

# 플라이애시 및 실리카흄을 사용한 고강도유동화 콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구

(제 2 보, 경화콘크리트의 공학적 특성 검토)

## An Experimental Study on the Engineering Properties of High Strength Flowing Concrete Using Flyash and Silicafume

(Part 2. Engineering Properties of Hardened concrete)

○김진만\* 이상수\* 김규용\*\* 김무한\*\*\*  
Kim Jin Man Lee Sang Soo Kim Gyu Yong Kim Moo Han

### ABSTRACT

Production of high strength concrete requires a low water-cement ratio and this leads to the high cement content. Mineral admixture like fly ash(FA) is often cheaper than ordinary portland cement(OPC) and this factor in combination with possible improvement in workability and moderation of the heat evolution of the cement-rich mixes tends to encourage its use. The other mineral admixture that its use has been widely advocated is silica fume that increases compressive strength due to its pozzolanic reaction.

The objective of this study is to assess the contribution of mineral admixtures(FA, SF) to the workability and the strength of concrete with low water-binder ratios. In this experimental study that investigates and analyzes the properties of fresh concrete, it is presented that using admixtures like flyash and silica fume as binding material increases properties of high strength flowing concrete having very low water cementitious ratios of 0.25 and 0.30.

### 1. 서론

본 연구는 고강도유동화 영역 콘크리트의 시공성 및 공학적 특성에 미치는 플라이애시 및 실리카흄의 영향을 실험적으로 알아보기 위한 것이다. 실험 요인 및 수준은 표 1과 같으며, 물결합재비 0.25와 0.30에서 플라이애시 및 실리카흄을 단위시멘트량의 10(%)를 대체한 콘크리트를 제조하여 혼화제를 사용하지 않은 플레인콘크리트와 아직굳지않은 상태에서 시공성 및 경화상태에서의 공학적 특성을 비교·검토하였다. 본 논문은 아직굳지않은 콘크리트의 시공성을 검토한 제1보<sup>1)</sup>에 이은 제2보로서 압축강도, 인장강도(할렬인장강도), 탄성계수등의 공학적 특성을 콘크리트의 종류에 따라 비교·검토하였으며, 또한 초음파속도, 반발도와 압축강도의 상관관계를 콘크리트의 종류에 따라 비교·분석하였다.

아직굳지않은 콘크리트의 시공성에 관하여 고찰한 제1보에 의하면, 본 실험에서 채용한 조합수준에서 고성능감수제의 사용에 의하여 슬럼프  $21 \pm 2\text{cm}$

Table 1 Experimental factors and levels

Factors		Levels
W/B <sup>1)</sup>		0.25 · 0.30
Replacement proportion of admixture(%) <sup>2)</sup>		0 · 10 (FA) <sup>3)</sup> · 10 (SF) <sup>4)</sup>
Test items	Fresh concrete	Air content, Compacting factor Unit weight, Mixing temperature, Time dependent change of slump, flow, and slump-flow
	Hardened concrete	Compressive strength, Splitting tensile strength Dynamic Modulus of Elasticity Ultra-sonic Pulse Velocity Rebound Number Unit Weight

1) W/B : Water binder ratio

2) Weight percentage

3) FA : Flyash

4) SF : Silica fume

\* 忠南大學校 大學院 博士課程

\*\* 忠南大學校 大學院 碩士課程

\*\*\* 忠南大學校 教授, 工博

의 높은 유동성을 갖는 콘크리트의 제조가 가능한 것으로 나타났으며, 실리카흙콘크리트의 경우에 플레인콘크리트에 비하여 동일한 수준의 유동성을 얻기 위한 고성능감수제의 사용량은 약간 증가하였으며, 경시에 따른 유동성 손실은 동일한 수준을 보이는 것으로 나타났다. 또한 플라이애시콘크리트의 경우에는 플레인콘크리트에 비하여 경시에 따른 유동성 손실이 작은 것으로 나타나 플라이애시가 고강도유동화 영역에서도 콘크리트의 유동성의 개선에 유리한 것으로 나타나고 있다.

## 2. 시험결과와 분석 및 검토

### 2.1 압축강도의 성장

경화콘크리트의 시험결과를 나타낸 표2 및 재령에 따른 압축강도의 발현성상을 나타낸 그림1에서 알수 있는 바와같이 4주 압축강도는 물결합재비 0.30에서 플라이애시콘크리트(이하 FAC로 약기함)는 531kgf/cm<sup>2</sup>, 플레인콘크리트(이하 PLC로 약기함)는 573kgf/cm<sup>2</sup>, 실리카흙콘크리트(이하 SFC로 약기함)는 695kgf/cm<sup>2</sup>을 발현하고, 물결합재비 0.25에서 FAC는 711kgf/cm<sup>2</sup>, PLC는 694kgf/cm<sup>2</sup>, SFC는 848kgf/cm<sup>2</sup>를 발현하고 있어 30SFC, 25PLC 및 25FAC의 조합에서 설계기준강도 600kgf/cm<sup>2</sup>, 25SFC의 조합에서는 설계기준강도 700kgf/cm<sup>2</sup> 이상의 고강도콘크리트의 제조가 가능할 것으로 사료된다.

물결합재비별 혼화재료의 사용에 따른 압축강도의 변화를 살펴보면, 물결합재비 0.30의 경우, 압축

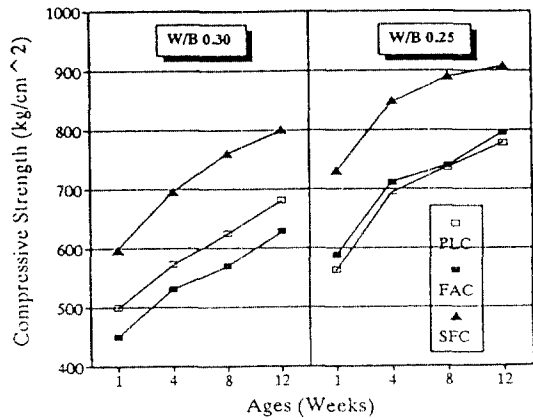


Fig. 1 Variation of Compressive Strength in according to Ages

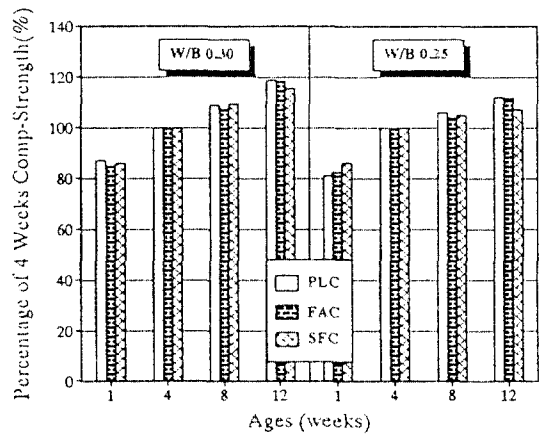


Fig. 2 Relationship between compressive strength at 1,8 and 12 weeks and compressive strength at 4 weeks.

Table 2 Test Results of Hardened Concrete

Test Items Type of Concrete	Compressive Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (kg/cm <sup>2</sup> )			Dynamic Modulus of Elasticity (× 10 <sup>10</sup> kg/cm <sup>2</sup> )			Ultra-sonic Pulse Velocity (km/sec)			Rebound Number (RN)			Unit Weight (kg/l)					
		PLC	FAC	SFC	PLC	FAC	SFC	PLC	FAC	SFC	PLC	FAC	SFC	PLC	FAC	SFC			
0.30	1W	499	450	596	33	27	31	4.01	3.87	3.97	4.57	4.63	4.54	38	35	39	2.42	2.41	2.44
	4W	573	531	695	35	29	34	4.16	4.11	4.20	4.57	4.65	4.56	39	37	40	2.43	2.45	2.42
	8W	624	570	760	39	34	41	4.46	4.27	4.35	4.73	4.71	4.62	40	39	40	2.44	2.41	2.45
	12W	680	628	801	40	38	45	4.34	4.43	4.47	4.68	4.73	4.63	40	39	41	2.43	2.42	2.43
0.25	1W	563	587	730	27	33	38	4.19	4.03	4.15	4.67	4.67	4.67	40	40	40	2.43	2.43	2.41
	4W	694	711	848	29	40	41	4.60	4.22	4.31	4.65	4.61	4.60	43	41	41	2.45	2.43	2.44
	8W	735	739	890	34	44	49	4.42	4.53	4.23	4.69	4.74	4.67	43	41	42	2.45	2.44	2.42
	12W	777	795	908	38	42	48	4.57	4.46	4.37	4.71	4.70	4.73	43	44	45	2.45	2.43	2.44

강도는 FAC, PLC, SFC의 순으로 증가 하는 것으로 나타났으며, 물결합재비 0.25의 경우에는 PLC와 FAC가 동일한 수준의 강도를 보이고 있고, SFC는 약 150kg/cm<sup>2</sup> 정도의 강도를 더 발현하는 경향을 보이고 있다. 이와같이 혼화재료중 실리카흙은 고강도유동화 콘크리트의 강도증진에 크게 기여할수 있는 것으로 나타나고 있고 플라이애시는 전보<sup>1)</sup>에서 고찰한 바와같이 고강도유동화콘크리트의 유동성 및 경제성 증진에 기여하는 것으로 나타나고 있어 이와같은 혼화재료를 고강도유동화 콘크리트에 적극적으로 도입하는 것을 심도있게 고려해야 할 것으로 사료된다.

재령 4주 압축강도에 대한 재령 1,8 및 12주의 강도비율을 나타낸 그림 2에서 나타난 바와같이 재령1주의 압축강도는 재령4주 강도의 80% 이상을 발현하여 조강화하는 경향을 보이고 있으며, 4주 이후에도 지속적인 강도증진을 보이고 있다.

재령4주에 대한 압축강도의 발현비율에 있어 혼화재료의 사용유무에 따른 영향은 본실험에서는 명확히 나타나지 않고 있으며, 물결합재비에 따른 영향은 8주 이후의 장기재령에서 물결합재비 0.25의 콘크리트에 비하여 물결합재비 0.30의 경우가 약간 높은 발현비율을 보이고 있다.

## 2.2 인장강도의 성장

조합조건별 재령에 따른 인장강도에 발현을 나타낸 그림3에서 알수있는 바와같이 SFC의 인장강도는 PLC와 비교하여 물결합재비 0.30의 경우 재령8주 이후에는 높게 발현하였지만 재령4주 이전에는 낮게 발현하는 경향을 보였으며, 물결합재비 0.25의 경우에는 전재령에서 PLC보다 높은 인장강도를 보

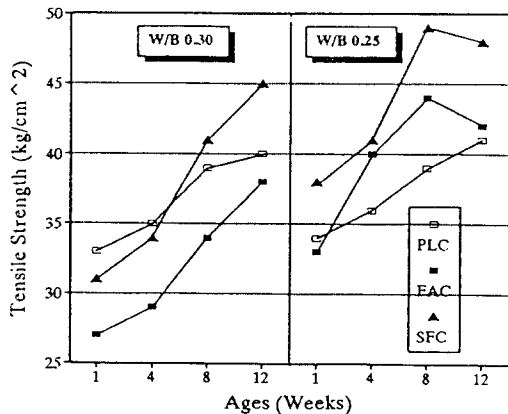


Fig. 3 Variation of Splitting Tensile Strength in according to Ages

이고 있으나 재령 12주에 재령 8주보다 낮은 인장강도를 보이고 있다. FAC의 경우에는 압축강도의 경우와 동일하게 물결합재비 0.30에서는 PLC보다 낮고 물결합재비 0.25에서는 PLC보다 동등하거나 약간 높은 수준의 인장강도를 보이는 것으로 나타나고 있어 물결합재비의 저하에 따라서 FAC의 인장강도의 발현이 개선되는 현상을 보이고 있다.

인장강도와 압축강도의 관계를 살펴보면, PLC에 비하여 FAC 및 SFC는 동일한 압축강도에서 낮은 인장강도치를 보이고 있어 혼화재료의 사용이 인장강도의 증진에 기여하지 못하는 것으로 나타나고 있다.

압축강도에 대한 인장강도의 비율은 1/15~1/21의 범위로 나타나고 있고 강도의 증가에 따라 그 비율이 저하하여 압축강도와 인장강도의 관계는 제곱근식에 회귀되는 것으로 나타나고 있다.

## 2.3 동탄성계수의 성장

압축강도 450~900kg/cm<sup>2</sup>의 범위에서 행한 본 실험결과 동탄성계수는 3.8~4.6( $\times 10^4$ kg/cm<sup>2</sup>)의 범위를 보이고 동일한 압축강도에서 동탄성계수는 물결합재비 0.30이 0.25보다 높은 값을 보이고 있는 것으로 나타나고 있다. 또한 압축강도의 증가에 따라서 동탄성계수의 편차가 증가하고 있으며, 혼화재료의 사용에 따른 유의 할 만한 경향은 보이지 않고 있다.

## 2.4 비파괴시험치의 상관관계 분석

표3은 압축강도와 각종비파괴시험치의 상관관계를 나타낸 것으로 반발도의 경우 전반적으로 높은 상관계수를 보이고 있으나 초음파속도의 경우에는

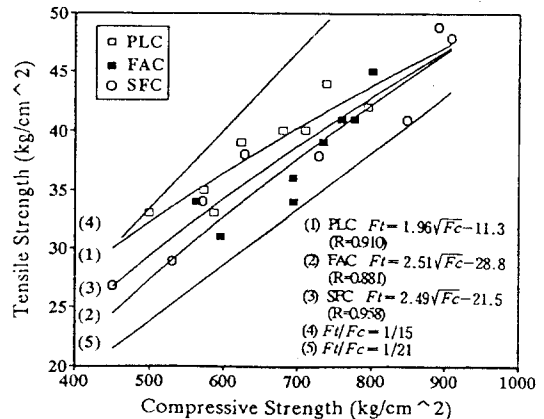


Fig. 4 Relationship between compressive strength and tensile strength

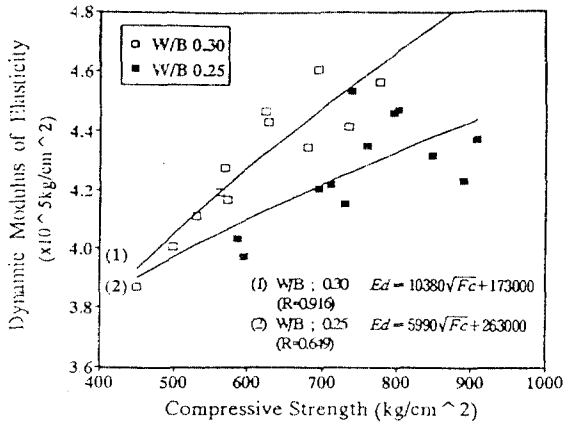


Fig. 5 Relationship between compressive strength and dynamic modulus of elasticity.

Table 3. Correlation equation and correlation coefficient according to mixing condition

Ultra-sonic Pulse Velocity	PLC	$F_c = 904V_c - 3560$ ( $R=0.632$ )
	FAC	$F_c = 464V_c - 1448$ ( $R=0.330$ )
	SFC	$F_c = 296V_c - 690$ ( $R=0.080$ )
	TOTAL	$F_c = 529V_c - 1779$ ( $R=0.257$ )
Rebound Number	PLC	$F_c = 51RN - 1390$ ( $R=0.914$ )
	FAC	$F_c = 38RN - 360$ ( $R=0.652$ )
	SFC	$F_c = 54RN - 1439$ ( $R=0.937$ )
	TOTAL	$F_c = 48RN - 1249$ ( $R=0.853$ )
Ultra-sonic Pulse Velocity + Rebound Number	PLC	$F_c = 45RN + 243V_c - 2309$ ( $R=0.925$ )
	FAC	$F_c = 75RN - 1056V_c + 2516$ ( $R=0.768$ )
	SFC	$F_c = 60RN - 1102V_c - 3465$ ( $R=0.977$ )
	TOTAL	$F_c = 49RN - 161V_c - 566$ ( $R=0.856$ )

PLC를 제외하면 거의 상관성이 없는 것으로 나타나고 있다. 그러나 초음파속도와 반발도의 복합법에 의하여 압축강도를 추정할 경우에는 양호한 상관성을 보이는 것으로 나타나고 있다.

### 3. 결론

고강도유동화 콘크리트의 시공성 및 공학적 특성에 미치는 플라이애시 및 실리카흙의 영향을 실험적으로 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 물결합재비 25%의 경우  $500\text{kg/m}^3$ , 물결합재비 30%의 경우  $600\text{kg/m}^3$ 의 단위결합재량에서 슬럼프

프  $22 \pm 2\text{cm}$ , 4주 압축강도  $531 \sim 848\text{kgf/cm}^2$  범위의 고강도유동화 콘크리트의 제조가 가능하였다.

2. 고강도유동화 콘크리트에서 단위시멘트량의 10(%)를 실리카흙으로 대체함으로써 플레인콘크리트에 비하여 약  $100 \sim 170\text{kgf/cm}^2$  정도의 압축강도의 증진을 보이는 것으로 나타났다.
3. 고강도유동화 콘크리트에서 플라이애시의 사용은 물시멘트비 0.30에서는 약간의 강도저하가 발생하였지만 물결합재비 0.25에서는 동등한 수준의 강도발현을 보이고 있으며, 아직굳지않은 상태에서의 유동성 증진에 기여하는 것으로 나타나고 있다.
4. 압축강도  $450 \sim 908\text{kgf/cm}^2$ 의 범위에서 인장강도는 압축강도의 1/15 ~ 1/21의 범위로 나타나 보통콘크리트에 비하여 매우 낮은 비율을 보이고 있으며, 압축강도의 증가에 따라 그 비율이 감소하는 것으로 나타나고 있다.
3. 본 실험결과에 의하면 30SFC, 25PLC 및 25FAC의 조합수준에서 설계기준강도  $600\text{kg/cm}^2$ , 25SFC의 조합수준에서는 설계기준강도  $700\text{kg/cm}^2$  이상의 고강도콘크리트의 제조가 가능할 것으로 사료된다.

### 參 考 文 獻

1. 김무한, 김진만, 김규용, 이상수 ; 플라이애시 및 실리카흙을 사용한 고강도유동화콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구 (제1보, 아직굳지않은 콘크리트의 시공성 검토), 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 1994. 11, pp. 161~166.
2. K. I. Johanson, etc ; Improving the Workability of High-Strength Concrete, Utilization of High Strength Concrete, Symposium in Lillehammer, Norway, June 20~23, 1993, 1993, pp.801-809.
3. M. N. Soutsos, etc ; Strength Development of Low Water-Binder Ratio Mixes Incorporating Mineral Admixtures, Utilization of High Strength Concrete, Symposium in Lillehammer, Norway, June 20~23, 1993, pp. 945~952.
4. 김무한, 김진만 ; 플라이애시를 사용한 고강도 콘크리트의 시공성 및 공학적 특성에 관한 기초적 연구, 大韓建築學會學術發表 論文集, 第14卷 第1號(通卷 第27輯), 1994. 4. 30, pp. 579-584.
5. 日本建築學會 ; 高強度コンクリートの技術の現状, 1991.