

# 플라이 애쉬 치환에 따른 알칼리-실리카 반응의 팽창저감 효과

## The Effect of Fly Ash Replacement on Alkali-Silica Reaction

김 정 은\*  
Kim, Jung Eun

전 쌍 순\*\*  
Jun, Ssang Sun

서 기 영\*\*\*  
Seo, Ki Young

진 치 섭\*\*\*\*  
Jin, Chi Sub

### ABSTRACT

The effect of fly ash to prevent detrimental expansion due to alkali-silica reaction was investigated through the ASTM C 1260 method that is one of the most commonly used method because results can be obtained within about 16 days. Reactive aggregate used is a metamorphic rock and sedimentary rock. The replacement proportions of portland cement by fly ash were respectively 0, 5, 10, 15, 25 and 35 percent. Expansion of mortar bars due to alkali-silica reaction decreased with the increase of fly ash content. The results show that the expansion due to alkali-silica reaction is dramatically reduced in the presence of high volume fly ash. When the fly ash content examine from all angles (strength and a flow), the replacement proportions of fly ash is about 25% in order to control on expansion.

### 1. 서 론

최근에 천연골재의 고갈과 골재수요의 증가로 인해 알칼리 반응성을 야기시킬 수 있는 쇄석골재의 사용량이 증가하고 있고, 국내에서 사용되고 있는 시멘트의 전알칼리 양이 0.6%를 넘는 수준에 이르고 있다. 골재의 다원화와 시멘트의 알칼리화는 알칼리-실리카 반응이라는 문제를 발생시킬 수 있다. 현재 우리나라에서 알칼리-실리카 반응에 의한 피해 사례가 보고된 적은 없지만, 쇄석골재의 사용과 시멘트의 고알칼리화로 알칼리-실리카 반응에 대한 문제는 심화될 것으로 예상된다.<sup>1)</sup> 따라서, 본 연구에서는 널리 사용되고 있는 혼화재료인 플라이 애쉬를 사용하여 알칼리-실리카 반응에 대한 팽창저감 효과를 알아보려고 한다. 이를 위해서, 플라이 애쉬를 시멘트 중량에 대해 치환하여, 치환율에 따른 알칼리-실리카 반응 팽창저감 효과를 평가하여 보았다.

### 2. 실험 개요

#### 2.1 실험 재료

##### 2.1.1 시멘트

본 연구에서 사용한 시멘트는 국내 S사의 보통포틀렌

트 시멘트로써 등가알칼리량( $0.658 K_2O + Na_2O$ )은 0.75%이고, 화학성분은 표 2.1과 같다.

표 2.1 사용 시멘트의 화학성분(%)

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>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
20.5	6.0	3.1	61.6	3.2	2.1	0.95	0.12

\* 정희원, 부산대학교 토목공학과 석사과정  
\*\* 정희원, 부산대학교 토목공학과 박사과정  
\*\*\* 정희원, 부산대학교 토목공학과 박사과정  
\*\*\*\* 정희원, 부산대학교 토목공학과 교수

### 2.1.2 혼화제

본 실험에서는 국내 S사의 플라이 애쉬를 사용하였고, 화학성분은 표 2.2와 같다.

표 2.2 플라이 애쉬의 화학성분(%)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>
51.83	26.28	7.43	0.15	6.51	1.08	1.08	0.49	0.72	1.01

### 2.1.3 골재

본 연구에서는 국내에서 사용되고 있는 쇄석골재 4가지(규석, 퇴적암, 변성암, 안산암)를 ASTM C 1260으로 반응성을 검토하였다. 시험결과 그림 2.1에서 보는 바와 같이 골재 2(퇴적암), 골재 3(변성암)이 zero reading 후 길이변화율이 0.2%를 넘어 ASTM C 1260에 준하여 반응성 골재로 판정하였다.

표 2.3 골재의 물리적 성질

골재 번호	암석 종류	채취장소	비중	흡수율 (%)	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )	잔입자량 (%)
1	규석	경북 충일	2.61	1.24	1,347	9.18
2	퇴적암	울산시 울주군 상북면	2.64	1.60	1,276	1.44
3	변성암	경남 마산시 진북면	2.65	1.07	1,522	1.30
4	안산암	경남 김해시 생림면	2.57	2.64	1,399	8.74

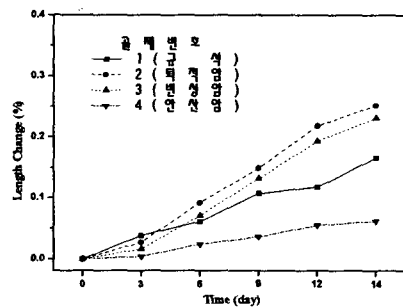


그림 2.1 NaOH 용액에 넣은 모르타르의 길이변화율

## 2.2 실험 계획

### 2.2.1 첨가한 알칼리 종류에 따른 길이변화

본 연구에서는 첨가한 알칼리 종류에 따른 쇄석골재의 알칼리-실리카 반응에 의한 모르타르 길이변화를 조사하기 위하여 NaOH 용액과 KOH 용액을 사용하여 팽창량의 차이를 비교하고자 한다.<sup>2)</sup>

### 2.2.2 플라이 애쉬 치환에 따른 팽창저감 효과

알칼리-실리카 반응의 팽창저감 효과는 ASTM C 1260 시험법에 준하여 플라이 애쉬를 시멘트 중량에 대하여 0, 5, 10, 15, 25 및 35%로 치환하여 모르타르 바의 길이변화율로 측정하였다.<sup>3)</sup>

## 2.3 실험 방법 및 계획

### 2.3.1 Mortar-Bar Method

#### (1) Mortar-Bar 제작

본 연구에서 시험 모르타르는 시멘트와 골재 무게비를 1 : 2.25로, 물·시멘트 비(W/C)는 0.47로 배합하였다. 각각의 플라이 애쉬 치환율 당 3개의 시편을 제작하였고, 시편의 치수는 2.5×2.5×30cm이다. 모르타르 바의 배합은 표 2.4와 같다.

표 2.4 Mortar-Bar 배합

플라이 애쉬 치환율(%)	W/C	단위량(g)			
		물	시멘트	플라이 애쉬	잔골재
0	0.47	206.8	440	-	990
5	0.47	206.8	418	22	990
10	0.47	206.8	396	44	990
15	0.47	206.8	374	66	990
25	0.47	206.8	330	110	990
35	0.47	206.8	286	154	990

#### (2) 시편의 보관 및 길이변화의 측정

시험 시편은 제작 후 24시간 동안 23℃의 온도로 유지시키고 시험 시편을 탈형한 다음, 초기길이를 측정하였다(initial reading). 초기길이를 측정한 후, 시편을 수돗물에 충분히 잠기도록 용기에 넣고 80±2℃의 온도로 유지시켰다. 수돗물에 담근 지 24시간 후에 길이변화를 측정하는 데 이것이 zero reading이다. zero reading이 끝난 후, 시험 시편은 NaOH 용액에 담그고 80±2℃의 온도로 유지시켰다. 용기는 밀봉이 가능하도록 제작된 것이고, Mortar-Bar의 길이변화는 zero reading 후 3, 6, 9, 12 및 14일에 대해 매번 같은 시간에 측정하였다.

### 2.3.2 모르타르 유동성 시험

플라이 애쉬 치환에 따른 유동성을 파악하기 위하여 플로우 시험을 실시하였다. 플로우치는 흐름시험기를 6초 동안 13mm로 10회 낙하하여 모르타르가 흘러 퍼진 증가된 평균지름을 원래의 지름에 대한 백분율로 나타내었다.

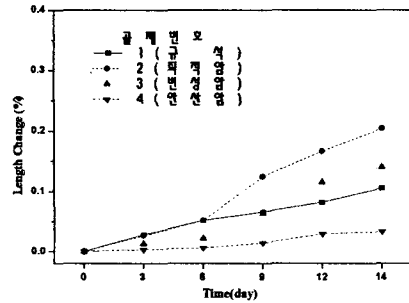
### 2.3.3 모르타르 압축강도 시험

플라이 애쉬 치환에 따른 모르타르의 압축강도 시험은 KS L 5105에 준하여 수행하였다. 공시체는 모르타르 길이변화 시험과 같은 배합으로 제작하였으며, 양생은  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 온도에 수중양생을 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 첨가한 알칼리 종류에 따른 길이변화율

그림 2.1과 3.1에서 골재 2(퇴적암)를 비교해 보면, NaOH 용액에 담갔을 때는 ASTM C 1260에 준하는 0.2% 이상의 길이 변화를 보여 반응성 골재로 판정되었지만, KOH 용액에 담갔을 때는 0.2% 미만의 길이 변화를 보여 잠재적인 반응성이 있는 것으로 판단되어 첨가한 알칼리가 NaOH 용액일 때가 KOH 용액보다 더 큰 팽창을 나타낸 것을 알 수 있다. 또한 골재 1, 3 및 4의 경우도 NaOH를 사용하였을 때가 KOH를 사용하였을 때 보다 길이변화가 더 크게 나타났다. 즉, 그림 3.1 KOH 용액에 넣은 모르타르의 길이변화율 초기 알칼리-실리카 반응에서 K에 의한 반응보다 Na에 의한 반응이 더 크게 일어남을 알 수 있다.



### 3.2 플라이 애쉬 치환에 따른 모르타르 길이변화

플라이 애쉬 치환율에 따른 모르타르 길이변화율은 그림 3.2와 3.3과 같다. 플라이 애쉬를 5%와 같이 소량 치환하였을 때는 그림 3.2에서는 플라이 애쉬를 치환하지 않은 것에 비해 큰 팽창을 보였으며, 그림 3.3에서는 플라이 애쉬를 치환하지 않은 것에 비해 팽창은 감소하였으나 ASTM C 1260에서 기준하는 0.1%의 이상의 팽창을 보여 유해한 팽창의 가능성이 있는 것으로 판단되었다. 플라이 애쉬를 5%와 같이 소량 치환하였을 때는 반응성 골재의 유해한 팽창을 억제하는 데 효과가 없었지만 치환율 10% 이상부터 알칼리-실리카 반응에 대한 팽창저감 효과가 나타났다. 그리고 플라이 애쉬 치환이 25% 이상이 되면 치환율이 그 이상이 되어도 길이변화는 비슷한 것으로 나타났다. 플라이 애쉬의 알칼리-실리카 반응에 대한 억제 효과는 모세관의 수를 줄이고 공극을 막는 효과를 함으로써 침투성을 줄이게 되고, 그 결과 수분의 원활한 이동도 억제시키는 것으로 판단된다.

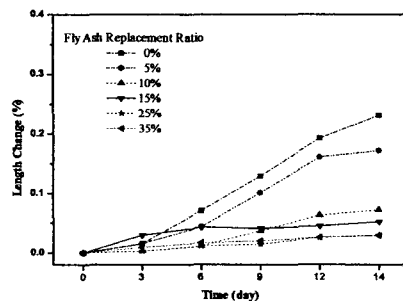
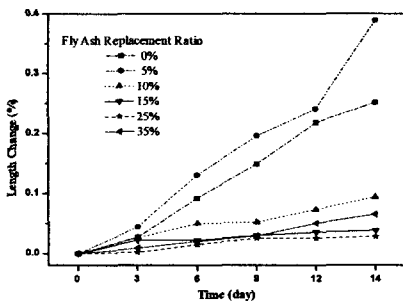
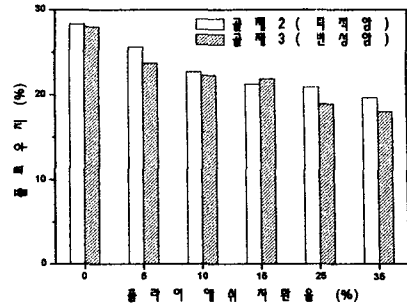


그림 3.2 플라이 애쉬 치환에 따른 모르타르 길이변화 (골재 2, 퇴적암)      그림 3.3 플라이 애쉬 치환에 따른 모르타르 길이변화 (골재 3, 변성암)

### 3.3 모르타르 유동성

플라이 애쉬를 첨가하는 것에 의해 시멘트 페이스트의 유동성이 향상된다는 것은 많은 연구자에 의해 보고되었지만, 같은 화력 발전소에서 배출한 플라이 애쉬도 입자의 특성, 입도 분포, 형상 등이 다르므로 유동특성도 변화하게 된다. 본 연구에서 사용한 플라이 애쉬의 유동특성은 그림 3.4에서와 같이 치환율이 증가할수록 플로우치가 감소하는 것으로 나타났다.



### 3.4 모르타르 압축강도

모르타르 압축강도 시험결과 그림 3.5와 3.6에서 그림 3.4 플라이 애쉬 치환에 따른 모르타르의 플로우치 보는 바와 같이 플라이 애쉬를 첨가할수록 강도가 작아지는 경향을 알 수 있다. 이는 반응성 골재를 사용하여도 플라이 애쉬가 가지고 있는 기본적인 성향인 조기강도 발현이 작은 것이 적용됨을 알 수 있었다.

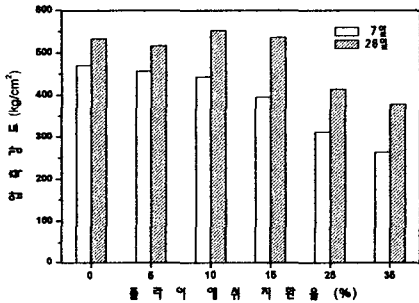


그림 3.5 플라이 애쉬 치환에 따른 모르타르 압축강도 시험 (골재 2, 퇴적암)

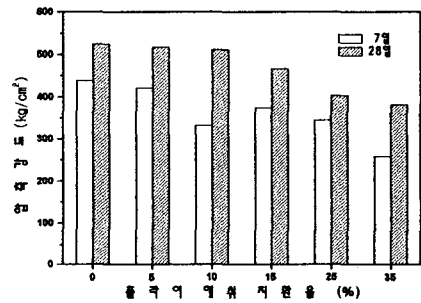


그림 3.6 플라이 애쉬 치환에 따른 모르타르 압축강도 시험 (골재 3, 변성암)

## 4. 결 론

- 1) 알칼리 종류에 따른 모르타르 길이변화 시험결과, 알칼리-실리카 반응은 NaOH 용액에 의한 팽창이 KOH 용액에 의한 팽창보다 더 큰 것을 알 수 있었다.
- 2) 유동성과 28일 강도측면 및 알칼리-실리카 반응에 대한 팽창저감 효과를 고려하여 볼 때, 플라이 애쉬를 시멘트 중량에 대해 25% 치환하는 것이 가장 바람직한 것으로 판단된다.
- 3) 플라이 애쉬를 5%와 같이 소량 치환하였을 경우에는 팽창을 증가시키는 역효과를 가져온다. 플라이 애쉬의 소량 치환은 강도, 유동성 그리고 알칼리-실리카 반응에 대한 측면에서도 불리함을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

1. 윤재환, "콘크리트의 알칼리골재반응과 대책", 한국콘크리트학회지, 제4권, 1호, pp.11~16, 1992.
2. 윤재환, 정재동, 이영수, "碎石 骨材의 알칼리-실리카 反應에 關한 實驗的 研究", 콘크리트학회 논문집, Vol.6, No.2, pp.108~117, 1994.
3. Shon Chang-Seon, Kang Soo-Geon, Kim Young-Su, "ASR Effectiveness of High Volume Fly Ash Cementitious Systems Using Modified ASTM C 1260 Test Method", KCI CONCRETE JOURNAL, Vol.14, No.2, pp.76~80, 2002.