



# 수계환경 적용을 위한 설계공극률 및 부석 혼입률에 따른 포러스콘크리트의 물리적 특성 평가

김우석<sup>1)</sup> · 박재로<sup>2)</sup> · 김봉균<sup>3)</sup> · 서대석<sup>3)</sup> · 박준석<sup>4)\*</sup>

<sup>1)</sup>금오공과대학교 건축학부   <sup>2)</sup>한국건설기술연구원 환경플랜트연구소   <sup>3)</sup>동산콘크리트산업(주) 동산BIO콘크리트연구소  
<sup>4)</sup>경북대학교 건설환경에너지공학부

## Physical Properties Evaluation of Porous Concrete according to Target Porosity and Pumice Contents Ratio for Application of the Aquatic Environment

Woo-Suk Kim,<sup>1)</sup> Jae-Roh Park,<sup>2)</sup> Bong-Kyun Kim,<sup>3)</sup> Dae-Seuk Seo,<sup>3)</sup> and Jun-Seok Park<sup>4)\*</sup>

<sup>1)</sup>School of Architecture, Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Rep. of Korea  
<sup>2)</sup>Environmental and Plant Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Rep. of Korea  
<sup>3)</sup>Dong San BIO Concrete Industry Laboratory, Dong San Concrete Industry Company, Yeosu 12659, Rep. of Korea  
<sup>4)</sup>School of Architecture & Civil Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Rep. of Korea

**ABSTRACT** The present study is mainly aimed at securing adequate pores which are applicable to the aquatic environment and satisfying the required strength of porous concrete as a structure by substituting pumice for crushed stone which is usually used for the fabrication of porous concrete. Accordingly, in order to deduce the optimum mixing conditions applicable to the aquatic environment, we sought to evaluate the porosity, coefficient of permeability and compressive strength of porous concrete based on the target porosity and the mixing factors for pumice. By examining the porosity and coefficient of permeability of porous concrete and the physical properties of its compressive strength based on the target porosity and the mixing factors for pumice, it is judged that the optimum mixtures for porous concrete applicable to the aquatic environment which satisfy both the necessity of securing adequate pores and the required strength for porous concrete as a structure are PC I I-10-0, PC I I-10-5 and PC I I-10-10.

**Keywords** : aquatic environment, pumice, porous concrete, porosity, coefficient of permeability, compressive strength

### 1. 서 론

다양한 환경적 기능을 가진 포러스콘크리트는 다공성 및 큰 표면적이 큰 특징이기 때문에 표면에 부착할 식물 플랑크톤, 미생물 등이 보다 많이 부착할 수 있어 수질정화의 측면에서도 유효하다.<sup>1-5)</sup> 포러스콘크리트가 생물막을 형성하여 여러 종의 미생물이 성장할 수 있으며, 미생물 담체로 활용이 가능한 것으로 연구되어졌다. 또한 자연정화방법인 역간접 접촉산화법의 가장 큰 장점으로 돌과 돌 사이에 생물막을 형성시킴으로서 오염수를 통과 시켜 유기물의 분해 촉진을 도모하는 것이 포러스콘크리트에 활용 가능한 것을 확인하

였다.<sup>6-7)</sup> 또한 포러스콘크리트가 하천 및 호소 등 다양한 수계환경에 적용 될 수 있다는 점을 고려해보면 동결기 하천의 동결로 인하여 콘크리트가 파손될 우려가 있고 나뭇가지와 같은 각종 부유물로 인하여 충격을 받을 수 있으므로 적절한 강도를 확보하는 것 역시 중요하다고 할 수 있다. 따라서 효과적인 수질정화성능을 가지면서 콘크리트 구조체로서의 소요강도를 동시에 만족하여야 한다. 콘크리트용 골재로 사용 가능한 부석은 미생물 담체로서 활용하여 다양한 폐수에서 혐기성 및 호기성 조건에서 우수한 처리효율을 나타내었으며,<sup>8-12)</sup> 생물반응조에서 생물막 및 미생물의 효율적인 증가와 부착을 보여주었다.<sup>13)</sup> 또한 바실러스 미생물의 내생포자 형성에 필요한 미네랄인 SiO<sub>2</sub>가 주로 이루어져 있기 때문에 미생물을 이용한 수처리 기능을 한 층 더 강화할 수 있으며,<sup>14-15)</sup> 부석표면에 음전하를 띠게 하여 중금속 등을 쉽게 흡수하기 때문에 환경 분야에서 다양한 용도로 연구되었다.<sup>16)</sup>

\*Corresponding author E-mail : a30426@nate.com  
 Received July 28, 2016, Revised September 28, 2016,  
 Accepted November 7, 2016  
 ©2016 by Korea Concrete Institute

이에 본 연구에서는 포러스콘크리트 제조시 사용되는 쇄석 대신 부석을 치환하여 수계환경에 적용이 가능한 적정 공극의 확보와 구조체로서의 소요 강도를 만족시키기 위한 것이 주목적이다. 이에 수계환경에 적용이 가능한 최적배합조건을 도출하기 위하여 설계공극률 및 부석의 배합요인에 따른 포러스콘크리트의 공극률 및 투수계수, 압축강도를 평가하고자 하였다.

## 2. 실험 개요

### 2.1 실험 재료

#### 2.1.1 시멘트

실험에서 사용한 시멘트는 국내 S사의 보통 포틀랜드 시멘트이며, 물리적 성질은 Table 1과 같다.

#### 2.1.2 굵은골재

골재는 5~13 mm 및 13~20 mm 입도의 화강암질 부순돌과 5~8 mm 입도의 백두산에서 생성된 부석<sup>17)</sup>을 사용했다. 각 골재의 물리적 특성은 Table 2와 같고, 부석의 화학조성비는 Table 3과 같다. 본 연구에 사용된 부석은 선행연구<sup>18)</sup>에서의 화학조성비와 비슷한 결과를 나타내었다.

Fig. 1과 같이 부석의 기공 형태는 FE-SEM (S-4300 and EDX-350; Hitachi, Tokyo, Japan)을 이용하여 관찰하였으며 구형, 타원형 또는 작은 구형 기공을 포함한 관형 등으로 다양하게 나타났다. 기공의 크기는 매우 다양하게 나타났으

며, 작은 기공들이 큰 기공에 융합되는 모습, 인접한 작은 기공이 서로 융합되는 모습도 확인하였다.

#### 2.1.3 혼화제

혼화제는 시멘트 분산작용과 미세공기의 연행으로 단위수량저감, 워커빌리티(Workability) 및 내동해성을 개선시키는 국내 D사 제품의 고성능AE감수제를 사용하였으며, 물리적 성질은 Table 4와 같다.

### 2.2 실험 방법

#### 2.2.1 공시체 배합 및 제조

부석을 이용한 포러스콘크리트의 물리적 특성 분석을 위한 배합요인은 W/C는 25%로 계획하였다. 설계공극률을 5%, 10%, 15%, 20%로 변화시키면서 각 배합에 대하여 부석의 혼입률을 0, 5, 10, 15, 20%로 설정하여 배합을 실시하였으며, 사용된 배합표는 Table 5와 같다. 또한 포러스콘크리트의 배합은 가변식 콘크리트 팬 믹서를 이용하여 분할혼합 방식으로 혼합을 실시하였다. (사)일본콘크리트공학협회 『포러스콘크리트의 설계·시공법의 확립에 관한 연구위원회』의 보고서의 『포러스콘크리트 공시체의 제작방법(안)』<sup>19)</sup>을 참조하여 혼합을 끝낸 후  $\Phi 10 \times 20$  cm 압축강도용 몰드에 1/2씩 채운 후 각 층마다 표면진동형 다짐기를 이용하여 15초 동안 다짐을 실시하여 공시체를 제작하였다. 포러스콘크리트가 타설된 공시체는 24시간 후에 탈형하여 소요의 재령까지  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 수중에서 표준양생을 실시하였다.

Table 1 Physical properties of cement

Setting time (min)		Compressive strength (MPa)			Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
Initial set	Final set	3d	7d	28d	3,318	3.14
240	340	17	28	43		

Table 2 Physical properties of coarse aggregate

Coarse aggregate	Grading (mm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Water absorption ratio (%)	Absolute Volume (%)	Unit volume weight (t/m <sup>3</sup> )
Crushed Aggregate	5~13	2.70	0.62	61.38	1,658
	13~20	2.70	0.45	60.67	1,641
Pumice	5~8	0.88	82.40	48.35	424

Table 3 Chemical composition of pumice

Compound name	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Loss on ignition
Contents (%)	71.0	10.7	4.79	0.43	0.09	0.08	5.34	4.34	2.42

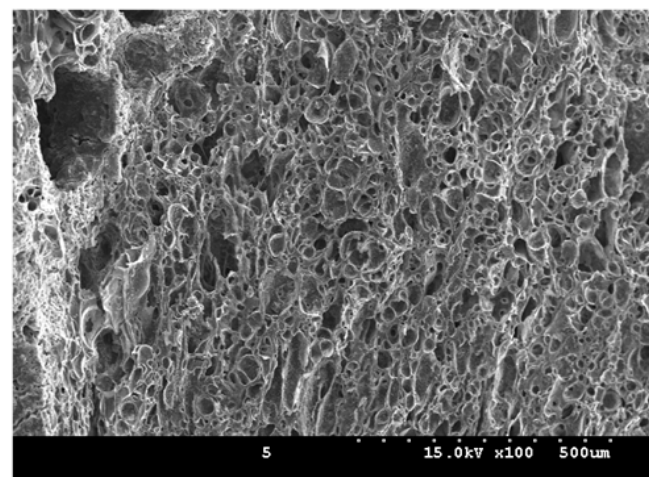


Fig. 1 Image of pumice using FE-SEM

Table 4 Properties of air-entraining and high-range water-reducing admixture

Appearance	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Alkaline content(%)	Chloride ion content(%)
brown liquid	1.06	0.9	< 0.01

**Table 5** Mixing design of porous concrete

Mix No.	Gradation (mm)	Target Void Ratio (%)	Pumice Content (Vol. %)	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )				
				Cement	Water	Crushed Stone	Pumice	Admixture
PC I -5-0	5 ~ 13	5	0	591	148	1658	-	2.661
PC I -5-5			5	591	148	1575	27	2.661
PC I -5-10			10	591	148	1492	54	2.661
PC I -5-15			15	591	148	1409	81	2.661
PC I -5-20			20	591	148	1326	108	2.661
PC I -10-0		10	0	503	126	1658	-	2.265
PC I -10-5			5	503	126	1575	27	2.265
PC I -10-10			10	503	126	1492	54	2.265
PC I -10-15			15	503	126	1409	81	2.265
PC I -10-20			20	503	126	1326	108	2.265
PC I -15-0		15	0	415	104	1658	-	1.869
PC I -15-5			5	415	104	1575	27	1.869
PC I -15-10			10	415	104	1492	54	1.869
PC I -15-15			15	415	104	1409	81	1.869
PC I -15-20			20	415	104	1326	108	1.869
PC I -20-0		20	0	327	82	1658	-	1.474
PC I -20-5			5	327	82	1575	27	1.474
PC I -20-10			10	327	82	1492	54	1.474
PC I -20-15			15	327	82	1409	81	1.474
PC I -20-20			20	327	82	1326	108	1.474
PC II -5-0	13 ~ 20	5	0	604	151	1641	-	2.718
PC II -5-5			5	604	151	1559	27	2.718
PC II -5-10			10	604	151	1477	54	2.718
PC II -5-15			15	604	151	1395	81	2.718
PC II -5-20			20	604	151	1313	108	2.718
PC II -10-0		10	0	516	129	1641	-	2.322
PC II -10-5			5	516	129	1559	27	2.322
PC II -10-10			10	516	129	1477	54	2.322
PC II -10-15			15	516	129	1395	81	2.322
PC II -10-20			20	516	129	1313	108	2.322
PC II -15-0		15	0	428	107	1641	-	1.926
PC II -15-5			5	428	107	1559	27	1.926
PC II -15-10			10	428	107	1477	54	1.926
PC II -15-15			15	428	107	1395	81	1.926
PC II -15-20			20	428	107	1313	108	1.926
PC II -20-0		20	0	340	85	1641	-	1.531
PC II -20-5			5	340	85	1559	27	1.531
PC II -20-10			10	340	85	1477	54	1.531
PC II -20-15			15	340	85	1395	81	1.531
PC II -20-20			20	340	85	1313	108	1.531

### 2.2.2 시험방법

부석을 이용한 포러스콘크리트의 물리적 특성을 분석하기 위하여 전공극률 및 압축강도시험, 투수계수시험을 실시하였으며, 포러스콘크리트의 전공극률 시험은 (사)일본콘크리트공학협회 『포러스콘크리트의 설계·시공법의 확립에 관한 연구위원회』보고서의 『포러스콘크리트의 공극률 시험방법(안)』중 용적법<sup>19)</sup>에 준하여 측정하였으며, 다음 식 (1)에 의하여 계산하였다. 또한, 투수계수시험은 『포러스콘크리트의 설계·시공법의 확립에 관한 연구위원회』보고서의 『포러스콘크리트의 투수시험방법(안)』<sup>19)</sup>에 준하여 Fig. 2와 같은 시험장치로 투수계수를 측정하였으며, Darcy 법칙에 근거하여 식 (2)에 의해 투수계수를 산출하였다. 포러스콘크리트의 압축강도시험은 재령 28일에서 KS F 2405<sup>20)</sup>에 준하여 국내 H사 제품의 용량 100 t의 유압식 만능시험기를 사용하여 압축강도를 측정하였다.

$$A_t = \left\{ 1 - \frac{(W_2 - W_1)/\rho_w}{V} \right\} \times 100 \quad (1)$$

여기서,

- $A_t$  : 포러스콘크리트의 전공극률(%)
- $V$  : 공시체의 용적( $\text{cm}^3$ )
- $\rho_w$  : 물의 밀도( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
- $W_1$  : 공시체의 수증질량(g)
- $W_2$  : 24시간 자연방치 후의 기건질량(g)

$$K = \frac{L}{H} \times \frac{Q}{A(T_2 - T_1)} \quad (2)$$

여기서,

- $K$  : 포러스콘크리트의 투수계수( $\text{cm}/\text{sec}$ )

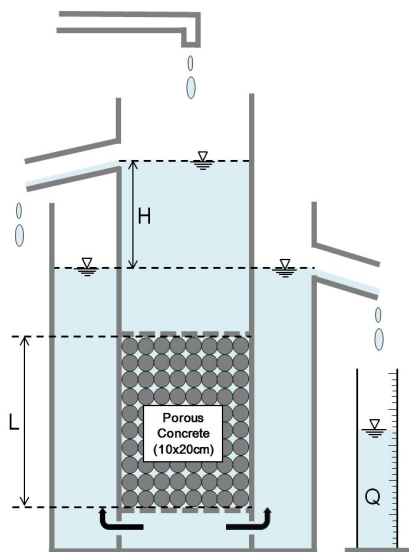


Fig. 2 Schematic diagram of coefficient of permeability test of porous concrete

- $L$  : 공시체의 높이(cm)
- $A$  : 공시체의 단면적( $\text{cm}^2$ )
- $T_1$  : 측정 개시시간(sec)
- $T_2$  : 측정 종료시간(sec)
- $H$  : 수위차(cm)
- $Q$  : 유량( $\text{cm}^3$ )

## 3. 시험결과 및 분석

### 3.1 공극률

#### 3.1.1 공극률 시험결과

포러스콘크리트의 설계공극률 및 부석의 혼입률에 따른 공극률시험 결과는 Fig. 3, 4와 같다. 부석을 혼입하지 않은 경우 골재입도 5~13 mm에서 설계공극률 5, 10%는 0.2% 증가하였으며, 15, 20%는 각각 0.3, 0.2% 감소한 것으로 나타났다. 골재입도 13~20 mm의 경우 설계공극률 5%는 0.2% 증가하였으며, 10%는 설계공극률과 동일한 공극률을 나타내었다. 설계공극률 15, 20%에서는 각각 0.6, 0.2% 감소하는 결과를 나타내었다. 또한 설계공극률에 비해 실측공극률의 증가 및 감소율이 골재입도 5~13 mm에서는 평균 3.3%로 나타났으며, 골재입도 13~20 mm에서는 평균 1.9%로 나타났다.

부석을 5, 10, 15, 20% 혼입한 경우 골재입도 5~13 mm에서 설계공극률 5%일 때 5.1, 5.0, 4.8, 4.7%, 설계공극률 10%일 경우 9.9, 9.6, 9.4, 9.2%, 설계공극률 15%일 경우 14.5, 14.1, 13.6, 13.2%, 설계공극률 20%일 경우 18, 17.6, 17.4, 17%로 나타났다. 골재입도 13~20 mm에서 설계공극률 5%

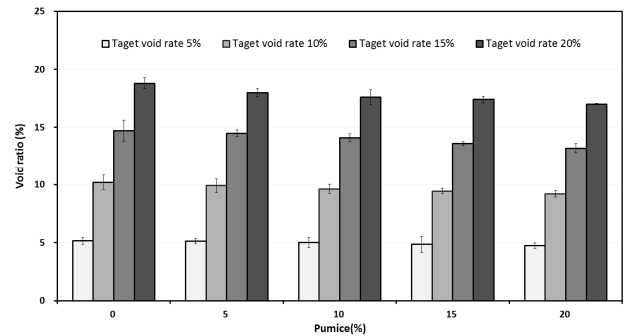


Fig. 3 Void ratio test of porous concrete(5 ~ 13 mm)

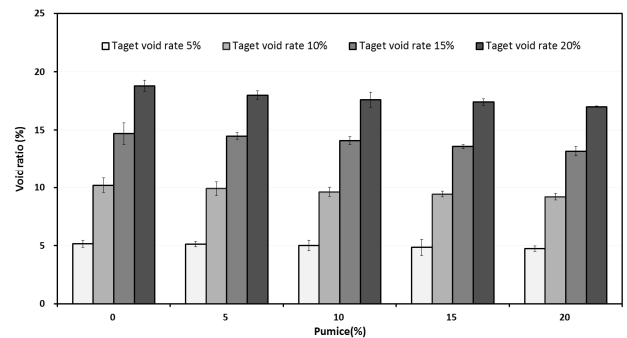


Fig. 4 Void ratio test of porous concrete(13 ~ 20 mm)

일 때 4.8, 4.6, 4.4, 4.1%, 설계공극률 10%일 경우 9.7, 9.4, 9.1, 8.7%, 설계공극률 15%일 경우 15.1, 14.6, 14.1, 13.6%, 설계공극률 20%일 경우 19.4, 18.8, 18.3, 17.4%로 나타났다.

### 3.1.2 공극률 시험결과에 대한 분석 내용

부석을 혼입하지 않은 경우 설계공극률과 실측공극률의 증가 및 감소율이 골재입도 5~13 mm에서 평균 3.3%, 골재입도 13~20 mm에서 평균 1.9%로 나타났기 때문에 본 연구에서 선정한 설계, 혼합 및 다짐방법이 적절한 것으로 판단된다.

부석을 혼입한 경우 골재입도와 관계없이 설계공극률에 비하여 실측공극률이 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 각 설계공극률 별로 부석의 혼입률 20%에서 가장 큰 감소율을 나타내었으며, 골재입도 13~20 mm 보다 5~13 mm의 경우 부석혼입률 15, 20%에서 더 큰 감소율을 나타내었다. 이는 부석을 혼입할 경우 다짐 및 배합시 부석의 마모와 파쇄로 인한 공시체의 공극 막힘 현상과 부석, 부순돌과의 골재입도 차이로 기인한 것으로 판단된다. 또한 골재입도가 작을수록 부석이 공극률에 미치는 영향은 더 큰 것으로 사료된다.

## 3.2 투수계수

### 3.2.1 투수계수 시험결과

포러스콘크리트의 설계공극률 및 부석의 혼입률에 따른 투수계수 시험 결과는 Fig. 5, 6과 같다.

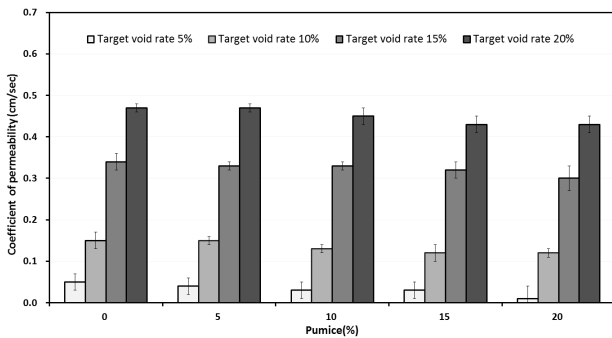


Fig. 5 Coefficient of permeability test of porous concrete (5 ~ 13 mm)

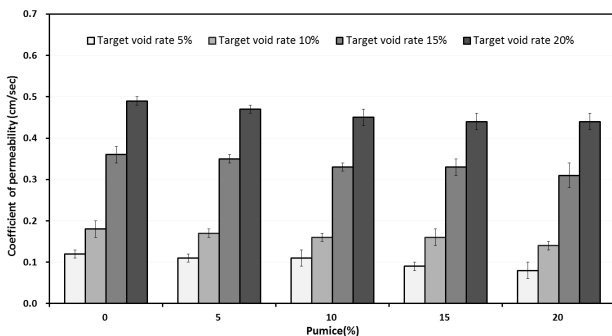


Fig. 6 Coefficient of permeability test of porous concrete (13 ~ 20 mm)

부석을 혼입하지 않은 경우 골재입도 5~13 mm는 설계공극률 5%에 비해 설계공극률 10, 15, 20% 증가할수록 투수계수가 66.7, 85.3, 89.3% 증가하는 경향을 나타내었다. 골재입도 13~20 mm는 설계공극률 5%에 비해 설계공극률 10, 15, 20% 증가할수록 투수계수가 33.3, 66.7, 75.5% 증가하는 경향을 나타내었다.

부석을 5, 10, 15, 20% 혼입한 경우 골재입도 5~13 mm의 설계공극률 5%에서는 0.05, 0.04, 0.03, 0.03, 0.01 cm/sec, 설계공극률 10%에서는 0.15, 0.15, 0.13, 0.12, 0.12 cm/sec의 투수계수를 나타내었다. 또한 설계공극률 15%에서는 0.34, 0.33, 0.33, 0.32, 0.30 cm/sec, 설계공극률 20%에서는 0.47, 0.47, 0.45, 0.43, 0.43 cm/sec의 투수계수를 나타내었다. 골재입도 13~20 mm의 경우 설계공극률 5%에서는 0.12, 0.11, 0.11, 0.09, 0.08 cm/sec, 설계공극률 10%에서는 0.18, 0.17, 0.16, 0.16, 0.14 cm/sec의 투수계수를 나타내었다. 또한 설계공극률 15%에서는 0.36, 0.35, 0.33, 0.33, 0.31 cm/sec, 설계공극률 20%에서는 0.49, 0.47, 0.45, 0.44, 0.44 cm/sec의 투수계수를 나타내었다.

### 3.2.2 투수계수 시험결과에 대한 분석 내용

골재입도 및 부석 혼입률과 관계없이 설계공극률이 증가할수록 투수계수가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 설계공극률이 증가할수록 단위결합재량이 감소하였기 때문에 투수계수가 증가하는 것으로 판단된다.

부석을 혼입하지 않은 경우 골재입도 13~20 mm 보다 5~13 mm의 경우 설계공극률 5%에 비해 10, 15, 20%로 증가할수록 투수계수의 차이율이 33.4, 18.6, 13.8% 더 크게 나타났다. 이는 골재입도가 작을수록 즉, 공극이 작을수록 투수계수의 차이는 크게 나타나는 것으로 판단된다.

부석을 혼입한 경우 골재입도 및 설계공극률에 관계없이 부석의 혼입률이 증가할수록 투수계수는 낮아지는 결과를 나타내어 본 연구에서는 부석의 혼입률 20%에서 가장 낮은 투수계수를 나타내었다. 골재입도 5~13 mm에서는 설계공극률 5, 10, 15, 20%에 따라 부석을 혼입하지 않은 경우와 부석의 혼입률 20% 차이가 80, 20, 11.8, 8.5%를 나타내었으며, 골재입도 13~20 mm에서는 33.3, 22.2, 13.9, 10.2%를 나타내었다. 이는 부석을 혼입할 경우 다짐 및 배합시 부석의 마모와 파쇄로 인하여 설계공극률이 낮아질수록 투수계수에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 PC I-5-0, PC I-5-5, PC I-5-10, PC I-5-15, PC I-5-20의 투수계수는 0.05, 0.04, 0.03, 0.03, 0.01 cm/sec로 낮은 투수계수를 나타내었기 때문에 연속공극이 제대로 형성 되지 않은 것으로 판단된다.

## 3.3 압축강도

### 3.3.1 압축강도 시험결과

부석을 이용한 포러스콘크리트의 설계공극률 및 부석의 혼입률에 따른 압축강도 시험 결과는 Fig. 7, 8과 같다. 이를

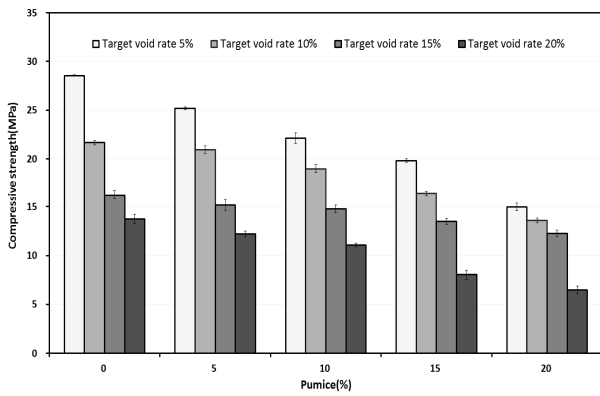


Fig. 7 Compressive strength test of porous concrete (5~13 mm)

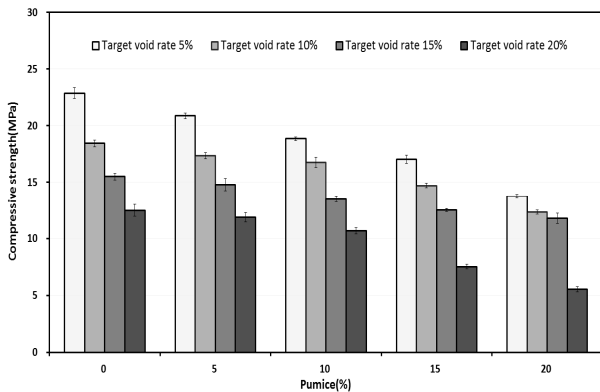


Fig. 8 Compressive strength test of porous concrete (13~20 mm)

고찰하여 보면 골재입도 5~13 mm는 설계공극률 5%의 경우 압축강도가 평균 20.7 MPa로 나타났으나, 설계공극률이 10, 15, 20%로 증가할수록 18.3 MPa, 14.4 MPa, 10.3 MPa를 나타내 공극률이 증가할수록 압축강도가 감소하는 경향을 보였다. 또한 골재입도 13~20 mm에서도 유사하게 설계공극률 5%의 경우 압축강도가 평균 15.7 MPa를 보였으나, 설계공극률이 10, 15, 20%로 증가할수록 15.3 MPa, 13.6 MPa, 9.6 MPa를 나타내어 공극률이 증가할수록 압축강도가 감소하는 경향을 보였다. 부석의 혼입률에 따른 결과는 입도 5~13 mm에서 부석을 포러스콘크리트에 혼입한 경우 혼입하지 않은 것에 비하여 설계공극률 5, 10, 15, 20%의 경우 각각 41.4, 37.4, 24.7, 52.7%의 강도 감소경향을 나타냈다. 입도 13~20 mm에서는 부석을 포러스콘크리트에 혼입한 경우 혼입하지 않은 경우에 비하여 설계공극률 5, 10, 15, 20%의 경우 각각 23.1, 28.2, 24.1, 55.7%의 강도 감소경향을 나타내었다.

### 3.3.2 압축강도 시험결과에 대한 분석 내용

압축강도 시험결과를 고찰하여 보면, 골재입도와 관계없이 설계공극률이 증가할수록 압축강도가 낮게 나타났다. 이는 설계공극률이 증가할수록 단위배합당 시멘트량이 감소하는 포러스콘크리트의 특성으로 골재간의 결합력이 감소하여 강도가 저하되었기 때문으로 판단되었다. 또한 부석이

혼입될 경우 부석의 혼입률이 증가할수록 골재입도 5~13, 13~20 mm 모두 일정한 비율로 강도가 감소하는 결과를 나타내었다. 이는 부순돌에 비하여 내부에 공극을 가지고 있는 다공성의 부석이 혼입되어 강도가 감소하는데 영향을 미치는 것으로 판단된다. 수질정화용 포러스콘크리트의 경우 필연적으로 수계환경에 적용되므로 충분한 내구성능을 발현하기 위해서는 강도가 매우 중요하다. 따라서 현행 하천 설계기준<sup>21)</sup> 및 하천설계실무요령<sup>22)</sup>에서는 하천에 설치되는 구조물의 용도 및 중요도에 따라 최소압축강도를 제시하고 있는데 하중을 직접 견디는 교각 등의 구조물이 아닌 기타의 무근콘크리트는 압축강도를 18 MPa 이상으로 제시하고 있으며, 하천 호안에 설치되는 콘크리트블록의 경우도 18 MPa 이상을 제시하고 있다. 또한 아직 KS기준에는 최소 소요강도에 대한 기준은 없으나 한국콘크리트공업협동조합연합회(SPS-KCIC0001-0703) 대한 단체 표준<sup>23)</sup>에도 공시체의 크기에 따라 13~16MPa 이상을 확보하도록 제시되어 있다. 이와 같은 기준을 고려하면 압축강도 시험결과를 토대로 본 연구에서 수계환경에 적용이 가능한 배합은 PC I-5-0, PC I-5-5, PC I-5-10, PC I-5-15, PC I-10-0, PC I-10-5, PC I-10-10 로 판단된다.

## 3.4 시험결과의 상관 관계

### 3.4.1 공극률과 압축강도와의 상관관계

포러스콘크리트의 공극률과 압축강도와의 상관관계를 살펴보면 모든 시험체에서 공극률이 증가할수록 압축강도가 감소하는 경향을 나타내었다. 그 중 변화폭이 가장 크게 나타난 부석이 함유되지 않은 시험체들은 Fig. 9와 같은 양상을 나타내었는데, 우선 골재입도 5~13 mm인 경우 공극률이 대략 5%인 경우를 기준으로 10%로 공극률이 증가할 때 압축강도는 24%감소, 15%로 증가시 43%감소, 20%로 증가시 52%감소되는 것으로 나타났다. 골재입도 13~20 mm인 경우에는 공극률이 대략 5%인 경우를 기준으로 하여 10%로 증가시 압축강도는 19%감소, 15%로 증가시 32%감소, 20%

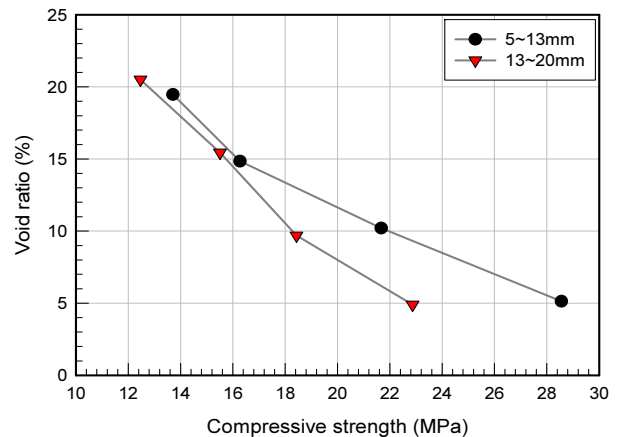


Fig. 9 Correlation between void ratio and compressive strength (fixed with pumice 0%)

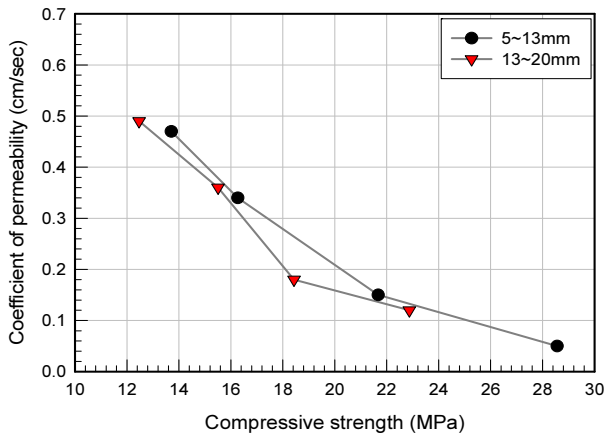


Fig. 10 Correlation between coefficient of permeability and compressive strength (fixed with pumice 0%)

로 증가시 45.5%감소되는 경향을 나타내었다. 이러한 결과로 포러스콘크리트의 공극률이 압축강도에 큰 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있었다.

### 3.4.2 투수계수와 압축강도와의 상관 관계

포러스콘크리트의 투수계수와 압축강도와의 상관 관계를 살펴보면 모든 시험체에서 투수계수가 증가할수록 압축강도가 감소하는 경향을 나타내었는데, 그 중 변화폭이 가장 크게 나타난 부석이 함유되지 않은 시험체들은 Fig. 10과 같은 양상을 나타내었다.

먼저 골재입도 5~13 mm인 경우를 살펴보면 설계 공극률이 5%인 경우 투수계수는 0.05 cm/sec이고 이때 압축강도는 28.56 MPa로 나타났다. 이를 기준으로 설계 공극률이 10%로 증가할 때 투수계수는 300% 증가, 압축강도는 24%감소하였고, 설계 공극률이 15%로 증가할 때 투수계수는 680%증가, 압축강도는 43%감소하였으며, 설계 공극률이 20%로 증가시 투수계수는 940%증가, 압축강도는 52%감소되는 것으로 나타났다. 다음으로 골재입도 13~20 mm인 경우를 살펴보면 설계 공극률 5%인 경우 투수계수는 0.12 cm/sec이고 이때 압축강도는 22.87 MPa로 나타났다. 이를 기준으로 설계 공극률이 10%로 증가할 때 투수계수는 150%증가, 압축강도는 19%감소하였고, 설계 공극률이 15%로 증가할 때 투수계수는 300%증가, 압축강도는 32%감소하였으며, 설계 공극률이 20%로 증가시 투수계수는 408%, 압축강도는 45.5%감소되는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 포러스콘크리트의 투수계수 역시 압축강도에 상당한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 부석을 이용한 포러스콘크리트의 설계공극률 및 부석의 배합요인에 따른 공극률 및 투수계수, 압축강도의 물리적 특성을 분석하여 수계환경에 적용 가능한 배합을 도출하고자 하였으며, 그 결과는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 공극률 시험결과, 부석의 혼입률이 증가할수록 부석을 혼입하지 않은 경우의 설계공극률에 비하여 공극률이 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 다짐 및 배합시 부석의 마모와 파쇄로 인한 공시체의 공극 막힘현상과 부석, 부순돌과의 입도 차이로 기인한 것으로 판단된다.
- 2) 투수계수의 시험결과, 공극률의 시험결과와 동일하게 부석의 혼입률이 증가할수록 투수계수는 낮게 나타났다. 또한 골재입도 5~13 mm, 설계공극률 5%에서는 0.05 cm/sec이하의 낮은 투수계수를 나타내어 연속공극이 제대로 형성되지 않는 것으로 판단된다. 이에 골재입도 5~13 mm, 설계공극률 5%의 배합은 수계환경에 적용할 경우 자연정화방법인 역간접 접촉산화법<sup>6-7)</sup>을 활용하지 못하는 것으로 판단된다.
- 3) 압축강도 시험결과, 설계공극률 및 부석의 혼입률이 증가할수록 압축강도가 감소하는 결과를 나타내었다. 이는 공극률이 증가할수록 단위배합당 시멘트량이 감소하는 포러스콘크리트의 특성으로 골재간의 결합력이 감소하여 강도가 저하되었기 때문으로 판단되며, 부순돌에 비하여 내부에 공극을 가지고 있는 다공성의 부석이 혼입되었기 때문으로 판단된다. 현행 하천설계기준<sup>21)</sup> 및 하천설계실무요령,<sup>22)</sup> 한국콘크리트공업협동조합연합회(SPS-KCIC0001-0703) 대한 단체표준<sup>23)</sup>을 기준으로 수계환경에 적용 가능한 배합은 PC I-5-0, PC I-5-5, PC I-5-10, PC I-5-15, PC I-10-0, PC I-10-5, PC I-10-10로 판단된다.
- 4) 포러스콘크리트의 공극률이 증가할수록 모든 시험체에서 압축강도가 감소하는 경향을 나타내었다. 그중 변화폭이 가장 크게 나타난 부석이 함유되지 않은 시험체들은 골재 입도에 따라 공극률이 대략 5%인 경우를 기준으로 10%로 공극률이 증가할 때 압축강도는 19~24%감소, 15%로 증가시 32~43%감소, 20%로 증가시 45.5~52%감소되는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 포러스콘크리트의 공극률이 압축강도에 큰 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있었다.
- 5) 설계 공극률이 일정할 경우 포러스콘크리트의 투수계수가 증가할수록 압축강도가 감소하는 경향을 나타내었다. 그 중 변화폭이 가장 크게 나타난 부석이 함유되지 않은 시험체들은 골재입도에 따라 설계 공극률이 5%인 경우를 기준으로 설계 공극률이 10%로 증가할 때 투수계수는 150~300% 증가, 압축강도는 19~24% 감소하였다. 또한, 설계 공극률이 15%로 증가할 때 투수계수는 300~680% 증가, 압축강도는 32~43% 감소하였으며, 설계 공극률이 20%로 증가시 투수계수는 408~940% 증가, 압축강도는 45.5~52% 감소되는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 포러스콘크리트의 투수계수 역시 압축강도에 상당한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

현재 국내에서 수계환경에 사용할 수 있는 콘크리트 관련 기준에서는 압축강도만 제시하고 있으며, 투수계수나 공극



물에 관한 기준은 제시하지 않고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 국내기준에 제시된 압축강도를 기준으로 수계환경에 적용할 수 있는 콘크리트를 평가하였다. 또한 향후 생물학적 방법을 콘크리트에 적용하기 위해 추가적으로 투수계수와 공극률의 평가를 실시하였다. 이와 같이 설계공극률 및 부식의 배합요인에 따른 포러스콘크리트의 공극률 및 투수계수, 압축강도의 물리적 특성에 대한 검토를 통하여 수계환경에 적용시 적정 공극의 확보와 구조체로서의 소요강도를 동시에 만족시키는 최적 배합은 PC I-10-0, PC I-10-5, PC I-10-10로 판단된다.

향후 본 연구에서 도출한 최적배합을 활용하여 수질정화 실험으로 오염물질 처리성능에 대한 연구가 추가적으로 진행할 필요가 있으며, 이에 대해 수계환경에 적용시 적정공극의 확보 및 구조체로서의 소요강도, 수질정화 성능을 동시에 만족할 수 있는 포러스콘크리트의 최종배합 도출이 필요할 것으로 판단된다. 그리고 하천에 많이 쓰이는 콘크리트의 문제점을 해결하기 위한 대책으로 포러스콘크리트를 이용한다면 비점오염원 등으로 인한 오염된 하천의 수질을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 물관리연구사업인 자연과 인간이 공존하는 생태하천 조성기술개발 연구단(GREEN RIVER)(12기술혁신C02)의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다.

## References

1. Tamai, M., Mizuguchi, H., Hatanaka, S., Katahira, H., Nakazawa, T., Yanagibashi, K., and Kunieda, M., Design. Construction and Recent Applications of Porous Concrete in Japan. In: Proceedings of the JCI Symposium on Design. Construction and Recent Applications of Porous Concrete, JCI. Tokyo, 2004, pp. 1-10.
2. Monters, F., Pervious Concrete: Characterization of Fundamental Properties and Simulation of Microstructure. PhD dissertation, University of South Carolina, 2006.
3. Wang, W., Study of Pervious Concrete Strength, Sci Technol Build Mater China, Vol. 6, No. 3, 1997, pp. 25-28.
4. Aamer Rafique Bhutta, M., Tsuruta, K., and Mirza, J., "Evaluation of High-Performance Porous Concrete Properties", *Constr Build Mater*, Vol. 31, 2012, pp. 67-73.
5. Kim, M. H., Baik, Y. K., Kang, S. P., Kim, Y. R., and Kim, J. H., "Fundamental Properties of Porous Concrete According to the Sizes of Aggregate", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 13, No. 5, 2001, pp. 438-446.
6. Branson, P. G., Fredrick, P. H., and Robert, P. G., "Algae Attachment on Carbonated Cements in Fresh and Brackish Waters-Preliminary Result", *Eco. Eng.*, Vol. 20, No. 4, 2003, pp. 309-319.

7. Yasunary, T., Rie, S., Kazuhiko, M., and Hajime, U., "Estimation of Self Purification Capacity of Biofilm Formed in Domestic Sewer Pipes", *Biochem. Eng. J.*, Vol. 31, No. 1, 2006, pp. 96-101.
8. Balapure, K., Bhatt, N., and Madamwar, D., "Mineralization of Reactive Azo Dyes Present in Simulated Textile Waste Water using Down Flow Microaerophilic Fixed Film Bioreactor", *Bioresour. Technol.*, Vol. 175, 2015, pp. 1-7.
9. Ebrahimi, S. H., and Borghei, M., "Formaldehyde Biodegradation using an Immobilized Bed Aerobic Bioreactor with Pumice Stone as a Support", *Sci. iranica*, Vol. 18, No. 6, 2011, pp. 1372-1376.
10. Joerdening, H. J., Hausmann, K., and Demuth, B., "Use of Immobilised Bacteria for the Wastewater Treatment-Examples from the Sugar Industry", *Water Sci. Technol.*, Vol. 53, No. 3, 2005, pp. 9-15.
11. Kasikara Pazarlioglu, N., Ozturk, R., and Ergun, F., "Biodecolourization of Direct Blue 15 by Immobilized Phancerochaete Chrysosporium, Process Biochem", Vol. 40, No. 5, 2005, pp. 1923-1929.
12. Borghei, S. M., Sharbatmaleki, M., Pourrezaie, P., and Borghei, G., "Kinetics of Organic Removal in Fixed-Bed Aerobic Biological Reactor", *Bioresour. Technol.*, Vol. 99, No. 5, 2008, pp. 1118-1124.
13. Ebrahimi, S. H., and Borghei, M., "Formaldehyde Biodegradation using an Immobilized Bed Aerobic Bioreactor with Pumice Stone as a Support", *Sci. iranica*, Vol. 18, No. 6, 2011, pp. 1372-1376.
14. Salehizadeh, H., and Shojaosadati, S. A., "Removal of Metal Ions from Aqueous Solution by Polysaccharide Produced from Bacillus Firmus", *Water Research.*, Vol. 37, No. 17, 2003, pp. 4231-4235.
15. Monteiro, S. M., Clemente, J. J., Henriques, A. O., Gomes, R. J., Carrondo, M. J., and Cunha, A. E., "A Procedure for High-Yield Spore Production by Bacillus Subtilis", *Biotechnol. Prog.*, Vol. 21, No. 4, 2005, pp. 1026-1031.
16. Nilsson, C., Lakshmanan, R., Renman, G., and Rajarao, G. K., "Efficacy of Reactive Mineral-Based Sorbents for Phosphate, Bacteria, Nitrogen and TOC Removal Column Experiment in Recirculation Batch Mode", *Water Research.*, Vol. 47, 2013, pp. 5165-5175.
17. Tun, S. H., Won, C. K., and Lee, M. W., "Cenozoic Volcanic Activity and Petrochemistry of Volcanic Rocks in the Mt. Paektu Area", *Journal of the Petrological Society of Korea*, Vol. 29, No. 3, 1993, pp. 291-307.
18. Khandaker, M., and Anwar, H., "Properties of Volcanic Pumice based Cement and Lightweight Concrete", *Journal of Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 2, 2004, pp. 283-291.
19. Japan Concrete Institute, Establishment of design · construction method of porous concrete on research committee, 2003.



- 20. Korean Agency for Technology and Standards, Standard test method for compressive strength of concrete, 2010.
- 21. Ministry of Land, River design criteria · explanation, 2009.
- 22. Ministry of Land, Design work trick of river conservation

- work, 2009.
- 23. Federation of Korea Concrete Industry Cooperatives, Revestment of concrete and block of retaining wall, 2012.

**요약** 본 연구는 포러스콘크리트 제조시 사용되는 부순돌 대신 부석을 치환하여 수계환경에 적용이 가능한 적정 공극의 확보와 구조체로서의 소요강도를 만족시키기 위한 것이 주목적이다. 이에 수계환경에 적용이 가능한 최적배합조건을 도출하기 위하여 설계공극률 및 부석의 배합요인에 따른 포러스콘크리트의 공극률 및 투수계수, 압축강도를 평가하고자 하였다. 공극률 및 투수계수의 시험결과, 부석을 혼입하지 않은 경우 골재입도와 관계없이 설계공극률에 비하여 실측공극률 및 투수계수가 비슷한 감소율을 나타내었다. 또한 골재입도 5~3 mm, 설계공극률 5%에서는 0.05 cm/sec이하의 낮은 투수계수를 나타내어 연속공극이 제대로 형성되지 않는 것으로 판단된다. 압축강도의 시험결과, 하천설계기준 및 하천설계실무요령, 한국콘크리트공업협동조합연합회의 수계환경에 적용이 가능한 콘크리트 기준으로 본 연구에서 적용이 가능한 배합은 PC I-5-0, PC I-5-5, PC I-5-10, PC I-5-15, PC I-10-0, PC I-10-5, PC I-10-10로 나타내었다. 이와 같이 설계공극률 및 부석의 배합요인에 따른 포러스콘크리트의 공극률 및 투수계수, 압축강도의 물리적 특성에 대한 검토를 통하여 수계환경에 적용시 적정 공극의 확보와 구조체로서의 소요강도를 동시에 만족시키는 최적 배합은 PC I-10-0, PC I-10-5, PC I-10-10로 판단된다.

**핵심용어** : 수계환경, 부석, 포러스콘크리트, 공극률, 투수계수, 압축강도