

## 최밀충전에 의한 흙의 적정입도 선정 방법

### The Method to Select the Optimal Particle Size of Earth by Optimum Micro-filler

황 혜 주\*  
Hwang, Hey Zoo

강 남 이\*\*  
Kang, Nam Yi

#### Abstract

The purpose of this study is to suggest optimum micro-filler experiment method to select the optimal particle size of earth for using in earth construction works and test this suggestion through compressive strength measurement.

According to the results of selecting the method to choose the optimum micro-filler mixing of earth and sand, three-stage filling(plate tamping) showed relatively high results and so was estimated to be the proper filling method.

According to the results of optimum micro-filler experiment of earth and sand by the maximal sizes of sand, between 80% and 90% showed the highest result values. The larger the maximum size of sand was, the lower the addition ratio of sand was in optimum micro-filler mixing.

According to the results of compressive strength experiment by the particle sizes of earth and sand, 90% in the addition ratio of sand showed the highest results, and so tended to be similar to the results of unit volume weight experiment.

키워드 : 흙건축, 최밀충전, 압축강도, 단위용적중량

Keywords : earth architecture, optimum micro-filler, compressive strength, unit volume weight

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

건축 재료로서 흙이 사용된 것은 아주 오래된 일이며 만리장성, 피라미드 등 많은 건축물들이 흙을 재료로 사용하였다. 우리나라도 한옥, 초가집 등에서 흙을 사용해 왔으며 현재에도 많은 흙건축물이 시공되며, 사용되고 있다. 그러나 우리나라의 경우 아쉽게도 흙을 주요 건축 재료로써 사용했던 과거의 기술들은 현재에까지 전해지지 못하고 있다.

최근 흙건축이 많은 사람들의 각광을 받으며 부흥을 일으키고 있으나 그 관련기술과 전문 인력이 부족하여 사용 중 많은 하자가 발생하고 있다. 왜냐하면 보통 흙은 점토, 실트, 모래로 이뤄졌는데, 우리나라 흙의 경우 실트 성분이 많기 때문에 자연에서 채취한 흙을 그대로 사용할 경우 양생과정에서 균열이 발생하게 된다.<sup>1)</sup> 그래서 이러한 문제를 해결하기 위해서 적당량의 모래를 흙에 혼합해서 사용해야 된다. 또한 흙을 채취하는 위치에 따라 흙의 기본 물성이 달라지기 때문에 그때마다 적정 배합이 바뀔 가능성이 높다. 그래서 사용하기 전에 흙에 대한 입도 등

의 물리적 성질과 화학적 성분 등에 대한 분석을 필요로 하며 용도에 따라서도 배합을 달리 사용하여야 한다.

흙을 주요 건축 재료로써 사용하기 위한 연구는 황혜주, 양근혁 등에 의해 구조재료로써 사용하기 위한 몰탈, 콘크리트 등 현대화에 대한 연구가 이뤄지고 있다. 또한 흙다짐 등의 공법에 의한 연구도 황혜주, QB.Bui 등에 의해 꾸준한 연구가 이뤄지고 있다. 그러나 흙을 사용하는 데 있어서 적정한 배합을 선정하기 위한 방법에 대한 연구는 아직 이뤄지지 않고 있다.

본 연구에서는 흙건축 시공에 사용하기 위한 흙의 적정 입도 선정을 위한 최밀 충전 실험 방법의 제안과 압축강도 측정을 통해 이를 검증하고자 한다.

### 1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 흙의 입도에 따른 단위용적중량과 압축강도에 대한 실험을 하고자 한다. 흙은 일반적으로 점토, 모래에 비해 실트 함량이 높기 때문에 적당량의 모래를 첨가하여야 한다. 그래서 흙과 모래의 첨가율에 따라 변화하는 흙배합의 단위용적중량을 확인하고 압축강도에 미치는 영향을 분석하기 위해 본 실험에서는 크게 세 가지 실험을 진행하였다.

첫째, 흙과 모래의 첨가율에 따른 단위용적중량을 실험하여 최밀 충전 배합을 찾기 위한 방법을 선정하기 위해 1단 채움(무다짐), 3단 채움(손다짐), 3단 채움(부다짐), 3

\* Main author, Dept. of Architecture Mokpo National Univ. South Korea. (zederro@korea.com)

\*\* Corresponding author, Dept. of Architecture Mokpo National Univ. South Korea. (21ckny@hanmail.net)

1) 황혜주, 흙건축, 도서출판씨아이알, 2008, p.117

단 채움(판다짐) 등 4가지 방법으로 단위용적중량을 측정하였다.

두 번째는 흙의 경우 채취 위치에 따라 입자의 특성이 달라지며 최대 치수 또한 달라진다. 그래서 모래의 최대 치수에 변화를 주어 단위용적중량을 측정하였다. 모래의 최대 치수를 5 mm, 2.36 mm, 1.18 mm 등 3가지 선정하였으며, 첫 번째 실험에서 선정된 방법으로 단위용적중량을 측정하고 차이를 분석하였다.

세 번째는 입도에 따른 압축강도를 측정하기 위해서 모래의 최대치수가 5 mm 모래를 사용하여 고강도 석회를 첨가한 다음 압축강도 실험을 실시하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 흙의 구성<sup>2)</sup>

흙은 고상(흙 입자, 유기물 등), 액상(물), 기상(공기)으로 이뤄져 있다. 이러한 흙의 3상의 비율은 흙의 채취 위치, 기상조건 등에 따라 달라진다. 이러한 3상의 비율은 흙의 물성에 영향을 주게 되므로 건축 재료로써 사용할 경우 이러한 특성을 잘 파악하여야 한다.

고상을 이루는 흙 입자의 경우 다양한 크기의 입자들이 혼합되어 있으며, 건축에서는 이러한 흙 입자의 크기별 분포율이 중요하다.

다양한 입도를 가지는 흙은 용도에 적합한 입도로 조절하여 사용해야 한다. 그렇지 않을 경우 사용 중이나 사용 후 강도 저하, 균열 발생 등의 문제를 발생하게 된다.

액상의 경우 물의 비율에 따라 흙의 함수상태가 달라지며, 건축 재료로써 사용할 때 유동성 및 부착성을 부여하게 된다. 또한 물의 비율에 따라 시공 후 압축강도나 균열에 영향을 미치게 된다.

기상은 흙 속에 존재하는 공기이며, 흙 입자 사이의 공극에 존재한다. 일반적으로 흙의 공극이 커지게 되면 흙입

자간의 인력이 작아져 흙은 쉽게 부스러지며 낮은 강도를 나타내며 공극을 최소화 할수록 높은 강도를 발현 할 수 있게 된다.

### 2.2 흙입자 분류

흙은 다양한 크기의 입자들의 혼합물로써 우리가 일반적으로 채취하는 흙을 한 가지 크기의 입자를 갖는 경우는 극히 드물다. 이러한 입자들은 크기에 따라 점토(0.002 mm 이하), 실트(0.002~0.074 mm), 모래(0.074 mm~2.5 mm)로 구분하게 된다.<sup>3)</sup>

점토는 실트, 모래와는 다른 성질을 가진다. 점토는 흙의 접착제 역할을 하는 입자로서 실트, 모래 등의 입자들 사이에서 서로를 부착하는 역할을 하게 된다. 실트와 모래는 크기만 다를 뿐 입자의 성질은 비슷하다. 접착력은 없으며 흙의 골격을 이루는 입자들로써 흙의 많은 체적을 차지한다. 실트의 경우 모래 보다 비표면적이 크기 때문에 흙을 반죽할 때 많은 물량을 요구하게 되며, 양생과정에서 물이 증발하게 되면 흙배합 내부에 많은 공극을 발생시킨다.<sup>4)</sup>

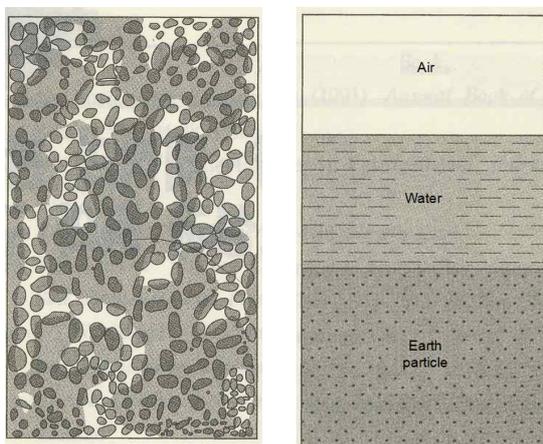
흙건축에서는 이러한 점토, 실트, 모래가 공법에 따라 적당한 비율을 구성해야 균열 제어 및 강도 증진에 효과적이다.

Table 1. Classification of earth particle

	clay	silt	sand
particle size (mm)	0 ~ 0.002	~ 0.074	~ 5
particle			

### 2.3 공극충전

흙은 내부에 많은 공극을 가지고 있다. 시멘트 등의 고화재를 사용하지 않고 흙을 사용하는데 있어서 내부 공극은 흙 재료의 강도 등의 역학적물성에 영향을 미치게 된다. 시멘트를 사용한 콘크리트의 경우에는 골재의 혼합에서 나타나는 공극이 시멘트의 사용량 및 강도, 유동성 등 다양한 물성에 영향을 미치므로 골재의 입도 및 입형에 따른 다짐 특성에 대한 연구를 진행해 왔다<sup>5)</sup>. 또한 콘크리트 내부의 공극비율이 콘크리트의 강도에 영향을 미치는 것과 관련된 연구도 진행되었다.<sup>6)</sup> 이처럼 공극은 재료의 역학적 특성과 많은 관련이 있다. 흙의 경우 내부의 공극은 흙이 종류, 입형 및 입도 등 다양한 요인에 의해 영향을 받으며 단위용적중량, 밀도, 함수율, 소성지수 등



(a) state of natural earth (b) 3-phase of earth

Fig. 1. 3-phase and state of earth

2) 황혜주, 흙건축, 도서출판 씨아이알, 2008, p.79-81

3) 황혜주, 흙건축, 도서출판 씨아이알, 2008 p.82

4) Gernot Minke, Earth Construction Handbook, Wit Press,2000

5) Mohammed H.M et al., Packing Theory for Natural and Crushed Aggregate to Obtain the Best Mix of Aggregate:Research and Development, World Academy of Science, Engineering and Technology, 2012, p.819-825

6) 한국콘크리트학회, 최신큰크리트공학, 기문당, 2001, p.290-291

다양한 물성에 영향을 받게 된다. 흙진축에서는 흙을 선정할 때 공극을 최소화하는 방법에 대한 정리는 정확히 되어있지는 않으나 흙의 용도에 따른 입도 범위를 제시하고 있어 흙의 사용상의 불편함을 덜어주고 있다.<sup>7)</sup>

### 3. 실험

#### 3.1 실험개요

최밀충전에 의한 흙의 적정 배합 선정 실험은 흙과 모래의 배합비에 따른 흙배합의 단위용적중량과 압축강도 실험을 진행하였으며, 3단계로 진행하였다.

첫 번째는 흙분말과 주문진표준사를 사용하여 단위용적중량실험을 실시하였다. 흙분말:주문진표준사 = 100:0 ~ 0:100 까지 각각의 재료를 10%단위로 증감하며 총 11수준의 시험을 실시하였으며 다짐 방법은 무다짐, 손다짐, 봉다짐, 판다짐의 4가지 방법에 의해 실험을 실시하였다.

두 번째는 흙분말과 해사를 사용하여 실험을 실시하였다. 단위용적중량 실험은 흙분말:해사=100:0 ~ 0:100까지 각각의 재료를 10% 단위로 증감하여 총 11수준의 실험을 실시하였으며 해사는 입자의 최대 크기를 5 mm, 2.5 mm, 1.12 mm의 3가지 수준으로 하였고, 단위용적중량실험은 3단 채움(판다짐)의 방법으로 실험을 실시하였다.

세 번째 실험은 모래의 최대 치수가 5 mm인 모래와 흙분말을 100:0 ~ 0:100까지 10% 수준으로 증감하여 총 11배합에 대해 압축강도 실험을 실시하였다. 흙배합의 경우 결합재를 첨가하지 않을 경우 매우 낮은 강도를 나타내므로 강도 확보를 위해 고강도석회를 흙배합의 15%(외할) 첨가하여 실험을 실시하였다.

Table 2. Experimental factors and levels

	factors	levels	methods
1st test	earth:sand	100:0,90:10,80:20,70:30,60:40,50:50,40:60,30:70,20:80,10:90,0:100	11
	tamping method	one-stage filling (non tamping), three-stage filling (hand tamping), three-stage filling (hand tamping), three-stage filling (plate tamping)	4
2nd test	earth:sand	100:0,90:10,80:20,70:30,60:40,50:50,40:60,30:70,20:80,10:90,0:100	11
	maximum size of sand(mm)	5 mm, 2.36 mm, 1.12 mm	3
	tamping method	three-stage filling (plate tamping)	1
3rd test	earth:sand	100:0,90:10,80:20,70:30,60:40,50:50,40:60,30:70,20:80,10:90,0:100	11
	maximum size of sand(mm)	5 mm	1
	High strength lime	15 %	1

7) 황혜주, 흙진축, 씨아이알, 2008, p.110-112

#### 3.2 실험재료

##### 1) 흙분말

모든 실험에 사용된 흙분말은 흙을 건조하여 미분말화한 것으로 전복의 D업체의 흙을 사용하였으며 물리, 화학적 성분은 아래 표 3과 같다.

Table 3. Properties of earth powder

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O
57.4	30.31	6.78	0.86	0.86	3.36
water content	specific gravity	size(μm)	0~2	2~75	75~150
1.67%	2.55	content(%)	21.4	74.8	3.8

##### 2) 주문진 표준사

1차 실험에 사용된 재료이며, KS L ISO679 시멘트의 강도 시험 방법의 규정을 만족하는 주문진표준사를 사용하였다.

Table 4. gradation of Jumunjin standard sand

size(mm)	0.15	0.3	0.6
content(%)	1.7	96.7	1.6

##### 3) 해사

2, 3차 실험에 사용된 재료이며, 인천광역시 강화군에서 채취하여 세척한 모래를 사용하였으며 물리적 특성을 아래 표 5와 같다.

Table 5. Physical properties of sand

maximum size(mm)	specific gravity	fineness modulus	water absorption(%)	water content(%)			
5	2.63	2.47	0.22	1.45			
size(mm)	0.074	0.15	0.3	0.6	1.2	2.36	5
content(%)	2.4	14.4	31.3	25.7	19.7	5.5	1

##### 3) 고강도석회

실험에 사용된 석회는 일반 석회에 비해 빠른 강도 발현을 보이는 특징을 갖는 것으로써 국내의 C업체에서 생산하는 제품을 사용하였으며, 물리·화학적 특성을 아래 표 6과 같다.

Table 6. Properties of High Performance Lime

fineness (cm/g)	setting time : initial(h)	setting time : final(h)	LOI(%)	density (g/cm <sup>3</sup> )	
5,969	5:50	8:20	2.5	2.74	
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	etc.
26.10	13.31	45.51	6.13	6.71	2.24

3.3 실험방법

1) 단위용적중량실험 및 공극률

흙과 모래를 10% 단위로 증감하면서 흙:모래 = 100:0 ~ 0:100까지 실험을 실시하였다. 1000 ml 용기에 건믹싱 된 혼합골재를 깔때기를 통해 자유낙하 시켜 투입하고 4가지 방법으로 단위용적중량을 측정하였다. 실험은 KS F 2505 단위용적중량 및 공극률 시험방법을 참고하여 실시하였다.

3단 채움의 경우에는 다짐을 실시할 경우 용적이 1000 ml 이상이 나와야 되므로 흙이 흘러내리지 않게 용기 상단에 별도의 용기를 제작하여 올려놓은 다음 실험을 실시하였다.

① 1단 채움, 무다짐

깔때기를 통해 1회에 1000 ml 용기의 상단까지 채우고 다 지지 않은 상태에서 남은 흙은 스페츄라를 이용하여 툽질하듯이 상단 면을 평평하게 면을 잡은 다음 중량을 측정하였다.

② 3단 채움, 손다짐

1000 ml 용기에 용적의 1/3을 채운 다음 3 cm 높이로 손으로 5회 다진다. 이러한 방법으로 상단까지 흙을 채운 다음 스페츄라를 이용하여 상단 면을 평평하게 면잡기 한 다음 중량을 측정하였다.

③ 3단 채움, 붕다짐

1000 ml 용기에 용적의 1/3을 채운 다음 Ø5 mm 다짐 붕을 이용하여 25회 끌고루 다진다. 같은 방법으로 용기의 나머지 2/3을 채운 다음 스페츄라를 이용하여 상단 면을 평평하게 면잡기 한 다음 중량을 측정하였다.

④ 3단 채움, 판다짐

플로우판 위에 1000 ml 용기를 놓고 용적의 1/3씩 채운 다음 플로우판을 25회 다진다. 같은 방법으로 용기의 나머지 2/3을 채운 다음 스페츄라를 이용하여 상단 면을 평평하게 면잡기 한 다음 중량을 측정하였다.

⑤ 단위용적중량 계산 방법

흙배합의 단위용적중량의 계산은 아래 수식과 같이 하였다.

$$\text{단위용적중량 } M(\text{kg}/\text{m}^3) = \frac{G-T}{V} \text{ 또는 } M = (G-T) \times F$$

$G$ : 용기를 포함한 시료의 중량(kg)  
 $T$ : 용기만의 중량(kg)  
 $V$ : 용기를 채운 물의 중량을 물의 단위용적중량으로 나눈 값( $\text{m}^3$ )  
 $F$ : 물의 단위용적중량을 용기를 채우는데 필요한 중량으로 나눈 값( $\text{m}^3$ )

Table 7. result of 1sf experiment

			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
mix - desi gn	mixing ratio (%)	jumunjin standard sand	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
		earth powder	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
	mixing quantity (g)	Jumunjin standard sand	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
		earth powder	2000	1800	1600	1400	1200	1000	800	600	400	200	0
r e s u l t	unit volume weight (g/L)	one-stage filling (non tamping)	755.9	786.9	861.4	968.0	1030.7	1154.2	1278.1	1358.7	1414.2	1397.9	1397.9
		three-stage filling (hand tamping)	806.9	880.7	961.2	1074.8	1179.8	1311	1460.8	1578	1619.5	1547.5	1516.4
		three-stage filling (hand tamping)	795.7	854.5	935.3	1053.1	1135.2	1258.3	1395.2	1504.3	1622.7	1579.3	1522.2
		three-stage filling (plate tamping)	891.4	954.7	1029.5	1128.9	1242.2	1378	1541.3	1691.4	1766.8	1662.8	1575.5

2) 압축강도 측정

흙배합의 압축강도를 측정하기 위해 KS L 5105 수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험 방법에 준하여 흙배합과 고성능석회를 혼합한 배합의 반죽, 플로 시험 및 압축강도 측정을 실시하였다.

3) 유동성 측정

유동성측정은 KS L 5105 수경성시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법에 준하여 실험하였다. 흙의 경우 미분말을 많이 함유하고 있으므로 물을 첨가하여 혼합할 경우 유동성 확보를 위해 많은 물을 필요로 한다. 본 실험에서는 이러한 부분을 감안하여 흙반죽에 필요한 물량을 적게 하였으며 흙건축에서 사용하는 소성상태의 반죽질기를 목표로 하였다. 이에 따라 목표 유동성은 110±5 mm로 하였다.

3.4 실험결과

1) 1차 실험 결과

단위용적중량 측정 결과 표 7과 같은 결과를 나타내었다.

단위용적중량은 1단 채움(무다짐)이 가장 낮은 중량을 나타내었다. 다음으로 3단 채움(붕다짐), 3단 채움(손다짐) 순이었으나 비슷한 결과를 나타냈다. 그리고 3단 채움(판다짐)에 의한 방법에서 가장 높은 결과 값을 나타냈다. 각각의 방법에 의한 단위용적중량의 차이는 모래의 첨가율이 증가할수록 커지는 경향을 보였으며 최밀 충전 배합인 흙:모래=20:80에서 가장 큰 차이를 보였다.

1단 채움(무다짐)의 경우 흙입자의 자중에 의해서 흙이 채워지는 것으로 흙배합 내에 공극이 많이 발생하며 채움이 완료된 이후에도 공극은 사라지지 않았다.

3단 채움(손다짐)의 경우에는 용기 전체에 충격이 가해지기 때문에 전체적으로 붕다짐에 비해 높은 결과를 나타내었으나, 흙분말의 첨가율이 90% 이상에서는 붕다짐에 비해 낮게 나타났다.

3단 채움(붕다짐)의 경우에는 흙분말의 첨가율 40% 이상부터는 붕다짐 후 붕을 뽑아 올리는 과정에서 생겨난 구멍이 없어지지 않아 다짐 효과가 작은 것으로 나타났

다. 붓다짐의 경우 고운 입자의 흙배합에서는 효과가 없는 것으로 판단된다.

3단 채움(판다짐)의 경우 플로우 판에서 용기 전체에 일정한 외력을 가하므로 흙배합의 다짐이 잘 되었으며 네 가지 방법 중 가장 높은 단위중량을 나타냈다. 다짐 초기 15회 다짐 시의 치밀량은 크고 나중 10회 다짐 시에는 치밀량은 극히 작게 나타났다.

다짐 후 입자들의 다짐상태는 아래 그림 2와 같으며 1단 채움(무다짐)의 경우 입자사이에 공극이 많이 보이고 가장 엉성한 형상으로 나타났다. 3단 채움(판다짐)으로 갈수록 입자 사이의 공극이 감소하고 치밀한 형상으로 나타났다.

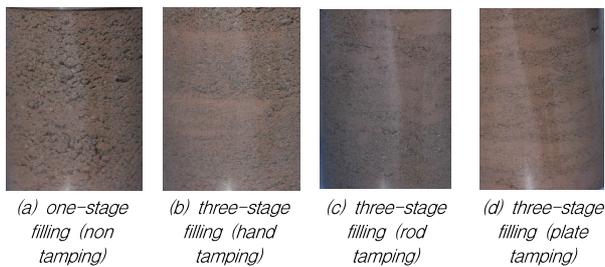


Fig. 2. experimental results by tamping method

주문진표준사의 첨가율이 증가함에 따라 단위용적중량은 증가하였으며, 주문진표준사의 첨가율이 80%일 때 가장 높은 단위용적중량을 나타내었고 이후에는 감소하는 것으로 나타났다.

흙배합의 단위용적중량이 높은 것은 흙배합 내부에 공극률이 작은 것을 의미한다. 그림 3에서 보는 것처럼 흙분말의 함량이 높은 경우 모래 입자들 사이의 거리는 멀고 그 중간에 공극률이 높은 점토, 실트 입자들이 채우고 있으므로 단위용적중량은 낮아지게 된다. 특히 입자들이 미세할 경우, 특히 0.001mm 이하의 미세한 콜로이드 입자들의 경우 입자들이 갖는 인력보다 반발력이 크기 때문에 입자사이의 거리가 멀어지게 되어 공극률이 커지는 것으로 판단된다.(그림 a) 그러나 점토, 실트, 모래가 적당량 혼합되었을 때는 입경이 크기 밀도가 높은 모래입자들이 공간의 대부분을 채우고 모래입자들 사이에 공극률이 큰 점토, 실트 입자들이 필요한 최소량만큼만 채워지기 때문에 흙배합의 내부의 공극은 작아지고 단위용적중량은 높아지게 된다.(그림 b) 그렇지만 점토, 실트 입자의 함량이 너무 낮을 경우, 모래 입자 사이에서 생기는 공극을 모두 채우지 못하였기 때문에 공극률이 높아지면서 단위용적중량은 낮아지는 것으로 판단된다.(그림 c)

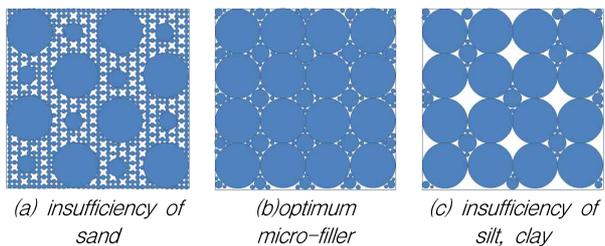


Fig. 3. state of earth mixture with various content of earth particle

실험 결과 주문진표준사와 흙분말의 최밀 충전비율은 단위용적중량이 가장 높고 공극률이 가장 낮은 흙:모래가 약 20:80의 비율로 혼합될 때 나타나는 것으로 판단된다.

또한 다짐방법에 있어서는 3단 채움(판다짐)의 경우가 가장 높은 중량을 나타내었으며 다른 방법보다 정밀한 방법으로 판단된다.

2) 2차실험 결과

모래의 최대 치수를 5 mm, 2.36 mm, 1.18 mm의 세 가지 종류로 하여 흙분말과 모래의 첨가율에 따라 3단 채움(판다짐)의 방법으로 단위용적 중량 측정 결과 표 8과 같이 나타났다.

모래의 함량이 낮은 경우에는 모래의 첨가율이 10%까지는 1.12 mm가 가장 높았으며, 이후 70%까지는 2.36 mm가 높게 나타났고, 80%이후로는 5 mm가 가장 높게 나타났다. 3가지 경우 모두 모래의 첨가율 80~90%에서 가장 높은 단위용적중량을 나타내었다.

최밀 충전은 입경이 큰 모래입자들 사이에서 생기는 공극에 미세한 흙분말이 채워지는 것으로 판단된다. 모래의 첨가율이 너무 낮을 때는 흙입자에 비해 상대적으로 입경이 큰 모래입자 사이의 거리가 멀어지게 된다. 그리고 그 공간을 공극률이 큰 흙분말이 채우기 때문에 단위 중량이 낮아진다. 반면 흙분말의 첨가율이 너무 낮을 경우 모래 입자 사이에서 발생한 공극을 채울 흙분말이 부족하기 때문에 단위용적중량은 낮아진다. 그러므로 모래 입자들 사이에서의 공극이 최소화 되고, 그 공극을 채우는 적당량의 흙분말의 비율이 최밀 충전 비율이 될 것으로 판단된다.

최밀 충전 모래의 첨가율이 80~90%에서 나타났는데, 이 구간에서는 모래의 최대치수가 작아질수록 최밀 충전 비율이 모래의 첨가율이 낮아지는 쪽으로 이동하는 경향을 나타내었다. 최밀 충전 입경이 큰 모래의 입자사이

Table 8. unit volume weight by maximum size of sand

mixing ratio(%)		mixing quantity (%)		unit volume weight(g/L)		
earth	sand	earth	sand	5mm	2.36mm	1.18mm
100	0	2500	0	866	866	866
90	10	2250	250	919	940	944
80	20	2000	500	998	1017	1013
70	30	1750	750	1087	1136	1129
60	40	1500	1000	1216	1244	1218
50	50	1250	1250	1365	1371	1358
40	60	1000	1500	1531	1538	1517
30	70	750	1750	1699	1731	1655
20	80	500	2000	1857	1832	1791
10	90	250	2250	1868	1835	1782
0	100	0	2500	1790	1768	1697

의 공극을 흙분말이 채울 때 형성된다. 그런데 비슷한 입도조건 및 입형을 갖는 모래의 경우 모래의 최대치수가 작아질 경우 단위용적중량이 작아지는 것으로 나타났다. 이는 최대치수가 작아짐에 따라 상대적으로 입자가 작은 모래의 양이 증가하면서 내부의 공극이 증가하였기 때문이다. 그러므로 모래의 최대치수가 작아질수록 입자 사이에 발생하는 공극을 채우는 흙분말의 비율은 증가하며 이 때문에 모래의 최대치수가 작아질수록 최밀 충전 흙분말의 첨가율이 높은 쪽으로 이동하게 된다. 또한 모래의 최대치수가 큰 배합이 작은 경우에 비해 단위용적중량이 높아지게 되는데 이는 굵은 입자의 비중이 상대적으로 높기 때문인 것으로 판단된다.

3) 3차 실험 결과

흙배합에 고강도석회를 15% 첨가하여 압축강도 실험을 실시한 결과 재령 28일 압축강도는 아래 표 9와 같은 결과가 나타났다.

목표 유동성 110±5mm를 만족하는 W/M(물/물탈비, %)은 모래의 첨가율이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났으며 대체적으로 일정하게 감소하였다. 흙배합내의 흙분말의 첨가율이 일정비율로 낮아졌으며 배합 내부의 미분의 함량이 감소하기 때문이다.

재령 28일 압축강도의 경우 모래의 첨가율이 0~50%까지는 모래의 첨가율이 증가하여도 압축강도는 큰 변화가 없었으며 오히려 모래의 첨가율이 0%인 경우에 비해 미미하지만 낮게 나타났다. 이후 모래의 첨가율이 90%일 때까지 압축강도는 증가하며 100%의 경우 다시 감소하는 것으로 나타났다.

단위용적중량의 경우에도 모래의 첨가율이 90%일 때 가장 높게 나타나 재령 28일 압축강도와 비슷한 경향을 나타내었으나 모래의 첨가율이 60% 보다 낮은 경우에는 압축강도와 단위용적중량이 비슷한 경향을 나타내지는 않았다.

압축강도 실험 결과 모래의 첨가율이 높은 경우에는 단위용적중량과 압축강도가 비슷한 경향을 보였으며 높은 상관관계를 가질 것으로 판단된다.

Table 9. result of 3rd experiment

	mixing ratio(%)			w/m (%)	flow (mm)	compressive strength (Mpa)	unit volume weight (g/L)
	earth	sand	HPL				
1	100	0	15	39	107	1.72	866
2	90	10	15	38	108	1.40	919
3	80	20	15	34	110	1.19	998
4	70	30	15	30	111	1.19	1087
5	60	40	15	28	112	1.20	1216
6	50	50	15	24	110	1.71	1365
7	40	60	15	21	111	2.69	1531
8	30	70	15	17	109	4.16	1699
9	20	80	15	15	110	6.59	1857
10	10	90	15	13	110	9.11	1868
11	0	100	15	14	119	6.03	1790

4. 결론

본 연구는 최밀 충전 실험을 통한 흙의 적정 배합 선정 실험을 실시하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 흙과 모래의 최밀 충전 배합을 선정하기 위한 방법 선정 결과 3단 채움(판다짐)이 다른 실험방법에 비해 상대적으로 높은 결과 값을 나타내었으며 적절한 채움 방법으로 판단된다.

2) 모래의 최대치수에 따른 흙과 모래의 최밀 충전 실험 결과 80~90% 사이에서 가장 높은 결과 값을 나타내었으며, 모래의 최대치수가 커질수록 최밀 충전 배합은 모래의 첨가율이 낮아지는 쪽으로 이동하는 경향을 나타내었다.

3) 흙과 모래의 입도에 따른 압축강도 실험결과 모래의 첨가율이 90%에서 가장 높은 결과를 나타내었으며 이는 단위용적중량 실험 결과와 비슷한 경향을 나타내었다.

Acknowledgement

This research was supported by The Development of Standard Model for Rural Green Home, Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, Republic of Korea.

References

- [1] 황혜주, 흙건축, 씨아이알, 2008 / (Hwang HZ. Earth Architecture. Seoul(Korea):CIR; 2008)
- [2] Romain A, Laetitia F, Batir en Terre, 1st ed. Kim SW, Cho MC, translator, Paju(Korea):Hyohyung; 2012
- [3] Gernot Minke, Earth Construction Handbook, WIT Press, 2000
- [4] 황혜주 외, 흙다짐 적용을 위한 흙의 선정 및 입도조건에 관한 연구, 한국생태환경건축학회 논문집, 2009, p.65-71 / (Hwang HZ, et al., A study on selection and size of Earth in application of Rammed Earth, Journal of the Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, 2009, p.65-71)
- [5] 김덕현 외, 굵은골재 최대치수별 굵은골재/잔골재 용적비에 따른 콘 크리트의 특성에 관한 실험적 연구, 한국시공학회논문집, 2004, p.97-103 / (Kim DH, et al., An Experimental Study on the Properties of Concrete according to G/S ratio classified by Maximum Size of Coarse Aggregate, Journal of the Korea Institute of Building Construction, 2004, p.97-103)
- [6] 이예진 외, 흙건축재료 및 공법의 이해를 위한 교육프로그램 연구, 한국생태환경건축학회 학술발표대회 논문집, 2012, p.123-128 / (Lee YJ, et al., A Study on the Education Program for method and material of Earth Architecture, Proceeding of annual conference of Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, 2012, p.123-128)
- [7] Cho GC, et al. Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength : Natural and Crushed sands, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering, 2006.05
- [8] M. R. Jones et al. Comparison of particle packing models for

proportioning concrete constituents for minimum voids ratio,  
Materials and Structures, 2002.06

- [9] Q.B.Bui et al. Durability of rammed earth walls exposed for 20  
years to natural weathering, Building and Environment, 2008.07
- 
- 

Received June 3, 2013;

Final revision received November 22, 2013;

Accepted December 27, 2013

