'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원전 콘크리트 구조물용 고성능 콘크리트 이용을 위한 실험 연구

An Experimental Study on the Utilization of High Performance Concrete for Structure in Nuclear Power Plant

우상균*, 송영철, 윤영수

전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

본 연구에서는 원자력 발전소 구조물 중 격납건물, 외벽, 돔(Dome)**과 철근 밀집지역 및** 12in **이하의 벽체와 슬래브에 고성능 콘크리트를 적용하기 위하여 원자력 발전소 구조물에 적합한 고성능 콘크리트를 개발하고, 개발된 고성능 콘크리트의 내구성능 및 시간 의존적인 변형 특성을 조사하여 기존의 원자력 발전소 구조물에 사용된 콘크리트와 성능을 비교함으로써 고성능 콘크리트의 성능향상 측면을 검증하여 실용화하고자 한다. 연구결과 돔**(Dome)**에 고성능 콘크리트를 적용하기 위해서** W/B 35%, Fly Ash **치환율** 20%, **유동화제 첨가량** 2% **로 한 경우 고성능 콘크리트의 성능향상 측면에서 가장 좋은 결과를 나타내었으며, 철근 밀집지역과** 12in **이하의 벽체와 슬래브에 적용하기 위해서는** W/B 45%, Fly Ash **치환율** 20%, **증점제 첨가량** 3% **인 경우 기존 발전소에 적용된 콘크리트보다 성능이 향상됨을 알 수 있었다.**

Abstract

This study is to develop high performance concrete for containment building, external wall, dome and slab structures in Nuclear Power Plant. This study presents various experimental performance to enhance the durability of concrete structures in NPP by varing the ratio of W/B, fly ash substitution and super plasticizer addition. The effect of durability of concrete corresponding to the change of these variable was evaluated and the optimum W/B ratio and the optimum quantity of fly ash and super plasticizer for concrete structures in NPP were recommended. The results show that W/B 35%, 20% of fly ash substitution and 2% of super plasticizer addition was found out to be an optimum quantity for dome structure and W/B 45%, 20% of fly ash substitution and 3% of super plasticizer addition to be an optimum quantity for wall and slab structures in NPP.

1. 서 론

국내에 고성능 콘크리트가 소개된 것은 불과 5 6년 정도밖에 되지 않기 때문에 고성능 콘크리트에 대한 개념 및 연구동향 그리고 연구방향에 대해서는 아직 정립이 안되어 있는 상태이며, 고성능 콘크리트를 발전소 콘크리트 구조물에 적용한 사례 또한 아직 없다. 따라서 고성능 콘크리트의 기본이 되는 재료선정 및 배합설계의 연구부터 우리 나라 실정에 맞는 현장적용과 그에 따른 구조성능 및 안전성 검토를 위한 기초연구가 필요한 실정이다. 국내의 경우, 원자력 발전소 건설시 주로 5종 시멘트(내황산염 시멘트)를 사용하고 있으나, 최근에는 제4의 콘크리트 구성요소라 일컬어지는 혼화재료가 급격히 발달, 실용화되면서 1종 시멘트에 혼화재를 첨가한 콘크리트가 원자력 발전소 건설시 효과적이라고 보고되고 있으며, 일본의 경우 원자력 발전소 콘크리트 구조물에 적용된 예도 있다. 이러한 혼화재료의 발달은 콘크리트의 시공성 및 공학적 특성을 한 단계 진전시키고 있다. 즉, 원자력 발전소, 댐, 프리스트레스트 콘크리트 구조물, 고속 전철 등 일반 구조물에 비해 내구성 측면이나 강도특성 및 안전성 측면에서 엄격한 품질관리가 가중되는 콘크리트 구조물에 혼화재료가 큰 역할을 하고 있다. 그 가운데 특히 원자력 발전소 건설에 있어 콘크리트 구조물은 차폐상의 요구나, 높은 내진성을 필요로 하기 때문에 구조체 단면이 필연적으로 커짐과 동시에 철근양도 증가하게 되는 일반적 특성을 가지고 있다. 또한 시공관리가 가중되는 원자력발전소 건설용 콘크리트의 요구성능으로서는 아직 굳지 않은 상태에서의 적정 워커빌리티, 공기량, 블리딩양 등과 경화후의 적정 압축강도, 건조수축, 내구성 지수 등과 같은 일반적인 보통 콘크리트의 요구성능 외에 온도응력의 최소화를 위한 수화열의 저하, 차폐성을 위한 적정 단위체적중량의 확보, 철근 밀집지역에서의 시공성의 향상 등이 추가적으로 요구된다.

따라서 본 연구에서는 고성능 콘크리트의 재료적 특성 및 배합특성을 조사하고, 실제 원자력 발전소 콘크리트 구조물에 적용된 사례들을 분석하여 원자력 발전소 콘크리트 공사에 있어서 다짐이 곤란한 구조부위의 시공성 향상과 매스 콘크리트의 수화열 저감 및 공학적 특성을 만족하는 고성능 콘크리트를 개발하여 실용화하고자 한다.

2. 본 론

고성능 콘크리트는 다짐을 하지 않아도 양호한 품질을 발휘할 수 있을 정도로 높은 유동성, 충전성, 재료분리 저항성을 갖고 있으므로 현장 시공시에 작업능력을 개선시켜 경제적으로도 유리한 콘크리트로 알려져 있다.

따라서 본 과제에서는 W/B를 달리하여 격납건물 외벽 돔(Dome)에 적용하기 위한 배합과 철근 밀집지역과 12in(30.48cm)이하의 벽체와 슬래브에 적용하기 위한 배합으로 구분하여 Fly Ash치환율을 0%, 10%, 20%, 30%로 설정하고, 증점제와 유동화제의 첨가량을 조절함으로서 고성능 콘크리트의 제반특성을 분석하고 최적 배합비를 도출하여 실제 원전 구조물에 적용할 수 있는 배합의 기초자료를 제공하고자 한다.

2.1 고성능 콘크리트 개발을 위한 실험

고성능 콘크리트의 요구성능으로서 유동성은 재료분리가 되지 않는 범위에서의 큰 유동성을 말하며, 높은 유동성만으로는 높은 충전성을 만족시키지 못한다. 따라서 유동성은 우수하면서 재료분리 저항성을 동시에 만족하여 충전성이 좋도록 복합적인 사항이 고려되어야 한다. 이러한 고성능 콘크리트의 요구성능은 상호불가분의 관계가 있는데, 이점이 고성능 콘크리트의 배합설계상의 주목할만한 점이다.

고성능 콘크리트 상호간의 관계분석 및 특성분석을 위한 본 과제의 실험계획은 <표 1>과 같다. 본 연구의 배합사항으로 격납건물 외벽 돔(Dome)에 적용하기 위한 배합(W/B=0.35)의 경우, Fly Ash 치환율을 0%, 10%, 20%, 30%로 하고 유동화제의 첨가량을 예비실험을 통해 2종류를 선택하여 최적의 Fly Ash 치환율과 유동화제의 첨가량을 결정한다. 또한 철근 밀집지역과 12in 이하의 벽체와 슬래브에 적용하기 위한 배합(W/B=0.45)의 경우, Fly Ash 치환율을 0%, 10%, 20%, 30%로 하고 증점제의 첨가량을 예비실험을 통해 3종류를 선정하여 최적의 Fly Ash 치환율과 증점제 첨가량을 결정한다. 이상의 결과를 토대로 최적 배합비를 도출한다.

표 1. 실험계획

WB	W	F/A 치환율	혼화제 첨가량	실험사항
0.35	175 kg/㎥	0% 10% 20% 30%	유동화제 1.5% 2.5%	Slump Flow 실험 굵은 골재 씻기 실험 박스 충전실험 V롯드 실험 압축강도실험 (재령 7일, 28일)
0.45	185 kg/㎥	0% 10% 20% 30%	증점제 0 g/㎥ 370 g/㎥ 740 g/㎥	

2.2 내구성능 및 시간 의존적 변형특성 비교검토

도출된 최적 배합비와 원자력 발전소 콘크리트 배합과의 단열온도 상승실험을 수행하여 수화열의 발생 정도를 비교하고, 시간 의존적 변형특성에서는 건조수축을 측정하여 비교한다. 또한 장기 재령(7일, 28일, 56일, 91일)에 따라 다짐유무에 의한 압축강도를 비교하여 고성능 콘크리트의 성능 향상 정도를 확인한다.

표 2. 실험계획

WB	W	F/A 치환율	혼화제 첨가량	실험사항
0.35	175 kg/㎥	0% 20%	유동화제 2.0%	단열온도 상승실험 건조수축 압축강도실험 재령 7일, 28일, 56일, 91일 다짐 무다짐
0.45	185 kg/㎥	0% 20%	증점제 300 g/㎥	

3. 실험결과

3.1 고성능 콘크리트 개발을 위한 실험

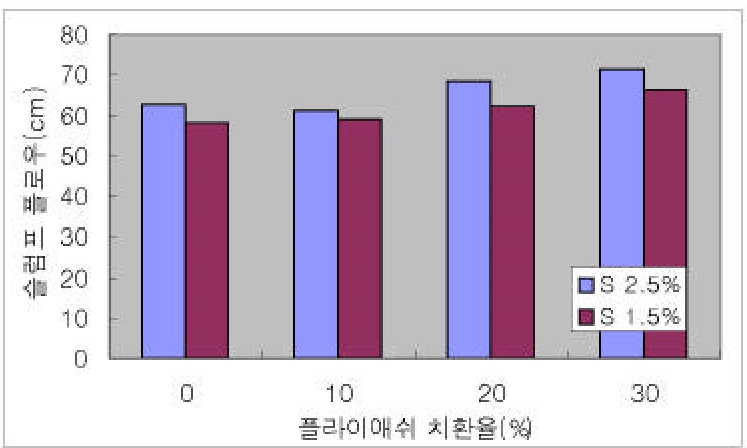
3.1.1 돔(Dome)에 적용하기 위한 배합

1) Slump Flow 실험

고성능 콘크리트의 유동성에 관한 실험 결과는 <표 3> 및 <그림 3.1>과 같다.

표 3. Slump Flow 실험

시편기호	혼화재 치환율	유동화제첨가량	Slump Flow (cm)
LFA00S25	Fly Ash 0%	S 2.5%	62.5
LFA00S15		S 1.5%	58.2
LFA10S25	Fly Ash 10%	S 2.5%	61
LFA10S15		S 1.5%	59
LFA20S25	Fly Ash 20%	S 2.5%	68.25
LFA20S15		S 1.5%	62.3
LFA30S25	Fly Ash 30%	S 2.5%	71.5
LFA30S15		S 1.5%	66.5



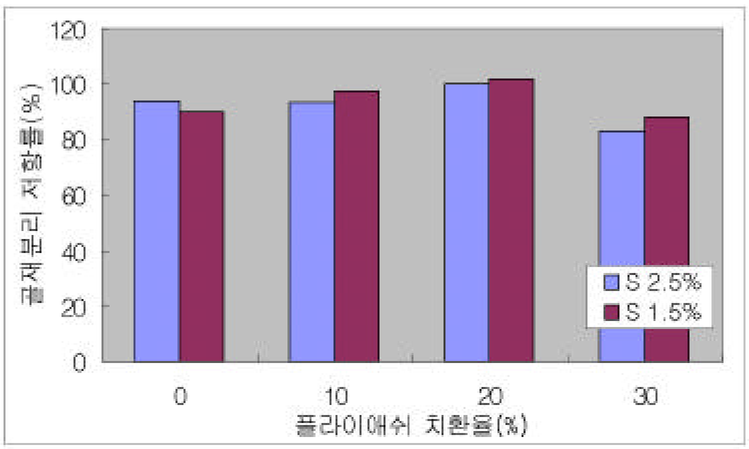
<그림 3.1> Slump Flow 실험

2) 굵은 골재 씻기 실험

고성능 콘크리트의 재료분리 저항성에 관한 실험 결과는 <표 4> 및 <그림 3.2>와 같다.

표 4. 굵은 골재 씻기 실험

시편기호	혼화재 치환율	유동화제 첨가량	20cm 내(%)	20cm 외(%)	재료분리 저항률 (%)
LFA00S25	Fly Ash 0%	S 2.5%	48	45	94
LFA00S15		S 1.5%	39	36	92
LFA10S25	Fly Ash 10%	S 2.5%	47	43	91
LFA10S15		S 1.5%	38	37	97
LFA20S25	Fly Ash 20%	S 2.5%	47	47	100
LFA20S15		S 1.5%	38	48	102
LFA30S25	Fly Ash 30%	S 2.5%	58	48	83
LFA30S15		S 1.5%	41	36	88



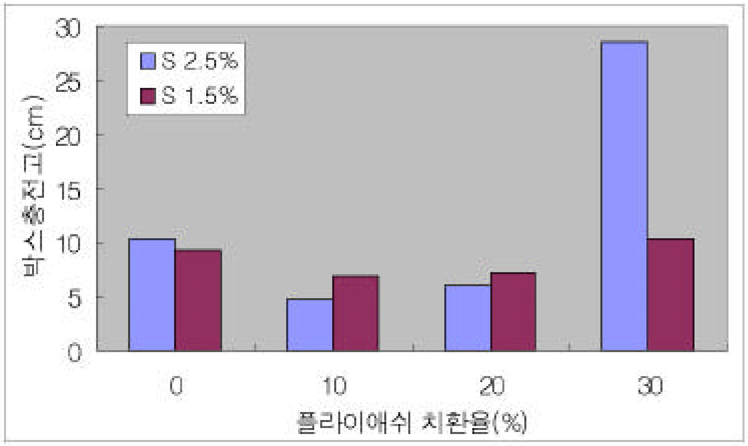
<그림 3.2> 굵은 골재 씻기 실험

3) **충전성 실험**

고성능 콘크리트의 BOX **충전성 실험에 관한 실험 결과는** <**표** 5> **및** <**그림** 3.3>**과 같다.**

표 5. 충전성 실험

시편기호	혼화재 치환율	유동화제첨가량	박스충전 (cm)
LFA00S25	Fly Ash 0%	S 2.5%	10.3
LFA00S15		S 1.5%	9.3
LFA10S25	Fly Ash 10%	S 2.5%	4.8
LFA10S15		S 1.5%	6.9
LFA20S25	Fly Ash 20%	S 2.5%	6.1
LFA20S15		S 1.5%	7.2
LFA30S25	Fly Ash 30%	S 2.5%	28.5
LFA30S15		S 1.5%	10.3

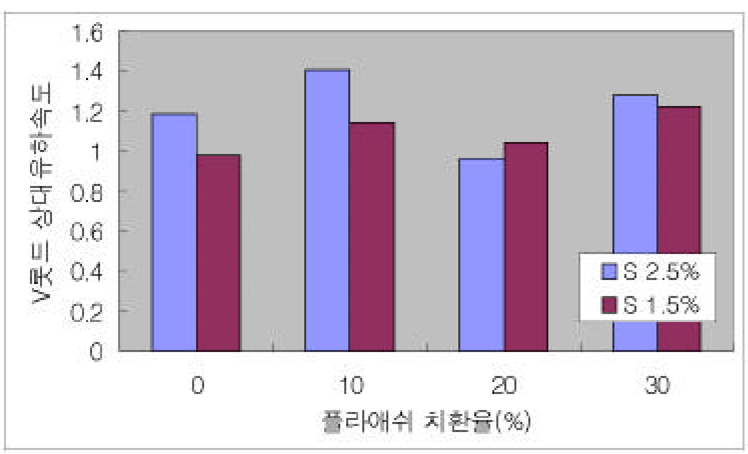


<그림 3.3> BOX 충전성 실험

고성능 콘크리트의 V **롯드 실험에 관한 실험 결과는** <**표** 6> **및** <**그림** 3.4>**와 같다.**

표 6. V **롯드 실험**

시편기호	혼화재 치환율	유동화제첨가량	V 롯드 상대유하시간
LFA00S25	Fly Ash 0%	S 2.5%	1.18
LFA00S15		S 1.5%	0.98
LFA10S25	Fly Ash 10%	S 2.5%	1.4
LFA10S15		S 1.5%	1.14
LFA20S25	Fly Ash 20%	S 2.5%	0.96
LFA20S15		S 1.5%	1.04
LFA30S25	Fly Ash 30%	S 2.5%	1.28
LFA30S15		S 1.5%	1.22



<그림 3.4 V 롯드 실험>

이상의 결과에서 Fly Ash **치환율은** 20%, **유동화제의 첨가량은** 2%**정도가 본 연구에서 요구되는 성능에 가장 적합한 것으로 판단된다. 따라서 격납건물 외벽 돔**(Dome)**에 적용하기 위한 최적 배합비를 도출하면** <**표** 7>**과 같다.**

표 7. 최적 배합비

WB (%)	S/A (%)	단위량(kg/ ㎥)					
		C	F/A	W	G	S	S.P(㎖/ ㎥)
35	47	400	100	175	833	739	8333

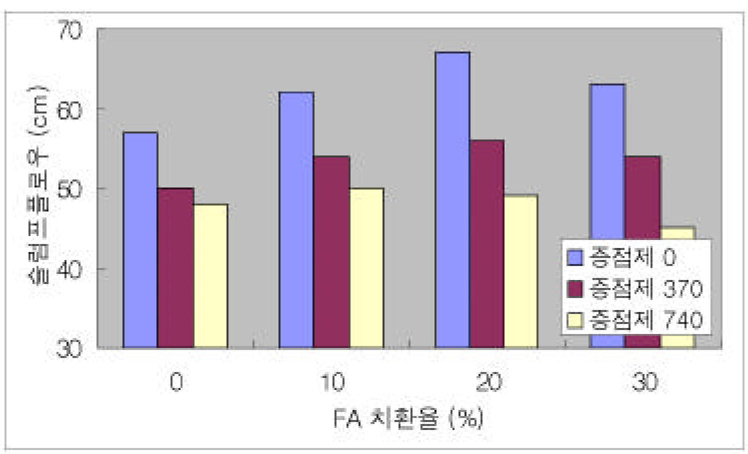
3.1.2 **철근 밀집지역과** 12in **이하의 벽체와 슬래브에 적용하기 위한 배합**

1) Slump Flow **실험**

고성능 콘크리트의 유동성에 관한 실험 결과는 <**표** 8> **및** <**그림** 3.5>**와 같다**.

표 8. Slump Flow 실험

시편기호	혼화재 치환율 (%)	증점제 첨가량 (g/㎥)	Slump Flow (cm)
HFA00V0	Fly Ash 0%	0	57
HFA00V1		370	50
HFA00V2		740	48
HFA10V0	Fly Ash 10%	0	62
HFA10V1		370	54
HFA10V2		740	50
HFA20V0	Fly Ash 20%	0	67
HFA20V1		370	56
HFA20V2		740	49
HFA30V0	Fly Ash 30%	0	63
HFA30V1		370	54
HFA30V2		740	45



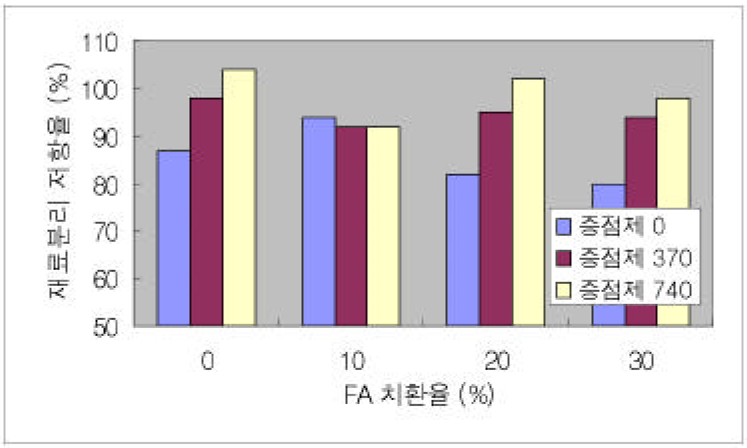
<그림 3.5> Slump Flow 실험

2) **굵은 골재 씻기 실험**

고성능 콘크리트의 재료분리 저항성에 관한 실험 결과는 <**표** 9> **및** <**그림** 3.6>**과 같다**.

표 9. 굵은 골재 씻기 실험

시편기호	혼화재 치환율 (%)	증점제 첨가량 (g/m³)	20cm 내	20cm 외	재료분리 저항률 (%)
HFA00V0	Fly Ash 0%	0	56	49	87
HFA00V1		370	53	52	98
HFA00V2		740	53	55	104
HFA10V0	Fly Ash 10%	0	55	52	94
HFA10V1		370	57	51	91
HFA10V2		740	57	52	92
HFA20V0	Fly Ash 20%	0	59	48	82
HFA20V1		370	53	51	95
HFA20V2		740	51	52	102
HFA30V0	Fly Ash 30%	0	64	51	80
HFA30V1		370	54	51	94
HFA30V2		740	53	52	98



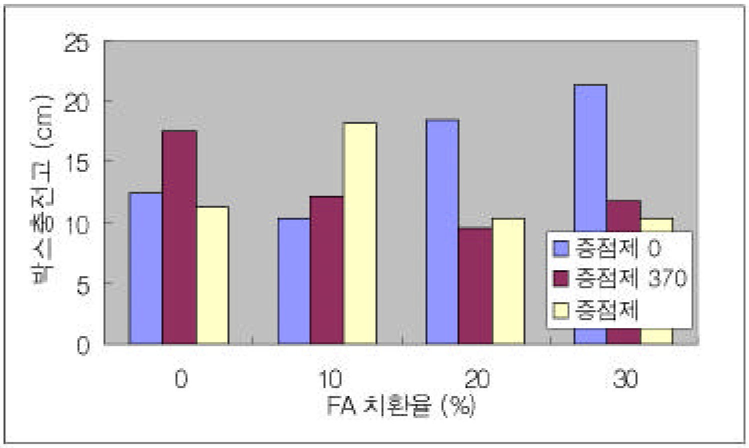
<그림 3.6> 굵은 골재 씻기 실험

3) 충전성 실험

고성능 콘크리트의 BOX 충전성 실험에 관한 실험 결과는 <표 10> 및 <그림 3.7>과 같다.

표 10. BOX 충전성 실험

시편기호	혼화재 치환율 (%)	증점제 첨가량 (g/m³)	박스충전고차 (cm)
HFA00V0	Fly Ash 0%	0	12.5
HFA00V1		370	17.5
HFA00V2		740	11.3
HFA10V0	Fly Ash 10%	0	10.3
HFA10V1		370	12.2
HFA10V2		740	18.2
HFA20V0	Fly Ash 20%	0	12.9
HFA20V1		370	9.6
HFA20V2		740	10.4
HFA30V0	Fly Ash 30%	0	21.3
HFA30V1		370	11.8
HFA30V2		740	10.3

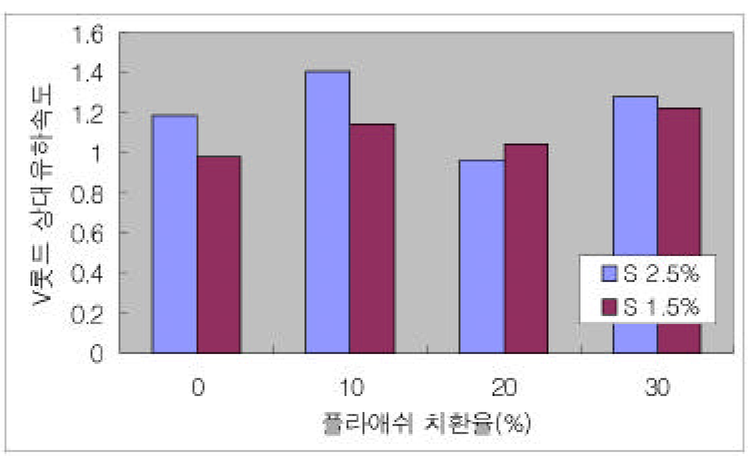


<그림 3.7> BOX 충전성 실험

고성능 콘크리트의 V 롯드 실험에 관한 실험 결과는 <표 11> 및 <그림 3.8>과 같다. 이상의 결과에서 철근 밀집지역과 12in이하의 벽체와 슬래브에 적용하기 위한 배합은 Fly Ash 치환율 20%, 증점제 첨가량은 300 g/㎥으로 판단된다. 따라서 철근 밀집지역과 12in이하의 벽체와 슬래브에 적용하기 위한 최적 배합비는 <표 12>와 같다.

표 11. V 롯드 실험

시편기호	혼화재 치환율	유동화제첨가량	V 롯드 상대유하시간
LFA00S25	Fly Ash 0%	S 2.5%	1.18
LFA00S15		S 1.5%	0.98
LFA10S25	Fly Ash 10%	S 2.5%	1.4
LFA10S15		S 1.5%	1.14
LFA20S25	Fly Ash 20%	S 2.5%	0.96
LFA20S15		S 1.5%	1.04
LFA30S25	Fly Ash 30%	S 2.5%	1.28
LFA30S15		S 1.5%	1.22



<그림 3.8 > V 롯드 실험

표 12. 최적 배합비

WB (%)	S/A (%)	단위량(kg/㎥)					
		C	F/A	W	G	S	증점제g/㎥
45	44	329	82	185	911	717	300

3.2 내구성 및 시간 의존적 변형특성 실험

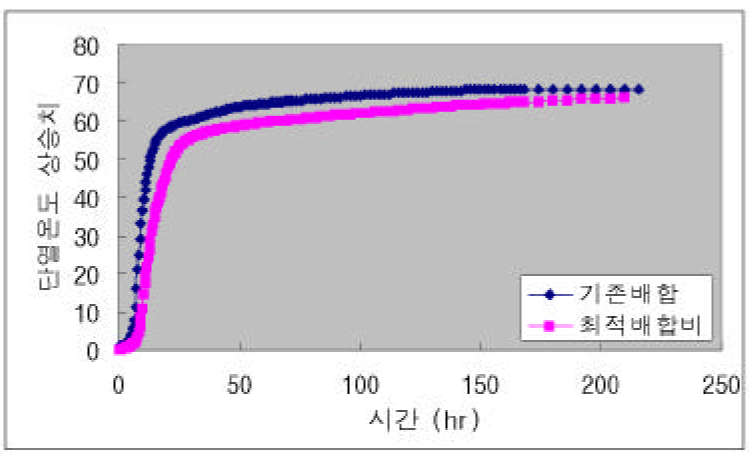
3.2.1 돔(Dome)에 적용하기 위한 배합

1) 단열온도 상승 실험

고성능 콘크리트의 단열온도 상승 실험에 관한 실험 결과는 <표 13> 및 <그림 3.9>와 같다.

표 13. 최대단열온도 상승값 (K), 반응속도 (α)

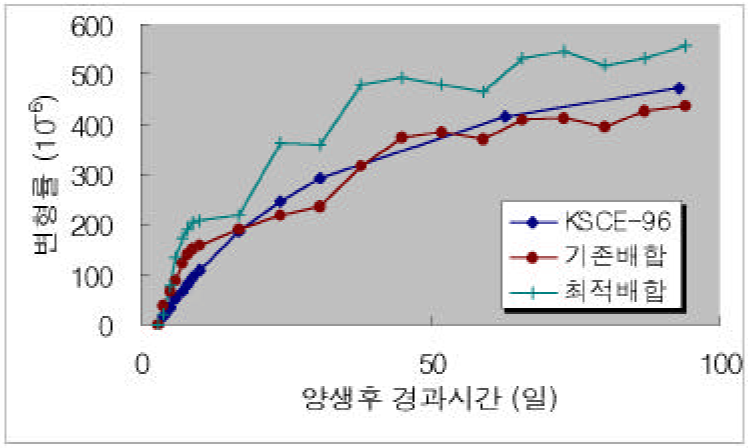
		최대단열온도 상승값 (℃)	반응속도 (℃/hr)
격납건물	기존배합	68.93222	1.14654
	최적배합	66.42773	0.912632



<그림 3.9> 단열온도 상승 곡선(격납건물)

2) 건조수축

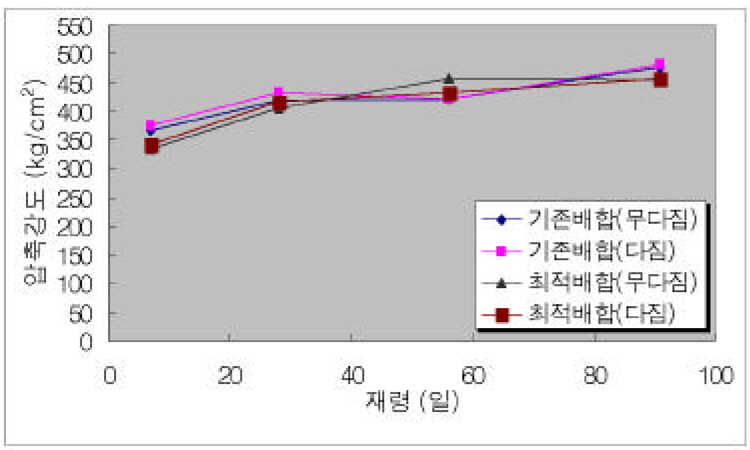
고성능 콘크리트의 건조수축에 관한 실험 결과는 <그림 3.10>과 같다.



<그림 3.10> 건조수축 실험 결과(격납건물)

3) **압축강도**

고성능 콘크리트의 압축강도에 관한 실험 결과는 <그림 3.11>과 같다.



<그림 3.11> 콘크리트의 압축강도 실험 결과(격납건물)

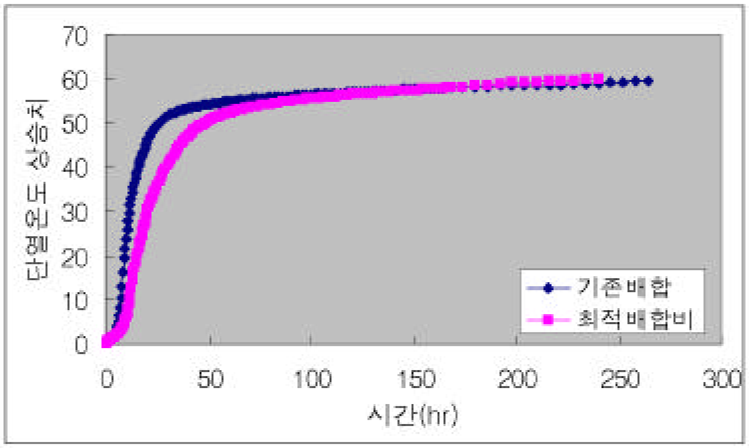
3.2.2 철근 밀집지역과 12in 이하의 벽체와 슬래브에 적용하기 위한 배합

1) **단열온도 상승 실험**

고성능 콘크리트의 단열온도 상승 실험에 관한 실험 결과는 <표 14> 및 <그림 3.12>와 같다.

표 14. 최대단열온도 상승값 (K), 반응속도 (α)

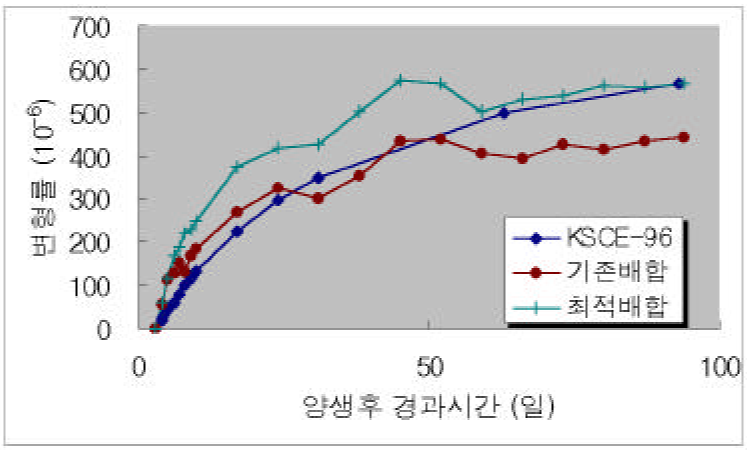
		최대단열온도 상승값 (℃)	반응속도 (℃/hr)
철근 밀집지역	기존배합	58.65797	1.07644
	최적배합	59.50891	0.81413



<그림 3.12> 단열온도 상승 곡선(철근 밀집지역)

2) 건조수축

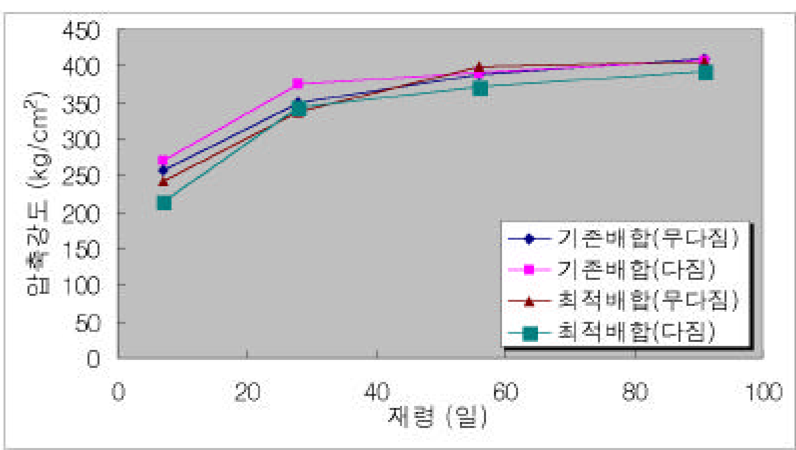
고성능 콘크리트의 건조수축에 관한 실험 결과는 <그림 3.13>과 같다.



<그림 3.13> 건조수축 실험 결과(철근 밀집지역)

3) 압축강도

고성능 콘크리트의 압축강도에 관한 실험 결과는 <그림 3.14>와 같다.



<그림 3.14> 콘크리트의 압축강도 실험 결과(철근 밀집지역)

4. 결 론

본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 격납건물에 적용하기 위한 배합의 경우, Fly Ash 치환율은 20%에서 가장 우수한 성능을 보였으며, 유동화제의 첨가량은 2.0%가 최적인 것으로 나타났다.

2) 철근 밀집지역에 적용하기 위한 배합의 경우, Fly Ash 치환율은 20%에서 가장 우수한 성능을 보였으며 골재 분리 현상을 방지하기 위한 증점제의 첨가량은 $300g/m^3$ 이 최적 첨가량으로 나타났다.

3) 내구성능 및 시간 의존적 변형특성 실험에서는 단열온도 상승 실험 및 압축강도 실험에서 기존 배합 보다 최적배합이 우수한 결과를 보여 주었다.

4) 본 과제를 통해서 도출된 최적배합은 국내에서 제시된 고성능 콘크리트의 기본 성능을 만족하고 있으며, 내구성 측면에서도 기존의 발전소 콘크리트 구조물에 사용된 콘크리트에 비해 우수한 것으로 판단되어, 향후 실용화를 위한 기초 자료로써 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1) Nicolas J. Carino, James R. Clifton, “High-Performance concrete; Research Needs to Enhance its Use”, Concrete International, pp.70 76, 1991. 9.

2) Pierre-Claude Aitcin, Adam Neville, “High Performance Concrete Demystified”, Concrete International, pp.21 26, 1996.

3) 삼성물산(주) 건설부문 종합기술연구소, “증점제를 이용한 다짐불요 콘크리트의 실용화에 관한 연구” 1997. 8.

4) 건설교통부, “초유동 콘크리트의 개발 및 실용화 연구” 1995. 10.

5) 강석화, 박칠림, “일본에서의 초유동 콘크리트의 실용화 동향”, 한국콘크리트학회, 콘크리트학회지, 제5권 제2호, 1993.

6) 변근주, “고성능 콘크리트의 연구 동향 및 전망”, 한국콘크리트학회, 콘크리트학회지, 제6권 제2호, pp.2 9, 1994.

7) 김화중, “일본에 있어서 초유동 콘크리트의 연구 및 장래 전망”, 한국재단, 학연산연구교류회, 제135회, pp.1 17, 1994.

8) 한천구외 4인, “증점제를 이용한 다짐불요 콘크리트의 실용화에 관한 연구”. 대한토목학회, 학술발표논문집, 제17권 제1호, 1997. 4.