

메타카올린을 혼합한 시멘트 페이스트의 유동 특성

최해영* · 김영남 · 송종택 전준영
<단국대 신소재공학과> <현대시멘트>

1. 서론

혼합재는 시멘트, 골재, 혼합수 이외의 재료로서 모르타르나 콘크리트의 혼합시 필요에 따라 한 성분으로 첨가된다¹⁾. 시멘트의 혼합재의 대표적인 것으로는 플라이 애쉬, 고로 슬래그, 실리카 폼 등이 있다. 실리카 폼의 경우, 고강도 및 화학적 내구성 등이 우수하여 사용되어지고 있으나, 수입에 의존해야 하는 실정으로 인해 국내에서는 사용시 단가가 높은 문제점이 있다. 이러한 관점에서 실리카 폼의 대체 재료로서 최근 주목받고 있는 혼합재가 메타카올린이다²⁾.

메타카올린은 시멘트의 혼합재로 약 10% 전후를 시멘트에 혼합 사용함으로써 초기강도, 내구성 등 콘크리트의 각종 물성을 현저하게 개선시키는 효과가 있다고 보고되어 지고 있다^{2), 3)}. 그러나, 국내에서는 메타카올린의 혼합재에 대한 연구가 시작된지 얼마되지 않아 국내 카올린 재료를 이용하여 기초 데이터를 정립할 필요가 있다.

본 연구에서는 앞으로 국내에서 사용되는 고가의 실리카 폼을 대체할 가능성이 있는 메타카올린을 사용하여 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)-메타카올린계 페이스트의 유동 특성에 관한 기초데이터를 얻고자 하였다. 또한, OPC-실리카 폼계에 대하여서도 동일한 실험을 하여 비교 검토했다.

2. 실험

2.1 실험 재료 및 조건

본 연구에 사용된 시멘트는 보통 포틀랜드시멘트(이하 OPC)를 사용하였으며, 혼합재로 메타카올린(이하 MK) 및 실리카 폼(이하 SF)을 사용하였다. 본 연구에 사용된 각 재료의 화학성분 및 물리적 성질은 표 1 및 표 2에 나타내었다. 페이스트 제조시 유동성 확보를 위하여 L사의 나프탈렌계 고성능감수제(PNS, 고형분 40%)를 사용하였다.

페이스트의 W/C, 메타카올린의 치환량, 혼화제의 첨가량에 따른 페이스트의 미니슬럼프 및 유동 특성을 파악하기 위하여 본 실험의 조건 및 치환량을 표 3과 같이 결정하였다.

또한, 본 실험에서 사용된 배합을 표 4에 나타내었다.

2.2 미니슬럼프의 측정^{4), 5), 6)}

시멘트 페이스트의 유동 특성을 알아보기 위해 W/C, MK의 치환량, 혼화제의 첨가량에 따른 경시변화를 미니슬럼프로 측정하였다. MK 분체 및 나프탈렌계 고성능감수제등을 첨가하여 2-3-2교반법에 의해 교반을 하였으며 미니슬럼프 콘에 시멘트 페이스트를 채운 다음 1분간 정치한 후, 미니슬럼프 콘을 들어올려 페이스트의 퍼짐이 멈추었을 때 중심을 지나는 대각선 4방향의 평균직경으로 그 결과를 표시하였다. 또한, 페이스트의 교반 직후부터 90분 경과 후까지 30분 간격으로 측정하여 초기 유동성 및 경시변화를 측정하였다. 이를 근거로하여 W/C 및 혼화제의 적정 첨가량

표 1. OPC 및 혼합재의 화학조성

구분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	F/CaO	K ₂ O/ Na ₂ O	LL	LSF	S,M	LM	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
함량 (%)	OPC	21.62	5.20	3.28	62.80	2.39	2.20	1.61	-	1.00	91.27	2.55	1.59	45.38	28.01	8.24	9.97
	MK	56	37	2.4	2.4	0.3	-	-	0.9	-	-	-	-	-	-	-	-
	SF	92	0.3	0.8	0.4	0.3	-	-	1.1	2.0	-	-	-	-	-	-	-

표 2. OPC 및 혼합재의 물리적 특성

구분	블레인 (cm ² /g)	잔사(44µm) (%)	플로값 (%)	응결		압축강도(kg ² /cm ²)		
				초결 (분)	종결 (시:분)	3일	7일	28일
OPC	3,224	9.4	105	5:30	6:40	207	305	372
MK	12,000	-	-	-	-	-	-	-
SF	150,000-300,000	-	-	-	-	-	-	-

표 3. 실험 변수

인자	변수
W/C	0.4, 0.45, 0.5
혼합재	MK, SF
혼합재의 치환량	5, 10, 15, 20 (%)
PNS의 첨가량	0.5, 0.7, 1.0 (%)

표 4. 페이스트 배합

구분	OPC	MK	SF
OPC	100	-	-
MK5	95	5	-
MK10	90	10	-
MK15	85	15	-
MK20	82	20	-
SF10	90	-	10
SF20	80	-	20
PNS	0.7%		
W/C	0.45		

을 유동 특성 실험에 반영하였다.

2.3 유동 특성 실험^{4), 5), 7)}

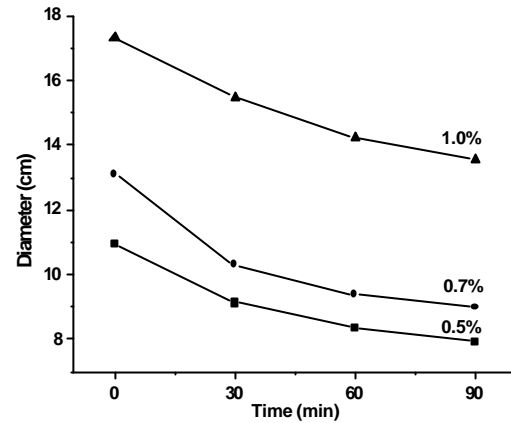
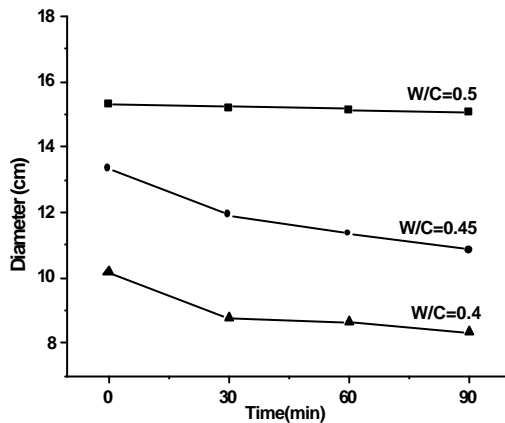
미니슬럼프 실험을 통하여 적정 W/C 및 혼화제 첨가량을 결정하여 유동 특성을 관찰하였다. 시멘트 페이스트는 소정의 분체 및 나프탈렌계 고성능감수제등을 넣고 페이스트를 3분간 혼합하여 제조하였으며, 원통형 용기에 넣고 실온에서 회전속도의 범위를 최소 0rpm에서 최고 150rpm까지로 하여 10rpm 단위로 상승 및 하강시켜 유동 특성을 관찰하였다. 본 실험에 사용된 Viscometer는 Brookfield사의 RVDV II+(USA), spindle SC4-21을 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미니슬럼프

(1) W/C 및 혼화제에 따른 영향

OPC에 W/C비 및 PNS 첨가량 변화에 따른 미니슬럼프 측정결과를 그림 1에 나타내었다. W/C



(a) W/C에 따른 미니슬럼프

(b) 혼화제 첨가량에 따른 미니슬럼프

그림 1. W/C 및 혼화제에 따른 미니슬럼프

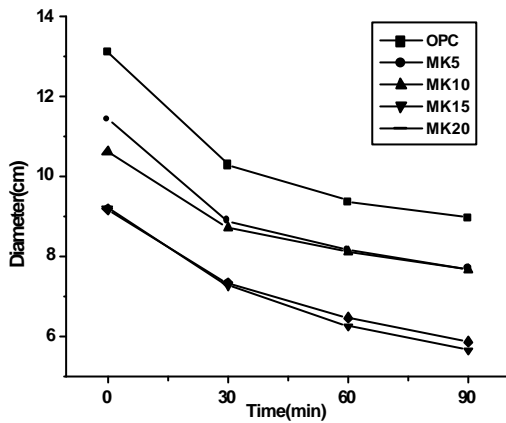
에 대한 미니슬럼프는 0.5>0.45>0.4의 순으로 감소함을 알 수 있었으며, 시간이 경과함에 따라 미니슬럼프 값이 낮아지는 것을 알 수 있었다. 이는 W/C가 증가할수록 미니슬럼프 값이 커지는 것을 나타내었다. W/C 0.5일 경우 재료분리가 발생하였으며, 또한 W/C 0.4일 경우 경시변화는 확인할 수 있었으나 MK를 치환했을 경우 미니슬럼프의 감소를 확인하기에는 매우 작은 값을 나타내었다. 그리고 PNS의 첨가량에 대한 영향은 첨가량이 증가할수록 미니슬럼프 값이 커지는 것을 나타내었다. 1.0% 경우는 0.7% 경우보다 큰 미니슬럼프 값을 가졌으며, 0.5%일때는 작은 값을 나타내었다. 이는 초기 수화 활성과 W/C, 고성능감수제와의 상호 작용과 깊은 관계가 있는 것으로 판단된다.

(2) MK의 치환량에 따른 영향

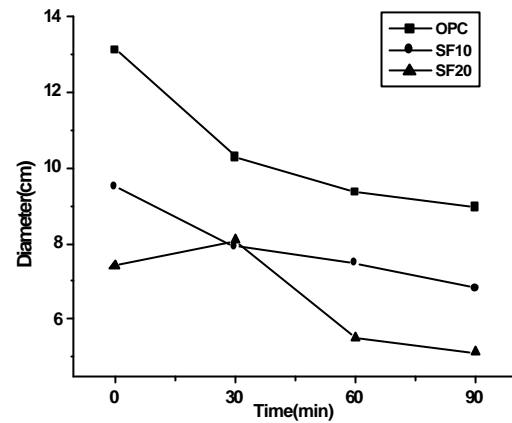
앞절에서 얻어진 실험결과를 통하여 결정한 W/C 0.45 및 PNS 첨가량 0.7%에서의 MK 및 SF 치환량 변화에 따른 미니슬럼프 결과를 그림 2에 나타내었다. 혼합재의 치환량이 증가함에 따라 미니슬럼프 값이 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 분말도가 큰 혼합재가 치환됨에 따른 비표면적이 증대되어 단위수량이 증가하는 현상이 윤활 역할에 의해 유동성을 개선시키는 효과보다 월선 크기 때문이라 알려져 있다⁸⁾. MK에서는 치환율이 각각 5%와 10% 및 15%와 20%일때 미니슬럼프 값이 비슷하게 나타났다. MK와 SF의 같은 치환수준에서의 미니슬럼프는 MK쪽이 더 높은 플로우 값을 갖는 것을 알 수 있었다. SF에서는 MK와 달리 치환량에 따른 미니슬럼프 값의 차이가 매우 컸다. 경시변화를 살펴보면 30분 이후에 유동성이 급격하게 저하되는 것을 확인할 수 있었으며, SF에서는 30분 경과 후 비슷한 미니슬럼프 값을 나타내었다가 다시 감소하는 현상을 확인할 수 있었다.

3. 2 유동 특성

그림 3에서는 미니슬럼프 실험을 통하여 결정한 W/C 0.45 및 PNS 첨가량 0.7%로 MK와 SF의 치환량에 따른 유동 특성을 나타내었다. MK의 경우 5% 치환된 경우부터 dilatancy의 경향이 보였으며, 15% 치환했을 때에는 dilatancy를 뚜렷이 나타냈다. 이는 MK 입자가 각지고 판상인 형태에 의해 입자 결합의 낮은 경향성 때문에 나타난다고 알려져 있다⁸⁾. 미니슬럼프 결과와 비교해 봤을 때 MK는 치환율이 각각 5%와 10%일때 비슷한 경향의 유동 특성을 나타내었으며, 15%와 20

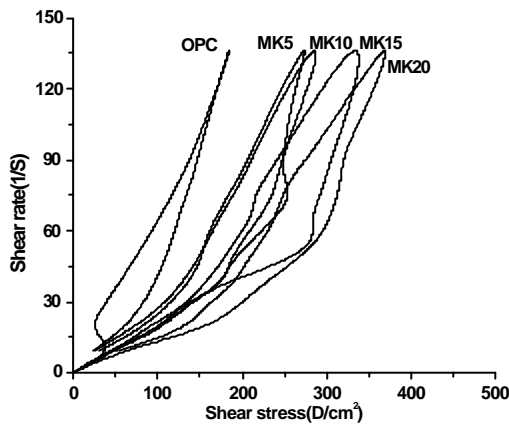


(a) MK 치환량에 따른 미니슬럼프

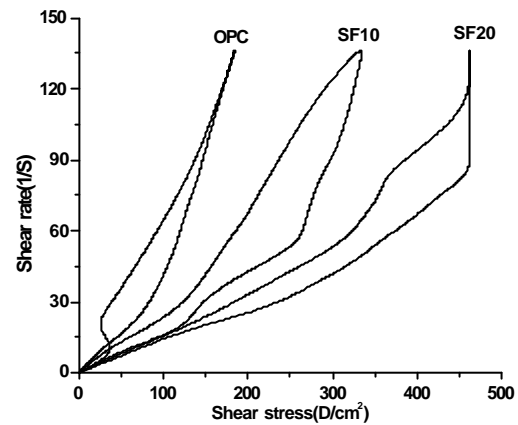


(b) SF 치환량에 따른 미니슬럼프

그림 2. MK 및 SF 치환량에 따른 미니슬럼프



(a) MK 첨가량에 따른 유동 특성



(b) SF 첨가량에 따른 유동 특성

그림 3. 혼합재의 치환량에 따른 유동 특성

%에서는 다소 차이를 나타내었다. MK에서의 히스테리시스 면적은 MK15까지는 다소 증가하나 MK20에서 다시 감소하는 경향이 나타났다.

SF20의 경우 thixotropy를 나타내고 있으며, 치환량이 늘어날수록 유동 특성이 급격히 저하되었으며, 히스테리시스 면적은 약간 감소하였다. MK와 SF의 치환량이 증가함에 따라 유동 특성이 감소하는 것을 나타내었다. MK와 SF의 치환율에 따라 비교해 보면 치환율이 10%일때는 비슷한 유동 특성을 나타내었으나 20%일때는 MK가 더 좋은 유동 특성을 나타내었다.

그림 4에서는 MK가 20% 치환된 경우 W/C에 따른 유동 특성을 나타내었다. W/C가 감소할수록 유

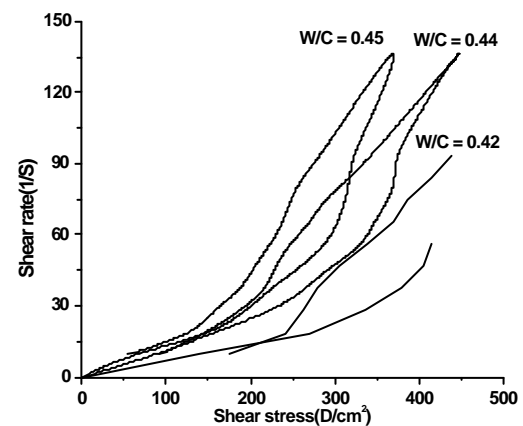


그림 4. W/C에 따른 유동 특성

동 특성이 감소함을 알 수 있었으며, dilatancy가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. W/C 0.42일 경우 사용한 spindle의 측정점도 범위를 벗어나는 높은 shear stress를 나타내었다.

4. 결론

MK를 첨가한 시멘트 페이스트의 유동 특성을 파악하기 위하여 실험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) W/C 및 PNS의 첨가량에 따라 시멘트 페이스트의 미니슬럼프 값에 상당한 차이를 나타내었으며, W/C 및 PNS의 첨가량이 증가할수록 미니슬럼프 값이 크게 나타남을 확인할 수 있었다.
- (2) MK와 SF의 치환량이 증가함에 따라 미니슬럼프 값이 감소하는 것을 알 수 있었으며, MK에서는 치환율이 각각 5%와 10% 및 15%와 20%일때 미니슬럼프 값이 비슷하게 나타났으나, SF에서는 MK와 달리 치환량에 따른 미니슬럼프 값의 차이가 매우 크게 나타남을 볼 수 있었다.
- (3) MK 및 SF의 치환량이 증가함에 따라 유동 특성이 감소하는 것을 나타내었다. MK와 SF의 치환율에 따라 비교해보면 치환율이 10%일때는 비슷한 유동 특성을 나타내었으나 20%일때는 MK가 더 좋은 유동 특성을 나타내었다.
- (4) MK는 5% 치환된 경우부터 dilatancy를 나타내고 있으며, 15% 치환된 경우부터는 dilatancy를 확실히 알 수 있었다. 그러나 SF는 20% 치환된 경우에서 thixotropy를 확인할 수 있었다.

< 참고 문헌 >

1. 양승규 외 5명, "혼합재를 첨가한 시멘트의 레올로지 특성", 콘크리트학회 논문집, 15(1), 271-276, (2003).
2. 김용태 외 4명, "콘크리트 혼화재료로서의 메타카올린의 기초적인 특성 연구", Proceedings of the KCI, 13(2), 281-286, (2001)
3. 안태호 외 3명, "고성능 콘크리트 제조시 메타카올린의 응용가능성", 29회 시멘트 심포지엄, 115-122, (2002).
4. 김재영, "저 분말도 포틀랜드 시멘트 및 고로슬래그 혼합시멘트의 수화특성", 석사학위논문, (1998).
5. 정재현, "석고형태에 따른 Belite-Rich Cement의 초기수화 및 유동특성", 석사학위논문, (2000).
6. 한국공업규격, KS L 5109.
7. 박춘근 외 4명, "광물혼화재의 종류별 함량에 따른 시멘트 페이스트의 유동 특성에 관한 연구", 콘크리트학회 논문집, 15(1), 107-113, (2003).
8. F. Curcio and B.A DeAngelis, "Dilatant Behavior of Superplasticized Cement Paste Containing Metakaolin", Cem. Concr. Res., 28(5), 629-634 (1998).
9. 정연식, "시멘트 콘크리트의 충전 특성과 Rheology", 콘크리트 학회지, 9(2), 55-61 (1997).