

SCM435 강의 라운드-오발 및 스퀘어-다이아몬드 압연 공정에서의 AGS 분포

이호원, S. H. Zahiri**, P. D. Hodgson**, 임용택
기계공학과, 한국과학기술원

School of Engineering and Technology, Deakin University, Australia**

AGS Distribution of Round-oval and Square-Diamond Rolling of SCM435 Steel

H. W. Lee, H. C. Kwon*, S. H. Zahiri**, P. D. Hodgson**, and Y. T. Im
Mechanical Engineering Department, KAIST
Rolling Technology and Process Control Research Group
POSCO Technical research Laboratories*
School of Engineering and Technology, Deakin University, Australia**

Abstract

This study investigated the local austenite grain size (AGS) distribution in rolling of SCM435 steel which is commonly used for high strength bolt. To investigate AGS distribution, round-oval (R-O) and square-diamond (S-D) rolling experiments were carried out with pilot mill. In round-oval rolling, local AGS has a tendency to increase when it goes to outward. In square-diamond rolling, local AGS has a tendency to increase when it goes to free surface. To investigate relation between AGS and process parameter, three dimensional FE analysis was carried out along with rolling experiment. To validate accuracy of FE analysis, we compared deformed geometry with FE result. The AGS prediction combined AGS model with numerical analysis was also carried out for center node of S-D rolling. Although this study brought experimental observation and its qualitative analysis into focus and quantitative AGS prediction will be done as a further work.

Key words: Austenite grain size, SCM435, round-oval, square-diamond

1. 서론

산업 전반에서 선재 압연재의 사용도는 매우 크다. 특히 SCM435 강재는 자동차의 고장력 볼트 등(Fig. 1)으로 사용되는 고급강재로 일반 구조용강에 비해 부가가치가 높다. 또 최근의 세계 자동차 시장에 차량 경량화가 요구되는 상황 속에서 SCM435 선재의 강도 및 내구성을 증가시키기 위사료된다.한 미세조직 예측 및 제어 관련 연구는 매우 중요하다.

선재 공정의 미세조직 예측 모델의 개발에 관한 연구는 최근 들어 활발히 이루어지고 있다. POSCO의 Lee 등(1)은 SCM435강종의 미세조직 모델을 개발하였고, Lee 등(2)은 근사변형률 모델과 기존의 미세조직모델과 연계하여 오스테나이트 결정립 크기(Austenite Grain Size, AGS)를 예측한 바 있다. 또 Kwon 등(3)은 유한요소해석과 미세조직 모델을 연계하여 S20C 선재 압연 공정의 AGS 변화를 분석하였다. 하지만 이러한 대다수 연구는 아직까지 일반 탄소강에 집중되고 있으며,

SCM435강의 미세조직 예측에 관한 연구는 찾아보기 어렵다. 따라서 SCM435강의 선재 압연 시의 미세조직 변화 경향을 알아보고 예측하는 연구가 필요한 것으로 사료된다.

본 연구에서는 대표적인 선재압연 공정인 라운드-오발 (Round-Oval), 스퀘어-다이아몬드 (Square-diamond) 압연 시 AGS 분포 특성을 관찰하고 유한요소해석을 통해 공정특성을 분석하였다. 또 AGS 예측 수식 모델을 이용하여 다이아몬드-스퀘어 압연에서 소재 중심부의 AGS 변화 거동을 분석하였으며 이를 실제 측정치와 비교하였다.

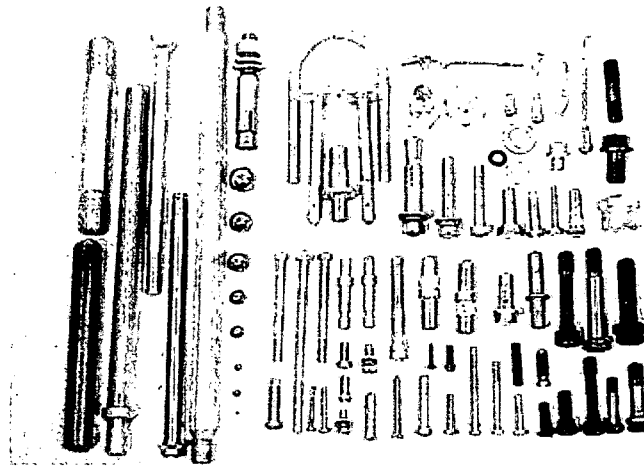


Fig. 1 High strength bolts made of SCM435.

2. 압연실험

미세조직 분포의 특성을 분석하기 위해 POSCO 기술연구소의 시압연기 (Pilot mill)를 이용하여 선재 압연 실험을 수행하였다. 라운드-오발 공형과 스퀘어-다이아몬드 공형의 압연실험을 수행하였으며 압연속도는 34rpm으로 설정하였다. 이때 사용한 롤 공형의 반경은 310mm이다. 실험에 이용된 사각 단면 및 원형 단면을 갖는 시편의 세부형상을 Fig. 2에서 나타내었으며 압연 전/후의 압연 시편의 형상도 동시에 나타내었다. 실험 대상인 SCM435강의 화학조성을 Table 1에 나타내었다.

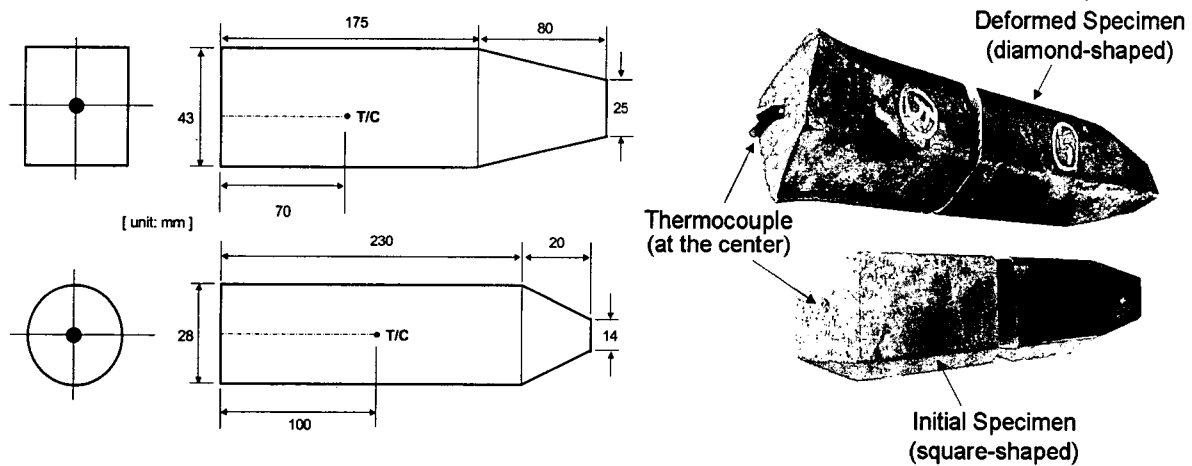


Fig. 2 Configuration of specimen and position of thermocouple (unit: mm).

Table 1 Chemical compositions of SCM435 steel

	C	Cr	Mn	Mo	P(max)	S(max)	Si
Wt.%	0.33-0.38	0.8-1.1	0.7-0.9	0.15-0.25	0.035	0.04	0.15-0.35

2.1 실험 방법

Fig. 3에 본 연구의 실험 장치를 개략적으로 나타내었다. 압연 실험은 크게 소재 가열 단계, 압연 단계, 그리고 담금질 단계로 이루어진다. 압연 이전에 균일한 초기 결정립도를 만들기 위해 압연 온도보다 약 100°C 더 높은 1100°C의 온도에서 시편을 1시간 동안 가열하였다. 이후 시편은 시압연기의 롤 가이드 (roll guide)로 옮겨지고, 시편의 온도가 1000°C에 도달하였을 때 압연을 수행하였다. 압연 후 시편을 지정된 일정 시간 동안 유지한 후 담금질하여 오스테나이트 결정립을 동결시켰으며 시편의 담금질을 위해 소재를 수조에 넣은 후 좌우로 흔들어 주었다.

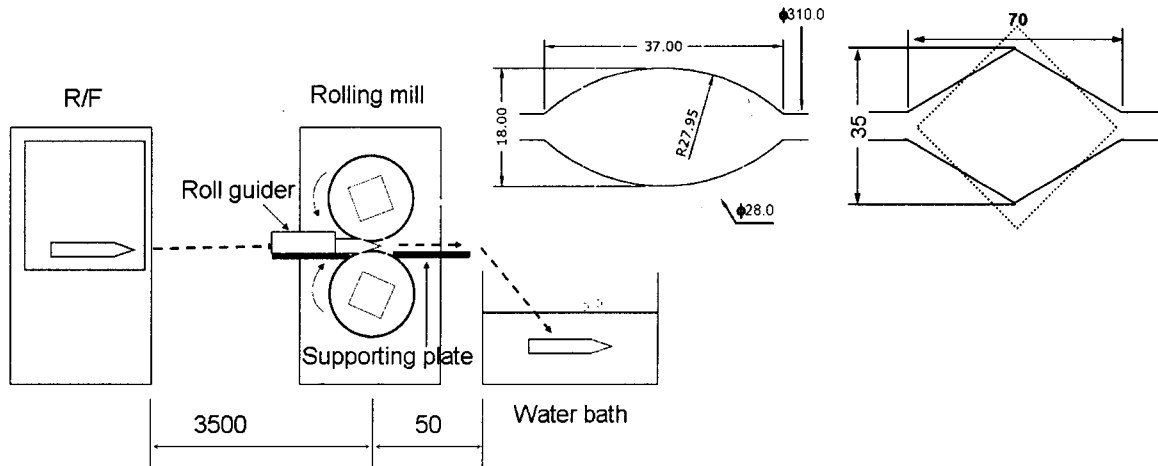


Fig. 3 Schematic of Experimental set-up.

소재의 온도 이력은 AGS 모델에서 미세조직 변화를 결정하는 중요한 변수이다. 따라서 정확한 온도 모델링은 정확한 미세조직 분석에 있어 매우 중요하다. 본 연구에서는 열전대를 이용하여 소재 중앙부의 온도를 측정하였으며 외부 온도는 비접촉식 온도 측정기 (pyrometer)로 측정하려고 하였다. 그러나 가열로를 빠져나온 시편의 표면에 산화막이 생성되어 표면 온도의 정확한 측정이 불가능하였다. 온도 측정을 위해 Fig. 2에서 나타낸 것처럼 시편의 중앙 점에 각각 70mm, 100mm 길이로 열전대를 연결하여 압연시작 이전부터 담금질 되는 단계 까지 중앙부의 온도이력을 측정하였다. 지름이 4.6mm인 K-type 열전대를 사용하였으며, 휴대용 데이터기록장치 (Data Acquisition System, YOKOGAWA mobile view recoder-MV100)를 사용하여 온도 이력을 기록하였고 이 때 샘플링 시간은 0.125초로 설정하였다.

담금질한 시편의 결정립도 측정을 위해 시편의 중앙부를 압연 방향과 수직인 방향으로 절단하여 마운팅을 제작하였다. 마운팅 된 시편을 P.800, P.1200의 Abrasive disc와 6 μm, 1 μm의 diamond suspension을 이용하여 폴리싱 하였다. Table 2의 용액을 사용하여 약 70°C의 온도에서 에칭 하였으며 교반기를 사용하여 시편 전체가 균일하게 에칭 될 수 있도록 하였다.

Table 2 Compositions of SCM435 etching solution

	Water	Picric acid	Hydrochloric acid	Wetting agent
Amount	100 ml	2 g	2 drops	16 drops

2.2 실험 결과

열전대를 사용하여 정확한 온도 이력을 얻었으며 가열로에서 꺼낸 시편이 압연 온도인 1000°C에 도달하는데 걸린 시간을 측정하였다. 몇 회의 반복 실험 결과 온도의 재현성을 확인 할 수 있었으며 이후의 반복실험에서는 열전대를 사용하지 않고 측정된 시간을 기준으로 압연 실험을 수행하였다. 이러한 과정을 통하여 실험 과정 전체의 온도 이력을 얻을 수 있었고 이를 Fig. 4에 나타내었다.

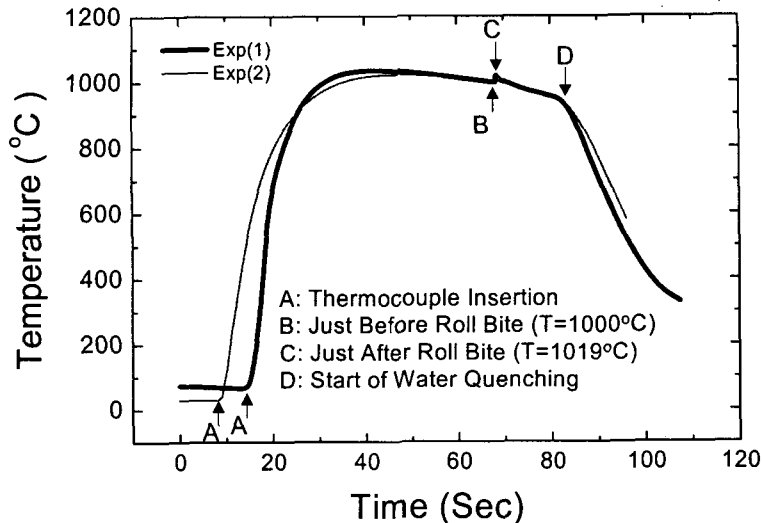


Fig. 4 Temperature history of square-diamond rolling.

A 시점은 열전대를 시편에 삽입하는 순간이며, A점에서 B점까지의 구간에서 온도는 급격하게 증가하다가 공기 및 롤 가이드로의 열손실에 의해 서서히 감소하는 경향을 보인다. B ($T=1000^{\circ}\text{C}$) 시점에서 압연이 시작되며 압연과정에서 소성발열에 의하여 C점 ($T=1000^{\circ}\text{C}$)까지 순간적으로 온도가 증가한다. C점 이후부터는 소재 중심부의 에너지가 롤 접촉부로 이동하면서 온도는 서서히 감소한다. 이때의 온도 감소율은 초당 4.3°C 로 측정되었다. 담금질이 시작되는 D 시점 이후에 소재의 온도는 초당 30°C 씩 감소하였다.

압연 단계 이전에 일부 시편을 바로 담금질 하여 초기 AGS 값을 측정하였다. 초기 AGS 값은 재료의 재결정거동을 결정하는 인자로 최종 AGS 값에 영향을 미치므로 압연전의 AGS 값을 측정하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 라운드-오발 패스와 스퀘어-다이아몬드 패스에서 관찰된 미세조직과 측정된 AGS를 보여주고 있다. 라운드-오발의 경우 결정립의 크기는 일정한 경향을 보여주고 있다. 중앙 점에 가까운 점들은 결정립의 크기가 작고, 경계면에 있는 점들은 상대적으로 결정립의 크기가 큰 경향을 보이고 있다. 이는 라운드-오발의 공정 특성상 경계면보다는 중앙부에서 변형이 집중되어 중앙 지점에 가까울수록 재결정 거동이 활발하게 일어나기 때문이다. 스퀘어-다이아몬드의 경우에는 롤과 접촉하지 않는 자유표면 (Fig. 6의 1)에 가까울수록 결정립의 크기가 큰 경향을 보이고 있다.

3. 유한 요소 해석

3.1 변형 해석

본 연구에서 사용한 유한요소해석 코드는 한국과학기술원에서 개발된 CAMPro이다. 본 코드는 강점소성(Rigid-Viscoplastic) 수식화에 기초하며 변형 해석과 매 단계 연계하여 열전달 해석을 수행하여 압연 중 소재의 변형 형상과 온도 분포를 예측할 수 있다. 관련된 수식화 과정과 이론적 배경은 참고문헌(5)으로 대신한다.

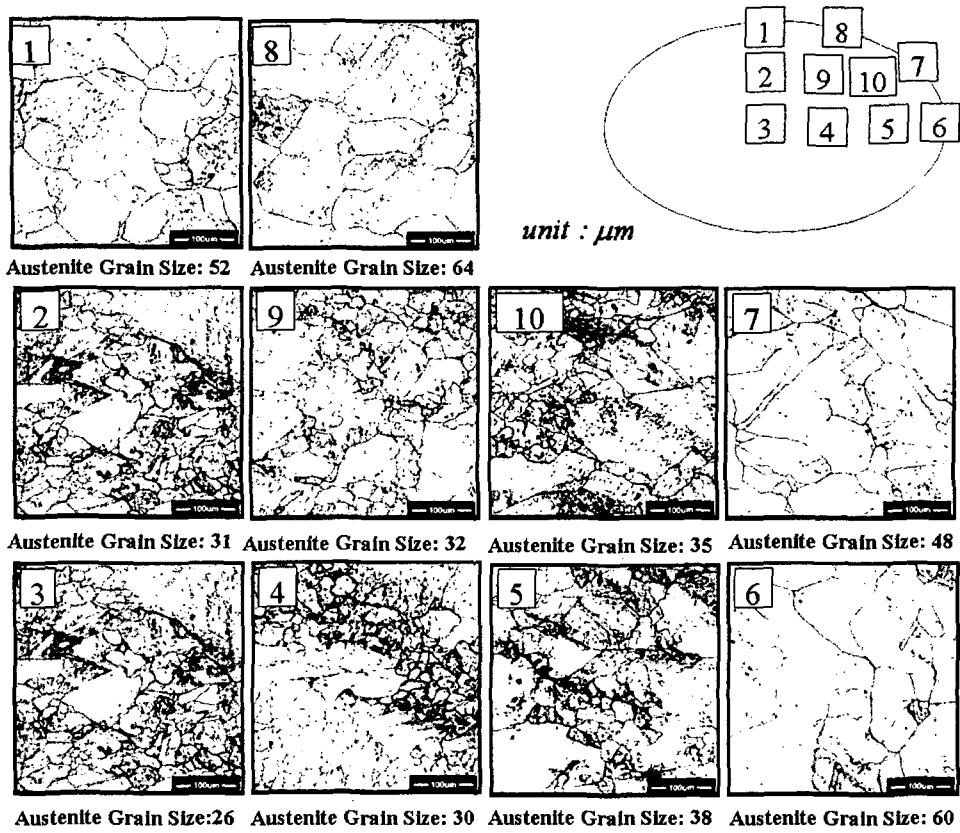


Fig. 5 Local micrographs of the specimen in round-oval rolling.

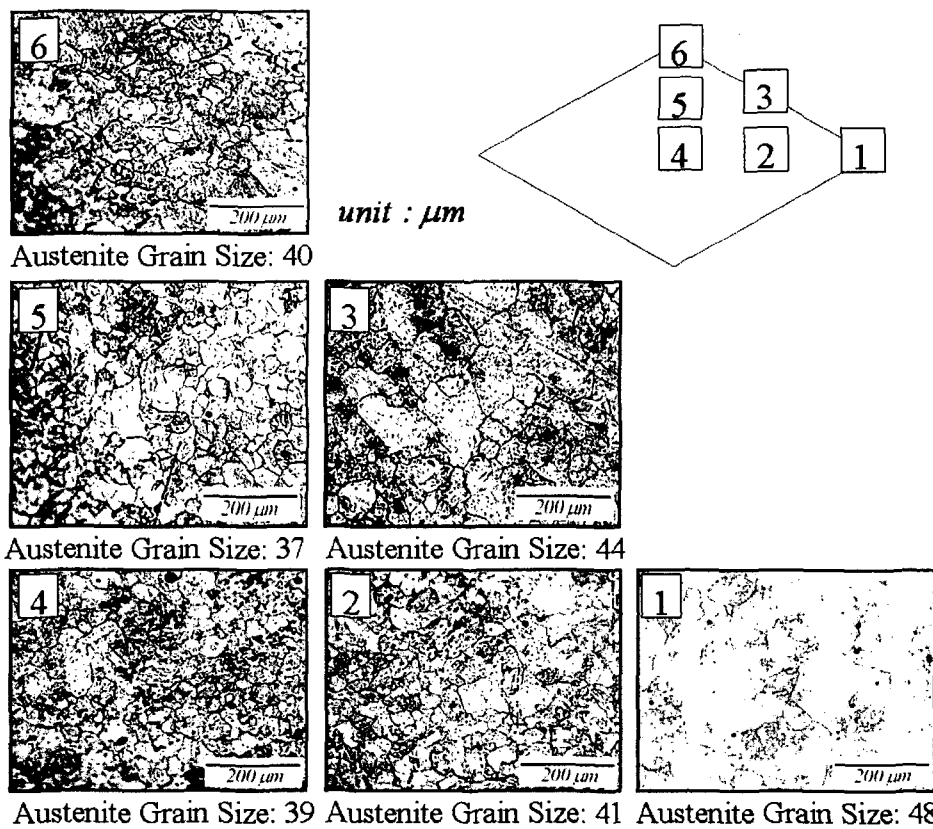


Fig. 6 Local micrographs of the specimen in square-diamond rolling.

유한요소해석의 정확성은 실험 결과와 해석 결과의 형상을 비교하여 검증하였다. Fig. 7에서 유한요소해석 결과가 실제 변형 형상보다 폭 퍼짐을 적게 예측하고 있다. 이 오차는 유한요소 해석에서 더 많은 수의 요소를 사용하면 줄일 수 있다. 본 연구에서는 정성적인 AGS 분포에 초점을 맞추고 있으므로 현재의 요소를 그대로 사용하기로 한다.

유한요소 해석의 결과를 Fig. 8에 정리하였다. 유효변형률의 경우를 살펴보면, 라운드-오발 압연과 스퀘어-다이아몬드 압연의 경우 확연한 차이를 보여주고 있다. 라운드-오발 압연의 경우 중앙부로 갈수록 유효변형률 값이 큰 경향을 보여주고 있음에 반해, 스퀘어-다이아몬드 압연에서는 자유표면에서 접촉면의 정점에 가까워질수록 유효변형률 값이 증가하고 있다. 온도는 라운드-오발의 경우 롤 접촉부에서 766°C까지 온도가 감소하였고, 스퀘어-다이아몬드 공정에서는 636°C까지 온도가 떨어졌다.

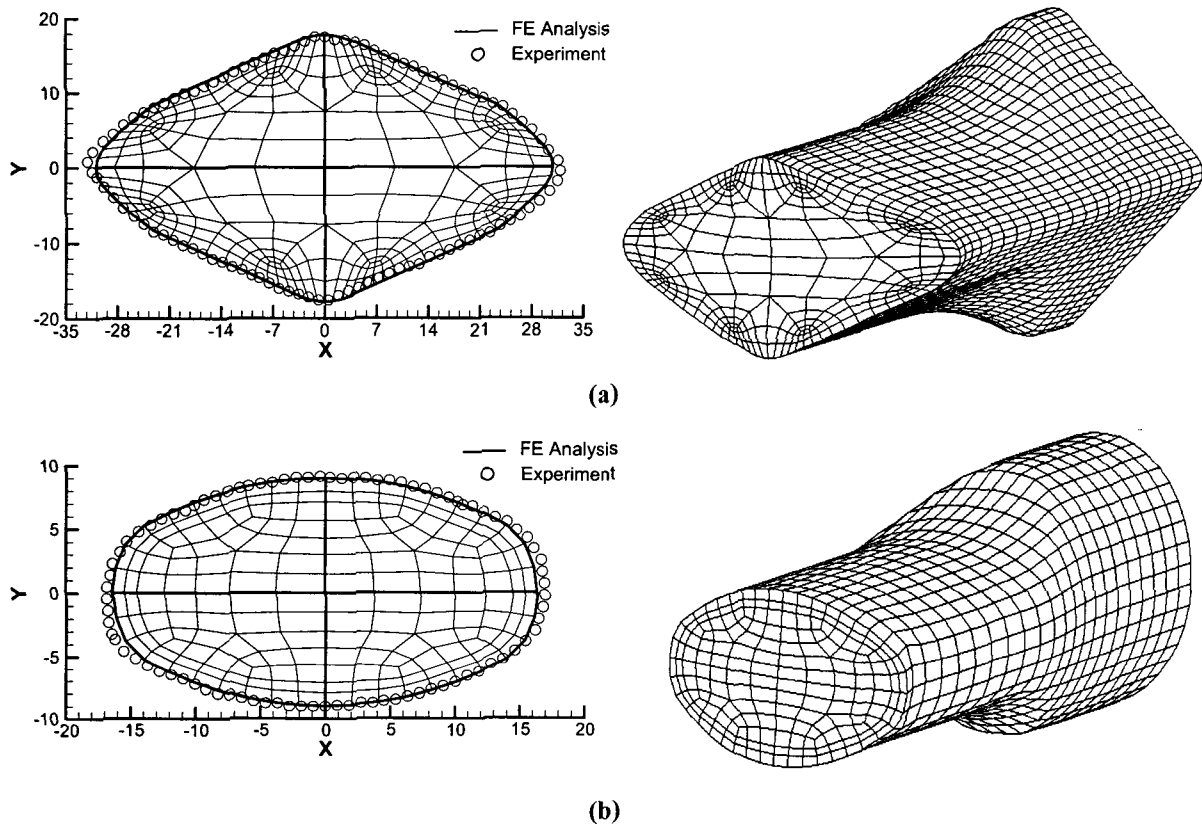
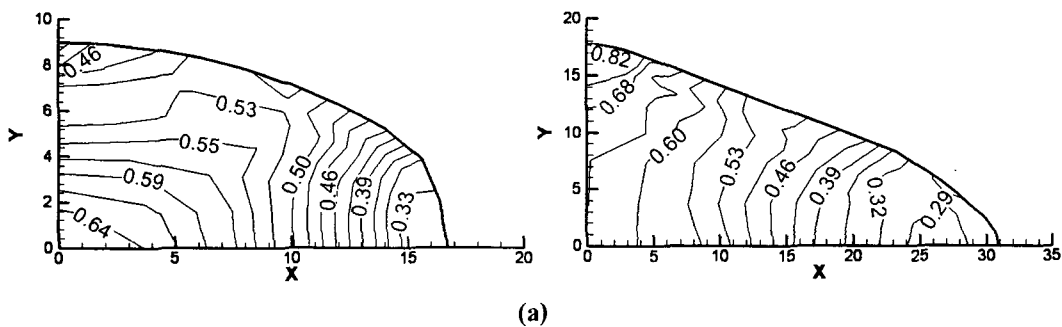


Fig. 7 Comparison of the FE analysis and experimental results in:
(a) Square-Diamond rolling and (b) Round-Oval rolling.



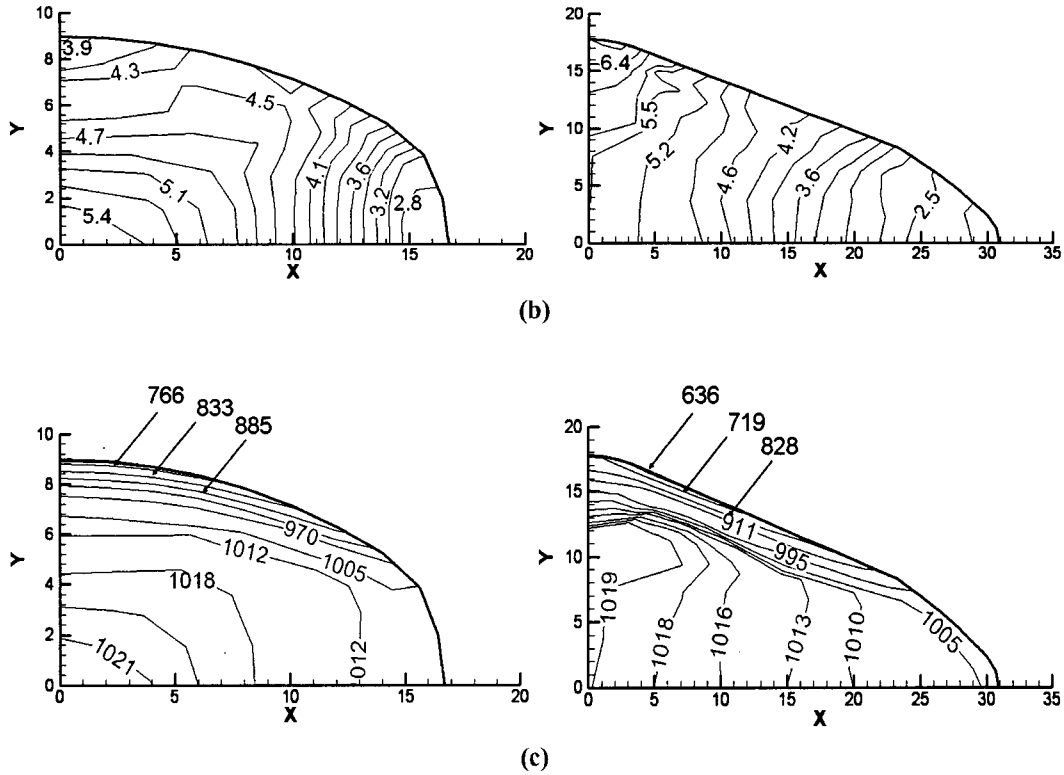


Fig. 8 FE results: (a) strain, (b) strain rate (1/s), and (c) temperature (°C) at the roll exit.

3.2 AGS 예측

스퀘어-다이아몬드 압연의 중심부에서의 오스테나이트 결정립 크기를 예측하였다. 중심부에서의 오스테나이트 결정립 크기는 기존에 개발된 AGS 수식 모델에 실험에서 얻어진 온도 이력과 유한요소 해석 결과를 적용하여 구하였다. 본 연구에서 사용된 AGS 수식 모델은 등온 조건하에 유도되었으므로, 온도가 계속 변하는 실제 압연 공정에 적용하기 위해 본 연구에서는 가법정리 (additivity rule)를 재결정 과정과 결정립 성장 수식에 적용하여 결정립도 변화를 예측하였다.

3.2.1 AGS 수식 모델

Zahiri 등의 수식 모델과 이 등의 수식 모델(1)을 사용하여 AGS 예측을 수행하였다. 자세한 모델은 Table 3에 표기하였다. Zahiri의 수식 모델은 기존의 Hodgson 등이 개발하였던 수식 모델(6)을 SCM435강에 적용하여 구한 모델이고, 이 등의 수식 모델(1)은 Sellars 등이 개발한 수식 모델(7)을 기반으로 하여 구하여진 모델이다. Zahiri의 모델은 결정립 성장을 표현 하는 모델에서 결정립 성장을 두 구간으로 나누어 모델링 하였다는 점에서 이 등의 모델과 차이가 있다.

3.2.2 AGS 예측 결과

AGS 예측 결과를 Fig. 9에 정리하였다. 세 번의 반복 실험 결과 중심부의 AGS값은 37 μ m, 42 μ m, 45 μ m 로 측정되었으며 평균값은 41 μ m로 계산되었다. Lee 등의 모델(1)로 예측한 결과 중앙점의 결정립도는 42 μ m이었으며 Zahiri 등의 모델에 따르면 결정립도는 30 μ m로 예측되었다. 그리고 두 모델 모두 정적재결정 거동을 예측하였다. 예측 결과 Lee 등의 모델(1)이 Zahiri 등의 모델보다 정확한 값을 예측하고 있다. 하지만 Zahiri 등의 모델도 측정에서의 오차 범위를 생각한다면 신뢰할 수 있는 결과를 예측하고 있으며 이 실험의 결과만으로 AGS 모델의 정확성을 검증하기는 어렵다. 따라서 다양한 공정 조건에서 실험을 수행하여 AGS 모델의 타당성을 검증할 필요가 있다.

Table 3 SCM435 AGS model developed by: (a) Zahiri and (b) Lee(1)

	Zahiri's model	Lee's model
Critical Strain	$\epsilon = 4.1 \times 10^{-4} d_0^{0.3} Z^{0.25}$	$\epsilon = 7.12 \times 10^{-4} d_0^{0.5} Z^{0.17}$
Static Recrystallization	$X = 1 - \exp\left[-0.693\left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^n\right]$ $n=1$	$X = 1 - \exp\left[-0.693\left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^n\right]$ $n=1$
	$t_{0.5} = t_0^{-p} d_0^q Z^{-r} \exp\left(\frac{314000}{RT}\right)$ $t_0 = 3.4 \times 10^{-14}, p=2, q=2$	$t_{0.5} = t_0^{-p} d_0^q \exp\left(\frac{300000}{RT}\right)$ $t_0 = 2.9 \times 10^{-18}, p=4, q=2$
Zener-Hollomon Parameter	$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q_{def}}{RT}\right)$ $Q_{def} = 240 \text{ KJ/mol}$	$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q_{def}}{RT}\right)$ $Q_{def} = 269 \text{ KJ/mol}$
Metadynamic Recrystallization	$X = 1 - \exp\left[-0.693\left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^n\right]$ $n=1.15$	$X = 1 - \exp\left[-0.693\left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^n\right]$ $n=1$
	$t_{0.5} = k_{md} \cdot n_{md}$ $k_{md} = 0.43, n_{md} = -1$	$t_{0.5} = k_{md} Z^p \exp\left(\frac{257000}{RT}\right)$ $k_{md} = 3.97 \times 10^{-3}, p = -0.77$
Recrystallized Grain Size -Static -Metadynamic	$d_{MDRX} = 1.5 \times 10^3 Z^{-0.23}$ $d_{SRX} = 350 d_0^{0.4} \exp\left(\frac{-45000}{RT}\right)$	$d_{MDRX} = 5.6 \times 10^3 Z^{-0.21}$ $d_{SRX} = 1.15 \times d_0^{0.67} \exp\left(\frac{-45000}{RT}\right)$
Grain Growth -Static $t < 1$	$d^7 = d_{MDRX}^7 + 7.5 \times 10^{24} t \exp\left(\frac{-40000}{RT}\right)$ $t = t_{ip} - 4.32 t_{0.5}$	$d^7 = d_{MDRX}^7 + 3.2 \times 10^{18} t \exp\left(\frac{-230000}{RT}\right)$ $t = t_{ip} - 2.65 t_{0.5}$
Grain Growth -Static $t > 1$	$d^7 = d_{MDRX}^7 + 7.5 \times 10^{24} t \exp\left(\frac{-40000}{RT}\right)$ $t = t_{ip} - 4.32 t_{0.5}$	$t = t_{ip} - 2.65 t_{0.5}$
Grain Growth -Metadynamic $t < 1$	$d^7 = d_{MDRX}^7 + 7.4 \times 10^4 t \exp\left(\frac{-113000}{RT}\right)$ $t = t_{ip} - 2.65 t_{0.5}$	$d^7 = d_{MDRX}^7 + 1.32 \times 10^{18} t \exp\left(\frac{-230000}{RT}\right)$ $t = t_{ip} - 2.65 t_{0.5}$
Grain Growth -Metadynamic $t > 1$	$d^7 = d_{MDRX}^7 + 7.5 \times 10^{24} t \exp\left(\frac{-40000}{RT}\right)$ $t = t_{ip} - 2.65 t_{0.5}$	$t = t_{ip} - 2.65 t_{0.5}$

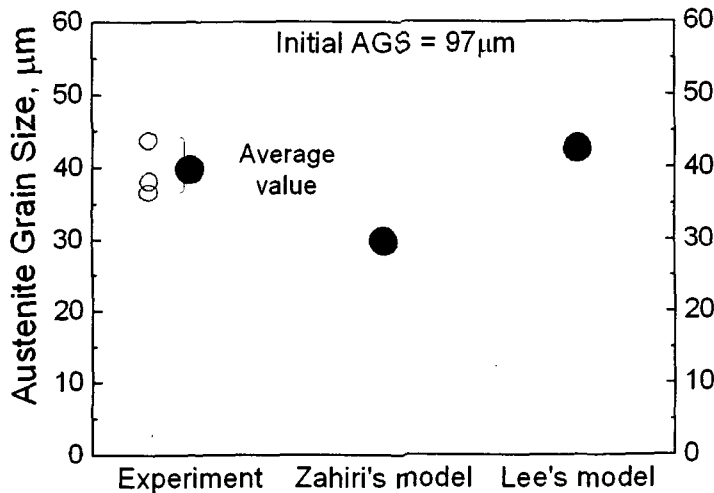


Fig. 9 AGS predictions vs. AGS measurements.

4. 결과분석 및 고찰

4.1 결과 분석

측정된 오스테나이트 결정립 크기와 유효변형률의 역수를 Fig. 10에 정리하였다. 스퀘어-다이아몬드 공정에서 대체적으로 유효 변형률 값이 큰 지점의 결정립 크기가 작은 경향을 볼 수 있다. 이러한 경향에 따라 6번 지점의 경우 유효변형률 값이 제일 크므로 결정립 크기가 가장 작아야 하지만 실험 결과 5번 지점이 가장 작다. 이는 재결정 거동이 유효변형률 뿐 아니라 온도의 영향도 받기 때문이다. 재결정 거동은 온도가 낮을수록 속도가 느린 경향을 보이는데, 6번 지점의 경우 다른 지점에 비해 온도가 상대적으로 많이 낮기 때문에 재결정 거동이 느린 속도로 발생하였다.

라운드 오발의 경우 경계면에 해당하는 1, 6, 8, 9 번 지점의 경우 결정립의 크기가 크고, 중앙 부분에 해당하는 나머지 점들은 결정립이 상대적으로 작다. 이는 라운드 오발의 경우 중앙부의 유효변형률이 경계보다 크며 온도 또한 경계보다 중앙부가 높기 때문이다.

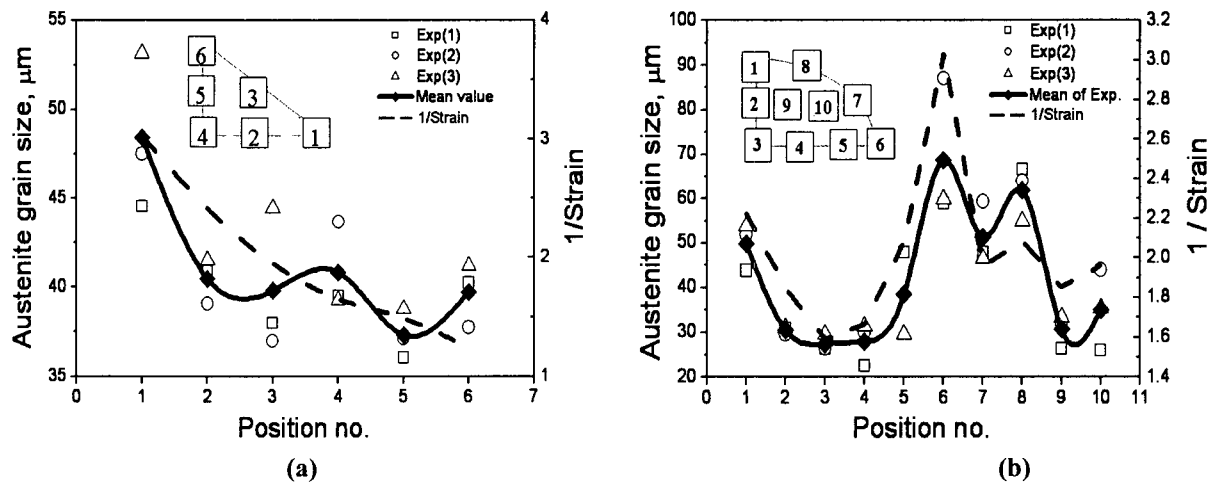


Fig. 10 AGS and strain distribution in (a) square-diamond rolling and (b) round-oval rolling.

4.2 고찰

현 연구에서 AGS 예측 과정에서 실험으로 온도 이력을 구한 소재 중앙부의 미세조직 예측에 초점을 맞추었다. 이는 실험 과정에서 다양한 지점에서 온도 이력을 측정하지 못하여, 정확한 온도 예측에 필요한 접면 열전달 계수 등을 정확히 결정할 수 없기 때문이다. 이러한 물성치의 결정은 실험 시 다양한 지점의 온도 이력을 비교하는 것으로 가능하다. 중앙 지점 뿐 아니라 외부 지점의 온도이력을 측정할 수 있는 효과적인 실험 방법을 고안하는 것이 중요하다.

AGS 예측 수식의 정확성을 검토하기 위해 압연 실험을 수행하였지만, 현재의 실험만으로는 AGS 수식 모델의 정확성을 검증하기 어렵다. AGS 수식모델의 정확성을 검증하기 위해서는 다양한 공정 조건하에서 실험을 수행하여 결과를 검토할 필요가 있다.

5. 결론

본 연구에서는 SCM435강의 라운드-오발 압연과 스퀘어-다이아몬드 압연 공정에서의 AGS 분포를 살펴보았다. 라운드-오발의 경우 중앙보다 경계면의 오스테나이트 결정립이 큰 경향을 보이고 있고, 스퀘어-다이아몬드 압연의 경우 중심부에서 자유표면으로 가까워질수록 결정립이 큰 경향을 볼 수 있었다. 또한 기존의 AGS 예측 모델을 스퀘어-다이아몬드 공정에 적용하여 모델의 타당성을 검증해 보았다. 그러나 다양한 공정 조건하에서 AGS 모델의 타당성을 검토할 필요가 있다.

후기

본 연구는 과기부에서 주관하는 국제 공동 연구 사업에 의하여 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. D. L. Lee et al., Journal of the Korean Institute of Metals and Materials, vol. 39, no. 6, pp. 655-659(2001).
2. Y. Lee et al., Material Science and Engineering, A336, pp. 177-189(2002).
3. H. C. Kwon et al., ISIJ International, vol. 43, no. 12, pp. 1967-1975(2003).
4. Annual Book of ASTM Standards, vol. 03. 03 ASTM, pp. 115(1986).
5. S. Y. Kim et al., Journal of Material Processing Technology, vol. 127, no. 1, pp. 57-64(2002).
6. P. D. Hodgson et al., ISIJ International, vol. 32, no. 12, pp. 1329-1338(1992).
7. C. M. Sellars, Material Science and Technology, vol. 6, pp. 1072-1081(1990).