

# 저발열형 시멘트를 사용한 콘크리트의 특성

강석화 · 정연식 · 노재호 · 한정호\* · 송용순

〈동양중앙연구소 건설재료연구실〉

## 1. 서 론

최근 콘크리트 구조물의 대형화에 따라 시멘트에 대한 저발열화의 요망이 점차 강해지고 있으며 이에 따라 각종 저발열형 시멘트가 개발되어 사용되고 있다. 매스콘크리트 공사에서 전체 콘크리트의 품질 및 시공기간에 영향을 미치는 가장 중요한 요소는 시멘트 수화열에 의한 균열 문제이다. 일반적으로 콘크리트의 수화발열량은 콘크리트중의 시멘트량과 사용하는 시멘트의 수화발열특성에 의해 좌우되는데 매스콘크리트용 시멘트는 수화발열량이 적으면서도 전체시간에 걸쳐 완만하게 수화열이 발생하는 것이 바람직하다.

이러한 매스콘크리트용 저발열형 시멘트 가운데 각종 미분말 혼합재를 사용한 혼합형 저발열 시멘트(super-low heat cement)는 1980년대 초부터 일본에서 활발한 사용검토가 행해져 本州 四國 교량군과 명석해협대교 등의 장대교량, LNG 저장탱크, 초고층건물의 기초 등 각종 매스콘크리트에 사용되기도 하였다.

혼합형 저발열 시멘트는 콘크리트의 수화열특성 개선효과 이외에도 콘크리트의 내화학적 및 염소이온 침투저항성 개선 등의 내구성 증가 효과가 있어 해양공사에도 사용이 기대되고 있으며

보통포틀랜드시멘트와는 다른 유변학적(rheological) 특성으로 인하여 다짐이 필요없는 '초유동' 콘크리트 제조에도 적합한 특성을 나타내고 있다. 국내에서도 최근 매스콘크리트 구조물의 시공이 증가하여 저발열 시멘트의 필요성이 커지고 있으나 아직 구체적인 사용검토가 이루어져 있지 않아 이에 대한 연구가 시급한 실정이다.

본 연구는 혼합형 저발열 시멘트의 기초특성과 이를 사용한 콘크리트의 실험모 현장시공 결과를 요약한 것이다.

## 2. 저발열 시멘트의 특성

### 2.1 화학적 특성

저발열 시멘트의 화학성분을 1종 보통포틀랜드 시멘트 및 5종 내황산염 시멘트, 슬래그 시멘트와 비교하여 <표 1>에 나타내었다. 저발열 시멘트는 SiO<sub>2</sub>의 함량이 높은 대신 CaO량이 상대적으로 적은 것이 특징이다.

### 2.2 물리적 특성

<표 2>에 나타난 바와 같이 저발열 시멘트는

각종 시멘트의 화학성분

<표 1>

시멘트 종류	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>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ig loss
1 종	20.68	5.16	3.02	62.42	4.71	2.42	0.97	0.06	0.32	0.15	0.11	1.36
5 종	22.81	3.49	4.79	63.04	2.63	1.88	0.62	0.10	0.24	0.15	0.14	1.17
슬래그	25.22	8.33	2.01	54.15	5.08	3.15	0.72	0.10	0.84	0.26	0.07	0.71
저발열	35.67	12.38	3.31	39.77	4.42	2.41	0.65	0.09	1.06	0.25	0.08	1.10

각종 시멘트의 물리성능

<표 2>

시멘트	비중	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	안정도 (%)	주도	응결 (h : m)		압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
					초결	종결	3 일	7 일	28 일
1종	3.15	3,438	0.241	24.5	3 : 08	5 : 18	242	343	401
5종	3.21	3,492	-0.031	23.5	3 : 48	8 : 13	230	309	397
슬래그	3.01	3,928	0.050	25.0	3 : 40	7 : 30	167	264	399
저발열	2.77	4,080	0.009	27.0	3 : 27	7 : 37	93	168	339

미분말 혼합재 첨가의 영향으로 비중은 감소하며 분말도는 다른 시멘트에 비해 크다. 특히 저발열 시멘트는 응결시간이 다소 길고 초기강도 발현이 상대적으로 작은 것이 특징이다.

2.3 수화열 특성

<표 3>에 미소수화열량계 (conduction calorimeter) 로 측정된 각종 시멘트의 수화발열 특성을 비교하여 나타내었다. 저발열 시멘트의 수화발열량은 1종 시멘트(OPC)의 1/2~2/3 수준으로 수화열 발생이 매우 작게 나타났다.

3. 저발열 시멘트를 사용한 콘크리트의 특성

3.1 단일온도 상승

<그림 1>은 콘크리트의 단일온도상승 실험결과를 나타낸 것으로 저발열 시멘트(LHC)를 사용한 경우 단위시멘트량 500kg/m<sup>3</sup>인 경우가 1종 시멘트(OPC)의 300kg/m<sup>3</sup>의 경우와 같은 수준의 수화발열량을 나타내었다. 즉 저발열 시멘트를 사용한 콘크리트는 OPC를 사용한 콘크리트에 비해 단일온도 상승 모델식의 최종적인 온도상승값은

각종 시멘트의 72시간 동안의 수화발열량(cal/g)

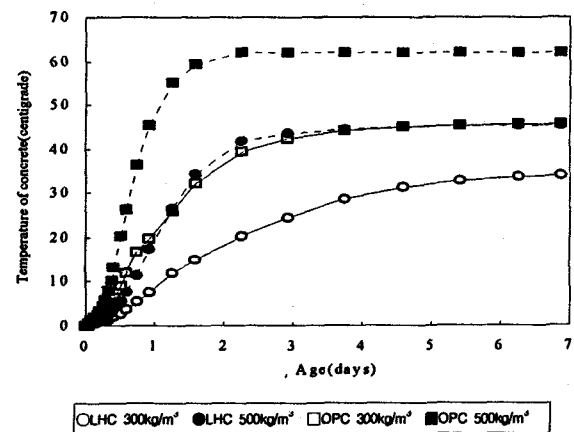
<표 3>

종류 항목	1종 시멘트	저발열 시멘트	슬래그 시멘트	5종 시멘트
24시간	45.7	23.4	32.8	42.1
48시간	56.3	35.9	49.6	57.2
72시간	65.7	42.4	54.5	65.5

20% 이상 감소하고, 온도상승곡선의 기울기는 1/3 이하로 감소하는 것으로 나타나 수화열 저감 효과가 매우 큼을 알 수 있다.

3.2 콘크리트의 경화전 특성

<표 4>에 저발열 시멘트를 사용하여 물시멘트비(W/C) 변화에 따라 제조한 콘크리트의 물성을 나타내었다. 저발열 시멘트를 사용하는 경우에 적정 공기량을 확보하기 위해 소요되는 공기연행제 첨가량이 OPC를 사용하는 경우보다 다소 증가하였으나 콘크리트의 작업성(슬럼프 및 반죽질기 등)은 전반적으로 크게 향상하였고 저발열 시멘트의 높은 보수성 효과로 블리딩이 거의 발생하지 않았다. 저발열 시멘트의 비중은 보통포틀랜드시멘트의 0.9배 정도이므로 동일 중량에 대해 약 12% 정도의 체적증가 효과가 있기 때문에 보통포틀랜드시멘트보다 더욱 적은 양의 시멘트를 사용하여도 콘크리트의 작업성을 유지할 수 있으므로 단위시멘트량 절감에 따른 발열량을 저감시



<그림 1> 콘크리트 단일온도실험결과(초기온도 20°C)

저발열 시멘트를 사용한 콘크리트의 물성

<표 4>

W/C (%)	S/A (%)	단위수량 (kg/m³)	단 위 시멘트량 (kg/m³)	Slump (cm)	Air (%)	압축강도 (kgf/cm²)			
						3일	7일	28일	91일
55	49.0	160	290	15	3.6	53	134	315	433
50	48.5	"	320	15	4.7	60	142	336	446
45	47.5	"	355	17	5.0	67	162	357	478
40	46.5	"	400	20	4.0	89	215	417	543
36	45.0	"	444	21	3.1	104	240	459	586
32	43.0	"	500	17	3.6	138	285	509	651
28	42.0	154	550	21	4.4	168	341	599	733

\* 고성능감수제=C×1.0~1.2%, AE제=C×0.03~0.045%

키는 부수적인 효과도 있을 것으로 판단되었다.

3.3 콘크리트의 경화후 특성

3.3.1 수중양생 압축강도

앞의 <표 4>에 나타내었듯이 저발열 시멘트를 사용하여 20℃에서 수중양생한 경우는 초기 재령에서는 비교적 강도 발현율이 작으나 재령 28일에서는 1종 시멘트와 거의 동일한 압축강도를 회복하고 있으며 잠재수경성을 가진 혼합재의 영향으로 장기적으로 강도가 증가하고 있음을 알 수 있다. 저발열 시멘트를 사용할 경우 28일 기준 600kgf/cm² 수준의 고강도 콘크리트도 제조 가능할 뿐만 아니라 고강도 콘크리트 제조시 단위 시멘트량 증가에 따른 수화열 발생문제도 함께 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3.2 매스콘크리트 내부에서의 강도발현 특성

매스콘크리트 부재내에서는 수화열에 의해 콘크리트의 내부 온도가 상승하므로 시멘트의 수화반응을 촉진시키는 효과가 있다. 저발열 시멘트

의 경우도 20℃ 수중양생시 일반시멘트와 비교하여 초기강도 발현율이 작게 나타나고 있으나 매스콘크리트 내부에서는 온도상승에 의해 촉진양생을 받으므로 수중양생과는 다른 강도발현 특성을 나타낼 것으로 예상된다.

일례로 하절기에 각 변의 길이가 1m인 부재에 콘크리트를 타설하는 경우를 가정하면 콘크리트의 온도는 30℃ 이상이 되고 수화열에 의해 1일~2일 정도내에 부재 내부온도는 약 60℃까지 도달하게 된다. 이와 같은 부재 내부의 온도이력을 고려하여 압축강도 공시체를 양생할 경우 <표 5>와 같이 3일에서 수중양생의 85% 이상의 강도를 발현하고 있음을 알 수 있다.

4. 현장적용

혼합형 저발열 시멘트는 수화발열량을 현저히 감소시킬 수 있다는 특징을 나타내는 동시에 잠재수경성이 있는 미분말 혼합재의 영향으로 경화후 장기간에 걸쳐 치밀한 미세구조를 형성함으로써 각종 유해물질의 침투를 방지하여 구조물의 내구성 개선에도 유리한 측면이 있다. 특히 염소이온에 대한 침투저항성이 강하다는 장점을 가지고 있어 해양 구조물 시공에 매우 적합할 것으로 판단된다.

본 현장적용은 국내 최대의 사장교로 현재 건설되고 있는 서해대교의 주탑 기초부에 저발열 시멘트를 시험적용한 결과이다. 주탑기초부는 바다 한가운데 건설되는 매스콘크리트 구조물로서 수화열 저감, 내해수성 확보, 다짐작업 생략이라는 3가지 성능이 요구되었고 저발열 시멘트를 사용하여 이러한 물성을 만족시킬 수 있는지에 대하여 5종 시멘트를 사용한 경우와 비교·검토하였다.

매스콘크리트 내부 온도이력을 고려한 저발열 시멘트 콘크리트의 강도특성

<표 5>

배 합 비				증기양생이력(출발온도 20℃)			시간				
W/C (%)	S/A (%)	단위수량 (kg/m³)	단위시멘트량 (kg/m³)	60℃ 도달시간	60℃ 유지시간	55℃ 유지시간	항목				
							매스콘크리트 증기양생	압축강도	인장강도	48	72
34.4	45	155	450	48	24	24	수중양생 28일 압축강도		478		

## 콘크리트 배합설계표

〈표 6〉

시멘트 종 류	굵은골재 최대크기 (mm)	W/C (%)	S/A (%)	단 위 수 량 (kg/m <sup>3</sup> )	단 위 시멘트 (kg/m <sup>3</sup> )	고성능 감수제 (kg/m <sup>3</sup> )	AE 감수제 (kg/m <sup>3</sup> )
저발열	19	45	53	180	400	8.4	-
5 종	25	51	46	175	346	-	1.0

## 4.1 콘크리트의 수화열

주탑기초의 레벨링 콘크리트 부재 일부에 3.7×3.4×1.2m의 크기로 5종 시멘트를 사용한 슬럼프 15cm의 일반배합 콘크리트와 저발열 시멘트를 사용한 초유동 콘크리트를 현장 베퉀플랜트에서 제조하여 타설하고, 부재 중앙부의 상단에서 5cm, 중앙부 하단에서 5cm, 측벽 중앙부의 위치에 온도 센서를 매립하여 수화열 발생에 의한 부재의 온도변화를 측정된 결과를 〈그림 2〉에 나타내었다. 저발열 시멘트를 사용한 초유동 콘크리트는 5종 시멘트를 사용한 기존의 25-240-15 콘크리트에 비해 시멘트량이 54kg/m<sup>3</sup> 증가한 배합이지만 부재 중심부의 최대 온도는 오히려 10.4℃ 저감되었다.

## 4.2 초유동성 및 강도특성

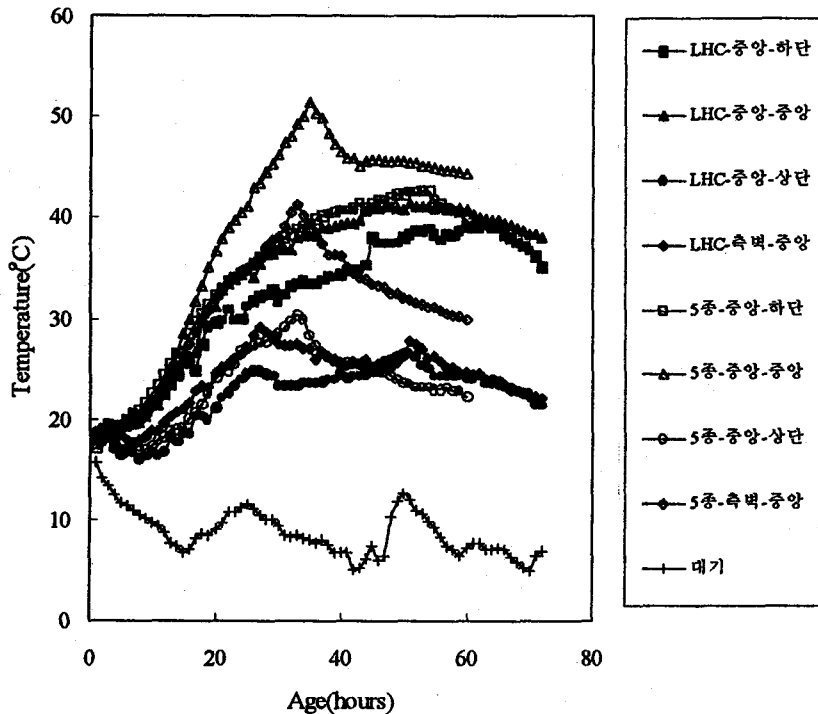
저발열 시멘트를 사용하여 현장 B/P에서 제조된 초유동 콘크리트를 다짐 없이 부재에 타설한 결과, 재료분리현상을 전혀 나타내지 않고 거푸집 내부를 밀실하게 충전하였으며 거푸집을 제거한 후의 콘크리트 표면도 곰보 등이 없는 매우 양호한 결과를 나타내었으며 블리딩이나 레이턴스 등도 발생하지 않았다.

제조 직후 채취한 공시체와 부재에서 채취한 코아 공시체의 재령별 압축강도를 〈표 7〉에 나타내었다. 초기재령 3일에서는 저발열 시멘트를 사용한 코아 공시체의 경우에 수중양생 공시체의 압축강도보다 큰 값을 나타내고 있어 매스콘크

콘크리트의 압축강도(kgf/cm<sup>2</sup>)

〈표 7〉

종 류	재 령	3일	7일	28일	56일
		표 준	저발열	66	184
수중양생	5 종	129	170	296	352
	코 아	저발열	94	118	209
공 시 체	5 종	98	129	208	222



〈그림 2〉 콘크리트 부재 내부의 온도변화 측정결과

리트 내부에서는 수화열에 의한 축진 양생효과가 나타나고 있음을 알 수 있다.

### 4.3 내화학적

#### 4.3.1 염소이온 침투 저항성

ASTM C 1202에 따라 실시한 콘크리트의 염소이온 침투 축진시험 결과를 <표 8>에 나타내었다. 저발열 시멘트는 5종 시멘트를 사용한 경우와 비교하여 약 1/3~1/6 수준의 통과 전하량을 나타내고 있어 해수중의 염소이온 침투에 대한 저항성이 매우 큼을 알 수 있다. 이는 저발열 시멘트에 혼합된 잠재수경성이 강한 혼합재의 영향으로 판단되는데 경화과정에서 포졸란 반응에 의해 치밀한 미세구조를 형성함으로써 염소이온의 침투경로를 차단하는 성능이 있음을 나타내는 결과이다.

#### 4.3.2 내약품성

여러가지 화학용액에 침지시킨 공시체의 중량 변화율 및 압축강도 저하율 결과를 <그림 3> 및 <그림 4>에 나타내었다.

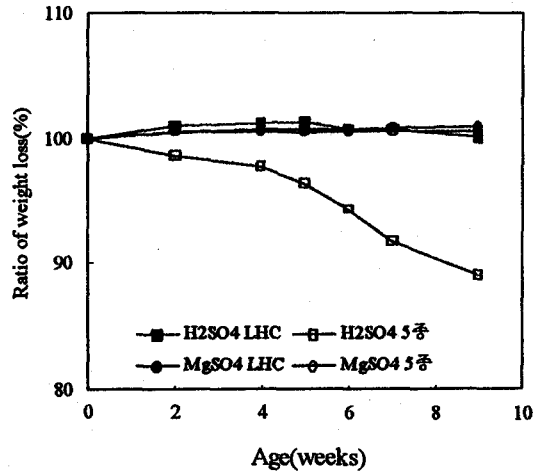
5종 시멘트만이 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 용액에 침지한 경우 재령 62일에서 약 15%의 중량 감소율을 보인 것 이외에는 나머지 경우 중량이 거의 감소되지 않았다. 황산염에 침지한 경우에는 두가지 공시체 모두 중량이 약간 증가하는 결과를 나타내었는데 이것은 콘크리트의 세공 및 표면에서 반응생성물의 결정이 침적되었기 때문인 것으로 판단된다.

황산 및 황산염, 인공해수에 침지시킨 공시체의 압축강도를 비교한 결과 두가지 시멘트가 화학약품의 침식에 의한 강도저하 경향은 유사하였다.

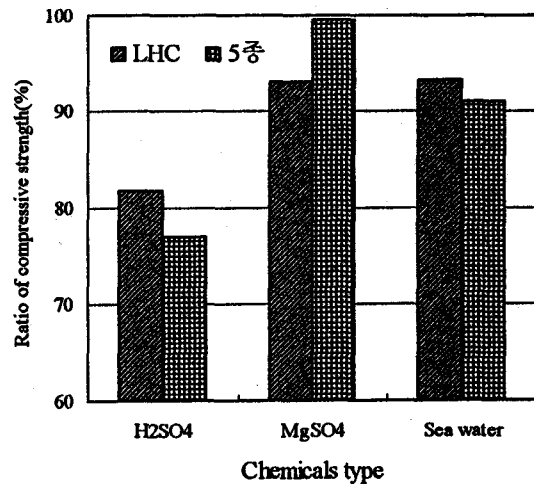
염소이온 침투시험 결과

<표 8>

콘크리트 종 류	5 종		저 발 열	
	28 일	56 일	28 일	56 일
통과전하량 측정치 (coulombs)	5,979	4,957	1,893	835
ASTM 규정결과	높 음 (4,000이상)	높 음 (4,000이상)	낮 음 (1,000~2,000)	매우낮음 (100~1,000)



<그림 3> 화학용액 침지후 콘크리트의 중량 변화율 (%)



<그림 4> 화학용액 침지후 콘크리트의 압축강도 변화율 (%)

## 5. 결 론

혼합형 저발열 시멘트를 사용한 콘크리트의 특성을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 저발열 시멘트의 수화발열량은 OPC의 2/3 이하이고, 저발열 시멘트를 사용한 콘크리트는 OPC를 사용한 콘크리트에 비해 단열온도 상승 모델식의 최종적인 온도 상승값은 20% 이상 감소하고, 온도상승곡선의 기울기는 1/3 이하로 감소하는 것으로 나타났다.
- (2) 저발열 시멘트를 사용한 콘크리트는 OPC를 사용한 콘크리트에 비하여 28일 압축강도는 거의 동등하나 초기강도 발현율은 낮고 장기

강도 발현율이 높은 것으로 나타났으며, 증기양생에 의한 온도이력 모사 결과, 저발열 시멘트를 사용한 콘크리트는 재령 3일에서 28일 수증양생 공시체의 85% 정도의 압축강도가 조기에 발현되었다.

- (3) 저발열 시멘트를 사용하여 단위시멘트량 약  $400\text{kg}/\text{m}^3$ 으로 실기 배치플랜트에서 제조된 초유동 콘크리트를 다짐 없이 부재에 타설한 결과, 골재 분리없이 거푸집 내부를 밀실하게 충전하였으며 거푸집을 제거한 후의 콘크리트 표면도 곰보 등이 없는 매우 양호한 상태였고 블리딩이나 레이턴스 등도 발생하지 않았다.
- (4) 부재 내부의 온도는 저발열 시멘트를 사용한 초유동 콘크리트가 5종 시멘트를 사용한 경우보다 약  $10.4^\circ\text{C}$  정도 저감되어 수화열 저감효과가 뚜렷하였다.
- (5) 코아 공시체의 압축강도는 초기재령에서도 5종 시멘트를 사용한 콘크리트와 동일 수준의 압축강도 발현율을 보였다.
- (6) 저발열 시멘트를 사용한 콘크리트의 경화조직은 치밀한 미세구조를 형성하여 염소이온의 침투에 대한 저항성이 5종 시멘트를 사용한 경우보다 약 3~5배 이상 증가하였다.
- (7) 저발열 시멘트는 5종 시멘트를 사용한 경우와 내약품성은 거의 동등한 결과를 나타내었다.

#### 〈참 고 문 헌〉

- (1) 노재호, 박연동, 송용순, 김훈, 강석화, “저발열 시멘트 및 콘크리트의 특성”, 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 제8권 2호(통권 제15집), 1996, pp. 345~351.
- (2) 노재호, 한정호, 송용순, 천재원, 최이현, “저발열 시멘트를 사용한 초유동 콘크리트의 물성”, 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제9권 1호(통권 제16집), 1997, pp. 649~656.
- (3) 강석화, 노재호, 한정호, 송용순, “혼합시멘트계 저발열 시멘트의 특성과 이용”, 한국건설기술연구회 춘계 연구발표회 논문집, 제5권 제1집(통권 제9호), 1997, pp. 136~148.
- (4) 牛山宏隆, “港灣工事に用いるセメント”, セメント・コンクリート, No.594, 1996年 8月, pp. 80~83.
- (5) ASTM C 1202-91 “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration”.
- (6) ASTM D 1141-86 “Standard Specification Substitute Ocean Water”.
- (7) 近田孝夫, “耐酸性とセメント”, セメント・コンクリート, No.594, 1996年 8月, pp. 56~59.