

등방성손상을 고려한 탄소성 대변형 문제의 유한요소해석(제1보) - 탄소성 손상 구성방정식 개발 -

노인식
충남대학교 공과대학

Finite Element Analysis of Elasto-Plastic Large Deformation considering the Isotropic Damage (the 1st Report) - Development of Elasto-Plastic Damage Constitutive Model -

IN SIK NHO

Dapt. of Naval Architectare and Ocean Engincering, Chungnam National University, Daejon 305-764, Korea

KEY WORDS: Continuum damage mechanics 연속체 손상 역학, Isotropic damage 등방성 손상, State variables 상태 변수, Thermodynamic approach 열역학적 정식화, Plastic damage flow rule 소성 손상 유동법칙, Damage evolution equation 손상 발전식

ABSTRACT: In this paper, a new constitutive model for ductile materials was proposed. This model can describe the material degradation due to the evolution of isotropic damage during elasto-platic deformation. The plastic flow rule was derived under the framework of thermodynamic approach of continuum damage mechanics (CDM) in which plastic strain, hardening parameters and isotropic damage were taken as thermodynamic state variables. And the process to determine material constants for constitutive model using an experimental data was presented.

1. 서 론

구조설계의 최적화를 위해서는 구조강도와 내하능력의 정밀한 평가가 우선되어야 한다. 따라서 구성부재의 손상발생 가능성과 손상진전 과정에 대한 정확한 판단을 바탕으로 하여 재료의 허용손상 범위에 대한 합리적인 설계기준이 마련되어야 할 것이다.

최근까지 재료가 하중을 받고 내부적인 손상이 누적되어 마침내 파단에 이르게되는 일련의 과정을 이론적으로 설명하기 위해서 전위(dislocation)이론 등 재료과학적 측면과 실제 구조물의 거동예측에 적용하기 위한 거시적인 접근방법으로서 점소성이론 또는 파괴역학 등 역학적인 측면에서의 연구들이 상당한 진전을 보이고 있다. 그러나 현재까지 개발되어 사용되고 있는 현상학적 모형들의 공통적인 문제점으로 지적될 수 있는 것은 하중을 받고 있는 재료 내부에서 손상을 입지 않은 부분(virgin material)과 이미 손상이 발생된 부분을 구분하여 처리할 수 없을 뿐 아니라 손상의 정도 즉 미소공동이나 미소균열의 생성으로 인하여 야기되는 재료자체의 약화현상을 표현하기는 더욱 어렵다는 점이다.

최근에는 Truesdell의 구성방정식의 열역학적 정식화 과정에 Kachanov(1958)에 의해 제안된 연속체손상역학(CDM, continuum damage mechanics)을 접목함으로써 손상을 변형률과 마찬가지로 재료거동의 이력을 나타내는 고유의 상태변수로 처리할 수

있는 구성방정식의 개발에 관한 연구가 시도되고 있다. 연속체 손상역학에서는 일정부위에 분포된 미소결합들의 평균적인 밀도를 손상이라는 내부변수로 간주함으로써 재료의 비선형 거동을 거시적인 관점에서 합리적으로 표현할 수 있다. 1980년대 이후 이를 바탕으로 하여 연성재료의 저사이클피로, 콘크리트, 암석, 빙과 같은 취성재료의 파괴 등 다양한 재료손상문제의 구성방정식에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 연속체 손상역학에서는 재료의 파손현상이 미세조직(micro-structure)수준에서 발생하는 공동(void), 미소균열 등 미소결합들의 생성 및 발전과 깊은 연관이 있다는 사실을 바탕으로 하여 개개결합들의 형상에 구애받지 않고 어떤 일정부위에 분포된 미세 결합들의 평균적인 밀도를 손상이라는 상태변수로 고려함으로써 재료의 비선형 거동을 거시적인 연속체역학의 관점에서 보다 효과적으로 표현할 수 있으며 최종적으로 강성을 완전히 잃게 되는 시점까지도 예측가능하기 때문에 앞으로 구조공학 분야에 광범위하게 적용 가능할 것으로 예측된다.

저자 등은 이미 구조물의 소성변형 과정에서 발생하는 재료 자체의 손상을 고려할 수 있는 좀더 합리적인 구조안전성 평가기법을 개발하기 위하여 이러한 연속체 손상역학 분야의 접근방법에 따라 이방성손상을 포함하는 각 상태변수들의 구성방정식과 소성-손상 유동법칙(plastic-damage flow rule)을 유도한 바 있다. 그러나 2차원 텐서량으로 대표되는 이러한 이방성 손상으로써 정식화하는 경우에는 모든 손상상태를 포괄, 일반

화하여 표현할 수 있다는 장점이 있으나 정식화 과정이 너무 복잡하고 구조해석을 위한 전산 프로그램의 작성이 어려울 뿐만 아니라 실험을 통한 재료상수의 결정과정도 매우 까다롭기 때문에 광범위한 분야에 적용하기가 어렵다는 문제점이 있다.

따라서 본 연구에서는 이미 이루어진 연구들을 바탕으로 하여 좀더 손쉽고 폭넓게 적용될 수 있는 등방성 손상을 이용한 탄소성 손상 구성방정식과 유동법칙을 제안하였다. 또한 Chow and Wang(1987, 1988)의 실험결과를 이용하여 이 수치모형의 재료상수들을 도출하고 그 적용성 및 타당성을 검토하였다.

2. 연속체 손상역학

2.1 등방성 손상

Kachanov(1958)는 크리프 변형에서 금속의 손상이 미소공동 발생에 기인하는 것으로 간주하고 이 공동에 의한 유효단면적의 감소비율을 손상변수 정의하여 단축응력 상태의 유효응력(effective stress)과 변형률의 관계식을 Fig. 1 과 같이 표현하였다.

일차원적인 하중상태만을 대상으로 하였기 때문에 손상변수는 손상의 방향성을 고려하지 못하는 스칼라량으로 표시된다. 이때 재료의 응력상태에 따른 손상의 진전속도, 즉 손상발전식(damage evolution equation)은 다루고자 하는 문제에 따라 경험적으로 기본형태를 가정하고 관련 재료상수들을 실험을 통하여 결정하게 된다. 개념적으로 명확하고 다루기가 쉽기 때문에 여러 연구자들에 의해 다양한 문제에 적용되고 있다.

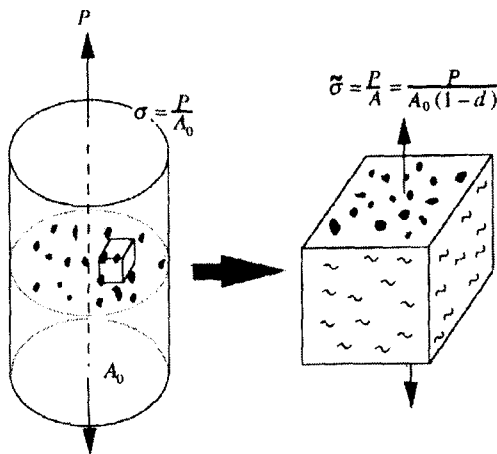


Fig. 1 Concept of isotropic damage model (Kachanov, 1958)

2.2 이방성 손상

일반적으로 재료의 손상은 어떤 방향성을 가진 미소균열 형태로 나타나는 경우가 많으며 취성이 큰 재료일수록 이러한 경향은 더욱 현저하다. 이러한 균열형 결함들은 작용하중의 방향에 따라 거동이 달라지게 된다. 결국 손상을 모든 방향으로 투영면적이 같은 공동으로 간주하는 등방성 손상이론으로는 이러한 손상에 기인하는 이방성 문제를 다룰 수 없기 때문에

취성재료나 다축응력상태 문제에 등방성 손상을 적용하는 것은 합리적이지 못하다는 사실을 쉽게 짐작할 수 있다. 따라서 Vakulenko and Kachanov(1971)는 균열이 존재하는 물체에서 손상변수를 균열의 수직방향 단위벡터와 변위점프(displacement jump)벡터의 다이아드 곱(dyadic product)에 대한 적분량으로 표시되는 텐서 손상(tensor damage)개념을 최초로 도입함으로써 이방성 손상의 가능성을 제시하였다. 이후 손상을 면적과 방향을 가진 벡터로 표시함으로써 취성재료의 파쇄손상(spall damage) 문제에 접근하는 방법이 제안되었으며(Davison and Stevens, 1978; Krajcinovic, 1985) Murakami and Ohno(1981)는 Vakulenko 형 손상텐서에서 변위점프벡터의 방향이 균열의 수직방향 벡터와 일치하는 것으로 간주하여 좀 더 간편한 모델을 제시하였다. 저자 등(Nho et al., 1997; Shin et al., 1997)은 연성재료의 소성손상 문제에 이러한 이방성 손상을 적용하여 일반화된 탄소성손상 구성방정식을 제안한 바 있으며 이 모델을 대변형 유한요소법으로 정식화하였다.

손상을 이와 같이 텐서량으로 일반화하여 표현하는 경우 손상의 물리적 특성을 충분히 구현함으로써 좀더 정확한 해석을 수행할 수 있다는 장점이 있는 반면 정식화의 복잡성, 재료상수 결정을 위한 실험의 어려움 등이 실제 문제에 대한 적용의 문제점으로 지적되고 있다.

3. 탄소성-손상 구성방정식의 정식화

3.1 개요

열역학적 구성방정식의 정식화과정을 등방성손상 문제에 적용하여 탄소성 손상 구성방정식을 유도한다.

(1) 상태변수의 정의

재료의 외부적 변형특성은 내부조직의 미시적 변화 즉, 열역학적 상태에 따라 결정되는 것으로 생각할 수 있고 이러한 내부의 열역학적 상태는 유한개의 독립변수들 즉, 상태변수들(state variables)의 함수로써 근사적 나타낼 수 있다(Lemaitre and Chaboche, 1990). 온도와 연성되지 않는 일반적인 고체역학 문제에서는 내부변수로서 탄, 소성 변형률, 온도 등을 취할 수 있으며 소성 손상변형에서의 에너지 소산 현상을 경화계수, 손상변수 등으로 표현할 수 있다면 결국 에너지 소산 플럭스변수 및 이에 대응하는 공액력들은 Table 1 과 같이 정리된다. 이때 손상변수는 손상발전의 방향성을 고려하지 않는 등방성으로 간주하여 스칼라량으로 표시된다.

Table 1 Dissipation variables in plastic damage problem

Flux variables		Conjugated forces	
plastic strain	ϵ_p	stress	$-\sigma$
kinematic strain	A	back stress	α
effective plastic strain	p	isotropic hard stress	R
isotropic damage	d	energy release rate	Y

(2) 유효응력 및 변형률 증가법칙

Fig. 1 으로부터 실제 재료에 유효하게 작용하는 응력 $\tilde{\sigma}$ 는 유효단면적 감소율을 의미하는 손상변수 d 로부터 다음과 같이 정의된다.

$$\tilde{\sigma} = \phi \sigma, \quad \phi = (1-d)^{-1} \quad (1)$$

정식화의 편의를 위하여 손상의 진전으로 열화된 재료의 거동은 단축응력 문제에서 Kachanov가 제안한 (2)식처럼 3축응력 상태에서도 손상을 받지 않은 원재료(virgine material)의 응력-변형률 관계식에서 응력성분들을 단순히 유효응력으로 대체하는 것만으로 표현 가능하다는 변형률 증가법칙(hypothesis of strain equivalence)을 적용한다.

$$\tilde{\sigma} = C_e : \epsilon_e \quad (2)$$

$$\sigma = (1-d) C_e : \epsilon_e \quad (3)$$

여기서, C_e 는 원재료의 탄성강성텐서이며 전변형률 ϵ 은 탄성변형률 ϵ_e 과 소성변형률 ϵ_p 의 가산분해 형태로 나타낼 수 있다고 가정한다.

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p \quad (4)$$

3.2 열역학적 정식화

(1) 소성 손상 유동법칙

점성효과가 무시될 수 있는 즉발적인 소성변형만을 고려한다면 에너지소산을 나타내는 플릭스 변수들의 발전식은 F 라는 등포텐셜곡면함수(equipotential surface function)에 대한 미분치와 $\dot{\lambda}$ 이라는 승수의 곱으로 표현 가능하다(Lemaitre and Chaboche, 1990). 이때, F 는 소성과 손상관련 변수들을 분리하여 다음과 같은 식으로 나타낼수 있다.

$$F(\sigma, \alpha, R, Y) = F_p(\sigma, \alpha, R) + F_d(Y) \quad (5)$$

또한 재료가 관계소성(associated plasticity)의 특성을 만족하는 경우에는 F_p 를 항복함수 f 와 동일한 함수로 가정할 수 있고 이것으로부터 다음과 같은 소성-손상 유동법칙(plastic-damage flow rule)이 유도된다.

$$\dot{\epsilon}_p = \dot{\lambda} \frac{\partial F_p}{\partial \sigma} = \dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial \sigma} \quad (6)$$

$$-\dot{A} = \dot{\lambda} \frac{\partial F_p}{\partial \alpha} = \dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial \alpha} \quad (7)$$

$$-\dot{p} = \dot{\lambda} \frac{\partial F_p}{\partial R} = \dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial R} \quad (8)$$

$$-\dot{d} = \dot{\lambda} \frac{\partial F_d}{\partial Y} \quad (9)$$

손상된 재료의 항복조건식이 손상을 고려하지 않을 때와 동일한 형태를 유지하며 응력 σ 대신 유효응력 $\tilde{\sigma}$ 의 함수로 표현될 수 있다고 가정한다면 von Mises 의 항복조건식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$f(\tilde{\sigma}, \tilde{\alpha}, \tilde{R}) = \tilde{\sigma}_{eq} - \tilde{R}(p) \quad (10)$$

여기서,

$$\tilde{\sigma}_{eq} = \left[\frac{3}{2} (\tilde{\sigma} - \tilde{\alpha})^D : (\tilde{\sigma} - \tilde{\alpha})^D \right]^{\frac{1}{2}} = \phi \sigma_{eq} \quad (11)$$

$$\tilde{\alpha} = \phi \alpha \quad (12)$$

이며 $()^D$ 는 텐서의 편차성분(deviatoric component)을 의미한다. 수정 Ramberg-Osgood식에 따르면 등방경화계수 R 은 다음과 같이 주어진다.

$$R(p) = \sigma_y (1 + cp)^n \quad (13)$$

$$\tilde{R}(p) = \phi R(p) \quad (14)$$

이때, c, n 은 재료상수이다. (11)-(14)식을 (6)-(8)식에 대입하면 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_p &= \dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial \sigma} = \dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}} \frac{\partial \tilde{\sigma}}{\partial \sigma} = \dot{\lambda} \phi \frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}} = \dot{p} \frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}} \\ &= \frac{3}{2} \dot{\lambda} \frac{\phi}{\sigma_{eq}} (\tilde{\sigma} - \tilde{\alpha}) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \dot{A} &= -\dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial \alpha} = -\dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial \tilde{\alpha}} \frac{\partial \tilde{\alpha}}{\partial \alpha} \\ &= \dot{\epsilon}_p \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \dot{p} &= -\dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial R} \\ &= \dot{\lambda} \phi \end{aligned} \quad (17)$$

여기서, (15)식의 양변을 서로 내적(inner product)한 다음 (17)식을 이용하여 정리하면 등가소성변형률속도 \dot{p} 는 다음과 같이 표시된다.

$$\dot{p} = \dot{\lambda} \phi = \left[\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_p : \dot{\epsilon}_p \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

3.3 응력-변형률속도 관계식

소성변형 및 손상이 발전되기 위해서는 항복함수 f 가 다음의 조건들을 만족해야한다.

$$f(\tilde{\sigma}, \tilde{\alpha}, \tilde{R}) = 0 \quad (19)$$

$$\dot{f} = \frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}} \dot{\tilde{\sigma}} + \frac{\partial f}{\partial \tilde{\alpha}} \dot{\tilde{\alpha}} + \frac{\partial f}{\partial \tilde{R}} \dot{\tilde{R}} = 0 \quad (20)$$

여기서,

$$\frac{\partial f}{\partial \tilde{\alpha}} = -\frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}}, \quad \frac{\partial f}{\partial \tilde{R}} = -1, \quad \dot{\tilde{R}} = -\frac{\partial \tilde{R}}{\partial p} \dot{p} \quad (21)$$

이므로 (20)식은 다음과 같이 변환된다.

$$\frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}} \dot{\tilde{\sigma}} - \frac{\partial f}{\partial \tilde{\alpha}} \dot{\tilde{\alpha}} - \frac{\partial \tilde{R}}{\partial p} \dot{p} = 0 \quad (22)$$

(22)식의 일관조건(consistency condition)으로부터 \dot{p} 이 구해진다.

$$\dot{p} = \left(\frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}} \dot{\tilde{\sigma}} - \frac{\partial f}{\partial \tilde{\alpha}} \dot{\tilde{\alpha}} \right) / \frac{\partial \tilde{R}}{\partial p} \quad (23)$$

(2)식의 양변을 시간에 대하여 미분하여 응력-변형률의 증분을 관계식으로 변환한다.

$$\dot{\tilde{\sigma}} = C_e \dot{\tilde{\epsilon}} = C_e (\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_p) \quad (24)$$

이식의 양변에 $\frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}}$ 를 전승하면 다음식이 도출된다.

$$\frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}} : \dot{\tilde{\sigma}} = \frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}} : C_e : \dot{\epsilon} - \frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}} : C_e : \dot{\epsilon}_p \quad (25)$$

또한, (22)식의 일관조건에 (25)식을 대입하면

$$\frac{\partial R}{\partial p} \dot{p} = \frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}} : C_e : \dot{\epsilon} - \frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}} : \tilde{\alpha} - \frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}} : C_e : \frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}} \dot{p} \quad (26)$$

와 같이 쓸 수 있다. 여기서, 등방경화를 H_I' 와 이동경화를 H_K' 를 다음과 같이 정의한다.

$$\frac{\partial R}{\partial p} \dot{p} = H_I' \dot{p}, \quad \frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}} \tilde{\alpha} = H_K' \dot{p} \quad (27)$$

(27)식을 (26)식에 대입하여 정리하면 (28)식이 도출되며

$$\dot{p} = \frac{\frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}} : C_e : \dot{\epsilon}}{H_I' + H_K' + \frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}} : C_e : \frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}}} \quad (28)$$

(24)식에 (28)식을 대입하면 유효응력과 변형률 증분율간의 관계식이 다음식과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\sigma}} &= \left[C_e - \frac{(C_e : \frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}}) \otimes (\frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}} : C_e)}{H_I' + H_K' + \frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}} : C_e : \frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}}} \right] : \dot{\epsilon} \\ &= C_{ep} : \dot{\epsilon} \end{aligned} \quad (29)$$

(29)식의 유효응력 변화율 $\dot{\tilde{\sigma}}$ 는 (1)식의 양변을 미분하여 다음과 같이 변환한 다음

$$\dot{\tilde{\sigma}} = \phi \dot{\sigma} + \phi^2 \sigma \dot{d} \quad (30)$$

여기에 (29)식을 대입하여 정리하면 최종적으로 응력-변형률-손상의 증분율에 대한 관계식이 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= (1-d) C_{ep} : \dot{\epsilon} - \frac{\sigma}{(1-d)} \dot{d} \\ &= \tilde{C}_{ep} : \dot{\epsilon} - \tilde{\sigma} \dot{d} \end{aligned} \quad (31)$$

여기서,

$$\tilde{C}_{ep} = (1-d) C_{ep} \quad (32)$$

3.4 손상발전식(Damage evolution equation)

(9)식의 손상포텐셜 F_d 를 Y 에 선형적인 함수의 형태로 가정하면(Lemaitre and Chaboche, 1990) 등방성손상의 진전율 \dot{d} 는 다음식과 같이 정리된다.

$$\dot{d} = -\lambda \frac{\partial F_d}{\partial Y} = -\lambda g(\tilde{\sigma}, d) \quad (33)$$

함수 g 는 손상진전 과정에 있어서의 모든 비선형성은 포괄적으로 표현하게 된다. 손상의 진전율이 법선방향 유효응력의 평균값 σ_m 과 등가응력의 크기에 비례하며 현재 손상크기의 함수로 간주하면 (33)식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{d} = \alpha (\langle \sigma_m \rangle + \sigma_{eq}) \cdot (1-d)^\beta \cdot \dot{p} \quad (34)$$

여기서,

α, β : 재료상수

$$\sigma_m = \frac{1}{3} (\tilde{\sigma}_{11} + \tilde{\sigma}_{22} + \tilde{\sigma}_{33}) \quad (35)$$

$$\langle \sigma_m \rangle = \sigma_m \quad \sigma_m > 0 \text{ 일때}$$

$$= 0 \quad \sigma_m \leq 0 \text{ 일때}$$

4. 재료상수의 결정

연성재료의 소성손상에 관한 연구들은 이미 다수 이루어진 바 있으나 실험결과까지 제시된 경우는 드물다. Chow and Wang(1987, 1988)은 알루미늄 합금 2024-T3 의 단축인장시험을 수행하여 손상이 연성재료의 소성거동에 미치는 영향을 고찰한 바 있으며 저자 등은 이미 이 실험결과를 이용하여 이방성손상 모델을 제안한 바 있다. 본 논문에서도 이 실험결과를 이용하여 등방성손상과 관련된 재료상수들을 구하는 과정을 보였다. 실험과정은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 소성변형시

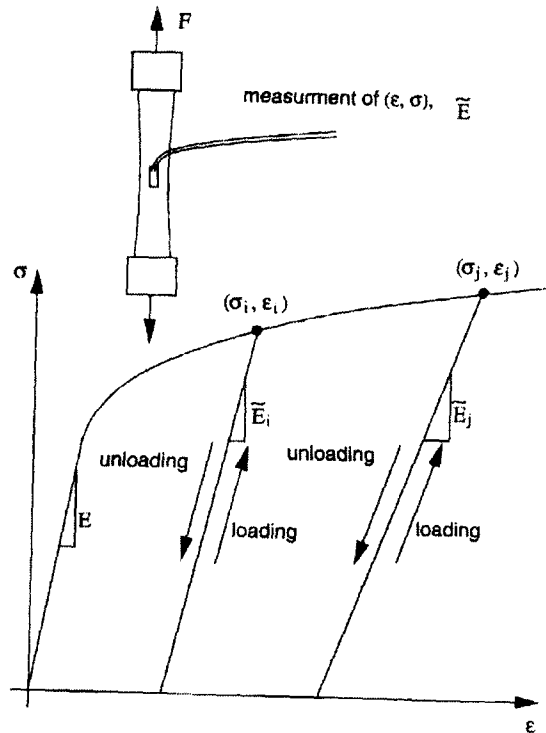


Fig. 2 Measurement process of isotropic damage

부하(loading)와 제하(unloading)과정을 반복하면서 결보기 탄성 계수 \tilde{E} 와 경화곡선을 측정하며 각 변형단계에서 손상변수 d 의 진전량을 다음식으로 부터 추정한다.

$$\begin{aligned} \tilde{E} &= E(1-d) \\ d &= 1 - \frac{\tilde{E}}{E} \end{aligned} \quad (36)$$

단축인장시험(Chow and Wang, 1987)으로 측정된 결보기 탄성계수를 Fig. 3에 보였으며 이 결과를 바탕으로 하여 (36)식으로 부터 계산된 손상변수의 변화를 Fig. 4에 도시하였다. 또한 유효응력과 변형률 간의 경화곡선을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4의 점들을 fitting함으로써 (34)식의 손상발전식과 관련된 재료상수 α, β 값을 결정하였고, Fig. 5로부터 (13)식의 등방경화 관련계수 σ_y, c, n 값들이 Table 2 와 같이 결정된다. Fig. 3, Fig. 4 및 Fig. 5 에서 실선으로 표현된 선들은 바로 이러한 재료상수들을 이용하여 fitting 한 현상학적 모형을 의미한다.

Table 2 Material constants for plastic deformation and isotropic damage evolution model

Material constants	Value
Elastic modulus	E 73600 MPa
Poisson's ratio	ν 0.35
Yield stress	σ_y 350 MPa
Isotropic hardening parameters	c 31
	n 0.36
Damage evolution parameters	α 1.4
	β 11.7

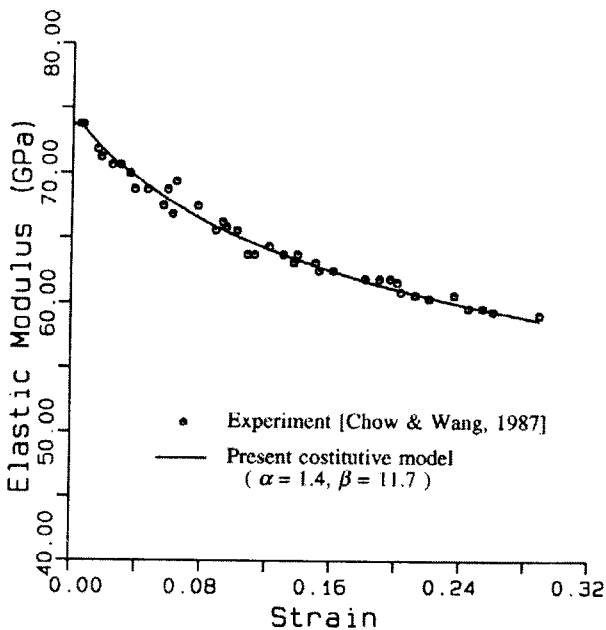


Fig. 3 Variation of effective elastic modulus

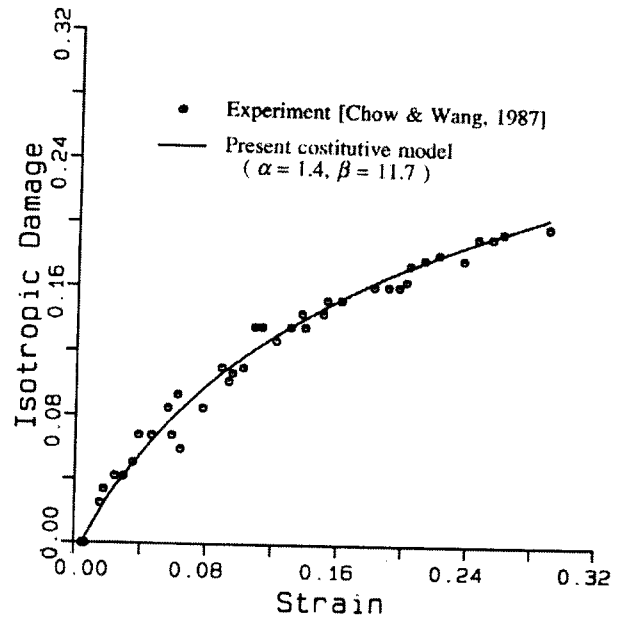


Fig. 4 Evolution of isotropic damage variable

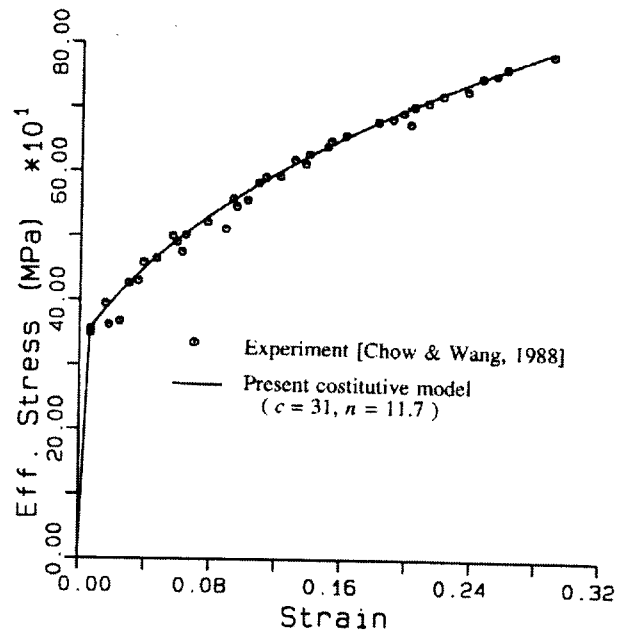


Fig. 5 Hardening curve of effective stress

5. 결 언

본 연구에서는 저자 등이 이미 소개한 바 있는 연속체 손상 역학분야의 연구들을 일반적인 구조공학 문제에 좀더 손쉽게 폭넓게 적용할 수 있도록 등방성 손상을 이용한 탄소성 손상 구성방정식과 유동법칙을 유도하였다. 제안된 구성방정식은 일반적인 탄소성 구성방정식의 기본형태를 그대로 유지하고 있

기 때문에 별다른 어려움 없이 기존의 탄소성해석 프로그램에 포함시킬 수 있다. 기존의 실험결과를 이용하여 이 수치모형의 재료상수들을 도출하는 과정을 보였으며 이 구성방정식 모델이 실험결과를 잘 표현할 수 있음을 확인하였다.

이어지는 제2보에서는 이 등방성 손상 탄소성 구성방정식을 이용한 경계치 문제를 해석하기 위하여 대변형 유한요소해석을 시도하였다. 차후 이러한 연속체 손상역학을 응용한 재료의 탄소성 손상해석 기법에 대한 타당성 검토와 적용분야의 다양화를 위한 실험분야의 연구가 보충되어야 할 것이다.

후 기

본 논문은 1997년도 교육부의 기계공학분야 학술연구조성비를 지원 받아 수행된 연구결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

- Chow, C. L., and Wang, J.(1987). "An Anisotropic Theory of Continuum Damage Mechanics for Ductile Fracture", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 27, pp 547~558.
- Chow, C. L., and Wang, J.(1988). "A Finite Element Analysis of Continuum Damage Mechanics for Ductile Fracture", *International Journal of Fracture*, Vol. 38, pp 3~16.
- Davison, L., and Stevens, A. L.(1973). "Thermomechanical Constitution of Spalling Elastic Bodies", *Journal of Applied Physics*, Vol. 44, pp 668~674.
- Kachanov, L. M.(1958). "Time of the Rupture Process under Creep Conditions", *Izv. AN SSSR., Otd. Tekh. Nauk.*, No. 8, pp 26~31 (in Russian).
- Kim, S. J., and Oden, J. T.(1988). "A Note on the Numerical Analysis of Material Damage based on the Theory of Materials of Type-N", *Computers and Mathematics with Applications*, Vol. 15, No. 3, pp 169~174.
- Krajcinovic, D.(1985). "Continuous Damage Mechanics Revisited: Basic Concepts and Definitions", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 52, pp 829~834.
- Lemaitre, J.(1984). "How to use Damage Mechanics", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 80, pp 233~245.
- Lemaitre, J.(1985). "A Continuous Damage Mechanics Model for Ductile Fracture", *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 107, pp 83~89.
- Lemaitre, J. and Chaboche, J. L.(1990). *Mechanics of Solid Material*, Cambridge University Press.
- Murakami, S., and Ohno, N.(1981). "A Continuum Theory of Creep and Creep Damage", 3rd IUTAM Symposium on Creep in Structures, eds., A.R.S. Ponter and D. R. Hayhurst, Springer-Verlag, pp 422~444.
- Nho, I. S., Shin, J. G. and Yim, S. J.(1997). "A finite element approach to anisotropic damage of ductile materials in large deformations. Part I: An anisotropic ductile elastic-plastic-damage model," *International Journal of Fracture*, Vol. 84, No. 3.
- Shin, J. G., Nho, I. S. and Yim, S. J.(1997). "A finite element approach to anisotropic damage of ductile materials in large deformations. Part II: Finite element formulation and applications", *International Journal of Fracture*, Vol. 84, No. 3.
- Vakulenko, A. A., and Kachanov, M. L.(1971). "Continual Theory of a Medium with Cracks", *Izv. AN SSSR., Mekhanika Tverdogo Tela*, Vol. 6, pp 159~166, (*Mechanics of Solids*, pp 145~151, translated from Russian).

1999년 9월 7일 원고 접수

2000년 5월 4일 수정본 채택