

기존 원전용 콘크리트와 다성분계 고유동 콘크리트의 장단기거동 비교 실험 연구

The Comparative Experimental Study of short and long-term Behavior of the Blended High-Fluidity
Cement Concrete and Existing Nuclear Power Plant Structural Concrete

이 평 석* 권 기 주** 김 수 만***
Lee, Pyung-Suk Kwon, Ki-Joo Kim, Su-Man

Abstract

In this study, it was founded to make the optimal mixture for producing concrete which is self-compacting, yet, and generates low heat of hydration by using flyash, blast furnace slags and limestone powders as binders in addition to cement while using super-plasticizers and viscosity agents as admixture agents. The structural behaviors of the concrete produced with the selected mixture were compared with those of the concrete currently using for construction of nuclear power plants. The study shows that the blended high fluidity concrete including limestone is better in workability and durability than the concrete currently in use for nuclear power plants.

요 지

본 연구에서는 결합재인 시멘트 외에 플라이애쉬, 고로슬래그 및 석회석 미분말을 사용하고 고성능감수제 등의 혼화제를 사용하여 고유동 무다짐이면서도 수화열을 적게 발생하는 콘크리트의 최적배합을 도출하였다. 이와 같이 선정된 배합으로 제조한 콘크리트의 장 단기거동을 기존 원전 콘크리트의 거동과 비교 검토하는 실험을 실시하였다. 연구결과 석회석이 혼합된 다성분계 고유동 콘크리트가 기존 원전용 콘크리트 보다는 시공성과 내구성이 향상되었음을 확인할 수가 있었다.

Keywords : Blended High-Fluidity Concrete, Workability, Durability, Nuclear Power Plant

핵심 용어 : 다성분계 고유동 콘크리트, 시공성, 내구성, 원자력발전소 구조물

* 정회원, (주)코센 부사장

** 정회원, 한국전력 전력연구원 책임연구원

*** 정회원, 수원대학교 토목공학과 교수

E-mail : pslee@kocen.com 031-777-8500

•본 논문에 대한 토의를 2004년 12월 31일까지 학회로 보내주
시면 2005년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

원자력발전소(원전)의 콘크리트 구조물은 철근이 조밀하여 콘크리트 치기 및 다지기가 원활하지 못한 부재요소가 많이 있다. 또한 방사능 차폐기능 때문에 벽체나 슬래브의 두께가 일반구조물에 비해 매우 두꺼운 매스콘크리트로 건설된다. 그러나 현재 건설중인 원전 콘크리트는 시멘트와 플라이애쉬를 결합재로 사용하여 슬립프 10 ϕ .5cm 정도인 일반콘크리트와 유사한 콘크리트를 사용하고 있다. 따라서 원전 콘크리트의 시공성을 보다 더 향상시키고 수화열을 저감시킬 수 있는 방안이 강구되어야 할 실정이다.

한편, 일반 콘크리트 분야에서는 고로슬래그, 플라이애쉬등의 광물질 미분말과 고성능 감수제 및 증점제 등의 혼화제를 사용하여 콘크리트의 각종 물성을 향상시키는 방안에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

이에 본 연구에서는 시공성과 내구성 향상을 목적으로 배합 제조한 다성분계 고유동 콘크리트의 장·단기 거동을 기존 원전 콘크리트의 특성과 비교, 분석하여 다성분계 고유동 콘크리트가 원전 구조물용으로 적합한지를 평가하였다.

2. 실험

2.1 실험재료 및 배합비

2.1.1 구성재료

본 실험에서는 결합재로 시멘트 이외에 플라이애쉬, 고로슬래그 및 석회석 미분말을 사용하였으며 이들의 주요 물리·화학적 성질은 Table 1에 수록된 바와 같다. 또한 잔골재는 강모래를 사용하였고 굵은골재는

부순돌로 최대치수 19 mm를 사용하였으며 이들의 물리적 성질과 입도분포는 Fig. 1에 도시되어 있다. 실험에 사용한 각종 혼화제의 물리·화학적 특성은 Table 2에 수록된 바와 같다.

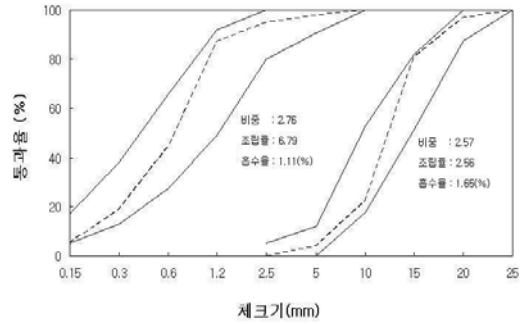


Fig. 1 골재의 입도분포 및 물리적 성질

Table 1 · 화학적 성질

종 류	비 중	분말도(cm^2/g)	비 고
시멘트 (I PC)	3.15	3,720	-
플라이 애쉬	2.30	3,210	분급
고로 슬래그 미분말	2.93	6,000	분쇄/ 1급
석회석 미분말 (NAC-400)	2.71	5,370	분쇄/ 1급

Table 2 · 화학적 특성

종 류	비중	pH	색상	고형분 (%)	점도 (cps)	습도 (%)
고성능 감수제 ()	1.07	5.25	암갈색	25.5	-	-
증점제	-	-	백색	-	7,900	8.0
A/E 제	1.03	-	백색	-	-	-
일반감수제 ()	1.15	7.9	암갈색	34.1	-	-

Table 3 콘크리트 배합표

콘크리트 종류	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kgf/m^3)							
			W	B	C	F/A	S/P	L/P	SP	증점제
SHF ()	39.4	43	185	470	376	94	-	-	2.82	-
MHS (,)	37	53	185	500	200	100	200	-	6.50	0.25
MHL (MHS+)	37	53	185	500	200	100	150	50	5.65	0.25

여기서, F/A : Flyash, S/P : Slag, L/P : Lime Stone

2.1.2 배합비

현재 원전에서 주요 구조물용으로 사용중인 콘크리트(재령 91일의 설계기준강도 385 kgf/cm²)의 배합비는 Table 3에 수록된 SHF 배합에 따른 것이다.

본 연구에서는 시공성과 내구성이 향상된 콘크리트 제조를 위해 폴리카본산계 고성능 감수제와 증점제를 사용한 다성분계 고유동 콘크리트인 MHS의 배합을 도출하였다. 그러나 이 MHS 콘크리트는 필요한 유동성은 확보되었으나 수화열 저감엔 큰 효과를 얻지 못해 고로슬래그의 25%를 석회석 미분말로 대체한 MHL 배합을 최종배합으로 선정하였다. 이러한 MHS와 MHL 배합도 Table 3에 수록되어 있다.

2.2 실험의 종류 및 방법

2.2.1 최적 배합비 도출 실험

기존 원전용 콘크리트를 대체할 수 있는 다성분계 고유동 콘크리트(MHS, MHL)는 Table 4에 수록된 고유동 콘크리트의 배합기준을 만족하도록 배합비를 변화시켜가면서 반복실험을 수행하여 Table 3에 수록된 최적의 배합비를 도출하였다.^{(1),(2)} 슬럼프 플로우시험, 깔대기 유하시험 및 충전고 높이차 시험은 KS에 관련 시험규정이 없어 외국의 관련 시험방법에 따라 수행하였다.^{(3),(4),(5)}

2.2.2 현장 적용성 시험

실험실에서 배합기준을 만족하는 고유동 콘크리트, MHL이 실제 건설현장에서 대용량의 배치플랜트로 생산할 때도 모든 기준을 만족시키는가를 확인하기 위해 현장 모의부재 타설시험을 실시하였다.

Fig. 2 및 Fig. 3에서 보인 두 종류의 모의부재를 제작하여 유동성, 간격통과성 및 재료분리저항성 등을 확인하였다.

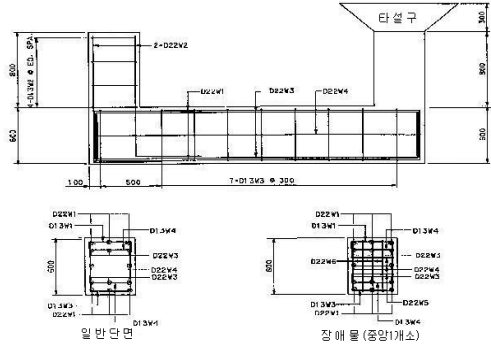


Fig. 2 (1)

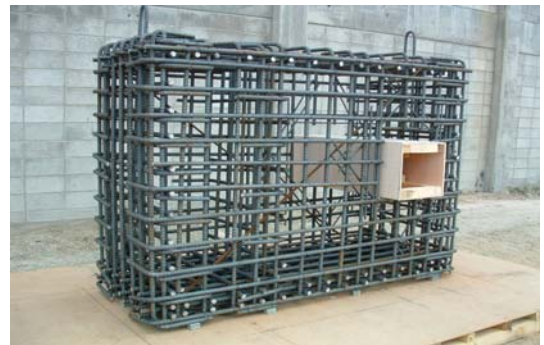


Fig. 3 (2)

2.2.3 장 단기거동 추정시험

(1) 압축강도 시험

KS F 2405에 따라 재령 7일, 14일, 28일 및 91일의 압축강도를 각 콘크리트에 대해 측정(3개평균)하였다.

Table 4 콘크리트의 배합기준

콘크리트 종류	배합기준						비고
	Slump	Slump flow	공기량	O ! 깔대기	Box 충전성	배합강도	
MHS	-	55 cm 이상	4.5 ±1.5%	유하시험, 15±5	높이차, 5cm 이하	385kgf/cm ²	고유동 ()
MHL	-	55 cm 이상	4.5 ±1.5%	유하시험, 15±5	높이차, 5cm 이하	385kgf/cm ²	고유동 ()
SHF	10±0.5cm	-	-	-	-	385kgf/cm ²	일반콘크리트 ()

(2) 건조수축 측정시험

건조수축에 따른 길이변화는 28일과 91일간 수중양생한 시편을 5개 제령 (1일, 7일, 28일, 60일, 91일)에서 KS F 2424에 따라 측정(3개 평균) 되었다.

(3) 압축크리프 측정

압축크리프 측정시험은 일반콘크리트, SHF와 고유동 콘크리트 중 MHL에 대해서만 KS F 2453에 따라 실시하였다.

(4) 중성화 깊이 측정시험

중성화 깊이 측정도 28일과 91일 양생분에 대해 실시하였다. 한 방향으로 이산화탄소의 침투를 유도하기 위해 시편의 5면을 애폭시로 코팅하였다. 촉진실험 장치속은 10% 농도의 이산화탄소, 온도 30℃, 상대습도 50%를 일정하게 유지할 수 있도록 했으며 7일, 28일, 60일 및 91일에 시험체를 이등분으로 쪼갬다음 그 면에 1%의 페놀프탈레인 용액을 분무하여 중성화 깊이를 측정하였다.

(5) 수용성 염화물 측정시험

염해 실험은 부식이 가장 빠르게 일어나는 3.6%(일반해수의 염화물 농도는 3~4%)의 NaCl 용액을 사용하였다. 28일 및 91일간 수중에서 표준 양생시킨 시편을 28일, 60일 및 91일 동안 용액속에 침전시킨 후 KS F 2713,

2714에 따라 염화물 함유량을 측정하였다.

(6) 황산염에 의한 길이변화 측정시험

황산염 실험은 ASTM C 1012에 준하여 실시하였다. 단 본 실험에서는 촉진조건을 위해 10% 황산나트륨 (Na₂SO₄) 용액을 사용하였다. 28일과 91일 동안 수중에서 양생한 시편을 사용하여 28일, 60일 및 91일 동안 수용액속에 침전시킨 후 각각의 길이변화를 측정 (3개 평균) 하였다.

(7) 동결융해 시험

동결융해 저항성 실험은 고유동 콘크리트, MHL 및 MHS에 대해서만 KS F 2456에 따라 상대동탄성계수와 내구성 지수를 각각 측정 및 계산하였다. 3개의 시험체를 300 cycle 까지 측정하여 평균하였다.

(8) 수화열 시험

수화열 시험은 보유 실험장비의 특성을 고려하여 JIS R 5203에 따라 단열상승온도와 반응속도를 측정하였다.

2.3 시편 제작 및 양생

장 단기거동 시험을 위해 제작된 시편의 종류 및 수량과 양생조건은 Table 5와 같다.

Table 5 · 단기거동 시험용 시편규격 및 양생

실험종류	시편의 규격	시편수량	양생 / 환경
압축강도	• 직립 10cm × 20cm 원주	36	• 3℃ 서 수중양생 • , 14, 28, 91 간 양생
건조수축	• 0cm×10cm×28.5cm • 8 , 91 양생분	18	• 3℃ 서 수중양생 • 상대습도 50% 유지
중성화	• 0cm×10cm×15cm • 8 , 91 양생분	24	• 3℃ 서 수중양생 • 촉진실험을 위해 10% 이산화탄소 농도에 노출 • 0℃ 50% 유지
염해	• 0cm×10cm×15cm • 8 , 91 양생분	18	• 3℃ 서 수중양생 • .6% NaCl 용액속에 침전
황산염	• 0cm×10cm×40cm • 8 , 91 양생분	18	• 3℃ 서 양생 • 0% 황산나트륨 용액 사용
압축크리프	• 직립 15cm × 30cm 원주	12	• ±2℃ 28 91 (50±4 %)
동결 융해	• 0cm×10cm×40cm	6	• ℃ 14 수중 양생후
수화열	• 시료당 500g	-	• 실험실 온도 20℃ : 1℃ 유지

3. 실험결과 및 평가

3.1 굳지 않은 콘크리트의 특성실험

3.1.1 최적 배합비 도출실험

Table 3에 수록된 고유동 콘크리트 MHS의 최적 배합비를 도출하기 위해 실시한 반복실험 배합표는 Table 6과 같다. 결합제인 시멘트, 플라이애쉬 및 고로슬래그 미분말의 혼합비와 이들 다성분계 결합제의 전체량은 본 연구에 선행하여 실시한 원전용 배합설계 연구 실험의 결과^{(6),(7)}에 기초하였다. 단위수량 및 잔골재율 조정을 통해 배합조건을 만족시키는 최적의 배합을 반복실험을 통해 선정하였다. 시간에 따른 물성치의 변화 즉 경시변화는 최소 90분 이상 유사 특성을 유지하는 것을 기준으로 삼았다.

현장에서 골재의 표면수 관리가 용이하도록 가수에 대한 예민성과 혼화제 제조회사별 영향도 검토하였다. 재료의 배합은 건비법 시간을 60초로 본비법 시간은

180초로 하여 배합이 원활하도록 하였다. 배합 후 운송하여 타설해야 하는 현장 상황을 고려하여 Table 6 배합표의 4-1배합을 MHS의 최적배합으로 선정하였다. MHL은 MHS의 고로슬래그량의 25%만 석회석 미분말로 대체시킨 후 Table 4의 배합기준을 만족시키기 위해 고성능 감수제량을 약간만 감소시켰다.

3.1.2 현장 모의실험

모의부재⁽¹⁾의 타설구를 통해 유입된 콘크리트는 바닥면에 설치된 3개의 장애물을 통과하여 반대방향으로 흘러가면서 투입구 쪽의 타설 높이보다는 조금 낮은 높이를 유지하면서 점차 상승하였다. 투입구 쪽의 콘크리트가 부재 상한선까지 충전되었을 때 반대편 수직벽면의 콘크리트도 거의 상한선까지 차올라왔다. 이때 투입구와 반대편 쪽에서 채취한 시료를 세척하여 분석한 결과 재료분리가 일어나지 않았음을 확인할 수 있었다. 이로써 본 유동화 콘크리트의 유동성, 충전성 및 재료분리 저항성은 기준을 만족하는 것으로 확인되었다.

Table 6 MHS() | 반복 실험 배합표

구분	W/B (%)	s/a (%)	VG (ℓ)	VP/VG (%)	단위재료량 (kgf/m ³)								slump flow (cm)	O ! 깔때기 유하시험 (sec)	Box 충전 높이차 (cm)
					W	C	S	G	F.A	Slag	AD	증점제			
1-1	37.0	49.0	311	1.158	185	200	768	858	100	200	5.0	-	66.0	17.5	2.5
1-2	37.0	51.0	299	1.206	185	200	799	825	100	200	5.0	-	65.0	16.4	1.5
1-3	37.0	53.0	287	1.257	185	200	831	791	100	200	5.0	-	62.0	14.9	0.0
2-1	37.0	53.0	287	1.257	185	200	831	791	100	200	5.0	-	65.0	10.5	0.0
3-1 (B)	37.0	53.0	287	1.257	185	200	831	791	100	200	5.0	-	66.0	12.5	0.0
3-2 (C)	37.0	53.0	287	1.257	185	200	831	791	100	200	5.0	-	65.0	15.4	0.5
4-1	37.0	53.0	287	1.257	185	200	831	791	100	200	7.25	0.135	65.0	15.8	0.8
5-1	37.0	53.0	287	1.257	185	200	831	791	100	200	5.0	-	65.0	15.8	0.8
5-2	37.0	50.0	305	1.182	185	200	784	841	100	200	5.0	-	65.0	22.0	1.5
5-3	37.0	49.0	311	1.158	185	200	768	858	100	200	7.25	0.135	67.0	46.0	3.3
6-1	37.0	53.0	287	1.257	185	200	831	791	100	200	7.25	0.135	65.0	15.8	0.8
6-2	37.0	53.0	287	1.257	185	200	831	791	100	200	7.25	0.270	63.0	25.4	1.2
7-1	37.0	53.0	287	1.257	185	200	831	791	100	200	7.25	0.135	66.0	16.24	0.8
7-2	37.0	53.0	287	1.257	185	200	831	791	100	200	7.25	0.135	65.0	15.86	0.0
8-1	37.0	53.0	287	1.257	185	200	831	791	100	200	7.25	0.135	66.0	20.4	0.0
8-2	37.0	53.0	287	1.257	185	200	831	797	100	200	7.00	0.135	65.0	16.10	0.0

3.1.3 수화열 시험

JIS R 5203에 따라 측정된 단열 수화열 온도를 배합 결합재 별로 Fig. 4에 수록하였다.

이 그림에서 보는 것과 같이 측정 시작 후 6시간 까지는 모두 비슷한 변화를 보이다가 약 15시간 경과 후 부터는 다성분계인 MHS 및 MHL은 온도가 크게 상승하지 않는 반면 SHF는 크게 상승하기 시작하여 측정후 약 40시간이 경과된 시점에는 두 종류 사이의 단열 온도 차이는 25°C 이상이 난다.

다성분계인 MHS와 MHL은 측정 시작 후 약 30시간 경과시부터 단열온도가 상승하기 시작한다. 60시간 정도가 경과되면 석회석이 혼합되지 않은 SHF와 MHS의 단열온도는 비슷하게 되지만 MHL은 그 이후에도 다른 두 경우보다는 낮은 단열 온도를 유지하고 있다.⁽⁸⁾

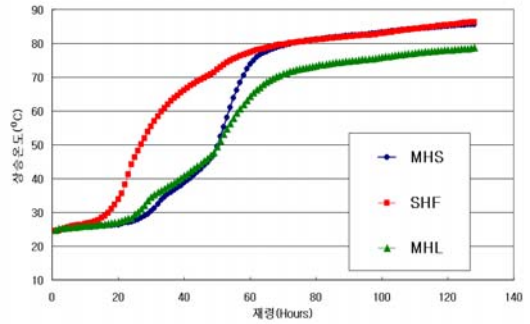


Fig. 4 혼화재별 단열 수화온도 변화

3.2 굳은 콘크리트의 특성 및 내구성 시험

3.2.1 압축강도

3가지 콘크리트의 재령별 압축강도 변화를 Fig. 5에 실었다. 설계기준강도 385 kgf/cm² (재령 91일 기준)는 모든 경우에 만족하였다.

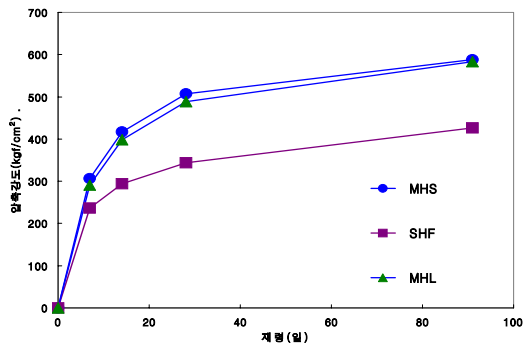


Fig. 5 재령에 따른 압축강도 변화

다성분계 고유동 콘크리트, MHS 및 MHL의 압축강도는 플라이애쉬만 대체된 일반콘크리트, SHF 보다 훨씬 높아서 재령 7일엔 SHF기준 27%, 재령 14일엔 38% 그리고 재령 28일 이후엔 최대 45%이상이나 높다. 이는 고로슬래그의 높은 분말도와 플라이애쉬의 포졸란반응으로 재령이 증가할수록 콘크리트의 구조가 치밀해짐으로써 나타난 현상이다.^{(9),(10)}

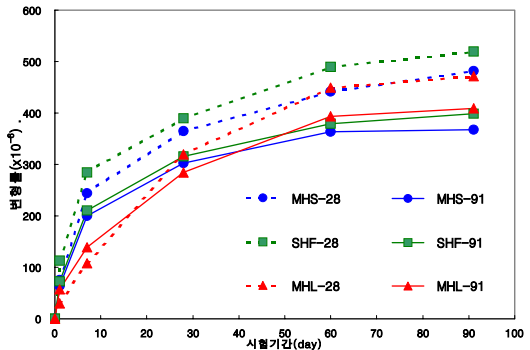


Fig. 6 건조수축에 의한 변형률

3.2.2 건조수축 실험

콘크리트 배합 종류별 건조수축에 의한 변형률 측정 결과를 Fig. 6에 나타냈다.

28일 양생분의 경우 초기 7일간 발생한 MHL의 건조수축 변형률은 석회석이 혼합되지 않은 다른 두 콘크리트 평균의 40% 수준이고 28일 후엔 85% 정도이다. 그러나 재령이 40일을 지나면 석회석의 영향은 없어지고 고로슬래그 미분말 혼합여부에 따라 건조수축 변형률이 차이를 보인다. 즉 고로슬래그 미분말이 함유된

고유동 콘크리트, MHS 및 MHL의 건조수축 변형률이 일반콘크리트인 SHF에 비해 적어진다.

한편 91일간 양생한 시편을 측정할 결과에서도 초기 7일간 발생한 수축변형률은 석회석이 혼합된 경우가 다른 두 콘크리트 평균의 67% 수준이고 28일 경과 후에는 93%로 증가한다.

3.2.3 압축 크리프 시험

석회석이 추가 혼합된 고유동 콘크리트 MHL과 일반 콘크리트 SHF의 압축 크리프 시험 결과는 Fig. 7에 되어 있다. 28일 양생분과 91일 양생 분 모두에서 석회석이 추가된 고유동 MHL의 크리프량이 SHF 보다 적음을 알 수 있다.

3.2.4 중성화 시험

양생기간 및 재령별로 측정된 중성화 깊이는 Fig. 8에 도시된 바와 같이 28일간 수중양생한 시편의 경우 MHL의 중성화 깊이가 MHS와 SHF보다 침전 약 15일 이후부터는 커지기 시작하여 침전 91일엔 평균 20% 정도 커졌다. 한편 91일간 양생한 시편의 경우는 초기엔 모두 비슷한 중성화 깊이를 보이다가 침전 28일부터는 SHF의 깊이가 2개의 다성분계 고유동화 콘크리트 MHS 및 MHL보다 커지기 시작하여 재령 91일경엔 그 차이가 20%나 되었다.

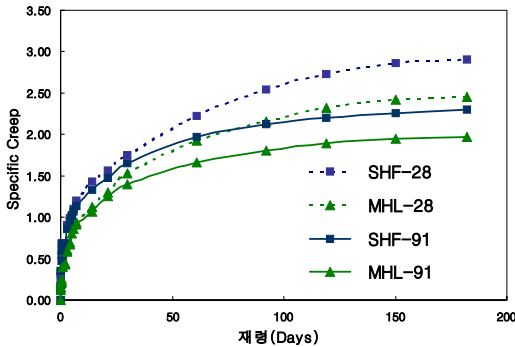


Fig. 7 대령별 콘크리트별 크리프량

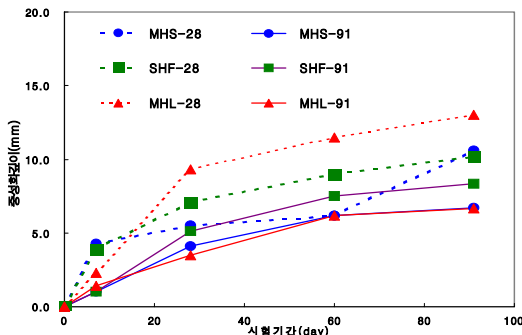


Fig. 8 양생 기간별 중성화 깊이 변화

3.2.5 염해 측정시험

용액속에서 28일, 60일 및 91일 동안 침전시킨후 채취한 시료속의 염분 함유량 측정결과를 Fig. 9에 도시되어 있다. 28일 및 91일 동안 수중에서 양생한 시료에서 공통으로 나타난 현상은 침전 초기엔 MHS의 염분 함유량이 다른 두 콘크리트 평균값보다 적었지만 (28일 양생시 82%, 91일 양생시 76%), 침전기간이 91일로 길어지면 석회석이 혼합된 MHL의 염분함유량이 다른 콘크리트의 83%정도로 나타남을 알 수 있었다.

3.2.6 황산염 측정시험

축진시험용 황산 용액속에 침전시킨 시편의 길이 변화율을 게이지 스테르를 이용하여 28일, 60일 및 91일에 각각 측정된 결과는 Fig. 10과 같다. 고유동 콘크리트의 황산에 대한 저항력은 일반콘크리트인 SHF에 비해 낮다. 그러나 고유동 콘크리트 중에서 석회석을 추가 혼합한 MHL의 경우는 저항력이 향상되었음을 알 수 있다.⁽¹¹⁾

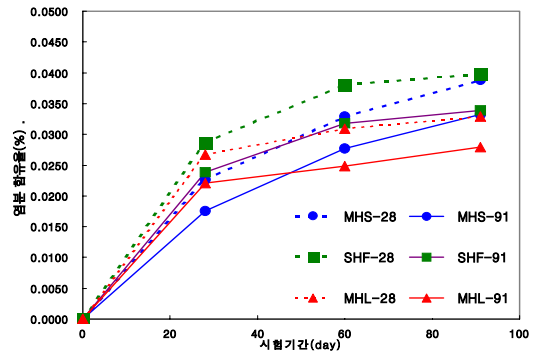


Fig. 9 침투 염분 함유량 측정

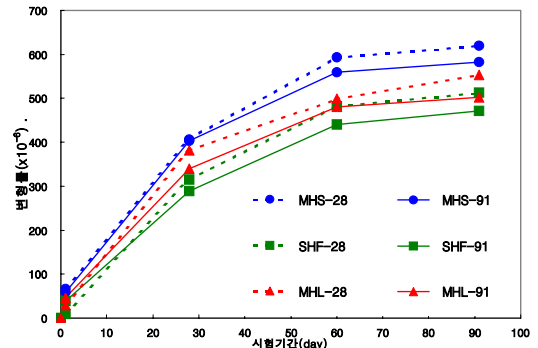


Fig. 10 황산염에 의한 길이 변화율

3.2.7 동결융해 저항성

동결융해에 대한 저항성을 실험한 결과 MHS와 MHL의 내구성지수는 각각 93%와 94%이다. 이러한 결과는 내구성지수가 60% 이상이면 동결융해 저항성은 어느정도 확보된 것으로 볼 수 있다는 문헌⁽¹²⁾에 따라 만족스런 저항성이 확보된 것으로 볼 수 있다.

4. 결 론

다성분계 고유동 콘크리트와 건설중인 원자력발전소 구조물용으로 사용중인 일반콘크리트의 장·단기거동을 실험을 통해 비교 분석한 결과 석회석이 함유된 다성분계 고유동 콘크리트가 현재 원전건설에 사용되는 일반콘크리트보다 시공성과 내구성이 상당히 개선되었음을 확인할 수 있었다. 이러한 개선된 결과를 항목별로 나열하면 다음과 같다.

- 1) 배합기준을 만족시키는 다성분계 고유동 콘크리트의 최적 배합비를 반복실험을 통해 도출하였으며 이 배합의 현장 적용성도 양호함을 확인하였다.
- 2) 재령 28일 이후의 고유동 콘크리트의 압축강도는 현재 원전 건설용으로 사용중인 콘크리트의 강도보다 매우 높았다.
- 3) 건조수축 및 크리프 변형률은 석회석이 함유된 고유동 콘크리트가 다른 두 콘크리트 보다 상대적으로 매우 적었다.
- 4) 다성분계 고유동 콘크리트 모르타르의 단열수화온도는 일반콘크리트 모르타르의 단열수화온도에 비해 초기에는 매우 낮았지만 50시간 경과 후에는 비슷한 양상을 나타내고 있었다. 다만 이때에도 석회석을 함유한 고유동 콘크리트 모르타르의 단열수화온도가 상대적으로 낮게 나타났다.
- 5) 콘크리트의 중성화, 염분침투 및 동결융해에 대한 내구저항성에서는 석회석을 함유한 다성분계 고유동 콘크리트가 가장 우수하게 나타났다. 다만 황산염에 대한 내구저항성은 일반콘크리트에 비해 다소 낮았다.

감사의 글

본 연구는 전력산업 연구개발사업의 지원 하에 이루어졌으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 한구천, 김성수, 손성운, "고유동 콘크리트용 분리 저항형 유동화제의 최적배합비 결정" 콘크리트학회 논문집, 제14권 3호, pp.275-282, 2002.6.
2. 황인동, "슬럼프 로스 저항형 고성능 A/E 감수제의 특성 및 활용", 콘크리트학회지, 제15권 5호, pp.39-44, 2003.9.
3. K.H.Khayat, "Optimization and Performance of Air-Entrained Self-consolidating Concrete", ACI Material Jr., 2000.
4. V. K. Bui, et al., "Rheological Model for Self-Consolidating Concrete", ACI Material Jr., 2000.
5. A. W. Saak et al., "New Methodology for Designing Self-Compacting Concrete", ACI Material Jr., 2001.
6. 한국수력원자력(주), 원전구조물 사용시멘트의 내구성 향상연구, 2002.3.
7. 권기주 외 11, 원전 콘크리트 구조물의 시공성 및 내구성 향상을 위한 다성분계 시멘트 콘크리트 개발(중간보고서), 한국전력 전력연구원, 2003.7.
8. E. H. Kadri and R. Duval, "Effect of Ultrafine Particles on Heat of Hydration of Cement Mortars", 2000.
9. 문한영, 최재진, "혼화재료의 활용현황 및 전망", 콘크리트학회지, 제15권 5호, pp. 10-16, 2003.9.
10. 오병환, "고성능 콘크리트의 개발과 국내콘크리트 구조물의 활용전망", 서울대학교 토목공학과, 2003.1.
11. T. H. Wee, et al., "Sulfate Resistance of Concrete Containing Mineral Admixtures", ACI Jr., 2000.
12. A. M. Neville, Properties of Concrete, Addison Wesley Longman Limited, pp.556-557, 1995.

(접수일자 : 2004년 8월 16일) (급행)