

플라이애쉬의 사용규정과 수요증가를 위한 고찰 A Study for the Use and Accelerating Demand of Fly Ash



이진웅*



배성웅**

1. 서론

1824년 포틀랜드시멘트가 개발된 이래로 콘크리트는 현재 가장 널리 사용되는 건설자재중의 하나이다. 최근에는 콘크리트에 포졸란계의 혼화재를 시멘트의 대체 재료로 많이 사용하고 있으며, 이러한 추세는 에너지절약 및 자원을 보존하는 차원에서 매우 바람직한 일로 사료된다.

플라이애쉬는 석탄화력발전소에서 생성되는 산업부산물로서 현재 시멘트 혼화제로부터 성토재에 이르기까지 다양하게 사용되고 있다.⁽¹⁾ 플라이애쉬의 물리적, 화학적 특성은 1937년에 Davis et al⁽²⁾을 시작으로 많은 연구가 행해지고 있으며, 세계 여러 나라에서는 플라이애쉬 이용에 관한 규정을 각 나라의 특성에 맞게 정해 놓고 있다. 현재 국내의 플라이애쉬 재활용량은 총생산량(2,600만톤)의 15%로 일본과 미국의 40%, 이탈리아와 벨기에의 각각 60%, 70%에 비해서 상당히 떨어져 있다.⁽³⁾ 앞으로 경제발전과 더불어 플라이애쉬의 생산은 더 증대할 것으로 예상되어(2,000년대에는 4,000만톤 예상) 국가의 에너지 절약 및 자원보존

의 측면, 그리고 산업폐기물의 처리방안 등 환경적인 측면에서도 많은 문제가 야기될 것으로 예상되어 플라이애쉬의 재활용에 중요성이 강조되고 있다.

이 원고의 목적은 외국의 플라이애쉬에 대한 사용규정을 우리 나라의 지방서와 비교 분석하여 올바른 사용방법을 알아보고, 국내 플라이애쉬의 수요증가를 위한 대책을 마련하는데 그 목적이 있다.

2. 플라이애쉬의 특성

플라이애쉬는 화력발전소에서 석탄을 땀후 발생하는 미분탄 연소의 산업부산물로서 무연탄인 경우는 원탄의 약 30~50% 정도, 유연탄인 경우 연소효율이 높으므로 원탄의 약 10~15% 정도의 플라이애쉬를 전기식이나 기계식 집진기를 이용, 수거하게 된다.⁽³⁾ 플라이애쉬의 품질은 사용한 원탄의 종류에 따라 다양하고, 주로 강열감량의 함유량과 분말도에 의해서 결정된다. 현재 우리나라를 포함한 세계 여러 나라에서는 정제공장을 통해 플라이애쉬의 품질을 높여 시멘트의 치환재 뿐만 아니라 다양한 용도에 사용하고 있다.

* 정회원, 동아건설산업(주) 기술연구실, 공박
** 정회원, 동아건설산업(주) 기술연구실, 연구원

표 1 플라이애쉬가 콘크리트에 미치는 영향 및 효과

영 향	효 과
물리적 영향 · 시멘트를 퍼지게 하는 영향 · 밀도를 높이는 영향 · 골재의 윤택을 도와주는 영향 · 동질성을 증가시키는 영향 · 부가적 수화물 생성	· 수분요구량이 줄어든다 · 블라딩과 골재분리현상이 줄어든다 · 워커빌리티, 이송성, 동질성, 안정성 그리고 마감성을 증가시킨다. · 시간에 경과에 따라 강도를 증가시킨다.
화학적 영향 · 포졸란작용 효과	

플라이애쉬의 색상은 크림색으로부터 회색, 흑색에 이르기까지 다양하고, 탄소, 철분 및 수분의 함량은 색깔에 영향을 주는데 탄소의 함유량이 증가함에 따라 연한 황색에서 황갈색으로 변화한다. 그리고 플라이애쉬의 화학적, 물리적 특성은 아래와 같다.

2.1 화학적인 성질

플라이애쉬의 주요성분은 규소, 알루미늄, 철의 산화물로서 이들 세 가지 성분이 전체의 80~90%를 차지한다. 플라이애쉬의 결정성분이 quartz, mullite, magnetite, hematite와 무수황산 칼슘이고, 칼슘과 황산이온을 포함하며, 마그네슘, 나트륨, 칼리 및 규산염 이온도 함유한다. 플라이애쉬는 고온연소 생성물이므로 화산회와 비슷한 특성을 가지고 있다. 예를 들어 석회와 물이 플라이애쉬의 주성분인 규사와 반응하여 시멘트성 물질을 생성하는 포졸란 성질을 가진다.⁽⁴⁾

2.2 물리적인 특성

플라이애쉬는 대체적으로 일부 결정질 물질과 함께 약간의 탄소를 함유하는 유리구상으로, 구형 입자 속에 여러 겹의 구면을 포함하는 단단한 입자와 내부에 이산화탄소(CO₂)와 질소(N₂)가스로 채워져 있는 공동체의 다공성 입자(cenosphers)로 구분된다. 단단한 입자와 다공성 입자의 생산 비율은 집진장치, 석탄의 종류 그리고 연소의 온

도에 따라 변한다. 플라이애쉬 입도는 포졸란의 활성도에 영향을 주는 물성으로서 입자크기는 0.5~100 μ m의 범위에 속하며 중간크기 내지 굵은 점토의 입자에 해당된다.

플라이애쉬의 분말도는 포졸란활성도와 콘크리트의 워커빌리티에 많은 영향을 미치게 되는데, 비중은 1.9~2.3으로서 시멘트 비중의 2/3에 해당된다. 이러한 플라이애쉬의 화학적 및 물리적 특성들은 콘크리트 경화 전과 경화 후 물성에 영향을 미치게 되는데 특성은 표 1⁽⁵⁾과 같다.

3. 플라이애쉬의 세계표준규정

플라이애쉬의 포졸란 현상이 발견되고, 재활용에 관한 많은 연구가 시작된 이래로 선진국을 포함 세계의 여러 나라들은 플라이애쉬의 사용을 촉진시키기 위해 콘크리트에 사용되는 플라이애쉬의 화학적, 물리적 성분에 관한 규정을 두고 운영하고 있다. 각 나라에서는 그 나라에서 생산되는 플라이애쉬의 특성을 고려하여 사용규정을 만들었으며, 표 2⁽⁶⁾에서는 세계 여러 나라의 품질규정에 관한 사항을 적고 있다. 대부분의 나라에서는 한 종류의 규정을 두어 품질관리를 하고 있으나, 미국, 호주 그리고 캐나다에서는 품질을 차등화한 것이 특이하다. 플라이애쉬의 정확한 사용을 위해 국내의 규정을 외국규정과 비교 분석하는 것이 바람직한 일로 사료된다.

3.1 화학적 특성



플라이애쉬중의 가용성 SiO₂는 시멘트 수화시 수산화 칼슘(Ca(OH)₂)과 상온에서 서서히 반응하며 CSH(CaO+SiO₂+H₂O)를 생성함으로써 포졸란반응을 일으킨다. KS F 4049에 의하면 한국에서는 일본과 같이 SiO₂만 따로 떨어뜨려서 최소 45%로 규정하고 있다가, 1988(KS L 5405)년부터 미국을 따라 SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃를 같이 묶어서 최소 70%까지를 제한하고 있다. 미국에서는 C class 플라이애쉬인 경우에는 함유량을 완화하여 50% 까지도 제한하고 있다.

표 2 플라이애쉬의 화학적 및 물리적특성에 관한 각국의 표준규정

나 라	호 주			캐나다			중국	인도	일본	한국		터키	미 국			영국		
제정일자	1971			1982			1979		1977	1979	1988		1985			1984		
분류번호	AS 3582.1			A23.5-M86				IS:3812	A6201	F4049	L5405	TS 639	ASTM			BS3892:		
	Fine	Medium	Coarse	N	F	C							N	F	C	Part 1		
화학적 성분	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (min %)							70			70	70	70.0	70.0	50.0			
	SiO ₂ (min %)								45	45								
	SO ₃ (max %)			3.0				3.0	2.75			5.0	5.0	4.0	5.0	5.0	2.0	
	수분 함량			1.0				1.0	12	1	1.0	1.0	3	3.0	3.0	3.0	0.5	
	강열감량(max %)			4.0	6.0	12.0	10.0	12.0	6.0	8.0		5	5.0	6.0	10	10.0	6.0	6.0
	MgO(max %)			4.0									5.0					
	활용가능한 알칼리 (Na ₂ O)(max %)								1.5				1.5		1.5*	1.5*	1.5*	
	CaO(max %)																10.0	
	Free CaO(max %)												6					
	Cl ⁻ (max %)																0.1	
물리적 성분	입도 -45μm(No.325) 체의 통과잔류물(max %)			25.0	40.0	60.0	34	34	34						34	34	34	12.0
	-비표면적(Blaine법) (min cm ² /g)									2400	2400							
	강도활성지수 -시멘트 사용 7일(min %)						75	75	75						75	75	75	80
	28일(min %)												70	75	75	75		
	-석회 사용 7일(min MPa)									4.0								
	압축강도비 -28일(max %)									80	60	60	100					
	-91일(min %)										70	70	100					
	수분함량(max %)									105	102	102	105		115	105	105	95
	비 중(min)										1.95	1.95						2
	알칼리 반응성 -팽창감소율(min %): 14일						75	60	60									
건조수축증가율(max %): 28일						0.03	0.03	0.03							0.03*	0.03*	0.03*	

• 선택 조건

(2) 무수황산(SO₃)

콘크리트에 존재하는 무수황산염은 Ca(OH)₂와 작용하여 만들어진 CaSO₄가 겔(gel)을 생성시켜 콘크리트 부피를 팽창시키고 균열의 원인이 된다. 무수황산은 NaSO₄과 MgSO₄ 형태로도 존재하게 되는데, NaSO₄는 lime과 작용하여 ettringite를 형성하고, 콘크리트의 부피팽창을 일으키는 원인이 된다. MgSO₄는 lime이 또한 작용하여 용해되고, 이것은 콘크리트의 수화작용을 불안정하게 함으로써 콘크리트의 질을 떨어뜨리게 된다. KS L

5405에서는 무수함량의 비율을 5.0%로 제안하였으나, 호주나 영국에서는 각각 3.0%, 2.0%로서 한국시방서 보다 낮은 것을 보여주고 있다.

(3) 수분함량

수분함량이 많게 되면 포졸란 반응이 늦어지고 강도가 약해지므로 함량을 제한하고 있는데 미국과 캐나다는 3.0%까지 한국, 일본, 중국은 1.0%까지로 우리나라의 수분함량의 제한이 미국에 비해 낮은 편이다. 그러나 인도에서는 12.0%까지를 허락하고 있다.

(4) 강열감량

강열감량은 플라이애쉬의 품질 즉, 분말도와 밀접한 관계가 있으며, 또한 장기 강도에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 한국에서는 플라이애쉬의 강열감량 한계치를 5.0% 이내로 규정하다가 1988년에는 6.0%로 수정하였다. 그러나 호주, 캐나다, 미국 등에서는 플라이애쉬의 사용을 다양화하고 수요를 촉진시키기 위해 플라이애쉬 품질에 따라 4.0%~12.0%까지로 나누고 있다.

(5) 알칼리(Na_2O)

알칼리의 함유량은 콘크리트의 내구성과 밀접한 관계가 있으며 기준 이상의 양은 알칼리 실리케이트 반응을 일으켜서 콘크리트 내부팽창 및 균열의 원인이 되어 함유량을 규제하고 있으며, 모든 나라가 동일하게 1.5%로 제한하고 있다.

3.2 물리적 특성

(1) 입도

입도는 포졸란 활성도와 콘크리트의 슬럼프에 영향을 주므로 플라이애쉬의 물리적 특성중 가장 중요한 요소로 간주되고, 정제시설을 이용하여 분말도를 높이고 있다. 대부분의 나라에서 입도를 $45\mu\text{m}$ 체의 잔류량으로 측정하는데, 미국과 캐나다에서는 34.0%로 호주는 25.0~60.0%까지, 영국은 12.0%로 잔류량을 제한하고 있다. 대체적으로 탄소함량이 증가할 수록 입도가 커지고, 콘크리트강도에 기여하는 수화물 생성이 감소하여 바람직하지 않은 것으로 알려져 있다. 우리나라와 일본에서는 비표면적 측정방법을 채택하여 $2,400\text{cm}^2/\text{g}$ 이상으로 규정하고 있고(KS F4049) 입도는 표면적의 값이 크거나 $45\mu\text{m}$ 체 잔류량이 적을 수록 높아지며 입도가 높을 수록 포졸란 반응이 커지고 장기강도가 높아진다.

(2) 강도활성지수 및 압축강도비

강도활성지수는 control mortar의 강도와 시멘트를 플라이애쉬로 대체한 것과의 비로 나타낸다. 일반적으로 입도가 작고 강열감량이 적은 플라이애쉬일 수록 강도 활성지수가 크다. 대부분의 나라에서는 강도평가를 강도활성지수로 측정하지만 일본과 우리나라에서는 압축강도비로 측정하는

데, 1974년에는 28일과 91일에 각각 60.0%와 70.0%로 정했으며, 1988년에는 100%까지 증가시켰다.

(3) 비중

비중은 강도에 영향을 주며 비중이 높으면 수밀성 증대등 플라이애쉬의 공학적 특성이 향상된다. 국내 규격에서나 일본에서는 비중을 1.95이상으로 규제하고 있으나 그외 나라에서는 특별히 규제하지 않고 있다.

(4) 건조 수축증가율

한국을 비롯 미국, 캐나다는 건조수축 증가율을 0.03%로 제안하고 그외에 나라에서는 특별한 제한규정을 두지 않고 있다.

4. 플라이애쉬의 이용도

산업부산물 재활용의 일환으로 플라이애쉬는 시멘트나 건축자재의 치환제로 널리 사용되고 있으나, 우리나라의 플라이애쉬의 재활용 비율은 선진국의 1/3 정도밖에 되지 않은 것으로 나타났다. 그 이유를 분석하여 보면 아래와 같다.

(1) 지방서 제정

표 1에서 보여진 바와 같이 한국지방서(KS F4049)와 일본지방서는 물리적 특성과 화학적 성분에 대한 제한이 같은 것을 보여주고 있고, 그러나 1988년에 제정된 KS L 5405 최대 강열감량을 6.0%로 1.0%를 증가시켰으며 물리적 성분에서는 수분의 함량을 3.0% 증가시켜 105%로 규정하였다. 1988년도 지방서는 1979년도 규정보다 플라이애쉬 사용에 관한 제한을 완화시켰으나, 아직도 선진국에 비해서 사용제한이 까다롭다.

플라이애쉬의 재활용을 늘리기 위해서는 미국이나 캐나다처럼 플라이애쉬의 품질을 차등화하여 사용하는 용도에 따라 다양하게 사용될 수 있도록 해야겠다. 예를 들어 최대 강열감량의 함유량을 다양화하여 함유량이 높아도 사용할 수 있도록 하고, 분말도 또한 차등화함으로 플라이애쉬 이용을 촉진시키는 것이 바람직한 일로 사료된다. 표 1에 의하면 영국지방서가 다른 나라 지방서에 비해서 전반적으로 규정이 엄격한 것으로 나타나 있으나, 앞으로는 규정이 훨씬 완화된 EN 450⁽⁷⁾을

사용할 예정이다. 예를들어 영국에서는 현재 분말도를 45 μ m계 통과잔유율 12% 미만으로 규정하고 있으나 앞으로는 EN 450을 적용하여 통과잔유율 45%로 규정이 완화되어 플라이애쉬의 재활용량이 지금보다 증가할 것으로 기대된다. 이러한 추세에 맞추어 우리나라 시방서도 더 세분화하고, 규정을 완화하는 것이 필요할 것이다.

(2) 회처리 방법

한국의 회처리 매립방식에는 습식방법과 건식방법이 있는데, 현재 화력발전소에서 석탄회를 배출할 때 발생된 회를 물과 혼합하여 회사장에 처리하는 습식방식이 대부분인 관계로 플라이애쉬의 이용을 저해하는 요소 중에 하나이다. 따라서 플라이애쉬 이용의 촉진을 위해서 앞으로 건설하는 화력발전소는 건식방법을 채택하는 것이 바람직할 것 같다⁽³⁾.

(3) 플라이애쉬에 관한 연구 미진

플라이애쉬에 관한 연구는 자원을 재활용하는 차원뿐만 아니라, 환경적인 문제에서 상당히 관심을 끌고 있으며 선진국에서는 플라이애쉬를 콘크리트 혼화재 뿐만 아니라, 건축, 토목 및 많은 분야에 활용하고 있으며, 사용량을 늘리기 위해 꾸준한 연구가 행해지고 있다. 현재 천연골재자원(석회석, 점토, 자갈, 모래 등)이 풍부한 관계로 우리나라는 플라이애쉬 사용분야가 선진국에 비해 한정되어 있으며, 생산량에 대한 소비량비율이 선진국의 1/3에도 미치지 못하는 형편이다. 현재 극히 일부 대학과 연구소에서 관심을 기울이고 있으나, 외국에 비해 연구실적이 부진한 실정이다. 따라서 플라이애쉬의 사용을 촉진시키기 위해서 사용용도를 다양화하고, 특히 대량 사용할 수 있는 분야에 많은 연구투자가 필요한 것으로 보인다.(예를 들어 인공경량골재, 비료 등)

(4) 플라이애쉬 품질의 차등화

플라이애쉬를 제품화하는데는 두가지 방법이 간주될 수 있을 것 같다. 첫번째는 제품을 고급화하여 플라이애쉬를 균질화시켜 구조물 공사 및 고품질 시멘트 2차 제품에 사용하는 방법과 두번째로는 대량소비를 위해 플라이애쉬를 정제하지 않고, 성토재나 비료의 치환재로 직접 사용함으로써 대량소비측면에서 많은 효과를 기대할 수 있을 것

이다.

(5) 기술자의 개방화

토목공사나 건축공사에 종사하는 우리나라 기술자들이 플라이애쉬에 관한 지식이 부족하고, 새로운 자재나 공법의 사용에 다른 선진국들에 비해 보수적인 성향을 보이고 있어서 현장에서 플라이애쉬를 사용하는데 어려움이 많은 것으로 알려져 있다. 따라서 플라이애쉬의 사용량을 늘리기 위해서 플라이애쉬에 대한 새로운 인식이 필요하다.

(6) 법령개정

현재 자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률⁽⁸⁾이 1992년 12월 8일에 제정되었으며, 이에 대한 시행령이 1993년 6월 24일에 공포되었으나, 법률에 따르면 연간전력을 1억KW이상 공급시 이 회사를 지정부산물 배출사업자로 정했을 뿐 석탄회(플라이애쉬)처리 및 사용에 관한 의무조항이 없다. 따라서 플라이애쉬 수요를 늘리기 위해서는 산업부산물의 재활용에 관한 보다 강화된 법령이 필요한 것으로 사료된다.

5. 결 론

(1) 우리나라의 시방서는 화학적 및 물리적 제안사항들이 주로 일본시방서와 비슷하여 다른 선진국에 비해서 강열감량, 수분함량 그리고 비중에서 제한이 많은 것으로 고찰되었다. 따라서 플라이애쉬 품질을 차등화하여 플라이애쉬 재활용을 활성화하는 것이 필요하다.


(2) 플라이애쉬의 재활용량을 높이기 위해서 플라이애쉬연구를 국책사업으로 선정하여 학교 및 기업연구소에서 연구할 수 있도록 많은 연구투자가 선행되어야 할 것이다.

(3) 품질을 차등화하여 플라이애쉬의 장점을 이용하고, 대량소비를 할 수 있도록 유도하는 것이 필요할 것 같다.

(4) 현장에서 근무하는 기술자들의 플라이애쉬에 대한 새로운 인식이 필요하며, 토목 및 건축공사에 널리 사용될 수 있도록 현장 기술자의 협조도 요구된다.

(5) 플라이애쉬 재활용을 촉진하기 위한 강력한 의무조항을 갖는 법령개정이 필요하다.

참 고 문 헌

1. 한국전력공사, "성토재로서의 석탄회 이용방안 연구," 1992. 6. pp. 462.
2. 한국전력공사, 석탄회, 1994. 4.
3. DAVIS, R. E., CARLSON, W., KELLEY, J. W. and HARHER, E. D. properties of cements concrete containing fly ash. Proceeding of the American Institute. Vol. 33, May-June, 1937, pp. 575-611.
4. DHIR, R.K. "Pulverized-fuel ash, Cement Replacement Materials," Ed. Swamy. Surrey university press, 1986, pp. 197-255.
5. 오병환, 정범석, "플라이애쉬 및 플라이애쉬 콘크리트의 제반특성 및 이용," 1991. 9. 제3권 3호 콘크리트 학회지, pp. 5-22.
6. 임남용, 조영임, "콘크리트 혼화재인 Fly ash의 세계표준규격비교," 1995. 5. 한국콘크리트학회 봄학술 발표회논문집, pp. 66~71
7. DHIR, R.K and JONES, M.R. "Euro-Cements impact of ENV 197 on concrete construction," 1994, pp. 57-68.
8. 한국전력공사, "자원의 절약과 재활 용촉진에 관한 법령집," 1994. pp. 84. 

한국콘크리트학회 제6회 기술강좌

- *강좌명 : "철근콘크리트 건축물의 배근설계"
- *일 시 : 1996. 4. 17(수) ~ 18(목) 09:00 ~ 18:00
- *장 소 : 한국과학기술회관 대강당

[강좌 내용]

- 제 1일 : 극한강도설계법에서의 배근 규정
 - (1) 보 및 슬래브의 배근(최기봉)
 - (2) 기초, 기둥 및 벽체 배근(김중구)
 - (3) Flat plate /slab 배근(전봉수)
 - (4) 내진설계 배근 규정(김궁환)
 - 제 2일 : 시공성을 고려한 배근설계
 - (1) 접합부 상세(윤영호)
 - (2) 철근 신조립 기술(양지수)
 - (3) Prestressed 구조의 배근설계(유영섭)
- *상기 강좌 내용은 사정에 따라 일부 변경될 수 있음.