

실리카흄을 혼합한 콘크리트의 高强度化에 관한 基礎的 研究

A Fundamental Study on the High Strength Concrete
Using Silica Fume

文翰英* · 金眞徹**

Moon, Han Young · Kim, Jin Chul

Abstract

For the purpose of improving the strength of Concrete, Silica Fume which has SiO_2 content of 90% and average particle diameter of $0.2 \mu\text{m}$ was substituted to some extent as a cementitious material of concrete. By means of using high range water reducing admixture and reducing water-cementations material ratio, the high strength mortar and concrete which have compressive strength of 865 kg/cm^2 , 725 kg/cm^2 , respectively were acquired. But the fact that the slump loss according to elapsed time was high and the tensile strength and elastic modulus were not improved sufficiently was the problem to be solved.

요 지

콘크리트의 강도를 크게 향상시키기 위한 연구의 일환으로 이산화규소의 함유량이 90% 이상이며, 평균입경이 $0.2 \mu\text{m}$ 정도되는 비정질의 실리카흄을 결합재의 일부로 대체하고 고성능감수제를 사용하여 물-결합재비를 대폭 감소시킨 모르타와 콘크리트를 제조하여 재령 28일에 압축강도의 최대값이 각각 865 kg/cm^2 와 725 kg/cm^2 의 고강도모르타 및 콘크리트를 얻었다.

그러나 굳지않은 콘크리트의 믹싱후 경과시간에 따른 슬럼프 손실이 큰 점과 아울러 인장강도 및 탄성계수가 크게 향상되지 않는 점이 충분히 해결되지 않았다.

1. 서 론

실리카흄이란 실리콘, 페로실리콘 등을 電氣爐에서 제조할 때 廢가스를 집진하는데 따라 얻어지는 超微粒子의 産業副産物로써, 북유럽과 캐나다에서 콘크리트용 混和材로 사용하기 시작한 것은 약 40년 정도되며, 초기에는 실리카흄의 超微粒子 때문에

콘크리트의 단위수량을 증가시키는 경향이 있어 단순한 시멘트 增量材로 평가 사용하였다고 한다.^(1,2)

그 이후 1960년대 고성능감수제가 개발되면서 실리카흄과 고성능감수제를 함께 사용하여 콘크리트의 성능을 개선하는 효과를 인정받아 세계 각국에서 많은 연구 성과가 발표되었다.⁽³⁻¹¹⁾

주지하는 바와같이 최근에 와서 콘크리트 구조물의 용도와 기능이 매우 다양하게 요구되므로써 이러한 요구조건을 만족시키기 위해서는 먼저 콘크리

* 정회원 · 한양대학교 공과대학 교수

** 정회원 · 동양 중앙연구소 연구원

트의 품질을 대폭 개선시켜 高機能化내지는 高品質化해야 하는 상황에 놓이게 되었다.

그러나 지금까지의 콘크리트용 재료 및 시공기술로서는 콘크리트의 강도에는 한계가 있었으며, 이러한 콘크리트의 한계를 극복하기 위한 한 수단으로 이산화규소(SiO₂)의 함유량이 90% 이상이며, 입자의 크기가 비표면적으로 20~25 m²/g 정도의 超微粒粉末인 실리카흙을 시멘트와 적정량 대체하고 고성능감수제를 사용한 고강도콘크리트를 제조하게 되었다.

그러므로써 시멘트 입자 사이를 micro filler 효과에 의하여 高密度로 충전함과 동시에 장기간에 걸친 포졸란반응으로 시멘트 복합체의 微細構造에서의 不連續領域을 감소시켜주므로써 高密度, 高品質의 高强度콘크리트의 제조가 가능해졌으며, 아울러 水密性, 耐久性을 向上, 改善하는데도 매우 좋은 결과를 얻었다.

본 논문에서는 이러한 시대적 배경을 고려해서 콘크리트의 강도를 대폭 향상시켜 高强度化하기 위한 목적으로 연구를 수행하게 되었으며, 먼저 실리카흙과 고성능감수제를 사용한 모르터를 제조하여 3종류의 양생방법(표준양생, 증기양생 및 오토클레이브양생)에 따른 강도특성을 재량별로 검토하였으며, 다음 단계에서는 굳지않은 콘크리트의 물성 및 경화한 콘크리트의 강도, 탄성계수에 관한 기초실험을 실시하여 그 실험결과에 대하여 고찰하였다.

(1) 시멘트 : 시멘트는 보통포틀랜드시멘트로서 화학성분 및 물리적성질은 표 1과 같다.

(2) 실리카흙 : 실험에 사용한 실리카흙은 노르웨이산 Elkem micro-silica 로서 화학성분 및 물리적성질은 표 1과 같다.

표 1에서 실리카흙의 비표면적은 시멘트의 약 64배 되는 초미립자임을 알 수 있으며, 실리카흙 입자를 전자현미경으로 20,000배 확대 촬영한 것이 사진 1이며, 이 사진에서 실리카흙 입자는 표면이 매끄럽게 보이는 球形을 띠고 있음을 알 수 있다.

(3) 골재 : 잔골재는 한강산 강모래이며, 굵은골재는 최대치수 19 mm의 부순돌을 사용하였으며 물리적성질은 표 2와 같다.

(4) 고성능감수제 : 나프탈린 슬폰산 폴르마린 고축합물이 주성분으로 비중 1.2, pH 9인 고성능감수제를 사용하였다.

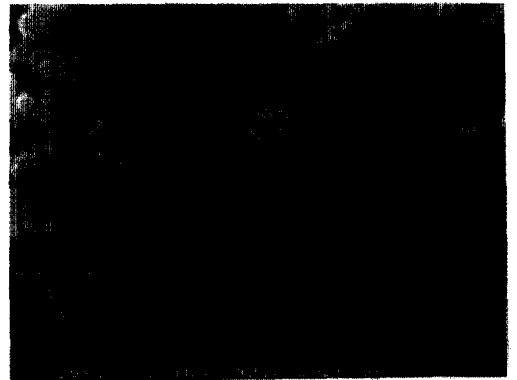


사진 1. 실리카흙 입자의 전자현미경 사진 (20,000배).

2. 실험 개요

2.1 사용 재료

표 1. 시멘트 및 실리카흙의 화학성분 및 물리적성질

분석값 구분	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	Ig loss (%)	비중	비표면적 (cm ² /g)
시멘트	20.8	6.3	3.2	62.0	3.3	2.3	—	—	1.0	3.12	3,200
실리카흙	91.2	1.3	0.8	0.7	0.3	—	0.47	0.84	2.3	2.51	204,700

표 2. 골재의 물리적 성질

항목 구분	굵은골재 최대치수(mm)	비 중	흡수율 (%)	조립율 (F.M)	유기불순물	단위용적중량 (kg/m ³)	실적율 (%)
잔 골 재	—	2.60	1.35	2.21	양호	1,620	61.8
굵은골재	19	2.63	1.40	6.75	—	1,521	58.0

2.2 실험 방법

(1) 믹싱 방법 : 모르터의 경우 믹서 용량 3/와 8/의 2종류를 사용하여 KS L 5105에 의하여 모르터를 제조하였으며, 콘크리트의 경우 용량 50/, 60 rpm의 강제식 믹서를 사용하여 3분 30초 동안 믹싱하였다.

(2) 슬럼프 시험 : 콘크리트 믹싱후 경과 시간에 따른 슬럼프 손실량을 알아보기 위하여 강제식 믹서에서 혼합된 콘크리트를 가정식 믹서에 옮겨 2 rpm으로 회전시키면서 90분 동안 5단계로 슬럼프 값을 측정하였다.

(3) 응결시험 : 굳지않은 콘크리트를 No.4체로 쳐서 굽은골재를 제거하고 모르터 시료만으로 KS F 2436의 관입저항침에 의한 응결시간을 측정하였다.

(4) 양생방법 : 모르터의 양생방법은 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 표준양생 이외에 증기 및 오토클레이브양생을 실시하였다. 증기양생은 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 10시간 정도 전치양생하고 시간당 15°C 로써 3시간 동안 온도상승시켜 최고온도 65°C 4시간의 등온양생기간을 거쳐 시간당 9°C 5시간의 온도강하기간을 거치는 과정으로 실시하였으며, 오토클레이브양생은 전치양생 13시간을 거쳐 시간당 3.3 kg/cm^2 승압기간 3시간, 10 kg/cm^2 3시간의 등온등압기간 및 3.3 kg/cm^2 3시간의 강압 온도강하기간을 거쳐 표준양생을 실시하였다.

(5) 강도시험 : 모르터는 $5 \times 5 \text{ cm}$ 입방체 공시체를 제작 1일후 탈형하여 3종류의 양생방법으로 제조한 공시체를 KS L 5105에 의하여 강도를 측정하였다. 한편 콘크리트는 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ 원주형 공시체를 제조하여 KS F 2505에 의하여 강도를 측정하였다.

2.3 모르터 및 콘크리트의 배합

모르터의 배합은 모래-결합재비 2.0, 실리카흙 혼합물 0, 10, 15 및 20%, 물-결합재비 25, 30, 35 및 38%, 고성능감수제 사용량 0, 0.6, 1.2, 1.8 및 2.4%로 변화시킨 총 16종류였으며, 잔골재는 강모래와 표준모래를 사용하였다.

한편 콘크리트의 배합은 단위시멘트량 500 및 600 kg, 물-결합재비 26, 30 및 34%, 실리카흙 혼합물 0, 10 및 20%, 잔골재를 38%로써 총 9종류의 콘크리트에 대하여 목표슬럼프 $8 \pm 1 \text{ cm}$ 가 되도록 정하였다.

3. 실리카흙 혼합 모르터의 실험결과에 대한 고찰

3.1 실리카흙의 혼합률이 강도에 미치는 영향

실리카흙을 시멘트 증량의 4단계로 혼합한 모르터를 표준양생과 증기양생을 실시하여 재령 1일로부터 재령 91일까지 압축강도를 측정한 결과가 그림 1이다.

이 그림에서 재령 1일의 압축강도를 제외하고는 실리카흙의 혼합률이 증가하는데 따라 압축강도가 증가함을 알 수 있으며 강도 증진효과는 증기양생보다는 표준양생이 더 크게 나타났다. 그러나 실리카흙을 혼합한 모르터의 증기양생 1일만에 561 kg/cm^2 이라는 높은 강도를 나타내었으며, 재령 3일까지는 증기양생의 효과가 컸으나 재령 28일 이후부터는 표준양생의 효과가 훨씬 큼을 알 수 있다.

실리카흙을 혼합함으로써 재령의 증가와 더불어 강도가 증진하는 것은 초미립자인 실리카흙이 시멘트 입자 사이의 공극을 밀실하게 채워 모르터를 치밀한 구조로 만들어 주는 효과 일명 micro filler효과에 따른 고밀도의 충전성과 시멘트 수화로 생성되는 수산화 칼슘과의 포졸란반응을 일으키는데 기인한다고 생각된다.

한편 그림 2는 강모래를 사용하여 표준양생한 모르터의 압축강도를 나타낸 것으로써, 플로우 값은

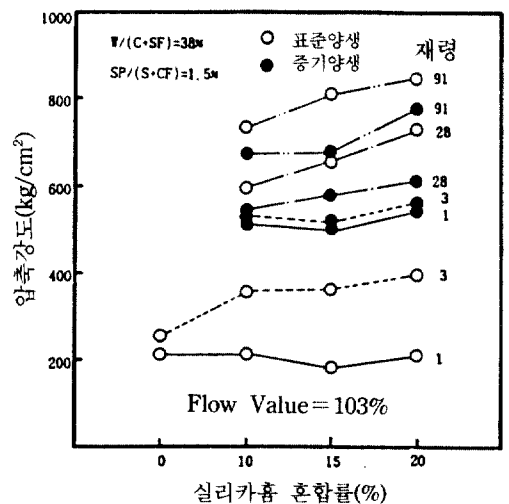


그림 1. 실리카흙 혼합률과 모르터의 압축강도와의 관계 (표준모래).

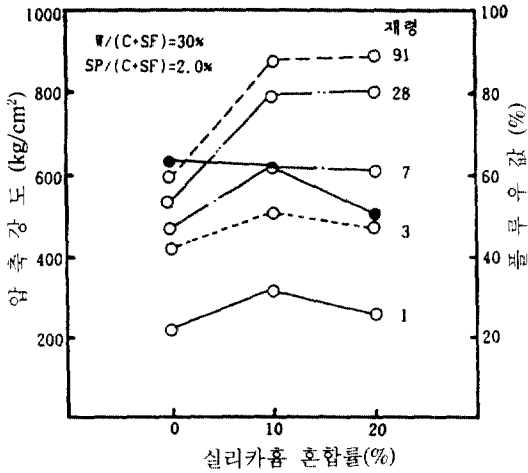


그림 2. 실리카흙 혼합률과 모르터의 압축강도와와의 관계 (강모래).

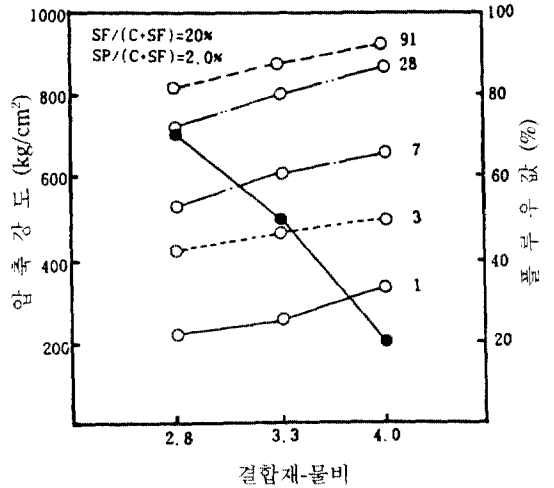


그림 3. 결합재-물비에 따른 모르터의 압축강도 (강모래).

실리카흙의 혼합률이 증가하는데 따라 감소되었으며, 그림 1과는 달리 실리카흙 혼합률 10%인 모르터가 재령 7일까지는 강도가 크게 나타났으며, 재령 28일 이후는 실리카흙 혼합률 20%인 모르터의 강도가 가장 크게 나타났다. 이러한 강도경향은 실리카흙의 실리카성분에 의한 포졸란활성이 활발히 진행되어 강도증진에 기여하였다고 생각된다.

3.2 결합재-물비와 압축강도와와의 관계

실리카흙의 혼합률 20%, 고성능감수제의 사용량 2.0%인 모르터의 결합재-물비 2.8, 3.3 및 4.0의 3 종류에 대한 재령 91일까지의 압축강도 시험결과를 나타낸 것이 그림 3이다.

이 그림에서 실리카흙을 혼합한 모르터의 경우에는 결합재-물비가 증가하는데 따라 압축강도가 재령에 관계없이 거의 직선적으로 증가하고 있음을 알 수 있으며 결합재-물비 4.0인 모르터의 재령 91일의 압축강도가 900 kg/cm² 이상의 고강도를 얻을 수 있었다. 이때 모르터의 플로우 값은 결합재-물비의 증가에 따라 급격하게 감소되는 경향을 보이고 있으며 결합재-물비 4.0인 모르터의 경우 플로우 값 20% 정도의 매우 뒤틀축이 되므로 공시체 제조에 어려움이 있었다.

3.3 양생방법이 모르터의 강도에 미치는 영향

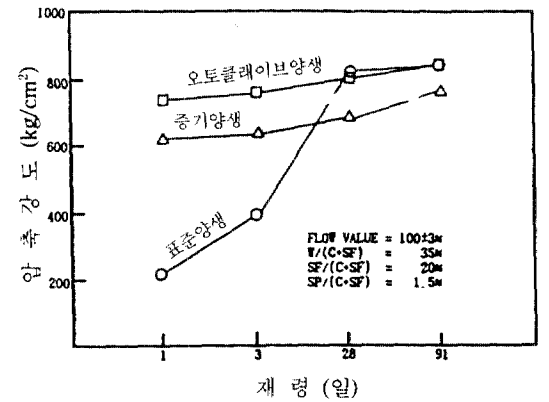


그림 4. 양생방법에 따른 모르터의 재령과 압축강도와의 관계(표준모래).

모르터 및 콘크리트제품을 성형후 초기에 소요의 강도를 얻어 빨리 탈형하여 거푸집의 회전율을 높이고, 제품을 빨리 출하하므로써 경제성을 높이기 위하여 증기양생, 오토클레이브양생 등과 같은 촉진양생을 실시한다. 본 실험에서는 양생방법이 실리카흙을 혼합한 모르터의 압축강도에 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위하여 표준양생, 증기양생 및 오토클레이브양생을 실시하여 재령 91일 까지의 압축강도를 측정된 결과가 그림 4이다.

이 그림에서 알 수 있듯이 증기양생과 오토클레이브양생은 재령 1일만에 611 kg/cm², 735 kg/cm²

정도의 고강도를 발현하는데 비해 표준양생한 모르터의 경우, 재령 3일의 압축강도는 매우 작았으나 그 이후 재령과 더불어 압축강도가 크게 증진되어 오토클레이브양생한 모르터의 강도와 거의 같은 반면 증기양생한 모르터의 압축강도 증진은 완만함을 알 수 있었다.

3.4 고성능감수제의 사용량에 따른 압축강도

초미립자인 실리카흄을 시멘트에 혼합한 모르터나 콘크리트의 경우 고강도를 얻기 위하여 고성능감수제의 사용은 필수불가결하다. 그래서 본 실험에서는 실리카흄 혼합 모르터에서 고성능감수제의 적정사용량과 그 효과를 알아보기 위하여 고성능감수제의 사용량을 5단계로 변화시켜 재령 91일까지의 압축강도를 측정하는 것이 그림 5이다.

동일 플로우 값($110 \pm 3\%$)을 얻기 위하여 고성능감수제의 사용량을 0.6%씩 증가시키는데 따른 물-결합재비는 감소되었으며, 1.2%를 넘어서면서 물-결합재비가 3%씩 감소하는 경향을 보였다.

이 그림에서 고성능감수제의 사용량이 증가하는데 따라 물-결합재비가 대폭 감소되어 감수효과가 우수함을 알 수 있으나 고성능감수제의 사용량이 2.4%에서 재령 28일 이후의 압축강도가 오히려 감소되므로써 고성능감수제 사용량의 최적값이 존재함을 알 수 있으며 과다하게 사용하면 오히려 강도가 둔화됨을 시사하는 결과로 생각되었다.

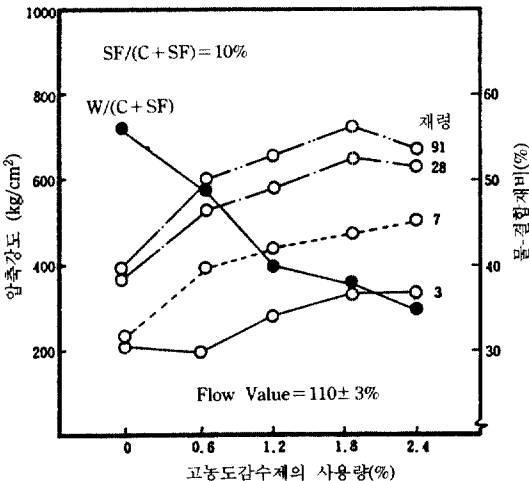


그림 5. 고성능감수제의 사용량에 따른 모르터의 압축강도 및 물-결합재비와의 관계 (표준모래).

3.5 믹싱후 경과시간에 따른 모르터의 콘시스턴스

굳지않은 모르터의 믹싱후 경과시간에 따른 작업성을 알아보기 위하여 믹싱후 일정시간까지 모르터의 콘시스턴스를 측정하는 방법들이 채택되고 있다. 여기서는 실리카흄을 20%까지 혼합한 물-결합재비 35%의 모르터를 믹싱후 2시간까지 플로우 시험을 실시한 결과를 정리한 것이 그림 6이다. 이때 실리카흄의 혼합률 0, 10 및 20%에서 각각 플로우 값은 110, 128 및 75%이며 실리카흄 혼합률 10%에서 가장 큰 플로우 값을 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있듯이 경과시간 30분 정도에서 실리카흄을 혼합한 모르터의 플로우 값의 손실률은 보통 모르터와 얼마간 상이하게 나타났다. 그러나 경과시간 60분부터 실리카흄의 혼합률의 증가에 따라 모르터의 플로우 값의 손실률이 증가되므로 시공성과 강도를 고려하여 실리카흄의 적정 혼합률을 정함이 좋겠다고 생각되었다.

4. 실리카흄 혼합 콘크리트의 실험결과에 대한 고찰

4.1 콘크리트의 응결에 대하여

물-결합재비 30%, 슬럼프 12±1cm, 실리카흄 혼합률 0, 10 및 20% (이때 고성능감수제의 사용량은 0.63, 0.71 및 1.17%) 인 굳지않은 콘크리트의 응결시간을 알아보기 위하여 No.4체로 굵은골재를 제거한 모르터 시료의 관입저항이 35 kg/cm², 280 kg/cm²

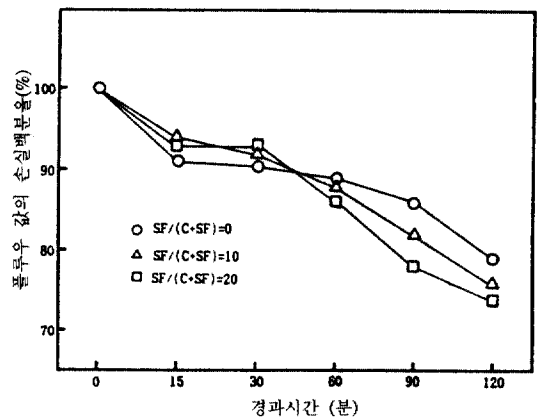


그림 6. 모르터의 경과시간별 플로우 값의 손실률.

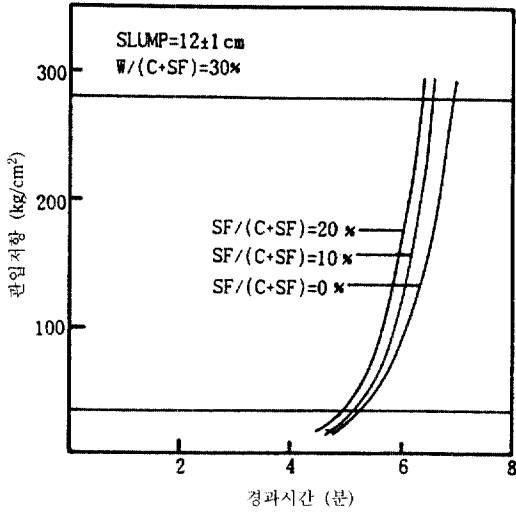


그림 7. 콘크리트의 응결시간.

가 될 때까지의 소요시간을 각각 측정하여 초결시간과 종결시간으로 정리한 것이 그림 7이다.

이 그림에서 3종류 콘크리트의 응결시간이 약간 상이함을 알 수 있다. 다시 말해서 실리카흙을 혼합하는데 따라 초결시간과 종결시간이 다같이 빨라지고 있으며 실리카흙 혼합물 20%의 경우는 종결시간이 약 50분 정도 빨라지는 결과를 나타내었다. 이러한 실험결과는 Almedia, Gonçalves씨가 발표한 실리카흙을 혼합한 고강도콘크리트의 응결시간에 관한 실험결과⁽¹²⁾와 거의 유사함을 알 수 있으나 실리카흙을 혼합함으로써 응결시간이 빨라지는 원인에 대해서는 아직 명확한 답을 얻지 못했다.

4.2 굳지않은 콘크리트의 슬럼프 손실

실리카흙을 혼합한 고강도콘크리트의 시공성과 관련된 자료를 얻기 위한 목적으로 물-결합재비 34%, 목표슬럼프 18±1.5 cm, 실리카흙 혼합률 0, 10 및 20%, 고성능감수제의 사용량 0.5, 0.73 및 1.1%로 혼합한 고강도콘크리트의 믹싱후 90분간의 슬럼프의 변화를 손실백분율로 나타낸 것이 그림 8이다.

이 그림에서 알 수 있듯이 실리카흙의 혼합률에 따라 약간 상이하긴 하지만, 3종류의 콘크리트가 경과시간 15분만에 약 60% 이상의 급격한 슬럼프 손실을 나타내었으며 경과시간 90분에는 슬럼프가

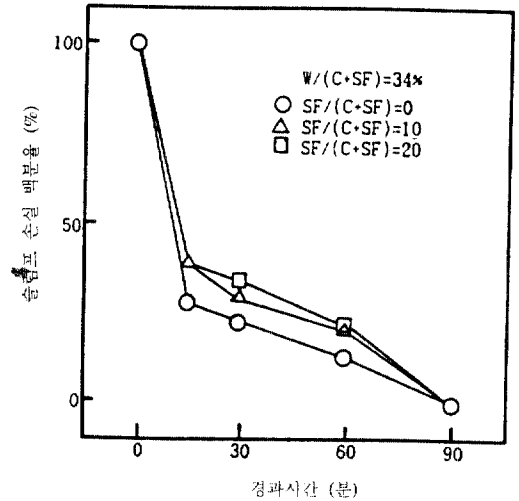


그림 8. 경과시간에 따른 슬럼프 값의 변화.

0에 도달하는 결과로 나타났다.

고성능감수제를 사용한 고강도콘크리트의 믹싱후 경과시간에 따른 슬럼프 손실 문제가 아직도 충분히 해결되지 않고 있는 문제점으로 지적되어 왔으나,⁽¹³⁾ 실리카흙 혼합 고강도콘크리트의 경우에도 예외가 아님을 알 수 있었으며 슬럼프 손실에 대한 대책이 요망되었다.

4.3 경화한 콘크리트의 강도에 대하여

실리카흙 혼합률 0, 10 및 20% 단위시멘트량 500 및 600 kg, 물-결합재비 26, 30 및 34%인 고강도용 콘크리트의 9 배합에 대하여 압축강도, 인장강도 및 탄성계수를 측정하여 정리한 것이 그림 9~그림 13이다.

먼저 실리카흙 혼합률에 따른 콘크리트의 강도를 재령별로 정리한 것이 그림 9이다.

이 그림에서 실리카흙 20% 혼합 콘크리트의 압축강도가 재령 28일에 725 kg/cm², 재령 91일에 813 kg/cm²의 큰 강도를 나타냄으로서 보통콘크리트보다 약 20% 정도 강도가 증진되었으며, 실리카흙의 혼합이 강도를 증진시키는데 유효함을 알 수 있다.

실리카흙을 20% 혼합한 고강도콘크리트의 결합재-물비와 강도와의 관계를 알아보기 위하여 결합재-물비 2.9, 3.3 및 3.8의 3종류에 대한 콘크리트의 압축강도를 나타낸 것이 그림 10이다. 이 그림에서

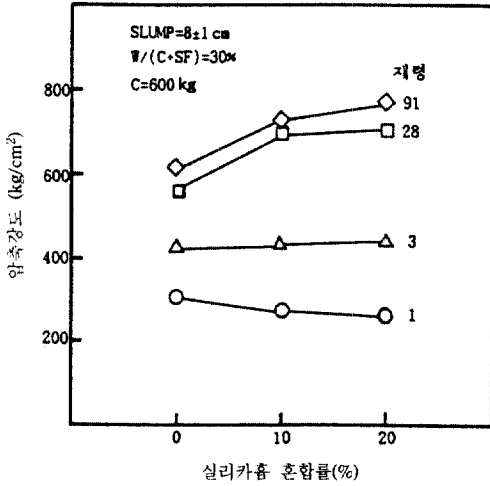


그림 9. 실리카흙 혼합률과 압축강도와의 관계.

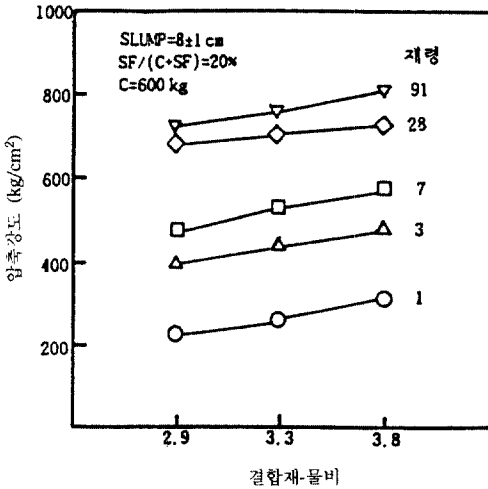


그림 10. 결합재-물비와 압축강도와의 관계.

실리카흙을 혼합한 고강도콘크리트의 경우에도 결합재-물비와 압축강도와의 사이에는 재령에 관계없이 보통콘크리트와 비슷한 관계가 있음을 알 수 있다.

실리카흙을 혼합한 콘크리트의 고강도를 얻기 위해서 필요로 하는 단위시멘트량을 알아보기 위하여 단위시멘트량 500 및 600 kg의 두 종류를 선택하여 강도시험을 실시한 결과가 그림 11이다. 이 그림에서 단위시멘트량 600 kg일 때 압축강도의 최대값을 나타내었으며, 단위시멘트량 500 kg에 비하여 압축강도가 약 9% 큼을 알 수 있다.

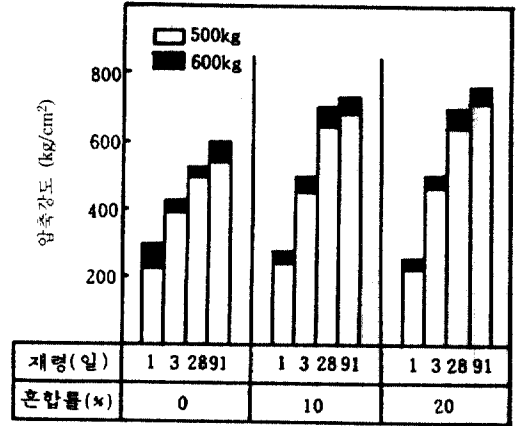


그림 11. 단위시멘트량에 따른 압축강도.

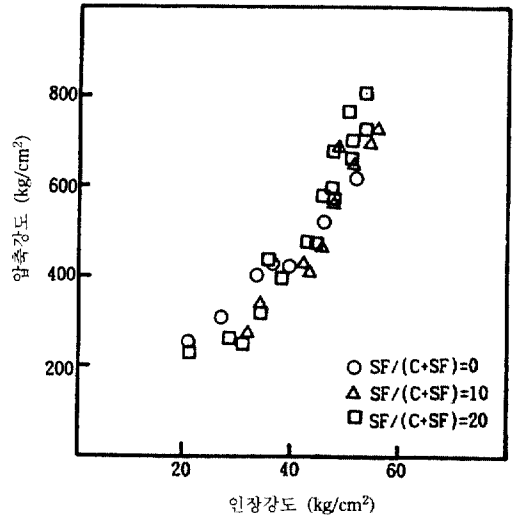


그림 12. 압축강도와 인장강도와의 관계.

고성능감수제를 사용한 일반적인 고강도콘크리트의 경우에도 단위시멘트량 600~700kg 정도에서 강도의 최대값을 나타내는 결과와 유사함을 알 수 있었다.⁽¹⁴⁾

이번에는 실리카흙을 혼합한 고강도콘크리트의 압축강도와 인장강도 사이에 어떤 관계가 있는지 알아보기 위하여 실시한 실험결과를 정리한 것이 그림 12이다. 이 그림에서 실리카흙의 혼합률에 따른 상관관계식은 다음과 같으며, 상관계수 0.95 이상으로 매우 크며, σ_c/σ_t 의 비는 보통콘크리트와 비슷한 10~12 정도를 나타내었다.

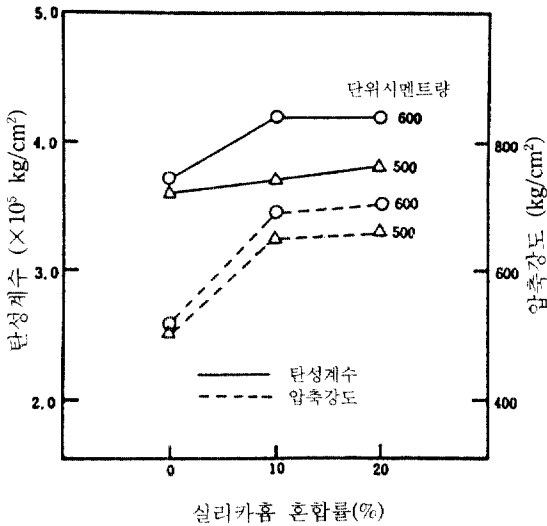


그림 13. 실리카흙 혼합물과 압축강도 및 탄성계수와 의 관계.(재령 28일)

$$\sigma_0 = 11.6\sigma_1 - 4.6 \quad (r=0.99)$$

$$\sigma_{10} = 18.5\sigma_1 - 318.5 \quad (r=0.99)$$

$$\sigma_{20} = 17.0\sigma_1 - 210.1 \quad (r=0.95)$$

끝으로 실리카흙 혼합물 0, 10 및 20%로 변화시킨 단위시멘트량 500 및 600 kg의 고강도콘크리트의 재령 28일에서의 정탄성계수와 압축강도를 나타낸 것이 그림 13이다.

이 그림에서 단위시멘트량 600 kg, 실리카흙 20%로 혼합한 콘크리트의 압축강도가 가장 크며, 정탄성계수도 압축강도가 클수록 크게 나타났으며, 정탄성계수의 최대값은 $4.3 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 정도였다. 이 값은 ACI에서 제안한 식⁽¹⁵⁾에 의해 구한 값과 거의 동일하거나 약간 낮은 값에 해당됨을 알 수 있었다.

5. 결 론

1) 실리카흙 혼합물 20%, 고성능감수제 사용량 2.0% 및 물-결합재비 25%로 대폭 감소시킨 모르터의 재령 28일과 91일의 압축강도가 각각 865 kg/cm^2 와 920 kg/cm^2 의 고강도를 얻을 수 있었다.

2) 실리카흙 혼합 모르터를 증기양생 및 오토클레이브양생한 결과 초기재령에서는 표준양생한 모

르터보다 높은 강도를 얻을 수 있었으나, 재령 28일 이후의 강도는 오히려 낮거나 비슷한 결과임을 알 수 있었다.

3) 실리카흙 혼합 모르터 및 콘크리트의 믹싱후 경과시간에 따른 유동성의 변화를 측정해 본 결과 고강도용 모르터 및 콘크리트와 비슷한 유동성 손실 경향을 나타내는 문제점이 있으므로 시공성을 고려할 때 적절한 대책이 요망된다.

4) 실리카흙 혼합 콘크리트의 재령 28일과 91일의 압축강도가 각각 725 kg/cm^2 및 813 kg/cm^2 의 고강도를 나타내었으나, 인장강도와 탄성계수 값은 크게 향상되지 않았으며, 고강도를 얻기 위하여 단위시멘트량은 600 kg 이상이 요망된다.

5) 실리카흙 혼합 고강도콘크리트의 경우 물-결합재비와 압축강도 및 인장강도와 인장강도 사이에는 보통콘크리트와 비슷한 경향의 직선적인 상관관계가 있었으며, 굳지않은 콘크리트의 응결시간을 측정해본 결과 실리카흙의 혼합물에 따라 초결시간과 종결시간이 빨라지는 결과를 나타내었다.

감사의 말

본 연구는 1991년 한국과학재단의 목적기초 연구비에 의하여 수행된 연구의 일부로써, 이에 재단 당국에 깊이 감사드립니다.

參 考 文 獻

1. Reported by ACI Committee 226, Silica Fume in Concrete, *ACI Materials Journal*, Mar-Apr, 1987.
2. 長瀧重義, シリカフュームのコンクリートへの利用の現狀と展望, *コンクリート工學*, Vol. 29, No. 4, 1991.
3. V. M. Malhotra, Fly Ash, Silica Fume Concrete-Properties, Applications and Limitations, *Concrete International*, Vol. 5, No. 5, pp. 40-46, May, 1983.
4. V. M. Malhotra, Fly Ash, Silica Fume, Slag & Other Mineral By-Products in Concrete, ACI Publication, SP-79. Vol. 1, 2, 1983.
5. P. Jahren, Use of Silica Fume, Slag & Other Mineral By-Products in Concrete, ACI Publication, SP-79. pp.625 - 642, 1983.
6. I. Meland, Influence of Condensed Silica Fume and

- Fly Ash on the Heat Evolution in Cement Pastes*, ACI Publication, SP-79. Vol. , pp.665 - 676, 1983.
7. H. H. Bache, *Densified Cement/Ultra-Fine Particle-Based Materials, Presented at the Second International Conference on Superplasticizers in Concrete*, Ottawa, Canada, June, 1981.
 8. V.M. Malhotra, *Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Proceedings Third International Conference*, Trondheim, Norway, ACI SP-114. 1989.
 9. V.M. Malhotra, *Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Proceedings Fourth International Conference*, Istanbul, Turkey, ACI SP-132. May, 1992.
 10. 李柄浩, 실리카흙 콘크리트의 工學的 特性에 관한 實驗的 研究, 忠南大學校 大學院, 博士學位論文, 1991.2.
 11. 河野 清 외 3명, 高粉末度のシリカ微粉末を用いた 콘크리트의 配合와 壓縮強度, *セメント.콘크리트 論文集*, pp.158 - 163, No.44, 1990.
 12. I.R. Almedia, Gonçalves, *Properties of Freshly Mixed High-Strength Concrete, Properties of Fresh Concrete*, Chapman and Hall, pp.227 - 234, 1990.
 13. 文翰英, 金基亨, 고성능감수제를 사용한 시멘트 복합체의 유동성 손실에 대한 연구, *콘크리트학회지*, 제 4권, 제 2호, 1992.6.
 14. 文翰英, 高強度콘크리트의 諸性質, *콘크리트工學 講座(III)*, *大韓土木學會誌*, 第 27卷, 第 2號, pp.41 - 49, 1979.4.
 15. Reported by ACI Committee 363, *State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete, ACI 363 R-84*, ACI Manual of Concrete Practice, PART.1, 1990.
(接受 : 1992. 7. 23)