

실리카흙을 혼합한 고강도콘크리트의 강도개선을 위한 연구

문 한 영
(한양대학교 토목공학과 교수)

문 대 중
(한양대학교 토목공학과 박사과정)

目 次

1. 서론	트의 단일온도
2. 콘크리트용 혼화제로서 실리카흙	4-5 실리카흙 혼합물이 콘크리트의 단일온도에 미치는 영향
3. 실험개요	4-6 단위결합재량과 압축강도와의 관계
3-1 사용재료	4-7 재령과 압축강도와의 관계
3-2 시험방법	4-8 실리카흙을 혼합한 고강도콘크리트의 강도
3-3 콘크리트의 배합	4-9 석고첨가량이 압축강도에 미치는 영향
4. 실험결과에 대한 고찰	4-10 석고를 첨가한 고강도콘크리트의 강도 발현 특성
4-1 고성능감수제의 사용량과 압축강도와의 관계	5. 결론
4-2 공기량과 압축강도와의 관계	참고문헌
4-3 슬럼프 손실 특성에 대한 고찰	
4-4 물-결합재비 및 단위결합재량과 콘크리	

1. 서 론

근년에 와서 건설기술이 크게 진보, 발전함에 따라 콘크리트 구조물에 요구되는 성능 또한 고품질화, 다양화 하는데 따른 콘크리트의 성능 및 기능을 향상시킨 고성능콘크리트가 출현하게 되었다.⁽¹⁻⁵⁾

고성능콘크리트는 기존의 콘크리트의 기능을 고강도화, 고유동화, 고내구성화 한 콘크리트로서 고로슬래그 분말, 플라이애쉬 및 실리카흙을 콘크리트에 혼합 사용하여 굳지않은 콘크리트의

유동성과 경화한 콘크리트의 강도 및 내구성을 크게 향상내지는 개선시킨 콘크리트를 말한다.⁽⁶⁻¹⁸⁾ 특히 실리카흙은 시멘트 비표면적의 50~80배에 이르는 초미립 분말이므로 콘크리트용 혼화제로 사용할 경우, 시멘트 입자 사이의 공극 및 불연속 영역을 충전하여 고밀도화하는 micro filler 효과와 포졸란 반응으로 콘크리트의 장기강도를 향상시키는데 유효하다는 연구성과도 발표되고 있다.^(1-13, 20-34)

실리카흙은 웨로실리콘 및 실리콘메탈을 제조 시 발생하는 산업부산물로서 대기중에 배출되는

양을 환경보호 차원에서 회수하기 위하여 1950년대 노르웨이에서 단지 시멘트 대체재로서 처음 콘크리트에 이용되기 시작하여, 1960년대에 이르러 고성능감수제가 개발되면서 실리카흙을 병용 사용하여 고강도, 고내구성 콘크리트를 개발하기 위한 연구가 진행되어 왔으며, 1970년대에는 실리카흙에 대한 규격안이 제정되었다. (14~18)

본 연구에서는 실리카흙과 고성능감수제를 병용하여 콘크리트의 고강도화를 위한 연구의 일환으로 실리카흙의 혼합률, 단위결합재량 및 석고의 첨가량, 물-결합재비를 변화시켜 콘크리트의 강도향상 및 콘크리트의 단열온도상승을 검토하였으며, 아울러 굳지않은 콘크리트의 슬럼프 손실 특성에 대한 기초실험을 실시하여 콘크리트의 강도를 크게 개선시키고자 하였다.

2. 콘크리트용 혼화재로서 실리카흙

실리카흙은 연무상의 용융 실리카를 냉각고화

표 2-1 실리카흙의 연간사용량 및 이용실적

생산 및 사용량 국 명	생산량(ton)	사용량(ton)
오스트레일리아	60,000	20,000
캐나다	23,000	11,000
프랑스	60,000	-
서독(통일전)	25,000	-
일본	25,000	-
노르웨이	140,000	40,000
남아프리카	43,000	0
스웨덴	10,000	1,000
미국	100,000	2,000

한 것으로 그 형태는 평균입경이 약 0.1 μ m정도이며, SiO₂ 성분이 80% 이상이며 평균 비표면적이 약 20m²/g으로 구형입자이며, Aitcin에 의하면 비중은 대개 2.1~2.2 정도이며 실리카흙의 성분의 종류에 따라 그 값은 달라지는데 SiO₂ 함유율이 작아지면 K₂O 및 CaO등이 성분이 많아져 비중이 커진다고 한다.

일반적으로 실리카흙의 품질특성은 다음과 4가지 경향이 있다고 판명되고 있다.

(1) SiO₂와 상관성이 있는 것 : Na₂O, K₂O

표 2-2 각국의 실리카흙에 대한 품질규격 및 규격안

특 성	국명 또는 제안자 명	Canada	Norway	Denmark	RILEM	Australia	Deutsch DIN 1045	USA ASTM Draft#13	Sweden PFS '85.2
발열량(mix%)	Si 또는 FeSi (Si≥75%)					(yes)			
화학성분									
SO ₃	1.0	-	4.0	-	-	2.0	-	4.0	
강열감량	6.0	5.0	5.0	6	6.0	2.0	6.0	5.0	
SiO ₂	85	85	-	(yes)	8.5	-	85	-	
함유율	(3.0)	-	1.5	(yes)	-	-	3.0	-	
MgO	-	-	5.0	-	-	-	-	5.0	
가용성물질	-	-	1.5	-	-	-	1.5	-	
Cl ⁻	-	-	0.1	-	-	0.1	-	0.2	
물리적 성질									
포졸란활성지수	85	95	-	95	future	100	85	-	
길이변화	0.2	-	-	-	(yes)	(yes)	-	-	
균일성 비중의 변동	5	-	-	-	(yes)	-	-	-	
45 μ m잔분의 변동	X±5	-	-	-	-	-	-	-	
AE제첨가량의 변동	(20)	-	-	-	-	-	20	-	
건조수축의 증가	(0.03)	-	-	-	-	-	0.1	-	
알카리 골재반응성	(80)	-	-	-	-	-	80	-	
표준연도수량의 증가	-	-	-	(yes)	-	-	-	-	

표 2-3 실리카흙의 제품형태에 따른 특성

실리카흙의 형태	장 점	단 점
분 말 상	① 높은 포졸란 반응 ② 기술적 성능 및 효율성 ③ 수송, 저장, 배합시 온도보호가 필요 없음	① 먼지와 습기에 민감 ② 높은 수송비 ③ 제한된 수송거리
과 립 상	① 최저의 수송비 ② 최소의 저장 및 수송 부피 ③ 먼지 감소	① 최소의 포졸란 반응성, 기능 및 효율성 ② 습기에 민감
Slurry	① 먼지가 없음 ② 간편한 수송과 배합 체계 ③ 현탁액으로 만들어 사용하므로 콘크리트에 혼합시 실리카흙이 혼합 및 분산이 용이	① 침전때문에 실리카량이 부정확 ② 단위수량 조절의 어려움 ③ 동결을 방지하기 위하여 수송, 저장, 배합시 온도 조절 필요 ④ 조속한 겔 형성을 방지하기 위하여 pH 조절 ⑤ 저장, 분배 탱크는 현탁액 속에서 실리카흙을 유지하기 위하여 일정 교반

및 MgO 등

- (2) 강열감량과 상관성이 있는 것 : 탄소 등
- (3) 습분과 상관성이 있는 것 : 비중 등
- (4) 기타 : 어디에도 속하지 않으나 어떤것은 극히 미량(1%에 미치지 않음)이기 때문에 다른성분과 상관성이 인정되지 않는 것

각국의 실리카흙에 대한 연간생산량 및 이용 실적과 품질규격 및 규격안이 표 2-1 및 표 2-2와 같다.

그리고 실리카흙을 제품형태에 따라 응축처리된것(과립상), 응축처리 되지 않은것(분말상), slurry의 3가지 형태로 분류할 수 있으며, 그 형태에 따른 장, 단점은 표2-3과 같다.

실리카흙은 매우 미세한 입자이기 때문에 모르터 및 콘크리트에 혼합할 경우 혼합시 점성이 커져 유동성이 저하하여 콘크리트의 슬럼프가 저하하므로 소요의 슬럼프를 얻기 위해서는 고성능감수제의 사용이 불가피하며, 실리카흙의 혼합률에 따라 공기연행이 어렵기 때문에 AE제 사용이 필요하다. 그러나 슬럼프가 크더라도 재료분리 및 블리딩이 없으며, 혼합률이 증가함에 따라 수화발열량은 작아지며, 실리카흙을 혼합하지 않은 경우에 비하여 초기 수화발열은 촉진된다. 그리고 경화한 콘크리트의 강도발현 메카니즘은 실리카흙의 마이크로 필러효과와 포졸란 반응으로 콘크리트의 강도를 향상시킨다. Bache, O.E. Gjorv에 의하면 실리카흙의 초

표 3-1 시멘트 및 실리카흙의 화학성분 및 물리적 성질

항 목	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	강열감량 (%)	비 중	비표면적 (cm ² /g)
종 류									
OPC	21.95	6.59	2.81	60.12	3.32	2.11	2.58	3.15	3.112
SF	92.24	0.94	0.61	0.25	1.32	0.50	3.02	2.33	204.700

(주) OPC : 보통포틀랜드 시멘트 SF : 실리카흙

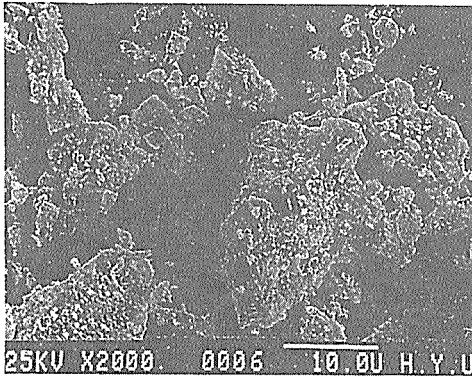


사진 3-1 시멘트의 전자현미경 사진

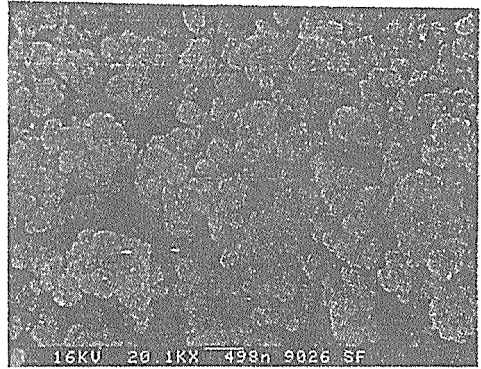


사진 3-2 실리카흙의 전자현미경 사진

졸란 반응은 재령 3일과 28일 사이에서 가장 활발히 진행된다고 보고하고 있다.⁽²¹⁾

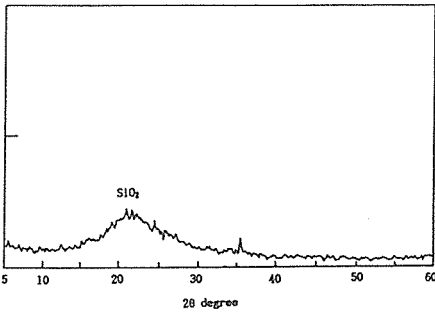


그림 3-1 실리카흙의 X선 회절도

미립자가 시멘트 입자 사이의 공극을 밀실하게 채우는 마이크로 필러효과에 의하여 콘크리트의 강도를 향상시킨다고 하였다.⁽²⁰⁾

또한 포졸란 반응은 포틀랜드 시멘트의 수화 반응에 생성되는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 반응하여 2차 수화물인 $\text{C-S-H}(2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$ 를 형성하여 시멘트와 골재면을 보다 강한 전이영역으로 변화시키는 것으로서 콘크리트의 강도 및 내구성을 증진시킨다고 알려져 있다. Mehta에 의하면 포졸란 반응은 시멘트 수화후 2일 정도에서 시작된다고 하며,⁽¹⁹⁾ O.E. Gjorv는 포졸란 반응으로 인한 강도기여는 주로 5~7일에서 일어난다고 하였으며,⁽²⁰⁾ Sellevold와 Radij는 실리카흙 혼합 콘크리트를 표준양생한 경우 포

3. 실험 개요

3-1 사용 재료

(1) 시멘트 및 실리카흙 : 시멘트는 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 실리카흙은 SiO_2 함량이 92.24%로 그 화학성분 및 물리적 성질은 표 3-1과 같으며, 시멘트와 실리카흙 입자의 전자현미경 및 X선 회절시험을 측정하여 나타낸 것이 사진 3-1 및 사진 3-2이며, 그림 3-1이다.

(2) 골재 : 잔골재는 한강산 강모래를 사용하였으며, 굵은골재는 최대치수가 19mm인 부순 자갈을 사용하였으며, 물리적 성질은 표 3-2와 같다.

(3) 석고 : 공업용석고를 사용하였으며 화학성분은 표 3-3과 같다.

(4) 고성능감수제 : 나프탈린 술폰산 포르말린 고축합물이 주성분이고 비중이 1.19~1.20, pH 9±1인 고성능감수제를 사용하였다.

표 3-2 골재의 물리적 성질

종 류 \ 항 목	최대치수 (mm)	비 중	흡수율 (%)	조립률	유기불순물	단위용적중량 (kg/m ³)	실적률 (%)
잔 골 재	—	2.60	1.83	2.66	양 호	1,584	61.0
굵 은 골 재	19	2.62	1.21	6.83	—	1,586	61.0

표 3-3 공업용 석고의 화학성분(%)

C	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cl	MgO	CO ₂	CaO	SO ₃
6.0	0.11	0.001	0.0001	—	0.0001	—	38.5	55.1

표 3-4 실리카흙 혼합 콘크리트의 배합표

단위결 합재량 (kg/m ³)	굵은골 재최대 치수 (mm)	슬럼프 (cm)	물- 결합재비 (%)	공기량 (%)	잔골재율 (%)	혼합률 (%)	단위중량(kg/m ³)					고성능 감수제 사용량 (Cx%)
							단위 수량	시멘트	실리 카흙	잔 골재	굵은 골재	
700	19	18±1	25	1.5±1	42	0	175	700	0	639	897	1.32
						10	"	630	70	"	"	1.30
						20	"	560	140	"	"	1.68
			23			0	161	700	0	657	915	1.52
						10	"	630	70	"	"	1.38
						20	"	560	140	"	"	1.60
750	19	18±1	23	1.5±1	42	0	172	750	0	627	873	1.87
						10	"	675	75	"	"	1.58
						20	"	600	150	"	"	2.17
			23 석고 3% 첨가			0	172	750	0	627	873	2.48
						10	"	675	75	"	"	2.00
						20	"	600	150	"	"	2.50
800	19	18±1	25	1.5±1	42	0	200	800	0	580	807	1.32
						10	"	720	80	"	"	1.30
						20	"	640	160	"	"	1.68
			23			0	184	800	0	597	831	1.52
						10	"	720	80	"	"	1.43
						20	"	640	160	"	"	1.80

3-2 시험 방법

(1) 콘크리트의 제조방법 : 실리카흙을 혼합한 고강도콘크리트를 제조하기 위하여 용량 50 l의 강제식 믹서에 시멘트, 실리카흙, 잔골재를 투입하여 30초 동안 건조상태로 믹싱한 후 혼합수와 고성능감수제 사용량의 2/3를 투입하여 2분 30초 동안 믹싱한 후 굵은 골재와 나머지 1/3의 고성능감수제를 넣고 1분 30초 동안 믹싱하여 콘크리트를 제조하였다.

(2) 슬럼프 손실 측정 시험 : 실리카흙을 혼합한 고강도콘크리트 제조시 콘크리트의 믹싱후 경과 시간에 따른 슬럼프 손실량을 알아보기 위하여 강제식 믹서에서 제조한 콘크리트를 가경식 믹서로 옮겨 속도 2rpm으로 회전하면서 90분 동안 30분 간격으로 슬럼프 시험을 실시하였다.

(3) 콘크리트의 온도 측정 시험 : 단위시멘트량이 많은 실리카흙 혼합 고강도콘크리트의 온도 변화를 알아보기 위하여 용량 25×25×25cm의 단열용기 속에 콘크리트를 채우고 콘크리트 중심 부위와 대각선 방향으로 3등분한 2지점에 온도 센서를 묻고 2시간 간격으로 72시간 동안 콘크리트의 온도를 측정하였다.

(4) 강도시험 : 용량 50 l의 강제식 믹서로 콘크리트를 믹싱한 후 30~40초 정도 진동다짐하여, ϕ 10×20cm의 원주형 공시체를 제조한 후 수중양생하여 재령 3, 7, 28 및 91일의 압축강도를 KS F 2423에 따라 측정하고, 인장강도 및 탄성계수는 재령 28일된 공시체를 KS F 2423 및 KS F 2438에 따라 측정하였다.

(5) 주사형 전자현미경 사진(SEM) 및 X선 회절시험 : 시멘트 및 실리카흙 입자의 모양 및 크기를 알아보기 위하여 전자현미경 사진으로 각각 2,000배와 20,000배로 확대하여 촬영하였으

며, 페이스트의 수화생성물을 알아보기 위하여 X선 회절시험 및 전자현미경 사진을 촬영하였다.

3-3 콘크리트의 배합

고강도콘크리트를 제조하기 위하여 단위결합재량을 700, 750 및 800kg/m³ 4종류, 물-결합재비는 23, 25%로 정하였으며, 잔골재율 42%, 공기량 1.5±1%, 목표슬럼프 18±1cm가 되도록 배합을 정한 것이 표 3-4이다.

4. 실험결과에 대한 고찰

4-1 고성능감수제의 사용량과 압축강도와의 관계

실리카흙 혼합 고강도콘크리트 제조시에 사용되는 고성능감수제의 사용량을 알아보기 위하여 단위결합재량 700, 750 및 800kg/m³과 물-결합재비 23 및 25%, 실리카흙을 단위결합재량

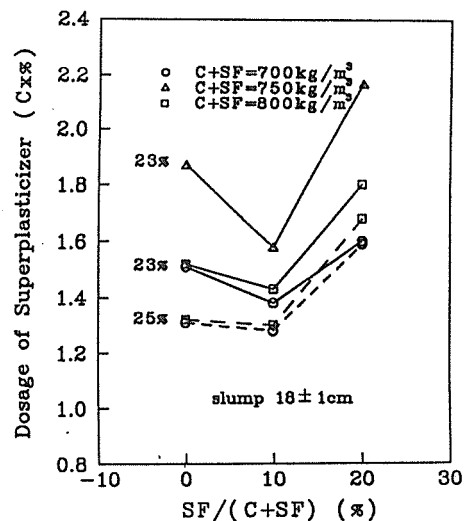


그림 4-1 실리카흙 혼합률에 따른 고강도콘크리트의 고성능감수제 사용량

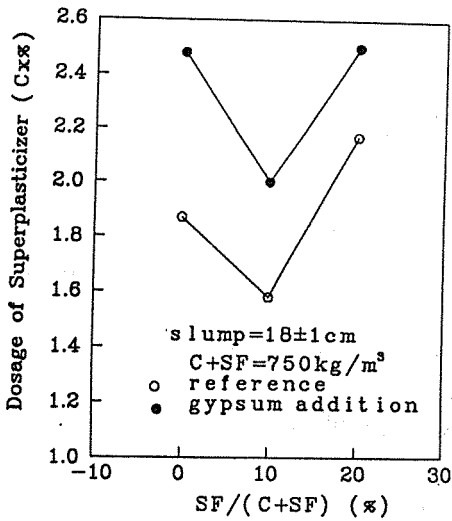


그림 4-2 실리카흙 및 석고 첨가에 따른 고성능감수제 사용량

중량에 0, 10 및 20% 혼합하여 목표슬럼프 18±1cm의 콘크리트를 제조하는데 요구되는 고성능감수제를 측정하여 정리한 것이 그림 4-1 및 그림 4-2이다.

그림 4-1에서 알 수 있듯이 동일 슬럼프의 굳지않은 콘크리트를 제조하는데 사용되는 고성능감수제량은 단위결합재량 및 물-결합재비에 따라 각각 다르게 나타남을 알 수 있으며, 일반적으로 물-결합재비가 작고 단위결합재량이 클수록 고성능감수제 사용량이 증가하였으며, 단위결합재량이 750kg/m³에서 고성능감수제 사용량이 가장 크게 나타났는데, 이는 외기온도가 골재의 표면수 및 혼합수를 증발시키기 때문이라고 생각된다. 특히 실리카흙 혼합물에 따른 고성능감수제 사용량은 실리카흙 혼합률 10%에서 가장 적게 요구되었다. 이는 콘크리트의 물-결합재비가 25% 이하일 경우 실리카흙 10% 혼합 콘크리트의 고성능감수제 사용량이 가장 작게 요구되었다는 연구결과와 비슷하며,⁽²²⁻²⁴⁾ 이 결과는 실리카흙 혼합률이 10% 전후일때 미분말 실리카흙이

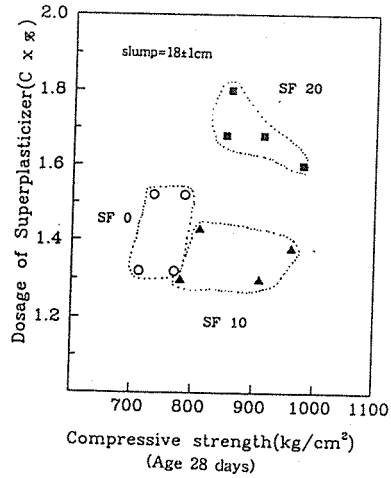


그림 4-3 실리카흙 혼합 콘크리트의 고성능감수제 사용량과 압축강도와의 관계

시멘트 입자간의 충전성 및 윤활작용이 가장 우수하며 동일한 워커빌리티를 갖는 콘크리트를 제조할 때 고성능감수제의 사용량이 가장 적게 소요되었다고 생각된다.

그림 4-2는 단위결합재량 750kg/m³, 물-결합재비 23% 및 슬럼프 18±1cm의 콘크리트와 석고 3% 첨가 콘크리트의 고성능감수제 사용량을 나타낸 것으로 외기온도가 높아지고 석고를 첨가함에 따라 고성능감수제 사용량이 크게 증가하였으며, 대체적으로 20-30% 정도 증가함을 알 수 있다. 이는 석고를 첨가함에 따라 강도를 증가시키는 잇점은 있으나, 고성능감수제가 많이 소요되므로 이에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

다음은 고성능감수제의 사용량과 경화한 콘크리트의 재령 28일 압축강도를 정리하여 나타낸 것이 그림 4-3이다. 그림에서 알 수 있듯이 실리카흙 혼합률 10%에서 고성능감수제 사용량이 가장 적게 소요되었으며 압축강도도 비교적 크게 나타남을 보이고 있으므로 실리카흙 10% 정도

의 혼합 콘크리트가 고성능감수제 및 압축강도 면에서 경제적이라고 생각된다.

4-2 공기량과 압축강도와의 관계

단위결합재량 3단계, 물-결합재비 2단계 및 실리카흙 혼합률 0, 10 및 20% 3단계로 변화시키고 목표슬럼프 18±1cm로 정하여 실리카흙 고강도콘크리트의 공기량을 측정하여 정리한 것이 그림 4-4 및 그림 4-5이다.

그림 4-4는 단위결합재량 700, 800kg/m³과

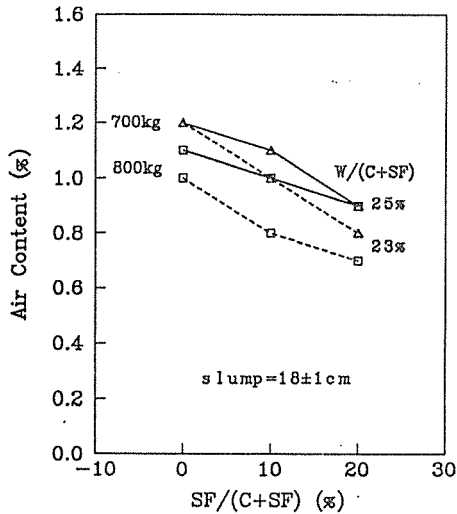


그림 4-4 실리카흙 혼합률에 따른 고강도콘크리트의 공기량

물-결합재비 23 및 25%일 때 실리카흙 혼합률에 따른 고강도콘크리트의 공기량을 나타낸 것으로 동일 슬럼프를 갖는 콘크리트의 공기량은 실리카흙 혼합률이 증가할수록 감소하며, 물-결합재비가 작고 단위결합재량이 클수록 감소하는 것을 나타내고 있다. 이는 실리카흙이 시멘트 입자간의 공극을 밀실하게 채워주는 microfiller 효과에 의해 공극이 감소되었다고 생각된다.

그림 4-5는 실리카흙 및 석고 첨가 고강도콘

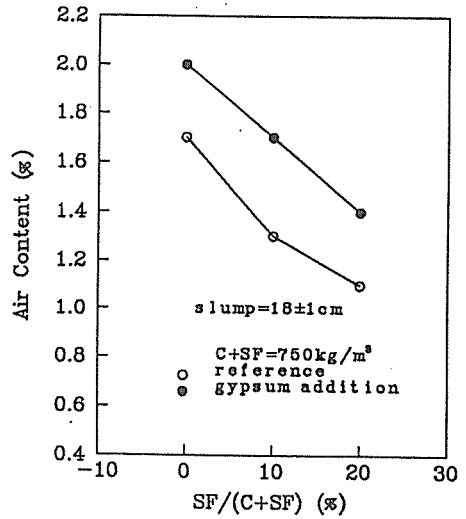


그림 4-5 실리카흙 및 석고 첨가 콘크리트의 공기량

크리트의 공기량의 변화를 나타낸 것으로 석고를 첨가하므로써 공기량이 커지며, 실리카흙 혼합률

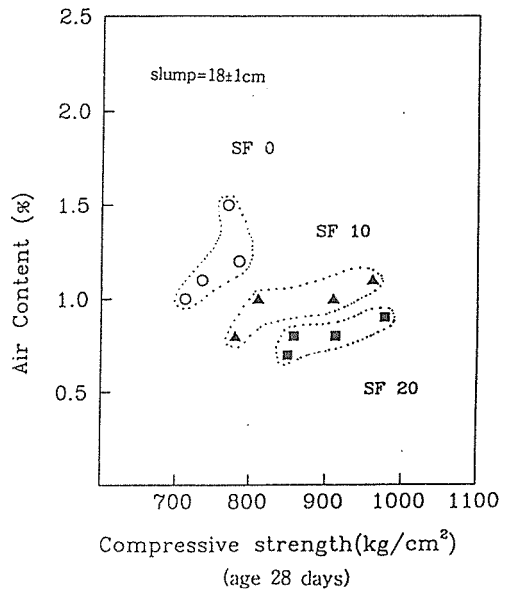


그림 4-6 실리카흙 혼합 콘크리트의 공기량과 압축강도와의 관계

이 증가할수록 감소함을 나타내고 있다. 그리고 그림 4-4와 비교해 볼때 공기량이 얼마간 큼을 알 수 있는데 이는 외기온도가 높아짐에 따라 다소 공기량이 크게 나타나기 때문이라고 생각된다.

다음은 실리카흙을 혼합한 콘크리트의 압축강도와 공기량의 관계를 알아보기 위하여 그림 4-4와 동일한 조건에서의 콘크리트 공기량과 재령 28일 압축강도를 정리한 것이 그림 4-6이다. 그림에서 알 수 있듯이 실리카흙 혼합률이 증가함에 따라 공기량이 감소하고 있으며, 압축강도도 증가함을 알 수 있다. 이는 미분말의 실리카흙의 microfiller 효과에 의하여 콘크리트를 밀실하게 채워주므로써 콘크리트의 강도가 향상되었다고 생각된다.

4-3 슬럼프 손실 특성에 대한 고찰

고강도 콘크리트를 제조하기 위하여 단위결합재량을 대폭 늘리고 물-결합재비를 감소하므로써, 슬럼프 손실에 미치는 영향 및 슬럼프 손실을 개선하기 위하여 실리카흙 및 석고 사용에

표 4-1 실리카흙 혼합 콘크리트의 경과시간별 슬럼프 손실 측정 결과

단위결합재량 (kg/m ³)	석고 첨가량 (Cx%)	실리카흙 혼합률 (%)	슬럼프값(cm)			
			0분	30분	60분	90분
750	0	0	16.0	8.4	4.5	2.0
	3		17.2	7.5	4.0	2.0
	0	10	17.0	4.7	2.4	1.0
	3		17.8	3.5	2.0	1.0
	0	20	17.5	7.2	3.5	1.5
	3		17.5	6.2	3.0	1.0

대하여 정리한 것이 표 4-1이며, 이 표를 그림으로 정리하여 나타낸 것이 그림 4-7~그림 4-9이다.

그림 4-7은 단위결합재량 750kg/m³, 물-결합재비 23% 및 실리카흙 혼합률 0, 10, 20%로 변화시키고 목표슬럼프를 18±1cm로 정하여 제조한 균질한 고강도콘크리트의 믹싱후 경과시간 90분까지 슬럼프 값을 측정하여 정리한 것이다. 이 그림에서 믹싱 후 경과시간에 따라 실리카흙을 혼합하지 않는 콘크리트가 슬럼프가 크게 나타나고 있으며, 특히 실리카흙 혼합률 10%에

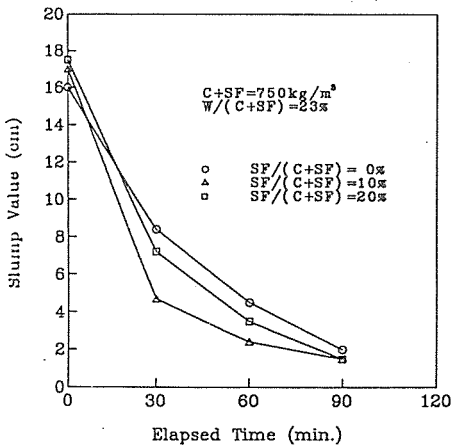


그림 4-7 실리카흙 혼합 콘크리트의 믹싱 후 경과시간에 따른 슬럼프 값

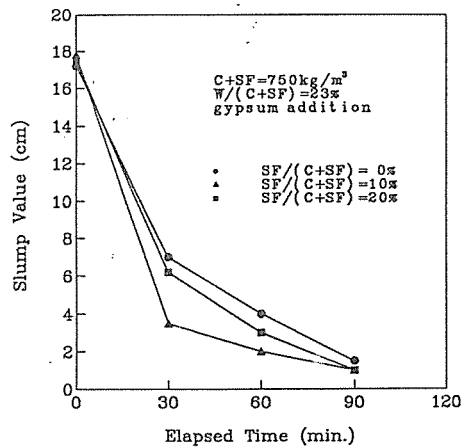


그림 4-8 실리카흙 및 석고 첨가 콘크리트의 믹싱 후 경과시간에 따른 슬럼프 값

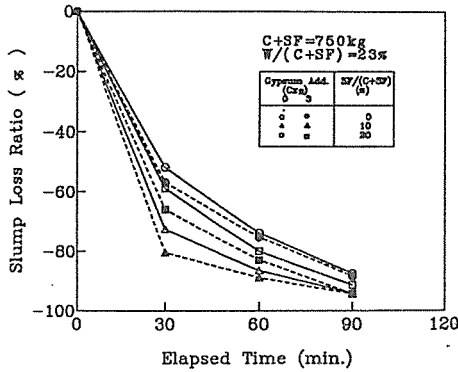


그림 4-9 실리카흙 및 석고 첨가 콘크리트의 믹싱 후 경과시간에 따른 슬럼프 손실률

서는 슬럼프가 크게 떨어지고 있으며, 경과시간 90분에서 실리카흙 혼합물에 관계없이 'No-Slump' 를 나타내고 있다.

그림 4-8은 그림 4-7의 동일한 조건에 석고를 3% 첨가한 고강도콘크리트의 믹싱 후 경과시간에 따른 슬럼프 값을 나타낸 것으로 그림 4-7과 비교해 볼 때 비슷한 경향을 나타내고 있으며 다소 슬럼프 손실이 크게 나타남을 알 수 있다.

이번에는 그림 4-7과 그림 4-8을 슬럼프 손실률로 나타낸 것이 그림 4-9이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 경과시간 30분에서 실리카흙 및 석고를 혼합하지 않은 경우 약 50% 정도의 슬럼프 손실률을 나타내는 반면에 실리카흙 10 및 20% 혼합에서 약 72 및 60% 정도의 슬럼프 손실률을 나타내었으며, 석고를 첨가하므로써 오히려 더 큰 슬럼프 손실률을 나타내고 있다. 또한 경과 시간 60분이 지나면서 실리카흙 및 석고 첨가에 관계없이 90% 이상의 슬럼프 손실률을 나타내고 있으며, 이는 석고가 시멘트의 초기수화를 지연한다는 결과⁽²⁴⁻²⁵⁾와 다소 상반되는 결과라고 생각되며 이에 대한 심도있는 연구가 필요하다

표 4-2 실리카흙 혼합 콘크리트의 경과시간별 온도변화 측정결과

단위결합재량 (kg/m ³)	물-결합재비 (%)	실리카흙 혼합률 (%)	슬럼프 값 (cm)	콘크리트의 온도(℃)											
				0시간	4시간	6시간	8시간	10시간	12시간	16시간	18시간	24시간	48시간	72시간	
700	25	10	18.5	24.0	27.2	32.6	46.6	52.0	51.0	49.7	46.1	34.9	26.1	24.7	
700	23	10	18.0	24.0	27.8	35.2	50.8	55.7	52.8	48.1	45.6	33.8	26.0	2.47	
750	23	0	20.5	26.0	27.0	28.5	32.0	52.0	59.0	54.0	48.6	41.0	29.0	27.0	
		10	17.5	26.0	27.5	36.0	53.0	56.9	56.0	51.7	46.8	38.0	30.0	28.0	
		20	19.5	26.0	29.0	34.8	47.5	54.1	52.9	50.1	46.5	38.5	30.0	27.6	
	석고 3% 첨가	0	19.0	26.0	29.0	35.3	45.0	66.5	69.0	63.0	58.7	42.0	29.5	27.0	
		10	19.0	26.0	31.5	39.7	54.0	65.0	63.8	59.9	57.5	44.0	30.0	28.0	
		20	17.0	26.0	31.0	39.0	49.5	62.7	61.3	54.9	53.5	43.0	29.0	27.6	
800	25	0	17.0	20.0	22.3	25.1	28.8	49.0	60.0	62.7	58.4	52.2	26.6	21.6	
		10	19.5	20.0	23.2	24.5	29.5	48.0	54.0	55.0	54.0	50.0	28.1	21.6	
		20	18.0	20.0	22.5	23.6	26.3	45.0	51.7	52.2	51.6	49.9	25.5	21.0	
	23	0	19.0	21.0	22.6	23.7	28.5	38.4	51.2	52.8	54.2	47.1	23.3	22.3	
		10	18.5	21.0	21.5	22.3	28.8	39.5	47.3	49.0	52.4	44.3	2.31	22.1	
		20	17.0	21.0	21.0	23.2	29.4	38.0	44.9	45.7	47.8	43.6	22.0	21.0	

다고 생각된다.

4-4 물-결합재비 및 단위결합재량과 콘크리트의 단열온도

단위결합재량이 크고 물-결합재비가 매우 작은 고강도콘크리트 및 매스콘크리트를 제조할 경우 시멘트의 수화열에 의한 콘크리트의 온도상승으로 콘크리트의 온도응력 및 온도균열 등과 같이 콘크리트에 악영향을 미치는 요인들이 발생하게 되므로 이를 해결하기 위한 대책 마련이 강구되어야 한다.⁽²⁶⁻²⁸⁾

단위결합재량 750kg/m³, 물-결합재비 23%, 실리카흙 혼합률 0, 10, 20% 및 석고 3% 첨가 콘크리트의 믹싱후 경과시간에 따른 온도변화를 측정하여 정리한 것이 표 4-2이며, 이 표를 그림으로 정리하여 나타낸 것이 그림 4-10~그림 4-

16이다.

그림 4-10과 그림 4-11은 단위결합재량 700, 800kg/m³, 물-결합재비 23%, 25% 및 실리카흙 혼합률 10%일때 믹싱 후 경과시간 70 시간 까지 콘크리트의 온도변화를 측정하여 정리한 결과를 나타낸 것으로, 초기온도와 최고온도와의 차이는 단위결합재량 700kg/m³일 경우 물-결합재비 23, 25%에서 각각 27.9, 24.8℃로 나타났으며, 단위결합재량 800kg/m³일 경우 30.9, 35℃로 대체적으로 단위결합재량이 클 경우에 온도상승이 큼을 알 수 있으며, 물-결합재비가 상이한 경우에 있어서는 서로 상반되는 결과를 얻었다. 이는 실험조건에 따라 약간의 차이가 있는 것으로 생각되며, 초기온도가 높을 수록 최고온도에 도달하는 시간은 빨라지고 최고온도 값은 비교적 작다는 결과와 유사하다고 생각된다.

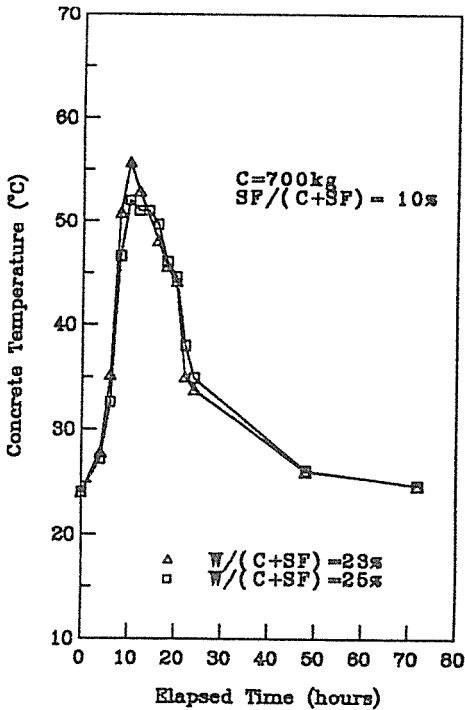


그림 4-10 물-결합재비에 따른 실리카흙 혼합 콘크리트의 온도변화
(C+SF=700kg/m³, SF/(C+SF)=10%)

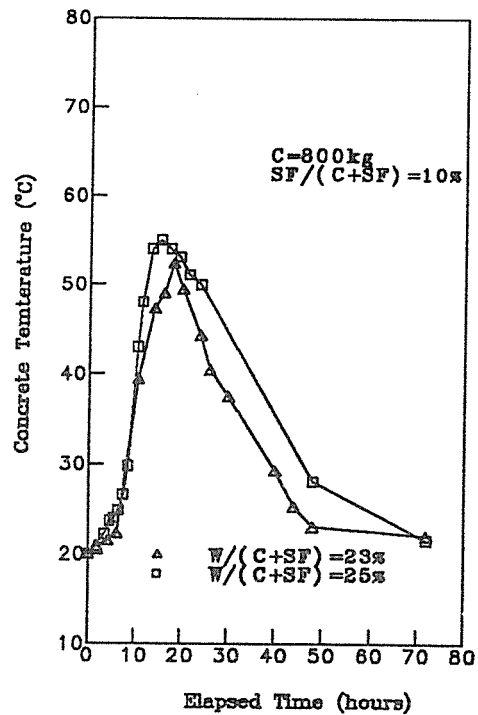


그림 4-11 물-결합재비에 따른 실리카흙 혼합 콘크리트의 온도변화
(C+SF=800kg/m³, SF/(C+SF)=10%)

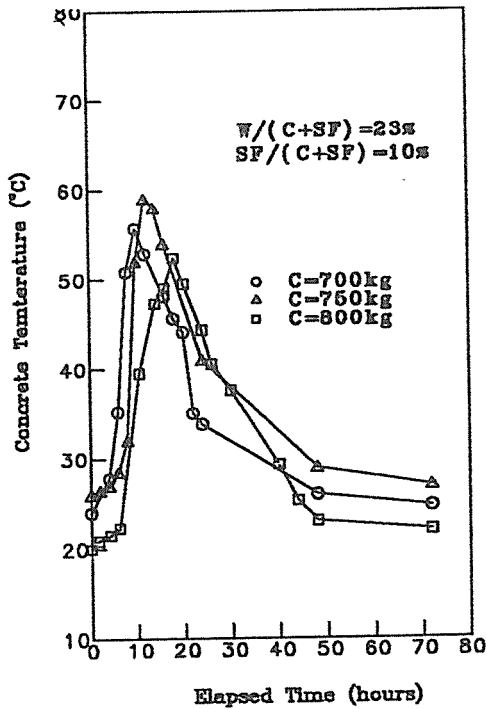


그림 4-12 단위결합재량에 따른 실리카흙 혼합 콘크리트의 온도변화

그림 4-12는 단위결합재량에 따른 실리카흙 혼합 콘크리트의 온도변화를 알아보기 위하여 단위 결합재량을 3종류로 변화시키고 물-결합재비 23%, 실리카흙 혼합률 10%로 제조한 콘크리트의 경과시간 72시간 까지 측정하여 정리한 것이다. 일반적으로 단위결합재량이 증가함에 따라 콘크리트의 온도상승이 큼을 알 수 있으며, 단위결합재량 700, 750, 800kg/m³에서 각각 27.9, 29.4, 30.9°C 정도의 온도상승이 있었으며, 최고온도에 도달하는 시간은 기온이 높아짐에 따라 빨라지는 경향을 보이고 있다.

이와 같이 고강도콘크리트를 제조할 경우 시멘트 수화열에 의한 콘크리트의 온도응력 및 온도균열이 발생하므로 이에 대한 대책이 마련되어야 한다.

4-5 실리카흙 혼합률이 콘크리트의 단열온도에 미치는 영향

그림 4-13은 단위결합재량 800kg/m³, 물-결합재비 23% 및 실리카흙 혼합률 0, 10, 20% 혼합 콘크리트의 믹싱 후 경과시간 72시간 까지 콘크리트의 온도변화를 측정하여 정리한 것으로, 최고 온도에 도달하는 시간은 약 18시간 정도로 나타났으며, 실리카흙 혼합률 0, 10 및 20%에서 최고 온도는 각각 54.2, 52.4 및 47.8°C 정도로 나타났다.

그림 4-14는 그림 4-13과 동일한 조건이며 물-결합재비가 25%인 실리카흙 혼합 콘크리트의 믹싱 후 경과시간에 따른 콘크리트의 온도변화를 측정하여 정리한 것으로, 최고온도에 도달하는 시간은 약 16시간 정도로 나타났으며, 실리카흙을 혼합하지 않은 콘크리트에 비하여 실리카

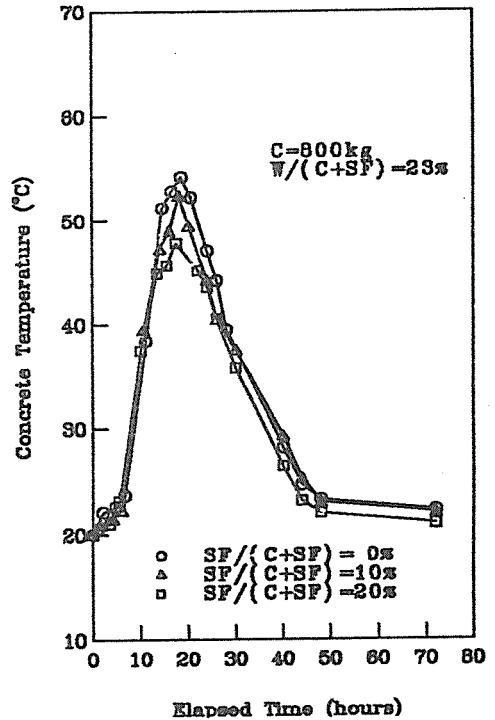


그림 4-13 실리카흙 혼합 콘크리트의 믹싱 후 경과시간에 따른 온도변화 (C+SF=800kg/m³, W/(C+SF)=23%)

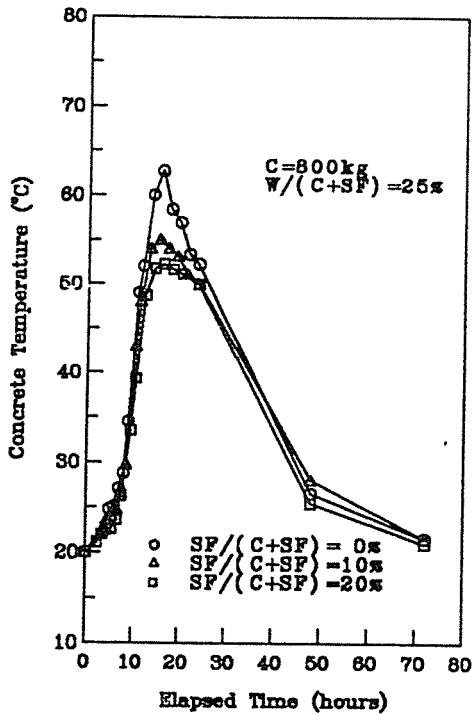


그림 4-14 실리카흙 혼합 콘크리트의 믹싱 후 경과시간에 따른 온도변화 (C+SF=800kg/m³, W/(C+SF)=25%)

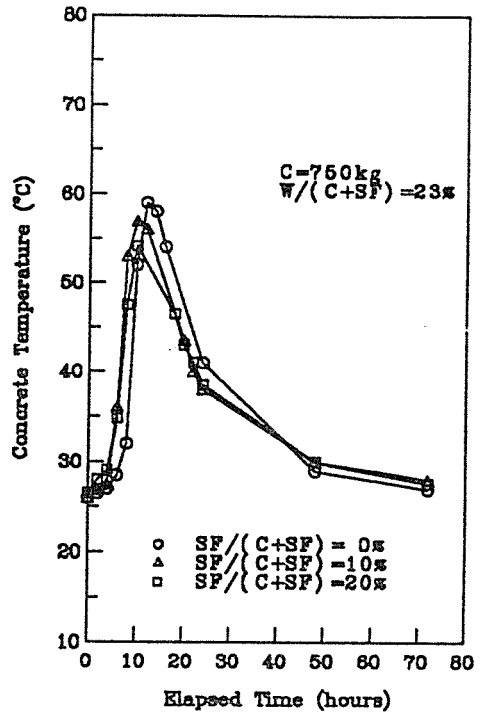


그림 4-15 실리카흙 혼합 콘크리트의 믹싱 후 경과시간에 따른 온도변화 (C+SF=750kg/m³, W/(C+SF)=23%)

흙 10 및 20%의 최고온도는 약 7.7 및 10.5°C로 감소하는 효과를 얻었다. 이는 실리카흙 혼합률이 증가함에 따라 시멘트량이 상대적으로 감소하여 C₂S 및 C₃S와 같은 시멘트 조성광물의 수화발열량이 감소했기 때문이라고 생각된다.⁽²⁶⁾

그림 4-15는 단위결합재량 750kg/m³, 물-결합재비 23% 및 실리카흙을 3단계로 변화시켜 믹싱후 경과시간 72시간 까지 콘크리트의 온도변화를 측정하여 정리한 것으로, 최고온도에 도달하는 시간은 10~12시간으로 외기온도가 높아짐에 따라 빨라지고 있으며, 최고온도상승률로 크게 나타나고 있다.

그림 4-16은 콘크리트의 강도를 향상시키기 위하여 석고를 3% 첨가하여 그림 4-15와 동일한 조건으로 콘크리트를 제조한 후 믹싱 후 경과시간에 따른 고강도콘크리트의 온도변화를 나타

내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 석고를 첨가하므로써 콘크리트의 온도가 급격히 올라가고 있음을 알 수 있으며, 앞의 그림 4-15와 비교해 볼 때 콘크리트의 최고온도는 12시간 정도에서 나타나고 있으며, 석고를 첨가하므로써 콘크리트의 강도를 증가시키는 효과는 있었으나 콘크리트의 온도는 약 9°C 정도까지 크게 나타나는 문제점이 있었다.

4-6 단위결합재량과 압축강도와의 관계

단위결합재량 700, 750, 800kg/m³, 물-결합재비 23, 25% 및 실리카흙을 0, 10, 20%로 변화시켜 재령 91일까지의 압축강도와 재령 28일의 인장강도 및 탄성계수를 KS 규정에 따라 측정하여 정리한 것이 표 4-3이다.

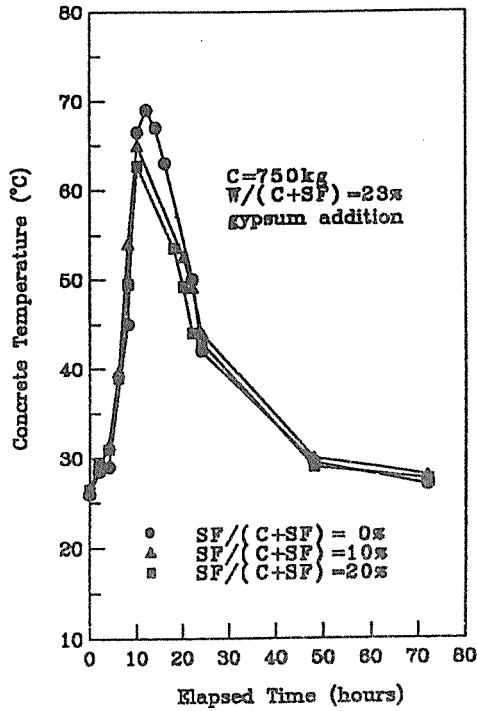


그림 4-16 실리카흙 및 석고 첨가 콘크리트의 믹싱 후 경과시간에 따른 온도변화
(C+SF=750kg/m³, W/(C+SF)=23%)

실리카흙 혼합 콘크리트의 최대 압축강도를 발현하는데 필요한 적정 단위결합재량을 알아보기 위하여 단위결합재량 3종류, 실리카흙 혼합률 0, 10, 20%, 물-결합재비 23%인 실리카흙 혼합 콘크리트의 재령 91일까지의 압축강도를 측정하여 정리한 것이 그림 4-17이다.

이 그림에서 알 수 있듯이 단위결합재량 750kg/m³에서 압축강도가 가장 크게 나타남을 알 수 있으며, 실리카흙 20% 혼합 콘크리트의 경우 재령 28일 및 91일에서의 압축강도가 1.024, 1.107kg/cm²의 고강도를 나타내었으며, 단위시멘트량이 700kg/m³정도에서 가장 큰 강도를 발현한다는 연구내용과 유사함을 알 수 있다.⁽²⁹⁾

이번에는 그림 4-17과 동일한 조건으로 제조한 실리카흙 혼합 고강도콘크리트의 재령 28일

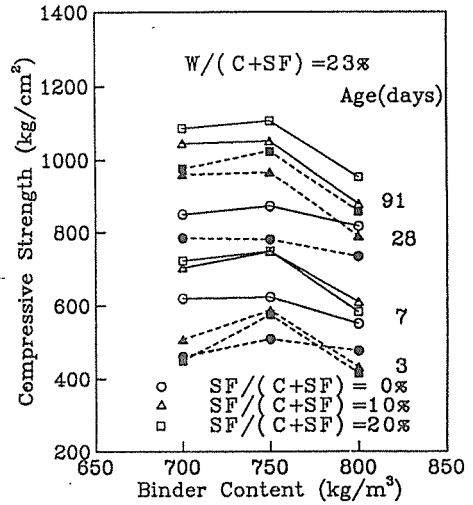


그림 4-17 실리카흙 혼합콘크리트의 단위 결합재량에 따른 압축강도

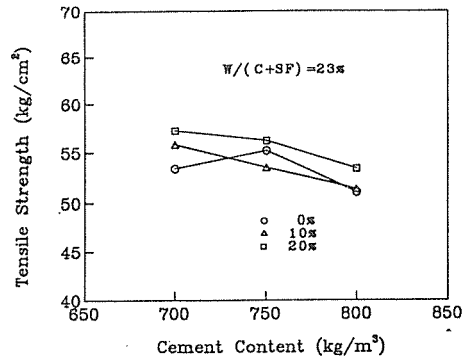


그림 4-18 실리카흙 혼합 콘크리트의 단위결합재량에 따른 인장강도

의 인장강도를 측정하여 정리한 것이 그림 4-18이다.

이 그림에서 실리카흙 혼합률에 따라 다소 차이는 있으나 대체적으로 혼합률이 클수록 인장강도가 얼마간 크게 나타남을 알 수 있으며, 이는

표 4-3 실리카흙 혼합 콘크리트의 강도실험 결과

단위 결합재량 (kg/m ³)	물-결 합재비 (%)	실리카흙 혼합률 (%)	압축강도(kg/cm ²)				인장강도 (kg/cm ²)	탄성계수 (× 10 ⁹ kg /cm ²)
			3일	7일	28일	91일		
700	25	0	370	581	770	837	50.2	3.63
		10	433	595	909	978	50.1	3.84
		20	352	665	912	1.060	53.0	3.92
700	23	0	462	621	785	850	53.4	3.69
		10	509	704	961	1,045	55.8	4.03
		20	450	723	977	1.086	57.2	4.14
750	23	0	510	625	781	872	49.5	3.59
		10	588	748	967	1.052	53.5	3.98
		20	576	749	1.024	1.107	56.2	4.10
750	23 석고 3% 첨가	0	566	649	801	889	50.3	3.72
		10	592	782	979	1.084	55.2	4.13
		20	579	797	1.058	1.170	56.9	4.20
800	25	0	375	512	712	791	47.2	3.44
		10	409	545	764	849	48.9	3.45
		20	436	589	850	944	50.3	3.72
800	23	0	478	552	735	817	51.1	3.53
		10	433	612	790	878	51.4	3.56
		20	416	584	858	953	53.4	3.78

미분말의 실리카흙이 시멘트 입자간의 결합력을 증가시키기 때문이라고 생각된다.

4-7 재령과 압축강도와와의 관계

단위결합재량 700, 800kg/m³, 물-결합재비 23, 25% 및 실리카흙 혼합률 3단계로 변화시켜, 재령 3, 7, 28 및 91일의 압축강도 및 압축강도비를 측정하여 정리한 것 그림 4-19~4-22이다.

그림 4-19는 단위결합재량 700kg/m³, 물-결합재비가 23%에서 얼마간 강도가 크게 나타났으며, 실리카흙 혼합 20%의 경우 재령 3일에서는 실리카흙을 혼합하지 않은 콘크리트보다 압축강도가 작게 나타났으나 재령이 커질수록 실리카흙 혼합률에 따라 압축강도가 크게 나타나고 있으며, 물-결합재비 23%, 실리카흙 혼합 20%

혼합 콘크리트의 재령 28일 및 91일 압축강도가 977, 1086kg/cm²으로 고강도를 얻었다. 이는 실리카흙의 포졸란반응이 재령이 증가함에 따라

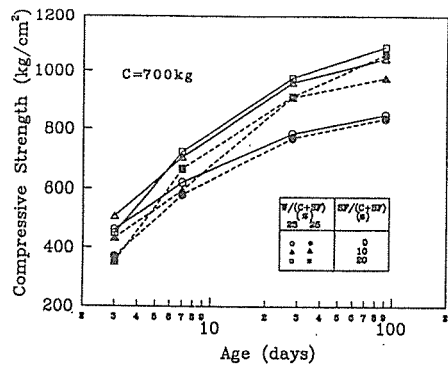


그림 4-19 실리카흙 혼합 콘크리트의 재령과 압축강도와의 관계(C+SF=700kg/m³)

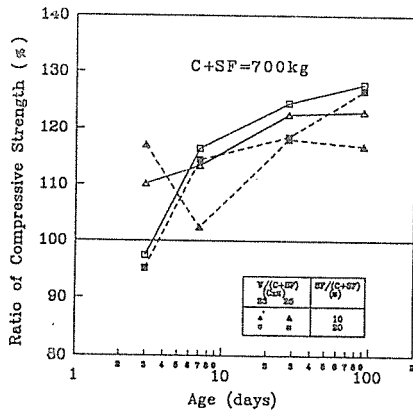


그림 4-20 실리카흙 혼합 콘크리트의 재령과 압축강도 비와의 관계(C+SF=700kg/m³)

크게 증가하는 이유라고 생각된다.⁽³⁰⁻³⁴⁾

그림 4-20은 그림 4-19의 실리카흙 혼합 콘크리트의 재령에 따른 압축강도비를 알아보기 위하여 실리카흙을 혼합하지 않은 고강도콘크리트의 압축강도를 100으로 정한 경우의 각 재령별 압축 강도비를 정리한 것이다. 이 그림에서 재령이 커질수록 실리카흙 혼합률에 따라 압축강도비가 크게 증가하고 있으며, 재령 91일의 압축강도비는 약 15~30% 정도로 증가함을 알 수 있다.

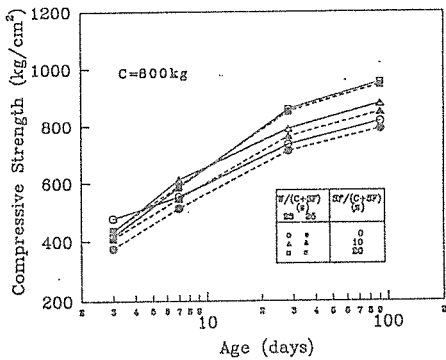


그림 4-21 실리카흙 혼합 콘크리트의 재령과 압축강도 비와의 관계(C+SF=800kg/m³)

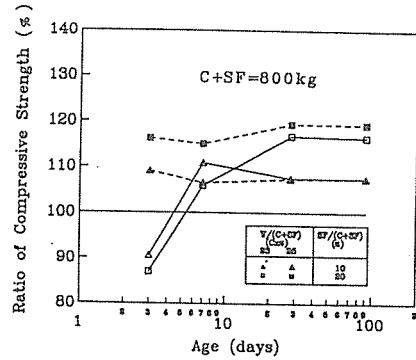


그림 4-22 실리카흙 혼합 콘크리트의 재령과 압축강도 비와의 관계(C+SF=800kg/m³)

그림 4-21은 단위결합재량 800kg/m³의 경우로 그림 4-19와 비슷한 경향을 보이고 있으나, 단위결합재량 700kg/m³에 비하여 오히려 강도가 적게 나타나고 있으며 실리카흙 혼합률 20%, 물-결합재비 23% 콘크리트의 재령 28일 및 91일 압축강도는 각각 858, 953kg/cm² 정도로 나타났다. 따라서 단위결합재량이 지나치게 크게 되면 콘크리트의 강도발현이 오히려 둔화된다고 생각된다.

그림 4-22는 그림 4-21을 압축강도비로 나타낸 것으로 물-결합재비 23%인 경우 재령 3일에서 압축강도비가 100보다 작게 나타났으나, 재령이 증가함에 따라 강도비는 증가하여 실리카흙 20%혼합 콘크리트의 재령 91일 압축강도비는 약 13% 정도 증가하였다.

4-8 실리카흙을 혼합한 고강도콘크리트의 강도

굳지않은 콘크리트의 슬럼프 손실 및 콘크리트의 온도상승을 감소하기 위하여 제조한 실리카

흙 혼합 콘크리트의 재령 28일 압축강도와 인장강도 및 탄성계수와와의 관계를 나타낸 것이 그림 4-23~그림 4-25이다.

그림 4-23은 단위 결합재량 700, 750, 800kg/m³, 실리카흙을 0, 10, 20% 혼합하여 고강도콘크리트를 제조한 후 재령 28일의 압축강도와 인장강도와의 관계를 나타낸 것으로 실리카흙 혼합 콘크리트의 경우 압축강도가

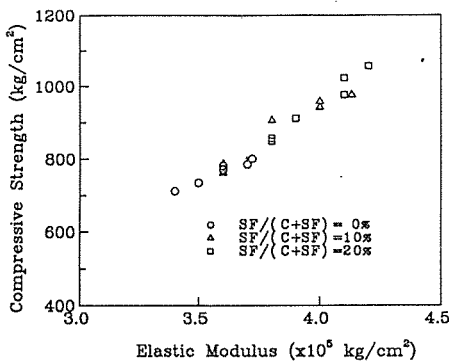


그림 4-23 실리카흙 혼합 콘크리트의 압축강도와 인장강도와의 관계

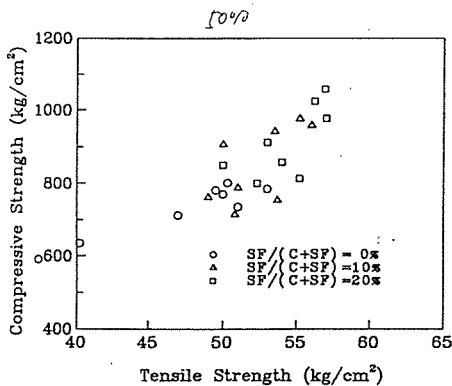


그림 4-24 실리카흙 혼합 콘크리트의 탄성계수와 압축강도와의 관계

1,000kg/cm² 정도에서 인장강도 55kg/cm² 정도로

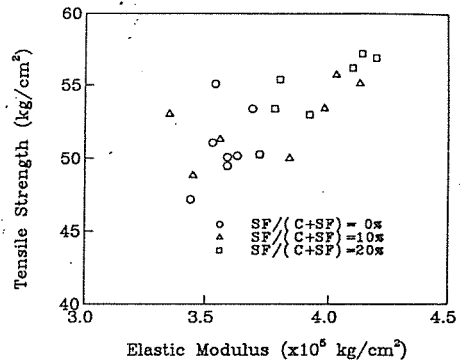


그림 4-25 실리카흙 혼합 콘크리트의 탄성계수와 인장강도와의 관계

$\sigma_c/\sigma_t = 17$ 정도로 보통콘크리트 비하여 압축강도는 크게 증가하는데 반면 압축강도와 인장강도의 비는 비교적 작게 나타나는 결과를 얻었다.

그림 4-24와 그림 4-25는 실리카흙 혼합률 0, 10 및 20%로 변화시켜 제조한 콘크리트의 탄성계수와 압축강도 및 인장강도와의 관계를 나타낸 것으로 동일한 배합에서는 실리카흙 혼합 콘크리트의 경우 압축강도 및 인장강도가 탄성계수와 비례적으로 증가함을 알 수 있으며, 실리카흙 20% 혼합 콘크리트의 압축강도가 1,086kg/cm²일 때 인장강도와 탄성계수 값이 각각 57.2kg/cm², 4.2×10^5 kg/cm² 정도로 최대치를 나타내고 있다. 여기서 탄성계수 값은 ACI에서 제안한 $E_c = 4270 \times W^{1.5} \sqrt{\sigma_{ck}}$ (kg/cm²) 식으로 구한 값보다 작게 나타났으며, Mehta 등이 고강도콘크리트에 적용하기 위하여 제안⁽²⁰⁾한 $E_c = 40,000 \sqrt{f_c} + 1.0 \times 10^6$ (Ib/in²) 식으로 구한 값과 비슷한 값을 나타내었다.

4-9 석고첨가량이 압축강도에 미치는 영향

실리카흙 혼합 콘크리트의 강도를 향상시키기 위한 방안으로 석고 첨가량에 따른 수화발열량

및 시멘트페이스트의 X선 회절시험을 실시하여 정리한 것이 그림 4-26 및 그림 4-27이다.

그림 4-26은 물-결합재비 35%, 고성능감수제 사용량 및 석고를 시멘트 중량에 1% 및 3% 혼합한 시멘트페이스트를 제조하여 경과시간 48시간까지 수화발열량을 나타낸 것으로 석고를 첨가할 경우 수화발열량은 작아지나 초기 수화발열이 커지는 것을 알 수 있다.

그림 4-27은 재령 28일에서 석고첨가량에 따른 시멘트페이스트의 조성광물을 알아보기 위하

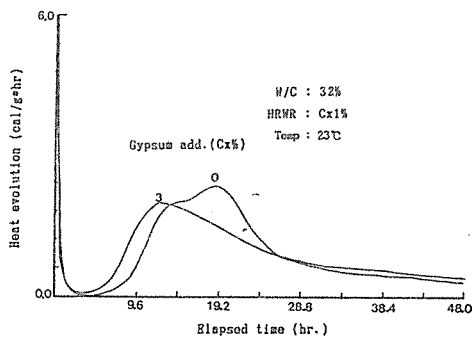


그림 4-26 석고 첨가량에 따른 수화발열량

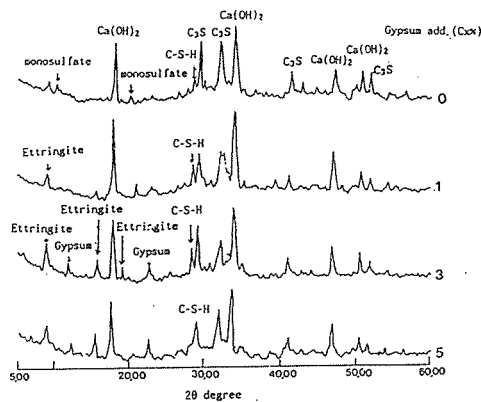


그림 4-27 석고첨가량에 따른 시멘트페이스트의 X선 회절도

여 X선 실험을 실시하여 정리한 것이다. 이 그림에서 석고를 첨가하지 않은 시멘트 경화체에서는 칼슘실리케이트 화합물의 수화생성물인 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, C-S-H 및 알루미늄이트 화합물의 수화생성물인 에트링가이트와 약간의 모노설페이트가 미약하게 나타남을 알 수 있으며, 석고 첨가량을 증가함에 따라 에트링가이트 피크가 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 석고를 첨가함에 따라 시멘트 경화체 내부의 조직이 에트링가이트 및 칼슘실리케이트계 수화생성물로서 치밀하게 되어 공극이 감소함으로써 모르타의 압축강도가 증가되었음을 나타내는 결과로 생각된다.

따라서 본 실험에서는 석고를 3%로 정하여 압축강도가 가장 크게 나타난 단위결합재량 750kg/m^3 에서 물-결합재비 23%, 실리카흙 혼합물 3단계로 변화시켜 제조한 콘크리트의 압축강도를 재령 91일까지 측정하여 정리한 것이 그림 4-28이다.

이 그림에서 알 수 있듯이 석고를 첨가함에 따라 초기재령에서의 강도도 증가하였으며, 재령이 증가함에 따라 상당히 크게 강도 증가가 나타났으며, 실리카흙 혼합 20%의 경우 재령 91일 압축 강도가 $1,170\text{kg/cm}^2$ 의 고강도를 발현하였다.

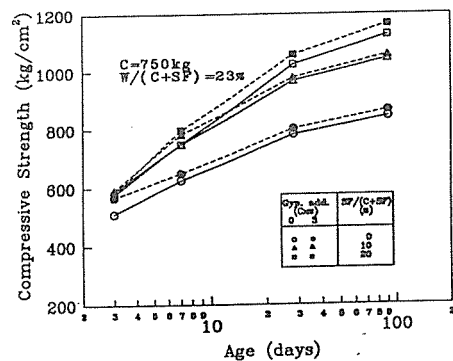


그림 4-28 석고를 첨가한 실리카흙 혼합 고강도 콘크리트의 압축강도

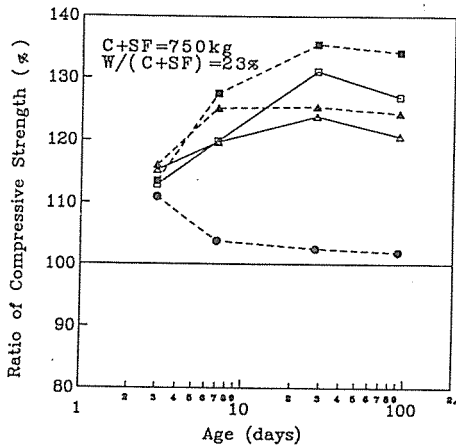


그림 4-29 석고를 첨가한 실리카흙 혼합한 고강도 콘크리트의 압축강도비

그림 4-29는 그림 4-28를 압축강도비로 정리하여 나타낸 것으로, 실리카흙 혼합 20%의 경우 석고를 첨가하지 않은 콘크리트에 비하여 재령 28일에서 약 5% 정도의 강도가 향상되었으며, 재령 28일 이후에서는 오히려 강도비가 떨어지는 경향이 나타났다. 이와 같이 석고를 첨가함으로써 시멘트의 실리케이트 화합물 및 알루미늄 수산화물의 초기수화를 촉진하여 강도가 향상되었다고 생각된다.

4-10 석고를 첨가한 고강도콘크리트의 강도발현 특성

실리카흙 및 석고첨가 콘크리트의 강도발현 특성을 알아보기 위하여 실리카흙 혼합 시멘트 페이스트와 석고를 3% 첨가한 시멘트 페이스트를 제조하여 재령 3일 및 28일에 대하여 X선 회절시험 및 전자현미경 사진을 촬영하여 측정하였다.

실리카흙 혼합률 3단계로 변화시키고 석고 0.3%를 첨가하여 재령 3일에서 시멘트 페이스트의 X선 회절 분석 결과가 그림 4-30 및 그림 4-31이다. 두 그림에서 석고를 첨가하지 않은 시멘트페이스트는 실리카흙 혼합률에 관계없이

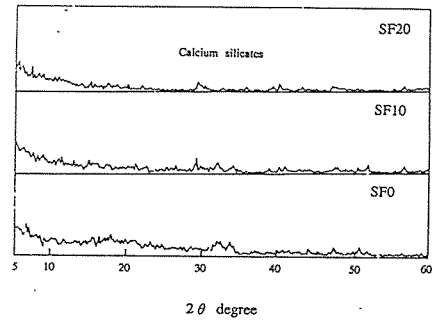


그림 4-30 실리카흙 혼합 페이스트의 X선 회절도 (재령 3일)

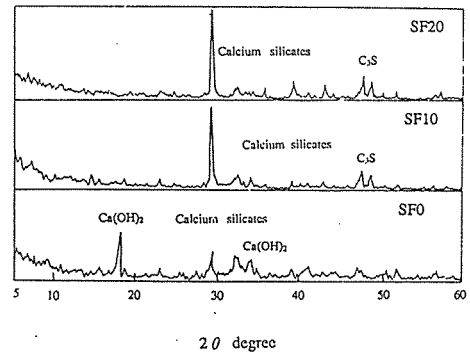


그림 4-31 실리카흙 및 석고 첨가 페이스트의 X선 회절도(재령 3일)

비슷한 경향을 보이며, 석고를 첨가할 경우 실리카흙 혼합률 0%에서는 칼슘실리케이트 화합물과 Ca(OH)_2 가 나타났으며, 실리카흙을 혼합함에 따라 Ca(OH)_2 가 없어지고 C_3S 수화생성물이 생성되는 경향이 나타났다.

그림 4-30 및 그림 4-31은 재령 28일의 X선 회절 분석 결과를 나타낸 것으로, 재령 3일의 결과와 비교해 볼 때 석고를 첨가하지 않은 경우 실리케이트 화합물의 생성이 많아짐을 알 수 있으며, 석고를 첨가할 경우 대체적으로 실리케이트 화합물이 감소하였다. 따라서 석고를 첨가할

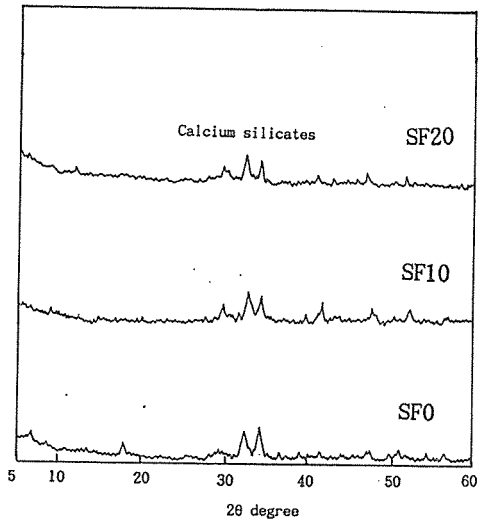


그림 4-32 실리카흙 혼합 페이스트의 X선 회절도 (재령 28일)

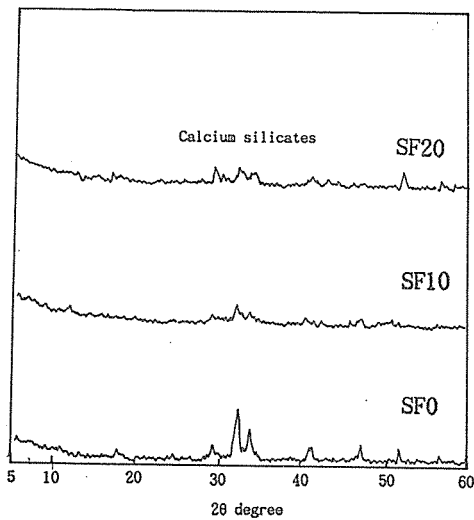


그림 4-33 실리카흙 및 석고 첨가 페이스트의 X선 회절도(재령 28일)

경우 초기재령에서의 수화 촉진이 상당히 크게

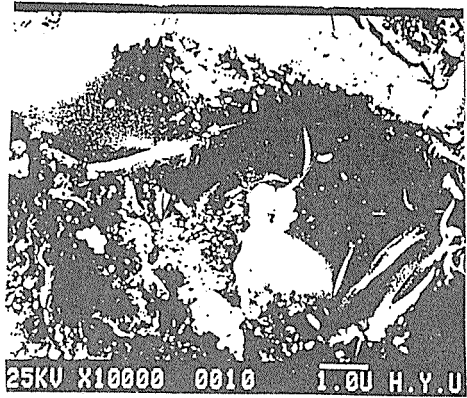


사진 4-1 보통포틀랜드시멘트페이스트의 전자현미경 사진(재령 28일)

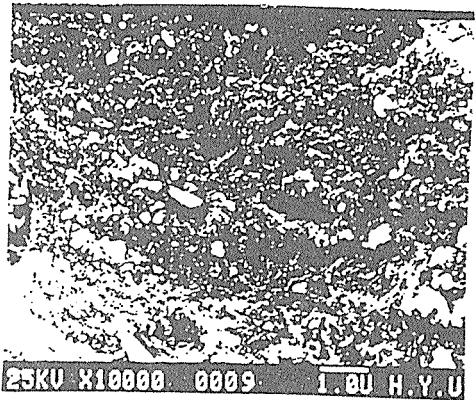


사진 4-2 실리카흙 혼합 페이스트의 전자현미경 사진 (재령 28일)

나타나므로, 초기 강도를 향상시키는 요인이라고 생각된다.

다음은 전자현미경 사진을 촬영하여 재령 28일에서 시멘트페이스트의 수화생성물을 알아보기 위한 것으로 사진 4-1~사진 4-3이다. 사진 4-1은 보통포틀랜드시멘트페이스트의 전자현미경 사진으로 미수화물로 보이는 부분이 나타나고 있으며, 사진 4-2에서는 실리카흙 20% 혼합 시멘

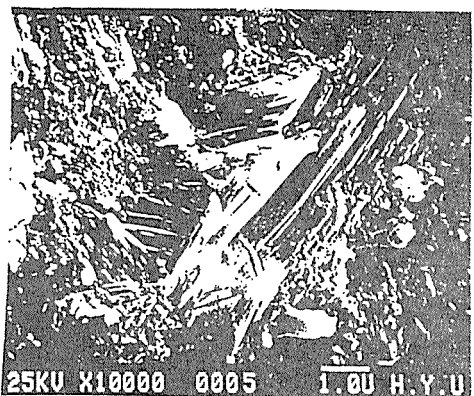


사진 4-3 실리카흙 및 석고 첨가 페이스트의 전자현미경 사진(재령 28일)

트페이스트의 전자현미경 사진으로 C-S-H계의 수화생성물이 나타나고 있으며, 사진 4-3은 실리카흙 20% 혼합 시멘트페이스트에 석고를 3% 첨가하여 전자현미경 사진을 촬영한 것으로 사진 4-2와는 달리 칼슘실리케이트 화합물의 수화생성물 및 알루미늄이트 화합물의 수화생성물로 보이며, 이들의 시멘트체이스트의 조직을 치밀하게 하여 콘크리트의 강도를 향상시키는 요인이 된다고 생각된다.

5. 결 론

(1) 실리카흙을 혼합한 고강도콘크리트에서 고성능감수제의 사용량은 혼합률 10%에서 가정 적게 요구되었으며, 공기량은 실리카흙 혼합률이 증가함에 따라 약간 작게 나타났으나, 석고를 첨가할 경우 고성능감수제 사용량 및 공기량이 각각 약간 크게 나타났다.

(2) 실리카흙을 혼합한 고강도용 콘크리트의 슬럼프 손실률은 실리카흙을 혼합하지 않은 콘크리트에 비하여 크게 나타났으며, 실리카흙을 10% 혼합한 콘크리트에서 믹싱후 경과시간 90분에서 90% 이상이 큰 슬럼프 손실률을 나타내는 문제점이 있었다.

(3) 단위결합재량 800kg/m^3 , 물-결합재비 25%인 실리카흙을 혼합하지 않은 콘크리트의 최고온도가 약 63°C 까지 상승하였으며, 실리카흙을 혼합함으로써 최고온도를 $5^\circ\text{C}\sim 10^\circ\text{C}$ 정도의 온도를 줄이는 효과가 있었으나, 고강도콘크리트의 수화열이 큰 문제점을 해결해야 할 과제라 생각된다.

(4) 단위결합재량 3종류 중에서 750kg/m^3 를 사용한 콘크리트의 압축강도가 가장 크게 나타났으며, 실리카흙을 20% 혼합한 콘크리트의 압축강도는 초기재령에서는 실리카흙을 혼합하지 않은 콘크리트에 비하여 작게 나타났으나, 재령 28일 및 91일 압축강도비가 각각 약 20~30% 정도로 크게 나타나는 효과가 있었다.

(5) 실리카흙을 20% 혼합한 고강도콘크리트에 석고를 3% 첨가하므로써 재령 91일 압축강도가 약 5% 정도 향상된 1.170kg/cm^2 의 고강도콘크리트를 얻었으며, 믹싱후 경과시간 30분에서 슬럼프 손실률이 20% 정도 증가하였으며, 콘크리트의 내부온도는 약 17% 정도 증가하는 문제점이 있었다.

(6) 실리카흙을 혼합한 고강도콘크리트의 압축강도는 실리카흙을 혼합하지 않은 콘크리트에 비하여 재령 28일에서 25% 정도의 1.058kg/cm^2 로 크게 향상되었으나, 인장강도와 탄성계수는 크게 향상되지 않으므로 고강도콘크리트의 인장강도 및 탄성계수는 크게 향상되지 않는 문제점이 해결되지 않았다.

참고문헌

1. 文翰英, 金眞徹, "실리카흙을 혼합한 콘크리트의 고強度化에 관한 基礎的 研究", 大韓土木學會論文集, 第12卷, 第4號, 1992년 12월
2. 李丙浩, "실리카흙 콘크리트의 工學的 特性에 關한 實驗的 研究", 忠南大學校, 博士學位論文, 1991. 2.
3. 丸山武彦 外 3名, シリカフェームコンクリートの諸性質に關する實驗的研究, コンクリート工

學年次論文報告集, 12-1, 1990.

4. 長瀧重義, “高性能 コンクリートに関する研究とその實用化”, コンクリート工學年次論文報告集, 日本コンクリート工學協會, 10-1, 1988.

5. P.K. Mehta and O.E. Gjørv, “Properties of Portland Cement Concrete Containing Fly Ash and Condensed Silica-Fume”, *Cement and Reserach*, Vol.12, pp.587-595, 1982.

6. V. Novokshchenov, “Factors Controlling the Compressive Strength of Silica Fume Concrete in the Range 100-150 MPa”, *Magazine of Concrete Reserach*, No. 158, March, 1992.

7. F. de Larraed, and J- L. Bostviroist, “On the long-term strength losses of silica-fume high-strength concretes”, *Magazine of Concrete Research*, No. 155, June, 1991, pp 109-119.

8. J. Armaghani, D. Romano, M. Bergin, and J. Moxley, “High Performance Concrete in Florida Bridges”, *High Performance Concrete in Severe Environments*, ACI, SP 140-1, 1992, pp. 1-24.

9. G.J.B Ithurrealde, and Joel Oliver, “High Performance Concrete for French Nuclear Containment Vessels”, *High-Strength Concrete 1993*, ACI, 1993, pp. 217-224.

10. Magne Massge, Steinar Helland, and Jan Erik Carlsen, “Chloride Penetration in Exposed to Marine Environment”, *High-Strength Concrete 1993*, ACI, 1993, pp. 838-846.

11. Pierre-Claude Aitcin, Shondeep, L. Sakar, Micheline Regourd, and Hugues Hornain, “Microstructure of A Two-Year

Old Very High-Strength(100 MPa) Field Concrete”, *High Strength Concrete*, NB, pp. 99-109.

12. Stella L. Marusin, “Chloride Ion Penetration in Conventional and Concrete Containing Condensed Silica Fume”, *Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI, SP 91-55, 1986, pp. 1119-1133.

13. Per A. Jahren, “Performance of Concrete Incorporating Condensed Silica Fume and Superplasticizers”, *Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI, SP 91-41, 1986, pp.865-892.

14. Norway Standard, NS 3050, 1976.

15. Norway Standard, NS 3474, 1978.

16. Denmark Standard, DS 411, 1986.

17. Canadian Standard, CAN/CSA-A23 5-M86, 1986.

18. A.M. Neville, ‘Properties of Concrete’, Pitman, 1981.

19. Rachel J. Detwiler and P. Kuma Mehta, “on the Mechanical Behavior of Concrete”, *ACI Materials Journal*, Nov-Dec., 1989.

20. P.K. Mehta and O.E.Gjørv, “Properties of Portland Cement Concrete Containing Fly Ash and Condensed Silica-Fume”, *Cement and Reserach*, Vol.12, 1982, pp. 587-595.

21. E.J. Sellevold, “Condensed Silica Fume(Micro Silica)in Concrete : Water Demand Strength Development”, *ACI SP-79*, 1983.

22. Y. Yamamoto and S. Kobayashi, “Effect of Temperature on the Properties of Superplasticized Concrete”, *ACI Journal*, 1986.

-
23. 文翰英, 金基亨, “高性能減水劑를 사용한 콘크리트의流動性 損失을 低減시키기 위한 研究”, 大韓土木學會論文集, 第12卷, 第3號, 1992년 9월.
24. T. Nawa, H. Eguchi, and Y. Fukaya, “Effect of Sulfate on the Rheological Behavior of Cement Paste Containing A Superplasticizer”, Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, ACI, SP 119-21, pp. 405-424.
25. M. Collepari, S. Momosi, and M. Valente, “Optimization of Superplasticizer Type and Dosage in Fly Ash and Silica Fume Concretes”, Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, ACI, SP 119-22, 1992, pp.425-443.
26. 谷口裕史 外 3名, “高強度コンクリートの強度および斷熱溫度上昇に及ぼす各種材料の影響”, 콘크리트工學年次論文報告集, 日本 콘크리트工學協會, 12-1, 1990.
27. Pierre-Claude Aitcin, Pierre Laplante, Claude Bedard, “Development and Experimental Use of a 90Mpa(13,000psi) Field Concrete”, ACI High-Strength Concrete, SP 87-5, pp.52-70.
28. P.C. Aitcin, G. Ballivy, D. Mitchell, M. Pigeon, and L.G. Coulomb, “The Use of A High Performance Air Entrained Concrete for The Construction of The Portneuf Bridge”, High Performance Concrete in Severe Environments, ACI, SP 140-3, pp. 53-72
29. 文翰英, “콘크리트 工學講座(II) 콘크리트의 高強度 發現 메카니즘과 製造”, 大韓土木學會誌, 第27卷, 第1號, 1979. 2.
30. Min-Hang Zhang and Odd E. Gjorv, “Effect of silica fume cement hydration in low porosity cement pastes”, Vol.21, No. 5, 1991.
31. M. Lessard, S.L. Sarkar, D.W. Ksinsik and P. C. Aitcin, “Long-term Behavior of Silica Fume Concrete”, Concrete International, April, 1992.
32. M. Lessard, S.L. Sarkar, D.W. Ksinisk and P.C. Aition, “Long-Term Behavior of Silica Fume Concrete”, Concrete International, April 1992.
33. 河野清 外 2名, “高粉末度のシリカ微分末を用いたコンクリートの配合と壓縮強度”, セメント・コンクリート論文集, No. 44, 1990.
34. P.K. Mehta, ‘Condensed Silica Fume’, Cement Replacement Materials, Vol.3 pp 134-168.