

프랙탈 이론에 기초한 섬유보강시멘트 복합체의 균열패턴의 정량분석

Quantitative Analysis of Crack Patterns of Fiber Reinforced Cement Composites based on Fractal

원 종 필* 김 성 애**
Won, Jong Pil , Kim, Sung Ae

ABSTRACT

Fractal geometry is a non-Euclidean geometry which has been developed to quantitative analysis irregular or fractional shapes. Fractal dimension of irregular surface has fractal values ranging from 2 to 3 and of irregular line profile has fractal values ranging from 1 to 2. In this paper, quantitative analysis of crack growth patterns during the fracture processing of fiber-reinforced cement composites based on fractal geometry. The fracture behaviors of fiber reinforced mortar beams subjected to three-point loading in flexure. The beams all had a single notch depth, but varying volume fractions of polypropylene, cellulose fibers. The crack growth behaviors, as observed through the image processing system, and the box counting method was used to determine the fractal dimension, D_f . The results showed that the linear correlation exists between fractal dimension and fracture energy of the fiber reinforced cement mortar.

1. 서론

시멘트계 복합체는 인장, 휨강도가 낮고 에너지흡수율이 작은 단점을 가지고 있다. 이런 단점을 개선하는 방법으로 섬유를 혼입하여 취성적인 재료의 성능을 개선하는 방법이 있다. 섬유보강 시멘트 복합체의 중요한 성능은 플레인 매트릭스에 비하여 재료의 파괴시 소산되는 에너지흡수능력이 크다는 것이다. 이러한 재료의 파괴시의 복합체내에서의 섬유의 역할은 균열을 가로지르는 가교작용을 통하여 주변의 매트릭스로 응력을 재분배시켜 응력집중을 억제하며 다중균열을 발생시킨다.^{1,2)} 이런 균열형성에 저항하는 섬유의 역할로 인해 균열은 휘게 됨으로써 균열의 직진성이 재료조직의 불규칙성과 미소균열사이의 상호간섭에 의한 합체에 의하여 상당히 방해받아 균열형태가 매우 불규칙하게 뒤틀리게 된다.²⁾ 섬유보강 시멘트 복합체의 파괴시에 소산되는 파괴에너지와 균열성장거동은 매우 밀접한 관련을 가지고 있다.²⁾ 그러나 기존의 연구에서는 균열을 단순히 물리적인 길이나 밀도로 평가하려는 시도가 대부분이었고, 복잡한 균열의 형

* 정회원, 건국대학교 농공학과 교수

** 정회원, 건국대학교 대학원

태를 정량화하려는 노력은 많이 시도되지 않았다. 이러한 관점에서 프랙탈적인 접근방법은 시멘트 복합체의 균열과 같은 불규칙한 곡선의 형태를 정량화 할 수 있다.^{3,4)}

프랙탈의 개념은 1970년대 후반 만델브로트가 처음으로 제안하여 최근 들어 여러 자연현상에 응용되기 시작했으며, 재료파괴 현상에도 균열형태 및 파단면 양상에 대한 정량적 해석기법으로 도입되기 시작했다. 프랙탈 곡선으로 나타내는 불규칙한 현상은 연속적이면서도 각 지점에서 미분이 불가능한 성질을 지니는 공간 점유특성을 나타내기 위하여 프랙탈 차원이라는 비정수 차원을 도입하여 표현할 수 있다.^{3,4)} 파괴시에 소산되는 파괴에너지는 파괴면의 균열특성과 관련되며, 재료의 역학적 성질과도 연관된다. 따라서 시멘트계 복합체의 파괴시에 역학적 거동은 파단면 및 균열의 프랙탈 특성에 의하여 나타낼 수 있다.

본 연구에서는 섬유보강 시멘트 복합체의 3점 휨시험을 통한 파괴시험을 실시하여 파괴에너지를 결정하고 섬유가 균열을 억제하고 균열성장에 저항함으로 인해 형성되는 복잡한 균열형상을 프랙탈 차원으로 정량화하여 두 변수의 상관관계에 대하여 알아보았다.

2. 프랙탈 기하

2.1 프랙탈 차원

일반적으로 수학, 물리연구에서의 모든 주제는 연속적이며, 선형이며 부드럽다, 그러나 자연계에서 일어나는 현상은 거칠고 불연속적인 형태를 나타낸다. 이론적인 프랙탈의 성질은 다른 스케일에서도 통계적으로 같은 패턴을 나타내는 것이다: 프랙탈 도형을 확대하면 전체형상과 동일한 형상을 나타낸다.⁵⁾

프랙탈 곡선의 총길이는 각 단계에서 4/3배로 증가한다. 따라서 반복횟수가 증가함에 따라 분할갯수 N은 1, 4, 16 ; s=1/S이며, S는 척도계수 1, 3, 9이다; 상응하는 길이는 1, 4/3, 16/9이다. 결국 프랙탈곡선의 길이는 무한하다.⁶⁾

프랙탈 차원 D_f 는 다음식(1)과 같이 나타낼 수 있다.^{6,7)}

$$D_f = \frac{\ln N}{\ln s} = 1.2619 \dots \dots \dots (1)$$

이 식은 다음식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$N = s^{D_f} \dots \dots \dots (2)$$

이러한 예를 통하여 프랙탈 차원 D_f 가 유클리드 차원을 초과한다는 것을 알 수 있다. D_f 가 직선일 때 1, 면은 2이며 곡선의 복잡성이 증가할수록 증가한다. 본 연구에서 사용된 프랙탈 차원의 산정은 박수계수법을 사용하였는데 이것은 여러 가지 크기의 격자를 이미지위에 오버랩시키고, 특정한 형상을 포함하는 격자의 갯수를 구하는 방법이다. 이 때 격자의 갯수와 격자크기의 역수와의 관계식을 로그를 취하여 이중로그 그래프로 나타내었을 때 직선의 기울기가 프랙탈 차원이며 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_f = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log(1/\epsilon)} \dots \dots \dots (3)$$

척도법은 주어진 길이 S의 잣대로 곡선의 전체길이를 결정하는 방법이다. 슬릿-아일랜드법은 앞선 두 방법이 파괴형상 ($1 < D_f < 2$)의 프랙탈 차원을 측정하는데 반해 파괴표면($2 < D_f < 3$)에 적용할 수 있다. 파괴표면의 각각의 다른 높이에서의 형상곡선 L과 그 면적 A를 로그를 위하여 이중로그 그래프로 나타냄으로써 프랙탈 차원이 결정된다.

2.2 프랙탈 차원과 균열패턴의 관계

만델브로트는 측정단위길이와 실측길이 사이의 관계가 프랙탈 차원, D_f 로 나타나는 다음과 같은 프랙탈 식을 발

표하였다.^{3,4)}

$$L(\epsilon) = L_0(\epsilon)^{1-D_f} \dots \dots \dots (4)$$

여기서, L 은 측정되는 불규칙한 실측길이, L_0 는 측정되어 지는 전체의 직선길이, ϵ 는 직선길이 L_0 와의 비이다. 위에 나타난 프랙탈 식은 자연상태의 모든 실측길이에 어떠한 자료 측정되느냐에 따라 다른 값을 나타낼 수 있다는 것을 시사한다. 이식을 섬유보강시멘트 복합체의 파괴시에 형성되는 균열패턴에 적용하여 측정된 균열의 길이와 파면의 직선 길이의 비로 나타낼 수 있다.

3. 파괴실험

3.1 사용재료 및 시편 형태

사용된 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트(Type 1)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. 배합설계는 일반모르타르와 섬유혼입율을 변화시킨 모르타르배합을 사용하였다. 섬유는 폴리프로필렌섬유 0.1%와 셀룰로오스섬유의 혼입율을 0.06%~0.13%로 변화시킨 배합이며, 배합설계는 Table 3과 같다. 본 연구에서는 정적 3점 휨시험을 실시하기 위하여 크기가 30×60×240mm의 직사각형 몰드를 각 배합에 2개씩 2회 반복 제작하였다. 시편의 초기너치와 시편의 깊이비를 0.5로 일정하게 하였다. 시편 제작시 몰드는 강재로 제작하였으며, 24시간 후에 탈형하여 28일 동안 22±3℃에서 수중양생하였다.

3.2 하중재하

정적 3점 휨시험을 실시하기 위하여 5ton 용량의 변위제어 만능재료시험기를 사용하였으며 하중의 재하속도는 0.1mm/min으로 하였다. 균열개구변위를 측정하기 위하여 크랙게이지를 초기너치의 양쪽에 부착하였으며 균열진전거동을 명확히 하기 위하여 균열진전이 예측되는 부분에 흰색 페인트를 칠한 후 실험을 실시하였다. 실험결과는 데이터 수집기를 통하여 하중-균열개구변위 곡선을 얻었으며, 균열개구변위는 0.4mm까지 측정하였다. 실험의 준비상태는 Figure 2와 같다.

4. 이미지 처리 및 프랙탈 차원의 산정

파괴실험 실시 후 시편의 표면에서 성장한 균열에 대한 더욱 자세한 정보를 얻기 위해 높은 해상도의 화상입력장치 시스템인 Sony DSC-F505K 디지털카메라를 사용하였다. 이 시스템은 광학적으로 5배의 배율을 갖고, 해상도는 2,110,000 화소수이다. 시편과 디지털카메라의 측정거리는 100mm로 고정하였다. 디지털카메라에 의해 촬영된 Figure 3과 같은 균열패턴은 (a)와 같은 이미지를 균열패턴을 명확히 구분하기 위하여 (b)와 같이 역상처리한 후 불필요한 부분을 제거하는 (c)와 같은 필터링과정을 거쳐 균열전과정을 명확히 인식하게 된다. 필터링된 이미지는 박수계수법으로 프랙탈 차원을 계산한다. 이 방법은 통계적인 자기닮음의 성질을 갖는 복잡한 형상의 프랙탈 차원을 구할 수 있는 일반적인 방법이다. 필터링된 이미지는 선형으로 크기가 감소된 사각형의 격자로 오버랩시킨 후 상자의 갯수와 상자의 크기를 이중로그 그래프로 나타내어 프랙탈 차원을 결정하였다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 휨강도 및 파괴에너지

섬유를 혼입하지 않은 모르타르와 폴리프로필렌섬유 0.1%와 셀룰로오스섬유의 혼입량을 0.06~0.13%로 변화시킨 섬유보강 모르타르의 휨강도와 파괴에너지 결과는 Table 4과 같다.

Figure 4는 파괴실험시 측정된 하중-균열개구변위 곡선이며 섬유를 혼입하지 않은 모르타르의 경우 극한하중에 도달한 후 급속한 파괴가 일어났으며, 섬유를 혼입하였을 경우 극한하중에 도달한 후에도 지속적으로 하중을 받으면서 천천히 파괴가 진행되었다. 따라서 섬유보강 모르타르내에서 섬유는 재료의 인장강도와 균열에 대한 저항성을 높이고 파괴에너지를 대폭 개선시킬 수 있으며 재료의 강도보다 에너지 흡수능력을 향상시키는 것을 알 수 있다. Figure 5는 모르타르의 휨강도 결과이며 폴리프로필렌섬유를 0.1% 혼입하였을 때 기준배합보다 휨강도가 1.27배 증가하였으며, 셀룰로오스섬유 혼입을 0.06%, 0.08%, 0.1%, 0.13%일 때, 1.16배, 1.40배, 1.20배, 1.10배가 증가하였다.

5.2 프랙탈 차원과 파괴에너지와 관계

섬유의 종류와 혼입율을 달리하였을 때에도 프랙탈 차원은 다르게 나타났다. 섬유보강복합체의 파괴실험으로 얻는 파괴에너지와 프랙탈 차원과의 관계는 Table 5와 같으며, Figure 6과 같은 상관관계를 보여준다. 그림과 같이 균열형상의 프랙탈 차원이 증가함에 따라 파괴에너지도 증가하는 비례관계를 나타내고 있다. 섬유보강 모르타르내에서 섬유는 균열역제 매커니즘에 의해 에너지를 흡수하여 균열형성에 필요한 에너지를 증가시킨다. 또한 이런 섬유의 역할로 인해 매트릭스내에서 성장하는 균열은 회개 됨으로써 균열의 직진성이 재료조직의 불규칙성과 미소 균열사이의 상호간섭에 의한 합체에 의하여 상당히 방해받아 균열형태가 매우 불규칙하게 뒤틀리게 되어 균열의 형태는 매우 복잡해진다. 따라서 섬유보강시멘트 복합체의 파괴시의 균열형태를 프랙탈 차원으로 정량화할 수 있으며, 이는 파괴에너지와도 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다.

6. 결론

3점 휨시험법을 이용한 섬유보강 시멘트 복합체의 파괴시험시에 얻은 시편의 영상을 이미지처리하여 파단면의 2차원적 성질인 균열패턴의 측정이 이루어졌으며, 박스계계수법으로 프랙탈 차원을 산정하였다. 그 결과 일반모르타르에 비하여 섬유보강모르타르의 휨강도 및 파괴에너지가 증가하였으나, 섬유혼입이 일정량을 초과한 경우 휨강도와 파괴에너지가 감소하는 경향을 보였다. 또한 파괴된 시편의 균열형상의 프랙탈 차원과의 관계는 재료의 파괴에너지가 증가함에 따라 프랙탈 차원이 증가하는 비례관계를 나타내었다. 이는 섬유보강시멘트 복합체의 파괴시 섬유는 균열형성과 전파에 저항하는 역할을 하며 그 결과 미세균열과 다중균열이 매트릭스에 발생한다. 따라서 파괴시 검출된 균열패턴은 복잡해지므로 프랙탈 차원이 증가하며, 이는 더욱 안정하게 복합체가 파괴하는 것을 의미한다. 따라서 섬유보강시멘트 복합체의 파괴시의 형성되는 균열형태를 비정수의 프랙탈 차원으로 정량화할 수 있으며, 이는 파괴에너지와 밀접한 관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

참고문헌

1. Zongjin Li, Faming Li, Tse-Yung Paul Chang, and Yiu-Wing Mai, *ACI. Mater. Jour*, 95(1998)
2. Aron Bentur, Sidney Mindess, ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS LTD(1990)
3. C.H. Jeon, S. I. Kwun, M.C. Shin, *J. of the Korean Inst. of Met. & Mater.* 33(1995)
4. B. B. Mandelbrot, W. H. Freeman, San Francisco, CA(1992)
5. E. Charkaluk, M. Bigerelle, A. Iost, *Eng. Frac. Mech*, 61(1998)
6. Victor E. Saouma, Member, ASCE, Christopher C. Barton, *J. of Eng. Mech*, 120(1992)
7. B. Chiaia, J. G. M. van Mier, and A. Vervuurt, *Cem. Concr. Res.* 28, 103-114(1998)

Table 1 Physical properties of cement

Finenes (cm^2/g)	Specific Gravity	Stability (%)	Compressive strength(kgf/cm^2)		
			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 Mixture proportions

Type	Cement (kg/m^3)	Water (kg/m^3)	Sand (kg/m^3)	Fiber Volume Fraction(%)	Superplasticizer (kg/m^3)
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

Table 4 Flexural strength and fracture energy

Matrix	a/H	Curing Age(days)	f_{tu} (kgf/cm^2)			G_f ($\times 10^{-3} \text{kgf}/\text{cm}$)					
Plain	0.5	28	25.97	21.51	26.23	mean	2.74	2.79	3.33	mean	
						24.57				2.95	
PP(0.1%)	0.5	28	29.27	32.43	31.92	mean	5.63	5.97	5.69	mean	
						31.21				5.76	
Cellulose	0.06%	0.5	28	29.55	31.10	27.21	mean	4.77	4.83	4.65	mean
							28.65				4.75
	0.08%	0.5	28	34.80	35.83	32.29	mean	5.85	6.28	5.96	mean
							34.31				6.03
0.1%	0.5	28	26.95	29.29	31.87	mean	5.68	5.89	5.77	mean	
						29.37				5.78	
0.13%	0.5	28	26.76	26.69	26.79	mean	4.64	4.53	4.70	mean	
						26.75				4.62	

Table 5 Correlations between fractal dimension and fracture energy

Matrix	Fractal dimension			G_f ($\times 10^{-3} \text{kgf}/\text{cm}$)					
Plain	0.991	0.980	1.005	mean	2.74	2.79	3.33	mean	
				0.992				2.95	
PP(0.1%)	1.007	1.040	1.010	mean	5.63	5.97	5.69	mean	
				1.019				5.76	
Cellulose	0.06%	1.017	1.048	0.993	mean	4.77	4.83	4.65	mean
					1.019				4.75
	0.08%	1.018	1.031	1.031	mean	5.85	6.28	5.96	mean
					1.027				6.03
0.1%	1.032	1.053	1.054	mean	5.68	5.89	5.77	mean	
				1.036				5.78	
0.13%	1.003	0.996	1.006	mean	4.64	4.53	4.70	mean	
				1.002				4.62	

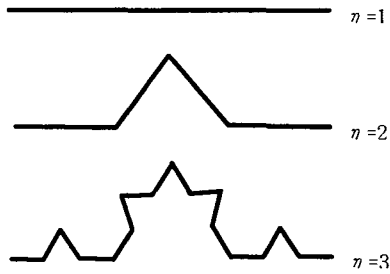


Figure 1 Stages in generation of the triadic koch curve

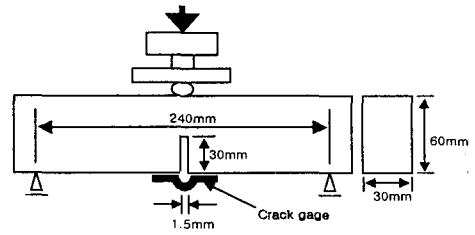
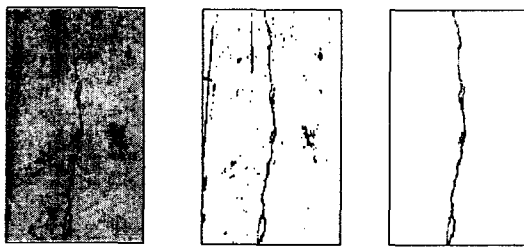


Figure 2 The schematic diagram of test apparatus



(a) Original image (b) Threshold (c) Filtering

Figure 3 Image processing on a crack patterns

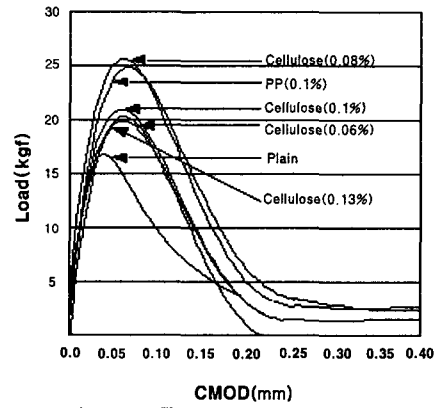


Figure 4 Typical Load-CMOD curve

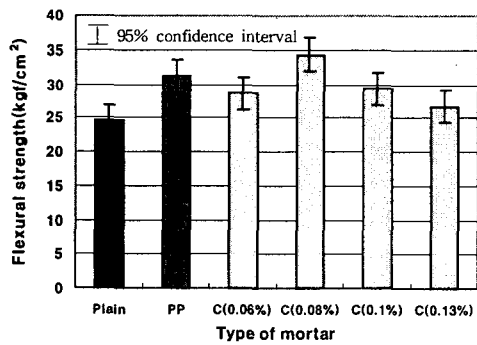


Figure 5 Flexural strength

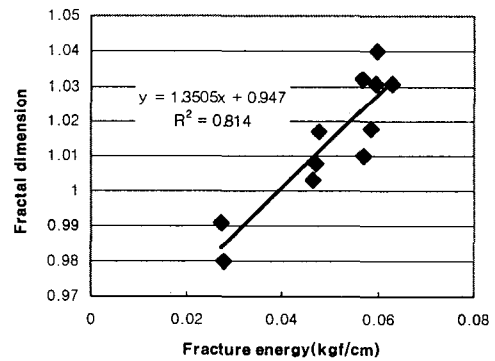


Figure 6 Correlation between fractal dimension and fracture energy