

# 플라이애시를 대량 사용한 모르타르의 유동성 및 강도특성에 관한 연구

최 세 진

〈삼표산업(주) 기술연구소 주임연구원, 공학박사〉

오 복 진

〈삼표산업(주) 기술연구소 소장, 공학박사〉

여 병 철

〈삼표산업(주) 레미콘사업본부장, 공학박사〉

- |              |                      |
|--------------|----------------------|
| 1. 서론        | 3. 실험결과 및 고찰         |
| 2. 실험계획 및 방법 | 3.1 플로우 검토 및 분석      |
| 2.1 실험계획     | 3.2 압축강도 검토 및 분석     |
| 2.2 배합       | 3.3 시멘트 물비와 압축강도의 관계 |
| 2.3 사용재료     | 4. 결론                |
| 2.4 시험방법     |                      |

## 1. 서론

석탄화력발전소에서 부산물로 생산되는 플라이애시는 국내의 경우 2002년 현재 약 480만톤이 발생하였으며, 재활용률이 꾸준히 증가하고 있으나 상당량이 매립처분되고 있는 실정이다.<sup>1)</sup> 이로 인해 매립처분지 확보에 어려움을 겪고 있으며, 환경적인 측면에서도 산업부산물의 재활용은 중요한 문제로 대두되고 있다.

일반적으로 플라이애시를 콘크리트용 혼화재로서 사용할 경우 플라이애시를 단위시멘트

량의 일부로 대체하여 사용하게 되는데, 이 경우 소량의 사용은 문제가 없으나 일정수준을 넘어설 경우 응결 및 경화 지연 등의 문제점으로 인하여 그 사용량에 제한을 받게 된다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 플라이애시를 잔골재의 대체재로서 사용하는 방법이 제안되고 있으며, 이러한 방법은 플라이애시를 대량 사용할 수 있는 것으로 알려져 있다.<sup>2),4),5)</sup>

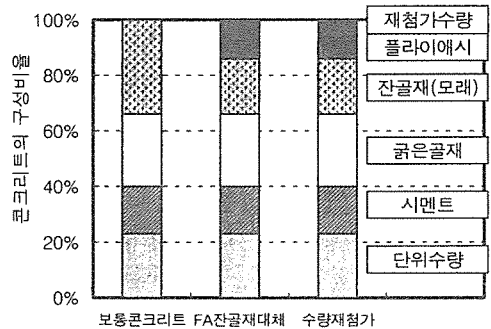
특히 최근 콘크리트용 천연골재자원의 고갈·부족문제를 해결하기 위한 골재대체자원의 개발이라는 측면에서도 이점을 가지고 있는

것으로 알려져 있다

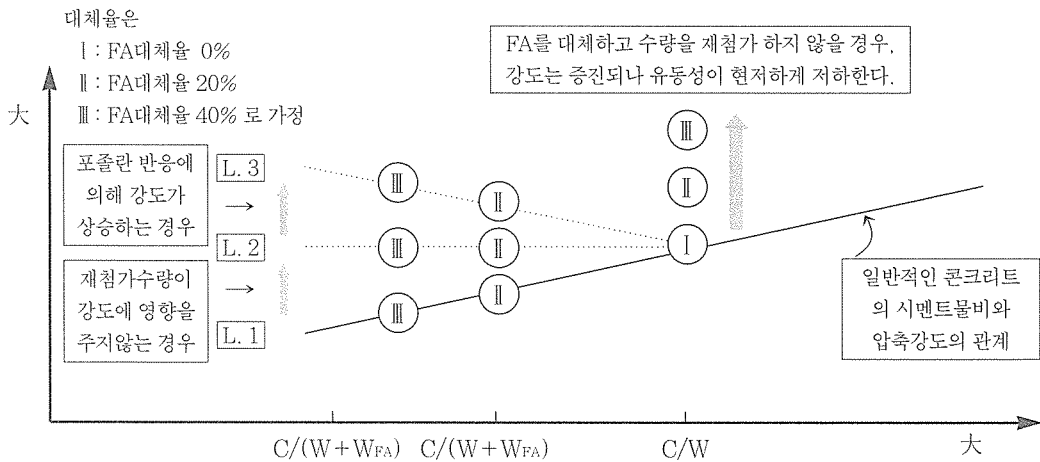
그러나, 플라이애시를 잔골재의 일부로 대체하여 사용할 경우 플라이애시 대체량이 증가함에 따라 점성이 증가하여 유동성이 저하하며, 이로 인해 소요의 유동성 확보를 위한 감수제, 유동화제 등 혼화제의 첨가량이 증가하여 경제성이 저하하게 되는 문제점이 발생하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 플라이애시를 잔골재의 일부로 대량 사용할 경우 발생하는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 절건상태인 플라이애시에 일정수량을 재첨가하는 방법을 도입하여, 모르타르의 유동성과 압축강도를 만족시키는 최적의 재첨가수량 범위를 검토·분석함으로써 플라이애시를 잔골재의 일부로 대

체하여 사용할 경우 대체량이 증가할수록 유동성이 현저하게 저하되는 문제점이 발생하게 되는데,<sup>2)</sup> 이는 배합설계시에 잔골재(모래)는



(그림 1) 플라이애시의 재첨가수량 개념도



(그림 2) 배합설계 개념도

량 사용한 콘크리트의 배합설계를 위한 참고 자료를 제시하고자 하였다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

일반적으로 플라이애시를 잔골재의 일부로

표건상태를 기준으로 설정하고 있으나, 플라이애시는 전혀 수분을 가지고 있지 않은 절건상태로서 다공질 구조인 플라이애시가 단위수량을 흡수하기 때문이다.<sup>6)</sup>

본 연구에서는 [그림 1]에서 보는 바와 같이 콘크리트에 플라이애시를 잔골재의 일부로 대체하고, 대체한 플라이애시의 중량에 비례하여 일정수량을 재첨가하는 개념을 도입하여, 소요

의 유동성을 만족시키며 강도저하가 최소로 발생하는 적정 제첨가영역을 찾고자 하였다.

[그림 2]는 본 연구의 배합설계 개념도를 나타낸 것으로 플라이애시를 잔골재에 대하여 각

[표 1] 모르타르 배합

FA대체율 <sup>1)</sup> (%)	W <sub>FA</sub> <sup>2)</sup> (%)	W/C (%)	단위수량 (kg/m <sup>3</sup> )			절대용적 (l/m <sup>3</sup> )			단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )			C/W
			기본수량	제첨가수량	합 계	시멘트	플라이애시	잔골재	시멘트	플라이애시	잔골재	
PL	-	45	298	0	298		0	462		0	1182	2.22
20	0	45	298	0	298		92			197		2.22
	22	50	298	35	333		57			122		1.98
	25	51	298	38	336		54		370	115	946	1.97
	28	51	298	42	340		50			107		1.95
	31	52	298	45	343		47			100		1.91
	34	52	298	48	346		44			93		1.93
40	0	45	298	0	298		185			393		2.22
	22	55	298	69	367		116			246		1.80
	25	57	298	77	375		108		277	230	709	1.77
	28	58	298	84	382		101			216		1.73
	31	59	298	90	388		95			201		1.70
	34	60	298	97	395		88			188		1.68
60	0	45	298	0	298	210	277			590		2.22
	22	61	298	104	402		173			369		1.65
	25	62	298	115	413		162		185	345	662	1.60
	28	64	298	125	423		152			323		1.56
	31	65	298	135	433		142			301		1.53
	34	67	298	145	443		132			281		1.50
80	0	45	298	0	298		369			787		2.22
	22	66	298	138	436		231			491		1.52
	25	68	298	153	451		216		92	460	263	1.47
	28	70	298	167	465		202			430		1.42
	31	72	298	180	478		189			402		1.38
	34	74	298	193	491		176			375		1.35
100	0	45	298	0	298		462			984		2.22
	22	71	298	173	471		289			615		1.40
	25	74	298	192	490		270		0	575	0	1.35
	28	77	298	209	507		253			538		1.31
	31	79	298	226	524		236			503		1.26
	34	82	298	242	540		220			469		1.23

주) 1) 잔골재의 용적에 대한 대체(플라이애시와 제첨가수량을 합한 값)  
 2) 대체한 플라이애시의 중량에 대한 제첨가수량 비율(W<sub>FA</sub>/(FA+W<sub>FA</sub>))

각 0, 20, 40% 대체한 배합을 예로 든 것이다. L.1은 일반적인 콘크리트에 있어서 시멘트물비와 압축강도의 관계를 나타내고 있는 것으로 시멘트물비가 증가함에 따라 압축강도가 증가하는 것을 나타내고 있다.

또한, 플라이애시를 잔골재의 일부로 대체한 콘크리트에 일정수량을 재첨가할 경우, 재첨가된 수량이 강도저하에 적은 영향을 주며 유동성 확보에 작용한다면 직선의 기울기는 L.1보다 완만해지며, 특히 재첨가된 수량이 강도저하에 전혀 영향을 주지 않고 유동성만을 향상시켜주는 최적수량일 경우에는 L.2와 같이 X축과 평행한 직선으로 될 것이다.

더욱이 장기재령에서 플라이애시의 포졸란반응에 의해 강도가 증진되는 경우에는 L.3과 같은 직선도 가능할 것으로 사료된다. 그러나 포졸란반응이 발생하면 강도에 영향을 주는 요인이 다양해질 것으로 판단되어, 본 연구에서는 포졸란반응에 의한 간섭이 없는 재령을 28일 이전으로 가정하고 28일 까지의 재령을 기준으로, 재첨가 수량이 강도저하에 가장 적은 영향을 주며 동시에 플라이애시를 대체하지 않은 배합(PL)의 유동성을 만족시키는 수준을 비교·검토하고자 한다.

## 2.2 배합

본 실험에 사용한 모르타르의 배합은 [표 1]에서 보는 바와 같이 일정수준의 강도를 발휘할 수 있는 콘크리트의 물시멘트비를 예비실험 등을 거쳐 45%로 고정하고, 이러한 콘크리트배합에서 굵은골재를 제외한 배합을 모르타르의 PL배합으로 선정하였다. 그 후, 이러한 PL배합에서 플라이애시를 잔골재(모래)의 용적에 대하여 각각 20, 40, 60, 80, 100% 대체하였으며, 또한 대체한 각각의 배합에 있어서 기존 문헌<sup>6),7)</sup> 및 수차례의 예비실험을 참고하여 재첨

가수량비를 22, 25, 28, 31, 34%(플라이애시 중량비)의 5수준으로 설정하여 적용하였다.

## 2.3 사용재료

본 실험에 사용된 재료는 [표 2]~[표 4]에서 보는 바와 같이 시멘트는 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 잔골재(모래)는 최대 치수 5mm, FM 2.85의 제염사를 사용하였다. 또한, 플라이애시는 보령산의 비중 2.15, 강열감량 3.5%의 제품을 사용하였다.

[표 2] 시멘트의 물리적 성질

종 류	비 중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	안정성 (%)	응결(h:m)	
				초결	종결
보통포틀랜드 시멘트	3.15	3,412	0.06	4:50	7:05

[표 3] 잔골재(모래)의 물리적 성질

종 류	비 중	조립률	흡수율 (%)	단위용적중량 (kg/l)
제염사	2.56	2.85	0.82	1.6

[표 4] 플라이 애시의 물리적 성질

종 류	비 중	강열감량 (%)	습성 (%)	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)
F급	2.15	3.5	0.19	4,550

## 2.4 시험방법

모르타르의 비빔은 모르타르용 믹서를 사용하여 시멘트, 모래와 플라이애시를 넣고 1분간 건비빔을 실시한 후 물(W+W<sub>FA</sub>)을 첨가하여 1분간 비빔을 실시하였으며, 비빔을 완료한 모르타르의 플로우를 측정하였다. 또한, 압축강

도시험을 위해 50×50×50mm의 공시체를 제작하여 20℃생을 행한 후, 재령 3, 7, 28일에 압축강도시험을 실시하였다.

[표 5]는 모르타르 실험결과를 나타낸 것이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

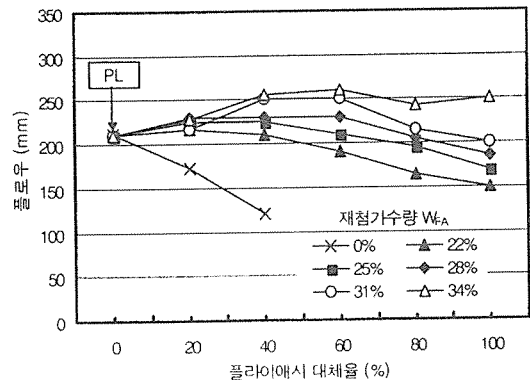
[표 5] 모르타르 실험결과

FA대체율 (%)	W <sub>FA</sub> (%)	W/C (%)	단위수량 (kg/m <sup>3</sup> )	플로우 (mm)	압축강도 (MPa)		
					3일	7일	28일
PL	-	45	298	205	21.3	38.0	50.1
20	0	45	298	173	29.7	44.6	57.5
	22	50	333	217	21.4	37.0	54.1
	25	51	336	225	20.8	35.8	49.9
	28	51	340	230	18.6	36.9	46.1
	31	52	343	217	16.7	35.2	50.0
	24	52	346	228	15.7	32.4	45.2
40	0	45	298	120	28.4	40.1	62.1
	22	55	367	210	20.9	34.6	51.9
	25	57	375	225	17.5	29.0	49.0
	28	58	382	230	17.6	28.4	43.1
	31	59	288	250	16.2	26.8	43.5
	34	60	395	255	14.9	25.0	45.1
60	0	45	298	-	-	-	-
	22	61	402	190	19.1	27.8	48.4
	25	62	413	210	18.6	25.6	47.2
	28	64	423	240	16.4	24.6	38.6
	31	65	433	250	14.4	20.0	37.6
	34	67	443	260	13.3	17.5	35.0
80	0	45	298	-	-	-	-
	22	66	436	165	17.6	26.5	44.1
	25	68	451	195	16.2	25.0	42.2
	28	70	465	205	15.2	22.5	38.7
	31	72	478	215	12.7	21.1	35.3
	34	74	491	235	12.0	17.6	32.4
100	0	45	298	-	-	-	-
	22	71	471	150	18.4	27.2	41.2
	25	74	491	170	16.2	23.7	42.5
	28	77	507	185	12.9	20.7	37.3
	31	79	524	200	12.2	19.2	33.5
	34	82	540	250	10.8	17.3	30.5

#### 3.1 플로우 검토 및 분석

[그림 3]은 재첨가수량에 따른 플라이애시 대체율과 플로우의 관계를 나타낸 것으로, 재첨가수량을 적용하지 않은 재첨가수량 0%의 경우 플라이애시 대체율이 증가함에 따라 직선적으로 플로우가 감소하고 있으며, 플라이애시 대체율 60% 이상에서는 급격한 점성의 증가로 인해 측정이 불가능할 수준으로 유동성이 저하하였다.

그러나, 일정수량을 재첨가한 W<sub>FA</sub> 22~34%의 경우 모든 배합에서 양호한 유동성을 나타내며 재첨가수량 W<sub>FA</sub>가 증가할수록 플로우가 점차 증가하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.



[그림 3] 재첨가수량에 따른 플로우의 변화

특히 W<sub>FA</sub> 25, 28%의 경우, 플라이애시 대체율 100%를 제외하고 대체적으로 PL배합과 유사한 플로우값을 나타내고 있어, 적정수준의 단위수량을 플라이애시에 재첨가할 경우 플라이애시를 잔골재 일부로 사용한 콘크리트의 유동성을 감수제, 유동화제 등의 혼화제의 사용량을 증가시키지 않고도 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

### 3.2 압축강도 검토 및 분석

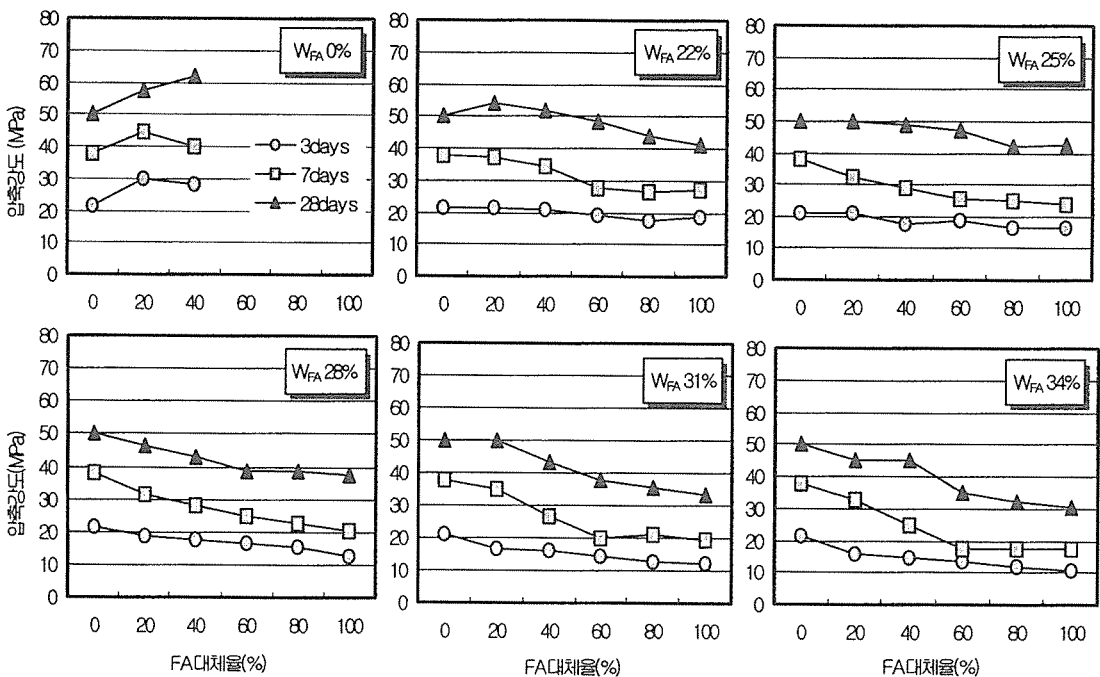
[그림 4]는 재첨가수량별 플라이애시 대체율에 따른 압축강도의 변화를 나타낸 것으로 플라이애시를 잔골재의 일부로 사용하고 일정수량을 재첨가하지 않은  $W_{FA}$  0%의 경우, 플라이애시 대체율이 증가함에 따라 압축강도가 대체적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며 플라이애시 대체율 60%이상의 배합은 비빔볼량으로 측정이 불가능하였다.

또한, 플라이애시를 잔골재의 일부로 대체하고 일정수량을 재첨가한 경우를 살펴보면, 재첨가수량이 증가할수록 즉,  $W_{FA}$ 가 22%에서 34%로 증가함에 따라 플라이애시 대체율 증가에 따른 압축강도 저하폭이 상대적으로 크게 나타나는 경향을 보이고 있으나,  $W_{FA}$  22%와 25%의 경우 재령 28일에서 플라이애시 대

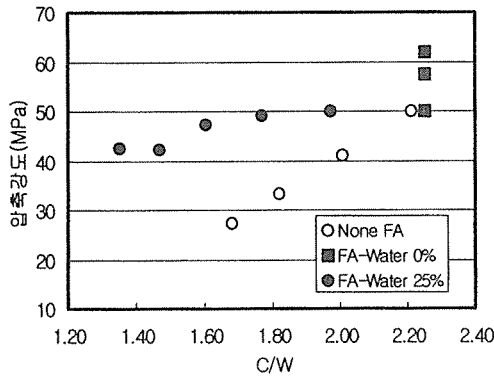
체율 60%까지 플레인(플라이애시 대체율 0%)의 압축강도와 유사하게 나타나고 있어 모르타르에 물을 재첨가함에 따른 압축강도 저하현상이 상대적으로 적게 나타났다.

### 3.3 시멘트물비와 압축강도의 관계

[그림 5]는 재첨가수량비 25%배합에서의 시멘트물비(C/W)와 압축강도의 관계를 나타낸 것으로 재첨가수량이 압축강도에 미치는 영향을 검토하기 위하여 플라이애시를 대체하지 않은 배합을 4수준( $FA$ 무대체 :  $W/C$  0.45, 0.50, 0.55, 0.60) 선정하여 모르타르를 제작, 압축강도를 측정한 후 시멘트물비와 압축강도의 관계를 플라이애시를 대체한 배합과 비교·검토하였다.



[그림 4] 플라이애시 대체율에 따른 압축강도의 변화

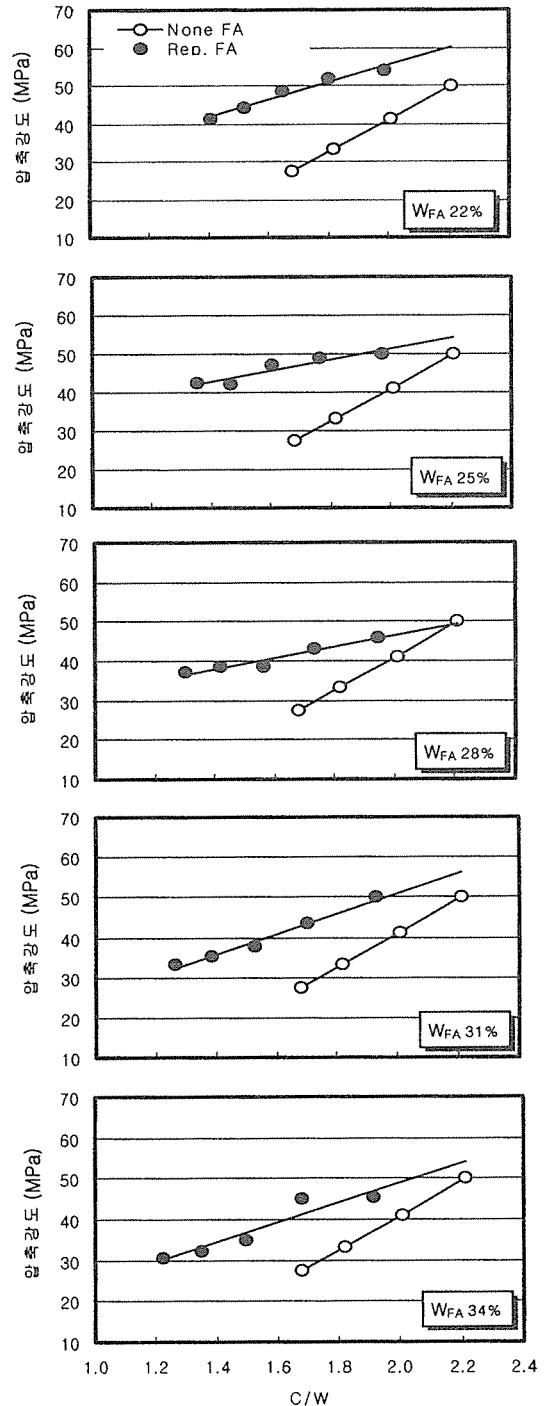


(그림 5) 시멘트물비와 압축강도의 관계 (W<sub>FA</sub> 25%)

플라이애시를 대체하지 않은 경우(None FA)를 살펴보면, 시멘트물비가 증가함에 따라 압축강도가 증가하는 즉, 배합설계 개념도를 나타낸 [그림 2]의 직선 L.1과 같은 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 플라이애시를 대체하고 재첨가수량을 적용하지 않은 경우 (FA-Water 0%)에는, 플라이애시 대체율이 증가할수록 압축강도는 직선적으로 증가하고 있으나 [그림 3]에서 나타낸 바와 같이 유동성이 급격히 저하하는 문제점이 발생하였다.

그러나, 플라이애시를 대체하고 재첨가수량을 적용할 경우(FA-Water 25%), [그림 5]에서 볼 수 있듯이 강도저하에 주는 영향이 상대적으로 작은 것을 알 수 있으며, 특히 시멘트물비 1.97~1.60(플라이애시 대체율 20~60%)에서는 플라이애시를 대체하지 않은 PL배합(C/W 2.22)과 거의 유사한 압축강도를 발현하는 것으로 나타났다.

[그림 6]은 재첨가수량별 시멘트물비와 압축강도의 관계를 나타낸 것으로, 전반적으로 시멘트물비가 감소함에 따라 압축강도가 감소하고 있으나, FA무대체에 비하여 FA를 대체하고 재첨가수량 W<sub>FA</sub>를 적용한 모든 배합에서 강도저하폭이 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. 특히, W<sub>FA</sub> 25, 28%의 경우 압축강도 변



(그림 6) 재첨가수량별 시멘트물비와 압축강도의 관계(재령28일)

화를 나타내는 직선기울기가 다른 배합에 비해 완만하게 나타나고 있어 상대적으로 양호한 결과를 보여주고 있다.

#### 4. 결론

플라이애시를 대량 사용한 모르타르의 유동성 및 강도특성에 관한 연구를 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 플라이애시를 대체하고 수량을 재첨가하지 않은 경우 유동성이 급격히 저하하였으나, 일정수량을 재첨가한 경우 모든 배합에서 양호한 유동성을 나타내며 재첨가수량  $W_{FA}$ 가 증가할수록 플로우가 점차 증가하였다. 특히  $W_{FA}25$ , 28%의 경우 플라이애시 대체율에 관계없이 대체적으로 PL배합과 플로우가 유사하게 나타났다.

2) 재첨가수량이 증가할수록 압축강도가 상대적으로 저하하는 경향을 보였으나,  $W_{FA}22$ , 25%의 경우 재령 28일에서 플라이애시 대체율 60%까지 PL과 유사한 압축강도를 보이며 재첨가수량에 따른 압축강도 저하현상이 상대적으로 적게 나타났다.

3) 플라이애시를 잔골재로 대체한 모르타르에서의 재첨가수량에 따른 시멘트물비와 압축강도의 관계를 검토한 결과, 재첨가수량비  $W_{FA}25\%$ 의 경우 굳지않은 상태의 유동성을 대체적으로 만족시키며, 경화후에도 강도저하에 상대적으로 적은 영향을 주는 것으로 나타났다.

4) 재첨가수량을 적용한 경우, 재첨가수량 비별로 다소 차이가 있으나 대체적으로 플라이애시 대체율 80%이상인 배합에서의 압축강도가 플라이애시를 대체하지 않은 배합에 비해 상대적으로 낮게 나타나, 플라이애시를 잔골

재의 일부로 대체할 경우 플라이애시 대체율은 80%이하로 설정하는 것이 유리할 것으로 사료된다.

#### ■ 參考文獻

1. 차동원, 한전의 석탄회 및 탈황석고 재활용 현황, 고성능콘크리트 국제 워크숍 논문집, 1999.10, pp.245~270
2. 최세진 외, 플라이애시의 치환방법 및 치환율에 따른 플라이애시를 대량 사용한 콘크리트의 특성에 관한 연구, 대한건축학회 논문집, 18권 2호, 2002. 2, pp.123~130
3. V. M. Malhotra et al, Mechanical Properties of Concrete Incorporating High Volumes of Fly Ash from Sources in the U.S., ACI Materials Journal, V.90, No.6, 1993, pp.535~544
4. 友澤史紀 ほか, フライアッシュを外割混合したモルタルの中性化特性, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol.21, No.2, 1999, pp.109~114
5. 友澤史紀 ほか, フライアッシュを大量使用したコンクリートの微細組織と壓縮強度, 日本建築學會構造系論文集 第517頁, 1999.08, pp.11~16
6. 松尾榮治 ほか, フライアッシュを細骨材代替に用いたモルタルの配合にする基礎的研究, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol.22, No.2, 2000, pp.1141~1146
7. 福留和人 ほか, 石炭灰を多量に用いた新しい硬化體製造方法, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol.19, No.1, 1997, pp.223~228



8. Nader Ghafoori, Yuzheng Cai, Laboratory-Made Roller Compacted Concretes Containing Dry Bottom Ash, *ACI Material Journal*, 1998. 5, pp.224~251
9. 松藤 泰典 ほか, 石炭灰のコンクリートの大量使用に関する研究, 日本建築學會學術講演梗概集, 1999. 9, pp.437~454
10. Use of Fly Ash in concrete(ACI Committee 226) ; *ACI Material Journal*, Vol.84, No.5, pp.381~409, 1987
11. 板井知明 ほか, フライアッシュを細骨材の一部と置換したコンクリートの諸特性, *コンクリート工學年次論文報告集*, Vol.23, No.2, 2001, pp.109~114
12. 이진용 외, 플라이애시 함유량이 콘크리트의 특성에 미치는 영향, 고성능콘크리트 국제 워크숍, pp.271~285, 1999
13. 최세진 외, 플라이애시를 대량 사용한 콘크리트의 배합설계를 위한 기초적 연구, 한국콘크리트학회 봄 학술발표회, 제13권 1호, 2001.5, pp.641~646
14. 김성수 외, Bottom-ash(무연탄)를 적용한 고유동충전재의 물리·역학적 성능비교, 한국콘크리트학회 논문집, 제13권 1호, 2001. 5, pp.263~268
15. 최세진 외, 플라이애시 품질에 따른 고유동콘크리트의 유동특성 및 공학적특성에 관한 실험적연구, 대한건축학회 대전·충남지부 논문집, 15권1호, 1998, pp.157~162
16. 松藤 泰典 ほか, 石炭灰のコンクリートの大量使用に関する研究, 日本建築學會學術講演梗概集, pp.437~454, 1999.9
17. 小山智幸 ほか, 石炭灰をコンクリートに大量使用するための安定化處理に関する研究´ *コンクリート工學年次論文報告集*, Vol.22.No.2, 2000, pp.115~120
18. A. Bilodeau and V.M. Malhotra, High-Volume Fly Ash System, International Workshop on high performance concrete utilizing supplementary cementitious materials, 1999.10, pp.43~64
19. K.Wesche, Fly Ash in Concrete - Properties and Performance, Report of Technical Committee 67-FAB use of Fly Ash in Building, RILEM, 1991
20. 山田有一 ほか, 石炭灰の有効利用に関する研究, 東京電力技術研究所報告書, 1985. 4, pp.82~132
21. 野口貴文, 新世紀の鐵筋コンクリート 高強度コンクリート, *建築雜誌*, Vol.113, No.1420, 1998. 3, pp.38~40
22. 成田健 ほか, フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートの基礎的研究, *コンクリート工學年次論文報告集*, Vol.23, No.2, 2001, pp.925~930