

## 시멘트 복합체의 균열성장거동에 관한 프랙탈 해석

원종필<sup>1)\*</sup> · 김성애<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>건국대학교 농공학과

(2000년 12월 13일 원고접수, 2001년 3월 26일 심사완료)

### Crack Growth Behaviors of Cement Composites by Fractal Analysis

Jong-Pil Won<sup>1)\*</sup>, and Sung-Ae Kim<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Agricultural Engineering, Konkuk University, Seoul, 143-701, Korea

(Received December 13, 2000, Revised March 26, 2001)

#### ABSTRACT

The fractal geometry is a non-Euclidean geometry which describes the naturally irregular or fragmented shapes, so that it can be applied to fracture behavior of materials to investigate the fracture process. Fractal curves have a characteristic that represents a self-similarity as an invariant based on the fractal dimension. This fractal geometry was applied to the crack growth of cementitious composites in order to correlate the fracture behavior to microstructures of cementitious composites. The purpose of this study was to find relationships between fractal dimensions and fracture energy. Fracture test was carried out in order to investigate the fracture behavior of plain and fiber reinforced cement composites. The load-CMOD curve and fracture energy of the beams were observed under the three point loading system. The crack profiles were obtained by the image processing system. Box counting method was used to determine the fractal dimension,  $D_f$ . It was known that the linear correlation exists between fractal dimension and fracture energy of the cement composites. The implications of the fractal nature for the crack growth behavior on the fracture energy,  $G_f$  is apparent.

**Keywords :** CMOD, Cement composites, Fractal dimension, Fractal geometry, Fracture energy,

#### 1. 서 론

콘크리트 및 모르타르는 경제성, 압축강도, 내구성 및 강성등의 우수한 물성을 가지고 있으나, 인장, 휨 및 충격 강도가 낮고 에너지흡수율이 작아 취성적이며 균열에 대한 저항성이 작은 단점을 가지고 있다. 이러한 재료적 특성은 재료의 파괴가 수많은 미세균열이 주균열로 성장하기 때문이다. 시멘트 복합체의 미세균열은 복합체 내부나 표면을 따라 성장하다가 장애물을 만나면 균열이 휘게 됨으로써 균열의 직진성이 재료조직의 불규칙성과 미소균열 사이의 상호간섭에 의한 합체에 의하여 상당히 방해받아서 균열형태가 매우 불규칙하게 뒤틀리게 된다<sup>1)</sup>.

기존의 시멘트 재료의 파괴에 관한 연구에서는 단순히 물리적인 균열의 길이나 밀도로 평가하려는 시도가 대부분이었고 균열의 뒤틀림에 의한 복잡한 균열형태를 정량화하려는 노력은 많이 시도되지 않았다. 이러한 관점에서 프랙탈적인 접근방법은 시멘트 복합체의 균열과 같은 불

규칙한 곡선의 형태를 정량화 할 수 있다<sup>2,3,5-9)</sup>.

프랙탈의 개념은 1970년대 후반 Mandelbrot가 처음으로 제안하여 최근들어 여러 자연현상에 응용되기 시작했으며, 재료파괴 현상에도 균열거동 및 파단면 양상에 대한 정량적 해석기법으로 도입되기 시작했다<sup>6)</sup>. 프랙탈 곡선으로 나타내는 불규칙한 현상은 연속적이면서도 각 지점에서 미분이 불가능한 성질을 지니는 공간 점유특성을 나타내기 위하여 프랙탈 차원(fractal dimension)이라는 비정수차원을 도입하여 표현할 수 있다<sup>2,3,5,6,9)</sup>. 파괴시에 소산되는 에너지는 파괴면의 균열특성과 관련되며, 재료의 역학적 성질과도 연관된다. 따라서 시멘트계 복합체의 파괴시에 역학적 거동은 파단면 및 균열의 프랙탈 특성에 의하여 나타낼 수 있다<sup>9,10)</sup>. 지금까지 파괴 매카니즘을 정량적으로 나타내기 위한 많은 방법이 제시되어 유용히 활용되고 있으나, 파단면 및 균열면 형상의 성질에 대하여 본질적인 비유클리드 기하학을 고려한 프랙탈적 해석에 대한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 시멘트 복합체의 파괴시에 형성되는 파단면의 2차원적 성질인 균열형상의 프랙탈 차원과 파괴에너지와의 관계를 파악하고, 파괴에너지에 대한 프랙탈 차

\* Corresponding author

Tel : 02-450-3750 Fax : 02-2201-0907

E-mail : jpwon@konkuk.ac.kr

원의 정량적 평가의 가능성을 제시하려 한다.

## 2. 프랙탈 기하

### 2.1 프랙탈 차원의 정의

Mandelbrot는 유클리드 차원의 한계를 극복하기 위하여 프랙탈 차원(fractal dimension)을 제안하였다<sup>8)</sup>. 프랙탈 기하학은 곡선의 접선을 정의할 수 없는 즉, 미분할 수 없는 형상을 취급하며 이러한 형상은 다른 스케일에서도 자기상사성(self-similarity)을 보존하게 된다. 이러한 자기유사성을 확대시켜 정량적으로 표시한 양이 프랙탈 차원이다. 프랙탈 기하학에서 임의의 형상에 대한 차원은 다음식으로 정의할 수 있다<sup>9)</sup>. 기하학을 고려한 프랙탈적 해석에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다.

$$N = r^{D_f} \quad (1)$$

여기서,  $N$ 은 각 단계에서의 subpart의 개수이고  $r$ 은 척도계수(scaling factor)로서 전체 곡선을 투영하였을 때의 길이를 1로 가정하여 그 곡선을 길이  $r$ 로 나누었을 때의 역수이다. 식(1)의 양변에 로그를 취하면 프랙탈 차원  $D_f$ 는 다음과 같다.

$$D_f = \frac{\ln N}{\ln r} \quad (2)$$

자기상사성(self-similarity)구조를 갖는 프랙탈 도형으로는 대표적으로 3분할형 코흐곡선(koch curve)이 있다. Fig. 1은 코흐곡선의 생성과정을 나타낸다. 창시자(initiator)는 길이 1인 초기의 기하학적 형상을 나타낸 것이고 생성자(generator)는 창시자의 형상을 변화시키는 도구이다.

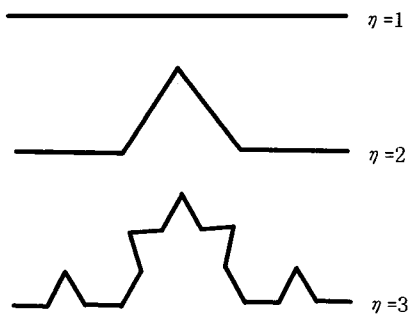


Fig. 1 Stages in generation of the triadic koch curve<sup>5)</sup>

코흐곡선의 생성은 창시자를 3등분하여 가운데 부분을 제거한 뒤 각각의 창시자 내측 끝점을 처음 창시자의 중간상측까지 길이 1/3되는 직선을 그음으로써 만들 수 있다. 이상의 생성자를 무한히 반복시키게 되면 인공적인 프랙탈 도형을 얻을 수 있으며 마지막 곡선의 프랙탈 차원을  $\eta=2$  단계에서  $r=9$ 이고  $N=16$ 이므로 식(2)에 의하여 계산하면 다음과 같다.

$$D_f = \frac{\ln 16}{\ln 9} \quad (3)$$

따라서, 코흐곡선의 프랙탈 차원은  $\eta$ 를 무한히 반복하여도 1.2619의 차원을 가지게 된다.

### 2.2 프랙탈 차원과 파괴에너지와의 관계

균열의 형태와 같은 불규칙한 곡선을 단위측정척도,  $\eta$ 의 크기함수로 평가한 Richardson의 식은 식(4)와 같다<sup>6,11)</sup>.

$$L(\eta) = L_0 \eta^{1-D_f} \quad (4)$$

여기서  $L$ ,  $L_0$ 는 불규칙한 실측길이와 측정되는 전체의 직선길이에 해당한다. 위에 나타난 프랙탈 식은 자연상태의 모든 실측길이가 어떠한 자로 측정되느냐에 따라 다른 값을 나타낼 수 있다는 것을 의미한다. 이 식을 균열성장거동에 적용하면 프랙탈 균열길이  $a_f$ 는 식(5)와 같이 표현된다<sup>11)</sup>.

$$a_f = a_o^{D_f} \epsilon^{1-D_f} \quad (5)$$

여기서,  $\epsilon = \eta \cdot a_o$ 이다.

에너지해방율  $G_{IC}$ 는 식(6)과 같이 표현된다.

$$G_{IC} = \frac{\partial U_e}{\partial (2a)} = \frac{\partial U_s}{\partial (2a)} = \frac{\pi \sigma^2}{E} \quad (6)$$

여기서,  $U_e$ 는 탄성에너지,  $U_s$ 는 균열이 성장에 필요한 에너지이다. 식(5)의 프랙탈 균열길이를 식(6)에 대입하면 식(7)과 같다.

$$G_{IC} = \frac{\pi \sigma^2}{E} a_o^{D_f} \epsilon^{1-D_f} = 2 \gamma \quad (7)$$

여기서,  $\gamma$ 는 표면에너지이다.

### 3. 파괴실험

#### 3.1 사용재료 및 배합설계

본 연구에서는 일반 시멘트 모르타르와 섬유를 혼입하여 에너지 흡수율을 증가시킨 시멘트 복합체의 균열성장 거동과 파괴에너지와의 관계를 알아보기 위하여 파괴실험을 실시하였다.

사용된 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트(Type I)가 사용되었고, 워커빌리티를 확보하기 위하여 국내 E사의 멜라민계 고성능 AE감수제를 사용하였다. 잔골재는 비중 2.6의 강모래가 사용되었다. 사용된 시멘트 및 잔골재의 물리적 특성은 Table 1, 2와 같다.

실험에 사용된 섬유는 폴리프로필렌섬유와 셀룰로오스섬유이며 각 섬유의 특성은 Table 3과 같다.

배합설계는 일반모르타르와 섬유혼입율을 변화시킨 모르타르 배합이며, 기준배합의 목표 플로우값은  $220 \pm 5$  mm이며, 재령 28일의 압축강도가  $270 \pm 5$  kgf/cm<sup>2</sup>, 공기량은 27% 이하이다.

Table 1 Physical properties of cement

Finenes (cm <sup>2</sup> /g)	Specific gravity	Stability (%)	Compressive strength(kgf/cm <sup>2</sup> )		
			3 days	7 days	28 days
3,488	3.15	0.08	224	308	404

Table 2 Physical properties of fine aggregate

Specific gravity			Absorption(%)	F.M.
Bulk	Bulk(SSD)	Apparent		
2.57	2.59	2.63	0.67	2.99

Table 3 Properties of specialty cellulose and polypropylene fibers<sup>4)</sup>

Property	Fiber type	
	Specialty cellulose fiber	Polypropylene fiber
Elastic modulus(kgf/cm <sup>2</sup> )	$61 \times 10^4$	$3.5 \times 10^4$
Bond strength(kgf/cm <sup>2</sup> )	15.3	4.1
Specific gravity	1.5	0.9
Fiber length(mm)	2.92	10
Effective diameter(mm)	0.015	0.1
Aspect ratio	200	190
Tensile strength(kgf/cm <sup>2</sup> )	5100	6210
No. of fiber per gram	1,100,000	12000
Fiber count, 1/cm <sup>3</sup>	1430	0.6
Specific surface(1/cm)	0.13	0.033

배합은 기준배합에 폴리프로필렌섬유 0.1%와 셀룰로오스섬유의 혼입율을 0.06%~0.13%로 변화시킨 배합이며, 배합표는 Table 4와 같다.

#### 3.2 시편 제작

본 실험은 정적 3점 휨시험(static three point bending test)을 수행하기 위하여 크기가 30×60×240 mm의 직사각형 몰드를 각 배합에 2개씩, 2회 반복 제작하였다. 시편의 초기너치(initial notch)와 시편의 깊이의 비를 0.5로 일정하게 하였으며, 실험의 개요도는 Fig. 2와 같다.

#### 3.3 실험장치 및 방법

파괴실험시 하중재하방법은 3점 휨하중법으로 하였으며, 5ton용량의 변위제어 UTM을 사용하였으며 하중의 재하 속도는 0.1 mm/min으로 하였다. 균열개구변위를 측정하기 위하여 크랙게이지를 초기너치의 양쪽에 부착하였으며 균열진전거동을 명확히 보기 위하여 균열진전이 예측되는 부분에 흰색 페인트를 칠한 후 실험을 실시하였다. 실험 결과는 데이터 수집기를 통하여 하중-균열개구변위 곡선을 얻었으며, 균열개구변위는 0.4 mm까지 측정하였다. 휨강도와 파괴에너지는 식(8) 및 식(9)와 같이 계산하였다.

Table 4 Mixture proportions

Type	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Fiber volume fraction (%)	Super plasticizer (kg/m <sup>3</sup> )
Plain	477.2	295.9	1431.6	-	4.7
Polypropylene fiber	477.2	295.9	1431.6	0.10	4.7
Cellulose fiber	477.2	295.9	1431.6	0.06	4.7
	477.2	295.9	1431.6	0.08	4.7
	477.2	295.9	1431.6	0.10	4.7
	477.2	295.9	1431.6	0.13	4.7

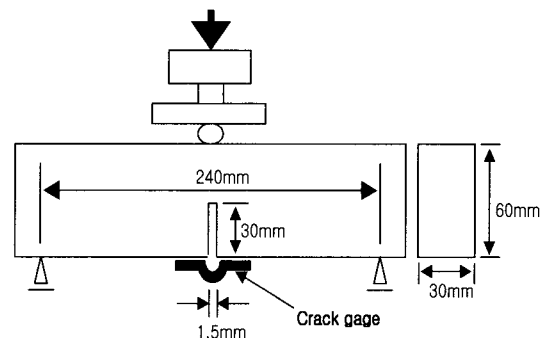


Fig. 2 The schematic diagram of test apparatus

$$f_b = \frac{3P_{\max} l}{2b(h-a)^2} \quad (8)$$

여기서,  $f_b$  : 휨강도  
 $P_{\max}$  : 측정된 최대하중  
 $l$  : 경간  
 $b$  : 시편의 폭  
 $h$  : 시편의 깊이  
 $a$  : 노치깊이

$$G_f = \frac{A}{b(h-a)} \quad (9)$$

여기서,  $G_f$  : 파괴에너지  
 $A$  : 하중-균열개구변 곡선의 면적  
 $b$  : 시편의 폭  
 $a$  : 노치길이  
 $h-a$  : 완전파괴시의 균열성장길이

#### 4. 프랙탈 분석

##### 4.1 영상의 처리 및 균열인식

파괴실험 실시 후 시멘트 복합체 시편의 표면에서 성장하는 균열에 대한 정보를 얻기 위해서 화상입력장치 시스템인 Sony DSC-F505K 디지털카메라를 사용하였다. 이 시스템은 5배의 배율을 갖으며, 해상도는 2,110,000 화소수(pixels)이다. 디지털카메라에 의해 촬영된 시멘트 복합체 표면의 균열에 대한 원래의 화상은 Fig. 3과 같이 (a)의 원화상을 (b)와 같이 역상처리한 후 불필요한 부분을 제거하는 (c)와 같은 필터링(filtering)과정을 거쳐 균열형상을 명확하게 인식하였다.

##### 4.2 프랙탈 차원의 산정

본 연구에서 사용한 프랙탈 차원의 산정방법은 박스계수법이다. Fig. 4는 박스계수법을 이용한 프랙탈 차원의 측정방법을 나타낸 것이다.

여러가지 크기의 격자에 대하여, 주어진 그림의 부분을 포함하는 상자수를  $y$ 축, 그 격자의 크기를 결정하는 축척의 역수를  $x$ 축으로 그래프를 나타낸다. 상자수와 격자크

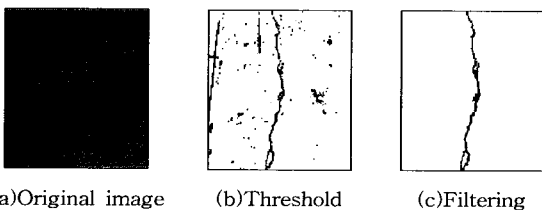


Fig. 3 Image processing on a crack

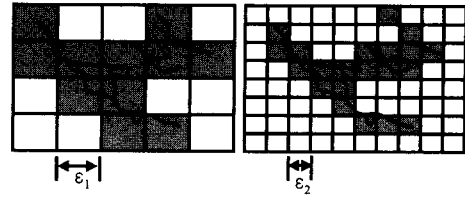


Fig. 4 Box counting method

기의 역수와 관계는 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$N = \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{D_f} \quad (10)$$

식(10)에 로그를 취하여 이중로그 그래프에 나타낼 때 선형 그래프가 된다. 따라서, 상자의 개수와 축척사이의 관계는 멱법칙(power law)이 성립한다. 이런 관계에서 직선의 기울기는 멱합수에서의 지수이다. 이 지수는 특히 그 도형의 프랙탈 차원을 나타내는데, 직선의 프랙탈 차원은 1, 원이나 정사각형은 2, 프랙탈 곡선의 차원은 1과 2 사이이다. 프랙탈 차원은 식(11)과 같이 나타낼 수 있다

$$D_f = \frac{\ln(N)}{\ln(1/\epsilon)} \quad (11)$$

#### 5. 실험결과 및 고찰

##### 5.1 휨강도 및 파괴에너지

기준배합에 폴리프로필렌섬유 0.1%와 셀룰로오스섬유의 혼입량을 0.06~0.13%으로 변화시킨 시멘트 복합체의 휨강도와 파괴에너지의 결과는 Table 6과 같다.

Table 6 Fracture test results

Type of mortar	a/h	curing days	$f_{tu}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )		$G_f$ (×10 <sup>-2</sup> kgf/cm)		
Plain	0.5	28	25.97	mean	2.74	mean	
			21.51		2.79		
			26.23		2.95		
PP(0.1%)	0.5	28	29.27	mean	5.63	mean	
			32.43		5.97		
			31.92		5.76		
Cellulose	0.06%	0.5	28	29.55	mean	4.77	mean
				31.10		4.83	
				27.21		4.65	
	0.08%	0.5	28	34.80	mean	5.85	mean
				35.83		6.28	
				32.29		5.96	
	0.1%	0.5	28	26.95	mean	5.68	mean
				29.29		5.89	
				31.87		5.77	
	0.13%	0.5	28	26.76	mean	4.64	mean
				26.69		4.53	
				26.79		4.62	

Fig. 5는 시멘트 복합체의 파괴실험시 측정된 하중-균열개구변위 곡선이며 일반 시멘트 복합체의 경우 최대하중에 도달한 후 급속한 파괴가 일어났으나, 섬유를 혼입하였을 경우 극한하중에 도달한 후에도 지속적으로 하중을 받으면서 천천히 파괴가 진행되었다. 따라서 섬유보강 시멘트 복합체의 파괴에너지는 일반 시멘트 복합체보다 매우 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 6은 시멘트 복합체의 휨강도 결과이며 폴리프로필렌섬유를 0.1% 혼입하였을 때 기준배합보다 휨강도가 1.27배 증가하였으며, 셀룰로오스섬유 혼입율 0.06%, 0.08%, 0.1%, 0.13%일 때 1.16배, 1.40배, 1.20배, 1.10배가 증가하였다. 셀룰로오스섬유 혼입율 0.08%에서 폴리프로필렌섬유 0.1% 혼입율과 비교할 때 1.1배 크게 나타났다.

Fig. 7은 하중-균열개구변위 곡선 아래의 면적으로 산정된 파괴에너지이며, 기준배합과 비교하여 폴리프로필렌 혼입율 0.1%에서 1.96배, 셀룰로오스섬유 혼입율 0.06%, 0.08%, 0.1%, 0.13%에서 1.61배, 2.04배, 1.96배, 1.57배가 크게 나타났다. 이는 섬유의 파괴, 가교작용, 섬유와 매트릭스의 분리, 섬유의 인발거동 등에 기인한 것이며 섬유의

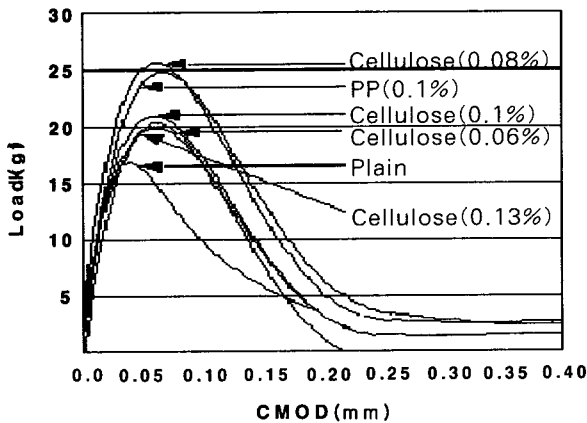


Fig. 5 Typical Load-CMOD curve

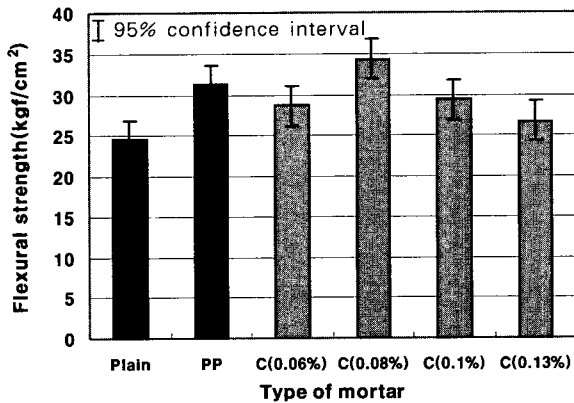


Fig. 6 Flexural strength

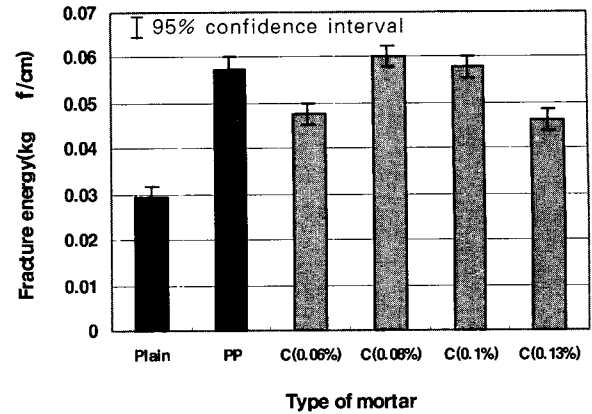


Fig. 7 Fracture energy

혼입이 시멘트계 복합체의 연성화에 크게 기여함을 알 수 있다. 또한 셀룰로오스섬유 혼입율 0.08%에서 휨강도와 파괴에너지가 가장 우수하게 나타났다. 셀룰로오스섬유는 시멘트 매트릭스와의 부착능력이 우수하고 단위면적당 차지하는 섬유의 수가 많아 폴리프로필렌섬유보다 복합체의 파괴에 대한 저항성이 큰 것으로 사료된다.

## 5.2 프랙탈 차원과 파괴에너지와의 관계

본 연구에서는 시멘트 복합체의 파괴시험을 통해 얻은 파괴에너지와 파괴면의 균열형상에 대한 프랙탈 분석을 실시하였다.

Fig. 8은 섬유종류와 혼입율을 달리했을 때의 프랙탈 차원의 산정결과이다. 섬유를 혼입한 복합체의 프랙탈 차원이 크게 나타났으며, 프랙탈 차원의 범위는 0.992~1.036로 나타났다.

파괴실험으로 얻은 파괴에너지와 프랙탈 차원과의 관계는 Table 8과 같으며, Fig. 9와 같은 상관관계를 보여준다. 그림과 같이 균열형상의 프랙탈 차원이 증가함에 따라 파괴에너지도 증가하는 비례관계를 나타내고 있다.

이러한 결과로부터 섬유보강 시멘트 복합체의 파괴에너지 증가는 재료의 파괴시 하중이 감소하여도 변형은 지속되는 인장연성거동에 기인하며, 섬유는 재료내에 가교작용 등으로 인하여 균열에 저항하는 힘을 증가시킨다. 또한 균열성장시에 섬유와 같은 장애물을 만나면 균열은 비틀림과 동시에 미세한 균열이 형성되어, 균열의 복잡성이 증가한다. 따라서 균열형상의 복잡성을 나타내는 프랙탈 차원으로 파괴역학의 주된 변수인 파괴에너지의 정량적인 평가가 가능하며, 균열성장거동의 예측이 가능하다고 사료된다.

## 6. 결 론

3점 휨시험법을 이용한 시멘트 복합체의 파괴실험시에 얻은 시편의 영상을 역상처리와 필터링의 과정을 거친 이미지 처리 후 박스계수법으로 프랙탈 차원을 산정하여 파괴에너지와의 관계를 파악하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 기준배합에 폴리프로필렌섬유 및 셀룰로오스섬유의 혼입률을 변화시킨 경우 프랙탈 차원의 범위는 0.992~1.036으로 나타났으며 또한 프랙탈 차원과 파괴에너지의 관계는 비례관계를 나타냈다.

2) 시멘트 복합체에 대해 균열형상의 복잡성을 나타내는 비정수 차원의 프랙탈 차원으로 파괴역학의 주된 변수인 파괴에너지의 정량적인 평가가 가능하며, 균열성장거동의 예측이 가능하다고 사료된다.

## 참고문헌

1. 김경수, 김재욱, 이용우, 배주성, “강섬유보강재가 콘크리트의 파괴인성과 강도에 미치는 영향,” 한국콘크리트학회논문집, 제6권 1호, 1994. 2, pp.131~133.
2. 권오현, 구동희, “프랙탈 특성 해석의 파괴역학적 적용,” 한국산업안전학회지, 제13권 4호, 1998. 12, pp.71~73.
3. 권오현, 윤유성, “프랙탈 차원을 이용한 균열진전거동의 평가에 관한 연구,” 부경대학교논문집, 제3권 2호, pp.155~156.
4. 원종필, 박찬기, “콘크리트의 초기 균열 제어를 위한 특수 가공된 셀룰로오스섬유의 적용에 관한 연구,” 대한토목학회논문집, 제20권 2-A호, 2000. 3, pp.311~319.
5. 조석수, 주원식, “프랙탈 차원을 이용한 재료손상의 자기상사성에 관한 연구,” 동아대학교부설 생산기술연구소 연구논문집, 제4권 1호, 1999, pp.7~10.
6. 전재홍, 신명철, “재료파괴의 프랙탈적 해석,” 대한 금속학회지, 1995, Vol.33, No.2, pp.276~279.
7. Carpinteri, A. and Chiaia, B., “Multifractal Scaling Law for the Fracture Energy Variation of Concrete Structures,” *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, Proceedings FRAMCOS-2, 1995, pp.581~596.
8. Mandelbrot, B. B., “*The Fractal Geometry of Nature*,” W. H. Freeman and Co., New York, 1982.
9. Lange, David A., Hamlin, M. Jennings, and Shah, Surendra P., “Relationship between Fracture Surface Roughness and Fracture Behavior of

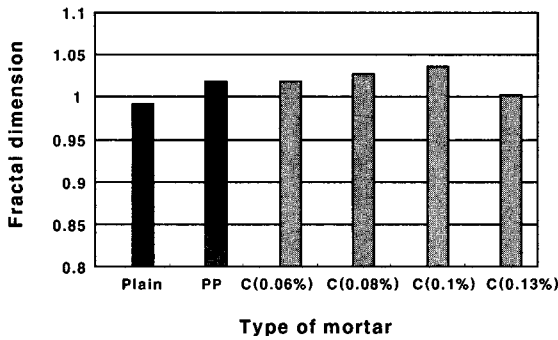


Fig. 8 Fractal dimension

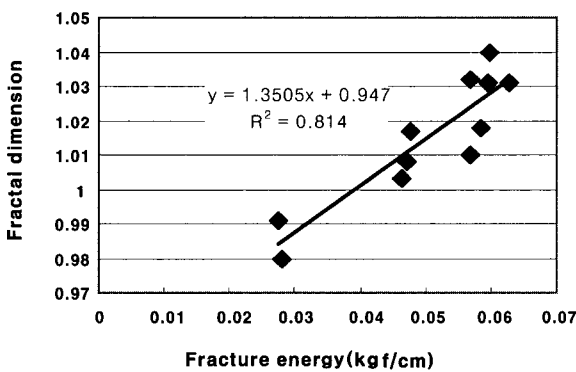


Fig. 9 Correlation between fractal dimension and fracture energy

Table 8 Correlations between fractal dimension and fracture energy

Type of mortar	Fractal dimension		$G_f$ ( $\times 10^{-2}$ kgf/cm)	
Plain	0.991	mean	2.74	mean
	0.980		2.79	
	1.005	0.992	3.33	2.95
PP(0.1%)	1.007	mean	5.63	mean
	1.040		5.97	
	1.010	1.019	5.69	5.76
Cellulose	0.06%	mean	4.77	mean
			4.83	
		0.993	1.019	4.65
	0.08%	mean	5.85	mean
			6.28	
		1.031	1.027	5.96
	0.1%	mean	5.68	mean
			5.89	
		1.053	1.036	5.77
	0.13%	mean	4.64	mean
			4.53	
		1.008	1.002	4.70

Cement Paste and Mortar," *Journal of American Ceramic Society*, Vol.76, No.3, 1993, pp.589~597.

10. Saouma, Victor E. and Barton, Christopher C. "Fractals, Fractures and Size Effects in Concrete," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.120, No.4,

April, 1994, pp.835~854.

11. Bazant, Zdenek P. and Planas, Jaime, "Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials," CRC Press, 1998, pp.480~487.

---

## 요 약

프랙탈 기하학은 재료의 파괴거동과 같은 자연계에 존재하는 불규칙한 현상을 비정수의 프랙탈 차원으로 정량화할 수 있다. 이런 프랙탈 차원에 기초하면 프랙탈 도형은 도형의 일부를 확대하면 전체와 같아지는 자기상사성 특성을 지닌다. 프랙탈적 해석방법을 시멘트 복합체의 파괴시의 균열성장거동에 적용하여 복합체의 미세구조와 파괴거동과의 관계를 알아볼 수 있다.

본 연구의 목적은 시멘트 복합체의 파괴시 소산되는 에너지와 균열의 프랙탈 차원과의 관계를 알아보는 데 있다. 시멘트 복합체의 파괴실험을 실시하여 파괴에너지를 측정 후, 파괴시 형성된 균열형상의 프랙탈 차원을 박스계수법을 통해 산정하고 그 관계를 알아보았다. 실험결과 프랙탈 차원과 파괴에너지의 관계는 비례관계를 나타냈으며 파괴에너지에 대한 프랙탈 차원의 정량적 평가가 가능하다고 사료된다.

**핵심용어 :** 균열개구변위, 시멘트복합체, 프랙탈 차원, 프랙탈 기하, 파괴에너지

---