X-ray Computed Tomography를 이용한 콘크리트의 손상파라미터 정량화

Introduction to Qunatification of Damage Parameters for Concrete Using X-ray Computed Tomography

박 대 효* 박 재 민** 안 태 송***
Park, Taehyo Park, Jaemin An, Tae-Song

ABSTRACT

The purpose of this work is to introduce some fundamental stereological concepts to quantify damage parameters using X-ray CT(Computed Tomography) in the scope of CDM(Continuum Damage Mechanics). X-ray CT is a completely nondestructive technique for visualizing features in the interior of opaque solid objects, and for obtaining digital information on their 3D geometries and properties. Many researchers have introduced lots of damage parameters to model the mechanical behavior of deteriorated materials. Those damage parameters can be represented in many forms such as specific void or crack surfaces, the spacing between cracks, the specific damaged surface area, the specific damaged surface area tensor, the mean solid path among the damaged surfaces and the mean solid path tensor. Despite of many accomplishments in CDM since there is no the systematic experiment, it have limitations in application. In this situation, X-ray computed tomography is highlited by many researchers and applied in a wide range of materials including rock, bone, ceramic, metal, soft tissue and concrete.

1. 서론

연속체 손상역학(CDM)은 다양한 크기와 방향으로 불규칙적인 형상을 가지고 분포되어 있는 미시균열에 의해 저화된 재료의 성질, 역학적 거동 그리고 신뢰성 등을 다루는 비교적 새로운 학문분야이다. 재료 본래의 손상과 손상 진전에 의해 야기되는 미시균열에 의한 재료 강성의 저하와 재료 성질의 악화에 대한 모델링을 위해 Kachanov[1]에 의해 스칼라 손상변수가 도입된 이후 여러 손상 변수들이 도입되었다. 내부 손상을 기술하기 위한 내부변수로는 손상 스칼라[1], 손상 벡터[2], 2차 텐서[3,4,5], 4차 텐서[6], 더 높은 짝수 차수 텐서[7] 등이 있다.

미시균열의 분포와 진전 확인을 위한 손상 특성분석 방법으로 Stereological Methods[8], Acoustic

* 정회원, 한양대학교 토목공학과 부교수
** 정회원, 한양대학교 대학원
*** 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원

Emission Test[9], Computerized Digital Image Processing and Analyses[10] 등과 같은 비파괴 특성분석 방법이 이용되어왔고 여전히 발전되고 있다.

본 논문에서는 x-ray CT를 이용하여 콘크리트 내부의 손상을 확인하고 손상파라미터 정량화를 위해 선행되는 이론적 배경이 고찰된다.

2. X-ray Computed Tomography

X-ray CT는 재료 내부의 특징적인 부분의 정확한 위치를 발견하거나, 재료 내부의 미시결함이나 미시균열의 특성 분석을 위해 X선을 재료에 투과하여 탐지기에 저장되는 데이타의 이미지 적층을 통해 재료의 3D 시각화를 재현하기 위한 장치이다. 그림 1은 X-ray CT 이미지 처리 메카니즘의 예시이다. 그림 2는 그림 1과 같은 X-ray CT를 이용하여 시편을 조금씩 회전시키면서 얻어진 2차원 단면의 적층을 통해 얻어진 3차원 렌더링 모습이다.

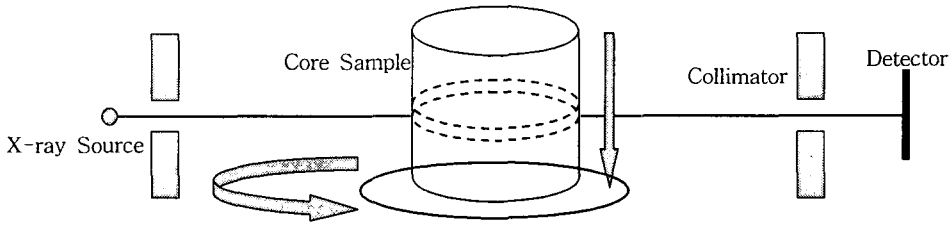

그림 1. X-ray CT 이미지 처리 메카니즘 예시 그림

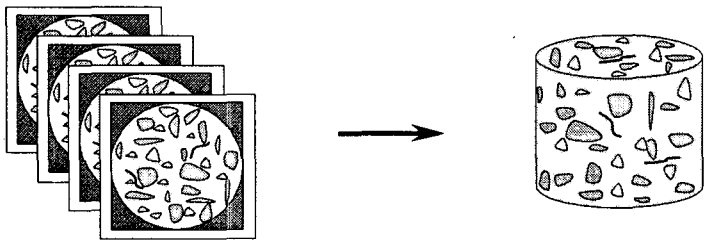

그림 2. 2차원 단면의 적층을 통한 3차원 렌더링

투사기를 통해 다양한 방향으로 여러 경로를 따라 시편을 통과하는 X선의 감쇠가 탐지기에 탐지된다. 재료의 감쇠계수와 관계있는 감쇠는 시편내의 다양한 성분의 공간상 위치를 나타내기 위해 사용된다. 시편을 통과한 데이터들은 감쇠 계수 μ에 대해 최초의 투사 강도 I_0와 최후 강도 I를 연결시키는 식 (1)과 같은 Beer's law를 사용하여 시편에서의 X선 감쇠 차이를 나타내는 이미지로 변경될 수 있다. d는 X선 경로를 따르는 거리 좌표이고 x는 적분상수이다.

$$I = I_0 \cdot \exp \int_0^d [-\mu(x)]\, dx \tag{1}$$

X-ray CT 이미지는 감쇠계수 μ에 대한 값의 공간 분포이고 μ의 값이 커질수록 밝아진다. 감쇠계수 μ는 특정 위치에서의 밀도 ρ, 그 위치에서의 재료를 구성하는 재료의 유효 원자수 Z 그리고 입사하는 X선 빔 에너지 E에 의해 다음과 같은 식으로 구해진다. a는 상대적으로 에너지 의존성이 적은 값이고 b는 상수이다[11].

$$\mu = \rho \cdot \left(a + \frac{bZ^{3.8}}{E^{3.2}} \right) \tag{2}$$

유효 원자수 Z는 다음과 같이 구해진다. f_i는 Z_i의 원자수를 가지는 i번째 요소의 총 전자수의 분율이다.

$$Z^{3.8} = \sum_i \left(f_i [Z_i]^{3.8} \right) \tag{3}$$

3. 입체 해석학적인 이론적 배경

X-ray CT를 이용하여 얻어진 2차원 단면의 정보로부터 3차원 시편 내부의 상태를 알아보기 위해서는 입체해석학 이론이 요구된다. 재료 내부의 공간 분포나 배열 상태 그리고 미시구조적 손상량을 나타내기 위한 도구로써 Buffon 변화과 페브릭 텐서(Fabric tensor)를 이용한 체계적인 접근 방법이 Kanatani[8,12]에 의해 시도되었다. 자동화 해석 기법과 함께 이러한 접근 방식은 효율적으로 손상 변수를 결정하기 위해 사용될 수 있었다. 식 (4)는 Buffon 변환, 식 (5)는 텐서 형태로 표현된 분포함수 그리고 식 (6)은 텐서 형태로 표현된 Buffon 변환이다.

$$N(m) = \int | m \cdot n | f(n)\, dn \tag{4}$$

$$f(n) = \frac{C}{4\pi}\left[1 + D_{ij} n_i n_j + D_{ijkl} n_i n_j n_k n_l + \cdots\right] \tag{5}$$

$$N(m) = \frac{2\pi C}{4\pi}\left[1 + \frac{1}{4} D_{ij} m_i m_j - \frac{1}{24} D_{ijkl} m_i m_j m_k m_l + \cdots\right] \tag{6}$$

여기서, $N(m)$ 은 m 방향으로의 단위 테스팅 라인당 교차점의 수이고 $f(n)$ 은 분포함수를 나타내므로 $f(n)\, dn$ 은 dn 방향으로의 곡선 길이, 표면적 그리고 다른 기하학적 양 등을 나타내는 값으로 정의된다.

식 (7), (8)은 Buffon 역변환을 나타낸다.

$$N(m) = \frac{C}{4\pi}\left[1 + F_{ij} m_i m_j + F_{ijkl} m_i m_j m_k m_l + \cdots\right] \tag{7}$$

$$f(n) = \frac{C/2\pi}{4\pi}\left[1 + 4F_{ij} n_i n_j - 24 F_{ijkl} n_i n_j n_k n_l + \cdots\right] \tag{8}$$

위의 식들에서 D_{ij}, D_{ijkl}, F_{ij}, F_{ijkl} … 등이 페브릭 텐서이고, c는 $c = \int f(n)\, dn$ 으로 정의되는 값이다. 분포함수의 정량화를 위한 일반적인 방법론은 식 (7)을 사용하여 여러 방향에서 관측된 페브릭 텐서 F_{ij}를 추정하고 식 (8)로부터 분포함수를 판단하는 것이다. 만약 분포함수가 이차 페브릭 텐서로 근사된다면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$N(m) = \frac{C}{4\pi}\left[1 + F_{ij} m_i m_j\right] \tag{9}$$

4. 손상 텐서

재료의 변형과 손상의 상태는 유효응력 개념을 적용하여 다음과 같은 식으로 표현된다. $\overline{\sigma_{ij}}$는 유효응력 텐서, σ_{kl}은 Cauchy 응력 텐서, **M**은 선형 변환 연산자로 손상 유효 텐서이다.

$$\overline{\sigma_{ij}} = M_{ijkl}\, \sigma_{kl} \tag{10}$$

M과 손상 텐서와의 관계는 4차 손상 텐서 ψ_{ijkl}와의 관계가 Chaboche, Ju 등에 의해 유도되었지만 2차 손상 텐서 ϕ_{ij}와의 관계보다 물리적인 특성화가 쉽지 않기 때문에[5] Murakami[4]에 의해 다음과 같은 관계가 유도되었다. $\boldsymbol{I}$는 2차 단위 텐서이고 $\boldsymbol{\varphi}$는 2차 손상 텐서이다.

$$\boldsymbol{M} = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{\varphi})^{-1} \tag{11}$$

5. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 콘크리트 내부 손상을 기술하기 위한 손상 파라미터 정량화 방법으로 X-ray computed tomography와 이를 통해 관측된 결과의 수학적 모델링을 위한 입체해석학적 기본 이론이 고찰되었다. 보통 고차

텐서가 사용될수록 표현의 정확성이 높아진다. 그러나, 계산상의 어려움과 2차 텐서만으로도 합리적인 근사가 가능하므로 2차 텐서가 사용된다[5,8,12].

많은 연구자들에 의해 이론적으로 발전되어왔음에도 실제적인 적용성에서 한계를 가지는 CDM은 X-ray CT와 같은 체계적인 실험 방법을 통해 이론과 실험의 일체화된 연구로 보다 발전될 것으로 기대된다. 따라서, 차후 연구에서는 X-ray CT를 이용하여 비손상면적, 손상면 사이의 평균 간극, 손상면적 분율, 결함크기, 평균 고체경로 등의 손상 파라미터들에 대한 정량화 모델링이 시도될 것이다. 그리고, 유효응력 개념에 입각하여 정량화된 손상 파라미터들의 손상 유효 텐서 M_{ijkl}와 이차 손상 텐서 ϕ_{ij}에 대한 영향을 고려하여 손상된 콘크리트에 대한 다음과 같은 구성방정식(Constitutive Equation)이 유도될 것이다. σ_{ij}는 손상된 콘크리트의 응력, E_{ijkl}은 손상된 콘크리트의 강성, ε_{kl}은 손상된 콘크리트의 변형율이다.

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl}\varepsilon_{kl} \tag{12}$$

감사의 글

"이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2002-042-D00116)." 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Kachanov, L.M., "On the creep fracture time," *Izv. adad. Nauk. USSR Otd. Tekh.*, Vol. 8, 1958, pp.26-31.
2. Krajcinovic, D., Fonseka, G.U., "The continuous damage theory of brittle materials," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 48, 1981, pp.809-815.
3. Karihaloo, B.L., Fu, D., "A damage-based constitutive law for plain concrete tension," European Journal of Mechanics-A/Solids, Vol. 8, 1989, pp.373-384.
4. Murakami, S., "Mechanical modeling of material damage," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 55, 1988, pp.280-286.
5. Voyiadjis, G.Z., Park, T., "Anisotropic damage effect tensors for the symmetrization of the effective stress tensor," *Journal of Applied Mechanics*, ASME, Vol. 64, 1997, pp.106-110.
6. Lubarda, V.A., Krajcinovic, D., "Damage tensors and the crack density distribution," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 30, No. 20, 1993, pp.2859-2877.
7. Onat, E.T., Leckie, F.A., "Representation of mechanical behavior in the presence of changing internal integration," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 55, 1988, pp.1-10.
8. Kanatani, K.I., "Stereological determination of structual anisotropy," *International Journal of Engineering Science*, Vol. 22, No. 5, 1984a, pp.531-546.
9. Holcomb, D.J., Costin, L.S., "Detecting damage surfaces in brittle materials using acoustic emission," *Journal of Applied Mechanincs,* Vol. 53, No.3, 1986, pp.536-544.
10. Yue, Z.Q., Chen, S., Tham, L.G. "Finite element modeling of geomaterials using digital image processing," *Computers and Geotechniques*, Vol. 30, 2003, pp.375-397.
11. Wellington, S.L., Vinegar, H.J., "X-ray computerized tomography," *Journal of Petroleum Technology*, 1987, pp.885-898.
12. Kanatani, K.I., "Distribution of directional data and fabric tensors," *International Journal of Engineering Science*, Vol. 22, No. 2, 1984b, pp.149-164.