

저열 포틀랜드(벨라이트)시멘트 콘크리트의 특성

Properties of Low Heat Portland(Belite Rich) Cement Concrete

하재담* 김기수* 김동석* 구본창* 조계홍* 이동윤**
Ha, Jae Dam Kim, Ki Soo Kim, Dong Suk Koo, Bon Chang Cho, Kye Hong Lee, Dong Yoon

ABSTRACT

Recently, it has been increased to construct massive concrete structures, like under-ground structure, offshore structure etc., ie. concrete construction have become larger and higher and are demanding lower heat concrete to prevent thermal cracking. It has been progressed to replace cements with fly-ash and slag to lower heat of hydration, but it is hard to control quality of the mineral admixtures in stage of adjusting of real construction. Application of low heat portland(Belite Rich) cement for the mass concrete is the best solution to satisfied those requirements. Here are explained the basic properties of fresh concrete as well as hardened concrete of using low heat portland cement(LHPC). Also, we compare the results of adiabatic temperature rise test using LHPC and OPC.

1. 서론

LNG 탱크의 지하연속벽, 주탑 기초, 지하철 등 국내에서 건설되고 있는 대형 콘크리트 구조물에서는 시멘트의 수화열에 의한 온도균열 문제가 중요시 되고 있어 이를 억제하는 연구가 계속 되고 있다. 온도균열에 영향을 미치는 요인은 구조물의 구속조건, 단위시멘트량, 콘크리트 타설온도 등 여러 인자가 있으나 이중 시멘트 자체의 수화발열 특성이 온도균열에 제일 영향을 미치므로 매스콘크리트에서의 저열 특성을 지닌 시멘트의 선정은 온도균열 억제를 위해 필수적으로 검토할 사항이다.

저열 시멘트로는 플라이애쉬, 슬래그미분말등의 포졸란물질을 보통 포틀랜드시멘트에 첨가한 2성분계 및 3성분계 시멘트 및 저열 포틀랜드(벨라이트)시멘트가 있으며 보통 포틀랜드시멘트에 비하여 수화열이 적고 또한 발열속도도 느리며 현장에서의 품질관리가 유리하여 매스콘크리트에 LHPC는 최적의 시멘트라 할 수 있다.

본 연구는 저열 포틀랜드(벨라이트)시멘트를 사용한 콘크리트를 매스콘크리트에 적용 될 수 있게 굳지않은 콘크리트, 굳은 콘크리트, 열적 특성 등을 도출하는데 있다.

*정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구실 선임연구원
*정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구실장
*정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구실 주임연구원
*정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구실 연구원
*정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 시멘트연구실 주임연구원
**쌍용양회공업(주) 전자재사업팀

2. 저열 포틀랜드(벨라이트)시멘트의 특성

2.1. 시멘트의 화학성분과 구성화합물

본 연구의 대상인 저열 포틀랜드시멘트(LHPC)는 국내 KS 규격의 4종을 만족하는 시멘트로 슬래그 미분말, 플라이애쉬 등의 혼합재를 첨가하지 않고 OPC와 마찬가지로 시멘트 클링커를 제조할 때 구성광물의 함량을 조절함으로써 대폭적인 수화열 저감과 장기 고강도의 발현 및 내구성의 향상을 도모할 수 있어 대형건축물 기초나 지하연속벽 등 매스 콘크리트부터 대형 건축용 철근 콘크리트까지 범용으로 사용할 수 있으며 혼합계시멘트에 비하여 콘크리트 배합설계가 단순하고 품질관리가 용이하며 표 1에 나타난 것과 같이 OPC 대비 수화열의 발생이 적은 C₂S가 두배 이상으로 함유되어 있어 수화발열 특성에 아주 유리하다.

표 1 시멘트의 화학성분과 구성화합물

시멘트 종류	화학성분 (%)						구성화합물 (%)			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	R ₂ O	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
OPC	21.0	5.9	3.2	62.5	2.1	0.78	49	23	10	9
LHPC	25.9	3.0	2.8	63.0	2.2	0.51	23	58	3	9
KS(4종)			6.5≥		2.3≥		35≥	40≤	7≥	

2.2. 시멘트의 물리적 성질과 수화열 특성

다음 표2에 나타난 것과 같이 OPC 대비 비중 및 비표면적은 높은 수준이며 용결은 지연된다. 또한 압축강도는 초기재령에서는 떨어지지만 28일 이후의 장기재령에서는 OPC를 상회하며 재령 91일에서는 150kg/cm² 이상 높은 강도발현을 나타낸다. 수화열은 7일재령에서 OPC 대비 60~70%, 28일재령 및 91일재령에서는 70~80% 수준의 저발열 특성을 가진다.

표 2 시멘트의 물리적 성능과 수화열 특성

시멘트 종류	비중	Blaine (cm ² /g)	용결(길모아)		압축강도(kg/cm ²)				수화열(cal/g)		
			초결(m)	종결(h)	3일	7일	28일	91일	7일	28일	91일
OPC	3.15	3200	270	6:50	195	290	376	437	81	92	99
LHPC	3.22	3450	350	8:50	136	177	365	560	57	66	78
KS(4종)	-	2800≤	60≤	10≥		75≤	180≤		60≥	70≥	

3. 저열 포틀랜드(벨라이트)시멘트 콘크리트의 특성

3.1. 사용재료 및 실험방법

시험배합에 사용된 시멘트는 위에 언급한 LHPC 및 Plain으로 OPC를 사용하였고 잔골재는 부강산 강사, 굵은골재는 25mm 청원산 쇄석을 사용하였으며 특성은 표 3에 나타난 것과 같이 일반적으로 많이 사용하는 골재이며 혼화제는 일반 레미콘공장에서 널리 사용하고 있는 감수율 10% 정도의 AE감수제인 NEOMIX를 사용하였다.

표 3 골재의 물리적 성질

항 목	조립율 (FM)	표건비중	흡수율 (%)	단위용적증량 (kg/m ³)	실적율 (%)
굵은골재	6.71	2.67	0.5	1560	58.1
잔골재	2.50	2.62	1.1	1820	70.2

본 연구에서는 단위수량을 160, 170, 180kg/m³으로 고정하고 물-시멘트비를 45, 55, 65%로 변화시켜 제작한 표준공시체(φ 10x20cm)를 시험 전까지 23±2°C의 온도로 수중 양생하였다.

3.2. 실험결과 및 고찰

3.2.1. 역학적 특성

아래의 표 4에 나타난 것과 같이 각 재령별 강도특성을 살펴보면 재령 3일, 7일 및 91일의 압축강도는 재령 28일의 압축강도 대비 각각 25~35, 45~55 및 155~165%의 강도발현을 하여 OPC대비 초기 강도 발현율이 낮으나 장기강도 발현은 월등히 우수한 것을 알 수 있으며 이는 LHPC의 구성광물 중 50%이상을 차지하고 있는 C₂S의 특성이 콘크리트의 강도 발현에 많은 영향을 주고 있음을 알 수 있으며 표 5에는 재령별 및 단위수량에 따른 압축강도와 시멘트-물비의 관계식을 도출하였다.

표 4 LHPC사용 콘크리트의 배합 및 특성

G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	Unit Weight(kg/m ³)					Slump (cm)	Air (%)	Compressive Strength (kg/cm ²)			
			W	C	S	G	AD			3d	7d	28d	91d
25	45	42	180	400	715	995	0.600	12.8	4.3	110	196	343	554
	55			327	740	1030	0.491	10.7	4.2	68	129	275	457
	65			276	758	1054	0.414	10.3	5.5	47	80	189	321
	45		170	378	746	1035	0.567	12.8	3.3	84	130	313	521
	55			309	768	1065	0.464	11.5	4.7	61	99	266	445
	65			261	784	1086	0.392	11.2	4.2	39	68	189	315
	45		160	356	728	1009	0.534	12.0	3.6	83	116	266	375
	55			291	751	1042	0.437	11.6	3.8	70	95	230	391
	65			246	767	1064	0.369	10.5	3.8	34	48	175	297

표 5 LHPC사용 콘크리트의 재령별 압축강도(σ)와 시멘트-물비(C/W) 관계식

Time(day)	Unit Water (kg/m ³)	Linear Regression for Data σ = A + B×C/W		
		A	B	R
3	180	-98.26	93.22	1.00
	170	-60.17	65.37	1.00
	160	-66.10	69.10	0.93
7	180	-180.69	169.85	1.00
	170	-68.19	89.95	0.99
	160	-92.85	96.41	0.95
28	180	-142.3	221.52	0.98
	170	-72.31	176.83	0.97
	160	-17.83	130.07	0.97
91	180	-178.03	334.66	0.98
	170	-73.55	177.30	0.97
	160	-18.66	130.38	0.98

또한 각 배합별 인장강도 및 탄성계수는 다음 표에 나타난 것과 같이 할렬인장강도는 압축강도의 1/10-1/8정도 수준이고 탄성계수는 ACI 제안식인 $E = 15000 \times \sqrt{\sigma_c}$ (kg/cm²)보다 조금 높은 수준이다.

표 6 LHPC사용 콘크리트의 재령별 압축강도, 탄성계수 및 활렬인장강도

W/C (%)	Unit Weight (kg/m ³)		s/a (%)	Compressive Strength (kg/cm ²)				Modulus of Elasticity (kg/cm ² × 10 ⁵)				Splitting Tension Strength (kg/cm ²)			
	C	W		3d	7d	28d	91d	3d	7d	28d	91d	3d	7d	28d	91d
	45	378		170	42	84	130	313	521	1.70	2.15	3.13	3.24	12.1	20.7
55	309	61	99			266	445	1.56	1.87	3.03	3.12	7.3	13.4	22.2	30.5
65	261	39	68			189	315	0.97	1.83	2.43	2.62	4.4	8.7	14.8	21.2

3.2.2. 단열온도 특성

콘크리트내에서 발생하는 온도분포는 외부의 특별한 열유입이 없는 한 시멘트의 수화열에 의해 좌우되며 LHPC인 경우 OPC의 약 70%정도의 수화열이 발현되는 것으로 보아 콘크리트에서도 비슷한 경향을 나타낸다. 콘크리트의 수화발열 특성은 단열온도상승시험으로 평가하며 본 연구에서는 50ℓ 용량의 시료로 물 순환식 방식에 의해 단열온도상승시험을 수행하였다.

다음 그림 1에서 보여 주는 것과 같이 단위시멘트량 500kg을 사용한 경우 LHPC(LH-60)인 경우 OPC대비 약 18°C정도의 온도저감효과가 있으며 또한 온도상승속도도 현저히 낮아 온도균열로 인한 균열을 억제할 수 있다.

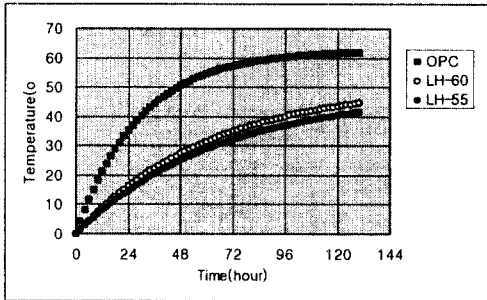


그림 1 OPC대비 LHPC의 단열온도상승량

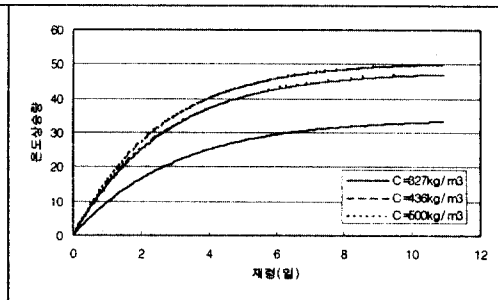


그림 2 단위시멘트량에 따른 단열온도상승량

또한 단위시멘트량에 따른 단열온도상승계수인 최대온도(K) 및 온도상승속도(α)를 추정하기 위해 그림 2에서 나타난 것과 같이 콘크리트의 타설온도로 20°C 고정하고 단위시멘트량(C)을 327, 436 및 500kg로 변화하여 시험하였고 회귀분석을 수행하여 다음 표7에 나타난 것과 같이 콘크리트표준시방서의 OPC와 비교한 결과 최대온도 및 온도상승속도가 낮아 온도균열 제어에 유리한 것을 알 수 있다.

표 7 시멘트량에 따른 최대온도(K) 및 온도상승속도(α)

시멘트종류	치기온도 (°C)	$Q(t) = K(1 - e^{-at})$			
		$K(C) = aC + b$		$\alpha(C) = gC + h$	
		a	b	$g(\times 10^{-5})$	h
OPC	20	0.11	13.0	3.8	-0.036
LHPC	20	0.10	2.18	0.32	0.225

3.2.3. 모형부재 시험

매스콘크리트 구조물에서 수화열에 의해 발생하는 응력은 주로 매스콘크리트 내부의 온도차 및 외부 구속조건에 따라 그 크기가 결정된다. 따라서, 본 시험에서는 동일 배합에 2가지의 다른 시멘트 즉 LHPC 와 OPC의 양을 436kg/m^3 로 하고 동일한 외부구속조건으로 시험체를 제작하였다. 또한 모든 경계조건을 동일상태로 맞추기 위해 두 시험체 모두 재령 28일 압축강도 400kg/cm^2 의 OPC로 기초를 타설하여 시험체가 기초에 의해 외부구속을 받을 수 있도록 높은 탄성계수의 기초콘크리트를 타설하고 28일 이상 충분히 양생을 하였다. 또한 시험체와 기초콘크리트 사이에 미끄러짐(slip)을 최소화하기 위해서 기초의 표면은 매우 거칠게 하고, 상하좌우 30cm의 간격으로 기초에 앵커를 설치하였다. 그리고, 육면체형태의 시험체를 한쪽방향으로 길게 하여, 즉 L/H 비를 크게 하여 시험체와 기초 사이에 외부구속이 제대로 일어나지 않는 경우에도 양생 후반부에 어느 정도 크기 이상의 응력을 기대할 수 있도록 하였다. 수화열 및 온도응력을 직접 비교 평가할 수 있도록 하였다.

본 연구를 위해 사용된 시험체의 형상 및 제원은 그림 3과 같다. 여기서 시험체의 중앙과 표면에서의 온도분포를 측정하기 위해 시험체당 4개의 열전대를 매설하였고 중앙부에서의 온도응력을 측정하기 위해 유효응력계와 매립형 변형률계, 무응력계를 설치하였다.

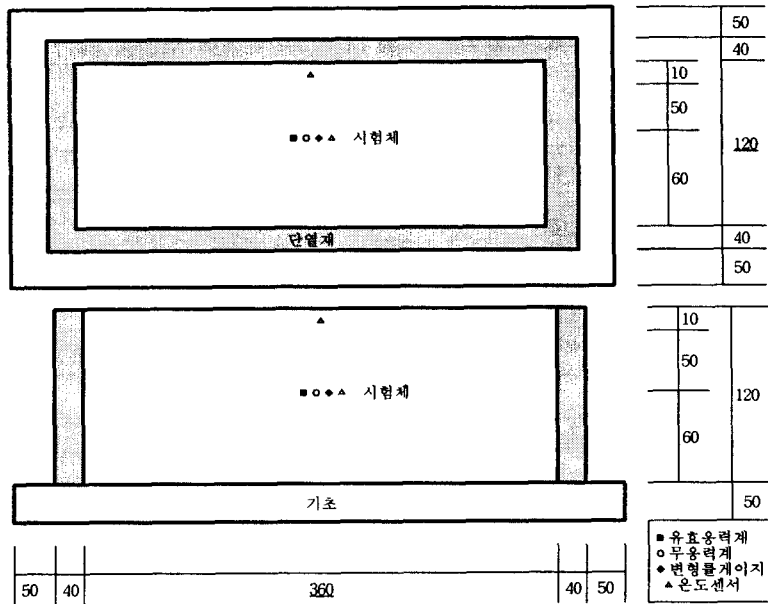


그림 3 시험체의 제원 및 측정센서의 위치

그림 4에 나타난 것과 같이 OPC 시험체의 경우 24시간만에 최고온도 76.3°C 에 도달하였고, LHPC 시험체의 경우는 35시간만에 최고온도 58.0°C 에 도달하여, LHPC 시험체가 OPC 시험체에 비해 최고온도가 약 18.3°C 가 낮았으며 LHPC 시험체의 최고온도 도달시간이 OPC 시험체보다 약 11시간이 늦어 LHPC 시험체의 반응속도가 OPC 시험체보다 많이 늦는 것으로 나타났다.

한편, 시험체 내외부 온도차이는 온도응력에 가장 큰 영향을 미치는 인자로서 그 값이 클수록 온도응력이 크게 나타난다. 이 값이 OPC 시험체는 25.3°C , LHPC 시험체는 16.8°C 로써 LHPC 시험체의 온도응력이 적게 나타날 것을 예상할 수 있다.

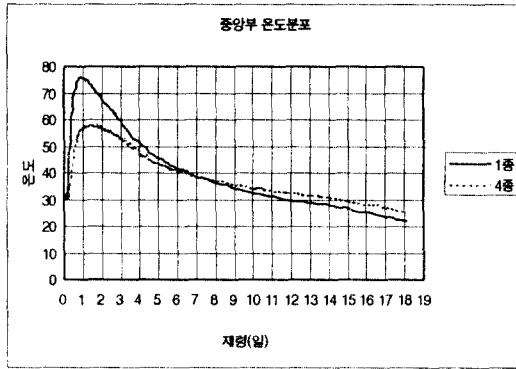


그림 4 중앙부의 온도분포 비교

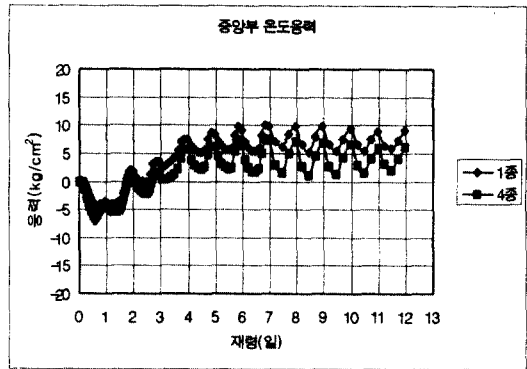


그림 5 중앙부의 온도응력분포 비교

위의 그림 5에서 보여주는 것과 같이 응력 측정 결과 최대 인장응력은 LHPC 시험체가 7.0kg/cm^2 으로 OPC 시험체의 10.8kg/cm^2 보다 약 30%정도 낮은 응력의 형태를 보여주어 온도응력의 저감에 LHPC가 매우 유리한 것을 알 수 있다.

4. 결론

저열 포틀랜드(벨라이트)시멘트 콘크리트의 특성은 다음과 같다.

- (1) 재령 3일, 7일 및 91일의 압축강도는 재령 28일의 압축강도 대비 각각 25~35, 45~55 및 155~165%의 강도발현을 하여 OPC대비 초기강도 발현율은 낮으나 장기강도 발현은 월등히 우수하다.
- (2) 활렬인장강도는 압축강도의 1/10-1/8정도 수준이고 탄성계수는 ACI 제안식인 $E = 15000 \times \sqrt{\sigma_c}$ (kg/cm^2)보다 조금 높은 수준이다.
- (3) 단위시멘트량이 500kg에서 LHPC인 경우 OPC대비 약 18°C정도의 온도저감효과가 있다.
- (4) $120 \times 360 \times 120\text{cm}$ 의 모형부재 시험결과는 다음 표에 나타난 것과 같이 최대온도는 OPC 대비 76%, 최대온도 도달시간은 145% 및 최대응력은 65%정도 수준으로 pre-cooling, pipe-cooling 등의 온도균열 억제 방법을 사용하지 않아도 동일 효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

시험체	최대온도	도달시간	내외부 온도차	최대응력
OPC	76.3°C	24시간	25.3°C	10.8kg/cm^2
LHPC	58.0°C	35시간	16.8°C	7.0kg/cm^2

참 고 문 헌

- 1) 하재담 외 5인, “저열 포틀랜드(4종) 시멘트를 사용한 고유동, 고강도콘크리트에 관한 연구”, KCI 1997년도 가을 학술발표회, 1997
- 2) 하재담 외 5인, “한국 및 일본의 Belite rich Cement를 사용한 자기충전형 콘크리트의 재료적 특성에 관한 연구”, KCI 1998년도 봄 학술발표회, 1998.
- 3) 黒田 保外 3人, 高ビーライト系セメントを用いたコンクリートの基礎的性状, セメント技術大會講演集, No. 47, pp. 152~157, 1993.
- 3) 岡村甫의 “하이퍼퍼포먼스 콘크리트”, 技報堂出版, 1993 pp. 35~58.