석회 종류와 배합비 별 문화재 보수용 석회 모르타르의 초기거동특성과 수축특성 연구

Initial Behavior and Shrinkage Properties of Lime Mortars for Restoration of Cultural Heritage According to the Mixing Ratio

남병직¹, 노상균², 김은경¹, 안선아¹, 강소영^{1,*}

¹국립문화재연구소 복원기술연구실, ²한국건설생활환경시험연구원 건설본부

Byeong Jik Nam¹, Sang Kyun Noh², Eun Kyung Kim¹, Sun Ah Ahn¹, So Yeong Kang^{1,*}

¹Restoration Technology Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon 34122, Korea

²Construction Division, Korea Conformity Laboratories, Cheongju 28115, Korea

Received October 15, 2020
Revised November 02, 2020
Accepted November 12, 2020

*Corresponding author

E-mail: soyeong.kang@korea.kr
Phone: +82-42-860-9349

Journal of Conservation Science
2020;36(6):456-474

<https://doi.org/10.12654/JCS.2020.36.6.02>

pISSN: 1225-5459, eISSN: 2287-9781

© The Korean Society of
Conservation Science for Cultural
Heritage

This is an Open-Access article distributed
under the terms of the Creative Commons
Attribution Non-Commercial License
(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted
non-commercial use, distribution, and
reproduction in any medium, provided
the original work is properly cited.

초 록 본 연구는 문화재 보수에 사용되는 소괴 소석회, 분말 소석회, 시판 소석회를 대상으로 배합비에 따른 석회 모르타르의 유동성, 응결시간 및 수축율을 비교하였다. 유동성 시험 결과, 문화재 조적용 석회 모르타르의 최적 배합수 비율은 소괴 소석회 8~10%, 분말 소석회 10~18%, 시판 소석회 17~40%의 범위로 나타났다. 응결시간과 수축율 분석 결과, 문화재수리표준 품셈에 기술된 전돌벽쌓기(습식) 대비 종결시간비는 시판 소석회(0.4) < 분말 소석회(5.6) < 소괴 소석회(5.7)의 순으로, 수축율은 소괴 소석회(1.1) < 분말 소석회(1.2) < 시판 소석회(3.0)의 순으로 나타났다. 물리·화학적 특성 분석 결과, 소석회의 입자크기가 커질수록 최적 배합수 함량은 낮아졌고 응결시간은 지연되며 수축율은 감소하였다. 이와 같은 결과는 향후 건축문화재의 수리·복원 현장에 사용되는 석회 모르타르의 초기거동과 수축특성을 예측하는데 기여할 것으로 판단된다.

중심어 석회 모르타르, 배합비, 유동특성, 응결특성, 수축특성

ABSTRACT This study investigated the initial behavior (flowability and setting properties) and shrinkage characteristics of lime mortar, based on the mixing ratio of hydrated lime (lump, powder) and commercial lime, which is primarily used for repairing and restoring cultural assets. The flowability showed that the optimum mixing water contents of the masonry lime mortar were 8~10% for the lump hydrated lime, 10~18% for the powdered hydrated lime, and 17~40% for the commercial hydrated lime. The results of the setting and shrinkage analysis showed that the average final setting time ratio compared to the standard of cultural asset repair was in the increasing order of commercial hydrated lime(0.4) < powder hydrated lime(5.6) < lump hydrated lime(5.7). Moreover, the average shrinkage ratio was ordered as lump hydrated lime(1.1) < powder hydrated lime(1.2) < commercial hydrated lime(3.0). The analysis of the physical and chemical characteristics of hydrated lime showed that the optimum mixing water content was reduced as the particle size of the lime increased, thus delaying the setting time and decreasing the length change rate (shrinkage). These results are expected to contribute to the prediction of the initial behavior and shrinkage characteristics of mortars using handmade and commercial lime during repair and restoration work on cultural, heritage buildings.

Key Words Lime mortar, Mixing ratio, Flowability properties, Setting properties, Shrinkage properties

1. 서론

석회는 인류가 고대부터 오랜 기간 사용해온 전통 건축 재료로서, 19세기 포틀랜드시멘트의 출현으로 점차 사용량이 줄어들었으나 1980년대 이후 환경 친화적 건축 재료가 다시금 부각되면서 유럽을 중심으로 다양한 석회계 모르타르가 개발되어 상용화되었다. 21세기는 급격한 경제성장과 무분별한 산업화로 지구환경오염의 가속화가 심각한 문제로 대두되었으며, 2005년 기후변화협약 이행을 위한 교토의정서의 공식발효 및 2007년 IPCC 보고서의 발표 이후 온실가스 감축과 자원고갈을 막기 위한 전 세계적 노력들이 진행되고 있다. 또한 온실가스의 주범으로 알려진 이산화탄소 발생 산업에 대한 규제가 강화되어 현대 건축분야에서도 시멘트 생산과정에서 발생하는 이산화탄소를 저감하기 위한 기술들이 연구되었고, 이에 비소성시멘트, 저온소성시멘트, 석회 모르타르 등이 대안재료로 제시된 바 있다(Hwang and Kang, 2010; Kang *et al.*, 2019b).

석회는 석회석의 소성을 통해 얻어진 탄산칼슘(CaCO_3)의 산화물로 통상 생석회(CaO)와 소석회(Ca(OH)_2)로 구분된다. 석회석은 $900 \sim 1,000^\circ\text{C}$ 로 소성하면 이산화탄소가 제거되면서 백색이나 회색의 생석회가 생성된다. 생석회는 물과 반응 시 다량의 열과 가스를 발생시키면서 미세한 분말의 소석회가 된다. 소석회는 이산화탄소와 반응하여 탄산칼슘으로 변환된다. 이렇듯 석회는 폐기물이 발생하지 않는 순환형 친환경재료로 내구성은 부족하지만 다양한 장점을 가진 건축 재료이다. 석회 경화체는 다량의 모세공극을 형성하고 있어 통기성 및 습도조절 기능이 우수하고, 공기층 형성에 의한 단열성의 확보, 내외벽 온도차에 의한 벽면 결로 현상을 방지한다. 수산화칼슘(Ca(OH)_2)의 수산기는 산화력이 높아 냄새물질 및 유해가스를 분해하며, 세균의 세포막을 파괴하여 활동을 억제하며, 석회 재료 자체의 높은 알칼리도(pH)에 의해 곰팡이류 및 대장균의 서식을 억제하는 효과가 있다. 또한 석회는 시멘트계에 비해 건조수축 변이에 의한 크랙 발생율이 적으며 장기적인 탄산화 작용(대기 중의 이산화탄소와 결합)에 의해 내구성이 점차 증진되며, 발생된 크랙 역시 자기회복력이 있는 것으로 보고되었다(Kim *et al.*, 2006).

이론적으로 생석회의 소화반응에 필요한 물의 양은 생석회 질량의 약 32%이나, 생석회 소화 시 물비가 높을수록 소석회의 평균 입자크기가 작아지며 입자분포는 균질해진다(Kang *et al.*, 2019a). 또한 7일간 숙성시킨 생석회를 이용하여 석회 모르타르를 만들 경우, 미장에 적절한 작업성을 확보하기 위한 생석회와 물의 최적비율을 5:6(질

량비 기준)으로 제안하였다(Park *et al.*, 2014). 모르타르의 배합비는 건축구조기준(2017) 및 모르타르 압축강도 실험규격(ASTM C109/C109M:16a, KS L 5105)에서 배합비(시멘트:모래)를 1:2.5~1:3(질량비 기준)으로 규정하고 있다. 또한 근대 조적식 건축물을 수리·복원하면서 확보한 모르타르와 조적개체의 성분분석 결과, 명동성당, 용산신학교 및 원효로성당의 경우 배합비[석회(CaCO_3):규사(마사토)]를 1:1~1:3으로 사용한 것으로 추정하였다(Kim, 2002; 2004). 「문화재수리표준품셈(2019)-전돌벽쌓기(습식)」은 배합비(소석회:시멘트:모래)를 1:0.2:4.9(질량비 기준)로 규정하고 있다.

우리나라는 일제강점기와 근현대화 과정을 거치면서 문화재 수리·복원에 사용되는 건축 재료의 전통 제조법과 시공법이 대부분 단절되었다. 특히 석회류는 문화재의 기초, 기단, 미장, 지붕, 전 공사 등 다양한 분야에서 사용되는 건축 재료로 용도에 따른 재료적 특성을 파악하고 구체적인 시공기준 마련이 필요한 상황이다. 이에 본 연구에서는 문화재 수리·복원에 주로 사용되는 소괴 소석회와 분말 소석회, 시판 소석회를 대상으로 배합비에 따른 석회 모르타르의 초기거동특성(유동특성, 응결특성)과 수축특성을 시험하여 현장적용을 위한 기초자료로 제시하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시험재료

본 연구에서는 석회 모르타르 제작을 위한 결합재료 소괴 소석회와 분말 소석회, 시판 소석회 세 종류를 사용하였다. 소괴 소석회는 현재 궁능문화재 수리·복원 현장(문화재청 궁능유적본부 직영보수단)에서 사용되고 있는 재료로 소괴 생석회(현대석회, CaO 85% 이하)를 건식소화시킨 후 7일, 1개월, 3개월, 6개월, 12개월간 숙성하였으며, 1차로 10 mm, 2차로 3 mm 체로 걸러 불순물을 제거하였다(Figure 1A). 분말 소석회는 분말 생석회(백광소재, CaO 90%)를 건식소화시킨 후 사용하였다(Figure 1B). 예비실험 결과 소괴 소석회와 분말 생석회를 소화시킬 때 필요한 물의 양은 현장 작업성을 반영하여 생석회와 물의 배합비를 1:1(질량비 기준)로 넣고 소석회를 제조하였다. 시판 소석회는 분말형으로 판매되고 있는 소석회(백광소재, CaO 70%)를 사용하였다(Figure 1C). 골재는 KS L ISO 679에 규정된 모르타르 강도시험용 표준사를 사용하였는데(Figure 1D), KS A ISO Guide 34에 의해 한국인정기구(KOLAS)로부터 공인받은 표준물질로 SiO_2 함량 98% 이상, 함수율 0.2% 미만이며, 입도분포는 Table 1과 같다.

Figure 1. Making hydrated limes and construction materials for lime mortars. (A) Hydrated lime from quick lime lumps, (B) Hydrated lime from quick lime powder, (C) Commercial hydrated lime, (D) ISO standard sand.

Table 1. Particle size distribution of ISO standard sand (KS L ISO 679)

Size of mesh(mm)	Cumulative residue(%) of mesh
2.00	0
1.60	7±5
1.00	33±5
0.50	67±5
0.16	87±5
0.08	99±1

2.2. 시험방법

2.2.1. 시험설계

본 시험에서 모르타르의 결합재(소석회)와 골재(모래) 배합비는 3:1, 2:1, 1:1, 1:2, 1:3으로 설정하였으며, 문화재

수리표준품셈(2019) 내 전돌벽쌓기(습식)에서 제안한 배합비(석회:시멘트:모래 = 1:0.2:4.9)를 비교 기준으로 삼았다. 1단계로 유동성 시험을 통해 석회 모르타르의 유동특성을 분석하여 소석회의 종류와 배합비에 따른 적정 배합수의 범위를 결정하였고, 이를 바탕으로 조적용 석회 모르타르 제작을 위한 최적 배합수 비율을 도출하였다. 2단계로 최적 배합수 비율을 적용한 석회 모르타르의 응결특성(초결시간, 종결시간)과 수축특성(길이변화율)을 분석하였다. 모르타르 성능평가를 위한 시험방법과 배합비는 Table 2, 3과 같다.

2.2.2. 모르타르 혼합

모르타르 혼합은 KS L 5109를 기준으로 시험하였다. 패들 및 혼합용기는 시멘트에 침식되지 않는 스테인리스강제이며, 혼합용기의 용량은 4.73 L를 사용하였다. 혼합

Table 2. Standard procedure of Experiment assessment

Method	Documents
Flow table test	KS L 5111 Flow table for use in tests of hydraulic cement
	KS L 5220 Dry ready mixed cement mortar
	KS L 5105 Testing method for compressive strength of hydraulic cement mortars
Setting time	KS L ISO 9597 Determination of setting time and soundness of cements
Length change	KS F 2424 Standard test method for length change of mortar and concrete

Table 3. Mixing proportion of lime mortars

No.	Sample name	Hydrated lime		Mixing ratio (by mass)		
		Preparations	Slaking period	Binder		Aggregate Sand
				Lime	Cement	
1	LL(7D)-1	Quick lime lumps	7 days	3	-	1
2	LL(7D)-2			2	-	1
3	LL(7D)-3			1	-	1
4	LL(7D)-4			1	-	2
5	LL(7D)-5			1	-	3
6	LL(1M)-1	Quick lime lumps	1 month	3	-	1
7	LL(1M)-2			2	-	1
8	LL(1M)-3			1	-	1
9	LL(1M)-4			1	-	2
10	LL(1M)-5			1	-	3
11	LL(3M)-1	Quick lime lumps	3 months	3	-	1
12	LL(3M)-2			2	-	1
13	LL(3M)-3			1	-	1
14	LL(3M)-4			1	-	2
15	LL(3M)-5			1	-	3
16	LL(3M)-6			1	0.2	4.9
17	LL(3M)-7			1.2	-	4.9
18	LL(6M)-1	Quick lime lumps	6 months	3	-	1
19	LL(6M)-2			2	-	1
20	LL(6M)-3			1	-	1
21	LL(6M)-4			1	-	2
22	LL(6M)-5			1	-	3
23	LL(12M)-1	Quick lime lumps	12 months	3	-	1
24	LL(12M)-2			2	-	1
25	LL(12M)-3			1	-	1
26	LL(12M)-4			1	-	2
27	LL(12M)-5			1	-	3
28	PL-1	Powdered hydrated lime	-	3	-	1
29	PL-2			2	-	1
30	PL-3			1	-	1
31	PL-4			1	-	2
32	PL-5			1	-	3
33	PL-6			1	0.2	4.9
34	PL-7			1.2	-	4.9
35	CL-1	Commercial hydrated lime	-	3	-	1
36	CL-2			2	-	1
37	CL-3			1	-	1
38	CL-4			1	-	2
39	CL-5			1	-	3

기는 패들이 공전과 동시에 자전 운동을 하는 전동 혼합기를 사용하였다. 제1속(저속)은 패들을 62 rpm으로 공전하면서 140 ± 5 rpm으로 자전시켰으며, 제2속(고속)은 패들을 125 rpm으로 공전하면서 285 ± 10 rpm으로 자전시켰다. 시험절차는 혼합용기에 결합재, 잔골재 및 배합수 전

량을 넣고 저속으로 60초, 고속으로 30초간 혼합하였다. 다음으로 90초간 혼합기를 정지시킨 후, 패들과 용기의 측면에 부착된 모르타르를 스크레이퍼로 긁어서 용기 가운데로 모으고 나머지 시간은 용기의 뚜껑을 덮어 둔다. 이후 고속으로 60초간 혼합하였다.

Figure 2. Flow table test of lime mortars. (A) Preparation of test sample, (B) Identification of a flow state.

Figure 3. Setting time of lime mortars. (A) Measurement of test sample(initial setting time), (B) Measurement of test sample(final setting time), (C) Comparison of the conditions of mortars on initial and final setting time.

2.2.3. 유동특성

문화재 현장에서 사용되는 조적용 석회 모르타르의 유동성 값과 예비시험을 통해 최적 유동성 값을 135 ± 15 mm로 설정하였다. 최적 유동성 값 확보를 위하여 조건별로 5회씩 배합수 범위를 조절하였으며, 배합수 비율(%)은 결합재와 잔골재의 총량에 대한 배합수의 질량 백분율로 결정하였다. 실험절차는 유동성 시험 틀을 유동성 시험 테이블의 중앙에 놓고, 모르타르를 틀에 2층으로 나누어 채워 넣는다. 이 때 모르타르의 각 층은 탬퍼로 20회씩 다지며, 틀의 윗면에 남아있는 모르타르는 곧은 날로 제거한다. 틀을 수직으로 들어 올린 후 플로 테스트 테이블을 12.7 mm 높이로 9초 동안 15회 낙하시켜 모르타르가 퍼지는 밀지름을 측정하였다. 시험은 온도 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 습도 $65 \pm 10\%$ 의 조건에서 실시되었다(Figure 2).

2.2.4. 응결특성

석회 모르타르의 응결특성을 파악하기 위하여 응결시간을 측정하였다. 응결시간 측정은 KS L ISO 9597에 준해 실험하였으며, 측정 도구는 초결침($\phi 1.13$ mm)과 종결침($\phi 5$ mm)을 사용하였다. 시험절차는 석회 모르타르를 유

리제 바닥판 위에 놓인 틀에 채워 넣고, 틀의 윗면에 남아있는 모르타르는 곧은 날로 제거한다. 모르타르 혼합 시 배합수를 가한 시점을 기준으로 모르타르의 응결상태에 따라 최소 20분에서 최대 12시간 간격으로 값을 측정하였다. 초결시간(initial setting time)은 초결침이 바닥판과의 거리가 4 ± 1 mm가 될 때를 기준으로 하였고, 종결시간(final setting time)은 종결침에 부착된 링이 시료에 자국을 남기지 못할 때를 기준으로 정의하였다. 시험은 온도 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 습도 $65 \pm 10\%$ 의 조건에서 실시되었다(Figure 3).

2.2.5. 수축특성

석회 모르타르의 수축특성을 파악하기 위하여 길이변화율을 측정하였다. 길이변화율 측정은 KS F 2424에 준해 실험하였다. 모르타르와 콘크리트 시험편의 길이 변화 측정법에는 시험편의 측면 길이 변화를 측정하는 콤퍼레이터 방법과 콘택트 게이지 방법, 시험편의 중심축의 길이 변화를 측정하는 다이얼 게이지 방법이 주로 사용된다. 예비시험 결과 석회 모르타르의 경우 시멘트와 콘크리트 시험편에 비해 비교적 정확도가 낮아 시험편 내부의 표점인 게이지플러그의 위치가 고정되지 않았다. 따라서

Figure 4. Length changes of lime mortars. (A) Measurement of test sample, (B) Shrinkage change of lime mortars.

본 실험에서는 매립형 게이지에 의한 데이터로거 방식으로 길이 변화율을 측정하였다. 실험절차는 $40 \times 40 \times 160$ mm 크기의 몰드 중앙에 매립형 게이지를 설치하고 모르타르를 채워 넣은 후 데이터로거에 연결하였다. 실험값은 모르타르를 몰드에서 탈형하지 않은 상태에서 1시간 간격으로 28일간 측정하였으며, 실험은 온도 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 습도 $65 \pm 10\%$ 의 조건에서 실시하였다(Figure 4).

2.2.6. 소석회의 물리·화학적 특성

결합재로 사용된 석회의 재료적 특성이 석회 모르타르의 물성에 미치는 영향을 파악하기 위해 소석회의 물리·화학적 분석을 실시하였다. 소석회의 주요 화학성분과 함량은 X-선 형광분석기(MXF-2400, Shimadzu, JPN)로 분석하였으며 동결 건조시킨 소석회를 bead로 제작한 후 maximum rating 50 kV, 100 mA, 4 kW, measuring rating 40 kV/ 70 mA, 2.8 kW 조건으로 분석하였다. 입자 분포와 평균 입자크기는 습식분산장치(Hydro 2000 S, Malvern instrument, GBR)가 장착된 입도분석기(Mastersizer 2000, Malvern instrument, GBR)를 이용하여 분석하였으며, 분산용매는 에틸알코올을 사용하였다. 분석시료는 마노막자로 미세하게 분쇄한 소석회 약 0.3 g을 에틸알코올 30 ml에 넣고 충분히 교반시킨 후 입도를 분석하였다. 분석 범위는 $0.02 \sim 2,000 \mu\text{m}$, 시료 주입 시 laser obscuration 범위는 16~18%, 1회 주입 시 10초간 5회 반복하여 분석하였고 15회 분석 후 평균값을 활용하였다. 공극률과 평균 기공 크기 및 겉보기 밀도는 수은압입법(MicroActive Autopore V 9600, Micromeritics, USA)으로 분석하였다. 수은 압입법의 분석범위는 50 nm - 900 μm , 수은의 압력범위는 0.1-60,000 psia, 수은 접촉각은 130° 로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유동특성

석회 모르타르 제작과정에서 배합수가 부족하면 점착성이 약해지고, 과량이 되면 결합재와 잔골재, 배합수 간에 재료분리가 발생할 수 있으므로 석회의 종류별 배합비에 따른 적정 배합수의 범위를 설정하는 것은 매우 중요하다. 본 실험에서는 유동성 시험을 통해 석회 모르타르의 적정 배합수 범위를 파악하고 현장조사 및 예비실험을 통해 설정한 조적용 석회 모르타르의 최적 유동성 값인 135 ± 15 mm에 적합한 최적 배합수 비율을 도출하였다. 분석 결과, 석회 모르타르의 배합수 비율은 석회의 종류와 배합비에 따라 변화하였다. 소괴 소석회의 적정 배합수 범위는 6~14%이고, 최적 배합수 비율은 7일 숙성 시 6~8%, 1, 3개월 숙성 시 8%, 6, 12개월 숙성 시 10%로 나타났다. 분말 소석회의 적정 배합수 범위는 6~20%이고, 최적 배합수 비율은 석회:모래 배합비의 골재량이 증가함에 따라(3:1~1:3) 18%에서 10%로 감소하는 양상을 보였다. 시판 소석회의 적정 배합수 범위는 16~46%, 최적 배합수 비율은 석회:모래 배합비의 골재량이 증가함에 따라(3:1~1:3) 40%에서 17%로 감소하였는데 이는 분말 소석회보다 큰 감소비율을 보인다. 문화재수리표준품셈 전돌벽쌓기(습식) 배합의 적정 배합수 범위는 10~14%, 최적 배합수 비율은 10~11%로 확인되었다(Table 4).

유동성 시험 결과에 선형, 지수, 거듭제곱, 로그 모델을 적용하여 회귀 모형을 추정하였으며, 결정계수(R^2)가 가장 큰 모델을 최적 회귀 모형으로 선정하였다. 소괴(7일, 1개월 숙성) 소석회는 선형, 시판 소석회는 거듭제곱, 그 외 소괴(3, 6, 12개월 숙성) 소석회, 문화재수리표준품셈 전돌벽쌓기(습식) 배합, 분말 소석회는 지수 모델로 나타나 본 실험에서는 동일 회귀 모형에 의한 전체비교를 위

모래 = 3:1~1:3) 회귀선의 기울기는 증가하였고, 숙성기간이 길어질수록 회귀선의 기울기 변화는 거의 없으나 최적 배합수 비율은 증가하였다. 분말 소석회의 경우 배합수 6~20% 구간에서 배합수의 증가에 따라 유동성 시험값이 증가하는 경향을 보였다. 골재량이 증가함에 따라

Figure 5. Flow properties of lime mortars.

Table 5. Regression analysis of mixing water and flow value

No.	Sample name	Hydrated lime		Regression equation (Exponential model)	R ²
		Preparations	Slaking period		
1	LL(7D)-1	Quick lime lumps	7 days	$y = 97.216e^{0.0541x}$	0.9900
2	LL(7D)-2			$y = 95.196e^{0.0562x}$	0.9825
3	LL(7D)-3			$y = 92.677e^{0.0579x}$	0.9933
4	LL(7D)-4			$y = 85.693e^{0.0617x}$	0.9933
5	LL(7D)-5			$y = 70.233e^{0.0753x}$	0.9950
6	LL(1M)-1	Quick lime lumps	1 month	$y = 87.735e^{0.0549x}$	0.9931
7	LL(1M)-2			$y = 89.599e^{0.0557x}$	0.9871
8	LL(1M)-3			$y = 86.003e^{0.0594x}$	0.9995
9	LL(1M)-4			$y = 79.129e^{0.0663x}$	0.9976
10	LL(1M)-5			$y = 72.151e^{0.0699x}$	0.9934
11	LL(3M)-1	Quick lime lumps	3 months	$y = 86.792e^{0.0517x}$	0.9968
12	LL(3M)-2			$y = 86.406e^{0.054x}$	0.9992
13	LL(3M)-3			$y = 86.585e^{0.0538x}$	0.9963
14	LL(3M)-4			$y = 79.92e^{0.0593x}$	0.9984
15	LL(3M)-5			$y = 70.09e^{0.0677x}$	0.9926
16	LL(3M)-6	Quick lime lumps	6 months	$y = 47.382e^{0.0974x}$	0.9895
17	LL(3M)-7			$y = 53.59e^{0.0879x}$	0.9939
18	LL(6M)-1			$y = 80.525e^{0.0464x}$	0.9888
19	LL(6M)-2			$y = 82.758e^{0.0462x}$	0.9854
20	LL(6M)-3			$y = 79.743e^{0.052x}$	0.9937
21	LL(6M)-4	Quick lime lumps	12 months	$y = 74.566e^{0.0571x}$	0.9994
22	LL(6M)-5			$y = 68.036e^{0.063x}$	0.9907
23	LL(12M)-1			$y = 80.205e^{0.0548x}$	0.9895
24	LL(12M)-2			$y = 80.811e^{0.0564x}$	0.9953
25	LL(12M)-3			$y = 81.407e^{0.058x}$	0.9990
26	LL(12M)-4	Powdered hydrated lime	-	$y = 76.012e^{0.0633x}$	0.9948
27	LL(12M)-5			$y = 67.383e^{0.0694x}$	0.9962
28	PL-1			$y = 70.238e^{0.0377x}$	0.9793
29	PL-2			$y = 66.363e^{0.0459x}$	0.9909
30	PL-3			$y = 66.103e^{0.0562x}$	0.9939
31	PL-4	Commercial hydrated lime	-	$y = 63.949e^{0.0726x}$	0.9955
32	PL-5			$y = 62.135e^{0.0806x}$	0.9942
33	PL-6			$y = 38.62e^{0.1175x}$	0.9752
34	PL-7			$y = 39.441e^{0.1152x}$	0.9998
35	CL-1			$y = 24.588e^{0.043x}$	0.9916
36	CL-2	Commercial hydrated lime	-	$y = 25.731e^{0.0467x}$	0.9598
37	CL-3			$y = 33.197e^{0.0519x}$	0.9824
38	CL-4			$y = 36.814e^{0.0666x}$	0.9845
39	CL-5			$y = 21.028e^{0.1114x}$	0.9945

(석회:모래 = 3:1~1:3) 회귀선의 기울기는 증가하였고, 최적 배합수 비율은 감소하였다. 시판 소석회의 경우 배합수 16~46% 구간에서 배합수의 증가에 따라 유동성 시험 값은 증가하는 경향성을 보였다. 골재량이 증가함에 따라 (석회:모래 = 3:1~1:3) 회귀선의 기울기는 증가하였고, 최적 배합수 함량은 감소하였다. 문화재수리표준품셈 전돌벽쌓기(습식) 배합의 경우 배합수 10~14% 구간에서 유동성 값은 증가하였고, 소피에 비해 분말 소석회 사용 시 회귀선의 기울기는 증가하였다. 시멘트 첨가에 따라 소피 소석회는 회귀선의 기울기가 증가하였고, 분말 소석회는 회귀선의 기울기 변화가 거의 없었다(Figure 5, Table 5).

3.2. 응결특성

석회 모르타르는 초결에서 응결이 시작되어 유동성이 없어지고 종결에서 응결이 완료되어 강도발현이 시작되므로, 응결특성을 파악하여 석회 모르타르의 적정 탈형 시간을 결정하는 것은 작업성과 내구성 예측 측면에서 중요하다. 따라서 본 실험에서는 석회의 종류와 배합비별 응결특성을 석회 모르타르의 응결시간(초결시간, 종결시간)으로 평가하였다.

초결시간 분석결과, 시판 소석회(1.3~2시간; 평균 1.6시간) < 표준품셈 전돌벽쌓기(습식) 배합(6시간) < 3개월, 6개월 숙성 소피 소석회(12~24시간; 평균 16.8시간) < 1개월 숙성 소피 소석회, 분말 소석회(12~24시간; 평균 19.2시간) < 7일 숙성 소피 소석회(24~36시간; 평균 28.8시간) < 12개월 숙성 소피 소석회(24~36시간; 평균 31.2시간)의 순으로 나타났다. 종결시간 분석결과, 시판 소석회(1.7~3시간; 평균 2.3시간) < 표준품셈 전돌벽쌓기(습식) 배합(6시간) < 3개월, 6개월 숙성 소피 소석회(24~36시간; 평균 28.8시간) < 1개월 숙성 소피 소석회(24~36시간; 평균 31.2시간) < 분말 소석회(24~48시간; 평균 33.6시간) < 7일 숙성 소피 소석회(24~60시간; 평균 40.8시간), 12개월 숙성 소피 소석회(36~48시간; 평균 40.8시간)의 순으로 나타났다. 석회 모르타르의 응결시간은 석회의 종류 및 배합비에 따라 변화하였다. 모든 석회 그룹에서 골재량이 증가(석회:모래 = 3:1~1:3)하면 초결시간과 종결시간이 단축되었고, 문화재수리표준품셈 전돌벽쌓기(습식) 배합의 경우 시멘트 첨가 시 초결시간 및 종결시간이 단축되었다. 석회 종류별 평균 종결시간을 검토했을 때, 배합비(석회:모래 = 3:1~1:3)은 시판 소석회(2.3시간) < 분말 소석회(33.6시간) < 소피 소석회(34.1시간)의 순으로, 배합비(석회:모래 = 1:1~1:3)은 시판 소석회(2.0시간) < 분말 소석회(28.0시간) < 소피 소석회(28.8시간)의 순으로

로 확인되었다(Table 6, Figure 6).

문화재수리표준품셈에서 제시하는 조적용 배합 시 확인된 종결시간(6시간)을 기준으로 석회 모르타르의 응결특성을 확인하였다. 배합비별 종결시간비[석회 모르타르/문화재수리표준품셈 전돌벽쌓기(습식) 배합]을 비교한 결과, 7일 숙성 소피 소석회는 3:1(10.00), 2:1(8.00), 1:1(6.00), 1:2(6.00), 1:3(4.00), 1개월 숙성 소피 소석회는 3:1(6.00), 2:1(6.00), 1:1(6.00), 1:2(4.00), 1:3(4.00), 3개월 숙성 소피 소석회는 3:1(6.00), 2:1(6.00), 1:1(4.00), 1:2(4.00), 1:3(4.00), 6개월 숙성 소피 소석회는 3:1(6.00), 2:1(6.00), 1:1(4.00), 1:2(4.00), 1:3(4.00), 12개월 숙성 소피 소석회는 3:1(8.00), 2:1(8.00), 1:1(6.00), 1:2(6.00), 1:3(6.00), 분말 소석회는 3:1(8.00), 2:1(6.00), 1:1(6.00), 1:2(4.00), 1:3(4.00), 시판 소석회는 3:1(0.50), 2:1(0.44), 1:1(0.39), 1:2(0.33), 1:3(0.28)로 나타났다. 결과를 종합했을 때 대부분의 석회 그룹에서 골재량이 증가할수록(석회:모래 = 3:1~1:3) 종결시간비는 감소하였고, 소피 소석회는 일부의 경우 배합비 1:1~1:3의 종결시간비의 변화가 거의 없었다.

석회 종류별 종결시간비를 비교한 결과, 배합비(석회:모래=3:1~1:3)은 시판 소석회(0.28~0.50; 평균 0.39) < 3개월 숙성 소피 소석회(4.00~6.00; 평균 4.80), 6개월 숙성 소피 소석회(4.00~6.00; 평균 4.80) < 1개월 숙성 소피 소석회(4.00~6.00; 평균 5.20) < 분말 소석회(4.00~8.00; 평균 5.60) < 7일 숙성 소피 소석회(4.00~10.00; 평균 6.80), 12개월 숙성 소피 소석회(6.00~8.00; 평균 6.80)의 순으로 증가하였다. 배합비(석회:모래=1:1~1:3)은 시판 소석회(0.28~0.39; 평균 0.33) < 3개월, 6개월 숙성 소피 소석회(4.00; 평균 4.00) < 1개월 숙성 소피 소석회(4.00~6.00; 평균 4.67), 분말 소석회(4.00~6.00; 평균 4.67) < 7일 숙성 소피 소석회(4.00~6.00; 평균 5.33) < 12개월 숙성 소피 소석회(6.00; 평균 6.00)의 순으로 확인되었다.

평균 종결시간비는 석회와 모래의 배합비가 3:1~1:3인 경우 시판 소석회(0.4) < 분말 소석회(5.6) < 소피 소석회(5.7)의 순이며, 배합비가 1:1~1:3일 때 시판 소석회(0.3) < 분말 소석회(4.7) < 소피 소석회(4.8)의 순으로 나타났다. 시판 소석회에 비해 소피 소석회와 분말 소석회의 종결시간비가 비교적 높으나, 입자 크기(소피형, 분말형)에 의한 특성 차이는 확인되지 않았다. 또한 소피 소석회는 숙성기간이 7일과 12개월의 경우 종결시간비가 비교적 높아 응결특성 측면에서는 1~6개월이 효과적인 숙성기간으로 확인되었다.

Table 6. Setting time of lime mortars

No.	Sample name	Hydrated lime		Initial setting time (hours)	Final setting time (hours)
		Preparations	Slaking period		
1	LL(7D)-1	Quick lime lumps	7 days	36	60
2	LL(7D)-2			36	48
3	LL(7D)-3			24	36
4	LL(7D)-4			24	36
5	LL(7D)-5			24	24
6	LL(1M)-1	Quick lime lumps	1 month	24	36
7	LL(1M)-2			24	36
8	LL(1M)-3			24	36
9	LL(1M)-4			12	24
10	LL(1M)-5			12	24
11	LL(3M)-1	Quick lime lumps	3 months	24	36
12	LL(3M)-2			24	36
13	LL(3M)-3			12	24
14	LL(3M)-4			12	24
15	LL(3M)-5			12	24
16	LL(3M)-6			6	6
17	LL(3M)-7			24	36
18	LL(6M)-1	Quick lime lumps	6 months	24	36
19	LL(6M)-2			24	36
20	LL(6M)-3			12	24
21	LL(6M)-4			12	24
22	LL(6M)-5			12	24
23	LL(12M)-1	Quick lime lumps	12 months	36	48
24	LL(12M)-2			36	48
25	LL(12M)-3			36	36
26	LL(12M)-4			24	36
27	LL(12M)-5			24	36
28	PL-1	Powdered hydrated lime	-	24	48
29	PL-2			24	36
30	PL-3			24	36
31	PL-4			12	24
32	PL-5			12	24
33	PL-6			6	6
34	PL-7			12	24
35	CL-1	Commercial hydrated lime	-	2.0	3.0
36	CL-2			1.7	2.7
37	CL-3			1.7	2.3
38	CL-4			1.3	2.0
39	CL-5			1.3	1.7

Figure 6. Setting properties of lime mortars.

3.3. 수축특성

석회 모르타르는 시공 후 배합수의 증발로 인한 건조 수축이 발생하여 조적개체와 모르타르 간 접착계면이 분리 될 수 있으므로, 석회의 종류별 배합비에 따른 수축특성을 파악하는 것이 필요하다. 따라서 본 실험에서는 석회의 종류와 배합비별 수축특성을 길이변화율(균열시작 시간에서의 최대 수축율)로 평가하였다.

평균 균열시작시간 분석결과, 3개월 숙성 소피 소석회는 사용한 표준품셈 전돌벽쌓기(습식) 배합(18시간) < 분말 소석회를 사용한 표준품셈 전돌벽쌓기(습식) 배합(20시간) < 시판 소석회(32.5~45.0; 평균 23시간) < 분말 소석회(20.0~32.5; 평균 27시간) < 6개월 숙성 소피 소석회(20.0~32.5; 평균 35시간) < 12개월 숙성 소피 소석회(15.0~30.0; 평균 38시간) < 3개월 숙성 소피소석회(35.0~45.0; 평균 40시간) < 1개월 숙성 소피 소석회(30.0~50.0; 평균 41시간) < 7일 숙성 소피 소석회(32.5~50.0; 평균 42시간)의 순으로 나타났다. 평균 길이변화율(수축율) 분석 결과, 3개월 숙성 소피 소석회를 사용한 표준품셈 전돌벽쌓기(습식) 배합(0.036%) < 6개월 숙성 소피 소석회(0.033~0.065; 평균 0.048%) < 1개월 숙성 소피 소석회(0.033~0.075; 평균 0.052%) < 7일 숙성 소피 소석회(0.026~0.091; 평균 0.063%) < 12개월 숙성 소피 소석회(0.043~0.082; 평균 0.064%) < 3개월 숙성 소피소석회(0.034~0.095; 평균 0.065%), 분말 소석회(0.042~0.096; 평균 0.065%) < 분말 소석회를 사용한 표준품셈 전돌벽쌓기(습식)(0.072%) < 시판 소석회(0.113~0.197; 평균 0.163%) 순으로 나타났다(Table 7, Figure 7).

석회 모르타르의 길이변화율은 석회의 종류와 배합비에 따라 변화하였다. 대부분의 석회그룹에서 골재량이 증가할수록 길이변화율은 감소하였으며, 문화재수리표준품셈 전돌쌓기(습식) 배합의 경우 시멘트 첨가 시 균열시작시간은 단축되나 길이변화율은 증가하였다. 분말 소석회의 경우 다른 석회와 달리 골재량의 증가에 따라 배합비 3:1에서 1:1까지는 길이변화율이 증가하였고, 배합비 1:1에서 1:3까지는 감소하는 경향을 보였다. 석회 종류별 평균 길이변화율 분석 결과, 배합비(석회:모래 = 3:1~1:3)은 소피 소석회(0.059%) < 분말 소석회(0.065%) < 시판 소석회(0.163%)의 순으로, 배합비(석회:모래 = 1:1~1:3)은 소피 소석회(0.046%) < 분말 소석회(0.076%) < 시판 소석회(0.144%)의 순으로 나타났다.

문화재수리표준품셈에서 제시하는 조적용 배합 시 확인된 길이변화율을 기준으로 석회 모르타르의 수축특성을 확인하였다. 배합비별 수축율비[석회 모르타르/문화재

수리 표준품셈 전돌벽쌓기(습식) 배합]을 비교한 결과, 7일 숙성 소피 소석회는 3:1(1.69), 2:1(1.60), 1:1(1.19), 1:2(0.90), 1:3(0.47), 1개월 숙성 소피 소석회는 3:1(1.39), 2:1(1.22), 1:1(0.85), 1:2(0.77), 1:3(0.61), 3개월 숙성 소피 소석회는 3:1(1.75), 2:1(1.56), 1:1(1.27), 1:2(0.82), 1:3(0.63), 6개월 숙성 소피 소석회는 3:1(1.20), 2:1(1.04), 1:1(0.87), 1:2(0.69), 1:3(0.60), 12개월 숙성 소피 소석회는 3:1(1.52), 2:1(1.40), 1:1(1.26), 1:2(0.99), 1:3(0.80)로, 분말 소석회는 3:1(0.78), 2:1(1.06), 1:1(1.77), 1:2(1.51), 1:3(0.92)로, 시판 소석회는 3:1(3.47), 2:1(3.64), 1:1(3.36), 1:2(2.52), 1:3(2.09)로 나타났다. 종합적으로 소피 소석회는 골재량이 증가할수록(석회:모래 = 3:1에서 1:3) 수축율비는 감소하였고, 배합비 1:1~1:3의 수축율비는 비교적 작게 나타났다. 반면 분말 소석회와 시판 소석회는 골재량이 증가할수록(석회:모래 = 3:1에서 1:3) 수축율비는 증가하다가 감소하는 경향성을 보였다.

석회 종류별 수축율비를 비교한 결과, 배합비(석회:모래 = 3:1~1:3)은 6개월 숙성 소피 소석회(0.60~1.20; 평균 0.88) < 1개월 숙성 소피 소석회(0.61~1.39; 평균 0.97) < 7일 숙성 소피 소석회(0.47~1.69; 평균 1.17) < 12개월 숙성 소피 소석회(0.80~1.52; 평균 1.19) < 3개월 숙성 소피 소석회(0.63~1.75; 평균 1.21), 분말 소석회(0.78~1.77; 평균 1.21) < 시판 소석회(2.09~3.64; 평균 3.02)순으로 나타났다. 배합비(석회:모래 = 1:1~1:3)은 6개월 숙성 소피 소석회(0.60~0.87; 평균 0.72) < 1개월 숙성 소피 소석회(0.61~0.85; 평균 0.74) < 7일 숙성 소피 소석회(0.47~1.19; 평균 0.85) < 3개월 숙성 소피 소석회(0.63~1.27; 평균 0.91) < 12개월 숙성 소피 소석회(0.80~1.26; 평균 1.02) < 분말 소석회(0.92~1.77; 평균 1.40) < 시판 소석회(2.09~3.36; 평균 2.66)의 순으로 확인되었다.

평균 수축율비는 석회와 모래의 배합비가 3:1~1:3인 경우 소피 소석회(1.08) < 분말 소석회(1.21) < 시판 소석회(3.02)의 순이며, 배합비가 1:1~1:3일 때 소피 소석회(0.85) < 분말 소석회(1.40) < 시판 소석회(2.66)의 순으로 나타났다. 소피 소석회와 분말 소석회에 비해 시판 소석회의 수축율비가 비교적 높으며, 응결시간과 유사하게 입자 크기(소피형, 분말형)에 의한 특성 차이는 보이지 않았다. 반면 소피 소석회의 경우 숙성기간에 따른 특성 변화가 확인되지 않았다.

3.4. 소석회의 물리·화학적 특성

X-선 형광분석 결과, 소피 소석회는 분말 소석회, 시판 소석회에 비해 SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , Na_2O 의 함량이 높고 CaO

Table 7. Length change of lime mortars

No.	Sample name	Hydrated lime		Crack start time (hours)	Shrinkage (%)
		Preparations	Slaking period		
1	LL(7D)-1	Quick lime lumps	7 days	32.5	0.091
2	LL(7D)-2			42.5	0.087
3	LL(7D)-3			50.0	0.064
4	LL(7D)-4			40.0	0.049
5	LL(7D)-5			42.5	0.026
6	LL(1M)-1	Quick lime lumps	1 month	42.5	0.075
7	LL(1M)-2			30.0	0.066
8	LL(1M)-3			50.0	0.046
9	LL(1M)-4			45.0	0.042
10	LL(1M)-5			37.5	0.033
11	LL(3M)-1	Quick lime lumps	3 months	35.0	0.095
12	LL(3M)-2			37.5	0.084
13	LL(3M)-3			37.5	0.069
14	LL(3M)-4			45.0	0.045
15	LL(3M)-5			45.0	0.034
16	LL(3M)-6			17.5	0.036
17	LL(3M)-7			50.0	0.014
18	LL(6M)-1	Quick lime lumps	6 months	20.0	0.065
19	LL(6M)-2			32.5	0.056
20	LL(6M)-3			30.0	0.047
21	LL(6M)-4			30.0	0.038
22	LL(6M)-5			20.0	0.033
23	LL(12M)-1	Quick lime lumps	12 months	15.0	0.082
24	LL(12M)-2			17.5	0.076
25	LL(12M)-3			30.0	0.068
26	LL(12M)-4			30.0	0.054
27	LL(12M)-5			30.0	0.043
28	PL-1	Powdered hydrated lime	-	22.5	0.042
29	PL-2			20.0	0.057
30	PL-3			32.5	0.096
31	PL-4			27.5	0.082
32	PL-5			30.0	0.050
33	PL-6			37.5	0.072
34	PL-7			45.0	0.036
35	CL-1	Commercial hydrated lime	-	32.5	0.188
36	CL-2			32.5	0.197
37	CL-3			45.0	0.182
38	CL-4			42.5	0.136
39	CL-5			37.5	0.113

Figure 7. Shrinkage properties of lime mortars.

함량이 낮아 석회 이외의 불순물 함량이 비교적 높은 것으로 추정되는데, 이는 소석회의 원재료와 제조방식에 따른 특성차이로 생각된다. L.O.I.는 시료 내 수분과 유기물, 이산화탄소 함량에 따른 작열감량으로 CaO 함량이 높을수록 L.O.I. 함량도 높아지는 것으로 보고되었는데(Kim *et al.*, 2018), 본 실험에서도 이와 유사한 경향성을 확인할 수 있었다(Table 8).

소석회의 입도 분석결과, 석회 종류별로는 시판 소석회(31.68 μm) < 분말 소석회(42.82 μm) < 소괴 소석회(46.56 μm)의 순으로 나타나, 시판 소석회에 비해 소괴 소석회와 분말 소석회의 입도가 큰 것으로 확인되었다. 또한 분말형에 비해 소괴형의 입도가 크게 나타났지만, 특성차이는 작았고, 소괴 소석회의 경우 숙성기간이 길어질수록 입도는 커지다가 6개월 이후 감소하는 경향성을 보였다(Table 8).

공극률(%) 분석결과, 석회 종류별로는 소괴 소석회(57.49%) < 시판 소석회(60.49%) < 분말 소석회(62.84%)의 순으로 나타났다. 소괴형에 비해 분말형의 공극률이 높았고, 소괴 소석회의 경우 숙성기간이 길어질수록 공극률은 감소하는 경향성을 보였으나 특성차이는 작았다. 겉보기 밀도(g/ml)는, 분말 소석회(0.525 g/ml) < 시판 소석회(0.572 g/ml) < 소괴 소석회(0.618 g/ml)의 순으로 나타났

다. 분말형에 비해 소괴형의 겉보기 밀도가 높았고, 소괴 소석회의 경우 숙성기간이 길어질수록 겉보기 밀도가 증가하는 경향성을 보였으나 특성차이는 작았다. 평균 공극 크기(μm) 분석결과, 석회 종류별로는 분말 소석회(0.198 μm) < 소괴 소석회(0.207 μm) < 시판 소석회(0.395 μm)의 순으로 나타나, 소괴 소석회와 분말 소석회에 비해 시판 소석회의 평균 공극크기가 큰 것으로 나타났다. 소괴형과 분말형의 특성차이는 거의 없었고, 소괴 소석회의 경우 숙성기간이 길어질수록 평균 공극크기가 감소하는 경향성을 보였으나 특성차이는 작았다(Table 8).

SEM-EDS 분석결과, 소괴 소석회는 숙성기간이 길어질수록 판상형에서 세립형으로 결정 형태가 변화하였다. 또한 소화 후 별도의 숙성기간을 거치지 않은 분말 소석회와 시판 소석회는 소괴 소석회와 달리 각 기동 형태의 결정이 곳곳에서 높은 빈도로 관찰되었다(Figure 8). 선행 연구에 의하면 소석회의 소화과정 중 장기간의 수분접촉은 결정성장과 입자응집에 영향을 미칠 수 있는데, 이로 인해 포틀랜드라이트 결정 형태가 각 기동에서 판상으로 변화하며 결정 크기는 1 μm 이하로 감소할 수 있음을 보고한바 있다(Elert *et al.*, 2002; Lanas and Alvarez, 2004; Carran *et al.*, 2012; Ahn *et al.*, 2018).

소석회의 물리·화학적 특성 분석결과, 분말형은 소괴

Table 8. Characteristics of hydrated limes used for mortars' production

Hydrated lime	Chemical composition (wt%)											Physical characteristics			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	L.O.I.	Particle size (μm)	Porosity (%)	Pore diameter (μm)	Bulk density (g/ml)
Lump (7 day) hydrated lime	18.39	4.13	0.69	53.34	1.02	1.49	0.50	0.09	0.05	0.02	20.54	39.06	58.85	0.251	0.573
Lump (1 month) hydrated lime	18.00	4.01	0.65	53.63	1.04	1.51	0.48	0.09	0.05	0.02	20.79	39.90	57.49	0.185	0.644
Lump (3 months) hydrated lime	17.20	3.59	0.61	54.75	1.04	1.35	0.41	0.08	0.05	0.02	21.33	54.38	57.09	0.169	0.649
Lump (6 months) hydrated lime	21.40	3.87	0.66	50.51	0.94	1.46	0.47	0.09	0.05	0.02	20.78	59.47	54.44	0.245	0.609
Lump (12 months) hydrated lime	19.29	4.18	0.73	51.06	0.99	1.44	0.52	0.10	0.05	0.02	21.93	39.98	59.56	0.184	0.615
Powder hydrated lime	1.74	0.30	0.30	66.71	1.07	0.05	<0.02	0.04	0.05	0.01	29.47	42.82	62.84	0.198	0.525
Commercial hydrated lime	1.31	0.39	0.32	68.41	2.67	0.11	<0.02	0.04	0.06	0.01	24.84	31.68	60.49	0.395	0.572

형에 비해 평균 공극크기는 유사한 범위에 분포하였으나, 석회의 공극률이 높고 겉보기 밀도는 낮고 입자크기는 작았다. 또한 불순물 함량이 낮고 CaO 함량은 높게 나타나 중량배합 시 수분에 접촉하는 반응면적이 넓어지면서 목표 유동성 확보를 위한 최적 배합수 함량을 높이는 요인으로 판단된다. 콘크리트의 경우, 시멘트 입도계수(CFM)

가 커질수록 낮은 분말도에 기인하여 물과 접촉할 수 있는 표면적이 작아지므로 콘크리트의 응결시간은 지연되며, 수화반응의 느린 진행으로 초기재령의 강도특성은 낮아진다고 보고한 바 있다(Noh and Han, 2012). 본 실험의 석회 모르타르의 경우 소석회의 입자크기가 커질수록 최적 배합수 함량은 낮아졌고, 응결시간은 지연되고, 길이

Figure 8. FE-SEM image of hydrated lime. (A) Lump (7 day) hydrated lime, (B) Lump (3 months) hydrated lime, (C) Lump (6 months) hydrated lime, (D) Lump (12 months) hydrated lime, (E) Powdered hydrated lime, (F) Commercial hydrated lime.

변화율(수축율)은 감소하였다. 또한 소괴 소석회의 경우 숙성기간이 길어질수록 공극률 및 평균 공극크기는 감소하였으나 특성차이는 작았고, 석회의 입자크기는 초기에 증가하다 6개월 이후 감소하였다. 시판 소석회는 소괴 소석회와 분말 소석회에 비해 공극률 및 결보기 밀도는 유사한 범위에 분포하였으나, 석회의 입자크기는 작았다. 또한 석회 모르타르 혼합 시 최적배합수 함량은 가장 높게 나타났는데, 이는 기타 석회그룹에 비해 시판 소석회의 높은 CaO 함량 및 평균 공극크기 등 원재료 및 제조방식에 따른 특성차이로 생각된다. 시판 소석회의 평균 공극크기는 소괴 소석회와 분말 소석회에 비해 약 2배 정도 높게 나타났는데, 이로 인해 모르타르 혼합 시 석회 입자의 공극 내에 가둘 수 있는 자유수의 증가로 인해 최적 배합수 함량이 증가한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 건축문화재 보수용으로 사용되는 소괴 소석회와 분말 소석회, 시판 소석회를 대상으로 배합비에 따른 석회 모르타르의 초기거동(유동특성, 응결특성)과 수축특성을 연구하여 현장적용을 위한 기초자료를 제시하고자 하였다.

유동특성 분석결과, 조적용 석회 모르타르의 최적 유동성 시험 값(135 ± 15 mm) 확보를 위한 석회 모르타르의 최적 배합수 비율은 소괴 소석회 8~10%, 분말 소석회 10~18%, 시판 소석회 17~40%의 범위로 확인되었다. 회귀방정식(지수모델) 분석결과, 배합수의 증가에 따라 유동성 시험 값은 증가하였으며 골재량의 증가(석회:모래 = 3:1에서 1:3)에 따라 회귀선의 기울기도 증가하였다. 또한 분말 소석회와 시판 소석회는 골재량이 증가함에 따라 최적 배합수 비율은 감소하였으나 소괴 소석회는 골재량에 관계없이 최적 배합수 비율이 일정하게 유지되었다.

응결특성 분석결과, 평균 종결시간비[석회 모르타르/문화재수리 표준품셈 전돌벽쌓기(습식) 배합]은 배합비(석회:모래 = 3:1~1:3)의 경우 시판 소석회(0.4) < 분말 소석회(5.6) < 소괴 소석회(5.7)의 순이며, 배합비(석회:모래 = 1:1~1:3)의 경우 시판 소석회(0.3) < 분말 소석회(4.7) < 소괴 소석회(4.8)의 순으로 나타났다. 시판 소석회에 비해 소괴 소석회와 분말 소석회의 종결시간비가 높았고, 입자 크기(소괴형, 분말형)별 특성차이는 비교적 작았다. 또한 소괴 소석회는 1~6개월이 효과적인 숙성기간으로 확인되었다.

수축특성 분석결과, 평균 수축율비[석회 모르타르/문화재수리 표준품셈 전돌벽쌓기(습식) 배합]은 배합비(석

회:모래=3:1~1:3)의 경우 소괴 소석회(1.08) < 분말 소석회(1.21) < 시판 소석회(3.02)의 순으로, 배합비(석회:모래 = 1:1~1:3)의 경우 소괴 소석회(0.85) < 분말 소석회(1.40) < 시판 소석회(2.66)의 순으로 나타났다. 소괴 소석회와 분말 소석회에 비해 시판 소석회의 수축율비가 높았고, 입자 크기(소괴형, 분말형)별 특성차이는 비교적 작았다. 또한 소괴 소석회는 숙성기간에 따른 특성차이는 거의 없었다. 석회 모르타르의 초기거동특성과 수축특성을 검토한 결과, 결합재 종류와 배합비에 따라 평균 종결시간비, 수축율비의 차이가 발생하여 석회 모르타르의 현장적용 시 용도별 시공기준에 부합하는 성능개선 연구가 필요하다. 이와 같은 결과는 향후 문화재 보수현장에서 조적용 석회 모르타르의 초기거동특성과 수축특성을 예측하는데 기여할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 문화재청 국립문화재연구소 문화유산조사연구(R&D) 사업의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 깊이 감사드린다.

REFERENCES

- Ahn, S.A., Kim, E.K., Nam, B.J., Hlaing, C.S.S. and Kang, S.Y., 2018, Mineralogical and physical properties of lime plaster used in wall repair in temple of Bagan, Myanmar. J. Miner. Soc. Korea, 31(4), 267-275. (in Korean with English abstract)
- ASTM, 2016, ASTM C109/C109M:16a Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens).
- Carran, D., Hughes, J., Leslie, A. and Kennedy, C., 2012, The effect of calcination time upon the slaking properties of quicklime. RILEM bookseries-Historic mortars, 7, 283-295.
- Elert, K., Rodriguez-Navarro, C., Pardo, E.S., Hansen, E. and Cazalla, O., 2002, Lime mortars for the conservation of historic buildings. Studies in Conservation, 47, 62-75.
- Hwang, H.Z. and Kang, N.Y., 2010, Preliminary study on traditional earth construction technique use of lime. Journal of the KIEAE, 10(2), 3-8. (in Korean with English abstract)
- Kang, S.H., Hwang, J.K. and Kwon, Y.H., 2019a, Effects of amount of slaking water on physical and chemical properties of handmade hydrated lime used for preservation of architectural heritage. Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction,

- 35(2), 21-28. (in Korean with English abstract)
- Kang, S.H., Hwang, J.K. and Kwon, Y.H., 2019b, Carbonation reaction and strength development of air lime mortar with superplasticizer. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 35(7), 179-186. (in Korean with English abstract)
- Kim, E.K., Ahn, S.A., Nam, B.J. and Kang, S.Y., 2018, A comparative study of outer castle pointing and modern pointing in Namhansanseong yeojang. *KOMUNHWA*, 92, 61-77. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.H., No, H.S. and Seo, S.S., 2006, Introduction of hydraulic lime mortar as eco-friendly architecture material. *Ceramist*, 9(3). (in Korean).
- Kim, T.N., 2002, Myung Dong cathedral church mortar 1th report. (in Korean with English abstract)
- Kim, T.N., 2004, Mortar and brick analysis of Yongsan seminary and Winhyoro cathedral church. (in Korean with English abstract)
- Lanas, J. and Alvarez, J.I., 2004, Dolomitic limes: evolution of the slaking process under different conditions. *Thermo-chimica Acta*, 423, 1-12.
- Noh, S.K. and Han, C.G., 2012, Effects of cement fineness modulus (CFM) on the fundamental properties of concrete. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 12(3), 284-290. (in Korean with English abstract)
- Park, C.W., Lim, N.G. and Lee, K.Y., 2014, A Research study on fundamental properties of traditional oil compound lime as eco-friendly building material. *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 30(7), 47-54. (in Korean with English abstract)
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2017, Building structure standards.
- Cultural Heritage Administration, 2019, Cultural property repair standard product count.
- KS, 2015, KS F 2424 Standard test method for length change of mortar and concrete.
- KS, 2017, KS L 5105 Testing method for compressive strength of hydraulic cement mortars.
- KS, 2017, KS L 5111 Flow table for use in tests of hydraulic cement.
- KS, 2018, KS L 5220 Dry ready mixed cement mortar.
- KS, 2016, KS L ISO 679 Methods of testing cements - Determination of strength.
- KS, 2014, KS L ISO 9597 Determination of setting time and soundness of cements.