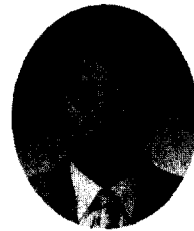

주물공장 플라이애쉬를 혼화재로 사용한 콘크리트의 기초적 성질

Fundamental Properties of Concrete Using
Casting Foundry Fly Ash as an Admixture



김희성*

Kim, Hee-Sung



진치섭**

Jin, Chi-Sub

ABSTRACT

Disposal of casting foundry fly ash generally depends on reclamation up to the present. This is the great loss from a standpoint of saving resources and utilizing industrial wastes. Therefore, a study on the reuse of fly ash as a substitute material for construction is necessary in order to utilize industrial wastes, to reduce cost and improve quality in producing concrete products, and to protect environment from pollution.

In this study, methods for the reuse of the casting foundry fly ash, industrial wastes products, as an admixture for concrete are discussed. For this purpose, fly ash was extracted from casting foundry and tests of physical and chemical properties are executed. Also, various characteristics of concrete using fly ash as an admixture are experimented. Finally, the reuse methods for casting foundry fly ash are presented.

Keywords : casting foundry, fly ash, reuse, industrial wastes, admixture, concrete

* 정회원, 부산대학교 생산기술연구소 전임연구원

** 정회원, 부산대학교 공과대학 토목공학과 교수

· 본 논문에 대한 토의를 2000년 10월 31일까지 확회로 보내주시면 2000년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근 산업이 발전함에 따라 산업폐기물의 양이 점차 증가하고 있으며, 이로 인하여 폐기물의 처리 비용이 증가되고, 환경오염, 매립부지 곤란 등 심각한 사회적 문제를 야기하고 있다.

특히, 사회적·경제적으로 많은 문제가 되고 있는 석탄화 및 화력발전소 플라이애쉬와 같은 산업부산물의 활용을 위한 연구는 지속적으로 진행되고 있지만, 주물공장에서 배출되는 플라이애쉬의 재활용에 대한 연구는 전무한 실정이다⁽¹⁾.

주물공장 플라이애쉬는 주물사의 재생과정 중 발생하는 데 이 또한 상당히 많은 양이 배출된다. 주물공장에서 발생하는 플라이애쉬량은 관련업계의 자체조사에 의하면 1992년을 기준으로 전국 543개소 주물공장에서 연간 12만~18만톤이 발생하나, 그 전부가 매립에 의존하고 있다. 따라서 폐자원의 유효활용 및 환경보호의 측면에서 플라이애쉬를 시멘트 제품예의 원료 및 콘크리트용 혼화재료로 사용할 수 있도록 이에 대한 연구와 관련법규가 절실히 필요하다.

본 연구의 목적은 실험을 통해 주물공장에서 발생하는 플라이애쉬를 재처리 과정을 거쳐 건설 산업에 재활용하는 방안을 수립하는 데 있다. 본 연구에서는 경남 진해시 남양동 소재 Y금속에서 발생하는 폐주물사를 채취하여, 폐주물사 재생공장인 D사에서 재생하는 중 발생하는 플라이애쉬를 사용하였다. 실험에 사용되는 플라이애쉬의 건설산업용 소재로의 적합성 여부를 평가하기 위하여, 주물공장 플라이애쉬 및 현재 콘크리트용 혼화재료로 사용되고 있는 화력발전소 플라이애쉬를 대상으로 물리·화학적 실험을 실시하였고, 콘크리트를 제작하여 이에 대한 기초적 성질을 실

험적으로 규명하였다.

2. 주물공장 플라이애쉬의 성질

2.1 주물공장 플라이애쉬의 재처리

주물공장 플라이애쉬는 주물사 재생과정 중 회전로에서 가열속도 5℃/min, 연소온도 680℃~700℃로 3시간 소성하는 동안 발생된다. 플라이애쉬 성 중의 탄소성분은 콘크리트 중의 공기량에 영향을 미쳐 압축강도를 저하시키며, 검은 색깔을 띠고 무게가 가벼워 블리딩 및 진동에 의해 탄소가 표면으로 모여 콘크리트 표면에 반점을 만들기도 하여 미관을 해친다. 또한, 유기혼화제를 흡수하므로 그만큼 더 많은 혼화제를 사용하게 되어 경비상승의 요인이 되고, 탄소 함량이 많을수록 사용수량을 증가시키는 등 콘크리트에 대단히 해로운 물질이다. 따라서 소성된 플라이애쉬의 탄소성분 유무를 반드시 확인하여 혼화재료로의 사용여부를 결정하여야 한다.

2.2 주물공장 플라이애쉬의 물리적 성질

주물공장 플라이애쉬의 표면형상을 조사하기 위해, 이온 코팅기(JEOL, JFC-1100E)와 전자현미경 카메라(SEM : JEOL, JSM-5400)를 사용하여 화력발전소 플라이애쉬와 비교·촬영한 것을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 주물공장 플라이애쉬의 입형은 화력발전소 플라이애쉬 보다는 다소 각이 진 형상이다. 이는 화력발전소 플라이애쉬의 경우, 석탄의 연소온도가 1,000~1,500℃ 정도로 용융상태에서 플라이애쉬가 구형으로 생성되는 반면, 앞에서 언급한 바와 같이

Table 1 Physical properties of fly ash

Classification	Unit ratio of water (%)	Compressive strength ratio (%)	Specific gravity	Blaine (cm ² /g)	Ignition Loss	Moisture (%)
Casting foundry fly ash	94.3	79.0	2.73	3,269	2.7	0.2
Steam power plant fly ash	93.2	116.2	2.31	3,186	4.9	0.1
KS L 5405	under 102	over 60 (at 28 days)	over 1.95	over 2,400	under 5	under 1



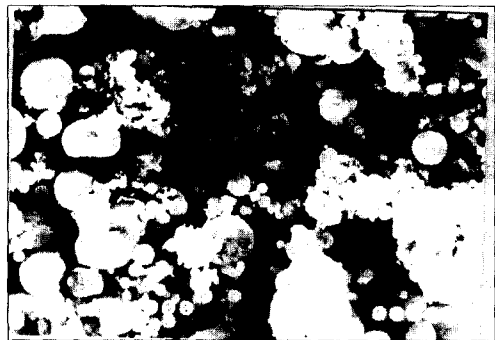
(a) casting foundry fly ash ($\times 200$)



(b) casting foundry fly ash ($\times 1000$)



(c) steam power plant fly ash ($\times 200$)



(d) steam power plant fly ash ($\times 1000$)

Fig. 1 SEM photographs of (a,b) casting foundry fly ash and (c,d) steam power plant fly ash.

주물공장 플라이애쉬의 경우에는 주물사를 재생하는 과정에서 연소온도를 $680\sim 700^{\circ}\text{C}$ 범위로 조정하였기 때문에 플라이애쉬의 입형이 용융상태에 도달하지 못하고 생성되어 불규칙한 것으로 판단된다. 따라서, 주물공장 플라이애쉬는 화력발전소 플라이애쉬에 비하여 불-베어링 효과가 다소 낮을 것으로 예상되어 시공성 확보 및 블리딩, 재료분리 등에 주의해야 할 것으로 판단된다. 한편, 입자크기는 집진기 종류나 발전소 가동상태에 따라 다른 데 일반적으로 입자크기의 범위는 $1\ \mu\text{m}\sim 100\ \mu\text{m}$ 정도 범위로 판단되었다. 플라이애쉬의 색상을 비교해 보면 주물공장 플라이애쉬가 화력발전소 플라이애쉬에 비하여 검정색에 가까운 것으로 판명되었다.

플라이애쉬의 물리적 특성은 Table 1과 같다. Table에서 알 수 있듯이 주물공장 플라이애쉬는 비중과 분말도 및 강열감량, 습분의 양이 KS L 5405 규정치에 적합한 것으로 측정되었다⁽²⁾. 연소온도가 낮음에도 불구하고 화력발전소 플라이

애쉬에 비하여 주물공장 플라이애쉬의 강열감량이 낮게 나타난 것은 플라이애쉬 속에 포함된 물(H_2O)과 탄산가스(CO_2)의 양이 작다는 것을 나타낸다. 분말도가 높게 측정된 것은 콘크리트의 워커빌리티에 영향을 주어 동일한 단위수량 및 물/시멘트비에 대하여 화력발전소 플라이애쉬보다 워커블한 콘크리트를 제작할 수 있게 된다.

2.3 플라이애쉬의 화학성분

본 연구에서 사용된 주물공장 플라이애쉬의 화학성분을 한국전자재시험연구소에 의뢰하여 분석한 결과는 Table 2와 같고, 각각의 화학성분은 KS L 5405에 규정된 값들을 모두 만족하고 있었다⁽³⁾. Table 2에서와 같이, 주물공장 플라이애쉬는 포졸란반응성 광물인 SiO_2 와 활용가능한 알칼리(Na_2O) 및 MnO , K_2O 의 함량이 화력발전소 플라이애쉬보다 높은 반면, Al_2O_3 및 Fe_2O_3 , CaO 의 함량은 낮게 측정되었다. ASTM 규정에

Table 2 Chemical compositions of fly ash

Item	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	MnO	CaO	K ₂ O	SO ₃
Casting foundry fly ash	84.7	6.30	3.52	0.38	0.06	0.26	0.72	1.41	tr
Steam power plant fly ash	49.0	36.60	4.40	0.20	0.06	0.19	2.87	0.97	0.97
KS L 5405	over 45	-	-	-	-	-	-	-	-
ASTM C618 (F)	over 70			under 1.5					under 5.0
ASTM C618 (C)	over 50			under 1.5					under 5.0

의한 F급 플라이애쉬는 SiO₂가 많고 CaO가 5% 이하로 적기 때문에 자경성이 없을 뿐 아니라 유기물 및 불연탄소의 성분이 남아 있으나, C급 플라이애쉬는 CaO가 15~30%로 많고 SiO₂가 상대적으로 적기 때문에 시멘트와 유사한 수경성을 나타낸다⁽⁴⁾. 이러한 화학성분의 차이는 수화반응 및 포졸란반응에서 서로 다른 메카니즘을 갖게 된다. 화학성분상의 조성으로 볼 때 주물공장 플라이애쉬는 국내의 대부분의 화력발전소에서 발생되는 플라이애쉬와 같이 F급에 속한다.

플라이애쉬의 물리적 성질이 콘크리트에 미치는 영향은 균지 않은 콘크리트에서 현저한 반면, 화학성분은 콘크리트의 강도와 화학저항성 등 경화된 콘크리트의 성질에 더욱 영향을 주는 것으로 알려져 있다.

3. 사용재료 및 시험방법

3.1 사용재료

본 연구에서는 주물공장 플라이애쉬를 콘크리트용 혼화재료로 활용함에 있어, 시멘트 대체재료의 적합성 여부를 판단하기 위하여, 시멘트 용적의 10%~50%까지 대체하여 콘크리트를 제작하고 균지않은 콘크리트 및 경화된 콘크리트의 제

Table 4 Admixture specification

AE water reducing agent	Recommended dosage	Main ingredient	Appearance
Standard Pozzolith No.84-K	C×0.2%	Ligno-sulfonate	Dark brown liquid

반 특성을 파악하였다.

콘크리트 제작에 사용된 잔골재는 합천사, 굵은골재는 쇠석골재이며, 시멘트는 내수용 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 골재의 물리적 성질은 Table 3과 같다.

플라이애쉬를 대체 사용함에 따라 초기강도 저하를 방지하기 위하여 AE감수제를 사용하였다. AE감수제를 사용함으로써 응결시간이 다소 지연되는 점도 있으나, 미세 기포에 의해 시멘트 입자를 분산시킴으로써 소요의 워커빌리티를 얻는데 필요한 단위수량이 대폭 감소된다. 본 연구에서 사용한 혼화재료인 AE감수제의 사양은 Table 4와 같다.

3.2 시험방법

콘크리트를 제작하기 위하여 AE감수제 사용 유무에 따라 각각 플라이애쉬를 시멘트 용적의

Table 3 Physical properties of aggregate for concrete

Item	Specific gravity	Absorption (%)	Finess modulus (FM)	Surface moisture (%)	Unit weight (kg/m ³)	Soundness (%)	Abrasion (%)	Material Finer than 0.08mm (%)
Fine aggregate	2.58	1.420	3.09	2.94	1,429	6.40	-	1.800
Coarse aggregate	2.95	1.189	6.85	0.60	1,465	7.10	11.5	0.296

Table 5 Mix proportions

Classification	f_{ck} (kgf/cm^2)	G_{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	Slump (cm)	Air content (%)	Unit Weight (kg/m^3)				AE Water reducing agent (g/m^3)
							W	C	S	G	
Ordinary concrete	280	20	50	51	8	2.0	183	368	898	979	0
AE concrete	280	20	45	41	8	6.0	146	324	790	1188	65

Table 6 Unit weight of cement and fly ash
(unit : kg/m^3)

Classification	Ordinary concrete				AE concrete			
	C	CF	C	SP	C	CF	C	SP
Replacement ratio (%)								
0	368	0	368	0	324	0	324	0
10	331	32	331	27	292	28	292	24
20	294	64	294	54	259	56	259	48
30	258	96	258	81	227	84	227	71
40	221	128	221	108	194	112	194	95
50	184	159	184	135	162	140	162	119

10~50% 수준으로 시멘트를 대체하여 사용하였다. 콘크리트 제작은 공칭용량 60리터의 강제식 믹서를 사용하였고, 압축강도 시험용 공시체는 $\phi 10 \times 20$ cm 원주형 몰드를 사용하여 봉다짐 방법으로 KS F 2403에 따라 제작하였다⁽⁴⁾. 실험에 사용된 콘크리트의 배합표는 Table 5와 같다⁽⁵⁾. 또한, 시멘트를 대체하여 사용되는 주물공장 플라이애쉬(CF) 및 화력발전소 플라이애쉬(SP)의 단위량은 Table 6과 같다. 표에서 f_{ck} 는 콘크리트의 설계기준강도, G_{max} 는 굵은골재 최대치수, W/C는 물/시멘트비, s/a는 잔골재율이며, W, C, S, G는 각각 단위수량, 시멘트량, 잔골재량, 굵은골재량이다.

공시체는 제작 후 24시간만에 탈형하여 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 온도의 수조에서 시험 직전까지 수중양생하였다⁽⁶⁾.

4. 시험 결과 및 고찰

4.1 콘크리트의 슬럼프 및 공기량 특성

굳지 않은 콘크리트의 특성을 파악하기 위하여 슬럼프와 공기량을 측정하였다^(7,8). 슬럼프 및 공기량은 워커빌리티에 큰 영향을 미치며 또 내구성, 강도 등에도 영향을 주므로 콘크리트 제작을 위한 배합 설계시 중요한 파라미터로 작용하여야에 대한 관리는 중요한 사항이다.

플라이애쉬 대체율에 따른 콘크리트의 슬럼프 및 공기량과의 관계를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다.

4.1.1 AE감수제를 사용하지 않은 콘크리트

Fig. 2에서 알 수 있듯이 주물공장(CF) 및 화력발전소(SP) 플라이애쉬를 20~30% 대체하였을 때, 플라이애쉬의 윤택 작용에 의하여 가장 좋은 슬럼프를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 30% 이상 대체하였을 경우에는 플라이애쉬의 응집과 수분 흡착에 따라 슬럼프가 감소하여 작업성을 저하시키게 된다.

콘크리트 공기량은 플라이애쉬 대체율이 증가할수록 감소하였으나 그 변화는 크지 않았다. 플라이애쉬 대체율이 증가함에 따라 플라이애쉬의

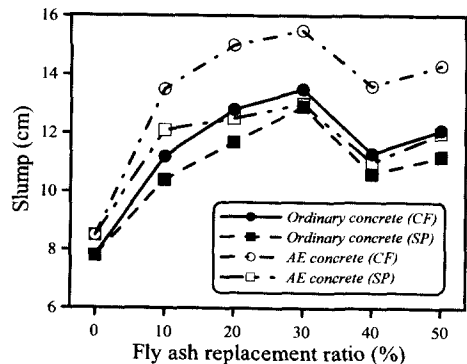


Fig. 2 Effect of fly ash replacement ratio on slump values

응집현상이 증가하여 플라이애쉬가 수화반응에 필요한 물을 부분적으로 흡착하게 되고, 콘크리트 내부의 자유수가 감소하고 연행공기 또한 감소하는 것으로 판단된다.

4.1.2 AE감수제를 사용한 콘크리트

Fig. 3에서 알 수 있듯이 플라이애쉬 대체율에 따른 슬럼프 및 공기량의 전체적인 경향은 AE감수제를 사용하지 않은 콘크리트의 경우와 유사하다. 플라이애쉬 대체율이 증가함에 따라 공기량이 감소하고 있으며, 다량의 플라이애쉬 대체 사용시 워커빌리티를 만족시키기 위하여 AE감수제 사용량이 증가되므로 20~30% 범위를 한도로 플라이애쉬 대체 사용량을 제한하여야 한다고 판단된다.

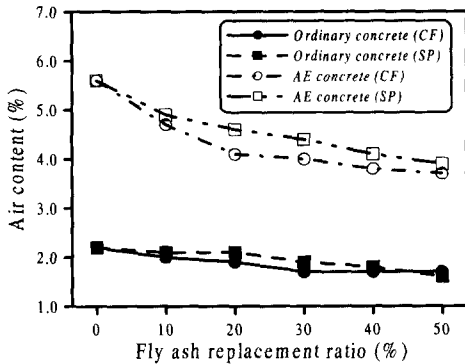


Fig. 3 Effect of fly ash replacement ratio on air content

4.2 콘크리트의 단위중량 특성

플라이애쉬를 시멘트 대체재로 사용하여 제작한 콘크리트 공시체의 재령 28일에서의 단위중량을 측정된 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

4.2.1 AE감수제를 사용하지 않은 콘크리트

대체적으로 일정한 경향을 보이지만 주물공장 플라이애쉬 대체율에 따른 단위중량은 보령 화력발전소 플라이애쉬 대체율에 따른 단위중량보다 다소 크게 측정되었다. 플라이애쉬의 비중은 보통 포틀랜드시멘트보다 작아 단위중량을 저하시키지만, 플라이애쉬의 유회작용으로 내부 공극을 감소시켜 보다 밀실한 콘크리트 생산이 가능하므로

플라이애쉬 대체 사용에 따른 단위중량에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

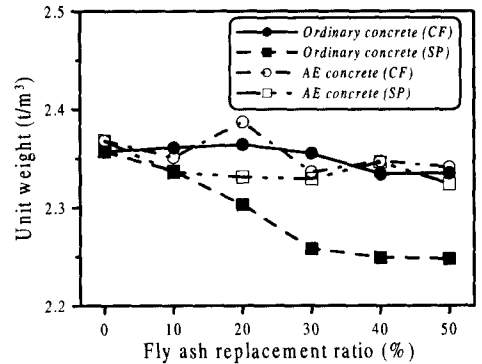


Fig. 4 Effect of fly ash replacement ratio on unit weight at 28 days

4.2.2 AE감수제를 사용한 콘크리트

AE감수제를 사용한 경우에도 주물공장 플라이애쉬 대체율에 따른 단위중량은 보령 화력발전소 플라이애쉬 대체율에 따른 단위중량보다 다소 크게 측정되었다. 또한 AE감수제를 사용한 경우의 콘크리트 단위중량은 AE감수제를 사용하지 않은 경우보다 크게 측정되었다.

4.3 콘크리트의 압축강도 특성

플라이애쉬를 시멘트 대체재로 사용하여 제작한 콘크리트 공시체의 재령 28일에서의 압축강도를 측정된 결과를 Fig. 5에 나타내었다⁽⁹⁾. 또한, 재령별 압축강도의 관계를 플라이애쉬 대체율 20%에 대하여 Fig. 6에 나타내었다.

4.3.1 AE감수제를 사용하지 않은 콘크리트

AE감수제를 사용하지 않은 콘크리트의 경우, 주물공장 플라이애쉬 대체율 20%까지는 28일 압축강도가 설계기준강도 280 kgf/cm²를 초과하였으며, 화력발전소 플라이애쉬도 유사한 결과를 나타내고 있다. 각각의 케이스별 강도 증진율을 보면 플라이애쉬의 특성상 초기강도는 기준 콘크리트보다 모두 낮으나 재령 28일 및 91일 강도는 대체율 20% 수준까지 기준 콘크리트의 강도를 초과하고 있다.

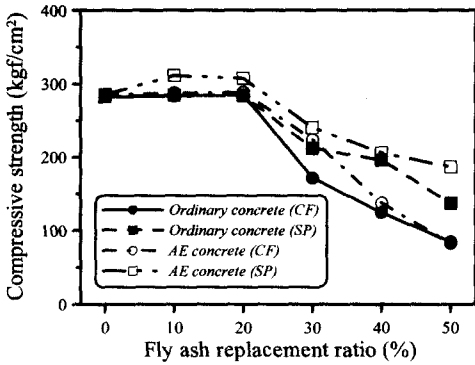


Fig. 5 Effect of fly ash replacement ratio on compressive strength at 28 days

4.3.2 AE감수제를 사용한 콘크리트

Fig. 5~6에서 알 수 있듯이 AE감수제를 사용한 경우, 플라이애쉬 대체율에 따른 강도 발현 양상은 AE감수제를 사용하지 않은 경우와 유사하다. 그러나, 표준형 AE감수제의 사용으로 초기 강도가 AE감수제를 사용하지 않은 경우보다 증대되었고, 공기 연행성의 증대로 밀실한 콘크리트의 제작이 가능하여 콘크리트의 전반적인 압축강도는 AE감수제를 사용하지 않은 경우보다 증가하였다.

5. 결 론

주물공정의 부산물로 배출되는 플라이애쉬에 대한 환경 보전 및 자원 재활용 측면에서 건설재료로의 사용성을 검토하기 위하여 플라이애쉬의 물리·화학적 시험을 실시하고, 콘크리트용 혼화재료로의 적합성을 측정하기 위하여 콘크리트를 제작, 기초적 성질을 시험하였던 바, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 주물공장 플라이애쉬의 물리·화학적 성질은 KS L 5405 '플라이애쉬'의 규정을 모두 만족하고 있어 시멘트와 혼합하여 사용 가능한 것으로 판단된다.
- 2) 주물공장 플라이애쉬의 분말도는 화력발전소 플라이애쉬에 비하여 높게 나타났다. 따라서, 포졸란 활성도가 증가하여 화력발전소 플라이애쉬를 사용하는 경우보다 초기 강도 증진에 기여할 수 있으며, 블리딩이

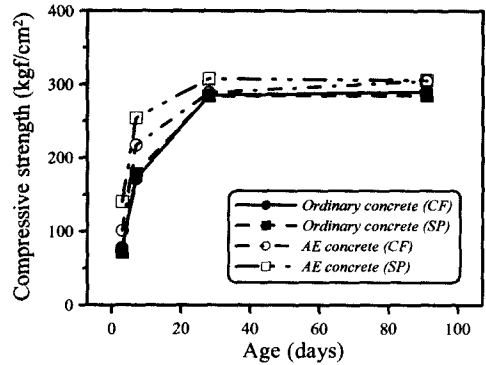


Fig. 6 Compressive strength versus age for concrete with fly ash replacement ratio of 20%

작고 워커블한 시멘트 제품 및 콘크리트를 얻을 수 있다.

- 3) 주물공장 플라이애쉬의 비중은 화력발전소 플라이애쉬에 비하여 높게 나타났다. 따라서, 시멘트 대체재로 사용시 화력발전소 플라이애쉬를 사용할 경우보다 단위 중량의 감소를 줄일 수 있고 보다 밀실한 제품을 얻을 수 있다.
- 4) 다량의 플라이애쉬 사용시 목표 슬럼프와 공기량을 확보하기 위해서는 적절한 양의 AE감수제를 함께 사용하여야 함을 알 수 있었다. AE감수제를 함께 사용하면 유동기포의 분산으로 수화반응을 촉진하여 압축강도는 개선되는 것으로 나타났다.
- 5) 콘크리트에 주물공장 플라이애쉬를 대체 사용시, 압축강도는 플라이애쉬를 20%까지 대체하였을 때 설계기준강도를 만족하였다. 플라이애쉬의 특성상 보통콘크리트와 비교하여 초기강도 보다는 장기강도의 발현율이 우수하므로 주물공장 플라이애쉬를 대체하여 사용하여도 큰 문제는 없으리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 '96 건설교통부의 연구비 지원(과제번호 R&D/96-0014)에 의하여 수행되었으며, 연구비를 지원해 주신 건설교통부 당국에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국전력공사, "석탄회", 한국콘크리트학회지, 1994.
2. 한국공업표준협회, "한국공업규격", KS L 5405, 1992.
3. 한국콘크리트학회, "콘크리트 혼화재료", 1996, pp.186-216.
4. Brook, J.W., Berkely, R.A., and Farzam, H., "A Non-Chloride Accelerating Admixture for Class CF Fly Ash", Concrete International, October, 1990, pp.51-54.
5. 한국공업표준협회, "한국공업규격", KS F 2403, 1980.
6. 대한토목학회, "콘크리트 표준시방서", 1996.
7. 진치섭, "콘크리트 및 구조시험", 제일문화사, 1986.
8. 한국공업표준협회, "한국공업규격", KS F 2402, 1982.
9. 한국공업표준협회, "한국공업규격", KS F 2421, 1979.
10. 한국공업표준협회, "한국공업규격", KS F 2405, 1997.

요 약

주물공장에서 발생하는 플라이애쉬는 현재까지 그 전부가 매립에 의존하고 있는 상태로 자원절약 및 산업폐기물의 유효이용이라는 측면에서 국가적인 손실이 아닐 수 없다. 따라서 산업폐기물의 유효이용, 콘크리트 제조시 원가 절감, 콘크리트 품질개선 및 환경보존의 측면에서 플라이애쉬를 혼화재료로 사용할 수 있도록 이에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 주물공장의 폐기물인 플라이애쉬를 건설산업에 재활용하는 방안을 수립하는 데 그 목적이 있다. 이를 위하여 주물공장에서 발생하는 플라이애쉬를 채취하여 물리·화학적 특성을 분석하였고, 주물공장 플라이애쉬를 시멘트 대체재로 사용한 콘크리트의 제반 특성의 규명과 함께 활용방안을 제시하였다.

(접수일자 : 2000. 2. 15)