

# 실리카흙을 혼입한 고품질 콘크리트의 특성에 관한 연구

A Study on the Characteristics of High-Quality Concrete Containing Silica Fume

o 배 수 호\*      윤 상 대\*\*      박 광 수\*\*\*      신 의 균\*\*\*  
Bae, Su Ho      Youn, Sang Dai      Park, Kwang Su      Shin, Eui Kyoun

## ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the mechanical properties and durability of high-quality concrete containing silica fume.

For this purpose, the optimum quantity of silica fume were obtained for high-quality concrete, and the mechanical properties and durability of it are analyzed according to amount of combined material.

### 1. 서론

가장 일반적인 콘크리트의 고강도화 방법은 단위시멘트량을 증가시켜 물-시멘트비를 감소시키는 것인데, 그에 따른 시공성 저하가 문제로 대두된다.

이에 따라 콘크리트용 혼화제로서 고성능 감수제나 고유동화제를 사용하면 시공성 저하문제는 해결할 수 있으나 단위시멘트량만의 증가로는 강도증진의 어느 한계가 나타나게 되고, 또한 과도한 단위시멘트량의 사용은 콘크리트의 높은 수화열을 유발하여 콘크리트의 강도는 물론 사용성에도 악 영향을 미치게 된다.

따라서 콘크리트의 강도를 증진시키고 수화열을 저감시키기 위해서는 콘크리트용 혼화재로서 플라이애쉬, 실리카흙, 고로슬래그미분말 등을 시멘트량의 일부로 대체하는데, 본 연구에서는

이들 중 강도증진 및 수화열 저감 목적으로 가장 각광을 받고 있는 실리카흙을 사용하여 콘크리트의 강도 특성 및 내구성을 시험·연구하였다.

이를 위하여 먼저 실리카흙의 혼입율별 콘크리트의 시공성 및 강도 특성을 고려하여 실리카흙의 최적혼입량을 결정한 후, 실리카흙의 최적혼입량을 사용한 고품질 콘크리트에 대하여 역학적 특성으로는 압축, 인장 및 휨강도와 탄성계수를, 내구성으로는 콘크리트용 잔골재로서 해사를 사용하여 콘크리트중 철근의 부식특성을 연구하였다.

### 2. 시험개요

#### 2.1 사용재료

##### 2.1.1 시멘트

시멘트는 시중에서 구입한 보통 포틀랜드 시멘트(A사 제품)를 사

\* 농어촌진흥공사 농공기술연구소 연구원

\*\* 농어촌진흥공사 농공기술연구소 수석연구원

\*\*\* 농어촌진흥공사 농공기술연구소 책임연구원

용하였으며, 그 물리적 성질은 표.1과 같다.

표.1 시멘트의 물리적 성질

비중	응 결 시 간		분말도 ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )	압축강도 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )		
	초결(min)	종결(hr)		$\sigma_3$	$\sigma_7$	$\sigma_{28}$
3.12	209	5.5	4.037	158	251	287

### 2.1.2 철근

콘크리트 공시체중의 철근부식촉진시험을 위한 철근시료는 D13이형철근으로서 그 물리적 성질은 표.2와 같다.

표.2 철근의 물리적 성질

철근 종류	철근 호칭	항복점 ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )	극한강도 ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )	연신율(%)
이형	D13	34	48	28

### 2.1.3 골재

본 연구에 사용된 잔골재시료로서 하천사는 남한강산(경기 여주군), 해사는 당진산(충남), 해남산(전남)을 사용하였고, 굵은골재 시료는 안성산(경기 안성군)을 사용하였으며, 이들의 물리적 성질은 표.3 및 표.4와 같다.

표.3 잔골재의 물리적 성질

시료 종류	비중	흡수율 (%)	단위용적중량 ( $\text{tf}/\text{m}^3$ )	200번체통과량 (%)	조립률 ( $\text{F} \cdot \text{M}$ )
하천사	2.59	1.5	1.635	2.4	2.37
해당진	2.60	1.1	1.643	2.3	2.85
사해남	2.61	0.3	1.500	1.1	2.60

표.4 굵은골재의 물리적 성질

굵은골재 최대치수 (mm)	비중	흡수율 (%)	단위용적중량 ( $\text{tf}/\text{m}^3$ )	조립률 ( $\text{F} \cdot \text{M}$ )	마모율 (%)
19	2.71	0.4	1.560	6.65	19.8

### 2.1.4 혼화제

본 연구에서 사용된 혼화제는 고강도 및 유동화 콘크리트용으로 사용되고 있는 나프탈렌계인 고성능 감수제(

표준형, K사)로서 그 품질특성은 표.5와 같다.

표.5 화학적 혼화제의 품질특성

비중	pH	고형분 (%)	표준사용량(%) (시멘트중량비)	주 성분	비고
1.21	8	41	0.2 ~ 2.0	Sodium salt of a sulfonate naphthalene	액상

## 2.2 시험방법

2.2.1 최적 혼화제(실리카흙)량 도출을 위한 배합시험

본 연구에서는 콘크리트의 강도증진을 위한 방법으로 시멘트량을 대체시키면서 강도증진 효과를 얻을 수 있는 실리카흙의 혼입방법을 선정하였고, 또한 그것의 최적첨가량을 도출시키기 위하여 단위결합재량을 450~800 $\text{kg}/\text{m}^3$ 까지 50 $\text{kg}/\text{m}^3$ 씩 증가시켰을 때, 각 단위결합재량에 대하여 실리카흙의 혼입률을 단위결합재량 중량비로 0~20%까지 5%씩 증가시키면서 그때의 굳지 않은 콘크리트의 작업성과 경화 콘크리트의 압축강도( $\sigma_3, \sigma_7$ )특성을 분석하였다.

2.2.2 최적 혼화제(실리카흙)량 도출

그림.1 및 그림.2는 하천사와 쇄석을 사용한 콘크리트의 경우, 각 단위시멘트량에 대하여 실리카흙의 혼입율을 시멘트중량비로 0~20%까지 5%씩 변화시키면서 콘크리트의 압축강도를 시험한 결과이다.

콘크리트의 재령 3일 강도를 기준으로 한 경우 시공성을 고려하였을 때, 최대압축강도를 발현시키는 최적혼화재량은 단위결합재량별로 차이가 있지만 단위결합재량 450 $\text{kg}/\text{m}^3$ 을

제외하면 그것의 15~20%로 나타났고, 콘크리트의 재령 7일 강도를 기준으로 한 경우에도 최대압축강도를 발현시키는 실리카흙의 혼입율은 15~20%로 나타났다.

따라서 콘크리트의 시공성을 고려하였을 때, 최대압축강도를 발현시키는 실리카흙의 혼입율은 재령 3일과 재령 7일 강도를 기준으로 한 경우 15~20%로 나타났으며, 실리카흙의 혼입율 15%와 20%사이의 압축강도를 비교하면 단위결합재량 550kg/m<sup>3</sup>, 600kg/m<sup>3</sup>, 700kg/m<sup>3</sup>에서는 전자가 크나, 그외의 경우는 후자가 큰 값을 나타내고 있는데, 이 경우는 대체적으로 실리카흙의 증가(15% → 20%)에 따른 압축강도의 뚜렷한 증진 효과가 나타나지 않았다(그림.1, 그림.2).

결국, 실용적인 측면에서 경제성까지 고려하게 되면, 실리카흙의 최적혼입율은 단위결합재량의 15%정도가 된다.

한편, 동일조건인 콘크리트는 일반적으로 재령 7일 강도가 크게 되면 재령 28일 강도로 크게 되는 것이 보통이기 때문에 이 실험결과를 재령 28일 강도를 기준으로 한 경우에도 잘 맞을 것으로 판단된다.

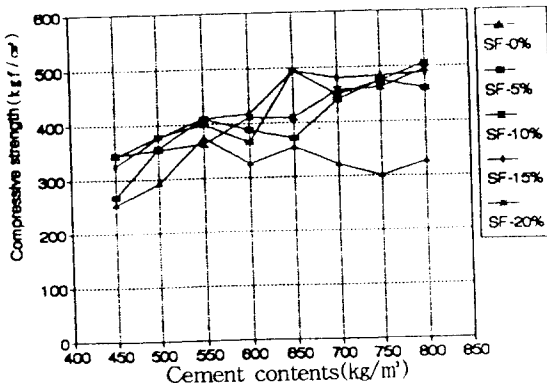


그림.1 실리카흙의 혼입율에 따른 압축강도 (재령 3일의 경우)

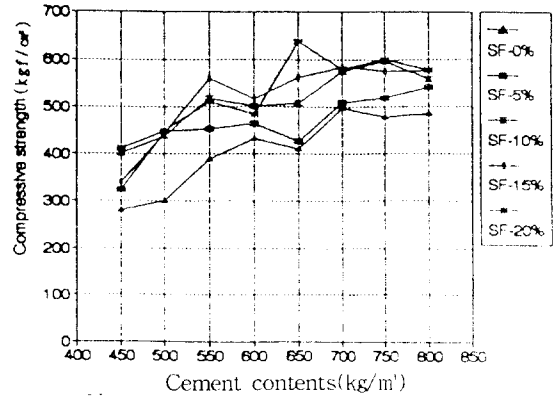


그림.2 실리카흙의 혼입율에 따른 압축강도 (재령 7일의 경우)

## 2.2.3 콘크리트 역학시험

### 1) 공시체 제작

고품질 콘크리트의 강도특성 및 탄성적 성질을 규명키 위한 콘크리트 공시체(압축 및 인장강도 시험용 :  $\phi 10 \times 20$ cm, 탄성계수 측정용 :  $\phi 15 \times 30$ cm, 휨강도 시험용  $15 \text{cm} \times 15 \text{cm} \times 53 \text{cm}$ )는 KS F 2403 (콘크리트의 강도시험용 공시체 제작방법)에 따라 제작하였으며, 성형후 24시간 경과하여 몰드를 제거하고, 시험전까지  $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 의 온도를 습윤양생하였다

### 2) 시험방법

#### ① 압축강도 시험

콘크리트의 압축강도 시험은 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 따라 하천사 및 해사 콘크리트의 공시체에 대하여 각 재령별 ( $\sigma_3, \sigma_7, \sigma_{28}$ )로 하였다.

#### ② 인장 및 휨강도 시험

콘크리트의 인장 및 휨강도 시험은 KS F 2423(콘크리트의 인장강도 시험방법)과 KS F 2407(콘크리트의 휨강도 시험방법 : 단순보의 중앙점 하중법)에 따라 압축강도 시험에서와 동일한 배합에 대하여 재령28

일 강도를 시험하였다

### ③ 탄성계수 측정

콘크리트의 탄성적 성질을 규명키 위한 탄성계수 측정은 KS F 2438(콘크리트의 원주 공시체의 정탄성계수 및 포아슨비 시험 방법)에 따라 탄성계수 측정용 공시체와 동일한 배합으로 동반 공시체를 추가로 제작하여 탄성계수 시험에 앞서 압축강도 시험을 행하여 파괴하중의 40%의 하중을 미리 계산한 다음, 파괴하중의 10%~70%까지 하중을 10%씩 증가시키면서 각각의 변위를 측정하였다.

### 2.2.4 콘크리트중의 철근부식촉진시험

#### 1) 공시체 제작

콘크리트중 철근의 부식촉진시험용 공시체는 KS F 2561의 부속서 2「콘크리트중의 철근의 부식촉진 시험방법」에 따라 제작하였다.

#### 2) 시험방법

콘크리트중 철근의 부식촉진시험은 KS F 2561의 부속서 2「콘크리트중의 철근의 부식촉진 시험 방법」에 준하였으며, 제작된 공시체에 대해서는 탈형후 건조되지 않도록 비닐포대에 넣어서 재령7일까지 양생을 시킨 후 표.6의 부식촉진시험 주기에 따라 15주기(1개월)경과후 콘크리트를 파괴하여 철근의 부식상태를 측정하였다.

표.6 공시체의 촉진시험 주기

시험조건	건조기 내부 (온도 180℃)에 공시체를 넣어서 밀폐시킴	자연 건조	수중 침지	비고
시험시간	12시간	12시간	24시간	촉진시험주기 : 48시간

## 3.1 고품질 콘크리트의 역학적 성질

### 3.1.1 압축강도

그림.3~그림.5는 각 시료별로 단위시멘트량이 450~700kg/m<sup>3</sup>일때, 그 중량비로 15%를 실리카흄으로 대체한 콘크리트의 강도시험 결과를 나타낸 것으로, 실리카흄을 혼입한 하천사 콘크리트의 재령 28일의 강도는 물-결합재비가 21%이상의 범위에서는 물-결합재비의 감소에 따라서 비례적으로 증가되나 그 이하의 범위에서는 강도증진이 거의 없으며(그림.3), 당진해사 및 해남해사 콘크리트의 경우는 물-결합재비가 각각 15%이상, 21%이상의 범위에서 압축강도가 물-결합재비의 감소에 따라서 비례적으로 증가되나 이들 값이하에서는 강도의 변동이 크게 나타났다(그림.4, 그림.5).

따라서 실리카흄을 혼입한 콘크리트는 물-결합재비가 약20%이상의 범위에서 압축강도와 결합재-물비가 비례관계에 있으나 그 이하에서는 강도증진이 거의 없거나 오히려 강도가 감소되는 경향이 나타났다.

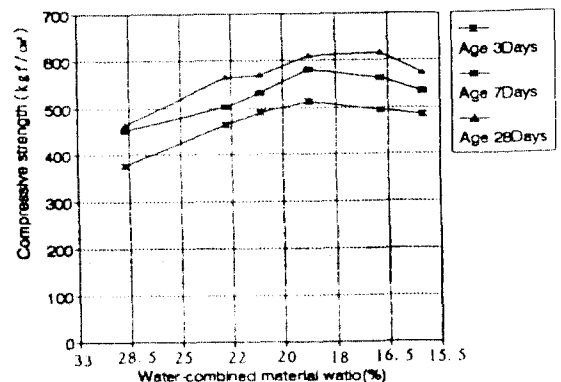


그림.3 콘크리트의 물-결합재비와 압축강도(하천사)

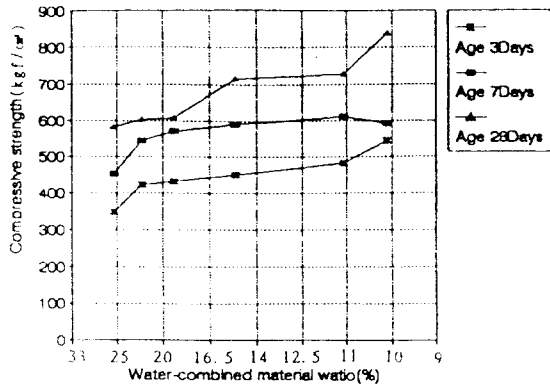


그림.4 콘크리트의 물-결합재비와 압축강도(당진해사)

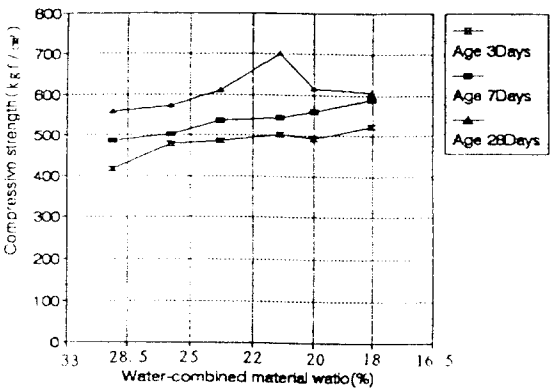


그림.5 콘크리트의 물-결합재비와 압축강도(해남해사)

### 3.1.2 인장 및 휨강도

실리카흙을 혼입한 콘크리트의 단위결합재량에 따른 압축강도에 대한 인장강도의 비율은 기준골재로서 하천사 콘크리트가 4.5~7.3%, 당진 및 해남해사 콘크리트가 각각 3.8~5.3%, 4.1~6.2%로 나타났으며, 압축강도에 대한 휨강도의 비율은 하천사 콘크리트가 17.8~20.5%, 당진 및 해남해사 콘크리트가 각각 13.2~19.4%, 16.4~19.1로 나타났다.

따라서 실리카흙을 혼입한 하천사, 해사 콘크리트의 인장 및 휨강도는 각각 압축강도의 1/13.5~1/26 및 1/5~1/7.5을 나타냈고, 또한 이들 콘크리트의 휨강도는 인장강도의 2.7~4.7배로 나타났다.

### 3.1.3 탄성계수

실리카흙을 혼입한 콘크리트의 탄성계수는 하천사 콘크리트의 경우 콘크리트 표준시방서의 계산식( $E_c = w^{1.5} \times 4,270 \sqrt{\sigma_{ck}} \text{ kgf/cm}^2$ )이 최고 9%까지 큰값을 나타내며 당진 및 해남해사 콘크리트의 경우는 각각 14%, 13%까지 큰값을 나타냈다

따라서 합리적인 구조설계자료를 제시하기 위해서는 고품질 콘크리트에 관한 탄성계수 적용식 마련이 시급한 실정이다

### 3.2 고품질 콘크리트의 내구성

실리카흙을 혼입한 콘크리트의 부식촉진시험 결과는 해남해사(염분함량:0.177%)를 사용한 콘크리트의 경우 시험한 전시료가 부식이 발생되지 않았으며, 당진해사(염분함량 : 0.202%)를 사용한 콘크리트의 경우도 단위결합재량 450kg/m³(철근의 부식면적률 : 1.5%)를 제외하며 전시료가 부식이 발생되지 않았다.

따라서 실리카흙을 혼입한 경우 콘크리트의 강도증진은 물론 콘크리트중 철근의 내부식성도 우수하게 됨을 알 수 있는데, 이것은 수화생성물량의 증대에 따라서 세공경의 크기 및 세공량이 감소되어 시멘트 경화체가 치밀하게 되기 때문이다. 이와 같이 콘크리트의 고강도화와 고내구성화는 각각 별다른 개념이 아니고 모두 콘크리트 조직의 치밀화를 도모하는 것이기 때문에 이들은 매우 밀접한 관계가 있음을 본 연구결과로부터 알 수 있다.

#### 4. 결론

단위결합재량이 450~700kg/m<sup>3</sup>일때 실리카흙을 단위결합재량의 중량비로 15% 혼입한 고품질 콘크리트의 역학적 특성 및 내구성을 시험·연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 실리카흙을 혼입한 고품질 콘크리트는 물-결합재비가 약20%이상의 범위에서 압축강도와 결합재-물비가 비례 관계에 있으나 그 이하에서는 강도증진이 거의 없거나 오히려 강도가 감소되는 경향이 나타났다.

2) 실리카흙을 혼입한 고품질 콘크리트의 인장 및 휨강도는 각각 압축강도의 1/13.5~1/26 및 1/5~1/7.5을 나타냈고, 또한 이들 콘크리트의 휨강도는 인장강도의 2.7~4.7배로 나타났다.

3) 실리카흙을 혼입한 고품질 콘크리트의 탄성계수는 콘크리트 표준시방서의 계산식에 의한 값보다 최대 12%까지 작게 나타났다.

따라서 합리적인 구조설계 자료를 제시하기 위해서는 고품질 콘크리트에 관한 탄성계수 적용식 마련이 시급한 실정이다.

4) 콘크리트중의 철근부식촉진시험 결과, 실리카흙을 혼입한 고품질 콘크리트는 당진해사를 사용한 콘크리트의 경우 단위결합재량 450kg/m<sup>3</sup>를 제외하면 전시료가 부식이 발생되지 않았다.

따라서 실리카흙을 혼입한 콘크리트는 강도증진은 물론 콘크리트중 철근의 내부식성도 매우 우수하게 됨을 알 수 있다.

#### 참 고 문 헌

1. 윤상대, 배수호 : “콘크리트용 대체골재 개발에 관한 연구(최종)”, 농어촌진흥공사 농어촌연구원, 94-05-19, 1994.12
2. 飛坂基夫, “高性能(AE)減水劑を用いた「高強度・高品質コンクリート」の諸性質”, セメント・コンクリート, No.548, 1992. 10, pp.9~18
3. 飛坂基夫, “高性能(AE)減水劑を用いた「高強度・高品質コンクリート」の諸性質”, セメント・コンクリート, No. 549, 1992. 11, pp.9~18
4. H.T. Cao and V. Sirivivatnanon, “Corrosion of Steel in Concrete with and without Silica Fume”, Cement and Concrete Research, Vol.21, 1991, pp.316~324