

# 다량의 플라이애쉬를 사용한 고유동충진재의 배합설계를 위한 실험적 연구

## An experimental study on mix design for flowable fill with high volume fly ash content

원 종 필\* (건국대) · 신 유 길 (건국대)

Won, Jong-Pil · Shin, You-Gil

### Abstract

This paper presents results of research performed to identify optimum mix proportions for production of flowable fill with high volume fly ash content. The fly ash used in this study met the requirements of KS L 5405 and ASTM C 618 for Class F material. Tests were carried out on concrete designed to have 10~15kg/cm<sup>2</sup> compressive strength at the 28-day age with fly ash contents of approximately 280kg/m<sup>3</sup>. Slump was held at 25±1cm for all mixtures produced compressive strengths at 28 days were found to range from 5.03 to 13.69kg/cm<sup>2</sup>.

### 1. 서론

#### 1.1 연구배경

석탄재의 환경적 문제를 해결하고, 폐기되고 있는 석탄재의 재활용을 위한 노력이 세계적으로 많이 진행되고 있다. 국내의 경우도 석탄 이용 발전소들이 줄어들고 있기는 하나 석탄재의 재활용률이 약 10~15% 정도에 그치며 나머지는 폐기되고 있어 사회적으로 문제화되고 있는 실정이다. 특히, 자원절약과 재활용 촉진에 관한 법률(제30조)에 의하면 산업 부산물인 석탄재를 연도별 재활용 계획에 따라 '98년부터 발생량의 35% 이상을 재활용하도록 규정하였으며, 연도별 재활용 비율은 '95년까지 15%, '97년까지 25%로 증가시켰다. 또한 근래에는 농공 및 공업단지 등에 증기 및 전기를 안정적으로 공급하기 위해 열병합발전소가 단계적으로 건설되고 있어 석탄재의 양이 증가될 전망이어서 이를 재활용하려는 노력이 더욱더 절실히 요구되어지고 있다.

#### 1.2 연구목적 및 범위

본 연구의 목적은 발전소에서 생성되는 석탄재(플라이애쉬)를 이용하여 고유동충진재를 개발, 건설 및 환경산업에 재활용하는 방안을 확보하려 한다. 이를 통해서

1998년도 한국농공학회 학술발표회 논문집 (1998년 10월 24일)

자원재활용을 물론 환경보전, 경제성, 신재료의 개발측면에서 보다 유용한 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 이러한 연구를 위해 국내에서 생산되는 플라이애쉬를 대상으로 배합조건 및 치환율을 다르게 하였을 때의 충전재로서의 유동성, 경시변화 및 강도발현 성상을 비롯한 제역학적 특성을 비교, 분석하여 성능 및 경제적으로 우수한 충전재를 개발하려고 한다.

## 2. 실험개요

### 2.1 사용된 일반재료의 특성

시멘트는 S사의 내수용 보통 포틀랜드시멘트로 품질시험 결과는 [Table 1]과 같다.

[Table 1] Chemical and physical properties of cement

분 말 도 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	비 중	안 정 도 (%)	압 축 강 도 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )		
			3일	7일	28일
3,488	3.15	0.08	224	308	404

잔골재는 강모래를 사용하였으며, 품질시험 결과는 [Table 2]와 같다.

[Table 2] Properties of fine aggregate

비 중			조 립 율	흡 수 율 (%)	단 위 중 량 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
절 건	표 건	겉보기			
2.587	2.604	2.63	2.99	0.67	1,624

### 2.2 플라이애쉬의 특성

본 연구에서 사용된 B화력발전소의 플라이애쉬에 대한 물리·화학적 특성을 분석한 결과는 [Table 3] 및 [Table 4]와 같다.

[Table 3] Physical properties of fly ash

구 분 \ 특 성	비 중	분 말 도 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	습 분 (%)	강 열 감 량 (%)
B화력발전소	2.34	3,700	0.13	3.07
KS L 5405	1.95 이상	2,400 이상	1.0 이하	6.0 이하
ASTM C 618	-	45 $\mu\text{m}$ 잔류량 34% 이하	5.0 이하	6.0 이하

[Table 4] Chemical properties of fly ash (단위:%)

구 분 \ 화 학 성 분	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
B화력발전소	52.00	27.01	3.93	7.85	1.92	0.58	0.13
KS L 5405	70.0 이상			-	5.0 이하	1.5 이하	5.0 이하
ASTM C 618 (F급)	70.0 이상			-	-	1.5 이하	5.0 이하

### 2.3 실험방법 및 변수

#### 2.3.1 실험방법

고유동충진재의 특성을 알기 위해 압축강도(KS L 5105), 슬럼프(KS F 2402), 공기량(KS F 2421), 단위중량(KS F 2409) 실험이 실시되었다. 배합설계에서 플라이애쉬 치환방법은 예비실험의 경우 통계기법인 2<sup>3</sup> 요인배치법을 사용하였으며, 예비실험의 결과를 분석한 후 최적배합설계를 위해 통계학의 최적화 방법인 반응표면분석법을 적용하였다. 한편, 본 연구의 목표 설계기준강도는 충진재의 굴착성을 고려한 10~15kg/cm<sup>2</sup> 정도, W/C+F는 0.9~1.1 정도, 목표슬럼프는 자가충진성을 고려하여 25±1cm로 결정하였으며, 충진재의 배합방법은 선-페이스트 방법을 택하였고, 배합시간은 전체 2분으로 하였다.

#### 2.3.2 실험변수

다량의 플라이애쉬를 사용한 고유동충진재의 최적배합설계를 위한 실험계획은 [Table 5]와 같다.

[Table 5] Factorial Design of experiments (단위:kg/m<sup>3</sup>)

예비 실험			본 실험				
인자	수준	최 저	최 고	인자	수준	최 저	최 고
시멘트		40	50	시멘트		50	70
플라이애쉬		200	240	플라이애쉬		240	280
모래		1400	1600	모래		1400	
물		319		물		319	

### 3. 실험결과 및 고찰

고유동충진재의 예비실험 결과 및 상관관계를 분석한 결과는 [Table 6] 및 [Table

7]과 같다. 실험결과는 각 배합을 2회 반복하여 실험을 실시한 평균치로 나타내었으며, 압축강도는 각 배합마다 3개의 공시체를 제작하여 측정된 값의 평균치로 나타내었다.

[Table 6] Pretest results

No.	시멘트 (kg/m <sup>3</sup> )	Fly ash (kg/m <sup>3</sup> )	모래 (kg/m <sup>3</sup> )	물 (kg/m <sup>3</sup> )	28일 압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )
1	40	240	1400	319	3.78	24.6	1	1.915
2	50	200	1600		7.75	17	2.6	1.922
3	50	240	1600		6.24	20.4	1.65	1.945
4	50	200	1400		7.84	20.3	1.05	1.967
5	40	200	1400		4.05	21.2	0.75	1.945
6	40	240	1600		4.93	22.5	2.1	1.945
7	50	240	1400		9.4	25.7	0.65	1.932
8	40	200	1600		3.78	17.7	1.6	1.947

[Table 7] Correlations between different material properties

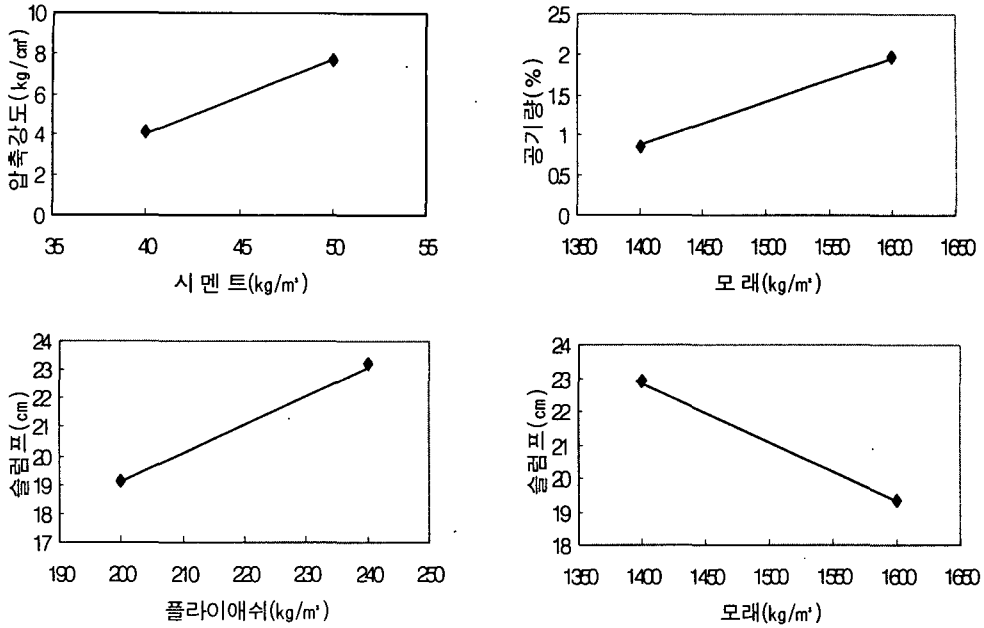
		압축강도	슬럼프	공기량	단위중량
상관계수	시멘트	.906**	-.114	.097	.115
	애쉬	.057	.746**	-.117	-.360
	모래	-.146	-.624*	.876**	.000
유의확률 (한쪽)	시멘트	.001	.394	.409	.393
	애쉬	.446	.017	.391	.190
	모래	.365	.049	.002	.500

\* 밀접한 관계, \*\* 매우 밀접한 관계,  $\alpha=0.05$  기준

[Table 7]의 압축강도는 시멘트, 공기량은 모래와 상관관계가 높았으며, 슬럼프는 플라이애쉬 및 모래와 상관관계가 높았는데, 이는 통계적으로 5%에서 유의함을 보여준다. 그리고 단위중량의 경우에는 특별히 영향을 받는 인자가 없었는데, 플라이애쉬와의 상관관계가 다른 인자들에 비해 다소 높았다. 이러한 예비실험의 결과를 바탕으로 설계기준강도와 목표슬럼프를 얻기 위한 본 실험이 이루어졌는데, 물과 모래인자를 고정시키고 실험결과에 많은 영향을 미친 시멘트와 플라이애쉬의 양을 조정하여 최적화를 시도하였다. 한편, 고유동충진재의 압축강도, 공기량, 그리고 슬럼프에 대한 세 가지 인자들의 영향을 통계적으로 분석한 경향은 다음의 [Fig. 1]에서 보여준다.

본 실험의 결과는 [Table 8] 및 [Table 9]와 같다. 표에서 배합 1, 7, 10, 11, 12가 설계기준강도와 목표슬럼프 값을 만족하였고, 공기량은 다량의 플라이애쉬 사용으로 상당히 낮았으며 상관계수도 높았다. 아울러 요인분석결과 플라이애쉬가 단위중량을 다소 감소시키는 것으로 나타났다. 고유동충진재의 설계기준강도 10~15kg/cm<sup>2</sup>은 장래에 언제든지 굴착이 가능하며, 슬럼프 25±1 정도는 다짐이 필요없

어 다짐이 어려운 시공지역에서 용이한 타설이 가능하다. 이는 굴착으로 인한 주변 시설물의 안전을 고려한 지하시설물의 충전, 파이프 하부충전, 지하수의 오염을 방지하기 위한 폐공의 충전, 그리고 폐광 등의 충전에 효과적으로 사용이 가능하다.



[Fig. 1] Trends in Test Results

[Table 8] Primary test results

No.	시멘트 (kg/m <sup>3</sup> )	Fly ash (kg/m <sup>3</sup> )	모래 (kg/m <sup>3</sup> )	물 (kg/m <sup>3</sup> )	28일 압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )
1	60	288	1400	319	12.8	26	0.35	2.11
2	50	240			6.44	24	0.34	2.12
3	50	280			5.24	25.5	0.3	2.095
4	60	260			6.95	24.2	0.39	2.1
5	60	260			7.96	24.7	0.4	2.097
6	60	260			7.91	25	0.35	2.119
7	70	240			10.56	25.3	0.4	2.118
8	60	232			7.43	24.2	0.45	2.093
9	46	260			5.03	25	0.4	2.092
10	60	260			10.47	25.1	0.37	2.098
11	74	260			13.27	25.8	0.35	2.12
12	70	280			13.69	26.2	0.2	2.09
13	60	260			8.79	25	0.35	2.095

[Table 9] Correlations between different material properties

		압축강도			슬럼프	공기량	단위중량
		7일	14일	28일			
상관계수	시멘트	.769**	.828**	.837**	.463	-.187	.280
	애쉬	.393	.332	.329	.731**	-.644*	-.249
유의확률 (한쪽)	시멘트	.001	.000	.000	.056	.270	.177
	애쉬	.092	.134	.136	.002	.009	.206

\* 밀접한 관계, \*\* 매우 밀접한 관계,  $\alpha=0.05$  기준

#### 4. 결론

다량의 플라이애쉬를 사용한 고유동충진재의 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 일반적으로 물/결합재 비가 증가할수록 압축강도는 감소한다. 시멘트 성분은 사용된 플라이애쉬가 자체에 매우 낮은 자경성을 가지고 있으므로 배합에 중요한 영향을 미친다.
- (2) 다량의 플라이애쉬를 포함한 저강도 고유동충진재는 현재 시판되고 있는 F급 플라이애쉬로 생산이 가능하고, 시공에 성공적으로 이용될 수 있다.
- (3) 반응표면분석 기법을 이용한 최적화 결과 장래의 굴착성을 고려한 설계기준강도  $10\sim 15\text{kg/cm}^2$ , 목표슬럼프  $25\pm 1\text{cm}$ 를 만족하는 시멘트와 플라이애쉬 양은 각각  $63\sim 70\text{kg/m}^3$ ,  $260\sim 280\text{kg/m}^3$ 인데, 그 중에서도 전체 고유동충진재의 비용을 최소로 할 수 있는 가장 좋은 배합은 시멘트  $60\text{kg/m}^3$ , 플라이애쉬  $280\text{kg/m}^3$ , 모래  $1400\text{kg/m}^3$ , 물  $319\text{kg/m}^3$  이었다.

본 논문은 1997년도 건국대학교 지원에 의한 논문임.

#### 《참고문헌》

- (1) ASTM C 618, Standard Specification for Fly ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete.
- (2) Controlled Low Strength Materials, Report by ACI Committee 229, Concrete International, pp. 55~64, July, 1994.
- (3) Optimization of Flowable Mix Proportions, M.E.Ayers, S.Z.Wong, and W.Zaman, pp. 15~37, SP 150, American Concrete Institute, Detroit, 1994