

압출/단조 금형의 취성결함성장예측

여은구^{*}, 이용신^{**}, 나경환^{***}

* 국민대학교 기계설계과 대학원

** 국민대학교 기계·자동차공학부

*** 한국생산기술연구원 소성가공연구실

Prediction of the Brittle Damage Evolution in Extrusion/Forging Die

E.G. Yoh^{*}, Y.S. Lee^{**}, K.H. Na^{***}

ABSTRACT

The failure of die often occurs as a result of growth of microcracks - referred as a brittle damage. In this study, an analysis of brittle damage evolution coupled with the elastic finite element analysis of die deformation is presented. A local transformation from the tractions of a workpiece mesh to those of a die mesh is developed. The brittle damage is defined as a vector considering the shape of common microcracks in the brittle metals and the damage function suggested by Krajcinovic is utilized. Applications of the proposed model to modeling damage evolution in the extrusion die and forging die are given and the characteristics of brittle damage evolution in die are in detail examined.

1. 서론

일반적으로 금형의 수명은 거시적으로 마모로 인해 치수오차가 생겨 수명이 다하거나 응력집중에 의한 과응력 또는 피로에 의해 발생하는 파괴 등으로 제한된다. 어떠한 경우든지 파괴된 금형의 미세조직을 관찰하여 보면 응력집중 부위나 탄성변형이 큰 부위에 무수히 작은 미소균열이 분포되어 있고 이런 미세결합들이 서로 연계·성장하여 거시적인 파괴를 일으키는 것을 확인할 수 있다. 소성가공에서 금형의 중요성으로 인하여 금형에 관한 많은 연구가 보고되어 왔다. 금형해석에 관한 연구는 여러 연구자들에 의해 진행되었음에도 불구하고 금형과 파괴의 근본원인이 되는 취성결함성장 등의 미세조직의 변화를 예측할 수 있는 미시적 관점에서의 연구는 거의 전무한 상태이다. 취성결함에 대한 연구는 과거에 몇몇 연구자들에 의해 시도되었는데 결함에 대한 이론은

Kachanov에 의해서 1958년에 시작되었지만 그 골격은 1980년도에 이르러서야 연속체결합역학(Continuum Damage Mechanics)으로 발전하였다.

본 연구에서는 소성가공에 의해 변형되는 소재의 탄·소성해석과 그 결과로 얻어지는 금형과의 접촉력을 이용하는 금형의 탄성응력해석 및 취성결함해석을 통합·연계하는 해석모델을 제시하고자 한다. 금형의 취성결함을 통계적으로 많이 관측되는 미시적 크랙형상에 근거하여 크기와 방향을 갖는 벡터로 정의하고 열·기계 연속체역학적 접근을 이용하여 Krajcinovic가 제시한 취성결함해석모델을 확립한다. 응용으로 압출금형과 단조금형에 대하여 제시된 연계해석을 수행하여 취성결함의 성장을 조사한다.

2. 취성결함모델

모든 공학재료는 미시적으로 재료의 내부를 검사해 보

면 미세결합들이 불균일하게 존재하지만, 이들을 거시적 관점에서 보면 국부적으로 결합들이 균일하게 분포되어 있다고 가정하는 것이 연속체 결합역학의 기본 출발점이다. 따라서 미세결합들의 효과를 거시적으로 반영하는 내부상태변수로 표시하고 상태변수의 발전식으로 결합성장을 모델링하여 결합크기의 분포 및 파괴 가능부분의 예측을 목표로 하게된다. 본 연구에서는 결합변수를 취성 파괴시의 미세크랙의 형태로부터 크기와 진행방향성을 갖는 벡터로 표현하여 Krajcinovic가 제시한 취성결합해석모델을 확립한다.

결합변수로는 재료내에 평면 동전모양을 가정하여 기하학적 정의를 벡터 $\omega = \omega_N \mathbf{N}$ 로 표시한다.(Fig. 1)

ω_N 은 주결합면에서의 기공밀도이고, \mathbf{N} 은 주 결합면의 법선방향 벡터이다. 취성재 파괴시에는 변형량이 매우 작다는 것을 근거하여 결합을 갖는 취성재료의 미소변형에 대한 Helmholtz자유에너지를 결합벡터 ω 와 탄성변형률텐서 ε 의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho\Psi = \frac{1}{2}(\lambda + 2\mu)\varepsilon_{KK}\varepsilon_{LL} - \mu(\varepsilon_{KK}\varepsilon_{LL} - \varepsilon_{KL}\varepsilon_{LK}) + \sum_{P=1}^{\infty} [C_1 \omega_K^{(P)} \varepsilon_{KL} \omega_L^{(P)} \varepsilon_{MM} + C_2 \omega_K^{(P)} \varepsilon_{KL} \varepsilon_{LM} \omega_M^{(P)}] \quad (1)$$

여기서 ρ 는 질량밀도이고, C_1 , C_2 는 스칼라값의 재료상수이며, λ 와 μ 는 Lamé상수이다. 윗 첨자는 P 번째 결합장을 의미하며 Fig. 1에서는 α -결합장과 β -결합장 두 가지를 보여 주고 있다. 따라서 식(1)의 자유에너지는 다양한 결합장을 포함하도록 확장될 수 있다. 자유에너지식을 포텐셜함수로 사용하면 등온과정에서 응력식은 아래와 같다.

$$\sigma_{IJ} = \rho \frac{\partial \Psi}{\partial \varepsilon_{IJ}} = D_{IJKL} \varepsilon_{KL} \quad (2)$$

각 결합장의 상태와 발전을 모사하기 위해서는 각 결합장마다 한 개의 결합식(소성변형을 규명하는 항복식과 같은 역할을 한다.)이 요구된다. 결합식은 결합성장여부를 판별하는 기준을 제시하는데, 결합성장을 일으키는 하중경로(loading path)에서는 다음조건을 만족해야 한다.

$$f = 0 \quad \text{and} \quad \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_{IJ}} d\varepsilon_{IJ} \geq 0 \quad (3)$$

한편 결합성장이 없는 하중상태에서는 다음을 만족하게 된다.

$$f = 0 \quad \text{and} \quad \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_{IJ}} d\varepsilon_{IJ} < 0 \quad (4)$$

식(3)의 조건이 만족될 때에 결합은 성장하며 그 결합벡터의 발전식은 결합변수의 정의로부터 다음과 같이 유도된다.

$$d\omega_i = d\omega_N n_i + \omega_N dn_i \quad (5)$$

여기서 ω_N 은 스칼라값이고 오른쪽 첫째항은 결합의 팽창, 둘째항은 결합의 회전을 나타낸다. 물리적으로는 변형을 받는 재료내부의 주변형률 방향과 수직으로 결합이 성장하는데 만일 주변형률 방향과 결합벡터의 방향이 다를 경우 결합성장과 함께 회전이 일어난다.

3. 금형해석모델

소재의 해석은 상용프로그램인 ABAQUS를 사용하여 탄·소성유한요소해석을 하였고, 해석결과로 금형과의 접촉면에 생긴 표면력으로부터 본 저자들이 전에 제시한 국부변환법에 의해 금형표면격자의 절점력을 생성하여 이를 바탕으로 금형의 탄성유한요소해석 및 취성결합해석을 수행한다. 여기서 결합을 입은 금형의 새질은 비가역과정을 겪기 때문에 소재로 인한 금형의 변형경로에 따라 결합해석이 이루어져야 한다. 접촉된 소재격자로부터 가장 가까운 금형격자를 구하여 접촉여부를 판별하고 접촉시 소재격자의 표면력을 금형격자의 표면력으로 보간하여 금형절점하중을 계산한다. 이러한 경로에 따른 해석 절차를 거치는 근본 원인은 본 연구의 취성결합 해석모델이 응력과 결합의 비선형관계 때문이다. 결합성장을 동반하는 변형의 진행에서는 결합의 성장에 따라 재료의 강성(stiffness)이 열성화 된다. 따라서 결합의 영향을 반영하지 않은 탄성해석의 결과로 얻은 응력경로를 이용하여 결합성장을 계산하여 얻은 축적된 결합은 상계치가 되고, 변형률 경로에 따른 결합성장 계산은 하계치를 주게된다.

- Step 1 소성가공(압출, 단조)공정에 대한 소재의 탄·소성해석을 한다.
- Step 2 소재의 표면력에서 접촉된 금형격자의 절점력을 구한다.
- Step 3 금형의 탄성변형해석을 수행한다.
- Step 4 상·하계 결합성장해석

4. 응용

본 연구에서는 취성결합성장을 예측할 수 있는 금형해석모델을 제시하고 축대칭의 전방압출금형과 단조금형의

해석에 적용하고자 한다. 축대칭형상에서 가능한 α -결합장과 β -결합장 두가지를 고려한다.(Fig. 1 참조) 그림에서 보여지는 바와 같이 α -결합장은 물리적으로 $r-z$ 면에 투영될 때에 선형의 미소크랙을 나타내고 결합면의 법선은 $r-z$ 면 내에 존재하고 파괴의 극단에는 r 면과 z 면이 파단면이 될 수 있다. β -결합장은 축대칭 문제에서는 미소크랙면의 법선이 원주방향으로 고정되어 있으며 $r-z$ 면을 절단면으로 하는 파괴를 일으킨다.

4.1 전방압출 금형해석

분포하중을 구하기 위하여 ABAQUS를 이용한 소재의 탄·소성 변형 해석을 하였다. 램의 속도는 18.5 mm/s 이고 금형과 소재의 마찰계수는 0.1로 가정하였다. 소재의 유한요소 격자와 금형의 유한요소격자가 경계면에서 일치하지 않기 때문에 본 연구에서 제시한 국부변환에 의해 금형 격자에 작용하는 표면력을 얻으며, 금형의 바닥면은 고정되고 바깥 원주면은 풀러지지를 가정하였다. 전방압출공정의 소재는 SCM435를 사용했고, 금형의 재료는 초경합금(WC)를 사용하였다.

Fonseka는 콘크리트의 초기결합을 0.01로 가정하였다. 그러나 본 연구에서 사용된 초경합금의 경우 콘크리트보다 더욱 작은 $1\sim 5\mu\text{m}$ 정도의 입자로 만들어진 P/M재이므로 초기결합을 $\omega_o^a = \omega_o^b = 0.0001$ 로 가정하였다. 초기결합각은 α -결합장의 경우 r 축과 만 시계방향으로 45° 기울어진 것으로 가정하였고, β -결합장의 방향은 $r-z$ 면의 법선방향이며 회전은 없는 것으로 가정하였다. 따라서 β -결합장은 원주방향의 인장응력에 의해 성장이 조절될 수 있다.

Fig. 2에서는 응력경로와 변형률경로에 따른 축대칭면($r-z$)에서의 α -결합장과 원주방향의 β -결합장분포를 보여주고 있다. 최종공정이 끝났을 때 α -결합장의 결합보다 β -결합장의 결합성장이 크게 나타나고 있으며 이는 금형이 인장의 원주응력을 반경방향응력이나 축방향응력보다 크게 받는 것에서 기인한다. 예측하는 바와 같이 변형률경로에 따른 결합성장(하계해)보다 응력경로에 따른 결합성장(상계해)이 전반적으로 크게 나타나고 있다. Fig. 3는 변형률 경로에 따른 결합성장(하계해, Fig. 2(c), (d) 참조)을 계산한 후에 각 결합장의 최대값 두 점을 추출하여 결합의 크기와 방향을 비례적으로 표현하였다. 소재의 변형이 급격히 진행되는 지역에서 금형의 결합이 최대가 되는 것을 예측하고 있다. Fig. 2, 3의 길

과에서 압출금형의 파손이 소재의 변형이 급격히 일어나는 금형부위의 β 결합장, 즉 $r-z$ 면을 절단면으로 하는 파괴가 먼저 일어날 것으로 예측할 수 있으며 이러한 결과는 실제 현장에서 종종 확인되고 있다.

4.2 단조금형해석

Fig. 4에서는 단조금형에 작용하는 분포하중을 구하기 위하여 ABAQUS를 이용한 탄·소성해석과정을 보여주고 있고, 상부펀치의 하강속도는 25 mm/s 이고 금형과 소재의 마찰계수는 0.1로 가정하였다. 단조공정의 소재는 SS41이고, 금형의 재료는 초경합금(WC)이다. 초기결합의 크기는 앞의 전방압출금형과 동일하게 ω_o^a, ω_o^b 모두 0.0001로 가정하였다. 초기결합각의 영향을 알아보기 위하여 β -결합장의 초기결합각은 고정시키고, α -결합장의 초기결합각을 45° 와 0° 로 놓고 해석하였다.

Fig. 5은 α -결합장의 초기각의 방향에 따라 결합분포의 양상이 달라지는 것을 보여주고 있는데 그것은 결합성장이 결합각에 따라 결합증분량과 결합회전량의 비가 달라지기 때문인 것으로 생각된다. 초기각이 0° 인 경우에는 반경방향의 인장응력에 의해 성장이 주도되므로 대칭축 아랫 부분에서 축적된 결합이 크고, 초기각이 45° 인 경우에는 반경방향과 45° 를 이루는 방향으로 큰 인장이 작용하는 우측 코너부근에서 α 결합의 최대가 발생하는 것을 예측하고 있다. β -결합장의 성장은 α -결합장 초기각의 영향이 없으며 원주방향 인장이 큰 좌측 모서리에서 최대결합을 보여주고 있다. 이 경우에는 좌측 코너부근에서 원주절단면이 발생되거나 우측코너에서 반경방향과 약 45° 를 이루는 절단면이 발생하는 파괴를 예측할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 소재에 대한 탄·소성해석과 금형의 탄성해석, 취성결합해석을 통합·연계하는 금형해석모델을 제시하였다. 제시된 모델에서는 소재에 대한 탄·소성해석은 상용 프로그램인 ABAQUS를 이용하였고 소재와 금형간의 접촉부에 발생하는 표면력은 국부변환에 의해 소재에서 금형의 절점력으로 변환하여 탄성해석을 수행하고 이를 바탕으로 결합성장을 계산하였다.

축대칭의 전방압출공정과 단조공정의 금형해석을 수행하여 결합성장의 특성을 조사하였다. 제안된 취성결합 모델에서는 비가역적 결합의 누적으로 인하여 축적된 결합의 크기는 변형이력에 의존성이 있는 것과 초기결합의

방향이 축적된 결함의 크기에 영향을 주는 것을 확인하였다. 취성결함의 정도를 크기와 방향으로 나타내어 결함의 정도를 정량화 하였고, 금형재료의 파손부위를 예측할 수 있으므로 제시된 금형해석모델은 금형설계에 이바지할 것으로 기대된다.

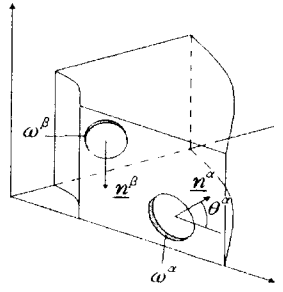


Fig. 1 Physical representation of α , β field damage

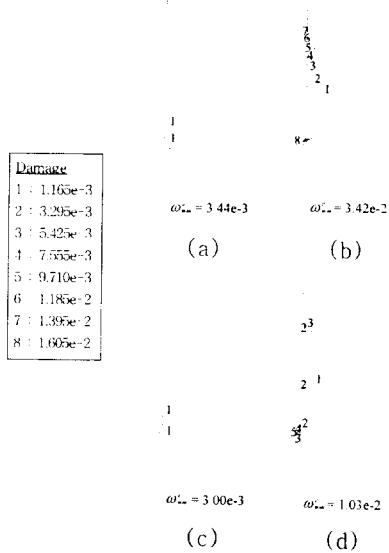


Fig. 2 Distributions of (a) α -field, (b) β -field damage simulated along a stress path and (c) α -field, (d) β -field damage simulated along a strain path

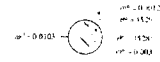


Fig. 3 Magnitude and orientation of maximum damage simulated along a strain path

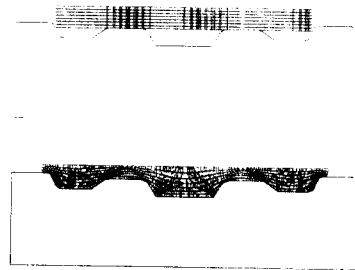


Fig. 4 Initial and final stage of pad forging process

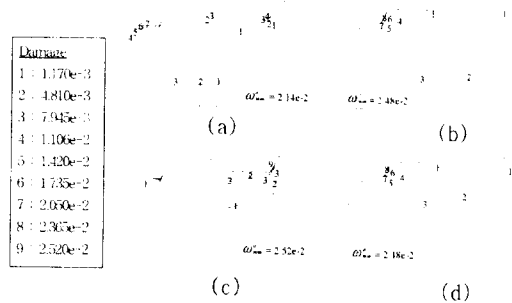


Fig. 5 Distributions of (a) α -field, (b) β -field damage simulated with the initial orientation of $\theta^{\alpha} = 0^{\circ}$ and (c) α -field, (d) β -field damage simulated with the initial orientation of $\theta^{\alpha} = 45^{\circ}$