

저열 포틀랜드(4종)시멘트를 사용한 고유동, 고강도콘크리트에 관한 연구

A Study on the Properties of High Performance Concrete Using Low Heat Portland(Type IV) Cement

최광일 *	김기수 **	하재담 ***
Choi, Kwang Il	Kim, Ki Soo	Ha, Jae Dam
김동석 ****	이순기 *****	이동윤*****
Kim, Dong Suk	Lee, Soon Ki	Lee, Dong Yoon

ABSTRACT

In recent years, concrete construction have become larger and higher and are demanding high performance concrete with lower heat to prevent thermal cracking, far greater workability, high strength and durability. Application of low heat portland(Type IV) cement for the high performance concrete is the best solution to satisfied those requirements. Here are explained the basic properties of fresh concrete as well as hardened concrete of high performance concrete using low heat portland cement

1. 서론

최근 국내 건설시장에서는 SOC 건설사업등의 대형 프로젝트의 추진으로 건축 구조물의 대형화, 지하화, 고층화, 고강도화 등에 따라 대규모의 Mass 시공이 요구되어 온도 응력에 의한 균열이 중대한 문제로 대두되고 있다. 중용열 시멘트보다 수화발열이 낮은 저열 포틀랜드(4종)시멘트는 광물자체의 구성비를 변경하여 제조한 시멘트로 슬래그나 플라이애쉬 등의 혼화재를 사용하지 않고도 저발열화가 가능하고 장기 강도 증진이 매우 우수하며, 내구성을 함께 지니고 있어 대심도 지하연속벽등 고강도, 고유동 및 저발열 특성을 동시에 요구하는 구조물에는 최적의 결합 재이다. 일본의 경우 1990년도부터 개발하여 1997년 4월부터 JIS화되어 판매되고 있는 저열 포틀랜드(4종)시멘트는 C_3A , C_4AF 량을 적게 조정하여 혼화체가 분산효과를 최대한 발휘하기 때문에 적절한 고성능 AE감수제를 첨가할 경우, 항복점은 감소하고, 소성 점도는 높기 때문에 고유동콘크리트용으로 타시멘트보다 유리하다. 이 연구에서는 쌍용양회공업(주)에서 국내

- * 정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구실 수석연구원
- ** 정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구실 실장(공학박사)
- *** 정회원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구실 선임연구원(공학박사)
- **** 쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구실 주임연구원
- ***** 쌍용양회공업(주) 건자재영업팀장
- ***** 쌍용양회공업(주) 건자재영업팀원

최초로 저열 포틀랜드(4종)시멘트의 개발을 완료하여 KS 4종 규격에 적합한 안정된 품질의 시멘트를 사용하여 고강도, 고유동 및 저발열의 콘크리트를 개발하여 물리특성 및 내구성에 관하여 검토한 결과이다.

2. 실험개요 및 방법

2.1. 사용재료

본 실험에 사용된 재료는 당사 저열 포틀랜드(4종)시멘트, 잔골재, 굵은골재, 고성능 AE감수제, 증점제 및 배합수이다.

2.1.1. 시멘트

시멘트는 저열 포틀랜드(4종)종을 사용하였으며 비고용으로 1종을 사용하였다. 시멘트의 물리적 특성은 다음 표에 나타난 것 같다.

표1. 시멘트의 물리적 성질

구 분	용결(겉모아) (시간:분)		KS 압축강도 (kg/cm ²)				KS 수화열 (J/g)		안정도 (%)	Blaine (cm ² /g)	비중
	초결	종결	3일	7일	28일	91일	7일	28일			
1종	4:40	7:20	207	279	376	-	340	407	0.02	3200	3.15
4종	6:20	9:05	136	172	375	609	206	277	0.01	3450	3.20
KS규격(4종)	≥1:00	≤10:00	-	≥75	≥180	-	≤251	≤293	≤0.80	≥2800	-

2.1.2. 골재

잔골재는 부강산 강모래를 사용하였고 굵은골재는 최대크기가 19mm인 단양산 쇄석을 사용하였으며 특성은 다음과 같으며 특히 고유동, 고강도콘크리트의 제조에 있어서 중요한 골재의 입도분포는 아래 그림과 같다.

표2. 골재의 특성

골재	항목	산지 및 종류	비중	흡수율 (%)	단위용적중량 (kg/m ³)	조립율	마모율 (%)
잔골재		부강산 하천사	2.58	1.1	1,626	2.73	-
굵은골재		단양산 쇄석	2.81	0.7	1,571	6.74	15.2

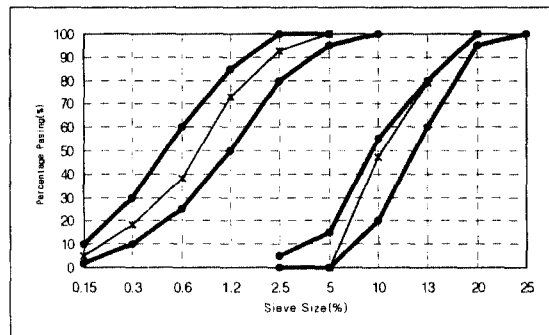


그림1. 골재의 입도분포

2.1.3. 고성능 AE감수제

본 실험에서 혼화제는 MBT(Master Builders Technologies)사와 당사의 협력제품인 폴리카본산계 고성능 AE감수제 표준형인 CONMIX SP-8N을 사용하였으며 품질특성은 다음과 같다.

표3. 고성능 AE감수제의 물리적 성질

주성분	비중	고형분 (%)	PH	염화물이온량 (%)	외관
Polycarbon 산 Ether계 복합체	1.05	18.0	6-8	0	흑색 액체

2.1.4. 증점제

분리저항성을 높이는 증점제의 선택에 있어서는 혼화제를 폴리카본산계로 사용하였기 때문에 Cellulose계가 적합성이 있으므로 독일 Bayer사의 Metyl Cellulose계인 Walocel을 사용하였으며 2%의 수용액에서 10000cps의 점도를 지닌 증점제이다.

2.2. 실험방법

본 연구에서는 대심도 지하연속벽등 고강도, 고유농 및 저발열의 특성을 동시에 요구하는 구조물에 적용을 목적으로 하여 Fresh 및 Hardened 콘크리트의 특성은 다음과 같은 규격 및 양생방법에 의해 실험 하였다.

표4. 콘크리트의 물성시험 및 시험방법

시험종목		시험조건	시험 공시체	양생방법
Fresh Concrete	• Slump	KS F 2402	-	-
	• Slump Flow	JASS 5 T-503	-	-
	• Air Content	KS F 2421	-	-
	• Flowability(V-LOT)	-	-	-
	• Bleeding	KS F 2414	-	-
Hardened Concrete	• Compressive Strength	KS F 2405	φ 10x20	표준 수중양생
	• Accelerated Curing(40°C)	JIS A 1805	φ 10x20	40°C 수중양생(1주)
	• Adiabatic Temperature Rise	-	50l	-
	• Modulus of Elasticity	KS F 2438	φ 10x20	표준 수중양생
	• Durability Factor	KS F 2437	10x10x40	표준 수중양생(2주)
	• Drying Shrinkage	KS F 2424	10x10x40	표준 수중양생(1주)
	• Accelerated Carbonation	-	φ 10x20	표준 수중양생(4주)

3. 결과분석 및 고찰

3.1. 최적배합비 도출

본 실험에서는 단위시멘트량, 단위수량, S/A, SP량, MC량 조절하여 실험한 결과 다음과 같은 배합 (LH-55 및 LH-60)을 사용한 고유농콘크리트가 위에 언급한 Fresh 및 Hardened Concrete 요구특성을 만족하였다. 비교실험을 위해 Plain(OPC)은 1종 시멘트를 사용하고 단위시멘트량은 LH-60과 동일 량인 500kg로 하였다.

표5. 배합표

Mix	$\sigma_{C,28}$ (kg/cm ²)	Gmax (mm)	W/C (%)	S/A (%)	Unit Weight(kg/m ³)					
					W	C	S	G	SP	MC
OPC	-	19	33.6	50.0	168	500	817	890	9.00	0.040
LH-55	550	19	35.4	50.0	168	475	830	904	8.55	0.040
LH-60	600	19	33.6	50.0	168	500	820	893	9.00	0.040

3.2. Fresh Concrete

3.2.1. 슬럼프, 슬럼프플로우 및 공기량과 그의 경시변화

고유동, 고강도콘크리트의 슬럼프 등을 측정하였으며 또한 다음 표에 나타난 것 같으며 슬럼프플로우가 50cm에 도달시간도 함께 측정하였다. 일본 JASS 5에 의하면 토목용 고유동콘크리트의 도달시간을 5-15초로 권장하고 있다.

표6. 슬럼프 및 그의 특성

Mix	Slump (cm)	Slump Flow (cm/cm)	Slump Flow 50cm 도달시간 (sec)	공기량 (%)
OPC	23.5	41/42	x	5.4
LH-55	26.0	62/62	6.4	3.5
LH-60	26.5	62/64	6.5	3.6

B/P에서 제조된 콘크리트는 운반을 거쳐 타설 하기까지 특성을 유지하여야 하기 때문에 슬럼프플로우 및 공기량의 손실이 적어야 한다. 다음 표에 나타난 것과 같이 LH-60인 경우 90분까지 측정 결과 슬럼프 손실이 적은 것으로 나타났으며 공기량 손실은 거의 없는 수준이다.

표7. LH-60배합의 경시변화

경과시간 (min)	Slump (cm)	Slump Flow (cm/cm)	Slump Flow 50cm 도달시간 (sec)	공기량 (%)
0	26.5	60/61	6.5	3.6
30	27.0	62/62	7.4	3.7
60	27.0	58/58	7.5	3.4
90	25.0	56/55	9.2	3.2

3.2.2. V-LOT 및 U관

고유동콘크리트의 유동성 및 충전성을 평가하기 위해 V-LOT 및 U관을 사용하였으며 유하속도 및 단차를 각각 측정함으로 충전성 및 간극통과성을 평가하였다.

충진성을 확보하기 위해서는 낙하시간이 15 ± 5 초가 되어야 하며 U관의 단차는 5cm 이내이어야 한다. 본 실험에서는 다음 표에 나타난 것 같이 90분까지 측정결과 Loss가 생기지 않았다. 즉 LH-55 및 LH-60은 90분까지 유동성을 유지하며 충전성에도 문제가 없는 것으로 나타났다.

표8. V-LOT 낙하시간 및 U관 단차의 경시변화

경과시간 (min)	LH-55		LH-60	
	낙하시간 (sec)	단차 (cm)	낙하시간 (sec)	단차 (cm)
0	16.0	1.5	11.0	0.0
30	19.0	2.0	16.2	1.0
60	17.4	1.5	14.6	1.0
90	19.2	3.0	11.5	2.0

3.2.3. 불리당량

불리당이 많은 콘크리트는 재료간의 부착력이 떨어지기 때문에 강도가 저하되며 특히 침하량이 많게

된다. 일반콘크리트에서는 0.5ml/cm²까지 허용이 되지만 JASS 5에 의하면 고유동콘크리트에 있어서는 0.3ml/cm²이하로 규정하고 있기 때문에 블리딩량을 최대한 줄이는 것이 바람직하며 아래 표에 나타난 것같이 소량의 블리딩이 발생되었다.

표9. 블리딩량

Mix	누적 블리딩량(ml/cm ²)				
	0min	30min	120min	180min	270min
OPC	0.000	0.010	0.072	0.098	0.125
LH-55	0.000	0.008	0.058	0.083	0.108
LH-60	0.000	0.007	0.052	0.078	0.095

3.3. Hardened Concrete

3.3.1. 압축강도

압축강도는 3, 7, 28일 및 91일 강도를 측정한 결과 Plain과 비교하여 볼 때 시멘트 량이 25kg/m³ 적은 LH-55의 경우에는 배합강도에 미치지 못하나 동일 시멘트 량의 경우인 LH-60은 초기강도는 떨어지나 장기강도는 높다. 즉 4종시멘트의 벨라이트의 고탍량으로 인하여 1종에 대비하여 초기강도는 불리하지만 재령 91일에서 재령 28일에 대비하여 강도 발현율이 135%나 되어 장기강도에 유리하다.

표10. 재령별 압축강도 및 압축강도 발현율

종류	Mix	재령(일)			
		3	7	28	91
압축강도 (kg/cm ²)	OPC	434	508	644	704
	LH-55	197	262	553	753
	LH-60	236	321	620	839
발현율 (%)	OPC	67	79	100	109
	LH-55	36	47	100	136
	LH-60	38	52	100	135

3.3.2. 촉진 양생 방법에 의한 28일 강도 추정식

촉진양생의 목적은 시멘트의 수화반응을 촉진하여 빠른 시일 내에 표준수중양생 콘크리트의 28일강도($\sigma_{c,28(20)}$)를 추정하는 것으로 방법은 여러 가지가 있다. 본 실험에서는 간단하고 강도발현 비율이 80% 이상 되어 오차가 적은 방법인 40°C 수중에서 7일간 양생하여 강도($\sigma_{c,7(40)}$)측정하는 방법을 사용하였으며 LH 배합의 강도측정 결과 다음과 같은 추정식을 구할 수 있었다.

$$\sigma_{c,28(20)} = 2.7 \cdot \sigma_{c,7(40)} - 690 \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad r=0.95$$

3.3.3. 단열온도상승실험

일반적으로 콘크리트의 단면이 80cm이상이면 Mass 콘크리트로 고려되며 보통 지중연속벽인 경우에 두께가 100cm 이상 되어 수화열에 의한 균열 문제를 심각히 고려하여야 한다. 따라서 이 경우에는 저발열의 특성을 지닌 4종 시멘트의 사용함으로 수화열의 문제를 최소화하여 Pre-Cooling 혹은 Pipe-Cooling등으로 인한 시간과 공사비를 줄일 뿐만 아니라 공기도 단축시킬 수 있다.

동일 배합인 OPC 와 LH-60의 단열온도상승을 비교한 결과 다음 그림에 나타난 것같이 저열 포틀랜드(4종)시멘트를 사용한 LH-60인 경우 초기의 온도가 20°C이상 낮아 온도응력으로 인한 균열문제를 최소화 할 수 있다.

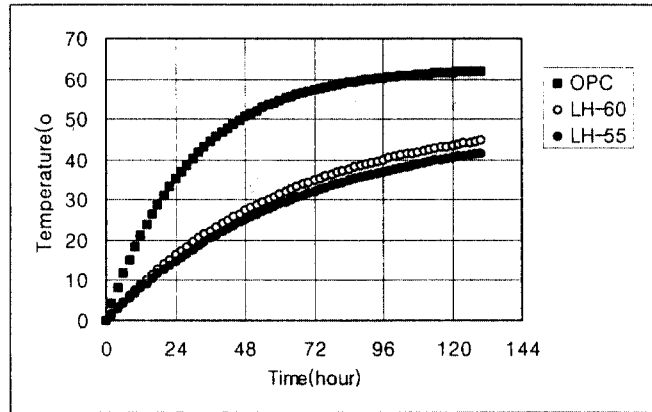


그림2. 단열온도상승실험

다음 표에 나타난 것같이 단열온도상승식 $Q(t)=K(1-e^{-\alpha t})$ 를 사용하여 최대온도(K) 및 온도상승속도(α)를 얻은 결과 저열 포틀랜드(4종)를 사용한 LH-60이 1종을 사용한 OPC에 비해 월등히 낮은 것으로 나타나 저발열의 특성을 충분히 발휘한다.

표11. 열적 특성

Mix	특 성	
	K(°C)	α
OPC	62.6	1.351
LH-55	42.3	0.901
LH-60	45.2	0.921

3.3.4. 탄성계수

일본의 JASS 5에 의하면 고유동콘크리트인 경우 재령 28일의 탄성계수가 적어도 $2 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 가 되어야 하며 아래의 표에 나타난 것같이 LH-55 및 LH-60의 경우 고강도영역이기 때문에 탄성계수가 높게 나타났다.

표12. 재령 28일의 탄성계수

Mix	$\sigma_{c,28}$ (kg/cm^2)	E_{28} ($\times 10^5 \text{ kg/cm}^2$)
OPC	644	3.2
LH-55	553	3.1
LH-60	620	3.3

3.3.5. 내구성 지수

동결융해 실험을 통하여 측정하는 내구성 지수는 일반콘크리트와 같이 고유동콘크리트에서도 60%이상이 되어야 하며 다음 그림에 나타난 것과 같이 90%이상으로 아주 양호한 것으로 나타났다.

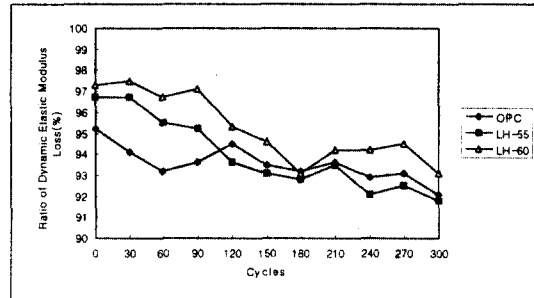


그림3. 내구성 지수 평가

3.3.6. 건조수축

굳은 콘크리트는 수분 및 온도의 변화에 민감하며 체적의 변화가 일어난다. 일반적으로 콘크리트는 타설후 기중양생에서 수분이 공기로 증발하여 콘크리트에 체적변화를 일으켜 수축하며 구속된 콘크리트에서는 이로 인하여 콘크리트에 균열이 발생한다. 즉 콘크리트의 균열의 방지하기 위해서는 건조수축이 적어야 하며 일본의 JASS 5에 의하면 고유동콘크리트의 건조수축율은 8×10^{-4} 이하로 규정하고 있다. 다음 그림에 나타난 것같이 12주까지 측정된 결과 일반 콘크리트와 같은 수준의 건조수축이 발생하였다.

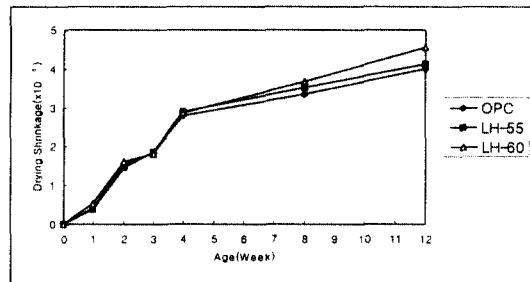


그림4. 건조수축

3.3.7. 중성화

공기중의 탄산가스(CO_2)가 콘크리트 중의 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)과 반응하여 탄산칼슘($CaCO_3$)으로 변하여 콘크리트가 알칼리성을 상실하면서 콘크리트의 표면에서부터 중성화된다. 콘크리트가 중성화 됨에 따라 수분과 탄산가스가 콘크리트내 배근된 철근에 도달하여 녹이 생기며 이 녹으로 인하여 부피 팽창이 일어나 콘크리트에 균열이 생김으로 구조물의 내구성이 감소된다.

일본의 JASS 5에 의하면 고유동콘크리트의 최대 중성화 깊이는 25mm로 정하고 있으며 본 연구의 고유동콘크리트는 탄산가스 10%, 온도 40°C 및 습도 60% 조건 내에서 4주간의 촉진 중성화 시험결과 아래 그림과 같이 이 규격을 만족하였다

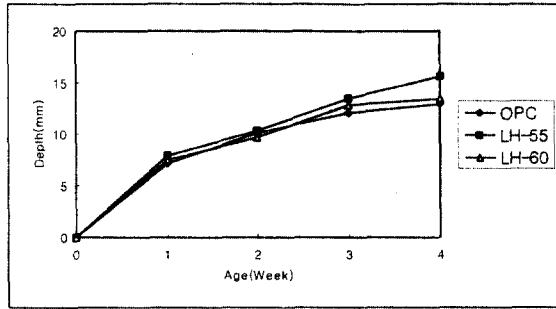


그림5. 촉진양생으로 인한 중성화 깊이

4. 결론

저열 포틀랜드(4종)시멘트를 사용하여 제조된 고유동, 고강도, 저발열콘크리트를 개발하여 특성을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Fresh Concrete에 있어서 유동성 및 충전성이 뛰어 났으며 경시변화 측정결과 90분까지 특성을 유지하여 레미콘에서 생산하여 타설까지 문제가 없을 것으로 사료된다.
- 2) Hardened Concrete의 특성도 전반적으로 좋았으며 특히 91일 재령에서의 135%이상의 압축강도 발현율은 1종 시멘트의 105-110%와 비교해 볼 때 장기적으로 지속적인 강도발현이 있음을 알 수있고 또한 단일온도상승이 최대온도치 및 온도상승속도가 1종대비 각각 30%정도 낮은 저발열의 특성을 지니고 있다.
- 3) 동결융해, 건조수축, 중성화 등의 내구성 실험을 통하여 일본 JASS 5의 규격을 만족하여 고내구력의 콘크리트로 사료되며 대심도 지하연속벽등 고강도, 고유동 및 저발열특성을 동시에 만족하여야 하는 구조물에 저열 포틀랜드(4종)시멘트를 사용한 고강도, 고유동콘크리트가 적합하다고 생각된다

5. 참고 문헌

- 1) 高ビーライト系ポルトランドセメント(セメントの性質と低熱・高流動・高强度コンクリートへの適用) 田中 光男外 3人, 콘크리트工學, Vol. 31(9), pp 18~27, 1993.
- 2) 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狀, 黒田 保外 3人, セメント技術大會講演集, No. 47, pp. 152~157, 1993.
- 3) 高ビーライト系セメントを用いた高流動コンクリートの調合と基礎物性, 原田 修輔外3人, セメント・콘크리트論文集, No. 50, pp. 630~635, 1996.
- 4) Effect of mix constituents on rheological properties of super workable concrete, T. Shindoh et al., Proceeding of the International RILEM Conference. No. 32 pp. 263~270, 1996