

# 콘크리트의 역학적 성능 및 공극구조가 스케일링 저항성에 미치는 영향

이승태\*

<sup>1</sup>군산대학교 토목공학과

## Influence of Mechanical Properties and Pore Structure on the Scaling Resistance of Concretes

Seung-Tae Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Kunsan National University

**요약** 스케일링은 겨울철 제설제 살포 및 동결융해의 복합작용으로 인하여 교통시설 구조물에서 발생하는 대표적인 콘크리트의 성능저하 현상이다. 본 논문에서는 콘크리트의 스케일링 저항성에 영향을 미치는 요인을 분석하기 위하여 콘크리트의 역학적 성능, 공극구조 특성과 스케일링 저항성과의 관계를 실험적으로 고찰하였다. 실험결과, 콘크리트의 스케일링 저항성은 콘크리트의 압축강도와는 그다지 상관관계가 적었으며, 오히려 콘크리트의 표면투수 특성과 밀접한 관련이 있는 것으로 조사되었다. 또한, 콘크리트의 스케일링 저항성을 평가하기 위한 파라미터로써, 기포 간극계수 및 비표면적은 적합하지 않은 것으로 나타났다. 한편, 결합재의 종류에 따른 스케일링 저항성도 상이하게 나타났으며, 보통포틀랜드시멘트 콘크리트 및 실리카흙 콘크리트에 비하여 고로슬래그미분말을 사용한 콘크리트의 스케일링 저항성이 상대적으로 낮은 것으로 나타났다.

**Abstract** The scaling of concrete caused by the combined effects of frost and deicing salt is one of the principle causes of damage to transportation infrastructure in cold-climate regions. In this study, to evaluate the factors affecting scaling resistance of concrete, the relationship between the properties of concrete, such as the mechanical properties and pore structure, and scaling resistance was examined experimentally. The test results showed that the scaling resistance was strongly dependent on the absorption properties of concrete, but not on the compressive strength. Furthermore, it is believed that both the spacing factor and specific surface of the air voids was not a good parameter for evaluating the scaling resistance of concrete. SGC concrete was less durable than OPC and SFC concrete with respect to the scaling resistance in the scope of the present study.

**Keywords** : Concrete, Mechanical properties, Pore structure, Scaling resistance

### 1. 서론

최근, 콘크리트 구조물의 고기능성을 요구하는 사회적 추세로 인하여 콘크리트의 고성능은 필수불가결의 요소로 인식되어지고 있다. 또, 콘크리트는 오랜기간 동안 역학적 성능 및 내구성이 우수한 경제적인 건설재료로써

알려져 왔다[1]. 그러나, 이상기후, 양질의 골재수급 문제, 해양구조물 축조, 환경오염 등 여러 요인으로 인하여 콘크리트의 내구성능 저하가 발생하며, 이로 인하여 콘크리트 구조물의 내구수명이 단축되는 결과를 초래하는 경우가 빈번하게 발생되고 있으므로 이에 대한 대책마련이 시급한 실정이다.

본 논문은 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원(KAIA)의 교통물류사업 “온실가스 배출 최소화를 위한 친환경 포장 도로 연구” 연구과제에서 연구비를 지원받아 수행된 결과입니다. 이에 감사드립니다.

\*Corresponding Author : Seung-Tae Lee(Kunsan National Univ.)

Tel: +82-63-469-4877 email: stlee@kunsan.ac.kr

Received September 16, 2015

Revised (1st November 13, 2015, 2nd November 30, 2015)

Accepted January 5, 2016

Published January 31, 2016

콘크리트의 내구성능을 저하시키는 주요 요인으로는 동결융해작용, 철근부식, 탄산화, 화학적 침식 등으로 분류할 수 있으며, 각각의 내구성능 저하요인에 대한 많은 연구가 전 세계적으로 수행되어 오고 있으며, 만족할만한 연구성과도 많이 보고되고 있다[2,3].

특히, 우리나라는 겨울철 제설을 위한 제설제 살포 및 동결융해작용으로 인한 콘크리트 포장의 내구성능저하, 즉, 스케일링(scaling) 현상이 많이 보고되고 있으며, 이는 교통시설 이용자의 편의성 감소 및 유지관리 비용증대를 초래하게 된다. 콘크리트의 스케일링 저항성은 제설제의 종류 및 농도, 시멘트량, 물-결합재비, 블리딩량, 연행공기량 등의 영향을 받는 것으로 알려져 있다[4-6]. 콘크리트의 스케일링 저항성에 영향을 미치는 요인에 대한 실험적, 해석적 연구가 여러 연구자들에 의하여 수행되어 오고 있으나, 일부 연구결과를 제외하면 아직까지 가시적인 연구성과는 다소 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 콘크리트의 스케일링 저항성에 영향을 미치는 요인을 평가하기 위하여 콘크리트의 강도, 흡수율 및 공극구조와 스케일링 저항성과의 관계를 실험적으로 검토하였다. 실험 및 분석을 통하여 도출된 결과를 이용함으로써 콘크리트의 스케일링 저항성 향상을 위한 재료적 요인을 파악하며, 한랭지역 제설제 살포 환경에서 내구성이 우수한 콘크리트 포장재료 선정을 위한 기초자료를 제시하는데 본 연구의 목적이 있다.

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료

본 연구에서 사용한 시멘트는 KS L 5201에 준하는 보통포틀랜드시멘트(이하 OPC, 밀도 = 3.15g/cm<sup>3</sup>, 분말도 = 3,480cm<sup>2</sup>/g)이며, 시멘트의 화학성분은 다음 Table 1과 같다. 또, 혼합시멘트 콘크리트 제조를 위하여 고로슬래그미분말(이하 SG, 밀도 = 2.92g/cm<sup>3</sup>, 분말도 = 4,450cm<sup>2</sup>/g) 및 실리카흙(이하 SF, 밀도 = 2.20g/cm<sup>3</sup>, 분말도 = 204,700cm<sup>2</sup>/g)을 OPC에 대하여 각각 40% 및 8%로 대체하여 사용하였으며, 광물질혼화제의 화학성분을 Table 1에 나타내었다.

잔골재(S)는 부순모래를 사용하였으며, 굵은골재(G)는 부순돌을 사용하였다. 본 실험에 사용된 골재의 물리적 성질은 Table 2와 같다. 또, 콘크리트의 적절한 유동

성(슬럼프 120±15 mm) 및 공기량(5±1.0%) 확보를 위하여 PC계열 고성능감수제(SP) 및 AE제(AEA)를 각각 사용하였다.

Table 1. Chemical composition of cement and mineral admixtures(%)

Types	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>	Ig. loss
OPC	19.8	4.8	3.1	61.5	2.9	2.8	2.9
SG	31.7	14.5	0.4	41.7	5.4	2.1	2.6
SF	91.2	1.3	0.8	0.7	0.3	-	2.3

Table 2. Physical properties of aggregates

Types	G <sub>max</sub> (mm)	Absorption (%)	F.M.	Density (g/cm <sup>3</sup> )
Sand	-	1.14	2.9	2.62
Gravel	25	0.85	6.8	2.67

### 2.2 배합

본 실험은 광물질혼화제를 사용하지 않은 기준배합(OPC 콘크리트)과 OPC에 SG 및 SF를 각각 40% 및 8%를 대체한 혼합시멘트계 콘크리트(SGC 및 SFC 콘크리트) 등 3배합의 콘크리트를 제조하여 실험을 수행하였으며, 각 콘크리트의 배합특성을 나타낸 것이 Table 3이다. 콘크리트의 w/b 및 S/a는 각각 46.7% 및 41.4%로 고정하였다. 믹싱된 콘크리트는 제조 1일 후 탈형한 후, 20±3°C 조건에서 각각 수증양생하였다.

Table 3. Mix proportions of concrete

Items	OPC	SGC	SFC
W	187	187	187
OPC	400	240	368
SG	-	160	-
SF	-	-	32
S	668	664	663
G	946	939	939
SP*	0.20	0.17	0.55
AEA**	0.50	0.80	0.15

\* SP : wt. of binder, %

\*\* AEA : wt. of SP, %

### 2.3 실험방법

#### 2.3.1 압축강도

수증양생한 Ø100×200mm 원주형 공시체를 대상으

로 KS F 2405에 의하여 재령 7 및 28일에서 압축강도를 측정하였다. 각 재령별로 3개 콘크리트 공시체의 압축강도를 측정하였으며, 그 평균값을 채택하였다.

### 2.3.2 흡수율

흡수율은 재령 28일 콘크리트 시편을 대상으로 실험을 실시하였으며, 콘크리트의 표면투수 특성을 평가하기 위하여 ASTM C 1585에 준하여 초기흡수계수( $S_i$  : Initial absorption coefficient)를 산정하였다.

### 2.3.3 공극구조 분석

콘크리트의 공극구조를 분석하기 위하여 재령 28일 시편 표면을 연마한 후, 고분말 백색 파우더를 충전하여 공극구조를 분석하였다. 사용한 화상촬영기는 QICAM 디지털 카메라(1.4 million, 1,392×1,040)에 현미경렌즈(optical 0.5-5×)를 부착하였으며, 시편이 자동으로 움직이면서 측정할 수 있도록 장치하였다. 촬영된 화상은 ‘image-pro’ 프로그램을 이용하여 콘크리트의 공극특성을 분석하였다[7].

### 2.3.4 스케일링 저항성

콘크리트의 스케일링 저항성을 평가하기 위하여 Fig. 1과 같이  $\varnothing 100 \times 70 \text{mm}$  콘크리트 공시체를 제작하여, 수중 및 기건양생을 각각 14일씩 실시하였으며, ASTM C 672에 준하여 매일 1사이클씩 총 50사이클의 동결융해 반복작용을 실시하였으며, 소정의 사이클에서 콘크리트 표면에서 박리된 스케일링량을 측정하였다. 실험에서 표면 노출용액으로 사용된  $\text{CaCl}_2$  용액의 농도는 4%로 정하였으며, 매 10사이클마다 증류수에 reagent급 시약을 용해하여 새로운 용액으로 교체하였다.

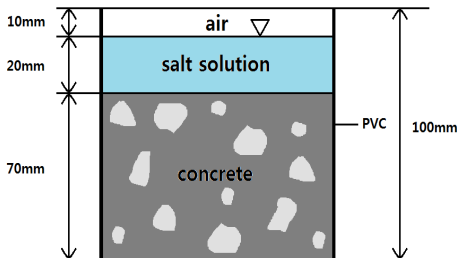


Fig. 1. Schematic drawing of concrete specimen for scaling test

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 콘크리트의 역학적 특성

본 실험에서 사용한 3종류 콘크리트의 재령별 압축강도 특성을 나타낸 것이 Fig. 2이다. 이 그림으로부터 OPC 콘크리트는 초기재령에서 SGC 콘크리트보다는 압축강도가 다소 크게 나타났으나, 재령 28일에서는 압축강도가 유사하게 나타났다. 한편, SFC 콘크리트는 실리카흙(SF)의 필러효과(filler effect), 포졸란반응(pozzolanic reaction), 천이지대 개선효과(ITZ densifying effect) 등으로 인하여 재령에 관계없이 3종류 콘크리트 중 압축강도 발현이 가장 우수하게 나타났다[8]. 예를 들어, 재령 28일에서 OPC 및 SGC 콘크리트는 각각 약 35.8 및 36.1MPa 정도의 압축강도 값을 나타낸 반면, SFC는 약 55.9MPa로 나타났다.

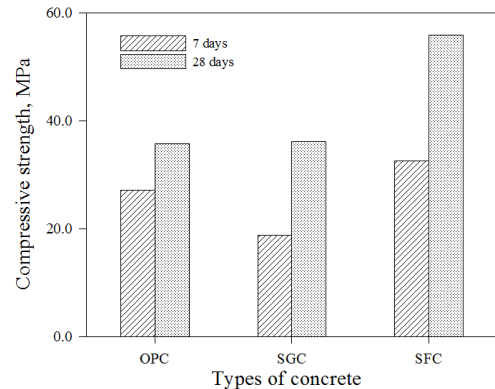


Fig. 2. Compressive strength development of concretes

본 연구에서는 3종류 콘크리트의 표면투수 특성을 평가하기 위하여 ASTM C 1585에 준하여 흡수율 실험을 실시하였으며, 콘크리트 종류별 재령 28일의 흡수율 실험결과를 Fig. 3과 같이 나타내었다. SGC 콘크리트의 흡수율 값이 상대적으로 크게 나타난 반면, SFC 콘크리트의 흡수율이 가장 작게 나타났다. 한편, Table 4는 콘크리트의 초기흡수계수( $S_i$ )를 비교하여 나타낸 것이다. 이 표에서 알 수 있듯이 SGC 콘크리트의  $S_i$  값은 OPC 및 SFC 콘크리트의 약 2.0 - 2.7배 정도 크게 나타남으로써 표면투수성이 상대적으로 떨어지는 것을 알 수 있다.

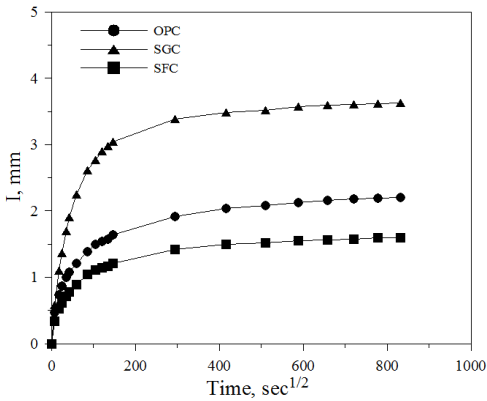


Fig. 3. Results of absorption measurement of concretes

Table 4. Initial absorption coefficient (Si) of concretes

Codes	Si ( $\times 10^{-4}$ mm $\sqrt{s}$ )
OPC	0.89
SGC	1.82
SFC	0.67

### 3.2 공극구조 특성

Table 5는 본 연구에서 사용한 3종류 콘크리트의 공극특성을 나타낸 것이다. 이 표에서 알 수 있듯이 굳지 않은 콘크리트 및 경화한 콘크리트의 공기량 측정결과는 다소 상이하게 나타났다. 굳지않은 콘크리트의 공기량은 ASTM C 231에 준하여 측정된 값으로써 전공기량(연행 공기 + 갠헨공기)을 의미하며, 경화한 콘크리트(재령 28 일)의 공기량은 직경이 10 ~ 1,000 $\mu$ m 범위의 공기량을 화상촬영분석으로 측정된 값이다. 실험결과, OPC 콘크리트의 경화 전 공기량은 5.6%이었으나, 경화 후 공기량 측정 값은 2.4%로 나타난 반면, SGC 콘크리트는 각각 5.1% 및 2.1%로 조사되었다. 한편, SFC 콘크리트의 경화 전 공기량은 3종류 콘크리트 중 가장 적게 나타났으나, 경화 후 공기량은 가장 큰 값을 나타내었다. 그러나, 3종류 굳지않은 콘크리트의 공기량은 목표공기량 (5 $\pm$ 1%)을 모두 만족하는 것으로 조사되었다. 또, 3종류 콘크리트의 기포 간격계수(spacing factor) 및 기포 비표면적(specific surface)을 측정한 결과를 표 5에 정리하여 나타내었다. 기포 간격계수 및 기포 비표면적은 반비례 관계를 나타내었으며, OPC 콘크리트의 기포 간격계수가 가장 큰 것으로 조사되었으며, SFC 콘크리트가 SGC 콘크리트보다 작은 간격계수 값을 나타냄을 알 수 있다.

본 연구에서 사용한 3종류 콘크리트의 화상촬영 이미지를 나타낸 것이 Fig. 4이다. 이 그림에서 알 수 있듯이, OPC 콘크리트는 골재와 bulk 페이스트 사이에서 비교적 큰 공극이 관찰된 반면, SFC 콘크리트는 직경이 작은 공극이 시편 전체에 걸쳐 다량으로 분포하고 있음을 알 수 있다.

한편, Fig. 5는 경화한 3종류 콘크리트의 공극직경별 공극수의 분포를 나타내고 있다. 이 그림으로부터 콘크리트 종류에 관계없이 직경 10 ~ 50 $\mu$ m 크기의 작은 공극이 가장 많이 분포하고 있음을 알 수 있으며, 200 $\mu$ m 이상의 공극량은 상대적으로 적게 나타났다. 특히, 기존 연구[9]에 따르면 콘크리트의 내구성에 영향을 미치는 공극크기를 약 50 ~ 200 $\mu$ m로 보고하고 있으며, 본 연구결과에서는 이 범위의 연행공기량이 SFC>SGC>OPC 콘크리트 순으로 나타남을 알 수 있다.

Table 5. Air void characteristics of concretes

Codes		OPC	SGC	SFC
Air content (%)	Fresh concrete	5.6	5.1	4.7
	Hardened concrete	2.4	2.1	2.9
Spacing factor( $\mu$ m)		352	259	206
Specific surface (1/mm)		21.8	31.4	34.1

### 3.3 콘크리트의 스케일링 저항성

ASTM C 672에 준하여 실시한 콘크리트의 스케일링 저항성 실험결과를 나타낸 것이 Fig. 6이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 OPC 및 SFC 콘크리트의 스케일링 저항성은 유사하게 관찰되었으나, SGC 콘크리트의 스케일링량은 50사이클 이후 약 1.8 kg/m<sup>2</sup>로 나타남으로써 스케일링 저항성이 상대적으로 낮은 것으로 조사되었다.

기존 연구결과에 따르면, SG를 사용한 콘크리트는 경화시 SG의 유리질(glassy) 특성 때문에 콘크리트의 표면이 상대적으로 약해져서 노출초기에 동해-염해 복합작용에 의한 스케일링이 많이 발생한다고 보고되고 있다 [10]. 또한, SGC 콘크리트의 스케일링량은 초기 10사이클에서 스케일링량이 대체적으로 큰 것으로 관찰되었다. 이는 SG의 수화물이 비정질상(amorphous phase)으로 생성됨으로써, 콘크리트 표면경화가 늦어져 초기 스케일링이 지배적인 것으로 나타났다[11]. 그러나, SG의 잠재수경성(latent hydraulic property)의 영향으로 10사이클 이후의 장기재령에서는 콘크리트 조직구조의 밀실화로

인하여 스케일링 량의 증가가 적게 나타남을 알 수 있다 [12].

### 3.4 콘크리트의 스케일링 저항성에 영향을 미치는 요인

Fig. 7은 콘크리트의 압축강도와 스케일링 저항성의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 SGC 콘크리트는 OPC 콘크리트와 비교해서 압축강도는 유사하였으나, 스케일링 저항성은 매우 낮은 것으로 나타났다. 그 이유는 선행 연구결과[2]에서 보고되었듯이, SG를 사용한 콘크리트는 블리딩량 증대, 표면 경화속도 저하 등으로 인하여 상대적으로 콘크리트 표면의 치밀도가

가 낮아졌기 때문으로 판단된다. 또, Stark & Ludwig[13]는 SG를 사용한 콘크리트 표면에는 염용액 ( $\text{CaCl}_2$  solution)에 쉽게 용해되는  $\text{CaCO}_3$  (예, aragonite 및 vaterite)가 다량으로 생성된 것이 스케일링 저항성 저하의 주요 원인인 것으로 보고하고 있다.

한편, SFC 콘크리트는 압축강도가 OPC 콘크리트에 비하여 상대적으로 높은 것에 비하여 스케일링 저항성은 OPC 콘크리트와 유사하게 나타나는 것으로 관찰되었다. 따라서, 콘크리트의 스케일링 저항성은 압축강도와는 그다지 큰 상관관계가 없는 것으로 조사되었으며, 사용한 광물질혼화제의 종류에 따라 스케일링 저항성이 달라지는 것으로 나타났다[10].

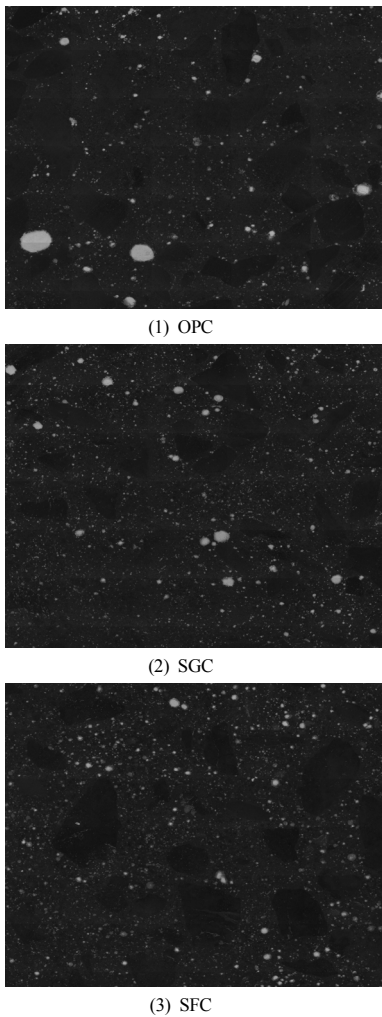


Fig. 4. Results of image analysis of concretes

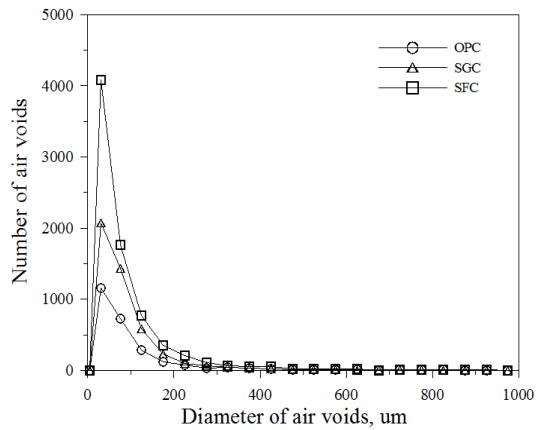


Fig. 5. Number of air voids of concretes

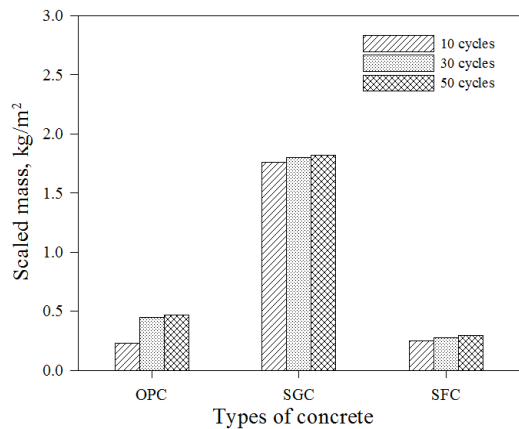


Fig. 6. Scaled mass of concretes exposed to 4%  $\text{CaCl}_2$  solution

한편, 콘크리트의 흡수율 실험에서 산정된 초기흡수 계수( $S_i$ )와 스케일링 저항성과의 관계를 도시한 것이 Fig. 8이다. 이 그림에서 콘크리트의 스케일링 저항성은 콘크리트의 초기흡수계수와 매우 좋은 상관관계가 있음을 알 수 있다. 다시 말해서, 콘크리트의 강도특성보다는 콘크리트 표면특성이 스케일링 저항성에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 콘크리트의 공극구조 특성과 스케일링 저항성과의 관계를 도시한 것으로써, 기포 간격계수가 작고, 기포 비표면적이 큰 SFC 콘크리트의 스케일링 저항성이 우수하게 나타났으나, SFC 콘크리트와 비교하여 간극계수와 비표면적이 값이 큰 차이가 나지 않는 SGC 콘크리트의 스케일링 저항성이 가장 떨어지는 것으로 조사되었다. 기존의 연구결과[14]에 따르면, 동일한 결합재를 적용한 콘크리트의 경우, 콘크리트의 동해(frost attack)는 기포 간극계수 및 비표면적에 지배적인 영향을 받으나, 스케일링 저항성은 콘크리트의 공극구조보다 오히려 결합재의 종류, 물-결합재비 및 콘크리트의 표면특성에 보다 더 지배적인 영향을 받는다고 보고하고 있다. 따라서, 본 연구결과에 따르면, 결합재가 상이한 콘크리트의 스케일링 저항성을 평가하기 위한 파라미터(parameter)로써, 간극계수 및 비표면적의 적용은 효과적이지 않은 것으로 판단된다.

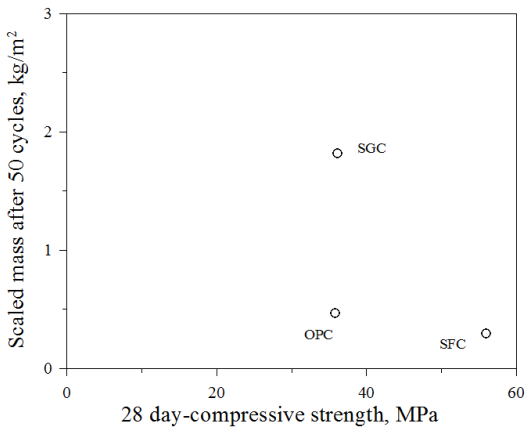


Fig. 7. Relationship between compressive strength and scaling resistance of concretes

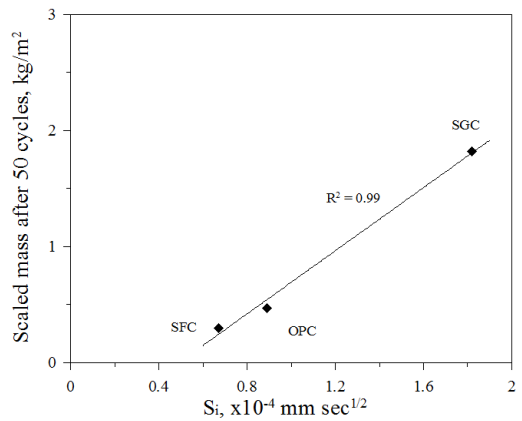


Fig. 8. Relationship between initial absorption coefficient and scaling resistance of concretes

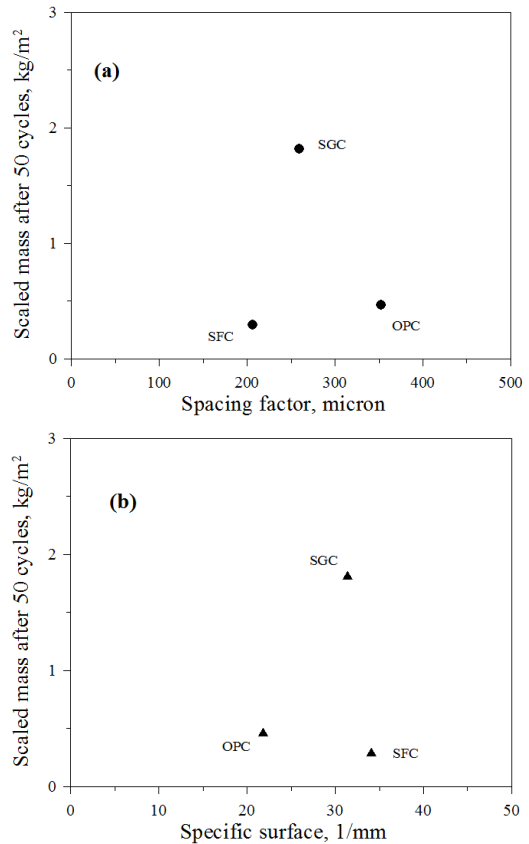


Fig. 9. Relationship between pore structure characteristics and scaling resistance of concretes, (a) spacing factor and (b) specific surface

#### 4. 결론

본 연구는 콘크리트의 스케일링 저항성에 영향을 미치는 요인을 실험적으로 평가한 것으로써, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 콘크리트의 역학적 특성을 고찰한 결과, 재령 7일에서 SGC 콘크리트의 압축강도는 OPC 콘크리트보다 작게 나타났으나, 28일에서는 강도발현이 유사하게 나타났으며, SFC 콘크리트는 재령에 관계없이 3종류 콘크리트 중 가장 우수한 강도발현 경향을 보였다. 한편, SGC 콘크리트의 흡수율은 상대적으로 크게 나타남으로써, 표면투수 특성이 가장 떨어지는 것으로 조사되었다.
2. 화상촬영 분석에 의한 경화한 콘크리트의 공극특성을 조사한 결과, 콘크리트 종류에 관계없이 직경 10 ~ 50 $\mu$ m의 작은 공극이 많이 분포하고 있었으며, 직경 200 $\mu$ m 이상의 공극량은 상대적으로 적었다. 또한, 직경 50 ~ 200 $\mu$ m의 연행공기량은 SFC>SGC>OPC순으로 나타났다.
3. 3종류 콘크리트 중 SGC 콘크리트의 스케일링 저항성이 가장 낮은 것으로 조사되었으며, 콘크리트의 스케일링 저항성은 압축강도와는 그다지 큰 상관관계가 없었으며, 오히려 콘크리트 표면투수 특성이 스케일링 저항성에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.
4. 본 연구의 범위에서 콘크리트의 스케일링 저항성을 평가하기 위한 파라미터로써, 기포 간극계수 및 비표면적은 적합하지 않은 것으로 나타났다. 따라서, 콘크리트의 스케일링 저항성에 영향을 미치는 재료 및 환경인자에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

#### References

- [1] P. C. Aitcin, "Cement of yesterday and today concrete of tomorrow", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 1349-1359, 2000.
- [2] S. Y. Han, K. K. Yun, K. G. Nam, K. R. Lee, Y. D. Eum, "Mechanical properties and chloride penetration resistance of shotcrete according to mineral admixture types and supplemental ratio", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 16, No. 7, pp. 4960-4968, 2015.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00365-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00365-3)
- [3] A. Elahi, P. A. M. Basheer, S. V. Nanukuttan, Q. U. Z. Khan, "Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 3, pp. 292-299, 2010.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.045>
- [4] J. J. Valenza, G. W. Scherer, "A review of salt scaling: II. Mechanism", *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, No. 4, p. 1022-1034, 2007.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.03.003>
- [5] P. V. Heede, J. Fumiere, N. D. Belie, "Influence of air entraining agents on deicing salt scaling resistance and transport properties of high-volume fly ash concrete", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 37, pp. 293-303, 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.01.005>
- [6] A. Nowak-Michta, "Water-binder ratio influence on de-icing salt scaling of fly ash concretes", *Procedia Engineering*, Vol. 57, pp. 823-829, 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.104>
- [7] S. I. Jeon, J. H. An, J. B. Lee, S. A. Kwon, "Variation of image analysis results for determining the characteristics of the air-void system on hardened concrete", *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 13, No. 1, pp. 157-168, 2011.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.7855/jksee.2011.13.1.157>
- [8] R. Siddique, "Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 55, No. 11, pp. 923-932, 2011.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.012>
- [9] P. K. Mehta, P. J. M. Monterio, "Concrete-Microstructure, Properties and Materials", Third Edition, McGraw-Hill, p. 31, 2006.
- [10] J. Deja, "Freeing and de-icing salt resistance of blast furnace slag concretes", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, No. 3, pp. 357-361, 2003.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00052-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00052-5)
- [11] J. Stark, H. M. Ludwig, "Freeze-de-icing salt resistance of concretes containing cement rich-in slag", In: *Proceedings of the International RILEM Workshop*, E&FN Spon, p. 123-38, 1997.
- [12] J. J. Valeza, G. W. Scherer, "A review of salt scaling: I. Phenomenology", *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, No. 7, pp. 1007-1021, 2007.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.03.005>
- [13] J. Stark, H. M. Ludwig, "Freeze-thaw and freeze-deicing salt resistance of concrete containing cement rich in granulated blast-furnace slag", *ACI Materials Journal*, Vol. 94, No. 1, p. 47-55, 1994.
- [14] D. K. Panesar, S. E. Chidiac, "Multi-variable statistical analysis for scaling resistance of concrete containing



GGBFS”, Cement and Concrete Composites, Vol. 29,  
No. 1, pp. 39-48, 2007.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.08.002>

---

이 승 태(Seung-Tae Lee)

[정회원]



- 1999년 8월 : 한양대학교 대학원  
토목공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 : 한양대학교 대학원  
토목공학과 (공학박사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 군산대학교  
토목공학과 교수

<관심분야>

건설재료, 콘크리트 구조, 콘크리트 포장