

# 플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 동결융해 저항성에 관한 연구

## Study on Freeze-thaw Resistance of Concrete using Fly-ash

최세규\*      임정호\*\*      김생빈\*\*\*      이석홍\*\*\*\*  
Choi, Se Gyu      Leem, Jeung Ho      Kim, Saeng Bin      Lee, Suck Hong

---

### ABSTRACT

Currently the study on the effective use of the fly ash is concentrated as construction materials, which is byproduct of electric power generating plants. Fly ash, therefore, can be used as concrete admixture for the purpose of not only increasing the concrete quality but also of utilizing materials.

Within the country it is not easy to use fly ash for the construction purpose because the properties of fly ash are varied due to the use of different raw ores in the various power plants. And little previous construction experiments and the basic experiments about the formation of bubbles are performed.

In this study the water-cement ratio is varied in 3 different values and compressive strength is measured and freeze-thaw experiments are performed to establish the relationships between water-cement ratios and the durability. And also for each batch of different water-cement ratio fly ash is substituted 10%, 20% and 30% of cement and concrete mixture the admixture and the formation of bubbles and also freeze-thaw resistance.

---

### 1. 서론

최근 급속한 산업기술의 발달로 생활이 한층 편리해진 반면 산업부산물이 대량 발생하여 오히려 생활환경에 악영향을 미치고 있으며 이러한 산업부산물을 단순히 매립하여 처리하기보다는 건설산업에 대량으로 활용함으로써 폐자원 재활용 및 고급자원으로 환원하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 일례로 화력발전소에서 원료로 사용되고 있는 석탄을 연소할 때 발생하는 플라이애쉬를 들 수 있다.

---

\* 정회원, 관동대학교 토목공학과 강사

\*\* 정회원, 관동대학교 토목공학과 부교수

\*\*\* 정회원, 동국대학교 토목공학과 교수

\*\*\*\* 현대건설 기술연구소 선임연구원

플라이애쉬는 과거에는 주로 매립용으로 사용되어 왔으나 최근에는 콘크리트의 품질개선과 시멘트 대체를 위한 혼화재료로서 경제적 시공과 산업부산물의 재활용이라는 측면에서 그 활용방안이 연구되고 있다. 외국에서는 이미 오래 전부터 플라이애쉬를 사용한 콘크리트에 대해 많은 연구가 이루어져 왔고 실용화 단계에 이르고 있다. 국내의 경우 기초적인 연구와 시공사례가 있으나 플라이애쉬를 사용한 콘크리트에 대한 내구성 연구나 그에 따른 특성과 관련된 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 국내 화력발전소에서 생산된 플라이애쉬를 시멘트대체용으로 사용한 콘크리트에 대하여 강도특성을 파악하였으며, 플라이애쉬의 사용이 내구성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 일반적으로 내구성 판단의 기준이 되고 있는 동결융해시험에 의하여 내구성지수의 변화를 고찰하였다.

## 2. 실험계획 및 사용재료

### 2.1 실험개요

본 실험은 플라이애쉬의 사용에 따른 콘크리트의 강도특성 및 동해저항성을 알아보기 위한 연구로서 우선 단위결합재량의 변화에 따른 동결융해 저항성을 알기 위하여 물-결합재비를 30%, 45%, 55%로 변화를 주었다. 또한 플라이애쉬의 치환율에 따른 결과값의 변화를 알아보기 위하여 각 물-결합재비별로 단위시멘트량의 0%, 10%, 20% 및 30%를 플라이애쉬로 치환한 콘크리트를 제작하였다.

압축강도용 공시체는 상온에서 1일 방치한 후 탈형하였고 연이어 표준양생하여 7일, 14일, 28일 그리고 장기재령 91일에서의 압축강도시험을 하여 압축강도의 변화를 분석하였으며, KS F 2456에 따라 수중 급속동결 급속융해 시험법으로 동결융해 시험을 실시하였다. 동탄성계수의 측정은 KS F 2437 규정에 따라 공명 진동에 의한 콘크리트의 동탄성계수, 동 전단 탄성계수 및 동 포아슨비의 시험방법에 의하여 측정하였다.

### 2.2 사용재료

본 연구실험에서 사용한 시멘트는 국내 H사 제품의 1종 보통포틀랜드 시멘트이며, 플라이애쉬는 영동화력발전소에서 산출되는 무연탄 플라이애쉬를 사용하였고, 잔골재 및 굵은골재는 한강에서 채취한 천연골재이며, 혼화제는 국산AE제와 고성능 유동화제를 사용하였다.

표 1 보통포틀랜드시멘트의 물리적 성질

구분 \ 항목	비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	안정성	용결시간(시간:분)		압축강도(kg/cm <sup>2</sup> )		
				초결	종결	3일	7일	28일
시멘트	3.15	3299	양호	2:25	6:05	210	283	369

표 2 시멘트 및 플라이애쉬의 화학적 성질

구분 \ 항목	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	강열감량
시멘트	20.08	5.88	3.33	62.71	2.76	1.2	0.8	2.23	0.4	0.41
플라이애쉬	55.31	35.09	4.18	0.44	0.58	0.13	0.91	0.01	0.85	2.50

표 3 잔골재의 물리적 성질

표 준 비 중	흡수율 (%)	각 체 통과 중량의 누가 백분율(%)							조립율 (F.M.)
		10mm	5mm	2.5mm	1.2mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm	
2.60	0.87	100	97	91	69	15	0	0	2.28

표 4 굵은골재의 물리적 성질

굵은골재최대치수 (mm)	표건 비중	흡수율 (%)	각 체 통과 중량의 누가 백분율(%)						조립율 (F.M.)
			80mm	40mm	20mm	10mm	5mm	2.5mm	
25	2.65	1.78	100	100	72	8	0	0	7.20

표 5 혼화제의 특성

	품명	주요성분	비중	상태	색상
AE제	LIGACE-AE5	고급지방산	1.05±0.1	액체	엷은 암갈색
유동화제	LIGACE-F	Naphthalene Sulfonate Polymer	1.18±0.1	액체	암갈색

### 2.3 배합설계 및 공시체 제작

본 실험에서는 물-결합재비를 30%, 45%, 55%의 3단계로 변화시켜 혼합하지 않은 보통콘크리트에 대하여 시험배치를 거쳐 배합설계를 하였으며, 각 물-결합재비에 대하여 플라이애쉬를 10, 20, 30%로 각각 치환하였다. 압축강도 공시체는  $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ 인 원주형 공시체를 제작하여 3개씩 재령별로 강도를 측정하였으며, 동결융해시험용 공시체는 각주형  $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 40\text{cm}$  공시체를 사용하였다.

표 6 콘크리트 배합설계표

공시체 종류	물- 결합재비 (%)	굵은골재 최대치수 (mm)	잔골재 율(%)	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )					혼화제	
				물	결합재량		잔골재	굵은 골재	유동화제 (kg/m <sup>3</sup> )	AE제 (g/m <sup>3</sup> )
					시멘트	플라이애쉬				
HN	30	25	35	150	500	0	644	1196	5	0
HN AE	30	25	35	150	500	0	644	1196	5	95
MN	45	25	36	175	389	0	643	1164	0	0
MN AE	45	25	36	175	389	0	643	1164	0	74
LN	55	25	38	175	319	0	700	1165	0	0
LN AE	55	25	38	175	319	0	700	1165	0	61

주) HN AE → H : 물-결합재비(30%), AE : AE제 사용

### 4.4 동결융해시험방법

동결융해시험 공시체는 KS F 2456에 근거하여 14일 표준양생 후 시험을 개시하였으며, 동결융해의 일정 주기간격으로 KS F 2456의 “공명 진동에 의한 콘크리트의 동탄성계수, 동전단탄성계수 및 동포아슨비의 시험방법”에 의해 동탄성계수를 측정하였다. 동결융해시험은 공시체의 온도를 동결완료시 -17℃, 융해완료시 +4℃가 되게 하였고 동결융해의 1사이클은 약 3.15시간이 소요되었다. 동탄성계수는 사진 4.2의 일본 MARUI사의 “Digital Type Young’s Modulus Rigidity Meter”를 사용하여 동탄성계수를 측정하였다. 동결융해 시험시간은 동결융해 반복이 300사이클이 되거나 상대 동탄성계수가 60% 이하로 될 때 시험을 완료하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 압축강도 측정결과 및 고찰

플라이애쉬를 사용한 콘크리트를 표준양생한 후 7일, 14일, 28일에서의 압축강도 및 장기재령인 91

일에서의 압축강도를 측정하였다. 또한 굳지 않은 콘크리트의 플라이애쉬의 치환율에 따른 슬럼프 및 공기량의 변화도 알아보았으며, 이에 대한 결과는 표 7과 같다.

표 7 압축강도시험 결과

공시체 종류	물-결합재비 (%)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	압축강도(Kg/cm <sup>2</sup> )			
				$\sigma_7$	$\sigma_{14}$	$\sigma_{28}$	$\sigma_{91}$
HN	30	12	3.4	301	368	417	428
HF10	30	12	2.2	282	362	386	435
HF20	30	16	1.9	267	342	382	432
HF30	30	16	1.9	244	295	379	392
HNAE	30	13	5.7	241	321	354	408
HF10AE	30	14	5.4	250	320	353	411
HF20AE	30	15	3.6	266	311	351	397
HF30AE	30	16	2.8	243	298	333	373
MN	45	8	2.2	220	275	310	324
MF10	45	9	1.7	236	226	298	332
MF20	45	11	1.6	215	251	289	323
MF30	45	16	1.1	175	206	278	289
MNAE	45	15	8.0	146	161	175	247
MF10AE	45	16	7.0	146	171	202	273
MF20AE	45	17	6.7	164	177	195	261
MF30AE	45	18	6.3	157	169	188	248
LN	55	8	3.0	183	240	251	261
LF10	55	8	1.7	182	214	242	255
LF20	55	10	1.4	157	188	222	232
LF30	55	13	0.8	130	165	195	204
LNAE	55	15	8.0	126	138	156	201
LF10AE	55	17	7.9	112	144	155	217
LF20AE	55	17	4.4	122	160	210	235
LF30AE	55	18	2.6	133	183	202	239

굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 및 공기량을 측정한 결과는 모든 물-결합재비의 경우에서 플라이애쉬의 치환율을 높일수록 슬럼프는 증가하는 경향을 보였으며, 공기량의 측정결과에서는 플라이애쉬의 치환율이 높아짐에 따라 공기량은 줄어들었다.

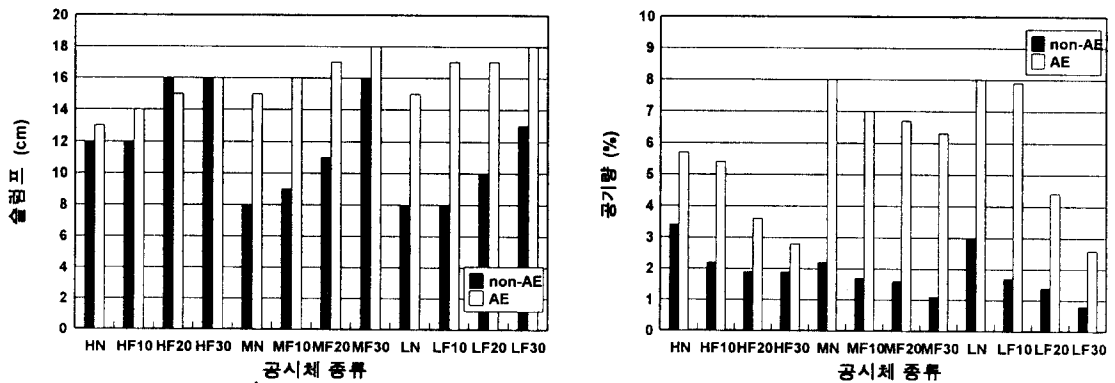


그림 1 플라이애쉬의 치환율에 따른 슬럼프 변화 및 공기량 변화

#### 4.6 동결융해 시험결과 및 고찰

플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 동결융해에 대한 저항성을 알아보기 위해 표준양생 후 재령 14일에서 실시한 동결융해시험 결과는 그림 2와 같다. 그림 3은 물-결합재비 별로 플라이애쉬의 치환율에 따른 내구성지수의 변화를 나타낸 그림이다.

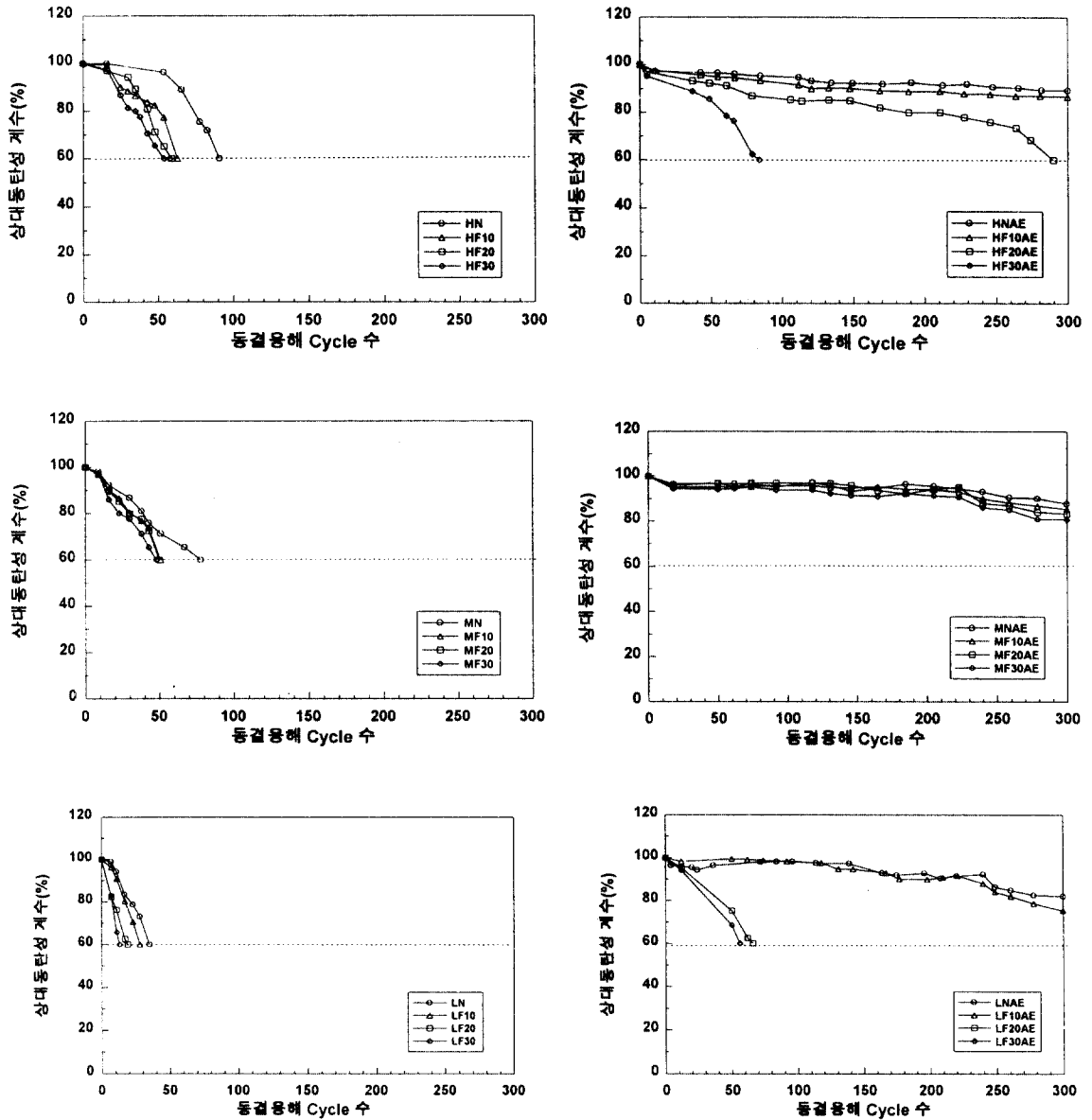


그림 2 플라이애쉬의 치환율과 상대동탄성계수와의 관계

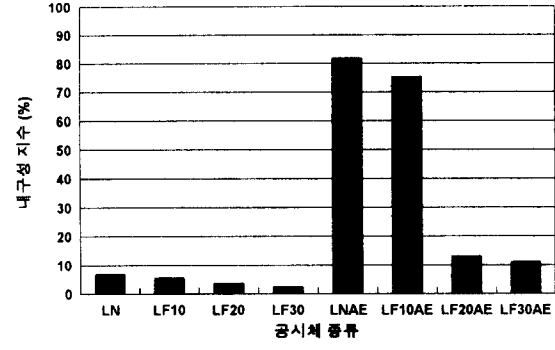
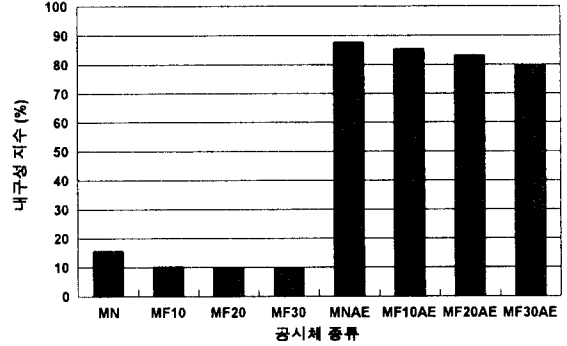
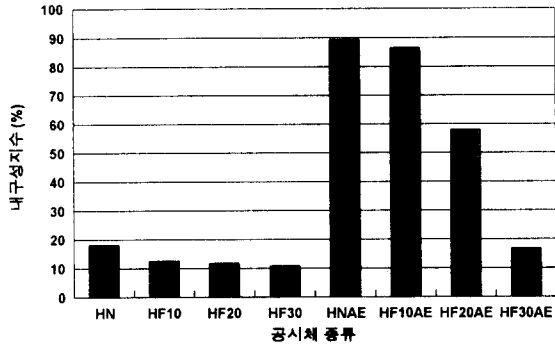


그림 3 플라이애쉬의 치환율에 따른 내구성지수

4. 결론

1) 압축강도 시험결과 non-AE 공시체의 91일 장기재령에서 물-결합재비가 30%인 경우와 45%인 경우에는 플라이애쉬 치환율이 20%까지는 보통콘크리트의 강도와 비슷한 것으로 나타났으며, 치환율이 30%가 되면 강도가 급격히 저하되었다. 물-결합재비가 55%인 경우 보통콘크리트에 비하여 장기재령에서의 압축강도는 모두 낮게 측정되어 강도증진에 불리한 결과를 나타냈다.

따라서 치환율을 30% 이상 사용하지 않는 것이 장기강도 측면에서 유리한 것으로 판단된다.

2) AE 콘크리트 경우 재령 91일에서 플라이애쉬의 치환율이 증가할수록 공기량이 감소되면서 압축강도는 증가되는 경향을 나타냈지만 Non-AE 콘크리트에 비해 강도가 매우 작게 발휘되었다. 따라서 플라이애쉬 치환 콘크리트에 공기연행을 위하여 AE제를 첨가할 때 주의할 필요가 있다.

3) 굳지않은 콘크리트의 슬럼프를 측정한 결과 플라이애쉬의 치환율의 증가에 따라 콘크리트는 점성과 유동성을 가지면서 슬럼프가 크게 증진되었고, 또한 유동성을 증가시켜 워커빌리티를 개선시킴으로 시공성에는 유리하게 작용하는 것으로 나타났다.

4) 동결융해 실험결과, Non-AE콘크리트의 경우 공기량의 발생범위는 0.8~3.4%로 나타나 굵은골재 최대치수가 25mm일 때의 표준시방서 기준인 5.0~6.0%에 미치지 못함으로 동결융해에 대한 저항성이 나쁘게 나타났다. 또한 플라이애쉬 치환율이 증가할수록 강도가 초기재령에서 발휘되지 못하여 동결융해 저항성이 저하되므로 초기재령에서 내구성을 고려할 경우 특히 양생을 충분히 실시하여야 한다.

5) 동결융해시험에서 AE제를 사용한 콘크리트는 플라이애쉬의 치환율이 증가할수록 보통콘크리트보다 공기량이 감소되므로 플라이애쉬 치환 콘크리트의 동결융해저항성을 높이기 위해서는 충분한 공기연행이 필요하다.

참고문헌

1. 한국전력공사 기술연구원, " 콘크리트 혼화재로서의 석탄회 이용방안 연구", 1989.
2. 한국산업규격, 플라이애쉬, KS L 5405.
3. ACI Committee 201, "Guide to Durable Concrete", ACI 201,29-77, ACI, Detroit, 1977.
4. 한국콘크리트학회, 콘크리트 혼화재료, pp.186-216, 1997.