



# 고로슬래그 미분말 혼입 시멘트 페이스트의 프랙탈 특성에 관한 기초적 분석

김지영<sup>1)</sup> · 최영철<sup>2)</sup> · 최성철<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup>중앙대학교 토목공학과 <sup>2)</sup>가천대학교 건축공학과 <sup>3)</sup>중앙대학교 건설환경플랜트공학과

## Basic Analysis on Fractal Characteristics of Cement Paste Incorporating Ground Granulated Blast Furnace Slag

Jiyoung Kim,<sup>1)</sup> Young Cheol Choi,<sup>2)</sup> and Seongcheol Choi<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Chung-Ang University, Seoul, 06974, Rep. of Korea

<sup>2)</sup>Department of Architectural Engineering, Gachon University, Seongnam, 13120, Rep. of Korea

<sup>3)</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Chung-Ang University, Seoul, 06974, Rep. of Korea

**ABSTRACT** This study aimed to conduct the basic analysis on the fractal characteristics of cementitious materials. The pore structure of cement paste incorporating ground granulated blast furnace slag (GGBFS) was measured using mercury intrusion porosimetry (MIP) and the fractal characteristics were investigated using different models. Because the pore structure of GGBFS-blended cement paste is an irregular system in the various range from nanometer to millimeter, the characteristics of pore region in the different scale may not be adequately described when the fractal dimension was calculated over the whole scale range. While Zhang and Li model enabled analyzing the fraction dimension of pore structure over the three divided scale ranges of micro, small capillary and macro regions, Ji et al. model refined analysis on the fractal characteristics of micro pore region consisting of micro I region corresponding to gel pores and micro II region corresponding to small capillary pores. As the pore size decreased, both models suggested that the pore surface of micro region became more irregular than macro region and the complexity of pores increased.

**Keywords** : fractal dimension, ground granulated blast furnace slag (GGBFS), pore structure, mercury intrusion porosimetry (MIP)

### 1. 서 론

Fractal geometry는 Mandelbrot (1979)에 의해 처음 도입된 개념으로, 1차원인 선, 2차원인 면, 3차원인 공간과 같이 정수의 차원으로 나타내어질 수 없는 불규칙적인 구조를 기하학적인 언어를 이용하여 특징 짓는 분야이며,<sup>1)</sup> 다수의 연구자에 의해 다공성 재료의 특성을 연구하기 위해 적용되어 왔다.<sup>2,4)</sup> 이와 같이 정수가 아닌 소수의 차원으로 나타낼 수 있는 이론적인 모델로는 Cantor bar, Koch curve, Sierpinski carpet 등이 있으며, 이와 같은 모델들은 Fig. 1과 같이 작은 구조가 전체 구조와 비슷한 형태로 끝없이 되풀이 되는 자기 유사성 (self-similarity)의 패턴으로 이루어져 있다. 이와 같은 구조를 프랙탈 구조라고 하며, 소수의 특정 프랙탈 차원(fractal dimension)을 갖는다.<sup>5-6)</sup>

시멘트계 재료의 공극 구조 또한 그 크기가 C-S-H 수화생성물의 집합체 및 inter-granular pore의 나노미터 단위부터 entrapped air void의 밀리미터 단위까지 넓게 분포하고 있는 불규칙한 조직으로 형성되어 있기 때문에,<sup>7)</sup> 위에서 언급한 이상적인 프랙탈 기하학 구조보다는 더 복잡한 구조이다.<sup>9)</sup> 그러나 공극률, 공극 크기 분포, 비표면적 등과 같이 실험적인 방법을 이용해서 공극 구조를 특징 지을 수 있는 변수들을 통해서 그 특성을 명확히 파악하는 데는 어려움이 있기 때문에,<sup>8)</sup> 최근 시멘트계 재료의 공극 구조를 특징지을 수 있는 새로운 방법으로 프랙탈 기하학을 적용한 연구가 다수 진행

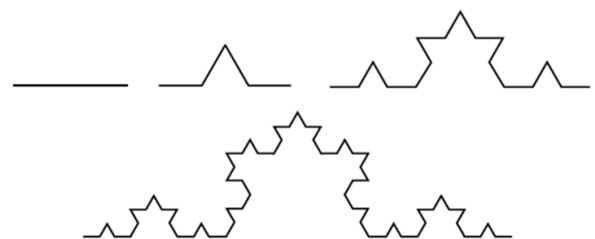


Fig. 1 Fractal geometry by Koch curve

\*Corresponding author E-mail : [schoi@cau.ac.kr](mailto:schoi@cau.ac.kr)

Received December 10, 2016, Revised December 22, 2016,

Accepted December 26, 2016

©2017 by Korea Concrete Institute

되어 왔다.<sup>5,8)</sup>

Zeng et al. (2010)<sup>5)</sup>은 Zhang and Li (1995) model과 Neimark's model을 각각 이용하여, 플라이에시가 치환된 시멘트 페이스트의 surface fractal dimension (SFD)과 공극 구조와의 상관관계를 연구하였다. 연구 결과, 시멘트계 재료의 공극 구조는 fine, transition, coarse pore range의 크기에 따라서 다른 프랙탈 특성을 나타내고, 수화반응 결과 생성된 수화생성물이 coarse pore range를 채우면서 SFD가 증가하며, 물-바인더 비가 증가할수록 이와 같은 반응이 가속화된다는 연구 결과를 발표하였다. Zeng et al. (2013)<sup>8)</sup>은 Zhang and Li (1995) model을 이용하여 양생 조건 및 GGBFS 혼입 유무에 따라 시편의 SFD의 변화 양상을 연구하였다. 연구 결과, 수중 양생 시보다 sealed-curing 했을 때 micro 영역의 SFD가 증가하는 결과를 보였다. 또한 GGBFS가 혼입되었을 때 micro 영역의 SFD가 증가한다는 연구 결과를 발표하였다.

위의 선행 연구들과 같이, 이전부터 다공성 재료의 구조 특성을 연구하기 위하여 프랙탈 기하학이 적용되어져 왔지만, 시멘트계 재료에 적용된 연구는 아직 초기단계이다. 이로 인해, 프랙탈 차원을 산정할 때, 다양한 실험 방법과 다양한 프랙탈 산정 모델을 사용하기 때문에 각 연구마다 결과의 분석이 다르게 나타난다. 이와 같은 이유로, 시멘트계 재료의 공극 구조를 특징 지을 수 있는 구조적 변수로서 프랙탈 차원 자체를 활용하기 어렵다는 한계점이 있다<sup>9)</sup>.

따라서 본 연구에서는, 시멘트계 재료의 프랙탈 차원에 대한 기초 연구로서, 시멘트계 재료의 공극 구조를 측정하는 실험 방법인 수은압입시험(Mercury Intrusion Porosimetry, MIP)을 이용한 기존의 프랙탈 산정 모델인 Zhang and Li (1995) model<sup>10)</sup>과 Ji et al. (1997) model<sup>11)</sup>을 비교·분석하기 위하여, GGBFS가 혼입된 시멘트 페이스트에 대하여 수은압입시험을 수행한 후, 실험 결과를 Zhang and Li (1995) model과 Ji et al. (1997) model에 각각 적용한 뒤, 그 결과를 비교·분석하였다.

## 2. Fractal model

### 2.1 Zhang and Li (1995) model

Zhang and Li (1995) model<sup>10)</sup>은 수은압입법 실험 동안, 압력의 증가에 따라 다공성 재료의 공극 표면에 수은이 충돌할 때 발생하는 표면에너지를 이용하여 제안된 surface fractal dimension model이며, Rootare and Prenzl<sup>12)</sup>에 의해 정의된 공극에 수은이 침투할 때 발생하는 일(work)을 이용하여 다음의 식 (1)을 산정하였다.

$$\sum_{i=1}^n \bar{P}_i \Delta V_i = -(S_E)_n \gamma \cos \theta \quad (1)$$

여기서,  $n$ 은 압력 구간의 수,  $\bar{P}_i$ 는  $i$ 번째 압력 구간에서의 평균 압력,  $\Delta V_i$ 는  $i$ 번째 압력 구간에서 침투된 수은 부피,  $\gamma$ 는

수은과 공극 표면 사이의 표면장력,  $\theta$ 는 수은과 공극 표면 사이의 접촉각,  $S_E$ 는 유클리드 공간에서의 공극 표면적을 나타낸다.

Mandelbrot<sup>13)</sup>이 제안한  $D$ 의 프랙탈 차원을 가진 표면적 ( $S$ )과 그 표면에 의해 둘러싸인 부피( $V$ ) 사이의 상관관계는 다음의 식 (2)와 같다.

$$S^{1/D} \propto V^{1/3} \quad (2)$$

여기서,  $S$ 는 공극 표면적,  $D$ 는 공극 표면의 프랙탈 차원,  $V$ 는 공극 표면에 의해 둘러싸인 부피를 나타낸다.

만일 프랙탈 표면이 유클리드 공간에서 측정되었다면, 위의 식 (2)는 차원 해석에 의해 다음 식 (3)으로 정리된다.

$$S_E = k r_n^{2-D} V_n^{D/3} \quad (3)$$

여기서,  $S_E$ 는 유클리드 공간에서의 공극 표면적,  $k$ 는 수은 침투 부피에 해당하는 표면적과 관계된 상수,  $r_n$ 은 공극 반지름을 나타낸다.

위의 식 (3)을 식 (1)에 적용하면, 식 (4)와 같이 최종적인 스케일링 관계가 성립된다.

$$W_n = \sum_{i=1}^n \bar{P}_i \Delta V_i \propto r_n^{2-D} V_n^{D/3} = Q_n \quad (4)$$

위의 식 (4)를 정리하면 다음 식 (5)와 같다.

$$\ln\left(\frac{W_n}{r_n^2}\right) = D \ln\left(\frac{V_n^{1/3}}{r_n}\right) + C \quad (5)$$

식 (5)에 의하면, 수은압입법 실험 결과를 이용하여  $\ln(W_n/r_n^2)$ 과  $\ln(V_n^{1/3}/r_n)$  사이의 관계를 bi-logarithmic 그래프로 나타냈을 때의 그래프의 기울기가 시편의 SFD ( $D$ )이다.

위의 식에 의하면 프랙탈 차원인  $D$ 값이 공극 표면적과 관계되기 때문에 Zhang and Li (1995) model에 의한 프랙탈 차원은 수화 반응이 진행되는 과정에서 변화하는 공극 표면의 surface fractal dimension이다. 또한 프랙탈 기하학 이론에 의하면,  $D$ 값이 2일 때는 2차원인 면과 같이 공극 표면이 매끄러운 형상이고,  $D$ 값이 3일 때는 공극이 매우 복잡하게 채워져 있는 형상을 의미하므로,<sup>14)</sup> Zhang and Li (1995) model을 이용해서 SFD를 산정할 때 이 값을 2와 3 사이라고 가정하고, 이 값이 3 이상일 경우에는 기하학적인 관점에서 물리적으로 옳다고 판단 한다.<sup>10)</sup>

### 2.2 Ji et al. (1997) model

Ji et al. (1997)<sup>11)</sup>은 Pfeifer and Avnir의 연구<sup>4)</sup>를 이용하여 시멘트 수화 생성물이 공극을 채우는 과정을 이용하여 경화

된 시멘트 페이스트의 프랙탈 차원을 산정하는 모델을 제시하였으며, 제안된 이론적 모델은 아래의 Menger sponge 모델과 유사하다.

수화 생성물이 채워지기 전의 공극을 단위 체적을 가진 정육면체 모양이고, 한 변이  $m^{-1}$ 인 작은 정육면체  $m^3$ 개로 나뉜다고 가정한다. 두 번째 단계에서, 수화반응이 진행되어 고체상의  $n$ 개(단,  $n < m^3$ )의 작은 정육면체 모양의 수화 생성물이 공극을 채우면,  $(m^3 - n)$ 개의 작은 정육면체 모양의 공극이 빈 공간으로 남게 된다. 채워지지 않은 각각의 정육면체는 한 변이  $m^{-2}$ 인 작은 정육면체  $m^3$ 개로 다시 나뉘고, 수화반응이 진행되어 고체상의  $n$ 개의 작은 정육면체 모양의 수화 생성물이 공극을 채우면,  $(m^3 - n)^2$ 개의 작은 정육면체 모양의 공극이 다시 빈 공간으로 남게 된다. 이와 같은 과정이 무한히 반복되면, 프랙탈 구조가 형성된다.

프랙탈 기하학의 원리<sup>13)</sup>에 따라, 한 변을  $m$ 등분 했을 때,  $D$ 차원의 공간에서 분할되는 도형의 총 개수( $N$ )는 다음 식 (5)와 같다.

$$N = m^D \quad (5)$$

이 때의 프랙탈 차원  $D$ 는 다음 식 (6)과 같다.

$$D = \log_m N = \frac{\log N}{\log m} \quad (6)$$

만일, 시멘트 페이스트 내의 수화 반응이 진행되어 capillary pore가  $m$ 등분됨과 동시에  $n$ 개의 수화 생성물로 채워진다고 가정하면, 이때의 프랙탈 차원은 위의 식 (6)을 이용하여 다음 식 (7)과 같이 계산된다.

$$D = \frac{\log(m^3 - n)}{\log m} = 3 + \frac{\log(1 - \frac{n}{m^3})}{\log m} \quad (7)$$

이 과정을 2차원의 평면으로 도식화한 그림( $m=3, n=2$ )은 아래 Fig. 2과 같다.

Ji et al. (1997)<sup>11)</sup>은 위의 프랙탈 차원 도출 과정을 수은압입법을 이용하여 측정된 실제 시멘트계 재료의 공극 구조에 확대 적용하였다. Pfeifer and Avnir의 연구에 따라 공극 형상을 길이  $h(\rho)$ 의 실린더형 형상으로 가정했을 때, 공극 반지름이  $\rho$ 에서  $\rho+d\rho$ 로 증가할 때의 공극 개수는 수은압입법을

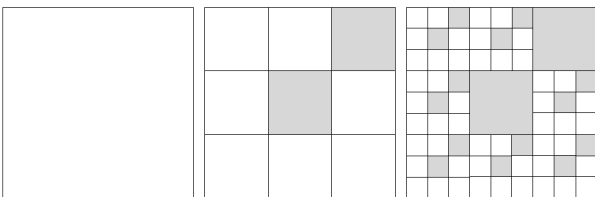


Fig. 2 Filling process of cement hydrates in plane situation (Ji et al., 1997)<sup>11)</sup>

통해 측정된 cumulative pore volume을 직경이 작은 공극부터 큰 공극까지 축적한 reverse cumulative intrusion volume ( $V_r^*$ ) 값을 이용하여 식 (8)과 같이 정리된다.

$$dM = \frac{dV_r^*}{d\rho} \frac{d\rho}{\pi\rho^2 h(\rho)} \quad (8)$$

여기서,  $dM$ 은 반지름이  $\rho$ 에서  $\rho+d\rho$ 로 증가할 때의 공극 개수,  $V_r^*$ 은 cumulative pore volume을 직경이 작은 공극부터 큰 공극까지 축적한 reverse cumulative intrusion volume,  $\rho$ 는 공극 반지름,  $h(\rho)$ 는 공극의 길이를 나타낸다.

반지름이  $\rho$ 인 공극이 반지름이  $r_m$ 인 공기 분자로 채워져 있다고 가정할 때(단  $\rho > r_m$ ), 프랙탈 구조를 갖는 공극에 채워질 수 있는 공기 분자의 개수( $n_a$ )는 식 (9)와 같다.

$$n_a = \frac{2\pi\rho h(\rho)}{\pi r_m^2} = \frac{2\rho h(\rho)}{r_m^2} \quad (9)$$

여기서,  $n_a$ 는 공기 분자의 개수,  $r_m$ 은 공기 분자의 반지름을 나타낸다.

위의 식 (8)과 (9)를 이용하면,  $dM$ 개의 공극에 채워질 수 있는 공기 분자의 개수는 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} dM \times n_a &= \frac{dV_r^*}{d\rho} \frac{d\rho}{\pi\rho^2 h(\rho)} \frac{2\pi\rho h(\rho)}{\pi r_m^2} \\ &= \frac{dV_r^*}{d\rho} \frac{2d\rho}{\pi r_m^2} \end{aligned} \quad (10)$$

프랙탈 기하학의 원리에 따라 공극 구조의 프랙탈 차원을  $D$ 라고 가정하고, 전체 공극에 채워질 수 있는 공기 분자의 총 개수는 식 (11)과 같다.

$$N_a = c r_m^{-D} \quad (11)$$

여기서,  $N_a$ 는 공기 분자의 총 개수,  $c$ 는 상수,  $D$ 는 공극 구조의 프랙탈 차원을 나타낸다.

전체 공극 구조 중  $\rho \geq r_m$ 을 만족하는 공극만이 공기 분자를 수용할 수 있고, 이때 공극에 의해 수용된 전체 공기 분자의 개수는 다음 식 (12)와 같다.

$$N_a = \int_{r_m}^{\rho_{max}} dM \times n_a = \int_{r_m}^{\rho_{max}} \frac{dV_r^*}{d\rho} \frac{2d\rho}{\pi r_m^2} \quad (12)$$

여기서,  $\rho_{max}$ 는 수은압입법에 의해 측정된 최대 공극 반지름을 나타낸다.

식 (11)의  $N_a$ 를 식 (12)에 대입하여 정리하면 식 (13)과 같이 프랙탈 차원( $D$ )과  $V^*$ 의 상관관계로 나타낸다.

$$V^* = t r_m^{3-D} \quad (13)$$

$$\log V^* = \log t + (3-D)\log r \quad (14)$$

$$= \log t + (3-D)\log \frac{d}{2}$$

여기서,  $t$ 는 상수,  $d$ 는 공극 직경을 나타낸다.

$$D = 3 - k \quad (15)$$

위의 식 (14), (15)에 의하여  $\log V^*$ 와  $\log d$  사이의 관계를 그래프로 나타냈을 때의 기울기 값( $k$ )을 이용해서 프랙탈 차원( $D$ )을 계산할 수 있다. Ji et al. (1997) model에서는 프랙탈 차원이 공극의 표면보다 공극부피와 관계되기 때문에 Ji et al. (1997) model에 의한 프랙탈 차원은 pore volume fractal을 나타낸다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험 개요

본 연구에서는 수은압입법을 통해 측정된 실험 결과를 Zhang and Li (1995) model 및 Ji et al. (1997) model에 각각 적

**Table 1** Mix proportion (Unit: g)

Specimen	Binder		Water	S.P.*	w/b**
	Cement	GGBFS			
GGBFS-35	7,800	4,200	2,400	63.6	0.2

\*Superplasticizer

\*\*water to binder (Cement+GGBFS) ratio

**Table 2** Properties of cement and GGBFS

Material	Properties
Cement	Type : Ordinary portland cement Blaine fineness : 3,270 cm <sup>2</sup> /g Density : 3.18 g/cm <sup>3</sup>
GGBFS	Blaine fineness : 4,330 cm <sup>2</sup> /g Density : 2.89 g/cm <sup>3</sup>

**Table 3** Chemical compositions of cement and GGBFS

	Cement (mass%)	GGBFS (mass%)
SiO <sub>2</sub>	20.80	34.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.93	16.40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.50	0.50
CaO	62.40	37.20
MgO	1.61	6.29
K <sub>2</sub> O	0.90	0.45
Na <sub>2</sub> O	0.33	1.33
SO <sub>3</sub>	2.21	2.71
H <sub>2</sub> O	-	-
LOI	2.74	0.17

용하여, 각 모델에 따른 시멘트계 재료의 프랙탈 특성을 비교·분석하였다. 바인더로는 선철 제련 시 발생하는 부산물인 고로슬래그 미분말(GGBFS)과 시멘트를 사용하였고, 물-바인더 비는 20%, GGBFS 치환율은 전체 바인더 중량 대비 35%를 적용한 배합으로 선정하였다. 고성능 감수제는 20%의 낮은 물-바인더 비를 유지하면서 작업성을 확보하기 위해, 전체 바인더 중량 대비 0.53%로 63.6 g이 사용되었고, 배합에 사용된 배합수의 양은 2,400 g이다. 본 연구에서 사용된 상세한 배합표는 Table 1과 같고, 재령 28일에서의 수은압입법 실험을 계획하였다.

본 연구에서 사용한 재료로서, 시멘트는 KS L 5201 “포틀랜드 시멘트”에 적합한 1종 시멘트를 사용하였고, GGBFS는 KS L 2563 “콘크리트용 고로슬래그 미분말”에 적합한 고로슬래그 미분말을 사용하였다. 각 재료의 구체적인 물성 및 화학적 조성은 각각 Table 2, Table 3과 같다.

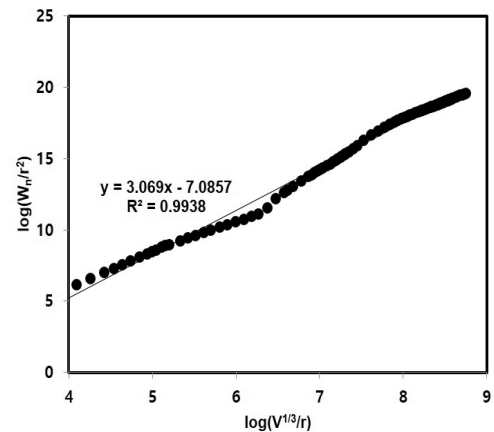
#### 3.2 실험 방법

본 연구에서는 Table 1의 배합에 따라 40×40×160 mm 몰드에 시편을 제작한 뒤, 항온항습실(23±2°C; >95% RH)에서 24시간 동안 양생시켰다. 타설 이후 양생된 시편은 탈형된 후, 28일간 23±2°C의 조건에서 수중 양생 시킨 후, 수은압입법 실험을 위해서 시편을 1×1×1 cm 정육면체 모양으로 조각낸 뒤, 60°C의 오븐에서 1일간 건조시켰다. Micromeritics AutoPore IV 9500을 이용하여 GGBFS가 35% 치환된 GGBFS 혼입 시멘트 페이스트의 공극 구조를 측정하였다.

### 4. 결과 및 분석

#### 4.1 Zhang and Li (1995) model의 surface fractal dimension

Fig. 3은 GGBFS 혼입 시멘트 페이스트의 전체 공극에 대해 Zhang and Li (1995) model을 이용하여 산정된 SFD로, 그



**Fig. 3** Surface fractal dimension over the whole scale range of pores using Zhang and Li (1995) model

값은 3.069이다. 그러나 Zhang and Li (1995) model을 산정 시, SFD 값이 2와 3사이에서 나타나고,  $D=3$ 일 때 전체 공극이 채워진다고 가정하였기 때문에, 전체 공극 영역에 대하여 SFD를 산정하면 모델의 가정 사항에 어긋나는 결과가 나타난다.

GGBFS 혼입 시멘트 페이스트 내의 실제 공극 구조는 그 크기의 범위가 넓게 분포하고 있기 때문에, 전체 공극 영역을 세 가지의 영역 범위로 나누어서 SFD를 재산정 하였다. Fig. 3의 그래프 형상에서 선형성이 저하되는 두 지점을 기준으로 Fig. 4와 같이 프랙탈 영역을 region I, II, III으로 구분 하였다.<sup>5)</sup>

Region I에 해당하는 공극 영역은 552~121,137 nm로 수화 생성물에 의해 채워지지 않은 공극인 large capillary pores에 해당하는 macro 영역이고,<sup>5,7)</sup> region I의 SFD는 2.294이다. Region III은 공극 크기가 6~40 nm에 해당하는 영역으로, 시멘트와 GGBFS의 수화반응으로부터 생성된 C-S-H 수화생성물 내의 gel pores 및 small capillary pores에 해당하는 micro 영역이고,<sup>5,7)</sup> 산정된 SFD는 2.378이다. 그러나 region II의

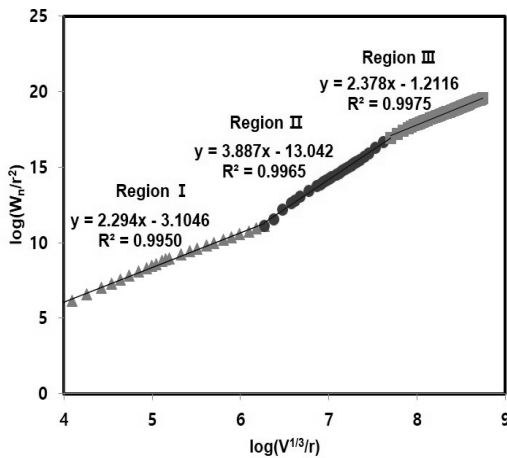


Fig. 4 Surface fractal dimension over the divided scale range of pores using Zhang and Li (1995) model

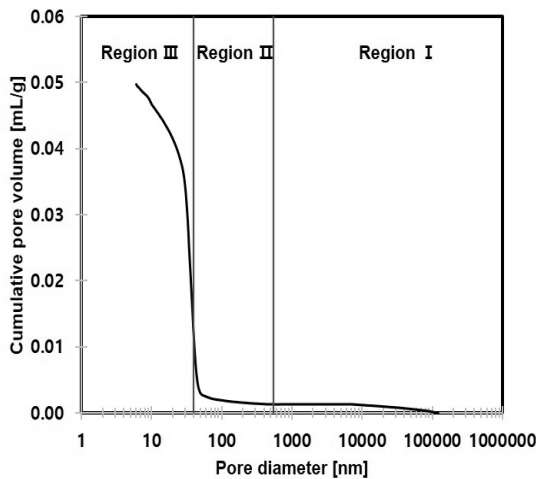


Fig. 5 Cumulative pore volume of specimen

SFD는 3.887로, 이 영역에 해당하는 공극은 프랙탈 특성을 갖지 않는 transition region에 해당 한다.<sup>5)</sup> Region II에서 프랙탈 특성이 나타나지 않는 이유로는 Fig. 5에 의하면, region II에서 주입될 수은의 양이 급격히 증가하는 구간이 나타난다. 기존 연구에 의하면 이와 같은 현상이 발생하는 주된 원인으로 ink-bottle pore의 존재 또는 이 구간에 가해지는 압력 크기로 인해 발생하는 공극 구조의 손상 때문인 것으로 판단된다.<sup>5)</sup> 또한 Region I과 region III의 SFD 값을 비교했을 때, region III에서의 값이 더 크게 나타났는데, 이는 large capillary pores의 공극 표면보다 C-S-H 수화생성물 내의 gel pores 및 small capillary pores의 공극 표면이 더 복잡하게 형성됨을 의미한다.

#### 4.2 Ji et al. (1997) model의 volume fractal dimension

Fig. 6은 Ji et al. (1997) model을 이용하여 산정된 GGBFS 혼입 시멘트 페이스트의 volume fractal dimension (VFD) 결과이다. 수은 주입량이 급격히 증가하는 transition 구간을 제외하고는, Zhang and Li (1995) model과 유사하게 공극 영역을 micro와 macro 영역으로 나누어서 VFD를 산정하였다. 그러나 Zhang and Li (1995) model과는 다르게 micro 영역 내에서도 선형성이 저하되는 지점이 발생하여 micro 영역을 I과 II의 두 영역으로 구분하여 VFD를 산정하였다.

Micro I에 해당하는 공극은 그 크기가 6~9 nm에 해당하는 영역으로, 시멘트와 GGBFS의 수화생성물인 C-S-H 내의 미세 공극 구조를 반영하며,<sup>5,7)</sup> volume fractal dimension 결과는 다음과 같다:  $D_I=3-k_I=3-2.118=0.882$ . Micro II에 해당하는 공극은 영역은 12~25 nm로 small capillary pores의 구조를 반영하고,<sup>5,7)</sup> 산정된 volume fractal dimension은 2.252이다. 마지막으로, macro 영역은 그 크기가 3,822~121,137 nm로 수화반응 결과 생성되는 수화생성물보다 크기가 큰 공극 영역에 해당하며,<sup>7)</sup> 그 값은 2.985이다.

Zhang and Li (1995) model을 이용한 SFD는 그 값이 증가

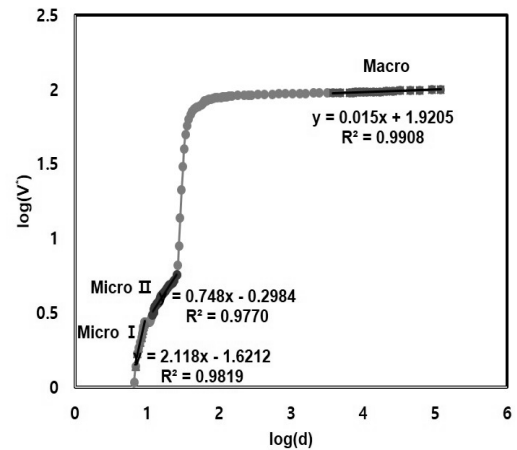


Fig. 6 Volume fractal dimension over the divided scale range of pores using Ji et al. (1997) model

**Table 4** Surface fractal analysis by Zhang and Li (1995) model

	D	R <sup>2</sup>	Pore range
Region I	2.294	0.9950	552~121,137 nm
Region II	3.887	0.9965	40~552 nm
Region III	2.378	0.9975	6~40 nm

**Table 5** Volume fractal analysis by Ji et al. (1997) model

	D	R <sup>2</sup>	Pore range
Micro I	0.882	0.9819	6~9 nm
Micro II	2.252	0.9770	12~24 nm
Macro	2.985	0.9908	3,822~121,137 nm

할수록 공극 표면이 복잡해짐을 의미하지만, Ji et al. (1997) model을 이용한 VFD는 수화 반응이 진행될수록 생성되는 수화생성물의 양이 증가하면서 그 값이 감소한다. Ji et al. (1997) model을 이용해서 산정된 각 영역 별 VFD를 비교했을 때, macro, micro II, micro I 순으로 결과 값이 감소하며, 이는 Zhang and Li (1995) model을 이용해서 분석했을 때와 유사하게 공극 영역이 작아질수록 그 형상은 복잡해진다는 결과를 나타낸다. 다음의 Table 4, 5는 두 모델을 이용해서 산정한 GGBFS 혼입 시멘트 페이스트의 공극 구조의 프랙탈 차원을 각 영역별로 나타낸다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 프랙탈 기하학을 이용하여 시멘트계 재료의 공극 구조의 특성을 연구하기 위하여, 먼저 수은압입법을 이용하여 GGBFS 혼입 시멘트 페이스트의 공극 구조를 측정하였다. 측정 결과를 SFD를 산정하는 Zhang and Li (1995) model과 VFD를 산정하는 Ji et al. (1997) model에 각각 적용하여 시편의 공극 구조의 프랙탈 특성을 분석하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) Zhang and Li (1995) model은 수은압입법 실험 과정에서 발생하는 열역학적 관계를 이용하여 공극 표면의 프랙탈 특성을 산정하는 모델이며, SFD값이 증가할수록 공극 표면 형상의 복잡성이 증가한다.
- 2) Ji et al. (1997) model은 수화 반응 결과 생성된 수화생성물이 공극을 채우는 과정을 이용하여 공극 부피의 프랙탈 특성을 산정하는 모델이며, 수화반응이 진행될수록 VFD값은 감소하는 경향을 보인다.
- 3) GGBFS 치환율이 35%인 GGBFS 혼입 시멘트 페이스트의 재령 28일에서의 프랙탈 분석 결과를 보면, 전체 공극 범위에 대하여 SFD값을 산정했을 때, 모델의 가정 사항에 어긋나는 결과를 보일뿐만 아니라 하나의 결과 값으로 넓은 범위의 공극 구조를 대표적으로 특징 짓는 데는 어려움이 있다. GGBFS 혼입 시멘트 페이

스트 내의 공극 구조는 그 크기에 따라 각각의 특성을 갖기 때문에, 프랙탈 차원을 산정 시 공극 영역을 나누어서 분석할 필요가 있다.

- 4) 이에 따라 Zhang and Li (1995) model을 적용하면, 공극 크기가 작은 micro 영역과 공극 크기가 큰 macro 영역에서 각각의 프랙탈 특성이 나타나며, C-S-H 내의 미세 공극 구조 및 small capillary pores에 해당하는 micro 영역의 공극 표면이 macro 영역보다 더 복잡한 형상을 나타냄을 확인할 수 있다. 반면, Ji et al. (1997) model을 적용하면, Zhang and Li (1995) model과는 다르게 micro 영역의 프랙탈 특성이 C-S-H 내의 미세 공극 구조를 나타내는 영역과 small capillary pores를 나타내는 영역으로 구분된다. 또한 공극 크기가 감소할수록 공극의 복잡성이 증가하는 결과를 보인다.
- 5) 본 연구를 통해서 시멘트계 재료의 fractal dimension은 수화 반응 과정에서 변화하는 공극의 형상을 반영하는 지표로 작용한다는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구를 바탕으로 향후 연구를 통해 수화 반응 결과 변화하는 염화물 확산계수,<sup>15)</sup> 동결융해 저항성능 등의 콘크리트의 내구적 특성 및 자기건조 (self-desiccation) 특성<sup>16)</sup>과 fractal dimension과의 연관성에 대한 연구를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2015년도 중앙대학교 CAU GRS 지원과 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비지원(16SCIP-C120795-01)에 의하여 작성되었음.

## References

1. Mandelbrot, B. B., *Fractals: Form, Chance, and Dimension*, WH Freeman and Co, New York, 1979.
2. Avnir, D., Farin, D., and Pfeifer, P., "Molecular Fractal Surfaces", *Nature*, Vol. 308, No. 5956, 1984, pp. 261-263.
3. Neimark, A. V., "Calculating Surface Fractal Dimensions of Adsorbents", *Adsorption Science & Technology*, Vol. 7, No. 4, 1990, pp. 210-219.
4. Pfeifer, P., and Avnir, D., "Chemistry in Noninteger Dimensions Between Two and Three I. Fractal Theory of Heterogeneous Surfaces", *The Journal of chemical physics*, Vol. 79, No. 7, 1983, pp. 3558-3565.
5. Zeng, Q., Li, K., Fen-Chong, T., and Dangla, P., "Surface Fractal Analysis of Pore Structure of High-volume Fly-ash Cement Pastes", *Applied Surface Science*, Vol. 257, No. 3, 2010, pp. 762-768.
6. Won, J. P., and Kim, S. A., "Crack Growth Behaviors of Cement Composites by Fractal Analysis", *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol. 14, No. 1, 2002, pp. 30-35.

7. Monteiro, P., *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, McGraw-Hill Publishing, 2006.
8. Zeng, Q., Luo, M., Pang, X., Li, L., and Li, K., "Surface Fractal Dimension: an Indicator to Characterize the Microstructure of Cement-based Porous Materials" *Applied Surface Science*, Vol. 282, 2013, pp. 302-307.
9. Gao, Y., Wu, K., and Jiang, J., "Examination and Modeling of Fractality for Pore-solid Structure in Cement Paste: Starting from the mercury intrusion porosimetry test", *Construction and Building Materials*, Vol. 124, 2016, pp. 237-243.
10. Zhang, B., and Li, S., "Determination of the Surface Fractal for Porous Media by Mercury Porosimetry", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 34, No. 4, 1995, pp. 1383-1386.
11. Ji, X., Chan, S. Y. N., and Feng, N., "Fractal Model for Simulating the Space-filling Process of Cement Hydrates and Fractal Dimensions of Pore Structure of Cement-based Materials", *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 11, 1997, pp. 1691-1699.
12. Rootare, H. M., and Prenzlow, C. F., "Surface Areas from Mercury Porosimeter Measurements", *The Journal of physical chemistry*, Vol. 71, No. 8, 1967, pp. 2733-2736.
13. Mandelbrot, B. B., *The Fractal Geometry of Nature*, Freeman: New York, 1982, pp. 109-115.
14. Jackson, S. D., Kennedy, D. R., Lennon, D., and Webb, G., "Reaction Kinetics and the Development of Catalytic Processes", *Studies in Surface Science and Catalysis*, Vol. 122, 1999, pp. 149-155.
15. Kim, T. S., Jung, S. H., Choi, Y. C., and Song, H. W., "An Experimental Study on Relation between Chloride Diffusivity and Microstructural Characteristics for GGBS Concrete", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 5, 2009, pp. 639-647.
16. Li, K., Zeng, Q., Luo, M., and Pang, X., "Effect of Self-desiccation on the Pore Structure of Paste and Mortar Incorporating 70% GGBS", *Construction and Building Materials*, Vol. 51, 2014, pp. 329-337.

**요약** 본 연구는 시멘트계 재료의 프랙탈 특성에 관한 기초적 연구로써, 고로슬래그 미분말 혼입 시멘트 페이스트의 공극 구조를 수은압입법을 이용하여 측정하였고, 측정된 결과를 프랙탈 모델에 적용하여 그 특성을 분석하였다. 분석 결과, 고로슬래그 미분말 혼입 시멘트 페이스트의 공극 구조는 그 범위가 나노미터부터 밀리미터 단위까지 다양하게 분포하는 불규칙한 조직이기 때문에, 전체 영역에 대한 프랙탈 차원을 산정했을 때 각 공극 영역의 특성을 반영할 수 없다. 따라서 프랙탈 차원 산정 시 공극 영역을 나누어서 분석하였다. Zhang and Li (1995) model을 적용했을 때, 시멘트와 GGBFS의 수화반응 결과 생성된 C-S-H 내의 gel pores 및 small capillary pores에 해당하는 micro 영역과 large capillary pores에 해당하는 macro 영역에서 각각 프랙탈 특성이 나타나는 결과를 보였다. 또한 macro 영역보다 micro 영역의 공극 표면이 더 불규칙한 형상을 나타내었다. Ji et al. (1997) model을 적용할 경우, micro 영역이 C-S-H 내의 gel pores에 해당하는 micro I과 small capillary pores에 해당하는 micro II로 구분되었으며, 각각의 프랙탈 특성이 산정되었다. 또한 Zhang and Li (1995) model을 결과와 유사하게, macro, micro II, micro I의 순서대로 공극 크기가 작아질수록 VFD 결과 값이 감소하였으며, 이는 곧 공극의 복잡성이 증가함을 나타낸다.

**핵심용어** : 공극 구조, 수은압입법, 스케일링 관계, 프랙탈 차원