

재료결합의 성장을 포함하는 스트립 드로잉 공정의 유한요소해석

함승연, 이용신
국민대학교 기계공학과

Finite Element Analysis of Strip Drawing Including the Evolution of Material Damage

Hahm, Seung-Yeun and Lee, Yong-Shin
Department of Mechanical Engineering, Kookmin University

ABSTRACT

Strip drawing of strain-hardening, viscoplastic materials with damage is analyzed by a rigid plastic finite element method. A process model is formulated using two state variables, one for strain hardening from slip dominated plastic distortion and the other for damage from growth of microvoids. Application of the model to aluminum strip drawing is given via implementation in a consistent penalty finite element formulation. The predicted density changes as a result of void growth are compared to those from experiments reported in the literature. The effects of drawing conditions such as drawing speed and die angle on the mechanical property changes are studied.

Key words: strip drawing, state variable, damage, microvoid, finite element method.

1. 서 론

공학 재료의 성형 가공은 재료의 미세 조직(Microstructure)의 변화를 수반하는 소성 변형에 의하여 원하는 형태의 제품을 만든다. 미세 조직의 변화들 중에서 미세 기공(Microvoid)의 발생 및 성장은 재료의 기계적 성질을 열성화시키며, 결국에는 재료의 파괴를 유발하게 되는데 이러한 현상을 총칭하여 재료 결합(Material Damage)이라 칭한다.^[1-5] 따라서 성형 가공되는 재료에 미세 결합이 있는 부분은 즉각적으로 제거되어야 하며, 그렇지 않을 경우 다음 단계의 가공 공정에서 재료의 파괴를 가져오거나, 그 부분에서 결합의 성장이 가속화되어 제품 수명의 단축을 가져오게 된다.

인발, 압출 또는 압연시에는 다이 사이의 변형이 일어나는 지역의 중심부에는 악

어 모양의 균열(Central Burst)이 발생하는 것이 보고되어 왔고^[7,8] 이를 규명하기 위한 많은 연구가 있었다. Coffin과 Rogers^[7]는 Central Burst가 미세 기공의 성장에 의한 것임을 확인하였다. Avitzur^[8], Pepe^[14] 등은 Central Burst를 일으키는 인발 공정 해석을 위하여 상계법, 미끄럼 선장법을 이용하였다. 위의 연구들은 미세 기공의 성장에 따른 체적 변화를 고려하지 않은 소성 변형을 해석하여 응력과 변형률(또는 변형률 속도) 분포를 얻고 후처리 과정으로 기공률 발전식을 이용하여 축적된 기공률을 계산하였기 때문에, 미세 기공의 성장에 따른 기계적 성질의 열성화가 공정 해석에는 반영되지 못하였다. 최근에 들어 Aravas^[15]는 Gurson^[10]에 의해 개발된 다공질재의 항복식(Yield Function)을 사용하여, 압출 성형되는 연성재 내의 기공률 성장을 예측하고자 하였다. Gurson은 완전 강소성 기질 내에서 구형 기공의 성장을 연구하여 다공질 재의 항복식을 개발하였기 때문에 기질의 변형 경화가 없는 것으로 가정하였다. 결과적으로 Aravas의 연구는 인발된 재료의 기공률을 과대 예측(4% 이상)하는 경향을 보여 주었다.

본 연구에서는 미세 기공을 포함하고 있는 변형 경화성, 변형률속도 의존성 금속(Strain-Hardening, Viscoplastic Metal)의 성형가공 공정해석 모델을 개발하고자 한다. 이 모델은 미세 조직들의 변화에 따른 기계적 성질의 변화를 반영하기 위하여 두개의 상태 변수를 도입하는데, 첫번째 상태 변수는 전위 밀도의 증가에 의한 변형 경화를, 두번째 상태 변수는 미세 기공의 성장에 따른 재료 열성화를 반영하고자 함이다. 정수압 응력은 미세 기공의 성장에 큰 영향을 미치므로, 이의 정확한 계산은 매우 중요하다. 이를 위하여 질량보전법칙에서 유도되는 압축성유동의 연속 방정식을 구속 조건으로 하고, 운동량보전으로부터 얻어지는 평형방정식의 가상일을 극소화하는 형태의 Consistent Penalty 유한요소모델이 제시되었다. 궁극적으로 본 연구에서는 기공률의 성장을 추적할 수 있는 유선적분법을 포함하는 성형가공 공정해석 모델을 제시하고, 알루미늄 스트립 드로잉공정에 적용하여 각종 공정조건이 결함의 성장 등 기계적성질의 변화에 미치는 영향을 연구한다.

2. 공정해석모델

2.1 지배방정식

본 연구의 성형해석모델은 인발, 압출 및 압연등의 입체성형공정의 해석에 관점을 두고 있다. 이러한 성형공정은 대변형에 의해 소재의 형상을 변화시키고, 또한 미세 조직의 변화가 동반된다. 거의 모든 공학재료는 결함을 내재하고 있고 소재의 변형과 더불어 그 결함들은 더욱 커지게 된다. 결함을 내재하는 소재의 성형가공 해석에서는 기공의 성장에 따른 체적 변화가 명백하므로 변형체 역학에서 고려하는 보전식(Conservation Equations)에는 운동량보존외에 질량보전식을 포함시켜야 한다. 또한 본 연구에서는 소성일의 열발산에 따른 온도 변화를 예측하기 위하여 에너지 보전식도 고려한다. 이러한 식들을 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{\rho} + \rho \nabla \cdot \underline{v} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \underline{\sigma}^T + \underline{b} = \rho \dot{\underline{v}} \quad (2)$$

$$\underline{\sigma}^T = \underline{\sigma} \quad (3)$$

$$\rho \dot{e} = -\nabla \cdot \underline{q} + \text{tr}(\underline{\sigma} \underline{L}) + \dot{Q} \quad (4)$$

위의 식들에서 \underline{b} , \underline{v} 와 \underline{q} 는 각각 체적력벡터, 속도벡터와 열유속벡터이고, \dot{Q} , ρ 와 e 는 단위체적당 열생성속도, 밀도와 내부에너지이다. $\underline{\sigma}$ 는 진응력텐서이며, \underline{L} 은 속도구배텐서(Velocity Gradient)이다.

소재의 밀도 ρ 는 기공이 없을때의 이론밀도 ρ_0 와 기공률 ϕ 로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\rho = \rho_0 (1 - \phi) \quad (5)$$

미세기공을 갖는 소재의 체적변형은 단지 미세기공의 성장에 따라 이루어진다고 가정하면, 질량보존을 나타내는 (1)식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\text{tr}(\underline{d}) = \frac{\dot{\phi}}{1 - \phi} \quad (6)$$

여기서 \underline{d} 는 변형률속도텐서이며, 본 연구에서는 질량보존을 만족시키기 위해 (1)식 대신에 (6)식을 구속조건으로 하는 유한요소정식화가 뒤에서 주어진다.

2.2 구성방정식

대변형의 열·기계학적해석에서 에너지보전식에는 내부에너지와 열유속벡터에 관한 구성방정식이 필요하다. 일반적으로 내부에너지는 온도와 관계가 다음과 같다.

$$e = \rho C_p (\theta - \theta_r) \quad (7)$$

여기에서 C_p 는 재료의 비열이고, θ_r 은 기준온도이다. 또한 열유속벡터도 온도구배에 비례하는 것으로 가정하였다. 즉

$$\underline{q} = -k(\nabla \theta)^T \quad (8)$$

위식에서 k 는 열전도의 계수이다. C_p 와 k 는 일반적으로 온도의 함수이나, 금속의 소성가공중에는 온도에 따른 변화가 적으므로 본 연구에서는 상수로하여 선형관계를 가정하였다.

한편 소성가공중인 소재의 변형경화성, 점소성 유동특성은 매우 복잡하여, 응력에 관하여는 보다 상세한 구성방정식이 필요하다. 금속의 소성가공 중에는 탄성변형이 매우작아 본 연구에서는 강소성을 가정하고 더불어 변형구배텐서를 체적변형과 전단변형의 두 성분으로 구분한다.

$$\underline{E} = \underline{E}^V + \underline{E}^P \quad (9)$$

여기에서 위의 첨자 V와 P는 각각 미세기공의 성장에 따른 체적변형과 형태변화만

을 유발하는 전단변형을 의미한다. 따라서 체적변형을 나타내는 변형구배 텐서와 속도구배 텐서는 다음과 같다.

$$F^V = \left(\frac{1}{1-\phi} \right)^{\frac{1}{3}} I$$

$$L = L^V + L^P = \underline{F}^V F^{V^{-1}} + \underline{F}^P F^{P^{-1}} \quad (10)$$

또한 편차 변형률 속도 텐서 d' 은 다음과 같다.

$$d' = d'^P = \frac{1}{2} (L^P + L^{PT}) \quad (11)$$

재료의 형태변화에 관한 소성유동의 구성방정식은 편차응력 텐서와 편차 변형률 속도 텐서의 관계로 주어질 수 있다. 유동규칙은 등방성을 가정한 Levy-Mises 형태에서 기공률의 영향을 반영하여 다음같이 가정하였다.

$$\underline{\sigma}' = (1 - \phi) \frac{\sigma_e}{3d_e} d' \quad (12)$$

유효응력(σ_e)의 상당변형률 속도(d_e)의 비는 비압축성소성변형의 항복조건식에서 구할 수 있으며, 본 연구에서는 Hart에 의해 개발되었고 Dawson 등에 의하여 단순화된 스칼라 상태변수모델에서 취하였다. 즉 유동응력은 다음의 형태로 계산된다.

$$\sigma_e = \sigma_e(d_e, \sigma^* : \theta) \quad (13)$$

위 식에서 상태변수 즉 하드니스(σ^*)는 전위운동에 기초한 소성변형의 강도를 나타낸다. 소성변형이 진행됨에 따라 전위밀도와 전위영킴이 증가하여 전위영킴은 전위운동에 저항으로 작용하게 된다. 따라서 변형경화성은 하드니스의 발전식으로 묘사될 수 있다. Hart모델의 상세한 설명은 참고문헌 [11]와 [12]에 주어져 있다.

본 연구의 주관점인 미세기공률의 성장은 체적변화를 일으키며, 이의 예측을 위한 기공률 성장모델로 Lee 와 Dawson^[6]에 의해 개발된 것을 사용하였다. 그들은 구형의 기공률 중앙부에 포함하는 기질이 원통형과 구형인 단위모형에서 다양한 외력을 받을 때 기공의 성장을 조사하였다. 기질은 변형경화성을 갖는 점소성재로 Hart 모델이 이용되었고, 제시된 기공률 발전식은 유효 변형률 속도, 기공률 그리고 정수압 응력을 하드니스로 나눈비의 함수로 표시되었다. 즉

$$\dot{\phi} = \dot{\phi} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma^*}, d_e, \phi \right) \quad (14)$$

참고문헌 [6]과 [13]에 상세한 설명이 주어진 (14)식의 기공률 성장모델에서 주요 특징은 정수압응력이 상태변수인 하드니스로 나눈비가 사용된 것으로 그 장점은 변형이 작은 지역에서 기공률 성장을 정확히 예측할 수 있는 점이다. 과거에 제시된 많은 기공률 성장모델 [1, 2, 3, 4, 5, 10]들은 정수압응력을 유동응력으로 나눈비(σ_m/σ_e)의 함수로 표시하여, 변형이 작은지역 즉 유동응력이 작은지역에서는 기공률 성장속도가

과대 예측되는 경향이 있었다.

2.3 경계조건

소성가공 공정의 역학적 해석은 평형방정식과 구성방정식외에 경계치 조건이 주어
져야 문제를 정립하게 된다. 물체의 경계에서는 속도나 표면력(traction)이 주어지
며, 다이와 접촉부에는 마찰력이 있는것을 가정하였다. 본 연구에서 사용하는 마찰모
델은 마찰력이 소재와 다이사이의 상대속도에 비례하는 것을 가정한다. 비례를 나타
내는 마찰계수를 β 라 하면, 그 식은 다음과 같다.

$$\hat{t}_f = \beta (v_d - v) \quad (15)$$

여기에서 v_d 는 다이의 속도이고 v 는 재료의 유동속도로 구하고자 하는 해의 일
부이다. 또한 다이와의 접촉부에서 소재의 유동속도는 다이 표면 법선방향 속도성분
이 영이 되도록 구속된다.

열전달 문제의 해석에는 경계에서의 온도 또는 열유속 벡터가 주어져야 한다. 경계
표면에서의 열유속은 대류, 복사 및 가열장치로부터의 열전달에 기인한다.

$$\hat{q} = \hat{q}_{conv} + \hat{q}_{rad} + \hat{q}_{other} \quad (16)$$

$$\hat{q}_{conv} = h(\theta - \theta_\infty) \mathbf{n}$$

$$\hat{q}_{rad} = \hat{\sigma} \hat{\varepsilon} (\theta^4 - \theta_{\infty r}^4) \mathbf{n}$$

여기에서 h 는 대류열전달계수, $\hat{\sigma}$ 는 Stefan-Boltzman 상수, $\hat{\varepsilon}$ 는 표면 방사율, 그
리고 θ_∞ 와 $\theta_{\infty r}$ 은 각각 대류 및 복사의 주위 절대온도이다.

본 연구에서 사용하는 상태변수 하드니스와 기공률(Φ)도 경계치가 주어져야 한다.
Eulerian 해석에서는 검사체적 안으로 물질이 들어가는 경계에서부터 변형이 시작된
다. Eulerian 검사체적의 입구경계를 S_i 라 표시하면 경계조건은 다음과 같다.

$$\Phi = \Phi_i, \quad \sigma^* = \sigma_i^* \quad \text{on } S_i \quad (17)$$

3. 유한요소정식화

앞에서 전개한 수학적 모델의 식들은 유한요소법을 이용하여 속도, 온도 및 하드니
스의 분포를 근사적으로 구할 수 있다. 본 절에서는 정상상태 성형가공의 Eulerian
해석을 목적으로 유한요소 정식화 과정을 소개한다.

3.1 속도 및 압력

정수압은 기공률의 성장에 가장 중요한 인자이므로, 정수압의 정확한 계산은 본 연구의 주요관점이다. 구속조건이 있는 식들의 유한요소 해를 구하는 방법으로 Consistent Penalty Finite Element Method (CPFEM)은 속도 및 압력분포의 예측에 좋은 결과를 준다. CPFEM에서는 질량보전식은 구속조건으로 이용되어 압력항을 penalization 하고 선형 운동량 보전식으로 부터 속도를 구한다. 속도와 압력은 형상함수를 이용하여 각 요소내에서 연속인 근사식으로 표현되나, 압력항은 각 요소의 유한요소 정식화 이후 소거되어 전영역으로 조합된다. 따라서 최종에는 속도만을 미지수로 해를 구하고 압력은 후처리 과정에서 구하여진다.

선형운동량 보전식으로 부터 얻은 가상일률(rate of virtual work) 범함수는 다음과 같다.

$$\delta J = - \int_V \underline{\sigma} \cdot \delta \underline{d} dV + \int_V \underline{b} \cdot \delta \underline{v} dV + \int_{S^{\sigma}} \underline{t} \cdot \delta \underline{v} dS \quad (18)$$

또 구속조건으로 사용될 질량보전식을 압력으로 penalization 한후에 범함수를 구하면 다음과 같다.

$$\delta I = \int_V \left[P - \lambda \left(\text{tr}(\underline{d}) - \frac{\dot{\phi}}{1-\phi} \right) \right] \delta p dV \quad (19)$$

여기에서 λ 는 penalty parameter이고, 본 연구에서는 유한요소의 Gauss 선택점에서의 유효 점성계수의 10^6 배로 값을 취하였다. 속도와 압력을 형상함수를 이용하여 근사식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\underline{v} = [N] \{U\} \quad , \quad P = [N_p] \{P\} \quad (20)$$

$[N]$ 과 $[N_p]$ 는 각각 속도 및 압력의 형상함수로 이루어진 행렬이고, $\{U\}$ 는 유한요소 절점에서의 속도를 준다. 압력의 형상함수로 전좌표계(global coordinate system)를 선택하기 때문에 $\{P\}$ 는 단순히 형상함수의 계수가 되며, 이러한 요소를 종종 노드리스 요소(nodeless element)라 부른다. (20)식을 이용하여 (18)와 (19)식을 유한요소 정식화하면 다음과 같은 행렬식들을 얻는다.

$$[K_\mu] \{U\} + [G]^T \{-P\} = \{F\} \quad (21)$$

$$[M_p] \{-P\} = - \wedge [G] \{U\} + \{F_\bullet\} \quad (22)$$

$$\wedge = \sum_i^{NQP} \lambda_i W_i$$

여기에서 W_i 는 Gauss 가중계수이고, NQP는 Gauss 선택점의 수이다. (21)과 (22)식에서 $\{-P\}$ 를 소거하면 단지 속도만이 미지수로 되어 다음과 같은 최종의 유한요소정

식을 얻는다.

$$[K_u + K_\lambda] \{U\} = \{F\} + \{F_\phi\} \quad (23)$$

$$[K_\lambda] = \wedge [G]^T [M_p]^{-1} [G] \quad (24)$$

여기에서 유한요소 강성행렬 $[K_u + K_\lambda]$ 는 대칭성을 유지하고 있으며, 속도의 함수로 비선형성을 내포하고 있으므로 반복법을 이용하여 강성행렬을 수정시켜가며 속도를 구한다.

3.2 온도, 하드니스 와 기공률

온도 분포는 에너지 보존식에서 Galerkin 의 가중 잉여치를 최소화하여 얻는다. 이 과정은 보편적인 것으로서 본 논문에서는 생략하였다. 두개의 상태변수 즉 하드니스와 기공률은 유선적분법(Streamline integration method)를 이용하여 구하였다. 유선적분법에서는 먼저 입자의 유동경로를 찾는 것으로 부터 시작한다. 유선상에서의 입자속도는 다음과 같다.

$$v_s = \frac{\partial x_s}{\partial t}$$

Eulerian 검사체적내에서의 유선은 그 선상의 수 많은 점들의 좌표값(x_s)으로 명시될 수 있다. 다음단계에서는 그 경로를 따라 하드니스와 기공률의 발전식을 적분하여 Eulerian 검사체적내의 임의 점에서의 하드니스와 기공률을 계산할 수 있다. 즉

$$\int_{x_s} d\sigma^* = \int \dot{\sigma}^* dt = \int_{x_s} \dot{\sigma}^* \frac{dx_s}{v_s}$$

$$\int_{x_s} d\phi = \int \dot{\phi} dt = \int_{x_s} \dot{\phi} \frac{dx_s}{v_s}$$

4. 스트립 드로잉 공정해석

본 연구에서 제시한 공정해석모델의 타당성을 검토하기 위하여 연속 다섯 패스의 스트립 드로잉 공정이 선택되었다. Coffin 과 Rogers는 알루미늄 스트립 드로잉에서 기공들의 성장에 따라 감소된 실제의 밀도를 측정하였으며, 그것은 유한요소해석에 측정과의 비교대상이 되었다. 그들의 실험에 사용된 스트립은 폭 5.0cm, 두께 0.5cm로 2차원 평면변형해석의 일반적인 조건을 만족시키고 있다.(그림1)

유한요소해석에서 사용하는 mesh의 크기는 실험에 사용된 시편의 크기와 상응하나 중심면의 대칭성을 고려하여 스트립의 윗쪽 반을 요소분할 하였고, 그것은 174개의

9-절점 Lagrangian 요소, 속도 및 온도분포 해석을 위하여는 모두 767개의 절점으로 구성되었다. (그림2) 문헌에 보고된 바에 의하면 두개의 드로잉 다이사이의 중심부에서 기공률의 성장이 커서 Central bursting의 원인이 되고 있다. 이에 따라 mesh의 형태도 변형지역(deformation zone)에서 세밀하도록 만들었고, 이 지역에서 유선적분법을 효율적으로 사용하기위해 유한요소의 크기에 따라 유선적분구간크기를 자동조절하는 법이 고안되었다. 각요소에서 소성유동방향으로의 요소간격의 약 1/10이 적절한 유선적분 구간크기로 추천되었다. 가공중인 스트립은 대변형에 수반되는 소성일발산에 의한 온도증가, 다이 및 대기와 접촉에 따른 열손실등이 있어 온도변화를 겪게된다. 수치해석에서는 실험조건과 같이 인발되기전의 스트립의 온도는 373K(알루미늄 용융점의 40%), 인발속도는 1, 2, 3 cm/s로 하였다. 두개의 상태변수 (σ^* , Φ)의 초기치는 Eulerian 유한요소해석에서 검사체적입구에서의 경계조건이 된다. 첫번째 상태변수인 하드니스(σ^*)는 알루미늄 고유의 것이고, 기공률(Φ)의 초기치는 0.0011로 알루미늄의 이론밀도와 실험에서 첫번째 드로잉공정전에 측정된 실제밀도로부터 구하였다. 이어지는 두번째 이후의 공정에서의 검사체적입구에서 상태변수의 경계조건은 앞선 공정의 검사체적 출구에서의 상태변수값이 사용되었다.

첫번째 공정해석은 Coffin 과 Rogers가 행한 실험과 일치하여 15° 다이 각도로 각 패스당 13.5%의 두께감소를 이루는 연속 5패스 드로잉공정이 선택되었다. 그림3와 그림4에서는 처음 세 패스(각각 두께감소율은 13.5%, 25.2% 그리고 35.3%)에서 하드니스와 기공률의 분포를 보여주고있다. 첫번째 패스후에 하드니스는 중심부보다 표면에서 증가되었는데 이것은 다이와의 접촉부에서 보다 큰 전단변형률을 유발하기 때문이다. 반면에 기공률은 표면보다 대칭면 즉 중심부에서 큰값을 주었는데 이것은 인발공정의 특성에서 중심부에서는 인발방향으로 큰 인장력을 일으키고 결과적으로 양의 정수압응력이 크게되어 기공의 성장을 촉진시키기 때문이다. 비슷한 경향들은 이어지는 패스에서 보다 뚜렷하게 나타나고 있다. 이와 같이 중심부에서 기공률이 커진것은 문헌에 보고된 바와 같은 Central burst의 원인이 될 수 있다.

두번째 패스에서는 표면근처에서도 기공률이 성장하는 것이 보이고 있는데 이것은 다이 접촉부에서 큰 전단변형에 기인하는 것으로 실험에서 보고된 표면크랙의 원인이 되고있다. 두번째 패스에서 알루미늄 스트립의 평균변형률 증가는 첫번째 패스와 같으나, 하드니스의 증가율은 줄어들고 있으며, 이것은 변형이 진척됨에 따라 변형경화성의 발전속도 즉 전단변형에 대한 저항(유동응력)의 증가속도는 점차 작아지는것을 의미한다. 그러나 변형이 진척됨에 따라 기공률은 그 증가속도가 커지고 있으며, 그것은 기공의 성장속도는 기공이 클수록 커지기 때문이다. 또한 각 패스의 검사체적 출구면에서 하드니스의 두께방향으로의 분포는 기공률의 분포보다 완만한데 이것은 실험에서 보고된 것과 같은 경향이다. 이어지는 공정에서도 하드니스와 기공률의 발전은 비슷한 경향이 나타나는 것으로 조사되었다.

알루미늄 스트립의 인발공정중에는 기공률의 성장에따라 실제의 알루미늄 밀도가

감소하게 된다. Coffin 과 Rogers는 두께감소율에 따른 알루미늄이 밀도감소를 보고 하였으며, 이것은 본 연구의 수치해석에 의한 결과와 비교되었다. 그림5에서 보여지는 바와 같이 두께감소율에 따른 밀도변화의 크기 및 경향이 비교적 일치하고 있으며, 제시된 모델의 타당성을 입증하고있다.

인발가공에서 소재의 소성유동 및 기공률의 성장에 영향을 주는 중요한 인자에는 인발다이각도, 인발속도 및 마찰계수등이 있다. 일반적으로 높은 마찰계수와 인발속도는 기공률의 성장을 촉진시키는 것으로 본 연구에서 조사되었으며, 이러한 경향은 실험에 의해 관측된 것과 같다. 그림6와 그림7에서는 10°, 20°, 30° 의 다이각도에서 두께감소율 20%로 인발하는 공정해석에서 얻어진 하드니스와 기공률의 분포를 보여주고 있다. 같은 두께감소율의 인발공정에서는 다이각도가 클수록 소성변형지역이 작으나, 두께방향의 큰 압축으로 인발방향으로 큰 인장력을 발생시킨다. 따라서 다이각도가 크면 중심부에서는 보다 큰 양의 정수압응력이 발생되고 기공률의 성장속도가 커지게되어, 인발후에는 소재의 평균기공률도 증가됨을 보여주고 있다.

5. 결 론

소성가공중에 일어나는 대변형은 소재의 미세조직을 변화시켜 재료의 기계적 성질을 열성화시키는 경우가 종종있다. 본 연구에서는 두개의 상태변수, 하드니스와 기공률을 도입하여 소성변형에 따라 유발되는 변형경화성과 미세기공의 성장에 따른 기계적성질의 열성화를 공정해석모델에 반영하였다. 미세기공의 성장에 따른 체적변화를 반영하기위해, 질량보전법칙을 구속조건으로 하는 Consistent Penalty Finite Method(CPFEM)을 이용하였으며, CPFEM은 기공률 성장에서 매우 중요한 정수압 응력을 정확히 계산할 수 있었다. 또한 정상상태 성형공정의 Eulerian 해석에서 유선을 따라 상태변수의 발전을 추적할 수 있는 유선적분법이 본 연구의 공정해석 모델에 도입되었다.

연속 다섯패스의 알루미늄 스트립 드로잉 공정을 유한요소 해석을 하여 문헌에 보고된 결과와 비교 검토하였다. 유한요소 해석에 의한 하드니스와 기공률 변화에 대한 예측은 실험결과와 일치하여, 제시된 공정모델의 타당성이 입증되었다. 또한 드로잉 속도, 드로잉 다이각도등의 드로잉 공정조건이 기공률의 성장등 기계적 성질의 변화에 미치는 영향을 조사하였다.

본 연구에서는 기공들의 합체(coalescence)나 생성(nucleation)이 비교적 적은 경우 즉 기공률 2~3%미만의 소재의 성형공정을 대상으로 하였다. 이러한 경우에는 본 연구에서 제시한 바와 같이 기공률의 변화만을 반영하는 공정해석으로도 기계적 성질의 변화를 예측할 수 있으나, 기공들의 합체나 생성이 활발하고 국부적인 파괴에 이를 때는 기공의 형상 및 분포등이 고려되어야하며 앞으로의 연구과제라 할 수 있겠다.

후 기

본 연구는 93년도 한국과학재단의 연구비지원에 의한 결과이며, 그림작성에 도움을 준 최승희 및 과학재단 관계자에 감사드립니다.

6. 참 고 문 헌

- [1].Kachanov, L.M., Time of the fracture process under creep conditions. Izv. Akad. Nauk. SSSR O.T.N.Tekh. Nauk. 8,26(in Russian), 1958
- [2].Krajcinovic, D., Damage mechanics, Mechanics of Materials, 8:117-197, 1989
- [3].Leckie, F.A., The constitutive equations of continuum creep damage. Phil. Trans. of the R. Soc. of Lond., A, 288:27-48, 1978
- [4].Cocks A.C.F. and M.F. Ashby, On creep fracture by void growth, Progress in Materials Science, 27:189-44,1982
- [5].McClintock, F.A., A criterion for ductile fracture by growth of holes. ASME Journal of Applied Mechanics, 35:363-371, 1968
- [6].Lee, Y-S and P.R.Dawson , Modeling ductile void growth in Viscoplastic materials, Mechaics of Materials 15: 21-34, 1993
- [7].Coffin, Jr. L.F. and H.C. Rogers, Influence of pressure on the structural damage in metal forming processes, Trans. ASM, 60:672-686, 1967
- [8].Avitzur B., Analysis of central bursting defects in extrusion and wire drawing, ASME Journal of Engineering for Industry, 90:79-91,1986
- [9].Engelman M.S., R.L. Sani, P.M. Gresho, and M. Bercovier, Consistent versusreduced integration penalty methods for incompressible media using several old and new elements, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2:25-42, 1982
- [10].Gurson, A.I., Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I - Yield criteria and flow rules for porous ductile media. J. of Engineering Meterials and Technology, ASME, 99:2-15, 1977

- [11].Hart E.W, Constitutive relations for inelastic deformation of metals
Journal of Engineering Materials and Technology, 98:193-202, 1976
- [12].Lee Y-S. and P.R. Dawson. Obtaining residual stresses in metal
forming after neglecting elasticity, ASME Journal of Applied
Mechanics, 111:318-327, 1989
- [13].이용신, 연성금속내의 미세기공성장에 따른 기계적성질의 변화를 반영
하는 성형 가공 공정해석 모델개발, KSF 931-1000-011-1, 1994
- [14].Pepe J.J, Central Burst Formation During Hydrostatic Extrusion,
Metals Engineering Quarterly,ASM, 16:46-52, 1976
- [15].Aravas N., The analysis of void growth that leads to central bursts
during extrusion, J. Mech. Phys. Solids, 34:55-79,1986

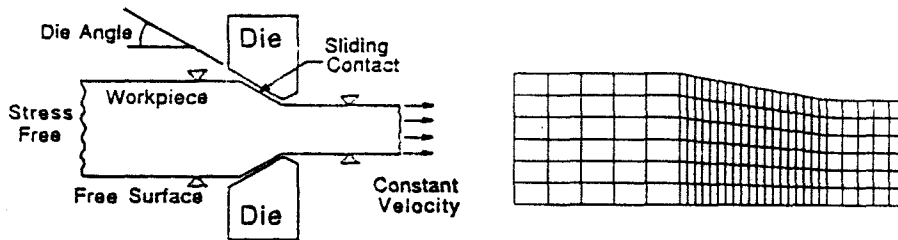


그림 1 스트립드로잉공정의 개략도 그림 2 스트립드로잉공정의 유한요소 mesh

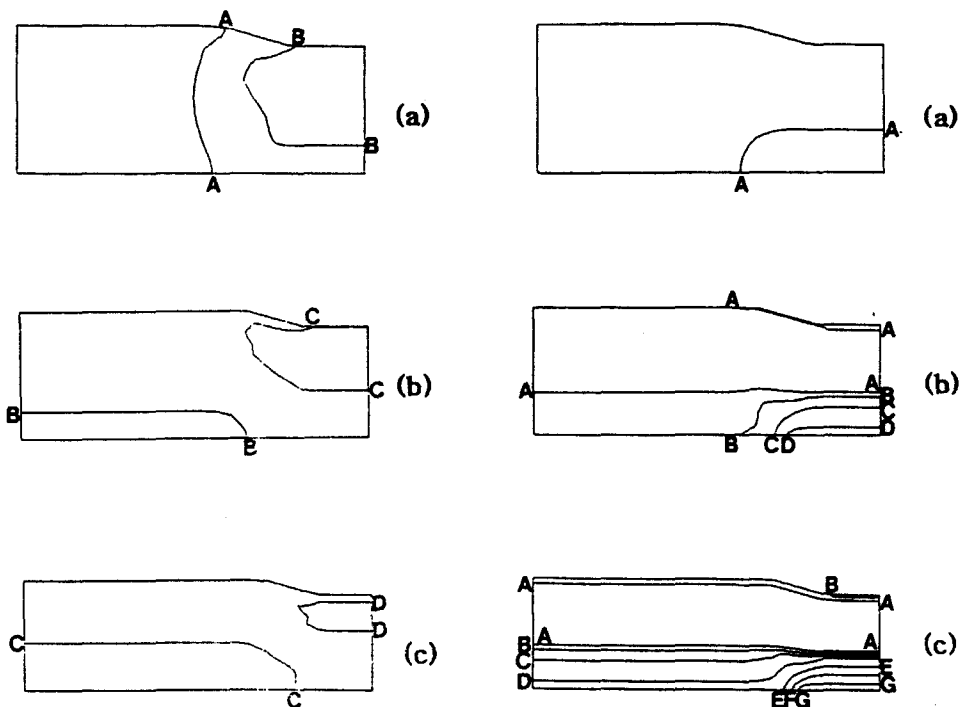


그림 3 하드니스분포: (a) Pass1, 13.5%두께감소 (b) Pass2, 25.2% 두께감소 (c) Pass3, 35.3%두께감소 $A=75\text{MPa}$, $\Delta\sigma^2=25\text{MPa}$, 드로잉 각 15°

그림 4 기공률분포: (a) Pass1, 13.5%두께감소 (b) Pass2, 25.2% 두께감소 (c) Pass3, 35.3%두께감소 $A=0.001$, $\Delta\phi = 0.25 \times 10^{-3}$, 드로잉 각 15°

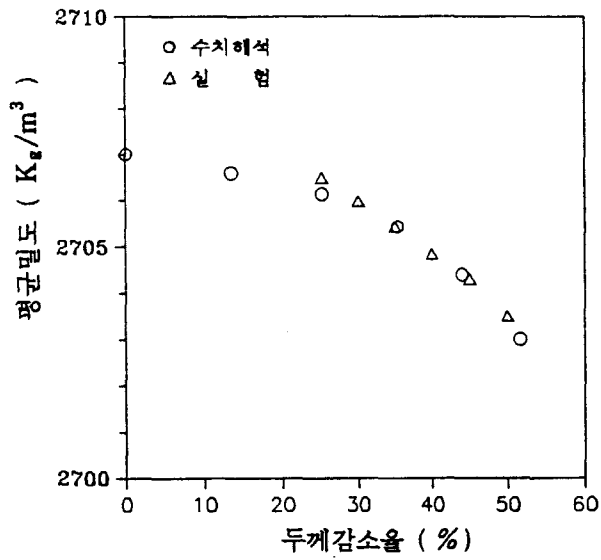
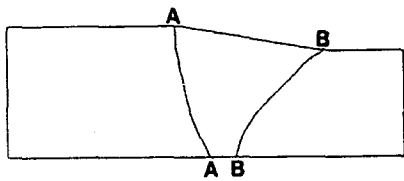
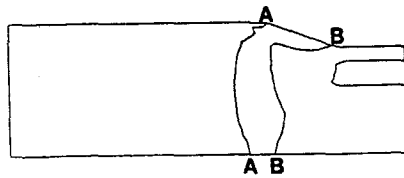


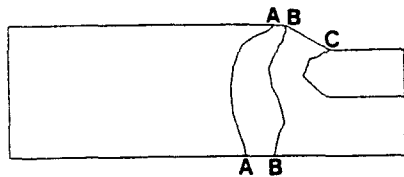
그림 5 두께감소에 따른 평균밀도변화



(a)

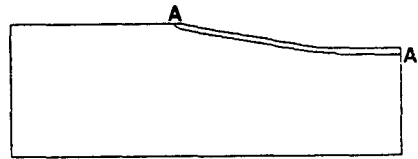


(b)

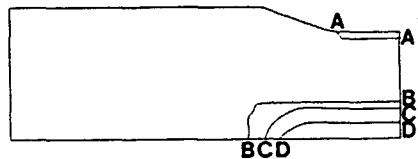


(c)

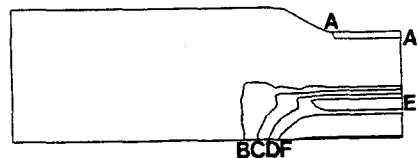
그림 6 하드니스분포: (a)드로잉각=10° (b)드로잉각=20° (c)드로잉각=30° : 20%두께감소, A=75Mpa, $\Delta\sigma^* = 25\text{MPa}$



(a)



(b)



(c)

그림 7 기공률분포: (a)드로잉각=10° (b)드로잉각=20° (c)드로잉각=30° : 20% 두께감소, A=0.001, $\Delta\phi = 0.25 \times 10^{-3}$