

광물혼화재가 혼합된 다성분 페이스트 시스템의 레올로지 특성 평가

박대호^{1)*} · 노명현¹⁾ · 박춘근²⁾

¹⁾ 한양대학교 토목공학과 ²⁾ 한국생산기술연구원

(2003년 11월 12일 원고접수, 2004년 2월 23일 심사완료)

Characterization of Rheology on the Multi-Ingredients Paste Systems Mixed with Mineral Admixtures

Tae-Hyo Park^{1)*}, Myung-Hyun Noh¹⁾, and Choon-Keun Park²⁾

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

²⁾ Korea Institute of Industrial Technology, Cheonan

(Received November 12, 2003, Accepted February 23, 2004)

ABSTRACT

The rheological properties of cement paste system mixed with mineral admixtures (MAs) used to increase the strength and improve durability and fluidity of concrete were investigated. And cement paste systems were designed as one-, two- and three-ingredients blended paste systems. The rheological properties of paste systems were assessed by Rotovisco RT 20 rheometer (Hakke inc.) having a cylindrical serrated spindle. The rheological properties of one-ingredient paste systems were improved with increasing the dosage of superplasticizer. For two-ingredients paste systems, as increasing the replacement ratio of blast furnace slag (BFS) and fly ash (FA), the yield stress and plastic viscosity were decreased compared with non-replacement. In the ordinary portland cement (OPC)-silica fume (SF) paste systems, in accordance with an increase in the replacement ratio of SF, the yield stress and plastic viscosity were increased steeply. For three-ingredients paste systems, both OPC-BFS-SF and OPC-FA-SF paste systems, the rheological properties were improved compared with the only replacement of SF. In the case of both two- and three-ingredients paste systems, the rheological properties using BFS were improved more than FA.

Keywords : rheological parameter, fluidity, cement paste system, mineral admixture, superplasticizer

1. 서 론

광물혼화재는(mineral admixture, 이하 MA) 콘크리트의 강도증진과 내구성 및 유동성 향상을 위해 필요에 따라 콘크리트 혼합시에 일정량 치환되는 재료로서, 고로슬래그 미분말(blast furnace slag, 이하 BFS), 플라이애쉬(fly ash, 이하 FA), 실리카 흙(silica fume, 이하 SF) 등이 다양하게 활용되고 있다. 일반적으로 BFS와 FA의 경우는 일정량의 치환에 따라 유동성이 개선되기도 하며, 각각 잠재수경성과 포졸란 반응에 의해 콘크리트의 장기강도 증진과 내구성 향상에 기여하는 것으로 알려져 있다.^{1,2)} 실리카 흙의 경우는 치환량이 늘어날수록 유동성이 저하되긴 하지만, 고강도 콘크리트나 고내구성의 치밀한 콘크리트를 제조하는 경우에 널리 사용되고 있다. 최근 이러한 MA의 특성을 고유동, 고강도, 고내구성을 목표로 하는

고성능 콘크리트(high performance concrete)에 반영하여, 최적의 배합을 찾고자 하는 연구^{3,4)}가 활발히 진행되고 있다.

한편, 시멘트페이스트나 콘크리트의 유동성을 측정하기 위해 기존의 경험에 근거한 정량적인 평가방법인 슬럼프 플로우 시험이나 슬럼프 시험 이외에 유동성을 근본적으로 정량화하기 위한 시험 방법이 개발되고 있으며, 유동성 정량화를 위해 대부분 소성점도(plastic viscosity)와 항복응력(yield stress)이라는 레올로지 정수가 이용되고 있다. 최근 연구결과⁵⁻⁷⁾ 시멘트페이스트나 콘크리트의 항복응력은 슬럼프와 관련되며, 소성 점도는 점착성(stickness), 성형성(placeability), 분출성(pumpability), 마감성(finishability)과 재료분리(segregation)와 같은 특성들과 관련된다 고 보고되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 OPC와 BFS, FA, SF의 세 종류의 MA들을 종류와 함량에 따라 일성분계(one-ingredient system), 이성분계(two-ingredients system), 삼성분계(three-ingredients system)로 구성하여 각각의 페이스트

* Corresponding author

Tel : 02-2290-0321 Fax : 02-2293-9977

E-mail : cepark@hanyang.ac.kr

시스템의 레올로지 특성을 비교·분석하고, 각 MA들의 광물특성에 따른 페이스트 시스템의 유동성상을 특성화 시키고자 한다. 또한 MA가 혼합된 시멘트페이스트의 레올로지 실험을 수행함으로써 향후 고성능 콘크리트의 배합연구시 유동성 제어를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험개요

2.1 실험인자 및 수준

다성분 MA 혼합페이스트 시스템의 레올로지 특성을 연구하기 위한 실험인자와 수준은 Table 1과 같다. 일정 분계에서는 고성능감수제(superplasticizer 이하 SP)의 첨가량을, 이성분계에서 치환되는 MA의 종류와 치환비율을, MA들이 혼합된 삼성분계페이스트 시스템에서는 MA들의 배합비율을 인자로 하여 각 시멘트페이스트 시스템의 레올로지 특성과 거동이 조사된다.

2.2 사용된 재료

본 연구에서는 시멘트와 광물혼화재들(MAs)이 바인더로서 사용된다. 시멘트의 경우, 국내 S사의 1종 보통포틀랜드시멘트(OPC, Blane 값: 3,290 cm²/g)가 이용되고, 광물혼화재로서 BFS, FA, SF의 세 종류의 MA들이 사용된다. 또한 시멘트페이스트에 레올로지 측정이 가능한 범위의 유동성이 부여되도록 국내 K사의 액상 폴리나프탈렌설포네이트계(PNS, 40% solids) 고성능 감수제가 첨가된다. 사용된 재료의 물리·화학적 특성은 Table 2, 3과 같다.

2.3 페이스트 시스템의 배합

실험에 사용된 물-바인더비(W/B)는 0.35로서 일정하게 고정되고, 이성분, 삼성분계에서는 시스템의 유동성이 확보되도록 모든 페이스트에 2.0% (B×wt%)의 SP가 일정하게 첨가된다. 일정분, 이성분, 삼성분계의 혼합 페이스트 시스템을 구성하기 위해서 Fig. 1과 같은 혼합 범위가 적용된다. Table 4는 본 실험에 사용된 페이스트 시스템의 배합을 나타낸다.

Table 3 Physical properties of used materials

Raw materials	Density (g/cm ³)	Specific surface area (cm ² /g)	Mean PD (μm)	Particle shape
CEM	3.15	3,290	18.07	Angular
BFS	2.91	5,962	8.07	Smooth cubic
FA	2.25	3,650	19.56	Spherical
SF	2.20	20,000	0.1	Spherical
Chemical admixture	Main ingredient	Color	Specific gravity (20°C)	pH
SP ^a	Polynaphthalene sulfonate(PNS)	Dark brown	1.3±0.05 g/cm ³	8~9

^aSP: Superplasticizer

Table 1 Factor and level of experiment (B×wt %)

Factor		Level
Dosage of SP (%)		0, 1.0, 2.0
Replacement rate of MA (%)	BFS	15, 30, 45
	FA	10, 20, 30
	SF	5, 10, 15
	BFS+SF	20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60
FA+SF		15, 20, 25(2), 30, 35(2), 40, 45

^aB : Binder ; B=Cement+MAs

Table 2 Chemical compositions of used materials (wt%)

Component	Cement	BFS ^a	FA ^b	SF ^c
SiO ₂	21.10	34.81	49.91	92.0
Al ₂ O ₃	5.13	16.19	22.54	1.3
Fe ₂ O ₃	3.30	0.47	11.37	2.4
CaO	62.51	41.25	5.84	-
MgO	2.72	8.05	1.25	0.4
SO ₃	2.37	0.16	-	-
C	-	-	4.1	1.2
Na ₂ O ₃	-	-	0.39	0.1
K ₂ O	-	-	0.87	1.2
L.O.I.	1.39	0.32	0.5	-

^aBFS: Blast furnace slag, ^bFA: Fly ash, ^cSF: Silica fume

Table 5 Mix proportions of each paste (B×wt %)

System types	Sign	W/B	Cement	MA		SP
				BFS(FA)	SF	
One-ingredient	CE1 ^a	0.35	100	-	-	-
	CE2		100	-	-	1.0
	CE3		100	-	-	2.0
Two-ingredients	BS1	0.35	95	-	5	2.0
	BS2		90	-	10	
	BS3		85	-	15	
	BB1(BF1)		85(90)	15(10)	-	
	BB2(BF2)		70(80)	30(20)	-	
	BB3(BF3)		55(70)	45(30)	-	
Three-ingredients	TB1(TF1)	0.35	80(85)	15(10)	5	2.0
	TB2(TF2)		75(80)	15(10)	10	
	TB3(TF3)		70(75)	15(10)	15	
	TB4(TF4)		65(75)	30(20)	5	
	TB5(TF5)		60(70)	30(20)	10	
	TB6(TF6)		55(65)	30(20)	15	
	TB7(TF7)		50(65)	45(30)	5	
	TB8(TF8)		45(60)	45(30)	10	
	TB9(TF9)		40(55)	45(30)	15	

^aCE1: One-ingredient system mix no. 1 that is containing cement only

2.4 실험 방법

2.4.1 측정장비

레올로지 측정은 물리적으로 정의된 조건하에서 전단응력과 전단속도와의 관계로부터 실시간 연속적으로 페이스트의 레올로지 곡선을 모니터링 할 수 있는 Rotovisco RT20 레오미터(HAAKE inc.)가 사용된다. Fig. 2에 보이는 측정 시스템의 메모리에 저장된 데이터는 후처리작업 과정에서 소성점도(η_{pl})와 항복응력(τ_0)을 계산하는데 사용된다. Fig. 3에 나타난 것처럼 스피ndl과 측정용기는 동일한 축방향으로 일정한 간격이 유지되어있고, 스피ndl과 측정용기 내부의 표면은 전단력 작용시 시료의 슬립현상이 방지되도록 축방향으로 톱니모양의 홈이 나있다.

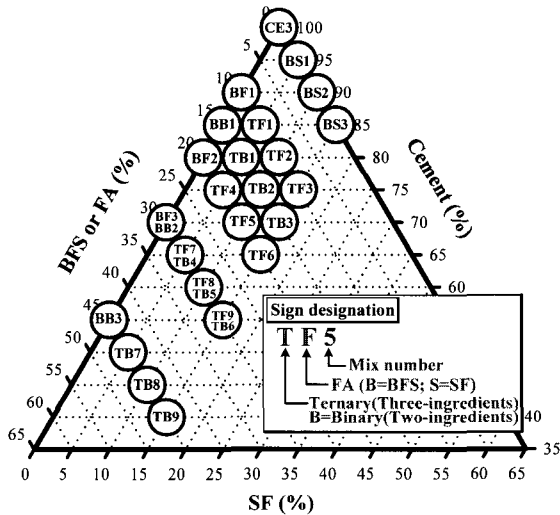


Fig. 2 Mix range of cement paste system

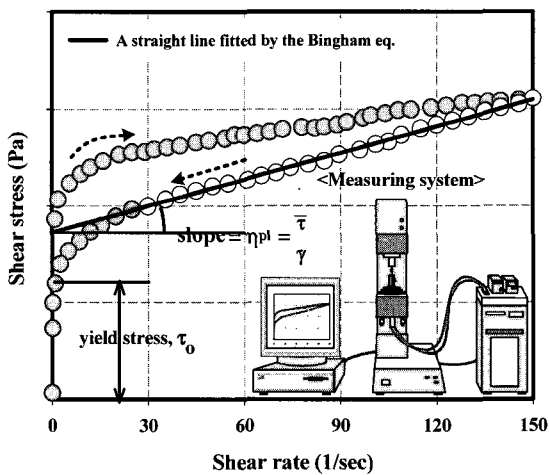


Fig. 3 Typical rheological curve described from the measuring system

2.4.2 측정방법

레올로지 정수 측정을 위한 시료는 다음과 같은 절차에 준하여 준비된다. 먼저 소정의 시멘트, MA들을 1000 ml 비커에 넣은 뒤 서로 잘 섞이도록 약 30초 동안 건비빔을 한 뒤, 2.0 wt%의 SP를 첨가한 수용액을 비커에 부은 다음 고속으로 일정하게 2분간 잘 젓는다. 저온 후, 시료를 레오미터 측정용기에 붓고, 불안정한 시료가 일정 수준의 평형에 도달되도록 약 30초 동안 정치시간을 둔 뒤 측정이 개시한다. 측정동안 용기 내 시료의 온도는 레오미터의 자동 온도제어장치를 통해 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지된다. 작용된 전단 속도는 0/sec에서 150/sec까지의 범위로 한정되고, 각각 1분씩 전단속도의 상승과 하강과정이 반복되며 레올로지 정수가 측정된다.

2.4.3 레올로지 해석

Fig. 2는 전형적인 레올로지 곡선의 한 형태를 나타낸다. 보는 바와 같이 전단속도의 상승 초기에 레올로지 곡선의 점선으로 정의되는 페이스트의 점도는 불규칙한 증감을 나타내기 때문에 전단속도가 하강하는 150/sec에서 30/sec사이 일정한 증감을 보이는 부분의 데이터를 선형회귀 분석하여 그 기울기가 페이스트의 소성점도로 가정된다. 한편 레오미터로부터 직접 측정된 레올로지 곡선에서 하강곡선과 전단응력 축(0/sec)이 만나는 절편이 페이스트의 항복응력으로 가정된다.

선형회귀에 적용한 모델식은 일반적으로 콘크리트의 레올로지 거동과 특성을 묘사하는 데 흔히 적용되는 빙함방정식이 이용된다. 이렇게 해서 구해지는 소성점도의 경우 측정된 레올로지 하강곡선의 일정부분을 선형회귀 분석하

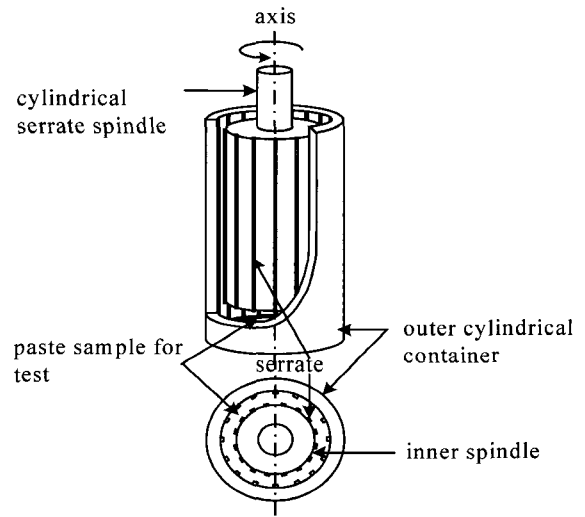


Fig. 4 Detail of the cylindrical serrated spindle and the container filled with samples: The outside surface on the inner spindle and the inside surface on the outer container are serrated to prevent the samples in the container to slip during the shear

였기 때문에 실제 측정된 곡선의 기울기와 잘 부합된다. 하지만 항복응력의 경우, 병합모델식으로부터 구한 항복응력과 레오미터로부터 직접 측정된 레올로지 곡선으로부터 구한 항복응력과는 큰 차이를 나타내는 경우가 있다. 따라서 레오미터로부터 직접 측정된 레올로지 하강곡선으로부터 항복응력이 계산된다. 소성점도를 구하기 위하여 적용된 병합모델식⁸⁾은 다음과 같다.

$$\tau = \tau_o + \eta_{pl} \dot{\gamma} \quad (1)$$

여기서, τ 는 전단응력(Pa)이고 $\dot{\gamma}$ 는 전단속도이며, τ_o 와 η_{pl} 은 실험 데이터를 회귀분석하여 얻어지는 항복응력과 소성점도이다. 한편, 시멘트페이스트 시스템의 경우 물과 미세한 바인더 입자 계면에 작용하고 있는 반데르발스 인력(Van der Waals attraction)에 의해서 견고한 구조가 형성되는데, 전단력이 초기에 작용할 경우 급격한 구조파괴(structural breakdown)가 유발되어 불규칙한 레올로지 거동현상이 나타나는 것으로 알려져 있다⁹⁾. 따라서 구조파괴가 없는 콘크리트에서는 잘 적용되는 병합모델식을 시멘트페이스트 시스템에 적용할 경우 레올로지 거동과 점수를 적절하게 예측할 수 없어 레오미터로부터 직접 측정된 실제 레올로지 곡선으로부터 거동과 항복응력이 예측되어진다.

3. 실험결과 및 분석

MA를 각 성분별로 혼합한 페이스트 시스템의 레올로지 특성 실험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

3.1 일성분 페이스 시스템(OPC 페이스트 시스템)

Fig. 4는 SP의 첨가율에 따른 OPC 페이스트 시스템의 레올로지 특성과 거동을 나타낸다. SP를 전혀 첨가하지

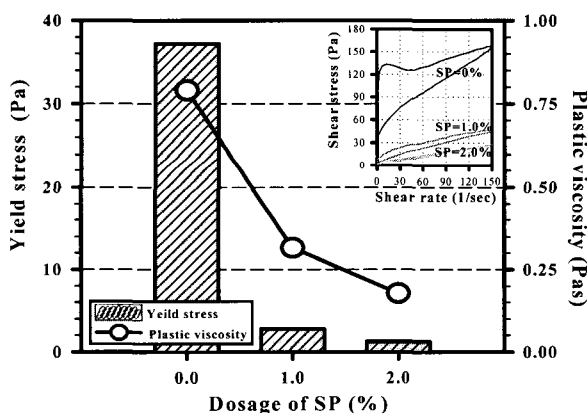


Fig. 5 Influence of dosage of superplasticizer on the rheological properties of OPC paste systems and the measured rheological curves

않은 경우보다 1.0~2.0 wt %로 첨가한 경우, 항복응력은 급격히 저하되고 소성점도도 상당히 감소된다. 본 실험에 사용한 폴리나프탈렌설포네이트(PNS)계 SP는 분자 구조 내에 음이온을 가지고 있어서 SP가 시멘트 입자 표면에 흡착할 경우 입자들 사이에 정전기적반발력(electrostatic repulsive force)이 생성되며, 이로 인해 입자들 사이에 강한 분산력이 유도되어 유동성이 증가하게 된다. 이와 같이 페이스트 시스템의 레올로지 특성은 SP 첨가율의 증가로 일정한 수준만큼 제어가 가능하게 된다.

3.2 이성분 페이스 시스템

(OPC-BFS, OPC-FA, OPC-SF 페이스트 시스템)

Figs. 5~7은 OPC에 각각 BFS, FA, SF를 첨가하여 이성분 페이스트화하여, 치환율을 변화시킨 경우에 나타나는 레올로지 특성과 거동을 보여주고 있다. 각각의 MA를 치환한 이성분 페이스트 시스템의 레올로지 경향은 MA의 종류와 치환율에 따라 서로 다른 특성과 경향이 나타난다.

3.2.1 OPC-BFS 페이스트 시스템

OPC-BFS 페이스트 시스템은 BFS의 치환율이 증가함에 따라 소성점도와 항복응력이 낮아지는 경향을 보인다(Fig. 5). BFS의 입자 형상은 구곡상의 파면을 갖는 입방상이며, 입자표면은 부드럽고 밀실하여 다소 매끄럽고 교반시 물을 잘 흡수하지 않는 구조이다.

따라서 평균 입경이 8.07 μm 인 BFS 입자가 18.07 μm 의 평균입경을 가지는 시멘트 입자사이의 공극에 충전되면, 엉켜 붙어있는 시멘트 입자사이의 마찰력을 저감시켜 유동성 개선에 유효하게 된다. 그리고 상대적으로 미세한 BFS 입자가 시멘트의 입자 속에 결합되면 페이스트의 전체적인 충전율이 높아져 구속수가 줄어들기 때문에 유동성에 관여하는 자유수가 증가하여 시스템의 레올로지 특성이 개선된다.

3.2.2 OPC-FA 페이스트 시스템

OPC-FA 페이스트 시스템에서는 FA를 치환하지 않은 경우보다 치환한 경우의 소성점도가 약간씩 높아지고 있지만, 20% 이상 치환한 페이스트는 점도 증가 비율이 상대적으로 낮게 나타난다. FA를 치환한 페이스트의 항복응력은 비치환한 페이스트보다 항복응력이 낮게 나타나지만, FA 치환율이 증가함에 따라 항복응력이 서서히 증가하는 경향이 보인다(Fig. 6).

이는 FA의 입형이 대부분 유동성 개선에 장점을 지닌 구형이긴 하더라도, 치환율의 증가에 따라 FA에 미소량(2~5 wt %) 함유된 미연소탄소량이 증가하게 되고, 이 불순물이 SP에 흡착되어 상대적으로 SP의 효과가 떨어지게 되기 때문이다.

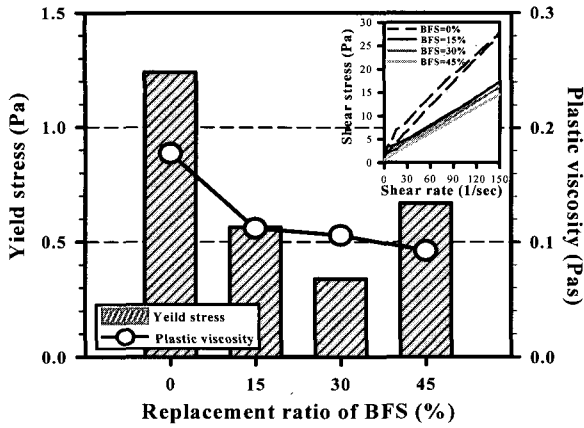


Fig. 6 Influence of dosage of superplasticizer on the rheological properties of OPC paste systems and the measured rheological curves

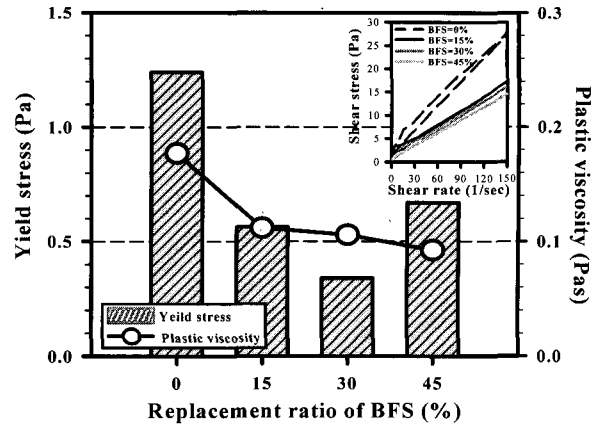


Fig. 7 Influence of replacement ratio of FA on the rheological properties of OPC-FA paste systems and the measured rheological curves

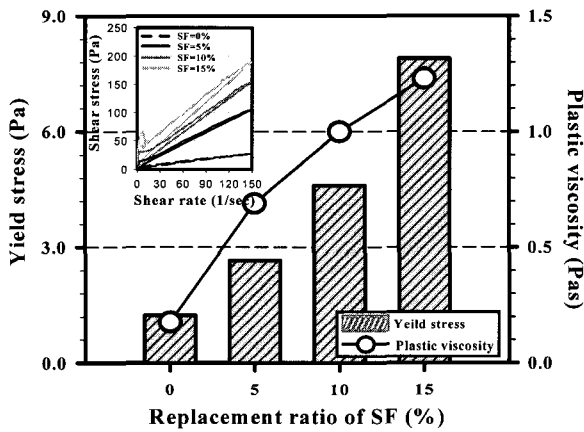


Fig. 8 Influence of replacement ratio of SF on the rheological properties of OPC-SF paste systems and the measured rheological curves

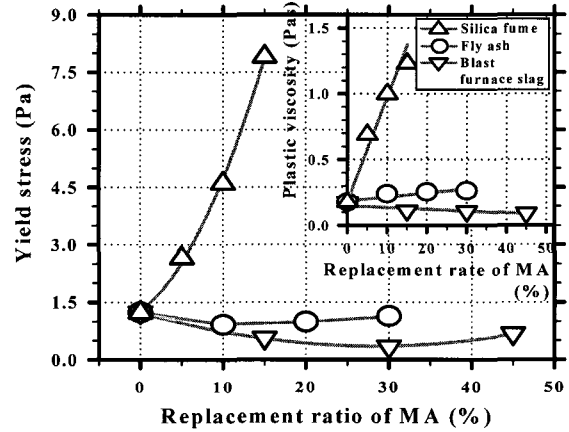


Fig. 9 The comparison of rheological properties in accordance with the replacement ratio of MAs

3.2.3 OPC-SF 페이스트 시스템

OPC-SF 페이스트 시스템의 경우 SF 치환율이 증가함에 따라 소성점도와 항복응력이 급격하게 증가하는 경향을 보인다(Fig. 7). SF는 초 미립분말(평균분말도=20,000 cm²/g)이며 SP 분자에 다층으로 흡착하여 겔층을 형성하려는 경향이 있다. 따라서 SF의 치환율이 증가함에 따라 시멘트 입자들 표면에 평행하게 흡착되어 분산을 유발할 수 있는 SP량이 감소하게 되고, 이에 따라 구속수가 증가되고 자유수의 이동이 억제되는 경향이 두드러져 결과적으로 레올로지 정수의 증가가 초래된다.

3.2.4 이성분 페이스트 시스템의 레올로지 특성 비교

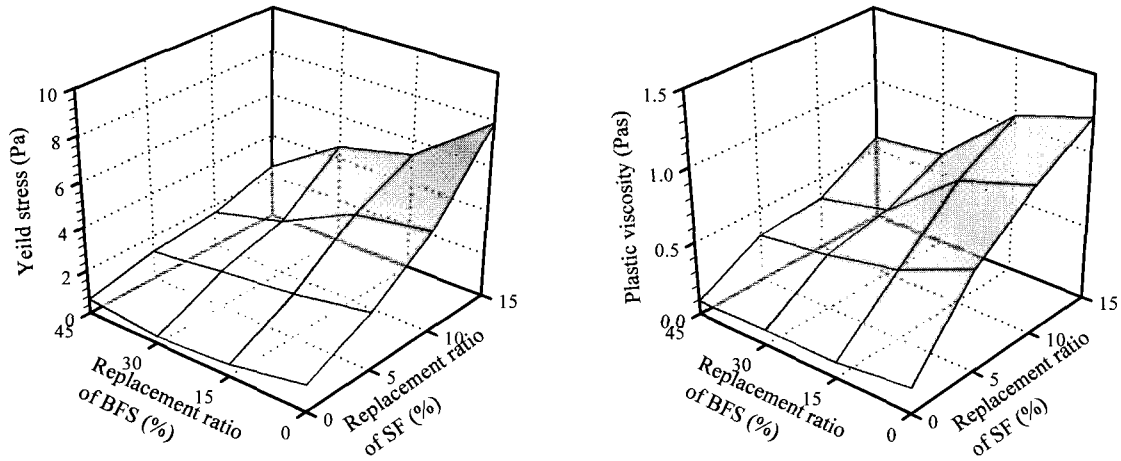
Fig. 8에서 MAs 치환율에 따른 이성분 페이스트 시스템의 항복응력과 소성점도가 비교되었다. 굳지않은콘크리트의 슬럼프와 관련된 항복응력 값을 레올로지 관점에서 특성화하면, OPC-BFS 페이스트 시스템의 유동성이 가장

우수한 것으로 나타나고, OPC-SF 페이스트 시스템의 유동성이 다른 페이스트 시스템과 비교하여 가장 나쁜 것으로 나타난다. 재료분리 저항성과 관련 있는 소성점도의 경우, OPC-SF 페이스트 시스템이 다른 페이스트 시스템보다 우수한 저항성이 있는 것으로 나타나고, OPC-FA, OPC-BFS 순으로 재료분리 저항성이 낮게 나타난다.

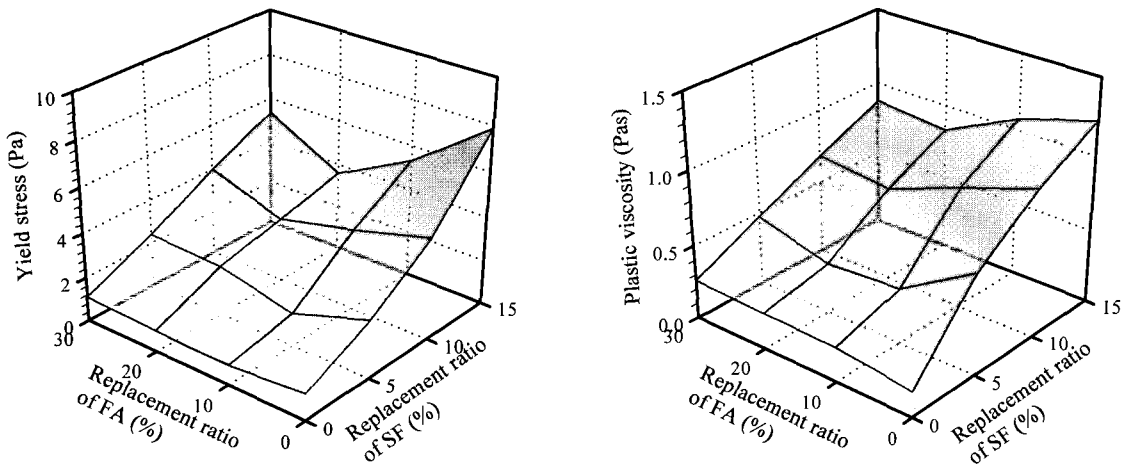
3.3 삼성분 페이스트 시스템

(OPC-BFS-SF, OPC-FA-SF system)

Fig. 9는 각각 OPC:BFS:SF, OPC:FA:SF의 혼합비율에 따른 삼성분 페이스트 시스템의 레올로지 특성을 나타낸다. SF를 단독으로 치환하는 것보다 BFS나 FA를 함께 혼합하여 사용할 경우 전체적으로 레올로지 특성이 향상된다. 이는 BFS와 FA의 광물특성이 SF와 서로 혼합하여 사용하더라도 광물 고유특성은 변하지 않고 남아있기 때문이다.



(a) The yield stress and plastic viscosity of OPC-BFS-SF paste systems



(b) The yield stress and plastic viscosity of OPC-FA-SF paste systems

Fig. 9 Influence of replacement ratio of BFS vs. SF and FA vs. SF on the rheological properties of three-ingredients paste systems

3.3.1 OPC-BFS-SF 시스템

BFS를 고정시킨 단면을 살펴보면 SF의 치환율이 높은 배합에서 항복응력과 소성점도가 높게 나타나는데, 그 이유는 앞서 이성분 페이스트 시스템에서 분석한 것처럼 SP에 겹겹이 흡착하려는 SF의 초 미립분말에 의한 영향 때문이다. SF를 고정시킨 경우는 BFS의 치환율이 증가함에 따라 유동성이 좋아지는 것으로 나타난다(Fig. 9(a)).

3.3.2 OPC-FA-SF 시스템

FA를 고정시킨 단면을 보면 OPC-BFS-SF 시스템과 마찬가지로 SF의 치환율이 높은 배합에서 항복응력과 소성점도가 높게 나타나고, 그 이유는 OPC-BFS-SF 시스템과 동일하다. SF를 고정시킨 경우는 각 고정단면에서 FA의 치환율이 증가함에 따라 항복응력이 감소하다 다시 증가하는 경향을 보인다(Fig 9(b)).

3.3.3 이성분과 삼성분 페이스트 시스템의 비교

이성분 페이스트 시스템에서와 마찬가지로 삼성분 페이스트 시스템에서도 BFS를 혼합한 OPC-BFS-SF 시스템이 FA를 혼합한 OPC-FA-SF 시스템보다 레올로지 특성이 좀더 개선되는 것으로 나타난다.

본 실험 범위에서 항복응력만을 고려하여 이성분과 삼성분 페이스트 시스템의 레올로지를 비교하면 OPC-BFS > OPC-FA > OPC-BFS-SF > OPC-FA-SF > OPC-SF 순으로 나타난다. SF를 배합에 넣은 이성분 페이스트 시스템의 경우에서 나타난 것처럼, SF의 경우 치환율의 증가에 따라 재료분리 저항성은 증가하지만, 유동성이 좋지 않게 되고, BFS나 FA의 경우는 유동성면에서 좋은 효과를 나타내기 때문에, SF를 단독으로 치환한 이성분 페이스트 시스템보다는 BFS나 FA를 SF와 함께 혼

합한 삼성분페이스트 시스템의 경우가 유동성과 재료분리 저항성 측면에서 좋은 결과가 나타나게 된다. 예를 들면, SF를 사용하여 고강도의 치밀한 콘크리트를 제조할 경우 BFS나 FA를 적절하게 혼합하여 사용하면, SF의 강도증대 효과와 BFS나 FA의 유동성 개선효과를 동시에 만족시킬 수 있게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 광물혼화재가 혼합된 페이스트 시스템의 레올로지 특성이 검토되었고, 어떠한 페이스트 시스템이 레올로지 관점에서 유리한지 조사되었다. 실험을 통해 나타난 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 일성분페이스트 시스템에서는 SP 첨가율이 증가함에 따라 레올로지가 개선된다. 시멘트페이스트 시스템의 레올로지 특성은 SP 첨가율의 증가로 일정수준만큼 제어가 가능하기 때문에, SP는 기본적으로 페이스트 시스템의 레올로지 특성을 향상시키는 데 중요한 인자이다.
- 2) 이성분 페이스트 시스템에서, OPC-BFS 시스템은 BFS의 치환율의 증가에 따라 소성점도와 항복응력이 낮아지고, OPC-FA 시스템은 FA를 비치환한 경우보다 치환한 경우의 소성점도가 약간씩 높아지지만, 20% 이상 치환한 페이스트는 점도 증가 비율이 매우 낮다. FA를 치환한 페이스트의 항복응력은 비 치환한 페이스트보다 항복응력이 낮지만, FA 치환율의 증가에 따라 항복응력이 서서히 증가한다. OPC-SF 시스템의 경우 SF 치환율의 증가에 따라 소성점도와 항복응력이 급격히 증가한다.
- 3) 삼성분 페이스트 시스템에서, SF 단독 치환보다 BFS나 FA를 함께 혼합하여 사용할 경우 전체적으로 레올로지가 개선된다. OPC-BFS-SF 시스템에서 SF의 치환율이 높으면 항복응력과 소성점도가 높게 나타나고, BFS의 치환율의 증가에 따라 유동성이 좋아진다. OPC-FA-SF 시스템도 SF의 치환율이 높은 배합이 항복응력과 소성점도가 높게 나타나고, 항복응력의 경우 FA의 치환율의 증가에 따라 감소하다 다시 증가한다.
- 4) 이성분, 삼성분페이스트 시스템 모두 BFS를 혼합한 시스템이 FA를 혼합한 시스템보다 레올로지 특성이 좀 더 개선된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 건설교통기술혁신사업(02 산학연A03-01)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Neville. A.M., "Properties of Concrete," Wiley, New York, 1996, pp.243~255.
2. Mindess, S., Young, J.F., and Darwin, D., "Concrete," Prentice Hall, New Jersey, 2003, pp.93~114.
3. Zhang, X. and Han, J., "The Effect of Ultra-Fine Admixture on the Rheological Property of Cement Paste," *Cement and Concrete Research*, Vol.30, No.8, 2000, pp.827~830.
4. Nehdi, M. and Aïtcin, P.-C., "Rheology of High-Performance Concrete: Effect of Ultrafine Particles," *Cement and Concrete Research*, Vol.28, No.5, 1998, pp.687~697.
5. Ferraris, C.F., Obla, K.H., and Hill, R., "The Influence of Mineral Admixtures on The Rheology of Cement Paste and Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol.31, No.2, 2001, pp.245~255.
6. Ferraris, C.F., de Sarrard, F., "Testing and Modeling of Fresh Concrete Rheology," NIST, USA, 1998 (NISTIR 6094), pp.1~5.
7. Ferraris, C.F., "Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete," State of the art report, J. Res. Nist 104(5), 1999, pp.461~478.
8. Tattersall, G.H. and Banfill, P.F.G., "The Rheology of Fresh Concrete," Pitman, 1983, 356pp.
9. Banfill, P.F.G., "The Rheology of Fresh Cement and Concrete-A Review," 11th I.C.C.C., Vol.1, 2003, pp.50~62.
10. Banfill, P.F.G., "Rheology of Fresh Cement and Concrete," E.&F.N.SPON, 1991, pp.13~26.
11. Williams, D.A., Saak, A.W. and Jennings, H.M., "The Influence of Mixing on the Rheology of Fresh Cement Paste," *Cement and Concrete Research*, Vol.29, No.12, 1999, pp.1491~1496.

요 약

콘크리트의 강도증진과 내구성 및 유동성 향상을 위하여 사용되는 광물혼화재가 혼합된 시멘트페이스트 시스템의 레올로지 특성이 연구되었다. 그리고 시멘트페이스트는 일성분, 이성분, 삼성분 혼합 페이스트 시스템으로 구성되었다. 페이스트 시스템의 레올로지 특성을 평가하기 위하여 Haake사의 Rotovisco RT 20 레오미터가 사용되었다. 레올로지 특성을 평가한 결과 다음과 같은 실험 결과를 얻었다. 일성분 페이스트 시스템의 경우, 고성능 감수제의 첨가량이 증가함에 따라 레올로지 특성들이 상당히 개선된다.

이성분 페이스트 시스템에서는 고로슬래그와 플라이애쉬의 치환율이 증가함에 따라 비치환된 시스템의 경우보다 항복응력과 소성점도는 감소된다. 실리카 폼이 치환된 이성분 페이스트 시스템에서는 실리카 폼의 치환율이 증가함에 따라 항복응력과 소성점도의 값이 급격히 증가된다. 삼성분 페이스트 시스템에서는 OPC-BFS-SF와 OPC-FA-SF 페이스트 시스템 두 경우 모두 실리카 폼을 단독으로 치환한 페이스트 시스템과 비교하여 레올로지 특성이 향상된다. 이성분과 삼성분 페이스트 시스템 모두 플라이애쉬 보다 고로슬래그를 배합에 넣어 사용할 때 레올로지 특성이 좀 더 개선된다.

핵심용어 : 레올로지 정수, 유동성, 시멘트페이스트 시스템, 광물혼화재, 고성능감수제
