

잔골재 입자 크기에 따른 모르타르의 레올로지 거동 특성

이진현¹, 김재홍¹, 김명규^{2*}

¹울산과학기술대학교 도시환경공학부, ²경남과학기술대학교 기계공학과

Fine Aggregates Size Effect on Rheological Behavior of Mortar

Jin Hyun Lee¹, Jae Hong Kim¹, Myeong Kyu Kim^{2*}

¹School of Urban and Environmental Engineering, UNIST

²Department of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University of Science and Technology

요약 콘크리트, 모르타르 등 건설재료의 강도와 작업성은 구성하는 잔골재의 조립률, 입자 크기, 흡수율 등의 물리적 특성에 영향을 받는다. 특히, 잔골재의 입자 크기와 그에 따른 입도 분포는 시공 품질을 좌우하는 건설재료의 작업성을 결정한다. 최근 들어 건설현장에서는 천연모래의 수급 불안정으로 다양한 종류의 잔골재를 사용하고 있는데, 잔골재의 입자 크기에 대한 검증 없이 사용하는 경우 건설재료의 품질 저하 문제가 빈번히 발생하고 있다. 이 논문에서는 잔골재의 입자 크기가 모르타르의 레올로지 거동에 미치는 영향을 분석하여 건설재료의 작업성 평가에 대한 기초 자료를 제공하고자 한다. 모르타르의 작업성 평가를 위해서는 일반적으로 많이 사용하는 미니 슬럼프 플로 시험과 건설재료용 레오미터를 이용하여 레올로지 특성, 즉 항복응력과 소성점도를 측정하였다. 사용한 샘플은 일반 모래에 대한 체가름 시험을 통해 입자 크기에 따라 분류한 11가지 종류의 모래를 동일한 배합비로 모르타르를 제조하여 사용하였다. 실험결과 입자 크기가 0.7 mm 이하로 작아질수록 모르타르의 항복응력과 소성점도가 점진적으로 증가하였다. 입자 크기가 0.34 mm 이하로 작아지면 모래 입자의 흡수율에 따른 영향이 커짐을 확인하였고, 흡수율만큼 배합수를 증가시키면 이에 대한 영향을 제거할 수 있었다. 따라서 0.34 mm 잔분에 대한 흡수율 보정은 건설재료의 작업성 관리에 매우 중요함을 확인하였다.

Abstract Physical characteristics of aggregates affect the workability and strength of mortar and concrete, which include their fineness ratio, particle size distribution and water absorption. The workability of construction materials decreases if the incorporated fine aggregates show improper size distribution of their particles. This study shows the particle size effect on the rheological behavior of mortar and provides basic information for evaluating its workability. A mini-slump flow test was adopted to evaluate the workability of mortar. In addition, its plastic viscosity and yield stress were measured using a rheometer for building materials. The sand samples were prepared by sieving river sand and sorting out with their particle sizes. As a result, it was observed that the fines less than 0.7 mm increases the yield stress and plastic viscosity of the mortar samples. If the fines are less than 0.34 mm, the water absorption of the fines dominates change on the workability.

Keywords : Aggregate, Concrete, Mortar, Particle Size, Rheology

1. 서론

최근 들어 국내에서도 잔골재의 수급이 불안정하여 기존의 표준사에 가까운 강모래 대신 다양한 종류의 잔골재 사용이 증가하고 있다[11, 12]. 예를 들어 다수의 현

장에서는 바닷모래를 세척하여 공급되는 세척사와 부순 골재를 혼합하여 조립률을 맞춘 형태의 잔골재의 사용이 보고되고 있다. 이러한 경우 잔골재의 입형, 크기 등 물리적 성질이 달라지므로, 동일한 배합비로 콘크리트를 생산하여도 강도를 비롯하여 전혀 다른 성능을 보여줄 수

이 논문은 2013년도 경남과학기술대학교 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Myeong Kyu Kim(Gyeongsang National University of Science and Technology)

Tel: +82-55-751-3314 email: mgkim@gntech.ac.kr

Received May 13, 2015

Revised (1st July 1, 2015, 2nd July 15, 2015)

Accepted August 6, 2015

Published August 31, 2015

있다. 특히 굳지 않은 콘크리트의 워커빌리티는 이러한 잔골재의 종류에 매우 큰 영향을 받는다[1-4]. 이 논문에서는 잔골재의 물리적 성질 중 입자 크기에 따른 모르타르의 레올로지 특성 변화를 분석하고, 기존의 배합비에서 다른 잔골재가 사용될 경우의 건설재료의 작업성과 유동성을 미리 평가할 수 있는 모델을 제공하고자 한다.

실험에 사용된 모르타르 샘플은 체가름 장치를 이용하여 입자 크기로 분류한 강모래(river sand)를 이용하여 제조하였다. 먼저 입자 크기에 따라 11가지 종류로 모래를 분류하였고, 각 모래를 이용하여 동일한 배합비에 대해서 11가지의 샘플을 만들었다. 모래의 입자 크기에 따른 모르타르의 유동성을 알아보기 위해 미니 슬럼프와 채널 플로 시험을 하였다. 또한 정량적인 레올로지 특성을 평가하기 위하여 모르타르용 회전형 레오미터를 사용하여 항복응력과 소성점도를 측정하였다. 이를 바탕으로 모래 입자 크기의 레올로지에 대한 영향을 Kreiger-Dougherty식을 기반으로 이론적으로 분석하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험인자

잔골재의 입자 크기를 실험인자로 하여 모르타르의 레올로지 특성을 측정하기 위해 체가름 장치를 이용하여 잔골재를 입자 크기 별로 분류하였다. Table 1은 KS F 2523 규격에 따른 잔골재 체가름 시험용 체이고, 보다 다양한 입자 크기의 효과를 파악하기 위해 Table 2의 과거 체가름 시험 규격에서 사용한 체를 함께 사용하였다.

Table 1. Sieve set 1

Sieve No.	#8	#16	#30	#50	#100
Size (mm)	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15

Table 2. Sieve set 2

Sieve No.	#10	#20	#40	#60	#100
Size (mm)	2	0.85	0.43	0.25	0.15

일반적으로 콘크리트 배합을 위해 사용하고 있는 강모래를 준비하였고, KS F 2502 규격에 따라 체가름 시험한 결과는 Fig. 1과 같다. 이를 이용하여 계산한 평균 입자 크기는 0.71 mm이고, 조립률은 2.39 이다.

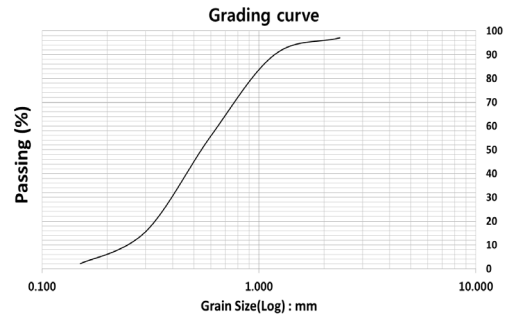


Fig. 1. Grading curve of river sand

강모래를 Table 1과 Table 2에서 정의한 체를 이용하여 입자 크기별로 분류하여, 각 체 위에 남은 모래로 샘플을 준비하였다. 예를 들어, 1번 체 조합을 사용하였을 때, 16번 체 위에 남은 모래의 평균 입자 크기는 상위의 8번 체와 16번 체의 평균인 1.77 mm로 계산된다. Table 3은 두 가지 체 조합을 각각 이용하여 생성한 샘플과 평균 입자 크기를 정리한 표이다. 여기서 GS는 원재료인 강모래를 의미한다. 그리고 Mix1은 S16과 S30을, Mix2는 S30과 S50을 1:1의 비율로, 또한 Mix3은 S16과 S30 그리고 S50을 1:1:1의 비율로 혼합한 샘플이다.

Table 3. Sand samples

Label	Mean size (mm)
GS	0.71
S16	1.77
S20	1.43
S30	0.89
S40	0.64
S50	0.45
S60	0.34
S100	0.23
Mix1	1.33
Mix2	0.67
Mix3	1.04

2.2 사용된 재료 및 배합

시멘트는 밀도 3,140 kg/m³, 분말도 335 m²/kg인 S4의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 사용된 시멘트의 화학 성분량은 Table 4와 같다.

Table 4. Oxide composition of portland cement

Oxides	Contents
CaO	65.47%
SiO ₂	17.71%
Al ₂ O ₃	4.5%
Fe ₂ O ₃	3.37%
MgO	3.29%
SO ₃	3.44%
K ₂ O	1.11%
Na ₂ O	0.16%
TiO ₂	0.31%

배합에 사용된 모래는 입자크기에 따른 영향을 분석하기 위해, 건조 상태로 실험을 진행하고 추후 흡수율에 따른 보정을 고려하였다. 모르타르 샘플의 유동성을 확보하기 위해 고성능 감수제(HRWRA)를 시멘트 중량 대비 0.6% 첨가하였다. 사용된 고성능 감수제는 폴리카본산계로 고흡분량이 22%이다. 또한 과도한 블리딩을 막기 위해 분말형 증점제(VMA)를 시멘트 중량 대비 0.1% 첨가하였다. 본 실험에서 사용된 모르타르 샘플의 배합표는 Table 5에 정리하였다.

Table 5. Mix proportion (weight ratio)

W/C (%)	cement : sand	HRWRA* (C×%)	VMA** (C×%)
45	1 : 1.2	0.6	0.1

*HRWRA : High-Range Water-Reducing Admixture

**VMA : Viscosity Modifying Admixture

배합과정은 Fig. 2와 같다. 처음 2분 동안 믹서로 모든 재료를 배합하였다. 그 다음 믹서를 1분 동안 정지시킨 후 스크래퍼를 이용하여 용기의 내부를 정리하였다. 다시 2분 동안 믹서로 배합하여 마무리하였다. 배합을 끝낸 뒤 4분 안에 실험을 준비하여, 총 9분이 경과한 시점에서 실험을 시작하였다.

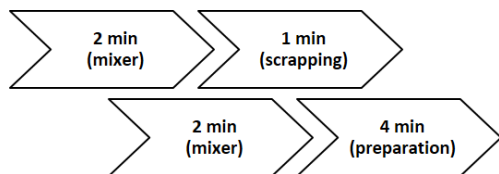


Fig. 2. Mixing process

2.3 유동성 시험

잔골재의 크기에 따른 모르타르의 유동성을 알아보기 위해 미니 슬럼프 플로와 채널 플로 시험을 수행하였다. 각 시험기의 외형과 치수는 Fig. 3과 4에 도시하였다.

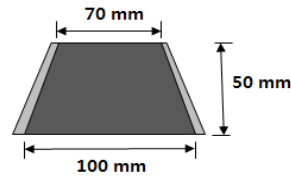


Fig. 3. Mini-slump

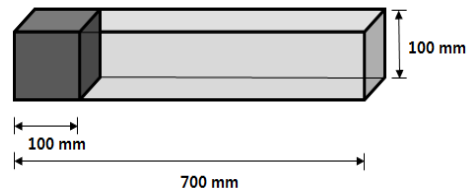


Fig. 4. Channel flow

배합을 시작한 뒤 9분이 경과한 시점에 모르타르를 흐르게 하고 모르타르가 멈출 때까지의 시간(T_f)과 최종 흐름 길이를 Table 6과 같이 측정하였다. 잔골재의 입자크기가 작아질수록 미니슬럼프 플로와 채널 플로의 최종 흐름 길이와 도달시간이 감소하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 평균 입자크기 0.89 mm (S30) 보다 작은 모르타르 샘플에서부터 확인할 수 있었고, 이보다 큰 모래입자를 가지는 경우에는 유동성의 차이가 크게 없었다.

Table 6. Result of mini-slump and channel flow test

Label	Mini-slump flow (cm)	T_f (s)	Channel flow (cm)	T_f (s)
GS	26	26	75	73
S16	28	30	83	70
S20	28	27	74	96
S30	27	23	63	70
S40	24	22	68	88
S50	23	13	50	90
S60	12	8	31	30
S100	11	1	10	-
Mix1	29	60	69	110
Mix2	29	60	70	120
Mix3	27	120	62	80

2.4 레올로지 실험

2.4.1 모르타르 레올로지 측정용 레오미터

일반적으로 사용하는 회전형 레오미터의 경우 실린더 형태의 로터를 회전시킬 때 발생하는 토크를 측정하였다 [5-6]. 모르타르와 같은 건설재료의 경우에는 잔골재의 크기가 상대적으로 커서 벽면에서 마찰 슬립이 발생할 수 있고, 내부의 로터가 플러그 형태로 그 주변부에만 제한적으로 속도장을 만드는 흐름상태가 발생할 수 있다. 이러한 샘플의 경우에는 외벽에 슬릿(slit)이 위치하고 내부의 로터는 베인(vane) 형태를 사용하여 상기된 측정 오차를 방지하였다. Fig. 5와 6은 본 실험에 사용된 회전형 레오미터의 구조와 규격이다. 실린더 용기의 내경은 74 mm 이고, 베인의 지름은 50 mm이다. 실린더 용기에 샘플을 약 130 mm 높이만큼 채우고, 임의의 회전속도 (rpm)로 로터를 돌릴 때 발생하는 토크 모멘트(N·m)를 측정하였다.



Fig. 5. Building Material Cell (BMC)



Fig. 6. Dimension of the BMC, in mm

본 연구에서 레올로지를 측정하기 위해 실시한 조건으로 시간에 따른 베인의 회전속도 프로토콜을 Fig. 7과 같이 나타내었다. 50초까지는 5초당 0.8 rps씩 회전속도

를 증가시키며, 50초부터 100초까지는 동일한 간격으로 회전속도를 감소시켰다.

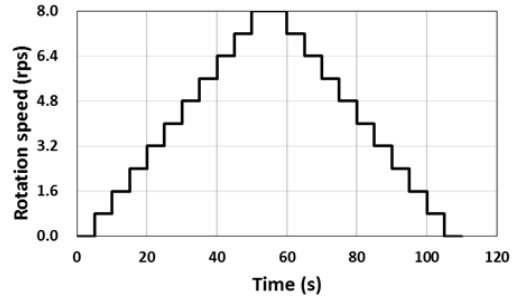


Fig. 7. Rotational speed of vane

이 프로토콜을 통해 회전수를 증가시키는 구간과 그리고 이어지는 회전수를 감소시키는 구간에서 2개의 유동곡선(flow curve)을 구할 수 있다. 실험 결과 측정된 두 개의 토크-회전수 관계는 모든 샘플에서 거의 일치하였다. 이는 실험 시간 약 2분 동안에는 모르타르의 틱소트로피(thixotropy)가 거의 발생하지 않음을 의미한다. 참고로 시멘트 페이스트의 경우 두 유동곡선이 차이가 있고, 사이의 면적을 틱소트로피 계수로 정의하여 분석하기도 한다[5].

2.4.2 Reiner-Riwlin 식을 이용한 레올로지 분석

이 논문에서 사용하고 있는 레오미터의 경우 넓은 간격 동심 원통관(wide-gap concentric cylinder) 형태로 내부 샘플이 모든 부분에서 선형의 속도장을 갖지 못할 수 있다. 또한 모르타르와 같은 빙햄모델(Bingham model)의 경우에는 외벽 주변부는 흐름이 없는 상태가 발생할 수 있다. 이러한 경우에는 Reiner-Riwlin 식을 이용하여 토크-회전수 측정 결과를 분석한다[6]. 이 분석식은 점도계 내부에서 시험하는 샘플이 모든 위치에서 유동이 발생한 경우와 그렇지 않은 경우로 분리하여 고려한다.

첫 번째, 베인을 회전시켰을 때 용기 내부 샘플의 모든 위치에서 0 이상의 전단속도가 발생하여 유동하는 경우, 빙햄모델에 대하여 식 (1)과 같이 토크-회전수 관계로 표현된다.

$$\Omega = \frac{T}{8\pi^2 h \mu_p} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) - \frac{\tau_y}{2\pi \mu_p} \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \quad (1)$$

여기서 Ω 는 회전수(rps), T 는 측정된 토크(N·m)이다. 그리고 h 는 베인의 높이, R_1 는 베인의 반지름, R_2 는 용기의 반지름이다. 따라서 빙햄모델의 재료상수인 항복응력(τ_y)과 소성점도(μ_p)를 측정된 토크-회전수 관계로부터 구할 수 있다.

만약 토크-회전수 관계를 다음 식 (2)와 같이 선형관계로 정의하면, 기울기(a)와 Y-절편(b)으로 분석할 수 있다.

$$T = a\Omega + b \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 비교하면, 다음과 같이 항복응력과 소성점도를 계산할 수 있다.

$$\tau_y = \frac{b}{4\pi h \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2}\right) \quad (3)$$

$$\mu_p = \frac{a}{8\pi^2 h} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2}\right) \quad (4)$$

두 번째 경우에는 베인을 회전시켰지만 용기 안의 모르타르 일부(외벽 근처)에 작용하는 전단응력이 재료의 항복응력보다 작아서, 그 부분에는 전단변형률속도가 0이 되는 경우(dead zone)이다. 이러한 경우에는 식 (5)와 같이 토크-회전수 관계가 표현된다.

$$\Omega = \frac{T}{8\pi^2 h \mu_p} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{2\pi h \tau_y}{T}\right) - \frac{\tau_y}{4\pi \mu_p} \ln\left(\frac{T}{2\pi h \tau_y R_1^2}\right) \quad (5)$$

이러한 경우에는 빙햄모델의 항복응력과 소성점도를 단순히 계산할 수 없고, 비선형 최적화기법을 이용하여 측정값을 기준으로 곡선 맞춤하여 구한다. 또한, 용기의 내벽 근처의 전단흐름이 없는 부분(dead zone)은 식 (6)을 이용하여, 회전 중심으로부터의 거리($R_{2,eff}$)로 표현된다.

$$R_{2,eff} = \sqrt{\frac{T}{2\pi h \tau_y}} \quad (6)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 모르타르의 레올로지 분석 결과

준비한 모르타르 샘플에 대한 레올로지 실험 결과를 상기된 두 가지 경우인 식 (1)과 (5)로 분석하면 Table 7

과 같다.

예를 들어 굵은 모래를 사용한 S16 샘플과 미세 모래를 사용한 S60 샘플의 경우 Fig. 8과 같이 유동곡선이 측정된다. 그래프에서 등근 점은 각 회전수에 따른 측정값이고, 이를 회귀분석하여 구한 선형관계식을 실선으로 도시하였다. 그리고 점선은 식 (5)의 전단흐름이 부분적으로 없는 경우에 대해 적용한 결과이다.

Table 7. Yield stress and plastic viscosity

Label	Eq. (1)		Eq. (5)	
	Yield Stress (Pa)	Plastic Viscosity (Pa·s)	Yield Stress (Pa)	Plastic Viscosity (Pa·s)
GS	16.944	19.866	19.866	1.818
S16	7.766	6.053	6.53	1.709
S20	2.824	1.857	1.857	1.707
S30	6.001	5.642	5.642	1.767
S40	23.298	26.746	26.746	1.466
S50	59.304	59.808	59.808	1.976
S60	242.512	57.350	257.566	2.971
Mix1	0	0.01	0.01	1.744
Mix2	24.004	24.316	24.316	1.796
Mix3	5.648	5.492	5.491	1.688

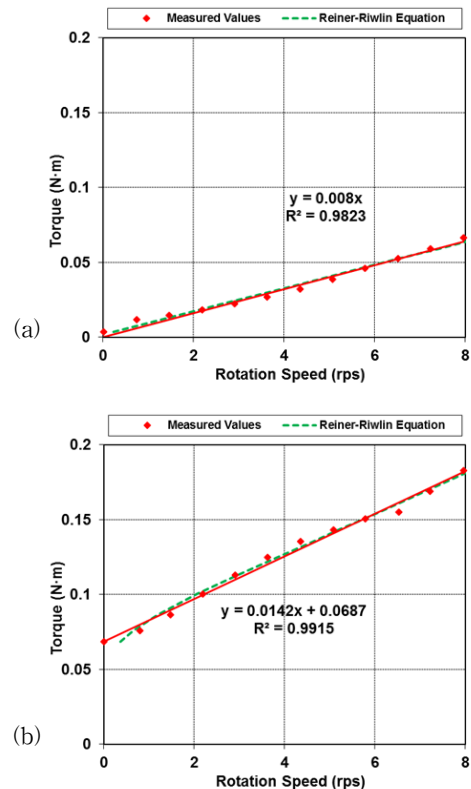


Fig. 8. Rheological test results: (a)S16 (b) S60

각 샘플별로 비교하기 위해, Table 7의 항복응력과 소성점도를 그래프로 도시하면 Fig. 9와 10과 같다. 용기 내부 모든 위치에서 전단흐름이 발생하였다고 가정하는 식 (1)의 경우가 항복응력은 작게, 소성점도는 크게 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 두 분석 식의 차이는 항복응력이 큰 경우 더 크게 발생하였다.

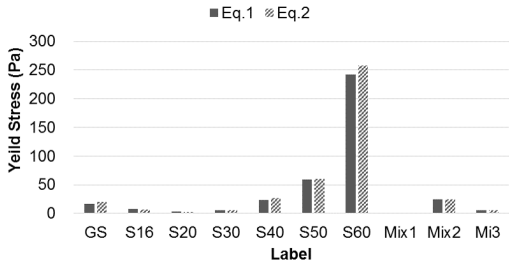


Fig. 9. Yield stress

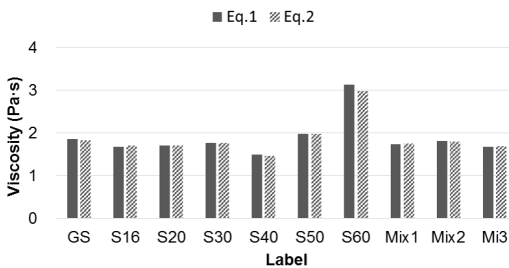


Fig. 10. Plastic viscosity

두 분석식에 대한 선택은 식 (6)의 유효 흐름 반경을 이용하여 기준을 정할 수 있다. 예를 들면, Fig. 11은 S60의 토크에 따른 유효 흐름 반경($R_{2, \text{effect}}$)을 보여주고 있으며, 여기서 최소값은 0.8 rps에서 29 mm이다. 즉, 회전속도가 매우 느릴 때 용기 전체의 내경 74 mm 중 중심축으로부터 29 mm이내에 위치하는 부분만 전단흐름이 발생하였다. 이 논문에서는 최저 회전수에서 용기 내경의 85% 보다 작게 유효 흐름 반경이 형성될 경우, 샘플 외측에 전단흐름이 발생하지 않았다고 판정하여, 식 (5)의 모델을 적용하였다. 이는 S40, S50, S60, Mix2, Mix3, GS에 해당한다.

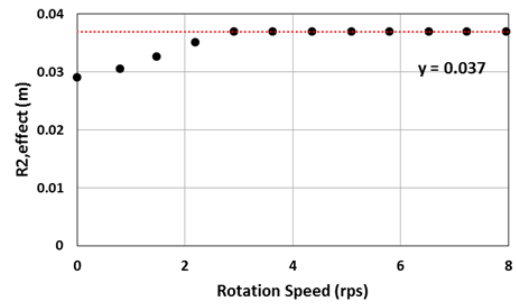


Fig. 11. Effective flow radius ($R_{2, \text{effect}}$) of S60

또한, Table 4의 배합비에서 모래를 제거하여, 동일한 물시멘트비와 동일한 양의 혼화제를 사용하여 준비한 시멘트 페이스트에 대해서도 레올로지 실험도 수행하였다. 실험 결과 시멘트 페이스트는 모르타르에 비해 낮은 점도를 보이며, 전단응력은 무시할 만큼 매우 작아서 뉴턴 모델(Newtonian model)로 판명되었다. 측정된 토크-회전수 관계는 식 (1)에서 항복응력을 0으로 가정하여 분석하였고, 그 결과 점도가 0.37 Pa·s로 측정되었다.

3.2 모래의 평균 입자 크기에 따른 검토

모래의 평균크기에 따른 항복응력과 소성점도의 변화를 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었다. 동그란 점은 S16과 같이 비교적 일정한 크기를 갖는 모래로 배합한 샘플이고, 세모난 점은 Mix1과 같이 여러 크기의 모래를 섞어 만든 샘플이다. 모래의 평균 입자 크기가 작아질수록 항복응력과 소성점도는 점차 커지는 경향이 있지만, 평균 입자 크기가 0.7 mm 이상에서는 그 경향이 미미하다. 참고로 유동성 시험 결과에서는 평균입자 크기 0.89 mm 이상에서 입자크기의 영향이 보이지 않았다.

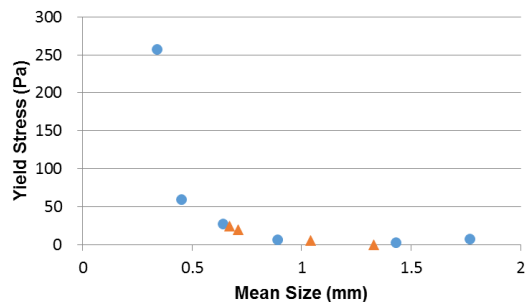


Fig. 12. Yield stress according to the particle size

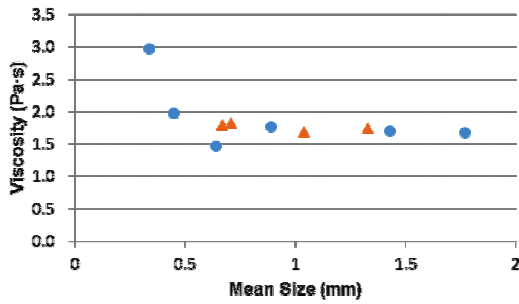


Fig. 13. Plastic viscosity according to the particle size

3.3 충전밀도에 따른 분석

3.3.1 충전밀도

모래 입자의 충전밀도(packing density)는 모르타르의 점도에 영향을 준다. 각 모르타르 샘플에 사용된 모래의 충전밀도를 다음의 방법으로 측정하였다.

- (1) 모래를 원통 모양의 1 L 용적기에 채워 넣고 무게를 측정한다. 이때 고무망치로 10번 이상 용기를 두드리면서 최대한 충전시키고, 표면을 평평하게 만들어서 최대 다짐 상태를 만든다.
- (2) 측정된 중량을 모래의 밀도로 나누어서 입자가 차지하고 있는 부피를 구한 후, 용적기의 크기 1 L로 나눈다. 결과적으로 건조 상태의 모래 입자에서 충전 가능한 입자의 최대 부피분율을 구할 수 있다. 각 샘플 별로 측정된 충전밀도는 Table 8과 같다.

Table 8. Packing density of each sample

Lable	Packing density
GS	0.695
S16	0.645
S20	0.656
S30	0.644
S40	0.640
S50	0.633
S60	0.626
Mix1	0.662
Mix2	0.671
Mix3	0.683

3.3.2 충전밀도를 이용한 점도 예측

Kreiger-Dougherty 식은 현탁액(suspension)의 점도를 고체 입자의 부피분율과 충전밀도, 그리고 용액의 고유점도(intrinsic viscosity)로 예측한다[7-10]. 이 식은 입자의 부피분율이 증가함에 따라 점도가 증가한다는 것을 보여준다. 본 실험의 경우에는 모르타르의 점도를 예측

하기 위해 시멘트 페이스트를 기반으로 모래의 충전밀도를 측정하여 적용하였다.

$$\eta = \eta_0 \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-[\eta]\phi_m} \quad (7)$$

여기서 η 는 모르타르의 점도 그리고 η_0 는 시멘트 페이스트의 점도이다. 고유점도 $[\eta]$ 는 모래입자를 구 모양으로 가정하여 2.5를 적용하였다. 모래입자의 부피분율(ϕ)은 Table 4의 배합비로부터 0.4로 계산된다. 모래입자의 충전밀도(ϕ_m)은 앞서 측정된 결과를 적용할 수 있다.

Table 9. Prediction errors

Label	Predictive Value	Experimental Value	Relative Error(%)
GS	1.640	1.818	10.87
S16	1.762	1.674	-5.01
S20	1.731	1.696	-2.05
S30	1.765	1.762	-0.18
S40	1.777	1.466	-17.54
S50	1.799	1.976	9.83
S60	1.822	2.971	63.04
Mix1	1.716	1.740	1.42
Mix2	1.693	1.799	6.22
Mix3	1.666	1.688	1.33

앞서 측정된 시멘트 페이스트의 점도 0.37 Pa·s를 기준으로 계산한 모르타르의 점도와 측정값과의 상대오차를 Table 9에 기록하였다. 특히 S60 샘플(평균 입자크기 0.34 mm)에서 상대오차가 크며, 이는 모래의 입자가 작아지면서 흡수율이 증가하여 점도가 보다 크게 측정된 것으로 판단된다.

3.3.3 흡수율을 보정한 예측

같은 질량일 때 크기가 좀 더 작은 모래가 더 넓은 표면적을 가지기 때문에 더 많은 물을 흡수한다. 이것은 물-시멘트 비에 영향을 미치고 모르타르가 더 높은 항복응력과 소성점도를 가지게 한다. 이러한 모래의 흡수량에 의한 물시멘트비 저하를 정량적으로 분석하기 위해 각 샘플 모래의 흡수율을 측정하였다. 기본적으로 KS F 2504에 따른 흡수율 측정 시험을 따르며, 요약하면 다음과 같다.

- (1) 500g의 모래를 24시간동안 물에 포화시킨다.

- (2) 모래의 표면에 있는 물기를 제거하면서 표면 건조 상태의 모래 무게를 측정한다(W_{ssd}).
- (3) 표면 건조 상태에서 무게를 측정한 모래를 섭씨 105도의 오븐에 24시간동안 건조시켜 완전 건조 상태로 만들어 무게를 측정한다(W_d).
- (4) 모래의 흡수량은 표면 건조 상태의 모래 무게에서 완전 건조 상태의 모래 무게를 뺀 값이므로, 이를 완전 건조 상태의 모래 무게로 나누면 흡수율을 계산할 수 있다.

Table 10. Absorption rate of each sample

Label	Absorption(%)
GS	2.59
S16	2.32
S20	1.97
S30	1.93
S40	3.49
S50	3.50
S60	7.26
S100	9.52
Mix1	1.83
Mix2	2.97
Mix3	4.88

Table 10은 흡수율 실험 결과를 보여준다. 모래의 입자가 작을수록 흡수율이 증가하며 특히 S60과 S100에서 큰 증가량을 볼 수 있다.

S50을 기준으로 흡수된 물의 양만큼을 추가하여 S60 모르타르에 대해 보정 실험을 실시하였다. 흡수된 물의 양과 기준 흡수율(3.50%)의 차이만큼의 물을 추가한다는 점을 제외하고 모두 같은 조건에서 재실험 하였다. 흡수율 보정 후의 레올로지 실험 결과와 예측값과의 상대오차는 Table 11과 같다.

Table 11. Plastic viscosity measurement considering water absorption

Label	Yield stress	Plastic viscosity	Relative Error
S60R	57.3 Pa	1.81 Pa·s	2.61%

따라서 0.34 mm(S60) 크기에서 보다 크게 측정된 레올로지 특성은 흡수율 보정을 통하여 Kreiger-Dougherty 식으로 예측할 수 있고 유동성의 변화는 입자 크기가 0.89 mm(S30) 정도로 작아졌을 때부터 발생한다.

이는 0.34 mm부터 0.89 mm 까지의 구간은 흡수율이 아닌 충전밀도에 따라 유동성과 레올로지 변화가 발생한다는 것을 의미한다. 따라서 Kreiger-Dougherty 식을 이용하여 시멘트 페이스트의 점도와 측정하고자 하는 모르타르의 모래의 충전밀도와 흡수율을 측정함으로써 특정 모르타르의 점도를 예측할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 모래입자의 크기에 따른 모르타르의 레올로지 특성을 검토하였고 사용된 모래입자의 크기에 따라 모르타르의 레올로지 특성을 Kreiger-Dougherty 식으로 예측하였다. 실험을 통해 분석한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 미니슬럼프 플로우 채널 플로우 실험 결과 모래입자의 크기가 작을수록 최종 흐름 길이와 도달시간이 감소한다. 이는 모래입자의 크기가 작을수록 모르타르의 항복응력과 소성점도가 증가하는 것을 의미한다.
- (2) 모르타르의 항복응력과 소성점도를 정량적으로 표현하기 위해서는 Reiner-Riwilin 식을 적용하여 토크-회전수 관계의 측정값을 분석하였다. 결과적으로 모래입자의 크기가 작을수록 항복응력과 소성점도가 증가하는 경향을 보이며, 항복응력은 모래의 입자크기가 0.7 mm 이상일 때는 크기에 영향을 받지 않는다.
- (3) Kreiger-Dougherty식은 모르타르의 점도를 예측하기 위해 사용할 수 있고, 다른 조건이 동일할 때 모래의 충전밀도가 낮아질수록 점도가 낮아진다. 충전밀도는 입자가 단분산 시스템에서 다분산 시스템으로 갈수록 높아진다. 다양한 모래 샘플을 이용하여 실험한 결과, 잔골재의 충전밀도를 측정하여 모르타르 점도에 대한 예측이 가능함을 확인하였다.
- (4) 잔골재의 흡수율 실험 결과 평균 입자크기 0.34 mm (S60) 정도부터 흡수율이 큰 폭으로 증가한다. 이러한 경우 흡수율 보정을 하여 Kreiger-Dougherty식으로 점도를 예측했을 때 오차가 크게 줄어들었다.

따라서 본 연구에서 제안된 방법으로 시멘트 페이스 트의 점도와 충전밀도를 측정함으로써 특정 모르타르의 점도를 예측하는데 유용하게 활용될 수 있다. 이는 현장 조건에 따라 잔골재의 종류가 변경되는 경우 충전밀도 시험으로 모르타르의 레올로지를 예측할 수 있음을 의미한다.

References

- [1] Goltermann, P., Johansen, V. and Palbol, L., "Packing of Aggregates: An Alternative Tool to Determine the Optimal Aggregate Mix", *ACI Materials Journal*, Vol. 94, No. 5, pp. 435-443, 1997.
DOI: <http://dx.doi.org/10.14359/328>
- [2] Mahmoodzadeh, F. and Chidiac, S. E., "Rheological Models for Predicting Plastic Viscosity and Yield Stress of Fresh Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 49, pp. 1-9., 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.03.004>
- [3] Roussel, N., Lemaitre, A., Flatt, R. J. and Coussot, P., "Steady State Flow of Cement Suspensions: A Micromechanical State of the Art", *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, pp. 77-84, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.026>
- [4] Park, D. H., Noh, M. H. and Park, C. G., "Characterization of Rheology on the Multi-Ingredients Paste Systems Mixed with Mineral Admixtures", *Journal of Koren Concrete Institute*, Vol. 16, No. 2, pp.241-248, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2004.16.2.241>
- [5] Ferron, R. P., Gregori, A., Sun, Z. and Shah, S.P., "Rheological Method to Evaluate Structural Buildup in Self-Consolidating Concrete Cement Pastes", *ACI Materials Journal*, Vol. 104, No. 3, pp. 242-250, 2007.
- [6] Koehler, E. P. and Fowler, D. W., "Development of a Portable Rheometer for Fresh Portland Cement Concrete", 306 p., International Center for Aggregates Research. Austin, TX, 2004.
- [7] Zhou, Z., Solomon, M. J., Scales, P. J., and Boger, D. V., "The Yield Stress of Concentrated Flocculated Suspensions of Size Distributed Particles", *Journal of Rheology*, Vol. 43, pp. 651-671, 1999.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1122/1.551029>
- [8] Wildemuth, C. R. and Williams, M. C., "Viscosity of Suspensions Modeled with a Shear-Dependent Maximum Packing Fraction", *Rheologica Acta*, Vol. 23, No. 6, pp. 629-635, 1984.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01438803>
- [9] Stickel, J. J. and Powel, R. L., "Fluid Mechanics and Rheology of Dense Suspensions, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 37, pp. 129-149, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.122132>
- [10] Khodakov, G. S., "On Suspension Rheology", *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, Vol. 36, No. 4, pp. 430-439, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1023/B:TFCE.0000036973.95412.a3>
- [11] Bae, S. H., Kim, C. D., and Lee, S. H., "Evaluation on Mix Characteristics of Concrete Using Fine Sand of Nakdong-River", *Journal of the Korean Academic Industrial Society*, Vo. 14, No. 3, pp. 1481-1488, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.3.1481>
- [12] Lee, S. H., Jung, Y. W., Jang, S. S., Yeo, I. D. and Choi, J. O., "A Study on Improving the Performance of Shale for Application of Aggregate for Concrete", *Journal of the Korean Academic Industrial Society*, Vol. 14, No. 11, pp. 5915-5922, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.11.5915>

이진현(Jin-Hyun Lee)

[준회원]



- 2015년 2월 : 울산과학기술대학교 도시환경공학부 학사졸업
- 2015년 3월 ~ 현재 : 울산과학기술대학교 도시환경공학부 석박사통합과정

<관심분야>

건설공학, 콘크리트, 레올로지

김재홍(Jae Hong Kim)

[정회원]



- 2008년 8월 : 한국과학기술원 건설 및환경공학과 (공학박사)
- 2008년 11월 ~ 2011년 7월 : Northwestern University Postdoctoral Fellow
- 2011년 8월 ~ 현재 : 울산과학기술대학교 도시환경공학부 조교수

<관심분야>

건설공학, 콘크리트, 레올로지

김 명 규(Myong Kyu Kim)

[정회원]



- 1994년 2월 : 경상대학교 기계공학과 (공학박사)
- 1980년 6월 ~ 1982년 8월 : 대동공업(주) 연구원
- 1982년 9월 ~ 현재 : 경남과학기술대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

기계공학, 유체역학