

판재 압연에서의 결함성장과 집합조직의 발전

이용신*

(2000년 2월 2일 접수)

Damage Evolution and Texture Development During Plate Rolling

Y. S. Lee

Abstract

A process model including the effects of both the texture development and ductile damage evolution in plane strain rolling is presented. In this process model, anisotropy from deformation texture and deterioration of mechanical properties due to growth of micro voids are directly coupled into the virtual work expressions for the momentum and mass balances. Special treatments in obtaining the initial values of field variables in the nonlinear simultaneous equations for the anisotropic, dilatant viscoplastic deformation are also given. Mutual effects of the texture development and damage evolution during plate rolling are carefully examined in terms of the distribution of strain components, accumulated damage, R-value as well as yield surfaces.

Key Words : Rolling, Texture, Anisotropy, Yield Surface

1. 서론

압연공정은 금속가공에 이용되는 판재의 90% 이상을 생산하는 중요한 소성가공 공정이다. 압연공정 중 소재는 큰 변형을 겪게 되고 동시에 재료 내부의 미세조직의 변화도 수반하게 된다. 재료 내부의 미세조직의 변화는 집합조직의 발전에 의한 이방성과 더불어 입벌림(Split Ends), 중앙균열(Central Burst) 등의 결함을 발생시킨다. 이와 같은 이방성이나 결함의 발생은 생산량의 감소,

제품의 질적 저하, 압연기의 손상뿐만 아니라 후속공정⁽¹⁾에도 영향을 준다. 따라서 고품질, 고정밀의 제품을 생산하기 위한 압연공정의 설계에 있어서 재료의 조성, 이방성, 미세기공의 성장, 온도, 마찰 등을 고려한 해석 시스템이 요구된다.

Taylor, Sachs, Kocks 등⁽²⁻⁴⁾은 결정소성학적인 측면에서 내부의 슬립을 바탕으로 미시적 거동을 해석함으로써 거시적 거동을 규명하려는 연구를 하였다. 최근 들어 이 같은 미시역학과 거시적 연속체 역학을 접목시키려는

* 국민대학교 기계·자동차 공학부

연구가 활발히 진행되고 있다

Coffin과 Rogers⁽⁶⁾는 압연공정 중의 입벌림, 중앙균열 등의 결합은 미세기공의 성장에 의해서 발생된다고 보고하였다. Avitzur와 동료들^(6~7), Turczyn⁽⁸⁾ 등은 미세기공 성장을 예측하기 위하여 상계해법(Upper Bound Method)을 이용하여 연구하였으며, 압연공정에서 상대두께(초기시편 두께/롤반경)가 크고 패스당 압하율이 작을 때 중앙균열이 발생할 확률이 높다고 보고하였다. Lee와 Dawson⁽⁹⁾은 연성결합을 기공률(f)로 정의하였으며, 미세기공의 성장에 따른 열성화(Softening)를 반영할 수 있는 모델을 제시하였다.

본 연구에서는 판재압연에서 나타나는 두 가지의 중요문제인 결정립 방위변화에 의한 이방성의 발전과 미세기공의 성장에 의한 재질의 열성화를 복합반영하고, 상호 영향을 예측할 수 있는 모델을 개발하고자 한다. 평면 변형을 연속 압연공정에 응용하여 각 압연단계에서 결합성장과 집합조직 발전의 상호영향을 소성변형비 R 값, 항복곡면, 변형률분포 등으로 상세히 조사한다.

2. 구성방정식

2.1 연성결합성장

본 연구에서 연성결합으로 정의되는 미세기공의 성장을 반영하는 기공률 발전식 $\dot{\phi}$ 는 Lee와 Dawson이 제안한 기공률 성장모델이 이용되었으며 유효변형률 속도, 기공률 그리고, 정수압 응력 (σ_m)을 변형경화를 모사하는 하드니스 (σ^*)로 나눈 비의 함수로서 식 (2)와 같이 주어진다.

$$\dot{\phi} = C_1 \frac{\dot{\phi}}{1-\phi} \text{Exp}(C_2 \frac{\sigma_m}{\sigma^*}) d_e \quad (1)$$

여기서, C_1 과 C_2 는 재료 고유의 상수이다. 기공률의 성장은 정수압응력 자체보다는 소재의 소성변형에 대한 저항을 나타내는 하드니스와의 비에 지수함수로 비례하는 것으로 표현하여 소성유동이 작은 변형에서도 기공률의 성장을 정확히 예측할 수 있는 것이 특징이며, 모델의 상세한 설명과 알루미늄의 물성계수 값은 참고문헌⁽⁹⁾에 주어진다.

2.2 집합조직발전

금속내부의 슬립은 슬립면상에서 슬립방향으로 전단 변형을 일으키며, 여러 개의 작용슬립 시스템에서 일어

나는 전단변형의 조합으로 외부의 거시적 소성변형이 나타난다. 이러한 경우에 각 결정립들은 변형경로에 따라 처음의 방위상태로부터 우선하는 방위로 회전하게 되어 집합조직을 형성하여 이방성을 발전시킨다.

본 연구에서는 Taylor가 제시한 바와 같이 모든 결정립의 변형률속도텐서는 다결정집합체의 변형률 속도 텐서(\mathbf{d})와 같은 것으로 가정하여, 결정립 집합체의 응력과 변형률 속도의 관계식(2)을 구하였다.

$$\sigma' = \frac{1}{N_g} \sum_{g=1}^{N_g} \left\{ \sum_{\alpha=1}^{N_s} f(\tau^{(\alpha)}) \mathbf{P}^{(\alpha)} \otimes \mathbf{P}^{(\alpha)} \right\}^{-1} \mathbf{d} \quad (2)$$

윗 식에서 $\mathbf{P}^{(\alpha)}$ 는 α 슬립시스템에서의 Schmid텐서의 대칭부이다. N_s , N_g 는 단 결정의 슬립시스템 수와 집합체내에 있는 결정립들의 수이다. $\tau^{(\alpha)}$ 는 α 슬립시스템에서의 분해전단응력이다. 변형이 진행됨에 따라 변하는 각 결정립의 오일러 각의 변화는 결정립의 회전텐서의 변화를 추적하여 계산한다. 이와같은 결정소성학 이론전개의 상세한 내용과 알루미늄의 물성계수 값은 참고 문헌 [1, 10, 12]등에 주어진다.

3. 유한요소 해석

집합조직의 발전과 결합성장을 고려한 정상상태 압연공정의 오일러리안 유한요소 해석을 위해서는 선형운동량 보존식 외에도 질량보존식을 고려해야한다.

가상일률의 정리를 적용하여 선형운동량 보존식을 범함수 꼴로 표현하면 식 (3)과 같으며, 이것은 유한요소 이산화의 바탕이 된다.

$$\delta J = - \int_V \sigma' \cdot \delta \mathbf{d} dV + \int_V p \text{tr}(\delta \mathbf{d}) dV + \int_S \mathbf{t} \cdot \delta \mathbf{u} dS \quad (3)$$

여기서, 텐서 $\delta \mathbf{d}$ 는 가상속도 $\delta \mathbf{u}$ 가 동반하는 가상 변형률속도를 나타내며 p 와 \mathbf{t} 는 각각 압력과 표면력을 나타낸다. 가상일률식에서 편차 진응력 σ' 은 다결정의 강·점소성의 구성방정식 (2)식을 이용하여 변형률속도 텐서로 나타낼 수 있으며, 이와 같은 과정이 집합조직의 발전에 따른 이방성을 반영하게 된다. 또한 압연소재의 체적변화는 단지 미세기공의 성장에 의한 것으로 가정한 질량 보존식을 압력으로 별칭화하여 범함수를 구하면 다음과 같다.

$$\delta I = \int_V \left[p + \lambda \left\{ \text{tr}(\mathbf{d}) - \frac{\dot{\phi}}{1-\phi} \right\} \right] \delta p \, dV \quad (4)$$

여기서 결함 발전 ($\dot{\phi}$)는 식(1)에서 주어지며, 동 별 척상수(Variable Penalty Parameter) λ 는 각 유한요소 Gauss 적분점에서의 유효점성계수의 10^6 배 값으로 취하였다. (3)와 (4)식에서 속도와 압력을 형상함수로 근사화한 후 유한요소 절점에서의 속도 (U)에 대한 식으로 정리하면 다음과 같은 형태의 최종의 유한요소 정식을 얻는다.

$$[[K_\mu] + [K_\lambda]]\{U\} = \{F_t\} \quad (5)$$

위와 같이 각 요소에서 구한 유한요소 정식은 전영역에 걸쳐 중첩되고 표면력 벡터, 속도 등의 경계조건을 적용시켜서 해를 구하게 된다. 물 접촉면에서의 경계조건은 물과 접촉하는 유한요소의 표면에 회전 국부좌표계를 설정하여 물의 법선방향 즉 국부좌표계의 z축방향의 속도성분이 영이 되도록 하였다. 또한, 물 접촉면에서는 소재와 물의 상대속도에 비례하는 마찰력 ($\hat{\mathbf{t}}$)이 작용하는 것으로 가정하였다.

$$\hat{\mathbf{t}} = \beta_f (\mathbf{u}_d - \mathbf{u}) \quad (6)$$

여기에서 β_f 는 동마찰계수이고, \mathbf{u}_d 는 다이의 속도이고, \mathbf{u} 는 구하고자하는 소재의 유동속도이다. 이와같은 동마찰 모델의 상세한 설명은 참고문헌 (9)에 주어진다.

4. 응용

앞에서 제시한 오일러리안 유한요소 해석 방법을 알루미늄 판재 압연에 응용하였다. 롤 반경, 패스당 압하량, 상대두께(초기시편 두께/롤반경) 등을 변수로 결함성장과 이방성의 발전을 비교할 수 있도록 선정한 4가지의 공정조건들을 Table 1에 나타내었다. Turczyn⁽⁸⁾이 제시한 압연에서의 중앙균열 조건에 근거하여 중앙균열 확률이 가장 작은 case1부터 확률이 점차 높아지도록하여 가장 확률이 높은 case4를 선정하였다. 압연방향, 두께방향 및 폭 방향을 각각 x, y 및 z 방향으로 설정하여 통상적으로 압연해석에 쓰이는 좌표계를 사용하였다. 판재 압연의 상하 대칭의 반쪽 부분을 해석영역으로 선정하였으며, 사용된 유한요소 격자는 9절점 4각 요소 45개로 구성되었다.

Table 1 Used parameters for rolling process

	case1	case2	case3	case4
roll radius (mm)	67.0	19.85	15.88	15.88
reduction(%) / pass	30	10	15	10
relative thickness	0.1	0.4	0.5	0.5
initial thickness (mm)	7.94			
total reduction (%)	60			
friction coeff. (GPa s/m)	100			
tangential velocity (m/s)	0.1			
material	Al-1100			

비선형문제의 유한요소 해석에 있어서 초기치의 결정은 수렴성에 큰 영향을 끼친다. 본 연구에서는 속도 및 상태변수의 초기치를 얻기 위하여 먼저 등방성 해석을 수행하였다. 등방성 해석의 물성모델 형태는 슬립시스템에서의 슬립에 대한 구성방정식에서 취하였으며, 등방성의 물성계수는 무질서방위를 갖는 다결정의 평균변형을 모사할 수 있도록 구하였다. 실제 공정에서 나타나는 0.01, 1, 100 세 가지의 유효변형률 속도에 대하여 단축인장, 순수전단, 조합응력 상태의 이방성 해석에서 얻어진 하드니스와 유효응력(Effective Stress, Fig. 1 참조)의 데이터를 평균적으로 모사할 수 있도록 등방성 모델의 계수를 결정하였다. 압연 전 초기상태의 기공률(f)은 알루미늄의 이론밀도와 압연 전 실제밀도로서 구한 0.0011로 적용되었으며, 참고문헌^[11]에서 취하였다.

4.1 결함성장(Damage Evolution)

선정된 네 가지의 모델을 전체 압하율 60%로 압연하였으며, 결함성장을 등방성 소재의 해석 결과와 초기 무질서방위(Random Texture)를 갖는 소재의 이방성 결함 해석 결과를 비교하였다. case1에서는 결함이 성장하지 않았으며, Fig. 2에 case2, 3, 4의 압연방향 중심부에서의 초기결함에 대한 성장비를 나타내었다. 압연이 진행될수록 결함이 성장하고 있으며, 집합조직의 발전은 결함성장을 작게하는 것을 볼 수 있다. 단일 패스당 압하율(10%)이 동일한 case2, 4에서는 상대두께가 더 큰 case4에서 결함이 더 크게 성장하였고, 상대두께(0.5)가 동일한 case3, 4에서는 단일 패스당 압하율이 더 작은 case4

에서 더 크게 성장한 것을 알 수 있다. 이와 같은 예측은 Avitzur⁽⁷⁾, Turczyn⁽⁸⁾ 등이 보고한 결과와 같은 경향이다.

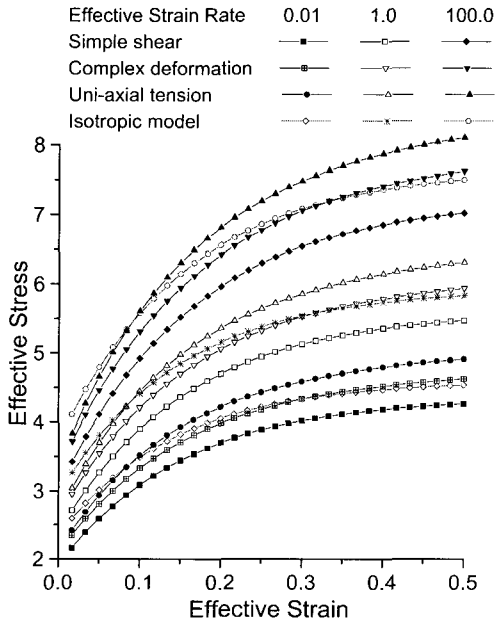


Fig. 1 Effective stress comparison between anisotropic and fitted isotropic model

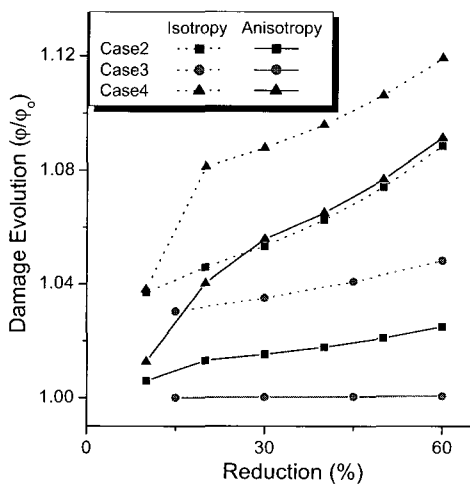


Fig. 2 Damage evolution along the center line for different process parameter

Fig. 3에는 앞서 해석한 결과에 대해서 두께방향의 결함분포를 나타내었다. 네 가지 경우 모두 표면부에서의 결함이 현저히 크게 성장한 것을 볼 수 있으며, 특히 case1에서 가장 크게 성장한 것을 볼 수 있다. 표면부에서의 결함은 롤 접촉에 의한 전단변형에 의해서 성장한다. 따라서 롤 접촉이 가장 많은 case1의 소재표면에서의 결함이 가장 크게 성장할 것이란 것을 예측할 수 있다. 반면 중심부에서는 상대두께나 압하율에 따라서 인장변형이 발생하며, 이에 따른 양의 정수압 응력이 결함을 성장시키기 때문에 각 경우마다 차이가 발생한다. 이러한 중심부 결함이 중앙균열을 일으키는데 상대두께가 크고 패스당 압하율이 작은 Case4에서 중심부 결함이 가장 크게 성장하는 것을 보여주는데 이것은 Avitzur⁽⁷⁾, Turczyn⁽⁸⁾ 등이 보고한 결과와 같은 경향이다.

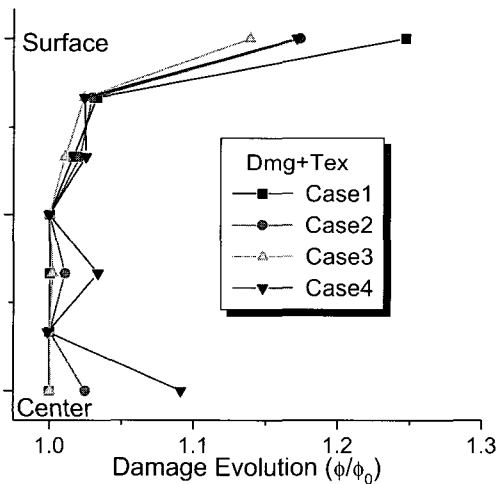


Fig. 3 Damage distribution through-thickness

4.2 초기 집합조직의 영향

두 가지 초기 집합조직(Random, Cube Texture)에 따른 중심부에서의 결함성장을 case2의 공정조건으로 해석하였으며, 등방성 소재의 결함해석 결과와 비교하였다.

Fig. 4에서 보이는 바와 같이 초기에 무질서 방위(Random Texture)를 갖는 소재의 이방성 해석은 등방성 해석 보다 결함의 성장이 작게 됨을 예측하나, 재결정 집합조직(Cube Texture)을 갖는 소재의 이방성 해석은 등방성 해석에 비해서도 결함성장이 보다 크게 되는 것을 예측하고 있다. 재결정 집합조직을 갖는 소재를 압연할 시에는 새롭게 형성되는 집합조직이 없어 압연 후에도 초기의 재결정 집합조직을 유지하는 것으로 알려져 있으나 결함의 성장은 다른 경우 보다 커짐을 예측하고

있다.

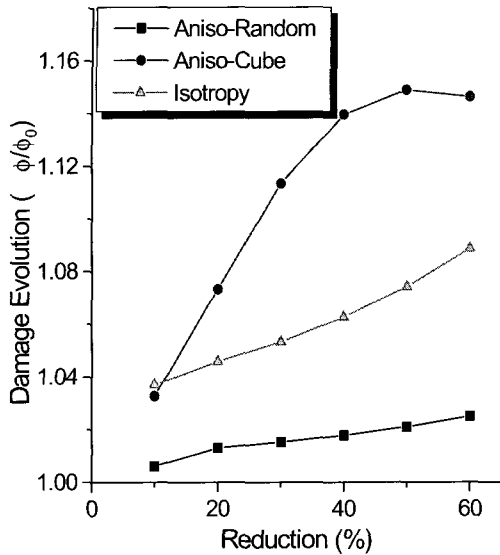


Fig. 4 Damage evolution along the center line with initial texture in case2

4.3 소성변형비, 항복곡면

일반적으로 금속재에 있어서 소성변형비 R값은 이방성을 나타내는 척도로써 많이 이용된다. R값은 재료의 인장시에 나타나는 폭 방향과 두께 방향의 소성변형률 혹은 소성변형률 속도의 비를 의미하며, 본 연구에서는 다음 식으로 정의한다.

$$R(\theta) = \frac{d_w}{d_t} \quad (7)$$

여기서, θ 는 인장방향이 압연방향과 이루는 각도를 나타내며, 아랫 첨자 w와 t는 각각 폭 방향과 두께 방향을 의미한다. 집합조직의 발달에 따라 변하는 R값과 항복곡면을 다결정 소성론을 이용하여 구하는 방법의 상세한 설명은 참고문헌⁽¹⁰⁾에 주어진다.

결함이 성장하지 않은 case1과 결함이 성장한 case2에 대해서 결함성장이 R값에 미치는 영향을 조사하였다. 압연 전 초기 소재는 두께방향으로 동일한 집합조직을 가지며, 무질서방위를 갖는 것으로 가정하였다. 압연 전 집합조직에 대한 R값과 두 가지 공정조건으로 압연한 후 표면(Center), 표면과 중심부를 2등분하는 중앙부(Middle), 중심부(Center)의 집합조직을 이용하여 R값을 구하였다.(Fig. 5, 6 참조)

압연 전 소재의 R값은 등방성 소재를 모사하기 때문

에 '1' 주위에서 고르게 분포하고 있으나 압연된 소재는 집합조직의 발달로 인하여 표면, 중앙, 중심부 모두 45° 부근에서 가장 큰 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 중심부에서는 45° 방향으로 R값이 최대 약 3 정도까지 증가하고있다. Fig. 5에 나타낸 case1의 경우 결함성장을 반영했을 때 중앙, 중심부에서는 R값이 결함을 반영하지 않은 해석 결과와 거의 일치하나 표면부에서는 전 방향에 걸쳐 R값이 약간은 감소한 것을 볼 수 있다.

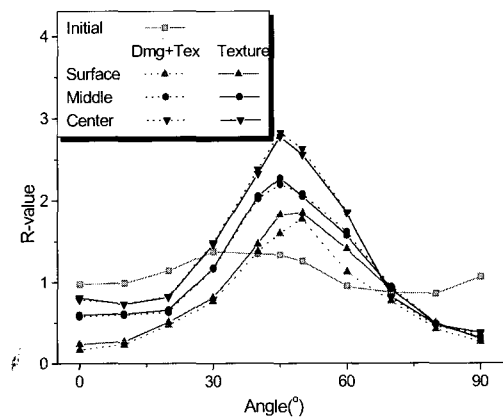


Fig. 5 Through-thickness R-values in case1

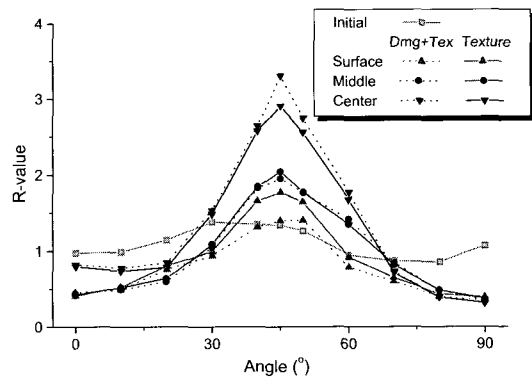


Fig. 6 Through-thickness R-values in case2

case2의 경우에는 결함을 반영한 해석의 경우에 중심부에서의 R값은 결함을 반영하지 않은 해석 결과보다 45° 방향에서 크게 증가하였고, 표면부에서는 결함을 반영한 해석의 R값은 감소하였다. 그러나 중앙부에서는 두 해석 모두 비슷한 R값의 분포를 보이고 있다.(Fig. 6 참조) 이는 case1에서는 표면부에서만 결함이 성장하였으

나, case2에서는 표면, 중심부 모두 결함이 성장하였기 때문에 R값의 차이가 난 것으로 추측된다. 위 결과처럼 결함성장을 연계한 이방성 해석에 있어서 결함의 성장은 중심부에서는 R값을 증가시키나 표면부에서는 감소시키는 것으로 나타났다.

두 가지의 초기 집합조직에 대해서 case2의 공정조건으로 60% 압연한 후 얻어지는 집합조직을 바탕으로 한 항복곡면을 Fig. 7에 나타내었다. 전반적으로 전단변형에 대한 항복저항은 초기 재결정 집합조직을 갖는 소재가 무질서 방위를 갖는 소재보다도 훨씬 크나 인장변형에 대해서는 작게 되는 것을 알 수 있다. 이방성 해석(Texture Analysis)과 이방성 결함해석(Damage & Texture Analysis)을 이용하여 60% 압연을 시뮬레이션하였고, 압연된 소재의 항복곡면은 거의 일치하고 있다. 즉, 결함의 성장은 초기 집합조직의 형태에 관계없이 항복곡면의 발전에 영향을 거의 끼치지 않음을 알 수 있다. 이것은 본연구의 결함이 등방성의 스칼라 변수로 정의된 것에 기인하는 것으로 추측된다.

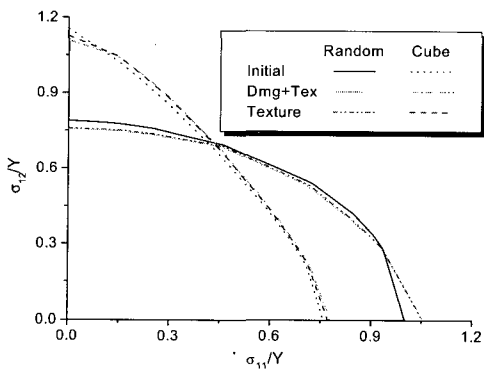


Fig. 7 Constant strain rate yield surface in case2

4.4 변형률 분포

결함의 성장이 유동장에 끼치는 영향을 조사하기 위하여 물질점의 유동 경로를 추적하고 그 경로에 따라 변형률 속도를 적분하는 유선 적분법에 의하여 변형률 분포를 계산하였다. 초기 집합조직은 무질서방위가 사용되었으며, 결함이 가장 크게 성장한 case1의 표면부 변형률을 Fig. 8에 나타내었다. 롤과 시편 사이의 마찰력으로 인하여 입구 전부터 급격히 변형이 생기는 것을 볼 수 있다. 압연 방향 변형률(ϵ_{xx})과 두께방향 변형률(ϵ_{yy})은 거의 일치하나, 전단방향의 변형률(ϵ_{xy})은 결함성장

을 반영한 해석에서 작게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 표면부에서는 인장보다는 전단변형에 의한 결함이 성장하였기 때문인 것으로 추측된다.

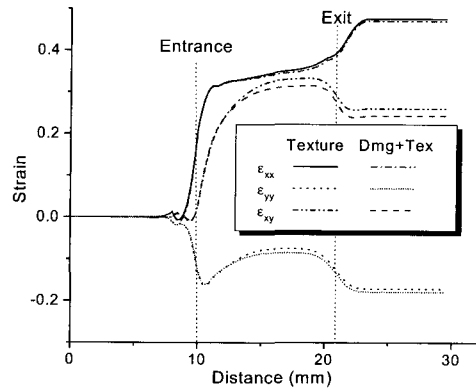


Fig. 8 Strain distribution along the surface line in case1

4.5 소재두께와 롤반경 비의 영향

롤 반경이 R값에 미치는 영향을 알아보기 위하여 롤 반경을 16, 27, 67mm로 선정하고 다른 공정변수들은 동일하게 하였다. 전체 압하율이 30, 60%인 2단 연속공정으로 해석하였으며, 60% 압연된 중심부 집합조직을 이용하여 R값을 구하였다.(Fig. 9 참조)

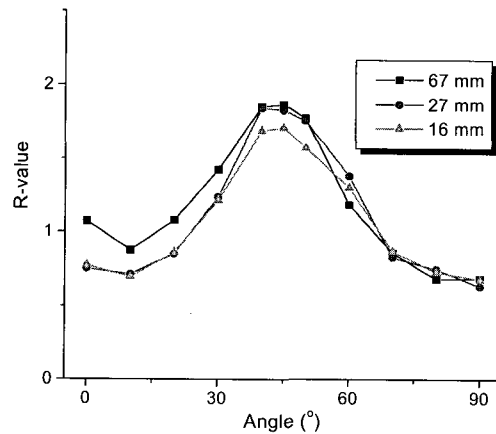


Fig. 9 R-value for different roll radius

세 가지 모델 모두 45°부근에서 가장 큰 R값을 가지는 것을 볼 수 있으며, 부분적으로 약간씩의 차이는 있지만

전반적으로 롤의 반경이 클수록 R값이 약간씩 증가하는 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 결정 소성학을 이용한 이방성 발전과 결함성장의 영향을 복합 반영하고 예측하는 유한요소 해석모델을 개발하여 압연공정에 적용하였다. 제시한 모델을 이용한 해석으로 얻은 결함성장이 Avitzur⁽⁷⁾, Turczyn⁽⁸⁾ 등이 보고한 결과와 유사한 경향을 보이는 것을 확인하였다. 집합조직의 발전과 결함성장의 상호 영향을 R값, 항복곡면, 변형률 분포로서 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 판재압연에서 중심부의 결함은 상대두께가 크고 패스당 압하율이 작을 때 크게 성장하였다.

(2) 초기 무질서 방위를 갖는 소재의 2차원 압연공정의 유한요소 이방성 해석은 등방성 해석보다는 결함성장을 작게 예측하였다.

(3) 재결정 집합조직을 갖는 소재의 압연은 다른 소재의 압연에 비해 이방성의 발전을 별로 일으키지 않으나, 결함은 크게 성장시키는 것을 예측하였다.

(4) 결함성장을 반영한 이방성해석에서의 R값은 결함성장으로 인하여 표면부에서는 감소되었으나 중심부에서는 증가되었다.

(5) 결함성장이 항복곡면에 미치는 영향은 그리 크지 않은 것으로 나타났는데, 그 이유는 등방성의 스칼라 결함변수를 사용한 때문으로 생각된다.

(6) 압연 공정 조건이 같을 경우에는 롤 반경이 클수록 R값도 크게됨을 확인하였다.

본 연구를 통하여 실제 압연공정에 있어서 등방성해석으로는 규명하지 못한 이방성이나 결함성장을 예측할 수 있게 되었으며 고품질, 고정밀의 제품설계와 보다 효

과적인 공정설계에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- (1) 배석용, 이용신, 1998, "판재의 초기 집합조직이 평면 변형률 스트레칭 변형에 미치는 영향", 한국소성가 공학회지, 제7권 제5호, pp. 459~464.
- (2) Taylor G. I., J. Inst. 1938, Metals, Vol. 62, pp. 307~324.
- (3) Sachs, G., Z. Verein Deut. Ing., 1928, Vol. 72, pp. 734.
- (4) Kocks U. F., 1958, Acta Metall., Vol. 6, pp. 85~94.
- (5) Coffin, Jr. L.F. and H. C. Rogers, 1967, Trans. ASM, 60: 672~686.
- (6) B. Avitzur, W. Gordon, S. Talbert, 1987, Transac. of the ASME, Vol. 109, pp. 338~346.
- (7) B. Avitzur, C. J. Van Tyne, S. Turczyn, 1988, J. of Eng. for Ind., Vol. 110, pp. 173~178.
- (8) S. Turczyn, 1996, J. of Mat. Proc. Tech., Vol. 60, pp. 275~282.
- (9) Lee. Y-S and P. R. Dawson, 1993, Mechanics of Materials, 15: 21~34.
- (10) E-G Yoh and Y-S Lee, 1998, 한국정밀공학회지, Vol. 15, No. 5, pp. 167~175.
- (11) Y-S. Lee, S-Y. Hahm, 1997, Int. J. Mech. Sci., Vol. 39, No. 5, pp. 565~573.
- (12) 김웅주, 이용신, 1996, "집합조직의 발전을 반영하는 다결정재의 정상 상태 성형공정해석" 한국소성가 공학회지, 제5권 제4호, pp. 297~304.