

결합재로서 플라이애쉬 100% 사용 모르타르의 강도발현에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Strength Development of Using Fly-Ash 100% Mortar for Binder

류금성* 고경택** 강수태* 안기홍* 김성욱*** 이장화**
Ryu, Gum Sung · Koh, Kyung Taek · Kang, Su Tae · Ahn, Ki Hong · Kim, Sung Wook · Lee Jang Hwa

ABSTRACT

Recently, by-products for example of fly-ash, blast-furnace slag and etc are generally using in concrete. However a mount of by-products are mostly dropped into the land and sea. Expecially it is necessary to manage against London Dumping Convention which is prohibited for throwing the by-product into the sea. The purpose of this study is for the active use of the fly ash, which is a by-product of the combustion pulverizes coal thermal power plants, to compensate for the lack of landfill and for conservation of energy, by using fly ash as the supplementary cementitious material, and to prove its possibility as the related products of the cements.

요 약

플라이애시, 고로슬래그 등의 산업부산물은 현재 콘크리트 등에 활용되고 있으나, 아직까지 많은 양을 매립하거나 해양에 배출하고 있는 실정이며, 특히 1996년 런던협약에 의해 산업폐기물의 해양배출이 금지됨에 따라 이데 대한 강력한 대처가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 CO₂ 배출 및 환경과괴의 원인이 되는 시멘트를 전혀 사용하지 않고 산업부산물 중 플라이애시 100% 사용한 콘크리트를 제조하기 위한 기초연구로써 재령, 온도변화, 알칼리자극제를 이용하여 시멘트 제로(zero) 콘크리트를 개발하는데 목적이 있다.

*정회원, 한국건설기술연구원 구조재료연구실 연구원

**정회원, 한국건설기술연구원 구조재료연구실 책임연구원

***정회원, 한국건설기술연구원 구조재료연구실 실장

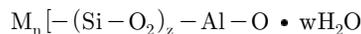
1. 서 론

최근 친환경에 대한 관심 증가와 함께 1992년 브라질 리오에서 지구온난화 방지를 위한 기후변화 협약이 채택된 이후 지구온난화 문제가 인류 공동과제로 인식되면서 세계 각국은 일찍부터 이의 대응방안을 마련하여 왔으며, 특히 1997년 일본 교토에서 기후변화협약에 관한 교토의정서가 채택된 이후, 2005년 발효된 교토의정서가 발효됨에 따라 세계 각국은 온실가스 감축의무를 준수해야 하는 실정에 와 있다. 특히 우리나라는 2013년부터 온실가스를 감축해야 하는 2차 의무이행 대상국에 편입될 것이 확실시됨에 따라 모든 산업분야에 걸쳐 반드시 온실가스를 감축해야하며, 시멘트 및 철강 등 건설과 관련하여 에너지를 대량 소비하고 폐기물을 많이 발생시키는 건설 활동은 온실가스를 줄여야 하는 주요 대상으로 초점이 되고 있다. 특히, 포틀랜드 시멘트는 고온(1450℃)상태에서 용융시켜야만 생산할 수 있기에 대량의 에너지를 소비할 뿐만 아니라 클링커 1톤 생산시 700~870kg의 이산화탄소를 배출하므로 시멘트 산업에서 이산화탄소 배출량은 전 세계 온실가스 배출량의 7%를 차지할 정도로 크기 때문에 국내에서도 시멘트 생산과정에서 배출되는 이산화탄소를 저감하는 대책이 강구되고 있다. 그러나 세계의 시멘트 수요량은 21세기 초반까지 매년 2.5~5.8% 정도 증가가 예상되고 있어서 교토의정서의 준수와 시멘트 수요의 증가를 동시에 충족시키기 위해서는 이산화탄소를 거의 배출하지 않는 알칼리 활성화 시멘트 및 콘크리트 개발 연구가 주된 관심사가 될 것이며, 중점 연구개발 분야는 시멘트를 다량 치환하거나 전혀 사용하지 않는 결합재 개발과 활성화제의 반응성 향상, 상온에서의 중합반응을 통한 고강도 콘크리트의 개발, 알칼리 활성화 콘크리트의 활용기술 개발 등이 될 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 시멘트를 전혀 사용하지 않고 산업 부산물 중 플라이애시를 100% 사용한 콘크리트를 제조하기 위한 기초연구로써 재령, 온도변화, 알칼리자극제를 이용하여 시멘트 제로(zero) 콘크리트를 개발하는데 목적이 있다.

2. 반응 메커니즘

포틀랜드 시멘트를 사용하지 않고 결합재로 Si와 Al이 풍부한 플라이애시와 같은 무기물이 알칼리성의 액체에 의해 활성화되어 결합재로서 작용하게 된다. 이 경우에 발생하는 화학적 반응이 중합반응(Polymerization)이다. 이러한 중합반응은 고알칼리 상태에서 Al-Si 광물에 화학적 반응이 일어나서 중합체의 Si-O-Al-O 결합을 구성하는 과정을 의미하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.



여기서, M : 알칼리요소이고, (-)표시는 결합이 존재함을 의미한다. 그리고 z는 1, 2 또는 3이고 n은 중합도(degree of polymerization)를 나타낸다.

또한, 플라이애시 내의 Si와 Al은 수산화나트륨과 규산화나트륨 용액의 화합물에 의해 활성화되어 결합재로 작용하게 된다. 일반적으로 알칼리성 활성화제로는 수산화나트륨(또는 수산화칼륨)과 규산화나트륨(또는 규산화칼륨)의 화합물로 사용되며, 열이 가해질 경우 화학반응이 가속화되기 때문에 일반적으로 고온에서 양생을 실시한다.

플라이애시를 결합재로 사용한 알칼리 활성화 시멘트는 알칼리 활성화제와 실리카 및 알루미늄 전구체들과의 개별적인 응집 과정에 의한 경화 기구로 특징될 수 있다. CSH gel과 같은 수화생성물이 형성되지 않기 때문에 양생온도에 매우 민감하다. 즉 알칼리 활성화 플라이애시 시멘트의 경화 과정을 살펴보면 1)수산화 이온들의 합성 작용을 통한 전구체들이 형성하고, 2)알칼리-실리카가 부분적으로 재구성되며, 3)무기질 구조의 형성을 위한 재 침전등의 3단계로 요약하여 나타낼 수 있다.

알칼리 활성화 플라이애시 시멘트에서는 Al/Si의 비가 함께 H₂O/SiO₂ 비도 중요하다. H₂O는 알루미늄

늄과 실리카 이온들의 용해 과정에서 중요한 역할을 하기 때문이다. 하지만 알칼리 활성 플라이애시 시멘트의 주요 경화기구인 지오폴리머화는 아직 명확하게 알려지지 않은 상태이다.

3. 실험계획 및 방법

3.1 실험계획

본 실험에서는 시멘트를 전혀 사용하지 않고 일반적으로 통용되는 분말도 3000cm³/g 플라이애시를 결합체로 사용하였다. 알칼리 활성화제는 수산화나트륨(NaOH) 첨가율을 6M, 9M, 12M 및 14M의 수용액 및 규산나트륨(Na₂SiO₃) 수용액을 사용하였고, 양생온도변화(23, 60℃)에 따라 각 재령별 강도발현특성을 검토하였다. 표 1은 KS L 5405에 따른 플라이애시의 물리·화학적 성질을 나타내고 있고 표 2는 실험 적용 배합비를 나타내고 있다.

표 1. 플라이애시의 물리·화학적 특성

이산화규소 (%)	수분 (%)	강열감량 (%)	밀도 (g/cm ³)	분말도 (cm ³ /g)	플로우값 (%)	활성도 지수 (재령 28일)
524	-	25	2.20	4012	97	97

표 2. 실험 적용 배합비(중량비)

플라이애시	모래	물	수산화나트륨 (6M 9M 12M 14M)	액상규산나트륨 (3중)
1	1.5	0.15	0.25	0.25

3.2 배합 및 양생방법

플라이애시 100% 사용한 모르타르의 비빔은 10ℓ 용량의 모르타르 전용 믹서에 플라이애시, 모래를 넣고 3분간 건비빔을 실시한 후 물, 수산화나트륨 및 규산나트륨을 혼합하여 넣고 5분간 비빔을 실시하였다. 알칼리 활성화제의 첨가율 및 양생온도변화에 따른 강도발현을 측정하기 위해 50×50×50mm의 큐빅몰드 이용하여 공시체를 제작하였다. 공시체 타설 후 양생온도변화에 따른 온도상승으로 인해 발생하는 수분의 증발을 막기 위해 비닐을 이용하여 밀봉하였으며, 항온항습기(23℃) 및 오븐(60℃)을 이용하여 양생을 실시하였다. 특히 양생온도 60℃는 24시간 동안 실시한 후 23℃에서 양생을 실시하였다.

4. 시험결과 및 분석

그림 1과 그림 2는 양생온도에 따른 재령별 압축강도를 나타내고 있다. 재령이 증가할수록 압축강도가 증가되는 것으로 나타났으며, 상온(20℃)에서 양생을 실시한 경우에는 10MPa 이상 강도발현을 하지 못했으나, 고온(60℃)에서 양생을 실시한 경우에는 재령 7일을 기준으로에서 30MPa 이상의 강도가 발현되는 것으로 나타났다. 또한 고온(60℃)에서 양생한 경우에는 초기재령 1일강도가 재령 28일 강도의 70~80% 이상 강도발현으로 급격한 강도증진이 일어나는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 플라이애시를 결합체로 사용한 알칼리 활성 시멘트는 알칼리 활성화제와 실리카 및 알루미늄 전구체들과의 개별적인 응집 과정에 의한 경화 기구로 특징으로, CSH gel과 같은 수화생성물이 형성되지 않으므로 양생온도에 매우 민감하기 때문으로 사료된다.

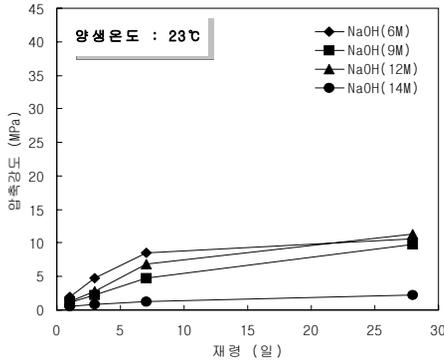


그림 1. 재령별 압축강도(양생온도 23°C)

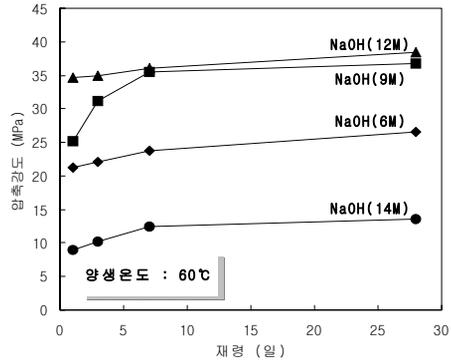


그림 2. 재령별 압축강도(양생온도 60°C)

그림 3은 수산화나트륨의 첨가비에 따른 압축강도를 나타내고 있다. 수산화나트륨 비라 6 mol에서 12 mol까지는 수산화나트륨의 첨가비가 증가할수록 강도발현이 점차적으로 증가하다가 14 mol에서는 강도발현이 급격히 감소하였다. 이것은 플라이애시를 결합재로 사용한 알칼리 활성 시멘트에서 알칼리 활성화제와 결합재와의 초기 반응속도가 매우 빠르게 나타났기 때문으로 판단된다. 따라서 플라이애시를 결합재로 사용한 콘크리트 제조시 압축강도 조절을 위한 배합 및 양생조건은 OPC 콘크리트에 비해 많은 예비 실험과 주의가 요구되며, 활성화제의 첨가량을 적절히 사용해야 할 것으로 판단된다.

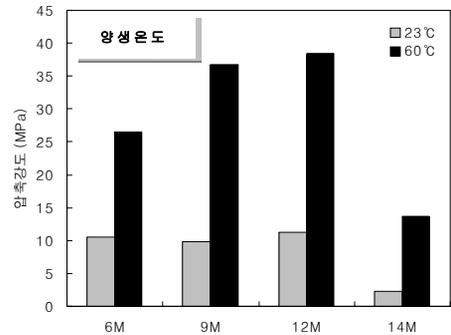


그림 3. 수산화나트륨 첨가비에 따른 압축강도

5. 결론

시멘트를 전혀 사용하지 않고 결합재로서 플라이애시 100% 사용한 모르타르의 재령, 온도변화 및 알칼리 활성화제 첨가량에 따른 압축강도 시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 재령이 증가할수록 압축강도는 크게 나타났으며, 고온(60°C)에서 양생을 실시한 경우가 상온(20°C)에서 양생을 실시한 경우보다 강도발현이 크게 나타났다. 또한 고온에서 양생시 초기재령 1일 강도가 28일 강도의 70~80%이상 발현되는 것으로 나타났다.
- (2) 알칼리 활성화제로 수산화나트륨을 사용한 결과, 첨가량을 적절히 사용해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 공공기술연구회 협동연구사업의 연구비지원(Q21. 건설용 신소재·재활용기술-시멘트 ZERO 콘크리트 개발 및 활용)의 지원 하에 수행되었습니다.

참고문헌

1. 양근혁, 송진규, "알칼리 활성화를 이용한 무시멘트 콘크리트의 구조 성능 및 적용" 한국 콘크리트학회지, 제19권 2호, 2007. 3, pp. 42~48
2. Hardjito, D, and Rangan, B.V. "Development and Properties of Low-calcium Fly Ash-based Geopolymer Concrete" Research Report GC-1, Faculty of Engineering, Curtin Univ. of Technology, 2005