

저발열 시멘트 및 콘크리트의 특성

Properties of Low-heat Cement and Concrete

노재호* 박연동** 송용순** 김 훈** 강석화**
Noh, Jae Ho Park, Yon Dong Song, Yong Soon Kim, Hoon Kang, Suck Hwa

Abstract

The study on the properties of low-heat cement that heat of hydration is relatively lower than that of ordinary portland cement and concrete made of this low-heat cement has been performed to test the heat of hydration and compressive strength, chemical resistance of concrete using low-heat cement to compare with concretes using other several types of cements.

1. 서 론

교량, 옹벽, 기초 등의 매스 콘크리트 구조물 공사에서 전체 시공기간과 콘크리트의 품질을 좌우하는 가장 중요한 요소는 초기 재령시 콘크리트 중 시멘트의 수화열에 의해 발생하는 온도응력에 의한 균열의 존재이다. 이러한 매스 콘크리트의 온도 상승에 영향을 미치는 요인에는 단위시멘트량과 타설 온도 등 여러 가지가 있지만, 이중에서도 가장 큰 영향을 미치는 요인은 사용하는 시멘트의 수화발열 특성이다. 매스 콘크리트용으로 사용하기 위한 시멘트는 수화발열량이 작고 수화열이 전체 시간에 걸쳐 완만하게 발생되어야 한다.

저발열 시멘트는 시멘트의 내부 조성물 및 성분을 조절하여 인위적으로 수화열이 적게 나오도록 하고 또한 수화발열속도가 늦도록 제조한 시멘트로서, 보통 포틀랜드시멘트(이하 OPC로 표기)에 비해 수화발열량이 적고 수화발열속도가 완만하여 시멘트 수화발열에 의한 콘크리트의 온도응력 발생을 대폭적으로 저감시킬 수 있어 매스 콘크리트용으로 사용이 적합하다.

본 연구에서는 당사에서 개발한 저발열 시멘트 및 저발열 시멘트를 사용하여 제조된 콘크리트의 특성을 파악하기 위하여 수화열 특성 및 강도 발현 특성에 관한 실험을 실시하였다.

* 정회원, 동양시멘트(주) 중앙연구소 선임연구원

** 정회원, 동양시멘트(주) 중앙연구소 주임연구원

*** 정회원, 동양시멘트(주) 중앙연구소 건설재료연구실장

2. 시멘트 물성

본 연구에서 사용한 저발열 시멘트는 콘크리트의 수화열 개선을 위하여 포틀랜드시멘트에 다량의 미분말 포졸란계 재료와 특성 개선재를 혼합한 결합재로서 다음과 같은 물성을 나타낸다.

(1) 화학성능

표 1에 저발열 시멘트의 화학성분 일례를 국내에서 사용되고있는 OPC와 고로슬래그 시멘트, 내황산염 시멘트와 비교하여 나타내었다.

표 1 시멘트 화학성분 일례

(단위 : 중량백분율)

종류 항목	OPC	저발열 시멘트			슬래그 시멘트	5종 시멘트
		I	II	III		
SiO ₂	20.80	33.10	34.70	35.4	26.14	22.69
Al ₂ O ₃	5.88	11.90	12.90	4.50	8.97	3.43
Fe ₂ O ₃	3.33	2.30	2.40	2.20	1.99	4.43
CaO	62.71	41.90	38.50	37.40	52.42	63.02
MgO	2.76	4.50	4.20	4.50	4.88	3.14
SO ₃	2.23	2.50	2.40	2.40	3.49	1.92
K ₂ O	0.85	0.68	0.67	0.64	0.70	0.53
Na ₂ O	0.15	0.17	0.18	0.18	0.10	0.09
TiO ₂	0.131	0.73	0.81	0.83	0.55	0.22
Mn ₂ O ₃	0.21	0.21	0.22	0.23	0.32	0.16
P ₂ O ₅	0.81	0.15	0.17	0.16	0.10	1.14
Ig. Loss	0.41	1.50	1.70	1.30	0.46	1.21

표 2 시멘트물리성능

Type	비중	블레인 (cm ² /g)	응결시간		W/B (%)	Flow	압축강도(kgf/cm ²)			
			초결(분)	종결(시:분)			3일	7일	28일	
OPC	3.15	3,214	187	06:03	48.5	105	236	307	392	
저 발 열 시 멘 트	I	2.85	4,020	305	07:40	48.5	94	103	190	390
						52.0	110	95	174	389
	II	2.80	4,080	335	07:35	48.5	92	90	165	363
						52.0	112	74	149	361
	III	2.79	4,110	315	07:40	48.5	95	70	146	344
						52.0	114	61	130	336
슬래그 시멘트	3.02	3,730	205	07:05	48.5	93	178	258	378	
5종 시멘트	3.18	2,699	298	07:35	48.5	98	201	274	363	

(2) 물리성능

본 시험에 사용된 시멘트의 물리적 성능을 정리하면 표 2와 같다. 저발열 시멘트는 활성도 증가를

위해 미분말화시킨 포졸란계 혼합재의 첨가로 비중이 감소하고 분말도가 증가하며 사용되는 포졸란의 종류와 혼합비율에 따라 수화발열특성과 압축강도 발현을 등의 특성이 달라진다. 시험결과, 저발열 시멘트 Type I 은 III 에 비해 압축강도는 저하나 수화발열량 감소의 효과가 큰 것으로 나타났다.

(3) 수화열 특성

시멘트만의 수화열특성을 검토하기 위하여 미소수화열량계(Conduction Calorimeter)를 이용한 수화열 측정 시험을 실시하였다. 미소수화열량계는 시멘트와 물을 혼합하여 수화반응 온도를 일정하게 유지하면서 발생하는 수화열을 감지하는 장치이다. 시험에서는 물 40g과 시멘트 20g을 23℃ 환경에서 실시하였으며, 미소수화열량계로 측정한 각종 시멘트의 수화발열특성을 정리하면 표 3과 같다.

표 3 각종 시멘트의 72시간 동안의 수화발열량

(23℃ 환경)

항목	종류 OPC	저발열 시멘트			슬래그 시멘트	5종 시멘트
		I	II	III		
24시간	45.7	26.6	23.4	20.9	32.8	42.1
48시간	56.3	42.8	35.9	35.3	49.6	57.2
72시간	65.7	45.7	42.4	41.6	54.5	65.5

3. 콘크리트 물성

3.1. 실험방법 및 재료

물시멘트비를 55%~28%로 변화시켜 슬럼프 15cm 이상, 공기량 $4.5 \pm 1.5\%$ 이고 콘크리트 온도 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 인 작업성이 우수한 콘크리트가 되도록 콘크리트를 공시체($\phi 10 \times 20\text{cm}$)를 제작하여 상대습도 99%의 항온항습조에서 20°C 로 양생하여 3일강도를 측정하고 이후 탈형하여 20°C 수중에 넣어 7일 및 28일 압축강도를 측정하였다.

콘크리트 실험에 사용된 기타 재료들의 물성은 표 4와 같다.

표 4 사용재료 물성

사 용 재 료	물 성
모래	비중 2.6, 조립율 2.8, 단위용중 $1,600 \text{ kg/m}^3$, 실적율 62%
갠자갈(최대치수25mm)	비중 2.65, 조립율 6.5, 단위용중 $1,530 \text{ kg/m}^3$, 실적율 59%,
혼화제	나프탈렌설폰산계 고성능AE감수제, 민줄 레진계 공기연행제

3.2. 실험결과 및 고찰

표 5~표 7 에 각각 저발열 시멘트 Type I, II, III 을 사용하여 제조된 콘크리트의 물성을 나타내었다. 저발열 시멘트의 각 재령에서의 C/W- σ 관계식을 표 8에 나타내었다.

저발열 시멘트는 불활성 포졸란 물질을 다량 사용하여 혼화제를 사용할 때, 작업성을 얻기 위한 단위수량 및 고성능감수제 첨가량이 일반 콘크리트보다 적게 요구되나 공기량 발현에 필요한 공기연행제 첨가량이 다소 증가하였다. 또한 육안관찰 및 시험결과, 블리딩이 거의 존재하지 않았으며 이는 저발열 시멘트의 보수성이 높기 때문으로 사료된다.

저발열 시멘트는 수화발열현상이 완만히 발생하기 때문에 초기강도가 다소 저하되고 응결시간이 길어지는 특성이 나타났다. 저발열 시멘트를 사용하여 20℃ 상온에서 제조한 콘크리트는 양생시의 강도 발현율이 28일 압축강도를 100%라 할 경우, 3일에서 약 20~30%, 7일에서 약 40~60%의 강도를

표 5 Type I 저발열 시멘트 사용 콘크리트 물성

W/C (%)	S/A (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	SP (C×%)	AEA (C×%)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	온도 (℃)	압축강도(kgf/cm ²)		
									3일	7일	28일
50	48.5	"	320	1.0	0.028	18	5.2	18	55	150	351
45	45.3	"	355	"	0.030	20	5.1	20	79	189	394
40	44.0	"	400	"	0.030	21	4.5	21	108	226	459
35	42.5	"	457	"	0.035	21	5.0	19	143	275	516
30	41.0	155	517	1.1	0.040	17	4.1	19	185	349	636

표 6 Type II 저발열 시멘트 사용 콘크리트 물성

W/C (%)	S/A (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	SP (C×%)	AEA (C×%)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	온도 (℃)	압축강도(kgf/cm ²)		
									3일	7일	28일
55	49.0	160	290	1.0	0.025	15	3.6	18	53	134	315
50	48.5	"	320	"	0.030	15	4.7	19	60	142	336
45	47.5	"	355	"	0.030	17	5.0	21	67	162	357
40	46.5	"	400	"	0.030	20	4.0	21	89	215	417
36	45.0	"	444	"	0.035	21	3.1	21	104	240	459
32	43.0	"	500	"	0.040	17	3.6	18	138	285	509
28	42.0	154	550	1.2	0.045	21	4.4	18	168	341	599

표 7 Type III 저발열 시멘트 사용 콘크리트 물성

W/C (%)	S/A (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	SP (C×%)	AEA (C×%)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	온도 (℃)	압축강도(kgf/cm ²)		
									3일	7일	28일
50	46.0	160	320	1.0	0.030	20	4.1	18	45	116	309
45	45.0	"	355	"	0.032	21	5.0	18	52	149	348
40	43.7	"	400	"	0.032	21	5.1	18	59	176	368
35	41.8	"	457	"	0.032	21	4.1	20	84	228	439
30	40.7	153	510	1.2	0.040	17	4.3	20	105	296	528

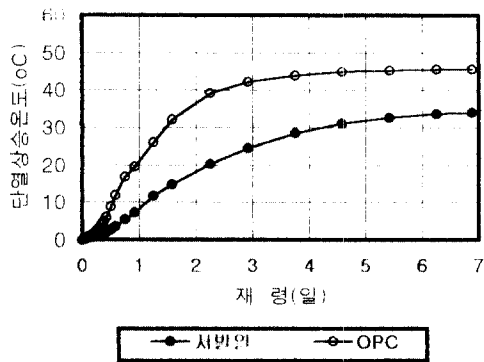
표 8 저발열 시멘트 사용 콘크리트 C/W-σ 관계식

재령	종류	Type I	Type II	Type III
		3일	$y=32.4C/W+16.8$ ($R^2=0.99$)	$y=19.2C/W+20.1$ ($R^2=0.94$)
7일	$y=48.4C/W+92.6$ ($R^2=0.98$)	$y=35.2C/W+76.3$ ($R^2=0.96$)	$y=43.9C/W+61.3$ ($R^2=0.96$)	
28일	$y=69.2C/W+263.6$ ($R^2=0.96$)	$y=46.4C/W+241.7$ ($R^2=0.96$)	$y=52.9C/W+239.7$ ($R^2=0.94$)	

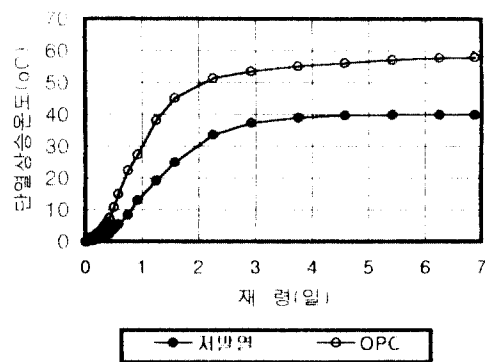
발현하여 1종 시멘트를 사용한 콘크리트가 보통 3일에서 약 50%, 7일에서 75% 이상의 강도발현율을 나타내는데 비해 초기강도 발현율이 낮으나 동일 28일 압축강도의 경우는 28일 이후의 장기강도가 1종 시멘트를 사용한 경우에 비하여 높을 것으로 예상된다.

4. 콘크리트 단열온도상승시험 결과

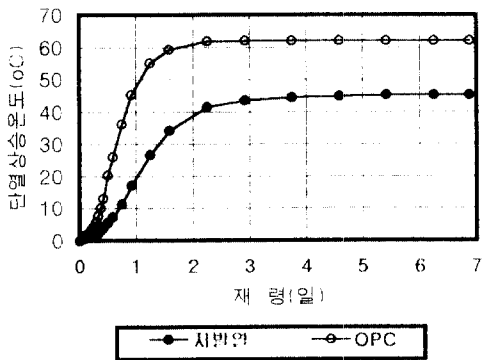
저발열시멘트를 사용한 경우의 수화발열특성을 평가하기 위하여 콘크리트 단열온도상승시험을 실시하였다. 단열온도상승시험은 50리터의 원통 용기에 제조된 콘크리트를 넣고 시료 용기의 주위 온도를 콘크리트 내부온도와 같도록 변화시켜 콘크리트 중의 시멘트가 완전 단열상태에서 수화반응을 일으키도록 하는 시험으로서 시험결과는 그림 1과 같다.



1-1 단열시멘트량 300kg/m³



1-2 단열시멘트량 400kg/m³



1-3 단열시멘트량 500kg/m³

그림 1 콘크리트 단열온도실험결과
(초기 온도 20℃)

5. 콘크리트 실구조물 온도이력 모사

콘크리트의 압축강도는 20℃ 수중양생을 표준으로 하고 있으나 실구조물에서의 콘크리트는 발생된 수화열이 외부로 발산되지 않고 축적되어 내부 온도가 증가함에 따라 축진양생을 받게 되므로 그 강도 발현 성상은 수중의 표준양생 공시체와는 다르다. 본 실험에서는 유한요소해석을 통해 1×1×1m의

정육면체 부재에서 콘크리트가 받는 온도이력을 증기양생 환경으로 그림 2 와 같이 모사하였으며, 저발열 시멘트를 사용한 콘크리트 배합설계는 표 9 와 같다.

증기양생시 각 48, 72, 96시간에서 압축 및 인장강도를 측정하여 동일한 콘크리트의 수중양생 28일 압축강도와 비교한 결과(표 10 참조), 매스 콘크리트에서는 내부에서 발생하는 수화열에 의해 시멘트의 수화반응이 촉진되어 28일 수중양생의 경우와 비교하여 2일에서 약 70%, 3일에서 약 80%, 4일에서 약 90%의 압축강도가 조기에 발현되는 것으로 나타났다.

표 9 모의부재 온도이력 모사 증기양생 실험용 콘크리트 배합설계

W/C (%)	S/A (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	SP (kg/m ³)	비 고
34.4	45	155	450	786	968	5.4	저발열 시멘트 Tpye II 사용

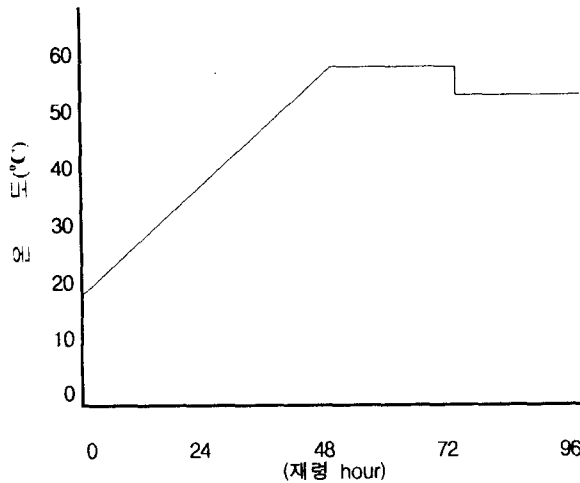


그림 2 온도이력 모사 증기 양생 이력

표 10 저발열 시멘트 사용 콘크리트 압축·인장강도 측정결과

(단위 : kgf/cm²)

항목		측정시기		
		48시간	72시간	96시간
증기양생	압축강도	358	426	435
	인장강도	34	38	40
수중양생 28일 압축강도		478		

6. 결 론

본 연구의 실험결과, 저발열 시멘트 및 저발열 시멘트 사용 콘크리트의 물성은 다음과 같다.

6.1 수화열 특성

- ① 본 실험에서 사용된 저발열시멘트의 수화발열량은 OPC의 2/3 이하이고, 저발열 시멘트를 사용한 콘크리트는 OPC 사용 콘크리트에 비해 단열온도상승식의 최종적인 온도상승값은 20% 이상 감소하고, 온도상승곡선의 기울기는 1/3 이하로 감소하는 것으로 나타났다.
- ② 저발열 시멘트를 사용한 단위시멘트량 500 kg/m³콘크리트의 단열온도상승곡선은 OPC를 사용한 단위시멘트량 300 kg/m³ 콘크리트의 단열온도상승곡선과 거의 유사하다.

6.2 압축강도 발현 특성

- ① 저발열 시멘트를 사용한 콘크리트는 OPC 사용 콘크리트에 비해 28일 압축강도는 거의 동등하나 초기강도 발현율은 낮고 장기강도 발현율이 높은 것으로 나타났다.
- ② 저발열 시멘트 사용시 압축강도 700kgf/cm²까지의 콘크리트를 제조할 수 있다.
- ③ 증기양생에 의한 온도이력 모사의 결과, 매스 콘크리트는 수화열에 의해 저발열 시멘트의 수화반응이 촉진되어 28일 수중양생에 비해 2일에서 약 70%, 3일에서 약 80%, 4일에서 약 90%의 압축강도가 조기에 발현된다.