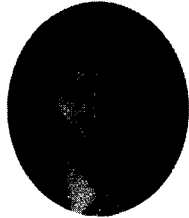


손상역학의 소개



박 대 효*



김 기 두**

국내의 피로파괴 (fatigue fracture)나 파괴역학 (fracture mechanics)과 같은 분야는 많은 발전이 있었으나 손상역학 (damage mechanics) 분야의 발전은 미흡하여 이 분야에 대한 이해를 돕기 위하여 손상역학의 역사적 배경, 용어의 정의, 현재의 연구동향, 손상역학의 적용 및 한계에 대하여 간략히 소개하고자 한다. 이 글에서는 전문 학술적인 내용은 피하였으며 손상역학 분야에 관심이 있는 이들을 위하여 이 글에서 인용된 저자들의 대표적인 문헌들을 중심으로 간략히 소개하였다.

1. 손상의 정의

먼저 손상역학을 설명하기 전에 손상 (damage)의 정의를 간략히 설명하고자 한다. 손상을 물리적 관점으로부터 설명한다면 미세균열에 기인한 표면의 불연속이나 미세동공으로 기인한 체적의 불연속 현상을 손상이라 정의한다. 따라서 손상

이론은 손상 과정의 초기상태로 (치녀상태)부터 마지막 과정 (균열발생) 사이의 현상의 진전을 기술하며 일반적으로 손상역학에서 다루는 균열의 크기의 한계는 금속이나 폴리머의 경우 0.1-1 mm이며 목재의 경우는 10mm 그리고 콘크리트의 경우는 100mm로 이 이상의 크기에 대한 영역은 균열역학 (crack mechanics)에서 다룬다.

2. 역사적 배경

거시적 파괴는 약 1500년경에 레오나르도 다 빈치에 의해 역학적으로 파괴의 특성이 연구되기 시작하여 응력과 변형을 성분의 함수형태로 수많은 파손의 기준들이 파괴를 특성화하기 위해 제안되어져왔다. 그러나 이 파괴에 앞서 수반되는 진행적인 재료의 성질의 악화에 따른 역학적 모형에 대해서 관심을 갖기 시작한 것은 1958년 러시아 역학자 Kachanov¹⁾의 연속 손상변수의

* 정회원·한국해양대학교 토목공학과, 전임강사

** 시설안전기술공단 연구개발실, 부장

도입으로 태동했다. 그러나 1968년에 역시 러시아 역학자인 Rabotnov²⁾에 의한 유효응력의 개념이 도입되기 전까지는 거의 15년간은 연속손상 변수의 개념은 실제적으로 무시되어져왔다. 이 손상역학의 기본적인 발전은 상대적으로 파괴역학의 비약적인 발전을 거듭한 이후 적어도 10년 뒤 1970년대에 들어와서 주로 프랑스 (Lemaitre^{3)-5), Chaboche⁶⁾), 영국 (Leckie⁷⁾), 일본 (Muramami⁸⁾)에서 받아들여 점차 비역행 과정의 열역학적인 뼈대구조로서 일반화되어 연속체 손상역학 (Continuum Damage Mechanics)으로 발전을 하게 되었다. 1980년대에 들어와서 등방성 손상의 개념으로부터 이방성손상이론의 정착과 더불어 이방성 재료에의 손상이론이 적용됨과 또한 많은 수치적인 적용이 유한요소법의 도구를 이용하여 연구되기 시작하였다. 특히 이 분야에서는 Simo⁹⁾의 공헌이 지대하였으나 불행하게도 그는 1994년에 그의 지병인 간암으로 이 세상을 달리했다. 특히 미국에서는 토목공학 분야의 주된 재료인 콘크리트에 대한 손상역학 이론의 적용이 Bazant¹⁰⁾ 나 Krajcinovic¹¹⁾ 등에 의하여 활발히 연구가 이루어지고 있다. 여기서는 손상역학의 열역학적인 내용은 상당히 학술적인 이론들이므로 가급적 생략하고 손상의 현상학적인 관점에서 기본이 되는 사항을 간략하게 설명하였다.}

3. 연속 손상 변수

러시아 역학자 Kachanov는 연속체역학의 뼈대 안에서 손상 (Continuous Damage Variable)의 개념을 소개했다. 손상변수는 다음의 손상의 물리적 뜻을 가지는 무차원의 계량적 표시이다. 손상은 미세규모에서 미세표면 또는 미소체적의 불연속의 기준으로서 설명될 수 있다. 이는 다시 중간규모 (Mesoscale)에서 깨진 결합의 수나 미세동공의 형태는 이 모든 결합의 교차하는 면적에 의해 근사화 할 수 있다. 예로서 이 손상 변수를 정의하기 위해 손상된 물체로부터 대표적인 체적 요소를 고려해보자. 이 체적요소의 어떤 수직 벡터에 의해 정의되는 단면적을 A 라하면 이면에 손상을 구성하는 균열과 동공들은 각기 다른 형태의 항적들을 남긴다. 여기서 서로 이웃하는 결

합사이의 상호작용과 기하학적인 불연속의 이웃 안에서 응력집중에 기인하는 이러한 항적 (trace)의 면적을 고려한 응력에 저항하는 면적을 유효 면적이라하고 \bar{A} 로 표시하자. 그러면 이 응력집중과 상호작용을 보정하는 결합의 흔적의 총 면적 A^D 가 $A - \bar{A}$ 로서 구해진다. 이로부터 손상변수는 스칼라량으로 $\phi = \frac{A^D}{A}$ 로 정의된다. 따라서 물리적 관점에서는 이 손상 변수는 수직벡터에 의해 결정된 단면적의 균열과 동공의 상대적인 또는 보정된 면적으로 볼 수 있고 수학적 관점으로는 손상변수는 불연속의 표면밀도라 할 수 있다. 이 정의로부터 스칼라양인 손상변수 ϕ 는 고려되는 방향과 점에 비독립적이며 0과 1사이의 값에 제한된다. 예로서 $\phi=0$ 는 대표체적 (RVE)의 비손상 상태에 해당하고 $\phi=1$ 는 대표체적이 완전하게 깨어져 두 부분으로 된 상태에 해당한다. 그러나 실제적으로는 $\phi < 1$ 인 상태에서 재료의 불안정 과정을 통하여 파손이 일어난다.

4. 유효응력

재료의 불연속의 표면적 밀도를 나타내는 손상 변수의 소개는 직접적으로 유효응력의 개념으로 이른다. 즉 하중에 유효하게 저항하는 단면에 의해 계산되어지는 응력으로 정의된다.

예로서 일축력의 경우에 P 라는 하중이 대표체적 (RVE)의 단면에 가해지면 일반적으로 평형방정식을 만족하는 응력 $\sigma = P/A$ 가 정의된다. 비슷하게 이 하중이 순수효 면적에 의해 저항된다면 유효응력은 다음과 같이 $\bar{\sigma} = P/\bar{A}$ 로 정의된다. 순수효단면적을 손상변수를 이용하면 다음과 같이 $\bar{A} = A(1 - \phi)$ 로 나타낼 수 있으며 이 관계를 이용하면 유효응력은 다시 다음과 같이 $\bar{\sigma} = \frac{1}{(1 - \phi)}\sigma$ 로 표시할 수 있다. 이로부터 명백하게 $\bar{\sigma} \geq \sigma$ 이며 비손상인 경우에는 $\bar{\sigma} = \sigma$ 가 성립하고 파괴순간에는 유효응력은 $\bar{\sigma}$ 는 무한대에 접근한다.

5. 한계 손상 변수

유효응력의 개념을 원자상호간의 결합의 상실에 의한 파괴의 순간에 적용하면 한계 손상 변수

를 이 현상의 발생에 일치하는 것으로 정의할 수 있다. 만약 결합의 상실에 의한 파괴시의 일축응력을 $\bar{\sigma}_u$ 라하고 σ_u 를 통상 극한 파괴응력이라 하면 한계손상 변수는 다음과 같이 $\phi_c = 1 - \frac{\sigma_u}{\bar{\sigma}_u}$ 로 정의 될 수 있다. 고체물리학은 $\bar{\sigma}_u$ 의 값의 크기 범위를 $\bar{E}/50 - \bar{E}/20$ 로 보여주며 일반적인 고체의 σ_u 는 $\bar{E}/100 - \bar{E}/250$ 정도 범위의 값을 갖는다고 보면 한계손상변수의 값의 범위는 0.5 - 0.9 정도가 된다. 여기서 \bar{E} 는 손상되지 않은 Young의 계수이다. 이론적으로 순수 취성재료의 한계손상 변수의 값은 0으로 나타내며 순수 연성재료의 한계손상계수는 1로 나타낸다. 그러나 어떠한 재료도 이상적인 순수 취성재료나 순수 연성재료일수는 없는 것이 자명한 사실이다.

7. 손상의 측정

손상을 직접적으로 측정이 용이한 것은 아니다. 손상의 계량적인 평가는 어떠한 물리적인 값과 같이 현상을 표현하기 위해서 택해진 변수의 정의에 관계한다. 손상의 측정은 손상역학에서의 두 개의 가설들 즉 변형률 증가의 가설 또는 보상 탄성 에너지 증가의 가설 중 하나와 연계된 유효응력의 개념을 기초로 한 정의를 가지고서 변형과 손상 사이의 결합과 본질적으로 연관되어있다. 가장 간단한 측정 예로서 탄성계수의 변화를 정적 시험에 의해 측정하여 손상변수를 채택된 두 개의 가설에 따라 다음과 같이 간접적으로 두 가지 형태로 나타낼 수 있다. 첫 번째로 변형률 증가의 가설을 채택한 경우에는 손상변수는 다음의 수식 $\phi = 1 - (E/\bar{E})$ 로 측정할 수 있으며 두 번째로 보상 탄성 에너지 증가의 가설을 채택한 경우에는 $\phi = 1 - \sqrt{(E/\bar{E})}$ 로 손상변수의 값을 간접적으로 나타낼 수 있다. 여기서 E 는 손상된 Young의 계수이다.

8. 손상역학의 두 가지 가설

손상된 재료의 변형거동은 유효응력의 개념과 함께 아래 두 개의 가설중 하나에 의해 설명되어진다

8.1 변형률 증가의 가설

이 가설은 1971년 프랑스의 Lemaitre⁴⁾에 의한 것으로 재료의 변형거동은 유효응력의 형태 안에서 오직 손상에 의해서만 영향을 받는다는 가정이다. 이를 다시 말하면 손상된 재료의 어떠한 변형거동도 비손상 재료의 구성 법칙에 있는 일반 응력이 유효응력으로 대치되는 것으로 나타낸다는 가설이다. 예로서 손상된 재료의 일축 선형 탄성 법칙은 다음과 같이 $\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{\sigma}{(1-\phi)E}$ 나타낸다. 이것은 모든 서로 다른 거동(탄성, 소성, 점탄소성)들이 손상결합의 표면 밀도에 의해 똑같은 방법으로 영향을 받는다는 가정으로 엄밀하지 못한 가설을 이룬다. 특히나 이 가설의 치명적인 약점은 손상역학의 일반화된 형태에서의 손상 탄성 강성 텐서가 대칭성을 유지 못하는 결과로서 고전 연속체역학을 벗어나는 것이다. 그러한 이유로 이 가설은 초기에 연속체 손상역학의 일반화가 설립되기 전에 주로 채택되었으나 이 가설의 단순성은 손상거동의 이치에 맞고 효율적인 형식주의의 확립을 가능케 했다.

8.2 보상 탄성 에너지 증가의 가설

이 가설은 1981년 프랑스의 Sidoroff¹²⁾에 의한 것으로 변형률 증가의 가설에 의한 약점을 보완하는 가설로서 손상된 재료의 보상(여상, Complementary) 탄성 에너지는 비손상 재료의 보상 탄성 에너지의 형태에서 응력이 유효응력으로 대치되는 것 이외는 같다는 가정이다.

9. 연속체 손상역학의 한계 및 연구개발방향

연속체 손상역학은 열역학의 뼈대 안에서 일반화되어 고전 연속체역학의 형태로 자리잡아가고 있으나 앞에서 언급한 바와 같이 손상된 변형의 거동은 가설에 의해 재료 손상악화를 고려한 손상 강성 텐서에 의해서 간접적으로 나타내어진다. 최근에 들어와서 손상 변형의 거동이 열역학적인 공식화로서 운동학적으로 직접 기술^{13)~15)}되어지고 있으나 아직도 손상역학의 기초개념인 손상 변수(일반화의 경우 손상 텐서)와 유효응력

(일반화의 경우 유효응력텐서)의 관계로서의 체계화가 부족한 실정이다. 이에 본 필자들¹⁰⁾⁻¹⁹⁾은 손상거동의 운동학적 변형거동을 위에 언급한 가설을 이용하지 않고 직접 손상 텐서를 변형장에 도입하여 기술하는 하는 것을 시도했으며 또한 열역학적인 관계에의 체계화에 대한 부분에 관심을 갖고서 연구를 진행중에 있으며 이러한 시도가 결실을 맺을 때 유한요소법을 이용한 손상의 수치 해석이 비약적인 발전을 이룰 것으로 보인다.

참 고 문 헌

1. L. M. Kachanov, On the time to failure under creep conditions (in Russian) *Izv. Akad. Nauk USSR Otd. Tekh. Nauk* 8, pp.26~31 (1958).
2. Y. N. Rabotnov, Creep rupture, in *Applied Mechanics Conf.* (edited by M. Hetenyi and H. Vincenti), Stanford University, 1968, pp.342~349.
3. J. Lemaitre, Evaluation of dissipation and damage in metals submitted to dynamic loading, *Proc. I.C.M. 1*, Kyoto, Japan, 1971.
4. J. Lemaitre, *A course on damage Mechanics*, Springer-Verlag, 1992.
5. J. Lemaitre and J. L. Chaboche, *Mechanics of solid materials*, Cambridge University Press, 1990.
6. J. L. Chaboche, Une loi differentielle d'endommagement de fatigue avec cumulation non lineaire, *revue Francaise de mechnique*, No. 50-51, 1974.
7. F. Leckie and D. Hayhurst, Creep rupture of structures, *Proceedings of R. Soc., London A*, Vol 240, 1974, p.323.
8. S. Murakami and N. Ohno, Creep damage analysis in thin-walled tubes, Inelastic behavior of pressure vessel and piping components, PVP-PB-028, ASME, New York, 1978, pp.55~69.
9. J. C. Simo and J. W. Ju, Strain- and stress based continuum damage models-II. computational aspects, *Int. J. Solids Structures* Vol. 23, No. 7, pp.841~869, 1987.
10. Z. P. Bazant, *Fracture and damage in quasibrittle structures*, E & FN SPON, 1994
11. D. Krajcinovic, *Damage Mechanics*, North-Holland, 1996.
12. F. Sidoroff, Description of anisotropic damage application to elasticity, in *IUTAM Colloquim on Physical Nonlinearities in Structural Analysis*, pp.237~244, Springer-Verlag, 1981.
13. Th. Lehmann, Thermodynamical foundations of large inelastic deformations of solids bodies including damage, *Int. J. Plasticity*, Vol. 7, pp.79~98, 1991.
14. H. M. Zbib, On the mechnics of large inelastic deformations: kinematics and constitutive modeling, *Acta Mechanica*, Vol. 96, pp.119~138, 1993.
15. V. A. Lubarda and D. Krajcinovic, Some fundamental issues in rate theory of damage-elastoplasticity, *Int. J. Plasticity*, Vol. 11, pp.763~797, 1995.
16. G. Z. Voyiadjis, and T. Park, Anisotropic damage effect tensors for the symmetrization of effective stress tensor," *ASME J. Applied Mechanics*, Vol. 64, No. 1, 1997, pp.106~110.
17. T. Park and G. Z. Voyiadjis, Kinematic description of damage, *ASME J. Applied Mechanics*, Vol. 65, No. 1, 1998, pp.93~98.
18. 박대효, 김기두, The kinematics of damage for elasto-plastic large deformation," *강구조학회 논문집*, Vol. 9, No. 3, 1997, pp.401~419.
19. G. Z. Voyiadjis, and T. Park, The kinematics of damage for finite-strain elasto-plastic solids, *Int. J. Engineering Science* 