

실리카흙 및 플라이애쉬를 사용한 초고강도 콘크리트에 관한 실험적 연구

-An Experimental Study on the Ultra High Strength Concrete using Silica-Fume and Fly-Ash-

0 박 기 철* 정 현 수**
Park, Ki Choul Chung, Heon Soo

ABSTRACT

Silica-Fume, an industrial by product, has an extremely small average partical size of $0.1\mu\text{m}$ and when used as a concrete admixture fills the fine voids which exist in concrete. The purpose of this study is to investigate material properties of the high-strength concrete using Silica-fume and Fly-Ash. The main variables studied are;

- a) water-cement ratio.
- b) Silica-Fume, Fly-Ash content.

The maximum compressive strength of $1000\text{kg}/\text{cm}^2$ is achieved with a mix using 18% water-cement ratio, 20% Silica-Fume and 10% Fly-Ash ratio.

1. 서 론

최근 선진국에서는 초고층 철근콘크리트 건축물이나 프리스트레스 콘크리트교량등에 부재단면의 축소나 철근량의 저감을 목적으로 압축강도가 $1000\text{kg}/\text{cm}^2$ 정도 이상의 고강도 콘크리트를 사용하는 경우가 증가하고 있다. 이러한 초고강도 콘크리트 생산은 혼화재료를 사용하지 않고 시멘트만을 사용해서는 불가능하며 일반적으로 실리카 흙(Silica-Fume), 플라이애쉬(Fly-Ash)등을 시멘트의 일부분으로 대체해서 사용하고 있다. 실리카 흙은 평균입경이 $0.02\sim 0.54\mu\text{m}$ 로 대단히 작고 이산화 규소(SiO_2) 함유율이 90% 이상을 차지하고 있으며, 시멘트의 수화에 의해서 생성되는 수산화 칼슘($\text{CA}(\text{OH})_2$)과 실리카가 pozzolanic reaction을 일으켜서 내부조직을 밀실하게 하기 때문에 콘크리트의 수밀성, 내구성을 개선하고 콘크리트 강도를 증진시킨다. 본 연구는 고강도 콘크리트 실용화 추세에 발맞추어 혼화재로서 실리카 흙과 플라이 애쉬를 사용하고, 혼화재로서는 나프타린계의 고성능 감수제를 이용하여 압축강도 $1000\text{kg}/\text{cm}^2$ 정도의 초고강도 콘크리트 제조를 위한 기초적 연구이다.

2. 실험 개요

* 중앙대 건축공학과 · 박사과정
** 중앙대 건축공학과 교수 · 공학

2.1 실험 계획

국내외적으로 발표한 기존 논문의 실험 결과를 분석해서 콘크리트 압축강도를 더 높일 수 있는 방향으로 실험변수를 설정하였다. 본 실험에서는 세골재율 35%, 단위시멘트량 $650\text{kg}/\text{m}^3$ 로 고정시키고 혼화제는 실리카 흙을 플라이 애쉬 양보다 많이 혼입하였을 때 강도증진을 보이기 때문에 실리카 흙은 시멘트의 10, 20%로 했으며 플라이 애쉬는 5, 10%로 실리카 흙보다 적게 배합했다. 물·결합재비(W/C+Ad:물시멘트비 대신 시멘트에 혼화재를 포함시킨 비율)와 혼화제의 양을 변수로 해서 4개의 series로 하였다.

본 실험에 사용한 실리카 흙 및 플라이 애쉬의 요인 및 수준을 <표1>에 나타냈다. 표에 나타난 실리카 흙 및 플라이 애쉬, 고성능 감수제의 혼입율은 시멘트에 대한 비율이다. 본 연구에서는 수화작용에 필요한 최소 물·결합재비인 18% 정도에서 32%까지 4단계로 배합했고, 슬럼프값을 15cm로 목표하여 고성능 감수제의 양을 조절하였다. 물·결합재비가 21%일 때 감수제량을 1.2% 첨가하여 슬럼프 경시 변화를 측정하였다.

<표 1> 요인 및 수준

요 인	수 준
물 결 합 재 비 (%)	18, 21, 25, 32
실 리 카 흙 혼 입 율 (%)	0, 10, 20
플 라 이 애 쉬 혼 입 율 (%)	0, 5, 10
실 리 카 흙 + 플 라 이 애 쉬 혼 입 율 (%)	15, 30
고 성 능 감 수 제 첨 가 율 (%)	0.3~1.2
목 표 슬 럽 프	15cm

<표 2> 실리카 흙과 플라이 애쉬의 화학적 성질

종 류	화 학 성 분 (%)								비 중
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	SO ₃	
실 리 카 흙	94	0.7	0.3	0.4	0.5	1.3	1.5	-	2.2
플 라이 애쉬	60.86	22.51	5.19	0.28	0.32	5.87	1.19	0.37	2.1
시멘트(1종)	20.9	6.0	3.2	62.6	-	-	3.3	2.3	3.15

<표 3> 감수제의 화학적 성질

구 분	주 성 분	고형분(μ/φ)	비중(20℃)	PH	외 관	표준사용량
MT 150	나프타린 슬론 산염 포르말린 축합물	480	1.2	10±1	흑갈색	c×1.5-1%

2.2 사용 재료

실험에 사용한 실리카 흙은 네델란드 산인 Elken Microsilica이고, 무연탄 연소시 분출된 제인 플라이 애쉬는 충남 서천화력 발전소에서 기증 받은 것을 사용하였다. <표2>는 실험에 사용한 실리카 흙 및 플라이 애쉬의 화학 성분을 나타냈다. <표3>은 고성능 감수제인 Mighty150의 화학적 성질을 나타내었다. 세골재는 임진강산이며 조립

율은 2.76이고, 최대치수가 10mm인 쇠석을 사용하였다. <표4>는 콘크리트 배합표를 나타냈다. 공시체명에 나타낸 A는 물-결합재비가 18%이며 S는 실리카 흙, F는 플라이 애쉬를 각각 나타냈다. S10은 실리카 흙 10%를 나타내며, SF15는 실리카 흙과 플라이 애쉬를 각각 10%, 5%를 모두 합한 15%의 혼화제량을 나타낸다.

<표 4> 콘크리트 배합표

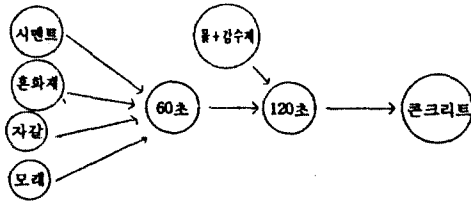
공시체명	물·결합재비 W/(C+Ad) ¹⁾ (%)	세골재율 (%)	감수제 첨가율 (%)	실리카흙 혼입율 (%)	플라이애쉬 혼입율 (%)	단위량 (kg/m ³)						슬럼프 치(cm)
						물		실리카흙 S	플라이애쉬 F	모래 S	자갈 G	
						W	C					
A-S-0	18	35	0.9	0	0	117	650	0	0	618	1148	19
A-S-10	18	35	1	10	0	117	585	65	0	610	1133	18
A-S-20	18	35	1.2	20	0	117	520	130	0	602	1118	16
A-F-5	18	35	1	-	5	117	617.5	0	32.5	614	1139	17
A-F-10	18	35	1	-	10	117	585	0	65	609	1131	15
A-SF-15	18	35	1.2	10	5	117	552.5	65	32.5	605	1124	15
A-SF-30	18	35	1.2	20	10	117	455	130	65	592	1100	14
B-S-0	25	35	0.6	0	0	162.5	650	0	0	576	1070	16
B-S-10	25	35	0.65	10	0	162.5	585	65	0	568	1055	17
B-S-20	25	35	0.8	20	0	162.5	520	130	0	560	1039	14
B-F-5	25	35	0.7	0	5	162.5	617.5	0	32.5	571	1061	16
B-F-10	25	35	0.8	0	10	162.5	585	0	65	567	1052	15
B-SF-15	25	35	1.2	10	5	162.5	522.5	65	32.5	563	1046	15
B-SF-30	25	35	1.2	20	10	162.5	455	130	65	592	1021	14
C-S-0	32	35	0.3	0	0	208	650	0	0	534	992	20
C-S-10	32	35	0.3	10	0	208	585	65	0	526	976	19
C-S-20	32	35	0.6	20	0	208	520	130	0	517	961	18
C-F-5	32	35	0.5	0	5	208	617.5	0	32.5	529	983	17
C-F-10	32	35	0.5	0	10	208	585	0	65	524	974	15
C-SF-15	32	35	1	10	5	208	552.5	65	32.5	521	967	16
C-SF-30	32	35	1	20	10	208	455	130	65	508	943	15
D-S ₁ -0	21	35	1.2	0	0	136.5	650	0	0	600	1115	18
D-S ₁ -0	21	35	1.2	0	0	136.5	650	0	0	600	1115	17
D-S ₁ -20	21	35	1.2	20	0	136.5	520	130	0	584	1084	18
D-S ₁ -20	21	35	1.2	20	0	136.5	520	130	0	584	1084	16
D-F ₁ -10	21	35	1.2	0	10	136.5	585	0	65	591	1097	15
D-F ₁ -10	21	35	1.2	0	10	136.5	585	0	65	591	1097	16

1) Ad: 혼화제(실리카 흙, 플라이 애쉬)

2) 슬럼프치: 실험시 측정된 실측치이다.

2.3 실험 방법

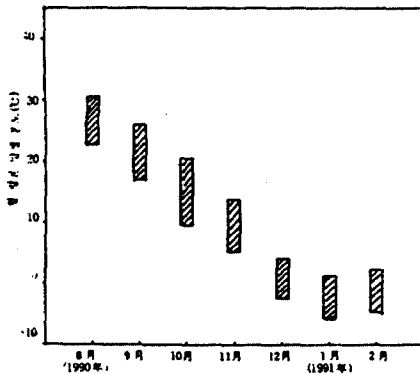
콘크리트 비빔은 100ℓ용량의 강제식 믹서(회전수 60 r.p.m)를 사용하여 (그림1)에 나타난 방법으로 실시했다.



(그림1) 비빔 방법

2.4 양생 온도

(그림2)는 콘크리트 양생기간 동안의 월 평균 최저 최고 온도 분포를 월별로 나타낸것이다. 본 실험의 양생조건은 실내의 대기 상태에서 수중양생하였다. 콘크리트 타설시 온도는 28~30.5°C였으며, 양생기간이 경과함에 따라 재령 1주시에는 양생온도가 22.7~30.5°C, 4주시에는 17~26°C, 26주시에는 -4.6~2.4°C로 가을, 겨울로 계절의 변화에 따라 대기온도는 계속 하락하였다.

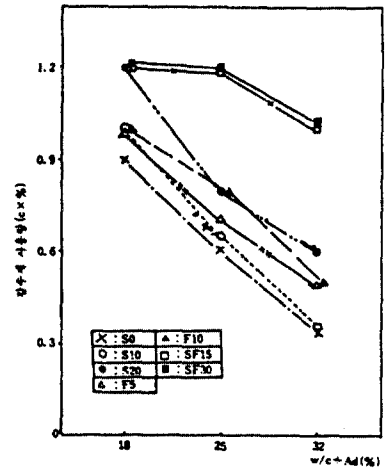


(그림2) 월 평균 양생온도

3. 실험결과 및 고찰

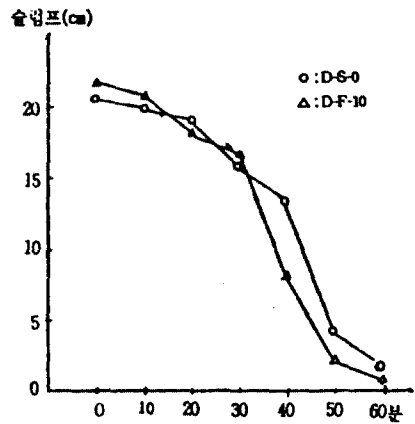
3.1 혼화제의 사용량 및 슬럼프 값의 경시변화

(그림3)은 물·결합제비, 혼화제의 종류 및 치환율이 다른 경우의 소요 slump를 얻기 위한 감수제의 사용량을 나타낸 것이다. 물·결합제비가 작을수록 혼화제의 첨가량이 클수록 일정 슬럼프 값을 얻는데 필요한 감수제의 사용량은 증가하고 있다.



(그림3) 물·결합제비와 감수제 사용량의 관계

(그림4)는 물·결합제비 21%, 감수제 첨가량 1.2% 일때 슬럼프 값의 경시변화를 측정된 결과이다. 플라이 애쉬를 10% 첨가한 콘크리트와 플레인 콘크리트인 경우 큰 차이를 보이고 있지 않으나 혼화제를 첨가한 공시체는 30분 경과후에 급격한 슬럼프 로스를 보여 주고 있으며, 플레인 콘크리트인 경우는 40분 이후에 급격한 저하를 보이고 있다.



(그림4) 슬럼프 값의 경시변화

3.2 혼화제가 조기강도에 미치는 영향

<표5>는 물·결합제비, 혼화제 종류 및 혼입율 별로 재령에 따른 압축강도의 실험 결과를 나타낸 것이다. 압축강도는 물·결합제비가 작을수록 혼화제의 혼입율이 클수록 크게 나타났다. (그림5)는 모든 공시체의 7일 압축강도를 나타낸 것이다. 혼화제를 사용하지 않은 경우에 물·시멘트비

<표5> 실험 결과

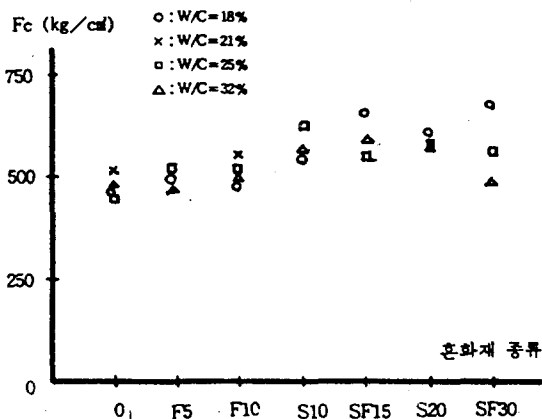
시험체 명	재령1주강도* (kg/cm ²)	재령4주강도 (kg/cm ²)	재령13주강도 (kg/cm ²)	재령26주강도 (kg/cm ²)
A-S-0**	454	602	650	717
A-S-10	550	734	786	792
A-S-20	610	796	824	847
A-F-5	499	647	690	724
A-F-10	474	632	704	732
A-SF-15	659	823	877	937
A-SF-30	675	862	914	982
B-S-0	456	598	632	654
B-S-10	628	720	758	782
B-S-20	580	708	752	773
B-F-5	517	634	682	721
B-F-10	521	626	655	682
B-SF-15	550	680	712	753
B-SF-30	562	709	750	786
C-S-0	480	562	613	636
C-S-10	566	674	720	757
C-S-20	567	702	732	763
C-F-5	469	580	620	650
C-F-10	494	604	654	682
C-SF-15	589	668	708	740
C-SF-30	484	651	684	722

* 콘크리트 압축강도는 3개 cylinder의 평균치

** A-S-0

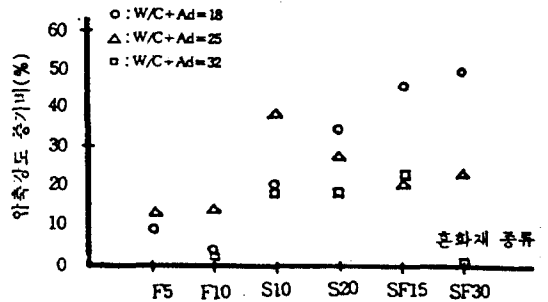
└─ 혼합재 혼입율
 └─ S: 실리카흙, F: 플라이 애쉬, SF: 실리카흙+플라이애쉬 (비율 2:1)
 └─ 물-결합재비 (A: W/C+Ad=18%, B: W/C+Ad=25%, C: W/C+Ad=32%)

에 의한 강도 차이는 크게 나타나고 있지 않다. 또한 플라이 애쉬와 실리카 흙을 각각 사용한 것보다 실리카 흙과 플라이 애쉬를 2:1비율로 섞은 공시체의 압축강도가 크게 나타났다.



(그림5) 혼화제의 종류 및 혼입량에 따른 7일 압축강도

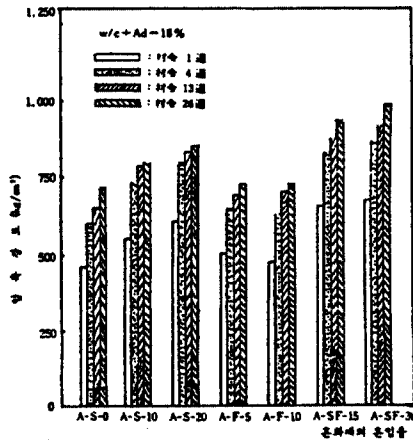
(그림6)은 혼화제를 사용하지 않은 공시체의 7일 압축강도에 대한 혼화제를 첨가한 공시체의 7일 압축강도 증가비를 혼화제 종류 및 혼입량 별로 나타낸 것이다. 물-결합재비가 18%인 경우에는 혼화제의 혼입율이 높수록 압축강도 증가율이 크다.



(그림6) 플레인 콘크리트에 대한 7일 강도 증가비

3.3 혼화제 혼입율과 압축강도의 관계

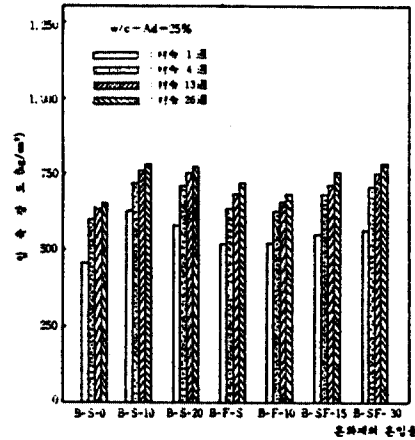
(그림7)은 물·결합재비가 18%일때 압축강도와 혼화제 혼입율과의 관계를 재령별로 나타낸 것이다. 실리카흙을 사용한 콘크리트는 플레인 콘크리트보다 실리카흙 혼입율이 증가 할 수록 재령에 관계없이 압축강도의 증가를 보이고 있다. 그러나 플라이 애쉬를 사용한 콘크리트의 압축강도는 플레인 콘크리트의 강도보다 약간 증가 하고 있지만 플라이 애쉬 혼입을 변화에는 거의 차이를 나타내고 있지 않다. 실리카흙과 플라이 애쉬를 2:1비율로 혼입한 시험체의 강도는 다른 시험체보다 가장 높은 압축강도 증가를 보이고 있으며, 혼화제의 혼입율이 15%보다 30%일 때가 큰 값을 보이고 있다.



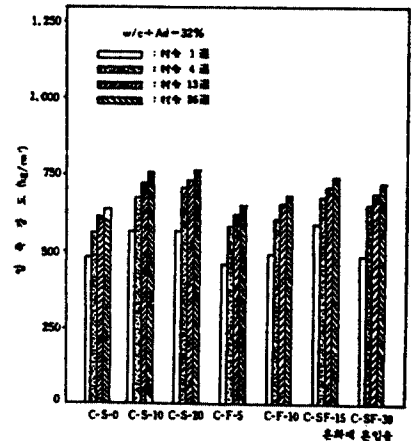
(그림7) 압축강도와 혼화제 혼입율의 관계

(그림8)은 물·결합재비가 25%일때 재령별 압축강도와 혼화제의 혼입율과의 관계를 나타낸 것이다. 실리카흙을 혼입한 시험체가 플레인 콘크리트나 플라이 애쉬를 혼입한 시험체보다 높은 강도 증가를 보였다. (B-SF-15), (B-SF-30) 시험체는 물·결합재비가 18%인 경우 실리카 흙만을 혼입한 시험체보다 실리카흙과 플라이 애쉬를 2:1 비율로 혼입한 시험체가 높은 압축강도의 증가를 보였지만, 물·결합재비가 25%에서는 실리카 흙만을 혼입한 시험체와 유사한 압축강도를 나타냈다.

(그림9)는 물·결합재비가 32%인 경우에 재령별 압축강도와 혼화제 혼입율과의 관계를 나타냈다. 재령1주에서 가장 높은 압축강도를 보인 것은 (C-SF-15) 시험체이며, 재령 4주 이후에는 실리카 흙을 20% 혼입한 시험체이다. 그러나 플라이 애쉬를 5% 혼입한 시험체는 1주 강도에서 플레인 콘크리트보다 강도가 적게 나타났으며, 그 이후 재령에서도 플레인 콘크리트와 강도 차이를 거의 보이고 있지 않다.



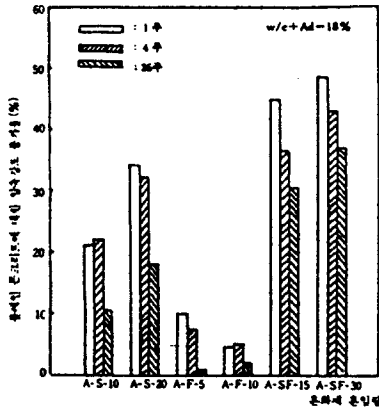
(그림8) 압축강도와 혼화제 혼입율의 관계



(그림9) 압축강도와 혼화제 혼입율의 관계

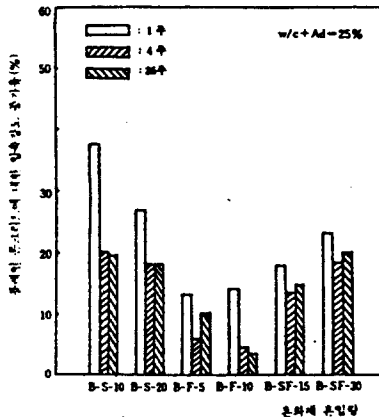
3.4 플레인 콘크리트에 대한 압축강도 증가율

(그림10)는 물·결합재비가 18%인 경우에 플레인 콘크리트에 대한 압축강도 증가율과 혼화제 혼입율과의 관계를 나타냈다. 압축강도 증가율은 대체적으로 재령1주에서 가장 크게 나타났으며, 재령1주시 압축강도 증가율이 높은 시험체가 장기재령에도 역시 높은 증가율을 보이고 있다. 재령별 평균 압축강도 증가율을 살펴보면 플라이 애쉬를 사용한 시험체의 강도 증가율은 3~6%, 실리카흙을 사용한 시험체의 강도 증가율은 18~28%, 실리카흙과 플라이 애쉬를 2:1비율로 사용한 시험체는 37~43%정도의 압축강도 증가율 나타났으며 혼화제의 첨가량이 많을 수록 압축강도 증가율은 상승하였다.



(그림10) 플레인 콘크리트에 대한 압축강도 증가율과 혼화제 혼입량의 관계

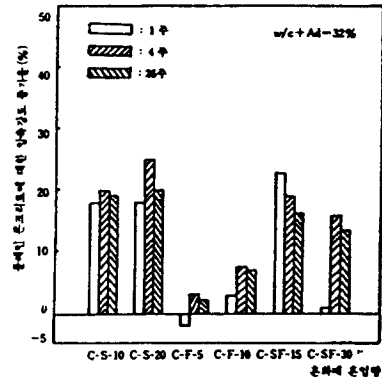
(그림11)은 물·결합재비가 25%일때 플레인 콘크리트에 대한 압축강도 증가율과 혼화제 혼입량의 관계를 나타냈다.재령4주 이후 실리카 흙을 혼입한 시험체의 강도 증가율은 18~20%,실리카 흙과 플라이 애쉬를 섞어서 혼입한 시험체의 강도 증가율은 14~18%로 유사한 강도 증가율을 보였다.



(그림11) 플레인 콘크리트에 대한 압축강도 증가율과 혼화제 혼입량의 관계

(그림12)은 물·결합재비가 32%일때 플레인 콘크리트에 대한 압축강도 증가율과 혼화제 혼입량의 관계를 재령별로 나타냈다.재령1주에서 플라이 애쉬 5%혼입한 (C-F-15) 시험체는 플레인 콘크리트 강도보다 2% 낮은 압축강도를 보이고 있다. (C-F-30)시험체의 1주강도 증가율이 1%에 그친 것은 물·결합재비가 32%로 증가 했으며 혼화제 혼입율이 30%로 큰 경우에 시멘트량의 감소로 인하여 조기 강도의 발현이 지연되기 때문으로 사료된다.따라서 조기에 높은 압축강도를 얻기

위해서는 물·결합재비를 20%내외 정도로 적은 범위를 선택 해야 할 필요가 있다.4주이후의 장기 재령에서는 실리카 흙만을 혼입한 시험체가 가장 높은 증가율을 보였다.



(그림12) 플레인 콘크리트에 대한 압축강도 증가율과 혼화제 혼입량의 관계

4. 결론

본 실험은 물·결합재비가 18~32% 범위에서 단위 시멘트량 650kg/m³,세굴재율 35%로 일정하게 했을때 혼화제의 종류 및 혼입율이 재령의 변화에 따라 콘크리트 압축강도 증가에 미치는 영향을 연구한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 재령의 변화에 따른 압축강도 증가는 물·결합재비가 작을 수록 혼화제 첨가율이 클 수록 높은 강도 증가를 보였다.

2) 혼화제로서 플라이 애쉬를 시멘트량에 5~10% 사용한 시험체는 플레인 콘크리트에 대한 압축강도 증가율이 5%내외로 다른 시험체보다 가장 적게 나타났다.

3) 물·결합재비가 18%일때 실리카 흙과 플라이 애쉬를 2:1비율로 혼화제를 시멘트량의 30% 치환해서 혼입한 경우 약 1000kg/cm²의 압축강도를 얻을 수 있다.

* 본 논문은 1990년도 한국 학술진흥의 자유공모과제 학술 연구 조성비에 의해 이루어 졌음을 밝히고, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. 永島幸夫外2名, "실리카흙을 사용한 초고강도 콘크리트의 연구", 일본건축학회대회 강연집 1989, 10

2. Tarun R. Maik and Bruce W. Rammen, "High-Strength Concrete Containing Large Quantities of Fly Ash", ACI MATERIAL Journal, March-April, 1989