

결함성장모델의 비교 연구

Comparative Study on Damage Evolution Models

*윤상헌¹, #이용신¹, 남원종¹, 박경태², 윤덕재³

*Sang Hun Yoon¹, #Yong-Shin Lee(yslee@kookmin.ac.kr)¹, W-J Nam¹, K-T Park², D-J Yoon³

¹ 국민대학교, ² 한밭대학교, ³ 생산기술연구원

Key words : Damage Evolution Model, Metal Forming, Finite Element Method

1. 서론

공학재료의 성형가공은 모든 산업체의 부품생산에 반드시 필요한 공정이다. 일례로 자동차 부품 중에 70~80%는 성형가공 공정을 거쳐 만들어지며, 최근의 NT, BT 또는 IT에 응용되는 부품들도 종래의 성형공정 내지는 마이크로 성형공정을 거치게 된다. 성형가공의 목적은 결함이 없이 기계적 성질이 우수하고, 원하는 형상의 제품을 생산하는 것이다. 생산기술의 발달은 복잡하고, 정밀한 제품을 성형하는 것을 가능하게 한다. 설계 의도에 따른 외형이 만들어졌는지는 쉽게 측정이 가능하나, 성형제품 내부의 기계적 성질에 관하여는 측정이 매우 어렵고, 가능하여도 고비용의 시험을 요하게 된다.

성형가공 중에 유발되는 소재 내부의 결함은 소재의 기계적 성질을 열화시키고, 궁극적인 파괴의 원인이 된다. 이에 엔지니어는 소성변형 중인 소재 내부의 결함성장 관련 예측이나 궁극적인 파괴에 관한 모델이 필요하다. 일반적으로 연성파괴에 관하여는 많은 연구가 발표되어 왔으나, 파괴에 이르기 전까지 소재의 기계적 성질에 지대한 영향을 미치는 결함 성장에 관하여는 상대적으로 연구가 적었다[1]. 결함 성장의 요인은 여러 형태의 변형으로 모든 성형공정에 적합한 결함성장 모델을 제시하는 것은 쉬운 일이 아니다. 일례로 선재 인발의 경우에 중심부의 균열(Central Bursting)은 평균응력이 주인자이고, 표면의 크랙은 마찰에 의한 과도의 전단변형이 원인이 되는 것으로 알려졌다. 따라서 엔지니어들은 기존의 결함성장 모델에 관한 특성을 이해하고 설계하는 공정의 특성을 고려하여 적절한 모델을 선택하고 적용할 수 있어야 한다. 이에 본 연구에서는 기존에 제시된 결함 성장 모델들의 특성을 비교 분석하는 연구를 수행하여 엔지니어들이 적절한 결함성장 모델을 선정하는 데에 기여하고자 한다.

2. 결함 성장 모델

본 연구에서는 알루미늄이나 연강과 같은 연성금속의 성형공정에서 결함의 성장을 예측하는 데에 널리 이용된 모델 중에서 Cockcroft et al., Brozzo et al., Oyane, Lee and Dawson 등이 제시한 결함 성장 모델을 선정하였다. Cockcroft et al.[2,3], Brozzo et al.[4], Oyane[5] 등의 결함 성장 모델은 그들이 제시한 연성파괴 모델에서 취하였다. Lee and Dawson[6]은 기공률을 연성결함으로 정의하고 변형경화와 변형률 속도 경화를 갖는 금속재의 결함성장 모델을 제시하였다.

Cockcroft et al. 등이 제시한 연성파괴 기준은 소성일의 차원으로 표현되었으나, 후에 Oh 등에 의하여 수정된 형태가 많이 쓰이고 있으며 다음과 같다.

$$d\phi_{Cockcroft} = c_1 \frac{\sigma_1}{\sigma_e} d\epsilon_e \quad (1)$$

윗 식에서 σ_1 은 최대 주응력이고, $\sigma_e, d\epsilon_e$ 는 각각 유효 응력, 유효변형률 증분이다.

Brozzo et al.[4]은 위의 모델에 평균응력의 영향을 반영하는 형태로 다음과 같은 결함성장 모델을 제시했다.

$$d\phi_{Brozzo} = c_2 \frac{\sigma_1}{\sigma_1 - \sigma_m} d\epsilon_e \quad (2)$$

Oyane [5]는 Cockcroft et al. 모델에서 평균응력의 영향을 유효응력으로 나눈 비로 반영하였으며 물성계수를 한 개 더 도입하였다.

$$d\phi_{Oyane} = c_3 \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_e} + c_4 \right) d\epsilon_e \quad (3)$$

위의 식(2)와 (3)에서 σ_m 은 평균응력이다. Lee [6] 등은 평균응력을 상태변수로 나눈 비를 지수함수 함수의 형태로 반영하였고, 결함 성장 속도가 현재의 결함 크기에 의존하는 형태로 제시하였다.

$$d\phi_{Lee} = c_5 \frac{\phi}{1-\phi} \text{Exp}[c_6 \frac{\sigma_m}{\sigma^*}] d\epsilon_e \quad (4)$$

윗 식에서 σ^* 는 점소성 재료의 변형경화 상태를 나타내는 상태변수로 변형률 속도의존성이 없는 경우에는 경화를 반영한 항복응력을 사용하여도 큰 차이는 없다.

3. 결함 해석

앞에서 언급된 모델의 비교를 위하여 단순한 균질변형의 경우와 전방압출과 같은 성형공정을 고려하였다.

3.1 순수전단에서의 결함성장 비교

본 연구에서는 결함 해석을 위한 모델 상수를 일축인장에서 파단시의 변형률에 도달하였을 때에 결함값이 파단 결함값 ($\phi_{fracture}$)이 되도록 계산하였으며 Table 1에 주어진 다. 결함상수를 계산할 때에 재료의 물성은 다음의 응력-변형률 관계식을 사용하였다.

$$\sigma_e = 493.37 (\epsilon_e + 0.00325)^{0.223} \quad (5)$$

Table 1 Damage model constants from tensile test

C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
1.389	0.9259	1.167	0.8571	5	1.291

결함성장 모델의 상수를 일축인장에서 구하였으므로 변형모드가 다른 순수 전단에서의 결함 성장을 비교하여야 모델의 일관성을 시험할 수 있다.

일반적으로 결함 성장에는 평균응력의 영향이 가장 큰 것으로 알려져 있다. 소성가공은 체적불변으로 평균응력은 부정적 변수가 되어 균질 변형에서는 식(5)의 구성방정식으로는 평균응력을 구할 수 없다. 통상의 금속 소성가공에서는 평균응력은 유효응력의 1/2 이하로 나타난다. 본 연구에서는 평균응력을 유효응력의 배수 - $0.25\sigma_e, 0.33\sigma_e$, 그리고 $0.4\sigma_e$ - 로 정하여 결함 성장을 비교한다. 평균응력이 $0.25\sigma_e$ 인 경우에는 전단변형을 받는 경우에 유효응력이 0.7에 이르러도 파괴를 예측하는 모델이 없으며 결함성장의 경향이 다른 경우와 비슷하여 생각한다. Fig. 1에서는 일축인장에서 파괴시의 유효 변형률에 도달할 때까지의 결함성장을 비교하여 보여준다.

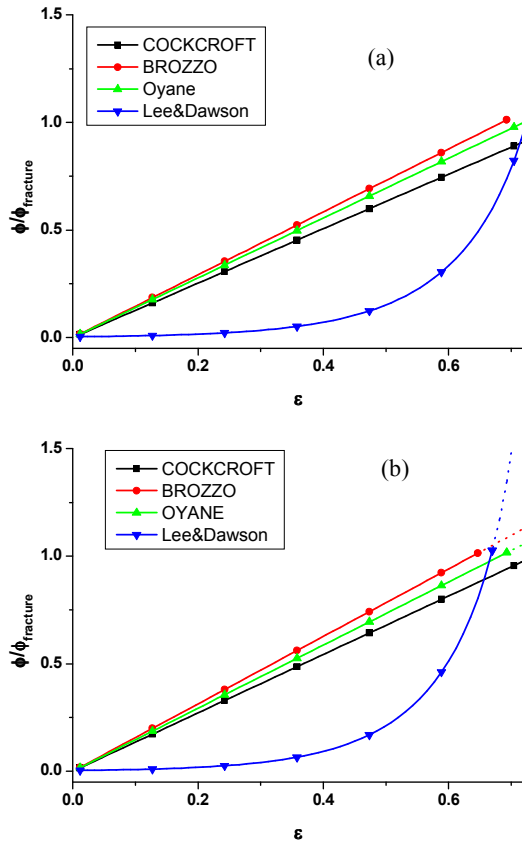


Fig. 1 Comparison of damage evolution for shear deformation: (a) $\sigma_m = 0.33\sigma_e$, (b) $\sigma_m = 0.4\sigma_e$

먼저 평균응력의 크기는 일축인장의 경우와 같도록 의도한 $\sigma_m = 0.33\sigma_e$ 인 경우에 약간의 차이가 있으나 모든 모델이 유효 변형률이 0.7에 도달하면 파괴가 거의 일어나는 것을 예측하고 있다. 그러나 평균응력이 유효응력의 0.4 배가 되는 경우에는 Brozzo 모델과 Lee-Dawson 모델이 먼저 파괴를 예측하고 있다. 이것은 Brozzo 모델과 Lee-Dawson 모델이 평균응력의 영향을 보다 크게 반영하는 결과로 실제에 근접하는 것으로 사료되지만 파괴시의 변형률 예측에서는 모든 모델이 10% 미만의 오차로 비슷하다.

그러나 결함의 성장형태를 살펴보면 Lee-Dawson 모델은 다른 모델들과는 완전히 다른 형태를 예측하고 있다. Lee-Dawson 모델은 초기에는 결함성장이 느리나 결함이 커져 갈수록 성장속도가 빨라지는 반면에 타 모델들은 선형의 성장속도를 보여준다. 그러나 실제의 경우에는 결함이 큰 소재가 기계적 성질이 열성화로 인하여 파괴에 보다 빨리 이르는 것을 고려하면 결함 성장의 형태를 고려하면 Lee-Dawson 모델을 사용하는 것이 합리적인 것으로 추천된다.

3.2 후방 압출 성형공정에서의 결함성장 예측

AZ31 Mg 합금 소재의 온간 후방 압출공정에서 결함성장 예측을 비교하여 보았다. 본 논문의 저자들 중에서 발표한 참고문헌 [7]에는 실험에 관한 상세한 설명이 주어진다. 다이의 내경은 30mm, 소재의 직경은 28mm, 펀치, 펀치속도는 20mm/s로 하였다. 실험에서는 내벽에서는 파괴가 관측되지 않았고 외벽에서만 성형성을 제한하는 파괴가 발생하였다. 본 연구에서는 Cockroft 모델을 이용하여 예측된 결함분포와 Lee & Dawson 결함성장 모델을 이용하여 예측한 결함분포를 Fig. 3에서 비교하여 보여준다. Lee & Dawson의

모델에서는 초기치 ($\phi_{fracture}$)가 요구되며 통상적인 0.0011을 사용하였고, c_5 와 c_6 는 각각 참고문헌[7]에 주어진 5와 0.5를 사용하였다.

Cockroft [2,3]의 결함모델을 이용한 경우에는 결함변수의 최대치가 외벽에서 발생하지만, 내벽에서의 결함값도 거의 최대치와 비슷한 것으로 나타난다. Lee & Dawson의 결함변수는 초기치로 나눈 값의 분포를 보여주는데, 결함변수의 최대치는 초기치의 약 50 배 정도이고, 실험에서 파괴가 발생하는 외벽에서 나타난다. 소재의 압출된 내벽에서는 결함변수의 값이 최대치의 1/2 이하로 되는 것을 보여주고 있다. 이것은 Cockroft 모델과 달리 실험결과와 일치하는 현상이다. AZ31 Mg 합금의 온간 후방압출성형의 해석에서는 Lee & Dawson의 결함성장 모델을 사용하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

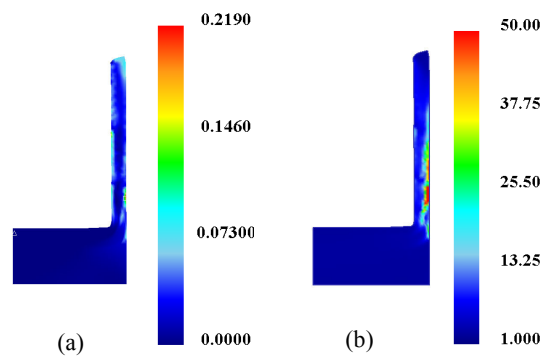


Fig. 2 Distribution of accumulated damage in extrusion. (a) Cockcroft model, (b) Lee-Dawson damage model.

후기

본 연구는 2007년도 과학기술부의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 이루어졌으며 (No. R01-2007-000-20239-0), 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참고문헌

1. J.H. Yoon, H.Huh, Y-S Lee, S.S Kim, E.J. Kim, H.J. Park, T.H. Choi, H.J. Lee, 2006, Finite element analysis of the hydro-mechanical punching process. Materials Science Forum, Vol 505-507, pp871-876.
2. M.G. Cockcroft and D.J. Latham, 1968, Ductility and the workability of metals, J. Inst. Met. Vol. 96, pp33-39.
3. S.I. Oh, C.C. Chen, S. Kobayashi, 1979, Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing, J. Eng. Ind. Trans. ASME Vol.101 pp36-44.
4. P. Brozzo, B. deLuka, R. Rendina, 1972, A new method for the prediction of formability in metal sheets, Proceeding of 7th Biennial conference on Sheet Metal Forming and Formability.
5. M. Oyane, 1972, Criteria of ductile fracture strain, Bull. of JSME Vol.15 pp1507-1513.
6. Y-S Lee, P.R. Dawson, 1993, Modeling ductile void growth in hardening viscoplastic materials, Mechanics of Materials, Vol. 15 pp.21-34.
7. D-J Yoon, E-Z Kim, Y-S Lee, 2007, Finite Element Study on Deformation Characteristics and Damage Evolution in Warm Backward Extrusion of AZ31 Alloys, Trans. of Materials Processing, Vol. 16, No. 8, pp. 614~620.