

# 플라이애시를 대량 사용한 콘크리트의 배합설계를 위한 기초적 연구

## A Fundamental Study on the Mix Design in High Volume Fly-Ash Concrete

심재형\* 김재환\* 최희용\* 강석표\* 최세진\* 김무한\*\*  
Shim, Jae-Hyung Kim, Jae-Hwan Choi, Hee-Yong Kang, Suk-Pyo Choi, Se-Jin Kim, Moo-Han

### ABSTRACT

Generally, when Fly-Ash was used as replacement material of cement in concrete, it might occur retardation of setting and hardening. So, it is unable to use a large amount of Fly-Ash as replacement for cement. However, if it is used as replacement material of fine aggregate in concrete, we can use a large amount of Fly-Ash and settle a problem of natural-aggregate exhaustion. Furthermore, engineering properties of High Volume Fly-Ash Concrete is better than that of plain concrete. But, the larger Fly-Ash is replaced, the more fluidity of High Volume Fly-Ash Concrete decrease, because porous organization of Fly-Ash adsorb water and Superplasticizer. In this study, after appending additional water to High Volume Fly-Ash Concrete in proportion to weight of Fly-Ash, we intend to find proper ratio which doesn't affect strength and satisfy fluidity.

As a result of this study, it was found that fluidity of mortar with 25~28 percentage of additional water was satisfied with fluidity of plain mortar, and compressive strength of that was similar to plain mortar's.

### 1. 서론

화력발전소 및 열병합발전소에서 부산물로 생산되는 플라이애시는 현재 약 400만 톤 이상 발생하고 있으며 재활용률이 꾸준히 증가하고 있으나 상당량이 매립처분되고 있는 실정이다.<sup>1)</sup> 이로 인해 매립처분지 확보에 어려움을 겪고 있을 뿐만 아니라, 환경적인 측면에서도 산업부산물의 재활용은 중요한 문제로 대두되고 있다. 일반적으로 플라이애시를 시멘트의 치환재료로 사용하는 경우 응결 및 경화 지연 등의 문제점으로 인하여 그 사용량에 제한을 받고 있다. 그러나 플라이애시를 잔골재의 치환재료로 사용할 경우 이러한 부분을 개선할 수 있으며, 제염사 사용에 따른 문제점의 해결과 골재대체자원의 개발이라는 측면에서도 이점을 가지고 있기 때문에 플라이애시를 잔골재의 일부로 사용되면 플라이애시의 대량사용이 가능한 것으로 보고되고 있다.<sup>2),3),4)</sup>

그러나, 플라이애시를 잔골재의 일부로 사용할 경우 플라이애시의 치환량이 증가됨에 따라 점성이 증가하여 유동성이 저하하는 단점을 가지고 있으며, 또한 다공질 구조의 플라이애시의 표면에 고성능

\* 정희원, 충남대학교 대학원 건축공학과

\*\* 정희원, 충남대학교 건축공학과 교수, 공학박사

감수제가 흡착되기 때문에 소요의 유동성 확보를 위해 고성능감수제의 첨가량이 증가하여 경제성이 감소하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 유동성과 압축강도를 만족시키는 최적의 재첨가수량 범위를 검토·분석함으로써 플라이애시를 잔골재의 일부로 대량사용한 콘크리트의 배합설계를 위한 참고자료를 제시하고자 하였다.

## 2. 실험계획 및 배합

### 2.1 실험계획

일반적으로 플라이애시를 잔골재의 일부로 사용한 콘크리트에서 보통 콘크리트와 동일하게 배합설계를 하는 경우 치환량이 증가할수록 유동성이 현저하게 저하되는 문제점이 발생된다. 이는 배합설계에 잔골재(모래)는 표준상태이나, 플라이애시는 전혀 수분을 가지고 있지 않은 상태(절건상태)로 플라이애시의 다공질 구조로 인하여 수분을 흡착하므로 이러한 유동성의 저하가 발생하기 때문으로 알려져 있다.<sup>6)</sup>

본 연구에서는 그림 1에서 보는 바와 같이, 배합설계시에 잔골재로 치환된 플라이애시의 증량에 비례하여 수량을 재첨가함으로써 소요의 유동성을 만족시키며, 강도저하가 최소로 발생하는 재첨가영역을 찾아 플라이애시를 잔골재의 일부로 사용한 콘크리트의 경제적인 배합설계방법의 확립에 필요한 기초적 자료를 마련하고자 하였다.

그림 2는 본 연구의 배합설계 개념도를 나타낸 것으로 플라이애시를 잔골재에 대하여 각각 10, 20, 30% 치환한 배합을 예로 든 것이다. L.1은 일반적인 콘크리트에 있어서 시멘트물비와 강도와의 관계를 나타내고 있는 것으로 시멘트물비가 증가함에 따라 압축강도가 증가하는 것을 나타내고 있다.

또한, 플라이애시를 잔골재의 일부로 사용한 콘크리트에 배합수를 재첨가하고, 재첨가된 수량이 모두 강도에 영향을 줄 경우 L.1과 같은 직선기울기로 나타나게 된다. 그러나 재첨가된 수량이 일부만 강도저하에 영향을 미치며 유동성 확보에 작용한다면 직선 기울기가 L.1보다 완만해지며 특히, 재첨가된 수량이 강도저하에 영향을 미치지 않고 유동성을 향상시켜주는 최적수량일 경우에는 L.2와 같이 X축과 평행한 직선이 될 것이다. 더욱이 장기재령에서 플

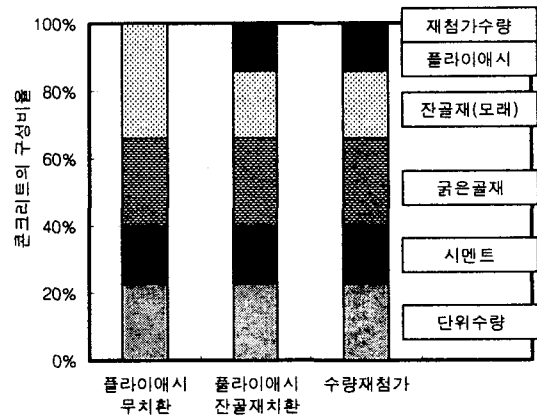


그림 1. 본 연구의 개념

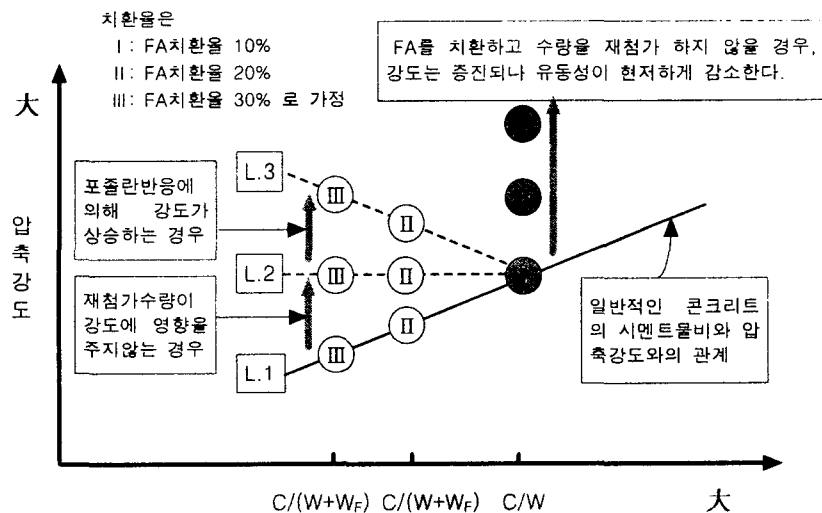


그림 2. 배합설계 개념도

표 1. 본 실험에 사용된 모르터배합

FA 치환율 <sup>3)</sup> (%)	재첨가수량 <sup>2)</sup> (%)	W+W <sub>F</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	절대용적 (ℓ/m <sup>3</sup> )				단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )				플로우 (mm)	C/W
			C	FA	W <sub>F</sub> <sup>1)</sup>	S	C	FA	W <sub>F</sub> <sup>1)</sup>	S		
0	PL	298		0	0	462		-	0	1182	205	2.22
20	0	298	210	92	0	370	662	197	0	946	173	2.22
	22	333		57	35			122	35		217	1.98
	25	336		54	38			115	38		225	1.97
	28	340		50	42			107	42		230	1.95
	31	343		47	45			100	45		217	1.93
	34	346		44	48			93	48		228	1.91
40	0	298	210	185	0	277	662	393	0	709	120	2.22
	22	367		116	69			246	69		210	1.80
	25	375		108	77			230	77		225	1.77
	28	382		101	84			216	84		230	1.73
	31	388		95	90			201	90		250	1.70
	34	395		88	97			188	97		255	1.68
60	0	298	210	277	0	185	662	590	0	473	-	2.22
	22	402		173	104			369	104		190	1.65
	25	413		162	115			345	115		210	1.60
	28	423		152	125			323	125		240	1.56
	31	433		142	135			301	135		250	1.53
	34	443		132	145			281	145		260	1.50
80	0	298	210	369	0	92	662	787	0	236	-	2.22
	22	436		231	138			491	138		165	1.52
	25	451		216	153			460	153		195	1.47
	28	465		202	167			430	167		205	1.42
	31	478		189	180			402	180		215	1.38
	34	491		176	193			375	193		235	1.35
100	0	298	210	462	0	0	662	984	0	0	-	2.22
	22	471		289	173			615	173		150	1.40
	25	491		270	192			575	192		170	1.35
	28	507		253	209			538	209		185	1.31
	31	524		236	226			503	226		200	1.26
	34	540		220	242			469	242		250	1.23

<sup>1)</sup> W<sub>F</sub> : 재첨가수량    <sup>2)</sup> 치환된 플라이애시의 중량에 대한 재첨가  
<sup>3)</sup> 잔골재의 용적에 대한 치환으로서 플라이애시와 재첨가수량을 합산한 값

라이애시의 포졸란반응에 의해 강도가 증진되는 경우에는 L3과 같은 직선도 가능해진다. 그러나 포졸란반응이 발생하면 강도에 영향을 주는 요인이 다양해지므로 본 연구에서는 포졸란반응에 의한 간섭이 없는 재령 28일 이전의 초기재령을 기준으로 하여 치환된 플라이애시의 중량에 대한 재첨가수량이 강도저하에 영향을 가장 적게 주면서, 플라이애시를 치환하지 않은 배합(PL)의 유동성을 만족시키는 영역을 파악하고자 하였다.

## 2.2 실험배합

본 실험에 사용된 모르터배합을 표 1에서 나타내고 있다. 물시멘트비 45%의 콘크리트배합을 기본으로 하여 굵은골재를 제외한 모르터배합을 PL배합으로 선정하였다. 이러한 PL배합에서 플라이애시를 잔골재(모래)의 용적에 대하여 각각 20, 40, 60, 80, 100% 치환하였다. 또한, 치환한 각각의 배합에 있어서 재첨가수량을 예비실험을 통하여 치환된 플라이애시 중량에 대하여 22, 25, 28, 31, 34%의 6수준으로 설정하였다.

### 2.3 사용재료

본 실험에 사용된 재료는 표 3~5에서 보는 바와 같이 시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며 잔골재(모래)는 최대치수 5mm, F.M. 2.85의 제염사를 사용하였다. 또한, 플라이애시는 보령산의 비중 2.15, 강열감량 3.5%의 제품을 사용하였다.

### 2.4 시험방법

모르터의 비빔은 모르터용 믹서기를 사용하여 시멘트, 모래와 플라이애시를 1분간 건비빔을 실시한 후 수량( $W+W_f$ )를 첨가하여 1분간 비빔을 실시하였으며 비빔을 완료한 모르터는 플로우콘에 두 번에 나누어 다지고, 플로우콘을 상방으로 끌어올린 후 플로우 테이블의 핸들을 돌려 5회의 낙하운동을 한 후 플로우를 측정하였다. 압축강도시험을 위해  $5 \times 5 \times 5$ cm의 공시체를 제작하여 20°C 수중양생을 행한 후, 재령 3, 7, 28일에 압축강도시험을 실시하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 플라이애시의 치환율에 따른 플로우의 변화

그림 3은 재첨가수량에 따른 플라이애시의 치환율과 플로우의 관계를 나타낸 것으로 전반적으로 재첨가수량이 증가할수록 유동성이 증가하는 경향을 보이고 있다. 재첨가수량 0%의 경우 플라이애시의 치환율이 증가함에 따라 적선적으로 플로우가 감소하는 것을 나타내고 있다. 또한, 플라이애시 치환율 60%의 경우에는 급격한 점성의 증가로 인해 측정이 불가능할 정도로 유동성이 떨어졌으며 치환율 80, 100%배합은 비빔이 불가능하였다.

그러나, 재첨가수량 22~34%의 모든 배합에서 양호한 유동성을 보이고 있으며 재첨가수량이 증가할수록 플로우가 증가하는 경향을 보이고 있다. 재첨가수량 25, 28%의 경우에는 플라이애시의 치환율과 관계없이 PL배합과 유사한 유동성을 나타내고 있다.

### 3.2 플라이애시 치환율에 따른 압축강도의 변화

그림 4는 플라이애시의 치환율에 따른 압축강도의 변화를 나타낸 것으로 전반적으로 플라이애시 치환율과 재첨가수량이 증가할수록 압축강도가 저하하였다. 재첨가수량이 0%인 경우에만 치환율이 증가함에 따라 강도가 증가하였으나 60%이상의 배합은 비

표 2. 시멘트의 물성

종류	비중	분말도 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	안정성 (%)	응결(h:m)	
				초결	종결
보통포틀랜드 시멘트	3.15	3,412	0.06	4:50	7:05

표 3. 잔골재(모래)의 물성

종류	비중	조립율	흡수율 (%)	단위용적중량 ( $\text{t}/\text{m}^3$ )
제염사	2.56	2.85	0.82	1.6

표 4. 플라이애시의 물성

종류	비중	강열감량 (%)	습분 (%)	분말도 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )
F급	2.15	3.5	0.19	4,550

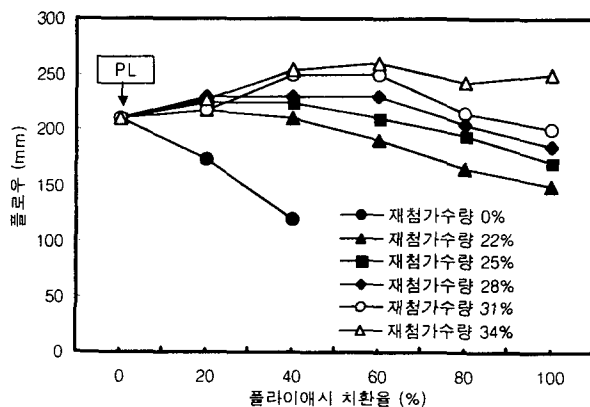


그림 3. 재첨가수량에 따른 플로우의 변화

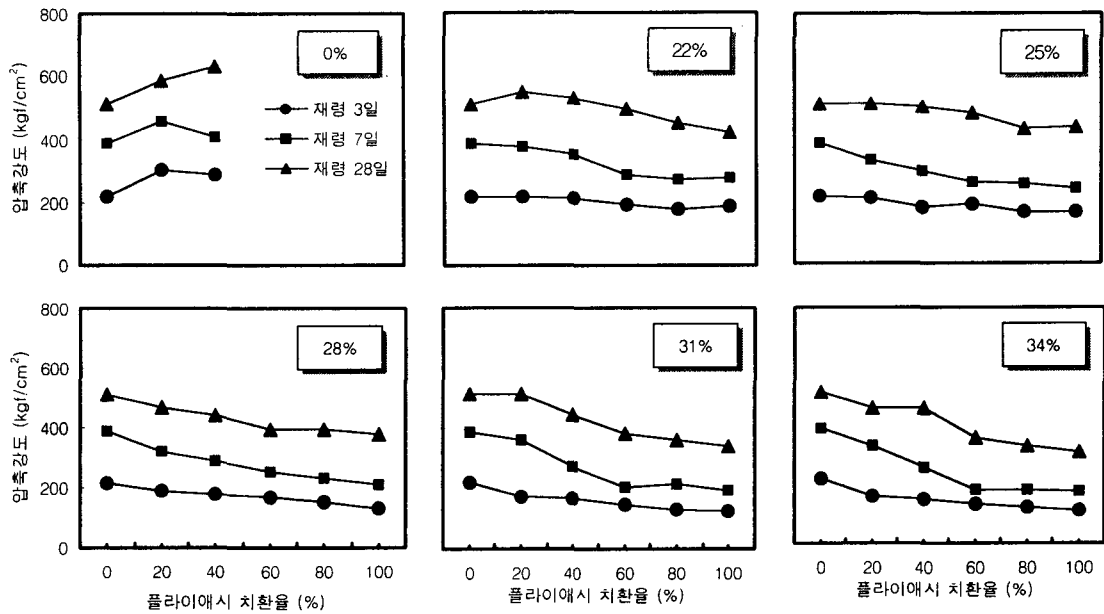


그림 4. 플라이애시의 치환율에 따른 압축강도의 변화

범불량으로 측정이 불가능하였다. 재침가수량 25%의 경우는 다른 배합에 비교하여 플라이애시의 치환율에 따른 영향이 다소 적게 나타나고 있다.

### 3.3 재침가수량에 따른 시멘트물비와 압축강도

그림 5는 재침가수량 25%배합에서 W와  $W_F$ 를 합한 전체 수량에 대한 시멘트물비(C/W)와 압축강도의 관계를 나타낸 것이다. 재침가수량이 강도에 미치는 영향을 검토하기 위하여 먼저 플라이애시를 치환하지 않은 4수준의 배합에서 시멘트물비와 압축강도와의 관계를 확인하였다. 플라이애시를 치환하지 않은 경우 시멘트물비가 증가함에 따라 압축강도가 증가하는 일반적인 경향을 보이며 그림 2의 L.1과 같이 나타났다. 플라이애시를 치환하고 수량을 재침가한 배합에서 재침가수량이 강도에 영향을 미치지 않고 유동성만을 향상시킨다면 그림 2의 L.2와 같이 X축과 평행하게 나타나는데 재침가수량 25%배합에서는 L.2와 유사한 경향을 나타내고 있다. 수량을 재침가하지 않은 배합은 플라이애시의 치환율이 증가할수록 강도는 직선적으로 상승하였지만 유동성이 급격히 떨어졌다.

그림 6은 재침가수량별 시멘트물비와 압축강도의 관계를 나타내고 있으며, 재침가수량 25~28%에서 L.2와 가장 유사한 직선의 형태를 보이고 있으며 재침가수량이 증가함에 따라 플라이애시를 치환하지 않은 콘크리트의 기울기와 유사하게 변한다. 이는 재침가수량이 증가할수록 재침가된 수량이 모르터의 유동성을 증가시킬 뿐만 아니라 강도저하에 영향을 주었기 때문으로

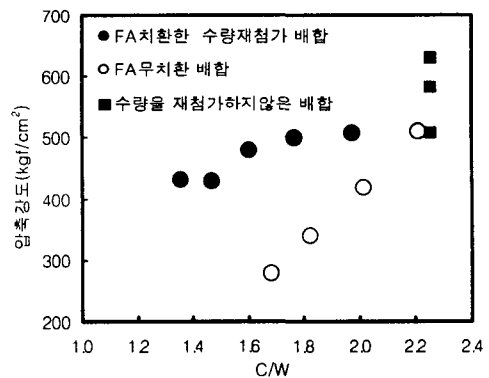


그림 5. 재침가수량 25%배합에서의 압축강도

판단된다. 또한, 플라이애시를 치환한 모든 배합에서 치환하지 않은 모르터에 비하여 동일한 시멘트물비에 높은 압축강도를 발현하고 있는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

플라이애시를 대량 치환한 콘크리트의 배합설계를 위한 기초적 연구를 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 재첨가수량에 따른 플로우의 변화는 수량을 재첨가하지 않은 경우 유동성이 급격히 저하하였으나, 재첨가수량이 증가할수록 유동성이 향상되는 것을 알 수 있었다. 특히, 재첨가수량 25~28%의 배합에서 PL과 유사한 유동성을 나타냈다.

(2) 재첨가수량 22~34%의 모든 배합에서 플라이애시의 치환율이 증가할수록 압축강도가 떨어지는 경향을 보이고 있으나 25%의 경우에는 치환율에 따른 영향이 상대적으로 적게 나타났다.

(3) 재첨가수량에 따른 시멘트물비와 압축강도와의 관계를 검토한 결과, 재첨가수량 25%의 경우에 강도에 가장 적은 영향을 주며 유동성을 향상시키는 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

- 1) 차동원, 한전의 석탄회 및 탈황석고 재활용 현황, 고성능콘크리트 국제 워크숍 논문집, 1999.10, pp.245~270
- 2) 김무한 외, 플라이애시의 치환방법에 따른 콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 학술발표논문집, 2000.10, pp.415~418
- 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) 友沢史紀 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, 1999, pp.109~114
- 5) 友沢史紀 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圧縮強度, 日本建築学会構造系論文集 第517号, 1999.08, pp.11~16
- 6) 松尾栄治 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.2, 2000, pp.1141~1146

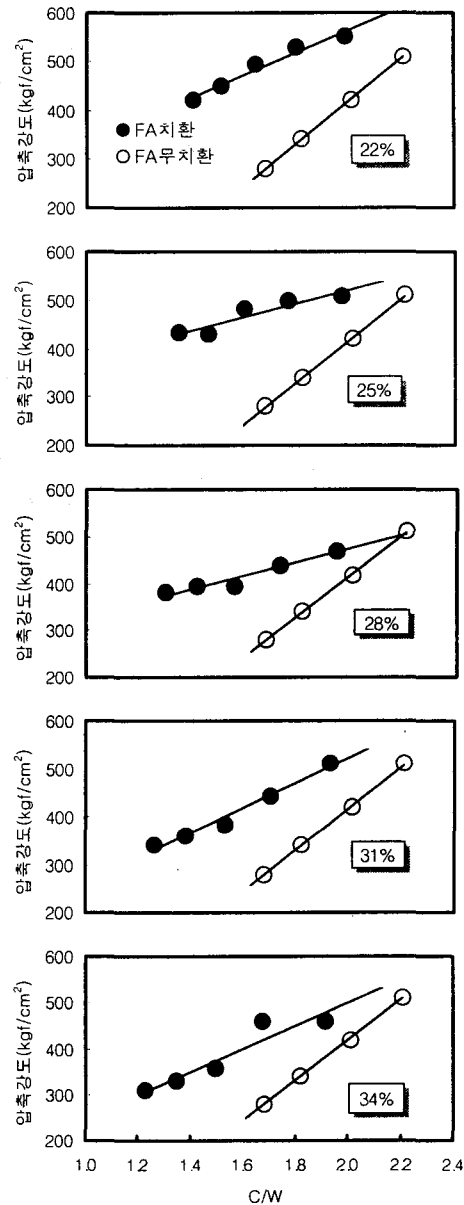


그림 6. 재첨가수량별 시멘트물비와 압축강도와의 관계