

다성분계 고유동 콘크리트의 장·단기거동 비교 분석

Comparative Experimental Study on Structural Behavior of Multi-component Self-Compacting Concrete

노재명* 권기주** 나환선*** 정원섭****
Noh, Jea Myoung Kwon, Ki Joo Nah, Hwan Seon Jung, Won Seoup

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 fly ash, 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.

1. 서론

원자력발전소 콘크리트 구조물은 벽체와 슬래브 두께가 일반구조물에 비해 훨씬 두꺼운 매스콘크리트로 설계되어 있고, 철근 밀집부위가 많아서 콘크리트 시공품질이 저하될 소지가 많다. 현재 콘크리트 배합설계는 1종 시멘트와 플라이애시를 이용하여 슬럼프 10±0.5cm 정도인 일반콘크리트와 유사한 배합을 유지하고 있으나, 성능 개량을 통해 수화열을 저감시키면서 시공성이 높은 고유동성 콘크리트 개발이 요구되고 있는 실정이다. 본 실험 연구에서는 내구성은 기존 콘크리트와 동등 이상이면서 시공성이 좋은 고유동 콘크리트의 현장 적용을 목적으로 수행한 내구성 실험 결과를 분석·평가하였다.

2. 실험

2.1 실험재료 및 배합비

2.1.1 구성재료

본 실험에서는 결합재로 시멘트 이외에 플라이애시, 고로슬래그 및 석회석 미분말을 사용하였으며 이들의 주요 물리·화학적 성질은 Table 1에 수록된 바와 같다. 또한 잔골재는 강모래를 사용하였고 굵은골재는 부순돌로 최대치수 19 mm를 사용하였다. 실험에 사용한 각종 혼화제의 물리·화학적 특성은 Table 2와 같다.

Table 1 결합재의 주요 물리·화학적 성질

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

* 정회원, 한국전력공사 전력연구원 일반연구원
** 정회원, 한국전력공사 전력연구원 책임연구원
*** 정회원, 한국전력공사 전력연구원 선임연구원
**** 정회원, 한국전력공사 전력연구원 선임연구원

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.

Table 2 혼화제의 물리·화학적 특성

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

Table 3 콘크리트 배합비

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

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

2.2 장·단기거동 시험의 종류 및 방법

2.2.1 압축강도 시험

KS F 2405에 따라 재령 7일, 14일, 28일 및 91일의 압축강도를 측정하였다(3개 평균).

2.2.2 건조수축 측정시험

28일과 91일간 수중양생한 시편을 5개 재령 (1일, 7일, 28일, 60일, 91일)에서 KS F 2424에 따라 측정되었다(3개 평균).

2.2.3 압축크리프 측정

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

2.2.4 중성화 깊이 측정시험

28일과 91일 양생분에 대해 실시하였다. 한 방향으로 이산화탄소의 침투를 유도하기 위해 시편의 5면을 에폭시 코팅하였다. 촉진실험 환경은 10% 농도의 이산화탄소, 온도 30℃, 상대습도 50%를 일정하게 유지하였으며 재령 7일, 28일, 60일 및 91일에 시험체를 이등분한 다음 그 면에 1%의 페놀프탈레인 용액을 분무하여 중성화 깊이를 측정하였다.

2.2.5 수용성 염화물 측정시험

28일 및 91일간 수중에서 양생시킨 시편을 28일, 60일 및 91일 동안 부식이 가장 빠르게 일어나는 3.6%(일반해수의 염화물 농도는 3~4%)의 NaCl 수용액 속에 침전시킨 후 KS F 2713, 2714에 따라 염화물 함유량을 측정하였다.

2.2.6 황산염에 의한 길이변화 측정시험

ASTM C 1012에 준하여 실시하였다. 28일과 91일간 수중에서 양생시킨 시편을 28일, 60일 및 91일 동안 10% 황산나트륨(Na₂SO₄) 수용액속에 침전시킨 후 길이변화를 측정하였다(3개 평균).

2.2.7 동결융해 시험

고유동 콘크리트, MHL 및 MHS에 대해서만 KS F 2456에 따라 3개의 시험체를 300 cycle 까지 상대 동탄성계수와 내구성 지수를 각각 측정 및 계산하였다.

2.2.8 수화열 시험

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

2.3 시편제작 및 양생

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

Table 5 장·단기거동 시험용 시편규격 및 양생

실험종류	시편의 규격	시편 수량	양생 환경
압축강도	• 지름 10cm × 20cm의 원주	36	• 23°C 에서 수중양생 • 7, 14, 28, 91일간 양생
건조수축	• 10cm×10cm×28.5cm • 28일, 91일 양생분	18	• 23°C 에서 수중양생 • 상대습도 50% 유지
중성화	• 10cm×10cm×15cm • 28일, 91일 양생분	24	• 23°C 에서 수중양생 • 30°C, 상대습도 50% 유지 • 촉진실험을 위해 10% 이산화탄소 농도에 노출
염해	• 10cm×10cm×15cm • 28일, 91일 양생분	18	• 23°C 에서 수중양생 • 3.6% NaCl 용액속에 침전
황산염	• 10cm×10cm×40cm • 28일, 91일 양생분	18	• 23°C 에서 양생 • 10% 황산나트륨 용액 사용
압축크리프	• 지름 15cm × 30cm 원주	12	• 20 ± 2°C 에서 28일 및 91일 양생 (상대습도 50 ± 4%)
동결융해	• 10cm×10cm×40cm	6	• 23°C 에서 14일 수중 양생후
수화열	• 시료당 500g	-	• 실험실 온도 20°C ± 1°C 유지

3. 내구성시험 결과 및 평가

3.1. 압축강도

설계기준강도 385 kgf/cm² (재령 91일 기준)는 모든 경우에 만족하였다. 다성분계 고유동 콘크리트, MHS 및 MHL의 압축강도는 플라이애시만 대체된 일반콘크리트, SHF보다 훨씬 높아서 재령 7일엔 SHF의 27%, 재령 14일엔 38% 그리고 재령 28일 이후엔 최대 45%이상 높다. 이는 고로슬래그의 높은 분말도와 플라이애시의 포졸란 반응으로 재령이 증가할수록 콘크리트의 구조가 치밀해짐으로써 나타난 현상이다(Fig 5).

3.2 건조수축 실험

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 측정된 결과에서도 초기 7일간 발생한 수축변형률은 석회석이 혼합된 경우가 다른 두 콘크리트 평균의 67% 수준이고 28일 경과 후엔 93%로 증가한다(Fig 6).

3.3 압축 크리프 시험

28일 양생분과 91일 양생 분 모두에서 석회석이 추가된 고유동 MHL의 크리프량이 SHF 보다 적음을 알 수 있다(Fig 7).

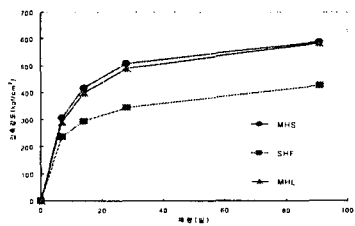


Fig. 5 재령에 따른 압축강도 변화

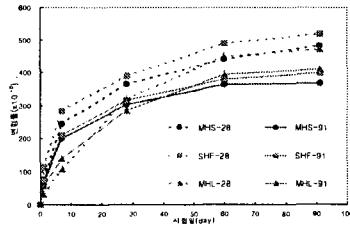


Fig. 6 건조수축에 의한 변형률

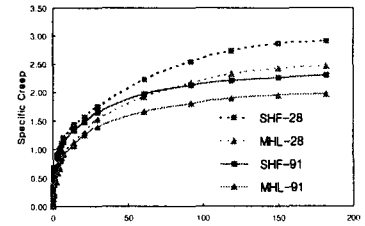


Fig. 7 재령별 콘크리트별 크리프량

3.4 중성화 시험

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 8).

3.5 염해 측정시험

28일 및 91일 동안 시료에서 공통으로 나타난 현상은 침전 초기엔 MHS의 염분함유량이 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(Fig 9).

3.6 황산염 측정시험

시편의 길이 변화률을 게이지 스타드를 이용하여 28일, 60일 및 91일에 각각 측정하였다. 고유동 콘크리트의 황산염에 대한 저항력은 일반콘크리트인 SHF에 비해 낮다. 그러나 고유동 콘크리트 중에서 석회석을 추가 혼합한 MHL의 경우는 저항력이 향상되었음을 알 수 있다(Fig 10).

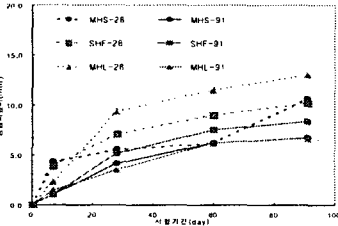


Fig. 9 침투 염분 함유량 측정

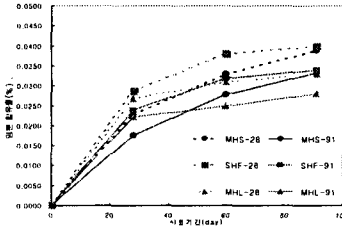


Fig. 8 양생 기간별 중성화 깊이 변화

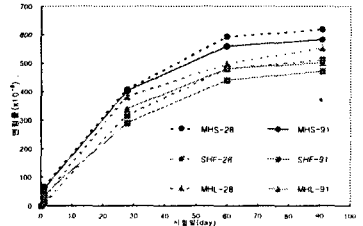


Fig. 10 황산염에 의한 길이 변화률

3.7 동결융해 저항성

동결융해에 대한 저항성을 실험한 결과 MHS와 MHL의 내구성지수는 각각 93%와 94%이다.

이러한 결과는 내구성지수가 60% 이상이면 동결융해 저항성은 어느 정도 확보된 것으로 볼 수 있다는 문헌(2)에 따라 만족스런 저항성이 확보된 것으로 볼 수 있다.

4. 결론

다성분계 고유동 콘크리트와 건설중인 원자력발전소 구조물용으로 사용중인 일반콘크리트의 장·단기거동을 실험을 통해 비교 분석한 결과 석회석이 함유된 다성분계 고유동 콘크리트가 현재 원전건설에 사용되는 일반콘크리트보다 내구성이 뛰어났음을 확인하였다.

- 1) 재령 28일 이후의 고유동 콘크리트의 압축강도는 현재 원전 건설용으로 사용중인 콘크리트의 강도보다 매우 높았다.
- 2) 건조수축 및 크리프 변형률은 석회석이 함유된 고유동 콘크리트가 다른 두 콘크리트보다 상대적으로 매우 적었다.
- 3) 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 이루어진 것으로 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국전력공사 전력연구원 '원전콘크리트 구조물의 시공성 및 내구성 향상을 위한 다성분계 시멘트 콘크리트 개발' 중간보고서, 2003. 7.
2. A. M. Neville, Properties of Concrete, Addison Wesley Longman Limited, pp.556-557, 1995.