

# 입도분포를 고려한 석분 사용에 따른 시멘트 모르타르 성질의 변화 이해

강수태  
대구대학교 토목공학과

## Understanding the Properties of Cement Mortar with Employment of Stone Dust considering Particle Size Distribution

Su-Tae Kang

Department of Civil Engineering, Daegu University

**요약** 이 연구에서는 고성능 시멘트 복합체의 잔골재 일부를 석분으로 대체하여 사용할 경우 재료의 성질 변화를 실험을 통해 살펴보았으며, 실험결과와 입도분포 특성과의 연관성을 여러 가지 모델들을 이용하여 분석하였다. 잔골재 중량 대비 0~30% 범위에서 석분을 치환한 시멘트 모르타르에 대해 유동성, 레올로지 특성, 강도 시험을 실시하였으며, 그 결과 석분 사용량이 증가함에 따라 유동성이 향상되고, 레올로지 정수(항복응력 및 소성점도)값이 감소하며, 압축강도 및 휨인장강도가 향상되는 것으로 나타났다. 이와 같은 실험결과는 모르타르를 구성하는 고체 입자들의 충전밀도와 밀접한 관련이 있으므로 최대 충전밀도를 얻기 위한 최적 입도분포 모델을 이용하여 그 영향을 분석하였다. 석분 사용량이 증가함에 따라 입자들의 입도분포가 최대 충전밀도를 얻기 위한 최적 입도분포에 더 가까워짐을 확인할 수 있었으며, 평균제곱근 오차를 이용하여 정량적으로 최적화 정도를 비교하였다. 석분 사용을 통한 입도분포 개선이 유동성의 향상과 소성점도의 감소, 그리고 강도의 향상에 미치는 영향은 관련된 여러 모델들을 이용하여 제시하였으며, 항복응력의 감소는 석분 사용에 따른 평균입경 크기의 증가와 관련이 있음을 보였다.

**Abstract** This study investigates the properties of a high-performance cementitious composite with partial substitution of stone dust for fine aggregate. The relationship between the properties and particle size distribution was analyzed using several analytical models. Experiments were carried out to examine the flowability, rheology, and strength of cement mortars with different stone-dust replacement ratios of 0-30 wt.%. The results showed improved flowability, lower rheological parameters (yield stress and plastic viscosity), and improved strength as the amount of stone dust increased. These results are closely related to the packing density of the solid particles in the mortar. The effect was therefore estimated by introducing an optimum particle size distribution (PSD) model for maximum packing density. The PSD with a higher amount of stone dust was closer to the optimum PSD, and the optimization was quantified using RMSE. The improvement in the PSD by the stone dust was proven to affect the flowability, strength, and plastic viscosity based on several relevant analytical models. The reduction in yield stress is related to the increase of the average particle diameter when using stone dust.

**Keywords** : Stone dust, particle size distribution, mortar, rheology, strength

---

본 논문은 2014학년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

\*Corresponding Author : Su-Tae Kang(Daegu Univ.)

Tel: +82-53-850-6528 email: [stkang@daegu.ac.kr](mailto:stkang@daegu.ac.kr)

Received September 30, 2016

Revised November 11, 2016

Accepted January 6, 2017

Published January 31, 2017

## 1. 서론

콘크리트는 건설재료 중 사용량으로 가장 큰 비중을 차지하는 재료이다. 2013년 레미콘 출하실적을 기준으로 한 콘크리트 사용량은 152 백만  $m^3$ 에 이른다[1]. 한편 콘크리트를 구성하는 재료 중 전체 부피의 2/3 이상을 골재가 차지하고 있다. 따라서 콘크리트의 수요에 맞춰 골재의 공급이 이루어지기 위해서는 아주 많은 양의 골재를 필요로 하게 된다. 2015년 골재의 공급실적에 대한 통계에 따르면 그 양이 161 백만  $m^3$ 에 이른다[2]. 이러한 많은 양의 골재 대부분은 예전에는 천연골재로 조달하였으나, 최근에는 천연골재의 고갈과 그에 따른 환경문제 등으로 수급이 매우 어려운 상황에 도달했으며, 골재의 상당부분을 암석을 파쇄한 부순자갈로 많이 사용하고 있다. 석분(stone dust)이란 암석으로부터 부순자갈을 만들 때 발생하는 부산물로서 입자의 크기로 볼 때 모래와 75  $\mu m$  이하의 미세입자들이 섞여 있는 수준으로 볼 수 있다. 현재 생산되는 석분은 암석의 파쇄과정에서 발생하기 때문에 입도분포의 조절이 불가능하고, 75  $\mu m$  이하의 미세입자의 양이 부순모래의 허용기준 7%를 초과하는 경우가 많으므로 모래 대용으로 사용되지 않고 있다. 주로 노반재나 뒷채움재 등으로 사용되며 레미콘 공장에서 입도분포와 미립분 허용범위를 만족하는 범위 내에서 모래와 일부 섞어서 사용하기도 하고, 또한 석분을 물로 씻어 미세입자를 제거하여 도로포장용, 벽돌생산 등에 모래 대용으로 활용하기도 한다. 하지만 여전히 석분 사용 범위가 제한적이며, 부순모래로 활용하기 위해서는 추가적으로 석분을 재가공해야 하며, 미세입자들은 응집 및 침전의 방법으로 걸러내는 공정을 거쳐야 하기 때문에 제조비용이 증가하게 된다. 따라서 부순모래의 재가공 공정을 거치기 전 상태의 석분을 적극적으로 활용할 수 있다면 골재 생산비용을 절감할 수 있을 뿐만 아니라 응집 및 침전되어 제거되는 석분슬러지 처리에 따른 환경문제도 해결할 수 있는 효과를 기대할 수 있다. 이런 관점에서 석분의 사용범위를 확대하기 위한 노력이 필요하며, 우선적으로 석분 사용에 따른 효과를 정량적이고 과학적인 방법으로 검증할 필요가 있겠다.

한편, 최근에 활발히 개발 또는 활용되고 있는 여러 종류의 고성능 시멘트 복합체의 다수가 골재 입자의 구성이 잔골재 이하의 미세입자들로 구성된 시멘트 모르타르를 기반으로 하고 있으며, 잔골재도 대부분 평균입경

0.5mm 이하의 작은 입경 크기로 구성된다[3-8]. 복합체의 충전밀도 향상과 균질성 확보를 위한 목적으로 주로 사용되는데, 일반적으로 모르타르나 콘크리트에 사용되는 4.75 mm 이내 입경범위의 잔골재에 비해 가격이 크게 비싸다. 따라서 경제성 관점에서 볼 때 고성능 시멘트 복합체에 사용되는 잔골재로서 석분의 활용 가능성을 검토해 볼 수 있을 것이다.

골재는 모르타르 및 콘크리트에서 차지하는 부피가 크기 때문에 그에 따른 영향도 매우 크다. 특히 골재의 다양한 성질 중에서도 골재의 입도분포가 미치는 영향은 다른 골재 성질들에 비해서 더 뚜렷하게 나타나며 작업성, 단위수량 및 단위시멘트량, 강성 및 강도, 수축 등에 크게 영향을 미친다. 따라서 석분 사용에 따른 영향을 파악하기 위해서는 골재 입도분포에 미치는 영향을 제대로 평가해야 할 필요가 있다.

이 연구에서는 석분 사용에 따른 모르타르의 성질 변화를 실험을 통해 살펴보고, 그 결과를 입도분포 특성과 연관하여 평가하고 분석하고자 하였다.

## 2. 최적 입도분포 모델

시멘트 모르타르나 콘크리트를 구성하는 골재는 충전 밀도를 크게 할 수 있도록 입도분포를 구성하는 것이 매우 중요하다. 단위 부피의 모르타르나 콘크리트 내 골재가 차지하는 부피가 가능한 클수록 나머지 부피를 채우는 시멘트와 배합수의 양을 줄일 수 있으며, 제조비용의 절감을 이끌어 낼 수 있다. 동일한 배합수량으로 작업성을 향상시킬 수 있으며, 강성 및 강도가 큰 골재의 부피가 증가할수록 모르타르 및 콘크리트의 강성 및 강도도 향상된다. 그리고 체적안정성이 높은 골재의 특성으로 수축도 저감시킬 수 있는 효과가 있다. 이러한 이유로 지금까지 충전밀도를 최대한 크게 할 수 있도록 골재의 입도분포를 최적화하기 위한 많은 연구가 이루어지고 여러 입도분포 모델이 제안되었으며[9-12], 그 중에서도 가장 일반적으로 적용되는 이상적인 모델이 Fuller and Thompson[9]의 입도분포 모델이다. 이 모델은 최대 충전밀도 또는 최소 공극량을 얻기 위한 골재의 입도분포를 다음과 같은 관계식으로 제시하고 있다.

$$P_i = 100 \left( \frac{D_i}{D_{max}} \right)^n \quad (1)$$

여기서,  $D_i$ 는 알고자 하는 체의 크기를 의미하며,  $D_{max}$ 는 골재의 최대 치수를 나타내고,  $P_i$ 는 체 크기  $D_i$ 의 누적 통과중량 백분율을 나타낸다.  $n$ 은 구성재료들의 충전밀도와 다짐정도에 따라 결정되는 지수로 0에서 1 사이의 값을 가지며, Fuller and Thompson[9]의 연구에서 제시한 지수  $n$ 의 값은 0.5이었다. 1960년대 미연방 도로국에서는  $n$ 의 값으로 0.45를 제시하기도 하였으며 [13], Brouwers and Radix[14]의 연구에서는 Fuller가 제안한  $n=0.5$ 는 최소입경 0.5 mm 이상의 재료들로 구성된 일반 콘크리트와 같은 경우에는 적합하지만 미세입자의 충전재 또는 미세 잔골재를 사용하는 다량으로 사용하는 최근의 고성능 시멘트 복합체에서는 적합하지 않으며,  $n=0.3$ 의 값이 보다 적합하다고 제시하였다.

Funk and Dinger[15]는 입자의 최소입경을 고려하여 다음과 같은 입도분포 모델식을 제시하였다.

$$P_i = \frac{D_i^n - D_{min}^n}{D_{max}^n - D_{min}^n} \quad (2)$$

여기서,  $D_{min}$ 은 구성재료 내 최소입경을 의미한다.

높은 밀도의 골재 입도분포를 사용하는 것은 골재가 전체 부피의 많은 부분을 차지하여 결합재량을 감소시키고, 결과적으로 제조비용을 줄일 수 있다는 것을 의미하기도 한다.

석분 사용에 따른 모르타르의 성질 변화에 대한 실험 결과를 분석하기 위하여 위의 입도분포 모델을 활용할 것이다.

### 3. 실험계획

#### 3.1 배합 및 사용재료

석분사용에 따른 골재의 입도분포 변화와 모르타르의 성질 변화 사이에서의 상관관계를 밝히기 위한 실험에 사용한 모르타르 배합은 KS L ISO 679에서 제시하고 있는 표준배합을 적용하여, 물시멘트비 0.5, 시멘트와 잔골재의 질량 비율 1:3을 적용하였다. 기본 배합의 잔골

재는 주문진 표준사를 사용하였으며, 석분 사용에 따른 모르타르의 물성 변화를 살펴보기 위한 실험으로 표준사의 일부를 석분으로 치환한 배합을 함께 설계하였다. 표준사 대비 석분의 치환율은 질량비로 0, 10, 20, 30 %를 적용하였다.

시멘트는 H사의 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 입자의 평균입경은 21.8  $\mu\text{m}$ 이다. 잔골재로 사용한 주문진 표준사는 평균입경이 약 540  $\mu\text{m}$ 이며 대부분의 입자크기가 300~600  $\mu\text{m}$ 에 분포하고 있다. 석분은 평균입경은 1.76 mm이며, 조립률 3.29로 일반적인 모래보다 큰 값을 가지는 것으로 나타났다. Fig. 1은 시멘트, 주문진 표준사 및 석분의 입도분포를 나타낸 것이다. Fig. 2는 표준체 통과중량 백분율을 기준으로 나타낸 석분의 입도분포를 KS F 2527에서 규정하고 있는 허용 입도분포 범위와 비교하여 나타낸 것으로, 2.36 mm체 통과량이 허용값보다 적은 것으로 나타났다. 실험에 사용한 석분의 75  $\mu\text{m}$  이하 크기의 미분량은 4.4%로 부순모래 허용값 7% 이내에 있는 것으로 나타났다.

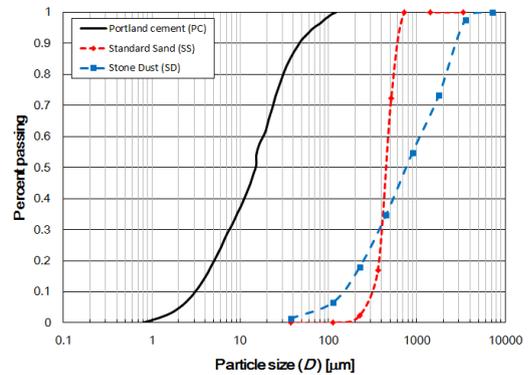


Fig. 1. Particle size distributions of cement, standard sand, and stone dust

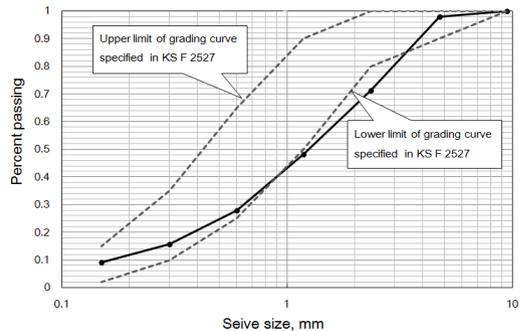


Fig. 2. Comparison of grading curve of stone dust with allowance

### 3.2 실험방법

배합 후 석분은 사용한 시멘트 모르타르의 굳지 않은 상태의 특성을 평가하였으며, 강도 특성을 파악하기 위하여 강도측정용 시험체를 제작하였다.

굳지 않은 상태 특성 평가는 KS L 5105에 따른 플로우 시험과 레오미터를 이용한 레올로지 평가 시험을 실시하였다. 레올로지 평가 시험에 사용된 레오미터는 Brookfield DV2T 점도계이며, 레올로지 시험은 0 ~ 150 rpm 범위에서 각 단계별 10 rpm 씩 증가시켜 5초 간격으로 측정하고 또 최대 rpm에 도달 후 다시 10 rpm 감소시키면서 측정하는 방법으로 진행하였으며, 그 측정 결과에 대해 Bingham 모델( $\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$  관계식)을 적용한 회귀분석을 통해 항복응력(yield stress,  $\tau_0$ )와 소성점도(plastic viscosity,  $\mu$ )를 구하였다.

강도는 압축강도 및 휨강도를 측정하였으며, 압축강도 시험체는 KS L 5105에 따라 50x50x50 mm 크기의 정육면체 시험체로 제작하였으며, 휨인장강도 시험체는 KS L ISO 679에 규정된 40x40x160 mm 크기의 시험체로 제작하였다. 강도평가용 시험체는 타설 종료 후 24시간 동안 기건 양생 후에 탈형하여 20±3℃의 수조에서 수중 양생하였으며 재령 28일에 압축 및 휨인장강도 시험을 실시하였다.

## 4. 결과 및 분석

### 4.1 플로우

Fig. 3은 플로우 결과를 나타낸 것으로, 석분 사용량이 증가함에 따라 플로우 값이 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 다양한 입자크기를 가진 석분의 재료의 충전효과를 향상시켜서 유효역할을 할 수 있는 배합수의 양이 증가하였기 때문으로 판단할 수 있다. 이와 같은 정성적 분석평가는 식 (2)의 입도분포 모델을 이용하여 인과관계 분석이 가능하다. Fig. 4는 실험에서 고려한 네 가지 골재 조합에 대한 입도분포(Particle Size Distribution, PSD) 곡선과 함께 식 (2)로 구한 이론적 최적 PSD 곡선을 함께 나타낸 것이다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 시멘트와 표준사료만 구성된 입자구성에서는 입경 40~400 μm 범위에서 최적 PSD 곡선과 실제 PSD 곡선 사이에 이격이 크게 나타난 반면, 석분을 표준사 대신 10~30% 사용한 경우에는 최대입경의 크기가 증가하면

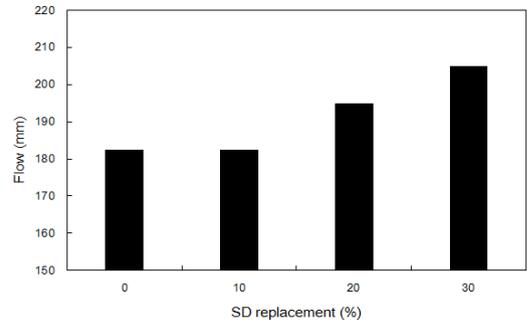


Fig. 3. Flow test results with different SD replacement ratios

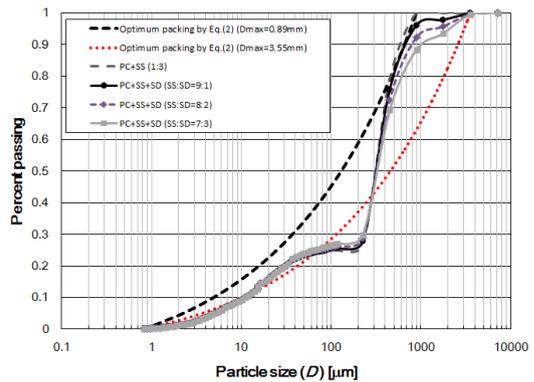


Fig. 4. Comparison of PSD curves with four different aggregate combinations and idealized optimum PSD curves

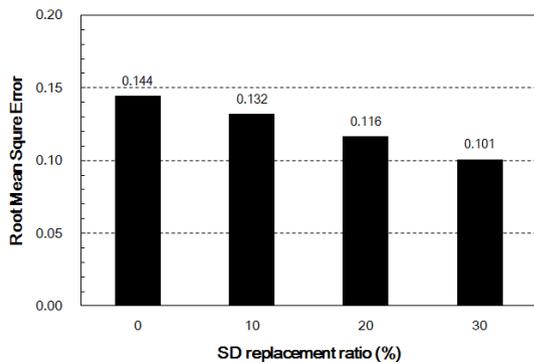


Fig. 5. RMSEs with different SD replacement ratios

서 최적 PSD 곡선이 빨간 점선과 같이 오른쪽으로 이동하며, 석분의 치환율이 10~30% 범위에서 증가할수록 입경 300~3000 μm 범위에서 최적 PSD 곡선과의 이격이 줄어드는 것을 알 수 있다. 각 골재 조합에 대한 PSD

곡선과 최적 PSD 곡선이 일치하는 정도는 평균 제곱근 오차(RMSE)를 이용하여 정량적으로 평가할 수 있으며, 그 식은 다음과 같다.

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_{i,meas} - P_{i,theo})^2}{N}} \quad (3)$$

반대수지 상의 등간격의 입경크기에 대하여 구한 평균제곱근 오차의 결과는 Fig. 5와 같으며, 석분을 치환하여 사용함으로써 평균제곱근 오차가 줄어들고, 석분 치환율이 10%에서 30%로 증가함에 따라 평균제곱근 오차가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

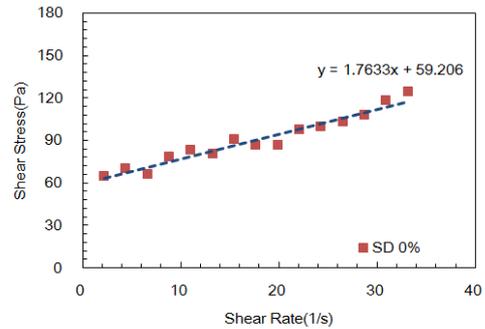
이 결과는 플로우 측정값과 직접적인 상관관계가 있음을 알 수 있으며, 구성입자들의 충전밀도가 증가함으로써 동일한 수량에 대해 작업성 향상에 도움이 되는 수량의 비중이 증가하여 플로우 값이 증가하는 결과로 나타났음을 쉽게 확인할 수 있다.

한편, 표준사와 석분의 흡수율 차이도 플로우 결과에 영향을 미칠 수 있다. 흡수율 실험결과, 표준사의 흡수율은 0.43, 석분의 흡수율은 1.76으로 석분의 흡수율이 크게 나타났다. 흡수율을 플로우에 대한 지배적인 영향인자로 본다면 석분 치환율이 증가할수록 플로우가 작게 나타나야 하겠지만, 실험결과에서는 반대로 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 흡수율 차이보다는 충전효과가 훨씬 더 크게 플로우 결과에 영향을 미쳤음을 의미한다.

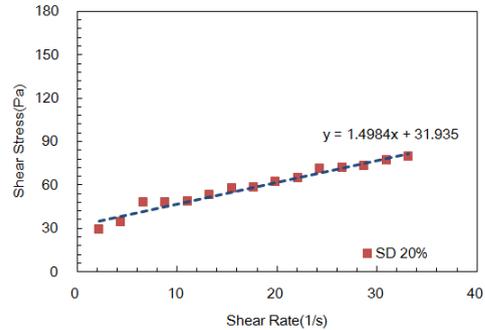
### 4.2 레올로지 특성

레오미터 실험을 통해 얻게 되는 유동곡선은 Fig. 6과 같다. Fig. 6(a)는 석분을 사용하지 않고 표준사만을 사용한 모르타르의 유동곡선을 나타낸 것이고, Fig. 6(b)는 석분을 20% 사용한 경우의 유동곡선을 나타낸 것이다. 유동곡선으로부터 선형 회귀분석을 통해 레올로지 정수를 구할 수 있으며, Fig. 7은 석분 치환율에 따른 레올로지 특성(소성점도 및 항복응력)의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 항복응력 및 소성점도가 석분 치환율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 쉽게 볼 수 있다.

항복응력은 거시적 관점에서 보면 입자들 사이의 마찰에 대한 저항력으로 볼 수 있다. 따라서 입자들의 사이의 접촉의 횟수가 얼마나 많은가에 따라 영향을 받으며,



(a) with standard sand(SS) only



(b) with SS and sand stone(SD) (SS:SD=8:2)

Fig. 6. Flow curves obtained from rheometer test

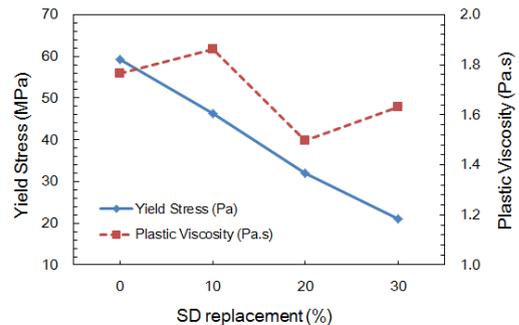


Fig. 7. Variation of yield stress and plastic viscosity according to SD replacement ratio

동일한 체적의 입자들에 대해 입자들의 크기가 작을수록 높은 항복응력을 가지게 된다. 물론 입자의 크기 외에 형상에 따라서도 영향을 받겠지만 표준사와 석분의 입형은 큰 차이가 없는 것으로 가정하여 입형에 따른 영향은 무시하였다. 입자크기에 따른 항복응력의 변화는 퍼콜레이션 기법(percolation approach)을 이용하여 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다[16-18].

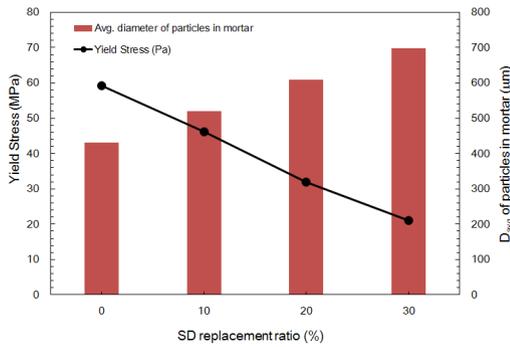


Fig. 8. Mean diameter of the particles in mortar vs. yield stress

$$\tau_o = \alpha(\psi - \psi_c)^\beta \quad (4)$$

여기서,  $\tau_o$ 는 모르타르의 항복응력을 나타내고,  $\psi$ 는 단위부피당 입자의 개수를 나타내는 값이며,  $\psi_c$ 는 퍼콜레이션 임계값에 해당한다. 그리고  $\alpha$ 는 비례상수이고,  $\beta$ 는 관계곡선의 형태를 결정하는 지수이다. 위 식은 결과적으로  $\psi \geq \psi_c$  범위에서 항복응력( $\tau_o$ )이  $\psi$ 의 함수임을 의미한다.

한편 단위부피당 입자의 개수,  $\psi$ 는 입자의 입경분포와 밀접한 관련이 있으며, 일반적으로 입자의 평균입경에 반비례한다고 볼 수 있다. 이와 같은 관계를 이용하여 네 가지 배합에 대한 고체입자들(시멘트와 잔골재)의 평균입경을 구하고 그 결과를 항복응력과 함께 비교하여 나타낸 것이 Fig. 8이다. 입자의 평균입경과 항복응력끼리 서로 반비례하는 것을 확인할 수 있다.

모르타르와 같은 현탁액(suspension)의 점성은 Krieger-Dougherty[19]의 모델식을 이용하여 평가할 수 있다.

$$\frac{\eta_s}{\eta_c} = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-[\eta]\phi_m} \quad (5)$$

여기서,  $\eta_s$ 는 현탁액(여기서는 모르타르를 의미함)의 점성을 의미하여,  $\eta_c$ 는 유체(여기서는 시멘트 페이스트를 의미함)의 점성을 나타낸다.  $\phi$ 는 현탁액 내 입자(여기서는 잔골재를 의미함)의 부피비를 의미하고,  $\phi_m$ 은 입자들의 최대다짐상태 부피비를 나타내며,  $[\eta]$ 는 고유점도(intrinsic viscosity)로서 완전 구형의 입자의 경우 2.5의

값을 가지며 시멘트계 재료는 대체로 6에 가까운 값을 가지는 것으로 알려져 있다[20-22].

$\eta_c$ 는 시멘트 페이스트의 점성으로 몰시멘트비에 의해 결정되므로, 실험에서 고려한 네 가지 배합에 대해 동일한 값을 가진다.  $\phi$ 는 잔골재의 부피비로서 표준사와 석분의 비중이 거의 동일하다고 했을 때 질량과 직접 관련이 있으므로 네 가지 배합에 대해 동일한 값을 적용할 수 있다. 그리고  $[\eta]$ 도 마찬가지로 잔골재 입형과 관련한 상수로 일정하다고 가정하면, 결국 모르타르의 점성,  $\eta_s$ 는 잔골재의 최대다짐상태 부피비,  $\phi_m$ 의 함수임을 알 수 있다. 이 값은 최대 충전밀도를 얻기 위한 식 (1) 또는 (2)의 이상적인 입도분포에 최대한 가까운수록 큰 값을 가질 것이며, Fig. 5에서 나타낸 평균 계급근 오차가 작을수록  $\phi_m$ 이 크다고 볼 수 있다. 따라서 Fig. 7에서 보는 바와 같이 석분의 혼입률이 증가할수록 소성점도가 감소하여 나타나는 것이다.

### 4.3 강도

Fig. 9는 석분 치환율에 따른 재령 28일에서의 압축강도 변화를 나타낸 것이다. 표준사만을 사용한 모르타르보다 석분을 일부 치환하여 사용한 모르타르의 강도가 더 크게 나타났으며, 10~30% 범위에서 석분 치환율이 증가할수록 강도가 더 향상되는 것을 알 수 있다. 골재의 조건 및 다짐 정도가 동일한 경우 강도는 몰시멘트비에 의해 결정되지만, 동일한 몰시멘트비를 적용하더라도 골재 조합 및 그에 따른 입도분포가 다르게 되면 강도가 변화함을 쉽게 알 수 있다. Fig. 10은 석분 치환율에 따른 휨인장강도의 변화를 나타낸 것으로, 강도의 변화가 압축강도에서만큼 뚜렷하게 나타나지 않지만, 석분 치환율이 증가함에 따라 강도가 약간 향상되는 경향을 확인할 수 있다.

석분 사용에 따른 모르타르 강도 변화는 Feret[23]이 제안한 압축강도에 대한 경험식을 이용하여 분석해 볼 수 있다. Feret[23]이 제안한 식은 다음과 같다.

$$f_c = K \left( \frac{V_c}{V_c + V_w + V_{air}} \right)^2 \quad (6)$$

위 식에서  $K$ 는 배합에 따른 상수이며,  $V_c$ ,  $V_w$ ,  $V_{air}$ 는 각각 단위부피당 시멘트, 배합수 및 공기의 부피를 나타낸다.  $V_{air}$ 는 구성입자들의 충전밀도 및 다짐도에 따

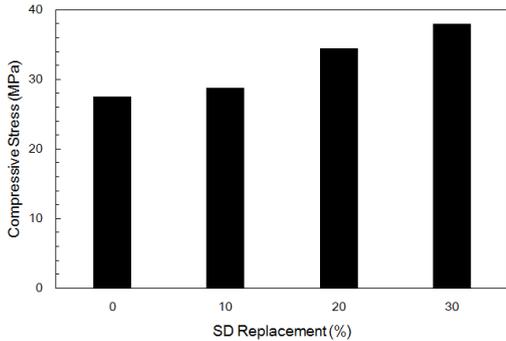


Fig. 9. Compressive strengths with different SD replacement ratios

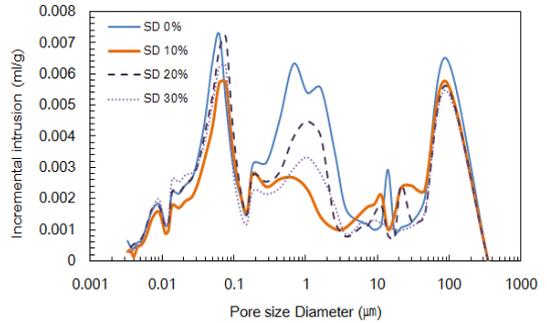


Fig. 11. Pore size distributions with different SD replacement ratios

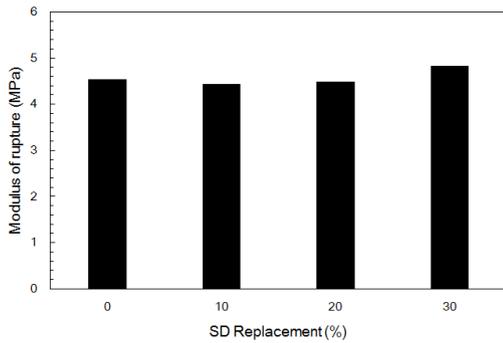


Fig. 10. Modulus of ruptures with different SD replacement ratios

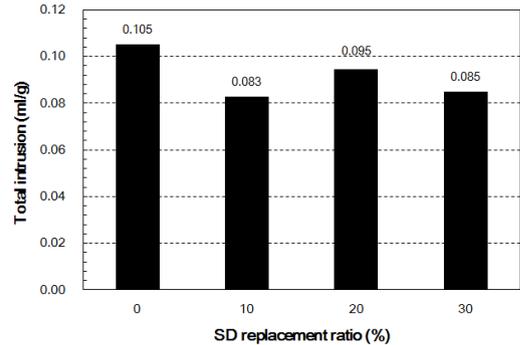


Fig. 12. Comparison of total pore volume according to SD replacement ratio

라 크게 영향을 받으며, 결국 경화된 콘크리트의 공극률에 영향을 미치고 강도에도 영향을 미치게 된다.

이후에 추가적으로 진행된 연구결과들에 따르면, 식 (6)의 지수값 2는 물시멘트비에 따라 달라질 수 있으며, 일반적으로 2~3의 값을 가진다.

실험에 사용한 네 가지 모르타르 배합에 대해 시멘트 량과 배합수량은 동일하게 적용하였다. 따라서 표준사와 석분슬러지 사이의 미소한 비중 차이를 고려하더라도 식 (6)에서  $V_c$ 와  $V_w$ 는 거의 동일하다고 볼 수 있으며, 결과적으로  $V_{air}$ 에 따라 강도가 변화됨을 알 수 있다.

$V_{air}$ 의 변화를 직접적으로 평가하지는 못하지만 경화 모르타르의 공극분포 및 공극량을 비교함으로써 간접적으로 평가할 수 있다. 공극분포 및 공극량은 MIP(Mercury Intrusion Porosimetry, 수은압입법) 분석을 통해 구할 수 있으며, 압축강도 측정 후 시료에서 샘플을 채취하여 분석한 결과는 Fig. 11, 12와 같다. Fig. 11은 공극 크기별 공극분포를 나타낸 것으로 석분을 사

용하지 않은 경우에 비해 석분을 일부 치환하여 사용하였을 때 100  $\mu\text{m}$  전후의 크기 영역과 0.1  $\mu\text{m}$ 에서 수  $\mu\text{m}$  사이의 크기 영역에서 공극이 현저히 감소하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 12는 총 공극량을 비교하여 나타낸 것으로, 석분을 일부 치환하여 사용함에 따라 공극량이 감소하는 것을 볼 수 있으며, 석분을 사용하지 않은 경우에 비해 석분 30%를 치환하여 사용한 경우 공극량이 약 15% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 결과적으로 공극의 감소가 강도 향상으로 나타난 것이라 볼 수 있다.

## 5. 결론

이 연구에서는 고성능 시멘트 복합체의 잔골재 일부를 석분으로 대체하여 사용할 경우 재료의 성질 변화를 실험을 통해 살펴보았으며, 실험결과를 입도분포 특성과의 연관성을 여러 가지 모델들을 이용하여 분석하였다.

그 결과를 종합하면 다음과 같다.

- (1) 석분 치환율을 변수로 한 모르타르 배합 플로우 시험에서는 석분 사용량이 증가함에 따라 플로우가 증가하는 것으로 나타났다. 최적입도분포 모델을 이용하여 석분을 사용함으로써 모르타르를 구성하는 입자들의 입도분포가 최적입도분포 곡선에 가까워짐을 확인하였으며, 이로 인해 충전밀도가 증가하고 동일한 배합수량으로 유동성 향상을 얻을 수 있음을 보였다.
- (2) 레올로지 시험에서는 석분 사용량 증가에 따라 항복응력 및 소성점도가 감소하는 결과를 나타내었다. 각각에 레올로지 정수에 대해 퍼콜레이션 기법과 Krieger-Dougherty의 모델식을 이용하여 모르타르 구성 고체입자들의 평균입경 및 충전밀도가 관련이 있음을 확인하였으며, 석분 사용량 증가에 따라 평균입경 및 충전밀도가 증가하여 항복응력 및 소성점도가 감소됨을 보였다.
- (3) 석분 치환율에 따른 압축강도 및 휨인장강도 시험 결과에서는 석분 사용량이 증가할수록 강도가 향상되는 것으로 나타났다. Feret의 강도와 공극률 사이의 관계식에 근거하여 공극률이 입자의 충전밀도 및 다짐도에 영향을 받음을 확인할 수 있었으며, 모르타르 내 공극분포 분석을 통해 석분 사용으로 인해 공극률이 감소하고 모르타르 강도가 향상되었음을 보였다.

## References

- [1] Korea Federation of Ready-mixed Concrete Industry Co-Operatives, Regional Shipment of Ready-mixed Concrete in 2015, 2016. (at <http://www.e-remicon.or.kr>)
- [2] Statistics Korea, Delivery performance of Aggregate, 2016. (at [http://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx\\_cd=1223](http://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1223))
- [3] D. R. Lankard, "Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON)", Concrete International, vol. 6, no. 12, pp. 44-47, 1984.
- [4] L. E. Hackman, M. B. Faarrell, and O. O. Dunham, "Slurry Infiltrated Mat Concrete(SIMCON)", Concrete International, vol. 14, no. 12, pp. 53-56, 1992.
- [5] V. C. Li, and C. K. Y. Leung, "Theory of Steady State and Multiple Cracking of Random Discontinuous Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites", ASCE Journal of Engineering Mechanics, vol. 118, no. 11, pp. 2246-2264, 1992.

DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1992\)118:11\(2246\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1992)118:11(2246))

- [6] H. H. Bache, "Introduction to Compact Reinforced Concrete", Nordic Concrete Research, Publication N6, 1987.
- [7] P. Richard, and M. H. Cheyrezy, "Reactive Powder Concrete", Cement and Concrete Research, vol. 25, no. 7, 1501-1511, 1995.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2)
- [8] P. Rossi, "Ultra-High-Performance Fiber- Reinforced Concretes", Concrete International, vol. 23, no. 12, 2001, pp. 46-52.
- [9] W. B. Fuller and S. E. Thompson, "The Laws of Proportioning Concrete", Transactions of the American Society of Civil Engineers, vol. 59, pp. 67-143, 1907.
- [10] J. Bolomey, "Granulation et prevision de la resistance probable des betons", Travaux, vol. 19, no. 30, pp. 228-232, 1935. (in French)
- [11] L. W. Nijboer, Plasticity as a Factor in the Design of Dense Bituminous Road Carpets, New York, Elsevier Publishing, 1948.
- [12] J. F. Goode, L. A. Lufsey, "A New Graphical Chart for Evaluation Aggregate Gradations", Proceedings from the Association of Asphalt Paving Technologists, New Orleans, USA, vol. 31, pp. 176-207, 1962.
- [13] Federal Highway Administration, Asphalt Concrete Mix Design and Field Control, Technical Advisory T 5040.27, Washington DC, Federal Highway Administration, 1988.
- [14] H. J. H., Brouwers, and H. J. Radix, "Self-Compacting Concrete: The Role of the Particle Size Distribution", 1st International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete SCC'2005, Changsha, China. pp. 109-118, 2005.
- [15] J. E. Funk and D. R. Dinger, Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspension Applied to Ceramic Manufacturing, Springer, 1994.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3118-0>
- [16] S. D. C Walsh, and M. O. Saar, "Magma yield stress and permeability: Insights from multiphase percolation theory", Journal of Volcanology and Geothermal Research, vol. 177, pp. 1011-1019, 2008.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.07.009>
- [17] D. P. Bentz, C. F. Ferraris, and M. A. Galler, "Influence of particle size distributions on yield stress and viscosity of cement-fly ash pastes", Cement and Concrete Research, vol. 42, pp. 404-409, 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.11.006>
- [18] A. Loiseau and J. F. Tassin, "Model nanocomposites based on laponite and poly(ethylene oxide): Preparation and rheology", Macromolecules, vol. 39, pp. 9185-9191, 2006.  
DOI: <https://doi.org/10.1021/ma061324w>
- [19] I. M. Krieger and T. J. Dougherty. "A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres", Journal of Rheology, vol. 3, no. 1, pp. 137 - 152, 1959.  
DOI: <https://doi.org/10.1122/1.548848>
- [20] T. A. L. Do, J. M. Hargreaves, B. Wolf, J. Hort, and J. R. Mitchell, "Impact of particle size distribution on

rheological and textural properties of chocolate models with reduced fat content”, *Journal of Food Science*, vol. 72, E542-552, 2007.

DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00572.x>

- [21] L. Struble and G. K. Sun, “Viscosity of portland cement paste as a function of concentration”, *Advanced Cement Based Materials*, vol. 2, pp. 62-69, 1995.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/1065-7355\(95\)90026-8](https://doi.org/10.1016/1065-7355(95)90026-8)
- [22] H. Justnes and H. Vikan, “Viscosity of cement slurries as a function of solids content”, *Annual Transactions of the Nordic Rheology Society*, vol. 13, pp. 75-82, 2005.
- [23] R. Feret, “On the Compactness of Hydraulic Mortars”, *Annales des Points et Chaussées*, vol. 7, no. 4, pp. 5-164, 1892. (in French)

강 수 태(Su-Tae Kang)

[정회원]



- 2003년 2월 : KAIST 건설및환경 공학과 (공학석사)
- 2010년 1월 : KAIST 건설및환경 공학과 (공학박사)
- 2002년 12월 ~ 2011년 8월 : 한국 건설기술연구원 수석연구원
- 2011년 9월 ~ 현재 : 대구대학교 토목공학과 조교수

<관심분야>

고성능 콘크리트, 섬유보강 복합체, 시공성능