

플라이애시 및 실리카흄을 사용한 고강도유동화콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구

(제 1 보, 아직굳지않은 콘크리트의 시공성 검토)

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

(Part 1. Workability of Fresh concrete)

○김진만* 이 상 수* 김 규 용** 김 무 한***
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

최근 구조물이 고층화, 대형화됨에 따라서 고강도영역 콘크리트에 대한 수요가 증가하고 있다. 일반적으로 콘크리트의 고강도화는 낮은 물시멘트비의 유지와 높은 단위시멘트량의 채용에 의하여 가능하게 되나, 물시멘트비를 낮게 유지할 경우 콘크리트는 뒤틀림으로 되어 적절한 시공성의 확보에 어려움이 발생하게 되므로 고성능감수제의 사용이 필요하게 된다. 또한 높은 단위시멘트량을 채용할 경우 수화열과 점성을 증가 시킬뿐만 아니라 경제적인 측면에서도 불리하게 되므로 이를 해결하는 것은 콘크리트 연구자들의 중요한 과제로 대두되고 있다.¹⁾⁻²⁾

산업폐기물의 일종으로 시멘트보다 좀 더 안가한 플라이애시는 고강도콘크리트에서 발생하는 상기와 같은 여러 문제점들을 완화시키는데 기여할 수 있으므로 선진국의 경우 많은 연구들이 행하여지고 있다. 또한, 실리카흄은 포조란 반응에 의하여 콘크리트의 강도 증진에 기여할 수 있는 것으로 보고되고 있어 고강도콘크리트의 제조에 많이 이용 되고 있다.³⁾⁻⁴⁾

이에 본연구는 25-30(%)의 낮은 물결합재비에서 고성능감수제를 사용하여 제조한 슬럼프 21 ± 2(cm)의 고강도유동화 콘크리트에서 플라이애시 및 실리카흄의 사용에 의한 아직굳지않은 상태에서 시공성 및 경화 상태에서의 역학적특성의 변화를 알아보기 위한 일련의 실험적 연구로서 본보는 실험계획 및 아직굳지않은 콘크리트의 물성을 검토한 제 1 보이다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

콘크리트용 혼화재의 사용량은 그 물리화학적인 특성과 조합조건에 따라 차이가 있지만 시멘트 중량에 대하여 플라이애시의 경우 10-15(%), 실리카흄의 경우 10-30(%)를 대체할 경우 콘크리트의 제물성개선에 유효한 것으로 보고되고 있다.²⁾⁻⁵⁾ 이에 본연구에서는 물결합재비 25, 30(%)에서 결합재 중량의 10(%)를 플라이애시 및 실리카흄으로 대체한 플라이애시콘크리트(FAC) 및 실리카흄콘크리트(SFC)를 제작하여 혼화재를 사용하지 않은 플레인콘크리트(PLC)와 시공성 및 공학적 특성을 비교·검토하였다. 아직굳지않은 상태에서의 측정항목으로는 공기량, 다짐계수, 단위용적중량, 비빔 온도, 슬럼프치, 슬럼프플로우치 및 플로우치이

* 忠南大學校 大學院 建築工學科 博士課程
** 忠南大學校 大學院 建築工學科 碩士課程
*** 忠南大學校 建築工學科 教授, 工博

며, 경시에 따른 시공성의 손실을 알아보기 위하여 슬럼프, 슬럼프플로우 및 플로우치를 비빔직후부터 비빔후 120분까지 15분 또는 30분 간격으로 측정하였다. 또한 경화상태에서의 각종 공학적 특성을 알아보기 위한 측정항목으로는 압축강도, 인장강도, 초음파속도, 동탄성계수, 정탄성계수 및 반발도로 하였다.

2.2 사용재료

본연구에서 사용한 시멘트는 국내 H사의 보통포틀랜드 시멘트, 실리카흙은 노르웨이의 마이크로 실리카, 플라이애시는 국내 K사의 것을 사용하였으며, 그 물리적 성질 및 화학적 조성은 Table 2, 3 및 4와 같다. 골재는 세골재의 경우 최대크기 5(mm)의 울진산 제염사를 사용하고 조골재는 최대크기 15(mm)의 켄 강자갈을 사용하였으며, 그 물리적 성질은 Table 5와 같으며, 고성능 감수제는 액상의 RH-1000을 사용하였으며, 그 물성은 Table 6과 같다.

Table 1. Experimental factors and levels

Factors	Levels
W/CT ¹⁾ (%)	25 · 30
Replacement proportion of admixture(% ²⁾)	0 · 10 (FA) ³⁾ · 10 (SF) ⁴⁾
Test items of fresh concrete	Air content Compacting factor Unit weight Mixing temperature Time dependent change of slump, flow, and slump-flow
Test items of hardened concrete	Compressive strength Splitting tensile strength Ultra sonic pulse velocity Dynamic modulus of elasticity Static modulus of elasticity Rebound number

- 1) W/CT : Water cementitious materials ratio
- 2) Weight percentage
- 3) FA : Flyash
- 4) SF : Silica fume

Table 2. Physical Properties of cement

Type of cement	Ordinary portland cement (Type I)	
Specific gravity	3.16	
Soundness (autoclave, %)	0.09	
Fineness	>44 μ m (%)	14.6
	>88 μ m (%)	4.1
	Blain (cm ² /g)	3,243
Compressive strength (kg/cm ²)	3 days	119
	7 days	249
	28 days	357
Time of set (h:m)	Initial	4:02
	Final	5:53

2.3 비빔방법

물결합재비 30(%) 이하의 고성능감수제를 사용한 콘크리트는 점성이 높아 종래의 일괄투입 방법을 사용하여 비빔을 행할 경우 재료의 균일성 확보에 어려움이 발생하게 되며, 또한 믹서에 과도한 부하를 발생시키게 되므로 본 실험에서는 Fig.1과 같이 모르터를 먼저 유동화시키는 비빔방법을 사용하여 재료의 균일성을 확보하고자 하였으며, 믹서는 공칭용량 100(ℓ)의 강제식의 것을 사용하였다.

2.4 콘크리트의 조합 및 각종 실험방법

콘크리트의 조합은 단위시멘트량을 물결합재비

Table 3. Physical properties and chemical composition of silica fume

Physical properties								
Specific gravity		Blain surface area (cm ² /g)			Coarse particles (>44 μ m, %)			
2.2		220,000			1.0			
Chemical composition								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	S	C
86	0.4	0.1	0.1	0.4	0.3	0.3	0.1	0.5
96	1.0	1.5	0.5	0.5	3.0	2.0	0.4	2.5

Table 4. Physical properties and chemical composition of flyash

Blain surface area (cm ² /g)	3376
Water requirement (% of control)	100
Strength activity index with portland cement, at 28days (% of control)	90.9
Specific gravity	2.18
Silicon dioxide(SiO ₂) (%)	62.9
Moisture content (%)	0.1
Loss of Ignition (%)	4.6

Table 5. Physical properties of aggregate

Type	Max. size	FM	Specific gravity	Pro. of absorption (%)	Pro. of solid volume (%)	Unit weight (kg/ ℓ ³)
Fine agg.	5	3.2	2.57	0.81	67.3	1.73
Coarse agg.	15	6.6	2.63	1.07	63.9	1.60

Table 6. Physical properties of superplasticizer

Appearance	Principle component	Specific gravity	Toxicity
Dark brown liquid	synthetic polymers	1.17	none

25(%)의 경우에는 500(kg/m³), 물결합재비 30(%)의 경우에는 600(kg/m³)로 고정하고 목표 슬럼프를 21±2(cm)로 하여 수차례의 시험비빔을 행한 후 Table 7과 같이 결정하였다.

슬럼프시험은 KS F 2402-79, 공기량 시험은 KS F 2421-76, 플로우 시험은 ASTM C 230-90, 다짐계수 시험은 BS 1882에 준하여 실시하였으며, 슬럼프플로우치는 슬럼프시험시의 퍼진 넓이를 두방향에서 측정된 것의 평균치로 하였으며, ASTM 플로우치는 측정된 플로우치를 다음식에 의하여 변환한 값으로 하였다.

$$\text{ASTM Flow} = \frac{(\text{Flow} - 25.4)}{25.4} \times 100$$

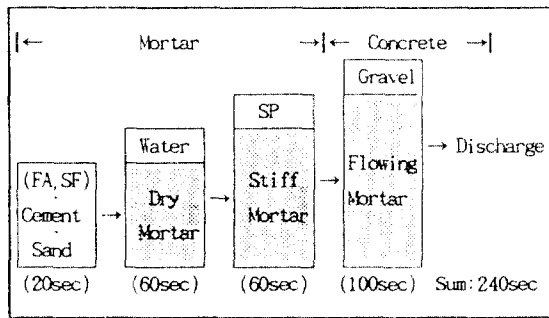


Fig 1. Mixing method of concrete

Table 7. Mix proportion of concrete

ID of mix.	W/CT (%)	Aiming slump (cm)	Replacement proportion of admixture (%/wt)	S/A (%/vt)	Water content (kg/m ³)	Unit volume (t/m ³)					Unit weight (kg/m ³)				
						C	FA	SA	S	G	C	FA	SA	S	G
25PLC	25	21 ± 2	0	38	150	190	-	-	247	403	600	-	-	635	1060
25FAC			10 (FA)			175	29	-			540	60	-		
25SFC			10 (SF)			159	-	27	500	-	60				
30PLC	30	21 ± 2	0	38	150	159	-	-	259	422	500	-	-	666	1110
30FAC			10 (FA)			143	24	-			450	50	-		
30SFC			10 (SF)			143	-	23	450	-	50				

Rem) 25 PLC

Type of concrete — PLC : Plain concrete
 — FAC : Fly ash concrete
 — SFC : Silica fume concrete
 W/CT(water cementitious materials ratios)

Table 8. Properties of fresh concrete.

ID of mix.	W/CT (%)	Dosage of SP (%)	Air content (%)	Unit weight (kg/l)	Mixing temperature (°C)	Initial slump (cm)	Initial flow (cm)	Initial slump-flow (cm)	Compacting factor (CF)
25PLC	25	1.4	2.8	2.45	27.0	22.5	53.0	45.0	0.99
25FAC		1.5	1.9	2.46	27.5	21.0	51.5	37.0	0.99
25SFC		2.0	1.9	2.47	28.0	20.2	33.0	33.0	0.97
30PLC	30	1.0	2.7	2.41	27.0	19.5	50.0	26.0	0.95
30FAC		1.2	2.2	2.42	27.0	23.7	61.5	51.0	0.98
30SFC		1.7	1.8	2.41	26.0	20.7	52.5	35.0	0.98

3. 실험결과와 분석 및 검토

3.1 비빔직후의 공기량 검토

아직굳지않은 콘크리트의 시험결과를 나타낸 Table 8 및 조합조건에 따른 공기량 및 단위용적중량의 변화를 나타낸 Fig.2에 나타낸 바와같이 공기량은 1.8-2.8(%)의 범위로 나타나 다소 많은 수준을 나타내고 있으며, 플라이애시 및 실리카흄을 사용한 경우에는 물시멘트비에 관계없이 플레

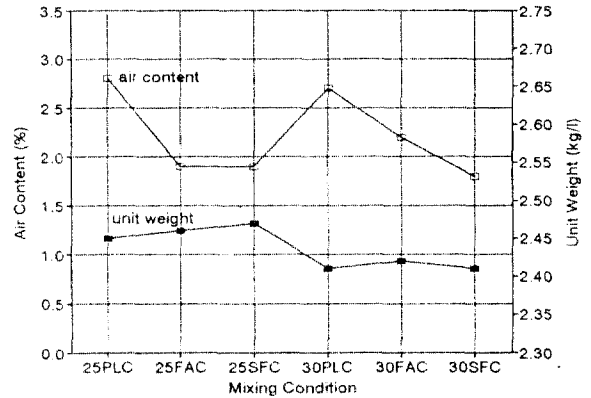


Fig. 2 Variation of air content and unit weight according to mixing condition.

인 콘크리트 보다 낮은 공기량을 보이고 있어 플라이애시 및 실리카흙이 콘크리트의 밀실화에 기여한 것으로 나타났으며, 단위용적중량의 증가에 따라서 공기량은 저하하는 경향을 보이고 있다.

3.2 비빔직후의 시공성 검토

조합조건별 목표슬럼프를 얻기 위한 고성능감수제의 첨가율의 변화를 나타낸 Fig.3에서 알 수 있는 바와같이 목표슬럼프 21±2(cm) 얻기 위한 고성능감수제의 첨가율은 1.0-2.0(%)의 수준이며, 물결합재비에 관계없이 PLC → FAC → SFC의 순으로 증가하고 있는 것으로 나타나고 있는데, 이는 비중이 높은 플라이애시 및 실리카흙을 시멘트에 대한 중량비로 대체하여 발생한 용적의 증가와 미연탄소분에 의한 수분의 흡착(플라이애시의 경우) 및 비표면적의 증가(실리카흙의 경우) 등의 원인에 의하여 나타난 결과로 사료된다.

Fig.4는 비빔직후의 슬럼프, 슬럼프플로우 및 플로우치의 변화를 조합조건별로 나타낸 것으로서, 본 실험에서 슬럼프치 19.5 - 23.7(cm), 슬럼프플로우치 26.0-51.0(cm), 플로우치 43.8-61.5 (cm) 범위를 갖는 시공성이 양호한 고강도유동화콘크리트의 제조가 가능하였다. 또한, 슬럼프는 조합조건에 관계없이 큰 변화를 보이지 않고 있지만 슬럼프플로우 및 플로우치는 변화의 폭이 크며, 특히 슬럼프플로우의 경우가 더 큰 변화를 보이고 있어 슬럼프가 큰 경우에 시공성을 판별하기에는 슬럼프플로우치를 사용하는 것이 유리할 것으로 사료된다.

다짐계수는 Fig.5에 나타낸 바와같이 슬럼프치가 상대적으로 낮은 30PLC가 0.95를 보인 것을 제외하면 모두 0.97-0.99의 높은 다짐계수치를 보이고 있다.

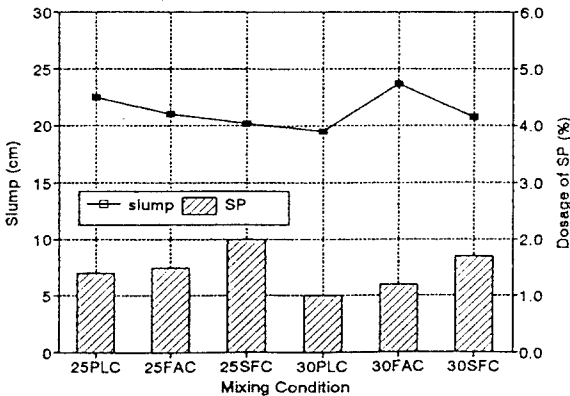


Fig. 3 Variation of slump and dosage of superplasticizer according to mixing condition.

3.3 경시변화 분석

Table 9 및 Fig. 6은 슬럼프, 슬럼프플로우 및 플로우치의 경시에 따른 변화를 나타낸 것으로 전반적으로 슬럼프의 경시에 따른 저하는 크지 않은 것으로 나타났다. 혼화재의 종류에 따라서는 플라이애시를 사용한 경우가 플레인콘크리트 및 실리카흙콘크리트에 비하여 슬럼프의 경시에 따른 저하가 적은 경향을 보이고 있어 플라이애시가 고강도콘크리트의 시공성 개선에 유효한 인자임을 알 수 있었다. 또한, 실리카흙을 사용한 고강도콘크리트는 유동성을 급격히 손실한다는 보고¹⁾와는 달리 실리카흙을 사용한 경우에도 플레인콘크리트와 동등한 수준의 손실을 나타내고 있다.

한편 초기슬럼프가 19.5(cm)로서 상대적으로 다른 조합에 비하여 낮은 30PLC의 경우 슬럼프의 손실이 약간 높게 나타나고 있어 고강도유동화콘크리트를 현장에 적용하기 위하여는 초기슬럼프를 20(cm) 이상으로 확보하는 것이 양호한 워커빌리

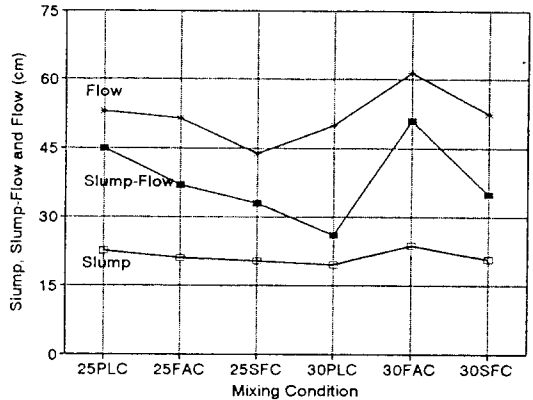


Fig. 4 Variation of slump, slump-flow, and flow according to mixing condition.

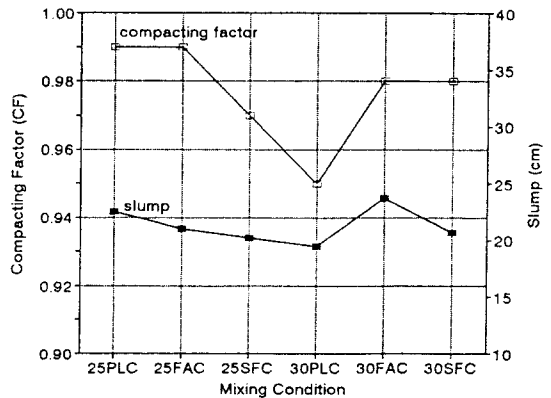


Fig. 5 Variation of compacting factor according to mixing condition

티를 유지할 수 있을 것으로 사료된다.

슬럼프플로우의 경우에는 슬럼프와는 달리 경시 초기에 급격한 손실을 보여 초기값이 높은 경우 (30FAC)에도 경시시간 60분에는 모두 30(cm) 이하의 값을 보이고 있으며, 플로우는 슬럼프와 유사하게 경시에 따라 완만한 감소를 보이고 있으며, 슬럼프의 급격한 손실을 보였던 30PLC의 경우에도 다른 조합과 유사한 경향을 보이고 있다. 또한 슬럼프플로우 및 플로우에서 혼화재료의 사용에 따른 경향은 슬럼프치에서와 동일한 것으로 나타났다.

이와같이 슬럼프 및 플로우치에 비하여 슬럼프플로우치가 경시초기에 급격한 손실을 보이는 것은 슬럼프, 슬럼프플로우 및 플로우의 경시변화를 초기치에 대한 백분율로 나타낸 Fig.7에서 더욱 명확히 알 수 있는데, 경시 60분에서 슬럼프치의 경우에는 초기치의 40-70(%), 플로우치의 경우에는 40-60(%) 수준의 값을 보이는 반면 슬럼프플로우치의 경우는 10-20(%)의 수준을 보이고 있음을 알 수 있다.

3.4 슬럼프, 슬럼프플로우 및 플로우의 상관관계의 분석

슬럼프치와 플로우치(ASTM 플로우치로 변환한

Table 9. Time dependent change of slump, slump-flow, and slump-flow

ID of mix.	Test items	Test Results of Slump, Flow and Slump-Flow (cm)						
		Init	15m	30m	45m	60m	90m	120m
25PLC	SL	22.5	21.2	20.1	17.5	13.0	9.6	7.5
	SL-FL	45.0	37.0	31.0	26.0	25.5	21.0	20.5
	FL	53.3	49.8	46.8	40.3	40.0	36.5	34.5
25FAC	SL	21.0	20.5	19.1	16.7	13.5	10.2	7.5
	SL-FL	37.0	33.0	36.0	27.0	23.5	24.0	20.5
	FL	51.5	45.5	42.5	43.5	40.0	37.5	33.5
25SFC	SL	20.2	19.2	17.1	12.8	12.0	9.1	5.6
	SL-FL	33.0	29.5	26.5	23.0	21.0	21.0	20.0
	FL	43.8	43.8	40.8	38.3	37.0	33.5	31.5
30PLC	SL	19.5	14.3	12.3	9.8	7.5	5.5	4.0
	SL-FL	26.0	24.0	22.0	21.0	21.0	20.0	20.0
	FL	50.0	45.5	41.3	40.0	38.0	37.3	33.5
30FAC	SL	23.7	23.0	21.0	19.0	16.8	11.5	9.4
	SL-FL	51.0	46.0	40.0	38.0	27.0	23.0	21.0
	FL	61.5	55.0	55.0	48.5	48.0	39.5	37.0
30SFC	SL	20.7	19.3	16.0	13.4	12.7	9.0	6.5
	SL-FL	35.0	29.5	25.0	23.0	21.0	21.0	21.0
	FL	52.5	52.0	44.0	42.0	36.3	37.0	34.0

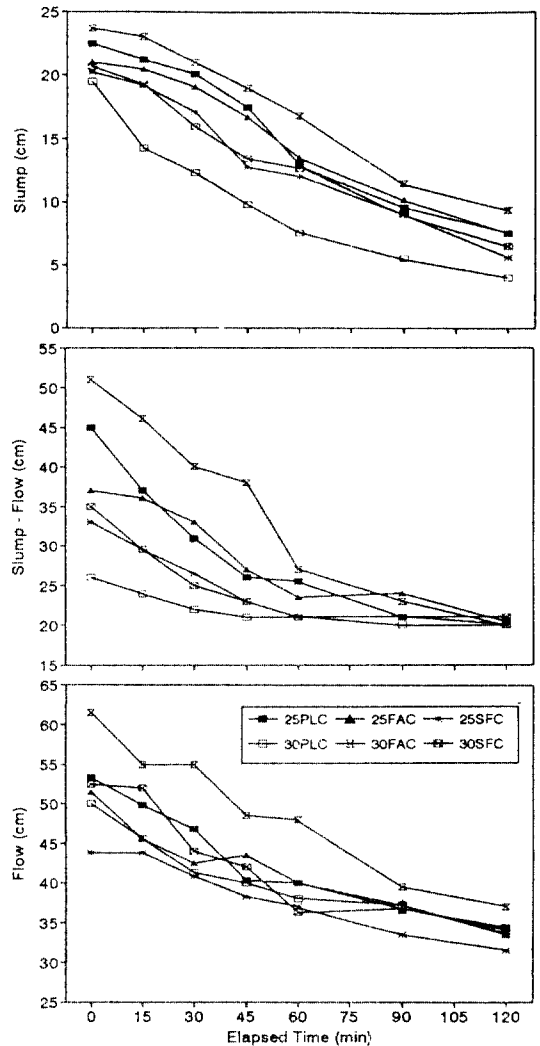


Fig. 6 Time dependent change of slump, slump-flow, and flow.

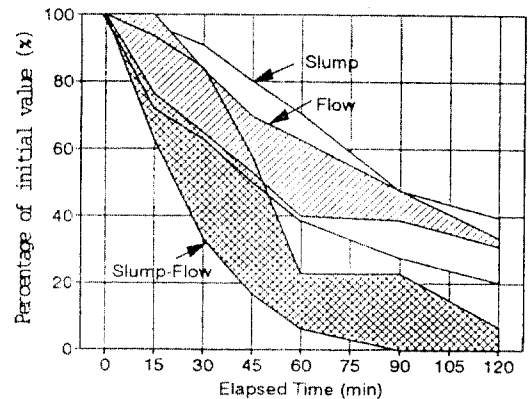


Fig. 7 Loss proportion of slump, slump-flow and flow according to elapsed time

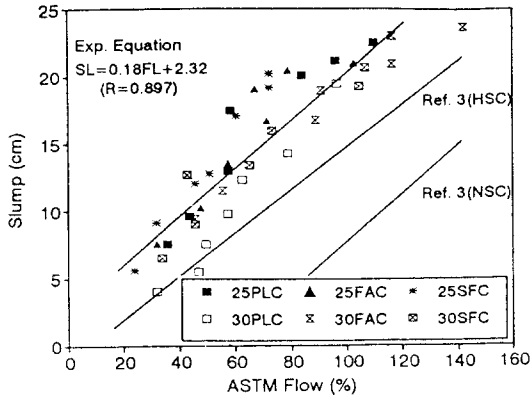


Fig. 8 Relationship between ASTM flow and slump.

값)의 관계는 Fig. 8에서와 같이 직선식으로 나타낼 수 있었으며, 본 실험의 측정치는 보통콘크리트에 비하여 동일 슬럼프에서 낮은 플로우값을 보이고 있는데 이는 점성이 높기 때문에 나타난 현상으로 사료된다. 또한 혼화재료의 사용에 의한 유의할 만한 경향은 나타나지 않고 있다.

Fig 9는 슬럼프치와 슬럼프플로우치의 상관관계를 나타낸 것으로서 두 측정치간의 관계는 지수식으로 표현할 수 있는 것으로 나타나고 있으며, 슬럼프치가 20(cm) 이상이 되면 슬럼프치의 변화보다 슬럼프플로우치의 변화가 매우 크게 되는 현상을 보이고 있어 슬럼프치가 큰 경우에는 슬럼프플로우치가 시공성 판별 유효한 인자로 나타나고 있으므로 고강도유동화콘크리트의 실용화를 위하여는 슬럼프플로우치에 대한 기준의 정립이 필요할 것으로 사료된다. 또한, 두 측정치간의 관계에 있어서 플라이애시 및 실리카흄의 사용에 의한 유의할 만한 경향은 나타나지 않고 있다.

4. 결론

플라이애시 및 실리카흄을 사용한 고강도유동화콘크리트의 시공성 및 역학적 특성에 관하여 실험적으로 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 물결합재비 25(%)의 경우 $500(\text{kg}/\text{m}^3)$, 물결합재비 30(%)의 경우 $600(\text{kg}/\text{m}^3)$ 의 단위결합재량에서 고성능감수제의 적절한 사용에 의하여 슬럼프 $21 \pm 2(\text{cm})$ 의 매우 높은 유동성을 갖고 재료의 분리가 없이 양호한 워커빌리티를 유지하는 고강도유동화 콘크리트의 제조가 가능하였다.
2. 플라이애시콘크리트와 실리카흄콘크리트는 플레인콘크리트에 비하여 동일한 수준의 시공성을 얻기 위한 고성능감수제의 양은 약간 증가하였으

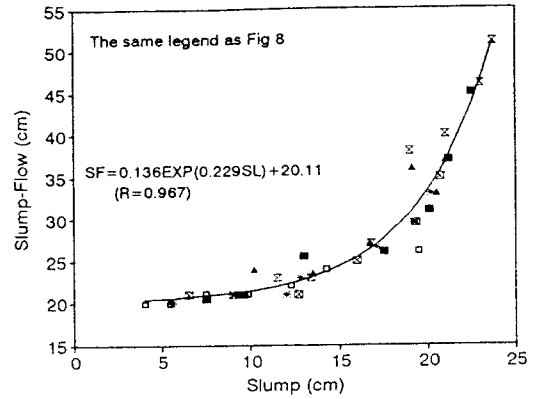


Fig. 9 Relationship between slump and slump-flow

나 플라이애시콘크리트는 플레인콘크리트에 비하여 경시에 따른 유동성 손실이 작은 것으로 나타나 플라이애시가 고강도유동화콘크리트의 시공성 개선에 유효한 인자임을 알 수 있었으며, 실리카흄을 사용한 경우에도 플레인콘크리트와 동등한 수준의 유동성 손실을 보이고 있다.

3. 슬럼프가 높아질수록 경시에 따른 유동성의 손실은 작아지는 것으로 나타나고 있어 고강도유동화 콘크리트의 현장 적용시 슬럼프는 재료의 분리가 없는한 20(cm) 이상 높게 확보하는 것이 유리할 것으로 사료된다.

4. 슬럼프치가 20(cm) 이상이 되면 슬럼프치의 변화보다 슬럼프플로우치의 변화가 매우 크게 되어 슬럼프치가 큰 경우에는 슬럼프플로우치가 시공성 판별에 유효한 인자로 나타났으며, 슬럼프플로우치의 기준화가 필요할 것으로 사료된다.

參 考 文 獻

1. K.I.Johanson, etc. : Improving the Workability of High-Strength Concrete, in High-Strength Concrete 1993 (Symposium in Lillhammer, Norway), Proceedings 2, 1993, pp.801-809.
2. 김무한, 김진만 : 플라이애시를 사용한 고강도콘크리트의 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.
3. 日本建築學會 : 高強度 コンクリートの 技術の 現状, 1991
4. 이덕준 : 고강도콘크리트의 경제적조합비 결정 및 실용화에 관한 연구, (주)대우 건설기술 연구소, 1988, pp.102-177.