

플라이애시를 多量 使用한 콘크리트의 强度特性에 관한 研究

The Study on the Strength Properties of High Volume Fly-Ash Concrete

백 민 수* 이 영 도** 정 상 진***
Paik, Min-Su Lee, Young-Do Jung, Sang-Jin

Abstract

To study of binder and fine aggregate a lot of replacement fly-ash concrete, initial characteristics, standard environment of curing temperature 20°C, hot-weather environment, cold weather environment of curing temperature 5°C. Flash concrete tested slump, air content, setting and Hardening concrete valuated setting period of form, day of age 3, 7, 28 compression strength in sealing curing. Underwater curing specimen compression strength of age 3, 7, 28day used strength change accordingly fly-ash concrete curing temperature. Purpose of study is consultation materials in field that variety of fly-ash replacement concrete mix proportion comparison and valuation.

(1) Setting test result, fly-ash ratio of replacement higher delay setting time. Same volume of fly-ash ratio of replacement is lower fly-ash ratio of replacement fine aggregate delay setting time. Setting test in curing temperature 35°C over twice fast setting in curing temperature 20°C and all specimen setting delay in curing temperature 5°C. F40 specimen end of setting about 30 time.

(2) Experiment result age 28day compression strength more higher plan concrete then standard environment in curing temperature 20°C, cold weather environment in curing temperature 5°C. most strength F43 is hot-weather environment in curing temperature 35°C replacement binder 25%, fine aggregate 15%.

(3) Hot-weather environment replacement a mount of fly-ash is a same of plan concrete setting period of form. Age 28day compression strength replacement a mount of fly-ash more hot-weather concrete then plan concrete.

키워드 : 플라이애시, 거푸집 탈형, 초기 재령
Keywords : fly-ash, demolding, primary age

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

국가경제의 발전과 산업구조의 고도화에 따라 우리나라의 전력사용량은 해마다 급증하고 있으며, 전력생산 체계의 다변화와 함께 화력발전의 수요도 점차 증가하는 추세에 있다. 석탄화력 발전소의 증가에 따라 산업부산물인 석탄회 발생량도 점차 증가하는 추세에 있다. 그러나 국내의 경우 화력발전소에서 발생하는 이들 석탄회의 약 30%만이 재활용되고 있으며, 대부분은 매립을 통하여 폐기 처분되고 있어 선진외국의 50~70% 이상 재활용하는 것과 비교할 때 자원이 부족한 우리나라의 실정으로서 매우 안타까운 일이 아닐 수 없다. 또한 석탄회의 매립은 매립지 확보의 어려움과 석탄회 매립지의 환경오염으로 인하여 경제적·환경적 비용 부담이 가중되고 있다. 따라서 대량으로 발생하고 있는 석탄회를 유효한 자원으로 재활용하고 환경문제를 해결하기 위해서는 석탄회의

다량사용이 가능한 분야에 대한 다양하고도 적극적인 용도 개발이 필요한 실정이다.

석탄회 중 플라이애시는 콘크리트용 혼화제로 사용할 경우 작업성 개선 및 수밀성 증진을 통한 내구성 향상이 가능하고, 수화열 저감을 통한 콘크리트의 균열감소 및 장기강도 증진 등의 효과가 있는 것으로 보고 되고 있다. 또한 에너지 소비 제품인 시멘트를 대체함으로써 경제적 장점이 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 플라이애시는 사용된 원탄의 종류 및 발전소의 연소시설 등에 따라 품질편차가 크고, 콘크리트의 혼화제로 사용될 경우 초기강도 저하 및 미연탄소분에 의한 AE제 흡착 등 콘크리트의 내구성을 저하시키는 몇 가지 제한적 요소를 내포하고 있어 플라이애시를 콘크리트에 대량으로 사용하는데 어려움을 가지고 있다. 그러나 최근 들어 외국의 경우 플라이애시를 다량 치환한 하이 볼륨 플라이애시에 대한 연구²⁾³⁾⁴⁾가 활발하게 진행되고 있으며, 국내에서도 플라이애시에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. 플라이애시를 다량 치환한 콘크리트에 관한 국내 연구의 경우 김무한⁵⁾은 플라이애시를 잔골재에 치환하는 연구를 통하여 고강도 콘크리트의 적용을 연구하였으며, 한천구⁶⁾는 30%의 플라이애시를 사용한 콘크리트의 거푸집 존치기간 결정에 관한 검토를 적

* 단국대학교 대학원 박사수료

** 경동대학교 건축환경공학부 교수, 공학박사

*** 단국대학교 건축공학과 교수, 공학박사

산온도에 따른 강도증진해석을 통하여 연구하였다. 기존 연구들의 경우 플라이애시를 결합재 또는 잔골재만을 치환한 콘크리트의 제특성 연구가 대부분이었다. 이에 본 연구에서는 보통 콘크리트에서 플라이애시를 다량 사용하기 위하여 시멘트 및 잔골재의 일부분을 동시에 치환한 배합을 사용하여 경제성을 고려한 콘크리트를 제작하여 표준, 서중, 한중환경에서 양생된 시험체의 특성평가를 통하여 플라이애시를 다량 사용한 콘크리트의 양생 환경에 따른 특성을 연구하였다.

1.2 연구 내용 및 범위

본 연구는 플라이애시를 보통 콘크리트 분야에 다량으로 사용하기 위한 연구로 진행되었다. 플라이애시를 치환하는데 있어 기존의 배합과 같이 결합재를 치환하여 사용할 경우 다량의 플라이애시 치환 시에는 강도의 심각한 저하가 발생하며, 이에 반해 플라이애시를 잔골재로 치환하는 경우는 강도의 증진을 가져오는 장점이 있어 고강도 콘크리트로의 활용이 될 수 있으나, 콘크리트 제작원가가 상승하는 문제점이 있어 보통 콘크리트로의 활용에는 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 콘크리트 배합시 결합재 및 잔골재의 일부분을 동시에 치환하는 배합⁷⁾을 사용하여 실험을 실시하였다. 양생의 경우 수중양생과 봉합양생을 실시하였다. 수중양생의 경우 20°C 표준환경뿐만 아니라, 서중 및 한중 환경 하에서 양생을 병행하여 양생온도 변화 및 재령에 따른 역학적 특성 변화를 검토하고, 플라이애시의 적정 치환율을 도출하였다. 또한 봉합양생 시험체는 현장에 타설된 거푸집 내부의 콘크리트와 가장 유사한 환경의 양생방법으로써 시험체의 강도발현을 검토하여 플라이애시 치환에 따른 측면 거푸집 존치기간의 결정 및 검토를 실시하였다. 위의 실험에 의한 결과를 제시함으로써 일반건설현장에서 실무에 활용 될 수 있는 참고자료를 제시하고자 하였다.

2. 실험

2.1 실험계획

본 실험의 콘크리트의 실험인자와 수준 및 측정항목은 표 1과 같다.

표 1. 실험인자와 수준 및 측정항목

실험인자		수준	
배합사항	결합재	2	보통포틀랜드 시멘트 플라이애시
	W/B(%)	2	45, 50 0, 10, 20
	치환율(%)	10	30, 31(25+5), 32(20+10) 40, 41(35+5), 42(30+10), 43(25+15)
	목표 슬럼프(cm)	1	18±2
	목표 공기량(%)	1	4.5±1.5
	양생온도(°C)	3	5, 20, 35
	측정항목	굳지 않은 콘크리트	3
경화콘크리트		1	압축강도

2.2 사용재료

1) 시멘트

본 실험에서 사용한 시멘트는 국내 S사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 물리적 성질은 표 2와 같다.

표 2. 시멘트의 물리적 성질

시멘트 종류	비중	분말도 (cm ² /g)	응결시간(H)		압축강도(kgf/cm ²)		
			초결	종결	3일	7일	28일
보통	3.15	3,400	4	6	198	272	389

2) 플라이애시

보령 화력발전소에서 생산정제 과정을 거친 유연탄 플라이애시를 사용하였고, 그 품질 특성은 표3과 같다.

표 3. 플라이애시의 물리·화학적 특성

	강열 감량 (%)	단위 수량비 (%)	분말도 (cm ² /g)	비 중	압축 강도비 (%)	SiO ₂ (%)	습 분 (%)
보령산	3.75	100	3,084	2.11	95	59.7	0.11
KS 규격	5 이하	102 이하	2,400 이상	1.95 이상	60 이상	45 이상	1 이하

3) 골재

굵은 골재의 경우 광주석산 부순돌을 사용하였으며, 최대 치수 25mm이하로 입도 조정하여 사용하였고, 잔골재는 인천 산 세척사를 사용하였으며 5mm이하로 입도 조정하여 사용하였다. 골재의 물리적 특성은 다음의 표 4와 같다.

표 4. 골재의 물리적 특성

구분	비중	흡수율	조립율	단위용적 중량	실적율
잔골재	2.60	0.98	2.87	1,590	61.2
굵은골재	2.62	1.8	6.8	1,596	61.04

4) 혼화제

혼화제는 국내에서 시판·사용되고 있는 J사의 AE감수제 표준형 및 AE제를 사용하였고, 혼화제의 물성은 표 5와 같다.

표 5. 혼화제의 종류 및 물성

제조회사	유형	주성분	비중	색상	비고
국내 J사	AE감수제	나프탈렌계	1.1	암갈색	-
국내 J사	AE제	-	-	암갈색	10배 희석

5) 배합

본 연구에 사용된 배합은 표 6과 같다.

본 연구에서는 플라이애시를 시멘트의 10, 20, 30, 40% 치

환을 하였다. 플라이애시 치환 방법은 10%와 20%의 경우는 시멘트에 대하여 치환을 하였으며, 치환율 30%와 40%의 경우는 시멘트 치환과 잔골재 치환을 동시에 실시하였다. 시험체번호 F31, F32의 경우 잔골재의 5%, 10%를 플라이애시로 치환하여 물결합재비가 감소하는 것을 알 수 있다. 40% 치환 시험체에서도 같은 방법으로 치환하므로써 시험체번호가 증가함에 따라 물결합재비가 역시 감소하는 것을 알 수 있다.

표 6. 콘크리트 배합표

시험체명	W/C (%)	W/B (%)	S/A (%)	FA치환율 (%)		단위용적중량(kg/m ³)				
				C	S	W	C	FA	S	G
W45-F00	45.0	45.0	41.0	0	0	180	400	0	696	1009
W45-F10	50.0	45.0	41.0	10	0	180	360	40	687	1000
W45-F20	56.3	45.0	41.0	20	0	180	320	80	680	990
W45-F30	64.3	45.0	41.0	30	0	180	280	120	676	980
W45-F31	60.0	42.9	40.1	25	5	180	300	120	655	985
W45-F32	56.3	40.9	39.2	20	10	180	320	120	633	990
W45-F40	75.0	45.0	41.0	40	0	180	240	160	670	971
W45-F41	69.2	42.9	40.1	35	5	180	260	160	648	976
W45-F42	64.3	40.9	39.2	30	10	180	280	160	626	980
W45-F43	60.0	39.1	38.2	25	15	180	300	160	605	985
W50-F00	50.0	50.0	43.0	0	0	180	360	0	744	994
W50-F10	55.6	50.0	43.0	10	0	180	324	40	735	986
W50-F20	62.5	50.0	43.0	20	0	180	288	80	729	977
W50-F30	71.4	50.0	43.0	30	0	180	252	108	726	969
W50-F31	66.7	47.6	42.2	25	5	180	270	108	707	973
W50-F32	62.5	45.2	41.5	20	10	180	288	108	688	977
W50-F40	83.3	50.0	43.0	40	0	180	216	144	719	961
W50-F41	76.9	47.6	42.2	35	5	180	234	144	700	965
W50-F42	71.4	45.2	41.5	30	10	180	252	144	681	969
W50-F43	66.7	43.5	40.7	25	15	180	270	144	662	973

2.3 실험방법

1) 슬럼프, 공기량, 압축강도

본 실험은 각각 KS규정에 의거하여 실험을 실시하였다. 슬럼프시험은 KS L 2402, 공기량시험은 KS L 2409, 압축강도 시험은 KS L 2405로 실시하였다. 시험체의 양생조건은 수중양생과 봉함양생을 실시하였다. 실험조건중 봉함양생은 거푸집 내부의 콘크리트 환경을 가장 유사하게 만들 수 있는 양생법으로 판단되어 실험을 실시하였고, 콘크리트의 초기강도 발현특성을 평가하여 거푸집 존치기간 검토를 위한 실험을 실시하였다.

2) 콘크리트 응결시험

KS F 2436규정에 따라 실시하였다. 콘크리트를 체로 쳐서 얻어지는 시멘트 모르터를 사용하여 시험하였으며 판입저항이 35kgf/cm²가되는 초결부터 280kgf/cm²의 종결까지의 소요시간을 측정하였다.

3. 실험결과 분석 및 고찰

3.1. 슬럼프 및 공기량에 관한 고찰

플라이애시 치환에 따른 슬럼프의 결과를 표 7에 나타내었다. 표에 나타난 것처럼 결합재 치환 시험체의 경우 플라이애시의 치환율이 증가함에 따라 슬럼프가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 현상은 플라이애시가 미세한 구형입자를 많이 포함하고 있어 이 구형입자의 볼-베어링 효과에 의해 유동성이 증가한 것으로 판단된다. 플라이애시를 30%, 40% 치환한 시험체의 경우 잔골재 치환율이 증가한 시험체일수록 유동성이 저하하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 현상은 표 건 상태의 잔골재 대신 절건상태의 플라이애시를 치환하므로써 절건된 미분량의 증가에 따른 유동성의 저하로 판단된다. 그러나 시멘트 치환된 플라이애시의 유동성 개선효과로 인하여 콘크리트 전체의 유동성은 크게 저하하지 않는 것으로 나타났다으며, 기준 시험체와 비교시 유사한 유동성을 나타내고 있다. 또한 플라이애시의 잔골재 치환에 따른 골재의 입도 변화의 경우 표준 입도의 범위를 만족하여 미분량 증가에 따른 콘크리트의 물성 변화는 크지 않을 것으로 사료된다.

3.2 AE제 사용량에 따른 공기량 변화

표 7. 플라이애시 치환에 따른 슬럼프 및 공기량

시험체명	혼화제량 20℃ (kg/m ³)		양생온도					
	AE 감수제	AE제	5℃		20℃		35℃	
			slump (mm)	air (%)	slump (mm)	air (%)	slump (mm)	air (%)
W45-F00	1.2	0.08	160	4.0	165	4.0	164	4.1
W45-F10	1.2	0.12	165	3.7	172	3.9	170	3.9
W45-F20	1.2	0.16	170	3.7	172	3.8	173	3.5
W45-F30	1	0.24	178	3.3	180	3.3	183	3.5
W45-F31	1	0.28	173	3.4	174	3.6	180	3.8
W45-F32	1	0.32	170	3.6	168	3.4	175	3.5
W45-F40	1	0.28	198	3.8	190	3.7	191	3.6
W45-F41	1	0.32	175	3.3	175	3.3	171	3.6
W45-F42	1	0.36	170	3.3	165	3.6	175	3.7
W45-F43	1	0.36	162	3.0	162	3.1	164	3.2
W50-F00	1.08	0.072	180	3.8	183	4.0	183	3.7
W50-F10	1.08	0.108	187	3.6	182	3.5	180	3.4
W50-F20	1.08	0.144	190	3.4	192	3.4	190	3.3
W50-F30	0.9	0.216	200	3.3	195	3.1	188	3.3
W50-F31	0.9	0.252	198	3.3	183	3.4	188	3.4
W50-F32	0.9	0.288	186	3.4	186	3.4	183	3.2
W50-F40	0.9	0.252	200	3.5	195	3.5	197	3.3
W50-F41	0.9	0.288	186	3.6	193	3.2	195	3.4
W50-F42	0.9	0.324	170	3.6	180	3.4	175	3.6
W50-F43	0.9	0.324	167	3.3	184	3.4	174	3.3

플라이애시 치환에 따른 목표 공기량을 얻기 위한 AE제 사용량 변화를 표 6에 나타내었다. 표에 나타난 것처럼 플라이애시 치환율이 증가할수록 목표 공기량을 얻는데 필요한 AE제의 사용량은 점차 증가하는 것으로 나타났다. 플라이애시를 사용하지 않을 경우 0.02%의 치환만으로 목표 공기량을

얼을 수 있었으나, 플라이애시의 치환율이 증가함에 따라 AE 제 사용량이 증가하는 경향¹⁾을 나타내어 플라이애시의 치환 40%의 경우 AE제의 사용량은 기준 시험체에 비하여 약 3.5~4.5배 정도까지 증가하는 것으로 나타났다.

3.3 콘크리트 응결시험 결과

양생온도 20°C에서의 응결시험은 W/B 45%경우 기준 시험체가 가장 빠른 응결을 나타내었고, 플라이애시 치환율이 높아질수록 응결시간이 지연되며, 같은 양의 플라이애시를 치환한 경우 잔골재의 플라이애시 치환율이 낮을수록 응결이 지연되어 같은 양의 플라이애시 치환시험체의 경우 총결합재량이 증가할수록 응결이 빠른 것으로 판단된다. 응결특성을 보면 플레인 콘크리트가 약 9.5시간이 경과하여 초결이 시작되어 12.5시간 후 종결하였다. 플라이애시 치환율이 40%인 시험체의 경우 결합재만을 치환한 F40시험체는 초결이 15시간이 경과한 후 시작하여 22시간 경과하여 종결을 하여 기준 시험체와 비교하여 약 2배나 늦게 응결이 지연되는 것으로 나타났다. 그러나 잔골재의 일부를 치환한 시험체의 경우 플라이애시 치환에 따른 콘크리트의 응결지연을 상당히 감소시키는 것으로 나타났다. W/B 50%경우는 W/B 45%와 거의 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 전체적으로 결합재량의 감소로 인해 응결시간이 약 1~2시간정도 늦어지는 것으로 나타났다.

양생온도 35°C에서의 W/B 45% 시험체의 응결시험의 경향은 양생온도 20°C와 유사하게 나타났다. 플레인 콘크리트의 경우 약 5.5시간에 초결을 시작하여 6.5시간 후에 종결을 한 것으로 나타났다. 플라이애시를 치환한 시험체의 응결시간의 경우 플라이애시 치환율이 증가할수록 응결시간도 지연되어 20°C시험체와 유사하게 나타나고 있으며, W/B 50%경우도 W/B 45%와 거의 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 전체적으로 양생온도 35°C에서의 응결시험은 양생온도 20°C에서의 응결시험보다 2배 이상의 빠른 응결을 나타내었다. 이것은 초기의 양생온도가 높을수록 빠른 수화반응을 일으켜 응결이 빠르게 진행되는 것으로 판단된다.

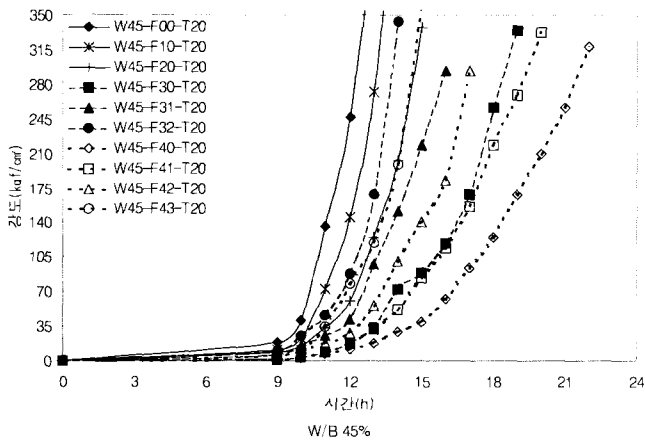


그림 1. 양생온도 20°C에서의 콘크리트 응결시험결과

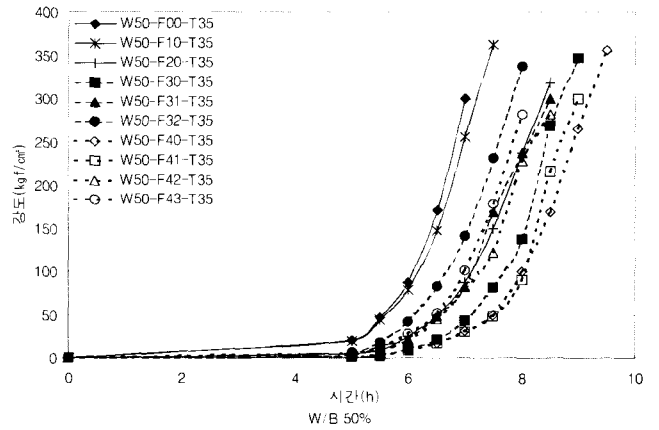
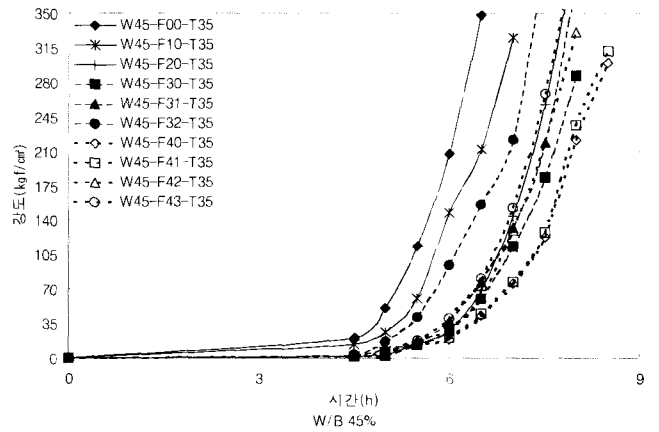
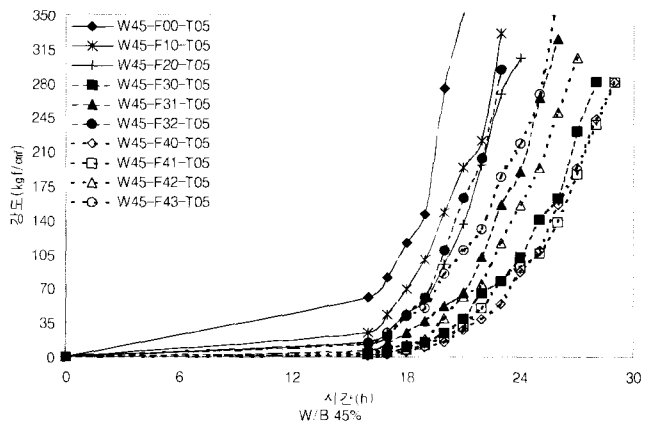
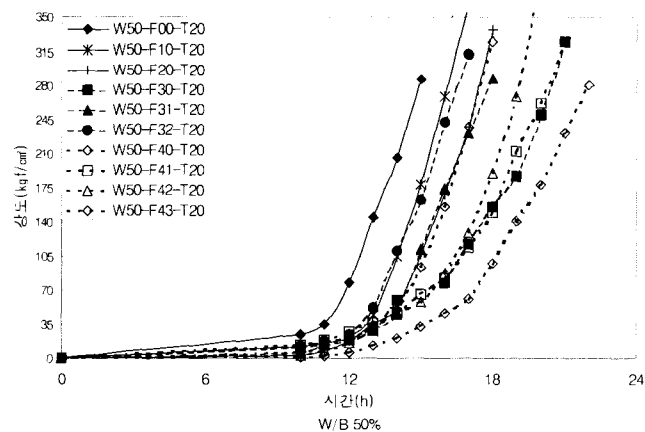


그림 2. 양생온도 35°C에서의 콘크리트 응결시험결과



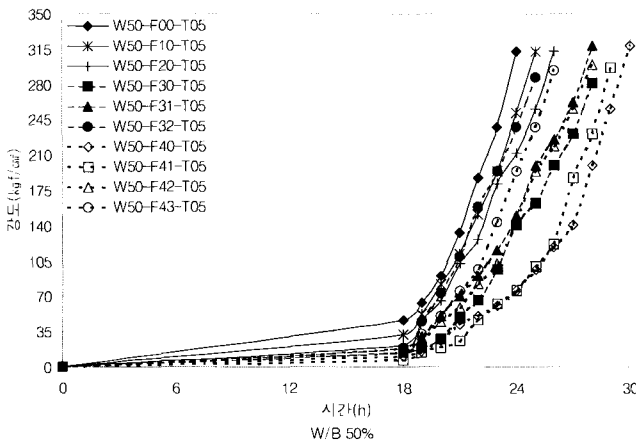


그림 3. 양생온도 5°C에서의 콘크리트 응결시험결과

양생온도 5°C에서의 응결시험의 경우 양생온도 20°C에 비하여 응결의 진행이 상당히 느린 것으로 나타났다. 응결특성을 살펴보면 기준 시험체의 경우 약 15시간 경과 후에 초결을 시작하여 20시간이 경과 후에 종결을 한 것으로 나타났다. W/B 45%와 W/B 50%가 거의 유사한 경향을 보이는 것으로

나타났다. 특히 양생온도 5°C에서의 플라이애시 40% 치환 시험체의 경우 약 21.5시간 경과 후에 초결을 시작하여 약 30시간 경과 후에 종결하여 콘크리트 응결에 1일 이상이 시간이 경과하는 것으로 나타났다.

3.4 경화 콘크리트의 실험결과

표 8에 플라이애시 치환방법 및 양생온도에 따른 콘크리트의 재령별 압축강도를 나타내었다.

1) 양생온도 20°C의 표준 환경에서의 강도발현특성

재령 28일 압축강도는 기준 시험체가 가장 높게 나타났으며 시멘트를 플라이애시로 치환한 경우 플라이애시의 치환율이 증가함에 따라 콘크리트의 강도가 저하하는 것으로 나타났다. 플라이애시의 일부분을 잔골재로 치환한 시험체의 경우는 잔골재의 치환율이 증가함에 따라 강도도 증가하는 것으로 나타났으며 특히 플라이애시 30%중 10%를 잔골재로 치환한 F32시험체와 플라이애시 40%중 15%를 잔골재로 치환한 F43시험체의 경우 다량의 플라이애시 치환에도 불구하고 기준 시험체 강도의 90%이상의 강도를 발현하는 것으로 나타났다. 이는 잔골재의 일부를 플라이애시로 치환함에 따라 전체

표 8. 콘크리트 압축강도 결과

단위 : kgf/cm

시험체명	보합양생												수중양생													
	5°C					20°C					35°C					5°C			20°C			35°C				
	3	5	7	10	28	1	3	5	7	10	28	1	3	5	7	10	28	3	7	28	3	7	28	3	7	28
W45-F00	31	68	107	139	242	65	151	207	234	243	292	101	213	245	268	285	294	43	119	249	162	244	321	182	240	305
W45-F10	27	63	100	128	226	59	138	181	214	232	285	95	208	242	260	281	303	43	105	227	156	230	310	175	228	327
W45-F20	25	60	92	115	207	45	118	158	178	201	256	65	159	194	212	227	259	38	97	204	128	196	288	134	209	303
W45-F30	19	48	71	87	182	28	90	115	145	168	230	40	114	141	164	181	226	26	69	175	103	147	240	100	171	278
W45-F31	22	51	75	93	186	48	99	131	161	185	237	63	129	162	177	194	254	35	85	210	125	186	268	103	184	285
W45-F32	27	60	89	110	211	54	115	152	178	204	277	80	155	205	120	235	285	39	91	217	142	224	309	140	196	332
W45-F40	17	32	49	64	151	21	79	108	123	148	203	37	105	128	144	162	212	22	63	152	87	143	230	100	158	254
W45-F41	19	40	60	78	170	37	87	113	131	158	210	43	115	139	161	178	240	23	70	171	111	164	248	108	175	287
W45-F42	27	49	77	97	194	47	94	138	158	184	241	50	129	164	188	204	246	34	81	188	136	185	258	117	199	312
W45-F43	29	55	91	113	211	58	132	169	188	215	280	63	179	223	240	255	309	40	88	210	140	210	299	168	236	343
W50-F00	31	72	104	129	217	60	121	180	210	226	262	63	164	215	227	234	244	37	104	217	145	207	265	168	213	261
W50-F10	26	63	91	116	203	51	102	145	167	187	243	52	129	189	210	224	249	33	93	201	106	162	251	147	200	278
W50-F20	20	53	82	106	188	42	96	122	156	175	221	42	126	147	163	180	235	32	88	179	93	151	233	129	172	256
W50-F30	15	36	56	80	150	24	59	85	115	131	178	33	99	131	149	163	205	21	66	145	71	120	188	103	146	238
W50-F31	17	43	70	92	178	38	87	119	148	173	217	33	117	158	174	191	220	25	73	156	104	151	237	123	177	274
W50-F32	22	48	74	99	183	49	98	148	171	198	239	41	128	168	190	205	251	32	82	182	123	167	252	131	190	280
W50-F40	10	30	47	65	128	26	55	79	96	113	158	30	91	114	125	142	189	17	53	123	59	103	176	99	125	232
W50-F41	13	32	51	71	138	27	67	91	111	129	166	33	103	127	139	155	213	22	61	136	63	117	199	103	128	255
W50-F42	18	38	66	85	153	33	80	122	138	158	215	35	121	142	155	171	223	25	71	156	81	139	229	118	151	272
W50-F43	22	40	67	87	179	42	87	131	158	180	238	50	137	169	205	223	253	29	80	172	93	148	249	123	161	283

적인 결합재의 양이 늘어나 강도가 증가한 것으로 판단된다. 위와 같은 경향은 물결합재비 45%, 50% 시험체 모두에서 유사하게 나타났다.

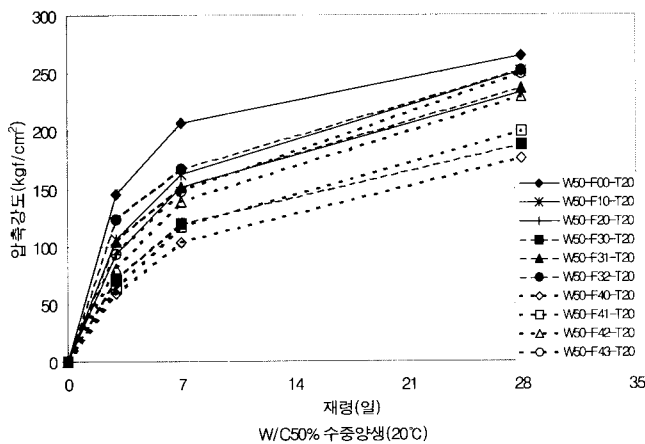
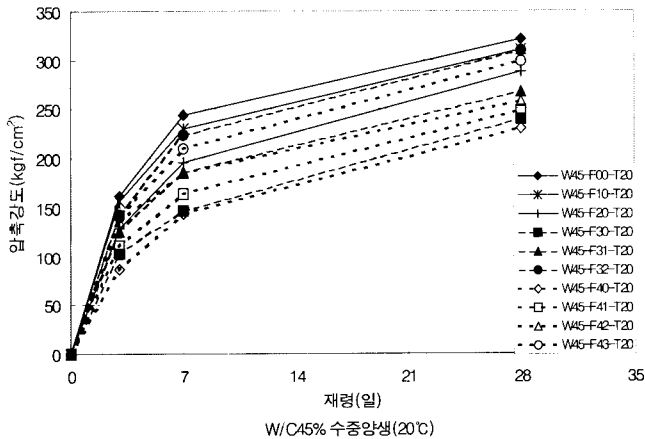


그림 4. 수중양생 시험체의 재령에 따른 압축강도(20°C)

2) 양생온도 35°C의 서중 환경에서의 강도발현특성

양생온도 35°C에서의 강도 발현특성은 시멘트를 플라이애시로 치환한 경우 플라이애시 치환율이 증가할수록 콘크리트의 강도가 저하하는 것으로 나타났다. 특히 초기강도의 경우 치환율이 증가할수록 강도의 저하가 크게 나타났으나, 플라이애시를 치환한 시험체의 경우 재령이 경과할수록 강도의 증진성이 높아져 재령 28일에서는 강도의 저하 폭이 크게 감소하는 것으로 나타났다. 플라이애시를 잔골재로 치환한 시험체의 경우는 표준환경에서와 같이 잔골재의 치환율이 증가함에 따라 강도도 증가하는 것으로 나타났으며 강도의 증가량은 표준환경보다 더 큰 것으로 나타났다. 재령별 강도를 살펴보면 재령 3일, 7일의 경우 기준 시험체가 가장 높은 강도발현을 보였으나, 재령 7일 이후 높은 강도 증진을 나타낸 배합 F43 및 배합F32가 재령28일에 가서는 기준 시험체와 유사하거나 더 높은 강도를 발현한 것으로 나타났다. 이는 초기강도의 경우 단위시멘트량이 많은 기준 시험체가 플라이애시를 치환한 시험체에 비하여 높은 강도발현을 하였으나, 고온에서의 급격한 수화반응 이후 재령이 경과할수록 강도의 증진량이 저하하는데 비하여 배합F43 시험체의 경우 다량으로 치환된 플라이애시의 고온에서의 빠른 포졸란 반응에 의해서 재

령 7일 이후 지속적인 강도발현을 하여 재령 28일에서는 기준 시험체보다 높은 강도발현을 이룬 것으로 판단된다.

3) 양생온도 5°C의 한중 환경에서의 강도발현특성

양생온도 5°C의 한중환경에서의 강도 발현의 경우 모든 시험체에서 양생온도 저하에 따른 강도 발현의 지연이 발생하였다. 재령 28일 강도의 경우 기준 시험체가 가장 높은 강도 발현을 나타냈으며, 시멘트를 플라이애시로 치환한 경우 플라이애시의 치환율이 증가함에 따라 콘크리트의 강도가 저하하는 것으로 나타났다. 이와 같은 특성은 모든 양생환경에서 동일하게 발생하였으며, 플라이애시의 일부분을 잔골재로 치환한 시험체의 경우 잔골재의 치환율이 증가함에 따라 강도도 증가하는 경향을 나타내고 있다. 플라이애시 치환 시험체의 경우 플라이애시 치환율이 증가할수록 모든 재령에서 강도저하가 발생하여 기준 시험체에 비하여 강도 발현이 상당히 지연되는 것으로 나타났다.

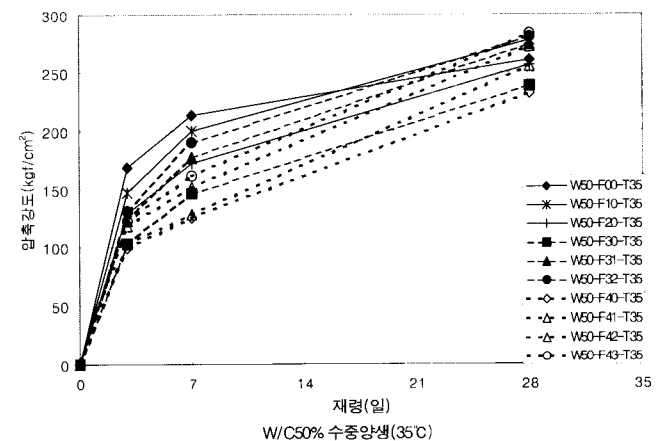
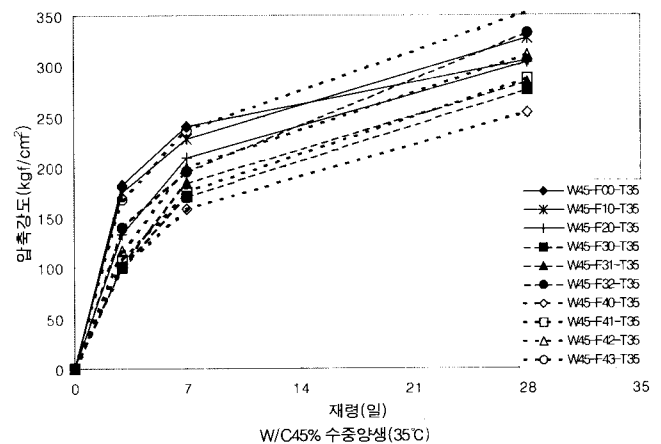


그림 5. 수중양생 시험체의 재령에 따른 압축강도(35°C)

4) 예상평균양생온도에 의한 콘크리트의 강도 보정값에 관한 고찰

구조체 콘크리트의 강도 관리를 위한 재령 28일의 배합강도를 결정하는데 있어 예상평균양생온도는 강도보정값 T를 결정하는데 매우 중요한 요소이다. 콘크리트의 강도보정값의 경우 18°C이하에 대하여만 온도에 따른 강도 보정값을 정하

고 있다. 보통 포틀랜드 시멘트의 경우 서중환경에서의 강도 변화가 거의 없으므로 인하여 강도 보정을 실시하지 않고 있다. 플라이애시 시멘트 역시 보통 포틀랜드 시멘트와 같이 18℃이하의 양생온도에 대해서만 강도보정값을 정하고 있다. 그러나 본 실험 결과 플라이애시를 치환한 콘크리트의 경우 서중환경에서는 콘크리트 강도가 표준 환경에서의 강도에 비하여 대부분의 경우 약 15kgf/cm²이상 증가하는 것으로 나타났다. 그러므로 서중환경에서의 강도보정이 가능하다고 판단되며, 이 경우 보정값 T는 마이너스 값을 갖게 될 수 있을 것으로 사료된다. 그림 7에 플라이애시 치환 콘크리트의 강도 보정 그래프를 나타내었다.

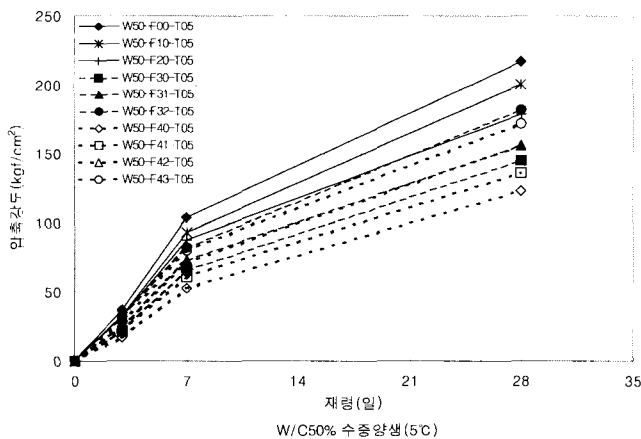
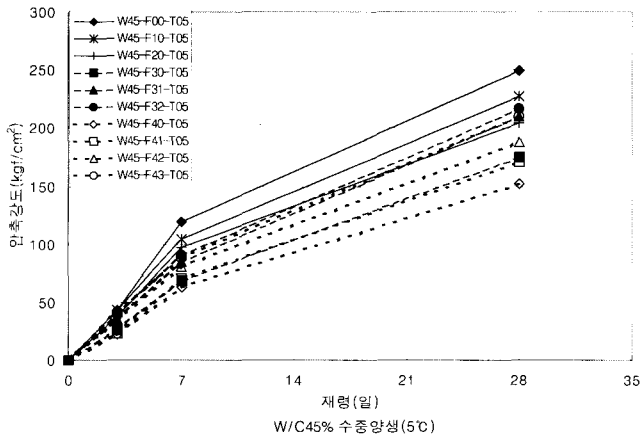


그림 6. 수중양생 시험체의 재령에 따른 압축강도(5°C)

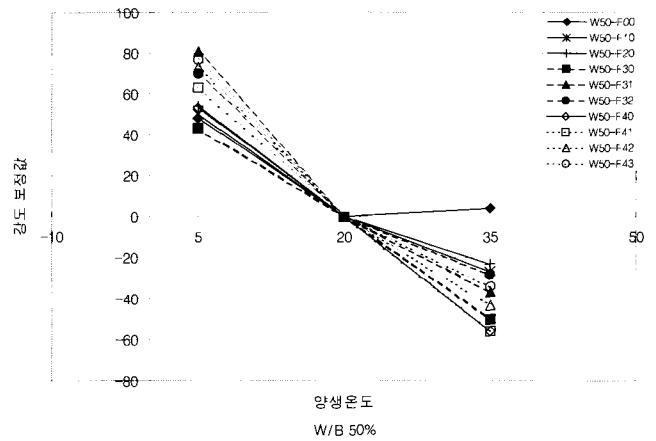
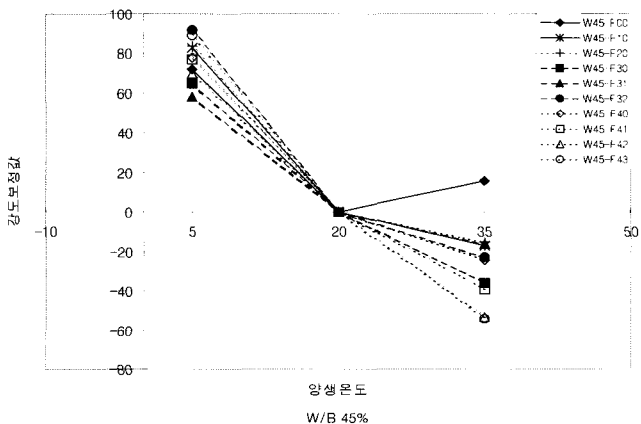


그림 7. 양생온도에 따른 콘크리트의 강도 보정값

5) 거푸집 존치기간에 관한 고찰

측면 거푸집 존치기간의 종료가 되는 강도인 압축강도 50kgf/cm²에 도달하는 재령을 표 9에 나타내었다. 표에 의하면 양생온도가 높을수록 존치기간이 단축되는 것으로 나타났다. 플라이애시 치환율에 따른 거푸집 존치기간의 경우 시멘트를 플라이애시로 치환한 경우는 플라이애시 치환율이 낮을수록, 동일 양의 플라이애시를 치환한 경우는 잔골재의 치환율이 높을수록 상기강도에 도달하는 재령이 짧아지는 것으로 나타났다. 양생온도 35℃에서는 플라이애시 치환율 증가에 따른 압축강도 50kgf/cm²에 도달재령이 크게 증가하지 않음을 알 수 있다. 특히 F32 및 F43과 시험체와 같이 플라이애시의 일부분을 잔골재로 치환한 배합의 경우 재령28일 압축강도 또한 기준 시험체의 재령 28일과 유사한 강도발현을 하는 것으로 나타나, 플라이애시를 다량 사용시 잔골재의 일부를 플라이애시로 치환한 콘크리트의 경우 서중 콘크리트에 활용되는 것이 유효할 것으로 판단된다.

표 9. 압축강도 50kgf/cm² 도달재령 단위 : 일

시험체명	FA치환율 (%)		양생온도(°C)		
	C	S	5°C	20°C	35°C
W45-F00	0	0	4	1	1
W45-F10	10	0	4.5	1	1
W45-F20	20	0	4.5	2	1
W45-F30	30	0	6.5	2	1.5
W45-F31	25	5	5	1.5	1
W45-F32	20	10	4	1	1
W45-F40	40	0	7.5	2.5	1.5
W45-F41	35	5	6	2	1.5
W45-F42	30	10	5.5	1.5	1
W45-F43	25	15	5	1	1
W50-F00	0	0	4.5	1	1
W50-F10	10	0	4.5	1	1
W50-F20	20	0	5	1.5	1.5
W50-F30	30	0	7	2.5	2
W50-F31	25	5	6	2	2
W50-F32	20	10	6	1.5	1.5
W50-F40	40	0	7.5	2.5	2
W50-F41	35	5	7	2	2
W50-F42	30	10	6	2	1.5
W50-F43	25	15	6	1.5	1

4. 결 론

플라이애시를 다량 치환한 콘크리트의 양생온도에 따른 초기특성변화에 대한 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 표준환경(양생온도 20℃)에서의 응결시험은 플라이애시 치환율이 높을수록 응결시간이 지연되며, 같은 양의 플라이애시 치환율의 경우 잔골재의 플라이애시 치환율이 낮을수록 응결이 지연되는 것으로 나타났다.
- 2) 서중환경(양생온도 35℃)에서의 응결시험의 경우 양생온도 20℃와 유사한 경향으로 나타내고 있으나, 양생온도 20℃에서의 응결보다 2배 이상의 빠른 응결을 나타내었다.
- 3) 한중환경(양생온도 5℃)에서의 응결시험의 경우 모든 시험체에서 응결의 지연이 나타났으며, F40 시험체의 경우 응결을 종료하는데 약 30시간이 걸리는 것으로 나타났다.
- 4) 서중환경(양생온도 35℃)에서 양생된 기준 시험체에서는 재령 5일 이전에는 높은 강도 발현을 나타내다가 그 이후 강도증진이 급격히 저하하여 재령 28일 강도의 경우 20℃에서 양생된 시험체와 비교시 강도가 미세하게 저하하는 것으로 나타났다. 한편 플라이애시 치환율이 높은 시험체의 경우 고온에서 플라이애시의 활발한 포졸란 반응으로 인하여 지속적인 강도발현을 나타냈으며, 특히 F43 시험체의 경우 기준 시험체보다 높은 강도를 나타내었다.
- 5) 한중환경(양생온도 5℃)의 경우 초기재령에 있어서의 강도 발현은 느리게 나타났으며, 플라이애시 치환율이 증가할수록 그 강도는 더욱 낮아지는 것으로 나타났으며, 잔골재의 일부를 플라이애시로 치환한 시험체의 경우도 재령 증가에 따른 강도의 증가 폭이 크지 않은 것으로 나타났다.
- 6) 재령 28일 압축강도는 일반 콘크리트의 경우 표준환경과 서중환경에서의 강도의 변화가 크지 않으나 플라이애시를 치환한 콘크리트의 경우 표준환경에서 양생된 시험체보다 서중환경에서의 양생된 콘크리트의 강도가 15kgf/cm² 이상 큰 것으로 나타났다.
- 7) 측면거푸집 존치기간은 양생온도가 높을수록, 플라이애시 치환율이 낮을수록 짧아지는 것으로 나타났다. 서중환경에서는 플라이애시 치환율에 따른 거푸집 존치기간의 증가 시간이 작아지는 것으로 나타났다.

본 실험결과 플라이애시를 다량 사용할 경우 플라이애시를 시멘트와 잔골재로 동시에 치환하여 사용시 거푸집 존치기간 및 재령 28일 강도가 기준 콘크리트와 유사한 것으로 나타나 서중 콘크리트에 대한 활용이 유효할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 대한주택공사, “플라이애쉬 콘크리트의 특성 및 적용성에 관한 연구”, 1994.
2. 笹原 厚, 『フライッシュ 置換率45%としたコソクリートのマスココソクリート工事への適用 (その1. 調合およびフレッシュ強度性状)』, 日本建築學會大會學術講演梗概集, 2000.9
3. 椎葉大和, 『フライッシュを大量使用したコソクリートの諸性状』, コソクリート工學年次論文集, 2001.
4. 松藤 奉典, 『フライッシュを外割大量使用するコソクリートの調合則に関する研究』, 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1998.9
5. 김무한외 5인, “플라이애쉬의 치환방법에 따른 콘크리트 특성에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 추계 학술발표대회 논문집, 2000. 10
6. 한천구의 4인, “플라이애시를 사용한 콘크리트의 강도증진 해석에 따른 거푸집 존치기간의 결정에 관한 검토”, 대한건축학회 춘계 학술발표대회 논문집, 2000. 4
7. 정상진의 5인, “High Volume 플라이애쉬 콘크리트의 양생온도에 따른 강도특성”, 대한건축학회 춘계 학술발표대회 논문집, 2002. 4
8. 정상진의 5인, “플라이애시를 사용한 일반구조체 콘크리트의 적용성 및 품질관리에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 논문집 구조계, 2000. 8