

시멘트 페이스트의 레올로지 특성에 미치는 혼화재 변수의 영향

Mineral Admixture Factors Affecting Rheological Properties of Cement Paste

○허영선* 황인성** 신현섭* 윤섭* 이건철*** 한천구****
Heo, Young-Sun Hawng, Yin-Sung Shin, Hyun-Sup Yoon, Seob Lee, Gun-Cheol Han, Cheon-Goo

Abstract

Cement paste is originally the basic material and crucial factor consisting concrete. This study investigates the relationship between flow apparatuses, which are ring flow(R-F), flow cone(F-C) and mini slump(M-S), in order to estimate the fluidity of cement paste. For quantitatively evaluating the measured data, this study also investigated the calibration of the rheology consistent, such as yield value and plastic viscosity, of cement paste using viscometer. For this purpose, the present work discussed the influence of 3 type of ordinary portland cement with different companies, affecting the fluidity of cement paste, and it also demonstrated the influence of the various kinds of mineral admixtures, such as fly ash(FA), blast furnace slag(BS) and silica fume(SF) and that of incorporating ratio. The author concluded that using R-F apparatus is the most effective flow test method of cement paste and it is exactly proportional to other apparatus' rheological properties.

키워드 : 시멘트 페이스트, 레올로지 특성, 회전점도계, 항복치, 소성점도

Keywords : Cement paste, Rheological Properties, Viscometer, Yield value, Plastic Viscosity

1. 서론

과거 기술 축적에 의해 경험적으로 판단되고 이용되던 기술의 흐름이 오늘날에 와서는 점점 한계에 부딪치고 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하고 좀 더 발전적이며 건설적이고 능률적인 기술의 성장을 위해서는 기초적 이론에 근거한 정량화의 노력이 절실히 필요하게 된다.

특히 콘크리트의 경우는 액체와 고체로 이루어져 있는 혼합물로써 미립자에서 굵은골재까지 넓은 입도분포를 갖는 다성분계로 이루어진 하나의 복합체이다. 이렇게 구성되어 있는 콘크리트는 구성재료와 타설방법, 혼화재의 종류, 믹싱 시간, 믹서기 종류, 혼화재의 첨가비율, 온도 등에 기인한 매우 복잡한 유동특성(Rheology properties)을 갖게 되는데, 이를 규명하기 위한 노력으로는 시멘트 페이스트의 레올로지 특성을 정밀하게 분석하여 궁극적으로 굳지않은 콘크리트의 유동성을 모델화 할 수 있는 기초적 판단 기준을 확립하는 것이다.

현재 다수의 국내 레미콘 회사에서는 굳지않은 시멘트 페이스트의 유동성을 간단하고 손쉽게 평가하기 위한 방법으로 링플로우를 사용하고 있는데, 이는 우리나라 규정에 없는 실험방법으로서 이에 대한 보다 정량적인 근거자료가 요구 되고 있다.

* 청주대학교 대학원 석사과정, 정회원

** 아세아시멘트(주) 연구개발팀 연구원, 공학박사, 정회원

*** 청주대학교 산업과학연구소 전임연구원, 공학박사, 정회원

**** 청주대학교 건축공학부 교수, 공학박사, 정회원

따라서 본 연구에서는 굳지않은 시멘트 페이스트의 유동성을 평가하기 위한 방법으로 링플로우(이하 R-F)와 플로우콘(이하 F-C) 및 미니슬럼프(이하 M-S) 등의 측정 장비를 비교하여, 시험기 간의 상호관계에 대한 검토를 실시하였는데, 본고에서는 이러한 플로우 측정장비를 이용하여 각종 시멘트와 혼화재 변수가 시멘트페이스트의 레올로지 성상에 미치는 영향을 분석하고, 아울러 회전점도계를 이용하여 측정된 데이터를 정량화함으로써, 효율적이고 신뢰할 수 있는 시멘트페이스트의 유동성 평가방안을 제시하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 표 1과 같다. 즉, W/C(W/B)는 30%와 40% 2수준으로 하였는데, W/C(W/B) 30%의 경우는 목표 슬럼프플로우가 $300 \pm 20\text{mm}$ 인 고유동 범위 시료를 만들기 위해 고성능감수제를 시멘트와 혼화재 질량비에 대해 0.85% 첨가하는 것으로 하였고, W/C(W/B) 40%의 경우 목표 슬럼프플로우가 $150 \pm 20\text{mm}$ 를 만족하는 일반유동의 시멘트페이스트로 제작하였는데, 이때, 목표 슬럼프플로우를 만족시키기 위해 고성능감수제는 사용하지 않는 것으로 하였다.

실험변수로 시멘트 회사별 A, B, C사의 3수준으로 하였고,

혼화재는 플라이애쉬(이하 FA), 고로슬래그 미분말 (이하 BS) 및 실리카흄(이하 SF)을 이용하였는데, FA 및 BS의 경우는 각각 시멘트 질량비에 대해 10, 20, 30% 치 환 사용하는 것으로 하였고, SF의 경우는 10, 20% 2개 수준에 대해 검토하는 것으로 하였으며, 균지않은 시멘트 페이스트의 실험사항은 표 1에 명시된 내용과 같다.

* A사를 플레인으로 잡고 혼화재 종류 및 치환에 따른 레올로지 특성 분석

* R-F : 링플로우, F-C : 플로우콘, M-S : 미니슬럼프

표 1. 실험계획

실험 요인					실험 사항	
W/C (W/B)	목표 슬럼프 플로우 (mm)	고성능 감수제 혼입률 (%)	시멘트 종류	혼화재		균지않은 시멘트 페이스트
				종류	치환율 (%)	
30	300±20	0.85	A사* (플레인)	FA	0	· R-F · F-C · M-S · L-F · 회전 점도계(레올로지 정수)
					10	
					20	
				BS	0	
					10	
					20	
40	150±20	0	B사 C사	SF	0	
					10	
					20	

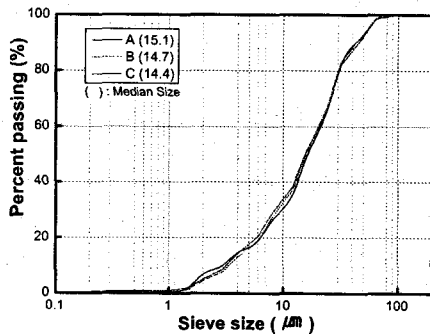


그림 1. 시멘트 회사별 입도분포

표 2. 혼화재의 물리적 성질

구분	주성분	색상	형태	밀도(g/cm³)
고성능감수제	폴리칼본산계	연황색	액상	1.14

표 3. 시멘트의 화학적 성분 및 분말도

시료명	화 학 성 분 (%)									Topas 주요광물조성 (%)				분말도 Blaine(cm²/g)
	LOI	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	SO₃	K₂O	Na₂O	C₃S	C₂S	C₃A	C₄AF	
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
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
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

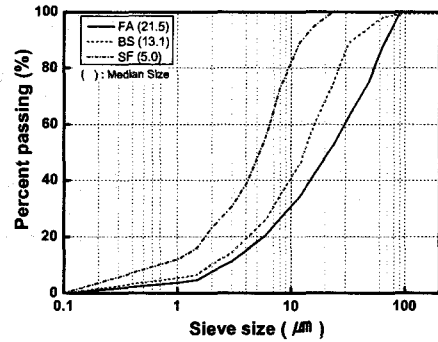


그림 2. 혼화재 종류별 입도분포

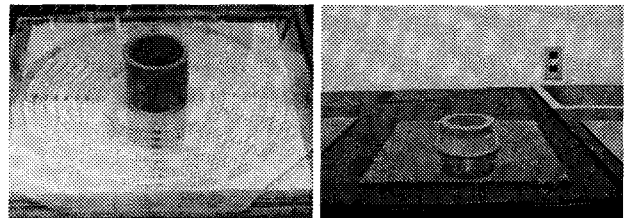
2.2 사용재료

본 실험에 사용한 시멘트는 국내산 A, B, C사의 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였고, 고성능감수제는 H사의 폴리칼본산계를 사용하였으며, 혼화재료로 FA, BS, SF은 모두 국내에서 유통되는 제품을 사용하였는데 각 사용재료의 화학적, 물리적 성질은 그림 1~2 및 표 2~3과 같다.

2.3 실험방법

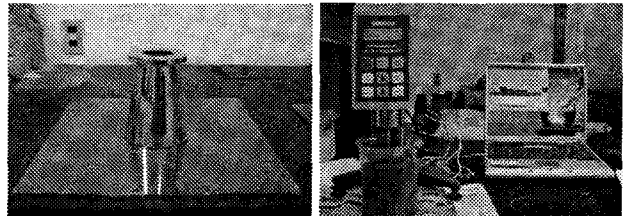
실험방법으로 시멘트페이스트의 혼합은 모르타 믹서를 이용하였고, 혼합방법은 잔골재의 혼합을 제외한 ASTM C305에 의거하여 모든 배합에 대하여 동일하게 실시하였다.

또한, 균지않은 시멘트 페이스트의 유동성 실험은 링플로우의 경우 JASS 15M-103, 미니플로우는 KS F 2474에 의거 실시하였고, 플로우테이블은 KS L 5111의 규준에 맞는 시험기를 이용하여 낙하를 가하지 않은 상태에서 측정하였으며, 회전 점



(a) 링플로우

(b) 플로우콘



(c) 미니슬럼프

(d) 회전점도계

그림 3. 각종 플로우 및 점도 측정장비

도계(Brookfield DV-11)에 의한 레올로지 정수의 측정은 JIS K 6901 규정에 의거하여 실시하였는데, 각 플로우 및 회전점도계 측정 모습은 그림 3과 같다

3. 실험결과 및 분석

3.1 시멘트 회사별 시멘트페이스트의 유동특성

그림 4~5는 시멘트 회사별 측정장비에 따른 유동성 평가 및 콘시스턴시 곡선을 나타낸 것이다.

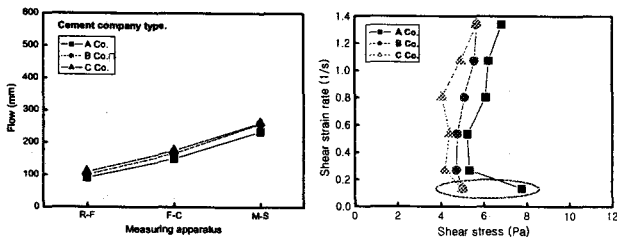


그림 4. 시멘트 회사별 측정장비에 따른 슬럼프플로우 및 콘시스턴시 곡선 (일반 시멘트 페이스트 범위)

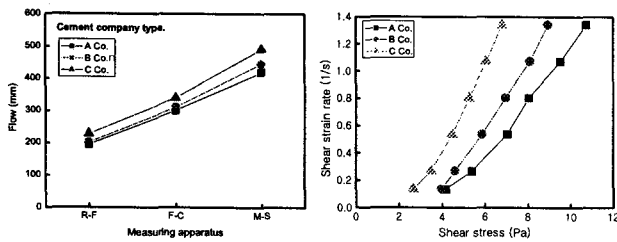


그림 5. 시멘트 회사별 측정장비에 따른 슬럼프플로우 및 콘시스턴시 곡선 (고유동 시멘트 페이스트 범위)

각종 플로우 실험기와 슬럼프플로우와의 관계는 R-F를 이용하여 측정한 경우 F-C 및 M-S를 이용하여 측정한 것과 동일한 순으로 나타났는데 일반 범위 및 고유동 범위에서 모두 C사의 시멘트의 유동성이 약간 큰 것으로 나타났고 다음으로 B, C 순으로 나타났다. 한편, 시멘트 회사에 따른 일반범위와 고유동 범위의 콘시스턴시는 각종 시험기에 의한 측정결과와 동일한 경향으로 나타났는데, 시험기에 의한 측정에서 유동성이 가장 컸던 C사의 항복치가 가장 작게 나타났고, A사 시멘트의 항복치가 가장 큰 것으로 나타났다. 또한 고유동과 달리 일반범위 시멘트페이스트의 경우 초기 측정값이 불안정하게 나타났는데, 이는 고농도 서스펜션의 고유한 특성으로 점성이 작은 고농도 서스펜션의 경우 전단변형시 간극수압의 이동으로 전단을 시작하는 범위에서는 순간 전단응력이 증가하게 되는데 이와같은 메카니즘에 의한 것으로 판단된다.

3.2 혼화재 종류별 치환율에 따른 시멘트페이스트의 유동특성

그림 6~11은 각종 측정 장비를 이용한 혼화재 종류별 치환율에 따른 시멘트페이스트의 유동성 평가 및 콘시스턴시 곡선을 나타낸 것이다.

먼저 그림 6~7과 같이 FA를 치환한 시멘트페이스트의 경우 일반유동 범위에서는 치환율이 증가 할수록 유동성이 저하하는 반면, 고유동 범위에서는 치환율이 작은 범위에서는 플로우가 감소하다가 치환율이 증가 할수록 점점 증가하는 경향으로 나타났는데, 이러한 유동특성은 모든 플로우 시험기에서 동일하게 나타났다. 또한, 콘시스턴시 곡선에서 FA 20%이상 치환한 일반 시멘트페이스트 범위의 경우 초기 값이 그림 4에서 설명한 내용과 다른 경향을 나타냈는데 이는 분체량 증가에 따른 점성이 커지면서 초기 항복치가 감소한 것에 기인한 결과로 사료된다.

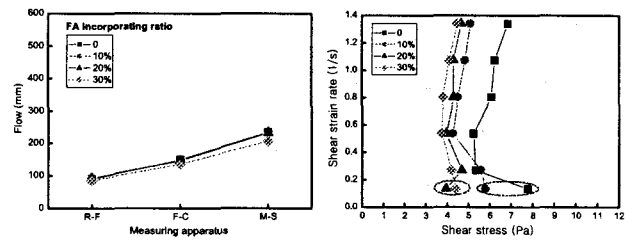


그림 6. FA 치환율별 측정장비에 따른 슬럼프플로우 및 콘시스턴시 곡선 (일반 시멘트 페이스트 범위)

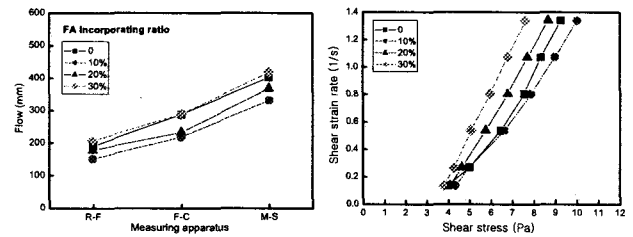


그림 7. FA 치환율별 측정장비에 따른 슬럼프플로우 및 콘시스턴시 곡선 (고유동 시멘트 페이스트 범위)

한편, 그림 8~9와 같이 BS를 치환한 시멘트페이스트는 FA를 치환한 경우와 비슷한 경향으로 나타났는데, 일반 시멘트페이스트의 범위에서의 유동성은 치환율이 증가할수록 동일하거나 약간 감소하는 것으로 나타났고, 고유동 범위에서는 점차 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 유동특성은 R-F, F-C, M-S 시험기에서 모두 동일한 경향을 기록하였다. 콘시스턴시 곡선의 특징으로는 그림8의 일반범위에서는 초기 전단응력이 다소 불안정한 것으로 나타난 반면, 그림 9의 고유동 범위에서는 치환율 증가에 따라 항복치가 작아지는 정상적인 경향으로 나타났는데, 유동특성 실험 결과와 같이 BS 치환율 30%에서 가장 작은 항복치를 기록하였다.

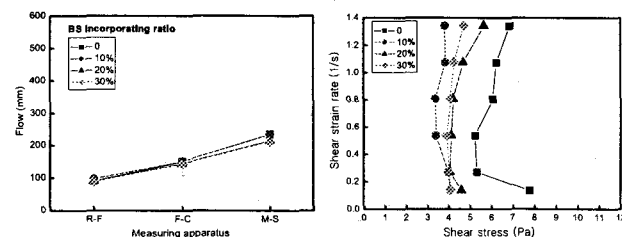


그림 8. BS 치환율별 측정장비에 따른 슬럼프플로우 및 콘시스턴시 곡선 (일반 시멘트 페이스트 범위)

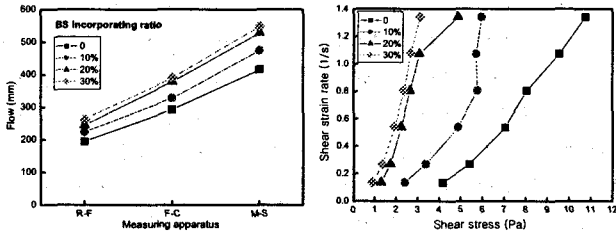


그림 9. BS 치환율별 측정장비에 따른 슬럼프플로우 및 콘시스턴시 곡선 (고유동 시멘트 페이스트 범위)

SF를 치환한 시멘트페이스트는 치환율의 증가에 따라 현저한 플로우치와 레올로지 정수 값을 나타냈는데, 그림 10-11과 같이 일반범위 및 고유동 범위에서 단 10%의 치환으로 시멘트 페이스트의 유동성은 급격히 감소하여 더 이상 측정이 불가능하였고, 이러한 결과는 슬럼프 측정장비에 따라서도 모두 동일하게 나타났다. 그림 10의 일반범위의 콘시스턴시 곡선에서 SF 치환에 따라 항복치가 급격히 증가하였고, 그림 11의 고유동 범위의 경우도 비슷한 이유에서 불안정한 값을 나타내었는데 이는 된비법 시료의 회전점도 측정시 스펀들이 시료 안에서 미끄러지면서 비 항복영역이 발생했기 때문으로 사료된다.

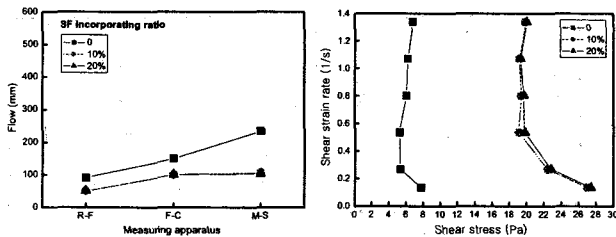


그림 10. SF 치환율별 측정장비에 따른 슬럼프플로우 및 콘시스턴시 곡선 (일반 시멘트 페이스트 범위)

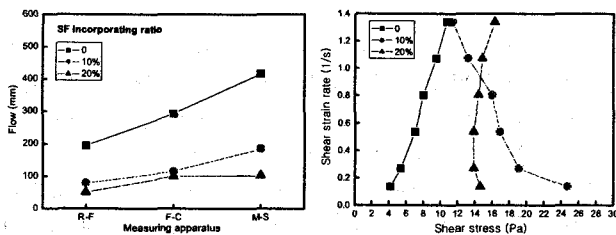
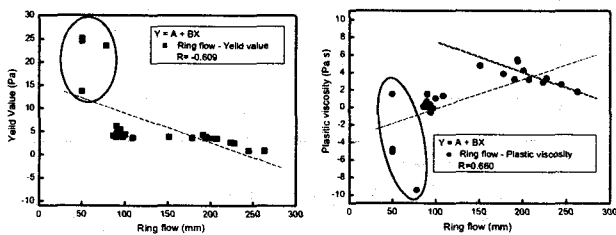


그림 11. SF 치환율별 측정장비에 따른 슬럼프플로우 및 콘시스턴시 곡선 (고유동 시멘트 페이스트 범위)

3.3 플로우 시험기와 레올로지 정수와의 관계

그림 12는 회전점도계에 의해 얻어진 데이터를 빙엄모델로 근사시킬 경우 얻어지는 레올로지 정수와 R-F에 의해 측정된 유동성과의 관계를 나타낸 것이다.



(a) 항복치 (b) 소성점도
그림 12. Ring flow 시험과 레올로지 정수와의 관계

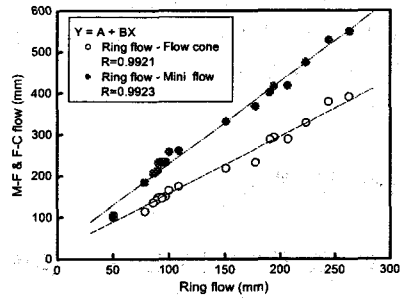


그림 13. R-F와 F-C 및 M-S시험과의 상관관계

그림 12-(a)의 R-F값과 항복치의 관계는 비교적 작은 음의 상관관계(R:-0.609)를 나타내고 있다. 이는 전술한 바와 같이 SF를 치환한 페이스트의 경우 시료계면과 스펀들 사이의 미끄러짐에 의한 오차일 확률이 크기 때문에 이를 제외할 경우 상관관계수가 상당히 증가할 것으로 분석된다. 또한, 그림 12-(b)의 R-F와 소성점도와의 상관관계는 전체적으로 0.660으로 양의 상관관계를 나타내고 있으나, 고유동 범위에서는 음의 상관관계를 기록하였고 일반범위에서는 양의 상관관계를 나타내어 이를 고려할 경우 R-F와 소성점도 값은 높은 신뢰구간을 형성할 것으로 분석된다. 반면, 본 실험에서 사용한 혼화재 변수로 SF의 경우는 소량의 사용만으로 시멘트페이스트의 유동특성과 레올로지 정수에 미치는 영향이 매우 이례적인 것으로 나타났는데, 그에 따른 메카니즘 분석은 향후 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

그림 13은 유동성 평가시험 결과 플로우 시험기간의 상관관계를 회귀분석하여 나타낸 것이다.

먼저, R-F와 F-C의 경우 상관관계수 R은 0.9921을 기록하였고 M-S는 0.9923으로서, 슬럼프 시험기 간의 상호관계는 매우 높은 신뢰구간을 형성하는 것으로 나타났다. 종합적으로, 이러한 결과를 토대로 향후 R-F를 이용한 시멘트페이스트의 유동성 평가 방법에 높은 신뢰성을 부여 할 수 있을 것으로 분석된다.

4. 결론

본 연구는 각종 플로우 측정 장비 및 회전점도계를 이용하여 시멘트페이스트의 레올로지 특성을 유동성 평가와 이에 따른 영향요인으로써 시멘트 회사별, 혼화재 종류별 및 치환율을 검토하였는데, 그 실험결과는 다음과 같다.

4.1 시멘트 회사별로 유동특성을 검토한 결과 모든

플로우 측

- 1) 시멘트 회사별로 유동특성을 검토한 결과 모든 플로우 측정 장비에서 동일하게 C사가 가장 유동성이 큰 것으로 나타났다, 다음으로 B, A사순으로 나타났다.
- 2) FA, BS, SF 등 혼화재 종류별 치환율에 따른 유동특성 및 콘시스턴시 곡선을 검토한 결과 모든 플로우 시험기에서 동일한 유동성 경향을 기록하였는데, 일부 시료를 제외하면 콘시스턴시 곡선과 유동특성의 상관관계는 매우 높은 것으로 나타났다.

- 3) R-F의 플로우 값과 레올로지 정수를 비교한 결과 항복치 및 소성점도 모두에서 양호한 상관관계를 기록하였다.
- 4) 플로우 시험기간의 상관관계를 분석한 결과 모든 장비에서 0.9이상의 높은 상관관계를 기록하여 향후 플로우 시험 시 측정 장비간의 비교 사용이 가능할 것으로 분석된다.

감사의 글

본 실험에 많은 협조를 해주신 아세아시멘트 제천공장 권오봉 차장님과 차완호 과장님께 깊은 감사를 드립니다.