

S20C강 저속 라운드-오발 압연의 AGS 분포

권혁철, 이호원*, 이영석**, 임용택*
공정제어 연구그룹, 포스코 기술연구소
기계공학과, 한국과학기술원*
기계공학과, 중앙대학교**

AGS Distribution in Low-Speed Round-Oval Rolling of S20C Steel

H. C. Kwon, H. W. Lee*, Y. Lee**, and Y. T. Im*
Rolling Technology and Process Control Research Group
POSCO Technical Research Laboratories
Department of Mechanical Engineering, KAIST*
Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University**

Abstract

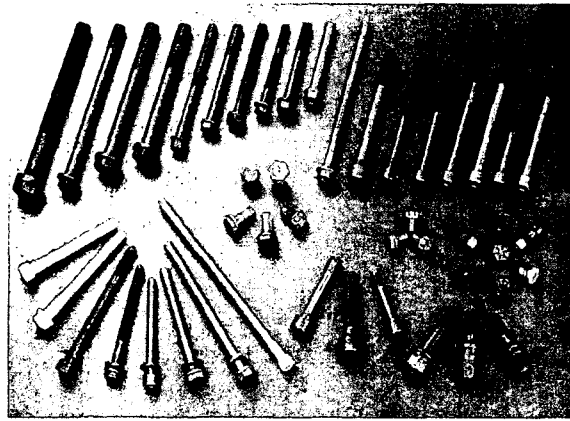
This study investigated Austenite Grain Size (AGS) distribution in Low-Speed Round-Oval Rolling. Rolling experiments were done along with the AGS numerical modeling to characterize the final AGS distribution and its kinetics behavior. For bar rolling experiment, we utilized the pilot rolling mill, operating at 34 fixed rpm, at POSCO Technical Research Laboratories. To investigate the microstructural observation, the rigid-viscoplastic finite element analysis was combined with Hodgson's AGS evolution model. To consider the transient thermal history in the integrative AGS modeling, additivity rule was introduced. The integrated analysis revealed that static or meta-dynamic recrystallization is responsible for the AGS difference in the inner or outer region of rolled bar. Comparative study showed that the current AGS modeling approach can be used to model the overall AGS distribution in bar rolling processes. For more accurate AGS prediction, the AGS modeling method should be verified under the various rolling conditions such as different rolling speeds and different deformations.

Key words : AGS, Bar Rolling, S20C, FEM, Additivity Rule.

1. 서론

선재 압연재가 산업체 전반에 차지하는 비중은 매우 높으며 최근 차량 경량화와 대규모 구조물의 필요성에 따라 기계적 성질 개선에 관한 요구가 지속적으로 증가하고 있다. Fig. 1에서는 그 대표적인 예로서 엔진용 고장력 볼트와 고장력강을 채택한 일본의 세토 대교를 보이고 있다. 이러한 사회적 요구에 부응하기 위해서는 선재 압연 중의 재료거동을 정확히 예측하고 이를 바탕으로 미세조직을 능동적으로 제어하는 기술의 개발이 필수적이다.

열간 압연의 미세조직 변화를 예측하여 공정을 제어하는 많은 연구가 진행되었으나 그 연구 범위는 변형거동의 모델링이 용이한 판재압연에 집중되었다(1,2). 선재를 포함하는 형상압연 분야



(a)



(b)

Fig. 1 Applications of high strength steel: (a) Special bolts and (b) Seto Bridge, Japan.

는 변형 특성 모델링이 어려워 이 분야의 미세조직 제어 연구는 손꼽을 수 있을 정도이다(3-5). 그러나 최근에는 PC의 계산 성능 진보(CPU: 3.2GHz)와 효율적 해석기법들의 개발 (Eulerian Scheme, Generalized Plain Strain Modeling, Slab-FE Combined Method)로 효율적인 변형 모델링이 가능해지면서 기존의 미세조직 모델과 FEM을 연계하는 연구들이 다수 보고 되고 있다.

선재 공정의 미세조직을 모델링하는 국내 연구로는 미세조직 모델을 근사변형 모델과 연계한 연구가 대표적이다. POSCO의 Lee 등(6)은 SCM435강종의 미세조직 모델을 개발하였고, Lee 등(7)은 근사변형 모델을 개발하여 기존의 미세조직모델과 연계하였다. 또한 Choi 등(8)은 부분재결정에서의 결정립도 예측 정확도 개선에 관한 연구를 수행한 바 있다. 근사변형 모델을 적용하는 것은 30여단에 이르는 선재 공정 미세조직을 효율적 모델링하기 위해 필요하다.

그런데 근사모델은 계산 효율성(계산시간: 초단위)에도 불구하고 소재 내부의 상세한 정보를 제공할 수 없어 부위별 결정립도 분포를 예측할 수는 없다는 한계점을 가지고 있다. 이러한 측면에서 유한요소해석기법을 이용한 공정특성 분석 및 AGS 모델과의 연계는 결정립도의 평균치와 함께 균질한 결정립도를 얻기 위한 공정인자의 분석이 가능하다. 이러한 단점에도 불구하고 FEM에 기반한 접근법은(계산시간: 수십분~수시간) 과도한 계산 시간으로 인해 초기 공정설계에 요구되는 공정인자의 변경에 이에 따른 최종 결정립도의 분석에 적절치 않다. 그럼에도 불구하고 유한요소기법은 근사모델에서 제시할 수 없는 선재공정의 미세조직 분포 특성을 상세히 분석할 수 있어 근사모델과 연계되어 사용될 때 조직제어측면에서 중요한 설계도구가 될 수 있다.

본 연구에서는 대표적 선재공정인 라운드-오발 압연에서의 미세조직 특성을 분석하였다. 압연 실험을 통해 AGS의 변화 양상을 고찰하였으며 유한요소해석법과 AGS 모델을 연계한 조직 예측을 통해 최종 미세조직 변화 과정을 분석하였다. 현 연구에서는 단 패스 공정에서 한정하여 공정

해석을 이용한 예측기법의 타당성을 검토하는데 초점을 맞추었다. 현 접근법은 선재 공정 AGS 분포의 정성적 예측에 적용될 수 있음을 밝혔다. 향후에는 다양한 공정조건에서 모델을 검증할 필요가 있으며 또한 다단 패스에서의 미세조직 예측의 타당성을 검토할 필요가 있다.

2. 압연 실험

선재 압연 공정에서의 오스테나이트 분포를 고찰하기 위해, POSCO 기술연구소의 시압연기 (pilot mill)를 활용하여 라운드-오발 압연 실험을 수행하였다. Fig. 2에 실험 장비의 개략적인 배치를 나타내었다. 장비는 크게 가열로(R/F), 압연밀(Rolling mill), 그리고 담금질을 위한 수조(Water bath)로 구성되어 있다. Table 1에 대상 강종인 S20C강의 화학 조성을 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of S20C steel

Element	C	Mn	Si	P(max)	S(max)
Wt%	0.20	0.45	0.25	0.03	0.25

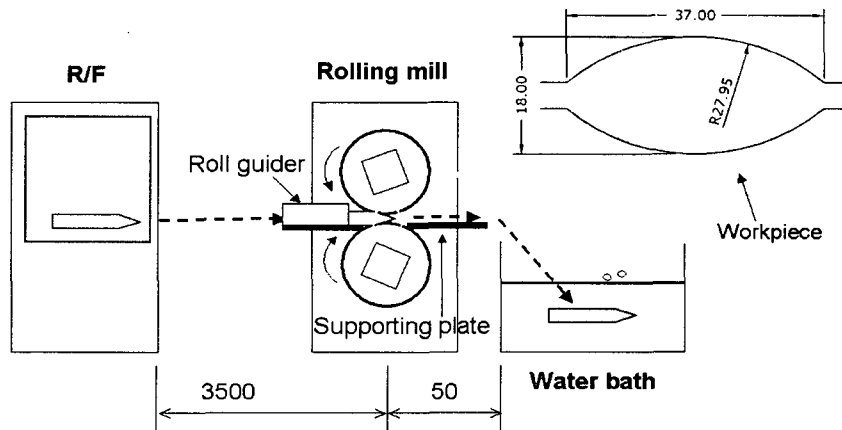


Fig. 2 Schematic of experimental set-up (unit: mm).

2.1 실험 방법

초기 소재의 형상과 치수를 Fig. 3에 나타내었으며, 온도 측정을 위해 열전대를 삽입한 위치를 동시에 표시하였다. 소재는 앞부분이 테이퍼진 원형봉이며 직경이 28mm인 S20C 봉강을 사용하였다. 오스테나이트 결정립도 측정을 위한 담금질을 용이하게 하기 위해 소재 직경을 적절하게 선정하였다. 그리고 압연 후 경과 시간에 따른 영향을 고찰하기 위해 경과 시간을 2초, 5초, 20초로 변화시켜 결정립도 변화를 고찰하였다. 소재는 1100°C 분위기에서 약 60분간 가열하였으며 추출된 가이드 상에 놓은 소재의 중앙부 온도가 1000°C로 떨어졌을 때 후단을 밀어주어 압연되도록 하였다. 이때 소재 중앙부에 비해 외곽부의 온도가 낮은 상태에서 압연이 이루어졌다.

2.2 실험 결과

압연 전 소재의 초기 결정립도는 부위별로 차이가 일부 있지만 평균적으로 110µm로 측정되었다. 압연 후 경과 시간이 20초 인 경우의 결정립 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 소재의 10개 지점에서 조직을 측정하였고 각 부위의 위치는 그림 우측 상단에 표시하였다. 압연 조직은 대부분이 급냉으로 생성된 마르텐사이트 조직이었다. 외곽부(1,6,7,8)보다는 중앙부(2,3,4,9,10)의 결정립도가 상대적으로 미세하게 나타났다. 이러한 경향은 경과 후 시간을 2초와 5초로 설정한 실험에서도 동일하게 나타났다. 이러한 부위별 결정립도 분포 차이를 분석하기 위해 다음 장에서 유한요소해석과 미세조직 모델을 연계하여 재결정 과정을 분석하였다.

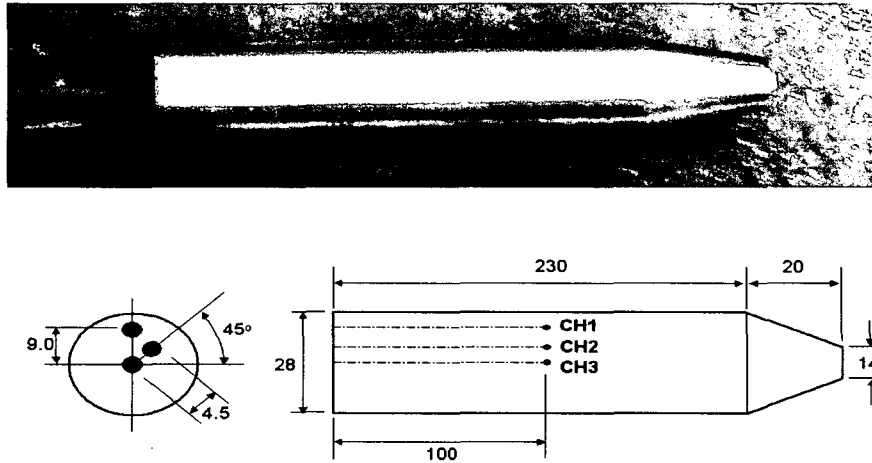


Fig. 3 Specimen for rolling experiment and thermocouple positions (unit: mm).

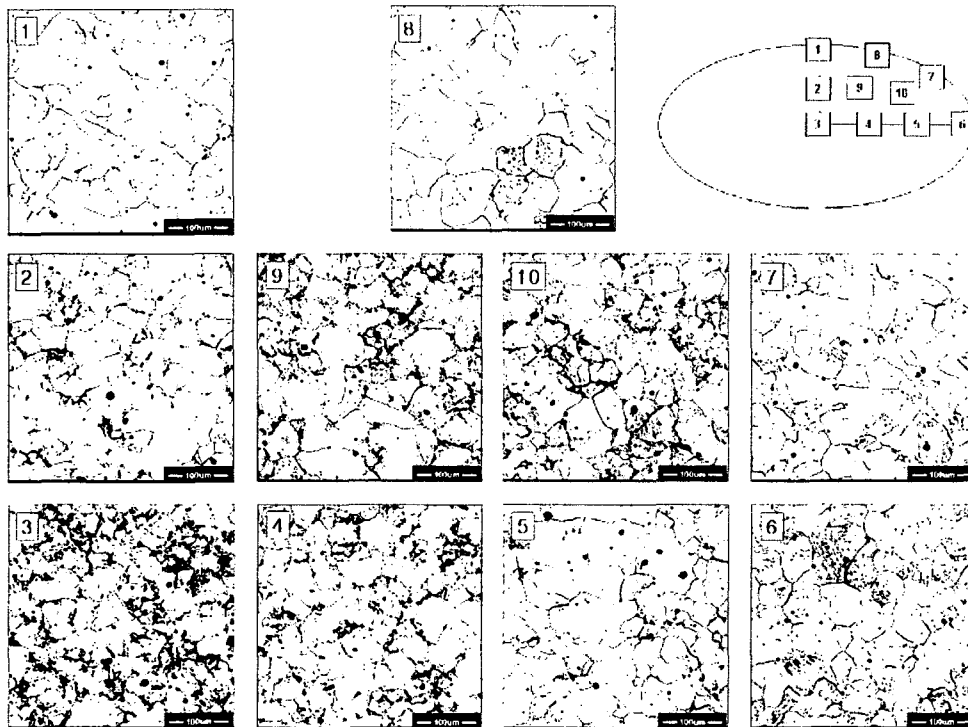


Fig. 4 Local micrographs frozen 20 seconds after round-oval rolling (scale bar:100 μ m).

3. 미세조직 예측

선재 압연 공정의 미세조직 예측을 위해서 변형 특성과 온도 변화를 정확히 예측할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 유한요소해석을 적용하고 AGS 모델과 연계하여 AGS 분포를 예측하였다.

3.1 통합 모델링

미세조직 모델과 유한요소모델의 통합은 Fig. 5에 나타난 방법으로 구현되었다. 미세조직 모델링을 위한 인자로 변형률, 변형률 속도, 온도, 패스간 이동시간, 초기 결정립도 등이 필요하다. 변형률은 누적변형률값을 사용하였고 변형률 속도는 압연 공정에서 매 단계마다 변하게 되므로 대표값으로서 시간에 대한 평균값을 사용하였다.

소재 온도는 압연되는 과정의 마지막 온도 분포와 압연이후의 온도 이력을 입력치로 사용하였

다. 일반적인 AGS 예측 모델은 등은 조건에서 유도되므로 온도가 지속적으로 변하는 실제 열간 공정에 적용하기 위해서는 가법정리를 적용한다. 비등온 온도 이력을 일정 간격을 갖는 등은 구간들로 나누고 각 구간에서 재결정분률식을 적용하고 해당구간에서의 분율을 계산하고 이를 초기치로 그 다음 등은 구간의 분률과 결정립도를 연속적으로 구한다. 최종 계산 결과는 오스테나이트 결정립도와 잔류 변형률이 되며 이 두 가지 결과는 후속 패스의 AGS 예측을 위한 초기값이 된다.

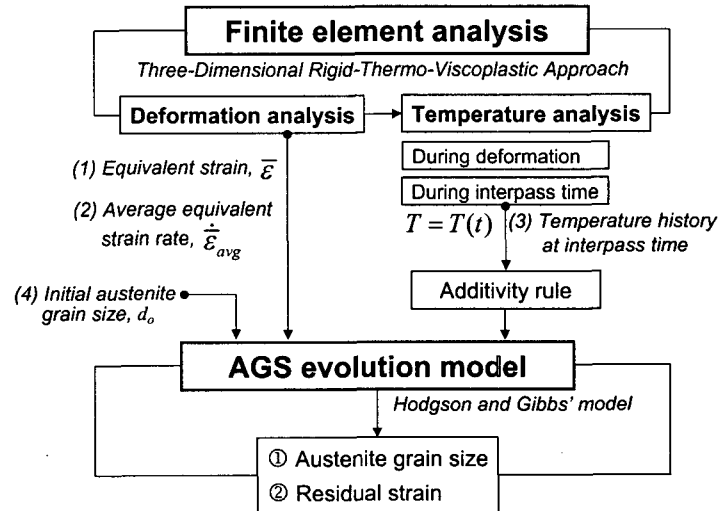


Fig. 5 Flow chart for AGS prediction by combining FEA and AGS model.

3.2 유한요소해석

본 연구에서 사용한 유한요소해석 코드는 한국과학기술원에서 개발된 CAMProII이다(9). 본 코드는 강점소성(Rigid-Viscoplastic) 수식화에 기초하며 변형 해석과 매 단계 열전달 해석을 수행하여 압연중 소재 변형과 온도 분포를 예측한다. 관련된 수식화 과정과 이론적 배경은 참고문헌(9,10)으로 대신한다. Kwon 등은 선재공정에 대해서 본 해석 코드의 정확성을 검증한 바 있다(11,12).

3.2.1 온도 예측

미세 조직 변화에서 온도는 가장 중요한 변수이므로 정확한 조직 예측은 정확한 온도 분포의 분석없이 불가능하다. 열간압연의 온도 예측을 위해서 실험 결과를 이용하여 열전달계수값을 역계산하므로써 최종적으로 전체 온도 분포를 예측한다. Fig. 6에 소재 내부의 두 지점(A, C in Fig. 3)에서 측정된 온도이력과 이를 이용한 접면열전달계수 결정과정을 나타내었다. 접면열전달계수는 압연중에 발생하는 소재 내부의 온도 구배를 결정할 뿐만 아니라 롤을 빠져나온 소재의 온도 이력을 결정하므로 이를 정확하게 측정하는 것이 중요하다.

열전달계수를 3000, 30000, 300000 W/m²/K로 설정하여 해석한 결과 계수값이 30000 W/m²/K일 경우 예측치와 실험치가 일치하였다. 따라서 이 값을 기준으로 열전달 계수값을 1000W/m²/K씩 변화시켜 실험치와 해석치의 오차가 최소화되는 지점을 찾았으며 그 값은 24000 W/m²/K로 결정되었다. 따라서 이 열전달 계수값을 이용하여 온도 분포와 이력을 계산하고 그 결과를 AGS 예측을 위한 기본 데이터로 활용하였다.

3.2.2 해석 결과

유한요소해석으로 구한 각종 물리량의 분포를 Fig. 7에 표시하였다. 변형률은 소재의 중심부에서 0.60, 최상부에서 0.45였으며, 우측 끝단의 자유표면부는 0.30으로 가장 작은 것으로 예측되었다. 그리고 변형률 속도는 누적 변형률의 시간 평균이므로 변형률과 유사한 분포를 가지는데 현 압연속도에서 압연시간은 약 0.1초이므로 변형률 속도는 약 10배의 값을 가진다.

압연 실험에서 소재의 초기 온도는 1000°C였으나 소성발열에 의해 약 20°C 상승하며, 압연직후 롤접촉부의 온도는 710°C까지 감소하였다. 그러나 이 온도 급감 구간은 롤과 접촉하는 상부면의

좁은 띠 구간에 국한되었으며 그 외의 구간에서는 온도구배가 크지 않았다. 그러나 압연된 소재가 롤을 빠져 나오면서 압연 중에 생성된 소재의 상부표면과 내부의 온도차이는 급격한 에너지를 유발하게 된다. 소재의 온도 구배는 압연후 약 5초 만에 사라져 950°C와 970°C 사이의 거의 균일한 온도 분포를 가진다. 이후 소재 온도는 초당 3.28°C씩 감소하면서 냉각이 진행되었다.

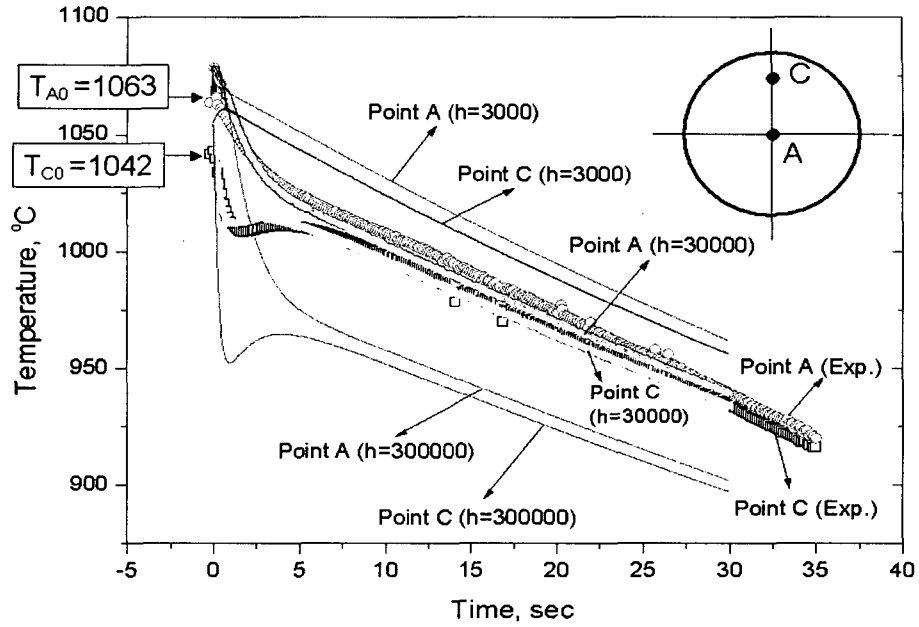


Fig. 6 Temperature distribution and calibration of interface heat transfer coefficient (scattered data: experiments, line data: predictions)

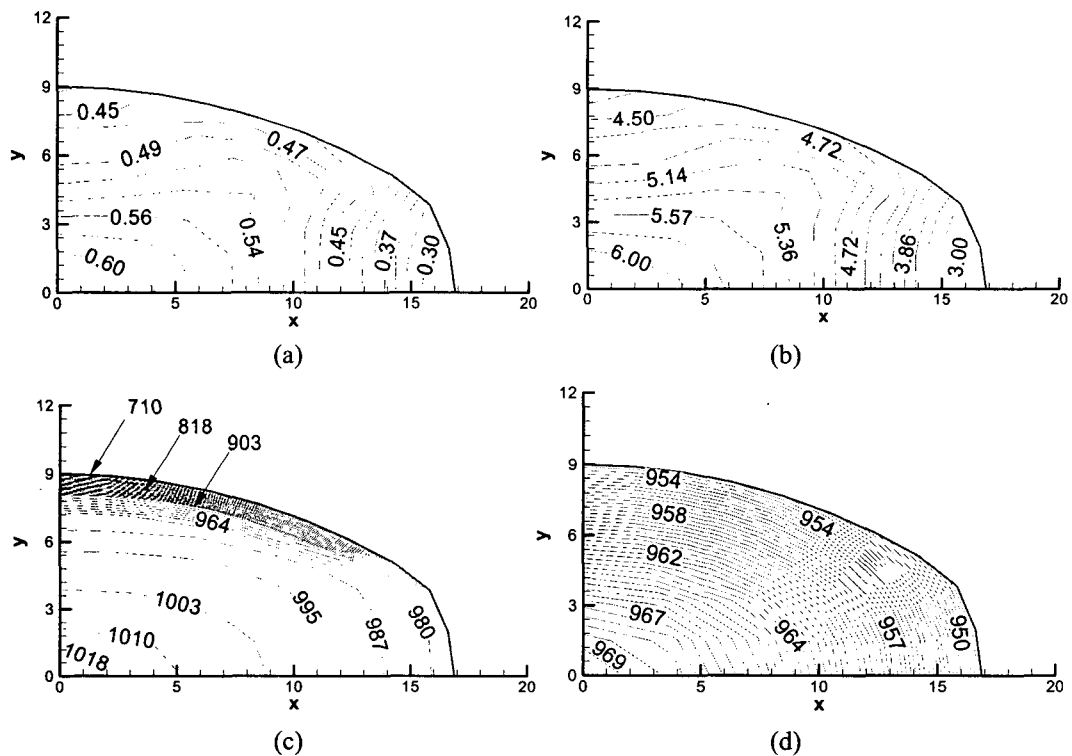


Fig. 7 Distribution of (a) strain, (b) strain rate(1/s), (c) temperature(°C) just after roll bite, and (d) temperature(°C) 5 seconds after roll bite

3.3 AGS 모델

본 연구에서 적용한 AGS 모델은 Hodgson 등에 의해 개발된 미세조직 모델(13,14)이다. 정적재 결정 부분은 Sellars 그룹의 모델과 동일하나 준동적재결정 수식과 결정성장 모델에서 차이가 있다. 특히 결정성장 모델은 완전재결정이 일어난 후 1초를 기준으로 두 구간으로 결정 성장과정을 모델링하여 결정립도 예측의 정확도를 개선한 모델이다. Hodgson 등은 상세한 적용결과는 보고하고 있지 않으나 본 모델이 후판압연, 선재 압연, 형상 압연 등 다양한 압연공정에서 미세조직 예측에 있어 비교적 정확한 결과를 보인 것으로 보고하고 있다. 이 모델은 Sellars 모델에 기반한 모델이므로 미세조직 예측을 위한 적용 알고리즘은 동일하다. 모델의 상세한 수식은 다음 장의 Table 2에 상세하게 나타내었으며 세부적인 설명은 참고문헌(13,14)으로 대신한다.

본 연구에서는 새로운 AGS 모델을 개발하기 보다는 본 AGS 모델을 유한요소해석 기법과 연계하여 선재 공정에서의 결정립도 예측의 타당성을 검토하는데 주안점을 두었다. 이 모델은 Kemp 등(15), Maccagno 등(14), 그리고 Lee 등(7)이 근사변형모델을 적용하여 선재압연 공정에 적용하였고 이로부터 평균결정립도를 예측한 바 있다. 그러나 현 모델을 이용하여 유한요소해석법과 연계하여 선재 공정의 부위를 결정립도를 예측한 연구는 보고 된 바가 없었다.

4. 결과 분석

4.1 분석

미세조직 예측 결과의 타당성을 검토하기 위해 예측된 미세조직 분포를 실측치와 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 패스간 이동시간이 2초, 5초, 20초 인 경우에 소재 내부의 10개 지점에서 측정된 결정립도와 예측 결과를 비교하였다. 소재의 중앙부(3,4)는 AGS 예측치가 30-35 μm 정도의 값으로 실험치와 거의 일치한다. 그 외의 지점에서는 두 값에 차이를 보이고 있으나 내부의 결정립이 외부보다 더 미세하게 나타나는 전체적인 경향은 잘 예측되고 있다. 예측치(속이 빈 기호로 나타냄)는 알파벳 'S'자를 시계 방향으로 90도 회전시킨 형태의 분포를 보이고 있으며 이는 실험치(속이 찬 기호로 나타냄)의 분포 양상과 동일하게 나타난다.

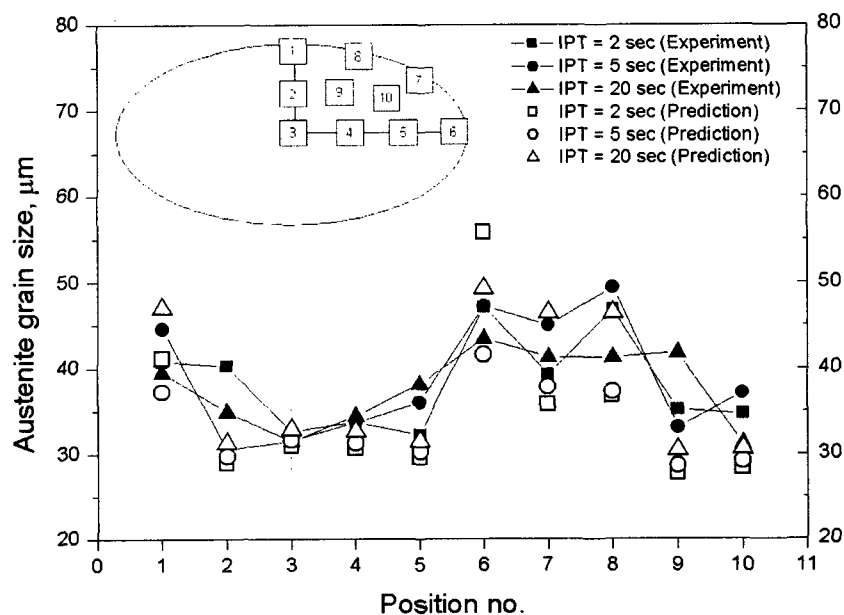


Fig. 8 Comparison of AGS prediction(solid symbol) and measurement(hollow symbol) (Positions were indicated at the top left side and IPT means interpass time)

Table 2 Equations and constants used in the AGS model proposed by Hodgson et al(13)

	Hodgson's model
Critical Strain	$\epsilon_c = 5.6 \times 10^{-4} d_0^{0.3} Z^{0.17}$
Static Recrystallization	$X = 1 - \exp\left[-0.693\left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^n\right]$ $n = 1$
	$t_{0.5} = t_0^{-p} d_0^q Z^{-r} \exp\left(\frac{23000}{RT}\right)$ $t_0 = 2.3 \times 10^{-15}, p = 2.5, q = 2.0$
Zener-Hollomon Parameter	$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q_{\text{def}}}{RT}\right)$ $Q_{\text{def}} = 300 \text{ KJ/mol}$
Metadynamic Recrystallization	$X = 1 - \exp\left[-0.693\left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^n\right]$ $n = 1.5$
	$t_{0.5} = k_{md} Z^{n_{md}} \exp\left(\frac{230000}{RT}\right)$ $k_{md} = 1.1, n_{md} = -0.8$
Recrystallized Grain Size -Static -Metadynamic	$d_{SRX} = 343 d_0^{0.4} \epsilon^{-0.5} \exp\left(\frac{-45000}{RT}\right)$ $d_{MDRX} = 2.6 \times 10^4 Z^{-0.23}$
Grain Growth -Static	if($t < 1$), $d^2 = d_{MDRX}^2 + 4.0 \times 10^7 t \exp\left(\frac{-113000}{RT}\right)$ $t = t_{ip} - 4.32 t_{0.5}$
	if($t > 1$), $d^7 = d_{MDRX}^7 + 1.5 \times 10^{27} t \exp\left(\frac{-400000}{RT}\right)$ $t = t_{ip} - 4.32 t_{0.5}$
Grain Growth -Metadynamic	if($t < 1$), $d^2 = d_{MDRX}^2 + 1.2 \times 10^7 t \exp\left(\frac{-113000}{RT}\right)$ $t = t_{ip} - 2.65 t_{0.5}$
	if($t > 1$), $d^7 = d_{MDRX}^7 + 8.2 \times 10^{25} t \exp\left(\frac{-400000}{RT}\right)$ $t = t_{ip} - 2.65 t_{0.5}$

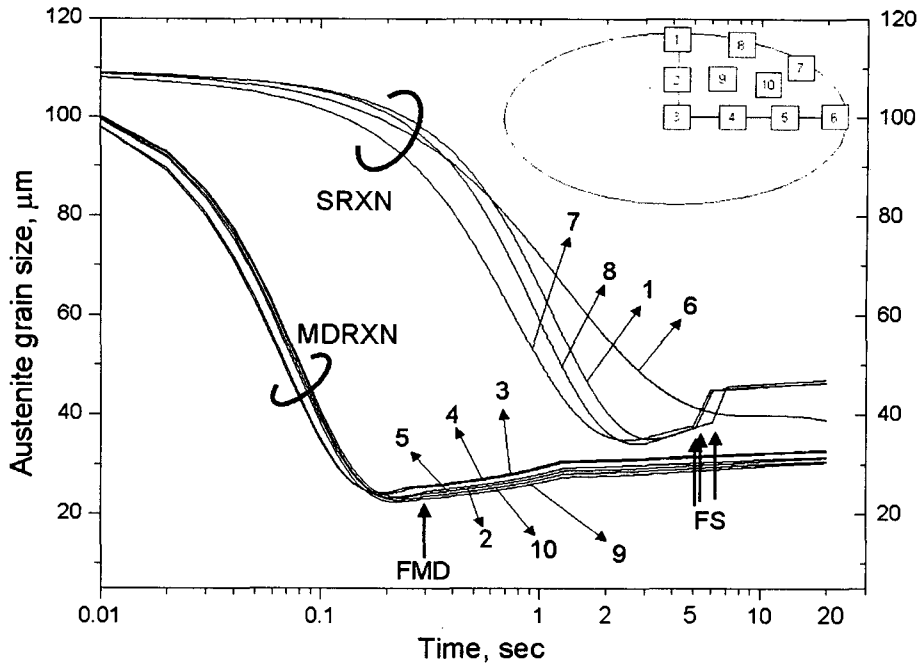


Fig. 9 Predicted AGS evolutions at each position of specimen

예측된 AGS 분포를 분석하기 위해 10개 지점에서의 재결정 거동을 분석하여 Fig. 9에 나타내었다. 그림에 따르면 소재 내부(2,3,4,5,9,10)에서는 준동적재결정(MDRXN)이 발생하였고 외곽부에서는 정적재결정(SRXN)이 발생하였다. 내부의 경우 0.3초 만에 완전한 준동적재결정(FMD, Full MDRXN)이 진행되었으며 외곽부는 5-7초 구간에서 정적재결정이 대부분 완료되었고 (FS, Full SRXN) 이후에 결정립 성장이 발생한 것으로 예측되었다. 3.2절의 해석결과를 참조하면, 소재의 중앙부는 변형량이 크고 고온이므로 준동적재결정에 의해 결정립 미세화가 크게 나타난 것으로 보인다. 이에 반해 소재 외곽부는 저온 조건(1,8,7)과 저변형 조건(6)에 의해 정적재결정이 발생하였으며, 이에 따라 중앙부보다 상대적으로 조대한 결정립이 생성된 것으로 보인다 (수식(1) 참조).

$$\varepsilon_c = 5.6 \times 10^{-4} d_0^{0.3} Z^{0.17}, \quad Z = \dot{\varepsilon} \exp(Q_{\text{def}} / RT) \quad (1)$$

여기서 d_0 는 초기결정립도, Z 는 Zener-Hollomon parameter를 나타내며, R 과 T 는 각각 가스 상수와 변형 온도를 나타낸다.

4.2 고찰

앞 절에서 AGS 분포 특성을 살펴보았다. 본 절에서는 소재 외곽부에서 발생하는 예측치와 측정치간의 오차의 요인을 분석하고 현재의 압연실험에서의 문제점과 미세조직 모델의 예측 정확도 개선을 위한 방안을 정리하였다.

(1) 압연 실험에서 재현성이 있는 실험을 구현하기가 어려우며 특히 재현성 있는 온도 이력을 얻는 것이 쉽지 않다. 이는 가열로를 빠져나온 소재가 압연되기 직전까지 약 30여초의 시간이 소요되며 공기 중의 열손실, 가이드 상에서의 열손실이 발생하기 때문이다. 게다가 실험자의 실험 방식에 따라서 온도 이력에 차이가 날 수 있기 때문이다. 따라서 온도 제어가 용이한 글리블 실험으로 단순 압축 실험에서 우선적으로 AGS 모델링 기법의 타당성을 검토할 필요가 있다.

(2) 다양한 공정에서 AGS 예측기법의 정확성을 검증해야 한다. 현 연구는 34rpm에서의 라운드-오발 공정에 한정하여 AGS 모델링 기법을 검증하였다. 스퀘어(Square)-다이아몬드(Diamond)와 같은 다른 패스 시퀀스에 대해서도 모델의 정확성을 검토할 필요가 있다. 본 연구 대상으로 선정된 공정 조건에서는 AGS 변화를 어느 정도 예측하고 있으나 현장에 적용하기 위해서는 다양한 압연속

도와 압하량에서 모델링 기법의 타당성이 검토되어야 한다.

(3) 압연 실험은 저속으로 진행되어 소재 표면에서 급격한 온도 변화가 나타났다. 온도 이력을 고려하기 위해 현재 가법정리를 적용하고 있으나 미세조직 모델이 유도되는 등은 조건과 온도 변화 폭에서 큰 차이를 보인다. 따라서 급격한 온도 이력에 따른 재결정 거동의 차이를 가법정리만으로는 모사하기 어렵다. 그러므로 실제 저속 압연 공정에서 나타나는 다양한 온도 이력의 영향을 어떠한 형태로든 고려할 수 있는 AGS 예측 모델이 제안되어야 할 것으로 보인다.

5. 결론

본 연구에서는 S20C강의 저속 라운드-오발 압연 공정에서의 AGS 분포를 측정하였고 유한요소 법과 AGS모델을 연계한 모델링 기법을 적용하여 미세조직 변화 과정을 분석하였다. 이를 통해 현 연구의 공정 조건에서는 소재의 중앙부에서 결정립 미세화가 촉진되며 외곽부는 압연 중의 급격한 온도 감소와 적은 변형량에 의해 결정립 미세화가 상대적으로 더디게 진행되는 것을 밝혔다. 그러나 예측기법의 타당성을 검증하고 후에 이를 실제 공정에 적용하기 위해서는 다양한 공정조건하에서 모델링 기법의 정확성을 검토할 필요가 있다.

참고문헌

1. C. M. Sellars, *Materials Science and Technology*, vol. 6, pp. 1072-1081(1990).
2. O. Kwon, *ISIJ International*, vol. 32, no. 3, pp. 350-358(1992).
3. R. Kopp et al., *Scandinavian Journal of Metallurgy*, vol. 20, pp. 351-353(1991).
4. M. Pietrzyk et al., *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 53, pp. 159-166(1995).
5. J. Yanagimoto et al., *ISIJ International*, vol. 40, no. 1, pp. 65-70(2000).
6. D. L. Lee et al., *Journal of the Korean Institute of Metals and Materials*, vol. 39, no. 6, pp. 655-659(2001).
7. Y. Lee, *ISIJ International*, vol. 39, no. 9, pp. 961-964(1999).
8. S. Choi et al., *Metals and Materials International*, vol. 8, no. 1, pp. 15-23(2002).
9. S. Kobayashi et al., *Metal Forming and the Finite Element Method*, Oxford University Press, (1989).
10. S. Y. Kim et al., *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 127, no. 1, pp. 57-63(2002).
11. H. C. Kwon et al., *ISIJ International*, vol. 43, no. 5, pp. 676-683(2003).
12. H. C. Kwon et al., *ISIJ International*, vol. 43, no. 12, pp. 1967-1975(2003).
13. P. D. Hodgson et al., *ISIJ International*, vol. 32, pp. 1329-1338(1992).
14. T. M. Maccagno et al., *ISIJ International*, vol. 36, no. 6, pp. 720-728(1996).
15. I. P. Kemp, *Journal of Ironmaking and Steelmaking*, vol. 17, pp. 139-143(1990).