

초미립자 지반주입재로서 플라이애쉬의 적용성에 관한 연구

A Study on the Utilization of Coal Fired Fly-ash
as Microfine Grouting Materials

천 병 식*¹

Chun, Byung-Sik

김 진 춘*²

Kim, Jin-Chun

Abstract

At the end of 1997 about 3 million tons of coal ash was produced as byproducts from the coal fired electrical power plants in Korea. Only about 27% of that byproducts was utilized as the admixtures of cement and concrete industry. But the large quantity of coal fired fly-ash has been used as the soil improvement materials in other countries. So the aim of this study is the estimation of the applicability of the coal fired fly-ash as microfine grouting materials by admixing the superfine particles which were separated from the coal fired fly-ash for the higher values.

The 6 types of specimens were manufactured in the laboratory for the purpose of estimating the chemical and physical properties of cement and grouts. These specimens consisted of 2 specific surfaces of 6,000 and 8,000cm²/g in Blaine method. And these specimens are divided into 3 ratios (30%, 50%, 70%) of fly-ash by weight.

From the estimated properties of the coal fired fly-ash microfine cements and grouts, 50% fly-ash is the most suitable ratio for grouting materials. However, further study of durability is necessary for using fly-ash grouts practically at the field projects. The higher content of the unburned carbon of fly-ash increases the thinner layer of carbon on the surface of solution of grouts, and requires more quantity of surface active agent.

As a results of this study, it is found that the microfine fly-ash is very useful as a good grouting material if 50% of fly-ash is added with the microfine portland cement. So, in the near future, if the coal fired fly-ash is able to be used as grouting material in Korea, the demand of fly-ash will increase rapidly.

*1 정희원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

*2 정희원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

요 지

1997년의 국내 플라이애쉬 발생량은 약 300만톤에 이르고 그 중 약 50만톤이 콘크리트 혼화재 료로, 약 30만톤이 시멘트 원료 및 콘크리트 2차제품의 원료로 재활용되었지만 외국에서 재활용 율이 높은 지반개량재로는 거의 실적이 없다. 따라서, 본 연구의 목적은 화력발전소의 부산물인 플라이애쉬로부터 초미분말을 분급하여 부가가치가 큰 초미립자 주입재로 적용할 수 있는지 가 능성을 확인하고자 한다.

본 연구를 위해서 블레인 비표면적 $6,000\text{cm}^2/\text{g}$, $8,000\text{cm}^2/\text{g}$ 의 2수준과, 플라이애쉬 첨가량 30%, 50%, 70%의 3수준 등 총 6가지 조합의 시제품을 만들었으며, 각각에 대해서 시멘트 특성, 주입 재 특성을 평가하였다.

시멘트의 물리적 특성, 주입재의 작업시간확보, 주입재 고결체의 내구성 측면에서 분석한 결 과, 플라이애쉬계 초미분말 주입재의 플라이애쉬 첨가량의 한계는 50%이하로 하는 것이 요망된 다. 또한, 플라이애쉬에 함유되어 있는 미연카본에 의해서 현탁액의 표면에 탄소피막이 형성되고 계면활성제의 소요량이 증가하므로 가급적 미연탄소 함유량이 적은 정제된 플라이애쉬를 사용하 는 것이 필요하다.

본 연구를 통해서 화력발전소의 폐기물인 플라이애쉬를 고부가가치 제품인 초미립자주입재로 적용이 가능함을 확인하였으며, 국내의 기술여건에서도 폐기플라이애쉬로부터 고분말 플라이애 쉬를 분급하는 것이 기술적으로 가능하기 때문에 본 연구성과는 현장적용성이 매우 높은 것으로 평가되었다.

Keywords : Coal fired fly-ash, Microfine cement, Grouting material, Unburned carbon content, Syneresis, Durability of hydrates, Admixture ratio

1. 서 론

과거 대부분의 국내 화력발전소가 플라이 애쉬(fly-ash)의 재활용에 대한 고려없이 설 계되었기 때문에 재활용실적이 매우 적고 대 부분 매립처리하였다. 그러나, 산업발전과 경 제의 성장으로 발전설비의 규모가 커지고 환 경문제가 대두되면서 플라이애쉬의 재활용이 시급히 요구되고 있는 실정이다.

플라이애쉬는 석탄중의 무기질성분의 점토 광물인 석영, 장석, 방해석 등이 연소과정중 에 용융·급냉되어 생성되기 때문에 유리질 과 결정질의 혼합물이며, 주성분인 유리질은 75~80%이며, quartz($\alpha\text{-SiO}_2$) 7~12%, mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) 7~15% 외 소량의 미 연탄소, magnetite(Fe_3O_4), hematite(Fe_2O_3) 등

이 존재한다.

석탄회는 분말형태로 가스와 함께 밖으로 배출되면서 집진기에 포집되는 플라이애쉬 (비회)가 약 80%이며, 연소되어 보일러 밑으 로 떨어지는 입도가 큰 bottom-ash(저회)가 약 20%정도로 구분된다. 또한, 연료로 투입되 는 석탄의 종류에 따라 국내산 무연탄을 연 소한 무연탄회와 수입되는 유연탄을 연소한 유연탄회로 구분이 된다.

무연탄 플라이애쉬와 유연탄 플라애시는 그 특성상 시멘트의 물리적특성에 미치는 영 향이 다르며 일반적으로 무연탄 플라이애쉬 는 미연카본 함량이 높고 구형화된 입자가 적기 때문에 주입재의 첨가재로 적합하지 않 을 경우가 많으며 각각의 일반적인 화학성분 은 표 1과 같다(오성원, 1997).

표 1. 석탄회 화학성분 분석결과(범위 및 평균치, %)

성분	종류	무연탄 플라이애시	유연탄 플라이애시
SiO ₂		50~56.5(52.6)	46.7~69.3(59.9)
Al ₂ O ₃		30.7~34.8(33.4)	18.7~24.8(23.3)
Fe ₂ O ₃		4.3~5.9(4.6)	3.6~9.5(7.3)
CaO		0.5~1.2(0.7)	1.0~16.0(3.6)
MgO		0.6~1.2(0.7)	0.5~2.2(1.1)
Na ₂ O		0.4~0.8(0.6)	0.1~0.7(0.5)
K ₂ O		3.5~5.1(4.5)	0.8~3.2(2.0)
SO ₃		0.1~0.8(0.5)	0.8~3.2(1.7)
TiO ₂		1.2~1.4(1.3)	0.6~1.3(1.0)
기 타		1.3~1.7(1.5)	0.5~1.5(1.1)

석탄은 풍부한 매장량, 저렴한 가격, 공급원의 안정성 등으로 전세계적으로 화력발전의 근간이 되는 연료로 사용되고 있으며 한국전력에서도 2000년대 초반에는 약 45,000MW 발전계획 용량 중에서 석탄화력이 30% 이상 차지할 중요한 전력원으로 비중이 확대되고 있

표 2. 국내 석탄회 발생전망(단위:천톤)

발전소/연도	'95	'96	'97	'00	'05	
국내 탄 화 력	서 천	368	382	383	413	430
	영 동	226	204	206	4	6
	영 월	204	209	178	-	-
	부 산	73	68	-	-	-
	군 산	38	39	40	-	-
	동 해	-	-	26	609	589
	소 계	909	902	833	1,026	1,026
해 외 탄 화 력	보 령	829	855	771	748	803
	삼천포	658	712	734	641	628
	호 남	123	125	122	141	129
	태 안	165	328	563	529	800
	하 동	-	-	207	784	827
	당 진	-	-	-	493	550
	영 흥	-	-	-	-	880
신규화력	-	-	-	-	70	
소 계	1,775	2,020	2,397	3,390	4,687	
총 계	2,684	2,922	3,230	4,419	5,713	

다. 따라서 석탄회 발생량도 더욱 증가할 것으로 예상되며, 이에 따라 한국전력에서는 석탄회 재활용율을 촉진하기 위해서 정제공장을 직접 건설하는 등 기반을 구축하기 시작하였고, 정부에서도 국가지원의 유효이용을 위해 '자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법' 및 '지침'을 개정하는 등 적극적으로 재활용을 확대하고자 노력하고 있다. 한편, 향후 국내에서의 석탄회 발생전망은 표 2와 같다(오성원, 1997).

또한, 최근 발표된 국제 석탄회 활용 심포지움(1995년, Lexington, USA) 자료에 의하면 세계 석탄회 발생 총량은 4.55억톤에 이르고, 이중 32.5%인 1.48억톤이 유효하게 자원으로 활용된 것이 표 3과 같이 보고되고 있다(노갑수, 1997).

표 3에서 볼 수 있듯이 석탄회를 유효하게 가장 많이 재활용하는 분야는 탄광갱도 충전재로 34.5%, 댐 및 터널 주입재로 30.9%, 시멘트 및 콘크리트 첨가재로 26.0%의 순서로

표 3. 세계 석탄회 활용 현황

분 야	용 도	수 량(천톤)	구성비(%)
시멘트	시멘트 원료	6,319	4.1
	혼합시멘트	4,049	2.7
	시멘트대체	28,336	19.2
	소 계	38,524	26.0
토 목	그라우트재	705	0.5
	아스팔트필러	749	0.5
	주입재/충전재	37,581	25.4
	노 반 재	6,682	4.5
소 계	45,717	30.9	
건 축	경 량 골 재	1,107	0.7
	벽돌/세라믹	1,177	0.8
	블 러 크	10,317	7.0
	소 계	12,601	8.5
기 타	탄광갱도충전재	40,522	27.4
	기 타	10,090	7.1
	소 계	51,090	34.5
합 계		147,932	100.0

재활용되고 있다. 즉, 토목분야의 주입재 및 지반개량재로 재활용을 많이 하는 것이 세계적인 추세임을 알 수 있다. 그러나, 국내에서는 현재까지 석탄회의 재활용 현황이 시멘트 및 콘크리트용 첨가재로서만 제한적으로 사용되고 있는 아쉬운 실정이다.

일반적으로 화력발전소에서 부산되는 석탄회의 입자는 보통시멘트정도의 입도를 갖고 있다. 보통시멘트를 주입재로 사용할 경우 입자가 크기 때문에 적용 대상지반이 조립질 사질지반 정도로 한정된다. 따라서 보통시멘트보다 입도가 1/4~1/5정도로 미립화한 초미립자시멘트(일명 마이크로시멘트)를 적용함으로써 적용대상의 한계를 실트성 사질지반까지 적용시킬 수 있다. 그러나, 이 경우 보통포틀랜드시멘트만 미분쇄하여 단독으로 사용할 경우 매우 강한 응집현상이 발생하여 주입성이 떨어지고, 수화활성이 너무커서 겔타임 확보가 어렵다. 따라서, 일반적으로 슬래그미분말을 첨가해서 점성과 수화활성을 떨어뜨림으로서 충분한 겔타임 조절이 가능하다(천병식, 1995, 1998, 천병식·김진춘, 1997, B.S.Chun and J.C.Kim, 1997).

초미립자 주입재의 첨가재로서 포졸란재료를 이용하는 것은 포졸란재료를 이용함으로써 주입재의 작업 겔타임이 확보되고, 장기적으로는 포졸란반응에 의한 강도증진이 가능하기 때문에 포졸란재료의 사용이 필요불가결한 요소가 되었다(島田 外, 1991, 草野, 1992). 따라서 본 논문에서는 종래의 슬래그미분말 대신 석탄회를 초미립화하여 재활용할 수 있는 사용조건을 선정하는데 연구의 목적이 있다.

2. 플라이애쉬의 포졸란반응 모식도

플라이애쉬가 시멘트와 혼합하여 주입재로 사용될 수 있는 것은 그림 1과 같은 포졸란반응에 의하여 부가적인 수화생성물을 만들기 때문이다. 포졸란반응이란 재료자체가 독자적인 수경성은 없으나 미분말화된 상태에

서 알칼리 또는 알칼리토류금속의 수산화물과 물이 공존할 때 수경성을 발휘하는 수화반응을 말한다. 이와 같은 특성을 갖는 것은 플라이애쉬, 수세슬래그미분말, 실리카흄, 제지애쉬미분말 등 산업부산자원계 포졸란재와 화산재, 규조토, 제오라이트 등 천연자원계 포졸란재가 대표적이다.

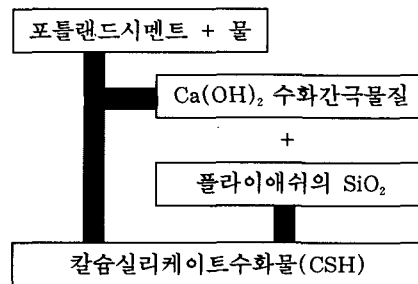


그림 1. 플라이애쉬의 포졸란반응 개념도

그림 1에서와 같이 플라이애쉬 입자는 시멘트와 혼합될 경우 시멘트의 수화간극물로 생성되는 $Ca(OH)_2$ 와 포졸란반응이 일어나므로 수화조직이 더욱 치밀해지고 장기강도가 증가한다. 즉, 플라이애쉬와 같은 포졸란재료를 첨가하여 사용할 경우 주입재 고결체의 수화물이 증가하여 장기강도를 향상시킬 수 있고, 또한 시멘트사용량을 줄일 수 있기 때문에 경제적인 측면과 환경적인 측면에서도 유리하다.

한편, 시멘트와 포졸란재료의 구체적인 화학반응은 그림 2와 같은 C_3S -포졸란계 수화반응과 그림 3과 같은 C_3A -포졸란계 수화반응으로 보고되고 있다(V.M. Malhotra and A.A. Ramezani-pour, 1994).

그림 2의 C_3S -포졸란계 수화반응 모식도에서 C_3S 및 C_3A 로부터 용출되어 나온 calcium 이온은 pozzolan 입자 표면에 흡착된다. C_3S 에 의해 형성된 C-S-H수화물은 C_3S 입자 표면에는 높은 CaO/SiO_2 몰비의 수화물이, 포졸란 입자 표면에는 낮은 CaO/SiO_2 몰비의 다공질

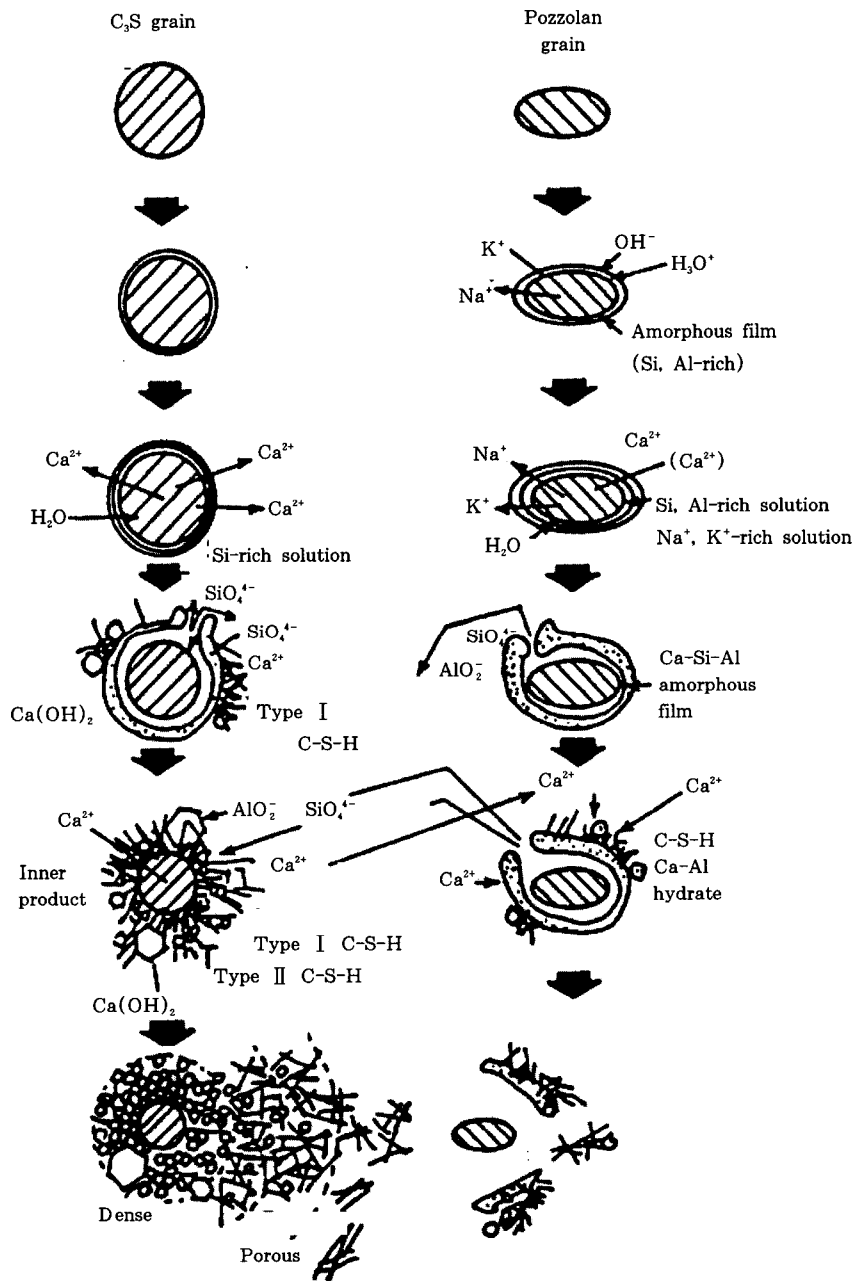


그림 2. C_3S -포졸란계 수화반응 모식도

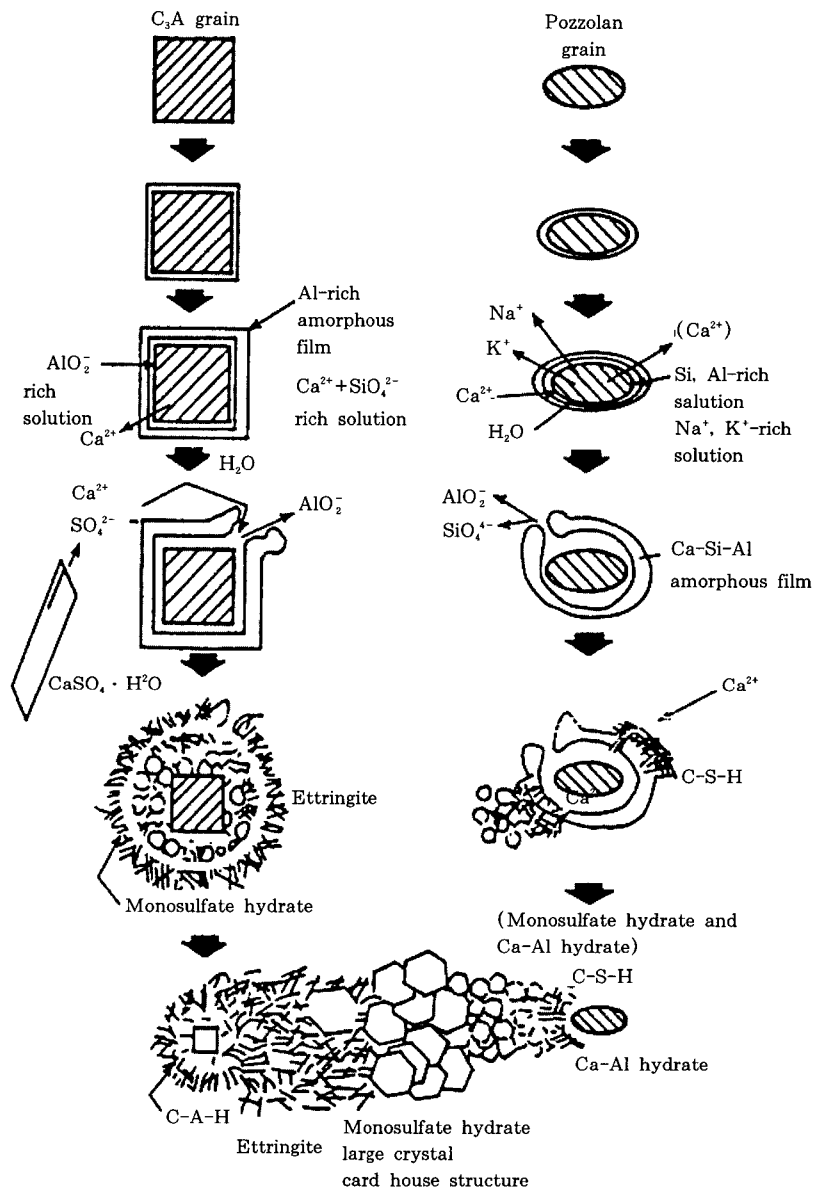


그림 3. C_3A -포졸란계 수화반응 모식도

수화물이 피복된다. 이 때 포졸란입자 표면에 물의 침투에 의해 점진적으로 Na^+ 와 Ca^{2+} 이 용해되어 나오고, 결국 표면에 Si와 Al이 많은 비정질(amorphous)의 층을 형성한다. 용해된 Na^+ , K^+ 는 OH^- 농도를 증가시키고, SiO_4^{4-} 와 AlO_2^- 의 용해를 가속화 하며, Ca^{2+} 와 결합하여 층의 두께를 증가시킨다. 그 후 삼투압에 의해 층이 점진적으로 파괴되고, 층과 포졸란 입자 사이에 공극이 형성된다. 이로 인해 SiO_4^{4-} 와 AlO_2^- 는 Ca^{2+} rich 용액으로 확산된다. 이외에도 C-S-H와 Ca-Al 수화물은 C_3S 입자의 외부 수화물의 표면에 형성되고, 파괴된 필름은 다소 확장된다. 이에 따라 비정질 Si, Al rich film은 Ca^{2+} 을 필름 내부로 이동이 가능하게 하고, 포졸란 입자의 표면에 calcium silicate와 calcium aluminate 수화물이 형성되어 포졸란 입자와 수화물 사이의 조직이 치밀하여 진다.

그림 3의 C_3A -포졸란계 수화반응 모식도에서 포졸란의 액상으로부터 Ca^{2+} 의 흡착과 에트린자이트와 다른 수화물이 생성된다면 C_3A 의 수화는 촉진된다. C_3A -포졸란 반응도 C_3S -포졸란 반응과 유사하다. Ettringite, monosulfoaluminate 수화물, calcium aluminate 수화물 및 calcium silicate 수화물은 포졸란 입자 외부 필름 표면이나, C_3A 입자의 수화물 층 표면에 생성되는데, 용액중에 Ca^{2+} 와 SO_4^{2-} 의 농도에 의존한다.

3. 플라이애쉬계 초미립자 주입재의 특성평가

3.1 사용재료

본 연구에 사용된 재료는 반응주재인 보통포틀랜드시멘트 및 플라이애쉬, 반응조재인 규산소다 3호, 점성개선재인 분산제가 사용되었다. 보통포틀랜드시멘트는 국내 S사의 D공장에서 생산된 것을 사용하였으며, 플라이애쉬는 국내 H전력의 S화력발전소에서 생산되

는 정제된 플라이애쉬를 사용하였다. H전력은 플라이애쉬의 재활용을 촉진하기 위해서 품질이 균일한 플라이애쉬를 생산할 수 있는 정제설비를 설치하여 1997년말 현재 남해안의 S화력발전소에서 정제된 플라이애쉬를 생산하고 있으며, 1998년말부터 서해한의 T화력발전소에서도 정제된 플라이애쉬가 생산될 예정이다. 한편, 반응조재인 규산소다 3호는 국내 D화학의 제품을 사용하였으며, 분산제는 수입품인 M혼화제를 사용하였다. 각각의 요구특성은 시멘트로서의 물리특성과 그라우트재로서의 물리특성으로 나눌 수 있으며, 시멘트로서의 물리특성은 산업규격을 적용하고 있지만 그라우트재로서의 물리특성은 아직 국가규격이 제정되어 있지 않기 때문에 현장에서 품질관리를 하는 일반적인 관리기준을 적용한다.

한편, 본 연구에 사용된 시멘트와 플라이애쉬의 블레인 비표면적 $6,000\text{cm}^2/\text{g}$ 이상 미분말은 용량 30 l의 실험용 소형 불밀을 이용하여 제조하였으며, 실제 공장에서 생산한 제품과 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

3.2 실험인자 및 조합

실험인자는 보통포틀랜드시멘트와 플라이애쉬의 혼합비와 혼합된 주입재의 블레인 비표면적으로 하였다. 실험조합은 혼합비가 중량비로 3:7, 5:5 및 7:3의 3수준과 블레인 비표면적 $6,000\text{cm}^2/\text{g}$ 및 $8,000\text{cm}^2/\text{g}$ 급 2수준 등 총 6가지로 조합하였으며 실험조합표는 표 4와 같다.

표 4. 플라이애쉬 혼합계 주입재의 실험조합표

시멘트:플라이애시 중량혼합비	블레인 비표면적(cm^2/g)	
	6,000~6,500	8,000~8,500
7 : 3	C7F3	C7F3
5 : 5	C5F5	C5F5
3 : 7	C3F7	C3F7

표 4에서 블레인 비표면적 6,000~6,500cm²/g의 주입재는 사질지반 및 균열이 비교적 큰 암반기초에 적용될 수 있으며 이 정도 품질의 주입재를 콜로이드급 주입재라고 부르고, 블레인 비표면적 8,000cm²/g이상의 주입재는 실트성 사질지반 및 미세균열이 많은 암반기초에 적용될 수 있으며 이정도 품질의 주입

재는 마이크로급 주입재라고 부르는 것이 일반적이다(천병식·김진춘, 1997, William, 1997).

3.3 실험방법

플라이애쉬 혼합계 주입재에 대한 평가방법은 표 5와 같이 시멘트로서의 품질과 표 6과 같이 주입재로서의 품질로 평가하였다.

표 5. 시멘트의 품질특성 평가 실험

항 목	방 법	명 칭
비중	장비메뉴얼	피크노미터
화합성분	기기분석	X-ray 형광분석기
입도	기기분석	Master Xsizer
분말도	KS L 5106	공기투과장치에 의한 포틀랜드시멘트의 분말도 시험방법
응결(길모어)	KS L 5103	길모어침에 의한 시멘트의 응결시간 시험방법
플로우 및 압축강도	KS L 5105	수경성시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법

표 6. 주입재의 품질특성 평가 실험

항 목	세 부 적 인 방 법
겔타임	<ul style="list-style-type: none"> • 배합 : A액 → 물/시멘트=2, B액 → 물/규산소다=1 • 혼합 : A액과 B액을 1:1부피비로 혼합 • 기구 : 비이커, 교반봉, 초시계, 저울, 온도계 • 측정 : A액과 B액의 교반시 겔화시간
B형점도	<ul style="list-style-type: none"> • 배합 : A액 → 물/시멘트=2 • 기구 : 비이커, 교반봉, B형점도계, 저울, 온도계 • 측정 : B형점도계의 회전마찰저항
침강속도	<ul style="list-style-type: none"> • 배합 : A액 → 물/시멘트=2 • 기구 : 매스실린더, 교반봉, 시계, 저울, 온도계 • 측정 : 시간단위별 현탁액 입자의 매스실린더내 침강깊이
침투성	<ul style="list-style-type: none"> • 배합 : A액 → 물/시멘트=2 • 기구 : 바스켓, 고무장갑, 초시계, 저울 • Sand Column Tester : 크기 ϕ 10cm × H30cm, 압력 1/3Hp • 측정 : Sand Column 침투시간, 재료분리 유무와 형상
호모겔강도	<ul style="list-style-type: none"> • 배합 : A액 → 물/시멘트=2, B액 → 물/규산소다=1 • 기구 : 바스켓, 큐빅몰드, 고무장갑, 초시계, 저울, 온도계 • 혼합 : A액과 B액을 1:1부피비로 혼합 • 시편 : 겔타임의 1/2정도 교반후 큐빅몰드에 서서히 투입 • 양생 : 3~6시간 습포양생 후 탈형 → 수중 표준양생 • 측정 : 각 재령당 3개씩 압축강도를 측정하여 평균치를 취함

3.4 실험결과

3.4.1 시멘트 특성평가

시멘트로서의 특성은 비중, 화학성분, 입도, 분말도, 응결, 플로우 및 압축강도를 측정하였다. 이들 특성은 주입재의 배합량계산, 성분확인, 침투성, 고결속도, 유동성 및 강도크기 등과 밀접한 관계가 있으며 각각의 특성치를 측정된 결과는 표 7~10과 같다.

표 7. 비중 및 블레인 비표면적

등급 조합	콜로이드급		마이크로급	
	비중	분말도 (cm ² /g)	비중	분말도 (cm ² /g)
C7F3	2.81	6,290	2.82	8,470
C5F5	2.68	6,270	2.71	8,340
C3F7	2.57	6,210	2.61	8,230

표 8. 입도분포(누적통과율:%)

시 료		입경 (μm)								평균 d ₅₀ (μm)
등급	조합	2	3	4	7	10	15	20	40	
콜로이드	C7F3	20.1	26.1	31.0	52.6	66.7	79.9	90.9	99.3	6.7
	C5F5	18.6	21.0	30.3	53.5	68.5	82.0	92.8	99.7	6.8
	C3F7	21.6	27.8	32.7	54.7	68.7	80.8	90.3	97.7	6.8
마이크로	C7F3	28.3	31.6	47.7	68.3	80.9	92.6	97.6	99.5	4.2
	C5F5	26.9	29.7	47.8	71.0	83.0	93.1	96.7	98.9	4.1
	C3F7	28.0	31.0	49.8	74.1	86.1	95.4	97.8	99.1	4.0

표 9. 화학성분(구성비:%)

시 료		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Ig.loss
등급	조합									
콜로이드	C7F3	30.1	11.9	3.7	46.1	1.6	0.19	0.69	2.9	2.0
	C5F5	37.8	15.3	4.2	36.6	1.4	0.23	0.72	2.5	2.1
	C3F7	42.7	18.4	4.9	27.7	1.0	0.22	0.74	2.0	2.3
마이크로	C7F3	30.3	12.7	3.9	45.9	1.2	0.27	0.70	2.8	2.2
	C5F5	35.7	15.6	4.4	37.0	1.1	0.26	0.71	2.4	2.4
	C3F7	42.0	19.3	5.1	27.4	0.7	0.32	0.75	2.1	2.5

표 10. 물리성능

시 료		W/C [%]	길모어 응결		Flow [%]	압축강도(kg/cm ²)			
등급	조합		초결[min]	종결[hr]		1일	3일	7일	28일
콜로이드	C7F3	29.4	285	8:10	116.5	141	321	388	497
	C5F5	29.8	375	11:00	124.2	82	177	234	369
	C3F7	30.0	525	14.30	136.5	26	82	126	205
마이크로	C7F3	29.9	215	7:05	102.3	205	338	371	509
	C5F5	30.3	280	8:20	111.5	111	224	336	410
	C3F7	30.6	410	11:40	121.1	31	102	157	221
KS L 5105		-	60이상	10이하	110±5	-	130이하	200이상	290이상

표 7로부터 플라이애쉬계 초미립자 주입재의 비중은 2.6~2.8로 보통포틀랜드시멘트의 3.15에 비해서 매우 작다. 따라서, 대상토질 단위부피당 주입재 투입부피가 증가되기 때문에 주입고결효과를 향상시킬 수 있다.

표 7~8로부터 블레인 비표면적 및 평균입경은 콜로이드급이 6,000~6,500cm²/g, 평균입경 약 7 μ m로 보통포틀랜드시멘트의 1/3정도다. 마이크로급이 8,000~8,500cm²/g, 평균입경 약 4 μ m로 보통포틀랜드시멘트의 1/5정도로 미세하다. 따라서 주입재로서 보통포틀랜드시멘트를 사용하는 경우에 비해서 콜로이드급은 3배이상, 마이크로급은 5배이상 침투효과가 있을 것으로 판단된다.

표 9로부터 플라이애쉬의 첨가량이 증가할수록 CaO/SiO₂몰비가 현저히 낮아진다. 시멘트수화물은 CaO-SiO₂-H₂O의 결합체로서 보통포틀랜드시멘트에서는 CaO/SiO₂몰비가 1~3정도가 보통이다. 본 연구에 사용된 혼합시멘트의 경우 플라이애쉬 첨가량이 50%이상인 경우 CaO/SiO₂몰비가 1이하로 떨어지기 때문에 초기강도 발현속도가 현저히 떨어질 것으로 판단된다. 따라서, 플라이애쉬를 첨가하는 량이 제한적임을 알 수 있다. 그러나, 초고강도콘크리트용 혼합계 특수시멘트의 경우 CaO/SiO₂몰비가 0.8정도로 낮을 경우 장기적인 고강도 발현에 더 적합하다는 보고도 있다.

표 10으로부터 플라이애쉬 첨가량이 증가할수록 유동성은 증가하지만 응결이 매우 지연되고, 강도가 현격히 떨어짐을 알 수 있다. 대부분의 공사시방서에서 주입재로 사용될 수 있는 시멘트의 기본적인 물성은 KS규격에 적합한 것을 사용하도록 권장하고 있음을 감안할 때 플라이애쉬 첨가량은 50%이하로 하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

3.4.2 주입재 특성평가

일반적으로 주입재의 침투성을 좌우하는 것은 주입재 입자의 크기와 현탁액의 점도가 가장 크게 영향을 미치기 때문에 분산제는

나프탈렌계, 리그닌계, 멜라민계, 카르복실산계 등 계면활성제를 1~3%정도 사용하여 주입현탁액의 점도를 5cps이하로 관리해야 한다. 따라서 본 실험에서는 주입재의 점도를 개선하기 위해서 시멘트 표면에서 반응하여 계면활성작용을 유도하는 멜라민계 분산제를 주입재 총중량의 1~2.5%를 조합별로 적당량 사용하였다. 즉, 콜로이드급 주입재에는 주입재 중량의 1~2%를 사용하였으며, 마이크로급 주입재에는 주입재 중량의 1.5~2.5%를 사용하였다. 이 경우 플라이애쉬 사용량이 증가할수록 계면활성제의 사용량이 증가하였는데 이것은 플라이애쉬에 함유되어있는 미연카본의 영향으로 판단된다.

주입재로서의 특성은 겔타임, B형점도, 침강속도, 침투성, 호모겔강도 등을 측정하였다. 이들 특성은 주입재의 시공성, 유동성, 침투성, 고결성 등과 밀접한 관계가 있으며 각각의 특성치를 측정된 결과는 표 11~13과 같다.

표 11. 겔타임, B형점도 및 침투성

시료	등급	조합	겔타임	B형점도	침투속도
			(sec)	(cps)	(sec)
콜로이드		C7F3	51	3.9	5
		C5F5	67	3.6	4
		C3F7	107	3.7	6
마이크로		C7F3	37	3.4	4
		C5F5	53	3.5	3
		C3F7	94	3.5	2
권장치			30~90	5이하	10이하

표 12. 침강율(침강깊이/실린더높이30cm×100%)

시료	등급	조합	측정시간(분)					
			0	10	20	30	45	60
콜로이드		C7F3	0	3.3	10.0	14.2	20.0	26.7
		C5F5	0	2.8	9.3	13.5	18.9	26.1
		C3F7	0	2.6	8.8	12.8	16.4	25.3
마이크로		C7F3	0	2.2	5.5	7.7	12.9	15.3
		C5F5	0	2.0	5.3	7.5	12.4	14.5
		C3F7	0	2.1	5.5	7.8	12.6	14.6

표 13. 호모겔강도 및 수축변형

시	료	호모겔강도(kg/cm ²)				28일후 수축변형
		1일	3일	7일	28일	
콜로이드	C7F3	6.9	13.1	16.7	10.2	0.1cm
	C5F5	2.5	3.6	4.7	2.5	0.4cm
	C3F7	0.7	0.6	0.7	측불	1.6cm
마이크로	C7F3	6.5	12.7	15.7	10.5	0.1cm
	C5F5	2.4	3.8	4.3	2.7	0.3cm
	C3F7	0.7	0.7	0.8	측불	1.6cm
권장치		1일 재령이후 1이상				-

표 11로부터 플라이애쉬 첨가량이 증가할수록 겔타임이 증가하며 플라이애쉬 첨가량의 한계는 50%정도로 판단된다. 또한, 마이크로급이 콜로이드급에 비해서 침투속도가 다소 빠름을 알 수 있다.

표 12로부터 콜로이드급이 마이크로급보다 입자크기가 크기 때문에 침강속도가 빠름을 알 수 있다.

표 13으로부터 주입재와 물유리가 반응한 고결체는 수중에서 겔의 용탈현상(syneresis)에 의해서 수축변형이 발생한다는 것을 알 수 있다. 그 결과 강도가 저하하고 투수계수가 커지므로 지반보강효과가 급속히 떨어질

수 있다. 이와 같은 고결체의 용탈현상에 의한 내구성 저하를 개선하기 위해서는 경화발현속도가 큰 주입재를 사용하는 것이 효과적이다. 그러나 플라이애쉬와 같은 포졸란재료를 사용하는 경우 장기강도는 향상되지만 초기의 경화발현속도가 현저히 떨어지므로 주입재로 사용할 경우 주의가 필요하다. 따라서 포졸란재료의 사용량에는 한계가 있으며, 혼합한계는 50%정도로 판단된다.

한편, 28일재령 후 수중에서 양생된 호모겔 고결체 시편의 수축변형을 관측한 결과 사진 1과 같았다.

사진 1로부터 플라이애쉬 첨가량이 증가할수록 고결체의 강도가 떨어지기 때문에 용탈현상과 수축에 의한 변형이 크며, 플라이애쉬 첨가량이 50%까지는 비교적 변형이 작음을 알 수 있다.

4. 현탁액 상태조사

슬래그계 주입재의 현탁액은 보통포틀랜드 시멘트에 비해서 약간 밝은 색상을 띠면서 부유물이 전혀 발생하지 않지만 플라이애쉬계 주입재의 현탁액은 표면에 사진 2와 같이 검은 탄소피막이 형성되는 것을 볼 수 있다.

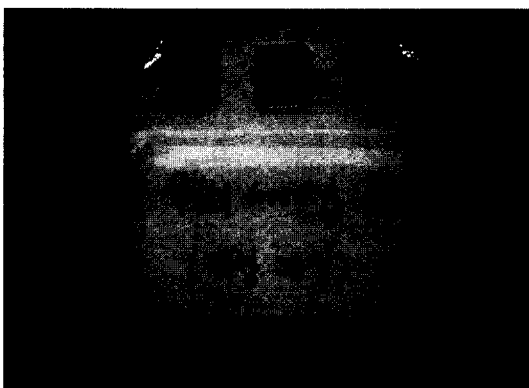


사진 1. 호모겔 고결체의 수축변형 형상 (석탄회 첨가량 50%)



사진 2. 현탁액 표면에 부유한 탄소피막 (석탄회 첨가량 50%)

이 탄소피막은 플라이애쉬에 혼입된 미연 카본이 부유된 것으로 주입재의 고결강도에 는 영향이 없지만 작업자에게 기피감을 줄 수 있고, 특히 현탁액의 점성을 줄이기 위해 서 첨가한 계면활성제를 다량 흡착하여 분산 효과를 떨어뜨리기 때문에 미연카본량이 가 능한 적게 함유된 플라이애쉬를 사용하는 것 이 요망된다.

5. 결 론

일반적으로 초미분말 주입재는 보통포틀랜 드시멘트와 포졸란재료의 혼합계이다. 종래의 초미분말 주입재는 보통 제철공장에서 부산 되는 슬래그미분말을 주재료로 적용하였다. 그러나 본 연구에서는 슬래그미분말과 함께 주요 부산자원의 하나인 석탄화력발전소에서 발생하는 플라이애쉬를 주재료로 적용가능성을 검토하고자 하였으며, 실험결과 다음과 같 은 결론들을 얻을 수 있었다.

- 1) 초미분말 플라이애쉬를 혼합한 혼합시 멘트는 보통시멘트에 비해서 비중이 매우 작고, 플라이애쉬 첨가량이 증가할수 록 응결지연 및 강도하락이 현저하기 때문에 혼합량의 한계가 작았다. 본 연 구의 실험결과 시멘트의 물리적 특성을 고려할 때 플라이애쉬 첨가 한계는 약 50%였다.
- 2) 초미분말 플라이애쉬 혼합시멘트를 주 입재로 적용할 경우 작업성, 침투성 및 고결성 측면에서 모두 적용이 가능함을 알 수 있었다. 그러나, 주입재의 고결체 가 수중에서 용탈현상과 수축에 의한 변형이 최소화 되기 위해서 플라이애쉬 혼합량을 50% 이하로 하는 것이 요망된 다.
- 3) 플라이애쉬가 혼합된 주입재는 미연카 본이 함유되어 현탁액 표면에 탄소피막 이 형성되고, 계면활성제의 소모량이 증 가한다. 따라서, KS규격에서 제안하고

있는 미연탄소 5%이하인 플라이애쉬를 사용할 것을 권장한다.

- 4) 연구를 통해서 화력발전소의 폐기물인 플라이애쉬를 고부가가치 제품인 초미 립자주입재로 적용이 가능함을 확인하 였으며, 국내의 기술여건에서도 폐기플 라이애쉬로 부터 고분말 플라이애쉬를 분리하는 것이 가능하므로 석탄회계 초 미립자 주입재의 실용화가 가능성이 매 우 높을 것으로 사료된다. 다만, 본 연구 에서는 국내에서 발생한 가장 일반적인 플라이애쉬만을 대상으로 사용 하였기 때문에 품질특성 차이가 큰 다른 제품 을 사용할 경우 위 결과가 다소 차이가 날 수 있음을 밝혀둔다.
- 5) 한편, 플라이애쉬계 초미립자 주입재에 대한 시제품을 제조하여 침투성에 대한 평가실험을 통해서 제품의 품질안정성, 주입효과, 경제성 및 시공성등을 평가할 것을 제안한다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 에너지자원기술개발 지원센터의 지원에 의하여 쌍용중앙연구소와 한양대학교 건설연구소 주관으로 수행되었으 며, 이에 감사드리는 바입니다.

참 고 문 헌

1. 천병식(1995), "건설기술자를 위한 地盤注入 工法," 圖技術, pp. 23~29
2. 천병식(1998), "지반공학-이론과실제-", 구미 서관, pp. 687~691
3. 천병식, 김진춘(1997), "지반보강용 마이크로 시멘트 및 실리카졸의 실용화 연구," 건설교 통부 연구개발사업 최종보고서 R&D/95-0084, pp. 82~85
4. 노갑수(1997), "플라이애쉬를 사용한 콘크리 트의 특성," 쌍용양회(주), 콘크리트 기술 세 미나 문집, pp. 1~8

5. 오성원(1997), "석탄회 배출 현황 및 대책," 쌍용양회(주) Fly-Ash 활용 기술 세미나 문집, pp. 63~79
6. 島田俊介 外 2人(1991), "最先端技術の薬液注入工法," pp. 105~127, 理工圖書
7. 草野一人(1992), "薬液注入工法ハンドブック," pp. 63~88, 吉井書店
8. B.S. Chun and J.C. Kim(1997), "A Case on the Improvement of Tunnel Grouting by Using Ultra Fine Cement in Korea," Proceedings of the 1st International Conference on Ground Improvement Techniques, Macau, pp. 149~154
9. B.S. Chun and J.C. Kim(1998), "Groutability of the Microfine Fly Ash Cement", Proceedings of the 2nd International Conference on Ground Improvement Techniques, Singapore, pp. 143~150
10. V.M. Malhotra and A.A. Ramezaniapour (1994), "Fly Ash in Concrete," CANMET, Canada, 2nd Edition, pp. 19~31.
11. William J. Clarke(1997), "Ultrafine Cement Grouting of Dry Joint in Huites Dam, Choix, Mexico," ASCE Geotechnical Special Publication No. 66, pp. 133~146

(접수일자 1998. 9. 1)