

# 시멘트 페이스트의 유동 특성에 관한 평가방법 비교연구

## A Comparison Study Between Evaluation Methods on the Rheological Properties of Cement Paste

한 천 구\*

Han, Cheon-Goo

이 건 철\*\*

Lee, Gun-Cheol

허 영 선\*\*\*

Heo, Young-Sun

### Abstract

This study investigates the influence of various blending factors on cement paste fluidity and find out the most effective evaluation method of cement paste flow, comparing flow test apparatuses such as ring flow(R-F), flow cone(F-C) and mini slump(M-S). A viscometer also measures the rheology coefficients to secure faithful numerical data. Firstly, series I examines cement paste, affected by several cement products and mineral admixture types in the range of W/B 40%, ordinary fluidity, and W/B 30%, high fluidity. In this series, the three types of cement product depended on companies, are randomly used and the mineral admixture, such as fly ash, blast furnace slag and silica fume, are incorporated in the cement paste, in response to the ratio of 10, 20, to 30%, respectively. In addition, series II studies various chemical admixture types, affecting the cement paste. This series is carried out with manufacturing companies and component types in the range of W/C 30%, high fluidity. For the manufacturing companies, randomly four products are used and for the component types, polycarboxylate, melamine, naphthalene and lignosulfonate type are chosen. Test results showed that in the fluidity test of cement paste considering various types of blending factors, R-F exhibited similar tendency with F-C and M-S. In the analysis of consistency curves measured by viscometer, the fluidity evaluation method using flow test apparatuses was significantly effective, except for the some of the low fluidity specimens. In conclusion of this study, R-F was the most convenient, faithful and effective fluidity evaluation method of cement paste.

키 워 드 : 시멘트 페이스트, 링플로우, 플로우콘, 미니슬럼프, 레올로지 특성, 회전점도계

Keywords : Cement paste, Ring flow, Flow cone, Mini slump, Rheological Properties, Viscometer

## 1. 서 론

과거, 기술 축적에 의해 경험적으로 판단되고 이용되었던 기술의 흐름이 오늘날에는 점점 한계에 부딪치고 있다. 이러한 문제를 좀 더 발전적이고, 능률적으로 해결하기 위해서는 기초적 이론에 근거한 정량화<sup>1)-5)</sup>의 노력이 절실히 필요하게 된다.

특히 콘크리트의 경우는 액체와 고체로 이루어져 있는 혼합물로서, 시멘트와 같은 미립자에서 굵은골재와 같은 입자크기까지 폭넓은 입도분포를 갖는 다성분계의 복합체이다. 이렇게 구성되어 있는 콘크리트는 구성재료의 종류와 혼합비, 혼화재료의 종류와 사용량, 믹서기 종류, 비빔 시간 및 온도 등에 따라서도 매우 복잡한 유동특성<sup>3),4)</sup> (Rheological properties)을 갖게 된다.

그런데, 현재 국내의 일부 레미콘에서는 시멘트의 품질 평가로서 굳지않은 시멘트 페이스트의 유동성을 간단하고 손쉽게 평가하기 위한 방법으로 링플로우를 사용하는 경우가 있는데, 이는 우리나라 규정에 없는 실험방법으로서 이에 대한 보다 정량적인 근거자료의 보충이 요구된다.

\* 청주대학교 건축공학부 교수, 공학박사, 정회원

\*\* 한국건설기술연구원, 건축도시연구부, Post Doc., 정회원.

\*\*\* 청주대학교 대학원 석사과정, 정회원

그러므로 본 연구에서는 이러한 링플로우(이하 R-F) 및 기타 유동성 측정 장비로 플로우콘(이하 F-C)과 미니슬럼프(이하 M-S) 등을 이용하여 시멘트 페이스트의 유동성을 평가하고, 시험기 간의 상호관계를 비교한 후, 이를 보다 정량적으로 뒷받침하기 위하여 회전점도계도 비교함으로써, 간편하며 신뢰할 수 있는 효율적인 시멘트 페이스트의 유동성 평가방법을 제안하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 표 1과 같다.

먼저, 시리즈 I에서는 시멘트의 제조사 및 광물 혼화재의 종류별 치환율 변화로서, 분체변화에 따른 유동특성을 실험하기 위한 것이다. 즉, 물결합재비(W/B) 30 및 40%의 2수준에 대해서 시멘트 제조사별로 A, B, C사의 3수준, 총 6수준으로 계획하고, 광물질 혼화재는 플라이애시(이하 FA), 고로슬래그 미분말(이하 BS) 및 실리카폼(이하 SF)을 이용하며, 각각 시멘트 질량비에 대해 0, 10, 20, 30%를 치환하여 사용한다. 단, SF의 경우는 30%의 경우 측정이 불가능하여 20%까지만 치환하여,

총 18 수준에 대해 검토하도록 한다.

시리즈 II의 경우는 화학 혼화제의 영향을 실험하기 위한 것으로 W/B 30% 1수준에 대하여 폴리칼본산계 고성능감수제의 제조 회사별로 A, B, C, D사의 4수준을 계획하고, 감수제 성분별로는 폴리칼본산계, 멜라민계, 나프탈렌계 및 리그닌계 등 4수준으로 총 8수준을 실험 계획한다. 이때 시리즈 I, II의 목표 플로우는 F-C 시험기를 기준으로 W/B 30%는 고유동 시멘트 페이스트 범위인 300±20mm, W/C 40%는 150±20mm를 만족하도록 배합 설계하여 여타의 배합에 동일하게 적용토록 한다. 굳지않은 시멘트 페이스트의 유동특성 평가와 관련한 실험 사항은 표 1과 같다.

표 1. 실험계획

구분	실험 요인						실험 사항	
	W/B	목표 슬럼프 플로우 (mm)	시멘트 제조사	혼화제		고성능 감수제		
				종류	치환율 (%)	회사		성분
시리즈 I	30	300±20	A사	-	-	A사	Psp <sup>1)</sup>	
	40	150±20	A사					FA BS SF
시리즈 II	30	300±20	A사	-	-	A사 B사 C사 D사	Psp Msp <sup>1)</sup> Nsp <sup>1)</sup> Lsp <sup>1)</sup>	
						A사		

- 1) Psp : 폴리칼본산계, Msp : 멜라민계, Nsp : 나프탈렌계, Lsp : 리그닌계  
2) FA, BS에 대해서만 실시  
3) R-F : 링플로우, F-C : 플로우콘, M-S : 미니슬럼프

## 2.2 사용재료

본 연구에 사용한 시멘트는 국내산 A, B, C사에서 생산되는 보통 포틀랜드시멘트를 사용하고, 혼화재료로 FA는 보령 화력산, BS는 포항제철소산, SF는 호주산을 사용한다. 또한 혼화제는 제조회사별로 국내산 A, B, C, D사의 폴리칼본산계 제품을 사용하고, 성분별에서는 A사에서 생산되는 제품으로 폴리칼본산계, 멜라민계, 나프탈렌계, 리그닌계를 사용토록 한다. 시멘트 및 혼화제의 입도분포 및 화학적 성질은 그림 1, 2 및 표 2와 같다.

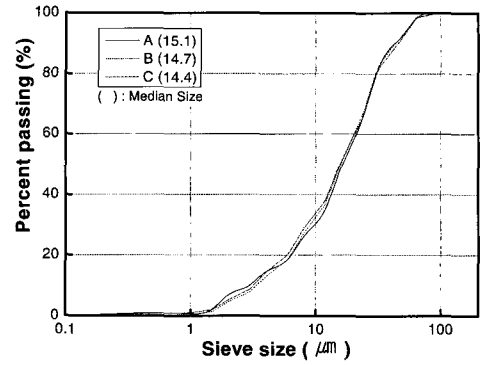


그림 1. 시멘트 회사별 입도분포

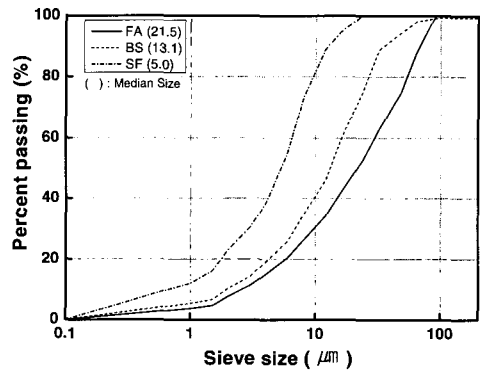
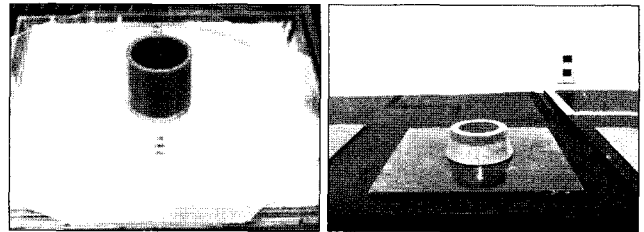


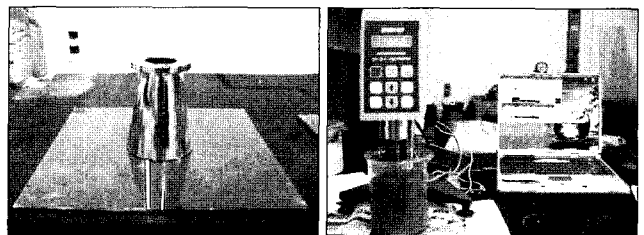
그림 2. 혼화제 종류별 입도분포

## 2.3 실험방법



(a) 링플로우

(b) 플로우콘



(c) 미니슬럼프

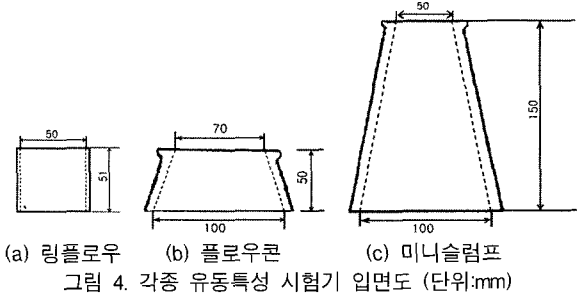
(d) 회전점도계

그림 3. 각종 유동성 시험기의 모습

표 2. 시멘트 및 혼화제의 화학적 성분 및 분말도

시료명	화 학 성 분 (%)									Topas 주요광물조성 (%)				분말도 Blaine(cm <sup>2</sup> /g)
	LOI	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	
시멘트 A	0.59	22.13	5.29	3.66	63.09	2.24	1.86	0.99	0.15	61.7	14.1	3.7	16.2	3,270
시멘트 B	2.31	20.97	4.93	3.66	62.01	2.65	2.30	1.03	0.15	58.7	13.0	3.9	12.0	3,393
시멘트 C	2.01	21.87	4.81	3.37	61.77	2.68	2.21	1.12	0.15	54.0	14.3	5.4	12.3	3,371
FA	4.26	58.87	25.84	4.99	3.63	0.93	0.39	1.08	-	-	-	-	-	3,132
BS	-1.18	35.63	15.20	0.74	39.75	7.15	2.11	0.59	-	-	-	-	-	3,298
SF	2.13	91.70	2.06	0.90	0.49	0.78	0.40	-	-	-	-	-	-	200,000

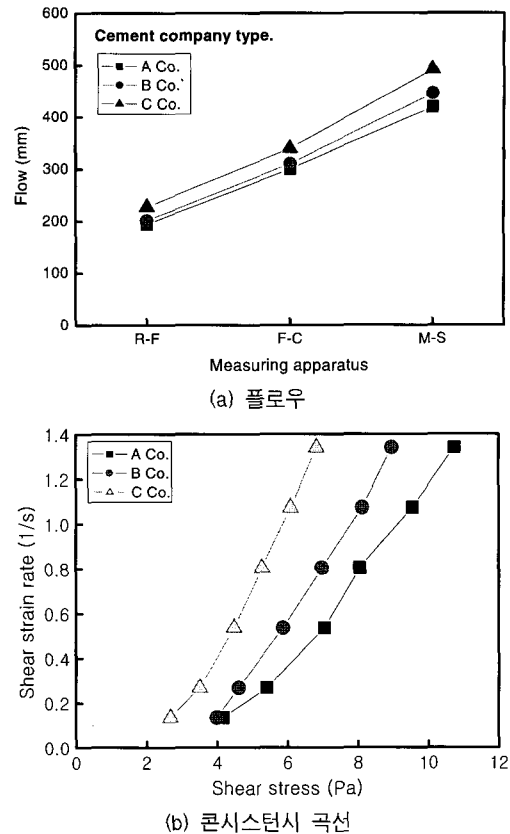
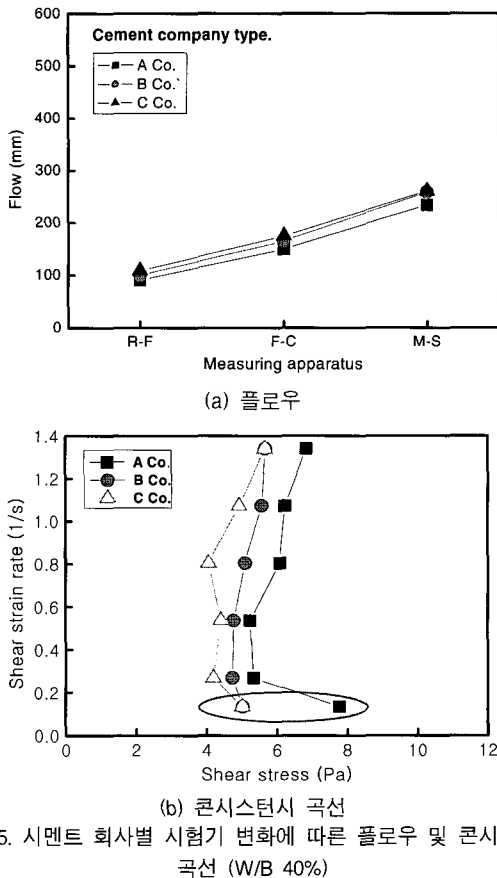
실험방법으로 시멘트페이스트의 혼합은 모르타 믹서기를 이용하는데, 혼합방법은 잔골재의 혼합을 제외한 ASTM C305에 의거 실시한다. 굳지않은 시멘트 페이스트의 유동성 평가 실험은 R-F의 경우 JASS 15M-103에 의거 실시하고, F-C는 KS L 5111의 규준에 맞는 시험기를 이용하여 낙하를 가하지 않은 상태에서 측정하며, M-S는 KS F 2474에 의거하여 실시한다. 또한, 시멘트 페이스트의 레올로지정수는 회전 점도계(Brookfield DV-11)를 이용하여 JIS K 6901 규정에 의거 실시하는데, 각 플로우 및 회전점도계 측정 모습은 그림 3, 4와 같다.



### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 시멘트 회사별 시멘트페이스트의 유동특성

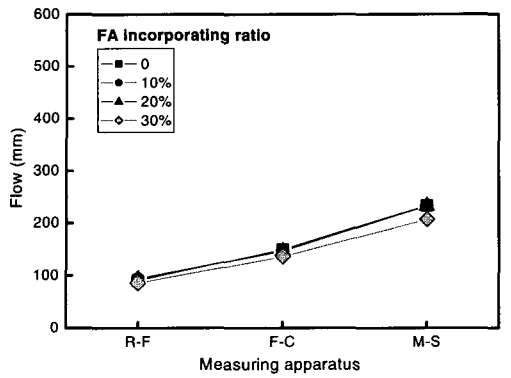
그림 5, 6은 시멘트 회사별 유동성 측정 시험기 변화에 따른 일반범위와 고유동범위의 플로우 및 콘시스턴시 곡선을 나타낸 것이다.



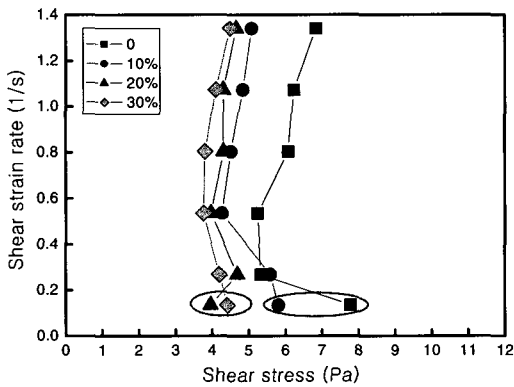
시멘트 회사별 각종 플로우 시험기에 의한 유동성 측정 결과 R-F를 이용하여 측정된 경우 그림 5-(a) 일반 범위 및 그림 6-(a) 고유동 범위에서 모두 A사 시멘트의 유동성이 가장 작은 것으로 나타났고, 다음으로 B, C 순으로 작게 나타났다. 이러한 결과는 F-C 및 M-S를 이용하여 측정된 플로우치와 유사한 경향을 나타내는 것으로 시험기간의 측정오차가 작은 것을 확인할 수 있었다. 한편, 시멘트 종류에 따른 5-(b) 일반 범위 및 그림 6-(b) 고유동 범위의 콘시스턴시는 각종 플로우 시험기에 의한 측정결과와 유사한 경향으로 나타났는데, 플로우 시험기에 의한 측정에서 유동성이 가장 크게 나타났던 C사의 항복치가 가장 작게 나타났고, A사 시멘트의 항복치가 가장 큰 것으로 나타났다. 또한 고유동과 달리 일반범위 시멘트페이스트의 경우 그림 5-(b)에서 원으로 표시한 바와 같이 초기 측정값이 불안정하게 나타났는데, 이는 고농도 서스펜션의 고유한 특성으로 점성이 작은 고농도 서스펜션의 경우 전단변형시 간극수압의 이동으로 전단을 시작하는 범위에서는 순간 전단응력이 크게 증가하여 초기 불안정한 수치를 기록한 것으로 분석되며, 시간이 지나면서 안정해지는 것으로 나타났다.

#### 3.2 광물 혼화재 종류별 치환율 변화에 따른 시멘트페이스트의 유동특성

먼저, 그림 7, 8은 유동성 측정 시험기별로 FA의 치환율 변화에 따른 일반(W/B 40%) 및 고유동(W/B 30%) 범위의 플로우와 콘시스턴시 곡선을 나타낸 것이다.



(a) 플로우

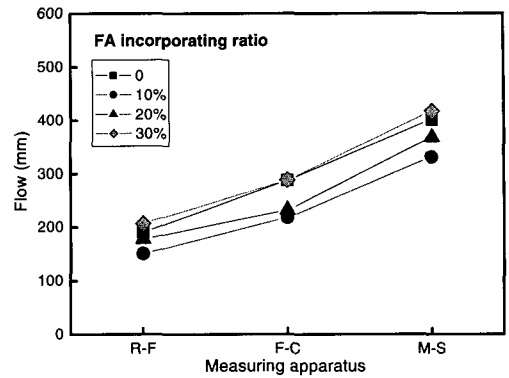


(b) 콘시스턴시 곡선

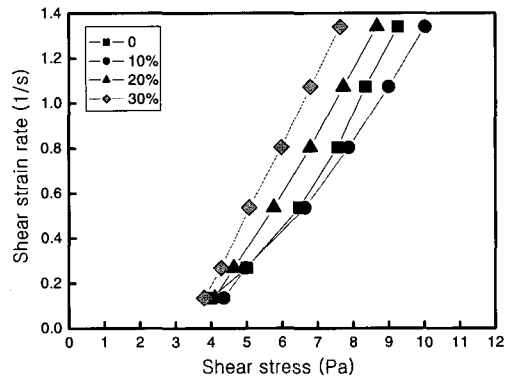
그림 7. FA 치환율별 시험기 변화에 따른 플로우 및 콘시스턴시 곡선 (W/B 40%)

그림 7-(a)인 일반 범위의 플로우에서는 FA의 치환율이 증가할수록 시멘트 페이스트의 유동성이 약간 저하하거나 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났으나, 고유동 범위에서는 FA를 10% 치환했을 경우 플레인보다 다소 감소하다가 치환율이 증가할수록 점점 플로우치가 커지는 것으로 나타났다. 이러한 유동특성은 R-F, F-C 및 M-S 등 모든 플로우 시험기에서 동일하게 나타났다. 이는 FA의 낮은 치환율에서는 분체량의 증가로 그림 7-(a)의 고성능감수제를 사용하지 않은 일반범위에서 나타난 결과와 유사하게 페이스트의 유동성 저하를 유발하였으나, 많은 치환율에서는 시멘트 대비 입형이 좋은 FA의 사용량이 증가하고, 고성능감수제에 의한 페이스트 입자 사이의 마찰력이 감소하면서 이러한 효과가 차감되어 발생한 것으로 판단된다. 또한, 그림 7-(b)인 일반 범위의 콘시스턴시 곡선에서 FA를 20%이상 치환한 경우 초기 값이 그림 5-(b)에서 나타난 결과와 다른 특성을 나타냈는데, 이는 분체량 증가에 따라 점성이 커지면서 초기 항복치가 감소한 것에 기인한 결과로 사료된다. 전체적으로 FA의 치환율이 증가할수록 그림 7-(b) 및 8-(b)의 일반 및 고유동 범위에서 콘시스턴시 곡선의 경향은 플로우 시험기에서 나타난 유동성 경향과 동일한 것으로 나타났다.

한편, 그림 9는 BS의 치환율별 유동성 측정 시험기 변화에 따른 일반 범위의 플로우와 콘시스턴시 곡선을 나타낸 것이고, 그림 10은 고유동 범위의 시험결과를 나타낸 것이다.

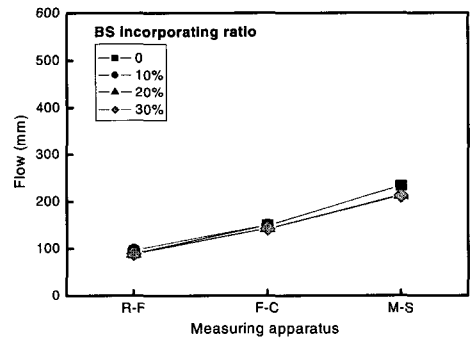


(a) 플로우

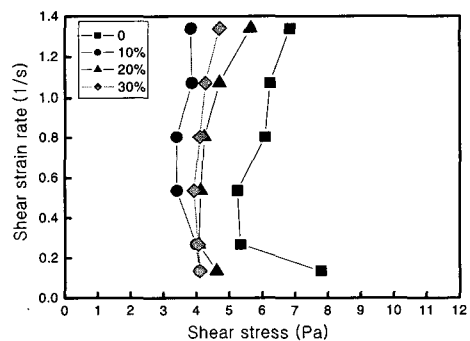


(b) 콘시스턴시 곡선

그림 8. FA 치환율별 시험기 변화에 따른 플로우 및 콘시스턴시 곡선 (W/B 30%)

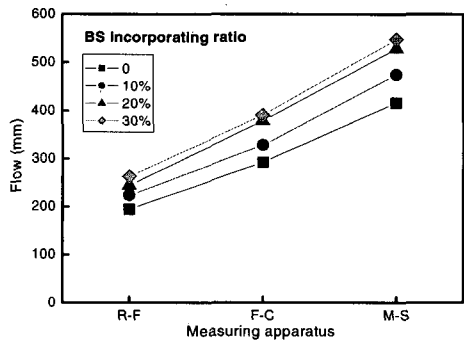


(a) 플로우

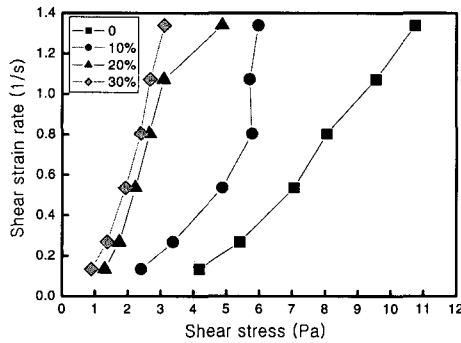


(b) 콘시스턴시 곡선

그림 9. BS 치환율별 시험기 변화에 따른 플로우 및 콘시스턴시 곡선 (W/B 40%)

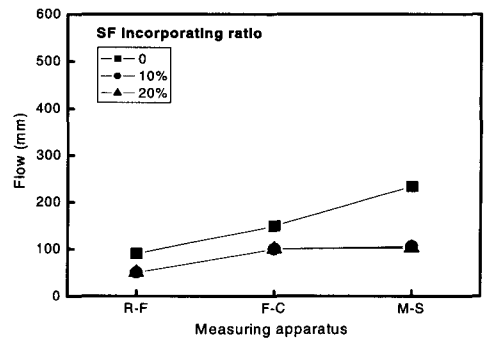


(a) 플로우

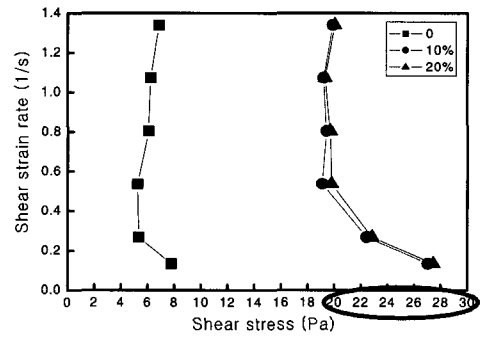


(b) 콘시스턴시 곡선

그림 10. BS 치환율별 시험기 변화에 따른 플로우 및 콘시스턴시 곡선 (W/B 30%)



(a) 플로우



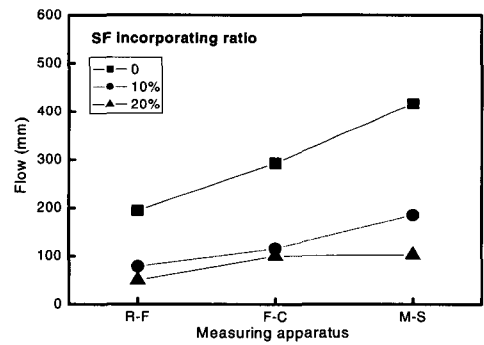
(b) 콘시스턴시 곡선

그림 11. SF 치환율별 시험기 변화에 따른 플로우 및 콘시스턴시 곡선 (W/B 40%)

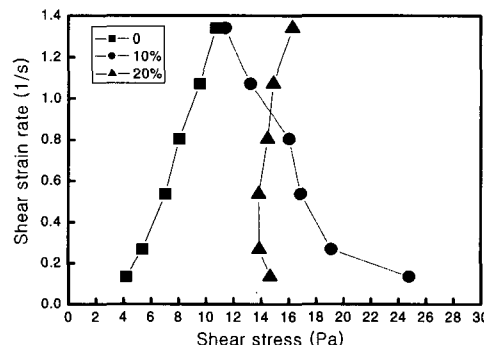
그림 9-(a) 및 10-(a)의 플로우 시험기에 의한 유동성평가에서 BS를 치환한 시멘트페이스트는 FA를 치환한 경우와 비슷한 경향으로 나타났다. 일반 시멘트페이스트의 범위에서 유동성은 치환율이 증가할수록 동일하거나 약간 감소하는 경향을 보였고, 고유동 범위에서는 점차 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 유동특성은 R-F, F-C, M-S 시험기에서 동일하게 나타났다. 한편, 콘시스턴시 곡선의 특징으로 그림 9-(b)의 일반범위에서는 초기 전단응력이 다소 불안정한 것으로 나타난 반면, 그림 10-(b)의 고유동 범위에서는 치환율 증가에 따라 항복치가 작아지는 정상적인 경향으로 나타났는데, 플로우 시험기에 의한 유동성 평가실험 결과와 같이 BS 치환율 30%에서 가장 작은 항복치를 기록하였다.

그림 11, 12는 SF의 치환율별 유동성 측정 시험기 변화에 따른 일반 및 고유동 범위의 플로우와 콘시스턴시 곡선을 나타낸 것이다.

SF를 치환한 시멘트페이스트는 치환율 증가에 따라 현저하게 작은 플로우치와 레올로지 정수 값을 나타내었다. 즉, 그림 11, 12와 같이 일반범위 및 고유동 범위에서 단 10%의 치환으로 시멘트페이스트의 유동성은 급격히 감소하여 더 이상의 플로우 측정이 불가능하였다. 이러한 결과는 회전점도계에서도 동일하게 나타났는데, 그림 11-(b) 일반 플로우범위의 콘시스턴시 곡선에서 소량의 SF 치환에 따라서도 항복치가 급격히 증가하였고, 그림 11-(b)의 고유동 범위의 경우도 이와 같은 결과 및 비슷한 이유에서 불안정한 값을 나타내었다. 이는 점성이 높은 된비빔 시료의 회전점도 측정시 스펀들이 시료 안에서 미끄러지면서 비 항복영역이 발생했기 때문으로 분석된다.



(a) 플로우



(b) 콘시스턴시 곡선

그림 12. SF 치환율별 시험기 변화에 따른 플로우 및 콘시스턴시 곡선 (W/B 30%)

### 3.3 화학 혼화제 회사별 시멘트페이스트의 유동특성

그림 13은 화학 혼화제 회사별 유동성 측정 시험기 변화에 따른 플로우 및 콘시스턴시 곡선을 나타낸 것이다.

먼저, 그림 13-(a)의 각종 시험기와 플로우와의 관계는 R-F를 이용하여 측정할 경우, F-C 및 M-S를 이용하여 측정할 것과 동일한 결과로 나타났는데, D사 제품의 폴리칼본산계 고성능 감수제를 혼입한 시멘트 페이스트의 유동성이 가장 큰 것으로 나타났고, 다음으로 C, B, A순으로 크게 나타났다. 또한, 그림 13-(b)의 콘시스턴시 곡선은 그림 13-(a)의 플로우 측정 결과와 동일한 경향을 나타내었는데, D사 혼화제를 혼입한 시멘트 페이스트의 항복치가 가장 작게 나타났고, A사의 혼화제를 혼입한 페이스트의 항복치가 가장 큰 것으로 나타났다.

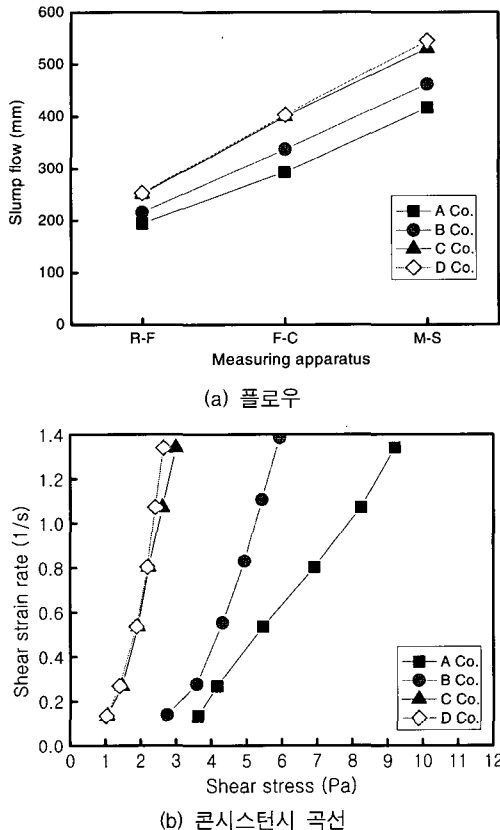


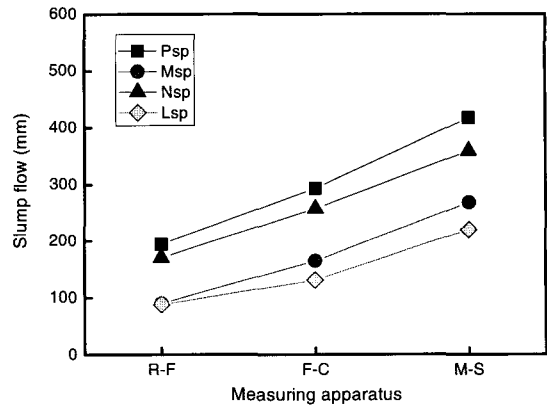
그림 13. 화학 혼화제 회사별 시험기 변화에 따른 플로우 및 콘시스턴시 곡선

### 3.4 화학 혼화제 성분별 시멘트페이스트의 유동특성

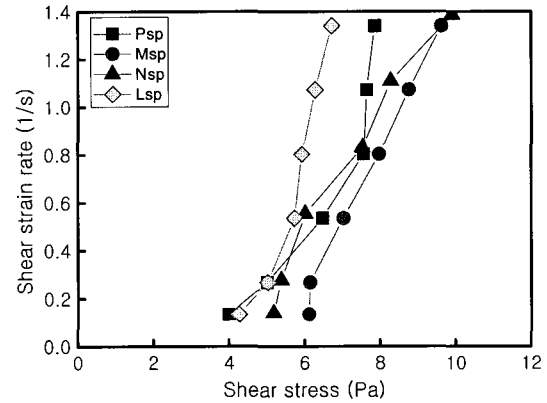
그림 14는 화학 혼화제 성분별 측정장비에 따른 플로우 및 콘시스턴시 곡선을 나타낸 것이다.

그림 14-(a)의 혼화제 성분별 플로우 측정결과는 기대했던 대로 각 시험기에서 모두 폴리칼본산계가 가장 높은 플로우치를 나타내었고, 다음으로 나프탈렌계, 멜라민 계, 리그닌계 순으로 나타났다. 한편, 플로우 시험기의 체적이 증가할수록 각 성분별로 플로우 값의 증가폭은 약간씩 커지는 경향을 나타내었는데, 이는 시험기 체적의 차이에 따른 변형량의 증가에 의한 것으로 사료된다. 또한, 그림 4-(b)와 같이 리그닌계의 경우 플로우치가 작음에도 불구하고 항복치가 가장 작은 것으로 나타나 다소 상이한 데이터 결과를 기록하였는데, 이는 리그닌을 치환한 시멘트 페이스트의 경우 비교적 플로우가 작고, SF를 치환한 경우와 달리 점성이 비교적 작은 된비밀 시료로써 회전 점도계의 측정시 회전 스펀들이 시료 안에서 미끄러지면서 응

력이 작은 범위에서 비 항복영역이 발생했기 때문인 것으로 사료된다.



(a) 플로우



(b) 콘시스턴시 곡선

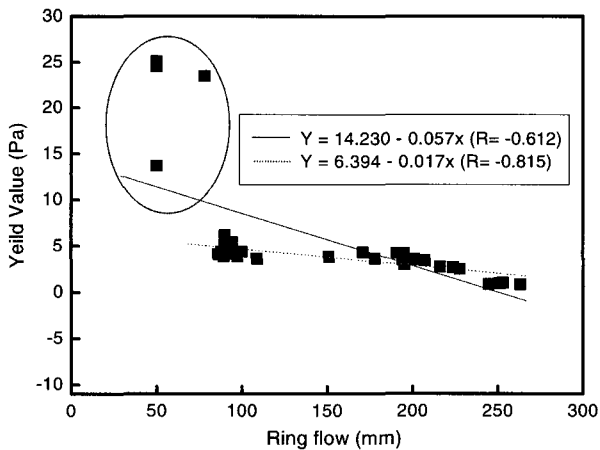
그림 14. 화학 혼화제 성분별 시험기 변화에 따른 플로우 및 콘시스턴시 곡선

### 3.5 R-F 시험기와 레올로지 정수와의 관계

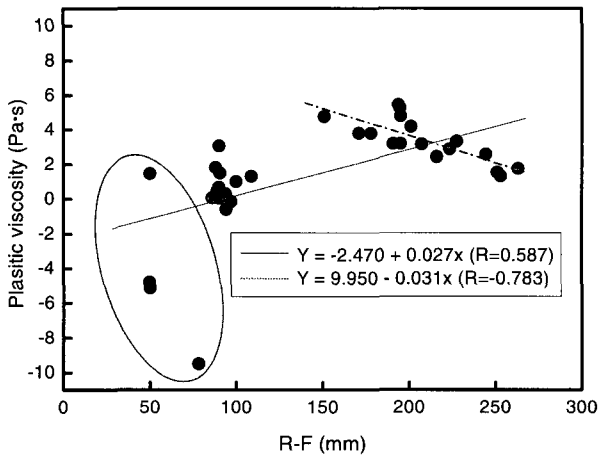
그림 15는 회전점도계에 의해 얻어진 데이터를 빙엄모델로 근사시킬 경우 얻어지는 레올로지 정수와 R-F에 의해 측정된 유동성과의 관계를 나타낸 것이다.

그림 15-(a)의 R-F에 의해 측정된 유동성과 항복치의 관계는 비교적 작은 음의 상관관계( $R=-0.612$ )를 나타내고 있다. 그러나 이는 전술한 바와 같이 SF를 치환한 페이스트의 경우 시료계면과 스펀들 사이의 미끄러짐에 의한 오차일 확률이 크기 때문에 이를 제외할 경우, 플로우가 증가할수록 항복치는 작아지는 경향으로 그림에서 점선으로 표시한 바와 같이 상관계수  $R$ 은 약  $-0.815$ 의 양호한 음의 상관관계로 분석된다.

또한, 그림 15-(b)의 R-F와 소성점도와의 상관관계는 전체적으로  $0.587$ 로 양의 상관관계를 나타내고 있으나, R-F에 의해 측정된 플로우치가  $80\text{mm}$ 이하에서는 전술한 바와 같이 레올로지 정수 측정시 시료의 계면과 스펀들 사이의 미끄러짐에 의한 오차일 확률이 크고, 고유동 범위에서는 음의 상관관계( $R=-0.783$ )를 나타내어 유동범위에 따라 다소 상이한 결과를 확인할 수 있었다. 이상과 같이 회전점도계를 이용한 시멘트 페이스트의 레올로지 정수 측정시 플로우 값이 매우 낮은 유동 범위에서는 측정오류가 발생하는 것으로 나타났다.



(a) 항복치



(b) 소성점도

그림 15. R-F의 시험결과와 레올로지 정수와의 관계

### 3.6 유동성 측정 시험기 간의 상관관계

그림 16은 유동성 측정 시험기 간에 따른 플로우치 시험결과를 R-F와 F-C 및 M-S의 상관관계로 회귀분석하여 나타낸 것이다.

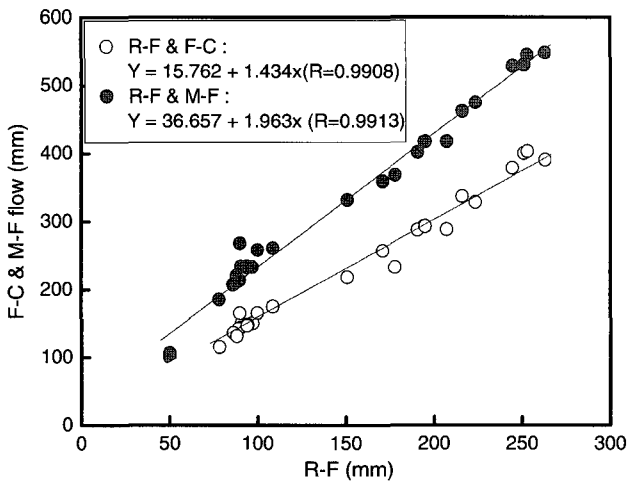


그림 16. R-F와 F-C 및 M-S시험과의 상관관계

R-F와 F-C의 경우 상관계수 R은 0.991을 나타내었고, R-F와 M-S의 경우는 0.992로 유동성 측정 시험기 간의 높은 상관성을 알 수 있었다. 이는 각각의 시험기를 이용하여 시멘트 페이스트의 유동성을 측정함에 있어 시험 도구간의 높은 신뢰감을 형성할 수 있음이 분석된다.

결국, 시멘트 페이스트의 유동특성을 양호하게 평가하고, 아울러 용량이 작아 간편하게 시험할 수 있는 가장 효율적인 시멘트 페이스트의 유동성 평가방법으로는 링플로우(R-F)가 바람직한 것으로 분석된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 시멘트페이스트의 레올로지 특성에 영향을 미치는 다양한 혼합변수의 영향과 유동특성 시험기 간의 상관관계에 대하여 검토하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 시멘트 제조사 변화 및 FA, BS, SF 등 광물질 혼화제 치환율 등 분체 변수에 따른 유동특성에서 R-F, F-C, M-S 시험기 간에는 용량 차에 기인한 변화 외에는 거의 차이가 없었지만, 회전점도계인 경우는 된플죽 조건에서 불안정한 레올로지 값을 나타내었는데, 특히 SF의 경우 치환율 10%이상일 때 점성증대에 기인하여 그 경향이 크게 발생하였다.
- 2) 화학 혼화제의 제조사 및 종류변수에 따른 유동특성 변화에서 R-F, F-C, M-S 시험기 간에는 역시 분체변수와 마찬가지로 거의 차이가 없었지만, 회전점도계인 경우 화학혼화제 성분에서 일반적인 경우와 상이한 경향이었는데, 특히, 리그네제의 경우 유동성이 가장 작아 플로우치가 작았음에도 불구하고, 항복치와 소성점도가 작은 특이한 유동특성이 발견되었다.
- 3) R-F치와 레올로지 정수와의 관계에서는 먼저, 80mm이하 작은 플로우값의 영역일 때에는 항복치 및 소성점도에 편차가 크게 발생하므로 이 부분을 제외하면 항복치에는 반비례관계, 소성점도에는 정비례관계를 형성하는데, 단 고 유동 범위에서는 소성점도의 경우 반비례 경향으로도 나타나고 있어 상관성이 작아지는 가운데 복잡한 양상을 나타내고 있다.
- 4) R-F, F-C, M-S의 플로우치 간에는 상관계수 0.99이상의 양호한 상관성을 나타내고 있다. 따라서 시멘트 페이스트의 유동성을 양호하게 평가하고, 아울러 용량이 작아 간편하게 시험할 수 있는 가장 효율적인 유동성 평가 방법으로는 R-F(링플로우)인 것으로 분석된다.

## 참 고 문 헌

1. Adrino Papo, Luciano Piani ; Effect of various superplast- icizers on the rheological properties of portland cement pastes, *Cement and Concrete Research* 34, 2004, pp.2097~2101
2. Chiara F. Ferraris, Karthik H, Russell Hill ; The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete, *Cement and Concrete Reaserch* 31, 2001, pp.245~255
3. M. Nehdi, S. Mindess, P.-C. Aïtcin ; Rheology of high-performance concrete : effect of ultrafine particles, *Cement and Concrete Research* 28, 1998, pp.687~697
- 4.李建哲 ; せん断ひずみ依存性を考慮したフレッシュコンクリートのレオロジー性質に関する研究, 名古屋大学博士学位論文, 2005
5. 森 博嗣, 谷川 恭雄 ; Fresh 콘크리트의 유동해석기술의 현황, 한국콘크리트학회지, 제 7권 5호, 1995. 10, pp.23~32
6. 우영제, 최성우, 한장현, 이정율, 반성수, 김무한 ; 시멘트페이스트의 유동성상에 영향을 미치는 시멘트 및 고성능AE감수제 효과에 관한 연구, 대한건축학회학술논문집, 제19권 제1호, 1999, pp.345~348
7. 박춘근, 노명현, 김학연, 이종필, 박대효 ; 광물혼화재의 종류별 함량에 따른 시멘트 페이스트의 유동 특성에 관한 연구, 콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제15권 1호, 2003. 5, pp.107~113
8. 최영준, 김재훈, 지남용, 김화중 ; 플라이애쉬 및 고로슬래그를 사용한 시멘트페이스트의 레올로지 특성에 관한 연구, 대한건축학회 논문집, 구조계, 14권 6호, 1998. 6, pp.105~115
9. 정연식 ; 시멘트 콘크리트의 충전 특성과 Rheology, 콘크리트학회지, 9권 2호, 1997. 4, pp.55~61
10. 윤상대 ; 고유동콘크리트의 메커니즘을 중심으로한 현상과 전망, 콘크리트학회지, 제7권 5호, 1995. 10, pp.90~100