

# 콘크리트 균열에 대한 프랙탈 적용 가능성

## Capability of Application of Fractal with Concrete Crack

구봉근\* 이재범\*\* 류연종\*\* 이현석\*\*

Koo, Bong Kuen Lee, Jae Bum Ryu, Youn Jong Lee, Hyoun Sok

---

### ABSTRACT

Fractal has the self-similar. It's character is used to explain the nature. The crack of the concrete is the nature appearance. So, we use the Fractal explain the character of crack of concrete. Many researchers study the Fractal. I study the many researcher's works and explain possibility of these works. We conducted a function that is the fractal fracture stress and finded some conclusions.

---

#### 1. 서론

카오스(chaos)란 말의 근원은 그리스어 발음으로써 영어로는 '케이오스'라고 발음되는 혼돈이란 뜻의 단어다. 카오스는 한마디로 정의하긴 어렵고 통일된 정의도 없지만, 흔히 걸음으로는 불규칙, 무질서해 보이는 비예측성 현상 속에 일정한 규칙성을 가진 운동을 일컫는 말이다. 다시 말해 '무질서 속의 질서'를 파악하려는 과학이다<sup>1)</sup>. 과학자들은 지금까지 매우 복잡해 보이는 자연현상이라도 숨겨져 있는 근본 원리는 매우 단순할 것이라 생각해 왔다. 이런 생각은 갈릴레오와 뉴튼이래 성공을 거두어 금세기의 중요한 업적인 양자 역학과 아인슈타인의 상대성 이론, 그리고 로렌츠의 카오스 이론을 도출하게 되었다. 위의 이론들을 과학자들은 20세기 과학의 3대 발견이라 부르고 있으며, 과학적으로 매우 중요한 개념을 지닌다<sup>1)</sup>.

그러나, 우리가 자연속의 현상들에 접근 할 때 많은 부분들의 생략과 가정을 통해서 접근하고 있다. 예를 들어 물체의 운동을 기술할 때, 중요성이 작은 것들을 생략하여 단순화된 운동방정식을 세우고,

---

\* 정희원, 충북대학교 토목공학과 교수, 공학박사

\*\* 정희원, 충북대학교 대학원 박사과정

그 방정식을 통해서 그 물체의 미래 상태를 예측한다. 이때 사용되는 방정식이 선형 방정식이며, 무시된 사실들은 주로 비선형적인 항들이다<sup>2)</sup>.

실제 자연계의 많은 자연현상들이 선형 방정식으로는 잘 설명되지 않는다. 물이 끓는 현상, 회오리바람이나 태풍, 갑작스런 전염병의 퍼짐, 특정한 생물의 개체수의 늘어남과 줄어듦 등 기타 많은 현상들은 전혀 이해할 수 없었다. 이런 현상들의 특징은 작용하는 물체의 수가 많고 그들이 매우 복잡하고 불규칙적인 운동을 한다는 점이다. 즉, 이 현상들은 선형이 아니라 비선형적인 방정식들로만 표현될 수 있다는 것이다. Chaos의 특징 중의 하나는 fractal이며, 이는 특이한 형태의 모양과 특이 차원을 가진다는 점이다<sup>1,2)</sup>.

본 연구는 비선형적인 움직임을 가지며, 균열 특성 역시 복잡한 비선형을 나타내는 콘크리트내의 균열성장과 균열의 특성을 fractal로 규명하고자 하였다. 실제 이와 같은 연구는 국내에서는 거의 전무한 상태이며, 국외의 논문들도 많지 않은 형편이다. 1990년대 초반에 연구가 시작되었으며, 아직도 연구가 많이 진행되고 있는 상황이다.

아직 특정한 방법과 특성이 정의되어 있지 않아 기존의 연구들을 비교하고, 콘크리트내에 fractal을 적용한 파괴역학이 어느 정도 진행되고 있는가와 그 적용가능성에 대하여 논하고자 한다.

## 2. 연구경향

지난 20년동안 프랙탈에 관한 연구는 비선형 자연현상에 대한 이해를 위하여 진행되어 왔으며, 일부 과학자들은 그 중 solid의 물리적 역학적 패턴을 연구했다. 실제 고체내 파괴면의 프랙탈 특성에 관한 연구의 선구자는 Mandelbrot이며, Dauskardt, Milman, Mosolov, Saouma, Barton 등이 암석, 세라믹, 콘크리트, 금속내의 균열면내에 존재하는 프랙탈 차원에 대해서 연구했다<sup>3,4,5)</sup>.

Barenblatt, Botvina, Chudnovsky, Wu 등은 균열과 미소균열내에 프랙탈의 특성인 자기 유사성이 존재함을 발견하였다<sup>3)</sup>.

실제적으로, 프랙탈의 차원과 프랙탈 면을 연구하는 목적은 파괴역학에 그 특성을 적용하여 좀 더 정확한 값들의 산출하며, 균열의 진전양상을 추정하기 위해서이다.

파괴역학의 경우, Griffith의 이론에서부터 시작되었다. Griffith의 취성파괴이론은 유리와 같은 완전 취성체에는 적용가능한 것 이었다. Orowan, Irwin 등이 이 이론을 수정하여 강재에도 적용 가능하게 하였다. 특히, Irwin은 응력확대계수(stress intensity factor)  $K$ 와 에너지 해방률(energy release rate)  $G$  라는 개념을 도입하여 균열전단의 응력상태를 나타내고자 하였다. 에너지 해방률  $G$ 의 값이 한계값인  $G_c$ 에 이르게 되면 균열의 진전이 발생한다고 생각하였다. 이는 파괴역학의 두 중요 인자로서 이를 파괴인성(fracture toughness)이라 부른다. 이 파괴인성을 이용하여 콘크리트의 파괴특성을 규명할 수 있다<sup>6)</sup>. 이에 대한 연구는 Bazant와 Shah 등에 의해서 연구가 활발히 진행되고 있다.

### 3. 프랙탈의 적용

콘크리트의 파괴는 취성체와 강재와는 다른 양상을 가지게 된다. 즉, 콘크리트는 준취성체로 분류할 수 있으며, 파괴양상도 취성체와는 다른 양상을 가지게 된다. 취성체가 선형성의 균열선을 가지면서, 동시에 파괴면이 매끈한 반면, 준취성체인 콘크리트는 파괴면이 불규칙하면서 동시에 선형성을 가지지 않는다. 즉, 파괴선 자체가 프랙탈적인 요소를 가지고 있다. 콘크리트의 파괴특성은 좁은 소성영역에도 그 원인이 있다. 균열 자체가 그 소성영역을 따라서 진전이 되기 때문이다.

이런 콘크리트의 프랙탈적인 특성이 바로 균열특성을 프랙탈로 해석할 수 있게 한다.

표 1은 각 재료별 프랙탈 차원을 도시한 것이다.

표 1. 각 재료별 프랙탈 차원

Material	Researcher	Dimension
Concrete	Saouma and Barton	1.04~1.26, 1.071~1.165
Rock	Sakellariou	1.117~1.525
Porcelain	Baran	1.16~1.33
Ceramic	Mecholsky	1.09~1.33
Limestone	Zhao	1.20~1.24
Sandstone	Zhao	1.27~1.33

표 1과 같이 콘크리트는 암석, 세라믹, 석회암, 도자기와 같은 어떤 재료와도 그 값이 같지 않으며, 최소 1.04에서 최대 1.26에 이르고 있다. 따라서, 콘크리트의 균열을 해석하기 위해서는 다른 재료에서 얻어지는 식이 아닌 콘크리트 자체 연구에서 얻어지는 식들을 이용해야 할 것이다.

일반적으로 재료의 프랙탈 차원을 구하는 것은 두 가지 방법이 있다. 실제 실험에서는 간단하고 실험에 쉽게 적용할 수 있는 Box Count 법을 사용한다. 이런 콘크리트의 프랙탈 차원을 파괴역학에 적용하기 위해서는 프랙탈 차원식을 구성하여야 한다.

대부분의 논문에서 the Hausdorff s-measure 식을 자주 사용하고 있다. 그 식은 식 (1)과 같다.

$$m_H(S, s) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \inf \left\{ \sum_{V \in G} (\text{diam } V)^s : S \subseteq \bigcup_{V \in G} V, \text{diam } V \leq \delta \right\} \quad (1)$$

여기서,  $G$ 는 집합  $S$ 의 Cover

$G$ 는  $O$ 의 부분집합이다.

$O$ 는 the totality of open balls

$s \geq 0$

$\delta$ 는 원자반지름

식 (1)을 이용해서 차원을 구하는 식을 찾으면,

$$\dim_H S = D = \inf \{s : m_H(S, s) = 0\} = \sup \{s : m_H(S, s) = \infty\} \quad (2)$$

식 (1), 식 (2)로부터 얻어지는 값들을 파괴역학식에 적용시키면 콘크리트의 파괴시에 발생하는 응력은 식 (3)과 같이 얻어진다.

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2\beta(1+D^*)m_D(\mathcal{L}_0)E_1}{k_1\mathcal{L}_0(1+a/l)}} \cdot (a/\mathcal{L}_0)^{D/2} \quad (3)$$

여기서,  $a$ 는 균열길이

$k_1$ 는 상수

$\beta(D^*)$ 는 specific energy absorbing capacity of a fractal surface

$\mathcal{L}_0$ 는 the length of the measured interval along the straight line

식 (2)와 식 (3)을 이용하면 실험한 콘크리트의 프랙탈 차원과 그 파괴응력을 계산할 수 있다. 이를 통해서 프랙탈이 콘크리트의 파괴에 적용 가능함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

- 1) 콘크리트 파괴에 프랙탈을 적용하는 것이 가능함을 알 수 있었다.
- 2) 프랙탈 기하학 용어의 사용은 특별한 항에서만 적용하여야 한다. 이는 물리적인 차원에서는 자주 사용하지 않기 때문이다.
- 3) 모든 자기상사성(self-similar)과 파괴특성비(scaling properties of fracture)가 프랙탈 기하방법으로 묘사되는 것은 아니다.
- 4) 콘크리트 프랙탈이 수학적으로 해석되고 있는데 물리적 측면에 대한 프랙탈의 적용이 가능하도록 프랙탈의 연구를 지속해야 할 것이다.

#### 참고문헌

1. Gleick, J., "Chaos", 동문사, 1993. 7, pp. 11~19, 45~153.
2. Kellert, S.T., "카오스란 무엇인가?", 범양사출판부, 1995. 3, pp. 19~52.
3. Borodich, F.M., "Some Fractal Models of Fracture", *IUTAM Symposium on Nonlinear Analysis of Fracture*, 3-7 September, 1995, pp. 239~259.
4. Avery, I., Hall, F.R., and Sturgess, C.E.N., "Fractal Modelling of Material", *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, pp. 565~571.
5. Cherepanov, G.P., Balankin, A.S., and Ivanova, V.S., "Fractal Fracture Mechanics-A Review", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 51, No. 6, 1995, pp. 997~1033.
6. 한국콘크리트학회, "최신콘크리트공학", 한국콘크리트학회, 1997. 10, pp. 477~516.