

저발열형 시멘트 개발에 관한 연구

Study on Low Heat Cements

최재웅^{*} 하재담^{**} 김동석^{***} 김기수^{****} 최룡^{*****}
Choi, Jae-Woong Ha, Jae-Dam Kim, Dong-Seuk Kim, Ki-Soo Choi, Long

ABSTRACT

Mass concrete structures have many critical points in service. The cracks caused by the heat of hydration is the most serious problem, so that many method to control cracks(precooling, postcooling, etc) have been applied to construction. But cooling methods take high cost and many installation and limits of field. Therefore it is useful to use the low heat hydration cements for low cost.

This paper describes the characteristics of a low heat cement mixing the ternary components of cement(portland cement, blast furnace slag, fly ash) recently developed for mass concrete, belite cement, low heat slag cement(belite base) and fly ash cement(belite base).

The objective of this paper is to study on low heat cement about initial compressive strength and hydration heat.

1. 서론

최근 들어 대형 매스구조물의 건설에 따라 저발열형 시멘트의 필요성이 대두되고 있다. 따라서 여러 가지 종류의 시멘트가 개발되어 사용되고 있다. 매스구조물에서 수화열에 의한 콘크리트 균열은 내구성을 위협할 수 있는 심각한 문제가 될 수 있다. 콘크리트의 수화발열은 시멘트 단위량과 시멘트의 수화발열량에 의해 결정된다.

대형공사에서는 공사일정 때문에 초기압축강도값이 중요한 변수가 될 수 있으며, 콘크리트의 작업성도 중요한 측면이 되어서 시멘트 단위량을 줄이는 것 만으로 수화열을 해결할 수 없다. 또한 시멘트 량 감소에 따른 초기압축강도 저하를 해결해야 하는 어려움도 있다.

본 연구에서는 저발열형시멘트라고 거론되는 3성분계시멘트, 저발열형 혼합계시멘트, 벨라이트시멘트, 벨라이트계 슬래그시멘트, 벨라이트계 플라이애쉬시멘트를 시멘트의 기본특성과 콘크리트 압축강도 및 단열온도상승측면에서 검토하였다. 본 결과로부터 매스 콘크리트 구조물에 적용가능성을 평가하여 보았다.

* 정회원, 쌍용중앙연구소 콘크리트연구실 주임연구원
** 정회원, 쌍용중앙연구소 콘크리트연구실 선임연구원
*** 정회원, 쌍용중앙연구소 콘크리트연구실 주임연구원
**** 정회원, 쌍용중앙연구소 콘크리트연구실 실장
***** 정회원, 쌍용중앙연구소 소장

2. 실험 개요

2.1 사용재료

본 실험에서는 시중에서 유통되는 KS규격의 저열 포틀랜드(4종)시멘트(약자 L로 표기), 저열 포틀랜드시멘트에 플라이애쉬를 중량비로 20% 첨가한 시멘트(약자 LF20로 표기), 저열 포틀랜드시멘트에 분말도 6,000cm²/g의 고로슬래그 미분말을 중량비로 50%, 70% 첨가한 시멘트(약자 LS50, LS70로 표기), 3성분계 저열혼합시멘트(약자 LM로 표기), 중용열 포틀랜드(2종)시멘트에 분말도 6,000cm²/g의 고로슬래그 미분말과 플라이애쉬를 첨가한 저발열형 혼합계시멘트 2종류(약자 MSF1, MSF2로 표기), 저열 포틀랜드시멘트에 분말도 6,000cm²/g의 고로슬래그 미분말과 플라이애쉬를 첨가한 저발열형 혼합계시멘트(약자 LSF로 표기) 등 8종류의 시멘트를 사용하였다. 표 1~4 에 실험에 사용한 고로슬래그 미분말 및 플라이애쉬의 화학성분, 석회석 미분말의 화학성분, 사용시멘트의 화학분석결과와 물리 시험결과를 나타내었다. 콘크리트 배합실험을 위하여 잔골재는 합천 강모래(조립율 2.50, 비중 2.58), 굵은골재는 대동 채석(조립율 7.14, 비중 2.64)을 사용하였으며, 석회석 미분말은 국내 J사의 제품 2종류(약자 LP1, LP2로 표기)를 사용하였다. 혼화제는 국내 A사의 고성능감수제 및 국내 T사의 AE제를 사용하였다.

표 1 고로 Slag 및 플라이애쉬의 화학분석 결과

구 분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI	Blaine (cm ² /g)
고로슬래그 미분말	31.5	13.2	0.49	43.8	6.04	0.20	0.49	2.65	0.5	6200
플라이애쉬	53.2	28.8	4.00	4.59	1.06	0.39	1.02	0.34	3.5	4700

표 2 석회석 미분말의 화학분석 결과

구 분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	LOI	Blaine (cm ² /g)
LP1	7.37	0.21	0.30	52.3	0.28	0.03	0.10	39.4	1860
LP2	0.52	0.14	0.11	54.8	0.90	0.02	0.09	43.4	3560

표 3 사용 시멘트의 화학분석결과

구 분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI
L	24.4	3.62	3.64	62.5	2.19	0.04	0.56	2.07	1.0
LS50	27.9	9.01	2.17	53.4	4.06	0.11	0.50	2.52	0.7
LS70	29.6	11.29	1.50	49.5	4.87	0.14	0.48	2.60	0.6
LF20	29.0	9.14	3.95	51.8	1.96	0.11	0.61	1.84	1.5
LM	31.7	15.7	2.51	42.3	3.64	0.34	0.78	1.95	1.1
MSF1	32.8	15.9	2.28	40.2	4.42	0.18	0.63	2.14	1.4
MSF2	33.9	16.9	2.77	38.1	3.90	0.21	0.70	1.82	1.7
LSF	33.0	15.4	2.23	41.5	4.03	0.16	0.57	2.22	0.9

표 4 사용 시멘트의 물리시험 결과

구 분	Blaine (cm ² /g)	응결특성		KS 몰탈 압축강도(kgf/cm ²)		
		초결(분)	종결(시간:분)	3일	7일	28일
L	3500	350	8:50	136	177	365
LS50	4950	375	9:40	133	201	324
LS70	5520	350	10:40	182	265	313
LF20	3770	410	11:00	92	122	194
LM	4100	320	9:20	93	165	322
MSF1	5240	345	10:50	162	244	304
MSF2	5040	390	10:50	127	209	303
LSF	5200	400	10:50	154	238	287

2.2 콘크리트 배합시험

콘크리트 배합조건은 최대골재치수 25mm, 단위시멘트량 285~301kg/m³, W/C=54~57, S/A=43.5 로 하여 슬럼프 11±2.5cm, 공기량을 4.0±1.0%로 맞추어 제작하였다. 콘크리트 배합을 표5에 나타내었다

표 5 콘크리트 배합

배 합 명	W/B (%)	S/A (%)	단위재료량(kg/m ³)					AD.(C×%)		Air (%)	Slump (cm)
			W	B	S		G	SP제	AE제		
					석분	모래					
L	57.0	43.5	162	285	-	812	1079	0.85	0.012	5.0	10.5
L(LP1-10)	57.0	43.5	162	285	85	731	1079	0.80	0.014	4.0	12.5
LF20	57.0	43.5	162	285	-	804	1069	0.85	0.018	4.8	13.5
LF20(LP1-10)	57.0	43.5	162	285	84	724	1069	0.85	0.02	3.2	12.0
L	54.0	43.5	163	301	-	806	1072	0.85	0.012	4.8	11.5
LS50	57.0	43.5	162	285	-	807	1072	0.85	0.016	5.0	13.5
LF20(LP1-10)	57.0	43.5	164	288	83	717	1058	1.0	0.03	5.0	12.0
LF20(LP1-15)					125	677	1058	1.1	0.04	4.4	9.0
LF20(LP1-20)					166	637	1058	1.2	0.03	3.0	9.5
LF20(LP2-10)					83	717	1058	1.1	0.04	4.5	13.0
L(LP2-10)	57.0	43.5	164	288	84	724	1069	1.0	0.025	4.6	8.5
LS50(LP2-10)					83	719	1062	0.9	0.025	4.1	13.0
LS70(LP2-10)					83	717	1059	0.9	0.025	3.8	11.0
LM(LP2-10)					82	710	1049	1.1	0.04	3.8	13.0
MSF1(LP2-10)					82	710	1049	0.8	0.04	3.8	12.5
MSF2(LP2-10)					82	709	1047	1.1	0.04	3.3	13.0
LSF(LP2-10)					82	711	1050	0.8	0.04	3.9	12.5

2.3 특성평가방법

경화콘크리트 특성평가를 위하여 콘크리트 배합후 압축강도용 공시체를 KS F 2403의 방법으로 제작하였으며, 공시체는 2일후 탈형하여 소정기간동안 수중양생을 실시하였다. 단열온도상승을 측정하기 위해서 50ℓ의 단열온도상승기에 배합된 콘크리트를 저장한후 7일까지 온도상승량을 관찰하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 시멘트 특성

시멘트 종류별 몰탈 압축강도 및 미소수화열 특성을 그림 1과 2에 나타내었다. 압축강도의 경우 3일 강도에서 LF20과 LM이 상대적으로 낮은 강도발현 특성을 나타내고, 28일 강도에서는 LF20을 제외한 7종류의 시멘트가 동등한수준의 강도를 나타내고 있다. 미소수화열 측면에서는 MSF1, MSF2, LSF가 24시간까지 5~6cal/g 수준의 낮은 수화열을 나타내고 있고, 전체적으로도 가장 낮은 수준의 수화열을 나타내고 있다. 2성분계 시멘트 중에는 LS70이 24시간까지 낮은 수화열을 나타내고 있고, 72시간이 경과한 후에는 다른 시멘트와 동등한 수준의 수화열을 나타내고 있다.

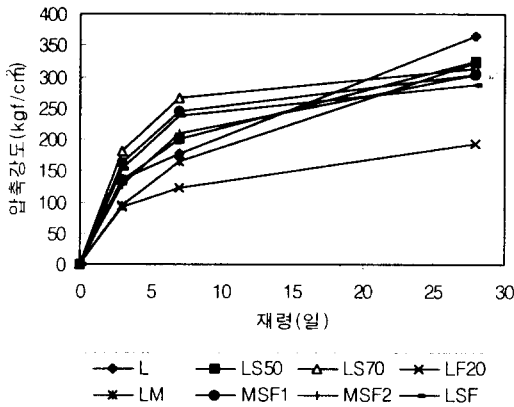


그림 1 시멘트 종류별 몰탈 압축강도

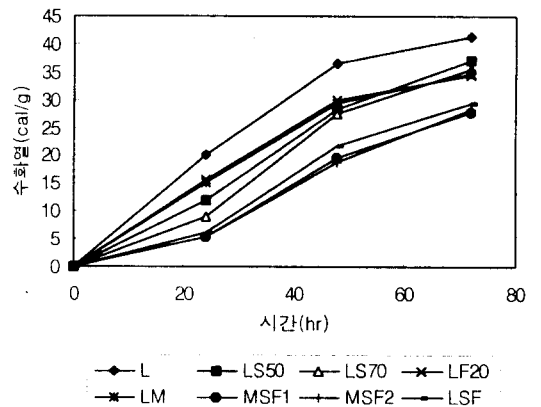


그림 2 시멘트 종류별 미소수화열

3.2 콘크리트 특성

3.2.1 압축강도

2.2 항의 표 5의 콘크리트 배합조건에 따른 콘크리트 압축강도 시험결과를 그림 3~5에 나타내었다.

저열 포틀랜드시멘트를 단독을 사용한 경우(L)보다 석회석 미분말(LP1)을 잔골재로 10% 치환한 경우에 압축강도의 증가가 나타났고, 시멘트 증가에 따른 압축강도증가효과는 크지 않았다. 플라이애쉬를 첨가한 경우(LF20)에는 낮은 수준의 압축강도를 나타내었으며, 석회석 미분말(LP1)을 잔골재로 10% 치환하여 강도증진효과를 얻었다. 분말도 6,000cm²/g의 고로슬래그 미분말을 50% 첨가한 LS50 시멘트를 사용한 경우에는 초기재령에서 강도증진효과가 석회석 미분말 첨가의 효과와 비슷하였다.

석회석 미분말의 강도특성에 미치는 영향은 석회석 미분말의 종류에 따른 차이는 없었으며, 첨가량 증가에 따라서 강도의 증진효과가 크지 않았다. 따라서, 시멘트 입도와 유사한 석회석 미분말(LP2)의

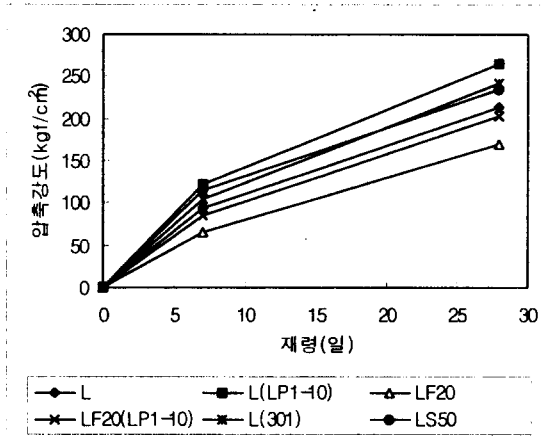


그림 3 재령에 따른 압축강도 발현

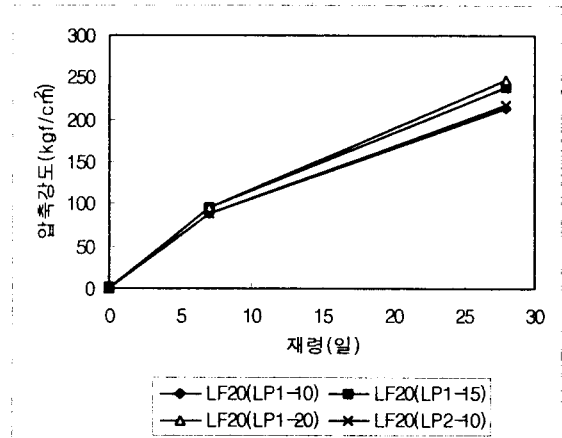


그림 4 석분첨가량에 따른 압축강도 발현

사용이 유리할 것으로 판단되며, 첨가량 증가에 따른 점성증가로 인한 작업성 저하의 문제로 첨가량은 10%가 적당하리라고 판단된다.

본 실험에서 검토하고 있는 8종류 시멘트의 콘크리트 압축강도의 경우 LS70와 LS50가 높은 수준의 강도를 초기부터 나타내고 있으며, MSF1과 LSF도 상대적 높은 수준의 강도를 나타내고 있다. 이러한 결과는 분말도 $6,000\text{cm}^2/\text{g}$ 의 고로슬래그 미분말이 초기재령에서 강도발현을 촉진시키는 작용을 하기 때문으로 판단되며, 장기재령으로 갈수록 강도기여 효과가 작아지는 경향이 있다. 일본에서 대형매스 구조물에 적용하는 혼합계시멘트는 분말도 $6,000\text{cm}^2/\text{g}$ 의 고로슬래그 미분말을 주로 사용해서 초기 강도증진에 기여하고 있는 경향과 일치하고 있다.

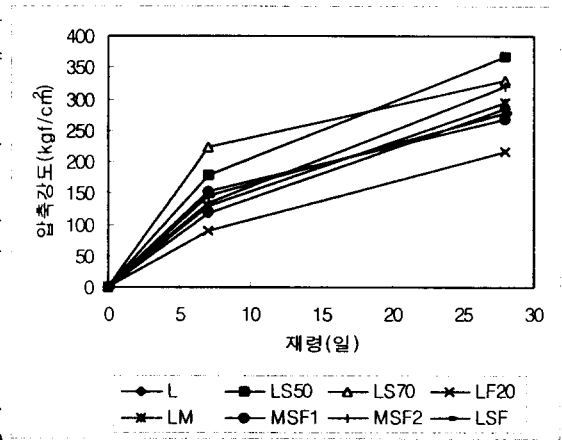


그림 5 시멘트 종류에 따른 압축강도 발현 (Binder: $288\text{kg}/\text{m}^3$, LP2-10)

3.2.2 단열온도상승

단열온도상승시험을 7일까지 실시하였으며, 그 결과를 표 6과 그림 6에 나타내었다. 시험결과 LS50은 최종단열온도상승량(K)값이 지나치게 높게 나타났고, 온도상승속도(α)도 낮아서 매스콘크리트에 적용하는 데에는 문제가 있으리라고 판단된다. 분말도 $6,000\text{cm}^2/\text{g}$ 의 고로슬래그 미분말을 사용한 MSF2 및 LS70과 플라이애쉬를 혼합한 LF20이 우수한 결과를 나타내고 있고, 저열 포틀랜드시멘트(L)도 양호한 결과를 나타내고 있다. 시멘트 종류간에 큰 차이를 나타내지 않고 있다. 분말도 $6,000\text{cm}^2/\text{g}$ 의 고로슬래그 미분말을 혼합한 슬래그시멘트는 첨가량이 70% 이상이 되어야 수화열 저감 효과가 있는 것을 확인할 수 있었다.

표 6 단열온도상승 시험결과

배합명	슬래그 Blaine	Binder량 (kg/m ³)	단열온도상승	
			K	α
L	-	288	31.0	0.32
LS50	6,000	288	43.8	0.21
LS70	6,000	288	30.7	0.32
LF20	-	288	28.1	0.31
LM	4,500	288	32.9	0.47
MSF2	6,000	288	29.1	0.34

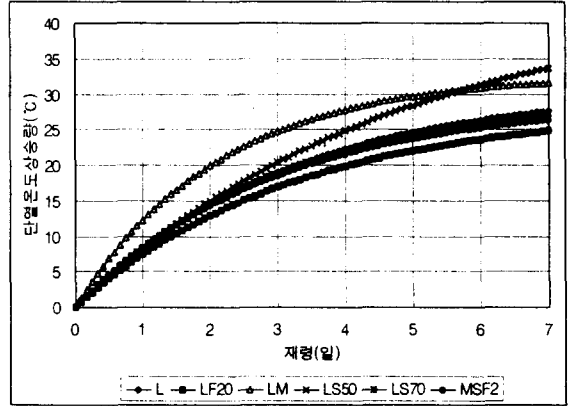


그림 6 시멘트 종류에 따른 단열온도상승

4. 결론

대형 매스구조물에 적용하기 위해서 8종류 저발열형 시멘트의 기본물성 검토 및 콘크리트 강도특성 및 단열온도상승시험을 실시한 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) LF20이 낮은 몰탈압축강도를 나타내고 있고, LF20을 제외한 7종류의 시멘트는 동등한 수준의 강도를 나타내고 있다. 중용열 포틀랜드(2종)시멘트 및 저열 포틀랜드(4종)시멘트에 분말도 6,000cm²/g 의 고로슬래그 미분말과 플라이애쉬를 혼합한 MSF1, MSF2, LSF가 전체적으로 낮은 수준의 수화열을 나타내고 있다.
- (2) 콘크리트 배합조건에서 시멘트량 감소에 따른 작업성 문제 및 초기강도저하를 해결하기 위해서 석회석 미분말을 사용하였다. 석회석 미분말의 첨가량 및 종류에 따른 차이는 없었고, 분말도가 시멘트와 유사한 석회석 미분말(LP2)을 잔골재로 10% 치환해서 작업성 개선 및 초기강도 향상이 가능하였다.
- (3) 콘크리트 공시체에서 분말도 6,000cm²/g 의 고로슬래그 미분말을 사용한 LS70과 LS50가 높은 수준의 초기강도를 나타내고 있고 MSF1과 LSF도 우수한 수준의 초기강도를 나타내고 있다. 분말도 6,000cm²/g 의 고로슬래그 미분말이 초기강도발현에 기여한다는 사실을 확인할 수 있었다.
- (4) 단열온도상승시험을 실시한 결과, LS50은 최종단열온도상승량(K)이 지나치게 높고, 온도상승속도(α)도 지나치게 낮아서 매스콘크리트에 적용에는 문제가 있으리라고 판단된다. 분말도 6,000cm²/g 의 고로슬래그 미분말을 사용한 MSF2, LS70과 플라이애쉬를 첨가한 LF20, 저열 포틀랜드시멘트(L)이 우수한 결과를 나타내고 있다.

참 고 문 헌

1. 최광일의 5인, "저열 포틀랜드(4종)시멘트를 사용한 고유동, 고강도콘크리트에 관한 연구", 한국콘크리트학회 1997년도 가을학술발표회 논문집, p422-429, Vol.9, No.2, 1997. 11.
2. 하재담의 5인, "저열 포틀랜드(벨라이트)시멘트 콘크리트의 특징", 한국콘크리트학회 1998년도 가을학술발표회 논문집, p66-71, Vol.10, No.2, 1998. 11.
3. M. Tatsumi, "The World Longest Suspension Bridge / Akashi Kaikyo Bridge Concrete Works of 1.43 Million Cubic Meter", Cement&Concrete No.552, p10-23, Feb. 1993.
4. M. Yasuda et al., "Construction of Anchorage with Highly Workable Concrete Capable of Casting 1900 Cubic Meter per Day / Akashi Kaikyo Bridge", Cement&Concrete, No.558, p60-64, Aug. 1993.