

열병합발전소 플라이애쉬의 품질 및 콘크리트의 역학적 특성

THE QUALITY PROPERTIES FOR FLY ASH OF COMBINED HEAT POWER PLANT AND MECHANICAL PROPERTIES IN CONCRETE

○ 李 相 洙¹⁾ 白 明 鍾²⁾ 元 澈²⁾ 安 宰 鉉³⁾ 朴 泚 林⁴⁾
LEE, SANG-SOO BACK, MYUNG-JONG WON, CHEOL AHN, JAE-HYEN PARK, CHIL-LIM

ABSTRACT

The primary purpose of this study is to investigate reusal techniques of fly ash of combined heat power plant in the construction field, which may contribute to the savings of construction materials and conservating environment. Firstly, chemical and physical characteristics of fly ash is analysed. And then, the usability of the concrete is tested by investigating the flowability and strength development through parameters of various replacement ratios with respect to different mixing conditions. Finally, the durability and mechanical properties (elastic modulus) of the concrete is tested.

As the result of the study, the following conclusions are derived : (1) the quantity of the CaO in the fly ash is relatively high based on the chemical analysis, (2) the compressive strength ratio of the mortar is satisfied with the specification, but the unit water ratio increased, (3) high strength concrete of more than 400kg/cm² can be developed in the ranges of FA 30%, W/B 40%, (5) the slump loss with the elapsed time due to the delivery is decreased as the replacement ratio of the fly ash is increased, (6) the modulus of the elasticity is matched with the specification of the Architectural Institute of Korea.

1. 서 론

1.1 연구배경

최근 공업단지내 입주업체 공장의 신·증설에 따른 가동율 증가로 안정적인 증기 및 전기를 저렴한 가격으로 공급하기 위하여 유연탄을 주원료로 하는 열병합발전소가 울산, 반월 등지에서 단계적으로 건설되고 있다.

이러한 열병합발전소의 건설은 입주업체의 중·장기적인 추가수요에 따른 대처방안책으로 향후에도 열병합발전소 설비확장 종합계획에 의거하여 계속적으로 늘어날 것으로 전망된다.

그러나 화력발전소와 마찬가지로 열병합발전소의 연소 보일러에서 생성되는 애쉬의 처리문제가 해결해야할 당면과제로 직

면해 있는 실정이다. 특히 資源節約과 再活用 促進에 관한 法律(제 30조)에 의하면 산업 부산물인 석탄재를 년도별 재활용 계획에 따라 '98년부터 발생량의 35% 이상을 재활용하도록 규정하였으며, 년도별 재활용 비율은 '95년까지 15%, '97년까지 25%로 증가시켰다.

이에 따라 향후 열병합발전소를 건설하기 위한 전제조건으로 애쉬를 재활용할 수 있는 설비를 갖추어야 할 뿐 아니라, 열병합발전소에서 생성되는 플라이애쉬를 건설 산업에 사용할 수 있는지를 검토·분석하고 규명할 필요가 있다.

1.2 연구목적 및 범위

본 연구의 목적은 실험을 통해 열병합발전소에서 생성되는 플라이애쉬를 建設産業에 재활용하는 方案을 確保하는 것이며, 이를 통해 자원 재활용은 물론 環境保存, 經濟性, 新材料의 開發 측면에서도 보다 유용한 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

- 1) 정회원, (주)대우건설기술연구소 주임연구원
- 2) 정회원, (주)대우건설기술연구소 연구원
- 3) 정회원, (주)대우건설기술연구소 선임연구원
- 4) 정회원, (주)대우건설기술연구소 소장(공박)

이러한 연구를 위해 울산석유화학 공단 내 열병합발전소에서 생성되는 플라이애쉬를 대상으로 화학적·물리적 특성을 분석하였으며, 또한 배합조건 및 치환율을 선정하여 流動性, 경시변화, 내구성 및 強度 發現 性狀을 비롯한 제 역학적 특성을 비교·분석하였다.

2. 실험개요

2.1 사용된 일반재료의 특성

시멘트는 S사의 내수용 보통 포틀랜드 시멘트로 품질시험 결과는 [표 1]과 같다.

[표 1] 시멘트의 품질시험 결과

분말도 (cm^2/g)	비중	안정도 (%)	압축강도(kg/cm^2)		
			3일	7일	28일
3,031	3.15	0.4	180	278	381

굵은골재는 곤지암石産 25mm 쇄석을, 잔골재는 여주산 강모래를 사용하였으며, 골재의 품질시험 결과는 [표 2]와 같다.

[표 2] 골재의 품질시험결과

특 성	잔골재	굵은골재
비 중	2.60	2.67
조 립 율	2.47	6.42
마 모 율(%)	-	22.0
흡 수 율(%)	1.24	0.81
단위중량(kg/m^3)	1,550	1,540

고성능 감수제는 국내에서 시판되는 나프탈렌계 DAREX SUPER-20을 사용하였다.

2.2 열병합 발전소 플라이애쉬 특성

2.2.1 플라이애쉬의 화학적 특성

본 연구에서 사용된 울산 열병합 및 보령 화력발전소의 플라이애쉬의 화학적 성분을 분석한 결과는 [표 4]와 같다.

[표 4]에서 보듯이 울산 열병합발전소의 플라이애쉬는 포졸란반응성 광물인 실리카(SiO_2) 및 알루미늄(Al_2O_3)의 함량이 화력발전소의 플라이애쉬(보령) 및 KS L 5405에 규정된 값보다 낮으나, 유리석회(CaO)의 함량은 높게 측정되었다.

일반적으로 F급 플라이애쉬는 SiO_2 가 많고 CaO 가 5% 이하로 적기 때문에 自硬性이

[표 4] 플라이애쉬의 화학적 특성

화학성분	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3
열병합 발전소 FA (1)	40.4	15.2	8.12	26.5	1.19	0.29	0.81	5.17
열병합 발전소 FA (2)	39.2	15.4	8.69	26.7	1.26	0.37	0.68	6.60
열병합 발전소 FA (3)	45.8	15.8	19.6	18.2	1.12	0.31	0.83	5.84
화력 발전소 FA (1)	62.8	20.7	9.0	2.56	1.33	0.27	0.85	tr
화력 발전소 FA (2)	54.1	27.5	7.6	3.66	1.05	0.52	-	0.13
KS L 5405 (JIS와 동일)	70 이상			-	5.0 이하	1.5 이하	-	5.0 이하
ASTM C 618(C급)	50 이상			-	-	1.5 이하	-	5.0 이하

없을 뿐 아니라 유기물 및 미연탄소의 성분이 남아있으나, C급 플라이애쉬는 CaO 가 15~30%로 많고 SiO_2 가 상대적으로 적기 때문에 시멘트와 유사한 水硬性을 나타내는 동시에 포졸란 반응을 띠고 있다.⁽¹⁾

이러한 화학성분의 차이는 수화반응 및 포졸란 반응에서 서로 다른 메커니즘을 갖게 된다. 국내의 화력발전소에서 생성되는 플라이애쉬의 대부분은 F급에 속하지만, 열병합발전소의 플라이애쉬는 화학성분에 따른 분류기준에서 볼 때, C급에 가깝다고 할 수 있다.⁽²⁾ 따라서 콘크리트에 사용할 경우, 強度特性 및 耐久性·耐化學性·透水性·膨脹性 등의 특성을 시험으로 규명하는 것이 필요하다.

2.2.2 플라이애쉬의 물리적 특성

열병합 발전소 및 화력발전소의 플라이애쉬의 물리적 특성은 [표 5]와 같다.

[표 5] 플라이애쉬의 물리적 특성

구 분	특 성	비중	분말도 (cm^2/g)	습분 (%)	강열 감량
열병합 발전소 FA (1)		2.24	3,040	0.52	7.89
열병합 발전소 FA (2)		2.23	3,132	0.30	5.16
열병합 발전소 FA (3)		2.14	3,047	0.91	15.8
화력 발전소 FA (1)		2.15	3,200	0.14	3.91
화력 발전소 FA (2)		2.21	4,201	0.12	5.49
KS L 5405 (F급)		1.95* 이상	2,400* 이상	1.0 이하	6.0% 이하
ASTM C 618 (C급)		-	45 μm 잔류량 34%이하	3.0 이하	6.0% 이하

* JIS A 6201 규준임

[표 5]에서 보듯이 열병합발전소의 플라이애쉬는 분말도가 다소 낮으며, 강열감량은 매우 높게 나타났다 이는 연소온도가 화력발전소보다 상대적으로 낮기때문인 것으로 사료된다.

2.3 실험방법 및 변수

2.3.1 실험방법

열병합발전소 플라이애쉬의 단위수량비 및 압축강도비의 측정은 KS, ASTM, ISO에 따라 제작한 플로우 및 모르타르 시험체로 특성을 비교하였으며, 콘크리트 특성은 슬럼프, 공기량 및 재령별 강도를 기본으로 하였다. 또한 경시변화, 동결융해 저항성, 기타 역학적 특성을 함께 측정하였다.

콘크리트의 배합에서 플라이애쉬 치환방법은 콘크리트 특성 및 經濟的 配合에 적합한 것으로 나타난 시멘트 중량비⁽³⁾로 결정하였다.

고성능 감수제의 첨가량은 목표 슬럼프 (18±2cm)를 얻는 범위에서 결정하였으며, 콘크리트 배합방법은 선-모르타르 방법을 선택하였고, 배합시간은 전체 3분으로 하였다.

2.3.2 실험변수

열병합발전소 플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 실험변수는 [표 6]과 같다. 물/결합재비는 40%, 45% 2종류로 정하였고, 플라이애쉬 치환율은 시멘트의 중량비로 0%, 10%, 30%, 50% 4종류를 변수로 선정하였으며, 상세 배합표는 [표 7]과 같다.

[표 6] 콘크리트 배합을 위한 실험변수

W/B* (%)	S/a (%)	단위수량	플라이애쉬 치환율(C%)	고성능 감수제	목표 슬럼프
40, 45	41	175 kg/cm ³	0, 10, 30, 50	0.8~2.0%	18±2cm

*여기서 B는 결합재(시멘트+플라이애쉬)를 말함

3. 실험결과 및 고찰

3.1 모르타르 시험결과

플라이애쉬의 재료 특성 및 콘크리트에 대한 사용성을 검토하기 위하여 각국의 규준에 규정된 방법으로 단위수량비 및 압축강도비를 측정하여 결과

[표 7] 콘크리트 배합조건

구분 시험체명	배합조건			단위 재료량(kg/m ³)			
	W/B (%)	S/a (%)	C	W	S	G	FA
FA-40 0	40		138	175	712	1,055	0
FA-40 10			394		707	1,047	44
FA-40 30			327		694	1,028	131
FA-40 50	45	41	219	175	697	1,028	219
FA-45 0			389		728	1,073	0
FA-45 10			350		723	1,071	39
FA-45 30			272		720	1,063	117
FA-45 50			195		715	1,035	195

[표 8] 모르타르의 특성실험 비교

특성 종류	단위재료량(g)			Flow (cm)	강도비 (%)		단위수량비 (%)
	C	S	FA		7일	28일	
KS	382.5	1,250	127.5	14.8	85	113	105
ASTM	400	1,375	100	11.8	75	84	103
ISO	400	1,500	100	19.2	98	106	111
KS CODE	510	1,250	247*	±5mm	-	min. 60	max. 102
ASTM CODE	500	1,375	242*	±5mm	min. 75	min. 75	max. 105
ISO CODE	500	1,500	250*	-	min. 60	min. 70	max. 102

* 단위수량

는 [표 8]과 같다.

모르타르 특성실험 결과, 각국의 Code에서 규정한 압축강도비는 모두 만족하였다. 이는 열병합발전소 플라이애쉬가 시멘트와 같은 수경성 물질이며, 포졸란 활용도가 크기때문에 우수한 강도특성을 나타낸 것으로 사료된다. 그러나 동일한 플로우(±5mm)를 만족하는 단위수량비는 각국의 규준에 따라 차이가 있지만 전반적으로 크게 나타났다. 이는 앞에서 실험한 플라이애쉬의 粒形 및 成分에 따른 차이로 사료된다.⁽⁴⁾

따라서 콘크리트의 流動性을 확보하기 위해서는 高性能 減水劑의 첨가량 또는 단위수량의 증가를 고려해야 할 것이다.

3.2 굳지않은 콘크리트 특성

3.2.1 슬럼프 및 공기량

물/결합재비에 따른 슬럼프 및 공기량 실험결과는 [표 9]와 같다.

[표 9] 굳지않은 콘크리트 특성

구분 시험체명	배합조건		고성능 감수제 (C×%)	콘크리트 특성	
	W/B (%)	S/a (%)		슬럼프 (cm)	공기량 (%)
FA-40-0	40	41	0.8	7.0	1.4
FA-40-10			0.9	17.5	1.1
FA-40-30			1.1	18.5	0.9
FA-40-50			1.8	20.0	0.9
FA-45-0	45	41	1.0	17.5	1.9
FA-45-10			1.0	19.0	1.4
FA-45-30			1.5	24.0	1.2
FA-45-50			2.0	21.0	1.0

플라이애쉬 치환율이 증가할 수록 목표 슬럼프(18±2cm)의 확보하기 위한 고성능 감수제의 첨가량이 증가하였으며, 이에 따른 콘크리트의 점성증가로 재료분리 저항성이 향상되었으며, 유동성 및 충전성을 개선할 수 있는 것으로 사료된다.

또한 플라이애쉬의 치환율이 증가할 수록 콘크리트의 응결시간이 증가하는 경향이 있기 때문에 현장품질관리 및 거푸집 관리방안도 함께 고려할 것이다.

공기량은 플라이애쉬의 치환율이 증가할 수록 감소하는 경향을 나타내었는데, 이는 플라이애쉬의 미연탄소 성분에 의한 흡착 효과로 사료되며⁽⁵⁾ 이에 대한 흡착 메커니즘을 향후 규명하는 방안이 필요하다.

3.2.2 경시변화에 대한 특성

콘크리트 배합직후의 초기 슬럼프를 21±2cm로 하여, 경시변화에 따른 슬럼프 및 슬럼프 플로우를 비교하였으며, 결과는 [표 10]에 나타난 바와 같다.

[표 10]에서 보듯이 플라이애쉬 치환율에 따른 슬럼프 및 슬럼프 플로우의 경시변화는 슬럼프 손실율이 감소하는 것으로 나타났다.

[표 10] 경시변화 특성

시험체명	경시변화 특성	경시변화(분)						
		직후	15	30	45	60	75	90
FA-40-0	슬럼프(cm)	20.0	17.0	7.0	3.0	-	-	-
	SL-FL(cm)	35	27	20	-	-	-	-
FA-40-10	슬럼프(cm)	20.0	18.0	17.0	10.0	6.0	5.0	2.0
	SL-FL(cm)	51	43	36	20	-	-	-
FA-40-30	슬럼프(cm)	19.0	14.0	8.0	6.5	4.5	2.0	-
	SL-FL(cm)	31	22	21	20	-	-	-
FA-40-50	슬럼프(cm)	24.0	22.0	21.0	17.0	12.0	6.0	2.0
	SL-FL(cm)	58	56	51	35	20	-	-

이는 고성능 減水劑의 添加量 및 凝結遲延 現象에 기인한 것으로 사료되며, 동일량의 고성능 減水劑를 후첨가할 경우 슬럼프 회복이 클 것으로 예상된다.

3.3 굳은 콘크리트 특성

3.3.1 플라이애쉬 치환율에 따른 강도발현

배합변수별 플라이애쉬의 치환율에 따른 강도발현 특성은 [표 11]에 나타난 바와 같다.

[표 11] 콘크리트의 강도발현 특성

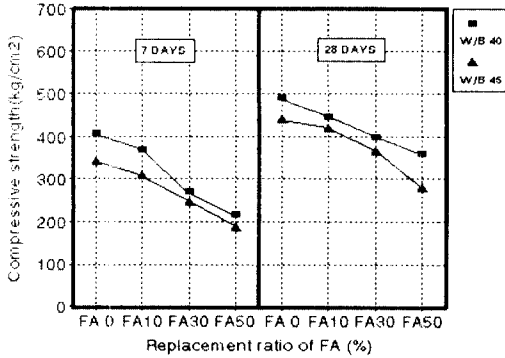
구분 시험체명	배합조건		압축강도 (kg/cm ²)		
	W/B (%)	S/a (%)	7일	28일	강도비 (%)
FA-40-0	40	41	409	490	83
FA-40-10			370	448	83
FA-40-30			270	400	68
FA-40-50			218	361	60
FA-45-0	45	41	342	439	78
FA-45-10			309	418	74
FA-45-30			248	366	68
FA-45-50			188	281	67

플라이애쉬 치환율이 증가할 수록 f_{c7}/f_{c28} 압축강도비는 감소하게 되는데, 이는 플라이애쉬의 포졸란 반응이 후기재령에 일어나기 때문에 초기강도 발현이 치환하지 않은 콘크리트에 비해 낮음을 알 수 있다.

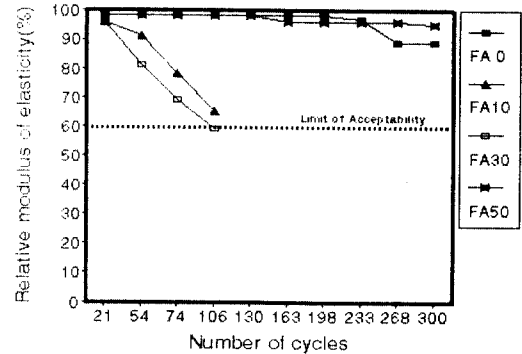
플라이애쉬의 치환율에 따른 재령별 강도발현은 [그림 1]과 같다.

플라이애쉬의 치환율이 증가할 수록 강도발현은 거의 직선적으로 감소하는 것으로 나타났기 때문에 요구되는 강도범위를 고려하여 배합조건을 선정하는 것이 바람직하다.

따라서 물/결합재비 40%, 플라이애쉬 치환율 30%이하에서는 400kg/cm²이상의 고강도 콘크리트를 생산하는 것이 필요하며, 300kg/cm²이하의 보통강도 콘크리트를 생산하기 위해서는 플라이애쉬 치환율을 최대한 증대시켜 경제적인 배합을 선정하는 것이 좋을 것으로 사료된다.⁽⁶⁾



[그림 1] 플라이애쉬 치환율에 따른 강도발현



[그림 2] 동결융해 사이클과 상대 동탄성계수와와의 관계(비공기연행)

3.3.2 압축-인장강도와의 관계

플라이애쉬를 치환한 콘크리트의 압축-인장강도와의 관계는 [표 12]와 같다.

[표 12] 압축-인장강도와의 관계

구분 시험체명	배합조건		압축강도 (kg/cm²)	인장강도 (kg/cm²)	F _t /F _c 비
	W/B (%)	S/a (%)			
FA-40-0	40	41	490	31	1/16
FA-40-10			448	31	1/15
FA-40-30			400	31	1/13
FA-40-50			361	28	1/13
FA-45-0	45	41	439	30	1/15
FA-45-10			418	30	1/14
FA-45-30			366	30	1/14
FA-45-50			281	27	1/10

압축강도 400kg/cm²이상의 高强度 領域에서는 압축강도/인장강도비가 1/15~1/16로 나타내었고, 400kg/cm²이하의 普通强度 領域에서는 1/12~1/13로 나타내고 있다. 또한 플라이애쉬 치환율에 따른 영향은 치환율이 증가할 수록 다소 낮은 범위를 나타내었다. 물론 高强度 領域에서 취성적인 특성을 나타내는 현상은 동일하지만, 고강도 범위에 적용하기 위해서는 인장강도를 개선하기 위한 방안을 검토해야할 것이다.

3.4 동결융해에 따른 내구성

[그림 2]는 공기를 연행하지 않은 콘크리트의 플라이애쉬 치환율에 따른 상대 동탄성계수와 동결융해 사이클의 관계를 나타낸 것이다.

결과를 비교해 보면, 플라이애쉬의 치환율이 10%, 30%인 경우에 상대적으로 낮은 사이클에서 손상을 받고 있는 것으로 나타났으며, 플라이애쉬의 치환율이 50%인 경우에는 耐久性 指數가 증가하는 것으로 나타났다.

플라이애쉬의 사용이 동결융해 저항성을 증가시킨다는 연구결과⁶⁾도 많이 있기 때문에 계속적인 실험을 통해 AE제 사용 및 명확한 경향을 분석할 필요가 있다.

3.5 콘크리트의 역학적 특성

3.5.1 탄성계수

플라이애쉬 치환율에 따른 역학적 특성을 알아보기 위하여 물/결합재비 40%를 선정하여 실험한 결과, [표 13]에서 보듯이 영계수의 경우, 대한건축학회의 기준식인 $E_{1/3} = 2.1 \times (\rho / 2.3)^{1.5} \times \sqrt{F_c / 200}$ 의 결과와 유사한 값을 보이고 있다. 또한 콘크리트의 F_t/F_c비는 1/11~1/13이고 F_b/F_c비는 1/6~1/8정도로 일반적으로 일반콘크리트와 유사한 경향을 나타내고 있다.

압축강도에 대한 인장강도비와 휨강도비

[표 13] 콘크리트의 역학적 특성 결과

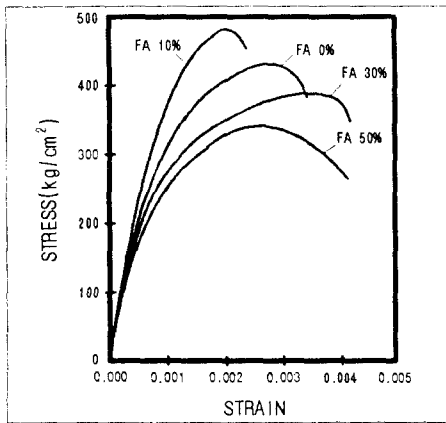
구분 시험체명	압축강도 (kg/cm²)	인장강도 (kg/cm²)	휨강도 (kg/cm²)	영계수 (×10 ⁹ kg/cm²)
FA-40-0	431	37	69	3.15
FA-40-10	482	40	62	3.33
FA-40-30	370	34	61	2.96
FA-40-50	344	31	46	2.88

를 개선하기 위해서는 매트릭스 부착력을 증가시키거나 사용성이 우수한 섬유보강 등의 방법을 강구하는 것이 바람직하다.

3.5.2 응력-변형도 관계

[그림 3]은 재령 28일에서의 플라이애쉬 치환율에 따른 응력-변형도 곡선을 나타내고 있다.

응력-변형도 곡선의 경향은 強度範圍에 따라 차이가 있으며, 치환율 10%를 제외하면 치환율이 증가할 수록 上昇 및 下降曲線의 기울기가 감소하였다.



[그림 3] 응력-변형도 곡선

4. 결 론

열병합발전소 플라이애쉬의 재료특성 및 콘크리트의 특성 실험결과는 다음과 같다.

- (1) 열병합발전소 플라이애쉬는 脫璜反應의 촉진을 위한 낮은 연소온도로 인해 CaO의 함량이 높아 C급에 가깝다.
- (2) 모르타르의 단위수량비는 약간 증가하나, 압축강도비는 규준에 만족하며 포졸란 활성도가 높은 것으로 나타났다.
- (3) 운반시간에 따른 경시변화는 플라이애쉬 치환율이 증가할 수록 슬럼프 손실이 감소되었고, 콘크리트의 유동성, 충전성 및 재료분리 저항성이 매우 우수하였다. 40%범위에서 400kg/cm²이상의 고강도 콘크리트를 생산할 수 있으며, 300kg/cm²이

하의 보통강도 콘크리트 생산은 물/결합재비 및 치환율을 상향조정하는 것이 바람직하다.

- (5) 내구성 실험 결과, 플라이애쉬의 치환율이 10%, 30%인 경우에 상대적으로 낮은 사이클에서 손상을 받으나, 플라이애쉬 치환율이 50%인 경우에는 耐久性指數가 증가하였다.
향후 공기연행제를 사용하는 방안도 함께 검토해야 할 것이다.
- (6) 탄성계수 측정결과, 大韓建築學會의 규준식의 결과와 유사한 값을 나타내었으며, 이에 따른 응력-변형도 곡선도 강도별 유사한 경향을 나타내었다.
- (7) 향후 열병합발전소에서 생성되는 플라이애쉬를 활용하기 위해서는 이에 관한 규준을 정립해야 할 필요가 있다.
- (8) 열병합발전소 플라이애쉬의 品質管理 및 乾燥收縮, 크리프, 耐化學性, 포졸란 활성도 등에 관한 계속적인 연구가 필요하다.

《참고문헌》

- (1) ASTM C 618, Standard Specification for FlyAsh and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete
- (2) John W. Brook, Renold A. Berkey, and Hamid Farzam, "A Non-Chloride Accelerating Admixture for class CF Fly Ash", Concrete international, October, 1990. pp.51~54
- (3) 朴泚林, 權寧鎬, "건축구조물에 고강도 콘크리트 현장적용-(株)大宇진해현장-", 한국콘크리트학회지 제5권4호. 1993.12. pp.54~65
- (4) 朴泚林외, "열병합발전소 플라이애쉬의 특성 및 활용방안에 관한 실험적 연구(고강도 콘크리트를 중심으로)", 한국콘크리트학회가 학술발표회 논문집, 제6권2호. 1994.11. pp.211~216
- (5) 山崎寛司, "鑛物質微粉末がコンクリートの強度におよぼす効果に関する基礎研究", 『土木學會論文集』. 1982年
- (6) 吉越盛次, "混和材としてのフライアッシュコンクリートに関する研究", 『土木學會論文集 第31號』. 1975年