

고칼슘 플라이애쉬의 특성 및 활용방안에 관한 연구

A Study on the Properties & Application for High-Calcium Fly Ash

원 철* 이상수** 권영호**
Won, Cheol Lee, Sang Soo Kwon, Yeong Ho
안재현*** 박철림***
Ahn, Jae Hyen Park, Chil Lim

요 약

본 연구의 목적은 고칼슘 플라이애쉬를 건설산업에 재활용하는 방안을 확보하는 것이며 이를 통해 자원 재활용은 물론 환경보존, 경제성, 신재료 등의 개발 측면에 보다 많은 자료를 실험을 통해 정립하고자 한다. 이러한 연구를 위해 고칼슘 플라이애쉬의 화학적·물리적 특성을 분석하였으며, 콘크리트에 사용 가능성을 검토하기 위하여 배합조건별 치환율을 선정하여 각각의 변수에 대한 유동성 및 강도 발전 성상을 비교·분석하였다. 또한 콘크리트의 내구성 및 탄성계수와 같은 역학적 특성도 알아보았다.

본 연구결과, ① 화학적 분석결과, 유리석회(CaO)의 함량이 높다. ② 모르타르의 단위수량비는 증가, 압축강도비는 규준을 만족하였다. ③ FA 30%, W/B 40%범위에서 400kg/cm² 이상의 고강도 콘크리트를 제조, 300kg/cm² 이하의 보통강도 콘크리트 생산은 W/B 45%, FA 50%에서 가능하였다. ④ 내구성 실험 결과, 플라이애쉬의 치환율이 50%인 경우에 耐久性指數가 증가하였다. ⑤ 운반시간에 따른 경시변화는 플라이애쉬의 치환율이 증가할 수록 슬럼프 손실율이 감소하였다. ⑥ 탄성계수는 대한건축학회의 규준식과 일치하였다.

Abstract

The primary purpose of this study is to investigate reusal techniques of high-calcium fly ash in the construction field, which may contribute to the savings of construction materials and conservating environment. Furthermore, it can setup material properties or characteristics required for development of new materials. Firstly, chemical and physical cahracteristics of high-calcium 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

* 정희원, (주)대우건설기술연구소 연구원
** 정희원, (주)대우건설기술연구소 주임연구원
*** 정희원, (주)대우건설기술연구소 선임연구원
**** 정희원, (주)대우건설기술연구소 소장(공박)

• 본 논문에 대한 토의를 1995년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 1996년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

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.

Keywords : high-calcium fly ash, replacement ratio, mixing conditions, elapsed time, elastic modulus, strength development, durability

1. 서론

1.1 연구배경

최근 공업단지내 입주업체 공장의 신·증설에 따른 가동률 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 해결해야 할 당면과제로 직면해 있는 실정이다. 특히 資源節約과 再活用 促進에 관한 法律(제30조)에 의하면 산업부산물인 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 고칼슘 플라이애쉬를 건설산업에 사용할 수 있는지를 검토·분석하고 규명할 필요가 있다.

미국과 캐나다의 플라이애쉬 규준¹⁾은 F급(Low-Calcium Fly ash), C급(High-Calcium Fly ash)으로 구분·관리하며, 콘크리트 산업에 활용하고 있다. 반면, 국내에서는 F급 플라이애쉬만을 규정하여 사용하는 실정이다.

1.2 연구목적 및 범위

본 연구의 목적은 실험을 통해 열병합발전소에서 생성되는 고칼슘 플라이애쉬를 건설산업에 재활용하는 방안을 확보하는 것이며, 이를 통해 자원 재활용은 물론 환경보존, 경제성, 신재료의 개발 측면에서도 보다 유용한 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

이러한 연구를 위해 울산석유화학공단내 열병합발전소에서 생성되는 고칼슘 플라이애쉬를 대상으로 화학적·물리적 특성을 분석하였으며, 또한 배합조건 및 치환율을 선정하여 流動性, 經時變化, 耐久性 및 強度發現 性狀을 비롯한 여러가지 역학적 특성을 비교·분석하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료의 특성

시멘트는 S사의 내수용 보통 포틀랜드 시멘트(1종)로 품질시험결과는 Table 1과 같다.

Table 1 Properties of cement(type 1)

Blaine (cm ² /g)	Specific gravity	Soundness (%)	Compressive strength (kg/cm ²)		
			3D	7D	28D
3.031	3.15	0.4	180	278	381

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

Table 2 Properties of aggregates

Types	Fine	Coarse
Specific gravity	2.60	2.67
F.M.	2.47	6.42
Abrasion(%)	-	22.0
Absorption(%)	1.24	0.81
Unit weight (kg /m ³)	1,550	1,540

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

2.2 고칼슘 플라이애쉬 특성

2.2.1 연소방식 및 발생량

울산 열병합발전소의 발전설비는 유연탄 유동층 연소보일러와 복수터빈 발전기 및 관련 부속설비로 구성되어 있으며, 플라이애쉬가 생성되는 연소방식 및 규모는 Table 3과 같다.

Table 3 Production and burning method

Burning method			Production (ton/year)	
Flowing medium	Temperature	Coal Size	Fly Ash	Bottom Ash
Sand	800~950℃	15mm Under	35,000	4,000

열병합발전소 보일러의 연소방식은 유동매체(sand)와 연료를 유동화시키는 것으로, 이때 석회석을 주입하여 연소중에 발생하는 SO₂와 반응시켜 CaSO₄를 생성시켜 제거하는 탈황설비를 갖추고 있다. 이러한 脫磺設備 및 재처리를 하지않고 원탄을 사용하는 방식이 열병합발전소의 장점으로 생각된다.

울산 열병합발전소의 연소보일러에서 생성되는 애쉬는 석탄량의 10% 정도이며, 이 중에서 건설재료로 사용할 수 있는 플라이애쉬는 약 90%이다.

현재 플라이애쉬 처리비는 2만원/ton 정도로 소요되며, 향후 건설재료로 플라이애쉬가 활용된다면 처리비 절감은 물론 시멘트 代替材로 인한 경제성 확보 및 환경보존, 자원재활용의 측면에서 큰 의의가 있을 것으로 사료된다.

2.2.2 플라이애쉬의 화학적 특성

본 연구에서 사용된 고칼슘 플라이애쉬와 저칼슘 플라이애쉬의 화학적 성분을 분석한 결과는 Table 4와 같다.

Table 4 Chemical properties of Fly ash

Chemical ingredient Types	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
High calcium fly ash(1)	40.4	15.2	8.12	26.5	1.19	0.29	0.81	5.17
	63.72							
High calcium fly ash(2)	39.2	15.4	8.69	26.7	1.26	0.37	0.68	6.60
	63.29							
High calcium fly ash(3)	45.8	15.8	10.6	18.2	1.12	0.31	0.83	5.84
	72.20							
Low calcium fly ash(1)	62.8	20.7	9.0	2.56	1.33	0.27	0.85	tr
	91.5							
Low calcium fly ash(2)	54.1	27.5	7.6	3.66	1.05	0.52	-	0.13
	89							
KS L 5405 (equal to JIS)	Min. 70			-	Max. 5.0	Max. 1.5	-	Max. 5.0
ASTM C 618 (C class)	Min. 50			-	-	Max. 1.5	-	Max. 5.0

Table 4에서 보듯이 고칼슘 플라이애쉬는 포졸란반응성 광물인 SiO₂ 및 Al₂O₃의 함량이 저칼슘 플라이애쉬(보령산)와 KS L 5405의 기준보다 낮으나, CaO의 함량은 높게 측정되었다. 이러한 결과는 Fig. 1의 X선 회절분석결과에서 보듯이 SiO₂ 및 CaO의 피크강도가 높게 나타나는 것으로 알 수 있다.

일반적으로 F급 플라이애쉬는 SiO₂가 많고 CaO가 5% 이하로 적기 때문에 自硬性이 없을 뿐

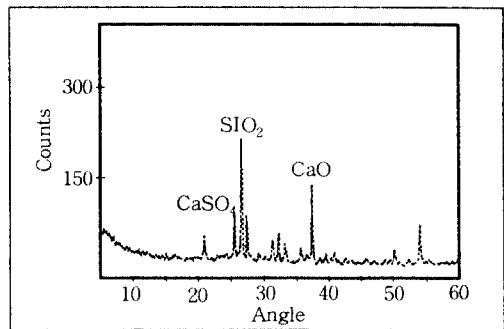


Fig. 1 Analysis of X-ray fluorescent

아니라 유기물 및 불연탄소의 성분이 남아있으나, C급 플라이애쉬는 CaO가 15~30%로 많고 SiO₂가 상대적으로 적기때문에 시멘트와 유사한 水硬性을 나타내는 동시에 포졸란 반응을 띠고있다.¹²⁾

이러한 화학성분의 차이는 수화반응 및 포졸란 반응에서 서로 다른 메카니즘을 갖게 된다. 국내의 화력발전소에서 생성되는 플라이애쉬의 대부분은 F급에 속하지만¹³⁾, 열병합발전소의 플라이애쉬는 화학성분에 따른 분류기준에서 볼 때, C급에 가깝다고 할 수 있다.¹⁴⁾ 따라서 콘크리트에 사용할 경우, 강도특성 및 耐久性·耐化學性·透水性·膨脹性 등의 특성을 시험으로 규명할 필요가 있다.

2.2.3 플라이애쉬의 물리적 특성

고칼슘 및 저칼슘 플라이애쉬의 물리적 특성은 Table 5와 같다.

Table 5 Physical properties of fly ash

Properties	Specific gravity	Blaine (cm ² /g)	Moisture content (%)	Loss on ignition
Types				
High calcium fly ash (1)	2.24	3.040	0.52	7.89
High calcium fly ash (2)	2.23	3.132	0.30	5.16
High calcium fly ash (3)	2.14	3.047	0.91	15.8
Low calcium fly ash (1)	2.15	3.200	0.14	3.91
Low calcium fly ash (2)	2.21	4.201	0.12	5.49
KS L 5405 (F class)	Min. 1.95*	Min. 2,400*	Max. 1.0	Max. 6.0%
ASTM C 618 (C class)	-	Retained on 45µm Max. 34%	Max. 3.0	Max. 6.0%

* JIS A 6201 specification

Table 5에서 보듯이 고칼슘 플라이애쉬는 분말도가 다소 낮으며, 강열감량이 약간 높은 것으로 나타났는데, 이는 연소온도가 저칼슘 플라이애쉬보다 상대적으로 낮기때문인 것으로 사료된다.

2.2.4 플라이애쉬의 입형 및 색상

고칼슘 및 저칼슘 플라이애쉬 입형은 Fig. 2 및 Fig. 3과 같다.

고칼슘 플라이애쉬는 저칼슘 플라이애쉬에 비해 불규칙한 입자의 형상을 띄고 있는데, 일반적으로 이러한 차이는 석탄의 연소온도에 의한 것으로 연소온도가 낮으면 강열감량이 증가하고 입형의 구형율이 낮다.¹⁵⁾

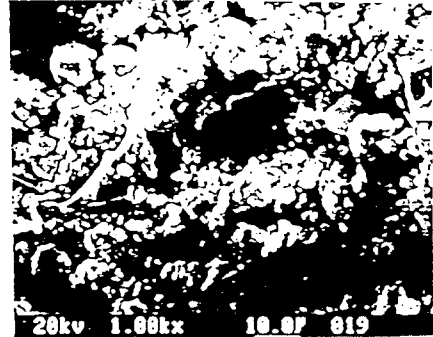


Fig. 2 Shape of high-calcium fly ash

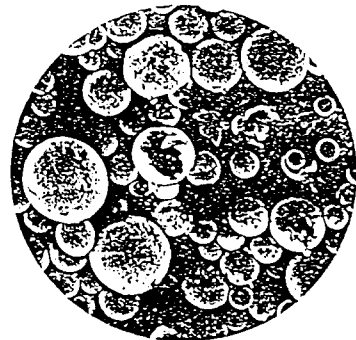


Fig. 3 Shape of low-calcium fly ash

저칼슘 플라이애쉬의 경우, 석탄의 연소온도가 1,000~1,500℃ 정도로 용융상태에서 플라이애쉬가 구형으로 생성되는 반면, 고칼슘 플라이애쉬의 경우에는 脫灰反應을 촉진시키기 위하여 연소온도를 800~950℃ 범위로 조정하기 때문에 플라이애쉬의 입형이 용융상태에 도달하지 못하고 생성되어 불규칙한 것으로 사료된다.

이러한 결과로 볼 때, 고칼슘 플라이애쉬를 사용한 콘크리트는 플라이애쉬의 구형입자가 갖는 Ball Bearing 효과가 낮을 것으로 예상된다. 따라

서 시공성 확보 및 클리딩, 재료분리 등에 유의해야 할 것으로 사료된다.

고칼슘 플라이애쉬의 입도분포는 1~100 μ m의 범위이며, 평균입경은 30~40 μ m로 시멘트의 입경과 유사하다. 색상은 저칼슘 플라이애쉬가 회색인데 비해 고칼슘 플라이애쉬는 갈색에 가깝다. 이러한 차이는 화학성분 비율 및 연소온도의 차이로 사료된다.

2.3 실험방법 및 변수

2.3.1 실험방법

고칼슘 플라이애쉬의 단위수량비 및 압축강도비의 측정은 KS 기준에 따라 제작한 플로우 및 모르타르 시험체로 특성을 비교하였으며, 콘크리트의 특성은 슬럼프, 공기량 및 재령별 강도를 기본으로 하였다. 또한 經時變化, 凍結融解抵抗性, 기타 역학적 특성을 함께 측정하였다.

콘크리트의 배합에서 플라이애쉬 치환방법은 콘크리트 특성 및 경제적 배합에 적합한 시멘트 중량비(replacement method)⁽³⁾로 결정하였다. 고성능 감수제의 첨가량은 목표 슬럼프(18 \pm 2cm)를 만족하는 범위에서 결정하였으며, 콘크리트 배합방법은 선-모르타르 방법을 선택하였고, 배합시각은 전체 3분으로 하였다.

2.3.2 배합변수

고칼슘 플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 배합변수는 Table 6과 같으며, 콘크리트의 상세 배합조건은 Table 7과 같다.

특히, 산업부산물의 재활용성을 높이기 위하여 플라이애쉬 치환율을 50% 범위까지로 하였다.

Table 6 Conditions of mixing design

W/B* (%)	S/a (%)	Unit Water (kg/m ³)	Replacement ratio of FA (C \times %)	S.P (%)	Target slump (cm)
40, 45	41	175	0, 10, 30, 50	0.8~2.0	18 \pm 2

* B : Binder material(cement+fly ash)

Table 7 Mixing conditions of concrete

Specimens	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight:(kg /m ³)				
			C	W	S	G	FA
FA-40-0	40	41	438	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	1,055	195

3. 실험결과 및 고찰

3.1 모르타르 시험결과

고칼슘 플라이애쉬의 재료 특성 및 콘크리트의 사용성을 검토하기 위하여 KS 기준에 따른 단위수량비 및 압축강도비 측정결과를 Table 8에 나타내었다.

Table 8 Properties of mortar

Codes	Unit weight(g)			Flow (cm)	Strength ratio(%)		Water ratio (%)
	C	S	FA		7d	28d	
High Calcium FA	382.5	1,250	127.5	14.8	85	113	105
Low Calcium FA	382.5	1,250	127.5	15.0	75	95	98
KS Code	510	1,250	247*	\pm 5mm	-	min. 60	max. 102

* Water weight (by Code)

모르타르 특성실험 결과, 고칼슘 플라이애쉬가 저칼슘 플라이애쉬보다 강도발현이 큰 것으로 나타났다. 이는 고칼슘 플라이애쉬가 시멘트와 유사한 수경성 물질인 CaO이 다량으로 함유하고 있어, 우수한 강도특성을 나타낸 것으로 사료된다.

그러나, 동일한 플로우(\pm 5mm)를 만족하는 단위수량비는 저칼슘 플라이애쉬보다 전반적으로 크게 나타났다. 이는 앞에서 실험한 플라이애쉬의 입형 및 성분에 따른 차이로 사료된다.

따라서 콘크리트의 流動性을 확보하기 위해서는 고성능 감수제의 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 Table 9와 같다.

플라이애쉬 치환율이 증가할 수록 목표 슬럼프 ($18 \pm 2\text{cm}$)를 확보하기 위한 고성능 감수제의 첨가량이 증가하였으며, 이에 따른 콘크리트의 粘性增加로 材料分離 抵抗性이 향상되었으며, 流動性 및 充填性을 개선할 수 있을 것으로 사료된다.

또한 플라이애쉬의 치환율이 증가할 수록 콘크리트의 응결시간이 증가하는 경향이 있기 때문에 현장 품질관리 및 거푸집 관리방안도 함께 고려해야 할 것이다.

Table 9 Properties of fresh concrete

Specimens	W/B (%)	S/a (%)	S.P. (C×%)	Properties	
				Slump (cm)	Air content (%)
FA 40-0	40	41	0.9	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	0.9
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

공기량은 플라이애쉬의 치환율이 증가할 수록 감소하는 경향을 나타내었는데, 이는 플라이애쉬의 미연탄소 성분에 의한 흡착효과로 사료되며⁽⁴⁾ 이에 대한 흡착 메카니즘을 향후 규명하는 방안이 필요하다.

3.2.2 경시변화에 대한 특성

콘크리트 배합직후의 초기 슬럼프를 $21 \pm 2\text{cm}$ 로 하여, 경시변화에 따른 슬럼프 및 슬럼프를 무로 비교하였으며, 결과는 Table 10에 나타난 바와 같다.

Table 10 Properties of elapsed time

Specimens	Properties (cm)	Elapsed time (min.)							
		0	15	30	45	60	75	90	
FA 40-0	Slump	20	17	7	3	-	-	-	
	Flow	35	27	20	-	-	-	-	
FA 40-10	Slump	19	14	8	6.5	4.5	2	-	
	Flow	31	22	21	20	-	-	-	
FA 40-30	Slump	20	18	17	10	6	5	2	
	Flow	51	43	36	20	-	-	-	
FA 40-50	Slump	24	22	21	17	12	6	2	
	Flow	58	56	51	35	20	-	-	

Table 10에서 보듯이 플라이애쉬의 치환율에 따른 슬럼프 경시변화는 치환율이 증가할 수록 손실율이 감소하는 것으로 나타났다.

이는 고성능 減水劑의 添加量 및 凝結遲延 現象에 따른 것으로 사료되며, 同一量의 고성능 減水劑를 후첨가할 경우 슬럼프 회복이 클 것으로 예상된다.

3.3 굳은 콘크리트 특성

3.3.1 치환율에 따른 강도발현

배합변수별 플라이애쉬의 치환율에 따른 강도발현은 Table 11에 나타난 바와 같다.

Table 11 Properties of strength

Specimens	W/B (%)	S/a (%)	Compressive strength (kg/cm ²)		
			7d	28d	f _{c7} /f _{c28} (%)
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 초기강도발현이 치환하지 않은 콘크리트에 비해 낮음을 알 수 있다.

플라이애쉬의 치환율에 따른 재령별 강도발현

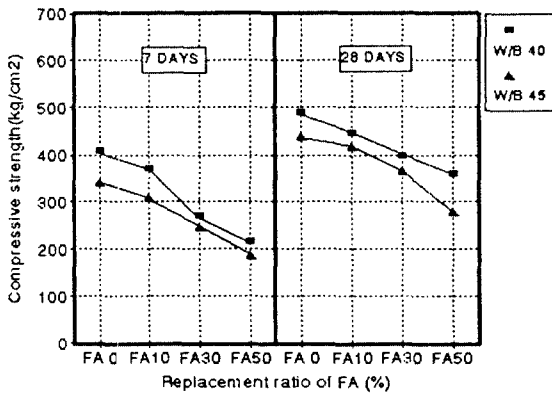


Fig. 4 Strength development by replacement ratio of FA

은 Fig. 4과 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/cm² 이상의 고강도 콘크리트를 생산하는 것이 필요하며, 300kg/cm² 이하의 보통강도 콘크리트를 생산하기 위해서는 플라이애쉬 치환율을 최대한 증대시켜 경제적인 배합을 선정하는 것이 좋을 것으로 사료된다.⁽³⁾

3.3.2 압축·인장강도와의 관계

플라이애쉬를 치환한 콘크리트의 압축·인장강도와의 관계는 Table 12와 같다.

400kg/cm² 이상의 高強度 콘크리트 領域에서는 압축/인장강도비가 1/15~1/16범위를 나타

Table 12 Relation of $f_c' - f_t$

Specimens	W/B (%)	S/a (%)	Strength(kg/cm ²)		f_t / f_c'
			Compressive	Splitting	
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

내었고, 400kg/cm² 이하의 普通強度 領域에서는 1/12~1/13로 나타내고 있다. 또한 플라이애쉬 치환율이 증가할 수록 다소 높은 범위를 나타내었다. 물론 高強度 領域에서 취성적인 특성을 나타내는 현상은 동일하지만, 고강도 범위에 적용하기 위해서는 인장강도를 개선하기 위한 방안을 검토해야 할 것이다.

3.4 동결융해 횟수에 따른 耐久性

Fig. 5는 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, 50%인 경우에는 耐久性 指數가 증가하는 것으로 나타났다.

플라이애쉬의 사용이 凍結融解 抵抗性を 증가시킨다는 연구결과^(6,9)도 많이 있기 때문에 계속적인 실험을 통해 플라이애쉬용 AE제 사용 및 명확한 경향을 분석할 필요가 있다.

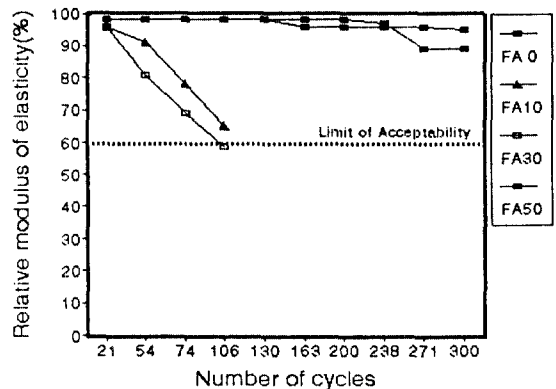


Fig. 5 Relation of freeze-thaw cycles and relative dynamic modulus(non-AE)

3.5 콘크리트의 역학적 특성

3.5.1 탄성계수

플라이애쉬 치환율에 따른 역학적 특성을 측정하기 위해 물/결합재비 40%를 선정하여 실험한 결과, Table 13에서 보듯이 영계수의 경우 대한건

축학회 표준식 $E_{1/3} = 2.1 \times (\rho/2.3) \times \sqrt{(F_c/200)}$ 의 결과와 유사한 값을 보이고 있다. 또한 콘크리트의 f_t/f_c 비는 1/11~1/13이고 f_b/f_c 비는 1/6~1/8정도로 나타났다.

Table 13 Mechanical properties

Specimens	Strength(kg/cm ²)			Young's modulus	Spec. of A.I.K
	Comp.	Split.	Flex.	(×10 ³ kg/cm ²)	
FA-40-0	431	37	69	3.15	3.08
FA-40-10	482	40	62	3.33	3.26
FA-40-30	370	34	61	2.96	2.86
FA-40-50	344	31	46	2.88	2.75

압축강도에 대한 인장강도 및 휨강도비를 개선하기 위해서는 매트릭스 부착력을 증가시키거나 사용성이 우수한 섬유보강 등의 방법을 강구하는 것이 바람직하다.

3.5.2 응력-변형도 관계

Fig. 5는 재령 28일에서의 플라이애쉬 치환율에 따른 응력-변형도 곡선을 나타낸 것이다. 응력-변형도 곡선의 경향은 강도범위에 따라 차이가 있으며, 치환율 10%를 제외하면 치환율이 증가할수록 상승 및 하강곡선의 기울기가 감소하였다.

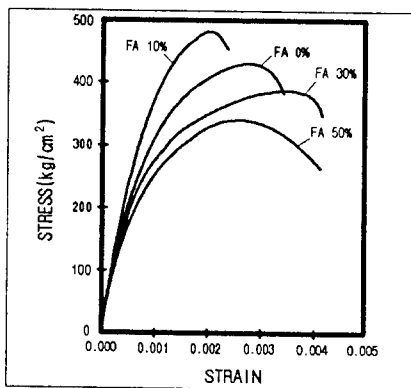


Fig. 6 Stress-strain curve

4. 결 론

우리나라 열병합발전소의 고칼슘 플라이애쉬의

재료특성 및 콘크리트의 활용방안에 관한 특성실험 결과는 다음과 같다.

(1) 고칼슘 플라이애쉬는 脫磺反應의 촉진을 위한 낮은 연소온도로 인해 유리 석회(CaO)의 함량이 높아 C급에 가까웠다.

(2) 모르타르의 단위수량비는 약간 증가하나, 압축강도비는 규준을 만족하며 포졸란 活性度가 높은 것으로 나타났다.

(3) 고칼슘 플라이애쉬의 치환율 30%, 물/결합재비 40% 범위에서 400kg/cm² 이상의 고강도 콘크리트를 생산할 수 있으며, 보통강도 콘크리트의 생산은 물/결합재비 및 치환율을 상향조정하는 것이 바람직하다.

(4) 운반시간에 따른 경시변화는 고칼슘 플라이애쉬 치환율이 증가할수록 슬럼프 손실이 감소되었는데, 이는 고성능 감수제 첨가량 및 응결지연 작용에 기인한 것이며, 콘크리트의 流動性 및 充填性, 材料分離 抵抗性이 매우 우수하였다.

(5) 내구성 실험 결과, 고칼슘 플라이애쉬의 치환율 10, 30%인 경우 상대적으로 낮은 사이클에서 손상을 받으나, 치환율이 50%인 경우에는 耐久性 指數가 크게 증가하였다. 향후 AE 제를 사용하는 방안도 함께 검토해야 할 것이다.

(6) 탄성계수 측정결과, 대한건축학회의 표준식의 결과와 유사한 값을 나타내었으며, 이에 따른 응력-변형도 곡선도 강도별 유사한 경향을 나타내었다.

(7) 향후 열병합발전소에서 생성되는 고칼슘 플라이애쉬를 활용하기 위해서는 이에 관한 규준을 정립해야 할 필요가 있다.

(8) 고칼슘 플라이애쉬의 품질관리 및 건조수축, 크리프, 내화학적, 포졸란 활성도 등에 관한 계속적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 열병합발전소 플라이애쉬를 재활용하기 위한 蔚山石油化學 支援(株)의 수탁연구과제로 수행된 것으로 서현민 팀장님을 비롯한 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

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. 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. 朴沘林, 權寧鎬, "건축구조물에 고강도 콘 크리트 현장적용-(株)대우진해현장-", 한국콘크리트 학회지 제5권4호, 1993. 12. pp. 54~65
4. 吉越盛次, "混和材としてのフライアッシュコンクリトに関する研究", 『土木學會論文集 第31號』, 1975年
5. 朴沘林 外, "열병합발전소 플라이애쉬의 特性 및 活用方案에 관한 實驗的 研究(고강도 콘크리트를 중심으로)", 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제6권2호, 1994. 11. pp. 211~216
6. 山崎寬司, "礦物質微粉末がコンクリトの強度におよぼす效果に関する基礎研究", 『土木學會論文集』, 1982年
7. (株)대우 建設技術研究所, 混和材를 사용한 高強度 콘크리트의 品質改善 研究, 技術論文, DEP-A0 27-93
8. K. Wesche, Fly Ash in Concrete(Properties and Performance), Report of Technical Committee 67-FAB, RILEM
9. Robert L. Yuan and James E. Cook, Study of a Class C Fly Ash Concrete, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral by Products, ACI Special Publication No. 79, ACI Detroit, 1983, 2Volumes pp. 1196

(접수일자 : 1995. 9. 7)