

고강도 플라이애쉬 콘크리트의 강도 및 작업성 특성 Strength and Workability Characteristics of High-Strength Fly Ash Concrete

○ 김진근* 박연동** 성근열***
Kim, Jin Keun Park, Yon Dong Sung, Keun Yeol

ABSTRACT

Fly Ash in concrete is known to be effective in improving workability, the reduction of heat of hydration, increasing the long-term compressive strength, and improving durability. Recently, fly ash is considered an essential material for the high-strength concrete.

In this paper, investigations for the strength and workability characteristics was carried out when fly ash was used in the high-strength concrete. As the result, fly ash was effective in increasing the long-term compressive strength, but the short-term compressive strength was gradually decreased with increasing fly ash contents. And also the use of superplasticizers was required for providing the proper workability when fly ash contents were increased. The optimum content of fly ash was about 10%.

1. 서론

화력발전소의 석탄의 연소 과정에서 발생하는 플라이애쉬는 산업 폐기물로서 막대한 처리 비용과 함께 매립장의 부족 등 여러가지 문제점을 야기시키고 있어 외국의 경우 플라이애쉬의 포졸란 성질을 이용하여 콘크리트의 혼화재로 사용하므로써 원가 절감과 콘크리트의 성질을 향상시키고 있다.

플라이애쉬를 콘크리트에 처음으로 사용한 것은 1937년 R. E. Davis 등^(1,2,3)이었으며, 1948년도에 U.S. Bureau of Reclamation에서 Hungry Horse Dam의 건설에 실제적으로 이용하였다.⁽²⁾

1970년대 들어와서 원유가 상승으로 인한 석탄화력발전소의 증가로 플라이애쉬의 생산량이 급격한 증가를 보이고 있고 국내의 경우 발생하는 플라이애쉬의 양이 연간 약 200만톤에 달하고 있다. 그러나 그 대부분이 폐기물로서 처리되고 10% 정도만이 레미콘, 벽돌제조, 도로포장 등에 이용되고 있는 형편이다.

한편 20세기 후반에 들어와서 구조물의 대형화, 특수화 추세로 보다 높은 강도의 콘크리트를 필요로 하게 됨에 따라 고강도 콘크리트의 개발 및 실용화의 필요성이 증가하고 있는 실정이다. 그러나 고강도 콘크리트는 제조상 높은 단위 시멘트량, 작업성 확보를 위한 혼화제의 사용, 사용 재료의 신중한 선택, 시공시 정밀 품질 관리 등, 많은 가격 상승 요인을 내재하고 있으므로 고강도

콘크리트의 실용화를 위해서는 플라이애쉬를 시멘트의 대체재로서 사용하는 등, 보다 저렴한 가격으로 고강도 콘크리트를 제조할 수 있도록 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 국산 플라이애쉬를 혼화재로 사용한 고강도 콘크리트의 강도 특성과 작업성 등을 검토함으로써 플라이애쉬 고강도 콘크리트의 실용화를 피하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 각 강도 수준의 고강도 콘크리트 기본 배합에 따라 플라이애쉬를 첨가하여 재령에 따른 강도 발현을 조사하여 국산 플라이애쉬의 최적 혼합율을 알아보고, 또한 고강도 콘크리트는 작업성의 확보가 필수적이므로 고성능 감수제를 사용하여 시간 경과에 따른 슬럼프 손실을 살펴봄으로써 작업성 확보 여부를 알아보하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험 계획

콘크리트의 강도, 내구성, 수밀성 등에 가장 큰 영향을 미치는 것은 물-시멘트비 및 단위 시멘트량이다. 본 연구에서는 고강도 플라이애쉬 콘크리트가 높은 강도, 내구성을 확보하고 재령에 따른 강도 발현 정도 및 작업성 특성을 분석하기 위하여 2종류의 보통 강도 콘크리트(배합 A, B) 및 4종류의 고강도 콘크리트(배합 C, D, E, F)를 기본 배합으로 선정하고, 시멘트에 대한 중량비 0%, 10%, 20%, 30%를 플라이애쉬로 치환하는 방법으로 3일, 7일, 28일, 90일의 압축강도를 측정하였다. 또한 배합비 G는 고강도 플라이애쉬 콘크리트의 작업성 확보 여부를 알아보기 위하여 단위 시멘트량 550kg/m³의 기본 배합에 시멘트량의 10%를 플라이애쉬로 치환

* 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수
** 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정
*** 준희원, 한국과학기술원 토목공학과 석사과정

하고 고성능 감수제 및 지연제를 사용하여 비빔 후 80분까지 20분 간격으로 슬럼프 변화량을 조사하였다. 본 연구에서 선택한 배합은 [표 1]과 같다.

[표 1] 고강도 플라이애쉬 콘크리트의 배합표 및 슬럼프

공시제 번 호	단 위 중 량 (kg/m ³)					혼 화 제 (type F) (%)	슬럼프 (cm)
	시멘트	Fly Ash	물	잔골재	굵은골재		
A-0	330	0	198.0	788.0	963.0	0	7.4
A-1	297	33	198.0	781.3	954.8	0	4.9
A-2	264	66	198.0	775.0	947.0	0	5.3
A-3	231	99	198.0	768.3	937.5	0	5.0
B-0	350	0	192.5	787.0	961.7	0	5.5
B-1	315	35	192.5	779.8	953.3	0	2.8
B-2	280	70	192.5	773.0	945.0	0	3.5
B-3	254	105	192.5	766.0	936.0	0	3.4
C-0	420	0	168.0	702.8	1054.3	1.2	
C-1	378	42	168.0	695.5	1043.5	1.2	
C-2	336	84	168.0	688.0	1032.0	1.5	
C-3	294	126	168.0	680.0	1020.0	1.7	
D-0	480	0	168.0	683.3	1024.8	1.5	
D-1	432	48	168.0	674.5	1011.5	1.5	
D-2	384	96	168.0	665.5	998.5	1.5	
D-3	336	144	168.0	657.3	985.8	1.8	
E-0	520	0	166.4	638.0	1042.0	1.8	
E-1	468	52	166.4	629.3	1026.8	1.8	
E-2	416	104	166.4	620.5	1012.5	2.0	
E-3	364	156	166.4	611.8	998.3	2.3	
F-0	600	0	162.0	568.8	1056.3	2.0	
F-1	540	60	162.0	559.8	1039.3	2.0	
F-2	480	120	162.0	550.3	1021.8	2.3	
F-3	420	180	162.0	541.0	1005.0	3.0	
G-1	550		165.0	580.6	1078.3	2.0	
G-2	550		165.0	580.6	1078.3	1.7+0.3*	
G-3	495	55	165.0	572.3	1062.9	2.0	
G-4	495	55	165.0	572.3	1062.9	1.7+0.3*	

*type D

2.2 실험 재료

2.2.1 시멘트

고강도 콘크리트 제조시 높은 단위 시멘트량으로 수화열이 많이 발생함을 고려하여 본 연구에서 사용한 시멘트는 국내에서 생산되는 시멘트 중 비교적 고강도 발현에 적합한 것으로 알려진 S사 제품의 수출용 2종 시멘트를 사용하였으며, 그 물리적 성질은 [표 2]와 같다.

[표 2] 시멘트의 물리적성질

시멘트 종 류	비 중	분 말 도 (cm ² /g)	용 결 (시간:분)		압축강도 (kg/cm ²)		
			초 결	종 결	3 일	7 일	28 일
Type II	3.15	3900	4:10	6:15	250	320	430

2.2.2 플라이애쉬

본 실험에서는 국산 플라이애쉬 중 콘크리트 혼합 재료로 가장 적합하다고 알려진 보령산 플라이애쉬를 사용하였다. 보령산 플라이애쉬는 사용 탄종이

전량 외국 수입 유연탄이며, 그 품질은 강열감량이 조금 높은 것을 제외하고는 KS L 5405의 품질 규격을 만족시키고, 또 ASTM C 618 F급의 규격을 모두 만족시킨다. 본 실험에서 사용한 플라이애쉬의 성분은 [표 3]과 같다.

[표 3] 플라이애쉬의 성분 및 성상

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	ig. Loss (%)	비 중	분 말 도 (cm ² /g)
55.1	34.9	3.7	3.6	1.2	0.7	6.8	2.06	3318

2.2.3 골재

본 연구에 사용한 잔골재는 금강 유역의 대평리산 강모래이며, 굵은골재는 쇄석 골재가 둥근 골재보다 고강도 발현에 유리함⁽⁴⁾을 고려하여 최대치수 13mm의 화강암 쇄석을 사용하였다. 잔골재 및 굵은골재의 물리적 성질은 [표 4]와 같다.

[표 4] 골재의 물리적성질

종 류	최대입경 (mm)	비 중	흡 수 율 (%)	조 립 율 (F.M)
잔 골 재		2.58	1.61	2.89
굵은골재	13	2.66	0.96	6.38

2.2.4 혼화제

고강도 콘크리트의 베이스 배합은 낮은 물-시멘트 비로 인해 작업성이 불량하므로 적절한 작업성을 확보하기 위해서는 감수제 계통의 혼화제를 사용해야 한다.

본 실험에서는 콘크리트의 제성질에 해로운 영향을 끼치지 않으면서 종래의 감수제에 비해 감수 효과가 탁월한 ASTM C 494, type F로 규정된 나프탈린계의 고성능 감수제와 고강도 플라이애쉬 콘크리트의 작업성 확보 여부를 알아보기 위하여 type D의 지연감수제를 사용하였다. 그 성분 및 성상은 [표 5]와 같다.

[표 5] 혼화제의 성분 및 성상

종 류	형 태	색 조	성 분	비 중	표준사용량
type F	액 상	암갈색	naphthalene polymers	1.21	0.4 - 3.0 %
type D	액 상	암갈색	hydroxylated organic compounds	1.24	0.2 - 0.5 %

2.3 비빔 방법

비빔에 사용된 믹서는 공칭용량 100리터의 강제식 믹서이며, 비빔은 재료를 굵은골재, 잔골재, 시멘

트, 플라이애쉬 순으로 투입하여 1분간 건비빔 한 다음, 물과 고성능 감수제를 동시에 첨가하여 4분간 비벼 고강도 콘크리트를 제조하였다.

2.4 공시체 제작 및 양생방법

압축강도 시험용 공시체는 ϕ 10x20cm 모듈드를 사용하여 KS F 2405에 따라 모듈드를 3층으로 나누어 각 층을 25회씩 붓다짐하여 제작하였다. 공시체는 제작 후 즉시 비닐을 덮어 수분의 증발을 방지하여 항온항습실(20±1°C, 99% R.H.)에서 48시간 성형 후 탈형하였다.

양생은 재령 28일까지 21±2°C의 수온으로 수중 양생을 하였으며, 그 이후로는 습윤 양생을 실시하였다.

2.5 실험 방법

압축강도 실험은 KS F 2405의 콘크리트의 압축강도 시험 방법에 따라 실시하였으며, 슬럼프 실험은 KS F 2402에 따라 비빔 즉시 실시하였다.

압축강도 실험은 3일, 7일, 28일, 90일 각 재령별로 3개의 공시체를 기본으로 하여 실시하였다. 이때 실험에 사용된 기기는 100톤 용량의 만능재료 시험기(U.T.M.)이며, 캘핑재료는 고강도 콘크리트 압축강도 실험에 적합한 유황 혼합물을 사용하였다.

[표 6] 압축강도

공시체 번호	압축강도 (kg/cm ²)			
	3 일	7 일	28 일	90 일
A-0	157	241	335	393
A-1	134	222	345	411
A-2	104	183	285	379
A-3	73	138	255	367
B-0	191	271	368	410
B-1	163	259	390	467
B-2	149	230	345	443
B-3	129	187	315	401
C-0	346	444	507	574
C-1	321	429	513	586
C-2	300	387	489	576
C-3	247	344	437	545
D-0	459	500	574	609
D-1	403	512	568	655
D-2	348	458	571	625
D-3	275	399	528	607
E-0	468	532	633	646
E-1	442	529	629	666
E-2	404	475	597	674
E-3	294	372	451	588
F-0	576	624	732	752
F-1	509	577	690	769
F-2	449	515	663	742
F-3	352	408	529	616
G-1	525	574	683	
G-2	480	588	699	
G-3	523	560	668	
G-4	478	560	679	

3. 결과 및 고찰

[표 6]은 배합 조건에 따른 각 재령별 압축강도를 나타내고 있으며, [표 7]은 고강도 플라이애쉬 콘크리트의 작업성 확보 여부를 알아보기 위한 슬럼프 변화량이다.

3.1 재령에 따른 강도 증진효과

[그림 1]은 재령에 따른 압축강도 발현 정도를 도시한 것이다. 플라이애쉬의 첨가율이 10%인 경우 단위 시멘트량이 비교적 적은 330kg/m³, 350kg/m³, 420kg/m³, 480kg/m³에서는 재령 28일 이전에 보통 콘크리트보다 강도가 높게 나타났으나, 단위시멘트량이 많은 520kg/m³, 600kg/m³에서는 재령 90일이 되어야 강도 역전이 이루어 졌다.

플라이애쉬의 첨가율이 20%, 30%로 증가할수록 초기 재령의 강도가 급격히 떨어졌으며, 30% 첨가 시에는 장기 재령에서도 강도 역전이 이루어지지 않았다. 또한 [그림 2]에서 알 수 있듯이 플라이애쉬의 첨가율이 10%일 때 28일 압축강도에 비하여 재령 90일의 압축강도는 단위 시멘트량에 따라 다소 차이는 있으나 평균적으로 9% 증가하였으며, 플라이애쉬 첨가율이 20%일 때 재령 90일의 압축강도는 재령 28일의 압축강도에 비해 19%증가가 있었

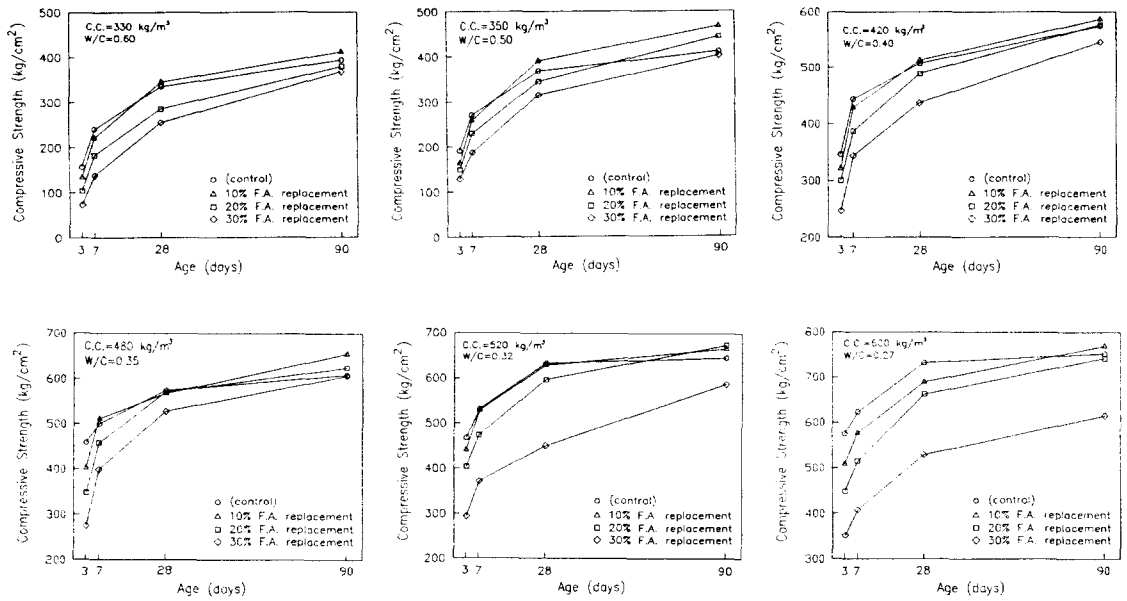
[표 7] 슬럼프 변화

공시체 번호	슬럼프 (cm)				
	즉시	20 분	40 분	60 분	80 분
G-1	22.7	23.0	22.5	20.0	18.1
G-2	23.4	23.1	20.7	17.7	15.6
G-3	21.8	21.7	19.0	17.3	12.3
G-4	22.1	21.1	20.1	13.1	8.0

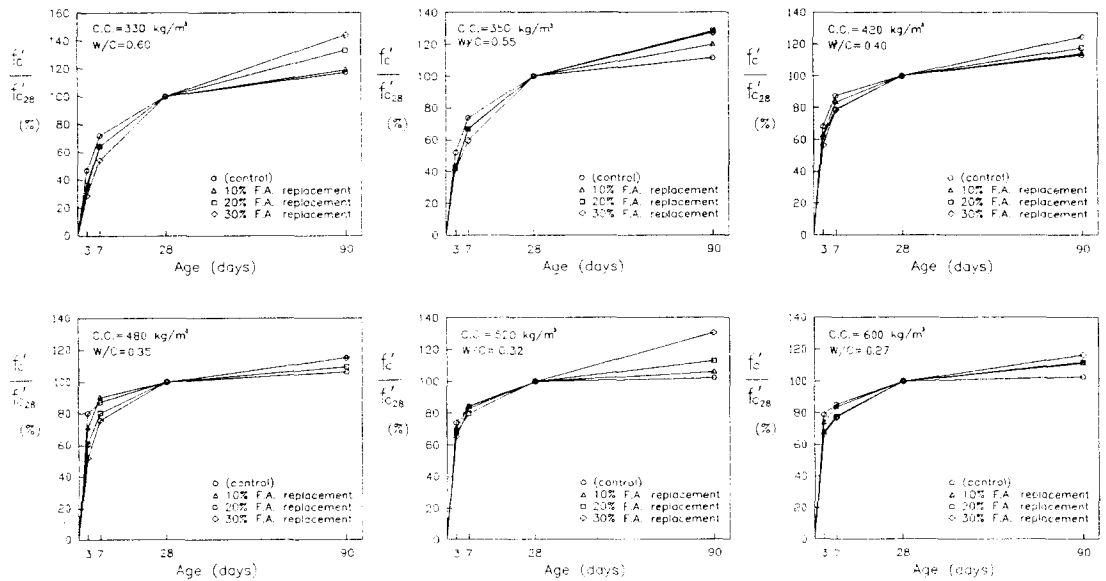
고, 30% 첨가시는 26% 증가가 있었다. 이것으로 부터 플라이애쉬의 첨가율이 증가할수록 재령에 따른 강도의 증진비가 큼을 알 수 있었다.

3.2 플라이애쉬 첨가율에 따른 강도 변화

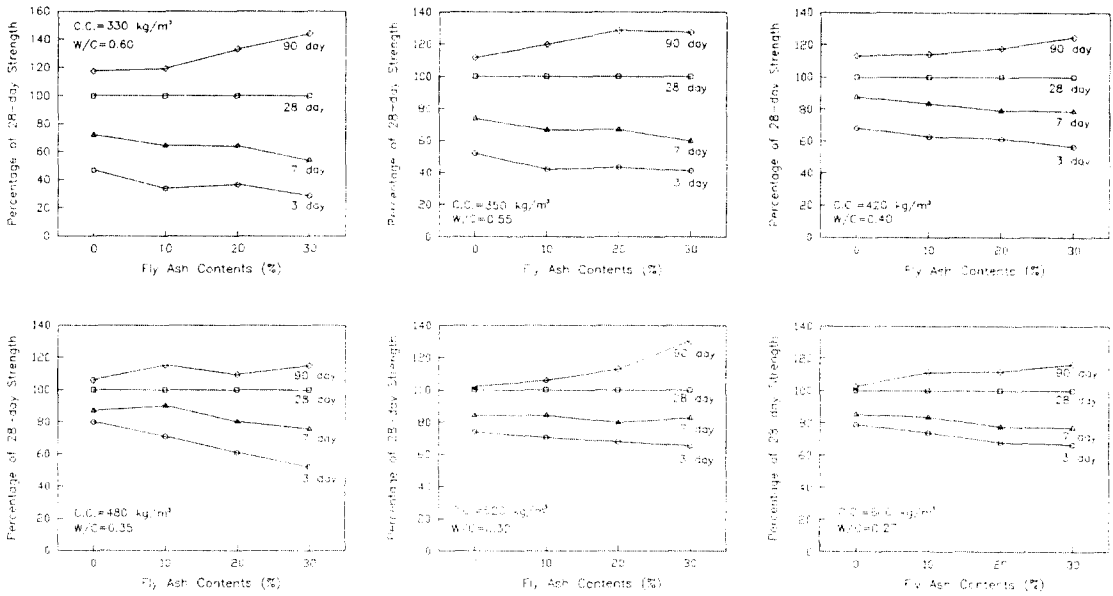
[그림 3]은 플라이애쉬의 첨가율에 따라 3일, 7일, 28일, 90일 재령의 28일 재령에 대한 압축강도비를 나타낸 것으로 플라이애쉬 첨가율이 증가함에 따라 단위 시멘트량에 관계없이 초기 재령에서의 강도는 일정하게 감소하고 있다. 장기 재령 강도는 플라이애쉬의 첨가율이 증가할수록 압축강도비가 점진적으로 증가하고 있어 플라이애쉬의 첨가율이 증가할



[그림 1] 재령에 따른 강도 변화



[그림 2] 재령에 따른 강도의 증진비



[그림 3] 플라이애쉬 첨가율에 따른 강도비

수록 장기재령에 대한 압축강도의 증진 효과가 클
을 알 수 있다.

3.3 고강도 플라이애쉬 콘크리트의 작업성 특성

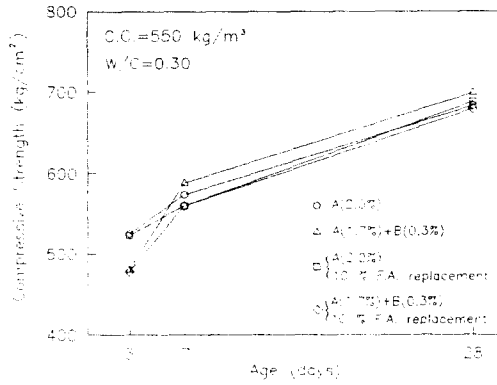
[그림 4] 및 [그림 5]는 고강도 콘크리트의 단위
시멘트량 550kg/m³에 플라이애쉬의 최적 혼입량을
10%로 보고 고강도 플라이애쉬 콘크리트의 작업성
확보 여부를 알아 보기 위하여 압축강도 및 슬럼프
변화를 도실했던 것이다. [그림 5]에서 알 수 있듯
이 플라이애쉬 콘크리트의 시간의 경과에 따른 슬
럼프 감소는 비빔 후 40분까지는 보통 콘크리트의
슬럼프 감소와 비슷하나, 그 이후로는 슬럼프
감소가 심함을 알 수 있다. 이것은 플라이애쉬의
첨가로 단위 수량을 감소시킬 수 있다는 외국의
연구 결과와는 달리 오히려 플라이애쉬의 첨가로
작업성이 악화됨을 보여주고 있다. 이는 국산
유연탄 플라이애쉬의 경우 증수현상이 나타난다는
화전 기술연구소의 보고서⁽⁵⁾ 및 서⁽⁶⁾의 연구 결과
와 일치하고 있다. 이같은 증수현상이 나타나는
이유로는 유연탄 플라이애쉬의 입자 표면에 요철이
많아 입자가 상당히 거칠게 되고, 입자 내부에 공
극이 많아 콘크리트 풀의 유동성을 악화시키기 때
문인 것으로 사료된다. 따라서 플라이애쉬를 콘크
리트의 혼화재로 사용할 때, 현장 타설시까지 작업

성을 확보할 수 있도록 고유동화제 및 지연제의 사
용이 필요하며, 각각의 유동화제 및 지연제에 따른
슬럼프 감소 현상에 대한 연구가 이루어져야 할 것
으로 사료된다.

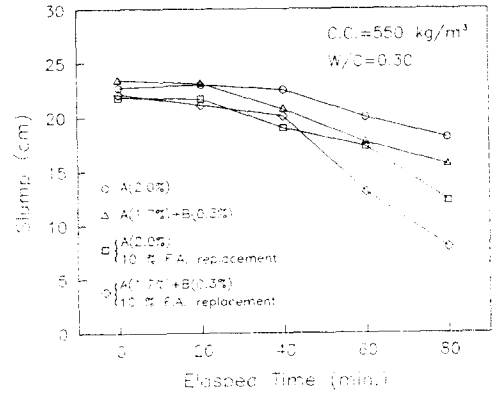
4. 결론

고강도 플라이애쉬 콘크리트의 각종 배합비에
따른 압축강도 및 작업성 특성을 연구한 결과
다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고강도 플라이애쉬 콘크리트의 초기 재령에서는
보통 콘크리트 보다 강도가 떨어지며 장기 재령에
서는 보통 콘크리트 보다 강도가 크게 발휘되어 압
축강도에 대한 플라이애쉬의 장기 재령 증진 효과
가 큰 것으로 나타났다.
2. 고강도 플라이애쉬 콘크리트의 단위 시멘트량에
대한 플라이애쉬의 최적 첨가량은 약 10% 정도이며
15% 까지도 첨가하여 사용할 수 있을 것으로 판단
된다.
3. 고강도 플라이애쉬 콘크리트의 슬럼프 감소가
보통 콘크리트의 슬럼프 감소보다 심하므로 작업성
확보를 위하여 고유동화제 및 지연제의 사용이 필
요하다.



[그림 4] 작업성 확보 여부를 위한 압축강도



[그림 5] 슬럼프 변화

4. 고강도 콘크리트의 혼화재로서 플라이애쉬를 사용할 경우 좋은 품질의 플라이애쉬 확보가 필수적이므로 플라이애쉬에 대한 적절한 품질관리가 필요한 것으로 판단된다.

5. 감사의 글

본 연구는 과학기술처에서 1988년 부터 1990년 까지 시행한 특정연구개발사업에 의하여 연구되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

6. 참고 문헌

1. ACI Committee 226, "Use of Fly Ash in

Concrete," ACI 226.3R - 87

2. Helmuth, R., "Fly Ash in Cement and Concrete," Portland Cement Association, 203 pp.

3. Malhotra, V. M., "Supplementary Cementing Materials for Concrete," CANMET, 1987, pp. 35-163

4. Carrasquillo, R. L., "The Production of High-Strength Concrete," Cornell Univ. May 1978.

5. 한국전력공사 기술연구원, "콘크리트 혼화재로서의 석탄회 이용 방안 연구," 1989.4.

6. 서정우, "플라이애쉬를 혼화재로 사용한 콘크리트의 실용화를 위한 연구," 박사학위논문 한양대학교 토목공학과, 1988, 102 pp.