

에너지 절감형 천연점토 대체 건축용 레드머드 세라믹 제품 원천기술 개발 최종보고서

2020. 01. 28.

주관연구기관 / 우석대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

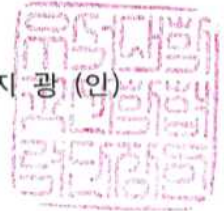
제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

'에너지 절감형 천연점토 대체 건축용 레드머드 세라믹 제품 원천기술 개발'(연구개발 기간 : 2018 .04 .17~ 2019 .12.31) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2020. 01. 28.

주관연구기관명 : 우석대학교 산학협력단 (대 표 자) 이 지 광 (인)



주관연구기관책임자: 강석표

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라
최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C14 2091-01	해당 단계 연구 기간	2018.04.17.~ 2019.12.31	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명	에너지 절감형 천연점토 대체 건축용 레드머드 세라믹 제품 원천기술 개발			
	세부과제명	-			
연구책임자	강석표	해당단계 참여연구원 수	총:12명 내부:12명	해당단계 연구비	정부:215,000천원 계:215,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 25명 내부: 25명	총 연구비	정부:365,000천원 계:365,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	우석대학교 산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음					
연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반과제				

9대 성과 등록 · 기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록 · 기 탁 번호	13	2									

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설 · 장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약	보고서 면수
□ 본 연구에서는 산업부산물 레드머드를 활용하여 600~1100℃의 저온 소성온도에서 구조적으로 안정한 천연점토 대체 에너지절감형 건축용 레드머드 세라믹 제품의 원천기술을 개발하였음. □ 천연점토 대체형 레드머드 세라믹 소재기술 [1차년도] – 강알칼리성의 산업부산물 레드머드를 산에 의하여 중화 전처리 개질한 후 천연 점토 대체재로 사용하여 구조적으로 안정한 소성체인 레드머드 세라믹 소재를 개발하였음. □ 에너지 절감형 건축용 레드머드 세라믹 제품기술 [2차년도] – 용점 강하제 및 미연탄소 산업부산물과 같은 소성 열효율 향상 보조재에 의한 900~1100℃의 소성온도 절감기술과 600~800℃의 알루미늄노실리케이트계 저온 소성 합성기술에 의한 에너지 절감형 건축용 레드머드 세라믹 제품을 개발하였음.	90page

요약문

연구의 목적 및 내용	산업부산물 레드머드를 활용하여 600~1100℃의 저온 소성온도에서 구조적으로 안정한 천연점토 대체 에너지절감형 건축용 레드머드 세라믹 제품의 원천기술을 개발하고자 함. ☐ 천연점토 대체형 레드머드 세라믹 소재기술 개발 - 레드머드 전처리 기술 및 환경성 평가 - 소성온도에 따른 레드머드 소성체의 기초물성 평가 - 천연점토 대체 레드머드 세라믹 최적배합도출 - 천연점토 대체 레드머드 세라믹 소재의 백화저감 및 억제기술 ☐ 에너지 절감형 건축용 레드머드 세라믹 제품기술 개발 - 전처리 개질에 의한 융점 강하제의 소성 온도 절감 기술 - 미연탄소 산업부산물을 활용한 소성 온도 절감 기술 - 알루미늄 실리케이트계 레드머드 세라믹의 저온 소성 합성기술 - 건축용 레드머드 세라믹 제품 적용 및 성능평가				
연구개발성과	☐ 천연점토 대체형 레드머드 세라믹 소재기술 ☐ 에너지 절감형 건축용 레드머드 세라믹 제품기술				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	☐ 레드머드를 재활용 자원으로 사용하기 위한 기초자료로의 활용 ☐ 에너지 절감형 건축 세라믹 제조 기술로 활용 ☐ 건축용 세라믹에서의 천연자원 절약 기술로 활용 ☐ 온실가스 저감기술에 기여 ☐ 산업부산물의 업사이클링(Up-cycling) 기술 개발 촉진에 기여 ☐ 국내 알루미늄/알루미늄 산업의 국제경쟁력 강화 ☐ 소성에너지 절감에 의한 경제적 효과 ☐ 천연자원의 절감 및 산업부산물 자원화 효과				
국문핵심어 (5개 이내)	레드머드	점토	세라믹	저온소성	에너지절감
영문핵심어 (5개 이내)	red mud	clay	ceramic	low temperature cofired	energy saving

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	1
가. 연구개발의 필요성	1
나. 연구개발 대상의 국내외 현황	2
다. 연구개발의 중요성	5
2. 연구수행내용 및 성과	8
가. 연구개발 추진 전략 및 방법	8
나. 연구개발 추진체계 및 일정	9
다. 연구개발 내용	11
(1) 레드머드의 특성 분석 및 친환경 전처리 기술	11
(2) 레드머드 세라믹의 백화저감 및 억제기술	22
(3) 천연점토 대체형 레드머드 세라믹 제조기술	35
(4) 천연점토 대체형 레드머드 세라믹의 소성에너지 절감기술	47
(5) 레드머드 세라믹의 색채 및 감성평가	59
라. 연구개발 성과	77
(1) 특허	77
(2) SCI 및 일반학술지 게재	77
(3) 학술대회 논문	77
마. 연구결과	78
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	79
가. 목표	79
나. 목표 달성여부	80
다. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구)	81
4. 연구개발성과의 활용계획	82
가. 추가연구의 필요성	82
나. 활용계획	84
붙임. 참고 문헌	86

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발의 필요성

□ 기후변화 및 자원수급 문제해결을 위한 재활용 건축소재 개발의 필요성

미래창조과학부의 미래전략보고서(2015)에 의하면 세계적으로 기후변화의 가속화와 원자재채굴의 한계에 따른 자원수급의 불안정성을 예상하고 있음.

- 기후변화 문제는 제조산업에서 배출하는 온실가스량과 밀접한 관계가 있음.
- 국내 천연자원이 고갈되어 감에 따라 천연광물을 대체 원료의 확보가 시급함.
- 자원순환기본법(2018.1.1. 시행)의 제정 등의 국가 정책적 노력이 진행됨.
- 산업부산물의 재활용 현황은 국가산업 경쟁력의 척도가 되고 있음.

□ 천연점토 대체 및 가성비 향상 레드머드 세라믹 소재기술 개발

레드머드는 알루미늄의 제조과정에서 발생하는 부산물로서 국내에서 연간 28만톤이 발생되고 있지만 그 활용은 10%에 그치고 있음. 천연점토와 유사한 화학적 조성을 가지고 있어 건설용 세라믹 소재로 사용하면 대량 재활용이 가능한 부산물임.

- 천연점토를 대체하기 위한 레드머드의 전처리 기술 개발
- 레드머드 세라믹 소재의 기초성능 및 환경성 평가
- 가용성 염류 제어를 통한 레드머드 백화저감 기술 개발

□ 고효율 에너지 절감형 건축용 레드머드 세라믹 제품기술 개발

고온소결은 세라믹 제조 과정에서 대량의 에너지를 소비하는 공정이며, 세계적인 에너지 문제의 관점에서 에너지 절감형 건축용 세라믹 제품 제조기술이 필요함.

- 미연탄소 함유 발전소 부산물을 활용한 소성온도 저감 기술
- 전처리 과정에서 생성되는 Na_2SO_4 (융점 강하제)을 활용한 소성온도 저감 기술
- 알루미늄 실리케이트계 레드머드 세라믹 제조를 통한 저온소성 합성기술
- 건축용 레드머드 세라믹 제품 활용성을 위한 기초성능, 색채 및 감성평가

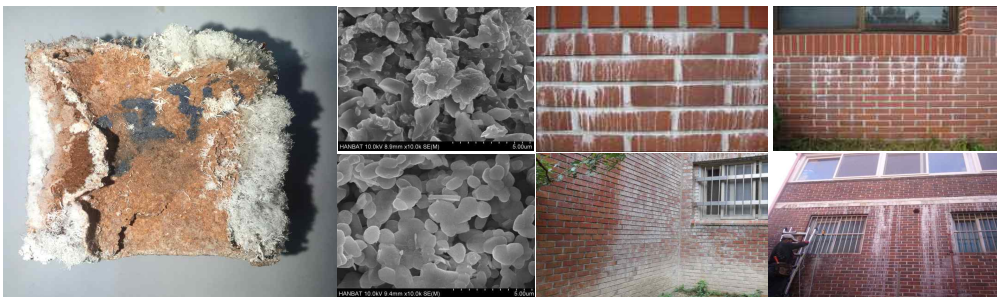


[그림] 연구개발의 개요

나. 연구개발 대상의 국내외 현황

(1) 국내 현황

- 산업부산물을 활용한 건축용 세라믹 제조기술
 - ○○연구원에서는 고령토를 무연탄 석탄회로 대체하는 기술을 개발.
 - 국내 벽돌 수요량을 바탕으로 고령토 50%를 무연탄 석탄회로 대체할 경우 무연탄 석탄회를 연간 24만톤 재활용할 수 있는 가능성을 검토하였음.
- 저에너지 고단열 점토벽돌의 제조
 - 벽돌생산 업체 A사와 ○○대학의 산학협력연구로서 저온소성한 기공성 점토벽돌에 대한 구조적 성능, 내후성과 및 동결융해에 대한 저항성능을 분석하였음.
 - 저온소성을 통해 건축구조재료로서의 기능을 만족하는 벽돌을 생산할 수 있었으며, 기공성 증가효과를 통해 단열성을 확보하여 적용된 건축물의 운용상에서 에너지 절감효과를 가질 수 있는 것으로 분석함.
- 레드머드를 중금속 제거제로서 재활용
 - ○○대학교를 비롯한 2~3개 연구팀에 의해 중금속 폐수처리를 위한 응집제 개발에 관한 연구가 진행되었음.
 - ○○공단 기술연구소에서는 비소와 중금속으로 오염된 토양의 정화에 있어 산업부산물인 제강슬래그와 레드머드 활용가능성을 평가한 결과 제강슬래그와 레드머드 등의 산업부산물을 이용한 토양 중 오염물질의 원위치 안정화 가능성을 확인하였음.
- 레드머드를 알칼리 활성화 시멘트 촉진제로 재활용
 - ○○대학교에서는 레드머드를 알칼리활성화 시멘트의 촉진제로서 연구 검토한 결과 레드머드의 강알칼리성으로 인하여 10%이내의 범위에서는 활용가능 할 것으로 제시함.
 - 레드머드 첨가율의 증가에 따라서 10~1000nm의 모세관 공극이 증가하여 흡수율이 높아지고 내구성이 저하함과 더불어 백화발생이 급격히 진행되는 것으로 발표함.
- 레드머드를 보통 포틀랜드 시멘트의 안료로서 재활용
 - 2000년대 후반 ○○대학교에서는 레드머드를 친환경 칼라콘크리트의 안료로 적용한 결과 단위시멘트량에 대하여 15%내외로 사용하게 되면 기존 산화철 피그먼트를 사용한 것과 비교하여 월등히 우수한 디자인 특성을 지닌 것으로 발표함.



[그림] 레드머드의 건설자재 활용 장애요인(백화)

(2) 국외 현황

■ 산업부산물인 레드머드의 재활용 용도

- 호주, 캐나다, 자메이카, 인도 등 보오크사이트 생산이 많은 국가나 이를 수입하여 수산화알루미늄 및 알루미나를 제조하는 국가에서 레드머드에 대한 재활용 연구는 활발하게 이루어져 왔음.
- 레드머드 재활용 기술은 레드머드에 함유되어 있는 스칸듐 등 희귀원소의 회수연구, 전자재활용기술, 도료의 안료 및 콘크리트 원료로의 활용기술, 플라스틱의 필러 및 촉매로의 활용기술, 흡착제로 이용한 산업폐수 슬러리에 대한 연구 등이 있음.
- 최근에는 러시아 ARRICT(All-Russian Research Institute of Chemical Technology)의 V.A. Pegano v등은 BP 부산물을 100% 재활용하기 위한 종합적 무폐기 기술개발을 추진하고 있음.

■ 레드머드의 세라믹 유약 적용에 관한 연구

- 터키에서 레드머드를 세라믹 유약으로 재활용하는 연구가 진행됨.
- 주성분이 적철광(α -Fe₂O₃)과 규산 알루미늄 규산염 수화물 (Na₂O, Al₂O₃, SiO₂, H₂O)인 레드머드를 사용하였고 표면특성과 유약의 화학적 강도 및 내마모성을 실험적으로 조사하였으며, 유약의 제조 시에 레드머드를 37wt%까지 첨가 가능하다는 것을 밝혔음.

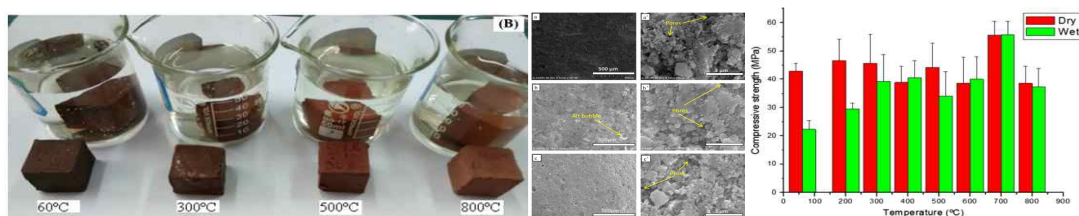
■ 천연점토 대체 레드머드를 활용한 저온소성 건축 세라믹 제조에 관한 연구

- 스페인에서 레드머드를 세라믹 제품의 바인더로 활용함으로써 레드머드의 재사용량을 증가시키려는 노력이 진행됨.
- 세라믹 기반재료로 사용되는 점토를 대체하는 연구를 진행하였으며, 천연점토에 대한 레드머드의 최적 치환율은 50%이고 소성온도는 950℃에서 소요의 목표성능을 만족할 수 있는 것으로 확인함.

■ 레드머드 지오폴리머 적용에 관련 연구

- 중국에서 800℃ 이하의 저온소성환경에서 레드머드 지오폴리머 제조에 관한 연구를 진행하였으며, 압축강도 40MPa를 발현하는 것을 확인하였고 700℃까지 소성할 경우 압축강도 55MPa까지 상승하는 결과를 얻었음.
- 레드머드에 함유된 2Na₂SiO₃(규산나트륨)이 지오폴리머 반응에 필요한 NaOH를 대체할 수 있어 레드머드 지오폴리머 제조의 가능성을 확인하였음.

※레드머드 지오폴리머의 제조 및 역학적 성능



[출처] Lemounga, P. N., Wang, K. T., Tang, Q., & Cui, X. M. (2017). Synthesis and characterization of low temperature (< 800° C) ceramics from red mud geopolymer precursor. Construction and Building Materials, 131, 564-573.

(3) 기술개발 성숙도

본 연구의 최종목표는 레드머드 및 발전소 폐기물 등의 산업부산물을 재활용하여 천연점토 대체 및 저온소성이 가능한 세라믹 소재기술 개발을 통해 에너지 절감형 건축 세라믹 제품을 개발하고, 이를 실험실 환경에서 구현 및 성능평가를 하고자 함.

구분		연구 착수	연구 종료	단계별 설명	
기초연구 단계	TRL 1	☐	☐	TRL 1	이론적 연구단계
	TRL 2	☐	☐	TRL 2	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☒	☐	TRL 3	실험적 증명 단계
	TRL 4	☐	☒	TRL 4	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☐	☐	TRL 5	유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	☐	TRL 6	유사환경 기술시험 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	☐	TRL 7	실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	☐	☐	TRL 8	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	☐	TRL 9	현장적용/사업화 단계

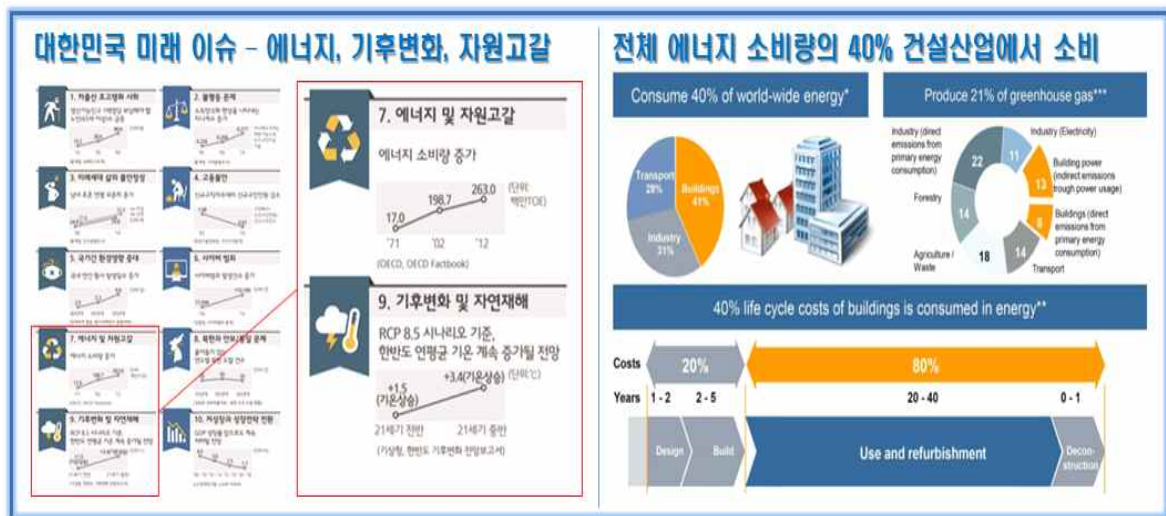
최종성과물	기술성숙도		설정근거
	유형	단계	
천연점토 대체 세라믹 소재기술	재료 자재	TRL 3	본 연구의 최종 성과물 중 하나인 천연점토 대체 건축 세라믹 소재는 천연점토를 대체 가능한 보크사이트 잔재물 및 산업부산물을 소성하여 세라믹 소재로 적용하기 위한 요소기술로 실험실 환경에서 기초기술을 확보하고자 하는 실험적 연구를 수행한 최종 결과물임. ☐ 주요 성과물 - 보크사이트 잔재물 및 산업부산물의 천연점토 대체 배합기술 - 천연점토 대체 보크사이트 잔재물의 세라믹 성형기술 - 천연점토 대체 보크사이트 잔재물의 세라믹 소성기술 - 천연점토 대체 세라믹 소재의 소성에 따른 색채평가 기술 - 천연점토 대체 세라믹 소재의 백화저감 및 억제 기술
에너지 절감형 천연점토 대체 건축 세라믹 제품 적용기술	재료 자재	TRL 4	본 연구의 최종 성과물 중 하나인 에너지 절감형 천연점토 대체 건축 세라믹 소재 적용기술은 1차년도에 확보되어진 천연점토 대체 건축 세라믹 소재를 적용하는 기술로서 저온소성하여 에너지를 절감하고 이를 건축 세라믹 소재인 벽돌 및 타일에 적용하고 이에 실험적 연구를 본격적으로 수행한 최종 결과물임. ☐ 주요 성과물 - 바텀애시를 활용한 세라믹 소재의 저온소성기술 - 에너지 절감형 천연점토 대체 세라믹의 건축 제품 적용기술 - 천연점토 대체 건축 세라믹 제품 성능평가 및 친환경 성능평가 - 천연점토 대체 건축 세라믹 제품의 유지관리 기술

다. 연구개발의 중요성

□ 건설산업에서 에너지 절감형 소재기술 개발의 중요성

건설산업은 대규모의 자원이 투입되며, 건축물의 생애주기에서 많은 자원과 에너지를 소비하기 때문에 온실가스 배출 저감을 위한 소재기술 개발이 필요함.

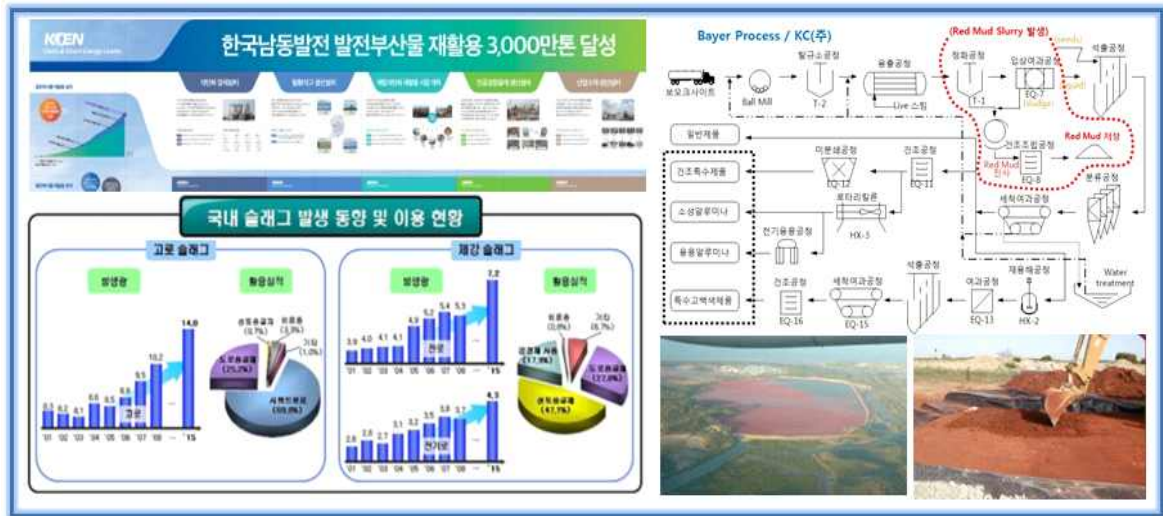
- 전 세계적으로 모든 에너지의 41%가 건축물에서 소비되고 있으며, 온실가스의 21%가 건축물에서 발생하고 있음.
- 건축물 건설단계에서 20%의 비용이 발생되고 운영단계에서는 80%의 비용이 발생되며, 이 비용 중 40%는 에너지로 소비되고 있는 상황임.
- 건축물 운용단계의 에너지 절감은 고단열 및 재생에너지 활용을 통해 고려되고 있으나, 생산단계의 에너지 소비에 대해서는 상대적으로 관심이 적음.



□ 건설산업의 부산물 확대이용과 업사이클링(up-cycling) 기술 개발의 중요성

건설산업에서 재활용 되는 산업부산물은 대부분 철강산업과 전력산업부산물에 국한 되고 있으며, 부산물의 활용은 저품질의 인식이 있어 부산물의 확대이용을 위한 미활용 자원의 재이용과 재활용되는 부산물의 업사이클링 기술 개발이 요구됨.

- 「자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률」에 따라 철강산업부산물과 석탄재는 지정부산물로 분류되어 건설산업에서 각각 95%, 75% 재활용 되고 있음.
- 알루미늄 산업제조 과정에서 발생하는 부산물인 레드머드는 국내에서 연간 28만톤이 발생되고 있지만 그 활용은 10%에 그치고 있음.
- 산업 폐기물의 단순재사용이나 원료사용이 아닌 사용자의 요구수준을 만족시킬 수 있는 산업부산물의 업사이클링 기술개발이 중요함.



□ 천연점토 대체 가성비 향상 레드머드 세라믹 소재기술 개발의 중요성

건축용 세라믹의 원료는 천연점토이며 천연자원이 고갈되어 감에 따라 천연광물 대체 원료 확보가 시급하며, 폐기물 관련 법률에 따라 레드머드 처리방법의 모색이 필요함.

- 레드머드는 주성분이 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 이며, 주로 석영(Quartz)상으로 구성되어 있어, 점토를 대체할 수 있는 적합한 산업부산물임.
- 레드머드는 천연점토와 유사한 색깔·질감을 구현이 가능하므로, 전처리 과정을 통해 고감성 세라믹 소재로 업사이클링이 가능함.
- 현재 레드머드의 폐기비용은 8.5만원/톤으로 원가절감에 크게 기여할 수 있으며 가성비 향상 세라믹 점토 소재로 활용이 가능함.



점토벽돌과 같은 건축용 세라믹은 소성과정(약 1200℃)에서 단위 개체 당 약 2.0kWh의 에너지 소요와 약 0.41kg의 이산화탄소가 배출됨.

- ### 건축세라믹의 전통적 제조방법



발생량 CO₂ 배출량 (kg/kg) (2010년 기준)

제품명	발생량 (kg/kg)	배출량 (kg/kg)
벽돌	100	100
지붕	100	100
벽돌	100	100
지붕	100	100
벽돌	100	100
지붕	100	100

온도

1200℃
1100℃
800℃
600℃

다양한 색채 구현 기술

소성 온도 절감 기술

저온 소성 합성 기술

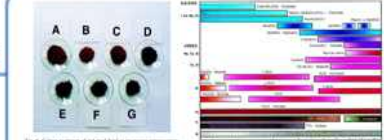
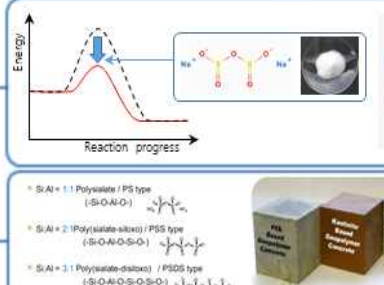


Fig. 4. Color variation of red and black color during sintering process (a) 1000°C, (b) 1100°C, (c) 1200°C, (d) 1300°C, (e) 1400°C, (f) 1500°C, (g) 1600°C.



Energy

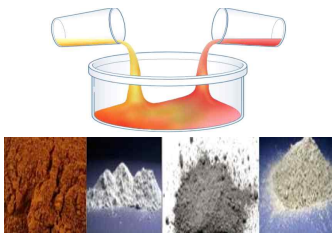
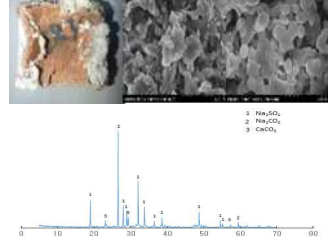
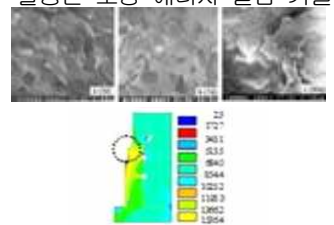
Reaction progress

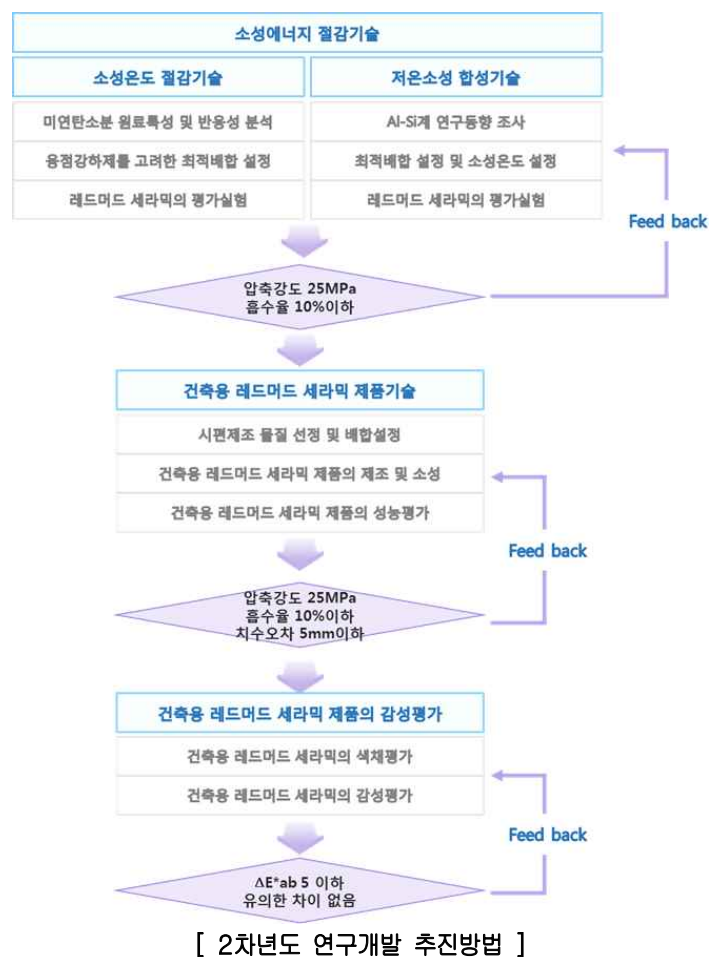
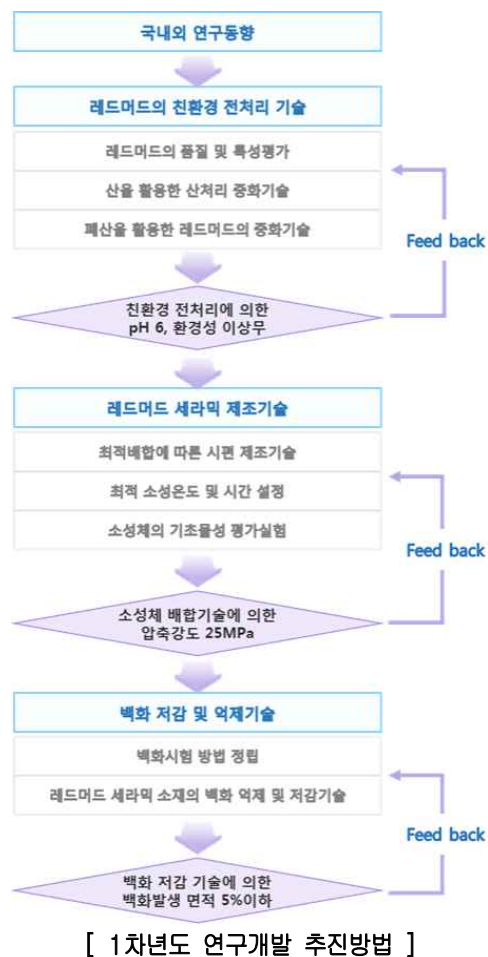
Na⁺ O²⁻ P⁵⁺ O²⁻ S⁶⁺ O²⁻ Na⁺

 - Si:Al = 1:1 Poly(silicate / PS type) -(Si-O-Al-O)-
 - Si:Al = 2:1 Poly(silicate-silicate) / PSS type $\text{-(Si-O-Al-O-Si-O)-}$
 - Si:Al = 3:1 Poly(silicate-dioxido) / PSDS type $\text{-(Si-O-Al-O-Si-O-Si-O)-}$

2. 연구수행내용 및 성과

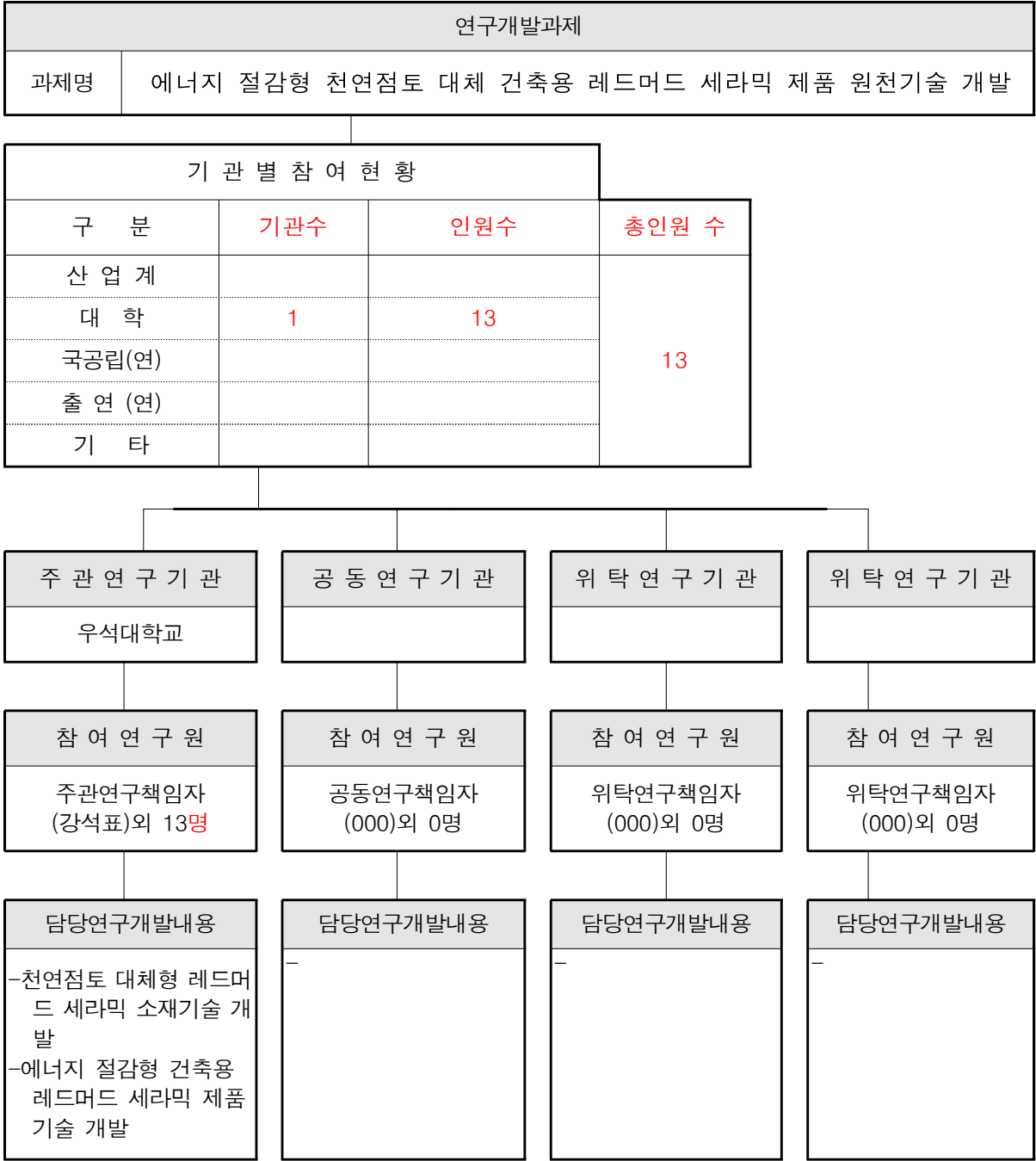
가. 연구개발 추진 전략 및 방법

최종 목표 및 성과물의 설정근거			
천연점토 대체형 레드머드 세라믹 소재기술 [1차년도]	1. 레드머드의 전처리 기술 	2. 천연점토 대체 레드머드 세라믹의 최적배합 	3. 레드머드 세라믹 소재의 백화억제 및 저감기술 
	1. 용점강화제 및 미연탄소를 활용한 소성 에너지 절감 기술 	2. 건축용 레드머드 세라믹의 제품 적용기술 	3. 건축 세라믹 제품의 평가기술 



나. 연구개발 추진체계 및 일정

(1) 연구개발 추진체계



(2) 연구개발 추진일정

구분	연구과제명 (연구 수행기관)	관련 성과목표/지표			세부추진내용 (연구수행 Activity)	Activity별 산출물	소요 연구비 (백만원)	1차년도				2차년도			
		핵심성과	단위성과	질적 성과지표				1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
총괄															
주관	천연점 토대 체형 레드머드 세라믹 소재기술 개발	A	A-1	A-1-①	국내외 연구동향	기술현황	5								
					레드머드 전처리 기술	전처리기술	10								
				A-1-②	환경성 평가	분석결과	10								
			A-2	A-2-①	소성체 배합기술	배합기술	15								
					소성 시간 및 온도	소성기술	15								
				A-2-②	소성체 평가기술	평가기술	10								
			A-3	A-3-①	백화 시험방법 정립	시험방법	5								
					백화 메커니즘 규명	메커니즘	10								
					레드머드 산처리 개질	개질	5								
				A-3-②	백화저감 배합기술	배합기술	15								
					백화저감 양생방법	양생방법	10								
	에너지 절감형 건축용 레드머드 세라믹 제품기술	B	B-1	B-1-①	융점강하제 소결특성	매커니즘	5								
					미연탄소분 산업부산물 분석	분석결과	10								
					미연탄소분 활용 메커니즘	메커니즘	10								
					미연탄소분 배합기술	배합기술	20								
					소성온도 저감기술	온도저감기술	20								
				B-1-②	Al-Si계 현황조사	기술현황	5								
					Al-Si계 합성가능 산업부산물 분석	분석결과	10								
					Al-Si계 합성 레드머드 메커니즘	메커니즘	10								
					Al-Si계 합성 레드머드 배합기술	배합기술	15								
					Al-Si계 합성 온도 저감 기술	비소성기술	15								
			B-1-③	세라믹 평가기술 현황조사	현황	5									
					세라믹 평가기술	평가결과	10								
			B-2	B-2-①	건축세라믹제품 평가기술	평가기술	10								
				B-2-②	치수안정성	평가결과	5								
				B-2-③	압축강도	평가결과	5								
				B-2-④	흡수율	평가결과	5								
			B-3	B-3-①	자료조사	기술현황	5								
					육안비색법	색차분석	10								
					색채계산법	계산식	10								
				B-3-②	자료조사	기술현황	5								
					만족도 평가	통계자료	10								
					감성평가분석	통계자료	10								
					기존기술 비교	비교표	10								

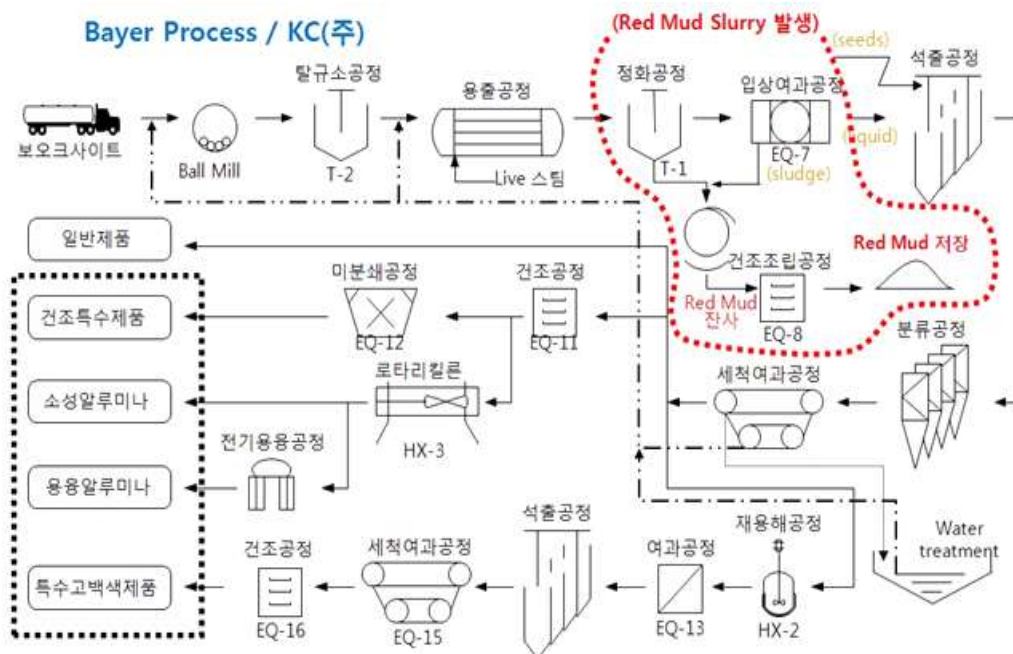
다. 연구개발 내용

(1) 레드머드의 특성 분석 및 친환경 전처리 기술

(가) 레드머드의 특성 분석

① 레드머드의 제조 활용 처리현황

- 레드머드는 보오크사이트로부터 수산화알루미늄/알루미나($\text{Al}(\text{OH})_3/\text{Al}_2\text{O}_3$) 제조과정에서 발생하는 산업부산물임. 제조공정인 베이어프로세스 특성 상 Al_2O_3 1톤을 생산하면 대략 2톤의 레드머드(주성분인 Fe_2O_3 로 하여 적색을 나타내며 레드머드(Red Mud), 적니(赤泥)등 다양한 명칭으로 불림)가 발생되고 있으며, 국내에서는 연간 약 30만톤이 발생되고 있음.
- 레드머드의 처리현황은 아래의 <표>과 같이 75% 이상이 매립되고 있으며, 재활용율은 15% 이하로 국내 전체 사업장폐기물의 재활용율 83.5%와 비교하여 재활용율이 매우 낮은 산업부산물임.



<그림> 레드머드의 발생공정

〈표〉 레드머드의 처리현황 (국내)

구 분	Pond 저장	매립	해양투기	2차가공	제품화
처리량 (Ton)	100,000	450,000	190,200	90,000	2,320
비 율 (%)	12.0	54.1	22.8	10.8	0.2



〈그림〉 레드머드의 발생상황 (국내)

② 레드머드의 로트별 분기별 품질 특성 평가 및 분석

㉞ 실험계획 및 방법

- 레드머드 슬러지의 로트별 분기별 특성 평가를 위하여 발생하는 전남 영월군 케이씨(주)에서 2018년 7월~2019년 4월 까지 총 4차례에 걸쳐 레드머드를 채취하였음.

〈표〉 실험요인 및 수준

구분	차수	채취일자 및 장소	평가항목
레드머드-1	1차	2018. 7. 13 / 케이씨(주)	• 함수율 • 성분분석(XRF) • 입형분석(SEM)
레드머드-2	2차	2018. 10 11 / 케이씨(주)	
레드머드-3	3차	2019. 1. 5 / 케이씨(주)	
레드머드-4	4차	2019. 4. 10 / 케이씨(주)	

㉟ 실험결과 및 분석

1) 레드머드 슬러지의 형태

- 레드머드 슬러지는 붉은 색을 띄고 있으며 형태는 점토질과 같은 머드형태로 원활하게 채취가 가능하였음. 레드머드 슬러지를 채취한 7월 13일, 10월 11일, 1월 5일, 4월 10일의 형태는 육안으로 관찰하였을 때 모두 같은 형태와 색상을 나타내고 있었음.

2) 레드머드 슬러지의 함수율 결과 및 분석

- 함수율 측정방법은 월별 채취 시료를 1,000g씩 계량하여 건조로에서 절건상태가 될 때까지 건조하여 건조 후 무게를 측정하였음.
- 함수율은 $100 - (\text{건조 전 무게} / \text{건조 후 무게}) \times 100$ 으로 계산하였음.
- 레드머드 슬러지의 함수율은 1년간 50.2~50.6%(오차범위 $\pm 2\%$)로 나타났으며, 레드머드 슬러지는 평균 함수율 50.4%로 채취시기에 관계없이 거의 동등하게 나타났음.

〈표〉 레드머드 슬러지의 함수율 결과

기호 (월/일)	레드머드-1 (7/13)	레드머드-2 (10/11)	레드머드-3 (1/5)	레드머드-4 (4/10)
건조전 무게(g)	1,000	1,000	1,000	1,000
건조후 성상				
건조후 무게(g)	494	497	495	498
함수율 (%)	50.6	50.3	50.5	50.2

3) 레드머드 슬러지의 성분분석(XRF)결과

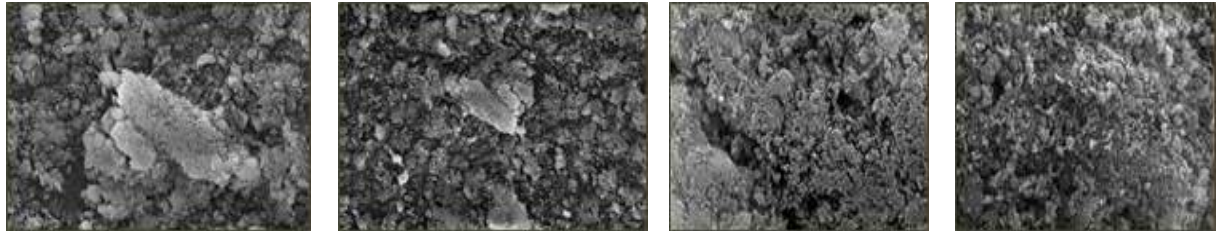
- 레드머드 슬러지의 Na_2O 성분은 9.0~10.5%로 나타났으며, 이는 알루미늄 추출공정에서 추출액으로 사용하는 가성소다(NaOH)로 인한 것으로 판단됨. 또한, 붉은색을 발현하게 하는 Fe_2O_3 성분은 평균 21.6~23.4%로 나타났음. 레드머드 슬러지는 1년간 발생하는 기간별 화학성분 차이는 거의 없는 것으로 나타났음.

〈표〉 레드머드 슬러지의 성분분석(XRF)결과

기호(월)	화 학 성 분 (wt.%)								밀도
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	
레드머드-1 (7月)	38.8	19.0	21.6	2.7	0.2	0.0	10.5	0.4	2.0
레드머드-2 (10月)	37.8	15.0	23.6	3.4	0.2	0.0	9.0	0.4	2.0
레드머드-3 (1月)	38.7	15.4	22.7	4.0	0.2	0.0	10.4	0.4	2.0
레드머드-4 (4月)	39.1	15.1	23.4	3.4	0.2	0.0	10.2	0.4	2.0
평균	38.8	16.1	22.8	3.4	0.2	0.0	10.0	0.4	2.0

4) 레드머드 슬러지의 입형분석(SEM)

- 레드머드 슬러지는 내부에 포집된 수분에 의한 응집상태의 입자를 포함하여 대체로 둥근형태의 입형으로 나타났으며, 레드머드 슬러지는 채취일자와 관계없이 대부분 유사한 입형구조를 나타내고 있어 로트나 계절별 영향은 미미한 것으로 판단됨.



(a) 레드머드-1 (7/13) (b) 레드머드-2 (10/11) (c) 레드머드-3 (1/5) (d) 레드머드-4 (4/10)

〈그림〉 월별 레드머드 샘플의 입형분석(SEM_×3,000배율)

③ 레드머드 슬러지의 환경성 평가 (중금속용출량)

- ‘토양환경보전법 시행규칙 [별표 3]’ 과 함께 시험결과를 <표>에 나타내었음. 6가 크롬을 포함한 대부분의 중금속은 불검출로 나타났으며, 토양오염 우려기준의 낮은 기준의 1지역에 모두만족하는 결과를 나타내었음.

〈표〉 토양오염우려기준(제1조의5 관련)

No	물질	토양오염우려기준 (제1조의5 관련) (mg/kg)			시험결과 (mg/kg)
		1지역	2지역	3지역	
1	카드뮴	4	10	60	2.99
2	구리	150	500	2000	불검출
3	비소	25	50	200	15.3
4	수은	4	10	20	불검출
5	납	200	400	700	불검출
6	6가크롬	5	15	40	불검출
7	아연	300	600	2000	11.4
8	니켈	100	200	500	19.7
9	불소	400	400	800	불검출
10	유기인화합물	10	10	30	불검출
11	폴리클로리네이티드비페닐	1	4	12	불검출
12	시안	2	2	120	불검출
13	페놀	4	4	20	1.62
14	벤젠	1	1	3	불검출
15	톨루엔	20	20	60	불검출
16	에틸벤젠	50	50	340	불검출
17	크릴렌	15	15	45	불검출
18	석유계총탄화수소(TPH)	500	800	2000	76
19	트리클로로에틸렌(TCE)	8	8	40	불검출
20	테트라클로로에틸렌(PCE)	4	4	25	불검출
21	벤조(a)피렌	0.7	2	7	불검출
22	1,2-디클로로에탄	5	7	70	불검출

(나) 레드머드의 친환경 전처리 기술

① 산종류에 의한 pH저감 전처리 기술

㉞ 실험계획 및 방법

1) 실험계획

- 본 연구에서는 LRM 첨가시 저하되는 시멘트의 압축강도를 개선하기 위하여 pH 11~12 인 LRM을 질산 및 황산으로 중화하여 pH를 7~8로 조절하고자 하였음.
- 이를 위하여 중화에 필요한 이론적인 물비를 계산하였고, 계산된 물비에 대하여 일정량 첨가하면서 적정량을 검토하였음

〈표〉 실험계획

Type of acid	I.D. of LRM*	Mix design of Cement paste		Test items
		Content LRM (%)	W/C (%)	
-	LRM	0, 1, 5, 10, 20	30	Compressive strength (1, 3, 7, 28days)
Nirtic acid	Neu-N			
Sulfuric acid	Neu-S			

*LRM : Liquefied Red Mud

2) 사용재료

□ 액상화 레드머드

- 액상화 레드머드는 Kang ang Kang(2018)의 연구에서 제시된 방법으로 제조하였음.



(a) 레드머드슬러지



(b) 호모믹서



(c) 분산 및 액상화



(d) 액상화 레드머드

〈그림〉 액상화 레드머드 제조과정

- 화학적 조성은 Na_2O 가 19.5 %, Al_2O_3 가 25.3 %, SiO_2 가 17.6 %, Fe_2O_3 가 28.2 %이고 함수율은 48.7 % 이며, pH는 11.4 으로 나타남.
- LRM의 평균입경은 $3.15 \mu\text{m}$ 로 최초 발생하는 레드머드 슬러지의 평균입경 $4.31 \mu\text{m}$ 와 비교하여 작은 입자를 나타냈음.

〈표〉 액상화 레드머드의 물리 화학적 특성

Type of binder	Moisture content (%)	pH	Chemical composition (%)						
			Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
LRM	48	11.4	19.5	17.6	25.3	28.2	2.12	0.0904	0.305

☐ 질산 및 황산

- LRM을 중화하기 위한 질산은 농도가 60 %인 시약급(삼천순약공업(주), Extra pure, Korea)을 사용하였고, 황산은 농도가 95 %인 시약급(대전화금(주), Korea)을 사용하였음.

☐ 시멘트

- 시멘트 페이스트의 압축강도 시험을 위해 사용한 시멘트는 국내 S사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였음.

3) 실험방법

☐ 액상화 레드머드의 중화

- LRM 100g을 중화하는데 필요한 질산의 이론적인 첨가량은 0.328mol이었고 농도 60%를 고려한 질산의 첨가량은 34.5g으로 계산되었음.
- 한편 황산의 이론적인 첨가량은 0.164mol이었고 농도 95%를 고려한 황산의 첨가량은 16.9g으로 계산되었음
- Na₂O의 존재형태가 LRM에서 모두 Na⁺ 이온 형태로 존재하지 않고 일부가 Si, Al 등과 함께 결합되어 불용성으로 존재하기 때문에 첨가량은 이론적으로 계산된 양보다 적은 것으로 예상하였음.
- 중화 LRM의 제조를 위하여 질산 및 황산을 이론적으로 계산된 첨가량 대비 20, 25, 30, 35, 40, 50% 첨가하여 제조하였음.

☐ 시멘트 페이스트의 압축강도

- 질산 및 황산 중화 LRM을 첨가한 시멘트 페이스트의 압축강도 특성을 KS F 2476에 의거하여 채령 1, 3, 7 및 28일 측정하였고, 그 결과를 Plain 및 LRM 첨가 시험체와 비교 검토하였음.

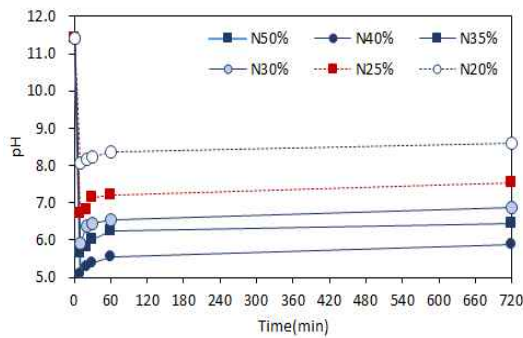
㊤ 실험결과 및 분석

1) 적정 첨가량 도출

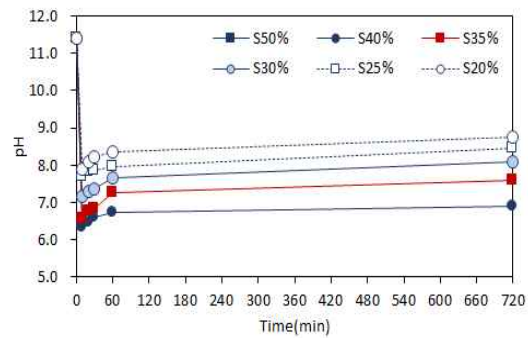
- LRM에 질산 및 황산을 첨가한 직후 pH는 급격히 낮아지고 일정 시간 경과 후 증가하여 60분부터 12시간까지 pH가 일정하게 유지되어 안정화되는 경향을 나타내며, 적정 첨가량은 질산 및 황산 첨가 후 12시간에 pH가 7~8을 유지하는 첨가량으로 선정하였음.
- 질산의 경우 적정 첨가량을 선정하기 위해 설정했던 12시간 후의 pH 7~8을 만족하는 질

산 첨가량은 이론 첨가량의 25%인 N25%로 나타남.

- 황산의 경우 적정 첨가량을 선정하기 위해 설정했던 12시간 후의 pH 7~8을 만족하는 황산 첨가량은 이론 첨가량의 35%인 S35%로 나타남.
- 산을 활용하여 레드머드 중화시 물에 산을 희석하여 약산으로 제조하여 사용하고 운반, 저장, 취급시 안전조치에 따라 취급하도록 하여야함.
- 제조된 중화 레드머드는 pH를 확인하고 사용하도록 하며 이후 토양오염공정시험, 폐기물공정시험 등과 같은 환경성 시험을 통해 환경안전성을 검토하도록 하여야함.



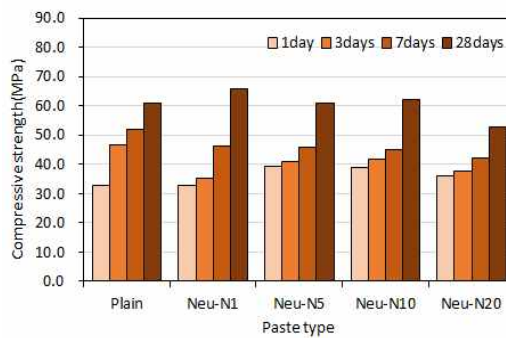
(a) Nirtic acid



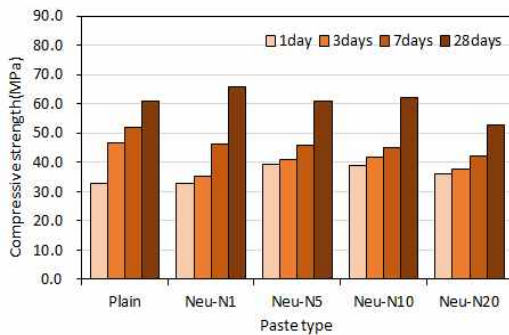
(b) Sulfuric acid

<그림> pH change according to the acidity

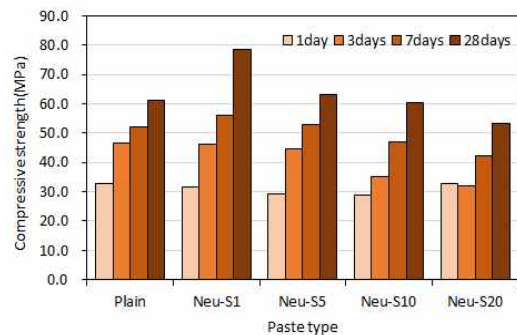
2) 시멘트 페이스트의 압축강도 특성



(a) Nirtic acid



(b) Neu-N



(c) Neu-S

<그림> 액상화 레드머드 페이스트의 압축강도

- LRM을 첨가한 시멘트 페이스트의 압축강도는 재령 28일에 Plain의 61.0MPa과 비교하여 첨가량이 증가할수록 강도는 감소하여 34.0~52.9MPa을 나타내고 있음.
- 질산 중화 LRM을 첨가한 시멘트 페이스트의 압축강도는 재령 28일 Plain 61.0MPa과 비교하여 비슷한 경향을 나타냈으며, 압축강도는 52.9~65.4MPa을 나타내 첨가량이 증가할수록 큰 변화가 나타나고 있지 않음.
- 황산 중화 LRM을 첨가한 시멘트 페이스트의 압축강도는 재령 28일 Plain의 61.0MPa과 비교하여 약 30%까지 높게 나타났으며 압축강도는 53.2~78.6MPa로 측정되어 황산 중화 LRM의 경우 1% 및 5%를 첨가할 경우 Plain 보다 높은 압축강도를 나타냄.

② 산업부산물을 활용한 레드머드의 반건조 전처리 기술

㉞ 실험계획 및 방법

1) 실험계획

- Non-heat treatment red mud powder(NTRM)은 레드머드슬러지 50%, 제지애시 35% 및 고칼슘 플라이애시 15%로 구성됨. 레드머드 슬러지, 제지애시와 고칼슘 플라이애시를 실험용 아스팔트 믹서를 이용해 4분간 혼합하였음.
- 제조된 NTRM 의 특징을 확인하기 위해 함수율, 입자크기, XRF 및 XRD을 분석하였음. 함수율은 혼합이 완료된 시점으로부터 2, 12, 24, 48, 72, 96 및 120시간의 경과시점에서 측정되었음.

〈표〉 실험계획

Materials	Proportion(wt%)	Mixing	Measured parameters
Red mud sludge	50	Asphalt mixer 4minutes	Water contents
Paper sludge ash	35		Particle size
High-calcium fly ash	15		XRF XDR

2) 사용재료

- 레드머드는 함수율 50%, 점도 10,000cP이며, 주요 산화물인 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 및 Na_2O 가 전체 구성의 87% 이상을 차지하고 있음.
- 제지애시는 주로 석회석을 첨가제로 사용하고 있기 때문에 Al_2O_3 , SiO_2 , CaO 가 전체 조성의 50% 이상을 차지하고 있음. CaO 의 함량이 전체의 59.70%이고, 주요산화물인 Al_2O_3 , SiO_2 및 CaO 함량은 86.53%을 나타냄.
- 고칼슘 플라이애시는 제지애시와 같이 주요산화물은 Al_2O_3 , SiO_2 , CaO 이고 CaO 가 차지하는 비율이 전체구성의 41.20%을 차지하고 있음.

〈표〉 반건조 레드머드 화학적 특성

Element oxides	Content(mass%)		
	Red mud	Paper sludge ash	High calcium fly ash
SiO ₂	38.80	17.00	26.70
Al ₂ O ₃	16.10	9.83	13.10
Fe ₂ O ₃	22.80	6.77	8.71
MgO	0.20	4.05	4.40
Na ₂ O	10.00		
CaO	3.40	59.70	41.20
TiO ₂	2.40	0.39	
SO ₃	0.24	1.80	5.28

3) 실험방법

a) 압축강도

- 40x40x160mm의 시험체를 20±2° C의 조건에서 1, 3, 7, 28일간 경화 후 압축강도를 AS TM C 349로 평가하였음.

b) 기공분포

- 기공분포와 누적기공률을 추정하기 위하여 수은압입법 MIP(autopore IV 9500; micromeritics, Norcross, GA, USA)를 사용하였음.

c) 흡수 계수

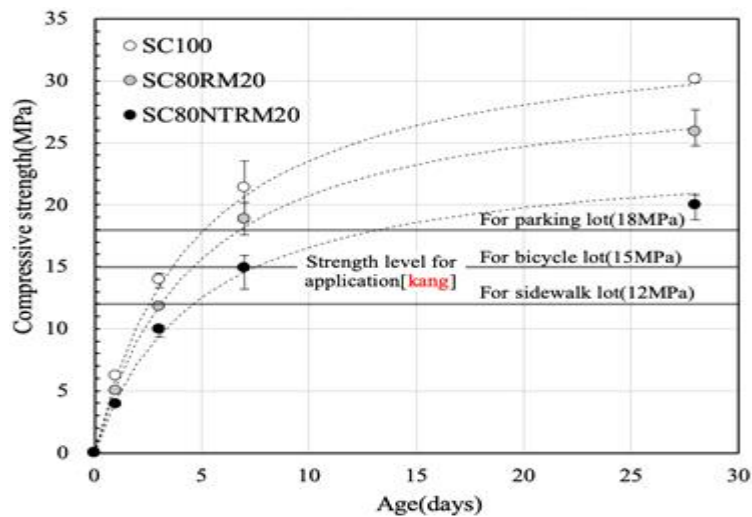
- 흡수 계수는 KS F 2609에 의하여 평가하였음.

㉡ 실험결과 및 분석

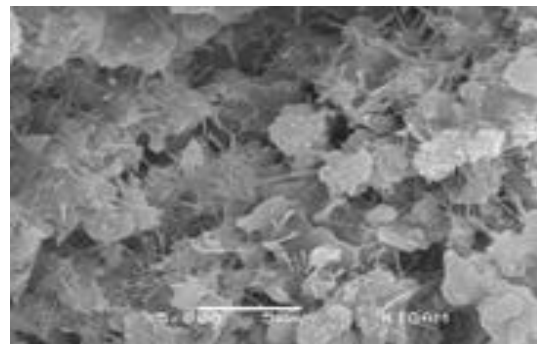
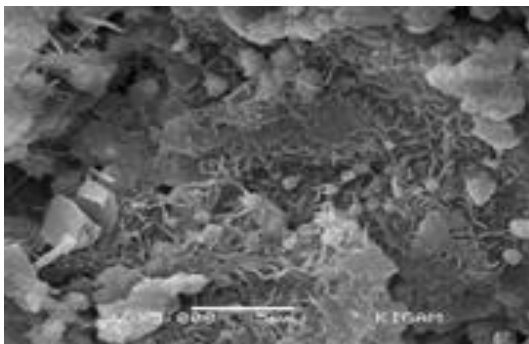
1) 압축강도

- 모든 재령에서 모르타르 시험체의 압축강도는 SC100이 가장 높고 SC80NTRM20이 가장 낮게 나타났음. 1일에서의 압축강도는 SC100이 6.26MPa, SC80RM20이 5.02MPa, SC80NTRM20이 3.95 MPa로 측정된 반면, SC100, SC80RM20 및 SC80NTRM20의 28일 압축강도는 각각 30.14, 25.91 및 19.98MPa로 재령이 증가함에 따라 압축강도의 차이도 커지는 경향이 나타났음.
- D.V.Riberio et al 의 연구에서는 레드머드의 첨가량이 증가할수록 밀도 및 압축강도가 상승한다고 보고하고 있는 것과 매우 다른 결과임. 이와 같은 차이는 D.V.Riberio et al 의 연구에서 사용한 Red mud보다 이 연구에서 사용한 레드머드는 상대적으로 큰 입자가 많이 있기 때문에 압축강도의 상승이 될 수 있을 만큼의 공극을 충전하지 못한 것으로 판단됨.
- Yuan Yao et al.의 연구에 의하면 레드머드와 석탄폐석, 플라이 애시, OPC를 혼합한 바인더 기반의 모르타르는 장기재령에서 포졸란반응에 의해 OPC 모르타르 보다 높은 압축강

도를 얻을 수 있는 것으로 보고되고 있음. 본 연구에서 사용한 제지애시와 고칼슘 플라이애시는 다량의 CaO를 포함하고 있어 수화반응에 의한 압축강도의 상승을 기대할 수 있을 것으로 생각되지만, 이미 제지애시와 고칼슘 플라이애시에 포함되어 있는 CaO는 NTRM의 제조과정에서 레드머드 슬러지의 수분과 반응하여 Potlandite가 생성됨으로써 모르타르의 강도발현에는 영향을 미치지 못하는 것으로 생각됨.



〈그림〉 압축강도 측정결과



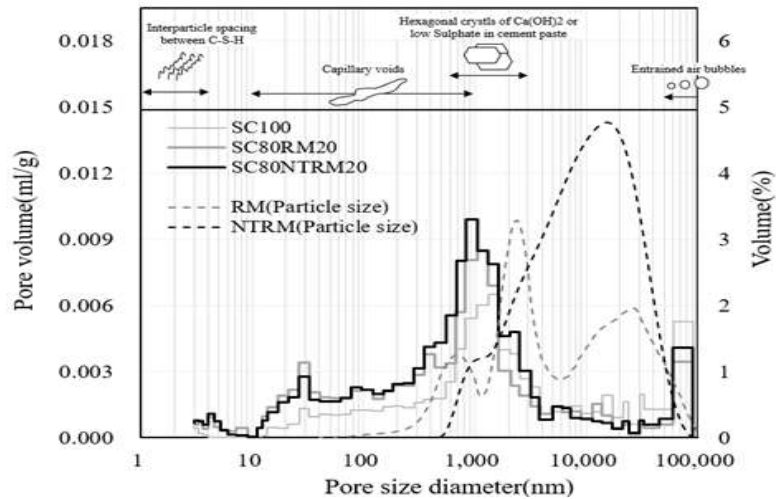
〈그림〉 1일 압축강도의 SEM사진

2) 기공분포

- 기공특성은 전체 기공률과 기공분포를 측정하였음. SC100, SC80RM20 및 SC80NTRM20의 기공률은 각각 17.16, 20.78 및 22.66%로 측정되었음. 레드머드가 포함된 SC80RM20과 SC80NTRM20의 기공률은 SC100의 기공률보다 3~5% 정도 높았으며, 그 중 SC80NTRM20의 기공률이 가장 높은 것으로 확인되었음.
- 작은 크기의 모세관 공극에 해당하는 10~100nm 공극의 분포는 SC80RM20이 가장 많고 SC100이 가장 적었음.
- 비교적 큰 모세관 공극에 해당하는 1,000nm 공극은 SC80NTRM20 이 가장 많았고 역시 SC100이 가장 적었음. 50nm이상의 공극의 분포는 SC80NTRM20 > SC80RM20 > SC100의

순서로 나타났으며, 이는 모르타르의 압축강도 시험결과의 영향과 높은 연관성을 찾을 수 있음.

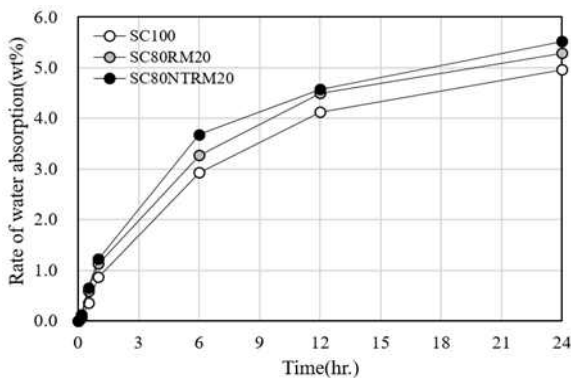
- 1000~10,000nm의 범위에서는 SC80RM20의 공극량이 가장 적게 나타났음. RM은 1000~10000nm 크기의 입자가 많이 있기 때문에 이 입자가 공극을 채워주는 효과(filling effect)에 의한 것으로 생각할 수 있으며, SC80NTRM20 시험체에서도 입도의 분포가 가장 큰 10,000~100,000nm의 구간에서 공극의 양이 가장 적은 것을 확인할 수 있었음.



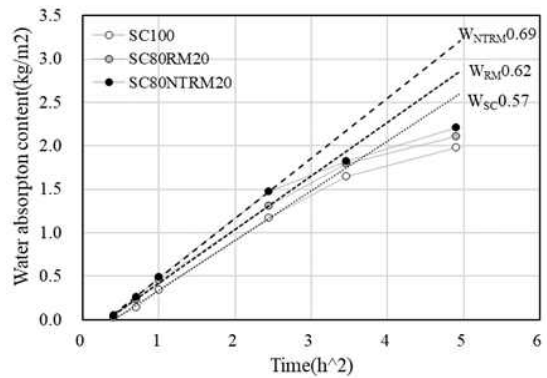
〈그림〉 기공분포

3) 흡수 계수

- SC100, SC80RM20 및 SC80NTRM20의 흡수계수는 각각 0.57, 0.62 및 0.69로 레드머드를 치환한 시험체에서 슬래그시멘트만을 사용한 모르타르 시험체보다 흡수계수가 높았고, RM을 치환한 모르타르 시험체보다 NTRM 을 치환한 모르타르 시험체가 흡수계수가 높았음.
- 공극은 수화물의 간극의 공간과 물의 공간으로 구분되며 큰 공극이 다수 포함될 경우 강도와 더불어 내구성에도 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있음. 따라서, RM과 NTRM 을 건설재료로 사용하기 위해서는 내구성에 대한 검토가 필요할 것으로 판단됨.



〈그림〉 모르타르의 흡수율 측정결과



〈그림〉 모르타르의 흡수 계수

(2) 레드머드 세라믹의 백화저감 및 억제기술

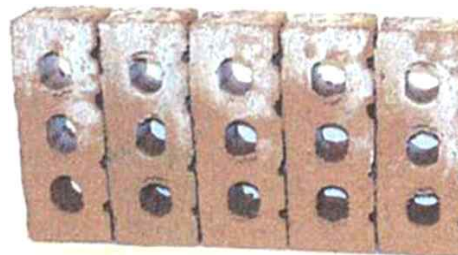
(가) 백화시험방법 조사 및 정립

① ASTM C 67

- ASTM C 67 : 2008 Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile 에서는 <그림>와 같이 제품을 직접 물과 접촉시켜 강제로 백화성분을 용해시켰음.
- 시멘트 경화체 표면에 백화를 발생시킨 다음 석출된 백화를 회수하여 그 성분과 발생량을 검토하는 방법인 Wick test법을 준용하고 있음.



a) 시험편



b) 시험결과

<그림> ASTM C 67의 백화 시험방법

② AS/NZS 4456.6

- 조적조 또는 포장재의 백화 가능성을 측정하기 위하여 호주에서 개발된 방법으로 <그림>에 나타난 바와 같이 시편의 한쪽편을 증류수에 7일간 침지(침지 깊이:25mm)한 후 건조하여 백화를 육안으로 관찰하였음.
- 증류수 대신에 염류(Na_2SO_4 와 KCl을 1:1로 혼합)를 녹인 용액(농도 0.1%, 1%, 10%)을 사용하기도 하였음. 시험 후 <표>에 따라 결과를 백화 발생 정도에 따라 5가지로 보고하도록 규정하고 있음.



a) 1% salt solution after 18hr



b) 10% salt solution after 3 days

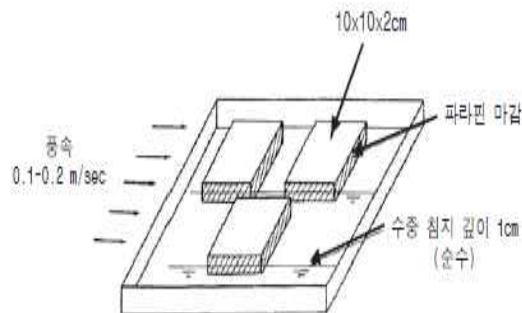
<그림> AS/NZS 4456.6 Test

〈표〉 AS/NZS 4456.6 백화 시험결과 보고

구분	정의
Nil	백화 발생하지 않음
Slight	시험편 각 표면의 염류 석출 면적이 10% 미만
Moderate	시험편 염류 석출 면적이 한쪽 표면의 10% 이상이지만, 전체면적의 50% 미만인 경우
Heavy	염류 석출 면적이 시험편 전체 면적의 50% 이상인 경우
Severe	시험편 표면에 가루가 동반된 백화

③ 일본건재시험센터 방법

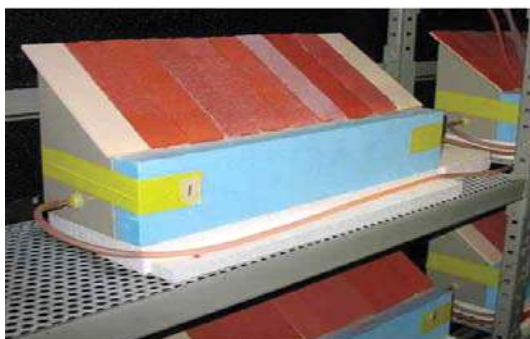
- 1980년대 초반 일본 건재시험센터에서 개발한 시멘트계 재료의 백화시험방법으로 온도 7℃ 습도 50% 조건에서 7일간 침지한 후 건조하여 백화 발생여부를 관찰하였음.



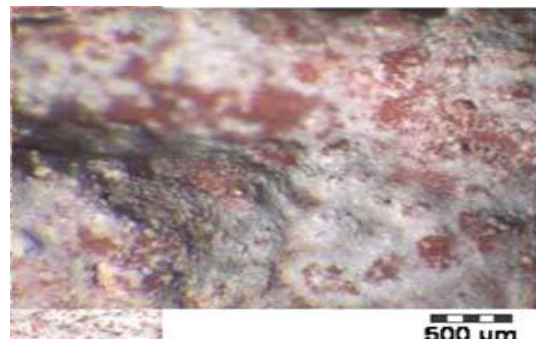
〈그림〉 건재시험센터 시험방법

④ Elotex Lab Test 방법

- 스위스 혼화재료 회사인 Elotex사가 1차 백화 가능성을 측정하기 위하여 개발한 방법임. 모르타르를 혼합한 후 즉시 다공질 타일위에 바르고, 20℃ 물이 하부에 순환하도록 설계한 시험장치 위에 설치함. 이와 같은 시험장치는 온도 7℃ 상대습도 80% 조건의 항온항습실에 놓고 백화 발생 여부를 관찰함.



a) Test apparatus



b) 시험결과

〈그림〉 Elotex Lab Test

(나) 백화 메커니즘 규명

① 실험계획 및 방법

㉞ 모르타르 배합

- 모르타르 배합은 <표>에 나타난 바와 같이 보통 포틀랜드 시멘트 및 슬래그시멘트를 결합재로 하여 W/B 75%, B:S 1:3으로 모르타르를 제작하였음. 또한 액상 레드머드는 보통 포틀랜드 시멘트 및 슬래그시멘트에 대하여 중량비로 0, 5, 10, 20, 30% 대체하였음.

<표> 실험계획

구분		결합재(%)		B:S	W/B (%)	측정항목
		시멘트	액상 레드머드			
보통포틀랜드 시멘트 (C)	CR0	100	0	1:3	75	•압축강도 •백화시험 •흡수율
	CR5	95	5	1:3	75	
	CR10	90	10	1:3	75	
	CR20	80	20	1:3	75	
	CR30	70	30	1:3	75	
슬래그시멘트 (SC)	SCR0	100	0	1:3	75	
	SCR5	95	5	1:3	75	
	SCR10	90	10	1:3	75	
	SCR20	80	20	1:3	75	
	SCR30	70	30	1:3	75	

㉟ 사용재료

1) 결합재

- 결합재 중 보통 포틀랜드 시멘트는 국내 S사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였음. 슬래그 시멘트는 국내 C사에서 시제품으로 제조되어진 고로슬래그 미분말의 주요 자극제로서 탈황석고를 사용하는 산업부산물만으로 제조된 클링커프리 시멘트를 사용하였음.

<표> 결합재의 물리 화학적 특성

구분	평균입경 (cm ² /g)	밀도 (g/cm ³)	lg. loss	화학조성비 (%)					
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
보통 포틀랜드 시멘트 (OPC)	3,144	3.15	1.32	21.7	5.7	3.2	63.1	2.8	2.2
슬래그 시멘트 (SC)	4,058	2.83	2.23	22.1	8.9	1.4	54.9	3.3	5.2

2) 골재

- 레드머드 세라믹의 백화 메커니즘 규명을 검토하기 위해 사용한 잔골재는 KS L 679에서 품질규정하고 있는 ISO 표준사를 사용하였음.

3) 레드머드 촉진제

- 레드머드 세라믹의 백화 메커니즘 규명을 검토하기 위해 사용한 레드머드는 고형분 51.6%, 단위용적질량 $1,570\text{kg/cm}^3$, 평균입경 $3.15\mu\text{m}$, 점도 7,850cP인 액상 레드머드를 사용하였음.

㊤ 실험방법

1) 압축강도

- 레드머드 세라믹의 백화 메커니즘 규명을 검토하기 위한 방법으로 압축강도 시험은 실험계획에 제시된 모르타르 배합을 KS L ISO 679 「시멘트의 강도시험방법」에 준하여 시험체 제작 후 각 양생조건에서 재령 28일에 측정하였음.

2) 백화시험

- 레드머드 세라믹의 백화 메커니즘 규명을 검토하기 위한 방법으로 백화시험은 일본 건재시험센터에서 개발한 「시멘트계 재료의 백화시험 방법(日本, JTCCM)」에 준하여 실시하였음.
- 백화발생 면적은 백화 촉진 항온항습기에서 14일 침지 후 백화발생 정도를 사진 촬영하고 ‘페인트넷’ 프로그램으로 백화발생 면적을 산출하여 정량화하였음. 백화 등급은 정량화된 백화발생 면적을 <표>에 나타난 바와 같이 백화 발생 면적에 따라 5등급으로 구분하였음. 또한 백화발생에 따른 시험체 중량 감소율은 백화가 발생한 시험체의 중량을 측정하고 백화생성 물질을 브러쉬로 제거한 후 시험체만의 중량을 측정함으로써 백화 중량 감소율을 계산하였음.
- 제거한 백화 생성물질은 보통 포틀랜드 시멘트 및 슬래그시멘트로 분류하여 채취한 후 SEM, EDS 및 XRD 분석을 실시하였음.

<표> 백화 발생 면적비율별 백화등급

백화등급	백화 발생 면적비율
I	발생 없음
II	10%미만
III	10%~30%미만
IV	30%~50% 미만
V	50% 이상



(a) 백화발생



(b) 화상처리 후



(c) 백화 제거 후

<그림> 백화발생 평가

3) 흡수계수

- 물 흡수량 m 을 y축으로, 그리고 실용적 측면을 고려하여 시간 t 의 x축을 $t^{1/2}$ 로 나타내면 물 흡수량과 시간과의 관계를 1차원 직선으로 표시할 수 있음.

$$m = w \cdot t^{1/2}$$

m (kg/m^2) : Water absorption weight by unit area

t (h) : Water absorption time

w ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$) : Water absorption coefficient

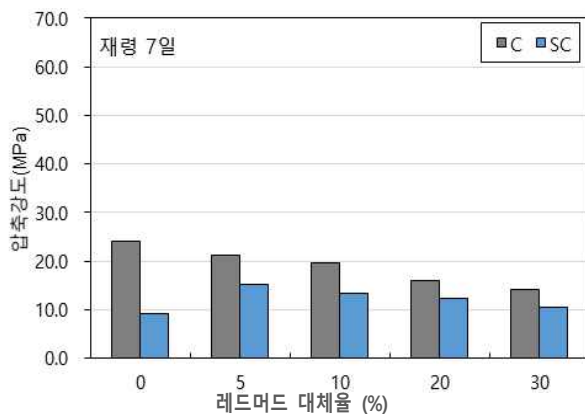
4) 용출 시험

- 레드머드 세라믹의 백화 메커니즘 규명을 검토하기 위한 방법으로 용출시험은 촉진 백화 시험 전과 후 시험체를 파쇄하여 1.25~1.50mm의 분말을 선별하여 ICP분석으로 정량 측정하였음.

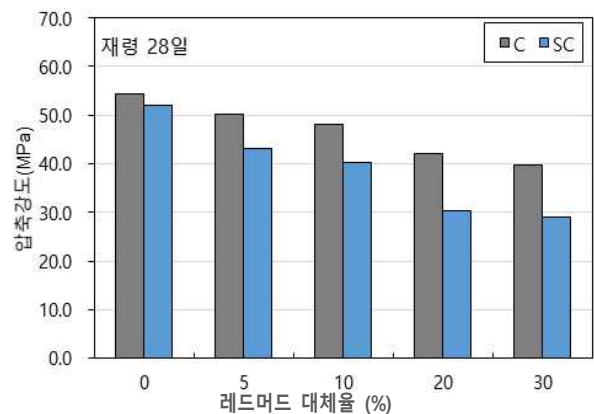
② 실험결과 및 분석

㉞ 압축강도

- 재령 7일 압축강도 측정결과 보통 포틀랜드 시멘트를 결합재로 사용한 경우 레드머드 대체율 0%인 CR0에서 24.0MPa, 5%인 CR5에서 21.1MPa, 10%인 CR10에서 19.6MPa, 20%인 CR20에서 16.0MPa, 30%인 CR30에서 14.1MPa를 나타내었음.



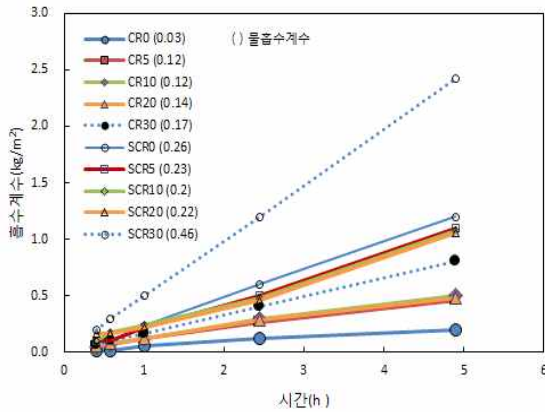
<그림> 재령 7일 압축강도 측정결과



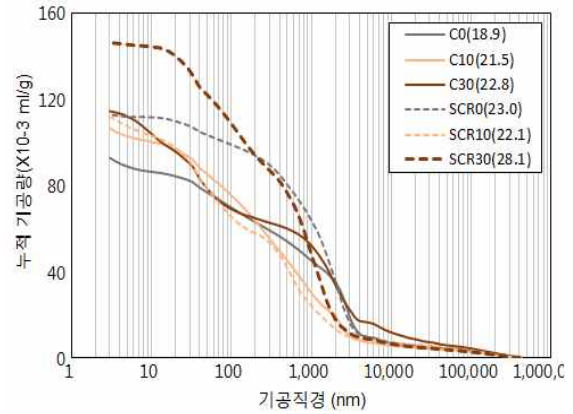
<그림> 재령 28일 압축강도 측정결과

㉔ 물 흡수계수 및 기공특성

- 보통 포틀랜드 시멘트를 결합재로 사용한 경우 레드머드 대체율 0%인 CR0에서 0.03%, 5%인 CR5에서 0.12%, 10%인 CR10에서 0.12%, 20%인 CR20에서 0.14%, 30%인 CR30에서 0.17%를 나타내었음.
- 레드머드 대체율에 따른 모르타르의 기공량은 결합재 종류에 관계없이 동일하게 레드머드 대체율이 증가할수록 기공량이 증가 하는 것으로 나타났음.



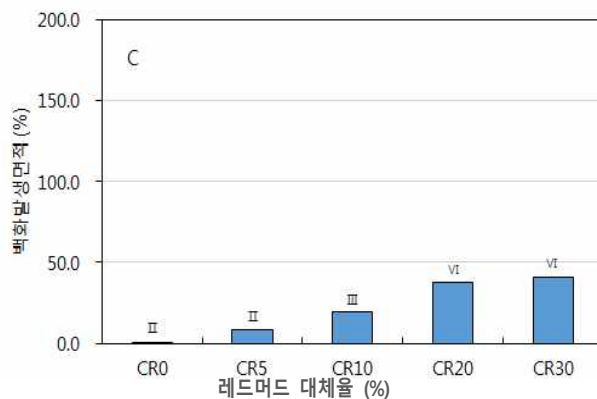
<그림> 흡수계수 측정결과



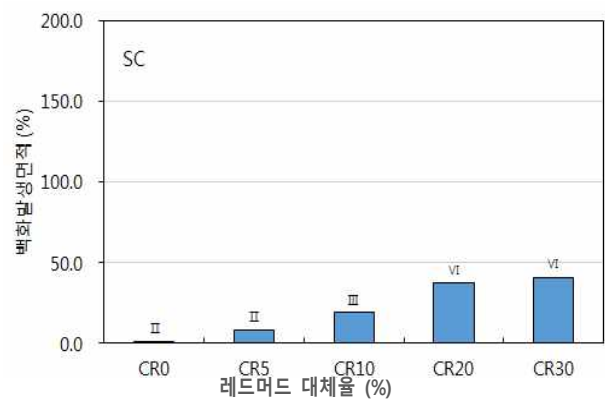
<그림> 기공특성

㉔ 백화발생

- 백화발생면적 및 백화발생등급은 보통 포틀랜드 시멘트를 결합재로 사용한 경우 레드머드 대체율 0%인 CR0에서 0.3%로 II 등급, 5%인 CR5에서 8.2%로 II 등급, 10%인 CR10에서 19.4%로 III 등급, 20%인 CR20에서 37.7%로 IV 등급, 30%인 CR30에서 40.6%로 IV 등급을 나타내었음.
- 슬래그 시멘트를 결합재로 사용한 경우 레드머드 대체율 0%인 SCR0에서 0.1%로 I 등급, 5%인 SCR5에서 9.1%로 II 등급, 10%인 SCR10에서 24.8%로 III 등급, 20%인 SCR20에서 35.5%로 IV 등급, 30%인 SCR30에서 38.1%로 IV 등급을 나타내었음.

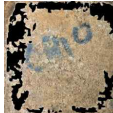


<그림> 흡수계수 측정결과

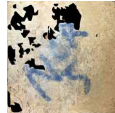
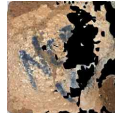
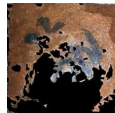
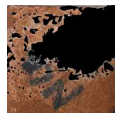


<그림> 기공특성

〈표〉 백화발생면적 측정결과 (C)

구분	백화 화상처리 전후의 이미지		백화 면적 비 (%)	백화 등급
	화상 처리 전	화상 처리 후		
CR0			0.3	II
CR5			8.2	II
CR10			19.4	III
CR20			37.7	IV
CR30			40.6	IV

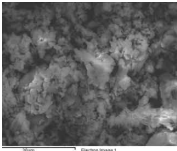
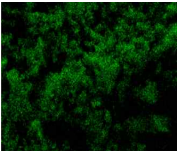
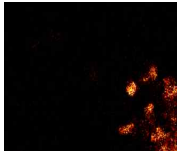
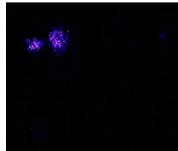
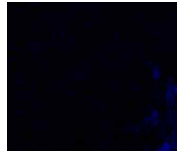
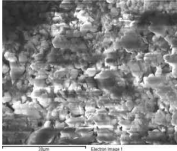
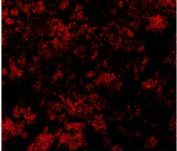
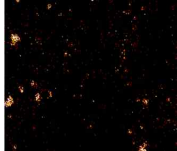
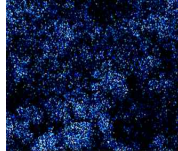
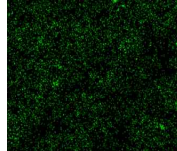
〈표〉 백화발생면적 측정결과 (SC)

구분	백화 화상처리 전후의 이미지		백화 면적 비 (%)	백화 등급
	화상 처리 전	화상 처리 후		
SCR0			0.1	I
SCR5			9.1	II
SCR10			24.8	III
SCR20			35.5	IV
SCR30			38.1	IV

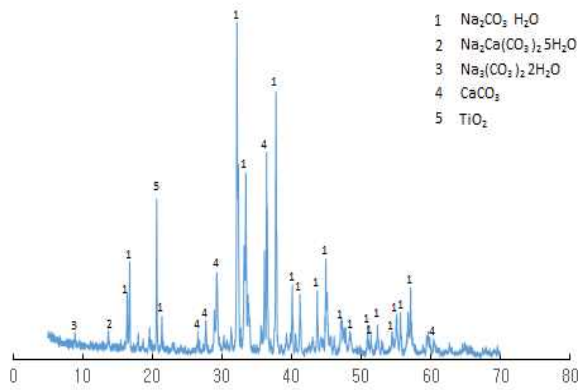
㉔ 백화물질 및 이온 용출량 분석

- 백화생성물질 EDS 분석결과 결합재 종류에 상관없이 모르타르에서 발생한 백화물질 모두 Na가 가장 많은 양을 차지하고 있었으며, Ca 및 Al도 미량이 동일하게 나타났음.
- Na의 경우 보통 포틀랜드 시멘트 모르타르 백화에서 35.08%, 슬래그 시멘트 모르타르 백화에서 22.27%를 나타내고 있어 백화의 주요한 원인이 레드머드 첨가시 혼입되어진 Na_2O 인 것으로 판단되어짐.

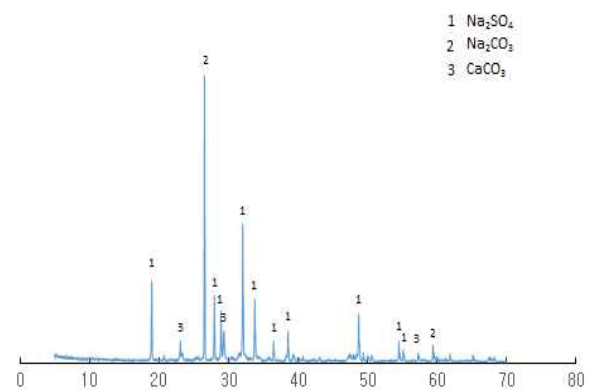
〈표〉 백화물질의 EDS 분석결과

	이미지	원소			
		Na	Ca	S	Al
C					
	질량 (%)	35.08	1.76	0.69	1.00
SC					
	질량 (%)	22.27	0.87	17.37	0.57

- 레드머드 세라믹의 백화 메커니즘 규명을 검토하기 위해 제작한 모르타르의 백화생성물질 XRD 분석결과 보통 포틀랜드 시멘트 모르타르에 레드머드를 대체한 백화는 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 가 주로 나타난 반면 슬래그 시멘트 모르타르에 대체한 백화는 Na_2SO_4 가 주로 나타나 결합재 종류에 관계없이 백화물질은 주로 나트륨계 화합물인 것으로 나타났다.

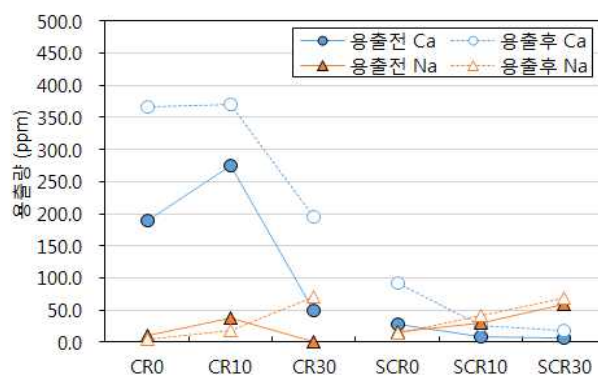


〈그림〉 백화생성물질 XRD분석결과
(보통 포틀랜드 시멘트)



〈그림〉 백화생성물질 XRD분석결과
(슬래그시멘트)

- 모르타르의 용출특성결과 Ca의 주요 공급원인 결합재를 레드머드로 대체하는 양이 증가할수록 Ca 용출량은 감소하였음.
- 가용성 Na의 경우 결합재인 보통 포틀랜드 시멘트 모르타르 및 슬래그 시멘트(SC)에서 Na_2O 가 거의 나타나지 않고 있기 때문에 주요 공급원은 레드머드인 것으로 판단됨.
- 백화 발생의 주요한 잠재 요소인 Ca 및 Na가 동시에 존재할 경우 용해도가 높은 Na의 용출량이 작더라도 백화발생에 더 큰 영향을 미친 것으로 판단됨.



〈그림〉 Na 및 Ca 이온 용출량

(다) 천연점토 대체형 레드머드의 백화 억제 및 저감 기술

① 실험계획 및 방법

㉞ 실험계획

1) 유기계 혼합형 백화저감제

- 백화저감 방안으로 유기계 혼합형 백화저감제를 레드머드에 대해 중량비로 1%, 3%, 5%, 첨가하여 압축강도, 백화발생면적을 검토하였음.

<표> 실험계획

구분	결합재(%)		유기계 혼합형 (%)	W/B (%)	B : S	평가항목
	시멘트	액상 레드머드				
OPC	C	100	0	75	1:3	•압축강도 •백화시험
	CR20	100	20			
	CR20-Ni1	100	20			
	CR20-Ni3	100	20			
	CR20-Ni5	100	20			

2) 무기계 도포형 백화저감제

- 백화저감 방안으로 무기계 도포형 백화저감제를 기준량의 25%, 50%, 100%, 150%를 표면에 도포 및 침지하여 휨강도, 압축강도, 백화발생면적, 흡수율을 검토하였음.

<표> 실험계획

구분		액상형 레드머드 축진제 (%)	결합재(%)		무기계 도포형 (%)	W/B (%)	B : S	평가항목		
			시멘트	액상 레드머드						
OPC	CR10	10	90	10	0	75	1:3	•백화시험		
	CR10SS		90	10	25(200g/m ²)					
	CR10S		90	10	50(400g/m ²)					
	CR10M		90	10	100(800g/m ²)					
	CR10L		90	10	150(1200g/m ²)					
	CR10I		90	10	침지					
	CR30	30	70	30	0					
	CR30SS		70	30	25(200g/m ²)					
	CR30S		70	30	50(400g/m ²)					
	CR30M		70	30	100(800g/m ²)					
	CR30L		70	30	150(1200g/m ²)					
	CR30I		70	30	침지					

㉔ 사용재료

a) 결합재

- 보통 포틀랜드 시멘트는 국내 S사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였음.

〈표〉 결합재의 물리 화학적 특성

구분	화학적 구성 (%)						비표면적 (cm ² /g)	밀도 (g/cm ³)	lg. loss
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃			
보통 포틀랜드 시멘트 (OPC)	21.7	5.7	3.2	63.1	2.8	2.2	3,144	3.15	1.32

b) 골재

- 레드머드 사용시 발생되는 백화현상을 검토하기 위해 사용한 잔골재는 KS L 679에서 품질규정하고 있는 ISO 표준사를 사용하였음.

c) 레드머드

- 레드머드는 선행연구에서 도출된 고형분 51.6%, 단위용적질량 1,570kg/cm³, 평균입경 3.15 μ m, 점도 7,850cP인 액상 레드머드를 사용하였음.

d) 백화저감제

- 백화현상을 저감 시키기 위해 사용한 유기계 혼합형 백화저감제의 화학적 특성을 〈표〉에 나타내었음.

〈표〉 유기계 혼합형 백화저감제의 화학적 특성

바인더	화학적 구성 (%)					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
유기계 혼합형 백화저감제	0.531	0.311	1.48	26.1	6.89	13.1

- 무기계 도포형 백화저감제의 물리·화학적 특성을 〈표〉 및 〈그림〉에 나타내었음.

〈표〉 무기계 도포형 백화저감제의 물리 화학적 특성

구분	외형	비중(g/L)	평균 입경(μ m)	pH
EVA	무색 투명 액상	475 $\pm$ 50	Max. 2% >400	9.1



〈그림〉 무기계 도포형 백화저감제

㉔ 실험방법

a) 압축강도

- 압축강도 시험은 실험계획에 제시된 모르타르 배합을 KS L ISO 679 「시멘트의 강도시험방법」에 준하여 시험체 제작 후 각 양생조건에서 재령 28일에 측정하였음.

b) 백화시험

- 백화 시험은 일본 건재시험센터에서 개발한 「시멘트계 재료의 백화시험 방법(日本, JT CCM)」에 준하여 실시하였음.

② 실험결과 및 분석

㉔ 유기계 혼합형 백화저감제

1) 압축강도

- 28일 압축강도의 경우 유기계 백화저감제 1%의 경우 17.25MPa, 3%의 경우 16.11MPa, 5%의 경우 14.8MPa로 나타나 유기계 백화저감제 첨가량이 증가 할수록 압축강도는 감소하는 것으로 나타났다.

〈표〉 압축강도 측정결과

구분	7일(MPa)	28일(MPa)
CR20	12.0	18.28
CR20-Ni1	9.25	17.25
CR20-Ni3	9.40	16.11
CR20-Ni5	7.25	14.8

2) 백화발생

- 유기계 혼합형 백화저감제를 첨가하지 않은 모르타르의 백화발생면적은 91.03%로 V 등급, 백화저감제를 1% 첨가한 경우 2.73%로 II 등급, 3% 첨가한 경우 0.01%로 II 등급, 5% 첨가한 경우 0.01%로 II 등급을 나타내어 백화저감제 첨가율이 증가할수록 백화발생면적은 감소하는 것을 확인 할 수 있었음.

〈표〉 백화발생면적 측정결과

구분	백화 화상처리 전후의 이미지		백화발생 면적비(%)	백화 등급
	화상 처리 전	화상 처리 후		
C			0.02	II
CR20			91.03	V
CR20-Ni1			2.73	II
CR20-Ni3			0.01	II
CR20-Ni5			0.01	II

㉠ 무기계 도포형 백화저감제

- 백화발생면적 및 백화등급 측정결과 무기계 도포형 백화저감제를 0% 도포한 CR10 모르타르는 20.24%로 II 등급, 25% 도포한 CR10SS 모르타르는 0.001%로 II 등급, 50% 도포한 CR10S 모르타르는 0.002%로 II 등급, 75% 도포한 CR10M 모르타르는 0.001%로 II, 100% 도포한 CR10L 모르타르는 0.0004%로 II 등급, 무기계 도포형 백화저감제에 침지 시킨 CR10I 모르타르는 0.0004%로 II 등급을 나타내었음.
- 백화발생면적 및 백화등급 측정결과 무기계 도포형 백화저감제를 0% 도포한 CR30 모르타르는 67.42%로 V 등급, 25% 도포한 CR30SS 모르타르는 0.005%로 II 등급, 50% 도포한 CR30S 모르타르는 0.001%로 II 등급, 75% 도포한 CR30M 모르타르는 0.012%로 II 등급, 100% 도포한 CR30L 모르타르는 0.0002%로 II 등급, 무기계 도포형 백화저감제에 침지 시킨 CR30I 모르타르는 0.0006%로 II 등급을 나타내었음.

- 무기계 도포형 백화저감제를 기준양의 25% 도포할 경우 백화발생면적은 감소하는 경향을 나타내었음. 1%미만의 백화발생면적비를 나타내었으며 등급은 II 등급 이하로 감소하였음.

〈표〉 백화발생면적 측정결과 (CR10)

구분	백화 화상처리 전후의 이미지		백화 면적 비 (%)	백화 등급
	화상 처리 전	화상 처리 후		
CR10			20.24	III
CR10 SS			0.001	II
CR10 S			0.002	II
CR10 M			0.001	II
CR10 L			0.000 4	II
CR10 I			0.000 4	II

〈표〉 백화발생면적 측정결과 (CR30)

구분	백화 화상처리 전후의 이미지		백화 면적 비 (%)	백화 등급
	화상 처리 전	화상 처리 후		
CR30			67.42 3	V
CR30 SS			0.005	II
CR30 S			0.001	II
CR30 M			0.012	II
CR30 L			0.000 2	II
CR30 I			0.000 6	II

(3) 천연점토 대체형 레드머드 세라믹 제조기술

(가) 소성온도에 따른 레드머드 세라믹 제조기술

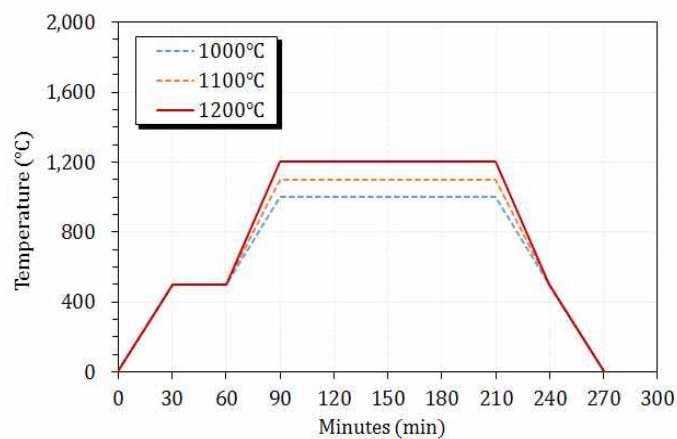
① 실험계획 및 방법

㉠ 실험계획

- 시료의 배합은 고령토만을 사용한 것과 고령토에 레드머드를 10%, 20%를 첨가한 배합으로 설정하였음. 시료배합에 따라 물을 가해 충분히 혼합한 후 소성조건으로 최대온도 1000℃, 1100℃, 1200℃에서 120분 정치한 후 방냉하여 소성을 완료하였음. 실험항목은 압축강도, 흡수율, 수축율을 측정하였음.
- 제조된 시편은 KS L 4201 점토벽돌 규격과 비교하여 활용가능성을 검토하였음.

〈표〉 실험계획

Index.	Mixing ratio(%)		Sintering conditions		Test items
	Kaolin	Redmud	Sintering temp.(℃)	Holding time(Min)	
RM0	100	0	1000 1100 1200	120	- Compressive strength - Absorptance - Open porosity
RM10	90	10			
RM20	80	20			



〈그림〉 소성 온도 조건

㉡ 사용재료

1) 레드머드

- 레드머드(Red mud)는 보오크사이트 원광석으로부터 수산화알루미늄($\text{Al}(\text{OH})_3$) 및 산화알루미늄(Al_2O_3) 성분을 가성소다 용액으로 추출하고 다시 고형물질로 석출되는 산업부산물임. 본 연구에서는 함수율 50%의 상태로 배출되고 있는 레드머드를 함수율 10% 내외로 가열 및 분쇄시켜 건조된 분말 레드머드를 사용하였음.

2) 고령토

- 본 연구에서 사용한 고령토는 국내 벽돌제조기업 S사에서 실제 벽돌제조에 사용되는 고령토를 사용하였음. 고령토의 화학조성은 세라믹 제조를 위한 Al_2O_3 가 35.3%, SiO_2 가 51.5%를 차지하고 있으며 용제로 활용 가능한 Fe_2O_3 가 5.3%를 차지하고 있음.

〈표〉 레드머드와 고령토의 화학적 조성

	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	Na_2O	CaO	TiO_2	SO_3	P_2O_5	MgO	K_2O	MnO
Redmud	25.3	17.6	28.2	19.5	2.12	6.11	0.305	0.101	0.0904	0.0495	0.0387
Kaolin	35.3	51.5	5.34	0.618	3.46	0.53	0.0347	0.095	1.43	1.39	0.0855

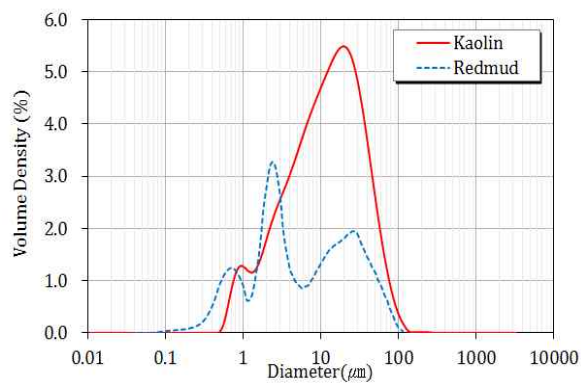


(a) 레드머드

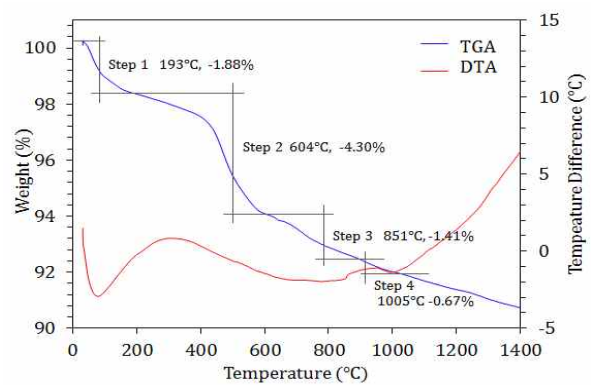


(b) 고령토

〈그림〉 사용재료



〈그림〉 레드머드와 고령토의 입자크기분포

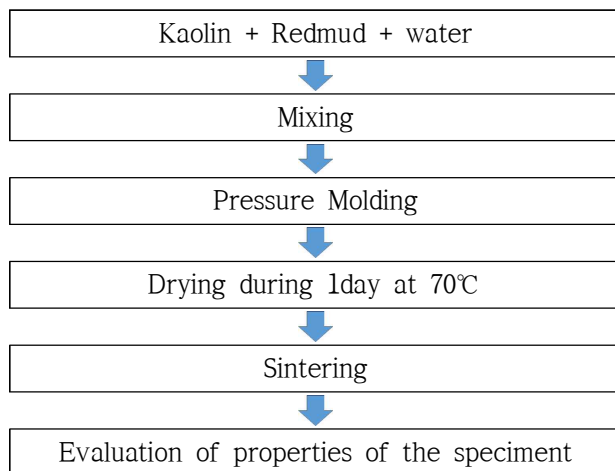


〈그림〉 고령토의 TG-DTA 분석

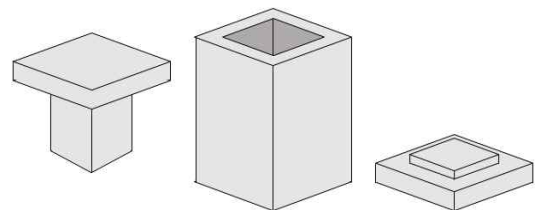
㉔ 실험방법

1) 시험체 제작

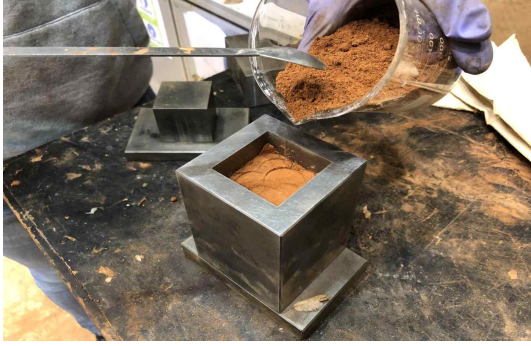
- 먼저 배합별 시료를 충분히 혼합한 후 시편을 성형하였으며, 성형된 시편을 1일 동안 70℃에서 충분히 건조한 후 소성조건에 따라 소성하여 평가하였음. 시편의 성형을 위하여 5×5×5cm 크기의 몰드를 제작하였음.
- 성형은 각각 시료의 비중을 고려하여 280g~255g의 시료를 계량하여 3회 나누어 타설하였으며 장비로 압축 시 시편의 위쪽과 아래쪽의 밀도가 다를 것을 방지하기 위하여 타설시 다짐을 다르게 하여 타설하였음. 1회 타설시 고무망치로 10회 두드린 후 모르타르 다짐봉으로 10회 다졌으며, 2회 타설시 고무망치로 15회 두드린 후 다짐봉으로 15회, 3회 타설시 고무망치로 20회 두드린 후 다짐봉으로 20회 다져넣었음. 이 후 압축장비를 사용하여 약 30MPa로 압축하여 시편을 성형하였으며 이를 다시 압축장비로 빼낸 후 시편 성형을 완료하였음.
- 제작이 완료된 시편은 건조기에서 약 70℃로 24시간동안 완전히 건조한 후 소성조건에 따라 소성하여 시편을 완성하였음.



<그림> 레드머드 세라믹 시험체 제작과정



<그림> 시료성형 몰드



(a) Pouring



(b) Compression of specimen

〈그림〉 실험장면

2) 시험방법

- 레드머드 세라믹의 압축강도는 KS L 4201에 의하여 평가하였음.
- 레드머드 세라믹의 흡수율은 시험체의 부피와 건조 무게 및 포화 습윤 무게를 측정하고 다음 Equation 1과 같이 흡수율(absorprance, %)을 계산하였음.

$$\text{흡수율}(\%) = \left(\frac{W_s - W_d}{W_d} \right) \times 100 \quad (1)$$

여기서,

Wd : 레드머드 세라믹 시험체의 건조무게 [g]

Ws : 레드머드 세라믹 시험체의 포화 습윤무게 [g]

- 레드머드 세라믹 소성수축율은 Equation 2와 같이 계산하였음. 한국산업규격인 점토벽돌 KS L 4201의 벽돌규격 1종, 2종의 물성 값과 비교하여 평가하였음.

$$\text{수축율}(\%) = \left(\frac{D_v - F_v}{D_v} \right) \times 100 \quad (2)$$

여기서,

Dv : 레드머드 세라믹의 소성 전 부피 [cm³]

Fv : 레드머드 세라믹의 소성 후 부피 [cm³]

② 실험결과 및 분석

㉞ 표면특성

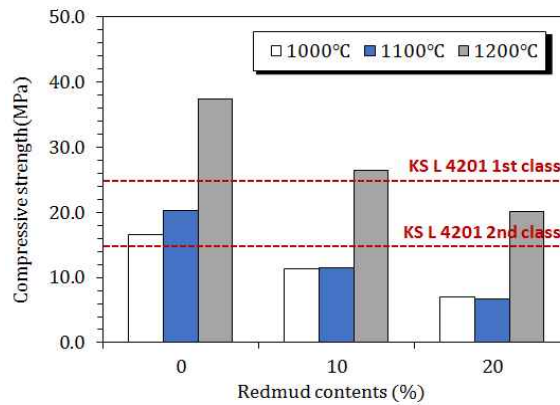
- 레드머드를 첨가한 시편은 고령토만 사용하는 한 경우에 비하여 어두운 색상을 나타내었음. 레드머드 세라믹 시편은 레드머드 첨가량이 높아질수록 소성온도가 높아질수록 더 어두운 색상을 나타내고 있음.

〈표〉 온도별 레드머드 세라믹 시험체

Index.	Sintering temp.(℃)		
	1000	1100	1200
RM0			
RM10			
RM20			

㉟ 압축강도

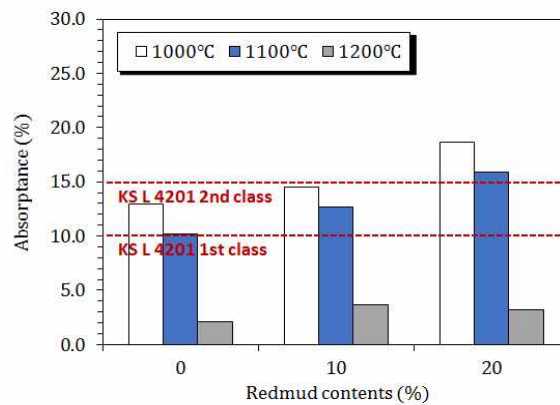
- 소성온도가 높아질수록 시험체의 압축강도는 높아지는 것으로 나타났음. 또한 레드머드 첨가량이 높아질수록 시험체의 압축강도는 낮아지는 것으로 나타남. 레드머드 첨가량 0%인 시험체의 경우 1000℃와 1100℃에서 16.6MPa, 20.3MPa를 나타내며 KS L 4201의 2종 규격인 압축강도 14.7MPa를 만족하는 것으로 나타났으며 1200℃에서 37.3MPa를 나타내며 1종 규격인 24.5MPa를 만족하는 것으로 나타남.
- 레드머드 세라믹 시험체는 1200℃에서 급격하게 압축강도가 증가하였는데, 이는 세라믹스가 1100℃~1200℃ 사이에서 소결된 것으로 판단되며 이는 고령토만을 사용한 시험체와 동일하게 나타나며 고온에서 압축강도가 높아지는 것은 레드머드 보다는 고령토의 영향이 큰 것으로 판단됨.
- 본 연구의 범위에서는 1200℃의 온도로 소성한다면 고령토에 레드머드를 10%를 첨가할 시 한국산업규격의 1종 규격을 만족 가능할 것으로 판단되며 20% 첨가할 시 2종을 만족할 것으로 판단됨.



<그림> 레드머드 세라믹 압축강도

㉔ 흡수율

- 그림에서 알 수 있듯이 소성온도가 높아질수록 시험체의 흡수율은 낮아지는 것으로 나타남. 또한 레드머드 첨가량이 높아질수록 흡수율은 높아지는 경향을 나타냄. 레드머드 첨가량 0%인 시험체의 경우 1000°C와 1100°C에서 각각 12.9%, 10.2%를 나타내며 KS L 4201의 2종 규격인 흡수율 15%를 만족하는 것으로 나타남.
- 소성온도 상승에 따른 흡수율의 감소는 매트릭스의 치밀화와 동시에 강도증진의 일반적인 세라믹 소결체의 특징인 것으로 판단되며, 레드머드를 첨가하여도 일반적인 소결특징을 갖는 것으로 나타남.

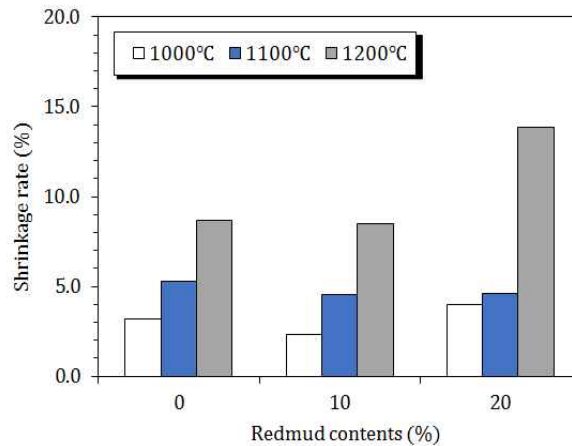


<그림> 레드머드 세라믹 흡수율

㉕ 수축율

- 소성온도가 높아질수록 시험체의 수축율은 증가하는 것으로 나타남. 레드머드 첨가량 0%인 시험체의 경우 1000°C에서 3.2%, 1100°C에서 5.3%, 1200°C에서 8.6%를 나타내며 소성온도가 높아질수록 수축율이 높아지는 것으로 나타남.

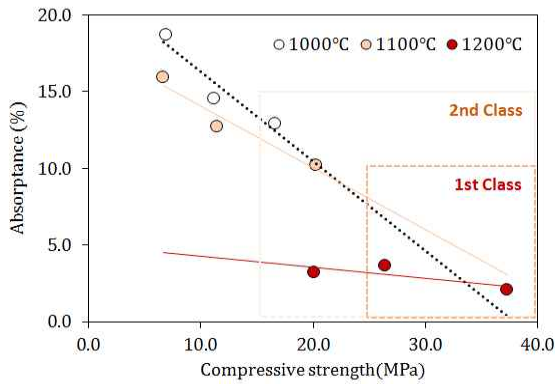
- 레드머드 세라믹을 제조할 경우 세라믹스 소결체의 골격을 형성하는 실리카 성분이 높은 재료를 사용하여 레드머드 소결체의 수축을 보완하여 시험체의 수축율을 낮추도록 해야 할 것으로 사료됨.



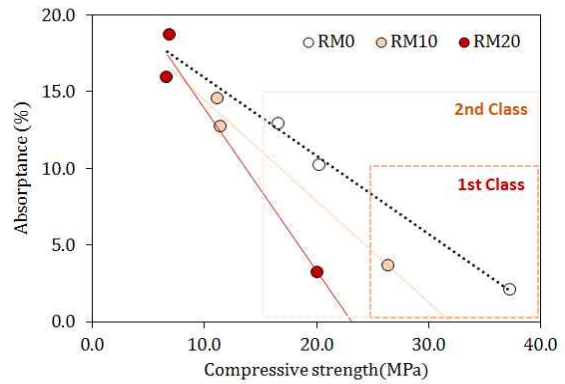
<그림> 레드머드 세라믹 수축율

㉠ 압축강도와 흡수율

- 한국산업규격 점토벽돌의 압축강도 기준은 1종의 경우 24.5MPa이상, 2종의 경우 14.7MPa 이상이며, 흡수율 기준은 1종의 경우 10%이하, 2종의 경우 15%이하임.
- 소성온도별 레드머드 세라믹은 흡수율이 높을 경우 압축강도는 낮아지는 경향을 나타냄. 한국산업규격과 비교한 레드머드 세라믹은 1종 규격을 1200°C 에서 2배합, 2종 규격을 1000°C, 1100°C, 1200°C 의 소성온도에서 각각 1배합이 만족하는 것을 확인할 수 있었음.
- 레드머드 세라믹은 레드머드 첨가량이 높아질수록 흡수율이 높고, 압축강도는 낮은 경향을 나타냄. 한국산업규격과 비교한 레드머드 세라믹은 1종 규격을 레드머드 첨가량 0%, 10%에서 각각 1배합씩 2배합, 2종 규격을 0%에서 2배합, 20%에서 1배합을 만족하는 것으로 나타남.
- 레드머드 세라믹의 압축강도와 흡수율의 관계를 종합해보면 본 연구의 범위에서는 레드머드 세라믹을 1200°C 로 소성하는 것이 흡수율이 낮고 압축강도가 높은 소성체를 얻을 수 있을 것으로 판단되며, 레드머드 첨가량을 20%이하로 할 때, 1200°C 까지 소성한다면, 점토벽돌 규격의 2종까지의 기준을 만족할 수 있는 것으로 나타남.



(a) 소성온도

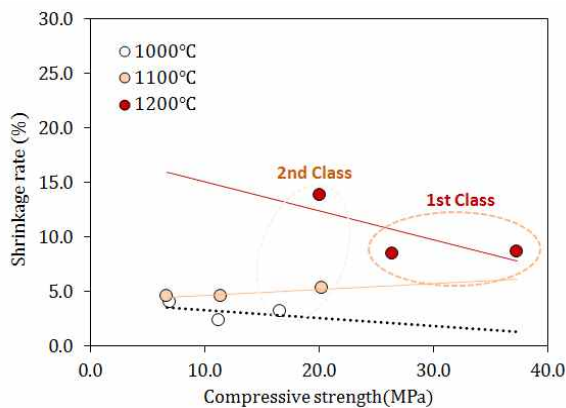


(b) 레드머드 사용량

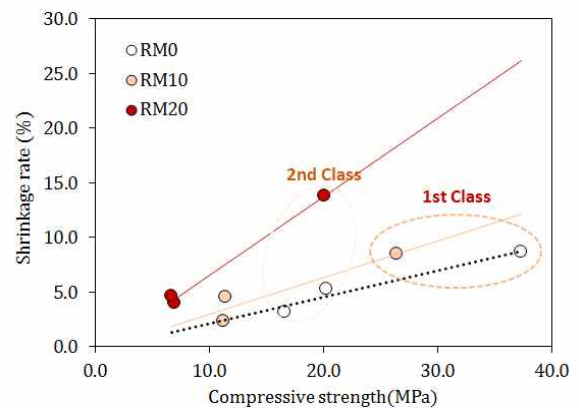
<그림> 압축 강도와 흡수율 사이의 관계

㉞ 압축강도와 수축율

- 소성온도가 높아질수록 수축율 및 압축강도가 높은 경향을 보이고 있으나, 그 영향은 1100°C 이하에서는 미미한 것으로 나타남. 1200°C에서는 수축율이 급격하게 높아지며 압축강도도 높아졌는데 이는 소성체의 소결현상으로 소성체가 수축되며 압축강도가 높아진 것으로 판단됨.
- 레드머드 세라믹은 레드머드 첨가량이 높아질수록 수축율 및 압축강도는 높은 경향을 나타냄. 또한 레드머드 첨가량이 높아질수록 압축강도 보다는 수축율이 큰 폭으로 변화하는 것으로 나타남. 한국산업규격과 비교한 레드머드 세라믹은 1종 기준을 첨가량 0%, 10%에서 각각 1배합씩 2배합이, 2종 기준을 0%에서 2배합, 20%에서 1배합을 만족하는 것으로 나타남. 레드머드를 10%이하로 사용한다면 소성온도 1200°C 까지 소성하여도 수축율은 10%이하로 나타날 것으로 판단됨.



(a) 소성온도



(b) 레드머드 사용량

<그림> 압축강도와 수축율의 관계

(나) 점토 종류에 따른 레드머드 세라믹 제조기술

① 실험계획 및 방법

㉞ 실험계획

- 시료의 배합은 레드머드만을 사용한 것과 점토벽돌 제조에 사용되는 원료인 마사토(S, Sandy loam), 블랙점토(B, Back clay), 백토(T, Terra alba), 장석(F, Feldspar)을 80% 레드머드를 20%로 제조한 배합으로 설정하였음.

〈표〉 실험계획

	Mixing ratio(%)					Sintering conditions			Test items
	Red mud	Sandy loam	Black clay	Terra abla	Feldspar	Rate of temperature increase	Sintering temp. (°C)	Holding time (Min)	
R10	100					3°C/min	900 1,100 1,200	30	-Compressive strength -Absorptance -Shrinkage rate
S8R2	20	80							
B8R2	20		80						
T8R2	20			80					
F8R2	20				80				

㉟ 사용재료

1) 레드머드

- 본 연구에서는 함수율 50%의 상태로 배출되고 있는 레드머드를 함수율 10% 내외로 가열 및 분쇄 시켜 건조된 분말 레드머드를 사용하였음.

2) 원재료

- 본 논문에서는 사용한 원료는 벽돌제조기업 S사에서 실제 점토벽돌 제조에 사용되고 있는 마사토(M, Masato), 블랙점토(B, Back clay), 백토(T, Terra alba), 장석(F, Feldspar)을 사용하였음

〈표〉 레드머드와 원재료들의 화학적 구성

	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	MnO
Redmud	25.3	17.6	28.2	19.5	2.1	6.1	0.3	0.1	0.05	0.1	0.04
sandy loam	25.6	61.3	4.3	1.3	0.9	0.5	0.02	0.04	4.8	0.9	0.1
Black clay	24.4	62.1	5.8	0.8	1.0	1.0	0.1	0.1	3.0	1.4	0.05
Tarra abla	33.1	50.7	1.7	2.5	9.9	0.2	0.02	0.04	1.2	0.5	0.03
Feldspar	23.0	61.9	8.3	0.3	0.3	1.2	0.1	0.1	2.9	1.5	0.1

- 본 논문에 사용된 원료의 xrd분석 결과 마사토, 블랙점토, 장석의 주요 구성 광물은 Quartz(SiO_2)로 나타났으며, 백토는 주구성 광물은 Albite($\text{Na}(\text{Al} \cdot \text{Si}_3 \cdot \text{O}_8)$)로 나타나고 있음. 원료들은 Muscovite($\text{K}(\text{OHF}_2)2\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}$), Cyclohexa-2($\text{C}_6\text{H}_4\text{O}_2$), Dickite-2M1 ($\text{Al}_2 \cdot \text{Si}_2 \cdot \text{O}_5(\text{OH})_4$) 등이 함유되어 있었음.



(a) Sandy loam



(b) Black clay



(c) Tarra abla



(d) Feldspar

<그림> 사용 점토 종류

㉞ 실험방법

1) 시험체 제작

- ‘(가) 소성온도에 따른 레드머드 세라믹 제조기술’의 시험체 제작방법과 동일하게 하였음.

2) 시험방법

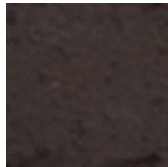
- ‘(가) 소성온도에 따른 레드머드 세라믹 제조기술’의 시험방법과 동일하게 압축강도, 흡수율, 수축율을 측정하였음.

② 실험결과 및 분석

㉞ 표면특성

- 레드머드만을 사용한 시편의 경우 다른 원료를 첨가한 시편과 비교하여 어두운 색상을 나타내고 있음. 원료 종류에 따른 레드머드 세라믹은 소성온도가 높아질수록 더 어두운 색상을 나타내고 있음.

〈그림〉 온도별 레드머드 세라믹 실험체

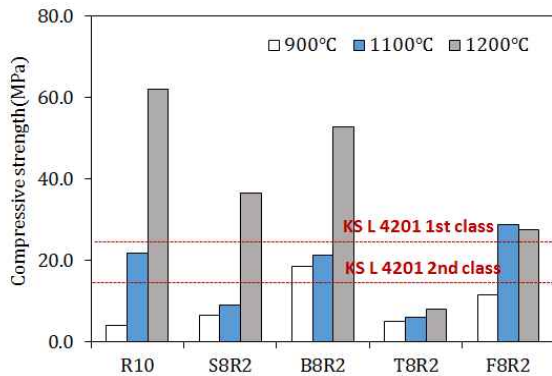
Index.	Sintering temp.(℃)		
	900	1100	1200
R10			
S8R2			
B8R2			
T8R2			
F8R2			

㉠ 압축강도

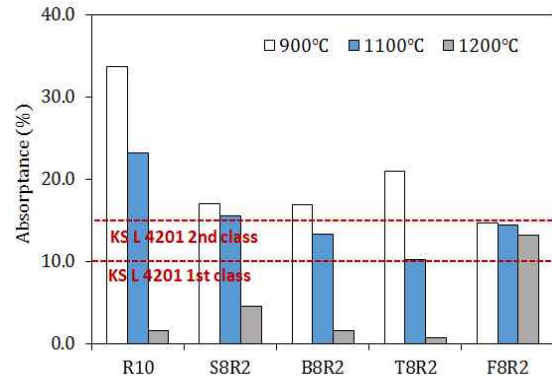
- 소성온도가 높아질수록 시험체의 압축강도는 높아지는 것으로 나타냄. 레드머드와 점토 벽돌 원료를 배합한 레드머드 세라믹의 경우 마사토는 소성온도 1200℃에서 36.5MPa의 압축강도를 나타내며 1종 성능을 만족하는 것으로 나타남. 블랙점토의 경우 1200℃에서 52.8MPa의 압축강도를 나타내며 1종 성능을 만족하였으며, 1100℃, 900℃에서도 각각 18.4MPa, 21.3MPa를 나타내며 2종 성능을 만족하였음. 백토의 경우 1200℃까지 소성하여도 6.0MPa 강도밖에 미치지 못하며 모든 소성온도에서 압축강도 성능을 만족하지 못하였음. 장석의 경우 소성온도 1200℃, 1100℃에서 28.7MPa, 27.5MPa의 압축강도를 나타내며 1종 성능을 만족하였음.
- 레드머드에 점토벽돌 원료를 첨가할 경우 레드머드만을 소성한 경우와 비교하여 다소 강도가 낮아지는 것으로 나타났으나 재료별 강도 감소는 상이한 경향을 나타내어 레드머드를 점토벽돌 원료로 사용하기 위해서는 원료별 특성이 충분히 고려되어야 할 것으로 판단됨.

㉔ 흡수율

- 소성온도가 높아질수록 시험체의 흡수율은 낮아지는 것으로 나타남. 흡수율의 경우 압축강도 측정결과와 마찬가지로 재료별 흡수율은 상이한 경향을 나타내, 원료별 특성 파악이 고려되어야 할 것으로 판단됨.



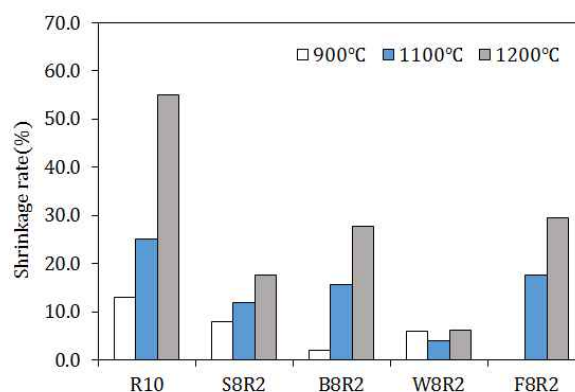
〈그림〉 레드머드 세라믹의 압축강도



〈그림〉 레드머드 세라믹의 흡수율

㉕ 수축율

- 소성온도가 높아질수록 시험체의 수축율은 증가하는 경향을 나타냄. 레드머드만으로 제조된 레드머드 세라믹은 소성온도 900°C에서 13.0%, 1100°C에서 25.0%, 1200°C에서 55.0%를 나타내며 소성온도가 높아질수록 수축율이 급격하게 증가하였음.
- 레드머드와 점토벽돌 원료를 배합한 레드머드 세라믹의 경우 마사토, 블랙점토, 장석은 소성온도의 증가에 따라 수축율은 증가하였음. 백토의 경우 가장 낮은 수축율을 나타냈는데 온도에 의한 영향도 미미하여 최대 6.1%의 수축율을 나타내 레드머드만을 사용한 레드머드 세라믹의 약 11.1%의 수준을 나타냄.

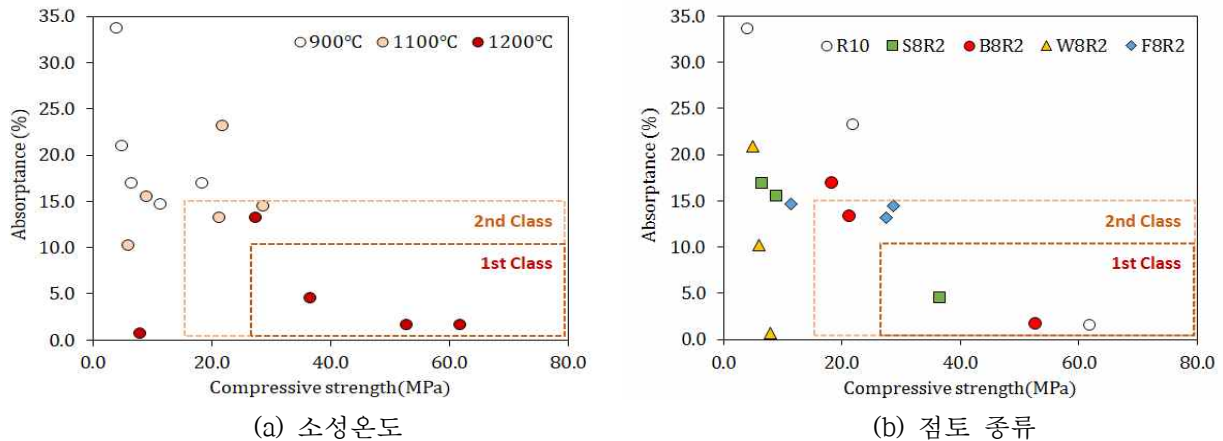


〈그림〉 레드머드 세라믹의 수축율

㉖ 압축강도와 흡수율

- 원료 종류별 레드머드 세라믹의 압축강도와 흡수율의 관계를 종합해보면 본 연구의 범위에서는 레드머드 세라믹을 1200°C로 소성하는 것이 흡수율이 낮고 압축강도가 높은

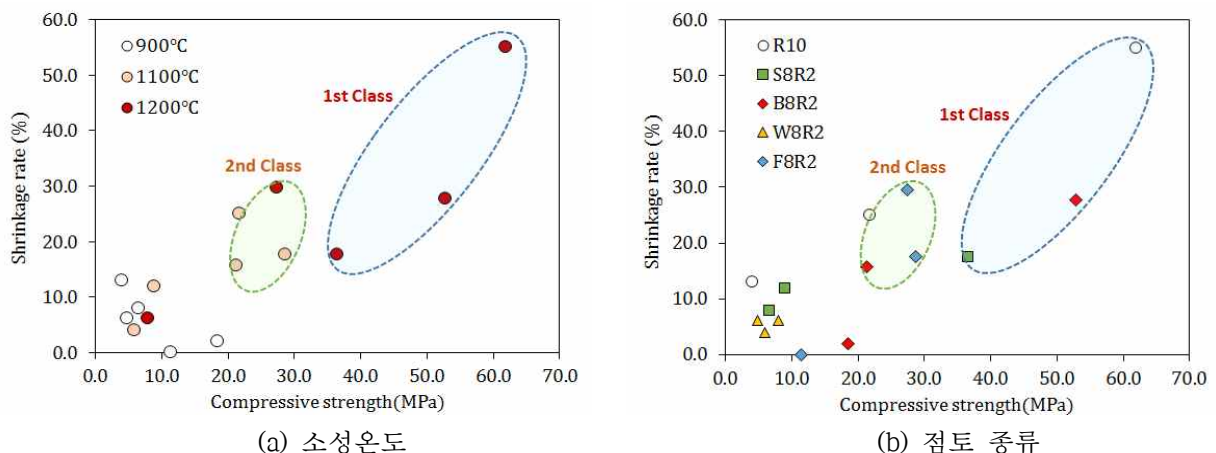
소성체를 얻을 수 있을 것으로 판단되며, 또한 다른 원료와 20% 이하로 레드머드를 혼합할 경우 압축강도가 30MPa이상이면 점토벽돌 규격의 1종 성능을 만족할 수 있을 것으로 판단됨.



<그림> 압축강도와 흡수율의 관계

㉞ 압축강도와 수축율

- 소성온도별 레드머드 세라믹은 소성온도가 높아질수록 수축율 및 압축강도는 높은 경향을 보이고 있음. 레드머드 세라믹은 특히 소성온도 1200℃에서 다양한 수축형태를 나타내고 있음.
- 원료 종류별 레드머드 세라믹의 압축강도와 수축율은 레드머드만을 첨가한 배합이 가장 높은 수축율을 나타내며 온도별 수축율의 차이도 가장 크게 나타남.
- 기존 점토벽돌 기업의 경우 점토벽돌 성능을 만족하기 위하여 원료의 특성에 따라 다양한 배합조성으로 비교 후 압축강도, 흡수율, 치수의 성능을 만족하는 결과치 얻어내고 있음.
- 각각의 원료의 산지 및 생산 조건이 다르기 때문에 점토벽돌 기업과의 원료의 배합을 비교하기 어려우나, 점토벽돌 원료와 레드머드를 혼합하여 세라믹을 제조하여 활용 가능성을 확인하였으며, 향후 점토벽돌 규격의 1종에 해당하는 결과치를 만족하도록 배합 및 성형 조건 등을 고려해야 할 것으로 판단됨.



<그림> 압축강도와 수축율의 관계

(4) 천연점토 대체형 레드머드 세라믹의 소성에너지 절감기술

(가) 미연탄소분 산업부산물 활용한 소성에너지 절감기술

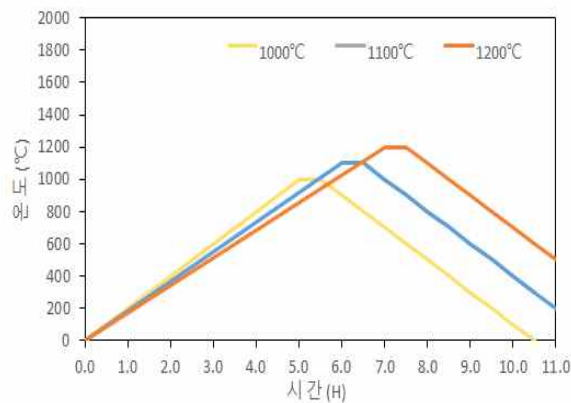
① 실험계획 및 방법

㉞ 실험계획

- 벽돌제조에 쓰이고 있는 블랙점토와 산업부산물인 바텀애시에 대해 레드머드를 20% 치환하여 배합하여 시험체를 제작하였음. 소성온도는 900℃, 1100℃, 1200℃로 설정하였고 설정온도에서 30분을 유지시켰음. 측정항목은 수축율, 흡수율, 압축강도를 측정하였음.

〈표〉 실험계획

구분	배합(%)				소성조건		측정항목
	블랙점토	레드머드	중화레드머드	바텀애시	소성온도(℃)	유지시간(분)	
B10	100				900 1100 1200	30	- 수축율 - 흡수율 - 압축강도
B9R1	90	10					
B8R1A1	80	10		10			
B7R1A2	70	10		20			
B8RN1A1	80		10	10			



〈그림〉 소성온도 조건

㉟ 사용재료

1) 레드머드

- 레드머드 및 산업부산물을 활용한 소성에너지 절감기술을 검토하기 위한 실험의 사용재료인 레드머드는 함수율 평균 50.4%의 슬러지 상태에서 건조 분쇄하여 함수율 10.2%의 건조 레드머드를 사용하였음.

〈표〉 분말 레드머드의 물리적 특성

색상	함수율(%)	pH	밀도(g/cm ³)	비표면적(m ² /g)	평균입경(μm)
적색	10.2	11.0	3.50	23.53	2.75

〈표〉 분말 레드머드 화학적 특성

	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅	\MgO	K ₂ O	MnO
레드머드	25.3	17.6	28.2	19.5	2.12	6.11	0.305	0.101	0.0904	0.0495	0.0387

2) 바텀애쉬

- 레드머드 및 산업부산물을 활용한 소성에너지 절감기술을 검토하기 위한 실험의 사용재료인 바텀애쉬의 화학적 특성을 〈표〉에 나타냈으며 〈그림〉과 같은 재료를 사용하였음.

〈표〉 바텀애쉬 화학적 특성

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃
바텀애쉬	0.099	4.27	3.42	4.18	9.67	0.019	0.133	67.0	0.378	0.16	10.1

3) 블랙점토

- 레드머드 및 산업부산물을 활용한 소성에너지 절감기술을 검토하기 위한 사용재료인 블랙점토는 벽돌제조기업의 S사의 실제 점토벽돌 제조에 사용되고 있는 재료로 사용하였음.

〈표〉 블랙점토 화학적 성분

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃
블랙점토	0.8	1.4	24.4	62.1	0.1	0.1	3.0	1.0	1.0	0.0	5.8

4) 중화 레드머드

- 중화 레드머드는 액상화 레드머드에 질산을 첨가하여 중화를 시킨 레드머드를 사용하였음.



〈그림〉 분말 레드머드



〈그림〉 바텀애쉬



〈그림〉 블랙점토



〈그림〉 중화 레드머드

㉔ 실험방법

1) 시험체 제작

- ‘(3) 천연점토 대체형 레드머드 세라믹 제조기술, (가) 소성온도에 따른 레드머드 세라믹 제조기술’의 시험체 제작방법과 동일하게 하였음.



(a) 혼합



(b) 다짐



(c) 성형



(d) 압출



(e) 성형완료



(f) 건조

<그림> 시험체 제작 순서

2) 압축강도

- ‘(3) 천연점토 대체형 레드머드 세라믹 제조기술, (가) 소성온도에 따른 레드머드 세라믹 제조기술’의 압축강도 시험방법과 동일하게 하였음.

3) 수축율 및 흡수율

- ‘(3) 천연점토 대체형 레드머드 세라믹 제조기술, (가) 소성온도에 따른 레드머드 세라믹 제조기술’의 수축율 및 흡수율 시험방법과 동일하게 하였음.

② 실험결과 및 분석

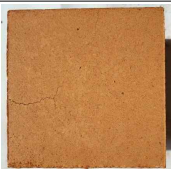
㉕ 표면 육안관찰

- 블랙점토 100% 첨가한 시험체는 900℃에서 밝은색을 띄며 살구색의 비슷한 색상으로 나타났음. 대부분의 시험체는 소성온도가 높을수록 붉은색에서 어두운 갈색으로 변하는 경향이 나타났으며, 900-1100℃는 비슷한 붉은 계열의 색상을 띄는 것으로 나타났음.

㉖ 압축강도

- 소성온도가 높을수록 압축강도는 증가하고 1,200℃에서 100.0MPa 이상 발현하였음. 레드머드 10%의 첨가량의 범위에서는 압축강도는 다소 감소하는 경향을 보이고 있으며 바텀에서 첨가량이 증가할수록 압축강도는 감소하는 것으로 나타났음.
- 중화 레드머드를 사용하게 되면(B8RN1A1) 건조 레드머드를 사용하는 레드머드 세라믹(B8R1A1)보다 압축강도는 증가하는 것으로 나타남

〈표〉 시험체 표면 색상

구분	소성 후(℃)		
	900	1100	1200
B10			
B9R1			
B8R1A1			
B7R1A2			
B8RN1A1			

〈표〉 실험 압축강도 측정결과

구분	압축강도(MPa)		
	소성온도		
	900℃	1100℃	1200℃
B10	47.4	88.1	104.0
B9R1	33.2	51.3	104.0
B8R1A1	26.5	38.1	85.0
B7R1A2	28.6	18.3	60.0
B8RN1A1	39.2	47.8	8.1

㉔ 흡수율

- 소성온도가 높을수록 흡수율은 감소하고 특히 1,200℃에서 크게 감소하였음. 레드머드 10%의 첨가량에도 흡수율은 증가하였고 바텀애시 첨가량이 증가할수록 흡수율은 증가하는 것으로 나타났음.

- 중화 레드머드를 사용하게 되면 건조 레드머드를 사용하는 레드머드 세라믹보다 흡수율이 상대적으로 감소하는 것으로 나타남.

〈표〉 흡수율 측정결과

구분	흡수율(%)		
	소성온도 900℃	소성온도 1100℃	소성온도 1200℃
B10	14.4	10.0	2.0
B9R1	15.5	12.6	0.8
B8R1A1	18.0	14.4	2.9
B7R1A2	17.6	16.2	1.2
B8RN1A1	15.2	12.3	0.4

㉔ 수축율

- 소성온도가 높을수록 수축량은 증가하고 특히 1,200℃에서 크게 증가하였음. 레드머드 10%의 첨가량의 범위에서는 수축량이 유사하였고 바텀애시 첨가량이 증가할수록 수축율은 감소하는 것으로 나타났음.
- 중화 레드머드 10% 첨가량에서는 1200℃에서도 1.3%의 수축율을 나타내고 있어 중화 전처리하는 수축저감에 효과적인 것으로 나타났음.

〈표〉 시험체 체적변화

구분	체적변화(cm ³)					
	소성온도					
	900℃		1100℃		1200℃	
	소성전	소성후	소성전	소성후	소성전	소성후
B10	130.49	130.15 (0.3)*	125.58	121.36 (3.4)*	125.82	106.53 (15.3)*
B9R1	130.00	130.00 (0.0)*	127.17	120.54 (5.2)*	129.58	106.64 (15.7)*
B8R1A1	127.93	127.33 (0.5)*	127.69	127.18 (0.4)*	126.83	108.03 (14.8)*
B7R1A2	129.20	128.78 (0.3)*	128.86	128.34 (0.4)*	120.15	106.30 (11.5)*
B8RN1A1	123.74	123.74 (0.0)*	123.00	123.00 (0.0)*	118.37	116.81 (1.3)*

()* : 수축율%

(나) 알루미늄 실리케이트계 레드머드 세라믹의 저온 소성 합성기술

① 실험계획 및 방법

㉞ 실험계획

- 실험 I 은 물유리 몰비를 1.0, 2.0, 3.0으로 설정하여 60℃로 2주간 양생시킨 후 0, 400, 600, 800℃로 소성하였음. 실험 II는 실험 I의 결과를 바탕으로 실험을 진행하였으며, 물유리 몰비를 1.6, 1.8, 2.0, 2.2로 설정하여 60℃로 1주간 양생시킨 후 0, 400, 600, 800℃로 소성하였음. 물유리는 R값($R = \text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$)을 기준으로 설정하였으며 R:W=15:1로 분말 레드머드를 사용하였음. 측정항목은 수축률, 흡수율, 압축강도를 검토하였음.

〈표〉 실험 계획

실험	시험체	물유리 몰비(mol)	온도조건		측정항목
			양생온도	소성온도(℃)	
I	I - 1	1.0	60 (2주)	0	-수축률 -흡수율 -압축강도(28일)
	I - 2	2.0		400	
	I - 3	3.0		600	
II	II - 1.6	1.6	60 (1주)	800	
	II - 1.8	1.8		0	
	II - 2.0	2.0		400	
	II - 2.2	2.2		600	

㉟ 사용재료

1) 레드머드(분말)

- 레드머드 및 산업부산물을 활용한 소성에너지 절감기술을 검토하기 위한 실험의 사용재료인 레드머드는 흡수율 평균 50.4%의 슬러지 상태에서 건조 분쇄하여 흡수율 10.2%의 건조 레드머드를 사용하였음.

2) 규산나트륨

- 지오폴리머 반응에 의한 레드머드 세라믹 실험을 위한 물유리를 제조하기 위해 삼전순 약공업주식회사에서 제조된 $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}=3:1$ 의 성분인 액상 상태의 규산나트륨을 사용하였음.

3) 가성소다

- 지오폴리머 반응에 의한 레드머드 세라믹 실험을 위한 물유리를 제조하기 위해 삼전순 약공업주식회사에서 제조된 분말상태의 가성소다를 사용하였음.



〈그림〉 규산나트륨



〈그림〉 가성소다

㉔ 실험방법

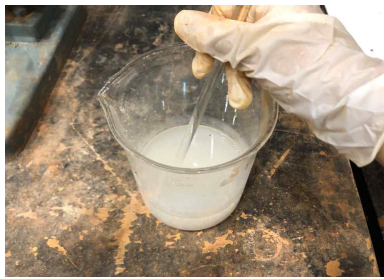
1) 지오폴리머 세라믹 시험체 제작

- 지오폴리머 반응에 의한 레드머드 세라믹 제조를 위한 세라믹 배합을 아래 <표>에 나타내었음. 레드머드 지오폴리머의 여러 조성은 활성화 용액의 물유리 ($R=SiO_2/Na_2O$)를 1.0에서 3.0, 1.6에서 2.2로 변화시켜 배합을 설정하였음.

〈표〉 실험배합

실험	물유리 몰비	Na_2O/Al_2O_3 (molar)	SiO_2/Al_2O_3 (molar)	레드머드 (g)	물유리 (g)	물 (g)
I	1.0	0.50	0.50	90	30	6
	2.0	0.50	0.25			
	3.0	0.50	0.17			
II	1.6	0.97	1.68	90	30	6
	1.8	0.92	1.70			
	2.0	0.88	1.72			
	2.2	0.85	1.74			

- 지오폴리머 반응에 의한 레드머드 세라믹 제조를 위한 세라믹 시험체 제작은 <그림>과 같은 과정으로 진행하였음. 혼합과정은 몰탈 믹서를 사용하여 균질한 상태가 될 때까지 약 10분간 혼합하였음. 시편의 성형을 위하여 $5 \times 5 \times 5$ cm 크기의 몰드에 2회 나누어 타설하였음. 타설 후 다짐봉으로 압력을 주면서 다짐을 하여 성형을 제작하였음.
- 실험 I의 시험체는 2주동안 온도 60°C , 습도 60%에서 밀봉양생을 시킨 후, 분당 2°C 씩 승온시켜 0, 400, 600, 800°C 로 소성하였음.
- 실험 II의 시험체는 1주동안 온도 60°C , 습도 60%에서 밀봉양생을 시킨 후, 분당 2°C 씩 승온시켜 0, 400, 600, 800°C 로 소성하였음.



(a) 물유리 몰비 조정



(b) 혼합



(g) 다짐



(h) 성형

<그림> 시험체 제작

2) 압축강도

- ‘(3) 천연점토 대체형 레드머드 세라믹 제조기술, (가) 소성온도에 따른 레드머드 세라믹 제조기술’의 압축강도 시험방법과 동일하게 하였음.

3) 수축율 및 흡수율

- ‘(3) 천연점토 대체형 레드머드 세라믹 제조기술, (가) 소성온도에 따른 레드머드 세라믹 제조기술’의 수축율 및 흡수율 시험방법과 동일하게 하였음.

② 실험결과 및 분석

㉞ 시리즈 I

1) 표면 육안관찰

- 몰비 1.0에서는 소성온도가 높아질수록 시험체 색상이 연한 갈색으로 띄는 것으로 나타났으며 몰비 2.0은 소성온도 600℃에서 가장 붉은색을 띄는 것으로 나타났음. 또한 몰비 3.0은 소성온도가 높을수록 어두운 갈색을 띄고 있으며 소성온도 600℃에서 가장 붉은색을 띄는 것으로 나타났음.

2) 압축강도

- 소성온도가 높아질수록 압축강도는 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 몰비 2.0에서 가장 높은 압축강도를 나타내고 있음. 몰비 2.0의 경우 400℃ 이상 소성할 경우 압축강도가 3배 가까이 증가하였으나 몰비 1.0 및 3.0의 경우 400℃ 이상 소성에 의한 압축강도의 뚜렷한 증진은 보여지지 않고 있음
- 압축강도 발현 측면에서는 몰비 2.0이 가장 우수한 것으로 나타났으나 최적의 범위를 설정하기 위해서는 추가적인 몰비 범위 검토가 필요할 것으로 판단됨

〈표〉 시리즈 I 표면색상

시리즈	물비	소성온도		
		400℃	600℃	800℃
I	1.0			
	2.0			
	3.0			

〈표〉 시리즈 I 압축강도 측정결과

시리즈	물비	압축강도(MPa)			
		양생온도 60℃	소성온도 400℃	소성온도 600℃	소성온도 800℃
I	1.0	8.4	10.2	11.4	18.3
	2.0	8.9	27.1	21.6	35.6
	3.0	3.6	6.6	6.7	8.2

3) 흡수율

- 레드머드 지오폴리머는 400℃ 이상 소성하게 되면 흡수율은 소성전 30%에서 40.0%이상 급격하게 증가하는 것으로 나타남. 그러나 400~800℃의 소성온도 범위에서는 흡수율에 큰 차이는 나타나고 있지 않음.
- 흡수율 측면에서는 레드머드 지오폴리머 물비 1.0과 2.0이상이 상이한 경향을 보이고 있기 때문에 최적의 물비 범위를 설정하기 위해서는 추가적인 범위 검토가 필요할 것으로 판단됨.

〈표〉 시리즈 I 흡수율 측정결과

시리즈	물비	흡수율 (%)			
		양생온도 60℃	소성온도 400℃	소성온도 600℃	소성온도 800℃
I	1.0	0(물에 녹음)	38.5	37.9	32.3
	2.0	26.4	41.7	42.6	42.4
	3.0	33.3	44.3	46.9	46.2

3) 수축율

- 레드머드 지오폐리머는 400~800℃ 범위에서 소성하게 되면 수축율은 1.0%이하를 나타내고 있어 체적변화는 거의 없는 것으로 나타났음. 그러나 몰비 1.0에서 400℃로 소성할 경우 시험체가 깨져서 흡수율이 증가하고 있어 이에 대한 추가적인 검토가 필요함.
- 수축율 측면에서는 레드머드 지오폐리머 몰비에 대한 영향은 거의 없는 것으로 나타남.

〈표〉 시리즈 I 시험체 체적변화

시리즈	몰비	체적변화(cm ³)					
		소성온도 400℃		소성온도 600℃		소성온도 800℃	
		소성전	소성후	소성전	소성후	소성전	소성후
I	1.0	123.8	108.0 (12.2)*	121.9	121.3 (0.0)*	119.5	118.9 (0.5)*
	2.0	119.5	119.5 (0.5)*	120.1	119.5 (0.5)*	119.5	118.9 (0.5)*
	3.0	120.7	120.1 (0.5)*	119.5	118.9 (0.5)*	118.9	118.2 (0.5)*

(*) : 수축율%

㉡ 시리즈 II

1) 표면 육안관찰

- 몰비 1.6은 소성온도 600℃에서 가장 붉은색을 띠는 것으로 나타났으며 몰비 1.8에서는 소성온도가 높아질수록 시험체 색상이 진한 갈색을 띠는 것으로 나타남. 또한 몰비 2.0과 2.2에서는 소성온도가 높을수록 어두운 갈색을 띠고 있으며 소성온도 600℃에서 가장 붉은색을 띠는 것으로 나타남.

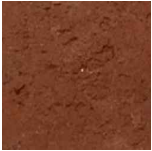
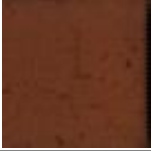
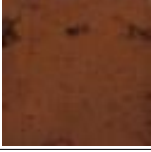
2) 압축강도

- 몰비 1.6~2.2의 레드머드 지오폐리머의 압축강도는 400~800℃의 범위에서는 소성에 의하여 소성전 6.7~11.3MPa와 비교하여 약 3배 정도 상승하여 21.0~38.7MPa를 발현하고 있음. 또한 몰비 1.6~2.0의 범위에서는 몰비가 증가할수록 압축강도는 감소하는 경향을 보이고 있으나 몰비 2.2에서는 상이한 경향을 나타내고 있음.
- 몰비 1.6이 압축강도 발현 측면에서는 가장 우수한 것으로 나타났으며 소성온도 400~800℃의 범위에서는 압축강도의 뚜렷한 증진은 보여지지 않고 있음.

3) 흡수율

- 몰비 1.6~2.2의 레드머드 지오폐리머의 흡수율은 400℃ 이상 소성하게 되면 흡수율은 소성전 20~30%에서 40.0%이상 급격하게 증가하는 것으로 나타남. 그러나 400~800℃의 소성온도 범위에서는 흡수율에 큰 차이는 나타나고 있지 않음.
- 몰비 1.6~2.2의 레드머드 지오폐리머는 흡수율 측면에서 큰 차이가 나타나지 않았음.

〈표〉 시리즈Ⅱ 표면색상

시리즈	몰비	소성온도		
		400℃	600℃	800℃
Ⅱ	1.6			
	1.8			
	2.0			
	2.2			

〈표〉 시리즈Ⅱ 압축강도 측정결과

시리즈	몰비	압축강도(MPa)			
		양생온도 60℃	소성온도 400℃	소성온도 600℃	소성온도 800℃
Ⅱ	1.6	11.3	35.7	38.1	38.7
	1.8	6.7	30.1	27.8	35.6
	2.0	8.4	26.7	29.4	28.4
	2.2	9.3	21.0	29.1	36.6

〈표〉 시리즈Ⅱ 흡수율 측정결과

시리즈	몰비	흡수율 (%)			
		양생온도 60℃	소성온도 400℃	소성온도 600℃	소성온도 800℃
Ⅱ	1.6	22.5	38.8	39.6	39.8
	1.8	9.3	40.8	41.5	42.3
	2.0	20.0	41.8	43.0	43.6
	2.2	30.1	41.9	43.8	44.7

3) 수축율

- 몰비 1.6~2.2의 레드머드 지오폴리머의 수축율은 400~800℃ 범위에서 소성하게 되면 수축율은 5.0%이하를 나타내고, 소성온도 높을수록 증가하고 몰비가 높아질수록 감소하는 경향을 나타내고 있음

〈표〉 시리즈Ⅱ 시험체 최적변화

시리즈	몰비	최적변화(cm ³)					
		소성온도 400℃		소성온도 600℃		소성온도 800℃	
		소성전	소성후	소성전	소성후	소성전	소성후
Ⅱ	1.6	120.1	118.9 (1.0)*	119.5	116.4 (2.5)*	120.7	115.2 (4.5)*
	1.8	121.3	118.9 (2.0)*	121.9	117.0 (4.0)*	120.1	118.9 (1.0)*
	2.0	120.1	119.5 (0.5)*	121.9	118.9 (2.5)*	122.5	118.9 (3.0)*
	2.2	120.1	120.1 (0.0)*	121.9	119.5 (2.0)*	121.3	118.9 (2.0)*

()* : 수축율%

(5) 레드머드 세라믹의 색채 및 감성평가

(가) 레드머드 세라믹 제품의 색채 평가

① 점토 종류 및 소성온도에 따른 레드머드 세라믹의 색채 평가

㉠ 분석개요

1) 분석목적

- 점토벽돌을 제조할 때 원료로서 레드머드를 사용하여 색채재현 정도를 분석하고자 함.

2) 분석 대상

- 측색대상 시편은 5cm×5cm×5cm 사이즈로서, 압축장비를 사용하여 35MPa의 강도로 성형함.
- 측색대상 시편의 색채측정을 위한 parameter는 원료대신 사용비율로서, 100%를 레드머드로 치환한 경우와 20%를 레드머드로 치환하고 나머지를 각각 마사토, 블랙점토, 백토, 장석을 사용한 경우로 성형한 시편임.
- 각 시편은 소성온도를 900℃, 1100℃, 1200℃로 설정하여 제작하였으며, 세가지 소성온도에 따른 시편의 색채를 측정하였음.

〈표〉 측색대상 시료(점토 블록)의 parameter

구 분		R레드머드	M마사토	B블랙점토	T백토	F장석
배합비(%)	레드머드	100	20	20	20	20
	마사토		80			
	블랙점토			80		
	백토				80	
	장석					80
소성조건	승온속도(℃/min)	3				
	소성온도(℃)	900, 1100, 1200				
	유지시간 (Min)	30				

3) 측색방법

- 측색은 외장재에 대한 일반적인 측색방법으로서 활용되는 시감측색법과 기기에 의한 물리적인 측색의 두가지 방법으로 진행.

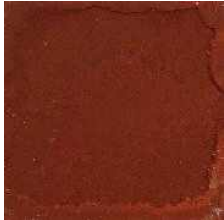
* 시감측색법 : 일출3시간 후부터 일몰3시간 전 사이의 운량 30%정도의 담천공 상태에서, 먼셀표색계에 의한 시감측색법으로 측색함.

* 물리측색법 : 점물측정 방식의 색채휘도계(CD-200, Minolta)를 이용하여, CIE D65광원을 기준광원으로 하여 측색하였음.

4) 분석방법

- 측정대상 시료는 외장재이므로 색차계산은 KS M ISO 7724(도료와 바니시 측색법)에서 규정하고 있는 외장마감재의 색채측정방법 및 색차계산방법에 근거하여, $L^*a^*b^*$ 색차계산식(KS A 0063: 색차표시방법)을 토대로 계산하였음.
- 색차분석의 기준 색채는 일반 점토벽돌 중 시중에 일반적으로 판매되는 붉은 벽돌에 대하여 밝은톤과 어두운톤의 두가지 톤의 색채를 기준색으로 하여, 색차를 계산하였음.

〈표〉 측색대상 시료

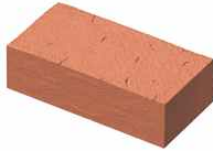
소성 품명 원료비율		소성온도 (℃)		
		900	1,100	1,200
R10	레드머드 100%			
M8R2	마사토 80% 레드머드 20%			
B8R2	블랙점토 80% 레드머드 20%			
T8R2	백토 80% 레드머드 20%			
F8R2	장석 80% 레드머드 20%			

㉔ 분석결과

1) 기준 점토 벽돌 색채

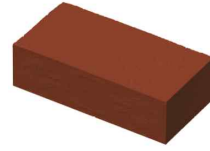
〈표〉 밝은 톤의 점토벽돌(Target1)

표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	15.8
	Y	11.6
	Z	3.8
CIE L*a*b*	L*	40.61
	a*	31.06
	b*	31.96
CIE Lch	L*	40.61
	C*	44.57
	h	5.8
Munsell	H	1.25
		YR
	V	4.2
	C	7.8



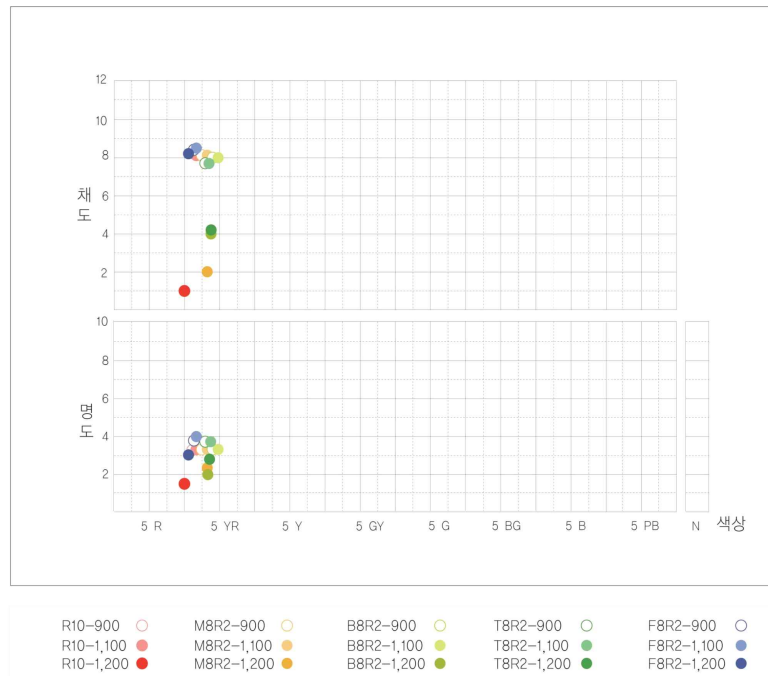
〈표〉 어두운 톤의 점토벽돌(Target1)

표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	2.2
	Y	3.1
	Z	1.9
CIE L*a*b*	L*	20.50
	a*	-15.41
	b*	11.23
CIE Lch	L*	20.5
	C*	19.07
	h	10.39
Munsell	H	2.5
		YR
	V	2.9
	C	6.1



2) 색채 분포 분석

- 점토블럭을 조성할 때, 레드머드, 마사토, 블랙점토, 백토, 장석을 원료로 사용할 경우의 색채 분포를 실측 분석하였음.
- 레드머드100%로 조성한 블록과 레드머드20%와 마사토, 블랙점토, 백토, 장석을 각각 80%가 되도록 조성한 블록의 색채를 실측함.
- 소성온도를 각각 900℃, 1,100℃, 1,200℃로 하였을 경우에 색채 변화를 분석함.
- 전체적으로 소성온도에 의한 색채분포 변화가 두드러지게 나타났으며, 소성온도가 1,200℃일 경우에 명도와 채도가 급격히 낮아지는 것으로 나타남.
- 레드머드를 100%사용하였을 경우에 Red에 가까운 색상계열로 나타났으며, 백토를 적용하였을 경우에 명도가 가장 높게 나타남.



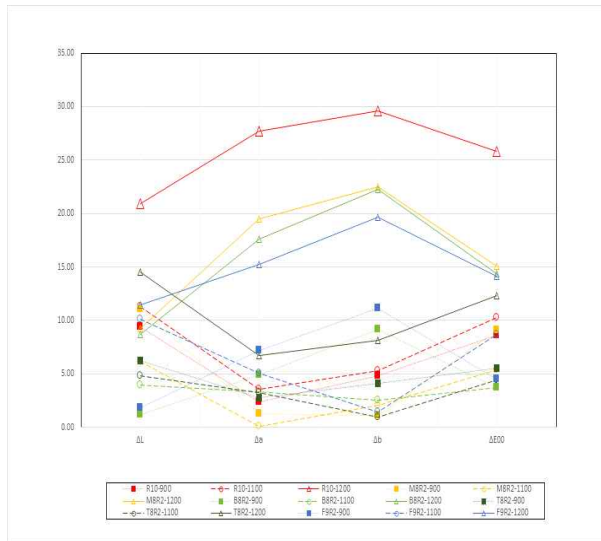
〈그림〉 시료의 먼셀색공간상 색채 분포도

3) 밝은 톤 점토벽돌과의 색차 분석

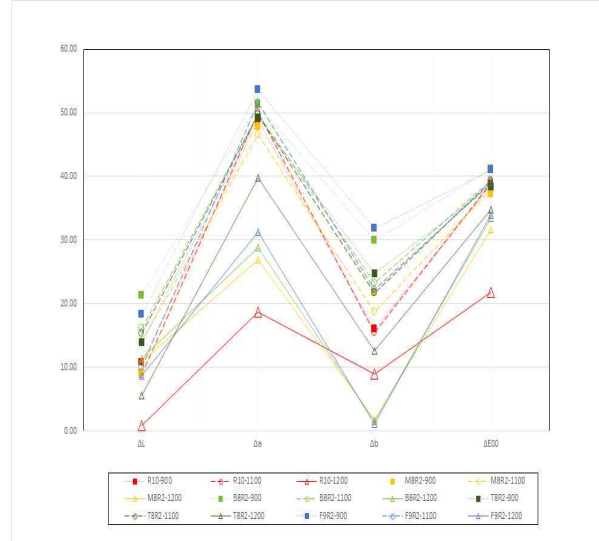
- 밝은 톤 점토벽돌과의 색차가 가장 큰 것은 레드머드 100%를 사용하고 1,200℃에서 소성한 블록이며, 색차가 가장 낮은 블록은 900℃에서 소성한 블랙점토 80%, 레드머드 20%로 구성된 블록임.
- 전체적으로 소성온도가 1,200℃인 샘플들의 색차가 큰 것으로 나타났으며, 소성온도를 낮추고 블랙점토나 장석을 사용한 경우가 밝은 톤의 점토벽돌과 색차가 낮게 나타남.
- 소성온도는 가능하면 낮게 하고, 블랙점토와 장석을 사용하면 색차가 5이하로 차이가 나므로, 연한톤의 점토벽돌 색채 구현에 유리한 것으로 분석됨.

4) 어두운 톤 점토벽돌과의 색차 분석

- 밝은 톤 점토벽돌과의 색차가 가장 큰 것은 장석과 백토를 80%씩 사용했던 블록으로, 둘다 소성온도가 900℃일 때 색차가 가장 크게 분석됨.
- 전체적으로 소성온도가 1,200℃인 샘플들의 색차가 작은 것으로 나타났으며, 소성온도를 높이고 레드머드 100%를 사용하는 경우에만 색차20정도로 낮게 나타남.
- 소성온도는 가능하면 높게 하는 것이 어두운 톤의 점토벽돌 색채구현에 유리한 것으로 분석됨.
- 전체적으로 색차가 30이상으로 크게 나와서 어두운 톤의 점토벽돌 색채를 현재의 조성으로 구현하기는 어려운 것으로 분석됨.



(a) 밝은 톤 점토벽돌



(b) 어두운 톤 점토벽돌

<그림> 색차분석

5) 색차값 분석

- Target1과의 색차는 블랙점토를 사용하였을 경우에 가장 낮게 나타났으며, 레드머드 100%를 적용하였을 경우에 가장 색차가 크게 나타났고, 소성온도를 낮게 할수록 색차가 낮게 나타남.
- 밝은 톤의 점토벽돌 색채를 구현하기 위해서는 레드머드만 사용하는 것 보다는, 마사토나 블랙점토, 백토, 장식 등을 혼합하는 것이 적절한 것으로 분석됨. 또한, 소성온도는 가능하면 낮게 하는 것이 점토벽돌 색채구현에 유리한 것으로 분석됨.
- Target2와의 색차를 분석하면, 블랙점토나 장석을 원료로 하였을 때 색차가 크게 나타나, 블랙점토나 장석을 사용하지 않는 것이 적절한 것으로 분석됨.
- 어두운 톤의 점토벽돌 색채를 구현하기 위해서는 소성온도를 높이는 것이 가장 효과적인 것으로 나타남. 또한, 레드머드를 100% 사용하였을 경우에 가장 효과적인 것으로 분석됨.

〈표〉 점토블럭의 조성비에 따른 색차값 분석

연번	조성비 시료명	레드머드 (%)	마사토 (%)	블랙점토 (%)	백토 (%)	장석 (%)	Target1과의 색차값 (ΔE^*_{ab})	Target2와의 색차값 (ΔE^*_{ab})
1	R10-900	100					8.61	38.71
2	R10-1100	100					10.27	39.02
3	R10-1200	100					25.80	21.86
4	M8R2-900	20	80				9.12	37.27
5	M8R2-1100	20	80				5.39	37.99
6	M8R2-1200	20	80				15.08	31.71
7	B8R2-900	20		80			3.74	41.15
8	B8R2-1100	20		80			3.70	39.40
9	B8R2-1200	20		80			14.36	33.49
10	T8R2-900	20			80		5.54	38.50
11	T8R2-1100	20			80		4.41	39.28
12	T8R2-1200	20			80		12.32	34.77
13	F9R2-900	20				80	4.51	40.95
14	F9R2-1100	20				80	8.67	38.98
15	F9R2-1200	20				80	14.11	34.00

② 소성에너지 저감형 레드머드 세라믹의 색채 평가

㉞ 분석개요

1) 분석목적

- 점토벽돌을 제조할 때 원료로서 레드머드를 사용하여 색채재현 정도를 분석하고자 함.

2) 분석 대상

- 측색대상 시편은 5cm×5cm×5cm 사이즈로서, 압축장비를 사용하여 35MPa의 강도로 성형함.
- 측색대상 시편의 색채측정을 위한 parameter는 원료대신 사용비율로서, 블랙점토를 100% 치환한 경우와 블랙점토 90%에 레드머드 10%, 블랙점토 80%에 레드머드 10%와 바텀애시 10% 블랙점토 70%에 레드머드 10%와 바텀애시 20%, 블랙점토 10%에 중화레드머드 10%와 바텀애시 10%를 사용한 경우로 성형한 시편임.
- 각 시편은 소성온도를 900℃, 1100℃, 1200℃로 설정하여 제작하였으며, 세가지 소성온도에 따른 시편의 색채를 측정하였음.

〈표〉 측색대상 시료(점토 블록)의 parameter

구 분		BL블랙점토	R레드머드	RN중화레드머드	BA바텀애시
배합비(%)	BL10	100			
	BL9:R1	90	10		
	BL8:R1:BA1	80	10		10
	BL7:R1:BA2	70	10		20
	B8:RN1:BA1	80		10	10
소성조건	승온속도(℃/min)	3			
	소성온도(℃)	900, 1100, 1200			
	유지시간 (Min)	30			

3) 측색방법

- 측색은 외장재에 대한 일반적인 측색방법으로서 활용되는 시감측색법과 기기에 의한 물리적인 측색의 두가지 방법으로 진행.

* 시감측색법 : 일출3시간 후부터 일몰3시간 전 사이의 운량 30%정도의 담천공 상태에서, 먼셀표색계에 의한 시감측색법으로 측색함.

* 물리측색법 : 점물측정 방식의 색채휘도계(CD-200, Minolta)를 이용하여, CIE D65광원을 기준광원으로 하여 측색하였음.

4) 분석방법

- 측정대상 시료는 외장재이므로 색차계산은 KS M ISO 7724(도료와 바니시 측색법)에서 규정하고 있는 외장마감재의 색채측정방법 및 색차계산방법에 근거하여, $L^*a^*b^*$ 색차계산식(KS A 0063: 색차표시방법)을 토대로 계산하였음.
- 색차분석의 기준 색채는 일반 점토벽돌 중 시중에 일반적으로 판매되는 붉은 벽돌에 대하여 밝은톤과 어두운톤의 두가지 톤의 색채를 기준색으로 하여, 색차를 계산하였음.

〈표〉 측색대상 시료

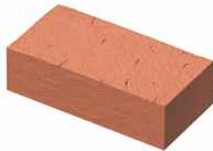
품명	소성 원료비율	소성온도 (℃)		
		900	1,100	1,200
BL10	블랙점토100%			
BL9:R1	블랙점토90% 레드머드10%			
BL8:R1:BA1	블랙점토80% 레드머드10% 바텀애시10%			
BL7:R1:BA2	블랙점토70% 레드머드10% 바텀애시20%			
BL8:RN1:BA1	블랙점토70% 중화레드머드10% 바텀애시10%			

㉔ 분석결과

1) 기준 점토 벽돌 색채

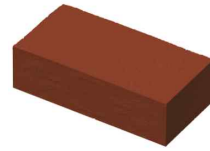
〈표〉 밝은 톤의 점토벽돌(Target1)

표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	15.8
	Y	11.6
	Z	3.8
CIE L*a*b*	L*	40.61
	a*	31.06
	b*	31.96
CIE Lch	L*	40.61
	C*	44.57
	h	5.8
Munsell	H	1.25
		YR
	V	4.2
	C	7.8



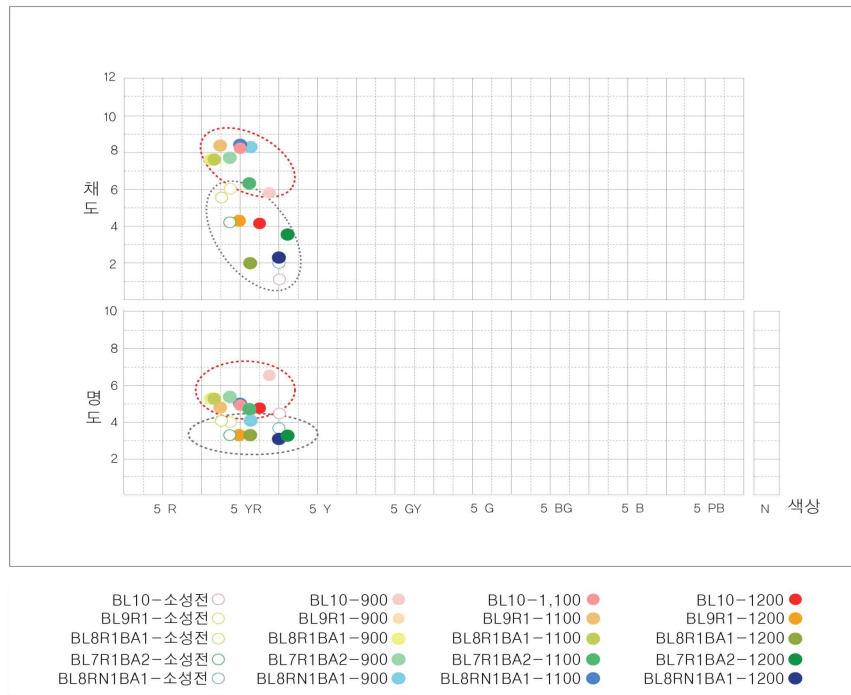
〈표〉 어두운 톤의 점토벽돌(Target1)

표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	2.2
	Y	3.1
	Z	1.9
CIE L*a*b*	L*	20.50
	a*	-15.41
	b*	11.23
CIE Lch	L*	20.5
	C*	19.07
	h	10.39
Munsell	H	2.5
		YR
	V	2.9
	C	6.1



2) 색채 분포 분석

- 점토블럭을 조성할 때, 블랙점토, 레드머드, 중화레드머드, 바텀애시를 원료로 사용할 경우의 색채 분포를 실측·분석하였음.
- 블랙점토 100%로 조성한 블록과 블랙점토 90%와 레드머드 10%, 블랙점토 80%와 레드머드 10% 및 바텀애시 10%, 블랙점토 70%와 레드머드 10% 및 바텀애시 20%, 블랙점토 80%와 중화레드머드 10% 및 바텀애시 10%가 되도록 조성한 블록의 색채를 실측함.
- 소성온도를 각각 소성전과 900℃, 1100℃, 1200℃로 하였을 경우에 색채 변화를 분석함.
- 전체적으로 소성온도에 의한 색채분포 변화가 두드러지게 나타났으며, 소성온도가 900℃와 1100℃일 경우에 명도와 채도가 상승하였다가 1200℃에서 급격히 낮아지는 것으로 나타남.
- 색상계열의 변화는 원료 배합 비율에 의한 변화는 크게 나타나지 않고 있으며, 소성온도에 의한 색상계열의 변화는 전반적으로 소성온도가 1200℃에서 Yellow에 가까운 색상계열로 변화하고 있음.
- 원료배합에 의한 색상계열은 레드머드가 배합되는 경우 Red에 가까운 색상계열을 나타내고, 중화레드머드와 바텀애시가 배합되는 경우는 Yellow에 가까운 색상계열을 나타내고 있음.



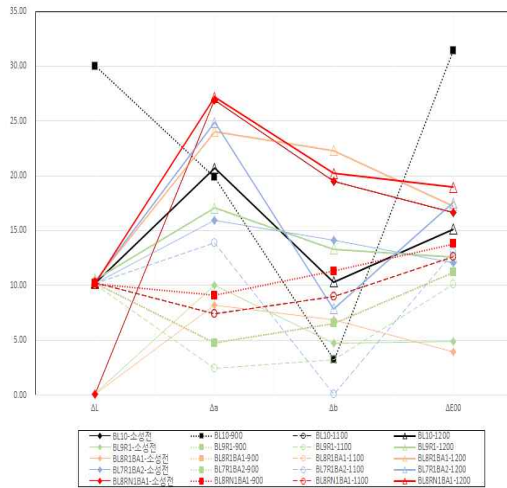
〈그림〉 시료의 먼셀색공간상 색채 분포도

3) 밝은 톤 점토벽돌과의 색차 분석

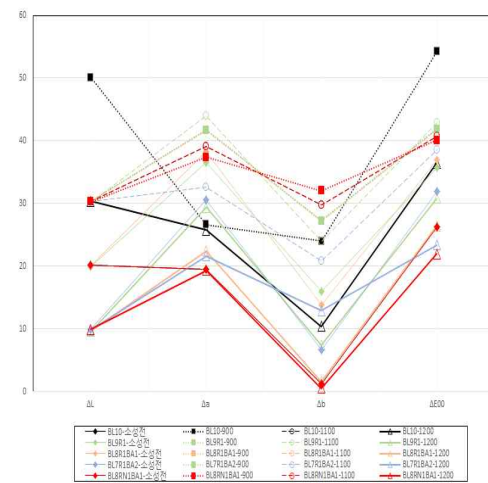
- 밝은 톤 점토벽돌과의 색차가 가장 큰 것은 블랙점토 100%를 사용하고 900℃에서 소성한 블록이며, 색차가 가장 낮은 블록은 900℃에서 소성한 블랙점토 90%, 레드머드 10%로 구성된 블록임.
- 전체적으로 소성온도가 1200℃인 샘플들의 색차가 큰 것으로 나타났고, 소성온도를 낮추고 레드머드나 바텀애시를 사용한 경우가 밝은 톤의 점토벽돌과 색차가 낮게 나타남.

4) 어두운 톤 점토벽돌과의 색차 분석

- 어두운 톤 점토벽돌과의 색차가 가장 큰 것은 블랙점토 100%를 사용하고 900℃에서 소성한 블록이며, 색차가 가장 낮은 블록은 1200℃에서 소성한 블랙점토 80%, 중화레드머드 10%, 바텀애시 10%로 구성된 블록임.
- 전체적으로 소성온도가 1,200℃인 샘플들의 색차가 작은 것으로 나타났으며, 소성온도는 가능하면 높게 하는 것이 어두운 톤의 점토벽돌 색채구현에 유리한 것으로 분석됨.
- 전체적으로 색차가 40이상으로 크게 나오고 있으며, 소성온도가 1200℃에서 색차가 다소 낮아지기는 하나 어두운 톤의 점토벽돌 색채를 현재의 조성으로 구현하기는 어려운 것으로 분석됨.



(a) 밝은 톤 점토벽돌



(b) 어두운 톤 점토벽돌

<그림> 색차분석

5) 색차값 분석

- Target1과의 색차는 블랙점토 90%에 레드머드 10%를 사용하였을 경우에 가장 낮게 나타났으며, 블랙점토 100%를 적용하였을 경우에 가장 색차가 크게 나타났고, 소성온도를 낮게 할수록 색차가 낮게 나타남.
- 밝은 톤의 점토벽돌 색채를 구현하기 위해서는 블랙점토만 사용하는 것 보다는 레드머드나 바텀애시 등을 혼합하는 것이 적절한 것으로 분석됨. 또한, 소성온도는 가능하면 낮게 하는 것이 점토벽돌 색채구현에 유리함.
- Target2와의 색차를 분석하면, 재료 배합은 색차에 큰 영향이 없는 것으로 분석되며, 어두운 톤의 점토벽돌 색채를 구현하기 위해서는 소성온도를 높이는 것이 가장 효과적인 것으로 나타남.

〈표〉 점토블럭의 조성비에 따른 색차값 분석

연번	시료명	조성비				Target1과의 색차값 (ΔE^*_{ab})	Target2와의 색차값 (ΔE^*_{ab})
		블랙 점토 (%)	레드 머드 (%)	바텀 애시 (%)	중화 레드머드 (%)		
1	BL10-소성전	100				16.69	26.18
2	BL10-900	100				31.38	54.24
3	BL10-1100	100				12.60	40.77
4	BL10-1200	100				15.15	36.42
5	BL9:R1-소성전	90	10			4.86	35.69
6	BL9:R1-900	90	10			11.20	41.86
7	BL9:R1-1100	90	10			10.07	42.87
8	BL9:R1-1200	90	10			12.56	30.83
9	BL8:R1:BA1-소성전	80	10	10		3.96	36.98
10	BL8:R1:BA1-900	80	10	10		11.2	41.86
11	BL8:R1:BA1-1100	80	10	10		11.2	41.86
12	BL8:R1:BA1-1200	80	10	10		17.25	26.39
13	BL7:R1:BA2-소성전	70	10	20		12.07	31.95
14	BL7:R1:BA2-900	70	10	20		11.20	41.86
15	BL7:R1:BA2-1100	70	10	20		13.06	38.52
16	BL7:R1:BA2-1200	70	10	20		17.55	23.40
17	BL8:RN1:BA1-소성전	80		10	10	16.69	26.18
18	BL8:RN1:BA1-900	80		10	10	13.78	40.07
19	BL8:RN1:BA1-1100	80		10	10	12.60	40.77
20	BL8:RN1:BA1-1200	80		10	10	18.95	21.96

(나) 레드머드 세라믹 감성평가 기법

① 실험계획 및 방법

㉞ 평가변인 및 평가대상

- 본 실험은 레드머드 세라믹의 색채와 재질에 대한 만족도를 평가하는 것으로, 평가변인은 레드머드 세라믹, 카본블랙, 페스티로폼, 황토, 바텀애시의 5가지로 설정하였음.

〈표〉 평가변인 카테고리 분류

평가변인	카테고리 분류
레드머드 세라믹	0.00%, 1.09%, 3.13%, 5.00%, 6.73%
카본블랙	0.00%, 0.07%, 0.15%, 0.22%, 0.37%, 0.73%
페스티로폼	0.00%, 0.18~0.22%
황토(%)	0.00%, 1.09%, 3.00%, 5.26%, 7.14%
바텀애시	0.00%, 30%-35%

㉟ 피험자의 구성

- 고감성 칼라 시멘트의 표면 질감과 색채에 대한 소비자의 만족도를 측정하기 위하여, 피험자는 건축환경에 대한 지각판단능력이 있다고 인정되는 건축을 전공하는 대학원생 및 학부 4학년을 대상으로 하여, 36명을 대상으로 실험을 실시하였음.

㊱ 실험방법

- 레드머드 세라믹의 표면 질감과 색채에 대한 소비자의 만족도를 측정하기 위하여, 5단계 가치단계법으로 평가하였음.
- 만족도에 대한 평가의 대상 어휘는 노출콘크리트 이미지에 적합한', '석재이미지에 적합한', '황토이미지에 적합한', '디자인이 마음에 드는', '유행에 앞선'의 5가지에 대하여 평가하도록 하였음.
- 데이터의 분석은 MS Excel과 SPSS 18.0을 이용하여 기술통계를 진행하고, 수량화 I 류(HAYASI I)분석을 실시하여 중회귀분석을 실시하였음.



<그림> 감성평가 시료



〈그림〉 만족도 평가 모습

평가대상번호	성 별		나이	소 속	이 름
	남	여			
황토 이미지에 적합한 노출콘크리트 이미지에 적합한 석재 이미지에 적합한 디자인이 마음에 드는 유행에 앞선					

〈그림〉 만족도 평가지

② 레드머드 세라믹의 만족도 분석결과

㉑ 평가변인에 의한 영향도 분석

- 평가변인에 의한 영향도를 파악하기 위하여 중회귀분석을 실시하였으며, 분석결과 중상관계수가 유행에 앞선은 0.5510이었으나, 나머지 네가지 만족도 측정은 모두 0.6이상의 높은 상관을 나타냄.
- 디자인이 마음에 드는, 유행에 앞선과 같은 평가항목에서도 레드머드의 영향이 가장 큰 것으로 나타났으며, 이는 세라믹을 베이스로 활용하여 제작한 시험체에 있어 레드머드가 색감이나 질감의 변화감에 영향을 가장 많이 주기 때문으로 분석됨.
- 또한, 레드머드 세라믹은 특히 ‘황토 이미지에 적합한’ 카테고리 분석에서 편상관계수가 0.8이상으로 가장 높게 나타나며 황토이미지와 유의한 차이가 나타나지 않는 것으로 파악됨.

〈표〉 평가변인 분석

평가형용사	중상관계수 (R2)	편 상 관 계 수 (범 위)				
		레드머드	카본블랙	페스티로폼	황토	바텀애시
노출콘크리트 이미지에 적합한	0.6422	0.749 (0.906)	0.301 (0.419)	0.060 (0.058)	0.395 (1.056)	0.325 (0.270)
석재 이미지에 적합한	0.7598	0.762 (0.729)	0.299 (0.208)	0.376 (0.250)	0.190 (0.261)	0.248 (0.129)
황토이미지에 적합한	0.8052	0.812 (1.361)	0.340 (0.365)	0.403 (0.451)	0.146 (0.444)	0.069 (0.058)
디자인이 마음에 드는	0.6857	0.786 (0.588)	0.256 (0.222)	0.134 (0.078)	0.551 (0.667)	0.090 (0.043)
유행에 앞선	0.5510	0.577 (0.407)	0.297 (0.216)	0.224 (0.139)	0.298 (0.318)	0.351 (0.186)

㉔ ‘노출콘크리트 이미지에 적합한’에 대한 평가 분석

〈표〉 ‘노출콘크리트 이미지에 적합한’의 카테고리 분석

변인	카테고리	샘플수	표 준 화 카테고리 수 량	편상관계 수	요인범 위	요인 범위 수량	표준화 카테고리 수 량 분 포 도								
							-1.0	0	1.0						
레드머드 (%)	0	30	0.259	0.749	0.906	33.44									
	1.09	4	-0.440												
	3.13	4	-0.606												
	5	3	-0.647												
	6.73	5	-0.331												
카본블랙 (%)	0	25	-0.030	0.301	0.419	15.47									
	0.07	5	0.130												
	0.15	3	0.231												
	0.22	5	0.073												
	0.37	3	-0.010												
	0.73	5	-0.188												
페스티로폼 (%)	0	40	0.008	0.060	0.058	2.14									
	0.2	6	-0.050												
황토(%)	0	42	0.017	0.395	1.056	38.98									
	1.09	1	0.549												
	3	1	-0.368												
	5.26	1	-0.396												
	7.14	1	-0.507												
바텀애시 (%)	0	36	0.059	0.325	0.270	9.97									
	30-35	10	-0.211												

㉔ ‘석재 이미지에 적합한’ 에 대한 평가 분석

〈표〉 석재 이미지에 적합한’ 의 카테고리 분석

변인	카테고리	샘플수	표준화 카테고리 수 량	편상관계수	요인범위	요인 범위 수량	표준화 카테고리 수 량 분 포 도
							-0.6 0 0.4
레드머드 (%)	0	30	0.212	0.762	0.729	46.23	
	1.09	4	-0.267				
	3.13	4	-0.517				
	5	3	-0.421				
	6.73	5	-0.394				
카본블랙 (%)	0	25	-0.066	0.299	0.208	13.19	
	0.07	5	0.057				
	0.15	3	0.087				
	0.22	5	0.008				
	0.37	3	0.115				
	0.73	5	0.142				
페스티로폼 (%)	0	40	-0.033	0.376	0.250	15.85	
	0.2	6	0.217				
황토(%)	0	42	-0.010	0.190	0.261	16.55	
	1.09	1	0.251				
	3	1	0.001				
	5.26	1	0.057				
	7.14	1	0.112				
바텀애시 (%)	0	36	-0.028	0.248	0.129	8.18	
	30-35	10	0.101				

㉕ ‘황토 이미지에 적합한’ 에 대한 평가 분석

〈표〉 ‘황토 이미지에 적합한’ 의 카테고리 분석

변인	카테고리	샘플수	표준화 카테고리 수량	편상관계수	요인범위	요인 범위 수량	표준화 수량 분포도
							-0.5 0 1.0
레드머드 (%)	0	30	-0.414	0.812	1.361	50.80	
	1.09	4	0.640				
	3.13	4	0.947				
	5	3	0.934				
	6.73	5	0.651				
카본블랙 (%)	0	25	0.123	0.340	0.365	13.62	
	0.07	5	-0.000				
	0.15	3	-0.242				
	0.22	5	-0.215				
	0.37	3	-0.242				
	0.73	5	-0.110				
페스티로폼 (%)	0	40	0.059	0.403	0.451	16.84	
	0.2	6	-0.392				
황토(%)	0	42	0.001	0.146	0.444	16.57	
	1.09	1	-0.217				
	3	1	-0.106				
	5.26	1	0.228				
	7.14	1	0.061				
바텀애시 (%)	0	36	0.013	0.069	0.058	2.17	
	30-35	10	-0.045				

㉞ ‘디자인이 마음에 드는’ 에 대한 평가 분석

〈표 3.133〉 ‘디자인이 마음에 드는’ 의 카테고리 분석

변인	카테고리	샘플수	표준화 카테고리 수 량	편상관계수	요인범위	요인 범위 수량	표준화 카테고리 수 량 분 포 도
							-0.60.4
레드머드 (%)	0	30	0.181	0.786	0.588	36.8	
	1.09	4	-0.332				
	3.13	4	-0.407				
	5	3	-0.364				
	6.73	5	-0.274				
카본블랙 (%)	0	25	-0.012	0.256	0.222	13.89	
	0.07	5	-0.037				
	0.15	3	-0.094				
	0.22	5	0.128				
	0.37	3	0.017				
	0.73	5	0.017				
페스티로폼 (%)	0	40	-0.010	0.134	0.078	4.88	
	0.2	6	0.068				
황토(%)	0	42	0.033	0.551	0.667	41.74	
	1.09	1	0.058				
	3	1	-0.358				
	5.26	1	-0.469				
	7.14	1	-0.608				
바텀애시 (%)	0	36	-0.009	0.090	0.043	2.69	
	30-35	10	0.034				

㉞ ‘유행에 앞선’ 에 대한 평가 분석

〈표〉 ‘유행에 앞선’ 의 카테고리 분석

변인	카테고리	샘플수	표준화 카테고리 수량	편상관계수	요인범위	요인 범위 수량	표준화 카테고리 수량 분포도
							-0.6 0 0.4
레드머드 (%)	0	30	0.109	0.577	0.407	32.15	
	1.09	4	-0.199				
	3.13	4	-0.283				
	5	3	-0.298				
	6.73	5	-0.090				
카본블랙 (%)	0	25	-0.038	0.297	0.216	17.06	
	0.07	5	-0.064				
	0.15	3	-0.001				
	0.22	5	0.152				
	0.37	3	0.008				
	0.73	5	0.096				
페스티로폼 (%)	0	40	-0.018	0.224	0.139	10.98	
	0.2	6	0.121				
황토(%)	0	42	0.019	0.298	0.318	25.12	
	1.09	1	-0.049				
	3	1	-0.243				
	5.26	1	-0.188				
	7.14	1	-0.299				
바텀애시 (%)	0	36	-0.040	0.351	0.186	14.69	
	30-35	10	0.146				

라. 연구개발 성과

(1) 특허

No.	특허명칭	등록번호	등록일	출원인 (등록권리자)
1	레드머드 세라믹 및 이의 제조방법	10-1964801	2019.03.27	우석대학교 산학협력단
2	백화현상 저감형 레드머드 조성물	10-1964794	2019.03.27	우석대학교 산학협력단

(2) SCI 및 일반학술지 게재

No.	논문명	학술지명	ISBN ISSN	주저자명	Vol. (No)	시작 페이지	끝 페이지	게재 일자
1	산업부산물 레드머드 첨가량에 따른 소성온도별 레드머드 세라믹의 특성	한국건축시공학회지	1598-2033	강석표	19(5)	401	409	2019.09
2	점토벽돌 제조 원료 종류에 따른 소성온도별 레드머드 세라믹의 특성	대한건축학회	1226-9107	강석표	35(10)	199	206	2019.09
3	알칼리 활성화 슬래그 결합체의 강도 발현 인자에 관한 연구	한국건설순환자원학회 논문집	2288-3320	황병일	6(2)	130	137	2018.06.
4	액상화 레드머드의 첨가량에 따른 시멘트 모르타르의 강도특성 및 색차 분석	한국건설순환자원학회 논문집	2288-3320	강석표	6(2)	146	152	2018.06.
5	양생조건에 따른 레드머드 혼입 알칼리활성화 슬래그 시멘트 모르타르의 강도 및 백화특성	한국건축시공학회지	1598-2033	강석표	18(3)	267	275	2018.06
6	첨가방식에 따른 액상화 레드머드 혼입 혼콘크리트의 역학적 특성	한국콘크리트학회 논문집	1229-5515	강석표	30(4)	411	418	2018.08
7	질산 및 황산에 의해 중화된 액상화 레드머드의 첨가량에 따른 시멘트 페이스트의 압축강도특성	한국건설순환자원학회 논문집	2288-3320	강석표	7(4)	333	340	2019.12
8	Characterization of Slag Cement Mortar Containing Nonthermally Treated Dried Red Mud	Applied sciences	2076-3417	최경철	9(12)	2510	2524	2019.09

(3) 학술대회논문

No.	논문명	학술지명	ISBN ISSN	주저자명	Vol. (No)	시작 페이지	끝 페이지	게재 일자
1	액상화 레드머드를 적용한 보강토 블록의 시제품 생산	한국건축시공학회 학술발표대회 논문집	-	강혜주	18(2)	179	180	2018.04
2	CSA 첨가율에 따른 유동성 채움재의 강도특성	한국 콘크리트학회 2019봄 학술대회 논문집	-	강혜주	31(1)	749	750	2019.05
3	소성온도에 따른 레드머드 세라믹의 강도특성	한국 콘크리트학회 2019봄 학술대회 논문집	-	강혜주	31(1)	543	544	2019.05
4	점토벽돌 제조용 원료로서 레드머드 재활용에 관한 연구	한국건축시공학회 학술발표대회 논문집	-	강혜주	19(1)	21	22	2019.05
5	레드머드를 활용한 점토벽돌의 색채 분포 분석	한국콘크리트학회 학술대회 논문집	-	강혜주	31(2)	423	424	2019.10

마. 연구결과

(1) 공공적 성과

- 천연점토를 산업부산물 레드머드로 대체하는 천연자원 절약 효과
- 산업폐기물 자원화로 처리비용 절감과 환경부하 저감효과
- 천연원료 사용 최소화로 인한 국제 환경정책에 능동적 대응

(2) 기술적 성과

- 국내 특허 2건을 등록하였음.
- 산업부산물 레드머드를 점토를 대체 가능한 세라믹 소재기술
- 산업부산물 보조에너지 활용에 따른 에너지 절감기술

(3) 학술적 성과

- SCI 1건(단독사사), 일반학술지 7건(단독사사 1개, 공동사사 6건)으로 논문 총 7건, 국내학술대회 5건을 출판하였음.

(4) 경제적 성과

- 천연점토 50%대체시 연간 28만톤의 레드머드 재활용 가능
- 레드머드 처리비용을 2만원으로 산출시매년 약 56억원의 처리비용 절감효과
- 산업부산물 보조에너지 활용에 따른 경제적 효과는 640억원/년

(5) 기타 성과

- 레드머드 발생처인 KC(주)와 레드머드 재활용에 대한 기술이전 계약을 추진 중

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

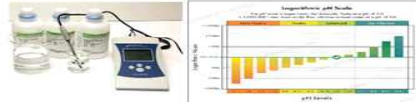
가. 목표

구분	내용
최종 목표	본 연구의 최종목표는 산업부산물 레드머드를 활용하여 600~1100℃의 저온 소성온도에서 구조적으로 안정한 천연점토 대체 에너지절감형 건축용 레드머드 세라믹 제품의 원천기술을 개발하고자 함.
세부 목표	□ 천연점토 대체형 레드머드 세라믹 소재기술 [1차년도] 강알칼리성의 산업부산물 레드머드를 산에 의하여 중화 전처리 개질한 후 천연 점토 대체재로 사용하여 구조적으로 안정한 소성체인 레드머드 세라믹 소재를 개발하고자 함. -레드머드 전처리 기술 및 환경성 평가 -소성온도에 따른 레드머드 소성체의 기초물성 평가 -천연점토 대체 레드머드 세라믹 최적배합도출 -천연점토 대체 레드머드 세라믹 소재의 백화저감 및 억제기술 □ 에너지 절감형 건축용 레드머드 세라믹 제품기술 [2차년도] 융점 강화제 및 미연탄소 산업부산물과 같은 소성 열효율 향상 보조재에 의한 900~1100℃의 소성온도 절감기술과 600~800℃의 알루미노실리케이트계 저온 소성 합성기술에 의한 에너지 절감형 건축용 레드머드 세라믹 제품을 개발하고자 함. -전처리 개질에 의한 융점 강화제의 소성 온도 절감 기술 -미연탄소 산업부산물을 활용한 소성 온도 절감 기술 -알루미노 실리케이트계 레드머드 세라믹의 저온 소성 합성기술 -건축용 레드머드 세라믹 제품 적용 및 성능평가

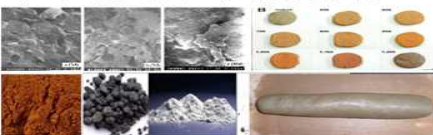
에너지 절감형 천연점토 대체 건축용 레드머드 세라믹 제품 원천기술 개발

1차년도

산업부산물 레드머드의 친환경 전처리 기술
강알칼리성 레드머드 중화처리 기술



천연점토 대체 세라믹 소재 배합기술
레드머드 활용 세라믹 소재 배합 및 성형기술



2차년도

산업부산물을 활용한 소성에너지 절감기술
미연탄소분 활용 및 알루미노 실리케이트에 의한 세라믹 기술

- Si:Al = 1:1 Polysialate / PS type (-Si-O-Al-O-)
- Si:Al = 2:1 Poly(sialate-siloxo) / PSS type (-Si-O-Al-O-Si-O-)
- Si:Al = 3:1 Poly(sialate-disiloxo) / PSDS type (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-)



건축용 레드머드 세라믹 제품 적용기술
레드머드 세라믹의 타일 및 벽돌 등의 건축제품 적용기술



나. 목표 달성여부

구 분			목표	측정방법	평가방법	달성도 (%)
레드머드 세라믹 소재기술	레드머드 전처리 기술 및 환경성 평가	레드머드 전처리 기술	pH 7	pH시험	KS M 0011	100
		환경성 평가	중금속 이상무	토양오염공정시험법	공인시험 성적서	100
	레드머드 세라믹 제조기술	소성체 배합기술	최적온도 및 배합	-	보고서	100
		소성체 평가기술	압축강도 25 MPa	KS L 5105	공인시험 성적서	100
	레드머드 세라믹 소재 백화저감 및 억제기술	백화저감기술	면적 5%이내	페인트넷 면적율	사진	100
		백화저감첨가제	면적 5%이내	페인트넷 면적율	사진	100
레드머드 세라믹 제품기술	소성에너지 절감기술	소성온도 점감기술	소성온도 800~1100℃	KS L 5105	보고서	100
		저온소성 합성기술	소성온도 600~800℃	KS L 5105	보고서	100
		세라믹 평가기술	압축강도 25 MPa	KS L 5105	공인시험 성적서	100
	건축용 레드머드 세라믹 제품기술	치수안정성	오차 ±5mm 이내	KS L 4201	공인시험 성적서	100
		압축강도	압축강도 25 MPa	KS L 4201	공인시험 성적서	100
		흡수율	10%이하	KS L 4201	공인시험 성적서	100
	색채평가 및 감성평가 기술	색채평가	ΔE^*_{ab} 5 이하	KS M ISO 7724	보고서	100
		감성평가	유의한 차이 없음	통계분석 (T Test)	보고서	100

다. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구)

- 해당사항 없음

4. 연구개발성과의 활용계획

가. 추가연구의 필요성

(1) 레드머드 세라믹의 상용화를 위한 추가 연구개발의 필요성

- 본 연구개발을 통해 레드머드 세라믹 제조를 위한 기초연구로서 레드머드의 세라믹 산업 활용가능성을 확인하였으며, 상용화 실용화를 위해서는 사업화를 위한 추가 기술개발이 필요할 것으로 판단됨.
- 레드머드 세라믹 제조를 위한 기존 사업장에서의 공정개선과 함께 최적 생산 방안을 마련하는 기술개발이 필요.
- 점토벽돌 사업장에 본 연구를 통해 개발된 레드머드 세라믹을 적용해보고 현장에서의 배합조건과 소성조건을 검토하여 내구성 향상 방안을 고려해야 함.

(2) 강알칼리성 레드머드 재활용을 위한 중화 기술의 필요성

- 산업부산물 레드머드는 pH 12~13의 강알칼리성 무기질폐기물로서 주변 생태계에 좋지 않은 영향을 미치는 것으로 인식되어 건축용 자재로서 활용하는데 큰 장애요인이 되고 있음.
- 강알칼리성인 레드머드를 재활용하기 위해서는 강산, 해수 및 광물탄산화 등의 중화방법을 통하여 pH를 낮추어 안전하게 재활용하는 기술개발이 필요함.
 - ※ 추출공정에서 사용되는 가성소다에 포함된 소량의 나트륨 화합물은 탈수 및 세척 시스템에 따라 달라질 수 있으며 잔류 용해성 나트륨 성분 중 가장 많은 알루미늄나트륨과 탄산나트륨의 혼합물은 레드머드의 pH 11~12의 강알칼리성을 나타냄

(3) 산업부산물 레드머드의 재활용 방안으로서 광물탄산화 가능성

- Global CCS Institute에 의하면 레드머드를 광물탄산화 하는 기술은 CO₂를 활용한 여러 가지 기술 중에서도 선도적으로 앞서가고 있는 기술로 소개되고 있으며 기술발달 수준은 상업적 운영규모의 직전단계로 평가되고 있음.
 - ※ 레드머드는 Bayer공정에서 나오는 무기질과 일부 알칼리성(NaOH) 성분의 혼합물을 포함하고 있음.
 - ※ 서호주 kwinana의 Alcoa는 암모니아 설비에서 나오는 CO₂를 레드머드 슬러리와 반응하여 pH를 낮춰 안전하게 줄이는 광물탄산화 플랜트를 운영하고 있음.
 - ※ 해수로 처리한 레드머드는 이론적으로 레드머드 1톤당 최대 750kg CO₂/t의 흡수 능력이 있다고 보고되고 있으며 Alcoa는 모든 알칼리를 탄산염으로 전환하는데 필요한 것이므로 레드머드 1톤당 30~35kg(건조중

량)을 제한함.

- Brinckerhoff, Parsons. "Accelerating the uptake of CCS: industrial use of captured carbon dioxide." Global CCS Institute 260 (2011).

- 국내에서는 이산화탄소와 반응성이 높은 물질로 존재하는 산업부산물을 광물탄산화 재료로 사용하는 것이 적합하며, 레드머드의 광물탄산화는 이산화탄소를 줄이고 레드머드의 pH를 저감시켜 건설 재활용 가능성을 높임.

※ 국내에는 칼슘이나 마그네슘을 다량 함유한 광산이 부족하여 천연광물을 이용한 이산화탄소 고정화는 어렵.

(4) 강알칼리성의 레드머드를 콘크리트용 재료로서 재활용시 현저한 압축강도 저하발생

- 강알칼리성의 레드머드를 시멘트와 혼합하여 사용하게 되면 초기에 C3A와 C3S의 반응성이 증가하여 수화진행이 빨라지지만 재령 1일 이후에는 지연되고 장기강도는 현저히 저하됨

※ 기존 연구에 의하면 액상화 레드머드를 시멘트 모르타르에 첨가하여 압축강도를 평가한 결과는 Plain과 비교하여 압축강도가 약 30% 이상 크게 감소하는 결과

- Kang, S.P., Kwon, S.J. (2017). Effects of red mud and alkali-activated slag cement on efflorescence in cement mortar, Construction and Building Materials, 133, 459-467.

(5) 레드머드는 광물탄산화는 광물탄산화 공정에 의해 중탄산나트륨 및 탄산나트륨 생성

- 광물탄산화는 크게 직접탄산화와 간접탄산화로 구분
- 직접탄산화는 이산화탄소가 직접 원료물질(천연광물 또는 산업부산물)과 반응하여 탄산화되는 단일공정
- 간접탄산화는 용제를 사용하여 원료물질에서 칼슘이나 마그네슘을 용출한 뒤, 이산화탄소가 그 용출액과 반응하여 탄산화되는 2단계 이상의 공정
- 기존 국내외 연구에서는 액상의 레드머드 슬러리에 이산화탄소를 주입시켜 수분에 있는 이산화탄소를 나트륨 금속산화물과 반응시켜 불용성의 중탄산나트륨 광물로 안정화시키는 연구가 수행되었음
- 국외의 경우 이산화탄소가 주입되기 전에 수산화나트륨 용액과 레드머드를 0.2 ~ 0.6 비율로 혼합하여 3.5bar, 상온에서 직접탄산화를 진행하였고, 최대 53kg CO₂/(ton red mud)를 저장한 보고 사례도 있음

- ※ Yadav, V. S., Prasad, M., Khan, J., Amritphale, S. S., Singh, M. and Raju, C. B. : Sequestration of carbon dioxide (CO₂) using red mud, Journal of Hazardous Materials, Vol. 176, pp. 1044-1050 (2010)
- 국내의 경우 레드머드가 염기성 물질로 pH 조절제로 사용가능 할뿐만 아니라 Ca제거율과 광물탄산화 효율 향상을 위해 첨가제로 사용할 수 있다고 보고
 - ※ 한국지질자원연구원, 알칼리계 산업부산물의 광물탄산화 연구, 미래창조과학부, 2016.12

나. 활용계획

□ 레드머드를 재활용 자원으로 사용하기 위한 기초자료로의 활용

친환경 제품으로 재활용하기 위한 레드머드의 경제적 제조기술로 활용

- 레드머드는 연간 약 28만톤이 발생하고 있으나, 대부분 매립·폐기되거나 성토 등 단순용도로만 사용 되고 있으며, 이 중 약 1%(2,500톤/년)만이 고부가가치 건설소재로 활용되고 있음.
- 국내 폐기물의 평균 재활용율은 2015년 기준 85%에 이르고 있으나, 레드머드의 높은 pH 및 유해물질 포함의 인식에 의해 레드머드의 경우 전체 재활용율은 15%로 재자원화 기술의 개발이 시급한 분야임.
- 연구개발 결과로부터 레드머드의 환경 안전성을 확인하고 건설분야의 기초소재로서의 기본성능을 확인함으로써 레드머드의 재활용을 증가를 위한 기초자료로 활용.

□ 에너지 절감형 건축 세라믹 제조 기술로 활용

소성온도 절감 및 저온소성 합성기술에 의한 에너지 절감형 건축용 세라믹 제조 기술로 활용

- 세라믹 산업은 첨단기술 소재로 관심 받고 있으나, 소온 소결과정이 필수적이므로 대량의 화석연료가 소비되는 등, 에너지 절약관점에서 한계가 있음.
- 전처리한 레드머드에 생성된 융점강화제와 석탄회에 포함된 미연탄소를 보조연료로 사용하여 소성온도는 낮춤으로써 화석연료 사용량 감소에 따른 에너지 및 온실가스 발생 저감 효과가 발생함.
- 레드머드의 화학적 구성에 따라 알루미늄 실리케이트계 세라믹 기술로 활용할 수 있으며, 저온 합성기술을 통해 저온소성 건축 세라믹 제조가 가능하므로 에너지 절감형 건축 세라믹 제조 기술로 활용 가능함.

□ 건축용 세라믹에서의 천연자원 절약 기술로 활용

천연점토와 유사한 특성을 갖은 레드머드를 건축용 세라믹 소재로 활용함으로써 천연자원 절약 기술로 활용.

- 벽돌, 시멘트, 위생도기, 유리, 타일, 내화물로 대표되는 건축용 세라믹의 제조에 사용되는 주요 원료는 고토, 점토, 장식 등의 천연자원이 사용됨.
- 국내 천연자원이 고갈되어 감에 따라 천연광물을 대체할 수 있는 원료의 확보가 시급함.
- 본 연구개발을 통해 레드머드를 천연점토 대체 건축용 세라믹 소재로 개발함으로써 연간 28만톤의 천연점토를 절약할 수 있음.

□ 기타 활용방안

- 레드머드 활용 촉진을 위한 기술(제품) 표준화 및 규격화 자료로 활용.
- 산업분야에서 순환자원 활용도 증진 및 이에 따른 이산화탄소 총량규제(에너지비용절감)나 환경부하저감의 대응기술로 활용.
- 각종 산업재산권 등 원천기술의 확보 및 기술보호에 활용.

< 참고문헌 >

1. Alam, S.; Das, S.K.; Rao, B.H. Characterization of Coarse Fraction of Red Mud as a Civil Engineering Construction Material. *J. Clean. Prod.* 2017, 168, 679--691.
2. Mymrin, V.; Guidolin, M.A.; Klitzke, W.; Alekseev, K.; Guidolin, R.H.; Avanci, M.A.; Pawlowsky, U.; Winter, E., Jr.; Catai, R.E. Environmentally Clean Ceramics from Printed Circuit Board Sludge, Red Mud of Bauxite Treatment and Steel Slag. *J. Clean. Prod.* 2017, 164, 831--839.
3. Li, J.; Xu, L.; Sun, P.; Zhai, P.; Chen, X.; Zhang, H.; Zhang, Z.; Zhu, W. Novel Application of Red Mud: Facile Hydrothermal-Thermal Conversion Synthesis of Hierarchical Porous AlOOH and Al₂O₃ Microspheres as Adsorbents for Dye Removal. *Chem. Eng. J.* 2017, 321, 622--634.
4. Kim, S.Y.; Jun, Y.; Jeon, D.; Oh, J.E. Synthesis of Structural Binder for Red Brick Production Based on Red Mud and Fly Ash Activated Using Ca(OH)₂ and Na₂CO₃. *Constr. Build. Mater.* 2017, 147, 101--116.
5. Mayes, W.M.; Burke, I.T.; Gomes, H.I.; Anton, Á.D.; Molnár, M.; Feigl, V.; Ujaczki, É. Advances in Understanding Environmental Risks of Red Mud after the Ajka Spill, Hungary. *J. Sustain. Metall.* 2016, 2, 332--343.
6. Liu, X.; Zhang, N. Utilization of Red Mud in Cement Production: A Review. *Waste Manag. Res.* 2011, 29, 1053--1063.
7. Sen, L.; Hotza, D.; Labrincha, J.A. Effect of Red Mud Addition on the Rheological Behaviour and on Hardened State Characteristics of Cement Mortars. *Constr. Build. Mater.* 2011, 25, 163--170.
8. Tsakiridis, P.E.; Agatzini-Leonardou, S.; Oustadakis, P. Red Mud Addition in the Raw Meal for the Production of Portland Cement Clinker. *J. Hazard. Mater.* 2004, 116, 103--110.
9. Villarejo, L.P.; Corpas-Iglesias, F.A.; Martínez-Martínez, S.; Artiaga, R.; Pascual-Cosp, J. Manufacturing New Ceramic Materials from Clay and Red Mud Derived from the Aluminium Industry. *Constr. Build. Mater.* 2012, 35, 656--665.
10. Ribeiro, D.V.; Labrincha, J.A.; Morelli, M.R. Use of Red Mud as Addition for Portland Cement Mortars. *J. Mater. Sci. Eng.* 2010, 4, 1--9.
11. Liu, R.-X.; Poon, C.S. Utilization of Red Mud Derived from Bauxite in Self-Compacting Concrete. *J. Clean. Prod.* 2016, 112, 384--391.
12. Geng, J.; Zhou, M.; Li, Y.; Chen, Y.; Han, Y.; Wan, S.; Zhou, X.; Hou, H. Comparison of Red Mud and Coal Gangue Blended Geopolymers Synthesized through Thermal Activation and Mechanical Grinding Preactivation. *Constr. Build. Mater.* 2017, 153, 185--192.
13. Jobbágy, V.; Somlai, J.; Kovács, J.; Szeiler, G.; Kovacs, T. Dependence of Radon Emanation of Red Mud Bauxite Processing Wastes on Heat Treatment. *J. Hazard. Mater.* 2009, 172, 1258--1263.

14. Cho, Y.K., Kim, H., Kim, Y.A. (2017). Effect of the fineness of fly ash on the compressive strength, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 5(3), 313-319
15. Gweok, G.H., Jee, N.Y., Yoon, S.C. (2007). The experimental study on the practical use of secondary product of concrete contained alkali-activated slag, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 23(1), 121-128
16. Han, C.G., Lee, D.Y. (2016). Quality of high volume blast furnace slag mortar depending on desulfurization gypsum treating methods and fine aggregate type, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 4(2), 157-164
17. Hanehara, S., Asano, S., Yamamoto, T., Nozaki, T. (2009). Characters of recent 16 fly ashes and their compressive strength of fly ash cement, *Cement Science and Concrete Technology*, 63, 120-126.
18. Jeon, B.H., Kim, H.S., Lee, S.H. (2018). A study on the evaluation of the carbonation resistance and properties ternary blended concrete according to replacement ratio of blast furnace slag and fly ash, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 30(1), 23-30
19. Kim, J.H., Park, B.S., Jung, S.H., Choi, Y.C. (2016). Effect of properties of fly-ashes on the characteristics of fly-ash mortars, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 4(4), 439-445
20. Koh, K.T., Ryu, G.S., Lee, J.H., Kang, H.J., Jeon, Y.S. (2011). Flowability and compressive strength of cementless alkali-activated mortar using blast furnace slag, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 6(1), 63-71
21. Koh, K.T., Ryu, G.S., Lee, J.H. (2010). Properties of the flowability and strength of cementless alkali-activated mortar using the mixed fly ash and ground granulated blast-furnace slag, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 5(4), 114-121
22. Korean Standard Association. (2016). Korean Standard L 5405 Fly ash.
23. Lee, H.J., Suh, J.I., Yoo, S.W. (2016). Bond behavior of concrete according to replacement ratio of fly ash and compressive strength of concrete, *Journal of the Korean Recycled Construction*
24. Choi, J.J., Hwang, E.H., Moon, D.J. (2006). An experimental study on the flowability and compressive strength of color concrete mixed with pigments, *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, 26(3), 547-553
25. Daniel, V.R., Joao, A.L., Marcio, R.M. (2011). Potential use of natural red mud as pozzolan for portland cement, *Materials Research*, 14(1), 60-6.
26. Jang, H.S., Lee, H.Y. (2007). "Analysis about color revelation degree of mortar that mixed pigment," *Korea Concrete Conference Proceedings*, 2007(11), 825-828.
27. Kang, S.P., Kang, H.J. (2017). Evaluation of dispersion characteristics for liquefied red mud by viscosity and sediment Index, *Journal of Korea Institute of Building Construction*, 17(6), 517-525
28. Kang, S.P., Kang, H.J. (2017). Pore and efflorescence characteristics of alkali activated slag-red mud cement mortar depending on red mud, *Journal of Korea Institute of Building*

- Construction, 17(3), 261-8
29. Kang, S.P., Kwon, S.J. (2017). Effects of red mud and alkali-activated slag cement on efflorescence in cement mortar, *Construction and Building Materials*. 133, 459-467.
 30. Kim, T.C. (2010). The Determination of Optimal Mixture Proportion and the Evaluation of Economic Benefits through Life Cycle Cost Analysis on Color Concrete Panel, Cheongju University, Korea.
 31. KS A 0062. (2013). How to Display by 3 Attributes of Color, KSA.
 32. Lee, J.Y., Go, S.S. (2003). Effect analysis of inorganic pigment on the colors of colored cement mortars applying CIE L*a*b* color system, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 19(11), 125-132
 33. Lee, M.H. (2003). Manufacture and application of color concrete, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 15(1), 43-48
 34. Lee, S.H., Kim, G.D., Chung, S.Y. (2004). Hannam-dong juvenile education culture center - mix design of black concrete and application technology, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 16(3), 50-57 f
 35. Pan, Z., Cheng, L., Lu, Y., Yang, N. (2002). Hydration products of alkali-activated slag-red mud cementitious material, *Cement and Concrete Research*, 32(3), 357-362.
 36. Pontikes, Y., Angelopoulos, G.N. (2013). Bauxite residue in cement and cementitious applications : current status and a possible way forward, *Resources, Conservation and Recycling*, 73(8), 53-63.
 37. Seok, H.S. (2017). Color Revelation Characteristics of Black Mortar according to Colorant Type and Contents , Korea International University Of Transportation Graduate School of Global Convergence Department of Construction Engineering.
 38. Sin, G.O. (2014). Study on the Color Variation of Buildings by Daylight, Ph.D Thesis, Chungnam National University, Korea.
 39. 박성준, “양생방법에 따른 알칼리 및 황산염 복합자극제를 사용한 비소성 시멘트 모르타르의 특성” *한국콘크리트학회* 27 (27): 237-244, 2015
 40. 김지훈, “양생 방법에 따른 알칼리활성 시멘트 모르타르의 특성” *한국콘크리트학회* 26 (26): 117-124, 2014
 41. 권성준, “레드머드 대체율에 따른 폴리머 혼입 알칼리활성화 슬래그 - 레드머드 시멘트 모르타르의 강도 및 기공특성” *한국구조물진단유지관리공학회* 20 (20): 26-33, 2016
 42. 강석표, “레드머드 대체율에 따른 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트 모르타르의 기공 및 백화특성” *한국건축시공학회* 17 (17): 261-268, 2017
 43. 정지용, “고강도 고로슬래그 혼합 시멘트 페이스트의 수화 및 포졸란 반응에 미치는 고로슬래그 미분말의 치환률과 분말도의 영향” *한국콘크리트학회* 27 (27): 115-125, 2015
 44. Oh YH, “The study of correlation between compressive strength and flexural bending strength of concrete pavement” 19 (19): 1025-1028, 2007
 45. Moon KJ, “Properties of non-sintered cement and concrete recycled with industrial waste” Chongbuk National University 2003

46. Pan Z, "Properties and microstructure of the hardened alkali-activated red mud-slag cementitious material" 33 (33): 1437-1441, 2003
47. Allahverdi A, "Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering" 463-483, 2014
48. Lee MS, "Concrete's water tightness evaluation based on water absorption coefficient theory" 17 (17): 75-83, 2001
49. Moon GD, "Comparative study of the test methods for efflorescence of building materials" 32 (32): 217-218, 2012
50. Rabbat BG, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-95)" 373-, 1995
51. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2014) AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. American Association of State Highway and Transportation Officials.
52. American Concrete Institute (ACI) (2011) Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Report ACI 318-11, American Concrete Institute.
53. Kim, H. J., Kang, S. P., and Choe, G. C. (2018) Effect of Red Mud Content on Strength and Efflorescence in Pavement using Alkali-activated Slag Cement. International Journal of Concrete Structures and Materials 207-215.
54. Korea Concrete Institute (KCI) (2012), Specifications for Structural Concrete, Korea Concrete Institute.
55. Lee, G. H. (2012) Engineering Properties and Applicability of Soil Mixed Pavement with Natural Soil Stabilizer. Ph.D. Thesis. University of Incheon Graduate School.
56. Pacheco, T., Fernando, Labrincha, J. and Leonelli, C. (2014) Handbook of Alkali-activated cements, Mortars and Concretes. Elsevier Science Ltd. 243-257.
57. Park, W. J. (2012) A Study on the Relationship between Compressive Strength and Various Properties of Recycled Aggregate Concrete. Journal of the Architectural Institute of Korea a Structure & Construction 28(3), 43-50. (In Korean)
58. Yang, I. H. and Kim, K. C. (2016) Mechanical Properties and Predictions of Strength of Concrete Containing Recycled Coarse Aggregates. Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection 20(2), 49-59. (In Korean)
59. Park, H., Yoo, S., & Jeong, M. (2010). Properties of the Sintered Eco-brick according to the Unburned Carbon Content of the Coal Briquette Ash, Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, 19(3), 16-23.
60. Jong, Y., Jeong S., & Chea, Y. (2005). Utilization of a Coal-preparation Refuse as a Raw Material for Clay brick, Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, 14(4), 3-9.
61. Ministry of Government Legislation. (2017). Waste control act. Korea .
62. Vincenzo, M., Renzo, C., Stefano, M., Giovanni, C., Marzio, M., Gerolamo, B., & Giorgio, C. (2000). Bauxite 'red mud' in the ceramic industry. Part 1: thermal behavior, Journal of the European Ceramic Society, 20(3), 235-244.

63. Kang, S., & Kang, H. (2017). Pore and Efflorescence Characteristics of Alkali Activated Slag-Red Mud Cement with Red Mud Content, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 17(3), 261~268.
64. Lee, J., Lee, S., Kim, H., Chei, E., & Lee, Y. (2002). Microstructure and Mechanical Properties of the Sintered Kaolin Block with Fly Ashes, *Journal of the Korean Ceramic Society*, 39(12), 1164~1170.f
65. Kim, S., No, H., Kim, U., & Cho, W. (2014). Study of the Relationship between the Characteristics of Regional Onggis and Fermentation Behavior: (1) Scientific Analysis of Regional Onggis in Korea, *Journal of the Korean Ceramic Society*, 52(1), 33~40.
66. Hong, H.S., Kim, Y.L., Cho, H.J., Kim, D.W., Kim, D.W., Kim, H.J., Kim, Y., Kim, S.P. (2017). Overview and future concerns for red mud recycling technology and industry, *Journal of the Korean Institute of Resources Recycling*, 26(5), 12~21.
67. Kang, H.J., Kang, S.P., Hwang, B.I. (2018). “Mechanical behavior of wet soil concrete with liquefied red mud addition rate,” *Proceedings of Korea Concrete Institute*, 30(1), 137~138.
68. Kang, J.S., Jeong, S.G., Jeong, S.W., Seo, U.Y., Lim, G.J., Ji, S.W. (2013). Coagulation of suspended solids and neutralization capacity of sludge in a settling pond of O limestone mine, *Journal of the Korea Resources Engineering Association*, 50(2), 204~211.
69. Kang, S.P. (2016). Properties of alkali-activated slag-red mud soil pavement using recycled aggregate, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 4(3), 276~283.
70. Kang, S.P., Kang, H.J. (2017). Characteristics of soil pavement by red mud content and binder type, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 5(1), 37~44.
71. Kang, S.P., Kang, H.J. (2018). Strength characteristic and color difference analysis of cement mortar according to the amount of liquefied red mud, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 6(2), 146~152.
72. Kang, S.P., Kwon, S.J. (2017). Effects of red mud and alkali activated slag cement on efflorescence in cement mortar, *Construction and Building Materials*, 133, 459~467.
73. Kim, H.J. (2007). Study on the Chemical Property and Application of Red mud, Master's Thesis, Chonnam National University, Korea
74. Lee, S.H., Kim, G.D., Chung, S.Y. (2004). Hannam-dong juvenile education culture center-mix design of black concrete and application technology, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 16(3), 50~57.
75. Lee, Y.W. (2013). A Study on the Recycling of Red mud for Alkali-Activated Non-Cement Binder, Master's Thesis, WooSuk University, Korea
76. Waste control enforcement rules act. Korea Ministry of Government Legislation. 2017. p. 1~8.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구 사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.