

저발열 시멘트

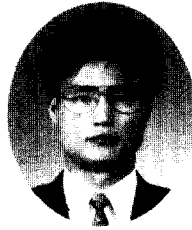
Low Heat Cement



이도현*



노재호**



송용순**



박춘근***



김병권***

1. 개발경위 및 종류

최근 국내에서는 국가적인 사회간접자본(SOC)에 대한 투자요구가 증대되어 토목 및 건축 구조물의 대형화 추세가 가속화됨에 따라서 거대한 해양구조물, 장대교량의 교각·교대 등의 하부구조물, 단면이 큰 라멘, 초고층 건축물의 기초 및 LNG 지하저장탱크 등의 지하구조물과 같은 부재크기가 큰 매스콘크리트 구조물이 많이 건설되고 있으며, 시공방법 등도 다양해 지고 있다.

그러나, 시멘트와 물이 접촉하면 수화반응이라는 발열반응이 일어나서 반응열이 방출되므로, 시멘트, 물, 골재 등이 혼합되어 제조되는 콘크리트에서는 경화과정중에 상당량의 수화열이 발생하게 된다. 이러

한 수화열은 특히 매스콘크리트와 같이 부재크기가 큰 구조물일수록 부재내부의 열응력을 증대시켜 균열을 발생시키는 주요 원인이 되므로, 콘크리트의 열응력에 의한 온도균열 발생을 어떻게 방지할 수 있는가가 매우 중요한 문제로 되어, 수화열이 완만하게 발생되고 또한 총 수화발열량이 적은 시멘트의 개발이 요구되었다.

이러한 수화열 저감을 위하여 종래에는 중용열시멘트, 고로시멘트, KS 4종 및 ASTM Type IV에 규정되어 있는 저열포틀랜드시멘트 등의 저발열 시멘트(Low Heat Cement : LHC)가 사용되어 왔다. 그러나, 선진외국에서는 1980년대에 들어 공기단축, 콘크리트의 대량타설 및 공사비 저감 등을 위하여 ASTM Type IV의 저열시멘트보다 수화발열량이 더

* 정회원, 대한주택공사 주택연구소, 선임연구원

** 동양중앙연구소, 건설재료 연구실 선임연구원

*** 정회원, 쌍용중앙연구소, Cement & Concrete 연구실장

**** 쌍용중앙연구소, Cement & Concrete 선임연구원

육 낮은 저발열 시멘트가 계속 개발되고 있다. 이러한 최근의 저발열 시멘트는 일반적으로 고로슬래그미분말을 다량 치환한 2성분계 및 고로슬래그와 플라이애쉬를 동시에 치환한 3성분계의 혼합계 시멘트와 클링커의 소성과정에서 벨라이트(C₂S, Belite)의 함유량을 크게 증대시킨 벨라이트계 시멘트로 구분될 수 있다. 벨라이트계 저발열 시멘트는 ASTM Type IV의 품질규격을 만족하므로 기존의 저열시멘트로 분류될 수 있다. 혼합계 저발열 시멘트는 혼합시멘트로 분류되어 포틀랜드 시멘트로 분류하기 곤란하지만, 성능면에서는 저열시멘트로 분류될 수 있다. 이러한 저발열 시멘트는 수화열 저감효과 이외에도 콘크리트의 내화학적 및 염소이온 침투저항성 등의 내구성을 증가시킬 뿐만 아니라, 국내에서도 최근에 개발되고 있는 초유동콘크리트의 제조에도 유리하다고 알려져 있다.

외국에서는 이미 혼합계 저발열 시멘트를 사용하고 있으며, 최근에는 벨라이트계 시멘트의 현장적용 사례도 증가하고 있다. 국내에서도 대형구조물의 증대와 함께 저발열 시멘트의 개발이 요구되어, 최근 관련업계의 T사에서는 고로슬래그와 플라이애쉬 등의 포졸란 물질을 포틀랜드 시멘트에 혼합한 3성분계 저발열 시멘트(Ternary Low Heat Cement)를 개발하여 현장시험적용 단계에 있으며, S사에서도 벨라이트계 저발열 시멘트(Belite Rich Low Heat Cement)의 개발에 성공하여 현장적용성을 검토중에 있다.

여기에서는 이상과 같은 국내실정을 고려하여 국내산 3성분계 및 벨라이트계 저발열 시멘트의 특성 및 콘크리트의 물성에 미치는 영향 등에 대하여 간략히 기술하고자 한다.

2. 저발열 시멘트의 특성

2.1 제조원리

활성상태의 시멘트 화합물은 물과 접촉하여 수화반응하므로써 저위의 에너지 상태인 수화물로 변하여 안정화되는데, 이 과정에서 에너지 상태의 변화량이 수화열로 나타난다. 포틀랜드 시멘트는 석회석과 점토 등으로 조합된 원료분말을 1450℃ 정도의 고온에서 소성하여 생성된 클링커에 3~5%의 석고를 혼합하여 분쇄함으로써 제조되는 것으로, 수화발열성을 비롯한 강도발현성 및 내구성 등의 시멘트의 제반

불성은 클링커를 구성하는 화합물의 양과 성질에 크게 좌우된다.

열역학 특성을 나타내는 용해열은 보통 포틀랜드 시멘트의 2,520 J/g에 비해 고로슬래그가 2,440 J/g, 플라이애쉬가 921 J/g으로 작은 값이다¹⁾. 따라서 포틀랜드 시멘트에 이러한 포졸란 물질을 혼합하여 제조되는 3성분계 저발열 시멘트는 수화열의 저감효과를 가져오게 된다. 3성분계 저발열 시멘트는 포틀랜드 시멘트 및 혼합계(포졸란)의 종류와 양 또는 분말도와의 조합으로 다양한 성능의 설계가 가능하다. 기본적으로 포졸란 재료의 사용에 따른 석고 첨가량의 변화가 필요하며 증량효과를 위한 석회석 미분말과 같이 변화 특성의 개선을 위하여 팽창제가 선택적으로 사용된다. 초저발열성을 나타내기 위해서는 포졸란 혼합량을 증가시킬 필요가 있다. 그러나, 포졸란의 증가는 수화반응속도 저하 및 수화열 감소효과가 있지만, 초기강도 발현을 저해하므로 혼합량에 한계가 있다. 따라서, 혼합계 저발열 시멘트는 포졸란 물질을 일반적으로 사용하는 것보다 더욱 작게 미분쇄한 비표면적이 큰 포졸란을 사용함으로써, 수화열 저감효과를 얻음과 동시에 강도발현성을 높일 수 있도록 제조된다.

한편, 포틀랜드 시멘트는 표 1과 같이 4종류의 주요화합물로 구성되어 있으며, 시멘트의 종류에 따라

표 1 포틀랜드시멘트의 주요화합물 구성비 (%)

시멘트의 종류	규산칼슘 화합물		간극상 물질		
	Alite (C ₃ S)	Belite (C ₂ S)	Aluminate (C ₄ A)	Ferrite상 (C ₄ AF)	
시멘트 포틀랜드	보통(N)	47	24	6	9
	조강(H)	64	11	8	8
	초조강(VH)	65	6	8	8
	중용열(M)	44	33	4	12
	내황상열(S)	49	28	2	16
Belite계 저발열(LHC-B)	27	58	3	9	

표 2 클링커 구성화합물의 특성²⁾

특성	C ₃ S	C ₂ S	C ₄ A	C ₄ AF	
강도발현	초기	높다	낮다	중간	낮다
	장기	높다	높다	낮다	낮다
수화열 ³⁾ (cal/g)	중간	낮다	높다	중간	
	(120)	(62)	(207)	(100)	
화학적항성	중간	높다	낮다	중간	
긴저수축	중간	작다	크다	작다	

³⁾ 이론반응열량(cal/g)

구성비가 다르다. 또한, 각각의 주요화합물은 표 2와 같이 서로 다른 성질을 가지고 있으므로, 이들의 특성이 시멘트의 성질을 좌우하는 중요한 요인이 된다.

표 1과 표 2에서와 같이 혼합계 저발열 시멘트를 제외하면 클링커의 75~80%는 단기강도 발현이 높고 수화열이 큰 Alite(C₃S)와 장기강도 발현이 높고 수화열이 적은 Belite(C₂S)의 규산칼슘 화합물로 구성된다. 또한, Aluminat(상(C₄A)과 Ferrite(상(C₃AF, 일명 Celite)은 C₃S와 C₂S 결정의 간극에 존재하며, 이들 간극질 화합물은 수화열이 매우 큰 반면 강도발현에는 그다지 기여하지 못한다. 각종 포틀랜드시멘트는 이상의 주요화합물의 구성비를 변화시켜 각 시멘트의 특징이 충분히 발현될 수 있도록 제조된다.

벨라이트계 저발열 시멘트는 수화발열량이 적고 장기강도 발현성이 높은 C₂S의 구성비를 크게 증가시키는 대신에 단기강도 발현이 높은 C₃S의 함량을 적절한 수준까지 줄이고, 수화발열이 높고 강도발현에 기여가 작은 간극질을 최대한 낮추어서 제조된다. 따라서 일반적으로 초기강도 발현이 늦은 경향이지만, 간극질의 함량을 낮추는 만큼 규산칼슘 화합물의 총함량을 증가시키므로써 초기강도 발현성을 어느정도 개선되도록 제조된다¹⁾.

2.2 화학적 특성

저발열 시멘트는 SiO₂의 함량이 높으며 황산염과의 반응으로 에트링가이트가 생성되어 콘크리트의 성능을 저하시키는 C₄A의 함량이 내황산염 시멘트의 수준으로 낮으므로 황산염에 대한 저항성이 향상된다. 또한, 알칼리 함유량이 KS규격의 저알칼리형 포틀랜드 시멘트의 규정 한계값인 0.6% 이하이므로 알칼리골재반응을 억제시키는 효과도 얻을 수 있다. 포졸란 미분말을 사용하는 혼합계는 물론 C₂S를 많이 함유하는 벨라이트계를 사용할 경우에도 미세조직이 치밀화되므로 이러한 효과는 더욱 증대되며, 내해수성도 증대된다.

2.3 물리적 특성

혼합계 저발열 시멘트는 고로슬래그 미분말과 플라이애쉬가 다량으로 사용된다. 따라서 비중이 보통 포틀랜드 시멘트에 비하여 낮으며, 포졸란재의 사용

으로 인하여 초기강도의 발현이 늦어지는 특성을 보완하기 위하여 포졸란을 고미분말화시키므로 분말도가 증가한다.

저발열 시멘트의 응결시간은 일반적으로 보통포틀랜드 시멘트에 비하여 다소 길며, 응결시간은 혼합계가 벨라이트계보다 다소 길다고 알려져 있으나, 실제 매스콘크리트 구조물에서는 수화열에 의한 부재의 온도상승으로 인하여 응결이 촉진되므로 거푸집 탈형시기가 크게 지연되지는 않는다.

또한, 혼합계 저발열 시멘트는 고로슬래그 미분말과 플라이애쉬가 다량으로 사용되므로 상대적으로 클링커량이 적은 반면에 벨라이트계 저발열 시멘트는 C₂S의 양이 많으며 C₃S의 양이 적다. 따라서, 저발열 시멘트는 보통포틀랜드 시멘트보다 초기강도 발현이 늦지만, 최근에는 클링커 구성화합물 비율의 최적화 및 분말도를 증대시키는 방법 등에 의해 초기강도 발현성도 크게 개선되고 있다. 반면에 장기강도는 C₂S의 수화가 장기재령까지 지속되므로 보통포틀랜드 시멘트 이상의 고강도를 발현한다¹⁾. 일반적으로 초기강도 발현은 3성분계가 빠르며, 장기강도 발현은 벨라이트계가 큰 경향이 있다.

표 3은 각종 포틀랜드 시멘트와 저발열 시멘트의 물리적 성질을 나타낸다.

표 3 시멘트의 물리적 성질

종 류	비 중	비표면적 (cm ² /g)	응결시간(h:m)		압축강도(kgf/cm ²)			
			초 결	종 결	3일	7일	28일	91일
N	3.15	3214	3-70	6-30	236	307	392	-
H	3.14	4360	1-55	2-55	279	374	494	527
M	3.21	3040	2-50	4-00	116	170	365	526
S	3.18	2699	4-98	7-35	201	274	363	-
B*	3.02	3730	3-25	7-05	178	258	378	-
LHC T**	2.80	4080	5-35	7-35	90	165	363	-
LHC-B	3.22	3380	4-20	7-20	120	176	375	610

* 고로시멘트 ** 3성분 혼합계 저발열 시멘트

2.4 수화열 특성

고로슬래그나 특히 플라이애쉬의 용해열은 보통포틀랜드 시멘트보다 작으며, 수화반응속도가 완만하다. 혼합계 저발열 시멘트는 이러한 포졸란의 열역학적 특성으로 인하여 수화열 저감효과를 가져오게 된다. 표 4는 국내산의 혼합계 저발열 시멘트와 보통포틀랜드 시멘트, 슬래그 시멘트 및 내황산염 시멘트의

수화발열특성을 미소수화열량계로 측정하여 비교한 결과로서, 일반적으로 저발열 시멘트의 수화발열량은 보통포틀랜드 시멘트의 1/2~2/3 정도이다¹⁾.

벨라이트계 저발열 시멘트는 C_3S 의 양을 대폭 증가시키고 C_2S 및 간극질의 양을 감소시키므로 인하여 총수화열량이 적으며, 수화반응이 완만하게 장기적으로 진행된다. 표 5는 KS L 5121의 시험방법에 의한 각종 시멘트의 수화특성을 비교한 것으로서, 벨라이트 저발열 시멘트의 수화열은 중용열 시멘트보다 낮고 혼합계 저발열 시멘트와 유사함을 알 수 있다.

표 4 혼합계 저발열 시멘트의 미소수화발열량 (cal/g)

종류	보통 시멘트	슬래그 시멘트	혼합계 저발열 시멘트
24시간	45.7	32.8	23.4
48시간	56.3	49.6	35.9
72시간	65.7	54.5	42.4

표 5 벨라이트계 저발열 시멘트의 수화발열량 (cal/g)

종류	보통 시멘트	조강 시멘트	중용열 시멘트	고로 시멘트	저발열 시멘트	
					혼합계	벨라이트계
7일	78.0	85.8	64.6	68.6	47.4	49.1
28일	89.2	94.8	76.3	82.5	64.8	64.3
91일	95.8	102.5	84.0	87.6	71.9	75.7

3. 저발열 콘크리트의 특성

3.1 콘크리트의 단열온도상승

저발열 시멘트는 구성성분에 의해 콘크리트의 수화열 저감효과를 나타내며, 기본적으로 콘크리트의 단위시멘트량에 따라 달라지게 된다. 그림 1은 국내 T사의 혼합계 저발열 시멘트를 사용한 콘크리트와 보통포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트의 단열온도상승 실험결과를 비교한 것이다. 여기에서 콘크리트의 수화열은 단위시멘트량이 클수록 증가하고, 저발열 시멘트의 단위시멘트량 500 kg/m³인 경우의 수화열이 보통포틀랜드 시멘트의 단위시멘트량 300 kg/m³의 경우와 동일한 수준임을 나타내어, 저발열 시멘트의 수화열 저감효과가 매우 크다는 것을 알 수 있다²⁾.

한편, 표 6은 벨라이트계 저발열 시멘트를 사용한 콘크리트의 단열온도상승 실험결과³⁾를 나타낸 것으로서, 보통포틀랜드 시멘트, 중용열 시멘트 및 고로 시멘트를 사용한 경우보다 단열온도상승량이 작고,

특히 초기재령에서의 콘크리트의 온도상승을 대폭 줄일 수 있음을 알 수 있다.

예를들어 저발열 시멘트를 사용하므로써 매스콘크리트의 중심온도를 10~20℃ 정도 낮출 수 있다.

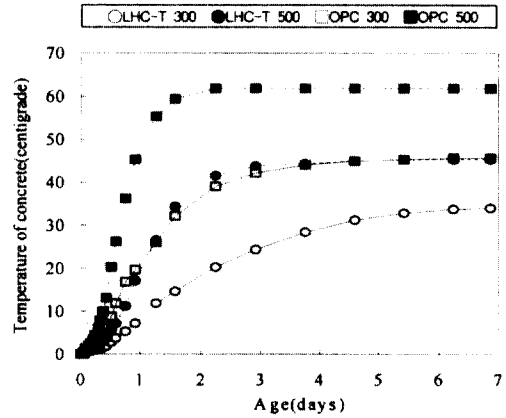


그림 1 콘크리트 단열온도실험결과 (초기온도 20℃)

표 6 콘크리트의 단열온도상승량 (℃)

(단위시멘트량 290 kg/m³, W/C=55%)

시멘트	재 령 (일)								
	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	7.0	14.0	21.0
N	16.4	32.5	42.9	45.1	46.0	45.5	47.3	48.1	48.3
M	11.1	23.5	30.9	34.2	36.2	37.7	39.7	42.7	43.9
B	7.7	21.5	36.5	43.0	45.6	46.7	47.6	48.8	49.3
LHC-B	7.0	15.6	19.7	22.3	24.3	26.2	29.6	37.4	40.4

3.2 굳지않은 콘크리트의 특성

저발열 시멘트의 제조를 위해서는 수화열 저감을 위하여 단위시멘트량을 줄여야 한다. 따라서 배합설계시 혼화제 첨가량을 증가시켜 작업성이 확보되는 범위안에서 단위시멘트량을 최소한으로 감소시켜야 한다. 이러한 측면에서 혼합계 저발열 시멘트는 비중이 보통포틀랜드 시멘트의 0.9배 정도이므로 약 12%의 체적증가 효과가 있기 때문에 단위시멘트량이 낮아진다. 또한, 혼합계 저발열 시멘트를 사용한 콘크리트는 일반적으로 응결시간 및 블리딩량이 다소 증대하는 경향이 있으나, 포졸란을 미분말화하여 비표면적을 증대시킴으로써 보수성을 증대시켜 블리딩 발생을 방지할 수 있으며, 반면에 공기연행제 사용량은 다소 증가한다. 표 7은 이러한 혼합계 저발열 시멘트를

표 7 저발열 시멘트를 사용한 콘크리트의 물성
(슬럼프 18±3cm, 공기량 4.5±1.5%)

W/C S/a (%)	W (%)	C (kg/m ³)	SP세	AE세	압축강도(kgf/cm ²)				
					3일	7일	28일	91일	
55	49.0	160	290	1.0	0.025	53	134	315	433
50	48.5	"	320	1.0	0.030	60	142	336	446
45	47.5	"	355	1.0	0.030	67	162	357	478
40	46.5	"	400	1.0	0.030	89	215	417	543
36	45.5	"	444	1.0	0.035	104	240	459	586
32	43.0	"	500	1.0	0.040	138	285	509	651
28	42.0	154	530	1.0	0.045	168	341	589	733

표 8 콘크리트의 블리딩 및 응결시간 (W/C=55%)

시멘트 종류	블리딩량 (cm ³ /cm ²)	블리딩량 (cm ³ /cm ²)	블리딩 종료시간 (시-분)	응결시간(시-분)	
				초 결	중 결
N	0.23	5.57	5-00	7-10	9-15
M	0.23	5.53	5-00	8-20	11-35
B	0.17	4.13	4-30	8-50	11-00
LHC B	0.24	5.64	5-00	8-15	11-50

사용한 굳지않은 콘크리트의 물성을 나타낸다.

반면에 벨라이트 시멘트는 포졸란을 사용하지 않으므로 표 8과 같이 응결 및 블리딩의 문제는 크지 않다. 즉, 콘크리트의 블리딩량은 보통포틀랜드 시멘트 및 중용열 시멘트와 거의 유사하며, 응결시간은 보통포틀랜드 시멘트보다 다소 늦은 경향이지만 중용열 시멘트와는 거의 동일하다.

한편, 혼합계의 경우에는 포졸란재가 다량으로 사용되고, 벨라이트계의 경우에도 C₂S의 양을 대폭적으로 증가시킨 것이므로, 시멘트의 구성화합물중 혼화제의 흡착작용이 상대적으로 큰 C₂S양이 적고 수화반응속도가 늦다. 따라서, 이러한 저발열 시멘트는 유동화제나 고성능감수제가 효과적으로 작용하여 콘크리트의 유동성이 유지되기 쉽다. 이러한 성질은 단위수량 저감효과를 가져오게 되므로 블리딩량을 줄일 수 있게 되며, 시공성 향상효과를 가져오며, 최근에 관심사로 되어 있는 초유동 콘크리트의 제조에도 매우 유리하다.

3.3 경화콘크리트의 특성

3.3.1 압축강도

혼합계 저발열 시멘트를 사용한 콘크리트를 20℃에서 수중양생할 경우, 표 7과 같이 초기강도의 발현

은 느리지만 재령 28일에서의 압축강도는 보통포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트와 거의 유사한 수준까지 회복된다. 그림 2는 혼합계 저발열 시멘트를 사용한 콘크리트의 재령에 따른 압축강도를 나타낸 것이다. 그러나, 표 9와 같이 표준양생 조건에서와는 달리 매스콘크리트에서는 수화열에 의한 내부온도 증가로 증기양생과 같은 축진양생 효과를 나타내므로 포졸란 반응이 급격히 활성화되어 응결 및 경화가 매우 빨라진다. 여름철에 콘크리트를 타설하는 경우를 가정하면, 콘크리트의 온도는 약 30℃ 이상이 되며, 콘크리트 부재의 각 변의 길이가 1m이면 그 내부온도는 약 1일~2일 정도에 약 60℃ 이상으로 된다. 표 5와 같이 이러한 조건에서 양생한 콘크리트의 3일 압축강도는 28일 수중양생 압축강도의 85% 이상이다.

벨라이트계 저발열 시멘트의 수화반응속도는 보통포틀랜드 시멘트보다 느리므로 콘크리트의 초기강도 발현이 다소 늦어지는 경향이지만, C₂S의 수화반응이 장기적으로 계속되므로 장기재령에서의 강도증진이 양호하여 다른 시멘트와 동등이상의 강도를 발현

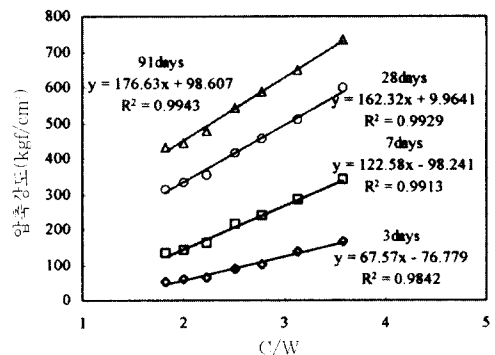


그림 2 저발열 시멘트 콘크리트의 압축강도

표 9 매스콘크리트 내부 온도이력을 고려한 저발열 콘크리트 (단위시멘트량 450 kg/m³, W/C=34.4%)의 압축강도 특성 (kgf/cm²)

축진양생 사이클	20°C - 60°C 도달(48시간)			
	60°C 유지(24시간)			
축진양생 강도발현	55°C 유지(24시간)			
	경과시간	48시간	72시간	96시간
수중양생 28일 압축강도	압축강도	358	426	435
	인장강도	34	38	40

한다. 표 10은 각종 시멘트를 사용한 콘크리트의 압축강도, 인장강도, 정탄성계수 실험결과로서, 벨라이트 시멘트를 사용한 콘크리트의 양호한 장기강도 발현성상을 알 수 있으며, 수중양생의 경우는 물론 밀봉양생의 경우에도 동일한 경향을 나타내고, 인장강도 및 정탄성계수도 압축강도와 동일한 경향임을 알 수 있다. 한편, 표 11과 같이 매스콘크리트 구조물과 동일한 온도이력에 의한 양생에서는 표준양생에 비해 초기강도 발현이 개선되며, 또한 부재의 최고온도가 낮고 초기재령에서의 과도한 고온이력을 받지 않으므로 장기재령에서도 강도가 증진된다.

일반적으로 초기강도 발현에는 혼합제가 유리하며 장기강도 발현에는 벨라이트계가 유리한 것으로 알려져 있다. 그러나, 실제의 매스콘크리트 구조물에서는 내부온도의 상승으로 초기강도가 높아지며, 보다 적극적인 방법으로서 초기강도 및 장기강도 개선과 수화열 저감 등을 고려하여 저발열 시멘트의 구성화합물의 구성비를 최적화하거나 혼합제의 분말도를 높이는 등의 방법을 통하여 각종 특성이 개선되어 가고 있다.

표 10 콘크리트의 강도특성 (W/C=55%)

압축강도 (kgf/cm ²)	시멘트	수중양생									밀봉양생		
		1일	2일	7일	28일	56일	91일	7일	28일	91일	7일	28일	91일
	N	84	202	288	388	408	431	287	366	413			
	M	50	130	495	327	396	443	193	310	410			
	B	38	125	191	378	436	481	204	363	455			
	LHC-B	35	83	138	318	398	456	156	310	452			
인장강도 (kgf/cm ²)	시멘트	3일	7일	28일	56일	91일							
	N	17.1	25.6	27.1	30.5	31.6							
	M	13.5	21.4	27.9	33.0	36.8							
	B	12.6	18.2	32.4	38.1	39.9							
탄성계수 (10 ³) kgf/cm ²	시멘트	7일	28일	56일	91일								
	N	2.99	3.22	3.37	3.50								
	M	2.57	2.90	3.12	4.01								
	B	2.30	3.15	3.21	3.84								
LHC-B	2.03	2.87	3.16	4.42									

표 11 매스콘크리트 양생에서의 압축강도 (W/C=55%)

압축강도 (kgf/cm ²)	시멘트	1일	3일	5일	7일	14일	28일	56일	91일
		N	142	274	306	316	336	343	345
M	83	200	260	289	331	359	380	401	
B	63	233	317	320	342	356	364	384	
LHC-B	43	96	165	223	326	386	431	442	

주: 두께 2m의 매스콘크리트 슬라브 중첩부의 온도이력에 의한.

3.3.2 기타특성

1) 건조수축

표 12는 벨라이트계 저발열 시멘트를 사용한 콘크리트의 길이변화 실험결과를 나타낸 것으로, 저발열 시멘트의 건조수축율은 고로시멘트에 비하여 약간 작고, 보통포틀랜드 시멘트와 중용열 시멘트와 동일한 수준이다. 이러한 경향은 혼합계 저발열 시멘트를 사용한 경우에도 동일하므로 건조수축에 대해서는 특별한 문제가 되지 않는다.

표 12 콘크리트의 길이변화율 (W/C=55%)

시멘트	길이변화율 (×10 ⁻³)							
	1주	2주	4주	8주	13주	26주	39주	52주
N	-0.72	-1.36	-2.66	-4.41	-5.39	-5.95	-6.32	-6.45
M	-0.59	-1.00	-1.91	-3.93	-4.95	-5.39	-5.80	-6.10
B	-1.66	-2.58	-3.96	-5.23	-6.06	6.43	6.90	-7.05
LHC-T	-0.85	-1.61	-2.46	-2.46	-5.24	-5.58	-6.01	-6.18
LHC-B	-0.79	-1.31	-2.33	4.48	-5.36	-5.65	-5.98	-6.15

2) 내해수성 및 내약품성

해수는 Cl⁻, SO₄²⁻, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ 등의 성분이 99% 이상을 차지하며 이중에서도 NaCl이 80% 이상을 차지한다. 이러한 성분이 시멘트 경화체의 내부로 침투하는 속도는 (Cl⁻) > (SO₄²⁻) > (Na⁺) > (Ca²⁺) > (Mg²⁺)의 순으로 빠르므로 Cl⁻이온은 시멘트 경화체에 가장 큰 영향을 미친다.

혼합계 저발열 시멘트는 혼합재의 염소이온 흡착 효과가 있고 재령이 경과할수록 수화물이 재석출되는 등의 영향으로 내부조직이 치밀해진다. 이러한 영향은 염소이온의 침투를 차단하여 콘크리트의 내해수성을 크게 증가시키고, 철근부식을 감소시키므로 해안 구조물용 콘크리트 공사에 매우 적합하다²⁾. 장기적으로 벨라이트계 저발열 시멘트도 칼슘실리케이트 수화물(C-S-H)의 형태가 미세하고 치밀하여 밀실한 수화조직을 형성하므로 치밀한 미세구조가 형성된다.

한편, 시멘트 경화체는 산과 염기 등의 화학물질에 노출되면 침식하게 되는데, 황산염의 침식을 받으면 에트리팅가이트와 석고가 석출되고 수산화칼슘이 소실되어 팽창반응이 일어나서 파괴된다³⁾. 저발열 시멘트는 시멘트 중의 C/A량을 5종시멘트 수준으로 대폭 저감시킨 것이므로 황산염에 대한 저항성이 증가된다.

3) 중성화 및 동결융해 저항성

벨라이트계 저발열 시멘트는 포졸란을 사용하지 않으므로 콘크리트의 알칼리성이 장기적으로 안정하게 유지되며, 보통포틀랜드 시멘트보다 CaO/SiO₂ 비가 낮은 치밀한 조직의 C-S-H 수화물이 생성된다. 표 13은 각종 시멘트를 사용한 콘크리트의 중성화 실험결과를 나타내는 것으로, 일반적으로 벨라이트계 저발열 시멘트를 사용한 콘크리트는 일반시멘트를 사용한 콘크리트와 중성화 속도가 동일하다.

혼합계의 경우에는 포졸란재를 전혀 사용하지 않는 벨라이트계와는 달리, 다량의 포졸란재를 사용하므로 중성화속도가 빠르다. 그러나, 매스콘크리트나 해양구조물과 같은 경우에는 철근의 피복두께가 크므로 콘크리트의 중성화는 크게 문제되지 않는다.

표 13 중성화 촉진시험 결과 (W/C=55%)

시멘트	중성화깊이 (mm)				
	1주	2주	4주	8주	13주
N	2.9	4.3	6.1	8.7	11.0
M	5.6	7.4	9.7	11.4	12.9
B	6.3	8.1	10.6	13.6	16.5
LHC-T	9.6	12.7	17.3	21.0	25.0
LHC-B	7.1	8.2	10.0	11.2	12.3

일반적인 콘크리트의 동결융해 저항성은 연행공기량에 의해 크게 좌우된다. 저발열 시멘트를 사용한 콘크리트도 마찬가지로 적당량의 공기를 연행하면 다른 시멘트를 이용한 콘크리트와 동등수준의 내동결융해성을 부여할 수 있으며, 또한 초기강도 발현이 늦다는 점을 감안하여 적절한 초기양생이 요구된다.

또한 저발열 시멘트를 사용한 콘크리트는 조직이 치밀하고 시멘트중의 알칼리 함유량이 적으므로 알칼리골재반응성을 억제하는 효과도 있다.

4. 적용사례

저발열 시멘트를 사용하는 주목적은 수화열을 저감시키기 위한 것이다. 그러나 최근에는 저발열 시멘트의 유동성 증대효과를 이용하여 고성능콘크리트의 제조목적으로 이용하는 사례가 증대하고 있다. 따라서 저발열 시멘트의 적용용도는 표 14와 같이 크게 저발열·고강도 구조물과 고유동·고강도 구조물로 구분할 수 있으며, 적용용도가 점차 다양해지고 있

다.

외국의 경우, 저발열 시멘트는 3성분 혼합계가 먼저 개발되어 현장에 적용되고 있으며, 최근에는 벨라이트계의 적용사례도 크게 증가하고 있다. 국내에서는 아직 저발열 시멘트를 현장에 적용한 사례가 없으나, 최근에 3성분계 저발열 시멘트가 현장시험적용 단계에 있으며, 벨라이트계의 현장적용성 연구도 활발하게 진행되고 있다. 여기에서는 현재 5종 시멘트를 사용하여 일반콘크리트로 시공중인 서해대교 사장교 주탑 기초부에 적용하는 것을 목표로 실시된 3성분 혼합계 저발열 시멘트를 사용한 초유동 콘크리트의 매스콘크리트 시험적용 사례¹⁾를 소개하기로 한다.

표 14 저발열 시멘트의 적용용도

구분	적용용도
고유동·고강도 구조물	· 초고층 RC구조물 · 콘크리트 2차품 · 지하연속벽
저발열·고강도 구조물	· 에너지 저장시설 · 대형교량 · 매스콘크리트 구조물

4.1 콘크리트 물성시험

1m×1m×1m 크기의 모의부재에 표 15와 같은 혼합계 저발열 시멘트를 사용한 초유동 콘크리트를 현장 배치플랜트에서 제조하여 타설하고, 모의부재 중앙부의 중심과 상·하단에서 각각 5cm의 위치에 수화열 센서를 매립하여 수화열 발생에 의한 콘크리트의 온도변화를 측정하였다. 그림 3은 콘크리트 온도변화 실험결과로서 저발열 시멘트를 사용한 초유동 콘크리트의 초기온도는 약 18℃였으며, 모의부재 중심부의 최대온도는 2일 후에 약 26℃를 기록하여 온도상승량을 10℃ 이내로 크게 낮출 수 있었다. 따라서 저발열 초유동 콘크리트를 주탑의 기초부에 적용할 경우에는 수화열 저감을 위한 파이프쿨링을 생략할 수 있다고 판단된다.

표 15 콘크리트 배합설계표

G _m (mm)	G _s (mm ³)	G _w (mm)	단위량(kg/m ³)		
			W	C	고성능 감수제
19	45	53	180	400	8.4

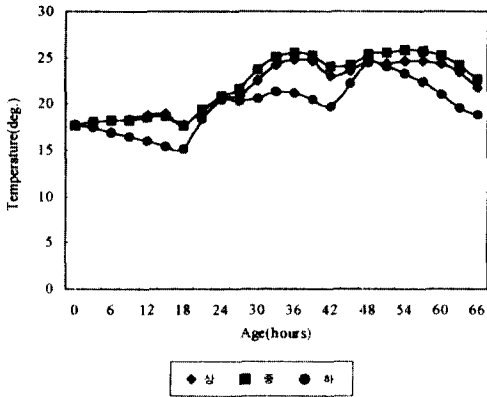


그림 3 모의부재 콘크리트 내부의 온도변화

표 16은 서해대교 현장의 대립산업 실기 배치플랜트에서 저발열·초유동 콘크리트의 레미콘을 제조하여 슬럼프 유지성능을 측정할 결과로서, 초유동 콘크리트의 슬럼프 플로우는 1시간이 경과할 때까지 박싱 직후의 초기 슬럼프 플로우를 유지하였다. 사진 1은 저발열·초유동 콘크리트의 슬럼프플로우 실험장면이며, 사진 2는 주탑 기초부 레벨링 콘크리트에 진동 다짐작업 없이 저발열 초유동 콘크리트를 타설하는 장면이다.

표 17은 저발열 시멘트를 사용한 초유동 콘크리트의 강도발현 성능을 측정할 결과로서, 초유동 콘크리트의 초기강도는 다소 낮은 편이나, 28일 이후에는 5종 시멘트를 사용한 경우와 동일한 압축강도를 나타내었다.

표 16 1시간의 경과에 따른 작업성 변화

경과시간	박싱후	30분	60분
슬럼프 플로우(cm)	60.5	60.0	59.5

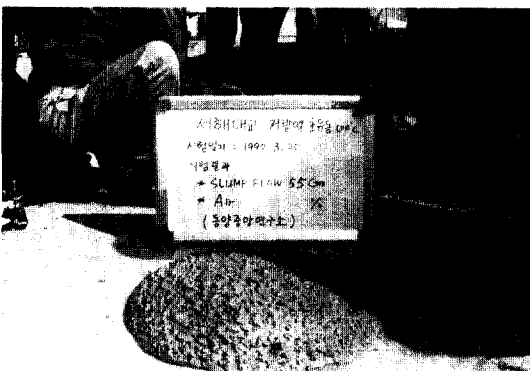


사진 1 초유동 콘크리트 슬럼프 플로우 측정

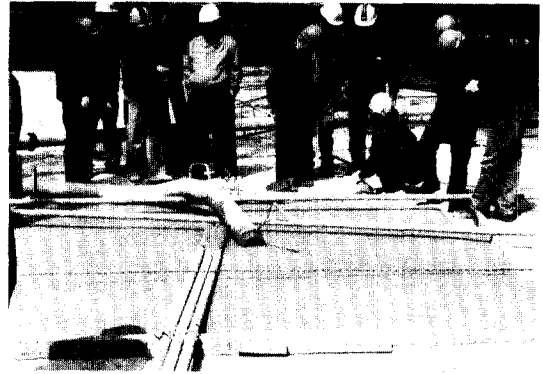


사진 2 초유동 콘크리트 타설장면

표 17 콘크리트의 압축강도 (kgf/cm²)

종류 \ 재령	3일	7일	28일	56일	91일
저발열·초유동	76	130	321	404	430

4.2 내해수성 및 내약품성

표 18은 콘크리트의 염소이온 침투저항성을 판단하기 위하여 ASTM C 1202에 의해 실시한 촉진시험결과로서, ASTM 규정의 염소이온 침투성 판정기준에 의해 판정해 보면, 저발열·초유동 콘크리트의 내해수성이 매우 우수하다는 것을 알 수 있다.

표 18 염소이온 침투성 촉진시험결과 및 판정결과

콘크리트 종류	저발열·초유동	
	28일	56일
침투전하량 (coulombs)	1,160	779
염소이온투과성 판정결과	낮음	매우 낮음

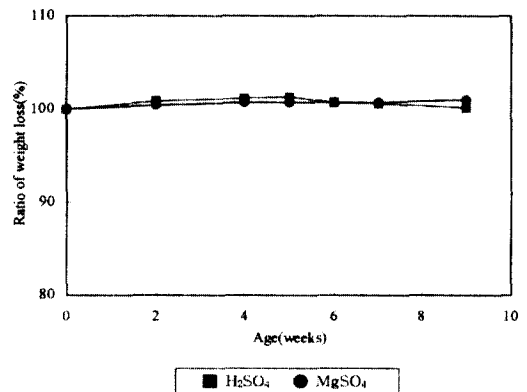


그림 4 화학용액 침지 콘크리트의 중량변화율

그림 4는 콘크리트의 내약품성을 측정하기 위하여 화학용액에 침지한 콘크리트의 중량변화율 측정결과로서, 황산용액에 침지시킨 저발열 콘크리트의 중량은 거의 감소되지 않았다. 또한, 표 19에서와 같이 저발열 시멘트를 사용한 콘크리트의 압축강도는 황산, 황산염 및 인공해수의 침식에 의해 다소 저하하는 경향이지만, 이러한 강도저하는 기존의 5종 시멘트를 사용한 경우와 동일한 수준으로 생각된다.

표 19 화학용액 침지 콘크리트 압축강도 변화 (kgf/cm²)

재령	양생조건	압축강도(kgf/cm ²)
56일	수중	404(100)
	2배 인공수해	377(93)
	H ₂ SO ₄ 5%	330(82)
	MgSO ₄ 10%	376(93)
91일	수중	430(100)
	2배 인공수해	374(87)
	H ₂ SO ₄ 5%	340(79)
	MgSO ₄ 10%	354(82)

주 : ()는 수중양생 강도에 대한 백분율 (%)

5. 향후의 전망

최근에 눈부신 발전을 이룩한 특수시멘트 제조기술은 소성과정에서의 온도와 화학성분의 조절로 클링커 구성성분을 조절하거나 분쇄방법의 변화로 입자 특성을 개선시키는 기술과 각종 혼합재의 종류와 분말도, 첨가량을 변화시켜 원하는 물성을 얻는 혼합재 사용 기술로 크게 나누어진다. 저발열 시멘트의 제조법도 이 두 가지의 기술로 대표되며, 전자의 소성기술에 의해 제조되는 시멘트가 고벨라이트 시멘트이며, 후자의 혼합재를 첨가하여 제조되는 시멘트의 대표적인 예가 3성분계 초저발열 시멘트이다.

이들 시멘트는 유동성 및 강도 특성이 서로 다르지만, 수화열 저감이라는 공통의 장점을 가지고 있으며, 동시에 고강도, 초유동, 고내구성을 확보하기에 유리하다는 장점이 있다. 이러한 특성들은 시멘트의 제조방법에 따라 달라지게 되며, 최근에는 두가지의 기술을 혼합하는 방법도 시도되고 있으므로 양자의 명확한 한계를 찾기가 곤란해지고 있다. 특히 세계의 시멘트 규격을 ISO 체제하에서 유럽의 시멘트 규격과 유사하게 하나로 통일하고 그 안에서 거의 모든 시멘트의 규격을 포함시키려는 의견도 제시되고 있다.

이상과 같이 저발열 시멘트의 특성을 이용한 구조물이 증대하고 있다. 지금까지는 주로 수화열 저감만을 주목적으로 사용되어 왔지만, 고강도콘크리트, 초유동콘크리트, 해양콘크리트 등은 물론 각종 특수 구조물 및 특수 성능을 부여하기 위한 공사에 이러한 저발열 시멘트의 적용이 크게 증대할 것임에 틀림없다. 이를 위하여 향후 저발열 시멘트 제조기술은 더욱 다양하게 발전할 것이므로 각각의 현장조건과 콘크리트의 요구성능에 맞추어 설계되고 사용되어져야 하며, 국내에서도 이러한 시멘트의 개발 및 적용방안에 관한 계속적인 연구에 박차를 가해야 할 것이다.

참고 문헌

- 1) 羽原俊祐, 飛内丰之, "低發熱セメント", セメント・コンクリート, No. 538, pp. 80~83, 1991.
- 2) 小野吉雄 : 水和セメントの鐵物相と水和特性, 콘크리트工學, Vol.19, No.11, pp.10~14, 1981.11.
- 3) Williamson, R.B., "Process in Materials Science", Vol.15, p.189, 1972.
- 4) 羽原俊祐・飛内丰之, "低發熱セメント, セメント・コンクリート", No.535, pp. 12~24, 1991.
- 5) 노재호, 박연동, 송용순, 김훈, 강석화, "저발열 시멘트 및 콘크리트의 특성", 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제8권 2호, pp. 345~351, 1996
- 6) 加藤和己・松高茂・澤木省一郎, "斷熱溫度上昇過程におけるセメント強度發現性" セメント・コンクリート論文集, No.45, pp.116~121, 1991.
- 7) 牛山弘隆, "港灣工事に用いるセメント", "セメント・コンクリート, No. 594, pp. 80~83, 1996. 8.
- 8) P. K. Metha, P. Schiessl and M. Raupach, "Performance and Durability of Concrete", 9th International Congr. Chem. of Cement, New Delhi, Vol. 1, pp. 571~585, 1992.
- 9) 五十細達夫・竹村英樹・内田清彦, "ブライト系低發熱セメントの熱/強度特性と硬化體組織, セメント・コンクリート論文集, No.45, pp.134~139, 1991.
- 10) 노재호, 한정호, 송용순, 최이현, 천재원 "저발열 시멘트를 사용한 초유동 콘크리트의 물성," 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제9권 1호(총권 제16집), pp. 649~656, 1997