

다량의 플라이애쉬를 사용한 유동성 시멘트복합체의 특성

Properties of Flowable High-volume Fly Ash-Cement Composites

원 종 필* 신 유 길** 안 태 송***
Won, Jong-Pil Shin, You-Gil Ahn, Tae Song

ABSTRACT

The purpose of this study was to examine the uses of fly ash as a type of construction material. In this paper the results from a recent study on development of a cement composite utilizing relatively large amount of fly ash are presented. The flowable fly ash-cement sand composite was investigated for strength and flowability characteristics. The independent variable considered were: fly-ash content, sand content, and ratio of water to cementitious materials. Results of this study show that high volume fly-ash composite can be proportioned to obtain 10~15kg/cm² compressive strength at 28 days. For applications requiring strengths between 10kg/cm² and 15kg/cm², the mixture with fly ash-cement ratio of 5.6 and sand-cement ratio of 28 with relatively high water content may be used. Slump was held at 25±1cm for all mixtures produced compressive strengths at 28 days were found to range from 5kg/cm² to 13.7kg/cm².

1. 서론

플라이애쉬를 주성분으로 하는 유동성 플라이애쉬-시멘트 복합체는 주로 압밀이 필요한 충전재를 대신해 사용하는 자가다짐이 되는 결합성 재료이다. 콘크리트의 품질저하가 재료적인 결합보다는 시공상의 문제에서 기인한다는 점에서 착안하여, 저장도의 비구조적인 충전분야에 적용하기 위해 연구되고 있다. 유동성 플라이애쉬-시멘트 복합체는 기본적으로 적은 양의 포틀랜드시멘트를 포함한 안정된 플라이애쉬이다. 유동성 플라이애쉬-시멘트 복합체는 충전재료용으로 개발되었기에, 구조용 충전재에 비해 뛰어난 물리적인 특성을 가지고 있고 일반적으로 충전재에 요구되는 경제성을 가지고 있다.

재래의 충전재들에 비해 유동성 플라이애쉬-시멘트 복합체가 가지는 2가지 주된 이점은 용이한 타설과 간편한 해체이다. 그러므로 다짐이 어려운 지역이나 시공이 문제인 지역에서는 유동성 플라이애쉬-시멘트 복합체가 고려될 수 있다. 그리고 포틀랜드시멘트 사용비율에 따라 83kg/cm² 이하의 강도를 발현한다. 이러한 강도는 자연상태 흙의 강도를 증가하는 것으로 충진을 통해 주변재료 보다 높은 강도를 만들어 줄 수 있다. 그러나, 유동성 플라이애쉬-시멘트 복합체의 강도가 주변재료 보다 큼에도 불구하고 장래에 필요할 때면 재래적인 방법들로 언제나 굴착이 가능하다.

* 정희원, 건국대학교 농공학과 조교수

** 건국대학교 농공학과 대학원

*** 정희원, 한국도로공사 도로연구소 재료연구실장

1.2 연구배경 및 목적

현재 국내의 화력발전소에서 부산되는 플라이애쉬는 연간 막대한 양이 발생하고 있는 실정으로서, 이러한 산업부산물을 이용한 물리적·역학적 성질이 우수한 고유동 플라이애쉬-시멘트 복합체의 개발 및 활용은 폐자원의 유효이용과 국내의 건설산업의 발전에 크게 기여할 것으로 기대된다. 따라서 본 연구에서는 산업부산물인 플라이애쉬를 사용한 고유동 플라이애쉬-시멘트 복합체를 제조하여 그 특성에 관한 기초적 연구를 수행하였다.

2 실험재료 및 방법

2.1 사용된 일반재료의 특성

시멘트는 S사의 보통 포틀랜드시멘트로 품질시험 결과는 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical and physical properties of cement

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

잔골재는 강모래를 사용하였으며, 품질시험 결과는 Table 2와 같다.

Table 2 Properties of fine aggregate

비 중			조 립 율	흡 수 율 (%)	단 위 중 량 (kg/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 4와 같다.

Table 3 Physical properties of fly ash

구 분 \ 특 성	비 중	분 말 도 (cm^2/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 μm 잔류량 34% 이하	5.0 이하	6.0 이하

Table 4 Chemical properties of fly ash

(단위:%)

구 분	화 학 성 분						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃
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

고유동 플라이애쉬-시멘트 복합체의 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 요인배치법을 사용하였는데, 실험변수는 시멘트, 플라이애쉬, 모래로 잡았다. 예비실험의 결과를 분석한 후 최적배합설계를 위해 통계학의 최적화 방법인 반응표면분석법을 적용하였다. 한편, 본 연구의 목표 설계기준강도는 충전재의 굴착성을 고려한 10~15kg/cm² 정도, W/C+F는 0.9~1.1 정도, 목표슬럼프는 자가충진성을 고려하여 25±1cm로 결정하였으며, 충전재의 배합방법은 선-페이스트 방법을 택하였고, 배합시간은 전체 2분으로 하였다.

2.3.2 실험변수

다량의 플라이애쉬를 사용한 고유동 플라이애쉬-시멘트 복합체의 최적배합설계를 위한 실험계획은 Table 5와 같다.

Table 5 Factorial Design of experiments

(단위:kg/m³)

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

고유동 플라이애쉬-시멘트 복합체의 예비실험 결과 및 각 인자와의 상관관계를 분석한 결과는 Table 6 및 Table 7과 같다. 실험결과는 각 배합을 2회 반복하여 실험을 실시한 평균치로 나타내었고, 압축강도는 각 배합마다 3개의 공시체를 제작하여 측정된 값의 평균치로 나타냈으며 슬럼프, 공기량, 단위중량은 2회 시험의 평균치로 나타내었다.

Table 6 Pretest results

No.	시멘트 (kg/m ³)	Fly ash (kg/m ³)	모래 (kg/m ³)	물 (kg/m ³)	28일 압축강도 (kg/cm ²)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	단위중량 (kg/m ³)
1	40	240	1400	319	3.78 (0.24)	24.6	1	1,915
2	50	200	1600		7.75 (0.14)	17	2.6	1,922
3	50	240	1600		6.24 (0.21)	20.4	1.65	1,945
4	50	200	1400		7.84 (0.18)	20.3	1.05	1,967
5	40	200	1400		4.05 (0.13)	21.2	0.75	1,945
6	40	240	1600		4.93 (0.53)	22.5	2.1	1,945
7	50	240	1400		9.40 (0.25)	25.7	0.65	1,932
8	40	200	1600		3.78 (0.12)	17.7	1.6	1,947

() : Standard deviation

Table 7 Correlations between different material properties

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

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

Table 7의 압축강도는 시멘트, 슬럼프는 플라이애쉬 및 모래와 상관관계가 높았으며 공기량은 모래와 상관관계가 높았다. 그리고 단위중량의 경우에는 플라이애쉬와 약간의 상관관계가 있었다. 이러한 예비실험의 결과를 바탕으로 설계기준강도와 목표슬럼프를 얻기 위한 본 실험이 이루어졌는데, 물과 모래인자를 고정시키고 실험결과에 많은 영향을 미친 시멘트와 플라이애쉬의 양을 조정하여 최적화를 시도하였다.

본 실험의 결과는 Table 8 및 Table 9와 같다. 표에서 배합 1, 7, 10, 11, 12가 설계기준강도와 목표 슬럼프 값을 만족하였고, 공기량은 다량의 플라이애쉬 사용으로 상당히 낮았으며 플라이애쉬는 단위중량을 다소 감소시키는 것으로 나타났다. 본 연구에서 고려된 고유동 플라이애쉬-시멘트 복합체의 설계기준강도 10~15kg/cm²은 장래에 언제든지 굴착이 가능하며, 슬럼프 25±1 정도는 다짐이 필요없어 다짐이 어려운 시공지역에서 용이한 타설이 가능하다. 이는 굴착으로 인한 주변시설물의 안전을 고려한 지하시설물의 충전, 파이프 하부충진, 지하수의 오염을 방지하기 위한 폐공의 충전, 그리고 폐광 등의 충전에 효과적으로 사용이 가능하다.

Table 8 Primary test results

No.	시멘트 (kg/m ³)	Fly ash (kg/m ³)	모래 (kg/m ³)	물 (kg/m ³)	28일 압축강도 (kg/cm ²)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	단위중량 (kg/m ³)
1	60	288	1400	319	12.8 (0.21)	26	0.35	2,11
2	50	240			6.44 (0.29)	24	0.34	2,12
3	50	280			5.24 (0.12)	25.5	0.3	2,095
4	60	260			6.95 (0.13)	24.2	0.39	2,1
5	60	260			7.96 (0.14)	24.7	0.4	2,097
6	60	260			7.91 (0.22)	25	0.35	2,119
7	70	240			10.56 (0.79)	25.3	0.4	2,118
8	60	232			7.43 (0.32)	24.2	0.45	2,093
9	46	260			5.03 (0.34)	25	0.4	2,092
10	60	260			10.47 (1.15)	25.1	0.37	2,098
11	74	260			13.27 (0.46)	25.8	0.35	2,12
12	70	280			13.69 (1.04)	26.2	0.2	2,09
13	60	260			8.79 (0.27)	25	0.35	2,095

() : Standard deviation

Table 9 Correlations between different material properties

		압축강도	슬럼프	공기량	단위중량
상관계수	시멘트	.837**	.463	-.187	.280
	플라이애쉬	.329	.731**	-.644*	-.249
유의확률 (한쪽)	시멘트	.000	.056	.270	.177
	플라이애쉬	.136	.002	.009	.206

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

4. 결론

다량의 플라이애쉬를 사용한 고유동 플라이애쉬-시멘트 복합체의 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 일반적으로 W/C비가 낮고, 플라이애쉬와 모래의 양이 감소할수록 압축강도는 증가하였으며, 시멘트 성분은 사용된 플라이애쉬가 자체에 매우 낮은 자경성(自硬性)을 가지고 있으므로 배합에 중요한 영향을 미친다.
- (2) 다량의 플라이애쉬를 포함한 저강도의 고유동 플라이애쉬-시멘트 복합체는 현재 시판되고 있는 F급 플라이애쉬로 생산이 가능하였으며, 비구조적 충전재로 사용 가능한 높은 슬럼프 및 10kg/cm² 내외의 재령 28일 압축강도를 발현하였다.
- (3) 반응표면분석 기법을 이용한 최적화 결과에서 장래의 굴착성을 고려한 설계기준강도 10~15kg/cm², 목표슬럼프 25±1cm를 만족하는 시멘트와 플라이애쉬 양은 각각 63~70kg/m³, 260~

280kg/m³인데, 그 중에서도 전체 고유동 플라이애쉬-시멘트 복합체의 비용을 최소로 할 수 있는 가장 좋은 배합은 시멘트 60kg/m³, 플라이애쉬 280kg/m³, 모래 1400kg/m³, 물 319kg/m³ 이었다.

《참고문헌》

- (1) Mix Design for Flowable Fly-Ash Backfill Material, R.Junardhanam, F.Burns, R.D.Peindl, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.4, No.3, pp. 252~263 August(1992).
- (2) ASTM C 618, Standard Specification for Fly ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete.
- (3) Filling Abandoned Underground Facilities with CLSM Fly Ash Slurry, Tarun R.Naik, Bruce W.Ramme, and Henry J.Kolbeck, Concrete International, pp. 19~25, July(1990).
- (4) Controlled Low Strength Materials, Report by ACI Committee 229, Concrete International, pp. 55~64, July(1994).
- (5) Optimization of Flowable Mix Proportions, M.E.Ayers, S.Z.Wong, and W.Zaman, SP 150, pp. 15~37, American Concrete Institute, Detroit. (1994)