

흡수성 물질과 초기 밀봉양생이 황토 모르타르의 건조수축과 압축강도에 미치는 영향

권양희¹, 홍성걸^{2*}

Effect of Absorbent Materials and Initial Sealed Curing on Drying Shrinkage and Compressive Strength of Hwangtoh Mortar

Yang-Hee Kwon¹, Sung-Gul Hong^{2*}

Abstract: This study investigates the effect of the absorbent materials on the material properties (compressive strength and drying shrinkage) of natural hwangtoh mortar which is one of the traditional building material in Korea. The absorbent materials used are seaweed paste and Super-Absorbent Polymer(SAP). In addition to the absorbent materials, the initial sealed curing recommended by the standard specification of properties for Korean traditional building materials is also a main interest of this study. Based on the test results of 28 days compressive strength and converged drying shrinkage, it is confirmed that the initial sealed curing for 7 days is effective to reduce the drying shrinkage and to enhance the compressive strength. Thus, it is verified that the recommendation is reasonable and has positive effects on the properties of the mortar. Next, the test results show that the addition of absorbent materials into the mortar is also effective to the two properties depending on their absorption capacity. Thus, it is more effective to use SAP than the seaweed paste because of higher absorption capacity. However, both the initial sealed curing and keeping total water contents of the mortar are required to show this effectiveness. Lastly, the compressive strength is inversely proportional to the drying shrinkage. By using this relation, the reason of the increase of compressive strength due to the initial sealed curing or the addition of absorbent materials is quantitatively explained.

Keywords: Hwangtoh mortar, Sealed curing, Superabsorbent polymer(SAP), Compressive strength, Drying shrinkage

1. 서 론

환경문제들을 해결하기 위한 노력과 건강에 대한 현대인들의 관심이 높아짐에 따라 친환경 건축 재료의 연구 개발이 활발하게 이루어지고 있다(Lee et al., 2006; Kim, 2011; Heo et al., 2014). 그 중에서도 황토는 우리나라의 건축 역사와 함께 이어져 내려온 전통 재료이면서, 시멘트처럼 제조 과정에서 이산화탄소를 발생시키지 않는 친환경 재료이다. 더불어 축열성, 자정력, 탈취 및 향균 능력이 뛰어나며, 온도를 통한 난방시 난방열이 황토 바닥을 통과하는 과정에서 인체에 유익한 원적외선을 방출하는 것으로 알려져 있다(Heo et al., 2014; Lee, 2006; Seong, 2007). 이러한 장점들과 함께 현재는 주로 주택의 마감재 또는 바닥재와 같은 용도로 사용되고 있다(Go et al., 2010). 그러나 황토 모르타르는 흡수성이 높은 재료 특

성으로 인해 건조수축 변형이 크게 발생할 수 있다(Yang et al., 2010). 높은 건조수축은 황토-목재 간 경계부의 틈과 균열을 발생시키고(Kim et al., 2004), 결국 단열성능을 저하시켜 주택의 열손실을 증가 시킬 수 있다(Hwang, 2011).

이와 같은 천연 황토의 문제점을 개선하기 위해 기존 연구에서는 전통적 방식에 따라 강회와 벚짚을 넣거나, 흙벽을 바를 때 미장이 빠르게 마르지 않게 하기 위해 해초풀을 섞어서 사용하였다(Lee et al., 2006). 문화재수리표준시방서(Cultural Heritage Administration, 2014)와 문화재수리 표준품셈(Cultural Heritage Administration, 2014)에서도 황토에 여물과 해초풀, 강회 등을 함께 사용하도록 명시하고 있으며, 실제로 전통 주택의 황토 벽체 시공 시 해초풀, 강회 등을 사용하고 있다. 특히, 강회와 같은 석회가 주 성분인 재료가 함께 사용될 경우 황토의 물 풀림 현상을 방지할 수 있다.

해초풀의 혼합 비율 및 방법은 이전의 기록과 현장에서 재료를 다루는 장인들의 경험에 의존하고 있다(Park et al., 2012). 그러나 지금도 사용되고 있는 건축재료 입에도 불구하고, 해초풀의 사용이 황토 모르타르의 재료특성에 미치는 영향에 대한 공학적이고 체계적인 연구가 이루어지지 않고 있다.

해초풀은 흡수 능력이 뛰어난 재료이며, 주재료인 갈조류

¹정회원, 서울대학교 건축공학과 박사과정

²정회원, 서울대학교 건축공학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: sglhong@snu.ac.kr

Department of Architecture & Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2016년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

는 주로 알긴산 (약 70~80%)으로 구성되어 있다(Lee et al., 1998). 알긴산은 해조 다당류의 일종으로 1,4-linked α -L-guluronic acid(G)와 1,4-linked β -D-mannuronic acid(M)로 이루어진 다당 폴리머(copolymer) 물질이다(Joo et al., 1995). 물에 녹으면 carboxyl acid group(-COOH)과 2가 양이온 간의 가교(cross-linking)로 인해 다공성 하이드로 겔(hydrogel)을 형성 한다(Yun, 2010; Wu et al., 2012). Fig. 1(a)는 carboxyl groups와 함께 가교된 알긴산의 화학적 구성을 보여준다(Wu et al., 2012). 이러한 구조적 특성 덕분에 해초풀은 자체 중량의 200~300배의 물을 흡수할 수 있다(Yang, 2003).

비록 흡수 능력을 지니지만, 천연 교차제인 이러한 해초풀의 사용은 벽체의 곰팡이와 같은 문제점을 유발시킬 수 있다(Hwang et al., 2009). 또한, 장기 보존이 어려우며 사용할 때마다 제조해야 하는 불편함이 있다. 그러나, 이러한 문제점을 개선시키기 위한 연구는 현재 찾아보기 어렵다.

해초풀과 유사한 구조를 가지면서 흡수 능력은 더 뛰어난 고흡수성 수지(Super-Absorbent Polymer, SAP)가 그것의 기능을 대체 할 수 있다. 시멘트 모르타르 또는 콘크리트의 새로운 첨가제로서의 가능성이 확인되고 있는(Kang et al., 2016) SAP은 가교된 고분자 하이드로 겔로써 carboxyl acid group (-COOH)이 가성소다(NaOH)로 부분 중화되는 공정에 의해 제조된다. 물 또는 수용액과 접촉 시 부피가 팽창 하면서, 건조상태 자기 중량 대비 최소 10배에서 최대 1500배의 물을 흡수할 수 있다(Assmann and Reinhardt, 2013). Fig. 1(b)는 폴리

아크릴산계(poly acrylic acid type) SAP의 화학적 구조를 보여 준다(Mechtcherine and Reinhardt, 2012). SAP에 의한 물의 흡수는 삼투압에 의해 발생되고, 3차원 망상구조로 인해 흡수된 물이 장기적으로 저장 될 수 있다(Kang et al., 2016).

이러한 흡수 능력을 기반으로 SAP은 현재 전 세계적으로 생산량 대부분(90% 이상)이 유아용 1회용 기저귀에 사용되고 있으며(Jensen and Hansen, 2001), 제조사의 체계적인 관리 아래 판매가 이루어지고 있는 재료이다. 제조 과정에서 높은 에너지를 소모한다거나 시멘트와 같이 다량의 이산화탄소를 배출하지 않기 때문에, 기존재료의 친환경성을 저해하지 않으면서 해초풀이 가지는 흡수 기능을 효과적으로 대체 또는 향상시킬 수 있다. 이와 더불어 SAP은 해초풀처럼 사용 직전에 제조되어야 하는 불편함 없이, 배합에 필요한 양만큼 극소량(콘크리트의 경우 일반적으로 시멘트 중량 대비 1% 이내)을 첨가하면 되기 때문에, 사용이 편리하다. 뿐만 아니라, 다른 건설재료(시멘트, 혼화제 등)처럼 분말 형태로 제공되기에 배송 및 취급이 편리하고, 방습처리만 이루어지면 장기보관도 가능하다. 추가로, 사용에 적합한 입도와 흡수력을 사용자가 선택하고 설계에 반영할 수 있기 때문에, 건설재료의 품질 관리 및 성능 조절이 가능한 재료이다.

해초풀 및 SAP과 같은 흡수성 물질을 혼입함으로써 기대할 수 있는 효과는 황토 모르타르 내부를 보다 습한 상태로 유지하여 빠른 건조를 막는 등 양생에 있어 보다 유리한 환경을 조성 하는 것이다. 습한 내부 환경 조성에 의해 황토 모르타르의 대표적 문제점인 극심한 건조수축이 완화될 수 있다. 문화재수리표준시방서(Cultural Heritage Administration, 2014) 역시 초기의 수분 건조를 막기 위해 황토 벽체가 완전히 양생될 때까지 적합한 보양을 하도록 명시하고 있으며, 보토 및 강회 다짐시 7일 이상을 적용하도록 명시하고 있다.

이러한 배경에서 이 연구에서는 해초풀, SAP과 같은 흡수성 물질의 혼입이 황토 모르타르의 건조수축과 압축강도에 미치는 영향을 조사하였다. 흡수성 물질의 혼입과 더불어, 초기 밀봉양생이 황토 모르타르의 최종 재료성능에 미치는 영향 역시 조사되어야 하므로 함께 고려되었다. 이와 같은 연구 목적을 달성하기 위해, SAP 또는 해초풀이 혼입된 황토 모르타르의 압축강도 및 건조수축이 초기밀봉 여부에 따라 측정되었고, 결과들을 분석하고 고찰하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 실험재료

황토 모르타르의 제조를 위해 Fig. 2에 제시된 6 가지 재료들과 물(서울시 상수도)이 사용되었다. 황토는 전북 고창산

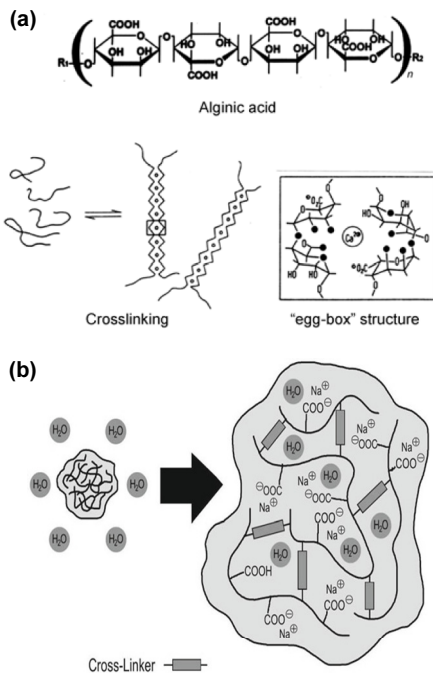


Fig. 1 Structure of absorbent materials: (a) alginic acid(Wu et al., 2012), and (b) SAP(Mechtcherine and Reinhardt, 2012)

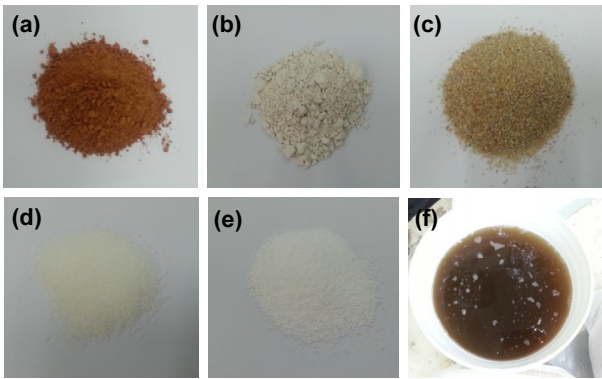


Fig. 2 Materials: (a) Hwangtoh clay, (b) slaked lime (c) sand, (d) SAP-AA type, (e) SAP-AM type, and (f) seaweed paste

적황토 분말이고, 소석회는 공업용 1등급이다. 두 재료들의 성분분석 결과를 Table 1에 제시하였다. 잔골재로 KS L ISO 679(시멘트 강도 시험 방법)(KATS, 2006)에 명시된 ISO 표준사가 사용되었다.

흡수성 재료인 해초풀은 국내 L사에서 구입하였으며, 사용된 SAP은 국내에서 제조 및 유통되는 Acrylic acid(AA)와 Acrylamide(AM)형 제품으로 종류가 서로 다르다. Fig. 2의 (d)와 (e)는 각각 AA형과 AM형 SAP의 건조 상태 사진이다. 두 제품은 입도 범위가 모두 0.2~1 mm로 크기가 비슷하다. 그러나 종류뿐만 아니라 형상 역시, AA형은 모래와 같은 비정형이고, AM형은 완전히 둥근 구슬형인 것과 같이 차이가 있다.

2.2 배합설계

Table 2와 같이 총 5 종류의 황토 모르타르 배합을 계획하였다. 시편들은 크게 흡수성 물질이 혼입되지 않은 기본 황토 모르타르 2종류와, 혼입된 황토 모르타르 3종류로 구분된다. 또한 각 시편들은 다시 초기밀봉 조건에 따라 기건 또는 밀봉

양생으로 구분된다. 문화재수리표준시방서(Cultural Heritage Administration, 2014)에 따라 초기밀봉 양생 기간은 7일로 결정하였다.

시편 이름 중 R은 기본 시편을 의미하며, R+We는 흡수성 물질이 혼입된 것(AA 시편)과 동일한 양의 물이 포함된 기본 시편으로, 동일한 조건에서 흡수성 물질의 흡수능이 황토 모르타르에 미치는 영향을 알아보기 위해 계획되었다. AA와 AM은 각각 SAP이 첨가된 시편을 의미하며, SP는 해초풀이 혼입된 시편을 의미한다.

결합재(황토와 소석회 합) 대비 잔골재의 비율은 예비실험을 통해 3으로 결정되었다. 첨가제인 해초풀과 SAP의 비율은 흡수능과 기존연구를 참고하여 각각 결합재 중량의 4%(Kim et al., 2010)와 0.4%(Kang et al., 2016)로 결정하였다. 유동성 시험은 KS L 5111(KATS, 2007)에 따라 진행되었으며, 작업성 확보에 필요한 목표 플로우는 170±5 mm로 설정되었다.

흡수성 물질이 황토 모르타르에 혼입될 경우, 작업성 확보에 필요한 목표 플로우를 만족시키기 위해 물이 더 첨가되어야 한다. 이 때문에 3종류의 시편들(AA, AM, SP)에 혼입된 물의 양은 기본 시편(R)보다 더 높다. 흡수성 물질의 흡수능이 우수할수록 목표 플로우를 만족시키기 위해 더 많은 물이 필요하다. 따라서, 흡수능은 SAP-AM > SAP-AA > 해초풀(SP) 순서인 것을 Table 2를 통해 확인할 수 있다. 한편, 또 다른 기본시편인 R+We가 계획된 이유는, 혼입된 물의 양이 동일한 조건에서 첨가제에 의한 흡수능이 황토 모르타르의 재료특성에 미치는 영향을 확인하기 위해서이다.

SAP은 물과 접촉 후 즉시 흡수 및 팽창하기 시작하여 일정 시간이 지나면 더 이상 물을 흡수하지 않는 평형상태가 된다. SAP의 흡수율 실험 결과(Mechtcherine and Reinhardt, 2012)를 살펴보면, 물과 접촉 후 5분 이내에 최대 흡수율의 50% 이상이 되며, 10분 이내에 최대 흡수율의 80~100%에 도달한다.

Table 1 Chemical composition of Hwangtoh and slaked lime(by wt.%)

Materials	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	LOI	Total
Hwangtoh	55.34	22.33	1.04	8.43	0.52	1.46	0.10	2.49	0.07	0.10	8.02	99.91
Slaked lime	0.57	0.54	0.01	0.14	1.12	74.51	0.01	0.12	0.004	0.01	23.00	100.03

Table 2 Mix proportion of Hwangtoh mortar

Name	Hwangtoh [g]	Slaked lime [g]	Sand [g]	Initial curing condition	Additives [g]			Total water [g]	Flow [mm]
					Sea weed paste	SAP-AA	SAP-AM		
R					-	-	-	91	170
R+We				Air-dry curing or Sealed curing	-	-	-	109	210
AA	70	30	300		-	0.4	-	109	168
AM					-	-	0.4	116	167
SP					4	-	-	99	173

따라서 SAP이 첨가되는 배합(AA, AM)의 경우 SAP의 흡수 속도를 고려하여 믹싱시간을 포함, 물을 투입하고 10분이 지난 후에 타설 하였다. 유동성 측정도 이 때 수행하였으며, 물과 접촉한 지 10분 이후에는 유동성 감소가 없는 것으로 가정 하였다.

2.3 실험방법

건조수축과 압축강도 측정을 위한 시편은 KS L 5105(KATS, 2007) 규격을 만족하는 5리터 급 모르타르 믹서를 사용하여 제작되었다. 우선 결합재인 황토와 소석회 그리고 잔골재인 모래를 모두 넣고 30초간 건비빔 한 후 물을 넣고 30초간 저속, 2분간 고속으로 혼합하였다. 흡수성 물질의 혼입은 제공되는 상태에 따라 다르게 진행되었다. 우선, 건조한 분말 상태로 제공되는 SAP은 입자크기가 잔골재와 유사하므로, 균질한 분산을 위해 건비빔 단계 전 잔골재와 함께 혼입되었다. 그러나 액상으로 제공되는 해초풀은 물과 함께 섞어 혼입되었다.

초기 밀봉양생이 적용되는 시편에 한해, 타설 직후 몰드 상부를 비닐로 덮어 7일 동안 수분손실을 방지하였다 (Fig. 3(b), (e)). 몰드 탈형 시점의 경우, 밀봉되지 않은 시편 (Fig. 3(c), (f))은 가장 빨리 탈형 할 수 있는 재령 1일째로 하였고, 이때 바닥면을 제외한 모든 면이 대기와 접촉하도록 하였다. 반면, 밀봉된 시편은 수분손실을 차단하기 위해 재령 7일째 밀봉 제거 및 탈형을 진행 하였다. 한편, 건조수축 시편의 경우 구속 조건을 배제하기 위해 탈형 전·후를 포함한 양생 전 과정에서

시편이 몰드와 접촉하는 모든 면에 테프론 시트가 사용되었다 (Fig. 3(a)). 배합이 종료된 모든 황토 모르타르를 각 시편 제작을 위한 몰드에 다짐하여 채운 후 즉시 20±2°C, 60±5% 조건인 항온·항습기에 넣고 측정일까지 양생하였다.

2.3.1 건조수축

천연황토 모르타르는 콘크리트 보다는 점토와 가까운 재료 특성을 나타내기 때문에 KS L 4004(KATS, 1997)와 같은 점토의 건조수축 측정법을 따랐다. 대기노출(기건양생) 시점부터 7일째 까지 24시간 단위로, 최초 40×40×160 mm³ 크기로 제작된 시편의 길이를 버니어 캘리퍼스로 측정하였다.

건조수축량(l_s)은 식 (1)과 같이, 타설시 최초 길이인 160 mm에서 측정된 시편의 길이를 뺀 값으로 결정되었다. 이때 각 시편의 상부와 하부의 수축정도가 서로 다를 수 있으므로, Fig. 4와 같이 최상부(l_t)와 최하부(l_b) 측정값의 평균을 1회 측정값으로 적용하였다.

시편 간 건조수축 비교를 위해 건조수축 변형율이, 식 (2)와 같이 수축량(l_s)을 타설 몰드의 길이(l_0)로 나눈 값으로 산정되었다. 실험오차를 고려하여 건조수축 변형율은 동일한 시편 3개의 평균값으로 결정되었다.

$$l_s = l_0 - (l_t + l_b) / 2 \quad (1)$$

$$b = l_s / l_0 \quad (2)$$

여기서, b : 건조수축 변형율(-), l_s : 수축량(mm), l_0 : 초기 시편 길이(mm), l_t : 최상부 측정값(mm), l_b : 최하부 측정값(mm)

이러한 건조수축은 시편이 수렴할 때 까지 측정하였다. 시편의 평균 수축량(l_s)이 측정 단위(0.1 mm) 내에서 3일간 변화가 없을 경우 건조수축이 수렴된 것으로 판단하였다. 이러한 기준에 따라 모든 시편을 고려하여 최종 건조수축 변형율은 밀봉 제거 후 7일째로 결정되었다.

2.3.2 압축강도

KS L 5105(KATS, 2007) 규격에 따라 황토 모르타르 시편 (50×50×50 mm³) (Fig. 3(d))의 압축강도가 재령 28일째 만능 재료시험기(최대하중 범위 200 kN)를 이용하여 측정되었다. 이때 최대하중은 로드셀(정밀도 0.01 kN)에 의해 기록되었다. 압축강도(σ)는 최대하중(P)을 시료 단면적(A)으로 나눈 값이며, 동일한 시편 3개의 평균값으로 결정하였다.

$$\sigma = P / A \quad (3)$$

σ : 압축강도 (MPa), P : 최대하중 (N), A : 시료의 단면적(mm²)

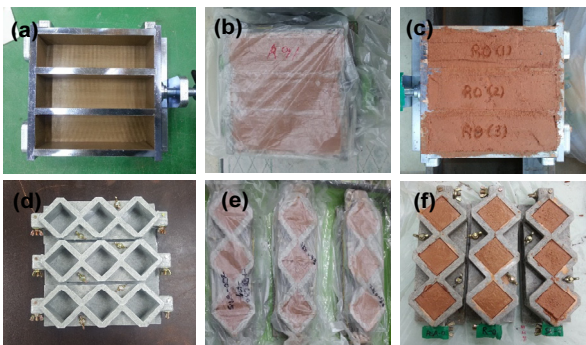


Fig. 3 Specimen preparation: (a) Mold for drying shrinkage specimens (with teflon sheets), (b) Specimens for drying shrinkage test with sealed curing and, (c) air-dry curing, (d) mold for compressive strength specimens, (e) Specimens for compressive strength test with sealed curing and, (e) air-dry curing

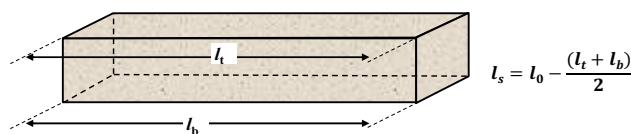


Fig. 4 Measurement method of length change by drying shrinkage

3. 실험결과 및 분석

이 연구에서 수행한 실험결과를 모두 Table 3에 요약하였으며, 각 항목별로 분석하였다.

3.1 건조수축

대기노출 후 7일째까지 측정된 황토 모르타르의 건조수축 변형율은 Fig. 5에 제시되어 있다. 앞에서 언급했듯이, 건조수축은 대기 노출 후 7일 이내로 수렴하는 것이 확인된다. 따라서 Table 3에 제시된 것과 같은 대기노출 후 7일째 값을 최종 건조수축이라 보아도 무리가 없다.

이러한 빠른 수렴성은 동일개체인 알칼리 활성 황토 모르타르(물-결합재 비율(W/B): 40%) 또는 대표적인 건설재료인 콘크리트와 분명히 대비되는 천연황토 모르타르의 건조수축 특성이다. 알칼리 활성 황토를 사용한 모르타르의 건조수축

은 재령 20일 이전에 급속히 증가하지만, 수렴양상은 재령 80일 이후에 나타난다(Mun et al., 2012). 또한, 콘크리트의 건조수축은 재령 20년 까지도 수렴을 보이지 않는다(Mehta and Monteiro, 1993). 이들 재료에서 측정된 최종 건조수축 변형율은 모두 1,500 $\mu\text{m}/\text{m}$ 이하로 나타났다.

천연 황토 모르타르의 건조수축 변형이 이들 재료들과 비교될 때 급속하게 진행되고, 변형량도 상당한 것을 확인할 수 있다. 개기공으로 되어 있어 수분 증발에 매우 유리한 조건을 가지고 있는 황토의 구조 때문에(Choi et al., 1997), 천연황토 모르타르의 수분증발은 대기노출 후 3일 만에 대부분이 완료되어 외기습도(R.H. 60%)와 평형상태가 된다. 또한, 최종 건조수축 변형율 역시 최초 시편길이의 약 2%(또는 20,000 $\mu\text{m}/\text{m}$) 내외로 앞에서 언급한 재료들과 비교할 때 최소 10배 이상으로 높다. 이는 작업성 확보를 위한 W/B가 2배 이상으로 높고, 황토 모르타르의 역학적 특성이 콘크리트 보다는 점토와 더

Table 3 Experiment results of Hwangtoh mortar

Specimen Name	W/B [%]	Initial curing condition	Drying shrinkage[%] ¹⁾	Comp. strength [MPa]	Increased value due to initial sealed curing	
					Drying shrinkage [%] ²⁾	Comp. strength [MPa]
R	91	Air-dry	19.11	0.352	-4.63	0.112 (31.8%)
		Sealed	14.48	0.464	(-24.2%)	
R+We	109	Air-dry	22.19	0.307	-1.56 (-7.2%)	0.026 (8.5%)
		Sealed	20.63	0.333		
AA	109	Air-dry	19.69	0.360	-1.77 (-9.2%)	0.069 (19.2%)
		Sealed	17.92	0.429		
AM	116	Air-dry	23.23	0.184	-6.25 (-26.9%)	0.264 (143.5%)
		Sealed	16.98	0.448		
SP	99	Air-dry	19.48	0.363	-1.09 (-5.6%)	0.013 (3.6%)
		Sealed	18.39	0.376		

¹⁾Drying shrinkage : Drying shrinkage was measured for 7 days after exposing the air-dry condition

²⁾Drying shrinkage : Negative sign indicates the decreased value

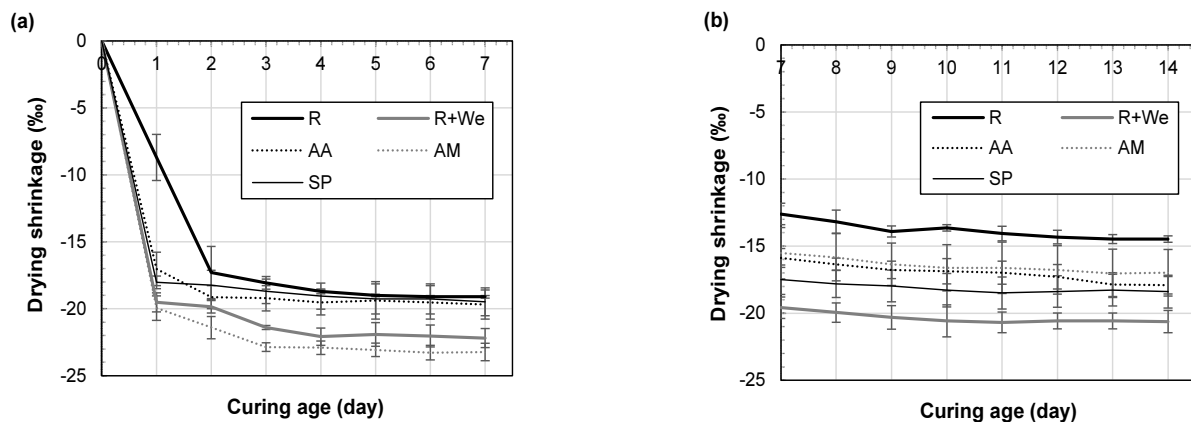


Fig. 5 Drying shrinkage of Hwangtoh mortar with curing age: (a) air-dry and (b) sealed curing

가까운 것이 기여했을 가능성이 높다.

황토 모르타르의 주 바인더인 황토는 주로 실트 크기의 입자로 구성되어 있으며 광물학적으로는 점토에 속한다. 따라서 화학적 및 물리적 특성이 점토와 매우 유사하다. 특히, 높은 공극율(50~55%)로 인한 공극 속의 수분 증발이 황토의 건조 수축량을 증가시키는 원인이 된다(Kim, 2011). 그러나, 콘크리트의 주 바인더인 시멘트와 비교할 때 비중이 낮고 흡수성이 높기 때문에 동일한 유동성을 확보하기 위해 더 높은 W/B가 요구되는데, 이는 다공성과 더불어 높은 건조수축의 원인이 된다.

황토 모르타르의 초기 밀봉양생은 건조수축 저감에 효과가 있는 것으로 확인된다. 효과의 정도는 흡수성 물질의 혼입과 포함된 물의 양에 의존하면서, 5.6~24.2%의 건조수축 저감율을 보였다. 이러한 결과를 통해 황토 모르타르의 경화가 진행되지 않은 상태에서 수분증발을 허용할 경우 건조수축은 더욱 극심하게 발생할 수 있는 것을 수치적으로 확인할 수 있다. 따라서 서론에서 언급한 대로 문화재수리표준시방서에 따른 7일간의 초기양생은 황토 모르타르의 과도한 건조수축을 완화하기 위해 필요한 절차인 것으로 확인된다.

한편, 흡수성 물질의 혼입 효과는 초기밀봉 조건에 의존하는데, 초기밀봉 적용시 그것에 의한 수축저감이 더욱 효과적인 것으로 나타났다. 우선, AA 시편의 경우 초기밀봉이 적용되지 않은 경우 R+We 대비 11%의 수축저감 효과를 보였고, 초기 밀봉 적용시 13%의 저감효과를 보였다. 즉, 밀봉적용시 수축 저감율이 2% 더 상승한다. 흡수력이 더 뛰어난 AM 시편의 경우 초기밀봉 적용에 따라 상반되는 결과를 보였다. 즉, 밀봉 미 적용시 오히려 R+We 시편 보다 건조수축이 5% 더 증가하였는데, 이는 W/B가 이 시편보다 7% 더 높기 때문이다. 그런데, 밀봉 적용시 반대로 R+We 시편 대비 18%의 수축저감율을 보였다. 또 다른 흡수성 물질인 해초풀은 초기밀봉과 관계없이 공통적으로 11~12%의 수축저감율을 보였는데, 여기에는 R+We 시편보다 W/B가 10% 더 낮은 것이 수축저감에 유리하게 작용한다. 따라서 해초풀의 순수한 흡수능력에 의한 저감으로 보기 어렵다.

이와 같이, 흡수성 물질의 혼입 자체는 건조수축 저감에 효과가 있는 것으로 확인된다. 그러나, 작업성 확보를 위해 물이 더 추가될 경우, 이러한 저감효과 보다 W/C 증가로 인한 건조수축 증가가 더욱 지배적이므로 흡수성 물질의 혼입이 효과적이지 않을 수 있다. 이러한 결론은 비록 흡수성 물질을 포함하지 않지만, W/B가 가장 낮은 R 시편의 건조수축이 모든 시편 중 가장 낮은 결과를 통해 도출된다. 따라서 흡수성 물질을 혼입하여 건조수축을 효과적으로 저감시키기 위해서는 작업성 확보를 위해 물을 증가시키는 방법이 아닌 다른 전략이 필요하다.

가장 일반적으로, 전체 포함되는 물의 양 또는 W/B를 증가시키지 않고 고성능 감수제를 첨가하는 방법이 있다. 그러나, 기존연구(Yang et al., 2006)에서는 황토를 혼화제로 혼입한 콘크리트에 리그닌계 감수제 혼입시 황토와의 반응에 의해 내부에 많은 공기를 발생시켜 압축강도 발현을 크게 감소시키는 것으로 나타났다. 또한, 리그닌계와 폴리카본산계를 1:1로 혼합한 감수제를 황토결합재를 사용한 모르타르에 혼입한 결과(Yang et al., 2006), 유동성 향상효과는 크지 않으며, 오히려 압축강도를 급격히 저하시켰기 때문에 이것의 사용은 적합하지 않다고 보고하였다. 따라서, W/B 변화 없이 천연황토 모르타르의 유동성을 향상시키기 위해서는 효과적인 고성능 감수제 또는 새로운 물질 및 방법에 대한 연구가 우선적으로 필요하다.

이 연구의 건조수축 측정결과에 따라, 천연황토 모르타르의 극심한 건조수축을 효과적으로 저감시키기 위해서 우선적으로 고려되어야 할 사항은 포함되는 물의 양을 줄이는 것이다. 다음으로, 밀봉 양생을 통한 재령 초기의 수분증발 방지이며, 마지막으로 흡수성 물질의 혼입을 통한 수분건조의 완화가 고려되어야 한다. 따라서, 전통 황토를 이용한 공사 시 재료가 완전히 양생될 때까지 수분건조를 막는 현재의 조치는 합리적이다. 흡수성 물질의 혼입은 물이 추가되지 않는다는 조건아래 건조수축 저감에는 효과가 있으며, 흡수력이 더 우수한 재료를 사용하여 초기밀봉 양생을 수행하면 그 효과를 더욱 증가시킬 수 있다.

3.2 압축강도

흡수성 물질의 종류와 초기 밀봉양생 적용에 따른 28일 압축강도를 Fig. 6에 나타냈다. 비록, 주로 전통주택의 마감용으로 사용되지만, 모든 시편은 압축강도가 0.5 MPa 이하로 시멘트 기반 건설재료들(시멘트 모르타르, 콘크리트, 벽돌 등)에 비해 매우 낮은 강도를 보였다. 낮은 강도에는 천연황토 모르타르의 낮은 수화반응성(Kang et al., 2008)과 높은 W/B가 주

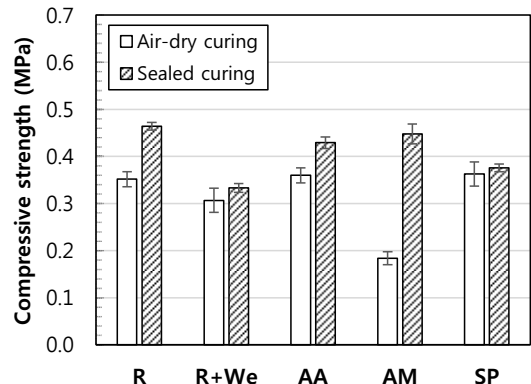


Fig. 6 Compressive strength of Hwangto mortar

로 기여한다.

이러한 황토 모르타르의 양생 초기에 수분증발을 차단할 경우 건조수축의 감소뿐만 아니라 압축강도 역시 증가하는 것으로 나타났다. 증가율은 3.6~143.5%로 건조수축과 유사하게 흡수성 물질의 혼입과 포함된 물의 양에 의존하였다. 밀봉 양생한 경우 더 높은 강도를 나타낸 원인 중 하나는 밀봉양생이 표면을 보호하고 수분손실을 방지하는 등 보다 양호한 양생조건을 유지하기 때문이다(Cho et al., 2013; Song, 2012).

가장 극적인 증가율을 보인 시편은 AM으로, 여기에는 가장 많은 양의 물이 포함되어 있다. 이 시편에 초기밀봉이 적용되지 않은 경우, 다른 시편들이 R+We 시편대비 증가한 것과 다르게, 압축강도가 40% 감소하였다. 이러한 감소에는 크게 두 가지 원인이 기여한다. 첫째는 W/B가 모든 시편들 중 가장 높은 것이고, 둘째는 모르타르 또는 콘크리트 내부에서 SAP은 흡수와 함께 팽창하고 결국 추가 공극 형성시키거나(Kang et al., 2016), 전체 공극율을 높이는 것이다(Kang et al., 2016). 그리고 SAP의 흡수력이 높을수록 증가하는 공극을 역시 높다. 이러한 공극을 증가에도 불구하고, 초기밀봉 양생 적용시 AM 시편은 초기의 습윤 상태 유지 또는 내부양생이 강도발현에 유리하게 작용하여 R+We 시편의 압축강도 보다 34.5% 더 높았다.

AA 시편도 유사하게 R+We 시편대비 압축강도 증가율이 초기밀봉 양생을 적용한 경우(34.5%)가 그렇지 않은 경우(17.3%)보다 더 높았다. 그러나, 해초풀이 혼입된 SP 시편은 오히려 초기밀봉이 적용되지 않은 경우(18.2%)가 적용된 경우(12.9%) 보다 근소한 차이로 증가율이 더 높았다. 해초풀 혼입에 의한 압축강도 증가에는 R+We 시편보다 W/B가 더 낮은 원인도 기여하므로, 이러한 증가에 해초풀의 흡수 능력이 모두 기여한다고 보기 어렵다.

초기밀봉이 수행되고 흡수성 물질을 포함하는 시편들 중에서 AM 시편의 압축강도가 가장 높다. 이는, 비록 가장 많은 물을 포함하더라도, 흡수능이 우수한 물질을 포함할 경우 내부양생이 효과적이라는 것을 의미한다. 내부양생은 수중 또는 습윤 양생과 유사하게 콘크리트와 같이 수화 반응에 의해 경화되는 재료들에게 보다 양호한 양생 조건을 제공시켜 주는 것으로, 외부의 수분을 내부로 이동시키는 것이 아니라 흡수성 물질이 흡수한 수분을 체적 전체로 확산시키는 양생방법이다(Kang et al., 2016). 이 연구에서는 흡수성 물질의 혼입에 의한 황토 모르타르의 내부양생 성능은 초기 밀봉양생을 전제조건으로 한다는 것을 새롭게 확인하였다. 그러나, 흡수성 물질에 의한 내부양생이 강도향상에 효과적이기 위해서는 앞에서 언급했듯이 포함되는 물의 양이 증가되어서는 안 된다.

한편, 황토 모르타르의 건조수축과 압축강도를 각각 검토하면, 흡수성 물질의 혼입 또는 포함된 물의 양에 따른 각 재료

특성의 경향성이 상호 유사한 것을 확인할 수 있다. Fig. 7은 초기밀봉 양생에 의해 증가한 압축강도와 감소한 건조수축 변형율을 나타낸다. 그림과 같이, 각 시편에 따른 두 재료특성이 서로 유사한 경향을 보이는데, 실제로 두 재료특성은 선형 추세선 결정계수(R^2)가 89.2%에 이를 정도로 확실한 상관성을 가진다. 이러한 상관성을 통해, 흡수성 물질의 혼입 또는 W/B 감소로 인한 황토 모르타르의 압축강도 증가에는 건조수축의 감소가 추가로 관계한다는 것을 알 수 있다. 이러한 관계는 밀봉양생 적용시 압축강도가 증가한 원인에도 동일하게 적용된다. Fig. 7과 같은 증가와 감소간의 상관성 뿐만 아니라, 황토 모르타르의 압축강도는 전체 건조 수축량과 밀접한 관련이 있을 가능성이 매우 높기 때문에, 이어서 추가적인 분석을 진행하였다.

3.3 건조수축에 따른 압축강도

Fig. 8과 같이 황토 모르타르의 28일 압축강도는 최종 건조수축 변형율과 상관성이 높은 것으로($R^2=86%$) 확인된다. 건조수축 변형율이 1%씩 증가 할 때마다 압축강도는 약 0.03 MPa 감소한다. 건조수축에 의존하는 천연 황토 모르타르의

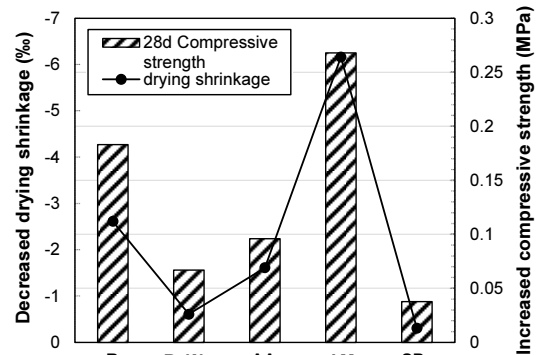


Fig. 7 Changed value due to sealed curing

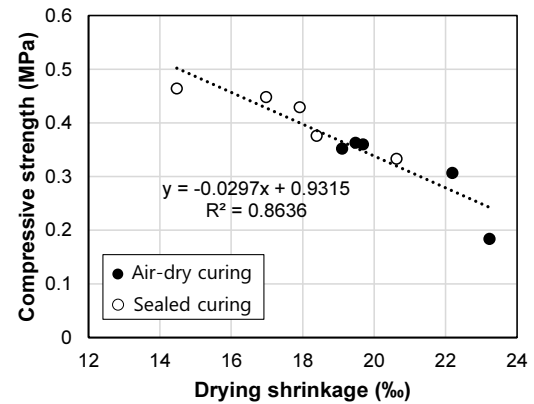


Fig. 8 Relationship between compressive strength and drying shrinkage

압축강도에는 균열이 연계될 가능성이 크다. 천연 황토 모르타르의 경우 포졸란 반응과 같은 수화반응성이 매우 낮기 때문에(Kang et al., 2008), 시멘트 기반 재료들 수준의 압축강도(수~수십 MPa)가 확보되기 어렵다. 이러한 상황에서 건조수축의 증가는 내부 균열의 확장으로 연결되어 결국 압축강도의 감소 원인이 된다(Yang et al., 2010).

이러한 상관성 검토를 통해 W/B의 감소, 초기의 밀봉양생, 그리고 흡수성 물질의 혼입과 같은 황토 모르타르의 건조수축 저감 전략은 동시에 압축강도 증가와도 연계되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 밀봉양생과 더불어 흡수성 물질을 혼입할 경우 해초풀 보다는 흡수 능력이 더 우수한 SAP을 이용하는 방법이 천연 황토 모르타르의 압축강도 증가와 건조수축 감소에 더 효과적이다.

4. 결론

이 연구에서는 천연 황토 모르타르에 사용되고 있는 흡수성 물질과 초기 밀봉양생 조건이 그것의 압축강도와 건조수축에 어떠한 영향을 얼마나 미치는지 실험을 통해 조사하였다. 흡수성 물질로 전통적 재료인 해초풀과 현대적 재료인 SAP이 선택되었으며, 초기밀봉 양생은 문화재표준시방서에 따라 7일로 결정되었다. 이러한 연구결과는 다음과 같이 요약된다.

- 1) 황토 모르타르의 건조수축은 타설 후 3일 만에 수렴에 근접할 정도로 빠르게 진행되며, 그것에 의한 길이 변형율은 2% 내외로 시멘트 기반 건설재료와 비교할 때 10배 이상으로 높은 수치를 나타낸다. 압축강도 역시 0.5 MPa 이하로 건설재료 중 낮은 범위에 속한다.
- 2) 초기 7일간의 밀봉양생은 황토 모르타르의 건조수축과 압축강도에 있어 긍정적인 영향을 미쳤다. 따라서, 문화재수리표준시방서에 명시된 초기양생은 필요한 절차이다.
- 3) 흡수성 물질의 혼입은 건조수축 저감과 압축강도 향상에 효과를 보였으며, 해초풀 보다는 흡수능력이 더 우수한 SAP이 더 효과적이었다. 그러나, 이러한 효과가 유효하기 위해서는 초기밀봉이 수행되어야 하고, 모르타르에 포함되는 물의 양이 증가되어서는 안 된다.
- 4) 건조수축과 압축강도의 선형 상관성이 확인되었다. 이러한 상관성은, 천연 황토 모르타르처럼 수화반응성이 극히 낮은 재료에서 건조수축에 의한 균열증가는 결국 압축강도의 하락으로 연결되는 것을 의미한다.

이와 같이 연구에서는 천연 황토를 이용하는 문화재 공사 및 전통주택 공사에 있어 초기 밀봉양생의 필요성을 실험

로 입증하였고, 해초풀과 같이 전통적으로 사용되고 있던 흡수성 물질의 원리 및 성능을 정량적이고 체계적으로 분석 및 평가하였다. 그리고, 이러한 기능을 현대화 및 대체할 수 있는 재료의 선택과 대체 가능성을 확인하였다. 마지막으로 천연 황토 모르타르의 건조수축-압축강도 상관성 도출에 의해 W/B의 감소, 초기의 밀봉양생, 그리고 흡수성 물질의 혼입과 같은 건조수축 저감 전략이 압축강도 증가에도 효과적이라는 것을 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 공학연구원의 게재료를 지원받았습니다.

References

Assmann, A., and Reinhardt, H. W. (2013), The Use of Superabsorbent Polymers to Mitigate Shrinkage of Concrete, *Mechanics and Physics of Creep, Shrinkage, and Durability of Concrete: A Tribute to Zdeněk P. Bažant: Proceedings of the Ninth International Conference on Creep, Shrinkage, and Durability Mechanics (CONCREEP-9)*, September 22-25, 2013 Cambridge, Massachusetts, ASCE Publications, 301-307.

Cho, H. B., Kim, H. Y., Lee, Y. D., and Jung, S. J. (2013), Effect of Maintaining Time of Formwork on Strength and Dry Shrinkage of Mock-up Concrete in cold Weather Condition, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure and Construction*, 29(7), 109-116 (In Korean, with English abstract).

Choi, H. Y., Hwang, H. J., and Kim, M. H. (1997), An Experimental Study on the Mechanism of the Red-Clay Reactions, *Proceeding of Architectural Institute of Korea*, 17(2), 1257-1262 (In Korean, with English abstract).

Cultural Heritage Administration (2014), Cultural Heritage Repair Standard of Estimated, Design DNA, Daejeon, Korea, 2014, 168-173 (In Korean).

Cultural Heritage Administration (2014), Cultural Heritage Repair Standard Specification, Design DNA, Daejeon, Korea, 185 (In Korean).

Go, S. S., Chung, C. W., Struble, L. J., and Lee, H. C. (2010), Pozzolanic Activity of Hwangtoh Clay, *Construction and Building Materials*, 24(12), 2638-2645.

Heo, J. O., Lee, J. K., and Hyung, W. G. (2014), Properties of Non-Sintered Hwangtoh Mortar Using Eco-Friendly Inorganic Binding Material, *Journal of the Korea concrete Institute*, 26(4), 499-506 (In Korean, with English abstract).

Hwang, H. J., Kim, T. H., and Yang, J. H. (2009), A Study on Selection and Size of Earth in Application of Rammed Earth, *Korea Institute of Ecological Architecture and environment*, 9(2), 65-71 (In Korean, with English abstract).

Hwang, Y. W. (2011), A Study of Dry-Wall Performance Evaluation:

- An Alternative to Korean Traditional Mud Walling, *Journal of the Korean Housing Association*, 22(6), 61-69 (In Korean, with English abstract).
- Jensen, O. M., and Hansen, P. F. (2001), Water-entrained Cement-based Materials: I. Principles and Theoretical Background, *Cement and concrete research*, 31(4), 647-654.
- Joo, D. S., Lee, J. S., Cho, S. Y., Shin, S. J., and Lee, E. H. (1995), Changes in Functional Properties of Alginic Acid by Enzymatic Degradation, *Journal of Korean Society of Food Science and Technology*, 27(1), 86-91 (In Korean, with English abstract).
- Kang, S. H., Wang, Z., Hong, S. G., and Moon, J. H. (2016), Micro-Computed Tomography Study on the Pore Structure of Ultra-high Performance Concrete Containing Water-entraining Admixture, *Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials*, Kassel.
- Kang, S. S., Lee, S. L., Hwang, H. J., and Cho, M. C. (2008), Hydration Heat and Shrinkage of Concrete Using Hwangtoh Binder, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 20(5), 549-555 (In Korean, with English abstract).
- Kang, S. H., Moon, J. H., and Hong, S. G. (2016), Effect of Internal Curing by Super-Absorbent Polymer (SAP) on Hydration, Autogenous Shrinkage, Durability and Mechanical Characteristics of Ultra-High Performance Concrete (UHPC), *Journal of the Korea concrete Institute*, 28(3), 317-328 (In Korean, with English abstract).
- Kim, G. J., Lee, H. C., and Go, S. S. (2010), An Experimental Study on the Properties of Hwangtoh Board, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 26(6), 45-52 (In Korean, with English abstract).
- Kim, M. S., Kim, J. T., and Park, H. S. (2004), A Study on the Conservative Building Improvements for Indoor Thermal Environment in a Traditional House of Genjaegotaek, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 20(7), 251-258 (In Korean, with English abstract).
- Kim, S. Y. (2011), *Properties of Loess Mortar Using Eco-Friendly Solidification*, Master's dissertation, Keimyung University, Department of Civil Engineering, 1-5, 11-14 (In Korean, with English abstract).
- Korea Agency for Technology and Standard (KATS) (2007), Testing Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar (KS L 5105), Korean Standards Association, KSA, 5 (In Korean).
- Korea Agency for Technology and Standard (KATS) (1997), Testing Method for Drying and Firing Shrinkages of Ceramic Whiteware Clays (KS L 4004), Korean Standards Association, KSA, 2 (In Korean, with English abstract).
- Korea Agency for Technology and Standard (KATS) (2006), Methods of Testing Cements: Determination of Strength (KS L ISO 679), Korean Standards Association, KSA, 16 (In Korean).
- Korea Agency for Technology and Standard (KATS) (2007), Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement (KS L 5111), Korean Standards Association, KSA, 5 (In Korean).
- Lee, D. S., Kim, H. R., Cho, D. M., Nam, T. J., and Pyeun, J. H. (1998), Uronate Compositions of Alginates from the Edible Brown Algae, *The Korea Society of Fisheries and Aquatic Science*, 31(1), 1-7 (In Korean, with English abstract).
- Lee, T. G. (2006), Determination of Ratios of Natural Ingredients for Loess (Hwangtoh) as Environmental-Friendly Materials, *Korea Institute of Ecological Architecture and Environment*, 6(2), 51-57 (In Korean, with English abstract).
- Lee, Y. S., Lim, S. W., Won, J. S., Kim, B. K., Kim, J. Y., and Choi, J. S. (2006), Development of Hwangtoh Mortar Using Seaweed, Trend/Research Report, Yeong dong Collage, 5-33 (In Korean).
- Mechtcherine, V., and Reinhardt, H. W. (2012), Application of Super Absorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction: State-of-the-Art Report Prepared by Technical Committee 225-SAP (Vol. 2), Springer Science & Business Media, 13-110.
- Mehta, P. K., and Monteiro, P. J. (1993), Concrete, The McGraw-hill Companies, The United States of America, 97-108.
- Mun, J. H., Yang, K. H., Jeon, J. K., and Hwang, H. Z. (2012), Shrinkage Crack Control of Hwangtoh Mortar using Fiber and Admixture, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 28(8), 111-119 (In Korean, with English abstract).
- Park, C. W., Lee, H. I., and Lee, K. Y. (2012), A Reserch Study on Fundamental Properties of Traditional Oil compound Lime as Eco-freindly Bulding Material, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 28(7), 107-115 (In Korean, with English abstract).
- Seong, J. U. (2007), A Study on the Physical Properties of the Loess Brick Mixed with Lime and Straw, Master's dissertation, Kyungpook National University, Department of Architectural Engineering, 7-9 (In Korean).
- Song, K. I. (2012), A Study on the Carbonation of Alkali Activated Slag Mortar Affected by Basicity and Sealed Curing, Master's dissertation, Chonnam National University, Department of Architectural Engineering, 76-79 (In Korean, with English abstract).
- Wu, Y., Mimura, H., Niibori, Y., Ohnishi, T., Koyama, S., and Wei, Y. Z. (2012), Study on Adsorption Behavior of Cesium Using Ammonium Tungstophosphate (AWP)-Calcium Alginate Microcapsules, *Science China Chemistry*, 55(9), 1719-1725.
- Yang, D. G. (2003), Preparation and Characteristics of Magnetic Alginate Adsorbents, Master's dissertation, Myongji University, Department of Environmental Engineering and Biotechnology, 9-10 (In Korean, with English abstract).
- Yang, K. H., Hwang, H. J., and Lee, S. (2010), Effects of Water-Binder Ratio and Fine Aggregate-Total Aggregate Ratio on the Properties of Hwangtoh-Based Alkali-Activated Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 22(9), 887-896.
- Yang, K. H., Hwang, H. Z., Kim, S. Y., and Song, J. K. (2006), Effect of Superplasticisers and Adimixtures on the Fluidity and Compressive Strength Development of Cementless Mortar Using Hwangtoh Binder, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 18(6), 793-800 (In Korean, with English abstract).
- Yang, K. H., Kim, S. Y., and Song, J. G. (2006), The Mechanical Characteristics of Concrete Mixed with Activated Hwangtoh and Specialty Cellulose Fiber, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 22(1), 111-118 (In Korean, with English abstract).
- Yun, J. H. (2010), Synthesis and Characterization of Biodegradable Polymer (Alginate) Extracted from Algae, Master's Thesis, Yonsei University, Department of Chemistry, 6-8 (In Korean, with English abstract).

Received : 07/14/2016

Revised : 08/02/2016

Accepted : 08/16/2016

요 지 : 이 연구에서는, 우리나라 전통 건축재료 중 하나인 천연 황토 모르타르에 사용되어 온 해초풀과 현대적 재료인 고흡수성수지 (Superabsorbent Polymer, SAP)와 같은 흡수성 물질이 이러한 모르타르의 건조수축과 압축강도에 미치는 영향이 조사되었다. 흡수성 물질과 더불어 문화재표준시방서에서 권고하는 초기 밀봉양생의 효과 역시 검토되었다. 실험에 의한 28일 압축강도와 수렴한 건조수축 변형율의 검토 결과, 우선 초기 7일간의 밀봉 양생은 강도향상과 수축저감에 효과적이었다. 따라서, 문화재표준시방서의 권고는 합리적이며 실효성이 있는 것으로 검증된다. 흡수성 물질의 혼입 역시 두 재료특성에 있어 효과적이는데, 그 효과는 물질들의 흡수 능력에 의존한다. 따라서, 흡수 능력이 더 높은 SAP을 사용하는 것이 해초풀을 사용하는 것보다 더 효과적이다. 그러나, 이러한 것들이 유효하기 위해서는 초기 밀봉양생과 물이 추가 되지 않는 조건들이 함께 따라야 한다. 마지막으로, 황토 모르타르의 압축강도의 증가는 건조수축의 감소와 선형적으로 관계한다. 이러한 선형 상관성에 의해, 초기밀봉 양생 또는 흡수성 물질의 혼입에 따른 모르타르의 압축강도 증가하는 원인이 정량적으로 설명될 수 있다.

핵심용어 : 황토 모르타르, 밀봉조건, 고흡수성수지(SAP), 압축강도, 건조수축
