

시멘트 혼합재의 입도분포와 페이스트 유동특성

The Particle Size distribution of Cement Binder and Rheological Properties of Paste

(Received May 30, 2011 / Revised June 29, 2011/ Accepted June 30, 2011)

유동우^{1)*} 최현국¹⁾ 이승현²⁾ 이세진²⁾

¹⁾성신양회 기술연구소 ²⁾군산대학교 신소재공학과

Dong-Woo Yoo^{1)*} Hyun-Kook Choi¹⁾ Seung-Heun Lee²⁾ Se-Jin Lee²⁾

¹⁾ Research and Development Center, Cheongwon-Kun, 363-940, Korea

²⁾ Green Construction Material Lab., Kunsan University, Kunsan, 573-701, Korea

Abstract

This study examined rheological properties of blast furnace slag and ash paste that are widely used as cement concrete for mineral admixture in current. In that way rheological properties of the paste of mineral admixture only was examined.

The result of this study were as follow:

In order to analyze that the rheological properties of the mineral admixture only, fine particles were produced with grinding machine to 3 particle sizes. These powders in general from the result of comparison with and analysis of rheological properties and the coefficient n and De values. The result that ash powder was higher in plastic viscosity and yield stress than Slag powder, and with the same n value, ash powder showed higher plastic viscosity and yield stress than Slag powder. But Slag powder in particle size distribution showed a sensitive tendency on changing in rheological properties.

키워드 : 유동특성, 입도분포, 슬래그 분말, 애시 분말

Keywords : Rheological Properties, Particle Distribution, Slag Powder, Ash Powder

1. 서론

종래에 시멘트의 입도에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다. 시멘트의 입도는 압축강도와 황산염저항성 등의 내구성에 영향을 미치며, 유동특성에도 큰 영향이 작용한다^{4,5,11)}. 또한 시멘트 혼합재로 널리 사용되는 플라이애쉬나 고로수쇄슬래그는 석탄화력발전소와 제철소에서 발생하는 산업부산물로서 순환자원의 대표적인 재료들이다. 이러한 혼합재들은 일정 입도로 분쇄되어 시멘트에 혼합사용하고 있으며, 시멘트 페이스트의 유동특성에 큰 영향을 준다^{1,6)}. 이들 분말의 입도해석에 많은 분포식이 사용되어지고 있으나, 근래에는 Rosin-Rammler의 분포식이 많이 사용되어지고 있다. 이는 시멘트와 같은 연속된 입도 분포를 가지는 분말의 경우 Rosin-Rammler 분포식이 적당한 것으로

알려져 있다^{7,12)}. 또한 입도에 따른 페이스트의 충전성의 영향을 검토하여 최적의 충전률을 검토한 문헌과 입자의 충전성을 고려하여 고강도 콘크리트용 시멘트를 연구한 예도 있다^{8,13)}. 이와 같이 분말은 입도분포에 따라 페이스트 조건에서 다른 충전률을 나타내며, 페이스트의 유동특성이 다르게 나타난다. 혼합재를 시멘트와 혼합하여 페이스트를 제조하여 실험하는 경우, 시멘트에 포함 되어 있는 광물 중 C_3A , C_4AF 의 간극상 물질과 석고 등은 물과 접촉 시 바로 반응을 시작하여 Ettringite 등의 수화물(水和物)을 형성한다. 이러한 수화물은 일정량의 물을 소모하므로 시멘트 페이스트의 유동특성 또한 영향을 받게 된다. 이러한 영향으로 혼합재 분말 단독의 입도분포와 표면특성이 유동특성에 미치는 영향을 정확히 검토하기 어렵다.

따라서, 본 연구에서는 혼합재의 입도분포가 페이스트 유동특성에 미치는 영향을 검토하기 위하여, 고로수쇄 슬래그와 플라이애쉬 분말을 단독으로 사용하여 제조한 페

* Corresponding author
E-mail : rdwoo@yahoo.co.kr

이스트의 유동특성을 검토하고자 한다. 그 방법으로 각 분말들의 액상 중 자유침강에 의한 충전률과 Rosin-Rammler 분포식에서 얻은 계수들과의 상관관계를 고찰하였다. 또한 페이스트 유동특성과 분포식에서 얻은 계수들과의 상관관계를 검토하였다.

2. 사용 재료의 특성

본 연구의 혼합재 페이스트의 유동특성 시험에 사용된 혼합재는 고로 수쇄 슬래그와 잔사회(Reject ash)를 사용하였으며, 이를 각각 3종의 분쇄기를 사용하여 3종류의 입도로 분쇄 후 이를 사용하여 각각의 입도분포특성 및 유동특성을 비교 검토하였다.

같은 비표면적에서 다른 입도분포를 얻기 위하여, 분쇄기는 A type은 볼밀, B type은 진동밀, C type은 제트밀을 사용하였다. 특히 제트밀의 경우 내부에 분급기가 내장되어 있으며, 후단에는 집진기가 부착되어 있어 입도분포가 다른 2가지 분쇄기와 다른 형태의 입도분포를 얻을 수 있었다. 볼밀은 batch type의 폐쇄식 분쇄기로 1회 분쇄시 12kg을 분쇄 하였으며, 진동밀은 상통과 하통으로 나누어진 연속식 밀을 사용하였다. 원재료의 화학조성 및 제조된 분말들의 비표면적은 Table 1, Table 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of binders

구분	LOI	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Total
Slag	0.01	34.92	42.09	16.21	0.46	4.97	0.05	98.71
Ash	4.09	56.32	6.40	22.25	7.64	1.41	0.00	98.11

Table 2 Sample name and Blaine of Slag Powders

Type	Blaine (cm ² /g)			Sample Name			
Slag Powder	A Type	3,277	4,857	6,288	AS30	AS50	AS60
	B Type	3,303	4,789	5,965	BS30	BS50	BS60
	C Type	3,187	4,294	6,597	CS30	CS50	CS60
Ash Powder	A Type	4,315	5,024	6,221	AF40	AF50	AF60
	B Type	4,363	5,065	6,540	BF40	BF50	BF60
	C Type	3,085	4,899	6,540	CF40	CF50	CF60

분쇄된 Slag 분말과 Ash 분말의 입도분포 곡선은 Fig. 1

에 나타내었다. 분말도가 증가 할수록 입도 분포가 좌측의 작은 입자 쪽으로 움직이고 있으며, C Type의 분쇄기로 분쇄한 시료들이 좁은 범위의 입도 분포를 나타내었다. A Type의 분쇄기를 사용한 경우 보다 B Type의 분쇄기를 사용한 분말들의 입도 분포가 다소 넓게 나타났다.

입자의 분포를 나타내는 여러가지 함수분포가 있으나, 시멘트와 같은 분쇄물의 입도분포는 Rosin-Rammler 분포식에 비교적 잘 따름이 인정되어 입도분포 평가에 가장 적합한 것으로 평가되고 있다^{2,9)}. Rosin-Rammler 분포식은 아래와 같다.

$$R = 100 e^{-dD_p^n}$$

$$R = 100 e^{-(D_p/De)^n}$$

여기서 De : 입도 특성수

(absolute size constant)

적산 체상분포가 36.8%일 때의 입경으로 입자의 크기를 나타내는 정수이다.

n : 균등수 (distribution constant)

D_p = De 일 때

$$R = 100e^{-1} \approx 36.8(\%)$$

즉, De는 R = 36.8% 입자경에 상당한다.

$$d = 1/De^n$$

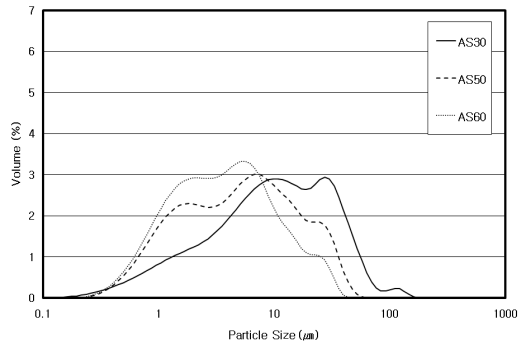
여기서 D_p : particle size (μm)

R : cumulative oversize percentage (%)

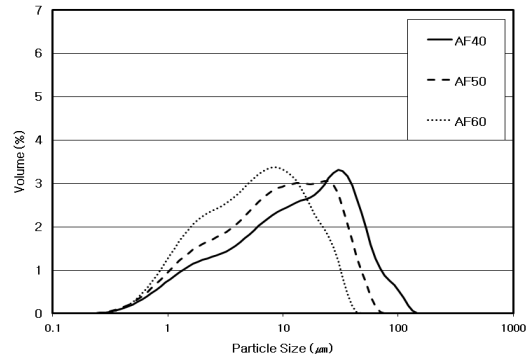
d : a constant related to particle size (μm)

이 식의 의미는 n을 균등수(입도분포의 넓이), d를 입경계수라 하며, 이들 균등수와 입경계수는 시료분말의 입경정도 및 입경간의 간격을 나타내는 것이다. 먼저 입경계수(입자크기의 정도) d가 커지면 시료분말의 입경은 미세한 분진으로 구성되며, 이것은 d가 클수록 R값이 작아지므로 체상분포입자도 작아진다는 것을 알 수 있다. 다음으로 입도분포범위(넓이)와 관련된 균등수 n값이 작을수록 입도분포범위는 넓어진다. 반대로 n값이 커지면 입경간격이 좁아져서 그 범위에서 존재하는 양이 많다는 것을 알 수 있다.

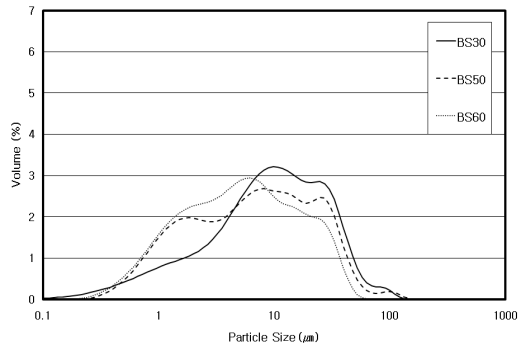
입도 분포 곡선에서 곡선의 모양이 좁고 뾰족한 분말들에서 높은 n 값을 나타내었고, 상대적으로 낮은 비표면적의 분말들에서 낮은 n 값을 나타내었다. De 값의 경우에서 비표면적이 높을수록 작은 수치를 나타내었으며, 특히 C Type의 분쇄기를 사용한 분말에서 매우 낮은 값을 나타내었다.



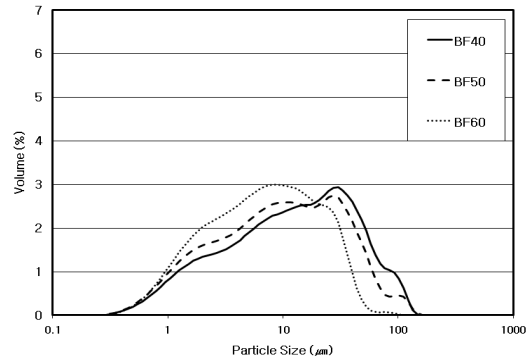
(a) A Type (Slag Powders)



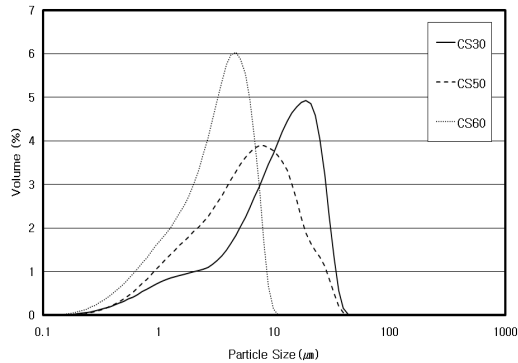
(d) A Type (Ash Powders)



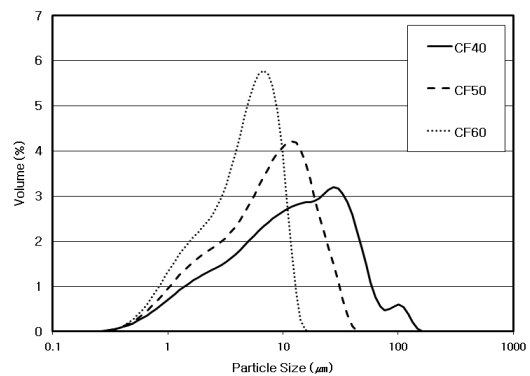
(b) B Type (Slag Powders)



(e) B Type (Ash Powders)



(c) C Type (Slag Powders)



(f) C Type (Ash Powders)

Fig. 1 Particle size distribution

d 값은 비표면적이 증가 할수록 높은 수치를 나타내어 분말들이미립 쪽으로 이동 한다는 것을 알 수 있었다.

분쇄된 분말들의 입형은 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 관찰 하였으며, 각 분쇄기별, 입도별로 제조된 분말의 전자현미경 사진을 Fig. 2에 나타내었다. 입형의 모양은 비표면적이 증가 할수록 각진 부분이 감소되었고, 입도는 가늘어 지는 것을 볼 수 있었다.

3종류의 분쇄기중 C type의 분쇄기를 사용한 것이 분말의 각진 부분이 많이 감소함을 볼 수 있으며, 이것은 충격

에 의한 파괴보다 압축공기의 흐름에 의한 마찰 작용이 많이 작용하기 때문인 것으로 보여 진다. 특히 C type이 분쇄기를 사용하여 분쇄 한 분말의 경우 미립이 거의 없고 입도가 매우 고르게 나타남을 볼 수 있었으며, 이는 분쇄기 내부에 내장 되어 있는 분금기와 분쇄기 후단의 집진기의 영향인 것으로 판단된다. A Type과 B Type의 분쇄기를 사용한 경우는 전자현미경 상에 큰 차이를 볼 수 없었으며, 입형 또한 비슷한 것으로 보였다.

Table 3 Physical properties

Slag powder	Average particle size(μm)	Rosin-Rammler eq.				Ash powder	Average particle size(μm)	Rosin-Rammler eq.			
		De	n	R ²	d			De	n	R ²	d
AS30	16.99	14.64	0.93	1.00	0.08	AF40	14.18	19.36	0.91	0.99	0.07
AS50	9.00	7.67	0.96	0.99	0.14	AF50	9.36	12.65	0.99	1.00	0.08
AS60	6.20	5.23	1.09	0.99	0.16	AF60	6.14	8.14	1.09	1.00	0.10
BS30	15.35	13.57	0.97	1.00	0.08	BF40	13.41	19.17	0.87	1.00	0.08
BS50	12.75	10.38	0.89	1.00	0.13	BF50	10.23	15.00	0.89	1.00	0.09
BS60	9.29	7.87	0.96	0.99	0.14	BF60	7.31	10.15	1.02	1.00	0.09
CS30	12.85	13.24	1.22	1.00	0.04	CF40	12.84	17.59	0.95	1.00	0.06
CS50	8.25	7.84	1.18	1.00	0.09	CF50	7.93	9.64	1.19	1.00	0.07
CS60	3.65	3.81	1.59	1.00	0.26	CF60	4.94	5.48	1.55	1.00	0.07

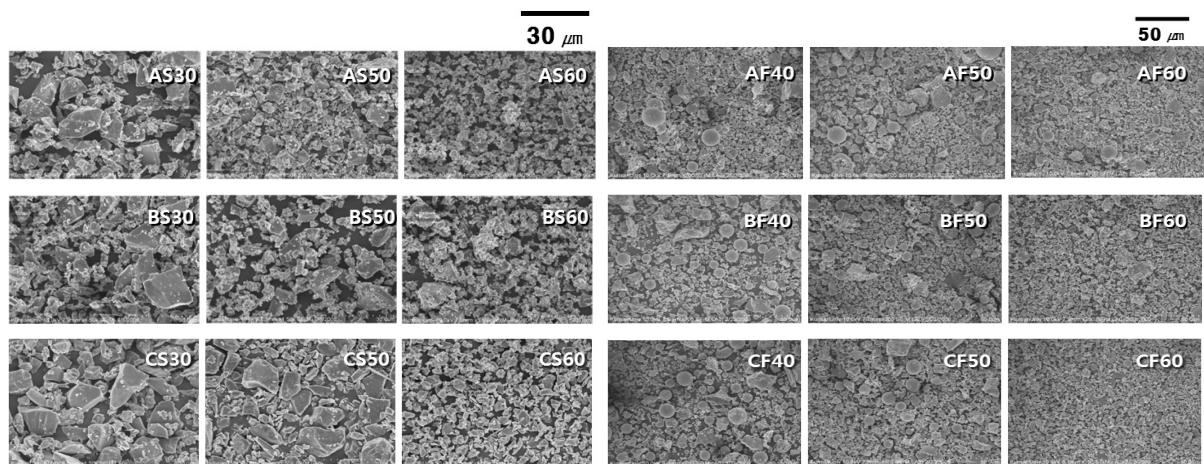
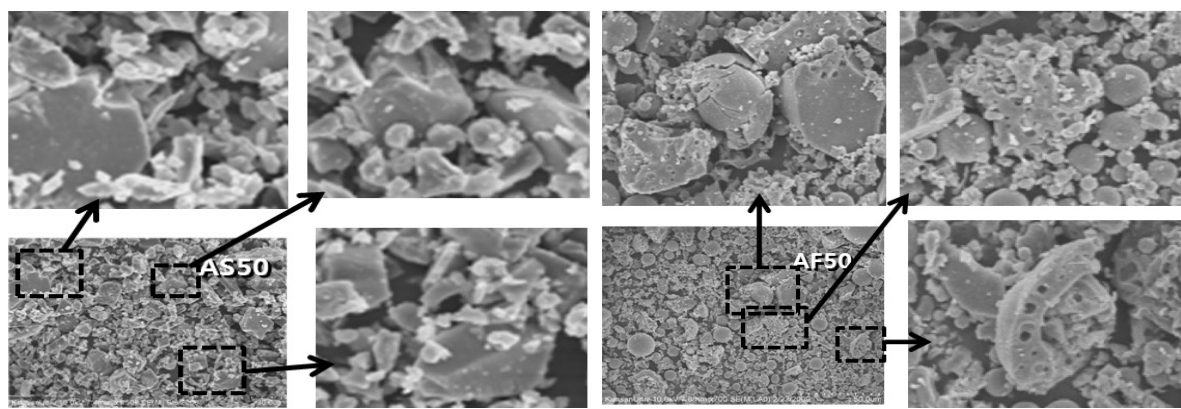


Fig. 2 SEM photographs



(a) Slag powder

(b) Ash powder

Fig. 3 Magnification of SEM photographs

그러나 임두섭 등의 보고에 의하면 B type의 분쇄기가 A Type의 분쇄기 보다, 분쇄 방식의 차이로 에너지 집중이 높아 입자의 표면에 메크로케미칼현상에 의한 상전이 현상이 발생한다는 보고도 있으나³⁾, 본 연구의 전자 현미경 사진에서는 특정한 차이를 발견할 수 없었다.

Ash 분말의 경우 낮은 비표면적에서는 Ash 특유의 세노스피어가 관찰되고 있으며, 높은 비표면적의 시료일수록 세노스피어는 작아지고, 그 양도 줄어드는 것을 볼 수 있었다. 특히 5,000 Blaine 부터는 세노스피어의 파괴된 파편을 관찰할 수 있었다. 또한 분쇄된 Slag 분말과 Ash 분말의 확대된 사진을 Fig. 3에 나타내었으며, Slag 분말에 비하여 Ash 분말이 표면의 굴곡이 심하게 나타나며, 다공질의 광물도 다수 관찰할 수 있었다. 세노스피어의 파괴된 단면에서는 작은 기공이 관찰되었고, 이러한 것들은 같은 입도에서 Slag 분말에 비하여 유동성에 많은 영향을 줄 것으로 예상되었다. 특히 감수제(계면활성제)의 사용시 큰 차이를 나타낼 것으로 예상된다. 반면 Slag의 경우 Ash에 비하여 비교적 깨끗한 표면을 나타내었다.

3. 시험 조건

미니플로우, 소성점도, 항복응력은 W/B = 60%에서 측정하였다. 본 연구에 사용된 미니플로우 시험 방법은 모르타르와 시멘트 페이스트 흐름성의 측정방법으로 매우 빠르고 경제적인 시험 방법이다¹⁰⁾. 시험은 2-3-2 교반법으로 하였으며 미니플로우 콘에 시멘트 페이스트를 채운 다음 1분간 정치한 후, 미니플로우 콘을 들어 올려 페이스트의 퍼짐이 멈추었을 때 중심을 지나는 대각선 4방향의 평균

직경을 구하여 그 결과를 표시하였다. 본 시험에 사용된 미니플로우 콘의 규격은 높이 57mm, 내경(아래 38mm, 위 19mm)을 가지는 것을 사용하였다.

소성점도와 항복응력의 측정은 분쇄된 분말을 물과 3분간 혼합하여 페이스트를 제조하여 항온이 가능한 원통형 용기에 넣고 실온에서 회전속도의 범위를 최소 1 rpm에서 최고 150 rpm까지 상승 및 하강시켜 유동특성을 관찰하였다. 사용한 회전식 점도계는 Brookfield사의 RVDV II (USA)이며, spindle은 SC4-29를 사용하였다. 유동성의 결과 해석은 Bingham equation을 사용하였다.

충전률은 액으로 증류수를 사용하였으며, 자유 침강조건에서 시험하였다. 분쇄된 분말을 W/B = 125%에서 혼탁액이 되도록 혼합하고, 메스실린더에서 6시간 동안 정치한 후, 침강된 슬러리의 체적을 측정하였다. 이 측정된 체적에 분말의 진비율을 대입하여 충전률을 측정하였다.

4. 혼합재 페이스트의 유동 특성

Slag 분말을 사용한 페이스트 유동특성의 상관관계를 그래프화 하여 선형회기분석을 하였다. 충전률과 소성점도 및 항복응력은 거듭제곱에 반비례하는 경향을 나타내었으며, 결정계수(R²)값은 각각 0.92와 0.84로서 높은 상관관계를 나타내었다(Fig. 4 (a)). 미니플로우 역시 소성점도 및 항복응력에 거듭제곱으로 반비례 하였으며, 선형회기 분석시 높은 상관관계를 나타내었다(Fig. 4 (b)). 충전률과 미니플로우는 직선으로 비례하는 경향을 나타내었다(Fig. 6).

Ash 분말을 사용한 페이스트 유동특성의 상관관계는

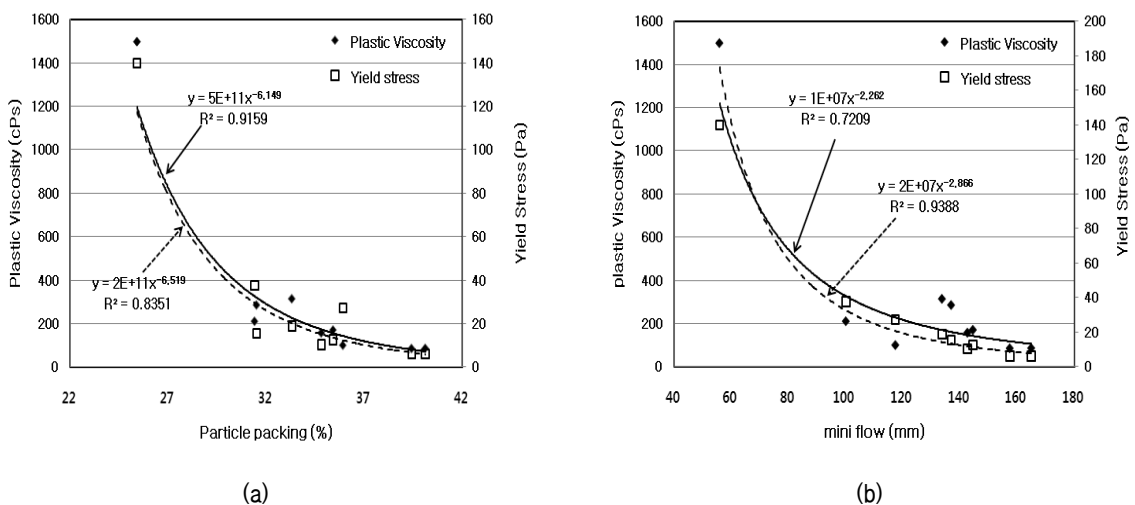


Fig. 4 Change of plastic viscosity and yield stress as a function of particle packing and mini flow at slag powders

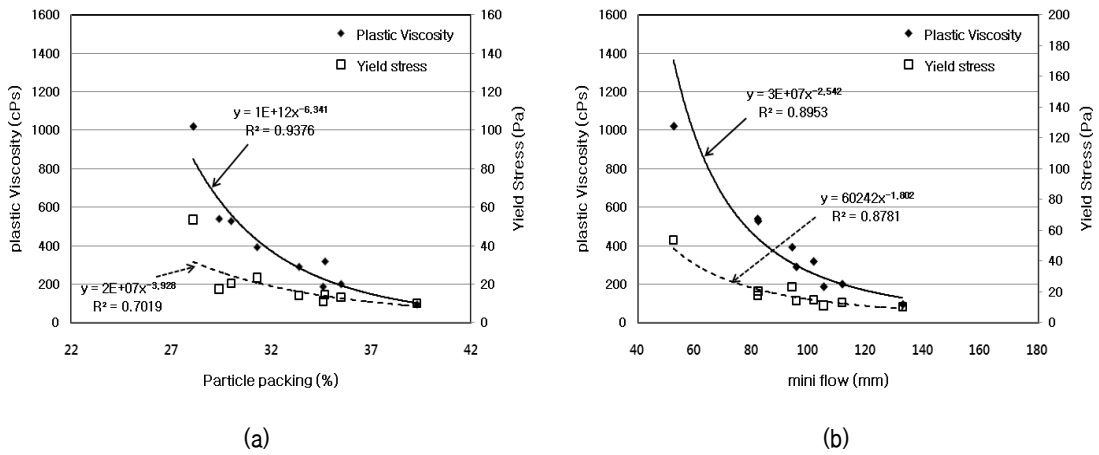


Fig. 5 Change of plastic viscosity and yield stress as a function of particle packing and mini flow at ash powders

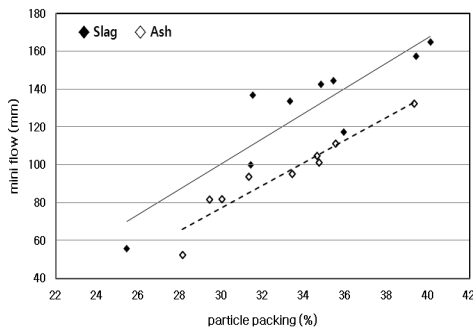


Fig. 6 Relationship between particle packing and mini flow at slag powders and ash powders

선행실험의 Slag 분말과 같은 경향성을 보였으며, 충전률과 소성점도 및 항복응력은 거둬제공에 반비례하는 경향을 나타내었으며, 결정계수(R^2)값은 각각 0.94와 0.70을 나타내었다(Fig. 5 (a)). 미니플로우 역시 소성점도 및 항복

응력에 거둬제공으로 반비례 하였고, 결정계수(R^2)값은 각각 0.90와 0.88을 나타내었다(Fig. 5 (b)). 충전률과 미니플로우는 직선 비례하는 경향을 나타내었다. 분쇄된 Ash 분말의 경우, 전반적으로 Slag 분말 보다 높은 소성점도와 항복응력 및 충전률 나타내었다 (Fig. 6).

5. 입도분포와 혼합재 페이스트의 유동특성

분쇄된 분말들의 입도분포를 Rosin-Rammler 분포식에 대입하여 얻은 De, n 값과 페이스트 유동특성의 실험에서 측정된 소성 점도와 항복응력의 관계를 회기분석으로 비교하여, Fig. 7의 결과를 얻었다. De 값은 소성점도 및 항복응력에 거둬제공으로 반비례하는 경향을 나타내었고, n 값은 직선 비례하는 결과를 나타내었다. 충전률과 미니플로우 관계를 Fig. 6에 나타내었고, Slag 분말이 Ash 분말보다 동일 충전률에서 높은 미니플로우 값을 나타내었다.

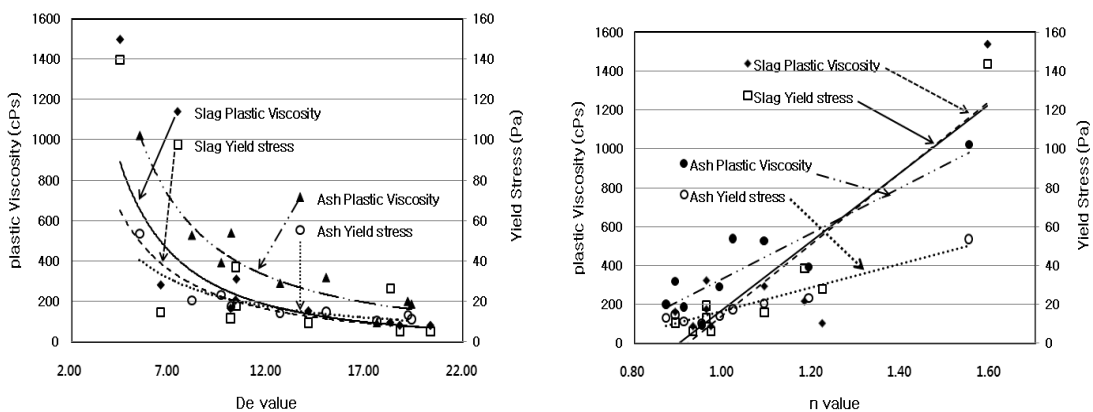


Fig. 7 Change of plastic viscosity and yield stress as a function of De value and n value at slag powders and ash powders

이는 Fig. 3에서 보여진 SEM 사진에서와 같이 입 형의 영향을 받는 것으로 보여진다. Fig. 7에 나타낸 De 값과 소성점도 및 항복응력의 비교 결과에서 Slag분말 보다 Ash 분말이 높은 값을 나타내었고, 거듭제곱에 반비례하는 경향성을 나타내고 있으며, Slag 분말보다 Ash 분말이 De 값의 변화에 일정한 경향성을 나타내었다. n 값과 소성점도 항복응력의 비교에서는 Ash 분말이 동일 n 값에서 Slag 분말에 비하여 비교적 높은 값을 나타내었으며, 각각의 추세선의 기울기는 Ash 분말이 slag 분말 보다 완만한 기울기를 나타내었다. 따라서 Slag 분말이 Ash 분말 보다 입도 폭의 변화에 대하여 유동특성이 민감하게 나타나는 것으로 나타났다.

이상의 결과에서 Slag 분말과 Ash 분말의 경우 같은 입도 분포에서 다소 상이한 유동특성을 나타내었다. 이는 입형 및 분말의 표면 상태에서 나타나는 차이인 것으로 생각 된다.

6. 고찰

분말입자를 기공이 없는 상태이고, 완전 구형의 상태로 가정하였을 때, 각 입경에 해당하는 분말의 개수와 그 분말의 표면적을 계산하면, 0.2 μm 이하에서 분말의 개수와 표면적은 급격히 증가하게 된다. 입도 분포에서 평균입경이 10 μm 로 가정 하였을 때, 10 μm 입경의 분말 한 개에 해당하는 0.2 μm 입경의 분말은 약 13만개로 계산되면, 표면적은 50배가량 증가한다. 이러한 계산 결과 값에서 작은 입경의 분말이 소량 증가하는 경우에도 분말의 비표면적은 급격히 늘어남을 알 수 있다. Rosin-Rammler 분포식의 De 값이 감소에 따라 입도 분포 곡선은 좌측의 작은 입경의 크기로 이동하고, 이는 분말의 비표면적 증가를 가져오게 된다. 이러한 분말의 비표면적의 증가는 페이스트에서 분말과 액의 접촉면 증가나 분말과 분말의 접촉 증가의 결과를 가져오며, 이것은 항복응력의 증가를 나타내게 되어 분리저항성의 증가가 나타내게 되는 것으로 생각 된다.

본 시험에서 사용된 원료 분말 중 충전률이 가장 높은 AS30과 가장 낮은 CS60 분말의 입도 분포곡선을 이용하여, 각 입자가 완전 구형이라는 조건에서, 각 분말의 입경에 해당하는 체적비율을 계산 후, 각 입경에 해당하는 분말의 개수와 표면적을 계산한 결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. AS30과 CS60 중에 1 μm 이하의 분말 개수 비율은 AS30이 37.3%, CS60이 47.5%로 CS60이 1 μm 이하의 분말 비율이 약 10% 가량 높게 나타났다. 또한, 기공이 없는 동일체적으로 가정하고 계산한 AS30과 CS60의 표면적 비율은 약 1.3배가량 CS60이 높았다. 이러한 계산 결과는 비

록 분말들이 완전한 구형이 아닌 비구형의 형태를 가진다 해도 유사한 경향성을 나타낼 것으로 보이며, 본장의 시험 결과에서도 AS30보다 CS60의 비표면적이 높았고, 항복응력과 소성점도 또한 높았다.

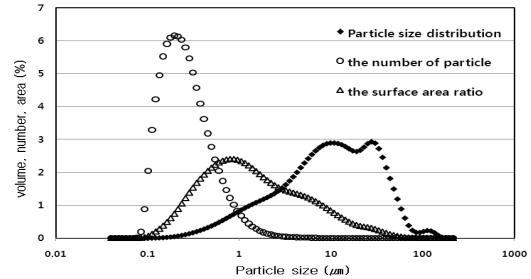


Fig. 8 Particle size distribution of CS30

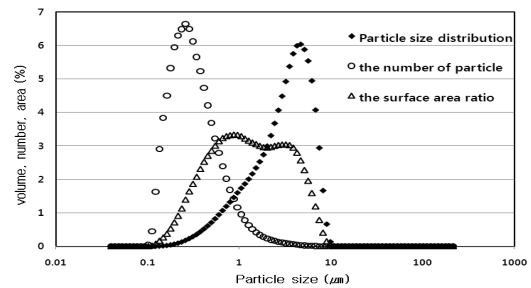


Fig. 9 Particle size distribution of AS60

충전률에서는 AS30이 39.4%, CS60이 25.4%로 나타났다. 이는 Fig. 10(a)과 같이 되며, AS30보다 CS60이 분말과 분말 사이에 보다 많은 공간(V1)이 필요하게 된다. 이는 앞에서 설명한 표면적의 차이에서 나타나는 결과로 해석되어진다. 그러나 통상적으로 페이스트의 유동특성을 시험하는 경우 Fig. 10(b)와 같은 조건에서 시험이 됨으로, 동일 체적에서 시험하는 조건이 된다. 그러므로 AS30에 비하여 CS60은 V2 만큼의 체적이 부족한 상태이다. 이는 자유 침강조건 보다 분말과 분말 사이의 거리가 가까워진 것을 의미하며, 그에 따라 분말과 분말사이의 마찰력 또한 증가 될 것으로 생각된다.

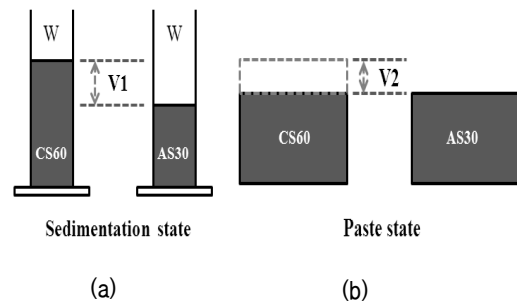


Fig. 10 Schematic diagram of particle packing test

결과적으로 분말의 물리적 특성(입도분포, 입형)을 고려한다면 CS60에 V2에 해당하는 물의 체적이 부족한 상태이고, 이것이 페이스트 유동특성의 측정결과로 나타나게 된다. 이러한 시험의 조건으로 볼 때, 자유 침강에 의한 충전률의 시험은 무한체적 조건에서 분체 입자의 물리적인 특성을 나타내는 것으로 해석되며, 일반적인 유동특성의 시험과 같이 페이스트를 제조하여 시험하는 경우는 제한된 체적에서 시험이 진행되므로, 분말의 물리적인 특성이 페이스트의 항복응력이나 소성점도의 차이로 나타게 된다.

본 연구에서 사용한 빙햄식 (Bingham equation)은 $\tau = \tau_0 + \eta_{pl}\gamma$ 와 같다. (여기서 τ 는 전단응력, τ_0 는 항복응력, η_{pl} 은 소성점도, γ 은 전단속도) 이 식에서 소성점도는 응력 하강곡선의 기울기에 해당하며, 항복응력은 y축(전단응력)의 절편에 해당 한다. 빙햄식은 낮은 전단속도 영역에서 틱소트로픽(Thixotropy)현상을 보이는 물질에 대한 전단응력/전단속도의 거동을 묘사하며, 전단응력이 임계항복응력(항복응력, τ_0)을 넘을 때 까지 흐르지 않는다. 따라서 물질의 흐름이 없는 상태이다. 즉 어떤 물질의 계가 항복응력이 높다는 것은 낮은 전단응력에서는 유동을 하지 않으므로, 비중차에 의한 분리현상이나, 액의 상등현상 (Bleeding 현상)등이 발생이 적게 나타난다. 본 연구에서 다루는 혼합재 페이스트 조건에서는 재료분리 저항성을 나타내는 수치로 해석 된다.

본 연구 결과에서 De값의 감소나, n값의 증가는 자유 침강법에 의한 충전률의 감소를 나타내고, 이것이 페이스트 조건에서는 항복응력과 소성점도 상승의 결과로 나타났다.

유동특성에 작용하는 분말의 물리적인 특성인 입도 외에도 입형의 특성이 작용하는 것으로 알려져 있다. 특히 분쇄기의 종류에 따라 분말의 표면에 메크로케미칼현상이 발생한다는 보고가 있으나³⁾, 본 연구에서는 분쇄 종류의 차이에서 나타나는 분말의 표면 변화는 SEM 사진상에서 확인하지 못하였고, 입자의 구형을 또한 같은 비표면적에서는 SEM 사진으로 확인하지 못하였다. 그러나 원재료의 차이에서 나타나는 입형의 차이는 Fig. 3의 확대 SEM 사진에서 보인 것과 같이 Slag 분말의 경우 표면이 매끄러운 상태였으나, Ash 분말의 경우 세노스피어의 파괴된 형태나, 해면상의 다공체를 확인 할 수 있었다. 이러한 차이에서 Ash 분말이 Slag 분말 보다 높은 소성점도와 항복응력 값을 나타낸 것으로 생각되어지며, 화학혼화제(고성능 감수제, 계면활성제)의 적용시 표면 흡착정도의 차이에 의해 유동특성의 차이가 크게 달라 질것으로 생각된다. 일반적으로 화학혼화제의 흡착이 적은 분말들이 물리적인 변화

(입도, W/B 등)에 민감한 유동특성의 변화를 보인다. 이러한 결과는 狩野和弘등이 검토한 보고서에서 “조립의 플라야에서 및 미립의 석영가스화 슬래그를 혼합한 시멘트 페이스트의 유동성이 좋다” 는 내용과 같은 결과를 나타내고 있다¹⁴⁾.

위와 같은 혼합재의 입도분포 및 입형에 의해 나타나는 유동특성을 이용시 분리저항성이 높은 고유동콘크리트나, 다량의 혼합재를 포함하는 혼합시멘트의 제조에 응용할 수 있을 것으로 생각된다.

7. 결론

1) 충전률과 미니플로우는 소성점도, 항복응력에 거둬제 곱으로 반비례하는 경향이였다(분말의 평균입경이 17~3.5 μm 사이 일 때).

2) 충전률과 미니플로우는 직선 비례 관계를 나타내었으며, 동일 충전률에서 Slag 분말이 높은 미니플로우 값을 나타내었다.

3) Rosin-Rammler 식의 De 값은 소성점도와 항복응력에 거둬제 곱으로 반비례하였으며, 또한 Ash 분말이 Slag 분말 보다 높은 값을 나타내었다. 이것은 일반적으로 같은 입경에 크기 일때 Ash 분말이 Slag 분말 보다 소성 점도와 항복응력이 높다는 것을 의미한다.

4) n 값은 소성점도와 항복응력에 직선으로 비례하였다. 동일 n 값에서는 Ash 분말이 Slag 분말 보다 비교적 높은 소성점도와 항복응력을 나타내었으나, 추세선의 기울기는 Slag 분말이 높았다. 따라서 입도분포 곡선의 폭의 변화는 Slag 분말이 민감한 경향을 나타내었다.

5) 분말도가 높은 분말일수록 소성점도와 항복응력은 증가 하였고, 충전률은 감소하였으며, Slag 분말에 비하여 Ash 분말이 소성점도와 항복응력이 높았다. 즉, Slag 분말 보다 Ash 분말이 분리저항성이 높은 것으로 판단된다.

6) 분말의 미립이 증가시 비표면적 증가에 의해 유동에 필요한 수량이 증가되고, 소성점도와 항복응력이 증가하여 분리저항성이 증가하였다. 다량의 혼합재를 포함하는 혼합시멘트에서 이러한 유동특성의 활용이 가능할 것으로 보인다.

참고문헌

- 1) 변승호, 김형철, 김재영, 최현국, 송종택, 보통포틀랜드 시멘트 물성에 미치는 시멘트 입도의 영향, Journal of

- the Korean Ceramic Society, 47권 5호, 2010.
- 2) 이승현, 시멘트에서 입도분포, 시멘트 sno. 166, pp. 62 ~ 66, 2003.
 - 3) 임두섭, 이원준, 유동우, 이승현, 진동밀을 이용한 슬래그 및 플라이애시의 표면개질효과, 한국건설순환 자원 학회 논문집, pp. 183 ~ 186, 2010.
 - 4) Hanifi Binici, Orhan Aksogan, Ismail H. Cagatay, Mustafa Tokyay, Engin Emsen, The effect of particle size distribution on the properties of blended cements incorporating GGBFS and natural pozzolan (NP), Powder Technology, Vol. 177, pp. 140 ~ 147, 2007.
 - 5) Hanifi Binici, Hu Seyin Temiz, Mehmet M. Kose, The effect of fineness on the properties of the blended cements incorporating ground granulated blast furnace slag and ground basaltic pumice, Construction and Building Materials, Vol. 21, pp. 1122 ~ 1128, 2007.
 - 6) C.K. Park, M.H. Noh, T.H. Park, Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures, Cem. Concr. Res., 35, pp. 842~849, 2005.
 - 7) S. H. Lee, H. J. Kim, E. Sakai, M. Daimon, Effect of particle size distribution of fly ash-cement system on the fluidity of cement pastes, Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp. 763 ~ 768, 2003.
 - 8) H. Wan, Z. Shui, Z. Lin, Analysis of geometric characteristics of GGBS particles and their influences on cement properties, Cement and Concrete Research, Vol. 34, pp. 133 ~ 137, 2004.
 - 9) K. van Breugel, Numerical simulation of hydration and microstructural development in hardening cement-based materials, Cement and Concrete Research, Vol. 25, pp. 319 ~ 331, 1995.
 - 10) S. Ramachandran, Mini Slump of Research Techniques, CONCRETE ADMIXTURES HANDBOOK, pp. 78 ~ 79, 1995.
 - 11) Yasumi Fukaya, Hitoshi Hoshihara, Yukio Mizukami, セメントの粒度分布が硬化体組織と強度に及ぼす影響, セメントコンクリート論文集, No.45 pp. 92 ~ 97, 1991.
 - 12) Kozaburo Yoshida, Shigeo Okabayashi, Koji Tanaka, セメントの粒度分布と充てん性ペースト強さ, セメントコンクリート論文集, No.45 pp. 86 ~ 91, 1991.
 - 13) 坂井悦郎, 柿沼保夫, 黒川大亮, 相川豊, 粒子の充てん性を考慮した高強度コンクリート用セメントの材料設計, セメントコンクリート論文集, No. 63 pp. 2 ~ 8, 2009.
 - 14) 狩野和弘, 秋山達志, 松井淳, 五十柄達夫, フライッシュおよび石炭ガ化スラグを混合したセメントペーストの流動性, セメントコンクリート論文集, No. 57 pp. 58 ~ 63, 2003.

시멘트 혼합재의 입도분포와 페이스트 유동특성

본 연구에서는 현재 시멘트 콘크리트 혼합재로서 널리 사용되고 있는 고로수쇄 슬래그와 애쉬의 페이스트 유동특성을 파악하였다. 그 방법으로 혼합재 단독을 사용한 페이스트의 유동특성을 파악하여, 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다. 혼합재 단독의 페이스트 유동특성을 시험하기 위하여, 3종류의 분쇄기를 사용하여 3가지 입도로 분쇄된 분말을 제조하였다. 이 분말을 Rosin-Rammler 분포식을 사용하여 얻은 계수 n 값과 De 값을 유동특성과 비교 분석한 결과에서, 일반적으로 같은 입경 크기 일 때 Ash 분말이 Slag 분말보다 소성점도 및 항복응력이 높았으며, 또한 동일 n 값에서 Ash 분말이 Slag 분말 보다 비교적 높은 소성점도와 항복응력을 나타내었으나, 입도분포 폭의 변화에는 Slag 분말이 Ash 분말 보다 민감한 유동특성의 변화 경향을 나타내었다.