

플라이애쉬 혼입 모르타의 역학적 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Mechanical Properties of Fly Ash in Mortar

박 일 용*	백 민 수**	손 종 규***
Park, Il Yong	Paik, Min Su	Shon, Jong Kyu
최	수****	정 상 진*****
Choi,	Soo	Jung, Sang Jin

Abstract

The purpose of this study is to find mechanical properties of fly ash ratio in mortar as flowing, setting time, compressive strength, suction ratio of water, length change ratio. As a result, it was shown that proper fly ash ratio replaced by cement weight in mortar was generally positive effect to flowing, compressive strength. suction ratio of water, length change ratio. So if fly ash is well done quality control is considered as good replacement of cement

1. 서 론

최근의 급속한 경제발전과 더불어 전력수요가 꾸준히 증가하여 왔고, 1970년대 초의 오일 파동 이후, 석탄에 대한 에너지 비중이 높아지면서 화력발전소가 증가하게 되었다. 따라서 화력발전소의 산업폐기물인 석탄회(Fly Ash)의 발생량은 1996년말 300만톤을 넘게되었으며 2005년중에는 600만톤을 상회할 것으로 예상되기 때문에 부존자원이 거의 없는 우리나라로서는 플라이애쉬가 귀중한 자원으로 평가되고 있다. 해외 선진국에서는 산업부산물인 플라이애쉬를 건축,토목재료 콘크리트분야등의 산업용재로 활용하기 위한 연구개발 및 응용이 30여년전 부터 활발히 진행되어 현재까지 많은 성과를 거두어 왔고 그 재활용 비율 또한 우리나라와는 비교가 안될 만큼 높은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 플라이애쉬를 일반 시멘트 몰탈에 혼입함으로써 변화하는 제반특성을 실험,실증적으로 규명하기 위한 것으로서 플라이애쉬 혼입량, 강열감량, 생산지등의 실험변수에 의한 플라이애쉬 혼입 모르타의 유동성을 비롯한 제반 역학적 특성을 일반 콘크리트와 비교·분석하고 이를 토대로 플라이애쉬 콘크리트 제조시 각종 실험변수 선정 및 적정강도 대비 최적 혼입율을 도출함으로써 플라이애쉬 콘크리트의 품질특성 규명 및 실용화를 위한 기초자료로 이용될 수 있도록 하는데 연구 목적이 있다.

- * 정회원, 단국대 대학원 석사과정
- ** 정회원, 단국대 대학원 박사과정
- *** 정회원, 대한주택공사 주택연구소 연구원
- **** 정회원, 대한주택공사 주택연구소 과장
- ***** 정회원, 단국대 건축공학과 부교수, 공학박사

2. 실험계획 및 방법

2.1 사용재료

(1) 시멘트

시멘트는 국내 S사에서 생산된 것으로서 KS L 5201규정에 적합한 보통포틀랜드 시멘트로 그 물리적 성질과 화학적 조성은 표 1 과 같다

표 1 시멘트의 물리적, 화학적 조성

화학적성질	성분	강열감량(LOD)	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Al ₂ O ₃
	구성비율(%)	1.0	21.1	2.9	62.5	3.3	2.2	6.5
물리적성질	비중	분말도(cm ² /g)	안정성	응결시간		압축강도(kg/cm ²)		
	3.15	2,900	양호	초결	종결	3일	7일	28일
				4h	6h	198	272	389

* S사의 시험결과표

(2) 세골재

골재는 미사리산으로 최대직경 5mm이하의 것을 사용하였고 물리적 특성에 관한 시험 결과는 표2와 같다.

표 2 세골재의 물리적 성질

골재종류	생산지	최대치수(mm)	표견비중	흡수율(%)	단위용적중량(kg/m ³)	실적율(%)	조립율(%)
세골재	미사리	5.0	2.57	0.98	1,590	61.2	2.87

(3) 플라이애쉬

본 연구에서 사용한 플라이애쉬는 보령산으로 KS L 5405규정에 적합한 것이며 그 물리적 특성은 표 3과 같다.

표 3 플라이애쉬의 물리적 특성

생산지(시험기호)	강열감량(%)	단위수량비(%)	분말도(cm ² /g)	비중	SiO ₂ (%)	압축강도비	습분(%)
보령(Fb ₁)	3.75	100	3,206	2.18	59.7	95	0.11
보령(Fb ₂)	4.72	99	3,201	2.21	47.6	93	0.14
삼천포(Fs)	3.58	101	3,964	2.25	94	61.2	0.18
KS규격	5이하	102이하	2,400이상	1.95이상	45이상	60이상	1이하

2.2 시험방법

플라이애쉬 혼입율에 따른 시멘트 모르타의 물리적 특성을 평가하기 위하여 KS L 2402에 의한 흐름시험, KS F 2405에 의한 압축강도시험, KS F 2407에 의한 휨강도시험, KS F 2503에 의한 흡수율 시험을 실시하였다. 길이변화는 KS F 2424에 의한 방법으로 다이알 게이지를 이용하여 측정하였고 플라이애쉬 혼입 시멘트의 응결시간 평가를 위해 KS L 5103에 의한 방법으로 실험을 실시하였다.

2.3 공시체의 제작 및 양생

각 공시체의 제작은 KS L 5109에 의한 방법으로 KS F 2476에 의거 실시하였고 결합재와 잔골재의 중량 배합비 1:2로 기계비빔 하였다. 플라이애쉬 혼입은 시멘트에 대한 중량 백분율 0-50%로 치환 하였다. 플라이애쉬 혼입에 따른 플로우값의 변화를 고찰할 수 있도록 시멘트 모르타의 플로우를 110 ±5mm를 기준으로 배합비를 결정하였다. 배합표를 표 4에 나타내었다. 공시체의 제작에는 4×4×16cm의 강세 3연형몰드를 사용하였으며 제작된 공시체는 표준수중양생을 실시하였다.

표 4 배합표

시험체명	W/B(%)	S/C(%)	혼입율(%)	단위용적증량(kg/m ³)			
				시멘트	플라이애쉬	세골재	물
Fb ₁ -R00	40	200	0	702	-	1146	281
Fb ₁ -R05			5	667	35	1146	281
Fb ₁ -R10			10	632	70	1146	281
Fb ₁ -R15			15	597	105	1146	281
Fb ₁ -R20			20	562	140	1146	281
Fb ₁ -R30			30	491	211	1146	281
Fb ₁ -R50			50	351	351	1146	281
Fb ₂ -R00			40	200	0	702	-
Fb ₂ -R10	10	632			70	1146	281
Fb ₂ -R20	20	562			140	1146	281
Fb ₂ -R30	30	491			211	1146	281
Fb ₅ -R00	40	200	0	702	-	1146	281
Fb ₅ -R10			10	632	70	1146	281
Fb ₅ -R20			20	562	140	1146	281
Fb ₅ -R30			30	491	211	1146	281

3. 실험결과 및 분석

3.1 플라이애쉬 혼입 시멘트의 응결시간

길모아 침에 의한 플라이애쉬 혼입 시멘트의 응결 시간을 측정하였으며 그 결과를 표 5에 나타내었다. 표에 의하면 플라이애쉬의 혼입율이 증가할수록 전반적으로 초결 및 종결이 늦어지는 것으로 나타났다. 50%의 경우는 응결지연시간의 지연이 상당히 높게 나타나고 있다.

표 5 플라이애쉬혼입 시멘트의 응결시간

구분	R00	R05	R10	R15	R20	R30	R50
초 결	5:30	5:30	5:15	5:15	5:25	5:30	6:30
종 결	7:45	7:45	7:45	8:15	8:15	8:30	9:45

3.2 플라이애쉬 혼입 모르터의 흐름특성

표 6 에 의하면 플라이애쉬의 혼입율이 증가할수록 플로우값이 증가하는 결과를 나타내고 있으며 특히, 플라이애쉬를 50%대체한 모르터의 경우 플라이애쉬를 혼입하지 않은 것보다 15%까지 유동성이 증진되는 결과를 보였다. 이것은 플라이애쉬 입자가 모르터속에서 불 배어링 역할을 하여 입자사이의 마찰계수를 감소시키기 때문으로 사료된다.

표 6 플라이애쉬 혼입 모르터의 Flow

(단위:mm)

구분	R00	R05	R10	R15	R20	R30	R50
Fb ₁	110	113	118	119	119	125	127
Fb ₂	114	-	126	-	131	110	-
Fs	117	-	119	-	124	114	-

3.3 압축강도

플라이애쉬 혼입 모르터 시험체에 대한 압축강도의 시험결과를 표 7에 나타내었다. 표에 의하면 플라이애쉬 혼입율 20%인 시험체가 강도발현이 높게 나타났으며 특히, Fb₁-R20의 시험체는 재령 91일의 압축강도가 724kg/cm²로 같은 혼입율의 다른 시험체보다 10%이상 높게 나타나고 있다.

재령에 따른 압축강도의 변화를 그림 1에 나타내었으며 그림에 의하면 플라이애쉬의 혼입율이 높을수록 초기재령에서의 압축강도는 일반 모르터에 비해 대체적으로 감소하는 경향을 보이고 있으나 재령 14일 이후부터는 강도증진이 두드러지기 시작해 28일 이후의 장기재령으로 갈수록 플라이애쉬의 혼입율에 따른 뚜렷한 강도증진을 보이고 있다. 이러한 경향은 강열감량 및 생산지등의 실험요인과 관계없이 동일한 경향을 나타내고 있다. 시멘트 모르터의 압축강도를 100으로 한 경우의 재령에 따른 압축강도의 관계를 그림 2에 나타내었다. 그림에 의하면 재령 14일 이전까지는 플라이애쉬의 혼입율에 비례하여 강도 발현이 낮게 나타나고 있으나 재령 14일을 기점으로 하여 91일의 장기재령에서는 일반 시멘트 모르터에 비해 최고 20%이상 강도발현이 증진되는 것을 보여주고 있다. 강열감량 및 생산지에 따른 압축강도의 변화를 각각 그림 3 과 그림 4 에 나타내었다. 그림 3 에 따르면 강열감량이 3.75%인 시험체의 압축강도가 4.72%인 시험체보다 강도가 평균 8%정도 높게 나타나고 있다. 생산지별 압축강도를 그림 4에서 보면 플라이애쉬의 혼입량에 관계없이 압축강도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타나고 있다.

표 7 강도 결과

구 분	압 축 강 도(kg/cm ²)					휨 강 도(kg/cm ²)			
	3일	7일	14일	28일	91일	7일	14일	28일	91일
Fb ₁ -R00	309(100)	421(100)	486(100)	528(100)	582(100)	92	97	99	101
Fb ₁ -R05	291(94)	386(92)	464(95)	503(95)	541(93)	89	91	92	96
Fb ₁ -R10	282(91)	375(89)	447(92)	514(97)	661(114)	81	90	93	98
Fb ₁ -R15	269(87)	352(84)	487(100)	525(99)	678(116)	81	86	87	95
Fb ₁ -R20	269(87)	376(89)	519(107)	556(105)	724(124)	81	90	94	104
Fb ₁ -R30	217(71)	285(68)	428(88)	511(97)	644(111)	72	79	85	97
Fb ₁ -R50	139(45)	187(44)	290(60)	394(75)	545(94)	51	60	68	83
Fb ₂ -R00	309(100)	388(100)	480(100)	535(100)	629(100)	93	94	95	97
Fb ₂ -R10	275(89)	355(92)	423(88)	503(94)	664(106)	82	89	93	102
Fb ₂ -R20	275(89)	360(93)	453(94)	526(98)	651(103)	79	83	88	99
Fb ₂ -R30	247(80)	259(67)	354(74)	512(96)	635(101)	67	72	82	94
Fs-R00	293(100)	362(100)	464(100)	527(100)	565(100)	81	90	92	93
Fs-R10	286(97)	332(92)	461(99)	520(99)	643(114)	79	84	90	93
Fs-R20	275(94)	316(87)	458(98)	549(104)	626(111)	75	82	90	96
Fs-R30	225(77)	288(79)	408(88)	480(91)	609(108)	63	74	83	93

* () : 시멘트 모르터 공시체의 강도를 100으로 한 경우의 압축강도비

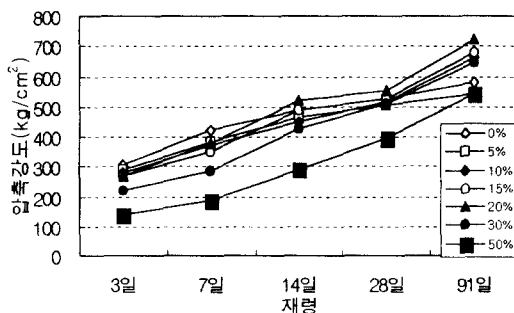


그림-3 재령과 혼입율에 따른 압축 강도변화

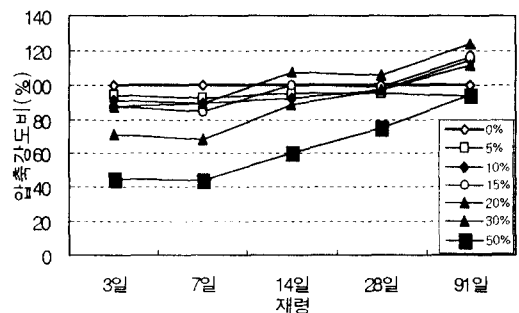


그림-4 재령과 혼입율에 따른 압축강도비

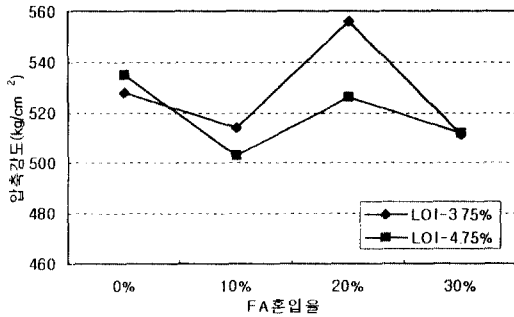


그림-3 재령(28일)과 강령감량에 따른 압축강도변화

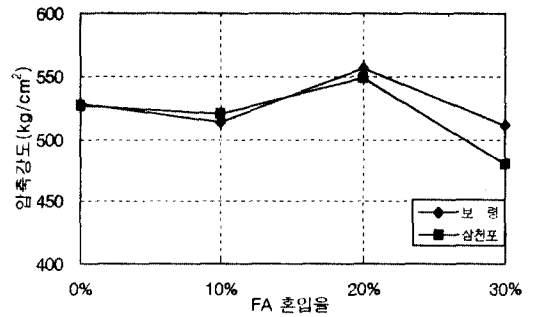


그림-4 재령(28일)과 산지별에 따른 압축강도변화

3.4 휨강도

플라이애쉬를 혼입한 모르타 시험체의 휨강도 결과를 표 7에 나타내었다. 표에 의하면 휨강도의 발현은 전술한 압축강도에서의 플라이애쉬 혼입에 따른 강도발현과 거의 유사하고 플라이애쉬의 혼입량이 증가할수록 휨강도의 발현은 대체적으로 낮게 나타나고 있다. 또한 초기재령에서는 플라이애쉬의 혼입율이 50%일 경우 휨강도의 발현율도 플레인 시험체에 비해 50%정도 낮게 나타나고 있으며, 이러한 경향은 모든 플라이애쉬 혼입율에서 공통적인 경향을 보이고 있어서 플라이애쉬 혼입율과 강도발현은 반비례함을 보여 주고 있다. 플라이애쉬 재령에 따른 휨강도의 변위는 플레인 시험체의 경우 휨강도의 발현이 재령 7일 이후에 크게 증진되지 않음을 알 수 있다. 플라이애쉬가 혼입된 시험체의 경우에는 초기 재령에서의 휨강도 발현은 플레인 시험체의 휨강도에 비해 낮게 나타나고 있으나 이후 재령에서는 강도 발현율이 상당히 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나, 장기재령에 이르러서도 플레인 시험체의 휨강도보다 플라이애쉬 혼입 시험체의 강도가 대체적으로 낮게 나타나고 있어 휨강도의 발현은 압축강도의 발현속도보다 느리게 나타남을 알 수 있다

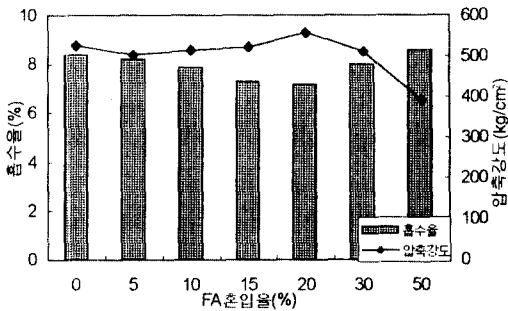


그림 5 플라이애쉬 혼입에 따른 흡수율변화(재령28일)

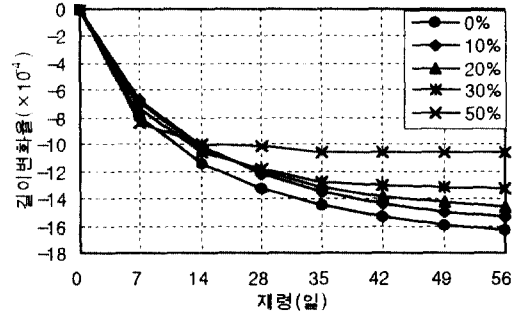


그림 6 플라이애쉬 혼입 시험체의 길이변화

3.5 흡수율

플라이애쉬 혼입에 따른 흡수율의 변화는 그림 5에 나타내었으며 그림에 의하면 플라이애쉬 혼입율이 일정 범위까지는 흡수율이 낮아지고 있어서 압축강도의 강도발현 양상과 유사한 경향을 보이고 있다. 이러한 현상은 플라이애쉬가 모르타속에서 수밀성을 증가시키는 것으로 압축강도의 발현과 상관관계가 있음을 알 수 있다.

3.6 길이변화율

그림 6은 플라이애쉬 혼입율별 재령 경과에 따른 건조수축 특성을 나타낸 것이다. 플라이애쉬 혼입율이 증가할수록 모르타 시험체의 건조수축에 의한 길이변화 특성은 감소하는 것으로 나타났으며 이

것은 재령이 경과할수록 더욱 큰 감소폭을 보이고 있다.

3.7 플라이애쉬 및 플라이애쉬 혼입 모르터의 pH값

pH값은 콘크리트의 중성화, 내구성에 관계된 사항으로서 본 연구에서는 보령, 태안, 삼천포 화력발전소에서 플라이애쉬를 채취하여 일반시멘트와의 pH를 비교·실험을 수행하였다. 실험결과 플라이애쉬가 혼입된 시멘트 모르터는 pH는 플라이애쉬 혼입율이 증가할수록 낮아지는 경향을 나타내고 있다. 플라이애쉬 혼입 시멘트의 pH는 9~11로서 일반 시멘트보다 낮은 수치를 나타내고 있으며 산지별로 차이가 큰 것으로 나타났다. 플라이애쉬 혼입 시멘트 모르터의 pH값도 플라이애쉬 혼입율이 증가할수록 낮아지는 경향을 나타내고 있다. 이것은 플라이애쉬 자체의 pH가 일반 시멘트보다 낮은 것에 기인하며, 일반 콘크리트의 구조체 적용시 중성화 및 내구성 저하의 요인이 될 수 있으므로 플라이애쉬를 콘크리트의 혼화재로 사용할 경우 품질관리 차원에서 반드시 확인할 항목이라 사료된다.

표 5 플라이애쉬 혼입 시멘트의 pH값

구분	일반시멘트	보령산	태안산	삼천포산
pH	12.542	11.001	9.252	11.939

표 6 플라이애쉬 혼입 모르터의 pH값

구분	R00	R10	R20	R30	R50
pH	12.318	12.234	12.284	11.893	11.581

4. 결론

본 연구에서는 플라이애쉬에 대한 기존의 연구자료를 분석하고 이를 바탕으로 플라이애쉬 혼입에 따른 모르터의 역학적 특성을 실험한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- 1) 플라이애쉬의 응결시간은 플라이애쉬의 혼입율이 클수록 전반적으로 초결 및 종결시간을 지연시키지만 그리 큰 영향은 없는 것으로 나타났다.
- 2) 굳지 않은 플라이애쉬 혼입 모르터의 Flow시험결과 혼입율이 클수록 Flow값이 증가했으며 50%대 체시 최고 15%까지 유동성이 증진되는 것으로 나타났다.
- 3) 플라이애쉬 혼입 모르터의 압축강도는 일반 모르터 시험체보다 초기 강도는 낮게 나타났지만 재령 14일 이후부터는 강도 발현속도가 급격히 증가해 28일 이후의 장기재령에서는 최고 20%이상 높게 나타났다. 또한 플라이애쉬 20%에서 압축강도가 가장 높게 나타났으며 이후의 혼입율에서는 오히려 감소하는 것으로 나타났다.
- 4) 휨강도는 플라이애쉬의 혼입율 20%에서 가장 높게 나타났으며 재령에 따른 강도발현속도는 압축강도보다 낮은 것으로 나타났다.
- 5) 흡수율은 플라이애쉬 혼입율이 20%이하까지는 감소하고 20%이상을 초과하면 다시 증가하는 것으로 나타나 플라이애쉬가 적절히 혼입될 경우 시멘트 경화체의 수밀성을 증진시키는 것으로 나타났다.
- 6) 건조수축에 의한 길이변화율은 플라이애쉬의 혼입율이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났으며 재령이 경과할수록 더욱 큰 감소폭을 보이고 있다.
- 7) 국내 생산 플라이애쉬의 pH는 평균 10.73으로 시멘트의 12.54보다 낮게 나타났으며 플라이애쉬가 시멘트 모르터에 혼입됨에 따라 pH의 감소폭은 다소 줄어드는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. M. Alsali, V. Sivasundram and V. M. Malholtra, Fly Ash in Concrete CANMET.MSL.94-15. Canada.1992