

실리카흙 및 실리카흙 콘크리트의 특성과 이용

김 형 태

(주) 대우엔지니어링 기술연구소 과장

1. 개요

최근 두 차례에 걸친 오일쇼크로 인하여 다른 분야와 마찬가지로 콘크리트 산업에서도 시멘트 생산시 요구되는 막대한 에너지를 절감하기 위하여 많은 연구기관들이 노력을 경주해왔다. 이러한 노력의 일환으로 Flyash, Slag, Pozzolan 등과 같은 시멘트질 재료가 실용화되고 있으며 특히 시멘트의 대체재로서 포졸란, 실리카흙 등의 사용에 주의가 집중되기 시작하였다.

실리카흙은 마이크로 실리카, 활성실리카, 또는 농축 실리카흙(Condensed Silica Fume) 등과 같이 여러가지 이름으로 불려지나 일반적인 호칭은 실리카흙이다.

실리카흙에 관련된 개발과정은 표1과 같이 요약되며 본격적인 연구는 스칸디나비아반도 국내의 아이슬란드, 노르웨이, 스웨덴 등에서 1976년 이후 시도되기 시작하였다. 북미의 경우는 80년대에 들어서면서부터 실리카흙의 사용이 보고되고 있다.

본 고에서는 실리카흙을 콘크리트에 적용하기 위해 가장 기본이 되는 실리카흙의 종류, 이의 물리, 화학적 특성 그리고 콘크리트에 적용시, 굳지않은 콘크리트 및 경화콘크리트에 대한 특성을 검토하였고 향후 이 결과를 토대로 활용이 기대되는 분야와 현재 갖고 있는 문제점 그리고 연구가 기대되는 분야 등을 제시하였다.

표1. 실리카흙의 발달과정

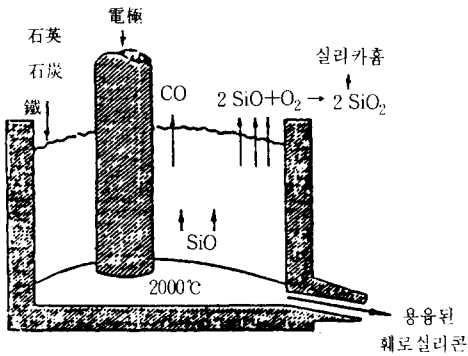
년도	발전개요
1950	노르웨이 공과대학에서 최초의 실험, 수행
1952	노르웨이, 오스룬의 터널공사에서 처음으로 현장실험수행
1971	카나다, 쉘부르크 대학에서 실험수행
1976	노르웨이에서 10% 첨가량의 기준이 정립 (NS3050)
1977	노르웨이에서 Remicon으로 생산개시
1981	노르웨이에서 10%첨가량의 시방승인 (NS3474)
1983	제1회 Flyash, Silica Fume, Slag 등의 광물 질부산물의 국제회의 개최(CANMET/ACI)
1984	일본에서 제작한 북해용 석유굴착리프 "SUPER CIDS"의 외벽에 사용
1985	실리카흙을 혼입한 초저밀 시멘트의 발매개시

2. 실리카흙의 재료 특성

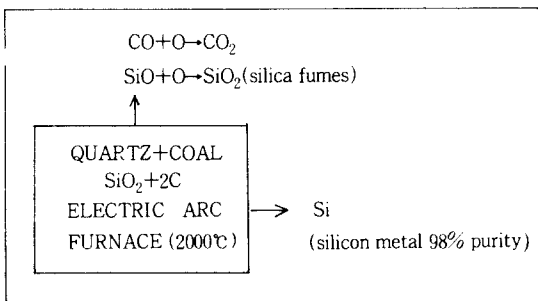
2.1 종류

실리카흙은 Flyash나 Slag 등과 같은 산업부산물로서 회수되므로 생산자체를 목적으로 하지는 않는다. 웨로실리콘(Ferrosilicon)의 원재료는 규소원료로 규사를, 환원제로서 석회나 철원료 등을 사용한다. 이들 원재료를 전기 아크로 중에서 용융하여 웨로실리콘을 제조할 때 발생하는 탄산가스중 안개형상의 SiO₂인 실리카흙을 집진장치를 이용하여 회수된다. 웨로실리콘합금은 보통 실리콘양이 50, 75, 90%가 되도록 생산되며 합금내의 실리콘양이 증가함에 따라 SiO₂의 양이 증가하게 된다. 미국에서는 콘크리트에 사용하기 위해 Grade

가 75% 이상인 실리카 함이 판매되고 있으며 현재까지 밝혀진 각국생산량과 실리카 함 콘크리트의 사용례는 표 2.1, 2.2와 같다. 이외에 실리카 함을 생산할 수 있는 다른 종류의 실리코합금은 Ferrochromium, Ferromanganese, Ferromagnesium, Calcium Silicon 등이 있으며, 이중 Ferrochromium에서 얻어진 실리카 함은 가장 많이 쓰이는 Ferrosilicon에서 얻어진 것과 특성이 유사하다는 것 이외에는 현재까지 연구된 바 없다. 따라서 앞으로 실리카 함 사용가능량은 실리카 함을 사용한 콘크리트의 기능상의 특성 뿐만 아니라 이들의 경제성과 관련 철강산업에 영향을 많이 받을 것으로 보인다.



(a) Ferro silicon



(b) Silicon metal

그림 1. 핵로실리콘(a)과 실리코합금(b)의 생산시 얻어지는 부산물인 실리카 함 회수과정

표 2.1 실리카 함의 각국 생산추정량(1982)

Region / country	From ferrosilicon furnaces, metric tons	From silicon furnaces metric tons
North America	110,000	-
Western Europe	188,000	-
Latin America	35,000	-
Far East	159,000	-
Canada	-	12,500
Norway	-	45,000
France	-	30,000
Italy	-	20,000
Portugal	-	15,000
Spain	-	5,000
Sweden	-	10,000
Switzerland	-	5,000
W.Germany	-	3,000
Yugoslavia	-	15,000
South Africa	-	15,000
United States	-	100,000

*Supplied by SKW Ltd., Chicago.

†SiO₁ content of silica fume from these furnaces is 84 to 88 percent.

‡SiO₁ content of silica fume from these furnaces is 93 to 98 percent.

2.2 실리카 함의 성질

1) 물리적 성질

실리카 함은 원재료인 규사와 석탄의 품질, 로(爐)의 종류에 따라 화학적 성질이 달라진다. 열이 회수되는 시스템이 없는 개방형로의 경우 배기가스의 온도는 200~400°C의 비교적 저온으로 미연소된 탄소가 잔류하므로 실리카 함은 흑색에 가까운 회색이 되고, 밀폐형의 경우는 배기가스 온도가 800°C로 대부분의 탄소가 연소되어 실리카 함은 백색에 가까운 회색을 띤다. 비중은 2.2이며, 분말도는 20,000m²/kg 입경은 대략 0.1~1.0μm이다. 단위용적 중량은 250~300kg/m³으로 크기 때문에 수송시에는 물을 가하여 슬러리(Slurry) 상태로 운반하기도 한다.

표 2.2 실리카흙 콘크리트의 사용예

프로젝트명	國名	構造物	建設年度	環 境	使用目的	配 合
高層빌딩	美國	高層빌딩	1984	· 기둥단면의 減少 · 強度增大 · 코스트다운	· 기둥단면의 減少 · 強度增大 · 코스트다운	시멘트(C)=390kg / m ³ 실리카흙(S)=15% 슬럼프=18cm σ_{28} =840kg / cm ²
北海油田	노르웨이	오일저장부와 플랫폼의 基礎部分	1981	北海	· 耐久性	S=10% σ_{28} =715kg / cm ²
Bergen 프로젝트	노르웨이	교량	1983~1985	冷寒地帶	· 材料分離貯藏 · 동해저항성 · 우수한 표면마무리	S=8% σ_{28} =410kg / cm ²
교량오버레이	美國	덮어씌우기	1983~1984	重交通荷重 狀態	· 조기고강도 · 長期耐久性 · 철근의 腐蝕抵抗性 · 凍結融解에 대한 抵抗性	C=450kg / m ³ S=10% σ_1 =400kg / cm ² σ_{28} =980kg/cm ²
L.A.水路 프로젝트	美國	河川水路	1984	—	· 長期耐久性 · 磨耗抵抗性	—
Gothenburg의 부두	스웨덴	부두	1976~1968	파랑하중의 부두	· 耐久性 · 磨耗抵抗性 · 強度 · 철근부식에 대한 保護	C=370kg / m ³ S=15% σ_{28} =610kg / cm ²
Buvika 프로젝트	노르웨이	穀物貯藏庫	1979	Trondheim地域	· 철근부식에 대한 保護 · 耐久性	C=230kg / m ³ S=15% σ_{28} =377kg / cm ²
Fiskaa 프로젝트	노르웨이	上路床板	1971	SO ₂ 로 汚染된 海邊	· SO ₂ 에 대한 保護	C=316kg / m ³ S=12% σ_{28} =480kg / cm ²
Norsk Hydro 프로젝트	노르웨이	床板	1977	초산공장부근의 外側	· 초산에 대한 保護	C=306kg / m ³ S=15% σ_{28} =452kg / cm ²
Kinzua 프로젝트	美國	Kinzua댐의 감쇄지	1983	모래나 돌을 포함한 流水地域	· 磨耗抵抗性 · 侵蝕	C=474kg / m ³ S=18% σ_{28} =981kg / cm ²
Lynn호 프로젝트	美國	강섬유보강 콘크리트	1984	斜面	· 傾斜面保護	C=450kg/m ³ S=45kg / m ³ 강섬유=75kg / m ³ σ_{28} =890kg / cm ²
Heggura 道路터널 프로젝트	노르웨이	강섬유보강 콘크리트	1982~1984	터널 (5,360m)	· 코스트다운 · 리바운드의 減少 · 強度 · 水性的 減少	C=450kg / m ³ S=36kg / m ³ 강섬유=75kg / m ³

표3. 실리카흙의 물리적 성질

	실리카흙	시멘트	비 고
색	밝은회색~검은회색	.	.
비중	2.2	3.1	.
분말도 (m^2/kg)	20000	300-400	· Flyash=400-700 · Slag=350-600
입경(μm)	0.1~1.0	10~100	.
단위용적중량 (kg/m^3)	250~300	1200	.

2) 화학적 성질

표4. 노르웨이 및 북미산 실리카흙의 대표적인 화학조성표

Constituent, percent	Elkem Spigerverket A/S Norway	North America	
		SKW Canada, Inc.	SKW Alloys, Calvert City, Ky, and Niagara Falls, NY, USA
SiO ₂	90.0-96.0	89.0-95.0	90.0-93.0
Al ₂ O ₃	0.5- 3.0	0.1- 0.7	0.5- 0.6
Fe ₂ O ₃	0.2- 0.8	0.1- 3.1	3.4- 4.5
MgO	0.5- 1.5	0.3- 1.0	0.3- 0.5
CaO	0.1- 0.5	0.1- 1.0	0.5- 0.8
Na ₂ O	0.2- 0.7	0.1- 0.2	0.1- 0.3
K ₂ O	0.4- 1.0	0.5- 1.4	1.0- 1.2
C	0.5- 1.4	2.1- 4.2	1.3- 3.6
S	0.1- 0.4	0.1- 0.2	0.1- 0.2
LOI=(C+S)	0.7- 2.5	2.3- 4.4	1.4- 3.8
SO ₃	-	0.1- 0.6	0.4- 1.3
Free moisture, H ₂ O	0.0	0.0- 0.6	0.0- 4.8

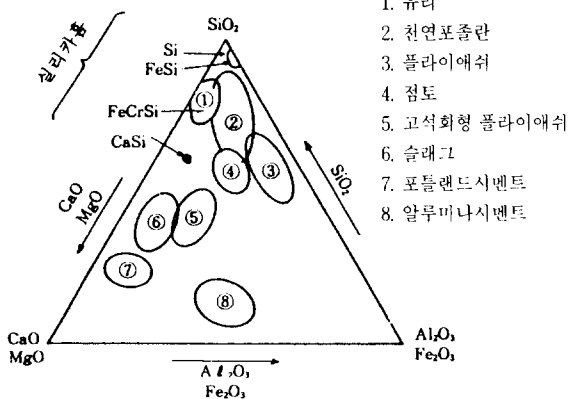


그림2. 실리카흙과 관련물질의 조성

실리카흙의 화학조성은 생산되는 합금이나 실리콘 종류에 따라 다르며, 통상 90% 이상의 SiO₂를 포함하고 있으며 대부분 비정형(Amorphous)이다. 표4에서는 가장 대표가 되는 노르웨이와 북미에서 실리코스로 생산되는 실리카흙의 화학조성을 나타내었고, 그림2에서는 이들의 실리카흙과 시멘트, Flyash, Slag 등 관련물질과의 화학조정 차이를 각도를 이용하여 비교하였다.

3. 실리카흙 콘크리트의 특성

실리카흙은 분말도가 높고 실리카량이 많아서 매우 효율적인 포졸란 재료이다. 이러한 실리카흙이 콘크리트에 사용될 경우의 목적은 시멘트 대체재와 또한 강도 및 내구성 증진을 위한 혼화재로서 표5와 같이 대별된다.

표5. 실리카흙의 사용목적과 이에 따른 사용량 및 효과

사용목적	사용량	효과	비 고
시멘트대체	5~10%	· 실리카흙 1kg에 대해 시멘트 3~4kg 감량 · 슬럼프 손실은 고성능 감수제사용으로 보전	Cost 문제 비교 후 수화열이 적어져 균열방지 효과 있음
혼화재	25%	· 고강도 확보 · 내화확성증진	· 수밀성증진

몰탈과 콘크리트에 실리카흙을 사용할 경우 사용량증가에 따라 단위수량의 증가를 수반하게 된다. 실험실 및 현장시공경험을 토대로 콘크리트내에 실리카흙의 적절한 분산을 위해 배합시간이 증가되어야 하며, 이는 실리카흙 사용량과 배합조건에 좌우된다. 특히 강도발현능력을 최대화시키기 위해 고성능감수제를 사용하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

3.1 굳지않은 콘크리트의 특성

1) 슬럼프

실리카흙은 비표면적이 크고 수산화칼슘과 단시간에 반응하여 겔상태의 물질을 생성하기 때문에 슬럼프가

나빠질 뿐만 아니라, 시간에 따른 슬럼프손실이 크게 된다. 따라서 소요의 슬럼프를 얻기 위해서는 필요한 단위 수량을 증가시키던가 아니면 고성능감수제를 병용하면 이를 방지할 수 있다. 실리카흙을 사용한 콘크리트는 점도가 높고 재료 분리에 강한 특성을 갖고 있다. 한 연구 결과 10% 이상 실리카흙 사용시 일정한 시간동안 동일한 컨시스턴스를 유지하기 위해 초기 슬럼프를 5cm 이상 증가시켜야 하는 것으로 밝혀졌다.

2) 공기연행

비표면적이 크고 미연소된 탄소가 함유되어 있어 AE제가 흡착되기 때문에 공기의 연행은 어렵다. 따라서 실리카흙의 사용량이 증가함에 따라 콘크리트내에 소요의 공기량을 얻기 위해서는 그림3에서와 같이 AE제의 사용량이 기하급수적으로 늘어나게 된다.

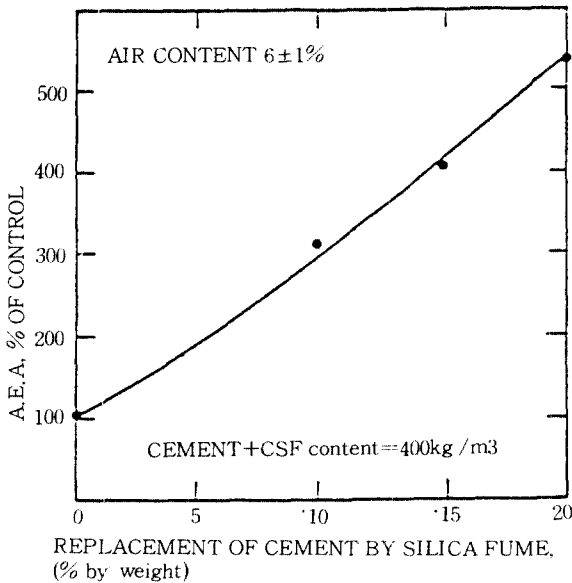


그림3. 실리카흙 사용량이 AE제의 사용량에 미치는 영향

3) 블리딩(Bleeding)

실리카흙은 친수성이 높기 때문에 물과 닿은 후 단시간에 반응하여 그 수화물이 시멘트입자 사이에 겔층을 형성하게 되므로 자유수의 이동을 억제하게 된다. 따라서 이로인해 블리딩이 현저히 떨어지게 되며, 치환율이 10% 이상이면 이는 거의 발생되지 않는다는 것이 연구 결과 밝혀졌다. 블리딩에 의해 표면에 수분이 전달되는

율이 콘크리트 표면에서 수분이 증발되는 비율보다 적게 되면 소성수축(plastic shrinkage)에 의한 균열이 발생되는 것으로 알려져 있다. 따라서 실리카흙콘크리트에서는 블리딩이 감소되기 때문에 이로 야기되는 소성수축에 의한 균열을 막기 위해 굳지 않은 콘크리트의 초기 수분손실방지책을 미리 마련해 두어야 한다.

3.2 경화콘크리트의 특성

1) 압축강도

실리카흙을 혼입한 몰탈 및 콘크리트의 강도 발현성은 대단히 양호하다. 이 발현성은 실리카흙의 종류, 시멘트의 종류, 첨가율, 양생방법 및 재령 등에 따라 다르며, 통상 보통 양생 조건하에서는 재령 3~28이 사이에 강도증진 효과가 나타난다. 실리카흙의 사용목적이 시멘트 대체재와 강도 및 내구성 증진을 위한 혼화제로서 대별되기 때문에 이들 각각에 대한 재령강도 발현특성은 각기 다른 양상을 보이고 있다. 그림 4.1, 4.2에는 일정한 슬럼프하에서 W/C=28%, 34%일 때 재령강도발현특성을 나타내고 있다. 또한 시멘트 종류는 보통 포틀랜드시멘트보다는 조강포틀랜드시멘트가 강도효율이 좋으며 시멘트 중의 알칼리 함유량이 많을 경우 초기강도가 커지고 적을 경우는 장기 강도가 커지는 것으로 밝혀졌다.

실리카흙콘크리트는 Flyash나 Slag를 포함한 콘크리트와 매우 유사하게 강도증진을 야기시키며 단지 차이점은 실리카흙은 Flyash 보다 효율적인 포졸란재이며, Flyash 콘크리트보다 초기에 포졸란반응이 일어난다는 점이다. 실리카흙을 혼입한 콘크리트의 휨 및 할렬인장강도의 발현은 압축강도의 경향과 유사하다.(1983. Malhotra & Carrette) 국내연구결과 이들과 압축강도와의 관계는 다음과 같으며 이때 C_0 , C_1 의 평균치는 1.31, 0.73로 나타났다.

$$f_r = C_0 \sqrt{f_c'}^r$$

$$f_{\varphi} = C_1 \sqrt{f_c'}$$

여기서 f_r =휨인장강도(MPa)

f_{φ} =할렬인장강도

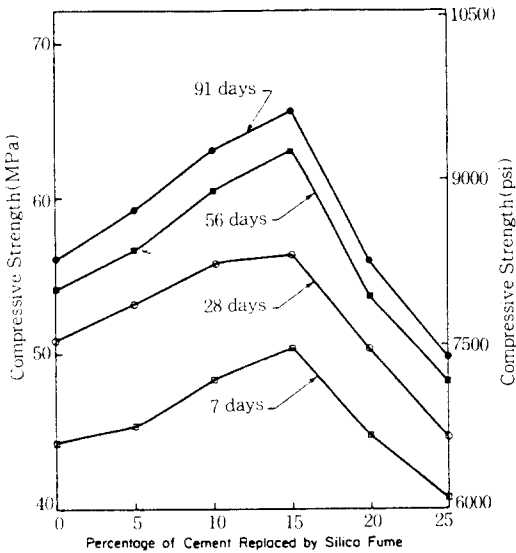


그림 4.1 W/ C=34%, 일정한 슬럼프시 압축강도의 변화

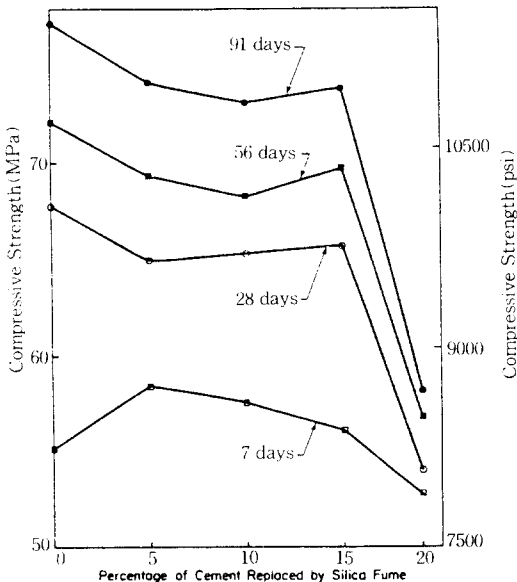


그림 4.2 W/ C=28%, 일정한 슬럼프시 압축강도의 변화

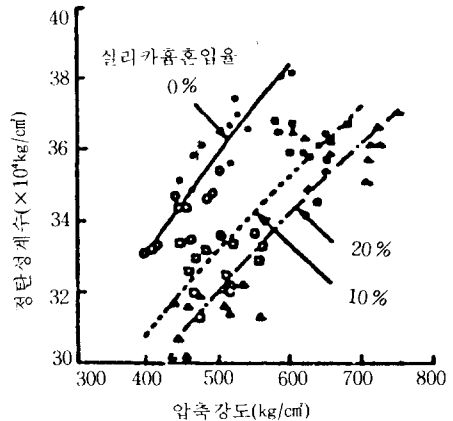
f'_c = 압축강도

C_0, C_1 = 실험상수

이 값들은 ACI에서 제안된 값보다 약간 크게 나타났다.

2) 탄성계수

실리카흙을 혼입할 경우 골재보다 탄성계수가 낮은 시멘트풀의 양이 증가하게 된다. 따라서 동일한 압축강도 수준에서는 그림5와 같이 실리카흙을 혼입한 경우가 더 낮은 탄성계수를 보이고 있다.



재령 7일		재령 28일	
기 호	실리카흙 혼입률	기 호	실리카흙 혼입률
-○-	0%	-●-	0%
-□-	10%	-■-	10%
-△-	20%	-▲-	20%

그림 5. 압축강도와 정탄성계수와의 관계

3) 건조수축과 크리프

실리카흙을 혼입하게 되면 시멘트풀량이 증가하게 되므로 건조수축이 클 것으로 예측되지만 실제 실험결과 그림6과 같이 실리카흙콘크리트의 건조수축은 물시멘트비에 관계없이 보통 콘크리트와 것과 비슷한 양상을 보이고 있다. 크리프의 경우 수중양생시에는 별차이가 없으나 기건상태에서는 실리카흙 콘크리트의 단위 크리프량이 그림7과 같이 크게 나타난다.

4) 내구성

① 내동결융해성

실리카흙의 혼입률이 15% 이하에서는 AE 콘크리트로 한 경우 충분한 내동결융해성을 갖는다. 이때 실험방법은 기존의 것(ASTM C666)에 의한다.

그러나 실리카흙의 혼입률이 20~30%에 이르게 되면 오히려 내동결융해성이 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 혼입률이 증가함에 따라 Matrix를 너무 치밀하게 만

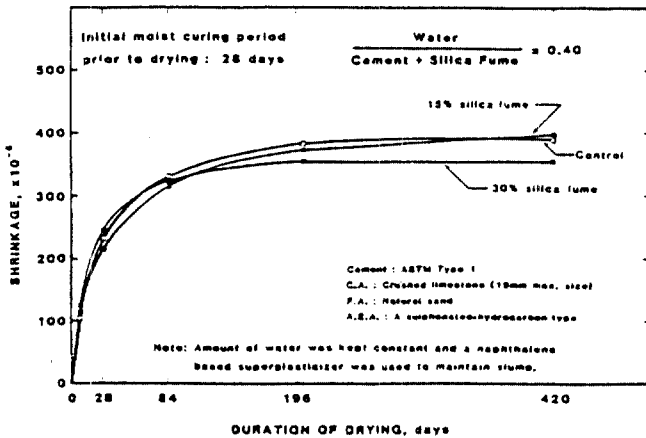


그림6. 물시멘트비 40%인 실리카흙 콘크리트의 건조수축

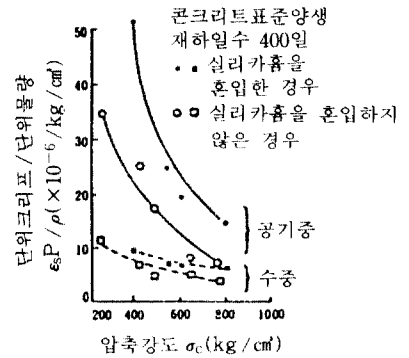


그림7. 실리카흙 콘크리트의 크리프 특성

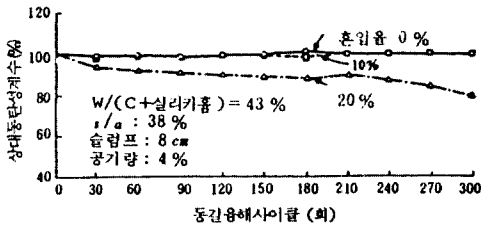


그림8. 급속동결융해 시험결과

들어 수밀성은 좋아지지만 내부에 갇힌 물의 적절한 이동이 통제되어 매트릭스내에 고르게 분포되지 못해 동결융해작용시 해롭게 작용하기 때문으로 판단된다.

② 알칼리 골재반응

Flyash나 천연포졸란처럼 실리카흙도 콘크리트내의 알칼리골재 반응에 의한 유해한 팽창을 방지하기 위해 사용될 수 있다. 아이슬란드에서는 5%의 실리카흙을 사용하던 이 문제를 해결할 수 있다고 했으나, 일본의 연구결과는 5% 첨가시 재령 4개월정도에서 팽창이 크게 나타났다고 보고하고 있어 상치된 결과를 보이고 있다. 따라서 실리카흙은 알칼리 골재반응을 억제하는 효과를 갖고 있다고 기대되나 이 효과는 골재의 종류, 실리카흙의 종류 및 첨가량에 따라 다르고 단순하지 않아 향후 연구가 요구되는 부분이다.

③ 기타

철근의 부식에 영향을 미치는 염소이온의 침투는 실리카흙콘크리트의 수밀성 증진때문에 적게 나타난다.

통상 실리카흙을 10% 이상 혼입하면 대략 염소이온 침투깊이는 50% 가량 감소된다. 또한 실리카흙 성분중 석영유리, 소다석회유리성분 등의 전기저항이 크기 때문 실리카흙은 시멘트대체재로 사용되어 시멘트자원을 보호할 수 있는 측면이 있고 고성능감수제와 병용하여 실리카흙콘크리트의 전기저항률은 혼입량에 따라 증가한다. 그의 관련된 장기특성에 대한 연구가 요구된다.

4. 활용분야 및 개선점

4.1 활용분야

표6. 실리카흙 콘크리트의 특성에 따른 활용분야

주요특성	활용분야	비고
High Strength	- prefabrication of concrete elements	· Flyash, Slag 콘크리트에 사용하면 초기재령 강도의 증진효과가 크다.
	- energy savings (no heat curing)	
	- anchoring; grouting materials	
	- injection mortars	
	- fiber reinforced materials	
	- shotcrete	
	- press tools	
	- casting machinery parts	
	- Bridge Deck construction, repair	

Low Permeability	-parking structure -waterproof constructions -corrosion protection -encapsulating nuclear waste -abrasion resistant concrete -underwater concrete
------------------	--

고강도 및 높은 수밀성을 확보할 수 있으므로 활용분야가 많을 것으로 기대된다. 실리카흙콘크리트의 특성에 따른 활용가능분야는 표6과 같이 제시될 수 있다.

4.2 개선점

실리카흙은 다른재료보다 분말도가 높고 비결정질이며 수밀성을 높여주며, 콘크리트내에 불리딩을 적게하기 때문에 이와 관련된 각종 원인에 의한 개선항목이 요구되며 현재까지 제시된 개선안을 요약하면 표7과 같다.

표7. 실리카흙을 콘크리트에 활용하기 위한 개선요구 항목

개선요구항목	원 인	개선안	비고
취급	분말도가 높고 밀도가 낮아서 선적, 운반, 저장, 배치시 분쇄발생	· 초기미립상태 · 농축상태 · 슬러리상태	
개인위생	초미립자이며 비결정질이기 때문에 작업시 이의 흡입가능성 농후	· 진분발생 최소를 위해 보호도구나 장비 개발 요구	
공기연행	실리카흙 치환율이 높을 경우 소오공기량을 얻기 위해 A.E제가 폭증한다	· 적절한 A.E제 개발	
소성수축	본래 불리딩이 적음데다 현장에서 고온, 저습 그리고 중요한 요인인 빠른 풍속 등의 요인의 복합될때 소성수축의 위험이 커진다	· 적절한 물리적 또는 화학적 보습제 개발	
품질관리	분말도가 높고 실리카흙 source 종류가 많으며 높은 탄소함유량에 의한 오염 등	· 분말도가 SiO ₂ 양을 정기적으로 검사	

5. 맺음말

콘크리트는 건설재료중 가장 기본적인 것으로 자원의

고갈과 더불어 오일쇼크로 인한 에너지절감 노력의 일환으로 콘크리트 특성(Capacity)을 개선하기 위해 포졸란재인 실리카흙이 개발되었다. 실리카흙은 노르웨이에서와 같이 가격이 저렴한 경우 시멘트 대체재로 사용되기도 하며 통상 콘크리트의 강도 및 내구성 증진을 위한 혼화재료로도 사용된다.

점차 건설수요의 증가로 인해 콘크리트의 특성 개선을 위한 실리카흙의 사용도 증가될 것으로 판단되기 때문에 실리카흙이 가지고 있는 약점인 슬럼프손실, 불리딩에 의한 소성수축 등에 대한 작업성개선대책이 필요하며, 현장에서의 효율적인 취급방법, 품질관리 등에 대한 방안이 강구되어야 할 것이다. 그리고 실리카흙콘크리트의 장단기 강도 및 역학적 특성에 대한 연구와 더불어 관련설계규정의 보완작업이 뒤따라 보다 폭넓은 활용분야에 적용될 수 있도록 노력을 기울여야 할 것이다.

참 고 문 헌

- Burgo, T.A., "14000 psi in 24 Hours" Concrete International, September, 1983 pp 36-41.
- 오병환, 엄주용, "실리카흙을 사용한 고강도콘크리트의 역학적특성과 최적함연구" 콘크리트학회지, 1권1호 1989.9, pp75-86.
- 변근주, "혼화재료" 한국레미콘공업협회, 1990.12, pp.45-53.
- 건설기술, "Silica Fume", 1985.1 pp.67-70.
- 笠井芳夫, "콘크리트 개질재료의 전개", 시멘트콘크리트지, 1988.10, pp.141-143.
- V. Yogendran, "Silica Fume in High-Strength Concrete", ACI Material Journal, 1987.3, pp. 124-129.
- ACI Committe 226, "Silica Fume in Concrete", ACI Material Journal, 1987.3, pp.158-166.
- V.M. Malhotra, "Flyash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete", ACI SP.91 Vol 2, 1986.