

# 혼화재 종류 및 치환율에 따른 모르터의 조기강도 특성에 관한 연구

## A study on the Early-Strength Properties of Mortar according to the Kinds and Replacement Ratio of Mineral Admixture

최 세 진\*                      이 성 연\*\*                      김 성 수\*\*\*  
 Choi, Se Jin                      Lee, Seong Yeun                      Kim, Sung Su

### ABSTRACT

Recently, due to the increase of high-rise buildings construction, many researches for making harden of concrete earlier and remove of forms faster are being performed to reduce construction period.

In this study, we compared and analysed the early strength properties of mortar according to the kinds and replacement ratio of mineral admixture to select the kinds and replacement ratio of mineral admixture of high early strength concrete.

For this purpose, mortar mixtures according to the kinds(FA, MK, ZR, BFS, DM) and replacement ratio(0, 2, 4% by volume of sand) of mineral admixture were selected.

From our test data, early-age compressive strength decreased in accordance with the increase of replacement ratio of fly-ash(FA) & blast furnace slag powder(BSF) and, in case of addition admixture, early-age compressive strength of with containing 4% appeared higher compared with containing 2%.

키워드 : 초고층건축물, 혼화재, 모르터, 조기강도, 치환율

Keywords : high-rise building, mineral admixture, mortar, early-strength, replacement ratio

## 1. 서 론

최근, 건설물량이 증가하고 있는 주상복합과 같은 초고층 건축물은 경제성 문제와 관계하여 건설공기의 단축이 매우 중요한 과제로 대두되고 있다<sup>1)</sup>. 콘크리트는 상온 이상에서는 정상적인 강도 발현을 하지만 온도가 낮아지면 강도 발현이 지연되는 성질을 가지고 있으며, 이러한 경우 강도 발현의 지연은 콘크리트 초기 강도에 큰 영향을 미치게 되어 거푸집 탈형을 지연시켜 공기에도 상당한 영향을 미치게 된다. 또한, 동절기의 경우 정상적인 거푸집 탈형을 위해서 열풍기 등의 열기구를 이용한 가열 양생으로 인한 비용 증가도 유발시키기 때문에 콘크리트 공사의 경제성을 저하시키는 요인이 되고 있다.

현재 건설공기를 단축하기 위한 방법으로 시스템 거푸집의 활용, 조립철근의 배근 등이 강구되고 있지만, 콘크리트 자체의 초기 강도발현을 촉진하여 거푸집 탈형 시기를 단축하는 방법도 중요시되고 있다.<sup>2),3)</sup> 그러나 대부분의 실제 건설 현장에서는 경제성에 중점을 두어 플라이애시 및 고로슬래그 미분말을 시멘트량에 대하여 일부 치환하여 사용함으로써 초기 강도에 불리하게 작용하고 있는 실정이다.

또한, 현재 국내 잔골재의 수급현황을 살펴보면 천연골재 자원의 고갈로 인하여 잔골재 공급의 어려움이 발생하고 있으며,

이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 경제성이 우수하고 생산이 용이한 부순모래가 가장 일반적으로 사용되고 있는 실정이다.

본 연구는 부순모래를 사용한 조기강도 콘크리트의 개발을 위한 연구의 일환으로 혼화재 종류 및 치환율에 따른 모르터의 유동성 및 압축강도 발현 특성을 비교·검토하였다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 표 1에서 알 수 있듯이 모르터 실험을 크게 I~III시리즈로 구분하여 설계기준강도 24MPa의 일반콘크리트 중 W/B 50.9%, 단위수량 174kg/m<sup>3</sup>의 콘크리트배합에서 굵은골재를 제외한 배합에 대하여 실험을 실시하였으며, 모든 배합의 목표플로우는 180±10mm로 선정하였다. 이 때 부순모래의 치환율은 수 차례의 시험비법과 기존 부순모래를 적용한 연구를 참고하여 압축강도가 가장 높게 발현하는 50%를 본 연구의 치환율로 선정하였다<sup>4)</sup>.

I 시리즈의 경우, 시멘트만을 사용한 배합에 대하여 혼화재의 외할치환(잔골재의 용적에 대한 치환)율에 따른 모르터의 조기강도 발현성상을 알아보기 위하여 단위수량을 고정 후 플라이애시(FA), 메타카올린(MK), 제올라이트(ZR), 고로슬래그 미분말(BFS) 및 규조토(DM)의 5종류 혼화재를 잔골재 용적에

\* 정희원, (주)삼표 기술연구소 책임연구원, 공학박사

\*\* 정희원, (주)삼표 기술연구소 소장, 공학박사

\*\*\* 정희원, (주)삼표 기술연구소 연구원

표 1. 실험계획 및 측정항목

Series	W/B (%)	FA 치환율 <sup>1)</sup> (%)	BFS 치환율 <sup>1)</sup> (%)	잔골재 치환 혼화재		목표 플로우 (mm)	감수제 첨가율 (%)	측정항목
				종류	치환율 <sup>2)</sup> (%)			
I	50.9	-	-	FA MK ZR BFS DM	0 2 4	180 ± 10	소정의 첨가량	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 플로우(mm)</li> <li>• 압축강도</li> <li>-18시간, 1, 2, 3, 7, 28일</li> </ul>
II	50.9	5	-	FA MK ZR BFS DM	0 2 4			
III	50.9	-	10	FA MK ZR BFS DM	0 2 4			

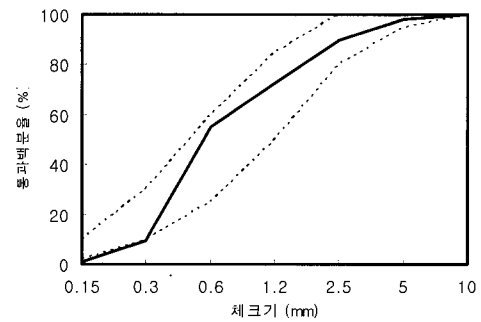
주) 1) 단위시멘트량에 대한 치환  
2) 잔골재 용적에 대한 치환

대하여 각각 2%와 4%로 치환하였다. 또한 II시리즈 및 III시리즈의 경우, 현재 가장 많이 사용되고 있는 콘크리트 혼화재료인 플라이애시와 고로슬래그미분말을 단위시멘트량에 대하여 각각 5% 및 10% 치환한 배합을 대상으로 I시리즈와 같이 5종류의 혼화재를 2%와 4%로 외할치환하였으며, 측정항목으로는 모르타 플로우 및 재령 18시간, 1, 2, 3, 7, 28일에서의 압축강도 특성을 비교·검토하였다.

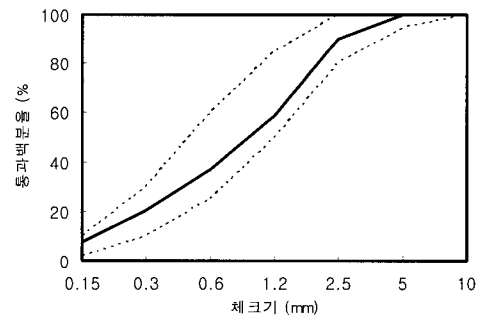
표 2. 사용재료의 물리적 성질

사용재료	물리적 성질	
시멘트	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1종 보통포틀랜드시멘트</li> <li>• 밀도:3.15g/cm<sup>3</sup> • 분말도:3,466cm<sup>2</sup>/g</li> </ul>	
혼화재 <sup>1)</sup>	FA	• 밀도:2.25g/cm <sup>3</sup> • 분말도:4,478cm <sup>2</sup> /g
	MK	• 밀도:2.53g/cm <sup>3</sup> • 분말도:12,110cm <sup>2</sup> /g
	ZR	• 밀도:2.18g/cm <sup>3</sup> • 분말도:5,833cm <sup>2</sup> /g
	BFS	• 밀도:2.89g/cm <sup>3</sup> • 분말도:4,668cm <sup>2</sup> /g
	DM	• 밀도:2.33g/cm <sup>3</sup> • 분말도:2,153cm <sup>2</sup> /g
잔골재	세척사	• 밀도:2.61g/cm <sup>3</sup> • 조립율:2.77 • 최대치수:5mm
	부순모래	• 밀도:2.63g/cm <sup>3</sup> • 조립율:2.86 • 최대치수:5mm
감수제	• 밀도:1.21g/cm <sup>3</sup> • 고형분:42%	

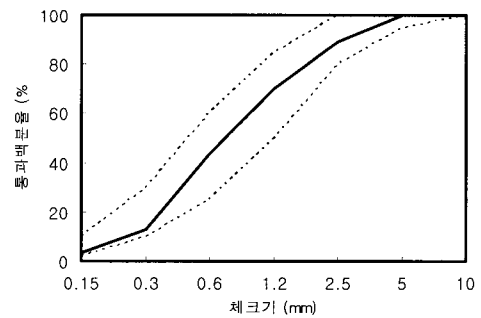
주) 1) FA : 플라이애시, MK : 메타카올린, ZR : 제올라이트  
BFS : 고로슬래그미분말, DM : 규조토



(a) 세척사



(b) 부순모래



(c) 혼합사

그림 1. 사용 잔골재의 입도분포곡선

표 3. 사용재료의 화학성분

(단위 : %)

성분 종류	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	L.O.I
C	21.79	5.30	3.57	63.34	1.95	2.17	1.16	0.21	0.52
FA	56.07	27.18	5.48	3.46	0.01	1.10	1.25	0.05	5.39
MK	47.99	41.19	2.69	3.10	0.55	-	0.59	1.30	2.60
ZL	62.96	13.47	2.47	2.15	1.66	-	1.63	1.48	14.18
BFS	33.45	16.76	0.56	40.35	4.34	2.81	0.53	0.35	0.86
DM	86.47	3.53	1.89	1.11	0.02	-	0.58	5.06	1.33

### 2.2 사용재료 및 시험방법

본 실험에 사용된 재료의 물리·화학적 성질을 나타낸 표 2 및 3에서 알 수 있듯이 시멘트는 밀도가 3.15g/cm<sup>3</sup>이고 분말도가 3,466cm<sup>2</sup>/g인 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 혼화제는 플라이애시(FA), 메타카올린(MK), 제올라이트(ZR), 고로슬래그미분말(BFS) 및 규조토(DM)의 5종류를 사용하였다.

또한 화학성분은 FA, MK, ZR 및 DM의 경우 SiO<sub>2</sub> 및 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 75% 이상으로 대부분을 차지하고 있으며, 강열감량은 FA 및 ZL이 각각 5.39 및 14.18%로 높게 나타났다.

잔골재로는 밀도 2.61g/cm<sup>3</sup> 및 조립률 2.77인 세척사와 밀도 2.63g/cm<sup>3</sup> 및 조립률 2.86인 부순모래를 사용하였으며, 사용된 잔골재의 입도분포곡선은 그림 1에서 보는바와 같이 세척사와 부순모래의 경우 모두 표준입도분포 범위를 만족하였으며, 이러한 세척사 및 부순모래를 50 : 50으로 혼합한 혼합사의 경우 대체로 표준입도곡선의 중간에 위치하는 분포를 보이고 있음을 알 수 있다.

또한 각 혼화제의 입형을 확인하기 위하여 실시한 SEM 촬영 결과를 나타낸 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 FA의 경우 무수히 많은 구형의 입자들을 확인할 수 있으며, 다른 혼화제 입자들의 경우 입자표면이 매우 거칠고, 특히 DM의 경우 입자들 사이에 원형 판상의 결정이 많이 관찰됨을 알 수 있다.

모르터 시험은 모르터용 믹서를 사용하여 비빔 후 목표플로우를 만족하는 배합에 대하여 50×50×50mm의 공시체를 제작하여 양생온도 23±2℃에서 수중양생을 실시한 후 재령 18시간, 1, 2, 3, 7 및 28일 압축강도 실험을 실시하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

표 4는 혼화제 종류 및 치환율에 따른 모르터의 시험결과를 나타낸 것이다.

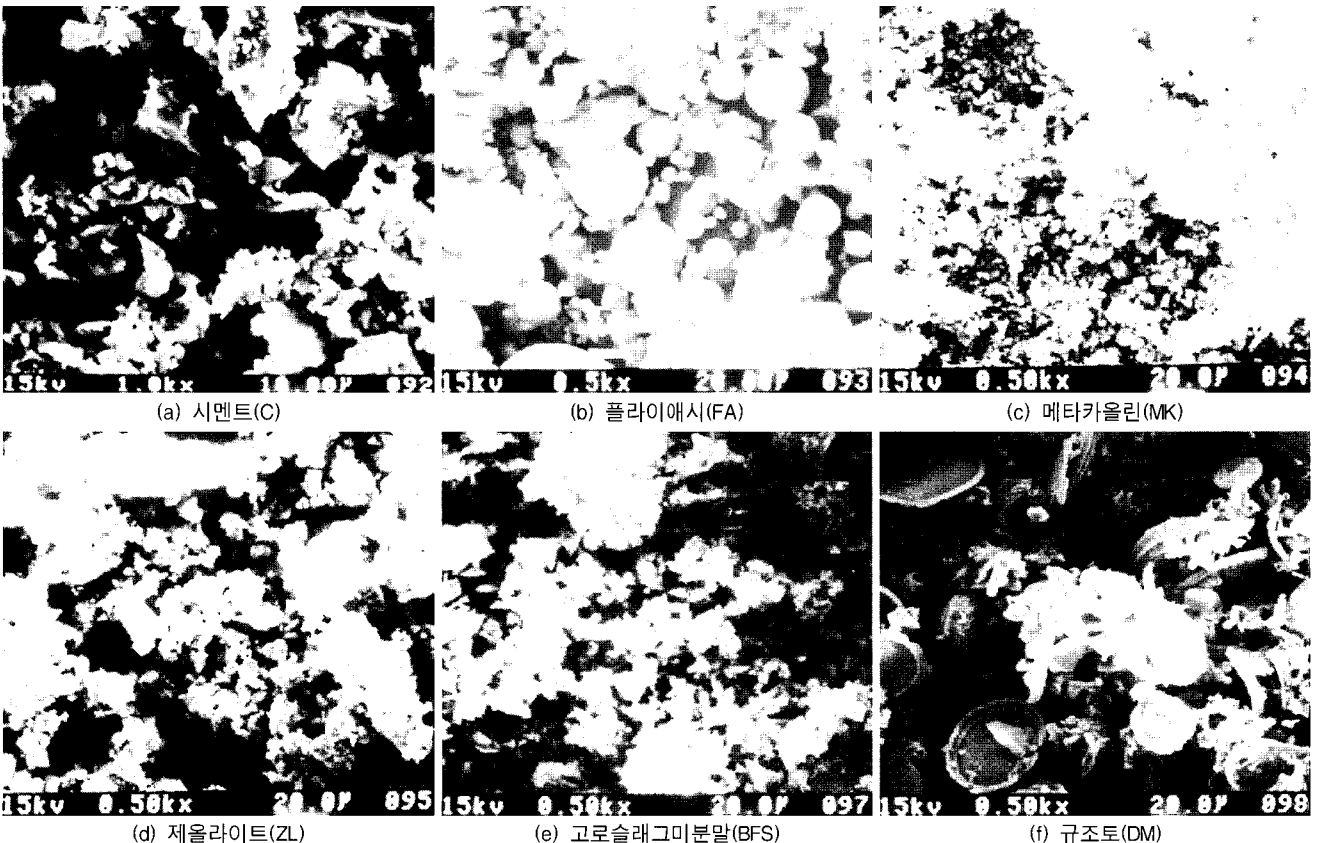


그림 2. 시멘트 및 혼화제의 입형

표 4. 모르터 시험결과

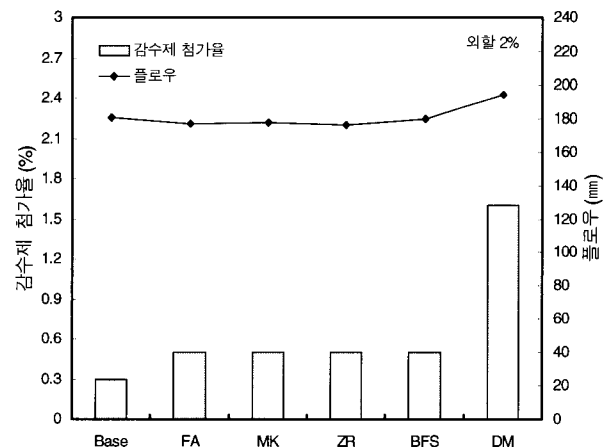
시리즈	FA 치환율 (%)	BFS 치환율 (%)	잔골재치환 혼화재		감수제첨가율 (%)	플로우 (mm)	압축강도(MPa)					
			종류	치환율 (%)			18h	1일	2일	3일	7일	28일
I	-	-	Base	-	0.3	180.6	7.1	10.3	18.8	25.7	45.2	57.9
			FA	2	0.5	177.0	6.6	9.8	21.7	26.8	42.2	53.9
			MK		0.5	177.5	6.8	9.9	21.7	27.3	41.0	53.4
			ZR		0.5	176.5	7.5	10.9	22.6	27.3	40.5	50.4
			BFS		0.5	179.5	7.5	10.7	21.6	27.1	41.2	53.6
			DM	4	1.6	194.0	0.0	0.0	10.9	16.9	29.7	38.6
			FA		0.6	170.0	7.2	10.8	20.9	26.8	42.0	50.4
			MK		0.6	170.5	7.5	9.9	22.6	28.7	45.3	54.8
			ZR		0.6	171.5	9.1	12.3	23.7	28.4	43.5	53.3
			BFS		0.6	179.0	7.2	10.7	19.6	26.0	40.7	52.1
			DM		2.6	175.5	0.0	0.0	0.0	10.2	30.2	38.3
			FA		2	0.4	183.0	6.0	9.4	18.5	25.1	44.5
FA	0.5	175.0	4.1			8.1	17.6	26.8	41.2	49.4		
MK	0.6	176.5	4.0	7.2		16.8	27.9	39.9	49.8			
ZR	0.6	174.5	4.7	8.5		18.7	29.2	42.2	52.4			
BFS	4	0.5	173.5	4.5	7.2	17.2	27.9	40.5	49.5			
DM		1.2	174.5	0.0	0.6	9.1	19.2	31.9	39.2			
FA		0.6	171.5	4.1	7.5	17.8	28.3	40.2	50.0			
MK		0.7	170.0	4.0	6.4	17.5	28.7	42.5	49.5			
ZR		1.0	170.5	4.1	7.2	17.9	27.7	41.0	49.7			
BFS		0.6	176.5	4.3	8.6	18.7	30.5	39.6	51.2			
DM		2.0	155.5	0.0	0.0	0.0	10.1	30.2	43.0			
FA		5	-	Base	-	0.2	182.0	6.6	8.9	17.7	24.3	41.6
FA	2			0.4	172.5	5.7	8.6	19.2	23.2	39.5	51.5	
MK				0.5	173.0	5.5	7.7	17.9	24.5	39.5	52.3	
ZR				0.5	169.5	6.9	9.3	20.1	25.7	43.0	54.7	
BFS				0.3	171.0	7.2	8.9	19.7	25.6	40.8	46.8	
DM	4			1.4	172.5	0.0	0.0	9.1	16.3	34.1	46.9	
FA				0.7	180.0	2.1	6.1	17.7	26.8	39.0	54.7	
MK				0.7	170.5	4.5	7.2	19.8	28.3	43.1	59.1	
ZR				1.0	179.0	3.4	6.6	18.7	28.1	37.9	55.2	
BFS				0.6	179.0	3.7	7.9	20.1	29.2	40.6	60.0	
DM				2.0	157.5	0.0	0.0	0.0	11.1	30.9	48.6	

### 3.1 유동특성 검토 및 분석

그림 3은 I 시리즈에서의 혼화재 종류에 따른 감수제 첨가율 및 플로우의 변화를 나타낸 것으로 혼화재를 잔골재치환하지 않은 Base의 경우 180±10mm인 목표플로우를 만족시키기 위한 감수제 첨가율은 0.3%였으나 혼화재(FA, MK, ZR, BFS, DM)를 2% 및 4%로 잔골재치환함에 따라 감수제 첨가율은 조금씩 증가하는 것을 알 수 있다. 감수제 첨가율은 Base의 경우와 비교하여 DM을 제외한 4종류 혼화재에서 유사하게 증가하였으나 DM을 잔골재치환 할 경우 감수제 첨가율은 5~8배 정도 크게 증가하는 것으로 나타났는데 이러한 원인은 DM의 경우 공극이 많이 존재하는 다공성 물질로 배합수 및 감수제를 일부 흡착했기 때문으로 판단된다<sup>3)</sup>.

그림 4는 II 시리즈에서의 혼화재 종류에 따른 감수제 첨가율 및 플로우 결과를 나타낸 것으로 동일한 유동성을 만족하기 위한 감수제 첨가율은 Base의 경우 I 시리즈에 비하여 다소 증가하였는데 이러한 감수제 첨가율의 증가는 FA를 치환할 경우 FA중의 미연탄소 성분이 일부 감수제를 흡착하였기 때문으로

판단된다. 또한, I 시리즈 경우와 비교하여 혼화재를 외할치환함에 따른 감수제 첨가율은 Base에 비해 0.1~0.3% 정도 높게 나타나며, ZR 및 DM을 제외한 나머지 배합에서 유사하게 나타났다.



(a) 잔골재 치환율 2%

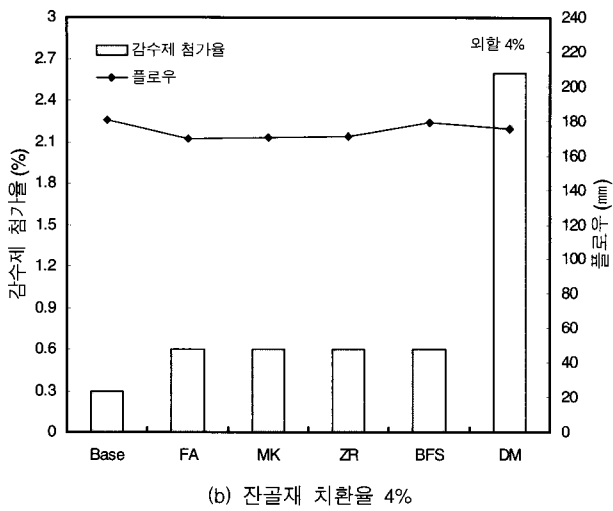


그림 3. 혼화재 종류에 따른 감수제 첨가율 및 플로우의 변화(I 시리즈)

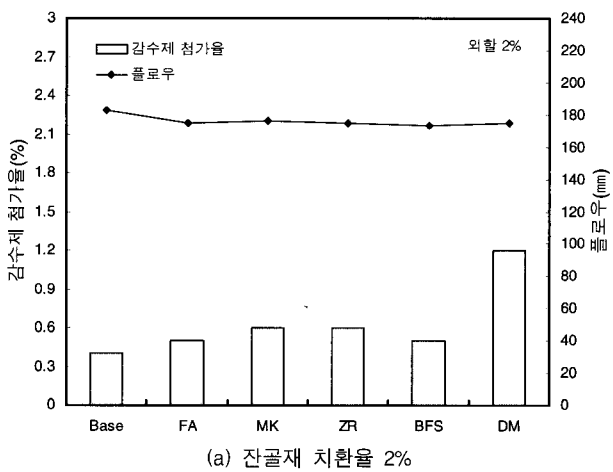


그림 4. 혼화재 종류에 따른 감수제 첨가율 및 플로우의 변화(II 시리즈)

또한, 그림 5는 III시리즈에서의 혼화재 종류에 따른 감수제 첨가율 및 플로우 변화를 나타낸 것으로 BFS를 10% 치환함에 따라 Base의 경우 I 시리즈에 비해 유동성이 증가하여 감수제 첨가율이 다소 감소하는 것으로 나타났으며, II시리즈의 경우와 비교하여 잔골재치환 2%의 경우 DM을 제외한 배합에서 감수제 첨가율이 0.1%정도 감소하였고 4%의 경우에는 II시리즈의 경우와 유사한 경향이 나타남을 알 수 있다.

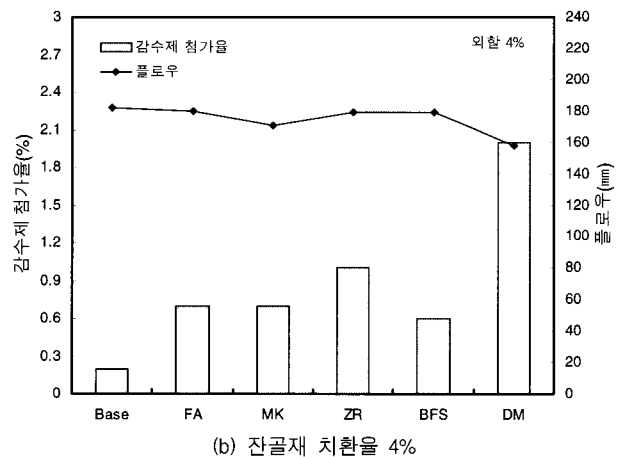
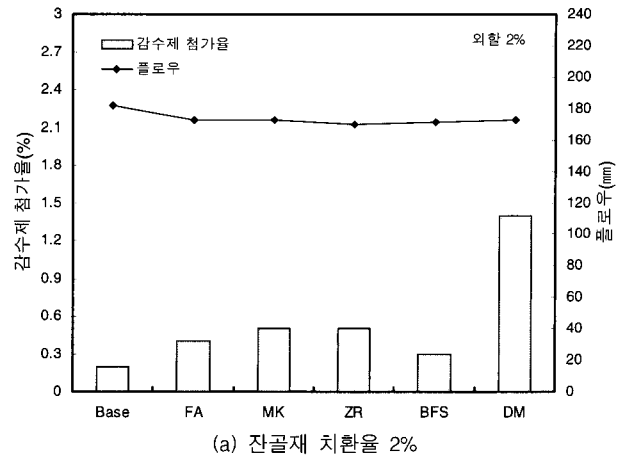


그림 5. 혼화재 종류에 따른 감수제 첨가율 및 플로우의 변화(III시리즈)

이상의 I~III시리즈의 혼화재 종류에 따른 감수제 첨가율 및 플로우의 변화를 검토한 결과 각종 혼화재를 잔골재 일부로 외할치환함에 따라 감수제 첨가율은 점차 증가하였으며, 특히 외할치환 4%의 경우 외할치환 2%에 비하여 목표플로우를 만족하기 위한 감수제 첨가율이 대체적으로 증가하였다. 또한, DM을 외할치환 할 경우 과도한 감수제 사용으로 인하여 초기 응결 지연 현상을 나타내었다.

### 3.2 압축강도 검토 및 분석

그림 6은 I 시리즈에서의 혼화재 종류에 따른 압축강도의 변화를 나타낸 것으로 외할치환 2%의 경우 FA, MK는 재령 1일까지 Base에 비해 다소 낮게 나타났으나 재령 2일 이후에는 역전되고, 재령 7일 이후에는 다시 재역전되는 것으로 나타났다. 또한 ZR 및 BFS의 경우 18h부터 재령 3일까지 모두 Base보다 강도가 높게 발현되었으며, DM의 경우 감수제의 과잉첨가로 인한 응결지연으로 재령 1일까지 강도측정이 불가능하였다. 외할치환 4%의 경우 재령 3일까지 DM을 제외하고 거의 모든 배합에서 Base에 비해 높은 강도를 발현하고 있으며, 재령 7일 이후에는 Base보다 상대적으로 낮게 나타났다. 대체적으로 재령 7일 이내의 조기강도 발현은 외할치환 2%에 비해 외할치환 4%에서의 압축강도가 높게 나타났다.

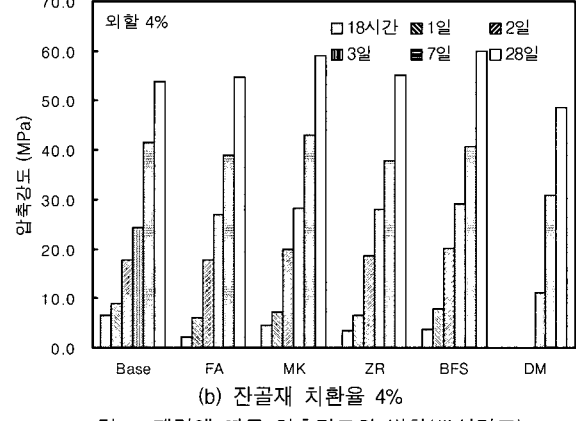
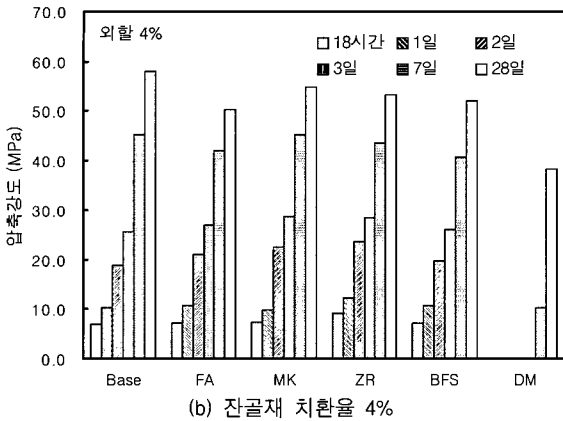
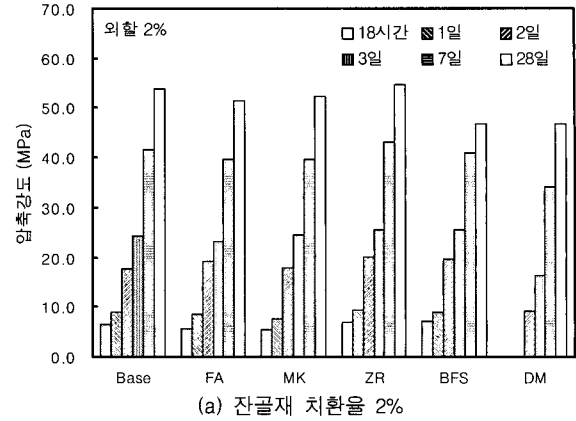
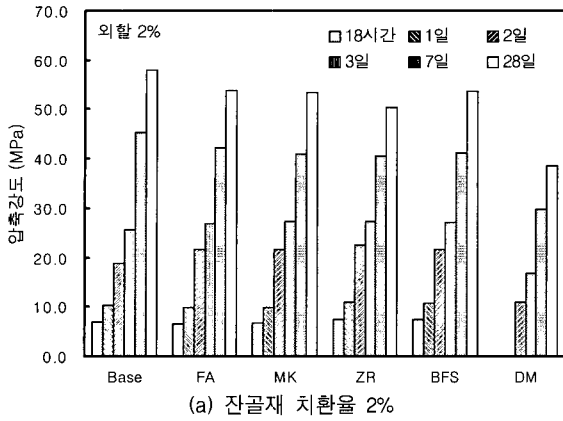


그림 6. 재령에 따른 압축강도의 변화(I 시리즈)

그림 8. 재령에 따른 압축강도의 변화(III 시리즈)

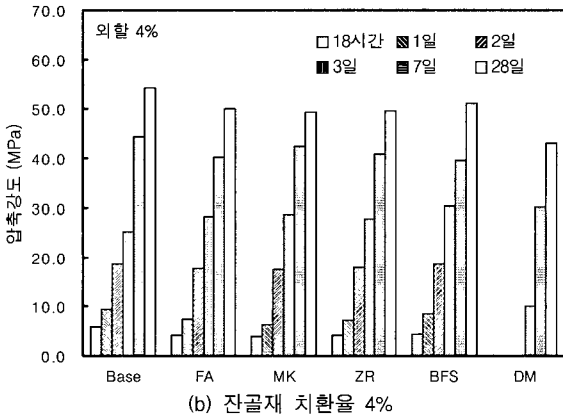
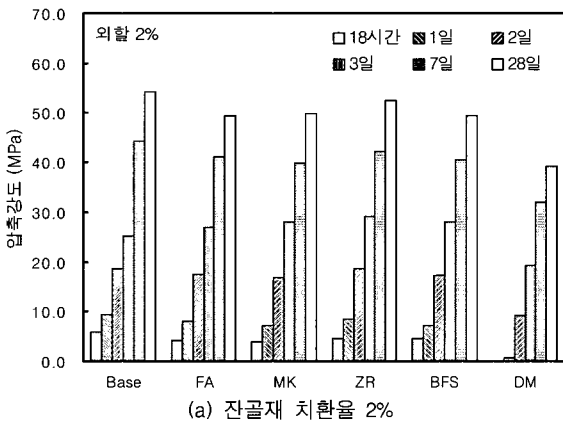


그림 7. 재령에 따른 압축강도의 변화(II 시리즈)

그림 7은 II 시리즈에서의 혼화재 종류에 따른 압축강도의 변화를 나타낸 것으로 Base에 비하여 외할치환 한 경우에 재령 3일을 제외하고 대체적으로 압축강도가 낮게 발견되고 있는데 이는 동일한 유동성을 확보하기 위한 감수제 첨가율이 외할치환한 경우에 상대적으로 증가했기 때문으로 사료된다. 또한 외할치환 비율에 따른 차이는 크지 않은 것으로 나타났으며, DM의 경우 I 시리즈에서와 마찬가지로 감수제의 과잉첨가로 인하여 재령 1일 및 2일의 초기 재령에서의 강도측정이 불가능하였다.

그림 8은 III 시리즈에서의 혼화재 종류에 따른 압축강도의 변화를 나타낸 것으로 Base의 경우 FA를 5% 치환한 II 시리즈에 비해 다소 높게 나타났으며, 외할치환 2%의 경우 ZR 및 BFS를 사용한 배합에서 혼화재를 치환하지 않은 I 시리즈의 Base와 유사한 강도 수준을 발현하여 상대적으로 높게 나타났다. 또한, 초기 압축강도의 경우 잔골재치환 2%가 4%에 비하여 크게 나타났으며, 재령 28일 압축강도 발현의 경우 4%가 더 크게 나타났다.

재령 18시간에서의 압축강도 변화를 나타낸 그림 9에서 보는바와 같이 혼화재를 치환하지 않은 시리즈 I의 경우가 가장 높은 압축강도를 발현하고 있으며, FA를 5% 치환한 시리즈 II 및 BFS를 10% 치환한 시리즈 III의 경우가 상대적으로 낮게 나타나고 있다. 외할치환율에 따른 변화를 살펴보면, 시리즈 I에서는 외할치환 4%, 시리즈 II에서는 유사하게 나타났으며, 시리즈 III에서는 외할치환 2%가 높은 강도를 발현하고 있다.

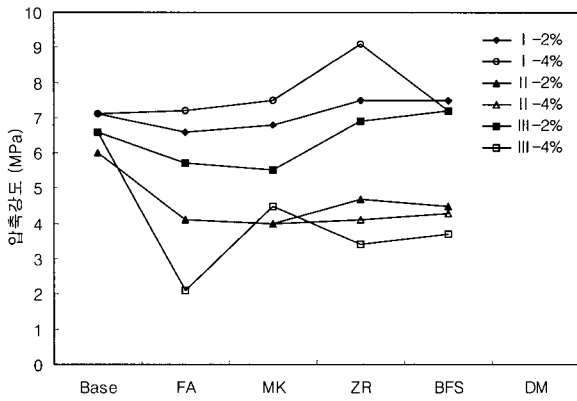


그림 9. 18시간에서의 압축강도

이상의 시리즈 I, II 및 III에서의 압축강도를 검토한 결과 DM을 잔골재치환한 경우 유동성을 확보하기 위한 감수제 첨가율이 크게 증가하여 초기 재령에서 탈형이 불가능하였으며, 재령 28일 압축강도 발현도 크게 저하되는 것을 알 수 있었다. 또한, ZR 및 BFS를 잔골재 용적에 대하여 외할치환 할 경우 FA, MK 및 DM에 비하여 조기강도 확보에 상대적으로 유리할 것으로 판단되었다. 특히, ZR을 사용할 경우 수화 초기에 천연 제올라이트 결정으로부터 이탈되는 활성알루미나가 Ca(OH)<sub>2</sub>와 반응하여 조기강도 확보가 유리한 것으로 판단된다<sup>6)</sup>. 또한, 외할치환 4%의 경우 외할치환 2%에 비해 초기 재령에서 뚜렷하게 큰 조기강도 발현을 나타내지 않고 있어 이를 콘크리트에 적용할 경우 외할치환 2%가 더 적절할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

혼화재 종류 및 치환율에 따른 모르타의 조기강도 특성에 대해 비교·검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 혼화재의 입형 확인을 위한 SEM 촬영에서 FA의 경우 무수히 많은 구형 입자들을 확인할 수 있었으며, DM의 경우 입자들 사이에 원형 판상의 결정들이 관찰되었다.
- 2) 혼화재 외할치환에 따른 감수제 첨가율은 Base에 비해 증가하였으며, 특히 외할치환 4%의 경우 외할치환 2%에 비해 유동성 확보를 위한 감수제 첨가율이 증가하였다.
- 3) DM을 외할치환한 경우 감수제 첨가율이 5~8배까지 크게 증가하여 초기 응결 지연 현상을 나타냈으며, 초기 및 재령 28일 압축강도 발현도 크게 저하되었다.
- 4) ZR 및 BFS를 외할치환한 경우 각 재령에서 압축강도가 가장 크게 발현되어 FA, MK 및 DM에 비하여 조기강도 확보에 상대적으로 유리할 것으로 판단된다.
- 5) 조기강도 확보를 위하여 혼화재를 외할치환할 경우의 외할치환율은 감수제 첨가율 증가에 따른 초기 재령의 강도 저하를 고려하여 4%에 비해 2%가 적절할 것으로 판단된다.

#### 참고 문헌

1. 김혁중, 김남옥, 고영주, 배주성, 플라이애쉬를 혼입한 콘크리트의 조기강도 개선에 관한 실험적 연구, 대한토목학회 정기학술대회논문집, pp.1164~1169, 2003
2. 류한길, 임남용, 박종옥, EAF Dust상의 증진속을 함유한 활성 구조토가 혼합된 시멘트 모르타의 내화특성에 관한 연구, 한국콘크리트학회논문집, 제 9권 1호, pp.143~151, 1997.02
3. 박종호, 이의배, 최세진, 이성연, 김규용, 김무한, 부순모래 대체율에 따른 콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구, 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 제 17권 2호, pp.739~742, 2005.11
4. 오성진, 유석형, 신성우, 이보형, 지식원, 콘크리트 강도증진에 따른 거푸집 존치기간 단축효과에 관한 연구, 대한건축학회 학술발표논문집, 제 22권 2호, pp.319~322, 2002.10
5. 이회근, 윤태섭, 이광명, 플라이애쉬를 함유한 고강도 콘크리트의 초기 강도와 속도 발현 특성, 한국콘크리트학회 봄학술발표논문집, pp.43~48, 2001
6. 주지현, 여동구, 강석표, 길배수, 남재현, 김무한, 슬립폼 적용을 위한 고강도콘크리트의 조기강도 발현성상에 관한 실험적 연구, 한국콘크리트학회 가을학술발표논문집, pp.355~358, 2000
7. 최재진, 엄명현, 이창용, 천연제올라이트를 혼화재로 사용한 모르타의 물성 연구, 대한토목학회논문집, 제15권 제5호, pp.1213~1223, 1995.09
8. 최재진, 제올라이트를 사용한 콘크리트의 기초적 성질에 관한 연구, 한국콘크리트학회논문집, 제 10권 5호, pp.205~216, 1998
9. 한천구, 황인성, 신병호, 콘크리트의 초기 강도발현에 따른 거푸집 제거시기의 결정, 대한건축학회논문집, 제 18권 9호, pp.157~162, 2002.09
10. 한천구, 황인성, 이승훈, 김규동, 콘크리트의 초기 강도발현에 미치는 혼화재료의 영향, 대한건축학회논문집, 제 19권 9호, pp.95~102, 2003.09
11. 홍상희, 김상우, 신병호, 황인성, 윤기원, 한천구, 초기재령에서 거푸집과 콘크리트간의 부착강도 특성, 대한건축학회 추계학술발표논문집, 제 21권 2호, pp.383~386, 2001.10
12. 황인성, 나운, 이승훈, 류현기, 한천구, 콘크리트의 초기 강도발현에 미치는 혼화제의 영향, 한국콘크리트학회 봄학술발표논문집, 제 15권 1호, pp.741~744, 2003
13. 황인성, 우종완, 김규동, 이승훈, 한천구, 조기강도 발현형 AE감수제를 사용한 콘크리트의 혼화재 치환방법 변화에 따른 초기 강도발현 특성, 한국콘크리트학회 가을학술발표논문집, pp.269~272, 2003
14. Carino N. J. and Tank R. C., Maturity Function for Concrete Made with Various Cement and Admixtures, ACI Material Journal, Vol. 89, No. 2, pp.188~196, 1992
15. D. Whiting, M. Nagi, and P.A. Okamoto, Early Strength Gain of Rapid Highway Repair Concrete, Concrete International, Vol. 16, No. 8, August, pp.28~35, 1994
16. Khil, B. S., Kwon, Y. J., Nam, J. H., and Kim, M. H., A Compressive Strength Prediction of High-strength Concrete by Maturity Method, Proceedings of The 4th Japan/Korea Joint Symposium on Building Materials, pp.167~175, 1999.2
17. Tank, R. C. and Carino N. J., Rate Constant Functions for Strength Development of Concrete, ACI Material Journal, Vol. 88, No. 1, pp.74~83, 1991.