

조선시대 조적용 석회의 소성 성능과 모르타르의 물성에 대한 실험 연구

An Experimental Study on the Firing Performance and Property of Lime Mortar for Building in Joseon Dynasty

이 상 옥*

Lee, Sang-Ok

(한국전통문화대학교 문화유산융합대학원 수리복원학과 박사과정)

정 광 용

Chung, Kwang-Yong

(한국전통문화대학교 보존과학과 교수)

Abstract

This study was to investigate the firing method of limestone in Joseon Dynasty, and analyze the physical-chemical properties of lime mortars in Joseon Dynasty. This study was to manufacture and evaluate the firing experiment and mortar of Limestone by each sort in order to reproduce the traditional lime mortars in Joseon Dynasty, and investigate the behavior to improve physical properties according to the firing method of Limestone. This study has found out that there were screening criteria and standard of appropriate firing temperature about the Limestone in Joseon Dynasty. Accordingly, this study was to improve its strength through various additives and mixture. In particular, in case of Limestone, the black and blue Limestone were preferred, and most of domestic Limestones were low grade Limestone including the clay and took ivory white or blue with low whiteness. This study has shown that the low grade Limestone was mined by the surface mining compared with the high grade Limestone as underground mining method, and could be used because it was easy to mine relatively and there was possibility that Natural Hydraulic Lime(NHL) was used with the traditional lime mortars in Joseon Dynasty.

주제어 : 조선시대, 전통 석회, 저품위 석회석, 소성실험, 천연 수경성 석회, 석회 모르타르

Keywords : Joseon Dynasty, Traditional lime, Low grade Limestone, Firing experiment, Natural Hydraulic Lime(NHL), Lime Mortars

1. 서 론

현재 문화유산 중 조적식 건축문화재의 경우 전통소재인 석회를 이용한 수리가 이루어져야 함에도 불구하고 강도의 문제로 현대 기법인 시멘트나 혼화재료를 첨가하여 사용하고 있다. 과연 전통소재인 석회 모르

타르는 강도가 약하고 동파에 취약한 재료인지에 대한 고찰이 필요하다.

최근까지 이루어진 국내 연구들은 의뢰에 기록된 18~19세기 조선시대 석회 모르타르의 배합방법에 대한 강도평가를 실시하였으며, 그 결과 조적용으로 사용하기에는 초기강도가 약하여 강도증진 방안이 요구되었다.¹⁾ 석회 모르타르의 강도증진을 위하여 배합비와 골

* Corresponding Author : Iso8675@naver.com

이 연구는 2015년도 한국전통문화대학교 학술연구지원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

1) 이권영, 「조선후기 관영건축공사의灰미장재와 공법에 관한 연구-營建儀軌의油灰,水灰,櫟上塗灰를 중심으로-」, 건축역사연구, 18권, 4호, 2009

재의 종류, 49일간 양생기간에 따른 강도양상이 연구되기도 하였으나 강도가 2MPa 이하로 나타나 다양한 배합비와 혼화제의 적용가능성 검토를 제시한 바 있다.²⁾ 석회 모르타르는 초기강도가 약한 대신에 기경성을 갖고 있어 대기 중 CO₂와 반응하여 매우 서서히 강도가 증진된다. 그러나 조적용으로 적합한 강도에 도달하기까지 많은 시간이 걸린다고 알려져 있으나, 1996~2005년에 진행된 국외 연구를 통하여 석회 모르타르의 탄산화 진행도와 강도의 상관관계를 분석한 결과에 따르면 제작 후 양생기간이 180일 지나면 충분한 탄산화가 진행되고 360일이 지나면 2.5MPa가 넘지 않는 강도로 수렴하는 경향이 나타났다.³⁾

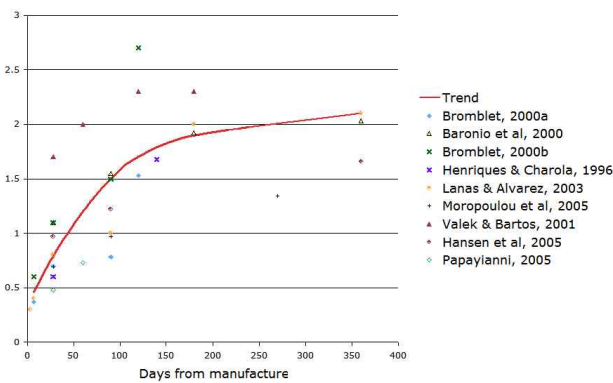


그림 1. 양생기간에 따른 석회 모르타르의 압축강도(studies 1996~2005); Robert(2006), 재인용

이와 같은 석회 모르타르의 강도는 조적용으로 사용하기에는 안전상의 문제로 인하여 사용이 부적합하다. 콘크리트표준시방서(2009)에서는 콘크리트의 내동해성이 강도, 함수율, 공극량 등에 따라 다르지만 일반적으로 콘크리트가 초기 동해에 견디는 압축강도로 2.9MPa를 제시하고 있다. 또한 심한 기상작용을 받는 콘크리트에 대해서는 안전율을 고려하여 최소 5MPa 이상의 압축강도를 지니도록 권고하고 있다. 따라서 현재의 생석회를 소화시킨 소석회를 사용하는 석회 모르타르의 경우 권고하고 있는 강도에 미치지 못하고 있는 실정이다. 또한 문화재청 보고서(2013)에 따르면 문화재 수리용 전통재료로써 석회의 경우 용도별 품질기준이 필요함을 언급하고 있다.⁴⁾

석회 모르타르의 약한 강도를 보완하고자 고문헌상의 배합비율과 혼화제인 다양한 유기물첨가제를 첨가함으로써 물성변화를 확인해보았으나 건축재료로 이용하기 위해서는 강도 향상과 수축변형 보완 등이 필요함을 제시하였다.⁵⁾⁶⁾ 아직까지 전통 석회에 대한 제작 기술은 명확하게 밝혀지지 않았다. 고문헌에 나타나는 배합비는 배합단위가 명확하지 않고 단위기준체계도 많이 다르기 때문에 정확한 배합방법을 도출하는 데 어려움이 있다. 또한 석회가 어떻게 생산되었는지와 어떻게 배합하였는지와 같은 시공 방법에 대한 자세한 기록을 찾을 수가 없으며 혼화제로 유기물을 첨가하였더라도 현대 기술로는 유기물 존재 여부를 판단하기에 어려움이 있다.

석회 모르타르의 강도를 증진시킬 수 있는 방안으로는 여러 방법이 있다. 첫째, 황토가 아닌 순도 높은 모래를 사용하거나, 둘째, 모래의 입도 크기의 경우 큰 것과 작은 것을 고루 사용하여 강도를 향상시키거나, 셋째, 클링커와 포졸란 물질을 사용하는 방법이 있다. 그중 본 연구에서는 조선시대에 점토질을 함유한 석회석을 고온으로 소성하였을 때 생성되는 클링커에 대한 적용 가능성을 검토해보고자 한다.

천연 수경성 석회(Natural Hydraulic Lime: NHL)의 경우 클링커의 포졸란 반응에 의하여 다양한 압축강도 구현이 가능하며, 유럽규격(BS EN 459-1)에서는 양생기간 28일 기준 2~15MPa 범주의 압축강도로 구분되어 규격화하고 있다. 장기적인 강도발현 특성을 지니고 있는 천연 수경성 석회의 경우 점토질을 함유한 석회석을 1200℃ 근처에서 소성하여 만들 수 있다. 국내의 석회석광산에서 채취되는 석회석의 경우 대부분이 점토질을 함유한 저품위 석회석에 해당되며, 고문헌에 기록된 석회 제작기술에서 조선시대에 천연 수경성 석회를 제작하였을 가능성을 확인할 수 있다.

천연 수경성 석회(NHL)의 경우 해외에서는 상용화 단계에 이르러 다양한 제품을 생산하고 있지만 국내의 경우에는 관련 특허가 1~2편에 불과하며 이를 문화재와 전통 석회에 관련하여 연구한 논문은 전무한 실정이다. 특히 해외에서는 기존의 문화재에 존재하는 석회 모르타르에 대한 분석을 실시한 후 물성이 유사

2) 권기혁·유혜란, 「조적조 건축물의 석회 모르타르 특성에 관한 실험적 연구」, 구조물진단학회지, 13권, 5호, 2009

3) Robert Michael Heathcote Lawrence, *A Study of carbonation in non-hydraulic lime mortars*, University of Bath, 2006

4) (재)역사건축기술연구소, 『문화재수리 전통재료 제작 및 활성화 방안 연구용역』, 문화재청 수리기술과, 2013, 371~376쪽

5) 박철우·이호일·이권영, 「친환경 건축재료로서 전통 유회(油灰)의 물성에 관한 실험적 연구」, 대한건축학회논문집(구조계), 28권, 7호, 2012

6) 박철우·임남기·이권영, 「친환경 미장재료로서 전통 수회(水灰)의 물성에 관한 실험적 연구」, 대한건축학회논문집(구조계), 30권, 7호, 2014

한 석회 모르타르를 제작하여 보존처리하고 있으며, 이때 대부분 천연 수경성 석회를 사용한다. 천연 수경성 석회는 천연 석회석을 소성하여 다른 혼화재 첨가 없이 제작되며, 초기 경화성과 장기적 강도발현 특성 때문에 해외에서는 역사적 건축물 보수시 주로 사용되고 있다.

따라서 본 연구에서는 소성실험을 바탕으로 고문헌상의 석회석 종류와 혼합수비(W/L), 첨가물에 따른 모르타르의 기초 물성평가와 양생기간에 따른 강도발현 양상을 확인해보고자 한다. 조선시대에 사용된 석회석을 규명하여 조적용 석회 제작기술에 대한 근거자료를 마련해 보고자 한다.

2. 고문헌에 나타난 석회석 선정기준

전통 석회의 제작을 위해서 사용되는 원료는 석회석과 굴 껍질이 있다. 석회는 원료의 화학적 성분과 결정구조에 따라서 품질과 강도에 큰 영향을 미친다. 조선시대에는 전통 석회 제작기술에 대한 문헌기록들이 다양하게 나타난다. 의궤와 『조선왕조실록』에서는 축성이나 담장공사, 능묘 등에 사용된 재료가 언급되어 있으며, 조선후기에는 『북학의(北學議)』, 『임원경제지(林園經濟志)』에서 전통 석회의 제작방법이 상세히 기록되어 있다. 특히 『북학의』와 『임원경제지』에서는 석회 모르타르의 강도향상을 위하여 여러 첨가제의 적용방법과 석회석의 소성방법, 골재의 선택방법 등에 대하여 기록되어 있다. 그러나 고문헌상의 기록들을 현대에 적용하기에는 여러 문제점이 존재한다. 과거 재료에 대한 용어가 현대의 어떤 재료에 해당하는지가 불분명하며, 배합방법상에서 측량 단위가 다름에 따라 정확한 배합방법 도출의 한계점이 존재한다. 따라서 과거의 기록에서 전통 석회를 재현하기 위한 근거자료를 마련하기 위해서는 항상 이러한 한계점들이 고려되어야 한다.

2-1. 조선시대 석회석

조선시대에는 석회를 제작하는 기법을 중국으로부터 전해 듣고 이를 나라 실정에 맞게 개선하여 사용한 것으로 보인다. 단편적인 예로는 문종 원년에 통사(通事) 김퇴가 북경에 다녀와서 상소한 내용이 있으며, 이와 같은 기록에서 유추할 수 있는 사실은 백색의 석회석이 아닌 흑청석(黑靑石)을 3일간 소성하여 생석회(CaO)를 만들고 이에 물을 부어 소석회(Ca(OH)₂)로 가공하는

기술이 있었음을 알 수 있다.⁷⁾

위의 김퇴의 상소문 기록에서도 알 수 있듯이 조선시대에 중국의 석회 제작기술을 참고하였음을 알 수 있으며, 『천공개물(天工開物)』에서도 석회석에 관한 내용이 저술되어 있다.⁸⁾ 『천공개물』에서는 석회석 선정 기준으로 청색이 가장 좋으며 황백색 다음으로 선호하였다고 한다. 또한 석회석은 노천채광으로 채취하였으며 소성의 중요성을 인지하고 있었음을 알 수 있다. 이 밖에 조선시대에 석회석에 대한 선정방법이 나타난 기록으로는 『세종실록지리지』에서 석회의 원료로 암석(崑石)과 흑청석(黑靑石)이 사용되었다는 기록이 있다.⁹⁾

『성종실록』에서는 석회석의 생산 위치와 석회의 제작이 가능한 석회석인지를 판단하는 기준이 있었음을 알 수 있다.¹⁰⁾

조선시대에는 석회석 품질에 대한 기준이 있었으며 그에 관한 기록도 보인다. 박제가의 『북학의』 「벽돌편」에서는 석회석을 시험하는 방법을 상세히 제시하고 있다.¹¹⁾ 그 내용 중에서 석회석을 소성하고 3분의 1이 줄었다는 사실로 알 수 있는 것은 석회석(CaCO₃)이 생석

7) “신이 북경(北京)에 가서 석회(石灰)를 만드는 법을 물으니, 흙 속에 묻힌 흑청석(黑靑石)을 취하여 가마솥[釜] 안에 쌓아 놓고 3일 밤을 태우면 그 빛이 희고, 돌 성질이 유한 것이 더욱 희며, 쓸 때에 물을 부으면 곧 석회(石灰)가 된다고 했습니다. 석회는 그 가마솥[釜]의 대·소에 따라 1백 석, 혹은 7·80석, 혹은 30여 석을 취하는데, 가마솥의 모양은 우리나라에서 굽는 벽돌 가마와 같았습니다.”라는 내용이 있으며 석회석 선정기준과 소석회 가공기술을 언급하고 있다; 『문종실록』, 6권, 문종 1년(1451 신미/명 경태(景泰) 2년), 3월 3일(임인), 2번째 기사

8) “백리 안팎의 지역에 있는 흙 속에는 반드시 태울 수 있는 석회석이 있다. 이런 돌은 청색이 가장 좋으며 황백색이 그 다음이다. 석회석은 지하 2, 3척에 묻혀 있고 캐내어 태운다. 그러나 지표에서 이미 풍화된 것은 쓸모가 없다”라는 내용에서 비교적 석회석 선정기준이 명확함을 알 수 있다; 宋應星, 『天工開物』, 崔柱 옮김, 傳統文化社, 1997, 91 · 249~251쪽)

9) 『세종실록지리지』, 경기 강화도호부

10) “신이 중국의 성보(城堡)를 보건대, 모두 벽돌[磚]을 써서 쌓았고, 우리나라 개성부(開城府)에도 모두 벽돌을 썼으니, 청컨대, 벽돌을 구워 쌓게 하소서. 또 석회(石灰)를 굽는 데 쓰는 돌이 고을 북쪽 30리 거리의 구룡연(九龍淵) 지역에서 생산되니 채취해 쓸 수 있습니다. 그 적당한지 여부를 측정 도체찰사(築城都體察使)로 하여금 의논해 아뢰게 하소서”라는 내용에서는 지역별 석회석의 특징이 있음을 인지하고 있었으며 각 석회석의 품질을 확인하여 사용하게끔 하였다는 것을 알 수 있다; 『성종실록』 80권, 성종 24년 7월 16일

11) “구워서 회로 만드는 돌은 푸른 것과 흰 것이 있는데, 무늬가 촘촘하고 빛깔이 윤택한 것이 좋고, 그렇지 않은 것은 엉성해서 밀착하지 못하다고 한다. 또한 석회석을 시험하는 방법으로는 먼저 돌 한 개의 무게를 달아 본 다음에 여러 가지 돌과 섞어서 굽고 다 구워진 뒤에 꺼내서 무게를 달아보았을 때 3분의 1이 줄었으면 돌의 질이 좋고 불기운이 고르게 되었다는 것을 알 수 있었다”라는 내용에서는 석회석의 품질을 판별하는 보다 명확한 기준을 제시하고 있음을 알 수 있다; 박제가, 『북학의(北學議)』, 이익성 옮김, 을유문화사, 2011, 58쪽

회(CaO)가 되면서 44%의 질량 감소가 발생되어야 하지만 이보다 적게 질량이 감소한 이유는 순도가 낮은 불순물(점토질)이 약 10~20% 함유된 석회석을 사용하였기 때문임을 알 수 있다.

이권영(2009) 연구자의 조선후기 석회 조달방식에 대한 조사결과를 보면 전체적으로 황해도·경기도의 석회를 주로 사용한 것으로 보이며, 고품위 석회석은 강원도에 위치한 ‘삼척·태백·정선지구’에 주로 분포되어 있는데 강원도 지역보다 황해도의 석회석을 선호한 것을 보았을 때¹²⁾ 점토질을 함유한 저품위 석회석을 품질이 좋은 석회석으로 인지하고 있었음을 알 수 있다. 고문헌상에서 조선시대에는 흑석·흑청석·황백석의 석회석이 사용되었으며, 각 석회석의 품질에 대한 기준을 갖고 있었다. 또한 성곽 및 조적용으로 사용된 회는 석회석을 이용하여 제작하였으며, 석회석 광산으로 주로 황해도의 금천(金川)산을 사용한 것으로 보아 주요 채취광산이 있었고 저품위 석회석을 선호하였다는 것을 알 수 있다.

국내의 석회석은 점토질을 함유한 저품위 석회석이 대부분이고 백색도가 낮은 유백색 또는 청색을 띠고 있다. 저품위 석회석은 갱내채광인 고품위 석회석에 비하여 노천채광으로 채광되며 상대적으로 채광이 용이하기 때문에 조선시대에도 저품위 석회석을 사용하였을 가능성이 높다.

3. 석회석 소성실험 및 모르타르 실험

3-1. 소성실험 방법

(1) 출발 원료

석회를 제작하기 위하여 고문헌상에 나타나는 종류별 석회석을 선정하였다. 석회석은 고문헌상에 기록된 청색, 흑색, 백색, 황색계열의 석회석을 선별하였다. 석회석은 직경 150~200mm 크기로 파쇄된 석회석을 이용하였다. 색상별 석회석의 XRF 분석을 통하여 CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO의 상대적인 함량비를 측정하였다. 각각의 성분 함량비를 통하여 수경성인자율 다음과 같은 산출식을 통하여 도출해낼 수 있다.

$$Cementation\ Index\ (C.I) = \frac{2.8 \times \%SiO_2 + 1.1 \times \%Al_2O_3 + 0.7 \times \%Fe_2O_3}{\%CaO + 1.4 \times \%MgO}$$

12) 이권영, 「조선 후기 관영건축공사의灰미장재와 공법에 관한 연구 -營建儀軌의 油灰, 水灰, 樑上塗灰를 중심으로-」, 건축역사연구, 18권, 4호, 2009

표 1. 천연 수경성 석회(NHL)의 교결작용 지수

| 3 Groups of Hydraulic Limes | Cementation Index (C.I.) |
|--------------------------------|--------------------------|
| Feebly hydraulic (NHL 2) | 0.30 ~ 0.50 |
| Moderately hydraulic (NHL 3.5) | 0.50 ~ 0.70 |
| Eminently hydraulic (NHL 5) | 0.70 ~ 1.10 |

(2) 소성 방법

석회석의 소성은 전기로(Elim Global, KK80)를 이용하여 산화환경에서 소성하였으며, 고문헌상의 기록과 석회가마터에서의 출토유물을 토대로 최대 소성온도를 1200℃로 선정



그림 2. 다양한 색상의 석회석

하였다. 승온 속도는 10℃/min으로 설정하였으며 최고 온도 유지시간은 48시간으로 유지시켰다. 냉각방법으로는 공기 중 급랭하는 방법으로 달궈진 석회석을 냉각시켰다.

(3) 수화 방법

각각의 소성시료들에 대하여 수화반응을 시켰다. 소성에 의해 생성된 CaO를 Ca(OH)₂로 전환시키기 위해서는 수화공정을 거쳐야 한다. 수화반응시 Sample : Water = 1 : 4, 교반속도는 300rpm을 기준으로 하였으며 샘플을 증류수에 넣은 후 10분 동안 정치시킨 뒤 30분 동안 교반하여 수화시켰다. 수화과정을 거친 시료는 여과 후 건조기에서 (105±5)℃에서 24시간 동안 건조하였다. 수화공정은 석회 모르타르 제작에 앞서 중요한 공정으로 고문헌상의 기록에서도 소성한 석회석을 공기 중에서 며칠간 습을 먹게 하거나 급히 사용하는 경우에는 물을 첨가하여 사용하였다는 기록이 있다. 수화공정을 거치지 않은 석회를 바로 사용할 경우 수화열에 의하여 팽창하거나 수분량 조절의 어려움으로 인하여 균열이 발생할 수 있다.

3-2. 모르타르 실험 방법

(1) 석회석 종류와 첨가물에 따른 모르타르 물성평가

석회 모르타르의 제작에 사용된 석회는 종류별 석회석을 소성하고 수화반응시킨 소석회를 이용하였다. 골재로는 ISO 표준모래를 사용하였으며 혼합수의 양은 W/L 비 0.8로 고정하여 제작하였다. 결합재와 골재의 배합비는 「BS EN 459-2: 2010」에 준해 석회 : 잔골재(+천연포졸란) = 1 : 3으로 하였다. 제작된 시험체는 20℃, RH 60%인 항온항습실에서 7일·28일·56일·84일의 양생

기간을 거쳐 장기적인 강도 양상을 파악하기 위하여 시험체의 압축강도를 측정을 하였으며 각각 시료에 대한 XRD 분석, SEM-EDS 분석, TG-DTA 시차열중량 분석을 실시하였다.

표 2. 석회 종류에 따른 모르타르의 배합비율

| Mortar code | | Composition of mortars (wt%) | W/L (%) |
|-------------|--|---|---------|
| LS-A | White Limestone | 1 (Hydrated lime) : 3 (Aggregate) | 80 |
| LS-B | Blue Limestone | 1 (Hydrated lime) : 3 (Aggregate) | 80 |
| LS-C | Yellow Limestone | 1 (Hydrated lime) : 3 (Aggregate) | 80 |
| LS-D | Black Limestone | 1 (Hydrated lime) : 3 (Aggregate) | 80 |
| LD-R | Black Limestone, Traditional rooftile | 1 (Hydrated lime) : 2 (Aggregate) : 1 (Traditional rooftile powder) | 80 |

(2) 천연 수경성 석회의 W/L 비에 따른 강도평가
Cementation Index 분석에 따라 NHL 5에 속하는 화학적 성분조성을 지닌 흑색 석회석에 대하여 혼합수(W/L)량에 따른 강도평가를 실시하였다. 제작에 사용된 석회는 1200℃에서 소성한 흑색 석회석을 공기 중에서 냉각시킨 후 수화반응을 거친 소석회를 사용하였으며, 골재로는 ISO 표준모래를 사용하였다. W/L 비는 소석회의 양에 따른 혼합수의 비율로 각각 50·60·70·80%로 정하였으며, 제작된 시험체는 20℃, RH 60%인 항온항습실에서 28일의 양생기간을 거친 시험체의 압축강도를 측정을 하였다.

표 3. 혼합수 비율(W/L)에 따른 모르타르의 배합비율

| Mortar code | | Composition of mortars (wt%) | W/L (%) |
|-------------|-----------------|--------------------------------------|---------|
| LD-A | Black Limestone | 1 (Hydrated lime) : 3 (Aggregate) | 50 |
| LD-B | Black Limestone | 1 (Hydrated lime) : 3 (Aggregate) | 60 |
| LD-C | Black Limestone | 1 (Hydrated lime) : 3 (Aggregate) | 70 |
| LD-D | Black Limestone | 1 (Hydrated lime) : 3 (Aggregate) | 80 |

3-3. 모르타르 분석방법

(1) 압축강도 측정

압축강도 시험은 50×50×50mm 크기의 큐빅 모양 시험체를 하중용 가압판 상·하부에 대고 800±50N/s의 하중속도로 가한 후, 최대하중을 단면적으로 나누어 3개의 평균값을 구하였다. 압축강도 시험은 「KS L 5105

(수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 실험방법)」에 의거하여 압축강도 시험기로 측정하였다.

(2) X선 회절분석

X선 회절 분석법은 시료가 어떠한 성분으로 구성되어 있는지 모르는 상태에서도 이 시료에 X선을 조사시켜서 나타나는 회절패턴(Diffraction Pattern)을 이미 알고 있는 시료데이터에서 얻어진 회절패턴과 서로 비교하여 그 성분을 알아낼 수 있다. 본 연구에서는 제작된 시편의 소성온도에 따른 광물조성변화를 분석하기 위해 X선 회절분석기(Rigaku Corporation D/MAX 2200/PC)를 이용하였다.

(3) 미세구조 관찰 및 분석

석회 모르타르의 분석을 위해 시료를 채취하여 현미경 관찰 및 성분분석을 실시하였다. 석회 모르타르의 결정상 종류에 따른 미세구조의 차이와 탄산화에 따른 결정의 성장정도를 관찰하여 제작방법을 분석해보고자 하였다. 석회 모르타르 시료를 초음파세척기에서 수회 증류수를 교체하며 이물질을 제거하고 열풍건조기에서 건조한 후 주사전자현미경(JSM-5510, JEOL)에 부착된 에너지 분산형 분석기(INCA, Olympus)를 이용하여 분석을 실시하였다.

(4) 시차열중량분석

석회 모르타르의 탄산화 정도와 결정구조를 분석하기 위해 시차열분석을 실시하였으며, 분석기기는 시차열분석기(TG 1820/Rigaku사)를 이용하였다. 시료는 최대한 오염이 되지 않도록 분말로 준비하였으며, 샘플팬(sample pan)은 알루미늄(Al₂O₃)을 사용하였다. 분석 조건은 20~1000℃ 사이에서 20℃/min의 승온(昇溫) 속도를 적용하였고, 이를 토대로 분석을 수행하였다.

4. 조선시대 석회 모르타르 제작 및 평가결과

4-1. 소성실험 결과

색상별 석회석에 대한 XRF 성분분석을 실시하였다. 흑색 석회석(LS-D)은 C.I.가 0.77로 가장 높은 수경성을 지닐 것으로 보이며 NHL 5의 범주에 속하는 것으로 나타났다. 그 밖의 백색, 황색, 청색 석회석은 C.I.가 0.3보다 낮게 나타나 수경성을 띠지 않을 것으로 판단되며 각각 백색, 청색, 황백색 석회석은 CaO 함량 48% 이상의 고품위 석회석으로 구별되었다. 흑색 석회석의 경우 CaO 함량 43.4%로 저품위 석회석에 속하며 점토질인 이산화규소(SiO₂)의 함량이 12.5%로 높게 나타났다.

표 4. 석회석 종류에 따른 화학조성

| Sample code | Chemical compositions (wt%) | | | | | C.I. |
|-------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | |
| LS-A | 0.35 | 0.13 | 0.10 | 55.05 | 0.73 | 0.02 |
| LS-B | 2.33 | 0.19 | 0.68 | 48.49 | 5.04 | 0.12 |
| LS-C | 0.71 | 0.16 | 0.15 | 55.18 | 0.38 | 0.04 |
| LS-D | 12.49 | 1.69 | 0.70 | 43.47 | 3.16 | 0.77 |

색상별 석회석의 XRD 분석결과, 청색 석회석(LS-B)과 흑색 석회석(LS-D)에서 석영(quartz) 피크가 높게 나타나 점토질을 함유한 것으로 보이며, 대부분 석회석(calcite, CaCO₃)으로 이루어진 것을 확인할 수 있었다.

색상별 석회석에 대한 시차열중량분석을 통한 광물상 분석을 실시한 결과, 600°C 이상에서 CaCO₃의 분해에 의한 무게손실이 공통적으로 나타났으며, 흑색 석회석(LS-D)의 경우 석영의 광물상 변화에 의한 발열반응이 관찰되었다.

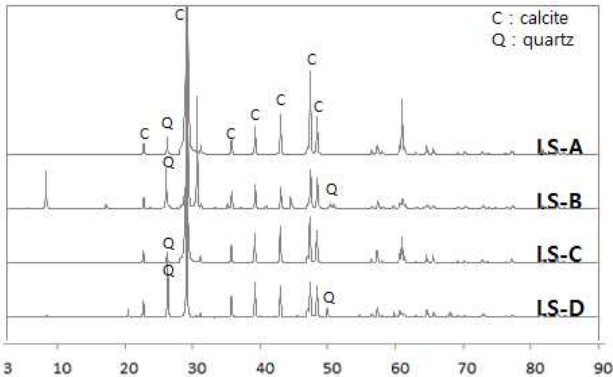


그림 3. 석회석 종류에 따른 XRD 분석결과 (LS-A: 백색, LS-B: 청색, LS-C: 황색, LS-D: 흑색 석회석)

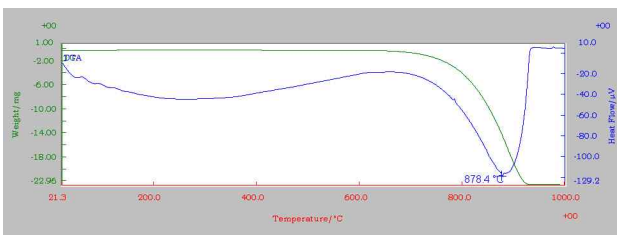


그림 4. 석회석의 TG-DTA 분석결과 (LS-A)

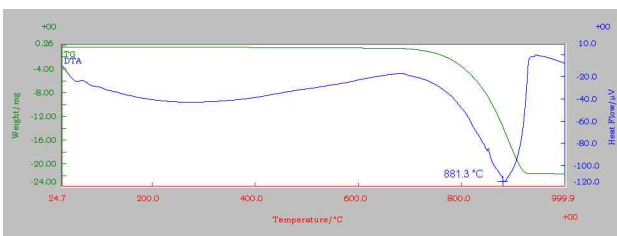


그림 5. 석회석의 TG-DTA 분석결과 (LS-B)

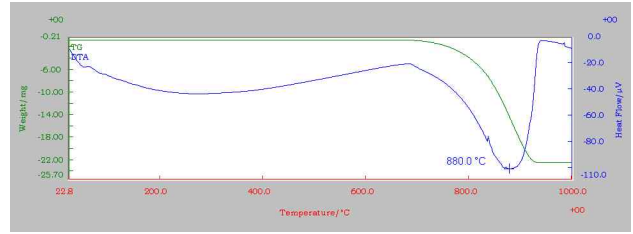


그림 6. 석회석의 TG-DTA 분석결과 (LS-C)

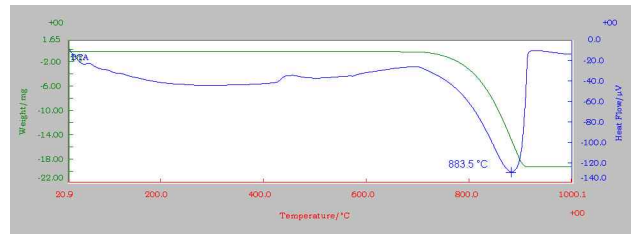


그림 7. 석회석의 TG-DTA 분석결과 (LS-D)

4-2. 수화반응 결과

색상별 석회석을 소성한 후 공기 중 급랭한 석회석에 대하여 Sample : Water = 1 : 4로 물에 침지시킨 후 더 이상 수화열이 발생하지 않을 때 건조기에서 105°C로 건조시켰다. 수화반응 전과 후 색상 차이가 발생하였으며 전체적으로 수화반응 후 백색도가 증가하였다. 수화반응이 완료된 시료에 대하여 소석회의 생성 여부를 판단하기 위해서 XRD 분석을 통해 광물상을 분석하였다. 흑색 석회석과 청색 석회석의 소석회에서 클링커-belite(C₂S)가 생성된 것을 확인할 수 있었다. 흑색 석회석의 소석회(HL-D)가 천연 수경석 석회(NHL) 제조용 저품위 석회석으로 적합할 것으로 판단된다.

수화반응시킨 소석회에 대한 시차열중량분석을 통한 광물상 분석을 실시한 결과, 600°C 이상에서 CaCO₃의 분해에 의한 미량의 무게손실과 흡열반응이 공통적으로 나타났으나 대부분 500°C 부근에서 감도가 높은 흡열피크가 관찰되어 대부분 소석회로 이루어진 것을 알 수 있다.

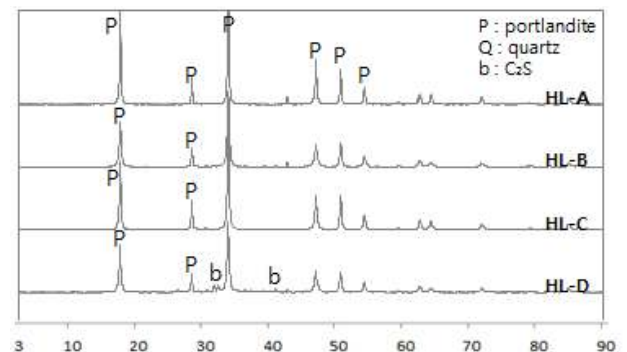


그림 8. 소석회 종류에 따른 XRD 분석결과 (HL-A: 백색, HL-B: 청색, HL-C: 황색, HL-D: 흑색 석회석)



그림 9. 수화반응 후 색상 변화

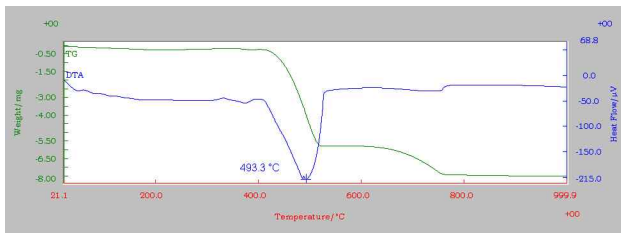


그림 10. 석회석의 TG-DTA 분석결과 (HL-A)

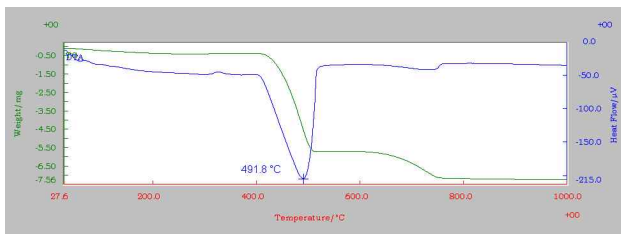


그림 11. 석회석의 TG-DTA 분석결과 (HL-B)

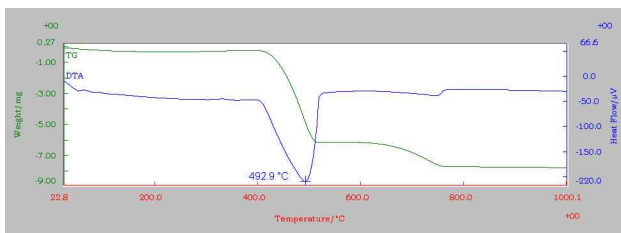


그림 12. 석회석의 TG-DTA 분석결과 (HL-C)

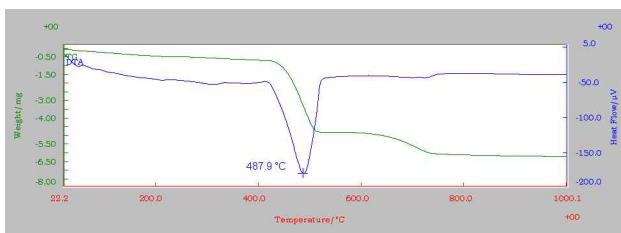


그림 13. 석회석의 TG-DTA 분석결과 (HL-D)

색상별 석회석의 소성실험을 통하여 제작된 소석회로 모르타르를 제작하여 압축강도를 평가하였다. 압축강도 측정은 양생기간 7일·28일·56일·84일을 기준으로 진행되었으며, 압축강도는 3.07MPa로 LS-C(황백색 석회석)이 가장 높았다. 전체적으로 양생기간이 증가할수록 강도가 증가되는 장기강도 발현 경향이 나타났으며 특히, 클링커 C₂S를 함유한 천연 수경성 석회인 LS-D(흑색 석회석)와 LS-B(청색 석회석)의 경우 강도가 양생 84일부터 높은 폭으로 강도가 증가하였다. LS-A와 LS-C의 경우 양생기간이 늘어날수록 강도의 증가폭이 줄어들면서 수렴하는 경향이 나타났다.

제품화된 프랑스 S사 천연 수경성 석회의 경우, 본 연구와 동일한 배합비로 제작하였을 때 양생기간에 따라 NHL 2는 7일 0.47MPa, 28일 1.25MPa, 6개월 2.88MPa, 12개월 2.90MPa, 24개월 2.75MPa의 강도가 나타난다. NHL 3.5 또한 압축강도가 각각 0.53MPa, 1.34MPa, 3.94MPa, 3.9MPa, 3.97MPa로 나타나며, NHL 5의 경우 0.88MPa, 1.5MPa, 5.31MPa, 6.5MPa, 7.8MPa로 나타난다.¹³⁾ 천연 수경성 석회의 경우 장기강도 발현이 이루어지기 때문에 양생 초기에는 6MPa 이하의 낮은 강도로 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 제작된 천연 수경성 석회(LS-D)의 경우 장기간의 강도증진이 이루어질 것으로 추정된다.

고문헌상에 기록된 천연포졸란인 소성기와 부스러기를 배합비 1(LS-D, Hydrated lime) : 2(Aggregate) : 1(Traditional roof tile powder)의 중량비로 배합한 후 항온습실에서 기건양생 28일 후의 압축강도를 측정하여 비교분석한 결과, 골재를 표준사를 이용한 시험체보다 소성기와 부스러기를 사용한 시험체가 12% 더 높은 압축강도 수치가 나타났다.

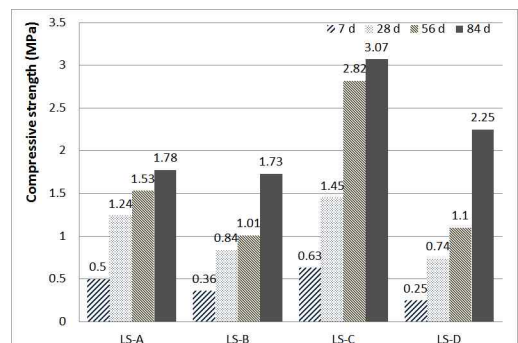


그림 14. 양생기간에 따른 LS-A, LS-B, LS-C, LS-D 모르타르의 압축강도 (7일, 28일, 56일, 84일)

4-3. 모르타르 실험 결과

(1) 석회석 종류와 첨가제에 따른 모르타르 물성평가

13) Saint Astier사, *Mortar Tests - Mixing Ratio 1:3*
<http://www.limes.us/wp-content/uploads/2013/02/MortarTests-MixingRatio1to3.pdf>

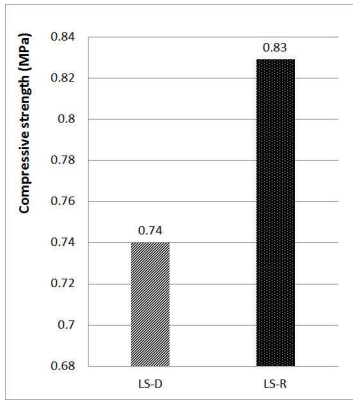


그림 15. LS-D, LS-R 모르타르의 압축강도 (28일 양생기간)

네 종류의 석회 모르타르에 대한 미세구조 관찰을 위하여 주사전자현미경 관찰을 실시하였다. 시료 모두 공극이 많고 치밀하지 못한 상태로 관찰되었으며, 구상의 탄산칼슘이 곳곳에 관찰되며 탄산화가 진행 중인 것으로 관찰되었다. 모르타르 LS-A, LS-B, LS-C는 그물망조직과 침상의 조직이 관찰되지 않아 C-S-H 수화물질이 형성되지 않는 것으로 관찰되었으며 모르타르 LS-D의 경우 일부에서 그물망조직이 관찰되었으나 발달정도가 약하였다.

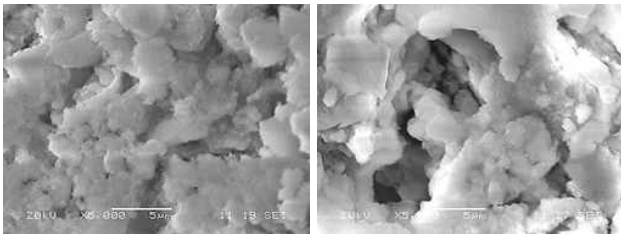


그림 16. 석회 모르타르의 SEM 관찰결과(LS-A, X5,000) (좌)
그림 17. 석회 모르타르의 SEM 관찰결과(LS-B, X5,000) (우)

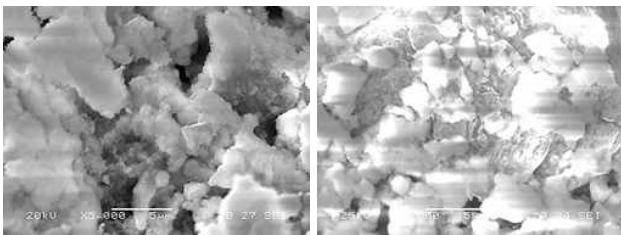


그림 18. 석회 모르타르의 SEM 관찰결과(LS-C, X5,000) (좌)
그림 19. 석회 모르타르의 SEM 관찰결과(LS-D, X5,000) (우)

(2) 천연 수경성 석회의 W/L 비에 따른 강도평가
천연 수경성 석회(LS-D)에 대한 석회 대비 혼합수비에 따른 강도평가 실시하였다. 천연 수경성 석회 모르타르의 혼합수비(W/L) 50%, 60%, 70%, 80%로 조절하여 압축강도를 측정하였다. 혼합수비(W/L) 50%, 60%인 LD-A와 LD-B는 점도가 약하여 시공성이 불량하였다.

혼합수비(W/L) 70%와 80%인 LD-C와 LD-D는 압축강도가 약 0.74~0.79MPa로 비슷한 수치로 나타났다. 혼합수량이 증가할수록 압축강도가 증가하였으나 80% 이상부터는 강도가 약해지는 경향이 나타났다. 흑색 석회석으로 제작한 천연 수경성 석회는 시공성과 강도를 고려하면 70~80%의 혼합수비가 적합할 것으로 사료된다.

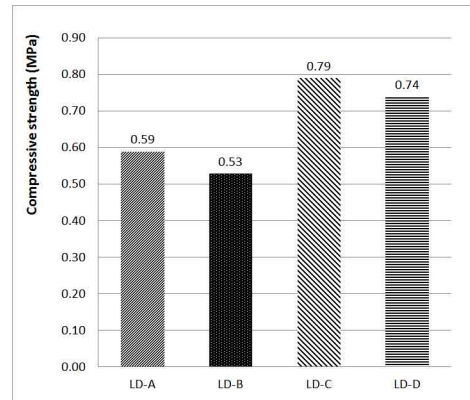


그림 20. 혼합수 비율에 따른 석회 모르타르의 압축강도 (W/L%: 50%, 60%, 70%, 80%)

5. 고찰 및 결론

본 연구에서는 고문헌 조사를 통하여 조선시대 석회의 제작기술을 연구하고, 이를 바탕으로 조선시대 조적용 석회를 재현하기 위한 석회석 소성실험과 모르타르 제작평가를 하였으며, 연구결과는 다음과 같다.

조선시대에는 석회석에 대한 선별기준과 적정 소성 온도 기준이 있었으며, 다양한 첨가물과 배합방법을 통하여 강도를 개선하고자 하였음을 알 수 있다. 특히 석회석의 경우 흑색과 청색 석회석을 선호하였는데, 이는 국내 저품위 석회석의 색상과 유사하다. 국내 석회석은 점토질을 함유한 저품위 석회석이 대부분이고 노천채광 방식으로 채광이 용이하므로 조선시대에 저품위 석회석을 사용하였을 가능성이 있다.

고문헌상에 나타나는 석회석 선별기준에 따라 국내의 색상별 석회석을 고온에서 소성하여 모르타르를 제작하고 이를 평가하였다. 1200℃의 고온에서 소성된 석회석들 중 황색과 흑색 석회석의 경우 수화반응을 거친 소석회에서 장기적 강도발현 특성을 지닌 클링커 C₂S가 생성되는 것을 확인할 수 있었다. 초기강도는 고품위 석회석에 속하는 백색 석회석과 황색 석회석을 이용한 모르타르가 높게 나타났으나 양생기간이 길어질수록 압축강도의 증가폭이 감소하고, 3MPa의 강도로 수렴하는 일반적인 소석회 모르타르의 강도발현 경

향이 나타났다. 이에 반해 천연 수경성 석회(NHL 5) 기준에 속하는 흑색과 청색 석회석을 이용한 모르타르는 지속적으로 강도가 증가하는 경향이 나타났으며, 장기간 양생시 높은 강도가 발현될 것으로 추정된다. 84일간의 양생기간으로 장기적 강도발현 특성을 규명하기에는 어려움이 있으나 클링커 C₂S가 생성되어 있고 강도 증가양상이 유럽의 천연 수경성 석회의 강도 증가 양상과 유사하기 때문에 점진적으로 강도가 증가할 것으로 판단된다.

국내의 흑색 석회석을 이용하여 제작한 모르타르는 천연 수경성 석회(NHL 5) 기준에 적합한 성분조성비를 지니고 있었으며, 고온소성시 클링커 C₂S가 생성되어 장기강도 발현 가능성이 확인되었다. 흑색 석회석으로 제작한 석회의 경우 혼합수 비율(W/L%)이 70~80%일 때 강도가 가장 높게 나타나는 것을 알 수 있었으며, 첨가물로 고문헌에 기록된 천연포졸란인 소성기와 가루를 첨가한 결과 12%의 강도 향상 효과를 확인할 수 있었다. 고문헌에 기록되어 있는 혼화제는 매우 다양하며 석회 모르타르에 첨가되었을 경우 강도 향상, 방수 기능, 작업성 향상 등 다양한 기능이 향상될 수 있다. 하지만 이러한 혼화제의 특성들은 원료인 석회의 제작공정에 따라 크게 좌우되기 때문에 우선적으로 원료에 대한 연구가 선행되어야 할 것이다.

본 연구에서는 조선시대의 석회석 선정기준과 소성 방법을 바탕으로 강도가 요구되는 조적용 석회의 복원 방안에 대한 기초연구를 진행하였다. 아직까지 문화재에 사용되는 석회 모르타르는 기준이 명확하지 않으며 조적용으로는 강도가 부족하다. 석회의 원료에 대한 과학적 분석 연구는 기초단계에 있으며, 문화재의 복원을 위한 재료의 진정성을 확보하기 위해서는 전통 석회의 제작기법에 대한 연구가 지속적으로 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 이권영, 「조선후기 관영건축공사의 灰미장재와 공법에 관한 연구 -營建儀軌의 油灰, 水灰, 櫟上塗灰를 중심으로-」, 건축역사연구, 18권, 4호, 2009
2. 권기혁·유혜란, 「조적조 건축물의 석회 모르타르 특성에 관한 실험적 연구」, 구조물진단학회지, 13권, 5호, 2009
3. 박철우·이호일·이권영, 「친환경 건축재료로서 전통 유회(油灰)의 물성에 관한 실험적 연구」, 대한건축학회논문집(구조계), 28권, 7호, 2012

4. 박철우·임남기·이권영, 「친환경 미장재료로서 전통 수회(水灰)의 물성에 관한 실험적 연구」, 대한건축학회논문집(구조계), 30권, 7호, 2014
5. 백철승, 「소형 회전형 소성로를 사용한 저품위석회석 소성 연구」, 광운대학교 대학원 석사학위논문, 2012
6. 김정아, 「석회석의 수화 조건과 생성연대가 아라고나이트 침강성탄산칼슘의 합성 특성에 미치는 영향」, 인하대학교 대학원 석사학위논문, 2006
7. 노진환·오성진·김경진, 「국내산 고품위 석회석의 광물상 및 광물특성에 관한 응용광물학적 연구」, 한국광물학회지, 17권, 4호, 2004
8. 조진상, 「천연수경성석회를 이용한 페이스트 및 모르타르의 물리·화학적 특성」, 강원대학교 대학원 박사학위논문, 2013
9. 문기연, 「무기질 혼화재 첨가에 따른 국내산 천연 수경성 석회의 수화특성」, 한국교통대학교 대학원 석사학위논문, 2015
10. Robert Michael Heathcote Lawrence, *A Study of carbonation in non-hydraulic lime mortars*, University of Bath, 2006
11. Jessica Snow and Clare Torney, *Lime Mortars in Traditional Buildings*, Historic Scotland, 2014
12. A. El-Turki, R.J. Ball, G.C. Allen, *The Influence of relative humidity on structural and chemical changes during carbonation of hydraulic lime*, Cement and Concrete Research, Vol.37, Iss.8, 2007
13. Sara Goñ et al, *Quantitative study of hydration C₃S and C₂S by thermal analysis evaluation and composition of C-S-H gels formed*, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol.102, Iss.3, 2010
14. J. Lanasa et al, *Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars*, Cement and Concrete Research, Vol.34, Iss.12, 2004
15. Rachel Chan and Vivek Bindiganavile, *Toughness of fibre reinforced hydraulic lime mortar. part-1: quasi-static response*, Materials and Structures, Vol.43, Iss.10, 2010
16. Lanzon M. and Garcia-Ruiz P.A., *Deterioration and Damage Evaluation of Rendering Mortars Exposed to Sulphuric Acid*, Materials and Structures, Vol.43, Iss.3, 2010

접수(2016. 4. 15)
수정(1차: 2016. 5. 17)
게재확정(2016. 5. 25)