

연속 인발공정에서 유한요소법을 이용한 Critical Damage Value 의 적용

박동인* · 김병민** · 고대철***

Application of Critical Damage Value to Continuous Drawing Process using FEM

D. I. Park, B. M. Kim, D.C.Ko

Abstract

The occurrence of ductile fracture is the working limit of many metal forming processes. It is necessary to predict the criteria and to apply the condition in a process design. Over the years, the way for clarifying conditions have been studied and presented. However such a way needs lots of experiments and analysis. In this study, in order to determine the critical damage value of a used material Cu 4N, it was performed a tensile test and FEM analysis by using DEFORM 2D. For applying the obtained critical damage value it was also performed a upsetting test by using DEFORM 2D. The way of determining a critical damage value which is presented in this study will make possible to find easily it which is one of the working limit factor. And the way of determining a critical damage value will make possible to find in multi-pass drawing process.

Key Words : Ductile fracture, Critical damage value, FEM, Cockcroft-Latham criteria, multi-pass drawing process, Pass schedule

1. 서론

연성 파괴는 많은 금속성형공정에서 성형성에 대한 한계값을 나타내는 중요한 요소이다. 제품에 연성 파괴가 발생하게 되면 불량으로 처리되며 이에 따른 추가적인 손실도 발생하므로 공정설계 단계에서 이를 예측하여 방지하고자 하는 연구가 많이 수행되었다. 금속성형공정에서 파괴가 일어나는 과정은 기공생성 및 성장과 크랙의 형상으로 되는 발전단계를 가지는 데, 이러한 모델을 근거로 지금까지 수많은 연성파괴의 기준들이 제시되었다. McClintock[1]는 타원기둥모양의 기공이 규칙적으로 배열되어 있는 평면변형 기공성장모델을 가정하여 해석을 하였고 Freudenthal[2]

은 파단으로의 변형에너지가 한계변수라 가정하여 해석하였다. Oyane[3]등은 작은 기공이 있는 재료와 없는 것의 연성파괴의 조건을 공식화하여 한계 체적 변형률이 재료 파단에 이를 때를 가정하여 해석하였으며 Osakada[4]등은 유효 소성변형률에 외연적 의존성을 포함하는 파단조건으로 접근을 제시하였다. 또한 Cockcroft[5]은 소성변형일 이 임계치에 도달하면 파괴가 발생한다는 소성변형 에너지 개념에 근거하여 연성파괴조건을 제안하였다. 이와 같이 수많은 연성파괴 기준들이 제시되었지만 이들 모두 소재에 가해지는 변형이 소재의 변형한계를 초과하게 될 때 파괴가 일어난다는 것에 기준을 두고 있다. 이러한 변형한계는 공정의 종류, 재료, 열처리, 마찰, 개재물의 분포와 양, 소재의 형상, 하중형태 등 많은 변수들

* 부산대학교 精密기계공학과

** 부산대학교 精密정형 및 금형가공연구소

*** 양산대학 자동차과

사이에서 복잡하게 변화하게 된다.

이러한 조건들을 통해 소재의 임계 연성과단값 (Critical damage value)을 구하기 위해서는 수많은 실험과 계산이 요구된다. 본 연구에서는 이러한 많은 파단 기준들이 제시된 후 많은 실험과 계산을 통해 연성과파괴기준으로 적절하다고 언급되고 있는 수정된 Cockcroft-Latham 조건[6]을 사용하여 임계 연성과단 값을 보다 간편하게 구할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 또한, 현재의 연성과단 값의 설정은 주로 옆셋과 같이 단공정 성형에 주로 적용되고 있어 다단공정을 거치는 연속 인발 공정에는 그 적용 방법을 달리해야한다. 따라서, 연속 인발 공정에서 연성과단값을 적용하는 방법에 대해 연구하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 소재의 단순 인장 시험과 강소성 유한요소 해석을 이용하여 임계 연성과단 값을 구하였으며, 구한 값을 기존의 연구결과들과 비교하였다. 또한 연속 인발 공정에도 적용하였다.

2. 이론

2.1 연성과파괴 기준

금속성형공정에서 발생하는 연성과파괴의 예측을 위하여 많은 이론이 제시되어 있으며, 본 연구에서는 식(1)의 수정된 Cockcroft-Latham 의 연성과파괴기준을 이용하였다. 즉,

$$\int_b^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} = C \quad (1)$$

C는 실험으로 결정되는 재료 상수이다.

식(1)은 소재의 전 영역에 대하여 각 요소의 적분점에서 계산되고, 모든 압축응력에 대해서는 영의 값으로 대체된다. 변형경로의 각 스텝에서 계산된 질점속도와 시간증분으로 질점좌표가 변화되고, 유효변형률은 변형경로를 따라 적분된다. 변형경로의 각 스텝에서 응력장과 변형률 장은 연성과파괴의 발생 여부를 판단하기 위해 수정된 Cockcroft-Latham 의 연성과파괴기준을 계산하는데 이용된다. 변형의 전 공정동안 식의 값은 누적되고 이와 같이 누적된 값이 연성과단 값(C)의 값을 초과했을 때 연성과파괴가 일어나는 것으로 고려하였다.

추가로 연성과단 값(C)를 인장시험에서 구할 경우에는 인장시험의 축선 상에서의 인장응력 σ^* 는 Bridgman 방정식으로 다음의 식 (2)와 같이 주어진다.

$$\sigma^* = \bar{\sigma} \left\{ 1 + \ln \left(1 + \frac{a}{2R} \right) \right\} \quad (2)$$

따라서 식(1)은 다음 식(3)과 같이 된다.

$$\int_b^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} = \int_b^{\bar{\epsilon}_f} \left\{ 1 + \ln \left(1 + \frac{a}{2R} \right) \right\} = C \quad (3)$$

3. 인장 시험 및 유한요소해석을 통한 Critical damage value 의 측정

상용 유한요소해석 코드인 DEFORM 2D 를 이용하여 Bridgman 방정식이 적용된 식에서 변수로 주어지는 최소반경 a, 곡률반경 R, 그리고 최대하중, 파단시의 Stroke 를 실제 인장시험 결과와 비교하여 임계 연성과단 값을 구하고자 한다.

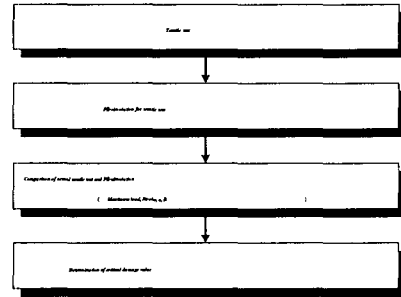


Fig. 1 Procedure for deciding critical damage value

3.1 인장시험

인장시험은 유압식 25ton MTS 로 수행하였으며, 인장 속도는 0.3mm/s 로 하였다. 적용된 소재는 Cu 4N 으로, KD 규격 인장시험편 14 호 원형 비례시험편으로 기계가공하여 인장시험을 수행하였다. Fig. 1 은 연성과단 값을 구하기 위한 절차를 도식적으로 나타낸 그림이다

인장시험 후 얻어진 유동응력식은 아래의 식 (4)과 같다.

$$\bar{\sigma} = 532.02 \bar{\epsilon}^{0.4198} (MPa) \quad (4)$$

3.2 유한요소 해석

앞서 수행된 인장시험을 통해 얻어진 유동응력식과 동일한 인장시험 조건으로 축대칭 1/2 단면에 대한 인장시험을 유한요소 해석을 수행하였다.

재료의 파단은 DEFORM의 옵션중 하나인 각각의 임계 연성 파단 값을 대입하여 시뮬레이션 상에서의 인장 시험 중 재료의 손상이 한계값에 이르렀을 때 요소를 분리시키는 방법을 사용하였다. 유한요소 해석은 소재의 파단에 직접적인 영향을 미치는 손상을 변화시키며 수행하였다.

3.3 실제 인장시험과 유한요소해석 결과의 비교 및 적용

Fig. 2와 Fig.3에 실제 인장시험과 유한요소해석을 수행하여 얻은 하중-스트로크 곡선을 나타내었다. 하중-스트로크 곡선에서 보면 최대하중이 각각 6189N과 6248N으로 차이가 0.9% 정도로 거의 같음을 알 수 있다. 또한 necking부분의 곡률반경은 Fig. 4와 같이 11 정도로 거의 유사한 값을 알 수 있다. 여기서 취한 곡률반경은 파단이 일어나기 직전의 값이다.

이를 바탕으로 기존의 문헌들에서 제시된 Cu의 임계 연성파단 값들의 범위인 1.3 부근의 값들을 DEFORM의 연성파단값에 적용시켜 얻어지는 반경 a와 파단시의 스트로크를 실제 실험값과 비교하였다.

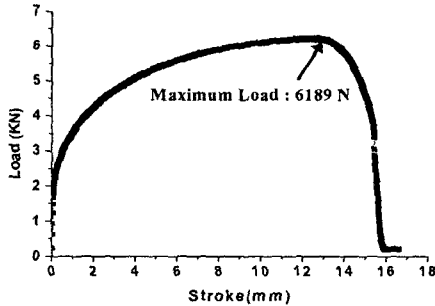


Fig. 2 Load-stroke curve in experimental tensile test

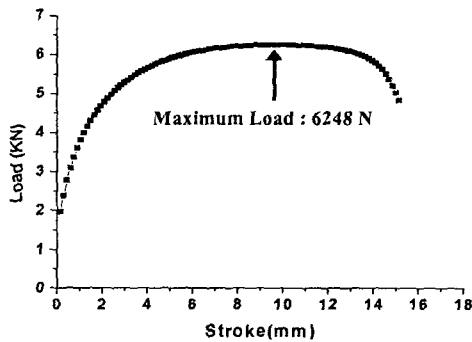


Fig. 3 Load-stroke curve in DEFORM 2D

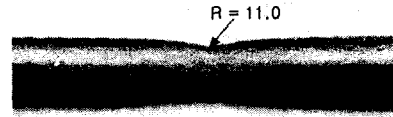


Fig.4 Comparison R of specimen just before fracture in

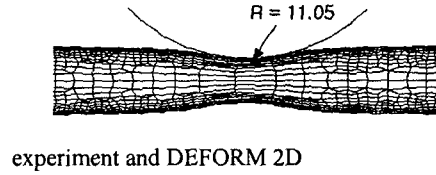


Table 1 Calculation of critical damage value by using interpolation

Damage value	Stroke	반경 a	비고
1.3	15.15mm	1.472mm	Simulation
1.4	15.3mm	1.422mm	Simulation
1.423	15.37mm	1.4mm	Experiment
1.45	15.45mm	1.36mm	Simulation

Table 1은 damage value를 1.3, 1.4, 1.45로 변화시켜 시뮬레이션을 수행하여, 각각의 파단 시 스트로크와 파단직전의 반경 a를 구한 것과 단축인장시험을 통해 얻어진 스트로크와 a의 비교를 통해 임계 파단 값이 계산한 것을 나타낸 것이다. 구하고자 하는 Cu 4N의 임계 연성파단 값은 내삽법을 이용하여 1.423이라는 값을 구하였다. 오차 값의 범위는 ± 0.00187 이다.

4. 연속 인발 공정에서 연성파단 값의 측정

4.1 연속 인발 공정에서의 연성과괴

기존의 연성과괴에 대한 적용은 초기 선재에 대해, 연성파단 값을 구한 뒤, 선재가 인발되면서 damage value 값이 누적되고, 최종적으로 내부결함이 발생하는 damage value 값인 초기에 구한 연성파단 값을 초과하게 되면 선재는 central burst 등의 결함이 생긴다는 이론이다. 하지만, 연속 인발 공정에서는 기존의 연성파단 값을 지정하는 것은 문제가 있다. 이는 패스 진행 후 선재는 전혀 다른 물성의 재료가 되기 때문이다. 따라서, 새로운 연성과괴 적용의 필요성이 생기게 된다. 새로이 제안하는 연성 파괴의 적용은 각 패스를 지남으

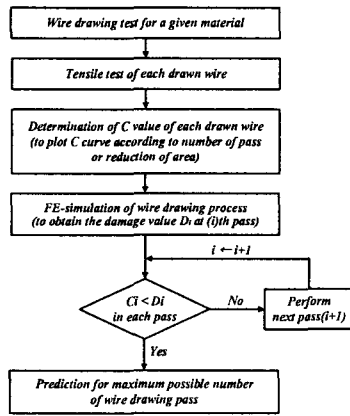


Fig. 5 Algorithm of new application

로 써 쥐는 선재의 성질을 적용하기 위해, 각 패스마다 인장 시험을 실시하여 각 패스에서의 임계 연성파단 값을 구하고, FEM 해석을 통해 각 패스에서의 damage value 값을 구한다. 각 소선의 임계연성파단값은 패스가 진행되면서 점점 감소하게 되고 매 패스마다 새롭게 계산되어지는 데미지 값은 부적절한 공정 변수에서의 공정을 제외하고는 일정한 범위를 가진다. 이 감소하는 각 소선의 임계 연성파단 값이 매 패스에서 계산되어지는 데미지의 범위에 도달하는 순간이 내부결함이 발생하는 패스수가 되는 것이다. Fig. 5 는 새로이 적용되는 연성파괴의 알고리즘을 나타낸 그림이다.

4.2 실제 공정에의 적용

본 연구에서 제안한 연성 파괴에 대한 새로운 적용의 검증에 위해, 실제 공정 및 유한 요소해석을 통해 적용해 보았다. 재료는 탄소량 0.82%인 고탄소강 소재를 사용하였다. Table. 2 에 본 공정 조건에 대해 나타내었다.

Material	0.82% High carbon steel
Semi-die angle α [°]	6
Bearing length, (l)	0.3 × d
Equipment for drawing	Draw bench

실제 공정에 적용하기 위해, 실제 공정에 사용되는 패스 스케줄에 대해 적용하였고, 패스 스케줄에 따라 실험을 실시하였다. 실제 공정의 패스 스케줄은 다음과 같다.

1) Pass Schedule

5.5(Initial) → 4.919 → 4.5 → 4.125 → 3.777 → 3.49 → 3.227 → 2.922 → 2.662 → 2.338 → 2.091 → 1.882 → 1.704 → 1.534 → 1.4 → 1.265 → 1.14 → 1.04(Final)

4.3 실제 공정에의 적용 결과

인발 공정 조건에 따라 실험을 실시하였고, 각 패스에서의 임계 연성파단 값과 각 패스에서의 유한요소해석에서 얻은 damage value 값을 비교하였다. 비교 분석결과, 각 패스에서의 임계 연성파단 값은 패스가 진행되면서, 감소하는 곡선을 보이고, 유한요소해석을 통해 얻은 각 패스에서의 damage value 값은 일정한 구간에 걸쳐 나타남을 볼 수 있다. 실험을 통해 구한 연성파단 값이 각 패스에서의 damage value 값과 같아지는 17 pass 에서 재료의 결함이 발생함을 예측할 수 있다.

4.3.1 실제 공정에 대한 결과

Fig. 6(a)는 기존의 방법으로 연속인발공정에 대한 연성파괴 해석을 수행한 그림이다. 그림에서 보듯이, 기존의 방법으로는 4 pass 에서 재료의 결함이 발생하는 것으로 예측된다. 이는 실제 공정 시에 발생하는 결함과는 상당한 차이가 있는 결과로 기존의 방법이 문제점이 있음을 나타낸다. Fig. 6(b)는 새로운 방법에 의한 연성파괴 해석을 수행한 그림이다. 새로운 방법에 의해서는 17 pass 에서 재료의 결함이 일어나는 것으로 예측된다

이는 실제 공정과도 상당히 유사한 결과로 새로운 방법에 의한 연성파괴 해석이 상당히 타당함을 뒷받침한다고 할 수 있다.

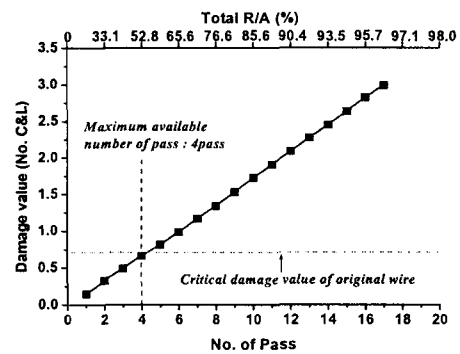


Fig. 6(a) Prediction of ductile fracture by conventional method in pass schedule

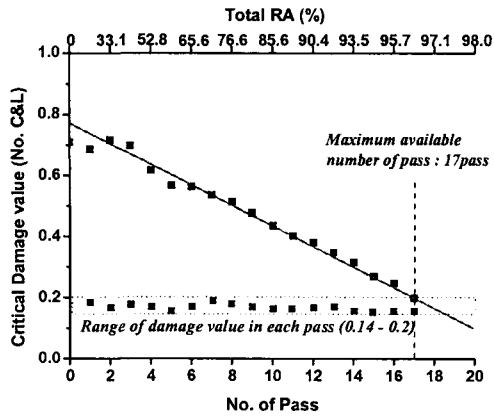


Fig. 6(b) Prediction of ductile fracture by new method in pass schedule

4.3.3 시편에 대한 void 여부 검사

해석에 대한 검증을 위해, 17 Pass 의 선재에 대한 검사를 실시하였다. 시편을 인발 방향에 수직인 단면과 인발 방향에 평행한 단면에 대해서 void 생성 여부에 대한 검사를 실시하였다.

Fig. 7(a)는 인발 방향에 수직인 단면에서의 조직 사진을 보여준다. 중심부에 마크된 부분에 void 가 생성되어 있음을 확인할 수 있다. Fig. 7(b)는 인발 방향에 평행한 단면에서의 조직 사진을 보여준다. 인발 방향을 따라 길이 방향으로 void 가 진전되어 있음을 눈으로 확인할 수 있다.

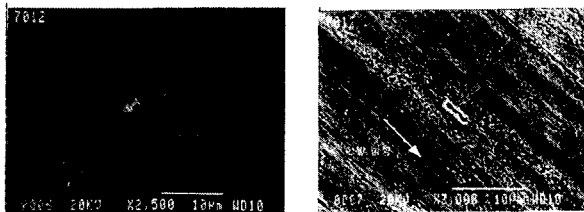


Fig. 7(a) Figure of void in section normal to the wire axis

Fig. 7(b) Figure of void in section parallel to the wire axis

5. 결론

본 연구를 통해, 임계 연성파단 값을 찾기 위한 쉬운 방법을 제시하였고, 연속 인발 공정에 더욱 적합한 새로운 연성 파괴의 적용을 제안하였다. 또한 실제 공정에서의 적용을 통해 제안된 이론을 검증하였

다. 이상의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 재료의 연성파단 값을 간단하고 명료하게 평가할 수 있는 방법을 제안하였고, 실제 공정에서 연성 파단을 예측하는데 유용하게 적용할 수 있을 것이다.

(2) 기존의 연성 파괴에 대한 이론은 인발 공정을 거치면서 새로운 재료 특성을 나타내는 연속 인발 공정에 대해서는 많은 문제점을 나타내고 있다. 본 연구를 통해 연속 인발 공정에서 연성파단 값을 적용할 수 있는 새로운 방법을 제안하였다.

(3) 실제 공정에 대해 적용하여 보았고, 기존의 방법에 의해서는 3, 4 Pass 에서 결함이 예측되는 경우에 있어서도 새로운 방법에 의한 접근은 17 Pass 정도에서 결함이 예측되었다. 실제 시편의 검사에서도 void 의 생성이 확인됨으로써 실제 공정에 더욱 타당한 방법이라고 판단된다.

참고 문헌

1. F. A. McClintock, S. M. Kaplan and C. A. Berg, "Ductile fracture by hole growth in shear bands", Int. J. Mech. Sci. Vol. 2, pp. 614, 1966
2. A. M. Freudenthal, The inelastic behaviour of solids, Wiley, New York, 1950.
3. M. Oyane, T. Sato, K. Okimoto and S. Shima, "Criteria for ductile fracture and their application", J. Mech. Work. Tech. Vol. 4, pp. 65, 1980.
4. K. Osakada and K. Mori, "Prediction of Ductile Fracture in Cold Forging", Annals of the CIRP, Vol. 27, pp. 135-139, 1978.
5. M. G. Cockcroft and D. J. Latham, "Ductility and the Workability of Metals", J. Inst. Metals, Vol. 96, pp. 33-39, 1968
6. S. I. Oh, C. C. Chen and S. Kobayashi, "Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing: Part 2-Workability in extrusion and drawing", J. Engng Ind. Vol. 36, pp. 101, 1979
7. E. G. Thomsen, "Tensile Fracture of Drawn Copper and Mild Steel", Trans. ASME Feb, Vol. 104, pp. 91-96, 1982
8. D. C. Ko, "An integrated methodology to predict material flow and ductile fracture by the finite element method and its applications to metal forming processes", Ph. D, Dissertation Univ. of Pusan, 1998