

# 실리카 흙 대체재로 활용 가능한 SFFB의 치환율에 따른 고강도 콘크리트의 품질특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Quality Properties of High Strength Concrete  
by the Replacement Ratio SFFB as Substitutes of Silica-fume

임 병 훈<sup>1)</sup>                      이 상 수<sup>2)\*</sup>                      윤 현 도<sup>3)</sup>                      윤 길 호<sup>4)</sup>  
Lim, Byung Hoon              Lee, Sang Soo                      Yun, Hyun Do                      Yoon, Gil Ho

## Abstract

This study set up 25, 35% for silica fume, SFFB's 2 level and water-combination material ratio, silica fume 10% for substitution ratio, and 4 level of SFFB 5, 10, 15(%) in order to compare and analyze the quality characteristic of ultra high strength concrete according to the substitution ratio of silica fume free binder (SFFB) that can be utilized as a substitute material for silica fume. As a result of an experimentation, the lower water-combination material ratio was, the higher addition ratio of high performance water-reducing agent for securing target liquidity increased, and it indicated the tendency that addition ratio of high performance water-reducing agent decreases because of material characteristic that SFFB has a lower absorptiveness than silica fume. The best strength was shown when SFFB substitution ratio is 10% at compressive strength and when substitution ratio is 15% at tensile strength, and it was indicated that at autogenous shrinkage contraction decreases compared to Plain(SF) regardless of substitution ratio of W/B and SFFB.

**Keywords** : Silica Fume Free Binder(SFFB), Silica Fume, Ultra High Strength, Autogenous Shrinkage

## 1. 서론(Introduction)

최근 사용량이 증가하고 있는 고강도콘크리트는 성능 개선과 경제성 향상을 목적으로 플라이애시, 고로슬래그 미분말 같은 광물질 혼화재를 다양으로 사용하고 있다. 이러한 광물질 혼화제는 콘크리트 내에서 시멘트와 반응하여 다량의 수화물을 생성함으로써 고강도 발현에는 매우 유리한 재료로 평가받고 있다. 광물질 혼화재중 실리카 흙은 강도나 내구성 측면에서 우수하여<sup>3)</sup>, 초고강도콘크리트나 내화확성이 요구되는 곳에 적극 활용되고 있으나, 현재 국내에서는 전량 수입에 의존하고 있는 실정이며, 다른 혼화재에 비해 단가가 높아 건설비용이 상승하게 됨에 따라 실리카 흙과 동일한 정도의 우수한 효과를 가지면서도 보다 경제적인 혼화재에 대한 요구가 증대되고 있다.<sup>4), 5)</sup> 실리카 흙은 고강도·초고강도콘크리트에 단독으로 사용하기 보다는 플라이애시나, 고로슬래그 미분말 등과 함께 3

성분계 또는 4성분계 재료를 함께 사용하여 제조하는 것이 일반적인 경향이다.<sup>1)</sup> 이에 따라 국내에서는 실리카 흙보다 가격이 저렴한 메타카올린에 관한 연구가 활발히 진행되어져 왔으나<sup>2)</sup>, 메타카올린의 유동성 저하, 높은 물-결합재비에 의한 강도저하, 수축률 증대 등 많은 문제점이 지적되어 이에 대한 개선이나 새로운 혼화재료의 개발에 대한 관심이 집중되고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 60MPa 이상의 초고강도 콘크리트용 결합재중 실리카 흙 사용범위인 5~15%를 대상으로 Ca-S 복합 화합물(칼슘염과 황화합물로 구성된 복합 결정성 화합물)이 주요조성인 SFFB(Silica Fume Free Binder)을 실리카 흙 대체하여 적용하고, 실리카흙을 적용한 배합과 콘크리트의 유동성, 강도특성 및 자기수축 등의 품질특성을 비교하고자 하며, 이러한 실험을 통하여 SFFB의 실리카 흙 대체 가능성을 검토하는 동시에 향후 초고강도 콘크리트의 배합설계에 필요한 기초적 자료를 제시하고자 한다.

1) 정희원, 우송대학교 건축공학과 교수, 공학박사  
2) 정희원, 한밭대학교 건축공학과 부교수, 공학박사  
3) 정희원, 충남대학교 건축공학과 교수, 공학박사  
4) 정희원, (주)계룡건설산업 건축부, 상무이사

\* Corresponding author : sslee111@hanbat.ac.kr 042-821-1118  
• 본 논문에 대한 토의를 2010년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2010년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Table 1 Concrete Mix

W/B (%)	Specimen	S/a (%)	Replacem-ent ratio (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )					
					C	S	G	SF	SFFB	HR WR
25	Plain	42	10	160	576	686	947	64	-	10
	SFFB5	42	5	160	608	693	958	-	32	6
	SFFB10		10		576	692	955	-	64	6
	SFFB15		15		544	690	953	-	96	5
35	Plain	45	10	165	424	794	971	47	-	7
	SFFB5	45	5	165	448	800	978	-	24	3
	SFFB10		10		424	799	977	-	47	4
	SFFB15		15		401	798	975	-	71	3

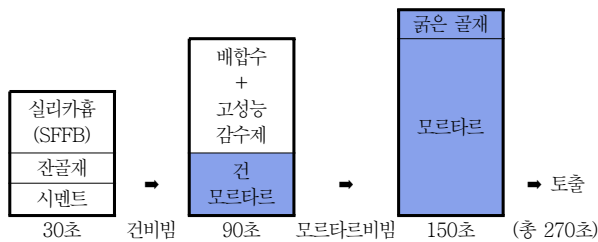


Fig. 1 Concrete Mix Method

## 2. 본 문

### 2.1 실험개요

#### 2.1.1 실험계획 및 배합

SFFB을 사용한 초고강도 콘크리트의 유동특성 및 강도특성에 관한 기초적 성상을 규명하기 위한 본 연구의 실험계획 및 배합은 Table 1과 같이 설정하였다. 즉 실리카흄과 SFFB의 치환율에 따른 영향을 비교·분석하기 위하여 물결합재비는 25% 및 35%로 2수준으로 설정하였으며, 실리카 흄 치환율은 10(%), SFFB의 치환율은 5, 10, 15(%의 4수준으로 설정하였고, 슬럼프 플로우는 65±5cm를 목표치로 설정하였다.

#### 2.1.2 실험방법 및 평가항목

실리카흄과 SFFB의 콘크리트의 비빔방법은 Fig. 1과 같으며 평가항목은 Photo 1과 같다.

#### 2.1.3 사용재료

본 연구에서 사용한 재료의 종류 및 물리적 성질은 Table 2와 같으며, SFFB(Silica Fume Free Binder)는 천연석고에서 추출된 Ca-S 복합화합물을 주요재료로 채택하고, 분산성을 확보하기 위한 유기 분산제 및 Ca-S

시험장비				
측정항목	슬럼프 플로우	공기량	인장강도	자기수축
시험방법	KS F 2594	KS F 2421	KS F 2423	KS F 2586

Photo 1 Testing Methods

Table 2 Using the physical properties of materials

사용재료	사용재료의 물리적 성질
시멘트	밀도 3.15g/cm <sup>3</sup> , 분말도 3,267cm <sup>2</sup> /g
실리카흄	밀도 2.20g/cm <sup>3</sup> , 분말도 220,000cm <sup>2</sup> /g
SFFB	밀도 2.2g/cm <sup>3</sup> , 분말도 2,000~2,200cm <sup>2</sup> /g
잔골재	세척사, 최대치수 5mm, 밀도 2.60
굵은골재	쇄석, 최대치수 19mm, 밀도 2.62

복합화합물의 경화속도를 조절하기 위한 유기 지연제를 적용한 무유기 복합화합물이며, SFFB는 ph 영역이 중성이어서 강알칼리의 시멘트-물계에 투입되면 시멘트 수화반응을 통해 초기 입경이 점점 축소되어 미세화 되고, 수화과정을 통해 새로이 생성된 화합물이 시멘트 간극, 공극을 채워주어 콘크리트의 수밀성 및 강도를 증진시켜주는 역할을 한다.

### 2.2 실험결과 및 분석

#### 2.2.1 슬럼프 플로우

Fig. 2 및 Fig. 3은 목표 유동성 65±5cm에 따른 슬럼프 플로우는 나타낸 그림으로서, W/B 25%일 경우 60분이 경과 후의 슬럼프 플로우는 SFFB의 치환율이 증가할수록 슬럼프 플로우도 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 W/B 35%의 경우에서도 W/B 25%와 비슷한 경향을 보였고, SFFB 치환율이 10%일 경우 배합직후와 60분 경과 후의 슬럼프 플로우 변화가 가장 적은 것으로 나타났다. 이러한 경향은 실리카 흄보다 낮은 저흡수성을 갖는 SFFB의 재료적 특성에 기인되는 것으로 판단된다.

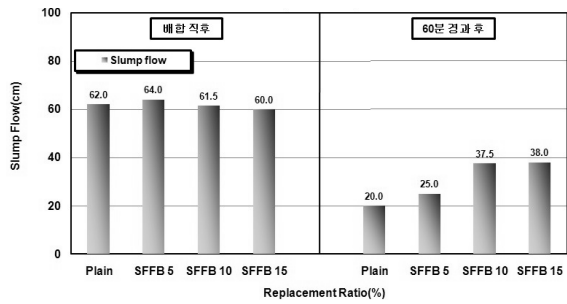


Fig. 2 Slump flow(W/B 25%)

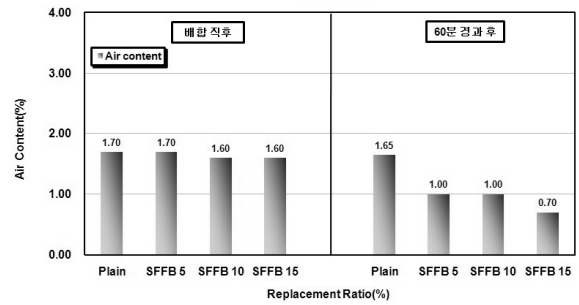


Fig. 5 Air content(W/B 25%)

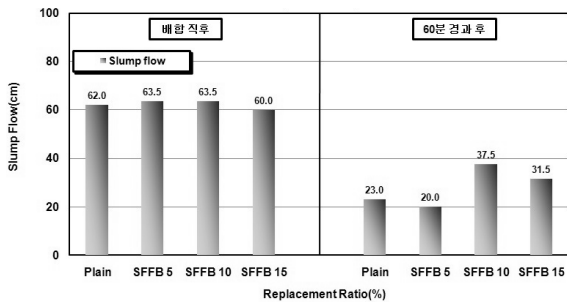


Fig. 3 Slump flow(W/B 35%)

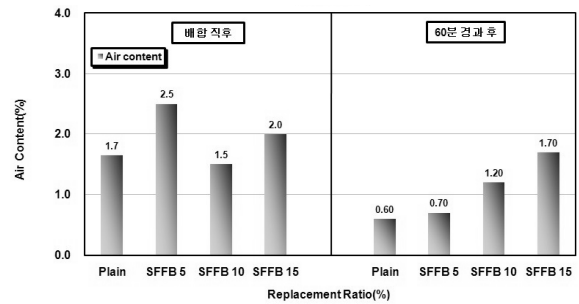


Fig. 6 Air content(W/B 35%)

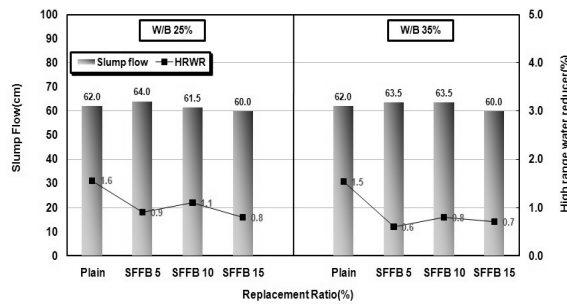


Fig. 4 Slump flow and HRWR

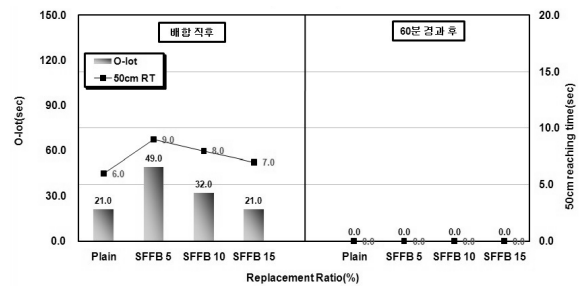


Fig. 7 O-lot and 50cm reaching times(W/B 25%)

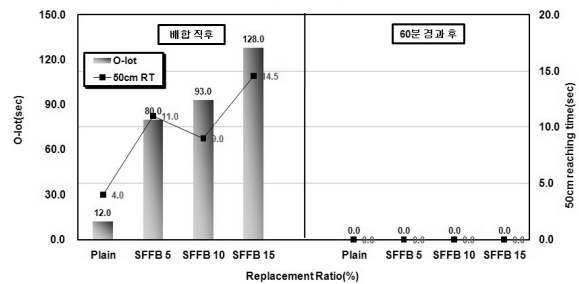


Fig. 8 O-lot and 50cm reaching times(W/B 35%)

한편 Fig. 4는 슬럼프 플로우 목표치인  $65 \pm 5\text{cm}$ 를 만족하기 위한 고성능감수제 첨가율의 변화를 나타낸 그림으로서, W/B가 낮아질수록 목표치인  $65 \pm 5\text{cm}$ 를 만족시키기 위한 고성능 감수제 첨가율은 증가하는 것으로 나타났으며, SFFB는 치환율과 상관없이 Plain(SF)에 비하여 목표유동성에 필요한 고성능 감수제 첨가율이 적은 것으로 나타나 실리카 흙 대신 SFFB를 사용할 경우 유동성 개선에 유리할 것으로 판단된다.

## 2.2.2 공기량

Fig. 5 및 Fig. 6는 W/B 및 SFFB의 치환율의 변화에 따른 공기량을 나타낸 그림으로서, W/B 25%일 경우 배합 직후 SFFB 치환율과 관계없이 1.6~1.7%의 일정한 범위를 나타내었으며, 60분 경과 후의 공기량은 실리카흙을 10% 적용한 Plain에 비하여 SFFB의 치환율이 증가

할수록 공기량 손실이 다소 증가되는 경향을 보였다. 반면 W/B 35%일 때 공기량은 배합 직후 1.5~2.5%의 범위를 나타내었으며, 60분 경과 후에는 Plain에 비하여 SFFB의 치환율이 5%일때를 제외하고는 치환율 증가에 따라 공기량 손실이 회복되는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 실리카 흙 및 SFFB의 분말도 차이, 치환율 증가

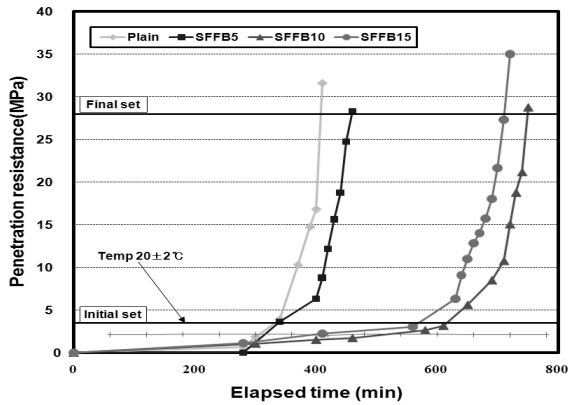


Fig. 9 Penetration resistance(W/B 25%)

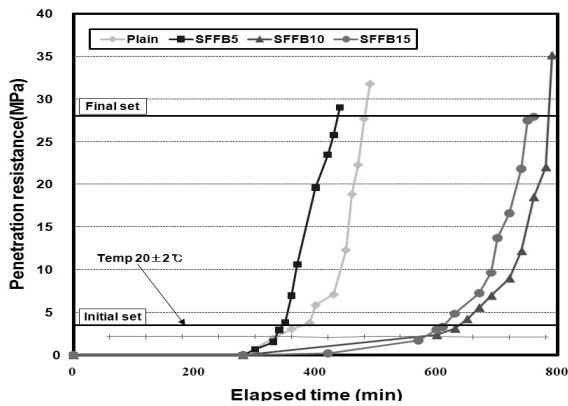


Fig. 10 Penetration resistance(W/B 35%)

에 따른 콘크리트 혼합상태 변화 및 SFFB의 저흡수특성 등에 기인되는 것으로 판단된다.

### 2.2.3 O-lot 유하시간

Fig. 7 및 Fig. 8은 W/B 및 SFFB의 치환율의 변화에 따른 O-lot 유하시간 및 50cm 도달시간을 나타낸 그림으로서, W/B 25%일 경우 SFFB의 치환율이 증가할수록 O-lot 및 50cm 도달시간이 감소하는 경향을 나타내었으며, SFFB의 치환율이 15%의 경우 Plain과 비슷한 경향을 나타내었다. W/B 35%일 경우에는 W/B 25%의 경우와 상반되는 경향을 나타내었다. 일반적으로 O-lot 유하시간은 콘크리트의 점성을 간접적으로 평가하는 방법으로서 본 실험결과에서 나타난 바와 같이, 목표 슬럼프플로우 값이 유사할 지라도 콘크리트의 구성재료 즉, 혼화재의 종류 및 치환율에 따라 콘크리트의 점성은 커다란 차이를 보인다는 것을 알 수 있다. 결국, 콘크리트의 워커빌리티는 유동성 및 점성의 적절한 조화가 이루어져야만 양호한 충전성을 확보할 수 있기 때문에 점성은 보통강도 콘크리트에서는 중요하지 않지만 고강도·초고강도 콘크

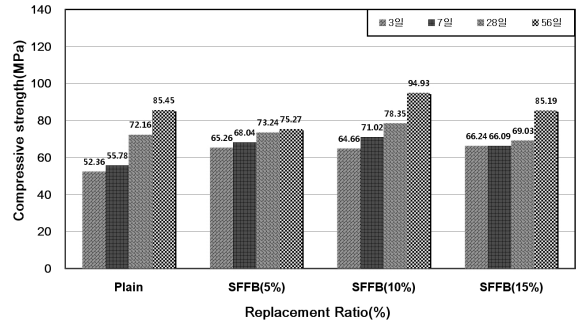


Fig. 11 Compressive strength(W/B 25%)

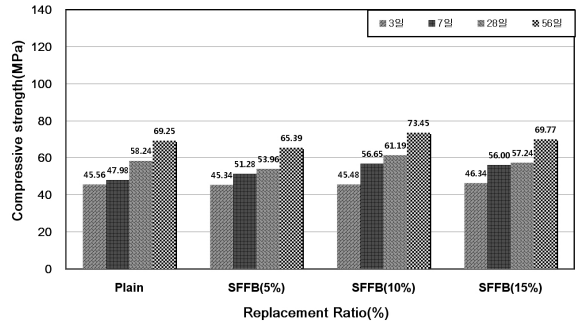


Fig. 12 Compressive strength(W/B 35%)

리트에서는 중요한 품질항목이라고 할 수 있다.

### 2.2.4 응결시험

Fig. 9 및 Fig. 10은 W/B 및 SFFB의 치환율의 변화에 따른 응결 시험결과를 나타낸 그림으로서, 관입저항은 3.5MPa가 되는 초결부터 28MPa의 종결까지의 소요시간을 측정하였다.

W/B 25%일 경우 SFFB의 치환율이 5%의 경우 Plain과 유사한 시간에 초결이 결정되었으나 치환율이 10, 15%의 경우 콘크리트의 초결시간이 지연되었으며 W/B 35%의 경우에도 W/B 25%의 경우와 유사한 경향을 보였다. 이와같이 SFFB의 치환율 증가에 따라 응결시간이 지연되는 경향은 SFFB를 구성하는 황화합물이 시멘트의 수화속도를 지연시키는 특성과 관련이 있는 것으로 판단된다.

### 2.2.5 압축강도

Fig. 11 및 Fig. 12은 W/B 및 SFFB의 치환율의 변화에 따른 압축강도 시험결과를 나타낸 그림으로서, W/B 25%의 경우 SFFB의 치환율이 5%~10%에서는 재령에 관계없이 압축강도가 증가되었으나, 15%의 치환율에서는 압축강도 상승이 다소 둔화되는 경향을 보였다. 따라서 실리카 흙 대신 SFFB를 적용할 경우 안정적인 콘크리

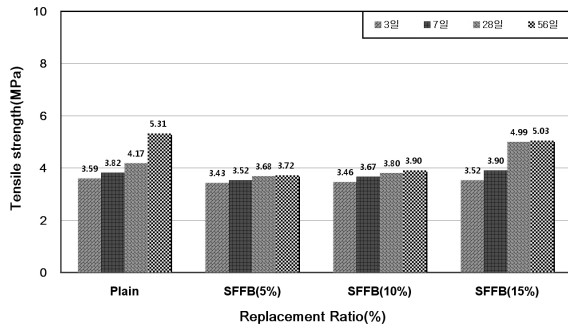


Fig. 13 Tensile strength(W/B 25%)

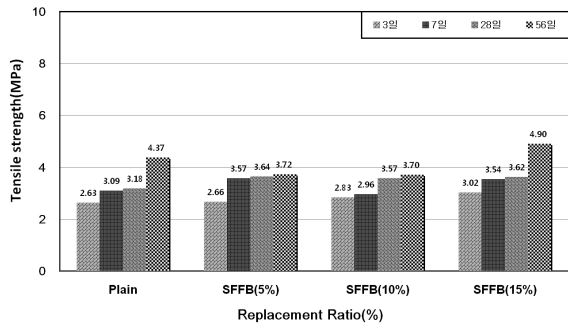


Fig. 14 Tensile strength(W/B 35%)

트 강도 확보를 위해서는 치환율 10% 범위내에서 적용하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

또한 W/B 35%의 경우에도 SFFB 치환에 의한 안정적인 강도확보에는 큰 문제가 없었으나, W/B 25%의 경우와 달리 SFFB 치환율 증감이 강도변화에 상대적으로 큰 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.

### 2.2.6 인장강도

Fig. 13 및 Fig. 14는 W/B 및 SFFB의 치환율의 변화에 따른 인장강도 시험결과를 나타낸 그림으로서, 실리카 함을 10% 적용한 Plain에 비해 W/B 25%의 경우 재령 56일을 제외하면 SFFB의 치환율 증가가 안정적인 인장강도의 확보에는 큰 지장을 주지 않는 것으로 나타났다. 또한 SFFB의 치환율이 증가됨에 따라 인장강도가 다소 향상되는 경향을 보였다.

또한 W/B 35%의 경우 W/B 25%의 경우와 같이 SFFB의 치환율 증가로 인장강도가 향상되는 경향을 나타냈다. 따라서 압축강도와는 다르게 W/B 변화에 관계없이 SFFB의 치환율이 15%일 경우 인장강도 발현이 가장 우수한 것으로 나타났다. 이는 SFFB의 재료적 특성에 의해 강도발현이 늦기 때문에 실리카 함과 동등이상의 인장강도를 확보하기 위해서는 SFFB의 치환율이 15%가 필요하다고 판단된다.

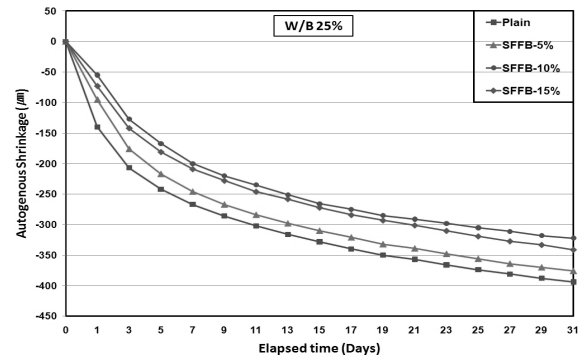


Fig. 15 Autogenous Shrinkage(W/B 25%)

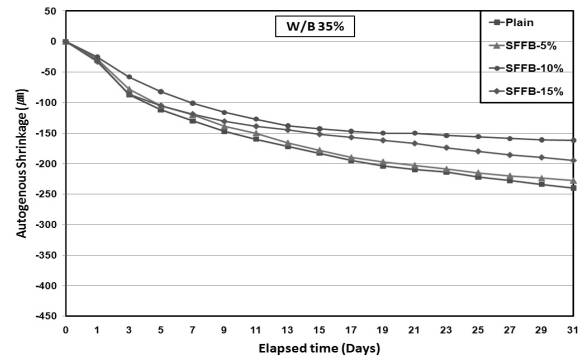


Fig. 16 Autogenous Shrinkage(W/B 35%)

### 2.2.7 자기수축

Fig. 15 및 Fig. 16는 W/B 및 SFFB의 치환율의 변화에 따른 자기수축을 나타낸 그림으로서, W/B와 SFFB의 치환율과 상관없이 SFFB가 Plain(SF)에 비해 자기수축이 저감하는 것으로 나타났으며, SFFB의 치환율이 10(%)일 경우 가장 자기수축이 저감하는 것으로 나타났다.

SFFB가 Plain(SF)에 비해 자기수축이 저감하는 이유는 SFFB가 저흡수성이며, 일반적으로 자기수축이 상대적으로 적은 Ca-S 복합 화합물(칼슘염과 황화합물로 구성된 복합 결정성 화합물)로 이루어져 있고, 시멘트 수화 반응을 지연시키기 때문에 수축저감이 일어나는 것으로 사료된다.

## 3. 결론

본 연구는 실리카함 대체재로 활용 가능한 SFFB의 치환율에 따른 고강도 콘크리트의 품질특성에 관한 실험적 연구의 결과로서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 슬럼프 플로우에서는 W/B가 낮아질수록 목표치인 65±5cm를 만족시키기 위한 고성능 감수제 첨가율

은 증가하는 것으로 나타내었다. 공기량에서는 배합 직후 W/B 25%일 경우 SFFB 치환율과 관계없이 일정한 범위를 나타내었으나, 60분 경화 후에는 공기량이 SFFB 치환율이 증가할수록 손실하는 경향을 나타내었다. 또한 W/B 35%의 경우의 60분 경과 후에는 공기량 손실이 회복되는 것으로 나타났다.

- 2) O-lot 및 50cm 도달시간은 W/B 25%의 경우 SFFB 치환율이 증가할수록 O-lot 및 50cm 도달 시간이 감소하는 경향을 나타내었으나, SFFB의 치환율이 15%의 경우 Plain과 비슷한 경향을 나타내었으며, W/B 35%일 경우에는 W/B 25%의 경우와 상반되는 경향을 나타내었다. 응결시험시간은 W/B 25%와 35%가 비슷한 경향을 나타내었고, SFFB의 치환율이 증가할수록 응결속도가 지연되는 것은 SFFB를 구성하는 황화합물이 시멘트이 수화속도를 지연시키는 특성과 관련이 있는 것으로 판단된다.
- 3) 압축강도는 W/B 25%의 경우 SFFB의 치환율이 5%에서 10%로 증가했을 때 압축강도도 증가하였으나, SFFB의 치환율이 15%의 경우에는 상승이 둔화되는 경향을 보였으며, W/B 35%의 경우에도 W/B 25%의 경우와 비슷한 경향을 나타내었다. 인장강도의 경우에는 SFFB 치환율이 증가할수록 인장강도도 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 시멘트 수화반응을 지연하는 SFFB의 재료적 특성에 의해 강도 발현이 늦게 개시되기 때문이라고 판단된다.
- 4) 자기수축에서는 W/B와 SFFB의 치환율과 상관없이 SFFB가 Plain(SF)에 비해 자기수축이 저감하는 것으로 나타났으며, SFFB의 치환율이 10%일 경우 가장 자기수축이 저감하는 것으로 나타났다.

이상의 결과를 종합하여 볼 때, SFFB의 치환율이 W/B

와 상관없이 SFFB 치환율이 10%일 경우 유동성 및 압축강도, 자기수축 등에서 Plain(SF)에 비하여 우수한 것으로 나타났으며, Plain(SF) 대체재로 SFFB를 사용할 경우 보다 양질의 고강도·초고강도 콘크리트를 만들 수 있을 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 중소기업청 및 대전광역시에서 지원하는 2009년도 산학 공동기술개발지원사업[과제명 : 초고강도 콘크리트용( $\geq 60\text{MPa}$ )용 Silica Fume Binder(SFFB)의 상용화 기술개발]에 의해 수행되었기에 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 박조범, 김호수, 전준영, 김은걸, 류득현, 실리카폼과 메타카올린을 사용한 다성분계 고강도콘크리트의 특성, 한국콘크리트학회 논문집 제20권 제3호, 2008, pp. 307-315
2. 이강필, 이승민, 이상수, 송하영, 국내·외산 메타카올린을 사용한 고강도 콘크리트의 내구특성에 관한 실험적 연구, 한국건축시공학회 학술. 기술논문발표회 논문집, v.9n.1(통권 제16호) 2009, pp. 239-242
3. 유정호, 이지환, 이승민, 노형남, 이상수, 송하영, 국내·외산 메타카올린을 사용한 고강도콘크리트의 특성에 미치는 물-결합재비의 영향에 관한 연구, 대한건축학회 학술발표대회 논문집 제28권 제1호, 2008, pp 519-522
4. 이상수, 메타카올린을 사용한 콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 구조계 22권 5호, 2006, pp. 137-144.
5. 이승민, 이지환, 이종석, 김재환, 이상수, 송하영, 실리카폼 대체재로 활용 가능한 메타카올린의 치환율에 따른 고강도 콘크리트의 품질특성에 관한 실험적 연구, 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, v.20n.1 2008, pp.333-336

(접수일자 : 2010년 3월 24일)

(심사완료일자 : 2010년 4월 27일)

## 요 지

본 연구에서는 실리카폼 대체재로 활용 가능한 실리카 폼 무혼입 결합재(SFFB)의 치환율에 따른 고강도 콘크리트의 품질특성을 비교·분석하기 위하여, 실리카폼, SFFB의 2수준과 물-결합재비는 25, 35% 치환율은 실리카 폼 10%, SFFB 5, 10 15(%)의 4수준으로 설정하였다. 실험을 실시한 결과, 목표 유동성을 확보하기 위한 고성능감수제의 첨가율은 물-결합재비가 낮을수록 증가하였으며, SFFB가 실리카 폼 보다 저흡수성을 갖는 재료적 특성으로 인해 고성능감수제의 첨가율이 감소하는 경향을 나타내었다. 압축강도에서는 SFFB 치환율이 10%일 경우 인장강도에서는 치환율이 15%일 경우 가장 우수한 강도를 나타내었으며, 자기수축에서는 W/B와 SFFB의 치환율과 상관없이 Plain(SF)에 비해 수축이 저감하는 것으로 나타났다.

**핵심 용어** : 실리카 폼 무혼입 결합재(SFFB), 실리카 폼, 초고강도 콘크리트, 자기수축