

혼합형 저발열 시멘트의 특성과 콘크리트 기초 물성에 관한 연구

A Study on the Basic Properties of Concrete
and Characteristics of Blended Low Heat Cement



송용순*

Song, Yong Soon



한정호**

Han, Chung Ho



강석화***

Kang, Suck Hwa



김상철****

Kim, Sang Chel

ABSTRACT

In study on the basic properties of concrete and characteristics of blended low heat cement that has relatively lower than heat of ordinary portland cement has been performed to test the workability of fresh concrete as well as heat of hydration and compressive strength, elastic modulus, drying shrinkage, freeze-thawing resistance, resistance of chloride ion penetration, carbonation of concrete using blended low heat cement to compare with concretes using other several types of cement, namely ordinary portland cement, sulphate resisting portland cement, blast furnace slag cement.

As the results of this study, it was proved that most of the properties of concrete using each cement were similar, but there were some differences in bleeding, setting time, heat of hydration, resistance of chloride ion penetration and carbonation. Specially, the hydration heat of concrete with blended low heat cement is relatively lower than that of the concrete containing ordinary portland cement, sulphate resisting portland cement, blast furnace slag cement. And the passed charge(coulomb) to resist

- * 정회원, 동양중앙연구소 건설재료연구팀 주임연구원
- ** 정회원, 동양중앙연구소 건설재료연구팀 선임연구원
- *** 정회원, 동양중앙연구소 건설재료연구팀장 책임연구원
- **** 정회원, 동아건설산업(주) 광안대교지원팀 책임연구원

- 본 논문에 대한 토의를 1999년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 1999년 2월호에 토의 회답을 게재하겠습니다.

chloride ion penetration of concrete with blended low heat cement is 5 times lower than that of the ordinary portland cement concrete, accordingly blended low heat cement expects that it is suitable to cement for marine structures.

Keywords : Blended Low Heat Cement, Heat of Hydration, Chemical Resistance, Adiabatic Temperature Rise.

1. 서 론

최근 사회간접자본(SOC)에 대한 투자요구가 증대되어 구조물의 거대화, 고층화 추세가 가속화됨에 따라 거대 해양구조물, 장대교량의 교각·교대 등의 하부구조물, LNG 저장 탱크 등 매스콘 크리트 부재내부에 시멘트의 수화반응에 의한 반응열이 열응력을 증대시켜 균열을 발생시키는 주요원인이 되고 있다.

따라서, 콘크리트의 열응력에 의한 온도균열 발생을 어떻게 방지할 수 있는가가 콘크리트의 고내구성과 연결된 매우 중요한 문제로써 수화열이 완만하게 발생되고 또한 총 수화발열량이 적은 특수 시멘트의 개발이 요구되었다. 이러한 수화열 저감을 위하여 선진외국에서는 1980년대에 들어 수화 발열량이 매우 낮은 초저발열형 시멘트로써 보통 포틀랜드시멘트에 고로슬래그 미분말과 플라이애쉬를 혼입한 이른바 3성분계 저발열시멘트(이하 저발열시멘트로 약칭)의 활발한 개발이 행해져 일본의 本洲와 四國을 연결하는 장대교량^(1,2)과 LNG 저장탱크⁽³⁾ 등의 매스콘크리트에 사용되기 시작했다.

한편, 최근 국내에서도 포틀랜드시멘트에 고로슬래그와 플라이애쉬 등의 포졸란 물질이 혼합된 저발열시멘트가 개발되어 장대 교량의 주탑기초, LNG 저장탱크 등 실구조물에서의 적용이 계속 검토되고 있다.

이에 본 연구에서는 이러한 저발열 시멘트의 특성 및 저발열 시멘트를 사용한 콘크리트(이하 저발열 콘크리트로 약칭)의 화학적 및 물리적 특성을 파악하기 위하여 현재 국내에서 많이 시판되고 있는 3가지 시멘트(1종 보통포틀랜드 시멘트, 5종 내황산염 시멘트, 고로슬래그 시멘트)와 동일한 조건에서 콘크리트를 제조하여 콘크리트의 물성 등을 비교 분석하였다.

Table 1 Item and method of test

	test item	specification and test method
cement mortar	chemical composition	-natural quantitative analysis(XRF)
	physical properties	-specific gravity, blaine, consistency, setting time (KS L 5110, 5106, 5102) -compressive strength (KS L 5105)
	heat evolution	-10, 20, 30, 40°C (W/C=50%)
concrete	chemical resistance	-sea water (ASTM D 1141), 10% CaCl ₂ , 10% Na ₂ SO ₄ , 10% MgCl ₂ -immersed after water curing for 7days
	workability	-slump(KS F 2402), air(KS F 2421) -slump=12~18cm, air=4.5±1.5%
	bleeding/setting time	-KS F 2411, 2436
	adiabatic temperature rise	-cement content 300, 500kg/m ³ -start temperature 20°C
- $\sigma_{ck} = 210 \text{ kgf/cm}^2$ - slump 15±2.5cm - air 4.5±1.5%	strength/elastic modulus	-KS F 2405, 2423, ASTM C 469-65 -size of specimen : $\phi 10 \times 20 \text{cm}$
	drying shrinkage	-KS F 2424 -20±10°C, RH 60±10% -size of specimen : 10×10×40cm
	freeze and thawing resistance	-KS F 2456 -after water curing for 28days -size of specimen : 10×10×40cm
	chloride ion penetration resistance	-ASTM C 1202-91, AASHTO T 259 -size of specimen : $\phi 10 \times 5 \text{cm}$
	carbonation	-40°C, RH 60%, CO ₂ 10% -after water curing for 28days

2. 실험 개요 및 사용 재료

2.1 실험개요

본 실험에 사용된 시멘트의 종류는 포틀랜드시멘트계로 1종과 5종시멘트, 혼합시멘트계에서 슬래그함유량이 45%인 슬래그시멘트, 그리고 1종시멘트에 슬래그와 플라이애쉬가 적절히 혼합된 저발열시멘트를 사용하였다. 각종 시멘트에 대한 물리·화학분석과 콘크리트 물성 실험 항목 및 방법은 Table 1과 같다.

2.2 사용재료

2.2.1 시멘트

각 시멘트에 대하여 XRF(X-Ray Fluorescence Spectrometer)분석을 통해서 얻어진 화학분석 결과는 Table 2와 같으며, 물리적 특성은 Table 3과 같다.

Table 2 Chemical properties of cement

type of cement	composition(%)							C ₂ S	C ₃ S	C ₃ A	C ₄ AF
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	I.g. loss				
Type I	20.4	5.1	3.0	61.6	4.7	2.4	1.4	50	21	8.4	9.1
Type V	22.5	3.5	4.7	62.3	2.6	1.9	1.2	47	29	1.3	14.3
slag	25.0	8.3	2.0	53.8	5.0	3.1	0.7	-	-	-	-
low heat	35.3	12.2	3.3	39.3	4.4	2.3	1.1	-	-	-	-

Table 3 Physical properties of cement

type of cement	specific gravity	blaine (cm ² /g)	consistency (%)	setting time (hr:min)		compressive strength(kgf/cm ²)			
				initial	final	3	7	28	91
Type I	3.15	3438	24.5	03:08	05:18	242	343	401	444
Type V	3.21	3492	23.5	03:48	08:13	230	309	397	506
slag	3.01	3928	25.0	03:40	07:30	167	264	399	535
low heat	2.77	4020	27.0	03:27	07:37	83	168	339	479

2.2.2 골재

콘크리트 물성시험에 사용한 골재의 물리적 성질은 Table 4와 같이 굵은골재는 쇠석골재를, 잔골재는 해사를 세척한 것을 사용하였다.

2.2.3 혼화제

콘크리트 제조를 위해 사용한 혼화제의 물리적

특성은 Table 5와 같다.

Table 4 Physical properties of aggregates

item	type of aggregate	fine aggregate	coarse aggregate (25mm)
specific gravity		2.59	2.63
absorption(%)		1.27	0.74
unit weight(kg/m ³)		1537	1469
void volume(%)		40.7	44.4
fineness modulus		2.64	6.83
NO.4 sieve	retained(%)	1.82	-
	passing(%)	-	1.43

Table 5 Physical properties of admixtures

item	type of admixture	air-entraining agent	water reducer
principal ingredient		fatty acid salts	lignin
specific gravity		1.050±0.002	1.185±0.005
pH		10.0±1.0	6.0±1.0
solution (%)		13.0±1.5	38.0±1.0
viscosity(20℃)		under 10	90±10

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시멘트의 특성

3.1.1 화학적 특성

저발열시멘트의 화학성분은 Table 2와 같이 포졸란계 혼화제 첨가의 영향으로 실리카(SiO₂)와 알루미나(Al₂O₃)의 함량이 높은 반면에 석회(CaO) 성분이 포틀랜드시멘트에 비해 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 아울러 각 시멘트는 SO₃ 성분 및 강열감량 등의 KS 규정값을 모두 만족하고 있는 것으로 나타났다. 또한 KS L 5201의 방법에 따라 계산된 시멘트의 구성광물은 5종시멘트의 경우 C₃S 및 C₃A가 1종시멘트에 비하여 적은 반면 C₂S, C₄AF비율은 크게 나타나 수화발열 및 강도 발현 특성이 다르게 나타날 것으로 판단된다.

3.1.2 물리적 특성

Table 3에 각 시멘트의 물리적 성질을 나타내었다. 저발열시멘트는 다른 시멘트와 비교하여 상대적으로 비중은 낮고 분말도(비표면적)가 크며,

1종 시멘트와 비교하여 응결이 다소 늦은 것으로 나타났다. 저발열시멘트나 슬래그시멘트의 응결이 1종에 비해 늦은 것은 혼화재 첨가에 의한 영향으로 판단되며, 5종의 경우에는 C₃A의 양이 1종에 비해 상대적으로 적게 포함되어 있기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 각 시멘트는 KS 규정의 물리적 요구성능을 모두 만족하고 있음을 알 수 있다. 또한 혼합형 시멘트쪽이 포틀랜드시멘트의 경우보다 동일한 반죽질기에 필요한 단위수량은 증가하는 것으로 나타났는데 이것은 시멘트의 비표면적과 관련이 있는 것으로 생각된다. 다시 말해서, 시멘트의 비표면적이 크게 되면 물과의 접촉면적이 커지게 되기 때문에 동일한 반죽질기를 나타내는데 필요한 단위수량이 증가하게 된다. 특히 저발열시멘트의 경우가 가장 큰 단위수량을 나타내고 있는데 비표면적이 다른 시멘트에 비해 가장 큰 값을 나타내고 있는 것파도 일치한다고 할 수 있다.

각 시멘트의 압축강도 발현특성은 초기재령에서는 1종>5종>슬래그>저발열의 순서로 강도발현률이 나타났으나 91일 장기재령에서는 초기재령과는 정반대의 순서로 강도발현률을 나타내었다. 즉 저발열시멘트와 슬래그시멘트의 경우는 잠재수경성 혼화재의 영향으로 장기에 걸쳐 수화반응을 일으키기 때문에 28일 이후의 장기재령에서 강도발현률이 매우 커지는 것으로 파악되었다.

3.1.3 수화발열특성

저발열시멘트의 수화발열특성을 비교하기 위하여 일정한 물시멘트비(W/C=50%)에서 온도를 변화시켜 수화가 가장 활발한 기간인 72시간까지의 수화발열량을 미소열량계(Conduction Calorimeter)를 이용하여 측정하였다.

Fig. 1과 같이 단위질량당 각 시간별로 발생되는 미소열량을 비교하면 1종과 5종, 슬래그와 저발열이 서로 다른 형태의 발열 곡선을 나타내고 있다. 1종과 5종의 수화발열 곡선의 형태는 10℃를 제외한 나머지 20, 30, 40℃의 반응조건에서는 매우 날카로운 피크형태의 곡선형태를 나타내는 반면에 슬래그와 저발열의 경우는 완만한 언덕형태(대략 2지점에 피크점이 있는)를 나타내 포틀랜드시멘트계와 혼합시멘트계의 수화발열 특

성이 뚜렷이 구분됨을 알 수 있다. 특히 5종시멘트의 경우 수화초기에는 거의 발열량이 없는 것으로 감지되고 있는데 이는 시멘트의 초기수화반응에 가장 큰 영향을 미치는 C₃A량이 상당히 작은 것에 기인한 것으로 판단된다.⁽⁴⁾ 이것은 시멘트의 응결 시험결과에서도 알 수 있듯이 5종시멘트가 1종에 비해 응결이 늦어지는 것과 관련이 있으며 강도발현도 1종에 비해 늦게 나타난 실험결과와도 상응하는 결과라고 할 수 있다.

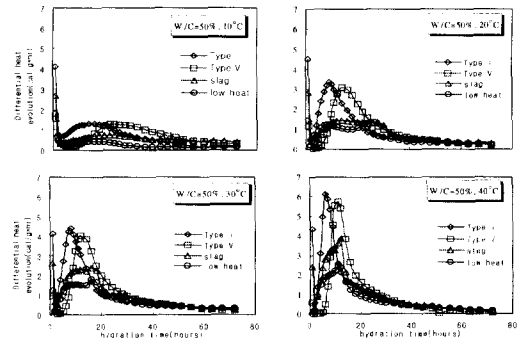


Fig. 1 Differential heat evolution of cements with temperature condition

또한, Fig. 2에 나타난 바와 같이 수화발열속도를 72시간까지 적산시킨 총 수화발열량을 비교해 보면 1종>5종>슬래그>저발열의 순서로 나타났으며, 특히 저발열시멘트의 적산 수화발열량은 1종에 비해 약 60% 정도의 발열량만을 나타내었다. 온도조건에 따른 수화발열 특성을 비교한 결과 예측대로 4종류 시멘트 모두 반응온도가 상승할수록 수화발열량이 증가하는 것으로 나타났다. 특히 10℃에서 반응시킨 경우에는 발열량이 극히 낮게 나타나고 있는데 이는 시멘트의 수화반응이 주변 온도에 매우 크게 관계됨을 알 수 있다. 시멘트의 종류별로는 저발열시멘트의 경우 온도조건에 의한 차이가 다른 시멘트의 경우보다 작게 수화발열량이 상승하는 것으로 나타났다.

3.1.4 내화학적

일반적으로 슬래그나 플라이애쉬와 같은 혼화재의 첨가는 포졸란 반응에 의한 콘크리트 조직의 치밀화와 침식성 물질과 반응하는 시멘트 수화물(Ca(OH)₂)의 저감효과에 의하여 여러 종

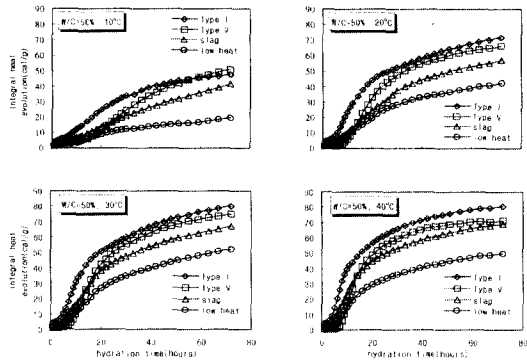


Fig. 2 Integral heat evolution of cements with temperature condition

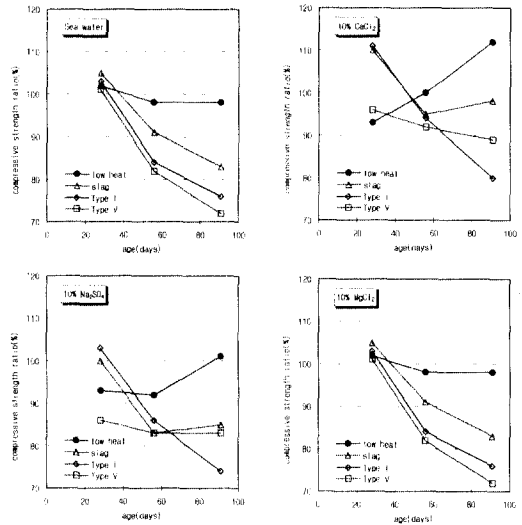
류의 침식성 물질에 대해서 저항성이 큰 것으로 알려져 있다.⁽⁵⁾ 따라서, 본 실험에서는 기존의 내해수성 및 침식성 물질에 저항성이 높은 것으로 알려진 포틀랜드시멘트와 혼합시멘트계에 대해서 Table 6과 같은 방법으로 화학물질의 종류에 따른 시멘트의 내화학성을 검토하였다.

Table 6 Experimental method of mortar to chemical resistance

W/C (%)	cement:sand (weight)	method of curing
48.5	1:2.45	① 23°C, 95%RH curing for 1day ② water curing for 6days ③ immerse in chemical solutions

표준수중양생 7일후에 각 화학용액에 침지하여 침지 재량별 모르타르의 압축강도를 수중양생 압축강도와 비교한 결과는 Fig. 3과 같다. 1종시멘트를 사용한 모르타르는 화학용액의 종류에 상관없이 전반적으로 압축강도가 저하하는 반면 저발열시멘트의 경우는 수화생성물인 $Ca(OH)_2$ 와 혼화재의 포졸란 반응에 의하여 미세한 수화구조물을 형성하기 때문에 황산염, 염화물 등 화학용액의 침식을 억제하고 수중양생 강도와 거의 동등한 장기강도 증진현상을 보였다. 특히 2배농도의 인공해수에 침지한 경우는 포졸란 반응에 의해 생성된 수화물의 미세한 구조형성과 수화물의 이온 흡착으로 이온의 침투를 억제^(6,7)하기 때문에 다른 시멘트와 비교하여 강도저하가 거의 없는

것을 알 수 있었다. 그러나, 5종시멘트의 경우는 황산염에 대한 저항성은 우수하였으나, 해수에 침지한 경우 1종시멘트와 비슷한 경향을 보여 해수에 대한 저항성이 저발열시멘트에 비하여 상대적으로 저하되는 것을 알 수 있었다.



*compressive strength ratio : ratio of mortar immersed chemical solutions and mortar cured water at same days(%)

Fig. 3 Comparison of compressive strength of mortar immersed in chemical solutions

3.2 콘크리트의 물성

콘크리트의 배합 실험은 단위수량 $165 \pm 5\text{kg}$, 물시멘트비(W/C) 40~55%에서 표준형 감수제를 단위시멘트량 중량비 0.3%로 고정 첨가하고, 소요 공기량을 얻을 수 있도록 AE제량을 조절하여 사용하였다. 콘크리트의 목표 슬럼프 및 공기량은 각각 12~18cm, $4.5 \pm 1.5\%$ 를 만족하는 범위에서 실행하였으며, 그 결과는 Table 7과 같다.

3.2.1 작업성

표준형 감수제 첨가량을 단위시멘트 중량의 0.3%로 고정 첨가하였을 때 동일한 작업성(슬럼프 12~18cm, 공기량 $4.5 \pm 1.5\%$)을 확보하는데 필요한 단위수량은 시멘트 종류에 상관없이 $165 \sim 170\text{kg/m}^3$ 정도였으며, 저발열콘크리트의

Table 7 Concrete mix proportion and test results

type of cement	water content (kg/m ³)	cement content (kg/m ³)	W/C (%)	S/A (%)	AEA (C×wt. %)	water reducer	slump (cm)	air (%)	compressive strength (kgf/cm ²)				elastic modulus × 10 ⁵		
									3	7	28	91	28	91	
low heat	165	300	55.0	42.9	0.055	0.3	16.6	3.6	44	103	242	342	2.66	2.94	
										119	241				
	165	330	50.0	42.0	0.050		16.2	3.5	56	117	271	380	2.65	3.03	
	165	360	45.0	41.3	0.048		17.3	3.2	75	140	304	421	2.84	3.07	
slag	156	390	40.0	40.9	0.055		14.7	3.6	76	155	324	449	2.86	3.10	
	165	300	55.0	47.0	0.012		14.8	3.8	115	161	311	385	2.78	3.16	
										166	207				
slag	165	330	50.0	44.5	0.015		12.3	3.6	130	193	358	459	2.79	3.20	
	165	367	45.0	41.5	0.020		13.5	3.5	145	217	405	487	3.03	3.26	
	Type I	165	300	55.0	47.0		0.010	16.2	4.8	142	217	303	347	2.77	3.06
										188	220				
165		330	50.0	45.7	0.015		14.5	5.3	180	259	341	398	2.93	3.05	
165		367	45.0	44.5	0.017		14.4	5.1	209	289	379	449	2.89	3.22	
Type V	170	425	40.0	43.0	0.020		12.5	4.9	265	326	412	465	3.10	3.21	
	165	300	55.0	48.0	0.007		18.0	5.3	124	198	304	396	2.80	3.37	
										178	218				
	165	330	50.0	46.0	0.009	18.5	4.6	151	222	309	409	3.22	3.51		
Type V	165	367	45.0	47.0	0.007	17.0	4.5	186	275	387	480	3.02	3.42		
	165	412	40.0	44.0	0.009	18.8	4.0	238	316	428	529	3.28	3.44		

경우는 목표 공기량을 확보하기 위하여 AE제 첨가량이 다른 시멘트에 비하여 3~5배 정도 증가하였지만 반죽질기는 전반적으로 동일하게 나타내었다. 5종시멘트를 사용한 콘크리트의 경우, 동일한 작업성을 나타내기 위하여 잔골재율(S/A)이 다른 시멘트에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 이와 같은 이유는 사용 혼화제와 5종시멘트와의 상호적합성에 그 원인이 있다고 판단되므로, 5종시멘트의 경우는 사전에 사용 혼화제와의 적합성 및 적정 첨가량을 파악할 필요가 있으며, 본 실험에서의 감수제 적정첨가량은 시멘트 중량의 0.15~0.25%인 것으로 판단되었다.

3.2.2 블리딩률 및 응결시간

Table 8과 같이 슬럼프 15±2.5cm, 공기량 4.5±1.5%를 만족하는 설계기준강도 $\sigma_{ck} = 210\text{kgf/cm}^2$ 콘크리트의 블리딩률 및 응결시험 결과를 각각 Fig. 4 및 Fig. 5에 나타내었다. 일반적으로 콘크리트의 블리딩에 영향을 미치는 요인으로 재료 및 배합조건, 시공조건 등이 있으나 본 시험에서는 골재 및 혼화제의 경우 동일한 것을 사용하였고, 동일한 작업성을 얻는 배합조건이었기 때문에 블리딩에 가장 큰 영향을 미치는 요인

은 시멘트로 단정할 수 있다.

특히 시멘트의 분말도 특성에 따라 블리딩에 차이가 발생한 것으로 판단되었다. 즉, 본 실험에 사용한 시멘트를 분말도의 크기 순으로 나열하면 저분말도>슬래그>1종 >5종시멘트순이다. 따라서 분말도가 큰 시멘트는 물과의 접촉면적이 커서 보수성이 높기때문에 블리딩률이 적게 나타난 것으로 생각된다.⁽⁸⁾

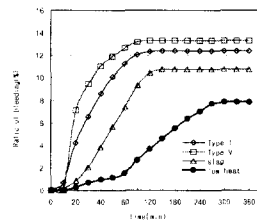


Fig. 4 Bleeding of concrete

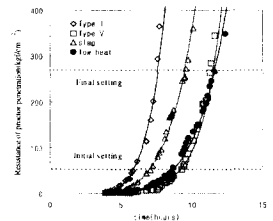


Fig. 5 Setting time of concrete

3.2.3 콘크리트 단열온도상승실험

시멘트의 수화발열 측정방법중 미소열량계에 의한 측정방법은 초기 설정된 온도를 일정하게 유지시킨 조건에서 각 시간에서의 발생열만을 측

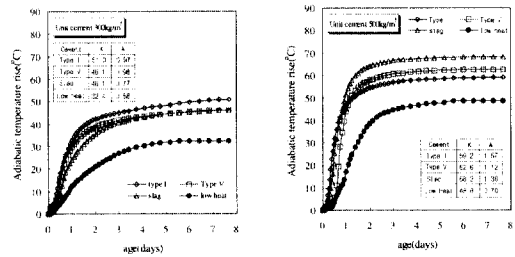
Table 8 Concrete mix proportion in specified compressive strength $\sigma_{ck}=210\text{kg/cm}^2(20\pm 3^\circ\text{C})$

type of cement	G_{max}	Targeted		water content (kg/m ³)	W/C (%)	S/A (%)	unit weight(kg/m ³)				slump (cm)	air (%)	compressive strength (kgf/cm ²)				
		slump	air				cement	aggregate		AEA (C×wt.%)			water reducer	3	7	28	91
								fine	coarse								
low heat	25 mm	15 ± 2.5 (cm)	4.5 ± 1.5 (%)	165	55.0	42.9	300	757	1024	0.055	0.3	17.5	4.2	73	124	242	306
slag				165	62.0	44.8	266	817	1023	0.02		16.0	4.5	78	133	245	310
Type I				171	60.0	46.9	284	847	973	0.009		15.0	5.0	113	184	249	286
Type V				165	55.9	47.8	295	868	962	0.007	0.25	16.0	4.4	120	170	254	313

정하므로 시멘트 수화열에 의한 시료의 온도상승은 발생하지 않는다. 그러나 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 방법이므로 상기 2가지 실험방법에는 큰 차이가 있으며, 콘크리트 수화열 시험기에 의한 단열온도상승실험이 현재까지 절대적인 측정법으로 사용되고 있다. 콘크리트의 초기온도 $20\pm 3^\circ\text{C}$ 로 고정시킨 상태에서, 단위시멘트량을 $300, 500\text{kg/m}^3$ 으로 각각 변화시켜 가면서 시멘트 종류에 따른 콘크리트의 단열온도상승실험을 수행하였다. Fig. 6을 보면 저발열시멘트가 단위시멘트량 500kg/m^3 에서 1종 보통 포틀랜드시멘트의 단위시멘트량 300kg/m^3 의 경우와 같은 수준의 수화열 특성을 나타내어 1종시멘트와 비교하여 수화열 저감효과가 매우 큰 것으로 나타났다. 즉, 저발열콘크리트는 1종 보통 포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트에 비해 단열온도상승 모델식의 최종적인 온도상승값(K)은 20% 이상 감소하고, 온도상승 기울기(α)는 $1/3\sim 1/2$ 이하로 작게 나타나 수화열 저감효과가 매우 크다는 것을 알 수 있었다.

슬래그시멘트를 사용한 콘크리트의 경우 단위시멘트량 300kg/m^3 인 경우에 1종, 5종과 거의 유사한 온도상승을 나타내었으나, 단위시멘트량 500kg/m^3 인 경우에는 오히려 1종, 5종에 비해 커지는 결과를 나타내었다. 이는 슬래그시멘트의 온도의존성에 기인한 것으로 슬래그시멘트는 보통 포틀랜드시멘트보다도 온도의존성이 훨씬 크기 때문에 주변온도가 높을수록 수화반응이 보다 활발하게 이루어져 단열조건하에서 실험할 경우

시료내부에서 발생한 수화열에 의해 온도가 상승하게 되고 이것이 수화반응을 다시 가속화시켜 결과적으로는 슬래그시멘트를 사용한 콘크리트의 단열온도상승이 커지는 결과를 가져온 것으로 판단된다.⁽⁹⁾



▶ $T = K(1 - e^{-\alpha t})$
 T: 시간 t에서의 단열온도상승치(°C),
 K: 최대상승온도치(°C), α : 반응속도, t: 재령(일)

Fig. 6 Adiabatic temperature rise of concrete

3.2.4 강도 및 탄성계수

동일한 작업성에서 사용 시멘트에 따른 압축강도 측정결과는 Fig. 7과 같다. 시멘트 종류에 따른 경화콘크리트의 재령별 $\sigma-C/W$ 관계는 시멘트 종류에 상관없이 재령별로 상관성이 매우 높게 나타났다.

저발열콘크리트의 초기 압축강도는 다른 시멘트에 비하여 작은 값을 나타내었고 또한 포틀랜드시멘트(1종 및 5종)는 물시멘트비에 따른 압축강도의 변화 기울기가 저발열콘크리트의 경우보다 크게 나타났다. 이것은 혼화재의 수화반응이 초기재령에서는 활성화되지 못하고 장기에 걸쳐 일어나는 것으로 콘크리트의 장기강도 발현에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

1) 압축강도 발현률

(1) 표준 수중양생

표준 수중양생시 재령 28일을 기준으로 한 각 재령별 강도 발현률을 비교하면 Fig. 8과 같다. 저발열콘크리트의 압축강도 발현률은 수중양생 재령 28일을 100%로 했을때 초기재령 3, 7일에서 각각 25~30%, 45~50%이지만 91일 발현률은 135~140%로 혼화재의 잠재수경성에 의한 장기강도 발현률이 다른 시멘트에 비하여 상대적으로 상당히 높음을 알 수 있었다. 그러나, 슬래그시멘트를 사용한 콘크리트의 경우는 블레인이 3.928(cm^2/g)인 고미분말로 수화반응이 촉진되어 재령 28일에서 타시멘트에 비하여 상당히 빠른 강도발현을 보이고 있는 반면 91일 재령의 강도발현률은 그다지 크지 않은 것으로 나타났다.

(2) 단열양생

Fig. 9는 콘크리트의 단열온도상승실험시 챔버 내부에 콘크리트 공시체를 양생시켰을 경우의 압축강도를 비교한 것으로 저발열콘크리트는 챔버 양생 7일에서 표준수중양생 재령 28일과 동일한 강도 발현률을 나타내고 있다. 이는 콘크리트의 수화반응열과 동일하게 챔버내부의 온도가 상승되는 조건이므로 혼화재의 잠재수경성 및 포졸란 반응이 활성화됨으로써 수중양생과는 다른 특성이 나타난 것으로 판단된다.⁽¹⁰⁾ 이와 반대로 1종 및 5종시멘트의 경우는 표준수중양생과 단열양생시의 강도발현 차이는 크지 않은 결과를 나타내고 있다. 따라서, 단열양생과는 동일하지는 않으나 실부재 내부에서도 발생한 수화열에 의해 온도이력이 발생하게 되고 이 경우 실부재의 강도 발현은 수중양생 공시체와는 매우 다른 특성을 나타낼 수 있어 시멘트의 종류에 따라서 온도의 존성에 큰 차이가 있다고 판단된다.

2) 인장강도 및 압축강도 관계

Fig. 10에서와 같이 콘크리트의 압축강도와 인장강도와의 관계는 시멘트의 종류에 상관없이 동일한 경향을 나타내었고, 압축강도 200 kgf/cm^2 전후로 하여 ACI⁽¹¹⁾ 및 CEB-FIP⁽¹²⁾의 관계식과 유사한 상관성을 보였으며, 인장압축강도비는 1/9~1/12정도로 나타났다.

3) 탄성계수

Fig. 11는 각 시멘트를 사용한 콘크리트 탄성

계수와 압축강도와의 관계를 나타낸 것으로, 동일한 골재를 사용했지만 압축강도 400 kgf/cm^2 이상에서는 시멘트의 종류에 따라서 약간의 편차를 보이고 있다. 그러나 콘크리트 표준시방서상의 압축강도와 탄성계수관계식⁽¹³⁾은 4종류의 시멘트 모두가 매우 유사한 관계를 나타내었다.

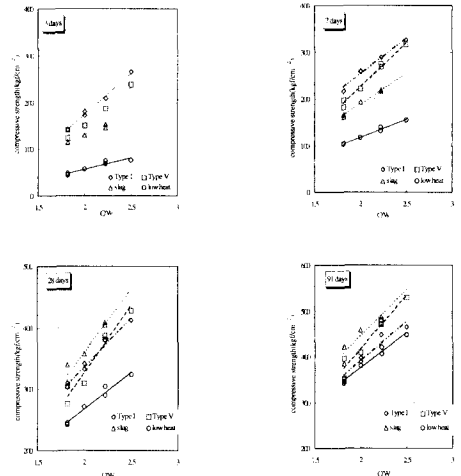


Fig. 7 Relation between compressive strength and C/W of concrete

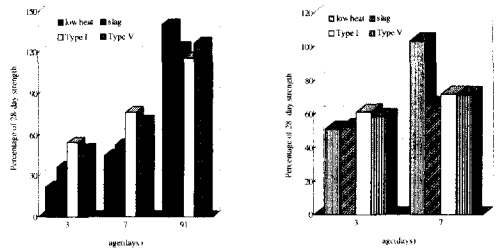


Fig. 8 Ratio of strength development of concrete(in water curing)

Fig. 9 Ratio of strength development of concrete (in chamber curing)

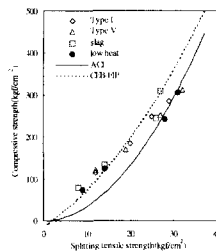


Fig.10 Relation between compressive and splitting tensile strength

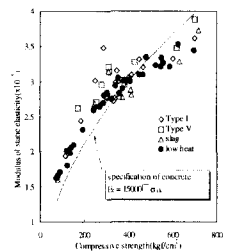


Fig. 11 Relation between compressive strength and elastic modulus strength

3.2.5 건조수축길이변화

Table 8과 같은 배합에서의 콘크리트 건조수축길이변화특성은 Fig.12와 같다.

콘크리트의 건조수축변형은 일반적으로 물시멘트비가 클수록 커지는 것으로 알려져 있지만, 본 시험결과에서는 그런 경향은 확인되지 않았다.

그 외에 단위시멘트량, 잔골재율 등 콘크리트의 건조수축에 영향을 미치는 인자들이 시멘트 종류에 따라서 약간의 차이가 있지만 동일한 작업성 및 설계기준을 만족하는 콘크리트 배합조성에서의 건조수축길이변화량은 초기 재령에서 저발열시멘트가 다소 큰 것으로 나타났으며 재령 6개월정도가 경과해서는 시멘트 종류에 상관없이 약 $4.5\sim 5.2\times 10^{-4}$ 로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

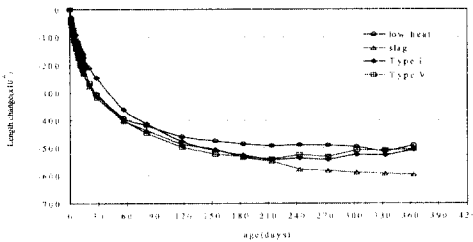


Fig. 12 Drying shrinkage of concrete

3.2.6 동결융해저항성

콘크리트 경화체가 동결융해저항 작용을 받는 경우 기공에 침투한 수분의 동결에 의해서 팽창압이 발생하기 때문에 콘크리트는 열화된다. 이와 같은 열화과정은 팽창에 의한 길이 증가와 스케일링에 의한 무게 감소를 수반하여 동결융해사이클에 따라 동탄성계수도 변화하게 된다.

Table 8과 같은 배합을 사용했을 경우 콘크리트의 동결융해저항성은 Fig. 13에서와 같이 전체적으로 동결융해사이클이 진행됨에 따라 수분의 침투로 인한 조직의 이완으로 콘크리트 표면이 열화되면서 중량 및 상대동탄성계수가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 특히 저발열시멘트와 슬래그시멘트의 경우는 혼화재의 포졸란 반응에 의한 수화 조직의 치밀화로 1종 및 5종 포틀랜드시멘트의 경우보다 열화가 덜 진행된 것으로 판단된다.

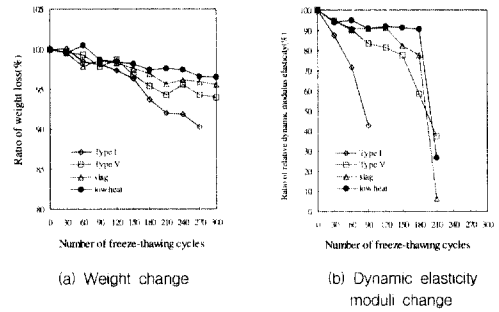


Fig. 13 Resistance of freeze-thawing of concrete

3.2.7 염소이온침투저항성

해수는 Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 등의 성분이 99% 이상을 차지하며 이중에서도 NaCl이 80% 이상을 차지한다. 이러한 성분이 시멘트 경화체의 내부로 침투하는 속도는 $Cl^- > SO_4^{2-} > Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$ 의 순으로 빠르므로 Cl^- 이온은 시멘트 경화체에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁴⁾ 따라서, 해안 구조물용 콘크리트에 사용될 수 있는 적절한 시멘트의 종류를 선정하기 위해서는 각종 시멘트에 대한 해수 저항성을 파악할 필요가 있다.

ASTM C 1202-91의 방법⁽¹⁵⁾에 따라 콘크리트 염소이온침투시험을 실시한 결과는 Fig. 14와 같다. 저발열시멘트>슬래그시멘트>1종 및 5종시멘트순으로 염소이온 투과에 대한 저항성이 높게 나타났다.

이와 같은 원인은 콘크리트 경화체의 기공 크기 및 분포 등 기공구조의 변화, 시멘트 수화물의 표면, 시멘트 미수화 혹은 수화물과 이온의 반응성 등에 따라 이온의 침투는 매우 다른 결과를 보이고 있는 것으로 국외 많은 연구 논문에서 해석하고 있다.^(6, 7, 16, 17, 18) 즉, 저발열콘크리트는 혼화재의 잠재수경성 및 포졸란 반응에 의하여 기공에 C-S-H(calcium silicate hydrate)와 같은 수화물을 형성시키면서 골재와 시멘트 수화물 사이의 연속 공극을 채우게 된다. 위와 같은 수화물의 생성에 의하여 저발열콘크리트는 포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트보다 경화체 내부의 기공 크기 분포가 작고 불연속성의 구조를 가지게 됨에 따라 염소이온의 투과 전하량은 포틀랜드시멘트계에 비하여 약 1/5정도로 감

소하는 경향을 나타낸 것으로 판단된다. 따라서, 저발열콘크리트는 슬래그시멘트를 사용한 콘크리트와 마찬가지로 콘크리트의 내해수성을 크게 증가시켜 철근부식에 대한 저항성이 향상되므로 해안 구조물용 콘크리트 공사에 매우 유리할 것으로 판단된다.

3.2.8 중성화

탄산가스 농도 10%(온도 40℃, 습도 55~65%)조건에서 축진양생시킨 콘크리트의 중성화 시험결과는 Fig. 15와 같다. 1종 및 5종 포틀랜드시멘트는 포졸란 물질을 사용하지 않으므로 콘크리트의 알칼리성이 장기적으로 안정하게 유지되는 것과는 달리 혼화재를 다량으로 사용한 슬래그, 저발열콘크리트의 경우 중성화 속도가 빠르게 나타나 중성화깊이는 재령 6주에서 포틀랜드시멘트에 비하여 약 1.5배이상을 나타내었다.

따라서, 혼화재가 다량으로 사용된 혼합시멘트계를 사용할 경우 콘크리트 자체의 품질이 가능한 한 치밀, 견고하도록 물시멘트비, 공기량, 기공량이 낮게 되도록 하거나, 충분한 초기양생과 표면 마무리재를 사용하고, 타설시에는 모르타르의 누출, 콘크리트의 분리, 피복 콘크리트의 결손이 생기지 않도록 거푸집의 제작 및 다짐방법 등을 충분히 고려해야 할 것으로 사료된다.⁽¹⁹⁾

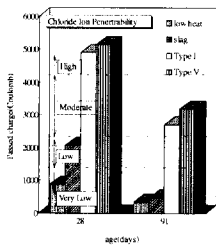


Fig.14 Passed charges of chloride ion penetration

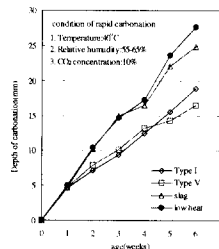


Fig.15 Rapid carbonation depth

4. 결론

본 연구에서는 매스콘크리트 및 해양구조물 등의 특수 구조물의 용도로 개발된 혼합형 저발열 특수시멘트의 제물성을 파악하고자 다른 시멘트의 경우와 비교하여 수행하였으며, 그 연구결과는

다음과 같다.

- (1) 저발열시멘트의 수화발열특성은 1종시멘트 대비 60%정도의 발열량을 보였으며, 내화확성은 혼화재의 포졸란 반응에 의한 미세한 수화구조물 형성과 이온 흡착으로 침식성 물질 및 해수에 대한 저항성이 우수하였다.
- (2) 설계기준강도 $\sigma_{ck} = 210\text{kgf/cm}^2$ 콘크리트에서의 불리딩률은 분말도가 큰 저발열콘크리트가 적게 나타났으며, 응결은 1종시멘트를 사용한 콘크리트보다 초결 및 종결에서 각각 2.5, 4.5시간 정도 지연되는 것으로 나타났다.
- (3) 저발열콘크리트의 압축강도는 포틀랜드계 시멘트보다 초기재령에서는 낮게 나타나지만 혼화재의 포졸란 반응에 의하여 장기강도 발현률이 상대적으로 상당히 높음을 알 수 있었다.
- (4) 저발열콘크리트의 단열온도상승량은 단위시멘트량 500kg/m^3 에서 1종시멘트의 단위시멘트량 300kg/m^3 의 경우와 같은 수준의 수화열 특성을 나타내어 수화열 저감효과가 매우 크다는 것을 알 수 있었으며, 온도균열의 제어에 매우 효과적인 시멘트라는 것을 확인할 수 있었다.
- (5) 저발열콘크리트의 건조수축 길이변화량은 초기 재령에서 1종 및 5종 포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트보다 큰 반면 재령 6개월이 경과한 시점에서는 약 5.2×10^{-4} 정도로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.
- (6) 저발열콘크리트의 동결융해저항성은 혼화재의 잠재수경성 및 포졸란 반응에 의한 경화체 조직의 치밀화로 포틀랜드시멘트보다 초기 싸이클에서 열화정도가 심하지 않았으며, 저발열, 슬래그, 1종 및 5종시멘트순으로 염소이온 투과에 대한 저항성이 높게 나타났다.
- (7) 축진 중성화 깊이는 포틀랜드시멘트계보다 혼합시멘트계의 경우 재령 6주에서 1.5배이상 진행된 것으로 나타나 설계 및 시공시 적용 가능한 중성화 방지 대책을 충분히 고려해야 할 것으로 판단되었다.

이상의 결과로 볼 때 저발열시멘트를 사용한 콘크리트는 수화열 저감 효과에 따른 온도균열제

어효과 및 염소이온의 침투에 대한 저항성이 높아 해안 구조물용 매스 콘크리트 적용시 매우 유리할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 加島 聰, 佐野華洋, 酒井和吉, 山岡禮三, 十河茂幸, "明石海峡大橋アンカレイジにおける低發熱型高强度コンクリートによる地下連續壁の施工", 콘크리트工學, Vol.29, No.4, April 1994, pp.59~69
2. 糸日谷淑光, 後勝英夫, 十河茂幸, "巨大アンカレイジをつくる", 세멘트·콘크리트, No. 561, Nov. 1993, pp. 30~43
3. 高木淳, 命倉健二, 中村龍一 외4인, "世界最大の LNG地下탱크の合理化施工", 세멘트·콘크리트, No. 572, Oct. 1994, pp. 8~13
4. 内川 浩, "混合세멘트의 수화 및 구조형성におよぼす混合材의 효과", 세멘트·콘크리트, No. 484, 1987年 6月, pp. 81~93.
5. 近田 孝夫, "耐酸性と세멘트", 세멘트·콘크리트, No. 594, 1996年 8月, pp. 56~59.
6. 内川 浩, "混合세멘트의 수화 및 구조형성におよぼす混合材의 효과", 세멘트·콘크리트, No. 488, 1988年 10月, pp. 33~48.
7. 牛山宏隆, "港灣工事に用いる세멘트", 세멘트·콘크리트, No. 594, 1996年 8月, pp. 80~83.
8. Neville, "Properties of concrete", Pitman, Great Britain, 1981, pp. 224~225.
9. 國府勝郎, 村田芳樹, "高爐슬라그木粉末의 用いた 콘크리트의 斷熱溫度上昇", 高爐슬라그木粉末의 콘크리트への適用の關するシンポジウム, 土木學會, 1987年 3月, pp. 51~58
10. 杉田英明, 平野利光, 永松武教, 熊谷秀春, "超低發

熱型세멘트を 用いた 콘크리트의 諸性狀", 콘크리트工學年次論文報告集, 12-1, 1990, pp.885~890

11. ACI Committee 318, "Building Code requirements of Reinforced Concrete and Commentary (ACI318-89/318R-89)", American Concrete Institute, Detroit, 1989, pp.353
12. "CEB-FIP Model Code for Concrete Structures", Comit Euro-International du Beton, Paris, 1978, pp.348.
13. 건설교통부, "콘크리트 표준시방서", 1996, pp.14~16.
14. 新崎義幸, "콘크리트의 耐海水性", 세멘트·콘크리트, No.562, 1993년12월, pp.46~48.
15. ASTM C 1202-91, "Standard Test Method for Electrical Indication of concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration"
16. Jan DEJA, "Chloride Resistance of the pastes and mortars containing mineral additives", Vol.4, Proceedings of the 10TH International Congress on the Chemistry of Cement, Gothenburg, Sweden, June 2-6, 1997
17. Portland Cement Association, "Supplementary Cementing Materials for Use in Blended Cements", Research and Development Bulletin RD112T, 1996, pp. 53~56
18. R. Douglas Hooton, "Permeability and pore structure of cement pastes containing fly ash, slag and silica fume", ASTM STP 897, June 1984, pp. 128~143
19. 岸谷孝一, 西澤紀昭, "中性化, 콘크리트構造物의 耐久性シリス", 技報堂出版, 1986.4, pp.21~33.

요 약

최근 국내에서 해양 구조물, 장대 교량의 하부구조물, LNG 저장탱크 등 매스콘크리트의 증가 추세에 따라 구조물의 고내구성과 관련하여 시멘트의 수화열에 의한 온도균열의 발생을 최소화 시킬수 있는 3 성분계 혼합형 저발열시멘트가 개발되어 실 구조물의 적용단계에 있으나, 저발열시멘트의 특성에 대한 전반적인 연구보고가 국내에서는 미진한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 3 성분계 혼합형 저발열시멘트의 특성 및 콘크리트의 기초물성을 1종 보통포틀랜드시멘트, 5종 내황산염시멘트, 슬래그시멘트와 비교하였다.

그 결과 저발열콘크리트의 압축강도는 초기재령에서 강도발현률이 적은 반면 장기강도발현률은 상당히 큰 경향을 보였다. 또한, 수화열은 1종시멘트를 사용한 콘크리트에 비하여 1/3~1/2정도로 매스콘크리트의 수화열을 대폭적으로 저감시킬 수 있을 뿐만 아니라 염소이온에 대한 저항성이 상대적으로 높게 나타나 거대 해양 구조물의 적용에 매우 유리한 시멘트로 판단되었다.

(접수일자 : 1998.5.29)