

# High Volume 플라이애시 콘크리트의 내구성 연구

## A Study On the Durability of High Volume Fly Ash Concrete

조 현 수\*      김 병 진\*\*      이 진 용\*\*\*      이 광 명\*\*\*\*  
Cho, Hyun Su      Kim, Byung Jin      Lee, Chin Yong      Lee, Kwang Myong

### ABSTRACT

Fly ash can be used as cement replacement material and can also produce the durable concrete. According to the results, the compressive strength of concrete containing fly ash is slightly lower than that of normal concrete at early ages, however, the long-term compressive strength is significantly higher beyond 90 days, and it increases the durability of concrete as well.

#### 1. 서론

국내외의 연구 결과에 의하면 콘크리트 생산시 플라이애시를 시멘트 대체재로 사용할 경우 콘크리트의 미세조직이 치밀해져 내구성이 향상되며, 수화열이 적게 발생되어 매스콘크리트에 적용하면 온도 응력에 의한 균열발생확률이 감소되는 등의 이점이 있다고 발표되고 있다. 그러나, 플라이애시의 실제 시멘트 대체율을 살펴보면 국내는 10% 정도, 선진국에서도 25% 정도의 한계를 보이고 있다.<sup>(1)</sup>

산업부산물인 플라이애시의 생산량이 점차 증가될 전망이며, 재활용 촉진에 노력하고 있는 추세이다.<sup>(4)</sup> 이에 플라이애시의 시멘트 대체율을 30~50%로 높여 경제적이면서, 내구성이 우수한 콘크리트의 생산 가능성을 파악하고자 콘크리트의 내구적 특성을 중심으로 규명하고자 한다.

#### 2. 시험

##### 2.1 시험 재료

##### 2.1.1 사용 결합재

D사에서 생산된 1종 보통포틀랜드 시멘트와 보령산 정제 처리한 플라이애시를 사용하였다. 시험에 사용된 시멘트와 플라이애시의 물리적 성질 및 화학적 성분은 아래 표 1과 같다.

- \* 정회원, 동아건설산업(주) 기술연구원 주임연구원
- \*\* 정회원, 동아건설산업(주) 기술연구원 연구원
- \*\*\* 정회원, 동아건설산업(주) 기술연구원 수석연구원
- \*\*\*\* 정회원, 성균관대학교 토목공학과 교수

표 1. 결합재의 화학적 조성 및 물리적 특성

구분 결합재	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> (%)	강열감량 (%)	비중	비표면적 (cm <sup>2</sup> /g)
시멘트	20.68	5.16	3.02	62.42	4.71	2.42	1.36	3.15	3,450
플라이애시	57.09	24.66	10.50	2.58	1.37	0.94	3.02	2.10	4,350

2.1.2 사용 골재

굵은골재는 최대치수가 25mm인 쇄석을 사용하였으며, 잔골재는 해사를 세척하여 사용하였다. 아래 표 2는 시험에 사용된 굵은골재와 잔골재의 물리적 성질을 나타낸 것이다.

표 2. 골재의 물리적 특성

종류	비중	흡수율 (%)	조립율	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )	마모율 (%)	안정성 (%)
잔골재	2.6	1.2	2.7	1,570	-	-
굵은골재	2.7	0.9	6.7	1,655	32.0	3.8

2.2 시험방법

2.2.1 배합비

배합비는 압축강도 270kg/cm<sup>2</sup>을 기준으로 하여 플라이애시를 시멘트 중량비로 0%, 10%, 30% 및 50%로 대체하였으며, 배합명을 각각 270-FA0, 270-FA10, 270-FA30 및 270-FA50으로 하였다. 배합비는 표 3과 같다.

표 3. 콘크리트 배합비

배합명	플라이애시 대체율(%)	배합량(kg/m <sup>3</sup> )					
		배합수	시멘트	플라이애시	잔골재	굵은골재	혼화제(%)
270-FA0	0	185	400	0	691	1032	0.2
270-FA10	10	185	360	40	683	1021	0.2
270-FA30	30	160	280	120	630	1115	0.7
270-FA50	50	145	200	200	616	1138	1.1

2.2.2 압축강도

콘크리트의 압축강도 측정을 위해 Ø10×20cm인 공시체를 제작하여 수중양생 하였다. 최대용량 300톤인 압축강도시험기를 사용하여 KS F 2405의 규정에 따라 압축강도를 측정하였다.

2.2.3 동결융해 저항성

콘크리트의 동결융해 반복에 의한 성능저하를 평가하기 위하여 KS F 2456의 시험방법 중 A방법인 수중급속동결융해시험법에 따라 시험을 실시하였으며, 시험에 사용된 시편은 10×10×40cm의 크기로 제작하여 28일간 수중양생한 콘크리트 공시체를 사용하였다.

동결융해에 의한 손상은 일정한 주기로 동탄성계수를 측정하여 판단하게 되는데, 본 시험에서는 공명진동수 측정법에 의하여 동탄성계수를 산정하였으며, 시험은 300주기를 원칙으로 수행하지만 상대동탄성계수가 60% 이하인 경우 시험을 종료하였다.

#### 2.2.4 중성화

콘크리트의 중성화 속도를 평가하기 위하여 일본 MARUI사에서 제작된 중성화촉진시험기를 사용하였으며, 시험을 위해  $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 인 공시체를 제작하였다. 시험조건은 내부온도 20℃, 습도 50% 및 CO<sub>2</sub> 농도 5%를 유지하였으며, 중성화 깊이를 파악하기 위해 페놀프탈레인 1% 용액을 사용하였다.

#### 2.2.5 내황산염 저항성

콘크리트의 화학저항성을 알아보기 위하여 US Bureau of Reclamation Test Method 4908B에 따라 5×5×25cm 시편을 10% 황산나트륨 용액에 침지하여 지속적으로 공시체의 길이변화 및 침식정도를 확인하였다. 공시체의 길이변화는 KS F 2424의 콤포레이터 방법에 의하여 측정하였다.

#### 2.2.6 철근부식

콘크리트 내부의 철근부식 저항성을 측정하기 위하여 피복두께를 2cm로 하여 철근을 매설한  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  공시체를 제작하였으며, 전압차에 의한 부식촉진장치를 구성하였다. 20V의 직류 전원공급 장치의 (+)극은 철근에 연결하고, (-)극은 공시체가 담겨있는 5% NaCl 용액에 연결하여 각 시편마다 10.Ω의 저항을 연결하여 저항에 걸리는 전압을 측정하여 전류로 환산하였다.

#### 2.2.7 내투수성

염소이온을 전압차에 의해 투과시켜 그 통과 전하량으로 콘크리트의 투수성을 평가하는 ASTM C 1209에 따라 시험을 실시하였으며, 시편은 28일 수중양생한  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  공시체를 5cm 길이로 절단하여 사용하였다.

### 3. 시험 결과

#### 3.1 압축강도

플라이애시를 혼입하지 않은 보통콘크리트와 비교할 때 초기재령에서는 낮은 압축강도를 보였으나, 재령이 길어질수록 압축강도가 증가하였다. 초기재령 3일과 7일까지는 플라이애시 혼입율 10%, 30% 및 50%인 배합 모두가 보통콘크리트보다 낮은 압축강도를 보였다. 그러나, 재령 28일에서 270-FA10 배합과 270-FA30 배합은 보통콘크리트보다 높은 압축강도를 보였으며, 270-FA50 배합은 9kg/cm<sup>2</sup> 낮은 압축강도를 보였다. 재령 90일 이후부터는 보통콘크리트에 비해 플라이애시의 혼입율이 증가할수록 압축강도가 증가하였다.(그림 1 및 표 4)

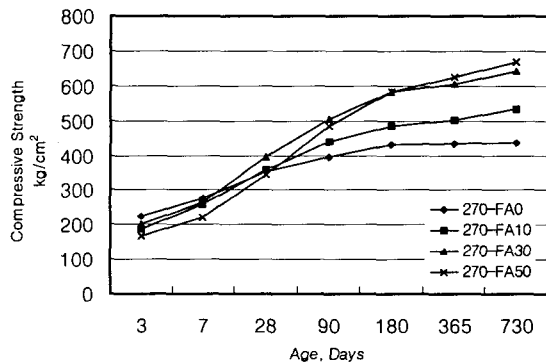


그림 1. 재령별 압축강도 시험 결과

표 4. 배합별 압축강도 결과

배합명	플라이애시 대체율(%)	압축강도(kg/cm <sup>2</sup> )						
		3일	7일	28일	90일	180일	265일	730일
270-FA0	0	224	276	352	397	431	433	435
270-FA10	10	187	258	358	438	486	502	532
270-FA30	30	200	265	397	504	583	605	641
270-FA50	50	165	221	343	486	583	625	669

3.2 동결융해 저항성

보통콘크리트보다 270-FA50 배합의 경우 동결융해 저항성이 떨어지는 것으로 나타났으나, 270-FA10 및 270-FA30 배합은 오히려 동해에 대한 저항성이 월등히 향상된 것으로 나타났다. 표 5 및 그림 2의 배합별 동결융해 저항성 시험결과에서 나타나듯이 270-FA0 배합의 경우 공기량이 5.5%로 다른 배합에 비하여 높았으며, 270-FA50 배합은 3.5%로 270-FA0 배합보다 상당히 낮았다. 동결융해 저항성이 플라이애시의 혼입율에 의한 영향보다는 공기량에 의한 영향이 크기 때문인 것으로 판단된다.

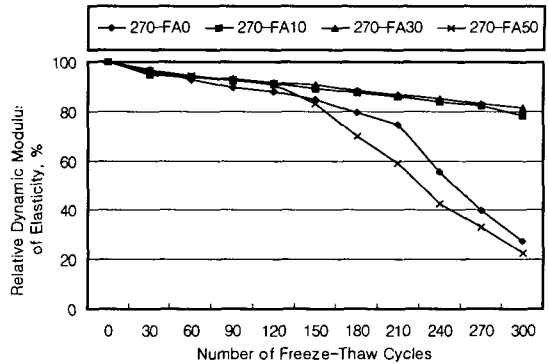


그림 2. 동결융해 저항성

표 5. 동결융해 시험 결과

배합	구분	종료사이클수	상대동탄성계수(%)	공기량(%)	비고
270-FA0		240	55	5.5	
270-FA10		300	82	4.5	
270-FA30		300	83	4.5	
270-FA50		210	58	3.5	

3.3 중성화

플라이애시의 혼입율에 관계없이 보통콘크리트보다 중성화 깊이가 증가하는 것으로 나타났으나, 초기재령에서 보다는 장기재령으로 갈수록 중성화 깊이는 감소하는 경향을 보였다.(그림 3) 그러나, 270-FA50 배합은 중성화 깊이가 월등히 증가하여 중성화에 대한 저항성은 상당히 떨어지는 것을 알 수 있다.

3.4 내황산염 저항성

플라이애시 혼입율이 증가할수록 공시체의 팽창율이 적어지는 경향을 보여, 보통콘크리트보다 황산염해에 대한 저항성이 우수한 것으로 나타났다. 플라이애시 혼입율이 증가함에 따라 조적이 치밀해져 황산염과의 반응이 어려워지기 때문에 콘크리트 공시체의 팽창 속도가 지연되는 것으로 판단된다. (그림 4)

### 3.5 철근부식

플라이애시 혼입율이 높을수록 콘크리트의 전해질 침투량 증가 시점이 지연되었으며, 특히 플라이애시의 혼입율이 30% 이상이 되면 철근부식에 의한 공시체의 파괴시점이 현저히 늦어졌다.(그림 5)

### 3.6 내투수성

플라이애시의 혼입율이 증가할수록, 공시체의 재령이 길어질수록 염소이온 투과량이 감소하는 것으로 나타났으며, 보통콘크리트의 경우 재령과는 상관없이 염소이온 투과량이 비슷하였다.(그림 6) 플라이애시가 30% 이상 혼입된 경우에는 플라이애시 혼입율 10%일 때보다 염소이온 투과량이 급격히 감소하였으며, 이는 플라이애시의 충전효과로 인해 콘크리트의 내부조직이 치밀해졌기 때문인 것으로 판단된다.

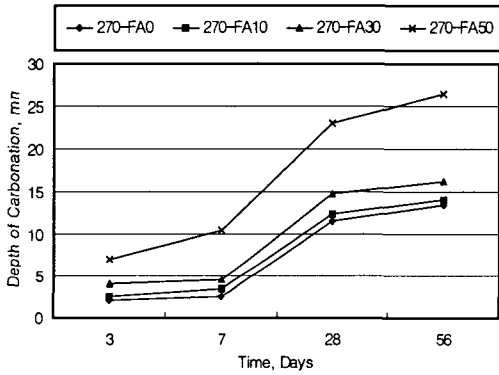


그림 3. 중성화 깊이

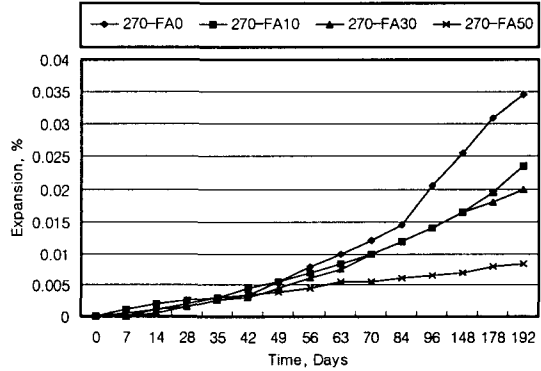


그림 4. 내황산염 저항성

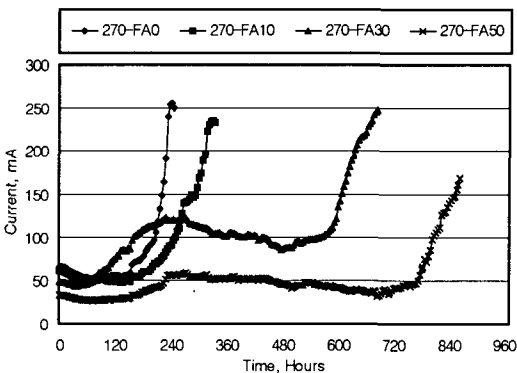


그림 5. 철근부식 시험 결과

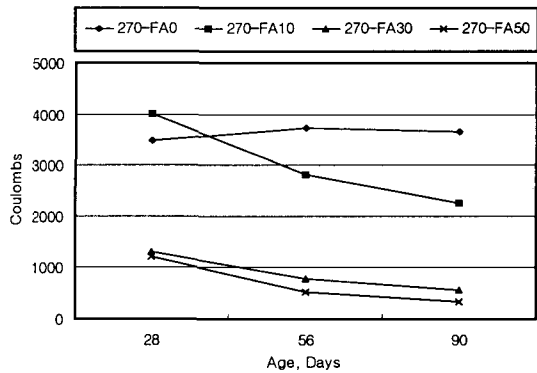


그림 6. 재령별 염소이온 투과 시험 결과

#### 4. 결론

설계기준강도를 270kg/cm<sup>2</sup>로 하여 플라이애시 혼입율을 0~50% 까지 변화시켜 플라이애시가 콘크리트의 내구성에 미치는 영향을 알아본 결과, 중성화 저항성을 제외하고는 플라이애시의 혼입율이 증가할수록 동결융해 저항성, 내황산염 저항성, 철근부식 및 내투수성에 우수한 효과를 나타내는 것을 알았으며, 본 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 플라이애시 콘크리트의 초기재령 압축강도는 플라이애시의 혼입율이 증가할수록 적어지며, 특히 플라이애시 혼입율이 50%인 경우는 급격히 감소한다. 그러나, 장기재령에서는 플라이애시의 포졸란반응으로 압축강도가 보통콘크리트보다 월등히 증가한다.
- (2) 플라이애시 혼입율이 10% 및 30%인 콘크리트는 동결융해 저항성에 상당히 우수한 효과를 나타냈으나, 혼입율이 50%인 경우 보통콘크리트보다 다소 떨어지는 것으로 나타났다. 동결융해 저항성의 경우에는 플라이애시의 혼입율 뿐만 아니라 공기량의 영향도 고려하여야 할 것으로 사료된다.
- (3) 플라이애시 혼입율이 10% 및 30%의 경우 보통콘크리트보다 중성화 저항성은 떨어졌으나 재령이 길어질수록 중성화 깊이가 감소하는 경향을 나타내었다.
- (4) 플라이애시의 혼입율이 증가할수록 황산염에 대한 저항성이 증가하여, 공시체의 팽창속도가 지연되었다.
- (5) 플라이애시의 혼입율이 증가할수록 콘크리트 내부에 있는 철근 부식으로 인한 콘크리트 공시체가 파괴되는 시점이 늦어졌다. 특히 플라이애시 혼입율이 30% 이상인 경우 파괴 시점이 현저히 지연되었다.
- (6) 플라이애시의 혼입율이 증가할수록, 재령이 길어질수록 플라이애시의 충전효과로 내부조직이 밀실해져 염소이온 투과량이 급격히 감소하였다.

#### 참 고 문 헌

1. 이진용, High Volume 플라이애시 콘크리트 기술개발에 관한 연구, 산업자원부, 1999.12
2. 이진용, High Volume 플라이애시 콘크리트의 내구적 특성 연구, 한국콘크리트학회, 제11권 2호, 1999.11
3. V.M. Malhotra, Fly Ash in Concrete, CANMET, 1994.9
4. 차동원, 한전의 석탄회 및 탈황석고 재활용 현황, 한국계면공학연구소, 고성능콘크리트국제워크숍, 1999.11