팽창제를 사용한 시멘트 혼합물의 재령별 수화물의 특성과 초기강도 개선 효과

송태협 · 박지선[†] · 이세현
한국건설기술연구원 공공건축연구본부

Hydrate Characteristics of Cement Mixtures with Expansion Additive According to Age and Improvement Effect on Initial Strength

Tae-Hyeob Song, Ji-Sun Park[†] and Sea-Hyun Lee

Building Research Department, Korea Institute of Construction Technology

(2013년 10월 1일 접수 : 2013년 10월 14일 최종수정 : 2013년 10월 15일 채택)

Abstract CSA, a cement mineral compound that is mainly composed of $3\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4$, generates ettringite as a hydration product after a reaction with glass (lime), gypsum and water to speed up the hardening process and enhance the strength and degree of expansion. When used as a cement admixture, there is increased production of ettringite, which can improve the initial strength in the first three days and ameliorate the reduction in the initial strength caused by the use of fly ash in particular. In this study, a hydrate analysis was performed using XRD and SEM after substitution with fly ash (30 %) and CSA (8 %) with the goal of observing the effect of CSA on the initial strength of a cement mixture containing fly ash. The results of the analysis showed that an addition of CSA promoted the production of ettringite and improved the initial strength, resulting in the generation of hydrates, which can effectively enhance the long-term strength of these materials.

Key words CSA, fly ash, hydrate, cement, hydro thermal reaction.

I. 서 론

보통의 플라이애시는 그 자체는 수화하지 않고 수산화칼슘(calcium hydroxide), 알칼리 등을 첨가하는 것에 의해 수화가 진행된다. 주로 수화생성물은 칼슘실리케이트 수화물(calcium silicate hydrate, 이하 CSH)이며 장기간에 걸쳐 수화물을 생성한다. 플라이애시 시멘트의 수화에 의하여 생성되는 수화물은 시멘트의 경우와 거의 동일하나, 생성하는 CSH의 Ca/Si비는 시멘트보다 낮게 나타나는 것이 일반적이다.

플라이애시 중의 이산화규소(silicon dioxide), 산화알루미늄(Aluminium oxide)은 공급되는 수산화칼슘이 많을수록 수산화칼슘을 다량 고정하고 생성되는 수화물은 칼슘이 많아지게 되며, 수산화칼슘이 적은 경우에는 그 반대로 된다. 즉, 수산화칼슘의 첨가량이 많을수록 빠르고, 이수석고의 첨가에 의해 플라이애시의 반응량이 증가한

다. 이것은 SO_4^{2-} 가 Al_2O_3 와 반응하여 산화알루미늄의 용출을 촉진시키고, 플라이애시의 유리결정 구조를 파괴함으로 인해 반응표면적이 증가하여 반응성이 높아지기 때문이다. 플라이애시의 유리질상과 Ca^{2+} 와의 반응은 일반적으로 느리고 상온에서는 1~3일부터 일어난다.¹⁾

플라이애시를 다량 대체하여 혼합한 플라이애시 시멘트의 경우, 보통 포틀랜드시멘트에 비하여 Ca^{2+} 이온농도가 낮고, 엘라이트(elite)의 수화반응이 늦어지기 때문에 초기강도 발현의 저하 및 수화열의 감소현상이 나타난다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 플라이애시 시멘트에 각종 무기염계 혼화제를 첨가하여 초기에 보다 높은 강도발현을 나타내도록 하였다. 이들 무기염계 혼화제는 K, Na, SO_3 등을 함유한 것으로 알칼리성을 나타내고 있다.²⁾

CSA 팽창제는 시멘트 및 물과 혼합하는 경우 수화반응에 의해 주로 에트링자이트(ettringite) 또는 수산화칼슘

[†]Corresponding author

E-Mail : batsun@kict.re.kr (J.-S. Park, KICT)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

등을 생성하여 콘크리트를 팽창시키는 작용을 하는 혼화재료로 정의할 수 있다. 이러한 CSA 팽창제는 미국의 ACI분류에 따르면 K형에 해당하며, 국내에서는 혼화재료로서 KS F 2562(콘크리트용 팽창제)로서 규격화되어 있다. CSA는 석회, 석고, 보오크사이트(bauxite)를 주 성분으로 하는 소성화합물을 적당한 입도가 되도록 분쇄한 것으로 $3\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4$, 유리석회, 석고의 3가지 주요광물로 이루어져 있다.^{3,4)} 이들 광물조성의 수화반응에 의해 생성된 에트린자이트($3\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)는 수 마이크로미터 정도의 미세한 침상결정으로 콘크리트 중의 미세공극을 충전하고 특히 콘크리트를 팽창 및 조강을 시키는 작용을 한다. 이와 같은 팽창은 강도증진에 따라서 생기는 팽창변형으로서 강도발현 전에 팽창하는 알루미늄 분말에 의한 가스발생이나 생석회의 수화에 의한 체적 증가와는 본질적으로 다른 것이다. 에트린자이트에 의한 팽창기구에 관해서는 결정 성장설, 재결정설, 분화설, 팽윤설 등이 보고되고 있으나, 에트린자이트의 결정성장 또는 생성량의 증대가 팽창의 주요인으로 생각하는 것이 타당하다. 이와 같은 CSA를 사용한 시멘트 수화물은 에트린자이트의 생성에 의해 조직을 치밀화하며, 건조수축을 저감하는 동시에 수밀성이 향상되며, 특히 팽창을 구속하는 것에 의해 미리 압축응력을 도입할 수 있는 것이다.

따라서 본 연구에서는 플라이애시 사용에 따른 초기강도 저하를 개선하기 위하여 CSA를 부분적으로 치환하고 이때 발생하는 수화열 및 성분을 분석하여 초기강도 개선효과를 분석하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서는 향후 플라이애시의 현장 활용 등을 고려하여 현실적으로 사용 가능한 플라이애시의 사용범위를 시멘트 중량의 30 %로 한정하여 실험을 진행하였다. 수화특성 분석을 위한 배합은 Table 1과 같이 플라이애시의 대체량을 시멘트 중량의 10, 20, 30 %까지 대체하고,

초기강도 개선을 위하여 보오크사이트계 CSA를 플라이애시 중량의 8 % 혼합하여 사용하였다. 혼합수의 양은 충분한 수화를 위하여 55 %로 하였으며, 배합표에 의하여 제작된 페이스트는 양생조건 25 °C의 환경에서 양생을 실시하고, 재령 6시간, 1, 3, 7일 경과한 후 실험체를 아세톤에 침지하여 수화를 정지시키고 건조에 따른 수화물의 변화를 방지하기 위하여 온도조건 45 °C에서 건조를 실시하여 각 실험에 필요한 시료를 준비하였다.

본 실험에서는 플라이애시 및 CSA를 함유한 시멘트 페이스트의 수화특성을 분석하기 위하여 미소수화열 측정을 통한 각 배합의 발열량을 측정하였고, 생성된 수화물의 분석을 위하여 X선 회절 분석을 이용하여 정량 분석을 실시하였다. 미소수화열 측정을 위한 시료는 배합별로 약 20 g씩 제작한 후 물-결합재비를 55 %로 수화시켰으며 이때의 항온조의 온도는 23 °C로 유지하였다. 잔골재 및 굵은골재가 포함되지 않은 배합에서 물-결합재비 55 %는 매우 높은 수치이나 미소수화열 측정은 발열량 자체가 중요한 것이기 때문에 완전한 수화를 위하여 물-결합재비를 높게 설정하였다. 본 실험에서 사용한 측정 장비는 6개의 시료를 동시에 측정할 수 있는 다점 측정형 Multi-Micro Calorimeter(MMC-5116)를 사용하여 측정을 실시하였다. XRD 분석은 각각의 재령에서 아세톤에 침지하여 수화를 정지시킨 시편을 대상으로 측정을 실시하여 재령 및 온도에 따른 수산화칼슘 및 에트린자이트 그리고 미수화물의 생성상태를 분석하였으며, 경화체의 미세구조를 살펴보기 위해 주사전자현미경 관찰을 실시하였다. 시편은 재령 1, 3, 7일에서 수화를 아세톤으로 정지시키고 건조시킨 후 상분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미소수화열 분석

시멘트를 물과 혼합하면 발열을 하면서 반응을 하는데 이때의 발열을 수화열(heat of hydration)이라 하며, 발생

Table 1. Mixing design and measurement list

Specimen	Cement(g)	Fly ash(g)	CSA(g)	Water(g)	List of measurement according to the ages*		
					Heating value	X-ray diffraction	SEM
FA 0	100	0			1d	1d, 3d	1d, 3d, 7d
FA 10	90	10			1d	1d, 3d	1d, 3d, 7d
FA 20	80	20					1d, 3d, 7d
FA 30	70	30		55	1d	6h, 1d, 3d	1d, 3d, 7d
FA 10 C8	90	9.2	0.8		1d	1d, 3d	1d, 3d, 7d
FA 20 C8	80	18.4	1.6				1d, 3d, 7d
FA 30 C8	70	27.6	2.4		1d	6h, 1d, 3d	1d, 3d, 7d

*h: hour, d: day

하는 생성열, ΔH 는 음의 값으로 표시되고 이 때의 화학반응성은 반응 전후의 Gibbs 자유에너지 차, ΔG 로 나타낼 수 있다. 유리석회, 엘라이트, 알루미늄이트(aluminate)와 같은 화합물의 발열은 크게 나타나지만 γ -C₂S, β -C₃S, 석고와 같은 화합물의 발열은 작고 수화하기 어렵다고 알려져 있다.⁵⁾

수화의 단계는 S_I, S_{II}의 유도기, S_{III}의 가속기, S_{IV}, S_V의 감속기로 나눌 수 있다. S_I은 주로 물과의 접촉에 의한 활성표면의 신속한 반응단계, S_{II}는 표면의 용해가 점차 과포화를 함함과 동시에 수화결의 흡착에 의해 수화가 일단 억제되는 단계, S_{III}는 물의 침입이 내부까지 이루어지며, 엘라이트와 같은 단기 반응형 화합물이 일제히 수화하기 시작하는 단계, S_{IV}는 다량으로 생성된 수화물로 입자 사이가 매워지고, 이온이 이동하기 어려워져서 수화속도가 급속히 저하하는 단계, S_V이후는 벨라이트(Belite)나 페라이트 같은 장기 반응형 화합물이 천천히 수화해 가는 단계이다.⁶⁾

이들 단계의 길이는 시멘트의 종류, 조성, 입자의 크기, 물-결합재비 등에 따라 크게 다르며, 강도발현에 커다란 영향을 준다.

수화에 따라 발생하는 열은 반드시 수화반응과 비례한다고 할 수는 없으나, 반응 정도를 확인 하는 데는 중요한 역할을 한다. 본 실험에서는 플라이애시를 30%까지 대체하고 이때 CSA를 혼입한 것과 혼입하지 않은 것을 비교 분석하였으며, 기준 배합으로 시멘트만을 사용하였다.

미소수화열을 측정하기 위한 물-결합재비를 55%로 하여 23°C에서 72시간까지 측정한 미소수화열량 및 제1, 제2 피크(peak) 도달 시간은 Table 2와 같다.

Fig. 1. Hydration reaction model(Cement).⁶⁾

Table 2. Concentration time and heating value of 1st and 2nd peak

Specimen	1 st peak		2 nd peak	
	Concentration time (min.)	Heating value (cal/g/h)	Concentration time (min.)	Heating value (cal/g/h)
FA 0	6.7	6.75	11.48	2.87
FA 10	6.7	6.60	12.36	2.52
FA 10 C8	6.7	6.64	12.12	2.50
FA 30	6.5	5.38	12.47	1.83
FA 30 C8	6.5	5.56	12.36	1.96

Fig. 2는 제1피크를 나타낸 것으로 시멘트의 발열량은 6.75 cal/g/h를 나타내며, 플라이애시 대체량이 증가할수록 점차 낮은 발열특성을 보이고 있다. 플라이애시를 10% 대체할 경우에는 약 3%정도 낮은 발열을 보이나 30%를 대체할 경우에는 시멘트만을 사용한 배합에 비하여 30% 정도 낮아져 발열량의 감소가 매우 급격하게 진행되는 것을 알 수 있다. CSA를 플라이애시 대체량의 8%를 혼합할 경우, 플라이애시 사용량 10%에서는 6.64 cal/g/h의 발열량을 나타내며, 플라이애시 30%에서는 5.56 cal/g/h의 발열량을 보여 플라이애시만을 사용한 배합보다 최대 3%까지 발열량이 높아졌다.

위와 같이 플라이애시 사용량이 증가할수록 수화열이 낮아지는 것은 플라이애시를 대체함으로써 시멘트 성분 중의 유리석회 함량이 낮아져 엘라이트에 의한 수화발열이 낮기 때문이다. CSA를 첨가할 경우 발열량이 약간 높아지는 것은 CSA에서 공급되는 유리석회의 양이 증가함으로써 전체적인 용해열이 증가하고 에트린자이트 생성열에 의한 것으로 판단된다.

제2피크는 일반적으로 4시간 이후부터 발현하기 시작하여 8~12시간 정도에 최고 피크를 보인다(Fig. 3참조). 시멘트 및 플라이애시를 함유한 배합의 수화열 측정 결과 약 4시간부터 수화가 다시 가속하기 시작하여 12시

Fig. 2. Heat of hydration(1st peak).

Fig. 3. Heat of hydration(2nd peak).

간 정도에 제2차 피크를 형성하고 있다. 1차 피크와 동일하게 시멘트만을 사용한 배합의 발열이 가장 높으므로 나타났으며, CSA를 첨가할 경우 플라이애시만을 사용한 배합보다는 계속적으로 높은 발열피크를 나타내고 있다. 유도기 부분에서 CSA를 첨가한 배합의 누적발열량이 시멘트만을 사용한 배합에 비하여 다소 높게 나타났으나 유도기 이후 계속적으로 시멘트만을 사용한 배합의 발열량이 증가하는 것으로 나타나 플라이애시에 의한 수화열 감소량이 현저한 것으로 알 수 있다. 제2피크 이후 감속기로 접어들어 확실한 발열피크는 나타나지 않지만, 엘라이트 및 벨라이트는 다량으로 생성된 칼슘실리케이트상으로 뒤덮여 이온의 이동이 어려워져 수화속도는 점차 느려지고 수화물간의 접촉에 의하여 응결이 시작되는 것으로 분석되었다.

이상과 같이 플라이애시 및 CSA 혼합에 따른 시멘트 혼합물의 발열특성을 분석하기 위하여 미소수화열을 측정된 결과, 플라이애시의 양이 증가할수록 응결과 경화에 영향을 미치는 제1피크 및 제2피크 모두 시멘트만을 사용한 배합에 비하여 발열량은 낮게 나타나는 것을 알 수 있었다, 그러나 CSA를 8% 첨가할 경우 플라이애시만을 대체한 배합에 비하여 최대 3%의 발열량 증가가 있었으며 제1피크 및 제2피크의 도달시간도 빠르게 나타나 응결과 경화에 영향을 미칠 수 있을 것을 알 수 있었다. 응결과 경화는 수화과정에서 발생하는 수화물의 형태, 공극의 크기 등 다양한 인자의 지배를 받기 때문에 수화발열 특성만으로 CSA의 첨가에 따른 강도개선 효과를 분석할 수는 없다. 즉, 이론고찰에서 언급한 바와 같이 CSA의 첨가에 따른 에트린자이트 생성물의 발현 시기 및 양의 조절에 의한 경화 메커니즘에 의한 강도 개선 효과가 더욱 클 것으로 판단된다.

3.2 X선 회절 분석

X선 회절 분석은 각각의 재료가 결정구조와 격자 크

기에 따라 고유한 회절정보를 가지고 있다는 원리에 따라, X선 빔을 시료에 주사하여 2θ 각도에서 얻은 특정 회절피크 패턴으로 물질을 정량분석하는 방법 중 하나이다.

정량에 이용할 수 있는 회절 피크에 대해서는 여러 가지로 검토되고 있는데, Cu K α 선을 사용한 2θ 값으로 에트린자이트 8.9°, 22.9°, 엘라이트의 29.3°, 알루미늄하이드록사이드의 33.2°, 페라이트의 33.8°, 유리석회의 37.1° 등을 들 수 있다. β-벨라이트 피크의 대부분이 엘라이트의 피크와 겹치므로, 강도가 작은 31.0°의 피크를 사용하는 경우가 많다.

Fig. 4는 재령 1일에서의 시멘트만을 사용한 배합과 플라이애시 10%, 30% 대체한 시료의 분석결과이다. 시멘트 배합 및 플라이애시 10% 대체한 배합의 경우 약 8.9°부근에서 초기의 에트린자이트 생성이 미세하게 나타난 것을 알 수 있으며, 플라이애시를 30% 대체한 배합은 22.9°에서 에트린자이트가 생성된 것으로 나타났다. 피크의 강도로 보아 동일 재령일 경우 플라이애시 첨가 초기의 에트린자이트 생성에 다소 불리한 것을 알 수 있다. 18°부근에서 수산화칼슘의 생성 피크가 나타났으며 33.5° 및 56°부근에서도 미세하게 생성되었다. 전반적으로 재령 1일에서는 미수화물인 벨라이트 및 엘라이트의 생성피크가 높게 나타나 수화물의 생성이 계속적으로 진

Fig. 4. X-ray diffraction Analysis(1day, Not Using CSA) (a) FA0 (b) FA10 (c) FA30.

Fig. 5. X-ray diffraction Analysis(1day, Using CSA)) (a) FA0 (b) FA10 C8 (c) FA30 C8.

행 상태인 것을 알 수 있다.

플라이애시를 30 %로 대체하였을 경우 재령이 경과할수록 18° 부근에서 수산화칼슘 수화물의 생성이 급격하게 증가하는 것으로 알 수 있다. 수산화칼슘 수화물은 재령 3일까지의 생성이 가장 활발하고 이후 플라이애시가 함유한 SiO₂의 성분과의 반응으로 인한 CSH의 생성으로 인해 양은 감소한다. 에트링자이트의 경우 22.9°에서 미세한 발생이 재령 6시간부터 계속적으로 발생되고 있으나 시간이 경과할수록 발생의 강도는 낮아지는 것으로 나타나 점점 소멸되는 것을 알 수 있다. 이는 시간이 경과함에 따라 에트링자이트가 모노설페이트(Mono

sulfate) 등으로 분해되어 에트링자이트 양이 상대적으로 감소되었기 때문으로 판단된다. 미수화물인 벨라이트는 재령 1일에서 가장 높게 나타났으며 재령 3일에서는 수산화칼슘 등의 수화물 등으로 전이된 것을 알 수 있다. 엘라이트는 재령 6시간에서 가장 많이 발견되었으며 재령이 경과할수록 강도가 낮게 나타나는 것으로 보아 벨라이트와 동일하게 수화물생성에 따른 감소로 판단할 수 있다.

플라이애시 30 % 배합에 CSA를 8 % 대체한 배합은 8.9°에서 에트링자이트의 생성이 지속적으로 관찰되었으며, 특히 재령 3일의 경우에는 32°와 36°부근에서 미량의 에트링자이트가 생성되어 CSA의 사용량이 증가에 따라 재령이 증가할수록 강도 증진에 효과적인 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

3.3 상분석

황광률의 연구에 의하면 일반 시멘트만의 수화 생성시에는 재령의 증가와 함께 수산화칼슘의 양이 점차 상승하지만 플라이애시를 대체할 경우 재령 28일 이후에는 감소하는 것으로 나타나는 것으로 보고하고 있다.^{7,8)} 시멘트 초기수화에서 가장 확실한 결정상으로 나타나는 수산화칼슘 및 에트링자이트의 생성 형태를 전자현미경으로 관찰한 결과 CSA를 8 % 대체할 경우 재령 3일까지는 초기강도에 효과적으로 작용하는 에트링자이트의 발생량이 높은 것으로 나타났다.⁹⁾

Fig. 6은 플라이애시를 10 % 대체한 시편의 페이스트의 재령 3일에서의 수화물 형태를 나타낸 것이다. 재령 1일에서는 미량의 수산화칼슘 및 칼슘실리케이트 수화물 등이 생성되었으나, 재령 3일에서는 에트링자이트가 생성된 것을 관찰할 수 있다. 특히 CSA를 8 % 대체한 배합의 사진에서 보는 바와 같이 구형의 플라이애시 입자에 칼슘실리케이트 수화물이 완전하게 생성되었으나, 플라이애시만을 대체한 배합의 경우에는 부분적으로 생성된 것을 볼 수 있다.

Fig. 6. Photos of SEM for FA10 and FA10 C8(3days).

Fig. 7. Photos of SEM for FA30 and FA30 C8(3days).

(CH: Calcium Hydroxide, CSH: Calcium Silicate Hydrate, AFt : Ettringite, FA : Fly Ash)

플라이애시를 30 % 대체한 시험체는 재령 1일에서 플라이애시만을 사용한 배합은 플라이애시 입자 및 미량의 수산화칼슘과 칼슘실리케이트 수화물을 관찰할 수 있으나 CSA를 혼합한 배합에서는 재령 1일에서 다량의 에트린자이트가 생성되었고, 칼슘실리케이트 수화물도 관찰할 수 있다. Fig. 7과 같이 CSA를 8 % 대체한 배합의 경우 재령 3일에서 점차적으로 에트린자이트의 성장이 활발하게 진행되는 것으로 볼 수 있으며 재령 7일에서는 이러한 에트린자이트가 다량의 모노설페이트 수화물과 혼합되어 있는 것으로 나타났다.

이상과 같이 전자현미경을 통한 플라이애시 시멘트와 CSA를 8 % 대체 플라이애시 시멘트의 미세구조를 관찰한 결과 CSA를 첨가할 경우 에트린자이트 수화물의 생성이 활발하여 모세관공극의 분포가 적게 나타났으며, 특히 Fig. 7에서와 같이 CSA 대체량이 상대적으로 많은 플라이애시 30 % 배합에서는 재령 1일에서부터 에트린자이트의 생성이 활발하고 재령 7일에서는 많은 양의 모노설페이트를 관찰함으로써 CSA가 강도 증진을 효과적으로 발휘할 수 있는 수화물의 생성에 많은 역할을 한 것으로 판단된다.

이러한 결과는 타카하시(Takahashi)의 연구와 동일한 결과로서, 플라이애시 입자표면에 알칼리 함량이 더 높아서 수화물의 침전을 방해하기 때문에 미수화 입자 표면 사이에 빈 공간이 존재하고 이에 따른 현미경 상으로 공극 관찰이 쉽게 나타날 수 있다.¹⁰⁾ 또한 1 μm 정도의 초기 에트린자이트 생성물을 수산화칼슘 사이로 발견할 수 있다.

4. 결 론

팽창재를 사용한 플라이애시 시멘트의 초기 수화특성 분석을 위하여 플라이애시를 최대 30 % 치환하고 팽창재인 CSA를 각 8 % 치환하여 시멘트 복합체의 수화열, 경정 성분, 미세구조를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을

수 있었다.

1) 수화특성을 분석한 결과 플라이애시만을 사용할 경우 수화열은 보통포틀랜드시멘트만을 사용한 배합에 비하여 제1피크 및 제2피크의 수화발생량은 낮게 나타났으나 CSA를 첨가할 경우 경화에 영향을 주는 제1피크 도달 시간 및 발열량이 보통 포틀랜드 시멘트 유사한 경향으로 나타났다. 또한 플라이애시 30 %, CSA 8 %를 대체할 경우 재령 1일에서 에트린자이트 생성량이 플라이애시 배합에 비하여 3배 이상 높게 발현하여 초기강도 개선에 효과적으로 작용하였다.

2) X선 분석결과 CSA를 첨가할 경우 재령 7일까지 에트린자이트 수화물의 생성이 활발하였으며, 상대적으로 벨라이트 및 엘라이트 등의 미수화물은 감소하였으며, 플라이애시만을 사용할 경우 수화개시 6시간, 1일에서 에트린자이트 피크가 매우 미약하게 발생하였다. 플라이애시를 30 % 대체하고 CSA를 첨가할 경우 재령 6시간 및 1일에서도 초기강도 개선에 효과적으로 작용할 수 있는 에트린자이트 피크가 명확하게 나타나는 것을 알 수 있었다.

3) 전자현미경 분석에서도 CSA를 첨가할 경우 재령 7일까지 에트린자이트 수화물의 생성이 활발한 것으로 나타났다으며 플라이애시 대체량 대비 8 %중량의 CSA를 사용하면 플라이애시 사용에 따른 초기강도 저감을 개선할 수 있는 것으로 나타났다.

4) CSA 사용량을 플라이애시 사용량의 절대비율로 치환하여 실험을 진행한 결과 플라이애시 사용량이 많을수록 CSA 사용량도 절대적으로 증가하였으며, 이때 재령 3일 이내의 초기에 에트린자이트의 생성이 활발한 것으로 나타나 사용량이 증가할수록 초기강도에 좋은 영향으로 작용하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 한국건설기술연구원 주요사업(인

공지반 구조물의 초장수명 철근콘크리트 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 관련 제위께 감사드립니다.

References

1. Y. K. Cho, J. H. Kim, T. Y. Hyun, Concrete & Slag, Green Solution, p. 125-154, D. B. Si, Korea Iron and Steel Association, Seoul (2012).
2. J. Y. Lee, S. Y. Bae and J. T. Song, Kor. J. Conc. Res., **11s**, 85 (1999).
3. W. K. Bang, Ph. D. Thesis (in Korea), p. 72-90, Yonsei University, Seoul (1998).
4. F. Tomosawa, T. Noguchi and C. Hyeon, J. Conc. Res., **C639**, 13 (1996).
5. Y. Arai, Cement Material Chemistry, p. 227-245, Dainippon Tosho Publishing Co., Ltd. Tokyo (1998).
6. T. H. Song, Ph. D. Thesis (in Korea), p. 30, KonKuk University, Seoul (2005).
7. K. R. Hwang, Ph. D. Thesis (in Japan), p. 123-157, Tokyo University, Tokyo (1999).
8. T. S, Hardened Structures with Products from Hydration Reaction, p. 46-52, Cement Association, Cement Science, Tokyo (1999).
9. E. Berry, R. T. Hemmings, M. H. Zhang, V. M. Malhotra, A. Bilodeau and G. G. Carette, EPRI TR-103151 (in Korea), p.3-8, Daejeon (1993).
10. S. B. P Chirstian, The Influence of Calciumsulfo aluminate as Accelerating Component within Cementitious System, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich (2000).