

플라이애쉬를 利用한 시멘트콘크리트의 品質向上

李 章 和

〈韓國建設技術研究院 前任研究員〉

1. 序 言

석탄화력 발전소의 副産物로서 배출되는 플라이애쉬(Fly ash)는 자원 재활용의 측면 및 시멘트 부족시기에 일정량의 시멘트를 代替시키는 절약측면에서 사용되기 시작하여 최근에는 특수한 목적의 콘크리트에 있어서 그 品質을 향상시킬 목적으로 사용하게 되었고 경제적 효과도 얻고 있다.

콘크리트의 結合材로서 시멘트는 보통포틀랜드 시멘트로부터 조강, 중용열, 저열, 내황산성 시멘트 등 용도에 따라 다양하게 생산되고 있으며 시멘트에 일정량을 혼합함으로써 콘크리트의 品質을 향상시킬 수 있는 混和材料(Chemical & Mineral Admixture)는 더욱 다양하게 개발·생산되고 있다. 이러한 시멘트와 混和材料의 品質관계는 어느정도 相反性을 가지고 있다. 다시말해서 시멘트의 品質이 용도에 맞게 상당히 우수하다면 混和材料는 불필요하게 될 것이다. 그러나 시멘트 생산시설의 관리, 소요 品質 및 소요경비 등의 문제가 서로 유기적으로 결부되어 시멘트와 混和材料가 공존하고 있는 셈이다.

특수한 性能이 요구되는 콘크리트 즉 耐海水性, 耐化學性, 水密性, 暑中, 매스콘크리트 등에 있어서 品質향상과 경제성을 동시에 만족시켜 줄 수 있는 混和材(Mineral Admixture)로

서 플라이애쉬의 성능은 널리 알려져 있는 편이다.

국내에서는 1983년까지 배출된 플라이애쉬가 國內産 무연탄을 연소한 것으로서 상대적으로 品質이 안정되지 못했기 때문에 콘크리트용 混和材로서의 성능에 문제가 있었지만 1984년 이후에는 수입유연탄을 연소시킨 플라이애쉬가 상당량 발생되고 그 品質도 비교적 안정되어 콘크리트의 용도에 따른 소요성능을 발휘할 수 있게 되었다. 따라서 本稿에서는 플라이애쉬를 이 용함에 따른 시멘트콘크리트 品質向上 및 운반 소요 경비 등의 關連사항에 대해 분석·기술하고자 한다.

2. 플라이애쉬의 물리·화학적 성질¹⁾

1) 물리적 성질

(1) 비 중

플라이애쉬의 비중은 1.9~2.3 정도이며 鐵分의 함량이 클수록 커진다.

(2) 粉末度

분말도는 SiO₂의 함량과 함께 포졸란 활성(Pozzolan Activity)을 지배하는 주요인자로서 콘크리트의 워커빌리티(Workability)에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 粉末度가 크면 작은 경

플라이애쉬의 화학성분 및 광물조성

〈表-1〉

화학성분	구성비율 (중량 %)	광물 조성	구성비율 (중량 %)	Trace Metal
SiO ₂	40 ~ 65	Mullite(3 Al ₂ O ₃ ·SiO ₂)	60 ~ 85	
Al ₂ O ₃	20 ~ 30			
Fe ₂ O ₃	3 ~ 10	Magnetite(Fe ₂ O ₃)	5 ~ 25	Co, Li, Mo
CaO	0.1 ~ 1			Ni, V
MgO	0.1 ~ 2	Quartz(SiO ₂)	1 ~ 10	
SO ₃	0.1 ~ 5			
Na ₂ O	0.2 ~ 1	Sulphate	1 ~ 4	
K ₂ O	0.2 ~ 1	Unburnt Carbon	1 ~ 10	

註: 구성비율의 수치는 플라이애쉬 품질에 따라 다를 수 있으며 그 개략치를 나타냄.

우보다 콘크리트 配合時 단위수량의 증가를 초래하지만 콘크리트내에서 골재사이의 공극을 충전시켜 줌으로써 水密性을 증대시킬 수 있다.

(3) 형 상

플라이애쉬의 形象은 기본적으로 球形으로서 대부분 1~100 μm 범위에 있고 평균 20~30 μm 정도이다. 비교적 큰 입자는 내부에 공극을 갖거나 더욱 미세한 球象입자가 魚卵처럼 혼입되어 있는 경우도 있다.

(4) 색 깔

플라이애쉬의 색깔은 담황색으로부터 회색, 암갈색에 이르기까지 다양하며 탄소, 철, 습분 등의 비율에 따라 달라진다.

2) 화학적 성질

(1) 화학성분

일반적으로 플라이애쉬의 물리적 성질이 콘크리트에 미치는 영향이 굳지 않은 콘크리트에서 현저한 반면 화학성분은 콘크리트의 강도와 化學抵抗性 등 경화콘크리트에 더 큰 영향을 미치며 〈表-1〉에 플라이애쉬의 화학성분 및 광물조성의 개략치를 나타내었다.

(2) 포졸란 활성(Pozzolan Activity)

포졸란이란 자체로서는 물과 반응하여 경화되

는 성질이 없고 물의 존재하에 수산화칼슘[Ca(OH)₂]과 결합하는 성질을 가지며 그 결과 불용성 경화물질(실리카질 화합물)을 다량 생성하여 장기적으로는 강도를 발휘하는 물질을 말한다. 플라이애쉬는 인공 포졸란 재료로서 물과 반응하여 경화하는 약간의 自硬性을 나타낸다.

(3) 강열감량(Loss on Ignition)

플라이애쉬에 존재하는 未燃炭粉의 양은 플라이애쉬의 품질이나 연소조건 등에 따라 다르지만 2~10% 정도이다. 플라이애쉬 중의 未燃炭素의 양을 강열감량(%)으로 표시하며 미연탄소는 콘크리트내에서 AE제를 흡착하기 때문에 더 많은 AE제를 필요로 하게 되어 중요한 문제점이 되고 있다. 콘크리트 혼화제용으로는 강열감량이 낮을수록 좋으며 각국에서는 규격으로 한계치를 규정하고 있다(KS L 5405, 6% 이내).

(4) pH치

플라이애쉬의 pH치는 8~13의 범위에 있으며 시멘트의 pH가 12 전후이므로 이와 비슷한 것이 효과적이다.

3. 시멘트콘크리트의 품질향상

良質의 플라이애쉬를 콘크리트 混和材로 이용하면 대부분의 경우 여러가지 品質(抵抗性)을

향상시키게 된다. 그러나 명심해야 할 사항으로서 水和熱 감소와 초기응결지연현상이 寒中 시공 시에는 불리하게 작용되므로 특히 유의해야 한다. 그리고 콘크리트 혼화제로서 양질의 플라이애쉬란 규격(KS L 5405, ASTM C 618, JIS A 6201 등)을 만족시키는 것을 말하며 양질의 플라이애쉬를 이용할 경우 콘크리트의 품질 향상에 관해 다음에 기술한다.

1) 강도증진¹⁾

플라이애쉬를 콘크리트 혼화제로 사용할 경우 초기재령에서는 강도가 플라이애쉬를 사용하지 않은 경우보다 낮지만 장기재령에서는 현저하게 증가한다. 따라서 초기재령의 강도발현이 큰 문제가 되지 않는 댐 및 포장콘크리트의 경우에는 상당한 利點을 얻게 된다. 또한 포졸란 활성도가 큰(95% 이상) 플라이애쉬는 재령 28일 부근에서 플라이애쉬를 사용하지 않은 일반콘크리트의 강도 수준을 확보할 수 있게 한다. <그림-1>은 국내에서 배출된 유연탄 플라이애쉬를 혼화제로 사용한 경우의 장기강도 발현상태를 나타낸 것이다.

최근 강도발현 상태가 좋은 플라이애쉬는 輕量高強度 콘크리트 제조에 있어 필수적인 재료로 활용되고 있다.

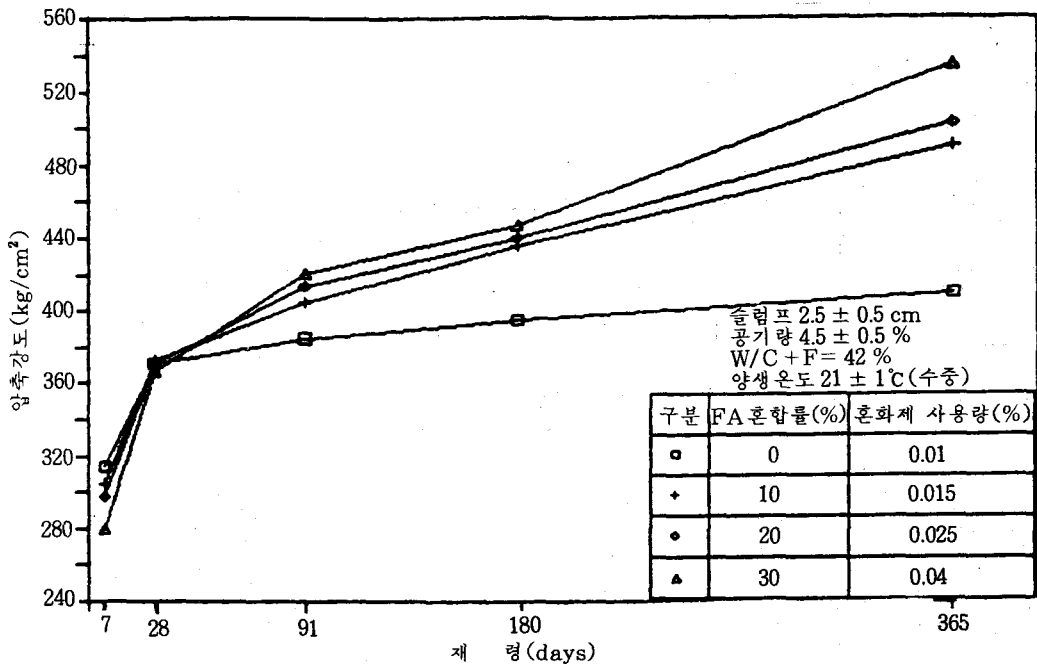
2) 水和熱 감소²⁾

플라이애쉬는 초기재령에서 응결지연으로 수화열의 발생을 다소 억제시킨다. <表-2>의 시험결과에 따르면 플라이애쉬 10%(시멘트 중량비) 혼합시 약 8%의 수화열이 줄어든다.

이러한 성질을 晝中 施工時 매스콘크리트, 댐 콘크리트, 도로포장 등에 활용함으로써 냉각(Cooling)비 절감, 온도차에 따른 콘크리트의 균열방지 등 품질관리의 효과를 얻을 수 있다.

3) 水密性 향상³⁾

일반적으로 水密性이 큰 콘크리트는 대부분의 耐久性能이 좋은 것으로 볼 수 있다. 분말도가 크고 포졸란 활성이 좋은 플라이애쉬는 골재사이의 공극을 채워 콘크리트를 치밀하게 해 줌으로써 콘크리트의 水密性을 향상시키게 된다. <表-3>은 KS F 2451에 따라 실시한 모르타르 투수시험 결과로서 유연탄 플라이애쉬의 경



<그림-1> 장기재령별 압축강도 시험결과 ($G_{max} = 25 \text{ mm}$, 유연탄 플라이애쉬)

수화열 시험결과(KS L 5121에 따름)

<表-2>

종 류	용 해 열 (cal/g)		수 화 열 (cal/g)	평균수화열 (cal/g)
	건조시멘트	수화시멘트		
시멘트 100 %	686.38	606.24	80.14	78.98
		605.83	80.55	
		610.11	76.27	
시멘트 90 % +AFA 10 %	591.48	526.73	64.75	71.88
		512.15	79.33	
		519.92	71.55	
시멘트 80 % +AFA 20 %	558.58	494.26	64.32	65.21
		489.18	69.40	
		496.67	61.91	
시멘트 70 % +AFA 30 %	513.35	461.13	52.22	55.06
		452.36	60.99	
		461.39	51.96	
시멘트 90 % +BFA 10 %	618.77	549.24	69.53	74.13
		539.88	78.89	
		544.78	73.99	
시멘트 80 % +BFA 20 %	593.42	520.43	72.99	68.94
		526.88	66.54	
		526.13	67.28	
시멘트 70 % +BFA 30 %	524.95	462.00	62.95	63.86
		464.17	60.78	
		457.09	67.85	

모르타르 투수시험 결과(KS F 2451에 따름)

<表-3>

구 분	Flow 치		흡 수 율 (10 ⁻³)	
			기 준 양 생	기준양생후 대기중 9개월
시멘트 100 %	160		6.0458 (100.0)	7.4250 (100.0)
시멘트 90 % +FA 10 %	AFA	160	6.2456 (103.3)	7.6679 (103.2)
	BFA	162	3.7858 (62.6)	2.3628 (31.8)
시멘트 80 % +FA 20 %	AFA	165	10.0228 (165.8)	9.9196 (133.6)
	BFA	163	4.1324 (68.4)	3.1256 (42.1)
시멘트 70 % +FA 30 %	AFA	162	13.5883 (224.8)	13.1865 (177.6)
	BFA	160	4.9465 (81.8)	3.2605 (43.9)

註: ()는 시멘트 100%에 대한 비(%).

AFA: 무연탄 플라이애쉬.

BFA: 유연탄 플라이애쉬.

우 투수량(흡수율)을 현저하게 줄여 주며 장기 재령에서의 효과는 더욱 커지는 것을 알 수 있다.

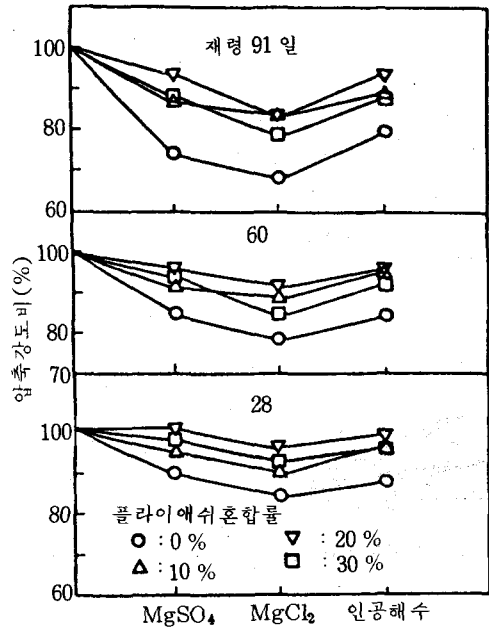
4) 耐海水性 향상

海水에 함유된 황산염은 시멘트 경화물에 작용하여 다량의 결정체를 가진 결정체를 형성하여 팽창함으로써 콘크리트를 붕괴시키는 작용을 하며 철근콘크리트에 있어서 염의 침투는 양극과 음극지역을 설정해서 철근을 부식시키고 결국에는 콘크리트의 손상을 유발시킨다.

일반적으로 콘크리트에 良質의 플라이애쉬를 혼화제로 사용함으로써 耐久性 및 水密性を 증진시켜 해수의 침해에 대한 저항성을 개선할 수 있다. <그림-2>²⁾는 海水에 대한 저항성을 시험하기 위하여 공시체를 각종 용액에 침지시킨 경우의 압축강도비를 나타낸 것이다. <그림-2>에서 알 수 있는 바와 같이 플라이애쉬를 혼합한 경우의 압축강도비가 혼합하지 않은 경우보다 크다. 이러한 플라이애쉬의 耐海水性を 인정받아 플라이애쉬시멘트가 해양콘크리트 구조물에 적용된 실적이 많다.

5) 耐化學性

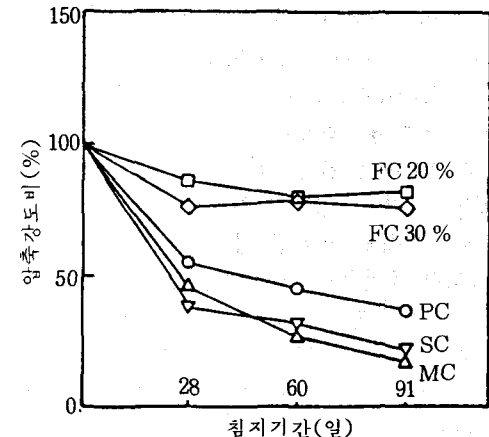
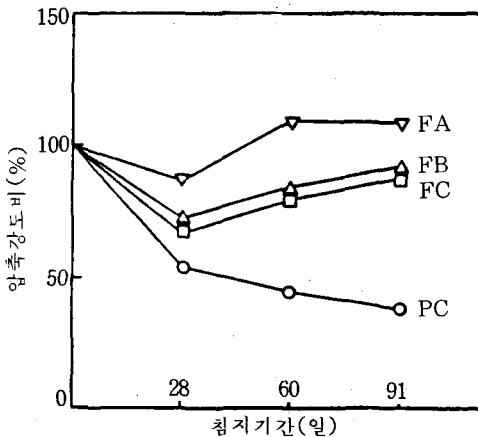
콘크리트는 海水, 산성토양, 下水, 공장폐수 등 여러가지 부식성 화학공격으로 인해 시멘트 사이의 결합력이 약화되고 황산·염산·초산 등의 無機酸은 시멘트 수화물 중의 석회·규산·



<그림-2> 각종 용액에 침지한 콘크리트의 압축강도비 변화

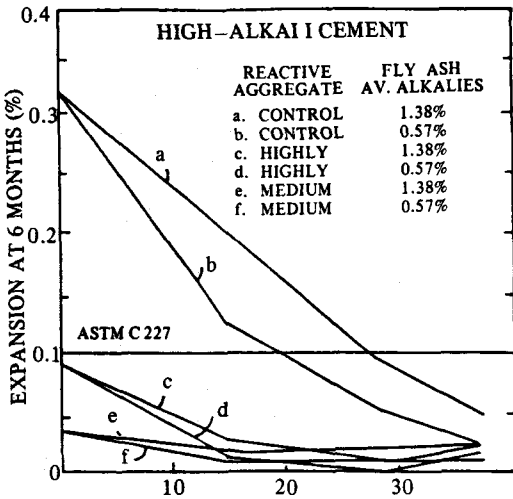
알루미나 등을 용해시켜 콘크리트가 침식·붕괴되게 한다. 그리고 일부 황산염은 수산화석회 및 알루미늄산삼석회(C₃A)와 반응하여 에트링가이트(Ettringite)를 만들고 이는 심하게 팽창하여 콘크리트를 파괴시킨다.

<그림-3>³⁾은 황산에 침지시킨 모르타르의 침지기간별 압축강도비를 나타낸 것으로서 플라이애쉬를 혼합한 경우의 강도비가 큰 것을



FA: Fly Ash A, FB: Fly Ash B, FC: Fly Ash C.
PC: Portland Cement, SC: Slag Cement MC: 중용열 시멘트.

<그림-3> 황산에 침지시킨 모르타르의 침지기간별 압축강도비



〈그림 - 4〉 플라이애쉬 혼합물-팽창률관계곡선(플라이애쉬 알칼리함유량 <1.5%)

알 수 있으며 이러한 압축강도비로서 황산용액에 대한 저항성이 큼을 판단할 수 있다.

이러한 플라이애쉬 콘크리트의 耐久化學性を 고려하면 下水管路의 콘크리트, 化學工場의 콘크리트 등 화학침해가 예상되는 분야에의 活用시 효과가 기대된다.

6) 알칼리·골재반응 억제효과

최근에는 대부분의 국가에서 콘크리트의 알칼리·골재반응으로 인한 손상이 문제시되고 있다. 알칼리·골재반응에 의한 콘크리트의 팽창·파괴는 포졸란을 첨가함으로써 완화된다는 것이 T. E. Stanton의 연구로 알려진 후 수많은 연구가 진행되었으나 그 억제 메카니즘은 완전히 해명되지는 않은 실정이다.

〈그림 - 4〉는 알칼리 함유량이 1.5% 이하인 플라이애쉬를 혼합한 경우의 모르타르봉 시험결과로서 혼합률이 증가할수록 팽창률이 낮아진다는 것을 알 수 있다. 플라이애쉬 혼합효과는 플라이애쉬 자체의 알칼리 함유량과 골재의 반응성에 따라 달라지며 플라이애쉬의 알칼리 함유량이 적을수록 억제효과가 크다.

7) 기 타

플라이애쉬를 이용한 품질향상의 측면과는 다

소 거리가 있을지라도 플라이애쉬가 하나의 필수 재료로 취급되는 분야로서 RCCD (Roller Compacted Concrete Dam), RCCP (Roller Compacted Concrete Pavement)에의 적용을看過할 수 없다. 또한 최근 영국, 스페인 등에서는 HFCC (High Fly ash Content Concrete)에 대한 연구와 포장에의 적용⁹⁾ 등이 콘크리트의 품질향상 및 경제성 提高의 관점에서 추진되고 있다.

4. 결 언

플라이애쉬를 시멘트콘크리트 혼화재로 활용할 경우 콘크리트의 품질향상 효과는 앞에서 기술한 바와 같이 대단히 크다고 볼 수 있다. 그리고 앞으로는 콘크리트의 用途에 따라서 強度로서 設計基準을 설정하기에 앞서 그 콘크리트가 처하게 되는 특수한 환경조건에 대한 耐久性能의 측면에서 設計基準의 설정이 필요하며 일부 선진국에서는 이러한 방향으로 인식이 전환되고 있다. 여러가지 경우에 있어서 플라이애쉬는 콘크리트의 耐久性 品質을 향상시킬 수 있으며 發生量 및 利用價格의 측면에서도 경제적인 混和材料로 인정되고 있다. 따라서 産業副産物인 막대한 양의 플라이애쉬를 건설재료로 이용하고 또한 품질을 향상시키는 것은 국가경제적 측면에서도 기여하는 바가 클 것이며 아울러 자연보전의 효과도 얻을 수 있다 하겠다.

〈참 고 문 헌〉

- 1) 콘크리트 혼화재로서의 석탄회 이용방안 연구, 한국전력공사 기술연구원, 1989. 4.
- 2) 문한영, 김기형, 김성수, "플라이애쉬를 혼합한 시멘트경화체의 인공해수에 대한 저항성", 대한토목학회 학술발표회 개요집, 1989. 10. pp.13~16.
- 3) 문한영, 서정우, 손형호, "시멘트경화체의 화학저항성에 관한 실험적 연구", 대한토목학회 학술발표회 개요집(I), 1987. 10. pp.28~34.
- 4) Ramon L. Carrasquillo, Peter G. Snow, "Effect of Fly Ash on Alkali Aggregate Reaction in Concrete", ACI Materials Journal, Jul-Aug., 1987, pp.299-305.
- 5) "Ash Tech '84", Second International Conference on Ash Technology and Marketing, Barbican Cent, London, Sept. 1984, pp. 445-482. ♣