고황산염 시멘트를 이용한 고강도콘크리트의 공학적특성에 관한 연구

A study on the Engineering Characteristics of High Strength Concrete used by High Calcium Sulfate Cement

박 승 범* 염 창 덕**

Seung Bue, Park Chang Duck, Im

Abstract

프리텐션방식 원심력 고강도콘크리트 말뚝은(KS F4306) 콘크리트의 압축강도가 800kg/cm² 이상인 고강도콘크리트를 요구하고 있으나 국내에서는 500kg/cm² 이상의 콘크리트 말뚝 제조가 불가한 실정이므로 본 연구에서는 고황산염시멘트를 이용한 고강도콘크리트 말뚝 제조에 관한 공학적 특성 연구의 일환으로써 고황산염시멘트의 수화 특성 및 고강도 발현 기구 구명과 공학적 특성중에서 압축·휨강도와 내동해성, 건조수축 특성 및 화학저항성등을 비교 고찰하여 보통시멘트 보다 품질 특성이 우수함을 확인하였다. 또한 고강도 콘크리트 말뚝의 시제품 제조를 위하여 2개 공장에서 현장 실험한 결과 960kg/cm²의 양호한 고강도콘크리트를 얻었다. 향후 고강도콘크리트 말뚝 제조의 공업화 및 양산화가 기대된다.

1. 서 론

토목·건축분야의 건설재료로 광범위하게 사용되고 있는 콘크리트는 그동안 꾸준한 품질개선과 제조기술의 발전으로 역학적특성이 개선된 고강도콘크리트 생산이 가능하였다. 지금까지 고강도콘크리트에 대한 정의는 미국 콘크리트학회에서는[1] 420kg/cm² 이상을, 한국 콘크리트학회의[2]시공 및 구조설계 지도서에서는 500kg/cm² 이상을, 토목용 콘크리트 제품의 고강도콘크리트 말뚝 (이하 고강도파일이라 한다)에서는 800kg/cm²이상으로 정의하고 있는등 아직까지 고강도콘크리트에 대한 정의도 확실하지 않은 실정이다.

그러나 국내 건축물에 대한 고강도콘크리트의 시공실적은 1980년 말까지 력키 쌍둥이 빌딩에 280kg/cm² 내외의 콘크리트가 타설 되었을 뿐 이렇다 할 고강도콘크리트 시공사례가 없다가 최근 분당 초고층 아파트 하부에 500kg/cm²의 고강도콘크리트를 적용하였으나 시험타설에 지나지 않고 있다. 한편 국내 토목 구조물에서의 고강도콘크리트 시공은 올림픽대교, 노량대교에 400kg/cm² 내외를 적용하고 있을뿐 500kg/cm² 이상의 고강도콘크리트 실용화는 아직 미흡한 것으로 평가된다.[3]

특히 토목용 콘크리트 제품에서는 고강도 및 고인성이 요구되어 고강도파일은 800kg/cm²의 압축강도를 요구하므로[4] 외국의 경우에는 고온고압 포화증기양생 (이하 오토클레이브 양생이라 한다) 또는 시멘트 품질을 개선시킨 첨가제를 이용하여,[5,6]실용화되고 있으나 국내 기술 수준으로는 콘크리트 압축강도가 500kg/cm² 이상인 파일제조가 불가한 실정이다. 그러나 최근 몇개 업체가 오토클레이브 양생을 이용하여 고강도파일 제품 생산을 시도하고 있지만 막대한 오토클레이브 설비투자와 엄격한 품질관리가 요구되어 중소기업형인 파일 제조 업체로써는 기업의 큰 부담으로 생각되어 진다

따라서 본 연구는 오토클레이브 설비 투자없이 기존의 증기양생 설비만으로 압축강도가 800kg/cm² 이상의 고강도콘크리트 및 고강도파일의 제조 가능성

* 정회원 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 정회원 충남대학교 대학원 박사 과정

을 검토하기 위하여 최근 국내 S사에서 시판되고 있는 특수시멘트의 일종인 고황산염시멘트를 사용하여 실험하였다.이때 고황산염시멘트의 수화특성과 조직내의 기공율을 검토함으로써 고강도 발현 기구구명과 공학적특성인 압축·휨강도, 건조수축, 내동해성, 화학저항성을 보통 포틀랜드시멘트와 비교 고찰하였으며 2개 파일 공장을 선정하여 고강도파일의 시제품제조를 통한 공업화 가능성 검토를 아울러 연구목적으로 하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

(1) 시멘트

국내 S사가 개발한 고황산염시멘트를(상품명:고강도시멘트) 이용하였고 이들 화학적·물리적 특성은 표 1,2와 같다.

한편 고황산염시멘트와 공학적특성을 비교하기 위하여 이용한 보통 포틀랜드시멘트의 화학적·물리적 특성은 표 3,4와 같다.

(2) 고성능감수제

고성능감수제는 나프탈렌설폰산염 고축합물계인 Mighity-150을 사용하였으며 이들 물리적 특성은 표 5와 같다.

(3) 골재

금강산 25㎜ 최석의 굵은골재와 잔골재를 사용하였으며 현장 적용 실험시 사용한 골재의 물리적성질은 표 6과 같고 대전지역 B공장의 경우 25㎜ 심천산 골재를 사용하였으며 문경 S공장에서는 25㎜ 석회석 골재를 사용하였다.

Table 1. Chemical composition of high calcium sulfate cement

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	Ig.loss	Sum
20.3	5.4	2.4	60.9	2.9	0.12	0.75	6.0	1.2	99.97

Table 2. Physical properties of high calcium sulfate cement mortar at steam curing

Specific gravity	Sound-ness	Setting		* Comp. Strength (kg/cm²)			
		Ini.	Fin.	1 d	3ds	7 ds	28ds
3.12	0.06	300	7:45	439	441	507	616

* Steam curing 65℃, 5hrs

Table 3. Chemical composition of portland cement

Chemical composition (%)									
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	Ig.loss	Sum
19.2	5.8	3.3	61.9	3.1	4.4	0.13	0.86	1.3	99.99

Table 4. Physical properties of portland cement

Specific gravity	Blaine (cm²/g)	88㎛ on re-sidue	Sound-ness	Setting time		Comp Strength (kg/cm²)		
				Ini.	Fin.	3ds	7ds	28 ds
3.13	4120	0.2	0.03	240	6:50	352	414	479

Table 5. 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%

Table 6. Physical properties of aggregate

Source		Kinds	Max Size	Specif-ic gravity	Abso-rption (%)	F.M
Laboratory		Coarse aggregate	25	2.64	2.40	7.20
		Fine aggregate	5	2.61	1.60	2.70
Plant	B Factory	Coarse Agg. (Sim chun)	25	2.61	2.48	6.90
	S Factory	Coarse Agg. (Moon Kyung)	25	2.59	2.51	7.10

2.2 실험방법

(1) 시멘트 수화특성

고강도 발현기구를 구명하기 위하여 고황산염시멘트와 보통시멘트의 물시멘트비 40%인 페이스트로 각각 표준양생과 증기양생 시킨 조건에서 재령기간에 따른 X-선 회절분석기로 수화물을 분석하였다.

이때 시멘트페이스트중에 함유된 기공율을 재령기간별로 Porosimeter기기를 이용하여 수은 압입법에 의한 총기공량을 측정하였다.

이때 적용된 증기양생은 그림 1과 같이 전치양생 3시간후 승온속도 15℃/hr로 하여 최고온도 65℃ 5시간 유지후 자연 냉각시켜 상온과 평형이 되는 시점에서 각 재령 기간동안 수중양생을 실시하였다.

(2) 고강도콘크리트의 역학적 특성

고황산염시멘트의 압축 및 휨강도 특성과 관계식을 도출하기 위하여 단위 시멘트량과 물시멘트비 변화 및 고성능감수제 변화에 따른 콘크리트 배합설계는 표 7과 같다.

또한 내동해성 및 건조수축 특성을 검토하기 위하여 표 8과 같은 콘크리트 배합으로 고황산염시멘트와 보통시멘트를 이용하여 각각 KS F2456, KS F2424에 의거한 공시체 제작 및 측정방법으로 실시하였다.

화학저항성은 상기 배합중 미경화된 Non-AE 콘크리트를 5㎜체로 체가름한 몰탈부분을 추출하여 5㎝ 입방체의 공시체로 제작하였다.

(3) 고강도파일 시제품 제조

2개 파일 공장을 대상으로 현장 적용 실험에 이용된 배합설계는 표 9와 같이 현장에서 사용되고 있는 기준배합을 근거로 하였으나 현장 골재의 열악한 조건과 콘크리트 작업성유지 등을 고려하여 단위시멘트량과 고성능감수제를 변화시켜 수정 배합하였다.

이때 원심력 다짐법에 의한 원통형 공시체를 제작하여 그림 2의 (a)와 같이 4등분한 후 상대되는 두 조각을 합한 그림 2의 (b)와 같이 하여 압축강도를 측정하였고, 현장에서의 하중 재하시험은[4] 그림 3과 같이 하여 파일의 균열 발생시점과 파괴 시점까지의 휨모멘트로 측정하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 고황산염시멘트의 수화특성

고황산염시멘트의 수화거동을 고찰하기 위하여 물시멘트비가 40%인 시멘트페이스트를 양생온도와 재령기간에 따른 수화물을 X-선 회절분석기로 측정하였다. 이들결과는 그림 4,5와 같고 회절각도 (2θ)가 약 9°에서 에트린자이트 Peak가 나타났다. 그림 4인 표준양생의 경우 고황산염시멘트가 보통시멘트에 비해 초기 재령에서 에트린자이트 수화물이 많이 발생되었고, 특히 65℃로 증기양생한 경우는 그림 5와 같이 보통시멘트에서는 에트린자이트 Peak가 거의 나타나지 않고 CSH 수화물과 Ca(OH)2 수화물로 존재하는데 비해 고황산염시멘트는 28일 경과후에도 에트린자이트 Peak가 존재하고 있다.

따라서 침상결정인 에트린자이트 수화물의 생성으로 시멘트 조직의 밀실화가 될 것으로 추찰되어 수화조직의 치밀성을 확인하기 위한 시멘트 페이스트내에 함유된 총기공량을 측정하였고 또한 몰탈 압축강도 측정 결과는 표 10과 같다.

이들결과는 그림 6과 같이 재령이 증가함에 따라 총기공량이 점차 감소되고 있으며 시멘트 종류별로 볼때 표준 양생의 경우 재령 1일에서 보통시멘트가 0.2501㎖/g,고황산염시멘트는 0.1936㎖/g으로 고황산염시멘트가 약 23% 공극의 감소현상을 나타내었으며 증기양생으로 한 경우 수화촉진에 의한 내부조직이 치밀하여 표준양생의 경우보다 총기공량이 30% 이상 현저히 감소되었고 이때에도 고황산염시멘트가 보통시멘트보다 공극 감소현상이 더 나타나 공극감소로 인한 강도증진이 예상된다.

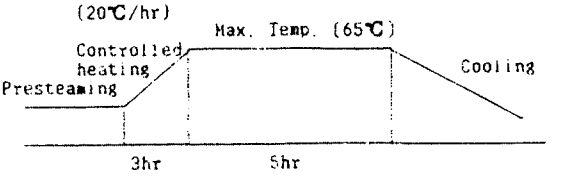
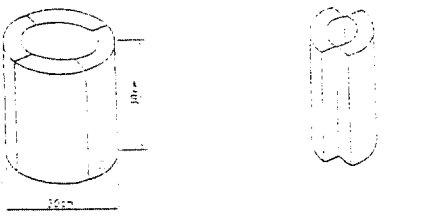


Fig. 1 Steam curing process



(a) (b)

Fig. 2 Testing method for comp. strength of spun concrete

Table 7. Mix proportion of high strength concrete used by high calcium sulfate cement for compressive and flexural strength

Unit Cement Content (kg/m³)	W/C (%)	Unit weight (kg/m³)				
		Cement	Water	Sand	Gravel	High range Water reducer
450	30	450	135	753	1142	1.5%(6.75kg)
	30	450	135	753	1142	2.5%(11.75kg)
	36	450	162	725	1099	1.5%(6.75kg)
	36	450	162	725	1099	2.5%(11.25kg)
550	30	550	165	688	1044	1.5%(8.25kg)
	30	550	165	688	1044	2.5%(13.75kg)
	36	550	198	654	992	1.5%(8.25kg)
	36	550	198	654	992	2.5%(13.75kg)
650	30	650	195	623	946	1.5%(9.75kg)
	30	650	195	623	946	2.5%(16.25kg)
	36	650	234	583	884	1.5%(9.75kg)
	36	650	234	583	884	2.5%(16.75kg)

Table 8. Mix proportion of high strength concrete for durability

Cement	Kind of Concrete	Test NO	W/C	Unit weight (kg/m³)					AE (C×%)
				Cement	Water	Sand	Gravel	High range water reducer (C×%)	
High calcium sulfate cement	Non-AE concrete	H-33-Non	33	500	165	704	1069	0.96	-
		H-30-Non	30	500	150	720	1093	2.13	-
		H-27-Non	27	500	135	736	1116	4.58	-
	AE concrete	H-33-AE	33	500	165	657	998	0.78	0.04
		H-30-AE	30	500	150	676	1021	1.96	0.04
		H-27-AE	27	500	135	689	1045	4.21	0.08
Ordinary portland cement	NON AE concrete	H-33-Non	33	500	165	706	1071	0.75	-
		H-30-Non	30	500	150	722	1095	1.39	-
		H-27-Non	27	500	135	737	1119	4.29	-
	AE concrete	H-33-AE	33	500	165	659	999	0.64	0.03
		H-30-AE	30	500	150	675	1024	1.26	0.03
		H-27-AE	27	500	135	691	1047	3.90	0.07

- S/A 40%, Slump 8±1㎝, Air concent 4.5±0.5%

ex) H -33 -Non 0 -30 -AE

(High calcium)-(W/C %)-(Non AE concrete) (Ordinary)-(W/C %)-(AE concrete)

Table 9. Mix proportions for high strength pile at batch plant

Mix Proportions	Unit weight (kg/m³)					Slump
	Cement	Water	W/C (%)	S/A (%)	High range water reducer (C×%)	
Base Mix design	540	156	29.0	40	1.0	0
Daejeon B Factory	560	147	26.3	40	1.5	1cm under
Moon Kyung S Factory	570	152	26.6	33	2.0	5cm under

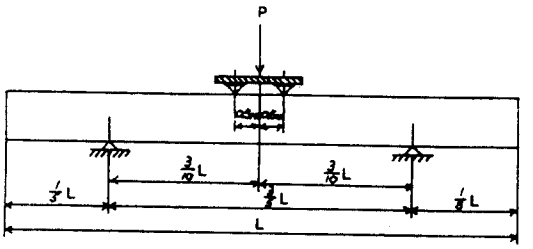


Fig. 3 Test arrangement of spun high strength concrete pile

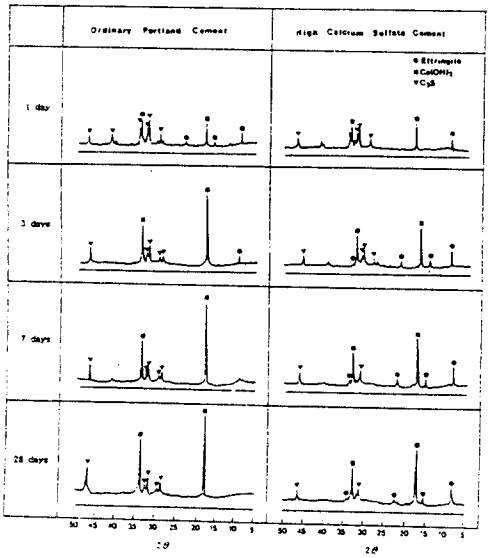


Fig. 4 X-ray diffraction patterns of each cement paste in standard curing condition

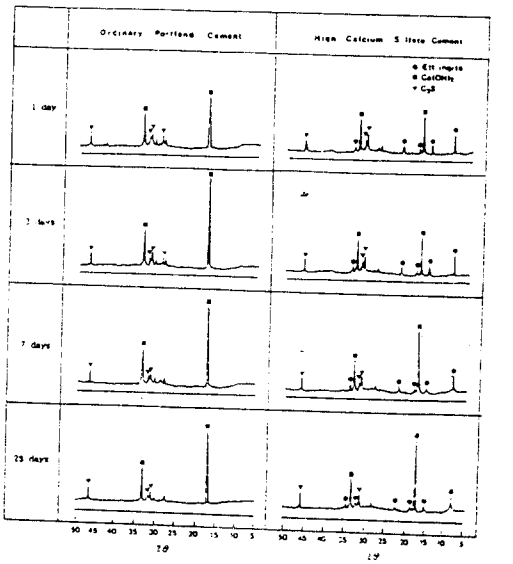


Fig. 5 X-ray diffraction patterns of each cement paste in steam cur condition (65℃, 5hr)

Table 10. Test results of total pore volume and comp. strength at each ages

condition	cement		1d	3ds	7ds	28ds
Standard curing (23℃)	Ordinary	Pore Volume	0.2501	0.2236	0.2081	0.1842
		Comp. Strength (kg/cm²)	215	298	425	496
	High calcium sulfate	Pore volume	0.1936	0.1806	0.1750	0.1789
		Comp. Strength	256	326	445	509
Steam Curing (65℃)	Ordinary	Pore volume	0.1760	0.1581	0.1417	0.1309
		Comp Strength	274	315	368	437
	High calcium sulfate	Pore Strength	0.1610	0.1503	0.1396	0.1278
		Comp. Strength	458	482	536	648

한편 재령기간에 따른 증기공랑과 압축강도간의 상관성은 그림 7과 같다. 이때 압축강도 측정은 물시멘트비 40%, 고성능감수제 1% 첨가와 시멘트 표준사 비율 1:2.45로 적용한 몰탈 압축강도이다.

증기공랑과 몰탈 압축강도의 상관식은 증 기공량이 작을수록 압축강도가 증기되어 고황산염시멘트를 증기양생할 경우 재령 28일에서 약 21%의 공극감소로 인한 강도증진이 27% 향상된 좋은 결과를 얻었다

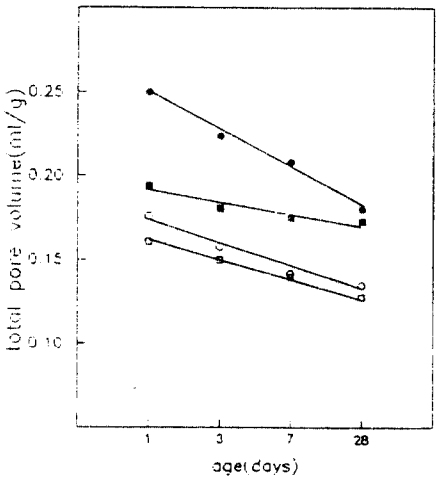


Fig. 6 Relationship between total pore volume and age

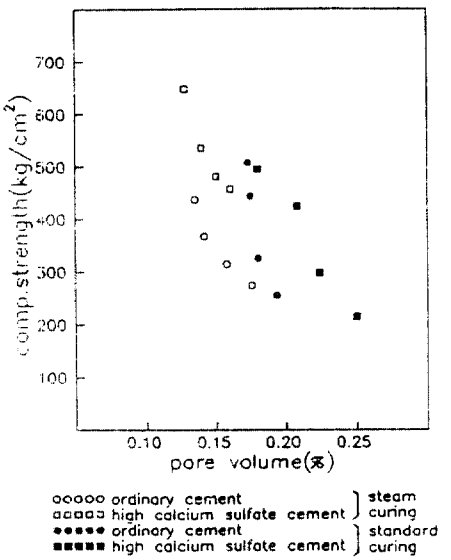


Fig. 7 Relationship between total pore volume and comp. strength

3.2 고황산염시멘트의 고강도콘크리트 특성

(1) 압축강도 및 휨강도

고황산염시멘트를 이용하여 증기양생 조건에서의 단위 시멘트량과 물시멘트비 변화 및 고성능감수제 첨가량 변화에 따른 압축강도 및 휨강도 측정 결과는 표 11과 같이 단위시멘트량 450kg/m³에서 650kg/m³까지 변화시킨 재령 28일의 콘크리트 압축강도는 평균 810kg/cm²내외이고 최고 904kg/cm²까지 얻었으며 휨강도는 91kg/cm² 내외의 고강도콘크리트를 얻었다.

압축강도와 휨강도간의 관계식은 그림 8과 같이 7일의 경우 식 (1)과 28일의 경우 식(2)를 도출하였다.

$Y_7 = 0.113151\ X - 2.22526$ ---------- (1)

$Y_{28} = 0.0860127\ X - 21.0807$ ---------- (1)

여기서 Y = 휨강도 (kg/cm²)

X = 압축강도 (kg/cm²)

이들결과는 보통시멘트를 이용하여 고강도콘크리트로 제조한 R. Thomas[7]의 연구 결과식인 $Y = 0.106088\ X - 5.34404$ 보다 휨강도 값이 약간 높게 나타났다.

Table 11. Relationship between comp. strength and flexural strength at each ages

Unit cement content (kg/m³)	W/C (%)	Admixture (C×wt%)	Slump (cm)	Comp. strength (kg/cm²)		flexural strength (kg/cm²)	
				7ds	28ds	7ds	28ds
450	30	1.5	0	766	836	81	95
	30	2.5	5.0	787	861	86	99
	36	1.5	7.0	701	770	73	91
	36	2.5	21.0	695	787	77	89
550	30	1.5	5.0	816	904	92	98
	30	2.5	12.5	737	862	91	96
	36	1.5	8.2	686	789	78	91
	36	2.5	21.4	705	734	82	86
650	30	1.5	9.0	784	886	80	93
	30	2.5	20.0	749	803	77	88
	36	1.5	22.0	651	755	71	83
	36	2.5	26.0	635	762	62	81

- Steam cured at 65℃, 5hr and then standard water cured until each ages

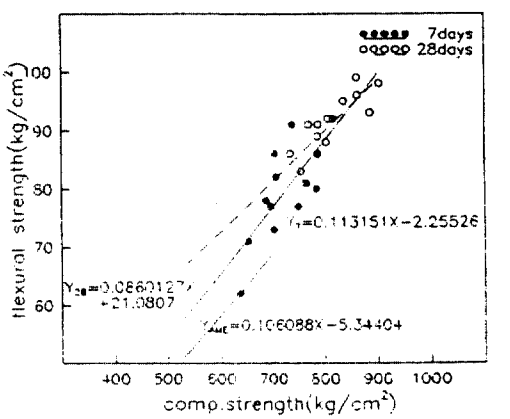


Fig. 8 Relationship between comp. strength and flexural strength (kg/cm²)

(2) 동결융해에 미치는 영향

콘크리트의 동결융해에 영향을 미치는 인자중 공기량 이외에 물시멘트비나 압축강도에 관계가 있는 것으로 알려져 있으므로[5,9,10] 시멘트종류, 물시멘트비 변화에 따른 AE 콘크리트 및 Non-AE 콘크리트를 표 12와 같이 제조하여 증기양생하여 14일간 수중양생후 각 사이클 변화에 따른 상대 동탄성계수와 내구성지수를 측정하였다.

이들 결과로부터 그림 9와 같이 Non-AE 콘크리트에서는 보통시멘트의 경우 180회 전후에서 상대 동탄성계수가 60%이하로 급격히 저하하는데 비해 고황산염 시멘트의 경우는 270회 전후로 내구성이 저하되어 보통시멘트 보다도 내구성이 우수하게 나타났으며 물시멘트비가 낮을수록 내구성이 양호한 양상을 보이고 있는데 이는 에트린자이트 수화물 형성으로 내부공극의 감소와 조직의 치밀화가 내구성 향상으로 판단된다. 그러나 본 실험에서 물시멘트비를 33,30,27%로 각각 하였지만 물시멘트비 26% 이상일 경우 내구성이 저하되어 AE 콘크리트로 제조 되어야 한다는 後藤幸正[11,12]등의 결과와 일치되어 물시멘트비 26% 이하로 할경우 내구성 향상이 기대된다.

한편 그림 9중에서 AE콘크리트로 제조할 경우에는 동결융해를 300회 실시하여도 내구성이 양호하게 나타났는데 이는 공기포기 동결팽창압을 완충 시킨 때문인 것으로[13,14,15] 판단된다.

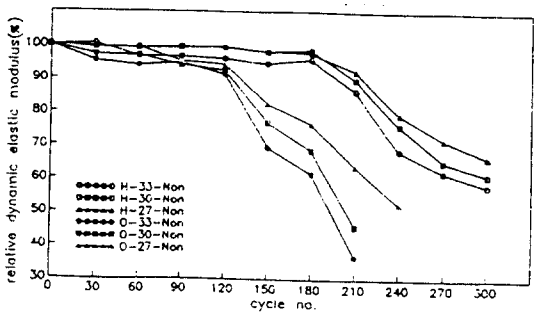
따라서 보통콘크리트보다 고황산염시멘트의 내구성이 약간 우수하나 내구성을 고려하여야할 강도콘크리트에서는 필히 AE 콘크리트로 제조되어야 할 것으로 생각된다.

Table 12. Test results of relative dynamic elastic modules of high strength concrete at steam curing condition (65℃, 5hr)

Test NO	Cycle number											Durability Factor (%)
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	
H-33-NON	100	100.5	96.7	96.7	95.9	94.6	95.7	86.4	68.5	62.1	58.2	56
H-30-NON	100	99.6	99.4	99.6	99.2	98.1	98.5	89.8	76.1	65.3	61.4	61
H-27-NON	100	99.4	99.2	99.3	99.5	98.2	97.9	92.3	79.5	71.9	66.8	67
H-33-AE	100	99.8	99.2	99.6	98.9	99.3	99.7	98.9	97.3	97.2	98.1	98
H-30-AE	100	99.7	99.9	100.1	98.5	99.1	99.4	98.6	97.2	97.8	98.6	98
H-27-AE	100	99.5	101.3	100.5	99.8	99.7	100.3	99.9	98.9	98.6	99.3	99
O-33-NON	100	95.3	94.0	96.8	91.3	89.6	81.6	36.7	-	-	-	38
O-30-NON	100	97.2	96.9	94.1	92.5	76.9	63.5	45.7	-	-	-	46
O-27-NON	100	98.2	98.6	95.4	94.2	82.5	76.3	63.6	52.5	-	-	56
O-33-AE	100	99.6	99.7	99.5	99.5	99.7	99.1	98.3	98.2	98.2	98.4	98
O-30-AE	100	99.8	99.9	99.7	99.5	99.7	99.3	98.6	98.5	98.3	98.3	98
O-27-AE	100	101.3	100.5	99.6	99.9	100.3	99.7	99.4	98.9	99.1	98.5	99

(3) 건조수축에 미치는 영향

고황산염시멘트를 이용한 고강도콘크리트의 건조수축 시험결과는 표 13과 같이 Non-AE 콘크리트를 대상으로 하여 표준양생과 증기양생조건을 비교 검토하였고 이를 그림 10과 그림 11로 나타내었다.



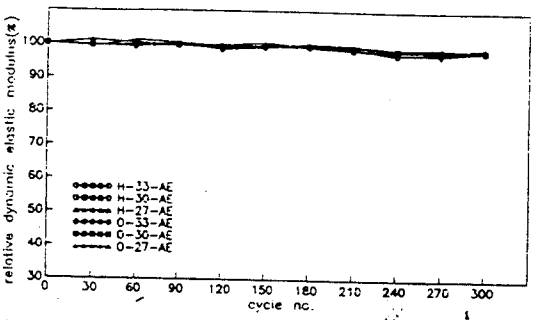


Fig. 9 Test result of relative dynamic elastic modulus at steam curing condition

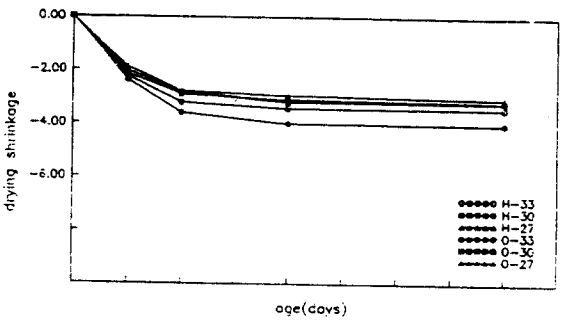


Fig. 10 Dryingshrinkage of high strength concrete at eacth W/C ratio at standard curing condition

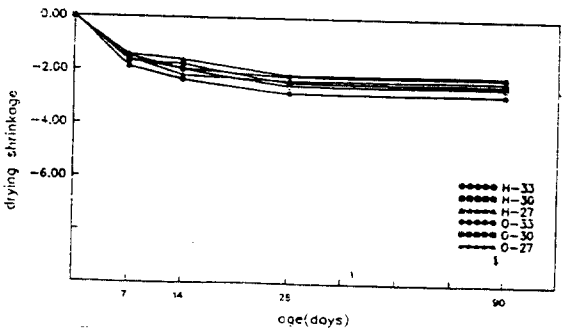


Fig. 11 Dryingshrinkage of high strength concrete at eacth W/C ratio at steam curing condtion (65℃, 5hr)

여기서 그림 10과 같이 표준양생시 건조수축은 재령 90일에서 보통시멘트의 경우 평균 3.47×10^{-4} 이며 고황산염시멘트는 평균 3.21×10^{-4} 수준으로

건조수축이 약 7%의 감소 효과가 나타났으며 그림 11과 같이 증기양생으로 실시한 경우 재령 90일의 보통시멘트에서 평균 2.55×10^{-4}, 고황산염시멘트는 약 2.30×10^{-4}으로 약 10% 건조수축 감소효과가 나타났다. 특히 증기양생으로 한 경우 표준양생시보다 건조수축 값이 약 28% 감소되어 증기양생시 건조수축에 의한 균열방지의 개선효과가 크게 있음을 나타냈는데 이는 촉진양생에 의한 초기강도 발현으로 인한 수화물 골격 형성으로 건조수축이 감소된 것으로 판단된다. 한편 물시멘트비가 낮을수록 건조수축 값이 감소되었는데 이는 단위 수량 감소에 의한 건조수축 감소로 생각된다.

(4) 화학저항성에 미치는 영향

시멘트 수화물중의 칼슘 모노설페이트는 해수나 토양중에 함유된 황산 이온에 의해 식(3)과 같이 에트린자이트로 다시 역반응이 일어나 팽창압에 의한 콘크리트 조직이 파괴되는 원인이 된다.

$$3[C_3A\cdot CaSO_4\cdot 12H_2O] \rightarrow 2C_3A + C_3A\cdot 3CaSO_4\cdot 32H_2O + 4H_2O \quad (3)$$

따라서 이러한 화학저항성을 검토하기 위하여 표 8 의 마경화된 Non-AE 콘크리트를 5mm체로 체가름한 골탈을 추출하여 5cm 입방체로 각 3개씩 제작하여 양생방법별로 7일간 양생시킨후 35% 황산나트륨 용액에 각 재령별로 무게 손실 중량 (%) 을 측정한 결과를 표 13, 그림 12에 나타내었다.

재령 90일의 표준양생시 고황산염시멘트는 6.13%의 손실중량을 보이고 있으나 보통시멘트의 경우에는 9.25%의 값을 나타내 약 34% 화학저항성 개선효과가 나타났으며 증기양생을 실시한 경우에는 표준양생시 보다 손실중량이 50% 정도 대폭 감소되어 화학저항성의 개선효과가 표준양생에서의 시멘트 종류에 의한 개선효과 보다 더 크게 나타났다. 이러한 원인은 증기양생으로 실시한 경우 고황산염시멘트는 에트린자이트 수화물로 내부조직을 치밀하게 하여 가용성염류의 침투가 어렵고 이로인해 화학저항성을 개선시킨 것으로 판단된다.

3.3 고강도파일의 시제품제조

800kg/cm²이상의 고강도콘크리트 제조와 고강도 파일의 시제품제조를 위하여 고황산염시멘트를 이용하여 대전지역 1개 공장과 문경지역 1개 공장의 파일 제조업체를 선정하여 현장 적용 실험을 실시하였다. 시제품제조는 대전 B공장의 경우 직경350mm 길이 7cm의 A종 파일을 12개 제작하였고 문경지역

Table 13. Test result of weight loss at 35% sodium sulfate solution

Test NO	W/C (%)	Standard curing condition 7 ds	14ds	28ds	90ds	Steam curing condition(65℃,5hr) 7 ds	14ds	28ds	90ds
H-33	33	0.83	1.95	3.28	6.15	0.21	0.25	0.95	2.17
H-30	30	0.72	1.28	3.15	6.13	0.19	0.24	0.93	2.15
H-27	27	0.69	1.85	3.13	6.11	0.19	0.24	0.89	2.29
O-33	33	1.81	3.03	4.93	9.46	0.34	0.93	1.94	3.95
O-30	30	1.68	2.94	4.84	9.21	0.31	0.92	1.89	3.87
O-27	27	1.42	2.90	4.76	9.07	0.31	0.91	1.76	3.54

ex) H-33

High calcium sulfate cement - W/C 33%

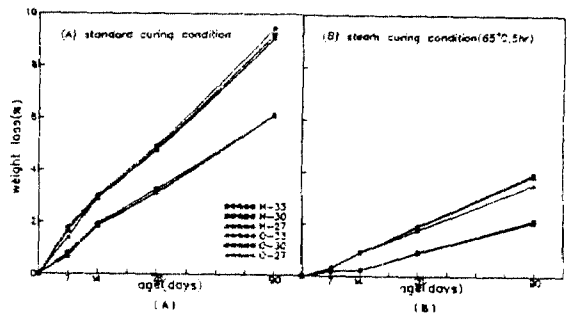


Fig.12 Relationship between weightloss and kinds of cement at 35% sodium sulfate solution.

S공장은 직경 350mm, 길이 10m의 A종 파일을 6개의 시제품을 제작하였다.

이때 시제품제조시 콘크리트 시료를 채취하여 압축강도를 측정한 결과는 표 14와 같이 대전 B공장의 경우 재령 7일에서 진동봉 다짐에 의한 압축강도는 834kg/cm²과 원심력다짐에 의한 원통형 공시체 압축강도는 947kg/cm² 의 높은 만한 고강도 콘크리트를 제조하였다.

또한 제품의 균열 휨모멘트 3.5t·m 이상, 파괴 휨모멘트 5.3t·m이상의 요구 규격치보다 약 3배의 높은 휨모멘트 결과를 얻었다.

한편 문경 S공장에서도 재령 14일에서 진동봉 다짐에 의한 압축강도가 826kg/cm²의 고강도파일 시제품을 제조하여 향후 고황산염 시멘트를 이용한 고강도파일의 공업화와 양산이 가능한 것으로 판단된다.

Table 14. Test results of spun high strength concrete piles

Factory		Compressive Strength (kg/cm2)				Bending moment (t.m)	
		demoulding	1 d	7ds	14ds	Crack	Fracture
KSF 4306 specification		600		800		3.5	5.3
B Factory	Vibrating mould	585	684	834	866	12.8	15.9
	Centrifugal mould	643	752	917	947		
S Factory	Vibrating mould	-	616	749	826	-	-

e

4. 결 론

(1) 고황산염시멘트의 고강도 발현기구는 재령 1일의 초기재령에 에트린자이트 수화물이 보통시멘트 보다 다량 생성되므로써 수화물에 의한 내부 공극을 밀실하게 하였으며 에트린자이트 생성시 32배의 자유수와 결합하므로써 시멘트내의 물시멘트비 감소 효과로 인한 공극감소 현상으로 수화물중의 증기공량이 보통시멘트 보다 약 21% 감소되어 이로 인해 압축강도가 약 27% 향상된 것으로 판단된다.

(2) 고황산염시멘트를 이용한 고강도콘크리트의 동결융해에 의한 내구성은 보통시멘트의 경우보다 양호하게 나타났으며 건조수축도 표준양생시보다 증기양생으로 한 경우에는 재령 90일의 건조수축이 약 28% 감소되어 균열 지의 개선효과가 큰 것으로 나타났으며 멘트 종류별로 보면 고황산염시멘트는 보통시멘트 보다 약 10%의 건조수축 개선효과가 있는데 이는 초기 재령에서 수화물중의 골격형성으로 인한 건조수축이 감소된 것으로 판단된다.

(3) 35% 황산나트륨 용액에서 침적기간별·무게손실중량 (%)에 의한 화학저항성을 측정한 결과 고황산염시멘트가 보통시멘트에 비해 화학저항성이 양호하게 나타났으며 특히 증기양생할 경우 표준양생시 보다 약 50%의 화학저항성 개선효과가 나타났는데 이는 에트린자이트 수화물에 의한 공극감소와 물시멘트비 감소로 인한 내부공극이 치밀하여 가용성 염류의 침투가 어려워 결국 화학저항성이 우수하게 나타난 것으로 판단된다.

(4) 고황산염시멘트를 이용한 고강도파일 시제품 제조는 2개공장을 대상으로 직경 350mm, 길이 7210m의 파일을 각각 12개와 6개씩 제조하였으며 콘크리트 압축강도가 800kg/cm² 이상인 고강도콘크리트와 고강도파일의 시제품 제작이 가능하였다. 따라서 향후 고강도파일의 공업화와 양산화가 기대된다.

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,pp9-57.

3. 申成雨,"고강도 콘크리트",콘크리트 학회지 제 2권 1호,1991,3,pp18-22.

4. 한국 공업 규격," 프리텐션 방식 원심력 고강도 콘크리트 말뚝", KSF 4306,1988.

5. 高橋和雄,"高强度コンクリート用混和材料の利用に關する研究",セメントコンクリート,No.466,1985, pp7-15.

6. 山内俊吉,近藤連一,"日本特公 昭31-4692".

7. Thomas R. and Kaplan M.F.,"Flexural strength of concrete and compressive strength of equivalent cubes", Magazine concrete research, Vol 9, No. 26,1957,pp89-94.

8. 김생빈,"高强度 콘크리트의 凍結融解抵抗에 미치는 氣泡 組織의 影響",콘크리트학회지 제4권 1호 ,1992,3,pp90-95.

9. Powers T.C.,"A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete", ACI Journal,proceeding vol41,No.4,1945,pp245-272.

10. Powers T.C. and Helmuth R.A.,"Theory of volume changes in hardened portland cement paste during freezing",proceedings,Highway Research Board, Vol 32,1953,pp285-297

11. Verbeck G.J.,"Pore structure",ASTM SP.tech., No.169,1956,pp136-142.

12. 鎰田英治,"セメント硬化體の微細構造とコンクリートの凍結",コンクリート工學, Vol19,No.11,1981, pp36-42.

13. A.M.Neville,"Properties of concrete",Pitman publishing,Bath,1977,pp22-263.

14. 田村康夫,"蒸氣養生した高强度コンクリートの組織構造と耐久性について",セ技年報 36,1972,pp251.

15. 大森淑幸,"蒸氣養生コンクリートの耐久性におよぼす諸要因の影響", セ技年報 40,1986, pp431-434.