

해양 매스콘크리트 타설을 위한 시멘트 종류별 기초시험

A Fundamental Study on the Several Types of Cements for Placing a Sea Massive Concrete

구 교 준* 송 용 순** 강 석 화*** 김 상 철****
Koo, Kyo Joon Song, Yong Soon Kang, Suck Hwa Kim, Sang Chel

ABSTRACT

Concrete structure placed in marine environment is subject to many different types of potential attack. Therefore the sea water resistance of cement and concrete must be considered when it is used for structure in the ocean.

For this purpose, this study was performed to investigate the properties of several types of cements for a massive concrete placed in marine environment.

1. 서 론

최근 LNG 탱크 및 해양에 건설되는 장대교량 등과 같은 대형구조물의 매스콘크리트 시공에서는 수화열 저감문제 뿐만 아니라 입지상 해양과 접한 지역에 건설된다는 점에서 해양구조물의 내구성 향상문제 등이 대두되고 있다. 이에 대한 대책의 일환으로 재료적인 측면에서 고강도, 고유동성, 고내구성 등의 특성을 지닌 재료의 고성능화에 대한 연구가 많이 진행되고 있으나 아직까지 실제 시공에 적용된 특수시멘트의 대응은 미약한 실정이다. 일례로 현재 부산 광안리 앞바다에서 진행되고 있는 광안대교 앵커블록 하부기초 구조물의 시공은 그 규모가 매우 큰 매스콘크리트 구조물이며, 따라서 수화열 발생에 따른 균열이 예상되기 때문에 가능한 한 수화발열량이 적은 시멘트의 사용이 불가피하다. 또한 해수에 직접 접촉되는 해안구조물이기 때문에 해수에 대한 저항성이 큰 콘크리트의 제조가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 상기 문제점에 대한 재료적 해결방안을 검토하고자 수화열 저감 및 해수에 대한 내구성이 요구되는 현수교 앵커블록 하부기초 구조물에 적합한 시멘트의 종류를 선정하고자 5종 시멘트, 슬래그 함유량이 각각 45, 65%인 슬래그시멘트 및 혼합형 저발열시멘트의 기초 특성과 현장에서 제조한 각종 콘크리트의 강도 및 내구성, 단열온도상승량 등의 비교실험을 실시한 결과에 대하여 고찰하였다.

*정회원, 동양중앙연구소 건설재료연구팀, 연구원

**정회원, 동양중앙연구소 건설재료연구팀, 주임연구원

***정회원, 동양중앙연구소 건설재료연구팀장, 책임연구원

****정회원, 동아건설산업(주) 광안대로지원팀, 책임연구원

2. 시험항목 및 방법

시멘트 및 콘크리트의 물성시험 항목 및 방법은 표 1과 같이 수행하였다.

표 1. 시멘트 및 콘크리트의 시험항목 및 방법

시험항목		시험방법	
시멘트	화학분석	화학성분분석	-XRF 기기분석
		미소수화열량	-Conduction Calorimeter -W/C=50%, 23℃
	물리분석	비중	-KS L 5110
		비표면적	-KS L 5106
		응결	-KS L 5103, KS L 5108
		물탈강도	-KS L 5105
콘크리트	단열온도상승시험	-Concrete Calorimeter -콘크리트 출발온도 10℃	
	축진중성화시험	-CO ₂ 농도 : 5%, 습도 : 60%, 온도 : 30℃ -축진재령 5주 (주간격) -중성화깊이, 중량	
	염소이온투과시험	-ASTM C 1202-94 -축정재령 : 28, 56일	

3. 시험결과 및 고찰

3.1 시멘트 분석결과

3.1.1 화학분석

화학분석결과 각 시멘트는 SO₃ 성분 및 강열감량 등의 KS 규정값을 모두 만족하고 있는 것으로 나타났지만, 혼합시멘트계인 슬래그시멘트와 저발열시멘트는 다량의 슬래그 치환첨가로 포틀랜드시멘트인 5종시멘트에 비하여 MgO, SiO₂ 및 Al₂O₃의 함량이 많은 반면 CaO의 함량은 적게 나타났다.

표 2. 시멘트의 화학조성

시멘트 종류	화학조성 (%)											
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Lg loss
5종 시멘트	22.9	3.0	4.4	63.1	3.2	1.9	0.6	0.1	0.2	0.2	0.1	1.1
슬래그시멘트 45%	26.7	9.6	1.6	51.3	4.9	3.4	0.6	0.1	1.0	0.4	0.1	0.02
슬래그시멘트 65%	28.4	10.5	1.4	49.1	5.1	2.7	0.6	0.2	1.2	0.4	0.1	0.4
혼합형 저발열시멘트	33.8	12.9	3.2	40.6	4.2	2.6	0.7	0.2	1.2	0.3	0.2	1.4

3.1.2 물리분석

표 3에 각 시멘트의 물리적 성질을 나타내었다. 표 3을 보면 전반적으로 혼합시멘트나 5종 시멘트는 일반적인 1종 포틀랜드시멘트에 비해 다소 응결이 늦은 것으로 나타났지만, 각 시멘트는 KS 규정의 물리적 요구성능을 모두 만족하고 있음을 알 수 있다. 또한 혼합시멘트계가 5종 포틀랜드시멘트의 경우보다 주도가 증가하는 것으로 나타났는데 이것은 시멘트의 비표면적과 관련이 있는 것으로 사료된다.

각 시멘트의 압축강도 발현특성은 초기재령에서는 5종 시멘트, 슬래그시멘트, 저발열시멘트의 순서로 강도발현 증진율이 높게 나타났지만 재령 28일에서의 강도는 거의 동등한 수준의 값을 나타내었다.

표 3. 시멘트의 물리분석결과

시멘트 종류	비중	블레인 비표면적 (cm ² /g)	주도 (%)	용결 (h:m)		압축강도 (kgf/cm ²)			
				초결	종결	3	7	28	91
5종 시멘트	3.22	3,277	22.7	04:24	07:59	208	285	393	490
슬래그시멘트 45%	3.05	4,034	25.0	02:57	06:29	168	255	484	536
슬래그시멘트 65%	2.97	4,294	27.0	02:43	07:40	136	196	377	500
혼합형 저발열시멘트	2.78	3,929	27.5	03:08	06:40	121	206	404	488

3.1.3 미소수화열량 분석

각종 시멘트의 수화발열특성을 비교하기 위하여 일정 물시멘트비(W/C=50%), 온도 23℃의 조건에서 수화가 가장 활발한 기간인 72시간까지의 수화발열량을 미소열량계(Conduction Calorimeter)를 이용하여 측정하였다.

그림 1에서와 같이 72시간까지의 최종적인 총 수화발열량은 5종>슬래그 45%>저발열=슬래그 65%의 순서로 크게 나타났고 저발열시멘트와 슬래그 65%가 포함된 슬래그시멘트는 5종 시멘트에 비해 약 60% 정도의 발열량만을 나타내었다.

그림 1의 각 시간별로 발생하는 미소열량을 비교하면 5종, 슬래그와 저발열이 서로 다른 형태의 발열곡선을 나타내고 있다. 5종의 수화발열 곡선의 형태는 매우 날카로운 피크형태의 지점이 나타나는 반면 슬래그와 저발열의 경우는 완만한 언덕형태(대략 2지점에 피크점 존재)로서 포틀랜드시멘트계와 혼합시멘트계의 수화발열 특성이 뚜렷이 구분됨을 알 수 있다.

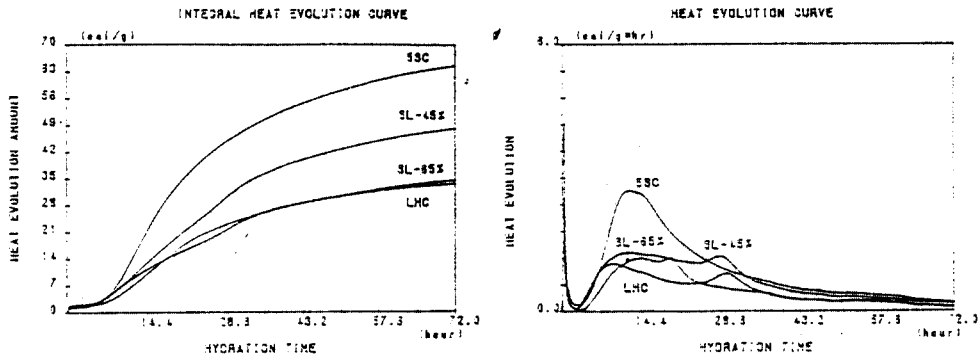


그림 1. 시멘트 종류별 미소수화열 측정결과

3.2 콘크리트 시험결과

본 시험에 사용된 콘크리트 배합은 25-240-15 레미콘 규격을 만족하는 것으로 다음 표 4와 같으며, 물성시험에 사용된 콘크리트 공시체는 현장에서 제조된 것을 사용하였다.

3.2.1 콘크리트 단열온도상승실험

콘크리트 단열온도상승실험은 용량 50리터의 강제 원통 용기중에 콘크리트를 채우고 시료 용기의 주위 온도를 콘크리트 내부온도와 같도록 변화시켜 콘크리트가 완전 단열상태가 되도록 한 조건에서 수화열에 의한 콘크리트의 온도상승을 측정하는 것으로 시멘트 종류에 따른 콘크리트의 단열온도상승 비교 실험을 행하였다.

표 4. 각종 시멘트를 사용한 콘크리트 배합표

시멘트 종류	굵은골재 최대크기	단위 수량 (kg/m ³)	W/C (%)	S/A (%)	단위재료량 (kg/m ³)				
					시멘트	굵은 골재	잔골재	고성능감수제* (C×%)	공기연행제** (C×%)
5종 시멘트	25mm	162	47.6	48.5	340	929	858	0.75	0.06
슬래그시멘트 45%		160	47.5	49.0	337	918	866	0.7	0.08
슬래그시멘트 65%		174	47.5	45.0	366	953	765	0.8	0.09
혼합형 저발열시멘트		166	47.5	46.0	349	947	791	0.7	0.095

* 나프탈렌계 고성능감수제 ** 옴이온계

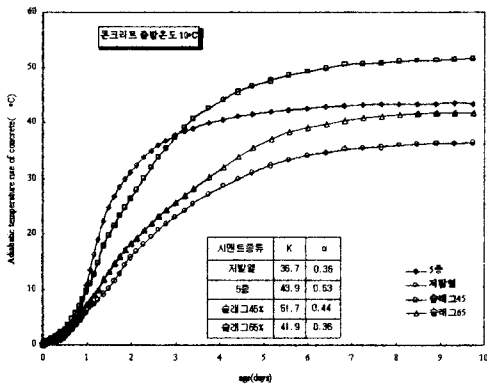


그림 2. 콘크리트의 단열온도상승시험결과

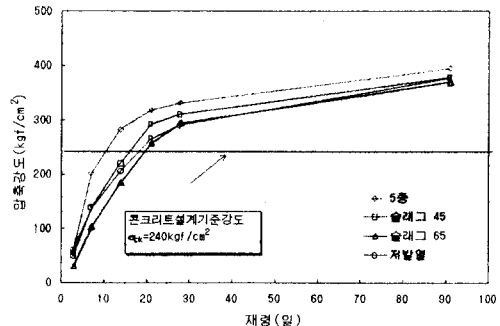
콘크리트의 초기 출발온도는 $10 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 하였으며, 측정기간은 10일로 하였다. 각 시멘트를 사용한 콘크리트의 단열온도상승시험결과는 그림 2와 같다. 그림 2에서와 같이 5종 시멘트와 저발열시멘트의 시험결과를 보면 최고단열온도상승량 및 수화발열속도는 각각 7.2°C , 0.3 정도 차이가 났으며, 슬래그시멘트에 비해 최고단열온도상승량 및 수화발열속도 또한 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 저발열시멘트를 사용하여 콘크리트를 타설할 경우 온도 균열의 제어에 매우 효과적일 것으로 판단되었다.

3.2.2 압축강도

타설현장에서 제조하여 1일간 보온양생후 수중양생을 실시한 공시체의 압축강도는 표 5 및 그림 3과 같다. 그림 3에서와 같이 혼합계 시멘트인 슬래그시멘트와 저발열시멘트는 재령 7일까지 강도발현이 적게 나타나고 있으나, 혼화제의 잠재수경성에 의하여 재령 28일 이후의 강도발현 증진율이 5종 시멘트에 비하여 커지는 것을 알 수 있었다. 또한 시멘트 종류에 상관없이 콘크리트의 재령 28일 강도는 설계기준강도인 $\sigma_{ck} = 240 \text{ kgf/cm}^2$ 를 만족하고 있어, 사용상에는 전혀 문제가 없는 것으로 판단된다.

표 5. 콘크리트 압축강도 측정결과

시멘트 종류	압축강도 (kgf/cm ²)					
	3일	7일	14일	21일	28일	91일
5종 시멘트	58	204	283	320	332	396
	17	61	85	96	100	119
슬래그시멘트 45%	50	140	222	294	311	380
	16	45	71	95	100	122
슬래그시멘트 65%	29	103	186	257	295	371
	10	35	63	87	100	126
혼합형 저발열시멘트	61	137	206	268	291	378
	21	47	71	92	100	130

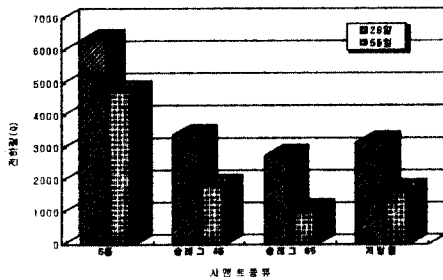


(주) 28일 압축강도 기준 각 재령에서의 강도발현율 그림 3. 시멘트 종류별 콘크리트의 압축강도

3.2.3 염소이온침투시험

광안대교 모의부재 타설시 채취한 공시체의 재령 28일 및 56일 공시체에 대한 염소이온 침투시험 결과를 그림 4에 나타내었다. 염소이온 투과시험법은 ASTM C 1202-94(Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration)에 따라 통과전하량을 구하였다.

통과전하량을 비교하면 5종 시멘트의 경우가 다른 혼합형 시멘트에 비하여 2배 정도 높게 나타나고 있으며 혼합시멘트중에서도 슬래그 65% 함유 시멘트의 경우가 가장 낮은 전하량을 나타내었다. 이는 5종 내황산염시멘트가 염소이온의 침투, 확산을 억제하는 효과가 혼합시멘트계에 비하여 현저히 떨어진다는 사실과 일치하고 있으며, 슬래그 미분말의 사용이 염소이온 침투 저항성을 향상시키는 유효한 방법이라는 것을 확인시켜주고 있다.



통과 전하량 (coulombs)	염소이온 투과성
4000 이상	높다
2000-4000	보통
1000-2000	낮음
100-1000	매우 낮음
100 미만	무시할 만함

그림 4. 시멘트 종류별 콘크리트 염소이온침투시험결과

3.2.4 촉진중성화시험

현장타설시 제조한 콘크리트 공시체에 대한 촉진중성화시험결과는 그림 5와 같다. 혼합시멘트계인 저발열시멘트와 슬래그시멘트의 중성화깊이는 재령 4주에서 5종 포틀랜드시멘트에 비하여 약간 큰 것으로 나타났지만, 현재 광안대교 앵커블록 하부기초의 철근 피복두께는 25cm로 설계되어 있는 점을 감안할 때 네 종류 시멘트 모두 콘크리트의 중성화에 의한 내구성 저하는 그다지 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

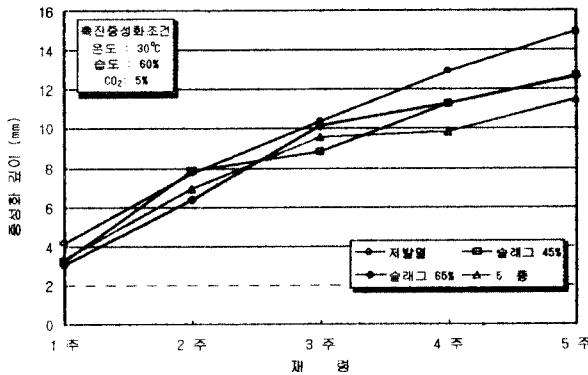


그림 5. 촉진중성화 깊이 측정결과

그러나, 혼화제가 다량으로 사용된 혼합시멘트계를 사용할 경우 콘크리트 자체의 품질이 가능한 한 치밀, 견고하도록 물시멘트비, 공기량, 기공량이 낮게 되도록 하거나, 충분한 초기양생과 소요부분의 내구성을 감안하여 콘크리트의 피복두께를 크게 하고 타설시에는 몰탈의 누출, 콘크리트의 분리, 피복 콘크리트의 결손이 생기지 않도록 거꾸집의 제작 및 다짐방법 등을 고려해야 할 것으로 사료된다.

5. 결론

광안대교 앵커블록 하부기초는 해수에 접촉되는 매스콘크리트 구조물로 시멘트의 수화열에 의한 온도균열과 해수에 대한 저항성이 우수한 시멘트의 사용이 필요하다. 광안대교 앵커블록 하부기초에 적절한 시멘트의 선정을 위해서 시멘트의 물리·화학분석, 콘크리트의 단열온도상승시험, 현장 타설 콘크리트 공시체의 물성을 평가한 결과는 다음과 같다.

- (1) 시멘트의 화학분석 결과 각 시멘트는 SO_3 성분 및 강열감량 등의 KS 규정값을 모두 만족하였으며, 물리분석 결과로는 전반적으로 혼합시멘트나 5종 시멘트 모두 1종에 비해 응결이 늦게 나타났으나 KS 규정의 물리적 요구성능을 모두 만족하고 있는 것으로 나타났다. 또한 몰탈 압축강도 발현특성은 초기재령에서 5종>슬래그>저발열의 순서로 강도가 높게 나타났으나, 재령 28일에서는 슬래그시멘트 45%가 가장 높게 나타난 반면 타 시멘트는 거의 동등한 수준을 보였다.
- (2) W/C=50%, 온도 23℃ 조건에서 72시간까지의 수화발열량 측정결과 5종>슬래그 45%>저발열=슬래그 65% 순으로 크게 나타났으며, 5종 포틀랜드시멘트에 비하여 혼합시멘트계가 약 60~70% 정도의 미소수화발열량을 나타내었다.
- (3) 콘크리트의 압축강도는 혼합계 시멘트인 슬래그시멘트와 저발열시멘트가 초기재령에서는 강도발현이 적게 나타났으나, 혼화재의 잠재수경성에 의하여 재령 28일 이후로 강도발현 증진율이 5종 시멘트에 비하여 커지는 것으로 나타났다. 또한 시멘트 종류에 상관없이 콘크리트의 재령 28일 강도는 설계기준강도인 $\sigma_{ck}=240\text{kgf/cm}^2$ 를 만족하였다.
- (4) 단열온도상승시험결과 저발열시멘트와 5종 시멘트의 최고단열온도상승량은 저발열시멘트가 5종 시멘트보다 약 7.2℃ 정도 낮고 수화발열속도도 낮아, 저발열시멘트를 사용하여 콘크리트를 타설할 경우 온도균열의 제어에 매우 효과적일 것으로 판단되었다.
- (5) 염소이온침투시험결과 5종 시멘트의 경우가 다른 혼합형 시멘트에 비하여 통과전하량이 2배 정도 높게 나타나고 있어, 5종 내황산염시멘트를 해안구조물에 사용하는 것은 충분히 검토해야 할 것으로 판단되며, 촉진중성화시험결과 혼합시멘트계인 저발열시멘트와 슬래그시멘트의 중성화깊이는 재령 4주에서 5종 포틀랜드시멘트에 비하여 약간 큰 것으로 나타났다.

참고문헌

1. X. Wu, D.M. Roy and C.A. Langton, "Early Stage Hydration of Slag Cement", CEMENT and CONCRETE RESEARCH, Vol. 13, pp.277-286, 1983.
2. 國府勝郎, 村田芳樹, 阿部立實, "高爐スラグ微分末を用いたコンクリートの斷熱溫度上昇", 高爐スラグ微分末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム, 土木學會, 1987. 3
3. 依田彰彦, "中性化・炭酸化", セメント・コンクリート NO.492, pp.38~40, Feb.1988
4. 岸谷孝一, 西澤紀昭, "コンクリート構造物の耐久性シリーズ-中性化", pp.21~40, 1986.4