

열병합발전소 플라이애쉬의 품질특성 및 콘크리트의 공학적 특성에 관한 연구

이 상 수

<<주>대우 건설기술연구소 주임연구원

원 철

<<주>대우 건설기술연구소 주임연구원

김 동 석

<<주>대우 건설기술연구소 주임연구원

- | | |
|---------------|--------------------------|
| 1. 서론 | 3. 실험결과 분석 및 검토 |
| 1.1 연구배경 | 3.1 굳지않은 콘크리트 특성 및 검토 |
| 1.2 연구목적 및 범위 | 3.2 경화 콘크리트의 특성 및 검토 |
| 2. 실험계획 및 방법 | 3.3 경화 콘크리트의 내구특성 및 검토 |
| 2.1 실험계획 | 3.4 경화 콘크리트의 장기거동특성 및 검토 |
| 2.2 사용재료 | 3.5 콘크리트의 수화특성 및 검토 |
| 2.3 시험항목 및 방법 | 4. 결론 |

1. 서론

1.1 연구배경

최근, 정부의 에너지 다변화 정책의 영향에 따라 공업단지내 입주한 공장 및 업체에 안정적이고도 저렴한 가격으로 증기 및 전기를 공급하기 위하여 유연탄을 주원료로 하는 열병합발전소가 울산, 인천, 부산, 구미, 반월 등에

서 단계적으로 건설되고 있다. 이러한 열병합발전소의 건설은 입주업체의 중·장기적인 추가수요에 따른 대처방안으로 향후에도 계속적으로 열병합발전소의 신설 및 설비확장 등이 필요할 것으로 예상된다. 그러나, 열병합발전소의 신설 및 확장에 따라 화력발전소와 마찬가지로 연소 보일러에서 발생하는 플라이애쉬의 처리문제가 대두되고 있으며, 이러한 처리방안은 열병합발전소의 운영 및 신규·증설에

도 영향을 미칠 수 있기 때문에 경제성 및 환경 보호 차원을 고려하여 가장 합리적인 방법을 제시할 필요가 있다.

1.2 연구목적 및 범위

본 연구는 열병합발전소에서 생성되는 플라이애쉬를 건설산업에 재활용하는 방안을 모색하기 위한 것으로 시멘트의 대체재로서 플라이애쉬를 재활용하게 된다면 환경문제 해소 및 처리비용, 재료절감 등을 통해 경제성을 확보할 수 있을 것이며, 더 나아가 Green Round에 대비하기 위한 방안으로 매우 바람직하다고 할 수 있다.

이러한 연구를 위해 울산석유화학공단내 열병합발전소에서 생성되는 플라이애쉬를 대상으로 물리·화학적 특성을 분석하였으며, 또한, 조합조건 및 치환율을 선정하여 유동특성 및 강도특성을 비롯해서 동결융해 저항성 및 내약품성과 같은 내구특성, 건조수축 및 크리프 등과 같은 장기거동 특성 및 수화특성에 대하여 실험·실증적으로 비교·분석하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구는 열병합발전소에서 생성되는 플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 유동특성 및 강도특성을 비롯해서 수화특성, 내구특성, 및 장기거동 특성을 실험요인 및 수준에 따라 검토하기 위하여 [표 1]과 같이 실험계획을 설정하였다.

2.2 사용재료

시멘트는 S사의 내수용 보통 포틀랜드 시멘

[표 1] 실험계획

조합조건 항목	W/B (%)	S/a (%)	FA대체율 (%)	비 고
유동특성	40	41	0, 10	-
강도특성	~	~	30, 50	
수화특성	60	47		
내동해성	40	41	0, 10	KS F 2456
건조수축			30, 50	KS F 2424
내약품성	50	43	0, 30	JIS 원안법
크리프	40	41		KS F 2453

[표 2] 골재의 품질시험결과

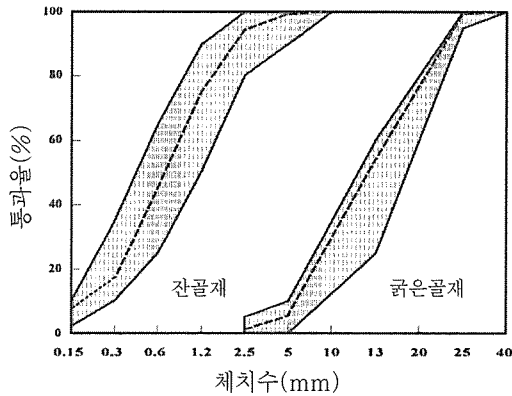
구분 종류	잔골재	KS F 2526	굵은 골재	KS F 2526	
비 중	2.62	≥2.5	2.63	≥2.5	
조립율(F.M.)	2.60	-	6.96	-	
마 모 율 (%)	-	-	21.4	≤40	
흡 수 율 (%)	0.85	≤3.0	0.73	≤3.0	
단위중량(kg/m ³)	-	-	1,480	≥1,250	
안 정 성 (%)	-	≤10	6.57	≤12	
NaCl (%)	0.012	≤0.04	-	-	
형상 시험* (%)	세장지수	-	-	30.0	≤40
	편평지수	-	-	12.9	≤40
	능각지수	-	-	10.9	≤12

* BS 812 시험방법에 의해서 실시하고 판정함.

트(I종)이며, 잔골재는 바닷모래를 세척하여 사용하였고, 굵은골재는 경기도 용원석산에서 생산되는 25mm쇄석을 사용하였다. 골재의 품질시험결과는 [표 2]와 같고, 입도분포곡선은 [그림 1]에 나타났다. 골재의 품질시험결과 모두 KS규준을 만족하고 있다.

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

또한, 본 연구에서 시멘트 대체재로서 사용된 플라이애쉬는 열병합발전소에서 생성되는 것으로서, 그의 품질시험결과는 [표 3]과 같으며, 화력발전소에서 생성되는 플라이애쉬와 상호 비교·검토하였다.



(그림 1) 골재의 입도분포곡선

[표 3]에서 보듯이 열병합발전소 플라이애쉬는 Pozzolan 반응성 광물인 SiO_2 , Al_2O_3 및 Fe_2O_3 의 함량이 화력발전소 플라이애쉬보다 낮으나 CaO 의 함량은 높게 측정되었다. 일반적으로 화력발전소 플라이애쉬는 SiO_2 가 많고 CaO 가 5% 이하로 적기 때문에, 自硬性이 없는 것에 반해, 열병합발전소 플라이애쉬는 CaO 가 15~30%로 많고 SiO_2 , Al_2O_3 및 Fe_2O_3 의 함량이 상대적으로 적기 때문에 Cement와 유사한 水硬性을 나타내는 동시에 Pozzolan 반응을 띠고 있는 것이 특징이라 할 수 있다.

한편, 열병합발전소 플라이애쉬는 미국에서 규정하고 있는 ASTM C 618(C급 플라이애

(표 3) 플라이애쉬의 품질시험결과

구분	화학적 특성				물리적 특성	
	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	Na_2O	SO_3	비중	강열감량 (%)
열병합 FA	58.5	27.8	0.6	5.9	2.69	4.67
화력 FA	89.1	2.5	0.3	1.1	2.21	3.57
KSL 5405 (F급 FA)	≥ 70	-	≤ 1.5	≤ 5	≥ 1.9 5	≤ 5.0
ASTM C 618 (C급 FA)	≥ 50	-	≤ 1.5	≤ 5	≥ 1.9 5	≤ 6.0

쉬)의 규준에 만족하는 것으로 나타내고 있어 이를 활용하기 위해서는 관련 규준을 재정립할 필요가 있다.

열병합발전소 플라이애쉬의 물리적 특성중 비중 및 강열감량은 약간 높은 것으로 나타났는데, 이는 연소온도가 화력발전소 플라이애쉬보다 상대적으로 낮기 때문인 것으로 사료된다.

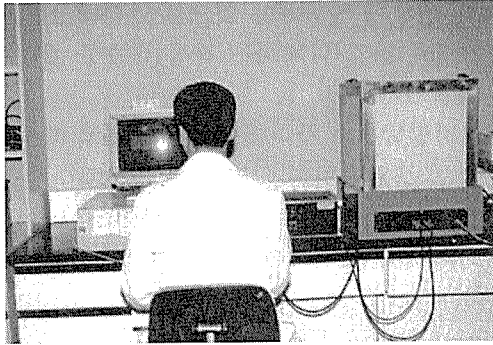
2.3 시험항목 및 방법

열병합발전소 플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 공학적 특성을 알아보기 위하여 슬럼프, 공기량 및 재령별 강도를 기본으로 측정하였으며, 또한, 경시변화를 비롯해서 동결융해횟수에 내동해성, 단열온도상승시험, 내약품성, 건조수축 및 크리프 특성을 함께 검토하였다.

콘크리트 배합에서 플라이애쉬 혼입방법은 경제적 조합을 선정하기 위하여 시멘트 중량비(replacement method)로 결정하였다. 고성능 감수제의 첨가량은 목표 슬럼프(18 ± 2 cm)를 만족하는 범위에서 결정하였으며, 콘크리트 배합방법은 선모르타 방법을 선택하였고 배합시간은 전체 3분으로 하였다.

(1) 단열온도상승시험

콘크리트의 단열온도상승값을 측정하기 위한 시험장치는 직접 시험법으로 완전단열된 입방시험장치에 각각의 조합조건에 따라 제조된 콘크리트를 일정용량(4 l)으로 충전한 후, 재령별 온도를 측정하였다. 온도센서에 의해 측정된 값은 컴퓨터에 데이터로 입력되어 단열온도상승값을 바로 출력할 수 있는 시스템이다. 단열온도상승 시험장면은



[사진 1] 단열온도상승 시험장면

[사진 1]과 같다.

한편, 콘크리트의 초기온도는 수화발열 특성에 큰 영향을 미치기 때문에, 이에 따른 오차를 최소화하기 위하여 콘크리트의 초기온도를 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ 로 조정하였다.

(2) 내약품성시험

내약품성시험은 ASTM C 267-82 및 JIS 원안법에 따라 실시하였으며, 시험체의 치수는 한변이 2cm인 입방체로, 이때, 물결합재비는 50%로 일정하게 하였다.

사용된 약품은 염산(HCl), 황산(H_2SO_4), 황산 마그네슘 (MgSO_4), 황산나트륨 (Na_2SO_4), 물(H_2O) 등을 선정하여 실험을 실시하였다. 이 때 사용된 약품의 농도는 [표 4]와 같다.

또한, 시험용액의 온도는 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 유지하였으며, pH조정은 2~3일 간격으로 측정하여

[표 4] 표준시험액과 pH조정액

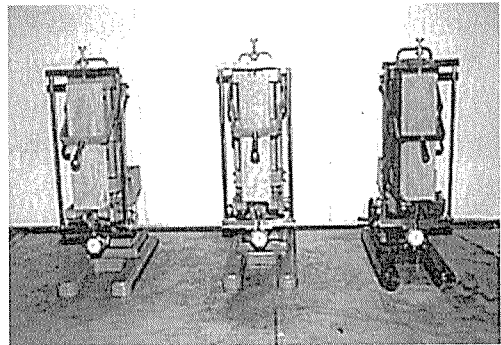
시약 (규준)	농도 (질량×%)	조정액 (용적비)	측정 pH
HCl(JIS K 8180)	2	1N(1:11)	0.86
H_2SO_4 (JIS K 8951)	5	1N(1:35)	0.27
Na_2SO_4 (JIS K 8986)	10	1N	7.3
MgSO_4 (JIS K 8995)	10	1N	5.0

오차가 생길 경우에는 전량을 교환하도록 하였다.

(3) 건조수축시험

콘크리트의 건조수축 시험방법은 KS F 2424 및 ASTM C 596의 규준에 따라 실시하였으며, 건조수축 측정용 시험체는 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 의 직육면체 시험체를 사용하였다.

건조수축용 시험체는 7일동안 습윤양생한 후, 온도 $20 \pm 1.0^\circ\text{C}$, 상대습도 $60 \pm 5\%$ 의 항온항습실에 보관하면서 [사진 2]와 같이 시험을 실시하였다. 건조수축 변형량은 정밀도 $1/100\text{mm}$ 인 다이얼게이지를 이용하여 측정하였다.

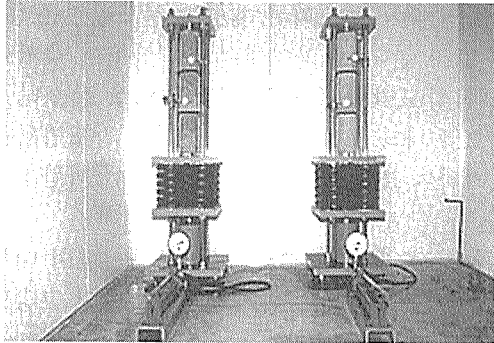


[사진 2] 콘크리트의 건조수축 시험장치

(4) 크리프시험

콘크리트의 크리프 시험방법은 KS F 2453 및 ASTM C 512의 규준에 따라 실시하였다. 크리프 측정을 위한 시험체는 $\phi 150 \times 300\text{mm}$ 원주형을 사용하였다.

제작된 크리프 시험체는 24시간 내에 해체하여 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 양생온도에서 28일동안 표준양생을 실시하였다. 한편, 재하기간동안의 항온항습실 온도는 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 를 유지시켰으며, 습도는 55%로 하였다. 크리프시험은 [사진 3]과 같이 실시하였다.



(사진 3) 콘크리트의 크리프 시험장치

재령 28일에서 압축강도의 40%를 초기재하하여 크리프시험을 실시하였으며, 재하하중의 측정에는 50ton용량의 Load Cell을 이용하였다. 또한, 하중값이 초기재하 하중의 2% 이상 오차가 생길 경우에는 보정하도록 하였다.

3. 실험결과의 분석 및 검토

3.1 굳지않은 콘크리트 특성 및 검토

(1) 슬럼프 및 공기량 변화

플라이애쉬의 대체율별 물결합재비에 따른 슬럼프 및 공기량 실험결과는 [표 5]와 같다.

플라이애쉬의 대체율이 증가할수록 목표 슬럼프(18±2cm)를 확보하기 위한 고성능 감수제 첨가율은 증가하였다. 이는 열병합발전소의 연소온도가 낮은 관계로 인해 플라이애쉬의 입형이 불규칙하고 미연탄소분이 많이 존재하고 있기 때문이라고 할 수 있다.

또한, 플라이애쉬 대체율의 증가에 따라 점성이 증대되는 경향을 나타내고 있기 때문에 재료분리 저항성이 우수할 것으로 사료된다. 그리고, 플라이애쉬의 대체율이 증가할수록 콘크리트의 응결시간이 증가하는 경향이 있기 때문에 향후에는 현장품질관리 및 거푸집 관리방안도 함께 고려해야 할 것이다.

한편, 공기량(비연행성)은 플라이애쉬의 대체율이 증가할수록 약간 감소하는 것으로 나타내었는데, 이는 미세한 플라이애쉬 입자가 공극을 충전하기 때문이라고 사료된다.

(표 5) 굳지않은 콘크리트의 시험결과

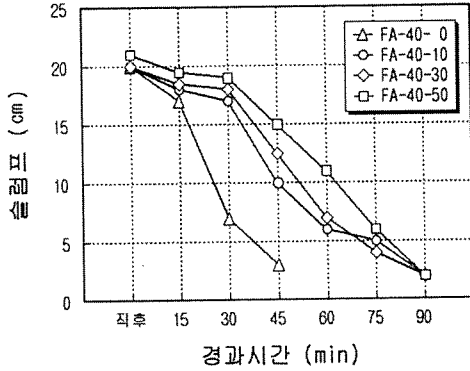
구분 조합조건	W/B (%)	S/a (%)	고성능 감수제 (B×%)	콘크리트 특성	
				슬럼프 (cm)	공기량 (%)
FA-40-0	40	41	0.8	17.0	1.4
FA-40-10			0.9	17.5	1.1
FA-40-30			1.1	18.5	0.9
FA-40-50			1.8	20.0	0.8
FA-45-0	45	41	1.0	17.5	1.9
FA-45-10			1.0	19.0	1.4
FA-45-30			1.5	24.0	1.2
FA-45-50			2.0	21.0	1.0
FA-50-0	50	43	0.8	18.0	1.2
FA-50-10			0.9	19.5	1.2
FA-50-30			1.3	19.5	1.1
FA-50-50			1.8	17.5	1.0
FA-55-0	55	45	1.1	17.0	1.8
FA-55-10			1.1	18.0	1.3
FA-55-30			1.3	20.0	1.3
FA-55-50			1.6	19.0	1.5
FA-60-0	60	47	1.3	12.0	2.2
FA-60-10			1.1	7.0	2.5
FA-60-30			1.2	8.0	1.8
FA-60-50			1.8	8.0	1.8

(2) 경시에 따른 유동특성

플라이애쉬 대체율별 경시에 따른 유동특성을 알아보기 위해 물결합재비 40%를 대상으로 플라이애쉬 대체율 0, 10, 30, 50(%)로 하여 슬럼프 시험을 수행하였다. 시험결과는 [그림 2]에 나타난 바와 같다.

플라이애쉬의 대체율에 따른 슬럼프의 경시 변화는 대체율이 증가할수록 손실율이 감소하

는 것으로 나타났다. 이는 고성능 감수제의 첨가량 및 플라이애쉬 혼입량에 따른 응결 지연 현상으로 사료된다.



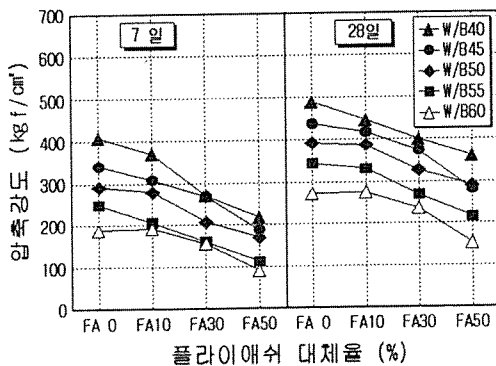
(그림 2) 플라이애쉬 대체율에 따른 슬럼프의 경시변화

3.2 경화 콘크리트의 특성 및 검토

(1) 플라이애쉬 대체율에 따른 강도발현

조합조건별 플라이애쉬의 대체율에 따른 강도발현은 [표 6]에 나타난 바와 같다.

플라이애쉬의 대체율이 증가할수록 f_{c7}/f_{c28} 압축강도비는 감소하게 되는데, 이는 플라이애쉬의 포졸란 반응이 후기재령에서 일어나기 때문에 초기강도 발현이 혼입하지 않은 콘크리트에 비해 낮음을 알 수 있다. 또한, 플라이



(그림 3) 플라이애쉬 대체율에 따른 강도발현

애쉬의 대체율에 따른 재령별 강도발현은 [그림 3]과 같다. 플라이애쉬의 대체율이 증가할수록 강도발현은 거의 직선적으로 감소하는 것으로 나타났기 때문에 요구되는 강도범위를 고려하여 조합조건을 선정하는 것이 바람직하다.

따라서, 물결합재비 40%, 플라이애쉬 대체율 30% 이하에서는 400kgf/cm^2 이상의 고강도 콘크리트를 제조하는 것이 필요하며, 300kgf/cm^2 이하의 보통강도 콘크리트를 제조하기 위해서는 콘크리트의 중성화에 커다란 문제가 없는 범위내에서 플라이애쉬 대체율을 최대한 증대시켜 경제적인 조합을 선정하는 것이 좋을 것이다.

(표 6) 조합조건에 따른 강도발현 특성

구분	W/B (%)	S/a (%)	압축강도 (kgf/cm^2)		
			7일	28일	f_{c7}/f_{c28} 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			269	374	72
FA-45-50			188	281	67
FA-50-0	50	43	292	393	74
FA-50-10			279	388	72
FA-50-30			207	327	63
FA-50-50			169	290	58
FA-55-0	55	45	249	345	72
FA-55-10			207	332	62
FA-55-30			160	269	60
FA-55-50			113	216	52
FA-60-0	60	47	188	273	69
FA-60-10			192	275	70
FA-60-30			154	236	65
FA-60-50			90	153	59

(2) 압축-인장강도와의 관계

플라이애쉬를 혼입한 콘크리트의 압축-인장강도와의 관계는 [표 7]과 같다.

400kgf/cm² 이상의 고강도 콘크리트 범위에서는 인장/압축강도비가 1/15~1/16범위를 나타내었고 300kgf/cm² 이하의 보통강도 콘크리트 범위에서는 1/11~1/12로 나타내고 있다. 또한, 플라이애쉬 대체율이 증가할수록 다소 높은 범위를 나타내었다.

물론, 고강도 범위에서 취성적인 특성을 나타내는 현상은 동일하지만, 고강도 콘크리트 구조물에서의 취성파괴에 대처하기 위해서는 섬유보강의 혼입 및 고강도 철근의 사용 등 인장강도를 개선시키기 위한 방안을 검토해야

[표 7] 조합조건에 따른 압축-인장강도와의 관계

구분 조합조건	W/B (%)	S/a (%)	압축강도 (kgf/cm ²)	인장강도 (kgf/cm ²)	F _t /F _c 비
FA-40-0	40	41	490	31	1/16
FA-40-10			448	31	1/15
FA-40-30			400	31	1/12
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			374	30	1/13
FA-45-50			281	27	1/10
FA-50-0	50	43	393	26	1/15
FA-50-10			388	26	1/15
FA-50-30			327	26	1/13
FA-50-50			290	24	1/12
FA-55-0	55	45	345	26	1/13
FA-55-10			332	26	1/13
FA-55-30			269	24	1/11
FA-55-50			216	20	1/11
FA-60-0	60	47	273	23	1/12
FA-60-10			275	23	1/12
FA-60-30			236	20	1/12
FA-60-50			153	15	1/10

할 것이다.

3.3 경화 콘크리트의 내구특성 및 검토

(1) 동결융해횟수에 따른 내동해성

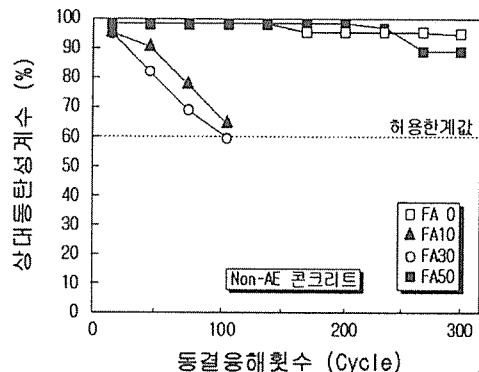
[그림 4]는 공기를 연행하지 않은 콘크리트 (Non AE 콘크리트)의 플라이애쉬 대체율에 따른 상대 동탄성계수와 동결융해횟수와의 관계를 나타낸 것이다.

그림에서 나타난 바와 같이 플라이애쉬의 대체율이 10%, 30%인 경우에 상대적으로 낮은 사이클에서 손상을 받고 있는 것을 알 수 있으며, 50%인 경우에는 내구성 지수가 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 플라이애쉬의 사용 및 강도의 대소에 따른 영향으로 사료되며, 앞으로 계속적인 실험을 통해 규명할 필요가 있다.

또한, [그림 5]는 플라이애쉬 대체율 30%인 경우에 공기연행체의 사용량(공기량)에 따른 시험결과를 나타낸 것이다.

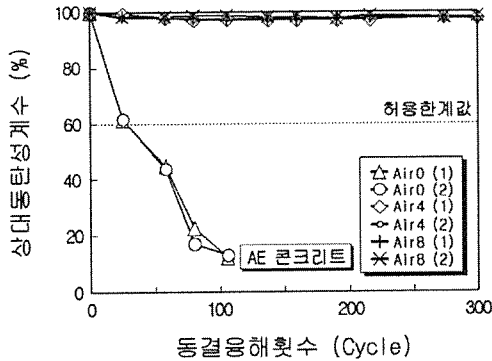
그림에서 보듯이 동일 조합조건에서 공기연행체 첨가량이 증가할수록 내구성 지수가 우수한 것으로 나타났다.

한편, 열병합발전소 플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 경우, 소요의 공기량을 확보하기



[그림 4] 동결융해횟수에 따른 상대동탄성계수(W/B 40%)

위한 공기연행제의 사용량은 화력발전소 플라이애쉬를 사용한 콘크리트보다 2배 정도의 높은 첨가량을 나타내고 있다. 이는 플라이애쉬 성분중 미연소 탄소에 의한 흡착효과가 상대적으로 크기 때문인 것으로 사료된다.

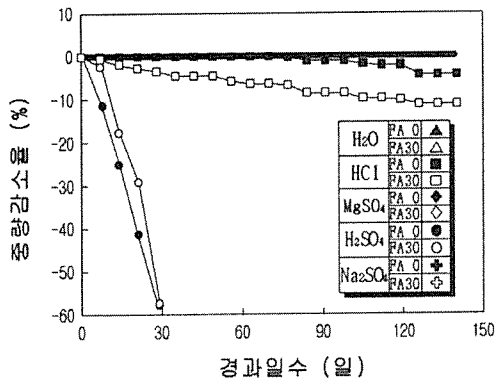


(그림 5) 동결융해횟수에 따른 상대동탄성계수(W/B 50%)

(2) 내약품성

플라이애쉬를 혼입하지 않은 시험체와 30%를 혼입한 시험체를 제작하여 각각의 시약에 침식시킨 후, 재령별 측정된 시험체의 중량감소율은 [그림 6]과 같다.

실험결과, 황산(H₂SO₄)과 염산(HCl)을 시약으로 사용한 용액에 침식시킨 시험체는



(그림 6) 경과일수에 따른 중량감소율 변화

침식재령 초기부터 중량감소를 나타내었으며, 특히 황산(H₂SO₄)에 침식시킨 시험체는 재령 3주의 중량감소율이 50%에 도달할 정도로 침식을 많이 받는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 플라이애쉬 혼입에 관계없이 측정된 것으로, 강알칼리성인 시멘트 수화물과 강산성인 황산(H₂SO₄)과 염산(HCl)의 화학작용에 의한 것으로 사료된다.

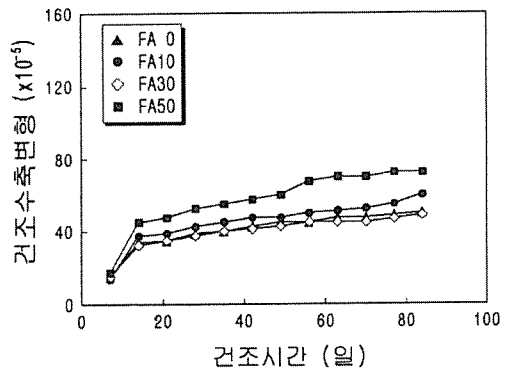
한편, 염산(HCl)에 침식시킨 경우, 플라이애쉬를 30% 혼입한 시험체의 중량감소율이 혼입하지 않은 시험체보다 약간 높은 것으로 나타났으며, 그밖의 용액(황산마그네슘 및 황산나트륨)에 침식시킨 시험체는 플라이애쉬 혼입여부에 관계없이 중량감소가 일어나지 않았다.

3.4 경화 콘크리트의 장기거동특성 및 검토

(1) 건조수축 특성

물결합재비 40%에서 건조수축에 따른 특성을 검토하기 위한 콘크리트의 길이변화 시험 결과는 [그림 7]과 같다.

그림에 나타난 바와 같이 플라이애쉬를 10, 30% 혼입한 콘크리트는 플라이애쉬를 혼입하지 않은 콘크리트와 유사한 경향을 나타내고 있는 반면에, 플라이애쉬 대체율이 50%로 높



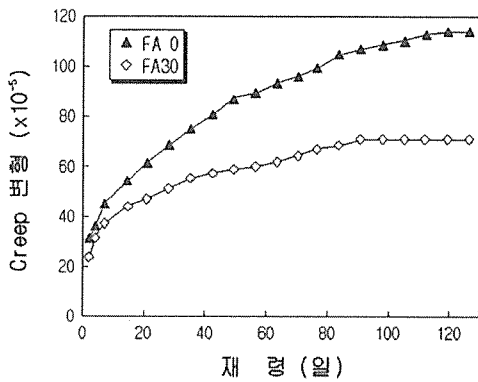
(그림 7) 건조기간에 따른 건조수축변형

은 경우에는 혼입하지 않은 콘크리트에 비해 높은 수축변형량을 나타내었다.

이는 단위수량이 일정할 경우, 플라이애쉬 대체율이 증가함에 따라 콘크리트 페이스트의 체적이 상대적으로 증가하였기 때문에 건조수축 변형이 증가한 것으로 사료된다.

(2) 크리프 특성

물결합재비 40%에서 플라이애쉬를 혼입하지 않은 시험체와 30% 혼입한 시험체의 크리프 변형을 재령별로 측정된 결과는 [그림 8]과 같다.



[그림 8] 재령에 따른 크리프변형

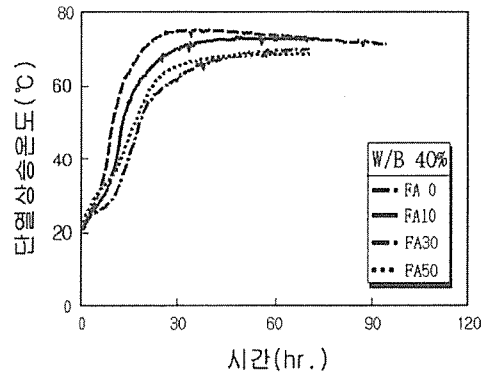
실험결과에 따르면, 플라이애쉬를 30% 혼입한 콘크리트의 크리프 변형은 플라이애쉬를 혼입하지 않은 콘크리트보다 작은 것으로 나타났다. 재령강도의 40%를 가압한 조건에서 강도발현성과의 관계를 명확하게 규명하기는 어렵지만 플라이애쉬 30%를 혼입한 콘크리트의 크리프 변형은 큰 문제가 없을 것으로 사료된다.

3.5 콘크리트의 수화특성 및 검토

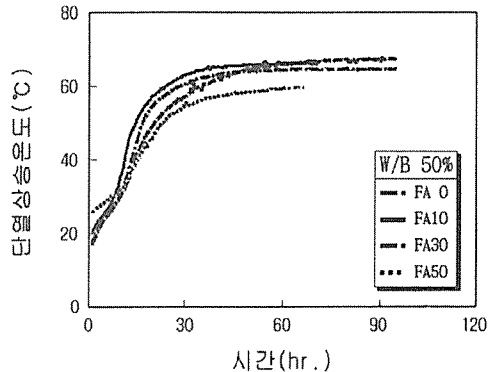
물결합재비가 40%인 시험체에 대한 플라이애쉬 대체율별 단일온도상승 시험결과는

[그림 9]와 같다.

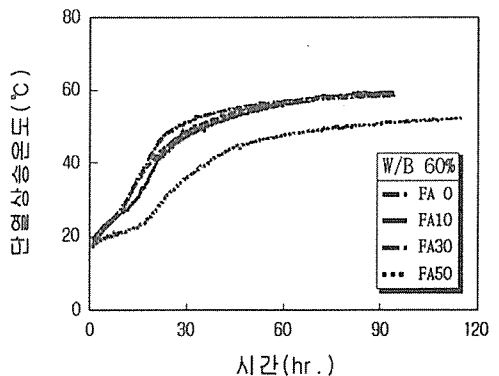
물결합재비 40%인 콘크리트에서 단일온도상승곡선은 플라이애쉬의 대체율이 증가할수



[그림 9] 경과시간에 따른 단일상승온도(W/B 40%)



[그림 10] 경과시간에 따른 단일상승온도(W/B 50%)



[그림 11] 경과시간에 따른 단일상승온도(W/B 60%)

록 낮게 측정되었다. 물론, 단열온도상승곡선의 기울기도 대체율이 증가할수록 낮게 나타나는 경향을 보였다.

또한, 물결합재비가 50% 및 60%인 콘크리트의 단열온도상승곡선은 각각 [그림 10] 및 [그림 11]에 나타난 바와 같다.

물결합재비에 관계없이 플라이애쉬의 대체율이 증가할수록 단열온도상승 기울기가 낮게 측정되었는데, 이는 화력발전소 플라이애쉬와 마찬가지로 열병합발전소 플라이애쉬를 사용하면 수화열 저감효과가 있다는 것을 알 수 있다.

그러나 물결합재비에 따른 상승곡선은 매우 상이하게 나타났다. 즉, 물결합재비가 증가할수록 단열온도상승값은 감소하고 상승기울기도 완만해지는 경향을 나타내었다. 이는 일정한 단위수량(175kgf/m^3)에 대해 물결합재비가 증가할수록 단위결합재량이 감소하게 되고 동일한 대체율에서도 단위시멘트량이 감소하기 때문에 시멘트 절대량의 감소에 따른 수화발열량 및 상승속도가 감소하게 된 것으로 사료된다.

4. 결론

국내 열병합발전소에서 생성되는 플라이애쉬의 품질특성 및 콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험결과를 요약하면, 다음과 같다.

(1) 열병합발전소 플라이애쉬는 일반적인 화력발전소 플라이애쉬보다 연소온도에 따른 영향으로 CaO 함량이 높다.

(2) 400kgf/cm^2 이상인 고강도 콘크리트를 제조하기 위해서는 물결합재비 40% 범위에서 플라이애쉬 대체율을 30% 이하로 관리하는 것이 바람직하다.

(3) 경시변화에 따른 유동특성은 플라이애쉬의 대체율이 증가할수록 슬럼프 손실이 감소

되었는데, 이는 고성능 감수제 첨가량 및 플라이애쉬 혼입량에 따른 응결지연 작용에 기인한 것이다.

(4) 내구성 실험결과, 플라이애쉬 대체율을 10, 30%인 경우, 상대적으로 낮은 사이클에서 손상을 받으나 치환율이 50%인 경우에는 내구성 지수가 크게 증가하였다. 또한, 플라이애쉬 대체율 30%에서 적정한 공기연행제의 첨가에 따라 내동해성 확보가 가능하였다. 한편, 내약품성 시험결과에서는 플라이애쉬의 대체율에 관계없이 우수한 것으로 나타났다.

(5) 장기특성 실험결과, 건조수축변형의 경우, 50%를 제외하면 혼입하지 않은 콘크리트와 유사한 것으로 나타났으며, 크리프 변형은 플라이애쉬 30% 혼입한 콘크리트가 혼입하지 않은 콘크리트보다 작게 나타났다.

(6) 콘크리트의 수화특성을 알아보기 위한 단열상승온도는 대체율이 증가할수록 감소하였으며, 물결합재비가 클수록 감소하는 경향을 나타내었다.

참고 문헌

1. 박칠림, 이보근, 권영호, 이상수, 원철, "열병합발전소 플라이애쉬의 특성 및 활용방안에 관한 실험적 연구", 대한건축학회 춘계학술발표논문집, 제15권 1호, 1995. 4, pp.639~644
2. 박칠림, 안재현, 권영호, 이상수, 원철, "고칼슘 플라이애쉬의 특성 및 활용방안", 한국콘크리트학회논문집 제7권5호, 1995. 10, pp.155~163
3. 박칠림, 안재현, 이상수, 원철, "열병합발전소 플라이애쉬의 품질 및 콘크리트의 역학적 특성", 한국콘크리트학회, 가을학술발표논문집, 제7권 2호, 1995. 11, pp.69~74
4. 박칠림, 권영호, 이상수, 원철, 안재현, "C급 플라이애쉬 콘크리트의 장기특성에 관한 연구", 한국콘크리트학회, 봄학술발표논문집, 제8권

1호, 1996. 5, pp.141~145

5. K. Wesche., "Fly Ash in Concrete", Report of Technical Committee 67-FAB, RILEM, 1991
6. JIS 原案, "セメントペーストの溶液浸せきによる耐薬品性試験方法(案)", コンクリート工

學, Vol.23, No.3, pp.63~64, 1985

7. Diamond Sydney, "On the Glass Present in Low-Calcium and High Calcium Fly Ash," Cement and Concrete Research, Vol.13, NO.4, pp.459~464, July 1983.

