

플라이애쉬를 대량 사용한 고강도 콘크리트에 관한 실험적 연구

The Experimental Study on High Strength Concrete of High Volume Fly-Ash

이 동 하* 서 동 훈* 전 판 근** 백 민 수*** 임 남 기**** 정 상 진*****
Dong-Ha Lee Dong-Hoon Seo Pan-Heun Jun Min-Su Park Nam-Gi Lim Sang-Jin Jung

Abstract

To study of high volume fly-ash concrete replace cement and fine aggregate together. Proportion consideration economy cost and performance improve replacement high volume fly-ash. Experimentation study of high-strength which cement about fly-ash replacement maximum 50%Flash concrete tested slump, air content, setting and Hardening concrete tested day of age 1, 3, 7, 28, 91 compression strength in underwater curing. Purpose of study is consultation materials in field that variety of fly-ash replacement concrete mix proportion comparison and valuation.

1. 서론

플라이애쉬는 현재 콘크리트용 혼화재료로 사용되고 있으며 수화발열의 저감, 경화체 조직의 치밀화, 장기강도증진, 워커빌리티 개선 등의 우수한 성질을 가지고 있으며, 경제성 및 공급의 안정성이 우수하여 점차 사용량이 증가하고 있는 추세이다. 또한 화력 발전소 산업폐기물인 플라이애쉬의 재활용은 환경적인 면에서도 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 다만, 플라이애쉬를 결합재의 일부로 치환하여 사용할 경우 치환율의 증대에 따른 단위시멘트량의 감소로 인해 초기강도저하 및 중성화에 대한 저항성이 저하하는 단점이 있다. 그러나 최근들어 외국의 경우 플라이애쉬를 다량치환한 하이 볼륨 플라이애쉬에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 연구의 경우 플라이애쉬를 다량 치환하는 방법으로 시멘트 및 잔골재의 일부분을 동시에 치환한 배합을 사용하여 경제성을 고려한 콘크리트의 성능증진에 관한 연구를 실시하였다. 본 연구에서는 다량의 플라이애쉬를 결합재 및 잔골재에 대하여 부분적으로 치환하여 고강도 콘크리트의 굳지 않은 콘크리트의 특성 및 경화 콘크리트의 특성에 관한 실험을 실시하였다. 여러가지 다양한 수준의 배합을 비교하여 현장에 도움이 될 수 있는 자료를 제시하는 것이 본 연구의 목적이다.

* 정회원, 단국대 대학원 석사과정

** 정회원, 단국대 대학원 박사과정

*** 정회원, 단국대 대학원 박사수료

**** 정회원, 동명정보대 건축공학과 교수

***** 정회원, 단국대 건축공학과 교수

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 실험의 배합은 물결합재비를 35%로 하였고, 플라이애쉬는 0, 10, 20, 30, 40, 50%를 치환하였으며, 40, 50%의 경우 시멘트 및 잔골재의 일부를 플라이애쉬로 치환하였다. 굳지 않은 콘크리트 실험으로는 슬럼프, 공기량, 콘크리트 응결시험을 실시하였고, 경화 콘크리트의 실험으로는 수중양생한 공시체를 재령 1, 3, 7, 28, 91일에 압축강도를 측정하였다. 또한, 혼화제의 경우 고성능AE감수제와 AE제를 사용하였다. 목표 슬럼프는 $18\text{cm} \pm 2\text{cm}$ 로 설정하였고, 목표 공기량은 $4.5 \pm 1.5\%$ 로 설정하였다. 본 실험의 실험인자, 수준 및 측정항목은 표 1과 같다.

표 1 실험인자와 수준 및 측정항목

구 분	W/B (%)	치환율 (%)	측정항목	
			굳지 않은 콘크리트	경화 콘크리트
인 자	35	0,10,20,30 40,41,42,43 50,51,52,53,54	슬럼프, 공기량, 콘크리트응결시험	압축강도 (1, 3, 7, 28, 91일)
수 준	1	13	3	5

2.2 배합계획

본 실험에서는 플라이애쉬를 시멘트의 10, 20, 30, 40, 50% 치환을 하였다. 플라이애쉬 치환 방법은 10, 20, 30%의 경우는 시멘트에 대하여 치환을 하였으며, 40%와 50%의 경우는 시멘트 치환과 시멘트와 잔골재 동시치환을 하였다. 시험체번호 F41, F42, F43의 경우 잔골재에 대한 5%, 10%, 15%를 치환하여 물 결합재비가 감소하는 것을 알 수 있다. 50%도 40%치환과 같은 방법을 사용하였다. 본 실험에서 사용한 배합은 다음의 표 2과 같다.

표 2 배합표

시험체명	W/C (%)	W/B (%)	S/A (%)	FA치환율 (%)		단위용적중량(kg/m ³)						
				C	S	W	C	FA	S	G	AD1	AD2
W35-F00	35.0	35.0	43.0	0	0	175	500	0	706	943	4.500	0.250
W35-F10	35.0	35.0	43.0	10	0	175	450	50	697	931	4.500	0.250
W35-F20	35.0	35.0	43.0	20	0	175	400	100	688	919	4.500	0.250
W35-F30	35.0	35.0	43.0	30	0	175	350	150	680	908	4.500	0.250
W35-F40	58.3	35.0	43.0	40	0	175	300	200	671	896	4.500	0.250
W35-F41	53.8	33.3	42.1	35	5	175	325	200	662	884	4.725	0.263
W35-F42	50.0	31.8	41.2	30	10	175	350	200	653	872	4.950	0.275
W35-F43	46.7	30.4	40.3	25	15	175	375	200	644	860	5.175	0.288
W35-F50	35.0	35.0	43.0	50	0	175	250	250	662	884	4.500	0.250
W35-F51	63.6	33.3	42.1	45	5	175	275	250	653	872	4.725	0.263
W35-F52	58.3	31.8	41.1	40	10	175	300	250	644	861	2.950	0.275
W35-F53	53.8	30.4	40.2	35	15	175	325	250	635	849	5.175	0.288
W35-F54	50.0	29.2	39.2	30	20	175	350	250	627	837	5.400	0.300

2.3 사용재료

2.3.1 시멘트

본 실험에서 사용한 시멘트는 국내산 S사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 시멘트의 물리적 성질은 다음의 표 3과 같다.

표 3 시멘트의 물리적 성질

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

2.3.2 골재

잔골재의 경우 북한강산으로서 최대치수를 5mm이하로 입도 조정하여 사용하였고, 굵은 골재의 경우 광주석산 쇄석으로 최대치수 20mm이하로 입도조정하여 사용하였다. 골재의 물리적 특성은 표 4와 같다.

표 4 골재의 물리적 특성

구분	비중	흡수율(%)	조립율(%)	단위용적중량(kg/m ³)	실적율(%)
잔골재	2.60	0.98	2.87	1,590	61.2
굵은골재	2.62	1.8	6.3	1,596	61.04

2.3.3 플라이애쉬

플라이애쉬의 경우 보령 화력발전소에서 생산·정제 과정을 거친 유연탄 플라이애쉬를 사용하였고, 그 품질 특성은 표 5와 같다.

표 5 플라이애쉬의 물리·화학적 특성

	강열감량(%)	단위수량비(%)	분말도(cm/g)	비중	압축강도비(%)	SiO ₂ (%)	습분(%)
보령산	3.75	100	3,084	2.11	95	59.7	0.11
KS 규격	5이하	102이하	2,400이상	1.95이상	60이상	45이상	1이하

2.3.4 혼화제

혼화제는 국내에서 시판·사용되고 있는 J사의 고성능AE감수제 표준형 및 AE제를 사용하였고, 혼화제의 물성은 표 6과 같다.

표 6 혼화제의 종류 및 물성

제조회사	유형	주성분	비중	색상	비고
국내 J사	고성능AE감수제	나프탈렌계	1.22±0.05	암갈색	-
국내 J사	AE제	-	-	암갈색	10배 희석

3. 실험결과 및 고찰

3.1 굳지 않은 콘크리트 실험결과

3.1.1 슬럼프 및 공기량

본 연구에서의 슬럼프 및 공기량은 각 배합별 혼화제의 적절한 혼입으로 목표슬럼프인 $18 \pm 2\text{cm}$ 와 목표공기량 $4.5 \pm 1.5\%$ 를 전부 만족하는 것으로 나타났다.

3.1.2 콘크리트 응결시험

콘크리트 응결시험의 경우 플레인이 가장 빠른 응결을 나타내었다. 플라이애쉬 치환율이 높아질수록 응결시간이 지연되며, 같은 양의 플라이애쉬를 치환한 경우 잔골재의 플라이애쉬 치환율이 높아질수록 응결시간이 감소되는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 플라이애쉬의 치환량이 동일한 경우 총결합재량(C+F_A)과 단위시멘트량이 증가하여 응결을 촉진시킨 것으로 판단된다. 시험체별 응결특성을 보면 플레인 콘크리트가 약 8시간이 경과하여 초결이 시작되어 11.5시간 후 종결하였다. 플라이애쉬 치환율이 50%인 시험체의 경우 시멘트만을 치환한

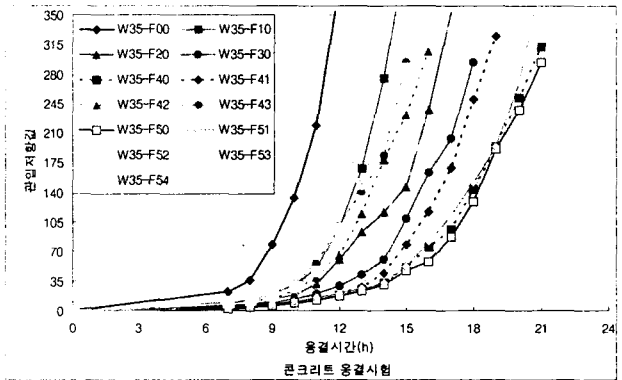


그림 3 콘크리트 응결시험

F50시험체는 14.5시간이 경과한 후 초결이 시작하여 21시간 경과하여 종결을 하여 플레인 콘크리트에 비하여 약 2배까지 응결시간이 지연되는 것으로 나타났다. 그러나 동일한 양의 플라이애쉬 치환 시험체는 잔골재 치환량이 증가할수록 콘크리트 응결시간의 저하를 상당히 감소시키는 것으로 나타났다.

3.2 경화 콘크리트 실험결과

콘크리트의 실험결과를 표 7에 나타냈다.

표 7 콘크리트 실험결과

단위 : kg/cm²

시험체명	굳지 않은 콘크리트		경화콘크리트				
	슬럼프 (mm)	공기량 (%)	1	3	7	28	91
W35-F00	172	4.5	222	328	393	467	523
W35-F10	180	4.4	177	305	373	513	544
W35-F20	182	3.9	152	294	385	528	554
W35-F30	190	4.2	70	239	315	430	505
W35-F40	196	4.2	57	172	263	400	463
W35-F41	187	4.0	68	209	280	430	513
W35-F42	178	3.9	81	234	332	485	560
W35-F43	170	3.6	103	265	360	523	584
W35-F50	198	4.1	57	161	221	345	420
W35-F51	186	4.0	58	170	248	407	464
W35-F52	190	3.9	70	188	256	432	523
W35-F53	180	3.8	81	216	281	458	594
W35-F54	170	3.9	100	224	334	508	625

3.2.1 시멘트만을 플라이애쉬로 치환한 콘크리트의 압축강도특성

시멘트만을 플라이애쉬로 치환한 시험체의 콘크리트 압축강도 특성의 경우 재령 28일 압축강도는 플라이애쉬를 20% 치환한 시험체가 가장 높은 강도발현을 보였다. 그러나 플라이애쉬 치환율이 30% 이상 시험체에서는 플레인보다 강도가 저하하는 것으로 나타났다. 초기강도의 경우 플레인 시험체가 플라이애쉬를 치환한 시험체보다 현저히 높은 강도발현을 하는 것으로 나타났으나, 재령이 경과함에 따라 강도차가 줄어드는 것으로 나타났다. 장기강도 특성의 경우 플라이애쉬를 20% 치환한 시험체가 가장 높은 강도발현을 보였고, 28일에서 91일까지의 강도증가량을 보면 플레인이 10%정도 증가한 반면, 플라이애쉬를 치환한 시험체는 10~20% 강도발현을 하는 것으로 나타났다. 고강도 콘크리트의 경우 플라이애쉬 치환시험체가 일반 콘크리트의 비하여 초기강도는 적으나 재령경과에 따른 강도의 증진이 크게 나타나, 재령 28일에서는 플레인 콘크리트를 초과하는 것으로 판단된다.

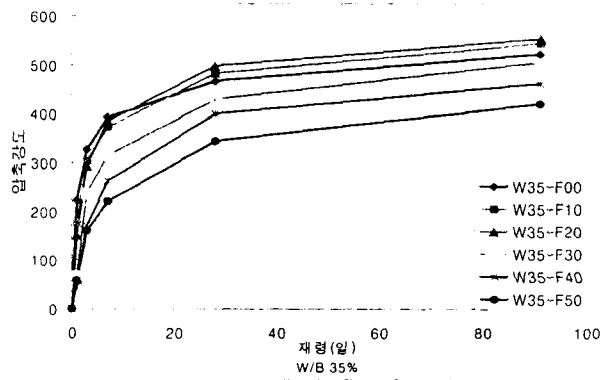


그림 2 결함재 치환에 따른 압축강도

3.2.2 잔골재 치환율에 따른 압축강도특성

플라이애쉬를 40% 치환한 시험체의 잔골재 치환율에 따른 강도는 초기재령의 경우 물결합재비가 가장 큰 F40 시험체와 물결합재비가 가장 작은 F43 시험체의 강도가 거의 유사한 것으로 나타났다. 재령 3일까지의 강도차가 크지 않았으나, 재령 7일부터 강도의 편차가 점진적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 재령 91일의 경우 가장 큰 강도차를 나타내고 있다. 재령 28일의 경우 F40과 F43의 강도차

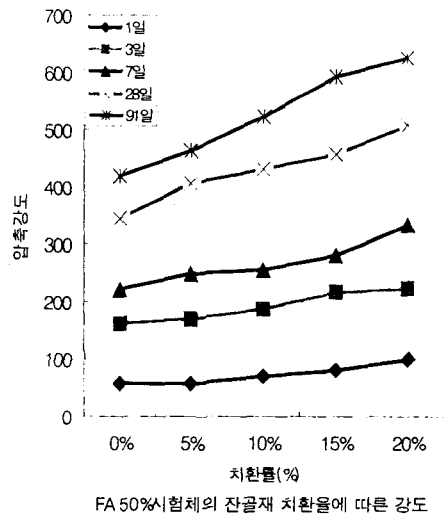
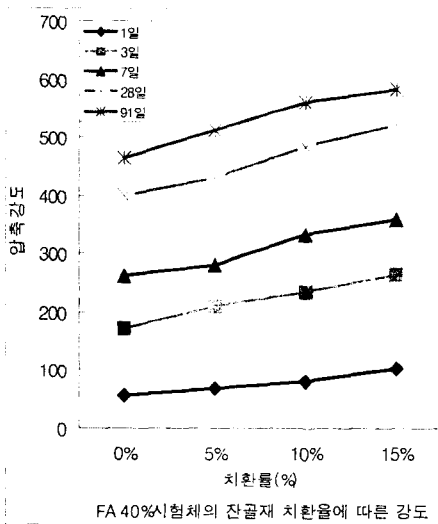


그림 3 잔골재 치환율에 따른 압축강도

가 약 110kgf/cm^2 나타났으며, F50과 F54의 강도차는 약 150kgf/cm^2 로 FA40% 시험체보다 더 큰 강도 차이를 나타내고 있다. 플라이애쉬 50% 치환 시험체보다 잔골재 변화에 따른 강도차가 큰 것은 FA50% 시험체의 잔골재 치환율이 증가하여 F50과 F54 시험체의 물결합재비의 차가 크게 되어 장기 재령에서의 강도차가 큰 것으로 판단된다.

4. 결론

플라이애쉬를 다량 치환한 고강도 콘크리트의 관한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 플라이애쉬 치환율이 높아질수록 응결시간이 지연되며, 같은 양의 플라이애쉬를 치환한 경우 잔골재의 플라이애쉬 치환율이 높아질수록 응결시간이 감소되는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 플라이애쉬의 치환량이 동일한 경우 총결합재량(C+FA)과 단위시멘트량이 증가하여 응결을 촉진시킨 것으로 판단된다.
- (2) 시멘트만을 플라이애쉬로 치환한 시험체의 콘크리트 압축강도 특성은 초기강도의 경우 플레인 시험체가 플라이애쉬를 치환한 시험체보다 현저히 높은 강도발현을 하는 것으로 나타났으나, 재령이 경과함에 따라 강도차가 줄어드는 것으로 나타났다. 장기강도 특성의 경우 플라이애쉬를 20% 치환한 시험체가 가장 높은 강도발현을 보였다.
- (3) 잔골재 치환율에 따른 압축강도특성은 재령 3일까지의 강도차가 크지 않았으나, 재령 7일부터 강도의 편차가 점진적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 재령 91일의 경우 가장 큰 강도차를 나타내고 있다.

참고문헌

1. 정상진 외, 「건축재료학」, 보성각.
2. 정상진 외, 「알기 쉬운 건축 시공·재료」, 보성각.
3. 정상진 외, 「플라이애쉬를 다량 함유한 콘크리트의 관한 실험적 연구」, 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 제 13권 제 2호 2001.11.
4. 정상진 외, 「플라이애쉬를 다량 치환한 콘크리트의 양생온도에 따른 강도특성에 관한 연구」, 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제 11권 제 1호 2002.5.
5. 仕人豊和, 「高強度コンクリートの強度發現特性に及ぼす初期溫度履歴條件の影響」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1999.10.
6. A.M Neville, "Properties of Concrete", 4th Edition, Longman, 1995.