

콘크리트 혼화재료로서의 메타카올린의 기초적인 특성 연구

A Fundamental Study of Metakaolin as a Pozzolan Material

김 용 태^{*} 안 태 호^{**} 강 범 구^{***} 이 정 율^{****} 김 병 기^{*****}
Kim, Yong Tae Ahn, Tae Ho Kang, Bum Gu Lee, Jeong Yul Kim, Byung Gi

Abstract

The utilization of metakaolin as a pozzolan material for mortar and concrete has received considerable attention in recent years. This paper estimates the fundamental properties of metakaolin as a pozzolan material in view of fluidity and compressive strength of cement paste and mortar in comparison of silica fume, fly ash and slag. The results show that in order to obtain the same initial fluidity, metakaolin needs higher dosage of PNS superplasticizer than fly ash and slag, however, less dosage than silica fume. In view of compressive strength of mortar, metakaolin exhibits much higher compressive strength than fly ash and slag, and similar compressive strength with silica-fume when 10 % of cement is replaced with a pozzolan material.

1. 서론

최근 고강도 및 고기능성 콘크리트의 수요가 높아짐에 따라 각종 혼화재료의 사용이 활발히 진행되고 있으며, 이러한 고성능 콘크리트에 첨가되어지는 혼화재료로는 플라이애쉬, 슬래그, 실리카폼 등의 포졸란 재료가 있다. 실리카폼의 경우 고강도 및 화학적 내구성 등 우수한 특성이 있어 많이 사용되어지고 있으나, 수입에 의존해야 하는 실정으로 인해 국내에서의 사용시 단가가 높은 문제점이 있다. 이러한 관점에서 실리카폼의 대체재로 최근 부각되고 있는 재료가 메타카올린이다. 메타카올린은 균일한 카올린을 전처리한 후 소성하여 활성화시킨 다음 미분쇄한 것으로, 시멘트 중의 alite의 반응속도를 증가시켜 초기강도를 현저히 증가시키고, 또한 수산화칼슘과의 포졸란 반응으로 증장기 강도 및 내구성을 향상시키는 것으로 보고되고 있다¹⁾²⁾³⁾. 특히, 메타카올린은 실리카폼과는 달리 국내에서 제조하고 있기 때문에 비용 측면에서 장점을 가지고 있다. 따라서 메타카올린은 아직까지 국내에서 활용되어지고 있는 부분이 많지는 않으나 향후 고가의 실리카폼을 대체할 수 있는 가능성이 높은 것으로 보인다. 본 연구에서는 고강도 콘크리트 제조시 메타카올린을 혼화재료로 사용할 경우의 유동성과 압축강도 특성에 대한 기초적인 연구를 수행하고자 하였다.

* 정회원, 경기화학공업(주) 연구개발센터 선임연구원
** 정회원, 경기화학공업(주) 연구개발센터 연구원
*** 정회원, (주)이지콘 콘크리트연구실 과장
**** 정회원, (주)이지콘 콘크리트연구실 연구원
***** 정회원, 경기화학공업(주) 연구개발센터 혼화재료팀 팀장 및 (주) 이지콘 콘크리트 연구실 실장

2. 실험방법

2. 1. 재료

시멘트는 PNS 계열 고성능감수제와 상용성이 우수한 H사 1종 시멘트를 사용하였으며, 모르타르 실험에서 사용되는 모래는 주문진 표준사를 사용하였다. 실험에서 사용한 혼화제는 PNS 계열 고성능감수제인 POWERCON(경기화학, 고흥분 함량 40 - 41 %)이었다. 혼화재료로 사용한 실리카폼은 체코산이었으며, 플라이애쉬, 슬래그, 메타카올린은 국내산을 사용하였다. 아래 그림에서 플라이애쉬는 FA, 슬래그는 SL, 메타카올린은 MK, 실리카폼은 SF로 표기하기로 한다. Table 1에 실험에서 사용한 메타카올린의 물성을 나타내었다.

Table 1 Characteristics of Metakaolin

Composition(%)							BLAINE	Appearance
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O+K ₂ O	cm ² /g	
56	37	2.4	0.2	2.4	0.3	0.9	12,000	light pink

2. 2. 미니슬럼프 실험

시멘트 페이스트의 유동성을 평가하기 위한 방법으로 미니슬럼프 실험을 실시하였다. 일정량의 시멘트와 혼화재료를 500 ml 플라스틱 비이커에 준비하고, 물과 혼화제를 혼합한 용액을 시멘트에 혼합하면서 일정한 속도로 교반하여 교반 5분후에 minicone(아래지름 38.1 mm, 위지름 19 mm, 높이 57.2 mm)에 페이스트를 붓고 난 후 minicone을 들어올려 생긴 원형의 페이스트의 지름을 측정하였다. 이후의 측정시간은 15, 30, 60, 90분으로 하였으며 측정 시간 1분전에 교반을 시작하여 측정시간에서 페이스트의 지름을 측정하였다. 미니슬럼프 실험의 배합비는 Table 2와 같다.

Table 2 Mixing Proportions Used in Minislump Test

W/C	C	W	AD
35 %	200	70	1.25 - 3.5 %

W/C비는 35 %로 고정하였으며, 혼화제 첨가량은 OPC, 플라이애쉬, 슬래그 치환 배합에서는 1.25 %로 하였고, 메타카올린 및 실리카폼 배합에서는 혼화제 첨가량이 증가하여 최고 3.5 %까지 적용하였다. 혼화재료의 치환율은 플라이 애쉬와 슬래그는 30 %까지, 메타카올린과 실리카폼은 20 %까지 하였다.

2. 3. 모르타르 실험

모르타르의 유동성 및 압축강도 측정을 위한 목적으로 실시하였다. 수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법(KS L 5105)을 따랐으며, 시간에 따른 유동성 변화를 파악하기 위한 목적으로 시멘트 : 표준사 : 물의 배합비는 실험목적에 맞게 다소 변경하였다. 모르타르 실험에서의 배합비는 Table 3과 같다.

Table 3 Mixing Proportions Used in Mortar Test

W/C	C	S	W	AD
40 %	900 g	1926 g	360 g	1.25 - 2.25 %

W/C는 40 %로 고정하였으며, 시멘트 : 표준사의 비율도 1 : 2.14로 고정하였다. 플라이 애쉬, 슬래그, 메타카올린, 실리카폼의 치환율은 10 %로 하였다. 혼화제 투입량은 1.25 %를 기준으로 하였으며, 메타카올린과 실리카폼 치환 배합에서는 첨가량이 증가하여 최고 2.25 %까지 적용하였다. 모르타르 실험

험에서는 아래지름 70 mm, 위지름 60 mm, 높이 40 mm인 cone을 사용하였으며, 5, 30, 60, 90분에서 flow를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3. 1. 혼화재료에 따른 유동성

Fig. 1과 Fig. 2는 OPC 및 플라이 애쉬, 슬래그, 메타카올린, 실리카폼이 10 % 치환된 배합에 대한 미니슬럼프 실험결과이다. 그림에서 보는 것과 같이 플라이 애쉬 및 슬래그를 치환한 배합에서는 OPC와 유동성이 거의 유사한 것으로 나타났다. 10 % 치환율에서는 플라이 애쉬 및 슬래그의 유동성 향상이 나타나지 않았으나, 치환율이 증가한 경우(20 - 30 %)에는 유동성이 다소 향상되는 것으로 나타났다. 메타카올린과 실리카폼을 10 % 치환한 배합에서는 초기 flow가 매우 감소한 것으로 나타났으며 (Fig. 3, Fig. 4), 특히 실리카폼이 치환된 배합에서는 초기 flow가 급격히 낮아져 미니슬럼프 실험조건에서는 측정이 불가능하였다(flow 6 cm 이하). 따라서 메타카올린과 실리카폼이 치환된 배합에서는 혼화제의 첨가량이 증가되어야 하며, 메타카올린의 경우에는 혼화제를 1.75 % (OPC 배합에 비하여 혼화제 투입량이 40 % 증가)를 투입하였을 때, 실리카폼의 경우에는 혼화제를 2.25 % (OPC 배합에 비하여 혼화제 투입량이 80 % 증가)를 첨가하였을 때 각각 OPC 배합에서와 유사한 초기 flow를 얻을 수 있었다. 하지만, 메타카올린이 치환된 배합에서는 혼화제의 첨가량을 증가시켜 초기 flow를 높여도 시간에 따른 유동성 감소폭이 매우 큰 것으로 나타났다. 메타카올린을 10 % 치환한 배합에서 혼화제 첨가량이 2 % 이상인 경우에는 블리딩이 발생하기 시작하여 혼화제 투입량을 더 증가시켜 유동성을 향상시키는 방법은 적절하지 않은 것으로 나타났다.

메타카올린과 실리카폼을 각각 20 %를 치환한 배합에서는 혼화제 투입량이 2.25 %, 3.5 % 이상이 되어야 OPC 배합에서와 유사한 초기 flow를 얻을 수 있는데, 이는 OPC 배합에서의 혼화제 투입량에 비하여 각각 80 %, 180 % 이상이 증가한 것이다(Fig. 5, Fig. 6). 메타카올린을 20 % 치환한 경우에는 2.5 % 이상의 혼화제가 첨가될 경우 블리딩이 발생하였다. 메타카올린과 실리카폼의 치환율을 증가시키면서 시멘트 페이스트 및 모르타르의 유동성을 측정한 결과, 메타카올린의 경우에는 치환율이 증가할수록 유동성이 급격히 저하하는데 비하여 실리카폼의 경우에는 치환율이 증가할수록 유동성이 다소 향상된다는 차이점이 있다(혼화제 첨가량을 증가하여 초기 flow를 OPC 배합에서와 유사하게 조절된 경우). 이는 메타카올린과 실리카폼을 혼화재료로 사용한 연구결과⁴⁾와도 유사한 결과이다. 실리카폼이 20 % 치환된 배합의 미니슬럼프 실험에서는 혼화제를 3.5 % 첨가하였을 때 초기 flow는 11.5 cm였으나, 90분에서의 flow가 10.8 cm로 90분에서도 초기 유동성의 94 %를 유지하였다.

메타카올린의 치환율에 대해서는 W/C비에 따라 10 - 20 %가 적절하다는 연구결과⁵⁾와 메타카올린의 치환율이 15 %인 경우 유동성이 20 % 이상 감소하며 적절한 치환율은 5 %라는 보고⁶⁾가 있는 등 서로 다른 주장이 있으며, 실제 사용시 사용목적에 따른 적절한 치환율을 선택하여야 할 것으로 보인다. 치환율이 증가하는 경우에는 유동성이 크게 나빠지므로 플라이 애쉬 및 슬래그와 같은 혼화재료를 병용하여 유동성을 향상시키는 방법도 검토할 필요성이 있는 것으로 사료된다.

3. 2. 혼화재료에 따른 압축강도 특성

Fig. 7은 혼화재료별 기간에 따른 모르타르의 압축강도를 나타낸 그림이다. OPC 배합에서의 모르타르의 압축강도는 재령 1일에서 228 kgf/cm²이며, 재령 28일에서 354 kgf/cm²으로 측정되었다. 플라이 애쉬 및 슬래그가 10 % 치환된 배합에서는 재령 28일까지의 압축강도가 모두 OPC 배합의 수치에 비해

낮은 것으로 나타났다. 따라서 플라이 애쉬 및 슬래그의 포졸란 반응에 의한 강도 발현은 28일 이후의 장기간에 걸쳐서 나타나는 것을 알 수 있다. 메타카올린이 10 % 치환된 배합에서 혼화제를 1.75 %를 첨가하였을 때의 모르타르의 재령 1일에서의 압축강도는 OPC 배합, 플라이 애쉬 치환 배합 및 슬래그 치환 배합에 비하여 저강도(176 kgf/cm²)를 나타내었으나, 재령 3일에서부터 급격히 압축강도가 증가(390 kgf/cm²)하여 OPC 배합에서의 28일 강도보다 높게 측정되었다. 재령 28일에서는 490 kgf/cm²

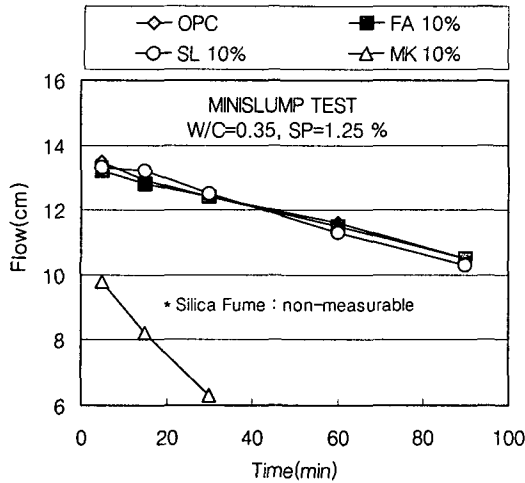


Fig. 1 Fluidity of OPC and pozzolanic material substituted-OPC with time in minislump test.

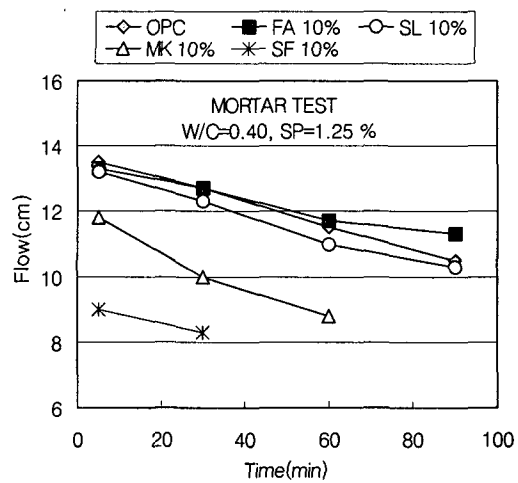


Fig. 2 Fluidity of OPC and pozzolanic material substituted-OPC with time in mortar test.

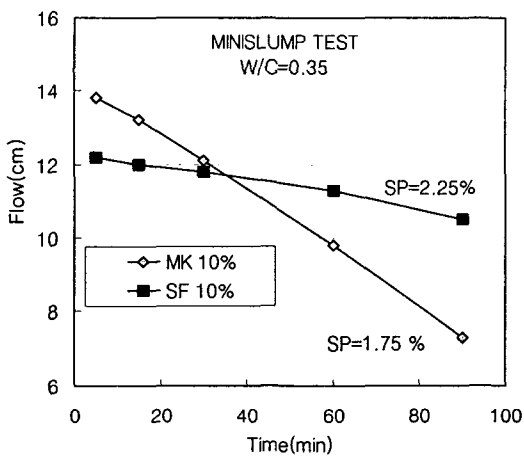


Fig. 3 Fluidity of OPC substituted by 10 % of metakaolin or silica fume with time in minislump test.

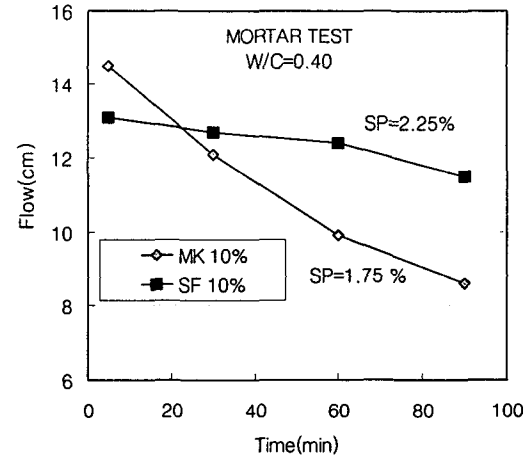


Fig. 4 Fluidity of OPC substituted by 10 % of metakaolin or silica fume with time in mortar test.

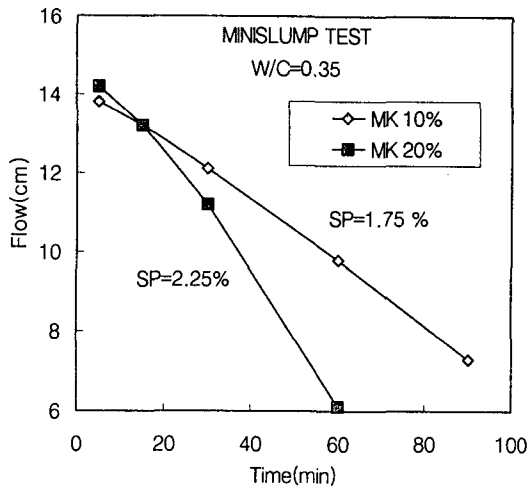


Fig. 5 Fluidity of OPC substituted by 10 % and 20 % of metakaolin with time in minislump test.

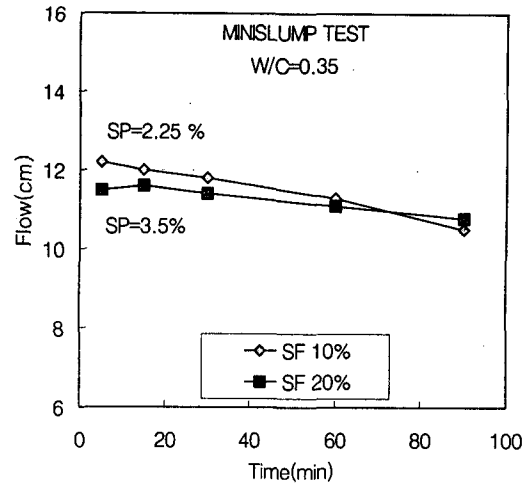


Fig. 6 Fluidity of OPC substituted by 10 % and 20 % of silica fume with time in minislump test.

으로 나타나 OPC 배합에서의 28일 압축강도에 비하여 약 40 % 정도 증가한 값을 보였다. 실리카폼을 10 % 치환한 배합에서 혼화제를 2.25 %를 첨가한 경우의 모르타르의 압축강도는 메타카올린과 유사한 특성을 보였다. 이는 메타카올린을 혼화재료로 사용한 배합에서 초기강도 발현이 매우 빠르며, 실리카폼의 강도발현과 비교할 수 있다는 보고⁷⁾와도 유사한 결과를 나타낸 것이다. 실리카폼 치환 배합에서도 메타카올린과 마찬가지로 재령 1일에서 181 kgf/cm²의 낮은 압축강도를 나타내었으나, 재령 3일 이후부터 OPC 배합에 비하여 높은 압축강도를 나타내었다. 재령 28일에서 516 kgf/cm²의 압축강도를 나타내어 OPC 배합에서의 28일 압축강도에 비하여 약 45 % 증가한 수치를 보였다. 따라서 메타카올린과 실리카폼을 혼화재료로 사용한 배합은 플라이 애쉬 및 슬래그를 사용한 배합에 비하여 압축강도에 있어서 매우 우수한 것으로 나타났으며, 단기간에 높은 강도를 필요로 하는 공사에 적합한 것을 알 수 있었다.

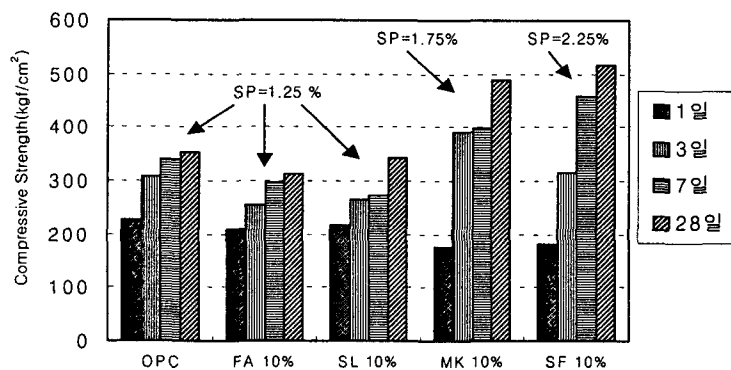


Fig. 7 Compressive strength of mortar prepared by using OPC and pozzolanic material substituted-OPC with time.

4. 결론

OPC 및 플라이애쉬, 슬래그, 메타카올린, 실리카폼을 치환한 배합에서의 미니슬럼프 실험 및 모르타르 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 메타카올린을 혼화재료로 사용하였을 경우 모르타르의 압축강도 발현이 매우 빨라 플라이 애쉬 및 슬래그를 사용한 경우에 비하여 초기 압축강도(3일)가 매우 크게 나타났으며, 실리카폼을 사용한 경우와는 유사한 압축강도 특성을 나타내었다. 따라서, 메타카올린은 실리카폼을 대체하여 단기간에 높은 압축강도를 발현하는 혼화재료로서 적합하였다.
- 2) 메타카올린을 혼화재료로 사용할 경우 OPC, 플라이애쉬 첨가배합, 슬래그 첨가배합에 비하여 혼화제 첨가량이 크게 증가하였으나, 실리카폼 첨가배합에 비해서는 첨가량이 감소하였다. 다만, 초기 flow가 OPC 배합과 유사한 혼화제 첨가량에서, 메타카올린 배합의 경우에는 치환율이 증가할수록 유동성이 저하하는데 비하여 실리카폼 배합의 경우에는 치환율이 증가할수록 유동성이 향상되는 차이점이 있었다.
- 3) 메타카올린은 실리카폼을 대체할 혼화재료로서의 가능성이 높으나 유동성 향상을 위한 추가적인 연구가 필요하고, 또한 플라이 애쉬 및 슬래그를 사용할 경우 콘크리트의 초기재령의 압축강도 저하를 줄이는 한 방법으로 메타카올린의 응용 가능성에 대한 연구가 필요하다.

5. 참고문헌

1. 정민철, "Meta Kaolin 및 silica fume을 이용한 고성능 고강도 시멘트 모르타르의 특성에 관한 연구", *Journal of the Korean Ceramic Society*, Vol. 33. 519-523(1996).
2. Brooks and Johari, "Long-Term Deformation of High-Strength Concrete Containing Silica Fume and Metakaolin", *Recent Advances in Concrete Technology*, SP 200-7, 97-111
3. Sabir and Bai, "Metakaolin and calcined clays as pozzolans of concrete ; a review", *Cement & Concrete Composites* 23, 441-454(2001)
4. Razak and Wong, "Effect of Incorporating Metakaolin on Fresh and Hardened Properties of Concrete", *Recent Advances in Concrete Technology*, SP 200-19, 309-323.
5. D.D.Vu, "Strength and durability aspects of calcined kaolin-blended Portland cement mortar and concrete", *Cement & Concrete Composites* 23, 471-478(2001)
6. Xiaoqian Qian et al, "The Relationships of Tensile-Compressive-Bending of High Performance Concrete with Metakaolin".
7. Joseph Cabrera and Moises Frias Rojas, "Mechanism of hydration of the metakaolin-lime-water system", *Cement and Concrete Research* 31, 177-182(2001).