

特別講演

# Fly ash의 품질평가 방안

이 승 현

〈군산대학교 재료·화학공학부 교수〉

## 1. 서 론

우리나라는 전력의 안정적, 경제적 공급을 위하여 1990년대 이후 에너지원의 다양화 정책에 따라 연료비 원가가 저렴한 석탄 및 원자력 발전은 지속적으로 증가한 반면 중유발전은 급속히 감소하였다. 2000년말 에너지원별 발전량 구성비는 석탄 28.17%, 원자력 27.57%, LNG 28.17%, 석유 9.76%, 수력 6.33%이다. <표 1>의 발전열원으로서의 석탄 사용량을 보면 수입탄이고 유연탄인 역청탄은 1995년에 1,620만톤을 사용하였으나 2000년에는 3,336만톤을 사용하여 5년 사이에 2배로 증가하였다. 또한 국내탄인 무연탄도 국내탄 활성화 정책에 힘입어 매년 약간씩 증가하여 2000년에는 284만톤이 사용되었다. 석탄을 발전열원으로 사용할 경우 석탄회의 발생이 필연적이며, 유연탄은 원탄 사용량의 10~15%, 무연탄은 40~45%가 회로 발생되고 있다.

현재 대부분의 화력발전소에서 배출되는 석탄회는 주로 슬러리화 하여 회사장(회처리장, ash pond)에 저장(혹은 매립)하고 있다. 회사장에 저장된 석탄회는 인근지역으로 비산되어 주변환경을 오염시키거나 화학성분의 침출에 의한 토양

및 수질 오염의 가능성이 제기되고 있다. 또한 기존 화력발전소들의 회사장은 포화되고 있으며 신규 화력발전소 건설시 회사장의 부지확보가 큰 부담으로 작용되고 있다. 따라서 석탄회를 재활용할 경우 폐기물의 재활용에 따른 부가가치 창출, 발전소 부지확보, 환경오염 방지 등 많은 문제점을 해결할 수 있다.

화력발전소에서 부산물로 배출되는 석탄회는 연료로 사용되는 석탄의 종류, 발전장비 및 보일러의 연소조건 등에 의해 크게 영향을 받으므로 화력발전소마다 석탄회의 물리·화학적 성질은 다르다. 현재 국내 화력발전소에서 사용되고 있는 석탄은 탄종이 다양하며, 산지 또한 다양하기 때문에 배출되고 있는 석탄회의 품질은 매우 불균질한 실정이다. 따라서 fly ash(석탄회)의 품질적인 측면에서 보면 품질편차가 크고, NOx 저감을 위해 보일러의 연소온도를 낮춤으로 미연탄소량과 이형의 입자가 많은 fly ash가 배출되고 있어 품질관리의 방안에 대한 확립이 절실히 요구되고 있다.

본 강연에서는 국내에서 배출되는 fly ash의 품질과 각국 규격에 대해 검토하고, 국내 실정에 맞는 품질관리 방안을 고찰하여 fly ash 유효이용 촉진을 위한 밑거름이 되고자 한다.

〈표 1〉 발전용 연료 사용량 (단위 : 10,000t)

구 분	1980	1995	1996	1997	1998	1999	2000
무 연 탄	164.1	242.9	251.4	230.5	252.7	259.7	284
역 청 탄	0	1,620.3	1,894.8	2,270.7	2,567.9	2,821.6	3,336.9
중 유	697.5	875.3	819.3	831	310	302.3	489.5
경 유	11.5	93.3	161.2	157.1	31	32.5	19.1
L N G	0	356.2	462.2	538	419	476.7	449.1

〈표 2〉 발전소별 석탄회 발생량

발전소 / 연도		1994	1996	1998	2000	2005	비고
국내탄화력	서천	402	404	348	413	430	구호남
	영동	154	239	262	4	6	
	영월	192	229	181	-	-	
	부산	55	60	-	-	-	
	군산	44	39	53	-	-	
	동해	-	-	127	609	589	
	소계	847	971	971	1,026	1,026	
석탄화력	보령	813	874	772	748	803	
	삼천포	602	699	685	641	628	
	여수1발	149	185	79	141	129	
	태안	-	385	560	529	800	
	하동	-	13	596	784	827	
	당진	-	-	-	493	550	
	영흥도	-	-	-	-	880	
	신규화력	-	-	-	-	70	
	소계	1,564	2,156	2,692	3,336	4,687	
계	2,411	3,127	3,663	4,362	5,172		

## 2. 석탄회의 발생량과 유효이용 현황

우리나라에서 연간 발생하는 석탄회는 2000년에 436.2만톤으로 1990년의 188.6만톤에 비해 2배 이상 증가하였으며, 2005년에는 571.2만톤으로 예상된다. 발전소별 석탄회의 발생량은 〈표 2〉와 같다. 2000년 기준으로 보면 무연탄회가 102.6만톤, 유연탄회가 333.6만톤으로 유연탄회가 3배 정도 더 많으며, 영흥도화력이 완공되면 유연탄회는 더 증가하여 2005년에는 468.7만톤에 이를 전망이다.

국내 석탄회 재활용 현황을 〈표 3〉에 나타냈다. 1990년에는 재활용율이 15.1%로 매우 저조하였으며 1995년까지 활용율이 20%를 밑도는 수준을 나타냈다.

그러나 1997년부터 재활용율이 점진적으로 증가하여 2000년에는 54.6%에 이르러 거의 선진국 수준에 이르게 되었다. 이렇게 재활용율이 증가하게 된 원인으로는 다음과 같은 사항을 열거할 수 있다. 첫번째로 정부에서 산업부산물에 재활용을 촉진하고자 1993년부터 “철강슬래그 및 석탄재 배출사업자의 재활용 지침”을 제정 운영하여 용도별 규격에 따른 재활용 방법, 재활용 계획의 수립, 재활용 목표율을 규정하고 있다. 이에 따라 매년 재활용 목표율을 설정하여 운영하고 있으며, 양질의 석탄재를 생산하기 위한 플라이 애쉬 정제공장도 현재 5군데가 가동되어 100만톤 이상의 정제회가 생산되고 있다. 두번째로는 정제회를 중심으로 레미콘 혼화재로 일부 지역에서 7~12% 정도를 사용하고 있고, 무연탄회

〈표 3〉 국내 석탄회의 재활용 현황

연도	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
발생량(천톤)	1,886	1,856	1,868	2,192	2,428	2,684	2,922	3,198	3,663	3,952	4,435
활용량(천톤)	282	291	198	284	358	491	640	868	1,178	1,678	2,420
활용율 (%)	15.1	15.7	10.6	13.0	14.7	18.3	21.9	27.2	32.2	42.5	54.6

<표 4> 발전소별 석탄회 재활용 실적 (2000년도)

발전소명	당진	태안	보령	서천	군산	호남	하동	삼천포	동해	영동	영월
발생량(천톤)	346	552	802	317	32	125	749	642	559	218	93
재활용율(%)	60.7	73.5	72.7	8.0	80.9	0	13.6	64.3	99.5	1.7	102

는 점토대용으로 시멘트 클링커 제조공장에서 원료로 사용하고 있어 대량으로 소비가 가능해졌기 때문이며 앞으로도 사용량이 증가할 것으로 예상된다.

그러나 레미콘의 주된 사용목적은 콘크리트 혼화재로서의 특성인 워커빌리티 개선, 수화열 감소, 장기강도 증진, 수밀성 향상 및 건조수축 감소 등의 유효성보다는 원가절감이라는 측면에서 사용되는 경우가 많다. 2000년도 발전소별 석탄회 재활용 실적을 <표 4>에 나타냈다.

특징적인 것은 발전소별 즉 지역별로 재활용율이 크게 차이가 난다는 것이다. 무연탄 화력발전소를 보면 영월 102%, 동해 99.5%로 전량이 재활용에 이용된 반면, 서천은 8.0%, 영동은 1.7%로 재활용이 거의 이루어지지 않고 있다. 영월과 동해는 인근지역의 시멘트 공장에 원료로 석탄회를 공급하고 있어 높은 재활용율을 나타내나, 반면에 서천과 영동은 시멘트 공장에의 원료공급이 힘들어 활용율이 저조하다. 유연탄 석탄회를 보면 석탄회 정제공장이 있는 보령, 삼천포, 태안 등은 재활용율이 64% 이상을 나타내고 있다.

2000년도 용도별 석탄회의 재활용 실적을 보면 콘크리트 혼화재가 54%, 시멘트 원료가 35%, 지반·성토재 8%, 시멘트 2차제품 2%, 기타가 1%를 차지하고 있다. 유연탄 석탄회는 대부분이 콘크리트 혼화재이고, 무연탄 석탄회는 대부분이 시멘트 원료와 지반·성토재로 사용하고 있다.

### 3. Fly ash의 품질에 대한 고찰

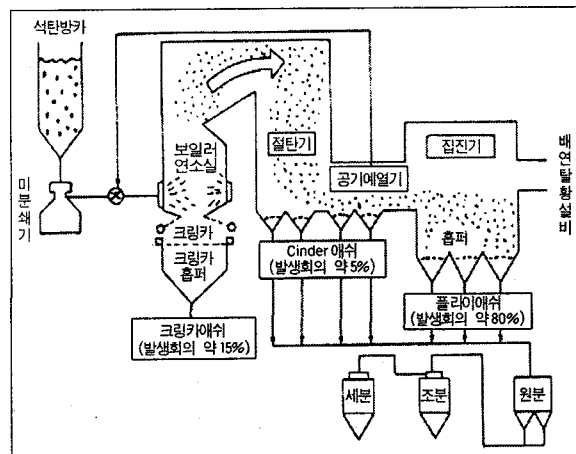
석탄화력발전소에서 배출되는 석탄회는 회를 집진하는 장소에 따라 fly ash, cinder ash, bottom ash로 분류된다. Fly ash는 전기집진기, cinder ash는 절탄기나 공기에열기 아래의 호퍼, bottom ash는 보일러의 하부에서 포집된 회를 말하며, 총 석탄회 발생량 중 대략 fly ash가 80%, cinder ash가 5%, bottom ash는 15% 정도

가 배출된다.

그러나 <그림 1>의 화력발전소의 회처리 계통도를 보면 cinder ash와 fly ash는 하나의 라인으로 처리되어 수집되므로, 일반적으로 fly ash와 cinder ash를 총칭하여 fly ash라 부른다. 이용하는 석탄회의 대부분은 fly ash로 재활용을 위하여 공기이송 설비에 의해 fly ash silo로 건식 이송되고, 재활용 되지 않은 fly ash는 bottom ash와 마찬가지로 transfer tank로 보내지고 ash pond장에 버려진다.

Fly ash의 다량 이용을 위해서는 품질의 일정한 확보가 필요하고 또한 이를 이용하기 위한 각종 시설, 운반 및 부대비용, 발전소 주변의 수요처 등 여러 조건이 만족되어야 한다. 특히 국내 fly ash는 미연탄소의 함량이 2~10% 정도로 변동이 심하여 품질관리가 어렵다. 미연탄소 함량이 높은 fly ash를 콘크리트 혼화재로 사용할 경우, 특히 유동성의 저하와 단위수량의 증가를 가져오게 된다.

따라서 일정하고 한국산업규격에 맞는 fly ash를 제조하기 위한 처리시설 및 저장시설이 필수적이며 이를 통한 품질관리가 필요하다. 석탄회 중의 미연탄소를 제거하는 기술을 정제기술이라



<그림 1> 화력발전소의 회처리 계통도

〈표5〉 Fly ash 정제공장 현황

구 분	보 령 화 력		삼 천 포 화 력	태 안 화 력
	한국FA공업(주)	보령FA공업(주)		
준 공 일	1991. 10	1972. 2	1997. 8	1998. 6
설 비 운 영	한국FA공업(주)	보령FA공업(주)	한전산업개발(주)	한전산업개발(주)
정제설비 Fly ash 처 리 현 황	40 T/H × 1	50 T/H × 1	40 T/H × 1	50 T/H × 1 20 T/H × 1
정제회 생산 예상량 (만톤/연)	25	25	26	30
정제회 품 질	미연탄소(%)	5 이 하	5 이 하	3(4) 이 하
	분말도(%)	2,400 이 상	2,400 이 상	2,400 이 상
경 제 방 식	원 심 분 리 (Static type)	원 심 분 리 (Dynamic type)	원 심 분 리 (Static type)	원 심 분 리 (Dynamic type)
미연탄소분석기	-	SEKAM(스웨덴)	CAMRAC(미국)	CAMRA(미국)

부르고, 현재 상업화 되고 개발중인 석탄회 정제 기술은 공기입도 분급법, 비중차 분리법, 부유선 별법, 정전분리법 등이 있다. 이러한 기술 가운데 가장 경제적이고 대량 처리할 수 있는 방법이 공기입도 분급방법이다.

이 방법은 분체를 입자 크기의 차에 따라 분리 하는 것으로 일반적으로 fly ash 중의 미연탄소는 입자경이 큰쪽에 상대적으로 많이 분포되어 있기 때문에 분급을 하여 입경이 작은 입자를 채취하면 미연탄소의 함량을 어느 정도까지 저감할 수 있다는 것으로 국내의 석탄회 정제기술은 모두 이 방법이다.

보통 많이 사용되는 방법으로는 원심력을 이용하는 공기분급기인 static separator와 rotor의 회전에 의해 입자에 원심력을 부여하는 dynamic

separator가 있다. 국내 정제공장 중에서 한국 fly ash 시멘트와 삼천포화력 정제공장이 static type이고 보령 fly ash 시멘트와 태안화력 정제공장이 dynamic type을 채택하고 있다. Fly ash의 정제공장 설치 현황을 〈표5〉에 나타냈다.

강민호 등은 보령 및 삼천포에서 정제되어 유통되는 20여개의 fly ash의 물리·화학적 품질특성을 조사하였다. 그 결과를 〈표6〉에 나타냈다. 강열감량과 단위수량비를 제외하고는 fly ash의 한국공업규격(KS L 5405)을 만족하고 있다. 그러나 fly ash의 품질평가 중에서 가장 중요한 항목인 강열감량은 보령산 fly ash는 2.9~8.3%, 삼천포산 fly ash는 3.0~5.8%로 정제했음에도 불구하고 KS 규격을 초과하는 정제회가 배출되고 있다. 또한 콘크리트 혼화제로 사용시 fly ash의

〈표6〉 정제 Fly ash의 물성

	K S L 5406	Fly ash 품 질						
		보 령 산			삼 천 포 산			
		X	R	범 위	X	R	범 위	
화학조성	SiO <sub>2</sub> (%)	45 이 상	57.1	4.72	46.7~64.5	55.6	4.34	46.7~56.2
	습 분 (%)	1 이 하	0.14	0.05	0.06~0.22	0.14	0.05	0.10~0.21
	강열감량 (%)	5 이 하	5.0	1.17	2.9~8.3	4.13	1.20	3.0~5.8
물 리 적 성 질	비 중	1.95 이상	2.34	0.05	2.25~2.42	2.42	0.04	2.36~2.48
	분말도비표면적(ml/g)	2400 이상	4030	376	3280~4550	4688	359	4170~5000
	단위수량비(%)	102 이 하	101.6	1.64	98.3~105.3	99.6	3.40	95.1~103.1
	압축강도비(%)	60 이 상	93.34	4.19	82.3~100.3	98.0	1.02	96.5~98.8

입자모형이 구형이므로 ball bearing 작용에 의해 마찰저항이 감소시켜 유동성의 향상, 즉 단위 수량을 감소시킨다.

그러나 <표 6>에서 보듯이 KS 규격 단위수량비 102%를 넘는 정제회도 있다. KS 규격을 초과하는 정제회는 주로 발전소의 부하가 많이 걸리는 여름철에 정제된 fly ash에서 많이 발견된다.

#### 4. Fly ash의 규격에 대한 고찰

세계의 많은 나라들은 fly ash의 활용도를 높이고 품질의 안정과 안정된 공급을 하기 위해서 <표 7, 8>과 같은 표준규격을 두고 있다. <표 7, 8>에서 보는 바와 같이 세계 각국의 fly ash 규격은 그 나라에서 배출되는 fly ash의 특성에 맞게 제정되어 나라마다 다르다.

각국에서는 fly ash의 규격을 제정할 때 다음 사항을 고려하여 제정한다. 첫번째는 규격이 유효이용을 제한해서는 안되며, 두번째는 소비자가 이용하기 간편해야 한다. 또한 규격시험 방법이 다른 나라 규격의 시험방법과 부합성이 있어야 한다. 세계적으로 fly ash에 대한 규격은 콘크리트 혼화재로서의 규격과 시멘트 혼합재로서의 규격으로 대별할 수 있다. 또한 단일규격과 차등규격(등급화 규격)을 두고 있다.

우리나라는 단일규격으로서 모르터 또는 콘크리트 혼화재료로 사용하는 fly ash의 품질에 대해서 1992년 KS L 5405를 제정하여, 이용시에는 이 규정에 합격한 fly ash를 사용해야 하는 것으로 규정되고 있다.

따라서 이 규격에 벗어난 fly ash는 콘크리트 혼화재로 사용하는데 제한을 받게 되므로 많은 국가가 규격에 품질의 차등화를 두어 가능하면 대부분의 fly ash가 이용되도록 운영되고 있다. KS 규격과 유사한 규격을 가지고 있던 일본규격(JIS A 6201)도 배출되는 fly ash의 특성에 맞게 활용을 확대하기 위하여 품질을 1999년에 4종류로 등급화하였다.

등급화한 배경을 보면, fly ash는 콘크리트 혼화재로서 적절한 재료이나 규격에서 약간 벗어나면 JIS 규격품이 아니기 때문에 이용에 제한을 받게 된다. 이러한 여건을 고려하여 광범위한 fly ash 품질에 대응할 수 있는 규격으로 개정하면

버려지는 것 없이 용도에 맞게 사용할 수 있을 것으로 기대되어 개정하였다.

Fly ash의 물리·화학적 성질 중에서 품질에 대응되는 항목은 미연탄소량과 분말도이고, 이 두 성질에 직접적인 영향을 받는 단위수량(flow 값)과 압축강도비(활성도지수)를 배려하여 4등급으로 나눴다. 그래서 배출되는 대부분의 fly ash가 콘크리트 및 모르터의 혼화재 및 기타 첨가재로 활용할 수 있는 길이 열렸다.

<표 7>의 단일규격을 채택하고 있는 나라를 보면 대부분 강열감량의 규정을 5% 이하를 채택하고 있으며, 우리나라에서 102% 이하로 채택하고 있는 단위수량비에 대한 규정은 채택하고 있지 않다. 분말도에 대한 규정도 채택하지 않은 나라가 많으며, 분말도에 대해 규정을 하고 있는 독일(DIN 18999)은 Blaine값이 아닌  $45\mu m$  체잔분으로 평가하고 있다.

<표 8>에 차등화 규격을 채택하고 있는 나라의 규격을 나타냈다. 차등화의 내용은 크게 2가지로 나눌 수가 있다. 하나는 미국과 캐나다와 같이 다양한 종류의 석탄을 사용하는 것에 기인하여 배출되는 fly ash의 화학적 조성과 광물학적 조성이 크게 다르기 때문에 사용의 혼란성을 없애기 위해 차등화 하였다. (<표 8-1>)

미국과 캐나다에서는 fly ash를 두 종류로 분류하여, F급은 무연탄이나 유연탄의 연소부산물로서 포졸란 성질을 가지는 것이며, C급은 갈탄이나 아역청탄의 연소부산물로서 포졸란 성질과 시멘트 반응성을 가진다. 보통 F급과 C급은 CaO 성분의 함량으로 분류하며 10% 이하인 것을 F급, 10% 이상인 것을 C급으로 분류하였다. 두번째로는 fly ash의 품질을 주로 미연탄소량과 분말도에 의해 품질을 등급화 하여 혼화재로서의 fly ash 특성도출과 활용율을 높였다. (<표 8-2>)

호주에서는 분말도( $45\mu m$  체잔분)와 강열감량에 의해 품질을 Fine, Medium, Coarse로 나누었고, 일본은 분말도( $45\mu m$  체잔분)와 강열감량에 의해 4등급으로 분류하였다.

일본의 경우, 1종은 높은 작업성을 부여하기 위해 Blaine값  $5,000cm^2/g$  이상, 강열감량 3% 이하, flow값비 105% 이상의 fly ash이고, 2종은 현재 우리나라의 KS규격에 해당하는 fly ash로서 실제 유통되는 것의 대부분을 차지하고 있

<표 7> 단일 규격을 채택한 나라

나 라		한 국	독 일	루마니아	러 시 아	덴 마 크	스 웨 덴	터 어 키	
규 격 명		KS L 5405 모르터, 콘크리트용	DIN 18999 (1991) 콘크리트용	STAS	GOST				
화학적 필요 성분	SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)						70 이상	70 이상	
	SiO <sub>2</sub> (%)	45 이상	25 이상	50.0 이상	40.0 이상				
	SO <sub>3</sub> (%)		3.0 이하			4.0 이하	4.0 이하	5.0 이하	
	습 분 (%)	1 이하			3.0 이하	1.5 이하		3 이하	
	강열감량 (%)	5 이하	5.0 이하		10.0 이하	5.0 이하	5.0 이하		
	Cl <sup>-</sup> (%)		0.10 이하			0.1 이하	0.1 이하	10 이하	
	CaO (%)		1.0 이하						
	MgO (%)					5.0 이하	5.0 이하	6 이하 (Free CaO)	
R <sub>2</sub> O (%)					1.5 이하	1.5 이하			
물리적 필요 성분	분말도	Blaine값 (cm <sup>3</sup> /g)	2400 이상						
		45μm 체 잔분		40 이하					
	비 중	1.95 이상							
	단위수량비 (%)	102 이하							
	Flow 값 (%)								
	압축강도비 (%)	7 일							
		28일	60 이상						
		91일		85 이상			70 이상	70 이상	
	활동화지수 (%)	28일							
		91일							
안정성 고압팽창 (%)									
Le-chatelier 팽창 (mm)			10 이하						
건조수축 증가율 (%) 28 일									
알카리 반응성 팽창 감소율 (%) 14 일									
균 등 성 조 건	분말도±450 cm <sup>3</sup> /g 이하 단위수량비 견본 제출의 5%이내	분말도 변동율은 평균값±8%이내 밀도는 보코값 ±150kg/m <sup>3</sup> 의 범위내							
기 타		이 규격은 유럽규격으로 되어 있음							

다. 그러나 품질의 향상을 도모하기 위해 Blaine 값을 2,500cm<sup>3</sup>/g(기존 2,400cm<sup>3</sup>/g) 이상, flow값

비 95%(기존 92%) 이상으로 하였다. 3종은 강열 감량의 값을 8% 이하, flow값비를 85% 이상으

<표 8-1> 차별화 규격을 채택한 나라

나 라		미 국			캐 나 다		
규 격 명		ASTM C 618-93a Fly ash, 천연포졸란을 포틀랜드시멘트 콘크리트의 광물질 혼화제로서의 표준 규격			CAN/CSA-A23, 5-MC86 (1986) 콘크리트용 FA		
		N (천연물질)	F (무연탄, 역청탄)	C (갈탄, 아역청탄)	F (무연탄, 역청탄)	C (갈탄, 아역청탄)	
화학적 필요 성분	SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	70 이상	70 이상	50 이상			
	SiO <sub>2</sub> (%)						
	SO <sub>3</sub> (%)	4.0 이하	5.0 이하	5.0 이하	5.0 이하		
	습분 (%)	3.0 이하	3.0 이하	3.0 이하	3.0 이하		
	강열감량 (%)	10.0 이하	6.0 이하 (12.0 이하)	6.0 이하	12.0 이하	6.0 이하	
	Cl <sup>-</sup> (%)		0.10 이하				
	CaO (%)		1.0 이하				
	R <sub>2</sub> O (%)	1.5 이하 (보충적 隨意條件)					
물리적 필요 성분	분말도	Blaine값 (cm <sup>3</sup> /g)					
		45μm 체잔분	34 이하	34 이하	34 이하	34 이하	
	비 중						
	단위수량비 (%)		115 이하	105 이하	105 이하		
	Flow 값 (%)						
	압축강도비 (%)	7일					
		28일					
		91일					
	활동화지수 (%)	28일	75 이상	75 이상	75 이상	75 이상	
		91일	75 이상	75 이상	75 이상		
	안정성 고압팽창 (%)		0.8 이하			0.8 이하	
Le-chatelier 팽창 (mm)							
건조수축 증가율 (%) 28일		0.03 이하 (선택적 조건)					
알카리 반응성 팽창 감소율 (%) 14일							
균 등 성 조 건		비중 : 변동은 평균값의 50%이내 45μm 체잔분 : 변동은 실적 또는 시험에 의해 사용자가 인정하는 경우에는 12%까지 가능			비중의 허용변동 : 5.0 이하 분말도의 허용변동 : 5.0 이하 AE 콘크리트의 경우 : 18 Vol%의 공기량에 필요한 AE제의 10회 시험평균값의 허용변동 : 20.0 이하		
기 타		복합계수의 보충적 隨意條件 복합계수 = 강열감량 × 분말도 (45μm 체잔분) ≤ 255					

로 나머지의 규격 값은 2종과 같게 하였다.  
강열감량은 발전소의 보일러의 구조, 연소방식

에 크게 의존하므로 강열감량이 큰 fly ash를 배  
출하는 화력발전소도 있으므로, 여기에서 배출되

〈표 8-2〉 차등화 규격을 채택한 나라

나		중					본				
규		CS 1595-91					JIS A 6201-1999(콘크리트용)				
		콘 크 리 트 용			시 멘 트 용						
		I	II	III	I	II	I	II	III	IV	
화학적 필요 성분	SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)										
	SiO <sub>2</sub> (%)						45.0 이상				
	SO <sub>3</sub> (%)	3.0 이하			3.0 이하						
	습 분 (%)	1.0이하	1.0이하		1.0이하	1.0이하	1.0 이하				
	강열감량 (%)	5.0이하	8.0이하	15.0이하	5.0이하	8.0이하	3.0 이하	5.0 이하	8.0 이하	5.0 이하	
	Cl <sup>-</sup> (%)										
	CaO (%)										
	MgO (%)										
	R <sub>2</sub> O (%)										
물리적 필요 성분	분말도	Blaine값 (cm <sup>3</sup> /g)					500이상	2500이상	2500이상	1500이상	
		45μm 체 잔분	12 이하	20 이하	45 이하		10 이하	40 이하	40 이하	70 이하	
	비 중						1.95 이상				
	단위수량비 (%)	95 이하	105이하	115이하							
	Flow 값 (%)						105 이상	95 이상	85 이상	75 이상	
	압축강도비 (%)	7 일									
		28일									
		91일									
	활동화지수 (%)	28일				75 이상	62 이상	90 이상	80 이상	80 이상	60 이상
		91일						100 이상	90 이상	90 이상	70 이상
	안정성 고압팽창 (%)										
	Le-chatelier 팽창 (mm)										
건조수축 증가율 (%) 28 일											
알카리 반응성 팽창 감소율 (%) 14 일											
균 등 성 조 건						Blaine값 : ±450cm <sup>3</sup> /g 이상 벗어나지 않는다 체가름법 : ±5% 이상 벗어나지 말아야 한다					
기	타										

는 fly ash도 규격에 포함되어 활용할 수 있도록 하기 위해 강열감량에 대한 규격값을 8% 이하로 하였다. 미연탄소는 flow값비에는 영향을 미치지므로 flow값비를 85%로 낮춰 잡았으나, 미연탄소

는 강도에 거의 영향을 미치지 못하므로 활동도 지수는 2종과 같은 값으로 하였다.

4종은 석탄회 정제공정시 조분으로 배출되어 폐기되는 분말도가 큰 fly ash이다. 규격값은 강



열감량 5% 이하, Blaine 1,500cm<sup>3</sup>/g 이상, flow 값비 75% 이상, 활성도지수 28일에서 60% 이상, 91일에서 70% 이상으로, 콘크리트에 혼합했을 때 유동성 증진, 강도발현 등을 기대하기 어렵기 때문에 콘크리트보다는 그라우트 재료나 모래의 미립분 보충 등에 사용한다. 규격의 차등화를 두고 있는 그외의 국가들도 자국에서 배출되는 fly ash의 특성을 고려하여 활용도를 높이는 방향으로 차등화를 두고 있다.

### 5. 플라이 애쉬의 품질관리 현황 및 평가방안 검토

#### 5.1 화력발전소에서의 품질관리 현황

우리나라 화력발전소에서 배출되는 fly ash 중에서 콘크리트 혼화재 및 시멘트 혼화재로 사용할 수 있는 fly ash는 유연탄 fly ash이다. 무연탄 fly ash는 미연탄소량이 10% 이상이어서 미연탄소량을 감소하는데에 따른 경제적 비용이 많이 들어 활용하기가 어렵다.

최근 최신식 유연탄 화력발전소가 건설되어 연소효율도 높아진 반면에 환경대책으로서 저 NOx 버너설치 등 저 NOx 운전에 의해 연소온도가 낮아져 석탄회 중의 미연탄소량이 높아지고 이형입자의 비율이 커질 가능성이 있으나, 화력발전소에서는 신뢰성 있는 연소설비, 고도의 연소기술 및 혼탄 등을 통하여 정밀한 연소관리를 하고 있기 때문에 품질이 저하되는 경향은 보여지지 않고 있다.

그러나 다양한 탄종 및 전력수요에 따른 보일러의 운전조건의 변화 등에 의해 연소조건에 변

화가 생겨 미연탄소량은 2~10% 정도의 범위로 변화하고 있어 화력발전소에서 배출된 상태로는 fly ash를 레미콘 공장 등에 공급할 수가 없다.

따라서 우리나라에서는 정제공장에서 정제하여 미연탄소량을 5.0% 이하로 관리하여 배출하고 있으나, 기류식 방식에 의한 정제는 미연탄소량이 원분에 비해 0.5~1.0% 정도 감소하므로 미연탄소량이 7.0% 이상일 경우에는 5.0% 이하로 관리하기가 어렵다.

일반적으로 화력발전소에서는 강열감량을 측정하여 보일러의 연소조정을 하고 있다. 일본의 경우에는 화력발전소에서 미연탄소량 뿐만 아니라 콘크리트 혼화제인 공기연행제의 흡착정도를 파악하기 위하여 methylene blue 흡착량을 측정하고 있다. Methylene blue 흡착량은 fly ash 중의 미연탄소량의 흡착특성을 나타내는 척도로서 미연탄소의 총표면적에 의해 결정된다. 같은 미연탄소의 양이라도 미연탄소의 세공구조에 공기연행제의 흡착특성이 변동되고, 연소온도가 낮고 환원분위기가 강하면 methylene blue 흡착량은 커진다.

최근 일본의 일부 화력발전소에서는 fly ash의 품질 향상과 안정화를 도모하기 위해 fly ash 분석의 자동화에 대한 연구 개발이 진행되고 있다.

한 예로서 연도로부터 fly ash 샘플을 자동채취하여 fly ash 중의 미연탄소분을 실제시간으로 측정하여, 그 분석 데이터를 보일러의 연소조정 신호로서 feed back시키고, 또한 fly ash silo를 선택하는 정보로 이용하고 있다. 현재 운용 또는 개발·시험되고 있는 것을 <표 9>에 나타냈다.

<표 9> 일본 화력발전소에서 석탄회 on-line 분석 system의 개발 예

system명	개발상황	실시장소	측정원리
석탄회 품질관리 system	실증시험중	중부전력(주)	<ul style="list-style-type: none"> <li>발생회의 정상(미연탄소, 입도, 성분) 등을 real-time으로 측정, 분석하여 회를 선택적으로 분별하여 품질관리 한다.</li> <li>미연탄소는 적외선법, 입도는 레이저광법, 성분은 형광 X 선법에 의해 측정한다.</li> </ul>
회 중 미연분 자동분석 system	운용중	<ul style="list-style-type: none"> <li>동북전력(주)</li> <li>상마공동화력발전소(주)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>석탄회 중에 포함되는 미연탄소량과 회의 색조와의 광학적 관계로 미연탄소량을 측정하여 연소관리 한다.</li> </ul>
	실증시험중	MCI 사	<ul style="list-style-type: none"> <li>회의 유전율이 미연탄소량과 상관이 있는 것을 이용하여 미연탄소량을 측정</li> </ul>

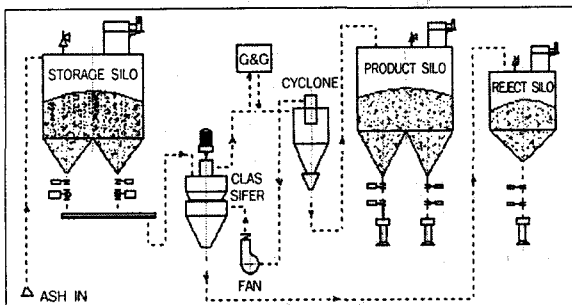
5.2 정제공장에서의 품질관리 현황

Fly ash 중의 과도한 미연탄소량은 활용하는데 장애요인이 되고 있어, 대규모의 유연탄 화력발전소는 부지내 및 바깥에 미연탄소를 감소하기 위해 정제공장(기류식 분급)을 갖추고 있다. 정제공장에서는 입하단계에서 강열감량을 측정하여 미연탄소분을 평가하여 분급기의 운용조건 등 회처리 설비의 운용관리를 하고 있다. 정제공장에서의 정제공정을 <그림 2>에 나타냈다.

화력발전소의 사이로에서 벌크차로 이송된 fly ash는 정제공장 원료저장 사이로에 저장시킨 후 회전밸브를 통과시켜 분급기로 이송된다. 분급기에서 허용 분말도를 벗어나는 조분 fly ash는 분급기 바닥에 낙하되어 불량품 저장사이로 이송하여 폐기처분되고, 미분(정제) fly ash는 원심력 집진기로 이동하여 제품 저장사이로에 이송된 후 air shocking 작업을 거쳐 출하 개폐장치를 통해 출하된다.

분급기에서 원심력 집진기로 fly ash가 이송될 때 분급기와 집진기 사이에 설치된 카본센서(Microwave 방식)는 분급기에서 나온 fly ash의 미연탄소 함유량을 측정하여 주며, 이때 부착된 레코너에 수치로 표시 기록된다. 분급기에서 이송된 fly ash는 PLC로부터 10분 동안의 cycle을 통해서 평균치를 내어 미연탄소 함유량이 4% 미만일 경우에는 제품 저장사이로로 이송된다.

미연탄소 함유량이 4% fly ash는 PLC의 신호를 받아 중간 저장 홀딩빈의 불량품 저장사이로로 이송하고 인버터의 회전속도를 조절하여 미연탄소 함유량이 4~5% 이하가 되도록 분급한다. 제품 저장사이로의 저장품에 대해서는 KS L 5405에 의한 시험항목으로 제품관리를 하여 품질



<그림 2> Fly ash 정제 공정도

을 확인하고 있다.

그러나 화력발전에서 입하된 fly ash의 미연탄소량이 8% 이상일 경우에는 강열감량 5% 이하를 맞추기가 어려워, 가끔 강열감량이 KS 규격에 벗어나는 fly ash가 생산된다.

5.3 품질관리의 방안

국내에서 fly ash는 화력발전소, 정제공장, 실수요업체를 거쳐 레미콘 공장으로 유통되지만 각 단계에서 품질관리의 주된 목적은 약간 다르다. 화력발전소에서는 연소조정, 정제공장은 입하하는 분급기의 운전조건이고 출하시에는 KS규격 만족, 레미콘 공장은 콘크리트의 품질안정이다.

Fly ash의 품질관리 시험은 발생단계(화력발전소 및 정제공장에 입하시)에서 측정하는 일상적인 관리시험(품질관리)과 정제공장에서 출하할 때와 레미콘 공장에서 입수시 시행하는 제품관리 시험으로 나눌 수 있다. <표 10>에 fly ash의 품질관리 운용 예를 나타냈다.

그러나 우리나라는 여러가지 여건상 상기 조건을 시험하여 품질관리를 한다는 것은 거의 불가능하다. 국내 화력발전소에서 배출된 fly ash의 특성을 발전소별, 호기별, 석탄 종류별, 집진기 호퍼별, 계절별(보일러의 운전조건)로 조사한 데이터는 없으나, 한국전력공사와 국내 연구자들에 의한 보고를 종합하면 우리나라에서 산출되는 fly ash의 특성은 다음과 같다.

① Fly ash의 품질평가의 기준이 되는 미연탄소량(강열감량)의 평균값은 무연탄 fly ash는 평균 12.99%, 유연탄 fly ash는 4.61%이나, 보일러 호기별 범위는 무연탄 fly ash는 8.24~27.6%이고, 유연탄 fly ash는 3.52~8.16%이다.

② 화학조성은 모든 fly ash가 KS L 5401의 SiO<sub>2</sub> 40% 이상을 만족시키고 있으며, 시멘트 경화체의 유해성분인 알카리, CaO, MgO 및 SO<sub>3</sub> 성분의 양을 보면 유연탄 fly ash는 안전한 범위 내에 있으나, 간혹 CaO 성분이 10%를 넘는 fly ash가 배출되는 경우도 있다. 무연탄 fly ash는 K<sub>2</sub>O 성분이 평균 4.5%(3.5~5.1%)로 많은 양을 함유하고 있어 사용에 주의가 필요하다.

③ 분말도의 척도인 Blaine값은 3,280~5,100 g/cm<sup>3</sup>로 KS L 5401의 2,400g/cm<sup>3</sup>의 값을 모든 fly ash가 만족하고 있다.

<표 10> Fly ash의 품질관리 운용의 예

	항 목	KS 규정치 (값의 조정)	화력발전소	정 제 공 장		보 통 콘크리트	고 성 능 콘크리트
				입 하	출 하		
품 질 관 리 시 험	SiO <sub>2</sub> (%)	45 이상			○	○	○
	습 분 (%)	1.0 이하			○	○	○
	강 열 감 량 (%)	5.0 이하	○	○	○	○	○
	비 중	1.95 이상			○	○	○
	분 말 도 (cm/g)	2400 이상	○	○	○	○	○
	45 $\mu$ m 체 잔 분 (%)			○	○	○	○
	단 위 수 량 비 (%)	102 이하			○	○	○
균일성	압 축 강 도 (%)	60 이상			○	○	○
	비 표 면 적 (cm <sup>2</sup> /g)	450 이내			○	○	○
구 형 울	단 위 수 량 비 (%)	5 이내			○	○	○
	구 형 울 (%)						○
	입 도 분 포						○
	염 소, 중 금 속					○	○
	알 카 리, SO <sub>3</sub>				○	○	○

④ 반응성의 척도인 압축강도비는 82.3~100.3 %로 KS L 5401의 60%를 상회하고 있다.

⑤ 유동성의 지표인 단위수량비는 95.1~103.1 %로 KS L 5401의 102% 이하를 만족하지 못하는 fly ash가 존재한다.

⑥ 비중은 2.25~2.48, 습분은 0.06~0.21%로 KS L 5401의 각각 1.95 이상과 1% 이하를 벗어 나는 fly ash는 보고되고 있지 않다.

즉 국내 유연탄 fly ash는 강열감량과 단위수량비를 제외하고는 KS 규정을 만족하고 있다. 단위수량비에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 미연탄소량이므로, 미연탄소량이 많으면 단위수량비가 커진다. 따라서 강열감량이 KS규격에 벗어난 경우에 단위수량도 벗어나는 경우가 많다.

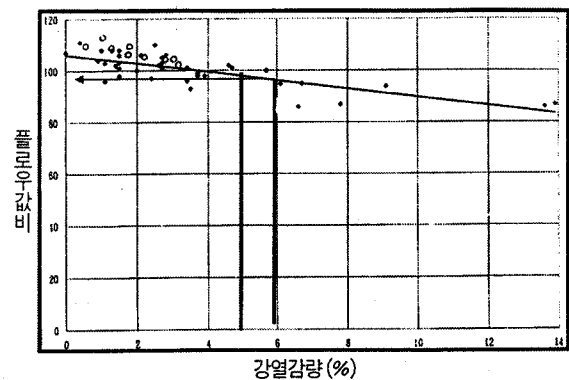
국내 유연탄 fly ash는 보일러의 과부하시에는 미연탄소량이 7~8%에 이르러 정제 후에도 5~6%를 나타내는 경우가 있어, 품질관리가 허술하면 KS규격에서 벗어나는 정제 fly ash가 레미콘 공장에 납품될 수도 있다.

<그림 3>에 JIS 개정을 위해 보고한 강열감량과 flow값 비와의 관계를 나타냈다. 이 데이터는 일본에서 배출되는 fly ash에 관한 것이지만, 화력발전소의 연소설비가 약간 다르더라도 사용되는

석탄의 종류가 유사하므로 참고하여 무방할 것으로 생각된다.

<그림 3>에서 보듯이 강열감량과 flow값 비와는 직선적인 상관관계가 보여지고 있다. 강열감량 5%일 때, flow값 비는 97% 정도를 나타내고 있다. 이는 단위수량비로 환산하면 100%에 해당되는 값이다.

만약에 강열감량이 6% 일 때 flow값 비는 96% 정도이며, 이를 단위수량비로 환산하면 101% 정도이다. 따라서 강열감량 6% 정도이면 KS규격



<그림 3> 플로우값 비와 강열감량과의 관계

〈표 11〉 Fly ash의 품질 분류 방법

강 열 감 량 (%)		분 말 도 (Blaine, <i>cm</i> /g)	
2.0 이하 (3.0 이하)	* 기류식으로 어렵다 * 기타 정제법	6,000 이상	* 특수 분급장치
2.0 ~ 5.0 (3.0 ~ 5.0)	* 기류식으로 가능 * 원분의 제한	5,000 ~ 6,000	* 고성능 분급장치
5.0 ~ 10.0	* 원 분 * 유연탄 저회	2,400 ~ 5,000	* 기류식 분급장치
10.0 ~ 15.0	* 무연탄회	2,400 이하	* 정제후 폐기물 * Bottom ash
15 이상	* 무연탄회		

의 단위수량비값 102% 전후를 나타낼 것으로 예상된다.

따라서 fly ash의 활용도를 높이고 국내 정제 공장에서 생산되는 정제회 모두가 KS규격을 만족하기 위해서는 강열감량을 5%에서 6%로 개정하는 것도 바람직한 것으로 생각된다.

국내 fly ash의 KS규격에 의한 등급화에 대해서 필자의 생각을 정리하면 다음과 같다.

Fly ash의 미연탄소량은 단위수량비에 영향을 미치고 Blaine값은 압축강도비에 큰 영향을 미치므로, 국내 유연탄 fly ash의 품질은 미연탄소량과 Blaine값에 의해 구분될 수 있으며, 대략적으로 분류하면 〈표 11〉와 같이 나눌 수 있다.

따라서 fly ash의 품질은 강열감량값과 Blaine

값의 조합에 의해 품질을 〈표 12〉와 같이 분류할 수 있다.

그러나 국내 여건상이나 현실적으로 강열감량 3% 미만, Blaine값 6,000*cm*/g 이상의 fly ash를 생산하기 어렵고, 6,000*cm*/g 이상의 고분말도의 fly ash를 생산되더라도 미연탄소를 감소하기 힘들어, 콘크리트에 혼합하더라도 콘크리트 물성 향상에 크게 기여하지 않을 것으로 생각된다.

따라서 등급화 한다면 강열감량을 기준으로 일 반급은 6% 미만 저급은 6~10%로 차등화시켜 일 반급은 콘크리트 혼화제용, 저급은 모르터 및 그 라우트용으로 활용하는 것도 하나의 방안이라 생각된다. 그러면 품질좋은 무연탄 fly ash도 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

〈표 12〉 Fly ash의 품질 구분 (등급)

고 급 화	상	Blaine 6,000 <i>cm</i> /g 이상, 강열감량 2% 이하 * 기류식으로는 어렵다 * 정전기법, 부유선광법, 가열법으로 어렵다 * 집진기의 단별채취만 가능
	중	Blaine 5,000 <i>cm</i> /g 이상, 강열감량 3% 이하 * 고성능 기류식 분급기로 가능하나 분급장치에 의해 미연탄소분이 증가하므로 탄중에 제한
	하	Blaine 6,000 <i>cm</i> /g 이상, 강열감량 5% 이하 * 고성능 기류장치로 분급이 가능 * 일본에서 고급회로 시판
중 급		Blaine 2,400 <i>cm</i> /g 이상, 강열감량 5% 이하 * KS 규격품, 정제회
저 급		Blaine 2,400 <i>cm</i> /g 이상, 강열감량 10% 이하 * 원분

## 6. 결 론

(1) 국내 화력발전소에서 배출되는 fly ash의 품질은 강열감량(단위수량비)을 제외하고는 KS L 5401을 만족하나, 무연탄 fly ash의 경우에는  $K_2O$ 의 양이 많으므로 사용할 때 알카리 양에 주의를 하여야 한다.

(2) 국내 fly ash는 미연탄소량이 KS L 5401 규격의 5%를 전후하여 변동이 심하여 정제하여도 KS 규정을 넘는 경우가 있으므로 품질확인 차원에서 미연탄소량에 대한 확인이 필요하다. 미연탄소량은 유동성의 지표인 단위수량비와 밀접한 관계가 있으므로 레미콘 공장 입하시에는 강열감

량과 단위수량비에 대한 품질확인이 필요하다.

(3) 최근 해외에서는 fly ash의 활용을 및 고품질화를 위하여 규격을 등급화 하는 경향이 있으나, 국내 여건상이나 강열감량 3% 미만, Blaine값 6,000 $cm^2/g$  이상의 고품질 fly ash를 생산하기 어려우므로, 강열감량이 높은 fly ash도 규격에 포함시키는 쪽으로 차등화시켜 강열감량이 높은 유연탄 fly ash 및 무연탄 fly ash도 활용할 수 있도록 등급화 하는 것이 바람직하다고 생각된다.

※ 참고 : 본 기고에서 인용된 데이터의 일부는 한국전력에서 발표한 문헌과 일본 fly ash hand book에서 발췌하였음.