경화촉진제와 조강시멘트를 사용한 시멘트 페이스트의 조기강도 발현 메커니즘에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Early Strength Development Mechanism of Cement Paste Using Hardening Accelerator and High-Early-Strength Cement

민 태 범¹⁾ 조 인 성²⁾ 이 한 승^{3)*}
Tae-Beom Min In-Sung Cho Han-Seung Lee

Abstract

The purpose of study is to analyze mechanism with early high portland cement and hardening accelerator. As the result, it was concluded that hardening accelerator makes accelerates appearance of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ through experiment using TG-DTA when it hydrates with cement. On the result of compressive strength, as increasing the amount of hardening accelerator used, early compressive strength was improved. Also, as a result of hydration heat, hardening accelerator accelerates hydration of C_3S that is cement's component. On the result of XRD's analyzation, hydration product for each age could be check and it was shown that as increasing the amount of hardening accelerator used, peak point of hydration product was recorded high. As the result of SEM, appearance of C-S-H was shown as the amount of $\text{Ca}(\text{OH})_2$'s appearance and each age according to additive contents of hardening accelerator. Therefore hardening accelerator used on this study is effective on getting early compressive strength.

Keywords : Cement hydration, Hardening accelerator, High early strength cement, Microanalysis, High-early-strength

1. 서 론

지금까지 프리캐스트 콘크리트 구조물에 관한 연구는 접합 부 구조성능 향상, 프리스트레스 도입, Half PC화 및 양생의 효율성 향상 등 주로 구조측면 및 시공측면에 관한 연구가 주를 이루고 있다. 하지만 상대적으로 콘크리트 재료측면에서의 연구는 다소 부족한 실정이다 (Maya et al., 2013; Yavuz et al., 2013; Vanessa Cristina et al., 2007).

특히, 프리캐스트 콘크리트 제작에서는 콘크리트의 조기강도 발현을 위하여 대부분 스팀양생 방법을 사용하고 있으며, 1일 12시간 정도의 스팀양생을 실시하는 실정이다. 그러나 현재 국제유가 급등으로 인한 증기양생 비용의 상승과 함께 양생비용이 증가함으로써 프리캐스트 생산업체들은 경제적 어려움을 겪는 실정이다. 따라서 이를 해결하기 위하여 증기

양생을 실시하지 않고 상온양생으로 PC거푸집의 조기탈형이 가능한 콘크리트 기술개발 요구가 절실히 요청되고 있다 (Turkel and Alabas, 2005; Tashiro and Tanaka, 1997). 또한, 프리캐스트 콘크리트 부재생산은 단시간 내에 대량의 부재를 제작하기 위해서 고가의 몰드가 대량으로 필요하다. 이는 스팀양생을 실시하는 경우에 양생시간이 길어지며 1일 1Cycle의 몰드 전용을 하지 못하기 때문이다. 따라서 양생시간을 단축시키며 몰드의 전용 횟수를 증가시키는 기술의 개발이 절실히 요청되고 있다 (Vacharapoom and Nashwan, 2006; Paolo and Maria, 2010).

최근 프리캐스트 산업에서는 콘크리트 제조 에너지를 줄이고 몰드의 전용횟수를 증가시키기 위하여 조강시멘트, 조강형 혼화제 및 조강형 혼화제의 사용과 함께 스팀양생기간을 줄이는 연구가 진행되고 있으나 근본적으로 스팀양생을

1) 정회원, 한양대학교 일반 대학원 첨단건축도시환경공학과 박사과정, ㈜케미콘 기술연구소 연구원
2) 정회원, ㈜케미콘 기술연구소 연구소장
3) 정회원, 한양대학교 ERICA 건축학부 교수, 교신저자

* Corresponding author : ercleehs@hanyang.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2014년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

사용하고 있다 (Baoju et al., 2001; Bull and Woodford, 1997).

따라서 이러한 문제점을 해결 하고자 본 연구에서는 선행 연구를 통하여 스팀양생을 실시하지 않고 상온양생으로 6시간에 몰드 탈형 강도인 10MPa 이상을 발현하는 프리캐스트 콘크리트 개발을 목적으로 한 시멘트모르타르 연구를 실시하여 그 가능성을 확인하였다 (Tae Beom et al., 2012). 그러나 역학적 연구를 수행함에 한계점이 있으며 사용재료의 강도발현 메커니즘에 관한 미세화학적 연구는 부족한 실정이다 (Tae Beom et al., 2013).

이러한 배경 하에, 본 연구의 목적은 C₃S가 다량 함유된 조강시멘트와 경화촉진제를 병용 사용하여 스팀양생 없이 상온에서 6시간에 10MPa 이상을 발현할 수 있는 프리캐스트 콘크리트의 강도발현 메커니즘을 미세화학적으로 규명하는 것이다.

2. 실험개요

2.1 실험개요

본 연구는 경화촉진제의 촉진성능을 검증하고자 실시한 실험적 연구이다. 골재를 혼합하는 경우, 골재의 고유 성분이 강도발현에 영향을 주고 미세분석 시 골재성분이 뒤섞여 촉진제 사용으로 생성되는 수화생성물을 뚜렷한 형태로 관찰이 불가능하다. 따라서 이를 최대한 배제하기 위하여 시험체의 치수를 줄이고 페이스트 시험체를 제작하여 실험을 실시하였다.

2.2 사용재료

2.2.1 시멘트

본 실험에서 사용된 시멘트는 S사의 1종 보통포틀랜드 시멘트와 C₃S 함유량이 높은 국내D사의 3종 조강시멘트를 사용하였으며 화합물 조성은 Table 1과 같다. 혼화제는 수축저감제가 포함되어 있는 PC계 고성능 감수제를 사용하였으며

Table 1 Cement composition

Type	Compound composition (%)				Fineness (cm ² /g)
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
OPC (type I)	50	26	9	9	3,507
High-Early-Strength Cement (type III)	58	21	11	10	4,914

경화 촉진제의 특성은 Table 2에 나타내었다.

2.2.2 경화촉진제

경화촉진제는 유기염계와 무기염계 두 가지로 구분 할 수 있다. 유기염계 경화촉진제는 아민류와 초산 아크릴산 등의 유기산, 리튬카보네이트, 탄산나트륨, 소듐 글루코네이트의 종류가 있다. 아민류의 경우 석고와의 반응에 통해서 Ettringite를 형성하고 생성된 수화물중 Ettringite가 mono sulfate로의 반응 진행을 촉진시켜 수화촉진 작용을 한다 (Daczko et al., 2003).

무기염계 경화촉진제의 종류는 염화칼슘, 플루오르화물, 실리케이트, 알루미늄에이트, 티오황산염, 칼슘 포메이트 등이 있다. 이중 칼슘 포메이트 계열의 경화촉진제는 C₃S의 수화반응을 촉진시켜 용액중의 수산화칼슘의 과포화도가 최고에 도달하게 만들며 시멘트 겔 (C-S-H Gel) 등의 수화생성물의 석출을 매우 활발하게 촉진시켜 초기 강도를 발현시키게 된다. 또한 칼슘포메이트 경화촉진제는 C-S-H Gel의 결정형상에 영향을 주어 장섬유상의 결정이 조직을 밀실하게 만들어 주며 강도를 증진시키는 역할을 한다. 또한 C₃S가 물과 접촉하면서 Ca²⁺ 이온과 OH⁻ 이온이 시멘트 페이스트 안으로 흡착하게 될 때 C₃S의 표면에 gel상을 형성한다. 형성된 gel상은 Ca²⁺와 다시 결합하여 C-S-H의 생성과 성장을 유도한다.

Table 2 Characteristic of hardening accelerator

Division	Main Component	Form	Color	Density (g/cm ³)
Hardening accelerator	Calcium formate	Powder	White	2.15

Fig. 1 Molecular structure of organic hardening accelerator

Fig. 2 Molecular structure of inorganic hardening accelerator

시멘트의 강도는 C-S-H와 밀접한 관계가 있다. 이러한 C-S-H는 시멘트의 구성 광물 중 C₃S와의 반응을 통해 유도 되는 것으로 기존 연구자들에 의해 밝혀진바 있다 (Anderson et al., 2003). C₃S는 시멘트 화합물중 수화가 가장 빠르며 물과의 반응을 통해 먼저 CaO 결합이 끊어져 Ca²⁺가 용해되어 과포화 농도에 도달하게 되면 Ca(OH)₂의 결정이 석출된다. 또한 남아있는 SiO₄⁻는 물과 반응하여 [Si(OH)₆]²⁻와 형태의 수소규산이온으로 용해되며 곧바로 축합하여 C₃S 미수화 입자 주변에 gel상을 형성하게 된다. 형성된 gel상은 Ca²⁺와 다시 결합하여 C-S-H의 생성과 성장을 유도한다 (Khurana and Torresan, 1997).

본 연구에서는 Ca²⁺가 C-S-H의 생성에 많은 영향을 미치는 점을 이용하여 주성분이 Ca²⁺인 칼슘계의 경화촉진제를 사용하였다. 경화촉진제의 주성분인 Ca²⁺는 이온 포화도를 빨리 과포화에 도달하게 만들어주는 역할을 하며 Ca(OH)₂의 형성을 촉진 시킨다. 또한 C₃S입자 주변에 생성된 gel과 결합하여 빠른 시간 내 C-S-H의 생성과 성장을 유도하는 특징이 있다.

2.3 실험체 제작

본 실험에 사용된 배합은 Table 3과 같다. 시멘트 페이스트 제작을 위한 페이스트 비빔은 KS L 5109에 의해 실시하였으며 실험체는 단순 강도 측정만 하기 위하여 40×40×160mm 규격 (KS L ISO 679)으로 제작하였다. W/C비는 경화촉진제의 성능을 최대화 시키는 것을 목적으로 시멘트 사용량을 높여 W/C비를 20%로 설정하였고 경화촉진제는 시멘트 중량대비 0%, 1%, 3%의 3수준으로 설정하였다. 또한 시멘트의 종류는 C₃S의 함량이 다른 일반포틀랜드 시멘트 (이하 OPC라고 칭함)와 3종시멘트 두 가지로 사용했으며 양생조건으로는 온도 20℃, 습도 60%로 항온·항습기를 이용하여 기건 양생을 실시하였다.

Table 3 Mixing design of cement paste

Specimen series		Cement type	W/C (%)	Unit weight (kg/m ³)		AD (C×%)	HA (C×%)
				W	C		
OPC series	OPC-0	OPC	20	200	1000	1.2	0
	OPC-1						1
	OPC-3						3
3J series	3J-0	High-Early-Strength Cement	20	200	1000	1.2	0
	3J-1						1
	3J-3						3

여기서, AD: Superplasticizer (시멘트 중량 대비 첨가)
HA: Hardening accelerator (시멘트 중량 대비 첨가)

2.4 측정항목

본 실험의 측정 항목은 Table 4와 같이 굳지 않은 페이스트와 경화한 페이스트로 나누었다. 또한 경화촉진제의 조강성 성능검증을 위해 실험체의 양생재령은 4, 6, 8, 12시간으로 설정하였다.

Table 4 Measurement Items

Experiment method	Items	Standard	Experiment equipment
Fresh cement Paste	Zero Flow	KS L 5105
	Setting time	KS L 5108
Hardened Cement Paste	Compressive strength	KS L ISO 679
	TG/DTA (Thermo Gravimetric Differential Temperature Analysis)	—
	SEM (Scanning Electron Microscope)	—
	Conduction calorimetry	—
	XRD	—

3. 실험결과 및 고찰

3.1 경화촉진제 사용량에 따른 유동특성

Fig. 3은 경화촉진제 첨가량에 따른 페이스트 Zero Flow 값을 나타낸 것이다. 실험 결과 경화촉진제의 사용량이 증가할수록 Zero Flow 값은 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 경화촉진제의 성분 중 유동성을 증가시키는 성분이 포함되어 있는 것으로 사료되며 일반 OPC를 사용한 실험체 보다 3종 시멘트를 사용한 실험체에서 유동성이 감소하는 원인은 3종 시멘트의 분말도 증가로 인하여 물과의 흡착 부족으로 인해 나타나는 현상으로 판단된다.

3.2 경화촉진제 사용량에 따른 응결실험 결과

Fig. 4는 경화촉진제의 사용량에 따른 응결시간을 나타낸

Fig. 3 Zero Flow test results

Fig. 4 Setting time test results

그림이다. 실험결과 경화 촉진제 사용량이 증가 할수록 응결 시간은 단축 되는 것을 알 수 있었으며 또한 일반 OPC 보다 3종시멘트를 사용한 실험체가 경화촉진제와 반응이 활발한 것을 알 수 있었다. OPC-0의 실험체와 OPC-3의 실험체를 비교하였을 때 180분의 응결시간을 단축시키는 것을 알 수 있었으며 3J-0의 실험체와 3J-3의 실험체의 응결시간차이는 220분의 차이가 나타났다. 또한 OPC-3이 3J-0보다 응결시간이 단축되는 것으로 나타났으며 이는 경화 촉진제가 시멘트 화합물 중 C_3A 와 C_4AF 를 촉진시켜 응결시간을 단축시키는 것으로 판단된다.

3.3 경화촉진제 첨가량에 따른 $Ca(OH)_2$ 정량분석

Fig. 5는 재령별 $Ca(OH)_2$ 함유량 비율을 나타낸 것이다. 실험결과 촉진제의 사용량이 증가할수록 $Ca(OH)_2$ 의 생성량이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 동일 재령에서의 사용된 시멘트에 따라 $Ca(OH)_2$ 의 생성량을 비교해 보았을 때 OPC를 사용한 실험체보다 3종 시멘트를 사용한 실험체에서 $Ca(OH)_2$ 가 많이 생성된 것을 알 수 있다. 이는 3종시멘트의 조강 성능에 따라 차이가 나는 것으로 판단된다. 하지만 OPC-3의 실험체는 촉진제가 혼입되지 않은 3J-0보다 $Ca(OH)_2$ 이 많이 생성된 것을 알 수 있다. 또한 $Ca(OH)_2$ 생성량과 응결시간을 비교 하였을때 응결시간이 단축될수록 $Ca(OH)_2$ 의 생성량이 증가하는 현상을 나타났으며 응결시간이 $Ca(OH)_2$ 생성에 영향을 미치는 것으로 사료된다. 따라서 촉진제는 시멘트의 종류에 상관없이 촉진제의 주 성분인 Ca^{2+} 이온이 용해되어 과포화 농도에 빨리 도달하게 만드는 역할을 함으로써 $Ca(OH)_2$ 의 결정 석출 속도에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Fig. 5 $Ca(OH)_2$ measurement results

Fig. 6 Compressive strength test results

3.4 경화촉진제 사용량에 따른 압축강도 결과

Fig. 6은 재령별 촉진제 함유량에 따른 압축강도를 나타낸 그림이다. 실험결과 경화촉진제 사용량이 증가할수록 압축강도를 증가하는 형상을 보였으나 3J-3의 실험체만 본 연구에서 설정한 재령 6시간의 목표 강도를 만족하는 하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 설정한 목표강도를 만족하기 위해서는 3종시멘트 사용이 필수적이라 할 수 있으며 촉진제 또한 사용 시멘트 량의 3% 이상이 사용되어야 할 것으로 판단된다. 또한 앞서 고찰한 응결실험과 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 정량분석 실험 그리고 압축강도 실험결과를 비교한 결과 촉진제의 사용량이 증가할수록 응결시간이 단축되며 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 생성량을 촉진시켜 초기강도에 영향을 미치는 것으로 보아 촉진제는 C_3S 이외의 다른 시멘트 화합물인 C_3A , C_2S , C_4AF 도 촉진시키는 것으로 판단된다.

3.5 경화촉진제 사용량에 따른 미소수화열 측정 결과

Fig. 7은 경화촉진제 사용량에 따라 제1차 피크의 수화속도를 나타낸 것이다. 수화속도 실험결과 OPC-Series 보다 3J-Series의 경우 초기 수화열이 높은 것을 알 수 있다. 이는 3종시멘트가 일반 OPC 보다 분말도가 높기 때문에 물과의 흡착 작용이 많기 때문에 수화열이 높은 것으로 판단된다. 또한 경화촉진제 사용량에 따라 수화 발열량이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 경화촉진제가 1차피크의 주된 수화 발열의 시멘트 화합물 중 C_3A 와 C_4AF 를 자극시키는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 경화촉진제 사용량에 따라 72시간 동안의 제2차 피크의 수화열을 나타낸 것이다. 수화속도 실험결과 OPC-Series

Fig. 7 Hydration heat of the first peak point depending on the amount used hardening accelerator

Fig. 8 Hydration heat of the second peak point depending on the amount used hardening accelerator

보다 3J-Series가 초기 수화속도가 빠르며 특히 C_3S 의 함량과 관계가 있는 2차피크가 빠른 시간에 나타나며 높게 나타나는 것을 알 수가 있다. 이는 경화 촉진제가 주로 C_3S 를 촉진시키기 때문에 OPC의 C_3S 함량보다 3종시멘트의 C_3S 함량이 높음으로 인해 이와 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다. 또한 경화촉진제 사용량이 증가할 수 록 1차 피크점이 사라지기 전 이미 2차 피크점을 향해 수화속도가 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 경화촉진제를 첨가함에 따라 C_3S 의 수화속도를 촉진 시킨 결과로 판단 할 수 있다. 따라서 수화속도 측정 실험을 통하여 본 연구의 핵심인 경화촉진제의 혼입에 따라 약 1시간 이후부터 경화촉진제가 C_3S 의 수화를 촉진시켜 조기에 강도발현을 이끌어내는 효과를 확인했다.

3.6 경화촉진제 사용량에 따른 XRD 측정 결과

Fig. 9의 (a), (b), (c)는 OPC series의 XRD분석결과를 나타낸 그림이다. OPC-0의 경우 수화 6시간에서부터 Ettringite

및 수산화칼슘 피크가 나타나고 있으나, 피크의 크기가 매우 미약하다. 이와 비교하여 경화촉진제를 사용한 OPC-1시편에서는 4시간에서부터 미약하게나마 에트링자이트 피크가 나타나고 있으며, OPC-3 사용한 시편에서는 4시간에 이미 Ettringite 피

Fig. 9 XRD analysis results

크와 수산화칼슘 피크가 관찰되고 있다. 따라서 경화촉진제를 사용함에 따라 Ettringite 피크가 나타나는 시기가 앞당겨지고, 동일 시간대에서 피크가 더 높게 나타나고 있어 시멘트의 수화반응이 촉진됨을 알 수 있다.

또한 Fig. 9의 (d), (e), (f)는 3J series의 XRD분석결과를 나타낸 그림이다. 3J-0의 분석결과 C₃A와 이수석고의 반응을 통하여 생성되는 Ettringite의 피크가 높게 나타나고 있으며, C₂S와 C₃S의 수화반응을 통하여 생성되는 Ca(OH)₂의 피크가 빠른 시간에 높게 나타나고 있다. 이는 3종 조강시멘트의 화합물 중 반응속도가 빠른 C₃A와 C₃S의 함량이 높기 때문인 것으로 판단된다. 또한 촉진제가 사용된 3J-1, 3J-3의 동일 재령의 분석결과 촉진제를 사용한 시편의 Ettringite 피크 및 Ca(OH)₂ 피크가 촉진제의 사용량이 증가할수록 높게 나타나는 것으로 나타났으며 촉진제의 사용량이 증가함에 따라 3J-1보다 3J-3시편에서 Ettringite의 피크가 먼저 사라지는 것으로 나타났다. 이는 촉진제가 Ettringite와 반응하여 Ca(OH)₂를 생성하기 때문에 Ca(OH)₂의 피크는 증가하고 Ettringite의 피크는 감소하는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 사용된 경화촉진제는 일반 포틀랜드 시멘트 보다 3종조강시멘트에 효과적인 것을 알 수 있었다.

3.7 시멘트 종류와 경화촉진제 첨가량에 따른 SEM 분석

본 연구에서는 촉진제의 사용량에 따라서 초기의 수화생성물을 시각적으로 확인하기 위하여 2000배율로 SEM 분석을 실시하였다. Photo 1은 OPC를 사용한 실험체의 촉진제 사용량에 따른 SEM 관찰결과를 나타낸 것이다.

OPC-0의 SEM 관찰결과 재령4시간 실험체에서는 미반응 시멘트가 다량 관찰되고 있으며, 재령6시간이 경과하면서 미

세한 수화물이 관찰되었다. 또한 재령8시간이 경과하면서 판상형의 Ca(OH)₂와 미세한 침상형의 Ca(OH)₂ 수화물이 관찰되었다. 촉진제 1%를 사용한 OPC-1의 경우 재령4시간에서 시멘트 입자들 사이에서 수화물이 관찰되나 OPC-0과 큰 차이를 나타내지는 않고 있다. 이와 비교하여 촉진제 3% 사용한 OPC-3의 경우 재령4시간에서부터 수화물이 관찰되었으며, 재령6시간에서 부터는 잘 발달된 Ca(OH)₂의 결정이 관찰되었다. 또한 재령 12시간에서는 OPC-0, OPC-1보다 수화물의 조직이 치밀하게 나타나고 있으며, 상대적으로 수화반응이 크게 향상되었음을 알 수 있다.

Photo 2는 3J-Series의 SEM분석 형상을 나타낸 것이다. 3J-0 실험체에서는 재령4시간부터 시간이 경과함에 따라 Ca(OH)₂의 형상이 관찰되었으며 재령 8시간 이후부터는 monosulphate와 C-S-H의 형상도 같이 관찰 되었다. 그리고 재령 12시간에서는 육면체의 판상형 결정인 Ca(OH)₂와 강도에 영향을 미치는 C-S-H의 결정과 Ettringite의 결정도 함께 관찰되었으며 수화생성물간 조직이 치밀한 것을 알 수 있다. 또한 3J-1의 SEM 분석 결과 3J-0과 비교하여 수화초기부터 다량의 수화생성물이 관찰되어지는 것을 알 수 있었다. 특히 Ettringite의 경우 3J-0시편에서는 소량만 관찰되어지고 있으며 결정이 미세하게 나타났다. 하지만 촉진제를 사용한 3J-1 시편에서는 6시간 이후부터 Ettringite가 관찰되며 수화물의 결정 또한 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 미세조직 역시 촉진제를 사용하지 않은 3J-0 보다 빠른 재령에 치밀한 구조를 나타내고 있음으로 강도발현을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 3J-3의 시편에서는 재령 4시간의 시편에서부터 미세조직이 매우 치밀하게 나타나는 것을 알 수 있다.

또한 3J-1과의 차이점을 살펴보면 3J-3의 시편에서는 상대적으로 Ca(OH)₂와 Ettringite 결정이 소량으로 나타났다. 이

(a) OPC-0

(b) OPC-1

(c) OPC-3

Photo 1 SEM analysis result of of OPC Series (x2000)

Photo 2 SEM analysis result of 3J Series (x2000)

러한 결과는 앞서 고찰한 XRD 결과와 유사하게 나타났으며 Ettringite의 경우 3J-1보다 3J-3에서 피크가 더 높게 나타났다. 이는 Ca(OH)_2 의 경우 재령6시간 까지 3J-1과 3J-3은 유사한 피크점을 보이고 있는 점을 고려 하였을 때 Ettringite와 Ca(OH)_2 의 생성이 소량으로 생성된 것이 아니라 수화생성물이 치밀하게 형성되어 관찰이 불가능한 것으로 판단된다. 따라서 본 SEM 분석을 실시한 결과 촉진제 사용량이 Ca^{2+} 이온의 생성에 영향을 미치는 것으로 나타났으며 Ca^{2+} 이온의 증가로 수화반응 속도가 증가하며 수화생성물 또한 증가시키는 것으로 나타났다. 이는 XRD결과와도 일치하는 것으로 판단되었다.

4. 결 론

C3S가 다량 함유된 조강시멘트와 칼슘계 경화촉진제를 병용 사용한 시멘트페이스트의 초기 재령 압축강도발현 메커니즘을 미세화확분석 실험을 통하여 규명한 것으로, 본 연구 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 조강시멘트에 첨가한 경화촉진제 양이 증가할수록 초기재령 압축강도는 크게 나타났으며, 경화촉진제 첨가량 3%인 경우, 재령 6시간에서 연구 목표인 압축강도 10MPa를 얻을 수 있었다.
- (2) 칼슘계 경화촉진제 사용에 의한 초기 재령 압축강도 증가는 경화촉진제의 주성분인 Ca^{2+} 이온이 용해되어 과포화 농도에 빨리 도달하게 만드는 역할을 함으로써 C_3S 를 조기에 자극시키고 다량의 Ca(OH)_2 의 결정 석출 속도에 영향을 미치기 때문으로 판단된다.
- (3) 경화촉진제와 조강시멘트에 다량 함유된 C_3S 의 반응

에 기인하는 수화발열속도 및 수화발열량이 커지는 것을 알 수 있으며, 이는 특히, 2차 피크시간을 앞당기는 역할을 하는 것으로 나타났다.

- (4) X선 회절 분석으로부터 경화촉진제 사용에 의해 초기 재령에서 Ettringite와 Ca(OH)_2 피크가 크게 나타나고, 이는 재령별 TG/DTA 실험 및 SEM 분석 결과와 일치하는 것으로 보아, 경화촉진제가 수화반응을 촉진시키는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

This study is part of the output of the research funding for Advanced-City Development project 2012 of the Ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs (Project No. 12, Advanced-City C19).

References

1. C. Tashiro, H. Tanaka. (1977), The effect of the lowering of initial curing temperature on the strength of steam cured mortar, *Cement and Concrete Research*, 7(5), 545-551.
2. Caijun, S., Fuqiang, H., Yanzhong, W. (2012), Effect of pre-conditioning on CO_2 curing of lightweight concrete blocks mixtures, *Construction and Building Materials*, 26(1), 257-267.
3. Caijun, S., Yanzhong, W. (2008), Studies on some factors affecting CO_2 curing of lightweight concrete products, *Resources, Conservation and Recycling*, 52(8-9), 1087-1092.
4. Daczko, J. A., Kurtz, M. A., Bury, M. A., Attiogbe, E. K. (2003), Zero Energy System for Precast Concrete Production, *Concrete International*, 25(4), 103-107.
5. Ian, H., Jacqui, G., Andrew, D. F. P. (2010), Managing for sustainability: findings from four company case studies in the UK precast concrete industry, *Journal of Cleaner*

-
- Production*, 18(2), 152-160.
6. J. W. Bull, C. H. Woodford (1997), Design of precast concrete pavement units for rapid maintenance of runways, *Computers & Structures*, 64(1-4), 857-864.
 7. Jose V. Marti, Fernando, G., Victor, Y., Julian, A. (2013), Design of prestressed concrete precast road bridges with hybrid simulated annealing, *Engineering Structures*, 48, 342-352.
 8. L. B., X. Y., Z. S., L. J. (2001), Some factors affecting early compressive strength of steam-curing concrete with ultrafine fly ash, *Cement and Concrete Research*, 31(10), 1455-1458.
 9. Maya, L. F., Zanuy, C., Albajar, L., Lopez, C., Portabella, J. (2013), Experimental assessment of connections for precast concrete frames using ultra high performance fibre reinforced, *Construction and Building Materials*, 48, 173-186.
 10. Min, T. B., Cho, I. S., Lee, H. S. (2012), Fundamental Study on the Development of Precast Concrete without Steam Curing, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 28(12), 61-68.
 11. Min, T. B., Cho, I. S., Lee, H. S. (2013), Fundamental Study on the Strength Development of Cement Paste using Hardening Accelerator and High-Early-Strength Cement, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 13(4), 407-415.
 12. Paolo, M., Maria, G. M. (2010), An innovative passive control technique for industrial precast frames, *Engineering Structures*, 32(4), 1123-1132.
 13. S. Turkel, V. Alabas. (2005), The effect of excessive steam curing on Portland composite cement concrete, *Cement and Concrete Research*, 35(2), 405-411.
 14. Vacharapoom, B., Nashwan, D. (2006), Intelligence approach to production planning system for bespoke precast concrete products, *Automation in Construction*, 15(6), 737-745.
 15. Vanessa, C. C., Mounir, K. E. D., Maria, C. N. (2007), Using a modified genetic algorithm to minimize the production costs for slabs of precast prestressed concrete joists, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 20(4), 519-530.
 16. Yavuz, Y., A. M. T. Waleed, Mohd. Saleh, J., Saleh, L. (2013), AAC-concrete light weight precast composite floor slab, *Construction and Building Materials*, 40, 405-410.
- Received : 12/07/2013
Revised : 01/08/2014
Accepted : 01/15/2014

요 지

본 연구는 조강시멘트와 경화촉진제를 사용하여 조기강도 발현의 메커니즘을 분석하는 것이 목적이다. 연구결과 경화촉진제는 시멘트와 수화반응시 Ca(OH)_2 의 촉진시키는 것을 TG/DTA 실험을 통하여 검정하였다. 압축강도 측정결과 경화촉진제의 사용량이 증가 할수록 초기압축강도가 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 미소수화열 측정결과 경화촉진제는 시멘트의 성분중 C_3S 의 수화반응을 촉진시키는 것으로 나타났다. XRD분석결과 재령별 수화생성물을 확인할 수 있었으며 경화촉진제의 사용량이 증가할수록 수화물들의 피크점이 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. SEM촬영을 한 결과 촉진제의 첨가량에 따라 Ca(OH)_2 의 생성과 재령에 따라 C-S-H의 형상을 관찰할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 사용된 경화촉진제는 조기강도발현 시키는 것에 대해 효과적인 것을 확인 할 수 있었다.

핵심 용어 : 시멘트 수화반응, 경화촉진제, 조강시멘트, 미세분석, 조기강도