

사상열간압연중 재결정거동 예측 및 제어

곽우진 *, 이경중 +, 권오준 ++, 황상무 **

* 포항공과대학교 대학원, ** 포항공과대학교

+++ 포항산업과학연구원

Prediction and Optimization of Recrystallization behavior during Multi-stage Hot Rolling

W.J. Kwak *, K.J. Lee +, O.J. Kwon ++, and S.M. Hwang **

* Graduate School, POSTECH

** Pohang University of Science and Technology (POSTECH)

+++ Research Institute of Industrial Science and Technology (RIST)

ABSTRACT

각 스탠드 유한요소해석 결과인 기계적-열적 변수들을 이용하여 재결정계산을 한다. 이때 온도변화를 정확히 반영하기 위해 재결정부피율 계산과 결정성장 계산에 additivity rule을 도입하였다. 또한 여러단계의 압연공정 각각에서의 재결정거동을 계속 추적하기 위해 또한 이때의 재결정의 영향을 재료유동에 반영하기 위해 sub-structure의 개념을 도입하였다.

이러한 과정을 거쳐 7패스후의 최종 두께방향으로의 결정크기분포를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 이때의 최종결정크기 분포를 균일화 시킬 수 있는 공정을 유전 알고리즘을 이용해서 찾아보았다.

Key words : additivity rule, finite element method, genetic algorithm, hot rolling, heat transfer analysis, interstand cooling, optimization, plastic deformation, recrystallization

약어

d	=	Grain size
F_i	=	i^{th} hot rolling stand ($i=1...7$)
L_{F_i}	=	interstand length after F_i

T	=	temperature
X	=	recrystallized volume fraction
$\bar{\epsilon}$	=	effective strain
$\delta\epsilon$	=	residual strain after deformation
$\dot{\bar{\epsilon}}$	=	effective strain rate
$\bar{\sigma}$	=	flow stress

서론

재결정거동을 예측하기 위해서 본 연구에서 Sellars 재결정모델식[1]을 사용한다. 이 식들을 이용하기 위해서는 재료의 가공중 변형률, 변형률속도 그리고 온도의 변화값들을 알아야한다. 그리고 변형후 재료의 온도 변화값들을 알아야한다. 사상열간압연 전 구간에서 재료내부의 열적-기계적 변수를 구하기 위해서 본 연구에서는 이미 정밀하게 검증된 유한요소해석방법을 도입한다 [2].

미세구조가 조밀할수록, 연성이 좋아지는 동시에 경도가 높아진다. 결정립크기는 이와같은 재료의 기계적성질을 결정한다. 제품의 기계적성질이 우수하기 위해서는 결정립의 미세화 뿐만아니라, 모든 부분에서 일정한 기계적성질을 가져야한다. 위치에따른 일정한 기계적성질을 갖기 위해서는 기본적으로 결정립분포가 균일해야한다. 이러한 결정립의 미세화 그리고 균일화를 위해서는 재결정거동을 제어해야한다. 재결정거동은 소성유동과 온도의 변화 그리고 결정의 성장시간 등에의해 결정이 되므로, 적절한 냉각과 스탠드간 이동거리 확보 그리고 압하률의 적절한 선택 등의 공정설계를 통해 재결정 현상을 제어할 수 있다. 본 연구에서는 유전알고리즘[3]을 이용하여 재결정거동에 관련된 최적설계를 수행하였다.

재결정거동 예측 시스템

사상압연과 같은 다단공정에서는 각각의 스탠드에서 재료의 가공이 일어나고 다음 스탠드로 이동중 재결정에의한 연화가 일어난다. 각 스탠드의 재결정거동은 다음 스탠드의 재료유동에 영향을 주게된다. 이와같은 재결정거동의 다음 스탠드 재료유동으로의 영향과, 재결정에의해 부분적으로 연화가 일어난 부분이 다시 가공을 받을때의 재결정거동과 같은 현상을 고려하기 위해 본 연구에서는 substructure algorithm을 도입한다. 연속적인 여러단계의 변형을 받게되면 하나의 재료영역은 여러가지의 특징을 가진 부분으로 나누어진다. 이러한 현상을 기술하기 위해서 본 연구에서는 현재 관심있는

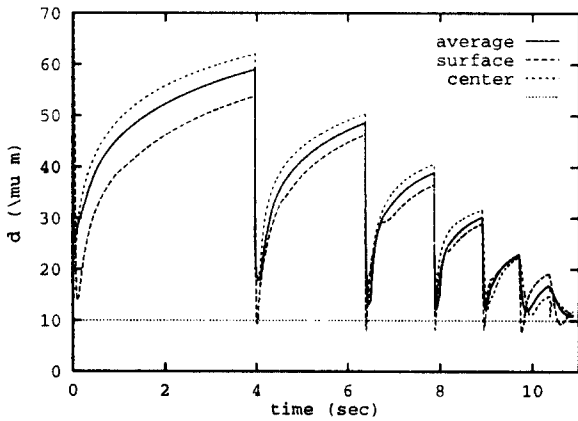


그림 1: LF1...7 = 5.5m의 결과

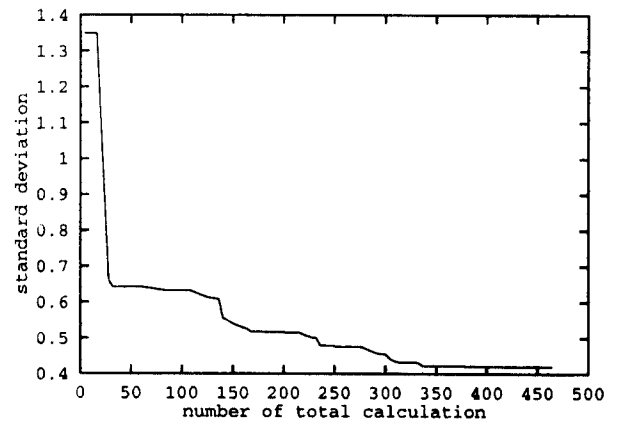


그림 2: 유전알고리즘의 진행과정

영역(structure)을 잔류변형률이 그대로 남는 부분과, 소멸되는 부분의 두가지 하부구조로 나눈다. 다음 스탠드에서는 이 두가지 각각의 sub-structure에서 독립적으로 재결정거동 예측을 한다. 이때, 잔류변형률이 소멸되는 부분은 재결정진행(d_{rex}) 결정크기값을 갖게되고, 잔류변형률이 남는 부분은 초기 결정크기를 그대로 갖는다. 만약 하나의 structure에서 재결정이 완료되면 이후부터는 결정성장을 한다. 또한, 하나의 요소가 이러한 다단 변형을 받게될때, 다음과 같은 유동용력값을 갖는다.

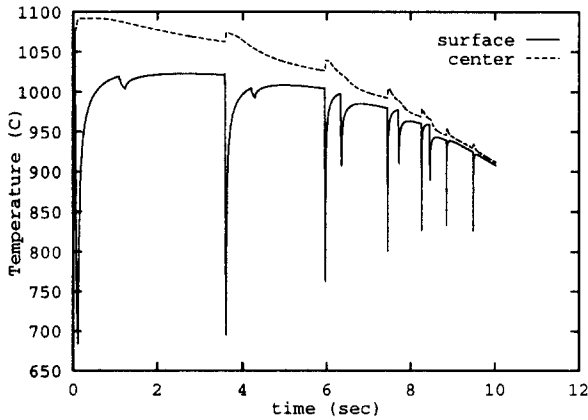
$$\delta\bar{\epsilon} = \sum_i Y_i(1 - X_i)\delta\epsilon_i, \quad \delta\bar{\epsilon}_N = \frac{\delta\bar{\epsilon}}{1 - A}, \quad A = \sum_i X_i Y_i$$

$$\bar{\sigma} = A\bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T) + (1 - A)\bar{\sigma}(\bar{\epsilon} + \delta\bar{\epsilon}_N, \dot{\bar{\epsilon}}, T)$$

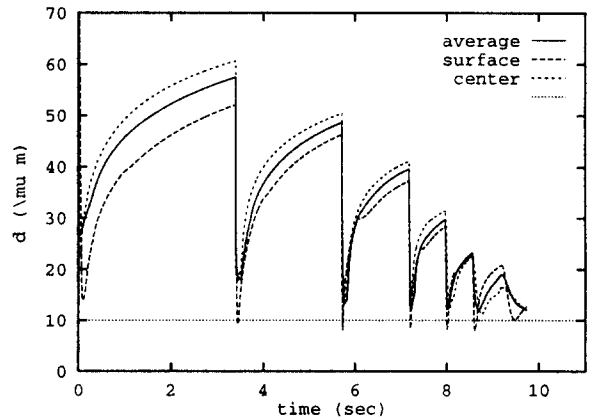
이때, Y_i , X_i , $\delta\epsilon_i$ 들은 i 번째의 substructure에서의 요소내에서의 부피률, 각각의 substructure내에서의 재결정부피률과 재결정이 일어나기전 변형률값을 나타낸다.

결과

본 연구에서는 사상열간압연의 최종시점에서의 두께방향으로의 결정크기 분포의 균일화를 목적함수로 선정하였다. 이경우 최적설계의 마지막 결과는 균일한 결정분포를 얻을 수는 있으나, 나머지 성질은 그리 좋지않을 수 있다. 최적설계 진행중의 계산된 공정중에서 목적함수값은 최적이지 아니나 전체적인 성질이 더 좋은 공정을 찾을 수도 있다. 보통 사상열간 압연에서는 $L_{F1} = \dots = L_{F7} = 5.5m$ 를 사용하고있다 (그림



(a) 시간에 따른 온도변화



(b) 시간에 따른 결정크기 변화

그림 3: 결정크기가 가장 균일한 최적의 공정결과

1). 본 연구에서 최종결정크기 분포의 균일화를 목적함수로 그리고, $L_{F7} = 5.5\text{m}$, 설계변수로는 사상열간압연 전반부 6스탠드 이후의 interstand length를 사용했을때는, $L_{F1} = 4.7\text{m}$, $L_{F2} = 5.3\text{m}$, $L_{F3} = 5.4\text{m}$, $L_{F4} = 4.2\text{m}$, $L_{F5} = 4.1\text{m}$, $L_{F6} = 5.5\text{m}$, $L_{F7} = 5.5\text{m}$ 으로 결과는 그림 2,3과 같다. 이때, 전체계산횟수의 의미는 유전 알고리즘으로 부터 결정한 설계변수 ($L_{F1} \dots L_{F6}$)들로써 수행한 열간사상압연 해석의 전체횟수를 의미한다. 이때, 사상압연 최종시점에서의 두께방향으로의 결정크기 분포의 표준편차는 0.420 이고, 평균결정크기값은 $10.8\mu\text{m}$ 이다. 스트립의 표면과 중심의 결정크기 차이는 $0.7\mu\text{m}$ 이고, 가장 큰 값과 가장 작은 결정크기값 차이는 $0.9\mu\text{m}$ 이다.

참고 문헌

- [1] C.M.Sellars, The Physical metallurgy of hot working, 1979, p3-15
- [2] S.M.Hwang, M.S.Joun and J.S.Park, Proc. 18th NAMRC, University park, Pennsylvania, 1990, p.13
- [3] J.S.Chung and S.M.Hwang, Journal of Materials Processing Technology, will be printed