

플라이 애쉬 및 플라이 애쉬 콘크리트의 제반 특성 및 이용

吳炳煥,* 鄭凡碩**

*정회원·서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

**정회원·서울대학교 대학원 토목공학과 박사과정

1. 서론

포졸란은 그 자체로는 수경성이 없는 미분상태로 실리카(silica)질을 포함하는 혼화재료로써, 천연 포졸란과 인공 포졸란으로 나눌 수 있다. 천연적으로 구할 수 있는 포졸란에는 화산재, 규조토, 규산백토 등이 있으며, 인공 포졸란에는 플라이 애쉬(FA, fly ash), 슬래그(slag), 소성 점토, 혈암 등이 있고 이러한 포졸란은 콘크리트 생성시 배합수 속의 수산화칼슘과 반응하여 불용성 화합물을 만든다.

포졸란을 사용한 콘크리트의 특징은 일반적으로 워커빌리티를 개선시키고 블리딩(bleeding) 및 재료의 분리가 작으며 수화열의 완화로 발열량이 작아진다. 또한 내구성, 수밀성 및 해수에 대한 화학적 저항성이 커지게 되고 강도의 증진은 느리지만 장기 강도는 일반 콘크리트에 비해 같거나 증진되는 효과를 얻을 수 있으며 특히 인장 강도가 증진된다. 그러나 단위수량을 많이 필요로 하는 경우가 많고 건조수축이 크게 되는 단점이 있다.

인공포졸란인 FA는 석탄을 원료로 하는 화력발전소에서 분쇄된 연료의 연소에 의해 발생되며 원탄의 약 15~45%비율로 발생하는 석탄회이다. 우리나라에서는 보령 및 삼천포 화력발전소가 가동된 1983년 이전에는 석탄재의 거의 전량이 해안 매립용으로 처분되었으나, 최근에는 품질개선과 시멘트 대체 재료로서의 경제적 시공 및 산업 폐기물의 재활용이라는 관점에서 일부 레미콘 회사가 원료질감의 목적으로 양질의 플라이 애쉬를 선별하여 사용하고 있는 실정이다.

2. 플라이 애쉬의 특성

2.1 물리적 특성

1) 입자모양 및 크기

FA(fly ash)는 대체적으로 일부 결정성 물질과 함께 약간의 탄소를 함유하는 유리球狀이다. FA는 구형입자속에 여러 겹의 구멍을 포함하는 단단한 입자(plerospheres)와 내부에 이산화탄소(CO₂)와 질소(N₂)가스로 채워져 있는 중공체의 다공성 입자(cenospheres)로 구분된다. 또한 FA는 고석회(high-lime) FA와 저석회(low-lime) FA로 구분되는데, 이는 ASTM규정에 따라 C급 FA와 F급 FA로 구분된다. Subbituminous를 원료로 하여 생성되는 F급 FA는 일반적으로 bituminous를 원료로 하여 생성되는 C급 FA보다 매끄러운 표면을 가지며 상대적으로 적은 양의 칼슘과 많은 양의 철을 함유하고 있다. 그림 2.1은 충분한 실리카와 알루미늄을 포함한 FA의 전형적인 입자 형성을 보여준다.

FA의 입도는 포졸란의 활성도에 영향을 주는 물성으로써 입자크기는 0.5~100 μ m의 범위에 속하며 중간크기 내지 굵은 점토의 입도에 해당된다.

2) 포졸란 활성도

ASTM C 618과 AASHTO M 295의 제령 7일 활성도 시험에 따르면 FA를 35% 대체한 콘크리트 시편을 35 \pm 1.7 $^{\circ}$ C의 온도에서 1일, 55 \pm 1.7 $^{\circ}$ C에서 6일 양생하여 보통콘크리트 강도의 75% 이상의 강도 발현을 규정하고 있다.

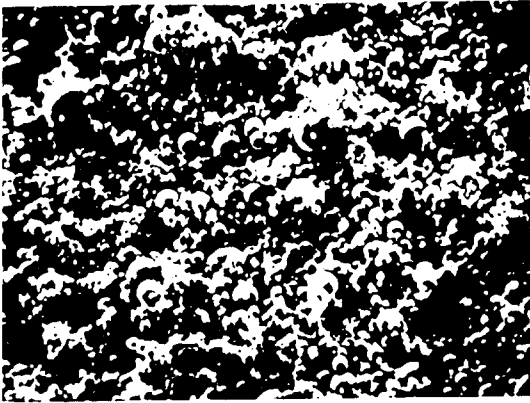


그림 2.1 Photomicrograph of fly ash (x1000)

3) 색상

FA의 색상은 크림색으로부터 회색, 흑색에 이르기까지 다양하다. 탄소, 철분 및 수분의 함량은 색깔에 영향을 준다.

4) 비중과 부피밀도

FA의 비중은 1.9-2.3으로서 시멘트 비중의 2/3에 해당된다. 건조한 FA의 부피밀도는 약 800kg/m³이다. 이 값은 치밀화 작용으로 사일로안에서 보다 상당히 큰 값이 될 수 있다. 이 사실은 사일로 설계시 고려되어야 한다. 공기를 포함하고 있을 때의 부피밀도는 500kg/m³밖에 되지 않기 때문에 저장용량 계산시에는 이 값이 유리하다.

5) 분말도

분말도는 포졸란 활성도와 콘크리트의 워커빌리티에 영향을 주는 매우 중요한 특성이다. 분말도의 측정방법으로는 체(sieve)에 의한 방법과 Blaine 투과법에 의한 비표면적 측정방법이 있는데 체에 의한 경우는 일반적으로 88- μ m(No.200)체 및 45- μ m(No.325)체에 의하여 측정한다.

KSL 5405에서는 분말도를 평균입경의 최대치(9 μ m이하)로 규제하고 있고, ASTM C 618에서는 45- μ m체 산량(34%)으로 규제하고 있으며, JISA 6201에서는 45- μ m체 산량 (25%이하)과 비표면적(2400cm²/g 이상)으로 동시에 규제하고 있다. 진기집진기에서 얻어진 FA의

분말도는 대체로 3000cm²/g 내외이다. 분말도는 비표면적의 값이 크거나 45- μ m체 산량이 적을수록 높아지며 분말도가 높을수록 포졸란 활성도가 커지고 FA를 혼합한 콘크리트의 워커빌리티가 향상된다.

6) 다짐(Compaction)특성

BS 다짐도 시험(BS 1377:1975 Test 12)은 FA의 수분과 진밀도 관계를 결정하기 위해서 행한다. 현장조건하에서 다짐도는 FA의 발생원, 사용된 다짐플랜트 및 현장조건 정도에 따라 달라진다. 표.2.1을 각종 充填材별 FA의 최대 진밀도의 최고 수분함량에 대한 비교표이다.

표 2.1 FA의 다짐도 특성

Type of soil	Average result of BS compaction test	
	Maximum dry density kg/m ³	Optimum moisture content%
Gravel, sand, clay	2.070	9
Sand	1.940	11
Sandy clay	1.840	14
Silty clay	1.670	21
Heavy clay	1.550	28
Fly ash	1.280	25

2.2 화학적 특성

FA는 고온연소생성물이므로 화산회와 비슷한 특성, 예를 들면 석회와 몰과 결합하여 시멘트성 물질을 생성하는 포졸란 성질을 가진다. 이와 같은 반응은 반응성 규사 성분과 관련이 있는 것으로 보여진다.

표 2.2 각종 물질의 조성에

成分 物質名	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO or Fe ₂ O ₃		CaO	MgO
표틀랜드시멘트	22.2	5.1	-	3.2	65.4	1.2
콘 크 리 트	62.4	8.9	-	-	16.5	1.2
Fly ash	57.3	26.6	-	4.7	2.1	1.2
高爐 Slag	33.4	14.5	0.4	-	41.0	6.0
轉爐 Slag	10.9	1.5	20.7	-	42.9	7.2
山 土	59.6	22.0	-	-	0.4	0.8
粘 土	50~70	15~35	-	2~10	1~6	1~5
全 地 殼	55.2	15.3	5.84	2.79	8.80	5.22
火 成 岩	59.12	15.34	3.80	3.08	5.08	3.49

표 2.3 FA의 성분 분석

炭 種		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	
수 입 유 연 탄	역 정 탄	U 탄	69.90	24.06	2.71	0.26	0.54	0.22	0.95	0.14
		C 탄	61.41	32.58	2.67	0.39	0.18	0.20	1.06	-
		B 탄	65.70	27.31	3.40	0.13	0.31	0.48	1.97	-
		D 탄	51.79	37.01	6.03	1.21	0.49	2.76	0.32	0.71
		P 탄	56.82	29.29	7.08	0.96	1.26	0.34	0.49	0.96
		N 탄	61.78	29.12	3.37	1.03	0.55	0.71	1.52	1.07
		아 역 정 탄	67.30	16.70	4.77	0.37	0.58	0.61	6.96	1.40
국 내 탄	무 연 탄	서 진 영 동 영 월	57.27	26.62	4.69	0.84	1.08	0.34	5.99	1.85
			52.16	29.51	9.62	0.52	0.85	1.68	3.45	-
			49.51	27.78	4.36	0.35	0.83	2.08	3.05	0.28

표 2.4 각국의 FA 규격기준

항 목	KSL 5405	ASTM618		JISA	비 고		
		F급	C급	6201			
화 학 성 분	SiO ₂	최 소 %		45	ASTMC 618 · F급유연탄 및 무연탄 Fly Ash · C급아유연탄 및 갈탄 Fly Ash		
	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	- %	70.0	70.0		50.0	
	MgO	최 대 %	5.0	5.0		5.0	
	SO ₃	- %	5.0	5.0		5.0	
	습 분	- %	1.0	3.0		3.0	
	강열감량 알칼리(Na ₂ O로서)	- %	6.0	12.0		6.0	6.0
분 말 도	평균입경	최 대 μm	9.0				
	비표면적	최 소 cm ² /g			2400		
	44μm체잔량	최 대 %		34	34	25	
	포졸란 활 성 도	시멘트사용시(28일) 석회사용시(7일)	최대조정 % 최 소 kg/cm ³	85 56	75 56.2	75 56.2	
리	소요수량비	최대조정 %	105	105	105	102	*양일성:10개의 선 행시험 (선행시험어 10개 미만서는 모두)의 평균치로 부탄의 편차의 최대%를 규제한 것임.
	긴축수축증가	28일 최대 %	0.03	0.03	0.03		
	안 정 도	오토클레브 팽창도:수축	최 대 %	0.5	0.8	0.8	
적	AE제량가량	최대조정 %	2.0				
	성 균 일 성	비표면적	15				
		44μm체잔량		5	5	5	
능	모르타 공기량 18%를 만드는데 소요되는 AE제량		20	20	20		
	모르타 팽창	14일 최대 %	0.020	0.020	0.020	0.020	
	압 축 강 도 비		28일 최소 %				60
			91일 최소 %				70

FA의 화학적 성분은 탄종, 연소조건 및 현장오염방지 설비의 효율에 크게 좌우된다. FA의 주요성분은 규소, 알루미늄, 철의 산화물로서 이들 세가지 성분이 전체의 80-90%를 차지한다. FA의 무기성분은 표2.2에서 보는

바와 같이 집토성분과 비슷하다.

FA의 화학분석 결과를 중앙백분율로 나타내면 위의 표2.3과 같이 X-ray diffraction패턴의 측정 결과 FA의 결정성분이 quartz, mullite, magetite, hematite와 무수황

산칼슘이라는 것을 알 수 있다. FA의 2-3%(중량백분율)는 수용성 성분이며, 용액의 액성은 일반적으로 알칼리성이고, 칼슘과 황산이온을 포함하고 마그네슘, 나트륨, 칼리 및 규산염이온(아주 적은 양)도 함유한다.

2.3 FA 규격기준

표2.4는 시멘트 몰타르 또는 콘크리트 혼합재료로 사용하는 FA의 규격을 비교한 것이다. 국내 발전소에서 발생하는 FA는 강열감량을 제외한 나머지 항목에서 모두 KS규격 기준내에 있는 것으로 보고되고 있다.

3. 플라이 애쉬를 사용한 콘크리트의 강도 및 역학적 특성

3.1 플라이 애쉬를 사용한 경화한 콘크리트의 성질

1) 재령에 따른 강도 증진의 효과

FA의 장기강도의 개선효과는 많이 보고되었으며, FA의 가장 큰 특징으로 알려져 있다. 따라서 재령에 따른 강도 증진 효과는 FAC의 특성을 규명하는데 중요한 요소가 된다. 그러나 FA를 이용한 콘크리트의 포졸란 반응에 관한 연구보고는 많으나 재령에 따라 매우 다양하므로 초기재령에서 FAC(fly ash concrete)의 강도 특성을 파악하기는 쉽지 않다. Whasha에 의하면 그림3.1에서와 같이 AE제 사용여부와 시멘트의 종류에 관계없이 FA로 포틀랜드시멘트의 일부를 대체한 콘크리트의 강도가 보통 콘크리트와 비교해서 1년 이상의 장기 강도에서 더 크게 나타났다고 한다.

국산 제1종 보통 포틀랜드 시멘트와 비중 2.23, 분말도 3190cm²/g 인 보령 화력발전소 산 유연탄 FA를 0, 10, 20, 30%로 변화시켜 대체 사용한 필자²⁾의 실험(표3.1)에서는 표3.2에서와 같이 90일 이후 부터는 FAC의 압축강도가 오히려 상회하고 있음을 알 수 있다. 또한 같은 W/C 비에서 부배합의 경우가 빈배합의 경우보다 대체적으로 효과가 양호하다고 할 수 있고, 이러한 경향은 28일 재령보다 90일 강도에서 두드러진다. 본 실험결과 FA의 첨가량 증가에 따라 28일까지의 강도는 감소하고 있으며,

표 3.1 시편기호 및 배합설계

試片記號	시멘트 (kg/m ³)	Fly Ash (kg/m ³)	물 (kg/m ³)	산 골재 (kg/m ³)	굵은골재 (kg/m ³)	M150 (%)	Slump (cm)
A 0	450	0	126	753.8	1126.5	1.7	14±1
A 10	405	45	126	747.6	1117.1	1.8	
A 20	360	90	126	741.3	1107.8	1.85	
A 30	315	135	126	735.1	1098.4	2.0	
AA 0	550	0	154	690.5	1031.8	1.6	
AA 10	495	55	154	682.8	1020.4	1.8	
AA 20	440	110	154	675.2	1009.0	1.8	
AA 30	385	165	154	667.6	997.6	1.9	
B 0	450	0	153	725.2	1083.7	1.2	
B 10	405	45	153	718.9	1074.3	1.5	
B 20	360	90	153	712.7	1065.0	1.4	
B 30	315	135	153	706.4	1055.7	1.6	
BB 0	550	0	187	655.5	979.5	1.0	
BB 10	495	55	187	647.9	968.1	1.0	
BB 20	440	110	187	640.2	956.7	1.1	
BB 30	385	165	187	632.6	945.3	1.2	
C 0	450	0	180	696.6	1040.9	0.9	18±1
C 10	405	45	180	690.3	1031.6	0.9	
C 20	360	90	180	684.1	1022.2	1.0	
C 30	315	135	180	677.8	1012.9	1.0	
CC 0	550	0	220	620.5	927.3	0.3	
CC 10	495	55	220	612.9	915.9	0.4	
CC 20	440	110	220	605.2	904.4	0.4	
CC 30	385	165	220	597.6	893.0	0.5	

* M150: Mighty 150, 시멘트 重量比

** A 및 AA: W/C=0.28, B 및 BB: W/C=0.34, C 및 CC: W/C=0.40

[EX] A 10: W/C=0.28, (시멘트+Fly Ash)=450 kg/m³, Fly Ash 10% 配合

BB 20: W/C=0.34 (시멘트+Fly Ash)=550 kg/m³, Fly Ash 20% 配合

그 이후의 강도는 증진되어 FA를 넣지 않은 보통 콘크리트의 강도에 육박하거나 상회하는 것으로 나타났다. FAC의 특성이 효과적으로 나타나는 장기강도 90일의 경우 몇가지 특징적인 현상을 살펴보면, 우선 W/C비가 낮은 경우(W/C=0.28) 최고의 강도는 단위 시멘트량에 관계없이 FA 20% 첨가에서 나타나며, W/C비가 높은 경우 FA 10% 첨가에서 최고의 강도를 얻을 수 있었다. 또 W/C=0.34인 경우 빈배합에서 FA 10%, 20% 첨가가 최고의 강도를 같이 나타내었고, 이것은 FA의 장기강도

표 3.2 압축강도 실험결과

(單位: MPa)

試片記號	3日	7日	28日	90日
A 0	32.6	39.3	51.0	58.6
A 10	24.8	31.1	47.9	59.0
A 20	20.6	30.4	43.4	60.4
A 30	18.2	28.7	39.1	56.0
AA 0	38.6	54.4	61.7	70.9
AA 10	32.6	44.1	54.9	71.6
AA 20	31.1	37.2	53.0	73.9
AA 30	25.3	32.2	50.6	71.3
B 0	22.6	29.5	41.1	47.7
B 10	18.9	21.9	38.2	49.7
B 20	18.7	21.5	34.8	47.8
B 30	17.5	19.7	31.4	45.8
BB 0	34.2	48.0	56.2	62.9
BB 10	27.0	43.1	53.3	63.4
BB 20	25.5	37.6	50.0	63.4
BB 30	22.6	29.2	45.1	59.5
C 0	21.8	28.3	40.1	46.9
C 10	18.0	21.2	36.8	48.8
C 20	15.2	22.4	34.1	47.1
C 30	14.2	17.5	29.3	39.3
CC 0	25.2	31.7	46.9	54.6
CC 10	22.7	30.9	41.1	56.9
CC 20	21.5	23.8	38.7	55.0
CC 30	20.1	23.4	35.3	50.2

(주. 1 MPa=10kg/cm²)

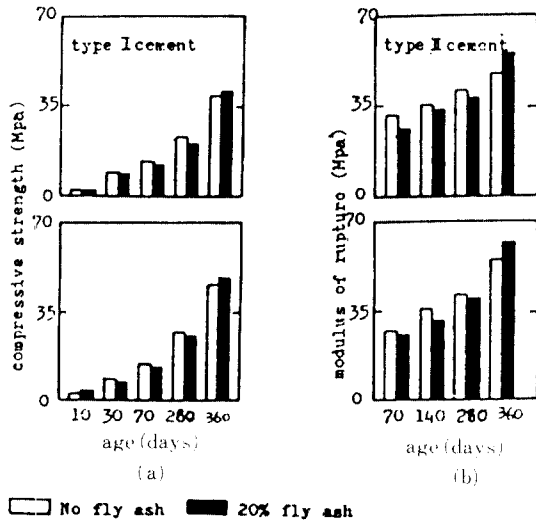


그림 3.1 플라이 애쉬를 대체한 AE콘크리트의 재령과 강도와와의 관계

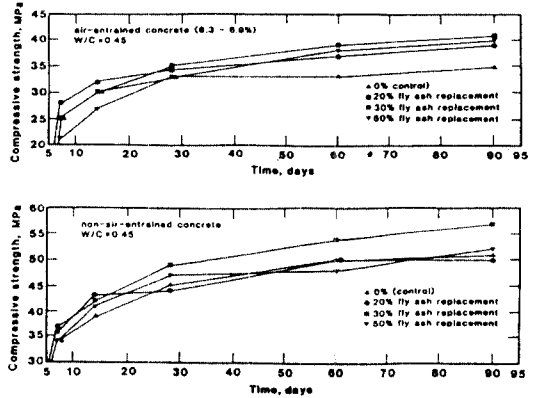


그림 3.2 C급 FA를 사용한 콘크리트의 강도발현정도

를 지배하는 포졸란 반응으로 설명될 수 있다.

C급 FA는 아역청탄이나 갈탄의 연소에 의해 생성되며, 콘크리트 강도 발현비율에 거의 영향을 미치지 않는다. Yuan & Cook은 C급 FA (CaO=30.3%)의 첨가에 따른 콘크리트의 강도발현정도를 실험하였으며, 그 결과는 그림3.2와 같다. F급 FA는 주로 역청탄의 연소에 의하여 생성되며, 입자의 크기가 크고 미연탄을 많이 함유하고 있다. F급 FA를 콘크리트에 사용하게 되면 콘크리트의 강도발현이 일반적으로 더욱 늦게 된다.

2) W/C비 변화에 따른 강도증진 효과

FA의 함량을 고정하고 W/C비를 변화시켜 강도를 측정된 필자의 실험결과를 회귀분석한 관계식은 표3.3에 나타난 바와 같다. 여기서 Y는 압축강도, X는 W/C비이다. 이를 빈배합과 부배합의 두 집단으로 볼때 W/C비에 의한 강도증진 효과는 부배합에서 더 큰것을 알 수 있다.

3) FA 함량변화에 따른 강도증진 효과 및 대체효과

FA의 함량에 따른 재령별 압축강도를 필자의 실험에서 W/C-강도 관계를 강도별로 분류하여 강도-FA량의 관계로 정리한 후, 이러한 W/C비-강도-FA량의 결과를 강도별로 회귀분석한 것은 그림3.3과 같다. 이 식을 이용함으로써 필요한 강도를 얻기위해 요구되는 W/C비 및 혼화재의 최적함량을 추정할 수 있다. 이 결과 단위 시멘트량 450kg/m³의 경우 FA 30% 첨가에서 강도의 발현이

상당히 저해됨을 알 수 있었고, 따라서 이 경우 적정 혼화재 첨가량은 20% 이내로 제한하여 사용함이 타당하다. 단위 시멘트량 550 kg/m³의 경우에 FA 30% 첨가까지도 강도발현이 우수하였으므로 그 제한을 30%까지 허용할 수 있다. 그러나 강도의 발현정도가 둔화됨을 비루어 더이상의 혼화재 첨가는 유의할 필요가 있다.

표 3.3 W/C-강도 관계식

試片記號	關係式	相關計數
A 0, B 0, C 0	Y = -90.8X + 75.0 (Y = -97.5X + 84.2)	0.95 0.90
A 10, B 10, C 10	Y = -92.5X + 72.4 (Y = -85.0X + 81.4)	0.92 0.90
A 20, B 20, C 20	Y = -77.5X + 63.8 (Y = -110.8X + 89.5)	0.90 0.89
A 30, B 30, C 30	Y = -81.7X + 61.0 (Y = -139.2X + 94.4)	0.95 0.99
AA 0, BB 0, CC 0	Y = -123.3X + 96.9 (Y = -135.8X + 109.0)	0.99 1.00
AA 10, BB 10, CC 10	Y = -115.0X + 88.9 (Y = -122.4X + 105.6)	0.91 1.00
AA 20, BB 20, CC 20	Y = -119.2X + 87.8 (Y = -157.5X + 117.7)	0.95 1.00
AA 30, BB 30, CC 30	Y = -127.5X + 87.0 (Y = -175.8X + 120.1)	0.99 1.00

* ()안은, 90日 強度까지 考慮한 境遇

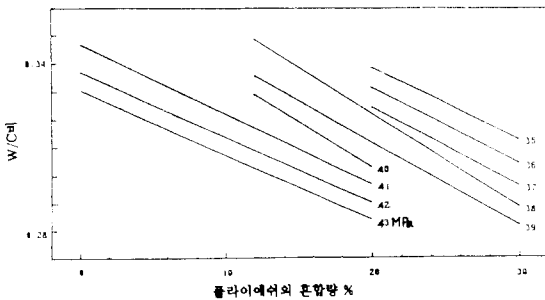


그림 3.3 강도-FA량-W/C비의 관계도(단위 시멘트량 450kg/m³)

4) 탄성계수

플라이 애쉬는 콘크리트의 탄성계수에 많은 영향을 끼치지 않는다. Ghosh & Timuk는 강도와 탄성계수의 관계를 그림 3.4와 같이 나타내고 모든 강도수준에서 플라이 애쉬 콘크리트의 탄성계수는 보통 콘크리트의 탄성계수와 비슷하다고 결론지었다.

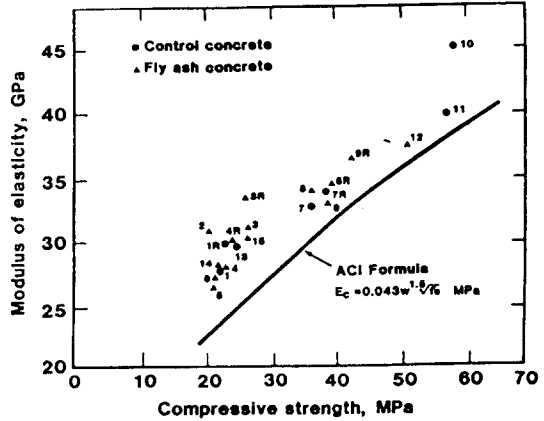


그림 3.4 FAC의 탄성계수

5) 크리이프

플라이 애쉬 콘크리트의 크리이프에 관한 자료는 많지 않다. Lohita등은 연구결과에서 플라이 애쉬 콘크리트의 강도, 탄성계수, 수축, 크리이프 등에 대한 최적값은 플라이 애쉬 혼입률이 15%일 때이며, 혼입률이 15%이하일 때에는 크리이프 증가는 무시할 수 있지만 혼입률이 그 이상이 되면 크리이프는 약간 증가한다고 하였다. Yuan & Cook은 C급 FA를 첨가한 고강도 콘크리트에 대해 연구하였는데, 30-50%의 FA를 첨가한 콘크리트가 보통 콘크리트나 20%를 첨가한 콘크리트보다 크리이프에 의한 변형량이 큰 것으로 나타났다.

6) 건조수축

일반적으로 FA는 콘크리트의 건조수축에 큰 영향을 미치지 않는다. Yuan & Cook은 C급 FA를 사용한 연구

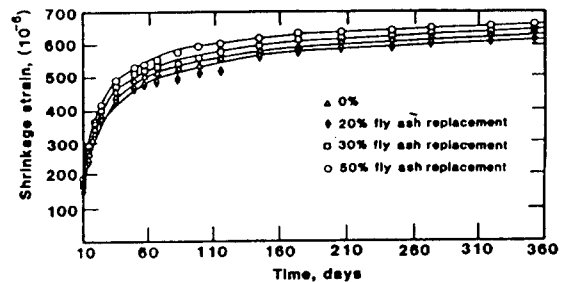


그림 3.5 C급 FAC의 건조수축

로부터 FA에 의한 시멘트 대체는 건조수축에 거의 영향을 미치지 않는다고 결론지었으며 실험결과는 그림 3.5와 같다.

7) 수화열 및 체적변화

단면이 크고 매시브한 콘크리트 구조물을 여름철에 시공할 경우 시멘트량이 크거나 조강시멘트 등을 사용하게 되면 시멘트의 수화반응으로 발생하는 수화열은 무시할 수 없을 만큼 크다.

Davis는 콘크리트의 수화열을 줄여주기 위하여 시멘트의 일부를 플라이 애쉬로 대체하므로써 수화열 발생속도를 완화시켰다고 하며 재령28일에서 수화열감소율은 정비해하지는 않지만 플라이 애쉬 대체율의 절반정도의 비율로 감소된다고 한다.

포틀랜드 시멘트를 플라이 애쉬로 대체한 콘크리트의 수화열이 보통 콘크리트보다 얼마간 낮으며 이 수화열의 발생량이 작은 점이 콘크리트의 건조수축을 줄이는 데 효과가 있을 것으로 생각된다. 이에 대한 연구실험 내용을 살펴보면 양질의 플라이 애쉬를 사용한 콘크리트를 1개월 정도 건조시켰을 때 플라이 애쉬를 사용한 콘크리트의 건조수축량이 5%정도 감소 되었으며 6개월 이상 건조시켰을 때 15~20%정도 감소되었다고 보고하고 있다.

이번에는 Brink의 10×10×75cm 공시체를 90일간 습윤양생한 후 온도 21℃, 습도 50%의 실내에서 건조시킨 다음 길이변화를 측정하여 결과를 정리한 것이 그림 3.6이다. 이 그림에서 포틀랜드 시멘트만을 사용한 보통 콘크리트에 비해 플라이 애쉬를 대체하는 비율에 따라 콘크리트의 체적이 크게 변화하며 재령에 따라 플라이 애쉬를 사용한 콘크리트의 건조수축의 정도가 보통 콘크리트보다 크게 감소하는 효과를 나타낼 수 있다. 그런데 탄소 함유량이 많고 분말도가 작은 플라이 애쉬를 사용한 콘크리트의 건조수축량은 보통 콘크리트보다 오히려 얼마간 크다는 연구보고가 있다. 한편 플라이 애쉬를 사용한 실제 공사현장의 경우에는 실내시험과는 달리 건조수축현상을 나타내는 경우가 있다고 한다. 그 이유는 실내시험의 경우 공시체의 중심선에 의하여 단축으로 콘크리트 표면의 수축만을 측정하여 판단하는 실험방법이 실제

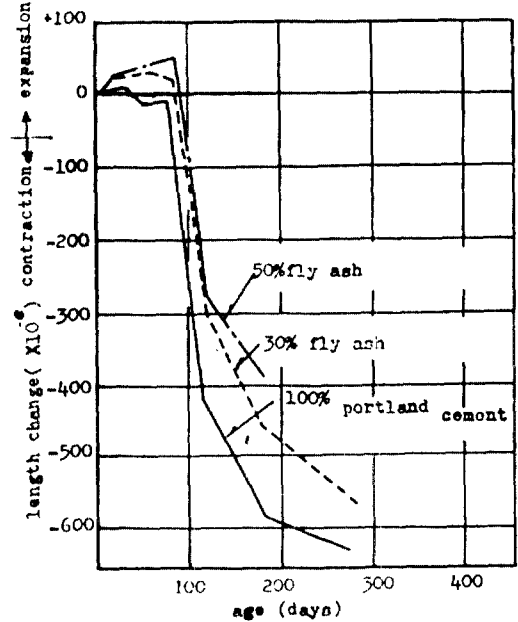


그림 3.6 FA 대체율과 콘크리트 건조수축과의 관계

의기상태에 노출된 콘크리트 부재의 건조상태와 다르기 때문에 평가된다. 이러한 실내시험의 약점을 개선, 보완하기 위한 방법으로 보로 제조한 공시체의 5면을 피복하고 한면만이 건조되도록 하여 표면부의 수축을 측정하여, 그 결과 플라이 애쉬를 사용하지 않은 콘크리트에 비해 플라이 애쉬를 사용한 콘크리트의 표면과 내부의 온도차가 완화되어 건조에 따른 인장응력이 감소됨을 입증하였다.

8) 수밀성 및 내구성

플라이 애쉬를 사용한 콘크리트의 경우 포졸란반응으로 인하여 장기재령에서 수밀성이 향상된다. 플라이 애쉬를 사용한 콘크리트의 투수시험결과 포틀랜드 시멘트만을 사용한 보통 콘크리트와 비교해서 플라이 애쉬로 25%~30% 대체한 콘크리트의 투수계수값이 훨씬 적은 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 다시 말해서 플라이 애쉬를 사용한 콘크리트의 수밀성이 크게 개선됨을 나타낸 것이다. 이 외에도 콘크리트 공시체 내부에 동심의 작은 구멍을 만들어 내부가 빈 공시체의 외부에서 수압을 가하는 간단한 투수시험방법을 통하여 플라이 애쉬의 사용이

콘크리트의 수밀성 향상은 浸蝕성물의 침투를 억제하여 콘크리트의 수밀성에 미치는 영향을 검토한 결과 플라이 애쉬를 사용한 콘크리트가 사용하지 않은 콘크리트에 비해 우수한 결과를 나타냄을 보여주었다.

콘크리트 구조물의 물리, 화학적 침식에 대한 저항성을 높임으로써 내구성을 개선한다.

또한 플라이 애쉬를 사용한 콘크리트에 양질의 혼화제를 사용하여 알맞은 공기량을 얻어낼 경우 동결융해에 대한 저항성을 향상시켜 준다고 하며 플라이 애쉬속의 미립자에 의해 공기포가 감소될 경우에는 보통 콘크리트에 비해 내구성이 오히려 저하한다고 Timms는 그 원인에 대하여 설명하고 있다.

한편 Larson은 콘크리트 절단면에서 공기포의 크기와 분포를 측정 한 후 동결융해시험을 실시하였으며 이 때 플라이 애쉬를 사용한 콘크리트의 동결융해시험에 의한 내구성은 보통 콘크리트와 비교해서 거의 유사한 결과를 얻었다고 보고하고 있다.

9) 내약품성²⁾

콘크리트구조물은 부식하기 쉬운 강재를 알칼리성의 콘크리트가 보호해 주기 때문에 강구조물에 비해서 내구성이 우수하며, 반영구적인 구조물로 생각되어 왔다. 그러나 근년에 와서 콘크리트 구조물의 조기열화부재가 사회적으로 크게 관심이 높아지고 있으며, 특히 항만구조물의 경우 해수중의 염소이온, 황산염이온, 나트륨이온, 마그네슘이온 등의 염류에 의하여 콘크리트구조물이 염해를 입은 사례가 종종 발생하므로써 알칼리 알재반응에 의한 열화와 함께 콘크리트구조물의 내구성에 대한 신뢰성을 크게 저하시켰다. 이외에도 하수, 공장폐수, 산성토양 및 오염된 환경등과 같은 화학적인 침식을 받은 경우도 많이 발생하므로써 콘크리트구조물의 화학저항성에 대한 검토가 절실히 요망되는 시기로 생각된다.

콘크리트의 화학저항성에 대한 실험으로서는 일반적으로는 산, 염 및 유기물 등의 약액중에 모르타나 콘크리트 공시체를 일정기간 침지하는 실험을 실시하고 있다. 분한영 교수님은²⁾ 국산 플라이 애쉬를 혼합한 콘크리트의 내약품성을 알아보기 위한 연구의 일환으로 보통 포틀랜드시멘트, 증용열 포틀랜드시멘트 및 고로슬래그 시멘트를

각각 사용하여 모르타 및 콘크리트 공시체를 제조하여 황산, 염산용액 및 인공해수에 침지시켜 시멘트 경화체의 열화의 정도 및 화학반응상태를 비교 고찰하였으며 그 결과를 간략하게 요약해보면 다음과 같다.²⁾

a. 황산에 의한 열화

플라이 애쉬 20%와 30%를 혼합한 시멘트(FC20, FC30)과 보통포틀랜드시멘트(OC), 증용열포틀랜드시멘트(MC) 및 고로슬래그시멘트(SC) 5종류를 사용하여 제조한 모르타의 압축강도비 및 중량비와 재령과의 관계를 나타낸 것이 그림 3.7과 그림 3.8이다. 이들 그림에서 플라이 애쉬 혼합률 20% 및 30% 모르타를 제외한 나머지 3

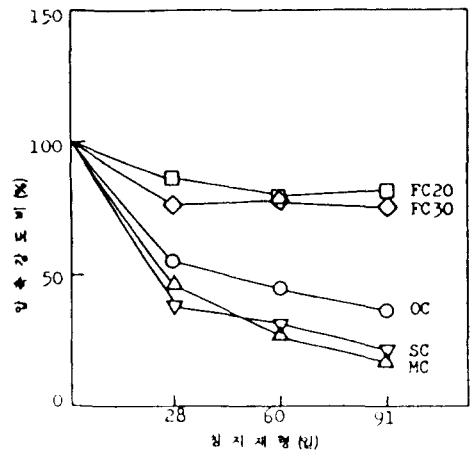


그림 3.7 황산에 침지된 모르타의 압축강도비와 재령과의 관계

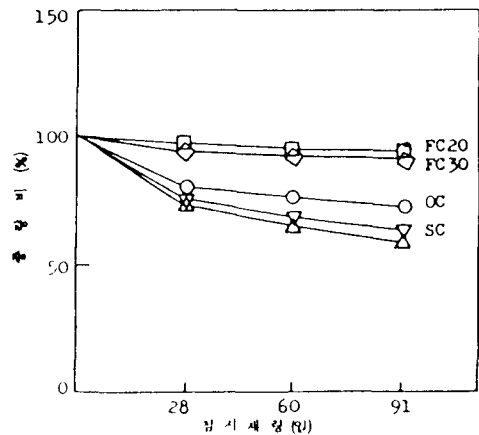


그림 3.8 황산에 침지된 모르타의 중량비와 재령과의 관계

종류 모르터는 재령이 증가할수록 강도비가 저하되었으며, 특히 MC를 사용한 모르터의 강도비의 저하가 OC를 사용한 모르터보다 약간 크게 나타났으며, 중량비도 압축강도비의 결과와 비슷함을 알 수 있다.

그래서 플라이 애쉬를 혼합한 시멘트풀을 60일간 수중에서 표준 양생한 공시체와 5% 황산에 침지한 공시체에서 채취한 분말시료를 각각 X선 회절분석해본 결과를 보면, 플라이 애쉬의 수화생성물이 황산의 침식에 비교적 안정한 ettringite로 이루어져 있는 점과 플라이 애쉬의 포졸란반응 진행으로 인한 수산화칼슘의 소비에 따라 석고의 생성이 억제되므로써 석고와 칼슘알루미늄이 수화물이 ettringite로 연화될 때의 팽창압을 다소 완화시켜 주기 때문에 플라이 애쉬를 혼합한 모르터의 황산에 대한 저항성이 포틀랜드시멘트를 사용한 모르터에 비해 좋은 결과를 나타내었다.

b. 염화칼슘에 의한 열화

콘크리트 제조시 사용되는 응결경화촉진제, 해사등과 겨울철 시멘트 콘크리트 포장의 눈과 얼음을 제거하기 위하여 사용되는 염화칼슘이 콘크리트 구조물에 미치는 영향은 매우 크다. 그래서 염화칼슘이 모르터 및 콘크리트에 미치는 영향을 알아보기 위하여 5%, 10% 염화칼슘 용액에 침지시킨 모르터 및 콘크리트의 압축강도와 중량을 측정해 본 결과, 플라이 애쉬를 30% 혼합한 모르터를 제외하고는 강도비가 유사한 감소현상을 나타내었으며, 농도에 따라 경향이 약간 상이함을 알 수 있다. 이러한 현상은 시멘트 수화물과 염화칼슘의 화학적 반응에 의한 것이라기 보다는 Ca^{2+} 이온의 공급으로 수화반응이 촉진되는데 따른 수화발열량의 증가와 이온해리시 발생하는 염로 인한 미세균열의 생성 및 다공화현상이 복합적으로 일어난 결과로 사료된다.

강도비 감소현상이 작거나 오히려 강도비가 큰 이유는 플라이 애쉬 혼합물의 크기에 따른 시멘트량의 감소로 인하여 수화열이 적어 미세균열의 발생을 감소시켰을 뿐만 아니라 염화칼슘 용액중의 Ca^{2+} 이온과 수중의 수산화기와 결합하여 생성된 수산화칼슘이 공급되므로써 포졸란반응이 계속되었기 때문이다.

이상의 결과로 살펴보면 국산 플라이애쉬를 적정량 혼합한 모르터나 콘크리트는 약품에 대한 열화를 줄이는데

효과가 있음을 알 수 있다.

c. 인공해수에 의한 열화

플라이 애쉬나 고로슬래그를 포틀랜드시멘트에 섞은 혼합시멘트 콘크리트의 내해수성이 우수함을 인정받아 해양콘크리트 구조물에 적용된 실적이 많이 있음은 잘 아는 바와 같다. 해수에 의한 화학적 침식작용은 Cl^{-} 이온 및 SO_4^{2-} 이온의 농도에 따라 다를 뿐만 아니라 각종 염류들의 공존비율에 따라서도 달라진다. 여기서는 국산 플라이 애쉬를 사용하여 제조한 시멘트풀, 모르터 및 콘크리트 공시체를 수중과 인공해수용액에 재령 91일간 침지한 후 재령별 강도, 중량변화 및 X선회절분석을 실시한 실험결과를 살펴 보기로 한다.²⁾

이 실험에서 고로슬래그 시멘트와 플라이 애쉬를 혼합한 시멘트를 사용한 콘크리트의 경우 재령 60일까지는 압축강도비의 변화가 거의 없었으며, 재령 91일에서 얼마간 감소되었고, 한편 플라이 애쉬20% 혼합시멘트 콘크리트의 강도감소가 가장 적게 나타났으며 보통포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트의 경우에는 재령 초기부터 강도의 감소현상을 나타내었다. 그래서 콘크리트의 중량을 측정해 본 결과 황산마그네슘에 침지한 경우와 마찬가지로 중량의 변화는 거의 없었다.

이상에서 고찰한 바를 종합해 보면 인공해수에 침지한 콘크리트의 압축강도의 감소율은 플라이 애쉬 20% 혼합시멘트가 적은 반면 Cl^{-} 이온이 가장 많이 침투된 보통포틀랜드시멘트의 압축강도 감소율이 제일 크게 나타났다. 따라서 플라이 애쉬 혼합시멘트나 고로슬래그시멘트와 같은 혼합시멘트가 보통포틀랜드시멘트보다 해수에 대한 저항성이 우수함을 알 수 있다.

3.2 플라이 애쉬를 사용한 굳지않은 콘크리트의 성질

1) 워커빌리티

플라이 애쉬 입자는 앞에서 언급한 바와 같이 대부분이 구형으로 콘크리트 믹싱시 골재와의 접촉면에서 볼베어링(ball-bearing)과 같은 작용을 하여 시멘트풀과 골재와의 사이에 마찰저항을 줄여 주므로써 콘크리트의 워커빌리티를 개선, 증대시키며 단위수량과 물-시멘트비도 아울러 감소시키는 효과를 가진다. 그림 3.9는 모르터의 단위수량

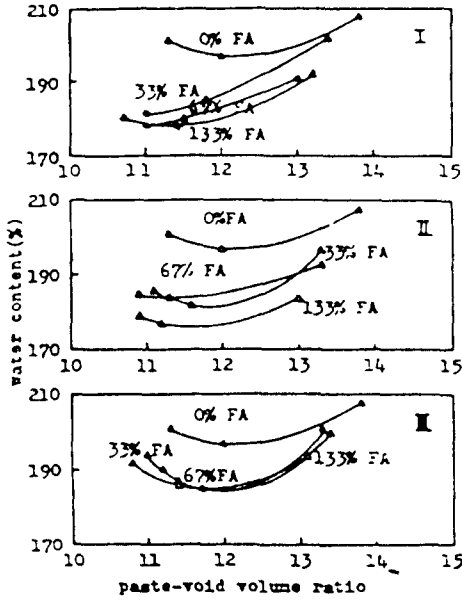


그림 3.9 모르터의 단위수량과 시멘트풀-시멘트공극용적비의 관계

과 시멘트풀-공극용적비와의 관계를 나타낸 것으로서 플라이 애쉬의 종류와 대체율에 따른 모르터의 단위수량을 구한 것이다.

이 그림에서는 플라이 애쉬를 사용한 모르터의 경우 플라이 애쉬의 종류와 분말도에 관계없이 보통 모르터보다 단위수량이 적게 요구되는 것을 알 수 있으며 그 정도는 제조공장에 따라 약간 상이함을 알 수 있다.

이와 유사한 경향으로 플라이 애쉬 20종류, 대체율 25%인 콘크리트의 연구실험 결과에서 단위수량의 감소율이 4-11%범위에 있음이 보고되고 있다. 한편 불리딩속도시험에서 구한 保水계수를 플라이 애쉬 입자의 형성, 표면상태와 관련시키므로써 플라이 애쉬의 구형입자가 콘크리트의 위크빌리티를 개선시키는 원인이 된다고 한다.

이외에도 플라이 애쉬의 사용은 콘크리트속의 잔골재의 미립분에 의한 상승수의 길을 차단하여 불리딩량을 감소시켜 주며 굳지않은 콘크리트의 잠성과 성형성을 증대시켜 주므로써 재료분리에 대한 저항성을 향상시켜 주는 효과도 기대할 수 있다. 그림 3.10은 보통 콘크리트와 플라이 애쉬 콘크리트의 불리딩을 비교한 것으로 플라이

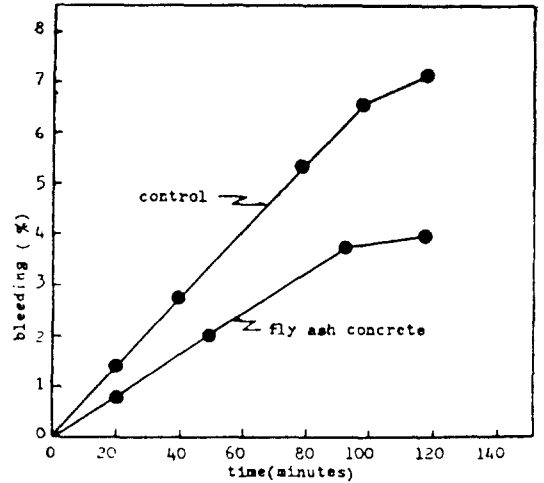


그림 3.10 보통콘크리트와 FAC의 불리딩량 비교

애쉬를 사용한 콘크리트가 불리딩량의 감소에 큰 효과가 있음을 알 수 있다.

2) 응결 및 슬럼프손실에 미치는 영향

플라이 애쉬를 사용한 굳지않은 콘크리트의 응결시간은 보통 콘크리트보다 약간 늦어지는 것이 일반적이며, 응결이 지연되는 이유는 플라이 애쉬의 분말도, 화학조성 및 콘크리트의 배합의 영향 때문이라고 한다. 특히 화학조성 중에는 미연소된 탄분량이 많을수록 응결시간을 지연시키는데 크게 영향을 미친다고 한다. 탄소함유량이 굳지않은 콘크리트의 응결시간에 미치는 영향에 관한 실험결과를 나타낸 것이 표 3.4이다.

표 3.4 FA 중의 탄소함유량이 응결시간에 미치는 영향

Fly ash source	Cement (g)	Fly ash (g)	Water (ml)	LOI (percent)	응결시간(h:min)	
					초경	종경
Control	650	0	165	-	2:10	3:35
Gallatin	406	244	169	2.35	3:25	4:40
Kingston	406	244	169	3.16	4:40	5:05
Colbert	406	244	186	10.45	4:20	6:35
Watts bar	406	424	243	15.68	6:25	7:10

이 표에서 시멘트의 60%를 플라이 애쉬로 대체했을 때 탄소함유량이 많은 경우 즉, 강열감량이 큰 플라이 애쉬를 사용한 경우의 응결시간이 2배정도까지 지연되는 결과를 나타냄을 알 수 있다. 응결이 지연되는 주된 원인은 시멘트의 수화에 의하여 생성된 Ca(OH)_2 의 농도를 낮추어 주므로써 C_3S 의 수화를 억제하기 때문이라고 설명하고 있다. 한편 플라이 애쉬의 사용은 콘크리트의 시간경과에 따른 슬럼프 손실을 감소시키는 데 유효하다고 한다. 또한 유기혼화제를 첨가한 경우에 비이온계의 혼화제를 사용한 콘크리트가 양이온계나 음이온계의 혼화제를 사용한 콘크리트에 비하여 시간경과에 따른 슬럼프손실이 크게 나타난다.

3) 유기혼화제의 흡착에 의한 영향

플라이 애쉬에 유기혼화제가 흡착하는 현상은 플라이 애쉬의 성질과 유기혼화제의 분자구조와 관계되며, 흡착량은 음이온계 계면활성제에 비하여 비이온계의 경우가 낮다고 한다. 그 이유는 비이온계 계면활성제 분자가 고체표면에 수평으로 흡착하기 때문에 흡착단면적이 음이온계나 양이온계 계면활성제에 비해 크기 때문이다. 플라이 애쉬에 유기혼화제의 흡착은 플라이 애쉬 중의 미연연탄소로 인한 것으로 흡착량은 미연연탄소량에 비례하며 미연연탄소량의 2% 전후에서 거의 포화에 달하였다는 보고가 있다.

그런데 미분말재료를 사용한 콘크리트의 공기량은 미립자의 영향으로 인해 약간 감소되는 경향이 있다. 일반적으로 위커블한 콘크리트를 잘 다지는 경우 대체로 1% 정도의 공기량이 존재하게 되나 플라이 애쉬를 사용할 경우 0.5% 정도로 줄어든다. 플라이 애쉬를 콘크리트에 사용할 경우 미립자의 영향에 의한 공기포의 감소와 함께 특히 AE제를 사용할 경우 미연연탄소에 AE제가 흡착하므로써 AE제의 농도가 감소되기 때문에 시멘트의 일부를 플라이 애쉬로 대체한 콘크리트의 경우 소요의 공기량을 얻기 위해서 AE제의 사용량을 증가시켜 주어야 한다. 그림3.11은 Tennessee Valley Authority가 행한 실험에 의한 결과로서 시멘트량을 모르타용적의 12%, 8%, 4%로 하고 플라이 애쉬를 시멘트량의 20%에서 100%까지 혼합하였을 때 모르타의 공기량을 10%로 유지하기

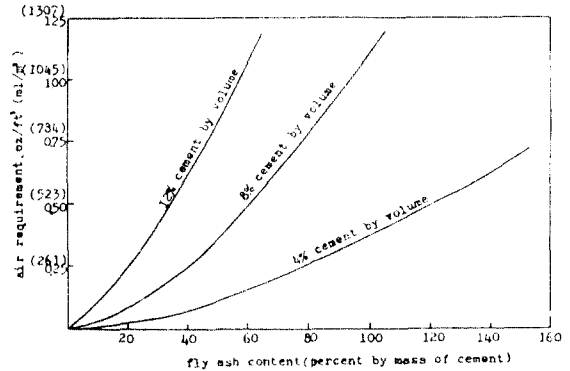


그림 3.11 모르타속의 FA의 혼입량과 AE제의 소요량과의 관계

위해 필요한 AE제 소요량을 나타낸 것이다. 이 그림에서 플라이 애쉬의 혼입량이 많을수록 AE제 소요량이 현저하게 증가하는 것을 알 수 있다.

한편 Lane은 플라이 애쉬 중의 미연탄소는 플라이 애쉬의 강열감량을 증가시키며 상열감량과 AE제 소요량과의 사이에는 직선관계가 있다고 보고 있다. 이러한 연구와는 달리 최근에 와서 플라이 애쉬 성분중에 비교적 알칼리를 많이 함유하고 있는 C급 플라이 애쉬에 대한 관심이 높아지면서 플라이 애쉬 중의 알칼리가 AE공기량에 미치는 영향이 검토되고 있다. Pistilli는 콘크리트 혼합수중 알칼리의 총량이 1.0%보다 크고 1.5-2.0%보다 작을 때 vinsol resin type의 공기연행제에 대한 AE공기의 산격계수(spacing factor)가 커진다고 보고하고 있다.

4) 온도 상승

플라이 애쉬는 콘크리트의 수화열을 감소시켜 수화열저하가 중요한 중력받 건설에 많이 사용된다. 그림3.12는 시멘트량의 30%를 캐나다산 플라이 애쉬로 대체했을 때의 온도 감소효과를 나타낸 것이다. 플라이 애쉬 콘크리트 초기세령에서의 열발생 정도는 동일질량의 시멘트의 15-30% 정도이다. 그림3.13은 부재크기에 따른 플라이 애쉬 콘크리트의 온도상승 정도를 나타낸 것이다.

저강습 플라이 애쉬가 콘크리트의 온도상승을 감소시키는 것은 사실이나, 고강습 플라이 애쉬는 열발생을 반드시 감소시키는 것은 아니다.

일반적으로 열발생 정도는 강도발현에 비례하며, 몇몇

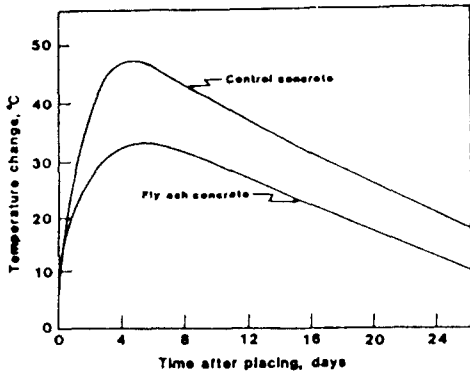


그림 3.12 FA의 온도감소효과

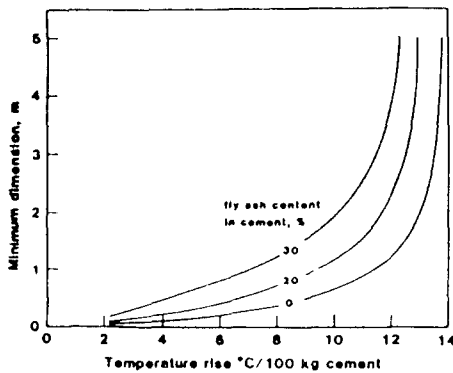


그림 3.13 부재크기에 따른 FAC의 온도상승정도

고칼슘 플라이 애쉬는 물과 매우 빨리 반응하여 과도한 일을 발생시킨다.

4. 콘크리트용 혼화재료로서 플라이 애쉬의 역사적 배경

플라이 애쉬를 콘크리트의 혼화재료로 사용하기 위한 착상은 1914년 Engineering News Record에 "An Investigation of the Pozzolanic in Coal Ash"란 제목으로 발표되었고 1932년에는 Cleveland Electric Illuminating Company, Detroit Edison Company와 같은 전력회사들의 광범위한 연구개발을 바탕으로 콘크리트용 혼화재료로서 활용이 시작되었으며 플라이 애쉬란 용어는 1937년 Davis등의 연구분헌에 최초로 사용되었다.

플라이 애쉬란 콘크리트용 혼화재료 대규모적으로 이용되기 시작한 것은 1948-1953 미국개척국에서 건설한 몬타나주의 Hungry Horse댐에서 부터이며 이를 계기로 플라이 애쉬의 사용실적은 크게 늘어나게 되었고 이에 따라 플라이 애쉬의 사용 및 실용화에 대한 규격을 제정하기에 이르렀다. 미국의 경우 1948년 규격 제정에 착수하여 1953년 규정을 제안하였고 1954년 개정을 거쳐 ASTM C 618-54T로 제정되었다.

이 ASTM 규정은 몇차례의 개정을 거쳐 1977년 C 급 플라이 애쉬를 포함하도록 하여 현재에 이르고 있다.

또한 일본에서도 1958년에 플라이 애쉬 규격이 제정되었으며, 프랑스는 1958년 플라이 애쉬 시멘트 규격을 제정하였고, 소련과 영국도 각각 1963년과 1965년에 플라이 애쉬 규격을 제정하는 등 많은 선진국들이 플라이 애쉬를 콘크리트용 혼화재료로 이용하기 위한 규격을 마련해 놓고 있다.

몇몇 플라이 애쉬 생산국의 플라이 애쉬 생산량과 유효사용량은 표4.1과 같다. 이 표에서 소련과 미국의 연간 플라이 애쉬 생산량은 각각 8,000만톤과 6,820만톤이나 되며 이들 중 연간 유효사용량은 미국의 24.1%에 비하여 소련은 5.0%에 지나지 않음을 알 수 있으며 기타 서독, 영국과 같은 나라는 연간 유효사용량이 각각 56.8%와 38.8%로서 상당히 많은 플라이 애쉬를 유효하게 사용하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 1980년 현재 미국에서 AASHTO 회원단체 59개 단체를 통하여 설문조사한

표 4.1 세계각국의 플라이 애쉬 발생량과 유효사용량

나라명	연간 생산량 (×100만톤)	연간 생산량 (톤/년)	유효사용량 (%)	
소련	80.0	1978	0.31	5.0
미국	68.2	1978	0.31	24.1
체코	16.3	1977	1.10	6.8
서독	15.0	1977	0.25	56.8
동독	15.0	1977	0.89	18.0
폴란드	15.0	1977	0.44	36.7
영국	11.9	1977	0.21	38.8
루마니아	7.0	1977	0.33	-
프랑스	5.2	1978	0.10	41.5
헝가리	5.1	1980	0.48	7.0
불가리아	5.0	1977	0.57	2.0

바에 의하면 응답한 51개 회원단체중 34개 단체가 플라이 애쉬를 시멘트 콘크리트용 혼화재료로 사용하고 있는 것으로 나타났으며 그 용도 또한 다양해져 포장 콘크리트, 교량 슬래브 콘크리트, 수리구조물, 도로, 중앙분리대 등에 사용되고 있으며 최근에 V.M. Malhotra에 의해 발표된 고유동화 플라이 애쉬 콘크리트에 대한 보고서에 포함되어 있는 fast truck 포장기법에 대한 보고등을 살펴보면 플라이 애쉬의 더욱 광범위한 사용 가능성을 보여 주고 있다.

우리나라에서 플라이 애쉬가 생산되기는 1930년 당인리 화력발전소의 준공으로 시작되었으나 보령 및 삼천포 화력발전소가 생기기 이전인 1983년까지는 그 전량이 무연탄 플라이 애쉬로서 K.S. 규격 및 외국의 플라이 애쉬 규격보다 미연탄소의 함량과 알칼리 성분 함량이 많아 콘크리트용 혼화재로서 사용이 어려워 매립용으로 대부분이 사용되어 왔으며 기와나 벽돌공장에 일부 재공될 정도이었다.

그러나 최근에 보면 보령, 삼천포 및 몇몇 화력발전소에서 생산되는 플라이 애쉬를 콘크리트용 혼화재로 사용하기 위한 연구개발 및 실용화 노력이 서서히 증가하고 있으며, 이에 대한 관심 또한 증대되고 있고, 또한 포장기층으로서의 lean concrete base 또 R.C.C. 공법(Roller Compacted Concrete)에서 fly ash의 사용은 거의 필수적인 것으로 되어 있다. 플라이 애쉬에 대한 규격을 1964년 KS L 5405와 1979년에 KS F 4049로 제정하였다.

5. 플라이 애쉬의 이용기술 및 이용현황

5.1 플라이 애쉬의 이용기술

FA는 입자가 고운 경량분말로서 모양은 구상이고 자유석회와 결합하는 포졸란 성질을 가지고 있고 물을 흡수한다. 이러한 물성을 가지고 있어 시멘트 및 콘크리트, 그라우트, 경량골재 및 건축재, 구조적 충전재로서 사용되고 있다. 또한 내화물, 페인트, 프라스틱, 화학약품, 여과, 절연체 등 각종 산업분야에 이용되고 있거나 이용 개발중에 있다.

1) 시멘트 및 콘크리트 분야 이용

FA는 외국의 경우 구조 콘크리트와 프리캐스트 콘크리트 제품에 널리 이용되고 있다. FA의 세가지 특성 즉 포졸란 성질, 둥근 모양, 물의 요구량이 적다는 것이 주로 그 효과를 대표하고 있다. FA는 포틀랜드 시멘트의 수화반응이 일어나는 동안 방출된 자유석회와 결합하여 시멘트성 화합물을 추가적으로 만든다. 이와 같은 반응을 이용하여 FA를 콘크리트에서는 시멘트 일부 대체용으로 사용하고 있다. 부분적 시멘트 대체는 돈을 절약할 수 있을 뿐만 아니라 여러가지 기술적 이익, 예를 들면 수화열의 감소를 가져와 대형 콘크리트 구조물에서 바람직한 결과를 가져온다. 콘크리트는 자유석회와 특정약품 특히 황산염간의 팽창반응으로 내부에서 손상을 받을 수가 있다. FA는 석회와 결합함으로써 그러한 손상위험을 줄여준다. FA에 의한 단순한 시멘트 일부 대체는 콘크리트 초기강도의 감소를 가져오지만 이것은 혼합설계에서 조절이 가능하다.

FA의 둥근 입자는 모난 일부골재와 혼합 사용할 때 콘크리트의 워커빌리티를 증가시킨다. 따라서 콘크리트의 치밀성을 증가시켜 일부수중에 포함된 황산염과 같은 침식성 화학성분의 침투를 막게 되어 손상위험을 줄여준다. FA는 지하 콘크리트 공사와 수중 공사에 특히 바람직하다. 포틀랜드 시멘트와 비교할때 FA는 콘크리트의 동일 워커빌리티를 유지하기 위하여 필요한 요구수량을 줄여준다. 수량의 감소는 대개 굳지않은 콘크리트의 분리 와 분리닝이 일어나지 않도록 도와주어 콘크리트 균일성을 유지시키고 장기 강도와 내구성을 증가시킨다.

2) 그라우팅 이용

기초용 및 구조용 목적으로 공간을 채우기 위하여 순 FA 만을 또는 시멘트와 혼합하여 그라우트로 사용할 수 있다. FA그라우트의 주된 이점은 FA의 둥근 모양으로 그라우트 흐름을 증가시키고, 플랜트의 마모를 감소시키고, FA의 입도가 작고 밀도가 낮아서 시멘트를 서스펜션상태로 계속 유지시켜 그라우트의 침투성을 증가시키고, FA그라우트는 다른 그라우트보다 가볍고, 또한 자유석회와 FA의 종합반응으로 황산염 저항성이 증가된다.

FA그라우트는 영국에서 널리 이용되고 있는데, 사용례

는 뱀하부 커어튼, 기초, 제방, 철로, 교각, 교대 및 붕괴를 막기 위하여 버려진 굴, 下水渠, 鑛軸 등의 공간을 메우는 목적으로 쓰여진다. FA-시멘트 그라우트의 전형적인 물성은 다음과 같다.

표 5.1 FAC 그라우트의 전형적 물성

FA/FA Part-by weight	Water	Bulk		STRENGTH 7DAYS		STRENGTH 28DAYS	
		Density	Density	150mm ²	N/mm ²	150mm ²	N/mm ²
1	1	0.5-0.6	190-1200kg/m ³	300-850	2.27-5.85	850-2000	5.85-11.78
2	1	-	1440-1920kg/m ³	300-500	2.07-3.44	800-1300	5.51-8.96
5	1	-	-	100-400	0.69-2.75	300-850	2.75-5.85
10	1	-	-	30-300	0.55-2.07	80-500	0.55-3.79
15	1	-	-	30-100	0.21-0.69	80-200	0.55-1.38
10	1	-	-	30-100	0.24-0.69	50-150	0.34-1.03

3) 건축재료 분야 이용

경량기포콘크리트(ALC)제조사는 입도가 높은 FA를 생석회, 시멘트와 함께 슬러리로 만들어 발포시킨 후 초경화상태에서 절단한 다음 특정압력하에서 증기 양생 처리과정을 거쳐 경량건축재가 만들어지며, 이러한 건축재는 600kg/m³ 정도로 매우 가볍고, 열전도도는 0.11kcal/m.h.℃의 낮은 값을 가진다.

기와, 벽돌 및 세라믹 제품 제조시 점토 대체로서 FA가 이용된다.

4) 경량 골재이용

경량 Sintered FA는 여러가지 용도로 쓰여진다. 고층 빌딩의 구조 콘크리트, 프리캐스트 구조용 판넬, 콘크리트 블럭 등의 골재로서 이용된다. Sintered FA를 사용한 콘크리트는 자갈을 골재로 사용한 콘크리트에 비해 무게가 2/3정도로 가볍고, 단열성은 2배가량 좋다. 소성 FA는 그밖에도 바닥 및 지붕의 절연기준대, 차량과 비행기용 arrester bed와 농업용으로 토지배수용과 식물생장재로서 이용된다.

5) 구조적 충전재등 토목분야 이용

충분한 수분을 함유하는 적당한 FA가 적당한 두께층으로 다져지면 그것은 하중 지지력이 우수한 성토가 된다. 영국에서는 대형 건축공사에서 이와 같은 방법으로

수백만톤의 FA가 쓰여지고 있다. FA의 두가지 특성이 성토에 있어 중요하다. 첫째 FA가 중량이 가볍다는 것이다. FA의 다져진 부피밀도는 일반적으로 1300-1600kg/m³으로서 종전의 대부분 성토재의 밀도보다 훨씬 작다. FA로써 만들어진 도로제방은 상대적으로 무게가 가볍고, 이는 하중지지력이 나쁜 땅에서 이점이 있다. 두번째 FA는 대부분의 경우 자체 경화작용을 가지고 있다. FA는 강도가 시간이 흐를수록 증가한다는 점이 비슷한 입도의 다른 재료와 다른 점이다. 적당히 다져진 FA를 이용한 성토내부에서 가라앉는 현상은 결과적으로 무시할 수 있다. 자체 경화작용은 다리교대의 뒷면과 같은 구조물에 대한 수평압력의 감소를 가져오기 때문에 FA를 이 목적으로 이용하면 더욱 경제적으로 설계할 수 있는 이점이 있다. 또한 플라이 애쉬는 지방안정재, 아스팔트 충전재, 노반재, 노상재 등에도 쓰여진다.

6) 농·수산 분야 이용

FA는 카리, 마그네슘화합물, 비분탄 Binder 등과 혼합하여 입자를 만들어 건조한 후 유동소성 냉각시켜 비료로 제조 이용한다. FA는 토양과 下水汚를 혼합함으로써 입도분포를 조절하고 유기물을 보급하는 토양개량제로서도 사용될 수 있다. 또한 FA를 樹脂, 자갈(또는 석고, 시멘트)와 함께 성형 조립식 대형 인공어초로서 해저에 침설, 이용될 수 있다.

7) 기타 이용

FA는 그밖의 여러가지 용도로 이용되고 있다. FA는 발생된 형태 그대로 이용되기도 하고, 유용한 적당부분을 얻기 위하여 일정한 처리를 거쳐 이용되기도 한다. 적당히 분류된 FA는 밀도 내열성, 성분이 서로 다른 범위를 가지며, 이들은 구조물, 세라믹, 플라스틱 등 특수용도로 이용되며, 슬러지 또는 유사한 물질의 건조제로 사용되기도 한다. 또한 새로운 용도 개발이 계속적으로 되고 있다.

5.2 외국의 이용 현황

1) 영국

최근 수년간 영국에서 발생하는 전체 플라이 애쉬 중 40% 이상이 유용하게 이용되고 있다. 중앙발전국(CEGB) 본사 및 지역별 플라이 애쉬 판매 및 기술부서가 FA이용에 관한 업무를 담당하고 있다. 영국에서는 도로 및 구조적 충전재 등 토목분야에 대량 이용되고 경량골재, 경량 콘크리트 블록 등 건축재, 시멘트 혼합재 및 그라우트 등으로 이용되고 있고, 특히 Ceno-sphere가 단열성, 전기 절연성을 향상시킬 목적으로 거의 모든 분야의 비금속재료로서 이용된다.

2) 서독

서독은 발전기술협회에서 기초기술의 연구를 수행하고 있고 응용기술의 개발은 발전소 및 민간단체에서 행해지고 있다. FA는 시멘트, 콘크리트 혼합재, 토목용 충전재, 경량골재, 블록 등에 이용되고 있다. 특히 VKR(VEVA Kraftwerke Ruhr AG)사는 발생된 플라이 애쉬의 95% 이상을 콘크리트 골재, 경량골재, 건축재, 토목재, 도로용 등 광범위한 분야에 이용하고 있다.

3) 프랑스

정부, 전력청, 전력공사 및 석탄공사중앙연구소가 그 중심적 지도기관이다.

프랑스에서는 1920년대부터 혼화 시멘트 연구가 열심히 행해지고 있고 구주제국중에서도 플라이 애쉬를 시멘트부문에 응용하는 것이 현저하다. 전 시멘트량의 90%가 혼화 시멘트라 한다. 그로 인하여 플라이 애쉬도 시멘트와 도로부문에서 전량의 70%를 차지하고 있는 현상이다.

4) 네델란드

네델란드는 라인강의 하구에 위치하여 모래, 점상 기타 연약지반의 지질조건을 가지고 있고 기온변화가 심한 나쁜 자연조건하에 있다. 모래, 자갈 등의 광물자원이 부족하여 플라이 애쉬를 자원으로 이용하려는 정책이 활발하다.

통산성, 후생성의 두 곳에서 플라이 애쉬 처분에 관한 위원회가 설치되어 있어 이 위원회의 지도원조하에 플라이 애쉬 유효이용에 관한 각종 연구개발이 행해지고 있다.

5) 미국

미국은 플라이 애쉬 이용의 보급책으로서 정부가 계약하는 건축공사에 플라이 애쉬를 활용하는 것으로써 이용촉진을 꾀하고 있다. 시멘트 혼화재, 충전재, 그라우팅으로 널리 이용되고 있으며 플라이 애쉬로부터 유가금속회수를 위한 연구가 Halomat사에서 진행되고 있다.

6) 캐나다

현재 FA를 실제 시공분야에서는 Saskatchewan주에서 동결-융해저항성을 증진시키기 위해 일부 사용하고 있으나 다른 분야에서는 거의 사용하지 않는 실정이다. 다만 CANMET(Canada Center for Mineral and Energy Technology)에서는 FA의 사용에 대한 여러 연구가 수행되고 있다.

5.3 국내 이용 현황

1989년 우리나라에서 발생된 플라이 애쉬는 약 200만톤으로 추산되는데, 이중 11%인 21만톤이 이용되었다. 이용량의 2/3정도가 콘크리트 혼화재로서 사용되었고, 나머지는 기와, 벽돌, 슬레이트 등 건축재 제조시 사용되었다. 이러한 이용률은 선진외국에 비하여 극히 저조하고 이용분야도 한정적이다.

이용률이 저조한 원인은 선진외국에 비하여 연구개발이 부진하여 분야별 이용기술이 확립되지 않았고, 플라이 애쉬의 미연탄소물 함량이 KS규격기준인 5%를 초과하는 경우가 있고, 천연골재가 풍부하여 경량골재로서의 이용에 대한 경제성이 낮고, Silo 및 입도분별기의 설치가 미비하여 입도별 수율을 창출하지 못하고 있다. 그 밖에도 FA이용에 대한 지원책이 전혀 없고, 일반국민의 플라이 애쉬 이용에 관한 인식도 부족한 실정이다.

6. 플라이 애쉬 사용에 대한 제한사항

FA는 콘크리트의 제반 특성을 향상시키므로 콘크리트 자체만을 고려할 때 FA의 사용은 매우 유익하다. 그러나 많은 연구보고에 따르면 이러한 FAC의 장점은 여러가지 추가적인 요소에 의해 그 사용이 제한될 수 있다.

VHTRC(Virginia Highway and Transportation

표 5.2 FA의 유효이용현황

항목	1987			1988			1989		
	무연탄	유연탄	계	무연탄	유연탄	계	무연탄	유연탄	계
石炭 消費量(천톤)	2,248	4,958	7,206	2,598	6,371	8,969	2,367	5,913	8,280
石炭灰 發生率(%)	43.84	13.33	22.80	47.73	13.37	23.32	49.51	13.78	23.99
石炭灰 發生量(천톤)	981	861	1,643	1,240	852	2,092	1,172	815	1,967
石炭灰 利用量(천톤)	88	86	174	95	146	241	78	135	213
石炭灰 利用量(%)	8.9	13.0	10.6	7.7	17.1	11.5	3.7	16.6	10.7
石炭灰 利用 現況(천톤)									
시멘트 原料	5.30		53.0	45.5		45.5			
콘크리트用 混和	2.8	86.2	89.0	15.6	145.8	161.4	1.2	134.7	135.9
기와, 벽돌, 슬레이트	28.2		28.2	34.3		34.3	35.2		35.2
크링카 販賣	3.5		3.5				5.8		5.8
其他							35.7		35.7
埋立(유상수기, 천톤)	140		140	405		405	349		349
灰捨場埋立(천톤)	753	575	1,329	740	706	1,446	745	680	1,425

Research Council)의 보고서는 고속도로 및 다른 교통시설물의 시공에서 FAC사용에 대하여 품질관리와 공정상의 문제점을 제시하고 있다.

FAC사용시 주요한 제한사항을 열거하면 다음과 같다.

- a. 모든 FA가 콘크리트 제반 특성을 향상시키기에 충분한 포졸란 활성도를 갖지는 않는다. 또한 같은 장소에서 채취한 FA도 품질이 일정하지 않다.
- b. 적당한 공기연행량을 유지하기 위하여 특별한 주의가 필요하다.
- c. FA를 현장까지 운반하기 위한 비용을 고려해야 한다.

- d. FA의 품질관리를 위하여 추가적인 인력과 시간 및 비용이 필요하다.
- e. FA의 대체량에 따라 새로운 콘크리트 배합 설계가 필요하다.

7. 미국의 플라이 애쉬 콘크리트 사용현황

다음 표 7.1은 미국의 도로 행정구역을 10개로 나누어 각 구역마다 플라이애쉬를 도로구조물등에 사용하고 있는 현황을 표로 작성하여 소개한 것이다. 이 표에서 보는 것처럼 각 구역마다 플라이 애쉬의 이용 실태가 각 구역마다 다르게 나타나고 있다.

표 7.1 FA 이용현황(by highway agencies)

주(State)	시설물*						FA 종류	FAC	FAC의 사용량(per 1000yd³)	비고
	도로 포장	교량 상판	연석 수로	기초 Seals	중앙 방벽	Pipe 기타				
Region 1										
Maine	NP	NP	NP	NP	NP	NP	-	NR	0	현재 규정을 재평가 중임.
Messachusetts	NP	NP	NP	NP	NP	NP	-	NP	0	EPA-FHWA에 따라 개정할 예정.
New Hampshire	NR	NP	NP	NP	NP	NP	-	NP	0	현재 규정을 재평가 중임.
New Jersey	NP	NP	NP	NP	NP	NP	F	NP	0	특별 규정을 위한 실험 계획.
New York	NP	NP	NP	NP	NP	NP	F	NP	0	수행중인 실험에 규정 수정.
Rhode Island	NP	NP	NP	NP	NP	NP	-	-	0	개정 계획 없음.
Vermont	NP	NP	NP	NP	NP	NP	-	NR	0	EPA-FHWA에 따라 개정할 예정.

주 (State)	시설물*						FA* 종류	FAC	FAC의 사용량 (per 1000yd ³)	비 고
	도로 포장	교량 상판	연석 수로	기초 Seals	중앙 방벽	Pipe 기타				
Region 3										
Delaware	PC	PC	PC	PC	PC	PC	C-F	NP	0	최근 규정 개정, 미시행중.
Columbia	PC	PC	PC	PC	PC	PC	C-F	PS	0.3	최근 규정 개정.
Maryland	PC	NP	PC	NP	PC	PC	F	NP	0	사용량은 보고된 바 없음.
Pennsylvania	PC	PC	PC	PC	PC	PC	C-F	PS	187	펄핑 Conc.는 FA사용 없음.
Virginia	PC	PC	PC	PC	PC	PC	F	PO	8	최근 규정 개정.
West Virginia	PC	PC	PC	PC	PC	PC	F	PS	532	도로포장에 대량 사용.
Region 4										
Alabama	R	PC	PC	PC	PC	PC	C-F	NR	-	F급 FA를 주로 사용.
Florida	PC	PA	PA	PA	PA	PA	F	PF	425	열악한 환경에서 주로 사용.
Georgia	PC	PC	PC	PC	PC	PC	F	PS	NR	
Kentucky	PC	NP	PC	PC	PC	PC	F	PS	NR	
Mississippi	PC	PC	PC	PC	PC	PC	F	PS	NR	최근 규정 개정.
North Carolina	NR	NP	NP	R	NP	PC	F	NP	NR	Seal Conc.에 주로 사용.
South Carolina	NR	NR	NR	NR	PA	PA	F	PS	NR	거의 사용하지 않음.
Tennessee	NP	NP	NP	NP	NP	NP	C-F	NP	0.7	실형적으로 사용.
Region 5										
Illinois	PA	NP	PA	NR	PA	PA	C-F	PO	256	최근 규정 개정.
Indiana	NP	NP	NP	NP	NP	NP	-	PS	NR	FA를 혼화제로 인정하지 않음.
Michigan	PC	NP	PC	PC	PC	PC	C-F	PF	200	포장을 제외하고 사용 않음.
Minnesota	PC	NP	PC	PC	PC	NR	C-F	PS	1M	F급 FA를 주로 사용.
Ohio	PC	NP	PC	NR	PC	PC	C-F	PS	0	최근 규정 개정.
Wisconsin	PC	NP	NP	NP	NP	PC	C-F	NP	240	포장에만 사용, 67%의 C급 FA.
Region 6										
Arkansas	PC	PC	PC	PC	PC	PC	C-F	PS	NR	
Louisiana	PA	NP	PA	PA	PA	PA	C-F	NP	NR	Prequalification Procedure.
New Mexico	PC	PC	PC	PC	PC	PC	C-F	NP	NR	FA 사용시 골재에 제한을 둠.
Oklahoma	PC	NR	NR	NR	NR	NR	C-F	NP	112	
Texas	PC	PC	PC	PC	PC	PC	C-F	-	-	특별 규정을 사용.
Region 7										
Iowa	PC	NP	PC	PC	PC	PC	C-F	PO	120	고품질 콘크리트만 허용.
Kansas	NP	NP	NP	NP	NP	NP	-	-	0	EPA-FHWA에 따라 개정할 예정.
Missouri	PC	NP	NP	NP	NP	NP	C-F	PO	-	FAC의 제한적인 사용.
Region 8										
Colorado	PC	PC	PC	PC	PC	NR	-	NP	-	특별한 조건에서 사용.
Montana	NP	NP	NP	NP	NP	NP	-	NP	0	
North Dakota	PC	NR	NR	NR	NR	NR	-	NP	-	고 강습 시멘트에 사용.
Utah	PC	PC	PC	PC	PC	PC	F	NP	300	

주 (State)	시설물*						FA* 종류	FAC	FAC의 사용량 (per 1000yd ³)	비 고
	도로 포장	교량 상판	연석 수로	기초 Seals	중앙 방벽	Pipe 기타				
Region 9										
Arizona	PC	PC	PC	PC	PC	PC	F	PF	182	95% F급 FA와 5% C급 FA 사용. 사용하지 않음.
California	PC	PC	PC	PC	PC	PC	C-F	PS	635	
Hawaii	PC	PC	PC	PC	PC	PC	C-F	NP	0	
Region 10										
Alaska	NP	NP	NP	NP	NP	NP	-	-	-	FAC의 사용에 없음.
Idaho	PC	NR	PC	PC	PC	PC	C-F	PS	0	FAC의 사용 계획 없음.
Oregon	NP	NP	PC	PC	PC	PC	C-F	NP	NR	
Washington	PC	PC	PC	PC	PC	PC	C-F	NP	NR	최근 규정 개정.

*R = 필요함, PC = 도급업자의 선택에 따라 인정될 수 있음, PA = 도로국의 선택에 따라 인정될 수 있음, NP = 규정에 의해 인정 않됨, NR = 알려지지 않음.
 *C = C급 FA, F = F급 FA, C-F = 등급의 구별없이 ASTM C 618에 따름
 *NP = 인정되지 않고 사용할 수 없음, PS = 인정되나 거의 사용하지 않음, PF = 인정되며 자주 사용됨, PO = 인정되나 사용예가 알려진 바 없음.

8. 맺는말

본 소고에서는 포졸란 재료로서 플라이 애쉬를 중심으로 이들 재료의 물리 화학적 제반특성과 이들을 콘크리트에 활용하였을 때 나타나는 제반 강도 및 역학적 특성에 대하여 고찰하였다. 포졸란 재료를 사용한 콘크리트의 기본 특성은 초기강도는 저하되나 장기강도는 회복되어 증가되고 일부 화학저항성 등도 증가하는 특성을 가지고 있다. 본 소고에서는 또한 미국등을 중심으로 플라이 애쉬를 도로포장 및 도로구조물에 적용한 예와 그 현황에 대하여도 고찰하였다.

플라이 애쉬는 우리나라에서도 화력발전소의 가동과 증설로 매년 상당량이 생산되고 있다. 이것은 산업부산물이기 때문에 이용이 되지 않을 경우 폐기처분해야 하는 많은 어려움을 안고 있다. 유럽등지에서는 유효이용율이 50~60%에 이르는 국가도 많은 것으로 알려지고 있다.

본 소고에서는 플라이 애쉬의 기본 특성과 플라이 애쉬를 콘크리트에 사용하였을 때 나타나는 제반 특성을 밝히고자 하였으며, 각국에서의 플라이 애쉬 이용현황을 소개하였다.

우리나라에서도 플라이 애쉬에 대한 품질개선과 품질규격화가 시급히 요청되고 있으며, 앞으로 이에 대한 좀더 구체적이고도 광범위한 연구개발이 각 분야별로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 오병환, 고재균, "플라이 애쉬 콘크리트의 강도 및 역학적 특성에 관한 연구", 콘크리트 학회지, 제3권 2호, 1991.6, pp.87-95.
- 문한영, 김기형, 김성주, "염용액에 침지한 콘크리트의 열화에 대한 연구", 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 제1권 1호, 1989.11, pp.25-30.
- Aitcin, P.C., "Comparative Study of the Cementitious Properties of Different Fly Ashes", ACI SP9 1-4, 1986.
- Swamy, R.N., "Early Strength Fly Ash Concrete for Structural Applications", ACI Journal, Sep-Oct, 1983.