

해양에 건설되는 초대형 매스콘크리트 구조물에 적합한 시멘트·콘크리트의 물성

송용순* · 강석화 · 이근성

<동양시멘트>

1. 서 론

최근 콘크리트 구조물의 대형화 추세에 따라 시멘트의 수화열에 의한 온도균열이 콘크리트의 품질에 가장 큰 영향을 미치고 있어 시멘트에 대한 저발열화의 요망이 점차 강해지고 있으며, 이에 따라 각종 저발열형 시멘트가 개발되어 사용되고 있다. 이러한 매스 콘크리트용 저발열형 시멘트 가운데 각종 미분말 혼합재를 사용한 혼합형 저발열시멘트(low heat cement)는 이미 국내에서도 각종 매스 콘크리트 공사에 사용이 되고 있다¹⁾.

한편, 이러한 매스콘크리트 구조물중에 현수교나 사장교와 같은 장대교량의 앵커블록이나 주탑 기초 등은 구조물의 특성상 보다 수화발열량이 적은 시멘트의 사용이 요구되고, 대부분 해양이나 해안 등에 건설이 되기 때문에 해수에 대한 저항성이 큰 콘크리트의 제조가 필요하다.

이와 같은 배경하에, 본 연구에서는 기존에 사용되고 있는 저발열형 시멘트보다도 더욱 수화발열량을 줄이고, 오히려 초기강도 발현이 우수한 혼합형 특수 시멘트(이하 혼합형 초저발열시멘트로 약칭)의 물리화학적 특성을 검토하였으며, 이 시멘트를 사용한 콘크리트의 물성에 대해서도 고찰하였다.

2. 시험 개요

2.1 시험항목 및 품질기준

새롭게 개발된 혼합형 초저발열시멘트 및 콘크리트의 시험항목 및 품질기준은 Table 1과 같다.

Table 1에 나타난 시멘트 및 콘크리트의 품질기준은 현재 보편적으로 많이 알려져 있는 저발열시멘트와 콘크리트에 비하여 수화열이 낮고 초기 재령 7일 강도의 기준값이 대폭 상향된 것이 특징이다.

2.2 사용재료의 특성

혼합형 초저발열 시멘트는 보통 포틀랜드시멘트, 고로슬래그 미분말, 플라이애쉬를 수화열 및 강도 발현, 작업성 등을 고려한 최적의 비율로 혼합된 것으로 그 물리·화학적 특성은 Table 2와 같다. 또한, 콘크리트의 작업성 및 초기 강도를 확보하기 위해 고미분말의 혼합재(비중 2.7, 비표면적 3720cm²/g, 평균입경 20 μ m)를 사용하였다. 고성능 감수제는 표준형 나프탈렌계를 사용하였으며, 잔골재는 강모래(비중 2.56, F.M.=2.5)를 굵은 골재는 쇄석(비중 2.61, G_{max}=25mm)을 사용하였다.

2.3 콘크리트 배합

혼합형 초저발열 시멘트를 사용하여 장대교량의 구체 콘크리트 품질기준에 적합하도록 배합 설계한 최종 결과는 Table 3과 같다. 고미분말 혼합재는 분말도별(입경), 종류별 첨가량(잔골재

Table 1. Test item of cement and concrete

시멘트			콘크리트			
항목	품질기준	시험방법 및 조건	항목	품질기준	시험방법 및 조건	
화학적분 (%)	MgO	6 이하	압축강도 (kgf/cm ²)	7일	150 이상	KS F 2405 (Φ 10×20cm)
	SO ₃	4 이하		28일	240 이상	
수화열 (cal/g)	7일	60 이하		91일	300 이상	
	28일	70 이하	인장강도 (kgf/cm ²)	7일	20 이상	KS F 2423 (Φ 10×20cm)
	3일	55 이하		28일	35 이상	
분말도(cm ³ /g)	3500 이상	KS L 5106	단열온도	상승량	30℃ 이하	-초기온도15, 25℃
비중	2.8 이상	KS L 5110	상승	상승계수	0.4~0.8	-측정기간 : 10일
압축강도 (kgf/cm ²)	3일	70 이상	슬럼프(cm)		14 ± 2	KS F 2402
	7일	120 이상	공기량(%)		5 ± 1.5	KS F 2421
	28일	220 이상	단위용적중량(kg/m ³)		2300 이상	수중양생 7일후 표건
강열감량(%)	3 이하	KS L 5120	염소이온투과성(Q)		2500 이하	ASTM C-1202
응결	초결	60분 이상	축진증성화(nm)		20 이하	온도 30℃, 습도 60%, CO ₂ 10%
	종결	10시간 이하				
안정도(%)	0.8 이하	KS L 5107	pH		-	콘크리트 혼합직후
			응결		-	KS F 2436
			블리딩율		-	KS F 2414
			탄성계수		-	KS F 2438

Table 2. Chemical and physic properties of blended low heat cement

시멘트 종 류	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	I.g. loss	비중	블레인 cm/g	수화열 cal/g	응결(h:m)		압축강도(kgf/cm ²)		
											초결	종결	3일	7일	28일
저발열	33.8	12.9	3.2	40.6	4.2	2.6	1.4	2.84	3929	39	04:20	07:45	121	206	404
초저발열	33.6	13.7	2.4	40.2	4.7	2.8	0.8	2.82	4300	34	05:50	08:20	149	205	320

Table 3. Concrete mix design of blended low heat cement

시멘트 종 류	굵은골재 최대크기	단위수량 (kg/m ³)	W/C (%)	S/A (%)	단위재료량(kg/m ³)					
					시멘트	잔골재	굵은 골재	미분말 혼합재	고성능 감수제	공 기 연행제
저발열*	25mm	166	47.5	46.0	349	791	947	-	C×0.7%	C×0.095%
초저발열		155	55.0	42.0	282	737	1037	82	C×1.0%	C×0.052%

의 중량비로 5~15% 치환 첨가), 잔골재율에 따라 작업성 및 초기 강도 발현이 매우 양호한 것을 결정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 초저발열 시멘트의 물성

초저발열 시멘트의 분말도는 4,300cm²/g 의 고미분말로 초기 압축강도 발현에 매우 유리한 특성을 가지고 있으나, 미소수화열은 5cal/g 정도의 차이로 큰 차가 없다. 또한, 응결은 초결에서 약간 지연되는 특성이 있지만 종결에서는 현재의 저발열 시멘트와 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 몰탈 압축강도는 재령 28일 강도를 기준으로 할 때 재령 3일에서 46%, 7일에서 64% 수준으로 앞서 언급한 것처럼 고미분말 및 기존의 저발열시멘트에 대한 성능개선을 통해 초기 재령에서 현 저발열 시멘트보다 높은 강도 발현율을 나타내도록 한 것이 특징이다.

3.2 초저발열 콘크리트의 물성

혼합형 초저발열 시멘트를 사용하여 Table 3 과 같은 콘크리트 배합 조건에서 콘크리트의 물리적 특성은 다음과 같다.

3.2.1 작업성(슬럼프 및 공기량)

혼합형 초저발열 시멘트를 사용한 초저발열 콘크리트의 슬럼프 및 공기량은 나프탈렌계 고성능감수제를 시멘트 중량비 1% 사용시 각각 15cm, 5.2%로 나타나 품질기준치를 만족하였다. 또한, 콘크리트의 수화열을 저감시키기 위해 초저발열 단위 시멘트량을 최대한 적게 사용하고 고미분말 혼합재의 첨가(잔골재 중량비로 10% 치환 첨가)에 의해 단위 결합재량을 상향²⁾시킴으로써 굳지 않은 콘크리트가 거칠거나 굵은 골재의 분리 현상은 나타나지 않았다.

3.2.2 응결 및 블리딩

초저발열 콘크리트의 응결은 Fig. 1과 같이 실내온도 20±3℃에서 초결 9~11시간, 종결 16~18시간으로 다소 지연되는 특성이 있어 거푸집의 양생 방법, 탈형 시기 등 충분한 배려가 필요한 것으로 판단된다. 또한, 블리딩율은 시간에 따라 서서히 발생하여 390분에 6%정도로 나타나 콘크리트 다짐 및 마무리 작업을 양호하게 유지하는데 매우 유리할 것으로 판단된다.

3.2.3 단열온도 상승량

재령 10일에서 콘크리트의 단열온도 상승량은 초기 출발 온도 15, 25℃의 변화에 따라 각각 28.5, 29.6℃로 거의 차이가 없고 목표치인 30℃

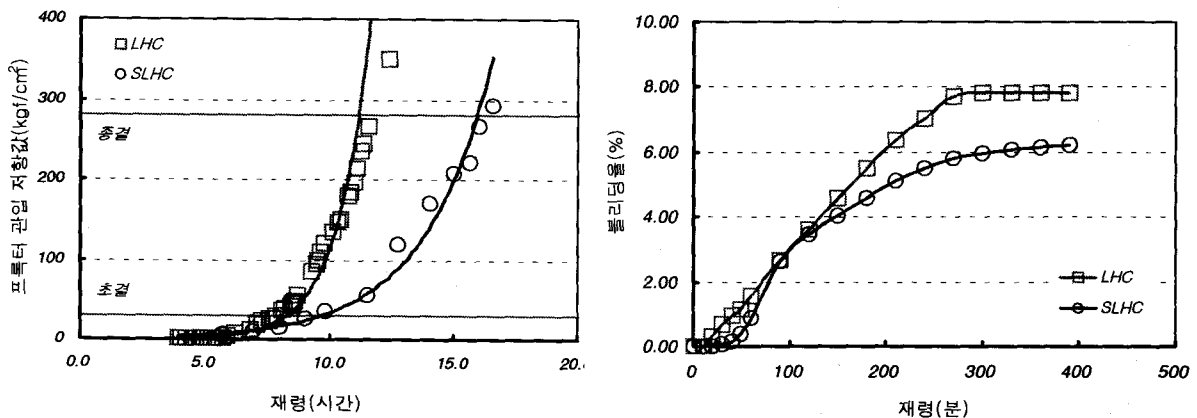


Fig. 1 Setting time and bleeding of concrete

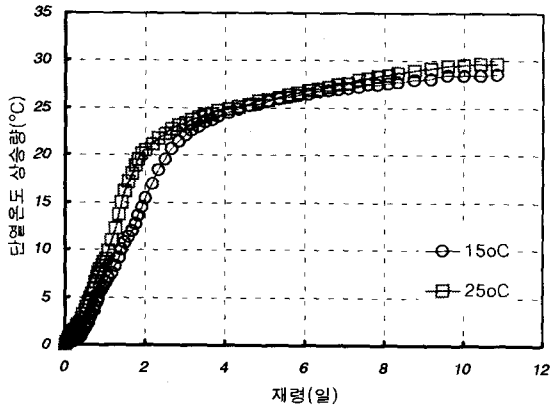


Fig. 2 Adiabatic temperature rise of concret

이하를 만족하였으며, Fig. 2에서와 같이 재령 3~4일에서 단열온도 상승량은 거의 최대치에 도달하는 특성을 보였다.

또한, 온도상승계수는 콘크리트 시방서의 $T=K(1-e^{-a(t-t_0)})$ 식을 적용하였을 때 콘크리트의 초기 출발온도에 따라 각각 0.48, 0.55로 약간 차이가 있는 것으로 나타났으나 품질 기준치를 만족하고 있다. 특히 재령 1일 이후의 온도상승곡선은 콘크리트 출발온도에 상관없이 거의 비슷한 양상을 나타내었다.

3.2.4 강도 및 탄성계수

초저발열 콘크리트의 압축강도는 Fig. 2와 같

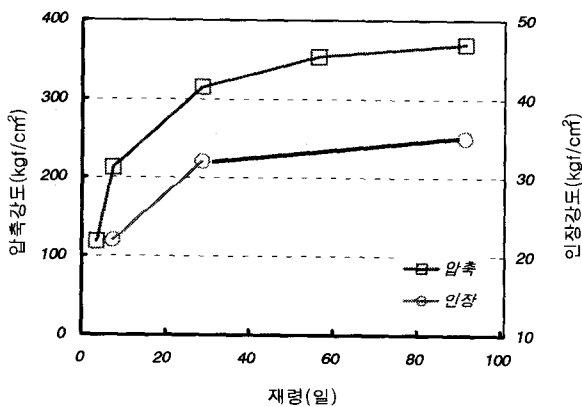


Fig. 3 Compressive strength and tensile strength of concret

이 단열온도 상승량이 낮은 것에 비하여 초기 재령 7일에서 압축강도 발현율(28일 기준 65% 수준)이 높은 것이 특징으로 Fig. 3과 같이 품질 기준치인 150kgf/cm²를 충분히 상회하였다. 초저발열 콘크리트의 인장강도는 압축강도의 1/8~1/12수준으로 재령 28일에서 압축강도가 최소 350kgf/cm²이상 만족해야 기준치에 도달할 수 있을 것으로 사료된다.

또한, 재령별 압축강도의 발현율은 Fig. 4와 같이 재령 28일을 100%로 할 때 재령 3일에서는 38%, 재령 7일 68%, 재령 14일 83%를 나타내어 현재 사용중인 저발열 콘크리트와 약간 차이가 있다. 즉, 재령 7일에서 품질 기준치(150 kgf/cm² 이상)를 만족시키기 위해 초저발열 콘크리트의 강도 발현율이 높은 것이 특징이다.

한편, 초저발열 콘크리트의 정탄성계수는 재령 28일에서 3.04×10^5 kgf/cm²로 현재 타설되고 있는 저판의 저발열 콘크리트보다 상당히 높은 것으로 나타났으며, 초저발열 콘크리트의 압축강도와 정탄성계수와 관계식은 Fig. 5처럼 $E_c = 0.15470 \sigma_{ck}^{0.5117}$ (R=98)으로 매우 양호한 상관성을 보였다.

3.2.5 염소이온투과성 및 중성화

재령 28일에서의 염소이온 침투 저항성은 통과전하량이 298 Coulombs로 기준치보다 상당히

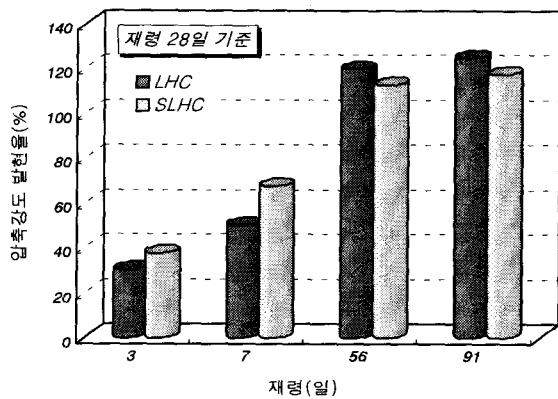


Fig. 4 Ratio of strength development of concrete

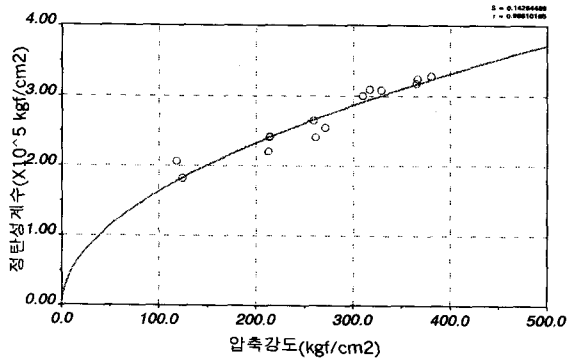


Fig. 5 Relation between compressive strength and elastic modulus of concrete

낮고 현재 타설중인 저발열 콘크리트의 1/3수준을 나타내어 현수교 앵커리지의 입지상 해수중 혹은 대기중 염분의 침투를 최대한 억제할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나, 촉진중성화 시험 결과 재령 5주에서 26mm를 나타내어 품질 기준치인 20mm보다 더 깊이 중성화가 진행되었다. 따라서, 철근의 피복두께를 고려한 중성화 방지 대책이 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 현수교나 사장교와 같은 장대 교량의 앵커블록이나 주탑 기초 등의 시공에 적합한 초저발열형 시멘트의 물리화학적 특성을 검토하였으며, 이 시멘트를 사용한 콘크리트의 물성에 대해서도 고찰하였다.

연구를 통해서 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 혼합형 초저발열 시멘트의 물리·화학적 특성은 모든 품질 기준을 만족하였다.
- (2) 혼합형 초저발열 시멘트를 사용한 초저발열 콘크리트는 초기강도 발현이 우수하면서 단열온도상승량 30℃이하의 기준치를 만족하였으며, 염소이온 투과량이 현 저발열 콘크리트와 비교시 1/3수준으로 내해수성이 매우 우수한 것으로 판단되었으나, 촉진 중성화는 기준치를 초과하여 별도의 대책이 필요한 것으로 판단되었다.

< 참 고 문 헌 >

- 1) 구교준, 송용순, 강석화, 김상철, "해양 매스콘크리트 타설을 위한 시멘트 종류별 기초시험", 한국콘크리트학회 논문집, 제10권 2호(통권 제19집), 1998. 11
- 2) 日本コンクリート工學協會, "石灰石微粉末の特性とコンクリートへの利用に関するシンポジウム", '98