

# 혼화재를 치환한 시멘트 모르터 및 콘크리트의 강도발현 특성에 관한 연구

**한 천 구** 청주대학교 건축공학부 교수, 공학박사  
**주 은 희** 청주대학교 건축공학과 대학원 석사과정

## 1. 서론

콘크리트용 혼화재는 콘크리트의 품질향상, 원가절감, 환경오염 방지 등을 목적으로 화력발전소나 제철소 산업에서 발생하는 산업부산물을 시멘트의 대체재료로 활용하고 있다.

이러한 혼화재는 콘크리트에 혼입하게 되면 시멘트 수화과정에서 화학반응을 수반하는 것으로 현재 가장 많이 사용되고 있는 혼화재인 플라이애쉬(이하 FA) 및 고로슬래그 미분말(이하 BS)은 지금까지 많은 연구진에 의해 다각도의 연구가 진행되어 왔다.

그러나 이와같은 혼화재는 포조란 반응과 잠재수경성 반응에 의해 강도가 발휘되는 것으로서 온도 의존성이 중요시 되고 있다.

그러므로 본 연구에서는 FA 및 BS를 치환한 시멘트 모르터 및 콘크리트의 양생온도에 따른 강도발현 특성에 대해 검토함으로써 실무에 참고할 수 있는 자료로 제공하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2-1 실험계획

본 연구의 실험계획은 [표 1]과 같다. 먼저 시리즈 I 인 시멘트 모르터의 실험으로 모르터 배합비는 1:3의 1수준에 대하여 혼화재를 치환하지 않은 Plain과 혼화재로 FA 및 BS를 10% 치환한 3배치에 대하여 양생온도 5, 20 및 35℃의 3수준으로 변화시킨다. 실험사항으로 굳지 않은 모르터에서는 플로우, 단위용적질량 및 응결시간을 측정하고, 경화 모르터에서는 압축강도 및 휨강도를 측정하도록 한다.

또한, 한중 및 서중조건을 고려한 시리즈 II 콘크리트의 실험으로 W/B는 45%의 1수준에 대하여 혼화재를 치환하지 않은 Plain과 FA 및 BS를 10% 치환한 3배치에 대하여, 양생온도 -5, 5 및 20℃의 3수준으로 실험계획을 한다.

이때 Plain 및 모든 배합의 목표 플로우 및

[표 1] 실험계획

구 분		시리즈 I (시멘트 모르터)	시리즈 II (콘크리트)
배 합 사 항	배합비 및 W/B(%)	2	1:3
	목표 플로우 및 슬럼프(mm)	1	150±15
	혼화제	3	Plain, FA, BS
	치환율(%)	2	0, 10
	양생온도(℃)	3	5, 20, 35
실 험 사 항	굳지않은 모르터	3	· 플로우 · 단위용적질량 · 응결시간 · 슬럼프 · 슬럼프플로우 · 공기량 · 단위용적질량 · 응결시간 · 블리딩
	경화 모르터	2	· 압축강도

[표 2] 모르터의 배합사항

배 합 비	혼화재 (%)	W/B (%)	단위 수량 (kg/m <sup>3</sup> )	용적배합 (ℓ / m <sup>3</sup> )			질량배합 (kg/m <sup>3</sup> )		
				C	S	B	C	S	B
1:3	P	46.2	234	161	595	0	506	1518	0
	FA10	46.4	233	143	591	23	452	1506	50
	BS10	46.8	236	144	593	17	454	1512	50

[표 4] 시멘트의 물리적 성질

밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	안정도 (%)	응결시간(분)		압축강도(MPa)		
			초결	종결	3일	7일	28일
3.15	3,265	0.15	210	300	22.0	28.9	38.9

[표 5] 플라이애쉬의 물리적 성질

밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	강열감량 (%)	압축강도비 (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	습분 (%)	단위수량 비(%)
2.22	3,850	4.2	92	67.5	0.2	100

슬럼프를 150±15mm, 콘크리트인 경우 목표 공기량을 4.5±1.5%를 만족하도록 배합설계한다. 굳지않은 모르터에서는 플로우, 단위용적질량 및 응결시간을 측정하고, 굳지않은 콘크리트에서는 슬럼프, 슬럼프플로우, 공기량,

단위용적질량, 응결시간 및 블리딩을 측정하고, 경화 콘크리트에서는 재령에 따라 압축강도를 측정한다.

[표 3] 콘크리트의 배합사항

W/B (%)	단위수량 (kg/m <sup>3</sup> )	S/a(%)	혼화재 치환	SP/C (%)	AE/C (%)	절대용적배합(ℓ / m <sup>3</sup> )				질량배합(kg/m <sup>3</sup> )			
						시멘트	혼화재	잔골재	굵은골재	시멘트	혼화재	잔골재	굵은골재
45	175	45	Plain	0.4	0.005	124	0	295	361	389	0	762	946
			FA10	0.6	0.007	111	18	293	358	350	39	756	939
			BS10	0.35	0.005	111	13	295	361	350	39	761	945

[표 6] 고로슬래그의 물리적 성질

밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	화학성분(%)			
		MgO	SO <sub>3</sub>	강열감량(%)	염화물 이온
2.91	4,463	5.90	2.78	0.5	0.001

[표 7] 골재의 물리적 성질

구분	밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	조립률 (FM)	흡수율 (%)	단위용적질량 (kg/m <sup>3</sup> )	0.08mm체 통과량(%)
잔골재	2.58	2.89	1.12	1,614	1.15
굵은골재	2.58	6.73	1.20	1,584	0.10

[표 8] 혼화제의 물리적 성질

구분	주성분	형태	색상	밀도(g/cm <sup>3</sup> )
SP제	나프탈렌계	액상	암갈색	1.185
AE제	빈줄계	액상	미황색	1.185

본 연구에 사용된 시멘트 모르터 및 콘크리트의 배합사항은 [표 2 및 3]과 같다.

## 2-2 사용재료

본 실험에 사용한 시멘트는 국내산 A사의 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였는데, 그 물리적 성질은 [표 4]와 같다. FA는 보령 화력산, BS는 포항제철소산을 사용하였는데, 그 물리적 성질 및 화학성분은 [표 5] 및 [표 6]과 같다. 또한, 사용골재로써 잔골재는 인천 중구 항동산 세척사, 굵은 골재는 경기도 광주산 25mm 부순 굵은 골재를 사용하였는데, 각 골재의 물리적 성질은 [표 7]과 같다. 혼화제로서 고성능 감수제는 국내산 D사의 나프탈렌계와 AE제는 국내산 빈줄계를 사용하였

는데, 그 물리적 성질은 [표 8]과 같다.

## 2-3 실험방법

본 연구의 실험방법으로 모르터의 혼합은 KS L 5109에 의한 수경성 시멘트 반죽 및 모르터의 기계적 혼합방법에 의거 실시하였고, 콘크리트의 혼합은 강제식 팬타입믹서를 사용하여 혼합하였다.

굳지 않은 모르터의 실험으로 플로우 시험은 KS L 5105, 단위용적질량 시험은 KS F 2409의 규정에 따라 실시하였고, 응결시간은 KS F 2436의 프록터 관입저항 시험방법에 의거 측정하였다.

굳지않은 콘크리트의 실험으로 슬럼프는 KS F 2402 규정에 의거 실시하였고, 슬럼프 플로우는 슬럼프 측정이 끝난 후 최대직경과 이에 직교하는 직경의 평균치로 하였으며, 공기량 및 단위용적질량은 KS F 2421 및 2409의 규정에 따라 실시하였다. 콘크리트의 응결시간은 KS F 2436, 블리딩은 KS F 2414에 의거 블리딩수를 측정한 후 블리딩량으로 평가하였다.

경화 모르터의 실험으로 공시체의 제작은 ASTM C 348의 규정에 의거 40×40×160mm의 몰드를 이용하여 제작한 후 계획된 양생온도의 수중양생을 실시하는 것으로 하였다. 압축강도 및 휨강도는 ASTM C 344 및 348의 규정에 의거하여 재령에 따라 측정하는 것으로 하였다.

경화 콘크리트의 실험으로 압축강도는  $\phi$  100×200mm 공시체를 KS F 2403의 규정에 의거 제작하여 KS F 2405 규정에 따라 측정하였는데, 모든 공시체의 양생방법은 타설 후 -5℃, 5℃, 20℃ 및 35℃의 온도가 유지되도록 1일간 기중봉함양생을 실시한 후 탈형

하여 소요의 재령까지 소정의 온도가 유지되는 양생수조에서 수중양생 하였다.

단, -5℃의 경우는 초기동해 방지를 위한 최소적산온도인 15℃ D·D를 만족하기 위하여 5℃에서 1일간 양생 후 -5℃의 냉동고에서 기중봉함양생을 소정의 재령까지 실시하도록 하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3-1 시멘트 모르타의 특성 분석

##### 3-1-1 굳지않은 모르타의 특성

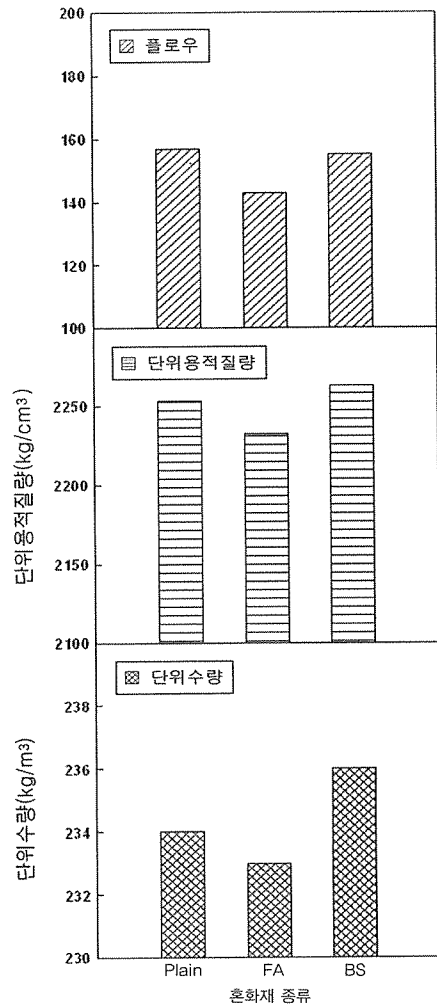
[그림 1]은 혼화재 종류별 시멘트 모르타의 플로우 및 단위용적질량 및 단위수량을 나타낸 것이다.

먼저, Plain 및 혼화재 치환에 따른 시멘트 모르타의 플로우값은 150±15mm의 범위로 목표 플로우값의 범위를 만족하였다. 단위용적질량은 FA, BS를 치환함에 따라 Plain과 비교하여 다소 작게 나타났는데, 이는 혼화재의 비중차이에 기인된 결과로 사료된다. 또한 유동성을 동일하게 하기 위하여 단위수량을 증감되었는데, FA가 유동성에 유리한 것으로 나타났다.

[그림 2]는 혼화재 종류 및 온도별 시멘트 모르타의 시간경과에 따른 관입저항값을 나타낸 것이다.

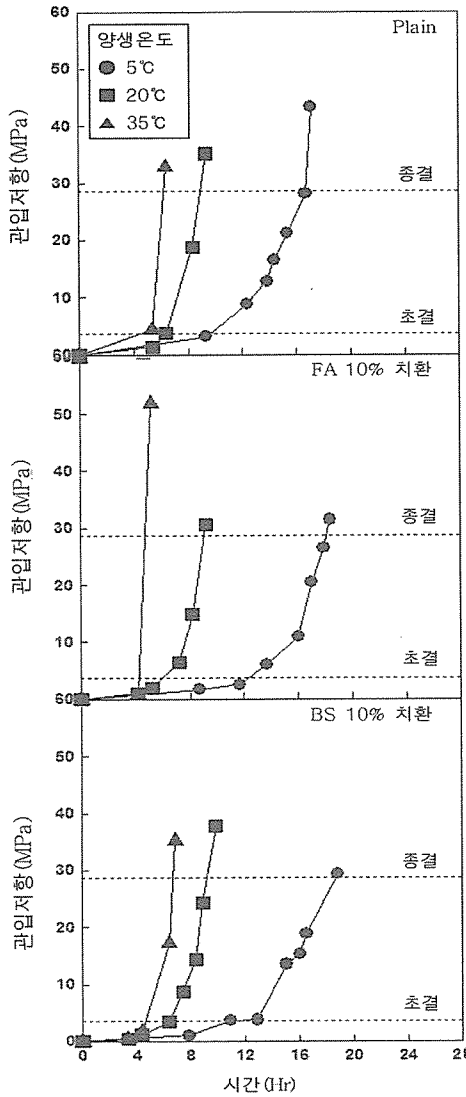
먼저, 혼화재 종류 및 온도별 시멘트 모르타의 응결시간은 온도가 높을수록 빠르게 나타났는데, 이는 시멘트의 수화반응 촉진에 기인된 결과로 사료된다.

혼화재 종류에 따라서는 온도 20℃인 경우 혼화재 종류에 관계없이 종결이 9시간 전후로 나타나고, 35℃인 경우 종결시간은 6시간 전후



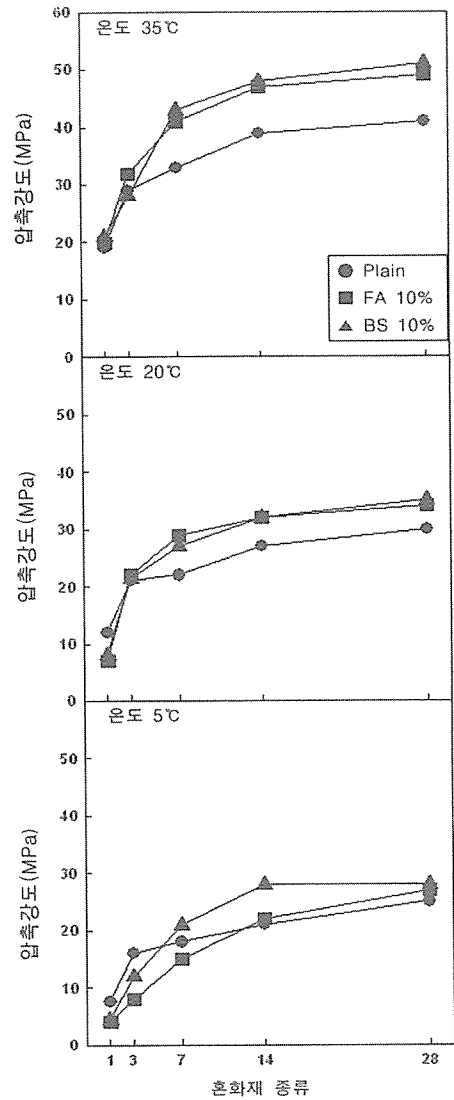
[그림 1] 혼화재 종류에 따른 시멘트 모르타 플로우, 단위용적질량 및 단위수량

로 큰 차이가 없었으나, 온도 5℃인 경우는 Plain의 경우 종결이 16시간 전후, FA는 18시간, BS는 19시간으로 Plain과 비교하여 2~3시간 정도 지연되는 것으로 나타났다. 이는 FA 및 BS의 경우 시멘트에 대한 치환으로 저온환경에서 시멘트량의 축소 및 포졸란 반응 혹은 잠재수경성 반응의 자극제 발생이 늦



[그림 2] 혼화재 종류 및 온도별 시간경과에 따른 관입저항

어짐에 기인하여 응결시간이 지연된 것으로 분석된다. 따라서 한중조건과 같은 저온에서 FA 및 BS를 사용할 경우 2~3시간 정도 응결지연 현상이 발생하므로 이에 대한 대책이 필요할 것으로 사료된다. 혼화재별로는 특히

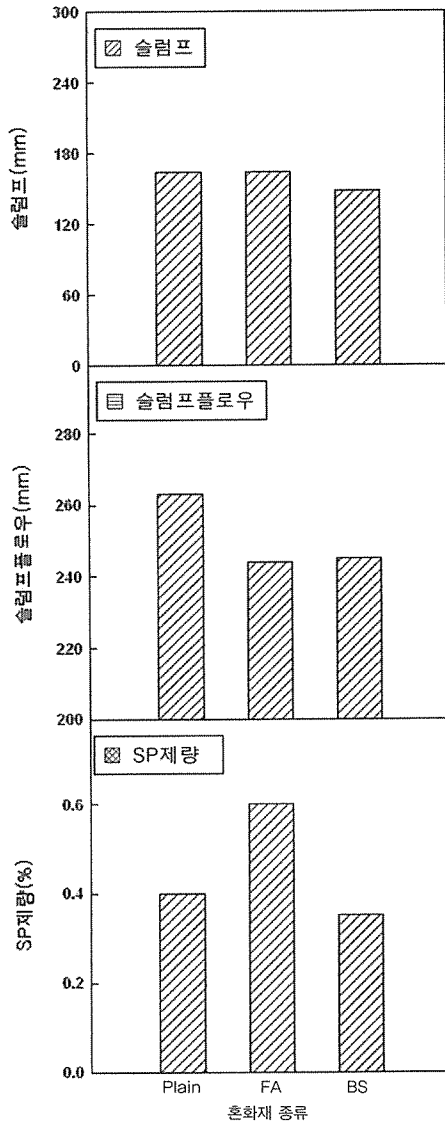


[그림 3] 혼화재 종류 및 온도별 재령에 따른 시멘트 모르타르 압축강도

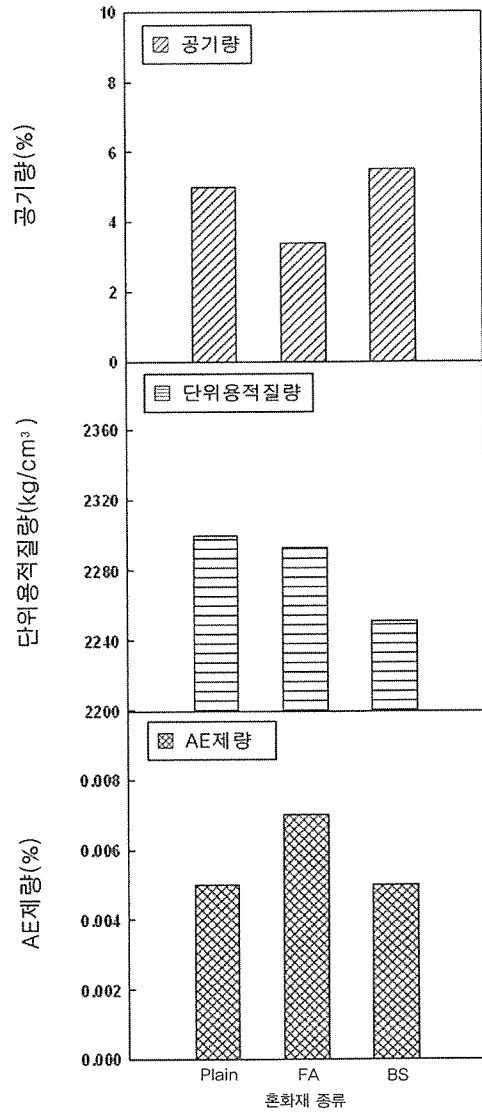
BS에서 지연이 크게 발생하였다.

### 3-1-2 경화 모르타르의 특성

[그림 3]은 혼화재 종류 및 온도별 재령경과에 따른 시멘트 모르타르의 압축강도를 나타



[그림 4] 혼화재 종류에 따른 콘크리트의 슬럼프, 슬럼프플로우 및 SP제량



[그림 5] 혼화재 종류에 따른 콘크리트의 공기량, 단위용적질량 및 AE제량

낸 것이다.

혼화재 치환 및 온도별 시멘트 모르타의 압축 강도는 전반적으로 재령이 경과할수록, 양생온도가 높을수록 증가하였다.

혼화재 종류에 따라서는 온도 35℃인 경우

초기재령에서의 강도차이는 크게 발생하지 않았으나, 재령이 경과함에 따라 FA 및 BS의 포졸란 반응 및 잠재수경성 반응에 의해 Plain보다 강도발현이 크게 나타났다.

혼화재 종류로는 특히 BS에서 크게 발현되

었다. 또한 양생온도가 20℃ 및 5℃로 낮아지면 3일, 7일과 같은 초기재령에서는 FA 및 BS가 낮았지만, 14일 및 28일에서는 유사하거나 크게 발현되어 저온이고 초기재령일수록 혼화재 치환 콘크리트의 강도저하에 유의할 필요가 있음을 알 수 있다.

### 3.2 콘크리트의 특성 분석

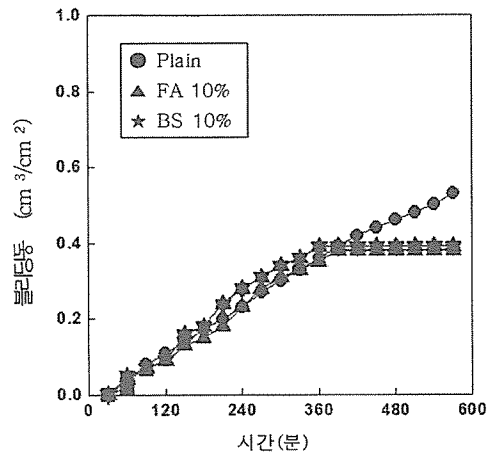
#### 3-2-1 굳지않은 콘크리트의 특성

[그림 4]는 혼화재 종류에 따른 콘크리트의 슬럼프, 슬럼프 플로우 및 SP제량을 나타낸 것이다. 전반적으로 콘크리트의 유동성은 배합설계를 통것으로 목표 슬럼프를 만족하였고, 슬럼프 플로우는 240~260mm의 범위로 나타났다. 단, FA의 경우는 유동성이 크게 나타나 SP제량이 제일 적었고, BS는 Plain보다 유동성이 저하하여 SP제량을 증가시켰다.

[그림 5]는 [그림 4]와 동일한 요령으로 공기량, 단위용적질량 및 AB제량을 나타낸 것이다. 공기량 역시 배합설계를 통하여 목표공기량을 만족시키는 것으로서 FA의 경우 공기량 확보를 위하여 AB제가 다량필요하였다. 단위용적질량은 공기량과 반대의 경향을 보였다.

[그림 6]은 혼화재 종류에 따른 콘크리트의 불리딩량을 나타낸 것이다. 전반적으로 시간이 경과할 수록 불리딩량이 증가하는 것으로 나타났는데, Plain에 비하여 FA나 BS를 사용한 경우는 360분 이후 불리딩이 더 이상 발생하지 않았는데, 이는 점성증진에 기인한 것으로 사료되며 FA 및 BS가 적정량 사용될 경우 불리딩 저감에 효과적일 것으로 분석된다.

[그림 7]은 혼화재 종류 및 온도별 콘크리트의 응결시간을 나타낸 것이다. 20℃인 경우는 혼화재를 치환한 경우가 Plain에 비하여



[그림 6] 혼화재 종류에 따른 콘크리트의 불리딩량

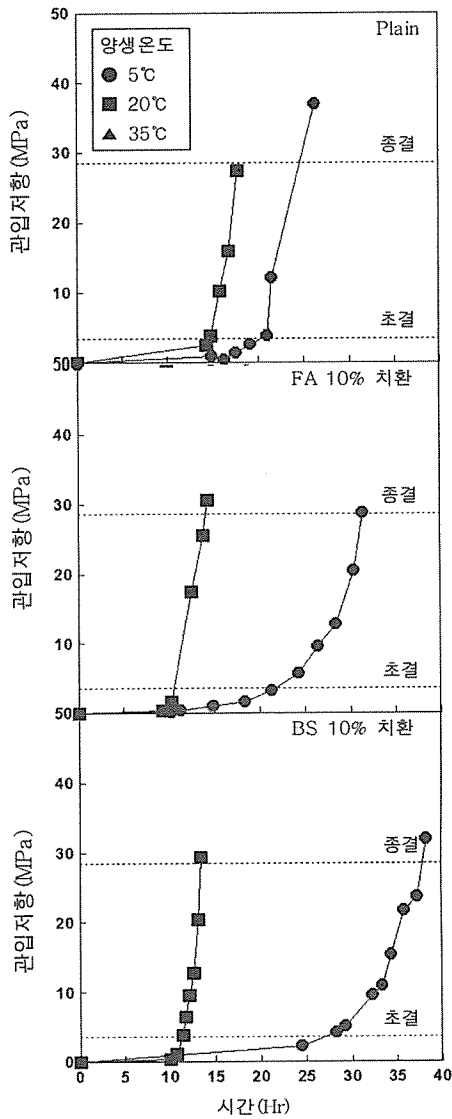
응결시간이 약간 단축되는 경향을 보였다. 단, 온도 5℃의 저온조건에서는 FA나 BS를 사용한 경우 Plain에 비하여 응결시간이 상당히 지연되는 것을 확인할 수 있었는데, 특히 BS가 더 많이 지연됨을 알 수 있었다.

#### 3-2-2 경화콘크리트의 특성

[그림 8]은 혼화재 종류 및 온도별 재령경과에 따른 콘크리트의 압축강도를 나타낸 것이다. 전반적으로 재령이 경과할수록 강도는 증진되는 것으로 나타났고, 온도별로는 온도가 낮을수록 강도는 낮게 나타났다.

먼저 양생온도 20℃인 경우, 전체적으로 Plain에 비하여 혼화재를 사용한 경우가 초기에는 낮은 강도로 나타났으나 재령이 경과함에 따라 Plain과 유사하거나 약간 높은 강도를 갖는 것을 확인할 수 있었다.

온도 5℃의 경우는 전체적으로 초기재령에서 혼화재를 사용할 경우 Plain에 비하여 약간의 저하가 발생하였고, 재령이 경과하여도 Plain에 비하여 전체적으로 낮거나 유사한 강



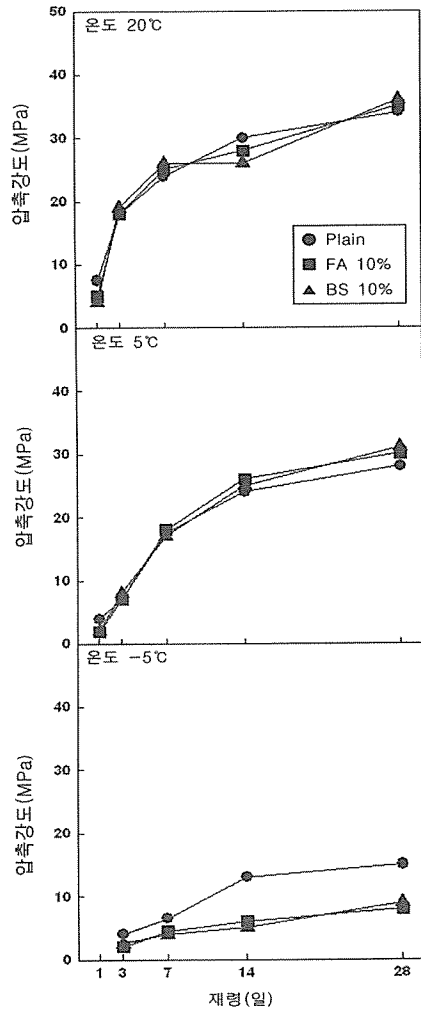
[그림 7] 혼화재 종류 및 온도별 콘크리트의 시간경과에 따른 관입저항

도를 나타내었다. 단, 양생온도 -5°C의 경우는 초기동해 방지를 위하여 1일 동안 5°C에서 양생 후 다시 -5°C로 양생하였는데, 전반적으로 FA 및 BS의 경우 초기에 낮은 강도증진

을 보이고 재령이 경과하여도 별로 강도증진이 적은 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구는 혼화재 종류별 양생온도변화에 따른 시멘트 모르터 및 콘크리트의 응결 및 강도발현 특성을 검토한 것으로, 그 실험결과



[그림 8] 혼화재 종류 및 온도별 재령에 따른 콘크리트의 압축강도



를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 혼화재 치환별 온도변화에 따른 시멘트 모르타의 응결특성으로 모든 수준에서 온도가 높을수록 응결이 촉진되었으나, 저온 환경에서는 FA 및 BS로 치환한 경우 지연되었는데, 특히 BS에서 크므로 한중조건에서의 초기강도 발현 성능이 불량하므로 한중조건에서의 응결시간 관리에 유의해야 한다.
- (2) 혼화재 치환별 온도변화에 따른 시멘트 모르타의 압축강도는 재령이 경과할수록, 온도가 높을수록 FA 및 BS 치환에서 크게 나타났으나, 저온환경에서는 Plain보다 초기강도일수록 크게 저하하는 것을 알 수 있었다.
- (3) 콘크리트의 응결특성은 시멘트 모르타와 유사하게 온도가 낮으면 FA 및 BS를 사용한 경우 크게 지연되는 것으로 나타났다.
- (4) 콘크리트의 강도특성은 시멘트 모르타와 유사하게 온도가 높을수록 FA 및 BS를 사용한 경우 Plain보다 강도가 증가하는 경향을 보였지만, 양생온도가 저온일 경우는 Plain보다 낮은 강도를 발휘하는 것으로 나타남에 따라 이에 대한 대책을 심도있

게 고려할 필요가 있는 것을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- 1) 한천구 ; 레미콘 품질관리, 기문당, 2002
- 2) 한천구 ; 콘크리트의 특성과 배합설계, 기문당, pp. 13~29, 1998
- 3) 한천구, 한민철 ; 기온과 콘크리트, 기문당, 2002
- 4) 한국콘크리트학회 ; 콘크리트 혼화재료, 기문당 1997.3, pp.11~12
- 5) 한천구, 한민철, 윤기원, 김기철, 심보길 ; 고로슬래그 시멘트를 사용한 콘크리트의 강도증진해석 및 기온보정강도의 설정에 관한 검토, 대한건축학회학술발표대회논문집, Vol. 20, No. 1, pp. 259~262, 2000. 4
- 6) 한민철, 최훈, 이광설, 윤기원, 한천구 ; 플라이애시를 사용한 콘크리트의 강도증진해석 및 기온보정 강도의 설정에 관한 검토, 대한건축학회 학술발표논문집, 제19권 2호, 1999. 10, pp.577~582
- 7) V.M. Malhotra, ; Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, aci, 1995, p.214