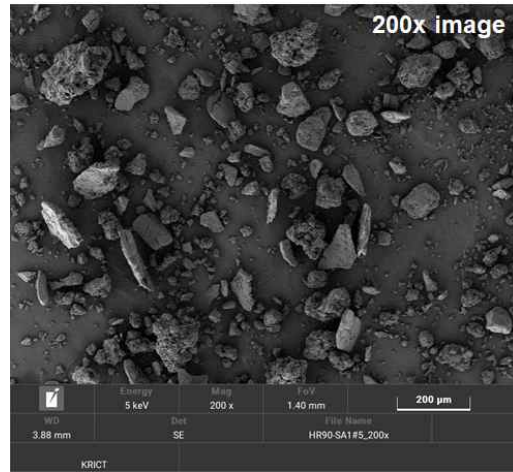
○ 내조해성 향상 기술을 적용한 무기계 수화열 저감재의 성능평가

■ 내조해성 향상 무기계 수화열 저감재의 미세구조 분석

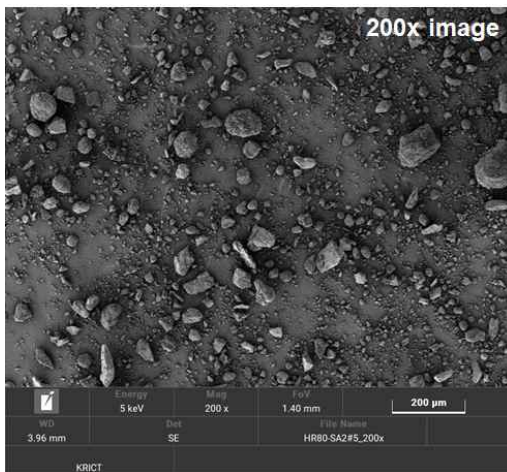
- 무기계 수화열 저감재의 내조해성을 향상시키기 위하여 안정화제를 첨가하는 방식이 채택되었기 때문에, 안정화제가 스트론튬계 재료의 내조해성에 미치는 영향에 대하여 미세구조 분석을 실시하였음.
- 미세구조 분석은 주사전자현미경(SEM), 에너지 분산 X선 분광법(EDS), 시차주사열량계(DSC) 및 푸리에 변환 적외선(FT-IR) 분석을 실시하였음.
- 그림 3에 SEM 분석(저배율) 결과를 나타내었으며, Plain(Hyper-HR)과 달리 안정화제가 첨가된 HR90-SA1, HR80-SA2, HR70-SA2의 입도가 더 작은 것을 확인.
- 그림 4에 SEM 분석(고배율) 결과를 나타내었으며, Plain은 판상형, SA1을 첨가한 경우에는 시트형, SA2를 첨가한 경우에는 구형 구조의 수화열 저감재가 확인됨.
- 특히, HR80-SA2보다 HR70-SA2의 수화열 저감재 표면에 더 많은 SA2가 코팅된 것을 확인.



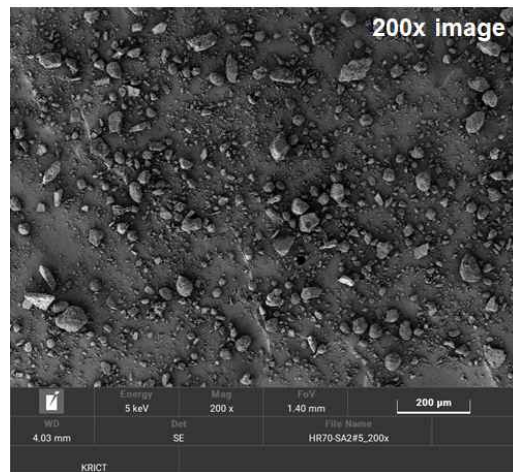
(a) Plain



(b) HR90-SA1

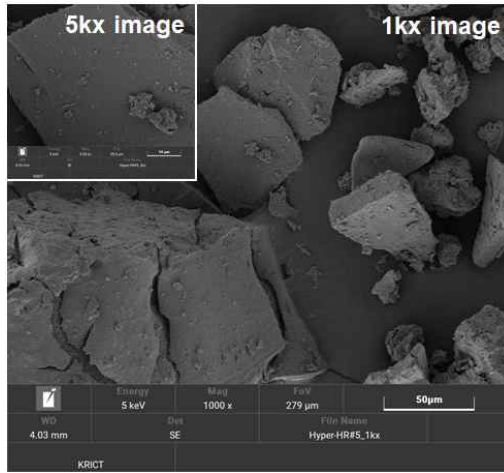


(c) HR80-SA2

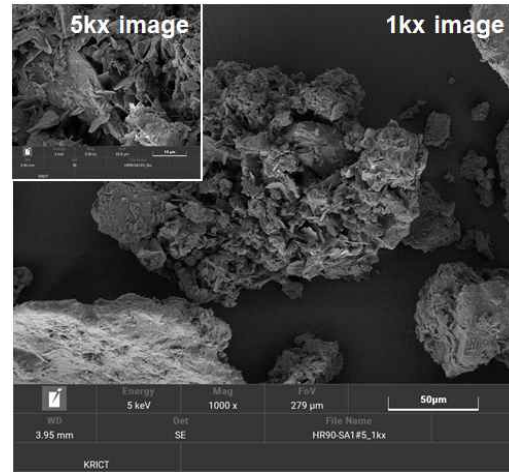


(d) HR70-SA2

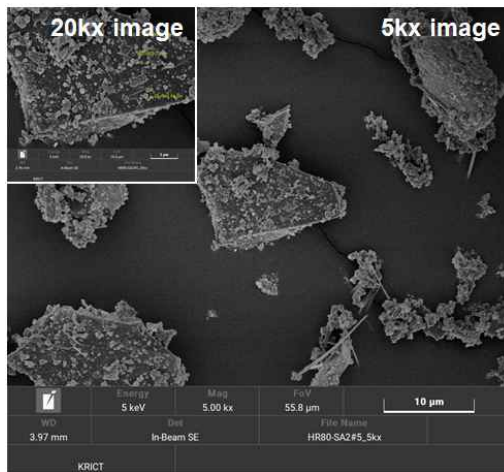
그림 3. 무기계 수화열 저감재의 안정화제 첨가에 따른 SEM 결과 (저배율)



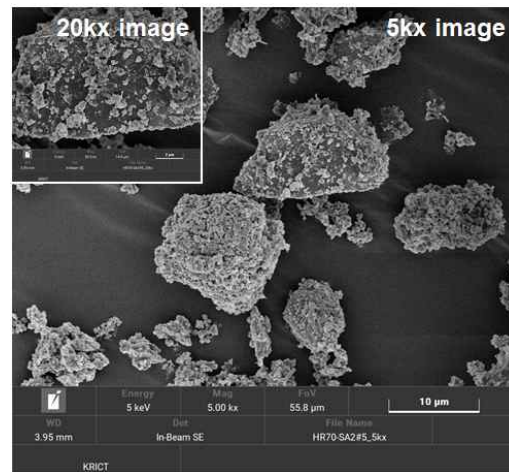
(a) Plain



(b) HR90-SA1



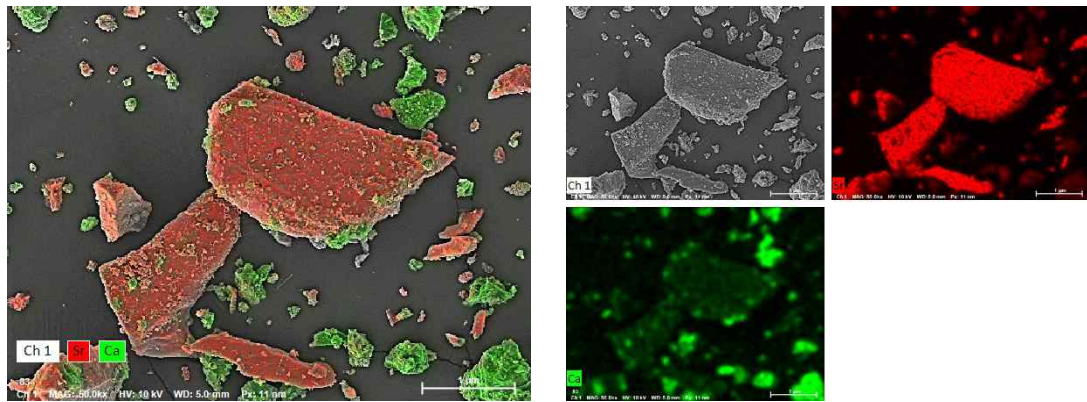
(c) HR80-SA2



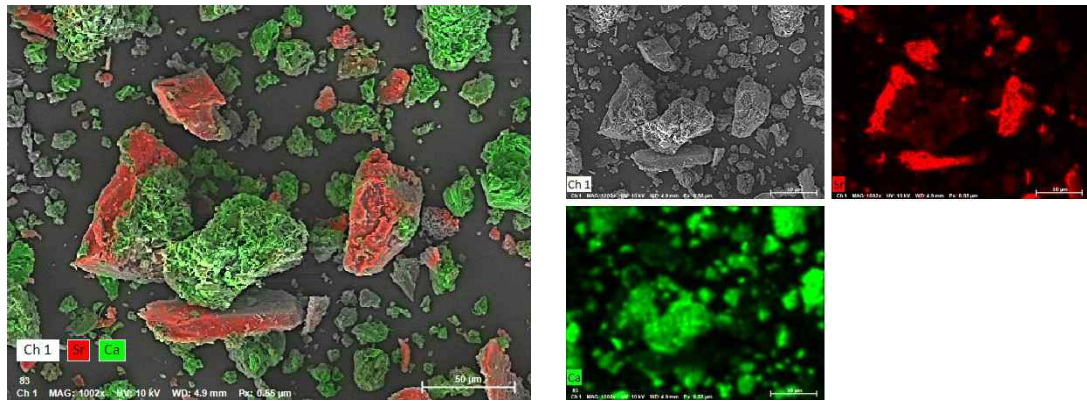
(d) HR70-SA2

그림 4. 무기계 수화열 저감재의 안정화제 첨가에 따른 SEM 결과 (고배율)

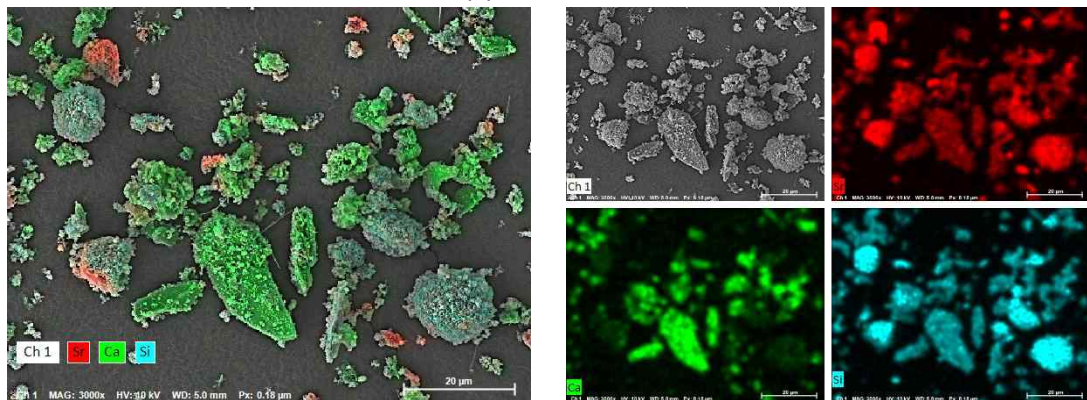
- 따라서, HR80-SA2보다 HR70-SA2의 입자 크기가 더 작은 이유는 스트론튬계 재료 표면에 SA2가 더 많이 코팅됨에 따라 수분 공급 및 뭉침 현상이 더 적게 발생하기 때문으로 판단.
- SEM 결과를 기반으로, EDS 분석을 실시하였으며, 이를 그림 5에 나타냄.
- Plain의 주 원료는 스트론튬계 재료이기 때문에, EDS Mapping 결과에서 주원소가 Sr인 것을 확인할 수 있음.
- HR90-SA1의 경우, 스트론튬계 재료 표면에 시트형 구조로 SA1이 코팅되어 있기 때문에, 고르게 분산되지 못하고 일부 입자에서 Sr이 그대로 노출되는 것을 확인함.
- HR80-SA2 및 HR70-SA2은 SA2가 구형 구조로 고르게 분포됨에 따라 대부분의 입자에서 Sr 성분이 노출되지 않는 것으로 확인됨.
- HR80-SA2보다 HR70-SA2가 SA2의 함량이 더 높기 때문에 입자의 Sr 성분 노출이 더 적게되고, 이로 인하여 가장 작은 입자크기(그림3(d))를 나타낸 것으로 판단됨.
- 결과적으로, 무기계 수화열 저감재의 SEM 및 EDS 결과를 통하여, 안정화제로써 SA2를 사용하는 것이 수화열 저감재의 내조해성을 향상시키는데 효과적이며, SA2 함량을 더 높이는 것이 내조해성을 향상시키는데 더 유리하다는 것을 도출할 수 있었음.



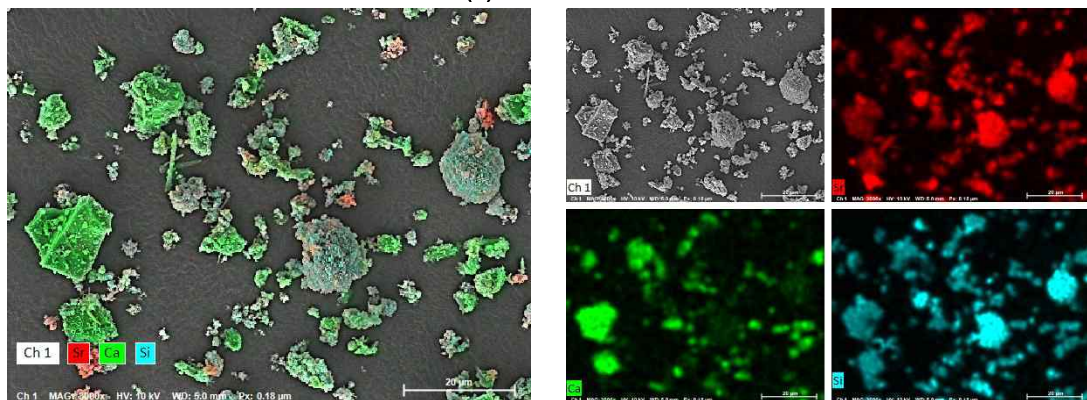
(a) Plain



(b) HR90-SA1

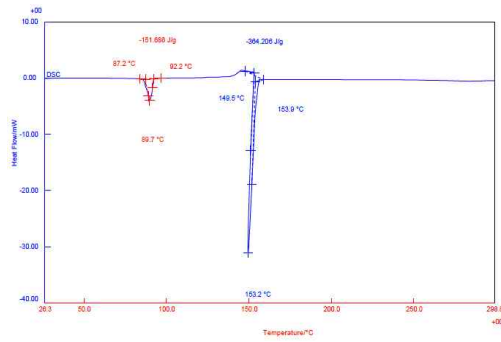


(c) HR80-SA2

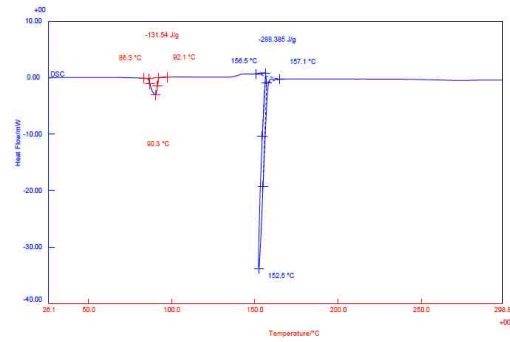


(d) HR70-SA2

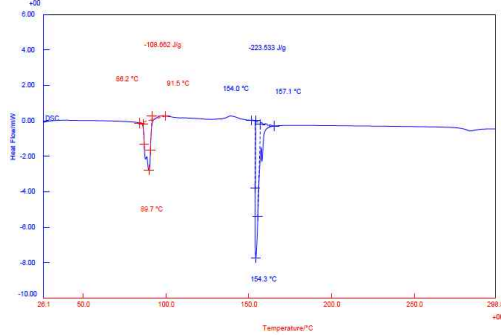
그림 5. 무기계 수화열 저감재의 안정화제 첨가에 따른 EDS 결과



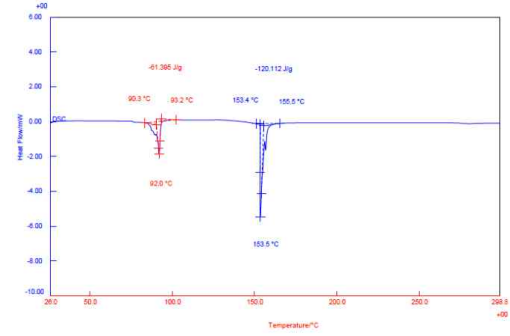
(a) Plain



(b) HR90-SA1

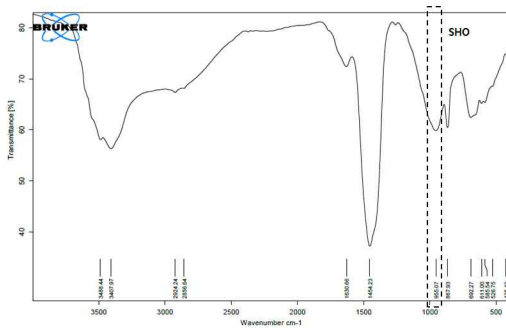


(c) HR80-SA2

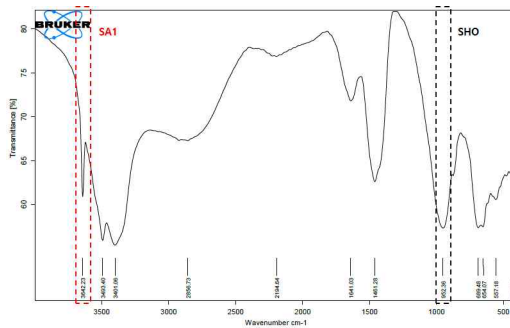


(d) HR70-SA2

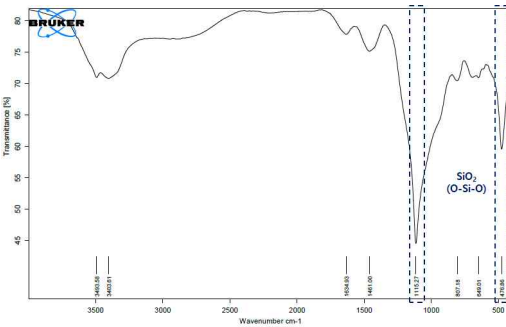
그림 6. 무기계 수화열 저감재의 안정화제 첨가에 따른 DSC 결과



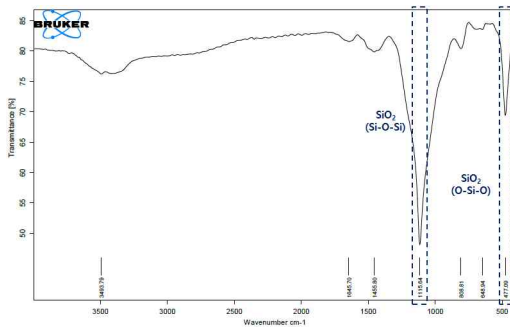
(a) Plain



(b) HR90-SA1



(c) HR80-SA2



(d) HR70-SA2

그림 7. 무기계 수화열 저감재의 안정화제 첨가에 따른 FT-IR 결과

- 그림 6 및 그림 7에 무기계 수화열 저감재의 안정화제 첨가에 따른 DSC 및 FT-IR 결과를 각각 나타내었음.
- DSC 결과에서 87°C 부근의 피크는 잉여수를 의미하며, 150°C 부근의 피크는 결정수를 의미함.
- 안정화제인 SA1 및 SA2의 첨가로 인한 코팅 효과로 결정수에 해당하는 150°C 부근의 피크가 Plain에 비하여 더 높은 온도 방향으로 Shift된 것을 확인함.
- FT-IR 결과에서 H<sub>2</sub>O에 해당하는 피크는 1630, 3437 및 3494 cm<sup>-1</sup>으로 볼 수 있음.
- HR90-SA1의 경우, SA1의 영향으로 인하여 H<sub>2</sub>O의 피크가 감소하는 것이 확인되지 않음.
- 반면, HR80-SA2 및 HR70-SA2은 SA2의 코팅 효과로 인하여 H<sub>2</sub>O의 피크가 Plain에 비하여 확연히 감소한

것을 확인함.

- 또한, HR80-SA2보다 HR70-SA2의 H<sub>2</sub>O에 해당하는 피크가 더 감소한 것으로 확인되었음.
- 무기계 수화열 저감재의 안정화제 첨가에 따른 미세구조 분석을 실시한 결과, 안정화제 SA1은 시트형 구조이기 때문에, 스트론튬계 재료의 내조해성을 향상시키기 위한 코팅으로 적합하지 않은 것으로 보임.
- 반면, 안정화제 SA2는 구형 구조를 가지고 있어, 스트론튬계 재료의 내조해성을 향상시키기 위한 코팅으로 적합한 것으로 확인되었으며, SA2의 양을 적절한 범위 내에서 더 많이 사용하는 것이 내조해성을 향상시키는 데 효과적인 것으로 확인되었음.
- 최종적으로, 내조해성 측면에서는 HR70-SA2를 무기계 수화열 저감재로써 사용하는 것이 가장 효과적인 것으로 판단함.

#### ■ 내조해성 향상 무기계 수화열 저감재의 수화열 저감 성능평가

- 무기계 수화열 저감재의 내조해성을 향상시키기 위하여 안정화제를 혼입하여 내조해성을 제어한 수화열 저감재의 수화열 저감 성능 및 압축성능을 평가하였음.

표 8. 시멘트 페이스트 및 콘크리트 배합

| 구분       | W/B  | S/a  | Unit weight (kg/m <sup>3</sup> ) |       |     |     | HR (wt.%) |
|----------|------|------|----------------------------------|-------|-----|-----|-----------|
|          |      |      | W                                | C     | S   | G   |           |
| 시멘트 페이스트 | 45.1 | -    | 600                              | 1,330 | -   | -   | 5         |
| 콘크리트     | 47   | 43.3 | 185                              | 394   | 717 | 992 |           |

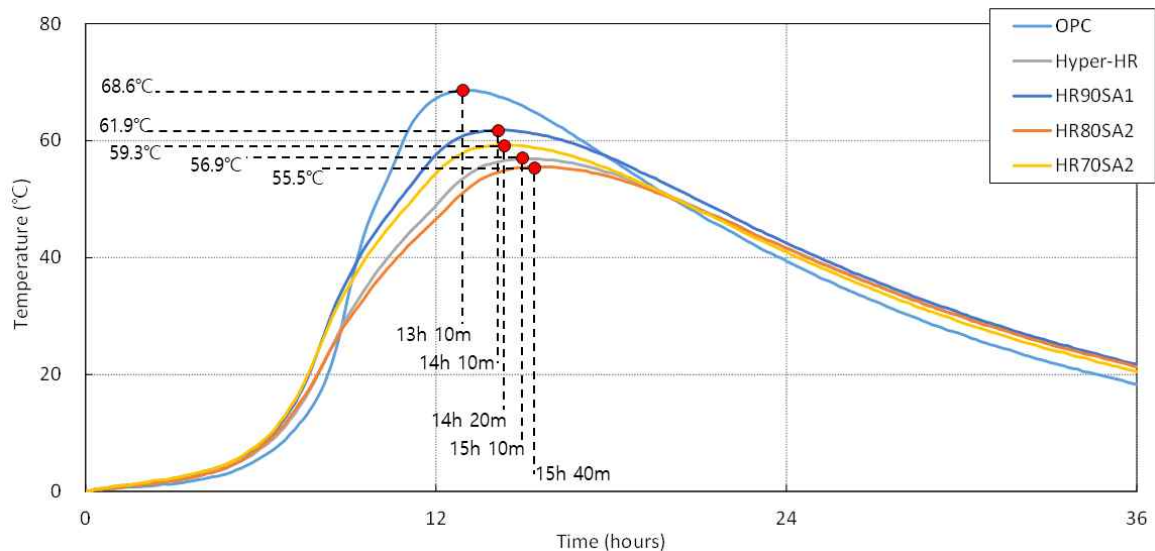


그림 8. 무기계 수화열 저감재의 안정화제 첨가에 따른 최고온도 감소량 및 최고온도 도달 시간

- 내조해성 향상 기술을 적용시킨 무기계 수화열 저감재의 장기저장성을 평가한 결과를 기반으로, HR90-SA1, HR80-SA2, HR70-SA2을 선정하여 성능평가를 진행하고자 하였음.
- 내조해성이 향상된 무기계 수화열 저감재의 성능평가는 간이단열온도 상승량 및 압축강도를 평가하는 것으로 설정하였으며, 간이단열온도 상승량은 시멘트 페이스트로, 압축강도는 콘크리트를 제조하여 평가하였음.
- 시멘트 페이스트 및 콘크리트의 배합은 표 8에 나타낸바와 같음.
- 시멘트 페이스트 및 콘크리트 모두 수화열 저감재의 혼입량은 바인더의 5wt.%로 설정하였음.
- 그림 8과 같이, 무기계 수화열 저감재의 간이단열온도 상승량을 평가한 결과, OPC 대비 최고 온도 감소율은 HR90-SA1 < HR70-SA2 < Hyper-HR < HR80-SA2 순으로 높은 것을 확인함.
- OPC 대비 최고 온도 도달 시간 또한 HR90-SA1 < HR70-SA2 < Hyper-HR < HR80-SA2 순으로 지연되는 것을 확인함.
- 수화열 저감재를 혼입하는 경우, OPC 대비 최소 6.7℃에서 최대 13.1℃ 까지 수화열 최고 온도가 저감되었음.
- 최고 온도 도달 시간은 OPC 대비 최소 1시간에서 최대 2시간 30분까지 지연되는 것으로 확인.

#### ■ 내조해성 향상 무기계 수화열 저감재의 압축 성능평가

- 내조해성 향상 기술을 적용시킨 무기계 수화열 저감재를 콘크리트에 혼입하여 압축강도에 미치는 영향을 평가하고자 하였으며, 그림 3에 나타낸바와 같음.
- 수화열 저감재는 간이단열온도 상승량 시험과 마찬가지로 HR90-SA1, HR80-SA2, HR70-SA2을 선정하여 성능평가를 진행하였음.
- 7일 재령 압축강도의 경우, HR70-SA2를 제외하고 OPC 대비 압축강도가 낮은 것을 확인하였음.
- 28일 및 56일 재령 압축강도의 경우, HR80-SA2 및 HR70-SA2가 OPC보다 높은 압축강도를 나타내었으며, Hyper-HR(Plain) 및 HR90-SA1은 OPC 보다 낮은 압축강도를 나타내는 것을 확인함.
- 이와 같은 결과는 간이단열온도 상승량 평가 결과와 비교하였을 때는 명확한 상관관계를 규명하기에는 어려움이 있음.
- 그러나 미세구조 분석 결과와 비교하였을 때, HR70-SA2를 사용한 콘크리트가 가장 높은 압축강도를 나타낸 원인은 뭉침 현상이 가장 적고 포졸란 반응이 가능한 안정화제의 첨가량이 가장 높기 때문인 것으로 사료됨.
- 내조해성 및 콘크리트의 성능을 고려하였을 때, HR80-SA2 또는 HR70-SA2의 사용이 합리적임.

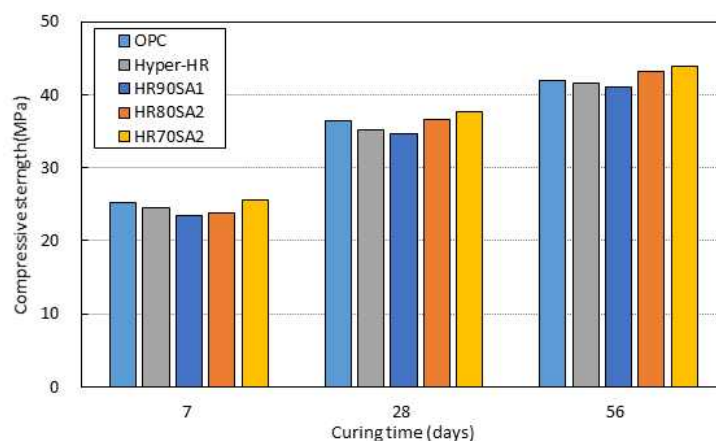


그림 9. 무기계 수화열 저감재의 안정화제 첨가에 따른 콘크리트의 압축강도

○ 서중환경 조건에서의 내조해성 향상 기술을 적용한 무기계 수화열 저감재의 1차 성능평가

■ 일본 서중환경에서의 무기계 수화열 저감재 성능평가

- 본 과제를 진행하는 주관 및 공동연구기관은 본 과제의 연구성과 달성을 위하여 일본의 큐슈대학교와 매스 콘크리트 수화열 제어 기술에 관한 연구협력을 진행하고 있음.
- 큐슈대학교가 위치해 있는 일본 후쿠오카 지역은 하기 계절의 평균 기온이 30℃ 이상의 서중환경이기 때문에 본 연구과제가 목표로 하고 있는 수출환경에 근접한 기후조건으로 판단할 수 있음.
- 본 과제에서 개발 중인 내조해성 향상 무기계 수화열 저감재의 수화열 제어 성능, 역학적 특성에 미치는 영향 및 장기저장성을 평가하는 것을 목표로 하고 있음.
- 표 9에 일본 서중환경에서의 무기계 수화열 저감재의 매스콘크리트 1차 성능평가 배합을 나타냄.
- 실험 수준은 NPC(OPC concrete), NPC\_HR1\_5(HR80-SA2) 및 NPC\_HR2\_5(HR70-SA2)으로 설정하여, 더 효과적인 수화열 저감재를 선정하고자 하였음.
- 그림 10, 11에 일본 서중환경에서의 무기계 수화열 저감재의 매스콘크리트 1차 성능평가 개요를 나타냄.

표 9. 일본 큐슈대학교 1차 성능평가 실험 콘크리트 배합

| 구분                   | W/B | S/a  | Unit weight (kg/m³) |     |     |     |      | HR<br>(wt.%) |
|----------------------|-----|------|---------------------|-----|-----|-----|------|--------------|
|                      |     |      | W                   | C   | S   | G   | AE   |              |
| NPC (OPC concrete)   | 47  | 43.3 | 185                 | 394 | 717 | 992 | 5.12 | 5            |
| NPC_HR1_5 (HR80-SA2) |     |      |                     |     |     |     | 5.52 |              |
| NPC_HR2_5 (HR70-SA2) |     |      |                     |     |     |     |      |              |



그림 10. 일본 큐슈대학교 무기계 수화열 저감재의 매스콘크리트 1차 성능평가

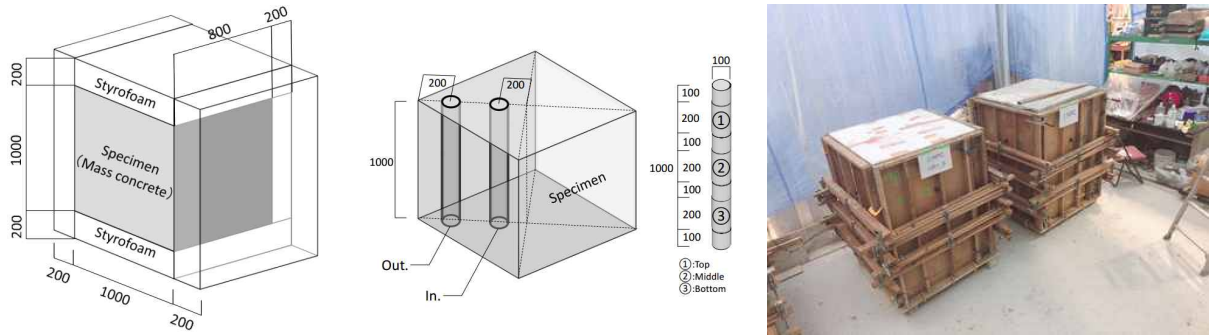


그림 11. 일본 큐슈대학교 무기계 수화열 저감재의 매스콘크리트 1차 성능평가 개요

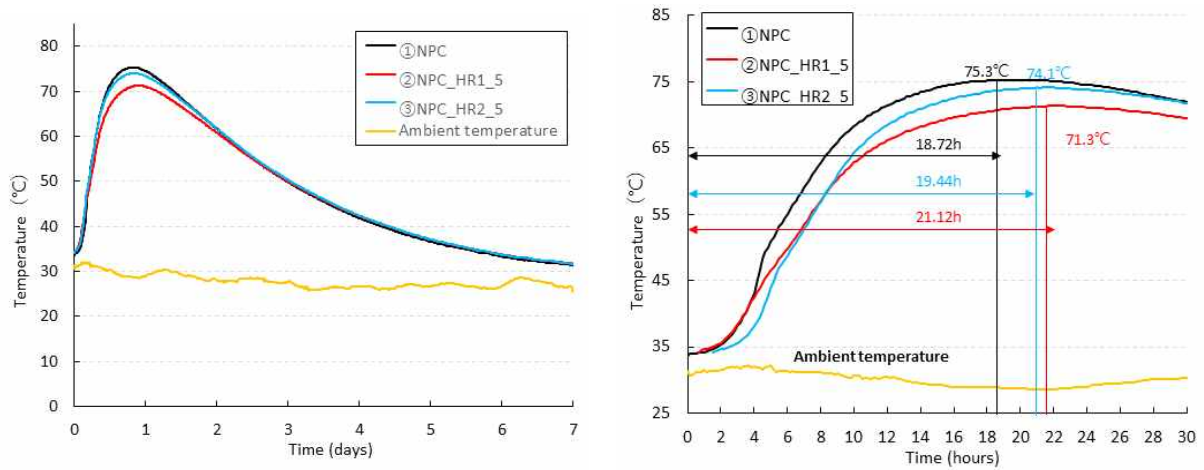
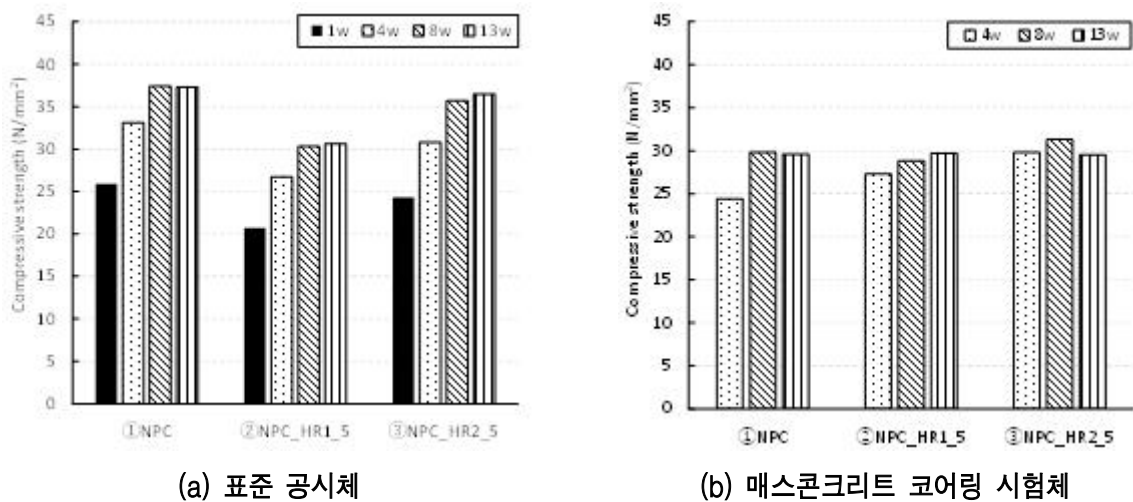


그림 12. 일본 큐슈대학교 무기계 수화열 저감재의 매스콘크리트 간이단열온도 상승량 1차 결과



(a) 표준 공시체 (b) 매스콘크리트 코어링 시험체  
그림 13. 일본 큐슈대학교 무기계 수화열 저감재의 압축강도 평가 1차 결과

- 그림 12 및 13에 일본 서중환경에서의 무기계 수화열 저감재를 혼입한 매스콘크리트의 수화열 제어 성능 및 압축강도를 각각 나타내었음.
- 무기계 수화열 저감재를 혼입한 매스콘크리트의 수화열 제어 성능을 평가한 결과, 국내에서 평가한 실험 결과와 경향이 유사한 것으로 확인되었음.
- 무기계 수화열 저감재를 혼입할 경우, 수화열 최고 온도가 감소되고, 최고온도 도달 시간이 지연되는 것으로 확인.
- 압축강도의 경우, NPC\_HR1\_5 시험체보다 NPC\_HR2\_5의 압축강도가 더 높은 것으로 확인되었으며, 이는 안정화제 SA2에 첨가되어 있는 포졸란 재료 성능 때문인 것으로 사료됨.
- 결과적으로, HR80-SA2는 수화열 제어 성능이 우수하지만, 압축강도 발현률이 다소 낮으며, HR70-SA2은 수화열 제어 성능은 다소 낮지만, 압축강도 발현률이 우수한 것으로 확인되었음.

## ■ 베트남 서중환경에서의 무기계 수화열 저감재 성능평가

- 일본 큐슈대학교와 수출환경에 적합한 내조해성 향상 무기계 수화열 저감재의 성능평가 연구협력을 진행하고 있으나, 동남아시아 지역의 무기계 수화열 저감재 성능 DB 구축이 필요할 것으로 판단하여, 베트남 하노이과학기술대학교 (Hanoi University of Science and Technology, HUST)와 연구협력을 추가적으로 진행하고 있음.
- 또한 베트남 건설부 산하 건설연구소(Vietnam Institute for Building Science and Technology, IBST)의 콘크리트 부서 ICT(Institute of Concrete Technology)에서 무기계 수화열 저감재의 성능평가 및 장기저장성 평가를 진행함.
- 표 10에 베트남 서중환경에서의 무기계 수화열 저감재의 매스콘크리트 1차 성능평가 배합을 나타냄.
- 실험 수준은 Plain(OPC concrete), HR-Type1(HR80-SA2) 및 HR-Type2(HR70-SA2)으로 설정하여, 더 효과적인 수화열 저감재를 선정하고자 하였음.
- 그림 14, 15에 베트남 서중환경에서의 무기계 수화열 저감재의 매스콘크리트 1차 성능평가 개요를 나타냄.

표 10. 베트남 ICT 1차 성능평가 실험 콘크리트 배합

| 구분                   | W/B  | S/a  | Unit weight ( $\text{kg/m}^3$ ) |     |     |      |           | HR (wt.%) |
|----------------------|------|------|---------------------------------|-----|-----|------|-----------|-----------|
|                      |      |      | W                               | C   | S   | G    | Admixture |           |
| Plain (OPC concrete) | 47.3 | 41.9 | 191                             | 404 | 755 | 1046 | 3.2       | 5         |
| HR-Type1 (HR80-SA2)  |      |      |                                 |     |     |      | 3.1       |           |
| HR-Type2 (HR70-SA2)  |      |      |                                 |     |     |      | 3.2       |           |



그림 14. 베트남 ICT 무기계 수화열 저감재의 매스콘크리트 1차 성능평가

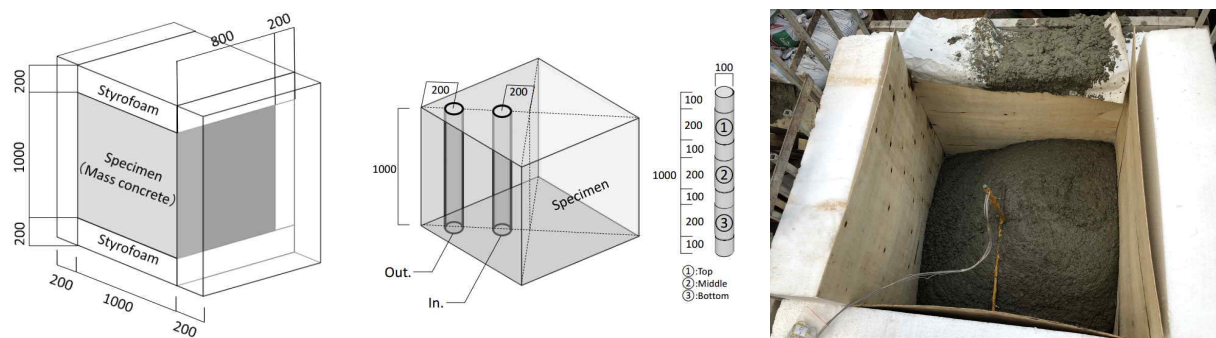
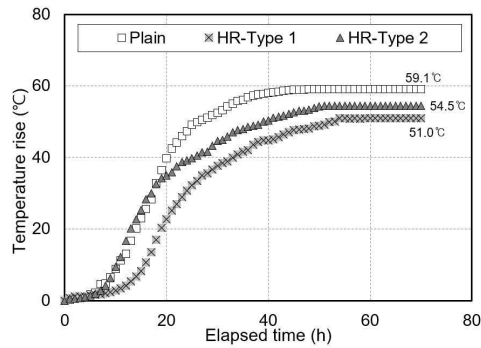
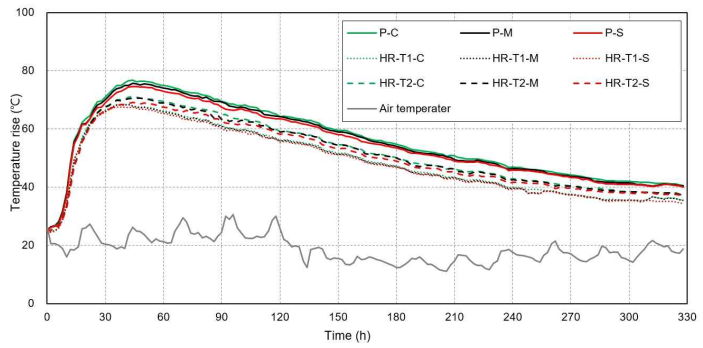


그림 15. 베트남 ICT 무기계 수화열 저감재의 매스콘크리트 1차 성능평가 개요

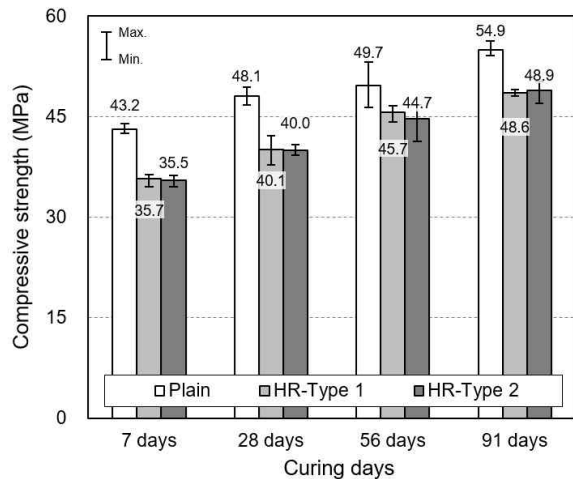


(a) 단열온도 상승

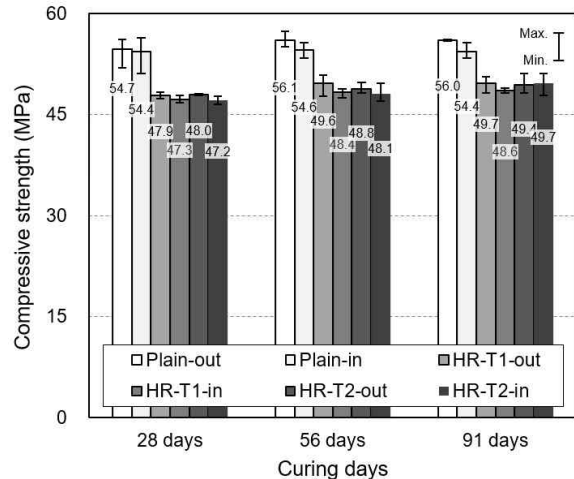


(b) 간이단열온도 상승

그림 16. 베트남 ICT 무기계 수화열 저감재의 매스콘크리트 단열/간이단열온도 상승량 1차 결과



(a) 표준 공시체



(b) 매스콘크리트 코어링 시험체

그림 17. 베트남 ICT 무기계 수화열 저감재의 압축강도 평가 1차 결과

- 그림 16 및 17에 베트남 서중환경에서의 무기계 수화열 저감재를 혼입한 매스콘크리트의 수화열 제어 성능 및 압축강도를 각각 나타내었음.
- 무기계 수화열 저감재를 혼입한 매스콘크리트의 수화열 제어 성능을 평가한 결과, 국내에서 평가한 실험 결과와 최고 온도 도달 경향이 다소 유사하였으나, HR-Type2가 예상외로 우수한 수화열 제어 성능을 나타냄.
- 무기계 수화열 저감재를 혼입할 경우, 수화열 최고 온도가 감소되고, 최고온도 도달 시간이 촉진되는 것으로 확인되어 국내 및 일본의 결과와 다른 경향을 나타내는 원인 분석이 필요할 것으로 사료됨.
- 압축강도의 경우, HR-Type1 및 HR-Type2의 압축강도가 다소 유사한 경향을 나타내었으며, Plain에 비하여 다소 낮은 압축강도를 나타냄.
- 결과적으로, 베트남 서중환경에서는 HR80-SA2 및 HR70-SA2의 수화열 제어 성능 및 압축강도 발현률이 크게 차이가 없는 것으로 판단됨.
- 내조해성이 향상된 무기계 수화열 저감재의 장기저장성, 성능평가 및 서중환경에서의 성능평가를 실시한 결과를 기반으로 시제품으로써의 생산성 및 성능을 평가할 실험군으로써 HR70-SA2를 선정하였음.

○ 내조해성 향상 기술을 적용한 무기계 수화열 저감재의 제품으로써의 장기저장성 평가

■ 내조해성 향상 무기계 수화열 저감재의 제품으로써의 장기저장성 평가

- 무기계 수화열 저감재의 장기저장성 평가 Series 1, 2, 3의 결과 및 성능평가 결과를 기반으로, 제품으로써의 장기저장성 평가를 계획하였음.
- 높은 내조해성, 수화열 저감 성능 및 압축 성능을 나타낸 HR70-SA2를 평가하는 것으로 설정하였음.
- 내조해성을 향상시킨 무기계 수화열 저감재를 그림 18과 같이 실제 제품 생산 과정에 적용하여, 실제 제품과 같은 시제품을 test bed로써 생산하고, 동일한 환경에서 1개월 간격으로 장기저장성을 평가하였음.
- 실제 제품 생산 과정과 동일하게 대용량으로 생산하기 때문에, 일부 이물질 또는 사전 뭉침 현상이 발생한 경우가 있으나, 제품가공 직후의 양이 0.01~0.1 wt.% 내외이기 때문에 품질에는 문제가 없는 것으로 사료.
- test bed용 시제품은 기존제품에 사용되는 실제 포장용기를 그대로 사용하였으며, 포장용기는 공기가 통하지 않는 폴리에틸렌(PE) 소재 및 비닐 소재의 2중 구조로 되어 있는 것을 사용하였음.

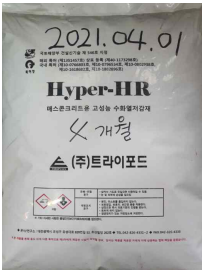
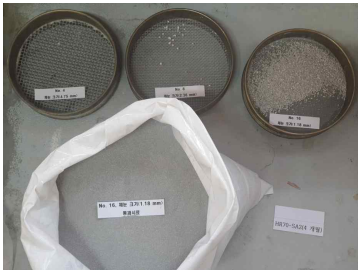
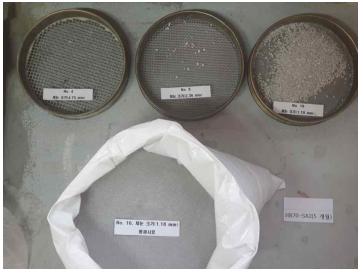
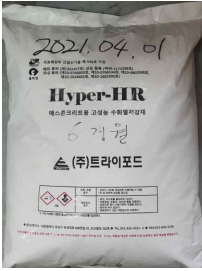


그림 18. 무기계 수화열 저감재의 실제 제품 생산 적용 및 포장 저장 과정

표 11. 무기계 수화열 저감재 시제품의 상태 변화 (계속)

| 구분                | 외관 |  | 특이사항                                                                                                                                                                                             |
|-------------------|----|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 제조 후<br>1개월<br>경과 |    |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 제조 후, 1개월이 경과하였으나, 뭉침 현상 등은 관찰되지 않음</li> <li>- 분말 상태</li> <li>- 체눈 크기 1.18mm 체가름(No.16) 99 wt.% 이상 통과</li> <li>- 조해성으로 인해 뭉침 현상이 발생한 덩어리 미관찰</li> </ul> |
| 등급                | I  |  |                                                                                                                                                                                                  |
| 제조 후<br>2개월<br>경과 |    |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 제조 후, 2개월이 경과하였으나, 뭉침 현상 등은 관찰되지 않음</li> <li>- 분말 상태</li> <li>- 체눈 크기 1.18mm 체가름(No.16) 99 wt.% 이상 통과</li> <li>- 조해성으로 인해 뭉침 현상이 발생한 덩어리 미관찰</li> </ul> |
| 등급                | I  |  |                                                                                                                                                                                                  |

표 11. 무기계 수화열 저감재 시제품의 상태 변화

| 구분                | 외관                                                                                  |                                                                                     | 특이사항                                                                                                                                                                                             |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 제조 후<br>3개월<br>경과 |    |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 제조 후, 3개월이 경과하였으나, 뭉침 현상 등은 관찰되지 않음</li> <li>- 분말 상태</li> <li>- 체눈 크기 1.18mm 체가름(No.16) 99 wt.% 이상 통과</li> <li>- 조해성으로 인해 뭉침 현상이 발생한 덩어리 미관찰</li> </ul> |
| 등급                | I                                                                                   |                                                                                     |                                                                                                                                                                                                  |
| 제조 후<br>4개월<br>경과 |    |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 제조 후, 4개월이 경과하였으나, 뭉침 현상 등은 관찰되지 않음</li> <li>- 분말 상태</li> <li>- 체눈 크기 1.18mm 체가름(No.16) 99 wt.% 이상 통과</li> <li>- 조해성으로 인해 뭉침 현상이 발생한 덩어리 미관찰</li> </ul> |
| 등급                | I                                                                                   |                                                                                     |                                                                                                                                                                                                  |
| 제조 후<br>5개월<br>경과 |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 제조 후, 5개월이 경과하였으나, 뭉침 현상 등은 관찰되지 않음</li> <li>- 분말 상태</li> <li>- 체눈 크기 1.18mm 체가름(No.16) 99 wt.% 이상 통과</li> <li>- 조해성으로 인해 뭉침 현상이 발생한 덩어리 미관찰</li> </ul> |
| 등급                | I                                                                                   |                                                                                     |                                                                                                                                                                                                  |
| 제조 후<br>6개월<br>경과 |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 제조 후, 6개월이 경과하였으나, 뭉침 현상 등은 관찰되지 않음</li> <li>- 분말 상태</li> <li>- 체눈 크기 1.18mm 체가름(No.16) 99 wt.% 이상 통과</li> <li>- 조해성으로 인해 뭉침 현상이 발생한 덩어리 미관찰</li> </ul> |
| 등급                | I                                                                                   |                                                                                     |                                                                                                                                                                                                  |

- 시제품으로써 생산된 수화열 저감재는 실내환경에서 그대로 방치하는 방식으로 장기저장성을 평가하고자 하였음.

- 표 11에 무기계 수화열 저감재 시제품의 상태 변화를 나타냄.

- 제조 후 1개월이 경과한 시점에서 수화열 저감재는 체가름(No.16)을 99.95 wt.% 통과하였음
- 제조 후 2개월이 경과한 시점에서 수화열 저감재는 체가름(No.16)을 99.88 wt.% 통과하였음
- 제조 후 3개월이 경과한 시점에서 수화열 저감재는 체가름(No.16)을 99.85 wt.% 통과하였음
- 제조 후 4개월이 경과한 시점에서 수화열 저감재는 체가름(No.16)을 99.79 wt.% 통과하였음
- 제조 후 5개월이 경과한 시점에서 수화열 저감재는 체가름(No.16)을 99.75 wt.% 통과하였음
- 제조 후 6개월이 경과한 시점에서 수화열 저감재는 체가름(No.16)을 99.72 wt.% 통과하였음

- 시간이 경과함에 따라 극히 일부의 수화열 저감재가 뭉치는 현상이 발생하였으나, 1개월 경과 시점 및 6개월 경과 시점을 비교하였을 때, 그 양은 약 0.3wt.% 미만으로 매우 소량임.
- 따라서, 내조해성을 향상시킨 수화열 저감재가 장기저장성에 매우 효과적인 것으로 확인되었으며, 내조해성 관점에서 수출이 가능한 수화열 저감재의 개발이 성공하였다고 판단할 수 있음.

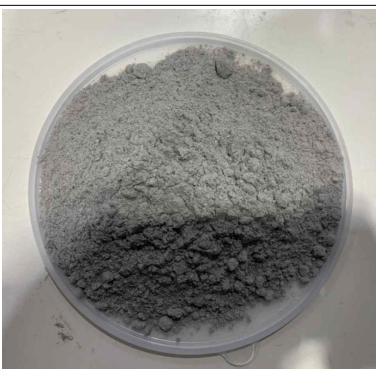
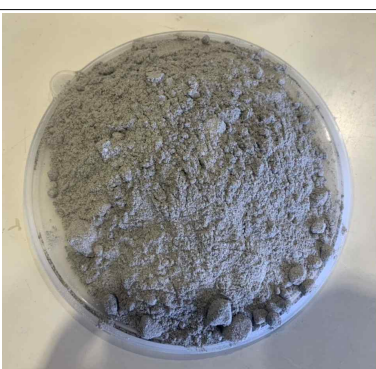
#### ■ 일본 서중환경에서 내조해성 향상 무기계 수화열 저감재의 제품으로써의 장기저장성 평가

- 국내 환경에서의 수화열 저감재 시제품의 장기저장성을 평가하여, 내조해성이 6개월 이상 향상된 것을 확인하였으나, 본 연구에서 목적으로 하고 있는 수화열 저감재는 수출환경에 적합한 내조해성 향상 수화열 저감재의 개발임.
- 따라서, 수출 목표 대상인 일본 서중환경에서의 수화열 저감재의 시제품 상태 변화를 평가하였음.
- 현재 수화열 저감재 시제품은 공식적인 제품군이 아니기 때문에, 국내에서 평가한 것처럼 시제품 포장상태로 수출을 할 수 없는 상황임.
- 따라서, 별도의 공기가 통하지 않는 폴리에틸렌(PE) 소재의 포장용기에 내조해성이 향상된 수화열 저감재를 포장하여 일본 서중환경에 배송하고, 표 12와 같이 동일한 환경에서 장기저장성을 평가하였음.

표 12. 내조해성이 향상된 무기계 수화열 저감재의 상태 변화 (일본) (계속)

| 구분                                       | 외관                                                                                  | 특이사항                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 서중환경<br>배송직후<br>(제조 후<br>1개월<br>경과)      |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 제조 후, 서중환경으로 배송하는 과정까지 약 1달의 시간이 경과하였으나, 뭉침현상 등은 관찰되지 않음</li> <li>- 분말 상태</li> <li>- 체눈 크기 1.18mm 체가름(No.16) 99 wt.% 통과</li> <li>- 조해성으로 인해 뭉침 현상이 발생한 덩어리 미관찰</li> <li>- 서중환경에서의 내조해성을 평가하기 위하여, 포장상태 그대로 실내 환경(실내 온도 28~30℃, 습도 40~60%)에서 방치</li> </ul> |
| 등급                                       | I                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 배송 후<br>1개월<br>경과<br>(제조 후<br>2개월<br>경과) |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 서중 실내 환경 노출 1개월, 제조 후 2개월 경과하였으나, 특이사항은 관찰되지 않음</li> <li>- 분말 상태</li> <li>- 체눈 크기 1.18mm 체가름(No.16) 99 wt.% 통과</li> <li>- 조해성으로 인해 뭉침 현상이 발생한 덩어리 미관찰</li> </ul>                                                                                          |
| 등급                                       | I                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

표 12. 내조해성이 향상된 무기계 수화열 저감재의 상태 변화 (일본)

| 구분                                       | 외관                                                                                  | 특이사항                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 배송 후<br>2개월<br>경과<br>(제조 후<br>3개월<br>경과) |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 서중 실내 환경 노출 2개월, 제조 후 3개월 경과하였으며, 작은 크기로 뭉쳐져 있는 덩어리 소량 관찰</li> <li>- 덩어리 직경 2.36mm 미만</li> <li>- 체눈 크기 1.18mm 체가름(No.16) 95 wt.% 통과</li> <li>- 체눈 크기 2.36mm 체가름(No.8) 99 wt.% 통과</li> <li>- 작은 충격에 덩어리가 쉽게 부서지며 분말상태 회복</li> </ul>                                                                                                              |
| 등급                                       | II                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 배송 후<br>3개월<br>경과<br>(제조 후<br>4개월<br>경과) |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 서중 실내 환경 노출 3개월, 제조 후 4개월 경과하였으며, 작은 크기로 뭉쳐져 있는 덩어리 일부 관찰</li> <li>- 큰 크기(2.36mm 이상)의 덩어리가 소량 관찰되었으나, 체가름 과정에서 쉽게 부서짐</li> <li>- 덩어리 직경 2.36mm 미만</li> <li>- 체눈 크기 1.18mm 체가름(No.16) 80 wt.% 통과</li> <li>- 체눈 크기 2.36mm 체가름(No.8) 99 wt.% 통과</li> <li>- 작은 충격에 덩어리가 쉽게 부서지며 분말상태 회복</li> </ul>                                                  |
| 등급                                       | II                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 배송 후<br>4개월<br>경과<br>(제조 후<br>5개월<br>경과) |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 서중 실내 환경 노출 4개월, 제조 후 5개월 경과하였으며, 작은 크기로 뭉쳐져 있는 덩어리 다소 관찰</li> <li>- 덩어리 직경 2.36mm 미만이 대부분</li> <li>- 체눈 크기 1.18mm 체가름(No.16) 78 wt.% 통과</li> <li>- 체눈 크기 2.36mm 체가름(No.8) 99 wt.% 통과</li> <li>- 작은 충격에 덩어리가 쉽게 부서지며 대부분이 분말상태를 회복하였으나, 일부 작은 크기의 덩어리들이 유지</li> <li>- 작은 충격에 유지되는 덩어리들은 작은 압력에 부서지며 분말상태 회복</li> </ul>                          |
| 등급                                       | II                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 배송 후<br>5개월<br>경과<br>(제조 후<br>6개월<br>경과) |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 서중 실내 환경 노출 5개월, 제조 후 6개월 경과하였으며, 작은 크기로 뭉쳐져 있는 덩어리 다수 관찰</li> <li>- 큰 크기(4.75mm 미만)의 덩어리가 소량 관찰되었으나, 손으로 만질 경우, 쉽게 부서짐</li> <li>- 덩어리 직경 2.36mm 미만이 대부분</li> <li>- 체눈 크기 1.18mm 체가름(No.16) 72 wt.% 통과</li> <li>- 체눈 크기 2.36mm 체가름(No.8) 94 wt.% 통과</li> <li>- 체눈 크기 4.75mm 체가름(No.4) 99 wt.% 통과</li> <li>- 작은 압력에 덩어리가 부서지며 분말상태 회복</li> </ul> |
| 등급                                       | III                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

- 배송 후 2개월 경과 시점부터 작은 크기의 덩어리들이 발생하기 시작하였으나, 작은 충격에 쉽게 부서짐.
- 배송 후 5개월 경과 시점부터 작은 충격에 쉽게 부서지지 않는 덩어리들이 소량 발생하기 시작하였으나, 작은 압력에 쉽게 부서지며 분말상태를 회복하는 것으로 확인되어, 사용상에 문제는 없을 것으로 사료됨.
- 결과적으로 제조 후 6개월이 경과된 시점에서 1개월 미만 경과된 시료보다 다소 뭉치는 현상이 발생함에 따라 상태가 불량해졌으나, 기존 제품과 같이 사용이 불가능한 수준은 아니었음.
- 일본 서중환경의 경우, 국내 환경보다 고온, 다습한 환경이기 때문에 내조해성이 향상된 무기계 수화열 저감재의 경우에도 상태 I 을 유지하기에는 한계가 있었음.
- 그러나, 시제품 상태로써의 수출 제약으로 인하여 공식적인 제품 포장 상태가 아닌 임의로 포장한 상태이기 때문에 이러한 불리한 상황임에도 불구하고 장기저장성이 6개월 이상인 것을 고려하였을 때, 무기계 수화열 저감재의 내조해성 향상은 성공적인 것으로 볼 수 있음.

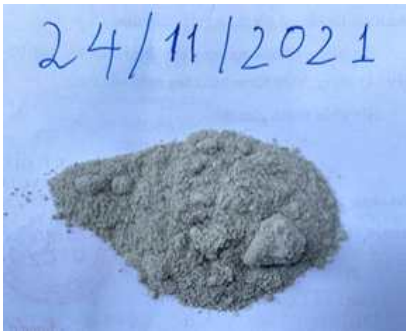
■ 베트남 서중환경에서 내조해성 향상 무기계 수화열 저감재의 제품으로써의 장기저장성 평가

- 일본 서중환경 보다 장기저장성 측면에서 더 불리한 환경을 가지고 있는 동남아시아 서중환경에서도 수화열 저감재의 장기저장성을 평가하고자 하였음.
- 따라서, 수출 목표 대상인 베트남 서중환경에서의 수화열 저감재의 시제품 상태 변화를 평가하였음.
- 현재 수화열 저감재 시제품은 공식적인 제품군이 아니기 때문에, 국내에서 평가한 것처럼 시제품 포장상태로 수출을 할 수 없는 상황임.
- 따라서, 별도의 공기가 통하지 않는 폴리에틸렌(PE) 소재의 포장용기에 내조해성이 향상된 수화열 저감재를 포장하여 베트남 서중환경에 배송하고, 표 13과 같이 동일한 환경에서 장기저장성을 평가하였음.

표 13. 내조해성이 향상된 무기계 수화열 저감재의 상태 변화 (베트남) (계속)

| 구분                               | 외관                                                                                  | 특이사항                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 서중환경<br>배송직후<br>(제조 후<br>1달 경과)  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 제조 후, 서중환경으로 배송하는 과정까지 약 1달의 시간이 경과하였으나, 뭉침현상 등은 관찰되지 않음</li> <li>- 분말 상태</li> <li>- 체눈 크기 1.18mm 체가름(No.16) 99 wt.% 통과</li> <li>- 조해성으로 인해 뭉침 현상이 발생한 덩어리 미관찰</li> <li>- 서중환경에서의 내조해성을 평가하기 위하여, 포장상태 그대로 실내 환경(실내 온도 30~35℃, 습도 50~70%)에서 방치</li> </ul> |
| 등급                               | I                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 배송 후<br>1달 경과<br>(제조 후<br>2달 경과) |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 서중 실내 환경 노출 1개월, 제조 후 2개월 경과하였으나, 특이사항은 관찰되지 않음</li> <li>- 분말 상태</li> <li>- 체눈 크기 1.18mm 체가름(No.16) 99 wt.% 통과</li> <li>- 조해성으로 인해 뭉침 현상이 발생한 덩어리 미관찰</li> </ul>                                                                                          |
| 등급                               | I                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

표 13. 내조해성이 향상된 무기계 수화열 저감재의 상태 변화 (베트남)

| 구분                               | 외관                                                                                  | 특이사항                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 배송 후<br>2달 경과<br>(제조 후<br>3달 경과) |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 서중 실내 환경 노출 2개월, 제조 후 3개월 경과하였으며, 작은 크기로 뭉쳐져 있는 덩어리 소량 관찰</li> <li>- 덩어리 직경 2.36mm 미만</li> <li>- 체눈 크기 1.18mm 체가름(No.16) 90 wt.% 통과</li> <li>- 체눈 크기 2.36mm 체가름(No.8) 99 wt.% 통과</li> <li>- 작은 충격에 덩어리가 쉽게 부서지며 분말상태 회복</li> </ul>                                                                                                                 |
| 등급                               | II                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 배송 후<br>3달 경과<br>(제조 후<br>4달 경과) |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 서중 실내 환경 노출 3개월, 제조 후 4개월 경과하였으며, 작은 크기로 뭉쳐져 있는 덩어리 일부 관찰</li> <li>- 큰 크기(2.36mm 이상)의 덩어리가 소량 관찰되었으나, 체가름 과정에서 쉽게 부서짐</li> <li>- 덩어리 직경 2.36mm 미만</li> <li>- 체눈 크기 1.18mm 체가름(No.16) 75 wt.% 통과</li> <li>- 체눈 크기 2.36mm 체가름(No.8) 99 wt.% 통과</li> <li>- 작은 충격에 덩어리가 쉽게 부서지며 분말상태 회복</li> </ul>                                                     |
| 등급                               | II                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 배송 후<br>4달 경과<br>(제조 후<br>5달 경과) |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 서중 실내 환경 노출 4개월, 제조 후 5개월 경과하였으며, 작은 크기로 뭉쳐져 있는 덩어리 일부 관찰</li> <li>- 큰 크기(4.75mm 미만)의 덩어리가 소량 관찰되었으나, 손으로 만질 경우, 쉽게 부서짐</li> <li>- 덩어리 직경 2.36mm 미만이 대부분</li> <li>- 체눈 크기 1.18mm 체가름(No.16) 70 wt.% 통과</li> <li>- 체눈 크기 2.36mm 체가름(No.8) 90 wt.% 통과</li> <li>- 체눈 크기 4.75mm 체가름(No.4) 99 wt.% 통과</li> <li>- 작은 압력에 덩어리가 부서지며 분말상태 회복</li> </ul>    |
| 등급                               | III                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 배송 후<br>5달 경과<br>(제조 후<br>6달 경과) |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 서중 실내 환경 노출 5개월, 제조 후 6개월 경과하였으며, 작은 크기로 뭉쳐져 있는 덩어리 다수 관찰</li> <li>- 큰 크기(4.75mm 미만)의 덩어리의 양이 다소 증가하였으나, 손으로 만질 경우, 쉽게 부서짐</li> <li>- 덩어리 직경 2.36mm 미만이 대부분</li> <li>- 체눈 크기 1.18mm 체가름(No.16) 65 wt.% 통과</li> <li>- 체눈 크기 2.36mm 체가름(No.8) 85 wt.% 통과</li> <li>- 체눈 크기 4.75mm 체가름(No.4) 99 wt.% 통과</li> <li>- 작은 압력에 덩어리가 부서지며 분말상태 회복</li> </ul> |
| 등급                               | III                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

- 배송 후 2개월 경과 시점부터 작은 크기의 덩어리들이 발생하기 시작하였으나, 작은 충격에 쉽게 부서짐.
- 배송 후 4개월 경과 시점부터 작은 충격에 쉽게 부서지지 않는 덩어리들이 소량 발생하기 시작하였으나, 작은 압력에 쉽게 부서지며 분말상태를 회복하는 것으로 확인되어, 사용상에 문제는 없을 것으로 사료됨.
- 베트남 서중환경의 경우, 일본 서중환경보다 고온, 다습한 환경이기 때문에 내조해성이 향상된 무기계 수화열 저감재의 경우에도 제조 후 6개월이 경과할 때까지 상태 II 을 유지하기에는 한계가 있었음.
- 그러나, 시제품 상태로써의 수출 제약으로 인하여 공식적인 제품 포장 상태가 아닌 임의로 포장한 상태이기 때문에 이러한 불리한 상황임에도 불구하고 장기저장성 평가 6개월까지 III 등급을 유지한 것을 고려하였을 때, 무기계 수화열 저감재의 내조해성 향상은 성공적인 것으로 볼 수 있음.
- 결과적으로 내조해성을 향상시킨 무기계 수화열 저감재가 서중환경에서도 목표한 장기저장성을 충분히 나타내는 것으로 확인되었음.

○ 내조해성 향상 기술을 적용한 무기계 수화열 저감재의 제품으로써의 성능평가

- 내조해성을 향상시킨 무기계 수화열 저감재의 제품으로써의 성능을 평가하기 위하여 수화열 저감 성능 및 압축성능을 평가하였음.
- 실제 제품 생산 공정을 적용하여 생산한 내조해성이 향상된 무기계 수화열 저감재를 이용하여 성능평가를 수행하였음.
- 일반강도와 고강도 콘크리트 영역에서 내조해성이 향상된 무기계 수화열 저감재가 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 평가하고자 표 14와 같이 콘크리트 배합을 설정하였음.
- 그림 19와 같이 성능평가는 슬럼프, 응결시간, 간이단열온도 상승 실험, 압축강도를 선정하였음.

표 14. 내조해성이 향상된 무기계 수화열 저감재 성능평가 실험 콘크리트 배합

| 구분                | W/B | S/a | Unit weight (kg/m³) |     |        |        | HR (wt.%) |
|-------------------|-----|-----|---------------------|-----|--------|--------|-----------|
|                   |     |     | W                   | C   | S      | G      |           |
| NC (OPC concrete) | 60  | 48  | 180                 | 320 | 876.93 | 947.94 | -         |
| NC_PC5 (HR70-SA2) |     |     |                     |     |        |        | 5         |
| HC (OPC concrete) | 33  | 45  | 168                 | 500 | 749.21 | 932.98 | -         |
| HC_PC5 (HR70-SA2) |     |     |                     |     |        |        | 5         |

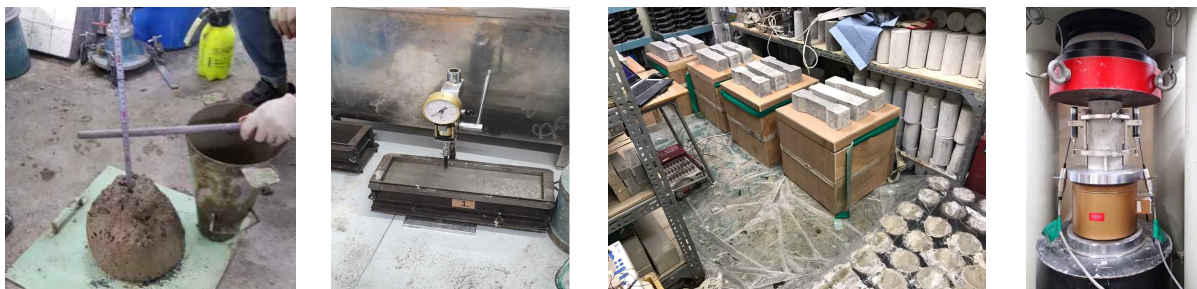
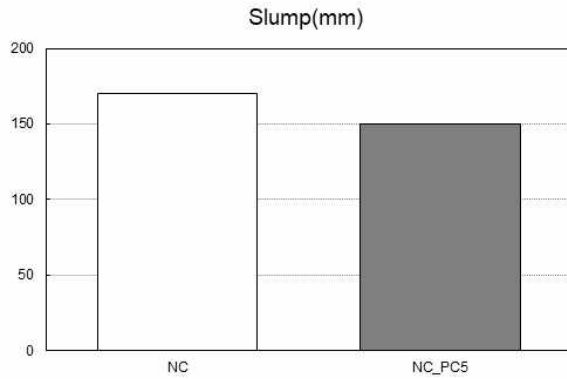
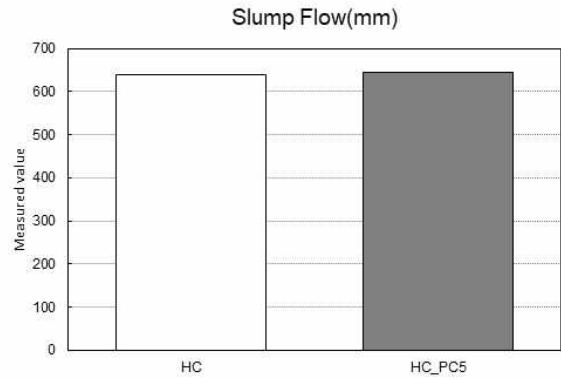


그림 19. 내조해성이 향상된 무기계 수화열 저감재 성능평가 개요

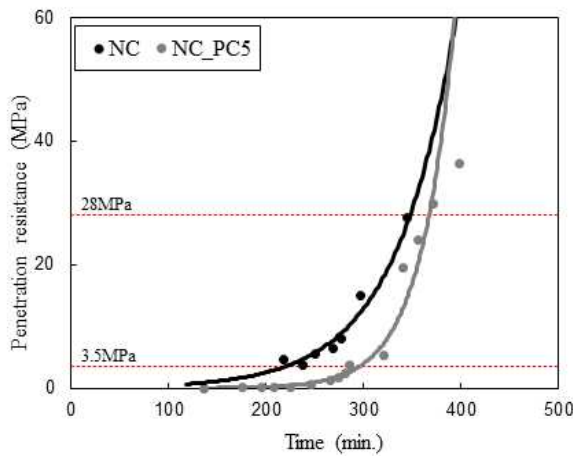


(a) NC

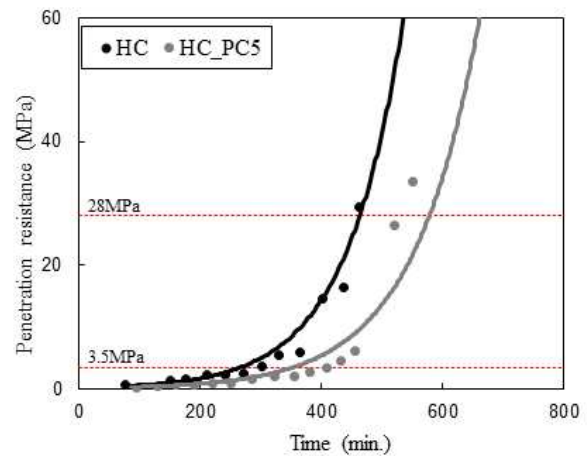


(b) HC

그림 20. 내조해성이 향상된 무기계 수화열 저감재를 혼입한 콘크리트의 슬럼프



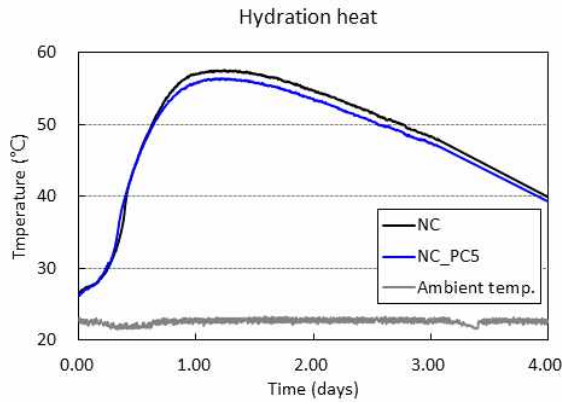
(a) NC



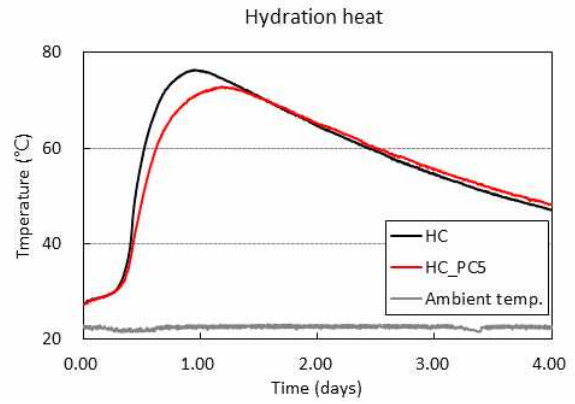
(b) HC

그림 21. 내조해성이 향상된 무기계 수화열 저감재를 혼입한 콘크리트의 응결시간

- 그림 20 및 21에 콘크리트의 슬럼프 및 응결시간을 나타냄.
- 일반강도 영역에서 무기계 수화열 저감재의 혼입은 콘크리트의 슬럼프를 감소시켰으나, 워커빌리티에 영향을 미칠 정도는 아닌 것으로 사료됨. (NC: 170mm, NC\_PC5: 150mm)
- 고강도 영역에서는 감수제가 다량으로 첨가되기 때문에, 무기계 수화열 저감재의 혼입은 콘크리트의 슬럼프 플로우에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었음.
- 일반강도 영역에서 무기계 수화열 저감재의 혼입은 콘크리트의 초결시간을 지연시켰으나, 종결시간은 촉진시키는 것으로 확인되었음.
- NC의 초결은 240min, 종결은 350min인 반면, NC\_PC5의 초결은 280min, 종결은 360min인 것으로 확인되었음.
- 고강도 영역에서는 감수제의 다량 첨가로 인하여 콘크리트의 초결 및 종결 시간이 모두 지연되었으며, 무기계 수화열 저감재의 혼입은 초결 및 종결 시간을 추가적으로 지연시키는 것으로 확인되었음.
- 그림 22 및 23에 콘크리트의 간이단열온도 상승 및 압축강도 결과를 나타내었음.
- 일반강도 영역에서 무기계 수화열 저감재의 혼입은 수화열 최고 온도를 약간 감소시키는 것으로 확인되었으나, 수화열 최고 온도 도달 시간 지연 및 수화열 최고 온도 도달 후의 온도 감소를 저감시키는 영향에 대해서는 효과가 뚜렷하게 보이지 않았음.
- 고강도 영역에서는 무기계 수화열 저감재의 혼입은 수화열 최고 온도를 크게 감소시키는 것으로 확인되었으며, 수화열 최고 온도 도달 시간 또한 크게 지연시키는 것으로 나타남.

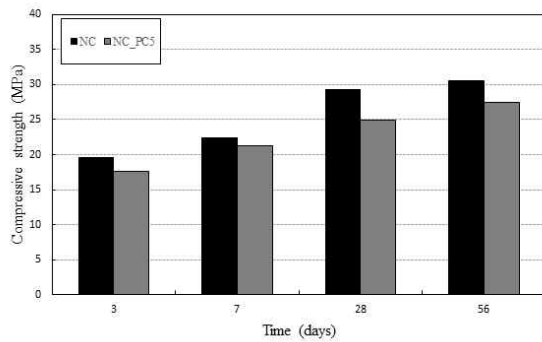


(a) NC

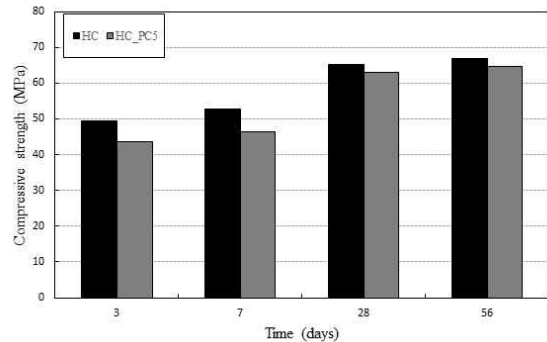


(b) HC

그림 22. 내조해성이 향상된 무기계 수화열 저감재를 혼입한 콘크리트의 간이단열온도 상승



(a) NC



(b) HC

그림 23. 내조해성이 향상된 무기계 수화열 저감재를 혼입한 콘크리트의 압축강도

- 무기계 수화열 저감재의 혼입은 일반강도 영역보다 고강도 영역이 더 효과적인 것으로 확인되었음.
- 일반강도 영역에서 무기계 수화열 저감재의 혼입은 콘크리트의 압축강도를 다소 감소시키는 것으로 확인되었으며, 초기강도보다 장기강도에서 감소의 영향이 더 큰 것으로 나타났음.
- 고강도 영역에서는 일반강도 영역과 유사하게 무기계 수화열 저감재의 혼입이 콘크리트의 압축강도를 감소시키는 경향이 확인된 반면, 장기강도보다 초기강도에서 압축강도 감소의 영향이 더 큰 것으로 나타났음.
- 이러한 원인에 대해서는 미세구조 분석 등의 좀 더 명확한 분석을 수행할 예정임.
- 결과적으로, 내조해성이 향상된 무기계 수화열 저감재는 콘크리트의 슬럼프에 부정적인 영향을 미치지만, 콘크리트의 초결시간을 지연시키는 대신 종결시간은 약간 촉진시킴으로 인하여 소정의 작업성을 확보할 수 있을 것으로 예상됨.
- 또한 수화열 저감시키는 능력을 확인하였으며, 고강도 영역에서 특히 수화열 저감 효과가 우수한 것으로 확인되었음.
- 내조해성이 향상된 수화열 저감재의 혼입은 콘크리트의 압축강도를 다소 감소시키는 경향이 확인되었으나, 설계압축강도를 모두 상회하는 결과가 확인되었기 때문에 재료적 측면에서 크게 문제가 되지 않을 것으로 사료됨.

○ 서중환경 조건에서의 내조해성 향상 기술을 적용한 무기계 수화열 저감재의 2차 성능평가

■ 일본 서중환경에서 무기계 수화열 저감재 제품으로써의 성능평가

- 본 과제에서 개발한 내조해성을 향상시킨 무기계 수화열 저감재가 제품으로써 일본 서중환경에서 수화열 제어 성능, 역학적 특성에 미치는 영향을 평가하고자 하였음.
- 표 15에 일본 서중환경에서의 무기계 수화열 저감재의 매스콘크리트 2차 성능평가 배합을 나타냄.
- 실험 수준은 OPC47\_HR0(OPC concrete), OPC47\_HR5(HR80-SA2), OPC32\_HR0(OPC concrete) 및 OPC32\_HR5(HR80-SA2)으로 설정하여, 일반강도 영역과 고강도 영역에 대하여 평가하였음.
- 그림 24에 일본 서중환경에서의 무기계 수화열 저감재의 매스콘크리트 2차 성능평가 개요를 나타냄.
- 그림 25에 일본 서중환경에서의 무기계 수화열 저감재를 사용한 매스콘크리트의 슬럼프를 나타내었으며, 수화열 저감재의 혼입은 일반강도 영역에서는 큰 영향이 없었으며, 고강도 영역에서는 슬럼프 플로우의 감소에 다소 영향을 미침.

표 15. 일본 큐슈대학교 2차 성능평가 실험 콘크리트 배합

| 구분                       | W/B | S/a  | Unit weight (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |          | HR (wt.%) |
|--------------------------|-----|------|----------------------------------|-----|-----|-----|----------|-----------|
|                          |     |      | W                                | C   | S   | G   | Admixute |           |
| OPC47_HR0 (OPC concrete) | 47  | 43.3 | 186                              | 395 | 717 | 990 | 4.5      | 0         |
| OPC47_HR5 (HR70-SA2)     |     |      |                                  |     |     |     |          | 5         |
| OPC32_HR0 (OPC concrete) | 32  | 47.0 | 175                              | 548 | 732 | 870 | 7.5      | 0         |
| OPC32_HR5 (HR70-SA2)     |     |      |                                  |     |     |     |          | 5         |

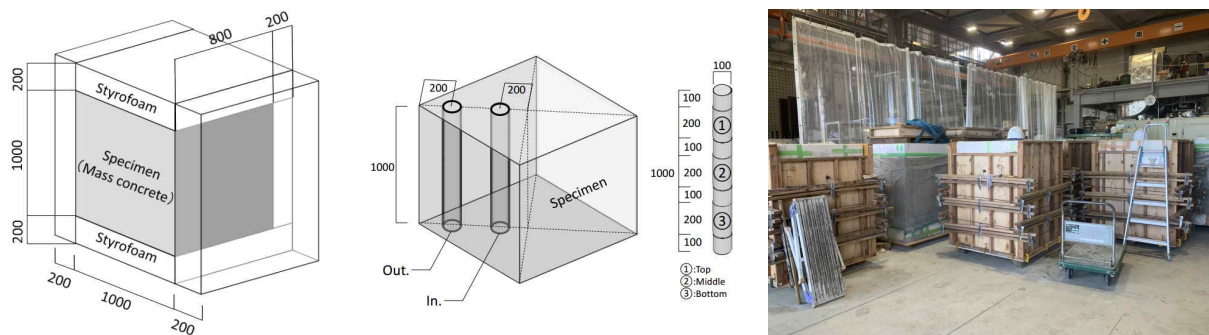


그림 24. 일본 큐슈대학교 무기계 수화열 저감재의 매스콘크리트 2차 성능평가 개요

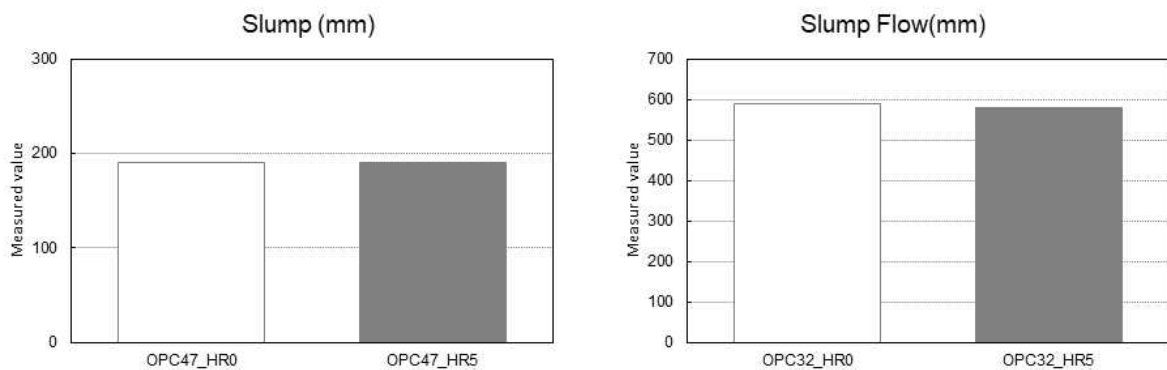
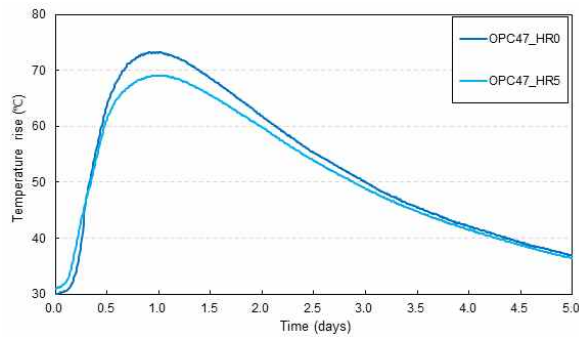
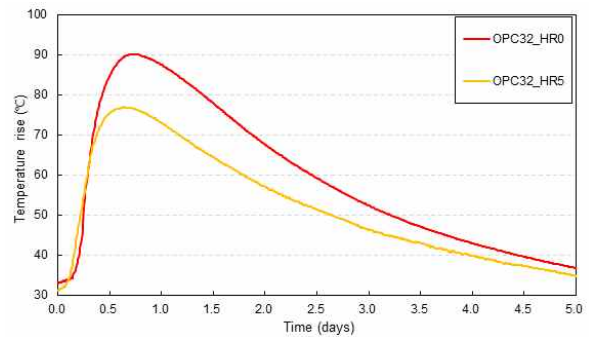


그림 25. 일본 큐슈대학교 내조해성이 향상된 무기계 수화열 저감재를 혼입한 콘크리트의 슬럼프

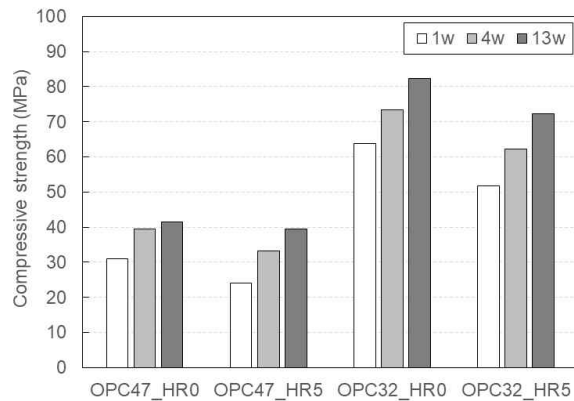


(a) NC

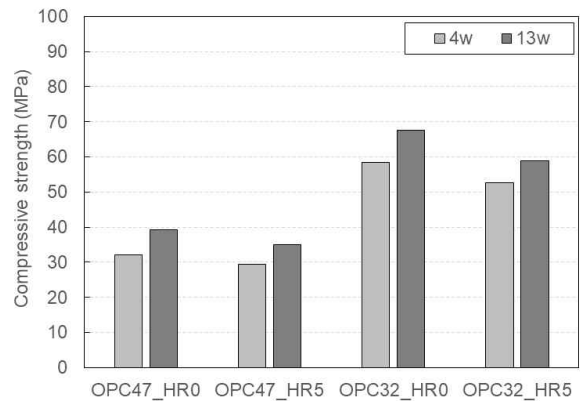


(b) HC

그림 26. 일본 큐슈대학교 무기계 수화열 저감재의 매스콘크리트 간이단열온도 상승량 2차 결과



(a) 표준 공시체



(b) 매스콘크리트 코어링 시험체

그림 27. 일본 큐슈대학교 무기계 수화열 저감재의 압축강도 평가 2차 결과

- 그림 26 및 27에 일본 서중환경에서의 무기계 수화열 저감재를 혼입한 매스콘크리트의 수화열 제어 성능 및 압축강도를 각각 나타내었음.
- 무기계 수화열 저감재를 혼입한 매스콘크리트의 수화열 제어 성능을 평가한 결과, 수화열 최고 온도 감소의 경향이 국내에서 평가한 실험 결과와 경향이 유사한 것으로 확인되었음.
- 일반강도 영역에서보다 고강도 영역에서 수화열 저감재의 사용에 의한 수화열 최고 온도 감소의 효과가 더 우수한 것으로 나타남.
- 그러나, 1차 성능평가 당시 나타났던 수화열 저감재의 사용에 의한 최고온도 도달 시간 지연 효과는 나타나지 않은 것으로 확인되었으며, 이에 대한 원인은 추가 연구가 필요할 것으로 사료됨.
- 압축강도의 경우, 수화열 저감재 사용에 의한 압축강도 감소 정도가 일반강도 영역보다 고강도 영역에서 더 높은 것으로 나타나, 국내 성능평가 결과와는 경향이 다른 것으로 확인되었음.
- 국내 성능평가 결과와 경향이 다른 원인은 시멘트, 골재 등의 재료가 다르기 때문인 것으로 예상되지만, 명확한 원인 파악을 위해서 추가 연구가 필요할 것으로 사료됨.
- 고강도 영역에서 수화열 저감재 사용에 의한 압축강도 감소의 원인은 수화열 최고 온도가 크게 떨어졌으나, 수화열 최고온도 도달 시간 지연 효과가 없기 때문에 강도 발현에 최적화되는 환경이 제공되지 못하였기 때문인 것으로 사료됨.
- 그러나, 수화열 저감재의 사용에 의한 압축강도 감소 정도가 설계압축강도를 하회하지 않기 때문에, 결과적으로 수화열 저감재의 사용에는 큰 문제가 없을 것으로 예상됨.

■ 무기계 수화열 저감재의 제품으로써의 매스콘크리트 수화열 해석

- 내조해성을 향상시킨 무기계 수화열 저감재의 제품으로써의 수화열 성능을 검토하기 위하여 일본 서중환경에서 매스콘크리트 간이단열온도 상승량 결과와 수화열 해석 결과를 비교하고자 하였음.
- 표 16에 일본 서중환경에서 수행한 매스콘크리트 간이단열온도 상승량 결과와 비교하기 위한 매스콘크리트 수화열 해석 입력 data를 나타내었음.
- 배합 정보는 일본 서중환경에서 수행한 매스콘크리트 배합 OPC47\_HR5와 동일하게 진행하였으며, 수화열 저감재의 혼입에 의한 수화열 감소 효과를 고려하였음.
- 수화열 해석은 슬라브 해석 모델을 선택하였으며, Solid elements, Mass size, 거푸집 양생기간 및 해체시기 7일로 설정하였음.
- 그림 28에 매스콘크리트 수화열 해석 모델링 개요를 나타내었음.
- 그림 29에 매스콘크리트 수화열 해석 결과를 나타내었으며, 결과를 토대로 온도-시간이력 그래프를 도출 및 OPC\_HR5 간이단열온도 상승 시험 결과와 비교하였음.

표 16. 매스콘크리트 수화열 해석을 위한 입력 Data

| 물성                                     |   | 콘크리트                   | 지반                     |
|----------------------------------------|---|------------------------|------------------------|
| 단열온도<br>상승값                            | K | 47.5                   | -                      |
|                                        | a | 0.750                  |                        |
| 비열 (kcal/N · °C)                       |   | 0.025                  | 0.02                   |
| 비중 (N/m³)                              |   | 2,350                  | 1,700                  |
| 열전도율 (kcal/m * hr * °C)                |   | 2.3                    | 1.7                    |
| 대류계수 (kcal/m² * hr * °C)               |   | 12                     | -                      |
| 외기온도 (°C)                              |   | 30                     | -                      |
| 타설온도 (°C)                              |   | 30                     | -                      |
| f <sub>28</sub> 압축강도 (MPa)<br>(설계기준강도) |   | 30                     | -                      |
| 탄성계수 (MPa)                             |   | 29,000                 | 980                    |
| 열팽창계수                                  |   | 1.0 * 10 <sup>-5</sup> | 1.0 * 10 <sup>-5</sup> |
| 푸아송비                                   |   | 0.18                   | 0.2                    |

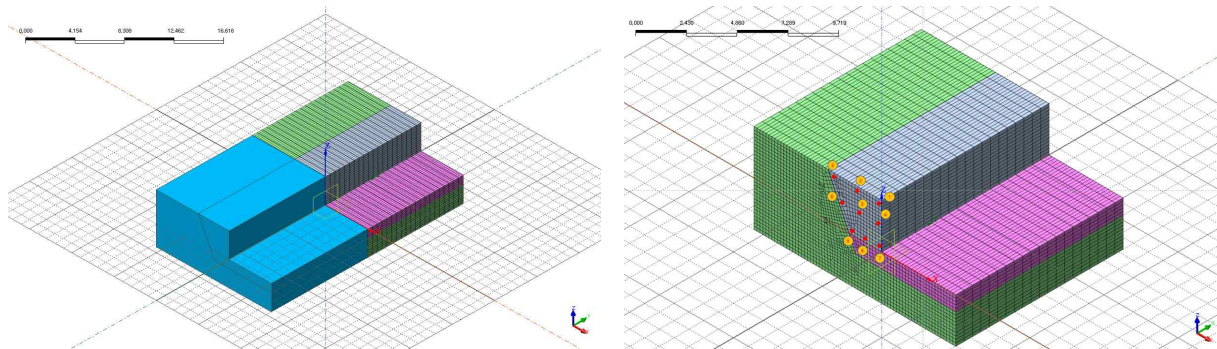
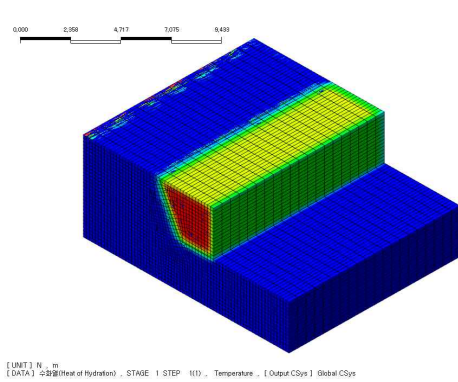
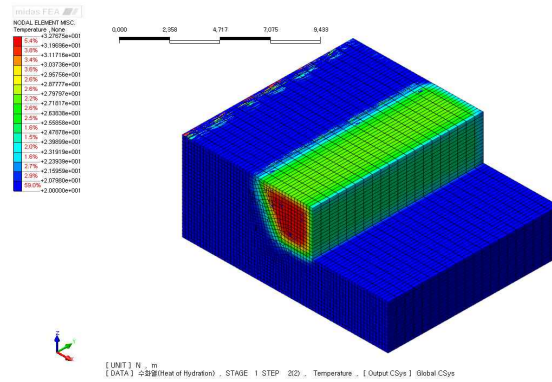


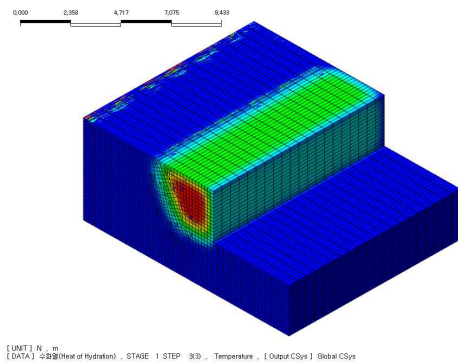
그림 28. 매스콘크리트 수화열 해석 모델링 개요



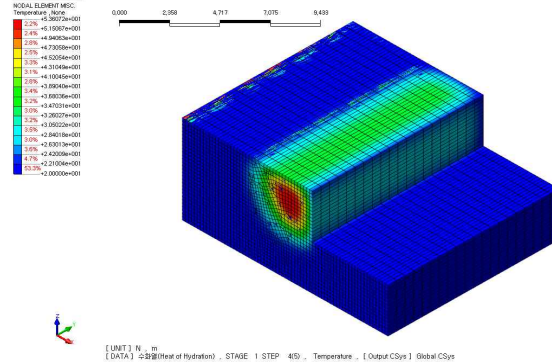
(a) 1day



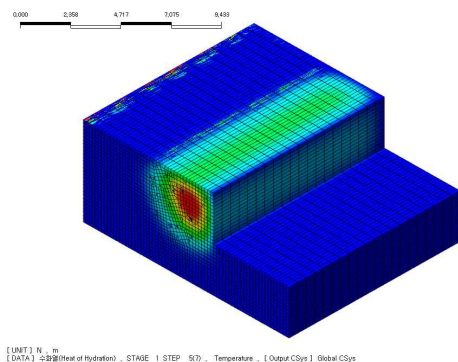
(b) 1.5day



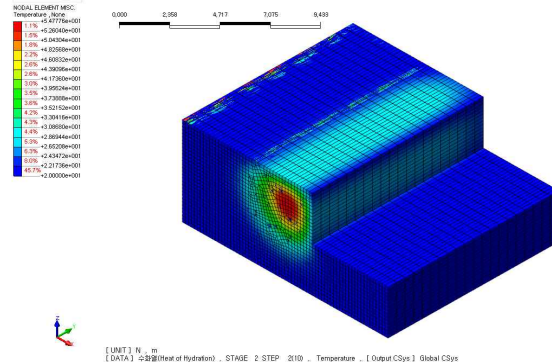
(c) 2day



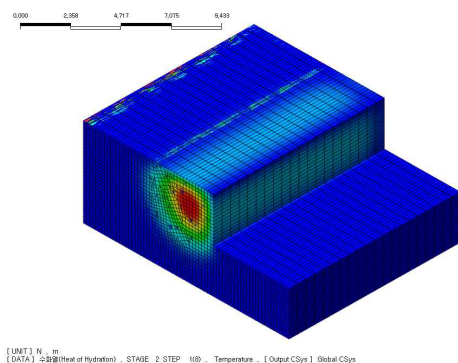
(d) 2.5day



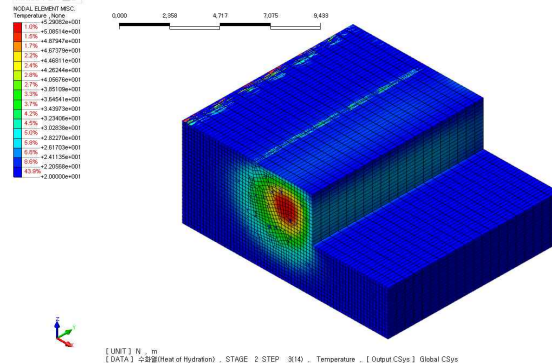
(e) 3day



(f) 3.5day



(g) 4day



(h) 5day

그림 29. 매스콘크리트 수화열 해석 결과

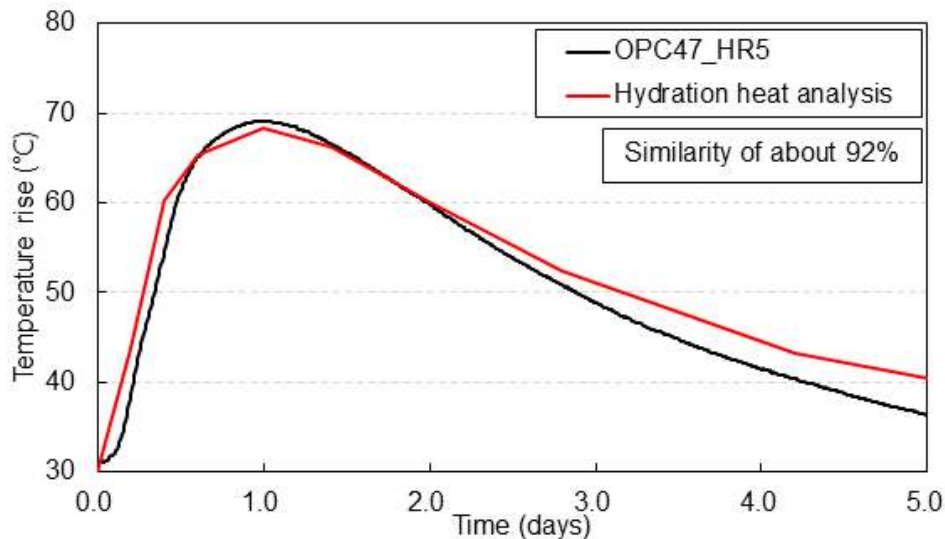


그림 30. 수화열 해석 및 실제 매스콘크리트 간이단열온도상승 결과값 비교

표 17. 베트남 ICT 2차 성능평가 실험 콘크리트 배합

| 구분                | W/B  | S/a  | Unit weight (kg/m³) |     |     |      |           | HR (wt.%) |
|-------------------|------|------|---------------------|-----|-----|------|-----------|-----------|
|                   |      |      | W                   | C   | S   | G    | Admixture |           |
| NC (OPC concrete) | 54.4 | 47.8 | 193                 | 355 | 937 | 1022 | 3.2       | 0         |
| NC_PC5 (HR70-SA2) |      |      |                     |     |     |      |           | 5         |
| HC (OPC concrete) | 36.6 | 45.1 | 185                 | 505 | 814 | 992  | 5.1       | 0         |
| HC_PC5 (HR70-SA2) |      |      |                     |     |     |      |           | 5         |

- 표 30에 일본 서중환경에서 평가한 OPC47\_HR5의 매스콘크리트 간이단열온도 상승 결과와 매스콘크리트 수화열 해석 결과를 비교한 결과를 나타내었음.
- 수화열 최고 온도 도달 시점까지는 간이단열온도 상승 결과와 매우 유사하였으나, 최고 온도 도달 이후 온도가 감소하는 과정에서 수화열 해석 결과값이 다소 천천히 떨어지는 경향이 확인되었음.
- 그러나 초기 온도 상승 및 최고 온도 도달 시점 등 전체적인 경향을 비교하였을 때, 매우 유사한 것으로 확인되었으며, 유사도가 약 92%인 것으로 확인됨.
- 결과적으로 수화열 저감재의 혼입에 의한 영향을 고려한 수화열 해석 결과와 실제 수화열 저감재를 혼입한 매스콘크리트의 간이단열온도 상승 결과가 일정 수준 이상으로 유사하다고 판단됨.

#### ■ 베트남 서중환경에서 무기계 수화열 저감재 제품으로써의 성능평가

- 본 과제에서 개발한 내조해성을 향상시킨 무기계 수화열 저감재가 제품으로써 베트남 서중환경에서 수화열 제어 성능, 역학적 특성에 미치는 영향을 평가하고자 하였음.
- 표 17에 베트남 서중환경에서의 무기계 수화열 저감재의 매스콘크리트 2차 성능평가 배합을 나타냄.
- 실험 수준은 NC(OPC concrete), NC\_PC5(HR80-SA2), HC(OPC concrete) 및 HC\_PC5(HR80-SA2)으로 설정하여, 일반강도 영역과 고강도 영역에 대하여 평가하였음.
- 그림 31, 32에 베트남 서중환경에서의 무기계 수화열 저감재의 매스콘크리트 2차 성능평가 개요를 나타냄.
- 그림 33에 베트남 서중환경에서의 무기계 수화열 저감재를 사용한 매스콘크리트의 슬럼프를 나타내었으며, 수화열 저감재의 혼입은 일반강도 영역 및 고강도 영역에서 슬럼프/슬럼프 플로우의 감소에 다소 영향을 미치는 것으로 확인되었음.
- 그림 34 및 35에 베트남 서중환경에서의 무기계 수화열 저감재를 혼입한 매스콘크리트의 수화열 제어 성능 및 압축강도를 각각 나타내었음.
- 무기계 수화열 저감재를 혼입한 매스콘크리트의 단열온도 상승 시험 결과, 수화열 저감재의 사용은 약 5°C

의 수화열 감소 효과가 있는 것으로 확인됨.

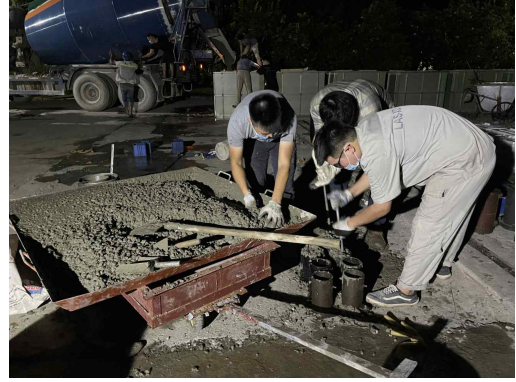


그림 31. 베트남 ICT 무기계 수화열 저감재의 매스콘크리트 2차 성능평가

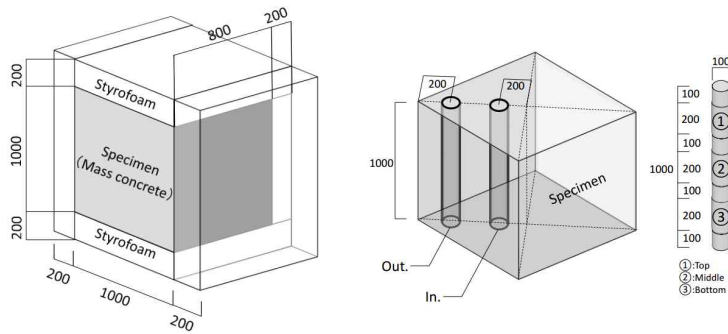


그림 32. 베트남 ICT 무기계 수화열 저감재의 매스콘크리트 2차 성능평가 개요

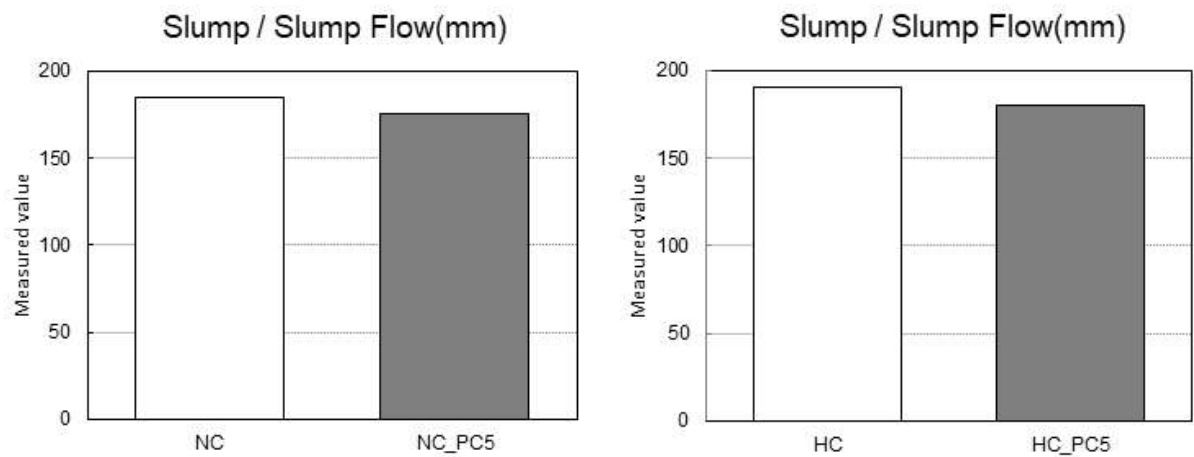


그림 33. 베트남 ICT 내조해성이 향상된 무기계 수화열 저감재를 혼입한 콘크리트의 슬럼프

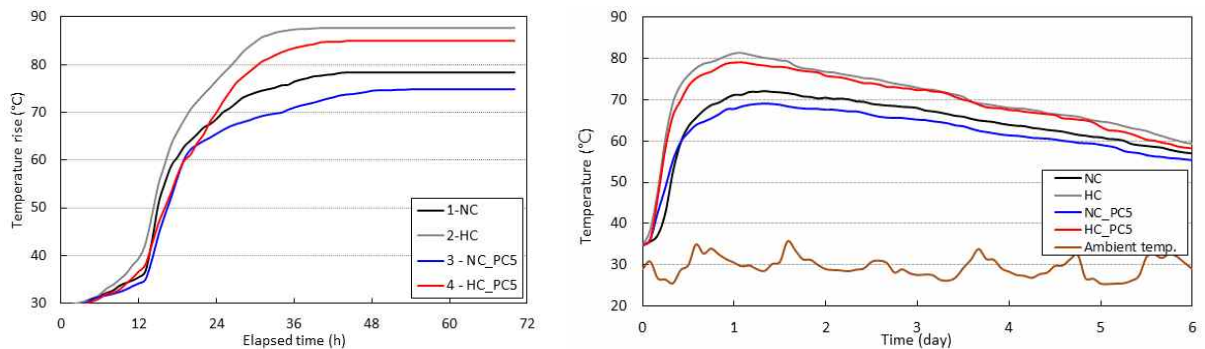
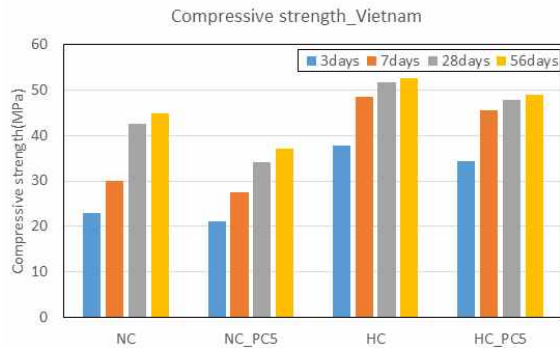
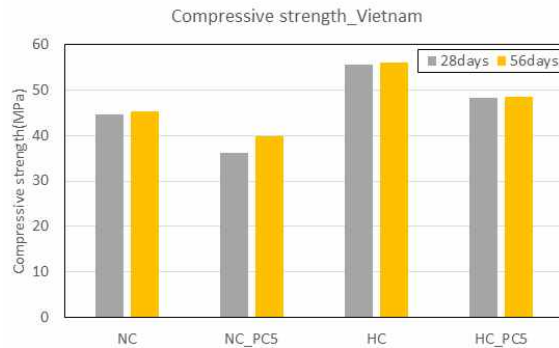


그림 34. 베트남 ICT 무기계 수화열 저감재의 매스콘크리트 단열/간이단열온도 상승량 2차 결과



(a) 표준 공시체



(b) 마스크콘크리트 코어링 시험체

그림 35. 베트남 ICT 무기계 수화열 저감재의 압축강도 평가 2차 결과

- 간이단열온도 상승 시험 결과, 수화열 저감재의 사용에 의한 수화열 최고온도 감소 효과는 고강도 영역보다 일반강도 영역에서 더 큰 것으로 나타나, 이는 국내 및 일본과 상이한 결과이기 때문에 재료적 차이 때문인 것으로 예상되지만 정확한 원인을 파악하기 위한 추가 연구가 필요할 것으로 사료됨.
- 수화열 저감재의 사용에 의한 최고온도 도달 시간 지연 효과는 나타나지 않은 것으로 확인되었으며, 이에 대한 원인은 추가 연구가 필요할 것으로 사료됨.
- 압축강도의 경우, 수화열 저감재 사용에 의한 압축강도 감소 정도가 고강도 영역보다 일반강도 영역에서 더 높은 것으로 나타나, 국내 성능평가 결과와는 유사하지만, 일본 성능평가 결과와는 경향이 다른 것으로 확인되었음.
- 이처럼 결과의 경향이 서로 다른 원인은 시멘트, 골재 등의 재료가 다르기 때문인 것으로 예상되지만, 명확한 원인 파악을 위해서 추가 연구가 필요할 것으로 사료됨.
- 또한, 수화열 저감재 사용에 의한 압축강도 감소의 원인은 수화열 최고 온도가 크게 떨어졌으나, 수화열 최고온도 도달 시간 지연 효과가 없기 때문에 강도 발현에 최적화되는 환경이 제공되지 못하였기 때문인 것으로 사료됨.
- 그러나, 수화열 저감재의 사용에 의한 압축강도 감소 정도가 설계압축강도를 하회하지 않기 때문에, 결과적으로 수화열 저감재의 사용에는 큰 문제가 없을 것으로 예상됨.

#### ○ 내조해성 향상 기술을 적용한 무기계 수화열 저감재의 생산성 향상 평가

- 본 연구의 수화열 저감재를 생산하는 위탁연구기관인 트라이포드에서 개발된 시제품 실제 생산을 통하여 생산성 향상 정도를 평가하였음
- 기존 트라이포드에서 생산하는 무기계 수화열 저감재의 경우, 조해성으로 인해 장기간의 분쇄기간이 필요하여 생산 소요 시간이 오래 걸리는 것으로 평가되었음
- 하지만, 개발된 시제품의 경우, 내조해성이 향상되어 분쇄시간이 감소하여 기존 제품과 비교하여 동 시간 대비 생산 소요 시간이 단축되었으며, 실제 생산 결과, 기존 제품은 한시간에 3ton 가량 생산하였지만, 개발된 시제품은 한시간에 약 6ton정도 생산되었음
- 하지만, 성능 향상을 위한 안정화제가 추가로 혼입되기 때문에 공정 추가와 같은 요인으로 인해 생산성 저감을 야기할 가능성이 있지만, 제품안정성 향상, 장기보관성 향상 등으로 인해 보관 관리 시간 및 비용이 감소되었음
- 따라서, 본 연구를 통해 수화열 저감재의 생산성을 약 2배 정도 향상시켰다고 판단되며, 공정 추가와 같은 요인으로 인해 감소율을 감안하여 1.5배(50%)의 생산성 향상을 이룩하였다고 분석됨

○ 연구개발 추진전략 · 방법

■ 주관 및 공동연구기관간의 유기적 연계성

- 본 연구개발은 무기계 상변환 콘크리트 수화열 저감재의 장기저장성 및 생산성 향상 기술 개발을 목표로 하며, 이를 실현하기 위해 주관연구기관에서는 무기계 상변환소재의 내조해성 향상 기술을 개발과 함께 이를 적용한 콘크리트의 기초 물성을 실험적으로 평가하고, 공동연구기관에서 실질적인 제품화를 위해 생산성 및 실증화 연구를 진행
- 주관연구기관인 충남대학교에서는 무기계 상변환소재의 고정화 기술 및 고형제제화 기술을 개발하고 콘크리트 적용 시 기초물성을 확보하여 상변환 소재를 활용한 장기저장형 수화열 저감재의 성능기반을 구축함
- 공동연구기관인 (주)트라이포드에서는 주관연구기관에서 개발한 수화열 저감재의 화학적 안정성 검토와 더불어 형태 안정성 향상 기술을 개발하고 Mock-up test 진행하여, 제품생산을 위한 기술적 검토를 수행함
- 충남대학교와 (주)트라이포드는 기존에 공동연구의 일환으로 온도균열 발생이 높을 것으로 판단되는 서중환경 (약 35℃)의 조건에서 1,000×1,000×1,000mm의 시험체를 이용한 Mock-up test를 수행함으로써, 수화열 저감재의 실질적인 성능평가를 위한 Mock-up test 수행
- 충남대학교와 (주)트라이포드는 Lab test 에서 Mock-up test 까지 연구결과에 대해 상호 피드백함으로써 유기적인 관계를 통해 효율적인 연구개발을 진행

■ 산학협력 네트워크 및 연구기기 공동 활용

- 본 연구를 통해 무기계 상변환 수화열 저감재의 장기저장성 및 생산성 향상 기술 개발을 실현하기 위해서는 산학협력 네트워크의 구성이 매우 중요하며, 이를 위해 본 연구에서는 개발기술을 실제 적용할 수 있는 기업을 공동연구기관으로 구성하고 있으며, 정부출연금 외에 산학협력 부담금을 조성하여 실질적인 연구참여가 가능한 시스템을 구축함
- 또한 대학과 기업에서 보유하고 있는 연구기기를 공동으로 활용이 가능하며, 충남대학교와 트라이포드는 함께 수화열 저감재의 성능평가 공동연구를 수행함으로써, 유기적이고 체계적인 네트워크 구축을 통해 목표하는 기술 개발을 수행하였음

■ 주관연구기관의 해외네트워크를 활용한 공동연구 및 시장개척

- 주관기관인 충남대학교와 공동연구기관인 (주)트라이포드는 일본의 다케모토유지 주식회사, 큐슈대학교와 함께 수화열 저감재의 성능평가에 대한 공동연구를 수행하며 한국과 일본에서의 다수의 회의 및 실험 등을 진행하였으며, 이를 통해 각 기관의 연구수행의 능력과 현 상황들에 대해 지속적으로 교류하고 있는 상태임
- 특히, 다케모토유지 주식회사는 일본에 본사를 두고 3개의 영업소 및 5개의 공장을 갖고 있으며, 한국, 대만, 인도 등에 합작회사를 설립하여 현재 중국, 대만, 인도, 미국 등에 해외사업소를 갖고 있는 등 아시아 지역의 다양한 시장현황 및 현지성능조건 등에 대해 파악하고 있어 향후 실질적인 사업화 성과 창출에 도움이 될 것으로 예상됨



- 일본뿐만 아니라 대표적인 서중환경인 동남아시아의 베트남에도 새로운 네트워크를 구축하고자 노력하였으며, 그 결과, 하노이과학기술대학교(Hanoi University of Science and Technology, HUST) 및 베트남 건설부 산하 건설연구소(Vietnam Institute for Building Science and Technology, IBST)의 콘크리트 부서 ICT(Institute of Concrete Technology)와 공동연구를 수행하고, 지속적인 교류를 실시하고 있는 상태임

#### 주관 : 충남대학교

- 표면처리를 통한 무기계 상변환소재 고정화 기술검토
- 다공성 재료 함침기술을 적용 무기계 상변환소재의 고품형 제제화 기술 개발

#### 주관 : 충남대학교

- 수화열 저감재 적용 콘크리트의 시공성 확보 기술
- 수화열 저감재 적용 콘크리트의 품질 성능 확보 기술

#### 공동 : (주)트라이포드

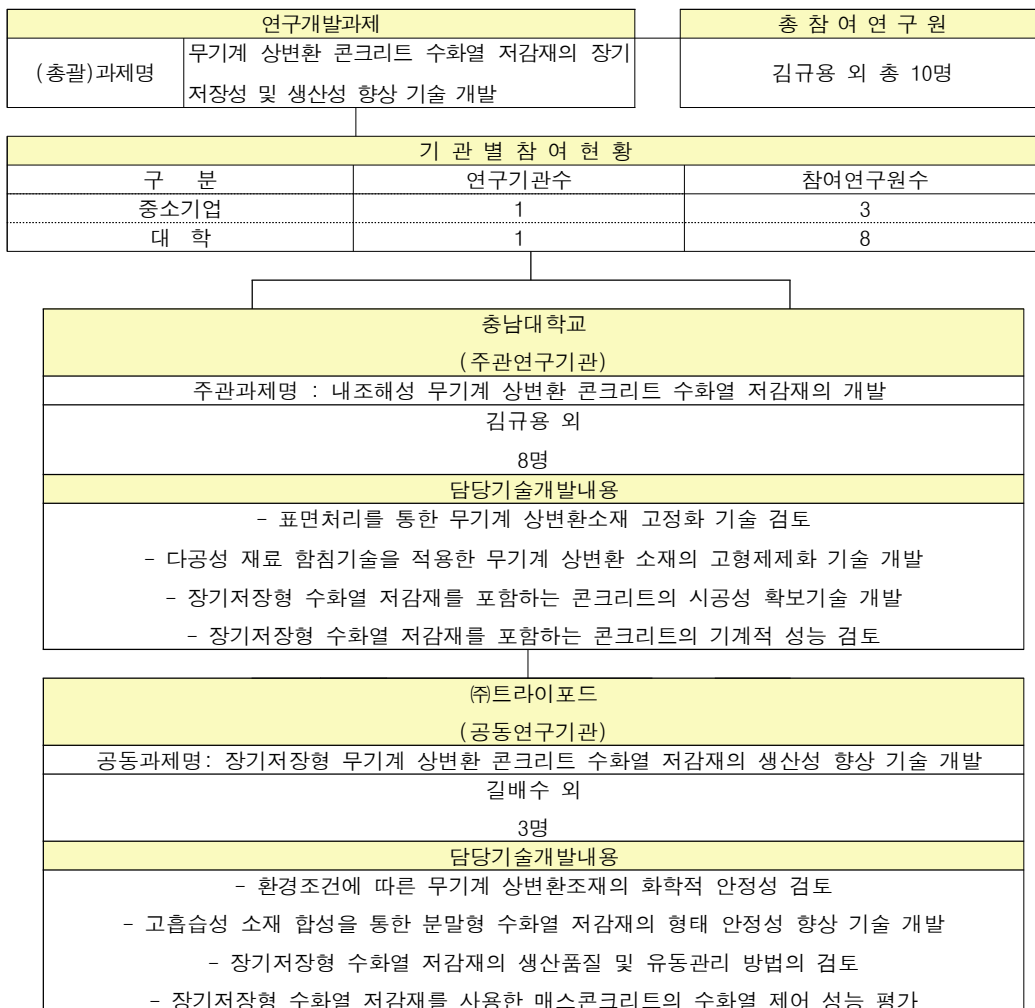
- 환경에 따른 무기계 상변환소재의 화학적 안정성
- 고흡습성 소재 함침을 통한 분말형 무기계 상변환 소재의 형태 안정성 향상 기술 개발

#### 공동 : (주)트라이포드

- 수화열 저감재 적용 매스콘크리트의 수화열 제어 성능 평가
- 장기저장형 수화열 저감재의 생산품질 및 유통 관리 방법 검토

## 무기계 상변환 콘크리트 수화열 저감재의 장기저장성 및 생산성 향상 기술 개발

### ○ 연구개발 추진체계



## ○ 추진일정

| 1차년도     |                                                         |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |                      |                         |
|----------|---------------------------------------------------------|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----------------------|-------------------------|
| 일련<br>번호 | 연구내용                                                    | 추진 일정 |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 연구<br>개발비<br>(단위:천원) | 책임자<br>(소속기관)           |
|          |                                                         | 1     | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |                      |                         |
| 1        | 국내외 연구 및<br>기술개발 동향 분석                                  |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 5,000                | 김규용(충남대)/<br>길배수(트라이포드) |
| 2        | 표면처리를 통한<br>무기계 상변화소재<br>고정화 기술 검토                      |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 32,500               | 김규용(충남대)                |
| 3        | 다공성 재료<br>함침기술을 적용한<br>무기계 상변화<br>소재의 고품질제화<br>기술 개발    |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 32,500               | 김규용(충남대)                |
| 4        | 저장환경 조건에<br>따른 무기계<br>상변화소재의<br>화학적 안정성 검토              |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 60,000               | 길배수<br>(트라이포드)          |
| 5        | 고흡습성 소재<br>합성을 통한 분말형<br>수화열 저감재의<br>형태 안정성 향상<br>기술 개발 |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 60,870               | 길배수<br>(트라이포드)          |
| 6        | 개발된 수화열<br>저감재의 성능<br>최적화를 위한 검토<br>및 보완                |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 20,000               | 김규용(충남대)/<br>길배수(트라이포드) |
| 2차년도     |                                                         |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |                      |                         |
| 1        | 강도별 수화열<br>저감재의 최적 배합<br>도출                             |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 40,000               | 김규용(충남대)                |
| 2        | 페이스트 조건에서<br>수화열 저감재의<br>성능 검토                          |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 40,000               | 김규용(충남대)/<br>길배수(트라이포드) |
| 3        | 모르타르 조건에서<br>수화열 저감재의<br>성능 검토                          |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 40,000               | 김규용(충남대)                |
| 4        | 콘크리트 조건에서<br>수화열 저감재의<br>성능 검토                          |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 40,000               | 김규용(충남대)                |
| 5        | 실험 결과 피드백을<br>통한 수화열 저감재<br>성능 최종 검토                    |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 45,000               | 김규용(충남대)                |
| 6        | Mock-up test를 통한<br>수화열 저감재의<br>성능 검토                   |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 130,000              | 길배수<br>(트라이포드)          |
| 7        | 실부재 요인에 따른<br>수화열 저감재의<br>수화발열 특성 분석                    |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 100,000              | 길배수<br>(트라이포드)          |
| 8        | 수화열 저감재의<br>생산품질 및 유통<br>관리방법 검토                        |       |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 58,400               | 길배수<br>(트라이포드)          |

### 3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

#### 1) 연구수행 결과

##### (1) 정성적 연구개발성과

---

###### ○ 1차년도

- 무기계 수화열 저감재의 내조해성 6개월 이상 달성
- 내조해성이 향상된 무기계 수화열 저감재를 사용한 콘크리트 압축강도 40MPa 이상 달성
- 내조해성이 향상된 무기계 수화열 저감재를 사용한 콘크리트 간이단열온도 상승량 70℃ 이하 달성

###### ○ 2차년도

- 장기저장형 수화열 저감재를 사용한 콘크리트 슬럼프 145mm 이상 달성
  - 장기저장형 수화열 저감재를 사용한 콘크리트 초결 280min 이하 달성
  - 장기저장형 수화열 저감재를 사용한 콘크리트 종결 360min 이하 달성
  - 장기저장형 수화열 저감재를 사용한 콘크리트 압축강도 40MPa 이상 달성
  - 장기저장형 수화열 저감재를 사용한 콘크리트 간이단열온도 상승량 70℃ 이하 달성
  - 장기저장형 수화열 저감재를 사용한 콘크리트 수화열 해석 유사도 90% 이상 달성
  - 장기저장형 수화열 저감재 시제품의 장기저장성능 6개월 이상 달성
  - 장기저장형 수화열 저감재 시제품의 기존 제품 대비 생산성 50% 이상 향상 달성
- 

##### (2) 정량적 연구개발성과

---

###### ○ 과학적 성과

- SCI 논문 1건 게재
- 국내전문학술지 2건 게재
- 국내 학술발표대회 5건 발표
- 보고서 4건
- 기술 요약 정보(SMK) 1건

###### ○ 기술적 성과

- 국내 특허 출원 2건
- 국내 특허 등록 1건
- 해외 특허(PCT) 출원 1건

###### ○ 경제적 성과

- 시제품 성과 1건
- 사업화 성과 1건
- 현장적용 성과 3건

###### ○ 사회적 성과

- 인력양성 박사 3명, 석사 1명
-

### (3) 세부 정량적 연구개발성과

#### [과학적 성과]

#### □ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

| 번호 | 논문명                                                                                                                       | 학술지명                   | 주저자명        | 호  | 국명      | 발행기관             | SCIE 여부<br>(SCIE/비SCIE) | 게재일        | 등록번호<br>(ISSN) | 기여율  |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------|----|---------|------------------|-------------------------|------------|----------------|------|
| 1  | 서중환경에서 스트론튬계 수화열저감재를 사용한 콘크리트의 수화발열특성 평가                                                                                  | 한국구조물진단유지관리공학회 논문집     | 서동균         | 24 | 대한민국    | 한국구조물진단유지관리공학회   | 비SCIE                   | 2020.12.31 | 2287-6979      | 100% |
| 2  | 다중 회전 날개 및 가이드 판 설치 파쇄장치를 통해 제작된 순환골재가 콘크리트의 역학적 특성 및 탄산화 저항성에 미치는 영향                                                     | 한국건설순환자원학회 논문집         | 조성광         | 9  | 대한민국    | 한국건설순환자원학회       | 비SCIE                   | 2021.06.30 | 2288-3320      | 100% |
| 3  | Effects of waste glass as a sand replacement on the strength and durability of fly ash/GGBS based alkali activated mortar | Ceramics International | Sasui Sasui | 47 | English | ELSEVIER SCI LTD | SCIE                    | 2021.04.16 | 0272-8842      | 100% |

#### □ 국내 및 국제 학술회의 발표

| 번호 | 회의 명칭                         | 발표 내용                                                                 | 발표자 | 발표 일시       | 장소         | 국명   |
|----|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----|-------------|------------|------|
| 1  | 한국건축시공학회 2020 가을학술발표대회 및 정기총회 | 잔골재용 폐유리의 표면개질이 모르타르의 역학적 특성 및 알칼리 실리카 반응에 미치는 영향                     | 손민재 | 2020.11.13. | 경주 블루원리조트  | 대한민국 |
| 2  | 한국건축시공학회 2020 가을학술발표대회 및 정기총회 | 폐유리 잔골재가 고강도 모르타르의 역학적 특성 및 알칼리-실리카 반응(ASR), ASR 후, 잔류 역학적 특성에 미치는 영향 | 유하민 | 2020.11.13. | 경주 블루원리조트  | 대한민국 |
| 3  | 한국구조물진단유지관리공학회 2020년 가을 학술발표회 | 무기계 상변환 콘크리트 수화열 저감재의 내조해성 및 상변이 안정성 향상 기술 개발                         | 길배수 | 2020.11.20. | 한국과학기술회관   | 대한민국 |
| 4  | 한국구조물진단유지관리공학회 봄 학술발표회        | 표면개질에 따른 폐유리 잔골재가 모르타르의 역학적 특성 및 알칼리 실리카 반응성에 미치는 영향                  | 손민재 | 2021.06.04  | 파라다이스호텔 부산 | 대한민국 |
| 5  | 한국구조물진단유지관리공학회 봄 학술발표회        | 고온에 노출된 고강도 콘크리트의 충격파괴특성                                              | 이상규 | 2021.06.04  | 파라다이스호텔 부산 | 대한민국 |

## □ 보고서 원문

| 번호 | 연도   | 보고서 명                                         | 발간일      | 등록 번호 |
|----|------|-----------------------------------------------|----------|-------|
| 1  | 2020 | 무기계 상변환 콘크리트 수화열 저감재의 내조해성 평가                 | 2020.10. | -     |
| 2  | 2020 | 연차(단계)실적·계획서 [국토교통기술촉진연구사업]                   | 2020.12. | -     |
| 3  | 2021 | 내조해성이 향상된 무기계 상변환 콘크리트 수화열 저감재의 시제품 적용 가능성 평가 | 2021.12. | -     |
| 4  | 2022 | 최종보고서 [국토교통기술촉진연구사업]                          | 2022.01. | -     |

## [기술적 성과]

## □ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

| 번호 | 구분 | 지식재산권 등 명칭<br>(건별 각각 기재)   | 국명   | 출원         |            |                   | 등록         |            |                 | 기여율  | 활용 여부 |
|----|----|----------------------------|------|------------|------------|-------------------|------------|------------|-----------------|------|-------|
|    |    |                            |      | 출원인        | 출원일        | 출원번호              | 등록인        | 등록일        | 등록번호            |      |       |
| 1  | 특허 | 내구성 및 작업성이 향상된 수화열 저감재     | 대한민국 | 주식회사 트라이포드 | 2021.06.03 | 10-2021-0072017   | 주식회사 트라이포드 | 2021.09.24 | 10-2307019-0000 | 100% | 자체 활용 |
| 2  | 특허 | 수화열 저감재의 생산성 향상을 위한 체가름 장치 | 대한민국 | 주식회사 트라이포드 | 2021.06.23 | 10-2021-0081559   |            |            |                 | 100% | 자체 활용 |
| 3  | 특허 | 내구성 및 작업성이 향상된 수화열 저감재     | PCT  | 주식회사 트라이포드 | 2021.09.30 | PCT/KR2021/013416 |            |            |                 | 100% | 자체 활용 |

## ○ 지식재산권 활용 유형

| 번호 | 제품화 | 방어 | 전용실시 | 통상실시 | 무상실시 | 매매/양도 | 상호실시 | 담보대출 | 투자 | 활용 예정 | 기타 |
|----|-----|----|------|------|------|-------|------|------|----|-------|----|
| 1  | √   |    |      |      |      |       |      |      |    | √     |    |
| 2  | √   |    |      |      |      |       |      |      |    | √     |    |
| 3  | √   |    |      |      |      |       |      |      |    | √     |    |

## [경제적 성과]

## □ 시제품 제작

| 번호 | 시제품명                   | 출시/제작일      | 제작업체명    | 설치장소     | 이용분야           | 사업화 소요 기간 | 인증기관 (해당 시) | 인증일 (해당 시) |
|----|------------------------|-------------|----------|----------|----------------|-----------|-------------|------------|
| 1  | 내조해성을 향상시킨 무기계 수화열 저감재 | 2021.10.21. | (주)트라이포드 | (주)트라이포드 | 매스콘크리트 수화열 제어용 | 2년        | -           | -          |

## □ 현장적용

| 번호 | 적용기술명                            | 적용일                       | 발주기관명    | 적용 연구개발기관명 | 적용현장명(장소)                     |
|----|----------------------------------|---------------------------|----------|------------|-------------------------------|
| 1  | 상전이 물질을 이용한 고성능 수화열저감재(Hyper-HR) | 2020.05.01. ~ 2020.07.31. | (주)브레인건설 | (주)트라이포드   | 강릉안인화력 1,2호기 건설공사(삼성물산)       |
| 2  | 상전이 물질을 이용한 고성능 수화열저감재(Hyper-HR) | 2020.08.01 ~ 2020.10.31.  | (주)브레인건설 | (주)트라이포드   | 강릉안인화력 1호기 석탄취급설비 건설공사(한진중공업) |
| 3  | 상전이 물질을 이용한 고성능 수화열저감재(Hyper-HR) | 2020.11.01. ~ 2021.07.31. | (주)브레인건설 | (주)트라이포드   | 강릉안인화력 2호기 석탄취급설비 건설공사(한진중공업) |

## □ 사업화 현황

| 번호 | 사업화 방식 | 사업화 형태   | 지역 | 사업화명                             | 내용                            | 업체명      | 매출액     |         | 매출 발생 연도 | 기술 수명 |
|----|--------|----------|----|----------------------------------|-------------------------------|----------|---------|---------|----------|-------|
|    |        |          |    |                                  |                               |          | 국내 (천원) | 국외 (달러) |          |       |
|    | 직접사업화  | 기존업체 상품화 | 대전 | 상전이 물질을 이용한 고성능 수화열저감재(Hyper-HR) | 스트론튬계 상변환소재를 활용한 수화열 저감 효과 확보 | (주)트라이포드 | 140,778 | -       | 2020년도   | -     |

## □ 매출 실적(누적)

| 번호 | 사업화명                             | 발생 연도  | 매출액     |        | 합계     | 산정 방법 |
|----|----------------------------------|--------|---------|--------|--------|-------|
|    |                                  |        | 국내(천원)  | 국외(달러) |        |       |
|    | 상전이 물질을 이용한 고성능 수화열저감재(Hyper-HR) | 2020년도 | 140,778 | 0      | 10,778 |       |
| 합계 |                                  |        | 140,778 | 0      | 10,778 |       |

## [사회적 성과]

## □ 전문 연구 인력 양성

| 번호 | 분류   | 연도   | 현황(명) |    |    |    |    |   |     |     |     |     |    |
|----|------|------|-------|----|----|----|----|---|-----|-----|-----|-----|----|
|    |      |      | 학위별   |    |    |    | 성별 |   | 지역별 |     |     |     |    |
|    |      |      | 박사    | 석사 | 학사 | 기타 | 남  | 여 | 수도권 | 충청권 | 영남권 | 호남권 | 기타 |
| 1  | 인력양성 | 2021 | 1     | 0  | 0  | 0  | 1  | 0 | 0   | 1   | 0   | 0   | 1  |
| 2  | 인력양성 | 2022 | 2     | 1  | 0  | 0  | 3  | 0 | 0   | 3   | 0   | 0   | 3  |

## [그 밖의 성과]

### ○ 국제 네트워크 형성

- 본 과제를 통하여 일본의 큐슈대학교 및 다케모토유지 주식회사와의 관계가 더욱 강화되었음
- 또한, 대표적인 서중환경이라고 할 수 있는 동남아시아 베트남의 IBST, ICT 및 HUST와 새로운 네트워크를 형성함으로써 향후, 무기계 수화열 저감재의 사업화 기반을 마련할 수 있는 계기가 되었음

### ○ 사업화 기반 마련

- 현재 수출용에 적합하게 개발한 장기저장형 무기계 수화열 저감재를 베트남 현장에 적용하기를 원하는 기업과 협의를 진행 중임
- 무기계 수화열 저감재의 사업화에 대하여 더욱 적극적으로 추진할 예정이며, 향후 사업화 성과 도출 성공 시, 지속적으로 KAIA 국토교통 R&D 사업관리시스템에 등록할 예정

## (4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항

### ○ 사업화 성과

- 사업화 성과는 계획되지 않은 성과였으나, 본 과제를 적극적으로 수행하는 과정에서 파생된 성과로써 향후 사업화를 추진하는데 많은 기여를 할 것으로 예상함

### ○ 현장적용 성과

- 현장적용 성과는 계획되지 않은 성과였으나, 본 과제를 적극적으로 수행하는 과정에서 파생된 성과로써 향후 사업화를 추진하는 과정에서 우수한 근거자료로써 기여할 것으로 예상함

## 2) 목표 달성 수준

| 연구개발목표                                    | 달성내용                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 달성도(%) |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| ○ 무기계 상변환 소재의 내조해성 및 상변이 안정성 향상 기술 개발     | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 내조해성 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 6개월 이상 달성 (6개월)</li> </ul> </li> <li>○ 압축강도 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 40MPa 이상 달성 (41.9MPa)</li> </ul> </li> <li>○ 간이단열온도 상승량 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 70℃ 이하 달성 (57℃)</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 100    |
| ○ 상변환 소재를 활용한 장기저장형 콘크리트 수화열 저감재 생산 기술 개발 | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 슬럼프 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 120±25mm 이상 달성 (150mm)</li> </ul> </li> <li>○ 응결시간 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 초결 280min 이하 달성 (280min)</li> <li>- 종결 360min 이하 달성 (355min)</li> </ul> </li> <li>○ 압축강도 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 40MPa 이상 달성 (42.8MPa)</li> </ul> </li> <li>○ 간이단열온도 상승량 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 70℃ 이하 달성 (63℃)</li> </ul> </li> <li>○ 수화열 해석 및 결과 비교 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 유사도 90% 이상 달성 (92%)</li> </ul> </li> <li>○ 제품의 장기저장성능 평가 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 시제품 6개월 이상 달성 (6개월)</li> </ul> </li> <li>○ 제품의 생산성 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 50% 이상 향상 달성 (50%)</li> </ul> </li> </ul> | 100    |

## 4. 목표 미달 시 원인분석

### 1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

- 정량적 실적 일부 달성 미달
  - 정량적 실적 중, SCI 논문 1건 및 일자리 창출 1건을 달성하지 못하였음.
  - 코로나 19 사태로 일본 및 베트남의 국가 차원 실외활동 금지로 인하여, 서중환경에 대한 실험이 지연되었으며, 이로 인하여 실험 결과의 도출이 지연되고, SCI 논문 성과 1건의 도출이 지연되었음.
  - 코로나 19 사태로 공동연구기관인 (주)트라이포드의 회사 경영에 어려움이 발생하였으며, 이러한 어려움에도 불구하고 인재 채용을 위하여 노력하였으나, 회사의 조건에 부합하는 인재를 찾지 못하였음.

### 2) 자체 보완활동

---

○ 과제 종료 후 정량적 실적 달성을 위한 노력

- 과제가 종료되었지만, 현재 SCI 논문 성과 1건을 달성하기 위하여 투고를 준비하고 있는 관계로, 2022년 2월 이내에 SCI 저널에 투고할 수 있을 것으로 예상, 결과적으로 2022년에 SCI 논문 성과 1건을 달성할 계획임.

○ 양적 성과 지표에 대한 만회대책

- 현재 SCI 논문 성과 1건 및 일자리 창출 1건을 미달성한 상태이나, SCI 논문 성과 1건의 경우 본 연구 개발을 통하여 얻을 수 있었던 연구결과들을 기반으로 투고할 원고를 준비하고 있기 때문에, 2022년 내에 성과를 달성할 수 있을 것으로 판단.
  - 일자리 창출 1건은 코로나 19 사태 등으로 인해 미달성한 상태이나, 본 연구개발을 통하여 성능을 발전시킨 무기계 수화열 저감재의 수출 기반 마련 및 시장 개척 과정에서 일자리 창출을 도모할 것이며, 이러한 일련의 과정에서 도출된 성과들은 모두 KAIA에 등록함으로써 과제 기간 내에 미달성한 성과에 대한 만회를 계획하고 있는 상황임.
- 

### 3) 연구개발 과정의 성실성

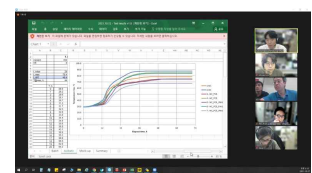
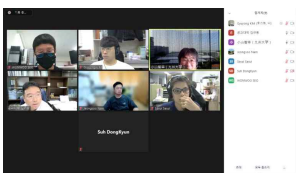
---

○ 장기저장성이 향상된 수화열 저감재를 개발하기 위한 노력

- 공동연구기관인 (주)트라이포드는 코로나 19 사태가 현재까지 지속되어 회사 경영에 어려움이 발생하였음에도 불구하고, 기존 생산라인을 일시중단하고 시제품 개발을 추진하는 등의 연구개발을 성공적으로 마무리하기 위하여 연구과제에 성실하게 임하였음.

○ 수출환경에 적합한 내조해성 향상 수화열 저감재의 성능평가를 수행하기 위한 노력

- 주관 및 공동연구기관은 본 연구를 통하여 개발한 내조해성 향상 수화열 저감재의 수출환경에 적합한지 검토하기 위하여, 국가 간의 대면 교류가 불가능한 상황에서도 온라인 미팅 등을 활용하여 국제 네트워크를 형성하고, 서중환경에 대한 수화열 저감재의 성능평가를 실시하는 등, 연구과제에 성실하게 임하였음.



---

## 5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

---

○ 기술적 측면

매스콘크리트 성능 개선에 기여

- 고로슬래그, 플라이애시 등은 다량 혼입에 따른 내구성 저하, 파이프 쿨링 공법 등은 별도의 시설과 공정이 필요하기 때문에 공사비가 증대되는 문제점이 있음
  - 내조해성 및 장기저장형 무기계 상변환 수화열 저감재 개발을 통해 별도의 시설 및 공정 없이 소량으로 기존 대비 경제적이고 우수한 매스콘크리트의 품질 확보 가능
-

---

## **무기계 상변환 수화열 저감재 품질 안정화 기술 선도**

- 조해성 개선을 통해 환경적 품질저하 요인을 최소화시키는 기술을 확보함으로써 국내·외 관련 분야 기술의 선도적인 역할이 가능

### **○ 경제적·산업적 측면**

#### **해외 건설시장 개척활동 활성화**

- 무기계 상변환 수화열 저감재 개발에 따른 매스콘크리트의 시공성 및 경제성 등과 같은 품질 개선이 가능하며, 이를 바탕으로 경쟁력을 강화하여 해외 수화열 저감재 시장에서 주도적인 시장 점유율 확대가 기대됨

#### **수화열 저감재 산업 활성화 촉진**

- 특히, 급격한 경제성장과 함께 건설시장이 활발한 신남방국가의 건설현장에 무기계 상변환 수화열 저감재를 선제적으로 도입하여 경제 및 산업적 측면에서 신남방정책에 기여할 수 있음
- 핵심기술의 국산화를 통해 산업 경쟁력을 향상시킴으로써 수화열 저감재 관련 산업의 선진화를 기대할 수 있음
- 개발 기술과 관련된 중소·중견기업을 육성하고 관련 산업에 있어서 기업 비즈니스 모델 창출지원이 가능할 것으로 예상됨

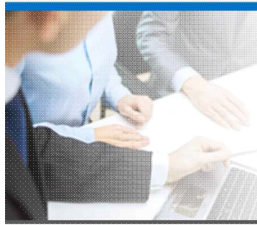
### **○ 사회적 측면**

#### **기술개발을 통한 고용창출 및 우수인재 발굴효과**

- 기술개발 활동으로 인한 연구개발인력의 직접적인 고용창출효과
- 기술개발에 따른 매출증대 및 기업성장에 따른 추가 우수인재 채용 가능성 확대
- 연계산업이 필요함에 따라 신규 일자리 창출에 대한 파급효과 발생 기대

### **○ 무기계 상변환 수화열 저감재 수출을 통한 글로벌 네트워크 강화**

- 터키, 카타르, 몽골, 베트남, 필리핀 및 캄보디아 등 매스콘크리트 수화열 저감 기술이 필요한 국가를 대상으로 개발기술의 홍보 및 영업을 통해 계약을 체결함으로써 글로벌 공급체인의 확대를 기대할 수 있음



- **매스콘크리트 성능 개선 기여**
  - 상변환소재 활용을 통한 매스콘크리트의 **내구성 개선 및 성능 발현**
  - 공기 단축, 매스콘크리트의 품질 확보
- **무기계 상변환소재 기반 수화열 저감재 기술 개발 촉진**
  - 상변환소재 고경화 및 고품제제화 기술 관련 분야의 **선도적 역할 수행**



- **해외 건설산업의 활성화**
  - 건설·토목 분야의 새로운 활로 개척을 통한 신규 매출 및 일자리 창출에 대한 **파급효과 발생 기대**
- **무기계 상변환소재 기반 수화열 저감재 수출을 통한 글로벌 네트워크 강화**
  - 글로벌 전문가와 국내 기업 연대를 통한 상품 경쟁력 확보
  - 기업 전문가의 글로벌 시장 확보 기회 확대



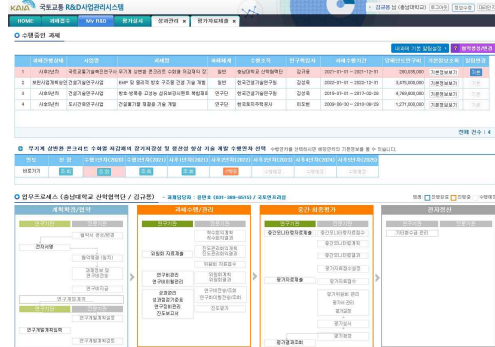
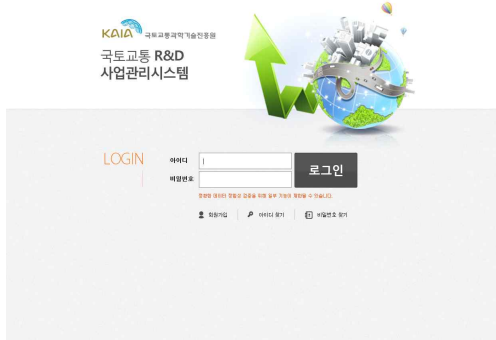
- **무기계 상변환소재 기반 수화열 저감재 기술 고도화**
  - 핵심 국산화, 전문 중소·중견기업 육성 가능
  - 고용창출, 글로벌 시장 점유율 대량 확보 기대  
(수화열 저감재 기술의 **선진화**를 통한 개발 선도국 발전 가능성 증대, 국가 경쟁력 확보)
- **수화열 저감재 산업 경쟁력 강화**
  - 중소·중견 기업 비즈니스 모델창출 지원



## 6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

### ○ 연구개발성과 관리

- 본 과제를 통하여 발생한 성과들은 보고서 자료 및 정량적 성과로써 KAIA 국토교통 R&D 사업관리시스템에 보관되고 있음
- 따라서 KAIA 국토교통 R&D 사업관리시스템을 적극적으로 활용할 계획이며, 향후 본 과제를 통하여 얻은 성과들을 기반으로 추가적인 성과가 도출될 경우, 유동적으로 성과등록을 실시하여 관리할 예정



### ○ 연구개발성과 활용 계획

#### ■ 매스콘크리트용 무기계 상변환 수화열 저감재 상용화 기반 구축

- 매스콘크리트 활용 증대로 인해 경제성이 높은 고성능의 수화열 저감재에 대한 수요 증가 예상
- 기존 수화열 저감재 대비 소량 첨가로 유사 수준의 수화열 저감 성능 확보가 가능하여 대단위 건설공사에 있어서 합리적인 재료로써 적용할 수 있음

#### ■ 장기저장 품질안정성 확보를 통한 국내·외 시장경쟁력 강화

- 기존 무기계 상변환 수화열 저감재의 경우 조해성으로 인해 장기저장 시 응고에 의한 품질저하 발생
- 내조해성을 향상시킴으로서 해외수출 시 발생할 수 있는 운송 및 현지 환경조건에 따른 품질의 불확실성을 해소하여 무기계 상변환 수화열 저감재의 인식제고 및 고품질의 제품 수출 가능 기대
- 선도적인 기술을 확보함으로써 관련 해외시장 점유 및 이에 따른 이윤창출을 계획

#### ■ 무기계 상변환 수화열 저감재 상용화 기술개발에 따른 관련분야 활성화

- 기존 수화열 저감 기술의 경우, 대부분 플라이 애쉬, 고로슬래그 등과 같은 혼화재 사용 또는 시멘트 조성물 조정, 타설 공법 및 파이프 쿨링 활용 등과 같은 분야에만 집중되어 있음
- 장기저장성 및 생상성이 향상된 무기계 상변환 수화열 저감재를 개발함으로써 고착화 되어 있는 수화열 저감재 기술 개발 분야의 활성화를 촉진할 수 있을 것으로 기대
- 시멘트 종류에 따른 수화열 저감 메커니즘 개선 및 시멘트콘크리트와의 반응상관성을 분석하여 보다 업그레이드된 신조성물 특허 도출 및 이를 활용한 추가 기능성 부가 신제품 출시 도모

#### ■ 기술개발을 통한 고용 창출 및 우수인재 발굴 효과

- 기술개발 활동으로 인한 연구개발인력 고용 창출 효과 및 매출 증대, 기업성장에 따른 우수인재 채용
- 장기보관성이 향상된 수화열 저감재 개발로 인하여 근무 환경 개선 및 업무 효율 증가
- 수화열 저감재의 품질에 대한 관심도 증가로 인하여 품질관리 신규 일자리 창출 기대

#### ■ 기타 활용 계획

- 무기계 상변환 수화열 저감재 활용 촉진을 위한 기술(제품) 표준화 및 규격화 자료로 활용 추진
- 적극적인 해외 판로 확보를 위해 국제 특허 출원 시 기반자료로 활용 계획

## 7. 참고 문헌

---

- 1) 한국도로공사 도로연구소. (1999). 매스콘크리트의 수화열에 의한 균열발생 여부에 관한 연구
- 2) Zhao, W., Su, Q., Han, F., & Wang, W. (2020). Study on the Heat of Hydration and Strength Development of Cast-In-Situ Foamed Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020.
- 3) 온정권. 시멘트 종류와 양생방법에 따른 매스콘크리트의 수화열 특성. 박사학위논문, 충남대학교, 2017, 17.
- 4) 쌍용양회공업주식회사(2009), 매스콘크리트 설계 가이드북, pp.14~26
- 5) Kim JK, Kim KH. Thermal Stress Analysis for the Heat of Hydration Considering Creep and Shrinkage Effects in Mass Concrete. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 1992 Jan;4(3):101-11.
- 6) Kim SC, Kang SH, Kim JK. Evaluation of Thermal Characteristics in Association with Cement Types in Massive Concrete Structure. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 1999 Jun;7(4):137-48.
- 7) Moon, HY, Chio YW. The Effect of Ground Granulated Blast-Furnace Slag on the Control of Temperature Rising in High Strength Concrete. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 1998 Jan;10(4):195-204.
- 8) Lee EB, Kim GY, Koo KM, Lee HJ, Kim YS, Nam JS. Early Age Properties of Hydration Heat and Autogenous Shrinkage of High-Strength Mass Concrete. *Journal of Architectural. Institute of Korea*. 2009 May;25(5):153-60
- 9) Gajada, J., and Vangeem, M. (2002) Controlling Temperatures in Mass Concrete. *Concrete International*, Vol. 24, No. 1, pp. 58-62
- 10) Paine, K. A., Dhir, R. K., & Zheng, L. (2006). Predicting early-age temperatures of blended-cement concrete. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials*, 159(4), 163-170.
- 11) 정철현, 박장호, & 이순환 (2000). 얼음과 냉각수를 이용한 콘크리트의 프리쿨링에 관한 연구. *콘크리트학회논문집*, 12(3), 95-102.
- 12) Raj, Piyus & Rai, Durgesh. (2018). Effect of Piped Water Cooling on Thermal Stress in Mass Concrete at Early Ages. *Journal of Engineering Mechanics*. 144.
- 13) 백동일, 김명식, 매스콘크리트의 수화열 저감을 위한 히트파이프의 현장적용성에 관한 연구, *한국콘크리트학회 논문집*, vol. 20, no 2(157-164). 2008.04
- 14) 콘크리트표준시방서(2003), 한국콘크리트학회.
- 15) Park, C.K., Lee, S.H., Kim, H.J., Kim, S.J., Lee, T.W. (2008) The Characteristics of Strength of Development and Hydration Heat on High Volume Fly-Ash Concrete. *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 1, pp. 417-420.

- 
- 16) Yum, C.S., Bae, W.M., Kim, M.S., Beak, D.I., and Kim, K.M. (2006) A Study on Field Applications of Hydration Heat Control in the Mass Concrete Using Oscillating Capillary Tube Heat Pipe. *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 18, No. 1, pp. 413-416.
  - 17) Seo, T.S., Lim, C.K., and Cho, Y.G. (2014) Experimental Study on Hydration Heat Control of Mass Concrete by Vertical Pipe Cooling Method. *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 26, No. 1, pp. 911-912.
  - 18) Hawlader, M.N.A., Uddin, M.S., and Khin, M.M. (2003) Microencapsulated PCM Thermal-energy Storage System. *Applied Energy*, Vol. 74, No. 1-2, pp. 195-202.
  - 19) Zalba, B., Marin, J.M., Cabeza, L.F., and Mehling, H. (2003) Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, No. 3, pp. 251-283
  - 20) Hunger, M., Entrop, A.G., Mandilaras, I., Brouwers, H.J.H., and Founti, M. (2009) The Behavior of Self-compacting Concrete Containing Micro-encapsulated Phase Change Materials. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, No. 10, pp. 731-743
  - 21) Meshgin, P., and Xi, Y. (2012) Effect of Phase-Change Materials on Properties of Concrete. *ACI Materials Journal*, Vol. 109, No. 1, pp. 71-80.
  - 22) Jayalath, A., San Nicolas, R., Sofi, M., Shanks, R., Ngo, T., Aye, L., and Mendis, P. (2016) Properties of Cementitious Mortar and Concrete Containing Microencapsulated Phase Change Materials. *Construction and Building Materials*, Vol. 120, pp. 408-417.
  - 23) 김용로, 정양희, 이도범, 길배수, 윤길호, 한승구, 잠열성 수화열 저감제를 사용한 저발열 콘크리트 개발에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 2006. 10
  - 24) 길배수, 水和熱制御材에 의한 매스 콘크리트 構造物의 溫度龜裂 低減에 關한 研究, 2012
  - 25) 대림산업(주), (주)트라이포드, 계룡건설산업(주), 스트론튬계 잠열재를 혼입한 프리믹스형 결합재를 이용하는 매스 콘크리트 구조물의 수화열 저감 및 온도균열 제어기술, 2007
  - 26) Hawes, D. W., Banu, D., & Feldman, D. (1989). Latent heat storage in concrete. *Solar energy materials*, 19(3-5), 335-348.
  - 27) Floros, M. C., Kaller, K. L., Poopalarn, K. D., & Narine, S. S. (2016). Lipid derived diamide phase change materials for high temperature thermal energy storage. *Solar Energy*, 139, 23-28.
  - 28) Agyenim, F., Eames, P., & Smyth, M. (2011). Experimental study on the melting and solidification behaviour of a medium temperature phase change storage material (Erythritol) system augmented with fins to power a LiBr/H<sub>2</sub>O absorption cooling system. *Renewable energy*, 36(1), 108-117.
  - 29) Aftab, W., Usman, A., Shi, J., Yuan, K., Qin, M., & Zou, R. (2021). Phase change material-integrated latent heat storage systems for sustainable energy solutions. *Energy & Environmental Science*, 14(8), 4268-4291.
  - 30) Kim, Y. R., Khil, B. S., Jang, S. J., Choi, W. C., & Yun, H. D. (2015). Effect of barium-based phase change material (PCM) to control the heat of hydration on the mechanical properties of mass concrete. *Thermochimica Acta*, 613, 100-107.
-

- 
- 31) Li, X., Zhou, Y., Nian, H., Ren, X., Dong, O., Hai, C., ... & Zeng, J. (2016). Phase change behavior of latent heat storage media based on calcium chloride hexahydrate composites containing strontium chloride hexahydrate and oxidation expandable graphite. *Applied Thermal Engineering*, 102, 38–44.
  - 32) 한상호, 이경희, 정성철, 김남호, 동양, 중앙, & 연구소. (1997). 규불화마그네슘에 의한 포틀랜드 시멘트의 수화 지연효과. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 34(2), 163–170.
  - 33) Prodjosantoso, A. K., Kennedy, B. J., & Hunter, B. A. (2002). Phase separation induced by hydration of the mixed Ca/Sr aluminates  $\text{Ca}_{3-x}\text{Sr}_x\text{Al}_2\text{O}_6$ : A crystallographic study. *Cement and concrete research*, 32(4), 647–655.
  - 34) REUTER, Hans; KAMAHA, Shouassi; ZERZOUF, Otmane. Hydrogen bonds in the crystal structure of strontium hydroxide octahydrate  $\text{Sr}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ . *Zeitschrift für Naturforschung B*, 2007, 62.2: 215–219.
  - 35) 장석준, 김병선, 김선웅, 박완신, & 윤현도. (2016). 상전이물질을 혼입한 시멘트 모르타르의 수화발열 및 강도 특성 평가. *콘크리트학회 논문집*, 28(6), 665–672.
  - 36) 남의현, 장석준, 김선웅, 박완신, & 윤현도. (2019). 상전이물질이 플라이애시 및 고로슬래그를 혼입한 모르타르의 수화발열에 미치는 영향. *한국구조물진단유지관리공학회 논문집*, 23(1), 1–8.
  - 37) 지상규, 장석준, 김지현, 박완신, & 윤현도. (2017). 상전이물질을 사용한 매스콘크리트의 수화열 특성. 2. *한국방재학회 논문집*, 17, 1–10.
  - 38) 서동균, 김규용, 길배수, & 남정수. (2020). 서중환경에서 스트론튬계 수화열저감재를 사용한 콘크리트의 수화발열특성 평가. *한국구조물진단유지관리공학회 논문집 (KSMI)*, 24(6), 189–196.
- 

## < 별첨 >

### 별첨 자료

1. 총 연구개발기간 성과점검기준표 및 증빙자료
  2. 세부 정량적 연구개발성과 증빙자료(총 연구개발기간 성과점검기준표 실적 증빙자료에 기 포함되어 있는 증빙자료 제외)
-

## 주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 ‘국토교통기술촉진연구사업’ 연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.