

노치시편을 이용한 연성파괴이론 상수 결정

김상우[#] · 권용철¹ · 권용남¹ · 이영선¹ · 이정환¹

Determination of ductile fracture parameters by notched specimen test

S. W. Kim[#], Y. C. Kwon¹, Y. S. Lee¹, Y. N. Kwon¹ and J. H. Lee¹

Abstract

In the last few years, ductile fracture criteria based on various hypotheses have been developed and utilized with FEM to predict forming failure. The accurate deformation analysis by the FEM and the decision of damage parameters are the most important factors in these approaches. In this paper, several conventional integral forms of fracture criteria were introduced and the test method to determine damage parameters by using notched specimen was suggested. Based on the results, damage parameters obtained under the different stress system (tensile and compression) are compared and analyzed.

Key Words : Ductile fracture, FEM, Metal forming

1. 서론

단조, 인발, 압출 등의 다양한 체적성형공정 중 금속소재는 가공경화와 함께 내부적인 손상(damage)을 받게 되며, 소재 내부에 누적된 손상이 한계에 달하게 되면 파단을 유발하게 된다. 따라서 소성가공공정의 설계에 있어 성형공정 중 발생하는 파괴에 대한 명확한 기준확립이 우선적으로 요구된다. 소성변형을 받는 금속소재에 발생하는 파괴는 대부분 연성파괴로서 내부에 발생하는 내부파괴와 외부표면에 발생하는 표면파괴 등 다양한 형태의 파괴양상을 보인다. 이러한 연성파괴가 발생하는 기준을 정립하기 위해 많은 선행 연구자들에 의한 실험적, 이론적 근거를 바탕으로 하는 연성파괴기준들이 제시되어왔다.[1-5] 아울러, 유한요소해석기술의 발전으로 소성가공공정 중 발생하는 복잡한 변형거동해석이 가능해짐에 따라 이들 연성파괴기준과 유한요소법이 접목되어

다양한 파괴현상을 예측하고자 하는 시도가 지속적으로 진행되고 있다.

유한요소법과 연계하여 연성파괴를 예측하는 방법으로는 크게 연속체손상역학(continuum damage mechanics)에 근거하여 내부에 누적되는 손상을 구성방정식에 고려함으로써 손상에 의한 효과를 나타낼 수 있는 방법[1]과 실험적, 이론적 근거에 의해 가정되는 적분형태의 손상지수가 한계치에 달할 때 연성파괴가 발생하는 것으로 예측하는 방법[2-5]이 있다. 전자는 상온 및 온·열간 성형공정의 손상까지 비교적 잘 예측하는 경향을 보이고 있으나, 손상을 포함하는 구성방정식을 구현하기 한 실험적 절차가 복잡하여 제한적으로 이용되고 있는 실정이다. 이에 반해 적분형태의 연성파괴기준은 기존의 구성방정식을 그대로 사용함으로써 가장 간단하게 사용할 수 있으며, 주로 냉간 성형공정에서의 파단예측에 사용되고 있다.

1. 한국기계연구원 소재성형연구센터

교신저자: 한국기계연구원 소재성형연구센터

E-mail: kimsw@kmail.kimm.re.kr

공정 중 발생하는 파괴현상을 예측하기 위해서는 정확한 응력, 변형률 해석과 함께 적용되는 연성파괴 상수의 결정이 주요한 인자이다. 따라서, 본 연구에서는 다양한 형상의 노치(notch)시편의 인장 및 압축실험을 통하여 세 가지 연성파괴이론에 근거한 연성파괴상수를 결정함에 있어 응력상태의 차이에 따른 의존성을 조사하였다.

2. 연성파괴이론

연성파괴를 예측하기 위한 다양한 파괴기준이 제시되어 있으며, 본 연구에서는 최대인장변형에너지밀도(maximum tensile strain energy per unit volume)에 근거한 Cockcroft-Latham의 이론과, 응력삼축도(stress triaxiality)에 근거한 Ayada의 모델 및 기공성장개념에 근거한 McClintock의 모델이 사용되었으며 각각의 이론에 의한 연성파괴조건은 다음과 같다.

? Normalized Cockcroft and Latham [2,3]

$$\int_{\bar{\epsilon}}^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} = C_1 \quad (1)$$

? Ayada et al. [4]

$$\int_{\bar{\epsilon}}^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} = C_3 \quad (2)$$

? McClintock [5]

$$\int_{\bar{\epsilon}}^{\bar{\epsilon}_f} \left[\frac{\sqrt{3}}{2(1-n)} \sinh \left\{ \frac{\sqrt{3}(1-n)}{2} \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{\bar{\sigma}} \right\} + \frac{3}{4} \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\bar{\sigma}} \right] d\bar{\epsilon} = C_2 \quad (3)$$

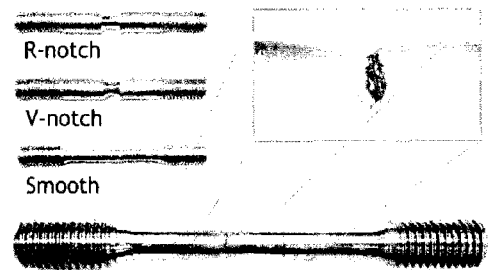
Where, $\bar{\epsilon}$ is fracture equivalent strain, σ_1 is maximum tensile stress, $\bar{\sigma}$ is equivalent stress, σ_m is mean stress, n is strain hardening exponent and C_i are damage parameters

3. 연성파괴상수의 결정

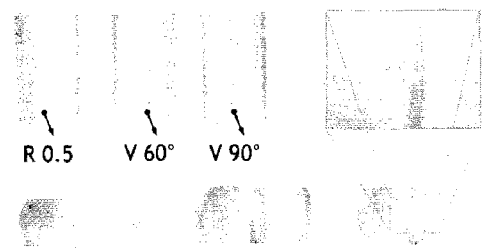
3.1 노치시편을 이용한 인장 및 압축실험

소재는 SCr440, SCM420H, S25C 세 종류의 냉간 성형용 강이 사용되었다. 노치형상에 따른 응력시스템의 차이를 유발하고 이에 대한 상기의 연성파괴 상수들의 의존성을 관찰하기 위해 Fig. 1 파

같이 6 가지 노치형상의 인장 및 압축시편을 제작하였다. 인장시편은 노치가 없는 ASTM 규격 인장시편과 함께 반경 5mm의 반원형 노치, 120°의 v 자형 노치를 사용하였으며, 압축의 경우 반경 0.5mm, v=60°, 90°의 세가지 종류의 노치를 시편의 길이 방향으로 새겼다. 인장시험의 경우 시편이 완전히 파단 될 때까지 실험을 수행하였으며 압축의 경우 시편의 표면에 가시적인 크랙(crack)이 발생할 때까지 실험을 수행하였다. 그 결과 Fig. 1 에서와 같이 인장시험의 경우 규격시편 및 반원형 노치시편에서는 네킹(necking)발생과 함께 소재내부에서 크랙이 발생하여 파단에 이르렀으며, v 자형 노치의 경우 최소단면부의 응력집중에 의한 표면파괴가 발생하여 내부로 진전되었다. 또한 압축실험의 경우 노치의 중심부에서 노치의 길이방향으로 표면 크랙이 발생하였다.



(a) Tensile test specimens



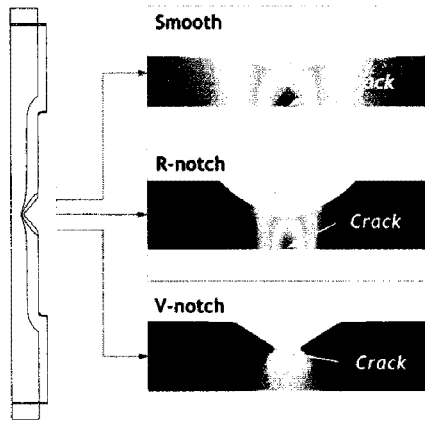
(b) Compression test specimens

Fig.1 Notched specimens for determination of damage parameters

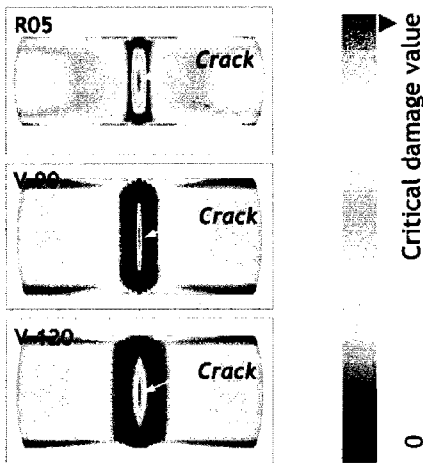
3.2 유한요소성형 해석

상용유한요소 해석 코드인 DEFORM-2,3D™ 을 사용하여 앞서 수행된 인장 및 압축실험에서 크랙이 발생될 때의 최소단면직경 또는 높이 감소율까지 유한요소성형해석을 수행하였으며, 해석으로부터 도출된 응력 및 변형률 정보로부터 식 (1)~(3)의 적분치를 각각 계산하여 연성파괴상수를

결정하였다. Figure 2는 SCr440소재의 유한요소해석 결과 Cockcroft-Latham의 연성파괴기준에 의한 적분치의 분포를 보여주고 있다. 모든 연성파괴조건에서 크랙이 발생한 부위를 동일하게 예측하였으며, 앞선 실험과 일치하는 경향을 보였다.



(a) Tensile test simulation



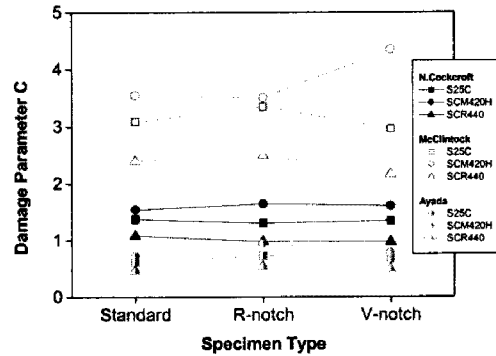
(b) Compression test simulation

Fig. 2 Finite element analysis of tensile and compression tests

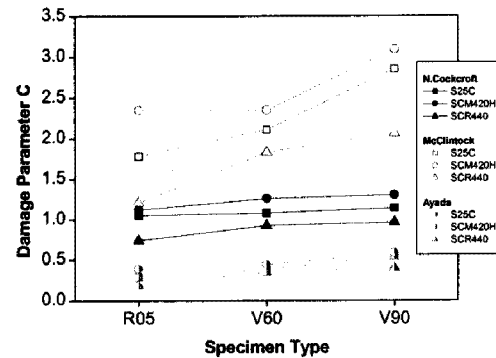
3.3 연성파괴상수 비교분석

실험 및 유한요소해석을 통해 세 가지 소재에 대한 인장 및 압축조건에서의 연성파괴상수를 각각 결정하여 Fig.3에 도시하였다. 우선, 본 연구에서 고려된 모든 연성파괴기준에 있어서 표면파괴가 발생하는 압축의 경우 내부파괴가 발생하는 인장에 비해 비교적 높은 연성파괴상수를 나타내었다. 이는 내부파괴가 주로 발생하는 압축, 인발 등의 성형공정과 표면파괴가 발생하는 단조, 압연 등의 성형공정에서의 연성파괴기준의 적용에 있

어 임계상수를 구하는 실험방법이 달라야 함을 의미한다. 또한 본 연구에서 사용된 세 가지 소재 중 유동응력이 가장 낮은 SCM420H 소재가 동일한 조건하에서 가장 큰 연성파괴상수를 나타냄으로써 세 가지 이론 모두 소재내부에 발생하는 변형에너지가 클수록 파단이 발생하는 임계값은 높아지는 것으로 나타났다.



(a) Tensile test

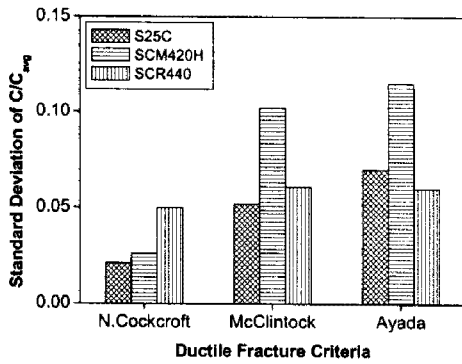


(b) Compression test

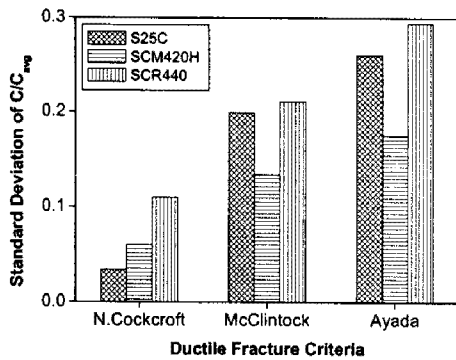
Fig. 3 Determined damage parameters

단순형상 시편의 인장, 압축 실험을 통해 결정된 연성파괴기준이 실제 성형공정 중 발생하는 복잡한 응력 시스템하에서 소재에 발생하는 파괴현상을 정확하게 예측하기 위해서는 다양한 응력 조건하에서 결정된 연성파괴상수 값이 비교적 유사하게 나타나야 한다. 따라서, 본 연구에서는 세 가지 연성파괴이론의 적용가능성을 검토하기 위해 노치형상에 따라 구해진 연성파괴상수(C)를 각각의 평균(C_{avg})으로 나누어 무차원화시키고, 무차원화된 연성파괴상수(C/C_{avg})의 표준편차를 구하여 비교함으로써 시편의 형상에 따른 연성파괴상수의 분산도를 살펴보았다. 우선, Fig. 4에서와 같이 인장실험을 통해 구한 값이 압축실험에 의한 값

보다 분산도가 작은 경향을 보였으며, 이는 압축 시편의 파단기준으로 가지적인 크랙 관찰에 의존한 원인으로 분석된다. 또한 본 연구에서 도입된 세가지 이론 중 인장, 압축 모든 경우에 있어 Cockcroft-Latham 이론에 의한 연성파괴상수가 가장 분산도가 작은 것으로 나타남으로써 다양한 공정에서의 연성파괴를 예측을 위한 기준으로 가장 적합한 것으로 판단된다.



(a) Tensile test



(b) Compression test

Fig.4 Standard deviation of $C/C_{average}$

4. 결론

본 연구에서는 냉간성형용 소재의 연성파괴상수를 결정하기 위해 다양한 형상의 노치시편을 이용하여 인장, 압축 실험 및 유한요소해석을 수행하였으며 이상의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 파괴모드가 상이한 인장 및 압축실험을 통해

결정된 연성파괴상수는 내부파괴가 주로 발생하는 인장실험에 의한 값이 압축에 비해 높게 나타났다.

2) 본 연구에서 도입된 세가지 연성파괴이론은 변형률 에너지, 기공성장모델, 응력삼축도 등 다양한 이론적 및 실험적 근거를 통해 구성되었으나 소재의 유동응력이 낮은 소재일수록 그 임계값이 높게 나타나는 경향을 보였다.

3) 다양한 노치형상의 시편에 대한 연성파괴상수를 결정하여 비교한 결과 본 연구에서 제시된 이론 중 Cockcroft-Latham 의 연성파괴이론이 노치형상에 따른 응력시스템의 차이에 대한 의존성이 가장 낮게 나타남으로써 다양한 성형공정에서의 연성파괴예측을 위해 가장 적합한 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 경남지역산업 중점기술개발사업의 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] J. Lemaitre, 1996, A course on damage mechanics, Springer, Berlin, Heidelberg, Newyork.
- [2] M.G. Cockcroft, D.J. Latham, 1968, Ductility and the workability of metals, J. Inst. Metals, Vol.96, pp33-39.
- [3] S.I. Oh, C.C. Chen and S. Kobayashi, Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing-part 2, Trans. ASME J. of Engineering for Industry, Vol.101, pp.36-44
- [4] T. Ayada, T. Higashino and K. Mori, 1984, Proc. Of 1st ICTP, Advanced Technology of Plasticity 1. pp.553.
- [5] F.A. McClintock, 1968, A criterion for ductile fracture by the growth of holes, Trans. ASME J. Appl. Mech., Vol.17, pp.363.