

# 플라이 애쉬를 다량 치환한 콘크리트의 중성화 특성에 관한 실험적 연구

## The Experimental Study on Neutralization Properties of High Volume Fly-Ash Concrete

백 민 수\* 김 우 상\*\* 김 종 원\*\*\* 김 제 섭\*\*\* 김 성 식\*\*\*\* 정 상 진\*\*\*\*  
Paik, Min-Su Kim, Woo-Sang, Kim, Jong-Won Kim, Jae-Seob Kim, Sung-Sik Jung, Sang-Jin

---

### Abstract

This study evaluated durability through measurement of substituted test piece's pH degree and experiments of neutralization. Comparing and evaluating cared test piece's pH degrees which we got before the neutralization and after the neutralization. After evaluating neutralization depth through neutralization, evaluating neutralization properties by Fly Ash replacement ratio. pH degree was decreased by cement replacement ratio of Fly Ash. And in the case of substitution of the same amount of Fly Ash, fine aggregate replacement ratio was increased. When the test piece, which had been cared in high temperature, was promoted to neutralization, Among the test piece which was replaced with Fly Ash 40%, the test piece which has high rate of fine aggregate proved opposition of neutralization. Through the test, I summarized that the test piece cared in high temperature was mostly effected by compress strength, the test piece cared in low temperature was mostly effected by pH degree.

---

### 1. 서론

급속한 경제성장과 산업의 발달로 인간의 생활은 편리하고 윤택해졌다. 그러나 이러한 성장은 천연자원의 고갈 및 환경오염 등 많은 문제점을 야기하게 되었다. 이에 따라 산업부산물의 재활용에 대한 필요성이 증가하고 건축물에 대한 경제성 및 고성능의 환경 친화적 측면이 요구되고 있어, 선진국의 경우 산업부산물이나 폐자재를 활용하는 빈도 또한 점차 높아지고 있다. 그러나 국내의 경우 이들 산업부산물에 대한 연구와 이용실적은 선진국에 비해 아직 미비한 실정이며, 산업부산물을 자원으로 활용하기 위한 연구가 절실히 요구되고 있으나, 대부분이 산업폐기물로 처리되고 있어 환경오염을 발생시킬 뿐만 아니라 매립 또는 처리장소 등의 확보에 있어서도 많

---

\* 정회원, 단국대 대학원 박사수료

\*\* 정회원, 단국대 대학원 석사과정

\*\*\* 정회원, 대흥엔지니어링 이사

\*\*\*\* 정회원, 단국대 건축공학과 교수

은 문제점이 제기되고 있는 실정이다. 콘크리트 혼화재료중 하나인 플라이 애쉬는 화력발전소에서 석탄이 연소되는 과정에서 발생하는 재활용 가능성이 높은 산업부산물로서 가격이 저렴하여 경제성에 좋고, 콘크리트 경화체 조직의 치밀성, 시공성 개선, 장기강도 향상 등 많은 장점이 있다. 콘크리트의 성능개선 및 자연환경 보전과 자원의 유효이용이라는 관점에서 플라이 애쉬를 콘크리트에 다량으로 활용하는 방안이 요구되고 있다. 본 연구에서는 플라이 애쉬의 다량 치환을 위하여 콘크리트 배합시 결합재 및 잔골재의 일부분을 동시에 치환하는 배합을 사용하여 실험을 실시하였다. 5℃ 한중환경, 20℃ 표준환경, 35℃ 서중환경하에서 양생된 시험체의 pH측정 및 중성화 특성 검토를 통하여 플라이 애쉬 콘크리트의 내구성에 대한 기초적 자료를 제시하고자 하였다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

본 실험의 배합은 물-결합재비를 45%, 50%의 2수준으로 하였고, 플라이 애쉬의 치환율은 0, 10, 20, 30, 31, 32, 40, 41, 42, 43%의 10수준으로 하였으며, 양생온도를 5℃, 20℃, 35℃의 2수준으로 하였다. 시험체는 10cm×10cm×10cm 몰드를 사용하여 제작하였다. 각각의 온도에서 28일 양생 후 8주간 중성화 측진을 실시하였다.

본 실험의 실험인자, 수준 및 측정항목은 표 1과 같다.

표 1 실험인자와 수준 및 측정항목

구 분	W/B (%)	양생온도 (℃)	치환율 (%)	측정항목		
인 자	45, 50	5, 20, 35	0,10,20,30,31,32,40,41,42,43	압축강도	pH	중성화 깊이
수 준	2	3	8	28	중성화 폭로 전후	중성화 8주 폭로

### 2.2 사용재료

#### 2.2.1 시멘트

본 실험에서 시멘트는 국내산 S사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

#### 2.2.2 골재

잔골재의 경우 북한강산으로서 최대치수를 5mm이하로 사용하였고, 굵은 골재의 경우 광주석산 쇄석으로 최대치수 25mm이하로 사용하였다. 골재의 물리적 성질은 표 2와 같다.

표 2 골재의 물리적 성질

구분	비중	흡수율(%)	조립률(%)	단위용적중량(kg/m <sup>3</sup> )	실적률(%)
잔골재	2.60	0.98	2.87	1,590	61.2
굵은골재	2.62	1.8	6.3	1,596	61.04

#### 2.2.3 플라이 애쉬

플라이 애쉬의 경우 보령 화력발전소에서 생산·정제 과정을 거친 유연탄 플라이 애쉬를 사용하였고, 그 품질 특성은 표 5와 같다.

표 3 플라이 애쉬의 물리·화학적 특성

	강열감량 (%)	단위수량비 (%)	분말도 (㎎/g)	비 중	압축강도비 (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	습 분 (%)
보령산	3.75	100	3,084	2.11	95	59.7	0.11
KS 규격	5이하	102이하	2,400이상	1.95이상	60이상	45이상	1이하

### 2.2.4 혼화제

혼화제는 국내에서 시판·사용되고 있는 J사의 AE감수제 표준형 및 AE제를 사용하였다.

### 2.3 배합계획

본 연구에 사용된 배합은 표 2와 같다.

본 연구에서는 플라이 애쉬를 시멘트의 30, 40% 치환을 하였다. 플라이 애쉬 치환 방법은 시멘트 치환과 시멘트와 잔골재 동시치환을 하였다. 시험체번호 F31, F32의 경우 잔골재에 대한 5%, 10%를 치환하여 물 결합재비가 감소하는 것을 알 수 있다. 40% 치환 시험체에서도 같은 방법으로 치환함으로써 시험체 번호가 증가함에 따라 물-결합재비가 역시 감소하는 것을 알 수 있다.

표 5 배합표

시험체명	W/C (%)	W/B (%)	S/A (%)	FA치환율(%)		단위용적증량(kg/m <sup>3</sup> )						
				C	S	W	C	FA	S	G	AD1	AD2
W45-F00	45.0	45.0	41.0	0	0	180	400	0	696	1009	1.2	0.08
W45-F10	50.0	45.0	41.0	10	0	180	360	40	687	1000	1.2	0.12
W45-F20	56.3	45.0	41.0	20	0	180	320	80	680	990	1.2	0.16
W45-F30	64.3	45.0	41.0	30	0	180	280	120	676	980	1	0.24
W45-F31	60.0	42.9	40.1	25	5	180	300	120	655	985	1	0.28
W45-F32	56.3	40.9	39.2	20	10	180	320	120	633	990	1	0.32
W45-F40	75.0	45.0	41.0	40	0	180	240	160	670	971	1	0.28
W45-F41	69.2	42.9	40.1	35	5	180	260	160	648	976	1	0.32
W45-F42	64.3	40.9	39.1	30	10	180	280	160	626	980	1	0.36
W45-F43	60.0	39.1	38.2	25	15	180	300	160	605	985	1	0.36
W50-F00	50.0	50.0	43.0	0	0	180	360	0	744	994	1.08	0.072
W50-F10	71.4	50.0	43.0	30	0	180	252	108	726	969	1.08	0.108
W50-F20	83.3	50.0	43.0	40	0	180	216	144	719	961	1.08	0.144
W50-F30	71.4	50.0	43.0	30	0	180	252	108	726	969	0.9	0.216
W50-F31	66.7	47.6	42.3	25	5	180	270	108	707	973	0.9	0.252
W50-F32	62.5	45.2	41.5	20	10	180	288	108	688	977	0.9	0.288
W50-F40	83.3	50.0	43.0	40	0	180	216	144	719	961	0.9	0.252
W50-F41	76.9	47.6	42.2	35	5	180	234	144	700	965	0.9	0.288
W50-F42	71.4	45.2	41.5	30	10	180	252	144	681	969	0.9	0.324
W50-F43	66.7	43.5	40.7	25	15	180	270	144	662	973	0.9	0.324

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 플라이 애쉬 치환에 따른 pH

pH 측정 시험에서는 플라이 애쉬 치환에 따른 촉진 중성화 전후 시험체의 pH 변화를 볼 수 있었다. 플라이 애쉬 치환에 따른 시험체의 pH를 <표 6>에 나타내었다. 중성화 전 시험체의 경우 플라이 애

쉬의 결합재 치환에 따라 pH가 저하 하였다. 양생온도 20℃의 기준 시험체의 경우 12.34의 pH를 나타내었으나 플라이 애쉬 치환량의 증가에 따라 pH의 저하가 발생하여 F40 시험체의 경우 11.82의 pH를 나타내어 0.52의 pH가 감소하였다. 잔골재 치환의 경우 잔골재 치환량이 증가할수록 pH도 증가하여 F43시험체의 경우 12.06의 pH를 나타내어 F40 시험체보다 0.24 pH가 증가하였다. 중성화 전 시험체의 pH 경우 다른 양생 환경 및 물결합재비 50% 시험체에서 유사한 경향을 나타내었다. 기준 시험체의 경우 12.32~12.42의 pH를 나타내었으며 F30과 F40시험체의 경우 각각 11.96~12.01, 11.77~11.82의 pH를 나타내었고 F32와 F43시험체의 경우 각각 12~12.1, 11.99~12.1의 pH를 나타내었다. 8주간 중성화를 촉진시킨 시험체의 경우 중성화 이전보다 1.66~2.69의 pH 저하가 발생하여 기준 시험체의 경우 10.44~10.71의 pH를 나타내었으며 F30과 F40시험체의 경우 각각 9.51~9.94, 9.1~9.62의 pH를 나타내었고, F32와 F43시험체의 경우 각각 10.09~10.57, 9.96~10.38의 pH를 나타내었다. 이러한 pH의 변화는 중성화 전 시험체에서는 시멘트의 수화생성물인 수산화칼슘의 양, 즉 단위시멘트량과 비례하며, 중성화 시험체에서는 탄산가스의 흡입으로 인한 탄산반응시 세공용액의 높은 pH를 유지하기 위하여 세공용액 속으로 수산화칼슘이 용해되어 소실됨으로써 알칼리성을 소실하여 pH 농도가 중성화 전 시험체보다 상대적으로 낮은 결과치를 나타내었다.

<표 6> 플라이 애쉬 치환 시험체의 중성화 전후 pH

시험체명	시험체 pH						시험체명	시험체 pH			
	5℃		20℃		35℃			20℃		35℃	
	폭로전	폭로후	폭로전	폭로후	폭로전	폭로후		폭로전	폭로후	폭로전	폭로후
W45-F00	12.42	10.65	12.32	10.66	12.38	10.71	W50-F00	12.32	10.44	12.35	10.45
W45-F10	12.25	10.51	12.24	10.48	12.21	10.49	W50-F10	12.18	10.14	12.19	10.22
W45-F20	12.17	10.27	12.16	10.29	12.11	10.24	W50-F20	12.09	10.10	12.04	10.04
W45-F30	12.01	9.58	11.97	9.77	11.96	9.94	W50-F30	11.97	9.51	11.97	9.61
W45-F31	12.10	9.93	12.06	10.04	12.00	10.20	W50-F31	12.02	9.76	12.03	9.85
W45-F32	12.20	10.35	12.14	10.33	12.16	10.57	W50-F32	12.12	10.09	12.13	10.33
W45-F40	11.77	9.53	11.82	9.37	11.80	9.62	W50-F40	11.79	9.1	11.80	9.28
W45-F41	11.92	9.50	11.90	9.61	11.88	9.81	W50-F41	11.87	9.28	11.87	9.51
W45-F42	11.97	9.78	12.00	9.85	12.03	10.04	W50-F42	11.98	9.72	11.98	9.76
W45-F43	11.99	10.13	12.06	10.12	12.07	10.38	W50-F43	12.04	9.96	12.10	10.06

### 3.2 플라이 애쉬 치환에 따른 중성화

플라이 애쉬 치환에 따른 중성화 촉진 깊이를 <표 7>에 나타내었다. 플라이 애쉬 결합재 치환의 경우 플라이 애쉬의 결합재량이 증가함에 따라 중성화 깊이도 증가하는 것으로 나타났다. 물-결합재비 45%, 20℃에서 양생된 기준 시험체는 촉진 중성화에 의해서 1.49mm의 중성화가 이루어졌다. 플라이 애쉬의 결합재량 치환량이 증가할수록 중성화 깊이도 증가하여 F40시험체의 경우 6.96mm의 중성화가 이루어져 기준 시험체에 비하여 467%의 중성화가 이루어졌다. 이는 F40시험체의 압축강도가 기준 시험체의 71.7%에 불과하며 플라이 애쉬 치환에 따른 pH 감소 때문에 중성화가 급격히 이루어진 것으로 판단된다. 결합재 치환의 경우 30% 이상 치환하였을 경우 시험체의 급격한 중성화가 이루어지는 것으로 나타났다. 플라이 애쉬를 잔골재의 일부로 치환한 시험체의 경우 F30시험체는 5.46mm가 중성화되었으며 잔골재 치환량이 증가함에 따라 중성화깊이가 저하하여 F32시험체의 경우 2.82mm가 중성화되어 F30시험체보다 중성화 깊이가 48.4% 저하하였다. 플라이 애쉬를 40% 치환한 시험체의 경우 F40시험체가 6.96mm의 중성화가 이루어졌으며 F43시험체의 경우 2.24mm의 중성화가 이루어져 결합

재만 치환된 F40시험체와 비교하여 중성화 저항성이 개선되는 것으로 나타났다. 이와 같이 F43시험체의 중성화 저항성이 크게 개선된 것은 플라이 애쉬의 일부를 잔골재 치환함에 따른 압축강도의 증가에 의해 치밀한 조직을 형성하였으며 또한 F40시험체와 비교하여 단위시멘트량 증가에 따른 시험체 pH의 증가 때문으로 판단된다. 양생온도 35℃에서 양생된 시험체의 경우 기준 시험체가 1.54mm의 중성화가 이루어졌으며 전체적인 시험체의 중성화의 깊이는 1.33mm~6.18mm를 나타내었으며 F32시험체의 경우 1.33mm가 중성화되어 기준 시험체보다 우수한 중성화 저항성을 나타내었다. 플라이 애쉬를 결합재로 대량 치환한 F30, F40 시험체의 경우 표준환경에서 양생된 실험체와 같이 중성화가 급격히 이루어진 것으로 나타났다. 양생온도 5℃에서 양생된 시험체의 경우 기준 시험체가 2.81mm의 중성화가 이루어졌으며 전체적인 시험체의 중성화의 깊이는 2.81mm~9.44mm를 나타내었다. F30 및 F40시험체의 경우 각각 7.87mm와 9.44mm가 중성화되어 다른 양생온도에서 양생된 시험체에 비하여 중성화가 현격하게 증가하는 것으로 나타났다. 물결합재비 50% 시험체의 경우 20℃에서 양생된 시험체의 경우 1.84mm~7.37mm의 중성화 깊이를 나타내었으며, 35℃에서 양생된 시험체는 2.1mm~6.04mm의 중성화 깊이를 나타내었다. 양생온도 20℃ 시험체의 경우 플라이 애쉬 치환량이 증가할수록 중성화깊이의 증가량이 큰 것으로 나타났다. 이는 플라이 애쉬의 결합재 치환의 경우 압축강도의 저하가 크게 발생하여 시험체 내부에 치밀하지 못한 조직을 형성하여 탄산가스의 침투가 용이하였기 때문에 중성화 깊이가 커진것으로 판단된다.

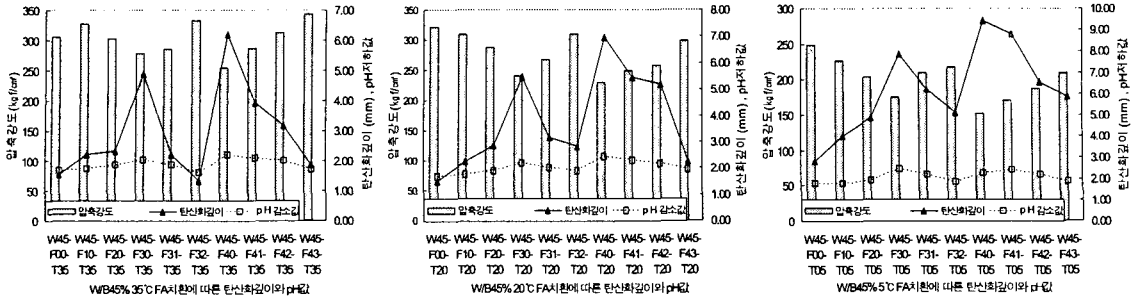
<표 7> 플라이 애쉬 치환에 따른 촉진중성화 깊이

시험체명	중성화깊이			시험체명	중성화깊이	
	5℃	20℃	35℃		20℃	35℃
W45-F00	2.81	1.49	1.54	W45-F00	1.84	2.10
W45-F10	4.01	2.27	2.21	W45-F10	2.38	2.43
W45-F20	4.88	2.85	2.32	W45-F20	3.82	2.68
W45-F30	7.87	5.46	4.89	W45-F30	6.83	5.13
W45-F31	6.23	3.14	2.22	W45-F31	5.98	3.41
W45-F32	5.13	2.82	1.33	W45-F32	5.86	2.00
W45-F40	9.44	6.96	6.18	W45-F40	7.37	6.04
W45-F41	8.82	5.45	3.93	W45-F41	6.97	5.45
W45-F42	6.56	5.18	3.17	W45-F42	5.69	4.89
W45-F43	5.87	2.24	1.86	W45-F43	5.50	2.75

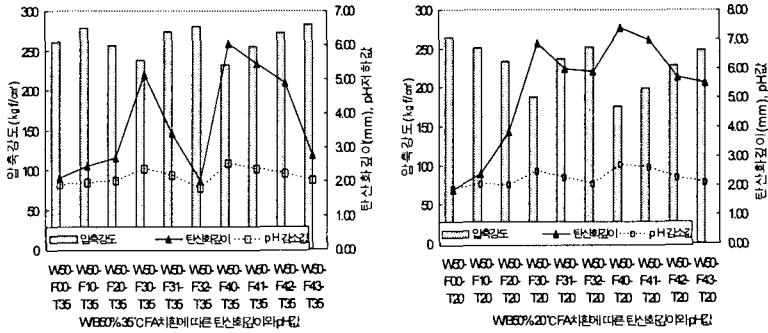
## 2) pH 및 압축강도와 중성화 깊이의 관계

플라이 애쉬 치환에 따른 pH와 중성화 깊이의 관계 및 압축강도와 중성화 깊이의 관계를 <그림 1> 및 <그림 2>에 나타내었다.

물-결합재비 45%, 35℃에서 양생된 기준 시험체의 경우 1.54mm의 중성화 깊이를 나타내었으며 F32 시험체의 경우 pH 12.16에 332kgf/cm<sup>2</sup>의 압축강도를 가지는 시험체로 중성화 깊이가 1.33mm로 기준 시험체보다 중성화 저항성이 우수한 것으로 나타났다. 시험체중 pH 12이상 압축강도300kgf/cm<sup>2</sup> 이상인 시험체의 경우 중성화깊이가 약 3mm이하인 것으로 나타나 플라이 애쉬가 치환되어도 위의 조건을 만족하는 시험체의 경우 중성화 진행이 늦은 것으로 판단된다. 플라이 애쉬의 결합재 치환의 경우 플라이 애쉬 치환량의 증가에 따라 pH와 압축강도는 저하하고 중성화 깊이는 증가하며 양생온도가 저하할수록 플라이 애쉬 치환에 따른 중성화 깊이의 증가량이 커진다. 잔골재 치환의 경우 잔골재 치환량이 증가할수록 pH 및 압축강도가 증가하여 중성화 깊이를 감소시킨다. 중성화 깊이와 pH의 경우 pH가 감소할수록 중성화 깊이는 증가하는 것으로 나타났으나, 중성화깊이의 경우 pH와 압축강도의 상호간의 영향을 받는 것으로 사료된다.



<그림 1> W/B45% 시험체의 FA 치환에 따른 탄산화 깊이와 pH의 관계



<그림 2> W/B50% 시험체의 FA 치환에 따른 탄산화 깊이와 pH의 관계

#### 4. 결 론

플라이 애쉬를 다량 치환한 콘크리트의 내구특성에 관한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 플라이 애쉬를 치환한 시험체의 pH 측정결과 플라이 애쉬의 결합재 치환량이 증가할수록 pH는 감소하는 것으로 나타났으며, 동일한 양의 플라이 애쉬를 치환한 F30, F40계열 시험체의 경우 잔 골재 치환량이 증가할수록 pH가 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 고온에서 양생된 F32, F43 시험체의 경우 다량의 플라이 애쉬를 치환하였음에도 기준 시험체와 비교시 중성화 깊이의 증가가 크지 않은 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 F32, F43 시험체의 경우 pH는 기준시험체보다 저하하였으나 높은 압축강도에 의한 조직의 밀실화로 인하여 중성화 저항성이 증가한 것으로 사료된다.
- 3) 플라이 애쉬 치환 시험체의 양생온도에 변화에 따른 중성화 촉진 실험 결과 시험체의 중성화는 pH와 압축강도의 상호간의 영향을 받으며 고온에서 양생된 시험체의 경우 압축강도에 의한 영향이 크며, 저온에서 양생된 시험체의 경우 pH의 영향이 큰 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

1. 정상진 외, “플라이 애쉬를 대량 사용한 고강도 콘크리트에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제 14권 제 2호 2002. 11.
2. 牧野貞之, “フライアッシュを用いたマスコンクリートの諸性状に関する検討”, 콘크리트工學年次論文報告集 Vol. 20.