

흙과 모래의 최밀충진효과와 석회복합체의 첨가에 따른 강도 증진

Increasing the Strength with Earth and Soil through Optimum Micro-filler Effect and Lime Composite Addition

황 혜 주* 노 태 학** 강 남 이***
Hwang, Hey-Zoo Roh, Tae-Hak Kang, Nam-Yi

Abstract

Earth has been used as a building material not only our country but also many foreign countries in the world. In foreign countries, we can often find the high-storied earthen houses which have been maintained for over several hundred years, which means the fact that earth differs in durability according to the methods of utilizing earth. So, the purpose of this study is to progress the fundamental research for utilizing earth as a wall material. Also, the another purpose of this study is to utilize the optimum micro-filler effect which adjusts the grain size of earth and the lime composite which promotes chemical combining power, and so examine whether earth material ensures its high compressive strength.

This study applied both of rammed earth method and pour earth method among earth architecture methods. This study investigated compressive strength, slump, and air content according to unit binder weight. On the basis of such experimental results, this study derived the following conclusions.

1) Optimum micro-filler mixtures reduce a lot of fine particles contained in earth. If optimum micro-filler mixtures are used as aggregates, they develop lower W/B and relatively higher strength than general earth.

2) In this study, which uses optimum micro-filler earth mixtures and lime composite, rammed earth method develops 29MPa and pour earth method develops 28MPa in 28 days compressive strength. Such strengths can be utilized in building walls.

키워드 : 최밀충진효과, 석회복합체, 흙다짐공법, 흙타설공법

Keywords : optimum micro-filler effect, lime composite, rammed earth method, pour earth method

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

흙은 우리나라뿐만 아니라 세계의 여러 나라에서 건축 재료로 사용되고 있다. 우리나라에서도 1970년대 새마을 운동이 있기 이전에는 많은 흙집들이 지어졌고 주위에서 쉽게 볼 수 있었다. 하지만 새마을 운동을 계기로 시멘트 및 2차제품이 벽체를 구성하는 주요 건축재료가 되었으며 흙은 구식의 재료로 밀려나게 되었다. 그러나 최근 환경문제로 인해 친환경재료에 대한 대중의 관심이 커졌고 흙집을 짓는 사례가 늘고 있다. 그렇지만 강도와 내구성이 약하다는 인식은 여전히 남아 있다.

그런데 해외의 경우 흙건축물이 짧게는 몇 십 년, 길게는 몇 백 년 동안 유지되고 있다. 그 이유는 흙을 건축재료로 사용할 때의 주의 사항을 잘 지켰기 때문이다. 특히 흙은 입도조건을 잘 맞추어야 강도가 높고 균열의 발생이 적으며 내구성이 좋게 된다. 또한 흙의 특성에 따라 강도의 개선을 위해 석회나 석회복합체를 혼합하기도 한다.

따라서 본 연구는 흙의 입도조건을 조절하고 석회복합체를 혼합하여 흙을 벽체재료로써 활용할 수 있는 강도 확보를 목적으로 한다. 장기적으로 흙건축 재료로서의 활용을 위한 내구성 및 역학적 특성이 연구될 것이며 본 연구는 이러한 연구의 기초자료를 제공하고자 한다.

1.2 연구의 방법 및 절차

본 연구에서는 친환경재료인 흙을 건축재료로 활용하기 위한 방안으로 흙의 입도조건을 조절하고 결합재로서 석회복합체를 활용하여 고강도화 하기 위해 실험하였다. 흙건축의 적용공법으로 다짐공법과 타설공법을 검토하였다. 먼저 흙의 입도조건을 개선하기 위해 최밀충진 실험

* 국립목포대학교 건축학과 교수, 공학박사
(zederro@korea.com)

** 교신저자, 국립목포대학교 건축학과 조교수
(lucas06@mokpo.ac.kr)

*** 국립목포대학교 건축학과 박사수료(21ckny@hanmail.net)
본 연구는 농림수산식품부 (농림, 식품, 수산) 기술개발사업의 지원에 의해 이루어진 것임.

을 실시하였다. 실트 이하의 입자를 많이 포함한 흙의 성질을 개선하기 위해 모래를 혼합하였으며 체적비에 따른 최밀충진배합을 선정하였다. 다음으로 최밀충진배합을 골재로 사용하여 석회복합체와의 적정배합을 찾는 실험을 하였다. 석회복합체의 단위결합재량(kg/m³)을 250, 350, 450 세 가지 수준으로 하고 각각의 단위결합재량에 W/B를 3가지 수준으로 하여 실험을 실시하였다. 다짐과 타설 공법에 의해 몰드를 성형한 후 재령별 압축강도, 유동성, 공기량을 측정하였다. 이중 가장 높은 강도를 갖는 배합을 흙만을 골재로 활용한 배합과 비교하여 압축강도와 유동성을 검토 하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 흙의 강도 이론¹⁾

흙은 크게 두 가지 반응원리에 의해 강도발현을 하게 되는데 입자이론과 결합재이론이 있다.

첫째, 입자이론은 입자간의 간격을 최소화하여 입자가 갖는 전기력과 인력을 이용하여 강도를 발현을 하게 되는데 이때 입자간의 간격을 최소화하기 위해 흙 내부에 발생하는 공극을 최소화 하는 최밀충진효과를 이용하는 것이다. 최밀충진효과는 큰 입자들 사이에서 발생하는 공극에 작은 입자들이 촘촘히 채워지면서 입자간의 인력을 최대화 하는 것이며 발생하는 인력은 뉴턴의 법칙을 따른다. 여기에 더하여 배합수에서 추가적인 결합력이 발생하게 된다. 첨가되는 물은 극성을 띠고 있으며 물과 점토분의 Na⁺, K⁺, Ca²⁺ 이온이 반응하게 된다. 이러한 반응으로 인하여 흙입자 중 실트, 모래, 자갈을 결합시키는 역할을 하게 된다. 이때 물과 점토분의 결합력은 쿨롱의 법칙을 따르게 된다.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \text{ ----- 뉴턴의 법칙}$$

$$f = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \text{ ----- 쿨롱의 법칙}$$

둘째, 결합재이론은 입자와 입자를 강한 결합력을 가진 외부 결합재의 첨가에 의해 강도를 발현하는 이론이다. 일반적으로 흙의 결합재로서 회를 많이 사용해 왔다. 여기에는 이온반응과 포졸란 반응에 의해 응결현상이 발생하게 되는데 이온반응은 석회 중의 Ca²⁺가 점토입자의 이온과 교환, 흡착되어 점토입자가 진립화하는 현상을 말한다. 다음으로 포졸란 반응은 흙의 SiO₂, Al₂O₃ 성분이 석회의 알칼리와 반응하여 CSH겔 (Afwillite 반응), SASH겔 (Strätlingite 반응)을 생성하여 흙의 점토분, 실트, 모래, 자갈 등의 입자들을 결합시켜 강도를 발현하는 반응이다.

2.2 해외 흙건축

흙을 이용한 건축은 세계 1/3의 인구가 이용하고 있으며 각각의 나라는 지역의 문화나 기후 및 기타 특성에 맞게 다양한 형태로 흙건축을 발전시켰다. 또한 흙건축의

내구성 증진을 위해 흙의 입도를 조정하고 흙의 내구성을 키우기 위해 여러 가지 물질을 첨가하기도 했다. 동물의 털과 분, 식물의 기름, 섬유를 섞어 사용하기도 하고 석회를 사용하기도 하였다. 시멘트를 섞지 않은 이러한 건축물들은 현재에도 사람들이 사용하고 있으며 앞으로도 이용될 것이다. 그림 1은 중동과 유럽의 흙건축 사례이다. 왼쪽은 중동의 도시 시밤은 약 16세기에 조성된 도시로서 대부분 흙벽돌로 지어졌으며 5층에서 15층 규모의 건물이 500여 채나 된다고 한다. 오른쪽은 독일의 여관으로 1820년에 지어진 7층 규모의 흙다짐 건축물로써 현재도 사용 중이다. 이외에도 아프리카, 북미, 아시아, 호주 에도 다양한 흙건축이 많이 존재한다. 그러나 이러한 건축물의 흙벽은 강도가 낮기 때문에 최하층의 경우 두께가 1m를 넘나들기 때문에 전용면적이 작은 단점이 있다.



a. 예멘의 빌딩 b. 독일의 여관
그림 1. 흙건축 해외사례

3. 흙과 모래의 최밀충진배합 도출 실험

3.1 실험개요

흙에는 실트 이하의 입자가 다량 포함되어 있다. 이 입자들은 비표면적이 크기 때문에 배합 시에는 다량의 물을 필요로 하지만 양생 후에는 잉여수의 증발에 의해 발생한 미세한 공극이 발생하여 흙의 물리적인 결합력을 약화시킨다. 본 실험에서는 흙의 물리적 결합력을 개선하기 위해 흙을 입도분석 한 다음 흙의 실트량을 제어하기 위해 모래를 첨가하여 최밀충진배합을 도출하고자 한다.

3.2 실험재료

1) 무안흙

습윤상태의 흙을 채취하여 8mm 체로 체가름 한 다음 기건상태에서 건조하여 실험에 사용하였으며, 흙의 물리, 화학적 성질은 표 1과 같다.

표 1. 무안흙의 물리·화학적 성질

함수율(%)		비중		공극률(%)		단위용적질량(kg/l)	
2.66		2.49		50.90		1.123	
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	LOI	
43.26	13.23	5.86	8.41	6.5	2.15	18.16	

2) 모래

인천광역시 강화군 앞바다에서 채취한 해사를 사용하였으며, 물리적 특성은 아래 표 2와 같다.

1) 황혜주, 흙건축, 도서출판 씨아이알, 2008

표 2. 모래의 물리적 성질

최대입경 (mm)	비중	조립률 (FM)	흡수율 (%)	실적률 (%)	단위용적질량 (kg/l)
5	2.6	2.47	0.22	57.7	1.5

3.3 실험방법

1) 입도분석 실험

모래의 입도분석은 골재의 체가름 시험법에 의해 모래를 건조하여 입도분석을 실시하였다. 그러나 흙은 점성이 크고 실트이하의 입자들이 뭉쳐있으므로 물을 뿌려 입자들의 뭉친 현상이 풀리도록 하여 체가름 시험을 하였으며 실트이하(0.074mm under)의 경우 레이저 입도분석을 실시하였다.

2) 최밀충진실험

건조된 흙과 모래의 체적비에 따라 혼합하여 일정한 용기 내에 다져 넣고 무게가 가장 높은 배합을 최밀충진 배합으로 선정하였다. 흙의 경우 건조된 상태에서도 입자들이 뭉쳐 있으므로 고무망치를 이용하여 잘게 부순 다음에 사용하였다.

3.4 실험결과

1) 입도분석실험

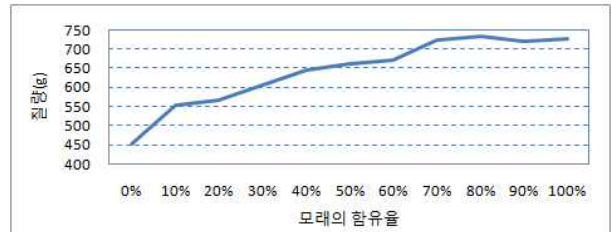
흙의 입도분석 실험 결과(그림 3), 시멘트를 활용한 몰탈 및 콘크리트 실험에서는 사용되지 않는 입도 영역인 0.002~0.074mm의 실트 입자의 비율이 50%를 넘는 것으로 나타났다. 단일 배합 시 비표면적이 큰 실트입자의 영향으로 유동성을 요하는 배합의 경우 필요 배합수량이 매우 높을 것으로 판단된다. 입도 조절을 위한 조치나 혹은 다른 처리 없이 사용할 경우 이로 인해 강도의 저하 현상이 높을 것으로 판단된다. 모래의 입도분석 결과 0.15mm 이하의 입자가 1%로 낮게 나타났으며 0.6~1.2mm 입자가 전체의 90%이상을 차지하는 것으로 나타났다.

2) 최밀충진실험

흙과 모래의 최밀 충진 배합(이하 최밀충진배합)은 흙:모래=17:83에서 가장 무게가 높은 것으로 나타났다.(그림 2) 최밀충진배합의 경우 모래의 첨가량이 높으므로 흙에 포함된 다량의 실트를 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 0.074mm 이하의 실트 및 점토는 전체 중량의 10.35%로 매우 낮게 나타났다. 점토분의 함유량은 0.9%로 매우 낮은 것으로 나타났으며 결합력을 보완하기 위한 결합체의 첨가가 필요할 것으로 판단된다.

공법 적용을 위해 실시한 비교 실험 결과는 그림 4와 같이 나타났다. 흙건축 공법 중 하나인 흙다짐공법과 입도를 비교한 결과 0.002mm이하의 점토입자의 함량이 매우 낮은 것으로 나타났으며 0.074mm의 실트입자는 최소 기준을 만족시켰다. 모래질 입자의 경우 각각 함량이 최소 기준을 벗어나지는 않는 것으로 나타났다. 흙의 타설과 관련하여 시멘트콘크리트의 잔골재와 입도비교를 한 결과 0.15mm 이상의 입자에서는 잔골재의 표준입도범위

를 만족시키는 것으로 나타났으나 콘크리트에서 사용되지 않는 입자 특히 0.074mm 이하의 실트, 점토 입자의 비율이 약 10%로 높게 나타났다. 이는 흙타설공법으로 시공 시 유동성을 확보하기 위한 높은 W/B를 요하게 되고 상대적으로 강도는 저하 될 것으로 사료된다.



a. 최밀충진실험 1차 결과



b. 최밀충진실험 2차 결과

그림 2. 흙과 모래의 최밀충진 실험

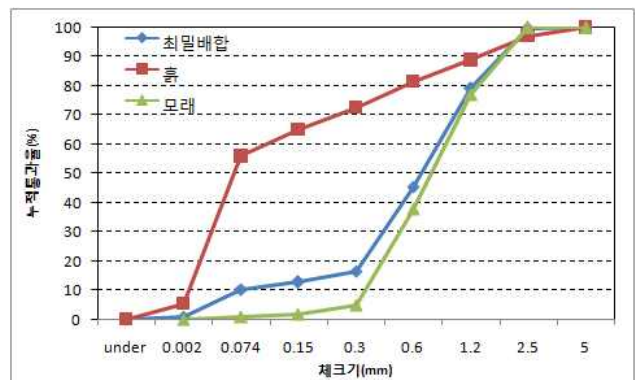


그림 3. 흙, 모래, 최밀충진배합의 입도분포 곡선

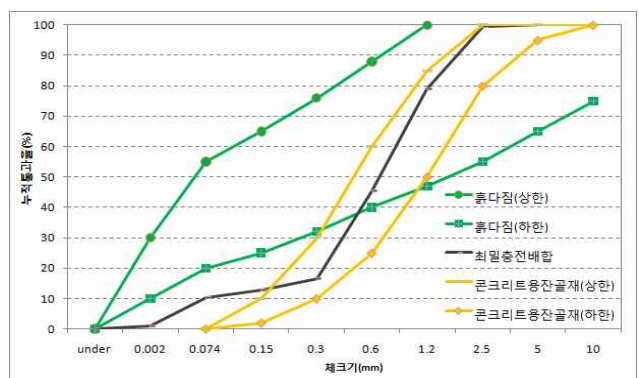


그림 4. 공법에 따른 입도 비교

4. 석회복합체를 혼합한 최밀충진배합의 강도 특성

4.1 실험 개요

본 실험에서는 입도를 개량한 최밀충진배합을 활용하여 고강도 벽체 재료를 만들기 위한 실험을 실시하였다. 실험은 크게 다짐공법과 타설공법으로 진행하였으며 최밀충진배합을 골재로 활용하였다. 강도를 개선하기 위해 석회복합체를 첨가하였으며 단위결합재량은 250, 350, 450의 3수준으로 하였다. 반죽질기에 따라 W/B를 3수준으로 설정하였다. 실험인자와 수준, 측정방법은 표 3과 같다. 실험 후 최밀충진배합을 골재로 사용한 배합과 일반 흙을 골재로 사용한 배합에 대해서 각각의 단위결합재량에 따른 W/B, 압축강도 특성을 비교분석하였다.

표 3. 흙벽체 적용 실험 인자 및 수준

성형방법	실험인자	실험수준	측정방법
다짐	단위결합재량 (kg/m ³)	250,350,450	공기량, 슬럼프, 압축강도
	W/B(%) 반죽질기에 맞게 조정	3수준	
타설	혼화제(%)	2%	

4.2 실험재료

배합에 사용된 골재는 최밀충진배합을 사용하였다. 흙에 부족한 화학적 결합력의 증진을 위한 결합재로서 석회복합체를 사용하였다. 석회복합체는 석회와 무기질 재료를 혼합한 재료이며 포졸란 반응을 일으키는 특성을 갖는 결합재이다. 물리, 화학적 성질은 아래 표 4와 같다. 강도증진을 위한 낮은 W/B 유지를 위해서 성능 감수제를 사용하였으며 물리적 성질은 아래의 표 5와 같다.

표 4. 석회복합체의 물리·화학적 특성

구분	분말도 (cm ² /g)	초결(h)	종결(h)	강열감량 (%)	비중 (g/cm ³)	
합량	5,969	5:50	8:20	2.5	2.74	
구분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	LOI
합량	26.10	13.31	45.51	6.13	6.71	2.24

표 5. 고성능 감수제의 물리적 성질

혼화제의 종류	유형	색상	주성분	독성	PH	비중
나프탈렌계	액상	암갈색	Copolymer	무	8-10	1.05±0.02

4.3 실험 방법

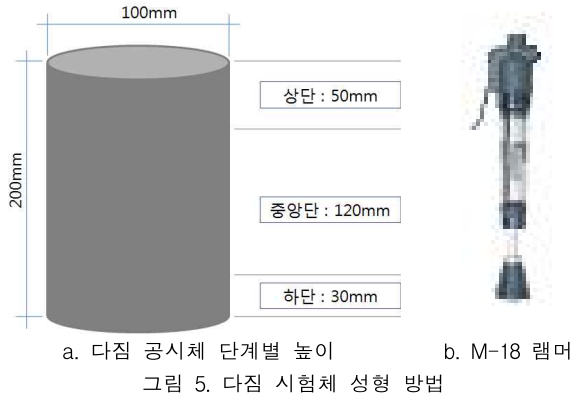
시험체의 성형방법은 흙건축 공법에 따라 다짐공법과 타설공법의 두 가지로 나누어 실시하였다. 흙다짐공법의 경우 배합의 유동성을 낮추어 목표 슬럼프를 0으로 하였다. 그로 인해 콘크리트 원형 공시체에 일반적인 몰드제작방법으로는 내부에 다량의 공극이 발생하게 된다. 그래서 흙건축 공법에서 사용되는 흙다짐용 M-18 소형 램머를 사용하여 시험체를 다져서 성형하였다. 다짐을 할 경우 체적의 약 60%가 감소하게 되므로 최상단의 경우 몰드 상단에 원통형의 빈 몰드를 가조립하여 골재를 부어 넣고 다진 다음 틀을 제거하고 남은 부분을 제거하였다. 다짐용 시험체의 다짐 방법과 M-18램머는 아래 그림 5

표 6. 석회복합체를 이용한 흙벽체 배합표

구분		W/B(%)	단위수량	단위결합재량	흙	모래	공기량	혼화제	
다짐공법	R O 1	용적배합(ℓ)	60	150	92.6	129	629	30	2%
		단위량(kg/m ³)			250	321	1634		
	R O 2	용적배합(ℓ)	70	175	92.6	125	608	30	2%
		단위량(kg/m ³)			250	310	1581		
	R O 3	용적배합(ℓ)	80	200	92.6	120	587	30	2%
		단위량(kg/m ³)			250	299	1527		
	R O 4	용적배합(ℓ)	40	140	129.6	124	606	30	2%
		단위량(kg/m ³)			350	309	1576		
	R O 5	용적배합(ℓ)	50	175	129.6	118	577	30	2%
단위량(kg/m ³)		350			294	1500			
R O 6	용적배합(ℓ)	60	210	129.6	112	548	30	2%	
	단위량(kg/m ³)			350	280	1425			
R O 7	용적배합(ℓ)	30	135	166.7	119	580	30	2%	
	단위량(kg/m ³)			450	296	1507			
R O 8	용적배합(ℓ)	40	180	166.7	111	542	30	2%	
	단위량(kg/m ³)			450	277	1410			
R O 9	용적배합(ℓ)	50	225	166.7	103	505	30	2%	
	단위량(kg/m ³)			450	258	1313			
타설공법	L O 1	용적배합(ℓ)	100	250	92.6	107	521	30	2%
		단위량(kg/m ³)			250	266	1354		
	L O 2	용적배합(ℓ)	105	263	92.6	105	510	30	2%
		단위량(kg/m ³)			250	260	1327		
	L O 3	용적배합(ℓ)	110	275	92.6	102	500	30	2%
		단위량(kg/m ³)			250	255	1300		
	L O 4	용적배합(ℓ)	50	175	129.6	113	552	30	2%
		단위량(kg/m ³)			350	282	1436		
	L O 5	용적배합(ℓ)	55	193	129.6	110	538	30	2%
		단위량(kg/m ³)			350	274	1398		
	L O 6	용적배합(ℓ)	60	210	129.6	107	523	30	2%
		단위량(kg/m ³)			350	267	1360		
	L O 7	용적배합(ℓ)	55	248	166.7	95	461	30	2%
		단위량(kg/m ³)			450	235	1199		
	L O 8	용적배합(ℓ)	60	270	166.7	91	443	30	2%
		단위량(kg/m ³)			450	226	1151		
	L O 9	용적배합(ℓ)	65	293	166.7	87	405	30	2%
		단위량(kg/m ³)			450	216	1102		

와 같다. 타설공법의 경우 유동성이 높으므로 KS F 2425에 의해 시험체를 제작하였다.

실험 측정 방법은 실험에 적용된 다짐과 타설공법의 경우 건축물의 구조 재료로서 사용하는 것을 목적으로 하므로 KS F 2405에 의거하여 재령에 따른 압축강도를 측정하였다. 타설의 경우 시공성을 고려하여 KS F 2402 슬럼프시험과 KS F 2449 공기량 측정을 실시하였다.



a. 다짐 공시체 단계별 높이 b. M-18 램머
그림 5. 다짐 시험체 성형 방법

4.4 실험 결과

1) 다짐공법 실험 결과

다짐공법에 의해 성형한 시험체의 재령별 압축강도 측정결과는 표 7과 같이 나타났다. 단위결합재량의 증가에 따라 압축강도는 대체적으로 증진되는 것으로 나타났으며 이는 결합재로서 석회복합체의 첨가량이 증가했기 때문인 것으로 판단된다.

각각의 단위결합재량에서 W/B에 대한 압축강도 변동 폭이 매우 큰 것으로 나타났으며 특히 단위결합재량이 증가할수록 변동 폭은 크게 증가하고 있다. 이는 단위결합재량이 증가함에 따라 분체량의 증가로 수화반응에 필요한 수량이 증가하며 그로 인해 물량이 부족할 경우 강도에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

재령 28일 기준으로 단위결합재량 450, W/B 40%에서 압축강도 29.2MPa로 가장 높게 나타났다. 압축강도 21MPa를 초과하는 배합은 단위결합재량 350일 때 W/B 50%, 60%로 나타났고 단위결합재량 450일 경우 W/B 40%, 50%로 나타났다. 저층 건축물의 경우 강도 측면에서는 사용이 가능할 것으로 판단된다.

다짐공법의 경우 벽체에 자연스러운 다짐결을 보여주는 공법인만큼 거푸집의 해체 시기도 중요하다. 일반적으로 다짐공법은 보통 시공 후 바로 거푸집을 해체하며

표 7. 다짐공법의 재령별 압축강도 및 강도 발현율

실험기호	단위결합재량 (kg/m ³)	W/B (%)	재령별 강도(MPa)				강도 발현율 (%)		
			1일	3일	7일	28일	1일	3일	7일
RO1	250	70	7.7	11.6	12.8	16.2	48	72	79
RO2	250	80	6.5	10.9	14	15.6	42	70	90
RO3	250	90	5.5	9.7	11	13.9	40	70	79
RO4	350	40	5.5	8.4	9	12.2	45	69	74
RO5	350	50	9.5	13.7	15.4	20.5	46	67	75
RO6	350	60	9.5	15.1	18.2	23.6	40	64	77
RO7	450	30	6.3	8.5	8.7	12.3	51	69	71
RO8	450	40	12.8	17.8	21.7	29.2	44	61	74
RO9	450	50	10.9	16.8	18.4	28.7	38	59	64

이는 W/B가 매우 낮기 때문에 가능하다. 그러나 본 실험에서는 다짐 시공성을 용이하게 하기 위해 유동성을 높였기 때문에 바로 탈형할 경우 형태가 무너진다. 그래서 재령 초기 강도가 중요하다. 시험체의 재령 1일의 초기강

도의 경우 모든 배합에서 5MPa를 초과하는 것으로 나타났다. 이는 거푸집의 탈형이 벽체의 외형이나 구조에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 사료되며 거푸집 해체 시기가 조기에 가능할 것으로 판단된다.

재령별 강도 발현율은 대부분의 시험체에서 재령 1일 40%이상의 강도 발현을 보인 것으로 나타나 초기 강도가 좋은 것으로 나타났으며, 재령 3일의 경우 60~70%의 강도 발현을 보인 것으로 나타났다.

2) 타설공법 실험 결과

시험체의 공기량 측정결과 4.5~6%를 나타냈다. 보통 콘크리트의 경우 공기량의 범위를 3~6%를 표준으로 하고 굵은 골재의 최대치수가 작은 경우 공기량이 많이 필요하다고 보고 있다. 이것과 비교해 볼 때 적정 범위를 크게 벗어나지 않는 것으로 판단된다.

타설공법이 장기적으로 펌프카 등의 기계화 시공 등을 고려했을 때 시멘트 콘크리트의 시공성과 비슷한 시공성을 확보해야 될 것으로 판단된다. 시멘트콘크리트의 경우 진동다짐인 경우 기둥, 벽에 요구되는 슬럼프 값은 100~150이다. 타설공법의 경우 시멘트콘크리트에서 사용하지 않은 0.074mm 이하의 입자들이 다량 포함되어 있고 이로 인하여 상대적으로 점성이 크다. 그래서 시멘트콘크리트와 비교했을 때 기준 슬럼프 값이 커야 될 것으로 판단되어 타설공법의 경우 목표 슬럼프를 180로 설정 하였다. 슬럼프 실험결과 각각의 단위결합재량에서 흙타설공법이 가능할 것으로 판단되는 목표 슬럼프 180을 확보한 것으로 나타났다.

표 8. 타설공법의 공기량, 슬럼프 측정

실험기호	단위결합재량 (kg/m ³)	W/B (%)	공기량 (%)	슬럼프 (mm)
LO1	250	100	5.5	105
LO2	250	105	5	212
LO3	250	110	5.5	260
LO4	350	65	5	45
LO5	350	70	6	190
LO6	350	60	4.5	265
LO7	450	50	5	115
LO8	450	55	6	185
LO9	450	60	4.5	280

타설공법의 압축강도 실험 결과 그림 8과 같이 나타났다. 단위결합재량의 증가에 따라 강도는 대체적으로 증가하는 것으로 나타났다. 재령 28일 압축강도가 21MPa를 초과하는 배합은 단위결합재량 350에서 W/B 65%, 70%와 단위결합재량 450에서 W/B 50, 55%, 60%으로 나타났으며 단위결합재량 450, W/B 50%에서 27.7MPa로 가장 높은 강도를 나타냈다.

타설공법의 재령별 강도 발현율은 28일 강도 대비 재령 1일 대부분이 20~30%의 강도 발현을 보였으며 재령 3일은 최소 43%에서 최고 66%의 강도 발현을 보였다. 재령 7일에는 대부분의 시험체가 65%이상의 강도 발현율을 보였다. KCI 2007에 따르면 28일 재령 압축강도가

24MPa인 시멘트콘크리트의 재령별 강도 발현율은 약 재령 1일 21%, 재령 3일 56%, 재령 7일 70%로 나타났다. 타설공법과 보통 시멘트콘크리트의 재령별 압축강도 발현율은 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.

타설공법은 다짐공법에 비해 대체적으로 재령에 따른 압축강도가 낮은 것으로 나타났으나 5MPa 이상의 큰 차이는 없는 것으로 나타났다.

표 9. 타설공법의 재령별 압축강도 및 강도발현율

실험 기호	단위결합재 (kg/m ³)	W/B (%)	재령별 강도(MPa)				강도발현율(%)		
			1일	3일	7일	28일	1일	3일	7일
LO1	250	100	3.6	9.1	10.1	13.7	26	66	74
LO2	250	105	3.4	8.3	9.8	12.7	27	65	77
LO3	250	110	3	7.7	9.1	11.8	25	65	77
LO4	350	60	4.2	11.1	13.5	18.3	23	61	74
LO5	350	65	6.7	13.4	15.7	23.2	29	58	68
LO6	350	70	3.1	11.4	12.4	21	15	54	59
LO7	450	50	7.3	14.9	18.5	27.7	26	54	67
LO8	450	55	4.6	11.8	14	27.4	17	43	51
LO9	450	60	6.8	15.3	15.9	23.6	29	65	67

5. 일반 흙과 최밀충진배합의 압축강도 및 유동성 특성

1) 다짐공법

각각의 단위결합재량에 따른 W/B와 재령 28일 압축강도 특성 비교는 아래 표 10과 같다. 최밀충진된 흙을 사용한 경우 W/B가 현저히 줄어드는 것으로 나타났다. 이는 전체 중량의 50% 이상이 실트이하의 미립분이었던 일반 흙이 최밀충진 실험에 의해 미립분의 함량을 약 10% 정도로 낮추었기 때문인 것으로 판단된다. 이로 인해 동일 단위결합재량을 갖는 경우의 압축강도는 최밀충진배합의 경우가 일반 흙에 비해 최소 3배 이상 높은 강도 발현을 보였다.

표 10. 다짐공법의 압축강도

일반 흙		단위결합재량 (kg/m ³)	최밀충진배합	
W/B (%)	압축강도 (MPa)		W/B (%)	압축강도 (MPa)
130	3.7	250	70	16.2
90	5.7	350	60	23.6
70	7.7	450	40	29.2

2) 타설공법

최밀충진배합의 경우 일반 흙에 비해 약 50%정도 낮은 W/B를 보인 것으로 나타났으며 유동성 또한 매우 좋은 것으로 나타났다. 또한 각각의 단위결합재량에서의 압축강도는 최밀충진배합의 경우 일반 흙 보다 최소 2배 이상 증진을 보였다. 이는 최밀충진효과에 의해 골재 전체에서 차지하는 미립분의 함량이 줄어들었고 이로 인해 유동성 확보에 필요한 수량의 감소와 잉여수의 감소에 따른 것으로 판단된다. 일반 흙을 골재로 활용한 경우 단위결합재량이 250에서 450으로 증가할 경우 압축강도는 4MPa의 증진을 보였으나 단위결합재량의 증가 없이 최

밀충진배합을 골재로 바꿀 경우 압축강도는 7.6MPa 증진되는 효과를 나타내었다. 이러한 결과는 단위결합재량 350, 450에서도 같은 결과를 나타냈다. 이는 벽체의 압축강도를 위해서는 단위결합재량을 증가시키는 것보다 최밀충진배합을 골재로 활용하는 것이 유리하다고 볼 수 있다. 공기량의 경우 대부분이 4~6% 범위를 나타냈다. 단위결합재량 450의 경우에는 두 배합간의 공기량이 2%로 큰 차이를 나타냈지만 기준에는 벗어나지 않는 것으로 나타났다.

표 11. 타설공법의 특성 비교

구 분	단위결합재 (kg/m ³)	W/B (%)	압축강도 (MPa)	공기량 (%)	슬럼프 (mm)
일반 흙	250	200	6.1	5	45
	350	140	5.3	6.3	84
	450	110	10.1	4	127
최밀충진 배합	250	100	13.7	5.5	105
	350	70	21	6	190
	450	55	27.4	6	185

6. 결 론

흙과 모래의 최밀충진효과와 석회복합체의 첨가에 따른 고강도 흙벽체 개발을 위해 실시한 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 흙과 모래의 최밀충진 실험 결과 최밀충진배합은 흙:모래=17:83으로 나타났다. 이는 0.074mm 이하의 미립분의 함량을 줄인 것으로 흙다짐공법과 비교 시 점토의 함량이 조금 부족하여 화학적 결합력을 보강할 수 있는 결합제를 필요로 한다. 콘크리트 잔골재와 비교 시 실트 이하의 입자의 비율이 높은 것으로 나타나 배합 시 상대적으로 높은 W/B를 필요로 하게 된다.

2) 최밀충진배합과 석회복합체를 혼합한 다짐 실험 결과 재령 28일 기준 압축강도가 21MPa를 초과하는 경우는 단위결합재량(kg/m³) 350일 경우 W/B 50%, 60%와 단위결합재량(kg/m³) 450일 경우 W/B 40%, 50%로 나타났다.

3) 다짐공법의 경우 재령 1일 초기강도 발현율이 높고 압축강도가 5MPa를 넘기 때문에 거푸집의 조기 탈형이 가능하며 다짐결의 표현이 용이하다.

4) 최밀충진배합과 석회복합체를 혼합한 타설 실험 결과 재령 28일 압축강도가 21MPa를 초과하며 목표 슬럼프를 만족시키는 배합은 단위결합재량 350의 경우 W/B 65%, 단위결합재량 450의 경우 W/B 55%로 나타났다. 이는 레미콘 및 펌프카 등을 활용한 기계화 시공이 가능한 수준으로 판단된다.

5) 타설공법의 경우 다짐공법에 비해 초기 강도 발현이 늦으나 보통 시멘트콘크리트의 재령별 압축강도 발현

울과는 큰 차이를 나타내지 않는다.

6) 최밀충전배합은 일반 흡에 포함된 다량의 미립분을 낮추어 골재로 사용한 것으로 일반 흡을 사용했을 경우에 비해 낮은 W/B로 배합이 가능하며, 상대적으로 높은 강도 발현을 나타낸다.

7) 특히 타설공법의 경우 유동성이 크기 때문에 실트 이하의 미립분이 많을 경우 유동성 확보를 위한 물량이 많아지고 이에 따른 강도 저하가 심하게 나타나게 되는데 최밀충전배합을 사용할 경우 이러한 단점을 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 친환경재료인 흡을 건축에서 활용하기 위한 방안으로 기초적인 압축강도에 대한 실험을 진행하였다. 그러나 석회 등 결합재의 첨가는 치밀한 입자를 갖는 고강도화는 가능하나 흡의 고유한 특성인 습도조절능력, 친환경성능 등은 상대적으로 약해지는 것으로 판단된다. 향후 흡의 고유한 특성과 강도 등의 관련성에 대한 연구가 추가적으로 진행되어야 될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국콘크리트학회, 최신콘크리트 공학, 기문당, 2001
2. 황혜주, 흡건축, 씨아이알, 2008
3. 황혜주 외, 황토의 반응메커니즘에 관한 연구, 대한건축학회, 1997
4. 윤석우 외, 황토결합재를 이용한 흙다짐공법의 역학적 특성에 관한 실험적 연구, 한국생태환경건축학회, 2009
5. 이정제 외, 흙다짐공법에서 거푸집축압에 대한 기초적 연구, 한국생태환경건축학회, 2009
6. KS F 4009 레드믹스트 콘크리트, 기술표준원, 2010.12.30

투고(접수)일자: 2011년 6월 15일

심사일자: 2011년 6월 20일

게재 확정일자: 2011년 8월 29일