

# 시멘트 특성의 변화가 고강도콘크리트의 재료 특성에 미치는 영향

## The Effects of Various Cement Types and Compositions on the Material Properties of High Strength Concrete

백 상 현<sup>\*</sup>  
Paik, S. H.

이 종 열<sup>\*\*</sup>  
Lee, J. R.

엄 태 선<sup>\*\*\*</sup>  
Um, T. S.

임 채 응<sup>\*\*\*</sup>  
Lim, C. Y.

안 광 원<sup>\*\*\*\*</sup>  
Ahn, K. W.

Recently, it is very necessary the development of the manufacturing techniques for high strength concrete(HSC) for the large-scale size and good quality of civil structure. But, the manufacture and quality control of HSC of which shrinkage, heat of hydration and workability at construction field are considered, is very difficult due to its low water-cement ratio and high quantity of unit cement content.

In the present study, we tried to know and assess the influences of chemical and physical properties of cement on the material properties of HSC. We analyzed basic properties of 4 kinds of cement whose chemical and physical properties are different each other through various tests such as chemical analysis and mortar test. Also, we performed the assessment of the material properties of HSC for each cement by the tests for the conditions of same mix design and similar compressive strength.

From the results in this study, the assessment of the important quality factors of cement influencing the properties of HSC may be utilized to quality control of applied cement to manufacture the HSC of high quality.

### 1. 서론

최근들어 구조물의 내형화 및 고품질화를 위한 고강도콘크리트의 제조기술 개발이 절실히 요구되고 있다. 그러나, 고강도콘크리트는 고강도 발현을 위한 낮은 물-시멘트비와 부배합의 영향으로 수축, 수화열 및 시공성이 고려된 고품질 콘크리트의 제조 및 관리가 매우 어렵다.

본 연구에서는 콘크리트의 주요한 구성 재료인 시멘트의 화학조성 및 물리특성의 변화가 고강도콘크리트의 재료 특성에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 이를 위하여 화학조성 및 물리특성이 각기 다른 4종류의 시멘트에 대하여 원료분석 및 모르타 시험을 통하여 기초적 특성을 분석하였다. 또한, 콘크리트 배합시험을 수행하여 각 시멘트 종류에 대한 동일 배합조건 및 일징 배합강도에서의 균질 않은 콘크리트의 특성 및 역학 특성에 대한 평가를 수행하였다.

본 연구에서 얻어진 고강도콘크리트의 특성에 미치는 시멘트의 품질 인자에 대한 평가 자료는 고품질의 고강도콘크리트 제조를 위한 시멘트 품질 관리의 유용한 자료로써 활용될 수 있을 것이다.

### 2 적용 시멘트의 물리·화학적 특성

#### 2.1 화학성분

- 
- \* 성희원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구소 실 주임연구원
  - \* 성희원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구소 실 실장
  - \* 경희원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구소 책임연구원
  - \* 경희원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구소 연구원
  - \* 경희원, 쌍용양회공업(주) 생산관리팀 팀장

고강도콘크리트의 특성 평가를 위하여 검토된 시멘트의 화학적 조성을 표 1에 나타내었다. 1P는 내수용 1종 시멘트이며, E1, E2는 수출용 시멘트로서 각 시멘트는 1P에 비하여 석회석 품위(고/저 품위), C/K 제조 및 분쇄시 부원료의 배합 등의 차이에 따라 알칼리 함량과 광물조성 등의 화학적 조성 및 분말도가 다소 차이를 갖는다. 또한, 3P는 내수용 3종 시멘트로서 1P에 비해 분말도가 높고, 분쇄시 부원료 배합의 차이에 따라 광물조성이 다소 차이를 나타낸다 여기서, 1P, E1 및 E2는 화학적 조성 및 분말도에 있어서 2, 3, 4, 5종 시멘트 보다는 1종 시멘트에 가까운 조성이다.

표 1 적용 시멘트의 화학적 특성

C/M	시멘트		Chemical Components (%)										광물조성			
	TYPE	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	Ig-Loss	F-CaO	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
1P	1종	내수용	20.72	6.15	3.05	62.18	2.78	2.11	0.84	0.10	2.08	1.30	44.01	26.20	11.12	9.29
E1		수출용J	20.94	5.30	3.25	63.44	2.65	1.95	0.60	0.10	1.79	0.88	53.29	19.83	8.54	9.90
E2		수출용A	21.02	4.80	3.29	63.69	2.64	1.99	0.59	0.12	1.44	0.77	56.89	17.35	7.16	10.01
3P	3종	내수용	19.90	5.60	3.00	62.30	2.80	4.20	0.84	0.10	1.40	1.60	48.49	20.47	9.76	9.13

## 2.2 물리적 특성

시멘트별 물리적 특성을 표 2에 나타내었다. 1P에 비해 E2와 3P는 응결이 빠르고, 고강도를 발현하며, 초기강도(재령1일) 발현율이 높다.

표 2. 적용 시멘트의 물리적 특성

구분	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	비중 (g/cm <sup>3</sup> )	응결		압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )			
			초결 (min.)	종결 (hr:min.)	1일	3일	7일	28일
1P	3224	3.15	260	06:49	100	213	293	373
E1	3254	3.15	255	06:30	111	231	317	417
E2	3665	3.15	200	05:50	123	235	325	435
3P	4350	3.12	185	04:50	150	270	366	470

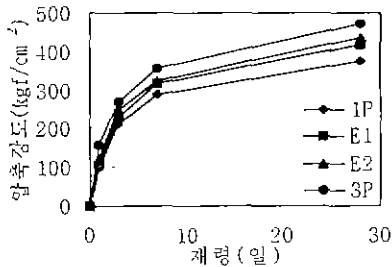


그림 1. 시멘트 종류별 모르터 압축강도

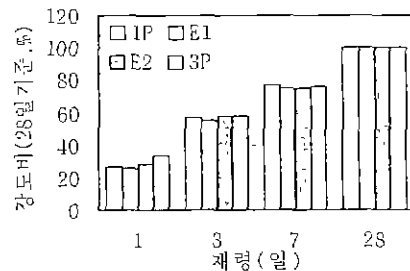


그림 2. 모르터 압축강도 발현특성

## 3 시멘트 종류별 고강도콘크리트 적용 특성

### 3.1 콘크리트 배합조건 및 유동 특성

시멘트별 고강도콘크리트에의 적용 특성을 평가하기 위한 배합조건은 표 3과 같다. 여기서, 내수용 1P의 배합조건은 현재 고속철도 교량 상부슬래브에 적용되는 콘크리트(설계강도 400kgf/cm<sup>2</sup>)의 시방 배합조건으로써, E1 및 E2는 이와 동일한 조건이고, 3P는 시킨 시험을 통하여 1P와 유사한 작업성 및 28일 강도를 발현하는 조건을 선정하였다.

그림 3에 각 조건별 슬럼프 경시변화 특성을 나타내었다. 콘크리트 배합 직후의 슬럼프는 모든 배합이 유사하였으며, 30분 경과 후 1P, E1 및 E2 조건에서는 거의 유사하였고, 3P의 경우 상대적으로 다소 낮은 슬럼프를 나타내었다. 시험결과로부터 고강도콘크리트의 시킨 경과에 따른 작업성은 시멘트의

화학적 조성에 비하여 분말도 특성이 보다 큰 영향을 주는 것으로 판단된다 또한, 일반적으로 시멘트의 알칼리 함량이 높을수록 급결성을 보이는 것으로 보고되고 있지만, 고강도콘크리트에 대하여는 시멘트의 알칼리 함량의 감소가 콘크리트의 부배합으로 인한 유동성 손실을 극복하지는 못하는 것으로 나타났다. 특히 E2 조건의 경우, 1P 시멘트에 비해 분말도가 다소 높지만, 알칼리 함량이 적고 초기 수화반응 속도가 큰 C<sub>3</sub>A의 함량이 적어 서로 상쇄되는 효과가 있는 것으로 판단된다.

표 3. 콘크리트 배합조건

C/M	배합조건		단위재료량(kg/m <sup>3</sup> )				SP (C <sup>m</sup> (%) <sup>1</sup> )	AE제 (C <sup>m</sup> (%) <sup>2</sup> )
	W/C (%)	S/a (%)	C	W	S	G		
1P	37.7	43	470	177	697	942	1.15	0.04
E1	37.7	43	470	177	697	942	1.15	0.04
E2	37.7	43	470	177	697	942	1.15	0.04
3P	45.9	43	410	188	705	953	1.35	0.04

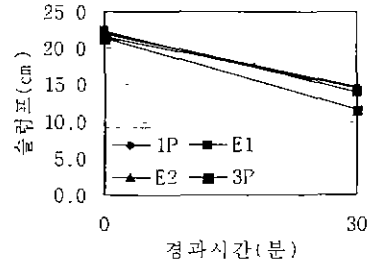


그림 3. 슬럼프 경시변화 특성

### 3.2 압축강도 특성

각 조건별 압축강도 시험결과를 그림 4에 나타내었고, 재령별 강도 발현율을 그림 5에 나타내었다. 1P에 비하여 E1 및 E2는 재령 28일에서 약 15%내외의 강도 증진을 나타내었다. 또한, 3P는 초기 3일에서 가장 높은 조강성을 나타내었고 단위시멘트량이 적음에도 불구하고(약 13%), 1P와 유사한 28일 강도를 나타내어 고강도 특성을 갖는 것으로 나타났다.

E1은 상대적으로 재령에 따른 강도 증진율이 가장 높았는데 이는 분말도와 알칼리 함량 등이 낮기 때문이며, E2 및 3P는 높은 분말도의 영향으로 고강도 특성을 나타내었다. 따라서, 부배합의 고강도콘크리트에 대하여는 시멘트의 알칼리 함량의 감소와 적절한 분말도 증가가 고강도화에 큰 기여를 하는 것으로 판단된다

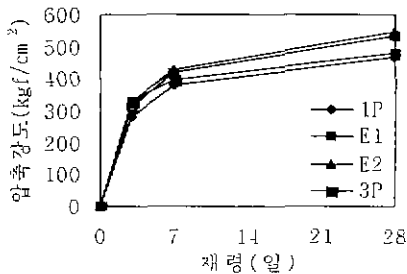


그림 4. 시멘트 종류별 압축강도

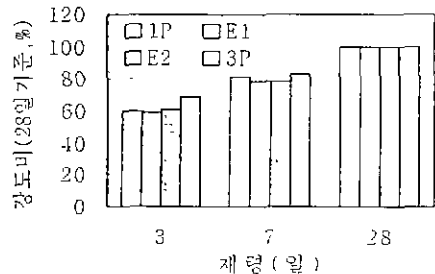


그림 5. 콘크리트 압축강도 발현특성

### 3.3 건조수축 특성

각 조건별 길이변화 시험결과를 그림 6에 나타내었다. 재령별 길이변화율은 거의 유사하였고, 특히 3P 조건에서는 초기 재령에서의 수축량이 적었는데 이는 적은 단위시멘트량으로 인한 초기의 자기수축(autogenous shrinkage)이 적어진 것에 기인된 것으로 판단된다. 일반적으로 시멘트의 여러 특성 중 C<sub>3</sub>A의 양이 수축에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있으나, 적용된 시멘트의 경우 그 함량이 큰 차이를 갖지는 않고 있어 이러한 특성이 크게 반영되지는 않는 것으로 나타났다 따라서, 고강도콘크리트를 적용하는 경우, 건조수축을 감소시키기 위하여는 시멘트의 품질개선 보다는 함수율이 높은 양질의 고성능 감수제를 적용하여 단위수량을 최소화하는 것이 필요하다

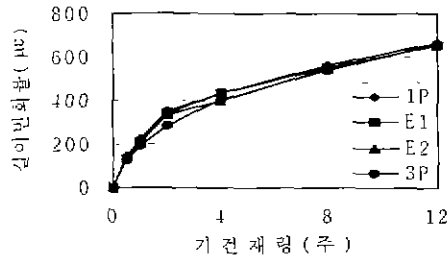


그림 6 건조수축 시험결과

#### 4. 설계강도 500kgf/cm<sup>2</sup> 조건에서의 시멘트 종류별 특성

##### 4.1 배합설계

본 장에서는 앞서 검토된 배합에 비해 보다 부배합에서의 각 시멘트별 고강도콘크리트의 재료 특성을 평가하기 위하여 동일 고강도 조건(설계강도 500kgf/cm<sup>2</sup>)에서의 재료 시험을 수행하였다. 기준 설계강도에 대한 시방배합을 위하여 W/C를 ±5%씩 변화시켜 배합시험을 수행하였다. 그림 7에는 이러한 배합시험의 분석결과를 나타내었고, 표 4에는 설계강도 500kgf/cm<sup>2</sup>에 대한 시방배합 조건을 선정 한 결과를 정리하였다.

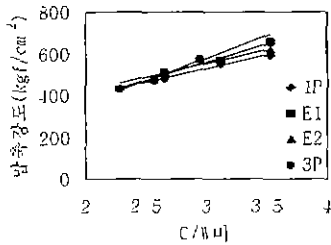


그림 7 시험배합 분석 결과

표 4. 설계강도 500kgf/cm<sup>2</sup>의 W/C비 선정

C/M	관계식 (강도=a+b×C/W비)			실제강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	배합강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	C/W비	W/C
	a	b	R				
1P	136.5	130.4	0.98	500	600	3.554	28.1
E1	44.5	171.8	0.99	500	600	3.233	30.9
E2	172.1	126.8	0.99	500	600	3.375	29.6
3P	-69.5	216.5	0.98	500	600	3.092	32.3

##### 4.2 콘크리트 배합조건

시험배합을 통하여 선정된 배합조건은 표 5와 같으며, 앞서의 400kgf/cm<sup>2</sup>에 대한 배합조건(표 3)에 비하여 배합 직후의 동일 작업성을 위한 단위수량 및 고성능감수제의 사용량이 증가하였다. E1과 E2는 1P에 비하여 부배합으로 인한 콘크리트의 검성 증가가 상대적으로 적었으며, E1은 가장 좋은 유동성을 나타내었다.

표 5 설계강도 500kgf/cm<sup>2</sup>의 시방배합 조건

C/M	배합조건		단위재료량(kg·m <sup>3</sup> )				SP (C <sup>-1</sup> )	VE계 (C <sup>-1</sup> )	slump (cm)	air (%)
	W/C(%)	S/a(%)	C	W	S	G				
1P	28.1	37.5	655	184	549	933	1.30	0.03	207	4.6
E1	30.9	40.0	586	181	612	935	1.30	0.03	219	4.4
E2	29.6	39.0	615	182	586	934	1.30	0.03	203	4.4
3P	32.4	39.0	586	190	585	933	1.40	0.03	200	4.3

##### 4.3 압축강도 특성

각 조건별 압축강도 시험결과를 그림 8에 나타내었고 계량편 강도 밀원율을 그림 9에 나타내었다. E1 배합은 단위시멘트량이 가장 적음에도 불구하고 가장 높은 강도를 나타내었으며 특히 1P의 경우

가장 적은 강도를 나타내어 400kgf/cm<sup>2</sup>에 대한 배합강도의 증진(약 25%)에 비해서 강도 발현을 위한 단위시멘트량이 급격히 증가(약 40%)하였다.

모든 배합이 앞서 검토된 배합에 비하여(그림 5) 재령 경과에 따른 강도 증진율이 전반적으로 감소하여 단위시멘트량이 많아지는 부배합 일수록 장기재령에서의 강도 증진율이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 1P에 비하여 3P가, E1에 비하여 E2가 장기강도 발현율이 감소하여 분말도의 증가가 부배합 일수록 장기강도 발현을 감소시킴을 알 수 있다. 동일 분말도(1P와 E1)에서도 재령별 강도 발현율이 달라져 알칼리 및 C<sub>3</sub>A 함량이 작을수록 장기강도 발현율이 커지는 것으로 나타났다.

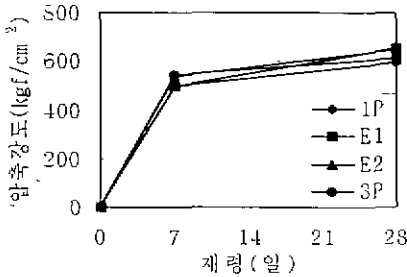


그림 8. 시멘트 종류별 압축강도

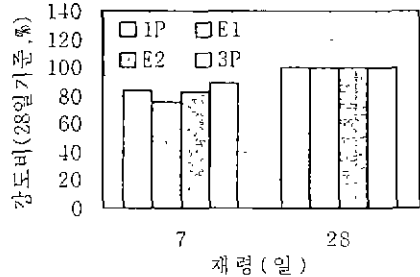


그림 9. 재령별 압축강도 발현율

#### 4.4 건조수축 특성

각 조건별 건조수축 시험결과는 그림 10과 같으며, 각 배합별 길이변화율은 거의 유사하였다.

#### 4.5 중성화 특성

고강도콘크리트의 내구특성 평가의 일환으로 중성화 특성을 평가하였다 이를 위하여 각 조건별 공시체(φ10x20cm)를 28일간 표준양생 한 후 온도 40℃, 상대습도 60%, CO<sub>2</sub> 농도 5%인 조건에서 촉진 중성화 시험을 수행하였으며, 그 결과는 그림 11과 같다 시험결과 각 조건별 중성화 특성은 거의 유사하였다. 이는 고강도콘크리트의 고강도성, 낮은 물-시멘트비 및 치밀 조직의 형성으로 인하여 일반 콘크리트에 비하여 중성화 등의 내구성이 매우 우수하기 때문으로, 포틀랜드시멘트를 격용하는 고강도 콘크리트는 시멘트 특성의 작은 변화가 내구성에 큰 영향을 주지는 않는 것으로 판단된다.

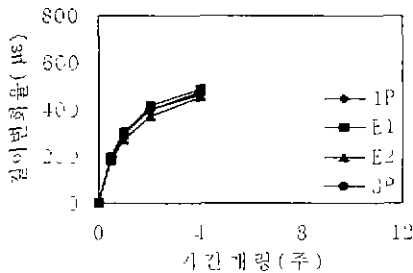


그림 10. 건조수축 시험결과

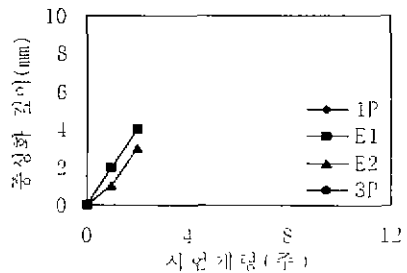


그림 11. 촉진 중성화 시험결과

#### 4.6 슬립스트 현상변화 특성

설계강도 500kgf/cm<sup>2</sup>의 배합은 설계강도 400kgf/cm<sup>2</sup>인 배합(그림 3 및 그림 12)에 비하여 단위시멘트량의 급격한 증가로 인한 부배합의 영향으로 시간경과에 따른 작업성이 급격히 감소된다. 이러한 강도의 부배합을 적용하는 경우, 현장 시공성을 확보하기 위해서는 지연성이 높은 양질의 화학 혼화제를 직접히 선정하여야 한다. 본 설계에서는 앞서 검토된 배합에서 적용된 고성능감수제(1PR)와 지연성이 높은 고성능AF 감수제(2PR)를 비교하여 부배합(설계강도 500kgf/cm<sup>2</sup>)에서의 유능성 확보 가능한 높은 감도

하였다. 적용된 배합조건은 표 6과 같고, 슬럼프 경시변화 및 압축강도 시험결과는 그림 12 및 그림 13과 같다. 30분후의 유동성이 PZ를 적용한 배합이 PR을 적용한 배합에 비해 크게 증가하였으며, 압축강도 발현은 거의 유사하였다. 이와 같이 극도의 부배합 콘크리트에서는 양질의 혼화제 적용으로 원활한 현장 시공성을 얻을 수 있다. 이와 함께, 감수율이 우수한 혼화제의 적용은 단위수량 및 단위시멘트량을 감소시켜 콘크리트의 수축 및 부배합으로 인한 수화열을 억제할 수 있을 것이다.

표 6. 유동성 개선을 위하여 검토된 배합조건

C/M	배합조건		단위재료량(kg/m <sup>3</sup> )				SP	AE제	slump	air
	W/C(%)	S/at(%)	C	W	S	G	(C <sup>m</sup> )	(C <sup>m</sup> )	(cm)	(%)
1P	28.1	37.5	655	184	549	933	1.30 <sup>*</sup>	0.03	21.7	4.7
1P-2							1.30 <sup>**</sup>	-	21.5	5.0

\* 고성능감수제 PR : 나프탈렌계(표 3과 표 5 적용 SP)

\*\* 고성능AE감수제 PZ : 폴리카본산계

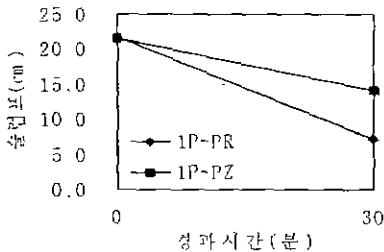


그림 12 슬럼프 경시변화 시험결과

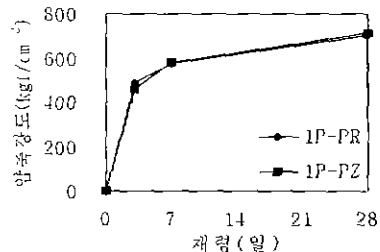


그림 13 압축강도 시험결과

### 5. 결론

- 1) 화학조성 및 물리특성이 다소 상이한 4종류 시멘트의 고강도콘크리트(설계강도 400kgf/cm<sup>2</sup>)에의 적용 특성을 평가하였는데, 검토된 시멘트 조건의 범위내에서는 고강도 발현을 위하여는 시멘트 분말도의 적절한 증가와 알칼리 함량의 저감이 요구된다. 그러나, 분말도 증가는 시공성 저하의 직접적인 원인이 되므로 양질의 혼화제 적용 및 시멘트의 알칼리 함량 감소가 필요하다.
- 2) 단위시멘트량이 극히 많은 부배합의 콘크리트(설계강도 500kgf/cm<sup>2</sup>)의 경우, 모든 배합의 장기강도 증진율이 감소하였으며, 내수용 1종시멘트(1P)는 강도발현에 비하여 시멘트량의 요구량이 크게 증가하였다. 이러한 극도의 부배합의 경우, 고강도 발현을 위하여는 분말도 증가보다는 알칼리 함량의 감소가 유리할 것으로 판단된다. 또한, 극도의 부배합의 영향으로 검토된 시멘트 종류와 무관하게 유동성의 급격한 손실을 야기하였으며, 이의 개선을 위하여 지연성이 양호한 혼화제를 검토한 결과 양호한 작업성을 얻을 수 있었다.
- 3) 검토된 포틀랜드시멘트를 적용하는 경우, 설계강도 400kgf/cm<sup>2</sup>이상의 고강도콘크리트는 건조수축 및 중성화 등의 장기 내구성이 시멘트의 종류와 거의 무관하게 양호한 특성을 얻을 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- 1 State-of-the-Art, " Report on High Strength Concrete ", ACI Committee 363 ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, 1996
- 2 S. P. Shah and S. H. Ahmad, " High Performance Concretes and Applications ", 1994
- 3 Henry G. Russell, Anthony E. Fiorato, " High Strength Concrete Research for Building and Bridges ", International Workshop on High Performance Concrete ", Bangkok, Thailand, 1994.