

실리카폼 콘크리트의 내구성

The Durability of Silica Fume Concrete



김성수 Seong-Soo, Kim
대진대학교 건설시스템공학과
교수
E : sskim@daejin.ac.kr



이정배 Jeong-Bae, Lee
대진대학교 건설시스템공학과
겸임교수
E : dlwjdqo@lycos.co.kr

1. 서론

현재 유럽 및 미주지역에서는 다양한 분야에 걸쳐 활발하게 실리카폼 콘크리트가 사용되고 있으며, 아시아 지역에서도 일본과 중국을 중심으로 해양구조물의 건설에 사용되고 있다. 국내의 경우 2000년대 이후 활발한 연구가 진행되어 왔으나, 실제로는 구조물의 시공에 적용된 경우는 거의 없는 상태이다. 국내에서도 실리카폼에 관련된 KS규격, 콘크리트 표준시방서 등에 실리카폼을 사용할 수 있는 길을 제시하였지만, 활발하게 적용되지 않아 안타까운 상황이다. 실리카폼은 지금까지 사용되고 있는 혼화재료들과는 달리 반응성이 뛰어나 기존의 광물질혼화재료가 가지는 여러 가지 단점들을 보완할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 실리카폼은 주로 콘크리트의 고강도화, 내구성향상, 시공성 개선, 기타 성질 개선을 위하여 혼화재료로 사용되거나 시멘트 대체 재료로 사용되고 있다. 실리카폼은 전기아크 용광로(Electric Arc Furnaces)에서 실리콘 금속(Silicon Metal) 혹은 규소철(Ferrosilicon) 합금의 생산과정에서 얻어지는 부산물로서 미세분말형의 비결정질 실리카(Very Fine Non-crystalline Silica)이다. 다시 말하면, 실리카폼은 용광로에서 배출되는 가스로부터 농축된 물질이라고 할 수 있다. 실리카폼은 비결정질 실리콘 제 2산화물을 다량으로

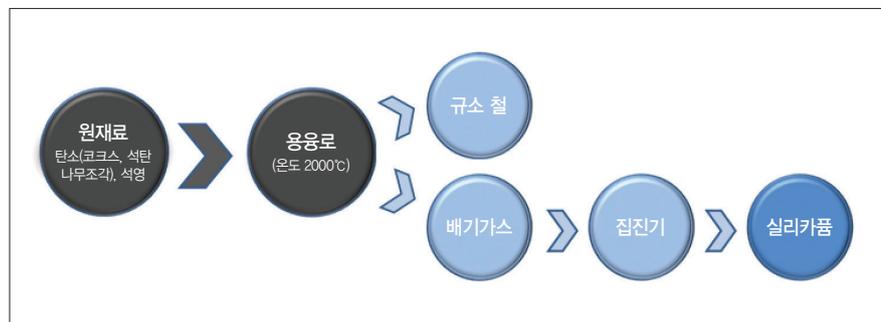


그림 1. 실리카폼의 생산과정

함유하고 있으며, 평균입자 0.15 μ m의 미세한 구형의 입자이다. 본고에서는 실리카폼의 특성, 콘크리트에 대한 내구성 및 시멘트와의 반응, 그리고 실리카폼이 어떻게 콘크리트에 활용되는지 국내외 사례를 제시하고 또한 활용이 기대되는 분야 등을 살펴보고자 한다.

2. 실리카폼의 재료 특성

대부분의 실리카폼은 밝은 회색과 어두운 회색 사이의 회색을 띠고 있으며, SiO₂는 무색이므로 실리카폼의 색상은 실리카 이외의 성분, 특히 함유된 탄소와 산화철에 의해 결정된다. 일반적으로 탄소의 함량이 증가할수록 실리카폼의 색상은 더욱 검게 된다. 실리카폼 중의 탄소의 함량은 목재 조각의 조성 성분, 나뭇조각과 석탄의 사용



그림 2. 실리카폼과 입자의 현미경 사진

[표 1] 합금 종류에 따른 실리카폼의 밀도

실리카 합금 종류	실리카폼의 밀도(Mgf/m ³)
Si	2.23
Si and FeSi 75%	2.26~2.27
FeSi 75%	2.21~2.23
FeSi 50%	2.3

[표 2] 실리카폼의 화학성분

화학성분(%)						
SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
92	0.8	0.3	0.4	0.3	0.2	0.9

[표 3] 실리카폼과 무기질 혼화재의 비표면적

결합재 종류	실리카폼	플라이애쉬	고로슬래그 미분말	보통포틀랜드 시멘트
비표면적 (m ² /kgf)	13,000 ~30,000	400~700	350~600	300~400

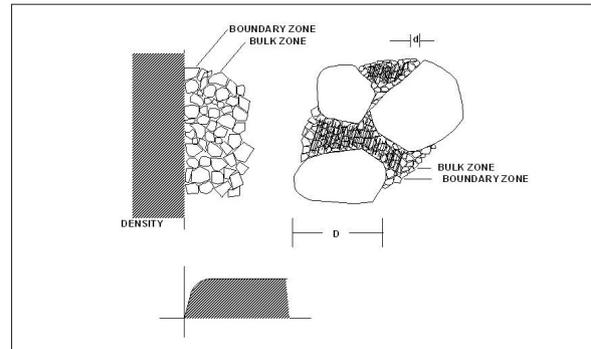


그림 3. 미세입자들의 충전거동

비율, 용광로의 온도, 용광로의 배출온도, 생산되는 금속 합금의 종류 등과 같은 생산 공정과 관련된 요인에 의해 영향을 받는다. 실리카폼의 비중(또는 밀도)은 일반적으로 2.2(2,200kgf/m³)이며, 공급원에 따라 실리카폼의 밀도는 약간씩 차이가 있다. 실리카폼의 밀도에 차이가 있는 것은 실리카폼 내에 포함된 실리카 성분의 양 때문이다. 실리카폼은 주로 매우 미세하고 매끄러운 구형의 유리질 입자이며, 비표면적은 대략 20,000m²/kgf이다. 입자는 1 μ m 미만인 입자가 95% 이상을 차지할 정도로 매우 작다. 실리카폼은 포집된 상태의 단위용적질량이 매우 작기 때문에 부피가 커서 운반에 막대한 비용이 들어간다. 실리카폼은 분말형, 슬러리형 및 과립형의 3종류가 있으나 국내에서는 대부분 과립형이 콘크리트에 사용된다.

2.1 실리카폼의 콘크리트에서의 작용 매커니즘

(1) 물리적 효과

일반적으로 시멘트 풀과 굵은 골재입자 사이의 천이영역의 강도는 시멘트 풀 강도보다 낮다. 콘크리트 내의 골재와 철근 밑에 블리딩 물이 축적되고 골재 표면과 콘크리트 표면 가까이에는 입자의 충전이 어렵기 때문에 천이영역은 많은 공극을 가지게 된다. 실리카폼은 시멘트 풀과 골재 입자 사이의 결합력을 증가시켜 콘크리트의 강도를 크게 증가시킨다. 단위 시멘트량의 2~5% 정도 되는 소량의 실리카폼만으로도 천이영역을 치밀한 구조를 만

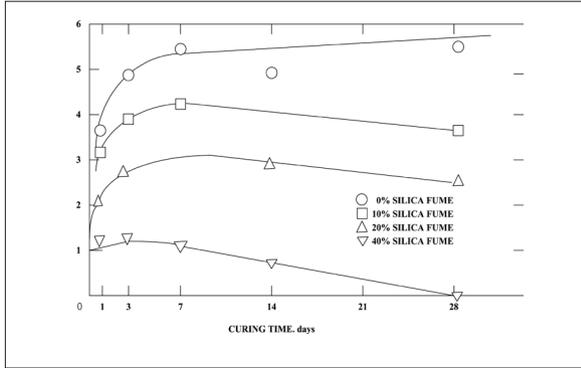
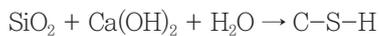


그림 4. 실리카폼을 사용한 시멘트 풀 내의 수산화칼슘 생성량

들 수 있으며, 이에 따라 미세구조의 강도와 파괴에너지에 의한 연성효과가 증가하게 된다. 많은 연구자들의 연구결과에 따르면, 미세 실리카폼 입자는 특히 천이영역 내에서 CH 결정의 크기가 작아지고 방향성을 갖지 않도록 결정핵 생성공간을 제공하고, CH의 크기와 양을 감소시켜 강도를 증진시키게 된다.

(2) 포졸란 반응

포졸란(pozzolan)이란 그 자체는 결합성(cementing property)을 거의 가지고 있지 않지만, 습도를 만나면 상온에서 수산화칼슘과 화학반응을 일으켜 결합성을 가진 화합물을 형성하는 규산질 재료(siliceous material) 또는 규산질과 알루미늄을 가진 재료를 말한다.



포틀랜드시멘트의 수화가 진행되면 포졸란 반응에 의하여 칼슘이온이 실리카와 결합하여 규산칼슘수화물(Calcium-Silicate-Hydrate ; C-S-H)을 형성한다. 이러한 형태의 수화물은 비정질의 실리카와 수산화칼슘의 용액 혼합물 내에서 형성된다. 이 반응은 세 가지의 특징을 가지고 있는데, 첫째로 느린 반응 때문에 수반반응과 강도발현이 늦은 편이고, 둘째로 석회 생성보다는 석회 소모기능을 가져 콘크리트의 내구성에 기여하며, 셋

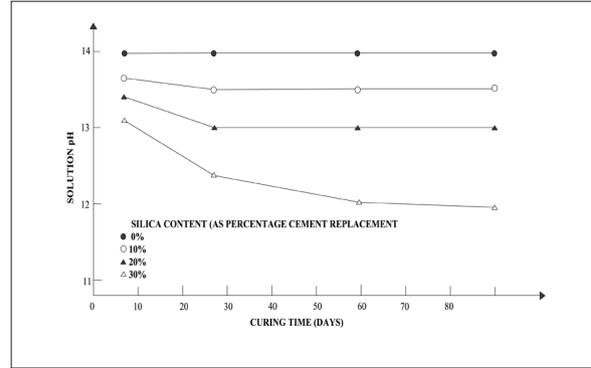


그림 5. 실리카폼이 시멘트풀의 공극수 pH 값에 미치는 영향, W/B=0.

째로 반응 생성물질이 모세공극을 메우고 콘크리트의 강도증진과 불투수성 개선에 효과적으로 기여한다는 점이다. 보통 포틀랜드시멘트와 실리카폼의 혼합비가 100:0, 90:10, 80:20 및 60:40일 때 재령에 따른 수산화칼슘의 생성량을 도시하면 그림 4과 같다. 실리카폼 양이 증가하면 28일 만에 CH는 거의 소멸 됨을 알 수 있다. 반면에 실리카폼의 양이 10% 정도로 적으면 28일 동안 CH의 50%가 소멸된다. 실리카폼 사용량이 증가할수록 수산화칼슘의 소비량이 빠르게 증가하고, 실리카폼 사용량이 적을수록 수산화칼슘의 소비량은 감소한다. 실리카폼이 초기수화를 촉진시켜 약 8시간까지는 수산화칼슘의 소비가 증가한다. 약 50%의 실리카폼을 포함하는 배합에서는 14일 후에 수산화칼슘이 완전히 소비되기도 하며, 약 20%의 부피를 실리카폼으로 대체 할 경우 수산화칼슘이 같은 재령에서 50% 감소하기도 한다. 한편, 낮은 알칼리량과 높은 SiO_2 함량을 갖는 실리카폼은 더욱 많은 수산화칼슘과 결합할 수 있으며 포졸란 반응의 범위를 증가시킬 수 있다.

(3) 공극구조

실리카폼의 사용량이 증가함에 따라 수화생성물의 Ca-Si 비는 감소하게 되며, 이로 인해 C-S-H는 더 많은 알루미늄이나 알칼리 같은 물질들과 결합하게 된다. 결국, 실리카폼 공극용액 중의 알칼리가 상당히 감소할

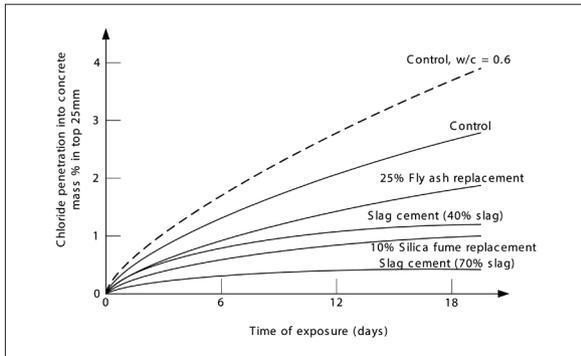


그림 6. 광물계 혼화제를 사용한 콘크리트의(w/c=0.5) 염화물 침투성 비교

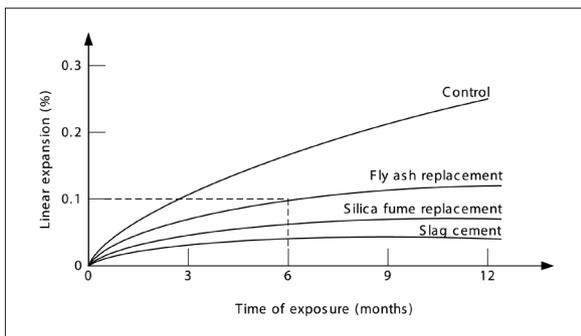


그림 7. 광물계 혼화제 종류에 따른 황산염에 대한 팽창률

수도 있게 된다. 그림 5와 같이 실리카폼의 치환율이 증가함에 따라 시멘트 풀 내에서 공극용액의 pH가 감소하게 된다. pH 값의 감소는 알칼리와 수산화칼슘이 실리카폼과의 반응을 증가시키기 때문에 발생한다. 실리카폼은 고로슬래그 미분말이나 플라이애시보다 공극용액의 수산화기의 양(hydroxyl content)을 크게 감소시킨다. 실리카폼 때문에 수산화칼슘이 소모되면서 공극용액의 pH가 감소하는 것보다 전기 저항성의 증가, 염소이온의 침투성 감소가 더욱 중요하다.

2.2 화학적 침식에 대한 내구성

콘크리트의 투수성은 화학적 침식을 받는 콘크리트의 열화속도를 결정할 때 가장 중요한 역할을 한다. 콘크리

트의 공극 크기가 감소하게 되면, 콘크리트의 내화학성에 영향을 주는 콘크리트 내의 이동특성, 투수성, 그리고 이온분산성을 제한하는 효과가 발생한다. 실리카폼, 플라이애시, 고로슬래그 미분말 등의 혼화재료를 사용하게 되면 주로 염화물 분산성의 저하를 유발하여 염화물 침투 감소 효과를 나타내는 것이다. 염분침지시험을 통해 각 혼화재료의 염화물 침투 저항성능을 비교하였다. 다음은 실리카폼, 플라이애시 및 고로슬래그 미분말 등 여러 가지 혼화재료를 사용할 경우의 내황산염 팽창 성능을 비교하면 그림 7과 같다. 여기서는 슬래그시멘트, 실리카폼, 플라이애시를 치환하는 순서로 황산염이 저항성능이 높게 나타났지만, 각 혼화재료의 치환율에 따라 그 순서가 바뀔 수도 있다. 가장 바람직한 혼화재료의 사용배합은 두 가지 이상의 혼화재료를 동시에 병행하여 사용하는 것이다.

3. 실리카폼의 콘크리트에의 활용

실리카폼의 생산량은 금속산업과 밀접한 관계를 가지고 있으므로 정확한 생산량을 추정하기는 어려운 상황이다. 북유럽을 중심으로 한 유럽의 여러 나라 및 미국을 비롯한 북미 지역에서도 실리카폼이 활발히 사용되고 있다.

3.1 연구사례

콘크리트에서의 실리카폼의 역할에 관한 연구는 스칸디나비아 반도의 국가들, 특히 노르웨이, 스웨덴 등에서

[표 4] 각국의 실리카폼 추정 생산량

국가명	생산량(ton)	국가명	생산량(ton)
미국	300,000	이탈리아	20,000
러시아	150,000	스웨덴	15,000
노르웨이	120,000	포르투갈	15,000
일본	70,000	캐나다	15,000
남미	35,000	유고슬라비아	15,000
스페인	30,000	오스트레일리아	12,000
프랑스	30,000	독일	6,000
아이슬랜드	20,000	스위스	5,000

연구가 시작되었으며 1952년 Bernhardt에 의해 처음 논문으로 발표 되었다. 그 후 실리카폼 활용에 대해 꾸준한 연구가 있어 왔고 1976년 노르웨이에서는 실리카폼을 혼합시멘트에 사용하는 것을 표준화 하였으며, 여러 구조물에 적용 하였다. 국내의 경우 국가나 대기업 연구소, 학교 실험실에서 고강도콘크리트 제작 목적으로 실리카폼을 적용하여 콘크리트 강도향상에 미치는 영향을 검토하

였을 뿐 높은 가격으로 인해 대형 실구조물에 적용한 사례는 전무하고, 단지 몇몇 국내 건설회사들이 외국에서 발주한 초고층구조물에만 국한하여 적용한 예만 있을 뿐이다.

3.2 국·내외 실리카폼을 활용한 구조물

국내의 경우 서울 도곡동 타워 팰리스가 실리카폼을 활용한 고강도와 고내구성 콘크리트구조물로 대표적이며, 실리카폼을 사용하여 강도 100MPa 이상의 콘크리트 중저준위 폐기물 저장용기를 개발한 바 있다. 또한 현재 UAE에 축조되고 있는 한국형원전의 경우 실리카폼을 적용한 콘크리트를 사용하고 있다. 향후 원자력발전소의 전력 공급 비율 증가에 따라 원전의 내구성능 증진에 대한 관심이 높아지고 있으며, 이를 위해서는 원자력 발전소, 폐기물 처리장 및 저장시설의 건설에 실리카폼을 적극 활용해야 할 것이다. 해외의 경우 실리카폼 콘크리트가 사용된 첫 번째 경우는 미국 펜실베이니아 서부에 위치한

Kinzua 댐인데, 수공구조물의 콘크리트 바닥 슬래브가 파손과 침식에 의하여 심하게 손상되어 있는 상태였다. 실험을 통하여 이에 대한 보수재료로 실리카폼 콘크리트가 선정되었고, 설계기준강도 86MPa을 90MPa로 넘겼으며 3년 후의 강도는 110MPa를 초과한 것으로 알려져 있다. 그 외에도 1987년 미국 메사추세츠 주의 Sandwich에 있는 철교의 파일두부 보수, 프랑스 Normandie 사장교의 PSC 박스거더와 주탑, 미국 캘리포니아 주 Death Valley에 위치한 Borax사 화학공장

[표 5] 실리카폼의 발달과정

년도	발전개요
1950	노르웨이 공과대학에서 최초의 실험, 수행
1952	노르웨이, 오스톤의 터널공사에서 처음으로 현장 실험수행
1971	캐나다, 쉘부르크 대학에서 실험수행
1976	노르웨이에서 10% 첨가량의 기준이 정립
1977	제1회 Flyash, SilicaFume, Slag 그 외 광물질 부산물의 국제회의 개최(CANMET/ACI)
1984	일본에서 제작한 북해용 석유굴착리프 "SUPER CIDS"의 외벽에 사용
1985	실리카폼을 혼입한 초치밀 시멘트의 발매개시



항목	단위 재료량, kgf/m ³
시멘트	430
실리카폼	22.5(치환율 4.9%)
물	158
잔골재	670
굵은골재	590
superplasticizer	7(결합재의 1.5%)
압축강도	550kgf/cm ²

Bergsoysundet bridge(노르웨이)



항목	단위 재료량, kgf/m ³
시멘트	420
실리카폼	40(치환율 8.7%)
물	165
잔골재	670
굵은골재	700
superplasticizer	7~8(결합재의 1.6%)
압축강도	700kgf/cm ²

Heidrun tension leg platform(북해)

그림 8. 실리카폼 콘크리트의 적용 사례



그림 9. 실리카폼을 활용한 국내·외 콘크리트 구조물

바닥구조물 보수 등, 원자력발전소 격납고와 폐기물 저장 시설, 해안 및 항만구조물에도 실리카폼 콘크리트가 사용되고 있다.

4. 결론

일반적으로 실리카폼은 단순히 초고강도 콘크리트 제작을 목적으로 할 때에만 적용하는 것으로 알고 있으나 실질적으로는 강도상승 목적이외에도 타 재료와의 결합력 향상, 내구성능 증진, 초기강도 발현 등 이미 상용화되어 있는 플라이애시나 고로슬래그 미분말에서 나타나지 않는 고유한 특성과 장점을 갖고 있는 재료이다.

다른 콘크리트 원재료에 비해 실리카폼이 다소 비싸다는 점 때문에 국내에서는 그 사용을 기피하는 경향이 있으나, 향후 구조물의 내구성 저하로 인해 보수보강에 소요되는 막대한 경비를 감안하여 볼 때 건설 당시에 소요되는 재료비 상승은 크지 않다. 실리카폼 콘크리트는 주로

미세구조나 거동에 집중되어 있으나, 아직도 이들을 입증할 수 있는 광범위한 실험방법이 부족하고, 콘크리트 강도 증가에 대한 매커니즘도 명확히 규명된 것은 없다. 향후 연구를 통해 매커니즘 분석과 실리카폼 콘크리트의 건조축축과 크리프, 동결융해 저항성, 내황산염 등 콘크리트의 내구성 부분에 더 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 변근주, 남진원, 실리카폼 콘크리트, 기문당, 2006.
2. 김상철, 유호석, 실리카폼의 콘크리트 구조물활용과 국내 이용 현황, 한국콘크리트학회 2001년도 가을 학술발표회 실리카폼과 내구성 포럼 발표집, pp. 63~78, 2001.
3. Mindess, S., Young, J. F., Darwin, D., Concrete, Pentice-Hall Second Edition, pp. 121~123.
4. ACI Committee 234(1996), Guide for the Use of Silica Fume in Concrete, American Concrete Institute.