

저온환경에서 고분말도 시멘트의 수화반응 및 강도발현 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Hydration and Strength Development of High Blain Cement at Low Temperature

문 영 범¹ 김 형 철^{1*} 최 현 국¹ 김 재 영¹ 이 한 승² 김 목 규²

Mun, Young-Bum¹ Kim, Hyeong-Cheol^{1*} Choi, Hyun-Kuk¹ Kim, Jae-Young¹ Lee, Han-Seung² Kim, Mok-Kyu²
*R & D Center, Sungshin Cement, Bugang-Myun, Sejong Special Self-Governing City, Republic of Korea*¹
*Department of Architectural Engineering, Han Yang University, Sangnok-Gu, Ansan, 426-791, Korea*²

Abstract

In this study, fundamental properties of cement were reviewed to apply high fineness cement at low temperature environment. The classified high fineness cement has large proportion of particles below 10 μm which affects early hydration: an overall reaction of cement hydration faster. As a result of using high fineness cement, setting time of concrete was reduced and compressive strength was higher than OPC at all ages. Especially, compressive strength was more than double its value compared with OPC after three days curing in low temperature. Faster reaction and higher heat of hydration was verified by calorimetry early and maximum heat of hydration was analyzed by adiabatic temperature raising test. The analysis of this study confirmed that high fineness cement can be suitable to be used in low temperature environment.

Keywords : high blaine cement, cement classification, particle size, cold weather concrete, extreme cold condition

1. 서 론

건설공기의 중요성은 항상 강조되고 있으며 그에 따른 시공기술의 개발도 획기적인 발전을 거듭해왔다. 특히 연중 시공을 위하여 한중 콘크리트는 매우 중요한 이슈로 부각되고 있으며 전 세계로 진출하는 우리나라 건설산업을 고려하면 동토지역 및 극지지역과 같은 극저온 환경에서의 건설은 더욱 더 그 중요성이 증가할 것으로 판단된다.

일반적으로, 저온환경에서 초래하는 콘크리트에 관한 문제는 초기동해와 강도발현의 지연이라고 할 수 있으며, 초기

동해방지를 위해서는 콘크리트의 압축강도가 5MPa 이상 필요하다고 알려져 있다[1]. 이에 대한 연구는 주로 한중 콘크리트 제조기술과 가열 보온양생 방법이 주를 이루고 있다. 여기서 콘크리트 제조기술이란 재료를 가열하여 온도를 높이는 일반적인 방법과 내한 촉진제를 사용하여 수분이 동결하지 않으며 수화를 촉진시키는 방법이다. 가열 보온양생 방법은 거푸집 등에 열선을 활용하여 가열하는 단열 양생방법과 제트히터, 갈탄 등 열원 공급을 통한 가열보온 양생방법이 있다. 이러한 방법들은 과다한 에너지 사용량 및 열원의 불균일한 공급 등으로 인해 품질저하, 공기지연 및 공사비 증대 등 여러 사회적인 비용을 증가시킨다.

콘크리트는 기본적으로 시멘트의 수화반응에 의하여 강도가 발현되기 때문에 저온환경에서의 구조물 안정성 및 고내구성을 확보하기 위해서는 시공단계 초기 시멘트의 수화반응이 매우 중요하지만 아직까지 시멘트 자체의 원천 재료에

Received : March 3, 2015

Revision received : April 7, 2015

Accepted : June 8, 2015

* Corresponding author : Kim, Hyeong-Cheol

[Tel: 044-275-7387, E-mail: cemenman@naver.com]

©2015 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

대한 연구는 주로 보통 포틀랜드 시멘트 혹은 조강 포틀랜드 시멘트를 대상으로 극히 제한적으로 이루어져 왔다.

시멘트 및 콘크리트의 물성 향상을 위해서는 시멘트 광물 조성을 변화시키는 방법, 혼합시멘트를 사용하는 방법 및 시멘트의 입자크기를 조정하여 분말도를 변화시키는 방법 등이 있다[2,3]. 일반적으로 동일 물-시멘트비에서 평균입자 크기의 감소는 수화율이 증가하여 강도를 향상시키며 특히 초기강도를 높이는 방법으로 가장 많이 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 시멘트의 초기 수화반응을 촉진시키기 위하여 1종 보통 포틀랜드 시멘트보다 더 높은 고분말도 시멘트에 초점을 맞추어 연구를 수행하였으며 이를 저온환경에서 사용하는 방안을 검토하기 위한 기초정보를 얻고자 하였다.

2. 실험 방법 및 개요

2.1 실험개요

본 연구는 고분말도 시멘트를 저온환경에서 사용하는 방안을 검토하기 위한 실험으로서, 입도를 조정한 고분말도 시멘트는 상용중인 시멘트의 입도를 조정한 것으로 분말도 11,000cm²/g이며, 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 분쇄하여 상용중인 1종 조강형 시멘트 및 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트의 재료적인 특성을 분석하였다.

석 및 응결시간을 분석하였으며 수화반응 특성을 평가하기 위한 온도조건은 20℃, 2℃로 설정한 수화반응 속도분석과 20℃, 2℃, -8℃로 설정한 몰탈 압축강도 실험을 실시하였다. 또한 단열온도 상승 시험을 통하여 -5℃에서의 시멘트 재료별 수화열 특성을 검토 하였다. 양생온도는 실제 시공 시 온도저하의 가능성을 고려하고 극저온환경 실험조건을 위해 설정된 값이며 해당 분석기기의 조건을 감안하여 실험을 실시하였다. Table 1은 본 실험에서 사용된 배합을 나타낸 표이다.

2.2 사용재료

본 연구에서는 S사 1종 보통 포틀랜드 시멘트(분말도 3,390cm²/g, 이하 OPC로 표기)와 S사에서 상용화중인 1종 조강형 포틀랜드 시멘트(분말도 4,220cm²/g, 이하 HBC로 표기)를 사용하였다. 또한 고분말도 시멘트 제조를 위하여 분급기를 사용하여 S사 1종 보통 포틀랜드 시멘트 제품의 입도를 조정하여 고분말도 11,000cm²/g(이하 NT로 표기)를 혼합 제조한 원료를 사용하였다. 또한 사용된 방동제는 국내 U사에서 제조된 무염화형용을 사용하였다. 사용된 모든 재료는 극저온 환경 조건으로 적용하기 위해 배합전 24시간동안 -8℃에서 동결시켰다.

2.3 실험 방법

2.3.1 응결시험

일반적으로 초기동해는 응결과정 또는 응결 후에 아직 충분한 강도가 발현되지 않는 단계에서 콘크리트 중에 수분이 동결하는 것에 의해서 발생하는 것으로 알려지고 있는데, 초기동해를 방지하기 위해서는 저온환경 하에서 응결축진이 크게 나타나는 것이 가장 안정적이며 이것은 초기강도 발현에 큰 영향을 주기 때문에 시멘트의 성능을 평가하는데 있어 매우 중요한 인자이다[4,5,6].

응결시험은 KS L 5108의 방법으로 시편을 만들어 주도를 측정 후 자동 비카 측정기로 초결 및 종결시간을 측정하였다. 분급한 고분말도 시멘트는 미세한 입자들이 다량 존재하여 응결시험 시 단위수량이 급격히 증가되어 분석하지 못하였다.

2.3.2 압축강도 측정

모르타르 압축강도는 최적의 초기온도 조건을 맞추기 위

Table 1. Mixing design of mortar

Specimen	Temperature (°C)	W/C (%)	Cement(%)			Sand (g)
			OPC ¹⁾	HBC ²⁾	NT ³⁾	
1	20	50	100			1350
2			100			
3			80	20		
1	2	50	100			1350
2			100			
3			80	20		
4			80	20		
5			90	10		
1	-8	50	100			1350
2			100			
3			80	20		
4			80	20		
5			90	10		

1) OPC: Ordinary Portland cement

2) HBC: High Blaine Cement

3) NT: Nano technology

분석항목은 원재료의 화학조성 및 물리적인 특성, 입도분

하여 시험 전 항온습습기를 이용하여 재료 및 몰드를 양생온도 조건에서 24시간동안 각각의 온도조건으로 안정화 시킨 후 실시하였다. 압축강도는 재령별 양생온도별 측정 하였으며 KS L ISO 679에 따라 실시하였다.

2.3.3 미소수화열 측정

Dale et al.[7]은 시멘트 수화모델로 평균입경이 5 μ m 및 30 μ m인 시멘트에 대하여 응결시간 및 수화열 등을 모델링 하였으며 모델링 결과 시멘트의 응결은 전단응력에 저항하는 것으로 수화생성물에 의해 수화된 시멘트 입자들이 부분적으로 연결되는 네트워크 형성에 의해 조절되고 응결시간은 입자가 작으면 빠르고 빠른 수화에 의해 수화열도 커지고 수화열도 커진다고 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 시멘트 수화반응 특성을 확인하기 위하여 미소수화열량계(TCC-26 T사 일본, 20 $^{\circ}$ C, 2 $^{\circ}$ C)로 72시간의 수화열을 측정하였다. 측정 한 실험체는 원재료의 비교를 실시하기 위하여 OPC와 HBC를 측정하였으며 압축강도 면에서 성능이 가장 우수했던 HBC+NT20를 선택하였다. 또한 수화열 측정은 물-시멘트 비를 0.5로 측정하였으며 최적의 초기온도를 맞추기 위하여 시험 전 24시간 동안 온도를 유지한 후 실시하였다.

2.3.4 모르타르 단열온도 시험

단열온도 상승 특성을 평가하기 위하여 모르타르를 대상으로 재료온도-5 $^{\circ}$ C에서 단열온도 상승시험을 실시하였다. 실험은 단열온도 상승시험 장치(ACM-202-6F, T사, 일본)로 실시하였으며 측정 한 실험체는 미소수화열 실험과 동일한 실험체를 대상으로 실시하였다.

3. 실험결과 분석 및 고찰

3.1 사용재료의 물성평가 결과

사용한 시멘트 원재료의 화학성분 분석결과는 Table 2와 같으며 시멘트의 형광 X선 분석방법 (KS L 5222)에 따라 실시한 실험값이다. Table 3의 결과는 포틀랜드 시멘트의 분말도 시험(KS L 5106), 비중 시험 (KS L 5110), 표준체 45 μ m에 의한 시멘트 분말도 시험방법 (KS L 5112)으로 나타난 결과이다. 분급기에 의한 입도 조정에 따라 나타난 특성은 강열감량, SO₃ 함량이 1종 보통포틀랜드 시멘트 보다 높았으며 분말도도 매우 높고 비중과 잔사는 낮아지는 것으로 나타났

로 나타났다. 이는 Yoshida 등[8]의 연구에서 시멘트를 분급한 결과 평균입경이 작을수록 강열감량과 C₃S량이 크고, 입경이 커질수록 C₂S량이 증가된다고 하였는데 이는 클링커 광물 및 석고의 분쇄특성에 의한 것으로 판단된다. 분쇄 특성은 클링커 광물의 C₃S가 C₂S보다 우수하며 클링커 보다는 이수석고의 분쇄성이 높은 것으로 알려져 있다. Table 3의 비중 차이를 보면, 분급된 고분말도 시멘트에 분쇄가 잘되는 물질이 다수 포함된 것을 알 수 있다. Table 4는 입도분석기 (LS 13 320, Beckman coulter)를 이용하여 입도분석 결과를 나타낸 것이다. 또한 Table 3에 나타난 입자 크기별 분류에서 분급된 고분말도 시멘트가 초기 수화반응이 빠른 10 μ m 이하의 입자가 OPC에 비하여 다량 존재함을 알 수 있다.

Table 2. Chemical compositions of cements

Specimen	Chemical composition(wt.%)						
	Ig-Loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
OPC	1.20	21.86	4.95	3.66	61.70	2.75	2.16
HBC	1.37	21.16	4.77	3.39	62.06	2.65	3.26
NT	2.76	20.79	4.84	3.45	59.90	3.67	2.66

Table 3. Physical properties of cements

Specimen	Physical properties		
	Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Residues (44 μ m)
OPC	3.15	3390	7.5
HBC	3.12	4220	3.8
NT	3.04	11000	2.7

Table 4. Particle size distribution ratio of cements

Specimen	Median (μ m)	Distribution ratio (%)			
		~ 1 μ m	1 ~ 10 μ m	10 ~ 44 μ m	44 μ m 이상
OPC	10.60	9.5	43.9	45.1	1.5
HBC	8.14	11.9	49.2	37.6	1.3
NT	4.85	12.5	60.1	27.0	0.3

Figure 1은 입도분포 분석결과를 나타낸 그림이다. 분석 결과 평균 입경은 OPC 10.6 μ m, 조강 8.14 μ m, 고분말도 시멘트 4.85 μ m로 분석되어 분말도가 높을수록 미세한 입자는 증가하는 것으로 나타났

반응시 물과의 접촉면적이 증가하기 때문에 초기 수화반응 속도가 증가함으로 본 연구의 목표인 저온환경 하에서 신속한 응결 및 초기 압축강도를 높이는 데 크게 기여할 것으로 판단된다.

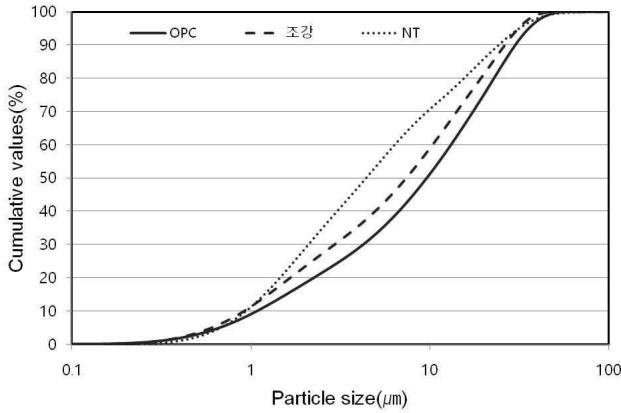


Figure 1. Particle size distribution of cements

3.2 응결시간 측정 결과

시멘트 응결시간 비교 실험 결과는 Table 5에 나타내었다. 응결실험 결과 HBC에서는 목표 주도 5mm에 소요되는 물량이 증가되는 것으로 나타났으며 응결시간은 단축되는 것으로 나타났다. 또한 HBC+NT20의 실험체에서는 초결과 종결이 241분, 300분으로 HBC의 260분, 355분 및 OPC의 275분, 370분보다 빠르게 나타났다. 이는 초기 수화반응에 큰 영향을 미치는 10 μ m이하 시멘트 입자의 함량이 높기 때문에 나타나는 것으로 판단된다[9]. 따라서 응결촉진 효과는 HBC+NT20이 가장 우수한 것으로 판단된다.

Table 5. Setting time of cements

Specimen	W/C Ratios (%)	Consistency (mm)	Setting time (min)	
			Inter set	Final set
OPC	0.28	5	275	370
HBC	0.29	5	260	355
HBC+NT20	0.33	5	241	300

3.3 모르타르 압축강도

Table 6은 재령별 양생 온도조건에 따른 압축강도 실험 결과를 나타낸 것이다. 실험결과 고분말 시멘트의 함유량이 높을수록 초기 및 장기강도 모든 영역에서 높은 수준의 압축 강도를 나타냈다. 이는 사전 연구[9,10,11]에서는 재령 3일

과 7일의 초기재령의 압축강도만 증가 하는 것으로 나타났으나 본 연구에서는 10 μ m 이하의 입경을 가지는 시멘트 입자의 영향으로 초기강도 및 28일 장기강도 까지 상승하는 것으로 나타났다.

Table 6. Test results of mortar compressive strength

Specimen	Temperature (°C)	Cement(%)			Compressive strength (MPa)		
		OPC	HBC	NT	3days	7days	28days
1	20	100			30.9	41.6	53.8
2			100		38.9	47.8	57.7
3			80	20	46.2	48.2	59.9
1	2	100			12.6	23.5	39.5
2			100		17.7	36.5	49.3
3			80	20	27.7	38.9	50.4
4	-8	80		20	19.5	31.4	45.4
5			90	10	22.7	37.3	49.6
1			100			2.2	8.9
2	-8		100		3.9	14.5	36.7
3			80	20	6.0	20.0	41.7
4			80	20	3.8	15.2	34.4
5			90	10	5.1	16.7	38.5

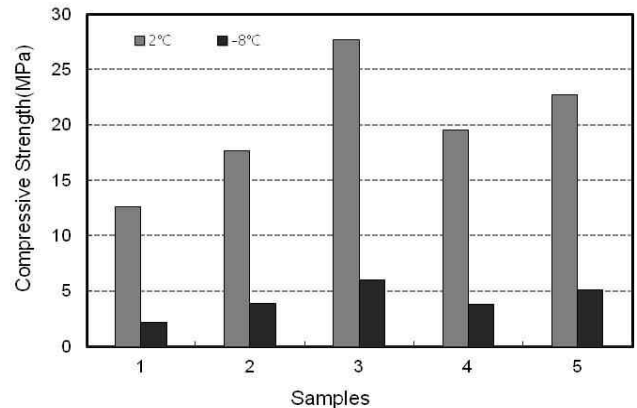


Figure 2. Compressive strength of mortar for 3days

이는 시멘트의 수화반응에서의 고분말의 입자가 대부분 수화반응에 참여하여 시멘트 수화 반응율이 상승된 것으로 판단된다. 또한 고분말도 입자는 초기 수산화칼슘의 생성을 촉진하고 지속적으로 강도를 발현시키는 수화물인 CSH($mCaO-nSiO_2-xH_2O$)gel을 다량 생성하여 장기강도 또한 우수한 것으로 판단된다. 그러나 상대적으로 입자가 큰 100 μ m 이상의 시멘트 입자는 강도 상승에 영향을 주지 못한 것으로 사료된다. Figure 2에 저온(2°C, -8°C) 실험의

재령 3일 압축강도 결과를 나타낸 것이다. 압축강도 측정 결과 고분말도 시멘트는 초기 강도증진 효과가 매우 우수한 것으로 나타났으며, 특히 온도가 낮을수록 강도차이는 더욱 크게 나타났다. 또한 양생온도 20℃에서는 NT가 혼합된 원료가 OPC 보다 압축강도가 25% 상승하였으며 양생온도 2℃에서는 120%, -8℃에서는 170% 압축강도가 상승하는 것으로 나타났다. 따라서 양생온도별 압축강도를 비교한 결과 극저온 환경일수록 강도발현 효과는 NT가 혼합된 원료가 더욱더 높을 것으로 판단된다.

3.4 미소수화열 측정

Table 7과 Figure 3, Figure 4는 미소수화열 측정 결과를 나타낸 것이다. 미소수화열 측과 결과 NT가 함유된 원료가 가장 빠른 수화속도와 가장 높은 수화발열량을 나타내었으며 시멘트입자의 고분말도 일수록 빠른 수화속도 및 수화열이 높은 것으로 나타났다. 또한 온도별 수화발열량을 비교하였을 때 양생온도 20℃보다 양생온도 2℃에서 그 차이는 더욱 크게 나타났다. 이를 백분율로 환산 하였을 경우 NT가 함유된 원료가 OPC 보다 양생온도 20℃에서 138%, 양생온도 2℃에서는 192%로 나타나는 것으로 보아 저온환경에서는 고분말도의 시멘트를 사용하는 것이 강도발현에 유효할 것으로 판단된다.

Table 7. Accumulation heat evolution rate of paste

Specimen	Accumulation heat evolution rate (J/g)	
	20℃	2℃
OPC	239.7884	120.7787
HBC	311.4021	177.0967
HBC+NT20	332.9948	232.7251

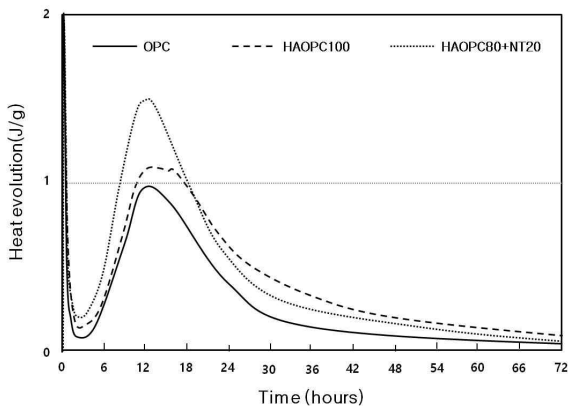


Figure 3. Hydration heat of cements (20℃)

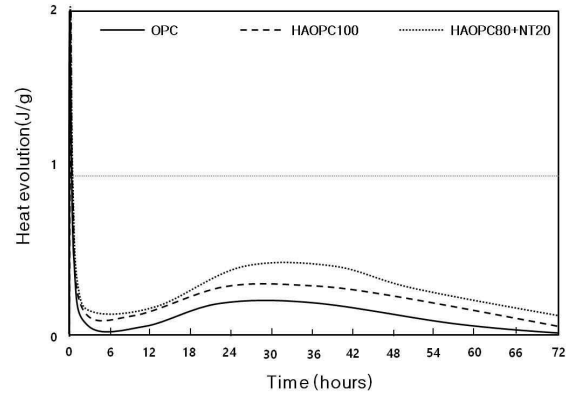


Figure 4. Hydration heat of cements (2℃)

3.5 단일온도 상승시험

Table 8과 Figure 5는 저온에서의 모르타르 단일온도 상승시험 결과를 나타낸 것이다. 실험결과 고분말도 입자가 많을수록 초기 수화 온도 및 전체 수화발열량도 높은 것을 알 수 있었다. 이는 이전의 응결 및 미소수화열 시험과 비슷한 결과로 입자의 크기가 반응속도 및 수화 반응열과 밀접한 관계가 있을 것으로 사료된다. 또한 입자가 작을수록 초기에 빠른 수화반응으로 수화온도가 높게 나타나고 최고 온도에 도달한 시간도 빠르며 최고 상승온도 또한 높음을 확인할 수 있었다.

Table 8. The internal highest temperature of mortar

Specimen	Sample temperature (℃)	The start temperature (℃)	The highest temperature (℃)	Temperature coefficient (K)	Rate coefficient of reaction (a)
OPC	-5	2.3	30.7	28.4	0.7
HBC	-5	2.3	30.8	28.5	0.8
HBC+NT20	-5	2.1	32.1	30.0	1.0

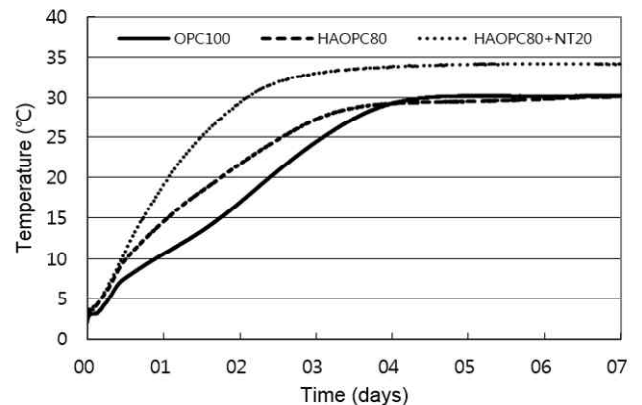


Figure 5. Adiabatic temperature rise test result of mortar

4. 결 론

상용중인 시멘트의 입도를 조정된 고분말도 시멘트를 사용하여 저온환경에서의 기초특성을 확인하기 위한 연구로서 입도 변화에 따른 특성, 응결 및 강도발현 특성, 수화반응 속도 및 수화열 분석 등을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 시멘트 분급을 통하여 제조된 시멘트는 분말도가 매우 높아지며 재료 내에 분쇄성이 높은 원료가 다량 함유되어 강열감량 및 SO₃의 함유량이 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 시멘트 입자의 분말도에 따라 입자의 크기별 분포가 매우 다르며 입도 조정하여 분급된 시멘트는 초기강도 발현을 높이는 10 μ m 이하의 입자가 다량 함유된 것으로 나타났다.
- 3) 응결실험 결과, 분말도가 높을수록 유동성에 필요한 수량이 증가되고 응결시간이 단축되는 것으로 나타났다. 이는 분급된 시멘트의 비표면적이 커지며 물과의 흡착면적이 증가됨으로 나타나는 현상으로 판단된다.
- 4) 압축강도 측정결과 모든 재령 및 온도 조건에서 분말도가 높은 시멘트 일수록 압축강도가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 입자가 작을수록 반응성 또한 높아 초기강도와 장기 강도가 높은 것으로 판단된다. 특히, 저온 일수록 초기강도가 매우 뛰어난 것으로 나타나 저온 환경에서 초기 동해 방지에 큰 효과가 있을 것으로 판단된다.
- 5) 미소수화열량계를 통한 시멘트의 수화속도와 총 수화열 측정 결과 고분말도 일수록 수화속도가 빠르며 수화열 또한 높아 초기에 강도를 발현시키는데 효과적인 것으로 사료된다.
- 6) 단열온도 상승시험결과와 미소수화열결과는 비슷한 결과를 얻었으며 고분말도 일수록 초기온도 상승이 높게 나타났으며 최고 상승온도 또한 높음을 확인할 수 있었다.

요 약

본 연구에서는 저온환경에 고분말도 시멘트를 적용하기 위하여 기초 특성을 검토하고자 하였다. 실험 결과 일반 시멘트에서 입도 분급된 고분말도 시멘트는 초기 수화에 큰

영향을 미치는 10 μ m이하의 입자가 다수 분포하였으며 분말도가 매우 높은 것으로 나타났다. 또한 분급된 미세한 시멘트 입자는 초기 수화반응이 매우 빠르고 이것은 시멘트의 수화 반응을 상승시킨다. 또한 고분말도 시멘트는 응결시간이 단축되고 모든 재령에서 압축강도가 높게 나타났다. 특히 저온환경에서는 초기 3일 압축강도 발현속도가 OPC 보다 2배 이상 발현하는 것을 확인할 수 있었으며 미소수화열 분석을 통해 수화반응 속도가 빠르고 수화열 또한 높은 것을 확인하였다. 또한 단열온도 상승 실험을 통해 초기 수화발열 상승온도 및 최고 상승온도가 높은 것으로 나타났다. 따라서 본 연구범위 내에서 저온환경 콘크리트에 우수한 시멘트 원료는 고분말시멘트로 판단된다.

키워드 : 고분말도, 시멘트 분급, 입자크기, 한중콘크리트, 극한환경

Acknowledgement

This study is part of the output of the research funding for Advanced-City Development project 2014 of the Ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs(14CTAP-C078650-01)

References

1. Kim YJ, Baek TR, LEE SS, Won C, Kim DS, Application of Cold Weather Concreting with Accelerator for Freeze protection to Full Scale Structures, Journal of Korea Concrete Institute, 2003 Apr;15(2):254-262.
2. Binici H, Cagatay IH, Shah T, Kapur S. Mineralogy of Plain Portland and Blended cement pastes, Building and Environment, 2008 Jul;43(7):1318-25.
3. Gutteridge WA, Dalziel JA, Filler cement: The effect of the secondary component on the hydration of portland cement: Part 2, Fine hydraulic binders, Cement and Concrete Research, 1990 Nov;20(6):853-61.
4. Jiang SP, Mutin JC, Nonat A, Studies on mechanism and physico-chemical parameters at the origin of the cement setting. I, The fundamental processes involved during the cement setting, Cement and Concrete Research, 1995 May;25(4):779-89
5. Ortiz J, Aguado A, Agullo L, Garcia T. Influence of environmental temperatures on the concrete compressive strength:

-
- Simulation of hot and cold weather conditions. *Cement and Concrete Research*, 2005 Oct;35(10):1970–79.
6. Princigallo A, Lura P, Breugel K, Levita G. Early development of properties in a cement paste: a numerical and experimental study. *Cement and Concrete Research*, 2003 Jul ;33(7):1013–20.
 7. Dale PB, Edward J, Garboczi, Claus JH, Ole MJ. Effect of cement particle size distribution on performance properties of Portland cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 1999 Oct;29(10):1663–71.
 8. Yoshida K, Okabayashi S, Tanaka K. Effect of particle size distribution of cement on packing density and compressive strength of paste. *The cement association of Japan*, 1991;45:86–91.
 9. Bezjak A. An extension of the dispersion model for the hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 1986 Mar;16(2):260–64.
 10. Frigione G, Marra S. Relationship between particle size distribution and compressive strength in Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 1976 Jan;6(1):113–27.
 11. Zhang YM, Naipier M. Effects of Particle Size Distribution, Surface Area and Chemical Composition on Portland Cement Strength. *Powder Technology*. 1995 Jun;83(3):245–52.