

열간압연시 미세조직 예측을 위한 유한요소 모델

조 현 중*, 김 낙 수**

A Finite Element Model for Predicting the Microstructural Evolution in Hot Rolling

Hyunjoong Cho*, Naksoo Kim**

ABSTRACT

A full three-dimensional thermo-coupled rigid-viscoplastic finite element method and the currently developed microstructural evolution system which includes semi-empirical equations suggested by different research groups were used together to form an integrated system of process and microstructure simulation of hot rolling. The distribution and time history of thermomechanical variables such as temperature, strain, strain rate, and time during pass and between passes were obtained from the finite element analysis of multipass hot rolling processes. The distribution of metallurgical variables were calculated on the basis of instantaneous thermomechanical data. For the verification of this method the evolution of microstructure in plate rolling and shape rolling was simulated and their results were compared with the data available in the literature. Consequently, this approach makes it possible to describe the realistic evolution of microstructure by avoiding the use of erroneous average value and can be used in CAE of multipass hot rolling.

Key Words: Rigid-Thermoviscoplastic Finite Element Method(강-열점소성 유한요소법), Kinematically Steady-state(동적 정상상태), Microstructure Evolution(미세조직변화), Shape Rolling(형상압연)

1. 서 론

냉간가공중 금속은 전위밀도의 증가로 인해 가공경화특성을 보이며, 유동응력은 전위밀도의 함수로 표현될 수 있다. 그러나, 높은 온도영역에서 금속을 가공할 때는 낮은 유동응력 수준으로도 재료의 파괴없이 큰 변형이 가능

하다. 또한 작용응력과 변형률속도가 큰 경우 금속조직의 변화가 생기게 되고, 이는 전위밀도의 감소로 인한 유동응력의 감소를 가져온다. 열간압연중 일어나는 미세조직의 변화를 동적회복(dynamic recovery)이라 하며, 재결정이 일어나는 경우를 동적 재결정(dynamic recrystallization)이라 한다. 이러한 미세조직은 변형후에도 불안

* 서강대학교 산업기술연구소

** 서강대학교 공과대학 기계공학과

정한 상태이기 때문에 압연 스탠드간에 정적회복(static recovery), 정적재결정(static recrystallization), 결정립성장(grain growth)으로 이어지는 조직 변화를 겪게 된다⁽¹⁾. 한편, 열간압연중 생기는 미세조직의 변화는 압연 후 제품의 기계적 성질에 큰 영향을 미치므로, 제품의 최종 미세조직을 예측하고 이것을 제어하려면 제품의 제조 공정, 즉 가열, 열간압연, 냉각과정에서 일어나는 각종 조직변화에 대한 정량적인 기술이 이루어져 공정변수와 상호관계가 명확하게 밝혀져야 한다. 이를 위해서는 열간에서 이루어지는 다단패스의 압연공정에 대한 체계적이고도 정량적인 공정해석이 필수적이다.

최근들어 미세조직의 제어기술은 열간압연공정설계에 있어서 매우 중요한 부분으로 다루어지고 있으며, 많은 연구가들에 의해 미세조직예측 모델들이 제시되고 있다. 또한 정확한 미세조직제어 방법은 많은 소성가공 공정해석에 유용한 결과를 주고 있는 유한요소법을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션 기술과 결합되어 발전하는 추세에 있다. Pietrzyk은 압연 스탠드의 출구 단면에서 유한요소해석을 통해 미세조직의 변화를 예측하였고⁽²⁾, Rantanen 등은 ABAQUS를 이용해 8패스의 열간압연공정을 해석한 후 미세조직변화와 예측된 압연하중을 실제 측정치와 비교하였다⁽³⁾. Karhausen등은 NASTRAN/SHAPE, ABAQUS 등을 이용해 CrV강의 5패스의 공정을 해석후 실험결과와 비교하였다⁽⁴⁾. Devadas 등은 Sellars, Nippon Steel, Kawasaki steel, IRSID에 의해 제안된 열간압연시 C-Mn강에 관한 미세조직 예측용 모델들의 특성을 비교 분석하였다⁽⁵⁾. 이외에도 많은 연구가 진행된바 있으나, 몇몇 모델들은 스탠드 사이에서 생기는 소재내 온도구배를 근사하거나 계산시에 평균온도를 사용하였고 대부분의 경우 미세조직예측 모델의 적용이 스탠드의 출구 단면에 한정되어 있다⁽⁶⁻¹⁰⁾. 압연도중 정적재결정과 결정립성장은 스탠드와 스탠드사이의 영역에서 연속적으로 일어난다. 따라서, 실제현상에 보다 근접한 수치적 모델의 도출을 위해서는 롤 스탠드뿐만 아니라 롤 스탠드 사이의 변화하는 온도와 시간의 고려가 반드시 필요하다.

본 연구에서 사용한 열간압연공정의 모델링 방법은 압연이 진행되는 동안, 압연롤 사이에서는 소재가 거의 동적정상상태(kinematically steady-state condition)를 이룬다고 가정 한 후⁽¹¹⁾, 압연로울의 전후에 일정한 거리를 두고 검사체적을 설정하여 이를 통과하는 소재에 대해서만 삼차원 강소성 유한요소법을 이용해 속도장을 구하고, 이로부터 변형되는 소재의 형상을 구하였다. 열전달해석

시에는 압연방향으로는 온도구배가 없다고 가정한 후, 각 절점이 특정단면에 도달하는 시간을 계산하여 이차원 유한요소법으로 온도분포를 구하였다. 이러한 과정을 다단패스의 압연공정에 대해 수행하여 미세조직의 예측에 필요한 가공이력(forming history)을 파악하였다. 즉, 유한요소해석결과 얻어지는 온도, 변형률, 변형률속도를 시간과 위치의 함수로 기록한 다음 이미 사용중인 미세조직 예측모델의 입력값으로 이용해 열간압연중 시간과 위치에 따라 정해지는 미세구조를 예측하였다.

2. 유한요소해석 이론

2.1 변형 해석

압연이 진행되는 동안 소재는 롤 사이에서 대변형을 받게 되므로 탄성변형을 무시한 강소성체로 가정할 수 있다. 평형방정식과 유동법칙을 사용한 구성방정식, 그리고 미소변형이론에 따른 적합방정식을 소재영역에 적용하여 경계조건을 포함하는 경계치문제의 약형을 만들고, 이를 절점에서의 변수로 이산화시키면 다음과 같은 비선형 연립방정식을 얻게 된다.

$$\begin{aligned} \Phi(\hat{\mathbf{v}}) = & \int_V \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV \hat{\mathbf{v}} + \int_V \mathbf{K} \mathbf{B}^T \mathbf{c} \mathbf{c}^T \mathbf{B} dV \hat{\mathbf{v}} \\ & - \int_{S_f} \mathbf{N}^T \mathbf{t} dS = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{여기에서, } \bar{\sigma} = \left(\frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} \right)^{\frac{1}{2}}, \dot{\bar{\epsilon}} = \left(\frac{2}{3} \dot{\epsilon}^p_{ij} \dot{\epsilon}^p_{ij} \right)^{\frac{1}{2}}$$

이고, $\hat{\mathbf{v}}$ 는 절점속도, $\bar{\sigma}$ 는 유효응력, $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형률속도, \mathbf{B} 는 변형률 행렬, \mathbf{K} 는 벌칙상수, \mathbf{t} 는 단위 면적당 작용외력, \mathbf{N} 은 요소 내의 보간함수행렬이고, \mathbf{c} 를 변형률속도성분으로 이루어진 벡터라고 할 때, \mathbf{c} 는 $\dot{\epsilon}_{kk} = \dot{\epsilon}_{11} + \dot{\epsilon}_{22} + \dot{\epsilon}_{33} = \mathbf{c}^T \dot{\epsilon}$, \mathbf{D} 는 $\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}^T \mathbf{D} \dot{\epsilon}$ 로 정의되는 계수행렬이다. 식 (1)로 표시되는 비선형 연립방정식은 직접반복법 또는 Newton-Raphson 반복법으로 해를 구할 수 있다.

작용외력은 주로 마찰력으로 수치해의 안정성을 위해 다음과 같은 마찰모델이 사용된다.

$$\mathbf{f} = -mk \left(\frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{|\mathbf{v}_t|}{a} \right) \right) \frac{\mathbf{v}_t}{|\mathbf{v}_t|} \quad (2)$$

여기에서, m 은 표면마찰인자(friction factor), k 는 소재의 전단항복응력, \mathbf{v}_r 은 톨표면과 소재의 상대속도이고, a 는 적당히 작은 상수(0.001)이다.

2.2 열전달 해석

열전달 해석의 지배방정식은 다음과 같이 표현되는 에너지 방정식이다.

$$(k_i T, i), i - \rho C_p \dot{T} + \dot{r} = 0 \quad (3)$$

여기에서, T 는 온도, \dot{T} 는 온도변화율, k_i 는 i 방향으로의 열전도율, ρ 는 밀도, C_p 는 비열이고, \dot{r} 는 단위부피당 열발생율이다. 식(3)의 에너지 방정식에 경계조건을 적용하고 유한요소이산화시키면, 다음과 같은 연립방정식을 얻게된다.

$$\int_V k_i \mathbf{M}^T \mathbf{M} dV \hat{T} + \int_V \rho C_p \mathbf{N}^T \mathbf{N} dV \hat{T} - \int_V \dot{r} \mathbf{N}^T dV - \int_{S_q} q_n^* \mathbf{N}^T dS = 0 \quad (4)$$

여기에서, $\mathbf{M} = [\frac{\partial N}{\partial x}, \frac{\partial N}{\partial y}, \frac{\partial N}{\partial z}]$ 이고, \hat{T} 는 절점에 서의 온도벡터이다. 경계면 (S_q)에서의 열유속(heat flux) q_n^* 는 두가지 유형으로 분류될 수 있다. 톨과 접촉하지 않은 자유표면에서는 열유속이 복사와 대류에 의해 정해진다. 즉, σ 를 Stephan-Boltzman 상수, ε 를 방사도 h 를 대류열전달계수, T_e 를 주위온도, T_s 를 소재 표면온도라 하면, 복사 및 대류에 의한 열유속은 다음과 같다.

$$q_n^* = \sigma \varepsilon (T_e^4 - T_s^4) + h(T_e - T_s) \quad (5)$$

한편, 톨과 접촉하고 있는 표면에서는 접촉에 의한 열전달과 마찰에 의한 열발생이 있으므로, 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$q_n^* = h_{lub}(T_m - T_s) + q_f \quad (6)$$

여기에서 h_{lub} 는 접촉열전달계수, T_m 은 로울표면의 온도이고, q_f 는 마찰에 의한 열유속이다.

식(4)에는 온도변화율이 포함되어 있으므로, 이는 다음과 같은 시간적분법을 사용하여 해결한다.

$$T_i = T_{i-\Delta t} + \Delta t \{ (1 - \beta) \dot{T}_{i-\Delta t} + \beta \dot{T}_i \} \quad (7)$$

여기에서 상수 β 는 0.5-1.0사이의 값을 취하여 시간에 대하여 해가 무조건적으로 수렴하도록 한다.

이상의 결과를 요약하면, 다음과 같은 연립방정식이 얻어진다.

$$[\mathbf{K} + \frac{1}{\beta \Delta t} \mathbf{C} + \mathbf{Q}] \hat{T} = \mathbf{r} + \mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_2 + \mathbf{C} \hat{T} \quad (8)$$

여기에서,

$$\mathbf{K} = \int_V k_i \mathbf{M}^T \mathbf{M} dV, \mathbf{C} = \int_V \rho C_p \mathbf{N}^T \mathbf{N} dV,$$

$$\mathbf{Q} = \int_{S_q} \langle h, h_{lub} \rangle \mathbf{N}^T \mathbf{N} dS, \mathbf{r} = \int_V \dot{r} \mathbf{N}^T dV$$

$$\mathbf{q}_1 = \int_{S_q} \langle \sigma \varepsilon (T_e^4 - T_s^4), q_f \rangle \mathbf{N}^T dS,$$

$$\mathbf{q}_2 = \int_{S_q} \langle h, h_{lub} \rangle \mathbf{N}^T T_e dS \text{ 이다.}$$

윗 식에서, $\langle \cdot \rangle$ 는 두 개의 항 중에서 한 개를 취한다는 기호이고, 소성변형이 진행되는 동안에 \dot{r} 은 단위부피당 소성일로 인한 열발생율이 된다.

3. 미세조직변화 예측방법

3.1 미세조직변화 예측모델

열간압연중 일어나는 미세조직변화를 예측하기 위해서는 회복과 재결정현상을 기술해야 하며 이로 인한 결정립 크기와 잔류변형률의 양을 예측할 수 있어야 한다. 변형중에 일어나는 동적회복과 동적재결정은 일반적으로 가해진 응력, 온도, 변형률, 변형률속도에 의해 영향을 받으며, 후판압연에서는 압하율이 보통 20% 이하이므로 고온인 경우를 제외하고는 동적재결정이 일어날 가능성이 거의 없으며 가령 일어난다 하더라도 고온에서는 정적재결정이 빠르게 진행되어 스택드사이의 구간에서 동적재결정 조직은 사라진다. 또한, 열간압연진행중 저온영역의 마무리 압연에서는 동적재결정이 일어나기에 필요한 유동응력의 수준이 높고, 많은 경우에 있어서 정적재결정이 압연된 제품의 최종 기계적 성질에 영향을 준다.

본 연구에서는 열간압연중 스택드사이에서 일어나는 정적재결정에 의한 미세조직의 변화를 예측하고자, 현재 널리 사용되고 있는 Sellars, Roberts, Yada 등에 의해 제

안된 미세조직예측 모델들을 사용하였다⁽¹¹⁻¹³⁾. 이 모델들은 C-Mn steel에 적용가능하고 재결정분률(the fraction recrystallized), 정적재결정 입도(static recrystallized grain size), 결정립 성장(grain growth) 등의 식으로 구성된다. 재결정속도에서 얻어지는 재결정분률은 식(9)와 같이 Avrami식 형태를 가지며 시간에 대해 S형상의 곡선이다.

$$x = 1 - \exp\left[-0.693\left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^k\right] \quad (9)$$

정적재결정의 경우 k 값은 1이 되고 준동적재결정(meta-dynamic recrystallization)의 경우는 2가 된다. $t_{0.5}$ 는 50% 재결정이 이루어지는데 걸리는 시간으로 Sellars[14], Roberts[13], Yada[17]는 각각 다음과 같이 제안하였다.

Sellars[14]:

$$t_{0.5} = 2.5 \times 10^{-19} d_o \varepsilon^{-4} \exp(300000/RT) \quad (10-1)$$

where $\varepsilon \leq 0.8\varepsilon_p$

$$t_{0.5} = 1.06 \times 10^{-5} Z^{-0.6} \exp(300000/RT) \quad (10-2)$$

where $\varepsilon \leq 0.8\varepsilon_p$

단, $\varepsilon_p = 4.9 \times 10^{-4} d_o^{0.5} Z^{0.15}$

Roberts[13]:

$$t_{0.5} = 5.1 \times 10^{-21} d_o^2 \varepsilon^{-4} \exp(330000/RT) \quad (11)$$

Yada[17]:

$$t_{0.5} = 2.86 \times 10^{-8} S_v^{0.5} \varepsilon^{-2} \dot{\varepsilon}^{-0.2} \exp(150000/RT) \quad (12)$$

where $S_v = \frac{24}{\pi d_o} [0.491 \exp(\varepsilon) + 0.155 \exp(-\varepsilon) + 0.1433 \exp(-3\varepsilon)]$

여기에서 Z (Zener-Hollomon parameter)는 온도와 변형률속도의 함수로 $Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)$ 의 관계가 있으며,

Q 는 활성화에너지, R 은 기체상수이다. 정적재결정 완료시의 입경(d_{rex})은 식(13), (14), (15)에 나타난 것과 같이 변형률에 큰 의존성을 가지며, Z 와 초기입경에 영향을 받는다.

Sellars(14) :

$$d_{rex} = 1.8 \times 10^3 Z^{-0.15}, \quad \varepsilon \geq \varepsilon^* \quad (13)$$

단, $\varepsilon^* = 2.8 \times 10^{-4} d_o^{0.67} Z^{-0.15}$

Roberts[13]:

$$d_{rex} = 6.2 + 55.7 d_o^{0.5} \varepsilon^{-0.65} \times \exp(-35000/RT) \quad (14)$$

Yada[17]:

$$d_{rex} = 5 S_v^{-0.6} \varepsilon^{-0.6} \quad (15)$$

결정립의 성장은 100% 재결정이 완료된후 스탠드사이의 남은 구간에 대해서 다음 식(16), (17), (18)을 이용해 계산한다

Sellars[14]:

$$d^{10} = d_{rex}^{10} + 3.87 \times 10^{32} t \exp(-400000/RT) \quad (16-1)$$

where $T \geq 1273K$

$$d^{10} = d_{rex}^{10} + 5.02 \times 10^{53} t \exp(-91400/RT) \quad (16-2)$$

where $T \geq 1273K$

Roberts[13]:

$$d^2 = d_{rex}^2 + 4.0 \times 10^6 T \exp(-118500/RT) \quad (17-1)$$

where $t \leq 20\text{sec}$

$$d^2 = d_{bp}^2 + 1.26 \times 10^8 t' \exp(-172000/RT) \quad (17-2)$$

where $t \geq 20\text{sec}, t' = t - 20\text{sec}$

Yada[17]:

$$d^2 = d_{rex}^2 + 1.44 \times 10^2 t \exp(-266700/RT) \quad (18)$$

윗식들은 스탠드와 스탠드사이에서 생성된 유한요소 모델의 각 절점에서 변형률, 변형률속도, 온도, 시간의 값을 대입해 계산되며, 최종적으로 결정립크기의 변화가 예측된다. 본 연구에서 스탠드사이의 구간에서 변형률과 변형률속도는 스탠드에서 압연에 의한 변형이 진행될때는 변수이나 스탠드와 스탠드 사이에서는 상수이므로 상수로 취급하였고 온도와 시간만이 연속적으로 변화한다고 가정하였다.

3.2 미세조직변화 예측순서

앞절에서 설명한 미세조직변화 예측모델을 다단계스의 압연공정에 적용하는 경우 첫번째 스탠드사이 영역에서는 소재전체에 균일한 초기결정입도가 지정된다. 각 절점에서 정적재결정 입경, 재결정 분률, 95%재결정에 필요한 시간이 계산된다. 95% 재결정에 걸리는 시간이 스탠드사이의 시간보다 작은 경우 완전재결정(full recryst-

tallization)으로 가정되고 남은 구간에 대해서 결정립성장
장이 계산된다. 스탠드간의 시간이 95% 재결정에 걸리
는 시간보다 작은 경우에는 부분재결정(partial recryst-
tallization)의 경우로써, 한 질점에서 재결정된 부분과
재결정되지 않은 부분이 동시에 존재한다고 가정한다⁽¹⁵⁾.
재결정된 부분은 잔류변형률을 갖지 않고 재결정된 결정
입도를 갖고 있는 반면에 미재결정부분은 잔류변형률과
초기결정입도를 갖는 것으로 취급한다. 이 경우 ϵ 을 변
형에 의한 총유�효변형률이라 할 때, 잔류변형률은 식
(19)의 관계를 이용해 계산하고, 식(20)을 이용해 유효
결정입도를 계산한다.

$$\epsilon_r = \epsilon(1 - x) \tag{19}$$

$$d_{eff} = (x)d_{rex} + (1 - x)d_0 \tag{20}$$

계산된 유효결정입도는 다음번 스탠드에서 초기결정입
도로 이용되며, 잔류변형률은 누적변형률로 취급되어 다
음 스탠드에서 생성된 변형률에 더해진다.

4. 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 미세조직변화 예측

4.1 평판압연에의 적용

개발된 유한요소 모델을 이용하여 Sellars, Yada,
Roberts에 의해 제안된 미세조직예측 모델들의 특성을
살펴보기 위해 두께 250mm에서 20mm로 압축되는, 스
탠드사이 시간 19초와 각 스탠드당 15%의 압하율을 갖
는 단순화된 16pass 평판압연공정을 해석하였다. 이 조
건은 Sellars가 이용했던 것과 동일한 스케줄이며 문헌⁽¹⁴⁾
에 그 결과가 제시되어 있다. 이 해석에 사용된 공정변수
들은 Table 1에 나타내었다. Fig.1에는 초기결정입도
300 μ m와 초기온도 1180 $^{\circ}$ C인 경우에 예측된 결정입도
변화를 나타내었다. 결정입도는 압연방향에 수직한 단면
상의 질점에서 계산된 결정입도들의 평균치를 사용하였
다. 압연초기에 높은 온도에서 재결정이 빠르게 이루어졌
고 결정립이 성장되었음을 알 수 있다. 이같은 경향은 압
연이 진행되면서 온도가 낮아짐에 따라 둔화되고 있다.
Sellars의 모델로 예측된 최종 결정입도는 20 μ m로
Yada와 Roberts의 40 μ m에 비해 작은 값을 나타내었다.

초기결정입도의 영향을 관찰하기 위해 초기결정립의 크
기를 1000 μ m로 가정한 경우 Fig.2에 나타난 것과 같이
첫번째 스탠드후 결정입도가 크게 감소하였으나 7번째
스탠드를 지나면서 부터 초기결정입도의 차이에 의한 영

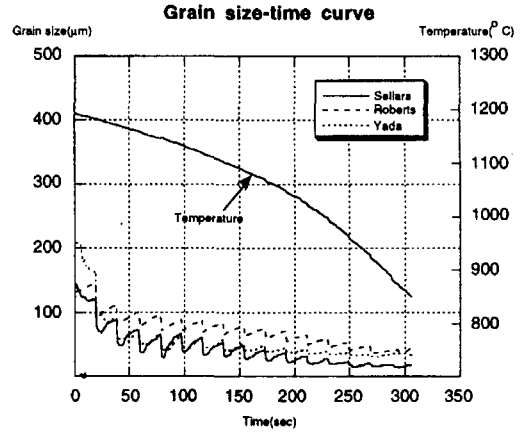


Fig. 1 Calculated grain size-time curve when $d_0=300\mu\text{m}$.

Table 1. Thermal Properties ⁽¹⁶⁾

Thermal Properties and Conditions	Value [Unit]
Thermal Conductivity k	$16.5 + 0.011T$ [W/mK]
Density ρ	7880 [kg/m ³]
Specific Heat at Constant Pressure C_p	$587.8 - 0.0683T$ [J/kgK]
Heat Transfer Coef. (Convection) h	30 [W/m ² K]
Heat Transfer Coef. (Contact) h_{sub}	100,000 [W/m ² K]

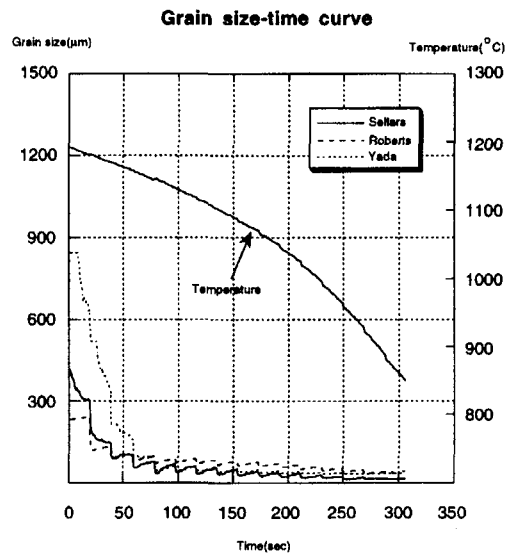


Fig. 2 Calculated grain size-time curve when $d_0=1000\mu\text{m}$.

향이 사라지고 나머지 구간에 대해서는 Fig.1과 비슷한 경향을 보이고 있다. 최종 예측된 결정입도는 20-40 μ m 정도로 초기결정입도 300 μ m때와 비슷한 결과를 나타내었다. Fig.3에서는 초기온도를 1180 $^{\circ}$ C에서 1280 $^{\circ}$ C로 높인 경우, 빠른 결정립 성장과 16번째 스탠드후에도 여전히 높은 온도의 영향으로 초기온도 1180 $^{\circ}$ C일 때 보다 큰 결정립 크기인 40-60 μ m 정도가 예측되었다.

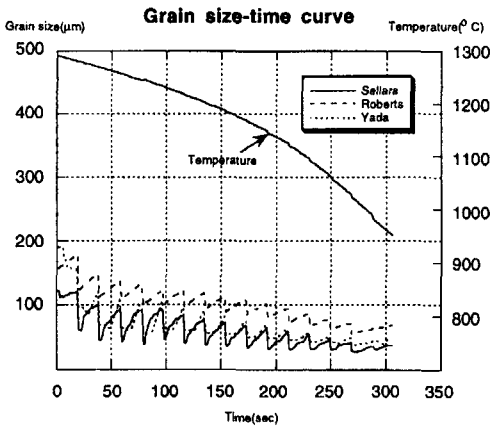


Fig. 3 Calculated grain size-time curve (the reheating temp.= 1280 $^{\circ}$ C).

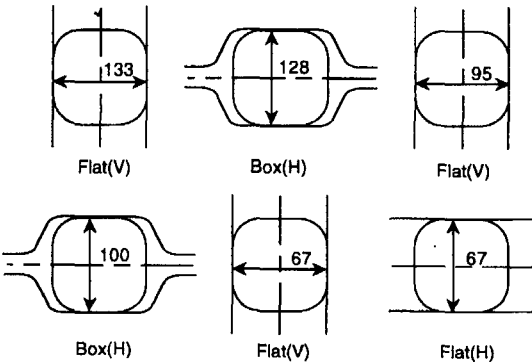


Fig. 4 Six pass rolling schedule(unit:mm).

4.2 형상압연에의 적용

평판압연 해석에 적용했던 모델중 Sellars의 모델을 이용해 산업용 6 패스의 형상압연 스케줄에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 전체 6패스의 단면 모습이 Fig.4에 나와 있고 소재의 재질은 AISI 1117(C-Mn steel grade), 초기온도 1148 $^{\circ}$ C, 스탠드간의 거리는 6.1m이

다. 롤의 회전속도를 알고 있으므로 스탠드사이의 시간을 계산하였고 실제 공정에서 스탠드간의 냉각은 없었다.

소재와 롤 표면간의 마찰인자 값으로는 0.8을 사용하여였고, 소재는 1215개의 질점과 896개의 요소를 사용하여 모델링하였다. 총 여섯패스의 해석에 걸린 시간은 IBM Risc/6000 37T 워크스테이션에서 약 20시간 정도가 소요되었다. 그밖에 해석에 사용된 조건은 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Computation conditions for shape rolling

Pass No.	Roll Speed (rad/sec)	Reduction(%)	Dwelling time(sec)
1	1.05	19.2	20.5
2	1.28	25.4	21.0
3	1.81	31.5	15.6
4	2.12	27.4	12.3
5	3.44	33.7	9.4
6	4.60	39.7	7.3 (4.96')

(* time after a pass)

Fig.5는 전체압연도중 예측된 결정입도의 변화추이를 보여 준다. 초기결정입도 300 μ m는 압연이 진행되면서 미세화되고 있으며, 스탠드 구간 1,2,3,4에서는 100% 재결정이 완료된후 결정립이 성장하고 있는 반면 스탠드 구간 5,6에서는 부분재결정이 관찰되었다. Fig.6을 참조하면 스탠드 구간 1,2에서 온도가 낮아진 것을 알 수 있는데, 이 구간에서 시간이 30-40초 정도로 상대적으로 크기 때문이다.

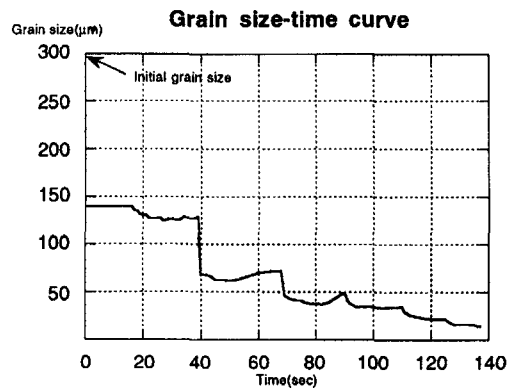


Fig. 5 Average grain size-time curve.

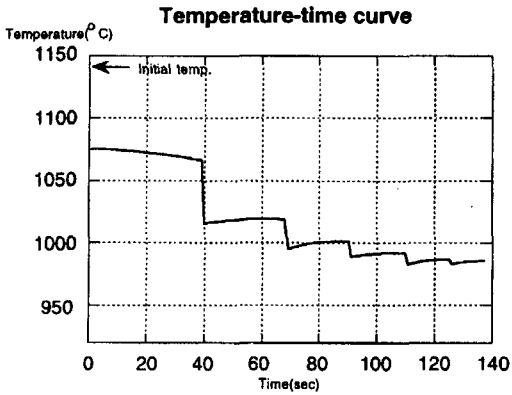


Fig. 6 Average temperature-time curve.

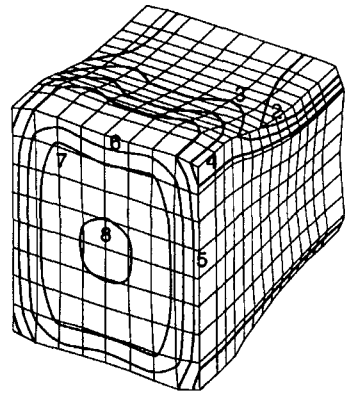


Fig. 8 Temperature distribution in the roll bite of stand 2.

4.2.1 스탠드간에 예측된 미세조직의 분포

Fig.7과 Fig.8에는 유한요소 해석결과 예측된 스탠드1과 스탠드2에서의 변형된 소재내 온도분포가 각각 출구와 입구쪽에서 본 그림으로 나타나 있고, Fig.9에는 스탠드 1과 2사이 구간에서 열전달해석에 의해 얻어진 소재내 온도분포가 나타나 있다. 스탠드 1에서 관찰된 롤쪽의 열전달로 인한 심한 온도구배가 사라지고, 내부로부터의 전도열전달로 인해 표면온도는 증가하였다.

Fig.10, Fig.11, Fig.12에는 각각 첫번째 스탠드 사이 구간에서 예측된 소재내 결정입도, 재결정분률, 잔류변형률의 분포가 나타나 있다. 소재의 중앙부분에서 초기 300 μ m의 결정립은 120 μ m 정도로 예측되었고 재결정분률은 1.0에 가까운 값을 가지므로 100% 재결정이 일어난 것으로 보인다. 그러나, 롤과 접촉했던 표면부분에서는 롤쪽에서의 열손실로 인해 150 μ m이상의 결정립과

Level	Temperature(°C)
1	850
2	900
3	950
4	1000
5	1050
6	1100
7	1150
8	1200
9	1250

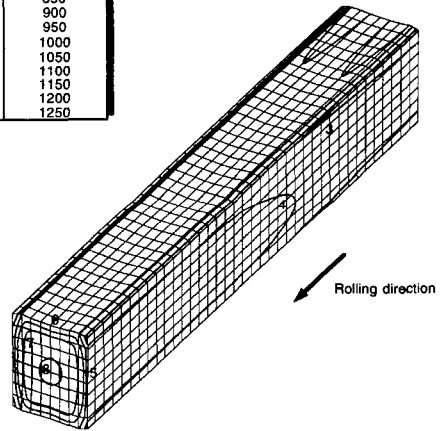


Fig. 9 Temperature distribution between stand 1 and stand 2.

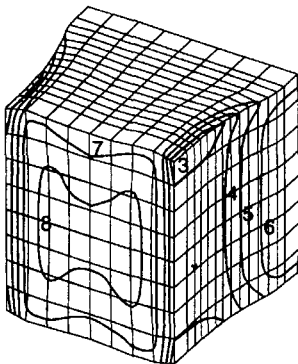


Fig. 7 Temperature distribution in the roll bite of stand 1.

0.9정도의 재결정분률을 나타낸다. 약간의 잔류변형률이 예측되었으나 거의 모든 부분에서 재결정이 이루어진 것으로 보인다.

Fig.13은 4번째 스탠드사이 구간에서 결정입도의 분포를 나타내었고, 결정립성장을 관찰하기 위해, 평균결정립의 크기가 가장 작게 예측된 14번째 단면(단면 A)과 마지막 단면인 20번째 단면(단면 B)에서의 결정입도 분포를 Fig.14와 Fig.15에 각각 나타내었다. 소재의 표면쪽에서는 미세한 변화만이 관찰된 반면 중앙부분에서 결정입도 40 μ m인 영역이 확대되었음을 알 수 있는데 이부위의 온도가 높기 때문에 빠른 속도로 결정립이 성장했기 때문이다.

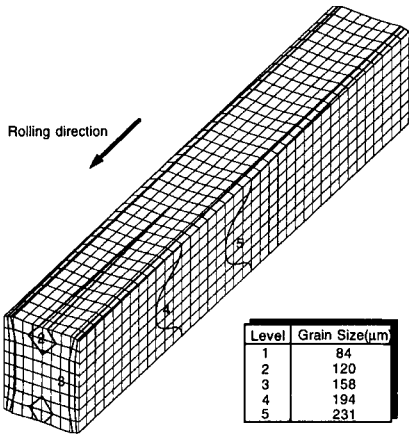


Fig.10 Recrystallized grain size distribution.

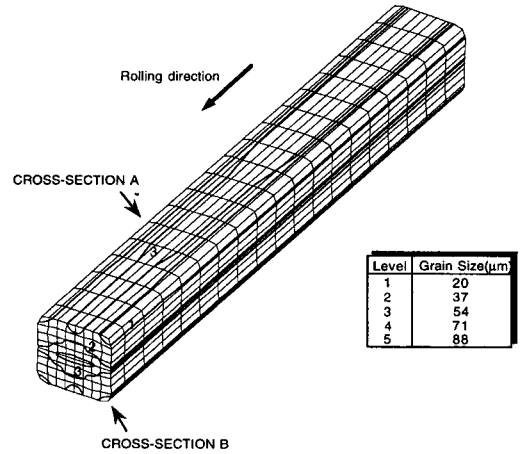


Fig. 13 Recrystallized grain size distribution between stand 4 and stand 5.

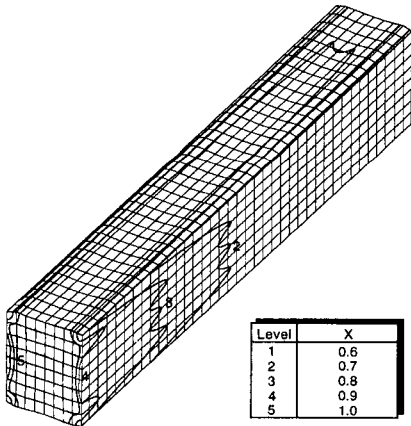


Fig. 11 Fraction recrystallized distribution.

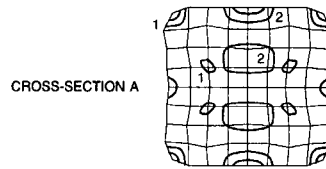


Fig.14 Recrystallized grain size distribution on the cross-section A during the interstand 4.

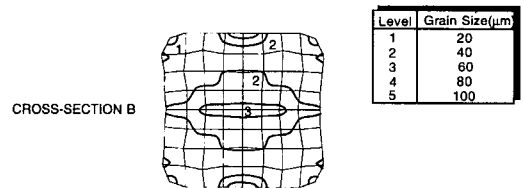


Fig.15 Recrystallized grain size distribution on the cross-section B during the interstand 4.

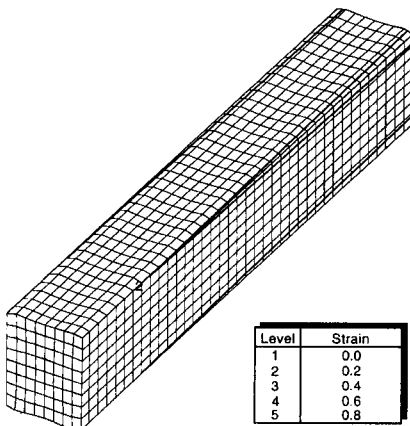


Fig. 12 Retained strain distribution between stand 1 and stand 2.

Fig.16에는 마지막 스탠드를 지난 후 단면에서 예측된 결정입도 분포를 나타내었다. 표면에서 $15\mu\text{m}$ 정도로 중앙부분의 $35\mu\text{m}$ 보다 미세하게 예측되었는데 중앙부분 온도가 1100°C 로 표면의 900°C 보다 200°C 정도 높기 때문에 온도차이에 의한 결정립성장속도의 영향이 크기 때문이다. 중앙부분의 조대한 오스테나이트 결정입도는 냉각시 조대한 퍼얼라이트 조직으로 상변태를 하게되고, 결정립이 큰 경우에는 항복강도가 낮기 때문에 압연후 제품 내부의 강도가 표면보다 낮을 것이라고 예측할 수 있다.

Fig.17과 Fig.18에는 최종적으로 예측된 재결정분율

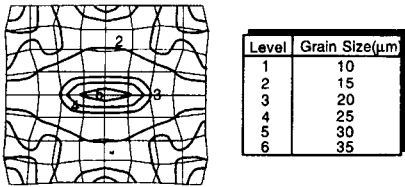


Fig.16 Recrystallized grain size distribution on the exit cross-section after final pass.

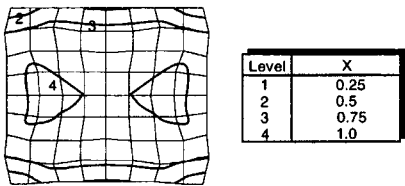


Fig.17 Fraction recrystallized distribution on the exit cross-section after final pass.

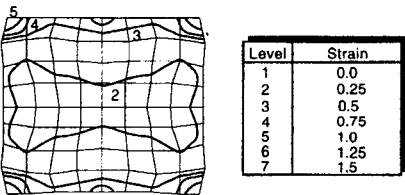


Fig.18 Retained strain distribution on the cross-section after final pass.

과 잔류변형률의 분포를 나타내었다. 6번째 스탠드에서 롤과 접촉했던 위, 아래 표면에 재결정분률 0.25-0.5 정도를 갖고 이 부위에서 부분재결정으로 인해 중앙의 0.25 보다 큰 0.75 정도의 잔류변형률이 발생함을 알 수 있다.

4.2.2 가공이력에 따른 국부 미세조직의 변화

Fig.19에는 단단열간압연중 소재내 특정질점(material point)이 겪는 가공이력(forming history)을 파악하기 위한 지점의 위치를 나타내었다. Fig.20의 온도변화 곡선을 보면 중앙부분의 3점 B, C, D는 적은 열손실과 소성일로 인해 높은 온도수준을 유지하고 있으나, 바깥쪽에 위치한 A, E, F의 경우는 압연스케줄에 따라 심한 온도변화를 겪고 있다. 부분재결정이 생기는 경우 축적되는 잔류변형률의 변화는 F점이 가장 크므로 이점에서 완전

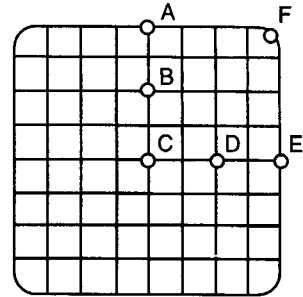


Fig.19 Initial time history tracing points on workpiece.

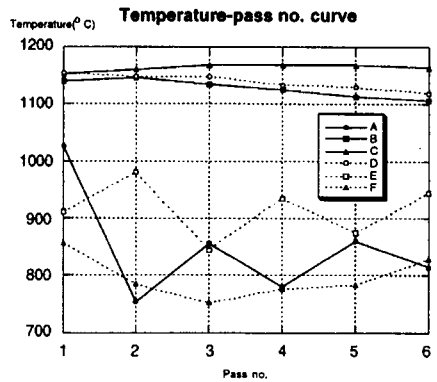


Fig.20 Temperature-pass no. curve.

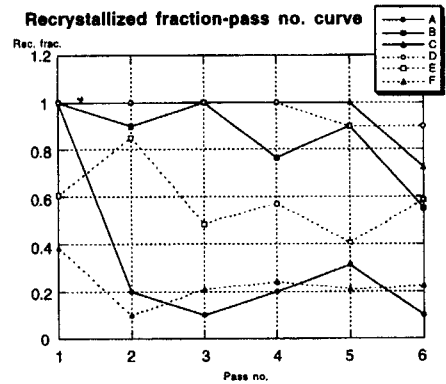


Fig.21 Fraction recrystallized-pass no. curve.

재결정이 일어나지 않음을 알 수 있고, 중앙부분의 C점에서는 마지막 두 스탠드를 제외한 모든 스탠드 구간에서 100% 재결정이 일어남을 알 수 있다.

Fig.21에서 F점은 잔류변형률이 축적됨에도 불구하고 낮은 온도로 인해 계속해서 0.2전후의 낮은 재결정분률을 나타낸다. 결정입도의 변화는 Fig.22에 나타나 있고

초기결정입도 300 μm 은 6지점에서 모두 20-40 μm 정도의 크기를 갖게된다.

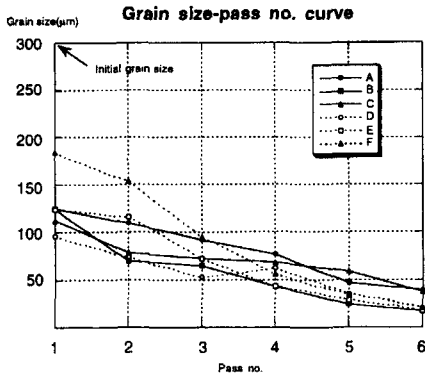


Fig. 22 Grain size-pass no. curve.

5. 결론

열간압연중 발생하는 미세조직변화를 예측하기 위해 강소성유한요소법을 이용해 전체공정중에 변화하는 소재내 온도, 변형률, 변형률속도의 이력을 파악하였고, 이를 여러 연구자들에 의해 제안된 미세조직 예측모델의 입력값으로 사용하여 다단열간압연중 발생하는 미세조직변화를 예측하는 유한요소모델을 작성하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 3차원 강소성유한요소법에 의한 정상상태 변형해석과 2차원 열전달해석으로 다단열간압연공정을 해석하였고, 해석결과 얻어지는 정보를 이용해 시간의 경과에 따른 미세조직변화와 소재내 미세조직분포를 예측하였다.

(2) Sellars, Yada, Roberts에 의해 제안된 미세조직 예측 모델을 단순화된 평판압연공정에 적용하여 문헌의 결과와 비교하였다. 소재의 초기온도는 미세조직변화에 뚜렷한 영향을 주는 반면 초기결정입도의 차이는 큰 영향을 주지 못하였다.

(3) 소재내 특정질점(material Point)이 겪는 가공이력을 파악한 뒤, 국부적인 미세조직변화를 예측하였고 형상압연의 경우 소재내의 온도구배로 인해 중앙부분과 표면에서의 20 μm 정도의 입경차이가 생김을 알 수 있었다.

본 연구에서 예측된 압연공정중의 미세조직변화의 파악은 공정설계자에게 유용한 도움을 줄 수 있는 자료로 활

용될 수 있으며, 제조공정중에 얻어진 미세조직과 기계적성질의 상호관계가 밝혀지면 이로부터 최종제품의 기계적성질을 예측할 수 있다. 본 연구에 사용된 해석방법은 국부적인 평균값을 이용한 계산시에 발생될 수 있는 오차를 지양할 뿐만 아니라, 신속하고도 저렴한 비용으로도 공정변수가 미세조직변화에 미치는 영향을 손쉽게 파악할 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 1996년도 서강대학교 교내연구비의 지원과 한국과학재단 목적기초연구 지원사업(과제번호 95-0200-14-04-3)에 의해 수행된 것으로, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. T. H. Courtney, Mechanical Behavior of Materials, McGraw-Hill Inc., pp. 309-319, 1990.
2. M. Pietrzyk, Finite element based model of structure development in the hot rolling process, steel research 61, No. 12, 1990.
3. A. S. Korhonen, A. Rantanen, and J. Larkiola, Microstructural Evolution During Hot Rolling, Annals of the CIRP, January, Vol. 40, 1991.
4. K. Karhausen, R. Kopp and M. M. de Souza, Numerical simulation method for designing thermomechanical treatments, illustrated by bar rolling, Scand. J. Metallurgy, pp.351-363, 1991.
5. C. Devadas, I. V. Samarasekera, and E. B. Hawbolt, The Thermal and Metallurgical State of Steel Strip during Hot Rolling: Part III. Microstructural Evolution, Metallurgical Trans., Vol. 22A, Feb., 1991.
6. S. Saimoto and R. G. Kamat, Microstructure and texture evolution in hot rolled AA 3004 aluminium alloy, Material Science and Technology October Vol. 8, 1992.
7. C. L. Davis and J. E. King, Effect of cooling

- rate on intercritically reheated microstructure and toughness in high strength low alloy steel, *Material Science and Technology* January Vol. 9, 1993.
8. T. Gladman, Deformation and recrystallization of steels, *Material Science and Technology* November Vol. 6, 1990.
 9. K. Karhausen and R. Kopp, Model for integrated process and microstructure simulation in hot forming, *Steel research* 63 No. 6, 1992.
 10. A. Rantanen, M. Malinen and A. S. Korhonen, Prediction of the Microstructure of Steel during Hot Rolling, *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 2, 1990.
 11. 김낙수, 열간압연의 유한요소해석, *한국소성가공학회지*, 제2권, 제3호, pp. 65-72, 1993.
 12. J. J. Jonas, Microstructural evolution during hot rolling, *Int. Symposium on mathematical modelling of hot rolling of steel*, 1990.
 13. A. Laasraoui, J.J. Jonas and D. L. Baragar, Computer modelling - An efficient tool for the steel industry, *Int. Symposium on mathematical modelling of hot rolling of steel*, 1990.
 14. C. M. Sellars, Modeling microstructural development during hot rolling, *Material Science and Technology*, November Vol. 6, 1990.
 15. C. M. Sellars and J. A. Whiteman, Recrystallization and grain growth in hot rolling, *Metal Science*, March-April, pp. 187-194, 1979.
 16. I.P. Kemp, Model of deformation and heat transfer in hot rolling of bars and sections, *Ironmaking and steelmaking*, 17, 2, pp. 139-143, 1990.
 17. H. Yada, Modelling of microstructural changes in steel processing and its application to the prediction of mechanical properties and resistance to deformation in hot strip mills, *Microstructural evolution in metal processing*, PED-Vol. 46, 1990.