

정상상태 압연공정의 오일러리안 해석에 관한 연구

이 용 신*

A Study on Eulerian Analysis for the Steady State Rolling

Yong-Shin Lee

1. 서 론

압연공정은 롤 사이에 소재를 통과시켜서 소성 변형을 겪도록 하여 원하는 형상의 제품을 대량으로 생산할 수 있는 효율적 공정이다. 압연 중인 소재의 대변형은 미세조직의 변화를 유발시키며 거시적으로는 소재의 기계적성질을 변화시킨다. 예를 들면, 냉간 압연 중인 소재의 소성변형은 슬립시스템의 활동에 의한 것으로 이에 수반되는 결정립들의 회전은 우선방위를 발전시킨다. 평판의 압연 중에 나타나는 평면변형을 집합조직은 판재 이방성의 주된 원인으로 후속 판재성형공정에서 성형성을 제한하는 가장 큰 원인이다. 다른 예로 압연된 판재의 중앙부에서 나타나는 미세기공의 성장은 판재의 기계적성질을 열성화 시키며 궁극에는 중앙부 균열(Central bursting)을 일으킨다. 그러한 기계적성질의 열성화를 종종 재료결함(또는 손상)이라고 칭한다. 연성금속의 경우에 결함은 소재 전체의 체적에 대한 기공의 체적비 즉 기공률(porosity)로 정의된다. 일반적으로 압연을 포함한 성형공정의 목적은 원하는 형상의 제품을 우수한 기계적성질을 갖도록 제작하는 것이다. 따라서 압연공정의 해석모델은 형상변화를 예측할 수 있음은 물론 기계적성질의 변화에 대한 예측 기능을 반드시 포함하여야 한다.

거의 모든 압연공정은 대량생산을 목적으로 설계되어 공정 중에는 본질적으로 전체 공정의 대부분에서 정상상태(Steady state)를 유지하게 된다. 따라서 압연공정의 초기와 말기를 제외한 정상상태의 압연공정 분석을 위하여는 오일러리안 해석

방법을 사용하는 것은 자연스러운 선택이며, 더불어 해석시간을 크게 단축하는 이점을 갖는다. 그러나 오일러리안 해석은 압연된 후의 소재의 형상까지도 고려하여 검사체적(Control volume)을 해석이 수행되기 전에 가정하여야 한다. 예를 들어 롤과 접촉하는 부분은 자연스럽게 검사체적의 표면으로 만들 수 있으나, 롤과 접촉하지 않는 자유표면은 해석으로부터 얻어야 하는 해의 하나이다. 거의 모든 경우에 처음 가정한 자유표면 형상은 최종 압연제품의 자유표면 형상과 일치하지 않는다. 또 다른 예로는 클래드 압연의 경우에 소재간의 접촉 면 형상(Profile)은 오일러리안 검사체적 내에서 가정한 형태가 실제로 압연 중에 접촉면 형상의 변화와 일치하지 않으므로 해의 일부로 구하여야 한다.

본 연구에서는 정상상태 압연공정의 오일러리안 해석에서 마이크로 결정소성학에 의거하여 집합조직의 변화와 그에 따른 이방성을 예측하고, 연속체 결함역학에 의거하여 미세기공의 성장과 기계적 성질의 열성화를 예측하여 매크로 공정 해석에 다시 반영하는 멀티 스케일 오일러리안 모델링 기법을 설명한다. 더불어 오일러리안 해석에서 검사체적의 외부 자유표면이나 내부 접촉면의 변화를 예측할 수 있는 자유표면 수정법과 유선추적법을 소개한다. 판재 압연에 적용하여 집합조직의 발전, 그에 따른 이방성 항복곡면 및 R-값 그리고 기공률의 분포를 조사하여 해석 모델의 타당성을 검증한다. 3 차원의 사각단면봉 압연 및 형상압연 그리고 2 차원의 극저온 압연 및 클래드 압연에의 적용 예를 보여준다.

* 국민대학교 기계자동차공학부
e-mail) yslee@kookmin.ac.kr

2. 오일러리안 공정해석 모델

본 연구의 공정해석 모델은 내부에 미세기공을 갖고 있는 다결정 금속의 변형경화서 점소성변형을 모사하기 위한 것으로 보전법칙, 구성방정식과 경계조건들로 이루어진다. 통상의 공정해석 모델과 다른점은 미세기공의 성장에 의한 체적변화를 동반하는 소성변형을 모사한다는 것과 거시적 소성변형을 마이크로 관점의 슬립시스템 활동으로 모사하기 위하여 결정소성학을 결합하는 것이다. 더불어 오일러리안 해석에서 형상변화를 예측하는 기법을 포함하는 점이다. 이에 통상의 평형방정식들의 소개는 생략하고, 기계적 성질의 변화 예측과 관련한 구성방정식들과 형상예측기법을 간략히 소개한다.

2.1 구성방정식

2.1.1 슬립시스템 활동의 구성방정식

금속내부의 슬립은 슬립면상에서 슬립방향으로 전단변형을 일으키며, 여러 개의 작용 슬립시스템에 일어나고 있는 전단변형의 조합으로 외부의 거시적 소성변형이 나타난다. 본 연구에서는 슬립시스템의 전단 변형률속도와 분해전단응력의 관계에 슬립시스템의 변형경화를 반영하는 구성방정식을 사용하였다.

$$\dot{\gamma}^{(\alpha)} = \dot{a}^{(\alpha)} \frac{\tau^{(\alpha)}}{\hat{\tau}^{(\alpha)}} \left| \frac{\tau^{(\alpha)}}{\hat{\tau}^{(\alpha)}} \right|^{(1/m)-1} \quad (1)$$

위 식에서 $\dot{a}^{(\alpha)}$ 는 α 슬립시스템에서의 분해전단응력($\tau^{(\alpha)}$)이 그 시스템의 하드니스($\hat{\tau}^{(\alpha)}$)에 도달했을 때의 전단 변형률속도이다. α 슬립시스템에서의 분해전단응력은 결정립의 진응력($\sigma^{(\alpha)}$)을 현재형상에서의 슬립시스템에 투영하여 다음과 같이 구한다.

$$\tau^{(\alpha)} = \text{tr}(\mathbf{P}^{(\alpha)} \boldsymbol{\sigma}^{(\alpha)}) \quad (2)$$

위 식에서 $\mathbf{P}^{(\alpha)}$ 는 현재형상의 α 슬립시스템에서 슬립방향벡터 $\mathbf{s}^{(\alpha)}$ 와 슬립면 법선벡터 $\mathbf{n}^{(\alpha)}$ 로 정의된 Schmid 텐서의 대칭부이다. 슬립시스템의 변형경화 즉 하드니스 발전식은 Voce 에 의해 제시되어 Kocks 에 의해 온도와 변형률속도 영향을 포함시키도록 수정된 것으로 다음과 같다.

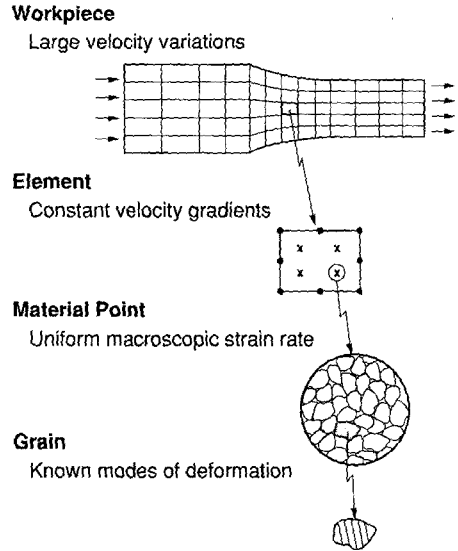


Fig. 1 Length scales in rolling simulation

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}} = \Theta_0 \left[\frac{\hat{\tau}_s(\dot{\gamma}^*) - \hat{\tau}_{avg}}{\hat{\tau}_s(\dot{\gamma}^*) - \hat{\tau}_0} \right] \dot{\gamma}^* \quad (3)$$

여기서

$$\hat{\tau}_s(\dot{\gamma}^*) = \hat{\tau}_{s0} \left| \frac{\dot{\gamma}^*}{\dot{\gamma}_s} \right|^{A/\mu}, \quad \dot{\gamma}^* = \sum_{\alpha} |\dot{\gamma}^{(\alpha)}| \quad (4)$$

윗식에서 μ 는 전단탄성계수이고 $\hat{\tau}_0$, $\hat{\tau}_{s0}$, $\dot{\gamma}_s$, Θ_0 와 A 는 재료상수이다.

슬립시스템의 구성방정식(1)에 결정립의 변형률속도와 슬립시스템상의 전단변형률 속도와의 관계와 결정립에 미치는 응력과 슬립시스템상의 전단 응력의 관계식(2)을 적용하면 단결정에 대한 응력과 변형률속도($\mathbf{d}^{(g)}$)의 관계식을 구할 수 있다.

$$\mathbf{d}^{(g)} = \left\{ \sum_{\alpha=1}^{N_s} \dot{\gamma}^{(\alpha)} \mathbf{P}^{(\alpha)} \otimes \mathbf{P}^{(\alpha)} \right\} \boldsymbol{\sigma}^{(g)} \quad (5)$$

결정립 집합체의 거시적 소성변형은 각 결정립들의 미시적 점소성 변형의 중첩으로 나타난다. 본 연구에서는 Taylor 가 제시한 바와 같이 모든 결정립의 변형률속도텐서는 다결정집합체의 변형률속도텐서(\mathbf{d})와 같은 것을 가정하였다. 즉

$$\mathbf{d} = \mathbf{d}^{(g)} = \sum_{\alpha=1}^{N_s} \mathbf{P}^{(\alpha)} \dot{\gamma}^{(\alpha)} \quad (6)$$

한편 다결정 집합체의 진응력($\boldsymbol{\sigma}$)은 각 단결정

의 응력을 평균하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma = \frac{1}{N_g} \sum_{g=1}^{N_g} \left(\sum_{\alpha=1}^{N_\alpha} \hat{f}(\tau^{(\alpha)}) \mathbf{P}^{(\alpha)} \otimes \mathbf{P}^{(\alpha)} \right)^{-1} \mathbf{d} \quad (7)$$

위의 구성방정식을 포함하여 본 연구의 결정소성학 이론은 참고문헌(4-6)등에 주어진다. 이와 같은 마이크로 스케일에서의 해석을 거시적 유한요소 해석에 사용할 때에 두 스케일 사이의 연결관계가 Fig. 1에 주어진다.

2.1.2 기공률 성장의 구성방정식

미세기공들의 성장은 체적변화를 일으키며, 이의 예측을 위한 기공률의 성장모델이 필요하다. Lee 와 Dawson(1)은 구형기공을 둘러싸고 있는 변형경화성 점소성의 원통형 기질로 된 단위모형 문제를 해석하여 기공률 성장모델을 제시하였다. 본 연구에 이용된 기공률 발전식은 유효변형률 속도, 기공률, 그리고 정수압 응력을 슬립시스템 하드니스로 나눈 비의 함수로 다음과 같다.

$$\dot{\phi} = C_1 \frac{\dot{\phi}}{1-\phi} \text{Exp}(C_2 \frac{\sigma_m}{\dot{\epsilon}}) d_e \quad (8)$$

C_1 과 C_2 는 재료 고유의 상수이며, 상세한 설명은 참고문헌(1)에 주어진다. 윗 식의 기공률 성장 모델에서 주요 특징은 정수압응력이 상태변수인 하드니스로 나눈 비가 사용된 것으로 그 장점은 변형이 작은 지역에서도 기공률 성장을 정확히 예측할 수 있는 점이다. 과거에 제시된 많은 기공률 성장모델은 정수압 응력을 유효응력으로 나눈 비(σ_m / σ_e)의 함수로 표시하여 변형이 작은 지역 즉, 유효응력이 작은 지역에서도 과대 예측되는 경향이 있었다.

2.2 형상 예측 (Shape prediction)

오일러리안 해석에서 형상예측을 위한 기법들은 자유곡면이나 이종재 접촉면에서는 경계를 가로질러 물질이동이 없어야 하는 점을 이용하거나 유동경로를 추적하여 변형이력을 구하여 형상예측을 수행하는 방법들이다. 본 연구에서는 그러한 방법들을 자유곡면 수정법과 유선추적법이라 칭하며 다음에 간략히 소개한다.

2.2.1 자유표면 수정법

자유표면(Free surface)이라는 것은 물질이 그 표면을 가로질러 이동이 없으며, 표면력(t)이 영인 것으로 그 수학적 표현은 다음과 같다.

$$\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = 0, \quad t = 0 \quad (9)$$

여기에서 단위 법선 벡터(normal vector) \mathbf{n} 은 올바른 위치에 있는 자유표면의 법선방향의 단위 벡터이다. (9)의 두 조건은 자유표면 상의 어느 점에서도 만족되어야 한다. 일반적으로 오일러리안 해석에서 $t=0$ 는 경계조건으로 주어지기 때문에 첫 번째 조건을 만족시키도록 처음에 가정한 검사체적의 자유표면을 수정시켜야 한다. 올바른 자유표면 상의 점들의 좌표 값(\mathbf{x})은 구하고자 하는 미지수이고 현재의 자유표면 상의 점들의 좌표 값(\mathbf{X})과의 관계는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\mathbf{x} = \mathbf{X} + \hat{\mathbf{d}} s \quad (10)$$

윗 식에서 $\hat{\mathbf{d}}$ 는 방향벡터로 현재의 자유표면 상의 점들이 (9)의 조건을 만족시키도록 움직이는 방향을 나타내고, 거리변수(distance parameter) s 는 그 점들이 이동해야 되는 크기로 구하고자 하는 해가 된다. (10)식의 표현은 방향벡터가 주어지는 경우에 공간에서의 움직임을 한 개의 미지수 s 로 표현하는 장점이 있다. 일례로 사각단면 봉 압연의 경우에 소재의 옆면은 자유표면으로 그 면 상의 점들은 면의 법선방향으로 $\hat{\mathbf{d}}$ 를 정하면 좋은 결과를 얻을 수 있다. (9)의 첫 번째 식에 Galerkin의 유한요소법을 적용하면,

$$\begin{aligned} R_s &= \int_{S_{cf}} \mathbf{Nv}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{x}) dS \\ &= \int_{S_{pf}} \mathbf{Nv}(\mathbf{X} + \hat{\mathbf{d}}s) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{X} + \hat{\mathbf{d}}s) \mathbf{J}(\mathbf{x} : \mathbf{X}) dS \quad (11) \end{aligned}$$

여기에서 자코비안, \mathbf{J} 는 올바른 자유표면 S_{cf} 과 현재의 자유표면 S_{pf} 상의 같은 물질 입자들이 차지하는 넓이의 비를 나타낸다. 이제 국부 표면좌표계 (α, β)를 도입하고, 그 기준 벡터 ($\mathbf{e}_\alpha, \mathbf{e}_\beta$)로 올바른 자유표면의 단위 수선벡터를 구한다.

$$\mathbf{n}(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{e}_\alpha \times \mathbf{e}_\beta}{|\mathbf{e}_\alpha \times \mathbf{e}_\beta|} \quad (12)$$

현재의 좌표값과 거리변수 s 를 형상함수로 근

사화하여, (11)식에 대입하여 정리하면 다음과 같은 유한요소 정식을 얻는다.

$$[K_{ij}]\{S_j\} = \{f_i\} \quad (13)$$

여기에서 강성행렬 $[K_{ij}]$ 는 올바른 자유표면에서의 속도분포 표현에 따라 선형과 비선형의 식을 얻을 수 있으나 본 연구에서 보여준 결과들은 선형화된 자유표면 수정 알고리즘을 사용하여 얻었다. 마지막으로 자유면 수정을 위한 유한요소법은 경계치가 요구된다. 이에 대해 Eulerian 검사체적의 입구의 위치를 고정하여 유동의 진행에 따른 검사체적의 경계를 예측하는 것으로 경계조건이 주어진다.

2.2.3 유선추적법

오일러리안 검사체적 내에 있는 입자의 유동경로는 위치는 현재위치에 대한 Talyor 급수 전개에서 고차항을 무시하고 2 차항까지 취하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{x}^{t+\Delta t} = \mathbf{x}' + \frac{\partial \mathbf{x}'}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial^2 \mathbf{x}'}{\partial t^2} \frac{\Delta t^2}{2} + \dots \quad (14)$$

윗식에서 $\mathbf{x}^{t+\Delta t}$ 와 \mathbf{x}' 는 각각 $t + \Delta t$ 시각과 t 에서 입자의 위치벡터이다. 현재 위치벡터의 시간에 대한 편미분은 입자의 속도로 표시하고, 증분 Δt 는 유선상의 거리 ($\Delta|\mathbf{x}'|$)를 입자속도(\mathbf{u})의 크기로 나누어 윗 식을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\mathbf{x}^{t+\Delta t} \cong \mathbf{x}' + \mathbf{u}' \left(\frac{\Delta|\mathbf{x}'|}{|\mathbf{u}'|} \right) + \frac{1}{2} \mathbf{u}' \cdot \nabla \mathbf{u}' \left(\frac{\Delta|\mathbf{x}'|}{|\mathbf{u}'|} \right)^2 \quad (15)$$

오일러리안 검사체적 내의 유선은 윗 식에서 얻는 좌표 값들로 정의 될 수 있다.

위의 유선 추적법은 여러 가지의 경우에 응용될 수 있다. 먼저 이중재 클래드 압연의 경우에는 경계면을 가로질러 물질의 유동이 없어야 하므로 오일러리안 격자 입구에서 이중재 경계에 있는 점에 대하여 (15)식으로 구한 경로가 처음에 가정한 경계면을 가로질러 움직이는 가를 조사한다. 만약 가로질러 움직이면 (15)식으로 구한 유동경로와 가정한 경계면과의 편차로부터 물질의 유동이 없는 수정된 경계면을 구하고 그에 따른 유한요소격자를 새로 만들어 수렴된 해를 얻을 때까지 반복하여 시뮬레이션을 계속한다.

극저온 압연의 경우에는 압연중인 소재의 결정립 크기 및 형상의 변화에 대한 예측이 매우 중요하다. 일반적으로 마이크로 스케일의 결정립의 크기는 매크로 스케일의 소재 크기에 비해 매우 작기 때문에 매크로 해석의 결과를 그대로 이용하지 못하고 두 스케일 간의 연결이 필요하다. 본 연구에서는 두 스케일간에 힘의 평형은 근사적으로 만족되나 기하학적 적합성은 정확하게 만족되는 방법을 사용한다. 즉 수 많은 결정립 집합체로 대응되는 매크로 점의 변형을 모든 결정립이 같은 변형을 겪는 것을 가정한다. 따라서 결정립의 크기 및 형상 변화를 예측하기 위하여는 매크로 점의 변형이력을 구하여야한다. 이 외에 특수강선으로 보강된 소재의 압연에서 보강된 강선의 형상 단면의 변화에 대한 예측에서도 강선이 있는 위치의 점이 겪는 변형이력을 필요로 한다.

이와 같은 변형이력은 변형구배텐서를 구하여 얻을 수 있다. 임의 점에서의 유동경로는 위의 식 (15)에 의하여 구하고 그 경로에 따라 변형구배텐서의 변화를 계산한다.

$$\mathbf{F}' = \int_0^t \dot{\mathbf{F}} dt = \int_0^t \mathbf{L}\mathbf{F}' \frac{d\mathbf{x}_c}{|\mathbf{u}_c|} \quad (16)$$

임의의 위치 또는 시각에서 변형구배텐서 \mathbf{F}' 는 식 (16)으로 표현되고, \mathbf{L} 과 \mathbf{u}_c 는 각각 속도구배텐서와 유동경로 상의 점에서 속도벡터이다.

한편 초기치에 해당하는 오일러리안 검사체적 입구에서의 변형구배텐서는 등각텐서(Identity tensor)이며, (16)식의 적분은 유동경로를 따라 수행한다. 시각 $t + \Delta t$ 에서 변형구배텐서는 Crank Nikolsson Scheme을 이용해 구한다.

$$\mathbf{F}^{t+\Delta t} = \left(\mathbf{I} - \frac{\Delta t}{2} \mathbf{L}^{t+\Delta t} \right)^{-1} \left(\mathbf{I} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{L}' \right) \mathbf{F}' \quad (17)$$

윗 식을 이용하여 유선 상의 모든 위치에서 변형구배텐서를 구하면, 변형률텐서를 비롯한 모든 변형이력 계산과 형상변화에 대한 예측이 가능하다.

2.3 수치해석 모델

집합조직의 발전과 결합성장을 반영하는 유동해석 과정은 오일러리안 해석에서 형상예측을 위한 알고리즘과 별도로 모듈화 되었다. 실제로는

유동해석에 쓰이는 변수들과 형상예측 해석에 쓰이는 변수들이 같거나 서로 의존성이 있어 유동해석과 형상예측 해석이 동시에 수행된 결과를 주도록 결합되어야 한다. 유동장의 해석에 대한 수치해석 정식화는 참고문헌⁽¹¹⁾에 주어진 것을 참조하도록 하고 본 논문에서는 결합의 과정만을 소개하도록 한다. 유동장의 비선형에 따른 발산의 문제를 해결하도록 초기치를 구하는 방법이 고안되었으며 전체 해석절차는 다음과 같다.

(1) 자유표면에 대한 가정을 한 초기의 오일러 리안 격자를 선정한다.

(2) 초기격자를 가지고 비압축성, 등방성 점성 유동해석을 수행한다.

(3) 집합조기의 발전에 따른 이방성과 결함성장을 반영하는 해석을 위한 초기치를 구한다.

(4) 체적변화를 동반하는 이방성의 소성유동해석을 수행한다.

(5) 가정된 격자가 최종형상 조건을 만족하는가를 검사한다.

- a) 만족하지 않으면, 격자를 수정하고 4 단계부터 다시 실행한다.
- b) 만족하면 해석을 마무리한다.

3. 응용

본 연구에서 제시된 공정해석 모델을 이용하여 정상상태 평판압연, 삼차원 사각단면 봉의 압연, 형상압연 및 클래드 압연을 시뮬레이션하였다. 압연된 소재의 이방성의 발전, 결함의 성장 및 형상변화를 예측하였다.

3.1 기계적 성질의 변화 예측

판재 압연에서 Table 1에 주어진 바와 같이 롤 반경, 패스당 압하량, 상대두께(초기시편 두께/롤 반경) 등을 변수로 하여 결함성장과 이방성의 발전을 조사하였다. 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. 판재압연의 상하 대칭의 반쪽 부분을 해석영역으로 선정하였으며, 사용된 유한요소 격자는 9절점 4각 요소 (Q9 요소) 45개로 구성되었다.

Table 1 Used parameters for rolling process

	case 1	case 2	case 3	case 4
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			

3.1.1 결함성장

선정된 네 가지의 모델을 전체 압하율 60%로 압연하였으며, 결함성장을 등방성 소재의 해석 결과와 초기 무질서방위(Random Texture)를 갖는 소재의 이방성 결함해석 결과를 비교하였다. case 1에서는 결함이 성장하지 않았으며, Fig. 2에 case 2, 3, 4의 압연방향 중심부에서의 초기결함에 대한 성장비를 나타내었다. 압연이 진행될수록 결함이 성장하고 있으며, 집합조기의 발전은 결함성장을 작게 하는 것을 볼 수 있다. 단일 패스당 압하율 (10%)이 동일한 case 2, 4에서는 상대두께가 더 큰 case 4에서 결함이 더 크게 성장하였고, 상대두께 (0.5)가 동일한 case 3, 4에서는 단일 패스당 압하율이 더 작은 case 4에서 더 크게 성장한 것을 알 수 있다. 이와 같은 예측은 Avitzur⁽⁷⁾, Turczyn⁽⁸⁾ 등이 보고한 결과와 같은 경향이다. Fig. 3에는 앞서 해석한 결과에 대해서 두께방향의 결함분포를 나타내었다. 네 가지 경우 모두 표면부에서의 결함이 현저히 크게 성장한 것을 볼 수 있으며, 특히 case 1에서 가장 크게 성장한 것을 볼 수 있다. 표면부에서의 결함은 롤 접촉에 의한 전단변형에 의해서 성장한다. 따라서 롤 접촉이 가장 많은 case 1의 소재표면에서의 결함이 가장 크게 성장할 것이라 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 Case 4에서 중심부 결함이 가장 크게 성장하는 것을 보여주는데 이것은 Avitzur⁽⁷⁾, Turczyn⁽⁸⁾ 등이 보고한 결과와 같은 경향이다.

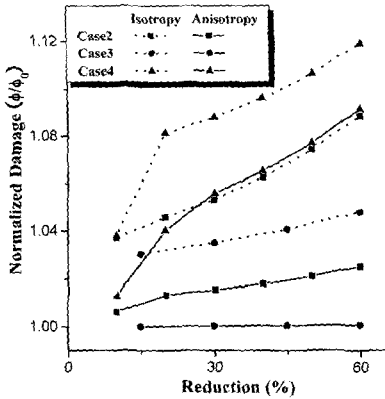


Fig. 2 Normalized damage along a centerline

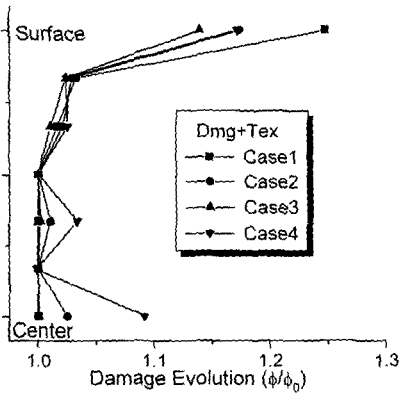


Fig. 3 Accumulated damage through thickness direction

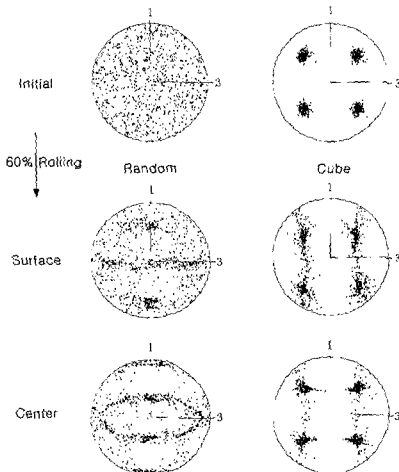


Fig. 4 {111} Pole figure for case 2

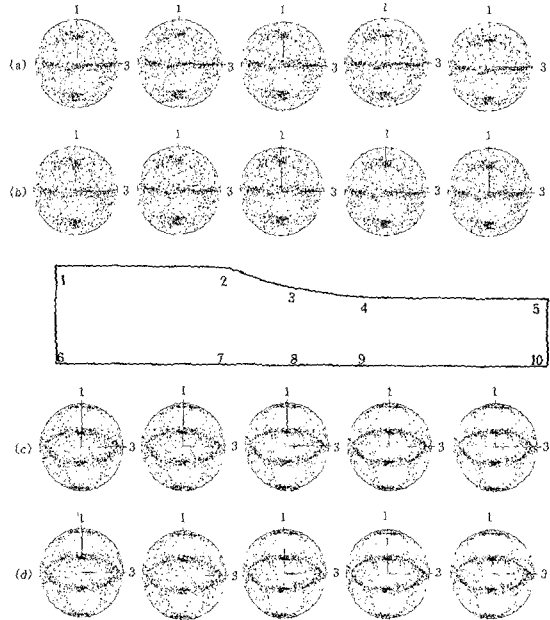


Fig. 5 Texture evolution in the final pass of case 2 : (a),(d)-Texture, (b),(c)-Damage+Texture

3.1.2 집합조직과 이방성

초기 무질서방위를 가지는 소재와 재결정 집합 조직을 가지는 소재를 case2의 공정조건으로 해석 하였다. Fig.4에 표면과 중심부에서 최종의 집합조직을 비교하였다. 초기 무질서 방위를 갖는 소재를 압연하였을 때 중심부에서는 평면변형을 압축으로 인한 집합조직으로 발전되었으며, 표면에서는 전단에 의한 집합조직이 주된것임을 볼 수 있다. 초기 재결정 집합조직을 갖는 시편을 압연하였을 때 중심부에서의 극점도는 초기 극점도에 비해서 약간의 형태 변화가 있었으나, 표면에서는 많은 변화가 생긴 것을 볼 수 있다. 초기 무질서 방위를 가지는 소재의 마지막 단계에서 중심부와 표면부에서의 극점도를 Fig.5에 나타내었다. Fig. 5에서의 압하율은 10%에 불과하므로 시편의 입구와 출구에서의 극점도의 변화는 그리 크지 않으나, 전체 압하가 발생하고 있는 롤 접촉부에서 집합조직이 집중적으로 발달되는 것을 볼 수 있다. 이방성 해석과 이방성 결합해석을 비교해 볼 때, 중심부(c, d)에서는 결합성장으로 인한 집합조직의 변화는 거의 나타나지 않았으나, 표면부(a, b)에서는 이방성 해석(a)에서 좀 더 발전된 전단변형형 집합조직이 나타나는 것을 볼 수 있다.

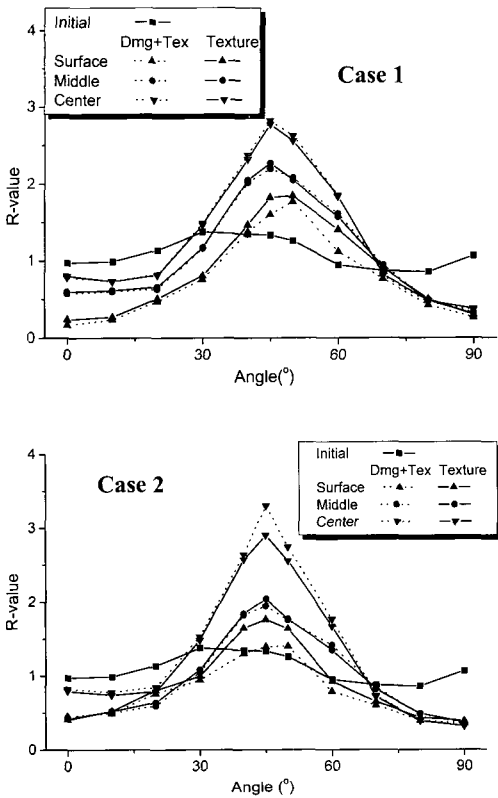


Fig. 6 Through-thickness R-values in Case 1 and Case 2

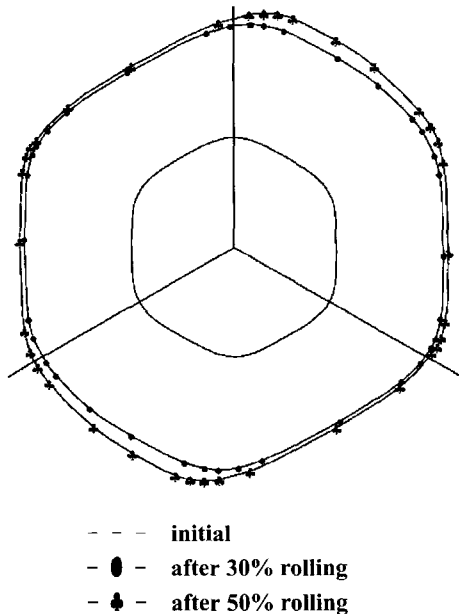


Fig. 7 Changes of yield surface during plate rolling with initial random texture

결합이 성장하지 않은 case 1과 결합이 성장한 case 2에 대해서 결합성장이 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.

압연 전 소재의 R값은 등방성 소재를 모사하기 때문에 '1' 주위에서 고르게 분포하고 있으나 압연된 소재는 집합조직의 발달로 인하여 표면, 중앙, 중심부 모두 45° 부근에서 가장 큰 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 중심부에서는 45° 방향으로 R값이 최대 약 3 정도까지 증가하고 있다. Fig.6에 나타난 case 1의 경우 결합성장을 반영했을 때 중앙, 중심부에서는 R값이 결합을 반영하지 않은 해석 결과와 거의 일치하나 표면부에서는 전 방향에 걸쳐 R값이 약간은 감소한 것을 볼 수 있다.

case 2의 경우에는 결합을 반영한 해석의 경우에 중심부에서의 R 값은 결합을 반영하지 않은 해석 결과보다 45° 방향에서 크게 증가하였고, 표면부에서는 결합을 반영한 해석의 R 값은 감소하였다. 그러나 중앙부에서는 두 해석 모두 비슷한 R값의 분포를 보이고 있다. 이는 case 1에서는 표면부에서만 결합이 성장하였으나, case 2에서는 표면, 중심부 모두 결합이 성장하였기 때문에 R값의 차이가 난 것으로 추측된다. 위 결과처럼 결합성장을 연계한 이방성 해석에 있어서 결합의 성장은 중심부에서는 R 값을 증가시키나 표면부에서는 감소시키는 것으로 나타났다.

Fig. 7에서는 30%, 50% 압연 패스를 지나면서 발달하는 항복곡면을 3축 응력의 π 평면상에 나타내고 있다. 변형이 증가됨에 따라 항복곡면이 성장하고 있으며, 그 형태가 초기의 대칭성을 잃고 찌그러지고 있다. 변형률속도의 방향은 항복곡면의 법선방향과 일치함을 고려할 때, 이러한 항복곡면의 형상변화는 이방성 변형거동을 초래하게 되리라는 것을 알 수 있다. 예로서 3-방향의 축하중이 존재하는 경우 초기에는 변형의 방향은 3-방향으로 일치하나, 50% 압연후 3-방향의 축하중 만으로도 상당히 큰 전단변형이 야기되리라는 것을 알 수 있다.

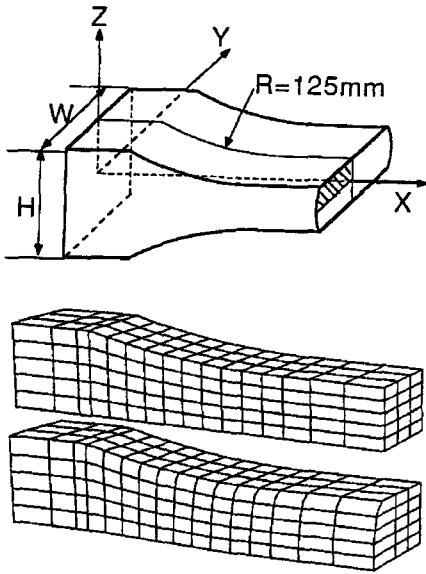


Fig. 8 Schematic of a bar rolling process and Eulerian finite element meshes before and after free surface correction

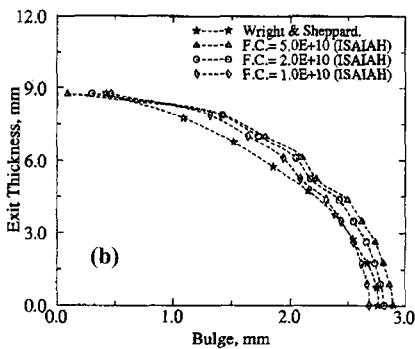
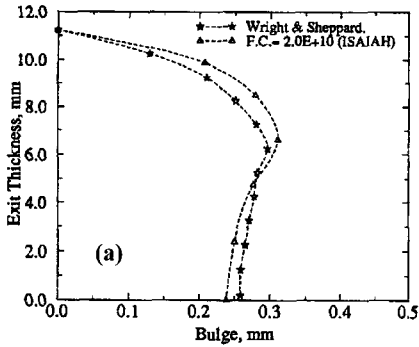


Fig. 9 Bulge profile at the exit plane for the bar rolling of (a) 10% and (b) 30% reduction

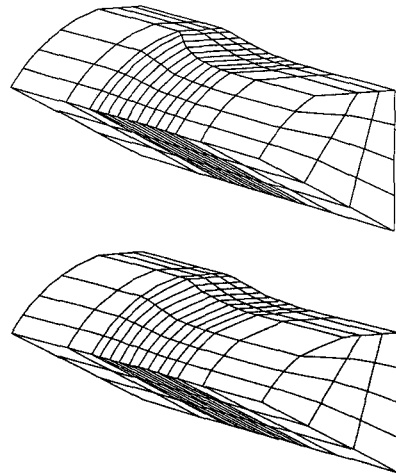


Fig.10 TRS rolling meshes before and after free surface correction

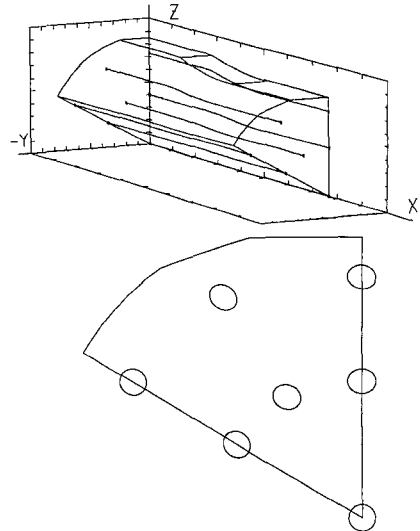


Fig. 11 Path lines and cross sectional shapes of seven particles

3.2 형상변화 예측

본 연구의 자유표면 수정알고리즘을 포함하고 있는 삼차원 오일러리안 유한요소해석 프로그램 ISAI AH 를 이용하여 사각봉의 압연해석(Fig.8 참조)과 Three-Roll-Stand 형상압연(TRS 압연)을 수행하였다. Fig. 8 에서는 사각단면 봉의 압연에서 자유표면 수정알고리즘을 적용하기 전과 후의 유한요소 격자를 보여주고 있다. Fig. 9 에서는 본 연구의 유한요소 예측한 사각단면 봉의 측면 형상을 문헌에서 발췌한 실험 결과와 비교하였다. 10% 압하율로 압연된 봉의 경우에는 롤사이를 지나는



Fig. 12 Cu-Al contact profile in an Eulerian mesh before and after correction using a stream line technique

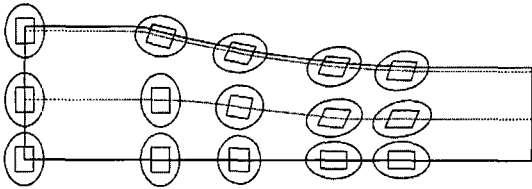


Fig. 13 Changes of grain shapes during cryogenic rolling at 196K

동안에 주로 소재의 표면에서 변형이 집중되어 이중별징이 나타나고 있는데 본 연구의 예측은 실험결과와 매우 잘 일치하고 있다. 30% 압하율의 경우에도 별징의 크기와 형태에서 유한요소 예측은 실험결과와 잘 일치하고 있어 제시한 모델의 타당성을 입증하는 것으로 볼 수 있다.

TRS 형상압연의 세 개의 롤은 서로 60 도의 각을 이루고 있으며 초기에 원형단면의 소재는 임의 형상의 단면으로 변형을 겪게된다. 대칭성을 이용하여 단면의 육분의 일만을 해석의 대상으로 선정하였으며, 압연 직전에 소재(50Cr V4)의 온도가 1200 K 이상인 고온에서의 형상압연을 시뮬레이션 하였다. Fig.10 에서는 초기의 가정된 검사체적에 의거한 유한요소격자와 본 연구에서 제시한 자유곡면 수정 알고리즘에 의하여 최종 수립된 형상에 의거한 유한요소격자를 보여주고 있다. 롤과의 접촉 전후에 있는 평면의 자유표면은 수정 전후에 거의 변화가 없으며, 측면의 둥근 자유곡면은 롤 접촉면과 가까운 부분에서 보다 큰 곡률 반경을 갖도록 수정된 것을 보여 주고 있으며, 이것은 실험에서 관찰된 것과 같은 경향이다. 자유표면 수정 알고리즘에 의한 최종 형상의 예측은 보통 3-4 회의 반복 횟수 내에서 수렴을 보여 주었다. TRS 압연 소재의 내부에는 원형 단면의 고강도 스테인레스 강선이 여러 곳에 박혀있다. Fig.11 에서는 해석 대상의 유한요소 격자 내에 있는 7 개의 강선이 오일러리안 검사체적 내에서 유동하는 경로를 보여주고 있다. 압연 전에는

7 개의 강선 모두가 원형 단면을 갖으나 압연 후에는 위치에 따라 단면 형상이 다르게 되는 것을 보여주고 있다. 단면의 중심에 있는 강선은 원형의 단면을 가장 잘 유지하고 있으며, 압연 롤 아래에 있는 강선들은 단면 중심에서 롤 방향으로 단축을 갖는 타원의 단면으로 변한 것을 보여주고 있다. 반면에 둥근 자유곡면과 교차하는 대칭면 상의 강선들은 단면의 중심에서 자유곡면의 방향으로 장축을 갖는 타원의 단면을 갖도록 변형된 것을 예측하고 있는데, 이러한 내부 강선들의 단면 변화는 학술지에는 발표되지 않았으나 실험에서 관측되는 바와 경향이 비슷하다⁹⁾

구리가 피복된 알루미늄 이중 판재의 클래드 압연을 시뮬레이션 하였다. 초기 오일러리안 격자에서 두 판재의 접촉면 형상은 가정되었고 (Fig. 12 에서 실선), 본 연구의 유선 추적법을 이용하여 수정된 접촉면 형상은 Fig. 12 에서 점선으로 표시되었다. 초기의 접촉면은 구리와 알루미늄의 체적비에 따라 가정되었었다. 판재가 롤사이의 변형구역으로 들어감에 따라 항복응력이 작은 알루미늄이 먼저 큰 변형을 겪는다. 알루미늄이 변형이 계속 진행됨에 따라 경화가 커지면 바깥 쪽의 구리도 변형이 커지는 현상이 해석결과에서 예측된다.

극저온 압연은 판재의 결정립을 나노급의 크기로 미세화하여 강도를 강화하도록 고안된 성형방법이다. 따라서 극저온 압연의 모델링에서는 결정립의 크기와 형태변화를 예측할 수 있는 기능이 필요하다. 초기 두께가 10mm 인 알루미늄 판재를 반경 40mm 인 롤을 갖고 196K 에서 40% 압연하는 공정을 시뮬레이션 하였다. 오일러리안 격자 입구에서 판재 두께방향의 중앙에서 표면까지 세점의 유동경로를 추적하고, 그 경로에 따라 변형구배텐서를 적분하여 변형이력을 조사하였다. Fig. 13 에서는 세점의 유동경로와 결정립의 형태변화에 대한 예측을 보여주고 있다.

4. 요약

정상상태 압연공정의 오일러리안 공정해석 모델에 관한 연구들을 종합 정리하였다. 본 연구의 유한요소해석 모델은 집합조직의 발전에 따른 이방성과 미세기공의 성장에 따른 기계적 성질의 열성화를 평형방정식에 직접 결합하였다. 따라서 집합조직의 발전 및 기공률의 변화를 예측하고 동시에 이방성과 기계적성질의 열성화를 해석에

반영할 수 있다. 더불어 오일러리안 해석에서 형상예측을 위하여 자유곡면 수정법과 유선추적법을 유한요소해석 모델에 결합하였다. 본 연구의 공정해석 모델을 평판 압연, 클래드압연, 삼차원 사각단면봉의 압연 및 형상압연에 적용하여 집합조기의 발전, R-값, 항복곡면, 결함성장 등의 기계적성질의 변화 예측과 클래드 압연시에 이중재 접촉면 형상, 배분립, 형상압연 시의 단면변화 등의 형상변화 예측을 보여주었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(KOSEF R01-2003-000-10202-0)의 지원에 의한 것이며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Y. S. Lee and Dawson: Mechanics of Materials, Vol. 15 (1993), p. 119.
- (2) Y. S. Lee, P. R. Dawson and T. B. Dewhurst: IJNME, Vol. 30 (1990), pp. 1403~1413.
- (3) Y. S. Lee and P. R. Dawson, ASME J. of Applied Mechanics, Vol 111. (1989).
- (4) K. Marthur, P. R. Dawson: Int. J. Plast., Vol. 5 (1989), pp. 67~94.
- (5) E-Z Kim, Y-S Lee: Trans. of KSME (A), Vol. 20 (1996) pp. 1516~1523.
- (6) G. I. Taylor: J. Inst. Metals, Vol.62 (1938), pp. 307~324.
- (7) B. Avitzur, C. J. Van Tyne and S. Turczyn: J. of Eng. for Ind., Vol. 110 (1988), pp. 173~178.
- (8) S. Turczyn: J. of Mat. Proc. Tech., Vol. 60 (1996), pp. 275~282.
- (9) Eva: Technical Report to F. Kocks GMBH & Co. (1990).
- (10) Truszkowski, 1980, Metall. Trans. A, 11A,(1980) pp. 749~758.
- (11) Y-S Lee, Transactions of Mat. Proc., KSTP Vol 9, No. 4(2000) pp. 372~378.