

# 실리카 흡을 혼입한 콘크리트의 투과특성에 관한 연구

## A Study on the Permeabilities of Concretes Containing Silica Fume

형 원 길\*      정 호 석\*      소 형 석\*\*      소 승 영\*\*\*      소 양 섭\*\*\*\*  
Hyung, Won-Gil    Jeong, Hyo-Seok    Soh, Hyoung-Seok    So, Seung-Young    Soh, Yang-Seob

### ABSTRACT

Tests have been carried out on four concretes containing different levels of silica fume to measure their permeability coefficient using water and oxygen, chloride ion. The total cementitious content was  $351\text{kg/m}^3$ , and the water/cementitious materials ratio was 0.55.

The results show that a dramatic reduction in permeability of concrete containing silica fume occurs due to formation of a discontinuous macro-pore system which inhibits flow. Porosity estimates from mercury-intrusion porosimetry are used to develop an explanations for the water and air permeability reduction. And, results of the rapid permeability test showed that the resistance of concrete to the penetration of chloride ions increases significantly as a contents of silica-fume is increased. The current intensity passing through the concrete containing silica fume is presented from 664C to 2166C.

### 1. 서론

내구적인 콘크리트는 계획된 사용년한 동안 최소한 유지될 수 있도록 요구되는 품질과 사용성을 보 유해야 된다. 그러나, 콘크리트는 타설 직후부터 지중 혹은 수중, 대기중에 노출되어 사용년한 동안 각종 물리적, 화학적 영향을 받게 된다. 때문에 각종 환경으로부터 유해성분들의 통로로서 물리적, 화학적 저항성을 제공하는 피복 콘크리트의 투과특성은 콘크리트 구조물의 내구성을 결정하는 가장 중요한 인자중 하나임을 나타낸다.<sup>1),2)</sup> 일반적으로 콘크리트 외부에 존재하는 각종 유해 물질들(황산염이나 염화물 이온, 산소, 이산화탄소)은 부분적인 침투나 혹은 확산, 흡수, 모세관 작용, 그리고 이들의 조합과 같은 다양한 매카니즘에 의해 콘크리트 내로 이동될 것이다. 따라서, 다양한 매카니즘에 의한 물질의 이동들 중 투과특성과 같은 하나의 특성은 각종 유해성분들의 침투에 대한 콘크리트의 저항성을 효과적으로 나타낼 수 있을 것이다<sup>2),3)</sup>.

최근, 급속한 산업화에 따른 토양의 오염도 증가 및 대기오염의 현저한 증가로 더욱 유해한 환경이 조성되고 있어 노출된 각종 콘크리트 구조물의 조기 성능저하가 우려되고 있다. 이에 각국에서는 콘크리트 구조물의 내구설계에 대한 중요성을 인식하고, 콘크리트 내구설계를 위한 기초자료를 축적하기

\* 정회원, 전북대학교 대학원 석사과정

\*\* 정회원, 서남대학교 건축공학과 교수

\*\*\* 정회원, 담양대학교 건축과 교수

\*\*\*\* 정회원, 전북대학교 건축·도시공학과 교수, 공업기술연구소

위해 콘크리트의 투과특성에 대한 광범위한 연구를 수행하고 있다<sup>4),5),6),11),12)</sup>. 그러나, 국내에서는 콘크리트의 내구설계를 위한 이용 가능한 기술적 자료가 매우 빈약한 실정이다.

이에 본 연구는 콘크리트의 내구설계에 가장 중요한 인자인 콘크리트의 투과특성을 평가하고자 수행된 일련의 실험 중 그 일부로서, 실리카 흙을 혼입한 콘크리트의 투과특성을 침투물질에 따라 평가하고자 수행되었다. 이를 위해 실리카흙 혼입율을 변수로 제작된 4종류의 콘크리트에 대해 침투물질에 따른 투과특성(투수성 및 투기성, 염화물 이온 침투성) 실험과 세공구조 측정실험 및 압축강도 실험을 실시하였다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 사용재료

본 실험에 사용된 시멘트는 KS L 5201의 규격품인 국내 S사 제품으로 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 골재는 최대 골재크기가 20mm인 쇄석과 5mm이하의 강모래를 사용하였다. 본 실험에서 사용된 혼화제는 캐나다에서 생산되는 실리카 흙을 사용하였으며, 그 일반적인 성질은 표 1과 같다.

표 1 실리카 흙의 화학적 성질

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	lgloss
97.33	0.24	0.33	0.30	0.33	0.00	0.43	0.13	0.01	0.06	0.11	4.42

### 2.2 공시체 제작 및 양생방법

본 연구로부터 제작된 콘크리트는 물/결합재비(W/C+SF)는 55%로서 실리카흙 혼입율을 시멘트 중량에 대해 0, 5, 10, 20%로 변화시킨 4종류였으며, 그 배합 결과는 표 2와 같다. Ø100×200mm의 원주 공시체로 제작된 이들 콘크리트의 슬럼프는 공기량의 변화 없이 슬럼프값 80±5mm로 유지되도록 유동화제를 첨가하였다.

특히, 콘크리트의 투수성 및 투기성, 염화물 침투성 실험용 공시체들은 재령 28일 후 50mm 두께로 삼등분 하였고, 공시체의 표면누출 방지를 위해 절단면을 제외한 원주면에 대해 5mm 두께로 에폭시 코팅하였다.

표 2. 배합표

Test Series	W/C+SF (%)	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )						Slump (cm)	Air (%)
		Cement	Water	Sand	Gravel	Silica-Fume	Superplasticizer		
SF0 (Plain)	55	351	193	731	978	-	-	8	1.7
SF5		333	193	725	978	176	0.700	8	1.7
SF10		316	193	718	978	351	0.351	8	1.9
SF20		281	193	689	978	702	1.053	8	2.7

### 2.3 실험방법

#### 1) 압축강도 및 흡수율 실험

본 연구에서 수행된 압축강도 및 흡수율 실험은 실리카 흙 혼입율을 변수로 제작된 재령 28일 원주 공시체(Ø100×200mm)에 대해 KS F 2405와 KS F 2503에 의거하여 수행하였다. 이때 각 공시체들의 흡수율은 표준상태인 콘크리트의 흡수량을 절건된 콘크리트의 중량에 대한 백분율로 나타내었다.

#### 2) 투수성 실험

본 연구에서 수행된 투수성 실험은 그림 1에 나타낸 실험링<sup>4),7),8)</sup>을 이용하여 측정하였으며, 투수계수는 식(1)을 이용하여 산정되었다<sup>9)</sup>.

$$K_v = \frac{Xp^2v}{2ht} \text{ ----- (1)}$$

여기에서,  $K_v$ =투수계수(m/s),  $h$ =물의 높이(m),  $Xp$ =침투깊이(m),  $t$ = $Xp$ 만큼 침투되는 데 걸린 시간(s),  $v$ =침투부분에서 물에 의해 충전된 공간의 체적(실험전·후의 공시체 중량측정으로부터 결정됨)이다.

### 3) 투기성 실험

본 연구에서 수행된 투기성 실험은 50mm 두께의 준비된 공시체를 그림 2의 실험링에 장치하고, 10.5 kgf/cm<sup>2</sup>의 압력으로 산소(O<sub>2</sub>)에 의해 공시체의 밀표면을 통해 제공되며, 유량계를 이용하여 콘크리트를 통과하는 산소의 흐름비율을 측정하였다. 산소를 이용하여 측정된 투기계수는 식(2)에 의해 산정되었다<sup>4)</sup>.

$$K_g = \frac{QX \cdot 2P_2}{A(P_1^2 - P_2^2)} \text{ ----- (2)}$$

여기에서,  $K_g$ =투기계수(m<sup>2</sup>),  $Q$ =흐름비율(m<sup>3</sup>/s),  $X$ =공시체의 두께(m),  $A$ =흐름면적(m<sup>2</sup>),  $P_1$ =입구에서의 압력(kgf/cm<sup>2</sup>),  $P_2$ =출구에서의 압력(kgf/cm<sup>2</sup>)이다.

### 4) 염화물 이온 침투성 실험

본 연구에서 수행된 염화물 이온 침투성 실험은 ASTM C 1202<sup>9)</sup>와 AASHTO T 277-831 "Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete"<sup>10)</sup>에 의거하여 수행하였으며, 실험방법은 그림 3 및 4와 같다.

### 5) 세공구조 측정 실험

본 연구에서 수행된 세공구조 측정실험은 수은 압입식 포로시메타(Micromeritic사 제품, AUTOPORE 9220)를 이용하여 세공반경 10~0.01 μm의 범위에서 세공경 분포와 전세공 용적을 측정하였다.

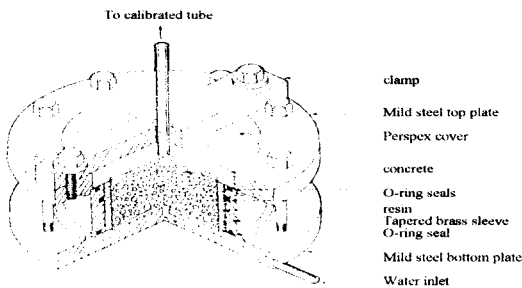


그림 1 투수성 실험링<sup>4)</sup>

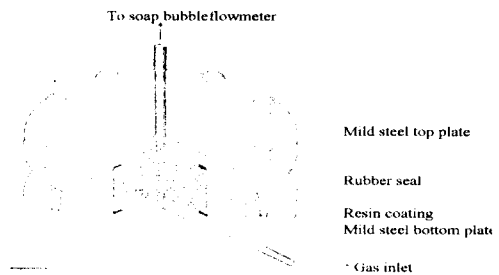


그림 2 투기성 실험링<sup>4)</sup>

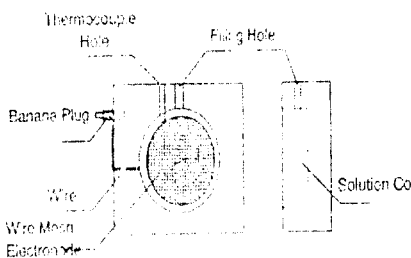


그림 3. 염화물 이온 침투성 장치<sup>10)</sup>

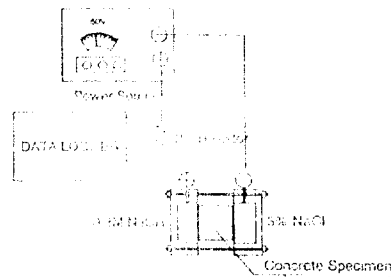


그림 4. Applied Voltage Cell<sup>10)</sup>

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 압축강도 및 흡수특성

표 3은 실리카흙의 첨가에 따른 콘크리트의 재령 28일 압축강도 및 흡수율의 실험결과를 나타내었다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 실리카 흙을 혼입한 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 382~425kgf/cm<sup>2</sup>으로 매우 높게 나타났으며, 흡수율은 실리카흙을 혼입하지 않은 콘크리트에 비해 약한 낮거나 동등한 수준으로 나타났다.

표 3. 압축강도 및 흡수율 시험결과

Test Series	Compressive Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Water Absorption (%)
SF0(Plain)	329	2.9
SF5	420	2.6
SF10	382	3.3
SF20	425	2.4

#### 3.2 세공구조 특성

그림 5에는 실리카흙 혼입율에 따른 각 공시체들의 세공경 분포와 전세공 용적을 나타내었다. 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 실리카 흙을 혼입한 공시체는 실리카흙을 혼입하지 않은 공시체에 비해 전세공 용적이 감소되었으며, 0.1 $\mu$ m 이하의 세공이 실리카 흙을 혼입하지 않은 공시체에 비해 많이 분포하고 있음을 알 수 있었다. 이는 실리카흙의 포졸란 반응과 매트릭스 충전효과에 기인된 결과로 판단되며, 콘크리트의 투과특성을 개선하는 데 크게 기여할 것으로 판단된다.

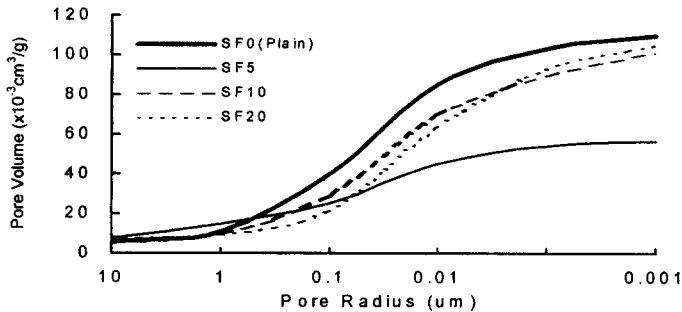


그림 5. 실리카 흙 혼입율에 따른 콘크리트의 세공경 분포와 전세공 용적

#### 3.3 투수성

그림 6에는 실리카흙 혼입율에 따른 콘크리트의 투수계수를 나타내었다. 그림 6에서 알 수 있는 바와 같이 실리카흙 혼입율을 5~20%로 변화시키기에 따라 현저히 낮은 투수계수를 나타내고 있으며, 그 개선효과는 실리카 흙을 혼입하지 않은 콘크리트에 비해 약 4.3~12.4배 정도 였다. 일반적으로 콘크리트의 투수성은 콘크리트의 포로시티 뿐 아니라 세공구조의 연속성이나 세공경 분포와 밀접하게 관련하고 있으며, 이상의 결과는 3.2절의 세공구조 실험결과로부터 실리카흙 첨가에 따른 콘크리트 세공구조의 불연속성이나 0.1 $\mu$ m 이하의 세공량, 전세공 용적의 감소 등에 기인되어 콘크리트내 물질 이동을 효과적으로 억제한 결과인 것으로 판단된다.

#### 3.4 투기성

그림 7에는 실리카흙 혼입율에 따른 콘크리트의 투기계수를 나타내었다. 그림 7에서 보는 바와 같이

W/C=55%인 콘크리트의 투기계수는  $1.15 \times 10^{-18} \text{ m}^2$  수준이었으며, 실리카흄을 혼입함에 따라 현저히 낮은 투기성을 나타내었다. 실리카흄 혼입율에 따른 콘크리트의 투기계수는  $4.02 \sim 1.78 \times 10^{-19} \text{ m}^2$  수준이었으며, 이는 실리카흄을 혼입하지 않은 공시체에 비해 약 2.9~6.5배 정도의 낮은 투기계수로서 실리카흄 혼입에 따른 콘크리트 투기성 개선효과를 확인할 수 있었다.

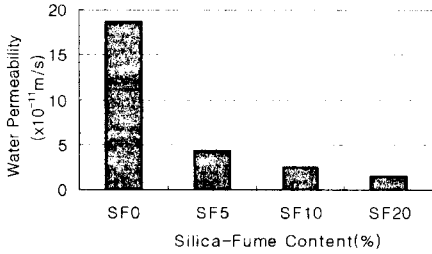


그림6. 실리카 흄 혼입율에 따른 콘크리트의 투수성

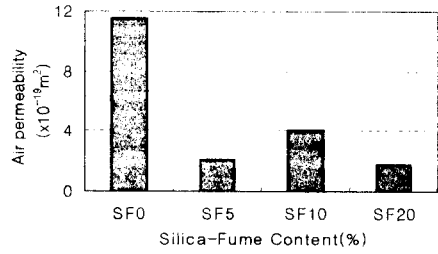


그림7. 실리카 흄 혼입율에 따른 콘크리트의 투기성

### 3.5 염화물 이온 침투성

그림 8에는 콘크리트 공시체를 통과한 시간에 따른 전류량(Ampers)을 나타내었으며, 그림 9에는 6시간 후 콘크리트 공시체를 통과한 통과 전하량(Coulombs)을 실리카 흄 혼입율에 따라 나타내었다. 그림 8 및 9에서 알 수 있는 바와 같이 실리카흄을 혼입하지 않은 일반 공시체는 실리카 흄을 혼입한 공시체에 비해 높은 통과 전하량을 보였으며, 4606C 수준으로 나타났다. 그러나, 실리카흄 혼입율을 5~20%로 변화시키기에 따라 663~2166C 수준으로 감소되었으며, 이는 표 5에 나타낸 ASTM C 1202의 염화물 이온 침투성에 따른 콘크리트의 투과성 분류로부터 실리카흄 혼입율 5%의 경우, 중간정도의 투과성 콘크리트로, 실리카흄 혼입율 10~20%의 경우, 매우 낮은 투과성 콘크리트로 각각 분류될 수 있다. 따라서, 실리카흄 혼입에 의해 콘크리트의 투과특성을 매우 낮은 투과성 콘크리트로 개선시킬 수 있음을 알 수 있었다.

표 4. 통과 전하량에 기초한 염화물 이온 침투성9)

Currents(Coulomb)	Chloride Ion Permeability
> 4000	High
2000-4000	Moderate
1000-2000	Low
100-1000	Very Low
100 <	Negligible

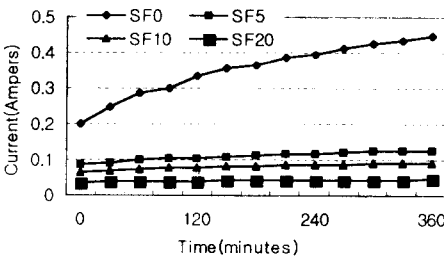


그림 8. 콘크리트 공시체를 통과한 시간에 따른 전류량(Ampers)

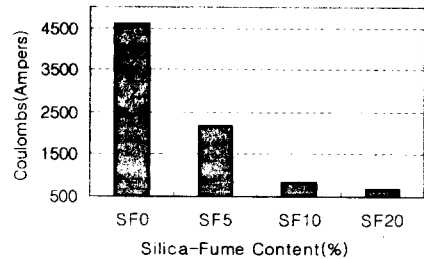


그림9. 실리카 흄 혼입율에 따른 콘크리트의 염화물 이온 침투성

#### 4. 결 론

본 연구는 실리카흙을 혼입한 콘크리트의 투과특성을 침투물질에 따라 평가하고자 수행되었으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

① 본 연구의 세공구조 측정 실험결과로부터 실리카흙을 혼입하지 않은 공시체에 비해 전세공 용적의 감소와  $0.1\mu\text{m}$  이하의 세공경 등이 많이 분포하고 있음을 알 수 있었다.

② 투수성 및 투기성 실험결과로부터 실리카흙을 혼입한 콘크리트는 실리카흙을 혼입하지 않은 콘크리트에 비해 투수성의 경우, 약 4.3~12.4배 정도, 투기성의 경우, 약 2.9~6.5배 정도의 낮은 투과특성으로 개선됨을 알 수 있었고, 이러한 결과는 세공구조 측정결과에 기인됨을 알 수 있었다.

③ 본 연구의 염화물 이온 침투성 실험결과로부터 실리카흙을 혼입한 콘크리트는 실리카흙 혼입율 10~20%에서 663~822C 수준으로 나타났으며, 이는 ASTM C 1202의 염화물 이온 침투성에 따른 콘크리트의 투과성 분류로부터 매우 낮은 투과성 콘크리트로 분류될 수 있다. 따라서, W/C=55%의 높은 투과성을 갖는 콘크리트는 실리카흙 혼입에 의해 매우 낮은 투과성을 갖는 콘크리트로 개선될 수 있음을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

1. Neville, A. M. Properties of concrete, Third edition, London, Pitman, 1981, pp.433-436.
2. Levitt, M, In-situ permeability of concrete, Developments in Testing Concrete for Durability, Papers for a one-day Conference, London, september 1984, The Concrete Society, 1985, pp.59-64.
3. Lawrence, C. D. Durability of concrete : molecular transport processes and test methods, Slough, Cement and Concrete Association , 1981, pp.25.
4. Bamforth, P. B. The relationship between permeability coefficients of concrete using liquid and gas, Magazine of Concrete Research, V.39, N.138, March 1987, pp.3-11.
5. Huang Cheng-yi, and Feldman, R. F., "Influence of Silica Fume on the Microstructural Development in Cement Mortars", Cement and Concrete Research, V.15, 1985, pp.285-294.
6. Valenta, O., The permeability and durability of concrete in aggressive conditions, Proceedings of 10th International Congress on Large Dams, Montreal, 1970, pp.103-117.
7. The Concrete Society, Permeability testing of site concrete - a review of methods and experience, Report of a Concrete Society Working Party , Permeability of Concrete and its control, Papers for a one-day Conference, London, 12 December 1985, The Concrete Society, 1985, pp.1-68.
8. Taylor Woodrow Research Laboratories, Marine durability survey of the Tongue Sands Tower, Published for the Concrete in the Oceans Management Committee by the Cement and Concrete Association, Slough, 1980, 141pp. Publication 15.615, Technical Reports No.5.
9. Annual Book of ASTM Standard, C 1202, Electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, 1990.
10. Standard Specification for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, Fourteenth Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington D. C., 1986.
11. Ozyildirim, C., Laboratory Investigation of Low-Permeability Concretes Containing Slag and Silica Fume, ACI Materials Journal V.91, No.2, March-April, 1994, pp.197-202.
12. Perraton, D., Aitcin, P. C., Vezina, D., Permeabilities of Silica Fume Concrete, ACI Detroit, SP-108, V.1, 1988, pp.63-84.