

# 高黃酸鹽 시멘트를 이용한 高强度 콘크리트의 壓縮強度 特性에 關한 實驗的 研究

## An Experimental Study on the Physical Properties of High Strength Concrete Used by High Calcium Sulfate Cement

박 승 범\*    임    창    덕\*\*  
Park, Seung Bum    Im,    Chang Duck

---

### 요 약

프리텐션 방식 원심력 고강도콘크리트 말뚝이 KS F4306 규격에 제정되어 콘크리트의 압축강도가 800kg/cm<sup>2</sup> 이상을 요구하고 있으나 국내에서는 500kg/cm<sup>2</sup> 이상의 제도가 불가한 실정인 것으로 평가된다. 따라서 본 연구에서는 고강도콘크리트 말뚝 제조에 적용하기 위한 고향산염 시멘트의 실험적 연구로써 석고계 첨가량 및 단위 시멘트량 변화가 증기양생 콘크리트의 제 강도 특성에 미치는 영향을 규명하는데 목적이 있다. 연구결과로부터 석고첨가량이 증대하면 콘크리트강도가 향상되지만, 7.5% 이상 첨가시에는 오히려 강도 저하현상이 나타나는 것으로 분석되었으며, 특히 단위시멘트량 변화에 따른 압축강도 영향은 그다지 크지 않은 것으로 나타났다.

한편 최고 압축강도 발현은 석고첨가량 5~7.5% 첨가와 단위시멘트량 500~540kg/m<sup>3</sup> 조건에서 800kg/cm<sup>2</sup> 이상의 고강도콘크리트 제조가 가능함을 확인하였다.

### Abstract

The revision of KS F4306 recommend the over 800kg/cm<sup>2</sup> compressive strength to manufacture pretensioned spun high strength concrete pile, there are many limitations to raise the over 500 kg/cm<sup>2</sup> compressive strength of concrete in Korea.

The objective of this study is to represent the various mechanical properties of high strength concrete made by high calcium sulfate cement mixed with gypsum, and to evaluate the effects of mixing proportioning and curing condition.

On the basis of experimental results of this study, the strength properties of concrete are incr-

---

\* 정회원, 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*\* 정회원, 충남대학교 대학원 박사과정

eased with the more added gypsum, but in the case of the over 7.5% of gypsum the strength of concrete is decreased.

The high strength properties of concrete used with high calcium sulfate cement is not much influenced with the unit cement contents.

Therefore, it is concluded that the optimum mixing compositions to make the over 800kg/cm<sup>2</sup> of high strength concrete are 5.0~7.5% weight percent of gypsum to the cement contents and 500~540kg/m<sup>3</sup> of unit cement contents.

**Keywords:** High strength concrete, High strength cement for steam curing, Pretensioned spun high strength concrete piles, Compressive strength, gypsum.

## I. 서 론

토목·건축분야의 건설재료로 광범위하게 사용되고 있는 콘크리트는 생산기술이 발달함에 따라 고강도콘크리트에 대한 정의도 변화되어 건축물인 경우, 1970년대까지는 약 350kg/cm<sup>2</sup> 이상의 콘크리트를 고강도콘크리트로 분류하여 왔으나 1980년 이후에는 압축강도가 420kg/cm<sup>2</sup> 이상으로 미국 콘크리트학회에서도 정의하고 있다<sup>(1)</sup>. 한편 국내의 경우 최근 한국 콘크리트학회에서 고강도콘크리트에 대한 시공 및 구조설계지도서를 작성하여 500kg/cm<sup>2</sup> 이상을 고강도콘크리트로 간주하고 있는 실정이다<sup>(2)</sup>.

그러나 토목용인 경우, 고강도콘크리트는 주로 콘크리트 공장 제품인 파일, 전주, 세크멘트, 트러스부재 등에서 요구하며 특히 프리텐션 방식 원심력 고강도콘크리트 말뚝(이하 고강도파일이라 한다)에서는 콘크리트 압축강도가 800kg/cm<sup>2</sup> 이상으로 정의하고 있는 등<sup>(3)</sup> 고강도콘크리트에 대한 정의가 확실하지 않지만 국내에서도 고강도콘크리트에 대한 관심과 연구가 활발히 추진되어<sup>(4,5)</sup> 고강도콘크리트가 상향 조정될 추세이다.

이와같은 콘크리트의 고강도화는 부재 단면이 감소하여 경제적이 될 뿐만 아니라 콘크리트 부재의 프리캐스트화가 용이하여 품질관리, 내진, 내구성면에서도 장점이 있기 때문에<sup>(6)</sup> 미국의 건축구조물인 경우 콘크리트 설계기준강도를 600kg/cm<sup>2</sup> 이상으로한 현장 시공예가<sup>(7)</sup> 많으며 two union square 같은 건축물은 실제 콘크리트강도가 1000kg/cm<sup>2</sup>이 넘는 초고강도콘크리트에 해당되고

있지만 향후 고강도콘크리트의 제조기술은 최고 1725~3045kg/cm<sup>2</sup>까지 제조할 수 있다고 기대<sup>(8)</sup>하고 있다.

그러나 이와같은 고강도콘크리트의 제조 방법은 시멘트페이스트의 강도, 골재의 강도, 페이스트와 골재계면의 부착강도 등을 이용한 개선 방법<sup>(9)</sup>이 있으나 이중 시멘트페이스트의 강도 개선방법은 주로 시멘트 자체강도를 증진시키는 방법과 고성능감수제에 의한 불시멘트비 감소로 인한 강도개선과 혼화재료인 첨가제에 의한 강도증진 방법, 양생 및 다짐방법에 의한 강도증진 방법<sup>(10,11)</sup>으로 구분된다.

여기서 고성능감수제에 의한 강도 개선방법은 국내에서도 보편화되어 있으며 혼화재료인 플라이애쉬나 실리카흄 등의 사용에 의한 강도개선은 국내에서 일부 연구자<sup>(12,13)</sup> 등에 의하여 연구 검토되고 있으나 품질관리의 어려움과 비경제적인 이유로 현장에서의 실용화는 미흡한 실정이다.

또한 양생 및 다짐방법에 의한 강도개선은 원심력 회전체에 의한 다짐과 촉진 양생방법인 증기양생을 동시에 실시하는 콘크리트 말뚝(이하 파일이라 한다)이나 콘크리트관(이하 홉관이라 한다)의 제품에 적용되고 있다.

특히 고강도파일의 경우 외국에서는 고온고압 포화 증기양생(이하 오토클레이브양생이라 한다) 또는 시멘트 품질을 개선시킨 고회산염 시멘트를 이용하여<sup>(14~16)</sup> 압축강도 800kg/cm<sup>2</sup>까지 실용화되고 있으나 국내에서는 1988년도에 국가 규격으로 제정하여 콘크리트 압축강도를 800kg/cm<sup>2</sup> 이상으로 요구하고 있을 뿐 국내 기술 수준으로는 500

kg/cm<sup>2</sup> 내외의 콘크리트 파일 제품제조에 불과한 실정이다.

이는 중소 기업형인 국내 제조 파일 제조업체가 고가의 장비이며 엄격한 품질관리가 요구되는 오토클레이브양생 설비의 투자는 기업의 큰 부담으로 생각되어진다.

따라서 오토클레이브양생을 하지 않고도 현재의 증기양생 설비만으로 콘크리트 압축강도가 800 kg/cm<sup>2</sup> 이상을 발현할 수 있는 고강도파일을 제조하기 위하여 시멘트 자체강도를 개선시키는 연구방안의 일환으로 포틀랜드 시멘트에 석고계 첨가재를 과량 첨가한 고허산염 시멘트의 특성을 검토하고자 시멘트중에 함유된 석고계 첨가재량이 고강도콘크리트의 압축강도에 미치는 영향과 단위 시멘트량이 콘크리트 압축강도에 미치는 영향 및 된배합 콘크리트에서의 고강도콘크리트의 최적 제조 조건을 설정하기 위한 실험적 연구를 수행하였다.

## II. 실험방법

### 2.1 사용재료

#### (1) 시멘트

국내 S사 제품인 포틀랜드시멘트를 이용하였으며 이들 화학적, 물리적 특성은 표1.2와 같다.

한편 S사에서 개발하여 시판되고 있는 고허산염시멘트의 화학적, 물리적 특성은 표3.4와 같다.

Table 4. Physical properties of high calcium sulfate cement mortar for steam curing

Specific gravity	Soundness	Setting		*Comp. Strength(kg/cm <sup>2</sup> )			
		Ini.	Fin.	1d	3ds	7ds	28ds
3.11	0.06	300	7:45	439	441	507	616

\* Steam curing condition 65°C, 5hr

#### (2) 석고

고황산염 시멘트특성을 조사하기 위한 석고계 첨가재의 화학성분은 표5와 같다.

#### (3) 고성능감수제

고성능감수제는 나프탈렌 설본산염 고축합물계인 Mighty-150을 사용하였으며 이들 물리적 특성은 표6과 같다.

Table 6. Physical properties of high range water reducing agent

name	Appearance	Spec. gravity	PH	ASTM C494 Solid base
Mighty-150	dark brown	1.2	7~9	45%

#### (4) 골재

콘크리트 실험에 이용된 골재는 금강産 25mm의 쇄석과 잔골재를 이용하였으며 이들 물리적 특성은 표7과 같다.

Table 1. Chemical composition of portland cement

Chemical composition (%)									
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>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Ig. loss	Sum
19.2	5.8	3.3	61.9	3.1	4.4	0.13	0.86	1.3	99.99

Table 2. Physical properties of portland cement

Specific gravity	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	88μ on residue	Soundness	Setting time		Comp Strength(kg/cm <sup>2</sup> )		
				Ini.(min)	Fin.(hr:min)	3ds	7ds	28ds
3.13	4120	0.2	0.03	240	6:50	352	414	479

Table 3. Chemical composition of high calcium sulfate cement for steam curing

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Ig. loss	Sum
20.3	5.4	2.4	60.9	2.9	0.12	0.75	6.0	1.2	99.97

Table 5. Chemical composition of gypsum for high calcium sulfate cement in steam curing condition

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Ig. loss	Sum
7.6	3.2	1.1	41.6	0.2	0.11	0.02	43.0	3.1	99.9

Table 7. Physical properties of aggregate

Kinds	Max. Size	F.M	Spec. gravity	absorption (%)	unit weight (t/m <sup>3</sup> )
Coarse Aggregate (crushed)	25	7.20	2.64	2.40	1.718
Fine Aggregate	5	2.70	2.61	1.63	1.526

## 2.2 실험계획 및 내용

석고 첨가재량 변화와 시멘트량 변화에 따른 고강도콘크리트의 최고 강도 발현영역을 검토하기 위하여 현재 과일 공장에서 이용되고 있는 배합을 참조하여 단위시멘트량, W/C, S/A를 결정하였으며 참고로 석고첨가에 의한 W/C비 표현은 포조란 반응성이 있는 실리카흙 및 플라이 애쉬나 포리마 첨가시 W/C+(S.P.F)로 표기치 않고 W/C비로 간략히 표기하였으며 고성능감수제는 예비시험을 통해 2.4% 내외로 결정하여 표8과 같은 인자 및 수준으로 일부 실험실시험인 L<sub>27</sub>형 실험계획법<sup>(17)</sup>을 이용하여 고강도콘크리트 제조시 주요인자를 분산 분석하여 유의차를 검정하였고 이들 주요인자에 의한 고강도콘크리트 압축강도 발현영역과 경향을 검토하였다.

Table 8. Experimental design

factor	level
Cement content(kg/m <sup>3</sup> )	500, 540, 580
Gypsum content(kg/m <sup>3</sup> )	0, 5, 7.5, 10
W/C ratio (%)	25, 28, 31
High range Water reducer	2.1, 2.4, 2.7
S/A (%)	35, 40, 45

이때 콘크리트 압축강도는 특수 양생방법인 증기양생이나 오토클레이브 양생등을 실시한 경우에는 재령 28일부터 빠른 시기에서 공시체의 강도를 표준으로 하여도 가능하다는 국내 콘크리트 학회 고강도콘크리트 시공지도서<sup>(2)</sup>에 따라 본 시험에서는 재령 1일과 7일까지만 측정하였다.

또한 고황산염시멘트의 증기양생시 수화조직을 주사형 전자 현미경과 X-선 회절분석기로 분석하여 고강도콘크리트의 메카니즘을 구명하였다.

## 2.3 측정방법

공시체제작은 KS F2403(시험실에서 콘크리트의 압축 및 휨강도 시험용공시체를 제작하고 양생하는 방법)에 의거 진동다짐으로 제작하였으며 증기양생조건은 최고온도 65℃, 승온속도 15℃/hr<sup>(22)</sup>로 표9와 같이 실시하였다.

이때 공시체 제작시 콘크리트 온도는 23℃로 하였고 증기양생후 2시간 이상 자연 냉각시킨 25℃내외의 공시체를 수중양생 수조에서 기건양생은 실험실내에서 각각 재령별로 구분하여 양생시킴으로써 양생시 보관방법에 따른 특성도 검토하였다.

Table 9. Steam curing condition

Presteaming time	Controlled heating	Max. Temp.	Steaming	Cooling time	Total time
3hr	Max. 15℃/hr	65℃	5hr	2hr over	12hr over

## III. 시험결과 및 고찰

석고계 첨가재와 시멘트량 변화에 따른 배합조건 및 시험결과는 Table 10과 같으며 실험번호 1~27번까지는 실험계획에 의거 인자 및 수준을 배열하여 반응표면 분석방법<sup>(17)</sup>으로 각 인자에 미치는 경향성을 검토하였고, 실험번호 28~36번은 석고 부첨가시의 참고자료용으로 실시하였다.

먼저 재령 1일과 7일에서 압축강도에 미치는 인자별 유의인자를 검토하기 위하여 분산분석한 결과 재령 1일에서는 석고계첨가량과 시멘트와 석고의 교호작용 및 시멘트와 물시멘트비의 교호작용이 유의인자로 나타났으며 재령 7일에서는 석고계첨가량과 물시멘트비 및 시멘트량과 석고의 교호작용이 유의인자로 나타났다.

특히 본 실험에서는 여러인자를 대상으로 실험하였기 때문에 통계처리시 분산 분석결과에 나타난 유의인자 수준만을 대상으로(석고, W/C, 시멘트 X석고) 그 경향성을 고찰하였으며 유의하지 않은 수준은 실험 오차범위로 간주하였다.

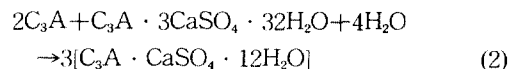
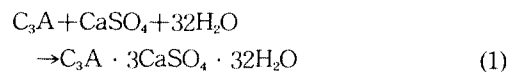
Table 10. Mix proportion and test result

No	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )					Slump (cm)	Comp. Strength(kg/cm <sup>2</sup> )		
	Cement	Gypsum (C×wt%)	Water Content (W/C %)	high range water reducer	S/A (%)		1d	7ds standard curing	7ds air curing
1	500	25.0 (5%)	125(25%)	10.5(2.1%)	35	0.0	661	783	835
2			140(28%)	12.0(2.4%)	40	0.0	395	724	862
3			155(31%)	13.5(2.7%)	45	21.2	536	758	858
4		37.5 (7.5%)	125(25%)	12.0(2.4%)	45	0.0	687	910	916
5			140(28%)	13.5(2.7%)	35	5.0	361	785	822
6			155(31%)	10.5(2.1%)	40	5.0	522	885	900
7		50.0 (10%)	125(25%)	13.5(2.7%)	40	0.0	614	794	825
8			140(28%)	10.5(2.1%)	45	0.0	409	720	742
9			155(31%)	12.0(2.4%)	35	10.5	594	693	845
10	540	27.0 (5%)	135(25%)	11.3(2.1%)	35	0.0	598	843	859
11			151(28%)	13.0(2.4%)	40	11.2	575	774	888
12			167(31%)	14.6(2.7%)	45	23.0	608	822	783
13		40.5 (7.5%)	135(25%)	13.0(2.4%)	45	0.0	550	713	779
14			151(28%)	14.6(2.7%)	35	13.0	545	734	781
15			167(31%)	11.3(2.1%)	40	16.5	555	664	768
16		54.0 (10%)	135(25%)	14.6(2.7%)	40	0.0	510	650	843
17			151(28%)	11.3(2.1%)	45	0.0	668	785	875
18			167(31%)	13.0(2.4%)	35	13.7	663	710	806
19	580	29.0 (5%)	145(25%)	12.2(2.1%)	35	0.0	375	788	809
20			162(28%)	13.9(2.4%)	40	4.1	490	776	820
21			180(31%)	15.7(2.7%)	45	21.5	416	725	785
22		43.5 (7.5%)	145(25%)	13.9(2.4%)	45	0.0	507	782	816
23			162(28%)	15.7(2.7%)	35	14.0	521	746	855
24			180(31%)	12.2(2.1%)	40	8.7	575	688	847
25		58.0 (10%)	145(25%)	15.7(2.7%)	40	0.0	730	735	841
26			162(28%)	12.2(2.1%)	45	0.0	588	694	782
27			180(31%)	13.9(2.4%)	35	18.1	657	694	737
28	500	0	125(25%)	12.0(2.4%)	45	0.0	600	594	702
29			140(28%)	13.5(2.7%)	35	13.7	559	584	627
30			155(31%)	10.5(2.1%)	40	8.8	533	542	645
31	540	0	135(25%)	13.0(2.4%)	45	0.0	525	587	713
32			151(28%)	14.6(2.7%)	35	20.9	531	552	663
33			167(31%)	11.3(2.1%)	40	16.9	405	586	622
34	580	0	145(25%)	13.9(2.4%)	45	0.0	381	637	697
35			162(28%)	15.7(2.7%)	35	22.5	556	640	670
36			180(31%)	12.2(2.1%)	40	21.7	431	575	609

### 3.1 석고계첨가량이 콘크리트 압축강도에 미치는 영향

석고계첨가량 변화에 따른 재령 7일의 콘크리트 압축강도 결과는 그림 1, 2와 같으나 일반적으로 시멘트중의 석고는 C<sub>3</sub>A 광물과 반응하여 식(1)과 같은 에트린자이트 수화물이 형성되면서 응결

현상이 나타나고 식(2)와 같은 안정한 칼슘 모노설페이트 수화물로 존재하지만



증기양생시에는 초기에 이러한 에트린자이트 수화물이 과량 발생하여 콘크리트내의 공극을 감소시켜 강도증진을 향상시키고 있다(6,18,19,20,21).

본 시험결과에서도 그림1과 같이 증기양생후 7일간 표준양생으로 보관한 콘크리트의 경우 단위시멘트량 500kg/m<sup>3</sup>와 석고계첨가량 7.5% 수준에서 최대강도인 약 910kg/cm<sup>2</sup>의 고강도콘크리트를 얻었으며 그림2의 기건양생조건에서도 동일한 양상을 보여 단위시멘트량 500kg/m<sup>3</sup> 물시멘트비 25%에서 약 920kg/cm<sup>2</sup>의 고강도콘크리트를 얻었다.

그러나 물시멘트비 변화에 따른 압축강도는 석고첨가량 증대에 따라 약간의 편차를 보이고 있는데 이는 된배합 콘크리트에서의 작업성 여하

에 따라 공시체 제작시 공극형성에 기인된 것으로 판단된다.

또한 증기양생후 기건양생으로 보관한 콘크리트의 압축강도가 표준(습윤) 양생으로 보관한 경우보다 평균 약 70kg/cm<sup>2</sup> 더 높게 압축강도가 발현되었는데 이는 압축강도 측정시 기건공시체에 의한 강도향상으로 생각되어진다.

한편 석고계첨가재를 첨가한 콘크리트가 석고를 첨가하지 않은 보통 콘크리트에 비해 약 50%의 강도 증진효과를 나타내었다.

이들 결과로 볼 때 석고계 첨가량이 물시멘트비 변화보다 더 크게 영향을 미치고 있으며 그 적정 첨가량은 7.5%내외로 판단된다.

### 3.2 단위시멘트량이 콘크리트 압축강도에 미치는 영향

단위시멘트량 변화에 따른 콘크리트 압축강도 관계도 앞의 그림1,2와 같이 단위시멘트량 증가에 따라 압축강도가 약간의 저하현상이 나타나고 있는데 이러한 현상은 된배합 콘크리트에서의 작업성에 기인된 것으로 판단되고 있으며 콘크리트의 압축강도를 개선시키기 위해 단순히 단위시멘트량을 과다하게 첨가하여도 고강도콘크리트의 강도증진은 한계가 있는 것으로 생각되어진다.

### 3.3 물시멘트비 변화가 콘크리트 압축강도에 미치는 영향

물시멘트비 변화가 콘크리트의 압축강도에 미치는 관계는 그림3,4와 같다.

이들 결과를 고찰하여보면 그림3과 같이 증기양생후 재령 7일의 표준양생의 경우 물시멘트비 증가에 따라 값의 변화는 있지만 물시멘트비 25%인 경우가 가장 높은 값을 나타내었다.

단위시멘트량 500kg/m<sup>3</sup>의 물시멘트비 31%에서 25%로 감소시킬 경우의 압축강도 증진은 약 20kg/cm<sup>2</sup> 내외이지만 그림4의 기건양생 조건에서는 물시멘트비 감소에 따라 강도 증진효과가 없이 거의 동일한 값을 나타내었다.

그러나 표준양생과 기건양생조건을 평균치로 종합하여 분석하면 물시멘트비 3% 감소에 따라

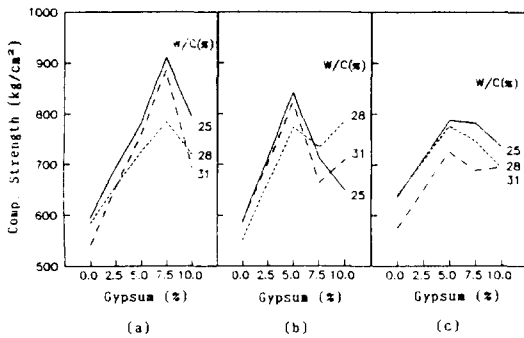


Fig.1 Relationship between comp. strength and gypsum content at 7 days in standard condition.

- (a) cement content : 500kg/m<sup>3</sup>
- (b) cement content : 540kg/m<sup>3</sup>
- (c) cement content : 580kg/m<sup>3</sup>

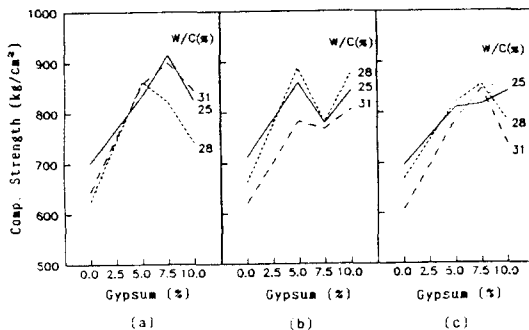


Fig.2 Relationship between comp. strength and gypsum content at 7 days in air condition.

- (a) cement content : 500kg/m<sup>3</sup>
- (b) cement content : 540kg/m<sup>3</sup>
- (c) cement content : 580kg/m<sup>3</sup>

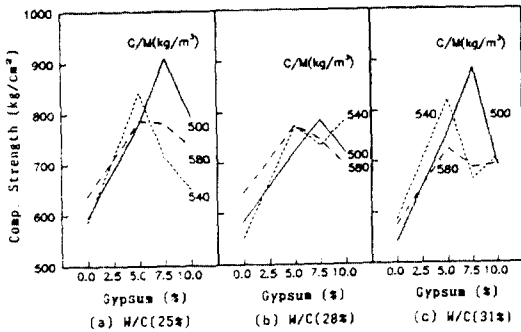


Fig.3 Relationship between comp. strength and gypsum content at 7 days standard condition in each W/C ratio.

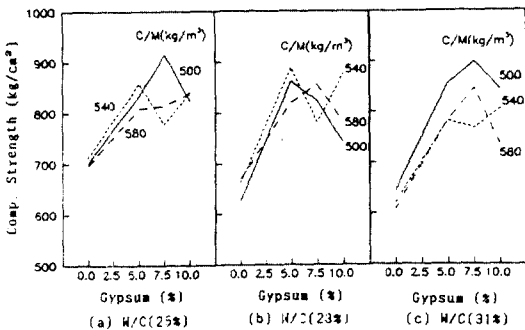


Fig.4 Relationship between comp. strength and gypsum content at 7 days air condition in each W/C ratio.

압축강도는 25~40kg/cm<sup>2</sup> 증가에 그치고 있으므로 석고계첨가재량 2.5%증가시 압축강도가 100 kg/cm<sup>2</sup>씩 증가하는 것에 비해 증가폭은 그다지 크지 않음을 알 수 있다.

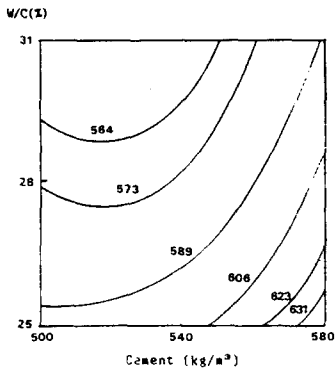
### 3.4 콘크리트 압축강도 경향 및 최적조건

앞의 실험결과를 이용하여 석고계첨가량, 단위시멘트량, 물시멘트비 변화에 따른 고강도콘크리트의 압축강도 값을 예측하고 최적화시키기 위하여 증기양생후 재령 7일의 수중양생시킨 콘크리트 압축강도를 반응 표면 분석 방법<sup>(17)</sup>으로 처리하여 독립변수가 3인 2차 다항 회귀식을 이용한 회귀식 산출은 표11과 같고 이를 이용한 등고선표는 그림 5,6,7과 같다.

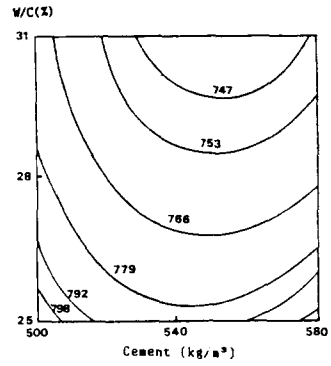
먼저 그림5의 (a)(b)(c)(d) 그림은 각각 석고계첨가량이 0, 5, 7.5 10%의 조건에서 물시멘트비와 단위시멘트량 변화에 따른 압축강도를 등고선으로 나타낸 그림으로써 석고계첨가량을 증가함에 따라 압축강도는 증가되어 석고계첨가가 7.5%인 경우 단위시멘트량 500kg/m<sup>3</sup>, 물시멘트비 25%인 조건에서 압축강도가 820kg/cm<sup>2</sup>까지 현장에서 제조가 가능할 것으로 판단되나 석고계첨가량이 증대되어

Table 11. Regression of equation at each condition

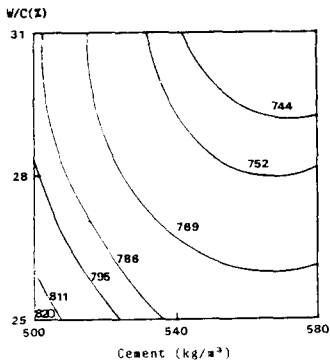
	Regression equation	Where
Fig.5	(a) $Y=574.33838+18.819051X_1-20.4571416X_3+17.1665X_1^2-3.5625X_1X_3+5.416515X_3^2$	$Y=$ Comp. Strength (kg/cm <sup>2</sup> )
	(b) $Y=756.9142-8.723809X_1-19.82857X_3+17.1165X_1^2+17.1665X_1^2-3.5625X_1X_3+5.416515X_3^2$	$X_1$ : Cement Content (kg/m <sup>3</sup> )
	(c) $Y=759.095975-22.495239X_1-19.514284X_3+17.1665X_1^2-3.5625X_1X_3+5.4165150X_3^2$	$X_3$ : W/C %
	(d) $Y=701.87365-36.266669X_1-19.1999984X_3+17.1665X_1^2-3.5625X_1X_3+5.416515X_3^2$	
Fig.6	(a) $Y=782.804509+91.31051X_2-19.82857X_3-118.8082X_2^2+0.6285716X_2X_3+5.4165515X_3^2$	$Y=$ Comp. Strength (kg/cm <sup>2</sup> )
	(b) $Y=756.9142+63.76765X_2-19.82857X_3-118.8082X_2^2+0.6285716X_2X_3+5.4165X_3^2$	$X_2$ : Gypsum Content %
	(c) $Y=765.356891+36.22479X_2-23.39107X_3-118.8082X_2^2+0.6285716X_2X_3+5.4165515X_3^2$	$X_1$ : W/C %
Fig.7	(a) $Y=782.159585-5.161309X_1+63.1390784X_2+17.1665X_1^2-27.54286X_1X_2-118.8082X_2^2$	$Y=$ Comp. Strength (kg/cm <sup>2</sup> )
	(b) $Y=756.9142-8.723809X_1+63.76765X_2+17.1665X_1^2-27.54286X_1X_2-118.8082X_2^2$	$X_1$ : Cement Content(kg/m <sup>3</sup> )
	(c) $Y=742.502145-12.28630X_1+64.3962216X_2+17.1665X_1^2-27.54286X_1X_2-118.8082X_2^2$	$X_1$ : Gypsum Content %



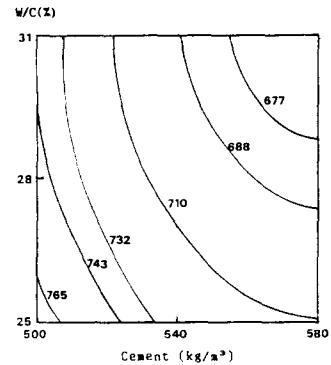
(a) gypsum content : 0%



(b) gypsum content : 5%



(c) gypsum content : 7.5%



(d) gypsum content : 10%

Fig.5 Relationship between cement content and compressive strength at each gypsum content (7 days, standard condition).

10% 첨가할 경우에는 오히려 강도 저하현상을 보이고 있다.

한편 그림6은 단위시멘트량 변화를 각 500, 540, 580kg/m<sup>3</sup>으로 변화시킨 상태에서 석고계첨가량과 물시멘트비 변화에 따른 고강도콘크리트의 압축강도를 등고선으로 나타낸 그림으로써 (a) (b)(c) 그림 모두 석고계첨가량이 5%미만에서는 거의 수직선으로 나타나 압축강도에 크게 영향을 미치어 석고계첨가량 증가에 따라 압축강도가 증가되지만 석고계첨가량이 5%이상 10%미만 범위에서는 최적 첨가조건이 각각 존재하는 것으로 나타났다.

또한 단위시멘트량 증대에 따른 콘크리트 압축강도는 단위시멘트량이 오히려 적은 쪽에서 높은 압축강도를 발현하였는데 이는 시멘트량이 증대할 수록 된 배합 콘크리트의 작업성이 불량하여 공시

체 제작시 콘크리트 내부에 공극이 발생된 것으로 생각되며 어느정도의 작업성 유지가 강도변현에 좋은 결과를 얻을 것으로 판단된다.

그림7의 (a)(b)(c)는 물시멘트비가 각각 25%, 28%, 31%인 조건에서 단위시멘트량 변화와 석고계첨가량 변화에 따른 콘크리트 압축강도를 등고선으로 나타낸 것으로써 콘크리트 압축강도는 물시멘트비가 감소함에 따라 압축강도가 증가되고 있지만 물시멘트비 3%감소에 약 25~40kg/cm<sup>2</sup>의 압축강도 증가에 지나지 않아 석고계첨가량 변화에 따른 압축강도 보다 매우 작은 것으로 판단된다.

따라서 이들 세인자를 종합하여 보면 최적 석고계첨가량은 5~7.5%내외이며 물시멘트비 25%, 단위시멘트량이 500~540kg/m<sup>3</sup>인 조건에서 고강도콘크리트의 최적 제조조건으로 판단된다.



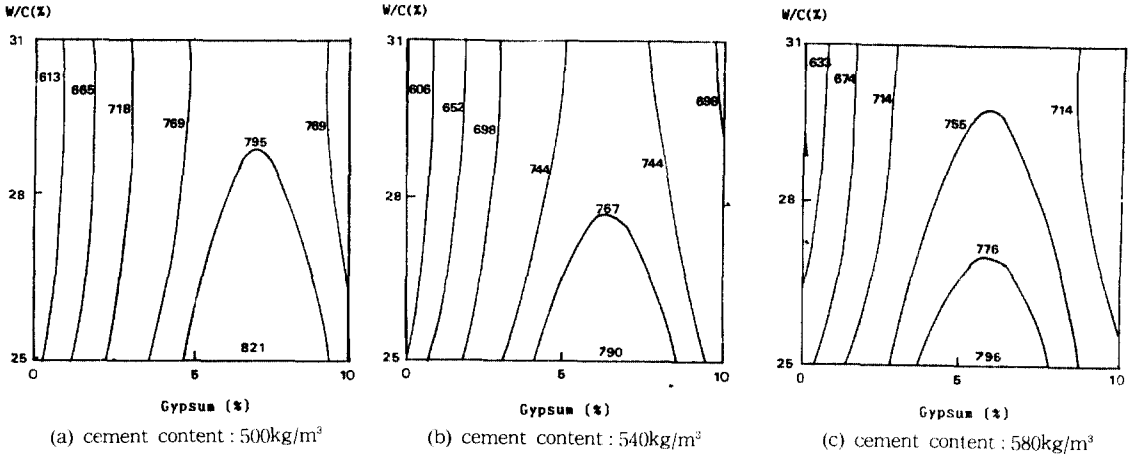


Fig.6 Relationship between gypsum content and compressive strength at each cement content.

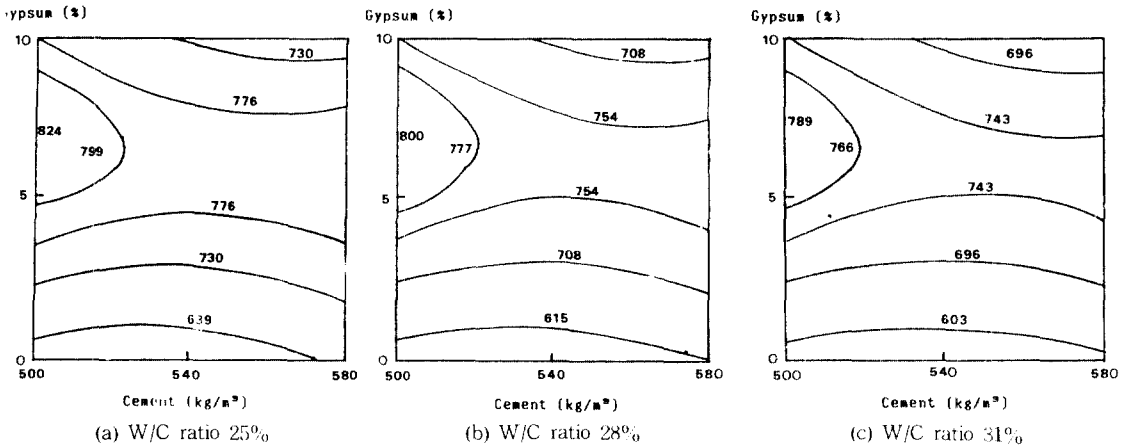


Fig.7 Relationship between cement content and compressive strength at each W/C ratio.

### 3.5 고향산염시멘트의 수화 특성

시판되고 있는 고향산염시멘트 페이스트의 수화 생성물을 보통시멘트와 비교하기 위하여 양생온도 65°C, 5시간으로 처리한 증기양생 조건에서 재령 1일과 7일의 수화조직을 전자 현미경으로 관찰한 결과는 사진1과 같이 보통시멘트에 비해 고향산염시멘트 페이스트는 재령 1일과 7일 모두 수화조직이 매우 치밀하게 되어 있음을 알 수 있고, 특히 재령 1일에서는 에트링자이트 광물이 보통시멘트에 비해 다량 석출되어, 그림8과 같은 X선 회절분석 결과에서도 확인되었다.

따라서 이들 결과로부터 고향산염시멘트 페이

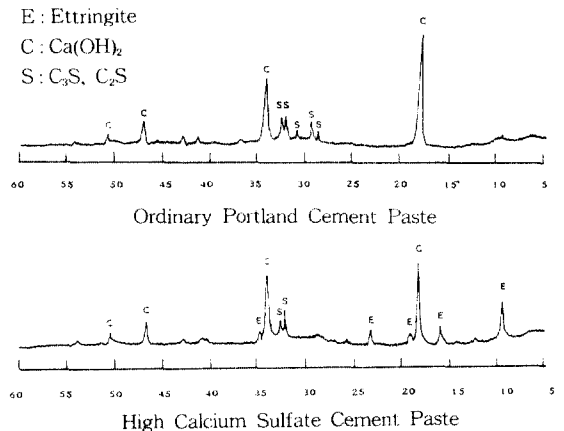


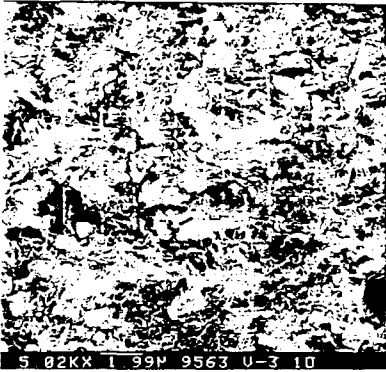
Fig.8 X-ray diffraction patterns of each cement paste at 1 day.



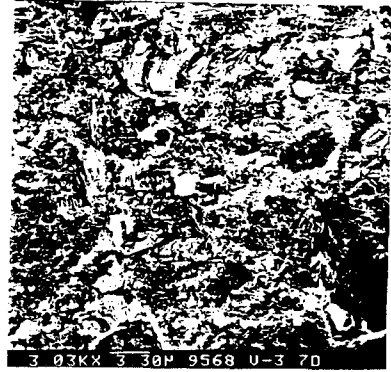
(a) ordinary portland cement at 1day



(b) ordinary portland cement at 7days



(c) high calcium sulfate cement at 1day



(d) high calcium sulfate cement at 7days

Photo 1. Microscopic analysis of cement hydration compared ordinary cement with high calcium sulfate cement at steam curing condition(65°C, 5hr)

스트의 수화조직은 초기재령에서 치밀하게 형성되어 시멘트 수화반응을 촉진시키고<sup>(20)</sup>, 에트린자이트 생성시 콘크리트중의 자유수(free water)와 반응하여 실질적으로 물시멘트 비를 작게하는 동시효과<sup>(9)</sup>와 침상결정인 에트린자이트 광물은 液狀反應이 지배적이므로 시멘트페이스트중의 공극을 감소시켜 콘크리트를 밀실하게 되어 고강도콘크리트가 가능하다는 重倉<sup>(6)</sup>의 실험결과를 입증하였다.

#### IV. 결 론

석고계 첨가재와 고성능감수제를 병행사용하고 포틀랜드 시멘트를 이용하여 첨가량 변화에 따른 증기양생시킨 된배합 콘크리트의 압축강도 특성과

영향에 대해서 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 고강도콘크리트의 압축강도에 미치는 유의인자는 석고계 첨가량과 물시멘트비 및 시멘트와 석고계첨가량의 교호작용으로 나타났으며 실험조건중 최고 압축강도는 단위시멘트량 500kg/m<sup>3</sup>, 물 시멘트비 25%, 석고계첨가량 7.5%와 고성능감수제 2.4%첨가조건에서 증기양생후 재령 7일의 표준양생시 910 kg/cm<sup>2</sup>와 기건양생시 916kg/cm<sup>2</sup>의 양호한 고강도콘크리트 결과를 얻었다.
- 2) 석고계첨가량을 증가시킬수록 재령 1일에서는 증가되는 경향을 보이고 있으나 재령 7일의 경우 7.5%이상 첨가시 오히려 강도 저하현상이 나타났고, 5~7.5% 수준에서 가장 높은 압축강도를 발현하고 있다.

## 참 고 문 헌

또한 물시멘트비 변화간에는 약간의 차이가 있지만 물시멘트비가 증가할 수록 압축강도는 저하하는 현상을 보이고 있다.

3) 단위시멘트량이 콘크리트 압축강도에 미치는 영향은 단위시멘트량  $40\text{kg}/\text{m}^3$  증대에 따라 압축강도는 약  $30\text{kg}/\text{cm}^2$ 씩 증가되고 있으나 고강도콘크리트의 강도발현은 한계가 있는 것으로 판단되며 물시멘트비 변화가 콘크리트 압축강도에 미치는 영향은 W/C비 13% 감소에 따라 압축강도는  $25\sim 40\text{kg}/\text{cm}^2$ 에 지나지 않고 있다.

4) 콘크리트의 압축강도 경향과 최적 조건 설정을 위해 증기양생후 재령 7일간 수증양생한 콘크리트 시험결과를 반응 표면 분석방법으로 분석한 결과 석고계첨가재량을 시멘트의 7.5% 첨가시 최고 강도인  $820\text{kg}/\text{cm}^2$ 을 기대할 수 있으나 10% 첨가시에는 오히려 강도 저하현상을 보이고 있으며 물시멘트 변화에 따른 압축강도는 물시멘트비 3% 감소에 따라 압축강도 향상은 약  $25\sim 40\text{kg}/\text{cm}^2$ 에 지나지 않고 있고 단위시멘트량 증가에 따른 콘크리트 압축강도는 단위시멘트량이 적은  $500\text{kg}/\text{m}^3$  범위에서 오히려 높은 강도를 발현하였다.

이는 단위시멘트량을 증가시킬수록 슬럼프 값이 거의 0인 뒤패합 콘크리트이기 때문에 작업성 불량으로 인한 콘크리트 공시체 내부에 공극이 발생된 것으로 판단된다.

따라서 이들결과를 종합하여 보면 최적 석고계첨가량은  $5\sim 7.5\%$  내외이며 단위시멘트량은 약  $500\sim 540\text{kg}/\text{m}^3$ 과 적당한 작업성을 갖는 콘크리트로 제조할 경우 최적 제조조건으로 판단되며 또한 현장에서 고강도콘크리트 제조가 가능할 것으로 판단된다.

5) 고황산염시멘트 페이스트의 수화조작을 관찰한 결과 재령 1일과 7일에서 보통시멘트에 비해 수화조작이 매우 치밀하고 X선 회절분석 결과에서도 초기에 에트린자이트 광물이 다량 존재하므로써 수화반응 촉진과 공극감소로 인한 콘크리트의 밀실화로 고강도가 발현되는 주 메카니즘으로 판단된다.

1. ACI 318-89, "Building code requirements for reinforced concrete", portland cement association, 1990.
2. 한국 콘크리트 학회, "고강도 콘크리트 실용화 연구", KCI Report No.91-01, 1991, pp.9-57.
3. 한국 공업 규격, "프리텐션 방식 원심력 고강도 콘크리트 말뚝", KSF 4306, 1988.
4. 신성우, 오병환 외 2명, "고강도, 유동화 및 섬유 콘크리트의 개발과 역학적 특성에 관한 연구(I, II, III)", 과학기술처, 1990.
5. 정헌수, "고강도 콘크리트의 제조 및 실용화 사례", 레미콘지, 제26호, 1990, pp.29-33.
6. 重倉祐光, "高強度コンクリート用混和材料に関する研究", 第4回コンクリート工學年次講演論文集, 1982, pp.109-112.
7. 溝淵利用, "場所打ち高強度コンクリートの現状", 콘크리트工學, Vol.30, No.6, 1992, pp.71-77.
8. Henry G. Russell, "Development in high strength concrete", ACI seminar on high strength concrete in Korea, 1990, pp.1-7.
9. 三宅信雄, "無機系混和材を用いた高強度コンクリートの力學的 性狀", 콘크리트工學, Vol.18, No.4, 1980, pp.23-29.
10. 磯屋孝代, "高強度コンクリートの特性に及ぼす練り混ぜ因子の影響", 콘크리트工學年次論文集, 13-1, 1991, pp.219-220.
11. 谷川恭雄, "高強度・超高強度コンクリートの壓縮破壞性狀に及ぼす粗骨材品質の影響", 콘크리트工學 年次論文集, 13-1, 1991, pp.209.
12. 김부한, "실리카흙 콘크리트의 시공성 개선 및 강도 특성에 관한 실험적 연구", 대한건축학회 학술발표 논문집 제8권 제2호, 1988, pp.463-468.
13. 김진근, "고강도 플라이애쉬 콘크리트의 장기 강도 특성에 관한 연구", 콘크리트 학회지, Vol.3, No.4, 1991, pp.107-115.

14. 影山博, “特殊混和材を用いた高強度コンクリート”, 材料, 第29巻 第318號, 1980, pp.14-19.
15. 田村康夫, “蒸氣養生した高強度コンクリートの組織構造と耐久性について”, セ技年報 36, 1982, pp.251-254.
16. 高橋和雄, “高強度コンクリート用混和材料の利用に関する研究”, セメントコンクリート, No.466, 1985, pp.7-15.
17. 朴聖炫, “現代實驗計劃法”, 文英社, 1986, pp.575-618.
18. 米田俊一, “高強度コンクリートに関する2,3の實驗”, セ技年報41, 1987, pp.205-208.
19. 西晴哉, “オートクレーブ養生と超高強度コンクリート”, コンクリート工學, Vol.18, No.5, 1980, pp.9-18.
20. 磯崎啓, “常壓蒸氣養生したEttringite高含有セメント硬化體強度について”, セ技年報, 1978, pp.59-62.
21. 服部健一, “高強度コンクリートの壓縮強度とセメント空隙比の関係について”, セ技年報34, 1980, pp.250-252.
22. 山田順治, “セメントとコンクリートの知識”, 鹿島出版社, 1976, pp.220.

(접수일자 : 1992. 7. 8)