

# 실리카흙을 사용한 高強度콘크리트의 力學的 特性和 最適配合研究

Mechanical Behavior and Optimum Mix Design of  
High Strength Concrete  
with Condensed Silica Fume Admixtures

吳 炳 煥,\* 嚴 柱 勇\*\*  
Oh, Byung Hwan Um, Joo Yong

## 요 약

本 研究에서는 실리카 흙을 사용한 高強度콘크리트의 製造와 力學的 特性 및 最適配合에 대한 실험적 研究를 수행하였다. 本 研究에서는 주요 실험변수를 물-시멘트비와 혼화제인 실리카 흙의 혼입량으로 정하였으며, 압축강도 및 휨강도와 할렬인장강도 특성을 분석하였다. 실리카 흙의 혼입으로 強度가 증가함을 발견하였으나 어느 범위 이상의 과도한 혼입은 오히려 강도를 저해하는 것으로 나타났다. 물-시멘트비 0.28에서는 실리카 흙 혼입량이 5%일 때 최대의 강도가 나타났고, 물-시멘트비 0.40에서는 15%, 물-시멘트비 0.55에서는 20%혼입에서 가장 큰 強度가 나타났다. 또한 본 연구에서는 압축강도와 물-시멘트비 및 실리카 흙량 사이의 관계를 도출하여 그 관계식을 제시하였으며, 이 式으로부터 소요강도를 위한 各 配合變數를 유추할 수 있다. 본 연구결과 물-시멘트비 효과와 실리카 흙의 효과가 상쇄되는 구간이 존재하며, 따라서 이들 효과를 함께 고려한 최적배합을 도출하여 제시하고 있다.

## ABSTRACT

Presented is a study on the mechanical behavior and optimum mix design characteristics of high-strength concrete with condensed silica-fume admixtures. The major test variables for the present experiment were the water-cement ratios and the amount of condensed-silica fume. The strength characteristics in compression, flexure and splitting-tension were investigated. The strength increase was observed up to a certain level due to the addition of condensed-silica fume. It was found that there exists an optimum amount of condensed silica fume which yields the highest strength at each specified water-cement ratio. The highest strengths were observed at the 5% addition of condensed-silica fume(CSF) for  $W/C=0.28$ , at the 15% addition of CSF for  $W/C=0.40$ , and at the 20% addition of CSF for  $W/C=0.55$ , respectively. The present study proposes the prediction equations which give the inter-relationships among compressive strengths, water-cement ratios, and the amounts of CSF. The effects of water-cement ratios, and CSF contents on the compressive strength of concrete were thoroughly studied and the present study shows the optimum mix-design characteristics of high-strength concrete.

\* 정희원, 서울대학교 공과대학 副教授, 土木工學科  
\*\* 정희원, 서울대학교 대학원 토목공학과, 박사과정

● 1989.9.2 접수. 본 논문에 대한 토론을 1990.3.31까지 본학회에 보내주시면 1990.6월호에 그 결과를 게재해 드리겠습니다.

## 1. 서 론

공학 전반에 걸친 최근의 연구현황은 각 분야에서 요구되는 신소재의 개발에 역점을 두고 있는 것으로 나타나고 있다. 건설분야에서도 구조물의 대형화와 고층화 추세에 따라, 그리고 복잡한 특수구조물의 건설이 증가함에 따라 강도가 높은 건설재료가 절실히 요구되고 있다. 고강도콘크리트의 개발은 이러한 요구에 부응하여 지난 10여년간 비약적인 발전을 해왔다.

고강도콘크리트란 종래의 콘크리트보다 강도가 높은 콘크리트를 말하는 것으로서, 그 의미에 있어서는 어느 정도 상대성과 시대성을 갖고 있지만, 현재상태에서는 압축강도가  $420\text{kg}/\text{cm}^2$  (=6,000psi) 이상인 콘크리트를 고강도콘크리트로 분류하는 것이 일반적이다.

이러한 고강도콘크리트는 높은 압축강도 뿐만 아니라 인장 및 부착강도가 아울러 증가하게 되고, 또한 크립과 건조수축 변형의 감소 등 콘크리트의 제 성질에 있어서 상당한 개선을 가져오게 된다.

최근들어 세계 주요국가에서는 고강도콘크리트의 사용이 계속 증가하고 있고, 더욱 높은 품질의 콘크리트를 얻기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(1)(9)(17)(18)(22)</sup> 미국에서는 Water Tower Place 라는 총 79층의 철근콘크리트 고층건물에 압축강도  $630\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 고강도콘크리트를 사용한 예를 비롯하여 많은 고층건물들이 고강도콘크리트를 사용하고 있고 아주 최근에는  $800\sim 900\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 고강도콘크리트를 개발하고 있다. 일본에서도 우다나베 철도교량 등에 약  $800\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 고강도콘크리트를 사용한 예가 보고되고 있다.

그러나 우리나라에서는 아직 압축강도  $500\text{kg}/\text{cm}^2$  이상의 고강도콘크리트를 실제 구조물에 사용한 예를 찾아보기 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 고강도 콘크리트의 제조와 그 역학적특성규명에 그 주목적을 두고 연구를 수행하였다. 특히, 최근 강도발현에 많은 기여를 하

는 것으로 알려진 실리카흄(Condensed Silica Fume ; CSF)을 사용하여, 실리카흄이 강도에 미치는 영향을 분석하고, 시멘트량과 물시멘트비(W/C비)등이 강도에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 재령별 고강도콘크리트의 강도발현 상태를 분석하였으며, 각 물시멘트비에서 강도발현을 가장 높게 하는 혼화제(실리카흄)의 최적혼입량을 결정하였다. 아울러 각 영향인자에 따른 고강도콘크리트의 제 특성을 분석 고찰하였다.

## 2. 고강도콘크리트 실험

### 2.1. 실험 개요

보통콘크리트의 제조에서와 마찬가지로 물-시멘트비는 고강도콘크리트 제조에 있어서 가장 중요한 변수가 된다. 일반적으로 고강도콘크리트는 물-시멘트비가 낮아야 하며 최근에 세계 주요국가에서 연구되고 있는 물-시멘트비의 범위는 약 27~50% 정도가 많이 사용되고 있다. 물-시멘트비가 낮을수록 일반적으로 강도발현이 크므로 적정 물-시멘트비는 강도와 내구성 등을 고려하여 결정되어야 할 것이다.

본 연구에서는 높은 강도를 얻을 수 있는 범위에서부터, 경제적이고 실용적인 보통의 범위까지 물-시멘트비를 정하였으며, 그 범위는 W/C=0.28에서 W/C=0.55까지 변화시켰다. 즉, 물-시멘트비는 각각 W/C=0.28, 0.40, 0.55의 세가지 시리즈로 하였고, 시멘트는 조기강도발현이 좋은 3종 포틀랜드시멘트를 사용하였다. 고강도발현을 위한 혼화제(CSF)는 단위 시멘트량에 대하여 각각 0%, 5%, 10%, 15%, 20%로 각각 변화시켰다. 또한, 낮은 물-시멘트비 등으로 인한 流動性的의 악화를 방지하기 위하여 혼화제로서 고성능유동화제 Mighty-150을 사용하였다. 강도실험은 재령에 따라 3일, 7일, 28일, 90일 강도를 측정하였다.

## 2.2. 實驗材料 및 配合內容

본 연구에서 사용된 혼화제는 1976년 노르웨이에서 개발된 컨덴스드 실리카흄(CSF)으로서 이 혼화제는 강력한 포졸란 재료로서, 제강용 탈산제인 페로 실리콘이나 실리콘 메탈을 전기로에서 제작할 때 발생하는 가스 중에서 얻어지는 산업부산물이다. 이 혼화제의 특징은 포졸란 반응이 극히 크며 비표면적 또한 매우 커서 강도 증진과 장기강도 확보 및 내구성 증진에 우수하다는 것이다. 본 연구에서 사용된 혼화제 실리카흄의 품질특성으로서, 그 성분은  $\text{SiO}_2$ 가 90.07%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 가 0.96%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 가 2.20%,  $\text{CaO}$ =0.35%,  $\text{MgO}$ =0.35%이고, 비표면적은 18~23m<sup>2</sup>/g, 평균입경은 0.13~0.16 $\mu\text{m}$ 의 미세한 입자로서 강력한 포졸란 재료이다.

고강도콘크리트의 제작은 우선적으로 낮은 W/C비가 요구되므로 유동성의 확보가 중요하다. 특히, 본 실험의 경우 고강도 발현을 위해 첨가한 혼화제(CSF)가 비표면적이 매우 크고 이에 따른 함수효과 역시 다른 혼화제보다 상당히 커서 유동성이 더욱 악화된다. 따라서 본 연구에서는 유동성의 확보를 위하여 Sulfonated Naphthalene계의 고성능감수제 Mighty-150을 사용하였다. 그 결과 W/C=0.28과 0.4에서 7±1cm, W/C=0.55에서 13±1cm의 슬럼프를 얻을 수 있었다. 이러한 슬럼프 관리를 통해 물-시멘트비가 일정할 때는 혼화제의 첨가량이 많아질수록 슬럼프값을 유지하기 위해 요구되는 혼화제량 역시 증가한다는 것을 알 수 있었다.

혼화제 첨가량의 증가 정도는 혼화제(실리카흄)량 증가에 따라 거의 일정하지만 물-시멘트비 40%에서보다는 28%에서, 또 혼화제 첨가량이 적은 값에서보다는 많은 값에서 상대적으로 크다는 것을 알 수 있었다. 물-시멘트비와 혼화제 함량에 따른 혼화제 첨가량의 변화를 그림 1과 그림 2에 나타내었다.

실험에 사용된 골재를 살펴보면 조골재의 조립률은 7.15, 세골재의 조립률은 2.20이며 조골재의 최대치수는 20mm이하로 제한하여 사용하였다. 이러한 각 재료를 사용하여 제작한 시편

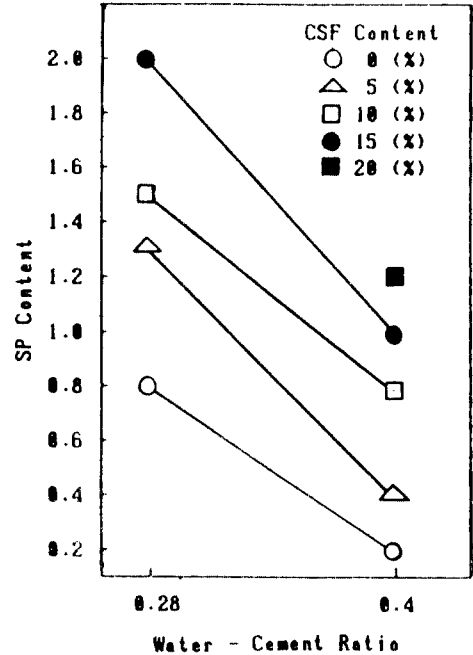


그림 1 W/C비에 따른 혼화제(Mighty-150) 첨가량의 변화

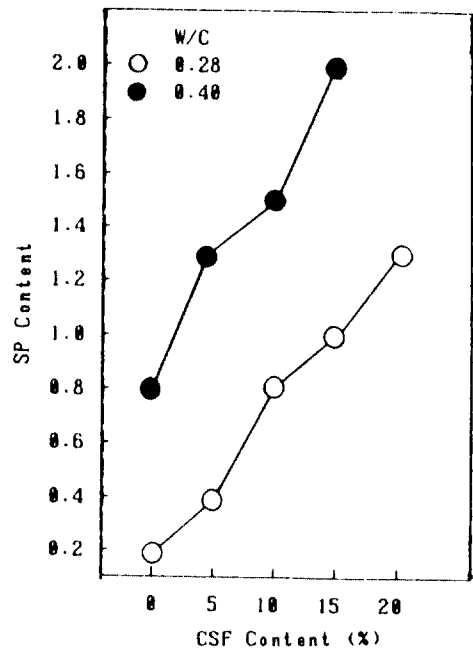


그림 2 CSF혼입량에 따른 혼화제(Mighty-150) 첨가량의 변화

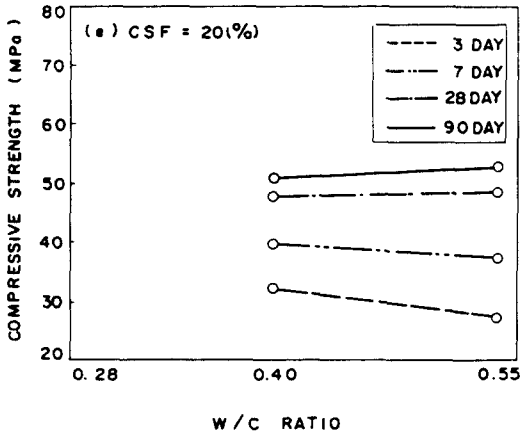
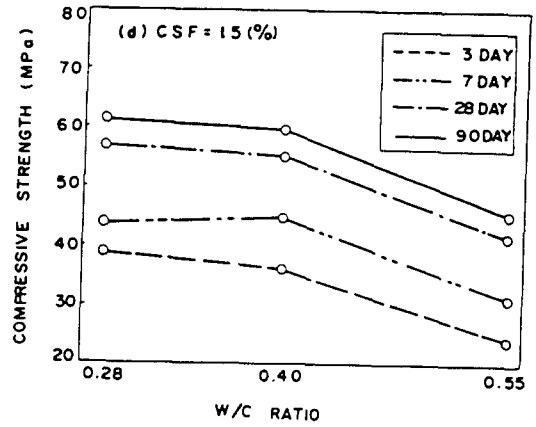
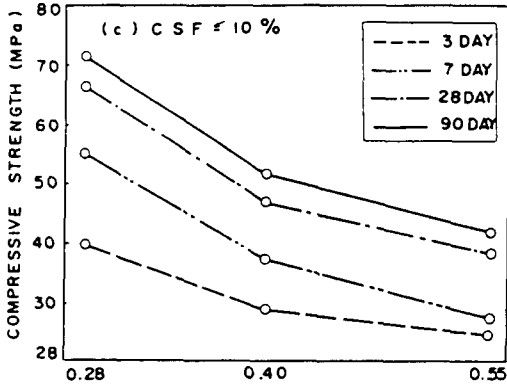
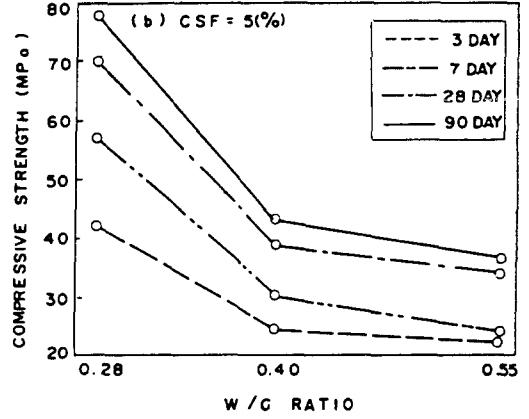
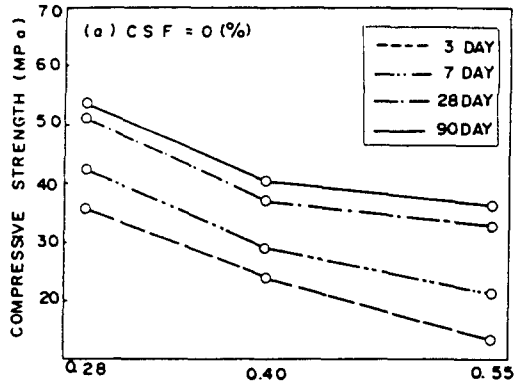


그림 3 물-시멘트비에 따른 재령별 압축강도의 변화

의 기호와 배합설계의 내용은 아래 표 1과 같다. 실험내용은 크게 물-시멘트비에 따라 세가지 시리즈로 분류하였고, A-시리즈는 W/C=0.28, B-시리즈는 W/C=0.40, C-시리즈는 W/C=0.55를 표시하고 있다. 각 시리즈 다음에 나오는 숫자는 혼화재의 혼입량(시멘트량에 대한 %)을 나타낸다.

표 1. 시편기호 및 배합설계내용(단위 kg/m³)

Test Series	Cement	CSF	Water	CA	FA	M150 (%)	Slump (cm)
A-0	500	0	135	1099	733	0.8	7±1cm
A-5	475	25	135	1084	723	1.3	
A-10	450	50	135	1078	718	1.5	
A-15	425	75	135	1070	714	2.0	
B-0	500	0	200	995	663	0.2	7±1cm
B-5	475	25	200	988	659	0.4	
B-10	450	50	200	981	654	0.8	
B-15	425	75	200	974	649	1.0	
B-20	400	100	200	967	645	1.2	
C-0	500	0	275	875	583	0	13±1cm
C-5	475	25	275	868	580	0	
C-10	450	50	275	861	574	0	
C-15	425	75	275	854	569	0	
C-20	400	100	275	847	565	0	

- 註 : (1) C.A : Coarse Aggregate  
 F.A : Fine Aggregate  
 M150 : Mighty-150(시멘트 중량비, %)  
 (2) A ; W/C=0.28, B ; W/C=0.4, C ; W/C=0.55  
 (3) (例) A-5는 W/C=0.28에서 혼화재(CSF) 5% 혼합된 경우를 나타냄.

시편은 제작후 24시간 경과한 다음 탈형하여 20±2°C의 수중에서 각 재령에 대한 양생을 하였다.

### 2.3 실험방법

물-시멘트비와 혼화재 첨가량의 변화에 따른 각각 경우에 대하여 ϕ100×200mm의 실린더 몰드 20개와 100×100×500mm 단면의 빔 몰드 3개씩을 사경식 믹서기 사용시의 표준비비기방법을 통해 제작하였다. 압축강도의 측정을 위하여 3, 7, 90일의 재령에 각 3개씩의 시편을, 28일의 재령에는 5개의 시편을 실험하여 평균하였고, 활렬인장강도 및 휨강도는 3개의 시편을 실험하

여 평균한 값이다. 각 실험은 재하능력 200ton의 만능재료 실험기를 사용하여 수행하였다.

## 3. 실험 결과의 분석 및 검토

### 3.1. 압축강도

각 실험시리즈별로 각 경우에 대하여 실험한 재령별 압축강도는 다음 표 2와 같다.

이 표 2에서 보는 바와 같이 각각의 물-시멘트비(각 시리즈)마다 가장 강도가 높게 나타나는 혼화재의 최적함유량이 존재한다는 것을 알 수 있다. 이것은 어느 한도 이상으로 혼화재의 첨가량이 많아지면 과도한 혼화재가 오히려 강도의 발현을 저해하는 것으로 설명될 수 있다.

표 2. 압축강도 실험결과(MPa)

Test Series	Age(days)	3	7	28	90
A	A-0	35.3	42.2	50.8	53.4
	A-5	41.9	56.9	70.0	77.6
	A-10	39.7	54.9	66.2	71.5
	A-15	38.8	43.8	56.9	61.4
	B	B-0	23.6	28.8	36.8
B-5	24.6	30.6	38.8	43.1	
B-10	28.4	36.9	46.6	51.3	
B-15	36.0	44.7	55.1	59.5	
B-20	32.5	40.0	48.1	51.4	
C	C-0	13.0	20.8	32.5	36.0
	C-5	22.5	24.3	34.3	36.8
	C-10	23.7	26.3	37.5	41.2
	C-15	23.7	30.6	41.2	44.9
	C-20	27.5	37.5	48.8	53.2

즉, W/C=0.28의 경우에는 CSF 5%첨가에서 최고의 강도가 얻어지며 그 이상 즉, 10%, 15%의 첨가는 강도의 발현을 오히려 저해하는 것을 알 수 있다. 또한, W/C=0.4(Series-B)에서는 15%의 혼화재 혼입량에서 최대의 강도가 나타남을 알 수 있다. 따라서, 정해진 물-시멘트비마다 실리카흙의 최적혼입량이 존재함을 알 수 있으며, 이것은 소요의 강도를 얻는데 가장 경제적인 배합을 가능케하는 중요한 인자가 된다.

그림 3은 재령별 강도를 물-시멘트비에 따라 표시하고 있는데, CSF혼입량별로 정리한 것이다.

즉, 각 물-시멘트비에서 CSF 혼입효과가 어느 때 가장 큰지를 보여주고 있다.

### 3.2. 材수에 따른 強度의 增進과 실리카흄의 영향

본 실험에서 사용된 재료가 제3종 조강시멘트와 강도증진에 실제적인 영향을 끼치는 혼화재(Condensed Silica Fume)이며 또, 초기강도발현에 어느 정도 기여하는 것으로 알려진 혼화재 Mighty-150이므로 이들 변수가 복합적으로 작용하는 재령강도의 증진효과는 고강도콘크리트의 강도특성을 고찰하는 중요한 수단이다.

일반적으로 재령강도의 추정에 사용되는 방법은 Branson<sup>(2)</sup>의 최소자승법을 이용한 다음 식(1)과 재령을 대수화하여 강도증진 정도를 추정하는 Anderson<sup>(3)</sup>의 제안식이 있는데, 본 연구에서는 Anderson공식을 이용하여 재령에 따른 강도증진효과를 분석하였다. 이것은 Anderson의 제안식이 실험자료와 좀더 높은 상관계수를 나타내었기 때문이다.

$$\text{Branson ; } f'_c(t) = \frac{t}{a+bt} f'_c(28) \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{Anderson ; } f'_c(t) = a \log t + b \dots \dots \dots (2)$$

여기서, t=재령(Age), f'\_c(28)=재령 28일에서의 압축강도, f'\_c(t)=재령 t에서의 압축강도, 그리고 a와 b는 실험상수이다. 표 3은 28일강도를 기준으로 한 재령별 강도증진률을 나타내고 있다. 표 4는 재령에 따른 강도증진 과정을 회귀분석하여 표로 만든 것이다. 관계식의 기울기가 클수록 재령에 따른 강도증진 효과가 크다는 것을 감안할 때, 이상으로부터 알 수 있는 것은 재령에 따른 강도증진 효과 역시 혼화재 첨가량의 증가에 따라 단순하게 증가하는 것이 아니라 강도발현을 저해하는 과대첨가량의 범위에서는 그 효과가 떨어지는 것을 보여주고 있다. 여기서 또 하나 주목할 점은 재령에 따른 강도증진 효과는 W/C=비가 일정할 때 혼화재 첨가에 의한 강도증진 효과가 클수록 크다는 것이다. 우선 W/C=0.28의 경우 재령에 따른 강도증진 효과는 강도가 클수록 커지다가 CSF 15%첨

가한 경우에서 급격히 떨어지는 것을 알 수 있다. W/C=0.4의 경우에서도 첨가량이 과대한 CSF 20%의 경우에서 같은 현상을 관찰할 수 있다.

재령별 압축강도의 증진효과를 혼화재함유량별로 나타내면 아래 그림 4와 같다. 이 그림 4는 재령별 강도증진은 물론 혼화재의 영향도 알 수 있게하고 있다.

그림 5, 그림 6, 그림 7은 재령별 강도증가현상을 대수축적으로 그린 것이며 그림 5는 W/C=0.28의 경우이고, 그림 6은 W/C=0.4, 그림 7은 W/C=0.55인 경우이다.

표 3. 재령별 강도 증진율

Test Series \ Age	3	7	28	90
A-0	0.70	0.83	1.0	1.05
A-5	0.60	0.81	1.0	1.11
A-10	0.60	0.83	1.0	1.08
A-15	0.68	0.77	1.0	1.08
B-0	0.64	0.78	1.0	1.09
B-5	0.64	0.79	1.0	1.11
B-10	0.61	0.79	1.0	1.10
B-15	0.65	0.81	1.0	1.08
B-20	0.68	0.83	1.0	1.07
C-0	0.40	0.64	1.0	1.11
C-5	0.65	0.71	1.0	1.07
C-10	0.63	0.70	1.0	1.10
C-15	0.58	0.74	1.0	1.09
C-20	0.56	0.77	1.0	1.09

### 3.3 물-시멘트비 및 실리카흄 혼입량과 강도 관계

각각의 물-시멘트비에서 강도발현이 가장 높은 실리카흄의 양이 나타나게 되며 이러한 현상을 그림으로 도시한 것이 그림 8이다.

이 그림에서 각 직선의 기울기는 물-시멘트비와 혼화재(CSF) 함유량 사이의 관계를 나타내고 있다. 기울기가 급격한 경우는 동일한 CSF 함량에서 물-시멘트비의 영향이 큰 것을 말해주고 있다. 그림 8은 각 재령에 관계없이 각 물-시멘트비마다 강도발현이 가장 좋은 혼화재 함

표 4. 재령-강도 관계식

Test Series	Regression Equation	상관계수
A-0	$Y = 15.8 \times + 28.2$ (12.5 × + 30.7)	1.00(0.98)
A-5	$Y = 28.3 \times + 30.2$ (23.7 × + 33.7)	0.98(0.98)
A-10	$Y = 26.5 \times + 29.2$ (20.9 × + 33.4)	0.98(0.98)
A-15	$Y = 19.0 \times + 29.0$ (16.2 × + 31.1)	0.99(0.99)
B-0	$Y = 13.6 \times + 17.2$ (11.4 × + 18.8)	1.00(0.99)
B-5	$Y = 14.5 \times + 17.9$ (12.7 × + 19.4)	1.00(0.99)
B-10	$Y = 18.5 \times + 20.2$ (15.5 × + 22.5)	0.99(0.99)
B-15	$Y = 18.6 \times + 27.7$ (16.0 × + 29.9)	1.00(0.99)
B-20	$Y = 15.8 \times + 25.6$ (12.8 × + 27.9)	0.99(0.98)
C-0	$Y = 20.0 \times + 3.61$ (16.0 × + 6.67)	1.00(0.98)
C-5	$Y = 12.6 \times + 15.4$ (10.7 × + 16.9)	0.97(0.98)
C-10	$Y = 14.7 \times + 15.6$ (12.9 × + 17.0)	0.98(0.98)
C-15	$Y = 18.0 \times + 15.2$ (14.8 × + 17.7)	1.00(0.99)
C-20	$Y = 21.6 \times + 18.0$ (17.5 × + 21.1)	0.99(0.98)

註 (1) Y = 압축강도(MPa), X = logt

(2) 表中에서 ( )는 90일 강도까지 고려하여 회귀 분석한 경우임.

유량을 보여주고 있는데, W/C=0.28에서는 CSF 5%, W/C=0.4에서는 15%, W/C=0.55에서는 20%로서 W/C비가 커질수록 CSF의 최적혼입량이 커진다는 것을 알 수 있다.

(1) W/C비와 혼화재 함유량의 상쇄효과

이러한 결과를 통해 관찰할 수 있는 가장 큰 특징은 W/C비에 의해 발현되는 강도와 혼화재의 작용에 의한 강도 사이에는 서로 상쇄되는 효과가 있다는 것이다. 즉 그림 8에서 알 수 있는 바와 같이 W/C비가 0.4이고 CSF함유량이 15%인 경우에는 W/C비가 0.28까지 낮아져도 강도의 증진은 거의 없음을 알 수 있다. 이와 마찬가지로 CSF함유량이 20%인 경우에서도 W/C비가 0.55에서 0.40까지 변하여도 그에 따른 강도의 증감은 별로 없다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 일정한 W/C비에 대한 혼화재 최적함유량과 혼화재 과대에 의한 강도발현저해 효과가 복합적으로 작용하는 것으로 설명될 수 있다. 즉, W/C비의 감소에 의한 강도증가와 혼화재 과다혼입에 의한 강도감소가 서로 상쇄되는 것이다. 따라서 이러한 경우의 W/C비 및 혼화재 함유량은 경제성과 사용성을 고려하여 결정되는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

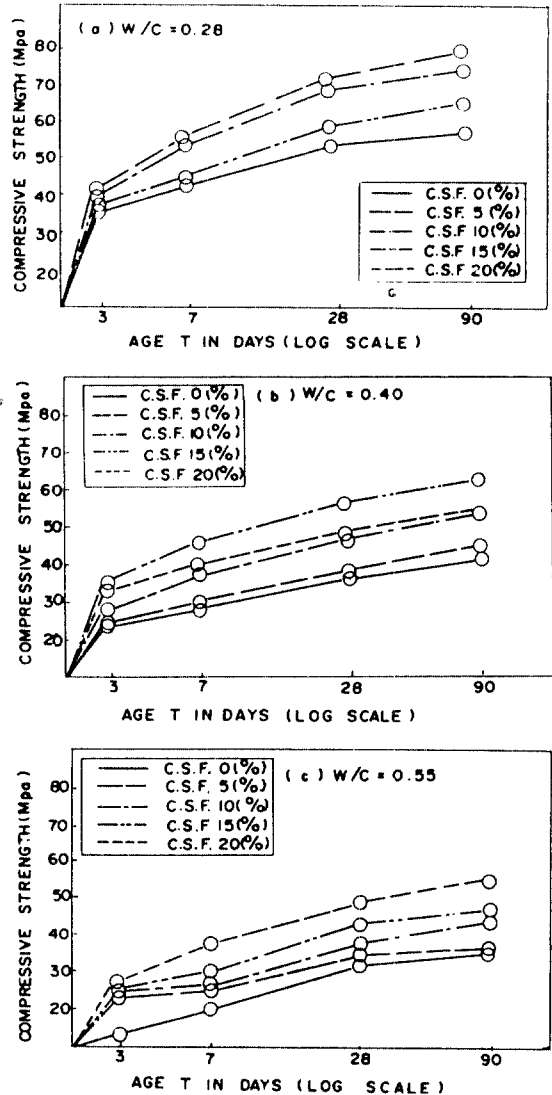


그림 4 CSF함유량별 재령에 따른 압축강도의 증가현상

이러한 상쇄효과를 본 실험결과 및 Yamato<sup>(21)</sup>와 Malhotra<sup>(16)</sup>의 실험결과를 병합하여 나타내면 다음 그림 9와 같다. 이 그림 9는 같은 강도를 얻고자 할 때 각 물-시멘트비와 혼화재 함유량 사이의 조합관계를 보여 주고 있다.

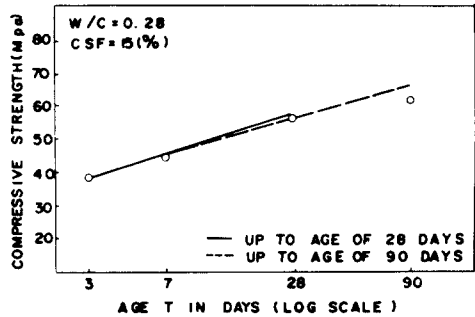
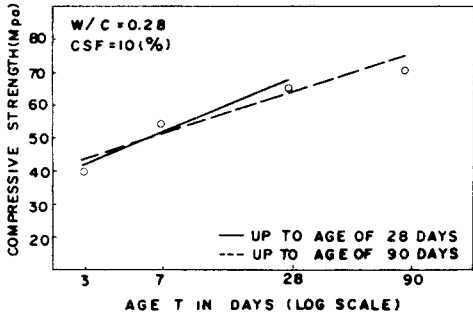
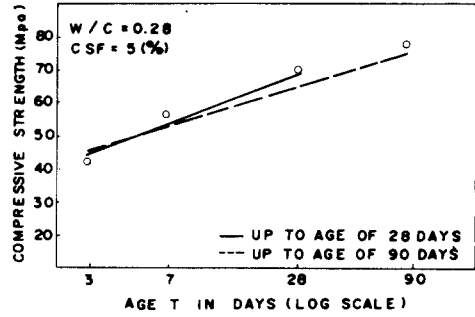
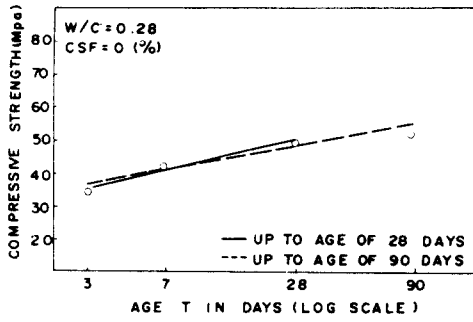


그림 5 W/C=0.28인 경우의 CSF 함유량별 재령에 따른 압축강도의 증가현상

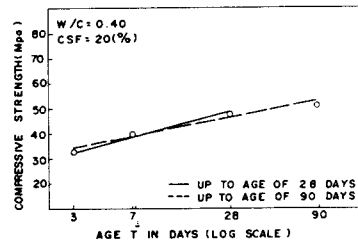
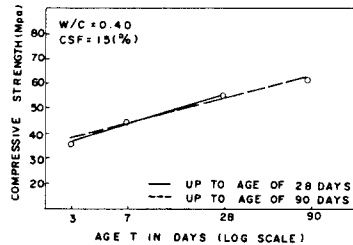
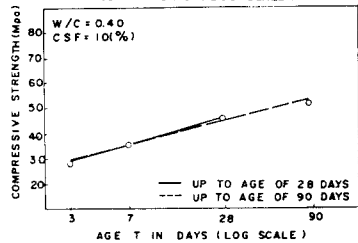
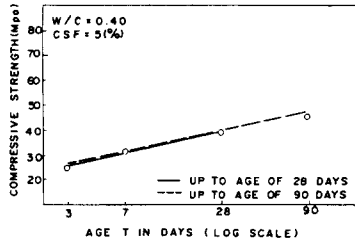
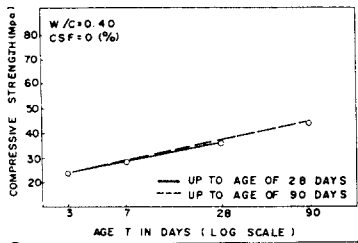


그림 6 W/C=0.40인 경우의 CSF 함유량별 재령에 따른 압축강도의 증가현상



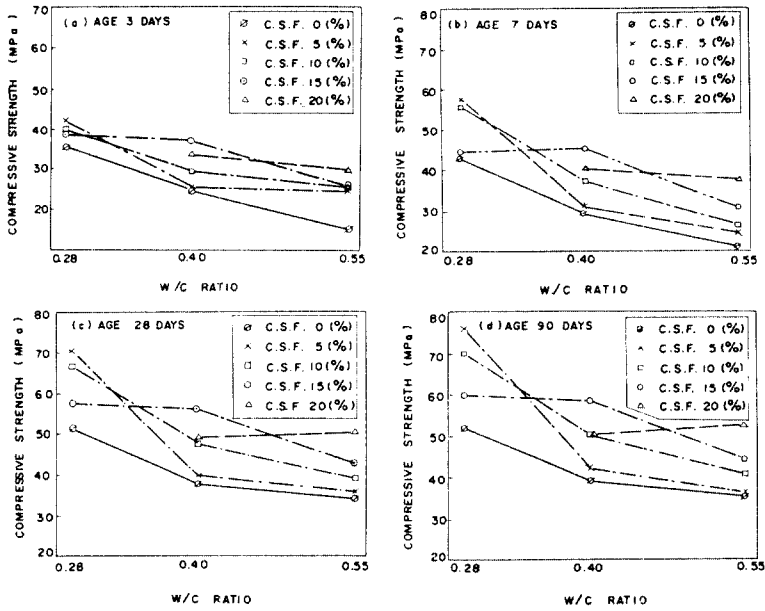


그림 7 W/C=0.55인 경우의 CSF 함유량별 재령에 따른 압축강도의 증가현상

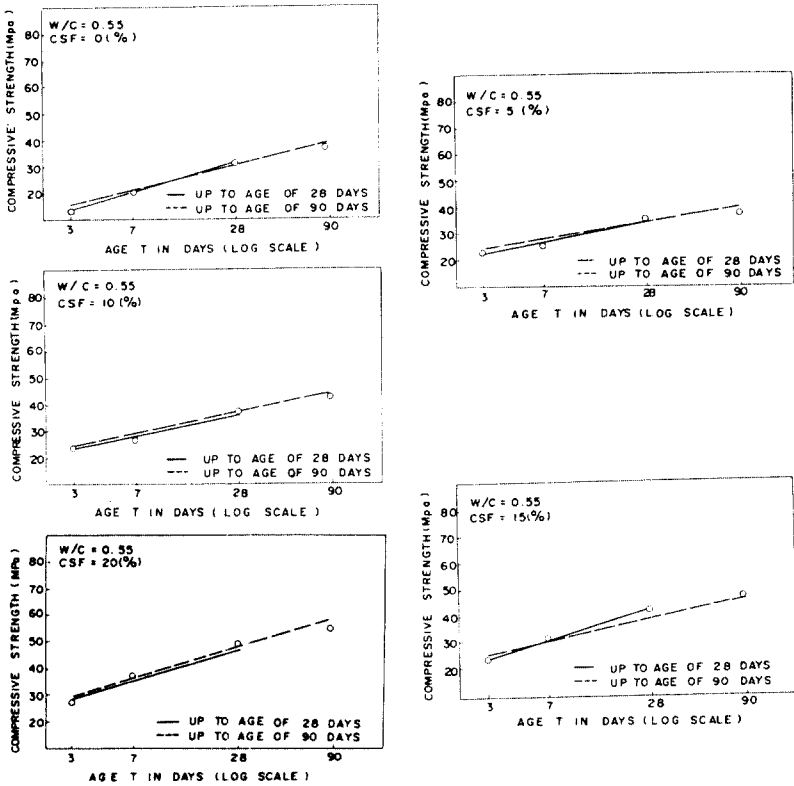


그림 8 각 물-시멘트비에서 CSF 혼입량에 따른 압축강도의 증진효과

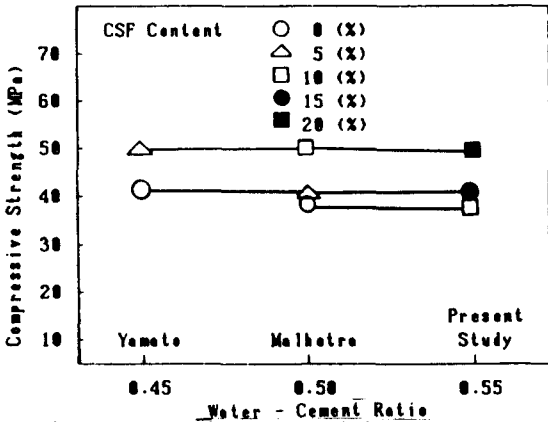


그림 9 동일한 압축강도를 얻기 위한 각 W/C 각 W/C비에서의 CSF혼입량 변화

(2) 물-시멘트비와 실리카흄 혼입량에 따른 강도 관계식

이제 그림 8의 결과를 이용하여 소요의 강도를 얻기 위해 요구되는 W/C비와 혼화재 혼입량을 구할 수가 있다. 28日 強度를 표준으로 하여 본 연구의 범위내에서 압축강도와 물-시멘트비 및 CSF 혼입량 사이의 관계를 구하면 아래 표 5와 같이 정리될 수 있다.

이 표 5의 자료를 근거로 하여 원하는 강도를 얻기 위해 필요한 물-시멘트비와 혼화재 혼입량을 구할 수 있고, 이들 사이의 강도-물시멘트비-혼화재 혼입량 간의 관계를 회귀분석한 것이 표 6이다. 이 표 6에서  $Y = W / (C + CSF)$ 로서 물-시멘트비를 나타내고,  $X = CSF$  혼입량(%)을 나타낸다. 각 공식의 도출에서 회귀식의 상관계수는 0.98이상으로 높은 상관관계를 나타내었다. 이 관계식을 통하여 강도, 물-시멘트비, CSF 혼입량의 세 변수중 하나가 제시되면 나머지 변수를 계산해 낼 수 있다.

### 3.4. 휨인장강도 및 활렬인장강도

본 연구에서는 압축강도와 아울러 재령28일의 휨강도 및 활렬인장강도를 측정하였으며 이를 요약한 것이 표 7이다. 휨강도와 활렬인장강도는 일반적으로 압축강도와 다음과 같은 관계를 가지고 있다.

$$f_r = C_0 \sqrt{f'_c} \quad (1)$$

$$f_{sp} = C_1 \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

표 5. 소요의 압축강도를 얻기 위해 필요한 W/C비 (28일 강도표준)

압축강도(MPa) / CSF혼입량(%)	0	5	10	15	20
71		0.281			
70		0.284			
69		0.289			
68		0.292			
67		0.296	0.283		
66		0.300	0.289		
65		0.304	0.295		
64		0.308	0.301		
63		0.311	0.307		
62		0.315	0.313		
61		0.319	0.319		
60		0.323	0.325		
59		0.326	0.331		
58		0.330	0.337	0.278	
57		0.334	0.343	0.340	
56		0.338	0.349	0.401	
55		0.340	0.355	0.412	
54		0.345	0.361	0.422	
53		0.350	0.367	0.433	
52		0.353	0.373	0.444	
51	0.287	0.357	0.379	0.454	
50	0.295	0.360	0.385	0.465	0.550
49	0.304	0.364	0.391	0.475	0.400
48	0.312	0.368	0.397	0.496	
47	0.320	0.372	0.408	0.497	
46	0.329	0.375	0.424	0.507	
45	0.337	0.380	0.440	0.518	
44	0.346	0.383	0.456	0.529	
43	0.354	0.387	0.473	0.539	
42	0.362	0.391	0.489	0.550	
41	0.371	0.394	0.505		
40	0.379	0.398	0.521		
39	0.387	0.418	0.537		
38	0.451	0.450			
37	0.417	0.485			
36	0.519	0.517			
35	0.485	0.550			

上記式에서  $f_r$  = 휨인장강도(MPa),  $f_{sp}$  = 활렬인장강도(MPa),  $f'_c$  = 압축강도(MPa),  $C_0$  및  $C_1$  은 실험상수이다. 표 7에는 본 연구에서 구해진 계수  $C_0$ 와  $C_1$ 이 수록되어 있으며, 그 평균치는 ACI에서 제안된 값보다 약간 크게 측정되었다.

표 6. 압축강도-물시멘트비-CSF혼입량관계식

압축강도(MPa)	물-시멘트비 예측식
39	$Y = 0.0150 \times + 0.3723$
40	$Y = 0.0142 \times + 0.3617$
41	$Y = 0.0134 \times + 0.3563$
42	$Y = 0.0132 \times + 0.3487$
43	$Y = 0.0128 \times + 0.3421$
44	$Y = 0.0124 \times + 0.3352$
45	$Y = 0.0121 \times + 0.3283$
46	$Y = 0.0117 \times + 0.3213$
47	$Y = 0.0113 \times + 0.3142$
48	$Y = 0.0110 \times + 0.3081$
49	$Y = 0.0108 \times + 0.3025$
50	$Y = 0.0107 \times + 0.2960$
51	$Y = 0.0105 \times + 0.2908$
52	$Y = 0.0091 \times + 0.3445$
53	$Y = 0.0083 \times + 0.3418$
54	$Y = 0.0077 \times + 0.3375$
55	$Y = 0.0072 \times + 0.3330$
56	$Y = 0.0063 \times + 0.3312$

註 : (1)  $Y = \frac{W}{(C + CSF)}$ , X = CSF혼입량(%)

표 7. 휨강도 및 할렬인장강도

Test Series	f'c	fr	fSP	C0	C1
A-0	51.0	9.85	5.49	1.38	0.77
A-5	70.2	11.33	7.21	1.35	0.87
A-10	66.5	10.35	5.96	1.37	0.73
A-15	57.1	9.85	6.27	1.30	0.83
B-0	36.9	7.88	5.33	1.30	0.88
B-5	38.9	7.88	4.87	1.26	0.78
B-10	46.8	7.64	5.96	1.12	0.87
B-15	55.3	8.87	6.59	1.20	0.89
B-20	48.3	8.37	5.44	1.20	0.78
C-0	32.6	7.88	3.45	1.38	0.61
C-5	34.5	8.37	3.45	1.43	0.59
C-10	37.6	8.62	4.08	1.41	0.67
C-15	41.4	8.87	3.76	1.38	0.58
C-20	49.0	8.87	4.08	1.28	0.58
AVE				1.31	0.74

3.5. 최적배합설계의 고찰

본 실험을 통하여 얻어진 고강도콘크리트 제조의 최적배합설계는 콘크리트를 구성하는 각 변수가 상호작용을 일으킴에 있어서 적정량이 투입되어, 각각의 작용을 저해함이 없이 최대의

효용을 일으키게 해야한다는 것이다.

본 연구에서 나타난 최적배합은 다음과 같이 요약될 수 있다.

(1) 각 물-시멘트비에는 최대의 효용을 발휘하는 혼화재(CSF)의 최적 함량이 존재한다. 즉, W/C=0.28에서는 CSF혼입량 5%, W/C=0.4에서는 15%, W/C=0.55에서는 20%가 최적혼입량으로 나타났다.

(2) 물-시멘트비에 대한 혼화재의 함량이 과도하여 강도발현을 저해하는 경우가 있으며 CSF 15%첨가의 경우 W/C=0.28에서 0.4범위까지 강도변화가 별로 없으므로 물-시멘트비를 0.4로 하는 것이 경제적이며 바람직하다. 또한, CSF 혼입량이 20%일 경우 W/C=0.4에서 0.55까지 강도증감이 없으므로 물-시멘트비를 0.55로 하는 것이 바람직하다.

4. 결 론

本 研究에서는 실리카흙을 사용한 高強度콘크리트의 제조와 역학적 특성 및 최적배합에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 주요 실험변수를 물-시멘트비와 혼화재인 실리카흙의 혼입량으로 하였으며 압축강도 및 휨강도와 할렬인장강도 특성을 분석하였다. 실리카흙의 혼입으로 強度가 증가함을 발견하였으며, 그러나 어느 범위 이상의 과도한 혼입은 오히려 강도를 저해하는 것으로 나타났다. W/C비 0.28에서는 5%의 실리카흙 혼입량에서 최대의 강도가 나타났고, W/C=0.40에서는 CSF혼입량 15%, W/C=0.55에서는 CSF 20%혼입량에서 최대강도가 나타났다. 또한 압축강도와 물-시멘트비 및 실리카흙 사이의 관계를 도출하여 관계식을 제시하였으며, 이러한 식으로부터 소요의 강도를 위한 각 배합변수를 유추할 수 있다. 낮은 물-시멘트비에서 혼화재의 과도혼입으로 오히려 강도가 낮아지므로 물-시멘트비가 높은 경우와 거의 같은 강도가 나오는 구간이 존재한다. 따라서 물-시멘트비 효과와 혼화재의 효과가 상쇄되는 구간을 구별해야 하며, 본 연구에서는 이들 효과를 고려하여 합리적인 최적배합을 제

시하고 있다. 앞으로도 우리나라에서 高強度콘크리트의 활발한 이용을 위하여 좀더 많은 연구 개발이 요망되고 있다.

### 감사의 글

이 논문은 한국과학재단의 1988년도 연구과제 지원에 의하여 연구되었으며 이에 깊은 감사료를 드립니다.

### 참고문헌

1. ACI, Manual of Concrete Practice, part 1, 1986.
2. Anderson, F.D., "Statistical Controls for High Strength Concrete", SP-87, ACI, 1985, pp. 71~84.
3. Branson, E., "Deformation of Concrete Structures", McGraw Hill, 1977. pp. 2~84.
4. Burgo, T.A., "14000psi in 24 hours", Concrete International, September. 1983, pp. 36~41.
5. Carlsson, M., "Use of C.S.F. in Concrete", SP-91, ACI, 1986. pp. 1013~1030.
6. Fafitis, A., "Lateral Reinforcement for HSC Columns", SP-87, ACI, 1985. pp. 213~232.
7. Halse, Y., "Development of Microstructure and Other Properties in OPC System", Cement and Concrete Research, Vol.14, 1984. pp. 491~498
8. Jahren, P.A., "Performance of Concrete Incorporating C.S.F. and Superplasticizers", SP-91, ACI, 1986. pp. 865~892.
9. Maage, M., "Strength and Heat Development in Concrete ; Influence of Fly Ash and Condensed Silica Fume", SP-91, ACI, 1986. pp. 923~940.
10. Malhotra, V.M., "Use of Mineral Admixtures for Specialized Concretes", Concrete International, April, 1984. pp. 19~24.
11. McCloskey, D.H., "Reinforced Corbels of High-Strength concrete", SP-87, ACI, 1985, pp. 197~212.
12. Mielenz, R.C., "History of Chemical Admixtures for Concrete", Concrete International, April, 1984. pp. 40~53.
13. Montgomery, D.G., "Fly Ash in Concrete-A Microstructure Study", Cement and Concrete Research, Vol.11., 1981.11 pp. 591~603.
14. Nilson, A.H., "Design Implications of Current Research on High-Strength Concrete", SP-87, ACI, 1985. pp. 85~118.
15. Radjy, F.F., "A Review of Experiences with Condensed Silica-Fume Concrete and Products", SP-91, ACI, 1986. pp. 1135~1152.
16. Sandvick, M., "Effect of CSF on the Strength Development of Concrete", SP-91, ACI, 1986. pp. 893~902.
17. Shah, S.P., "Structural Properties of High Strength Concrete and its implications for Precast Prestressed Concrete", PCI Journal, 1985. pp. 92~129.
18. Swamy, R.N., "High-Strength Concrete-Material Properties and Structural Behavior", SP-87, ACI, 1985. pp. 35~50.
19. Swartz, S.E., "Structural Bending Properties of Higher Strength Concrete", SP-87, ACI, 1985. pp. 147~178.
20. Wolsiefer, J., "U.H.S. Field Placeable Concrete with Silica Fume Admixtures", Concrete International, April, 1984. pp. 25~31.
21. Yamato, Takeshi, "Strength and Freezing-and-Thawing Resistance of Concrete Incorporating Condensed Silica Fume", SP 91, ACI, 1986, 1095~1118.
22. "고강도, 유동화, 섬유콘크리트의 개발과 역학적 특성에 관한 연구", 과학기술처 연구보고서, 1988. 3.