

# 양생온도가 플라이애시 기반 시멘트 ZERO 모르타르의 강도에 미치는 영향

## Influence of Curing Temperature on the Strength Properties of Fly Ash Based Cement ZERO Mortar

강 현 진\*      고 경 택\*\*      류 금 성\*      이 장 화\*\*      김 성 옥\*\*\*  
Kang Hyun Jin   Koh, Kyung Taek   Ryu, Gum Sung   Lee, Jang Hwa   Kim Sung Wook

---

### ABSTRACT

Portland cement production-1.5billion tonnes yearly worldwide-contributes substantially to global atmospheric pollution(~7% of total of CO<sub>2</sub> emissions). Attempts to increase the utilization of fly ash, a by-products from thermal power plant to partially replace the cement in concrete are gathering momentum. But most of fly ash is currently dumped in landfills, thus creating a threat to the environment. Therefore, In this study, influence of curing temperature(30, 60, 90°C) on the strength of properties fly ash based cement ZERO mortar was investigate, measured a weight change and pH change according to each care of curing temperature. The test results that a curing at 90°C is appropriate in case of the high strength concrete is required in the early-age of the curing and 60°C is efficient for the case of requiring high strength at age 28 days. Furthermore pH variation and value of compressive strength are judged to correlate but change of weight is not the case.

### 요 약

포틀랜드 시멘트는 전 세계적으로 매년 15억 톤을 생산하고 있으며, 이로 인해 전체의 배출량에 7% 이상의 CO<sub>2</sub> 가스 배출로 많은 지구환경을 지속적으로 오염을 시키고 있다. 그리고 화력발전소에서 발생하는 산업부산물인 플라이애시를 시멘트와 일부 대체하여 콘크리트에 재활용하고 있으나, 50% 이상을 해안 및 육상에 매립함으로써 환경적인 문제를 유발하고 있다. 따라서 본 연구에서는 플라이애시 기반 모르타르의 양생 온도(30, 60, 90°C)가 강도에 미치는 영향을 검토하였으며, 각각의 양생온도별 중량변화와 pH 변화를 검토하였다. 실험결과 재령초기에 고강도가 요구되는 콘크리트의 경우 90°C의 양생이 적절하며, 재령 28일에서 높은 강도가 요구되는 경우 60°C가 효율적인 것으로 판단된다. 또한 pH 변화와 압축강도 결과는 관계가 있는 것으로 판단되나 중량변화는 관계가 없는 것으로 나타났다.

---

\* 정회원, 한국건설기술연구원 구조재료연구실 연구원  
\*\* 정회원, 한국건설기술연구원 구조재료연구실 책임연구원  
\*\*\* 정회원, 한국건설기술연구원 구조재료연구실 실장

## 1. 서 론

최근 지구온난화 방지를 위한 기후변화 협약이 채택된 이후 지구온난화 문제가 세계의 공동과제로 인식되고 있는 실정이다. 이와 관련하여 전 세계의 국가들이 CO<sub>2</sub> 가스를 절감하기 위한 대책들을 마련하고 있는 실정이다. 최근 2008년 7월에는 일본 도야코에서 열린 G8 정상회담에서 각국 정상들은 2050년까지 배출가스를 현재의 50%로 감축하는 방안을 검토하고 있다. 이렇게 강도 높은 온실가스 감축노력은 우리나라도 예외는 아니며, 2013년부터 온실가스를 감축해야하는 2차 의무 이행 대상국에 편입될 것이 확실시되고 있어 강력한 대책이 필요한 실정이다. 따라서 이산화탄소 절감을 위한 무시멘트 콘크리트를 개발하여 다량의 이산화탄소를 발생시키는 시멘트 대신 산업부산물을 활용한 시멘트 ZERO 콘크리트 개발이 시급한 실정이다.

본 연구에서는 플라이애시를 100% 사용한 시멘트 ZERO 모르타르의 양생온도 30, 60, 90℃에 따른 재령 1, 3, 7 및 28일 모르타르의 압축강도와 중량변화를 측정하였다. 또한 pH를 측정하기 위하여 시편을 채취하고 분쇄하여 증류수를 10:90 비율로 희석한 후 pH 를 측정하여 양생 방법 및 재령에 따른 pH 변화를 검토하였다.

## 2. 실험 방법 및 사용재료

### 2.1 사용재료

본 연구에서 사용되는 플라이애시의 물리 화학적 특성은 <표 1>과 같다. 플라이애시는 보령 화력발전소의 플라이애시를 사용하였으며, 알칼리 활성화제는 이전의 연구를 통하여 알칼리 자극제의 몰농도 및 알칼리 활성화제의 비율을 실험한 결과 가장 강도발현이 우수한 9M NaOH와 소듐실리케이트를 50:50의 비율로 제조하여 사용하였다.

<표 1> 플라이애시의 물리적·화학적 성질

	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	L.O.I	Surface area (cm <sup>2</sup> /g)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
플라이애시	55.3	25.8	5.5	2.9	0.8	0.3	3.2	4,369	2.18

<표 2> 배합표

### 2.2 실험 방법

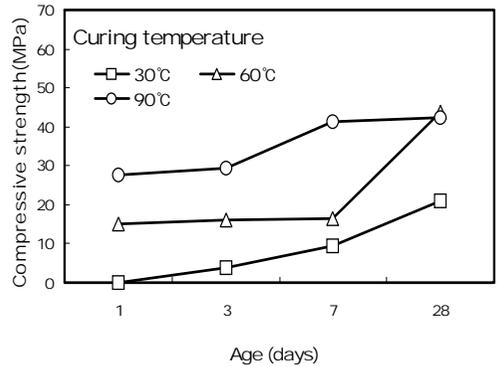
배합은 <표 2>와 같이 실시하였으며, 10리터 믹서에 먼저 플라이애시, 폐유리 미분말 및 잔골재를 넣어 30~40 rpm 속도로 2분간 건비빔을 실시한 다음, 1일 전에 제조된 알칼리 자극제와 소듐실리케이트로 구성된 알칼리 활성화제 및 배합수를 넣어 다시 70~80 rpm 속도로 3분간 믹싱하여 시멘트 ZERO 모르타르를 제조하였다.

이렇게 제조된 시멘트 ZERO 모르타르의 시공성을 평가하기 위해 KS L 5105에 준하여 플로우 실험을 실시하였다. 그리고 압축강도 시험은 50×50×50mm의 모르타르 공시체를 제작하여 30, 60 및 90℃에서 24시간동안 고온양생을 실시하였으며, 그 후 상온(23±2℃)에서 기건양생을 실시한 후 재령 1, 3, 7 및 28일 압축강도를 측정하였다. 또한 시멘트 ZERO 모르타르의 반응성을 분석하기 위하여 재령에 따른 모르타르 시편 중심부를 추출하여 시료를 채취한 후 유리사말로 분쇄를 하여 미분말로 준비한 후 증류수와 10:90의 비율로 희석하여 pH Meter (Orion 3-star)를 이용하여 pH를 측정하였다. 또한 중량변화는 Ø100×200mm의 원주형 공시체를 제작한 후 60℃에서 각각 24, 48, 72시간을 양생한 후 중량변화를 측정하여 수분 감소를 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 압축 강도

<그림 1>은 양생온도가 압축강도에 미치는 영향을 분석하기 위해 30, 60 및 90℃에서 24시간 동안 양생을 실시하여 정해진 재령에서 압축강도를 측정하였다. 사전에 상온인 20℃에서 양생을 실시한 경우에는 <그림 2>와 같이 단순 건조에 의한 썩 상태로 남아 있는 것으로 나타났다. 이 결과로부터 플라이애시 표면의 유리질 피막을 파괴하고 중합반응을 활성화시키기 위해서는 고온양생이 반드시 필요한 것으로 분석되었다. 따라서 양생온도 30, 60 및 90℃로 고온양생 처리한 후 실험한 결과 재령 7일까지는 양생온도가 높을수록 압축강도가 향상되는 것으로 나타났다. 재령 28일에서 양생온도 60℃와 90℃는 30℃에 비해 강도가 크게 나타났으나, 60℃와 90℃는 오히려 강도가 역전되는 결과가 나타났다. 양생온도 60℃에서는 재령 7일과 재령 28일 사이에 강도 증진이 크게 나타났으나, 양생온도 90℃에서는 7일 강도와 유사하게 나타났다. 이와 같이 양생온도가



<그림 1> 양생온도에 따른 재령별 압축강도

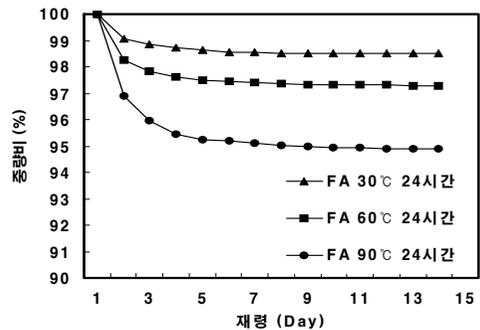


<그림 2> 상온에서의 썩겉 현상

높을수록 강도가 향상되는 것은 콘크리트 내부의 수분감소를 유도하고 pH 상승으로 플라이애시를 활성화시킬 수 있는 고알칼리 환경으로 변화되어 플라이애시의 중합반응이 가속화되었기 때문이다. 그리고 양생온도 90℃에서 재령 7일과 재령 28일 사이에서 강도 증진이 없는 것은 24시간 동안 90℃의 고온양생으로 재령 7일까지 플라이애시의 중합반응이 빠르게 이루어져 플라이애시의 잠재적 중합반응이 대부분 발생함으로써 그 이후의 재령에서 강도 증진이 작은 것으로 분석된다.

#### 3.2 양생온도에 따른 중량변화

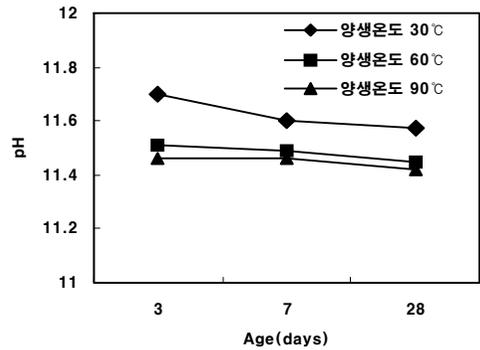
<그림 3>는 양생온도 30, 60 및 90℃에서 양생시간에 따른 재령별 중량 변화를 측정하여 정리한 것이다. 고온양생 초기에 급격한 중량변화가 있으나, 재령이 경과함에 따라 중량변화가 점차 작아지는 경향을 나타내고 있다. 이러한 원인은 공시체 내부의 수분감소율이 표면에서 심부로 갈수록 수분배출이 어렵고 20±3℃의 기온상태에서는 수분배출의 효과가 크지 않은 것으로 판단된다. 플라이애시 기반 모르타르의 중합반응이 활성화되기 위해서는 콘크리트 내부의 물이 배출되어야 하므로 중량변화를 통하여 콘크리트의 중합반응 활성화 정도를 판단할 수 있다. 또한 양생온도에 따른 중량변화를 통하여 재령 28일 강도에서는 60℃의 양생조건에서도 90℃와 비슷한 압축강도를 나타내어 단순한 중합반응으로 강도가 발현된 것은 아니라고 판단되며, 다른 2차적인 반응이 함께 발생한 것으로 판단된다.



<그림 3> 양생온도에 따른 중량변화율

### 3.3 pH 변화

<그림 3>은 양생온도에 따른 재령별 pH 변화를 측정하여 정리한 것이다. 다만, 여기서 측정된 pH 값은 모르타르 자체의 고유값이 아니라 상대적 비교를 위해 시멘트 ZERO 모르타르 분말을 10:90으로 희석시킨 시료의 값이다. 측정결과, 양생온도가 증가할수록, 재령이 길어질수록 pH는 낮아지는 경향을 나타내었다. 플라이애시의 중합반응을 유도하기 위해서는 플라이애시 표면의 유리질 피막을 제거하기 위한 강알칼리성의 알칼리 자극제가 필요하다. 초기에는 알칼리 자극제가 플라이애시의 유리질 피막을 서서히 파괴하기 시작하여 파괴가 끝난 후 중합반응이 서서히 진행되는 것으로 판단된다. 따라서 양생온도가 30℃인 경우 유리질 피막을 제거하기 위한 시간이 길게 소요되어 중합반응이 거의 일어나지 못하고 모르타르 내부의 Na<sup>+</sup> 이온이 다량 존재하여 재령 초기 3일의 pH가 높게 나타났으며, 유리질 피막 제거 후 강도발현이 시작되는 3일 이후부터는 Na<sup>+</sup> 이온이 중합반응에 사용되어 pH가 점차 낮아지는 것으로 판단된다. 고온인 60 및 90℃의 경우 초기 고온의 오븐에서 빠른 수분 증발로 내부의 알칼리성이 높아져 유리질 피막을 빠르게 파괴하고 플라이애시 내부의 Si-Al 성분과 중합반응이 빠르게 시작하여 Na<sup>+</sup> 이온이 다량 사용됨에 따라 낮은 pH 값을 나타낸 것으로 판단된다.



<그림 4> 양생온도에 따른 재령별 pH 변화

## 4. 결론

플라이애시 기반 시멘트 ZERO 모르타르의 양생온도에 따른 강도 특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 재령초기에 고강도가 요구되는 콘크리트인 경우에는 90℃의 양생온도가 적절하며, 재령 28일에서 높은 강도가 요구되는 경우에는 양생온도 60℃가 효율적인 것으로 판단된다.
- 2) 양생온도에 따른 재령별 pH 변화는 압축강도 실험 결과와의 연관성은 있는 것으로 사료되거나 중량변화와의 연관성은 없는 것으로 사료된다.

### 감사의 글

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

### 참고문헌

1. 배수환 외 3인, "자극제 사용 및 양생온도 변화에 의한 플라이애쉬 모르타르의 강도발현에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 2003, pp.277~280
2. Bakharev, T., "Geopolymeric materials prepared using class F fly ash and elevated temperature curing," Cement and Concrete Research, volume.35, 2004, pp.1224~1232.
3. Djwantonoro Hardjito et. al., "Cementless Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: From Waste to Benefit," Workshop on Fly Ash, Bhubaneswar, Orissa, India, 2004.