



## 실리카푼과 메타카올린을 사용한 다성분계 고강도콘크리트의 특성

박조범<sup>1)\*</sup> · 김호수<sup>2)</sup> · 전준영<sup>1)</sup> · 김은겸<sup>2)</sup> · 류득현<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>유진기업 기술연구소

<sup>2)</sup>서울산업대학교 토목공학과 친환경소재제품인력양성센터 (EMEC)

## Properties of Ternary or Quaternary High Strength Concrete Using Silica Fume & Meta Kaolin

Cho-Bum Park,<sup>1)\*</sup> Ho-Su Kim,<sup>2)</sup> Jun-Young Jeon,<sup>1)</sup> Eun-Kyum Kim,<sup>2)</sup> and Deug-Hyun Ryu<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>R&D Division, Eugene Corporation Co., Ltd., Goyang 412-480, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Civil Engineering, Eco-product and Materials Education Center, Seoul National University of Technology, Seoul, 139-743 Korea

**ABSTRACT** In this study, it is investigated the properties of high strength concrete using mineral admixture, on the purpose of use of meta kaolin for the substitutive materials to silica fume which is so expensive. The plain mixtures are 3 degrees which are ordinary portland cement, blast furnace slag cement and OPC included fly ash 20%, and silica fume and meta kaolin are substituted for the each plain mixtures in the range of 20%. The results of experiment showed as follows. In case of silica fume was only used, the viscosity and slump flow of fresh concrete were much decreased, on the contrary air content increased. But as usage of meta kaolin increased, to being increase the viscosity of fresh concrete, slump flow increased and air content and usage of super-plasticizer were decreased. Accordingly the workabilities of concrete were against tendency between silica fume and meta kaolin. The compressive strength, velocity of ultrasonic pulse and unit weight were increased according to usage of meta kaolin, the properties of hardened concrete were judged that they are affected with air content of fresh concrete, so it is very important to control air content of high strength concrete. Therefore, the use of meta kaolin is prospected to the substitutive material of silica fume, in case of using silica fume and meta kaolin, it is judged that the optimum usage of silica fume and meta kaolin is about 10% respectively, considering workability and strength of concrete.

**Keywords :** high strength concrete, silica fume, meta kaolin, air contents

### 1. 서 론

최근 사용량이 증가하고 있는 고강도콘크리트는 성능 개선과 경제성 향상을 목적으로 플라이애쉬 고로슬래그 미분말 같은 광물질 혼화제를 다량으로 사용하고 있다. 이러한 광물질 혼화제는 콘크리트 내에서 시멘트와 반응하여 다량의 수화물을 생성함으로써 고강도 발현에는 매우 유리한 재료로 평가받고 있다.

광물질 혼화제 중에서는 고강도 발현을 목적으로 실리카푼이 많이 사용되고 있으나, 실리카푼은 다른 혼화제에 비하여 가격이 상대적으로 높기 때문에 고강도콘크리트에 단독으로 사용하기 보다는 플라이애쉬나 고로슬래그 미분말 등과 함께 3성분계 또는 4성분계 재료를 함께 사용하여 다성분계 콘크리트<sup>0)</sup>로 제조하는 것이 고강도콘크리트의 일반적인 경향이다.

그리고 고강도콘크리트에 주로 사용하는 실리카푼의 대체 재료로서 메타카올린에 대한 검토가 일부 보고되고 있다. 그러나 메타카올린이 아직 현장에 사용된 예는 없으며, 콘크리트용 혼화제로 단순 적용에만 국한되어 있는 실정이다. 기존의 연구로는 메타카올린을 결합제에 단독으로 대체하여 사용한 것<sup>3,5)</sup>이 대부분이며, 다른 혼화제와 함께 사용한 실적이 없어, 고로슬래그 미분말이나 플라이애쉬, 실리카푼 등의 광물질 혼화제와 혼합 사용한 경우의 특성에 대한 연구가 요구되고 있다.

본 연구에서는 고가의 실리카푼의 대체 재료로서 메타카올린의 적용성을 평가하기 위하여 3가지 타입의 기준 배합을 설정하였으며, 이러한 기준배합에 대하여 실리카푼과 메타카올린을 단독 또는 혼합하여 사용한 3성분계 또는 4성분계 고강도콘크리트를 제조하였다. 그리하여 고강도콘크리트용 혼화제로서 실리카푼과 메타카올린을 혼합 사용한 콘크리트의 특성을 분석하여 향후, 현장 적용에 있어서 다성분계 고강도콘크리트에 대한 실용적인 자료를 제공하고자 한다.

\*Corresponding author E-mail: etranger@dreamwiz.com

Received August 30, 2007, Revised December 28, 2007, Accepted January 13, 2008

©2008 by Korea Concrete Institute

## 2. 실험 계획

### 2.1 사용 재료

실험 재료는 결합재와 골재, 화학 혼화제를 사용하였으며, 각 재료의 세부적인 내용은 다음과 같다.

#### 2.1.1 결합재

콘크리트 제조에 사용한 결합재는 시멘트, 고로슬래그 시멘트, 플라이애쉬, 실리카폼 및 메타카올린이며, 각 재료에 대한 대표적인 특성은 Table 1과 같다.

특히 메타카올린은 콘크리트용 결합재로 사용한 연구는 많지 않으나, 실리카폼의 대체재료로서 유동성이 개선되고, 혼화제 사용량 감소, 동결융해저항성 등이 실리카폼을 사용한 콘크리트에 비하여 우수한 것으로 보고되고 있는 광물질 혼화재료이다.<sup>1,4)</sup>

#### 2.1.2 골재

잔골재와 굵은골재는 KS 기준을 만족하고 있는 인천산과 경기 광주산으로 최대 치수는 잔골재가 5 mm인 바다 모래, 굵은골재는 20 mm 부순 자갈로서, 각각의 물리적 특성은 Table 2와 같다.

#### 2.1.3 혼화제

화학 혼화제는 국내산 PC계 고성능감수제로서 KS F 2560 (콘크리트용 화학 혼화제)을 만족하고 있는 표준형 제품으로, 물리적 특성은 Table 3과 같다.

## 2.2 실험 방법

콘크리트 제조 및 시험은 KS방법에 따라 실시하였으며, 고성능감수제가 충분히 분산력을 발휘하도록 총 5분 동안 혼합하여 콘크리트를 제조하였다.

콘크리트 제조 후, 굳지 않은 상태에서는 슬럼프와 슬럼프플로우, 500 mm 도달시간, 공기량을 측정하였으며, 굳은 후에는 재령 3, 7, 28일의 압축강도와 재령 28일에 초음파속도와 단위용적질량을 측정하였다. Table 4는 콘크리트 세부 시험 항목이다.

## 2.3 실험 배합

콘크리트 배합은 설계기준강도 80 MPa, W/B 0.24, s/a 0.44, 단위수량 160 kg/m<sup>3</sup>이며, 보통포틀랜드시멘트 100%, 고로슬래그 시멘트 2중, 시멘트 80%에 플라이애쉬 20%를 대체한 배합을 각각 기준배합으로 하였다.

각각의 기준배합에 대하여 실리카폼과 메타카올린을 혼합하여 20%를 대체하였으며, 혼합비율 20% 내에서 각 재료를 5%씩 증감시켜 총 5수준으로 하였다. 굳지 않은 콘크리트에서 목표 슬럼프플로우를 600 ± 100 mm, 목표 공기량은 2.0 ± 1.0%로 하였다.

예비 실험 결과 실리카폼과 메타카올린을 사용함에 따라 유동성이 크게 변화하여 고성능감수제 사용량을 배합마다 달리 하였다. 또한 응결지연과 재료분리를 우려하여 그 사용량을 2.3% 이하로 하였으나, 일부 배합에서는 유동성 제어에 한계가 있어 목표 유동성을 만족하지 못

**Table 1** Main properties of binder

Item Binder	KS	Type	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Fineness (×10 <sup>3</sup> cm <sup>2</sup> /g)	Ignition loss (%)	Compressive strength (MPa) (activity index (%))				SiO <sub>2</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	
						3d.	7d.	28d.	91d.			
Cement	L 5201	type 1	Criteria	-	Over 2.8	Below 3.0	Over 12.7	Over 19.6	Over 27.9		-	Below 3.5
			Result	3.15	3.365	2.44	202	27.0	35.8		20.6	2.21
BFS cement	L 5210	type 2	Criteria	-	Over 3.0	Below 3.0	Over 6	Over 12	Over 28			Below 4.0
			Result	3.03	4.022	0.80	18.1	28.7	48.7			2.7
Fly ash	L 5405	type 2	Criteria	Over 1.95	Over 3.0	Below 5.0			(Over 80)	(Over 90)	Over 45	
			Result	2.20	3.272	3.82			(98.0)	(105)	52.3	
Silica fume	F 2567	densified	Criteria	-	Over 150	Below 5.0		(Over 95)			Over 85	Below 3.0
			Result	2.20	300(BET)	2.20		(115)			87.6	0.56
Meta kaolin	-	-	Criteria	-	-	-					-	-
			Result	2.50	17.51	2.52					57.4	0.02

**Table 2** Physical properties of aggregate

Item	Unit	Coarse		Fine	
		KS	Result	KS	Result
Density	g/cm <sup>3</sup>	Over 2.50	2.67	Over 2.50	2.58
Absorption	%	Below 3.0	1.45	Below 3.0	0.70
0.08 mm sieve passing ratio	%	Below 1.0	0.57	Below 3.0	0.97
Bulk density	kg/m <sup>3</sup>	-	1,578	-	1,598
Solid volume (& ratio for shape determination)	%	- (Over 55)	60.0 (56.2)	-	61.9 (-)
Fineness modulus	-	-	6.10	2.15~3.38	2.72

**Table 3** Properties of super plasticizer (standard type)

Item	Unit	KS criteria	Result
Ratio of decrease water	%	Over 18	22.0
Bleeding ratio	%	Below 60	47.0
Difference of setting time	Initial	min.	-30 ~ +120
	Final	min.	-30 ~ +120
Ratio of compressive strength	3d.	%	Over 135
	7d.	%	Over 125
	28d.	%	Over 115
Elapsed time change	Slump	mm	Below 60
	Air content	%	within $\pm 1.5$

**Table 4** KS experiment method

Item	Method	Explanation
Manufacturing concrete	F 2425	Method of making test sample of concrete in laboratory
Slump	F 2402	Method of test for slump of concrete
Slump flow & 500 mm arrival time	F 2594	Method of test for slump flow of fresh concrete
Air content	F 2421	Test for air content of fresh concrete by pressure method
Compressive strength & unit weight content	F 2405	Method of test for compressive strength of concrete
Velocity of ultrasonic pulse	F 2418	Testing method for pulse velocity through concrete

하였다. 본 실험의 인자와 수준은 Table 5와 같고, 3가지 기준배합은 Table 6에 나타났다.

### 3. 실험 결과

각각의 기준배합에 대하여 실리카폼과 메타카올린을 혼합하여 사용한 콘크리트의 특성은 Table 7과 같다.

#### 3.1 굳지 않은 콘크리트의 특성

##### 3.1.1 슬럼프

콘크리트의 슬럼프는 Fig. 1과 같다. OPC, SC와 FA를 기준으로 한 배합에서는 각각 275, 240, 265 mm의 값으로 측정되었다. OPC 배합에서 많은 혼화제 사용량이 요

구되어 OPC 단독보다는 고로슬래그 미분말이나 플라이 애쉬를 함께 사용하는 것이 유리하였다.

이러한 기준배합에 대하여 실리카폼과 메타카올린을 혼합하여 대체한 경우, SC 계열에서는 슬럼프가 증가하였고, OPC와 FA 계열에서는 큰 변화가 없었다. SC기준 배합에서는 240 mm로 가장 낮은 값이었으나, 실리카폼이 감소하고, 메타카올린이 증가함에 따라 슬럼프도 함께 증가하여 메타카올린을 20% 대체한 배합에서는 대체적으로 모든 계열에서 높았다.

##### 3.1.2 슬럼프플로우

슬럼프플로우는 Fig. 2와 같이 OPC, SC와 FA 기준배합에서 각각 740, 585, 655 mm로 측정되었다. 다성분계 고강도콘크리트에서의 유동 특성은 제어가 어려워 혼화제 사용량을 달리 하였는데, 이러한 이유로 인하여 슬럼프플로우 차이가 크게 나타난 것으로 판단된다.

SC 기준배합에 대하여 실리카폼 20%를 사용하였을 경우에는 유동성이 부족하여 고성능감수제를 기준배합보다 2배 정도로 증가시켰으나, 470 mm로 매우 낮게 측정되었으며, 메타카올린이 실리카폼보다 많아지면서 슬럼프플로우는 증가하였다.

메타카올린 20% 배합에서는 OPC 계열을 제외하고는 기준배합보다 높게 측정되었다. 특히, FA계열에서 메타카올린을 15~20%를 사용한 경우에는 약 760 mm로 재료 분리 경향이 다소 관찰되었다.

##### 3.1.3 공기량

굳지 않은 콘크리트의 공기량 변화는 Fig. 3과 같다. 각각의 기준배합에서는 1.0~2.4%로 측정되었으며, 실리카폼 20% 배합에서는 2.8~3.4%로 기준배합보다 크게 상

**Table 5** Factor & degree

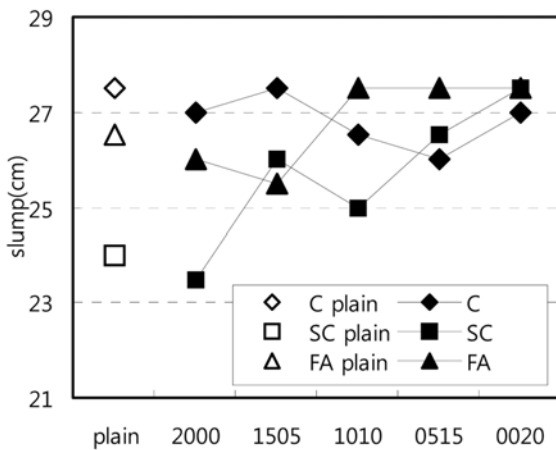
Section	Plain	SF:MK mix ratio (%:%)
Factor	OPC, SC, OPC80%+FA20%	0:0 20:0, 15:5, 10:10, 5:15, 0:20
Degree	3	6
Mark	C, SC, FA	Plain, 2000, 1505, 1010, 0510, 0020

**Table 6** Mix proportion of plain

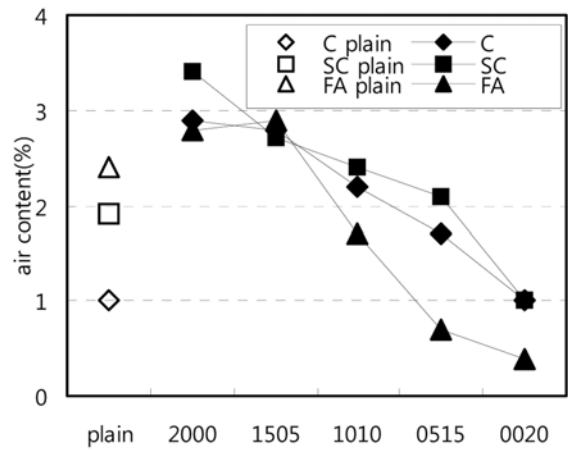
Item	Mixture	Water	c (sc)	Fly ash	Sand	Gravel
Volume (l/m <sup>3</sup> )	C plain	160	212	-	268	341
	SC plain	160	(219)	-	265	337
	FA plain	160	180	45	262	333
Weight (kg/m <sup>3</sup> )	C plain	160	667	-	693	916
	SC plain	160	(678)	-	685	906
	FA plain	160	568	99	678	896

**Table 7** Experiment results

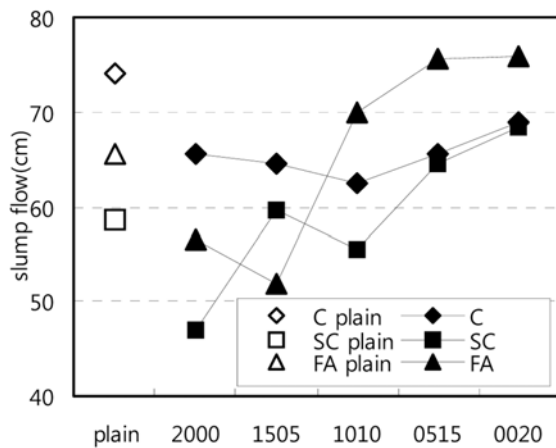
Mixture	Slump (mm)	Slump flow (mm)	Air content (%)	500 mm arrival time (sec)	Dosage of SP. (B×%)	Compressive strength (MPa)			Strength increase ratio (%)			Ultrasonic pulse (km/sec)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )
						3d	7d	28d	3d	7d	28d		
Cplain	275	740	1.0	8.72	1.65	53.7	67.7	83.0	-	-	-	4.904	2,487
C2000	270	655	2.9	4.76	2.3	37.6	56.7	79.5	70.1	83.8	95.8	4.768	2,374
C1505	275	645	2.8	4.85	2.2	42.4	63.5	86.4	79.0	93.9	104	4.826	2,402
C1010	265	625	2.2	7.07	2.2	40.5	67.7	93.5	75.5	100	113	4.832	2,407
C0515	260	655	1.7	7.03	2.2	41.7	73.0	101	77.6	108	122	4.902	2,439
C0020	270	690	1.0	5.0	2.2	45.9	72.3	108	85.5	107	130	4.941	2,457
SCplain	240	585	1.9	11.1	1.0	44.4	72.1	89.8	-	-	-	4.876	2,432
SC2000	235	470	3.4	-	2.1	30.1	54.6	85.6	67.9	75.8	95.4	4.846	2,369
SC1505	260	595	2.7	6.44	2.0	33.1	62.2	90.5	74.6	86.4	101	4.892	2,394
SC1010	250	555	2.4	7.54	1.8	35.3	65.1	93.0	79.6	90.4	104	4.848	2,392
SC0515	265	645	2.1	6.78	1.8	37.9	70.3	95.4	85.5	97.6	106	4.885	2,432
SC0020	275	685	1.0	4.81	1.7	38.7	70.6	103	87.3	98.0	115	4.953	2,471
FAplain	265	655	2.4	6.16	0.85	47.5	62.4	75.9	-	-	-	4.883	2,414
FA2000	260	565	2.8	3.62	1.7	41.7	57.1	80.9	87.6	91.5	107	4.750	2,373
FA1505	255	520	2.9	8.10	1.9	40.4	61.0	83.2	85.0	97.6	110	4.811	2,370
FA1010	275	700	1.7	4.52	2.2	41.3	69.6	96.0	86.9	111	127	4.916	2,413
FA0515	275	755	0.7	3.85	2.2	39.8	67.8	93.6	83.7	109	123	4.929	2,441
FA0020	275	760	0.4	4.85	2.0	41.8	67.8	94.0	87.9	109	124	4.914	2,462



**Fig. 1** Slump according to substitute ratio



**Fig. 3** Air content according to substitute ratio



**Fig. 2** Slump flow according to substitute ratio

증하였다. 이러한 원인은 유동성 확보를 위해 고성능감수제 사용량을 증가시킨 것에 그 원인이 있는 것으로 판단된다.<sup>2)</sup> 특히 실리카폼 20% 배합에서는 콘크리트의 점성이 저하되어 유동성도 함께 감소된 것으로 판단되며, 그에 따라서 공기량이 모두 높았다.

이후 실리카폼의 사용량이 감소하고, 메타카올린의 사용량이 증가하면서 공기량은 지속적으로 감소하여 메타카올린 20% 배합에서는 0.4~1.0%로 측정되었으며, Fig. 4와 같이 공기량은 슬럼프플로우와는 반비례하였다.

이러한 원인은 실리카폼 사용량이 높은 배합에서 실리카폼의 분말도가 다른 결합재에 비하여 높기 때문에 단위수량과 혼화제를 상대적으로 많이 흡착하여 슬럼프플로우가 낮게 나타났으며, 그에 비해 분말도가 낮은 메타

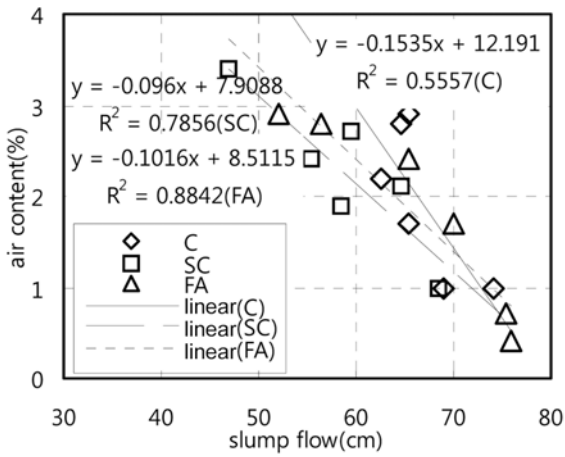


Fig. 4 Slump flow and air content

카울린은 단위수량과 혼화제를 덜 혼합한 것으로 판단된다. 또한 메타카울린의 사용량 증가에 따라 슬럼프플로우가 증가되면서 콘크리트 내부의 공기가 빠져 나와 공기량이 감소된 것으로 판단된다.

### 3.1.4 500 mm 도달시간

Fig. 5는 슬럼프플로우와 함께 측정된 500 mm 도달시간을 나타낸 것이다. 각 기준배합에서는 FA 배합에서 가장 빠른 시간이었으며, 다음으로 OPC 배합, 그리고 SC 배합이 가장 느린 11.1초로 측정되었다.

실리카폼과 메타카울린을 사용한 배합에서는 대체적으로 기준 배합보다는 빠른 시간이었으며, FA 계열에서는 F1505배합을 제외하고 모두 측정시간이 빨랐으나, S2000 배합은 슬럼프플로우가 500 mm에 도달하지 못하였다. 그리고 OPC, SC 계열에서는 실리카폼 10%까지는 도달시간이 증가하였으나, 이후 메타카울린 사용량이 증가하면서 500 mm 도달시간도 함께 단축되었다.

전체적으로 실리카폼과 메타카울린을 혼합사용한 경우에는 기준배합보다 시간이 빨랐으며, 슬럼프플로우 결과와 유사한 결과를 보여 슬럼프플로우가 증가한 경우에는 500 mm에 도달 시간도 감소되었다.

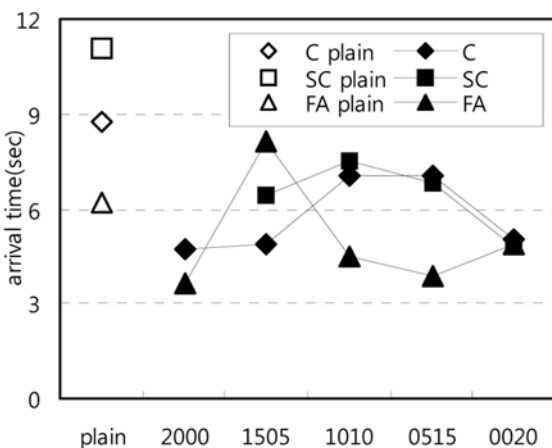


Fig. 5 500 mm arrival time of slump flow

### 3.1.5 고성능감수제 사용량

다음 Fig. 6은 유동성을 확보하기 위해 투여한 고성능감수제의 사용량을 나타낸 것이다. 기준배합에서는 고성능감수제가 0.85~1.65%로 사용되었으나, 실리카폼 20% 배합에서는 사용량이 급격하게 증가하였다.

FA계열에서는 사용량이 증가되긴 하였으나, 전체적으로 슬럼프플로우 결과와 대비하여 보면, 메타카울린 사용량이 증가되면서 고성능감수제의 사용량이 소폭 감소하였다. 이러한 원인은 실리카폼의 분말도가 높아 혼화제와 단위수량이 다량 흡착된 것으로 판단되며, 상대적으로 메타카울린은 실리카폼 보다는 분말도가 낮은 것에 그 원인이 있는 것으로 판단된다.

## 3.2 굳은 콘크리트의 특성

### 3.2.1 혼화제 사용량에 따른 압축강도

실리카폼과 메타카울린을 혼합 사용한 콘크리트의 압축강도는 Fig. 7과 같이 나타났다.

재령 3일에서는 30.1~53.7 MPa의 범위로 측정되었으며, 단위 시멘트량의 차이로 인하여 OPC, FA, 그리고 SC 계열의 순으로 강도가 높게 나타났다. 또한 메타카울린 사용량이 증가하면서 전체적으로 압축강도가 비례적으로 증가하는 경향이였다.

재령 7일에서는 54.6~73.0 MPa의 범위로 나타났다. 기준배합에서는 재령 3일과 달리 SC배합에서 압축강도가 가장 높았으며, OPC와 FA계열의 순으로 나타났다.

실리카폼과 메타카울린을 사용한 배합에서는 3가지 계열에서 강도가 유사하였으며, 전체적으로 메타카울린 사용량이 증가하면서 압축강도가 증가하는 경향이였다. 메타카울린 15%와 20%에서는 기준배합과 유사하거나 높았으며, FA 계열에서는 실리카폼과 메타카울린을 각각 10%씩 혼합사용한 배합에서 가장 높게 측정되었다.

재령 28일에서는 압축강도가 75.9~110 MPa의 범위로 나타났다. 설계기준강도 80 MPa을 기준으로 모든 배합에서 기준을 상회하였으나, FA 기준배합에서만 설계기준강도에 미치지 못하였다. 그리고 각 계열에 상관없이 실

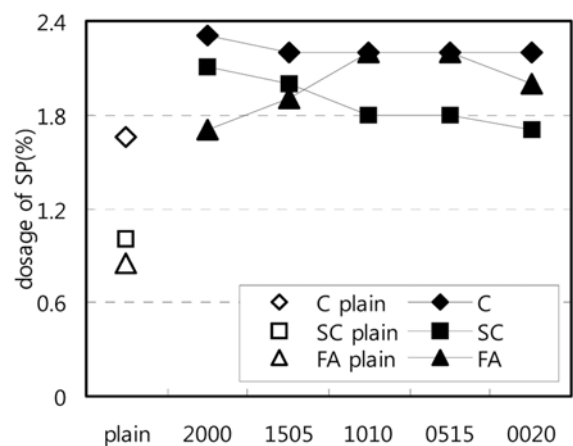


Fig. 6 Dosage of super-plasticizer

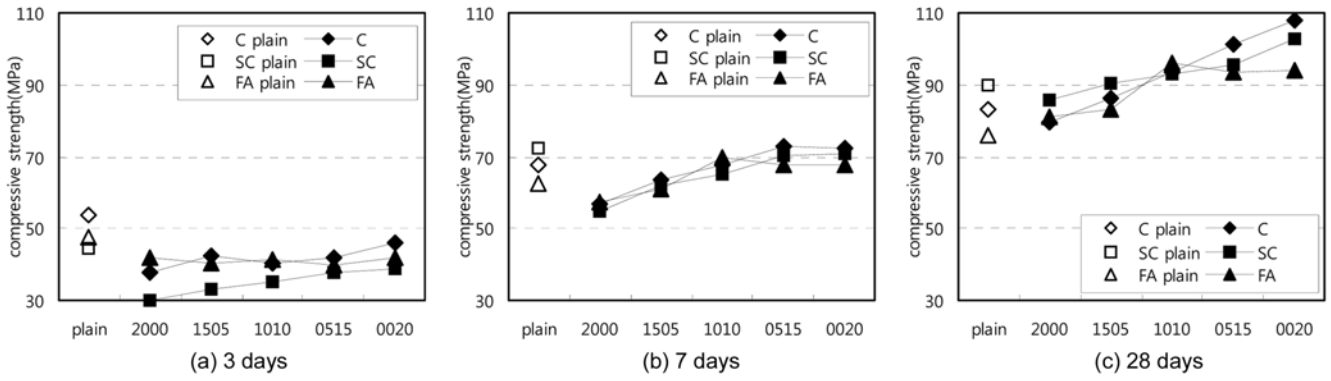


Fig. 7 Compressive strength according to substitutive ratio

리카폼 20% 배합에서는 전체적으로 기준배합과 유사하거나 소폭 저하되었으나, 메타카올린 사용량이 5%씩 증가되면서 지속적으로 압축강도가 증가하였다. FA 계열은 재령 7일과 유사하게 실리카폼과 메타카올린을 10%씩 혼합할 경우 가장 높은 강도를 보였다.

또한 메타카올린 20% 배합에서는 OPC 계열에서 가장 높은 110 MPa로 측정되었다. 따라서 강도 측면에서는 모든 재령에서 실리카폼보다는 메타카올린 사용량이 많은 배합에서 강도발현이 유리한 것으로 판단된다.

이와 같이, 실리카폼보다 메타카올린 사용량이 많은 배합에서 압축강도가 증가한 것은 유동 특성과 유사한 것으로 메타카올린 사용량에 따라 공기량이 감소한 것에 그 원인이 있는 것으로 판단된다. 다음 Fig. 8은 공기량과 재령 28일 압축강도가 서로 반비례관계로 나타났으며, SC계열에서 가장 높은 79%의 상관관계를 보였다.

각각의 계열을 비교하면 OPC 계열에서는 실리카폼보다는 메타카올린 사용량이 많은 배합에서 강도발현이 우수하였다. 또한 SC 계열에서는 실리카폼을 단독으로 사용하기 보다는 메타카올린을 함께 사용하는 4성분계 배합이 강도 발현에 가장 유리하였다. 또한 FA 계열에서도 실리카폼과 메타카올린 각각 10%의 4성분계 배합이 강도 발현에 유리한 것으로 판단된다.

따라서 강도 특성을 종합하여 볼 때는 실리카폼과 메

타카올린을 혼합 사용한 배합의 강도가 높게 측정되었다. 재령 3일에서는 기준배합보다 혼화재를 사용한 배합이 낮았으며, 재령 7일과 28일에는 메타카올린 사용량 10% 이상의 배합에서 압축강도가 높았다. 이러한 결과를 바탕으로 하면 사용실적이 거의 없는 메타카올린은 실리카폼의 대체 재료로서 강도 확보가 가능할 것으로 전망된다.

다음 Fig. 9는 재령에 따른 콘크리트의 압축강도를 나타낸 것으로, 재령경과에 따라 범위가 다소 크게 측정되었다. 이러한 원인은 배합 조건에 따라 OPC와 같은 단일 재료를 사용한 배합과 고로슬래그 시멘트나 플라이애쉬를 대체한 혼합시멘트에 실리카폼과 메타카올린을 사용한 4성분계 배합 등의 특성이 다른 결합재들과 함께 혼합되면서 나타난 특성이라고 판단된다.

### 3.2.2 압축강도비

Fig. 10은 각 재령에서의 기준배합에 대한 압축강도비를 나타낸 것이다. 전체적으로 재령이 경과하면서 강도비가 증가하였으며, 실리카폼 사용량보다 메타카올린 사용량이 증가하면서 강도비도 증가하였다.

OPC 계열에서는 재령 3일과 7일에 경향이 뚜렷하지는 않았으나, 메타카올린 사용량 증가에 따라 강도비도 크게 증가하는 추세를 보였다. 재령 28일에는 그 경향이 초기재령보다는 더욱 뚜렷하게 나타나, 강도비가 모두 급격하게 상승하였으며, 실리카폼보다는 메타카올린이 5%

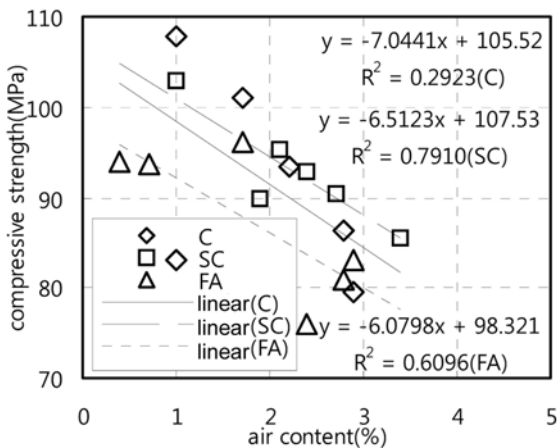


Fig 8. Compressive strength and air content

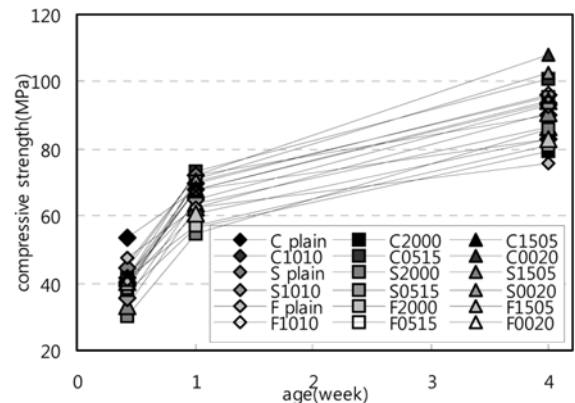


Fig 9. Compressive strength according to age

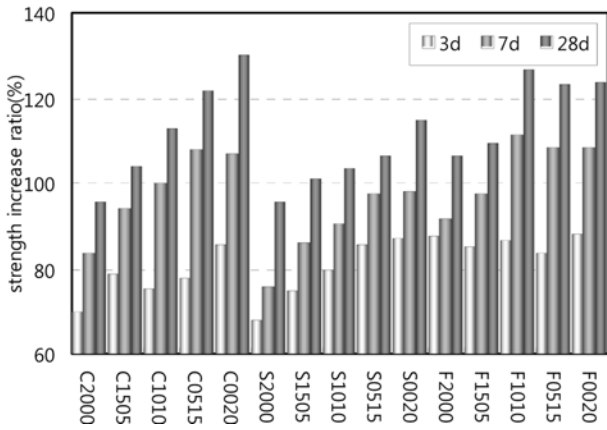


Fig. 10 Ratio of strength increase to plain

이상 사용된 배합에서는 100% 이상으로 발현되었다.

SC 계열에서도 메타카올린의 사용량이 증가하면서 모든 재령에서 강도비도 함께 직선적으로 증가하였다. 기준 배합이 OPC보다 높게 측정되어 SC 계열의 강도비는 OPC 계열의 강도비보다 낮았다.

FA 계열에서는 재령 7일과 28일에서 실리카폼 10%와 메타카올린 10%를 사용한 배합까지는 강도비가 증가하였으나, 그 이후의 대체율에서는 감소하였다. FA 계열에서는 실리카폼과 메타카올린을 10%씩 사용한 배합이 재령에 관계없이 높은 강도비를 보여 강도발현 측면에서는 가장 최적 배합인 것으로 판단된다.

### 3.2.3 초음파 속도

Fig. 11은 재령 28일에 측정된 콘크리트의 초음파속도를 나타낸 것으로, 3가지 기준배합에서는 4.876~4.904 km/sec의 범위로 측정되어 큰 차이가 없었다.

OPC 계열에서는 4.768~4.941 km/sec의 범위로 측정되었으며, 기준배합에 비하여 실리카폼 20% 대체한 배합에서는 감소되었다. 그러나 메타카올린 사용량이 점진적으로 증가되면서 초음파속도도 비례하여 메타카올린 20%에서는 기준배합보다 높게 측정되었다.

SC 계열은 4.846~4.953 km/sec의 범위로, OPC 계열에

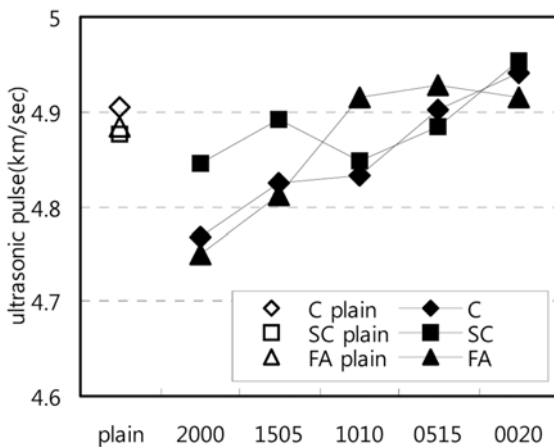


Fig. 11 Velocity of ultrasonic pulse

비해서는 측정 범위 폭이 적게 나타났다. 메타카올린 사용량 증가에 따라 초음파속도도 증가하여 OPC 계열과 유사하였다. FA 계열에서도 메타카올린 사용량 증가에 비례하였으나, 다른 계열과는 달리 메타카올린 사용량 15%에서 가장 높은 값을 보였다.

굳은 콘크리트의 초음파 속도는 앞선 압축강도와 유사한 경향이었으며, 이러한 원인 또한 굳지 않은 콘크리트에서의 공기량에 영향을 받은 것으로 판단된다. Fig. 12와 같이, 콘크리트의 공기량과 초음파속도와의 관계에서 압축강도와의 관계와 유사한 반비례관계로 나타났으며, 28일 압축강도보다는 다소 높은 상관관계를 보였다.

### 3.2.4 단위용적질량

굳은 콘크리트의 단위용적질량은 Fig. 13과 같이 2,369~2,487 kg/m<sup>3</sup>의 범위로 측정되었다. 기준 배합에서는 OPC 배합이 높은 값을 보였으며, 다음으로 SC, FA 배합의 순서로 나타났다.

각각의 기준배합에 대하여 실리카폼 20%를 대체한 배합에서는 2,369~2,374 kg/m<sup>3</sup>의 값을 보여 거의 유사하였다. 그리고 메타카올린 사용량이 5%씩 증가되면서 평균 23 kg/m<sup>3</sup>씩 증가하였으며, 메타카올린 20%를 대체한 배

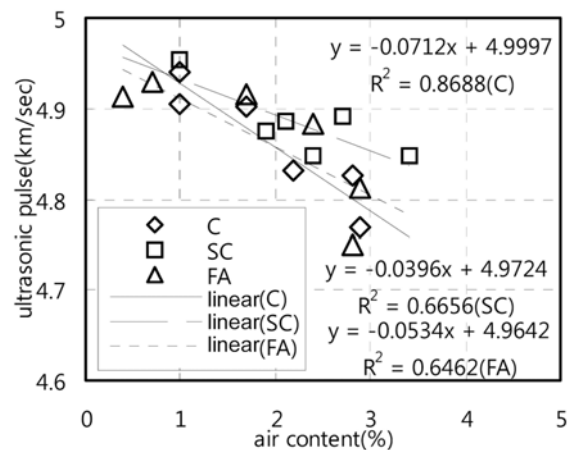


Fig. 12 Velocity of ultrasonic pulse & air content

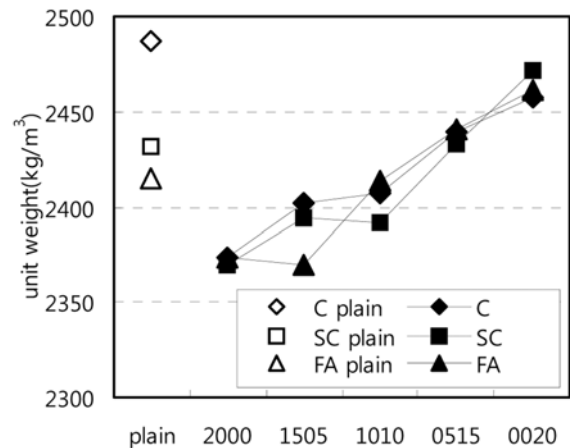


Fig. 13 Unit weight of hardened concrete

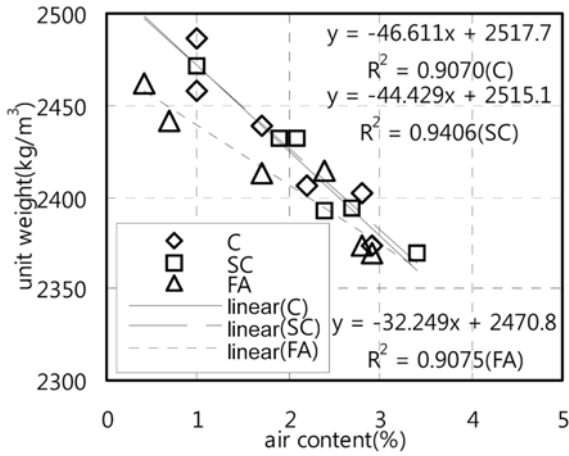


Fig. 14 Unit weight & air content

합에서는 실리카폼 20% 배합에 비하여 약  $91 \text{ kg/m}^3$  증가한 평균  $2,463 \text{ kg/m}^3$ 으로 다소 높았다. 이는 실험에 사용한 재료 특성 중에서 메타카올린의 밀도가 실리카폼보다 높고, 굳지 않은 콘크리트의 공기량 차이에 그 원인이 있는 것으로 판단된다.

따라서 굳은 콘크리트의 단위용적질량도 초음파속도와 유사한 경향을 보여 메타카올린 사용량 증가에 따라 비례적으로 증가하였다. 다음 Fig. 14는 굳지 않은 콘크리트의 공기량과 단위용적질량과의 관계를 나타낸 것으로, 2가지 인자 사이에는 서로 반비례관계를 보였으며, 초음파속도와의 관계보다 다소 높은 상관관계를 나타냈다.

이상과 같이 본 연구에서는 콘크리트의 압축강도, 단위용적질량, 초음파속도 모두 콘크리트의 공기량에 영향을 받은 것으로 판단되며, 고강도콘크리트에서는 공기량을 제어하는 것이 콘크리트 전체의 품질 특성을 지배하는 가장 중요한 인자인 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구는 고강도콘크리트용 혼화제로서 실리카폼의 대체재로 메타카올린의 적용성을 평가하기 위한 것으로, 실리카폼과 메타카올린을 혼합 사용하여 콘크리트 특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 실리카폼과 메타카올린을 사용한 다성분계 배합은 목표 유동성을 만족하기 위해서 고성능감수제의 사용량이 기준배합에 대하여 최대 2.5배가 증가되었다.
- 2) 실리카폼만 사용한 배합에서는 높은 분말도로 인하

여 슬럼프플로우가 낮게 측정되었으나, 메타카올린이 증가함에 따라 슬럼프플로우가 증가하였다.

- 3) 콘크리트의 공기량은 슬럼프플로우와는 반대로 메타카올린을 사용하지 않은 경우에는 높았으며, 메타카올린 사용량이 증가하면서 공기량도 감소하였다.
- 4) 실리카폼과 메타카올린을 혼합 사용한 경우, 압축강도는 초기재령에서는 기준배합보다 낮았으나, 재령 28일에는 설계기준강도를 모두 상회하였다.
- 5) 혼화제 사용량 20% 범위 내에서 실리카폼과 메타카올린을 각각 10%씩 대체하여 혼합사용하는 것이 유동성과 강도측면에서 적절한 것으로 판단된다.

이상과 같이, 실리카폼과 메타카올린을 혼합 사용한 콘크리트에서는 기준배합보다 고성능감수제의 사용량이 증가되었으나, 유동성 증진과 강도 발현에는 매우 효과적이었다. 또한 고강도 발현을 목적으로 할 경우 실리카폼과 메타카올린을 단독보다는 혼합 사용하는 것이 성능개선에 유리할 것으로 판단되며, 메타카올린은 고가의 실리카폼을 대체하여 고강도콘크리트의 경제적인 혼화제로서 활용이 가능할 것으로 전망된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2006년도 환경부의 환경기술인력양성지원사업으로 지원되었습니다.

#### 참고문헌

1. 김병기, 이상수, “콘크리트용 혼화제로서 메타카올린의 특성 및 활용,” 콘크리트학회지, 15권, 5호, 2003, pp. 24~32.
2. 변근주, 김장호, 남진원, 김호진, “실리카폼 콘크리트,” 기문당, 2006, pp. 49~57.
3. 원종필, 권연성, 이준자, “고반응성 메타카올린을 사용한 고성능 콘크리트의 특성,” 콘크리트학회 논문집, 14권, 3호, 2002, pp. 349~356.
4. 이병우, “메타카올린을 이용한 3성분계 콘크리트의 유동특성 개선에 관한 실험적 연구,” 건국대학교 대학원 박사학위 청구논문, 2006, pp. 29~38.
5. Wong, H. S. and Razak, H. Abdul, “Efficiency of Calcined Kaolin and Silica Fume as Cement Replacement Material for Strength Performance,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, Iss. 4, 2005, pp. 696~702.
6. Laldji, Saïd and Arezki, Tagnit-Hamou, “Properties of Ternary and Quaternary Concrete Incorporating New Alternative Cementitious Material,” *ACI Materials Journal*, Vol. 103, No. 2, 2006, pp. 83~89.



---

**요 약** 본 연구에서는 고가의 실리카폼의 대체 재료로서 메타카올린을 사용할 목적으로 광물질 혼화재와 혼합사용한 고강도콘크리트의 특성을 검토하였다. OPC 100%와 고로슬래그시멘트, 그리고 OPC와 플라이애쉬 20% 사용한 배합을 기준배합으로 하였으며, 각각의 배합에 실리카폼과 메타카올린을 20% 범위 내에서 혼합하여 대체하였다. 실험 결과, 목표 유동성을 만족한 기준 배합에 대하여 실리카폼만 대체하였을 경우에는 점성이 저하되었으며, 슬럼프플로우는 감소하였고, 공기량은 증가하였다. 이에 비하여 메타카올린의 사용량이 증가할수록 콘크리트의 점성이 증가되면서 슬럼프플로우는 증가하였고, 공기량은 감소, 그리고 고성능감수제 사용량도 감소하였다. 경화 콘크리트의 특성은 압축강도와 초음파 속도, 그리고 단위용적질량이 메타카올린 사용량에 따라 증가하였는데, 이러한 원인은 굳지 않은 콘크리트의 공기량에 영향을 받는 것으로 판단되어 고강도콘크리트는 공기량을 조절하는 것이 중요한 항목으로 나타났다. 따라서 고강도콘크리트용 혼화재로서 실리카폼의 대체 재료로서 메타카올린의 활용이 가능할 것으로 전망되며, 혼합 사용하는 경우에는 유동성과 강도 특성을 고려하여 실리카폼과 메타카올린은 각각 10% 정도가 적정 사용량인 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 고강도콘크리트, 실리카폼, 메타카올린, 공기량