

# 포졸란 함유 콘크리트의 공극구조와 투과특성

## Pore Structure and Permeability of Concrete Containing Pozzolanic Materials

김재신<sup>\*</sup> 소형석<sup>\*\*</sup> 소승영<sup>\*\*\*</sup> 소양섭<sup>\*\*\*\*</sup>  
Kim, Je-Sin, Soh, Hyung-Seok, So, Seung-Young, Soh, Yang-Seob

### ABSTRACT

The paper presents results of an investigation on the permeability characteristics and pore structure of concrete containing different levels of fly ash, silica fume, or blast furnace slag. The total cementitious content was 351kg/m<sup>3</sup>, and the water/cementitious materials ratio was 0.55. The porosity and pore structure of representative pastes of the matrix were measured using mercury intrusion porosimetry, and the permeability characteristics of concrete were also determined by water and oxygen permeability, chloride ion penetration. The results show that significant reduction in permeability of concrete containing pozzolanic materials due to formation of a discontinuous macro-pore system which inhibits flow. And, the permeability of concrete and pore structure(capillary porosity or total porosity) shows linear relationship.

### 1. 서론

콘크리트는 타설 직후부터 사용년한 동안 각종 환경에 노출되어 물리적 혹은 화학적인 영향을 받게 된다. 때문에 콘크리트 외부에 존재하는 각종 유해 물질들(황산염이나 염화물 이온, 산소, 이산화탄소)은 장기간에 걸쳐 부분적인 침투나 혹은 확산, 흡수, 모세관 작용, 그리고 이들의 조합과 같은 다양한 이동 메카니즘에 의해 콘크리트 내로 침투될 것이고, 콘크리트 구성물들과 물리적 혹은 화학적 상호작용을 일으킨다. 이러한 상호작용은 콘크리트 조직의 성분변화 혹은 팽창에 의한 균열발생 뿐 아니라 콘크리트내 보강된 철근의 부식을 야기시켜 콘크리트의 내구년한과 내력을 현저히 감소시킬 수 있다<sup>1)</sup>. 따라서, 콘크리트 외부의 각종 유해성분들이 콘크리트 내부로 확산 혹은 침투되는 것을 억제하는 것은 콘크리트의 내구성을 향상시키는 가장 중요한 인자이며, 그 중 하나가 포졸란재의 이용에 의한 콘크리트 조직구조의 개선이다<sup>2)</sup>.

이에 본 연구는 포졸란재의 종류와 혼입량을 달리하여 제작된 포졸란 함유 콘크리트의 투과특성을 투수성과 투기성, 그리고 통과전하량 측정에 의한 염화물 이온 침투성에 의해 종합적으로 평가하고, 그들의 공극구조 변화를 검토하였으며, 포졸란 함유 콘크리트의 공극구조(공극율과 공극 분포상태)와 투과특성 사이의 상호관련성을 평가함으로써 포졸란재의 이용에 대한 기초자료를 제시하고자 한다.

\* 정회원, 전북대학교 대학원 석사과정

\*\* 정회원, 서남대학교 건축공학과 교수

\*\*\* 정회원, 담양대학교 건축과 교수

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

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 사용재료

본 실험에 사용된 시멘트는 국내산 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 골재는 최대 골재크기가 20mm인 쇄석과 5mm이하의 강모래를 사용하였다. 또한, 혼화제는 충남 보령산 플라이 애쉬와 북미(캐나다)산 실리카 흙, 광양제철소산인 고로 슬래그분말을 사용하였으며, 이들 결합재의 화학적 성분과 물리적 성질은 표 1과 같다.

표 1. 결합재의 화학적 성분과 물리적 성질

성분(%)	시멘트	플라이 애쉬	실리카 흙	고로슬래그 분말
SiO <sub>2</sub>	20.57	53.08	97.33	33.1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.48	25.25	0.24	13.76
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.18	12.84	0.33	0.85
CaO	63.03	2.61	0.3	40.59
MgO	3.41	1.37	0.33	7.22
SO <sub>3</sub>	2.23	0.06	-	1.65
lg.loss	1.24	2.1	4.42	0.91
분말도	3266 cm <sup>2</sup> /g	3280 cm <sup>2</sup> /g	20 m <sup>2</sup> /g	4550 cm <sup>2</sup> /g
비 중	3.15	2.17	2.2	2.9

### 2.2 공시체 제작 및 양생방법

본 연구로부터 제작된 보통콘크리트와 포졸란재 함유 콘크리트는 물/결합재비(W/B)=55%로서 포졸란재의 종류와 혼입량을 주요 변수로 하였으며, 공기량의 변화 없이 슬럼프 값 8cm를 유지하도록 유동화제를 시멘트 중량에 대해 0.3~0.6% 첨가하였다. 그 배합결과는 표 2와 같다.

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

표 2. 배합표

공시체의 종류	WB (%)	단위수량 (kg/m <sup>3</sup> )	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )						Slump (cm)	Air (%)
			Cement	Fly ash	Silica fume	Blast furnace slag	Sand	Gravel		
N55 (Plan)	55	193	351	-	-	-	767	1016	8	1.7
FA10		194	316	35	-	-	755	1016		1.9
FA20		192	281	76	-	-	742	1016		1.7
FA30		193	246	105	-	-	730	1016		1.1
SF5		193	333	-	17.6	-	763	1016		1.7
SF10		192	316	-	35.1	-	756	1016		1.9
SF20		194	281	-	70.2	-	737	1016		0.6
BFS40		193	211	-	-	140.4	759	1016		1.0
BFS50		193	176	-	-	175.5	756	1016		1.2
BFS60		192	140	-	-	210.6	754	1016		0.8

### 2.3 실험방법

1) 투수성 및 투기성 실험 : 본 연구에서 수행된 투수성 및 투기성 실험은 50mm 두께의 준비된 재령 28일 시편을 Taywood Engineering Limited에 의해 제안된 실험링<sup>3)</sup>에 장치하고, 10.5 kgf/cm<sup>2</sup>의 압력으로 물과 산소(O<sub>2</sub>)를 공시체의 밀표면을 통해 제공하여 눈금튜브(calibrated tube)와 유량계(soap bubble flowmeter)를 이용하여 콘크리트를 통과하는 물과 산소의 흐름비율을 측정하였다. 투수계수는 식(1)을 이용하여 산정되었으며<sup>4)</sup>, 투기계수는 식(2)를 이용하여 산정되었다<sup>4)</sup>.

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

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

식(1)에서, K<sub>v</sub>=투수계수(m/s), h=물의 높이(m), Xp=침투깊이(m), t=Xp만큼 침투되는 데 걸린 시간(s), v=침투부분에서 물에 의해 충전된 공극의 체적(실험전·후의 공시체 중량측정으로 부터 결정됨)이다. 식(2)에서, K<sub>g</sub>=투기계수(m<sup>2</sup>), Q=흐름 비율(m<sup>3</sup>/s), X=공시체의 두께(m), A=흐름면적(m<sup>2</sup>), P<sub>1</sub>=입구에서의 압력(kgf/cm<sup>2</sup>), P<sub>2</sub>=출구에서의 압력(kgf/cm<sup>2</sup>)이다.

2) 염화물 이온 침투성 실험 : 본 연구에서 수행된 염화물 이온 침투성 실험은 AASHTO T 277-831 "Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete"<sup>5)</sup>에 의거하여 재령 28일 시편에 대해 수행하였다.

3) 세공구조 측정 실험 : 본 연구에서 수행된 세공구조 측정실험은 수은 압입식 포로시메타 (AUTOPORE 9220)를 이용하여 재령 28일 시편에 대해 세공반경 3.75~7500nm의 범위에서 세공경 분포와 전세공 용적을 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 공극구조특성

그림 3에는 보통 콘크리트와 포졸란 함유 콘크리트의 세공경 분포와 전세공 용적, 그리고 50NM 이상의 공극경(모세관 공극) 용적을 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 플라이애쉬를 혼입한 콘크리트의 전세공 용적은 보통 콘크리트에 비해 비슷하거나 약간 적게 나타났지만, 50NM 이상의 공극경 용적은 매우 적게 나타났다. 또한 실리카흄과 고로슬래그분말을 혼입한 콘크리트들은 전세공 용적 뿐 아니라 50NM 이상의 공극경 용적에서도 매우 적게 나타났으며, 혼입율이 증가됨에 따라 적게 나타났다. 이는 포졸란재들의 포졸란 반응에 의한 공극구조 개선 효과에 기인된 결과로 판단되며, 투과특성을 개선하는 데 크게 기여할 것으로 판단된다.

#### 3.2 투과특성

그림 4에는 보통 콘크리트와 포졸란 함유 콘크리트의 투수성 및 투기성, 통과전하량에 의한 염화물 이온 침투성을 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 각 공시체들의 투수성과 투기성 결과는 비슷한 경향으로 나타났지만, 통과전하량에 의한 염화물이온 침투성은 약간 다른 경향을 보였다. 또한 포졸란 함유 콘크리트들의 투수성, 투기성, 염화물이온 침투성은 보통 콘크리트에 비해 매우 낮게 나타났으며, 실리카흄을 20% 혼입한 콘크리트가 가장 낮은 투과특성을 보였다. 실리카흄 20% 혼입 콘크리트의 투과특성은 보통 콘크리트와 비교하여 투수성에서 약 11배, 투기성에서 약 9배, 염화물이온 침투성에서 약 6배 정도의 개선효과를 보였다. 포졸란재의 첨가에 따른 이상의 개선효과는 포졸란 반응에 의한 수산화칼슘의 비결정질 칼슘실리케이트 수화물로의 변화 및 모세관 공극의 감소, 전세공 용적의 감소, 꼬인 공극구조(공극의 불연속성) 등에 기인된 결과로 판단된다.

#### 3.3 공극구조와 투과특성의 관계

보통콘크리트와 포졸란 함유 콘크리트의 공극구조와 투과특성과의 관계는 그림 5에 나타내었다. 그림에서와 같이 콘크리트 투과특성과 전세공 용적 혹은 투과특성과 모세관 공극용적(50NM이상의 공극경 용적)과의 관계는 선형적이며, 전세공 용적(포로시타) 보다는 오히려 모세관 공극용적과의 관련성이 더욱 높은 것으로 나타났다. 또한 염화물이온 침투성을 나타내는 통과전하량과 공극구조와의 관계는 매우 빈약하게 나타났으며, 투수성과 공극구조와의 관련성이 결정계수 0.92로 가장 높은 것으로 나타났다.

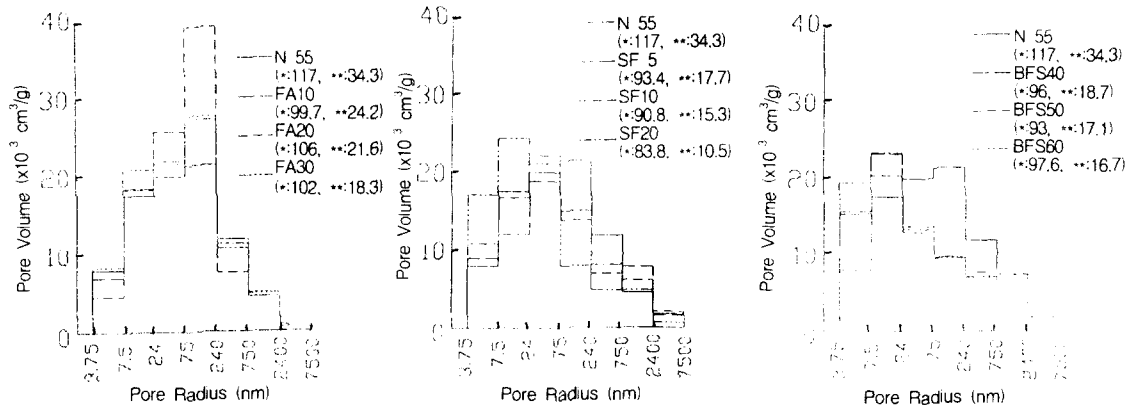


그림 3. 보통 콘크리트와 포졸란 함유 콘크리트의 공극구조(\*:전세공용적, \*\*:50NM이상의 공극경 용적)

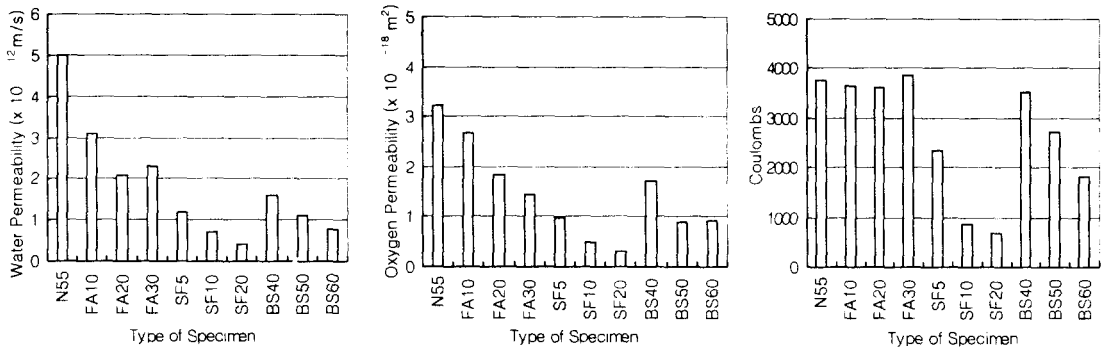


그림 4. 보통 콘크리트와 포졸란 함유 콘크리트의 투과특성

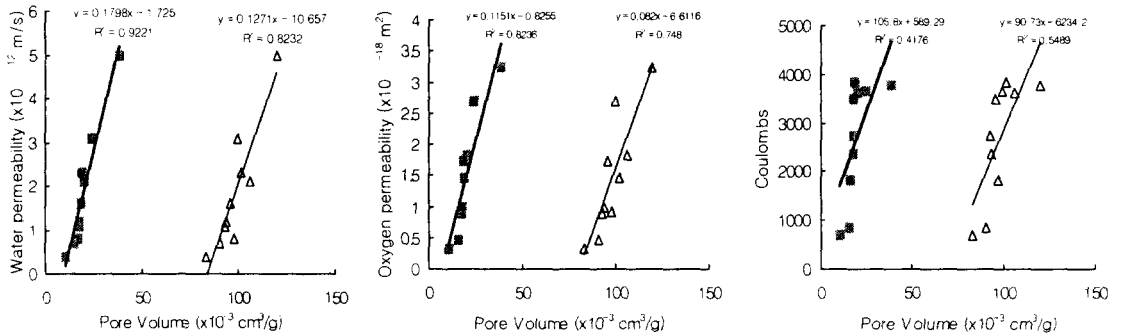


그림 5. 콘크리트의 투과특성과 공극구조

#### 4. 결론

포졸란 함유 콘크리트의 공극구조는 포졸란 반응에 의해 보통 콘크리트에 비해 적은 전세공 용적을 나타냈으며, 특히 50NM 이상의 공극경(모세관 공극) 용적이 매우 적게 나타내었다. 이러한 결과에 기인하여 포졸란 함유 콘크리트의 투과특성(투수성, 투기성, 염화물이온 침투성)은 보통 콘크리트에 비해 매우 낮게 나타나고 있으며, 포졸란재 중 실리카흄이 가장 우수한 개선효과를 보였다. 또한 콘크리트의 공극구조와 투과특성 사이의 관계는 선형적으로 나타났으며, 전세공 용적(포로시티) 보다는 오히려 모세관 공극용적과의 관련성이 더욱 높은 것으로 나타났다. 특히, 투수성과 공극구조, 투기성과 공극구조 사이의 관련성은 매우 높게 나타나 콘크리트의 투과특성과 공극구조(모세관 공극용적) 사이의 상호 관련성이 매우 높음을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

1. Neville, A. M. Properties of concrete, Third edition, London, Pitman, 1981, pp.433-436.
2. 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.
3. 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.
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. 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.