

Rheological Properties of Ordinary Portland Cement - Blast Furnace Slag - Fly Ash Blends Containing Ground Fly Ash

Hyo Sang Park, Dong woo Yoo*, Seung Ho Byun, and Jong Taek Song[†]

Department of Materials Science and Engineering, Dankook University, Cheonan 330-714, Korea
*Major of Materials Science and Engineering, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea
(Received October 28, 2008; Revised December 9, 2008; Accepted December 15, 2008)

분쇄된 플라이애시를 혼합한 3성분계 시멘트의 유동특성

박효상 · 유동우* · 변승호 · 송종택[†]

단국대학교 신소재공학과

*군산대학교 신소재공학과

(2008년 10월 28일 접수 ; 2008년 12월 9일 수정 ; 2008년 12월 15일 승인)

ABSTRACT

In this study, rheological properties of ternary system cement containing ground fly ash(F3, Blaine specific surface area 8,100 cm²/g) were investigated using mini slump, coaxial cylinder viscometer and conduction calorimeter. In the results, the segregation resistance was observed at high W/B and PC area while the replacement ratio of F3 was increasing. The 2:5:3 system was shown in higher fluidity and lower hydration heat than 3:4:3 system. The segregation range of cement pastes occurred over 175 mm in average diameter by mini slump and below 10 dynesec/cm² of the plastic viscosity or below 50 cP of the yield stress by coaxial cylinder viscometer. It was observed that even if BFS and FA blended together admixture properties would remaine as they were separately. The properties of admixture would not be changed. On the above results, the decreased replacement ratio of OPC and increased replacement ratio of admixtures would be possible.

Key words : Fly ash, Blast furnace slag, Rheological properties, Blended cement, Fluidity

1. 서 론

최근 세계적으로 건축구조물의 초고층화 및 대형화에 따라 고강도 콘크리트에 대한 연구가 점차 증가하는 추세이다.^{1,2)} 국내 건설사들은 2000년대 들어 도곡동 타워펠리스와 목동 하이페리온을 시작으로 초고층 구조물을 지속적으로 건설하여 왔다. 이러한 초고층 구조물 건설분야는 최근 부산 롯데월드, 잠실 제2롯데월드, 인천타워, 상압 DMC랜드마크 등 100층 이상 초고층 구조물 건설계획으로 이어지고 있다.³⁾ 이러한 이유로 최근 시멘트 및 콘크리트는 고품질화 고기능화 또는 특성화 등이 요구되고 있으며, 특히 고유동화가 관심의 대상이 되고 있다. 시멘트의 유동성은 콘크리트의 성능 향상과 깊은 관련이 있고, 유동성은 고성능 콘크리트의 가장 중요한 변수 중 하나라고 생각된다. 최근에는 시멘트 페이스트의 항복값과 콘크리트의 슬럼프와 같은 경향을 보이며, 소성점도는 콘

크리트의 점착성, 안정성, 유동성, 재료분리 등과 밀접한 연관이 있다고 보고⁴⁾되고 있다.

콘크리트의 품질을 향상시키기 위하여 각종 혼합재에 대한 많은 연구⁵⁻⁷⁾가 진행되고 있으며, 그 대표적인 예로 플라이애시, 고로슬래그, 실리카흙, 메타카올린 등이 있다.

고로슬래그는 고로에 장입된 철광석, 코크스와 석회석 등에 포함된 비철성분이 용융된 것으로 잠재수경성 물질로써 시멘트 혼합재로써 많이 사용되고 있다. 국내의 석탄화력 발전소는 전력수급의 증가에 따라 중요한 전력원으로 점차 비중이 확대되고 있으며, 대표적인 혼합재 중 플라이애시는 석탄화력 발전소에서 부산물로 발생되고 있다. 석탄화력 발전소에서 석탄의 연소 후 배연 가스와 함께 보일러에서 배출되어, 말단의 집진기 하부로 발생하는 회분을 석탄회(ash, 원료회)라 한다. 이것을 분급하여 얻는 세분한 것이 콘크리트 혼합재로 널리 사용되어지고 있는 플라이애시(fly ash)이며, 건축·토목 분야에서 시멘트 혼합재로서 사용하고 있다.

그러나 석탄의 종류 및 연소조건이 다양하여 품질편차가 크기 때문에 고로슬래그에 비하여 활용율이 저조한 실

[†]Corresponding author : Jong-Taek Song

E-mail : song8253@dankook.ac.kr

Tel : +82-41-550-3533 Fax : +82-41-550-3530

Table 1. Chemical Compositions of Raw Materials

		Chemical Compositions									Average Particle Size (μm)	Blaine (cm ² /g)	
		Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	LOI		
OPC		4.19	17.76	3.24	67.16	2.26	0.23	1.21	0.09	2.99	0.84	13.7	3,350
B													
F	S1	14.55	29.98	0.50	45.92	4.90	0.73	0.60	0.21	-	-	7.83	3,950
S													
F	F1	23.66	49.83	9.03	8.77	1.83	1.62	1.97	0.72	0.96	2.88	10.7	3,060
A	F2	23.68	51.58	8.7	8.00	1.83	1.37	1.8	0.68	0.77	2.84	3.52	8,100

※ OPC : Ordinary Portland Cement, BFS : Blast Furnace Slag, FA : Fly Ash

정이며 플라이애시에 대한 연구는 분급되어 세분한 플라이애시에 대한 연구가 주로 검토되고 있고 이것을 분쇄한 플라이애시에 대한 연구는 상당히 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 분쇄한 플라이애시를 3성분계에 적용하여 유동특성을 조사하고자 한다. 고로슬래그와 플라이애시를 서로 다른 분말도로 분쇄하여 물/결합재비(W/B)와 폴리카르복실레이트계 고유동화제(PC)의 함량에 따른 혼합 시멘트 배합조건인 OPC30:BFS40:FA30 System과 OPC의 함량을 감소시키고 BFS의 함량을 증가시킨 OPC20:BFS50:FA30 System에 분쇄된 플라이애시(8,100 cm²/g)를 0~30%까지 치환하여 W/B와 PC함량 변화에 따른 유동특성과 혼합 시멘트의 배합조건에 따른 수화열특성을 미니슬럼프, 점도, 미소수화열 측정을 통하여 검토하였다.

2. 실험 방법

2.1. 실험 재료 및 조건

본 연구에 사용된 시멘트는 S사의 보통 포틀랜드 시멘트(이하 OPC라 함)를 사용하였으며, 혼합재로 S사의 고로슬래그(이하 BFS라 함)를 사용하였다. 플라이 애시(이하 FA라 함)는 삼천포 화력 발전소에서 발생하는 것을 사용하였다. BFS의 Blaine 비표면적은 3,950, 7,910 cm²/g(이하 S1, S2이라 함)로 분쇄 하였고, 분급되어 세분한 FA Blaine 비표면적 3,060 cm²/g(이하 F1이라 함)을 4,120, 8,100 cm²/g(이하 F2, F3이라 함)로 분쇄하여 제조하였으며, OPC와 BFS, FA의 화학조성은 Table 1에 나타내었다. 고성능 유동화제로서는 국내 L사의 폴리카르복실레이트 고유동화제(이하 PC라 함)를 사용하였다.

실험 조건 및 치환량은 Table 2에 나타내었으며, 사용된 배합비는 Table 3에 나타내었다.

2.2. 미니슬럼프 시험 및 점도 측정⁸⁾

미니슬럼프 시험은 유동성을 알아보기 위하여 시멘트 페이스트의 배합에 따른 W/B와 PC첨가량을 달리하여 측정하였다. 본 실험에 사용된 미니슬럼프 시험 방법⁸⁾은 모르타르와 시멘트 페이스트의 시멘트 작업성에 대한 혼합

재의 많은 양을 효과적으로 연구하기 위하여 매우 빠르고 경제적인 시험 방법이다. 이러한 목적을 위하여 사용된 미니슬럼프 콘은 일반적인 슬럼프 콘보다 더욱 작고 슬럼프와 미니슬럼프의 결과 값이 우수한 상호연관성을 나타내고 있는 것⁹⁾이 특징이다. 시험은 2-3-2 교반법으로 하였으며 미니슬럼프 콘에 시멘트 페이스트를 채운 다음 1분간 정지한 후, 미니슬럼프 콘을 들어올려 페이스트의 퍼짐이 멈추었을 때 중심을 지나는 대각선 4방향의 평균 직경을 구하여 그 결과를 표시하였다. 또한, 90분까지의

Table 2. Experimental Factors

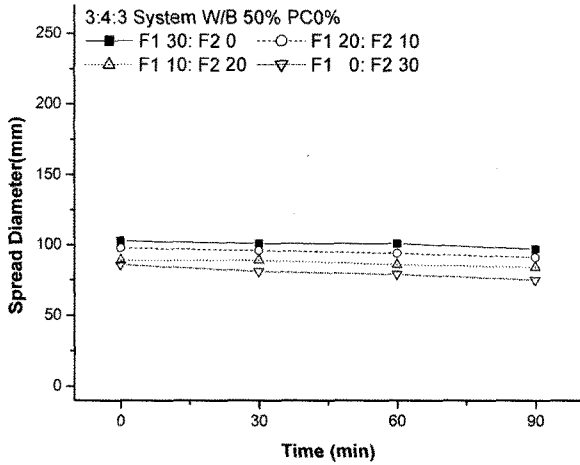
Levels	Factors
	OPC-BFS-FA
W/B	50, 70 (wt%)
Admixtures	BFS(S1), FA(F1, F2)
Replacement ratios of mineral admixture	0, 10, 20, 30 (wt%)
Dosages of Polycarboxylate	0, 0.3, 0.5 (wt%)

Table 3. Mixing Ratio of Cement Pastes

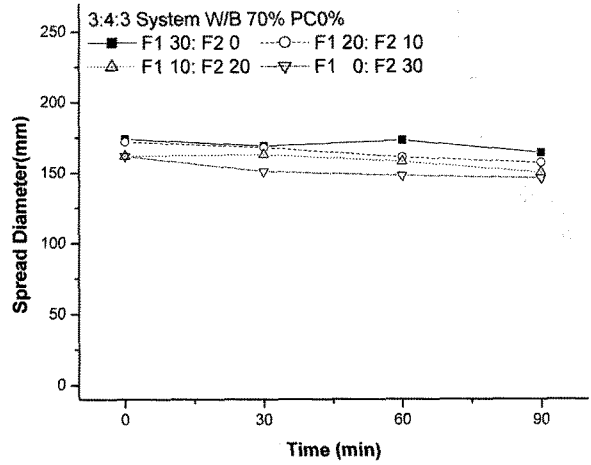
System	Name	OPC	BFS	F1	F2
OPC30%-BFS40% -FA30% system	F1:F2 (30:0)			30	0
	F1:F2 (20:10)			20	10
	F1:F2 (10:20)	30	40	10	20
	F1:F2 (0:30)			0	30
OPC20%-BFS50% -FA30% system	F1:F2 (30:0)			30	0
	F1:F2 (20:10)			20	10
	F1:F2 (10:20)	20	50	10	20
	F1:F2 (0:30)			0	30

경시변화를 측정하였으며 측정전 1분간 재교반 하였다. 미니슬럼프 실험을 통하여 적정 혼화제 첨가량을 결정

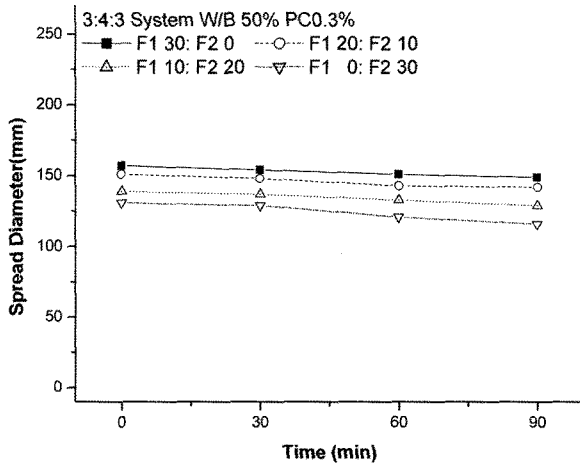
하여 유동 특성을 관찰하였다. 시멘트 페이스트는 OPC, 고로슬래그(S1)와 플라이애시(F1, F2) 및 PC를 넣고 페이



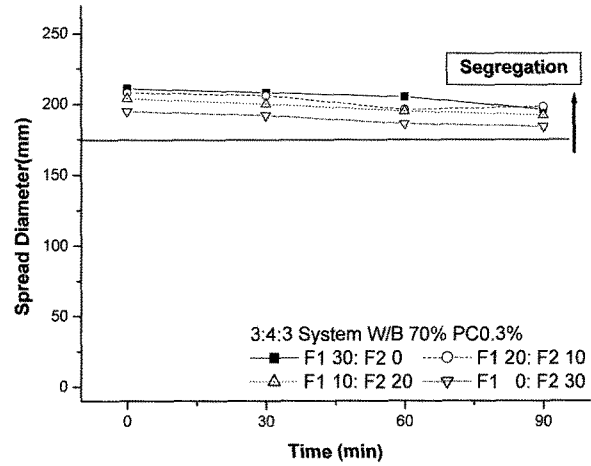
(a) W/B 50 wt%, PC 0 wt%



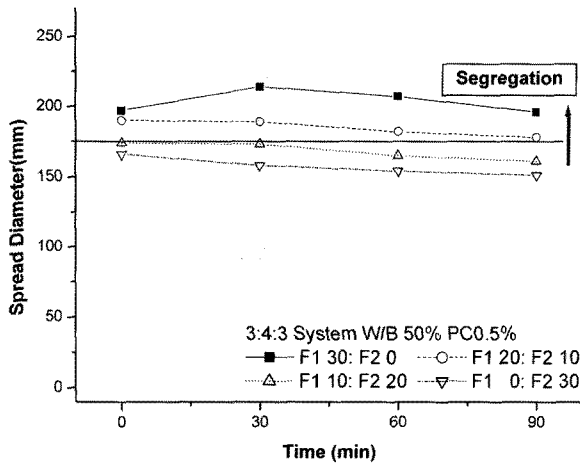
(b) W/B 70 wt%, PC 0 wt%



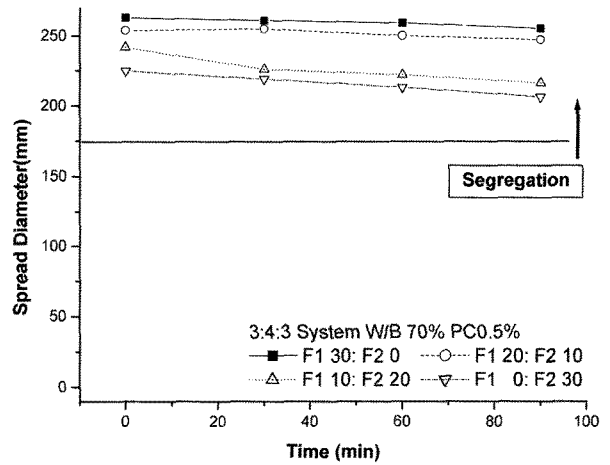
(c) W.B 50 wt%, PC 0.3 wt%



(d) W/B 70 wt%, PC 0.3 wt%



(e) W/B 50 wt%, PC 0.5 wt%

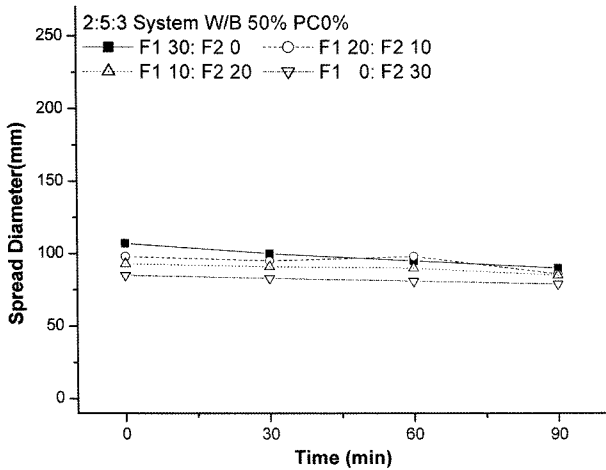


(f) W/B 70 wt%, PC 0.5 wt%

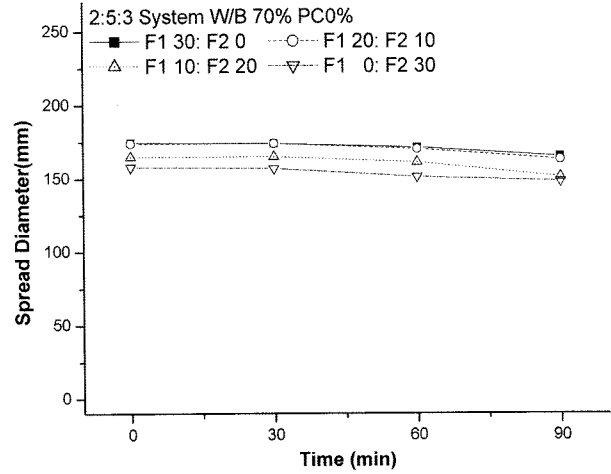
Fig. 1. Change of mini-slump as a function of PC dosage in cement pastes. (3 : 4 : 3 System)

스트를 3분간 혼합하여 제조하였으며, 항온이 가능한 원통형 용기에 넣고 실온에서 회전속도의 범위를 최소 1 rpm

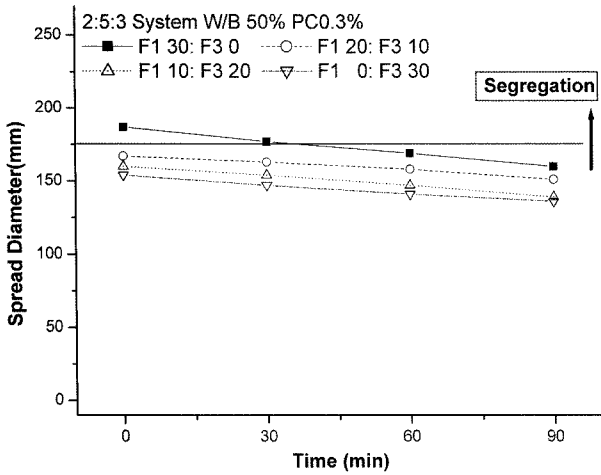
에서 최고 150 rpm까지 상승 및 하강시켜 유동 특성을 관찰하였다. 본 실험에 사용된 회전식 점도계는 Brookfield



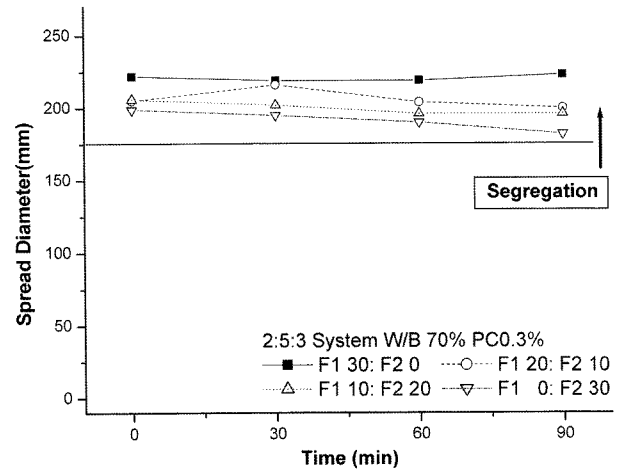
(a) W/B 50 wt%, PC 0 wt%



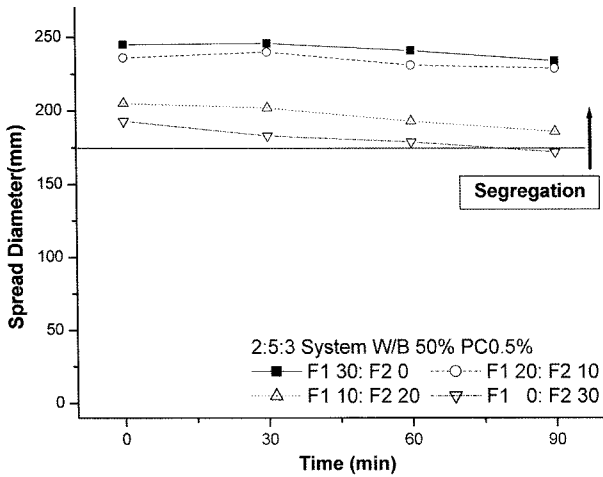
(b) W/B 70 wt%, PC 0 wt%



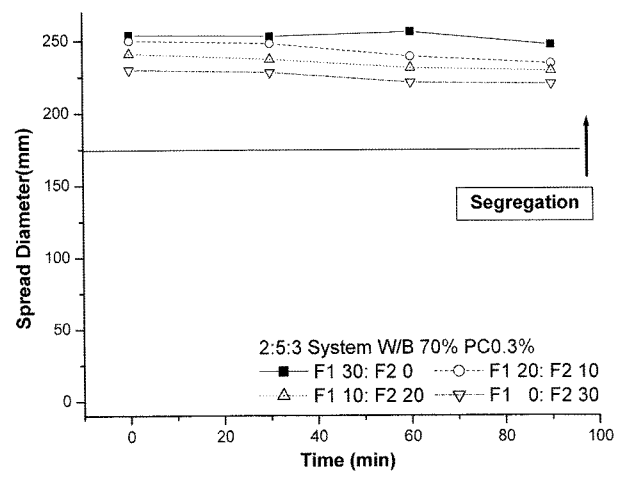
(c) W/B 50 wt%, PC 0.3 wt%



(d) W/B 70 wt%, PC 0.3 wt%



(e) W/B 50 wt%, PC 0.5 wt%



(f) W/B 70 wt%, PC 0.5 wt%

Fig. 2. Change of mini-slump as a function of PC dosage in cement pastes. (2 : 5 : 3 System)

사의 RVDV II+(USA)이며, spindle은 SC4-29 사용하였다.

2.3. 미소수화열 측정

3:4:3 System과 2:5:3 System의 수화발열 특성을 알아보기 위해서 W/B 0.5, 20의 조건하에서 미소수화열량계 (Tokyo Ricko TCC-26)를 이용하여 24시간 동안의 수화발열량을 측정하여 비교하였다.

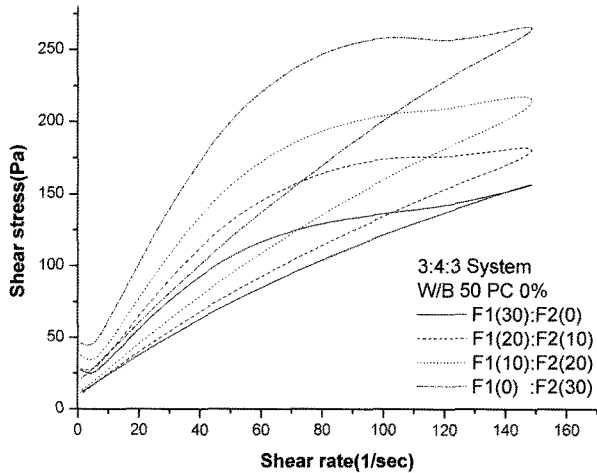
3. 실험결과 및 고찰

3.1. 시멘트 페이스트의 유동성

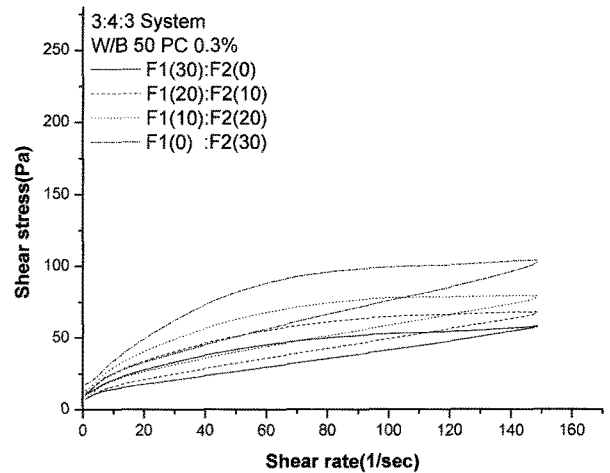
미니슬립 실험방법을 이용한 유동성을 3:4:3 System과 2:5:3 System에 F3를 치환하여 W/B와 PC함량에 따른 변화를 Figs. 1, 2에 나타내었다. W/B와 PC함량의 증가에 따라 전체적인 유동성은 증가하였으며, 유동특성에 대한 선행실험과 유사한 결과로서 BFS와 FA의 광물특성에 의해 분쇄된 플라이애시의 치환량이 증가함에 따라 유동성

은 감소하였지만 전체적인 재료분리 저항성은 증가하였다. 분쇄된 플라이애시의 Blaine 비표면적 증가에 따라 단분자 흡착에 필요한 유기 혼화제의 첨가량이 증가하고 FA의 수화활성이 증가하기 때문에 유동특성 저하 현상이 발생하였고, SCC(self-compacting concrete)의 유동성능에 영향을 미치는 혼화제의 유변학적 특성^{10,11)의 선행 실험에서 혼화제를 사용하지 않은 FA의 혼합 페이스트의 실험결과 혼합물이 증가함에 따라 구속수비는 감소하는 경향을 나타내었으나, 작은 민감도 영향으로 F2의 점성이 증가하여 재료 분리 저항성이 우수한 것으로 생각된다.}

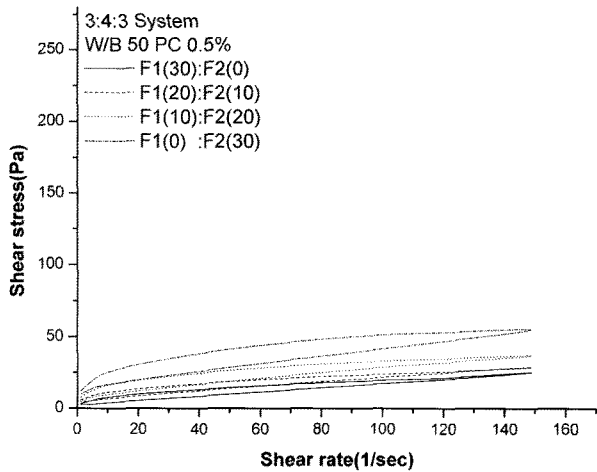
재료 분리 현상은 W/B 70 wt% PC 0.3 wt%와 0.5 wt% 첨가와 평균 직경 175 mm 이상에서 두 시스템 모두 발생하였다. W/B 및 PC 첨가량이 적정범위를 초과하게 되어 재료분리 현상이 발생된 것으로 생각되는데 기존의 선행실험들에서는 W/B 70 wt%는 과잉수로 인한 재료 분리 현상이 쉽게 발생하여 사용하지 않은 것으로 알려져 있지만 본 실험의 배합 조건에서 재료 분리 발생 범위를 알



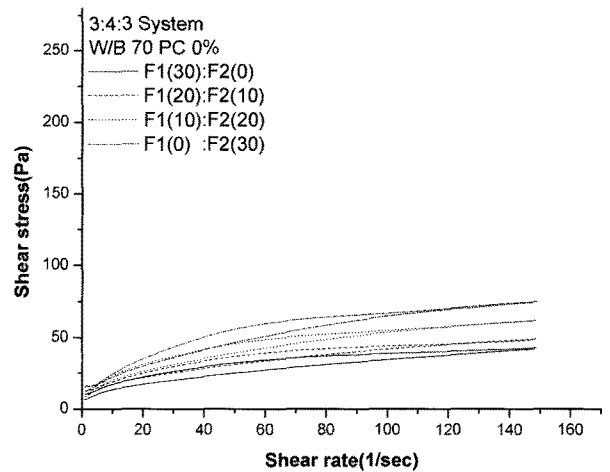
(a) W/B 50 wt%, PC 0 wt%



(b) W/B 50 wt%, PC 0.3 wt%



(c) W/B 50 wt%, PC 0.5 wt%



(d) W/B 70 wt%, PC 0 wt%

Fig. 3. Rheological curves as a function of PC dosage for the samples with various W/B. (3 : 4 : 3 System)

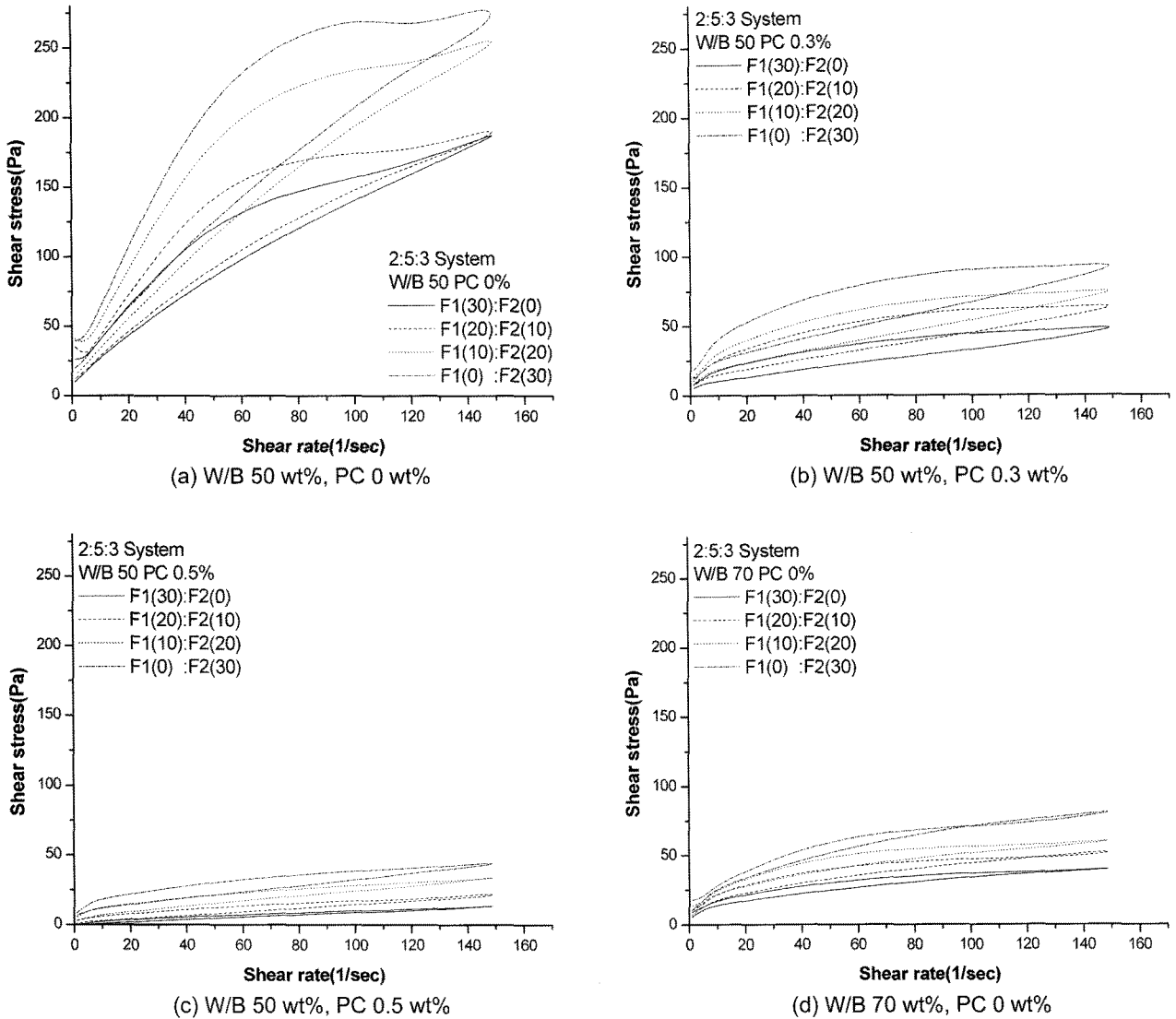


Fig. 4. Rheological curves as a function of PC dosage for the samples with various W/B. (2 : 5 : 3 System)

고자 실시하였다.

재료 분리 현상을 제외한 모든 샘플에서 3:4:3 System 보다 2:5:3 System이 더 우수한 유동성을 나타내었다. 이것은 OPC의 함량을 10 wt% 감소시키고 BFS의 함량을 10 wt% 증가시킴으로써 BFS의 유동성이 증가하고 더불어 재료 분리 저감성을 FA의 장점인 재료 분리 저항성이 보완해 주는 것으로 생각된다. 즉 BFS와 FA의 광물특성이 서로 혼합하여 사용할 경우에도 광물 고유특성은 변하지 않고 남아 있기 때문에¹¹⁾ 유동성 측면에서 OPC의 양을 줄이고 다른 혼합재의 양을 늘리는 것이 가능하다고 생각된다.

3.2. 유동특성

3성분계 혼합 비율에 따른 유동특성을 점도 측정을 통해 확인해 보았다. 미니슬럼프 결과와 동일한 경향으로

유동성이 증가함에 따라 시멘트 페이스트의 유동곡선 측정을 통하여 전단응력을 Figs. 3, 4에 나타내었다. 전단응력은 단위 시간당 전단 변형률의 변화를 나타내는 전단 속도에 따른 것이다. 전단응력의 상승, 하강곡선 중 하강 곡선의 기울기는 소성점도, 전단응력 축의 절편은 항복응력을 의미한다. 또한 히스테리시스 루프(Hysteresis Loop)는 시간당 소모되는 응력으로 회전속도가 상승될 때와 하강될 때의 곡선의 면적차이를 적분하여 얻은 값으로, 작은 면적일수록 지속적인 외력에 의해 우수한 유동특성과 페이스트의 수화가 진행됨에 따른 구조파괴(structural breakdown)의 양을 나타내는 것으로 생각할 수 있다.¹²⁾

유동곡선의 레올로지 상수를 이용하여 산출한 소성점도와 항복응력의 값을 Figs. 5, 6에 나타내었다. 미니 슬럼프와 점도 시험들의 결과와 같이 PC 첨가량과 W/B의 증가에 따라 소성점도와 항복응력 값은 감소하였고, 가장

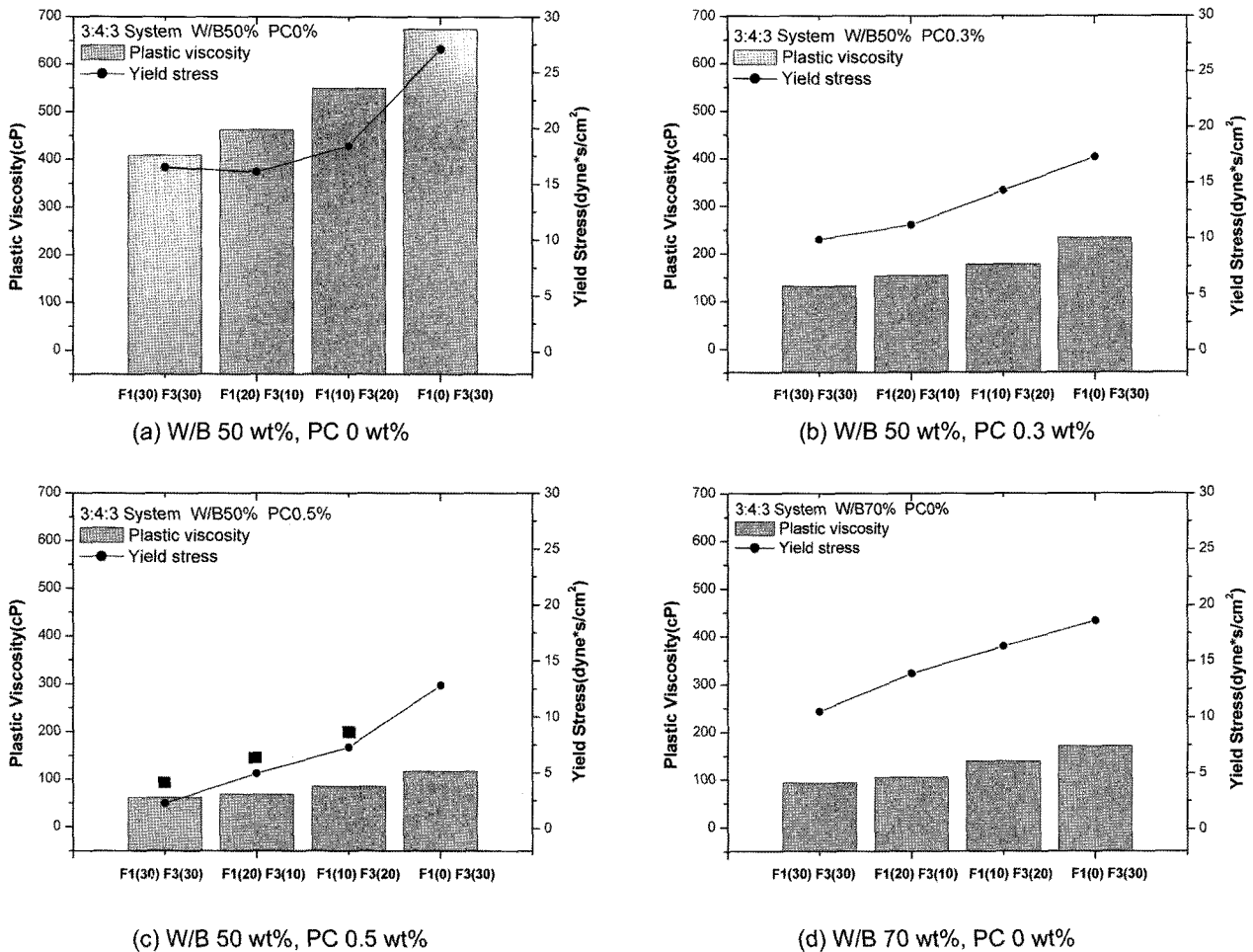


Fig. 5. Change of plastic viscosity and yield stress as a function of PC dosage for the samples with various replacement ratio of F2. (3 : 4 : 3 System, ■ : Segregation)

우수한 유동성을 나타낸 W/B 70 wt%, PC 0.3 wt%에서 가장 낮은 소성점도와 항복응력 값을 나타내었다. 또한 3:4:3 system보다 2:5:3 system이 더 낮은 소성점도와 항복응력 값을 나타내어 앞의 실험들의 결과들과 상응하는 경향성을 나타내고 있다. 레올로지 상수를 이용한 재료분리 현상은 소성점도 50 cP 이하, 항복응력 10 dyne*sec/cm² 이하에서 각각 발생하였다. W/B 70 wt%, PC 0.3 wt%, 0.5 wt%일 때 0과 유사한 결과값이 나와 그래프에는 나타나지 않았다.

W/B 50%에서 3:4:3 System과 2:5:3 system을 비교시 PC 0 wt%일때 3:4:3 system보다 2:5:3 system의 배합 조건에서 소성점도와 항복응력은 증가하였으나, PC 0.3 wt% 첨가시에는 소성점도와 항복응력이 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 것은 BFS가 OPC보다 PC에 민감한 것 즉 혼화제의 영향성이 큰 것으로 생각된다.¹¹⁾ 이것은 미니슬립 W/B 50 wt%, PC 0.3 wt%에서도 같은 경향이 나타나 점도측정 결과와 일치한다.

또한 W/B 50 wt%, PC 0.3 wt% 첨가시 3:4:3 system

F1(20):F2(10)와 2:5:3 system F1(10):F3(20)가 미니슬립과 소성점도, 항복응력에서 유사한 레올로지 측정값을 나타내어 다른 system에서도 유사한 레올로지 특성을 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

3.3. 선형회귀분석

PC 첨가량 및 W/B 변화량 별로 선형회귀 분석한 소성점도와 항복응력의 측정값들을 종합하여 상호연관성을 고찰하고자 Fig. 7에 나타내었다.

상호연관성의 결과에서는 항복응력과 소성점도는 비례, 미니슬립 측정값과 항복응력은 반비례적 상관적인 경향성을 찾을 수 있었고, 각각 R₂(결정계수)의 값은 3:4:3 system에서는 0.691과 0.787을 나타내었고, 2:5:3 system에서는 0.729와 0.852를 나타내어 2:5:3 system이 더 높은 상관관계가 있음을 알 수 있었다.

3.4. 미소수화열

일반적으로 저발열 시멘트는 수화열 저감효과 이외에

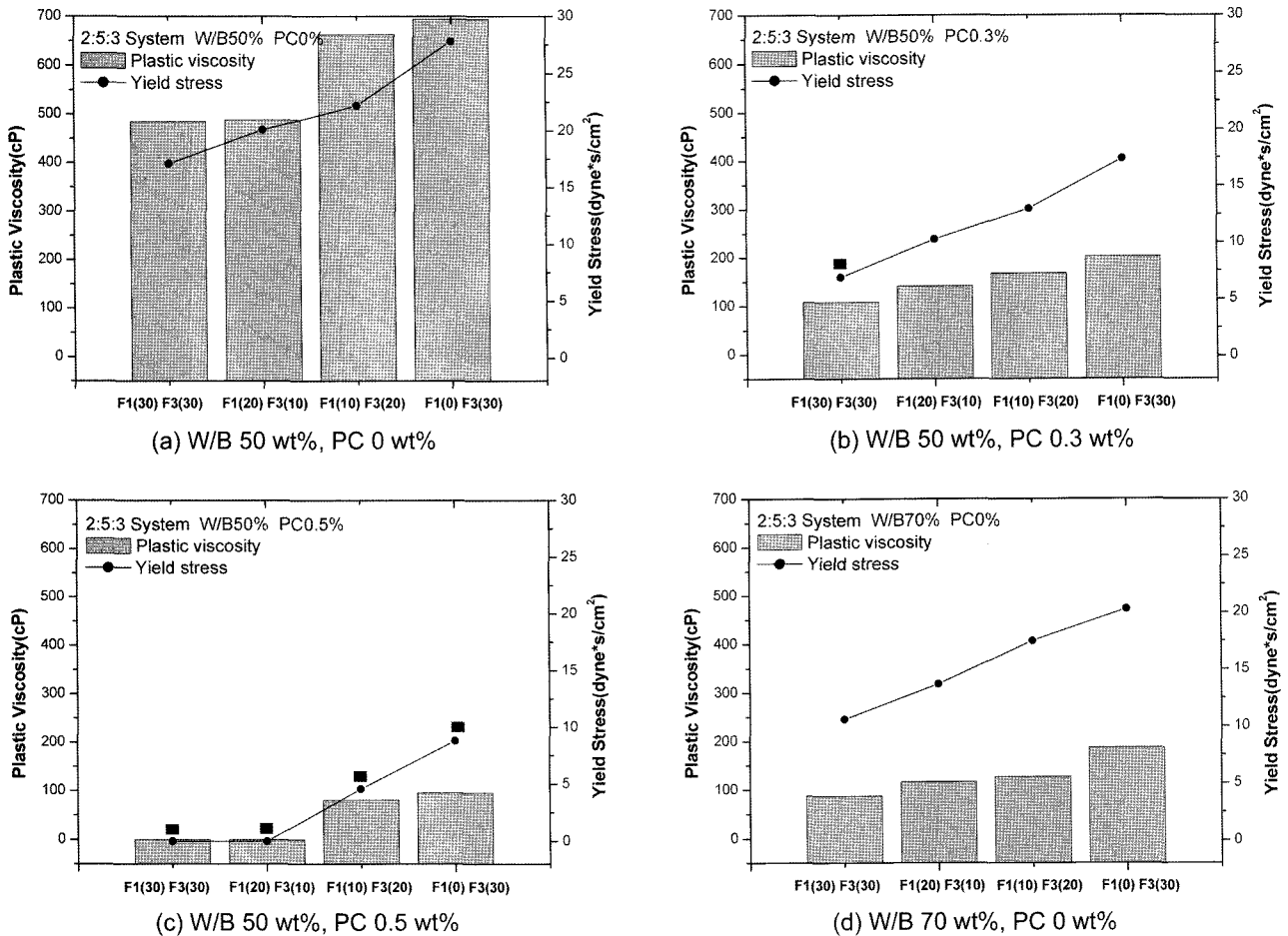


Fig. 6. Change of plastic viscosity and yield stress as a function of PC dosage for the samples with various replacement ratio of F2. (2 : 5 : 3 System, ■ : Segregation)

도 콘크리트의 내화학적 및 염소이온 침투저항성 등의 내구성을 증가시킬뿐만 아니라, 초유동콘크리트의 제조에도 유리하다고 알려져 있다.³⁾ 3성분계 저발열 시멘트는 포틀랜드 시멘트 및 혼합재의 종류와 양 또는 분말도와의 조합으로 다양한 성능의 설계가 가능하며 초저발열성을 나타내기 위해서는 포졸란 혼합량을 증가시켜 사용한다.^{13,14)}

따라서 본 실험에 사용된 배합조건인 3:4:3 system과 2:5:3 system의 수화발열 특성을 비교하기 위하여 재료분리가 발생하지 않은 W/B 70, 50 wt%, PC 0.3 wt%에서 F1(10):F2(20)의 조건에서 미소수화열량계를 이용하여 측정하였고 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 그리고 수화 시간에 따른 수화발열량을 Table 4에 나타내었다.

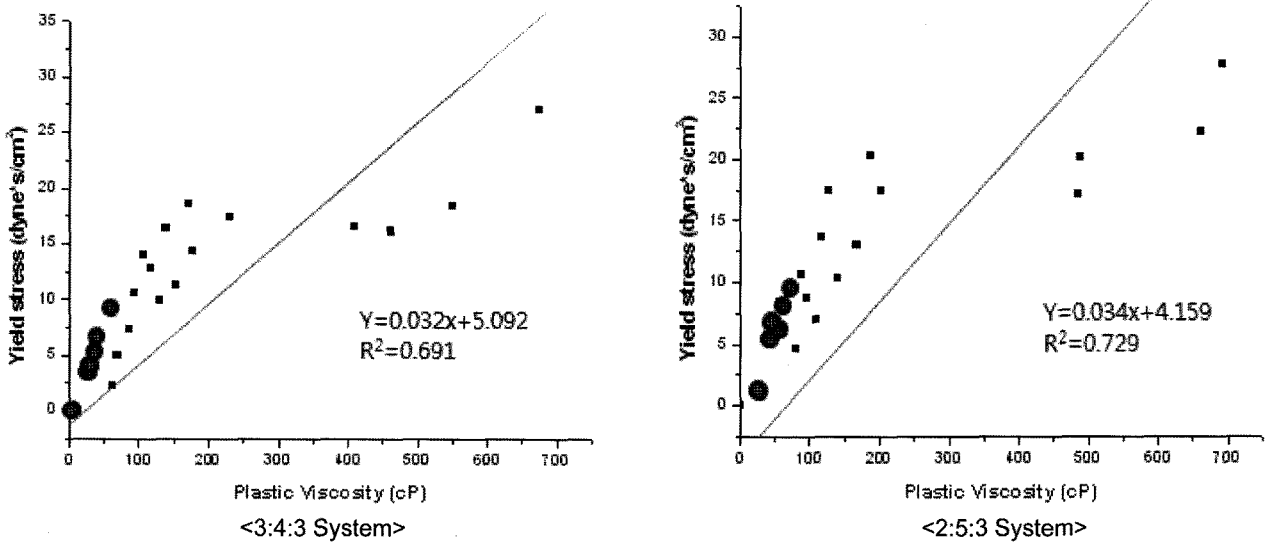
실험 결과 배합조건에서는 OPC>3:4:3 system>2:5:3 system 순으로 수화열이 높은 것으로 나타났으며, W/B에서는 OPC>3:4:3 system>2:5:3 system으로 나타났다. 이것은 수화열을 상승시키는 OPC의 함량이 감소하고 수화열을 저감시키는 BFS의 양이 증가하여 2:5:3 system이 초저발열 특성을 나타낸 것으로 생각된다. 또한 2:5:3 system이 3:4:3 system보다 우수한 유동성을 나타내어 초저발열

시멘트가 우수한 유동성을 나타낸다는 보고와도 일치하는 결과이다.^{13,15)}

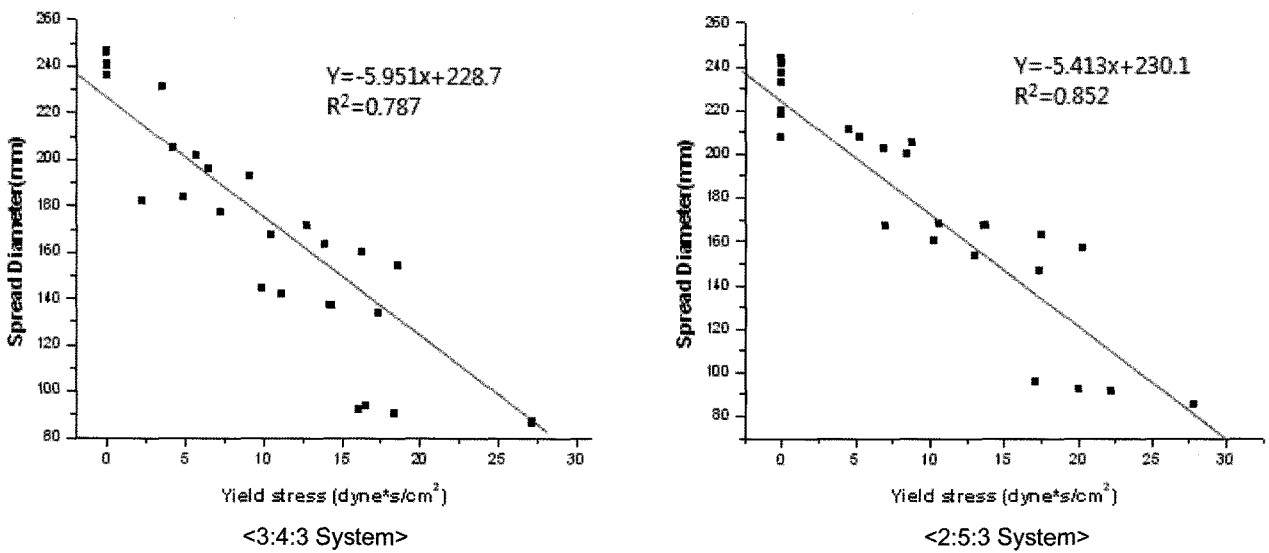
4. 결 론

분쇄된 플라이애시를 혼합한 포틀랜드 시멘트-고로슬래그-플라이애시 혼합시멘트의 유동특성을 파악하기 위하여 시험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 재료 분리 현상은 소성점도 50 cP 이하, 항복응력 10 dyne*sec/cm² 이하에서 관찰되었다. 즉, W/B 70 wt% PC 0.3, 0.5 wt%일때, 3성분계에서 모두 발생하였고, 3:4:3 system일때 W/B 50 wt%, PC 0.5 wt%의 경우 F1(0):F2(30)을 제외하고 나머지 시료에서 모두 발생하였다.
2. 분쇄된 애시의 첨가량이 증가할 수록 두 3성분계 모두 재료 분리 저항성이 증가하였다.
3. 재료 분리를 제외한 모든 샘플에서 3:4:3 system보다 2:5:3 system이 더 우수한 유동성을 나타내었다.
4. W/B 50 wt%, PC 0 wt% 첨가시 3:4:3 system보다 2:5:3 system이 소성점도와 항복응력은 증가하였고, PC



(A) Yield stress & Plastic viscosity



(B) Mini-slump & Yield stress

Fig. 7. Correlation between plastic viscosity, yield stress and minislump. (● : segregation)

Table 4. Hydration Heat Comparison of the Hydrated Cement Pastes

Hydration heat	Notation					
	OPC 100% (W/B 50%)	3:4:3 System		2:5:3 System		OPC 100% (W/B 70%)
		F1:F2 (10:20)	F1:F2 (10:20)	F1:F2 (10:20)	F1:F2 (10:20)	
		W/B 50%	W/B 70%	W/B 50%	W/B 70%	
Total (J/g)	123.58	37.19	34.16	28.99	25.58	91.52

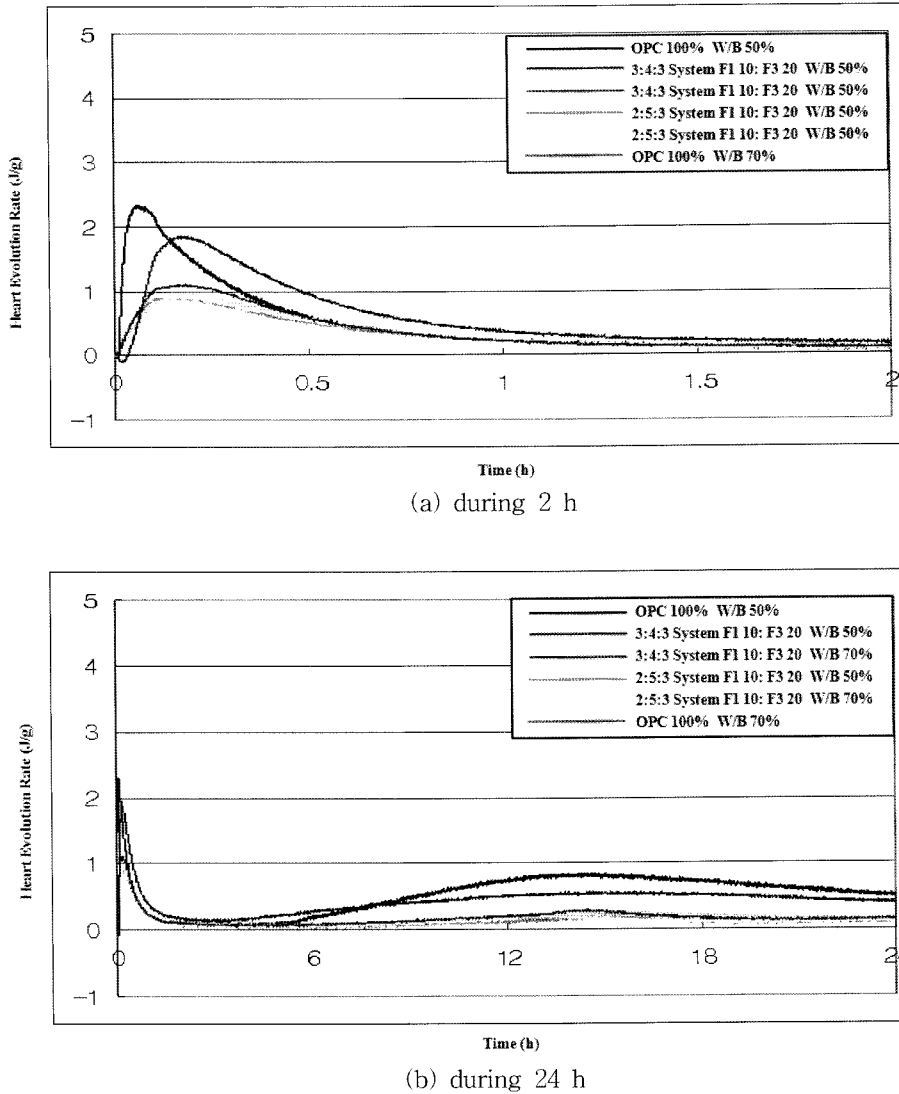


Fig. 8. Heat evolution rate of the cement pastes.

0.3 wt% 첨가시 소성점도와 항복응력이 감소하였다. 이것은 BFS가 OPC보다 PC의 민감성 즉 혼화제의 영향성이 큰 것으로 생각된다.

5. 동일한 조건에서 일부 F2의 치환량이 다른 3:4:3 system과 2:5:3 system이 유사한 레올로지 측정값을 나타내었다.

6. 2:5:3 system이 3:4:3 system 보다 낮은 수화열을 나타내었다.

REFERENCES

1. K. Habel, M. Viviani, E. Denarie, and E. Bruhwiler, "Development of the Mechanical Properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC)," *Cem. Concr. Res.*, **36** [7] 1362-70 (2006).
 2. J. Yammine, M. Chaouche, M. Guerinet, M. Moranville,

and N. Roussel, "Form Ordinary Rheology Concrete to Self Compacting Concrete: A Transition between Frictional and Hydrodynamic Interactions," *Cem. Concr. Res.*, **38** [7] 890-96 (2008).
 3. J. H. Kim, and K. I. Lee, "Necessity of Blended Cement(in Korean)," *J. Korea Concrete Institute*, **20** [3] 10-2 (2008).
 4. T. H. Park, M. H. Noh, and C. K. Park, "Characterization of Rheology on the Multi-Ingredients Paste Systems Mixed with Mineral Admixtures(in Korean)," *J. Korea Concrete Institute*, **16** [2] 241-48 (2004).
 5. C. K. Park, S. H. Lee, H. J. Kim, S. J. Kim, and T. W. Lee, "The Characteristics of Strength of Development and Hydration Heat on High Volume Fly-Ash Concrete(in Korean)," *J. Korea Concrete Institute*, **20** [1] 417-20 (2008).
 6. G. Bar-Nes, A. Katz, Y. Peled, and Y. Zeiri, "The Mechanism of Cesium Immobilization in Densified Silical-fume Blended Cement Pastes," *Cem. Concr. Res.*, **38** [5] 667-74 (2008).
 7. Z. Jing, F. Jin, T. Hashida, N. Yamasaki, and E. H. Ishida,

- “Influence of Additions of Coal Fly Ash and Quartz on Hydrothermal Solidification of Blast Furnace Slag,” *Cem. Concr. Res.*, **38** [7] 976-82 (2008).
8. S. Ramachandran, “Mini Slump of Research Techniques,” pp. 78-9, *Concrete Admixtures Handbook*, 1995.
 9. V. S. Ramachandran, Z. Shihua, and J. J. Beaudoin, “Application of Miniature Tests for Workability of Superplasticizer Cement Systems,” *Il Cemento.*, **85** 83-8 (1988).
 10. S. K. Yang, W. J. Lee, D. S. Kim, Y. S. Chung, J. S. Ryu, and J. R. Lee, “Rheological Properties of Cement Using Admixtures(in Korean),” *J. Korea Concrete Institute*, **15** [1] 271-75 (2003).
 11. Y. W. Choi, D. J. Moon, H. J. Kang, and W. Y. Jung, “Rheological Properties of Admixture which an Influence on the Self-Compacting Concrete(in Korean),” *KSCE J. of Civil Engineering*, 2523-26 (2006).
 12. Y. W. Choi, Y. J. Kim, W. Choi, and K. M. Lee, “A Study on the Rheological Properties of Superfluidity Self Compacting Concrete Utilizing Tailings from the Tungsten Mine(in Korean),” *J. Korea Concrete Institute*, **18** [1] 89-92 (2006).
 13. D. H. Lee, J. H. Noh, Y. S. Song, C. K. Park, and B. K. Kim, “Low Heat Cement(in Korean),” *J. Korea Concrete Institute*, **9** [3] 48-56 (1997).
 14. W. S. Joung, K. J. Kim, H. S. Nah, B. C. Oh, and J. M. Noh, “An Experimental Study on the Hydration Heat of Self-Compacting Concrete(in Korean),” *J. Korea Concrete Institute*, **16** [1] 152-55 (2004).
 15. B. S. Lee, S. K. Kim, S. Y. Kim, S. M. Choi, and G. S. Lee, “Examination on Application of High-Performance Concrete using Fine Fly Ash as Replacement Material of Silica Fume(in Korean),” *J. Kor. Ceram. Soc.*, **44** [9] 502-09 (2007).