

광물혼화재의 종류별 함량에 따른 시멘트 페이스트의 유동 특성에 관한 연구

A Study on the Rheology Properties of Cement Paste with Variation of Quantity and Type of Mineral Admixture

박 춘 근^{*} 노 명 현^{**} 김 학 연^{***} 이 종 필^{****} 박 대 효^{*****}
Park, Choon-Keun Noh, Myung-Hyun Kim, Hag-Youn Lee, Jong-Pil Park, Tae-Hyo

ABSTRACT

The rheology properties of cement paste with variation of quantity and type of mineral admixture were investigated. The rheology of the paste was assessed by using a HAAKE Rotovisco(RT 20) rheometer having cylindrical serrate spindle. The results were as follows: The viscosity and the yield stress of cement paste were decreased by the only replacement of 10% BFS(blast furnace slag) or the only replacement of 30% FA(fly ash), whereas SF(silica fume) increased them as the replacement quantity was increased. Increasing the dosage of HRWR(high-range water reducer), the rheology properties were improved significantly in cement paste with the replacement of SF. In addition, rheology properties of two ingredient blended pastes, such as BFS(20%)-SF(5%), FA(20%)-SF(5%), were improved more than those of three ingredient blended paste, BFS(20%)-FA(20%)-SF(5%).

1. 서 론

시멘트 페이스트나 콘크리트의 유동성을 측정하기 위해서 기존의 플로우 테스트나 슬럼프 테스트 이외의 점도(viscosity)와 항복치(yield value)라는 레올로지 정수를 이용하는 유변학(rheology)적 관점의 연구¹⁾가 많이 활용되고 있다. 최근 연구결과²⁻⁴⁾ 유동곡선의 항복치는 콘크리트의 슬럼프와 관련이 있고, 점선의 기울기인 점도는 점착성(stickness), 성형성(placeability), 분출성(pumpability), 마감성(finishability)과 재료분리(segregation)와 같은 특성들과 관련이 있다고 보고하고 있다. 지금까지 페이스트와 콘크리트의 레올로지 연구 결과들은 유동특성을 잘 대변하고 있어 향후 레올로지 관점의 응용연구가 더욱 급부상되리라 보고, 본 연구에서는 고성능 콘크리트(high performance concrete 이하 HPC)에 강도증진과 내구성 증대를 위해 치환되는 광물 혼화재(mineral admixture, 이하 MA)를 시멘

* 정회원, 한국생산기술연구원 수석연구원, 공학박사

** 정회원, 한양대학교 토목공학과 석사과정

*** 정회원, 한국기술교육대학교 건축공학과 석사과정

**** 정회원, 한국생산기술연구원 선임연구원, 공학석사

***** 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수, 공학박사

트 페이스트에 치환하여 고성능 콘크리트의 유동성 개선에 일조하기 위한 기반 연구를 수행하고자 하였다. 본 연구에서 사용된 MA로는 고로슬래그(blast furnace slag, 이하 BFS), 플라이 애쉬(fly ash, 이하 FA), 실리카 폼(silica fume, 이하 SF)이며, 이들은 HPC의 레올로지 특성을 소량의 치환으로 어느 정도 개선시키는 효과를 보이기도 하지만, W/B, 고성능 감수제(High-Range Water Reducer, 이하 HRWR), AE 연행제와 같은 계면활성제, 믹싱방법, MA 혼용비율 등에 따라 레올로지 특성에 많은 변화를 주는 것으로 연구되었다⁵⁻⁸⁾. 또한 3개의 MA중 SF의 경우는 첨가량 늘어날수록 유동성이 저하되긴 하지만, 고강도 콘크리트(high strength concrete) 제조시 강도 증진을 위해 일반적으로 사용되며, 치환량의 증가에 따라 뛰어난 강도증진 효과를 나타내기 때문에 다른 MA와 적절히 혼용해서 사용하고 HRWR이나 AE 연행제와 같은 계면활성제를 적정량 사용하면 HPC의 강도 성능에 효과적인 기여를 할 수 있으리라 본다.

2. 실험개요

2.1. 실험 인자 및 수준

페이스트의 W/B, MA의 종류와 치환량, HRWR의 첨가량에 따른 페이스트의 유동성 및 레올로지 특성을 파악하기 위하여 본 실험의 인자 및 수준을 표 1과 같이 결정하였다.

2.2. 페이스트 배합

본 실험에서 사용된 배합을 표 2에 나타내었다.

2.2. 사용재료

본 실험에 사용된 재료로 국내 H사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)와 BFS, FA, SF의 3종의 MA를 사용하였다. 또한 HRWR은 S사의 액상 나프탈렌 설포네이트계 혼화제를 사용하였다. 사용된 시멘트, MA, HRWR의 특성은 표 3에 나타내었다.

표 3. 사용재료의 물리적 특성

Raw materials	Density (g/cm ³)	Specific surface area (cm ² /g)	Mean PD (μm)	Max PD (μm)
Cement	3.15	3290	18.07	146.81
BFS	2.89	4500	12.87	110.98
FA	2.25	3650	19.56	133.74
SF	2.05	20,000	0.1	0.3

Chemical Admixture	Main ingredients	Color	Specific Gravity (20℃)	pH
HRWR	Naphtalene Sulfonate	Dark brown	1.3±0.05 g/cm ³	8~9

표 1. 실험인자 및 수준

Factors	Levels
W/B	0.33, 0.43, 0.54, 0.67
Type of Mineral Admixture(MA)	BFS, FA, SF
Replacement rate of MA (B×%)*	10, 20, 30 (%)
Dosage of HRWR (C×%)**	0, 0.5, 1.0 (%)

*B : Binder(cement+MA) **C : Cement

표 2. 페이스트 배합

Factors	W/B	Replacement rate of MA (%)			Dosage rate of HRWR(%)
		BFS*	FA**	SF***	
W/B	0.33	0			0
	0.43				
	0.54				
	0.67				
Type of MA	0.54	0	0	0	0.5
		10	10	10	
		20	20	20	
		30	30	30	
Dosage of HRWR	0.54	20			0
					0.5
	0.43	0	0	10	0.75
		1.0			
Mix. of MA	0.54	20	0	5	0.5
		0	20	5	
		10	10	5	

*BFS: Granulated Blast Furnace Slag

**FA : Fly ash

***SF : Silica fume

2.3. 측정 장비 및 방법

본 실험에 사용된 레올로지 측정장비는 HAAKE사의 Rotovisco RT20(Model) 레오미터를 사용하였으며, 그림 1에 나타내었다. 레오미터의 측정은 소정의 시멘트, 물, MA, HRWR을 600 ml 비커에 넣고 일정속도로 1분간 믹싱한 후 페이스트를 레오미터 측정용기에 부은 후 용기 내 페이스트의 온도를 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 로, 스피들 회전 속도의 범위를 0rpm에서 150rpm범위로 정하여 각각 1분씩 회전속도의 상승과 하강과정을 반복하여 레올로지 특성을 측정하였다. 그림 2에 나타난 것처럼 측정된 레올로지 곡선 중에서 회전속도의 상승과정에서 측정된 x 축(전단응력축)의 절편을 페이스트의 항복치로 가정하였고, 페이스트의 점도의 경우는 스피들 회전속도의 상승시에 매우 급격한 변화를 나타내지만, 하강시에 일정한 증감을 나타내는 경향에 착안하여 곡선의 피크치와 회전속도의 하강과정으로 측정된 x 축(전단응력축)의 절편을 연결한 직선의 기울기의 역수를 페이스트의 평균 점도로 가정하여 실험 데이터를 평가하였다.

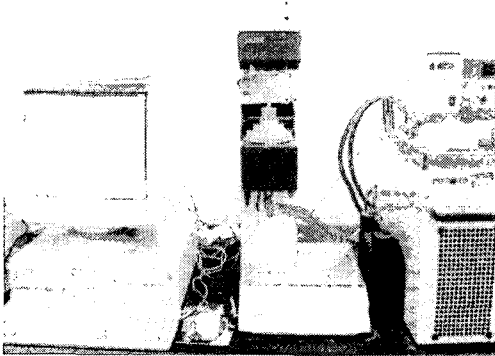


그림 3. 실험에 사용한 측정장비(레오미터)

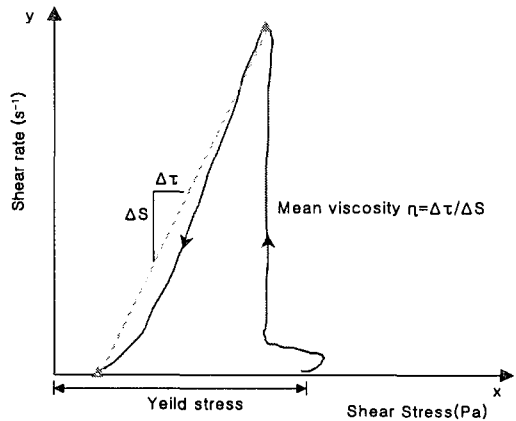


그림 4. 레올로지 곡선의 형태

3. 실험결과 분석

광물 혼화재를 종류별로 함량별로 혼합한 시멘트 페이스트의 레올로지 특성 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

3.1. 물-시멘트 비(W/B)의 영향

그림 3에 나타난 것처럼 W/B가 증가할수록 레올로지 특성은 향상되는 것으로 나타났다. 콘크리트의 슬럼프 값과 밀접한 관련이 있는 항복치의 값은 W/B=0.33에서 200Pa정도에서 W/B=0.67의 22Pa정도로 상당한 차이를 보이고 있다. 이는 다른 배합조건을

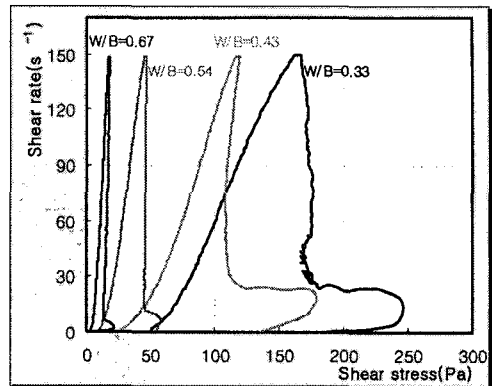


그림 5. W/C에 따른 레올로지 특성

고정시킨 상태로 소정의 워커빌리티를 얻기 위해서는 W/B를 증가시켜야 함을 의미하며, W/B는 기본적으로 페이스트의 레올로지 특성을 향상시키는 데 중요한 인자임을 알 수 있었다.

3.2. 광물 혼화제(MA)의 종류 및 함량의 영향

W/B를 0.54로 하고 바인더에 대하여 MA를 각각 10, 20, 30%씩 단독으로 치환하여 HRWR를 각각 0.5%씩 첨가한 경우 BFS와 FA, SF의 레올로지 특성변화를 그림 4와 5에 나타내었다. BFS는 단독으로 10%를 치환한 페이스트와, FA는 단독으로 30%로 치환한 페이스트에서 우수한 레올로지 특성을 보이는 것으로 나타났다. 본 실험에 사용된 BFS 경우의 평균 분말도는 $4,500\text{ cm}^2/\text{g}$ 으로 10% 치환으로 레올로지 개선 효과를 보이는 데 그 이유는 BFS의 작은 입자가 시멘트 입자 사이에 공극에 결합되어 뽁뽁하게 엉켜 붙어 있는 시멘트 입자들을 어느 정도 분산시키는 윤활제 역할이 유동성 개선에 기여한 것이라고 판단되며, 20%와 30% 치환 페이스트에서 항복치가 증가 되는 이유는 BFS의 고 분말 입자가 다량 치환됨에 따라 비표면적이 증대되어 단위수량이 증가되는 현상이 윤활 역할에 의해 유동성을 개선시키는 효과보다 훨씬 크기 때문이라 사료된다. 하지만 BFS 30%의 항복치는 BFS 20%의 항복치보다 오히려 작았다. FA를 10%와 20%로 치환한 경우 항복치가 증가하는 현상은 FA가 HRWR에 흡착하여 HRWR을 첨가한 효과가 반감되었기 때문으로 생각되는데, 이는 HRWR을 전혀 첨가하지 않고 FA를 20%로 치환한 경우의 항복치가 FA 20%, 30%를 치환한 페이스트보다 오히려 작게 나온 결과로부터 추측할 수 있다. 반면 30%의 첨가에 의해 항복치가 급격히 줄어드는 현상은 30%의 치환량대 HRWR의 첨가 비율이 적정수준에 도달했음을 암시하며, 이때 시멘트 입자가 고르게 분산되는 효과가 나타났다고 판단된다. SF의 경우는 그 치환량이 증가할 경우 항복치가 급속도로 증가함을 보이는데 이는 SF의 경우가 마치 증점제와 같은 역할을 하기 때문이다. SF의 경우는 고 분말도(평균 분말도= $20,000\text{ cm}^2/\text{g}$)이며 첨가되는 HRWR에 겹겹이 흡착되어 겔층을 형성하게 되므로 자유수의 이동이 억제되어 치환되는 SF의 양이 증가할수록 소요의 유동성을 얻기 위해 요구되는 단위수량이나 HRWR의 양도 또한 상당히 증가된 것으로 보인다. 실험결과 SF를 30% 치환시킨 페이스트의 항복치는 SF를 10% 치환시킨 항복치의 약 15배 정도에 이르는 것으로 나타났다.

MA의 종류별로 MA를 10%로 치환했을 경우의 항복치는 BFS<OPC<SF<FA의 순으로 나타났고, MA=20%로 치환했을 경우는 OPC<FA<BFS<SF의 순으로 나타났으며, MA=30%의 경우는 FA<OPC<BFS<SF의 순으로 나타났다.

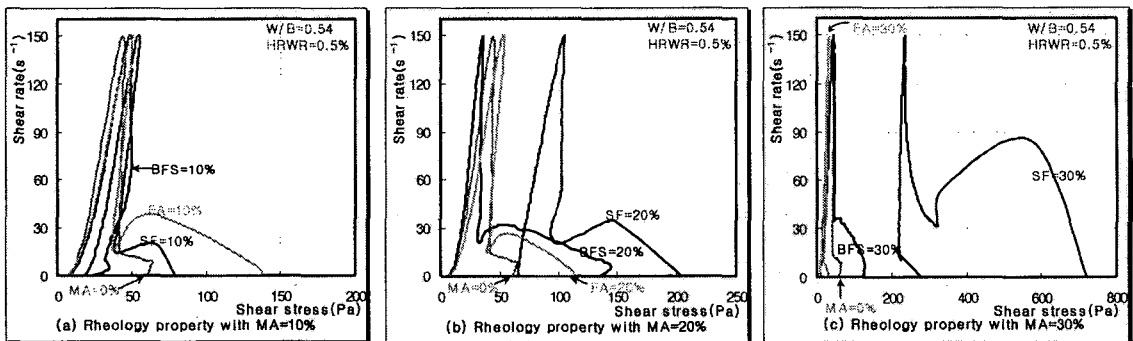


그림 6. MA의 종류에 따른 레올로지 특성

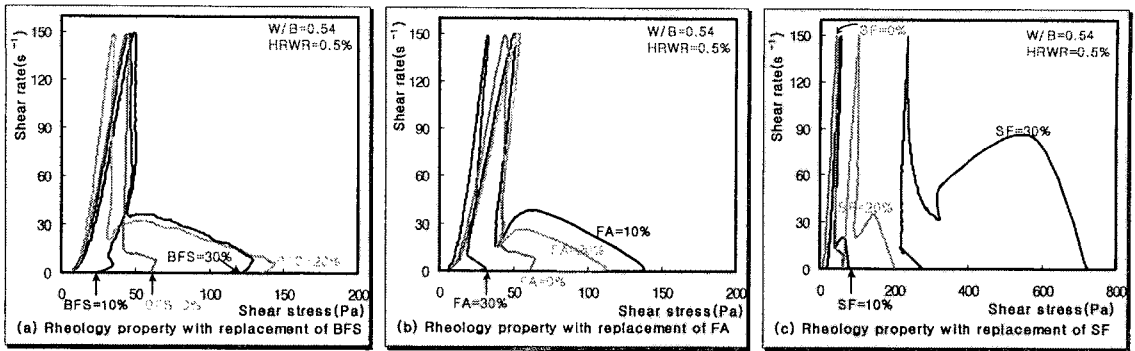


그림 7. MA의 치환량에 따른 레올로지 특성

3.3. 고성능감수제(HRWR)의 영향

HRWR에 첨가량에 따른 레올로지 특성변화를 그림 6에 나타내었다. HRWR을 BFS와 FA에 각각 0.5%, 1.0%를 첨가하면 항복치가 오히려 증가하고 있으며, 따라서 두 경우에 있어서는 HRWR의 첨가가 오히려 유동성을 저하시킨다고 판단된다. 따라서 MA의 종류와 함량별로 적정의 HRWR을 조절할 필요가 있다. HRWR의 첨가량을 무조건 증가시킨다고 레올로지 특성이 개선되지는 않는다고 판단되며, 특히 W/B의 값을 고려하여 MA의 종류와 함량에 따라 적정의 HRWR의 값을 조절해야 한다고 생각한다. SF의 경우는 HRWR의 첨가량이 증가할수록 레올로지 특성이 크게 개선됨을 알 수 있다. 한편 SF를 20%로 치환한 페이스트의 경우에 HRWR의 첨가량이 증가함에 따라 히스테리시스 면적의 상당히 감소함을 알 수 있다. 본 HRWR의 첨가량에 따른 레올로지 시험에서 HRWR의 첨가에 따라 레올로지 특성이 가장 민감하게 개선되는 MA는 SF임을 확인할 수 있었다. W/B=0.54, SF 10%, HRWR=0.5%인 배합에서 W/B를 0.43으로 약 20%를 감소시키고 HRWR의 첨가량을 1.0%으로 2배 증가 시키면 W/B=0.54인 페이스트의 항복치에 근접해 갔지만, 여전히 항복치는 W/B가 큰 페이스트가 낮게 나타났다(그림 7). 하지만 HRWR을 1.0% 첨가시킨 경우 히스테리시스 면적은 급격히 줄어드는 현상을 보였다. 이는 HRWR 첨가량 증가로 인한 점도가 상당히 개선되었기 때문으로 사료된다. 따라서 SF를 광물 혼화재료로 첨가할 경우 HRWR의 첨가량을 증가하여 점도를 개선할 수 있다고 생각된다.

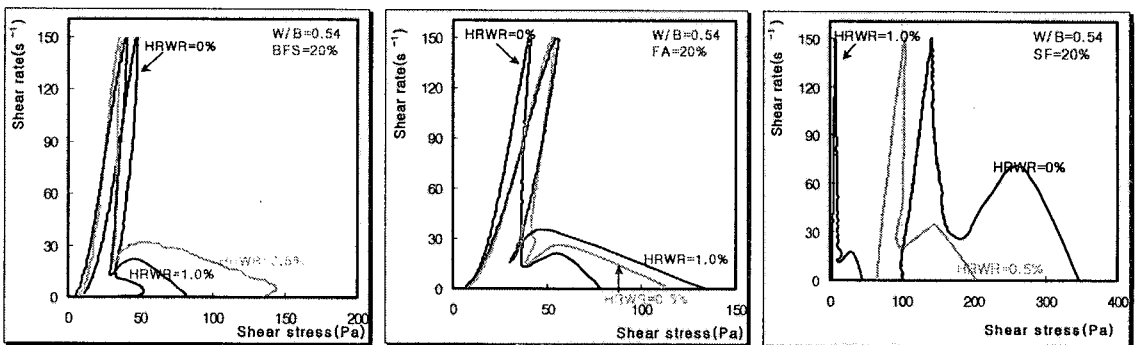


그림 8. HRWR 첨가량에 따른 레올로지 특성

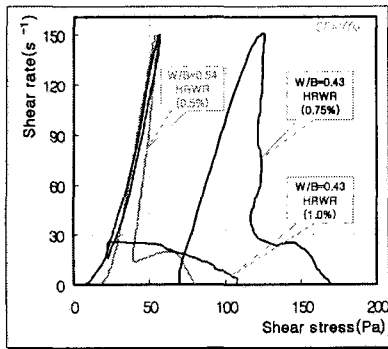


그림 9. W/B 감소에 따른 HRWR의 첨가량 변화

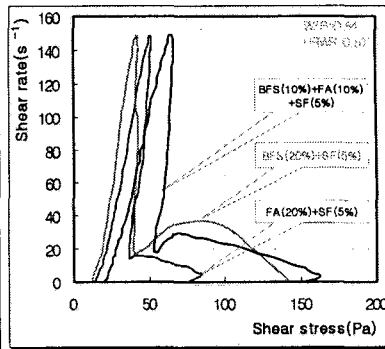


그림 10. MA 혼용 페이스트의 레올로지 특성

3.4. MA 혼용 페이스트의 레올로지 특성

총 MA의 치환량을 25%로 고정하고 MA중 SF의 양을 5%로 고정한 후 BFS와 FA의 함량에 변화를 주어 레올로지를 측정하여 그림 8에 나타내었다.

실험결과 항복치는 FA(20%)-SF(5%) < BFS(20%)-SF(5%) < BFS(10%)-FA(10%)-SF(5%) 순으로 나타났고, 점도는 BFS(20%)-SF(5%) < FA(20%)-SF(5%) < BFS(10%)-FA(10%)-SF(5%)으로 나타났다. 본 실험범위에서는 3상 치환보다는 2상 치환된 페이스트가 레올로지를 더욱 향상시키는 것으로 나타났다.

4. 결 론

MA를 함유한 시멘트 페이스트의 레올로지 특성을 파악하기 위하여 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) W/B가 증가할수록 레올로지 특성은 향상되며, 페이스트의 항복치도 상당히 감소하였다. 다른 배합조건을 고정시킨 상태로 소정의 워커빌리티를 얻기 위해서는 W/B를 증가 시키야 하는 것처럼, W/B는 기본적으로 페이스트의 레올로지 특성을 향상시키는 데 중요한 인자임을 알 수 있었다.
- (2) BFS 10% 단독 치환한 페이스트와 FA는 30% 단독 치환한 페이스트에서 레올로지 특성이 개선되는 것으로 나타났다. 레올로지 개선 이유는 BFS의 경우 미세한 입자들에 의한 분산효과이였으며, FA의 경우는 FA 치환량대비 HRWR의 첨가 비율이 적정수준에 도달되어 시멘트 입자가 고르게 분산되었기 때문이다. SF의 경우는 치환량이 늘어날수록 레올로지 성능이 급격히 저하되었다. 특히, SF를 30% 치환시킨 페이스트의 항복치는 SF를 10% 치환시킨 항복치의 약 15배 정도에 이르는 것으로 나타났다.
- (3) 본 실험에서 HRWR을 BFS와 FA에 각각 0.5%, 1.0%씩 첨가하면 항복치가 오히려 증가하였다. 이로써 MA의 종류와 함량별로 적정의 HRWR가 있음을 알 수 있다. SF의 경우 HRWR의 첨가량이 증가할수록 레올로지 특성이 크게 개선되었고, SF를 20%로 치환한 페이스트의 경우에는 HRWR의 함량이 증가함에 따라 히스테리시스 면적의 상당히 감소하였다. 본 실험에서 HRWR의

첨가에 따라 레올로지 특성이 가장 민감하게 개선되는 MA는 SF임을 확인할 수 있었다.

- (4) MA 혼용 페이스트의 레올로지 특성 실험결과 본 실험범위에서는 3상 치환보다는 2상 치환된 페이스트가 레올로지 특성을 더욱 향상시키는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 건설교통기술혁신사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. P. F. G. BANFILL, "Rheology of Fresh Cement and Concrete", E.&F.N.SPON, 1991, pp.13~26.
2. C. F. Ferraris, et al, "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.
3. C. F. Ferraris, F. de Sarrard, "Testing and Modeling of Fresh Concrete Rheology", NIST, USA, 1998 (NISTIR 6094).
4. C. F. Ferraris, "Measurement of the rheological properties of high performance concrete", State of the art report, J. Res. Nist 104(5), 1999, pp.461~478.
5. Xiong Zhang, Jihong Han, "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.
6. M. Nehdi, et al, "Rheology of High-Performance Concrete: Effect of Ultrafine Particles", Cement and Concrete Research, vol. 28, No. 5, 1998, pp.687~697.
7. 윤재환, "고유동 콘크리트의 레올로지 특성에 관한 실험적 연구", J. of Inst. of Industrial Technology The Univ. of Suwon, Vol. 12, 1997.
8. David A. Williams, et al, "The influence of mixing on the rheology of fresh cement paste", Cement and Concrete Research, vol. 29, No. 12, 1999, pp.1491~1496.