보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( )
국토교통기술촉진연구 사업 제2차 연도 최종보고서

R&D /
16 CTAP-C115206-01

액상형 레드머드 촉진제를 활용한 알칼리활성화 고감성 칼라시멘트 개발

최종보고서

2018.08.05.

주관연구기관 / 우석대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

Land Infrastructure and Transport R&D Report

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

'액상형 레드머드 촉진제를 활용한 알칼리활성화 고감성 칼라시멘트 개발'(연구개발 기간 : 2016.06.22 ~ 2018.06.21) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2018.08.05

주관연구기관명 : 우석대학교 산학협력단 (대표자) 김 주 석 (인)

주관연구기관책임자: 강 석 표

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>17CTAP-C115206-02</td><td>해당 단계 연구 기간</td><td>2016.06.22. ~ 2018.06.21.</td><td>단계구분</td><td>2/2</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">국토교통기술촉진연구사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">기초원천</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4">액상형 레드머드 촉진제를 활용한 알칼리활성화 고감성 칼라시멘트 개발</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">-</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">강 석 표</td><td>해당단계 참여 연구원 수</td><td>총: 13명
내부: 12명
외부: 1명</td><td>해당단계 연구개발비</td><td>정부:200,000천원
계 : 200,000천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간 참여 연구원 수</td><td>총: 20명
내부: 19명
외부: 1명</td><td>총 연구개발비</td><td>정부:380,000천원
계 : 380,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및 소속 부서명</td><td colspan="3">우석대학교 산학협력단</td><td>참여기업명</td><td>-</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명 : -</td><td colspan="2">상대국 연구기관명: -</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="3">연구기관명: -</td><td colspan="2">연구책임자: -</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약</td><td colspan="2">보고서 면수: 320 page</td></tr>
</table>

□ 본 연구에서는 산업부산물인 함수율 50%의 레드머드 슬러지를 고속전단회전 분산시켜 **액상화한 레드머드 촉진제**와 **활성 슬래그 바인더**를 혼합하여 천연 황토의 질감을 표현할 수 있는 **알칼리활성화 슬래그-레드머드 고감성 칼라시멘트(이하 고감성 칼라시멘트)**를 개발하였음.

□ **1차년도** : 함수율 50%의 레드머드 슬러지를 건조공정 없이 고속전단회전 혼합방식으로 알칼리활성화 액상형 레드머드 촉진제 개발하였음.
- 제조원가를 절감하기 위하여 레드머드 슬러지를 건조공정 없이 재활용한 알칼리활성화 액상 촉진제 제조기술개발
- 고감성 칼라시멘트의 백화발생을 저감하기 위하여 산처리에 의한 레드머드 개질 기술 개발

□ **2차년도** : 고로슬래그에 건식 탈황석고와 같은 분말형 산업부산물 자극제로 이루어진 분말형 활성 슬래그 바인더에 액상형 레드머드 칼라촉진제를 혼합하는 클링커 프리 시멘트(Clinker Free Cement)의 하나인 알칼리활성화 고감성 슬래그-레드머드 칼라시멘트
- 천연 황토 또는 착색안료를 사용하지 않더라도 천연황토와 동일한 질감을 표현할 수 있는 고감성 건설기술
- 제조시 다량의 탄소가 발생하는 포틀랜트 시멘트를 전혀 사용하지 않고 산업부산물만으로 알칼리활성화 시켜 강도를 발현하는 탄소저감 건설기술

<국문 요약문>

<table>
<tr><td>연구의
목적 및 내용</td><td colspan="5">□ 연구목적
산업부산물인 함수율 50%의 레드머드 슬러지를 고속전단회전 분산시켜 액상화한 레드머드 촉진제와 활성 슬래그 바인더를 혼합하여 천연 황토의 질감을 표현할 수 있는 알칼리활성화 고감성 칼라시멘트를 개발하고자 함.

□ 연구내용
▪ 레드머드 슬러지를 분산시킨 액상형 레드머드 촉진제 개발
- 알칼리자극제로서 산업부산물의 재활용기술
- 고속전단회전 방식에 의한 레드머드 슬러지의 액상 분산기술
- 액상형 레드머드 촉진제의 백화저감 및 억제 기술
- 액상형 레드머드 촉진제의 색채 정량평가 및 유지기술
▪ 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 고감성 칼라시멘트 개발
- 산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더 개발
- 활성 슬래그 바인더와 액상 레드머드 촉진제의 배합기술
- 고감성 칼라시멘트를 활용한 흙포장 적용기술
- 고감성 칼라시멘트를 활용한 콘크리트 적용기술
- 고감성 칼라시멘트의 감성평가 기법개발</td></tr>
<tr><td>연구개발성과</td><td colspan="5">□ 액상형 레드머드 촉진제 개발
□ 알칼리활성화 고감성 칼라시멘트 개발</td></tr>
<tr><td>연구개발성과의
활용계획
(기대효과)</td><td colspan="5">□ 문화탐방로, 산책로와 같은 고감성 지역 문화콘텐츠 개발에 활용
□ 국가시책에 부응하는 탄소저감 산업육성 기여
□ 산업부산물의 업싸이클링(Up-Cycling) 기술개발 촉진에 기여
□ 무기안료시장 45만 달러/년의 수입대체 효과</td></tr>
<tr><td>핵심어
(5개 이내)</td><td>레드머드</td><td>촉진제</td><td>고감성</td><td>칼라시멘트</td><td>알칼리활성화</td></tr>
</table>

<Summary>

<table>
<tr><td>Purpose & Contents</td><td colspan="5">☐ Purpose
This study is to develop the alkali-activated high sensitivity color cement which can be natural loess feel using activated slag binder and liquid red mud accelerator dispersed red mud sludge of 50% water content at a high speed rotary shear.

☐ Contents
▪ Development of liquid red mud accelerator dispersed sludge
- Recycling of industrial by-product as alkali-activator
- Technology of dispersing the red mud sludge by the high-speed rotary shear
- Technology for efflorescence reduction of liquid red mud accelerator
- Technology for color evaluation of liquid red mud accelerator
▪ Development of high sensitivity color cement using liquid red mud accelerator
- Development of activated slag binder using industrial by-products
- Technology for mixing the activated slag binder and the liquid red mud accelerator
- Technology for application high sensitivity color cement on the soil pavement
- Technology for application high sensitivity color cement on the concrete
- Development of sensibility evaluation method for high sensitivity color cement</td></tr>
<tr><td>Results</td><td colspan="5">☐ Liquid red mud accelerator
☐ High sensitivity color cement</td></tr>
<tr><td>Expected Contribution</td><td colspan="5">☐ Utilizing the local cultural content development such as trails and cultural trail
☐ Contribute to the industrial growth for reducing the carbon that meets the national policy
☐ Contribute to the development of up-cycling technology for industrial by-products
☐ Import substitution effect of $450 in the Inorganic Pigments Market</td></tr>
<tr><td>Keywords</td><td>red mud</td><td>accelerator</td><td>high sensitivity</td><td>color cement</td><td>alkali-activated</td></tr>
</table>

< Contents >

Chapter 1. Summary of Research and Development 3

1. Purpose of Research and Development 3

2. Necessity of Research and Development 4

3. Range of Research and Development 6

Chapter 2. Domestic and overseas Technology Development Status 9

1. Domestic Technology Development Trends 9

2. Overseas Technology Development Trends 12

3. Differentiation of technology 16

Chapter 3. Research Performance and Achievements 23

1. Goals and content of Research and Development 23

2. Results and Discussion of Research and Development 27

A. Characteristics of Red Mud Sludge 27

B. Manufacture of Liquid Red Mud Accelerators of Red Mud Sludge by High Speed Shear Rotation Method 37

C. Effloresce Characteristics and Reduction Technology of Liquid Red Mud Accelerators 61

D. Alkali-activated Slag Redmud High Sensitive Color Cement Manufacturing Technology 122

E. Alkali activated slag Red mud Highly sensitive color cement Application technology 161

F. Evaluation of Field Application of Alkali Activated Slag-Red Mud High Sensitive Color Cement 206

G. Color and Sensibility Evaluation Technique of High Sensitivity Color Cement 225

3. Summary of Research and Development Results 292

Chapter 4. Achievement of Goal and Contribution to Relevant Field 299

1. Goal Achievement 299

2. Contribution to Relevant Field 300

Chapter 5. Plan to Use Research and Development achievements 305

Chapter 6. Overseas Science and Technology Information Collected During The Research Process 315

Chapter 7. Security Rrating of Research and Development Achievement 321

Chapter 8. Status of Research Facilities and Equipment Registered in the National Science and Technology Comprehensive Information System 325

Chapter 9. Implementation of Safety Measures in laboratories Based on Research and

Development tasks 329
Chapter 10. Research Achievements of Research and Development Project 333
Chapter 11. Etc 337
Chapter 12. References 341

< 목 차 >

제1장. 연구개발과제의 개요 3

1. 연구개발의 목적 3

2. 연구개발의 필요성 4

3. 연구개발의 범위 6

제2장. 국내외 기술 개발 현황 9

1. 국내 기술개발 동향 9

2. 국외 기술개발 동 12

3. 연구개발대상 기술의 차별성 16

제3장. 연구수행 내용 및 성과 23

1. 연구개발의 목표 및 내용 23

2. 연구개발 결과 및 토의 27

가. 레드머드 슬러지의 특성 분석 27

나. 고속 전단회전방식에 의한 레드머드 슬러지의 액상형 레드머드 촉진제 제조 37

다. 액상형 레드머드 촉진제의 백화 특성 및 저감기술 61

라. 알칼리활성화 슬래그 레드머드 고감성 칼라시멘트 제조기술 122

마. 알칼리활성화 슬래그-레그머드 고감성 칼라시멘트 활용기술 161

바. 알칼리활성화 슬래그-레드머드 고감성 칼라시멘트의 현장적용성 평가 206

사. 고감성 칼라시멘트의 색채평가 기법 및 감성평가 기법 225

3. 연구개발 결과 요약 293

제4장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 299

1. 목표 달성도 299

2. 관련분야 기여도 300

제5장 연구개발성과의 활용 계획 305

제6장 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 315

제7장 연구개발성과의 보안등급 321

제8장 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황제 9장 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 325

제9장 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 329

제10장 연구개발과제의 대표적 연구 실적 333
제11장 기타 사항 337
제12장 참고 문헌 341

< 표 목 차 >

<표 2.1> 폐기물관리법 시행 규칙에 따른 재활용범위 11
<표 2.2> 기존 관련 연구수행 목록 16
<표 2.3> 국내외 관련(유사)기술과의 특징(수준) 비교(정량적 비교) 17
<표 2.4> 국내외 관련(유사) 특허 분석-1 18
<표 2.4> 국내외 관련(유사) 특허 분석-2 19
<표 3.1> 레드머드의 처리현황 (국내) 28
<표 3.2> 실험요인 및 수준 29
<표 3.3> 레드머드 슬러지의 함수율 결과 31
<표 3.4> 레드머드 슬러지의 성분분석(XRF)결과 31
<표 3.5> 중금속용출량 측정결과 33
<표 3.6> 흙포장재 급성독성시험 34
<표 3.7> 흙포장재 급성독성시험 결과 35
<표 3.8> 실험 계획 38
<표 3.9> 레드머드 슬러지의 물리 화학적 특성 39
<표 3.10> 분산제의 물리 화학적 특성 40
<표 3.11> 증점제의 물리 화학적 특성 41
<표 3.12> 소포제의 물리 화학적 특성 41
<표 3.13> 액상형 레드머드의 분산직후 초기 점도와 최종 경과시간 180일의 점도 비교 44
<표 3.14> 침전지수 측정결과 49
<표 3.15> 플레인 시료의 침전상태 관찰결과 50
<표 3.16> W/R비 200%의의 침전상태 관찰결과 51
<표 3.17> 침전지수 측정결과 52
<표 3.18> 침전지수 측정결과 53
<표 3.19> 침전지수 측정결과 54
<표 3.20> 입경측정 결과 57
<표 3.21> AS/NZS 4456.6 백화 시험결과 보고 63
<표 3.22> 실험계획 64
<표 3.23> 결합재의 물리 화학적 특성 64
<표 3.24> 백화 발생 면적비율별 백화등급 66
<표 3.25> 압축강도 측정결과 68
<표 3.26> 기공특성 및 물흡수계수 측정결과 70
<표 3.27> 백화발생면적 측정결과 (OPC) 72
<표 3.28> 백화발생면적 측정결과 (SC) 73
<표 3.29> 백화물질의 EDS 분석결과 75
<표 3.30> 실험계획 81
<표 3.31> 결합재의 물리 화학적 특성 81

<표 3.32> 표준수중양생 모르타르의 강도 측정결과 84
<표 3.33> 기건양생 모르타르의 강도 측정결과 86
<표 3.34> 고온양생 모르타르의 강도 측정결과 88
<표 3.35> 저온양생 모르타르 강도 측정결과 90
<표 3.36> 표준수중양생 모르타르의 흡수율 측정결과 92
<표 3.37> 기건양생 모르타르의 흡수율 측정결과 93
<표 3.38> 고온양생 모르타르의 흡수율 측정결과 94
<표 3.39> 저온양생 모르타르의 흡수율 측정결과 95
<표 3.40> 백화시험 결과 (OPC) 97
<표 3.41> 백화시험 결과 (SC) 98
<표 3.42> 실험계획 101
<표 3.43> 산종류에 의한 Na_2O의 용해 101
<표 3.44> 실험계획 102
<표 3.45> 온도변화에 의한 Na_2O의 용해 103
<표 3.46> 실험계획 104
<표 3.47> 반응시간에 따른 Na_2O의 용해 104
<표 3.48> 실험계획 106
<표 3.49> 실험계획 107
<표 3.50> 결합재의 물리 화학적 특성 108
<표 3.51> 유기계 혼합형 백화저감제의 화학적 특성 108
<표 3.52> 무기계 도포형 백화저감제의 물리 화학적 특성 109
<표 3.53> 압축강도 측정결과 110
<표 3.54> 백화발생면적 측정결과 111
<표 3.55> 흡수율 측정결과 113
<표 3.56> 백화발생면적 측정결과(CR10) 116
<표 3.57> 백화발생면적 측정결과(CR30) 117
<표 3.58> 실험계획 123
<표 3.59> 각 산업부산물의 성분분석(XRF)결과 126
<표 3.60> 각 산업부산물의 분말도 및 밀도 측정 결과 127
<표 3.61> 각 산업부산물의 평균입경 및 입형(SEM) 130
<표 3.62> 각 산업부산물의 흡수율 분석결과 131
<표 3.63> 실험계획 133
<표 3.64> 보통 포틀랜트 시멘트의 물리 화학적 성분 134
<표 3.65> 산업부산물의 화학적 특성 134
<표 3.66> 자극제의 화학적 성질 135
<표 3.67> 압축강도 및 압축강도 발현비 측정결과 (SB 1Type) 136
<표 3.68> 압축강도 및 압축강도 발현비 측정결과 (SB 2Type) 138
<표 3.69> 압축강도 및 압축강도 발현비 측정결과 (SB 3Type) 140

<표 3.70> 수경율 측정결과 142
<표 3.71> 석회 포화도 측정결과 143
<표 3.72> CaO/SiO_2 측정결과 144
<표 3.73> $CaO+Al_2O_3+SO_3/SiO_2$ 측정결과 145
<표 3.74> 활성 슬래그 바인더의 최적배합 선정 146
<표 3.75> 실험계획 147
<표 3.76> 결합재의 물리화학적 특성 149
<표 3.77> 플로우 측정결과 151
<표 3.78> 플로우 측정결과 152
<표 3.79> 압축강도 및 압축강도 발현비 측정결과 153
<표 3.80> 액상형 레드머드 첨가율에 따른 색차분석결과 155
<표 3.81> 액상형 레드머드 첨가량에 따른 색차분석1 156
<표 3.82> 토양오염 공정시험결과 158
<표 3.83> 흙포장재 단체표준규격에 규정된 사용재료의 제한규정 162
<표 3.84> 흙포장재 성능기준 162
<표 3.85> 실험계획 163
<표 3.86> 결합재의 물리화학적 특성 164
<표 3.87> 골재 물성 164
<표 3.88> 백화발생 면적비율별 백화등급 168
<표 3.89> 최적함수비 측정결과 169
<표 3.90> 압축강도 측정결과 172
<표 3.91> 흡수율 측정결과 174
<표 3.92> 백화발생면적 측정결과(OPC) 177
<표 3.93> 백화발생면적 측정결과(SB) 178
<표 3.94> 실험계획 180
<표 3.95> 실험배합 180
<표 3.96> 활성 슬래그 바인더의 물리 화학적 특성 181
<표 3.97> 골재의 물리적 특성 182
<표 3.98> 슬럼프 측정결과 185
<표 3.99> 공기량 및 단위용적질량 측정결과 187
<표 3.100> 압축강도 및 압축강도 발현비 측정결과 189
<표 3.101> 압축강도 및 압축강도 발현비 측정결과 191
<표 3.102> 탄성계수 측정결과 193
<표 3.103> 실험계획 195
<표 3.104> 콘크리트 배합 195
<표 3.105> 결합재의 물리화학적 특성 196
<표 3.106> 골재의 물리적 특성 196
<표 3.107> 슬럼프 측정결과 198

<표 3.108> 공기량 측정결과 199
<표 3.109> 단위용적질량 측정결과 200
<표 3.110> 압축강도 201
<표 3.111> 케이씨㈜ 흙포장재 현장시험시공 개요 207
<표 3.112> 케이씨㈜ 흙포장재 시험시공 품질평가 (28일) 212
<표 3.113> 케이씨㈜ 흙포장재 시험시공 품질평가 (28일) 213
<표 3.114> 고감성 칼라시멘트 콘크리트 2차제품 제조시험 216
<표 3.115> 고감성 칼라 시멘트 콘크리트의 2차제품 시험시공 개요 219
<표 3.116> 콘크리트 2차제품 시제품의 치수 측정결과 221
<표 3.117> 콘크리트 2차제품 시험시공 품질평가 221
<표 3.118> 1차 분석용 변인 225
<표 3.119> 2차 분석용 변인 225
<표 3.120> 3차 분석용 변인 225
<표 3.121> 1차 분석용 측색대상 시료(콘크리트 블록)의 조성비 226
<표 3.122> 2차 분석용 측색대상 시료(콘크리트 블록)의 조성비 227
<표 3.123> 3차 분석용 측색대상 시료(콘크리트 블록)의 조성비 228
<표 3.124> 콘크리트 블록의 조성비에 따른 색차값 분석 274
<표 3.125> 측색대상 시료(콘크리트 블록)의 조성비 275
<표 3.126> 시료의 조성비 276
<표 3.127> 평가변인 카테고리 분류 277
<표 3.128> 피험자의 구성 279
<표 3.129> 평가변인 분석 280
<표 3.130> ‘노출콘크리트 이미지에 적합한 ‘의 카테고리 분석 281
<표 3.131> ‘석재 이미지에 적합한’ 의 카테고리 분석 282
<표 3.132> ‘황토 이미지에 적합한’ 의 카테고리 분석 283
<표 3.133> ‘디자인이 마음에 드는’ 의 카테고리 분석 284
<표 3.134> ‘유행에 앞선’ 의 카테고리 분석 285
<표 3.135> 평가변인 분류 286
<표 3.136> 피험자의 구성 286
<표 3.137> 평가 어휘 287
<표 3.138> 요인분석결과 288
<표 3.139> 연구개발 목표 및 개발결과 요약 293
<표 3.140> 연구개발결과 세부평가 항목 294
<표 3.141> 연구개발 성과 목표 달성도 295
<표 3.142> 연구개발성과 세부내용 296
<표 4.1> 시멘트 1톤 제조시 발생되는 석탄소비량 및 CO_2 배출량 300
<표 4.2> 1㎥ 결합재 생산시 기존제품과 개발제품의 CO_2 배출량 301
<표 5.1> 레드머드 처리량 분석 310
<표 6.1> 레드머드의 재활용기술 316

< 그 림 목 차 >

<그림 1.1> 연구개발의 개요 3
<그림 1.2> 건설산업분야에서 감성활용 기술의 필요성 4
<그림 1.3> 건설산업분야에서 감성활용 기술의 필요성 4
<그림 1.4> 탄소저감형 친환경 차세대 바인더 기술의 필요성 5
<그림 1.5> 알칼리활성화 슬래그-레드머드 칼라시멘트의 백화저감 필요성 5
<그림 1.6> 연구개발의 추진전략 6
<그림 1.5> 알칼리활성화 슬래그-레드머드 칼라시멘트의 백화저감 필요성 5
<그림 1.6> 연구개발의 추진전략 6
<그림 2.1> 레드머드의 건설자재 활용 장애요인(백화) 9
<그림 2.2> 국외의 레드머드 재활용 사례 12
<그림 2.3> ASRC 경화체 조직 12
<그림 2.4> 선행연구과제와의 차별성 16
<그림 3.1> 연구개발의 최종목표 및 세부목표 23
<그림 3.2> 레드머드의 발생공정 28
<그림 3.3> 레드머드의 발생상황 (국내) 29
<그림 3.4> 레드머드 채취샘플성상 30
<그림 3.5> 월별 레드머드 샘플의 입형분석(SEM_×3,000배율) 32
<그림 3.6> 레드머드 슬러지 39
<그림 3.7> 레드머드 슬러지 XRD 결과 40
<그림 3.8> 레드머드 슬러지의 입도분포 40
<그림 3.9> 호모믹서 41
<그림 3.10> 호모믹서 원리 41
<그림 3.11> 점도 측정장비 42
<그림 3.12> 점도 측정 모습 42
<그림 3.13> 침전지수 측정예시 42
<그림 3.14> 측정시료 42
<그림 3.15> 입도 분석기 43
<그림 3.16> 점도 측정결과 45
<그림 3.17> 초기점도와 180일 점도와의 관계 46
<그림 3.18> W/R에 따른 점도비 47
<그림 3.19> W/R에 따른 점도비 48
<그림 3.20> 플레인 시료의 침전지수 50
<그림 3.21> W/R 200%의 침전지수 51
<그림 3.22> W/R 100%의 침전지수 52
<그림 3.23> W/R 100%의 침전지수 54
<그림 3.24> W/R 25%의 침전지수 55

<그림 3.25> W/R에 따른 입도분포 56
<그림 3.26> W/R에 따른 평균 입경 57
<그림 3.27> 점도와 침전지수의 관계 58
<그림 3.28> 초기와 180일의 점도관계 59
<그림 3.29> ASTM C 67의 백화 시험방법 62
<그림 3.30> AS/NZS 4456.6 Test 62
<그림 3.31> 건재시험센터 시험방법 63
<그림 3.32> Elotex Lab Test 63
<그림 3.33> 액상형 레드머드 촉진제 65
<그림 3.34> 백화발생 평가 66
<그림 3.35> 재령 7일 압축강도 측정결과 69
<그림 3.36> 재령 28일 압축강도 측정결과 69
<그림 3.37> 흡수계수 측정결과 71
<그림 3.38> 기공특성 72
<그림 3.39> 백화발생면적 측정결과 (C) 74
<그림 3.40> 백화발생면적 측정결과 (SC) 74
<그림 3.41> EDS 분석결과 76
<그림 3.42> 백화생성물질 XRD분석결과 (C) 77
<그림 3.43> 백화생성물질 XRD분석결과 (SC) 76
<그림 3.44> 열중량분석 79
<그림 3.45> 용출량 79
<그림 3.46> 양생조건 82
<그림 3.47> 표준수중양생 모르타르의 강도 측정결과 85
<그림 3.48> 기건양생 모르타르의 강도 측정결과 87
<그림 3.49> 고온양생 모르타르의 강도 측정결과 89
<그림 3.50> 저온양생 모르타르의 강도 측정결과 91
<그림 3.51> 흡수율 측정결과 (표준 수중양생) 92
<그림 3.52> 흡수율 측정결과 (기건양생) 93
<그림 3.53> 흡수율 측정결과 (고온양생) 94
<그림 3.54> 흡수율 측정결과 (저온양생) 95
<그림 3.55> 백화시험 결과 (OPC) 99
<그림 3.56> 백화시험 결과 (SC) 99
<그림 3.57> 산종류에 의한 Na_2O의 용해 102
<그림 3.58> 온도에 따른 10% HCl안의 Al_2O_3, Fe_2O_3, Na_2O, SiO_2 조성 103
<그림 3.59> 온도에 따른 10% HCl안의 Al_2O_3, Fe_2O_3, Na_2O, SiO_2 조성 105
<그림 3.60> 무기계 도포형 백화저감제 109
<그림 3.61> 압축강도 측정결과 110
<그림 3.62> 백화발생면적 측정결과 112

<그림 3.63> 압축강도 측정결과(CR10) 114
<그림 3.64> 압축강도 측정결과(CR30) 114
<그림 3.65> 압축강도 측정결과(CR10) 118
<그림 3.66> 압축강도 측정결과(CR30) 118
<그림 3.67> 각 산업부산물의 종류 123
<그림 3.68> XRF 측정장비 124
<그림 3.69> XRd 측정장비 124
<그림 3.70> 입도 분석기 125
<그림 3.71> 각 산업부산물의 XRD분석결과 126
<그림 3.72> 산업부산물의 분말도 및 밀도 측정 결과 127
<그림 3.73> 입도분석 결과 129
<그림 3.74> 각 산업부산물의 입도분석 결과 130
<그림 3.75> SB 1Type 압축강도 측정결과 137
<그림 3.76> SB 1Type 압축강도 발현비 137
<그림 3.77> AAS 2타입 압축강도 측정결과 139
<그림 3.78> AAS 2타입 압축강도 발현비 139
<그림 3.79> AAS 3타입 압축강도 측정결과 141
<그림 3.80> AAS 3타입 압축강도 발현비 141
<그림 3.81> 압축강도 발현비에 따른 수경율 측정결과 142
<그림 3.82> 압축강도 발현비에 따른 석회 포화도 측정결과 143
<그림 3.83> 압축강도 발현비에 따른 CaO/SiO_2 측정결과 144
<그림 3.84> 압축강도 발현비에 따른 $CaO+Al_2O_3+SO_3/SiO_2$ 측정결과 145
<그림 3.85> 레드머드 사진 148
<그림 3.86> 플로우 테이블 사진 149
<그림 3.87> 플로우 측정사진 149
<그림 3.88> 압축강도 측정장비 사진 150
<그림 3.89> 압축강도 측정사진 150
<그림 3.90> 색채 측정 사진 150
<그림 3.91> CIE Lab color system 150
<그림 3.92> 플로우 측정결과 152
<그림 3.93> 압축강도 측정결과 154
<그림 3.94> 압축강도 발현비 154
<그림 3.95> 액상형 레드머드 첨가량에 따른 a*와 b* 측정결과 156
<그림 3.96> a* 와 b*의 상관관계 측정결과 157
<그림 3.97> 최적함수비 산정 실험과정 165
<그림 3.98> 압축강도 시험과정 166
<그림 3.99> 흡수량 시험 과정 167
<그림 3.100> 화상처리 전 후 168

<그림 3.101> 최적함수비 측정 결과 (1) 170
<그림 3.102> 최적함수비 측정 결과 (2) 171
<그림 3.103> 압축강도 측정결과 173
<그림 3.104> 흡수율 측정결과 175
<그림 3.105> 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 백화발생면적비율 176
<그림 3.106> XRD 분석결과 181
<그림 3.107> 슬럼프 측정사진 182
<그림 3.108> 공기량(Air Content) 측정사진 183
<그림 3.109> 탄성계수 측정사진 184
<그림 3.110> 슬럼프 측정결과 185
<그림 3.111> 슬럼프 측정결과 186
<그림 3.112> 공기량 및 단위용적질량 187
<그림 3.113> 압축강도 발현비 및 TG 측정결과 190
<그림 3.114> 할렬인장강도 및 발현비 측정결과 192
<그림 3.115> 탄성계수 측정결과 193
<그림 3.116> 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 슬럼프 198
<그림 3.117> 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 공기량 199
<그림 3.118> 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 단위용적질량 200
<그림 3.119> 결합재 종류별 압축강도 (증기양생) 202
<그림 3.120> 결합재 종류별 압축강도 (수중양생) 203
<그림 3.121> 흙포장재 2차 시험시공 개략도 207
<그림 3.122> 흙포장재 2차 시험시공 개략도 및 위치 207
<그림 3.123> 케이씨㈜ 흙포장재 현장시험시공_준비 및 바탕정리 208
<그림 3.124> 케이씨㈜ 흙포장재 현장시험시공_자재입고 209
<그림 3.125> 케이씨㈜ 흙포장재 현장시험시공_흙포장재 포장(1) 210
<그림 3.126> 케이씨㈜ 흙포장재 현장시험시공_흙포장재 포장(2) 211
<그림 3.127> 압축강도 측정결과 212
<그림 3.128> 휨강도 측정결과 213
<그림 3.129> 미끄럼 저항성 측정결과 214
<그림 3.130> 동결융해 100cycle 이후 측정결과 214
<그림 3.131> 콘크리트 2차제품 시험생산 개략도 및 위치 216
<그림 3.132> ㈜콘스텍 217
<그림 3.133> 생산플랜트 전경 217
<그림 3.134> 콘크리트 2차제품 생산과정 218
<그림 3.135> 콘크리트 2차제품 시험조적 개략도 및 위치 219
<그림 3.136> 케이씨㈜ 흙포장재 현장 콘크리트 2차제품 조적 220
<그림 3.137> 압축강도 측정결과 222
<그림 3.138> 흡수율 측정결과 222

<그림 3.139> 측색 방법 예시 229
<그림 3.140> CIE Lab 표색계 230
<그림 3.141> L*, a*, b* 직교 좌표계 230
<그림 3.142> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료1 231
<그림 3.143> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료2 232
<그림 3.144> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료3 233
<그림 3.145> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료4 234
<그림 3.146> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료5 235
<그림 3.147> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료6 236
<그림 3.148> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료7 237
<그림 3.149> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료8 238
<그림 3.150> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료9 239
<그림 3.151> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료10 240
<그림 3.152> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료11 241
<그림 3.153> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료12 242
<그림 3.154> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료13 243
<그림 3.155> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료14 244
<그림 3.156> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료15 245
<그림 3.157> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료16 246
<그림 3.158> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료17 247
<그림 3.159> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료18 248
<그림 3.160> 건조 레드머드의 상태에 따른 분석결과-시료1 249
<그림 3.161> 건조 레드머드의 상태에 따른 분석결과-시료2 250
<그림 3.162> 건조 레드머드의 상태에 따른 분석결과-시료3 251
<그림 3.163> 건조 레드머드의 상태에 따른 분석결과-시료4 252
<그림 2.164> 건조 레드머드의 상태에 따른 분석결과-시료5 253
<그림 3.165> 건조 레드머드의 상태에 따른 분석결과-시료6 254
<그림 3.166> 건조 레드머드의 상태에 따른 분석결과-시료7 255
<그림 3.167> 건조 레드머드의 상태에 따른 분석결과-시료8 256
<그림 3.168> 건조 레드머드의 상태에 따른 분석결과-시료9 257
<그림 3.169> 건조 레드머드의 상태에 따른 분석결과-시료10 258
<그림 3.170> 건조 레드머드의 상태에 따른 분석결과-시료11 259
<그림 3.171> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료1 260
<그림 3.172> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료2 261
<그림 3.173> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료3 262
<그림 3.174> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료4 263
<그림 3.175> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료5 264
<그림 3.176> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료6 265

<그림 3.177> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료7 266
<그림 3.178> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료8 267
<그림 3.179> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료9 268
<그림 3.180> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료10 269
<그림 3.181> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료11 270
<그림 3.182> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료12 271
<그림 3.183> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료13 272
<그림 3.184> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료14 273
<그림 3.185> 감성평가 시료 278
<그림 3.186> 만족도 평가 모습 279
<그림 3.187> 만족도 평가지 280
<그림 3.188> 선호도 평가지 287
<그림 3.189> 인자득점 플로트도 (Ⅰ요인-Ⅱ요인) 289
<그림 3.190> 인자득점 플로트도 (Ⅱ요인-Ⅲ요인) 290
<그림 4.1> 1㎥ 결합재 생산시 CO2 배출량300 301
<그림 5.1> 국내특허등록 305
<그림 5.2> 국제특허 출원 305
<그림 5.3> 레드머드 건설사업화 진행 연혁 306
<그림 5.4> 액상형 레드머드 슬러지의 사업성 및 기술성 307
<그림 5.5> 액상형 레드머드 슬러지의 사업성 및 기술성 308
<그림 5.6> 액상형 레드머드 촉진제의 시장분석 309
<그림 5.7> 사업화 목표(안) 311
<그림 6.1> Bauxsol에 의한 광산배수 처리 사례 316
<그림 6.2> Effect of concentration on the uptake of rhodamine B. 318
<그림 6.3> Effect of adsorbent dose on the adsorption of rhodamine B on red mud. 318
<그림 11.1> 한국건설순환자원학회지 특집기사 게재 337

제 1 장
연구개발과제의 개요

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발의 목적

◎ 산업부산물을 업싸이클링(Upcycling)한 고감성 건설기술 수요 증대

감성융합 기술의 세계시장은 연평균 27%씩 급성장 하고 있으며 건설분야에서도 감성 활용 기술의 필요성이 증대되고 있다. 기존에는 버려지던 산업부산물을 단순히 재활용하는 차원(recycling)에서 향후에는 재활용에 새로운 가치를 더해(upgrade) 감성을 부여하는 가치상향형의 고감성 업싸이클링(upcycling) 건설기술에 대한 요구가 증대되고 있다.

◎ 레드머드 슬러지를 활용한 천연황토 질감 구현 액상형 레드머드 촉진제 개발

재활용율 15%이하인 레드머드를 천연 황토의 질감을 구현할 수 있도록 건조분쇄 공정없이 액상형 친환경 칼라촉진제를 개발하고자 한다. 보오크사이트로부터 수산화알루미늄 추출공정에서 발생되는 레드머드 슬러지는 Fe_2O_3가 약 20% 함유되어 자연스런 천연 황토색을 나타낸다. 함수율 50%의 슬러지를 소성건조 및 분쇄공정 없이 슬러지 상태로 고속전단 회전시켜 가성비를 향상시킨 액상형 레드머드 촉진제로 개발하고자 한다.

◎ 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 알칼리활성화 고감성 칼라시멘트 개발

고로슬래그와 건식 탈황석고 자극제로 이루어진 분말형 활성 슬래그 바인더와 레드머드 슬러지를 액상형한 알칼리활성화 촉진제를 혼합하여 천연 황토 질감을 표현할 수 있는 알칼리활성화 고감성 칼라시멘트를 개발하고자 한다. 알칼리활성화 고감성 칼라시멘트는 포틀랜트시멘트를 전혀 사용하지 않는 탄소저감형 친환경 차세대 바인더로서 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트로 정의하고 있다.



<그림 1.1> 연구개발의 개요

2. 연구개발의 필요성

◎ 건설산업 분야에서의 감성 활용기술의 필요성 증대

21세기에는 감성에 바탕을 둔 꿈을 대상으로 하는 시장이 정보를 기반으로 하는 시장보다 더 커질 것이며, 감정을 대상으로 하는 시장이 물리적 상품을 대상으로 하는 시장을 능가할 것 이라고 덴마크의 미래학연구소장 랄프 예센(Rolf Jensen)이 보고하였다.

미, 일, EU 선진국은 감성융합기술을 국가차원의 연구개발 과제로 추진하고 있으며 감성 융합기술 세계시장은 15년 약 875억 달러 규모로 연평균 27%씩 급성장하고 있다. 1인당 국민소득 2만 달러 시대를 맞아 양적팽창보다는 질적인 부분을, 이성보다는 감성을 자극하는 사회적 트렌드의 변화에 대응할 수 있는 감성 건설기술의 필요성이 대두되고 있다.



<그림 1.2> 건설산업분야에서 감성활용 기술의 필요성

◎ 레드머드 업싸이클링에 의한 고감성 건설재료화 기술의 필요성

연평균 25만톤 발생되는 산업부산물 레드머드를 건설재료로서 활용하게 되면 우수한 천연질감을 나타내지만 강도저하, 백화발생, 제조원가 상승 등으로 인하여 재활용에 제한적이다.

보오크사이트로부터 수산화알루미늄/알루미나($Al(OH)_3/Al_2O_3$) 제조과정에서 발생하는 부산물인 레드머드는 국내에서 연간 약 25만톤이 발생되며 재활용율은 15%이하인 실정이다. 레드머드는 알루미늄 추출공정상의 가성소다로 인하여 Na_2O가 4~5%함유되어 pH 11~12의 강알칼리성을 띄며 기존 시멘트에 적용시 강도 저하 및 백화가 발생하게 된다. 레드머드의 발생형태는 함수율 50~60%의 슬러지 상태이며 배출된 후 소성건조공정과 분쇄공정을 거쳐 함수율 약 10% 내외로 조절된 스칼렛 분말(Scarlet Powder)로 가공처리되어 재활용되고 있으나 에너지소비 및 환경문제와 더불어 원가가 상승되고 있다.

☞ 본 연구개발은 레드머드 슬러지의 건조·분쇄 가공처리 없이 레드머드 슬러지를 고속전단회전 방식에 의하여 분산시켜 액상형 레드머드 촉진제 개발함으로서 원가를 절감시킬 수 있는 고감성 칼라시멘트를 개발하여 고부가가치 업싸이클링(Upcycling) 하고자 한다.



<그림 1.3> 건설산업분야에서 감성활용 기술의 필요성

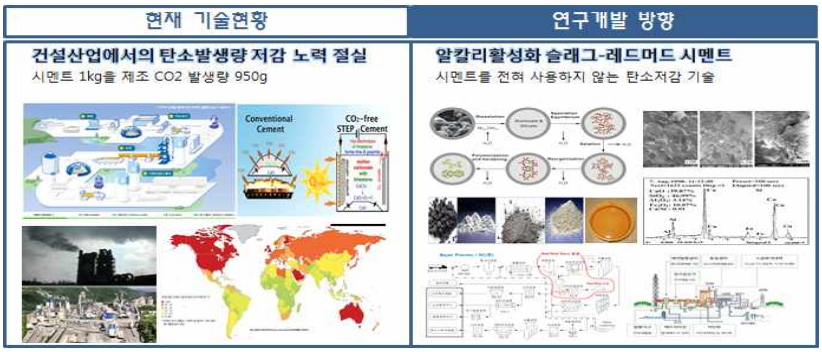
◎ 탄소저감형 친화경 차세대 바인더 기술의 필요성

시멘트 1kg을 제조하는데 발생되는 CO_2 가스의 양은 약 950g으로 보고되고 있으나 산업부산물을 100% 재활용한 고감성 칼라시멘트는 소성과정을 거치지 않는 탄소저감 건설기술이다. 우리나의 경우 1990년도의 이산화탄소 배출량은 약 2억 2,620만톤 이었으나, 현재는 약 5억 9,880만톤 발생하여 매년 증가하는 추세이다.

포틀랜트 시멘트를 전혀 사용하지 않고 탄소발생을 저감할 수 있는 레드머드 활용 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트(Alkali-activated Cement) 개발의 필요성 대두되고 있다.

알칼리활성화 시멘트 연구의 일환으로서 고로슬래그미분말, 액상 알칼리 촉진제, 레드머드로 구성되어진 클링커 프리 시멘트로 2000년 초반 Pan Zhihua 등에 의하여 처음으로 소개되었다. 알칼리 촉진제로서 가성소다 또는 물유리와 같은 강알칼리 고위험 액상 촉진제를 사용함으로서 취급이 위험하고 단가가 높아지는 단점이 있다.

☞ 본 연구개발은 가성소다, 물유리와 같은 고위험성 촉진제를 사용하지 않고 활성 슬래그 바인더와 함께 액상 레드머드 촉진제를 활용하는 고감성 칼라시멘트를 개발하고자 한다.



<그림 1.4> 탄소저감형 친환경 차세대 바인더 기술의 필요성

◎ 알칼리활성화 슬래그-레드머드 칼라시멘트의 백화저감 필요성

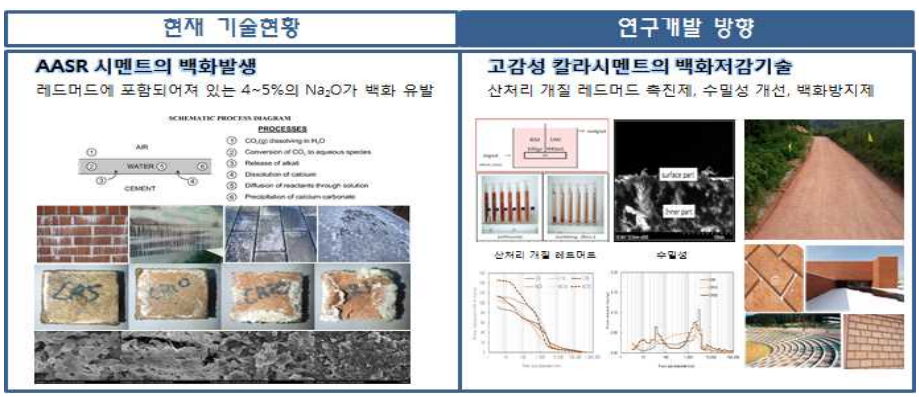
레드머드를 콘크리트에 적용한 사례로는 ○○엔지니어링에서는 기존 시멘트에 레드머드를 착색제로 사용한 현장 콘크리트 및 콘크리트 패널을 일부 현장에 적용하고 있다.

레드머드에 포함되어져 있는 Na_2O 성분으로 인하여 시멘트에 적용시 강도가 저하되고 백화가 발생하였다.

○○대학교에서는 레드머드를 알칼리활성화 시멘트의 촉진제로서 연구 검토한 결과 레드머드의 강알칼리성으로 인하여 10%이내의 범위에서는 활용가능 할 것으로 제시하였다.

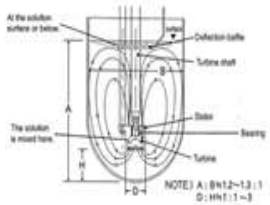
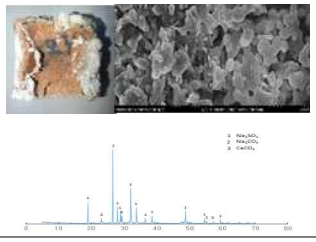
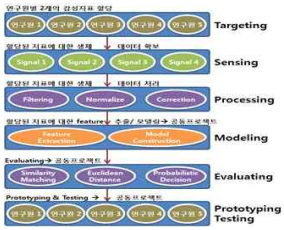
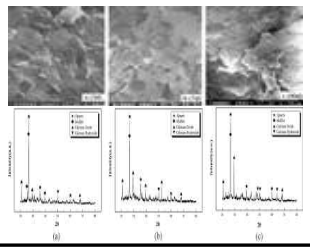
레드머드 첨가율의 증가에 따라서 10~1000nm의 모세관 공극이 증가하여 흡수율이 높아지고 내구성이 저하함과 더불어 백화발생이 급격히 진행되는 것으로 발표하였다.

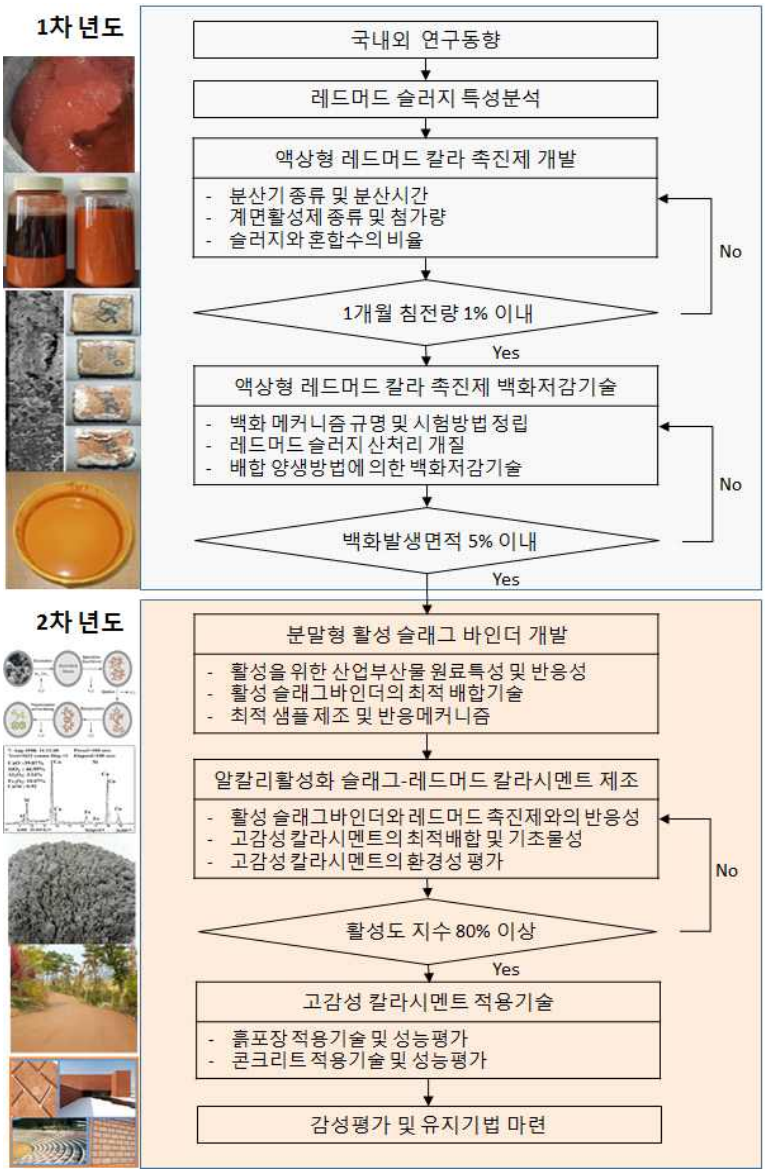
☞ 본 연구개발은 레드머드 건설재료화 국내 기술개발 현황에서 가장 문제시되고 있는 백화발생을 액상형 산처리 개질 레드머드 촉진제에 의하여 억제 및 저감 시키고자 한다.



<그림 1.5> 알칼리활성화 슬래그-레드머드 칼라시멘트의 백화저감 필요성

3. 연구개발 범위

<table>
<tr><th colspan="4">연구개발 범위</th></tr>
<tr><td>액상형
레드머드
촉진제
제조기술
[1차년도]</td><td>1.액상 입자 분산기술
  </td><td>2. 백화억제 및 저감기술
  </td><td>3. 감성평가 기법
  </td></tr>
<tr><td>고감성
칼라시멘트
제조기술
[2차년도]</td><td>1. 활성 슬래그 바인더 제조
  </td><td>2. 고감성 칼라시멘트 제조
  </td><td>3. 고감성 칼라시멘트의 적용
  </td></tr>
</table>



〈그림 1.6〉 연구개발의 추진전략

제 2 장
국내외 기술 개발 현황

제 2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내 기술개발 동향

1) 레드머드를 중금속 제거제로서의 재활용

○○대학교를 비롯한 2~3개 연구팀에 의해 중금속 폐수처리를 위한 응집제 개발에 관한 연구가 진행된바가 있다.

○○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 확인하였다. 그러나 지속적인 연구가 이루어지지 못하고 실질적인 활용은 이루어지고 있지 않다.

2) 레드머드를 보통 포틀랜트 시멘트의 안료로서 재활용

벽돌 등 건자재로의 재활용 기술은 KC(주) 공장의 건설과 함께 추진되어 공장 인근에 연간 20만장 규모의 벽돌공장을 세워 레드머드를 재활용하고 있다. 그러나 레드머드에 포함되어 있는 Na성분에 의하여 생산된 벽돌에 하얀색의 백화가 생겨 미관상 문제를 발생시켜 수요가 감소하였고, 현재는 가동을 완전히 중지·폐업한 상태이다.

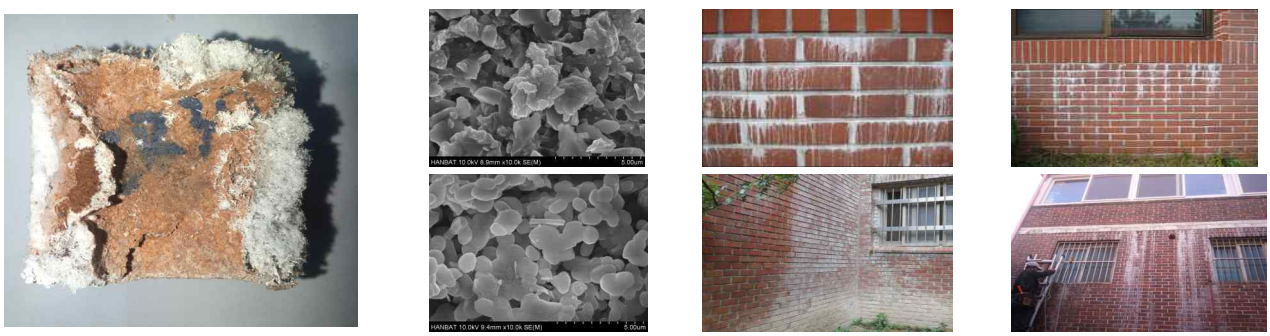
2000년대 후반 ○○대학교에서는 레드머드를 친환경 칼라콘크리트의 안료로 적용한 결과 단위 시멘트량에 대하여 15%내외로 사용하게 되면 기존 산화철 피그먼트를 사용한 것과 비교하여 월등히 우수한 디자인 특성을 지닌 것으로 발표하였다.

레드머드를 시멘트에 사용할 경우 압축강도 저하 및 건조수축이 증대하여 내구성에 문제가 발생하였으며, 백화발생으로 인한 칼라콘크리트의 취약점이 있는 단점을 내포하고 있다.

레드머드를 콘크리트에 적용한 사례로는 ○○엔지니어링에서는 기존 시멘트에 레드머드를 착색제로 사용한 현장 콘크리트 및 콘크리트 패널을 일부 현장에 적용하였다.

레드머드에 포함되어져 있는 Na_2O 성분으로 인하여 시멘트에 적용시 강도저하 및 백화가 발생되어 건설산업 파급효과는 미미하다.

○○대학교에서는 레드머드를 알칼리활성화 시멘트의 촉진제로서 연구 검토한 결과 레드머드의 강알칼리성으로 인하여 10%이내의 범위에서는 활용가능 할 것으로 제시하였으나 레드머드 첨가율의 증가에 따라서 10~1000nm의 모세관 공극이 증가하여 흡수율이 높아지고 내구성이 저하함과 더불어 백화발생이 급격히 진행되는 것으로 발표하였다.



<그림 2.1> 레드머드의 건설자재 활용 장애요인(백화)

3) 매립 복토제로의 활용

현재 대부분의 발생된 보크사이트 잔사물은 플라이애쉬 및첨가제등과 혼합하여 진흙의 상태를 고형화하고 pH를 안정화하여 복토재나 매립용으로 처리하고 있다. 이 처리방법은 대량으로 활용하기에는 적합하나 많은 비용이 수반되고 님비현상으로 인하여 많은 제약을 받고 있는 실정이다.

4) 중화처리제로의 활용

보크사이트 잔사물은 알루민산나트륨과 탄산소다를 함유한 알카리성으로 여러 산업에서 발생하는 산성의 폐수의 중화제로 사용하기에 적합하다. 이에 수분의 감소와 첨가제등을 혼합하여 폐산의 중화처리제로 개발하여 판매중에 있으며 중 화물의 안정성이 뛰어나 판매시장이 지속적으로 성장될 것으로 예상된다.

5) 안료 및 알칼리 특수시멘트 재료로의 활용

시멘트 조성에 있어 알칼리 자극제나 클링커 프리 시멘트 등으로 활용 가치가 있음을 많은 연구를 통하여 입증을 하고 있으며 최근 슬러리 액상형을 통한 용이성을 증가시키고 백화 현상, 강도저하를 개선한 제품을 개발하여 기능성 안료로써의 가치를 부여하여 상품화를 추진하고 있다.

6) 탄소광물화

최근 호주에서등 탄소를 직접 고정화 하는데 보크사이트 잔사물을 활용하는 기술이 개발되고 있으며 케이씨도 국제적 탄소저감정책에 따라 가능성을 입증하기 위해 여러 국가기관과 탄소고정화 사업을 실행하고 있다. 알칼리 물질의 광물탄산화에서 중요한 점은 폐기물에 함유된 Binary Oxide(CaO, MgO or $Ca(OH)_2$, $Mg(OH)_2$)에 의해 공급되는 양이 중요하지만 보크사이트 잔사물에는 충분하지 않아 이를 유도하기 위해 첨가제로 혼합하여 활용하는 가능성을 연구하고 있다.

7) 중금속 흡착

일반적으로 광산의 폐수와 광미를 안정화 방법으로 시멘트나 석회 또는 알칼리 물질과 광미를 혼합하여 유해물질의 용출 가능성을 낮추는 방법이 대표적이다. 이때 알칼리 특성을 가지는 보크사이트 잔사물을 이용해 산성 광미 pH를 중성 및 약알칼리 상태로 조절하면 광미에서 발생하는 유해물질인 Cu, Zn, Cr, As, Pb, Mn등의 용출을 방지 할 수 있으며 낮은 pH에서 발생하는 광미의 잠재적 환경의 유해성을 낮출 수 있다.

8) 인 제거제

보크사이트 잔사물은 수질의 부영양화 물질인 인 흡착능력이 뛰어나 수질 오염방지용 세라믹 여재를 개발하고 있다. 보통의 여재의 경우 인흡착 효율이 60 % 미만이었으나 보크사이트 잔사물을 기반으로 한 여러 첨가제를 혼합하여 80 %까지 흡착율을 증가시킬 수 있었다. 향후 환경적 영향 평가와 대량 생산기술이 상용화 된다면 수질환경 개선과 산업부산물 재활용의 두 가지 목적을 동시에 달성하리라 기대하고 있다.

9) 레드머드 재활용 관련 법규(폐기물 관리법)

레드머드는 폐기물 관리법에 의해 재활용 관련법규가 재정되어 있으며 시행규칙 [별표 4]의 3에 의해 보크사이트 잔재물로 분류된다. 레드머드의 분류번호는 51-02-09로 재활용 유형은 R-3-1, R-3-2, R-4-7, R-10과 R-4-2, R-7-3, R-10에 해당된다.

재활용 유형의 R-3, R-4은 재생이용 할 수 있는 상태로 만들거나 재생이용하는 유형이며, R-7은 토양이나 공유수면 등에 성토재・복토재・도로기층재・채움재 등으로 재활용하는 유형, R-10은 제품 제조 등을 위한 중간가공폐기물을 만드는 유형으로 분류되며 재활용 유형별 세부분류를 <표 2.1>에 나타내었다. 본 연구에서의 알칼리활성화 고감성 칼라시멘트로의 재활용은 R-4-2에 해당하여 세부분류는 골재, 유리, 시멘트, 콘크리트 및 레미콘, 내화물, 요업제품, 각종 석제품 등 비금속광물제품이나 아스콘, 아스팔트, 고화제 등 기타로 분류된다.

<표 2.1> 폐기물관리법 시행 규칙에 따른 재활용범위

분류번호	폐기물 종류	재활용 유형	사전분석 확인여부
51-02-09	보크사이트 잔재물	R-3-1, R-3-2, R-4-7, R-10	해당 없음
		R-4-2, R-7-3, R-10	해당
재활용 유형	재활용 유형별 세부분류		
R-3-1	단순 해체, 분리, 파쇄, 선별 등의 공정을 통해 폐기물에서 금속 또는 비금속 자원을 회수하는 유형		
R-3-2	용융, 용해, 반응, 추출, 등의 공정을 통해 폐기물에서 금속 또는 비금속 자원을 회수하는 유형		
R-4-7	유・무기성 화합물, 산화물 등의 화학물질이나 안료나 도료, 페인트, 착색제 등 화학제품을 제조하는 유형		
R-4-2	골재, 유리, 시멘트, 콘크리트 및 레미콘, 내화물, 요업제품, 각종 석제품 등 비금속광물제품이나 아스콘, 아스팔트, 고화제 등 기타		
R-7-3	폐기물매립시설의 복토재 또는 바다와 인접한 폐기물매립시설의 복토재, 차수재로 사용하는 유형		
R-10	R-3부터 R-9까지의 재활용 유형에 따라 재활용하기 위한 중간가공 폐기물을 만드는 유형		

2. 국외 기술개발 동향

1) 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 왔다.

국외 레드머드 재활용 기술은 레드머드에 함유되어 있는 스칸듐 등 희귀원소의 회수연구, 건자재 활용기술, 도료의 안료 및 콘크리트 원료로의 활용기술, 플라스틱의 필러 및 촉매로의 활용기술, 흡착제로 이용한 산업폐수 슬러리에 대한 연구 등이 있다.

최근에는 러시아 ARRICT(All-Russian Research Institute of Chemical Technology)의 V.A. Peganov등은 레드머드를 100% 재활용하기 위한 종합적 무폐기 기술개발을 추진하고 있다.

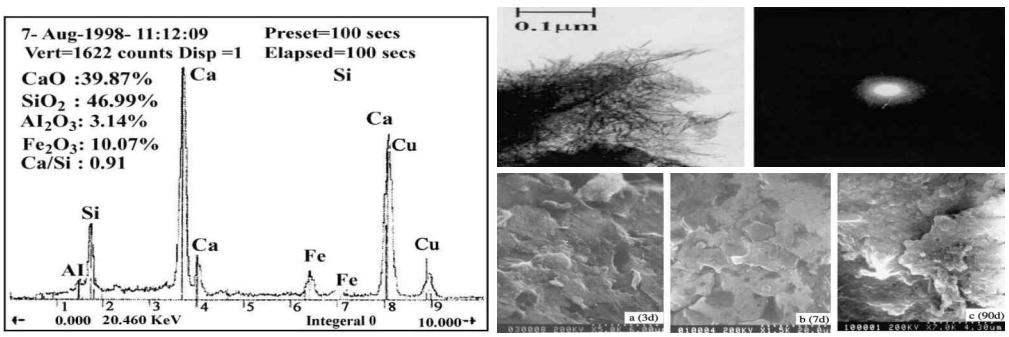


<그림2.2> 국외의 레드머드 재활용 사례

2) 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트(Alkali-activated Slag-Red Cement, ASRC)로의 활용

국외 기존 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트(ASRC)는 고로슬래그, 액상 알칼리자극제, 레드머드로 구성되어진 포틀랜트 시멘트를 사용하지 않는 클링커 프리 시멘트(Clinker Free Cement)이다. 알칼리활성화 슬래그시멘트는 높은 초기 및 종국 강도, 우수한 화학저항성이 검증되었지만 중요한 원재료인 고로슬래그의 높은 가격과 수급의 어려움으로 인하여 보급화가 힘들자 고로슬래그의 대체재로서 산업부산물인 레드머드를 활용하여 비중을 줄이고자 하는 연구가 2000년 초반 ○○등에 의하여 처음으로 소개되었다.

ASRC 경화체는 알칼리활성화 슬래그시멘트와 마찬가지로 밀실한 조직을 생성하여 초기 및 종국 강도가 높고, 화학저항성이 향상되는 것이 입증되었다. ASRC 시멘트도 알칼리활성화 슬래그시멘트와 마찬가지로 알칼리자극제로서 가성소다 또는 물유리와 같은 강알칼리 액상 자극제를 사용함으로서 취급이 위험하고 단가가 높아지는 단점과 이로 인한 백화가 발생하기 쉬운 단점이 있다.



<그림2.3> ASRC 경화체 조직

3) 시멘트 생산

보크사이트 잔사물을 포틀랜트 시멘트로 활용하는 연구는 75년 이상 진행되고 있다. 보크사이트 잔사물에 함유되어 있는 나트륨의 존재가 문제될 수 있지만 알루미늄 및 철 함유량은 시멘트의 강도 및 경화 특성 측면에서 활용 가치가 높다.

인도에서는 보크사이트 잔사물 50%와 석고를 혼합하여 포틀랜트 시멘트보다 강도가 향상된 철분이 풍부한 특수 세팅 시멘트를 제조하였고 그리스 Alumina 공장의 보크사이트 잔사물도 현재 지역 시멘트 산업에 사용하고 있다.

4) 도로건설등

탈수, 압축 후 적절한 결합제와 혼합된 보크사이트 잔사물은 도로 건축소재로 우수한 물성을 가지며 보크사이트 광산위주의 지역 운송도로 건설에 사용되어 왔다. 프랑스 Gardanne Alumina, 호주 Alcoa, 자메이카에서도 도로와 플랫폼 건설에 사용하고 있다.

5) 제방건설

탈수되고 압축 된 보크사이트 잔사물은 우수한 불 침투성을 가지므로 제방 및 다이크의 벽 건설에 유리하며 플라이 애시(fly ash), 점토로 덮어 물 침투를 줄이고 식물 성장을 촉진할 수 있어 전 세계적으로 널리 채택되고 있다.

6) 벽돌생산

보크사이트 잔사물에 함유된 나트륨 이온은 벽돌의 장기간내후성과 내구성을 감소시키므로 나트륨 이온을 칼슘으로 대체하여 특성을 현저히 향상시킬 수 있다. 무기(생석회, 석회석, 시멘트 및 석고) 또는 유기 결합제(PVA, PMMA)로 제조된 벽돌을 제조 할 수 있다.

7) 경량골재

보크사이트 잔사물과 발포제를 플라이 애시와 혼합하여 일반적으로 제조하여 제조되고 있다. 보크사이트 잔사물로 제조된 원료와 포졸란 시멘트로 규산염과 결합하여 만든 벽돌은 좋은 특성을 나타내었으며 건물건축에 여전히 사용되고 있다.

8) 토량개량

호주 서부에 있는 Alcoa에서는 모래 토양에 250 톤/ha 이상의 수준으로 보크사이트 잔사물과 5% 석고를 혼합하여 모래토양에 첨가하므로 토양의 수분 보전 및 영양소 이용 능력을 향상시켰다. 특히 비료 사용량을 줄일 수 있게 암모니아 및 인 보존이 크게 증가했다고 한다. pH 8 이하로 부분적으로 중화된 보크사이트 잔사물에 대한 인산염 보존 효과는 매우 뛰어난 것으로 나타났다. 이산화탄소에 의해 탄산 된 후 만들어진 보크사이트 잔사물을 Alkaloam ® 이라는 이름으로 1993년에 상업화하기도 하였다. 이 물질은 농업용 석회와 유사한 방식으로 작용하며 강한 인 흡착력을 지닐 뿐 아니라, 인의 침출성을 감소시키고 이로 인하여 강이나 하천으로 유입되는 인의 양을 감소시켜 부영양화를 예방하는 장점을 가지고 있다.

9) 철 회수

보크사이트 잔사물의 산화철 함량은 최대 60 %로 높은 편에 속한다. 이로 인해 많은 연구 및 회수 방법들이 꾸준히 제안되었으며 그 중 일부는 다음과 같다.

- 3℃에서의 수소, 일산화탄소 등의 가스 환원을 통한 회수

- 1,700 ℃의 전기 아크로에서 보크사이트 잔사물과 코크스 혼합 가열로 철분의 90% 회수
- 보크사이트 잔사물을 탄산나트륨과 같이 소성하여 물에 용해한 후 알루민산나트륨 용액을 회수하고 환원 과정으로 강자성 상태로 전환 후 자기 분리에 의한 회수
- 샤프트 킬른 상부에 보크사이트 잔사물을 장입 한 다음 바닥에서 수소, 암모니아 및 가스 연소 후 회수
- 보크사이트 잔사물을 염소 처리 후 티타늄 및 알루미늄 클로라이드를 단계적 제거 후 회수
- <350 ℃에서 일산화탄소 및 수소로 처리 한 다음 염화칼슘을 첨가하고 530-600 ℃로 가열 후 물로 용해하여 철, 티타니아 및 실리카를 분리 회수할 수 있다.

10) 산성광산 폐수의 중금속 흡착

보크사이트 잔사물은 중금속, 특히 광산 및 광물 가공 과정에서 발생되는 폐수의 중금속 흡착능력이 뛰어나 많은 연구가 진행되었다. 이탈리아에서는 해수로 보크사이트 잔사물을 중화시켜 제품화 하거나 일부 비소의 흡수율을 향상시키기 위해 플라이 애쉬와 혼합하기도 한다. 석고와 혼합 된 보크사이트 잔사물은은 구리, 아연, 니켈 및카드뮴을 제거하는 우수한 능력을 갖는다. 호주 Virotec 회사는 중금속 흡수 특성이 좋은 Bauxsol 이라고하는 부분 중화 된 물질을 생산하기 위해 바닷물보다는 염수를 사용하여 상당한 양을 생산하고 있다.

11) 인산염 제거

중화된 보크사이트 잔사물은 인산염 제거에 효과적이며 중국에서는 염산으로 부분 중화를 실시하여 열처리 후 연구 결과 99 % 이상의 인이 제거됨을 확인하였다. 영국의 하수 처리장 시험에서도 인산염 흡수제로 펠렛 형태의 제품을 사용하여 최종 유출수에서 매우 낮은 수준의 인 함량(0.06 mg/L 미만)을 달성 하여 종래의 방법으로는 달성하기 어려운 유출수의 EU 기준치를 충족시킬 수 있었다.

12) 제강내화물

루마니아에서는 보크사이트 잔사물을 침식에 대한 단열 내 화제의 보호에 필요한 일레나이트 사용량을 줄이기 위해 용광로에 공급되는 티타늄계 물질로 첨가하여 철강 생산의 내화제에 사용된다.

13) 안료적용

적색의 보크사이트 잔사물은 높은 철 함량과 미세한 입자상태로 다양한 물질의 안료로 주목받고 있다. 벽돌에 보크사이트 잔사물을 2~5 %로 첨가하면 산화철 안료의 원료비용을 줄이고 벽돌에 균일 한 적색을 발현할 수 있다. 적색 타일과 윈도우 창틀 및 바닥에 광범위하게 적용을 시도하였으나 현재의 수요는 많이 줄어들었다. 일부는 플라스틱 안료, 특히 폐수관 용 PVC에 사용된 사례가 있다. 아일랜드의 라르네(Larne) 공장에서는 공장을 폐쇄한 후에 수년 동안 Kiln을 사용하여 타일, 페인트 및 플라스틱 용 산업 안료를 제조한 사례도 있다.

14) 촉매제조

보크사이트 잔사물의 장점인 저비용, 고 표면적, 일회성주 성분인 산화철 및 티타니아의 촉매 역할에 많은 연구자들은 상당한 관심을 보이고 있다. 석유 정제에서 있어 중질 탄화수소 공급 원료 가공시 코크스 형성을 억제하기 위한 촉매로서 보크사이트 잔사물의 가능성을 확인하는 연구가 수행되고 있다.

15) 목재 대용품

일부 연구소에서는 보크사이트 잔사물을 천연 섬유 및 폴리에스테르 수지에 50 % 첨가하여 목재 응용 제품을 대체 할 수 있는 우수한 제품을 개발하여 고강도, 내수성, 내후성 및 내화성이 우수한 제품을 제조하기도 하였다.

16) 지오폴리머

Geopolymers는 포틀랜드 시멘트에 비해 많은 장점을 가지고 있으며, 특히 제조 과정에서 이산화탄소의 생성을 줄일 수 있다. 지오 폴리머의 형성은 실리카 및 알루미나 종류를 알칼리에 용해시킨 다음 - (- Si-O-Al-O-) n- 폴리머 체인의 중합반응을 일으킬 수 있으며 보크사이트 잔사물의 알루미나와 고 알칼리성의 규조류의 존재는 건축 자재의 제조에 매력적이라고 할 수 있다.

17) 기타

희토류 및 기타 금속의 추출에도 많은 연구가 진행되었으나 희토류의 가격변동과 제조 방법에 따른 수익성에 있어 아직까지는 많은 검토 필요한 실정이다.

3. 연구개발대상 기술의 차별성

가. 선행연구

본 기술개발의 연구 책임자는 수산화알루미늄 제조공정 부산물인 레드머드의 재활용에 관심을 가지고 수년간 연구를 수행하고 있으며 최근 들어 환경부 및 중소기업청 연구과제를 통하여 통하여 소기의 성과를 이루어 오고 있다.

◎ 2014년 중소기업청 산학연협력기술개발사업

과제명 : 레드머드 혼입 쏘일바인더를 활용한 알칼리활성화 흙포장재 개발

주요내용 : 레드머드 슬러지를 건조 분쇄한 스칼렛으로 알칼리활성화 흙포장재를 개발하고자 하는 것으로서 건조 분쇄공정으로 인한 스칼렛의 제조원가 상승 및 백화발생 문제점 도출하고자 하였다.

◎ 2014년 환경부 환경산업선진화 기술개발사업

과제명 : 베이어프로세스(레드머드의 비가열 알칼리 활성 자원화 및 활용기술

주요내용 : 레드머드 슬러지를 고칼슘 플라이애시 및 제지애시와 같은 산업부산물로 물리적으로 혼합하여 함수율을 저감시키는 비가열 알칼리 활성화 기술로서 활성도가 낮아 지반개량재 등의 저활성 용도로 제한적으로 재활용 되어진다.

☞ 본 연구책임자의 선행연구 레드머드는 레드머드 슬러지를 건조 분쇄시킨 스칼렛으로서 건조 분쇄 공정으로 인해 100,000원~150,000원/톤 정도의 고가로 유통되어 있으나 본 기술개발에서는 레드머드 슬러지를 건조 분쇄 공정없이 액상형한 액상형 레드머드 촉진제를 개발함으로서 제조비용을 절감하고 다양한 기능성을 제공할 수 있는 고감성 레드머드 칼라시멘트 제조기술을 <그림 2.4>와 같이 개발하고자 한다.

<표 2.2> 기존 관련 연구수행 목록

부처명	사업명	과제명	예산(백만원)	비 고
중소기업청	산학연협력기술개발	레드머드 혼입 쏘일바인더를 활용한 알칼리활성화 흙포장재 개발	83	주관
환경부	환경산업선진화 기술개발사업	레드머드의 비가열 알칼리 활성 자원화 및 활용기술	72	위탁



<그림 2.4> 선행연구과제와의 차별성

나. 지적재산권 조사를 통한 본 기술개발의 차별성

본 개발 기술인 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 알칼리활성화 고감성 칼라시멘트와 유사한 특허를 분석한 결과 레드머드를 자극제로 활용한 칼라시멘트 기술은 발견하지 못하였으며, 특허 침해 소송은 없을 것으로 판단된다.

<표 2.3>과 <표 2.4>를 참고해 유사한 특허를 분석한 결과, 대부분의 특허는 고로슬래그의 자극제로 액상형 혹은 분말형의 규산나트륨, 가성소다 등을 사용한 기술이 대부분이다. 레드머드 슬러지를 액상으로 분산시켜 알칼리활성화 촉진제로 활용하고자 하는 본 개발 기술은 기존기술과 차별화가 있는 것으로 판단되며, 본 연구개발이 성공적으로 완료되면 선진국 기술 수준으로 도약이 가능한 기술로 판단된다.

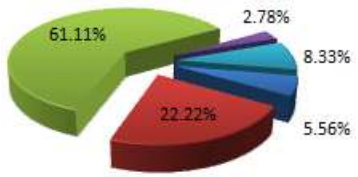
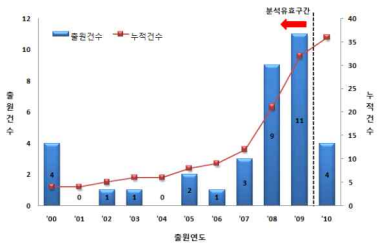
<표 2.3> 국내외 관련(유사)기술과의 특징(수준) 비교(정량적 비교)

정량적 평가항목	본 기 술	국내 유사·경쟁기술 (기술명 : 무시멘트결합재) (기관명 : ○○대학교)	선진국 유사·경쟁기술 (기술명 : 지오폴리머) (기관명 : Arbrolite)
시멘트 사용여부	0%	0%	0%
활성화 원재료의 종류	고로슬래그미분말, 플라이애시, 유동층 보일러 고칼슘 플라이애시	고로슬래그미분말 플라이애시	고로슬래그미분말 플라이애시, 바텀애시
자극제 종류	액상 레드머드 촉진제, 건식 탈황석고 등	NaOH, 물유리, KOH 등	NaOH, 물유리, KOH 등
압축강도 (28일)	30~40MPa	30~60MPa	30~100MPa
양생방법	상온양생 가능	고로슬래그 기반 (상온양생) 플라이애시 기반 (증기 및 오토클레이브 양생)	증기 및 오토클레이브 양생
내화학성	포틀랜드 시멘트 대비 200% 이상 발휘	포틀랜드 시멘트 대비 150% 이상 발휘	포틀랜드 시멘트 대비 200% 이상 발휘
중금속 고정화 능력	포틀랜드 시멘트 대비 200% 이상 발휘	포틀랜드 시멘트 대비 150% 이상 발휘	포틀랜드 시멘트 대비 200% 이상 발휘
pH	12 이하	12.5 이상 (콘크리트 2차제품, 토양 및 유·무기성 슬러지 고화 부적합)	12.5 이상 (콘크리트 2차제품, 토양 및 유·무기성 슬러지 고화 부적합)
내해수성	포틀랜드 시멘트 대비 150% 이상 발휘	포틀랜드 시멘트 대비 120% 이상 발휘	포틀랜드 시멘트 대비 150% 이상 발휘

<표 2.4> 국내외 관련(유사) 특허 분석-1

보 유 기 술 일 반 사 항			
기술명	무시멘트 결합재	특허건수	36건
세부기술	액상형 레드머드 촉진제를 활용한 알칼리활성화 고감성 칼라시멘트 개발		

관련 기술분야 주요 특허동향

국가별 동향	연도별 동향	상위출원인	
		전남대학교 산학협력단	10
		한국건설기술연구원	3
		한국건설기술연구원	3
		Compagnie Du Sol	3
		전북대학교 산학협력단	2

보유특허 POOL 리스트

NO	특실	출원번호	출원일	등록번호	공개번호	명칭
1	P	KR2007-0065185	2007-06-29	0855686		무시멘트 알카리 활성 결합재
2	P	WO2003-KR00753	2003-04-14		WO03/089385	CLAYPOROUSCONCRETECOMPOSITESOFNON-CEMENTTYPESANDITSAMANUFACTURING METHOD
3	P	EP08723255	2008-03-03		2164816	ALKALI-ACTIVATED BINDER WITH NO CEMENT, METHOD FOR FABRICATING MORTAR USING IT, AND METHOD FOR FABRICATING ALKALI-ACTIVATED REINFORCEMENT MORTAR WITH NO CEMENT
4	P	JP2010-514586	2008-03-03		2010-532307	시멘트를 포함하지 않은 알칼리 활성 결합재, 그것을 이용한 모르타르의 제조 방법 및 시멘트를 포함하지 않은 알칼리 활성 보강 모르타르의 제조 방법
5	P	KR2002-0020658	2002-04-16	0348697		시멘트 무첨가형 점토 포러스 콘크리트 조성물 및 그 제조 방법
6	P	WO2008-KR01217	2008-03-03		WO09/005205	ALKALI-ACTIVATED BINDER WITH NO CEMENT, METHOD FOR FABRICATING MORTAR USING IT, AND METHOD FOR FABRICATING ALKALI-ACTIVATED REINFORCEMENT MORTAR WITH NO CEMENT
7	P	EP00401058	2000-04-14		1044941	Deferred setting concrete
8	P	JP2000-114763	2000-04-17		2000-313652	DELAYED SETTING CONCRETE
9	P	US2000-548965	2000-04-13	6506249		Delayed-setting concrete
10	P	JP2007-069048	2007-03-16		2008-230869	CONCRETE COMPOSITION
11	P	JP2007-264464	2007-10-10		2009-091207	MANUFACTURING METHOD OF CONCRETE BLOCK
12	P	JP2008-187658	2008-07-18		2009-137826	METHOD FOR MANUFACTURING CONCRETE SECONDARY PRODUCT AND THE CONCRETE SECONDARY PRODUCT

<표 2.4> 국내외 관련(유사) 특허 분석-2

NO	특실	출원번호	출원일	등록번호	공개번호	명칭
13	P	JP2008-187659	2008-07-18		2009-137827	METHOD FOR MANUFACTURING CONCRETE SECONDARY PRODUCT AND CONCRETE SECONDARY PRODUCT
14	P	JP2008-224562	2008-09-02		2010-059003	CONCRETE SECONDARY PRODUCT USING MOLTEN SLAG
15	P	JP2009-245764	2009-10-26		2011-088800	CONCRETE MEMBER
16	P	KR2008-0098196	2008-10-07	1007928	2010-0039006	고로슬래그 미분말의 물성 개선을 통한 시멘트 대체용 프리믹스 혼화재 조성물 및 이를 포함하는 콘크리트용 결합재 조성물
17	P	KR2009-0039488	2009-05-06	0942032		무시멘트 알칼리 활성결합재, 상기 결합재를 포함하는 무시멘트 알칼리 활성 모르터, 콘크리트 및 콘크리트 제품
18	P	KR2009-0057913	2009-06-26	1014866	2011-0000441	무시멘트 알칼리 활성 조적 제품
19	P	KR2009-0097773	2009-10-14	0942028		무시멘트 알칼리 활성결합재, 상기 결합재를 포함하는 무시멘트 알칼리 활성 모르터, 콘크리트 및 콘크리트 제품
20	P	KR2009-0114972	2009-11-26	1014868		무시멘트 마그네슘계 알칼리 활성결합재, 상기 결합재를 포함하는 무시멘트 마그네슘계 알칼리 활성 모르터, 콘크리트 및 콘크리트 2차 제품
21	P	WO2010-KR00536	2010-01-29		WO10/087636	ALKALI-ACTIVATED BINDER,, ALKALI- ACTIVATED MORTAR, CONCRETE PRODUCTS AND WET RED CLAY PAVING MATERIAL USING BINDER
22	P	KR2000-0047010	2000-08-14	0367480	2002-0013312	고로슬래그를 이용한 고강도 콘크리트 2차제품 및 그 제조 방법
23	P	KR2005-0045677	2005-05-30	0628848		무기결합재 조성물 및 이를 이용한 경화체 제조 방법
24	P	KR2005-0079529	2005-08-29	0690009		산업부산물을 이용한 다기능성 무기결합재 조성물
25	P	KR2006-0029803	2006-03-31	0702417		지반주입재용 무기결합재 조성물 및 그 제조 방법
26	P	KR2008-0019498	2008-03-03	0908498		무시멘트 알카리 활성 벽돌
27	P	KR2008-0082209	2008-08-22	1018008	2010-0023453	플라이애쉬와 고로슬래그를 이용한 무시멘트 콘크리트의 제조 방법
28	P	KR2010-0090257	2010-09-15	1028011		고로슬래그를 이용한 무시멘트 콘크리트 제조 방법
29	P	KR2009-0103208	2009-10-29		2010-0070983	인산염을 함유하는 고강도 결합재 조성물
30	P	KR2009-0019692	2009-03-09		2010-0101286	폐광미를 이용한 고강도 결합재 조성물
31	P	KR2009-0057051	2009-06-25		2010-0138493	패각 분말이 부착된 친환경 코팅 콘크리트
32	P	KR2009-0082689	2009-09-02		2011-0024618	고로슬래그, 분말형 규산나트륨, 탈황석고를 포함하는 결합재를 이용하는 무시멘트 콘크리트 조성물 및 무시멘트 콘크리트의 제조 방법
33	P	KR2009-0123900	2009-12-14		2011-0067339	석분을 포함하는 상온 강도발현용 비소성 결합재와 상온 강도발현 콘크리트 조성물 제조 방법 및 그 콘크리트 조성물
34	P	KR2009-0123902	2009-12-14		2011-0067341	고로슬래그를포함한비소성결합재및이를이용한조강형무시멘트모르타르조성물
35	P	KR2010-0013423	2010-02-12		2011-0093395	고로슬래그를 이용한 무시멘트 콘크리트 및 그 제조 방법
36	P	KR2010-0013908	2010-02-16		2011-0094497	유· 무기복합 고강도 시멘트 제로 콘크리트 조성물

제 3 장
연구 수행 내용 및 성과

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1. 연구개발의 목표 및 내용

가. 연구개발의 최종 목표

구분	내용
최종 목표	산업부산물인 함수율 50%의 레드머드 슬러지를 고속전단회전 분산시켜 **액상형한 레드머드 촉진제**와 **활성 슬래그 바인더**를 혼합하여 천연 황토의 질감을 표현할 수 있는 **알칼리활성화 슬래그-레드머드 고감성 칼라시멘트**(이하 고감성 칼라시멘트)를 개발하고자 한다.
세부 목표	□ **레드머드 슬러지를 분산시킨 액상형 레드머드 촉진제 개발 [1차년도]** - 알칼리자극제로서 산업부산물의 재활용기술 - 고속전단회전 방식에 의한 레드머드 슬러지의 액상 분산기술 - 액상형 레드머드 촉진제의 백화저감 및 억제 기술 - 액상형 레드머드 촉진제의 색채 정량평가 및 유지기술 □ **액상형 레드머드 촉진제를 활용한 고감성 칼라시멘트 개발 [2차년도]** - 산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더 개발 - 활성 슬래그 바인더와 액상 레드머드 촉진제의 배합기술 - 고감성 칼라시멘트를 활용한 흙포장 적용기술 - 고감성 칼라시멘트를 활용한 콘크리트 적용기술 - 고감성 칼라시멘트의 감성평가 기법개발



<그림 3.1> 연구개발의 최종목표 및 세부목표

나. 연차별 연구개발 목표 및 내용

(1) 1차년도

(가) 개발 목표

- 주관연구기관 (우석대학교) : 레드머드 슬러지를 분산시킨 액상형 레드머드 촉진제 개발

(나) 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(우석대학교):

알칼리자극제로서 산업부산물의 재활용기술

고속전단회전 방식에 의한 레드머드 슬러지의 액상 분산기술

액상형 레드머드 촉진제의 백화저감 및 억제 기술

액상형 레드머드 촉진제의 색채 정량평가 및 유지기술

핵심성과	주요 연구활동	세부 연구내용
액상형 레드머드 촉진제 개발	■ 국내외 연구동향 조사 및 분석	-레드머드 재활용 관련 국내외 연구동향 조사 -KS, ISO, JIS, ASTM 등 국내·외 관련 표준(기준) 조사 및 분석 -국내·외 레드머드의 제조·활용·처리현황 및 기술자료 조사
	■ 레드머드 슬러지의 특성 분석	-국내 레드머드 슬러지의 로트별·분기별 품질특성 평가 및 분석 (성분, 입형, 입도, SEM, XRF, XRD 등) -레드머드 슬러지의 환경성평가 :중금속용출량/토양오염분석(폐기물공정시험법-2011) :어독성 평가(KS I 3217).
	■ 고속 전단회전방식에 의한 레드머드 슬러지의 액상형 레드머드 촉진제 제조	-액상형 레드머드 촉진제의 제조기술 :레드머드 슬러지의 액상 분산을 위한 최적 계면활성제의 종류 및 첨가량 선정 :고효율 액상 분산을 위한 고속 전단회전방식 분산기의 최적 속도 및 시간 도출 :레드머드 슬러지의 액상 분산효과 평가 -액상형 레드머드 촉진제의 성능평가 :레드머드 슬러지 비율에 따른 색채 평가 :경과시간에 따른 액상형 레드머드 촉진제의 침전특성 -레드머드 슬러지 입도 분급에 따른 액상형 레드머드 촉진제의 성능비교 검토
	■ 액상형 레드머드 촉진제의 백화억제 및 저감기술	-백화시험방법의 정립 -액상형 레드머드 촉진제에 의한 백화 메커니즘 규명 :기존 포틀랜트시멘트와의 백화생성물질 비교평가 :알칼리염 용출특성 :백화생성물질의 SEM, XRD 분석 -액상형 레드머드 촉진제의 백화 억제 및 저감방안 :각종 산종류(염산, 황산, 질산, 인산 등)에 따른 산처리 레드머드 개질특성 :배합, 양생방법, 백화저감제 등에 의한 백화저감 특성 -고감성 칼라시멘트의 백화발생에 따른 감성평가
	■ 액상형 레드머드 촉진제의 색채평가 기법	-육안비색에 의한 측색 및 색차분석 :레드머드 슬러지와 혼합수 비율에 따른 색차분석 :레드머드 촉진제 첨가량에 따른 색차분석 -색채 계산법에 의한 색차분석 :레드머드 슬러지와 혼합수 비율에 따른 색차분석 :레드머드 촉진제 첨가량에 따른 색차분석 -품질기준(안) 마련

(2) 2차년도

(가) 개발 목표

- 주관연구기관 (우석대학교) : 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 고감성 칼라시멘트 개발

(나) 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(우석대학교):

산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더 개발

활성 슬래그 바인더와 액상 레드머드 촉진제를 활용한 고감성 칼라시멘트 배합기술

고감성 칼라시멘트의 성능평가

고감성 칼라시멘트를 활용한 흙포장 적용기술

고감성 칼라시멘트를 활용한 콘크리트 적용기술

고감성 칼라시멘트의 감성평가 기법개발

핵심성과	주요 연구활동	세부 연구내용
고감성 칼라시멘트 개발	■ 산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더 개발	-슬래그 활성을 위한 산업부산물의 원료 특성 및 반응성 분석 :유동층분진, 고칼슘플라이애시, 제지애시, 탈황석고의 반응성 검토 -실내 배합실험을 통한 활성 슬래그 바인더의 최적 제조 배합기술 :혼합비율, 종류, 첨가제 등에 따른 활성 슬래그 바인더의 물성평가 -활성 슬래그 바인더의 최적 샘플 제조 및 반응메커니즘 규명 :성분, 입도, 분말도, XRF, XRD 등
	■ 알칼리활성화 슬래그-레드머드 고감성 칼라시멘트 제조기술	-활성 슬래그 바인더와 액상형 레드머드 촉진제와의 반응성 분석 및 적정 배합 도출 :성분, 입도, 분말도, XRF, XRD 등 -고감성 칼라시멘트의 기초물성 평가실험 :배합요인, 원료품질, 종류, 혼입율 등 -고감성 칼라시멘트의 기초 물성검증 :응결특성, 경화특성, 압축강도, 유동성, 수축율, 흡수율 등 -고감성 칼라시멘트의 환경성평가 :중금속용출량/토양오염분석(폐기물공정시험법-2011)
	■ 알칼리활성화 슬래그-레드머드 고감성 칼라시멘트의 적용기술	-고감성 칼라시멘트를 활용한 흙포장 활용기술 :흙포장재의 관련규격(단체표준 등) 분석 및 규격별 개발목표치 설정 :고감성 칼라시멘트를 활용한 흙포장재의 최적 배합비 도출 및 기초성능 :개발된 흙포장재 제품의 각종 성능평가(Lab-Test) (압축강도, 휨강도, 동결융해 후 압축강도, 미끄럼 저항성 등) :개발된 흙포장재 제품의 백화발생특성 :고감성 칼라시멘트를 활용한 흙포장재의 감성평가 -고감성 칼라시멘트를 활용한 콘크리트 활용기술 :고감성 칼라시멘트를 사용한 칼라 콘크리트의 특성(Lab-Test) :개발된 고감성 칼라콘크리트의 각종 성능평가 :개발된 고감성 칼라콘크리트의 감성평가
	■ 고감성 칼라시멘트의 감성평가기술	-질감 색채에 대한 만족도 평가 분석 :천연 흙포장과의 비교 평가 :안료 첨가 칼라콘크리트와의 비교 평가 -이미지 감성평가 비교분석 (T Test) :천연 흙포장과의 비교 평가 :안료 첨가 칼라콘크리트와의 비교 평가

2. 연구개발 결과 및 토의

가. 레드머드 슬러지의 특성 분석

(1) 서언

국내에서 가장 많이 레드머드가 발생되는 KC(주)는 현재 전량 수입에 의존하고 있는 수산화알루미늄($Al(OH)_3$)을 국산화하기 위해 보오크사이트로부터 수산화알루미늄을 생산하고 있다. 1995년부터 가동한 수산화알루미늄 공장의 안정가동 보장, 폐기물 처리비용 절감을 통한 경쟁력 제고를 위해서는 레드머드 처리 기술이 시급히 해결되어야 할 실정이다.

레드머드는 수산화 알루미늄 공장에서 발생되는 산업부산물로서 회수되지 못한 caustic soda가 많이 pH가 높고 철분이 많은 것이 특징이다. 일반적으로 레드머드는 50%의 iron oxide, 20%의 aluminium oxide, 10%의 silica, 10%의 titania, 5%의 sodium oxide, 2%의 calcium oxide로 구성되어 있다고 보고되고 있으나 그 특성은 출발원료인 보오크사이트의 특성 및 수산화알루미늄의 제조방식 등에 따라 상당히 다르다. 또한 레드머드는 인체에 무해하나 나트륨 및 철성분이 다량 함유되어 있어 사전 처리없이 원료로서 사용하기 어렵다. 사전처리 없이 건자재의 원료로서 사용하여 건자재를 제조할 경우 함유된 여러 화합물들에 의해 공융점을 형성하며 염분(Na_2O)의 과량함유로 백화현상을 초래하고 철분(Fe_2O_3) 과다로 균열, 수축, 뒤틀림 현상 등 많은 문제점이 발생된다. 이러한 문제점을 해결하고자 할 때 기술개발비용과 레드머드의 경제성이 새로 대두된다. 선진국의 경우 레드머드가 경제성 있는 용도로 개발되지 않아 막대한 비용을 부담하고 여러 경로를 통해 폐기하고 있다. 대규모의 수산화알루미늄 생산공장이 있는 선진국의 경우 대부분의 공장이 주거지역과 멀리 떨어져 있고 주변이 광활한 지역이므로 가장 저렴한 댐 저장법 및 바다에 버리는 방법을 채택해 왔다. 그러나 최근 대두되고 있는 환경문제를 고려하였을 때 레드머드의 활용 처리 기술개발은 필연적으로 요구된다.

국내의 경우 수산화알루미늄 사업이 전개되지 않아 레드머드 이용법에 대한 연구가 전무한 실정이며 국외의 경우 안정화 처리 방법을 통해 강알칼리성인 레드머드를 HCl 또는 H_2SO_4를 사용하여 중화시킨 후 폐기 하고 있으나 2차 공해 발생 등 여러 가지 문제가 발생된다.

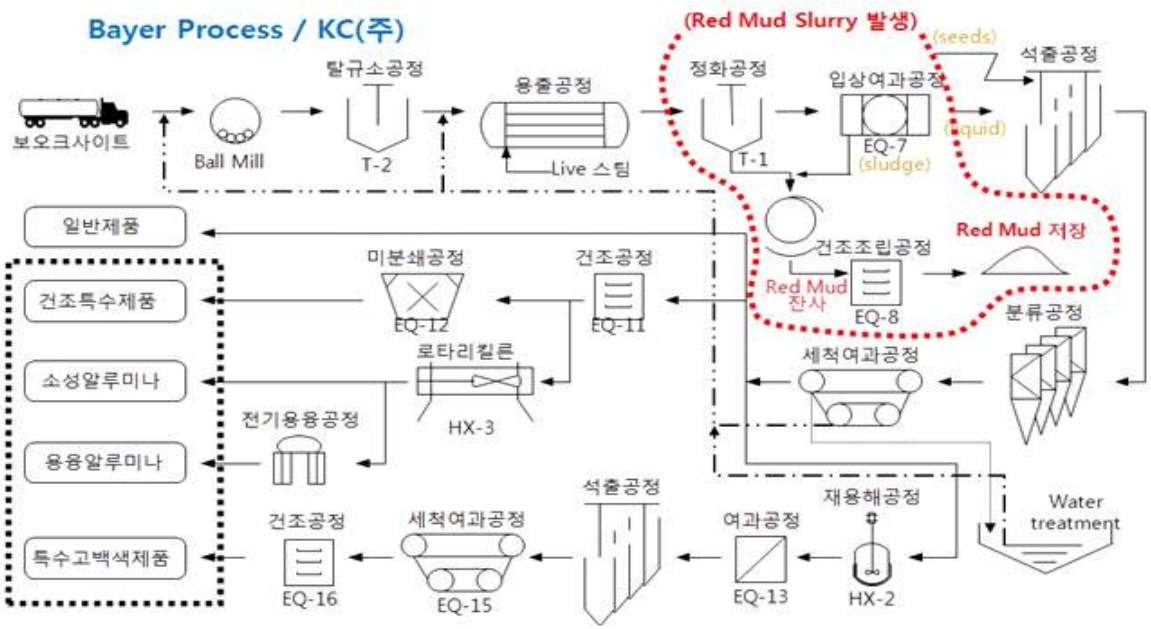
레드머드 활용 제품으로는 알루미늄의 회수 및 적색안료 인공골재 아스팔트 포장재 인공토양 건설재료, 연마재, 페인트, 안료, 유독가스 흡착제등의 제조에 관한 연구가 활발히 진행중이나 현재까지 기업화에 성공한 사례는 매우 미미한 편이다.

따라서 본 절에서는 보오크사이트로부터 수산화알루미늄 추출공정에서 발생되는 레드머드 슬러지를 건설자재로서 재활용하기 위해 레드머드의 제조활용 및 처리현황에 대해 조사를 실시하였다. 또한 레드머드의 로트별, 분기별 품질특성, 환경성 평가를 실시하여 건설산업 분야에 대량 활용하고자 하였다.

(2) 레드머드의 제조 활용 처리현황

레드머드는 아래의 <그림 3.2>와 같이 보오크사이트로부터 수산화알루미늄/알루미나($Al(OH)_3/Al_2O_3$) 제조과정에서 부산물로 발생하는 산업부산물이다. 제조공정인 베이어프로세스 특성 상 Al_2O_3 1톤을 생산하면 대략 2톤의 레드머드(주성분인 Fe_2O_3로 인한 적색의 칼라로 인해 레드머드(Red Mud), 적니(赤泥)등 다양한 명칭으로 불림)이 발생되어지고 있으며, 국내에서는 연간 약 30만톤이 발생되고 있다.

레드머드의 처리현황은 아래의 <표 3.1>과 같이 75% 이상이 매립되거나 해양투기되고 있으며, 재활용율은 15% 이하로 국내 전체 사업장폐기물의 재활용율 83.5%와 비교하여 재활용율이 매우 낮은 산업부산물이다. 2010년 통계에 따르면, 생활폐기물과 건설폐기물을 포함한 국내 사업장 폐기물의 총 발생량(364,267톤/일) 중 재활용은 83.5%인데 비하여 매립은 9.4%, 소각 5.3%에 불과하고, 나머지는 해역으로 배출되고 있다. 해양투기는 국제간의 분쟁이 될 수 있으며 관련 국제협약(런던협약)에 가입함으로써 그 비율은 점점 낮아질 것이고, 소각처리 역시 고비용의 처리법으로 소각이후 최종 매립처리하는 방식으로 효용성이 낮다. 레드머드 처리 방안으로 지금까지 대부분 매립처리 해오고 있으나, 매립에 의한 2차 토양 및 지하수 오염으로 인하여 사회적으로 큰 문제로 대두되고 있어 레드머드의 재활용 대책이 국가·사회적으로 시급한 실정이다.



<그림 3.2> 레드머드의 발생공정

<표 3.1> 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 3.3> 레드머드의 발생상황 (국내)

(3) 레드머드의 로트별 분기별 품질 특성 평가 및 분석

(가) 실험계획 및 방법

레드머드 슬러지의 로트별 분기별 특성 평가를 위하여 레드머드가 발생되는 전남 영월군 케이씨(주)에서 2016년 7월~2017년 4월 까지 총 4차례에 걸쳐 레드머드를 채취하였다. 환경적 영향에 의한 레드머드의 특성을 검토하기 위하여 하절기에서 동절기까지 샘플을 채취하였으며 실험계획을 <표 3.2>에 나타내었다. 평가항목으로는 형태, 함수율, 성분분석, 입형분석을 실시하였다.

<표 3.2> 실험요인 및 수준

구분	차수	채취일자 및 장소	평가항목
레드머드-1	1차	2016. 7. 13 / 케이씨(주)	• 함수율 • 성분분석(XRF) • 입형분석(SEM)
레드머드-2	2차	2016. 10 11 / 케이씨(주)	
레드머드-3	3차	2017. 1. 5 / 케이씨(주)	
레드머드-4	4차	2017. 4. 10 / 케이씨(주)	

(나) 실험결과 및 분석

① 레드머드 슬러지의 형태

레드머드 슬러지의 로트별 분기별 특성 평가를 위한 레드머드 슬러지의 채취 후 사진을 <그림 3.4>에 나타내었다. 레드머드 슬러지는 붉은 색을 띄고 있으며 형태는 점토질과 같은 머드형태로 채취시 원활하게 채취가 가능하였다. 레드머드 슬러지를 채취한 7월 13일, 9월 11일, 10월 5일, 12월 9일의 형태는 육안으로 관찰하였을 때 모두 같은 형태와 색상를 나타내고 있었다.



(a) 레드머드-1(2016/7/13)　(b) 레드머드-2(2016/10/11)

(c) 레드머드-3(2017/1/5)　(d) 레드머드-4(2017/4/10)

<그림 3.4> 레드머드 채취샘플성상

② 레드머드 슬러지의 함수율 결과 및 분석

레드머드 슬러지의 로트별 분기별 특성 평가를 위한 함수율 측정결과를 <표 3.3>에 나타내었다. 함수율 측정방법은 월별 채취 시료를 1,000g씩 계량하여 건조로에서 절건상태가 될 때까지 건조하여 건조 후 무게를 측정하였다. 함수율은 100-(건조 전 무게/건조 수 무게)×100으로 계산하였다. 7월에 채취한 레드머드-1의 경우 함수율 50.6%를 나타내었으며 10월에 채취한 레드머드-2는 50.3%, 1월에 채취한 레드머드-3은 50.5%, 4월에 측정한 레드머드-4의 경우 50.2를 나타내었다. 레드머드 슬러지의 함수율은 1년간 50.2~50.6%(오차범위±2%)로 나타났으며, 레드머드 슬러지는 평균 함수율 50.4%로 채취시기에 관계없이 거의 동등하게 나타났다.

<표 3.3> 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 로트별 분기별 특성 평가를 위한 성분 분석결과를 <표 3.4>에 나타내었다. 레드머드 슬러지의 Na_2O성분은 9.0~10.5%로 나타났으며, 이는 알루미늄 추출공정에서 추출액으로 사용하는 가성소다(NaOH)로 인한 것으로 판단된다. 또한, 붉은색을 발현하게 하는 Fe_2O_3성분은 평균 21.6~23.4%로 나타났다. 7월, 10월, 1월, 4월 각각 채취한 시료의 평균 값은 SiO_2는 38.8%, Al_2O_3는 16.1%, Fe_2O_3는 22.8%, CaO는 3.4%, MgO는 0.2%, Na_2O는 10.0%, K_2O는 0.4%가 나타났다. 레드머드 슬러지는 1년간 발생하는 기간별 화학성분 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

<표 3.4> 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 슬러지의 로트별 분기별 특성 평가를 위한 샘플의 입형분석 결과를 <그림 3.5>에 나타내었다. 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 판단된다.



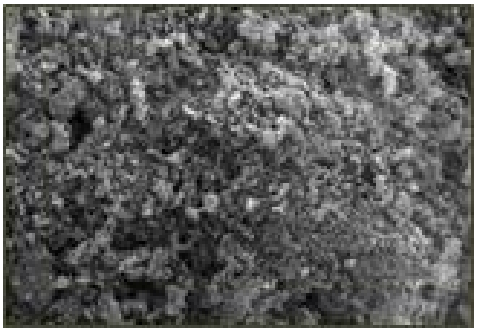
(a) 레드머드-1 (7/13)



(b) 레드머드-2 (10/11)



(c) 레드머드-3 (1/5)



(d) 레드머드-4 (4/10)

<그림 3.5> 월별 레드머드 샘플의 입형분석(SEM_×3,000배율)

(다) 소결

본 절에서는 보오크사이트로부터 수산화알루미늄 추출공정에서 발생되는 레드머드 슬러지를 건설자재로서 재활용하기 위해 레드머드의 로트별, 분기별 특성 평가를 실시하였다. 그 결과 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 레드머드 슬러지의 로트별 분기별 특성 평가를 위한 레드머드의 형태, 함수율, 성분, 입형은 로트별 분기별 영향은 미미한 것으로 나타났다.
- 레드머드 슬러지의 육안 관찰결과 같은 색상과 같은 형태로 확인되었으며 함수율은 평균 50.4%, 오차율 ±0.2%로 나타나 기온에 따른 영향은 판단된다. 레드머드의 화학성분은 채취시기와 관계없이 거의 일정하여 품질적으로 안정적이며, Na_2O성분은 약 10%로 함유되어 있어 추출공정에서 사용하는 가성소다(NaOH)에 기인한 것으로 사료된다. Fe_2O_3는 평균 22.8%로 나타나 채취시기와 관계없이 똑같이 붉은색을 나타내고 있다. 레드머드 슬러지의 입형은 대체적으로 둥근형태로 관찰되었으며 대부분 유사한 것으로 나타났다.

(4) 레드머드 슬러지의 환경성 평가

(가) 중금속용출량

레드머드 슬러지의 환경성 평가를 위하여 폐기물공정 시험기준(환경부고시 제 2016-196호, 2016. 10.13)에 의하여 중금속용출량을 검토하였다. '지정폐기물에 함유된 유해물질의 기준'과 함께 시험결과를 <표 3.5>에 나타내었다. 6가 크롬을 포함한 대부분의 중금속은 불검출로 나타났으며, 용출된 중금속은 구리 0.073mg/L, 비소 0.192mg/L, 수은 0.0007mg/L로 미량이 검출되어 유해물질의 기준에 적합한 것으로 나타났다.

<표 3.5> 중금속용출량 측정결과

No	유해물질	기준 (mg/L)	시험결과 (mg/L)
1	시안화합물	1	불검출
2	크롬	-	-
3	6가크롬	1.5	불검출
4	구리	3	0.072
5	카드뮴	0.3	불검출
6	납	3	불검출
7	비소	1.5	0.192
8	수은	0.005	0.0007
9	유기인화합물	1	불검출
10	폴리클로리네이티드 비페닐(PCBs)	액체상태의 것 : 2	불검출
		액체상태이외의 것 : 0.003	불검출
11	테트라클로로에틸렌	0.1	불검출
12	트리클로로에틸렌	0.3	불검출
No	유해물질	기준 (%)	시험결과
13	할로겐화유기물질	5	불검출
14	기름성분	5	불검출

(나) 어독성 평가

액상형 레드머드 촉진제로 제조된 최종제품인 고감성 흙포장재를 (주)한국생물안전성연구소에 시험의뢰하였으며, 담수어류에 대한 급성독성시험을 진행하였다. 시험물질은 흙 포장재 이며 시험제목은 흙포장재의 담수어류 (잉어, Cyprinus carpio)에 대한 급성독성시험으로 시험기준은 화학물질의 시험방법”, 제3장 제3항 어류급성독성시험(국립환경과학원 고시 제 2015-8호)에 의해 수행되었다. 시험의뢰사항을 <표 3.6>에 나타내었다.

<표 3.6> 흙포장재 급성독성시험

시험물질	흙포장재
시험제목	흙포장재의 담수어류 (잉어, Cyprinus carpio)에 대한 급성독성시험
시험기준	“화학물질의 시험방법”, 제3장 제3항 어류급성독성시험 (국립환경과학원 고시 제 2015-8호)

① 시험방법

시험어류의 단위체중 1g 당 시험용수의 양이 1L가넘도록 80L (30x60x45cm) 용량의 직육면체 수조를 사용하여 순화기간동안 시험조건과 동일한 수온에서 유지되도록 하였으며, 순화중인 사육수의 용존 산소량을 포화농도의 80% 이상으로 유지하기 위해 연속폭기로 산소공급을 실시하였다.

원통형의 유리제품 12.5L (높이 25.5cm×∅25.5cm)용기 시험물질 노출 후 96시간 지하수를 전처리필터 (1.0㎛)와 중간필터 (0.5㎛) 또한 세균제거필터 (0.1㎛)로 정수된 지하수로 1주 이상 연속폭기하며 정체하여 사용하였다. 수온은 순화온도와 동일한 범위 (20.0-24.0℃)내로 유지하되 시험기간 중 수온의 변화는 ±1℃ 이상 변화되지 않도록 하였다. 또한 시험용수의 용존산소량은 최소한 포화농도 60%를 유지하도록 하였다.

치사개체의 판정은 시험생물 투입 후 3시간 및 24시간 간격으로 96시간까지 관찰을 실시하여 관찰 시 형태이상, 유영이상, 출혈 등의 중독증상과 치사 개체수를 관찰하였고, 치사어의 판정은 시험생물을 유리막대로 건드렸을 때 움직임이 없거나 아가미 호흡이 중단된 경우 치사로 판정하였다.

② 시험결과

흙포장재의 담수어류에 대한 급성적 영향을 평가하고, 반수치사농도(LC50)를 산출하기 위해 잉어(Cyprinus carpio)를 이용하여 급성독성시험을 96시간 동안 지수식으로 실시하였다.

시험용액 중 시험물질의 농도는 주원료 투입비율을 기준으로 100.0mg/L 및 음성대조군으로 구분하였으며, 해당시험 조건하에서, 흙포장재의 잉어에 대한 48시간 및 96시간 반수치사농도(LC50)는 주원료 투입비율 기준으로 모두 100.0mg/L이상이었다.

치사개체 및 이상증상 결과 노출기간 96시간동안, 음성대조군 및 실험물질 처리군인 100.0mg/L 농도군에서 치사 및 어떠한 중독증상도 관찰되지 않았다. 시험환경조건 결과 시험기간 동안 수온은 평균 22.6℃(22.4~22.8℃), pH는 평균 7.26(6.86～8.02), 용존산소노도는 포화용존산소량 대비 평균 90.5%(74.1～109.5%)로 측정되었다.

또한 사용한 시험용수의 경도는 54mg $CaCo_3$/L로 측정되었다. 전장 및 체중 결과 노출종료

후 음성대조군과 시험물질 처리군 시험어의 전장 및 체중을 측정한 결과, 전장은 평균 3.71cm(3.14～3.96cm), 체중은 평균 0.76g(0.42～0.99g)으로 측정되었다. 급성독성시험결과 <표 3.7>과 같이 흙포장재 담수어류((잉어, Cyprinus carpio)에 대한 48, 96시간 반수치사농도(LC50)는 모두 100.0mg/L 이상이었고, 무영향농도(NOEC)는 모두 100.0mg/L이었다.

<표 3.7> 흙포장재 급성독성시험 결과

노출시간	농 도	치사개체	결 과
96시간	100.0mg/L	0마리	독성없음

(다) 소결

본 절에서는 보오크사이트로부터 수산화알루미늄 추출공정에서 발생되는 레드머드 슬러지를 건설자재로서 재활용하기 위해 레드머드의 환경성 평가를 실시하였다. 그 결과 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 레드머드 슬러지의 환경성 평가결과 6가 크롬을 포함한 대부분의 중금속은 불검출로 나타났으며, 용출된 중금속은 구리 0.073mg/L, 비소 0.192mg/L, 수은 0.0007mg/L로 미량이 검출되어 유해물질의 기준에 적합한 것으로 나타났다.
- 액상형 레드머드 촉진제로 제조된 최종제품인 고감성 흙포장재의 어독성 평가 결과 흙포장재의 잉어에 대한 48시간 및 96시간 반수치사농도(LC50)는 주원료 투입비율 기준으로 모두 100.0mg/L이상이었다. 또한 치사개체 및 이상증상 결과 노출기간 96시간동안, 음성대조군 및 실험물질 처리군인 100.0mg/L 농도군에서 치사 및 어떠한 중독증상도 관찰되지 않았다. 흙포장재의 시험환경조건 결과 시험기간 동안 수온은 평균 22.6℃(22.4~22.8℃), pH는 평균 7.26(6.86～8.02), 용존산소노도는 포화용존산소량 대비 평균 90.5%(74.1～109.5%)로 측정되었다. 또한 사용한 시험용수의 경도는 54mg $CaCo_3$/L로 측정되었다. 흙포장재의 전장 및 체중 결과 전장은 평균 3.71cm(3.14～3.96cm), 체중은 평균 0.76g(0.42～0.99g)으로 측정되었다. 급성독성시험결과 흙포장재 담수어류((잉어, Cyprinus carpio)에 대한 48, 96시간 반수치사농도(LC50)는 모두 100.0mg/L 이상이었고, 무영향농도(NOEC)는 모두 100.0mg/L이었다.

(4) 결언

본 절에서는 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 알칼리활성화 고감성 칼라시멘트 개발을 위하여 레드머드 발생처에서 레드머드 슬러지를 채취하여 특성 분석을 하였으며 현재 제조 활용 처리현황, 품질특성 평가 및 분석, 환경성 평가를 검토하였다. 그 결과 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 레드머드는 보오크사이트로부터 수산화알루미늄/알루미나($Al(OH)_3/Al_2O_3$) 제조과정에서 부산물로 발생하는 산업폐기물로 현재 75% 이상이 매립되거나 해양투기되고 있으며, 재활용율은 15% 이하로 국내 전체 사업장폐기물의 재활용율 83.5%와 비교하여 재활용율이 매우 낮은 산업부산물이다.
2) 레드머드의 로트별 분기별 품질 특성 평가 및 분석결과 레드머드 슬러지의 형태는 붉은색을 나타내고 있으며 점토질과 같은 머드 형태를 나타내고 있다. 레드머드 슬러지는 평균함수율 50.4%, 오차율 ±0.2%로 나타나 기온에 따른 영향 즉, 1년간 발생하는 레드머드의 함수율 차이는 거의 없는 것으로 판단된다. 월별 레드머드의 화학성분은 거의 일정하여 품질적으로 매우 안정적이며, Na_2O성분은 약 10%로 함유되어 있어 추출공정에서 사용하는 가성소다(NaOH)에 기인한 것으로 사료된다. 월별로 채취한 각 레드머드의 입형은 대체적으로 둥근형태로 대부분 유사한 것으로 나타났다.
3) 레드머드 슬러지의 환경성 평가를 위하여 중금속 용출량 및 어독성을 평가하였다. 중금속 용출량은 폐기물공정 시험기준(환경부고시 제 2016-196호, 2016. 10.13)에 의하여 검토하였다. 6가크롬을 포함한 대부분의 중금속은 불검출로 나타났으며, 용출된 중금속은 구리 0.073mg/L, 비소 0.192mg/L, 수은 0.0007mg/L로 미량이 검출되어 유해물질의 기준에 적합한 것으로 나타났다. 레드머드 슬러지의 어독성 평가는 국립환경과학원 고시 제 2015-8호 “화학물질의 시험방법”, 제3장 제3항 어류급성독성시험에 의하여 진행하였다. 결과는 치사개체 및 이상증상 결과 노출기간 96시간동안, 음성대조군 및 실험물질 처리군인 100.0mg/L 농도군에서 치사 및 어떠한 중독증상도 관찰되지 않았다. 시험환경조건 결과 시험기간 동안 수온은 평균 22.6℃(22.4~22.8℃), pH는 평균 7.26(6.86～8.02), 용존산소노도는 포화용존산소량 대비 평균 90.5%(74.1～109.5%)로 측정되었다.

나. 고속 전단회전방식에 의한 레드머드 슬러지의 액상형 레드머드 촉진제 제조

(1) 서언

최근 감성융합 기술의 세계시장은 연평균 27%씩 급성장 하고 있으며 건설 분야에서도 감성 활용기술의 필요성이 증대되고 있다. 기존에는 버려지던 산업부산물을 단순히 재활용하는 차원에서 향후에는 재활용에 새로운 가치를 더해 감성을 부여하는 가치상향형의 고감성 업싸이클링(upcycling) 건설기술에 대한 요구가 증대되고 있다.

한편 보오크사이트로(Bauxite)부터 수산화알루미늄 추출공정에서 발생되는 레드머드 슬러지는 Fe_2O_3가 약 20% 함유되어 있으며 자연스런 천연 황토색으로 건설산업 분야에 활용 가능성이 높다. 이러한 레드머드는 건설 산업에 재활용하고자 하는 연구가 국내외적으로 다양하게 수행되고 있다. Pontikes and Anglopoulos의 연구에 의하면 레드머드에 10 ~ 15% 함유되어져 있는 Na_2O는 슬래그나 알루미노 규산염 광물이 해리되어 축중합을 통해 안정한 수화물을 생성하기 위한 자극제나 촉진제로서 액상 규산나트륨(Sodium Silicate) 대신 활용 가능하거나 인산나트륨(Sodium Phosphate) 대신 지연제로서 활용 가능하여 각종 건설자재로서의 재활용이 가능하다고 보고하고 있다.

또한 레드머드를 건설자재로서 재활용하고자 하는 국내의 대표적인 연구로서 Kang은 레드머드를 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트로 재활용 하고자 하는 논문을 발표하였다. 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트는 알칼리자극제, 고로슬래그와 레드머드로 구성되어 있는 클링커 프리 시멘트이다. 그러나 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트는 레드머드 대체율이 증가할수록 압축강도는 감소하고 직경 10～1000nm의 모세관 공극이 증가하는 문제점이 있다. 또한 나트륨계 자극제인 레드머드로 인하여 Na_2SO_4의 물질로서 백화발생이 증가하는 것으로 보고하였다.

현재 산업부산물 레드머드는 베이어프로세스 공정으로 인하여 함수율 50%의 슬러지 상태로 배출되고 있으며 이를 재활용하기 위한 방법으로 함수율 10% 내외의 분말형태로 제조하여 재활용하고 있다. 그러나 분말형태의 제조는 가열 및 분쇄 공정이 필요하고 이로 인하여 제조원가가 상승하여 재활용이 제한적이다. 연간 30만톤이 발생되고 있는 레드머드를 건설 산업에 적극적으로 재활용하기 위해서는 취급이 간편하고 제조원가를 절감시킬 수 있는 재활용 기술 개발이 요구된다.

따라서 본 절에서는 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 알칼리활성화 고감성 칼라시멘트 개발을 위하여 산업부산물인 함수율 50%의 레드머드 슬러지를 가열 공정 없이 고속전단회전방식에 의하여 액상형 레드머드 촉진제로 제조하고자 하였다. 액상형 레드머드 촉진제 제조를 위하여 적정 혼합수 및 촉진제 분산을 위한 분산제, 침강을 방지하는 침강방지제와 같은 첨가제를 혼입하고 고속전단회전장비를 사용하여 액상형 하였으며 제조된 액상형 레드머드 촉진제의 점도, 입도, 침전지수를 측정하여 분산특성을 검토하였다.

(2) 실험계획 및 방법

(가) 실험계획

고속 전단회전방식에 의한 레드머드 슬러지의 액상형 레드머드 촉진제의 제조를 위한 실험계획을 <표 3.8>에 나타내었다. 액상형 레드머드 촉진제의 제조를 위하여 W/R비를 200%, 100%, 50%, 25%로 설정한 후 분산제, 증점제를 적정 첨가한 총 23개 실험요인에 대하여 분산특성을 검토하였다. 또한 액상형 레드머드 촉진제 제조시 발생하는 기포를 최소화하기 위하여 소포제를 레드머드 슬러지에 대하여 0.14%로 동일하게 첨가하였다. 액상형 레드머드 촉진제의 분산특성을 검토하기 위하여 6개월간 침전지수, 점도 및 입도를 비교 검토하였다.

<표 3.8> 실험 계획

혼합수/레드머드 (%)	시료번호	레드머드	혼합수	증점제	분산제	소포제	기본샘플
200	1	1400	2800	0	0	2(0.14)	★
	2	1400	2800	20(0.014)	0	2(0.14)	
	3	1400	2800	20(0.014)	100(0.07)	2(0.14)	
	4	1400	2800	20(0.014)	200(0.14)	2(0.14)	
	5	1400	2800	30(0.021)	3002(0.21)	2(0.14)	
100	6	1400	1400	0	0	2(0.14)	★
	7	1400	1400	4(0.003)	0	2(0.14)	
	8	1400	1400	4(0.003)	50(0.04)	2(0.14)	
	9	1400	1400	10(0.007)	100(0.07)	2(0.14)	
50	10	1400	700	0	0	2(0.14)	★
	11	1400	700	0	100(0.07)	2(0.14)	
	12	1400	700	2(0.001)	0	2(0.14)	
	13	1400	700	5(0.004)	0	2(0.14)	
	14	1400	700	5(0.004)	100(0.07)	2(0.14)	
	15	1400	700	5(0.004)	200(0.14)	2(0.14)	
	16	1400	700	5(0.004)	350(0.25)	2(0.14)	
	17	1400	700	5(0.004)	500(0.36)	2(0.14)	
	18	1400	700	5(0.004)	700(0.50)	2(0.14)	
25	19	1400	350	0	0	2(0.14)	★
	20	1400	350	0	200(0.14)	2(0.14)	
	21	1400	350	0	350(0.25)	2(0.14)	
	22	1400	350	0	500(0.36)	2(0.14)	
	23	1400	350	0	700(0.50)	2(0.14)	

( ) : 레드머드에 대한 첨가제 비율 (%)

(나) 사용재료

① 레드머드 슬러지

레드머드(Red mud)는 보오크사이트(Bauxite) 원광석으로부터 수산화알루미늄($Al(OH)_3$) 및 산화알루미늄(Al_2O_3)을 제조하는 공정에서 발생되는 산업부산물이다. 국내의 경우 레드머드는 Bayer Process를 통하여 Al_2O_3 1톤을 생산하면 함수율 40～60%의 슬러지상태로 대략 2톤이 발생되며, 발생량은 국내 발생량의 대부분을 차지하고 있는 K사에서만 연간 약 30만톤이 슬러지 상태로 발생되고 있다.

액상형 레드머드 촉진제 제조를 위한 레드머드 슬러지의 물리화학적 특성을 <표 3.9>에 나타내었으며 실험에 사용한 레드머드 슬러지를 <그림 3.6>에 나타내었다. 또한 <그림 3.7>에 XRD분석결과를 나타내었다. 레드머드 슬러지의 화학조성은 대부분 SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3가 약 80%를 차지하고 있으며, 그중 레드머드가 붉은색으로 나타나게 하는 Fe_2O_3는 22.8%를 차지하고 있다. 물리적 특성의 경우 밀도는 2.0g/cm^3로 나타났으며, 평균입경은 4.31㎛로 입도분포를 <그림 3.8>에 나타내었다. 레드머드의 건설자원으로 활용하는데 장애요소 중 하나인 함수율은 50.2%로 나타났다. 또한 점도는 20000cP로 유동성이 매우 낮고 워커빌리티가 나쁘며 원재료 자체에서 물과 레드머드 슬러지가 분리되어 원상태로 재활용하기에 어려운 상태이다.

<표 3.9> 레드머드 슬러지의 물리 화학적 특성

구분	화학성분 (wt.%)								밀도 (g/cm^3)	평균입경 (㎛)	함수율 (%)	점도 (cP)
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O				
레드머드 슬러지	38.8	16.1	22.8	3.4	0.2	0.0	10.0	0.4	2.0	4.31	50.2	20000



(a) 레드머드 채취현장

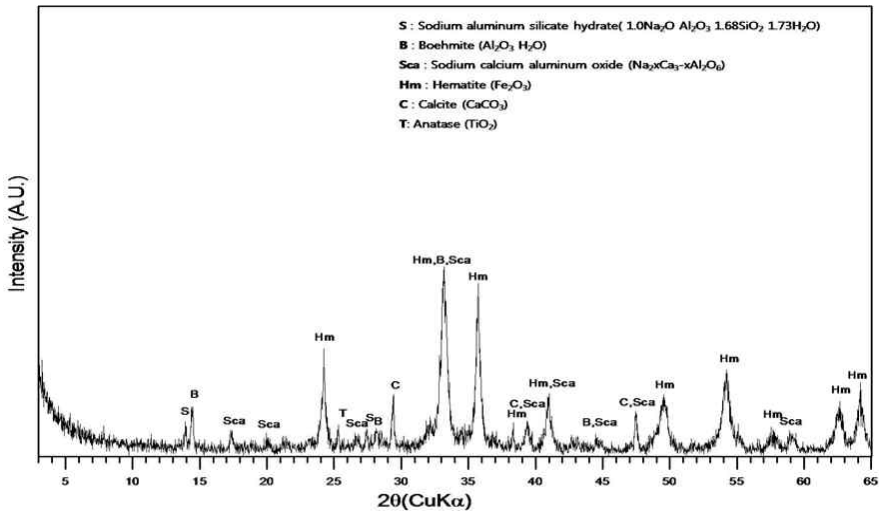


(b) 레드머드 슬러지 모습

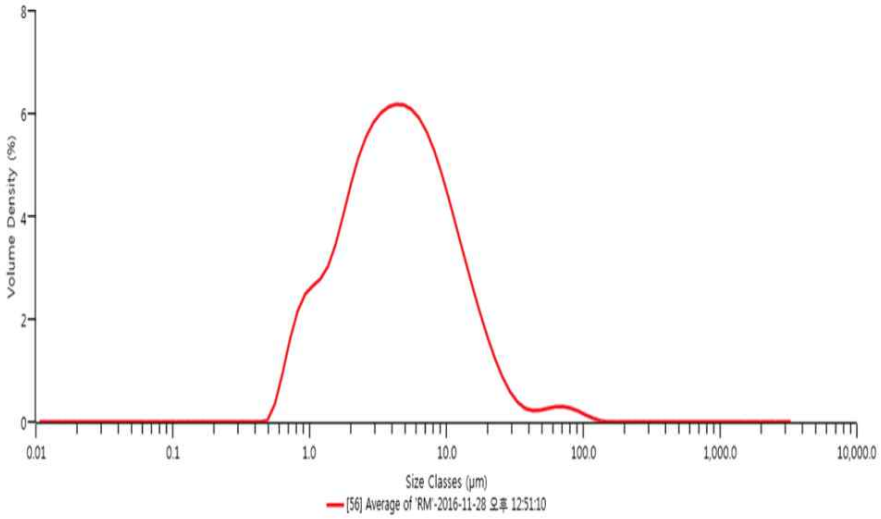


(b) 레드머드 슬러지 모습 2

<그림 3.6> 레드머드 슬러지



<그림 3.7> 레드머드 슬러지 XRD 결과



<그림 3.8> 레드머드 슬러지의 입도분포

② 분산제

액상형 레드머드 촉진제 제조를 위한 분산제의 물리 화학적 특성을 <표 3.10>에 나타내었다.

분산제는 국내 S사의 polycarboxylic acid계 분산제를 사용하였으며 비표면적은 1.136, ph는 6.72이며 점도는 180cPs을 나타내었다.

<표 3.10> 분산제의 물리 화학적 특성

구분	색상	비표면적	pH	고형분(%)	점도(cps)
Polycarboxylic acid series	밝은갈색	1.136	6.72	40.7	180

③ 증점제

액상형 레드머드 촉진제 제조를 위한 증점제의 물리 화학적 특성을 <표 3.11>에 나타내었다. 증점제는 국내 H사의 Methyl Cellulos계 증점제를 사용하였다. 증점제는 형태는 흰색의 분말 형태로 점도는 32900cps, NaCl은 1.36%, 함수율은 1.40%를 나타내었다.

<표 3.11> 증점제의 물리 화학적 특성

구분	색상	점도(cps)	NaCl wt(%)	함수율 wt(%)
Methyl Cellulos	무색	32900	1.36	1.40

④ 소포제

액상형 레드머드 촉진제 제조를 위한 소포제의 물리 화학적 특성을 <표 3.12>에 나타내었다. 소포제는 국내 K사의 무색 투명한 액상의 Polyoxyalkylene alkylether계 소포제로 pH는 4.5~7.5를 나타내며 비중은 0.9984, 점도 269(25℃, cPs)를 가진다.

<표 3.12> 소포제의 물리 화학적 특성

구분	형태	pH	비중	점도
Polyoxyalkylene alkylether	무색 투명	4.5~7.5	0.9984	269(25℃, cPs)

(다) 실험방법

① 액상형 레드머드 촉진제의 분산

고속 전단회전방식에 의한 레드머드 슬러지의 액상형 레드머드 촉진제의 제조를 위하여 레드머드 슬러지를 분산하였다. 레드머드 슬러지의 분산은 국내 K사의 호모믹서를 사용하여 혼합 분산하였다. 혼합수와 레드머드 슬러지를 3분간 분산시킨 후 분산제, 증점제 및 소포제를 차례로 첨가하여 2분간 추가 분산시켰다. 레드머드 슬러지를 분산하기 위한 장비를 <그림 3.9>에 나타내었으며 분산모습을 <그림 3.10>에 나타내었다. 호모믹서는 회전하는 rotor와 고정되어있는 stator 사이의 세밀한 간극으로 강력한 전단에너지를 만들어내는 분산장비이다. 호모믹서의 회전자는 고속 회전하여 약 20~30m/s의 높은 전단력을 발생시키고 이로 인하여 주위에 진공이 발생되고 그 진공에 의해 레드머드 슬러지가 아래에서 회전자 사이로 빨려 들어가며 입자가 분산되고 입경이 작아지게 된다.



<그림 3.9> 호모믹서



<그림 3.10> 호모믹서 원리

② 점도 측정방법

고속 전단회전방식에 의한 레드머드 슬러지의 액상형 레드머드 촉진제 제조를 위하여 레드머드 슬러지를 분산한 뒤 점도를 측정하였다. 점도는 액상형 레드머드 촉진제 제조 직후와 180일이 경과된 후 측정하였으며 180일 경과 후 측정은 혼합수와 레드머드가 침전되어 분리된 경우 혼합수를 스포이드로 제거 후 레드머드 부분의 시료를 200ml 동일량 채취하여 측정하였다. 점도 측정장비는 <그림 3.11>와 같은 brookfield사의 점도계를 사용하였으며 측정시 4번 Spindle을 사용하여 10rpm으로 동일한 조건 하에서 <그림 3.12>에 나타낸 바와 같이 점도를 측정하였다.



<그림 3.11> 점도 측정장비

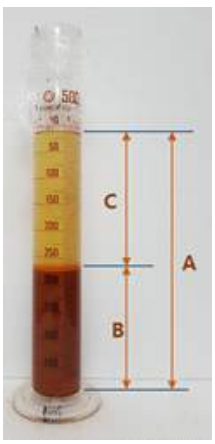


<그림 3.12> 점도 측정 모습

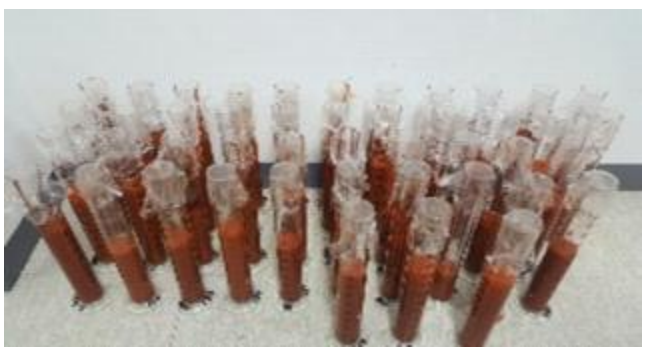
③ 침전지수 산출방법

고속 전단회전방식에 의한 레드머드 슬러지의 액상형 레드머드 촉진제 제조를 위하여 레드머드 슬러지를 분산한 뒤 침전지수를 측정하였다. 액상형 레드머드 촉진제의 분산정도를 정량화하기 위하여 침전지수를 활용하였다. 경과일수에 따른 침전지수를 산출하기 위한 시료는 액상형 레드머드 촉진제를 분산시킨 직후 500ml 매스실린더에 동일 양으로 담아 외부와의 공기를 차단된 상태로 상온에서 180일 동안 정치시켰다. 최초 1주일은 24시간 간격, 이후 7주는 7일 간격, 이후 4개월은 한 달 간격으로 총 180일 동안 <그림 3.13>와 같이 침전 높이를 측정하였으며 이를 식 1과 같이 계산하여 침전지수를 산출하였다.

$$\text{침전지수}(\%) = 100 - \frac{n\text{일에서 레드머드의 침전된 높이}(B)}{\text{액상 레드머드의 최초 높이}(A)} \times 100 \quad \cdots \text{ 식 } 1$$



<그림 3.13> 침전지수 측정예시



<그림 3.14> 측정시료

④ 입도 측정방법

고속 전단회전방식에 의한 레드머드 슬러지의 액상형 레드머드 촉진제 제조를 위하여 레드머드 슬러지를 분산한 뒤 입도를 측정하였다. 액상형 레드머드 촉진제의 입자크기 및 입자분포 측정을 위하여 <그림 3.15>에 나타낸 바와 같이 Malvern Instrument사의 Mastersizer 3000-Maz6140 입도분석기로 입도를 측정하였다. 입도분석기의 일정파장의 레이져 beam이 입자에 도착하면 빛이 산란, 투과, 흡수된다. 산란되는 빛 중에는 회절, 굴절, 반사되는 것이 있으며 흡수된 빛의 일부는 입사 빛 보다 긴 파장의 빛을 다시 방출하기도 한다. 이렇게 동시에 복합적으로 나타나는 광산란 정도를 검출기로 검출하여 입도분포를 측정하였다.



<그림 3.15> 입도 분석기

(3) 실험결과 및 분석

(가) 점도

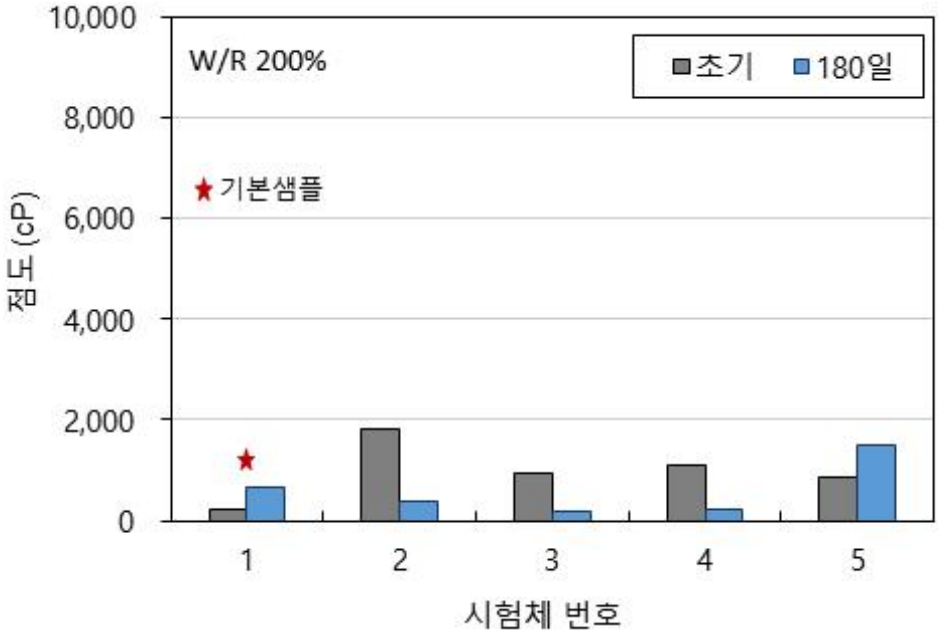
액상형 레드머드 촉진제의 분산직후 초기 점도 및 최종 경과시간 180일의 점도와 점도비를 <표 3.13> 및 <그림 1.16~1.17>에 나타내었다. 액상형 레드머드의 분산직후 초기점도는 물비 200%의 경우 240~1800cps, 물비 100%의 경우 800~1880cps, 물비 50%의 경우 580~7580cps, 물비 25%의 경우 1060~9100cps로 나타났다. 액상형 레드머드의 경과시간 180일 점도는 물비 200%의 경우 180~1500cps, 물비 100%의 경우 260~1680cps, 물비 50%의 경우 140~6680cps, 물비 25%의 경우 760~14000cps로 나타났다. 본 실험의 범위에서는 W/R비가 높을수록 점도는 전반적으로 감소하고, 경과시간 180일의 점도는 플레인을 제외한 대부분의 시료에서 초기점도와 비교하여 낮아지는 경향을 나타냈다.

액상형 레드머드 촉진제의의 시료별 초기점도에 대한 경과시간 180일의 점도비를 <그림 3.18~3.19>에 나타내었다. 액상형 레드머드 촉진제의 점도비는 물비 200%인 경우 21.1~283.3%를 나타내었으며 플레인의 경우 283.3%를 나타내었다. 점도비는 물비 100%의 경우 27.1~210.0%를 나타내었으며 플레인의 경우 210.0%를 나타내었으며, 물비 50%의 경우 20.0~172.3%를 나타내고 플레인의 경우 172.3%를 나타내었다. 물비 25%의 경우 점도비는 40.5~153.8%를 나타내었으며 플레인의 경우 153.8%를 나타내었다. 액상형 레드머드 촉진제의 180일 점도는 초기점도와 비교하여 대체적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 혼합수와 레드머드 슬러지만을 분산시킨 No 1, 6, 10, 19 시료의 경우 180일 점도가 초기점도보다 높게 나타나고 있다.

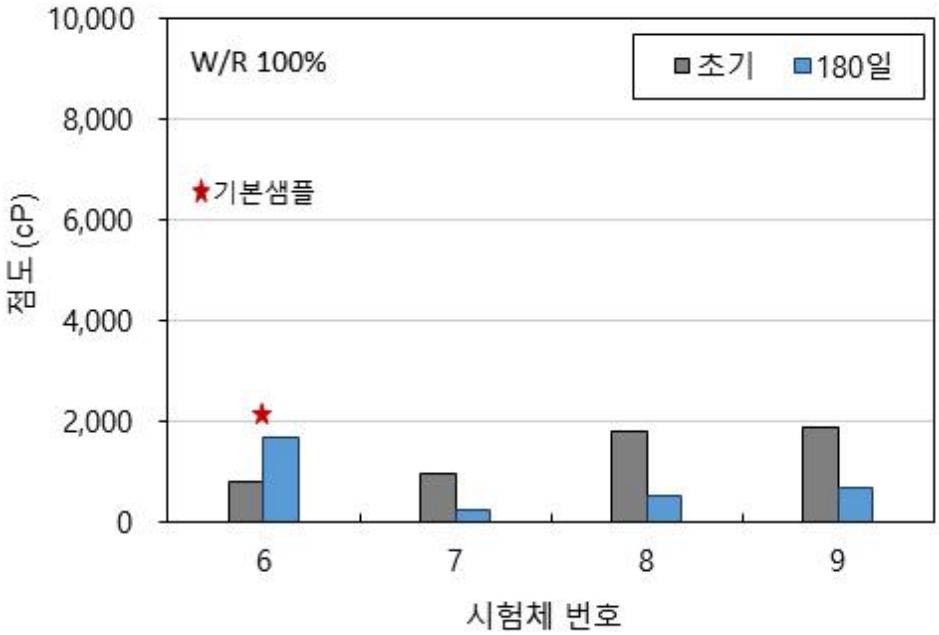
이는 혼합수 만으로 분산시킬 경우 직후에는 슬러지의 응집 입자가 분산되나 시간이 경과하면서 분산된 입자의 재응집 현상이 일어났기 때문으로 사료된다. 또한 No.5시료도 점도비가 174%로 매우 높게 나타났는데 이는 W/R 200%의 높은 혼합수비에 증점제 다량으로 혼합되었기 때문에 초기점도에 대한 180일 점도비가 약 174%로 높게 나타난 것으로 판단된다. 액상형 레드머드의 분산결과 혼합수만을 분산할 경우 점도가 높아지지만 분산제와 증점제를 혼합하여 분산할 경우 점도가 높아지지 않고 낮아지거나 유지하는 경향을 나타냈다.

<표 3.13> 액상형 레드머드의 분산직후 초기 점도와 최종 경과시간 180일의 점도 비교

물/레드머드 (%)	시료 번호	점도(cPs)		점도비	플레인
		초기	180일		
200	1	240	680	283.3	★
	2	1800	380	21.1	
	3	960	180	18.8	
	4	1100	240	21.8	
	5	860	1500	174.4	
100	6	800	1680	210.0	★
	7	1880	700	27.1	
	8	960	260	28.9	
	9	1800	520	37.2	
50	10	3100	5340	172.3	★
	11	1920	760	39.6	
	12	4020	4300	107.0	
	13	7580	6680	88.1	
	14	4300	2280	53.0	
	15	3020	1420	47.0	
	16	1380	140	10.1	
	17	700	140	20.0	
	18	580	240	41.4	
25	19	9100	14000	153.8	★
	20	6620	2680	40.5	
	21	1980	940	47.5	
	22	2020	1140	56.4	
	23	1060	760	71.7	

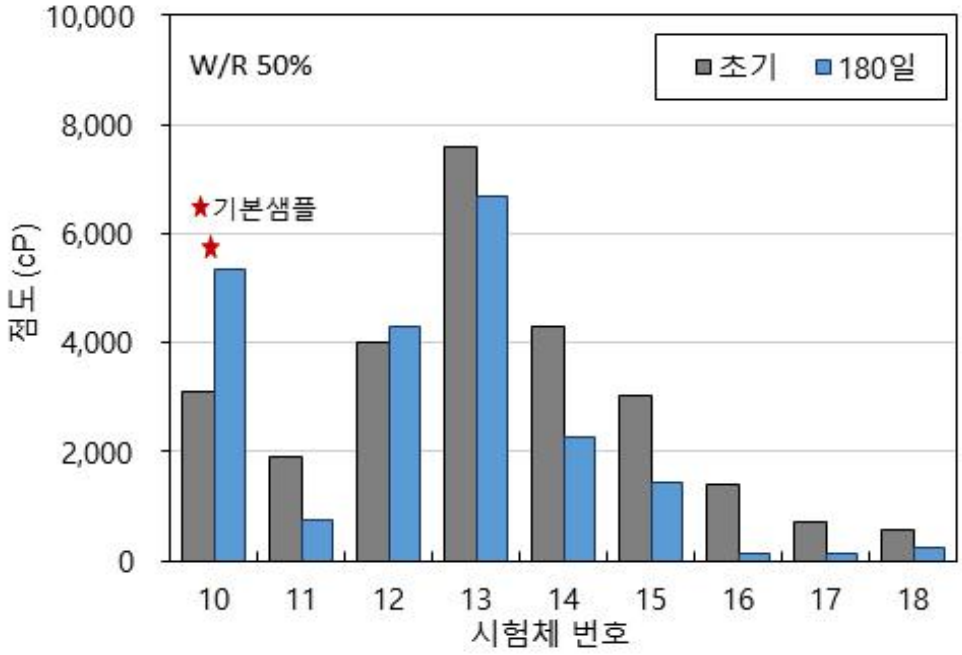


(a) 200%

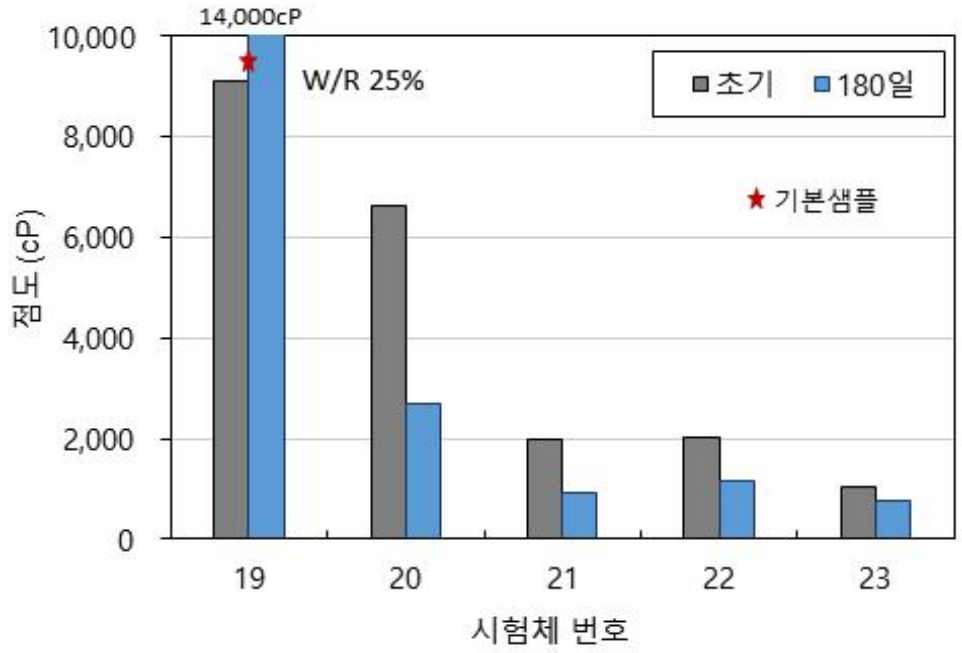


(b) 100%

<그림 3.16> 점도 측정결과

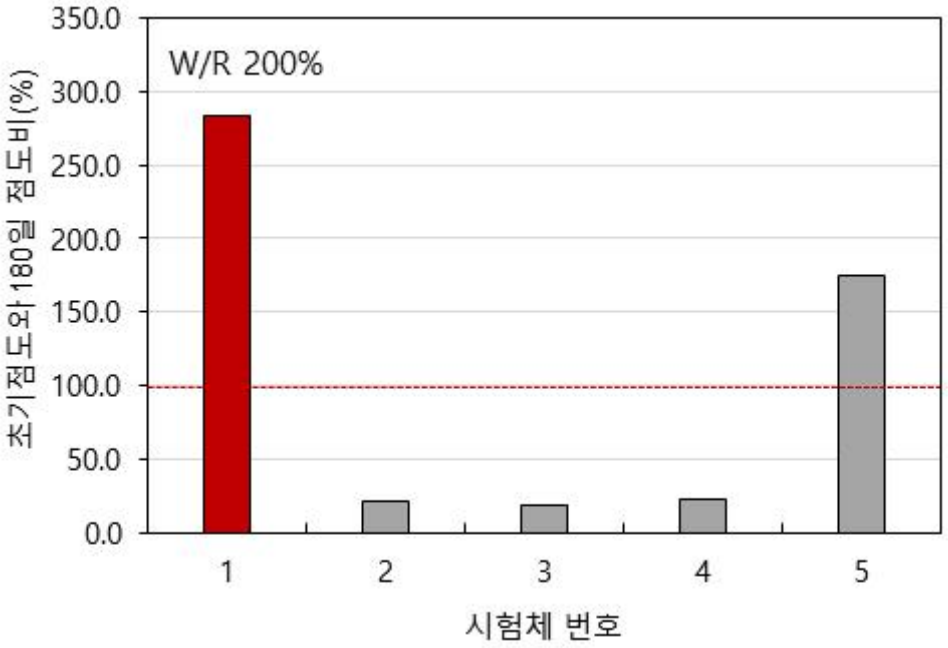


(c) 50%

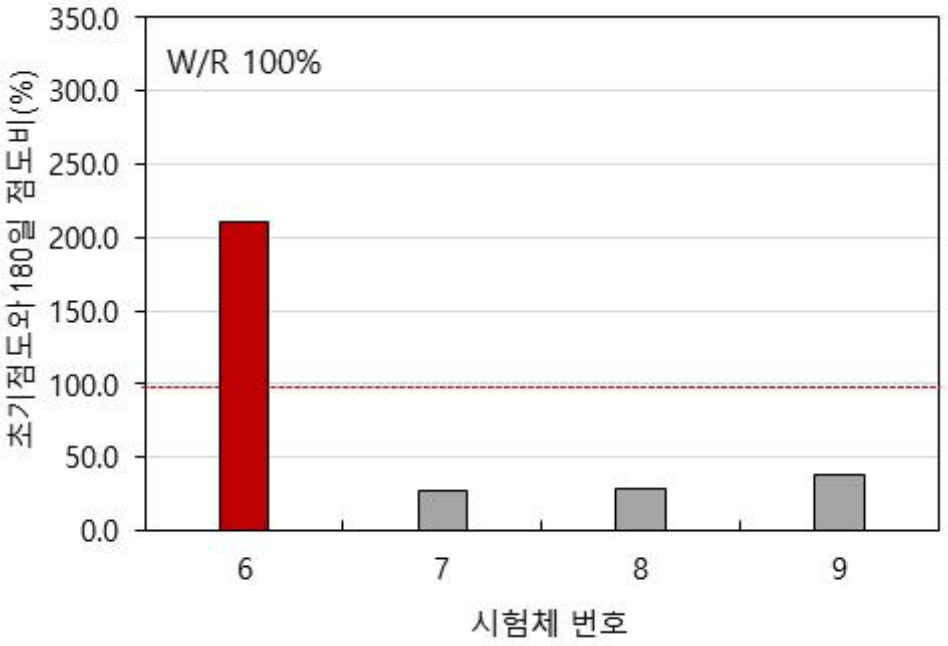


(d) 25%

<그림 3.17> 초기점도와 180일 점도와의 관계

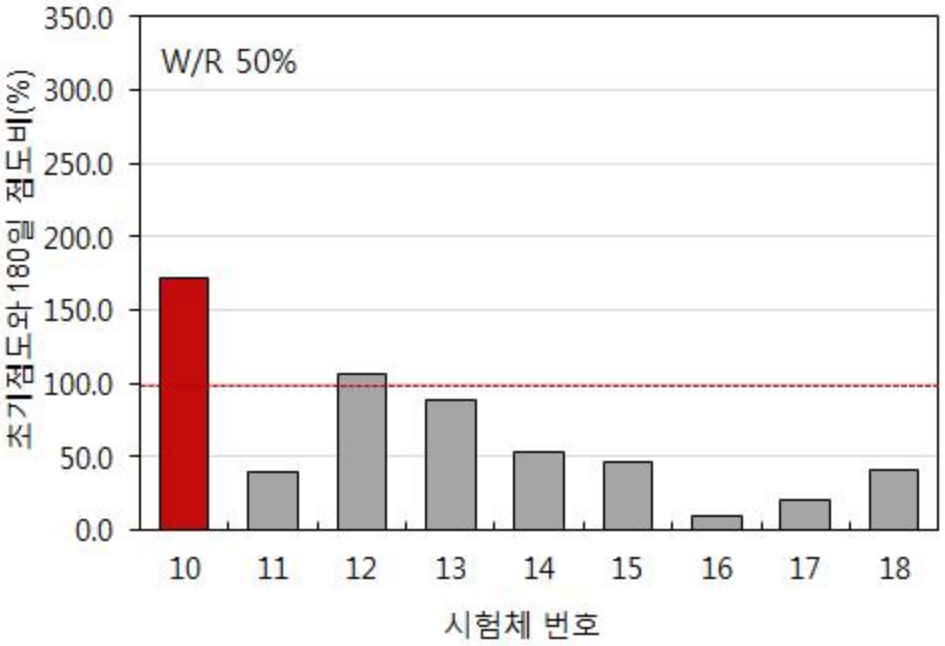


(a) 200%



(b) 100%

<그림 3.18> W/R에 따른 점도비



(c) 50%



(d) 25%

<그림 3.19> W/R에 따른 점도비

(나) 침전지수

액상형 레드머드 촉진제의 분산직후에서 180일까지의 침전지수 측정결과를 <표 3.14>에 나타내었다. 침전지수는 경과시간 증가할수록 높게 나타났으며 초기에 급격하게 증가하고 일정시간 이후에는 유지되는 경향을 나타내었다.

<표 3.14> 침전지수 측정결과

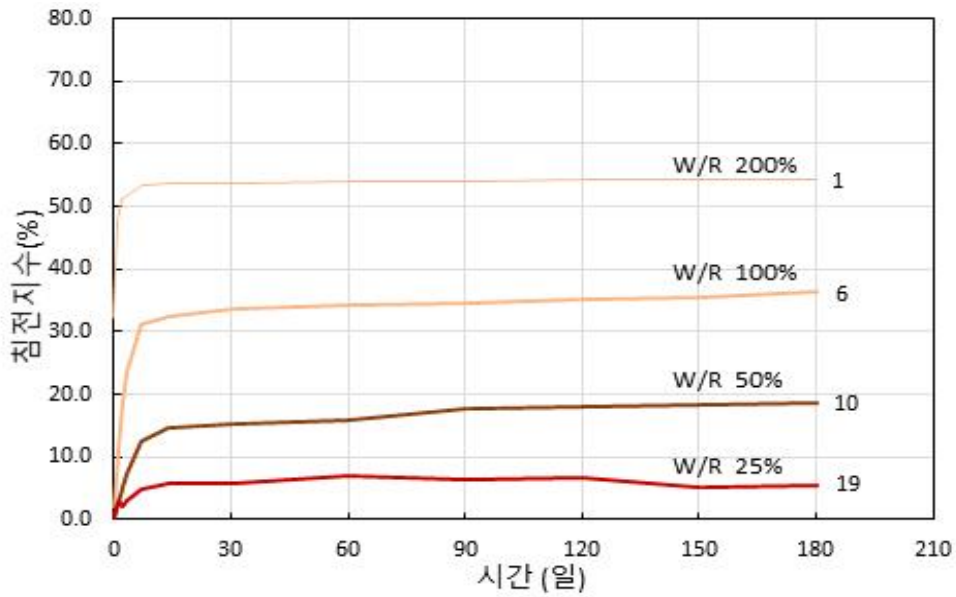
시료 번호	초기	1일	2일	3일	7일	14일	30일	60일	90일	120일	150일	180일
1	32.4	47.6	51.4	51.6	53.4	53.6	53.8	54.0	53.9	54.3	54.3	54.3
2	0.8	7.4	10.3	11.9	12.5	23.2	29.3	34.3	37.4	38.9	45.1	46.9
3	0.4	2.3	2.3	2.3	8.4	27.8	36.2	41.4	43.8	46.1	48.3	50.2
4	0.4	0.6	1.8	6.11	9.6	38.0	43.9	47.6	50.0	51.7	53.4	55.3
5	0.4	0.8	1.0	1.0	3.1	9.6	13.3	17.3	21.4	23.5	27.7	34.4
6	2.2	11.3	18.6	23.6	31.3	32.5	33.7	34.3	34.7	35.3	35.5	36.3
7	0.2	2.4	4.6	6.2	10.6	15.1	20.2	23.6	26.1	27.3	28.8	30.6
8	0.4	1.0	1.6	2.0	4.4	8.8	17.8	23.8	26.7	28.3	30.2	31.0
9	1.0	5.0	8.0	9.6	14.0	19.0	27.0	32.6	35.0	37.7	38.7	40.2
10	1.0	2.8	5.2	7.2	12.6	14.6	15.4	16.0	17.6	18.0	18.5	18.7
11	0.8	2.6	4.6	6.4	12.8	19.8	23.8	24.5	25.7	26.5	27.3	34.4
12	0.0	2.0	2.4	2.8	2.8	3.8	7.9	9.9	11.2	12.4	14.2	13.4
13	0.0	0.0	1.2	1.6	1.6	1.6	1.6	3.4	4.6	4.2	4.7	5.9
14	0.0	1.6	2.2	2.2	2.2	2.2	2.8	3.1	4.9	5.9	8.3	9.9
15	0.0	0.4	1.0	3.6	3.6	3.6	4.0	5.5	7.1	8.5	9.2	10.6
16	0.2	2.4	3.2	4.2	8.8	15.2	24.9	32.6	36.2	38.2	39.5	40.3
17	0.4	1.0	2.0	2.8	6.8	11.2	17.2	23.2	25.8	27.6	31.0	30.6
18	0.2	6.4	9.0	10.4	14.6	21.2	30.0	36.7	39.6	43.0	44.1	43.9
19	0.4	2.9	2.2	2.9	4.9	5.9	5.9	6.9	6.5	6.7	5.3	5.5
20	0.0	1.0	1.6	2.6	4.1	6.7	9.3	12.3	12.6	13.4	14.5	14.8
21	0.0	1.2	1.6	2.0	3.6	5.6	11.6	17.0	20.4	22.6	25.6	25.4
22	0.0	1.0	2.2	3.8	9.4	13.6	18.7	23.6	26.9	29.1	31.9	32.8
23	0.0	0.8	1.2	1.6	3.4	6.0	12.2	17.2	20.0	21.1	22.3	22.8

① 플레인 시료

혼합수만을 사용하여 분산시킨 플레인(Plain) 액상형 레드머드 촉진제의 경과시간 직후, 30일, 150일, 180일 시료의 침전상태를 <표 3.15>에 나타내었으며 180일동안의 침전지수 변화를 <그림 3.20>에 나타내었다. 레드머드 슬러지와 혼합수만을 혼합 분산시킨 액상형 레드머드의 W/R비에 따른 침전지수는 W/R비가 높을수록 높은 침전지수를 나타냈다. 최종 경과시간 180일에서의 침전지수는 W/R비 200%의 경우 54.3%, W/R비 100%의 경우 36.3%, W/R 50%의 경우 18.7%, W/R비 25%의 경우 5.5%를 나타내었다. 또한 W/R비에 따른 침전지수는 W/R비가 높을수록 초기에 급격하게 증가하는 경향을 나타내고 있다. 최종 경과시간 180일 침전지수 값의 90%에 도달되는 W/R비별 경과시간은 W/R비 200%에서는 1일, W/R비 100%에서는 7일, W/R비 50%에서는 60일, W/R비 25%에서는 7일로 나타났다.

<표 3.15> 플레인 시료의 침전상태 관찰결과

물/레드머드 (%)	시료번호	경과시간에 따른 침전상태			
		직후	1개월	5개월	6개월
200	1				
100	6				
50	10				
25	19				



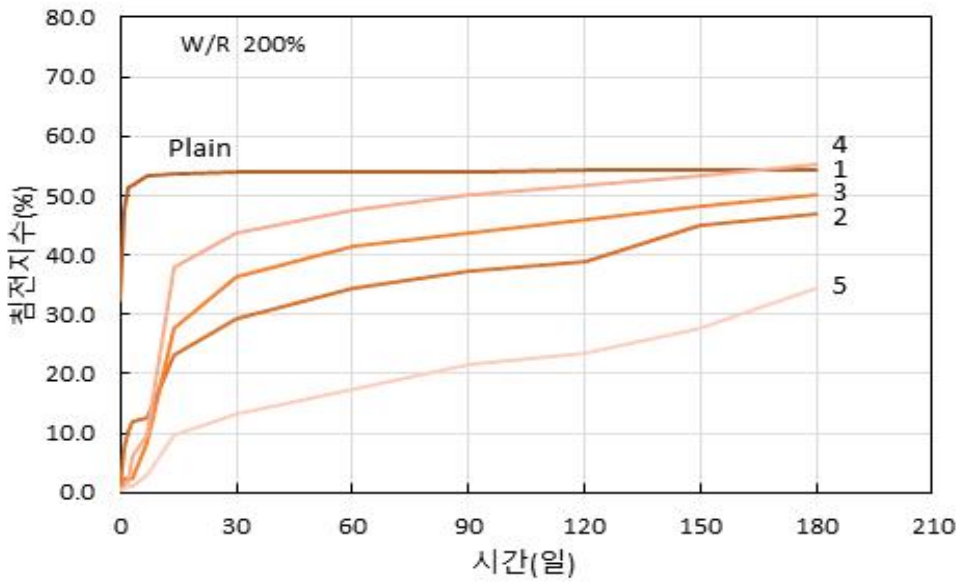
<그림 3.20> 플레인 시료의 침전지수

② W/R비 200%

액상형 레드머드 촉진제의 W/R비 200%의 경과시간 직후, 30일, 150일, 180일 시료의 침전상태를 <표 3.16>에 나타내었으며 180일 동안의 침전지수 변화를 <그림 3.21>에 나타내었다. 혼합수만을 사용한 플레인 시료의 경우 54.3%이었으나 분산제 및 증점제를 사용한 시료의 경우 34.4~55.3%를 나타내고 있어 플레인과 비교하여 상대적으로 작게 나타났다.

<표 3.16> W/R비 200%의의 침전상태 관찰결과

물/레드머드 (%)	시료번호	경과시간에 따른 침전상태			
		직후	1개월	5개월	6개월
200	1 (Plain)				
	2				
	3				
	4				
	5				



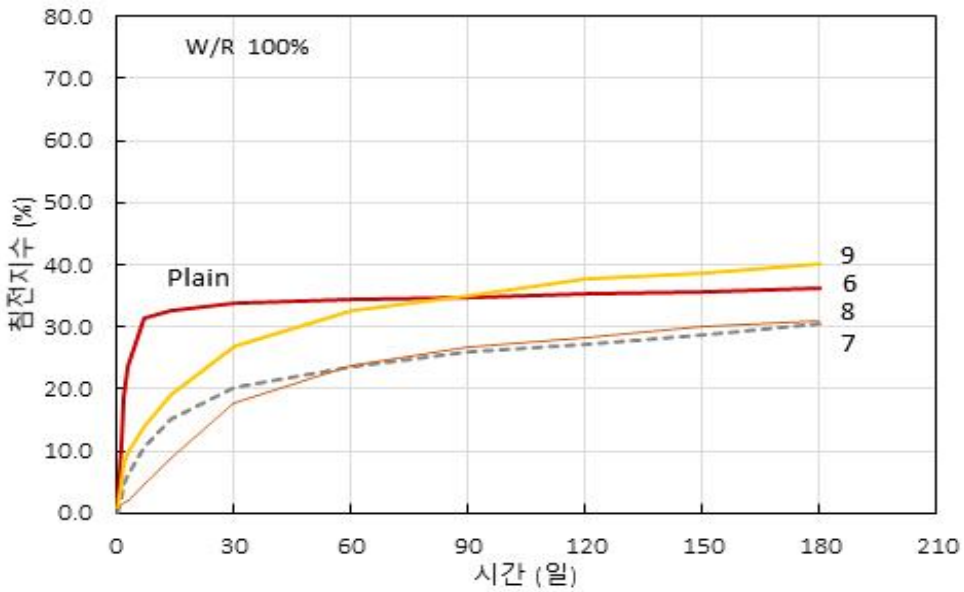
<그림 3.21> W/R 200%의 침전지수

③ W/R비 100%

액상형 레드머드 촉진제의 W/R비 100%의 경과시간 직후, 30일, 150일, 180일 시료의 침전상태를 <표 3.17>에 나타내었으며 180일 동안의 침전지수 변화를 <그림 3.22>에 나타내었다. 혼합수만을 사용한 플레인 시료의 경우 36.3%이었으나 분산제 및 증점제를 사용한 시료의 경우 30.6～40.2%를 나타내고 있어 플레인과 비교하여 유사하게 나타났다.

<표 3.17> 침전지수 측정결과

물/레드머드 (%)	시료번호	경과시간에 따른 침전상태			
		직후	1개월	5개월	6개월
100	6 (Plain)				
	7				
	8				
	9				



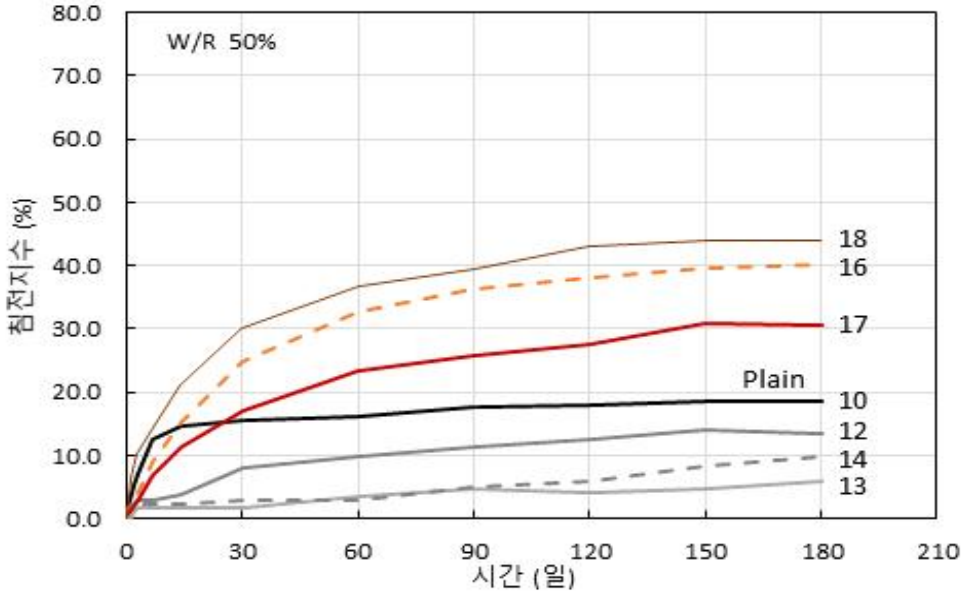
<그림 3.22> W/R 100%의 침전지수

④ W/R비 50%

액상형 레드머드 촉진제의 W/R비 50%의 경과시간 직후, 30일, 150일, 180일 시료의 침전상태를 <표 3.18>에 나타내었으며 180일 동안의 침전지수 변화를 <그림 3.23>에 나타내었다. 혼합수만을 사용한 플레인 시료의 경우 18.7%이었으나 분산제 및 증점제를 사용한 시료의 경우 5.9～43.9%를 나타내고 있어 플레인과 비교하여 가장 큰 차이를 나타내고 있다.

<표 3.18> 침전지수 측정결과

물/레드머드 (%)	시료번호	경과시간에 따른 침전상태			
		직후	1개월	5개월	6개월
50	10 (Plain)				
	11				
	12				
	14				
	16				
	17				
	18				



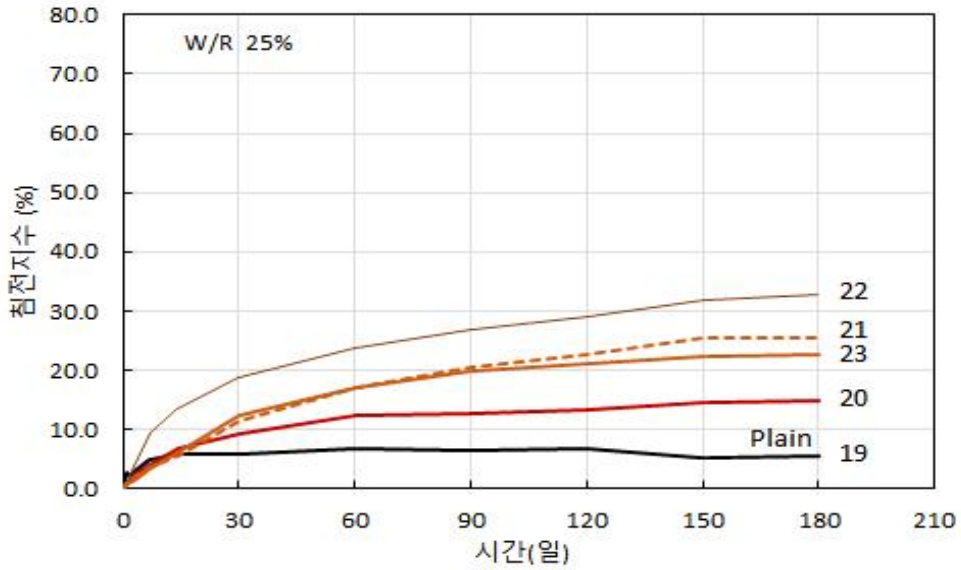
<그림 3.23> W/R 100%의 침전지수

⑤ W/R비 25%

액상형 레드머드 촉진제의 W/R비 25%의 경과시간 직후, 30일, 150일, 180일 시료의 침전상태를 <표 3.19>에 나타내었으며 180일 동안의 침전지수 변화를 <그림 3.24>에 나타내었다. 혼합수만을 사용한 플레인 시료의 경우 5.5%이었으나 분산제 및 증점제를 사용한 시료의 경우 14.8~32.8%를 나타내고 있어 플레인과 비교하여 상대적으로 크게 나타났다.

<표 3.19> 침전지수 측정결과

물/레드머드 (%)	시료 번호	경과시간에 따른 침전상태			
		직후	1개월	5개월	6개월
25	19 (Plain)				
	20				
	22				
	23				

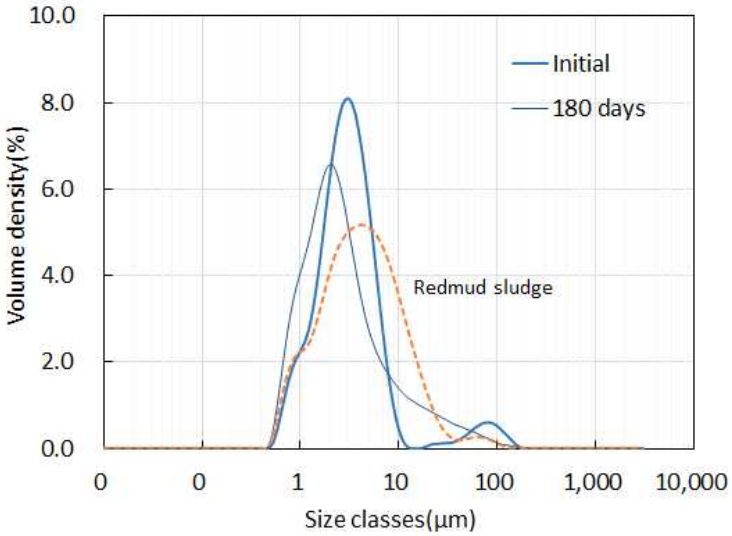


<그림 3.24> W/R 25%의 침전지수

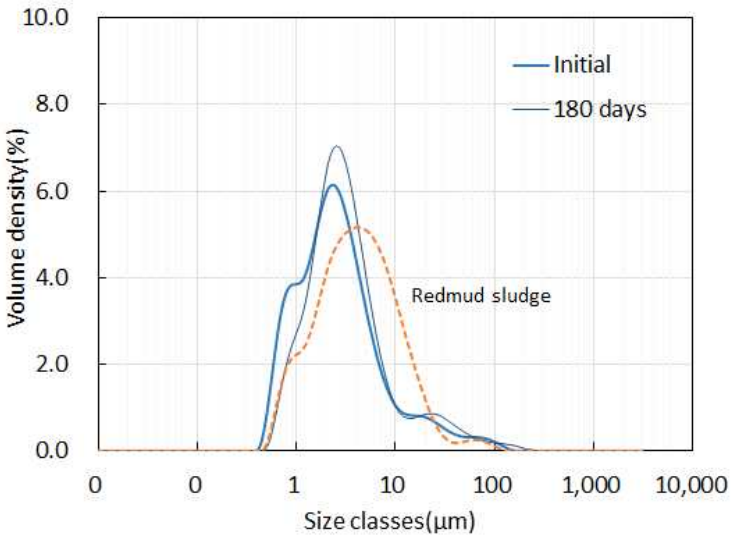
(다) 입도

W/R비에 따른 액상형 레드머드 촉진제의 분산직후 및 최종 경과시간 180일에서의 입자분포를 레드머드 슬러지와 비교하여 <그림 3.25>에 나타내었다. 레드머드 슬러지를 분산시킨 액상형 레드머드 촉진제의 입자분포는 레드머드 슬러지의 입자분포와 비교하여 좌측으로 이동하고 있어 분산을 하게 되면 레드머드의 입자는 작아지는 것으로 나타났다. 이는 호모믹서의 고속 회전하는 회전자로 인한 주위의 진공으로 높은 전단력이 발생하고 이로 인하여 레드머드 슬러지가 아래에서 회전자 사이로 빨려 들어가며 분산되어 입자의 충돌 및 회전자와 고정자 사이의 충격으로 입경이 줄어든 것으로 판단된다. 또한 액상형 레드머드 촉진제는 W/R비가 낮아질수록 전체적인 입자가 더욱 작아지는 경향을 보이고 있는데 이는 액상형 레드머드 촉진제의 W/R비가 낮아질수록 점도가 증가되며 점도의 증가로 인하여 전단력이 높아졌기 때문으로 사료된다.

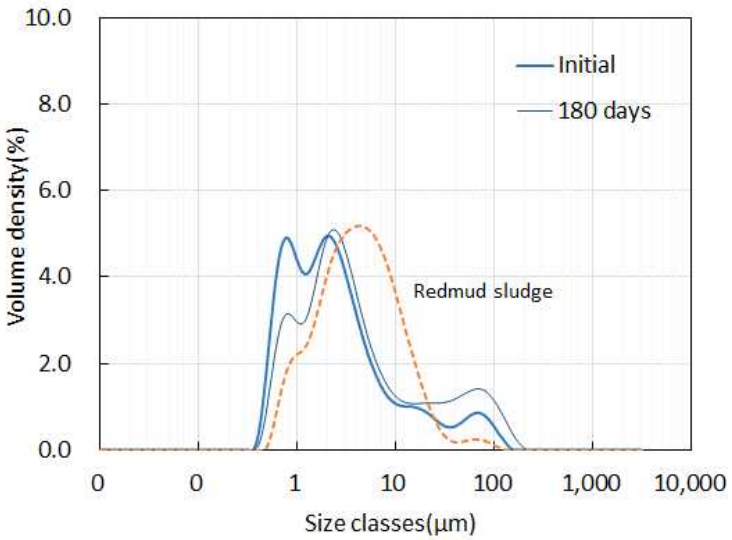
또한 경과시간에 따른 액상형 레드머드 촉진제의 입자분포는 분산직후와 경과시간 180일을 비교할 시 시간이 경과할수록 다소 우측으로 이동하며 입자가 커지는 경향을 보이고 있으며 이는 W/R비가 낮아질수록 뚜렷한 경향으로 나타나고 있다. 그러나 최종 180일이 경과하더라도 레드머드 슬러지의 평균입경과 비교하여 작은 것을 알 수 있다.



(a) W/R 100%



(b) W/R 50%



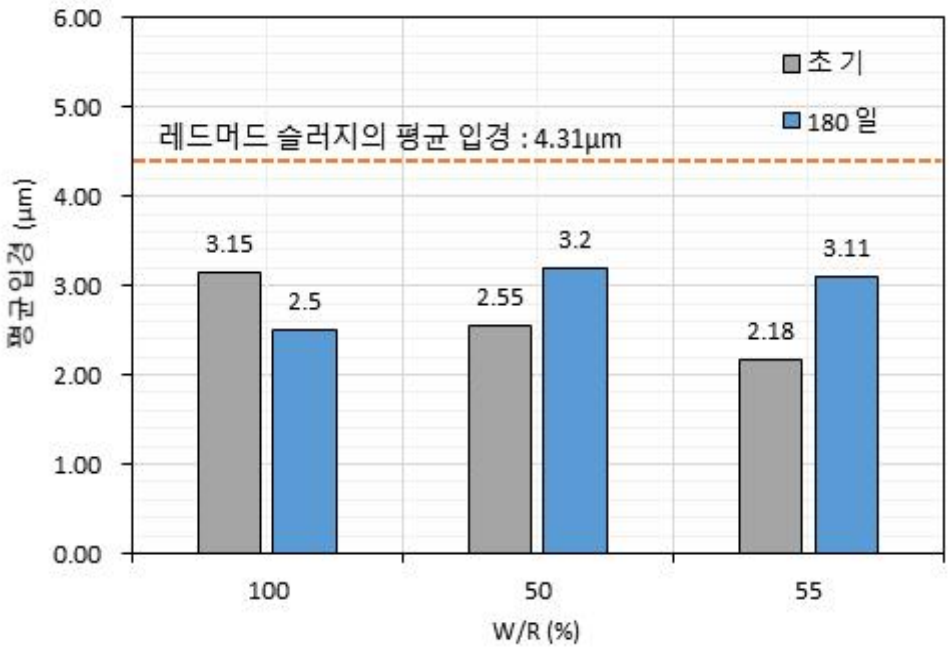
(c) W/R 25%

<그림 3.25> W/R에 따른 입도분포

W/R비별 액상형 레드머드 촉진제의 분산직후 및 최종 경과시간 180일에서의 평균입경을 <표 3.20> 및 <그림 3.26>에 나타내었다. W/R비 100%의 평균입경은 직후에서 3.15㎛, 최종 경과시간 180일에서 2.5㎛로서 직후보다 오히려 감소하는 것으로 나타났다. W/R비 50%의 평균입경은 직후에서 2.55㎛, 최종 경과시간 180일에서 3.2㎛로서 직후보다 증가하였으며 W/R비 25%의 평균입경은 직후에서 2.18㎛, 최종 경과시간 180일에서 3.11㎛로서 직후보다 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 W/R비가 감소할수록 점도가 낮아지고 경과시간이 지날수록 분산되었던 입자들이 재응집되어 나타난 결과로 사료된다.

<표 3.20> 입경측정 결과

W/R(%)	입경 (㎛)	
	초기	180일
100	3.15	2.5
50	2.55	3.2
25	2.18	3.11



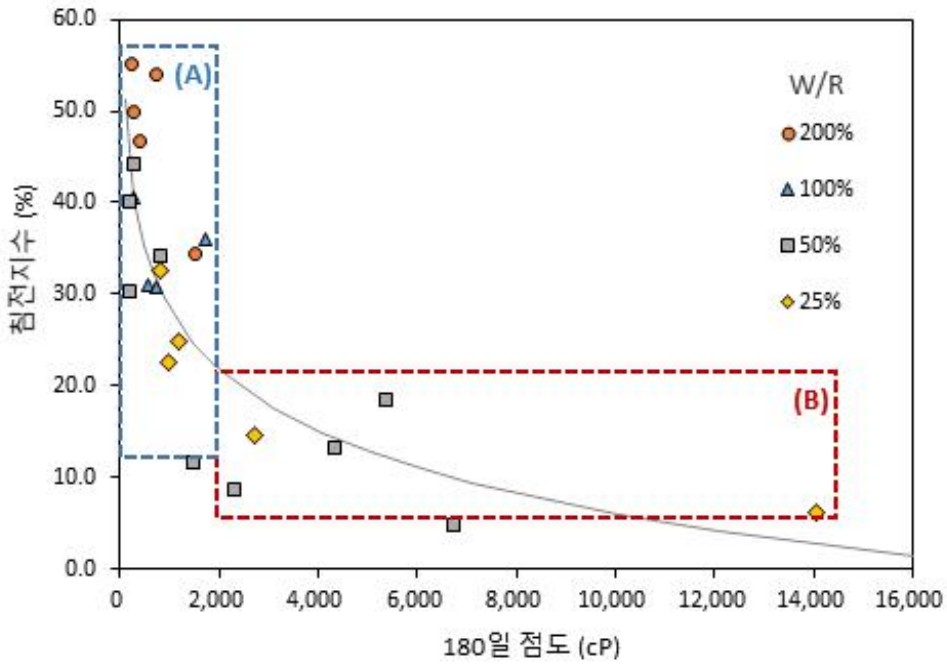
<그림 3.26> W/R에 따른 평균 입경

(라) 점도와 침전지수의 관계

액상형 레드머드 촉진제의 최종 경과시간 180일에서의 침전지수 및 점도를 <그림 3.27>에 나타내었다.

최종 경과시간 180일 침전지수에 미치는 점도의 영향은 점도가 낮을수록 침전지수가 높은 값을 나타내고 있다. 따라서 점도를 활용하여 최종 경과시간 180일의 침전지수를 예측 가능할 것으로 사료된다. 특히 점도 2000cP를 중심으로 침전지수는 유의할 만한 경향을 나타내고 있다. 점도 2000cP이하에서는 침전지수가 큰 변화폭을 보이고 있으나 점도 2000cP이상에서는 다양한 점도 범위에서 침전지수는 크게 변하지 않는 것으로 나타났다. 이를 구체적으로 점도 2000cP이하를 ‘A구역’으로 점도 2000cP이상을 ‘B구역’으로 구분하여 비교하였다.

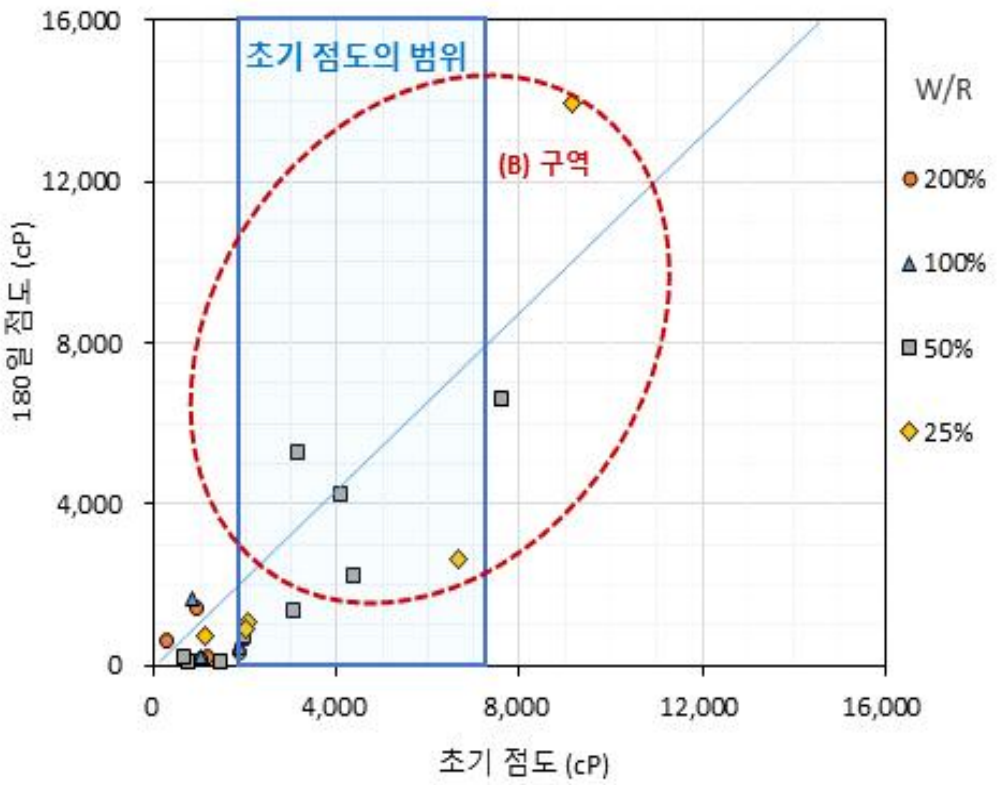
점도 2000cP이하의 A구역 침전지수는 11.9～55.3%로 나타났으며 W/R비는 200%, 100%, 50%, 25%로 침전지수 및 W/R비가 다양하게 나타나고 있다. 그러나 점도 2000cP이상의 B구역 침전지수는 5.0～18.7%로 나타나며 W/R비는 50%, 25%로 A구역과 비교하여 침전지수 및 W/R비가 낮은 변화폭으로 나타나 액상형 레드머드 촉진제가 안정화 되어있는 것을 알수있다. 따라서 액상형 레드머드 촉진제의 품질관리 측면에서 점도를 2000cP이상으로 유지하며 W/R비를 50% 이하로 설정하는 것이 적정할 것으로 판단되며 이때의 침전지수는 20%이하를 나타내고 있다.



<그림 3.27> 점도와 침전지수의 관계

액상형 레드머드 촉진제의 분산 직후 초기점도와 최종 경과시간 180일에서의 점도비교를 <그림 3.28>에 나타내었으며 <그림 3.27>에 B구역을 표기하였다. 액상형 레드머드 촉진제의 점도는 분산 직후와 경과시간 180일에서 유사한 경향을 나타내고 있다. 최종 경과시간 180일에서의 점도와 침전지수 관계에서 적정점도로 판단한 2000cP이상의 B구역 또한 초기점도에서 2000～9000cP정도를 나타내고 W/R비는 50%이하를 나타내어 20%이하의 침전지수를 유지하기 위해서는 W/R비는 50%이하로 설정하고 분산 직후 초기점도는 2000～8000cP를 가지는 것이 적정할 것으로 판단된다.

따라서 연구의 범위에 한하여 경과시간 180일에서의 침전지수에 액상혈 레드머드 촉진제의 안정적인 분산을 위해서는 초기 점도를 2000cP～8000cP를 적용하고 목표 침전지수를 20%이하로 설정하는 것이 적정할 것으로 사료된다. 또한 목표 침전지수 20%이하 분산직후 점도 2000～8000cP에 포함되는 시료는 W/R비 50%이하로서 적정 혼합수비로 판단된다.



<그림 3.28> 초기와 180일의 점도관계

(4) 결언

본 연구에서는 슬러지 상태로 배출되는 레드머드의 재활용 및 건설산업분야의 대량 활용을 위한 방안으로서 액상형 레드머드 촉진제를 제조하고 점도와 침전지수를 통하여 분산 특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 액상형 레드머드 촉진제의 점도는 전반적으로 W/R비가 높을수록 감소하고, 경과시간 180일의 점도는 분산제 및 증점제를 사용한 시료에서 초기점도와 비교하여 전반적으로 낮아졌으나 혼합수와 레드머드 슬러지만을 분산시킨 시료에서는 경과시간 180일 점도가 초기점도보다 높게 나타났다.
2) 액상형 레드머드 촉진제의 침전지수는 산제 및 증점제를 사용한 시료에서 W/R비가 클수록 증가하고, 혼합수만을 사용한 플레인 시료와 비교하여 분산제 및 증점제를 사용한 시료의 경과시간에 따른 침전지수는 완만하게 증가하는 경향을 보이고 있다.
3) 최종 경과시간 180일 침전지수에 미치는 경과시간별 점도의 영향은 점도가 낮을수록 침전지수가 높은 값을 나타내며 이는 분산 직후와 최종 경과시간 180일에서 유사하게 나타나고 있다.
4) 액상형 레드머드 촉진제의 안정적인 분산을 위해서는 초기 점도를 2000cP에서 8000cP을 적용하고 목표 침전지수를 20%이하로 설정하는 것이 타당할 것으로 사료되며 향후 액상형 레드머드의 경제적인 배합조건에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

다. 액상형 레드머드 촉진제의 백화 특성 및 저감기술

(1) 서언

최근 건설 산업에서는 주요 온실가스 발생 원인인 포틀랜드시멘트의 사용량을 줄이기 위하여 화력발전소에서 발생하는 플라이애시나 철강 산업의 부산물인 고로슬래그 등과 같은 산업폐기물을 이용하는 순환자원 재활용 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구의 일환으로 시멘트를 전혀 사용하지 않고 플라이애시 또는 고로슬래그 미분말을 이용한 알칼리 활성화 시멘트 연구도 국내·외에서 활발하게 이루어지고 있다.

알칼리 활성화 시멘트는 초기 강도 발현과 화학 저항성이 높은 것으로 알려져 콘크리트 및 시멘트 관련 연구자들에게 많은 관심을 받고 있으나 국내의 경우 주로 고가의 자극제를 사용하여 경화 메커니즘 규명 및 강도발현 특성에 중점을 두고 연구들이 수행되고 있다. 이는 알칼리 활성화 시멘트가 건설산업 현장에 실제로 활용되는데 가장 큰 장애요소로 고가의 자극제에 의한 경제적인 단점을 해결하기 위하여 자극제로써 활용 가능한 산업부산물에 관심이 모아지고 있다.

레드머드(Red mud)는 보오크사이트 원광석으로부터 수산화알루미늄($Al(OH)_3$) 및 산화알루미늄(Al_2O_3)을 제조하는 공정에서 발생되는 산업부산물이다. 국내의 경우 레드머드는 Bayer Process를 통하여 Al_2O_3 1톤을 생산하면 함수율 40～60%의 슬러지상태로 대략 2톤이 발생되며, 발생량은 국내 발생량의 대부분을 차지하고 있는 K사에서만 연간 약 30만 톤이 슬러지 상태로 발생되고 있다.

알칼리 활성화 슬래그-레드머드 시멘트는 알칼리 활성화 시멘트 연구의 일환으로 시멘트 조성에서 알칼리 자극제, 고로슬래그와 레드머드로 구성되어, 포틀랜드시멘트를 사용하지 않는 클링커 프리 시멘트(Clinker Free Cement)를 의미한다. 유사한 시멘트계 재료로써 알칼리 활성화 슬래그 시멘트, 알칼리 활성화 슬래그-플라이애시 시멘트, 알칼리 활성화 슬래그-포졸란 시멘트 등이 있다. 알칼리 활성화 슬래그-레드머드 시멘트는 레드머드를 액상 규산나트륨 또는 수산화나트륨과 같이 고로슬래그미분말의 자극제로 활용하는 것으로 2000년 초반 해외에서 처음으로 발표되었다.

한편 시멘트 및 콘크리트 연구자들에게 백화는 구조적으로 문제가 되지 않는다는 근거로 상대적으로 적은 관심과 연구가 이루어지고 있다. 그러나 알칼리활성화 시멘트의 경우 백화에 매우 취약하고 심한 경우에는 구조적으로 문제가 될 수도 있는 유해한 백화가 발생되기도 한다. 특히 나트륨 계열의 자극제를 사용하는 알칼리활성화 결합재는 백화에 더욱 취약한 것으로 알려져 있다. 이것은 미반응 상태로 존재하는 Na_2O가 증가할수록 Na_2O/Al_2O_3가 증가하고 알칼리활성화 결합재의 생성물인 알루미노실리케이트 구조에서 나트륨 이온이 상대적으로 쉽게 이동할 수 있어 포틀랜드 시멘트와 비교하여 백화발생에 매우 취약한 것으로 알려져 있다.

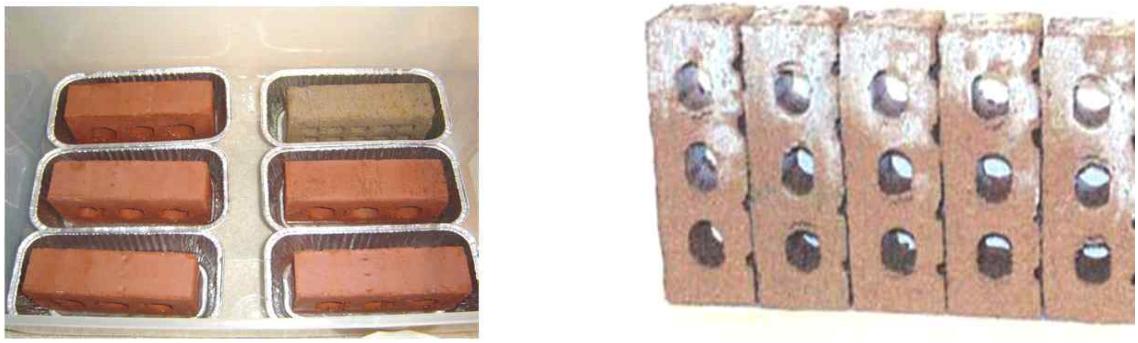
이와 같은 백화 발생 가능성이 높은 클링커 프리 시멘트의 백화 억제방법으로서 다양한 방안들이 검토되어지고 있다. 그 중에서도 65℃ 이상의 고온증기양생을 실시하게 되면 강도가 증가되고 조직이 치밀해져 알칼리 용출량이 감소함으로서 백화가 감소되는 것으로 보고된 바가 있다.

따라서 본 절에서는 액상형 레드머드 촉진제 사용시 발생되는 백화 발생 여부를 객관적으로 평가하고 정량적으로 판정 할 수 있는 방법을 조사하였다. 또한 기존 백화측정방법에 대하여 비교・분석을 실시하고 건설 산업분야에서 레드머드 사용시 발생되는 백화를 억제 및 저감시키고자 하였다.

(2) 백화시험방법 조사 및 정립

(가) ASTM C 67

ASTM C 67 : 2008 Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile 에서는 <그림 3.29>와 같이 제품을 직접 물과 접촉시켜 강제로 백화성분을 용해시키고 시멘트 경화체 표면에 백화를 발생시킨 다음 석출된 백화를 회수하여 그 성분과 발생량을 검토하는 방법인 Wick test법을 준용하고 있다.



a) 시험편 b) 시험결과

<그림 3.29> ASTM C 67의 백화 시험방법

(나) AS/NZS 4456.6

조적조 또는 포장재의 백화 가능성을 측정하기 위하여 호주에서 개발된 방법으로 <그림 3.30>에 나타낸 바와 같이 시편의 한쪽편을 증류수에 7일간 침지(침지 깊이:25mm)한 후 건조하여 백화를 육안으로 관찰한다. 증류수 대신에 염류(Na_2SO_4와 KCl를 1:1로 혼합)를 녹인 용액(농도 0.1%, 1%, 10%)을 사용하기도 한다. 시험 후 <표 3.21>에 따라 결과를 백화 발생 정도에 따라 5가지로 보고하도록 규정하고 있다.



a) 1% salt solution after 18hr b) 10% salt solution after 3 days

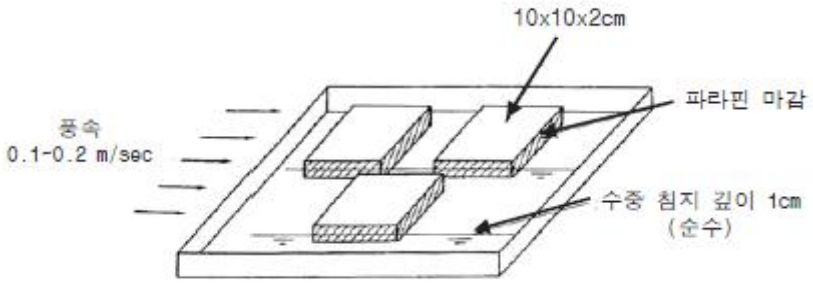
<그림 3.30> AS/NZS 4456.6 Test

<표 3.21> 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% 이상인경우
Severe	시험편 표면에 가루가 동반된 백화

(다) 일본건재시험센터 방법

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

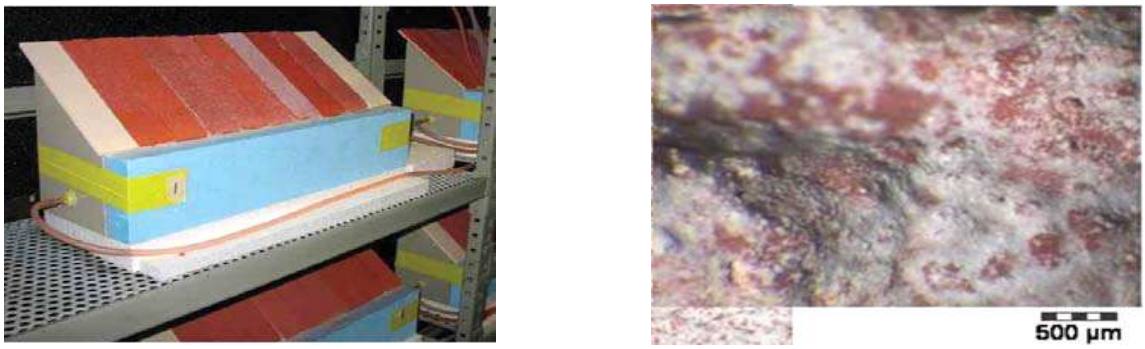


<그림 3.31> 건재시험센터 시험방법

(라) Elotex Lab Test 방법

스위스 혼화재료 회사인 Elotex사가 1차 백화 가능성을 측정하기 위하여 개발한 방법이다. 모르타르를 혼합한 후 즉시 다공질 타일위에 바르고, 20℃ 물이 하부에 순환하도록 설계한 시험장치 위에 설치한다. 이와 같은 시험 장치는 온도 7℃ 상대습도 80% 조건의 항온항습실에 놓고 백화 발생 여부를 관찰한다. 일반적으로 모르타르의 경우 백화 발생까지 7일 이상이 소요되는 것으로 보고되어지고 있다. 기존 백화 시험방법들인 침지법과는 달리 별도의 시험 장치를 활용하는 방법이지만 시험 소요기간이 기존 방법들과 비슷하다.

기존의 백화 시험방법들은 대부분 시험편을 증류수에 침지시킨 후 건조하여 백화 발생여부를 관찰하도록 규정하고 있으며 공통적으로 7일 이상의 시험 기간이 필요한 단점이 있다.



a) Test apparatus　　b) 시험결과

<그림 3.32> Elotex Lab Test

(3) 액상형 레드머드 촉진제의 백화 특성

(가) 액상형 레드머드 촉진제의 백화 특성

① 실험계획 및 방법

㉮ 모르타르 배합

액상형 레드머드 촉진제의 백화특성을 검토하기 위한 실험계획을 <표 3.22>에 나타내었다. 모르타르 배합은 <표 3.22>에 나타낸 바와 같이 보통 포틀랜트 시멘트 및 슬래그시멘트를 결합재로 하여 W/B 75%, B:S 1:3으로 모르타르를 제작하였다. 또한 액상형 레드머드 촉진제는 보통 포틀랜트 시멘트 및 슬래그시멘트에 대하여 중량비로 0, 5, 10, 20, 30% 대체하였다. 측정항목으로서는 압축강도, 백화시험, 흡수율을 측정하였다.

<표 3.22> 실험계획

구분		결합재(%)		B:S	W/B (%)	측정항목
		시멘트	액상형 레드머드 촉진제			
보통포틀랜트 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	

② 사용재료

㉮ 결합재

액상형 레드머드 촉진제의 백화특성을 검토하기 위해 사용한 결합재의 물리 화학적 성질을 <표 3.23>에 나타내었다. 결합재 중 보통 포틀랜트 시멘트는 국내 S사의 보통 포틀랜트 시멘트를 사용하였다. 슬래그 시멘트는 국내 C사에서 시제품으로 제조되어진 고로슬래그미분말의 주요 자극제로서 탈황석고를 사용하는 산업부산물 만으로 제조된 클링커프리 시멘트를 사용하였다.

<표 3.23> 결합재의 물리 화학적 특성

구분	평균입경 (cm^2/g)	밀도 (g/cm^3)	Ig. loss	화학조성비 (%)					
				SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3
보통 포틀랜트 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

㉯ 골재

액상형 레드머드 촉진제의 백화특성을 검토하기 위해 사용한 잔골재는 KS L 679에서 품질 규정하고 있는 ISO 표준사를 사용하였다.

㉰ 액상형 레드머드 촉진제

액상형 레드머드 촉진제의 백화특성을 검토하기 위해 사용한 액상형 레드머드 촉진제는 선행연구에서 도출된 고형분 51.6%, 단위용적질량 1,570kg/cm^3, 평균입경 3.15㎛, 점도 7,850cP인 액상형 레드머드 촉진제를 사용하였다. <그림 3.33>의 (a)는 액상화 레드머드의 원재료인 레드머드 슬러지이며 (b)는 선행연구에서 도출된 액상형 레드머드 촉진제 이다.



(a) 레드머드 슬러지 (b) 액상형 레드머드 촉진제

<그림 3.33> 액상형 레드머드 촉진제

③ 실험방법

㉮ 압축강도

액상형 레드머드 촉진제의 백화특성을 검토하기 위한 방법으로서 압축강도 시험은 실험계획에 제시된 모르타르 배합을 KS L ISO 679 「시멘트의 강도시험방법」에 준하여 시험체 제작 후 각 양생조건에서 재령 28일에 측정하였다. 측정장치는 UTM(Universal Test Machine)을 사용하였다.

압축강도 시험체는 50×50×50mm 금형 몰드를 사용하여 제작 한 후 1일 후에 탈형하고 온도 20℃ 상대습도 50%의 조건에서 28일간 양생을 실시하였다. 측정재령 28일에 압축강도를 측정한 후 3개 시험체의 평균값으로 압축강도를 산정하였다.

㈏ 백화시험

액상형 레드머드 촉진제의 백화특성을 검토하기 위한 방법으로서 백화시험은 일본 건재시험센터에서 개발한 「시멘트계 재료의 백화시험 방법(日本, JTCCM)」에 준하여 실시하였다.

백화 시험체는 4×4×4cm 시험체를 제작하여 온도20℃, 상대습도 60%에서 28일 양생하였다. 백화 시험은 28일 양생 후 시험편의 측면을 파라핀으로 실링처리하고 온도 7℃, 상대습도 50% 조건의 항온항습기에서 14일 동안 시험체 하부 2~10mm를 증류수에 침지하여 백화발생을 살펴보았다. 백화발생 면적은 백화 촉진 항온항습기에서 14일 침지 후 백화발생 정도를 사진 촬영하고 '페인트넷' 프로그램으로 백화발생 면적을 산출하여 정량화하였다. 백화 등급은 정량화된 백화발생 면적을 <표 3.24>에 나타낸 바와 같이 백화 발생 면적에 따라 5등급으로 구분하였다. 또한 백화발생에 따른 시험체 중량 감소율은 백화가 발생한 시험체의 중량을 측정하고 백화생성 물질을 브러쉬로 제거한 후 시험체만의 중량을 측정함으로서 백화 중량 감소율을 계산하였다. 제거한 백화 생성물질은 보통 포틀랜트 시멘트 및 슬래그시멘트로 분류하여 채취한 후 SEM, EDS 및 XRD 분석을 실시하였다.

<그림 3.34>은 백화 촉진 항온항습기에서 14일 침지한 후 CR30 시험체에서 발생한 백화 사진(a)과 이를 '페인트넷'으로 화상처리한 백화 사진(b) 및 백화제거 후 시험체 사진(c)을 나타내었다.

<표 3.24> 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 3.34> 백화발생 평가

㉰ 흡수계수

다공질의 친수성을 갖고 있는 건축 재료가 물과 접촉하면 모세관 현상을 통해 기공의 내부로 물이 흡수 된다. 물론 표면 장력의 대소에 따라 흡수되는 물의 량이 달라지지만 일반적으로 초기에는 많은 양의 물이 흡수되고 시간의 흐름에 따라 점차 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 물 흡수 현상을 다음과 같이 지수적으로 수식화 할 수 있다.

$m=c\cdot\ tn$ (2)

이미 많은 실험을 통하여 그 지수 값이 n=1/2이라는 것이 입증되었다.

즉, 단위 면적 당 물 흡수량 m(kg/m^2)은 시간 t와 포물선적 관계를 갖는다. 따라서 물 흡수량 m을 y축으로, 그리고 실용적 측면을 고려하여 시간 t의 x축을 t1/2로 나타내면 물 흡수량과 시간과의 관계를 1차원직선으로 표시할 수 있다.

$m=w\cdot\ t^{1/2}$ (3)

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

t (h) :Water absorption time

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

식 (3)의 기울기 W를 “물 흡수계수”라 한다. 물 흡수계수가 큰 재료일수록 같은 시간에 많은 양의 물을 흡수함을 의미하며 하며, 무기질 건설재료의 수밀성을 평가하는 지표로 사용되고 있다.

이에 물흡수계수를 산출하기 위한 흡수시험은 5×5×5cm 시험체를 온도 20±2℃, 상대 습도 65±5%의 표준 상태에서 항량이 될 때까지 건조하였다. 건조된 시험체의 측면은 에폭시로 실링 처리하고, 약 20℃의 물에 2~10mm 정도의 깊이로 담근 후 10분, 30분, 1시간, 6시간, 24시간에 시험체의 물흡수량을 측정하였다. 물흡수량을 흡수면의 단위면적당 물흡수량(kg/cm^2)으로 환산하여 시간 $t^{1/2}$에 따라 표시하고 4개 이상의 측정값이 일직선상에 위치하면 흡수시험을 종료하였다.

㉱ 용출 시험

액상형 레드머드 촉진제의 백화특성을 검토하기 위한 방법으로서 용출시험은 촉진 백화 시험 전과 후 시험체를 파쇄하여 1.25~1.50mm의 분말을 선별하였다. 선별된 분말 샘플과 증류수를 중량비 1:50으로 혼합하여 촉진 백화시험 조건과 동일한 온도 7℃, 상대습도 50% 조건의 항온항습기에 48시간 유지한 후 분말샘플이 침전되어 맑아진 상층부에서 채취한 20mL를 거름종이로 걸러냈다. 백화의 주요한 잠재요인으로 판단되는 백화 전 및 후 시험체에서의 가용성 Na+와 Ca+ 용출량은 걸러진 액상 샘플을 이용하여 ICP분석으로 정량 측정하였다.

② 실험결과 및 분석

㉮ 압축강도

액상형 레드머드 촉진제의 백화특성을 검토하기 위해 제작한 모르타르의 재령 7일 압축강도 및 28일 압축강도 측정결과를 <표 3.25>에 나타내었다.

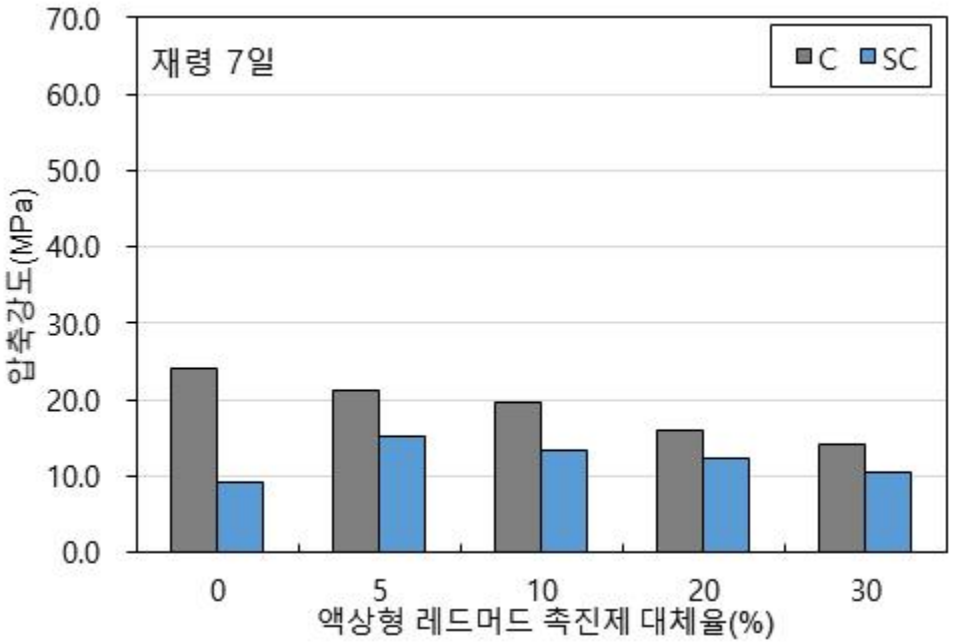
재령 7일 압축강도 측정결과 <그림 3.35>에 나타낸바와 같이 보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 경우 액상형 레드머드 촉진제 대체율 0%인 CR0에서 24.0MPa, 5%인 CR5에서 21.1MPa, 10%인 CR10에서 19.6MPa, 20%인 CR20에서 16.0MPa, 30%인 CR30에서 14.1MPa를 나타내었다. 슬래그 시멘트를 결합재로 사용한 경우 액상형 레드머드 촉진제 대체율 0%인 SCR0에서 9.30MPa, 5%인 SCR5에서 15.1MPa, 10%인 SCR10에서 13.3MPa, 20%인 SCR20에서 12.2MPa, 30%인 SCR30에서 10.4MPa를 나타내었다.

재령 28일 압축강도 측정결과 <그림 3.36>에 나타낸바와 같이 보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 경우 액상형 레드머드 촉진제 대체율 0%인 CR0에서 54.5MPa, 5%인 CR5에서 50.3MPa, 10%인 CR10에서 48.0MPa, 20%인 CR20에서 42.1MPa, 30%인 CR30에서 39.8MPa를 나타내었다. 슬래그 시멘트를 결합재로 사용한 경우 액상형 레드머드 촉진제 대체율 0%인 SCR0에서 51.9MPa, 5%인 SCR5에서 43.1MPa, 10%인 SCR10에서 40.2MPa, 20%인 SCR20에서 30.0MPa, 30%인 SCR30에서 29.0MPa를 나타내었다.

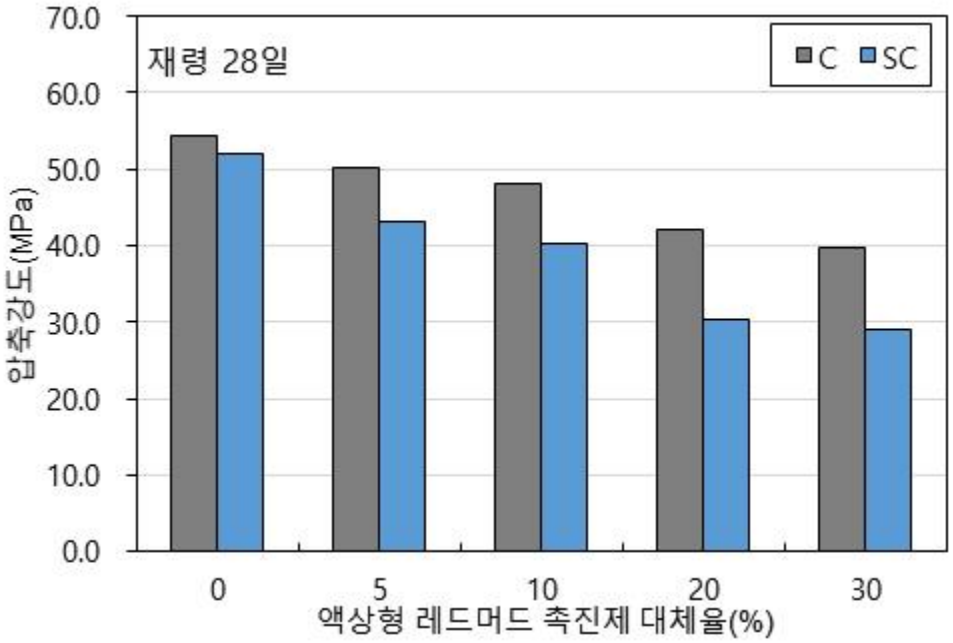
결합재 종류에 관계없이 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 압축강도는 감소하는 경향을 보이고 있다. 슬래그 시멘트의 경우 7일 재령에서는 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가함에 따라서 압축강도는 다소 증가하는 경향도 보이고 있었지만 28일 재령에서는 보통 포틀랜트 시멘트 시험체와 비교하여 액상형 레드머드 촉진제 대체율의 증가에 따른 압축강도 감소폭이 상대적으로 더 크게 나타나고 있다.

<표 3.25> 압축강도 측정결과

구분		압축강도 (MPa)	
		7일	28일
보통 포틀랜트 시멘트 (C)	CRO	24.0	54.5
	CR5	21.1	50.3
	CR10	19.6	48.0
	CR20	16.0	42.1
	CR30	14.1	39.8
슬래그시멘트 (SC)	SCR0	9.30	51.9
	SCR5	15.1	43.1
	SCR10	13.3	40.2
	SCR20	12.2	30.2
	SCR30	10.4	29.0



<그림 3.35> 재령 7일 압축강도 측정결과



<그림 3.36> 재령 28일 압축강도 측정결과

㈏ 물 흡수계수 및 기공특성

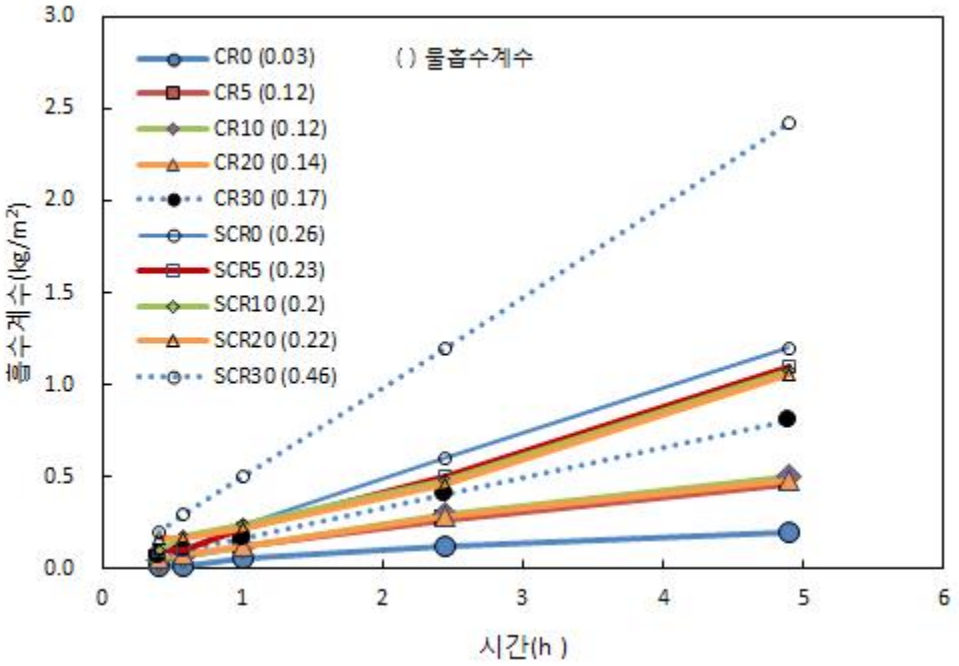
액상형 레드머드 촉진제의 백화특성을 검토하기 위해 제작한 모르타르의 물 흡수계수 및 기공특성 측정결과를 <표 3.26>에 나타내었다.

액상형 레드머드 촉진제를 활용한 모르타르의 물 흡수계수 측정결과를 <그림 3.37>에 나타낸바와 같이 보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 경우 액상형 레드머드 촉진제 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 나타내었다. 슬래그 시멘트를 결합재로 사용한 경우 액상형 레드머드 촉진제 대체율 0%인 SCR0에서 0.26%, 5%인 SCR5에서 0.23%, 10%인 SCR10에서 0.20%, 20%인 SCR20에서 0.22%, 30%인 SCR30에서 0.46%를 나타내었다. 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 모르타르의 물 흡수계수 측정결과 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 물흡수계수는 결합재 종류에 관계없이 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 물 흡수계수가 증가하는 것으로 나타났다.

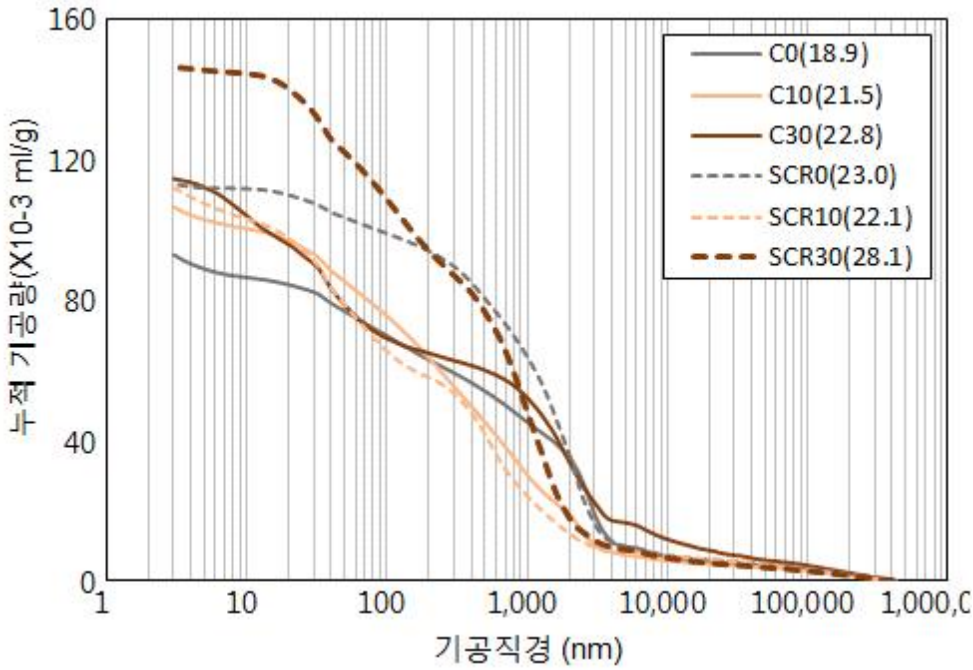
액상형 레드머드 촉진제를 활용한 모르타르의 기공특성 측정결과 <그림 3.38>에 나타낸바와 같이 보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 경우 액상형 레드머드 촉진제 대체율 0%인 CR0에서 18.9%, 10%인 CR10에서 21.5%, 30%인 CR30에서 22.8%를 나타내었다. 슬래그 시멘트를 결합재로 사용한 경우 액상형 레드머드 촉진제 대체율 0%인 SCR0에서 23.1%, 10%인 SCR10에서 22.1%, 30%인 SCR30에서 28.1%를 나타내었다. 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 모르타르의 기공량은 결합재 종류에 관계없이 동일하게 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가 할수록 기공량이 증가 하는 것으로 나타났다.

<표 3.26> 기공특성 및 물흡수계수 측정결과

구분		물 흡수 계수(%)	기공량(%)
보통 포틀랜트 시멘트 (C)	CR0	0.03	18.9
	CR5	0.12	-
	CR10	0.12	21.5
	CR20	0.14	-
	CR30	0.17	22.8
슬래그시멘트 (SC)	SCR0	0.26	23.1
	SCR5	0.23	-
	SCR10	0.20	22.1
	SCR20	0.22	-
	SCR30	0.46	28.1



<그림 3.37> 흡수계수 측정결과



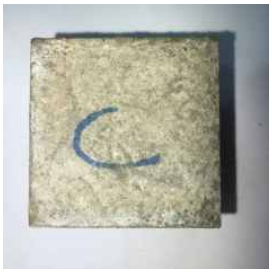
<그림 3.38> 기공특성

㈐ 백화시험

액상형 레드머드 촉진제의 백화특성을 검토하기 위해 제작한 모르타르의 백화발생면적 및 백화발생등급 측정결과를 <표 3.27> 및 <표 3.28>에 나타내었다.

액상형 레드머드 촉진제를 활용한 모르타르의 백화발생면적 및 백화발생등급은 <그림 3.39>에 나타낸바와 같이 보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 경우 액상형 레드머드 촉진제 대체율 0%인 CR0에서 0.3%로 Ⅱ등급, 5%인 CR5에서 8.2%로 Ⅱ등급, 10%인 CR10에서 19.4%로 Ⅲ등급, 20%인 CR20에서 37.7%로 Ⅳ등급, 30%인 CR30에서 40.6%로 Ⅳ등급을 나타내었다.

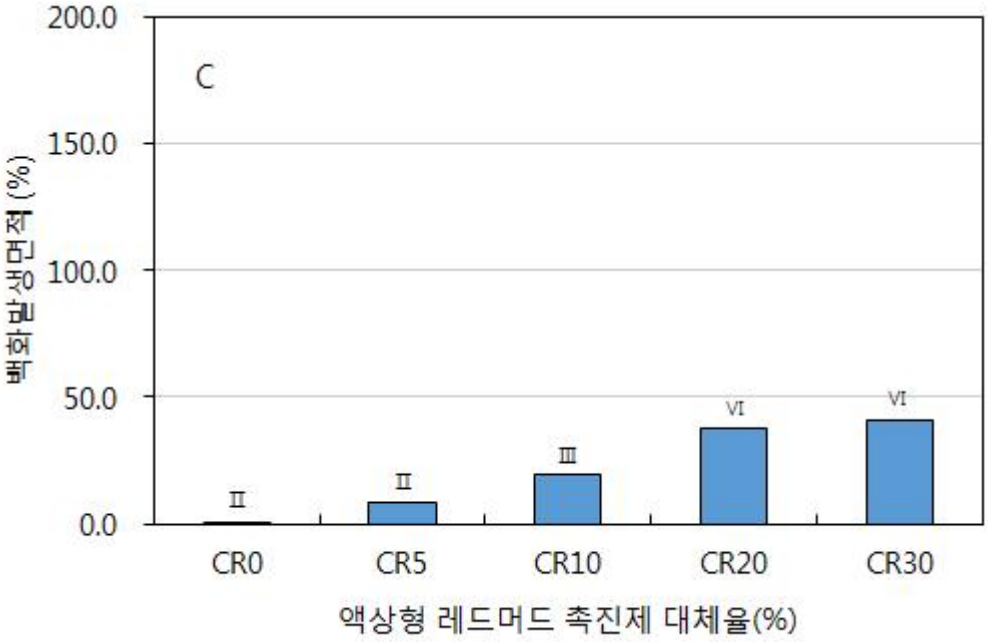
<표 3.27> 백화발생면적 측정결과 (C)

구분	백화 화상처리 전후의 이미지		백화발생 면적비(%)	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

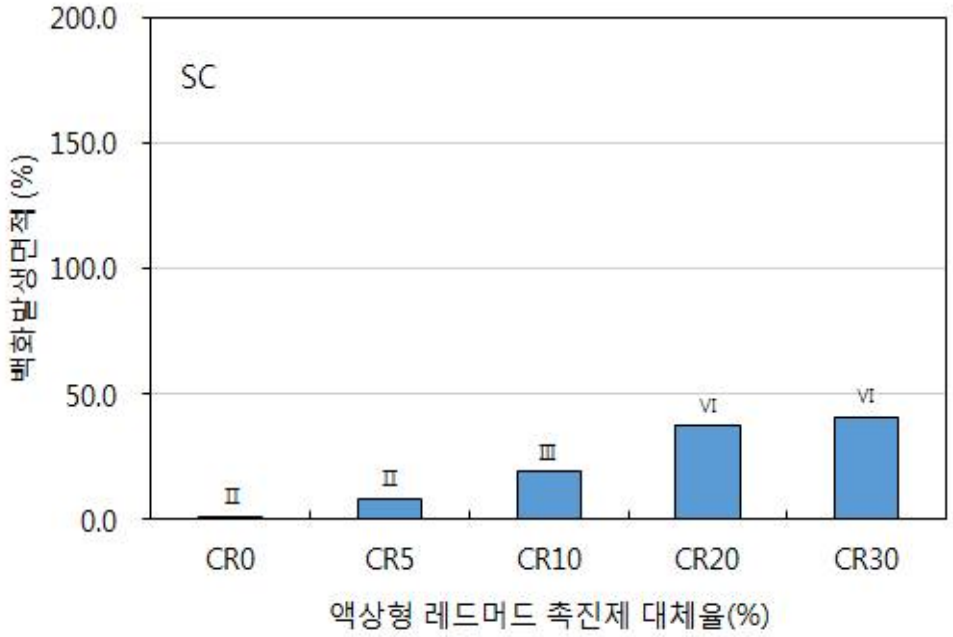
액상형 레드머드 촉진제를 활용한 모르타르의 백화발생면적 및 백화발생등급 <그림 3.40>에 나타낸바와 같이 슬래그 시멘트를 결합재로 사용한 경우 액상형 레드머드 촉진제 대체율 0%인 SCR0에서 0.1%로 Ⅰ등급, 5%인 SCR5에서 9.1%로 Ⅱ등급, 10%인 SCR10에서 24.8%로 Ⅲ등급, 20%인 SCR20에서 35.5%로 Ⅳ등급, 30%인 SCR30에서 38.1%로 Ⅳ등급을 나타내었다.

<표 3.28> 백화발생면적 측정결과 (SC)

구분	백화 화상처리 전후의 이미지		백화발생 면적비(%)	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



<그림 3.39> 백화발생면적 측정결과 (C)

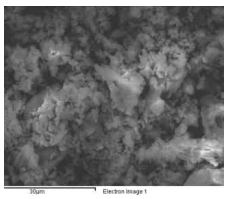
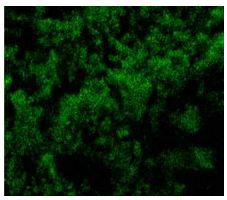
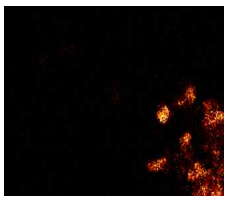
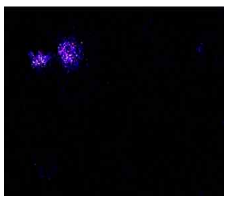
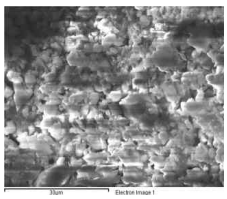
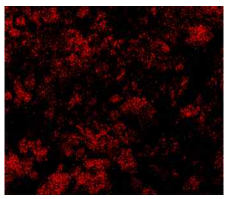
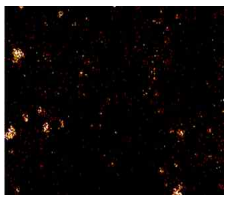
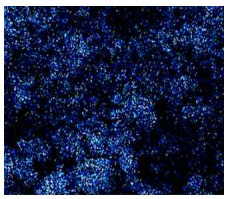
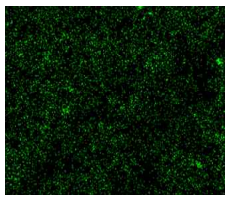


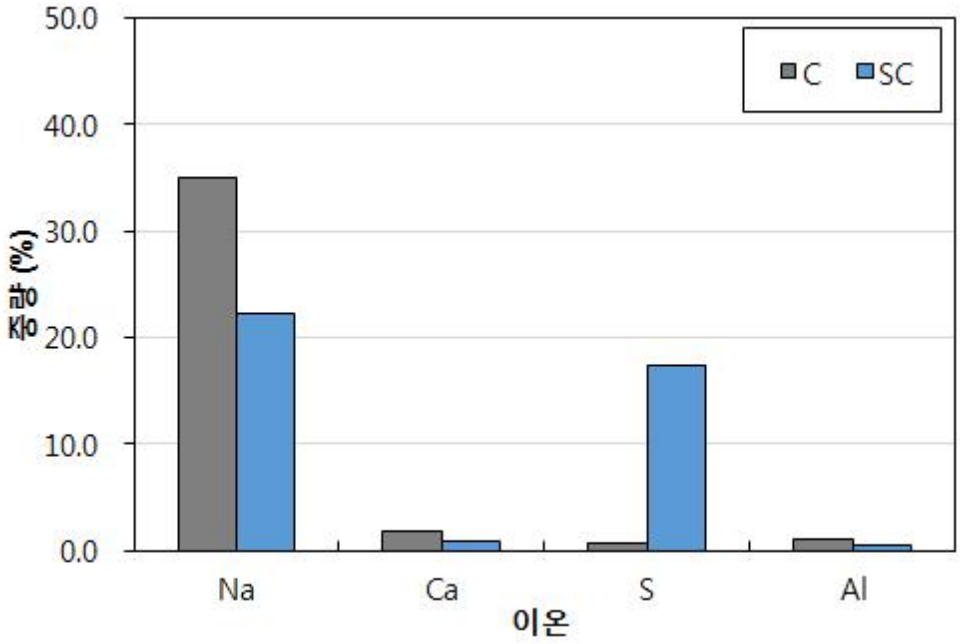
<그림 3.40> 백화발생면적 측정결과 (SC)

액상형 레드머드 촉진제의 백화특성을 검토하기 위해 제작한 모르타르의 백화생성물질 EDS 분석결과를 <표 3.29> 및 <그림 3.41>에 나타나내었다. EDS 분석결과 결합재 종류에 상관없이 모르타르에서 발생한 백화물질 모두 Na가 가장 많은 양을 차지하고 있었으며, Ca 및 Al도 일부 미량이 동일하게 나타났다.

Na의 경우 보통 포틀랜트 시멘트 모르타르 백화에서 35.08%, 슬래그 시멘트 모르타르 백화에서 22.27%를 나타나고 있어 백화의 주요한 원인이 레드머드 첨가시 혼입되어진 Na_2O인 것으로 판단되어진다. 한편 S의 경우 보통 포틀랜트 시멘트 모르타르 백화에서는 0.69%로서 매우 낮게 나타나고 있는 반면 슬래그 시멘트 모르타르 백화는 17.37%로서 상대적으로 매우 높게 나타나고 있다. 이는 결합재인 보통 포틀랜트 시멘트 모르타르에서는 SO_3 성분이 2.2%인 반면 결합재인 슬래그 시멘트 모르타르에서는 고로슬래그미분말의 자극제로서 산업부산물인 탈황석고를 사용하여 SO_3 성분이 5.2%로서 상대적으로 많은 양이 포함되어져 있고 경화체에서도 미반응 황산염이 용해되어 표면으로 용출된 것으로 판단된다.

<표 3.29> 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



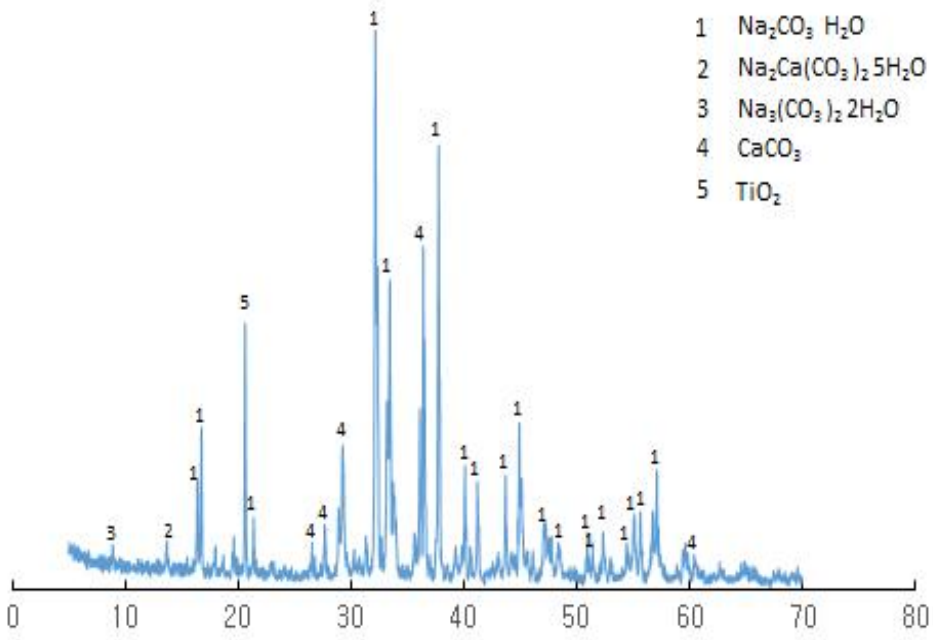
<그림 3.41> EDS 분석결과

액상형 레드머드 촉진제의 백화특성을 검토하기 위해 제작한 모르타르의 백화생성물질 XRD 분석결과를 <그림 3.42~3.43>에 나타낸바와 같이 보통 포틀랜트 시멘트 모르타르에 액상형 레드머드 촉진제를 대체한 백화는 Na_2CO_3 H_2O가 주로 나타나며, 슬래그 시멘트 모르타르에 액상형 레드머드 촉진제를 대체한 백화는 Na_2SO_4가 주로 나타나 결합재 종류에 관계없이 백화물질은 주로 나트륨계 화합물인 것으로 나타났다.

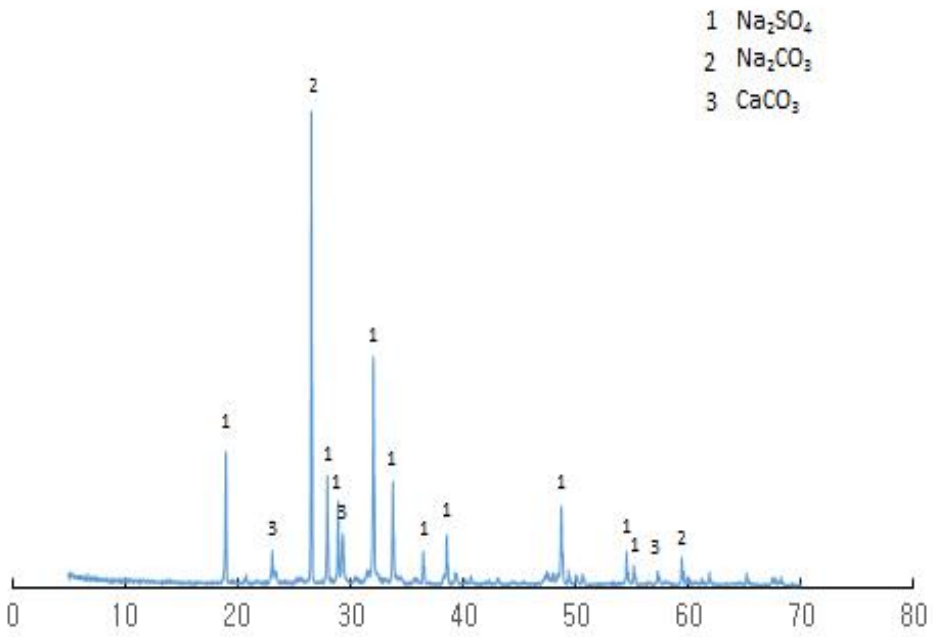
보통 포틀랜트 시멘트를 사용한 콘크리트 백화의 주성분인 $CaCO_3$가 일부분 보이고는 있지만 레드머드 혼입시 나타난 백화의 주성분이 나트륨계 화합물인 것은 백화원인이 레드머드인 것으로 판단된다. 보통 포틀랜트 시멘트 모르타르에 액상형 레드머드 촉진제를 대체한 백화는 레드머드에서 공급되는 Na와 대기중의 CO_2 가스가 반응하여 생성되는 일반적인 알칼리탄산염 백화인 Na_2CO_3 H_2O이다. 이는 NaOH 및 물유리와 같은 나트륨계 자극제로부터 Na가 충분히 공급되어 발생하는 지오폴리머 백화물질의 생성메커니즘과 유사한 것으로 판단된다.

$$CO_2(g)+2OH^-(aq) \rightarrow CO_3^{2-}(aq) + H_2O$$
$$2Na^+(aq)+CO_3^{2-}(aq)+7H_2O \rightarrow Na_2CO_3 \cdot 7H_2O$$

그러나 결합재로서 슬래그 시멘트를 사용한 모르타르에서 발생한 백화는 레드머드에서 공급되는 Na와 고로슬래그미분말의 자극제로서 사용된 탈황석고에서 공급되는 SO_3가 반응하여 생성된 것으로 추정되는 Na_2SO_4가 주를 이루고 있다.



<그림 3.42> 백화생성물질 XRD분석결과 (보통 포틀랜트 시멘트)

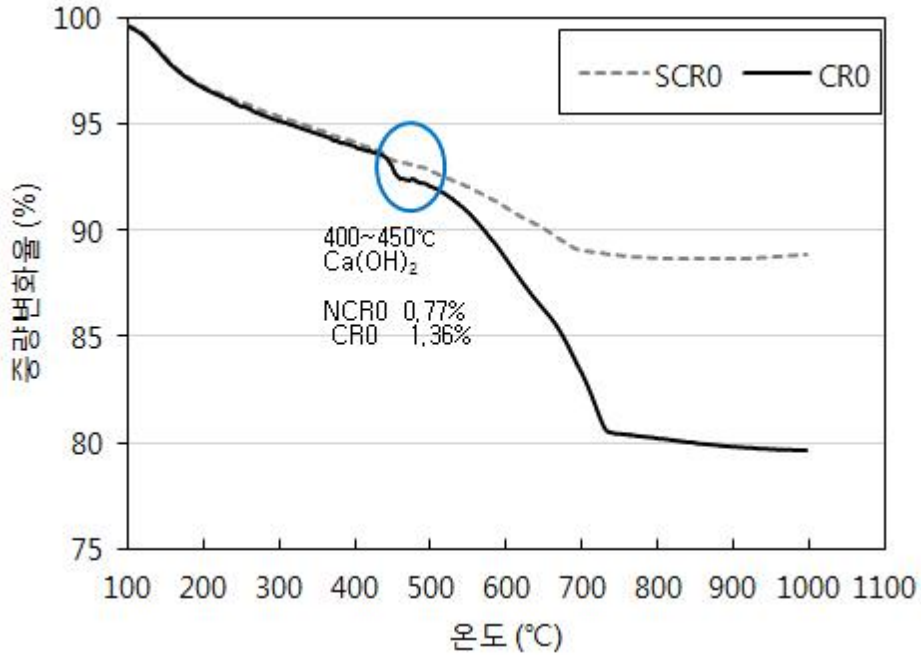


<그림 3.43> 백화생성물질 XRD분석결과 (슬래그시멘트)

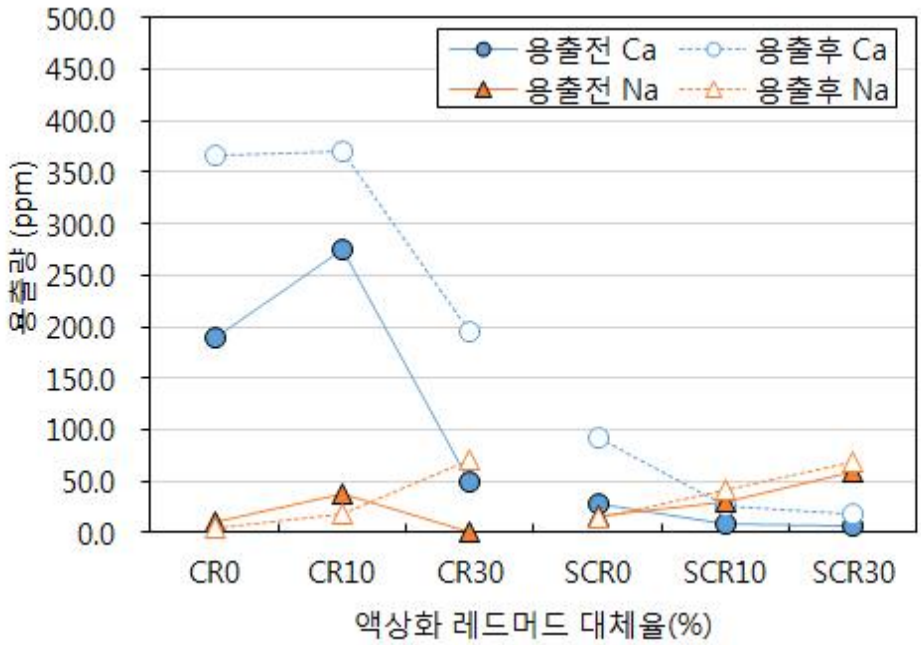
액상형 레드머드 촉진제의 백화특성을 검토하기 위해 제작한 모르타르의 열중량 분석결과를 <그림 3.44>에 나타내었다. 보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 경우 액상형 레드머드 촉진제 대체율 0%인 CR0에서 $Ca(OH_2)$ 분해로 인하여 발생되는 400~450℃에서의 중량감소율이 1.36%로 나타났으며 슬래그시멘트를 결합재로 사용한 경우 액상형 레드머드 촉진제 대체율 0%인 SCR0에서 0.77%로 나타나 슬래그시멘트 모르타르와 비교하여 높은 것으로 나타났다.

액상형 레드머드 촉진제의 백화특성을 검토하기 위해 제작한 모르타르의 용출특성결과를 <그림 3.45>에 나타내었다. 보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 경우 액상형 레드머드 촉진제 대체율 0%인 CR0의 경우 Ca 용출량은 시험 전 189.1ppm 이었으나 슬래그시멘트를 결합재로 사용한 경우 액상형 레드머드 촉진제 대체율 0%인 SCR0 시험체에서 27.6 ppm으로 CR0의 약 1/10수준이었다. 이에 따라 Ca의 주요 공급원인 결합재를 액상형 레드머드 촉진제로로 대체하는 양이 증가할수록 Ca 용출량은 감소하였으며, 특히 결합재를 보통 포틀랜트 시멘트로 사용한 모르타르에서 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 Ca 용출량이 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 또한 백화시험 후 시험체에서의 가용성 Ca 용출량은 시험전과 비교하여 모든 시험체에서 증가하는 것으로 나타났다.

가용성 Na의 경우 결합재인 보통 포틀랜트 시멘트 모르타르 및 슬래그 시멘트(SC)에서 Na_2O가 거의 나타나지 않고 있기 때문에 주요 공급원은 레드머드인 것으로 판단된다. 따라서 결합재 종류별 보통 포틀랜트 시멘트 모르타르 및 슬래그시멘트 모르타르에서의 백화 시험전 Na 용출량은 액상화 레드머드 촉진제 레드머드 대체율이 0%에서 각각 11.3ppm, 16.7ppm, 액상화 레드머드 촉진제 레드머드 대체율 10%에서 각각 38.5ppm, 30.8ppm, 액상화 레드머드 촉진제 레드머드 30%에서 각각 84.9ppm, 60.0ppm으로서 결합재 종류에 관계없이 액상화 레드머드 촉진제 레드머드 대체율이 증가할수록 증가하고 있다. 백화 시험 후 Na 용출량은 Ca 용출량처럼 증가하지는 않고 있으나 백화시험전과 유사한 수준을 보이고 있어 시험체 표면에 발생된 백화를 제거한다고 하더라도 이후에 또다시 백화발생 잠재 가능성은 있는 것으로 판단된다. 용출량과 백화발생 특성을 살펴보면 보통 포틀랜트 시멘트 모르타르에 액상화 레드머드 촉진제 레드머드를 사용한 모르타르의 경우 Ca 용출량이 Na 용출량보다 많았지만 발생한 백화성분이 Na_2CO_3 H_2O가 주를 이루고 $CaCO_3$가 미미하게 보이고 있었다. 이는 백화 발생의 주요한 잠재 요소인 Ca 및 Na가 동시에 존재할 경우 용해도가 높은 Na의 용출량이 작더라도 백화발생에 더 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.



<그림 3.44> 열중량분석



<그림 3.45> 용출량

③ 소결

본 절에서는 액상형 레드머드 촉진제의 백화특성을 검토하기 위해 액상형 레드머드의 첨가량을 결합재의 중량비로 대체하여 압축강도, 백화시험, 흡수율을 검토하였다. 그 결과 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 결합재 종류별 28일 압축강도는 슬래그시멘트 모르타르의 경우 29.0~51.9MPa로서 보통 포틀랜트 시멘트 모르타르 39.8~54.5MPa와 비교하여 상대적으로 낮은 압축강도를 나타내고 있으며, 결합재 종류에 관계없이 동일하게 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 압축강도는 감소하는 경향을 보이고 있다.
- 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 모르타르의 물 흡수계수 및 기공량 측정결과 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 물흡수계수 및 기공량은 결합재 종류에 관계없이 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 물 흡수계수 및 기공량은 증가하는 것으로 나타났다.
- 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 모르타르의 백화발생면적 측정결과 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 백화발생면적은 결합재 종류에 관계없이 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 백화발생면적은 증가하는 것으로 나타났다.
- 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 모르타르의 백화생성물질 EDS 측정결과 결합재 종류에 상관없이 모르타르에서 발생한 백화물질 모두 Na가 가장 많은 양을 차지하고 있었으며, Ca 및 Al도 일부 미량이 동일하게 나타났다.
- 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 모르타르의 백화생성물질 XRD 측정결과 보통 포틀랜트 시멘트 모르타르에 액상형 레드머드 촉진제를 대체한 백화는 Na_2CO_3 H_2O가 주로 나타났으며, 슬래그 시멘트 모르타르에 액상형 레드머드 촉진제를 대체한 백화는 Na_2SO_4가 주로 나타나 결합재 종류에 관계없이 백화물질은 주로 나트륨계 화합물인 것으로 나타났다.
- 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 모르타르의 열중량 분석결과 보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 경우 400~450℃에서의 중량감소율이 1.36%로 나타났으며 슬래그시멘트를 결합재로 사용한 경우 0.77%로 나타나 슬래그시멘트 모르타르와 비교하여 높은 것으로 나타났다.
- 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 모르타르의 용출량 분석결과 Na 용출량은 결합재 종류에 관계없이 액상화 레드머드 촉진제 레드머드 대체율이 증가할수록 증가하고 있다. 백화시험 후 Na 용출량은 Ca 용출량처럼 증가하지는 않고 있으나 백화시험전과 유사한 수준을 보이고 있어 시험체 표면에 발생된 백화를 제거한다고 하더라도 이후에 또다시 백화발생 잠재 가능성은 있는 것으로 판단된다.

(나) 액상형 레드머드 촉진제 모르타르의 양생조건에 따른 백화특성

① 실험계획 및 방법

㉮ 실험계획

양생조건에 따른 액상형 레드머드 촉진제를 사용한 모르타르의 백화 억제 및 저감을 위한 실험계획을 <표 3.30>에 나타내었다. 액상형 레드머드 촉진제는 보통 포틀랜트 시멘트와 슬래그 시멘트의 중량비로 0%, 10%, 20% 대체하였다. 제작된 모르타르는 온도 20℃ RH 50%의 기건양생, 온도 20℃의 수중양생, 온도 70℃의 고온양생, 온도 7℃ RH 30%의 저온양생 으로 설정하여 양생하였으며 W/C는 75%, B:S는 1:3으로 설정하였다. 측정 항목으로는 압축강도, 휨강도, 흡수율, 백화발생면적을 실시하였다.

<표 3.30> 실험계획

구분		배합사항(%)		W/B (%)	B:S	양생조건	측정항목
		결합재	액상형 레드머드 촉진제				
보통 포틀랜트 시멘트 (OPC)	OPC 0	100	0	75	1:3	•표준수중양생 (20℃) •기건양생 (20℃ RH50%) •고온양생 (70℃) •저온양생 (7℃ RH30%)	•압축강도 •휨강도 •흡수율 •백화시험
	OPC 10	90	10				
	OPC 20	80	20				
슬래그 시멘트 (SC)	SC 0	100	0				
	SC 10	90	10				
	SC 20	80	20				

② 사용재료

㉮ 결합재

양생조건에 따른 액상형 레드머드 촉진제를 사용한 모르타르의 백화 억제 및 저감을 위해 사용한 결합재의 물리 화학적 성질을 <표 3.31>에 나타내었다.

<표 3.31> 결합재의 물리 화학적 특성

구분	평균입경 (cm^2/g)	밀도 (g/cm^3)	Ig. loss	화학조성비 (%)					
				SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3
보통 포틀랜트 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

㉯ 골재

양생조건에 따른 액상형 레드머드 촉진제를 사용한 모르타르의 백화 억제 및 저감을 위해 사용한 잔골재는 KS L 679에서 품질규정하고 있는 ISO 표준사를 사용하였다.

㉰ 액상형 레드머드 촉진제

양생조건에 따른 액상형 레드머드 촉진제를 사용한 모르타르의 백화 억제 및 저감을 위해 사용한 액상형 레드머드 촉진제는 선행연구에서 도출된 고형분 51.6%, 단위용적질량 1,570kg/cm^3, 평균입경 3.15㎛, 점도 7,850cP인 액상형 레드머드 촉진제를 사용하였다.

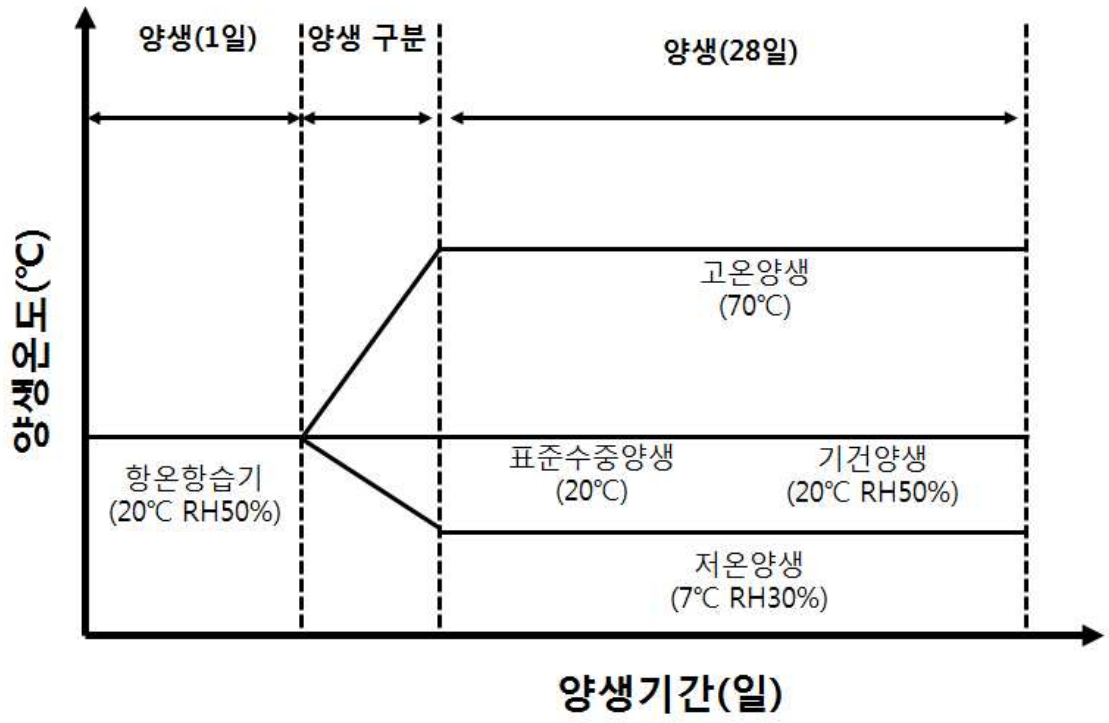
③ 실험방법

㉮ 모르타르 배합

양생조건에 따른 액상형 레드머드 촉진제를 사용한 모르타르의 백화 억제 및 저감을 검토하기 위한 방법으로서 모르타르 배합은 보통 포틀랜트 시멘트와 슬래그 시멘트를 결합재로 사용하여 W/C 75%, B:S 1:3, 결합재 : 액상형 레드머드 촉진제를 100:0, 90:10, 80:20 의 비율로 혼합하여 모르타르를 제작 하였다.

㉯ 양생조건

양생조건에 따른 액상형 레드머드 촉진제를 사용한 모르타르의 백화 억제 및 저감을 검토하기 위한 방법으로서 양생조건은 시험체 제작 후 온도 20℃, 상대습도 50%의 항온항습실에서 1일간 양생한 후 탈형 하였다. 탈형한 시험체는 실험계획에서 제시한 양생조건인 표준수중양생, 기건양생, 고온양생, 저온양생에서 각각 존치하였다. 각각의 양생조건은 <그림 3.46>에 나타낸 바와 같이 표준수중양생의 경우 온도 20℃ 양생수조, 기건양생의 경우 온도 20℃ 상대습도 50%의 항온항습기, 고온양생의 경우 온도 70℃의 건조기, 저온양생의 경우 온도 7℃ 상대습도 30%의 항온항습기에서 양생하였다.



<그림 3.46> 양생조건

④ 시험방법

㉮ 압축강도 및 휨강도

양생조건에 따른 액상형 레드머드 촉진제를 사용한 모르타르의 백화 억제 및 저감을 검토하기 위한 방법으로서 압축강도 및 휨강도 시험은 실험계획에 제시된 모르타르 배합을 KS L ISO 679 「시멘트의 강도시험방법」에 준하여 시험체 제작 후 각 양생조건에서 재령 28일에 측정하였다. 측정장치는 UTM(Universal Test Machine)을 사용하였다.

압축강도 및 휨강도 시험체는 40×40×160mm인 각주형 공시체를 사용하여 제작한 후 1일 후에 탈형하고 각 양생조건의 항온항습기에서 양생을 실시하였다. 각각의 양생조건에서 측정재령 28일에 휨강도를 측정한 후 측정이 완료된 2개의 시험체를 이용하여 압축강도를 측정하였다. 각각의 양생조건에서의 휨강도는 3개, 압축강도는 6개의 평균값으로 하였다.

㉯ 흡수율

양생조건에 따른 액상형 레드머드 촉진제를 사용한 모르타르의 백화 억제 및 저감을 검토하기 위한 방법으로서 흡수율 시험은 각 양생조건별로 28일 양생된 5×5×5cm 시험체를 KS F 2609 「건축 재료의 물 흡수계수 측정방법」에 따라 온도 20±2℃, 상대 습도 65±5%의 표준상태에서 항량이 될 때까지 건조하였다. 건조된 시험체의 측면은 에폭시로 실링 처리하고, 약 20℃의 물에 2～10mm 정도의 깊이로 담근 후 10분, 30분, 1시간, 6시간, 12시간, 24시간에 시험체의 물 흡수량을 측정하였으며 물 흡수량을 시험체 질량으로 나누어 흡수율을 산정하였다.

㉰ 백화발생면적

양생조건에 따른 액상형 레드머드 촉진제를 사용한 모르타르의 백화 억제 및 저감을 검토하기 위한 방법으로서 백화시험은 일본 건재시험센터에서 개발한 「시멘트계 재료의 백화시험방법(日本, JTCCM)」에 준하여 실시하였다.

(다) 실험결과 및 분석

① 압축강도 및 휨강도

㉮ 표준수중양생

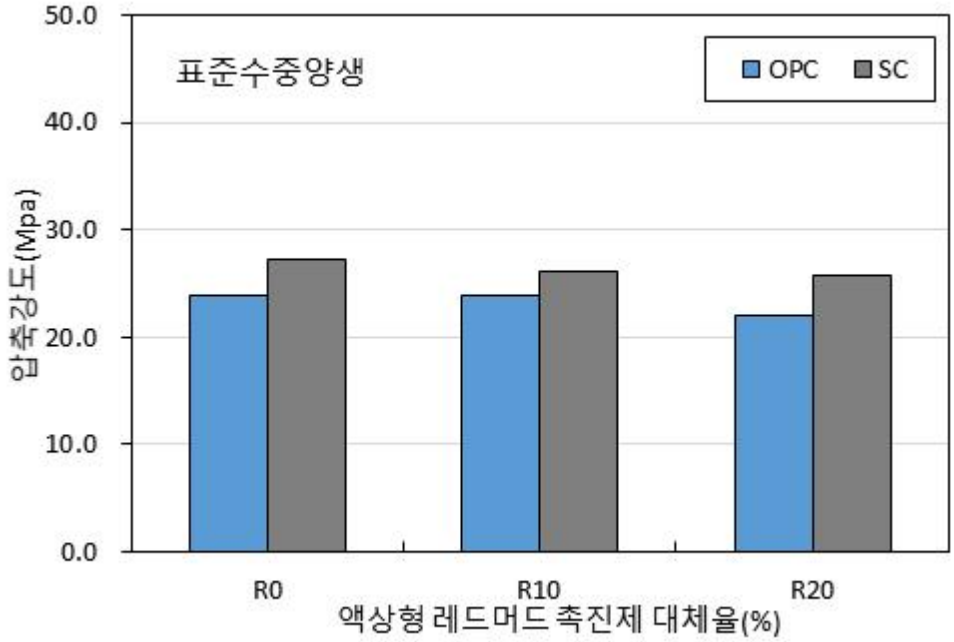
액상형 레드머드 촉진제를 사용한 표준수중양생 모르타르의 28일 압축강도 및 휨강도 측정결과를 <표 3.32>에 나타내었다.

표준 수중양생 모르타르의 압축강도는 <그림 3.47> (a)에 나타낸 바와 같이 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 다소 감소하고 있으나 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 보통 포틀랜트 시멘트와 비교하여 슬래그 시멘트에서 상대적으로 높은 압축강도를 발현하고 있다.보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르의 28일 압축강도 측정결과 액상형 레드머드 촉진제를 0% 대체한 경우 23.8MPa, 10%의 경우 23.8MPa, 20%의 경우 22.1MPa를 나타내었다. 슬래그 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르의 28일 압축강도 측정결과 액상형 레드머드 촉진제를 0% 대체한 경우 27.3MPa, 10% 대체한 경우 26.2MPa, 20% 대체한 경우 25.7MPa를 나타내었다.

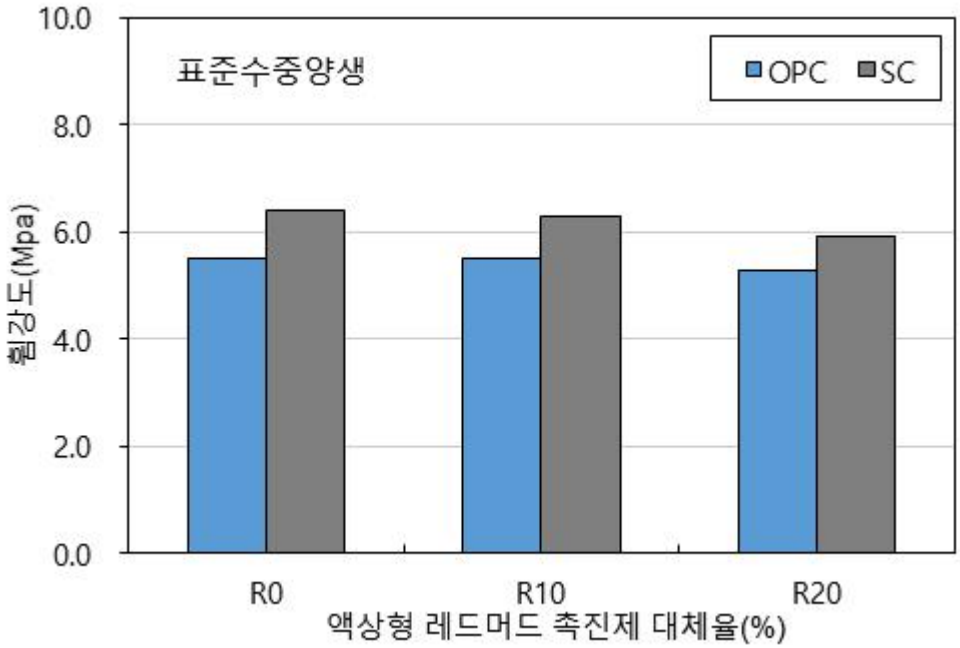
표준 수중양생 모르타르의 휨강도는 <그림 3.47> (b)에 나타낸 바와 같이 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 다소 감소하고 있으나 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 보통 포틀랜트 시멘트와 비교하여 슬래그 시멘트에서 상대적으로 높은 휨강도를 발현하고 있다. 보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르의 28일 휨강도 측정결과 액상형 레드머드 촉진제를 0% 대체한 경우 5.5MPa, 10%의 경우 5.5MPa, 20%의 경우 5.3MPa를 나타내었다. 슬래그 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르의 28일 휨강도 측정결과 액상형 레드머드 촉진제를 0% 대체한 경우 6.4MPa, 10% 대체한 경우 6.3MPa, 20% 대체한 경우 5.9MPa를 나타내었다.

<표 3.32> 표준수중양생 모르타르의 강도 측정결과

구분		압축강도(MPa)		휨강도(MPa)	
		보통 포틀랜트 시멘트 (OPC)	슬래그 시멘트 (SC)	보통 포틀랜트 시멘트 (OPC)	슬래그 시멘트 (SC)
액상형 레드머드 촉진제 대체율(%)	R0	23.8	27.3	5.5	6.4
	R10	23.8	26.2	5.5	6.3
	R20	22.1	25.7	5.3	5.9



a) 표준수중양생 모르타르의 압축강도 측정결과



b) 표준수중양생 모르타르의 휨강도 측정결과

〈그림 3.47〉 표준수중양생 모르타르의 강도 측정결과

㉯ 기건양생

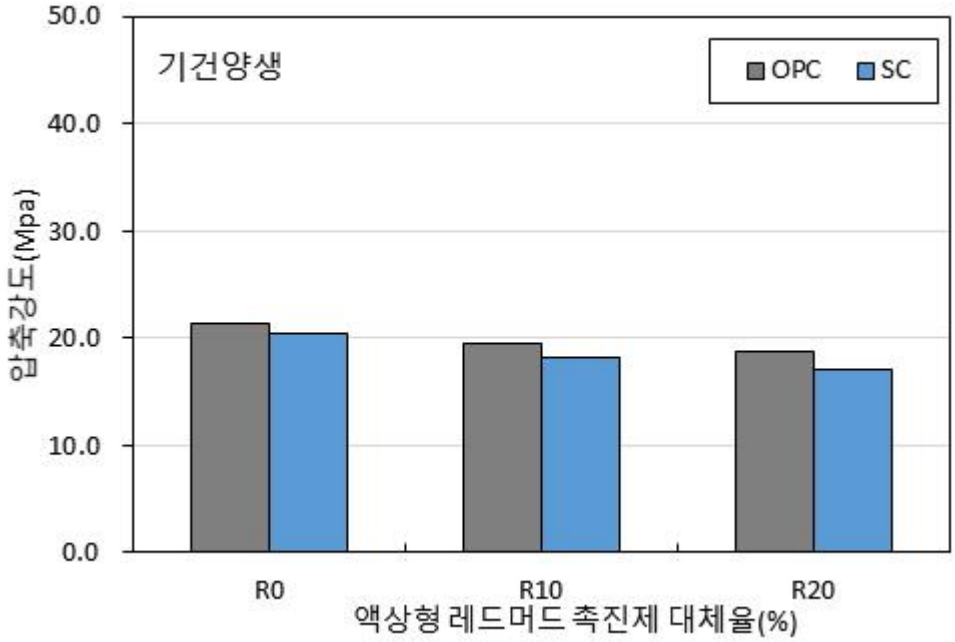
액상형 레드머드 촉진제를 활용한 기건양생 모르타르의 28일 압축강도 및 휨강도 측정결과를 <표 3.33>에 나타내었다.

기건양생 모르타르의 압축강도는 <그림 3.48> (a)에 나타낸 바와 같이 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 다소 감소하고 있으나 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 보통 포틀랜트 시멘트와 비교하여 슬래그 시멘트에서 표준 수중양생과는 상이하게 상대적으로 낮은 압축강도를 발현하고 있다. 보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르의 28일 압축강도 측정결과 액상형 레드머드 촉진제를 0% 대체한 경우 21.3MPa, 10%의 경우 19.5MPa, 20%의 경우 18.8MPa를 나타내었다. 슬래그 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르의 28일 압축강도 측정결과 액상형 레드머드 촉진제를 0% 대체한 경우 20.5MPa, 10% 대체한 경우 18.2MPa, 20% 대체한 경우 17.0MPa를 나타내었다.

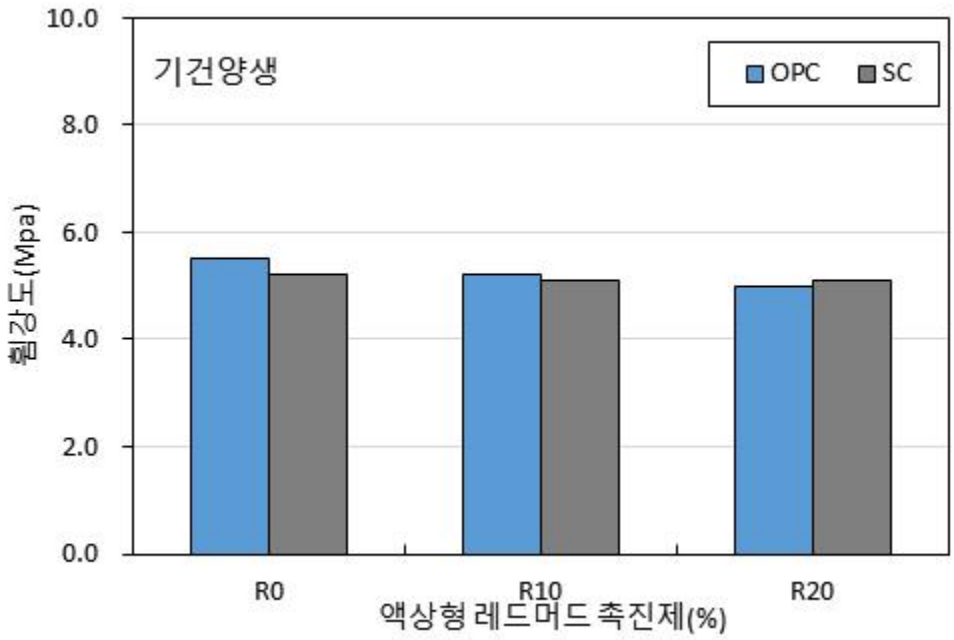
기건양생 모르타르의 휨강도는 <그림 3.48> (b)에 나타낸 바와 같이 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 다소 감소하고 있으나 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 보통 포틀랜트 시멘트와 비교하여 슬래그 시멘트에서 표준 수중양생과는 상이하게 상대적으로 낮은 압축강도를 발현하고 있다. 보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르의 28일 휨강도 측정결과 액상형 레드머드 촉진제를 0% 대체한 경우 5.5MPa, 10%의 경우 5.2MPa, 20%의 경우 5.0MPa를 나타내었다. 슬래그 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르의 28일 휨강도 측정결과 액상형 레드머드 촉진제를 0% 대체한 경우 5.2MPa, 10% 대체한 경우 5.1MPa, 20% 대체한 경우 5.1MPa를 나타내었다.

<표 3.33> 기건양생 모르타르의 강도 측정결과

구분		압축강도(MPa)		휨강도(MPa)	
		보통 포틀랜트 시멘트 (OPC)	슬래그 시멘트 (SC)	보통 포틀랜트 시멘트 (OPC)	슬래그 시멘트 (SC)
액상형 레드머드 촉진제 대체율(%)	R0	21.3	20.5	5.5	5.2
	R10	19.5	18.2	5.2	5.1
	R20	18.8	17.0	5.0	5.1



a) 기건양생 모르타르의 압축강도 측정결과



b) 기건양생 모르타르의 휨강도 측정결과

<그림 3.48> 기건양생 모르타르의 강도 측정결과

㉰ 고온양생

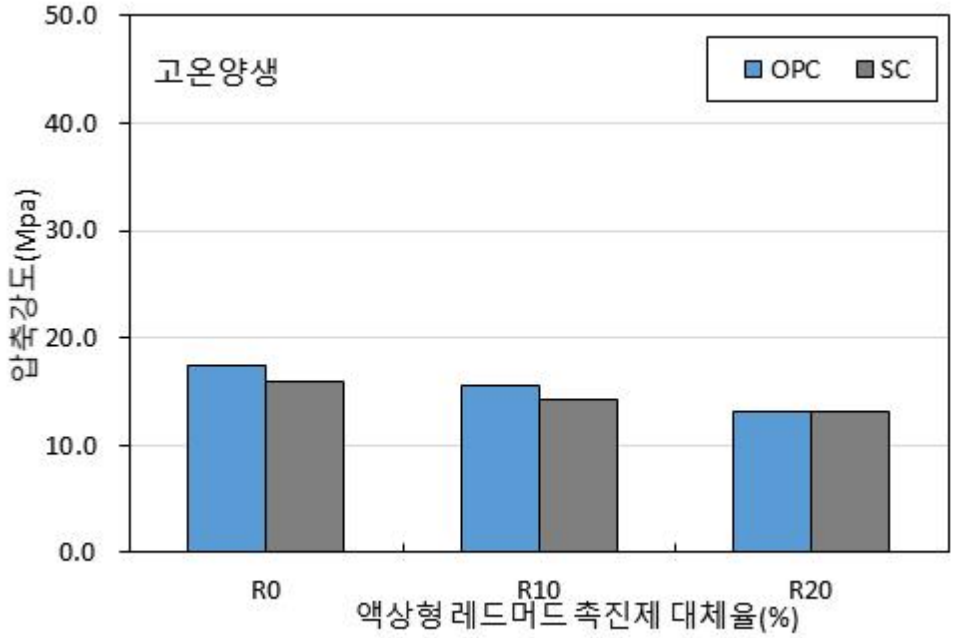
액상형 레드머드 촉진제를 활용한 고온양생 모르타르의 28일 압축강도 및 휨강도 측정결과를 <표 3.34>에 나타내었다.

고온양생 모르타르의 압축강도는 <그림 3.49> (a)에 나타낸 바와 같이 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 보통 포틀랜트 시멘트와 비교하여 슬래그 시멘트에서 낮은 압축강도를 발현하고 있다. 보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르의 28일 압축강도 측정결과 액상형 레드머드 촉진제를 0% 대체한 경우 17.4MPa, 10%의 경우 15.6MPa, 20%의 경우 13.2MPa를 나타내었다. 슬래그 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르의 28일 압축강도 측정결과 액상형 레드머드 촉진제를 0% 대체한 경우 15.9MPa, 10% 대체한 경우 14.2MPa, 20% 대체한 경우 13.1MPa를 나타내었다.

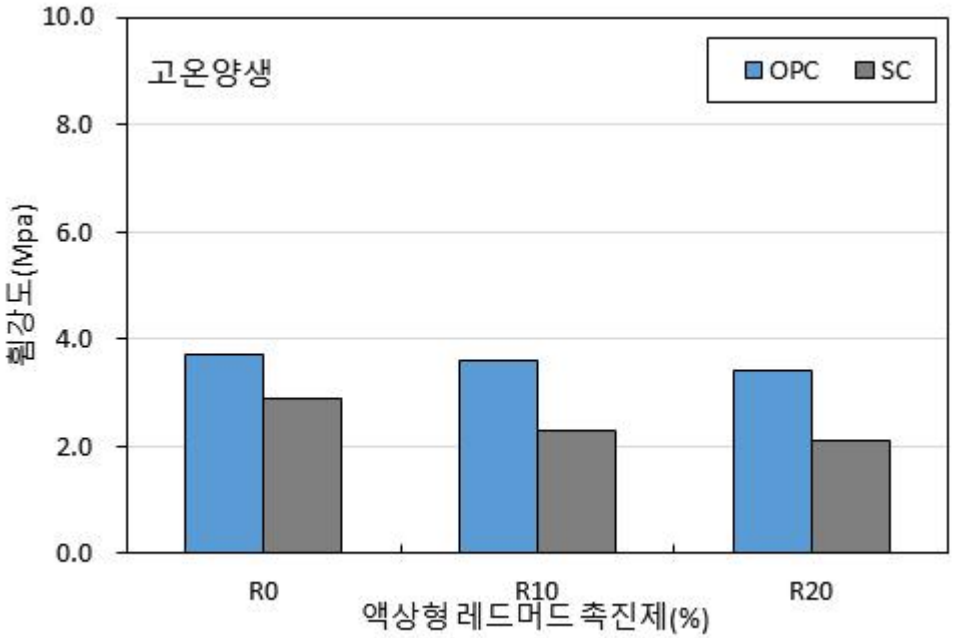
고온양생 모르타르의 휨강도는 <그림 3.49> (b)에 나타낸 바와 같이 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르의 28일 휨강도 측정결과 액상형 레드머드 촉진제를 0% 대체한 경우 3.7MPa, 10%의 경우 3.6MPa, 20%의 경우 3.4MPa를 나타내었다. 슬래그 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르의 28일 휨강도 측정결과 액상형 레드머드 촉진제를 0% 대체한 경우 2.9MPa, 10% 대체한 경우 2.3MPa, 20% 대체한 경우 2.1MPa를 나타내었다.

<표 3.34> 고온양생 모르타르의 강도 측정결과

구분		압축강도(MPa)		휨강도(MPa)	
		보통 포틀랜트 시멘트 (OPC)	슬래그 시멘트 (SC)	보통 포틀랜트 시멘트 (OPC)	슬래그 시멘트 (SC)
액상형 레드머드 촉진제 대체율(%)	R0	17.4	15.9	3.7	2.9
	R10	15.6	14.2	3.6	2.3
	R20	13.2	13.1	3.4	2.1



a) 고온양생 모르타르의 압축강도 측정결과



b) 고온양생 모르타르의 휨강도 측정결과

〈그림 3.49〉 고온양생 모르타르의 강도 측정결과

㉲ 저온양생

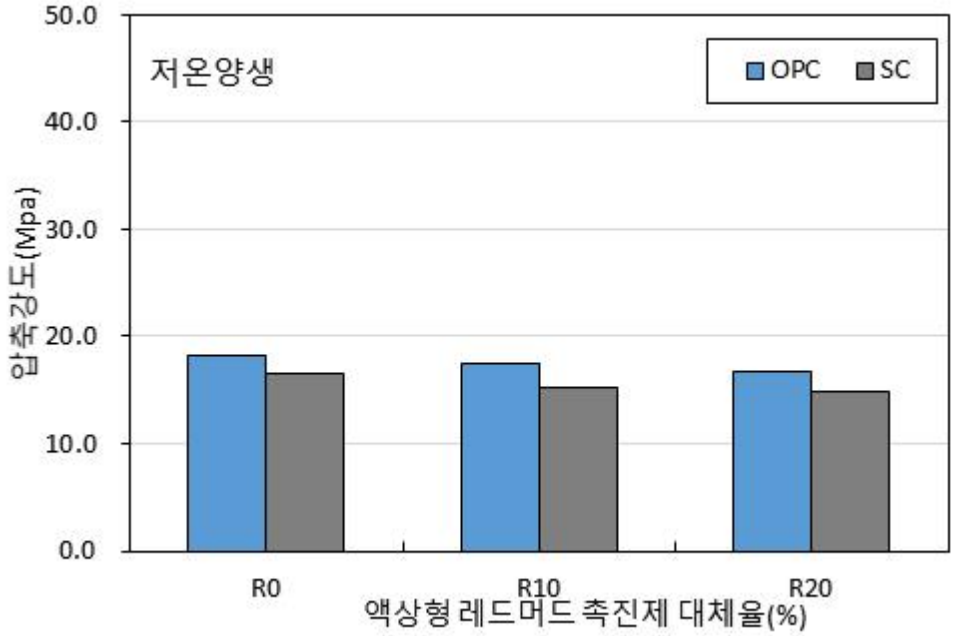
액상형 레드머드 촉진제를 활용한 저온양생 모르타르의 28일 압축강도 및 휨강도 측정결과를 <표 3.35>에 나타내었다.

저온양생 모르타르의 압축강도는 <그림 3.50> (a)에 나타낸 바와 같이 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 다소 감소하고 있으나 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 보통 포틀랜트 시멘트와 비교하여 슬래그 시멘트에서 낮은 압축강도를 발현하고 있다. 보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르의 28일 압축강도 측정결과 액상형 레드머드 촉진제를 0% 대체한 경우 18.2MPa, 10%의 경우 17.5MPa, 20%의 경우 16.8MPa를 나타내었다. 슬래그 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르의 28일 압축강도 측정결과 액상형 레드머드 촉진제를 0% 대체한 경우 16.5MPa, 10% 대체한 경우 15.2MPa, 20% 대체한 경우 14.9MPa를 나타내었다.

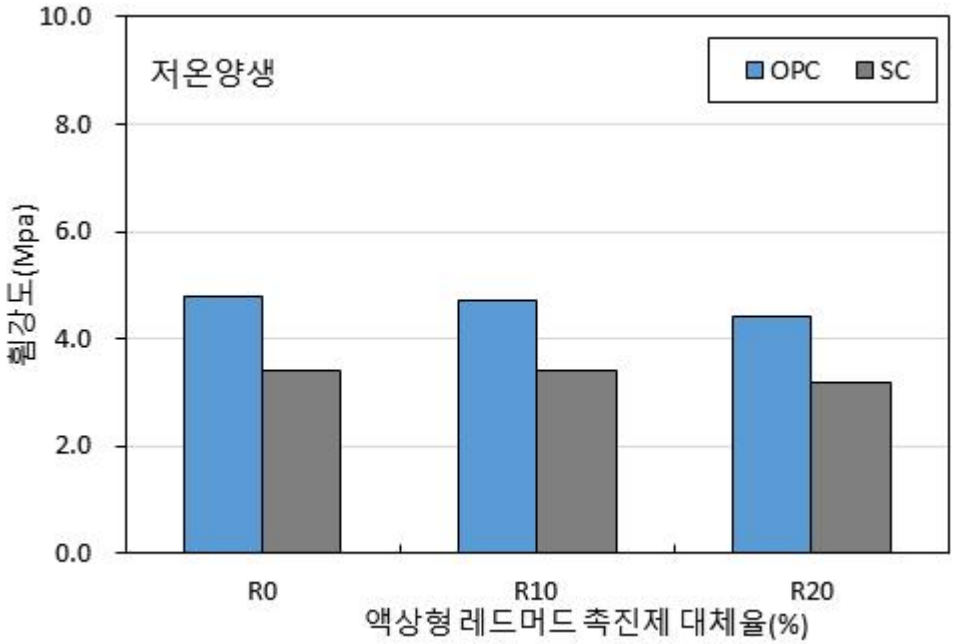
저온양생 모르타르의 압축강도는 <그림 3.50>(b)에 나타낸 바와 같이 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 다소 감소하고 있으나 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르의 28일 휨강도 측정결과 액상형 레드머드 촉진제를 0% 대체한 경우 4.8MPa, 10%의 경우 4.7MPa, 20%의 경우 4.4MPa를 나타내었다. 슬래그 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르의 28일 휨강도 측정결과 액상형 레드머드 촉진제를 0% 대체한 경우 3.4MPa, 10% 대체한 경우 3.4MPa, 20% 대체한 경우 3.2MPa를 나타내었다.

<표 3.35> 저온양생 모르타르 강도 측정결과

구분		압축강도(MPa)		휨강도(MPa)	
		보통 포틀랜트 시멘트 (OPC)	슬래그 시멘트 (SC)	보통 포틀랜트 시멘트 (OPC)	슬래그 시멘트 (SC)
액상형 레드머드 촉진제 대체율(%)	R0	18.2	16.5	4.8	3.4
	R10	17.5	15.2	4.7	3.4
	R20	16.8	14.9	4.4	3.2



a) 저온양생 모르타르의 압축강도 측정결과



b) 저온양생 모르타르의 압축강도 측정결과

〈그림 3.50〉 저온양생 모르타르의 강도 측정결과

② 흡수율

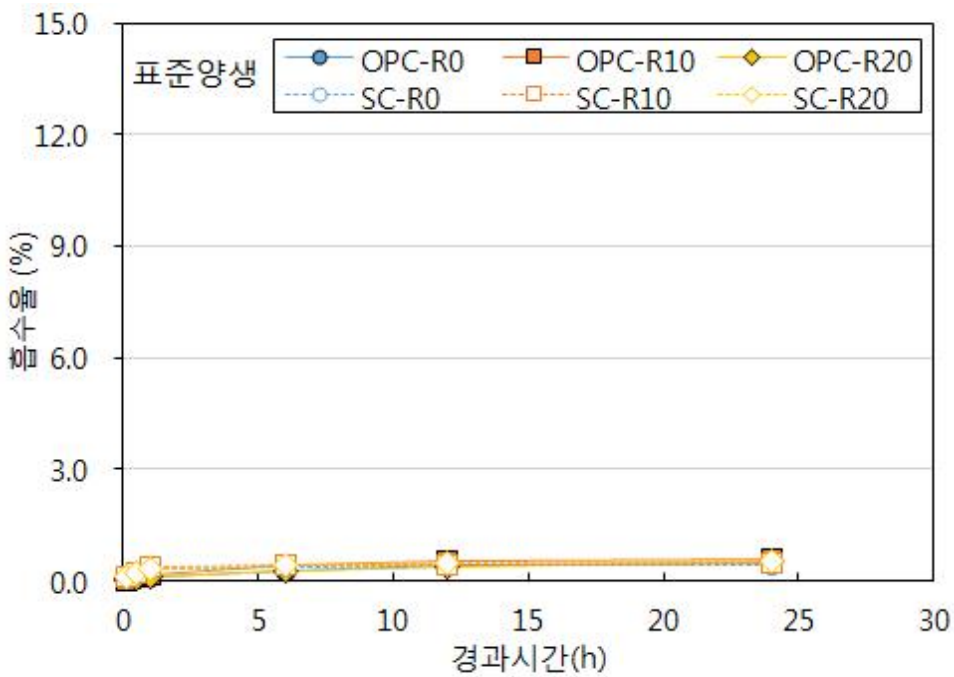
㉮ 표준수중양생

액상형 레드머드 촉진제를 활용한 표준 수중양생 모르타르의 흡수율 측정결과를 <표 3.36> 및 <그림 3.51>에 나타내었다.

보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르의 흡수율 측정결과 레드머드를 0% 대체한 경우 0.3%, 10%의 경우 0.53%, 20%의 경우 0.4%를 나타내었다. 슬래그 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르의 흡수율 측정결과 레드머드를 0% 대체한 경우 0.38%, 10% 대체한 경우 0.41%, 20% 대체한 경우 0.52%를 나타내었다.

<표 3.36> 표준수중양생 모르타르의 흡수율 측정결과

구분			경과시간별 흡수율(%)						
			0hr	0.16hr	0.5hr	1hr	6hr	12hr	24hr
표준수중양생	보통 포틀랜트 시멘트 (OPC)	R0	0.05	0.08	0.10	0.30	0.42	0.47	0.30
		R10	0.04	0.14	0.16	0.42	0.53	0.57	0.53
		R20	0.04	0.08	0.11	0.28	0.40	0.52	0.40
	슬래그 시멘트 (SC)	R0	0.07	0.20	0.34	0.40	0.42	0.45	0.38
		R10	0.12	0.21	0.37	0.41	0.41	0.49	0.41
		R20	0.13	0.20	0.35	0.42	0.46	0.58	0.52



<그림 3.51> 흡수율 측정결과 (표준 수중양생)

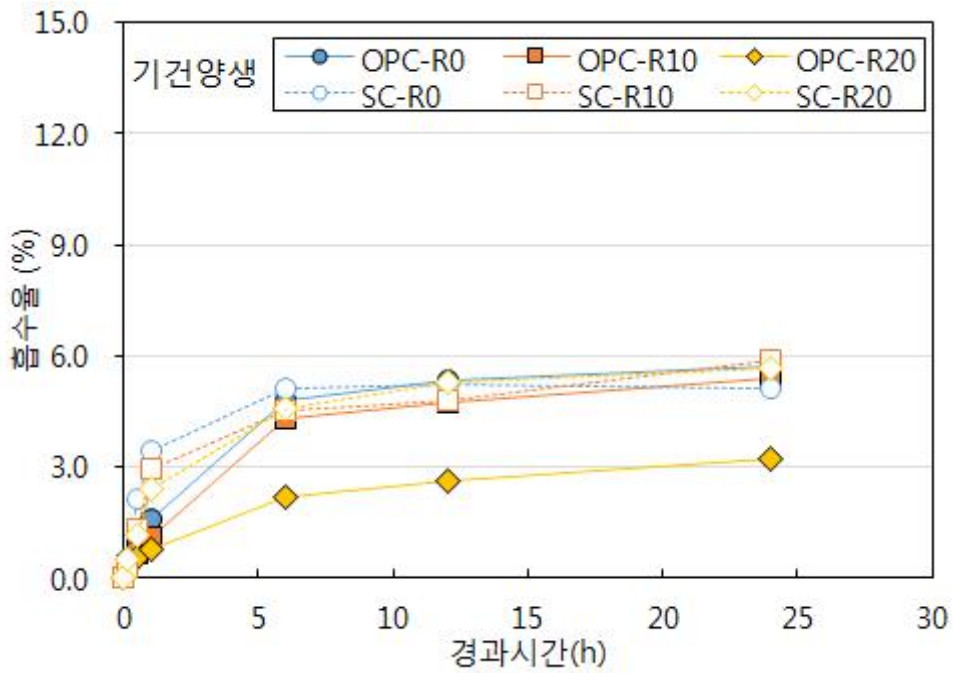
㉰ 기건양생

액상형 레드머드 촉진제를 활용한 기건양생 모르타르의 흡수율 측정결과를 <표 3.37> 및 <그림 3.52>에 나타내었다.

보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르의 흡수율 측정결과 레드머드를 0% 대체한 경우 5.74%, 10%의 경우 5.39%, 20%의 경우 3.20%를 나타내었다. 슬래그 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르의 흡수율 측정결과 레드머드를 0% 대체한 경우 5.10%, 10% 대체한 경우 5.90%, 20% 대체한 경우 5.65%를 나타내었다.

<표 3.37> 기건양생 모르타르의 흡수율 측정결과

구분			경과시간별 흡수율(%)						
			0hr	0.16hr	0.5hr	1hr	6hr	12hr	24hr
기건양생	보통 포틀랜트 시멘트 (OPC)	R0	0	0.52	1.02	1.60	4.78	5.33	5.74
		R10	0	0.36	0.68	1.09	4.29	4.72	5.39
		R20	0	0.30	0.55	0.78	2.20	2.64	3.20
	슬래그 시멘트 (SC)	R0	0	0.53	2.16	3.45	5.10	5.22	5.10
		R10	0	0.31	1.34	2.95	4.50	4.80	5.90
		R20	0	0.49	1.15	2.42	4.60	5.29	5.65



<그림 3.52> 흡수율 측정결과 (기건양생)

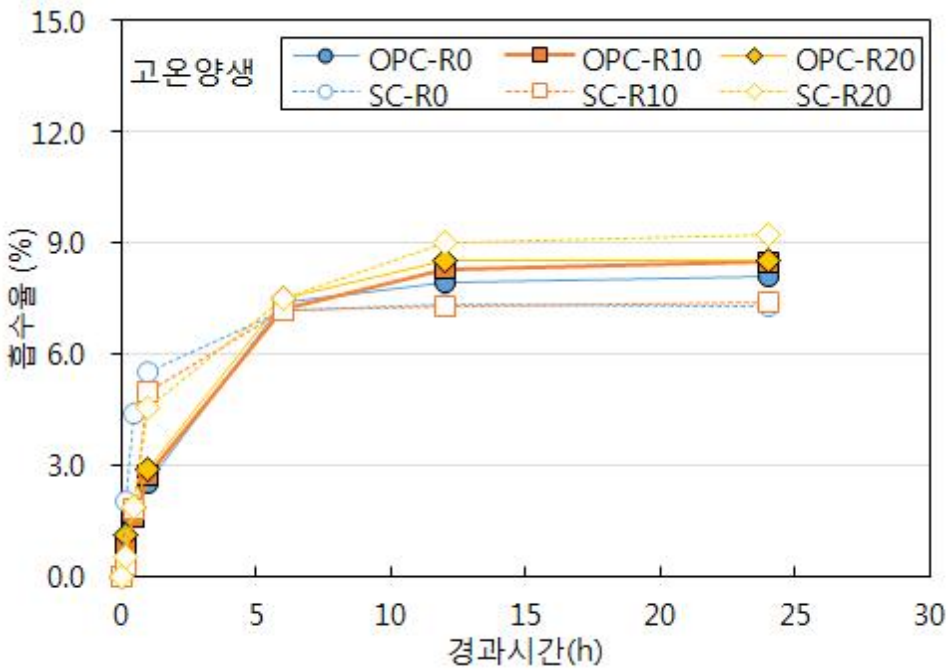
㈐ 고온양생

액상형 레드머드 촉진제를 활용한 고온양생 모르타르의 흡수율 측정결과를 <표 3.38> 및 <그림 3.53>에 나타내었다.

보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르의 흡수율 측정결과 레드머드를 0% 대체한 경우 8.08%, 10%의 경우 8.49%, 20%의 경우 8.50%를 나타내었다. 슬래그 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르의 흡수율 측정결과 레드머드를 0% 대체한 경우 7.30%, 10% 대체한 경우 7.40%, 20% 대체한 경우 9.22%를 나타내었다.

<표 3.38> 고온양생 모르타르의 흡수율 측정결과

구분			경과시간별 흡수율(%)						
			0hr	0.16hr	0.5hr	1hr	6hr	12hr	24hr
고온양생	보통 포틀랜트 시멘트 (OPC)	R0	0	0.92	1.60	2.52	7.40	7.94	8.08
		R10	0	0.80	1.59	2.74	7.20	8.30	8.49
		R20	0	1.12	1.87	2.87	7.50	8.50	8.50
	슬래그 시멘트 (SC)	R0	0	2.06	4.40	5.52	7.20	7.33	7.30
		R10	0	0.31	1.81	4.99	7.20	7.30	7.40
		R20	0	0.51	1.86	4.58	7.51	8.98	9.22



<그림 3.53> 흡수율 측정결과 (고온양생)

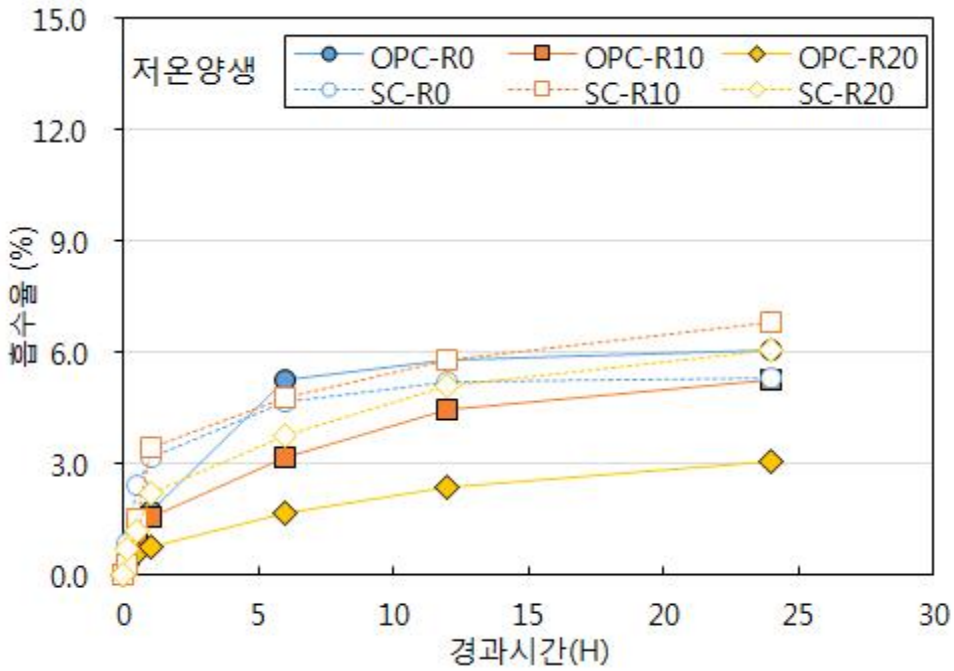
㉲ 저온양생

액상형 레드머드 촉진제를 활용한 저온양생 모르타르의 흡수율 측정결과를 <표 3.39> 및 <그림 3.54>에 나타내었다.

보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르의 흡수율 측정결과 레드머드를 0% 대체한 경우 6.05%, 10%의 경우 5.28%, 20%의 경우 3.07%를 나타내었다. 슬래그 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르의 흡수율 측정결과 레드머드를 0% 대체한 경우 5.30%, 10% 대체한 경우 6.81%, 20% 대체한 경우 6.09%를 나타내었다.

<표 3.39> 저온양생 모르타르의 흡수율 측정결과

구분			경과시간별 흡수율(%)						
			0hr	0.16hr	0.5hr	1hr	6hr	12hr	24hr
저온양생	보통 포틀랜트 시멘트 (OPC)	R0	0	0.26	1.01	1.75	5.26	5.80	6.05
		R10	0	0.28	0.89	1.56	3.16	4.45	5.28
		R20	0	0.30	0.58	0.78	1.70	2.36	3.07
	슬래그 시멘트 (SC)	R0	0	0.88	2.41	3.20	4.70	5.20	5.30
		R10	0	0.30	1.53	3.45	4.80	5.83	6.81
		R20	0	0.73	1.17	2.19	3.76	5.11	6.09



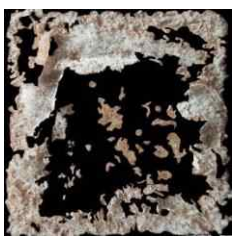
<그림 3.54> 흡수율 측정결과 (저온양생)

④ 백화시험

액상형 레드머드 촉진제를 사용한 보통 포틀랜트 시멘트 모르타르의 백화발생면적 측정결과를 <표 3.40> 및 <그림 3.55>에 나타내었다. 표준수중양생을 실시한 모르타르의 백화발생면적 및 백화발생등급은 액상형 레드머드 촉진제 대체율 0%에서 0.17%로 Ⅱ등급 , 10%에서 0.02%로 Ⅱ등급 , 20%에서 0.03%로 Ⅱ등급인 것으로 나타났다. 기건양생을 실시한 모르타르의 백화발생면적은 액상형 레드머드 촉진제 대체율 0%에서 0.02%로 Ⅱ등급, 10%에서 87.58%로 Ⅴ등급, 20%에서 91.65%로 Ⅴ 등급인 것으로 나타났다. 고온양생을 실시한 모르타르의 백화발생면적은 액상형 레드머드 촉진제 대체율 0%에서 2.28%로 Ⅱ등급, 10%에서 61.05%로 Ⅴ등급, 20%에서 96.16%로 Ⅴ등급인 것으로 나타났다. 저온양생을 실시한 모르타르의 백화발생면적은 액상형 레드머드 대체율 0%에서 0.01%로 Ⅱ등급, 10%에서 10.86%로 Ⅲ등급, 20%에서 53.7%로 Ⅴ등급인 것으로 나타났다.

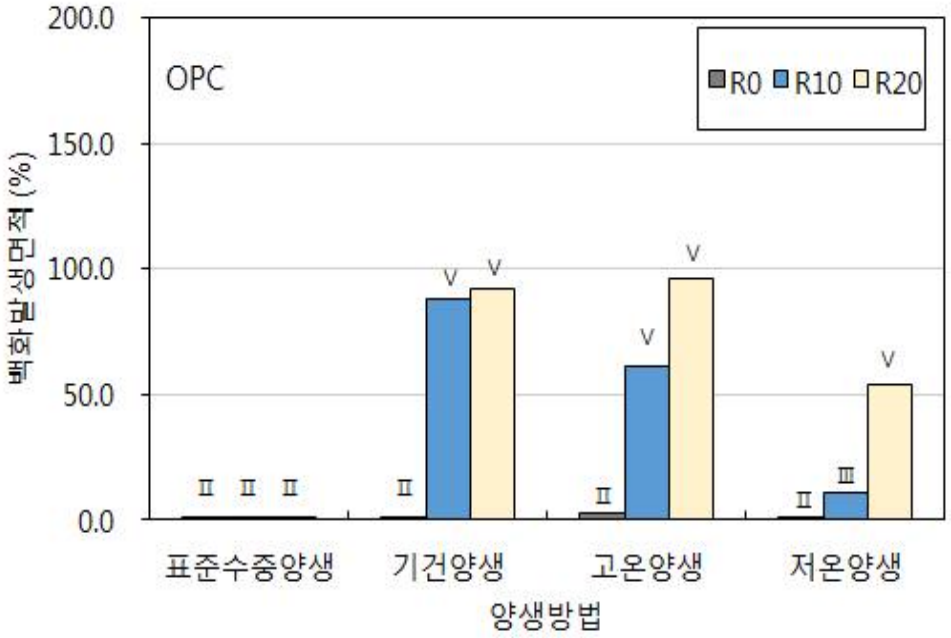
액상형 레드머드 촉진제를 사용한 슬래그 시멘트 모르타르의 백화발생면적 측정결과를 <표 3.41> 및 <그림 3.56>에 나타내었다. 표준수중양생을 실시한 모르타르의 백화발생면적 및 백화발생등급은 액상형 레드머드 촉진제 대체율 0%에서 0.03%로 Ⅱ등급, 10%에서 0.02%로 Ⅱ등급, 20%에서 1.56%로 Ⅱ등급 인것으로 나타났다. 기건양생을 실시한 모르타르의 백화발생면적은 액상형 레드머드 촉진제 대체율 0%에서 0.01%로 Ⅱ등급, 10%에서 23.47%로 Ⅲ등급, 20%에서 72.51%로 Ⅴ등급 인 것으로 나타났다. 고온양생을 실시한 모르타르의 백화발생면적은 액상형 레드머드 촉진제 대체율 0%에서 0.03%로 Ⅱ등급, 10%에서 91.35%로 Ⅴ등급, 20%에서 93.31%로 Ⅴ등급 인 것으로 나타났다. 저온양생을 실시한 모르타르의 백화발생면적은 액상형 레드머드 대체율 0%에서 0.01%로 Ⅱ등급, 10%에서 71.86%로 Ⅴ등급, 20%에서 74.16%로 Ⅴ등급 인 것으로 나타났다.

<표 3.40> 백화시험 결과 (OPC)

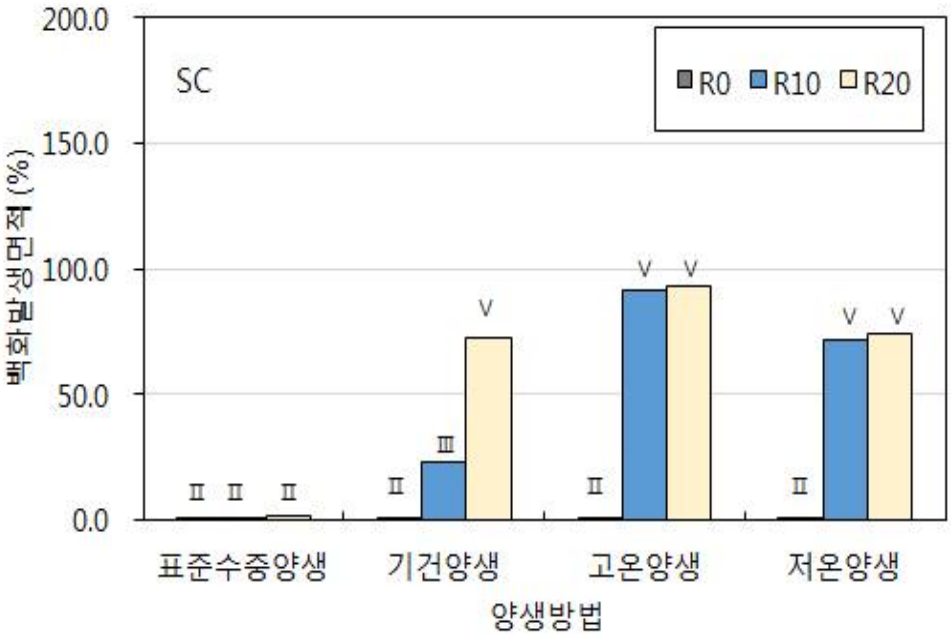
양생조건	OPC		
	액상형 레드머드 촉진제 대체율(%)		
	0	10	20
표준수중양생			
백화발생면적(%)	0.17	0.02	0.03
백화발생등급	II	II	II
기건양생			
백화발생면적(%)	0.02	87.58	91.65
백화발생등급	II	V	V
고온양생			
백화발생면적(%)	2.28	61.05	96.16
백화발생등급	II	V	V
저온양생			
백화발생면적(%)	0.01	10.86	53.7
백화발생등급	II	III	V

<표 3.41> 백화시험 결과 (SC)

양생조건	SC		
	액상형 레드머드 촉진제 대체율(%)		
	0	10	20
표준수중양생			
백화발생면적(%)	0.03	0.02	1.56
백화발생등급	II	II	II
기건양생			
백화발생면적(%)	0.01	23.47	72.51
백화발생등급	II	III	V
고온양생			
백화발생면적(%)	0.03	91.35	93.31
백화발생등급	II	V	V
저온양생			
백화발생면적(%)	0.01	71.86	74.16
백화발생등급	II	V	V



<그림 3.55> 백화시험 결과 (OPC)



<그림 3.56> 백화시험 결과 (SC)

(라) 소결

본 절에서는 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 모르타르의 백화 특성을 검토하고자 액상화 레드머드 촉진제의 첨가량과 모르타르의 양생방법을 달리하여 백화 특성을 검토하였다. 그 결과 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 결합재 종류별 28일 압축강도는 슬래그시멘트 모르타르의 경우 29.0~51.9MPa로서 보통 포틀랜트 시멘트 모르타르 39.8~54.5MPa와 비교하여 상대적으로 낮은 압축강도를 나타내고 있으며, 결합재 종류에 관계없이 동일하게 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 압축강도는 감소하는 경향을 보이고 있다.
- 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 모르타르의 물 흡수계수 및 기공량 측정결과 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 물흡수계수 및 기공량은 결합재 종류에 관계없이 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 물 흡수계수 및 기공량은 증가하는 것으로 나타났다.
- 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 모르타르의 백화발생면적 측정결과 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 백화발생면적은 결합재 종류에 관계없이 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 백화발생면적은 증가하는 것으로 나타났다.
- 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 모르타르의 백화생성물질 EDS 측정결과 결합재 종류에 상관없이 모르타르에서 발생한 백화물질 모두 Na가 가장 많은 양을 차지하고 있었으며, Ca 및 Al도 일부 미량이 동일하게 나타났다.
- 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 모르타르의 백화생성물질 XRD 측정결과 보통 포틀랜트 시멘트 모르타르에 액상형 레드머드 촉진제를 대체한 백화는 Na_2CO_3 H_2O가 주로 나타났으며, 슬래그 시멘트 모르타르에 액상형 레드머드 촉진제를 대체한 백화는 Na_2SO_4가 주로 나타나 결합재 종류에 관계없이 백화물질은 주로 나트륨계 화합물인 것으로 나타났다.
- 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 모르타르의 열중량 분석결과 보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 경우 400~450℃에서의 중량감소율이 1.36%로 나타났으며 슬래그시멘트를 결합재로 사용한 경우 0.77%로 나타나 슬래그시멘트 모르타르와 비교하여 높은 것으로 나타났다.
- 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 모르타르의 용출량 분석결과 Na 용출량은 결합재 종류에 관계없이 액상화 레드머드 촉진제 레드머드 대체율이 증가할수록 증가하고 있다. 백화시험 후 Na 용출량은 Ca 용출량처럼 증가하지는 않고 있으나 백화시험전과 유사한 수준을 보이고 있어 시험체 표면에 발생된 백화를 제거한다고 하더라도 이후에 또다시 백화발생 잠재 가능성은 있는 것으로 판단된다.
- 양생방법에 따른 모르타르의 28일 압축강도 및 휨강도는 표준수중양생과 비교하여 기건양생, 고온양생, 저온양생에서 60～77.4% 수준으로서 강도에 영향을 미치는 정도는 온도보다는 습도가 큰 것으로 나타났다.
- 흡수율 측정결과 상대습도가 상대적으로 낮은 기건, 고온, 저온양생의 경우 표준수중양생과 비교하여 흡수율이 상대적으로 높게 나타났다. 백화발생면적 측정결과 액상형 레드머드 촉진제 모르타르를 표준수중양생 시킨 시험체에서는 백화가 거의 발생하지 않은 반면 기건양생, 고온양생, 저온양생 시킨 시험체에서는 액상형 레드머드 대체율이 증가할수록 백화발생이 증대되고 있다

(4) 액상형 레드머드 촉진제의 백화 억제 및 저감기술

(가) 산처리 개질에 의한 백화 억제 및 저감방안

① 산종류에 의한 Na_2O의 용해

㉮ 실험계획 및 방법

액상형 레드머드 촉진제의 백화 억제 및 저감을 위한 레드머드의 산 종류에 따른 산처리 개질 실험계획을 <표 3.42>에 나타내었다. 레드머드의 산처리 개질을 위하여 염산(HCl), 황산(H_2SO_4), 질산(HNO_3)의 세 가지 용액을 5, 10, 15%로 농도를 달리하여 사용하였다. 처리 방법으로는 200㎖씩 산을 계량하여 플라스크에 넣고, 레드머드 100g을 10분에 걸쳐 서서히 투입한 후 150rpm, 40℃로 유지하면서 24시간 반응시켰다. 반응 후 반응물을 원심분리기로 고형물과 반응액으로 분리시켜 반응액에 녹아 있는 성분을 원자 흡광기로 정량 분석하였다.

<표 3.42> 실험계획

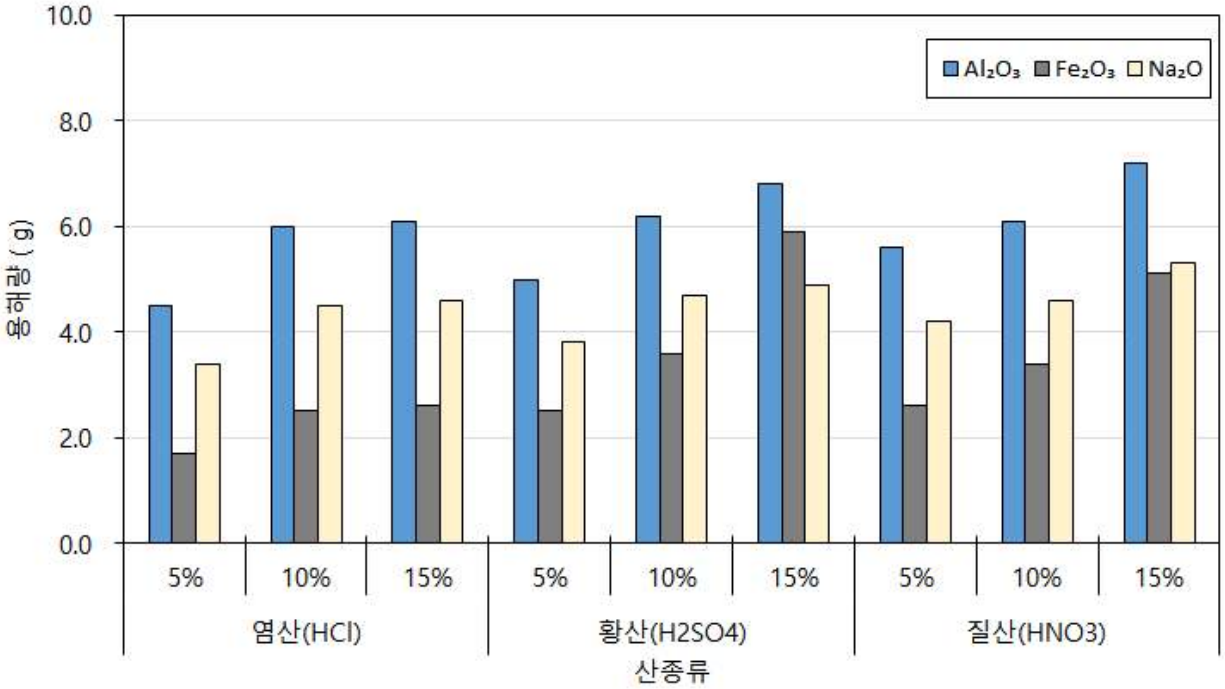
구분	레드머드(g)	산종류(%)		
		염산(HCl)	황산(H_2SO_4)	질산(HNO_3)
C5	100	5	-	-
C10	100	10	-	-
C15	100	15	-	-
S5	100	-	5	-
S10	100	-	10	-
S15	100	-	15	-
N5	100	-	-	5
N10	100	-	-	10
N5	100	-	-	15

㉯ 실험결과

액상형 레드머드 촉진제의 백화 억제 및 저감을 위한 레드머드의 산 종류에 따른 산처리 개질 실험결과를 <표 3.43> 및 <그림 3.57>에 나타내었다. 산처리 개질 시험결과 모든 산에서 Al_2O_3, Fe_2O_3, Na_2O가 용해되었으며 농도가 높아질수록 더 많은 양의 성분이 용해되었다. 레드머드에서 백화를 발생시키는 성분인 Na_2O의 용해 결과는 염산 15%에서 4.6g, 황산 15%에서 4.9g, 질산 15%에서 5.3g이 용해되었으며 레드머드의 Na_2O의 조성을 낮게 만들기 위해서는 Na_2O가 최대한 용해되어야 하므로 본 실험에서는 질산(HNO_3) 15%가 가장 적당할 것으로 판단된다.

<표 3.43> 산종류에 의한 Na_2O의 용해 (단위 : g)

구분	염산(HCl)			황산(H_2SO_4)			질산(HNO_3)		
	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%
Al_2O_3	4.5	6.0	6.1	5.0	6.2	6.8	5.6	6.1	7.2
Fe_2O_3	1.7	2.5	2.6	2.5	3.6	5.9	2.6	3.4	5.1
Na_2O	3.4	4.5	4.6	3.8	4.7	4.9	4.2	4.6	5.3



<그림 3.57> 산종류에 의한 Na_2O의 용해

② 온도변화에 의한 Na_2O의 용해

㉮ 실험계획 및 방법

액상형 레드머드 촉진제의 백화 억제 및 저감을 위하여 HCl 용액을 사용하여 온도에 따른 산처리 개질실험을 진행하였으며 실험계획을 <표 3.44>에 나타내었다. 실험방법으로 6개 1L 4구 플라스크에 냉각기를 부착시키고 각각 물중탕을 설치한 후 10% HCl 200ml를 각각 플라스크에 넣고, 레드머드 100g을 10분에 걸쳐 서서히 투입 후 각각의 플라스크를 30, 40, 50, 70, 80℃로 유지하면서 24시간동안 150rpm으로 반응시켰다. 반응 후 반응물을 원심분리기를 이용하여 고형물과 반응액을 분리시킨 후 반응액에 용해된 Al_2O_3, Fe_2O_3, Na_2O을 원자 흡광기로 정량 분석하였다.

<표 3.44> 실험계획

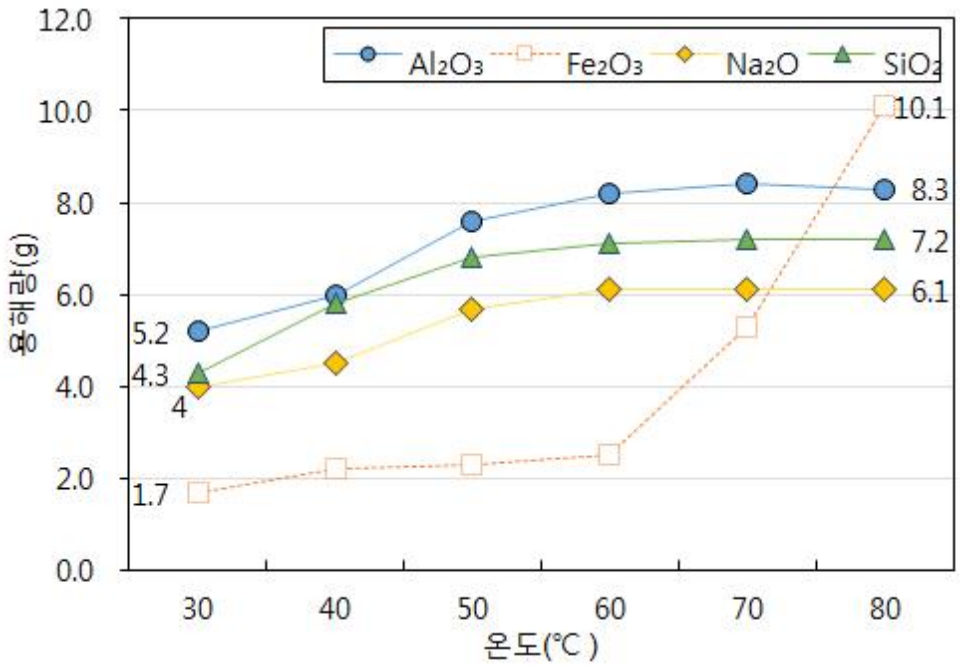
구분	레드머드(g)	염산(HCl)	반응온도
H30	100	10% 200ml	30℃
H40	100	10% 200ml	40℃
H50	100	10% 200ml	50℃
H60	100	10% 200ml	60℃
H70	100	10% 200ml	70℃
H80	100	10% 200ml	80℃

㉯ 실험결과

액상형 레드머드 촉진제의 백화 억제 및 저감을 위하여 HCl 용액을 사용하여 온도에 따른 산처리 개질시험 결과를 <표 3.45> 및 <그림 3.58>에 나타내었다. 측정결과 Al_2O_3와 Na_2O, SiO_2는 온도가 증가할수록 용해는 증가하나 60℃ 이상에서는 미미하게 증가하는 것으로 나타났다. 또한 Fe_2O_3의 경우 60~80℃에서 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 액상형 레드머드 촉진제의 백화 억제 및 저감을 위한 HCl용액의 적정 반응온도는 레드머드에서 백화를 발생시키는 성분인 Na_2O를 최대한 용해 가능한 60℃가 가장 적당할 것으로 판단된다.

<표 3.45> 온도변화에 의한 Na_2O의 용해 (단위 : g)

구분	온도(℃)					
	30	40	50	60	70	80
Al_2O_3	5.2	6.0	7.6	8.2	8.4	8.3
Fe_2O_3	1.7	2.2	2.3	2.5	5.3	10.1
Na_2O	4	4.5	5.7	6.1	6.1	6.1
SiO_2	4.3	5.8	6.8	7.1	7.2	7.2



<그림 3.58> 온도에 따른 10% HCl안의 Al_2O_3, Fe_2O_3, Na_2O, SiO_2 조성

③ 반응시간에 따른 Na_2O의 용해

㉮ 실험계획 및 방법

액상형 레드머드 촉진제의 백화 억제 및 저감을 위하여 HCl 용액을 사용하여 반응시간에 따른 레드머드 개질실험을 진행하였으며 실험계획을 <표 3.46>에 나타내었다. 실험방법으로 1L 4구 플라스크에 냉각기를 부착시키고 물중탕을 설치한 후 10% HCl 200ml를 플라스크에 넣고, 레드머드 100g을 10분에 걸쳐 서서히 투입하였다. 플라스크를 60℃로 유지하면서 24시간동안 150rpm으로 반응시켰다. 이후 플라스크에서 매 5시간 간격으로 10ml씩 시료를 채취하여 원심 분리기를 이용하여 고형물과 반응물을 분리시킨 후 반응물 속에 함유된 Al_2O_3, SiO_2, Fe_2O_3, Na_2O을 원자 흡광분석기를 이용하여 정량 분석하였다.

<표 3.46> 실험계획

구분	레드머드(g)	염산(HCl)	반응온도	채취시간
H30	100	10% 200ml	60℃	5h
H40	100	10% 200ml	60℃	10h
H50	100	10% 200ml	60℃	15h
H60	100	10% 200ml	60℃	20h

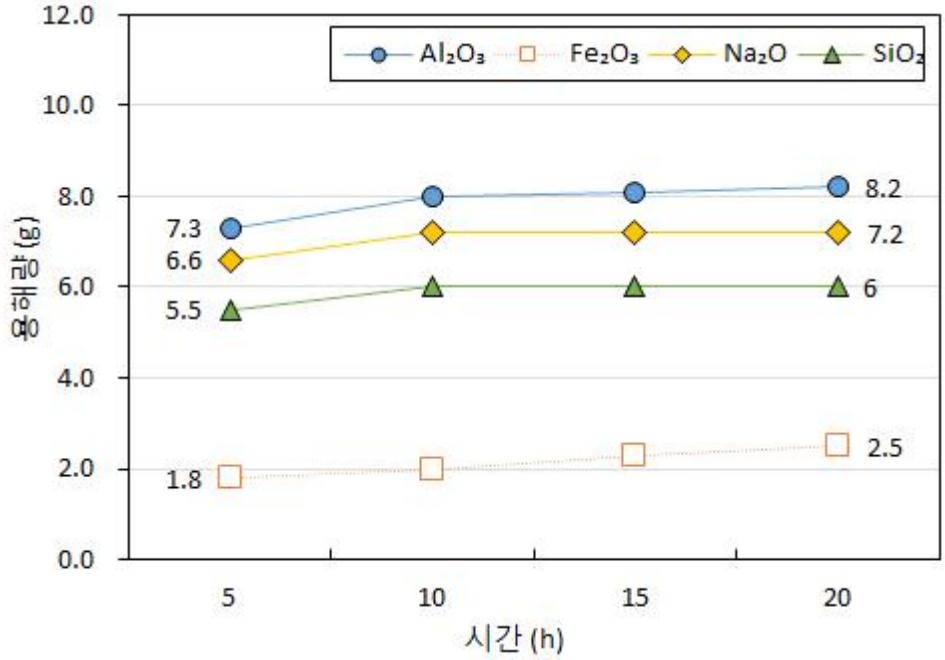
㉯ 실험결과

액상형 레드머드 촉진제의 백화 억제 및 저감을 위하여 HCl 용액을 사용하여 반응시간에 따른 레드머드 개질실험을 진행하였으며 실험결과를 <표 3.47> 및 <그림 3.59>에 나타내었다.

측정결과 Al_2O_3, Fe_2O_3의 경우 10시간 이후 용해량의 변화는 미미한 것으로 나타났다. Na_2O, SiO_2의 경우 10시간 이후 용해량의 변화는 나타나지 않고 있어 10시간 내에 반응이 완료되는 것으로 판단된다. 액상형 레드머드 촉진제의 백화 억제 및 저감을 위한 HCl용액의 적정 반응시간은 레드머드에서 백화를 발생시키는 성분인 Na_2O와의 반응시간인 10시간 이내로 하는 것이 가장 적당할 것으로 판단된다.

<표 3.47> 반응시간에 따른 Na_2O의 용해 (단위 : g)

구분	시간(h)			
	5	10	15	20
Al_2O_3	7.3	8.0	8.1	8.2
Fe_2O_3	1.8	2.0	2.3	2.5
Na_2O	6.6	7.2	7.2	7.2
SiO_2	5.5	6.0	6.0	6.0



<그림 3.59> 온도에 따른 10% HCl안의 Al_2O_3, Fe_2O_3, Na_2O, SiO_2 조성

④ 소결

본 절에서는 액상형 레드머드 촉진제의 백화 억제 및 저감을 위하여 산종류, 반응온도, 반응조건에 따른 레드머드의 산처리 개질 실험을 진행하였다. 레드머드에서 백화를 발생시키는 성분인 Na_2O의 용해량을 기준으로 산처리 개질 조건을 정리하였다. 그 결과 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 산 종류에 따른 Na_2O의 용해량은 질산(HNO_3) > 황산(H_2SO_4) > 염산(HCl)로 나타났다. HCl의 온도에 의한 Na_2O의 용해량은 80℃ = 70℃ = 60℃ > 50℃ > 40℃ > 30℃으로 나타났다. 반응시간에 따른 Na_2O의 용해량은 20시간 = 15시간 = 10시간 > 5시간으로 나타났다.

(나) 백화저감제를 활용한 백화 억제 및 저감방안

① 실험계획 및 방법

㉮ 실험계획

액상형 레드머드 촉진제 사용시 발생되는 백화현상을 저감 시키기 위해 백화저감제를 활용한 실험계획을 아래 <표 3.48>에 나타내었다. 결합재로서 보통 포틀랜트 시멘트(OPC)를 사용하여 W/B 75%, B:S=1:3의 모르타르 배합에서 액상형 레드머드 촉진제를 결합재에 대하여 20% 첨가하였다. 또한 백화저감 방안으로 유기계 혼합형 백화저감제를 액상형 레드머드 촉진제의 중량비로 1%, 3%, 5%, 첨가하여 압축강도, 백화발생면적을 검토하였다.

<표 3.48> 실험계획

구분		결합재(%)		유기계 혼합형 백화저감제 (%)	W/B (%)	B : S	평가항목
		시멘트	액상형 레드머드 촉진제				
OPC	C	100	0	0	75	1:3	•압축강도 •백화시험
	CR20	100	20	0			
	CR20-Ni1	100	20	1			
	CR20-Ni3	100	20	3			
	CR20-Ni5	100	20	5			

액상형 레드머드 촉진제 사용시 발생되는 백화현상을 저감 시키기 위해 백화저감제를 활용한 실험계획을 아래 <표 3.49>에 나타내었다. 결합재로서 보통 포틀랜트 시멘트(OPC)를 사용하여 W/B 75%, B:S=1:3의 모르타르 배합에서 액상형 레드머드 촉진제를 결합재에 대하여 10, 30% 대체하였다. 또한 백화저감 방안으로 무기계 도포형 백화저감제를 기준량의 25%, 50%, 100%, 150%를 표면에 도포 및 침지하여 휨강도, 압축강도, 백화발생면적, 흡수율을 검토하였다.

<표 3.49> 실험계획

구분		액상형 레드머드 촉진제 대체율 (%)	결합재(%)		무기계 도포형 백화저감제 (%)	W/B (%)	B : S	평가항목
			시멘트	액상형 레드머드 촉진제				
OPC	CR10	10	90	10	0	75	1:3	•흡수율 •백화시험
	CR10SS		90	10	25			
	CR10S		90	10	50			
	CR10M		90	10	100			
	CR10L		90	10	150			
	CR10I		90	10	침지			
	CR30	30	70	30	0			
	CR30SS		70	30	25			
	CR30S		70	30	50			
	CR30M		70	30	100			
	CR30L		70	30	150			
	CR30I		70	30	침지			

㉮ 사용재료

ⓐ 결합재

액상형 레드머드 촉진제 사용시 발생되는 백화현상을 검토하기 위해 사용한 결합재의 물리 화학적 성질을 <표 3.50>에 나타내었다. 보통 포틀랜트 시멘트는 국내 S사의 보통 포틀랜트 시멘트를 사용하였다.

<표 3.50> 결합재의 물리 화학적 특성

구분	화학적 구성 (%)						비표면적 (cm^2/g)	밀도 (g/cm^3)	Ig. loss
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3			
보통 포틀랜트 시멘트 (OPC)	21.7	5.7	3.2	63.1	2.8	2.2	3,144	3.15	1.32

ⓑ 골재

액상형 레드머드 촉진제 사용시 발생되는 백화현상을 검토하기 위해 사용한 잔골재는 KS L 679에서 품질규정하고 있는 ISO 표준사를 사용하였다.

ⓒ 액상형 레드머드 촉진제

액상형 레드머드 촉진제 사용시 발생되는 백화현상을 검토하기 위해 사용한 액상형 레드머드 촉진제는 선행연구에서 도출된 고형분 51.6%, 단위용적질량 1,570kg/cm^3, 평균입경 3.15㎛, 점도 7,850cP인 액상형 레드머드 촉진제를 사용하였다.

ⓓ 백화저감제

액상형 레드머드 촉진제 사용시 발생되는 백화현상을 저감 시키기 위해 사용한 유기계 혼합형 백화저감제의 화학적 특성을 <표 3.51>에 나타내었다.

<표 3.51> 유기계 혼합형 백화저감제의 화학적 특성

바인더	화학적 구성 (%)					
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3
유기계 혼합형 백화저감제	0.531	0.311	1.48	26.1	6.89	13.1

액상형 레드머드 촉진제 사용시 발생되는 백화현상을 저감 시키기 위해 사용한 무기계 도포형 백화저감제의 물리·화학적 특성을 <표 3.52> 및 <그림 3.60>에 나타내었다.

<표 3.52> 무기계 도포형 백화저감제의 물리 화학적 특성

구분	외형	비중(g/L)	평균 입경(㎛)	pH
EVA	하얀 백색 분말	475±50	Max. 2%>400	9.1



<그림 3.60> 무기계 도포형 백화저감제

㉰ 시험방법

ⓐ 압축강도

액상형 레드머드 촉진제 사용시 발생되는 백화현상을 검토하기 위한 방법으로서 압축강도 시험은 실험계획에 제시된 모르타르 배합을 KS L ISO 679 「시멘트의 강도시험방법」에 준하여 시험체 제작 후 각 양생조건에서 재령 28일에 측정하였다. 측정장치는 UTM(Universal Test Machine)을 사용하였다.

압축강도 시험체는 50×50×50mm 금형 몰드를 사용하여 제작 한후 1일 후에 탈형하고 온도 20℃ 상대습도 50%의 조건에서 28일간 양생을 실시하였다. 측정재령 28일에 압축강도를 측정한 후 3개 시험체의 평균값으로 압축강도를 산정하였다.

ⓑ 백화시험

액상형 레드머드 촉진제 사용시 발생되는 백화현상을 검토하기 위한 방법으로서 백화 시험은 일본 건재시험센터에서 개발한 「시멘트계 재료의 백화시험 방법(日本, JTCCM)」에 준하여 실시하였다.

② 실험결과 및 분석

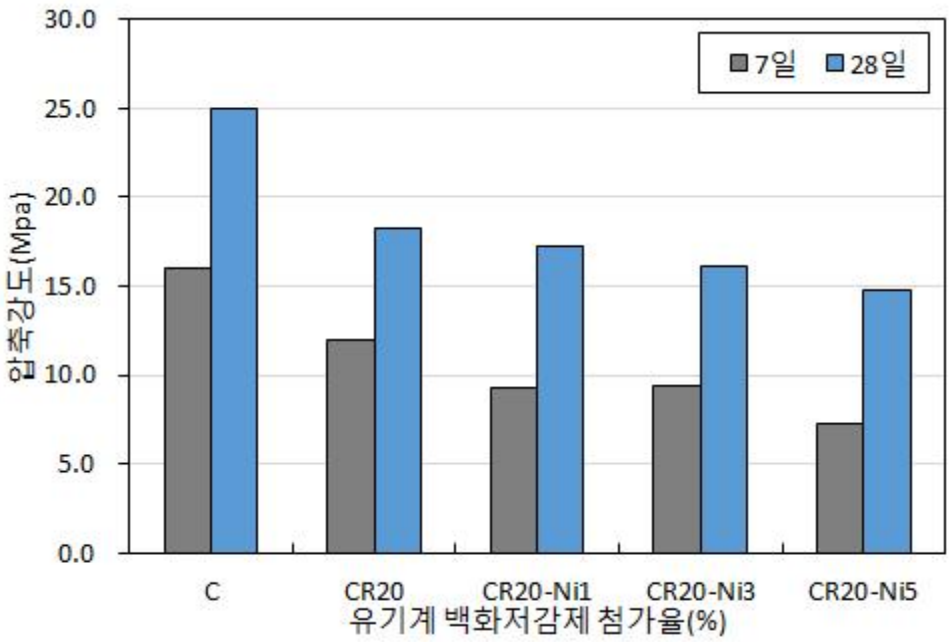
㉮ 유기계 혼합형 백화저감제의 강도 및 백화 특성

ⓐ 압축강도

유기계 백화저감제를 활용한 모르타르의 압축강도 측정결과를 <표 3.53> 및 <그림 3.61>에 나타내었다. 유기계 혼합형 백화저감제를 0% 첨가한 모르타르의 7일 압축강도는 12.0MPa, 28일 압축강도는 18.28MPa, 1% 첨가한 모르타르의 7일 압축강도는 9.25MPa, 3% 첨가의 경우 9.40MPa, 5% 첨가의 경우 7.25MPa를 나타내었다. 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 3.53> 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

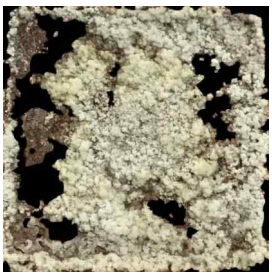


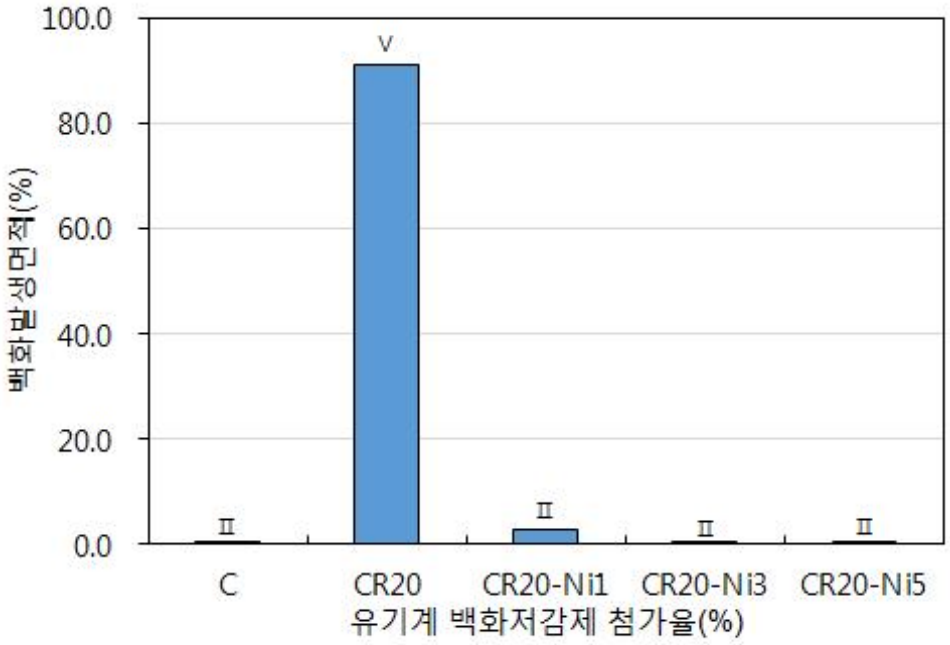
<그림 3.61> 압축강도 측정결과

ⓑ 백화발생면적

유기계 백화저감제를 활용한 모르타르의 백화발생면적 및 백화등급 측정결과를 <표 3.2.69> 및 <그림 3.62>에 나타내었다. 유기계 혼합형 백화저감제를 첨가하지 않은 모르타르의 백화발생면적은 91.03%로 Ⅴ등급, 백화저감제를 1% 첨가한 경우 2.73%로 Ⅱ등급 , 3% 첨가한 경우 0.01%로 Ⅱ등급, 5% 첨가한 경우 0.01%로 Ⅱ등급을 나타내어 백화저감제 첨가율이 증가 할수록 백화발생면적은 감소 하는 것을 확인 할 수 있었다.

<표 3.54> 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



<그림 3.62> 백화발생면적 측정결과

㉯ 무기계 도포형 백화저감제의 흡수율 및 백화 특성

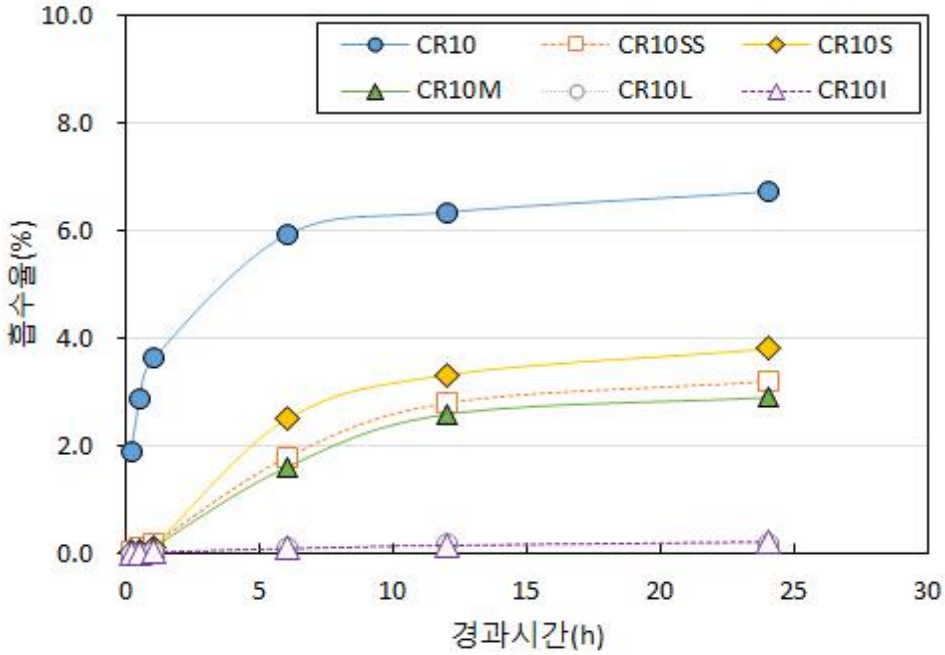
ⓐ 흡수율

무기계 백화저감제를 활용한 모르타르의 흡수율 측정결과를 <표 3.55>에 나타내었다. 액상형 레드머드 촉진제를 10% 대체한 모르타르의 흡수율 측정결과를 <그림 3.63>에 나타내었다. 흡수율 측정결과 무기계 도포형 백화저감제를 0% 도포한 CR10 모르타르는 6.72%, 25% 도포한 CR10SS 모르타르는 3.20%, 50% 도포한 CR10S 모르타르는 3.80%, 75% 도포한 CR10M 모르타르는 2.90%, 100% 도포한 CR10L 모르타르는 0.19%, 무기계 도포형 백화저감제에 침지 시킨 CR10I 모르타르는 0.21%로 나타났다.

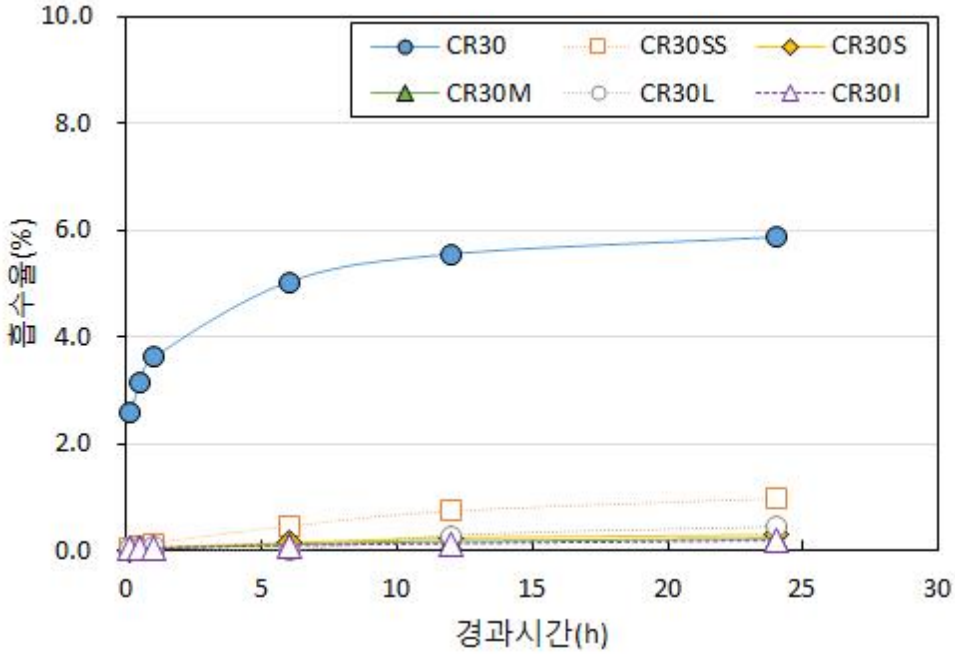
액상형 레드머드 촉진제를 30% 대체한 모르타르의 흡수율 측정결과를 <그림 3.64>에 나타내었다. 흡수율 측정결과 무기계 도포형 백화저감제를 0% 도포한 CR30 모르타르는 5.87%, 25% 도포한 CR30SS 모르타르는 0.98%, 50% 도포한 CR30S 모르타르는 0.29%, 75% 도포한 CR30M 모르타르는 0.22%, 100% 도포한 CR30L 모르타르는 0.44%, 무기계 도포형 백화저감제에 침지 시킨 CR10I 모르타르는 0.18%로 나타났다.

<표 3.55> 흡수율 측정결과

구분		경과시간별 흡수율(%)						
		0hr	0.16hr	0.5hr	1hr	6hr	12hr	24hr
CR10	CR10	0	1.90	2.87	3.62	5.92	6.34	6.72
	CR10SS	0	0.04	0.11	0.19	1.80	2.80	3.20
	CR10S	0	0.03	0.05	0.13	2.50	3.32	3.80
	CR10M	0	0.03	0.06	0.13	1.61	2.59	2.90
	CR10L	0	0.02	0.02	0.04	0.10	0.17	0.19
	CR10I	0	0.02	0.02	0.04	0.10	0.15	0.21
CR30	CR10	0	2.58	3.15	3.61	5.03	5.55	5.87
	CR10SS	0	0.03	0.08	0.13	0.45	0.74	0.98
	CR10S	0	0.01	0.03	0.05	0.14	0.23	0.29
	CR10M	0	0	0.02	0.03	0.11	0.17	0.22
	CR10L	0	0.03	0.04	0.06	0.01	0.28	0.44
	CR10I	0	0.02	0.02	0.03	0.08	0.12	0.18



<그림 3.63> 압축강도 측정결과(CR10)



<그림 3.64> 압축강도 측정결과(CR30)

ⓑ 백화 특성

무기계 도포형 백화저감제를 사용한 모르타르에 액상형 레드머드 촉진제를 10% 대체한 모르타르의 백화발생면적 및 백화등급 측정결과를 <표 3.56> 및 <그림 3.65>에 나타내었다.

백화발생면적 및 백화등급 측정결과 무기계 도포형 백화저감제를 0% 도포한 CR10 모르타르는 20.24%로 Ⅱ등급, 25% 도포한 CR10SS 모르타르는 0.001%로 Ⅱ등급, 50% 도포한 CR10S 모르타르는 0.002%로 Ⅱ등급, 75% 도포한 CR10M 모르타르는 0.001%로 Ⅱ, 100% 도포한 CR10L 모르타르는 0.0004%로 Ⅱ등급, 무기계 도포형 백화저감제에 침지 시킨 CR10I 모르타르는 0.0004%로 Ⅱ등급을 나타내었다. 무기계 도포형 백화저감제를 기준양의 25% 도포할 경우 백화발생면적은 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 1%미만의 백화발생면적비를 나타내었으며 등급은 Ⅱ등급 이하로 감소하였다.

무기계 도포형 백화저감제를 사용한 모르타르에 액상형 레드머드 촉진제를 30% 대체한 모르타르의 백화발생면적 및 백화등급 측정결과를 <표 3.57> 및 <그림 3.66>에 나타내었다.

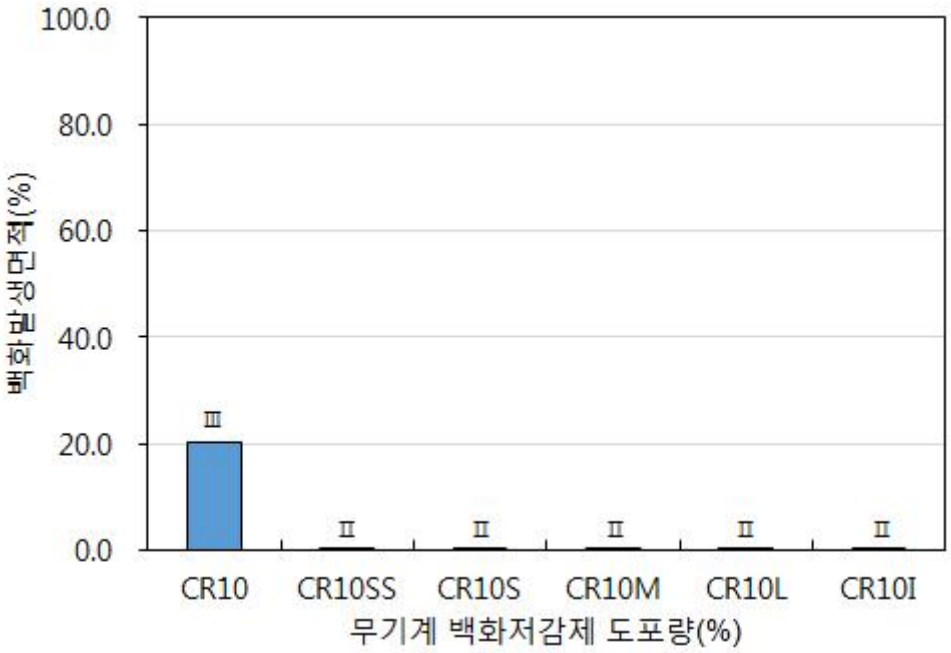
백화발생면적 및 백화등급 측정결과 무기계 도포형 백화저감제를 0% 도포한 CR30 모르타르는 67.42%로 Ⅴ등급, 25% 도포한 CR30SS 모르타르는 0.005%로 Ⅱ등급, 50% 도포한 CR30S 모르타르는 0.001%로 Ⅱ등급, 75% 도포한 CR30M 모르타르는 0.012%로 Ⅱ등급, 100% 도포한 CR30L 모르타르는 0.0002%로 Ⅱ등급, 무기계 도포형 백화저감제에 침지 시킨 CR30I 모르타르는 0.0006%로 Ⅱ등급을 나타내었다. 무기계 도포형 백화저감제를 기준양의 25% 도포할 경우 백화발생면적은 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 1%미만의 백화발생면적비를 나타내었으며 등급은 Ⅱ등급 이하로 감소하였다.

〈표 3.56〉 백화발생면적 측정결과(CR10)

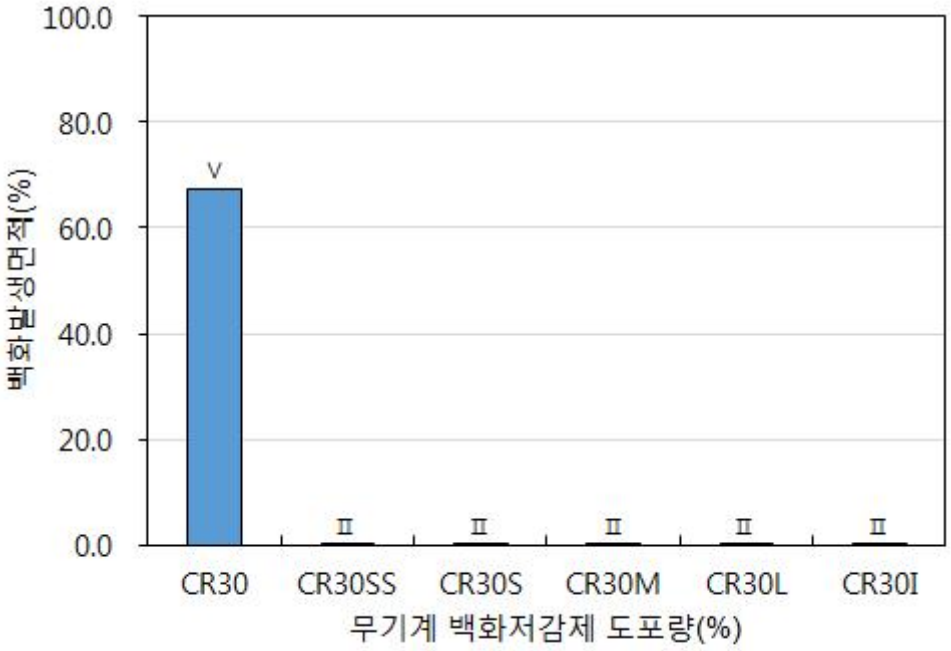
구분	백화 화상처리 전후의 이미지		백화발생 면적비(%)	백화 등급
	화상 처리 전	화상 처리 후		
CR10			20.24	Ⅲ
CR10SS			0.001	Ⅱ
CR10S			0.002	Ⅱ
CR10M			0.001	Ⅱ
CR10L			0.0004	Ⅱ
CR10I			0.0004	Ⅱ

〈표 3.57〉 백화발생면적 측정결과(CR30)

구분	백화 화상처리 전후의 이미지		백화발생 면적비(%)	백화 등급
	화상 처리 전	화상 처리 후		
CR30			67.423	Ⅴ
CR30SS			0.005	Ⅱ
CR30S			0.001	Ⅱ
CR30M			0.012	Ⅱ
CR30L			0.0002	Ⅱ
CR30I			0.0006	Ⅱ



<그림 3.65> 압축강도 측정결과(CR10)



<그림 3.66> 압축강도 측정결과(CR30)

(다) 소결

본 절에서는 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 모르타르의 백화발생에 따른 저감방안을 제시하기 위해 유기계 혼합형 백화저감제 및 무기계 도포형 백화저감제를 사용하여 백화저감방안을 검토하였다. 그 결과 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 유기계 혼합형 백화저감제를 사용한 모르타르의 28일 압축강도 측정결과 유기계 혼합형 백화저감제 첨가량 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. 백화발생면적 측정결과 유기계 혼합형 백화저감제를 첨가하지 않은 모르타르의 백화발생면적은 91.03%로 Ⅴ등급, 백화저감제를 1% 첨가한 경우 2.73%로 Ⅱ등급 , 3% 첨가한 경우 0.01%로 Ⅱ등급, 5% 첨가한 경우 0.01%로 Ⅱ등급을 나타내어 백화저감제 첨가율이 증가할수록 백화발생면적은 감소하는 것을 확인 할 수 있었다.
- 무기계 도포형 백화저감제를 사용한 모르타르의 흡수율 측정결과 액상형 레드머드 촉진제를 10% 대체한 모르타르의 흡수율은 무기계 도포형 백화저감제를 0% 도포한 CR10 모르타르의 경우 6.72%, 25% 도포한 CR10SS 모르타르의 경우 3.20%, 50% 도포한 CR10S 모르타르의 경우 3.80%, 75% 도포한 CR10M 모르타르의 경우 2.90%, 100% 도포한 CR10L 모르타르의 경우 0.19%, 무기계 도포형 백화저감제에 침지 시킨 CR10I 모르타르의 경우 0.21%로 나타났다. 액상형 레드머드 촉진제를 30% 대체한 모르타르의 흡수율 측정결과 무기계 도포형 백화저감제를 0% 도포한 CR30 모르타르의 경우 5.87%, 25% 도포한 CR30SS 모르타르의 경우 0.98%, 50% 도포한 CR30S 모르타르의 경우 0.29%, 75% 도포한 CR30M 모르타르의 경우 0.22%, 100% 도포한 CR30L 모르타르의 경우 0.44%, 무기계 도포형 백화저감제에 침지 시킨 CR10I 모르타르의 경우 0.18%로 나타났다. 백화발생면적 측정결과 액상형 레드머드 촉진제를 10%, 30% 대체한 모르타르에서 무기계 도포형 백화저감제를 기준양의 25% 도포할 경우 백화발생면적은 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 1%미만의 백화발생면적비를 나타내었으며 등급은 Ⅱ등급 이하로 감소하였다.

(5) 결언

본 절에서는 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 모르타르의 백화 특성을 검토하고자 백화시험방법 자료조사, 액상화 촉진제 첨가량에 따른 백화특성, 양생조건에 따른 백화특성, 산처리 개질에 의한 백화억제, 백화저감제를 활용한 백화저감방안을 검토하였다. 그 결과 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 백화시험방법 관련 자료 조사결과 충분한 가습시간과 적합한 건조시간(속도) 조절이 백화실험에 있어서 핵심 요인으로 판단된다.
2) 액상형 레드머드 촉진제의 첨가량에 따른 백화특성 검토결과 결합재 종류별 28일 압축강도는 슬래그시멘트 모르타르의 경우 29.0~51.9MPa로서 보통 포틀랜트 시멘트 모르타르 39.8~54.5MPa와 비교하여 상대적으로 낮은 압축강도를 나타내고 있으며, 결합재 종류에 관계없이 동일하게 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 압축강도는 감소하는 경향을 보이고 있다. 물 흡수계수 및 기공량 측정결과 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 물흡수계수 및 기공량은 결합재 종류에 관계없이 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 물 흡수계수 및 기공량은 증가하는 것으로 나타났다. 백화발생면적 측정결과 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 백화발생면적은 결합재 종류에 관계없이 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 백화발생면적은 증가하는 것으로 나타났다. 백화생성물질 EDS 측정결과 결합재 종류에 상관없이 모르타르에서 발생한 백화물질 모두 Na가 가장 많은 양을 차지하고 있었으며, Ca 및 Al도 일부 미량이 동일하게 나타났다. 백화생성물질 XRD 측정결과 보통 포틀랜트 시멘트 모르타르에 액상형 레드머드 촉진제를 대체한 백화는 Na_2CO_3 H_2O가 주로 나타났으며, 슬래그 시멘트 모르타르에 액상형 레드머드 촉진제를 대체한 백화는 Na_2SO_4가 주로 나타나 결합재 종류에 관계없이 백화물질은 주로 나트륨계 화합물인 것으로 나타났다. 열중량 분석결과 보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 경우 400~450℃에서의 중량감소율이 1.36%로 나타났으며 슬래그시멘트를 결합재로 사용한 경우 0.77%로 나타나 슬래그시멘트 모르타르와 비교하여 높은 것으로 나타났다. 용출량 분석결과 Na 용출량은 결합재 종류에 관계없이 액상화 레드머드 촉진제 레드머드 대체율이 증가할수록 증가하고 있다. 백화 시험 후 Na 용출량은 Ca 용출량처럼 증가하지는 않고 있으나 백화시험전과 유사한 수준을 보이고 있어 시험체 표면에 발생된 백화를 제거한다고 하더라도 이후에 또다시 백화발생 잠재 가능성은 있는 것으로 판단된다.
3) 액상형 레드머드 촉진제 모르타르의 양생조건에 따른 백화특성 검토결과 양생방법에 따른 모르타르의 28일 압축강도 및 휨강도는 표준수중양생과 비교하여 기건양생, 고온양생, 저온양생에서 60～77.4% 수준으로서 강도에 영향을 미치는 정도는 온도보다는 습도가 큰 것으로 나타났다. 흡수율 측정결과 상대습도가 상대적으로 낮은 기건, 고온, 저온양생의 경우 표준수중양생과 비교하여 흡수율이 상대적으로 높게 나타났다. 백화발생면적 측정결과 액상형 레드머드 촉진제 모르타르를 표준수중양생 시킨 모르타르 에서는 백화가 거의 발생하지 않은 반면 기건양생, 고온양생, 저온양생 시킨 모르타르 에서는 액상형 레드머드 대체율이 증가 할 수록 백화발생이 증대되고 있다.
4) 산종류에 의한 DSP(Disilication Production) 용해 결과 레드머드 안의 Fe_2O_3 조성을 높게 만들기 위해서는 Fe_2O_3는 최소한 Al_2O_3, Na_2O는 최대한 용해시켜야 하므로 HCl 10%가 가장 적당할 것으로 판단된다. HCl % 용액에서 온도에 의한 DSP(Disilication Production)의 용해 결과 Al_2O_3와 Na_2O는 온도가 증가할수록 용해는 증가하나 60℃이상에서는 미미하게

증가하는 것으로 나타났다. 따라서 Al_2O_3, SiO_2와 Na_2O는 같은 경향으로 나타나며, SiO_2 경우 60℃ 이상에서는 반응하지 않았다. 또한 Fe_2O_3는 60℃ 이상에서 급격히 반응 되므로 Al_2O_3, Na_2O, SiO_2는 최대 Fe_2O_3는 최소로 반응 시키기 위해서는 10% HCl 60%가 적당할 것으로 판단된다. 반응시간에 따른 DSP(Disilication Production)의 용해결과 10% HCl 60℃에서 DSP 구성 물질인 Al_2O_3, Na_2O, SiO_2와 free NaOH, Na_2CO_3, 등은 모두 60℃에서 반응이 완료 되며 Fe_2O_3의 경우 시간이 경화함에 따라 반응은 계속되었다. 레드머드중 Al_2O_3, Na_2O, SiO_2을 최대 Fe_2O_3를 최소로 하는 산처리 조건은 산농도 10% HCl, 반응 온도는 60℃, 반응시간은 10시간이 가장 적당할 것으로 판단된다.

5) 백화저감제를 활용한 백화특성 검토 결과 유기계 혼합형 백화저감제를 사용한 모르타르의 28일 압축강도는 유기계 혼합형 백화저감제의 첨가량이 증가 할수록 압축강도는 감소하는 경향을 나타내었으며 백화발생면적은 유기계 혼합형 백화저감제 첨가량이 증가 할수록 백화발생면적은 감소하는 경향을 나타내었다. 무기계 도포형 백화저감제를 사용한 모르타르의 흡수율 측정결과 무기계 도포형 백화저감제 도포량이 증가 할수록 흡수율은 낮게 측정되었다. 백화발생면적 측정결과 액상형 레드머드 촉진제를 10%, 30% 대체한 모르타르에서 무기계 도포형 백화저감제를 기준양의 25% 도포할 경우 백화발생면적은 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 1% 미만의 백화발생면적비를 나타내었으며 등급은 Ⅱ등급 이하로 감소하였다.

라. 알칼리활성화 슬래그 레드머드 고감성 칼라시멘트 제조기술

(1) 서언

최근 녹색성장이 키워드로 부각됨에 따라 국제적으로 환경 부하 저감을 위한 노력이 활발하게 이루어지고 있다. 건설산업의 경우 건설재료의 대부분을 차지하고 있는 보통 포틀랜트 시멘트를 제조할 경우 많은 에너지를 소비하고 CO_2 가스가 발생되어 환경문제에 대한 주요 원인이 되고 있다. 이러한 연구의 일환으로 건설 산업에서는 시멘트를 전혀 사용하지 않고 산업부산물을 재사용하며 경제적인 효과를 동시에 얻을 수 있는 방법으로 플라이애시 또는 고로슬래그 미분말을 이용한 알칼리활성화 무시멘트 연구가 국・내외에서 활발히 이루어지고 있다.

알칼리 활성화 시멘트는 초기 강도 발현과 화학 저항성이 높은 것으로 알려져 콘크리트 및 시멘트 관련 연구자들에게 많은 관심을 받고 있으나 국내의 경우 주로 고가의 자극제를 사용하여 경화 메커니즘 규명 및 강도발현 특성에 중점을 두고 연구들이 수행되고 있다. 이는 알칼리 활성화 시멘트가 건설산업 현장에 실제로 활용되는데 가장 큰 장애요소로 고가의 자극제에 의한 경제적인 단점을 해결하기 위하여 자극제로써 활용 가능한 산업부산물에 관심이 모아지고 있다.

레드머드(Red mud)는 보오크사이트 원광석으로부터 수산화알루미늄($Al(OH)_3$) 및 산화알루미늄(Al_2O_3)을 제조하는 공정에서 발생되는 산업부산물이다. 국내의 경우 레드머드는 Bayer Process를 통하여 Al_2O_3 1톤을 생산하면 함수율 40～60%의 슬러지상태로 대략 2톤이 발생되며, 발생량은 국내 발생량의 대부분을 차지하고 있는 K사에서만 연간 약 30만 톤이 슬러지 상태로 발생되고 있다.

알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트는 알칼리활성화 시멘트 연구의 일환으로서 시멘트 조성에서 알칼리자극제, 고로슬래그와 레드머드로 구성되어져 있으며, 포틀랜트 시멘트를 사용하지 않는 클링커 프리 시멘트(Clinker Free Cement)를 의미한다. 유사한 시멘트계 재료로서 알칼리활성화 슬래그 시멘트, 알칼리활성화 슬래그-플라이애시 시멘트, 알칼리활성화 슬래그-포졸란 시멘트 등이 있다. 알칼리활성화 레드머드-슬래그 시멘트는 레드머드를 액상 규산나트륨 또는 가성소다와 같은 고로슬래그미분말의 자극제로서 활용하고자 하는 것으로서 2000년 초반 해외에서 처음으로 발표되었다.

그러나 산업부산물로 제조된 알칼리 활성화슬래그 시멘트는 소성과정을 거치지 않기 때문에 기초 원료의 화학조성 범위가 불균질 하여 화학적 조성이 조금만 변동되어도 강도에 큰 영향을 미칠 수 있다. 기초 원료의 화학적 조성이 변동된다면 알칼리 활성화슬래그 시멘트의 배합비율이 조정되어야 하지만 이는 제품의 품질 안정성 확보에 문제를 가져올 수 있다는 단점이 있다.

따라서 본 절에서는 산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 반응성을 분석하고 기존 보통 포틀랜트 시멘트의 성분관리에 이용되고 있는 화학적 비율과 계수를 알칼리활성화 슬래그 시멘트의 화학적 정량분석 결과에 적용하여 알칼리활성화 슬래그 레드머드 고감성 칼라시멘트의 화학조성 허용범위를 검토하고 최적배합을 찾고자 하였다.

(2) 슬래그 활성을 위한 산업부산물의 원료특성 및 반응성 분석

(가) 실험계획 및 방법

① 실험계획

슬래그 활성을 위한 산업부산물의 원료 특성 및 반응성을 분석하기 위한 실험계획을 <표 3.58>에 나타내었다. 산업부산물로는 산화칼슘(CaO)량이 비교적 많은 것으로 보고되고 있는 PA, CFA, BFS, CaO, RGF 총 5종류로 선정하였다. 측정항목으로서 성분분석, 입도분석, 입형분석, 분말도, 흡수율을 측정하였다.

<표 3.58> 실험계획

기호	산업부산물 명칭	발생원	측정항목
PA	페이퍼애시	제지공장(J사)	• 성분분석(XRF 및 XRD) • 입도분석 • 입형분석(SEM) • 분말도 • 흡수율
CFA	고칼슘플라이애시	열병합발전(K사)	
BFS	고로슬래그미분말	제철공장(P사)	
CaO	생석회	석회석(T사)	
RGF	부산물석고	발전소(K사)	

② 사용재료

슬래그 활성을 위해 사용한 산업부산물의 사진을 <그림 3.67>에 나타내었다. 산업부산물 중 페이퍼애시(PA)는 J사의 제지공장에서 발생한 것을 사용하였으며 고칼슘플라이애시(CFA)는 K사의 열병합 발전사에서 발생한 것을 사용하였다. 고로슬래그미분말(BFS)은 P사의 제철공장에서 발생하는 것을 사용하였으며 생석회(CaO)는 T사의 석회석을 사용하였다. 부산물석고(RGF)는 K사의 발전소에서 발생하는 것을 사용하였다.



a) PA　b) CFA　c) BFS

d) CaO　e) RGF

<그림 3.67> 각 산업부산물의 종류

③ 실험방법

㉮ XRF

슬래그 활성을 위한 산업부산물의 원료 특성 및 반응성을 분석하기 위하여 XRF분석은 <그림 3.68>에 나타낸 바와 같이 Rigaku사의 ZSX Primus IV을 이용하여 분석하였다. 5g 정도의 시료를 채취하여 300메시 정도로 분쇄하여 시료 용기에 올려놓았다. 시료로부터 발산되는 2차(형광) X선을 검출하여 물질의 정성, 정량 분석하였다.



<그림 3.68> XRF 측정장비

㉯ XRD

슬래그 활성을 위한 산업부산물의 원료 특성 및 반응성을 분석하기 위하여 XRD분석은 <그림 3.69>에 나타낸 바와 같이 Rigaku사의 Smart Lab을 이용하여 분석하였다. XRD는 X선회절법에 의한 정성분석은 미지시료의 회절 pattern과 이미 알고 있는 물질의 회절 pattern등을 비교하여 전자 중에 후자의 pattern이 포함되어 있으면, 전자에는 후자의 물질이 함유되어 있다고 판정하는 방법으로 시료를 약 10㎛이하로 분쇄 후 시료 용기에 올려놓았으며 전기적으로 X선을 발생시켜 시료로부터 반사되어 나오는 X-선 회절을 이용하여 물질을 분석하였다.



<그림 3.69> XRd 측정장비

㉰ 입도분석

슬래그 활성을 위한 산업부산물의 원료 특성 및 반응성을 분석하기 위하여 입도분석은 <그림 3.70>에 나타낸 바와 같이 Malvern Instrument사의 Mastersizer 3000-Maz6140 입도분석기로 입도를 측정하였다. 입도분석기의 일정파장의 레이져 beam이 입자에 도착하면 빛이 산란, 투과, 흡수된다. 산란되는 빛 중에는 회절, 굴절, 반사되는 것이 있으며 흡수된 빛의 일부는 입사 빛 보다 긴 파장의 빛을 다시 방출하기도 한다. 이렇게 동시에 복합적으로 나타나는 광산란 정도를 검출기로 검출하여 입도분포를 측정하였다.



<그림 3.70> 입도 분석기

㉱ 입형분석(SEM)

슬래그 활성을 위한 산업부산물의 원료 특성 및 반응성을 분석하기 위하여 입형분석은 Malvern Instrument사의 Mastersizer 3000-Maz6140 현미경으로 배율 1000, 3000, 10000배율로 측정하였다.

㉲ 분말도

슬래그 활성을 위한 산업부산물의 원료 특성 및 반응성을 분석하기 위하여 분말도 블레인 공기투과장시를 이용하여 구하였다.

㉳ 흡수율

슬래그 활성을 위한 산업부산물의 원료 특성 및 반응성을 분석하기 위한 흡수특성 분석은 산업부산물에 수분을 외할로 10%비율로 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70%까지 증가시키며 육안상의 액상한계를 평가하였다.

(나) 실험결과 및 분석

① XRF 분석결과

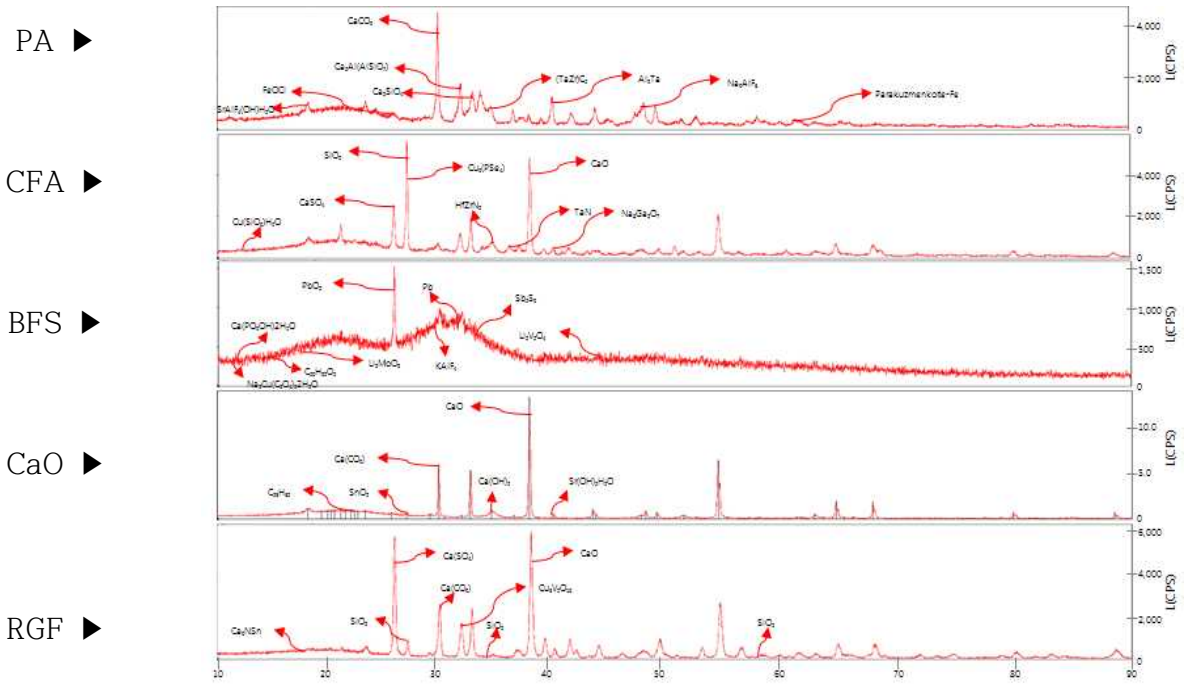
슬래그 활성을 위한 산업부산물의 XRF 분석결과를 <표 3.59>에 나타내었다. 슬래그 활성을 위한 각 산업부산물의 CaO함량은 PA의 경우 59.7%, CFA의 경우 41.2%, BFS의 경우 49.1%, CaO의 경우 89.0%, RGF의 경우 75.9%로 나타났다. 각 산업부산물의 CaO함량은 모두 40% 이상으로 나타났으며, CaO 함량은 생석회인 CaO를 제외하고 부산물석고(RGF), 제지애시(PA)가 많은 것으로 나타났다.

<표 3.59> 각 산업부산물의 성분분석(XRF)결과

구분	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	Fe_2O_3	ZnO	Na_2O
PA	4.05	9.83	17.0	1.180	0.237	59.7	0,388	0.074	6.770	0.273	ND
CFA	4.40	13.1	29.7	1.240	0.996	41.2	0.568	0.071	8.710	0.019	ND
BFS	3.95	14.2	30.0	0.791	0.420	49.1	0.477	0.493	0.619	0.005	ND
CaO	5.12	1.60	2.68	0.472	0.265	89.0	ND	0.088	0.774	0.007	ND
RGF	9.20	4.67	7.02	1.970	0.256	75.9	ND	0.103	0.864	0.011	ND

② XRD 분석결과

슬래그 활성을 위한 산업부산물의 XRD 분석결과를 <그림 3.71>에 나타내었다. 대부분의 산업부산물은 회절각도 30~40° 상에서 CaO 성분 피크가 높게 발생하였으며, CaO성분에서 기원한 $CaCO_3$, $CaSO_3$ 성분 피크도 발생하는 것으로 나타났다.



<그림 3.71> 각 산업부산물의 XRD분석결과

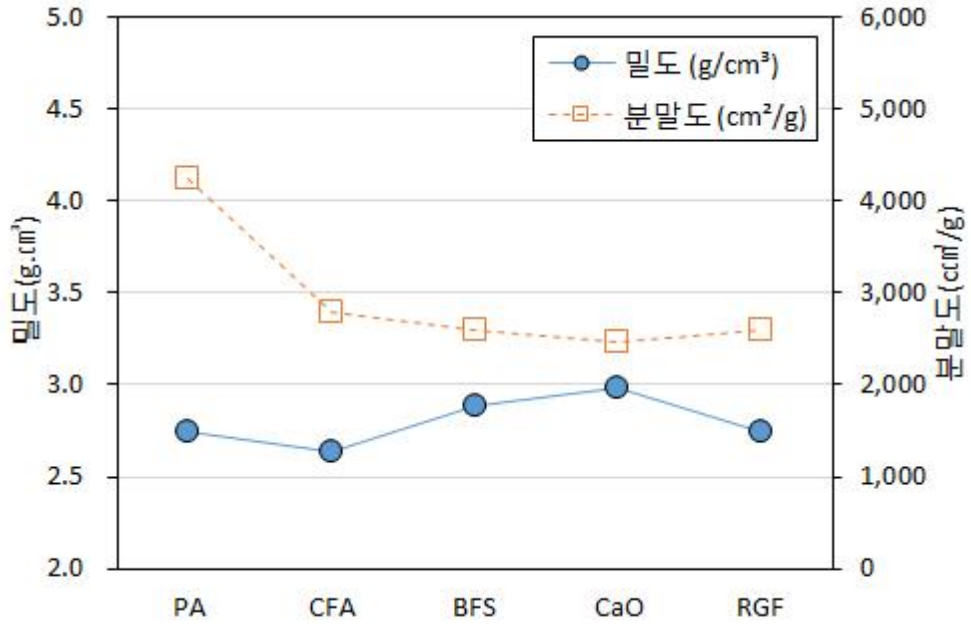
③ 분말도 및 기초물성 분석결과

슬래그 활성을 위한 산업부산물의 밀도 및 분말도 분석결과를 <표 3.60> 및 <그림 3.72>에 나타내었다. 생석회인 CaO가 2.98g/cm^{3}로 가장 높고, 고칼슘플라이애시인 CFA가 2.64g/cm^{3}로 가장 낮게 나타났으며 산업부산물 별 밀도는 2.64~2.98g/cm^{3}로 큰 차이는 없는 것으로 나타났다.

산업부산물 별 분말도는 PA가 4,240cm^2/g으로 가장 높고, CaO가 2,470cm^2/g으로 가장 낮게 나타났다. 산업부산물 별 분말도는 PA를 제외한 산업부산물은 2470~2800cm^2/g으로 비슷한 것으로 나타났다.

<표 3.60> 각 산업부산물의 분말도 및 밀도 측정 결과

구분	PA	CFA	BFS	CaO	RGF
밀도 (g/cm^3)	2.75	2.64	2.89	2.98	2.75
분말도 (cm^2/g)	4,240	2,800	2,600	2,470	2,590

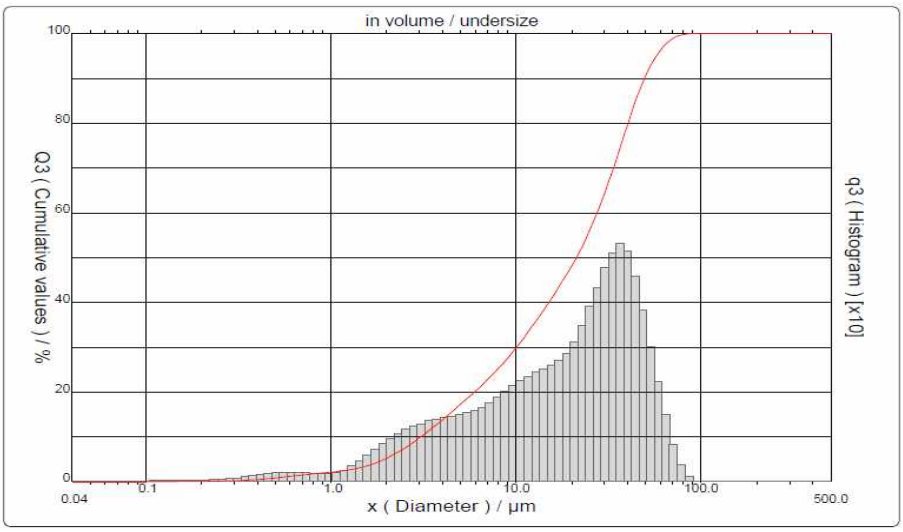


<그림 3.72> 산업부산물의 분말도 및 밀도 측정 결과

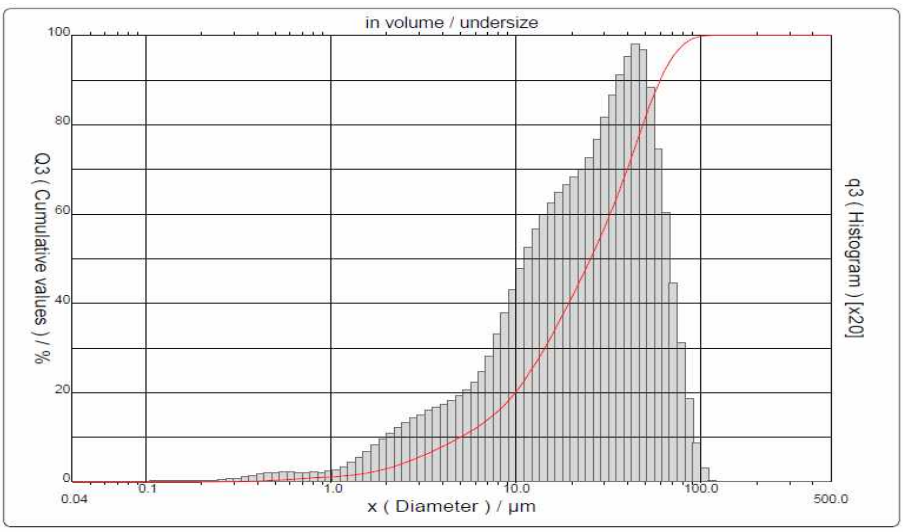
④ 입도분포 및 입형(SEM) 분석결과

슬래그 활성을 위한 산업부산물의 입도분포 분석결과를 <그림 3.73> 및 <그림 3.74>에 나타내었다. 각 산업부산물의 입도분포는 다양한 형태를 보이고 있으며, 고로슬래그를 미분쇄한 BFS는 10㎛이하의 미립자가 가장 많은 것으로 분석되었다. 하지만 천연소재를 가공한 생석회(CaO)와 산업부산물인 CFA는 10㎛이하의 미립자분이 상대적으로 적게 나타났으며, BFS의 약 50% 정도인 것으로 분석되었다.

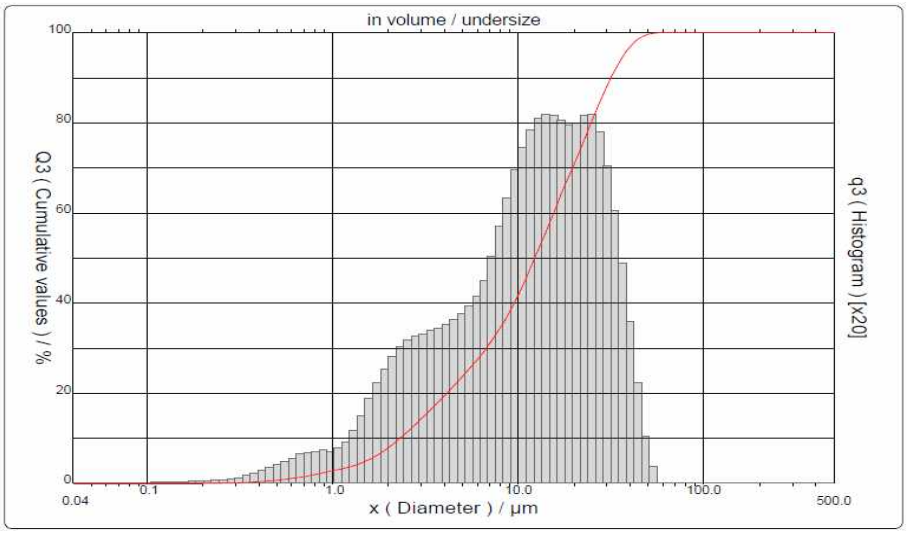
슬래그 활성을 위한 산업부산물의 평균입경 및 SEM촬영에 의한 입형 결과를 <표 3.61>에 나타내었다. 각 산업부산물의 평균입경은 CaO 〉 CFA 〉 RGF 〉 PA 〉 BFS 순으로 큰 것으로 나타났으며, 특히 주요 대상물질인 PA, CFA, RGF의 입자크기는 비교적 유사한 것으로 나타났다. 또한, 입형을 살펴보면 PA와 CFA는 모나거나 세장한 입자가 비교적 다량으로 함유되어 있으나, 인위적으로 파쇄된 제품인 BFS 및 CaO는 상대적으로 이러한 입자가 적게 함유되었다.



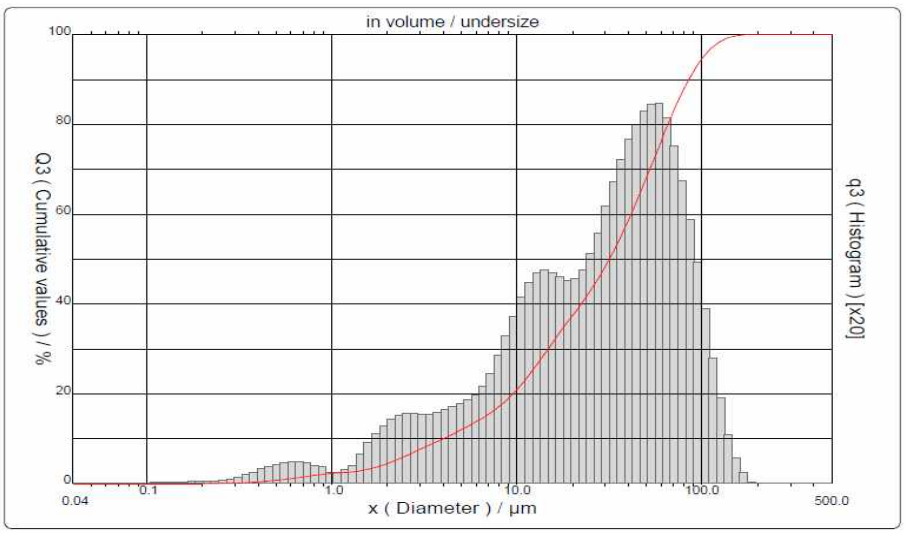
(a) PA



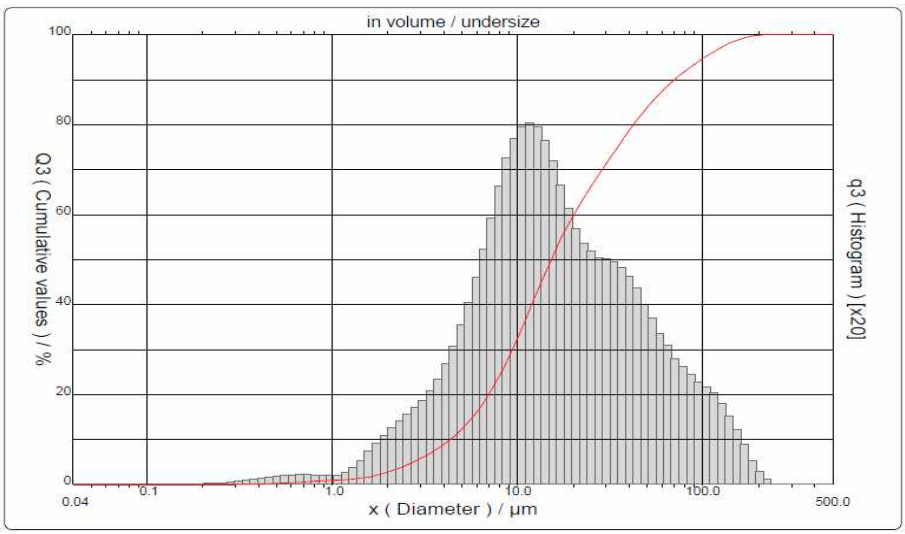
(b) CFA



(c) BFS

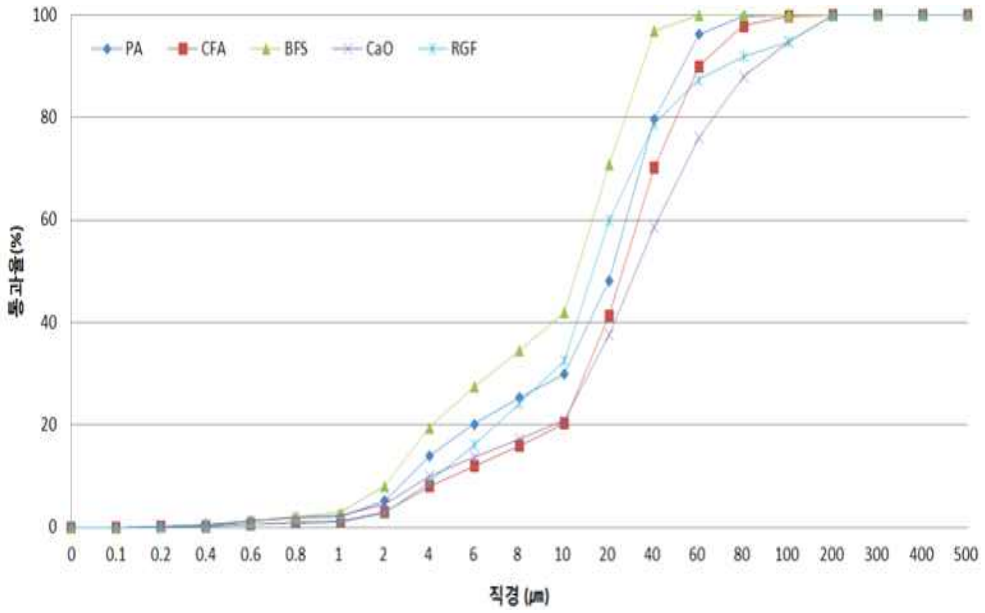


(d) CaO



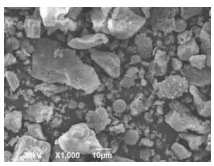
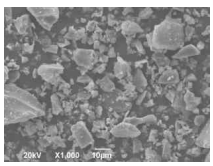
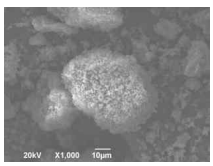
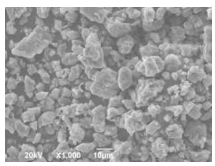
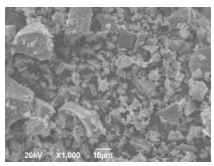
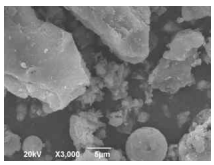
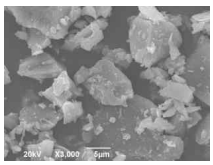
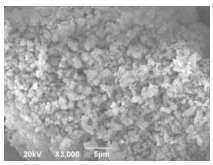
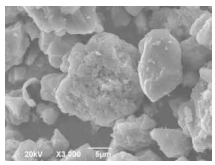
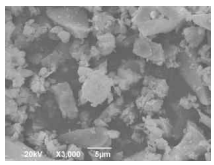
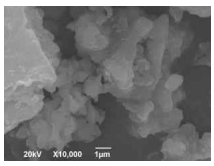
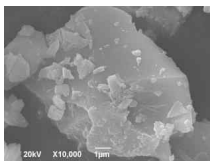
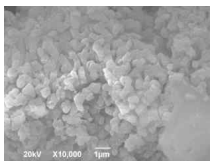
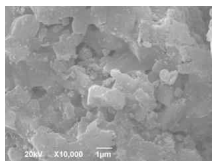
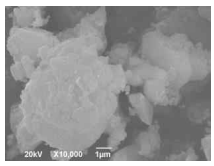
(e) RGF

<그림 3.73> 입도분석 결과



<그림 3.74> 각 산업부산물의 입도분석 결과

<표 3.61> 각 산업부산물의 평균입경 및 입형(SEM)

구분	PA	CFA	BFS	CaO	RGF
평균 입경 (㎛)	24.01	29.61	14.85	38.86	28.15
입형 (×1,000)					
입형 (×3,000)					
입형 (×10,000)					

⑤ 흡수특성 분석결과

슬래그 활성을 위한 산업부산물의 수분을 외할로 첨가했을 때의 외관 성상을 <표 3.62>에 나타내었다. 흡수특성 분석결과 PA 및 CFA는 함수율 70%까지 육안상 액상한계에 도달하지 않아 원료의 흡수특성이 매우 우수한 것으로 나타났다. 특히, PA의 경우 고함수율 영역에서도 흡수특성이 가장 우수한 것으로 나타났다. 반면, BFA 및 CaO는 함수율 30~40%에서 육안상 액상한계에 도달하는 것으로 나타났다.

<표 3.62> 각 산업부산물의 흡수율 분석결과

구분 / 함수율	PA	CFA	BFS	CaO
0%				
10%				
20%				
30%				
40%				
50%			Liquefied Condition	Liquefied Condition
60%				
70%				

(다) 소결

본 절에서는 산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더 개발을 위하여 슬래그 활성을 위한 산업부산물의 원료 특성 및 반응성을 검토하였다. 분말형 활성 슬래그 바인더 제조를 위한 산업부산물의 특성 검토에 대한 결과는 다음과 같다.

- 산업부산물별 XRF 검토 결과 대부분의 산업부산물에서 CaO성분이 40% 이상으로 나타났으며 천연소재인 생석회(CaO)를 제외하고 RGF가 75.9%로 가장 많이 나타났다.
- 산업부산물별 XRD 검토 결과 각 산업부산물별로 CaO 성분 피크가 가장 높게 나타났으며, 이에 기원한 $CaCO_3$, $CaSO_4$ 성분 피크도 다소 높게 분석되어 Free CaO 성분을 다량 함유하고 있는 것으로 나타났다.
- 산업부산물 별 평균입경은 CaO 〉 CFA 〉 RGF 〉 PA 〉 BFS 순으로 나타났으며, 입형의 경우 PA와 CFA는 모나거나 세장한 입자가 비교적 다량으로 함유되어 있는 것으로 나타났다.
- 산업부산물 별 흡수특성 검토결과 BFA 및 CaO는 함수율 30~40%에서 육안상 액상한계에 도달하는 것으로 나타났으며 PA 및 CFA는 함수율 70%까지 육안상 액상한계에 도달하지 않아 원료의 흡수특성이 매우 우수한 것으로 나타났다.

(3) 산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더 개발

(가) 실험계획 및 방법

① 실험계획

산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 최적 배합을 설정 하고자 하는 실험계획을 아래 <표 3.63>에 나타내었다. 이를 위하여 결합재는 보통 포틀랜드 시멘트(C)와 고로슬래그의 자극제로 산업부산물 A, B, C 3종류와 천연무수석고(AH), 소석회(HL)를 사용하였다. 측정항목으로서는 재령 3일, 7일, 28일 압축강도와 품질안정성 확보를 위한 영향인자 해석을 실시하였다.

<표 3.63> 실험계획

구분	결합재 (%)							C:S	W/C (%)	측정항목
	보통 포틀랜트 시멘트	고로 슬래그	산업부산물			천연 무수 석고	소석회			
			A	B	C					
C	100	-	-	-	-	-	-	1:3	60	• 압축강도 (3일, 7일, 28일) • 품질안정성 확보
SB1-1	-	80	20	-	-	-	-			
SB1-2	-	85	15	-	-	-	-			
SB1-3	-	90	10	-	-	-	-			
SB1-4	-	95	5	-	-	-	-			
SB2-1	-	70	20	10	-	-	-			
SB2-2	-	50	20	20	-	-	-			
SB2-3	-	60	20	30	-	-	-			
SB2-4	-	70	20	-	10	-	-			
SB2-5	-	50	20	-	20	-	-			
SB2-6	-	60	20	-	30	-	-			
SB3-1	-	80	10	-	-	5	-			
SB3-2	-	80	10	-	-	-	5			
SB3-3	-	80	10	-	-	-	10			

② 사용재료

㉮ 결합재

산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 최적 배합을 설정하기 위해 사용한 재료를 <표 3.64>에 나타내었다. 보통 포틀랜트 시멘트는 국내 S사에서 시판하고 있는 비표면적 3.144cm^2/g, 밀도3.15g/cm^3 인 보통 포틀랜트 시멘트를 사용하였다.

활성슬래그 바인더를 구성하고 있는 산업부산물의 화학적 성분을 <표 3.65>에 나타내었다. 활성슬래그 바인더의 주요성분인 SiO_2는 1.5%~31.2%, Fe_2O_3는 0.3%~7.8%, Al_2O_3는 0.4%~16.5%, CaO는 33.4%~66.1%, SO_3는 4.1%~30.2%로 나타났다.

<표 3.64> 보통 포틀랜트 시멘트의 물리 화학적 성분

구분	평균 입경 (cm^2/g)	밀도 (g/cm^3)	Ig. loss	화학적 성분 (%)					
				SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3
보통 포틀랜트 시멘트	3,144	3.15	1.32	21.7	5.7	3.2	63.1	2.8	2.2

<표 3.65> 산업부산물의 화학적 특성

구분	화학적 성분 (%)							
	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3
고로슬래그	31.2	0.5	11.4	43.3	7.4	0.4	0.2	4.1
A	1.5	0.3	0.4	66.1	0.5	0.1	0.05	30.2
B	22.5	7.8	16.4	38.2	3.9	0.8	1	7.6
C	28.4	2.4	16.5	33.4	1.7	1.2	2	4.8

㉯ 골재

산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 최적 배합을 설정하기 위해 사용한 잔골재는 KS L 679에서 품질규정하고 있는 ISO 표준사를 사용하였다.

㉰ 자극제

산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 최적 배합을 설정하기 위해 사용한 자극제의 화학적 성질을 <표 3.66>에 나타내었다.

<표 3.66> 자극제의 화학적 성질

구분	화학적 성분 (%)							
	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3
천연무수석고	0.85	0.05	0.73	43.1	0.03	-	-	54.97
소석회	-	0.12	0.19	65.88	1.03	-	-	1.13

③ 실험방법

산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 최적 배합을 설정하기 위해 압축강도 시험은 KS L 5105 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법에 따라 시험체를 제작하여 재령 3일, 7일, 28일에 압축강도를 측정하였다.

품질안정성 확보를 위한 영향인자 해석은 아래 식에 나타낸 바와 같이 일반적으로 보통 포틀랜트 시멘트는 화학분석 결과로부터 시멘트의 성질을 추측 할 수 있는 수치로서 Bogue의 계산식에서 얻어진 시멘트 화합물 조성 방법을 이용하여 해석을 실시하였다. 여기서, 수경율(H・M)은 Hydraulic Modulus 이며 석회포화도(L.S.D)는 Lime Saturation Degree이다.

$$\text{수경율}(H.M) = \frac{CaO - 0.7 \times SO_3}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} \qquad (1)$$

$$\text{석회포화도}(L.S.D) = \frac{Ca0 - 0.7 \times SO_3}{2.8 \times SiO_2 + 1.2 \times Al_2O_3 + 0.65 \times Fe_2O_3} \qquad (2)$$

(나) 실험결과 및 분석

① 압축강도

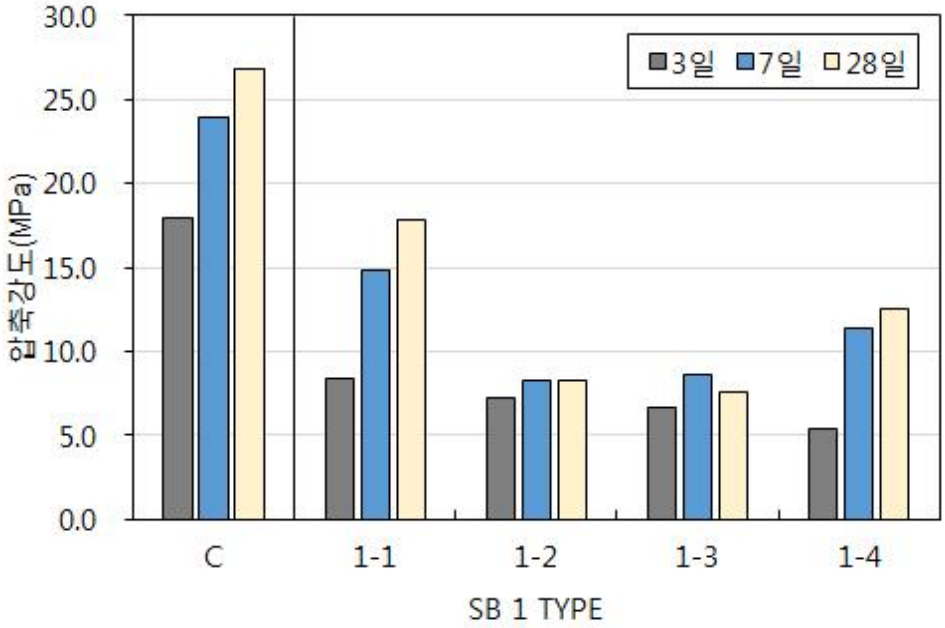
㉮ SB 1Type

산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 압축강도 측정 결과를 <표 3.67> 및 <그림 3.75>에 나타내었다. 활성 슬래그 바인더 1-1 모르타르의 압축강도 측정결과 재령 3일에서 8.42MPa, 7일에서 14.7MPa, 28일에서 17.8MPa를 나타내었다. 1-2 모르타르의 경우 재령 3일에서 7.18MPa, 재령 7일에서 8.21MPa, 재령 28일에서 8.29MPa를 나타내었다. 1-3 모르타르의 경우 재령 3일에서 6.70MPa, 재령 7일에서 8.59MPa, 재령 28일에서 7.58MPa를 나타내었다. 1-4 모르타르의 경우 재령 3일에서 5.39MPa, 재령 7일에서 11.3MPa, 재령 28일에서 12.5MPa를 나타내었다.

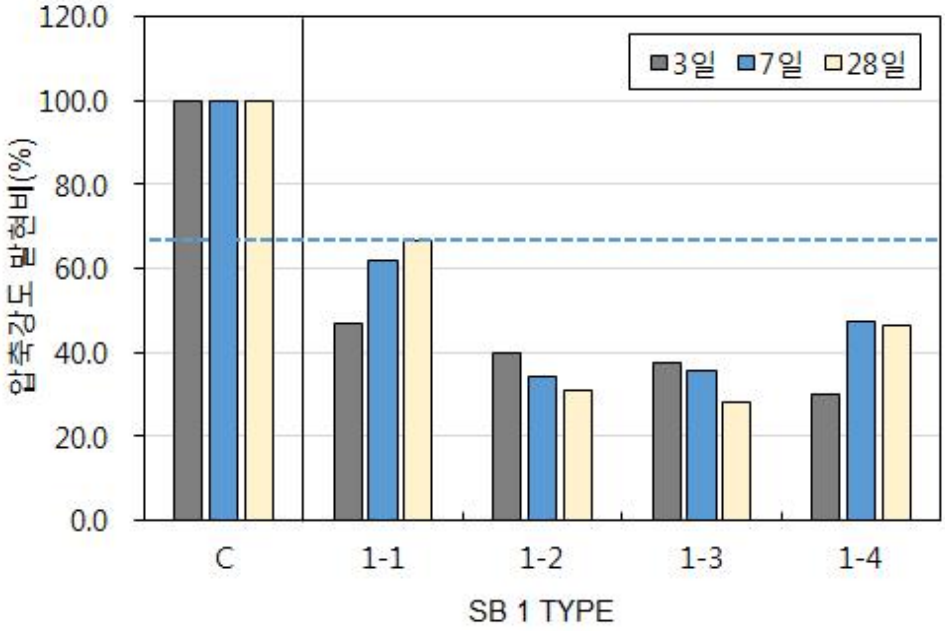
산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 압축강도 발현비 측정 결과를 <표 3.67> 및 <그림 3.76>에 나타내었다. 산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 압축강도 발현비는 보통 포틀랜트 시멘트와 비교하여 1-1 모르타르의 경우 재령 3일에서 46.9%, 재령 7일에서 61.7% 재령 28일에서 66.4%를 나타내었다. 1-2 모르타르의 경우 재령 3일에서 40.0%, 재령 7일에서 34.2%, 재령 28일에서 30.9%를 나타내었다. 1-3 모르타르의 경우 재령 3일에서 37.4%, 재령 7일에서 35.8%, 재령 28일에서 28.2%를 나타내었다. 1-4 모르타르의 경우 재령 3일에서 30.0%, 재령 7일에서 47.3%, 재령 28일에서 46.6%를 나타내었다.

<표 3.67> 압축강도 및 압축강도 발현비 측정결과 (SB 1Type)

구분		압축강도 측정결과(MPa)			압축강도 발현비(%)		
		3일	7일	28일	3일	7일	28일
보통포틀랜트 시멘트 (C)		17.9	23.9	26.8	100	100	100
활성 슬래그 바인더 (SB)	1-1	8.42	14.7	17.8	46.9	61.7	66.4
	1-2	7.18	8.21	8.29	40.0	34.2	30.9
	1-3	6.70	8.59	7.58	37.4	35.8	32.4
	1-4	5.39	11.3	12.5	30.0	47.3	46.6



<그림 3.75> SB 1Type 압축강도 측정결과



<그림 3.76> SB 1Type 압축강도 발현비

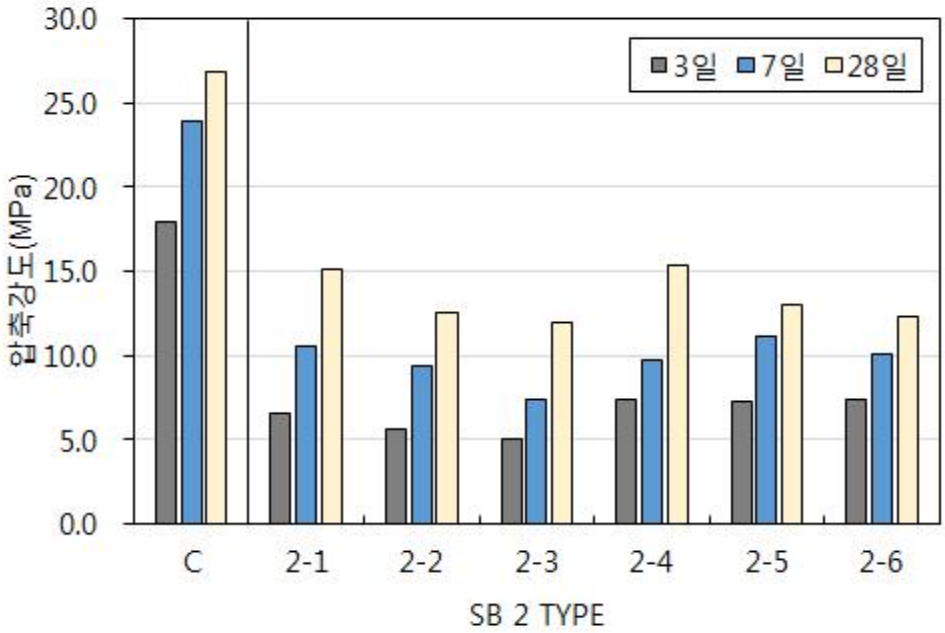
㉯ SB 2Type

산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 압축강도 측정 결과를 <표 3.68> 및 <그림 3.77>에 나타내었다. 활성 슬래그 바인더 2-1 모르타르의 압축강도 측정결과 재령 3일에서 6.59MPa, 7일에서 10.5MPa, 28일에서 15.1MPa를 나타내었다. 2-2 모르타르의 경우 재령 3일에서 5.61MPa, 재령 7일에서 9.34MPa, 재령 28일에서 12.5MPa를 나타내었다. 2-3 모르타르의 경우 재령 3일에서 5.07MPa, 재령 7일에서 7.41MPa, 재령 28일에서 11.9MPa를 나타내었다. 2-4 모르타르의 경우 재령 3일에서 7.38MPa, 재령 7일에서 9.73MPa, 재령 28일에서 15.4MPa를 나타내었다. 2-5 모르타르의 경우 재령 3일에서 7.27MPa, 재령 7일에서 11.0MPa, 재령 28일에서 13.0MPa를 나타내었다. 2-6 모르타르의 경우 재령 3일에서 7.35MPa, 재령 7일에서 10.1MPa, 재령 28일에서 12.3MPa를 나타내었다.

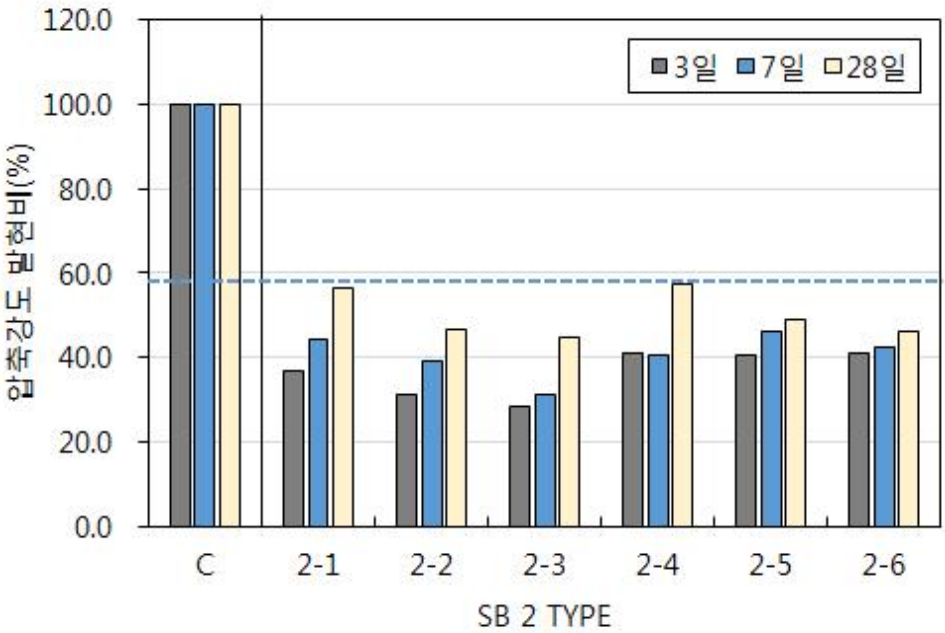
산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 압축강도 발현비 측정 결과를 <표 3.68> 및 <그림 3.78>에 나타내었다. 산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 압축강도 발현비는 보통 포틀랜트 시멘트와 비교하여 2-1 모르타르의 경우 재령 3일에서 36.7%, 재령 7일에서 44.1% 재령 28일에서 56.6%를 나타내었다. 2-2 모르타르의 경우 재령 3일에서 31.3%, 재령 7일에서 39.0%, 재령 28일에서 46.7%를 나타내었다. 2-3 모르타르의 경우 재령 3일에서 28.2%, 재령 7일에서 30.9%, 재령 28일에서 44.4%를 나타내었다. 2-4 모르타르의 경우 재령 3일에서 41.1%, 재령 7일에서 40.6%, 재령 28일에서 57.4%를 나타내었다. 2-5 모르타르의 경우 재령 3일에서 40.5%, 재령 7일에서 46.3%, 재령 28일에서 48.7%를 나타내었다. 2-6 모르타르의 경우 재령 3일에서 41.0%, 재령 7일에서 42.3%, 재령 28일에서 46.0%를 나타내었다.

<표 3.68> 압축강도 및 압축강도 발현비 측정결과 (SB 2Type)

구분		압축강도 측정결과(MPa)			압축강도 발현비(%)		
		3일	7일	28일	3일	7일	28일
보통 포틀랜트 시멘트 (C)		17.9	23.9	26.8	100	100	100
활성 슬래그 바인더 (SB)	2-1	6.59	10.5	15.1	36.7	44.1	56.6
	2-2	5.61	9.34	12.5	31.3	39.0	46.7
	2-3	5.07	7.41	11.9	28.2	30.9	44.4
	2-4	7.38	9.73	15.4	41.1	40.6	57.4
	2-5	7.27	11.0	13.0	40.5	46.3	48.7
	2-6	7.35	10.1	12.3	41.0	42.3	46.0



<그림 3.77> AAS 2타입 압축강도 측정결과



<그림 3.78> AAS 2타입 압축강도 발현비

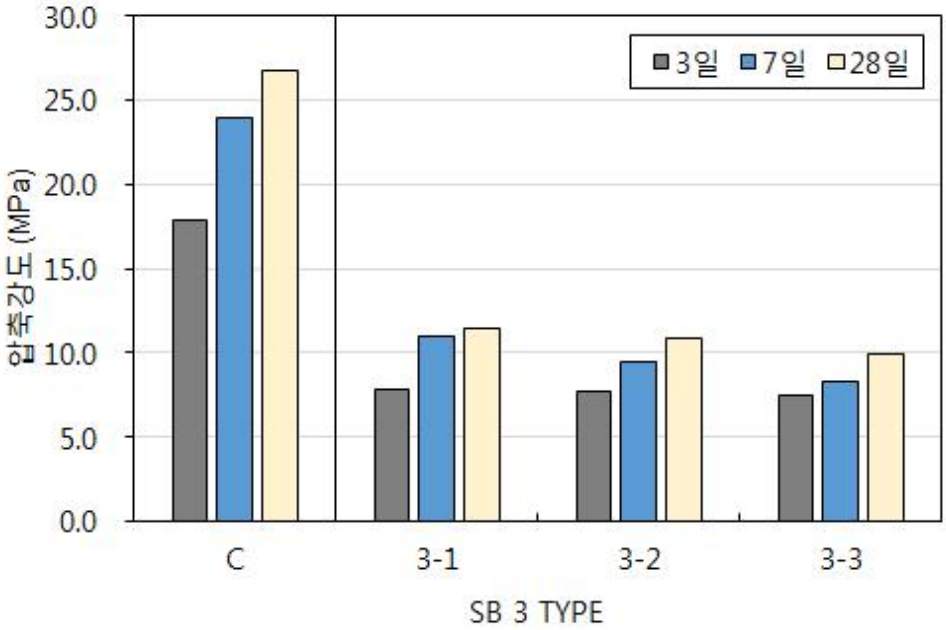
㉰ SB 3Type

산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 압축강도 측정 결과를 <표 3.69> 및 <그림 3.79>에 나타내었다. 활성 슬래그 바인더 3-1 모르타르의 압축강도 측정결과 재령 3일에서 7.86MPa, 7일에서 10.9MPa, 28일에서 11.4MPa를 나타내었다. 3-2 모르타르의 경우 재령 3일에서 7.74MPa, 재령 7일에서 9.47MPa, 재령 28일에서 10.8MPa를 나타내었다. 3-3 모르타르의 경우 재령 3일에서 7.44MPa, 재령 7일에서 8.26MPa, 재령 28일에서 9.93MPa를 나타내었다.

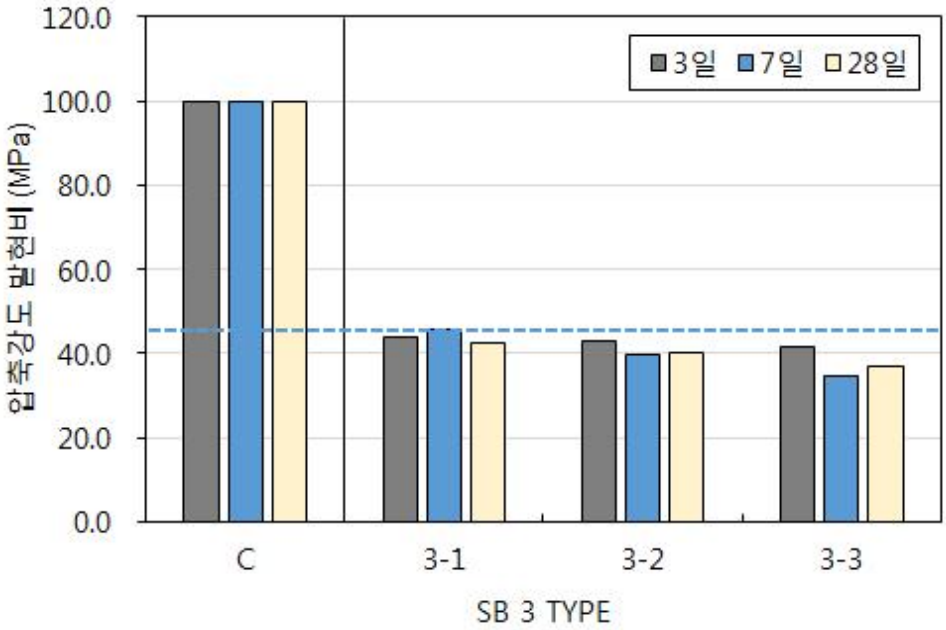
산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 압축강도 발현비 측정 결과를 <표 3.69> 및 <그림 3.80>에 나타내었다. 산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 압축강도 발현비는 보통 포틀랜트 시멘트와 비교하여 3-1 모르타르의 경우 재령 3일에서 43.8%, 재령 7일에서 45.8% 재령 28일에서 42.5%를 나타내었다. 3-2 모르타르의 경우 재령 3일에서 43.1%, 재령 7일에서 39.5%, 재령 28일에서 40.3%를 나타내었다. 3-3 모르타르의 경우 재령 3일에서 41.5%, 재령 7일에서 34.5%, 재령 28일에서 37.0%를 나타내었다.

<표 3.69> 압축강도 및 압축강도 발현비 측정결과 (SB 3Type)

구분		압축강도 측정결과(MPa)			압축강도 발현비(%)		
		3일	7일	28일	3일	7일	28일
보통 포틀랜트 시멘트 (C)		17.9	23.9	26.8	100	100	100
활성 슬래그 바인더 (SB)	3-1	7.86	10.9	11.4	43.8	45.8	42.5
	3-2	7.74	9.47	10.8	43.1	39.5	40.3
	3-3	7.44	8.26	9.93	41.5	34.5	37.0



<그림 3.79> AAS 3타입 압축강도 측정결과



<그림 3.80> AAS 3타입 압축강도 발현비

② 수경율(Hydraulic Modulus)

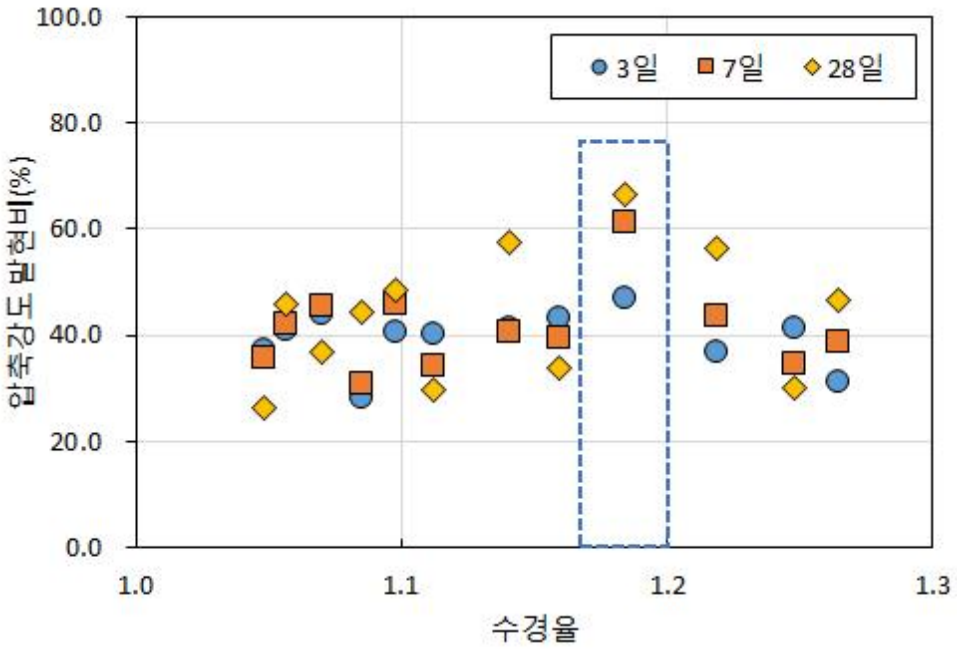
산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 수경율 측정 결과를 <표 3.70>에 나타내었으며 수경율과 압축강도 발현비 관계를 <그림 3.81>에 나타내었다. 활성 슬래그 바인더 1Type 으로 구성된 활성 슬래그 바인더의 수경율 측정결과 SB1-1에서 1.184, SB1-2에서 1.112, SB1-3에서 1.048, SB1-4에서 0.990으로 나타났다.

2Type의 경우 SB2-1에서 1.218, SB2-1에서 1.264, SB2-3에서 1.085, SB2-4에서 1.140, SB2-5에서 1.098, SB2-6에서 1.056으로 나타났다.

3Type의 경우 SB3-1에서 1.070, SB3-2에서 1.159, SB3-3에서 1.248 인 것으로 나타났다. 수경율과 압축강도 발현비는 <그림 3.81>에 나타낸 바와 같이 적정 수경율 구간의 경우 재령 3일, 재령 7일, 재령 28에서 1.15~1.18 범위내에 존재하고 있음을 확인 할 수 있었다.

<표 3.70> 수경율 측정결과

구분	OPC	SB 1Type				SB 2Type						SB 3Type		
		1-1	1-2	1-3	1-4	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	3-1	3-2	3-3
수경율	2.219	1.184	1.112	1.048	0.990	1.218	1.264	1.085	1.140	1.098	1.056	1.070	1.159	1.248



<그림 3.81> 압축강도 발현비에 따른 수경율 측정결과

③ 석회 포화도(Lime Saturation Degree)

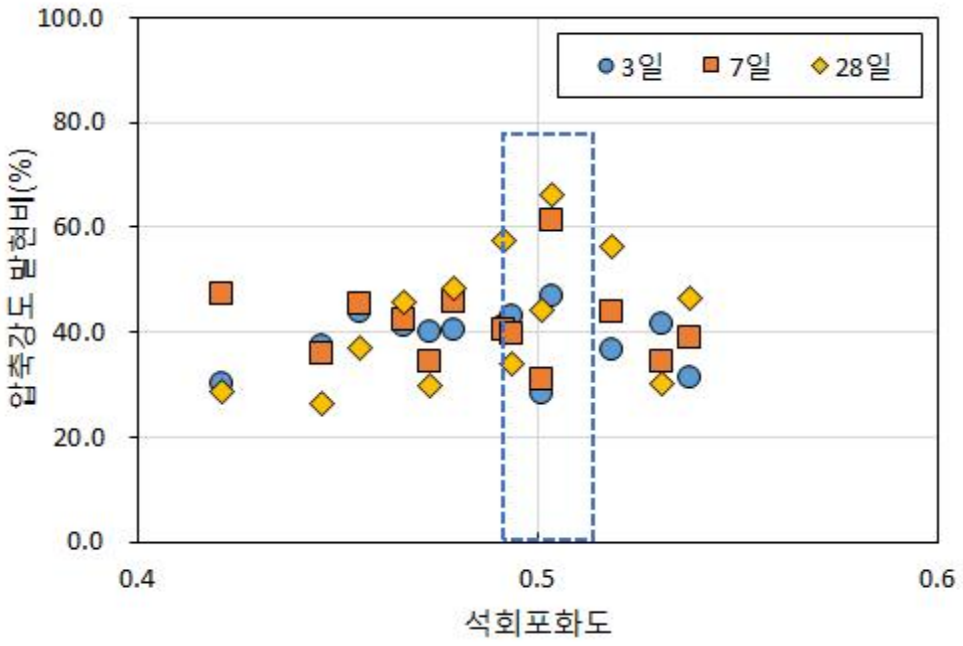
산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 석회 포화도 측정 결과를 <표 3.71>에 나타내었으며 석회포화도와 압축강도 발현비 관계를 <그림 3.82>에 나타내었다. 활성 슬래그 바인더 1Type 으로 구성된 활성 슬래그 바인더의 석회 포화도 측정결과 SB1-1에서 0.504, SB1-2에서 0.473, SB1-3에서 0.446, SB1-4에서 0.421으로 나타났다.

2Type의 경우 SB2-1에서 0.518, SB2-2에서 0.538, SB2-3에서 0.501, SB2-4에서 0.491, SB2-5에서 0.479, SB2-6에서 0.467으로 나타났다.

3Type의 경우 SB3-1에서 0.455, SB3-2에서 0.493, SB3-3에서 0.531 인 것으로 나타났다. 석회포화도와 압축강도 발현비는 <그림 3.82>에 나타낸 바와 같이 재령 3일, 재령 7일, 재령 28에서 0.48~0.51 범위내에 존재하고 있음을 확인 할 수 있었다.

<표 3.71> 석회 포화도 측정결과

구분	OPC	SB 1Type				SB 2Type						SB 3Type		
		1-1	1-2	1-3	1-4	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	3-1	3-2	3-3
석회 포화도	0.956	0.504	0.473	0.446	0.421	0.518	0.538	0.501	0.491	0.479	0.467	0.455	0.493	0.531



<그림 3.82> 압축강도 발현비에 따른 석회 포화도 측정결과

④ CaO/SiO_2

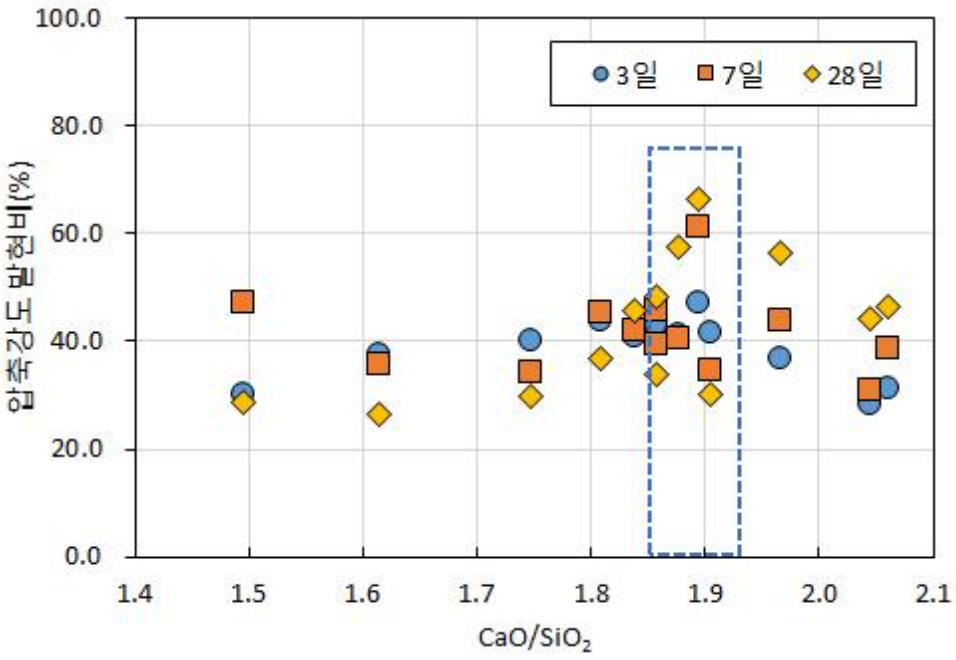
산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 CaO/SiO_2 측정 결과를 <표 3.72>에 나타내었으며 CaO/SiO_2와 압축강도 발현비 관계를 <그림 3.83>에 나타내었다. 활성 슬래그 바인더 1Type 으로 구성된 활성 슬래그 바인더의 CaO/SiO_2 측정결과 SB1-1에서 1.895, SB1-2에서 1.747, SB1-3에서 1.615, SB1-4에서 1.496으로 나타났다.

2Type의 경우 SB2-1에서 1.966, SB2-2에서 2.061, SB2-3에서 2.045, SB2-4에서 1.876, SB2-5에서 1.857, SB2-6에서 1.838으로 나타났다.

3Type의 경우 SB3-1에서 1.808, SB3-2에서 1.857, SB3-3에서 1.905 인 것으로 나타났다. CaO/SiO_2와 압축강도 발현비는 <그림 3.83>에 나타낸 바와 같이 적정 CaO/SiO_2 구간의 경우 재령 3일, 재령 7일, 재령 28에서 1.26~1.28 범위 내에 존재하고 있음을 확인 할 수 있었다.

<표 3.72> CaO/SiO_2 측정결과

구분	OPC	SB 1Type				SB 2Type						SB 3Type		
		1-1	1-2	1-3	1-4	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	3-1	3-2	3-3
CaO/SiO_2	3.100	1.895	1.747	1.615	1.496	1.966	2.061	2.045	1.876	1.857	1.838	1.808	1.857	1.905



<그림 3.83> 압축강도 발현비에 따른 CaO/SiO_2 측정결과

⑤ $CaO+Al_2O_3+SO_3/SiO_2$

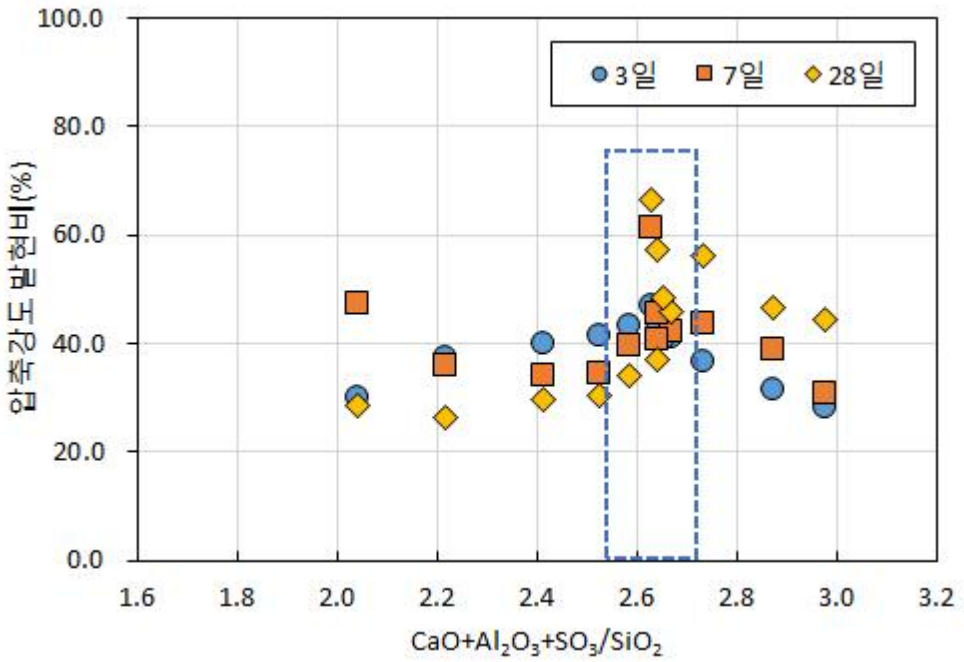
산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 $CaO+Al_2O_3+SO_3/SiO_2$ 측정 결과를 <표 3.73>에 나타내었으며 $CaO+Al_2O_3+SO_3/SiO_2$와 압축강도 발현비 관계를 <그림 3.84>에 나타내었다. 활성 슬래그 바인더 1Type 으로 구성된 활성 슬래그 바인더의 $CaO+Al_2O_3+SO_3/SiO_2$ 측정결과 SB1-1에서 2.628, SB1-2에서 2.411, SB1-3에서 2.217, SB1-4에서 2.043으로 나타났다.

2Type의 경우 SB2-1에서 2.733, SB2-2에서 2.872, SB2-3에서 2.976, SB2-4에서 2.641, AAS2-5에서 2.654, SB2-6에서 2.668으로 나타났다.

3Type의 경우 SB3-1에서 2.643, SB3-2에서 2.585, SB3-3에서 2.526 인 것으로 나타났다. $CaO+Al_2O_3+SO_3/SiO_2$ 와 압축강도 발현비는 <그림 3.84>에 나타낸 바와 같이 적정 $CaO+Al_2O_3+SO_3/SiO_2$ 구간의 경우 재령 3일, 재령 7일, 재령 28에서 2.61~2.62 범위내에 존재하고 있음을 확인 할 수 있었다.

<표 3.73> $CaO+Al_2O_3+SO_3/SiO_2$ 측정결과

구분	OPC	SB 1Type				SB 2Type						SB 3Type		
		1-1	1-2	1-3	1-4	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	3-1	3-2	3-3
$CaO+Al_2O_3+SO_3/SiO_2$	3.437	2.628	2.411	2.217	2.043	2.733	2.872	2.976	2.641	2.654	2.668	2.643	2.585	2.526



<그림 3.84> 압축강도 발현비에 따른 $CaO+Al_2O_3+SO_3/SiO_2$ 측정결과

⑥ 활성 슬래그 바인더 최적 배합 선정

산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 압축강도와 품질안정성 확보를 위하여 연구결과 도출된 수경율(H・M), 석회포화도(L.S.D) CaO/SiO_2 및 $CaO+Al_2O_3+SO_3/SiO_2$등의 비율 및 계수를 이용하여 최적의 배합을 다음 <표 3.74>와 같이 선정하였다. 그 결과 보통 포틀랜트 시멘트와 비교한 28일 압축강도의 활성도 지수는 81.5%로 나타났다.

<표 3.74> 활성 슬래그 바인더의 최적배합 선정

구분	결합재 (%)							압축강도(MPa) (활성도지수, %)		
	보통 포틀랜트 시멘트	고로 슬래그	산업부산물			천연 무수 석고	소석회	3일	7일	28일
			A	B	C					
C	100	-	-	-	-	-	-	18.0	22.8	25.7
SB	-	75	13	7	-	1	4	11.4 (63.5)	17.8 (78.2)	20.9 (81.5)

(다) 소결

본 절에서는 산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 최적 제조 배합기술을 설정하고자 압축강도와 품질안정성 확보를 위한 영향인자 해석을 실시하였다. 그 결과 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 압축강도 측정결과 보통 포틀랜트 시멘트의 압축강도와 비교하여 활성 슬래그 바인더 모르타르 1Type에서 압축강도 발현비율이 66.4%로 가장 우수하게 나타났으며, 2Type에서 57.4% , 3Type에서 42.5%으로 나타났다.
- 산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 화학적 성분 분석결과 SiO_2는 평균 14.0%, Al_2O_3는 평균 7.6%, CaO는 평균 48.1%, SO_3는 평균 17.1%로 나타났으며 이들의 양비가 소량 변화함에 따라 압축강도에 큰 영향을 주는 것을 확인 할 수 있었다.
- 산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 주요성분인 CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, SO_3의 상호관계를 파악하여 수경율(H・M) 석회포화도(L.S.D) CaO/SiO_2 및 $CaO+Al_2O_3+SO_3/SiO_2$등의 비율 및 계수를 이용하여 최적의 압축강도를 발현하는 구간을 검토한 결과 이들 모두 일정범위 내에 존재하고 있음을 확인 할 수 있었다. 산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 조합관리에 이용할 경우 원료배합물의 비율을 일정범위내로 조정한다면 큰 품질 편차를 보이지 않아 품질 안정성을 확보 할 수 있을 것으로 판단된다.
- 산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 압축강도와 품질안정성 확보를 위하여 연구결과 도출된 최적의 배합을 선정하였고 그 결과 보통 포틀랜트 시멘트와 비교한 28일 압축강도의 활성도 지수는 81.5%로 나타났다

(4) 액상형 레드머드 촉진제 및 활성 슬래그 바인더를 활용한 고감성 칼라시멘트의 특성

(가) 실험계획 및 방법

① 실험계획

액상형 레드머드 촉진제 및 활성 슬래그 결합재를 활용한 고감성 칼라시멘트의 특성을 검토하기 위한 실험계획을 <표 3.75>에 나타내었다. 결합재는 보통 포틀랜드 시멘트(C)와 활성 슬래그 바인더(SB)를 사용하였으며 단위 시멘트량은 400kg/m^3, W/C비는 70%로 설정하였다. 액상형 레드머드 촉진제는 시멘트 중량에 대하여 12.5%, 25%, 37.5%, 50%로 외할 첨가하였으며 액상형 레드머드 촉진제의 함수율을 고려하여 배합별로 수량을 제외하고 W/C비를 계산하여 배합하였다. 액상형 레드머드 촉진제의 및 활성 슬래그 바인더를 활용한 고감성 칼라시멘트의 특성을 검토하고자 플로우, 압축강도, 색차분석, 환경성평가를 실시하였다.

<표 3.75> 실험계획

구분		결합재량 (%)	W/C (%)	액상형 레드머드 촉진제 (%)	단위수량(kg/m^3)				측정항목
					보통 포틀랜트 시멘트	잔골재	혼합수	액상형 레드머드 촉진제	
보통 포틀랜트 시멘트 (C)	C0	400	70	0	400	1697	280	-	• 플로우 • 압축강도 (7일, 28일) • 색차분석 • 중금속용출량
	C50	400	70	12.5	400	1697	256	50	
	C100	400	70	25	400	1697	232	100	
	C150	400	70	37.5	400	1697	207	150	
	C200	400	70	50	400	1697	183	200	
활성 슬래그 바인더 (SB)	SB0	400	70	0	400	1683	280	-	
	SB50	400	70	12.5	400	1683	256	50	
	SB100	400	70	25	400	1683	232	100	
	SB150	400	70	37.5	400	1683	207	150	
	SB200	400	70	50	400	1683	183	200	

② 사용재료

㉮ 액상형 레드머드 촉진제

레드머드(Red mud) 슬러지는 보오크사이트 원광석으로부터 수산화알루미늄($Al(OH)_3$) 및 산화알루미늄(Al_2O_3)을 제조하는 공정에서 발생되는 산업부산물이다. 국내의 경우 레드머드는 Bayer Process를 통하여 Al_2O_3 1톤을 생산하면 함수율 40~60%의 슬러지 상태로 대략 2톤이 발생되며, 발생량은 국내 발생량의 대부분을 차지하고 있는 K사에서만 연간 약 30만톤이 슬러지 상태로 발생되고 있다. 레드머드를 활용하기 위한 기존방법으로 건조분쇄 공정을 거친 건조 레드머드의 특성과 배출형태인 레드머드 슬러지의 물리화학적 특성은 SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3가 약 80%를 차지하고 있으며, 레드머드가 황토색으로 나타나게 하는 Fe_2O_3는 22.8%를 차지하고 있다.

레드머드 슬러지의 사진을 <그림 3.85> (a)에 나타내었다. 물리적 특성은 함수율 50.2%의 슬러지 상태로 진밀도는 2.0g/cm^3, 평균입경 4.31㎛이다. 현재 가장 많은 재활용 형태인 건조 레드머드는 <그림 3.85> (b)와 같으며 물리적 특성은 함수율 10.2%의 건조분말로서 진밀도는 3.50g/cm^{3}로 시멘트와 비교하여 상대적으로 크며 비표면적은 23.53m^2/g, 평균입경은 2.75㎛이다.

레드머드 슬러지를 분산시켜 액상형 레드머드 촉진제로 제조하기 위하여 국내 K사의 호모믹서를 사용하여 혼합 분산하였다. 혼합수와 레드머드 슬러지를 3분간 분산시킨 후 분산제, 증점제 및 소포제를 차례로 첨가하여 2분간 추가 분산시켰다. 본 논문에서 레드머드 슬러지를 분산시키기 위한 장비로서 호모믹서는 회전하는 rotor와 고정되어있는 stator 사이의 세밀한 간극으로 강력한 전단에너지를 만들어내는 분산장비이다. 호모믹서는 회전자의 고속 회전으로 인해 약 20～30m/s의 높은 전단력이 발생되고 주위의 진공에 의해 레드머드 슬러지가 아래에서 회전자 사이로 빨려 들어가며 입자가 분산되어 입경이 작아지게 된다.

본 절에서 사용한 액상형 레드머드 촉진제를 <그림 3.85> (c)에 나타내었다. 제조된 액상형 레드머드 촉진제의 고형분은 51.6 %, 단위용적질량은 1,570kg/cm^{3}이며, 평균입경은 3.15㎛로 <그림 3.85>와 같이 레드머드 슬러지보다 작고 건조 레드머드 2.75㎛와 비교하여 비교적 구형으로 입자는 크지만 비교적 고른 입도 분포를 나타내고 있다. 점도는 7,850cP를 나타내며 레드머드 슬러지 점도인 약 20000cP보다 낮은 점도를 나타내고 있다.



(a) 레드머드 슬러지 (b) 건조 레드머드 (c) 액상형 레드머드 촉진제

<그림 3.85> 레드머드 사진

㉯ 결합재

액상형 레드머드 촉진제 및 활성 슬래그 바인더를 활용한 고감성 칼라시멘트 제조를 위한 결합재의 물리·화학적 특성을 <표 3.76>에 나타내었다. 결합재는 선행연구에서 도출된 산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더를 사용하였으며 비표면적 4,058cm^2/g, 밀도 2.83g/cm^3를 나타내고 있다. 또한 비교군으로 국내 S사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

<표 3.76> 결합재의 물리화학적 특성

구분	비표면적(cm^2/g)	밀도 (g/cm^3)	Ig. loss	화학적 성분 (%)					
				SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3
활성 슬래그 바인더	4,058	2.83	2.23	22.1	8.9	1.4	54.9	3.3	5.2
보통 포틀랜트 시멘트	3,144	3.15	1.32	21.7	5.7	3.2	63.1	2.8	2.2

㉰ 잔골재

액상형 레드머드 촉진제 및 활성 슬래그 바인더를 활용한 고감성 칼라시멘트 제조를 위해 사용한 골재는 KS L ISO 679의 주문진 표준사를 사용하였다.

③ 실험방법

㉮ 플로우

액상형 레드머드 촉진제 및 활성 슬래그 바인더를 활용한 고감성 칼라시멘트 모르타르의 플로우 측정은 KS L 5111 시멘트 시험용 플로 테이블 표준의 장비를 사용하여 KS L 5105 수경성 시멘트 모르타르의 압축 강도 시험방법 9의 '플로의 결정'에 의해 수행하였다. 플로우 측정에 사용한 플로우 테이블과 측정사진을 <그림 3.86> 및 <그림 3.87>에 나타내었다.



<그림 3.86> 플로우 테이블 사진



<그림 3.87> 플로우 측정사진

㉯ 압축강도

액상형 레드머드 촉진제 및 활성 슬래그 바인더를 활용한 고감성 칼라시멘트 모르타르의 압축강도를 측정하기 위하여 KS L ISO 679에 의거하여 공시체를 각 재령별로 3개씩 제작하여 양생온도 20±2℃ 및 상대습도 70%의 항온항습기에서 양생하였다. 재령 7일, 28일이 경과한 후 KS F 5105 수경성 시멘트 모르타르의 압축 강도 시험 방법에 의해 압축강도를 측정하였다. 압축강도 측정에 사용한 UTM과 측정사진을 <그림 3.88> 및 <그림 3.89>에 나타내었다.



<그림 3.88> 압축강도 측정장비 사진



<그림 3.89> 압축강도 측정사진

㉰ 색차측정 분석

액상형 레드머드 촉진제 및 활성 슬래그 바인더를 활용한 고감성 칼라시멘트 모르타르의 색차분석을 위한 측색방법은 일반적인 측색방법인 시감측색법과 기기에 의한 물리적인 측색의 두가지 방법으로 진행하였다.

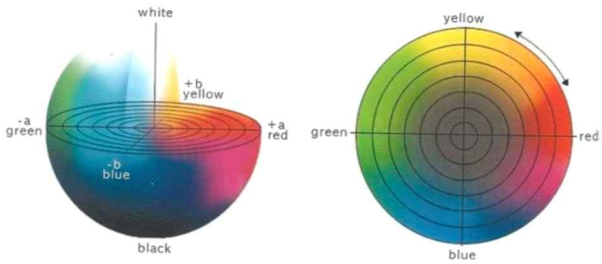
일출 3시간 후부터 일몰 3시간 전 사이의 운량 30%정도의 담천공 상태에서, 먼셀표색계에 의한 시감측색법으로 측색하는 시감측색법과 접물측정 방식의 색채휘도계(CD-200, Minolta)를 이용하여, CIE D65광원을 기준광원으로 하여 측색하는 물리측색법을 사용하였다.

측색대상에 대하여 측색한 표색계는 <그림 3.90>에 나타낸 CIE 1976 L*a*b*를 측정하였으며, 시감측색에 의한 측색은 <그림 3.91>과 같이 Munsell 색채계를 기준으로 하였다.

분석방법은 국제조명위원회(Commission Internationale de l' Eclairage, 약칭 CIE)가 1976년에 권장한 지각적으로 거의 균등한 보도를 가진 색공간인 CIE L*a*b* 표색계를 기준으로 계산하였으며 색차계산은 KS M ISO 7724도료와 바니시 측색법에서 규정하고 있는 고감성 칼라 시멘트의 색채측정방법 및 색차계산방법에 근거하여, L*a*b*색차 계산식은 KS A 0063: 색차표시방법을 토대로 계산하였다.



<그림 3.90> 색채 측정 사진



<그림 3.91> CIE Lab color system

㉱ 환경성 평가

액상형 레드머드 촉진제의 첨가율에 따른 알칼리활성화 슬래그-레드머드 고감성 칼라시멘트의 환경성 평가를 위하여 토양오염공정시험기준 (국립환경과학원고시 제 2017-22호, 2017.08.11.)에 의하여 환경성 평가를 시행하였다.

(나) 실험결과 및 분석

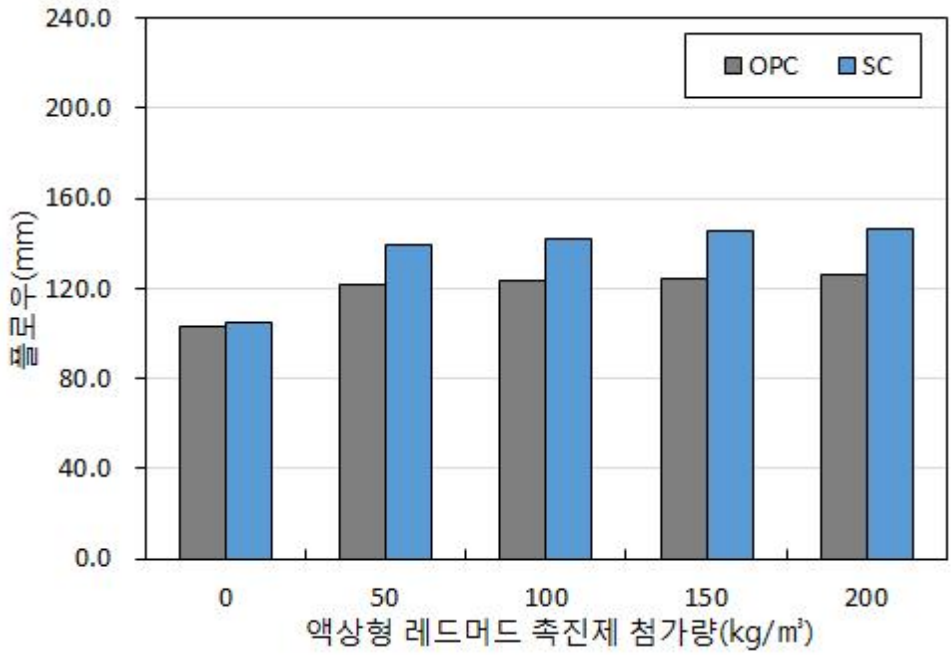
① 플로우

액상형 레드머드 촉진제 및 활성 슬래그 바인더를 활용한 고감성 칼라시멘트 모르타르의 플로우 측정결과를 <표 3.77> 및 <그림 3.92>에 나타내었으며, 측정사진을 <표 3.78>에 나타내었다. 결합재를 보통 포틀랜트 시멘트로 사용한 경우 액상형 레드머드 촉진제를 첨가하지 않은 C0에서 102mm, 액상형 레드머드 촉진제를 결합재에 대하여 12.5% 첨가한 C50에서 121mm, 25% 첨가한 C100에서 123mm, 37.5%첨가한 C150에서 124mm, 50%첨가한 C200에서 126mm를 나타내었다. 액상형 레드머드 촉진제를 보통 포틀랜드 시멘트 모르타르에 첨가하게 되면 플로우는 증가하는 것으로 나타났으며 액상형 레드머드 촉진제를 첨가하지 않은 시험체와 비교하여 첨가율 50%의 경우에서 급격히 플로우가 증가하였다. 액상형 레드머드 촉진제의 첨가율에 따른 변화는 121~126mm로 나타나 첨가율에 따른 영향 정도는 미미한 것으로 나타났다.

결합재를 활성 슬래그 바인더로 사용한 시멘트 모르타르의 플로우 측정결과 액상형 레드머드 촉진제를 첨가하지 않은 SB0에서 104mm, 액상형 레드머드 촉진제를 결합재에 대하여 12.5% 첨가한 SB50에서 138mm, 25% 첨가한 SB100에서 142mm, 37.5%첨가한 SB150에서 145mm, 50%첨가한 SB200에서 146mm를 나타내었다. 액상형 레드머드 촉진제를 활성 슬래그 바인더에 첨가하게 되면 플로우는 증가하는 것으로 나타났으며 액상형 레드머드 촉진제를 첨가하지 않은 시험체와 비교하여 첨가율 50%의 경우에서 급격히 플로우가 증가하였다. 활성 바인더를 결합재로 사용한 경우 액상형 레드머드 촉진제의 첨가율에 따른 변화는 138~146mm로 나타나 첨가율에 따른 영향 정도는 보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 경우보다 큰 것으로 증가났다. 결합재를 활성 슬래그 바인더를 사용한 경우는 액상형 레드머드 촉진제를 첨가할수록 보통 포틀랜트 시멘트를 사용한 경우보다 더 좋은 유동성을 나타냈다. 이는 일반적으로 보통 포틀랜트 시멘트보다 수화반응이 지연되는 슬래그 바인더가 액상형 된 레드머드와 함께 볼베어링 역할을 하여 유동성을 증진시킨 것으로 판단된다.

<표 3.77> 플로우 측정결과

구분		플로우(mm)
보통 포틀랜트 시멘트 (C)	C0	102.9
	C50	121.4
	C100	123.5
	C150	124.4
	C200	126.2
활성 슬래그 바인더(SB)	SB0	104.7
	SB50	138.9
	SB100	142.3
	SB150	145.3
	SB200	146.1



<그림 3.92> 플로우 측정결과

<표 3.78> 플로우 측정결과

구분	액상형 레드머드 촉진제 첨가량(kg/m³)				
	0	50	100	150	200
C					
SB					

② 압축강도

액상형 레드머드 촉진제 및 활성 슬래그 바인더를 활용한 고감성 칼라시멘트 모르타르의 압축강도 및 압축강도 발현비 측정결과를 <표 3.79>에 나타내었다.

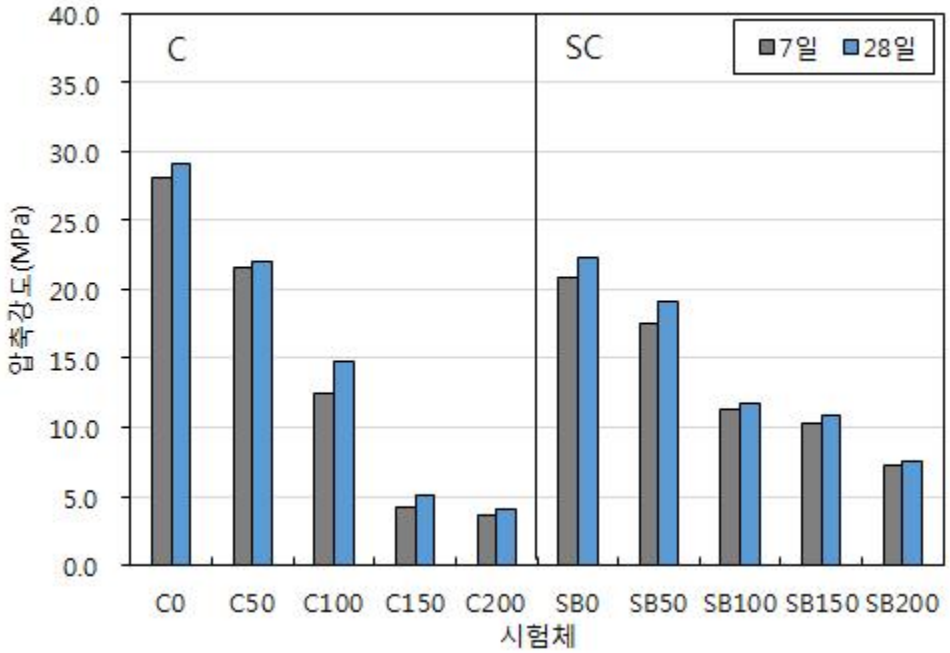
결합재를 보통 포틀랜트 시멘트로 사용한 시멘트 모르타르의 28일 압축강도는 <그림 3.93>에 나타낸 바와같이 C0에서 29.1MPa, C50에서 22.0MPa, C100에서 14.8MPa, C150에서 5.10MPa, C200에서 4.10MPa를 나타내며 액상형 레드머드 촉진제를 첨가할수록 압축강도는 낮아지는 것으로 나타났다.

결합재를 활성 슬래그 바인더로 사용한 시멘트 모르타르의 28일 압축강도는 <그림 3.93>에 나타낸 바와같이 SB0에서 22.3MPa, SB50에서 19.1MPa, SB100에서 11.7MPa, SB150에서 10.9MPa, SB200에서 7.60MPa를 나타내며 보통 포틀랜트 시멘트와 마찬가지로 액상형 레드머드 촉진제를 첨가할수록 압축강도는 낮아지는 것으로 나타났다. 본 절에서는 배합에서 액상형 레드머드의 함수율을 고려하여 혼합수량을 제외하였기 때문에 물비의 영향보다는 기존 분말 레드머드를 사용한 시멘트 모르타르의 연구결과와 마찬가지로 레드머드의 첨가로 직경 10~1,000nm의 모세관 공극이 증가와 하는 것과 더불어 레드머드의 첨가율이 증가할수록 실질적인 결합재의 손실량이 증가하기 때문에 수화반응에 의한 수화생성물의 감소로 강도발현 정도가 미미한 것으로 판단된다.

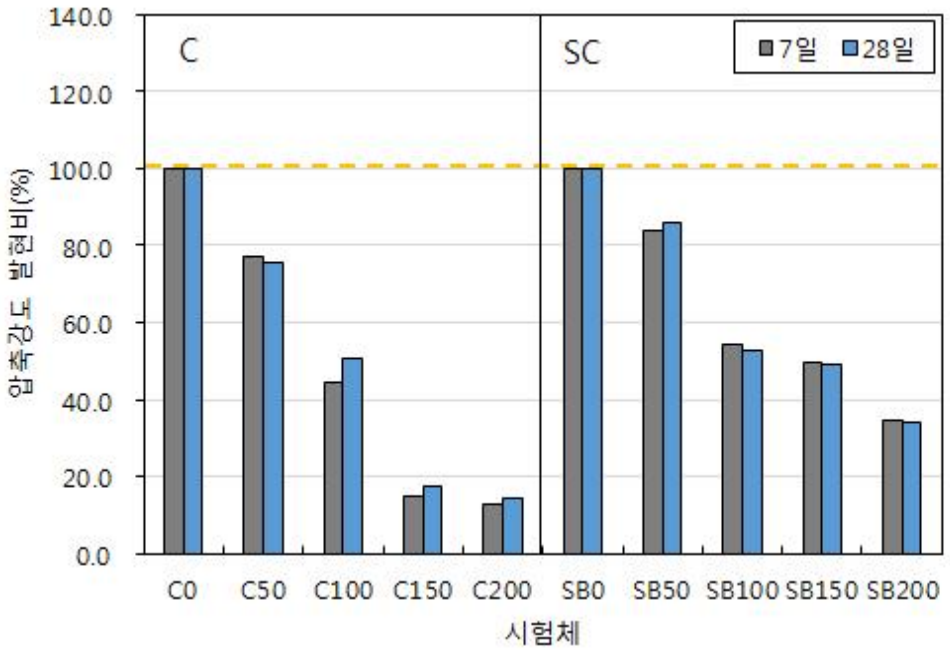
액상형 레드머드 촉진제를 첨가하지 않은 플레인 시료인 C0, SB0와 액상형 레드머드 촉진제를 첨가한 시멘트 모르타르의 상대 압축강도 비를 <그림 3.94>에 나타내었다. 결합재를 보통 포틀랜트 시멘트로 사용한 시멘트 모르타르의 28일 상대 압축강도 비는 C0 100%에 대하여 C50에서 75.6%, C100에서 50.8%, C150에서 17.7%, C200에서 최소 14.2%로 급격한 감소를 나타내었다. 결합재를 활성 슬래그 바인더로 사용한 시멘트 모르타르의 28일 상대 압축강도 비는 SB0 100%에 대하여 SB50에서 85.7%, SB100에서 52.7%, SB150에서 49.0%, SB200에서 34.2%를 나타내었다. 액상형 레드머드 촉진제를 첨가량에 따른 시멘트 모르타르의 압축강도 영향정도는 활성 슬래그 바인더보다 보통 포틀랜트 시멘트가 큰 것으로 나타났으며 첨가량에 따른 강도 감소폭이 큰 것으로 나타났다.

<표 3.79> 압축강도 및 압축강도 발현비 측정결과

구분		압축강도 (MPa)		압축강도 비(%)	
		7일	28일	7일	28일
보통 포틀랜트 시멘트 (C)	C0	28.1	29.1	100.0	100.0
	C50	21.6	22.0	77.0	75.6
	C100	12.5	14.8	44.6	50.8
	C150	4.20	5.10	14.8	17.7
	C200	3.60	4.10	12.8	14.2
활성 슬래그 바인더(SB)	SB0	20.8	22.3	100.0	100.0
	SB50	17.5	19.1	84.0	85.7
	SB100	11.3	11.7	54.3	52.7
	SB150	10.3	10.9	49.6	49.0
	SB200	7.20	7.60	34.8	34.2



<그림 3.93> 압축강도 측정결과



<그림 3.94> 압축강도 발현비

③ 색차분석

색의 3속성에 의한 표시방법에 의하면, 색에는 3가지의 성질과 차원이 있고 이 3가지의 차원은 색상(Hue), 명도(Value, lightness), 채도(Chroma)로 분석된다. 또한 이것을 색감각의 3속성이라 부르며 이와 같은 색의 3속성에 의한 표시기호에 따라 유채색은 먼셀 표색계(H V/C)로 '5R 4/10' 와 같은 예로 나타낼 수 있다.

L*a*b*표색계는 1976년에 국제조명위원회에서 규격화한 표색계 하나로 물체의 색을 표현하는데 가장 일반적으로 사용되고 있다. L*a*b*표색계는 L*는 명도를 색상과 채도를 표시하는 색도를 a*, b*로 표시하고 있으며 a*는 빨강색 방향 -a*은 녹색 방향으로, b* 는 노랑색 방향, -b*는 파란색 방향을 표시하고 있다. 각 방향으로 수치가 커짐에 따라 색도가 높게 되고 중앙으로 감에 따라 무채색으로 된다. 그리고 L* 값은 명도를 나타내는 것으로 측정범위는 0에서 100까지이며, 0은 검정색이며, 100은 흰색을 나타낸다. 또한 a*와 b*값은 색상과 채도가 종합된 것으로 측정범위는 각각 +60에서 -60까지 120등급으로 분류된다.

액상형 레드머드 촉진제 및 활성 슬래그 바인더를 활용한 고감성 칼라시멘트 모르타르 시험체의 사진을 <표 3.80>에 나타내었으며 색차분석 결과를 <표 3.81>에 나타내었다. 색차값에 해당하는 ΔE^*ab값은 결합재를 보통 포틀랜트 시멘트로 사용한 시멘트 모르타르의 경우 C0에서 25.11, C50에서 7.14, C100에서 3.28, C150에서 9.07, C200에서 13.67을 나타내며 액상형 레드머드 촉진제를 첨가할수록 색차값은 비교적 증가하는 것으로 나타났다. 결합재를 활성 슬래그 바인더로 사용한 시멘트 모르타르의 경우 ΔE^*ab값은 SB0에서 28.15, SB50에서 5.32, SB100에서 7.09, SB150에서 11.85, SB200에서 9.32를 나타내며 보통 포틀랜트 시멘트와 마찬가지로 액상형 레드머드 촉진제를 첨가할수록 색차값은 증가하는 것으로 나타났다.

액상형 레드머드 촉진제의 첨가율에 따른 색강도(color strength)를 고려한다면 본 연구에서의 효율적인 첨가율은 결합재 보통 포틀랜트 시멘트의 경우 증가폭이 큰 C150, 활성 슬래그 바인더의 경우 가장 높은 값을 나타내는 SB150이 적정할 것으로 판단된다.

결합재를 보통 포틀랜트 시멘트로 사용한 시멘트 모르타르의 명도에 해당하는 L* 값은 52.85~54.87로 나타났으며, 결합재를 활성 슬래그 바인더로 사용한 시멘트 모르타르의 L*값은 52.66~62.98을 나타내 활성 슬래그 바인더를 결합재로 사용하는 것이 더 높은 명도 값을 타내는 것으로 측정되었다.

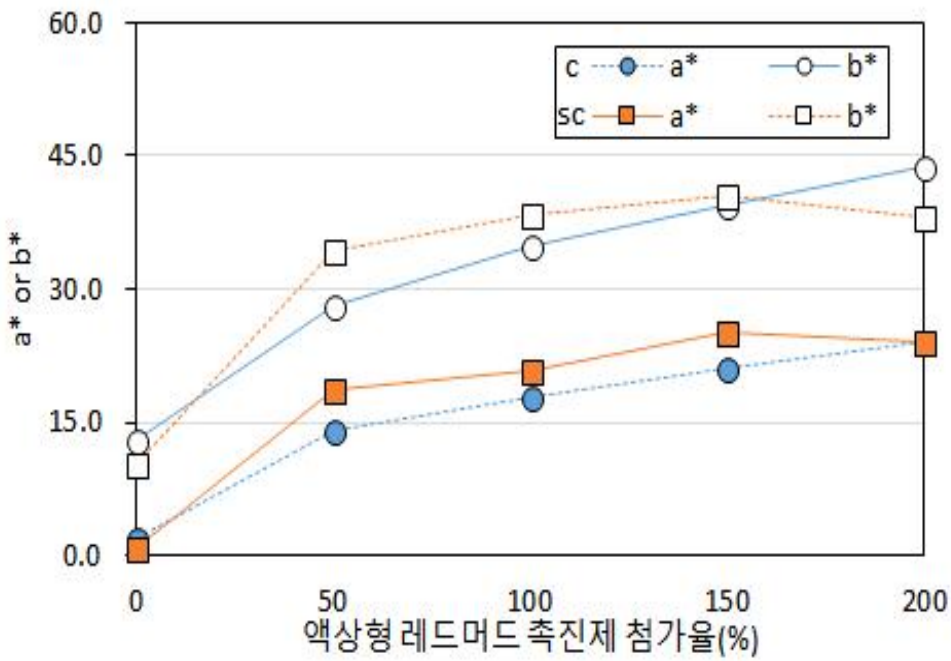
<표 3.80> 액상형 레드머드 첨가율에 따른 색차분석결과

구분		색차값 (ΔE^*ab)	CIE L*a*b*		
			L*	a*	b*
보통 포틀랜트 시멘트(C)	C0	25.11	53.92	1.82	12.93
	C50	7.14	52.82	13.98	28.06
	C100	3.28	54.87	17.78	34.74
	C150	9.07	53.09	21.1	39.56
	C200	13.67	53.87	24.02	43.87
활성 슬래그 바인더(SB)	SB0	28.15	62.98	0.82	10.31
	SB50	5.32	52.66	18.76	34.24
	SB100	7.09	58.68	20.95	38.37
	SB150	11.85	60.4	25.25	40.44
	SB200	9.32	55.22	24.06	38.10

액상형 레드머드 촉진제 및 활성 슬래그 바인더를 활용한 고감성 칼라시멘트 모르타르의 색도를 a*값 및 b*값을 <그림 3.95>에 나타내었다. 결합재 종류와 관계없이 액상형 레드머드 촉진제를 첨가할수록 빨간색 방향에 해당하는 a*값은 증가하는 것으로 나타났다. a*와 마찬가지로 노란색 방향에 해당하는 b*값은 액상형 레드머드 촉진제를 첨가할수록 증가하는 것으로 나타났다. 기존 황토색을 나타내는 무기안료 제조시 산화철 안료를 비율에 따라 Red와 Yellow를 혼합하여 제조하는 것과 같이 사용하는 것과 같이 액상형 레드머드 촉진제의 첨가량에 따른 색도 값으로 기존 산화철 안료의 비율에 따른 색채 값을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

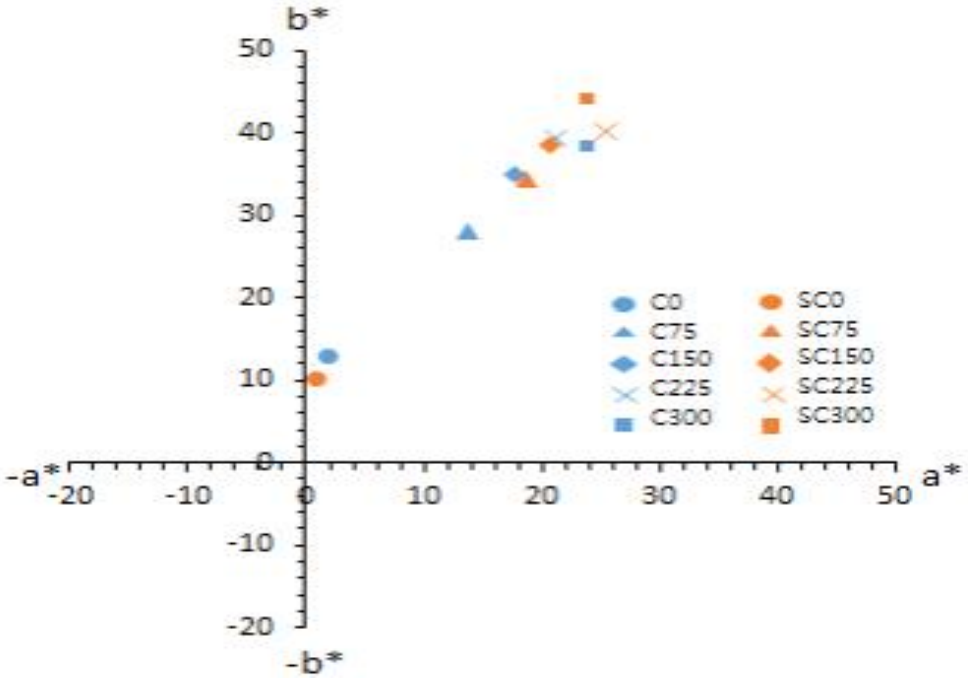
<표 3.81> 액상형 레드머드 첨가량에 따른 색차분석

구분	액상형 레드머드 촉진제 첨가율(%)				
	0	50	100	150	200
보통 포틀랜트 시멘트(C)					
활성 슬래그 바인더(SB)					



<그림 3.95> 액상형 레드머드 첨가량에 따른 a*와 b* 측정결과

액상형 레드머드 촉진제의 첨가량에 따른 알칼리활성화 슬래그-레드머드 고감성 칼라시멘트 모르타르의 a*와 b*의 관계를 <그림 3.96>에 나타내었다. 액상형 레드머드 촉진제를 첨가한 시멘트 모르타르는 모든 시험체에서 색채는 a*과 b*구역의 YR계열 범위에 분포하는 것으로 나타나며 액상형 레드머드 촉진제의 첨가량이 증가할수록 a* 및 b*값이 증가하며 색채는 뚜렷해지는 경향을 나타내었다.



<그림 3.96> a* 와 b*의 상관관계 측정결과

④ 환경성평가

토양환경보전법은 토양오염우려기준과 토양오염대책기준을 1지역, 2지역, 3지역으로서 구분하며 본 연구의 적용 지역은 3지역으로 3지역은「지적법」에 따른 지목이 공장용지 · 주차장 · 주유소용지 · 도로 · 철도용지 · 제방 · 잡종지인 지역과 국방 · 군사시설 부지를 일컫는다.

액상형 레드머드 촉진제 및 활성 슬래그 바인더를 활용한 고감성 칼라시멘트 모르타르의 토양환경보전법에 따른 토양오염공정시험기준 및 토양오염공정시험결과를 <표 3.82>에 나타내었다. 고감성 칼라시멘트 모르타르의 토양오염 공정 시험결과 21개 기준 항목 중 5가지 항목만 미량 검출되고 대부분의 시험항목은 불검출로 나타났다. 시험결과는 토양환경보전법 시행규칙과 비교할시 아주 미량의 성분만 검출되어 토양오염우려기준을 만족하며 적합 결과를 얻었다.

<표 3.82> 토양오염 공정시험결과

기준항목			토양환경보전법 시행규칙	토양오염공정 시험결과
항목명	기호	단위		
카드뮴	Cd	mg/kg	180	불검출
구리	Cu		6,000	불검출
비소	As		600	불검출
수은	Hg		60	불검출
납	Pb		2,100	24.3
6가크롬	Cr^{6+}		120	1.3
아연	Zn		5,000	19.8
니켈	Ni		1,500	20.6
불소	F^-		2,000	388
유기인	-		-	불검출
폴리클로리네니티드리비페닐	PCBs		36	불검출
시안	CN^-		300	불검출
페놀	-		50	불검출
벤젠	BTEX		9	불검출
톨루엠			180	불검출
에틸벤젠			1,020	불검출
크실렌=자인렌			135	불검출
석유총탄화수소	TPH		6,000	불검출
트리클로로에틸렌	TCE		120	불검출
테트라클로로에틸렌	PCE		75	불검출
벤조(a)피렌	-		21	불검출
검토결과				적합

(다) 소결

본 절에서는 선행연구에서 도출된 분말형 활성 슬래그 바인더와 액상형 레드머드 촉진제를 활용하여 제조된 알칼리활성화 슬래그 레드머드 고감성 칼라시멘트의 특성을 검토하였다. 그 결과 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 액상형 레드머드 촉진제를 보통 포틀랜드 시멘트 모르타르에 첨가하게 되면 플로우는 증가하는 것으로 나타났으며 액상형 레드머드 촉진제를 첨가하지 않은 시험체와 비교하여 첨가율 50%의 경우에서 급격히 플로우가 증가하였다. 액상형 레드머드 촉진제를 활성 슬래그 바인더에 첨가하게 되면 플로우는 증가하는 것으로 나타났으며 액상형 레드머드 촉진제를 첨가하지 않은 시험체와 비교하여 첨가율 50%의 경우에서 급격히 플로우가 증가하였다. 결합재를 활성 슬래그 바인더를 사용한 경우는 액상형 레드머드 촉진제를 첨가할수록 보통 포틀랜트 시멘트를 사용한 경우보다 더 좋은 유동성을 나타냈다.
- 액상형 레드머드 촉진제 및 활성 슬래그 바인더를 활용한 고감성 칼라 시멘트 모르타르의 28일 압축강도 측정결과 결합재를 보통 포틀랜트 시멘트를 사용하였을 경우 액상형 레드머드 촉진제 첨가량이 증가 할수록 압축강도는 낮아지는 경향을 나타내었다. 결합재를 활성 슬래그 바인더로 사용한 시멘트 모르타르의 경우 보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르와 유사한 경향을 나타내었다.
- 액상형 레드머드 촉진제 및 활성 슬래그 바인더를 활용한 고감성 칼라 시멘트 모르타르의 색차 측정결과 결합재를 보통 포틀랜트 시멘트를 사용하였을 경우 액상형 레드머드 촉진제 첨가율이 증가 할수록 색차값은 비교적 증가하는 것으로 나타났다. 결합재를 활성 슬래그 바인더로 사용한 시멘트 모르타르의 경우 보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르와 유사한 경향을 나타내었다.
- 액상형 레드머드 촉진제 및 활성 슬래그 바인더를 활용한 고감성 칼라시멘트 모르타르의 색도를 a*값 및 b*값 측정결과 결합재 종류와 관계없이 액상형 레드머드 촉진제를 첨가할수록 빨간색 방향에 해당하는 a*값은 증가하는 것으로 나타났다.
- 액상형 레드머드 촉진제 및 활성 슬래그 바인더를 활용한 고감성 칼라시멘트 모르타르의 토양환경보전법에 따른 토양오염공정시험기준 및 토양오염공정시험결과 고감성 칼라시멘트 모르타르의 토양오염 공정 시험결과 21개 기준 항목 중 5가지 항목만 미량으로 검출되었으며 대부분의 시험항목은 불검출로 나타났다. 시험결과는 토양환경보전법 시행규칙과 비교할시 아주 미량의 성분만 검출되어 토양오염우려기준을 만족하며 적합 결과를 얻었다.

(5) 결언

본 절에서는 앞서 고속전단회전방식에 의해 제조된 액상형 레드머드 촉진제와 분말형 활성 슬래그 바인더를 활용하여 알칼리활성화 슬래그-레드머드 칼라시멘트를 제조하고자 하였다. 이를 위해 액상형 레드머드 촉진제 및 활성 슬래그 바인더를 활용한 고감성 칼라시멘트의 모르타르의 강도 및 색차를 검토하였으며 활성 슬래그 바인더와 액상형 레드머드 촉진제의 반응성을 검토하였다. 그 결과 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 산업부산물별 XRF 검토 결과 대부분의 산업부산물에서 CaO성분이 40% 이상으로 나타났으며 천연소재인 생석회(CaO)를 제외하고 RGF가 75.9%로 가장 많이 나타났다. 산업부산물별 XRD 검토 결과 각 산업부산물별로 CaO 성분 피크가 가장 높게 나타났다. 산업부산물 별 평균입경은 CaO 〉 CFA 〉 RGF 〉 PA 〉 BFS 순으로 나타났으며, 입형의 경우 PA와 CFA는 모나거나 세장한 입자가 비교적 다량으로 함유되어 있는 것으로 나타났다. 산업부산물 별 흡수특성 검토결과 BFA 및 CaO는 함수율 30~40%에서 육안상 액상한계에 도달하는 것으로 나타났으며 PA 및 CFA는 함수율 70%까지 육안상 액상한계에 도달하지 않아 원료의 흡수특성이 매우 우수한 것으로 나타났다.
2) 산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 압축강도 측정결과 보통 포틀랜트 시멘트의 압축강도와 비교하여 활성 슬래그 바인더 모르타르 1Type에서 압축강도 발현비율이 66.4%로 가장 우수하게 나타났다. 산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 화학적 성분 분석결과 SiO_2는 평균 14.0%, Al_2O_3는 평균 7.6%, CaO는 평균 48.1%, SO_3는 평균 17.1%로 나타났으며 이들의 양비가 소량 변화함에 따라 압축강도에 큰 영향을 주는 것을 확인 할 수 있었다. 산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더의 주요성분인 CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, SO_3의 상호관계를 파악하여 수경율(H・M) 석회포화도(L.S.D) CaO/SiO_2 및 $CaO+Al_2O_3+SO_3/SiO_2$등의 비율 및 계수를 이용하여 최적의 압축강도를 발현하는 구간을 검토한 결과 이들 모두 일정범위 내에 존재하고 있음을 확인 할 수 있었다.
3) 액상형 레드머드 촉진제 및 활성 슬래그 바인더를 활용한 고감성 칼라시멘트 모르타르의 플로우, 28일 압축강도, 색차 측정결과 결합재 종류과 관계없이 액상형 레드머드 촉진제 첨가량이 증가 할수록 플로우, 28일 압축강도, 색차는 증가 하는 것으로 나타났다. 토양환경보전법에 따른 토양오염공정시험기준 및 토양오염공정시험결과 고감성 칼라시멘트 모르타르의 토양오염 공정 시험결과 21개 기준 항목 중 5가지 항목만 미량으로 검출되었으며 대부분의 시험항목은 불검출로 나타났다. 시험결과는 토양환경보전법 시행규칙과 비교할 시 아주 미량의 성분만 검출되어 토양오염우려기준을 만족하며 적합 결과를 얻었다.

마. 알칼리활성화 슬래그-레드머드 고감성 칼라시멘트 활용기술

(1) 서언

산업부산물 레드머드는 자체적으로 pH 11이상의 매우 높은 알칼리성 무기질 폐기물로서, 원상태에서 주변 생태계에 악영향을 끼치게 되므로 적절한 처리가 필요하다. 그러나 레드머드에 10~15% 함유되어져 있는 Na_2O는 슬래그나 알루미노 규산염 광물이 해리되어 축중합을 통해 안정한 수화물을 생성하기 위한 자극제나 촉진제로서 액상 규산나트륨(Sodium Silicate) 대신 활용 가능하거나 지연제로서 인산나트륨(Sodium Phosphate) 대신 활용 가능하여 각종 건설자재로서의 재활용이 가능하다.

강알칼리성의 레드머드를 건설산업용 촉진제로서 활용하고자 하는 연구로서 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트가 국내외적으로 발표되고 있다. 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트는 알칼리활성화 시멘트 연구의 일환으로서 시멘트 조성에서 알칼리자극제, 고로슬래그와 레드머드로 구성되어져 있으며, 포틀랜드시멘트를 사용하지 않는 클링커 프리 시멘트(Clinker Free Cement)를 의미한다.

최근 지방 자치단체를 중심으로 문화탐방로, 자전거도로 및 주차장(광장)등을 건설하면서 친환경적이고 정서적인 안정감을 주는 흙포장재의 보급이 확대되고 있다. 국내 흙포장 시장규모는 2012년부터 2014년까지의 조달청 나라장터 계약금액을 근거로 평균하여 산출한 결과 평균 약 2,500억원으로 분석된다.

천연 흙포장의 경우 천연 황토 또는 마사토에 시멘트 또는 고화재와 같은 결합재를 혼합하여 다짐하는 방법으로 시공되어지고 있다. 그러나 흙의 재질 자체가 시멘트의 수화작용과 잘 맞지 않기 때문에 콘크리트와 비교하여 상당히 고가이지만 내구성이 현저히 저하되어 표면파괴, 포장면에서 마사토의 날림 등과 같은 현상으로 흙포장 자체에 대한 부정적인 이미지를 심어주고 있는 실정이다.

이와 같은 고가의 낮은 내구성을 지닌 천연 흙포장재를 대체할 수 있는 방법으로서 보오크사이트 원광석에서 생산되는 알루미나의 선광과정에서 발생되는 무기질 부산물인 레드머드를 활용하고자 하는 연구가 국내에서 이루어지고 있다. 레드머드는 화학조성에서 Fe_2O_3를 약 22%를 차지하고 있어 붉은 황토색을 띄고 있으며 이는 천연 황토와 같은 색감으로 천연 흙포장을 대체할 수 있는 흙포장재에 활용하기 적절할 것으로 판단된다.

따라서 본 절에서는 앞서 제조된 알칼리활성화 슬래그-레드머드 고감성 칼라시멘트를 흙포장재, 콘크리트 2차제품에 적용해 보고자 하였다. 고감성 칼라시멘트를 흙포장재에 적용하기 위하여 먼저 흙포장재 관련 규격을 분석하고 실험실 범위에서 흙포장재를 제조하여 각종 성능평가를 진행하였다. 또한 고감성 칼라시멘트를 콘크리트 2차제품에 적용하기 위하여 고감성 칼라시멘트를 사용한 콘크리트 2차제품의 특성을 실험실 범위에서 검토하고 각종 성능평가를 통해 알칼리활성화 슬래그-레드머드 고감성 칼라시멘트의 적용성을 검토하였다.

(2) 고감성 칼라시멘트를 활용한 흙포장 활용기술

(가) 국내 흙포장재 단체표준규격 조사 및 분석

본 절에서는 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 고감성 칼라시멘트를 흙포장재에 적용하기 위하여 요구 성능 및 목표 수준을 검토하였으며 흙포장재 단체표준규격(SPS-KSCICO-001-2006)의 사용재료 및 성증기준을 <표 3.83> 및 <표 3.84>에 나타내었다.

흙포장은 흙을 주재료로 한 포장공법으로서 콘크리트와 아스팔트의 대체 포장재로 그 효용가치가 높다. 최근 콘크리트의 사용과 더불어 시멘트, 모래 및 자갈의 사용이 급격히 증가하면서 자원이 고갈되고 있으며, 이에 대체할 수 있는 재료의 개발은 중요한 과제이다.

<표 3.83> 흙포장재 단체표준규격에 규정된 사용재료의 제한규정

사용재료	사용재료에 대한 규정 사항
1. 시멘트	시멘트는 KS L 5201에 적합한 것 또는 이와 동등 이상인 제품을 사용
2. 골재	골재는 깨끗하고 단단하며 내구적인 것으로 적당한 입도를 가지며 점토덩어리, 유기물, 가늘고 긴 돌조각 등의 해로운 양을 포함해서는 안 되며 KS F 2526, KS F 2527, KS F 2573에 적합한 것으로서『석면 안전관리법』제 11조 제 6항에 따른 가공·변경된 석면 함유가능 물질의 석면 허용기준을 충족.
3. 황토	황토는 4번체 (4.75mm)를 100% 통과하는 덩어리짐이 없는 것 또는 건조시켜 분말로 가공한 것.
4. 사용수	상수돗물을 사용하는 것을 원칙으로 하고, 그 외의 물을 사용할 경우 KS F 4009 부속서 2『레디믹스트 콘크리트의 혼합물에 사용되는 물』에 따름
5. 흙	흙은 흙의 통일 분류방법(U.S.C.S)에 따르고, 점토 덩어리가 없는 것.
6. 바인더	바인더는 흙콘크리트의 물리적 특성을 향상시켜 접착력이나 작업성을 높일 수 있도록 보완적으로 사용하는 것으로, 그 종류는 KS F 4916에서 정한 시멘트 혼화용 폴리머 분산제 및 시멘트 혼화용 재유화형 분말수지로 구분되며, 그 품질은 KS F 4916의 표1 폴리머 시멘트 모르타르 시험에 적합.
7. 혼화제	혼화제는 KS F 2560, KS F 2563, KS L 5405에 적합.
8. 흙고화제	흙 고화제는 다음 <표 3.2.111>에 적합한 것 또는 이와 동등 이상의 것.

<표 3.84> 흙포장재 성능기준

항목	보도용		자전거도로용		주차장용		시험방법
	일반형	투수형	일반형	투수형	일반형	투수형	
압축강도(MPa)	12 이상		15 이상		18 이상		KS F 2405
휨강도(MPa)	1.2 이상		1.5 이상		3.0 이상		KS F 2408
동결융해(100cycle) 후 압축강도(MPa)	재령(28일) 강도의 80% 이상						KS F 2456 KS F 2405
미끄럼 저항성 (BPN)	30 이상		40 이상				KS F 2375
투수계수 (cm/sec)	-	1.0×10^{-3} 이상	-	1.0×10^{-3} 이상	-	1.0×10^{-3} 이상	KS F 2394 KS F 4001
비고	1. 압축강도 1회 시험 결과의 평균값은 구입자가 지정한 호칭 강도 값 이상이어야 한다. 2. 강도 시험에서 공시체의 재령은 28일로 한다. 3. 단, 통행을 위한 최소강도 기준은 부속서 B의 양생기간을 거친 후 호칭강도의 70%이상을 만족하여야 한다.						

(나) 흙포장재의 규격 최적배합비 도출 및 기초성능평가

① 실험계획 및 방법

㉮ 실험계획

알칼리활성화 고감성 칼라시멘트를 활용한 흙포장재의 최적배합 도출 및 기초성능평가를 검토하기 위한 실험계획을 <표 3.85>에 나타내었다. 결합재로 보통 포틀랜트 시멘트와 활성 슬래그 바인더를 사용하였으며 액상화 레드머드 촉진제는 각각의 결합재 중량에 대하여 0%, 5%, 20%, 40%, 60% 대체하였다. 결합재별 사용 배합수량은 최적함수비를 구하여 결정하였으며, 측정항목으로 압축강도, 흡수율, 백화시험을 실시하였다.

<표 3.85> 실험계획

흙포장재 결합재 비율(%)				결합재(g)		골재(g)	배합수	측정항목
구분		시멘트	액상형 레드머드 촉진제 대체율(%)	보통 포틀랜트 시멘트	액상형 레드머드 촉진제			
보통 포틀랜트 시멘트 (OPC)	OPC0	100	0	5,000	0	20,000	최적함수비에 의하여 변동	• 압축강도 • 흡수율 • 백화시험
	OPC5	95	5	4,750	250	20,000		
	OPC20	80	20	4,000	1,000	20,000		
	OPC40	60	40	3,000	2,000	20,000		
	OPC60	40	60	2,000	3,000	20,000		
활성 슬래그 바인더 (SB)	SB0	100	0	5,000	0	20,000		
	SB5	95	5	4,750	250	20,000		
	SB20	80	20	4,000	1,000	20,000		
	SB40	60	40	3,000	2,000	20,000		
	SB60	40	60	2,000	3,000	20,000		

㉮ 사용재료

ⓐ 결합재

알칼리활성화 고감성 칼라시멘트를 활용한 흙포장재의 최적배합 도출 및 기초성능평가를 검토하기 위해 사용한 결합재의 물리·화학적 특성을 <표 3.86>에 나타내었다. 결합재는 앞서 00절에서 제조된 산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더를 사용하였으며 비표면적 4,058cm^2/g, 밀도 2.83g/cm^3를 나타내고 있다. 또한 비교군으로 국내 S사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

<표 3.86> 결합재의 물리화학적 특성

구분	비표면적(cm^2/g)	밀도 (g/cm^3)	Ig. loss	화학적 성분 (%)					
				SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3
활성 슬래그 바인더	4,058	2.83	2.23	22.1	8.9	1.4	54.9	3.3	5.2
보통 포틀랜트 시멘트	3,144	3.15	1.32	21.7	5.7	3.2	63.1	2.8	2.2

ⓑ 액상형 레드머드 촉진제

알칼리활성화 고감성 칼라시멘트를 활용한 흙포장재의 최적배합 도출 및 기초성능평가를 검토하기 위해 사용한 액상형 레드머드 촉진제는 선행연구에서 도출된 고형분 51.6 %, 단위용적질량 1,570 kg/cm^3, 평균입경 3.15㎛, 점도 7,850cP인 액상형 레드머드 촉진제를 사용하였다.

ⓒ 골재

알칼리활성화 고감성 칼라시멘트를 활용한 흙포장재의 최적배합비 도출 및 기초성능평가를 검토하기 위해 사용한 골재의 물성을 <표 3.87>에 나타내었다. 잔골재의 경우 밀도 2.56g/cm^3, 최대치수 5mm, 흡수율 1.01%의 부순 모래를 사용하였으며, 굵은골재의 경우 밀도, 2.67g/cm^3, 최대치수 20mm, 흡수율 1.39%의 부순 굵은골재를 사용하였다.

<표 3.87> 골재 물성

구분	물리적 특성
잔골재	최대크기 : 5mm, 밀도 : 2.56 g/cm^3, 흡수율 : 1.01%
굵은 골재	최대크기 : 25mm, 밀도 : 2.67 g/cm^3, 흡수율 : 1.39 %

㉰ 실험 방법

ⓐ 최적함수비

알칼리활성화 고감성 칼라시멘트를 활용한 흙포장재의 최적배합 도출 및 기초성능평가를 검토하기 위해 실시한 최적함수비(ω_{opt}, O,M,C)는 KS F 2312 중 A다짐시험을 실시하였으며, 시료는 배합 후 경화까지 시간이 소요되는 점을 감안하여 반복법으로 실시하였다. 사용된 몰드의 내경(D)은 10.0cm, 높이(h)는 12.7cm로 체적은 1,000cm^{3}이며, 래머는 직경 5cm, 낙하고 30cm, 무게는 2.5kgf이고, 층당 25회로 3층 다짐을 실시하였다. KS F 2312에 의한 최적 함수비 실험과정을 <그림 3.97>의 a)~f)에 나타내었다.



a) 재료투입



b) 혼합



c) 타설



d) 다짐



e) 측정

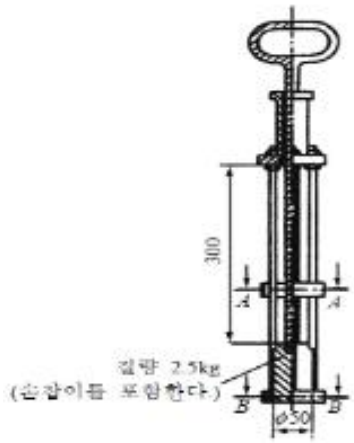


f) 건조 후 시료

<그림 3.86> 최적함수비 산정 실험과정

ⓑ 압축강도 시험

알칼리활성화 고감성 칼라시멘트를 활용한 흙포장재의 최적배합 도출 및 기초성능평가를 검토하기 위해 실시한 압축강도 시험체 제작은 흙콘크리트 단체표준규격(SPS-KSCICO-001:2013)에 준하여 Φ10×20cm 몰드에 <그림 3.98>의 a)에서 보는 바와 같은 래머를 사용하여 제작하였다. 래머는 직경 5cm, 낙하고 30cm, 무게는 2.5kgf이고, 층당 25회로 3층 다짐을 실시하였으며, 압축강도 시험은 제작한 공시체를 28일 기건 양생 후 KS F 2405 콘크리트 압축강도 시험방법에 의하여 측정하였다.



a) 래머



b) 혼합



c) 다짐



d) 시험체



e) 측정

<그림 3.98> 압축강도 시험과정

ⓒ 흡수율 시험

알칼리활성화 고감성 칼라시멘트를 활용한 흙포장재의 최적배합 도출 및 기초성능평가를 검토하기 위해 실시한 흡수율 시험은 <그림 3.99>과 같이 KS F 2609「건축 재료의 물 흡수 계수 측정 방법」에 준하여 실시하였다. 흙포장재 흡수율 시험체 제작은 건식 흙포장재의 압축강도 시험체 제작과 동일하게 Φ10×20cm 몰드에 직경 5cm, 낙하고 30cm, 무게는 2.5kgf의 래머로 25회 1층 다짐을 실시하여 제작하였다.

제작된 흙포장재 시험체를 온도 20±2℃, 상대 습도 65±5%의 표준 상태에서 항량이 될 때까지 건조하였고, 시험체의 측면은 에폭시로 방수 처리하고, 약 20℃의 물에 2~10mm 정도의 깊이로 담근 후 10분, 30분, 1시간, 6시간, 24시간에 시험체의 질량을 측정하였다. 흙포장재의 물과 접촉시 시간에 따른 면적당 흡수량은 다음과 같이 계산하였다.

$$m=w\cdot\sqrt{t}$$

여기에서 m : 면적당 물 흡수량(kg/m^2)

w : 물 흡수 계수(kg/m^{2}h0.5)

t : 시간(h)



(a) 다짐 (b) 증류수에 담금

<그림 3.99> 흡수량 시험 과정

ⓓ 흙포장재의 백화특성 검토

알칼리활성화 고감성 칼라시멘트를 활용한 흙포장재의 최적배합 도출 및 기초성능평가를 검토하기 위해 실시한 백화 시험은 일본 건재시험센터에서 개발한 시멘트계 재료의 백화시험 방법에 준하여 실시하였다.

흙포장재 백화 시험체 제작은 건식 흙포장재의 압축강도 시험체 제작과 동일하게 Φ 10×20cm 몰드에 직경 5cm, 낙하고 30cm, 무게는 2.5kgf의 래머로 25회 1층 다짐을 실시하여 제작하였다. 제작된 흙포장재 시험체를 20℃, 다습조건에서 1일 양생 후 탈형하고, 1일 동안 80℃ 건조하였으며, 시험편의 측면을 파라핀으로 실링처리한 후 증류수에 침지하고, 7℃, 50% 조건에서 14일 침지하였다.

80℃에서 1일 동안 건조한 후 그림 촬영하여 백화현상을 측정하였으며 백화면적은 '페인트넷' 프로그램을 이용하여 면적을 구한 후 화상 처리하여 정량화하였으며, 백화발생 등급을 <표 3.88>에 나타낸 바와 같이 백화 발생 면적 비율에 따라 5등급으로 구분하였다. 흙포장재 백화발생 화상처리 전 후 그림을 <그림 3.100>에 나타내었다.

<표 3.88> 백화발생 면적비율별 백화등급

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



a) 백화 발생 후 화상처리 전　　b) 백화 발생 후 화상처리 후

<그림 3.100> 화상처리 전 후

② 실험결과 및 분석

㉮ 최적함수비

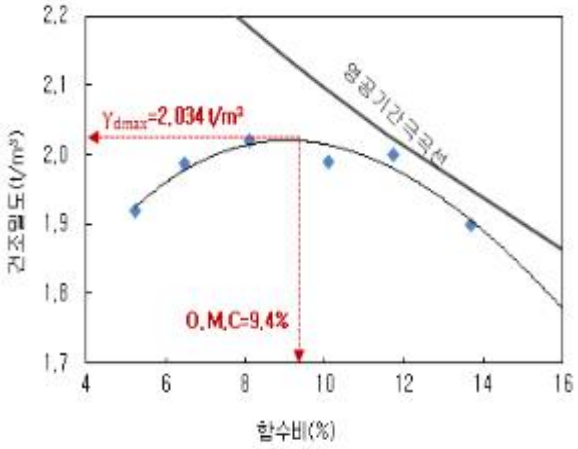
알칼리활성화 고감성 칼라시멘트를 활용한 흙포장재의 다짐 시험결과를 <표 3.89>에 나타내었다. 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 다짐시험 결과 최적함수비는 9.4～9.8%의 구역내에 분포하였고, 최대건조단위중량은 2.034～2.044 t/m^{3}을 나타내고 있어 배합에 따른 분산은 크게 나타나지 않고 있다.

최적 함수비는 보통 포틀랜트 시멘트의 경우 OPC0에서 9.4%, OPC5에서 9.4%, OPC20에서 9.6%, OPC40에서 9.7%, OPC60에서 9.8%를 나타내고 있어 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 최적 함수비는 다소 증가하는 경향을 보였다. 또한 활성 슬래그바인더를 결합재로 사용한 경우 SB0에서 9.4%, SB5에서 9.4%, SB20에서 9.6%, SB40에서 9.7%, SB60에서 9.8%를 나타내고 있어 보통 포틀랜트 시멘트와 비교하여 동일한 최적 함수비를 나타내고 있었으며, 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 다소 증가하는 경향을 보이고 있다.

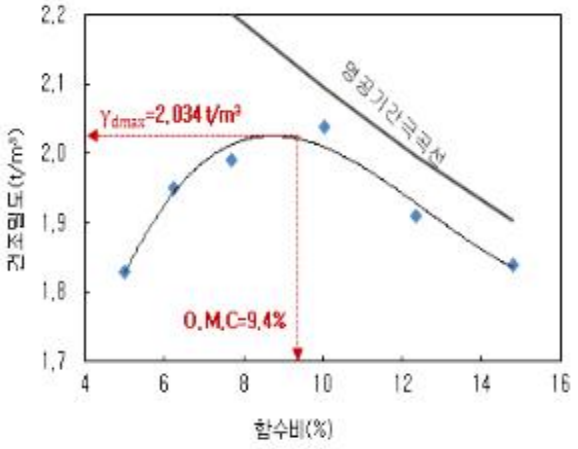
최대건조밀도는 보통 포틀랜트 시멘트의 경우 OPC0에서 2.034t/m^3, OPC5에서 2.039t/m^3, OPC20에서 2.041t/m^3, OPC40에서 2.042t/m^3, OPC60에서 2.044t/m^{3}를 나타내고 있어 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 유의할만한 경향은 나타나고 있지 않았으며, 활성 슬래그 바인더를 결합재로 사용한 경우 SB0에서 2.034t/m^3, SB5에서 2.036t/m^3, SB-20에서 2.039t/m^3, SB40에서 2.044t/m^3, SB60에서 2.042t/m^{3}를 나타내고 있어 보통 포틀랜트 시멘트와 유사한 수준을 나타내었다. 최적 함수비 측정결과를 <그림 3.101> 및 <그림 3.102>에 나타내었다.

<표 3.89> 최적함수비 측정결과

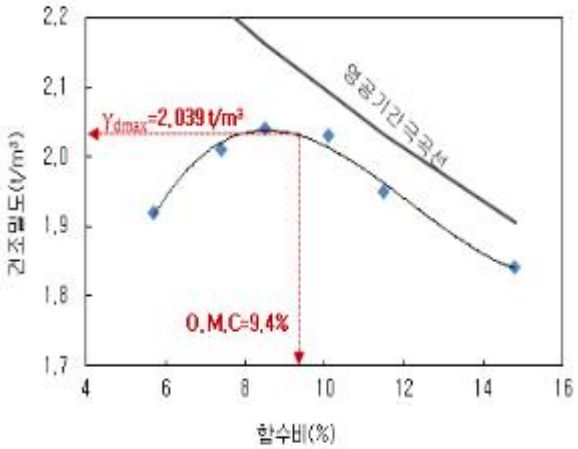
구분		건조밀도(γ_{dmax} , t/m^3)	최적 함수비(ω_{opt}, %)
보통 포틀랜트 시멘트 (OPC)	OPC0	2.034	9.4
	OPC5	2.039	9.4
	OPC20	2.041	9.6
	OPC40	2.042	9.7
	OPC60	2.044	9.8
활성 슬래그바인더 (SB)	SB0	2.034	9.4
	SB5	2.036	9.4
	SB20	2.039	9.6
	SB40	2.044	9.7
	SB60	2.042	9.8



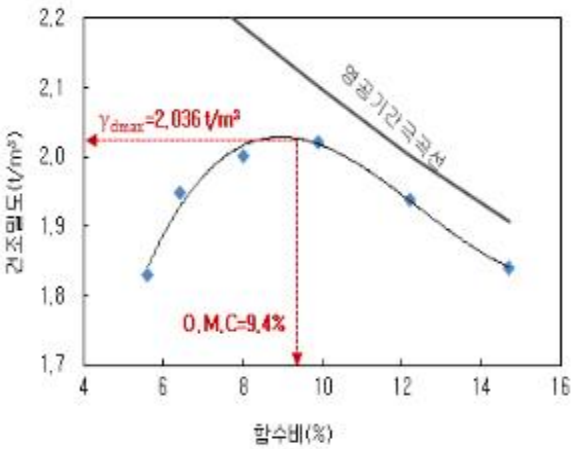
a) OPC0



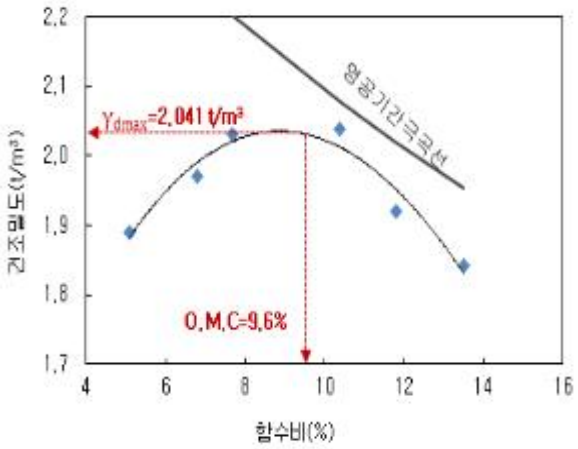
b) SB0



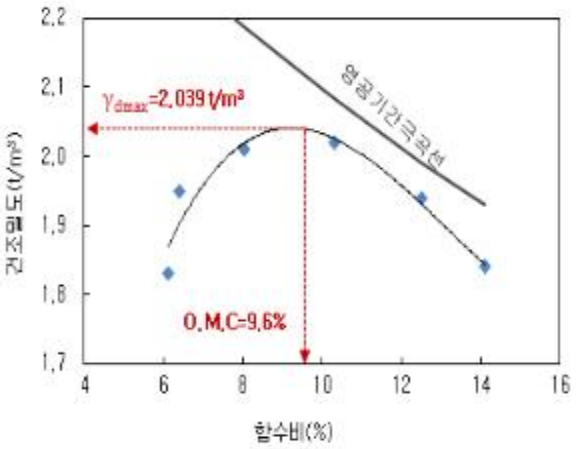
c) OPC5



d) SB5

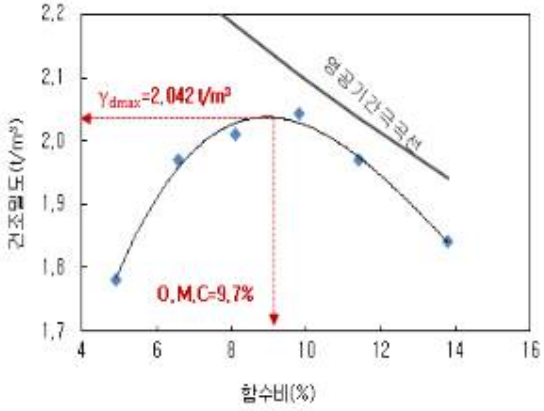


e) OPC20

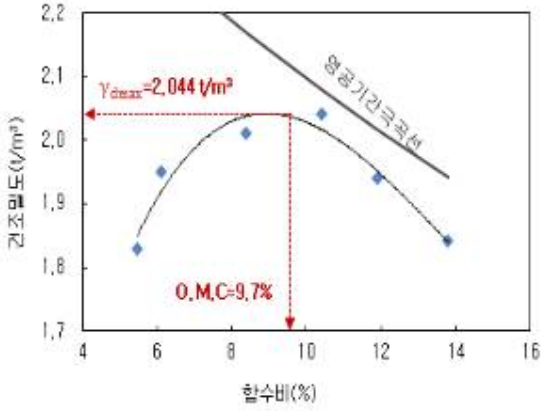


f) SB20

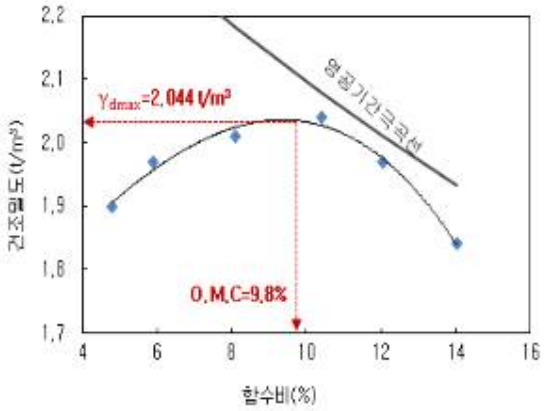
<그림 3.101> 최적함수비 측정 결과 (1)



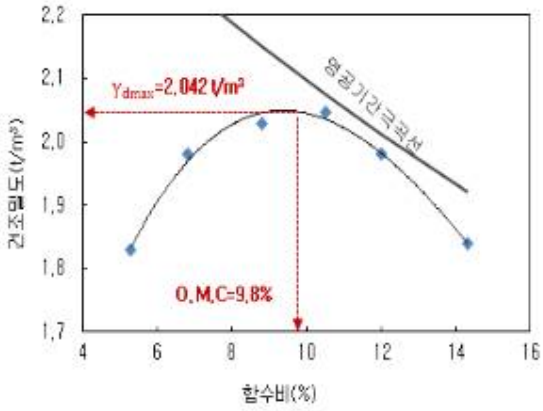
g) OPC40



h) SB40



i) OPC60



j) SB60

<그림 3.102> 최적함수비 측정 결과 (2)

㉯ 압축강도

알칼리활성화 고감성 칼라시멘트를 활용한 흙포장재의 압축강도 시험결과를 <표 3.90>에 나타내었다. 보통 포틀랜트 시멘트(OPC)에 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 흙포장재의 압축강도는 <그림 3.103>의 a)에 나타낸 바와 같이 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 감소하였으며, 28일 압축강도는 14일 압축강도와 비교하여 오히려 감소하는 경향을 나타내었다.

14일 압축강도의 경우 OPC0에서 36.6MPa, OPC5에서 33.8MPa, OPC20에서 29.3MPa, OPC40에서 20.0MPa, OPC60에서 15.6MPa을 나타내고 있어 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 압축강도는 감소하여 액상형 레드머드 촉진제 대체율 60%에서는 최대 약 30%이상 감소하였다.

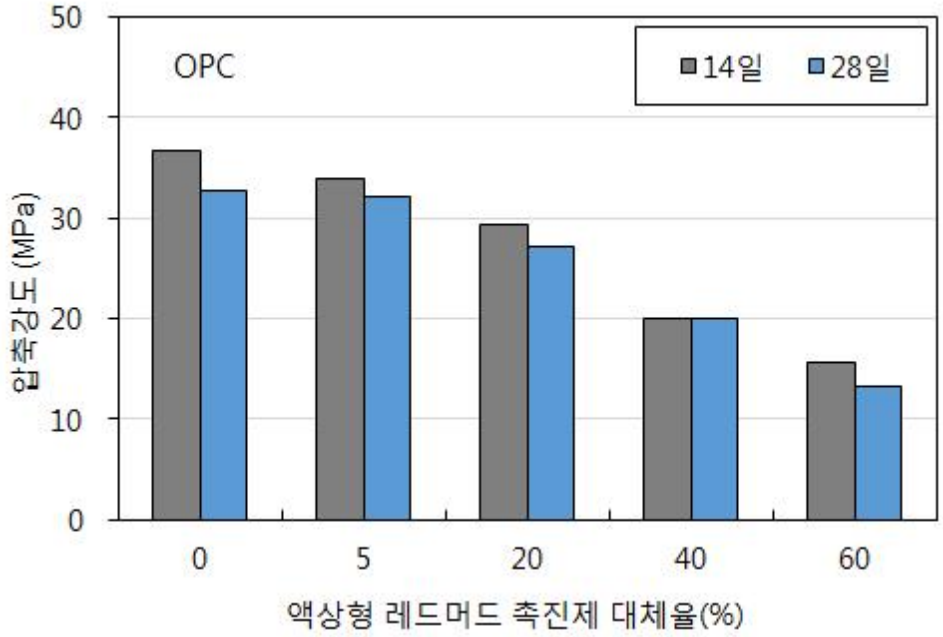
28일 압축강도의 경우 OPC0에서 32.7MPa, OPC5에서 32.0MPa, OPC20에서 27.2MPa, OPC40에서 19.9MPa, OPC60에서 13.3MPa를 나타내고 있어 오히려 14일 압축강도와 비교하여 오히려 감소하는 경향을 나타내었다.

활성 슬래그 바인더(SB)에 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 흙포장재의 압축강도는 <그림 3.103>의 b)에 나타낸 바와 같이 활성 슬래그바인더(SB)를 사용한 시험체와 비교하여 레드머드 대체율이 5%에서 다소 증가하였지만 액상형 레드머드 촉진제 대체율 20%이상에서는 대체율이 증가할수록 감소하였다.

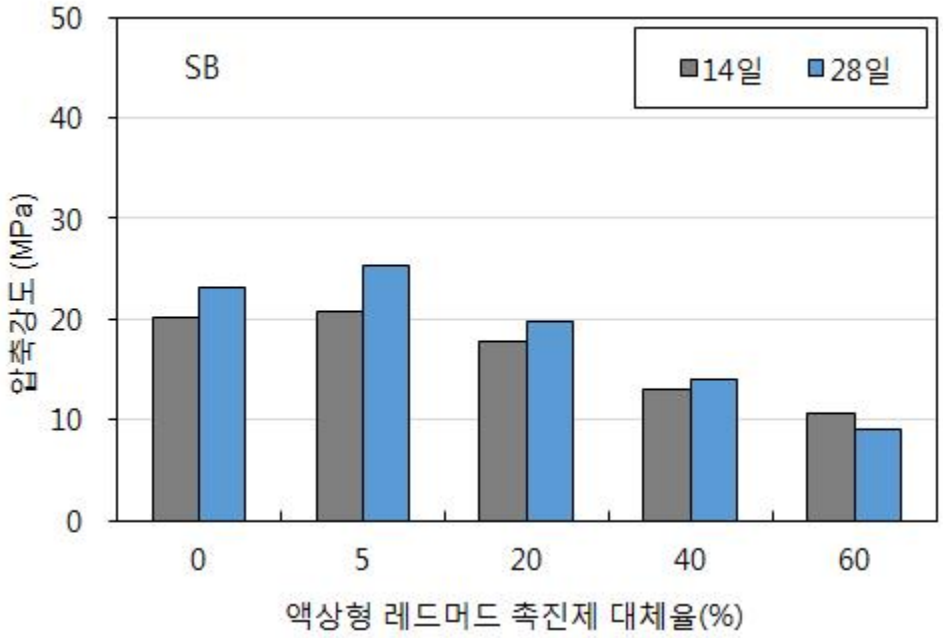
14일 압축강도의 경우 SB0에서 20.1MPa, SB5에서 20.8MPa, SB20에서 17.7MPa, SB40에서 13.0MPa, SB60에서 10.6MPa을 나타내고 있다. 또한 28일 압축강도의 경우 SB0에서 23.1MPa, SB5에서 25.3MPa, SB20에서 19.8MPa, SB40에서 14.0MPa, SB60에서 9.0MPa를 나타내고 있어 14일 압축강도와 비교하여 감소하는 OPC와 상반된 경향을 <그림 3.103>과 같이 나타내었다.

<표 3.90> 압축강도 측정결과

구분		압축강도 (MPa)	
		14일	28일
보통 포틀랜트 시멘트 (OPC)	OPC0	36.6	32.7
	OPC5	33.8	32.0
	OPC20	29.3	27.2
	OPC40	20.0	19.9
	OPC60	15.6	13.3
활성 슬래그바인더 (SB)	SB0	20.1	23.1
	SB5	20.8	25.3
	SB20	17.7	19.8
	SB40	13.0	14.0
	SB60	10.6	9.0



a) OPC



b) SB

<그림 3.103> 압축강도 측정결과

㉰ 흡수율

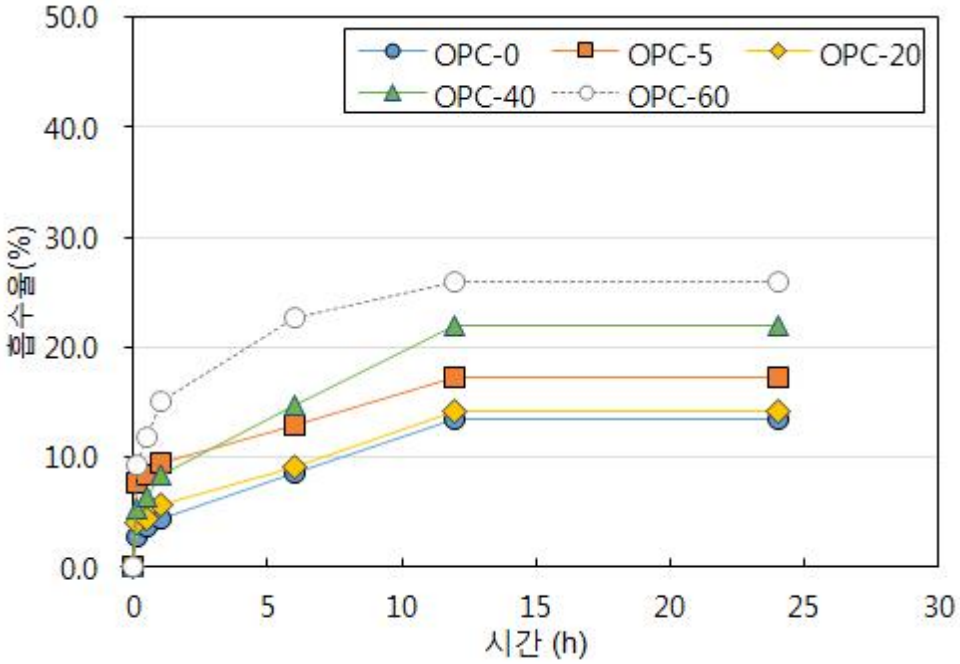
알칼리활성화 고감성 칼라시멘트를 활용한 흙포장재의 흡수율 측정결과를 <표 3.91>에 나타내었다. 보통 포틀랜트 시멘트(OPC)와 활성 슬래그바인더(SB)를 사용한 시험체의 흡수율을 비교할 경우 보통 포틀랜트 시멘트(OPC)가 활성 슬래그바인더(SB) 보다 높은 흡수율을 보였으며 액상형 레드머드 촉진제 대체율 60%에서는 활성 슬래그바인더(SB)가 더 높은 것으로 나타났다.

보통 포틀랜트 시멘트(OPC)에 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 흙포장재의 흡수율은 <그림 3.104>의 a)에 나타낸바와 같이 보통 포틀랜트 시멘트(OPC)만을 사용한 시험체와 비교하여 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 증가하였으며, 액상형 레드머드 촉진제 대체율 60%에서 가장 높은 흡수율을 보였다.

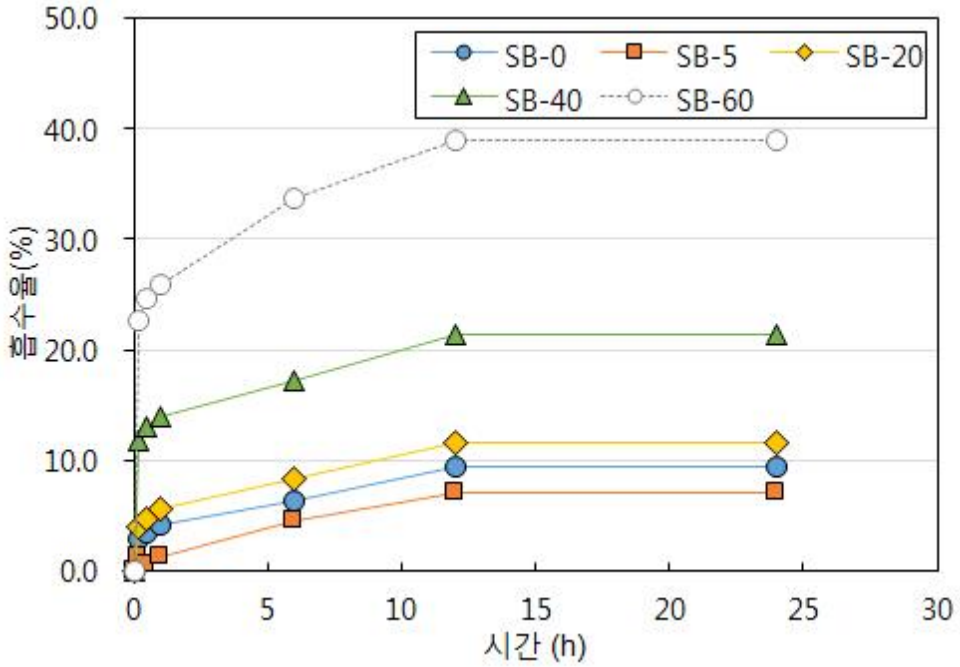
활성 슬래그바인더(SB)에 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 흙포장재의 흡수율은 <그림 3.104>의 b)에 나타낸 바와 같이 활성 슬래그바인더(SB)만을 사용한 시험체와 비교하여 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 흡수율 또한 증가하는 경향을 나타내었다.

<표 3.91> 흡수율 측정결과

구 분		흡수율(%)						
		0hr	0.16h	0.5h	1h	6h	12h	24h
보통 포틀랜트 시멘트 (OPC)	OPC0	0.0	2.70	3.60	4.40	8.50	13.4	13.5
	OPC5	0.0	7.70	8.30	9.50	12.9	17.2	17.2
	OPC20	0.0	4.10	4.50	5.70	9.10	14.1	14.2
	OPC40	0.0	5.30	6.40	8.30	14.7	22.0	22.1
	OPC60	0.0	9.30	11.9	15.1	22.6	25.9	25.9
활성 슬래그바인더 (SB)	SB0	0.0	2.90	3.50	4.10	6.40	9.50	9.50
	SB5	0.0	1.20	0.60	1.30	4.50	7.01	7.10
	SB20	0.0	4.10	4.80	5.60	8.40	11.6	11.6
	SB40	0.0	11.7	13.0	14.0	17.3	21.3	21.3
	SB60	0.0	22.7	24.6	25.9	33.7	39.0	39.0



a) OPC



b) SB

<그림 3.104> 흡수율 측정결과

㉲ 백화시험

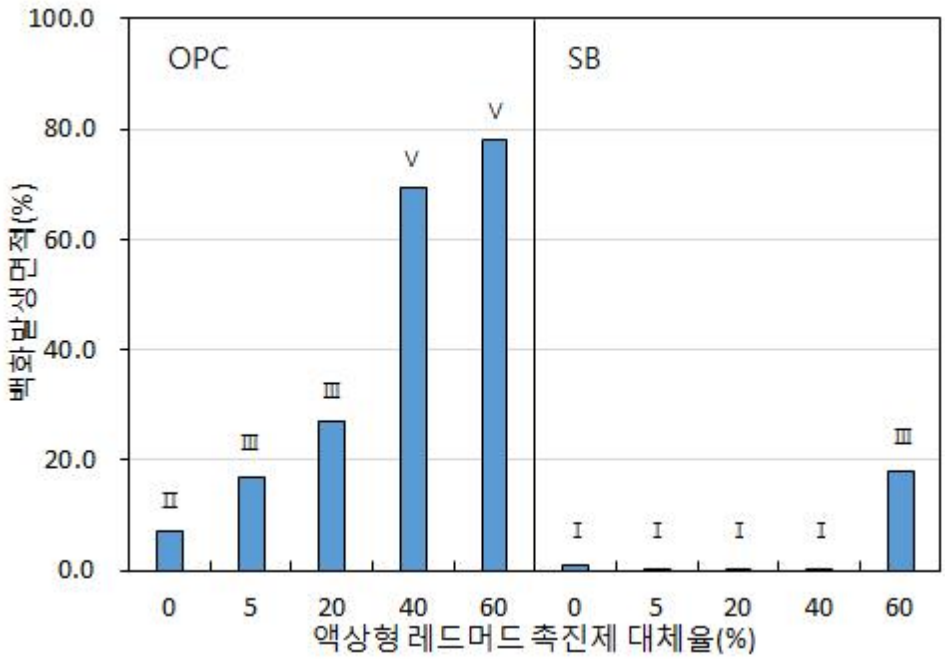
알칼리활성화 고감성 칼라시멘트를 활용한 흙포장재의 백화시험결과를 <그림 3.105>, <표 3.92~3.93>에 나타내었다.

백화발생비는 활성 슬래그바인더(SB) 흙포장재의 경우 액상형 레드머드 촉진제 대체율 40%까지는 백화발생이 거의 나타나지 않고 있으나 보통 포틀랜트 시멘트(OPC) 흙포장재의 경우 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 백화발생비가 뚜렷하게 증가하는 경향을 나타내었다.

보통 포틀랜트 시멘트(OPC)의 경우 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 흙포장재의 백화발생면적비에 따른 백화등급은 OPC0에서 7.1%로서 Ⅱ등급, OPC5에서 17.0%로서 Ⅲ등급, OPC20에서 26.9%로서 Ⅲ등급, OPC40에서 69.5%로서 Ⅴ등급, OPC60에서 78.2%로서 Ⅴ등급으로 구분된다.

본 절의 범위 내에서는 보통 포틀랜트 시멘트(OPC)에 액상형 레드머드 촉진제를 대체하는 흙포장재의 경우 백화등급이 Ⅲ등급 이상으로 나타나고 있어 백화발생 확률이 매우 높을 것으로 판단된다.

활성 슬래그바인더(SB)의 경우 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 흙포장재의 백화발생면적비에 따른 백화등급은 SB0에서 1.0%로서 Ⅰ등급, SB5에서 0.2%로서 Ⅰ등급, SB20에서 0.3%로서 Ⅰ등급, SB40에서 0.4%로서 Ⅰ등급, SB60에서 17.8%로서 Ⅲ등급으로 구분되었다. 본 절의 범위 내에서는 활성 슬래그바인더(SB)에 액상형 레드머드 촉진제를 대체하는 흙포장재의 경우 액상형 레드머드 촉진제 대체율 40%까지는 백화가 거의 발생되지 않고 있어 보통 포틀랜트 시멘트(OPC)와 비교하여 뚜렷하게 백화저감효과가 있는 것으로 판단된다.

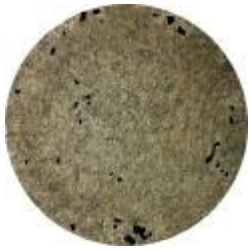


<그림 3.105> 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 백화발생면적비율

<표 3.92> 백화발생면적 측정결과 (OPC)

구분	액상형 레드머드 촉진제 대체율 (%)	백화 화상처리 전후의 이미지		백화발생 면적비 (%)	백화 등급
		화상 처리 전	화상 처리 후		
보통 포틀랜트 시멘트 (OPC)	0			7.12	II
	5			17.04	III
	20			26.99	III
	40			69.52	V
	60			78.22	V

<표 3.93> 백화발생면적 측정결과 (SB)

구분	액상형 레드머드 촉진제 대체율 (%)	백화 화상처리 전후의 이미지		백화발생 면적비 (%)	백화 등급
		화상 처리 전	화상 처리 후		
활성 슬래그 바인더 (SB)	0			1.01	I
	5			0.18	I
	20			0.27	I
	40			0.37	I
	60			17.86	III

(다) 소결

본 절에서는 알칼리활성화 고감성 칼라시멘트를 활용한 흙포장재의 요구 성능 및 목표수준 설정하기 위해 흙포장재 단체표준규격인 흙콘크리트(SPS-KSCICO-001-2006)을 참조하여 설정하였다. 또한 알칼리활성화 고감성 칼라시멘트를 활용하여 흙포장재를 제작하였으며 흙포장재의 최적배합 도출 및 기초성능평가를 검토하였다. 그 결과 아래와 같은 결과를 얻을수 있었다.

- 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 고감성 칼라시멘트를 흙포장재에 적용하기 위한 요구 성능 및 목표 수준을 검토결과 흙포장재 단체표준규격(SPS-KSCICO-001-2006)을 통해 사용 재료 및 성증기준을 확인 할 수 있었다.
- 결합재 종류별 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 다짐시험 결과 최적함수비는 9.4～9.8%의 구역내에 분포하였고, 최대 건조단위중량은 2.034～2.044 t/m^{3}을 나타내고 있어 배합에 따른 분산은 크게 나타나지 않고 있다. 결합재 종류별 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 압축강도의 경우 보통 포틀랜트 시멘트(OPC)에 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 흙포장재의 압축강도는 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 감소하였으며, 28일 압축강도는 14일 압축강도와 비교하여 오히려 감소하는 경향이 나타났다.
- 활성 슬래그바인더(SB)의 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 흙포장재의 압축강도는 활성 슬래그바인더(SB)만을 사용한 시험체와 비교하여 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 5%에서 다소 증가하였지만 액상형 레드머드 촉진제 대체율 20%이상에서는 대체율이 증가할수록 감소하였다.
- 흡수율 측정결과 결합재인 보통 포틀랜트 시멘트(OPC)와 활성 슬래그바인더(SB)의 흡수율을 비교시 보통 포틀랜트 시멘트(OPC)가 활성 슬래그 바인더(SB)보다 높은 흡수율을 보였으며, 액상형 레드머드 촉진제 대체율 60%에서는 활성 슬래그바인더(SB)가 더 높은 것으로 나타났다.
- 백화시험 결과 결합재 종류별 백화발생면적비는 활성 슬래그바인더(SB) 흙포장재의 경우 액상형 레드머드 촉진제 대체율 40%까지는 백화발생이 거의 나타나지 않고 있으나 보통 포틀랜트 시멘트(OPC) 흙포장재의 경우 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 백화발생 면적비가 뚜렷하게 증가하였다.

(3) 고감성 칼라시멘트를 활용한 콘크리트 활용기술

(가) 액상형 레드머드 촉진제 첨가방식에 따른 고감성 칼라콘크리트 특성

① 실험계획 및 방법

㉮ 실험계획

알칼리활성화 고감성 칼라콘크리트의 특성을 검토하기 위한 실험계획을 <표 3.94>에 나타내었다. 착색재로서 액상형 레드머드 촉진제의 투입방식에 따른 습식 콘크리트의 강도 및 백화특성을 검토하기 위하여 W/C 45%, 단위시멘트량 300kg/cm^{3}의 콘크리트에 액상형 레드머드 촉진제의 투입양을 내할 및 외할로 각각 0, 20, 40% 투입한 후 재령 91일까지의 압축강도, 인장강도 및 탄성계수를 측정하였다.

<표 3.94> 실험계획

구분	액상형 레드머드 촉진제 첨가량		W/C (%)	시멘트 단위수량 (kg/m^3)	측정항목
	투입방식	비율 (%)			
활성 슬래그바인더 (SB)	내할대체	0	45	300	• 압축강도 • 할렬인장강도 • 탄성계수 (7, 28, 56, 91일)
		20			
		40			
	외할첨가	20			
		40			

㉯ 콘크리트 배합 및 비빔방법

알칼리활성화 고감성 칼라콘크리트의 특성을 검토하기 위한 콘크리트 배합을 <표 3.95>에 나타내었다. 액상형 레드머드 촉진제는 내할첨가 및 외할첨가 동일하게 시멘트량에 대하여 20%에서 60kg/m^3, 40%에서 120kg/m^3 첨가하였다. 내할첨가의 시멘트량은 액상형 레드머드 촉진제 20%에서 240kg/m^3, 40%에서 180kg/m^{3}으로 감소하였다. 외할첨가의 시멘트량은 액상형 레드머드 촉진제 첨가량에 상관없이 300kg/m^3 동일하였다.

콘크리트의 비빔은 60 l 용량의 트윈샤프트 믹서를 사용하였으며 시멘트 및 골재를 일괄투입하여 건비빔을 30초간 실시하고 물을 첨가하여 2분 30초간 비빔을 실시하였다. 혼합된 콘크리트에 액상형 레드머드 촉진제를 혼입하여 균질하게 섞이도록 1분 30초간 재혼합 하였다. 총 비빔시간은 4분 30초가 소요되었다.

<표 3.95> 실험배합

구분	W/B (%)	S/A (o/wt)	혼합수 (kg/m^3)	단위수량(kg/m^3)			
				C	RS	S	G
Plain	45.0	0.50	135	300	0	961	995
IN20	45.0	0.50	135	240	60	935	968
IN40	45.0	0.50	135	180	120	908	940
OUT20	45.0	0.50	135	300	60	961	995
OUT40	45.0	0.50	135	300	120	961	995

㉰ 사용재료

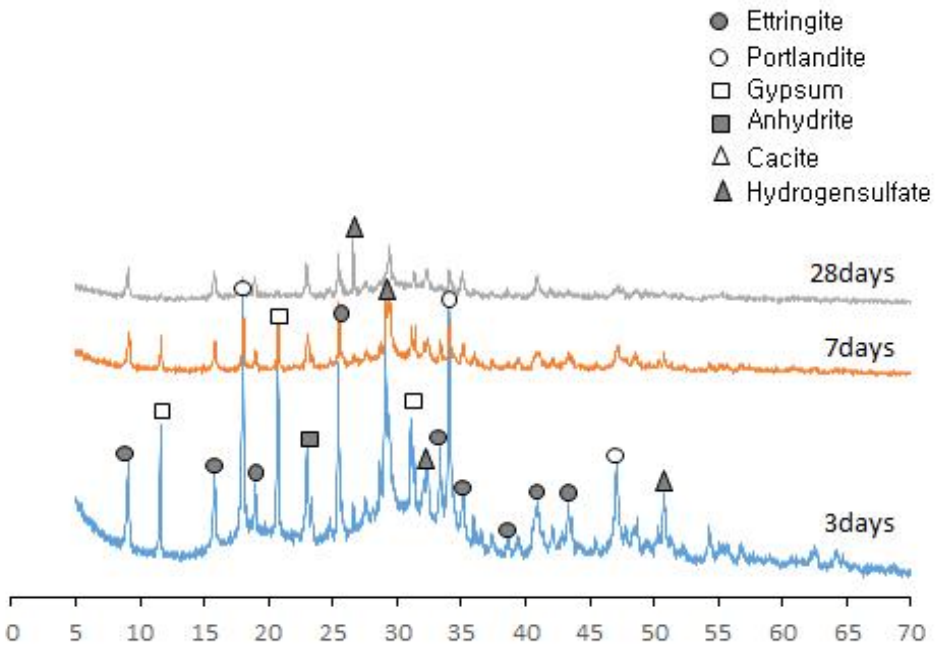
ⓐ 활성 슬래그 바인더

알칼리활성화 고감성 칼라콘크리트의 특성을 검토하기 위해 사용한 활성 슬래그 바인더의 물리화학적 특성을 보통 포틀랜트 시멘트와 비교하여 <표 3.96>에 나타내었다.

활성 슬래그 바인더는 고로슬래그미분말을 기반으로 하고 주요 자극제로서 탈황석고, 고칼슘 플라이애시와 같은 산업부산물 만으로 제조된 클링커프리 시멘트이다. 활성 슬래그바인더의 화학조성은 SiO_2 21.2%, Al_2O_3 8.8%, CaO 46.6%, SO_3 11.5%이다. 보통 포틀랜트 시멘트와 비교하여 CaO의 조성비율은 낮지만 SO_3와 Al_2O_3의 조성비율은 높다. 또한 물리적 특성으로서 비표면적은 4,058cm^2/g, 밀도는 2.83g/cm^3으로서 보통 포틀랜트 시멘트와 비교하여 가볍고 세립하다. 본 연구에서 사용한 활성 슬래그 바인더의 수화반응을 검토한 페이스트의 재령별 XRD 분석결과를 <그림 3.106>에 나타내었다. 고로슬래그미분말의 자극제로서 탈황석고, 고칼슘플라이애시와 같은 산업부산물 분말 자극제만을 사용함으로서 주요 수화생성물은 에트린자인트와 미반응 석고 등으로 구성되어져 있는 것을 알 수 있다.

<표 3.96> 활성 슬래그 바인더의 물리 화학적 특성

구분	비표면적 (cm^2/g)	밀도 (g/cm^3)	Ig. loss	화학적 성분 (%)					
				SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3
OPC	3,144	3.15	1.32	21.7	5.7	3.2	63.1	2.8	2.2
SB	4,058	2.83	2.23	22.1	8.9	1.4	54.9	3.3	5.2



<그림 3.106> XRD 분석결과

ⓑ 골재

알칼리활성화 고감성 칼라콘크리트의 특성을 검토하기 위해 사용한 골재의 물성을 <표 3.97>에 나타내었다. 잔골재의 경우 밀도 2.56g/cm^3, 최대치수 5mm, 흡수율 1.01%의 부순모래를 사용하였으며, 굵은골재의 경우 밀도, 2.67g/cm^3, 최대치수 20mm, 흡수율 1.39%의 부순 굵은골재를 사용하였다.

<표 3.97> 골재의 물리적 특성

구분	물리적 특성
잔골재-부순모래	최대크기 : 5mm, 밀도 : 2.56 g/cm^3, 흡수율 : 1.01%
굵은골재-부순자갈	최대크기 : 25mm, 밀도 : 2.67 g/cm^3, 흡수율 : 1.39 %

ⓒ 액상형 레드머드

알칼리활성화 고감성 칼라콘크리트의 특성을 검토하기 위해 사용한 액상형 레드머드 촉진제는 선행연구에서 도출된 고형분 51.6%, 단위용적질량 1,570kg/cm^3, 평균입경3.15㎛, 점도 7,850cP인 액상형 레드머드 촉진제를 사용하였다.

㉮ 실험방법

ⓐ 슬럼프

알칼리활성화 고감성 칼라콘크리트의 특성을 검토하기 위해 콘크리트의 굳지 않은 특성으로서 슬럼프, 공기량, 단위용적질량을 평가하였다. 슬럼프는 KS F 2402 「콘크리트의 슬럼프 시험방법」에 준하여 측정하였다. <그림 3.107> 과 같이 시험방법으로서는 슬럼프콘의 용적을 3등분으로 나누어 각층마다 콘크리트를 넣어 다짐봉으로 전면을 고르게 25회 정도 다진다. 다짐이 종료된 후 슬럼프콘의 윗 부분을 다짐봉으로 고르게 한 후, 콘을 수직방향으로 들어 올린 후 콘의 상단으로부터 가라앉은 값을 측정하였다.



<그림 3.107> 슬럼프 측정사진

ⓑ 단위용적질량 및 공기량

알칼리활성화 고감성 칼라콘크리트의 특성을 검토하기 위한 단위용적질량은 KS F 2409 「굳지 않은 콘크리트의 단위용적 질량 및 공기량 시험방법(질량방법)」에 준하여 측정하였으며, 공기량 시험은 KS F 2421 「굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험방법」에 준하여 측정하였다. <그림 0.0>와 같이 콘크리트를 측정용기의 용적에 3층으로 나누어 고르게 분포시키며 각층을 25회씩 다진다. 이때 다짐대에 의해 생긴 빈틈은 용기의 측면을 두들겨서 없앤 후 윗부분을 고르게 긁어내어 용기의 상면과 일치시킨다. 다음 밸브를 잠근 다음 압력을 가하여 압력계의 눈금을 영점에 조정한 후 주밸브를 충분히 열어 눈금이 안정되었을 때 공기량을 측정한다.

공기량 시험은 KS F 2421규정에 의거 공기실 압력법에 의한 공기 함유량 시험방법으로 측정하고, 단위용적질량 시험은 KS F 2409규정에 의거 질량방법을 이용하여 측정한다. <그림 3.108> 과 같이 공기량을 측정하는 모습을 나타내었다.



<그림 3.108> 공기량(Air Content) 측정사진

ⓒ 압축강도 및 탄성계수

알칼리활성화 고감성 칼라콘크리트의 특성을 검토하기 위한 콘크리트콘크리트의 압축강도 시험은 KS F 2405 「콘크리트 압축강도 시험방법」에 준하여 측정하였다. 압축강도용 공시체는 각각의 배합별로 Ø 10×20㎝의 원주형몰드에 KS F 2403에 따라 제작하였으며, 표준 수중양생 하였다. 재령별로 KS F 2405에 규정에 따라 <그림 3.109> 과 같이 콘크리트의 압축강도실험을 수행하였다. 콘크리트 강도실험일은 재령 7일, 28일 및 56일에서 3개의 공시체를 평균하여 압축강도로 결정하였다.

액상화 레드머드 혼입 콘크리트의 탄성계수는 KS F 2438 「콘크리트 원주 공시체의 정탄성계수 및 포아송비 시험방법」에 준하여 <그림 3.109> 과 같이 측정하였다.



<그림 3.109> 탄성계수 측정사진

압축강도 실험 시에 탄성계수를 측정하기 위하여 두 개의 원형 치구를 공시체 중앙 100 mm 구간에 설치하였다. 원형 치구 사이에 실린더 공시체 원주방향으로 120° 간격으로 3개의 LVDT를 설치하였으며, 하중재하 시에 변위를 <그림3.109>과 같이 측정하였다. 하중재하는 2000 kN 용량의 만능시험기(UTM)를 사용하여 변위제어 방식으로 하중을 재하 하였으며, 0.025 mm/s의 변위제어속도를 사용하였다. 압축강도 실험에서 측정한 하중과 변위를 이용하여 압축강도-변형률 곡선을 측정하였다. 압축응력-변형률 곡선에서 변형률이 0.00005인 점과 최대 하중의 40%에 해당하는 점의 선분의 기울기를 이용하여 탄성계수를 산정하였다.

ⓓ 인장강도

알칼리활성화 고감성 칼라콘크리트의 특성을 검토하기 위한 콘크리트의 인장강도 시험은 KS F 2423 「콘크리트의 쪼갬 인장강도 시험방법」에 준하여 측정하였다. 압축강도, 정탄성계수 및 쪼갬 인장강도는 측정 재령 7일, 28일, 56일, 91일에서 3개의 시험체 측정 후 평균값으로 하였다.

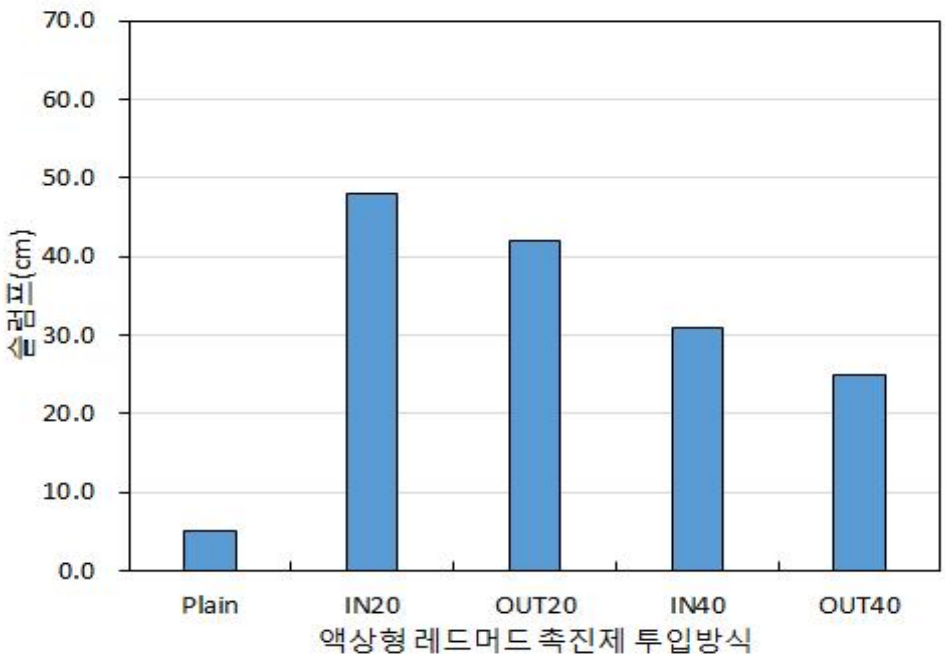
② 실험결과 및 분석

㉮ 슬럼프

알칼리활성화 고감성 칼라콘크리트를 활용한 콘크리트의 슬럼프 측정결과를 <표 3.98> 및 <그림 3.110>, <그림 3.111>에 나타내었다. 액상형 레드머드 촉진제를 혼입하지 않은 플레인 콘크리트의 슬럼프는 5cm 이지만 액생형 레드머드 촉진제를 첨가함으로서 슬럼프는 25~48cm로 증가하였다. 슬럼프는 외할첨가 보다는 내할첨가에 의하여 상대적으로 높게 나타났고, 첨가량이 많을수록 감소하였다. 이는 액상형 레드머드 촉진제가 고형분이 51.6%로서 48.4%가 물이고 더불어 액상형 레드머드 촉진제 제조과정 중에 혼입되는 분산제의 영향인 것으로 사료된다.

<표 3.98> 슬럼프 측정결과

구분		플로우(cm)
활성 슬래그 바인더 (SB)	Plain	5.1
	IN20	48.2
	OUT20	31.4
	IN40	42.0
	OUT40	25.2



<그림 3.110> 슬럼프 측정결과



(a) Plain



(b) IN20



(c) OUT20



(d) IN40



(e) OUT40

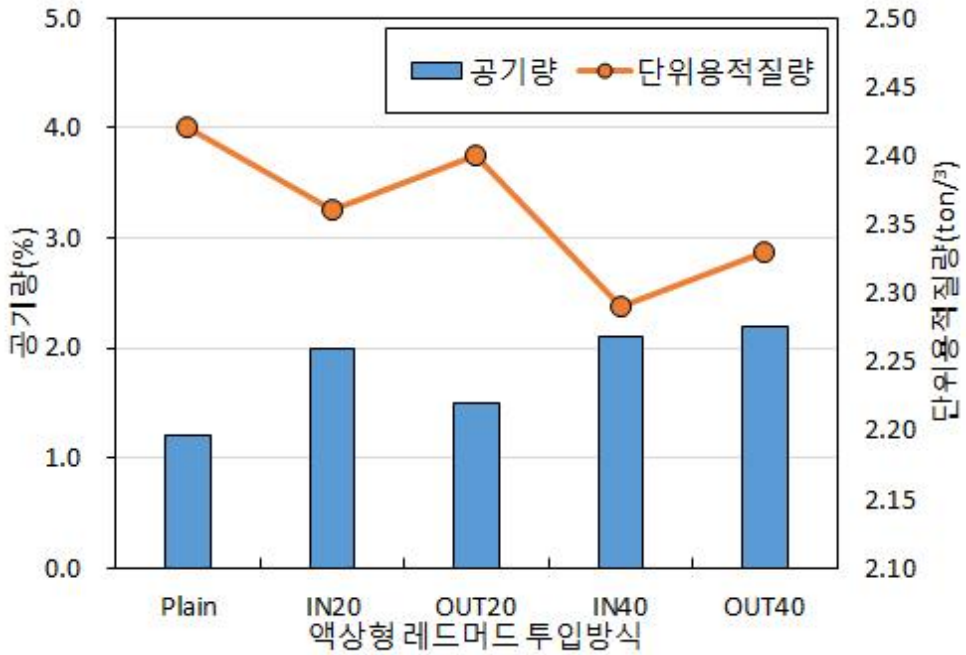
<그림 3.111> 슬럼프 측정결과

㉰ 공기량 및 단위용적질량

알칼리활성화 고감성 칼라콘크리트를 활용한 콘크리트의 공기량 및 단위용적질량 측정결과를 <표 3.99> 및 <그림 3.112>에 나타내었다. 액상형 레드머드 촉진제를 혼입하지 않은 플레인 콘크리트의 공기량은 1.3% 이지만 액생형 레드머드 촉진제를 첨가함으로서 공기량은 1.6~2.2%로 증가하였다. 공기량은 첨가 방식에 따른 큰 차이없이 대체적으로 2.0%까지 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 플레인 콘크리트의 단위용적질량은 2.40ton/m^3이었고 액상화 레드머드 첨가에 따라서 공기량이 증가하고 이로 인하여 단위용적질량은 2.29~2.38ton/m^3으로 감소하였다.

<표 3.99> 공기량 및 단위용적질량 측정결과

구분		공기량(%)	단위용적질량(ton/m^3)
활성 슬래그 바인더 (SB)	Plain	1.2	2.42
	IN20	2	2.36
	OUT20	2.1	2.29
	IN40	1.5	2.4
	OUT40	2.2	2.33



<그림 3.112> 공기량 및 단위용적질량

㉰ 압축강도

알칼리활성화 고감성 칼라콘크리트를 활용한 콘크리트의 압축강도 및 압축강도 발현비 측정 결과를 <표 3.100>에 나타내었다.

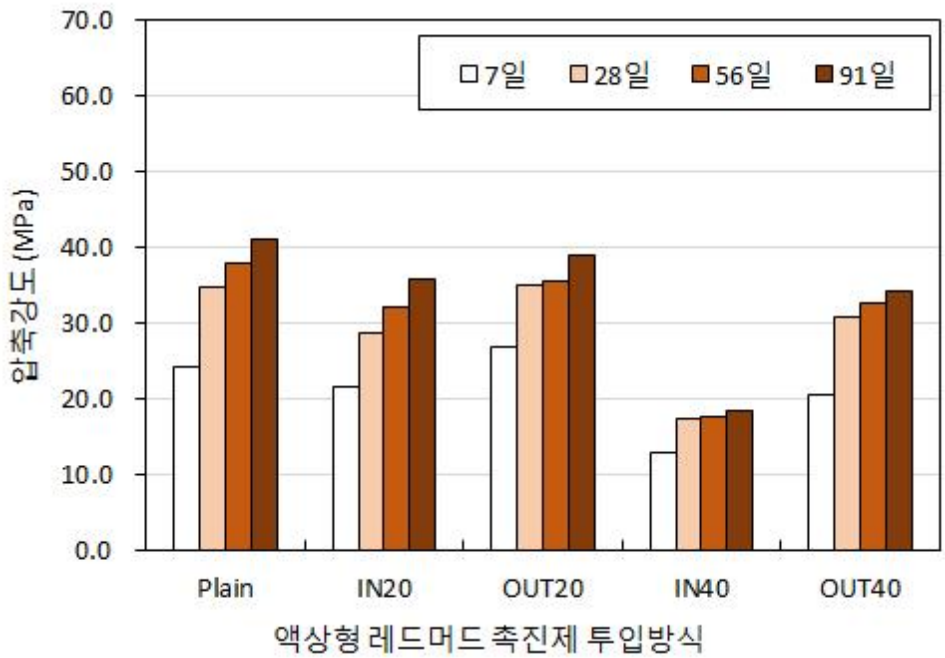
액상형 레드머드 촉진제를 혼입하지 않은 플레인 콘크리트 압축강도는 <그림 3.113>의 a)에 나타낸바와 같이 재령 7일에 24.3MPa, 재령 28일에 34.7MPa, 재령 56일에 38.0MPa, 재령 91일에 41.0MPa을 나타내었다. 반면 시멘트량이 감소하는 내할 첨가의 콘크리트 압축강도는 IN20에서 21.5～35.9MPa, IN40에서 12.9～18.4MPa로 나타났으며, 시멘트량을 고정시킨 외할 첨가의 콘크리트 압축강도는 EX20에서 26.9～39.1MPa, EX40에서 20.5～34.4 MPa를 나타내었다. 플레인과 비교하여 액상형 레드머드 촉진제를 내할 또는 외할 첨가한 콘크리트는 강도가 감소하고 첨가량이 클수록 강도의 감소폭은 증가하는 것으로 나타났다. 이는 액상형 레드머드 촉진제는 고형분이 51.6 %로서 48.4%는 물이 포함되어 있다. 따라서 첨가량이 많아질수록 혼합수량도 함께 증가하여 실제적인 물시멘트비가 증가되었기 때문으로 사료된다.

. 액상형 레드머드 촉진제를 혼입하지 않은 플레인 콘크리트와 액상형 레드머드 촉진제 첨가한 콘크리트의 상대 압축강도비를 <그림 3.113>의 a)에 나타내었다. 플레인 콘크리트와 비교하여 단위 시멘트량이 감소하는 액상형 레드머드 촉진제 내할 첨가 콘크리트의 상대 압축강도 비는 <그림 3.113>의 b) 에 나타낸 바와 같이IN20에서 83～88 %, IN40에서 44～53 %로 감소하는 경향을 보이고 첨가율이 증가할수록 압축강도는 크게 저하하는 것으로 나타났다. 반면 시멘트량을 고정시킨 액상화 레드머드 외할 첨가 콘크리트의 상대 압축강도 비는 EX20에서 93～110 %, EX40에서 83～88 %로 내할첨가와 비교하여 상대적으로 압축강도 저감폭은 작고 첨가량이 증가할수록 압축강도 저감폭은 작아지는 것으로 나타났다.

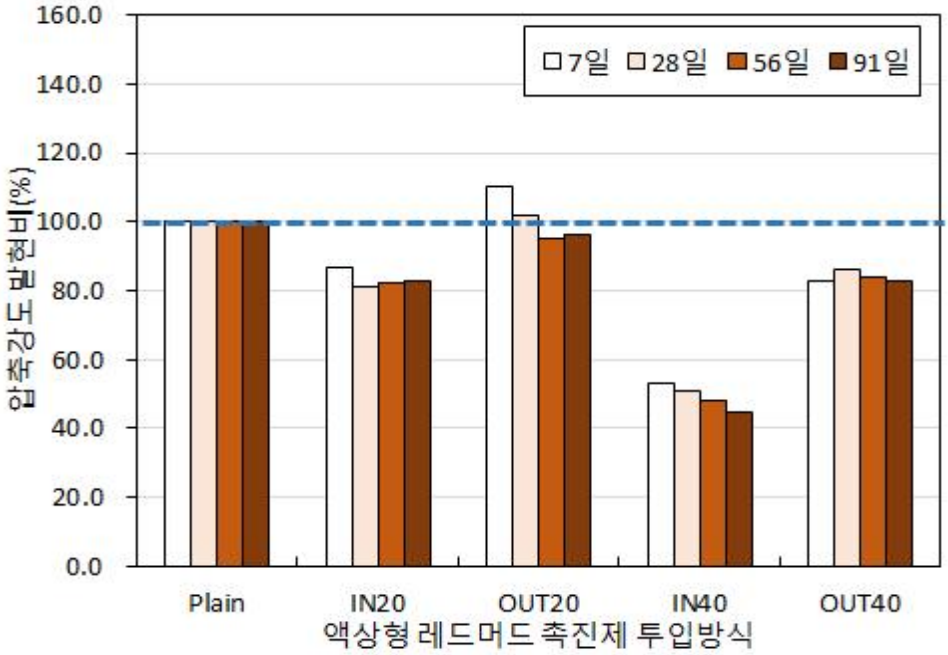
이와 같은 액상형 레드머드 촉진제 첨가량에 따른 시멘트량의 변화는 <그림 3.113>의 c)에 나타낸 바와 같이 시험체의 TG 분석결과에서 $Ca(OH)_2$ 양의 변화를 비교해 봄으로서 좀 더 명확하게 알 수 있다. $Ca(OH_2)$는 400～500℃의 구간에서 분해되기 때문에 이 구간에서의 중량감소율을 $Ca(OH)_2$ 양으로 추정해볼 수 있다. 그 결과 Plain 0.76 %와 비교하여 시멘트량이 감소하는 내할첨가의 경우 IN20에서는 0.54%, IN40에서는 0.45%를 나타내고 있어 시멘트량의 감소가 압축강도 저감의 원인인 것으로 사료된다. 반면 시멘트량을 고정시킨 외할첨가의 경우 EX20에서는 0.62%, EX40에서는 0.61%로서 Plain과 비교하여 감소하였지만 내할첨가와 비교하여 감소폭은 줄어들었다. 이는 외할첨가인 EX20, EX40의 경우 시멘트량을 고정시키고 액상화 레드머드를 부가적으로 첨가하여 전체 용적은 증가하였기 때문에 단위용적으로 환산하면 시멘트량은 다소 감소한 결과로 사료된다.

<표 3.100> 압축강도 및 압축강도 발현비 측정결과

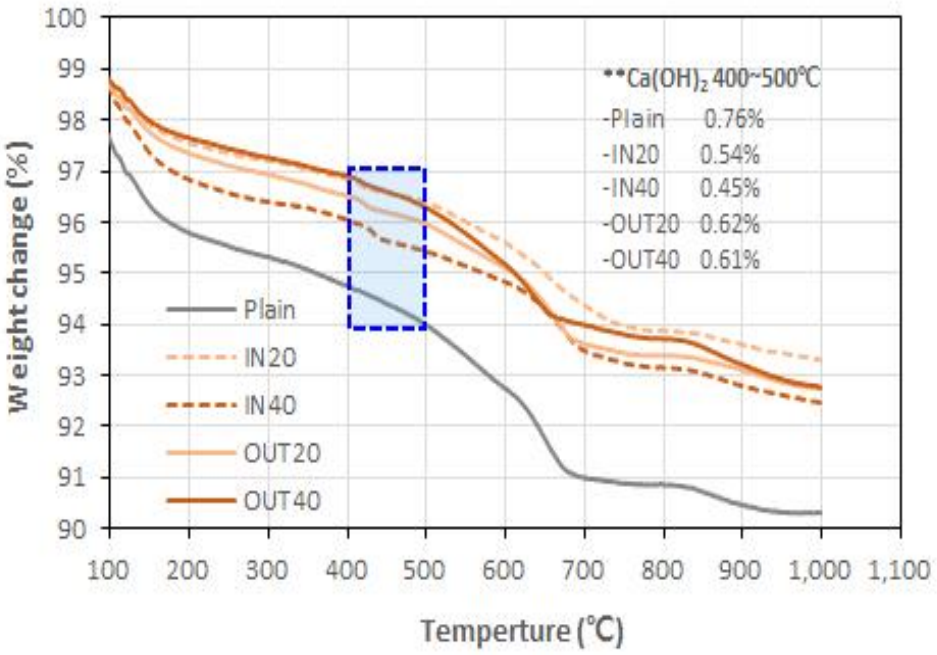
구분		압축강도(MPa)				압축강도 발현비(%)			
		7일	28일	56일	91일	7일	28일	56일	91일
활성 슬래그 바인더 (SB)	Plain	24.3	34.7	38.0	41.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	IN20	21.1	29.4	33.1	37.2	87.2	81.1	82.1	83.5
	OUT20	26.2	34.7	38.1	39.2	110.1	102.8	95.8	96.7
	IN40	12.4	17.5	17.8	18.0	53.5	51.5	48.3	45.2
	OUT40	20.8	31.4	33.5	36.8	83.2	86.7	84.6	83.2



a) 압축강도 측정결과



b) 압축강도 발현비



c) TG 측정결과

<그림 3.113> 압축강도 발현비 및 TG 측정결과

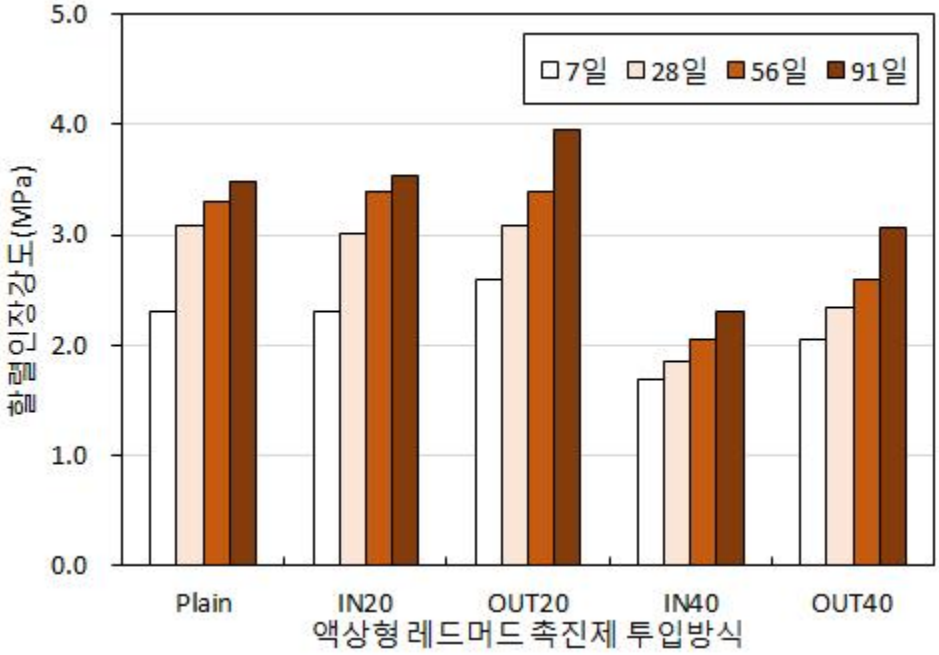
㉲ 인장강도

알칼리활성화 고감성 칼라콘크리트를 활용한 콘크리트의 쪼갬 인장강도 측정결과를 <그림 3.114> 및 <표 3.101>에 나타내었다. 액상형 레드머드 촉진제를 혼입하지 않은 플레인 콘크리트 쪼갬 인장강도는 재령 7일 2.31MPa, 재령 28일 3.06MPa, 재령 56일 3.21MPa, 재령 91일3.44 MPa을 나타내었다. 반면 시멘트량이 감소하는 내할 첨가 콘크리트의 쪼갬 인장강도는 IN20에서 2.29～3.51 MPa, IN40에서 1.71～2.31 MPa로 나타났으며, 시멘트량을 고정시킨 외할 첨가 콘크리트의 쪼갬 인장강도는 EX20에서 2.58～3.93 MPa, EX40에서 2.04～3.06 MPa를 나타내었다.

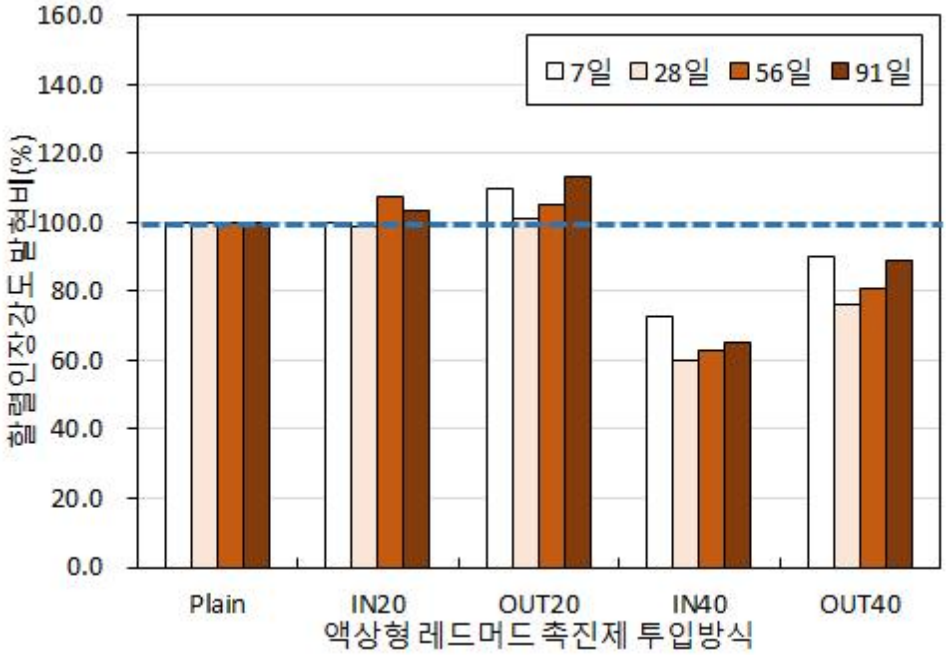
액상형 레드머드 촉진제를 혼입하지 않은 플레인 콘크리트와 비교한 액상형 레드머드 촉진제 첨가 콘크리트의 상대 쪼갬 인장강도비를 <그림 3.114>에 나타내었다. 플레인 콘크리트와 비교하여 단위 시멘트량이 감소하는 액상화 레드머드 내할 첨가 콘크리트의 상대 쪼갬 인장강도 비는 IN20에서 99～105 %, IN40에서 60.2～74.1 %로 나타났다. 콘크리트의 쪼갬 인장강도는 내할첨가 20 %에서 동등이상을 보이고 내할첨가 40 %에서는 30 %이상 감소하였다. 단위 시멘트량을 고정시킨 외할첨가 콘크리트의 상대 쪼갬 인장강도 비는 EX20에서 100～114 %, EX40에서 75.6～88.9 %로 나타나 콘크리트의 쪼갬 인장강도는 내할첨가와 유사하게 외할첨가 20 %에서는 동등이상의 쪼갬 인장강도를 보이고 있으나 외할첨가 40 %에서는 쪼갬 인장강도는 약 20 % 감소하는 것으로 나타났다.

<표 3.101> 압축강도 및 압축강도 발현비 측정결과

구분		할렬인장강도(MPa)				할렬인장강도 발현비(%)			
		7일	28일	56일	91일	7일	28일	56일	91일
활성 슬래그 바인더 (SB)	Plain	2.30	3.08	3.30	3.49	100.0	100.0	100.0	100.0
	IN20	2.30	3.02	3.39	3.54	100.0	98.5	107.5	103.2
	OUT20	2.60	3.08	3.40	3.95	110.0	101.1	105.2	113.4
	IN40	1.70	1.85	2.06	2.30	73.2	60.4	63.8	65.6
	OUT40	2.06	2.35	2.60	3.06	90.4	76.3	81.4	89.2



a) 할렬인장강도



b) 할렬인장강도 발현비

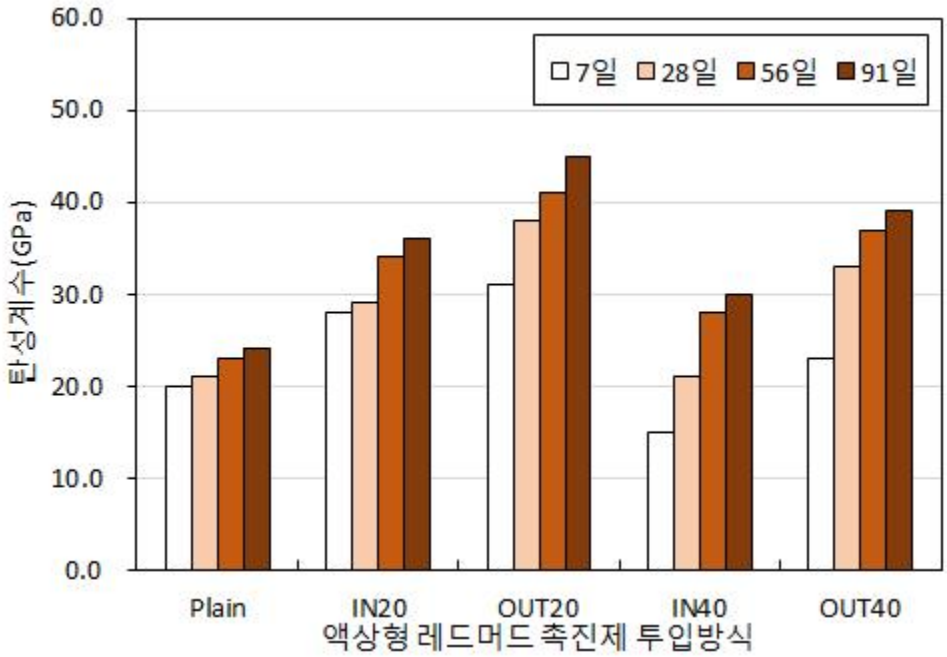
〈그림 3.114〉 할렬인장강도 및 발현비 측정결과

㈐ 탄성계수

알칼리활성화 고감성 칼라콘크리트를 활용한 콘크리트의 탄성계수 측정결과를 <표 3.102>에 나타내었다. 액상화 레드머드를 혼입하지 않은 플레인 콘크리트의 탄성계수는 <그림 3.115>에 나타낸바와 같이 재령 7일에 19.7GPa, 재령 28일에 20.2GPa, 재령 56일에 22.4GPa, 재령 91일에 23.7GPa를 나타내었다. 반면 시멘트량이 감소하는 내할 첨가의 콘크리트 탄성계수는 IN20에서 27.3～36.4GPa, IN40에서 15.3～30.3GPa로 나타났으며, 시멘트량을 고정시킨 외할 첨가의 콘크리트 탄성계수는 EX20에서 31.3～45.3GPa, EX40에서 24.5～39.0GPa를 나타내었다.

<표 3.102> 탄성계수 측정결과

구분		탄성계수(GPa)			
		7일	28일	56일	91일
활성 슬래그 바인더 (SB)	Plain	20.1	21.2	23.0	24.4
	IN20	28.7	29.5	34.4	36.6
	OUT20	31.6	38.5	41.3	45.8
	IN40	15.5	21.7	28.1	30.2
	OUT40	23.3	33.2	37.5	39.1



<그림 3.115> 탄성계수 측정결과

(다) 소결

본 절에서는 액상형 레드머드 촉진제 첨가방식에 따른 고감성 칼라콘크리트의 특성을 검토하였다. 그 결과 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 액상형 레드머드 촉진제 혼입 콘크리트의 슬럼프 측정결과 외할첨가 보다는 내할첨가에 의하여 상대적으로 높게 나타났고, 첨가량이 많을수록 감소하였다.
- 액상형 레드머드 촉진제 혼입 콘크리트의 압축강도 측정결과 액상형 레드머드 촉진제를 내할 또는 외할 첨가한 콘크리트는 강도가 감소하고 첨가량이 클수록 강도의 감소폭은 증가하는 것으로 나타났다.
- 액상형 레드머드 촉진제 혼입 콘크리트의 쪼갬 인장강도 측정결과 액상형 레드머드 촉진제를 내할 또는 외할 첨가한 콘크리트는 강도가 감소하고 첨가량이 클수록 강도의 감소폭은 증가하는 것으로 나타났다
- 액상화 레드머드 촉진제 혼입 콘크리트의 탄성계수 측정결과 액상화 레드머드를 혼입하지 않은 플레인 콘크리트의 탄성계수는 재령 7일에 19.7GPa, 재령 28일에 20.2GPa, 재령 56일에 22.4GPa, 재령 91일에 23.7GPa를 나타내었다. 반면 시멘트량이 감소하는 내할 첨가의 콘크리트 탄성계수는 IN20에서 27.3～36.4GPa, IN40에서 15.3～30.3GPa로 나타났으며, 시멘트량을 고정시킨 외할 첨가의 콘크리트 탄성계수는 EX20에서 31.3～45.3GPa, EX40에서 24.5～39.0GPa를 나타내었다.

(4) 고감성 칼라시멘트의 콘크리트 2차제품 활용기술

(가) 실험계획 및 방법

① 실험계획

알칼리활성화 고감성 칼라시멘트 콘크리트 2차제품의 특성을 검토하기 위한 실험계획을 <표 3.103>에 나타내었다. 결합재를 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)와 활성 슬래그바인더(SB)로 사용하여 액상형 레드머드 촉진제를 각 결합재 비율에 따라 0, 5, 10 % 대체하여 시험체를 제조하였다. 양생방법은 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 알칼리활성화 고감성 칼라시멘트의 활용용도를 고려하여 상온수중양생(20℃), 1일 고온증기양생(70℃) 후 상온양생 하였으며 측정항목으로는 슬럼프, 공기량, 단위용적중량, 압축강도를 측정하였다. <표 3.104>에 콘크리트의 배합을 나타내었다.

<표 3.103> 실험계획

결합재		레드머드 촉진제(%)	W/B	S/a	양생방법	측정항목
보통 포틀랜트 시멘트 (OPC)	OPC0	0	32.5	43	• 상온수중양생 (20℃) • 고온증기양생 후(70℃)상온양생	• 슬럼프 • 공기량 • 단위용적중량 • 압축강도 (7, 28, 56일,91일)
	OPC5	5				
	OPC10	10				
활성 슬래그 바인더 (SB)	SB0	0				
	SB5	5				
	SB10	10				

<표 3.104> 콘크리트 배합

결합재		W/B	S/a	단 위 질 량 (kg/㎥)					
				혼합수	시멘트	활성 슬래그 바인더	레드머드 촉진제	잔골재	굵은 골재
보통 포틀랜트 시멘트 (OPC)	OPC0	32.5	0.43	180	450	-	0	815	951
	OPC5	32.5	0.43	180	428	-	23	813	949
	OPC10	32.5	0.43	180	405	-	45	812	948
활성 슬래그 바인더 (SB)	SB0	32.5	0.43	180	-	450	0	780	910
	SB5	32.5	0.43	180	-	428	23	780	911
	SB10	32.5	0.43	180	-	405	45	781	911

② 사용재료

㉮ 결합재

알칼리활성화 고감성 칼라시멘트 콘크리트 2차제품의 특성을 검토하기 위해 사용한 결합재의 물리·화학적 특성을 <표 3.105>에 나타내었다. 결합재는 앞서 00절에서 제조된 산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더를 사용하였으며 비표면적 4,058cm^2/g, 밀도 2.83g/cm^3를 나타내고 있다. 또한 비교군으로 국내 S사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

<표 3.105> 결합재의 물리화학적 특성

구분	비표면적(cm^2/g)	밀도 (g/cm^3)	Ig. loss	화학적 성분 (%)					
				SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3
활성 슬래그 바인더 (SB)	4,058	2.83	2.23	22.1	8.9	1.4	54.9	3.3	5.2
보통 포틀랜트 시멘트 (OPC)	3,144	3.15	1.32	21.7	5.7	3.2	63.1	2.8	2.2

㉯ 골재

알칼리활성화 고감성 칼라시멘트 콘크리트 2차제품의 특성을 검토하기 위해 사용한 골재의 물성을 <표 3.106>에 나타내었다. 잔골재의 경우 밀도 2.56g/cm^3, 최대치수 5mm, 흡수율 1.01%의 부순모래를 사용하였으며, 굵은골재의 경우 밀도, 2.67g/cm^3, 최대치수 20mm, 흡수율 1.39%의 부순 굵은골재를 사용하였다.

<표 3.106> 골재의 물리적 특성

구분	물리적 특성
잔골재-부순모래	최대크기 : 5mm, 밀도 : 2.56 g/cm^3, 흡수율 : 1.01%
굵은골재-부순자갈	최대크기 : 25mm, 밀도 : 2.67 g/cm^3, 흡수율 : 1.39 %

㉰ 액상형 레드머드 촉진제

알칼리활성화 고감성 칼라시멘트 콘크리트 2차제품의 특성을 검토하기 위해 사용한 액상형 레드머드 촉진제는 선행연구에서 도출된 고형분 51.6%, 단위용적질량 1,570kg/cm^3, 평균입경 3.15㎛, 점도 7,850cP인 액상형 레드머드 촉진제를 사용하였다.

③ 실험방법

㉮ 슬럼프

알칼리활성화 고감성 칼라시멘트 콘크리트 2차제품의 특성을 검토하기 위한 방법으로서 슬럼프는 KS F 2402 「콘크리트의 슬럼프 시험방법」에 준하여 측정하였다. 시험방법으로서는 슬럼프콘의 용적을 3등분으로 나누어 각층마다 콘크리트를 넣어 다짐봉으로 전면을 고르게 25회 정도 다진다. 다짐이 종료된 후 슬럼프콘의 윗 부분을 다짐봉으로 고르게 한 후, 콘을 수직방향으로 들어 올린 후 콘의 상단으로부터 가라앉은 값을 측정하였다.

㉯ 단위용적질량 및 공기량

알칼리활성화 고감성 칼라시멘트 콘크리트 2차제품의 특성을 검토하기 위한 방법으로서 단위용적질량은 KS F 2409 「굳지 않은 콘크리트의 단위용적 질량 및 공기량 시험방법(질량방법)」에 준하여 측정하였다. 또한 공기량은 KS F 2421 「굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험방법」에 준하여 측정하였다. 공기량 시험은 콘크리트를 측정용기의 용적에 3층으로 나누어 고르게 분포시키며 각층을 25회씩 다진다. 이때 다짐대에 의해 생긴 빈틈은 용기의 측면을 두들겨서 없앤 후 윗부분을 고르게 긁어내어 용기의 상면과 일치시킨다. 다음 밸브를 잠근 다음 압력을 가하여 압력계의 눈금을 영점에 조정한 후 주밸브를 충분히 열어 눈금이 안정되었을 때 공기량을 측정한다. 공기량 시험은 KS F 2421규정에 의거 공기실 압력법에 의한 공기 함유량 시험방법으로 측정하고, 단위용적질량 시험은 KS F 2409규정에 의거 질량방법을 이용하여 측정하였다.

㉰ 압축강도

알칼리활성화 고감성 칼라시멘트 콘크리트 2차제품의 특성을 검토하기 위한 방법으로서 압축강도 시험은 KS F 2405 「콘크리트 압축강도 시험방법」에 준하여 측정하였다. 압축강도용 공시체는 각각의 배합별로 Ø 10×20㎝의 원주형몰드에 KS F 2403에 따라 제작하였으며, 표준 수중양생 하였다. 콘크리트 강도실험일은 재령 7일, 28일 및 56일에서 3개의 공시체를 평균하여 압축강도로 결정하였다.

(나) 실험결과 및 분석

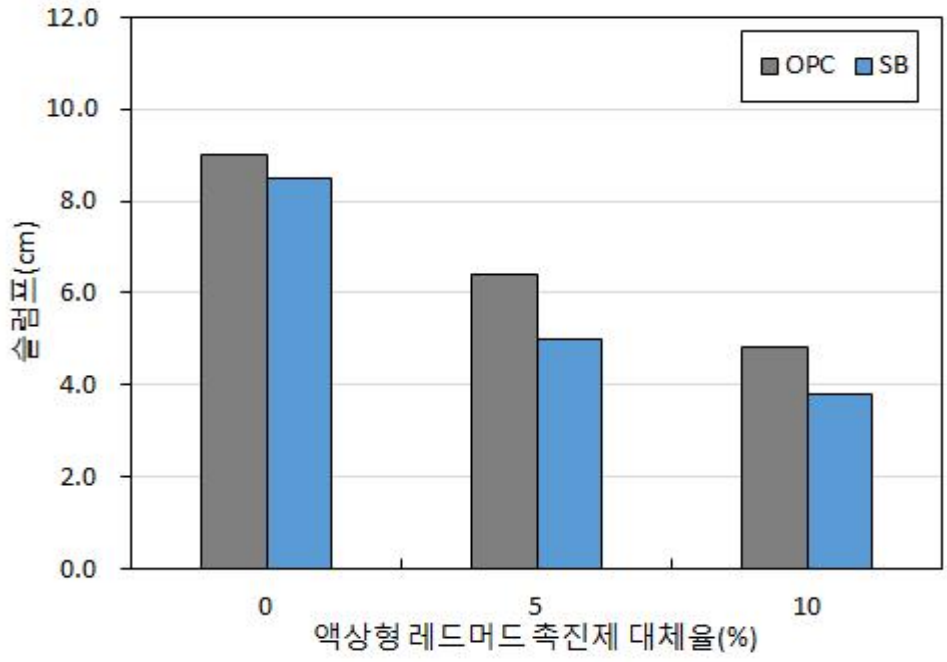
㉮ 슬럼프

알칼리활성화 고감성 칼라시멘트 콘크리트 2차제품의 슬럼프 측정결과를 <표 3.107> 및 <그림 3.116>에 나타내었다.

결합재를 보통 포틀랜트 시멘트로 사용한 OPC0의 경우 9.0cm, OPC5의 경우 6.4cm, OPC10의 경우 4.8cm 으로 나타났다. 결합재를 활성 슬래그 바인더로 사용한 SB0의 경우 8.5cm, SB5의 경우 5.0cm, SB10의 경우 3.8cm으로 나타났다. 슬럼프는 보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 경우보다 활성 슬래그 바인더를 결합재로 사용한 경우가 더 낮게 나타났다. 액상화 레드머드 촉진제의 대체율에 따른 슬럼프는 결합재 종류에 상관없이 액상형 레드머드 촉진제의 대체율이 증가할수록 낮아지는 경향을 보이고 있다.

<표 3.107> 슬럼프 측정결과

구분		슬럼프(cm)
보통 포틀랜트 시멘트 (OPC)	OPC0	9.0
	OPC5	6.4
	OPC10	4.8
활성 슬래그 바인더 (SB)	SB0	8.5
	SB5	5.0
	SB10	3.8



<그림 3.116> 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 슬럼프

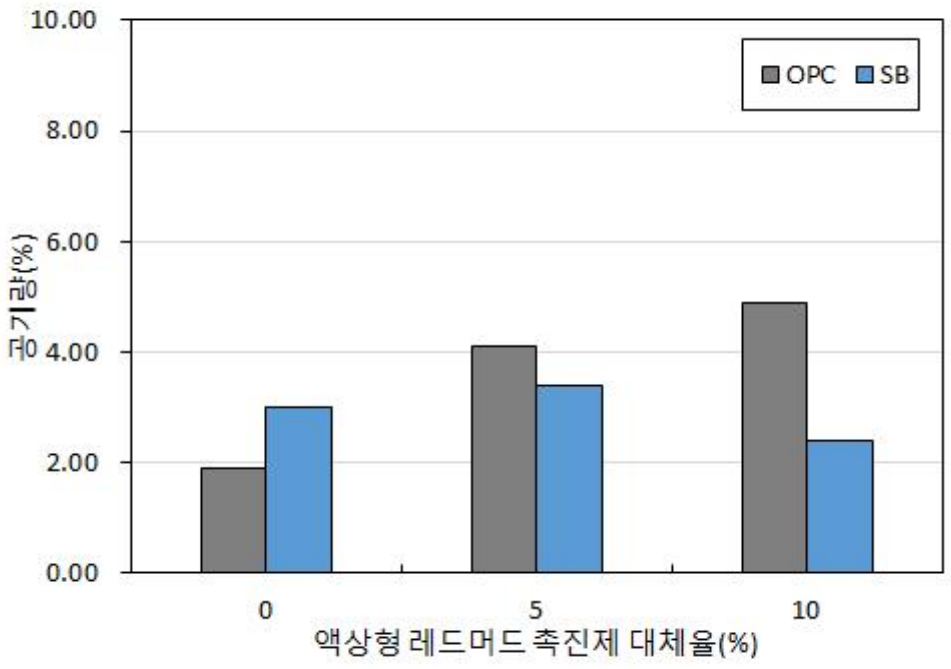
㉰ 공기량

알칼리활성화 고감성 칼라시멘트의 콘크리트 2차제품의 공기량 측정결과를 <표 3.108> 및 <그림 3.117>에 나타내었다.

결합재를 보통 포틀랜트 시멘트로 사용한 OPC0의 경우 1.9cm, OPC5의 경우 4.1cm, OPC10의 경우 4.9cm 으로 나타났으며, 공기량은 액상화 레드머드 촉진제의 대체율이 증가할수록 증가하는 경향이 보였다. 결합재를 활성 슬래그바인더로 사용한 SB0의 경우 3.0cm, SB5의 경우 3.4cm, SB10의 경우 2.4cm으로 나타났으며, 공기량은 액상화 레드머드 촉진제의 대체율이 증가할수록 점차 감소하는 경향이 보였다. 공기량은 보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 경우보다 활성 슬래그 바인더를 결합재로 사용한 경우가 더 낮게 나타났다. 액상화 레드머드 촉진제의 대체율에 따른 공기량은 결합재 종류에 상관없이 레드머드의 대체율이 증가할수록 낮아지는 경향을 보이고 있다.

<표 3.108> 공기량 측정결과

구분		공기량 (%)
보통 포틀랜트 시멘트 (OPC)	OPC0	1.9
	OPC5	4.1
	OPC10	4.9
활성 슬래그 바인더 (SB)	SB0	3.0
	SB5	3.4
	SB10	2.4



<그림 3.117> 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 공기량

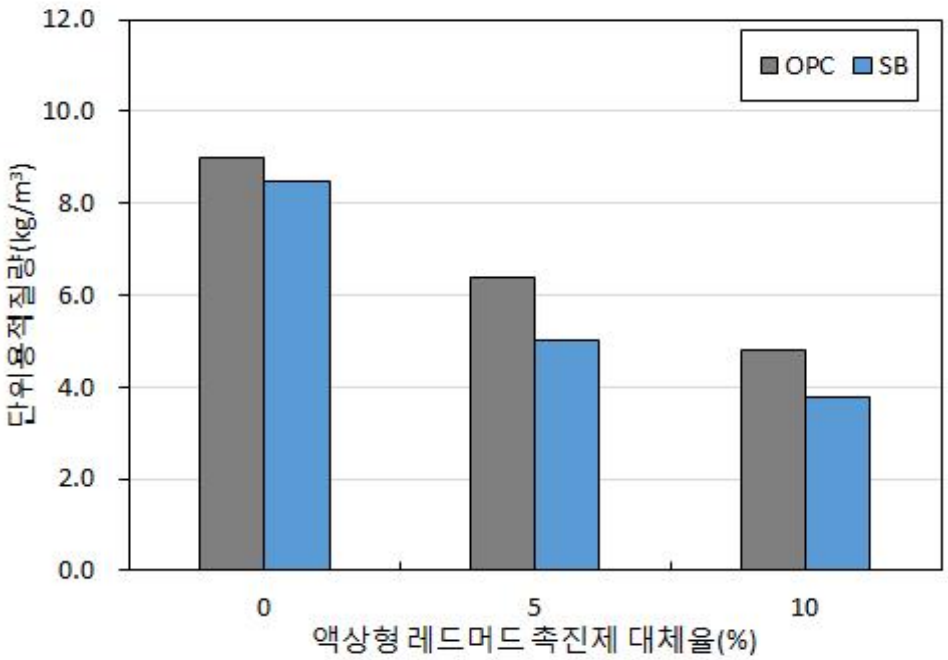
㈐ 단위용적질량

알칼리활성화 고감성 칼라시멘트 콘크리트 2차제품의 단위용적질량 측정결과를 <표 3.109> 및 <그림 3.118>에 나타내었다.

단위용적질량 측정결과 결합재를 보통 포틀랜트 시멘트로 사용한 OPC0의 경우 2.18kg/m^3, OPC5의 경우 2.26kg/m^3, OPC10의 경우 2.25kg/m^3 으로 나타났다. 결합재를 활성 슬래그 바인더로 사용한 경우 SB-의 경우 2.26kg/m^3, SB-5의 경우 2.25kg/m^3, SB10의 경우 2.23kg/m^3으로 나타났다. 보통 포틀랜트 시멘트를 결합재로 사용한 경우보다 활성 슬래그 바인더를 결합재로 사용한 경우가 슬럼프는 더 낮게 나타났다. 액상화 레드머드 촉진제의 대체율에 따른 단위용적질량은 결합재 종류에 상관없이 보통 포틀랜트 시멘트와 활성 슬래그 바인더가 비슷한 경향으로 나타났다.

<표 3.109> 단위용적질량 측정결과

구분		단위용적질량 (kg/㎥)
보통 포틀랜트 시멘트 (OPC)	OPC0	2.18
	OPC5	2.26
	OPC10	2.25
활성 슬래그 바인더 (SB)	SB0	2.26
	SB5	2.25
	SB10	2.23



<그림 3.118> 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 단위용적질량

㉲ 압축강도

알칼리활성화 고감성 칼라시멘트 콘크리트 2차제품의 압축강도 측정결과를 <표 3.110> 및 <그림 3.119>, <그림 3.120>에 나타내었다.

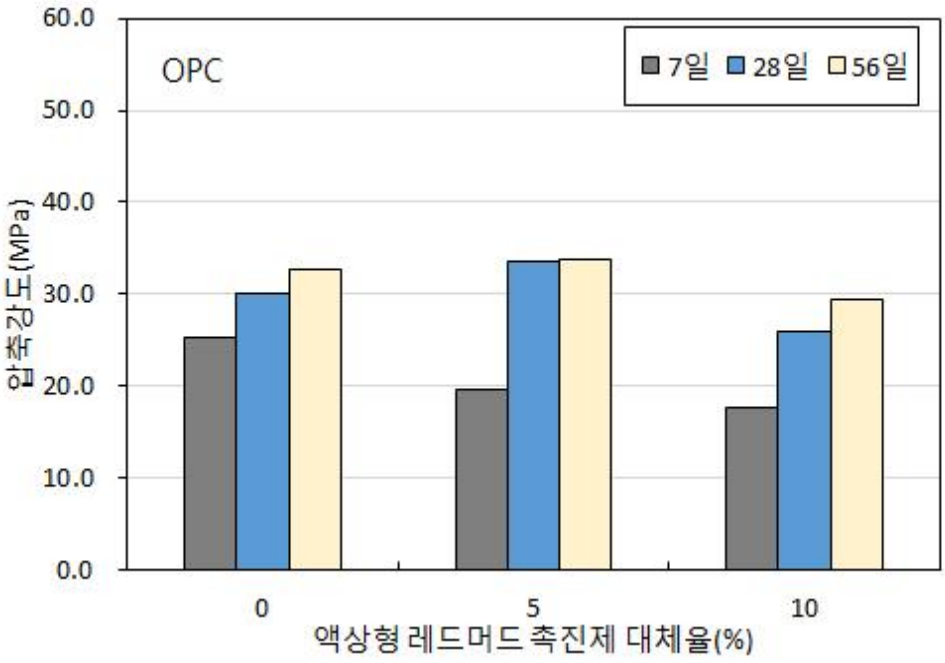
증기양생의 경우 결합재를 보통 포틀랜트 시멘트로 사용한 OPC0는 30.0MPa, OPC5는 33.6MPa, OPC10는 25.9MPa 으로 나타났으며 결합재를 활성 슬래그 바인더로 사용한 SB0는 22.7MPa, SB5는 30.3MPa, SB10는 34.7MPa로 나타났다.

수중양생의 경우 결합재를 보통 포틀랜트 시멘트로 사용한 OPC0는 43.9MPa, OPC5는 32.7MPa, OPC10는 29.4MPa 으로 나타났으며 결합재를 활성 슬래그 바인더로 사용한 SB0는 17.4MPa, SB5는 28.4MPa, SB10는 30.9MPa로 나타났다.

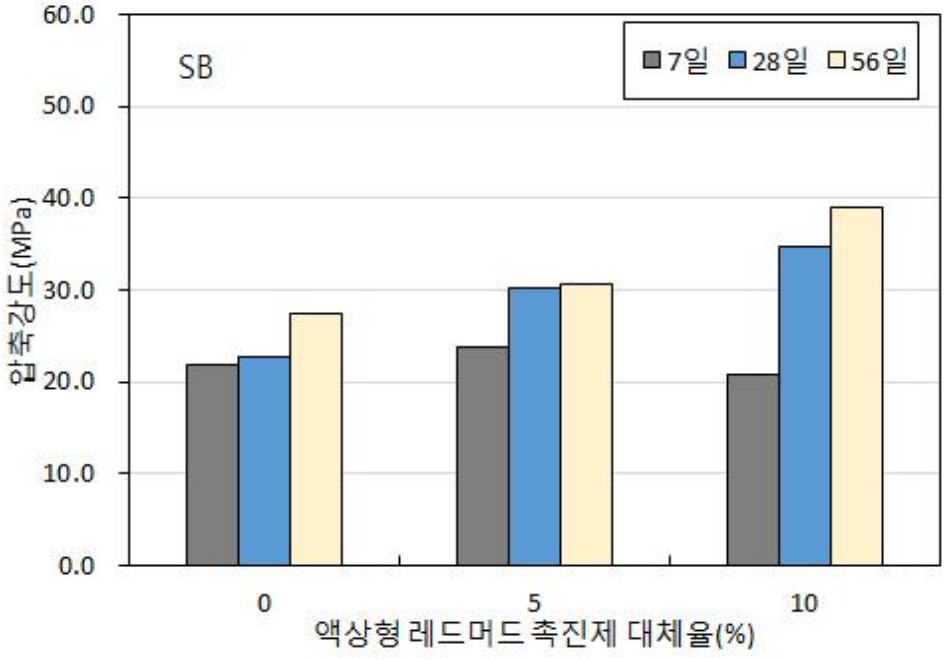
양생방법에 따른 압축강도에서 보통 포틀랜트 시멘트를 사용한 결합재에서는 증기양생보다 수중양생이 더 높은 강도를 나타냈으며, 활성 슬래그 바인더를 사용한 결합재에서는 수중양생보다 증기양생이 더 높은 강도를 나타내었다. 압축강도는 액상형 레드머드 촉진제의 대체율이 높아질수록 보통 포틀랜트 시멘트는 감소하고 활성바인더는 증가하는 것으로 나타났다.

<표 3.110> 압축강도

구분		압축강도(MPa)					
		증기양생			수중양생		
		7일	28일	56일	7일	28일	56일
보통 포틀랜트 시멘트 (OPC)	OPC0	25.2	30.0	32.6	32.5	43.9	44.2
	OPC5	19.7	33.6	33.7	23.6	32.7	33.1
	OPC10	17.7	25.9	29.5	20.9	29.4	30.1
활성 슬래그 바인더 (SB)	SB0	21.8	22.7	27.5	16.8	17.4	20.0
	SB5	23.7	30.3	30.7	23.5	28.4	30.6
	SB10	20.8	34.7	38.9	27.1	30.9	34.2

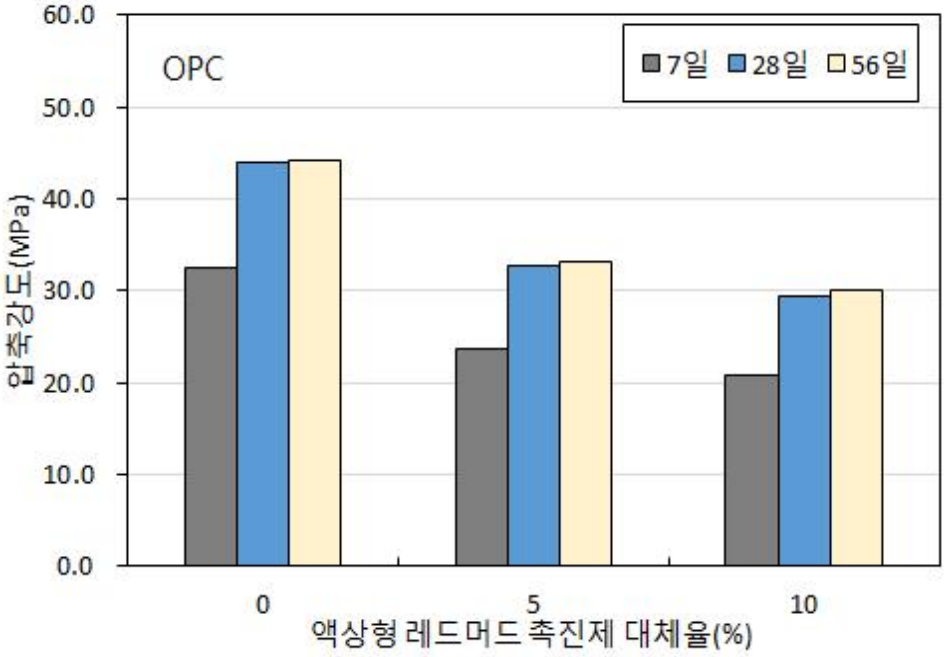


(a) OPC

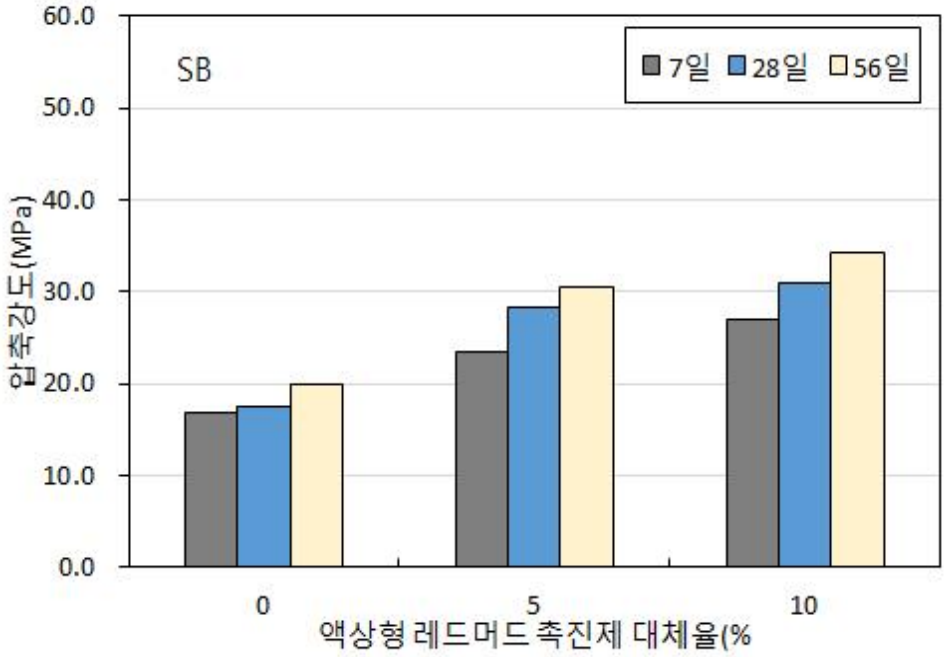


(b) SB

<그림 3.119> 결합재 종류별 압축강도 (증기양생)



(a) OPC



(b) SB

<그림 3.120> 결합재 종류별 압축강도 (수중양생)

(다) 소결

본 절에서는 알칼리활성화 고감성 칼라시멘트 콘크리트 2차제품의 특성을 검토하기 위해 액상형 레드머드 촉진제를 각 결합재 비율에 따라 대체하고 양생방법을 상온수중양생과 고온증기 양생으로 구분하여 특성을 검토하였다. 그 결과 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 알칼리활성화 고감성 칼라시멘트 콘크리트 2차제품의 특성을 검토한 결과 슬럼프의 경우 결합재 종류에 상관없이 액상형 레드머드 촉진제의 대체율이 증가할수록 낮아지는 경향을 보이고 있다.
- 알칼리활성화 고감성 칼라시멘트 콘크리트 2차제품의 특성을 검토한 결과 공기량의 경우 액상화 레드머드 촉진제의 대체율에 따른 공기량은 결합재 종류에 상관없이 레드머드의 대체율이 증가할수록 낮아지는 경향을 보이고 있다.
- 알칼리활성화 고감성 칼라시멘트 콘크리트 2차제품의 특성을 검토한 결과 단위용적질량의 경우 결합재 종류에 상관없이 보통 포틀랜트 시멘트와 활성 슬래그바인더가 비슷한 경향으로 나타났다.
- 알칼리활성화 고감성 칼라시멘트 콘크리트 2차제품의 특성을 검토한 결과 양생방법에 따른 압축강도의 경우 보통 포틀랜트 시멘트를 사용한 결합재에서는 증기양생보다 수중양생이 더 높은 강도를 나타냈으며, 활성 슬래그바인더를 사용한 결합재에서는 수중양생보다 증기양생이 더 높은 강도를 나타내었다. 압축강도는 액상형 레드머드 촉진제의 대체율이 높아질수록 보통 포틀랜트 시멘트는 감소하고 활성바인더는 증가하는 것으로 나타났다.

(5) 결언

본 절에서는 액상화 레드머드 촉진제를 활용한 알칼리활성화 슬래그-레드머드 고감성 칼라시멘트의 활용기술을 검토 하였다. 이를 위해 고감성 칼라시멘트 흙포장 활용기술, 고감성 칼라시멘트의 콘크리트 활용기술, 고감성 칼라시멘트 콘크리트 2차제품의 특성을 검토 하였다. 그 결과 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 고감성 칼라시멘트를 흙포장재에 적용하기 위한 요구 성능 및 목표 수준을 검토결과 흙포장재 단체표준규격(SPS-KSCICO-001-2006)을 통해 사용재료 및 성증기준을 확인 할 수 있었다. 결합재 종류별 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 다짐시험 결과 최적함수비는 9.4～9.8%의 구역내에 분포하였고, 최대 건조단위중량은 2.034～2.044 t/m^3을 나타내고 있어 배합에 따른 분산은 크게 나타나지 않고 있다. 결합재 종류별 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 압축강도의 경우 액상형 레드머드 촉진제 대체율이 증가할수록 감소하였으며, 28일 압축강도는 14일 압축강도와 비교하여 오히려 감소하는 경향이 나타났다. 흡수율 측정결과 결합재인 보통 포틀랜트 시멘트(OPC)와 활성 슬래그바인더(SB)의 흡수율을 비교시 보통 포틀랜트 시멘트(OPC)가 활성 슬래그 바인더(SB)보다 높은 흡수율을 보였으며, 액상형 레드머드 촉진제 대체율 60%에서는 활성 슬래그바인더(SB)가 더 높은 것으로 나타났다. 백화시험 결과 결합재 종류별 백화발생면적비는 활성 슬래그바인더(SB) 흙포장재의 경우 액상형 레드머드 촉진제 대체율 40%까지는 백화발생이 거의 나타나지 않고 있으나 보통 포틀랜트 시멘트(OPC) 흙포장재의 경우 액상형 레드머드 촉진제 대체율에 따른 백화발생면적비가 뚜렷하게 증가하였다.
2) 액상형 레드머드 촉진제 혼입 콘크리트의 슬럼프 측정결과 외할첨가 보다는 내할첨가에 의하여 상대적으로 높게 나타났고, 첨가량이 많을수록 감소하였다. 압축강도 측정결과 액상형 레드머드 촉진제를 내할 또는 외할 첨가한 콘크리트는 강도가 감소하고 첨가량이 클수록 강도의 감소폭은 증가하는 것으로 나타났다. 쪼갬 인장강도 측정결과 액상형 레드머드 촉진제를 내할 또는 외할 첨가한 콘크리트는 강도가 감소하고 첨가량이 클수록 강도의 감소폭은 증가하는 것으로 나타났다. 탄성계수 측정결과 액상화 레드머드를 혼입하지 않은 플레인 콘크리트의 탄성계수는 재령 7일에 19.7GPa, 재령 28일에 20.2GPa, 재령 56일에 22.4GPa, 재령 91일에 23.7GPa를 나타내었다. 반면 시멘트량이 감소하는 내할첨가의 콘크리트 탄성계수는 IN20에서 27.3～36.4GPa, IN40에서 15.3～30.3GPa로 나타났으며, 시멘트량을 고정시킨 외할 첨가의 콘크리트 탄성계수는 EX20에서 31.3～45.3GPa, EX40에서 24.5～39.0GPa를 나타내었다.
3) 고감성 칼라시멘트 콘크리트의 2차제품 활용 가능성을 검토한 결과 슬럼프의 경우 결합재 종류에 상관없이 액상형 레드머드 촉진제의 대체율이 증가할수록 낮아지는 경향을 보이고 있다. 공기량의 경우 액상화 레드머드 촉진제의 대체율에 따른 공기량은 결합재 종류에 상관없이 레드머드의 대체율이 증가할수록 낮아지는 경향을 보이고 있다. 단위용적질량의 경우 결합재 종류에 상관없이 보통 포틀랜트 시멘트와 활성 슬래그바인더가 비슷한 경향으로 나타났다. 압축강도의 경우 보통 포틀랜트 시멘트를 사용한 결합재에서는 증기양생보다 수중양생이 더 높은 강도를 나타냈으며, 활성 슬래그바인더를 사용한 결합재에서는 수중양생보다 증기양생이 더 높은 강도를 나타내었다. 압축강도는 액상형 레드머드 촉진제의 대체율이 높아질수록 보통 포틀랜트 시멘트는 감소하고 활성바인더는 증가하는 것으로 나타났다.

바. 알칼리활성화 슬래그-레드머드 고감성 칼라시멘트의 현장 적용성 평가

(1) 서언

최근 감성융합 기술의 세계시장은 연평균 27%씩 급성장 하고 있으며 건설 분야에서도 감성 활용기술의 필요성이 증대되고 있다. 기존에는 버려지던 산업부산물을 단순히 재활용하는 차원에서 향후에는 재활용에 새로운 가치를 더해 감성을 부여하는 가치상향형의 고감성 업싸이클링(upcycling) 건설기술에 대한 요구가 증대되고 있다.

한편 보오크사이트로(Bauxite)부터 수산화알루미늄 추출공정에서 발생되는 레드머드 슬러지는 Fe_2O_3가 약 20% 함유되어 있으며 자연스런 천연 황토색으로 건설 산업분야에 활용 가능성이 높다. 국내의 경우 산업부산물 레드머드는 함수율 50%의 슬러지 형태로 연간 약 30만톤이 발생하고 있다.

또한 레드머드를 건설자재로서 재활용하고자 하는 국내의 대표적인 연구로서 레드머드를 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트로 재활용 하고자 하는 논문을 발표하였다. 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트는 알칼리자극제, 고로슬래그와 레드머드로 구성되어 있는 클링커 프리 시멘트이다. 그러나 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트는 레드머드 대체율이 증가할수록 압축강도는 감소하고 직경 10~1000㎚의 모세관 공극이 증가하는 문제점이 있다. 또한 나트륨계 자극제로 사용되는 레드머드로 인하여 Na_2SO_4의 물질로서 백화발생이 증가하는 것으로 보고하였다.

산업부산물 레드머드는 보오크사이트 원광석으로부터 수산화알루미늄($Al(OH)_3$) 및 산화알루미늄(Al_2O_3) 성분을 가성소다 용액으로 추출하고 다시 고형물질록 석출되는 베이어프로세스 공정으로 인하여 함수율 50%의 슬러지 상태로 배출되고 있다. 현재 레드머드는 함수율 10% 내외의 분말형태로 제조하여 재활용하고 있다. 그러나 분말형태의 제조는 가열 및 분쇄 공정이 필요하고 이로 인하여 제조원가가 상승하여 재활용이 제한적이다. 연간 30만톤이 발생되고 있는 레드머드를 건설 산업에 적극적으로 재활용하기 위하여 취급이 간편하고 제조원가를 절감시킬 수 있는 레드머드 액상화 기술개발이 요구된다.

한편 최근 지방 자치단체를 중심으로 문화탐방로, 자전거도로 및 주차장(광장)등을 건설하면서 친환경적이고 정서적인 안정감을 주는 흙포장재의 보급이 확대되고 있다. 국내 흙포장 시장규모는 2014년부터 2016년까지의 조달청 나라장터 계약금액을 근거로 평균하여 산출한 결과 평균 약 2,500억 원으로 분석된다. 천연 흙포장의 경우 천연 황토 또는 마사토에 시멘트 또는 고화재와 같은 결합재를 혼합하여 다짐하는 방법으로 시공되어지고 있다. 그러나 다양한 적용 환경으로 원지반에서의 현장 발생토가 다르기 때문에 콘크리트와 비교하여 상당히 고가이지만 내구성이 현저히 저하되어 표면 파괴, 포장면에서 마사토의 날림 등과 같은 현상으로 흙포장 자체에 대한 부정적인 이미지를 심어주고 있는 실정이다.

이와 같은 고가의 낮은 내구성을 지닌 천연 흙포장재를 대체할 수 있는 방법으로 산업부산물인 레드머드를 콘크리트에 착색재로서 재활용함으로서 내구성이 향상된 천연 흙포장 질감을 표현할 수 있을 것으로 판단된다. 분말 레드머드를 콘크리트 착색재로 사용할 경우 기존 콘크리트 제조 플랜트에 혼입하여 사용하게 되며 이로 인한 플랜트 변색으로 인하여 사용 기피 현상이 나타나고 있다. 그러나 액상화 레드머드의 사용은 제조 플랜트에서 생산된 일반 콘크리트를 운반트럭으로 이동하여 현장에서 혼입하여 사용할 수 있는 장점이 있다.

따라서 본 절에서는 알칼리활성화 슬래그 레드머드 고감성 칼라시멘트를 활용하여 고감성 칼라시멘트 흙포장재에 시험적용하고 현장 활용성 및 시공성을 평가하고자 하였다.

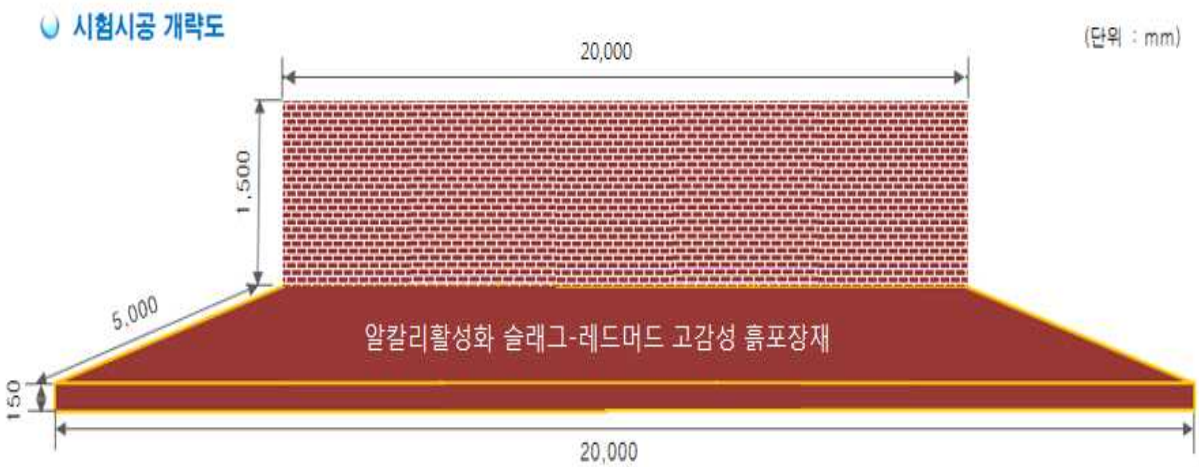
(2) 고감성 칼라 시멘트의 흙포장 현장 시험시공

(가) 개요

알칼리활성화 슬래그 레드머드 고감성 칼라시멘트를 활용한 흙포장재의 현장시험시공을 실시하기 위한 계획을 <표 3.111> 및 <그림 3.121>에 나타내었다. 현장시험시공은 <그림 3.122>에 나타낸 바와 같이 알루미나를 추출하고 레드머드 발생지인 전라남도 영암군에 위치하고 있는 케이씨㈜ 야적장에서 시험시공을 진행하기로 하고, 본사 관계자 및 시험시공 위치를 선정하였다.

<표 3.111> 케이씨㈜ 흙포장재 현장시험시공 개요

구 분	단 위	규 격	면 적(㎡)	혼입율	비 고
흙포장면적	m^2	T=15cm	100	15%	-
장 소	KC(주) 전라남도 영암군 삼호읍 대아로 57 - 삼불교 건너서 바로 우측				
기 간	2017.03.08. ~ 2017.03.10				



<그림 3.121> 흙포장재 2차 시험시공 개략도



<그림 3.122> 흙포장재 2차 시험시공 개략도 및 위치

(나) 현장시험시공

알칼리활성화 슬래그 레드머드 고감성 칼라시멘트를 활용한 흙포장재의 시험시공 과정을 <그림 3.123> ~ <그림 3.126>에 나타내었다. 현장시험시공은 장비 운반 및 이동 → 바탕정리 → 자재입고확인 → 잡석포설 → 잡석다짐 → 흙포장재 바인더 투입 → 혼합 → 믹싱 → 운반 → 포설 면잡기 → 다짐 보호막 설치 → 롤러다짐 → 2차 포설 및 다짐 → 주변부 정리 → 완료 순으로 진행 하였다.



a. 장비 운반 및 이동



b. 장비 운반 및 이동



c. 바탕정리



d. 바탕정리 완료



e. 자재입고확인



f. 자재 보관

<그림 3.123> 케이씨㈜ 흙포장재 현장시험시공_준비 및 바탕정리



a. 기층용 25mm 잡석 입고



b. 석분 입고



c. 장비 이송완료



d. 장비 이송사이트 정리



e. 잡석 운반



f.잡석 포설



g. 잡석 다짐



h. 석분 준비

〈그림 3.124〉 케이씨㈜ 흙포장재 현장시험시공_자재입고



a. 흙포장재 바인더 투입



b. 재료 투입(1)



c. 재료 투입(2)



d. 혼합 믹싱



e. 완료 운반



f. 운반



g. 포설 면잡기



h. 다짐 보호막 설치

<그림 3.125> 케이씨㈜ 흙포장재 현장시험시공_흙포장재 포장(1)



a. 롤러다짐



b. 2차 포설 및 다짐



c. 주변부 정리(1)



d. 주변부 정리(2)



e. 흙포장재 설치완료



f. 품질평가 시험체 제작



g. 시공완료(1)



h. 시공완료 경과 1년 후

<그림 3.126> 케이씨㈜ 흙포장재 현장시험시공_흙포장재 포장(2)

(다) 현장시험시공 결과

① 압축강도 및 휨강도

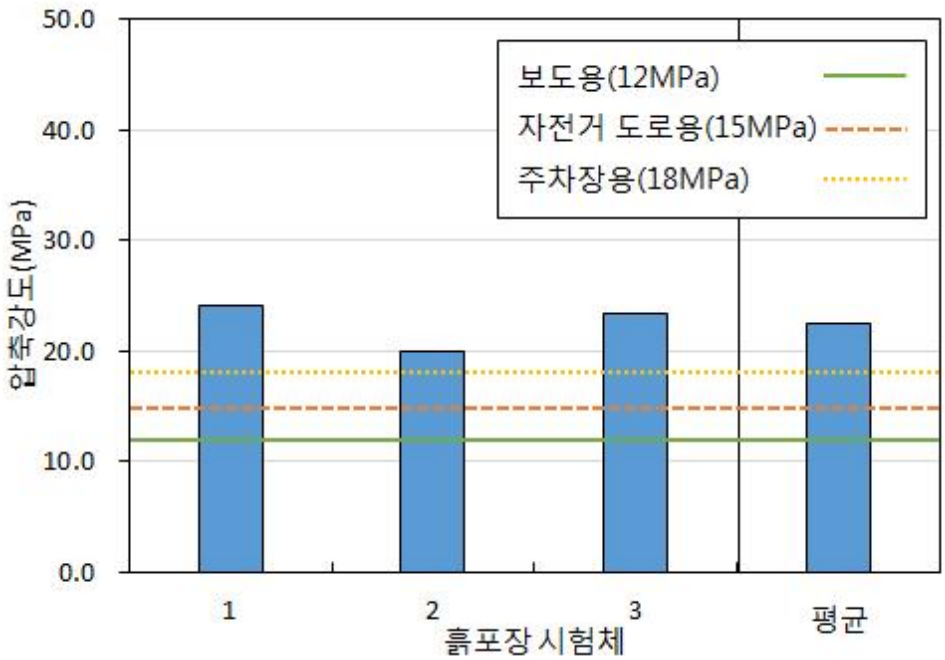
알칼리활성화 슬래그-레드머드 고감성 칼라 시멘트를 활용한 흙포장재의 현장시험시공 28일 압축강도 및 휨강도 측정 결과를 <표 3.112>에 나타내었다.

알칼리활성화 슬래그-레드머드 고감성 칼라 시멘트를 활용한 흙포장재의 현장시험시공 28일 압축강도는 <그림 3.127>에 나타낸 바와 같이 평균 22.5MPa로 흙포장재 규격서 기준 보도용 12MPa, 자전거 도로용 15MPa, 주차장 18MPa 이상을 만족하는 것으로 나타났다.

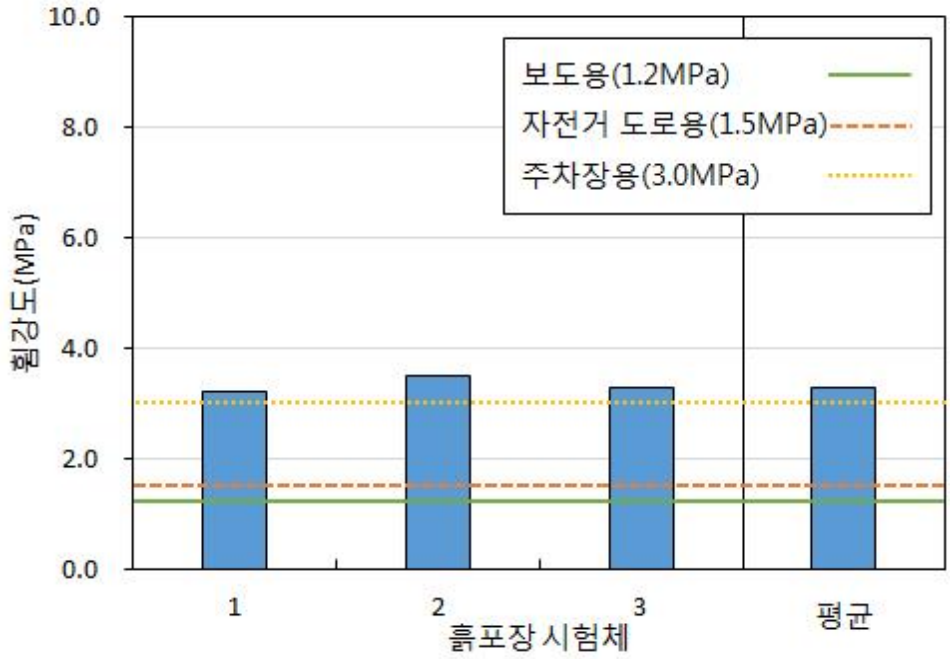
알칼리활성화 슬래그-레드머드 고감성 칼라 시멘트를 활용한 흙포장재의 현장시험시공 28일 휨강도는 <그림 3.128>에 나타낸 바와 같이 평균 3.3MPa로 흙포장재 규격서 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

<표 3.112> 케이씨㈜ 흙포장재 시험시공 품질평가 (28일)

구 분	압축강도 (MPa)	휨강도 (MPa)	단체표준 규격서 기준		단체표쥰 규격서 만족여부
			압축강도(MPa)	휨강도(MPa)	
흙포장재	24.1	3.2	•보도용 12이상 •자전거도로용 15이상 •주차장용 18이상	•보도용 12이상 •자전거도로용 1.5이상 •주차장용 3.0이상	OK
	19.9	3.5			
	23.4	3.3			
평균	22.5	3.3			



<그림 3.127> 압축강도 측정결과



<그림 3.128> 휨강도 측정결과

② 미끄럼 저항성 및 동결융해 저항성

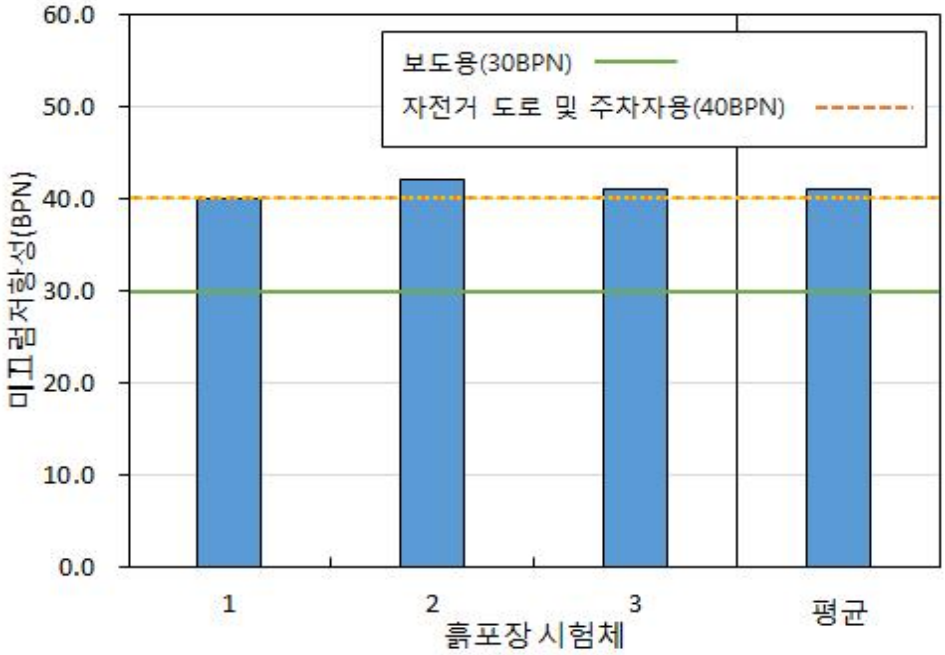
알칼리활성화 슬래그-레드머드 고감성 칼라 시멘트를 활용한 흙포장재의 현장시험시공 28일 미끄럼 저항성 및 동결융해 저항성 측정 결과를 <표 3.113>에 나타내었다.

알칼리활성화 슬래그-레드머드 고감성 칼라 시멘트를 활용한 흙포장재의 현장시험시공 28일 미끄럼 저항성은 <그림 3.129>에 나타낸 바와 같이 평균 41BPN으로 흙포장재 규격서 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

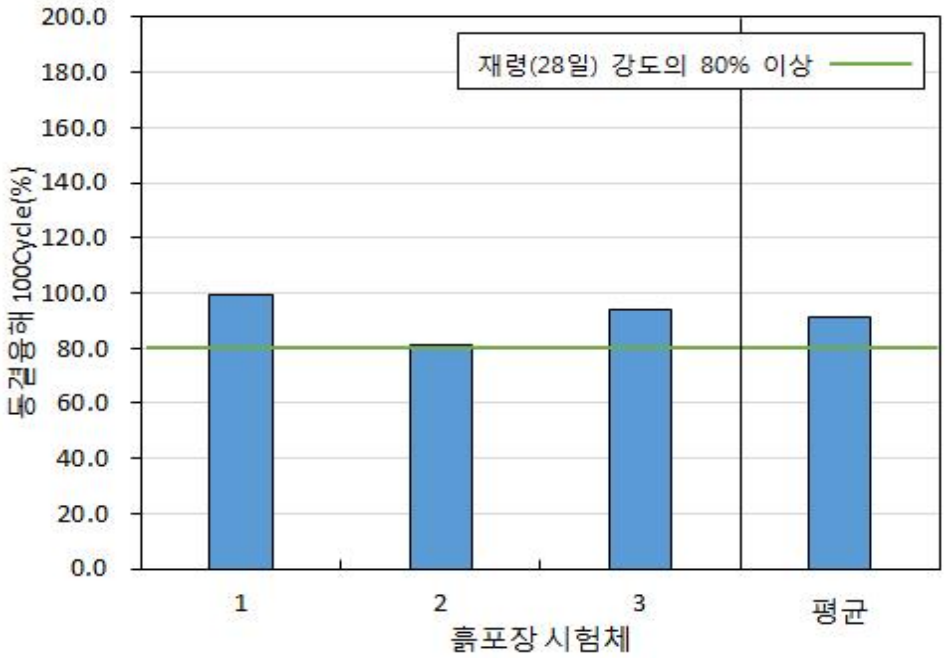
알칼리활성화 슬래그-레드머드 고감성 칼라 시멘트를 활용한 흙포장재의 현장시험시공 28일 동결융해 100cycle 이후 측정결과는 <그림 3.130>에 나타낸 바와 같이 평균 20.5MPa로 약 91% 이상의 강도를 유지하였으며, 규격서 기준 80%이상을 만족하는 것으로 나타났다.

<표 3.113> 케이씨㈜ 흙포장재 시험시공 품질평가 (28일)

구 분	미끄럼 저항성 (BPN)	동결융해 100cycle (%)	단체표준 규격서 기준		단체표쥰 규격서 만족여부
			미끄럼 저항성 (BPN)	동결융해 100cycle (%)	
흙포장재	40	99.4	•보도용 30이상 •자전거도로용, 주차자용 40이상	•재령(28일) 강도의 80% 이상	OK
	42	81.2			
	41	94.1			
평균	41	91.0			



<그림 3.129> 미끄럼 저항성 측정결과



<그림 3.130> 동결융해 100cycle 이후 측정결과

(라) 소결

본 절에서는 고감성 칼라 시멘트를 활용한 흙포장재의 현장시험시공을 검토하고자 하였다. 그 결과 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 알칼리활성화 슬래그-레드머드 고감성 칼라 시멘트를 활용한 흙포장재의 현장시험시공 28일 압축강도 측정결과 평균 22.5MPa로 흙포장재 규격서 기준 보도용 12MPa, 자전거 도로용 15MPa, 주차장 18MPa 이상을 만족하는 것으로 나타났다.
- 알칼리활성화 슬래그-레드머드 고감성 칼라 시멘트를 활용한 흙포장재의 현장시험시공 28일 휨강도 측정결과 평균 3.3MPa로 흙포장재 규격서 기준을 만족하는 것으로 나타났다.
- 알칼리활성화 슬래그-레드머드 고감성 칼라 시멘트를 활용한 흙포장재의 현장시험시공 28일 미끄럼 저항성 측정결과 평균 41BPN으로 흙포장재 규격서 기준을 만족하는 것으로 나타났다.
- 알칼리활성화 슬래그-레드머드 고감성 칼라 시멘트를 활용한 흙포장재의 현장시험시공 28일 동결융해 100cycle 이후 측정결과 평균 20.5MPa로 약 91%이상의 강도를 유지하였으며, 규격서 기준 80%이상을 만족하는 것으로 나타났다.

(3) 고감성 칼라 시멘트의 콘크리트 2차제품 현장 시험시공

(가) 개요

고감성 칼라 시멘트를 활용한 콘크리트 2차제품 현장시험시공을 실시하기 위해 <표 3.114> 및 <그림 3.131> ~ <그림 3.133>에 나타낸바와 같이 콘크리트 2차제품을 제조하는 업체의 설비를 활용하여 고감성 칼라 시멘트 콘크리트 2차제품을 제조하고자 하였다. 해당 업체는 충청남도 공주시 우성면 공수원로 3-110에 위치한 ㈜콘스텍이며, 시험생산 후 모니터링을 위해 관련 담당자 및 본사 관계자와 사전 협의 후 레드머드가 발생되는 전라남도 영암군에 위치한 케이씨㈜ 야적장을 선정하여 조적하기로 하였다.

<표 3.114> 고감성 칼라시멘트 콘크리트 2차제품 제조시험

제 품 명	고감성 칼라 시멘트의 콘크리트 2차제품	생산업체	㈜콘스텍
용 도	옹벽용	규 격	기본형 (450×500×300×200mm)
생 산 량	약 9 톤	생산개수	400개



<그림 3.131> 콘크리트 2차제품 시험생산 개략도 및 위치





<그림 3.132> ㈜콘스텍





<그림 3.133> 생산플랜트 전경

(나) 시험생산

고감성 칼라 시멘트를 활용한 콘크리트 2차제품의 현장시험시공을 진행하기 위한 시험생산 과정을 <그림 3.134>에 나타내었다. 시험생산 순서는 골재준비 → 비빔 후 토출 → 이송 → 형틀 내 투입 → 진동다짐 → 고온증기양생 → 가압성형 → 완료 순으로 진행하였다.



a. 액상형 레드머드 촉진제 투입



b. 비빔 후 토출



c. 이송



d. 형틀 내 투입



e. 진동다짐



f. 고온증기양생



g. 가압성형



h. 완료

<그림 3.134> 콘크리트 2차제품 생산과정

(다) 현장시험시공

고감성 칼라 시멘트를 활용한 콘크리트 2차제품 현장시험시공을 실시하기 위해 <표 3.115> 및 <그림 3.135>에 고감성 칼라 콘크리트 2차제품 시험조적 개요를 나타내었다. 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 콘크리트 2차제품 생산 후 모니터링을 위해 관련 담당자 및 본사 관계자와 사전 협의 후 레드머드 발생지인 전라남도 영암군에 위치하고 있는 케이씨㈜ 야적장에 고감성칼라 콘크리트 2차제품을 조적하였다.

<표 3.115> 고감성 칼라 시멘트 콘크리트의 2차제품 시험시공 개요

구 분	내 용
장 소	전라남도 영암군 삼호읍 대아로 57 KC(주)
기 간	2017.03.08.~ (3일간)
시공면적/수량	36 / 400개
투입장비	포크레인 1대 (02)
인력구성	작업반장(1인) + 특별인부(2인) + 보통인부(2인)
시공순서	바탕정리→1단 조적→블록 흙 채움→2단 쌓기→반복→마무리



<그림 3.135> 콘크리트 2차제품 시험조적 개략도 및 위치

(라) 현장시험시공

고감성 칼라 시멘트를 활용한 콘크리트 2차제품의 현장시험시공을 진행하기 위한 현장시험시공순서를 <그림 3.136>에 나타내었다. 현장시험시공 순서는 칼라보강토 옹벽블록 준비 → 조적 → 완료 순으로 진행하였다.



a. 칼라보강토 옹벽블록



b. 칼라보강토 옹벽블록 조적(1)



c. 칼라보강토 옹벽블록 조적(2)



d. 칼라보강토 옹벽블록 조적(3)



e. 칼라보강토 옹벽블록 조적완료



f. 시공 완료 1년 경과 후

<그림 3.136> 케이씨㈜ 흙포장재 현장 콘크리트 2차제품 조적

(마) 현장시험시공 결과 및 분석

① 치수측정

고감성 칼라 시멘트를 활용한 콘크리트 2차제품의 치수측정 결과를 <표 3.116> 및 에 나타내었다. 치수 측정결과 콘크리트 호안 및 옹벽 블록에 관한 <표 0.0>단체표준(SPS-KCIC0001 - 0703)에서 규정하고 있는 ± 2mm를 모두 만족시키는 것으로 나타났다.

<표 3.116> 콘크리트 2차제품 시제품의 치수 측정결과

구 분	측정부위별 치수(mm)			
	a	b	c	h
칼라보강토 옹벽블록	449	448	301	200
설계제원	450	500	300	200
허용차	± 2mm			

② 압축강도

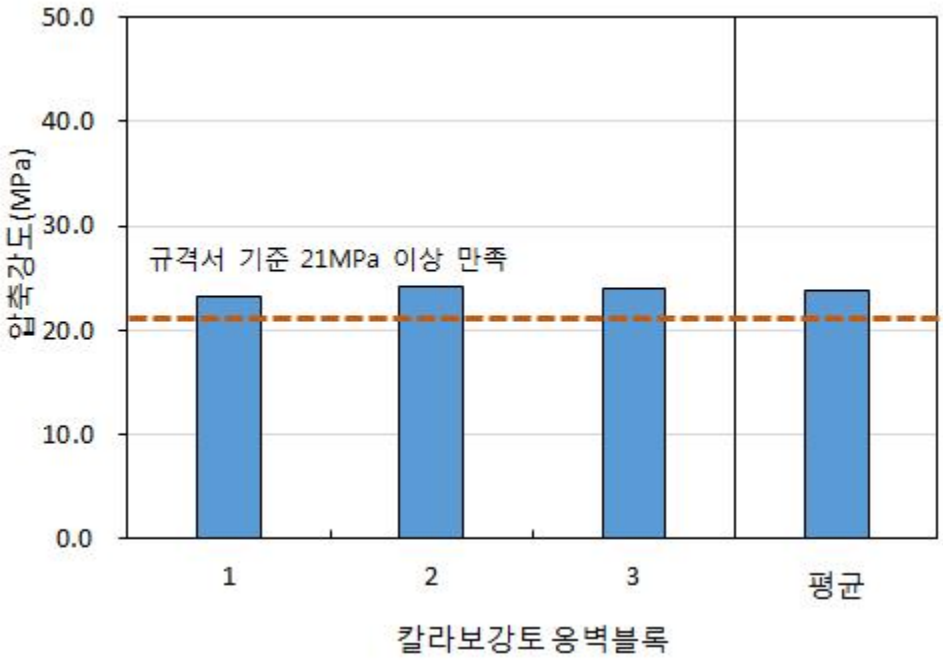
고감성 칼라 시멘트를 활용한 콘크리트 2차제품의 압축강도 및 흡수율 측정결과를 <표 3.117>에 나타내었다.

고감성 칼라 시멘트를 활용한 콘크리트 2차제품의 압축강도는 <그림 3.137>에 나타낸 바와 같이 평균 23.7MPa로 규격서 기준 21MPa 이상을 만족하는 것으로 나타났다.

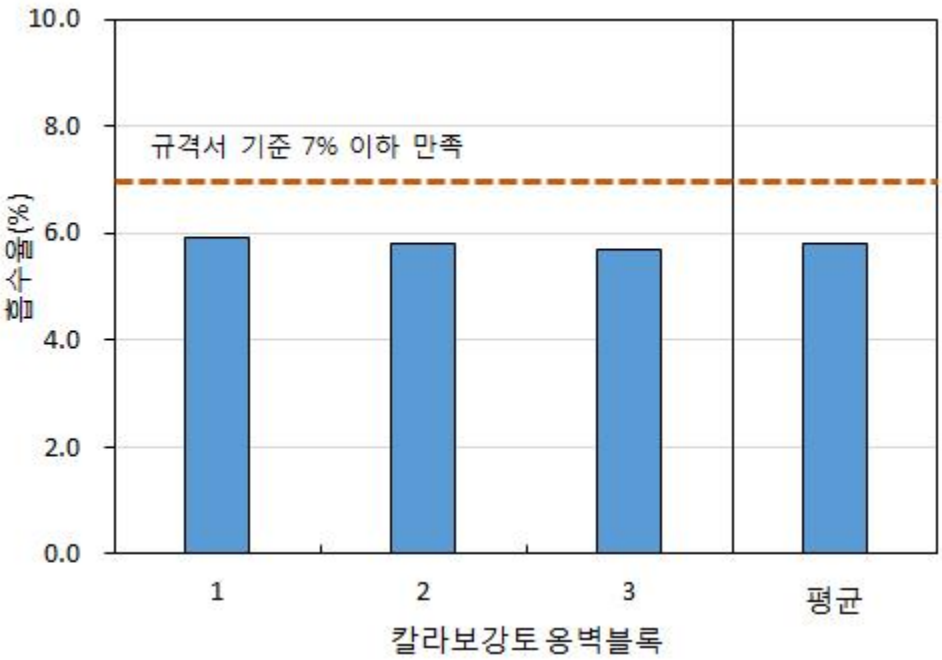
고감성 칼라 시멘트를 활용한 콘크리트 2차제품의 흡수율은 <그림 3.138>에 나타낸 바와 같이 평균 5.8%로 규격서 기준 7% 이하를 만족하는 것으로 나타났다.

<표 3.117> 콘크리트 2차제품 시험시공 품질평가

구 분	압축강도 28일 (MPa)	흡수율(%)	단체표준 규격서 기준		단체표준 규격서 만족여부
			압축강도 28일 (MPa)	흡수율(%)	
콘크리트 2차제품	23.2	5.9	•압축강도 21이상	• 흡수율 7%이하	OK
	24.1	5.8			
	24.0	5.7			
평균	23.7	5.8			



<그림 3.137> 압축강도 측정결과



<그림 3.138> 흡수율 측정결과

(바) 소결

본 절에서는 고감성 칼라 시멘트를 활용한 콘크리트 2차제품의 시험생산 및 현장시험시공을 검토하고자 하였다. 그 결과 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 고감성 칼라 시멘트를 활용한 콘크리트 2차제품의 시험생산 및 현장시험시공 결과 치수 측정의 경우 콘크리트 호안 및 옹벽 블록에 관한 단체표준(SPS-KCIC0001 -0703)에서 규정하고 있는 ± 2mm를 모두 만족시키는 것으로 나타났다. 또한 압축강도 측정결과 평균 23.7MPa로 규격서 기준 21MPa 이상을 만족하는 것으로 나타났다. 흡수율 측정 결과 평균 5.8%로 규격서 기준 7% 이하를 만족하는 것으로 나타났다.

(4) 결언

본 절에서는 액상화 레드머드 촉진제를 활용한 알칼리활성화 슬래그-레드머드 고감성 칼라 시멘트의 현장 적용성 평가를 검토하고자 하였다. 이를 위해 고감성 칼라 시멘트의 흙포장 현장시험시공, 고감성 칼라시멘트 콘크리트 2차제품의 시험생산 및 현장시험시공을 검토하였다. 그 결과 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 알칼리활성화 슬래그-레드머드 고감성 칼라 시멘트를 활용한 흙포장재의 현장시험시공 28일 압축강도 측정결과 평균 22.5MPa로 흙포장재 규격서 기준 보도용 12MPa, 자전거 도로용 15MPa, 주차장 18MPa 이상을 만족하는 것으로 나타났다. 휨강도의 경우 평균 3.3MPa로 흙포장재 규격서 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 미끄럼 저항성의 경우 평균 41BPN으로 흙포장재 규격서 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 동결융해 100cycle 이후의 경우 평균 20.5MPa로 약 91%이상의 강도를 유지하였으며, 규격서 기준 80%이상을 만족하는 것으로 나타났다.
2) 고감성 칼라 시멘트를 활용한 콘크리트 2차제품의 시험생산 및 현장시험시공 결과 치수 측정의 경우 콘크리트 호안 및 옹벽 블록에 관한 단체표준(SPS-KCIC0001 -0703)에서 규정하고 있는 ± 2mm를 모두 만족시키는 것으로 나타났다. 또한 압축강도 측정결과 평균 23.7MPa로 규격서 기준 21MPa 이상을 만족하는 것으로 나타났다. 흡수율 측정 결과 평균 5.8%로 규격서 기준 7% 이하를 만족하는 것으로 나타났다.

사. 고감성 칼라시멘트의 색채평가 기법 및 감성평가 기법

(1) 고감성 칼라 시멘트의 색채평가 기법

(가) 고감성 칼라 시멘트의 색채 분석 개요

① 분석 목적

콘크리트 블록의 색채발현을 위한 첨가제로 산업폐기물인 레드머드(분말, 액상)를 사용하여 콘크리트 블록을 형성하였으며, 이때의 색채 분포를 분석하였다. 레드머드를 첨가하여 제작한 콘크리트 블록은 YR계열의 색채를 띄기 때문에 YR계열의 흙포장과 유사한 색채를 재현할 수 있으며, 따라서, 콘크리트 블록의 색채와의 색차도 분석하여, 색채 재현성을 확인하고자 하였다. 콘크리트를 조성할 때 레드머드를 투입한 경우, 흙포장과 유사한 색채를 나타내는 것으로 파악되어, 천연 흙포장과 색차가 적게 나타나도록 조성하기 위한 적정 조성비율과 조성방법을 파악하고자 하였다.

② 분석 대상

분석대상 시료는 색채휘도계(CD-200, Minolta)로 측정할 수 있는 최소 크기인, 5cm×5cm×5cm 크기의 블록형태로 제작하였다. 산업 폐기물인 레드머드를 첨가제(안료의 역할)로서 활용하여 콘크리트를 제작하고, <표 3.118>과 같이 이의 적용 유형에 따라 측색 · 분석하였다. 콘크리트 제작시 레드머드를 추가할 때, 레드머드의 상태에 따라서 색채 재현이 달라질 것으로 판단되어, 레드머드를 건조상태, 반건조상태, 중화 상태의 세가지 상태로 분류하여 동일한 양을 투입하고, 이에 따른 색채변화를 측정하였다. 중화 상태의 레드머드는 비율을 달리하여 세가지 비율로 투입하고, 색채 변화를 측정하였고, 레드머드의 첨가율에 따른 색채 분포를 <표3.119>과 같이 분석하였다.

콘크리트에 레드머드를 첨가하여 흙포장재와 유사한 색채를 나타내도록 흙포장재의 색차를 분석하였다. 콘크리트에 레드머드를 포함한 액상촉진제를 투입할 경우, 내할 또는 외할에 따라 달리 재현되므로, 이에 대한 색채분포의 차이를 분석하였다. 콘크리트에 레드머드 촉진제 첨가율에 대한 차이가 색채분포에 어떤 영향을 미치는지를 <표3.120>과 같이 확인하였다.

측색대상의 구체적인 조성비는 <표 3.121> 및 <표3.122>,<표 3.123>과 같다.

<표 3.118> 1차 분석용 변인

구분	첨가제
액상화/분말	액상 레드머드 촉진제/ 건조 레드머드, 나이아신
액상화	레드머드 슬러지, 보통 포틀랜트 시멘트/슬래그 시멘트

<표3.119> 2차 분석용 변인

구분	레드머드
레드머드 상태	건조/ 반건조/ 중화
중화 레드머드 중량	45 / 90 / 135
레드머드 첨가율	0 / 10 / 20 / 30

<표3.120> 3차 분석용 변인

구 분	대상
액상촉진제	액상 레드머드 촉진제
첨가율	바인더의 내할/외할, 첨가율(레드머드 중량)

<표 3.121> 1차 분석용 측색대상 시료(콘크리트 블록)의 조성비

연번	제품명 \ 조성비	액상 레드머드 촉진제	건조 레드머드	나이아신	슬래그 시멘트	첨가제 유형		결합재	
						액상화	분말	OPC	SC
1	LN 0	180		0		○		○	
2	LN 2	183		1.5		○		○	
3	LN 4	186		3.0		○		○	
4	LN 8	192		6.0		○		○	
5	DL 0		75	0			○	○	
6	DL 2		75	1.5			○	○	
7	DL 4		75	3.0			○	○	
8	DL 8		75	6.0			○	○	
9	C					○		○	
10	C 75	75				○		○	
11	C 150	150				○		○	
12	C 225	225				○		○	
13	C 300	300				○		○	
14	SC				600	○			○
15	SC 75	75			600	○			○
16	SC 150	150			600	○			○
17	SC 225	225			600	○			○
18	SC 300	300			600	○			○

<표 3.122> 2차 분석용 측색대상 시료(콘크리트 블록)의 조성비

조성비 / 연번	제품명	건조 레드머드 (g)	반건조 레드머드 (g)	중화 후 레드머드 (g)	R/B (%)	총 중량 (g)
1	SC	0	0		20	2070
2	SC-R20	90	0		20	2160
3	SC-DR20		90		20	2160
4	SC-NDR10			45	10	2115
5	SC-NDR20			90	20	2160
6	SC-NDR30			135	30	2205
7	CR0	0			0	2138
8	CR10	68			10	3274
9	CR10N	45			10	2183
10	CR30	68			30	3274
11	CR30N	135			30	2275

<표 3.123> 3차 분석용 측색대상 시료(콘크리트 블록)의 조성비

조성비 / 연번 / 제품명		첨가율 (바인더의 내할)	레드머드 내할(g)	첨가율 (바인더의 외할)	레드머드 외할(g)	액상 레드머드 촉진제(g)
1	SC0-45	0	0	0	0	300
2	내-SC20-45	20	290.0	0	0.0	240
3	내-SC40-45	40	580.0	0	0.0	180
4	외-SC20-45	0	0.0	20	290.0	300
5	외-SC40-45	0	0.0	40	580.0	300
6	SC0-65	0	0.0	0	0.0	300
7	내-SC20-65	20	290.0	0	0.0	240
8	내-SC40-65	40	580.0	0	0.0	180
9	외-SC20-65	0	0.0	20	290.0	300
10	외-SC40-65	0	0.0	40	580.0	300
11	C20			20	290.0	
12	C40			40	580.0	
13	SC20			20	290.0	
14	SC40			40	580.0	

③ 측색 방법

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

- 시감측색법 : 일출3시간 후부터 일몰3시간 전 사이의 운량 30%정도의 담천공 상태에서, 먼셀표색계에 의한 시감측색법으로 측색하였다.
- 물리측색법 : 접물측정 방식의 색채휘도계(CD-200, Minolta)를 이용하여, CIE D65광원을 기준광원으로 하여 측색하였다.

측색대상에 대하여 측색한 표색계는 CIE XYZ, CIE Yxy, CIE 1976 L*a*b*, CIE Hunter Lab, HVC를 측정하였으며, 시감측색에 의한 측색은 Munsell 색채계를 기준으로 하여 <그림 3.139>와 같이 비교 분석하였다.



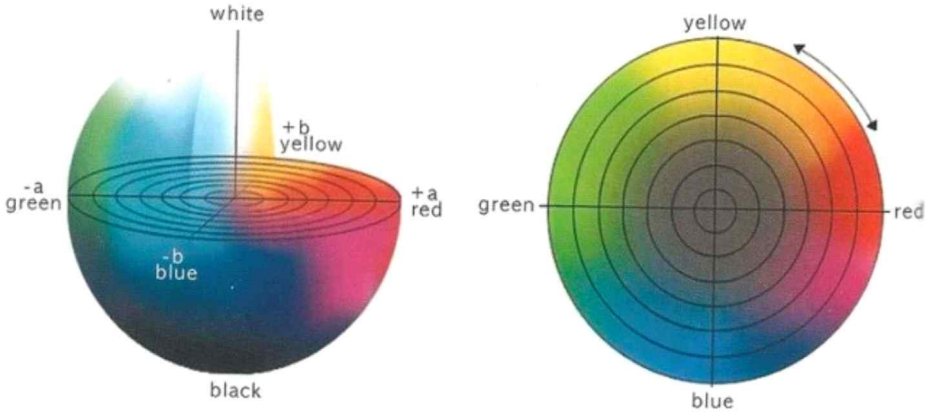
<그림 3.139> 측색 방법 예시

④ 분석방법

국제조명위원회(Commission Internationale de l' Eclairage, 약칭 CIE)가 1976년에 권장한 지각적으로 거의 균등한 보도를 가진 색공간인 CIE L*a*b* 표색계를 기준으로 계산하였다.

측정대상 시료는 외장재이므로 색차계산은 KS M ISO 7724(도료와 바니시 측색법)에서 규정하고 있는 고감성 칼라 시멘트의 색채측정방법 및 색차계산방법에 근거하여, L*a*b*색차 계산식(KS A 0063: 색차표시방법)을 토대로 계산하였다.

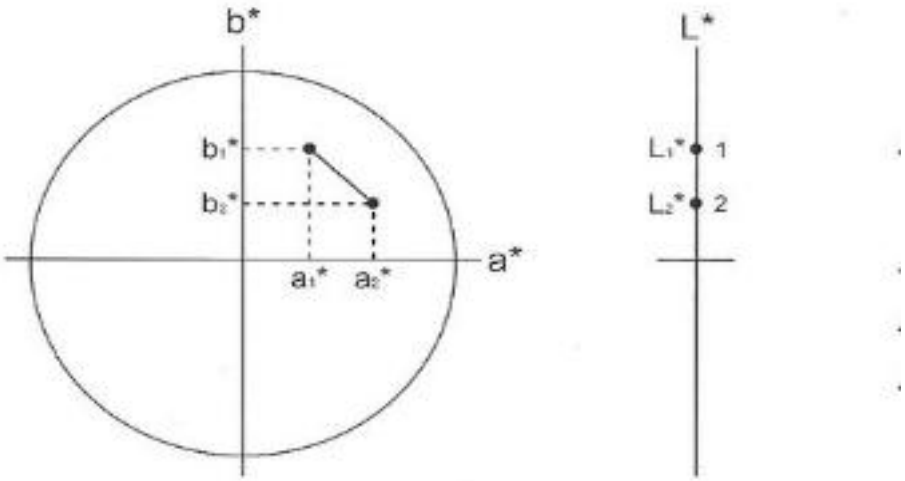
CIE Lab 색좌표 : CIE Lab 색좌표는 L*, a* ,b*로 표시하게 되며, <그림 3.140>와 같이 L*은 명도지수, a*,b*는 크로마틱네스 지수를 나타내었다.



<그림 3.140> CIE Lab 표색계

$$L^* = 116 f(Y/Y_n) - 16$$
$$a^* = 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)]$$
$$b^* = 200[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)]$$

- 색차 : 색공간에서 두색의 위치 사이의 거리로서 △E로 표시하며 '델타E' 라고 읽었다.
- 색차식 : CIE Lab 좌표상에서의 표준색상 과 시료색상 의 색차는 각 좌표의 색차성분 L*, a*, b* 직교 좌표계 상의 최소제곱근 거리로 <그림 3.141>과 같이 계산되었다.



<그림 3.141> L*, a*, b* 직교 좌표계

$$\Delta E^*ab = \{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2\}^{\frac{1}{2}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1)$$

ΔE^*ab : L*a*b*표색계에 의한 색차

⊿L*,⊿a*,⊿b*: KS A 0067(L*u*v*표색계에 의한 물체색의 표시 방법)에 규정하는 L*a*b*표색계에서 2개의 물체색의 명도 지수 L* 및 크로마틱네스 지수 a*,b*의 차이다.

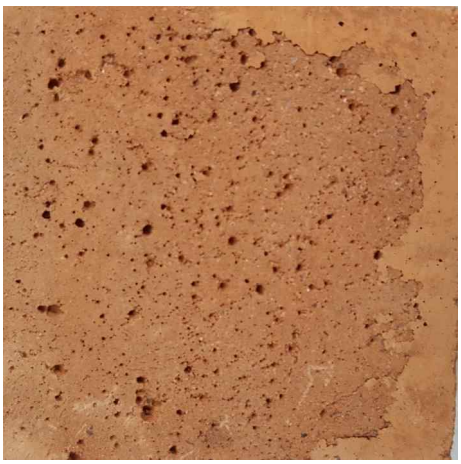
본 연구에서는 물리측색법에 의한 CIE65광원 기준 접물측정 방식의 색채휘도계(CD-200, Minolta)로 측정한 값을 토대로 하여, CIE(1976) L*a*b*색차식을 이용하여 분석하였다.

(나) 고감성 칼라 시멘트의 색채특성 및 색차 분석

① 레드머드의 적용 유형에 따른 분석

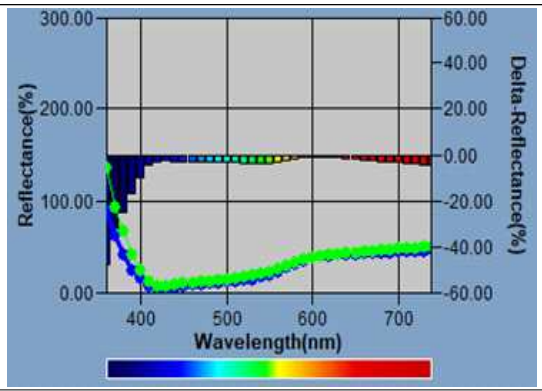
■ LN측정결과 a: LN 0

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
7.34	LN0	
	나이아신	0%
	건조레드머드	0g
	레드머드 슬러지	180g
	나이아신	0g

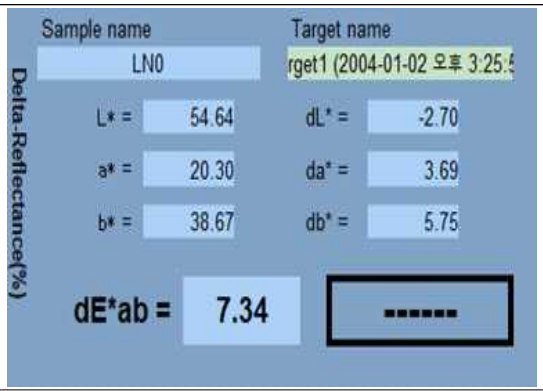


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	25.98
	Y	22.58
	Z	7.7
CIE L*a*b*	L*	54.64
	a*	20.3
	b*	38.67
Hunter Lab	L	47.52
	a	17.47
	b	21.63
CIE Lch	L*	54.64
	C*	43.67
	h	62.3
Munsell	H	6.6
		YR
	V	5.42
	C	7.17

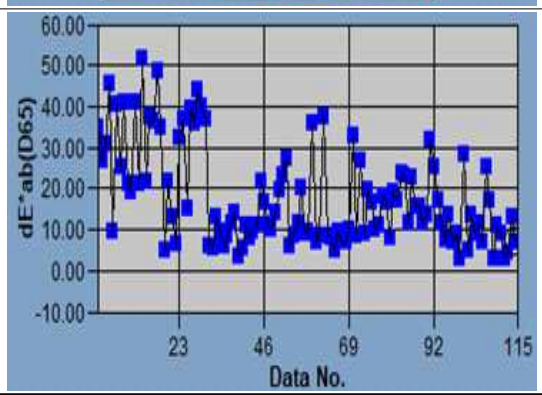
결과값 (1)



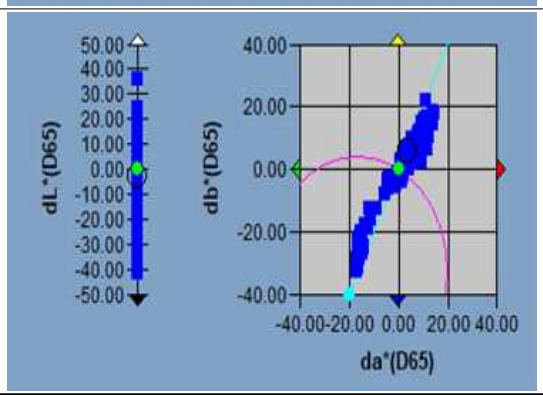
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.142> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료1

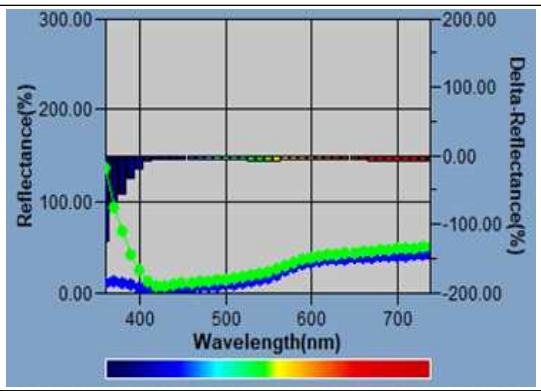
■ 시료2 : LN 2

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
12.97	LN2	
	나이아신	2%
	건조레드머드	0g
	레드머드 슬러지	183g
	나이아신	1.5g

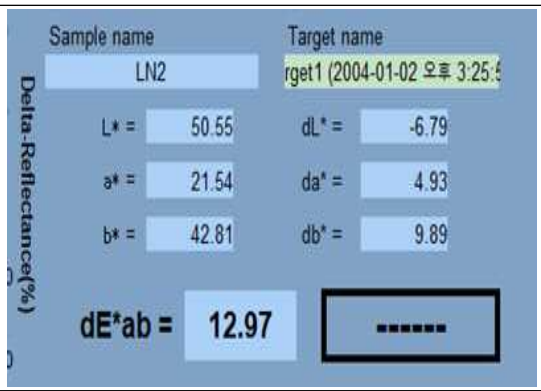


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	22.25
	Y	18.89
	Z	4.99
CIE L*a*b*	L*	50.55
	a*	21.54
	b*	42.81
Hunter Lab	L	43.46
	a	18.14
	b	21.86
CIE Lch	L*	50.55
	C*	47.92
	h	63.29
Munsell	H	6.8
		YR
	V	5.03
	C	7.75

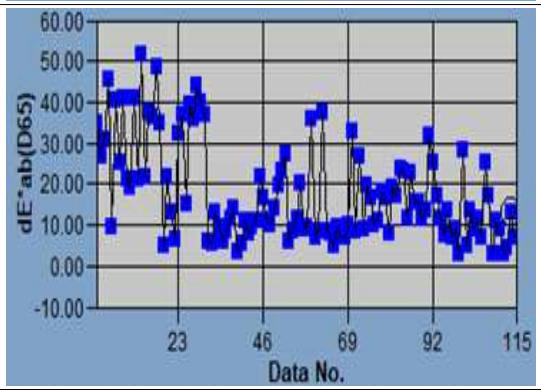
결과값 (1)



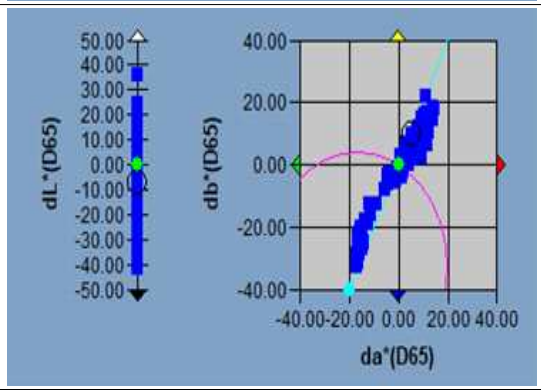
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.143> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료2

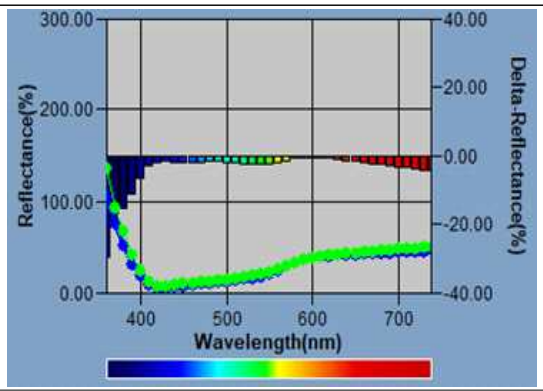
■ 시료3 : LN 4

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
4.48	LN4	
	나이아신	4%
	건조레드머드	0g
	레드머드 슬러지	186g
	나이아신	3g

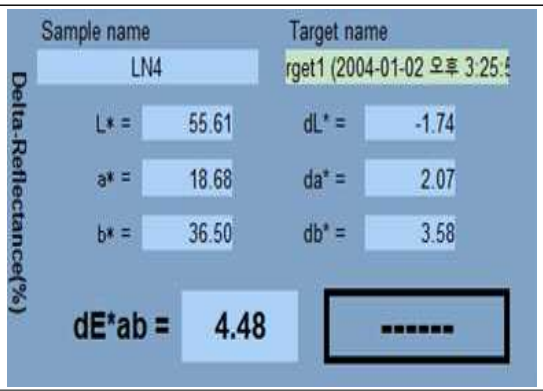


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	26.6
	Y	23.52
	Z	8.82
CIE L*a*b*	L*	55.61
	a*	18.68
	b*	36.5
Hunter Lab	L	48.5
	a	16.09
	b	21.06
CIE Lch	L*	55.61
	C*	41
	h	62.9
Munsell	H	6.9
		YR
	V	5.52
	C	6.72

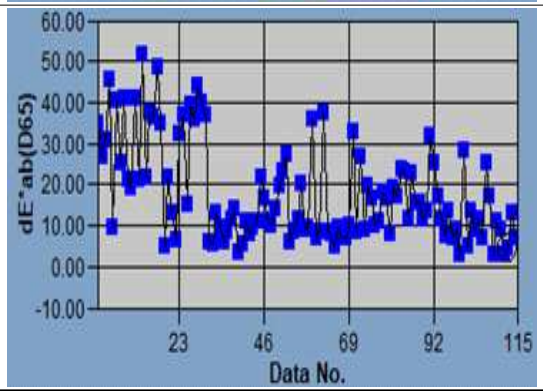
결과값 (1)



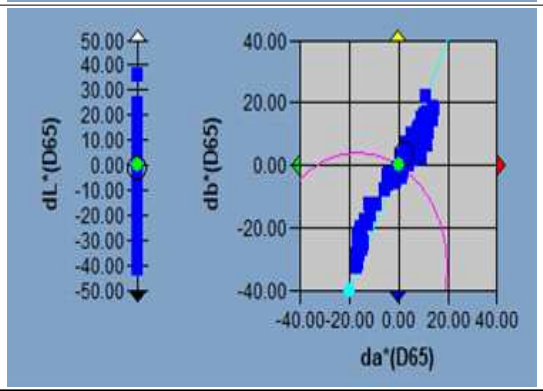
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.144> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료3

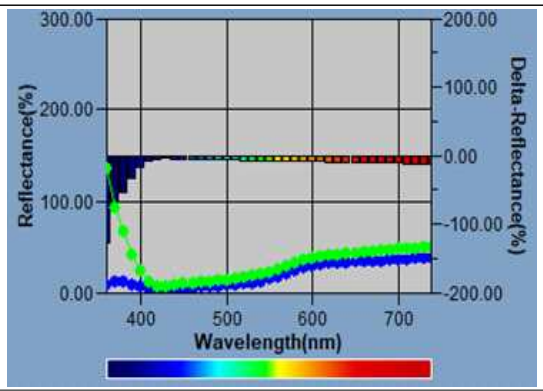
■ 시료4 : LN 8

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
11.33	LN8	
	나이아신	8%
	건조레드머드	0g
	레드머드 슬러지	192g
	나이아신	6g

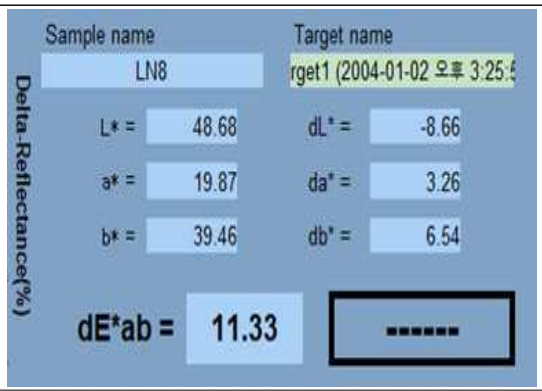


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	20.21
	Y	17.34
	Z	5.02
CIE L*a*b*	L*	48.68
	a*	19.87
	b*	39.46
Hunter Lab	L	41.64
	a	16.44
	b	20.29
CIE Lch	L*	48.68
	C*	44.18
	h	63.27
Munsell	H	7.0
		YR
	V	4.84
	C	7.15

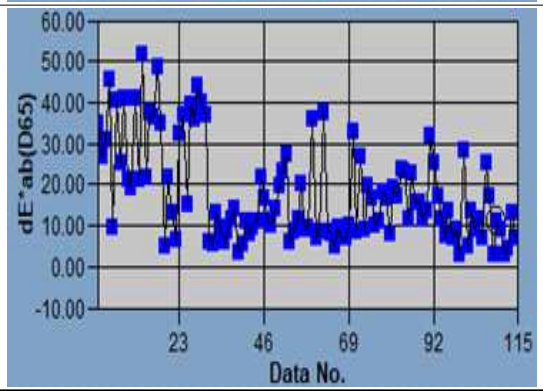
결과값 (1)



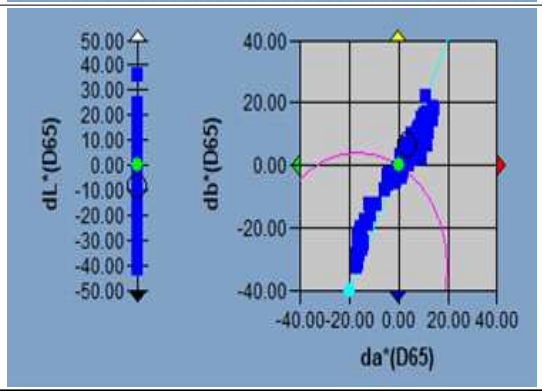
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.145> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료4

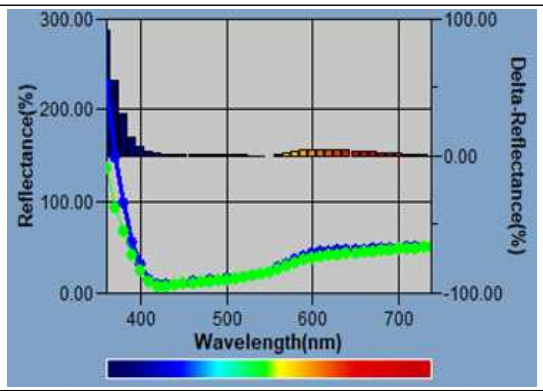
■ 시료5: DL 0

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
2.98	DL0	
	나이아신	0%
	건조레드머드	75g
	레드머드 슬러지	0g
	나이아신	0g

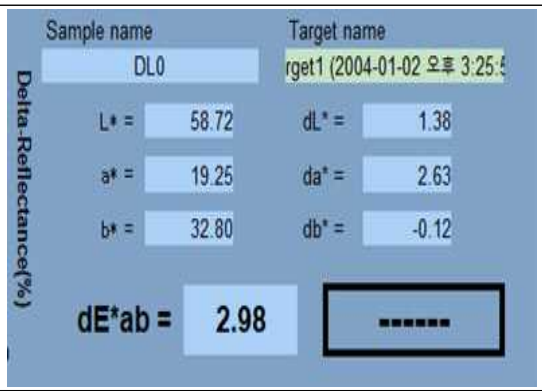


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	30.16
	Y	26.73
	Z	11.88
CIE L*a*b*	L*	58.72
	a*	19.25
	b*	32.8
Hunter Lab	L	51.7
	a	16.92
	b	20.21
CIE Lch	L*	58.72
	C*	38.03
	h	59.6
Munsell	H	5.8
		YR
	V	5.82
	C	6.44

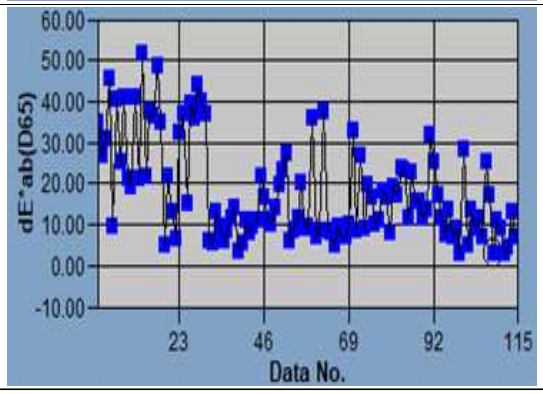
결과값 (1)



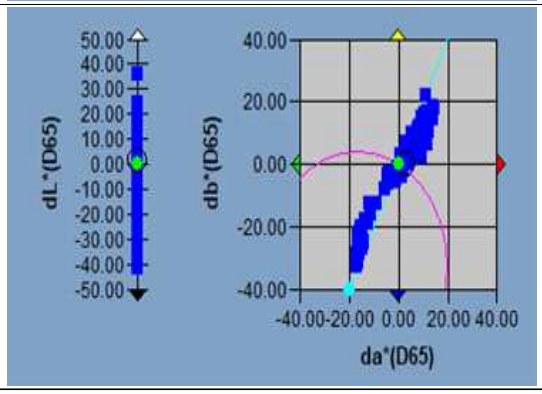
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.146> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료5

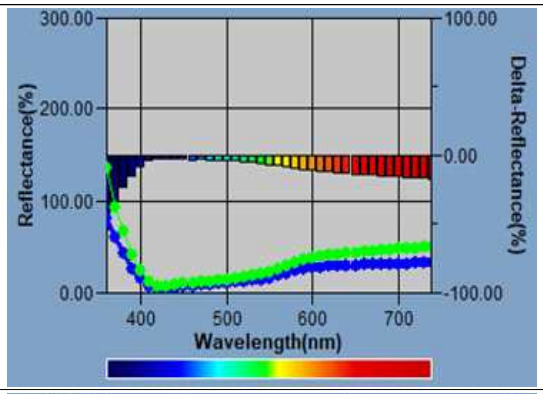
■ 시료6 : DL 2

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
8.96	DL2	
	나이아신	2%
	건조레드머드	75g
	레드머드 슬러지	0g
	나이아신	1.5g

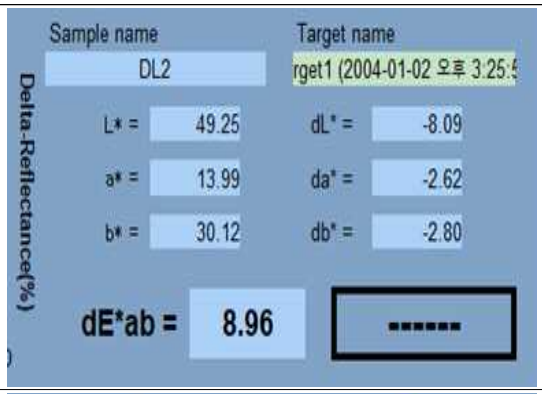


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	19.52
	Y	17.8
	Z	7.5.
CIE L*a*b*	L*	49.25
	a*	13.99
	b*	30.12
Hunter Lab	L	42.19
	a	11.39
	b	17.1
CIE Lch	L*	49.25
	C*	33.21
	h	65.08
Munsell	H	8.0
		YR
	V	4.87
	C	5.29

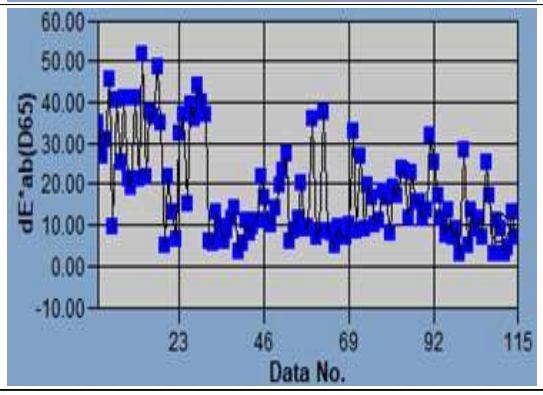
결과값 (1)



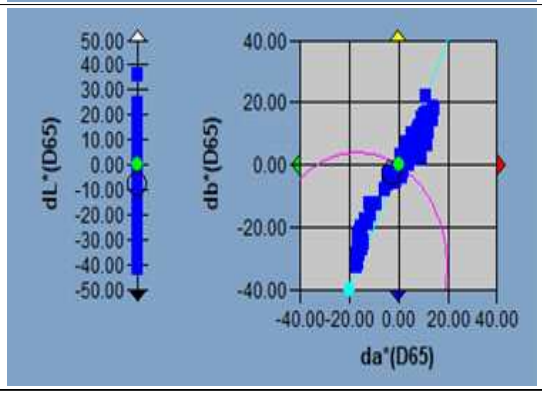
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.147> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료6

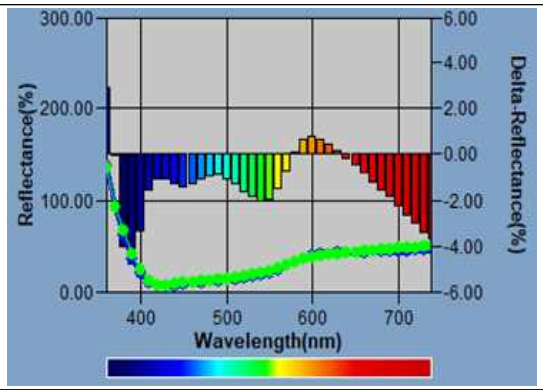
■ 시료7 : DL 4

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
3.31	DL4	
	나이아신	4%
	건조레드머드	75g
	레드머드 슬러지	0g
	나이아신	3g

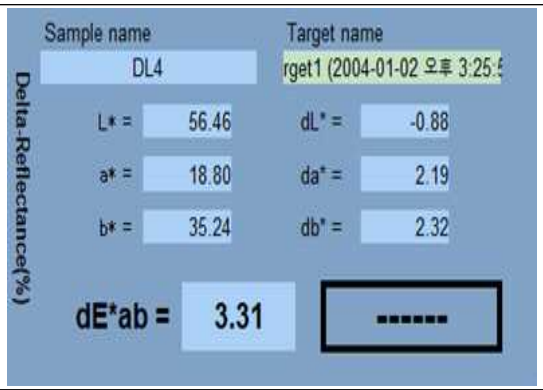


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	27.54
	Y	24.37
	Z	9.68
CIE L*a*b*	L*	56.46
	a*	18.8
	b*	35.24
Hunter Lab	L	49.37
	a	16.29
	b	20.76
CIE Lch	L*	56.46
	C*	39.95
	h	61.92
Munsell	H	6.6
		YR
	V	5.6
	C	6.61

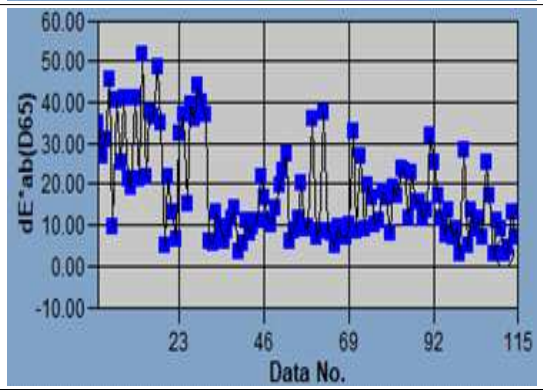
결과값 (1)



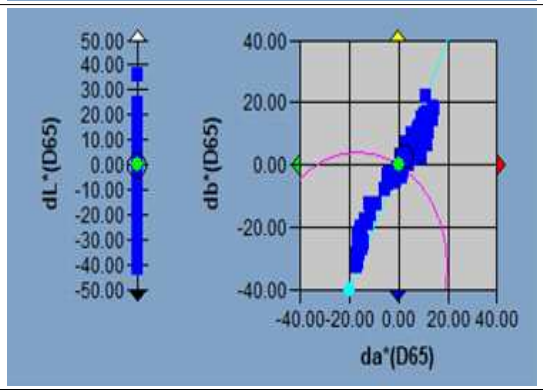
결과값 (3)



결과값 (2)



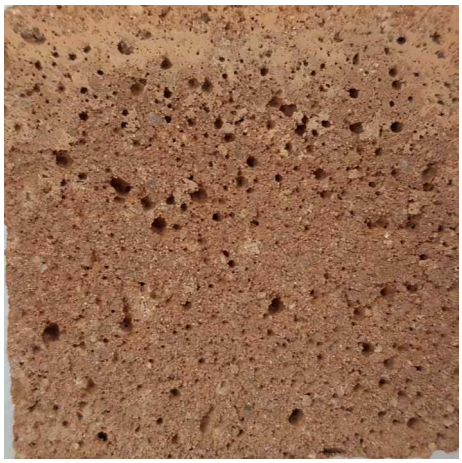
결과값 (4)



<그림 3.148> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료7

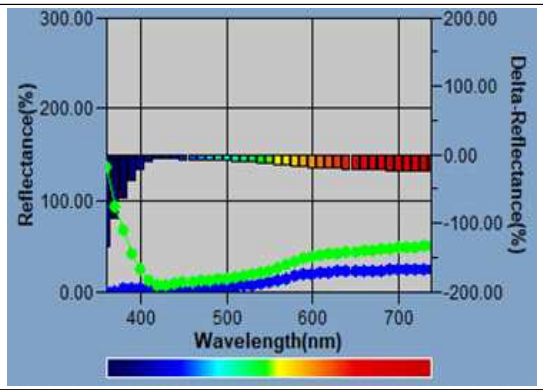
■ 시료8 : DL 8

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
17.11	DL8	
	나이아신	8%
	건조레드머드	75g
	레드머드 슬러지	0g
	나이아신	6g

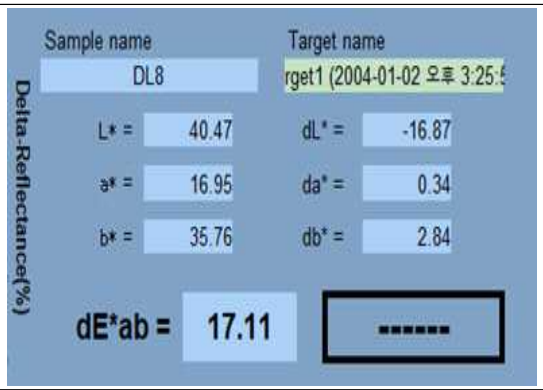


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	13.39
	Y	11.54
	Z	3.14
CIE L*a*b*	L*	40.47
	a*	16.95
	b*	35.76
Hunter Lab	L	33.97
	a	13.08
	b	16.93
CIE Lch	L*	40.47
	C*	39.57
	h	64.64
Munsell	H	7.7
		YR
	V	4.03
	C	6.36

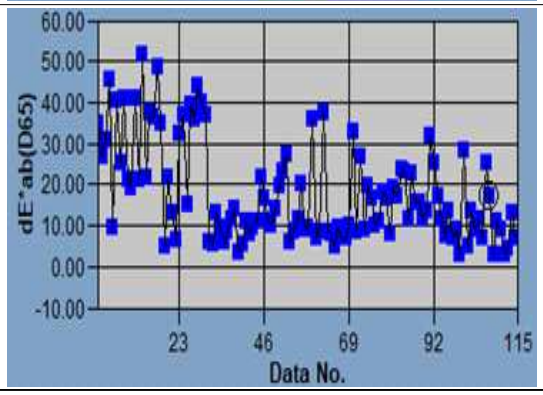
결과값 (1)



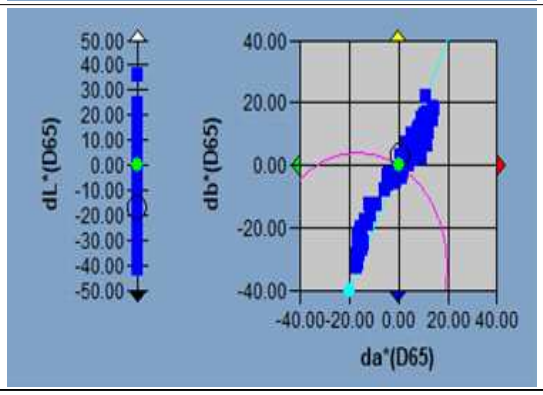
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.149> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료8

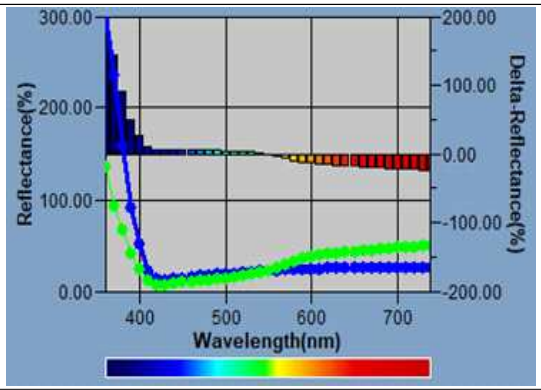
■ 시료9 : C

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
25.11	C	
	결합재	OPC
	보통포틀랜드 시멘트	600g
	슬래그 시멘트	0g
	레드머드 슬러지	0g

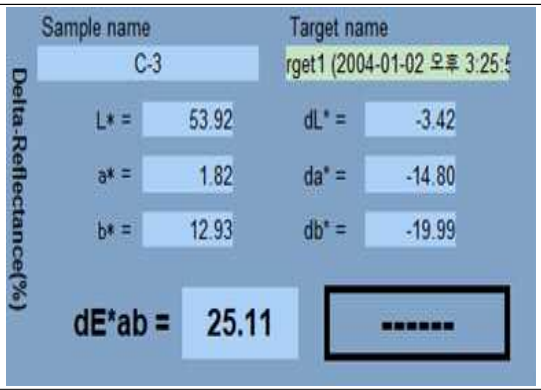


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	21.14
	Y	21.9
	Z	16.72
CIE L*a*b*	L*	53.92
	a*	1.82
	b*	12.93
Hunter Lab	L	46.8
	a	1.47
	b	9.01
CIE Lch	L*	53.92
	C*	13.06
	h	82
Munsell	H	3.3
	Y	
	V	5.27
	C	1.94

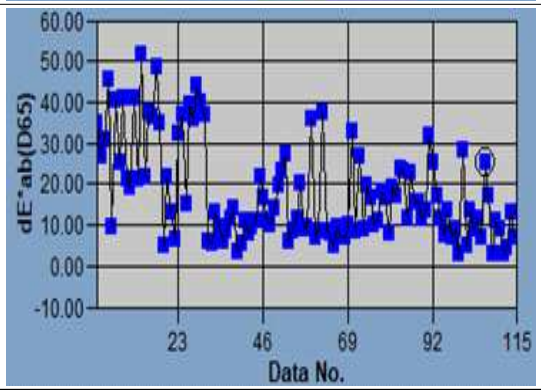
결과값 (1)



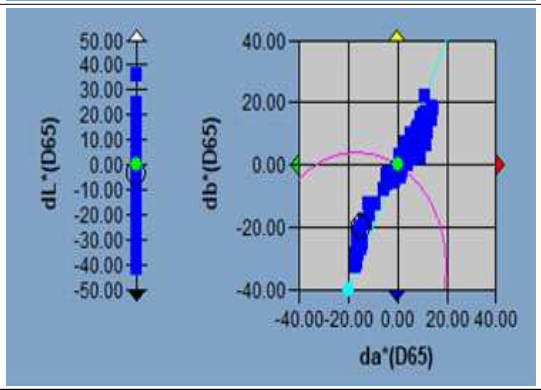
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.150> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료9

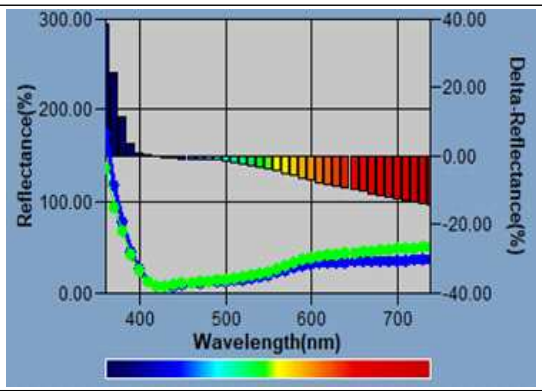
■ 시료10 : C 75

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
7.14	C75	
	결합재	OPC
	보통포틀랜드 시멘트	600g
	슬래그 시멘트	0g
	레드머드 슬러지	75g

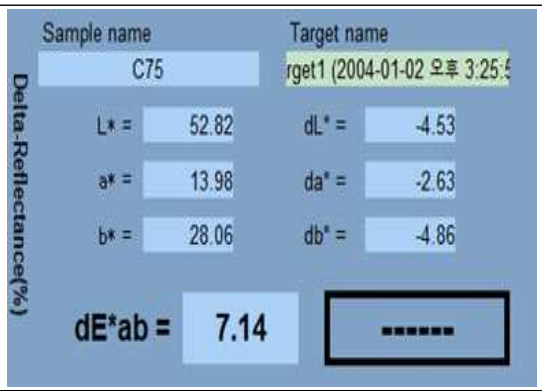


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	22.73
	Y	20.88
	Z	9.97
CIE L*a*b*	L*	52.82
	a*	13.98
	b*	28.06
Hunter Lab	L	45.69
	a	11.65
	b	16.92
CIE Lch	L*	52.82
	C*	31.36
	h	63.51
Munsell	H	7.6
		YR
	V	5.22
	C	5.1

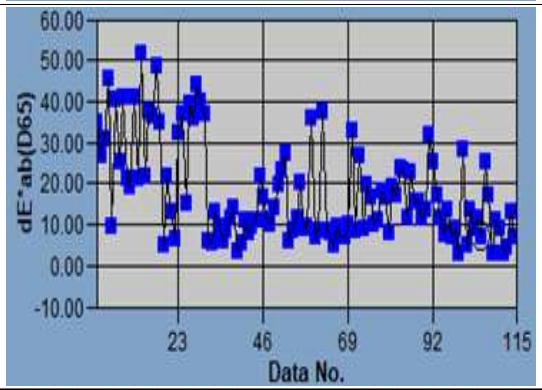
결과값 (1)



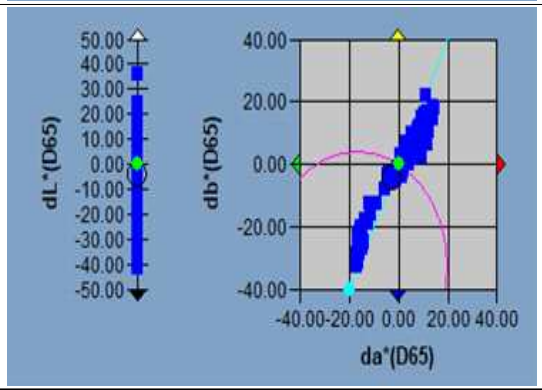
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.151> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료10

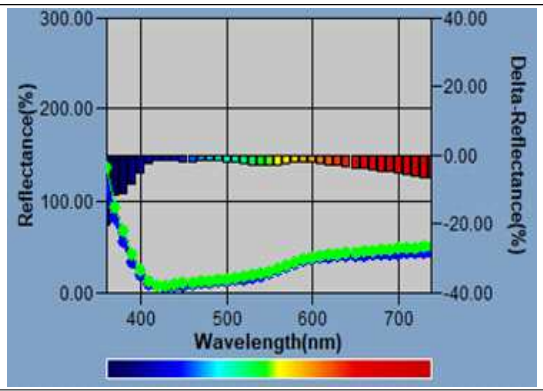
■ 시료11 : C 150

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
3.28	C150	
	결합재	OPC
	보통포틀랜드 시멘트	600g
	슬래그 시멘트	0g
	레드머드 슬러지	150g

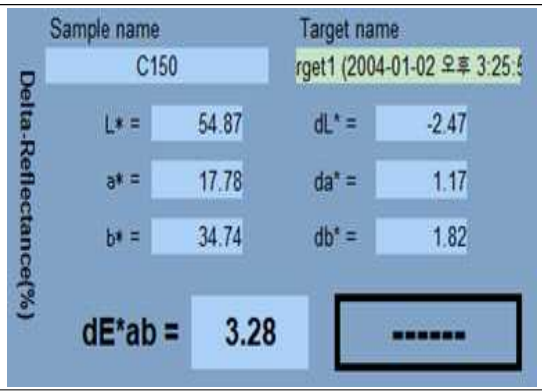


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	25.62
	Y	22.81
	Z	8.97
CIE L*a*b*	L*	54.87
	a*	17.78
	b*	34.74
Hunter Lab	L	47.75
	a	15.2
	b	20.19
CIE Lch	L*	54.87
	C*	39.03
	h	62.89
Munsell	H	7.0
		YR
	V	5.44
	C	6.38

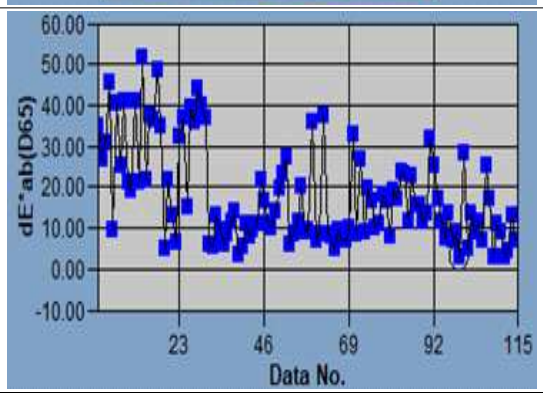
결과값 (1)



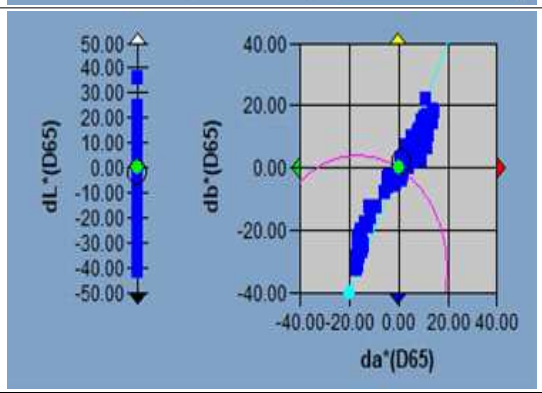
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.152> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료11

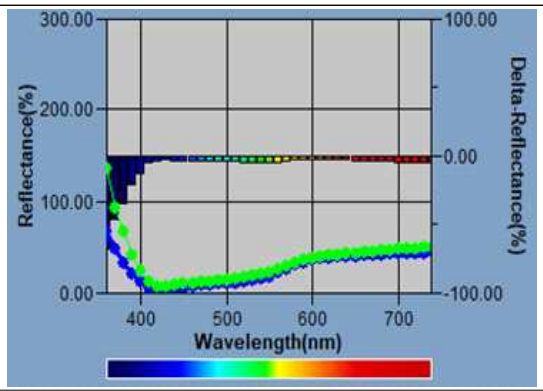
■ 시료12 : C 225

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
9.07	C225	
	결합재	OPC
	보통포틀랜드 시멘트	600g
	슬래그 시멘트	0g
	레드머드 슬러지	225g

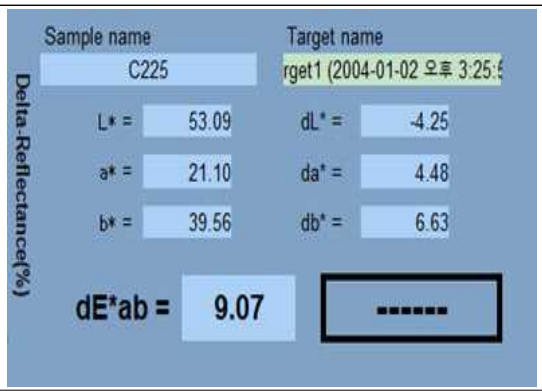


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	24.6
	Y	21.13
	Z	6.76
CIE L*a*b*	L*	53.09
	a*	21.1
	b*	39.56
Hunter Lab	L	45.96
	a	18.03
	b	21.53
CIE Lch	L*	53.09
	C*	44.83
	h	61.93
Munsell	H	6.4
		YR
	V	5.27
	C	7.35

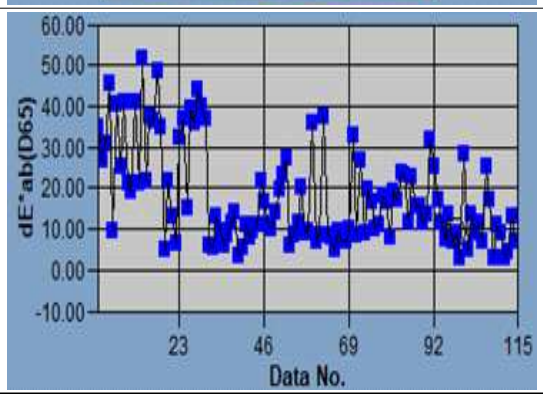
결과값 (1)



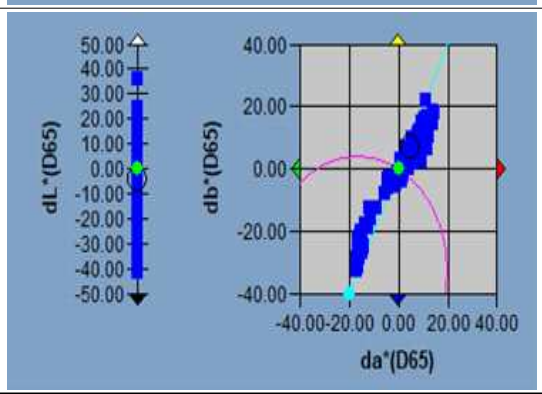
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.153> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료12

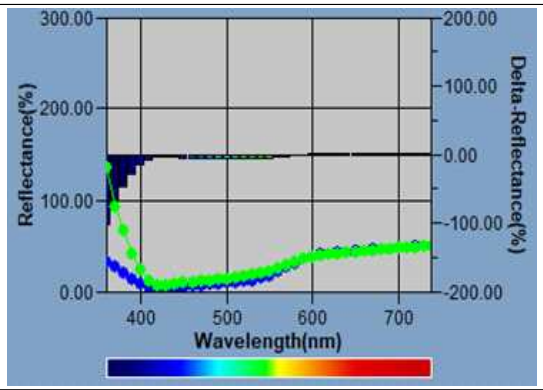
■ 시료13 : C 300

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
13.67	C300	
	결합재	OPC
	보통포틀랜드 시멘트	600g
	슬래그 시멘트	0g
	레드머드 슬러지	300g

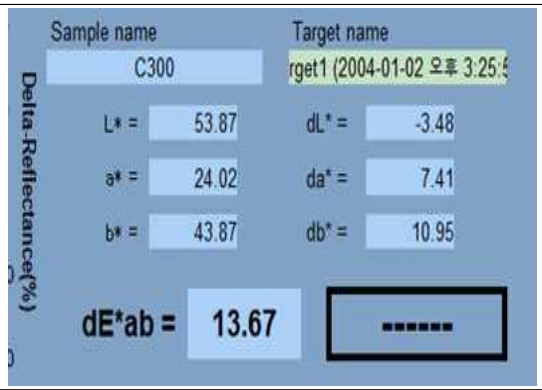


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	26.08
	Y	21.85
	Z	6.03
CIE L*a*b*	L*	53.87
	a*	24.02
	b*	43.87
Hunter Lab	L	46.74
	a	20.82
	b	23.18
CIE Lch	L*	53.87
	C*	50.02
	h	61.3
Munsell	H	5.9
		YR
	V	5.36
	C	8.28

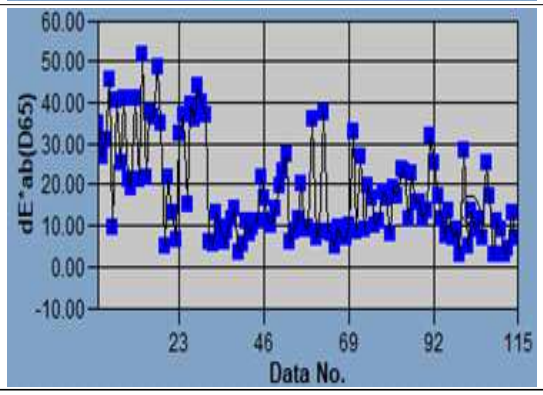
결과값 (1)



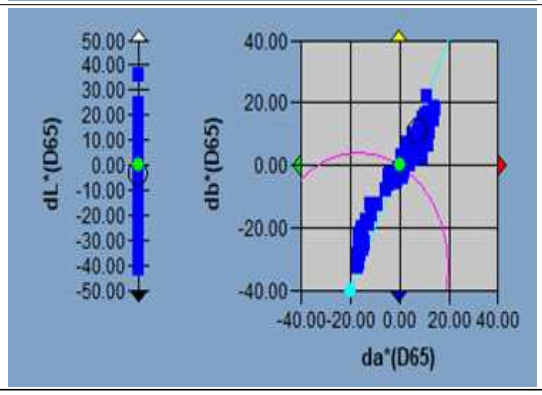
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.154> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료13

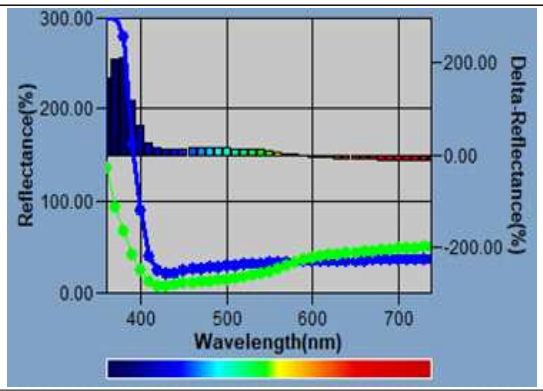
■ 시료14 : SC

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
28.15	SC	
	결합재	SC
	보통포틀랜드 시멘트	0g
	슬래그 시멘트	600g
	레드머드 슬러지	0g

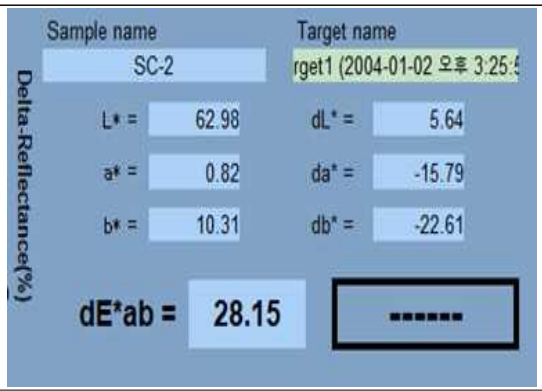


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	30.15
	Y	31.57
	Z	26.75
CIE L*a*b*	L*	62.98
	a*	0.82
	b*	10.31
Hunter Lab	L	56.19
	a	0.7
	b	7.89
CIE Lch	L*	62.98
	C*	10.34
	h	85.46
Munsell	H	4.0
		Y
	V	6.16
	C	1.5

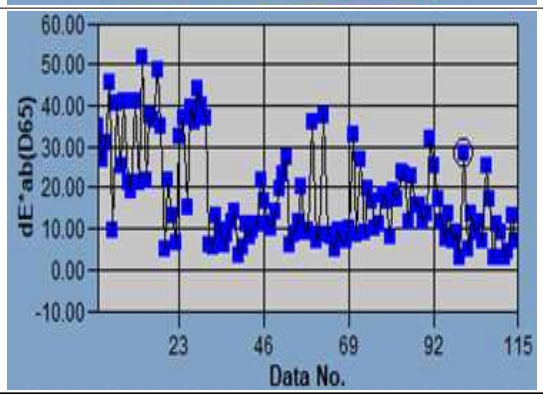
결과값 (1)



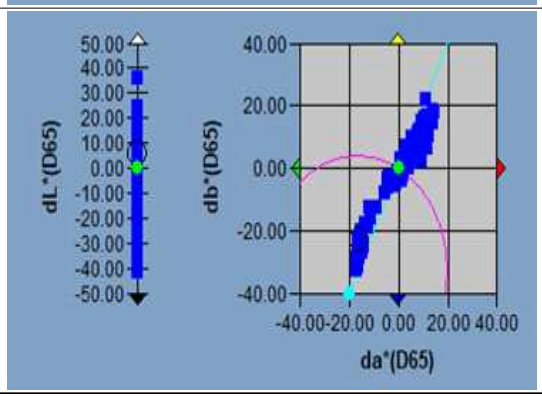
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.155> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료14

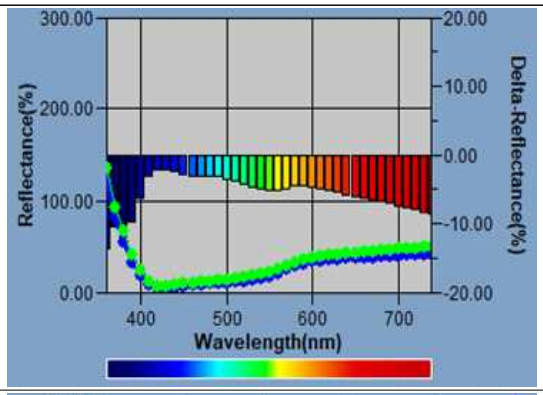
■ 시료15 : SC 75

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
5.32	SC75	
	결합재	SC
	보통포틀랜드 시멘트	0g
	슬래그 시멘트	600g
	레드머드 슬러지	75g

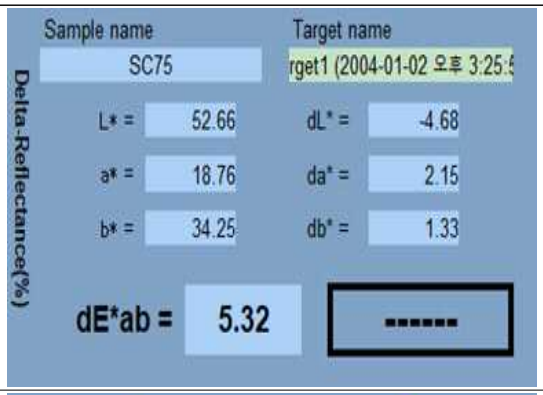


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	23.64
	Y	20.74
	Z	7.99
CIE L*a*b*	L*	52.66
	a*	18.76
	b*	34.24
Hunter Lab	L	45.54
	a	15.87
	b	19.48
CIE Lch	L*	52.66
	C*	39.05
	h	61.29
Munsell	H	6.5
		YR
	V	5.22
	C	6.43

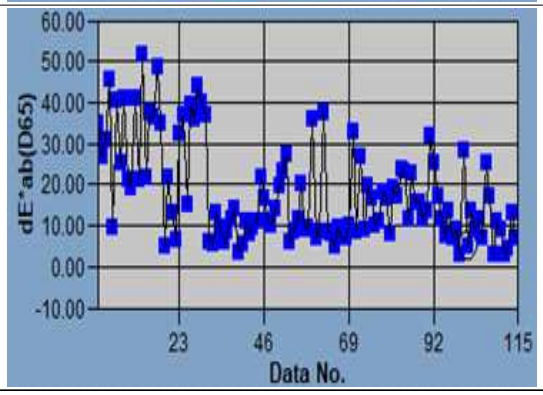
결과값 (1)



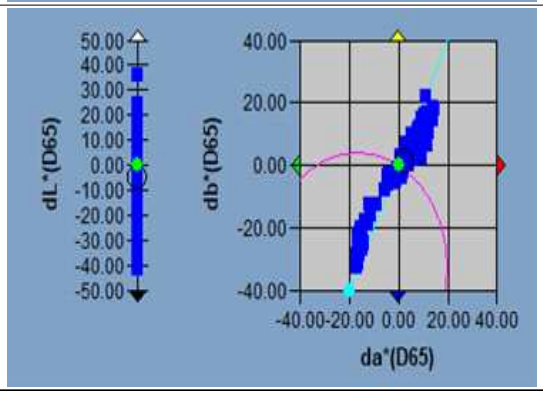
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.156> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료15

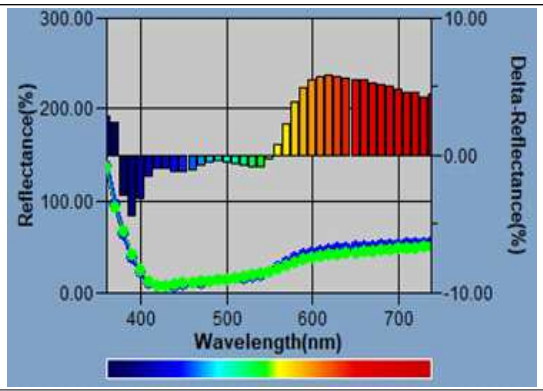
■ 시료16 : SC 150

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
7.09	SC150	
	결합재	SC
	보통포틀랜드 시멘트	0g
	슬래그 시멘트	600g
	레드머드 슬러지	150g

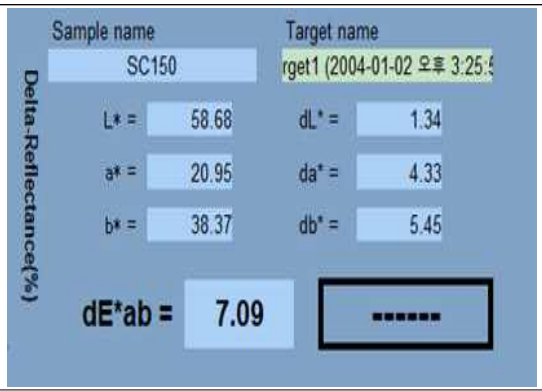


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	30.57
	Y	26.68
	Z	9.91
CIE L*a*b*	L*	58.68
	a*	20.95
	b*	38.37
Hunter Lab	L	51.66
	a	18.51
	b	22.55
CIE Lch	L*	58.68
	C*	43.71
	h	61.37
Munsell	H	6.2
		YR
	V	5.83
	C	7.3

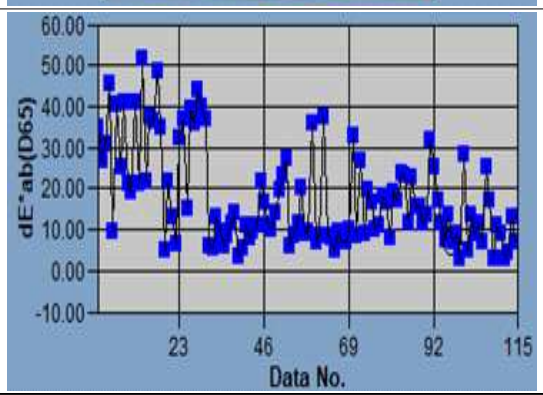
결과값 (1)



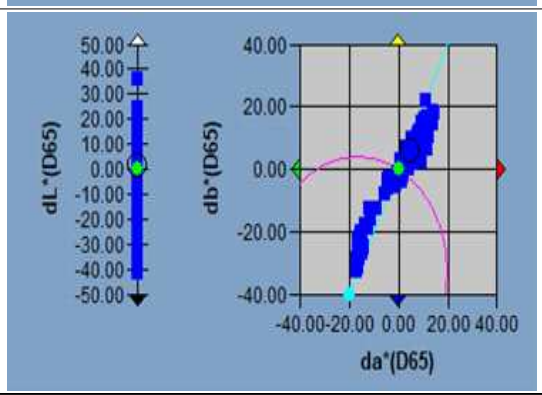
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.157> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료16

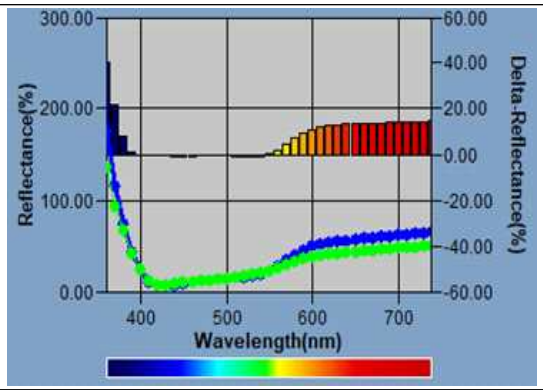
■ 시료17 : SC 225

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
11.85	SC225	
	결합재	SC
	보통포틀랜드 시멘트	0g
	슬래그 시멘트	600g
	레드머드 슬러지	225g

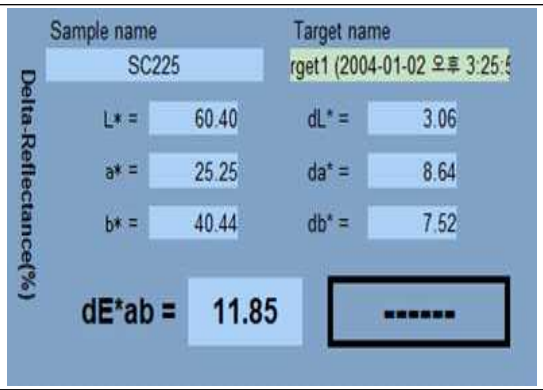


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	33.81
	Y	28.57
	Z	10.2
CIE L*a*b*	L*	60.4
	a*	25.25
	b*	40.44
Hunter Lab	L	53.45
	a	22.82
	b	23.8
CIE Lch	L*	60.4
	C*	47.68
	h	58.02
Munsell	H	4.8
		YR
	V	6.01
	C	8.2

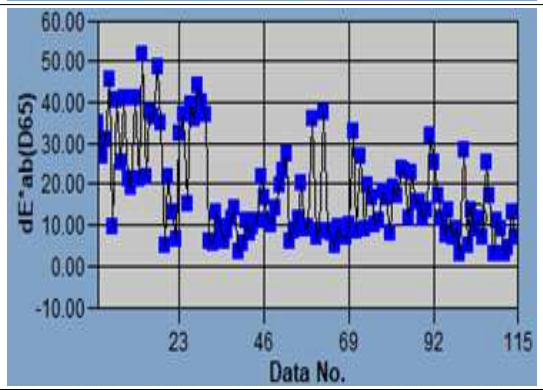
결과값 (1)



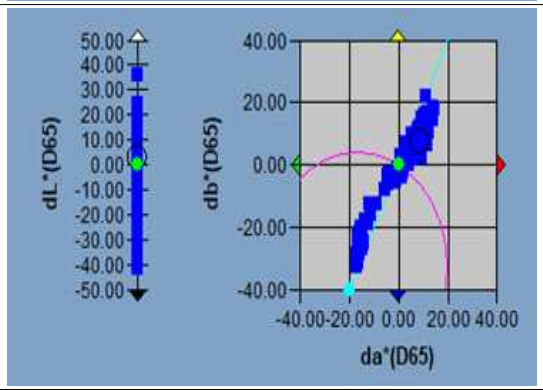
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.158> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료17

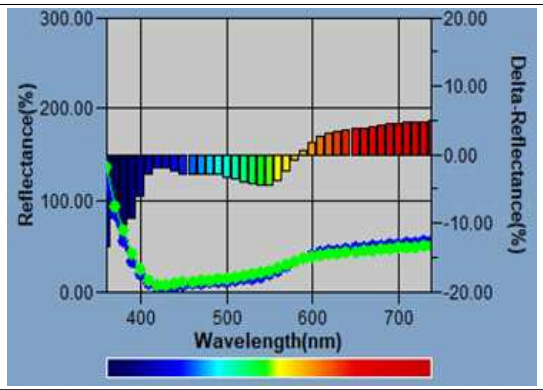
■ 시료18 : SC 300

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
9.32	SC300	
	결합재	SC
	보통포틀랜드 시멘트	0g
	슬래그 시멘트	600g
	레드머드 슬러지	300g

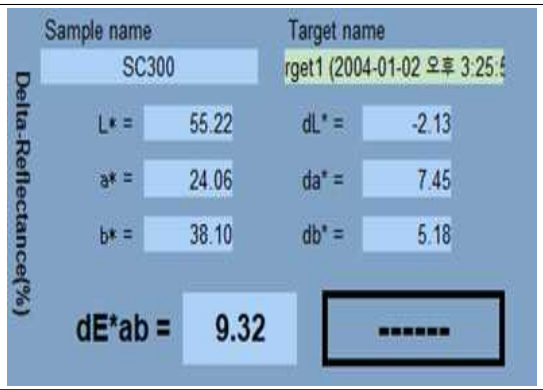


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	27.51
	Y	23.14
	Z	8.15
CIE L*a*b*	L*	55.22
	a*	24.06
	b*	38.1
Hunter Lab	L	48.11
	a	21.03
	b	21.57
CIE Lch	L*	55.22
	C*	45.06
	h	57.73
Munsell	H	4.9
		YR
	V	5.48
	C	7.68

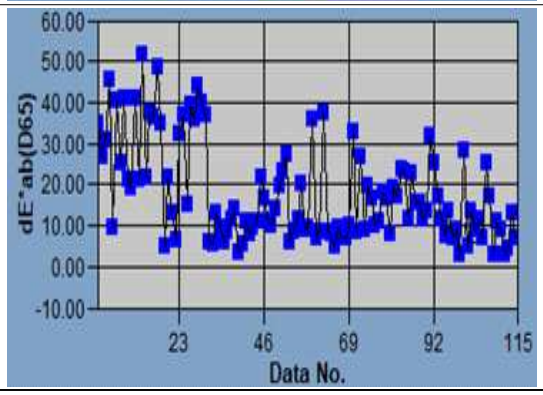
결과값 (1)



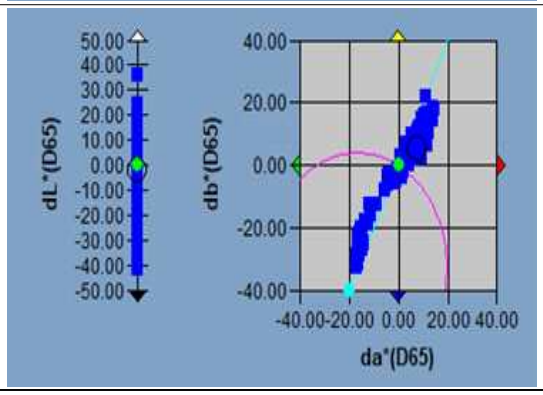
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.159> 레드머드의 적용 유형에 따른 분석결과-시료18

② 건조 레드머드의 상태에 따른 분석

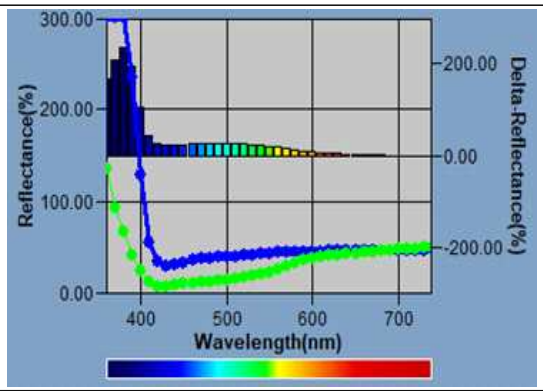
■ 시료1 : SC

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
32	SC	
	건조 레드머드	0g
	반건조 레드머드	0g
	중화후 레드머드	0g
	R/B	20%

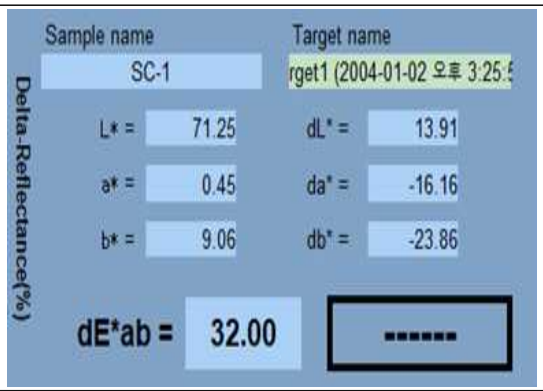


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	40.5
	Y	42.56
	Z	37.9
CIE L*a*b*	L*	71.25
	a*	0.45
	b*	9.06
Hunter Lab	L	65.24
	a	0.41
	b	7.4
CIE Lch	L*	71.25
	C*	9.07
	h	87.14
Munsell	H	4.4
	Y	
	V	7
	C	1.3

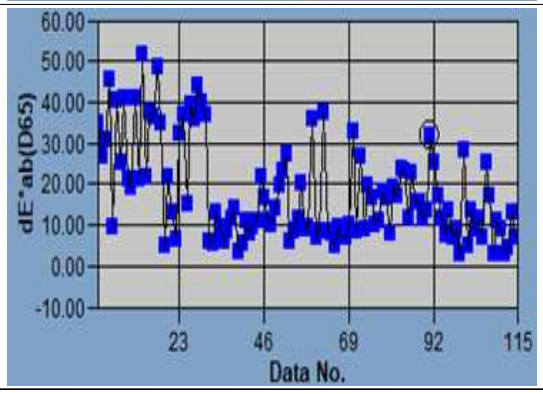
결과값 (1)



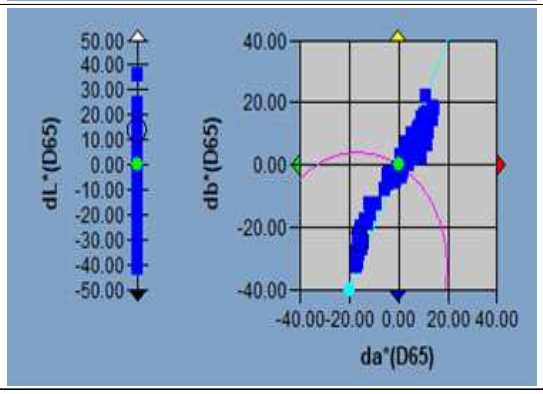
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.160> 건조 레드머드의 상태에 따른 분석결과-시료1

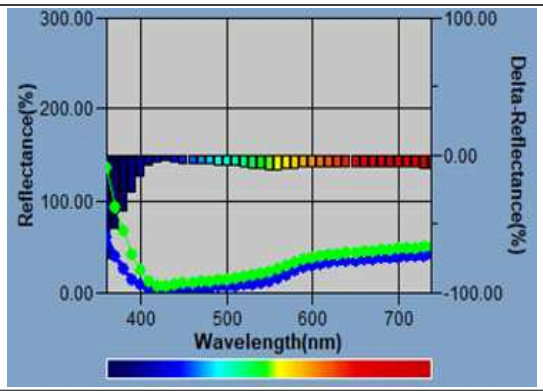
■ 시료2 : SC-R20

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
13.78	SC-R20	
	건조 레드머드	90g
	반건조 레드머드	0g
	중화후 레드머드	0g
	R/B	20%

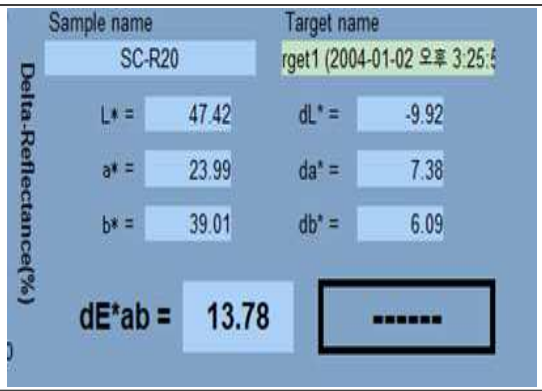


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	19.95
	Y	16.35
	Z	4.67
CIE L*a*b*	L*	47.42
	a*	23.99
	b*	39.01
Hunter Lab	L	40.43
	a	19.97
	b	19.8
CIE Lch	L*	47.42
	C*	45.8
	h	58.41
Munsell	H	5.1
		YR
	V	4.72
	C	7.7

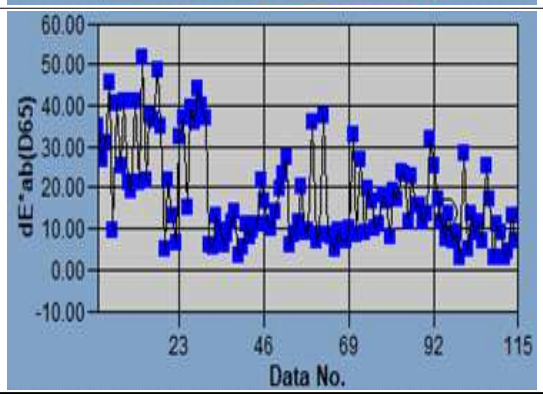
결과값 (1)



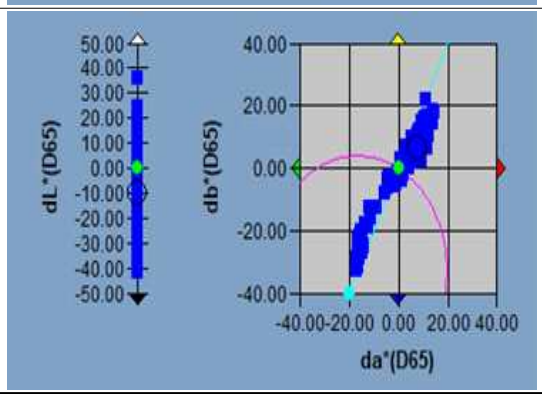
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.161> 건조 레드머드의 상태에 따른 분석결과-시료2

■ 시료3 : SC-DR20

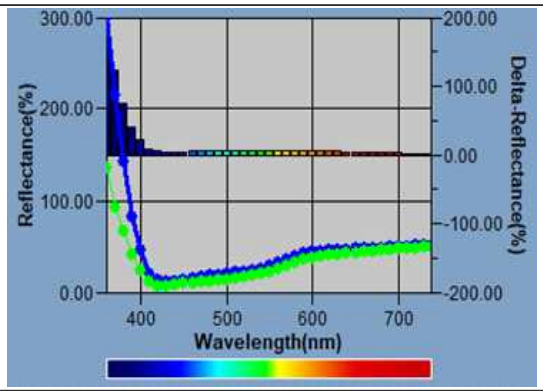
색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
7.54	SC-DR20	
	건조 레드머드	0g
	반건조 레드머드	90g
	중화후 레드머드	0g
	R/B	20%



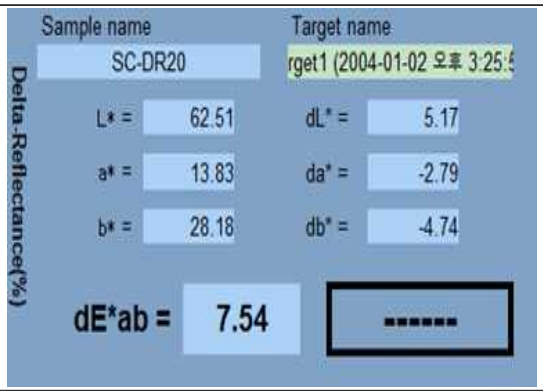
표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	33.15
	Y	31
	Z	16.51
CIE L*a*b*	L*	62.51
	a*	13.83
	b*	28.18
Hunter Lab	L	55.68
	a	12.23
	b	18.71
CIE Lch	L*	62.51
	C*	31.39
	h	63.87
Munsell	H	7.5
		YR
	V	6.18
	나. C	(가) 5.22

(가

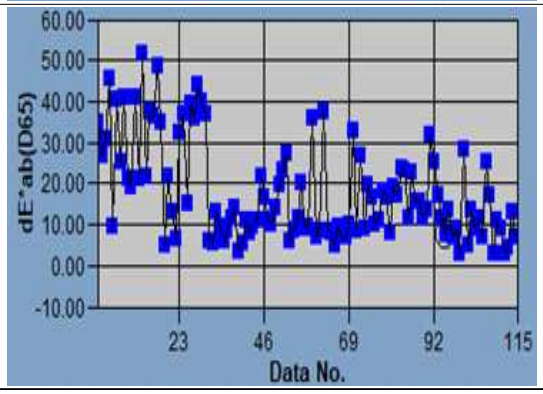
결과값 (1)



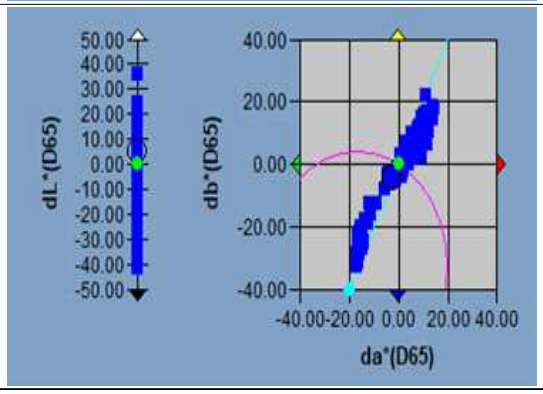
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.162> 건조 레드머드의 상태에 따른 분석결과-시료3

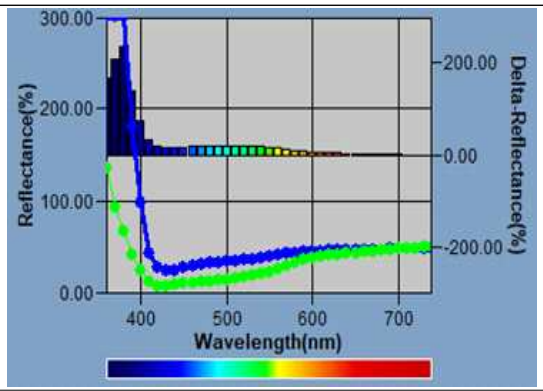
■ 시료4 : SC-NDR10

색차값 ($\Delta E*ab$)	시료명	
25.26	SC-NDR10	
	건조 레드머드	0g
	반건조 레드머드	0g
	중화후 레드머드	45g
	R/B	10%

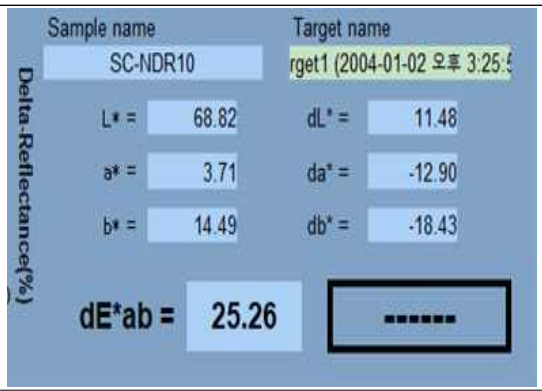


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	38.21
	Y	39.09
	Z	30.68
CIE L*a*b*	L*	68.82
	a*	3.71
	b*	14.49
Hunter Lab	L	62.53
	a	3.31
	b	11.21
CIE Lch	L*	68.82
	C*	14.96
	h	75.62
Munsell	H	0.9
		Y
	V	6.77
	C	2.29

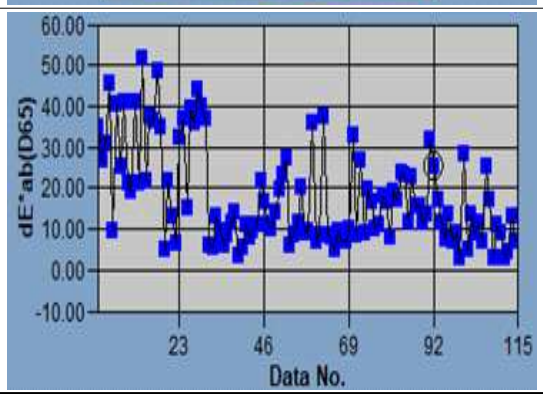
결과값 (1)



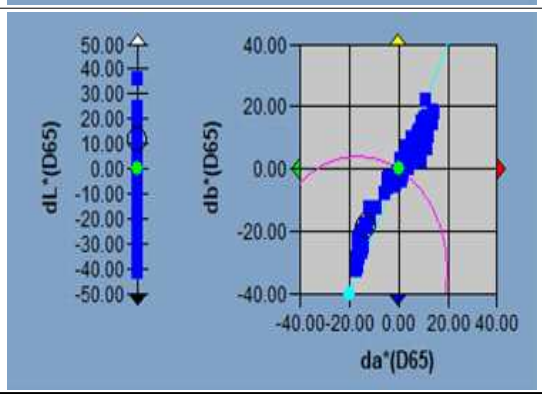
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.163> 건조 레드머드의 상태에 따른 분석결과-시료4

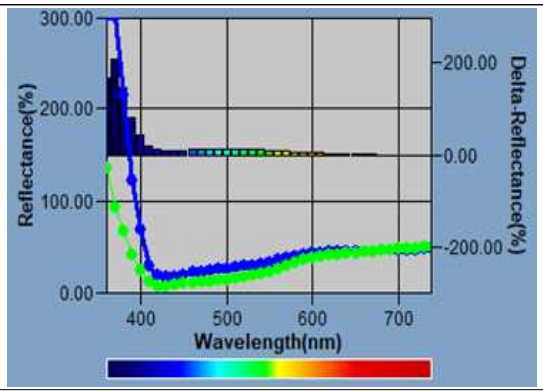
■ 시료5 : SC-NDR20

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
17.07	SC-NDR20	
	건조 레드머드	0g
	반건조 레드머드	0g
	중화후 레드머드	90g
	R/B	20%

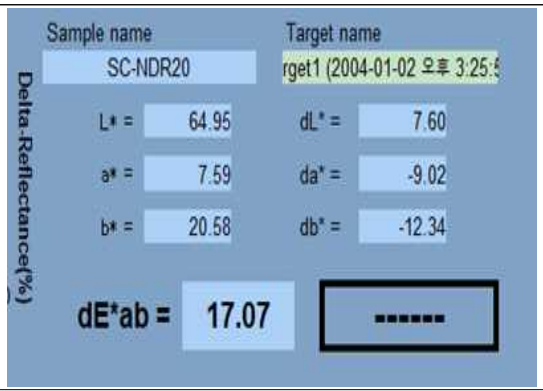


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	34.37
	Y	33.98
	Z	22.59
CIE L*a*b*	L*	64.95
	a*	7.59
	b*	20.58
Hunter Lab	L	58.29
	a	6.69
	b	14.8
CIE Lch	L*	64.95
	C*	21.93
	h	69.75
Munsell	H	9.3
		YR
	V	6.4
	C	3.51

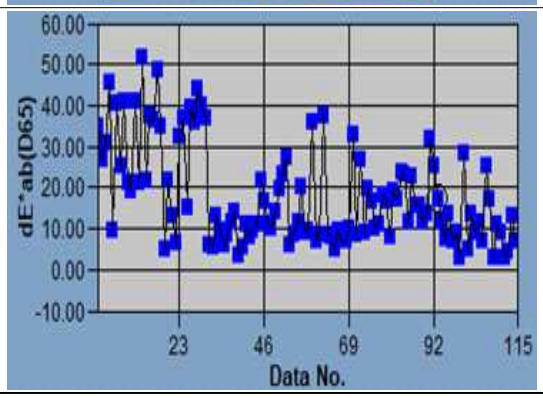
결과값 (1)



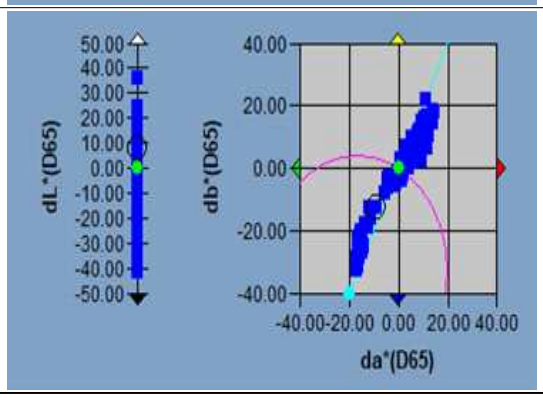
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 2.164> 건조 레드머드의 상태에 따른 분석결과-시료5

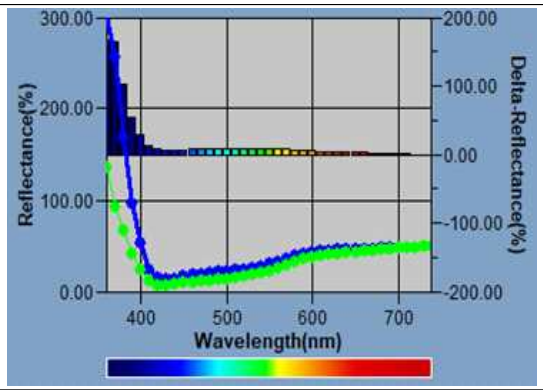
■ 시료6 : SC-NDR30

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
11.45	SC-NDR30	
	건조 레드머드	0g
	반건조 레드머드	0g
	중화후 레드머드	135g
	R/B	30%

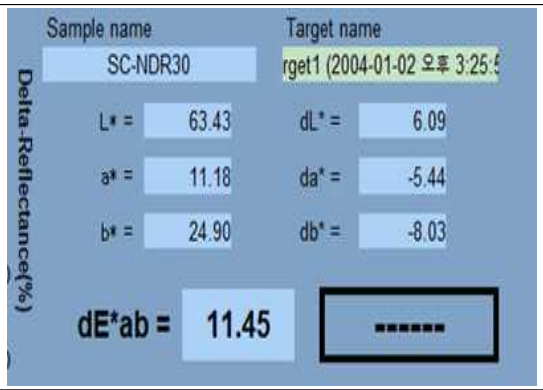


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	33.52
	Y	32.11
	Z	18.87
CIE L*a*b*	L*	63.43
	a*	11.18
	b*	24.9
Hunter Lab	L	56.66
	a	9.86
	b	17.1
CIE Lch	L*	63.43
	C*	27.29
	h	65.83
Munsell	H	8.2
		YR
	V	6.26
	C	4.48

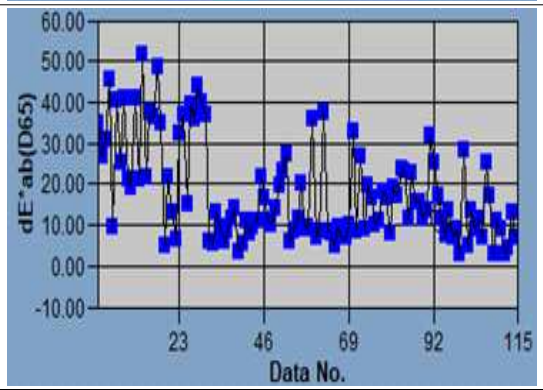
결과값 (1)



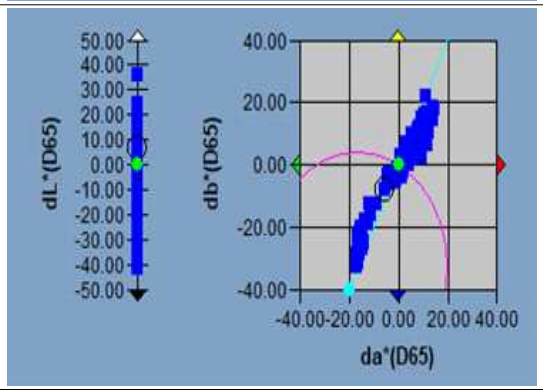
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.165> 건조 레드머드의 상태에 따른 분석결과-시료6

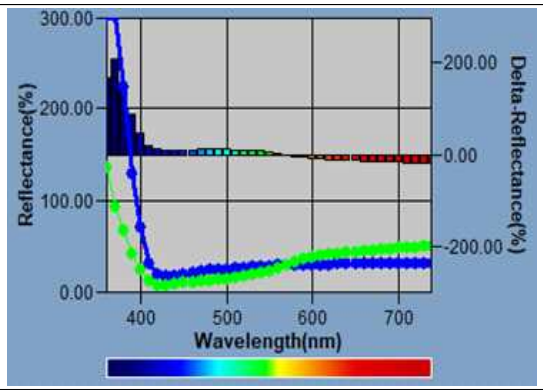
■ 시료7 : CR 0

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
27.12	CR0	
	RM첨가율	0%
	보통 포틀랜트 시멘트	450g
	건조레드머드	0g
	나이아신	0g
	잔골재	1350g

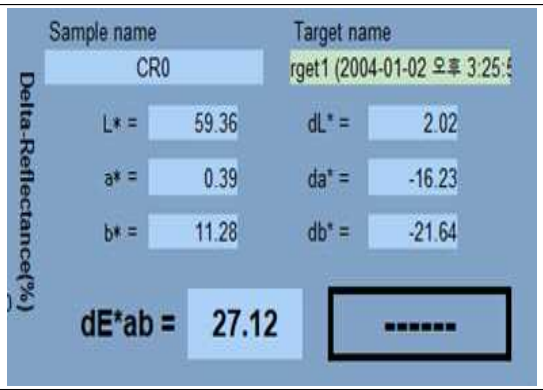


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	26.09
	Y	27.42
	Z	22.4
CIE L*a*b*	L*	59.36
	a*	0.39
	b*	11.28
Hunter Lab	L	52.36
	a	0.32
	b	8.34
CIE Lch	L*	59.36
	C*	11.29
	h	88.04
Munsell	H	4.8
	Y	
	V	5.8
	C	1.62

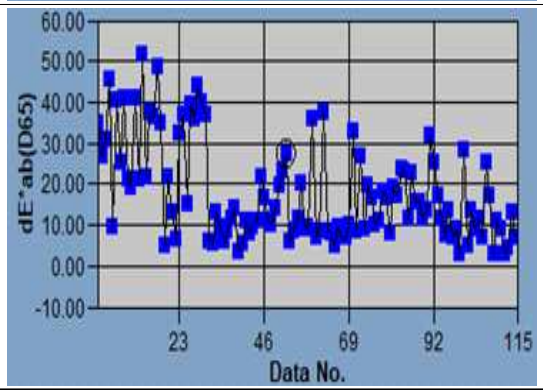
결과값 (1)



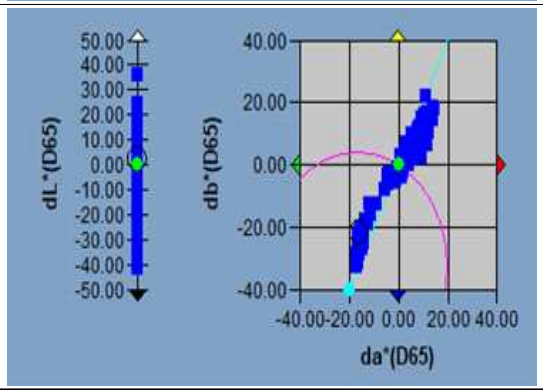
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.166> 건조 레드머드의 상태에 따른 분석결과-시료7

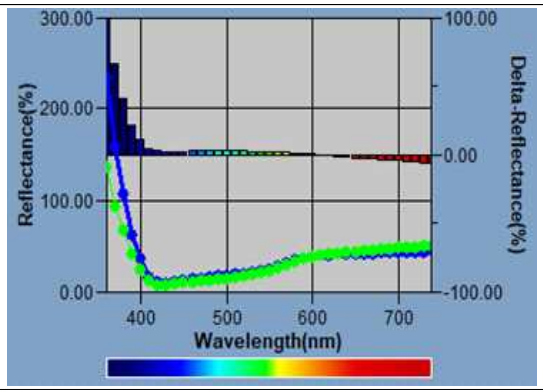
■ 시료8 : CR 10

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
5.89	CR10	
	RM첨가율	10%
	보통 포틀랜트 시멘트	675g
	건조레드머드	68g
	나이아신	0g
	잔골재	2025g

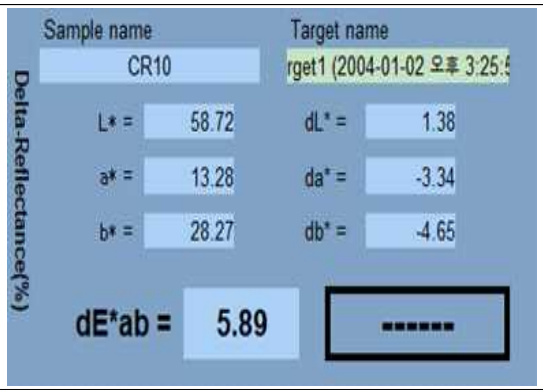


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	28.6
	Y	26.72
	Z	13.64
CIE L*a*b*	L*	58.72
	a*	13.28
	b*	28.27
Hunter Lab	L	51.7
	a	11.46
	b	18.09
CIE Lch	L*	58.72
	C*	31.23
	h	64.84
Munsell	H	7.9
		YR
	V	5.8
	C	5.11

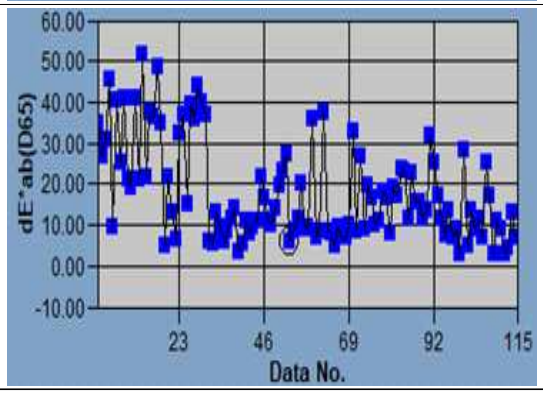
결과값 (1)



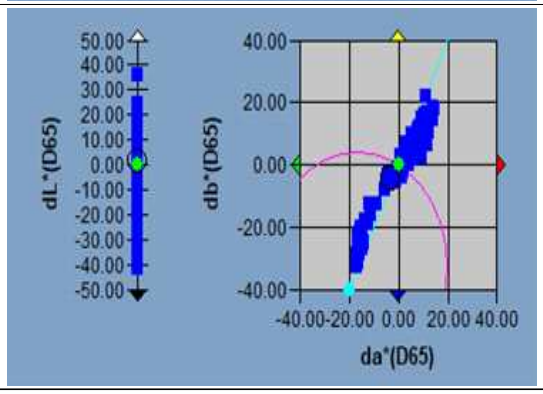
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.167> 건조 레드머드의 상태에 따른 분석결과-시료8

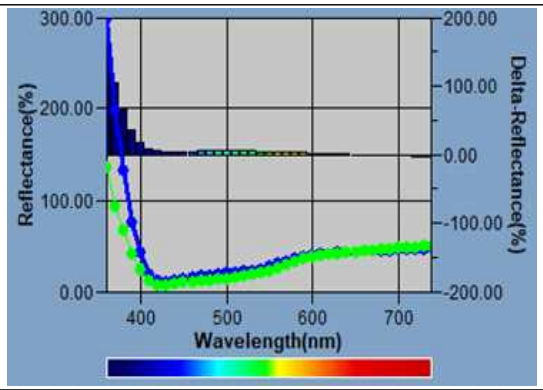
■ 시료9 : CR10N

색차값 ($\Delta E*ab$)	시료명	
8.58	CR10N	
	RM첨가율	10%
	보통 포틀랜트 시멘트	450g
	건조레드머드	45g
	나이아신	0.9g
	잔골재	1350g

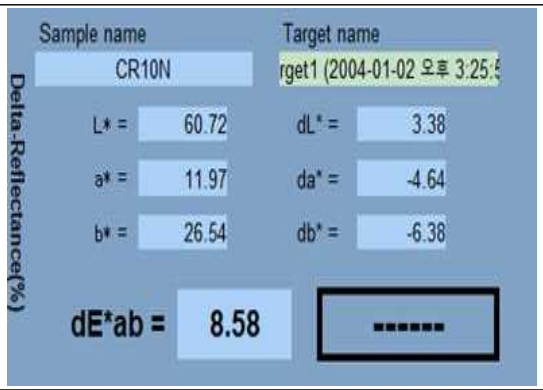


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	30.52
	Y	28.93
	Z	15.85
CIE L*a*b*	L*	60.72
	a*	11.97
	b*	26.54
Hunter Lab	L	53.79
	a	10.42
	b	17.56
CIE Lch	L*	60.72
	C*	29.12
	h	65.73
Munsell	H	8.1
		YR
	V	6
	C	4.77

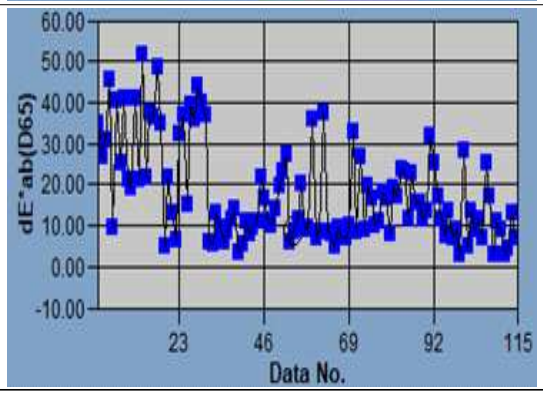
결과값 (1)



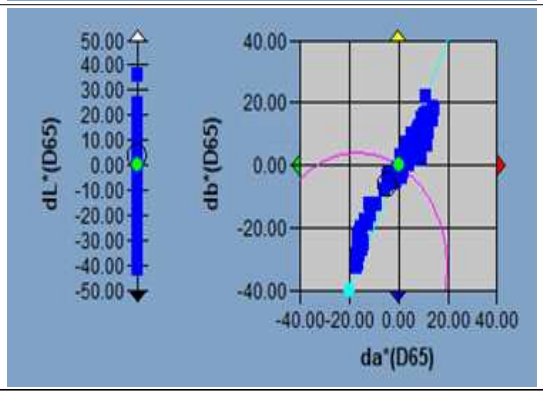
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.168> 건조 레드머드의 상태에 따른 분석결과-시료9

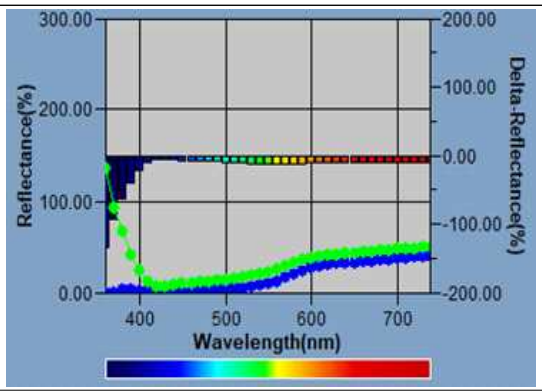
■ 시료10 : CR 30

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
20.45	CR30	
	RM첨가율	30%
	보통 포틀랜트 시멘트	675g
	건조레드머드	68g
	나이아신	0g
	잔골재	2025g

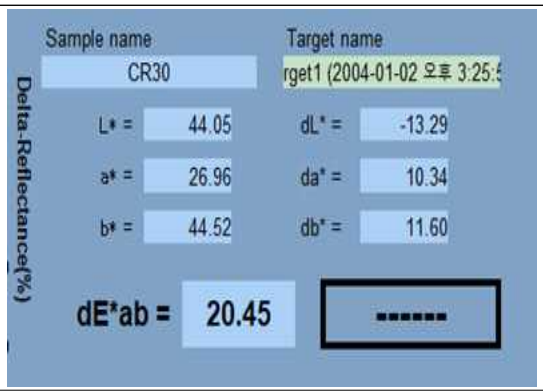


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	17.71
	Y	13.87
	Z	2.76
CIE L*a*b*	L*	44.05
	a*	26.96
	b*	44.52
Hunter Lab	L	37.25
	a	22.18
	b	20.25
CIE Lch	L*	44.05
	C*	52.04
	h	58.8
Munsell	H	4.9
		YR
	V	4.4
	C	8.8

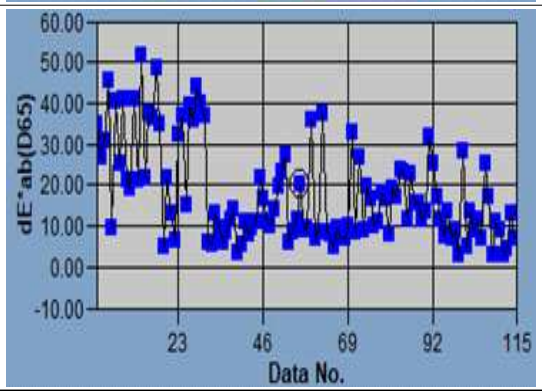
결과값 (1)



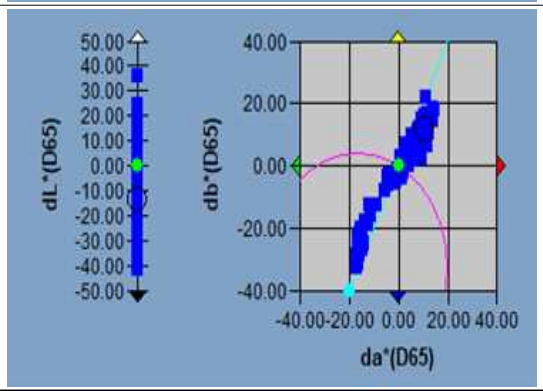
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.169> 건조 레드머드의 상태에 따른 분석결과-시료10

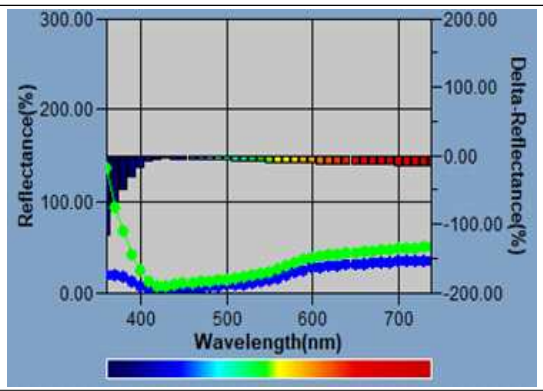
■ 시료11 : CR30N

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
11.43	CR30N	
	RM첨가율	30%
	보통 포틀랜트 시멘트	450g
	건조레드머드	135g
	나이아신	2.7g
	잔골재	1350g

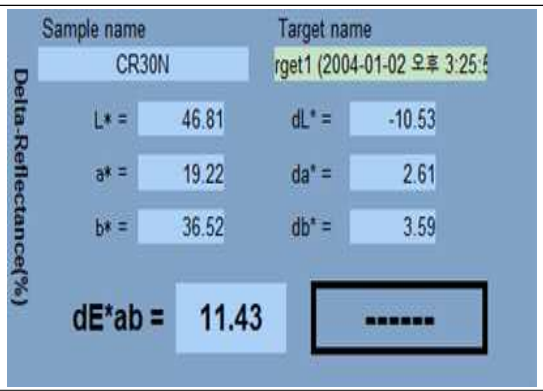


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	18.49
	Y	15.88
	Z	4.96
CIE L*a*b*	L*	46.81
	a*	19.22
	b*	36.51
Hunter Lab	L	39.85
	a	15.67
	b	18.85
CIE Lch	L*	46.81
	C*	41.27
	h	62.24
Munsell	H	6.7
		YR
	V	4.65
	C	6.74

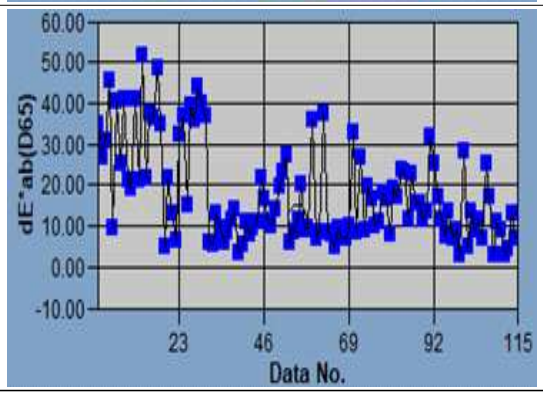
결과값 (1)



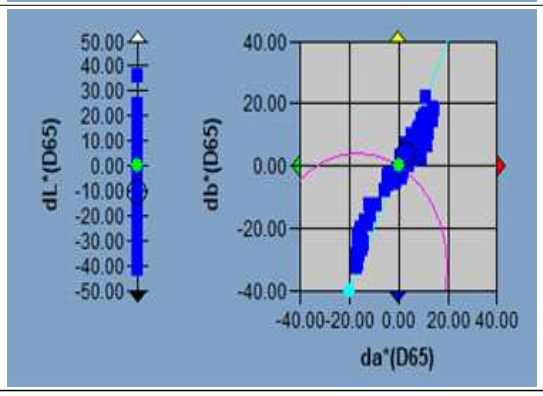
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.170> 건조 레드머드의 상태에 따른 분석결과-시료11

③ 레드머드 첨가율에 따른 분석

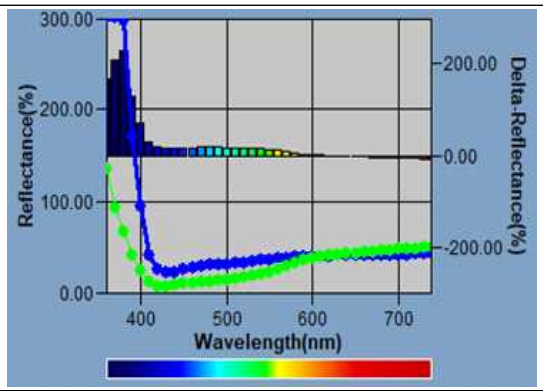
■ 시료1 : 내SC0-45

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
26.67	내SC0-45	
	Repl.RS	0
	첨가율 내할	0
	레드머드 중량	0kg
	첨가율 외할	0

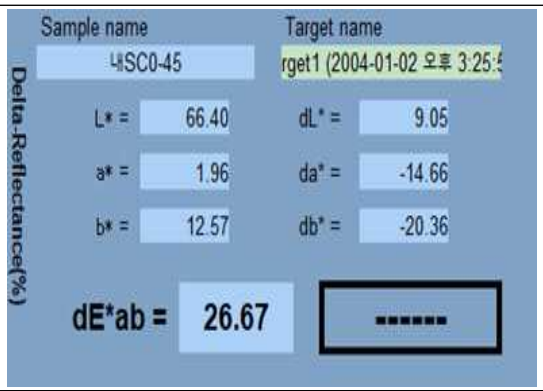


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	34.54
	Y	35.84
	Z	29.13
CIE L*a*b*	L*	66.4
	a*	1.96
	b*	12.57
Hunter Lab	L	59.87
	a	1.71
	b	9.69
CIE Lch	L*	66.4
	C*	12.72
	h	81.15
Munsell	H	2.4
		Y
	V	6.52
	C	1.87

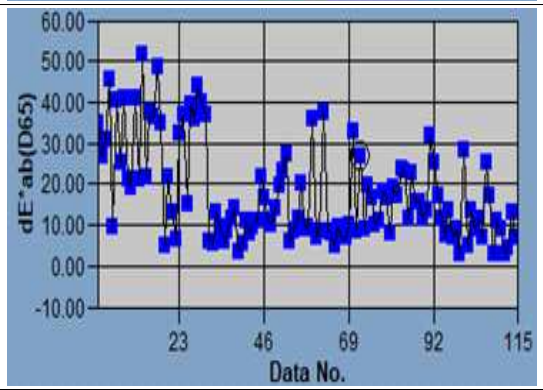
결과값 (1)



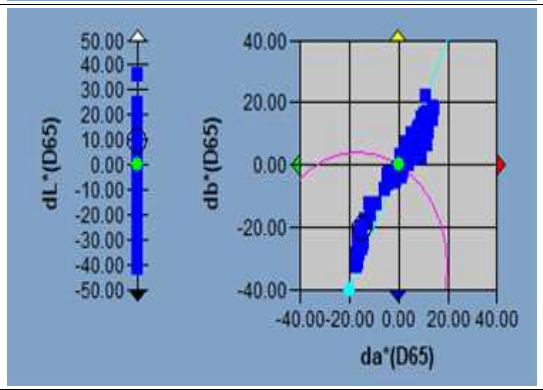
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.171> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료1

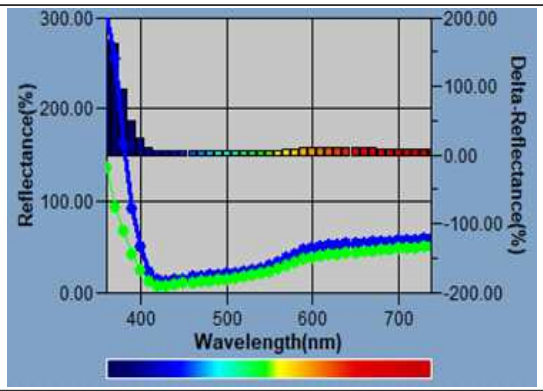
■ 시료2 : 내SC20-45

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
7.29	내SC20-45	
	Repl.RS	20
	첨가율 내할	20
	레드머드 중량	290kg
	첨가율 외할	0

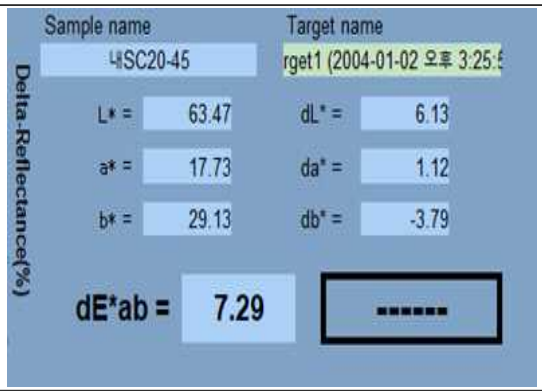


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	35.47
	Y	32.16
	Z	16.84
CIE L*a*b*	L*	63.47
	a*	17.73
	b*	29.13
Hunter Lab	L	56.71
	a	15.95
	b	19.37
CIE Lch	L*	63.47
	C*	34.1
	h	58.68
Munsell	H	5.5
		YR
	V	6.29
	C	5.87

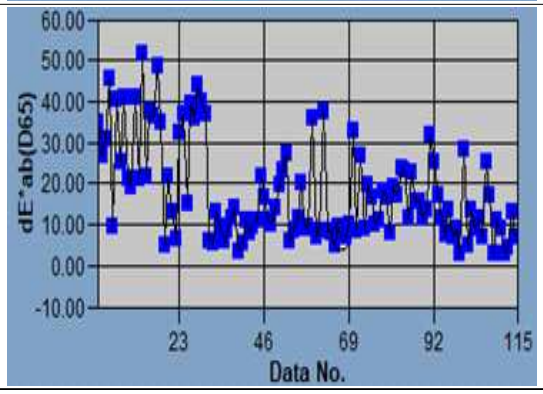
결과값 (1)



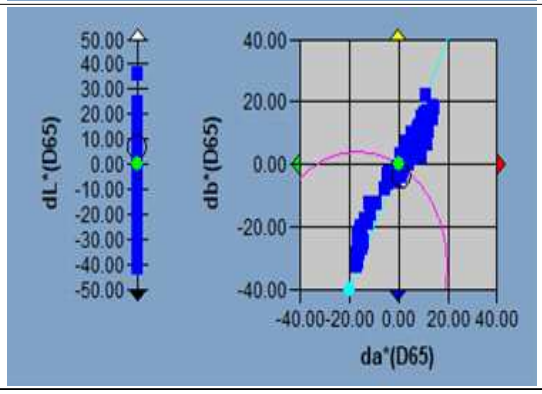
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.172> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료2

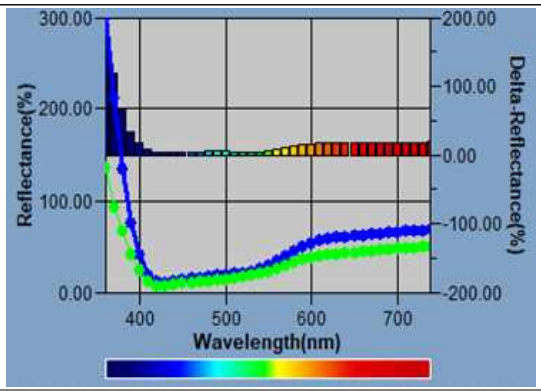
■ 시료3 : 내SC40-45

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
9.49	내SC40-45	
	Repl.RS	40
	첨가율 내할	40
	레드머드 중량	580kg
	첨가율 외할	0

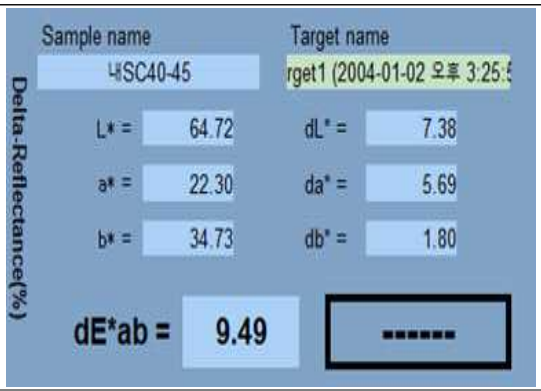


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	38.49
	Y	33.7
	Z	15.28
CIE L*a*b*	L*	64.72
	a*	22.3
	b*	34.73
Hunter Lab	L	58.05
	a	20.47
	b	22.36
CIE Lch	L*	64.72
	C*	41.27
	h	57.29
Munsell	H	4.8
		YR
	V	6.43
	C	7.2

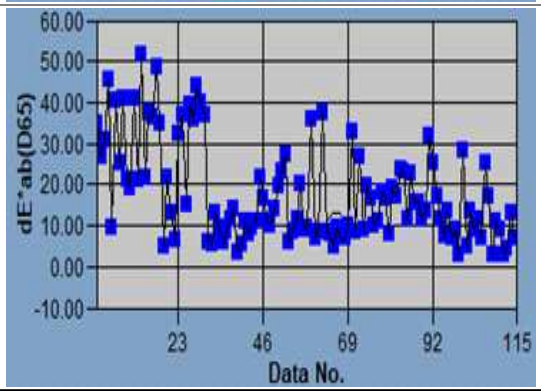
결과값 (1)



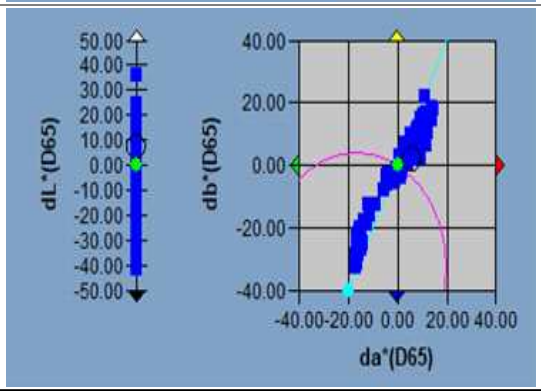
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.173> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료3

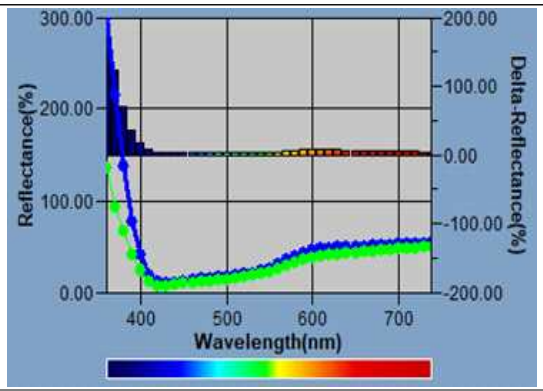
■ 시료4 : 외SC20-45

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
5.02	외SC20-45	
	Repl.RS	0
	첨가율 내할	0
	레드머드 중량	290kg
	첨가율 외할	20

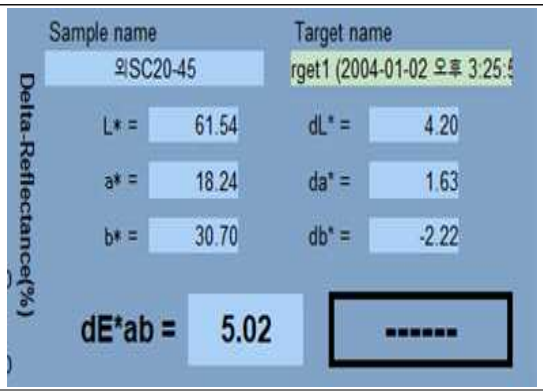


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	33.21
	Y	29.87
	Z	14.65
CIE L*a*b*	L*	61.54
	a*	18.24
	b*	30.7
Hunter Lab	L	54.65
	a	16.26
	b	19.8
CIE Lch	L*	61.54
	C*	35.71
	h	59.28
Munsell	H	5.7
		YR
	V	6.1
	C	6.1

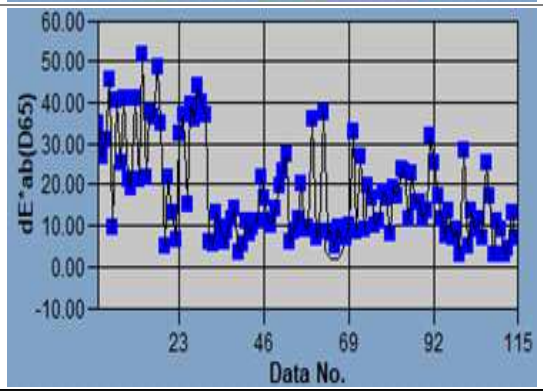
결과값 (1)



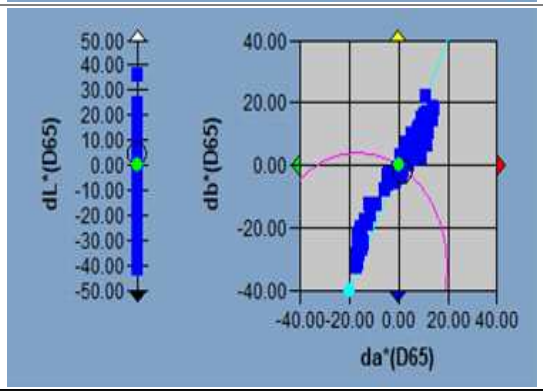
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.174> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료4

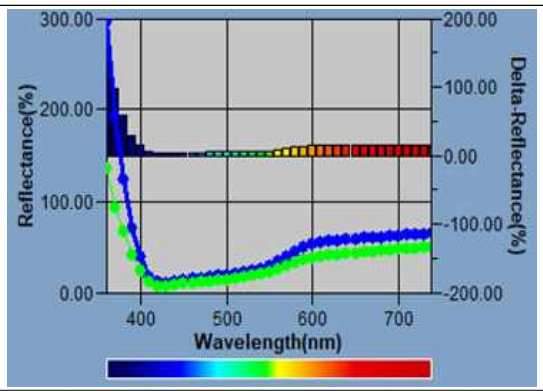
■ 시료5 : 외SC40-45

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
8.46	외SC40-45	
	Repl.RS	0
	첨가율 내할	0
	레드머드 중량	290kg
	첨가율 외할	20

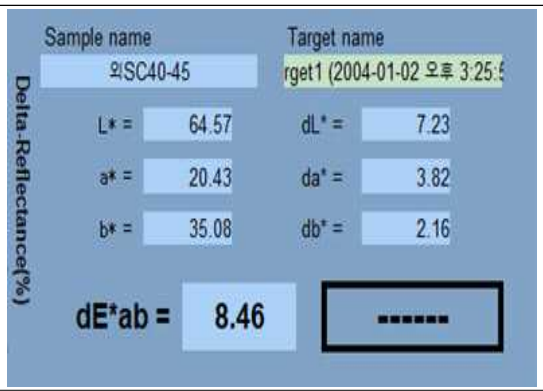


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	37.72
	Y	33.51
	Z	15.02
CIE L*a*b*	L*	64.57
	a*	20.43
	b*	35.08
Hunter Lab	L	57.89
	a	18.64
	b	22.5
CIE Lch	L*	64.57
	C*	40.6
	h	59.78
Munsell	H	5.6
		YR
	V	6.41
	C	6.95

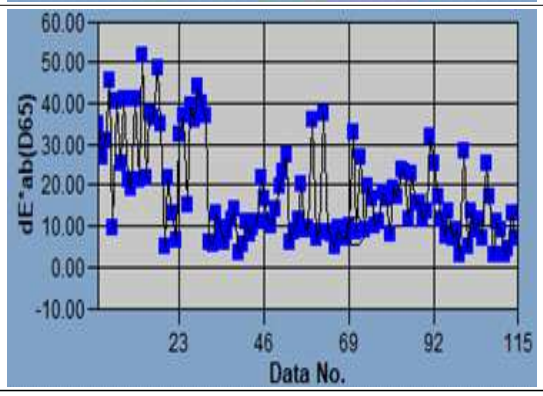
결과값 (1)



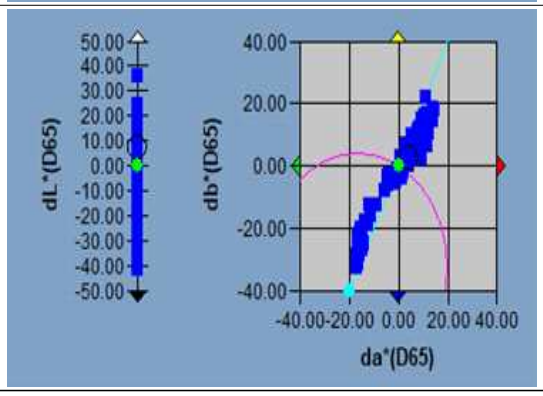
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.175> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료5

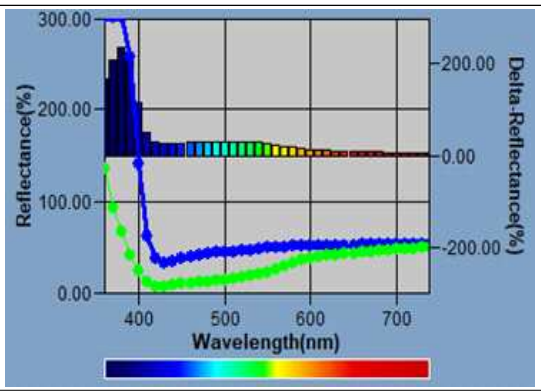
■ 시료6 : 내SC0-65

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
32.88	내SC0-65	
	Repl.RS	0
	첨가율 내할	0
	레드머드 중량	0kg
	첨가율 외할	0

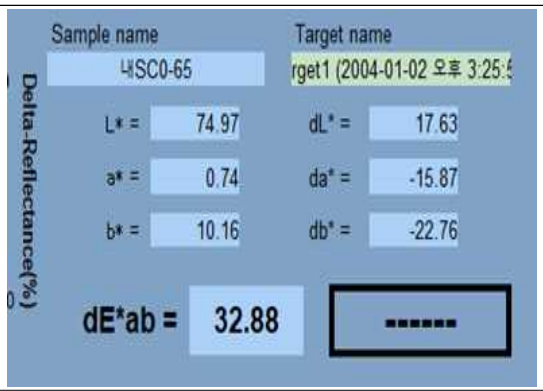


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	45.99
	Y	48.23
	Z	42.34
CIE L*a*b*	L*	74.97
	a*	0.74
	b*	10.16
Hunter Lab	L	69.45
	a	0.68
	b	8.44
CIE Lch	L*	74.97
	C*	10.19
	h	85.83
Munsell	H	3.9
		Y
	V	7.38
	C	1.45

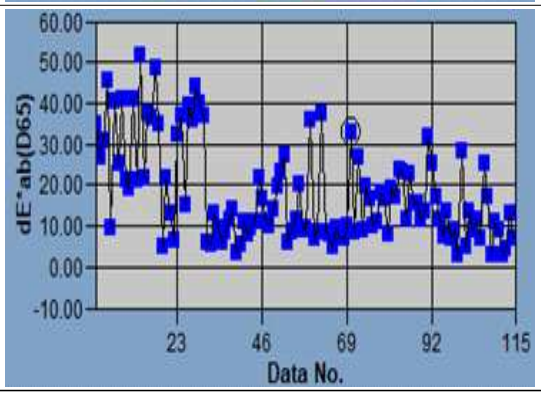
결과값 (1)



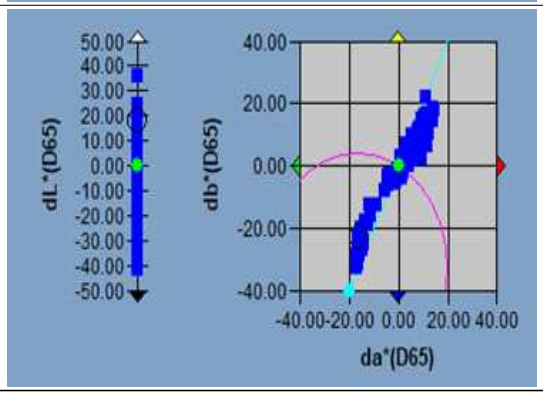
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.176> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료6

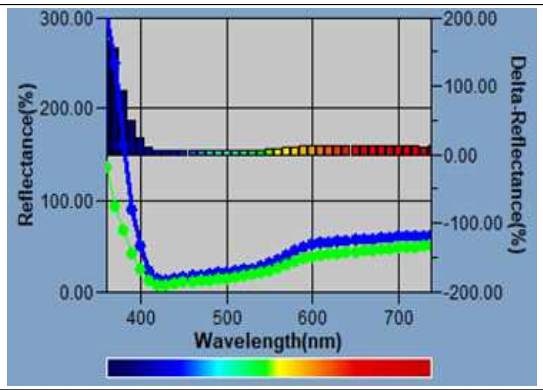
■ 시료7 : 내SC20-65

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
7.99	내SC20-65	
	Repl.RS	20
	첨가율 내할	20
	레드머드 중량	290kg
	첨가율 외할	0

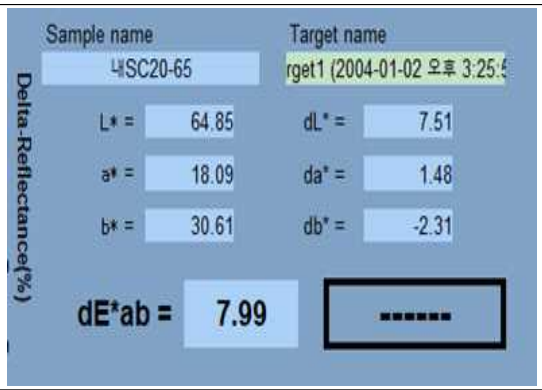


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	37.36
	Y	33.86
	Z	17.27
CIE L*a*b*	L*	64.85
	a*	18.09
	b*	30.61
Hunter Lab	L	58.19
	a	16.42
	b	20.37
CIE Lch	L*	64.85
	C*	35.55
	h	59.42
Munsell	H	5.7
		YR
	V	6.43
	C	6.1

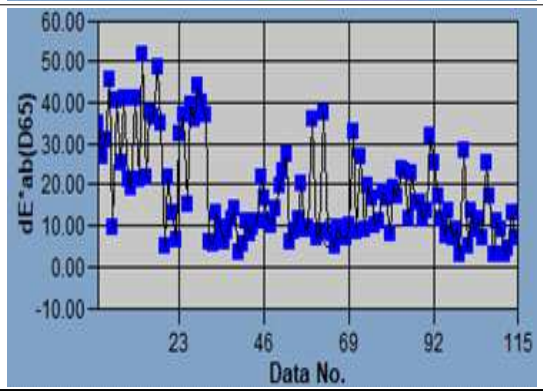
결과값 (1)



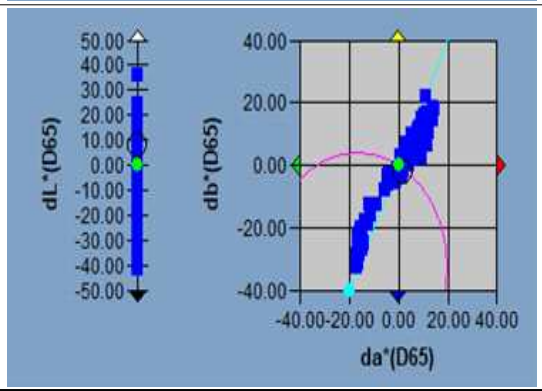
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.177> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료7

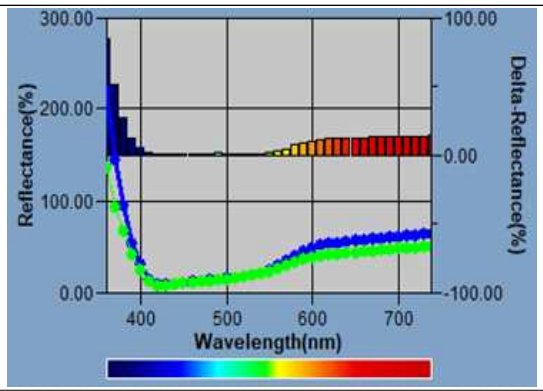
■ 시료8 : 내SC40-65

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
8.62	내SC40-65	
	Repl.RS	40
	첨가율 내할	40
	레드머드 중량	580kg
	첨가율 외할	0

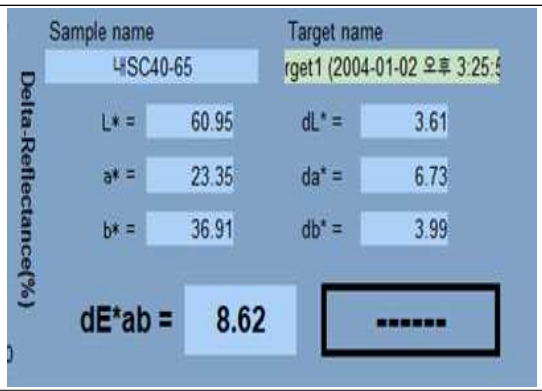


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	33.94
	Y	29.19
	Z	11.78
CIE L*a*b*	L*	60.95
	a*	23.35
	b*	36.91
Hunter Lab	L	54.03
	a	21.05
	b	22.5
CIE Lch	L*	60.95
	C*	43.68
	h	57.69
Munsell	H	4.8
		YR
	V	4.05
	C	7.55

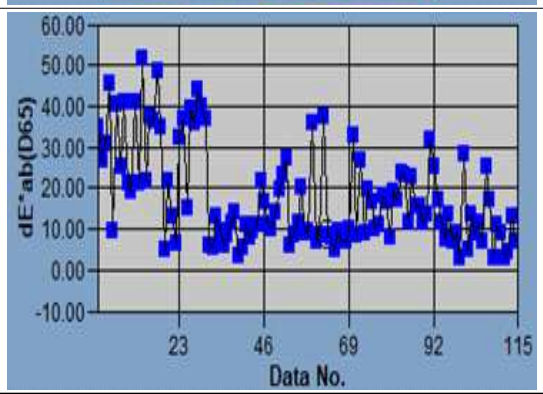
결과값 (1)



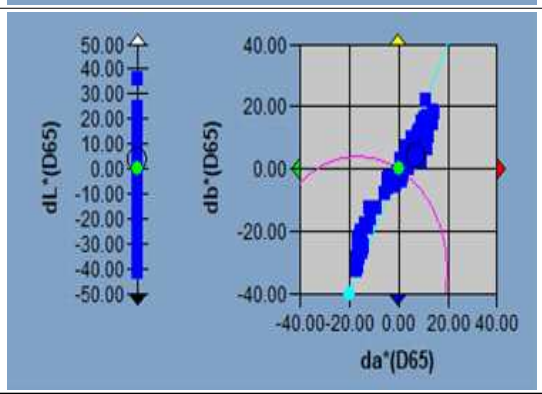
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.178> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료8

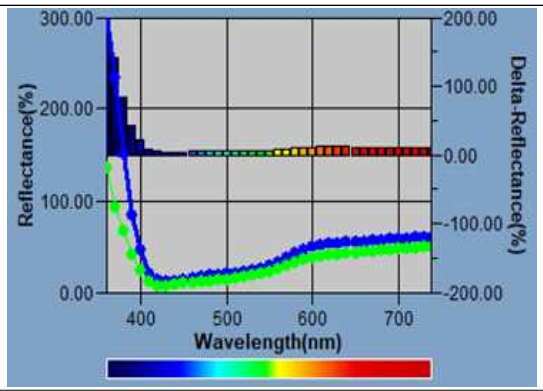
■ 시료9 : 외SC20-45

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
7.17	외SC20-65	
	Repl.RS	0
	첨가율 내할	0
	레드머드 중량	290kg
	첨가율 외할	20

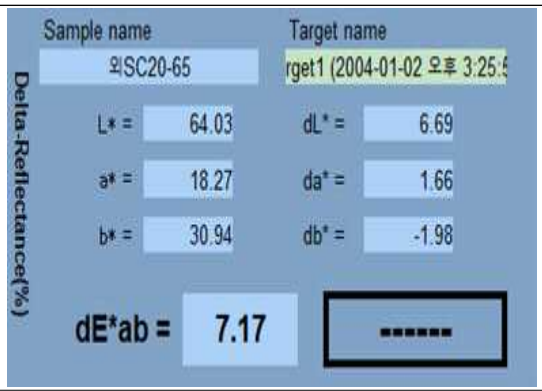


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	36.35
	Y	32.84
	Z	16.45
CIE L*a*b*	L*	64.03
	a*	18.27
	b*	30.94
Hunter Lab	L	57.3
	a	16.51
	b	20.39
CIE Lch	L*	64.03
	C*	35.93
	h	59.44
Munsell	H	5.7
		YR
	V	6.35
	C	6.15

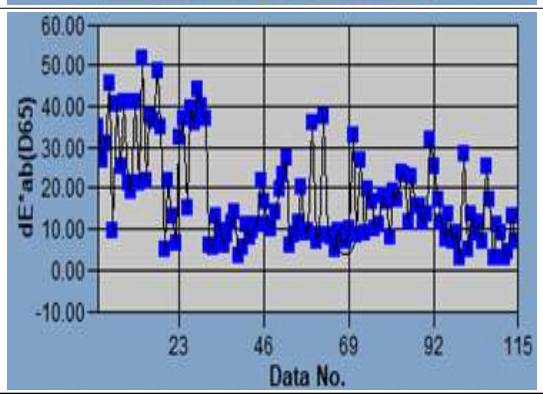
결과값 (1)



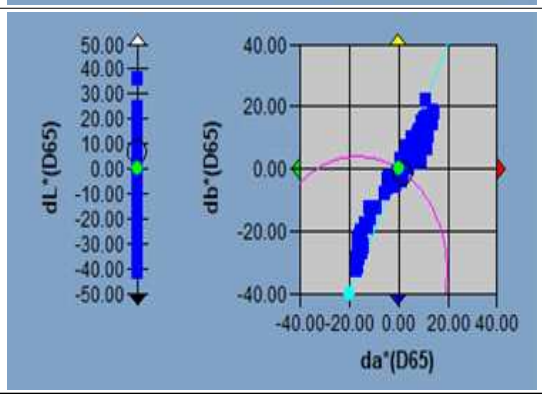
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.179> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료9

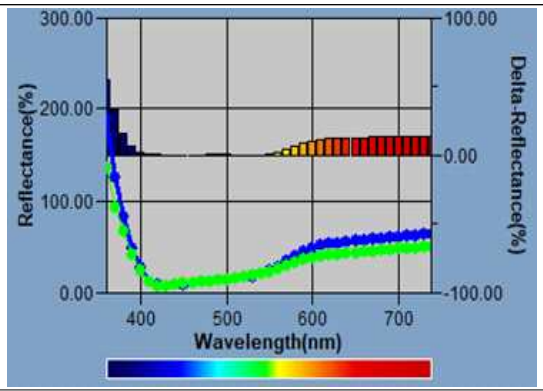
■ 시료10 : 외SC40-65

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
10.05	외SC40-65	
	Repl.RS	0
	첨가율 내할	0
	레드머드 중량	580kg
	첨가율 외할	40

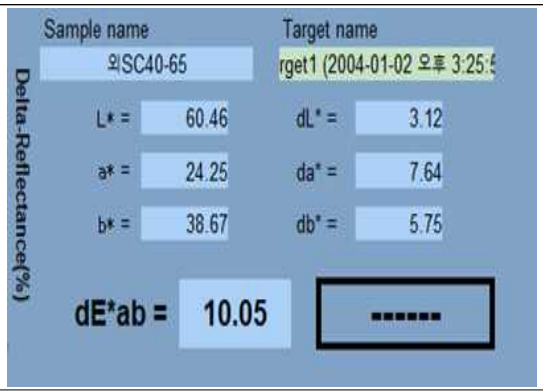


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	33.6
	Y	28.64
	Z	10.84
CIE L*a*b*	L*	60.46
	a*	24.25
	b*	38.67
Hunter Lab	L	53.51
	a	21.86
	b	23.11
CIE Lch	L*	60.46
	C*	45.64
	h	57.91
Munsell	H	4.9
		YR
	V	6.01
	C	7.86

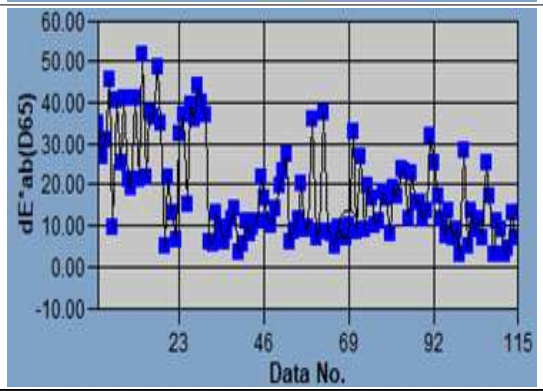
결과값 (1)



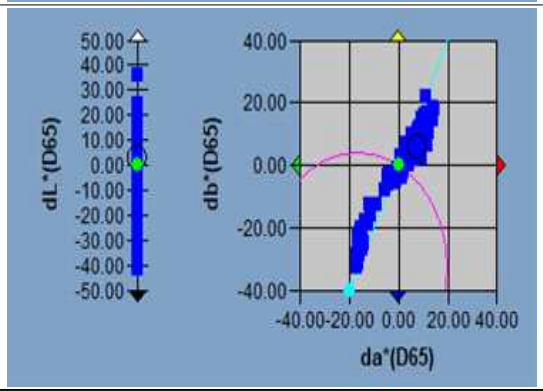
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.180> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료10

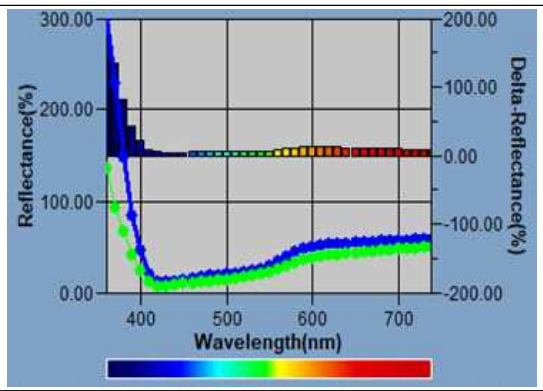
■ 시료11 : C 20

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
7.26	C20	
	잔골재	934g
	굵은골재	967g
	레드머드 촉진제 첨가율 외할 RS	20
	레드머드 중량	290kg

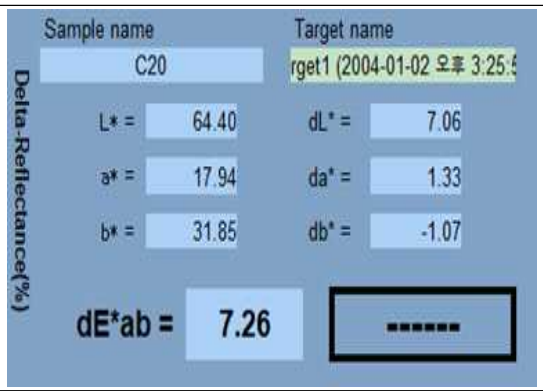


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	36.73
	Y	33.3
	Z	16.33
CIE L*a*b*	L*	64.4
	a*	17.94
	b*	31.85
Hunter Lab	L	57.7
	a	16.23
	b	20.91
CIE Lch	L*	64.4
	C*	36.55
	h	60.61
Munsell	H	6.1
		YR
	V	6.39
	C	6.21

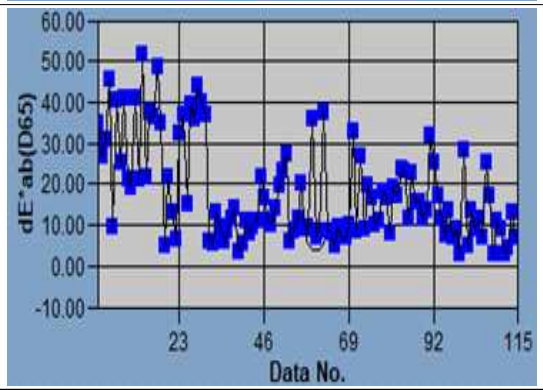
결과값 (1)



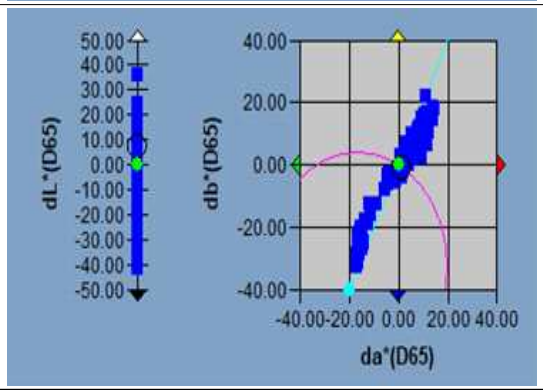
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.181> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료11

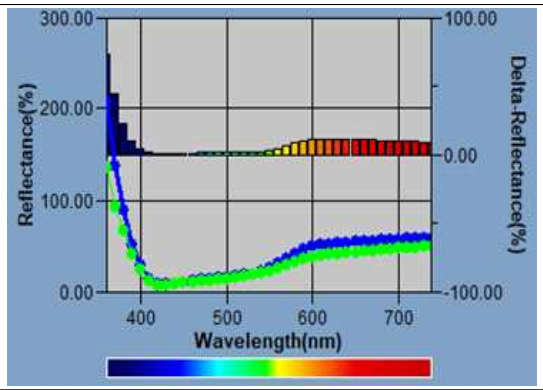
■ 시료12 : C 40

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
8.4	C40	
	잔골재	934g
	굵은골재	967g
	레드머드 촉진제 첨가율 외할 RS	40
	레드머드 중량	580kg

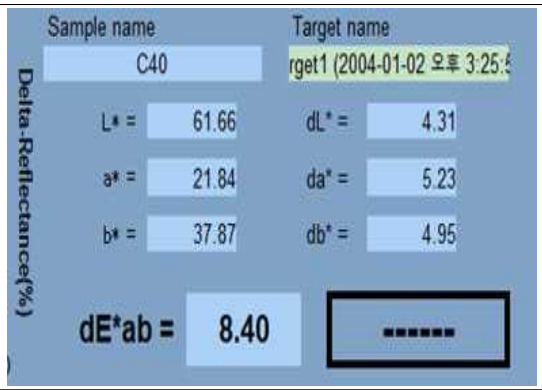


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	34.39
	Y	30
	Z	11.87
CIE L*a*b*	L*	61.66
	a*	21.84
	b*	37.87
Hunter Lab	L	54.78
	a	19.69
	b	23.07
CIE Lch	L*	61.66
	C*	43.72
	h	60.02
Munsell	H	5.7
	YR	
	V	6.13
	C	7.42

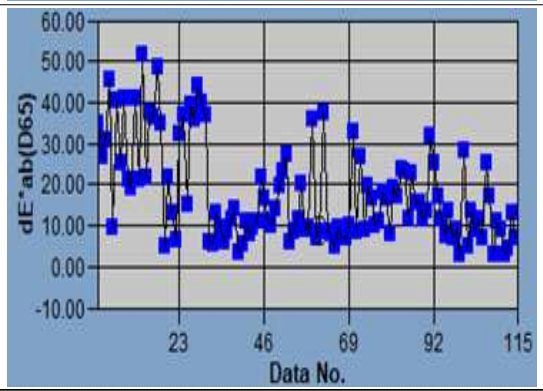
결과값 (1)



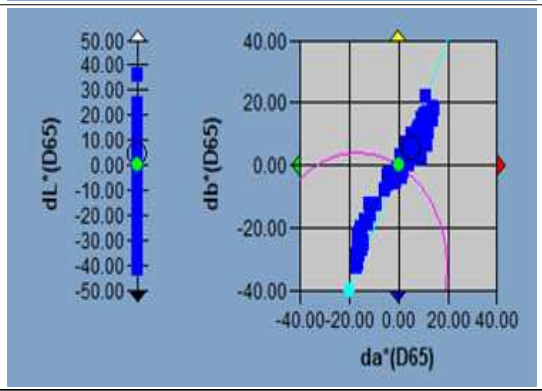
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.182> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료12

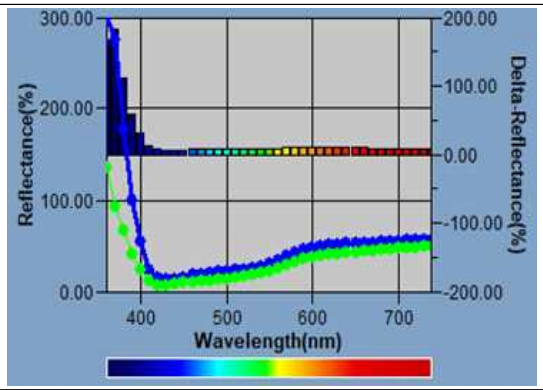
■ 시료13 : SC20

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
9.17	SC20	
	잔골재	923g
	굵은골재	955g
	레드머드 촉진제 첨가율 외할 RS	20
	레드머드 중량	290kg

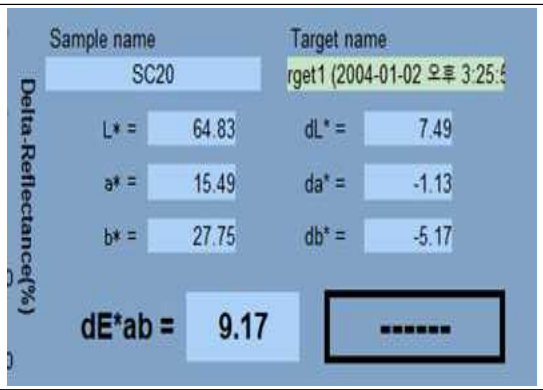


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	36.55
	Y	33.84
	Z	18.65
CIE L*a*b*	L*	64.83
	a*	15.49
	b*	27.75
Hunter Lab	L	58.17
	a	13.95
	b	18.88
CIE Lch	L*	64.83
	C*	31.78
	h	60.84
Munsell	H	6.4
		YR
	V	6.42
	C	5.4

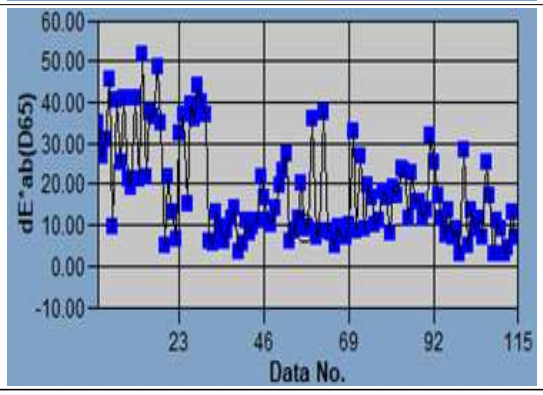
결과값 (1)



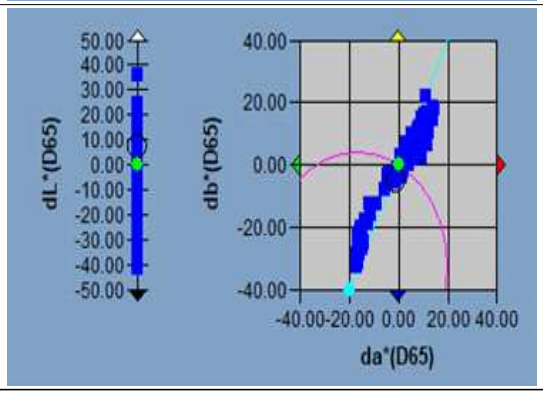
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.183> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료13

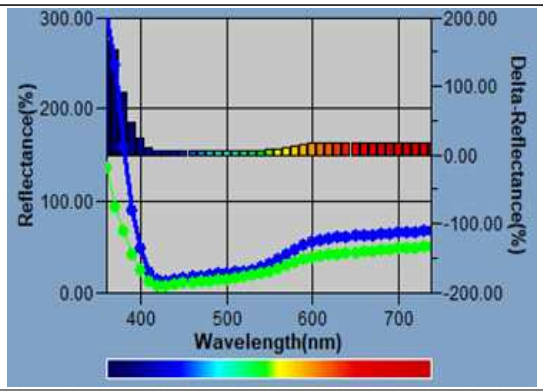
■ 시료14 : SC40

색차값 (ΔE^*ab)	시료명	
9.48	SC40	
	잔골재	923g
	굵은골재	955g
	레드머드 촉진제 첨가율 외할 RS	40
	레드머드 중량	580kg

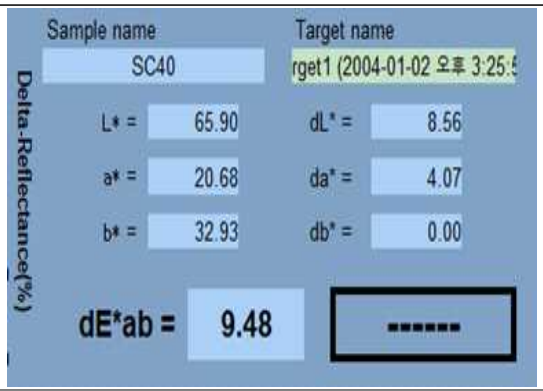


표색계	좌표축	좌표값
CIE XYZ	X	39.59
	Y	35.2
	Z	17.03
CIE L*a*b*	L*	65.9
	a*	20.68
	b*	32.93
Hunter Lab	L	59.33
	a	19.02
	b	21.74
CIE Lch	L*	65.9
	C*	38.88
	h	57.87
Munsell	H	5.0
		YR
	V	6.55
	C	6.77

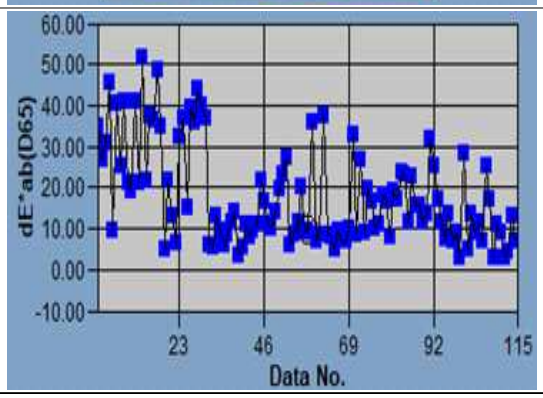
결과값 (1)



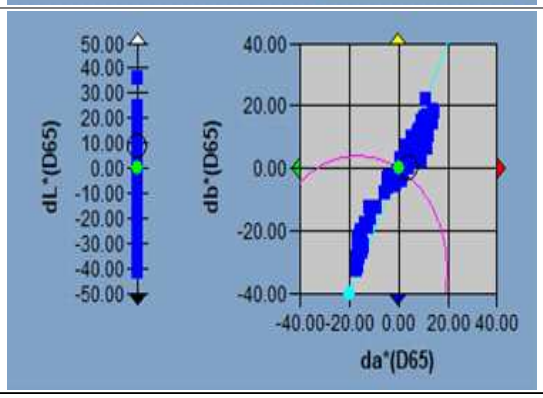
결과값 (3)



결과값 (2)



결과값 (4)



<그림 3.184> 레드머드 첨가율에 따른 분석결과-시료14

(다) 고감성 칼라 시멘트의 색채특성 및 색차 분석 결과

① 레드머드의 적용 유형에 따른 분석

콘크리트 블록을 조성할 때, 산업폐기물인 레드머드를 투입하였으며, 첨가한 레드머드의 상태에 따른 색채의 분포를 측정·분석을 <표 3.124>에 나타내었다.

콘크리트 블록에 레드머드를 첨가하면, 색채는 YR계열의 중명도/ 중채도의 범위에 분포하는 것으로 나타났다. 기존의 황토 블록과의 색차를 분석하면 채도가 높은 색채가 색차값이 적게 나와서, 첨가제 유형은 분말을 결합재는 일반 시멘트를 사용하고, 건조 레드머드를 사용한 것이 색차가 적은 것으로 나타났다. 전체적으로는, 액상 레드머드 촉진제보다는 건조 레드머드를 사용하는 것이 기존의 황토블록과 색차를 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 액상 레드머드 촉진제를 사용할 경우, 나이아신을 3.0g을 사용하는 것이 색차가 적게 나타났다.

슬래그를 사용하면, 명도가 높아지면서 색차가 커지는 경향이 있었으며, 액상 레드머드 촉진제를 75g 첨가하였을 때 색차가 가장 낮게 나타났다.

레드머드를 첨가하고, 슬래그를 혼합하여 제작한 시료의 경우, 건조 레드머드만 첨가한 경우보다 grayish한 색채분포를 나타내는 것으로 나타났다. 콘크리트를 조성할 때 레드머드를 투입하여 흙포장과 유사한 시각적 효과를 얻기 위하여, 적절한 레드머드 상태와 비율을 파악하고자 색채 분포를 <표 3.124>과 같이 측정·분석하였다.

<표 3.124> 콘크리트 블록의 조성비에 따른 색차값 분석

조성비 / 연번 / 제품명		**색차값 (ΔE^*ab)**	액상 레드머드 촉진제 (g)	건조 레드머드 (g)	나이아신 (g)	슬래그 시멘트 (g)	첨가제 유형		결합재	
							액상화	분말	OPC	SC
1	LN 0	7.34	180		0		○		○	
2	LN 2	12.97	183		1.5		○		○	
3	LN 4	4.48	186		3.0		○		○	
4	LN 8	11.33	192		6.0		○		○	
5	DL 0	2.98		75	0			○	○	
6	DL 2	8.96		75	1.5			○	○	
7	DL 4	3.31		75	3.0			○	○	
8	DL 8	17.11		75	6.0			○	○	
9	C	25.11					○		○	
10	C 75	7.14	75				○		○	
11	C 150	3.28	150				○		○	
12	C 225	9.07	225				○		○	
13	C 300	13.67	300				○		○	
14	SC	28.15				600	○			○
15	SC 75	5.32	75			600	○			○
16	SC 150	7.09	150			600	○			○
17	SC 225	11.85	225			600	○			○
18	SC 300	9.32	300			600	○			○

② 건조 레드머드의 상태에 따른 분석

동일한 중량(90g)의 레드머드를 건조 상태, 반건조상태, 중화 후로 구분하여 투입하였을 경우에, 반건조상태의 레드머드를 투입한 경우가 가장 흙포장과 유사한 색채를 나타내는 것으로 분석되었다.

건조 레드머드를 68g, 레드머드 첨가율을 10%로 투입하였을 경우가 흙포장과 색차는 가장 낮게 나타나, 흙포장의 효과를 가장 잘 나타내는 것으로 분석이 되었다..

동일한 건조 레드머드를 투입하였을 경우에는, 레드머드 첨가율을 10%정도로 하는 것이 흙포장의 효과를 가장 잘 나타내며, 레드머드 첨가율이 30%로 높아지면, 흙포장과의 색차가 오히려 커지는 것으로 나타내었다.

블록의 채도가 5-6사이인 것이 가장 흙포장과 유사한 색감을 나타내는 것으로 분석되며, 레드머드 분말의 경우 채도를 강하게 연출되도록 하므로 분말의 함유량을 10%내외로 하는 것이 적절할 것으로 분석이 되었다.

콘크리트에 레드머드를 첨가하여 흙포장 색채와 유사한 색채를 나타낼 수 있도록 하였으며, 이때 레드머드를 포함한 액상촉진제를 투입할 경우, 내할 또는 외할에 따라 달리 재현되므로, 이에 대한 색채분포의 차이를 <표 3.125>과 같이 분석하였다.

<표 3.125> 측색대상 시료(콘크리트 블록)의 조성비

조성비 / 연번 / 제품명		**색차값 (ΔE^*ab)**	건조 레드머드 (g)	반건조 레드머드 (g)	중화 후 레드머드 (g)	R/B (%)	총 중량 (g)
1	SC	32.00	0	0		20	2070
2	SC-R20	13.78	90	0		20	2160
3	SC-DR20	7.54		90		20	2160
4	SC-NDR10	25.26			45	10	2115
5	SC-NDR20	17.07			90	20	2160
6	SC-NDR30	11.45			135	30	2205
7	CR0	27.12	0			0	2138
8	CR10	5.89	68			10	3274
9	CR10N	8.58	45			10	2183
10	CR30	20.45	68			30	3274
11	CR30N	11.43	135			30	2275

③ 레드머드 첨가율에 따른 분석

레드머드를 첨가하지 않은 경우에는 Y계열의 채도 2이하의 색채를 나타내어, 육안으로는 무채색으로 보이는 정도의 색채를 <표 3.126>과 같이 나타내었다.

콘크리트 블록 제조시 액상 레드머드 촉진제를 첨가할 경우 내할 비율로 첨가하는 것이 황토와 유사한 색채를 나타내는 것으로 분석되었다.

바인더의 첨가율이 클수록 황토와 색차가 커지는 것으로 분석되었다.

콘크리트를 조성할 때, 가장 효과적으로 흙포장을 재현하려면, 바인더의 외할 첨가율이 20으로, 레드머드 외할 290g, 액상 레드머드 촉진제를 300g 투입한 경우인 것으로 분석되었다.

<표 3.126> 시료의 조성비

조성비 / 연번	제품명	색차값 (ΔE^*ab)	첨가율 (바인더의 내할)	레드머드 내할 (g)	첨가율 (바인더의 외할)	레드머드 외할 (g)	액상 레드머드 촉진제(g)
1	SC0	26.67	0	0	0	0	300
2	내-SC20	7.29	20	290.0	0	0.0	240
3	내-SC40	9.49	40	580.0	0	0.0	180
4	외-SC20	5.02	0	0.0	20	290.0	300
5	외-SC40	8.46	0	0.0	40	580.0	300
6	SC0	32.88	0	0.0	0	0.0	300
7	내-SC20	7.99	20	290.0	0	0.0	240
8	내-SC40	8.62	40	580.0	0	0.0	180
9	외-SC20	7.17	0	0.0	20	290.0	300
10	외-SC40	10.05	0	0.0	40	580.0	300
11	C20	7.26			20	290.0	
12	C40	8.40			40	580.0	
13	SC20	9.17			20	290.0	
14	SC40	9.48			40	580.0	

(2) 고감성 칼라 시멘트의 감성평가 기법

(가) 고감성 칼라 시멘트의 만족도 분석

본 기술로 개발하는 고감성 칼라 시멘트를 개발하는 데에 있어, 시장에서 소비자의 감성에 충족되는 방향으로 개발하여 소비자의 구매욕구를 향상시킬 수 있도록 하기 위하여, 고감성 칼라 시멘트의 재질과 색채를 다양하게 재현하는 기술도 개발하였으며 이에 따른 만족도와 선호도를 조사・분석하였다.

① 실험계획 및 방법

㉮ 평가변인 및 평가대상

본 실험은 고감성 칼라 시멘트의 색채와 재질에 대한 만족도를 평가하는 것으로, 평가변인은 고감성 칼라 시멘트에 첨가한 첨가물을 대상으로 액상형 레드머드, 카본블랙, 폐스티로폼, 황토, 바텀애시의 5가지로 설정한 것을 <표 3.127> 및 <그림 3.185>로 나타내었다..

평가변인에 대한 세부 카테고리는 첨가물의 중량비를 기준으로 분류하였으며, 액상형 레드머드는 0%, 1.09%, 3.13%, 5.00%, 6.73%의 5가지로, 카본블랙은 0.%, 0.07%, 0.15%, 0.22%, 0.37%, 0.73%의 6가지로, 폐스티로폼은 0%, 0.18~0.22%의 두가지로 황토는 0%, 1.09%, 3.0%, 5.26%, 7.14%의 5가지로, 바텀애시는 0%, 30~35%의 두가지로 분류하여 진행하였다.

<표 3.127> 평가변인 카테고리 분류

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



<그림 3.185> 감성평가 시료

㉰ 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, <표 3.128>과 같이 36명을 대상으로 실험을 실시하였다.

감성평가에서의 피험자 수는 일반적으로 30명을 기준으로 하며, 본 실험의 데이터 분포는 각 항목별로 정규분포를 이루고 유의수준 5%를 기준으로 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 피험자의 시력은 교정시력 1.0이상을 대상으로 하였다.

<표 3.128> 피험자의 구성

성 별	남 : 30명, 여 : 6명
계	36명

㉱ 실험방법

<그림 3.186>과 같이 실험은 평가변인에 해당하는 첨가물이 카테고리 분류체계에 맞게 첨가되어 제작된 시료를 시각적으로 판단하여 평가하도록 하였으며, 실험은 빛의 영향을 받지 않도록 하기 위해, 암막 블라인드가 설치된 실험실에서 실시하였다.

피험자가 평가할 때, 조명에 의해 영향을 받지 않도록 하기 위하여 암실에서 5분간 암순응을 한 후에 평가하도록 하였으며, 평가대상 시료들을 랜덤으로 평가하도록 하였다.

고감성 칼라 시멘트의 표면 질감과 색채에 대한 소비자의 만족도를 측정하기 위하여, 5단계 가치단계법으로 평가하였다.

만족도에 대한 평가의 대상 어휘는 <그림 3.187>과 같이 '노출콘크리트 이미지에 적합한', '석재이미지에 적합한', '황토이미지에 적합한', '디자인이 마음에 드는', '유행에 앞선' 의 5가지에 대하여 평가하도록 하였다.

데이터의 분석은 MS Excel과 SPSS 18.0을 이용하여 기술통계를 진행하고, 수량화 I 류(HAYASI I)분석을 실시하여 중회귀분석을 실시하였다.



<그림 3.186> 만족도 평가 모습



<그림 3.187> 만족도 평가지

② 고감성 칼라시멘트의 만족도 분석결과

㉮ 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 나타내었다.

만족도에 대한 평가는 <표 3.129>와 같이 노출콘크리트 이미지, 석재이미지, 황토이미지를 나타내는 데에 전체적으로 액상형 레드머드에 의한 영향이 가장 큰 것으로 나타났다.

디자인이 마음에 드는, 유행에 앞선과 같은 평가항목에서도 액상형 레드머드의 영향이 가장 큰 것으로 나타났으며, 이는 콘크리트를 베이스로 활용하여 제작한 시험체에 있어 액상형 레드머드가 색감이나 질감의 변화감에 영향을 가장 많이 주기 때문으로 분석된다.

<표 3.129> 평가변인 분석

평가형용사	중상관계수 (R^2)	편 상 관 계 수 (범 위)				
		액상형 레드머드	카본블랙	폐스티로폼	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)

㉰ '노출콘크리트 이미지에 적합한' 에 대한 평가 분석

노출콘크리트 이미지에 가장 부정적인 영향을 주는 것은 액상형 레드머드이고, 긍정적인 영향이 가장 많은 것은 카본블랙인 것으로 분석된다.

평가변인별 평가특성을 <표 3.130>과 같이 분석하면, 노출콘크리트 이미지에 적합하다고 평가한 특성을 분석하면, 액상형 레드머드와 황토에 의한 영향이 가장 컸으며, 액상형 레드머드는 0%, 황토는 0.549% 포함되고, 카본블랙이 0.15%, 폐스티로폼이 0%, 바텀애쉬가 0%인 것이 평가가 높게 나타났다.

<표 3.130> '노출콘크리트 이미지에 적합한 '의 카테고리 분석

변인	카테고리	샘플수	표준화 카테고리 수량	편상관계수	요인범위	요인범위 수량	표준화 카테고리 수량 분포도 -1.0 0 1.0
액상형 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				
폐스티로폼 (%)	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				

㉰ ‘석재 이미지에 적합한’ 에 대한 평가 분석

평가변인의 세부 영향도를 <표 3.131>과 같이 분석하면, 액상형 레드머드가 들어간 항목들이 전체적으로 부정적인 평가를, 카본블랙이 긍정적인 평가를 주는 것으로 나타났으며, 황토의 영향도 긍정적인 것으로 나타났으며, 폐스티로폼과 바텀애시도 긍정적인 영향을 주는 것으로 분석된다.

석재이미지를 잘 표현하기 위해서는 액상형 레드머드를 사용하지 않아야하며, 카본블랙은 0.73%로 많이 들어간 것이 평가가 높게 나타났으며, 폐스티로폼과 바텀애시를 사용하는 것도 석재이미지 표현에는 긍정적인 영향을 주는 것으로 분석된다.

황토의 경우, 노출콘크리트와 마찬가지로 석재이미지에도 1.09% 함유한 것이 평가가 높게 나타났으며, 석재이미지에서는 황토를 사용하는 것이 전반적으로 다 긍정적인 평가를 나타내는 것으로 분석된다.

<표 3.131> 석재 이미지에 적합한’ 의 카테고리 분석

변인	카테고리	샘플수	표준화 카테고리 수량	편상관계수	요인범위	요인범위 수량	표준화 카테고리 수량 분포도 -0.6 0 0.4
액상형 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				
폐스티로폼 (%)	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				

㉲ ‘황토 이미지에 적합한’ 에 대한 평가 분석

평가변인의 세부 영향도를 <표 3.132>과 같이 분석하면, 액상형 레드머드가 들어간 항목들이 전체적으로 긍정적인 평가를 받는 것으로 나타났으며, 실제 황토의 경우도 5.26%이상인 경우에는 긍정적인 평가를 그 이하인 경우에는 부정적인 평가에 영향을 주는 것으로 분석된다.

황토이미지에 적합한 제품을 만들기 위해서는 카본블랙, 폐스티로폼, 바텀애시는 사용하지 않는 것이 적합한 것으로 나타났다.

황토이미지를 잘 연출하기 위해서는 액상형 레드머드는 3.13%~5.0%가 가장 적합하며, 황토의 경우는 5.26%정도가 가장 적합한 것으로 분석된다. 액상형 레드머드를 첨가하게 되면 황토이미지와 유사한 색상을 나타내 유의한 차이가 나타나지 않는 것으로 판단된다.

<표 3.132> ‘황토 이미지에 적합한’ 의 카테고리 분석

변인	카테고리	샘플수	표준화 카테고리 수량	편상관계수	요인범위	요인범위 수량	표준화 카테고리 수량 분포도 -0.5 0 1.0
액상형 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				
폐스티로폼 (%)	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				

㉮ ‘디자인이 마음에 드는’ 에 대한 평가 분석

평가변인의 세부 영향도를 <표 3.133>과 같이 분석하면, 액상형 레드머드가 들어간 항목들이 전체적으로 부정적인 평가를, 황토도 대체적으로 부정적인 평가에 해당하는 것으로 나타났다. 전체적을 평가에 가장 영향을 미치는 변인은 황토인 것으로 나타났다.

카본블랙은 소량일 경우에는 부정적인 평가이나, 카본블랙이 많이 들어간 것은 긍정적인 평가를 받았으며, 0.22%일 때 가장 긍정적으로 평가하는 것으로 나타났다. 폐스티로폼과 바텀애시는 평가에 긍정적인 영향을 주는 것으로 나타났다.

황토의 경우 1.09% 함유한 것이 평가가 높게 나타났으며, 그 이외에는 부정적인 평가를 나타내는 것으로 분석된다.

<표 3.133> ‘디자인이 마음에 드는’ 의 카테고리 분석

변인	카테고리	샘플수	표준화 카테고리 수량	편상관계수	요인범위	요인범위 수량	표준화 카테고리 수량 분포도 -0.6 0 0.4
액상형 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				
폐스티로폼 (%)	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				

㉮ ‘유행에 앞선’ 에 대한 평가 분석

<표 3.134>와 같이 유행에 앞선 스타일의 고감성 칼라 시멘트를 만들기 위해서는 액상형 레드머드와 황토를 사용하지 않는 것이 적합하며, 폐스티로폼과 바텀애시를 사용하는 것은 적절한 것으로 분석되었다.

카본블랙의 경우 0~0.15%는 부정적인 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 평가에 가장 긍정적인 것은 0.22%일 경우인 것으로 나타났다.

전체적으로 가장 영향을 끼치는 요인은 액상형 레드머드이고, 다음으로 황토인 것으로 나타나, 액상형 레드머드와 황토는 사용하지 않는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

<표 3.134> ‘유행에 앞선’의 카테고리 분석

변인	카테고리	샘플수	표준화 카테고리 수량	편상관계수	요인범위	요인범위 수량	표준화 카테고리 수량 분포도 -0.6 0 0.4
액상형 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				
폐스티로폼 (%)	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				

(나) 고감성 칼라 시멘트의 선호도 분석

① 실험계획 및 방법

㉮ 평가변인 및 평가대상

본 실험은 고감성 칼라 시멘트의 색채와 재질에 대한 이미지에 따른 선호도를 평가하는 것으로, 평가변인은 고감성 칼라 시멘트에 첨가한 첨가물을 대상으로 액상형 레드머드, 카본블랙, 폐스티로폼, 황토, 바텀애시의 5가지로 <표 3.135>와 같이 설정하였다.

평가변인에 대한 세부 카테고리는 첨가물의 중량비를 기준으로 분류하였으며, 액상형 레드머드는 0%, 1.09%, 3.13%, 5.00%, 6.73%의 5가지로, 카본블랙은 0.%, 0.07%, 0.15%, 0.22%, 0.37%, 0.73%의 6가지로, 폐스티로폼은 0%, 0.18~0.22%의 두가지로 황토는 0%, 1.09%, 3.0%, 5.26%, 7.14%의 5가지로, 바텀애시는 0%, 30~35%의 두가지로 분류하여 진행하였다.

<표 3.135> 평가변인 분류

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

㉯ 피험자의 구성

고감성 칼라 시멘트의 표면 질감과 색채에 대한 소비자의 고감성 칼라 시멘트 선호도를 측정하기 위하여, 피험자는 건축환경에 대한 지각판단능력이 있다고 인정되는 건축을 전공하는 대학원생 및 학부 4학년을 대상으로 하여, <표 3.136>과 같이 36명을 대상으로 실험을 실시하였다.

감성평가에서의 피험자 수는 일반적으로 30명을 기준으로 하며, 본 실험의 데이터 분포는 각 항목별로 정규분포를 이루고 유의수준 5%를 기준으로 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 피험자의 시력은 교정시력 1.0이상을 대상으로 하였다.

<표 3.136> 피험자의 구성

성 별	남 : 30명, 여 : 6명
계	36명

㈐실험방법

실험은 평가변인에 해당하는 첨가물이 카테고리 분류체계에 맞게 첨가되어 제작된 시료를 시각적으로 판단하여 평가하도록 하였으며, 실험은 빛의 영향을 받지 않도록 하기 위해, 암막 블라인드가 설치된 실험실에서 실시하였다.

피험자가 평가할 때, 조명에 의해 영향을 받지 않도록 하기 위하여 암실에서 5분간 암순응을 한 후에 평가하도록 하였으며, 평가대상 시료들을 랜덤으로 평가하도록 하였다. 고감성 칼라 시멘트의 표면 질감과 색채에 대한 소비자의 만족도를 측정하기 위하여, 7단계 의미미분법(SD법 : Sementic Differenctial Method)으로 평가하였다.

SD법에서 사용한 평가 어휘는 아파트의 외장 이미지, 건축물 외장색채, 재료에 관한 선행연구를 토대로 다음 표와 같이 10쌍의 어휘를 선정하였으며, 이때 선정된 평가어휘들은 오스굿의 이론에 따라 평가성(evaluation), 역량성(potency), 활동성(activity)에 골고루 분포하도록 정리하여 선정하였다. 데이터의 분석은 MS Excel과 SPSS 18.0을 이용하여 기술통계와 요인분석을 진행하여, 고감성 칼라 시멘트의 이미지에 대한 평가경향을 <표 3.37> 및 <그림 3.188>과 같이 분석하였다.

<표 3.137> 평가 어휘

세련된-촌스러운	편안한-불편한
모던한-클래식한	개성있는-평범한
고급스러운-서민적인	첨단적인-전통적인
로맨틱한-댄디한	우아한-내추럴한
중후한-캐주얼한	자연스러운-인공적인



<그림 3.188> 선호도 평가지

② 고감성 칼라시멘트의 선호도 분석결과

㉮ 요인분석

고유치 1이상인 인자가 세가지로 구분되어 분류되었다. 세가지 요인에 의해서 89%이상의 설명력을 갖는 것으로 <표 3.138>과 같이 분석하였다.

요인분석결과, 10쌍의 평가어휘는 3가지 축으로 분류되었으며, Ⅰ축은 '자연스러운', '중후한', '우아한', '고급스러운', '모던한'의 축으로, '자연스러운'은 Ⅰ축의 다른 이미지와 반대 경향을 나타내는 것으로 분석되었다. Ⅱ축은 '편안한', '세련된', '첨단적인'으로 구성되었으며, Ⅲ축은 '로맨틱한', '개성있는'으로 구성되었다.

<표 3.138> 요인분석결과

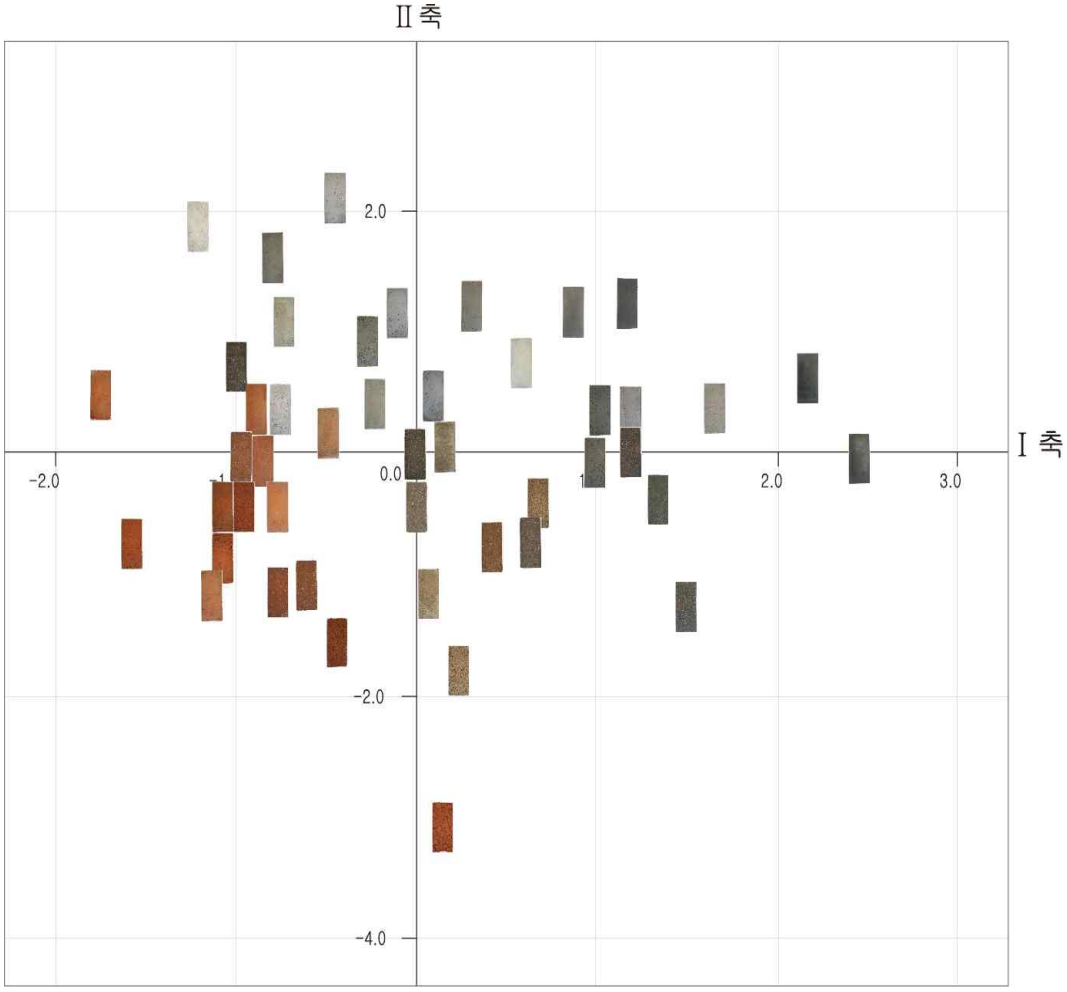
요인	평가어휘	인자부하량			공통성
		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	
Ⅰ	자연스러운	-0.858	-0.326	0.050	0.844
	중후한	0.740	0.246	0.335	0.721
	우아한	0.655	0.596	0.373	0.923
	고급스러운	0.652	0.620	0.391	0.963
	모던한	0.631	0.621	0.362	0.914
Ⅱ	편안한	0.202	0.931	0.139	0.927
	세련된	0.572	0.689	0.396	0.959
	첨단적인	0.630	0.645	0.369	0.949
Ⅲ	로맨틱한	0.086	0.284	0.914	0.923
	개성있는	0.616	0.118	0.638	0.800
고 유 치		3.687	3.145	2.092	
기 여 율		36.866	31.446	20.922	
누 적 율		36.866	68.312	89.234	

㉰ 요인별 선호이미지의 평가특성 분석

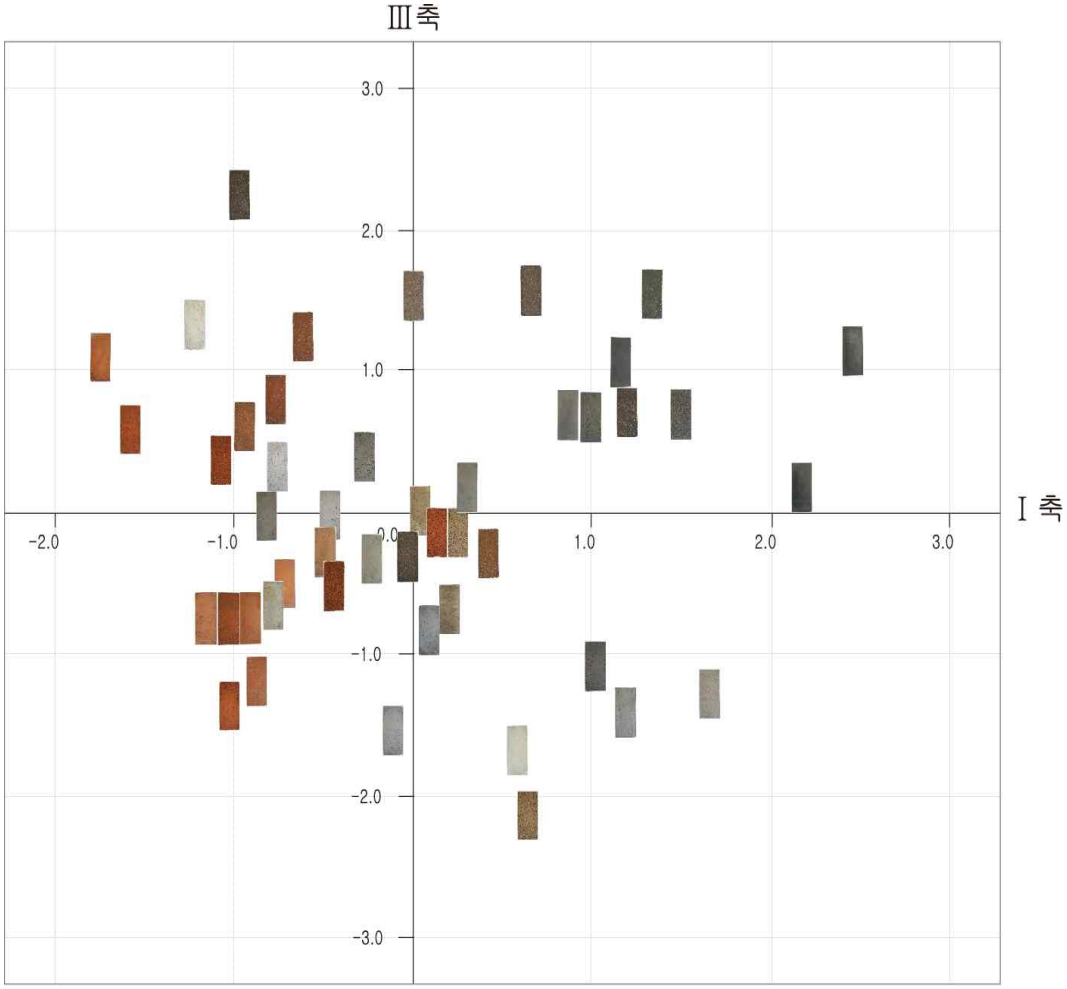
요인득점에 의한 플로트도를 분석하여 평가특성을 <그림 3.189>와 같이 분석한 결과, Ⅰ축은 명도가 낮고 무채색에 가까운 것이 평가가 높게 나타났으며, 액상형 레드머드를 첨가한 시료의 평가가 낮게 나타났다.

Ⅰ축인 '중후한', '우아한', '고급스러운', '모던한' 이미지를 나타내게 하려면, 무채색의 저명도의 색채가 나타나도록 시료를 구성하는 것이 효과적이며, '자연스러운' 이미지의 고감성 칼라 시멘트를 제작하려면 액상형 레드머드나 황토를 섞어 붉게 하건, 고명도의 제품을 제작하는 것이 적합한 것으로 분석된다.

Ⅱ축에서는 무채색의 고명도 시료가 평가가 높게 나타났으며, 명도가 낮거나 붉은색의 시료들이 평가가 낮게 나타난다. Ⅱ축의 '편안한', '세련된', '첨단적인' 이미지의 고감성 칼라 시멘트를 제작하려면, 고명도 무채색의 고감성 칼라 시멘트를 구성하는 것이 바람직하며, 황토가 약간 들어가는 것은 적절하나 액상형 레드머드를 사용하는 것은 적합하지 않은 것으로 분석된다.



<그림 3.189> 인자득점 플로트도 (Ⅰ요인-Ⅱ요인)



<그림 3.190> 인자득점 플로트도 (Ⅱ요인-Ⅲ요인)

요인득점 <그림 3.190>과 같이 플로트도에 의하면, Ⅲ축의 경우 색채의 영향을 크게 받지는 않는 것으로 나타났으며, '로맨틱한', '개성있는' 이미지의 제품을 제작하려면, 채도가 강하고 명도도 강하고, 광택재질감을 살려주는 것이 효과적인 것으로 분석된다.

(3) 결언

본 절에서는 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 고감성 칼라시멘트를 사용하여 콘크리트블록을 제조하고 콘크리트 블록의 색채평가 및 감성평가를 진행하였다. 색채평가는 레드머드의 형태 및 첨가량에 대한 색채분석을 실시하였으며 감성평가의 경우 만족도 분석과 선호도 분석을 실시하였다.

1) 콘크리트 블록에 레드머드를 첨가하면, 색채는 YR계열의 중명도/ 중채도의 범위에 분포하는 것으로 나타났다. 기존의 황토 블록과의 색차를 분석하면 채도가 높은 색채가 색차값이 적게 나와서, 첨가제 유형은 분말을 결합재는 일반 시멘트를 사용하고, 건조 레드머드를 사용한 것이 색차가 적은 것으로 나타났다동일한 중량(90g)의 레드머드를 건조 상태, 반건조상태, 중화 후로 구분하여 투입하였을 경우에, 반건조상태의 레드머드를 투입한 경우가 가장 흙포장과 유사한 색채를 나타내는 것으로 분석이 되었다.
2) 고감성 칼라시멘트의 만족도 평가 결과 같이 노출콘크리트 이미지, 석재이미지, 황토이미지를 나타내는 데에 전체적으로 액상형 레드머드에 의한 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 디자인이 마음에 드는, 유행에 앞선과 같은 평가항목에서도 액상형 레드머드의 영향이 가장 큰 것으로 나타났으며, 이는 콘크리트를 베이스로 활용하여 제작한 시험체에 있어 액상형 레드머드가 색감이나 질감의 변화감에 영향을 가장 많이 주기 때문으로 분석된다.
3) 고감성 칼라시멘트의 선호도 분석결과 고유치 1이상인 인자가 세가지로 구분되어 분류되었으며 세가지 요인에 의해서 89%이상의 설명력을 갖는 것으로 분석하였다. 요인분석결과, 10쌍의 평가어휘는 3가지 축으로 분류되었으며, Ⅰ축은 ‘자연스러운’, ‘중후한’, ‘우아한’, ‘고급스러운’, ‘모던한’ 의 축으로, ‘자연스러운’ 은 Ⅰ축의 다른 이미지와 반대 경향을 나타내는 것으로 분석되었다. Ⅱ축은 ‘편안한’, ‘세련된’, ‘첨단적인’ 으로 구성되었으며, Ⅲ축은 ‘로맨틱한’, ‘개성있는’ 으로 구성되었다.

3. 연구개발 결과 요약

가. 연구개발 결과

본 연구에서 도출된 연구개발 결과를 <표 3.139>에 나타내었다. 연구개발 목표로서 알칼리 자극제로서 산업부산물의 재활용기술, 고속전단회전방식에 의한 레드머드 슬러지의 액상 분산기술, 액상형 레드머드 촉진제의 백화저감 및 억제기술, 액상형 레드머드 촉진제의 색채 및 감성평가기술, 산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더 기술, 고감성 칼라시멘트를 활용한 흙포장 적용기술, 고감성 칼라시멘트를 활용한 콘크리트 적용기술을 검토하였다.

<표 3.139> 연구개발 목표 및 개발결과 요약

연구개발 목표	연구개발 결과 요약
알칼리자극제로서 산업부산물의 재활용기술	• 레드머드와 더불어 고로슬래그 및 건식 탈황석고와 같은 산업부산물을 사용한 산업부산물 100% 재활용기술 • 고위험 액상 알칼리 자극제 대신 분말형 자극제를 사용한 안전한 자극제 활용기술
고속전단회전 방식에 의한 레드머드 슬러지의 액상 분산기술	• 함수율 50%로 발생되는 레드머드 슬러지를 고속전단회전방식에 의해 분산시킨 가성비 향상 액상화 기술 확보 • 고함수율의 레드머드를 경제적으로 활용 할 수 있는 제조생산기술 확보
액상형 레드머드 촉진제의 백화저감 및 억제 기술	• 액상형 레드머드 촉진제 사용시 표면에 발생되는 백화현상을 저감 및 억제 시킬수 있는 기술 확보 • 액상형 레드머드 촉진제를 산처리 개질하여 백화발생 주 요인인 Na+를 제거 할수 있는 기술 확보
액상형 레드머드 촉진제의 색채 및 감성평가 기술	• 액상형 레드머드 촉진제 혼입율에 따른 색채 특성 및 정량적 평가기법 구축 • 평가대상 시편에 대한 7단계 가치단계법을 이용하여 유사도, 색감, 만족도 분석
산업부산물을 활용한 분말형 활성 슬래그 바인더 기술	• 산업부산물을 100% 재활용한 클링커 프리 탄소저감형 알칼리활성화 슬래그 시멘트 제조 기술확보 • 건설소재의 고부가 가치로 활용 가능한 알칼리 활성바인더 제조기술과 응용기술로의 가치성을 만족시키는 기술 확보
고감성 칼라시멘트를 활용한 흙포장 적용기술	• 흙콘크리트 단체 표쥰 규격인 보도용 13MPa, 자전거도로용 15MPa, 주차장용 18MPa를 모두 만족 • 천연황토색과 유사한 색감으로 인위적인 안료에서는 표현하기 어려운 색상 발현 가능
고감성 칼라시멘트를 활용한 콘크리트 적용기술	• 고감성 칼라시멘트를 활용한 콘크리트 중금속용출량, 폐기물공정시험 기준치 만족

본 연구의 연구개발결과 세부평가 항목을 <표 3.140>에 나타내었다. 연구개발결과 세부평가 항목으로서 촉진제 제조기술, 촉진제 품질관리기법, 칼라시멘트 제조기술, 칼라시멘트 적용기술을 검토하였다. 평가항목 측정결과 개발 목표치를 성공적으로 모두 달성하였다.

<표 3.140> 연구개발결과 세부평가 항목

평가항목 (주요성능, Spec 등)		개발 목표치	목표 달성도
레드머드 촉진제 제조기술	레드머드 슬러지 분석	중금속 이상무	100%
	슬러지 분산기술	침전량 1%	100%
	촉진제 백화저감기술	백화면적 5%	100%
촉진제 품질관리기법	성능평가	활성도지수 80%	100%
	색채평가	$\triangle E^*_{ab}$ 5 이하	100%
칼라시멘트 제조기술	활성 슬래그 바인더 제조	활성도지수 80%	100%
	칼라시멘트 제조기술	활성도 지수 80%	100%
칼라시멘트 적용기술	흙포장 적용기술	압축강도 21MPa	100%
	콘크리트 적용기술	압축강도 21MPa	100%
	감성평가	유의한 차이 없음	100%

나. 연구개발 성과

본 연구개발을 통한 연구성과를 요약 정리하면 아래 <표 3.141>과 같다. 즉, 과학기술적 성과로서 SCI(E)급 학술지 게재는 목표치인 1건을 만족하였으며, 일반학술지게재는 목표치 대비 166%의 연구성과를 달성하였다. 또한 국내 특허출원은 <표 3.142>에 나타낸 바와 같이 2건으로 목표치를 달성하였으며, 이중 1건은 특허등록이 완료되었다.

<표 3.141> 연구개발 성과 목표 달성도

성과지표	성과 목표	성과 달성	분석결과
SCI(E)급 학술지 게재(2점)	1건	1건	2
일반학술지게재(1점)	3건	3.5건	3.5
특허출원(1점)	2건	3건	3
특허등록(2점)	1건	2건	4
소계(점수)	9점	9점	12.5점

<표 3.142> 연구개발성과 세부내용

항 목	연구개발 성과내용	비 고
국외 학술지 게제	Effects of red mud and Alkali-Activated Slag Cement on efflorescence in cement mortar	Construction and Building Materials
	Effect of Red Mud Content on Strength and Efflorescence in Pavement using Alkali-Activated Slag Cement	International Journal of Concrete Structures and Materials
국내 학술지 게제	폴리머혼입 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트모르타르의 내구특성	대한건축학회
	레드머드 대체율에 따른 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트 모르타르의 기공 및 백화특성	한국건축시공학회
	점도 및 침전지수에 의한 액상화 레드머드의 분산 특성평가	한국건축시공학회
	양생조건에 따른 레드머드 혼입 알칼리활성화 슬래그 시멘트 모르타르의 강도 및 백화특성	한국건축시공학회
	알칼리활성화 슬래그 결합재의 강도 발현 인자에 관한 연구	(사)한국건설순환자원학회
	레드머드 대체율에 따른 결합재별 흙포장재 특성	(사)한국건설순환자원학회
국제 학술대회 발표	Analysis of Color Distribution of Concrete Finishing Materials by adding Industrial Waste	13th AIC Congress 2017
국내 학술대회 발표	초기점도가 액상화 레드머드의 침전지수에 미치는 영향	한국콘크리트학회
	액상화 레드머드 첨가율에 따른 습식 흙 콘크리트의 역학적 거동 특성	한국콘크리트학회
	물리적 요인에 의한 액상 레드머드의 분산지수	(사)한국건설순환자원학회
	알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트 모르타르의 양생방법에 따른 백화특성	(사)한국건설순환자원학회
	알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트(ASRC)의 건설분야 활용기술	(사)한국건설순환자원학회
	레드머드를 활용한 외장재의 만족도분석	한국건축시공학회
	레드머드 혼입에 따른 시멘트 모르타르의 기공특성	한국건축시공학회
	레드머드 첨가에 따른 알칼리활성화 슬래그-레드머드 건식 흙포장재의 다짐 특성	한국건축시공학회
	산업부산물로 제조된 활성 슬래그 바인더를 활용한 알칼리활성화 시멘트 모르타르의 특성	한국건축시공학회
	액상레드머드 첨가방식에 따른 ASRC 콘크리트의 특성	한국건축시공학회
국내 특허출원 및 등록	레드머드 액상 슬러리 및 이의 제조방법	제10-1812791호
	흙포장용 조성물	제10-1789990호
국제 특허출원	Red mud liquid slurry and preparation method thereof	출원번호 1-2017-05003

제 4 장
목표 달성도 및 관련분야 기여도

제 4장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 1차년도

구 분		개발목표	측정방법	평가방법	달성도 (%)
촉진제 제조기술	레드머드 슬러지분석	중금속 이상무	토양오염공정시험법	공인 시험성적서	100
	슬러지 분산기술	침전량 1%	육안	최종보고서	100
	촉진제 백화저감기술	백화면적 5%	면적율	최종보고서	100
촉진제 품질관리기법	성능평가	활성도지수 80%	KS F 2563 부속서 A	공인 시험성적서	100
	색채평가	$\triangle E^*_{ab}$ 5 이하	KS M ISO 7724	최종보고서	100

나. 2차년도

구 분		개발목표	측정방법	평가방법	달성도 (%)
칼라시멘트 제조기술	활성 슬래그 바인더 제조	활성도지수 80%	KS F 2563 부속서 A	공인 시험성적서	100
	칼라시멘트 제조기술	활성도지수 80%	KS F 2563 부속서 A	최종보고서	100
칼라시멘트 적용기술	흙포장 적용기술	압축강도 21MPa	흙콘크리트 단체표준 규격	공인 시험성적서	100
	콘크리트 적용기술	압축강도 21MPa	KS F 2405	공인 시험성적서	100
	감성평가	유의한 차이 없음	통계분석 (T Test)	최종보고서	100

2. 관련분야 기여도

가. 시멘트 사용량절감을 통한 온실가스 감축

2010년 기준 국내 온실가스 배출량은 세계 7위, 1인당 배출량은 3위를 기록하고 있다. 이에 정부에서는 신기후체제에 선제적으로 대비하기 위하여 국가 온실가스 감축목표를 2030년 기준배출량(BAU, Business As Usual) 대비 37%로 설정하였다. 또한, 시멘트, 발전, 철강 산업 등 온실가스 배출 산업에 대한 산업별 감축 목표도 제시하고 있다. 시멘트는 도로, 댐, 주요 건축물 등 사회기반시설 구축을 위한 건설분야 핵심 재료이다.

시멘트는 주원료인 석회석을 1,450 고온에서 소성하기 때문에 많은 에너지를 사용하게 되고 이로 인하여 시멘트 제조공정에서 많은 온실가스가 배출이 이뤄진다. 에너지 사용에 따른 온실가스 배출뿐만 아니라, 석회석의 탈탄산 공정($CaCO_3CaO + CO_2$)으로 인한 온실가스 배출도 이뤄진다. 이와 같은 시멘트 제조공정상의 고온 소성 및 석회석 탈탄산으로 인해 시멘트 생산 시 배출하는 온실가스의 약 90%를 배출하게 된다.

국내 시멘트 산업에서는 2020년 BAU 대비 8.5%(약 347만톤)의 감축목표를 설정하고 있다. 국제에너지기구(IEA, International Energy Agency)는 시멘트 분야 온실가스 감축 기술 로드맵 보고서를 통해 시멘트산업에서 온실가스를 저감할 수 있는 방안으로 고온 소성 과정을 통해 생산되는 시멘트 반제품 형태인 클링커(Clinker) 사용량을 줄이는 방법, 제조 설비의 에너지 소비효율 강화, 대체 에너지 사용, 온실가스 포집/저장(CCU, Carbon Capture and Storage) 기술 등을 제안하고 있다. 국내 시멘트 생산업체들의 제조설비의 경우 에너지 효율이 우수한 최신식 설비를 도입하고 있으며, 온실가스 포집/저장 기술은 기술개발 단계로 시멘트 생산현장에 적용하기에는 어려운 실정이다.

국내 실정 및 기술개발 현황 등을 고려할 경우, IEA에서 제시하는 온실가스 배출량 저감 방안 중 고로슬래그 미분말, 플라이애시 등 혼합재 사용량을 증가시켜 클링커 사용량을 절감시키는 방안이 가장 실효적이라고 할 수 있다. (참고 <표 4.1> 시멘트 1톤 제조시 발생되는 석탄소비량 및 CO_2배출량)

<표 4.1> 시멘트 1톤 제조시 발생되는 석탄소비량 및 CO_2 배출량

항 목	환 산 량
이산화탄소 배출량	- 탈탄산으로부터의 CO_2 : 0.52톤 - 석탄연소로부터의 CO_2 : 0.32톤 - 설비운전용 화력발전소 생산전력의 CO_2 : 0.1톤 이상
기타 석탄연소시 발생되는 가스	CO, SOx, NOx, 미세 Dust 등
필 요 열 용 량	4 GJ
석 탄 소 비 량	132 kg
시멘트 킬른에서 석탄 연소시 발생하는 CO_2	석탄 1톤 연소시 CO_2 : 2,418 kg 2,418× 0.132 = 320kg

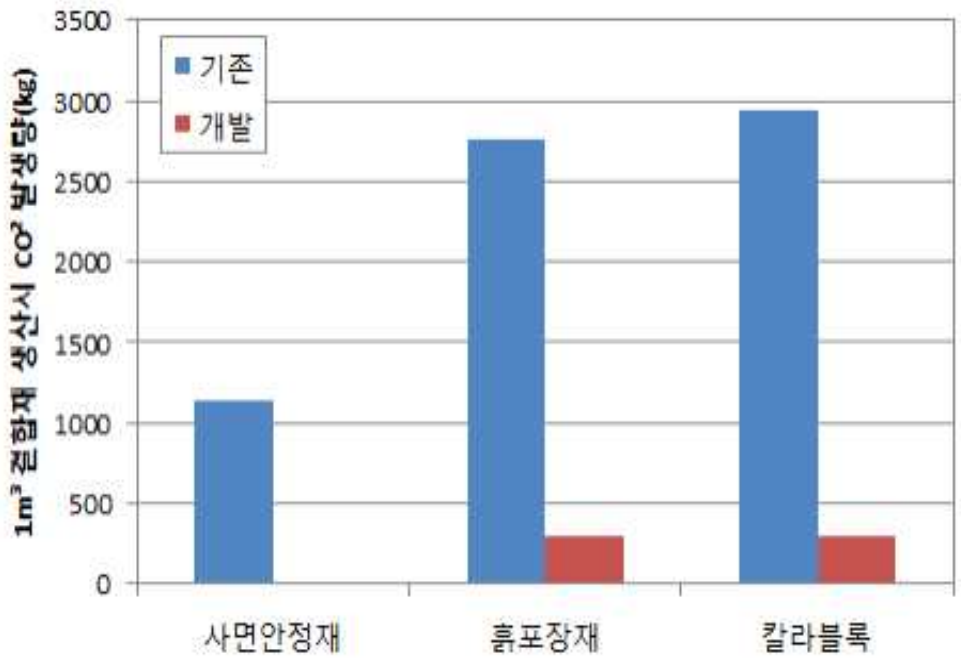
주) 시멘트킬른에서 사용되는 화석연료(석탄)의 열량은 26GJ/T이며, CO_2 배출계수는 93kg/GJ로 환산

본 연구에서 개발된 기술을 통해 온실가스 절감효과로 선행 연구와 달리 레드머드 슬러지를 액상화 함으로서 고에너지의 소성건조공정을 생략(에너지부하 저감효과) 현재 대부분 매립·폐기되고 있는 레드머드와 각종 산업부산물을 자원화하여 대량 활용함으로서 매립·폐기량을 대폭 절감 (환경부하 저감효과) 각종 산업부산물(폐기물)의 안정적 처리 및 순환자원화 기술을 통해 환경오염의 최소화 실현한다.

제품에 환경부하가 매우 높은 시멘트나 생석회 등 천연원료의 사용을 최소화하여 국제환경정책(기후변화협약 등)에 능동적으로 대응하고 CO_2 의무감축대상국 선정 시 시멘트클링커 생산량을 50% 이상 감축해야 한다. (참고 <표 4.2>, <그림 4.1> 1㎥ 결합재 생산시 기존제품과 개발제품의 CO_2 배출량)

<표 4.2> 1㎥ 결합재 생산시 기존제품과 개발제품의 CO_2 배출량

구 분	1㎥ 결합재 생산시 시멘트 사용량(kg)		CO_2 배출량(kg)	
	기존	개발	기존	개발
흙포장재	2900	300~370	2755	285~356
칼라콘크리트블록	3100	300~370	2945	285~356



<그림 4.1> 1㎥ 결합재 생산시 CO_2 배출량

나. 산업부산물을 다량 활용한 친환경 제품의 제조기술 확보

레드머드는 보오크사이트로부터 수산화알루미늄/알루미나($Al(OH)_3/Al_2O_3$) 제조과정에서 부산물로 발생하는 산업부산물이다. 제조공정인 베이어프로세스 특성 상 Al_2O_3 1톤을 생산하면 대략 2톤의 레드머드가 발생되며, 주성분인 Fe_2O_3로 인한 적색의 칼라로 인해 레드머드(Red Mud), 적니(赤泥)등 다양한 명칭으로 불리어지고 있으며, 국내에서는 연간 약 30만톤이 발생되고 있으며, 이러한 레드머드의 처리현황은 75% 이상이 매립되거나 해양 투기되고 있으며, 재활용율은 15% 이하로 국내 전체 사업장폐기물의 재활용율 83.5%와 비교하여 재활용율이 매우 낮은 산업부산물이다. 2010년 통계에 따르면, 생활폐기물과 건설폐기물을 포함한 국내 사업장 폐기물의 총 발생량(364,267톤/일) 중 재활용은 83.5%인데 비하여 매립은 9.4%, 소각 5.3%에 불과하고, 나머지는 해역으로 배출되고 있다. 이러한 해양투기는 국제간의 분쟁이 될 수 있으며 관련 국제협약(런던협약)에 가입함으로써 그 비율은 점점 낮아질 것이고, 소각처리 역시 고비용의 처리법으로 소각이후 최종 매립 처리하는 방식으로 효용성이 낮다.

레드머드의 처리방안으로 지금까지 대부분 매립처리 해오고 있으나, 매립에 의한 2차 토양 및 지하수 오염으로 인하여 사회적으로 큰 문제로 대두되고 있어 레드머드의 재활용 대책이 국가·사회적으로 시급한 실정이다 이러한 레드머드 슬러지는 소성건조공정과 분쇄공정을 거쳐 함수율 약 10% 내외로 조절된 스칼렛 분말(Scarlet Powder)로 만들어져 주로 콘크리트 제품의 안료로서 재활용되어지고 있다. 아주 적은 적용처의 용도로 사용되고 생산량이 부족했던 기존의 제품을 대량 생산화 하여 처리가 곤란한 산업부산물의 사용량을 증대화 시키고 건설분야로 많은 소재로 이용 할 수 있도록 재활용 기술이 활용된다면 이를 사용한 많은 제품의 실용화로 인한 제품시장의 영역이 활성화 될 수 있을 것으로 판단된다.

제 5 장
연구개발성과의 활용 계획

제 5장 연구개발성과의 활용 계획

1. 액상형 레드머드 촉진제 사업화

레드머드는 보오크사이트로부터 수산화알루미늄 추출공정에서 발생되는 산업부산물로서 KC(주)에서 연간 30만톤이 발생되고 있다. KC(주)는 레드머드를 콘크리트 안료 형태로 재활용하기 위한 방법으로 함수율 10% 내외의 분말형태로 제조하여 재활용하고 있다. 그러나 분말형태로 사용시 가열 및 분쇄공정으로 인해 제조원가가 상승하게 되며 배처플랜트 변색 오염과 분말계량오차 발생으로 현장에 적용하는데 장애요인이 발생하게 된다.

액상형 레드머드 촉진제의 경우 높은 함수율로 발생되는 레드머드 슬러지에 적정 수량과 분산제, 증점제를 사용하여 작업용도에 알맞게 제조가 가능하다. 액상형 레드머드 촉진제를 콘크리트 안료로 사용할 경우 현장 레미콘트럭 내에서 혼합하여 배처플랜트의 오염을 막을 수 있으며 분말 안료와 비교하여 계량오차가 저감되고 경제성이 향상된다.

작업용도, 경제성을 고려한 액상형 레드머드 촉진제 사업화는 건설산업분야에서 필수적으로 이루어져야 할 사업이다. 주관기관인 우석대학교 연구책임자는 본 연구사업 결과물로서 <그림 5.1> 및 <그림 5.2>에 나타낸 바와 같이 레드머드 액상화 관련 국내 특허등록, 국제특허 출원을 완료하였다. 또한 이와 같은 지적재산권을 사업화 하기 위하여 국내 레드머드 발생량의 95% 이상을 차지하고 있는 KC(주)와 사업화에 대한 협의를 추진 중에 있다.

◎ 국내특허등록
특허명 : 레드머드 액상 슬러리 및 이의 제조방법
등록번호 : 제10-1812791호 (2017.12.20.)
출원인 : 우석대학교 산학협력단(강석표, 강혜주, 황병일)

◎ 국제특허출원
Title : Red mud liquid slurry and preparation method thereof
Country : Vietnam (Dec. 11, 2017) 국제특허 출원
Priority : Claiming Application No. : 10-2016-0168399



<그림 5.1> 국내특허등록



<그림 5.2> 국제특허 출원

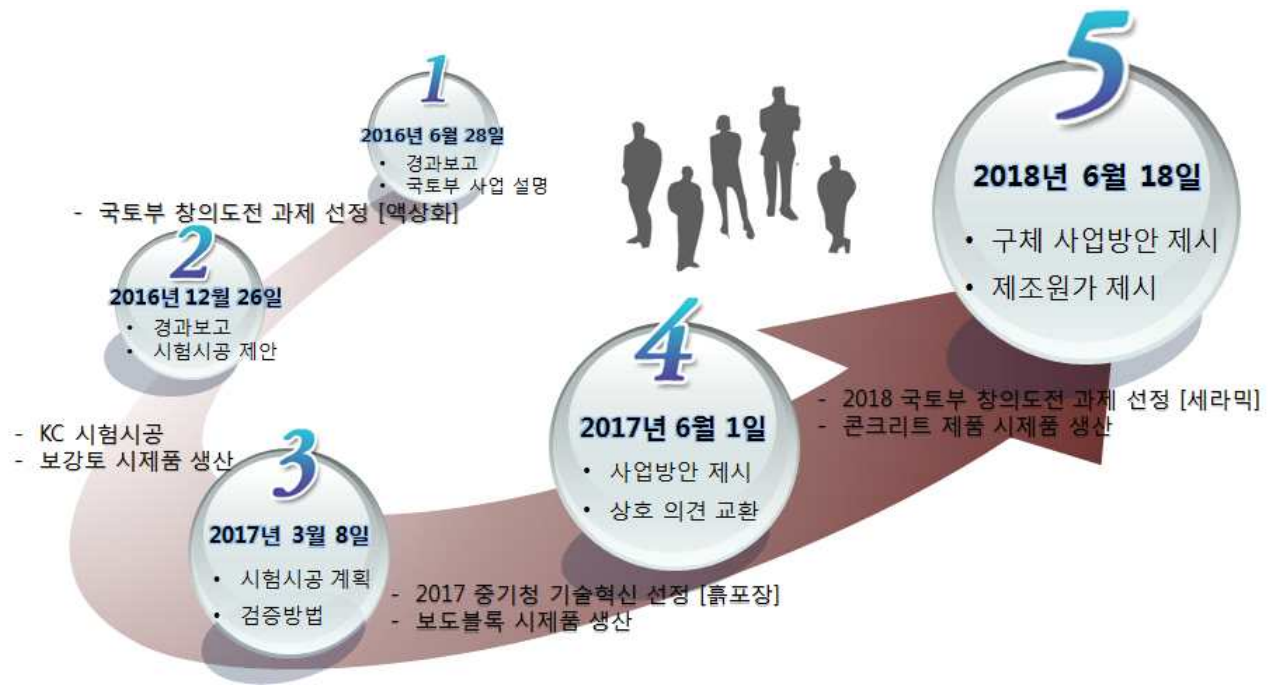
2. 레드머드 건설산업 사업화 진행 경과

레드머드 슬러지를 건설산업에 사업화하기 위해 국내에서 레드머드가 가장 많이 발생되는 KC(주)와 레드머드 건설산업 사업화를 위한 5차례의 진행경과를 <그림 5.3>에 나타내었다.

◎ 1차 협의(2016년 06월 28일) : 국토교통기술촉진 연구사업 “액상형 레드머드 촉진제를 활용한 알칼리활성화 고감성 칼라시멘트 개발” 설명
◎ 2차 협의(2016년 12월 26일) : 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 고감성 흙포장재 현장 시험시공 제안
◎ 3차 협의(2017년 03월 08일) : 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 고감성 흙포장 현장시험 시공 구체적 계획 협의 및 검증방법 논의
◎ 4차 협의(2017년 06월 01일) : 고감성 흙포장 현장시험시공 경과관찰 논의 및 사업화방안 제시
◎ 5차 협의(2018년 06월 18일) : 액상형 레드머드 촉진제 활용한 구체적인 사업화방안 제시 및 제조원가 제시







<그림 5.3> 레드머드 건설사업화 진행 연혁

3. 액상형 레드머드 촉진제의 사업화 장점

◎ 액상으로 인한 취급의 용이성

레드머드를 재활용하고자 했던 기존연구에서는 레드머드 슬러지를 분말화 하여 사용 하였으나 본 기술개발에서 개발한 액상형 레드머드 촉진제는 기존 분말 스칼렛과 비교하여 분진발생이 없고 취급이 용이하여 현장에서 쉽게 적용가능 한 것으로 나타났다.

◎ 제조고정 단순화로 초기 투자 리스크 경감

고함수율의 레드머드 슬러지를 액상으로 분산시키는 단순 공정 사업화를 위한 초기투자 리스크를 경감 시킬 수 있는 것으로 나타났다.

◎ 액상형 레드머드 촉진제의 분산 및 유지기술

강알칼리성의 레드머드 슬러지에 경제성을 고려한 분산제 및 작업용도에 적합하게 사용가능한 증점제의 의해 레드머드 슬러지가 침강되는 현상을 방지 할 수 있는 것으로 나타났다.

◎ 재활용 용도 확대를 위한 백화저감기술

레드머드에 포함된 Na에 의해 시멘트 모르타르 경화체 표면에 발생하는 백화현상을 혼합형 첨가제를 통해 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다.



<그림 5.4> 액상형 레드머드 슬러지의 사업성 및 기술성

4. 경제성 평가

액상형 레드머드 촉진제를 활용한 칼라블록 안료 원가분석을 기층용과 표층용으로 나누어 <그림 5.5>에 나타낸 바와 같이 원가분석을 실시하였다. 기층용 산화철안료를 사용한 기존 블록은 (0.1m^3 기준) 붉은색을 나타내기 위해 Yellow 계열 0.8kg, Red 계열 0.4kg을 투입하여 블록을 생산한다. 산화철 안료를 사용하여 생산한 블록의 제조 안료 원가는 18,000원/1m^3으로 분석되었다. 그러나 액상형 레드머드 촉진제를 사용한 블록의 경우 (0.1m^3 기준) 7.1kg을 투입하여 블록 제조 안료 원가는 3,550원/1m^3으로 나타나 기존 블록의 제조 안료 원가와 비교하여 약 80.3%를 절감 가능 한 것으로 나타났다.

표층용 산화철안료를 사용한 기존 블록은 (0.1m^3 기준) 붉은색을 나타내기 위해 Yellow 계열 1.2kg, Red 계열 0.6kg을 투입하여 블록을 생산한다. 산화철 안료를 사용하여 생산한 블록의 제조 안료 원가는 27,000/1m^3으로 책정되었다. 그러나 액상형 레드머드 촉진제를 사용한 블록의 경우 (0.1m^3 기준) 15kg을 투입하여 액상형 레드머드 촉진제를 사용한 블록의 제조 안료 원가는 7,500원/1m^3으로 나타나 기존 블록의 제조 안료 원가와 비교하여 약 72.3%를 절감 가능 한 것으로 나타났다.

액상형 레드머드 촉진제를 활용한 칼라블록 안료 원가분석을 실시한 결과 기층용의 경우 기존 블록대비 80.3% 절감 가능 한 것으로 나타났으며 표층용의 경우 기존블록대비 72.3% 절감 가능한 것으로 나타나 가격경쟁력은 우수한 것으로 나타났다.



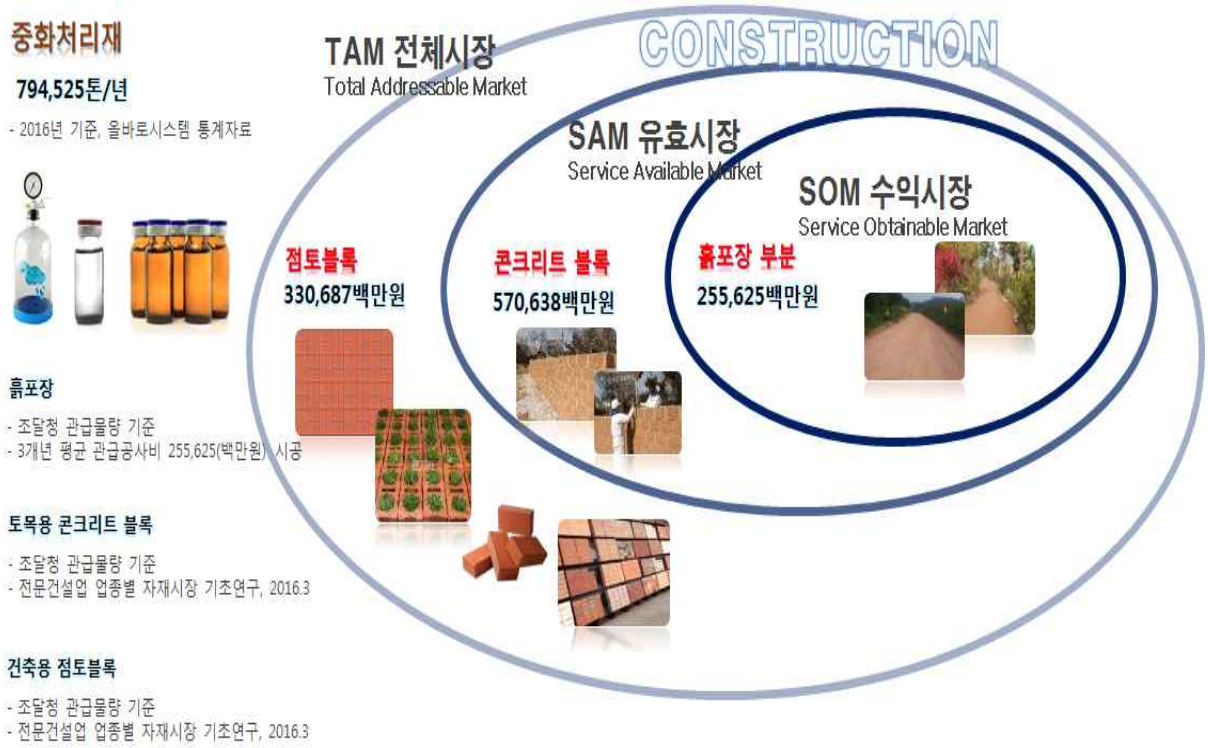
<그림 5.5> 액상형 레드머드 슬러지의 사업성 및 기술성

5. 시장분석

액상형 레드머드 촉진제의 시장분석 결과를 <그림 5.6>에 나타내었다. 액상형 레드머드 촉진제의 시장을 분석한 결과 Service Obtainable Market(SOM) 수익시장으로서 흙포장재가 255,625백만원으로 분석되었으며 Service Available Market(SAM) 유효시장으로서 콘크리트 블록이 570,638백만원으로 분석되었다. 또한 Total Addressable Market(TAM) 전체시장으로서 점토블록이 330,687백만원으로 분석되었으며 중화처리재로 794,525톤/년으로 분석되었다.

액상형 레드머드 촉진제를 활용한 흙포장재 및 시멘트 착색제를 통한 레드머드 슬러지의 처리량을 분석한 결과를 <표 5.1>에 나타내었다. 흙포장재의 경우 조달청 관급물량 기준 3내년 평균 관급공사비는 255,625(백만원)으로 나타났으며 이중 흙포장재 재료비는 약 60%가 해당되어 150,000(백만원)으로 나타났다. 흙포장재 재료비 150,000(백만원)을 흙포장재 수량 200,000원/톤에 적용한다면 750,000톤의 물량이 산출된다. 흙포장재 수량 750,000톤 중 액상형 레드머드 촉진제를 2% 대체시 15,000톤을 소비 가능할 것으로 분석되었다.

시멘트 착색제의 경우 유무기 기능성 안료 시장분석을 실시한 결과 시멘트 착색제는 4,000톤/년으로 조사 되었다. 시멘트 착색제로서 액상형 레드머드 촉진제를 사용할 경우 산화철 안료 : 액상 레드머드 촉진제의 비는 1:7로 분석되었다. 시멘트 착색제에 산화철 안료를 대신하여 액상형 레드머드 촉진제를 100% 대체 할 경우 28,000톤으로 분석되었으며 50% 대체할 경우 14,000톤으로 분석되었다.



<그림 5.6> 액상형 레드머드 촉진제의 시장분석

<표 5.1> 레드머드 처리량 분석

<table>
<tr><th colspan="2">구분</th><th colspan="2">흙포장재</th><th colspan="2">시멘트 착색제</th></tr>
<tr><td rowspan="3">공사
소비량</td><td>2014년</td><td colspan="2">252,724,000,000 원</td><td colspan="2">4,000톤</td></tr>
<tr><td>2015년</td><td colspan="2">277,996,000,000 원</td><td colspan="2">4,000톤</td></tr>
<tr><td>2016년</td><td colspan="2">305,795,000,000 원</td><td colspan="2">3,500톤</td></tr>
<tr><td colspan="2">제조비용</td><td colspan="2">레드머드(황토)+부순모래+자갈+첨가제
200,000원/m^3</td><td colspan="2">산화철 : 액상형 레드머드 촉진제
1 : 7</td></tr>
<tr><td rowspan="3">소요물량</td><td>2014년</td><td>15,000톤</td><td rowspan="3">3개년 평균
약 15,000톤/년</td><td>14,000톤</td><td rowspan="3">3개년 평균
약 13,416톤/년</td></tr>
<tr><td>2015년</td><td>16,499톤</td><td>14,000톤</td></tr>
<tr><td>2016년</td><td>18,149톤</td><td>12,250톤</td></tr>
</table>

6. 사업화 목표

액상형 레드머드 촉진제를 건설산업에 사업화 하기위한 사업화 목표(안)을 도입기, 진입기, 성장기, 안정기로 나누어 <그림 5.7>에 나타내었다. 도입기와 진입기에서는 10,000톤의 레드머드 슬러지를 처리 할 수 있을 것으로 나타났으며 성장기에서는 50,000톤, 안정기에서는 80,000톤을 처리 할 수 있을 것으로 나타났다. 액상형 레드머드 촉진제 사업화 기간중 안정기인 2023년에는 연 80억의 매출을 창출 할 수 있을 것으로 나타났다.

◎ 도입기(2018년) : 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 고감성 흙포장재 파일럿 플랜트 구축
◎ 진입기(2019년) : 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 고감성 흙포장재 공장신설
◎ 성장기(2020년) : 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 액상 안료분야 공략 및 콘크리트 블록 범위 확장
◎ 안정기(2023년) : 액상형 레드머드 촉진제를 활용한 블록시장 분야 공략 및 신규 사업장 설치



<그림 5.7> 사업화 목표(안)

제 6 장
연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

제 6장 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

1. 탄소 포획의 단서를 제공하는 레드머드

최근 영국 옥스퍼드 대학(Oxford University) 지구과학부 및 옥스퍼드 마틴 스쿨(Oxford Martin School , colleagues from the Universities of Hull, Leeds, Newcastle and Budapest University of Technology and Economics) 소속의 Phil Renforth는 레드 머드가 남긴 침착된 침전물의 지구화학적 분석(geochemical analysis)을 통하여 정화 기술(remediation technique)이 대기로부터 이산화탄소를 흡수하는 결과를 낳았다는 사실을 보여 주었다. 연구팀은 최근 연구 결과를 Science of the Total Environment에 보고했다.

이 연구는 오염물질 이동성(contaminant mobility)에 대한 효과를 평가하고 원소 분석(elemental analysis)과 안정한 동위원소 분석(stable isotope analysis)을 통하여 레드 머드와 석고에 영향을 받는 하류 작용으로 생성된 침전물의 평가를 통하여 탄소 격리(carbon sequestration) 가능성을 평가했다. 석고 보드에 전형적으로 이용되는 자연적으로 발생하는 광물인 석고의 추가가 대기 중 이산화탄소를 격리하는 것은 의도하거나 기대했던 효과는 아니었다고 Phil은 밝혔다. 이것은 제지 공정 같이 높은 pH를 지닌 폐기물을 발생시키는 산업에서 상당한 영향을 끼칠 수 있다. 대기 중 이산화탄소는 지구 기후 변화의 주요 원인이며, 전 세계 연구진이 이산화탄소 배출을 억제하기 위한 연구를 수행 중이다.

옥스퍼드 마틴 스쿨의 지구공학 프로그램을 통하여 옥스퍼드 대학에서 수행된 연구는 공기 중에서 이산화탄소를 적극적으로 제거하는 방법을 조사 중이다. 연구진이 탄산염(carbonate)과 중탄산염 이온(bicarbonate ion)의 형태로 용액에 함유되어 있는 지역의 높은 pH 용액이 대기로부터 이산화탄소를 흡수한다는 사실을 알았다고 Phil은 설명했다. 석고의 추가는 용액에 칼슘(calcium)을 공급하여 탄산칼슘(calcium carbonate)을 형성하고 이산화탄소를 격리하는 효과를 낸다고 Phil은 밝혔다.

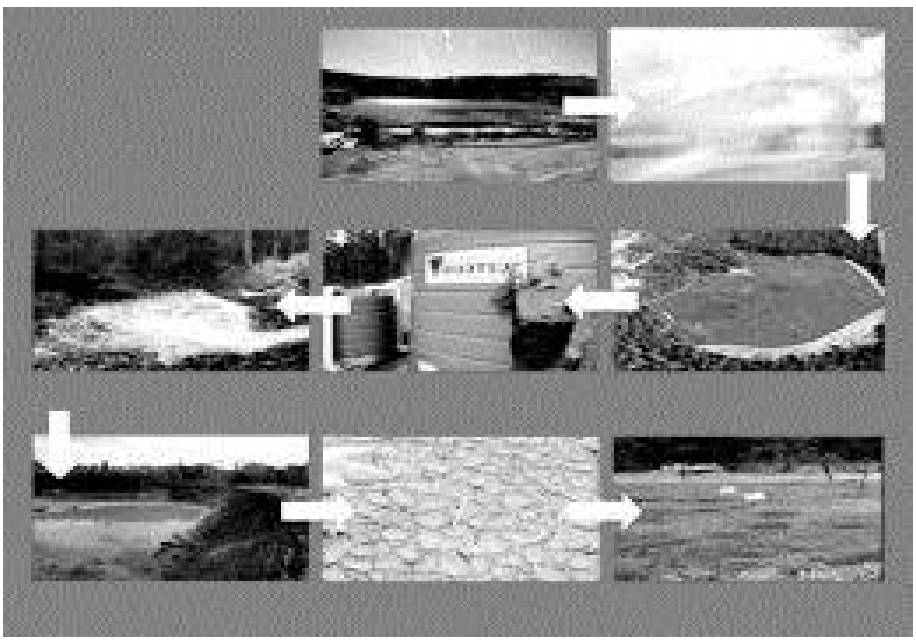
이러한 연구 결과는 대기 중에서 탄소를 포획하는 새로운 방법으로 이어질 수 있을 것이다. 석고를 추가한 결과로 형성된 탄산염 침전물의 C와 O의 안정한 동위원소 비율이 대기 중 이산화탄소 격리에서 중화 공정(neutralisation process)의 중요성을 정량화하는 데 이용됐다. 이 연구의 결과는 탄산염 침전물에 의해 상쇄될 수 있는 3-4 %의 이산화탄소를 직접적으로 배출시키는 알루미늄 생산 산업에 상당한 영향을 줄 수 있다. 또한, 석고 추가에 의한 탄산화 작용(carbonation)은 오염물질 정화를 위하여 중요하게 다루어질 뿐 아니라, 레드 머드의 역사적인 축적을 위한 물리적 안정화 전략을 제공할 것이다.

2. Bauxsol에 의한 광산배수 처리

Red mud에 대한 재활용 연구는 호주, 캐나다, 자마이카, 인도 등 보오크싸이트 생산이 많은 국가나 이를 수입하여 수산화알루미늄 및 알루미나를 제조하는 국가에서 활발하게 이루어져 왔다. Red mud의 재활용 기술은 적니에 함유되어 있는 스칸듐 등의 희귀원소 회수 연구, 건자재 활용 기술, 도료의 안료 및 콘크리트 원료로의 활용 기술, 플라스틱의 필러(filler) 및 촉매로의 활용 기술, 적니를 흡착제로 이용한 산업폐수 처리에 대한 연구 등이 있으며, 이를 <표 6.1>에 요약하였다. <그림 6.1>은 Red Mud를 가 공 하 여 개 발 한 Virotec’s사의 Bauxsol 제품을 호주의 New South Wales내 Mt.Carrington 광산배수 처리에 적용한 사례이다. 최근에는 러시아 ARRICT(All-Russian Research Institute of Chemical Technology)의 V.A.Peganov 등은 Red Mud를 100% 재활용하기 위한 “종합적 무 폐기 기술(ComplexWasteless Technology)” 개발을 추진하고 있다.

<표 6.1> 레드머드의 재활용기술

분 류	내 용
원소회수	scandium, gallium, yttrium
건자재	벽돌, 보도블록, 등 건축자재
원료화	시멘트콘크리트, 도료의 안료
촉매	화학공정의 촉매
응집제	수처리 등의 무기 응집제
필러	플라스틱의 filler



<그림 6.1> Bauxsol에 의한 광산배수 처리 사례

3. 알루미늄 산업 폐기물인 적니(Red mud)를 사용한 Rhodamine B, Fast Green, Methylene Blue의 제거

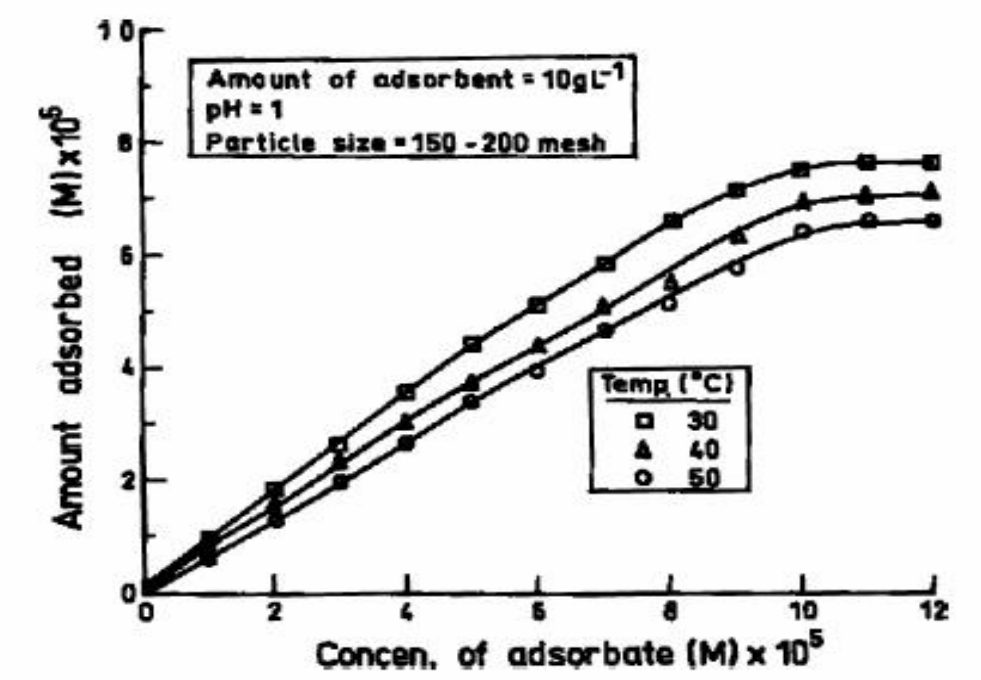
여러 가지 염색 물질 가운데 methylene blue, rhodamine B, fast green은 가장 흔하게 사용되는 물질이다. 또한 rhodamine B와 fast green은 발암물질로 추정되고 있기 때문에 폐수에서 이것들을 제거하고자 하는 노력이 많이 이루어지고 있다. 수중 오염물질을 제거하는 방법에는 역삼투법, 이온 교환법, 침전법, 흡착법 등이 있다. 그 중 활성탄을 이용한 흡착법이 가장 널리 이용되고있다. 그러나 활성탄은 단가가 높기 때문에 이를 대체할 만한 다른 흡착제의 개발이 이루어져야 한다. 본 논문에서는 단가가 낮은 알루미늄 산업 폐기물인 적니를 이용하여 염색 물질들을 제거하는 실험을 수행하였다.

적니는 인도의 Himdustan Alluminum Company로부터 얻었으며 이를 적당히 처리하여 활성 적니를 만들었다. 활성 적니 1g을 증류수 (100mL, pH 6.8)에 넣고 2시간 섞어준 후 24시간이 지나면 물의 pH가 7.5로 증가하였다. 또한 활성 적니는 물, 염용액, 약산과 약염기 용액, 유기용매, 30~50℃의 온도, 1.0~10.0의 pH에서 안정했다. 적니의 조성은 38.80% Fe_2O_3, 18.80% TiO_2, 9.64% SiO_2, 17.28% Al_2O_3, 6.86% Na_2O 였으며, 점화로 인한 손실은 7.34%였다. 밀도는 2.0g/cm^3, 유공성은 0.45% fraction, 표면적은 108 m^2/g 이었다. <그림 6.2>는 rhodamine B가 낮은 농도(≤1.0 X 10-5 M)에서는 92.5% 정도 흡착되며 높은 농도(1.0X10-4 M)에서는 75.2% 정도 흡착됨을 보여준다. Fast green과 methylene blue 역시 비슷한 양상을 보이며, 이는 수중에서 염색물질을 제거하는데 적니가 효율적으로 사용될 수 있음을 말해준다. 각각의 염색물질을 제거하는데 적당한 최적 pH는 rhodamin B 1.0, fast green 7.0, methyleneblue 8.0 이었다.

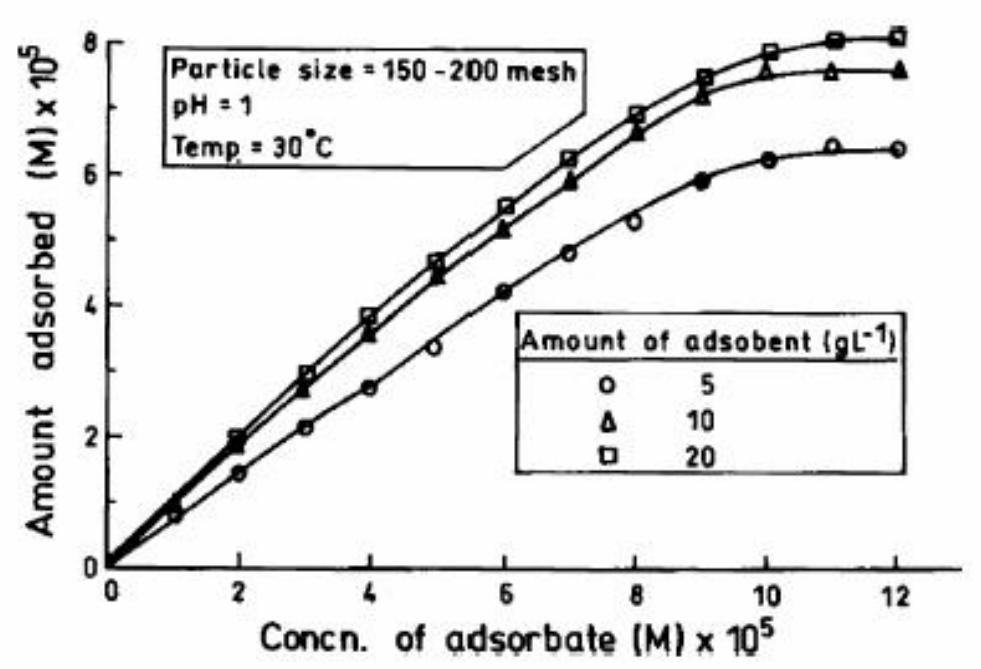
이것은 적니의 ZPC와 염색물질이 가지는 전하와 관련되어 있다. <그림 6.3>은 적니의 양을 달리하였을 때 rhodamine B의 흡착량이 어떻게 변화하는지를 보여준다. 적니의 양이 많을수록 rhdamine B의 흡착량도 많아지지만, 적니의 양이 10.0 g/L 때가 가장 적당하다고 여겨진다. 각각의 염색물질이 적니에 흡착할 때 평형에 이르는 시간은 rhodamine B 3시간, fast green 7시간, methylene blue 8시간이었다.

온도가 증가함에 따라서 흡착되는 양은 감소하는데, 이러한 현상은 fast green과 methyleneblue에서도 나타났다. 이것은 염색 물질들의 제거 반응이 발열 반응임을 보여준다. 또한 적니의 입자 크기가 흡착에 미치는 영향을 보면 입자 크기가 작을수록 제거 효과가 크게 나타났는데, 이것은 작은 입자 크기가 표면적을 넓게 하기 때문이다. 보통의 폐수에는 다양한 오염 물질들이 포함되어 있다. 따라서 다른 오염 물질인 양이온 혹은 음이온 계면 활성제가 염색물질의 제거에 미치는 영향을 살펴보았다. Rhodamine B와 fast green의 경우는 양이온 계면 활성제인 CTAB 혹은음이온 계면 활성제인 menozol 1B가 매우 적은 농도로 존재할 때에도 흡착에 영향을 받았다. 그러나 methylene blue의 경우는 계면활성제가 높은 농도(10-6 M)로 존재할 때에만 영향을 받았다. 염색물질의 제거는 Langmuir 모델과 Freundlich 모델을 따랐으며, 각각의 경우 그 상수 값들을 구했다. 또한 염색물질의 제거는 batch 시스템에서 보다는 column 시스템에서 더 효과적이었다.

적니는 재사용 가능성도 매우 좋았다. 그러나 적니 자체의 값이 싸며 사용된 적니는 건축자재로 이용될 수 있기 때문에 재사용 할 필요가 없다. 활성탄과 적니를 사용했을 때 (구입, 운반, 사용의 전 과정을 포함했을 때)의 비용을 추정해보면, 톤 당 활성탄이 약 $285.0(U.S.), 적니가 약 $25.0(U.S.)이다. 위의 모든 결과를 종합해 볼 때, 적니는 rhodamine B, fast green, methyleneblue를 빠르고 계속해서 제거하는 데 매우 효과적이다. 또한 적니는 활성탄을 대체할 수 있는 매우 가능성 있는 흡착제이다.



<그림 6.2> 적니의 양을 달리하였을 때 rhodamine B의



<그림 6.3> 적니의 양을 달리하였을 때 rhodamine B의 흡착량

제 7 장
연구개발성과의 보안등급

제 7장 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	□ 보안과제 ■ 일반과제

제 8 장
국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

제 8장 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

(해당사항 없음)

제 9 장
연구개발과제 수행에 따른
연구실 등의 안전 조치 이행 실적

제 9장 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

(해당사항 없음)

제 10 장
연구개발과제의 대표적 연구 실적

제 10장 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/ 특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록국가	Impact Factor	논문게재일 /특허등록일	사사여부 (단독사사 또는 중복사사)	특기사항 (SCI여부/ 인용횟수 등)
1	특허	레드머드 액상 슬러리 및 이의 제조방법	우석대학교	출원인	대한민국		2017.12.20		
2	특허	흙포장용 조성물	우석대학교	출원인	대한민국		2017.10.19		
3	특허	Red mud liquid slurry and preparation method thereof	우석대학교	출원인	베트남				
4	논문	Effects of red mud and Alkali-Activated Slag Cement on efflorescence in cement mortar	우석대학교	주저자	Construction and Building Materials		2017.02	중복사사	SCI
5	논문	Effect of Red Mud Content on Strength and Efflorescence in Pavement using Alkali-Activated Slag Cement	우석대학교	교신저자	International Journal of Concrete Structures and Materials		2018.02	중복사사	SCI
6	논문	폴리머 혼입 알칼리 활성화 슬래그-레드머드 시멘트 모르타르의 내구특성	우석대학교	주저자	대한건축학회 논문집-구조계		2017.01	단독사사	
7	논문	레드머드 대체율에 따른 결합재별 흙포장재의 특성	우석대학교	주저자	한국건설순환자원학회논문집		2017.03	중복사사	
8	논문	알칼리활성화 슬래그 결합재의 강도발현 인자에 관한 연구	우석대학교	주저자	한국건설순환자원학회논문집		2018.06	중복사사	
9	논문	레드머드 대체율에 따른 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트 모르타르의 기공 및 백화특성	우석대학교	주저자	한국건축시공학회 논문집		2017.06	중복사사	
10	논문	점도 및 침전지수에 의한 액상화 레드머드의 분산 특성평가	우석대학교	주저자	한국건축시공학회 논문집		2017.12	중복사사	
11	논문	양생조건에 따른 레드머드 혼입 알칼리 활성화 슬래그 시멘트 모르타르의 강도 및 백화특성	우석대학교	주저자	한국건축시공학회 논문집		2018.06	중복사사	

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/ 특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록국가	Impact Factor	논문게재일 /특허등록일	사사여부 (단독사사 또는 중복사사)	특기사항 (SCI여부/ 인용횟수 등)
12	기타	Analysis of Color Distribution of Concrete Finishing Materials by adding Industrial Waste	우석대학교	주저자	13th AIC Congress 2017		2017.08.17	중복사사	국제 학술논문
13	기타	액상레드머드 첨가 방식에 따른 ASRC 콘크리트의 특성	우석대학교	주저자	한국건축시공학회 2018년 춘계학술발표대회 논문집		2018.05	중복사사	학술논문
14	기타	초기점도가 액상화 레드머드의 침전지수에 미치는 영향	우석대학교	주저자	한국콘크리트학회 2018 봄 학술대회 논문집		2018.05	단독사사	학술논문
15	기타	액상화 레드머드 첨가율에 따른 습식 흙 콘크리트의 역학적 거동 특성	우석대학교	주저자	한국콘크리트학회 2017 가을 학술대회 논문집		2017.11	중복사사	학술논문
16	기타	물리적 요인에 의한 액상 레드머드의 분산 지수	우석대학교	주저자	한국건설순환자원학회 2017 봄학술발표 논문집		2017.04	단독사사	학술논문
17	기타	알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트 모르타르의 양생방법에 따른 백화특성	우석대학교	주저자	한국건설순환자원학회 2018 봄학술발표 논문집		2018.04	중복사사	학술논문
18	기타	레드머드 혼입에 따른 시멘트 모르타르의 기공특성	우석대학교	주저자	한국건축시공학회 2017년 춘계학술대회 논문집		2017.05	단독사사	학술논문
19	기타	레드머드를 활용한 외장재의 만족도분석	우석대학교	주저자	한국건축시공학회 2017년 춘계학술발표대회 논문집		2017.05	단독사사	학술논문
20	기타	레드머드 첨가에 따른 알칼리활성화 슬래그-레드머드 건식 흙포장재의 다짐 특성	우석대학교	주저자	한국건축시공학회 2017년 춘계학술발표대회 논문집		2017.11	단독사사	학술논문
21	기타	산업부산물로 제조된 활성 슬래그 바인더를 활용한 알칼리활성화 시멘트 모르타르의 특성	우석대학교	주저자	한국건축시공학회 2018 춘계학술발표대회논문집		2018.05	중복사사	학술논문
22	기타	알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트(ASRC)의 건설분야 활용기술	우석대학교	주저자	한국건설순환자원학회 2018 봄학술발표 논문집		2018.04	중복사사	학술논문

제 11 장
기타 사항

제 11장 기타 사항

연구 진행과정 중 수집한 국내외 최신 기술 정보를 정리하여 아래와 같이 (사)한국건설순환자원학회의 한국건설순환자원학회지 2017년 12월호에 주관연구책임자인 우석대학교 강석표 교수가 집필주간이 되어 <그림 11.1>「산업부산물 레드머드의 건설산업 재활용 기술 및 현황」이라는 주제로 특집기사를 게재 하였다.

□ 제목 : 산업부산물 레드머드의 건설산업 재활용 기술 및 현황

□ 게재지 : 한국건설순환자원학회지 2017년 12월호

□ 특집기사 배경 : 보크사이트 원광석에서 수산화알루미늄을 추출한 후 발생되는 산업부산물인 레드머드는 세계적으로 1억 2천만 톤이 발생되고 있으며, 국내의 발생량도 20여만 톤에 이르고 있다. 황토와 같이 붉은색을 나타내 적니(赤泥)라고도 불리는 레드머드는 색상 및 화학적 구성 성분이 각종 산업분야에 활용하기 충분한 가능성을 가지고 있으며, 특히 건설산업분야에서의 경우 폐기물 관리법 시행 규칙에 의한 재활용 방안을 제시하고 있어 제도적 기반도 마련되어 있는 여건이다. 현재까지의 처리 기술은 극히 일부만 저부가가치로 상용화되고 있으며 레드머드 재활용을 위한 연구는 아직 초기단계에 불과하다. 레드머드의 재활용은 현재까지 국내외 주요 도전 과제로 남아있다. 본 특집에서는 현재 산업부산물 레드머드의 현황과 국내의 건설산업으로의 활용된 대표적인 사례를 소개하고자 한다. 본 특집을 통해 산업부산물 레드머드의 재활용처가 다양하게 확대되는 계기가 되기를 기대해 본다.

□ 특집기사

- 보크사이트 잔사물(레드머드)의 개요 및 국내외 처리현황 - 케이씨(주)
- 건설산업에 재활용하기 위한 보크사이트잔사물의 환경안정성 - 케이씨(주)
- 산업부산물 레드머드의 건설산업 재활용 증진을 위한 액상화 기술개발 - 우석대
- 산업부산물 레드머드를 활용한 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트의 특성 - 우석대
- 산업부산물 레드머드를 활용한 흙포장재의 특성 및 현장적용 사례 - ㈜에이엠에스엔지니어링



<그림 11.1> 한국건설순환자원학회지 특집기사 게재

제 12 장
참고 문헌

제 12장 참고 문헌

1. Allahverdi A, Najafi Kani E, Hossain KM, Lachemi M(2014), Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Chapter 17. Method to control efflorescence in alkali-activated cement-based materials, pp.463-483.
2. A. Kashani, J.L. Provis, G.G. Qiao, J.S.J. van Deventer(2014), The interrelationship between surface chemistry and rheology in alkali activated slag paste, Constr, Build. Mater, Vol.65, pp.583-591.
3. C. Gonga, N. Yang(2000), Effect of phosphate on the hydration of alkali-activated red mud slag cementitious material, Cem. Concr. Res, Vol.30, No.7, pp.1013-1016.
4. C. Dow, F.P. Glasser(2003), Calcium carbonate efflorescence on Portland cement and building materials, Cem. Concr. Res, Vol.33, No.1, pp.147-154.
5. Daniel VR, Joao AL, Marcio RM(2011). Potential use of natural red mud as pozzolan for portland cement. Materials Research, Vol.14, No.1, pp.60-66.
6. E.N. Kani, A. Allahverdi, J.L. Provis(2012), Efflorescence control in geopolymer binders based on natural pozzolan, Cem. Concr. Compos, Vol.34, No.1, pp.25-33.
7. Hakkinen, T. (1986), Properties of alkali-activated slag concrete, VTT Research Notes, Technical Research Centre of Finland(VTT), No. 540.
8. J.J. Chang, W. Yeih, T.J. Chung, R. Huang(2016), Properties of pervious concrete made with electric arc furnace slag and alkali-activated slag cement, Constr. Build. Mater, Vol.109, pp.34-40.
9. Krivenko, P.(1994), Theory, Chemistry, Structure and Properties of Alkaline Cementitious Systems, First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ukraine, Vol. 1, pp.12-129.
10 .Kumar, S., Kumar, R., & Mehrotra, S. (2010). Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolymer, J Mater Sci, vol.45, No.3, pp.607-615
11. Kropp, J. (1995), Performance Criteria for Concrete Durability, E&FN Spon, London, pp.103-111.
12. K. Sakai(2005), Environmental design for concrete structures, J. Adv. Concr. Technol, Vol.3, No.1, pp.17-28.
13. Kang SP, Kwon SJ.(2017), Effects of red mud and alkali-activated slag cement on efflorescence in cement mortar. Construction and Building Materials, Vol.133, pp.459-467.
14. N.M. Al-Akhras, M.N. Smadi(2004), Properties of tire rubber ash mortar, Cem. Concr. Compos. Vol.26, pp.821-826.
15. Narender Reddy, A., Anitha, D., & Venkata Tilak, U. (2014), Performance of Alkali Activated Slag and Alkali Activated Slag + Fly Ash with various Alkali Activators, International Journal of Engineering and Technical Research, Vol. 2, No.1, pp.73-78.
16. N. Mobasher, S.A. Bernal, J.L. Provis(2016), Structural evolution of an alkali sulfate activated slag cement, J. Nucl. Mater, Vol.468 PP.97-104.

17. Osgood, C.E., Suci, G.J. and Tannenbaum, P.H. (1957) The measurement of meaning. University of Illinois Press, Urbana, journal name of Advances in Aging Research, Vol.3 No.1, pp.336-342.
18. P. Kresse(1987), Efflorescence—echanism of occurrence and possibilities of prevention, Betonw Fert. Tl.-Tech, Vol.53, pp.160-168.
19. Pan, Z., Cheng, L., Lu, Y., Yang, N. (2002), Hydration products of alkali-activated slag-red mud cementitious material, Cement and Concrete Research, Vol.32, No.3, pp.357-362.
20 .Pan, Z., Li, D., Yu, J., Yang, N. (2003), Properties and microstructure of the hardened alkali-activated red mud-slag cementitious material, Cement and Concrete Research, Vol.33, No.9, pp.1437-1441.
21. Perez-Villarejo, L., Corpas-Iglesias, F. A., Martinez-Martinez, S., Artiaga, R., Pascual-Cosp, J. Pascual-Cosp(2012), Manufacturing new ceramic materials from clay and red mud derived from the aluminium industry, Constr. Build. Mater, Vol.35, pp.656-665.
22. Pontikes Y, Angelopoulos GN.(2013) Bauxite residue in cement and cementitious applications : Current status and a possible way forward, Resources. Conservation and Recycling, Vol.73, No.8, pp.53-56.
23. Pontikes, Y., & Angelopoulos, G. (2013), Bauxite residue in cement and cementitious applications : Current status and a possible way forward, Resources, Conservation and Recycling, Vol.73, pp.53-63.
24. Pacheco-torcal, Fernando, Labrincha, Joao, Leonelli, C.(2014), Handbook of Alkali-activated cements, Mortars and Concretes. USA: Elsevier Science Ltd. Chapter 9, Analysing the relation between pore structure and permeability of alkali-activated concrete binders; pp.243-257.
25. Rabbat BG(1995), Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318-95)and Commentary (ACI 318R-95), Washingtion, D.C: Famingtion hills, pp.373.
27. S.H. Lee, W.J. Park, H.S. Lee(2013), Lifecycle CO2 assessment method for concrete using CO2 balance and suggestion to decrease LCCO2 of concrete in South-Korean apartment, Energy Build, Vol.58, pp.93-102.
28. S.H. Jung, S.-J. Kwon(2013), Engineering properties of cement mortar with pond ash in South Korea as construction materials: from waste to concrete, Cent. Euro. J., Vol.3, No.3, pp.522-533.
29. X. Liu, N. Zhang, H. Sun, J. Zhang, L. Li(2011), Structural investigation relating to the cementitious activity of bauxite residue -Red mud, Cem. Concr. Res, Vol.418, pp.47-53.
30. X. Ke, S.A. Bernal, J.L. Provis(2016), Controlling the reaction kinetics of sodium carbonate-activated slag cements using calcined layered double hydroxides, Cem. Concr. Res, Vol.81, pp.24-27.
31. Y. Gu, Y.-H. Fang, D. You, Y.-F. Gong, C.-H. Zhu(2015), Properties and microstructure of alkali-activated slag cement cured at below- and about-normal temperature, Constr. Build. Mater, vol.79, pp.1-8.
32. Z. Pan, L. Cheng, Y. Lu, N. Yang(2002), Hydration products of alkali-activated slag-red mud cementitious material, Cem. Concr. Res, Vol.32, pp.357-362.
33. Zhang, Z., Provis, J.L. (2014). Andrew reid, hao wang, fly ash-based geopolymers: the

relationship between composition, pore structure and efflorescence, Cement and Concrete Research, Vol.64, pp.30-41.
34. 강석표(2012), 알칼리활성화 무시멘트 결합재의 촉진제로서 레드머드 활용에 관한 연구, 대한건축학회, 28권, 제 11호, pp.133-140.
35. 강석표(2013). 폴리머혼입 알칼리활성화 무시멘트 결합재 모르타르의 강도특성, 대한건축학회 논문집, 제 8권, 제 1호, pp.112-119.
36. 강석표 외(2015), 레드머드를 활용한 알칼리 활성화 흙포장재 현장 적용성 평가에 관한 연구, 한국건축시공학회, 제 15권, 제 1호, pp.96-97.
37. 강석표 외(2016), 레드머드 대체율에 따른 폴리머 혼입 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트모르타르의 강도 및 기공특성, 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, 제 20권, 제 2호, pp.26-33
38. 강석표(2016). 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트(ASRC)의 건설분야 활용기술, 한국콘크리트학회 학회지, 제 28권 6호 pp.47-52.
39. 강석표 외(2017), 폴리머 혼입 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트모르타르의 내구특성, 대한건축학회 논문집, 제 33권, 제 1호, pp.81-88.
40. 강석표 외(2017), 레드머드 대체율에 따른 알칼리활성화 슬래그-레드머드 시멘트 모르타르의 기공 및 백화특성, 한국건축시공학회지, 제 17권, 제 3호, pp.261-268.
41. 고경택 외(2010), 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말의 혼합 사용한 무시멘트 알칼리 활성 모르터의 유동성 및 강도 특성, 한국건설순환자원학회, 제 5권, 제 4호, pp.114-121
42. 고경택 외(2011), 고로슬래그를 사용한 무시멘트 알칼리 활성 모르타르의 유동성과 압축강도, 한국건설순환자원학회, 제 6권, 제 1호, pp.63-71.
43. 김지훈 외(2014), 양생 방법에 따른 알칼리활성 시멘트 모르타르의 특성, 한국콘크리트학회 논문집, 제 26권, 제 2호, pp.117-124.
44. 김태완 외(2015), 칼륨명반과 수산화나트륨으로 활성화된 고로슬래그 미분말의 강도 특성, 콘크리트학회, 제 27권, 제 2호, pp.95.
45. 김주형 외(2016), 플라이애시 종류에 따른 플라이애시 모르타르의 특성에 대한 연구, 한국건설순환자원학회논문집, 제 4권, 제 4호, pp.439-445.
46. 궉기홍 외(2007), 알칼리 활성화 슬래그(AAS) 경화체의 콘크리트 2차 제품 활용에 관한 실험적 연구, 대한건축학회, 제 23권, 제 1호, pp.121-128.
47. 류금성 외(2013), 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 혼합 사용한 지오폴리머 모르타르의 강도발현 및 내구성, 한국건설순환자원학회, Vol.1, No.1, pp.35-41.
48. 문경주(2004), 산업폐기물을 이용한 비소성 시멘트 및 콘크리트의 특성, 전북대학교 박사학위 논문, pp.161-172.
49. 문규돈 외(2012), 건축재료의 백화 시험방법에 관한 비교 연구, 대한건축확회 학술발표대회 논문집, 32권, 제 1호, pp.217-218.
50. 박필환(2009), 시멘트의 수화에서 VAE 폴리머의 영향에 관한 연구, 명지대학교 박사학위논문, p.129-134.
51. 상명규(2008), SBR(Sequencing Batch Reactor) 공정에서의 슬러지 침전특성분석, 서울시립대학교, pp.64.
52. 이진숙 외(2000), 주거단지 외장색채계획을 위한 배색안 작성 연구, 대한건축학회 논문집, 제 16권, 제 10호, pp.129-135.
53. 이진숙 외(2001), 재료의 색채와 입도가 건축재료 평가에 미치는 영향도 예측, 한국실내디자인학회 논

문집, pp.64.
54. 이민석 외(2001), 물 흡수계수 이론을 이용한 콘크리트의 수밀성 평가, 대한건축학회 논문집, 제 17권, 제 2호, pp.75-83.
55. 이진숙 외(2002), 실내마감재의 종류별 색채 평가특성 분석을 위한 연구, 한국색채학회 논문집, 제 16권, 제 2~3호, pp.77-87.
56. 이형집 외(2016), 플라이애시 치환율 및 압축강도에 따른 콘크리트의 부착 거동, 한국건설순환자원학회, 제 4권 , 제 1호, pp.19-24.
57. 이진숙 외(2002), 실내마감재의 종류별 색채 평가특성 분석을 위한 연구, 한국색채학회 논문집, 제12권 제4호 pp.77-87.
58. 오용환 외(2017), 콘크리트포장의 압축강도와 휨강도의 상관관계 연구, 한국콘크리트학회 학술대회 논문집, 제 19권, 제 2호, pp.1025-1028.
59. 위준우 외(2010), 알칼리 활성화 반응에 의한 고로슬래그 경량골재 콘크리트의 실험적 연구, 대한건축학회 논문집, 제 26권, 제 9호, pp.87-94.
60. 정상화 외(2015), 고강도 고로슬래그 혼합 시멘트 페이스트의 수화 및 포졸란 반응에 미치는 고로슬래그 미분말의 치환률과 분말도의 영향, 한국콘크리트학회, 제 27권, 제 2호, pp.115-125.
61. 전배호 외(2018). 플라이애시 및 고로슬래그 미분말의 치환율에 따른 삼성분계 콘크리트 특성 및 탄산화 저항성 평가에 관한 연구, 콘크리트학회논문집, 30권, 제 1호, pp.23-30.
62. 조영근 외(2017), 플라이애시 입도가 압축강도에 미치는 영향, 한국건설순환자원학회, 제 5권, 제 3호, pp.313-319.
63. 추용식, 박용안, 이희준, 박광순, 권수재(1999), 부유물질의 응접작용 및 침전특성에 관한 실험적 연구, 한국해양학회, 제 4권, 제 1호, pp.40-49.
64. 한상수 외(2004), 가로변 건물 외장 재료의 구성과 이미지에 관한 연구, 대한건축학회 논문집, pp.207.
65. 한천구 외(2016). 탈황석고의 가공법 및 잔골재종류 변화에 따른 고로슬래그 미분말 다량 치환 모르타르의 품질, 한국건설순환자원학회, 제 4권, 제 2호, pp.157-164.
66. 형원길(2006), 유리전이온도(Tg)에 따른 아크릴계 폴리머 시멘트 모르타르의 특성, 대한건축학회 논문집, 제 22권, 6호, pp.103-109.
67. 형원길 외(2014), 양생 방법에 따른 알칼리활성 시멘트 모르타르의 특성, 한국콘크리트학회, 제 26권, 제 2호, pp.117-124.
68. 형원길 외(2015), 양생방법에 따른 알칼리 및 황산염 복합자극제를 사용한 비소성 시멘트 모르타르의 특성, 한국콘크리트학회, 제 27권, 제 3호, pp.236-243.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.