

열간압연 중 발생하는 강판재 내의 재결정 거동 예측

이정서* · 박종진*

(1998년 1월 26일 접수)

Prediction of Recrystallization Behaviors in Steel Sheet during Hot Rolling Process

Jung-Seo Lee and Jong-Jin Park

Abstract

Recently, the SPPC technology is being developed in steel rolling industries for the purpose of enhancing mechanical properties of rolled sheets. The technology is to produce steel sheets with finer and more uniformly distributed grains by prediction of recrystallization behaviors and on-line control of rolling parameters during hot rolling process. In this study, a finish rolling process was analyzed by a three-dimensional rigid-thermoviscoplastic finite element method and recrystallization behaviors of several locations in the sheet were predicted by Sellars equations. As a result, it was found that the initial grain size of 84 μm became 21-23 μm , 20-22 μm and 18-20 μm at front, middle and end portions of the sheet, respectively. It was also found that variations of the grain size became 0.6-2 μm and 10 μm in thickness and width directions, respectively.

Key Words : 유한요소법(Finite Element Method), 재결정(Recrystallization), 열간압연(Hot Rolling), 강판재(Steel Sheet)

1. 서 론

자동차, 조선, 산업기계 등에 많이 사용되는 강판재는 기계적 성질(예: 항복강도, 인장강도, 연신율, 소성비 등)이 좋아야 하며 또한 균일하여야 하는데, 이는 각각 결정을 미세화하고 그들을 균일하게 분포함으로써 이루어질 수 있다. 최근에는 강판재의 기계적 성질에 대한 요구 사항이 높아짐에 따라 이를 만족시키기 위한 압연기술이 필요하게 되었다. 이를 위하여 재질예측 및 제어(SPPC: structure/property prediction and control) 기술이 개발되고 있는데 이는 압연의 전 공정, 즉 가열, 압연, 냉각

에서 일어나는 금속학적 현상을 수식화하고 이를 토대로 공정인자와 재질과의 관계를 규명하는 수식 모델을 개발하여 압연공정의 제어에 적용하는 기술이다.⁽¹⁻³⁾

금속재료의 미세조직은 재료가 거처온 열-기계적 이력(thermo-mechanical history)에 의하여 결정된다. 열간압연과 같이 고온에서는 온도, 변형률, 변형률속도의 이력에 따라 초기조직이 변형, 회복, 재결정, 결정립성장의 과정을 반복적으로 거치면서 미세조직이 변화하게 된다. 일반적으로 열간압연 판재는 길이가 매우 크므로 이러한 열-기계적 이력이 길이방향으로 불균일하게 되고 결과적으로 미세조직이 길이방향으로 불균일하게 된다. 또한 폭

* 홍익대학교 공과대학 기계공학과

과 두께 방향으로도 미세조직이 불균일하게 나타난다. 따라서 균일한 미세조직을 형성하기 위해서는 길이와 폭방향으로 압연조건을 적절히 조절하여야 하는데, 이를 위해서는 열간압연시 판재내의 열-기계적 이력을 파악하고 이로부터 재결정거동을 예측하는 연구가 선행되어야 한다. 본 연구에서는 압연중의 판재변형은 삼차원 비등온 강소성 유한요소법으로 해석하고, 스탠드간 이송중의 판재온도변화는 이차원 열전달 유한요소법으로 해석하였다. 이로부터 구한 판재내의 여섯 위치의 열-기계적 이력을 Sellars가 제안한 재결정식에 적용하여 열간압연공정중 발생하는 재결정거동을 추적하여 보았다. 이와 유사한 연구로는 조현중⁽⁴⁾이 형강압연에서 발생하는 재결정현상을 유한요소법으로 예측하였고, 곽우진⁽⁵⁾ 등이 열간단조중에 발생하는 재결정현상을 유한요소법으로 예측하였다. Kopp등⁽⁶⁾은 금속재료의 열간변형중 발생하는 미세조직을 예측하였으며, Shen⁽⁷⁾은 내열합금의 단조중 발생하는 미세조직의 변화를 모델링하였다. 그리고 Xu⁽⁸⁾ 등은 강의 열간단조중 발생하는 미세조직을 모델링하였다. 본 연구의 초점은 강판재 열간압연의 삼차원 유한요소해석을 수행하고, 이로부터 Sellars 재결정식을 이용하여 판재의 길이, 폭, 두께방향으로의 결정립분포를 예측한 것이다.

2. 압연공정의 유한요소해석

본 연구에서 해석한 압연공정은 Fig. 1에 도시되어 있듯이 조압연(roughing mill) 후 일곱 개의 스탠드(F1~F7)에 의하여 강판재가 연속적으로 압연되는 사상

압연(finishing mill)공정이다. 소재는 SS400 (0.161C-0.68Mn-0.05Si)이며, 조압연 직후의 온도는 1020℃이고, 판재의 두께, 폭 그리고 길이는 각각 37.2 mm, 1100 mm 그리고 38.5 m이다. 각 스탠드에서의 압하율, 롤속도, 롤직경, 마찰계수, 열전달계수, 스탠드간 이송시간등은 Table 1에 나타나있다. 조압연 후 사상압연설비까지의 구간(5 m)에서 판재는 공냉을 받으며 60 mpm의 속도로 이송된다. 이 구간에서의 대류열전달계수는 0.0295 N/sec/mm/℃를 적용하였다. F1, F2, F3 후에는 냉각수 분무(water spray), F4, F5, F6, F7 후에는 냉각수 장막(water curtain)에 의한 수냉을 받는다. 각 스탠드간 거리는 5.5 m이다. 실제 압연공정에서는 조압연설비와 사상압연설비 사이에 보열커버가 있으나, 본 연구에서는 시간경과에 따른 온도저하와 이에 따른 판재의 선단부, 중단부, 후단부의 미세조직의 차이를 예측하기 위하여 보열커버 없이 공냉을 받는 것으로 가정하였다. 판재의 변형과 온도분포가 압연방향과 수직인 단면에서 볼 때 상하 및 좌우 대칭이므로 판재단면의 1/4에 해당되는 부분만을 해석에 사용하였다.

판재의 유동응력은 $\sigma = K[1.3(\epsilon/0.2)^n + 0.3(\epsilon/0.2)](\dot{\epsilon}/10)^m$ 으로 표현하였다.⁽⁹⁾ 여기서 $K = 0.28\exp[5/t - 0.01/(C + 0.05)]$, $n = 0.41 - 0.07C$, $t = T(K) - 1000$, $m = (-0.019C - 0.126)t + (0.075C - 0.05)$ 그리고 C는 탄소의 wt%이다. 슬래브-유한요소 혼합법으로 작성된 삼차원 비등온 강소성 유한요소 프로그램을 사용하여 압연중의 변형을 해석하여 변형률, 변형률속도와 변형열을 구하고, 이송 중의 공냉과 수냉은 이차원 열전달해

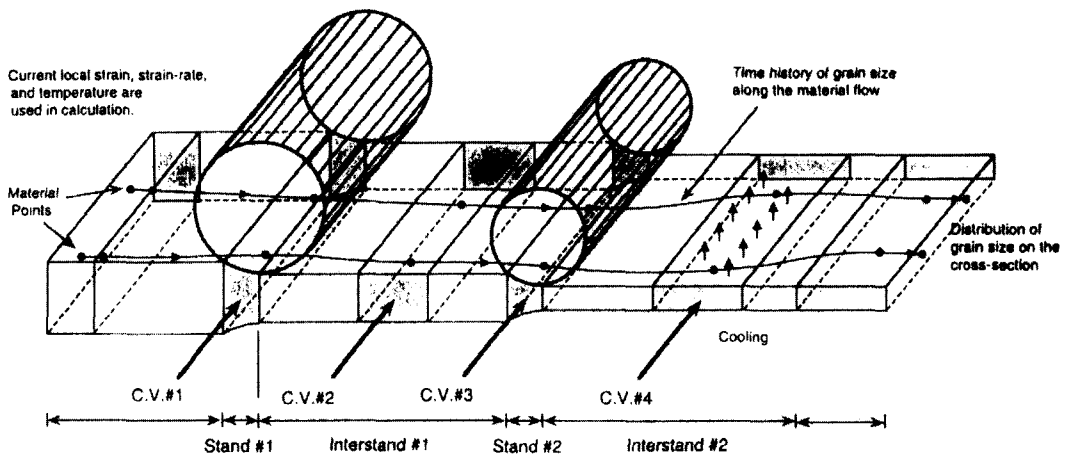


Fig. 1 A schematic diagram to represent a multi-stand rolling process

Table 1 Rolling conditions at each stand

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
reduction in thickness	0.302	0.380	0.355	0.286	0.237	0.195	0.122
roll speed (mpm)	64.34	103.55	161.04	227.61	300.18	374.85	432.42
roll diameter (mm)	741	762	789	741	719	783	803
friction factor (m)	0.2	0.2	0.2	0.1	0.05	0.05	0.05
heat transfer coefficient (N/sec/mm/°C)	0.185	0.375	0.54	0.54	0.4	0.285	0.162
interstand time(sec)	5.1	3.2	2.1	1.4	1.1	0.9	0.7

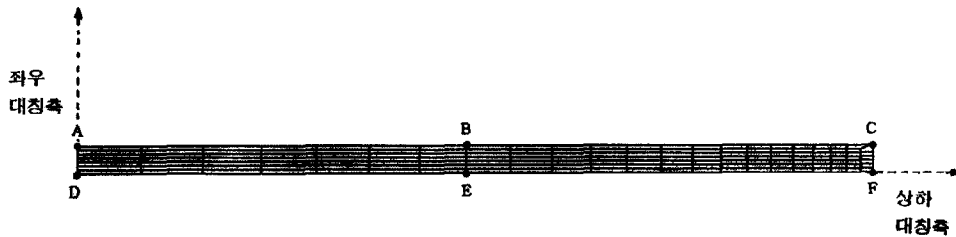


Fig. 2 Locations of six points to trace in a quarter of the cross section

석을 수행하였다.^(10,11) 실제 관재가 롤사이에서 압하되는 시간은 매우 짧으므로 이 시간동안의 롤과 대기로의 열손실은 무시하였다. 선단부, 중단부, 후단부에 대한 해석은 조압연설비에서 사상압연설비까지의 이송시간만을 증가시켰을 뿐 나머지 조건은 동일하게 적용하였다. Fig. 2는 사상압연 시작전 관재의 1/4단면을 나타내고 있는데, 열-기계적 이력과 재결정거동을 추적할 위치를 A, B, C, D, E, F와 같이 선택하였다.

Fig. 3에는 해석으로부터 구한 선단부의 온도 변화를 도시하였다. 해석에는 많은 재료 및 공정 상수가 사용되어야 하는데 가장 결정하기 어려운 상수들이 공냉과 수냉시의 열전달 계수들이다. 본 연구에서는 A점의 실제 온도 측정자료를 기준으로 이들을 역추적하여 열전달계수들을 구하였다. 이 과정에서 같은 냉각수 분무와 냉각수 장막 구간이더라도 다르게 나타났다. 이러한 열전달계수들은 중단부와 후단부의 해석에서도 동일하게 적용하였다. 실

제 공정에서의 수냉은 스탠드사이의 일부 구간에서만 실시하지만 수냉효과가 미치는 영역의 판단이 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 스탠드사이의 전 구간에서 일정한 수냉이 실시된다고 가정하였다. 따라서 Table 1에 나타난 열전달계수들은 구간에 대하여 평균화한 것으로 실제값들보다 작게 나타났을 것이다. 관재가 얇으므로 단면에서의 변형률분포는 거의 균일하였으며, 단면에서 변형열에 의한 온도상승도 균일하게 나타났다.

조압연 후 관재는 사상압연의 첫 스탠드 F1까지 5초 동안 공냉되므로 A점과 B점은 990.2°C, D점과 E점은 1019.6°C, C점은 975.8°C, F점은 995.1°C로 냉각되었다. D점과 E점의 온도가 다른 점보다 높게 나타난 것은 관재의 중심부분이기 때문에 열손실이 가장 적었기 때문이며 C점이 가장 낮게 나타난 것은 코너점이기 때문에 열손실이 가장 크게 발생하였기 때문이다. 하지만, 압연이 진행될수록 두께가 얇아져 F7 후의 온도는 A점과 B점은 880.5°C D점

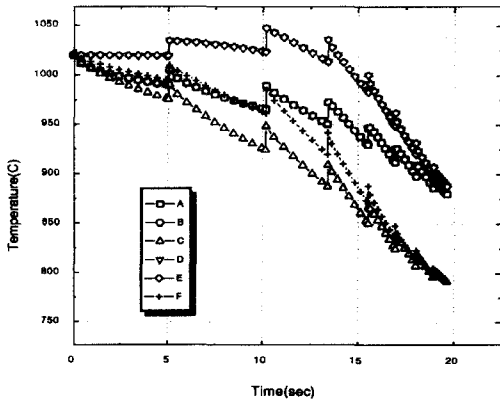


Fig. 3 Predicted temperatures at six points in the front portion

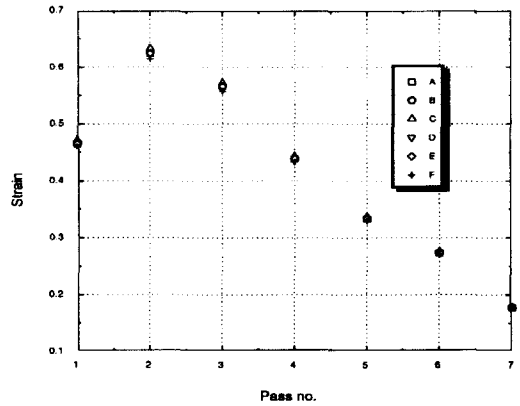


Fig. 4 Predicted strains at each stand in the front portion

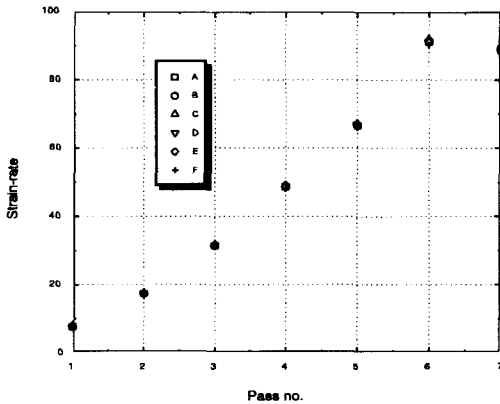


Fig. 5 Predicted strain rates at each stand in the front portion

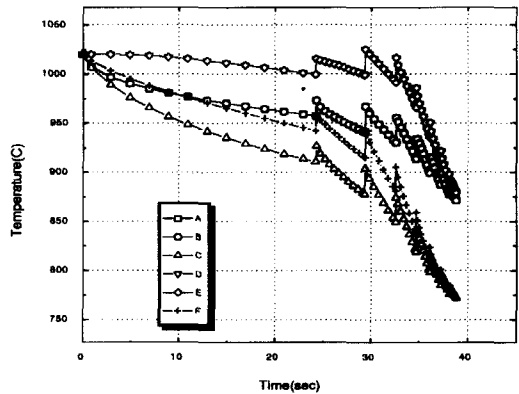


Fig. 6 Predicted temperatures at six points in the middle portion

과 E점은 888.4℃로 차이가 작아졌다. 특히 C점의 온도는 압연공정의 전반부에서는 F점보다 낮지만 후반부로 진행될수록 두께가 얇아져 F7 후 C점은 792.0℃, F점은 792.3℃로 거의 같아졌다. Fig. 4는 선단부가 각 스탠드에서 받는 변형률을 나타낸 것이다. 각 스탠드마다 여섯 위치에서의 변형률은 거의 같으나, Table 1에 나타나 있듯이 각 스탠드에서의 압하율이 다르므로 이에 따라 변형률도 변화하고 있다. Fig. 5는 선단부의 각 스탠드에서의 변형률속도를 나타낸 것이다. 변형률속도는 각 스탠드에서의 변형률을 실제 압연시간(또는 물과 판재의 접촉시간)으로 나눈 값이다. 따라서 변형률속도도 거의 같게 나타났다. 압연공정의 후반부로 갈수록 변형률이 작아짐에도 불구하고 변형률속도가 커지는 것은 판재가 점점 얇아지면

서 속도가 빨라져 접촉시간이 매우 작아지기 때문이다.

Fig. 6은 중단부의 온도 변화를 나타낸 것이다. 조압연 후 판재길이는 38.5 m이므로 19.2 m 되는 지점을 중단부로 간주하면 이 부분이 F1까지 이동하는데 소요되는 시간은 24.2초가 된다. 이 시간동안 판재는 공냉되어 F1에 들어가기 직전의 온도는 A점과 B점은 957.4℃, D점과 E점은 999.4℃, C점은 910.9℃, F점은 942.5℃가 되었다. 전반적으로 온도변화는 선단부와 유사하게 나타났다. F7 후의 온도는 A점과 B점은 871.4℃, D점과 E점은 879.2℃로 차이가 작게 나타났으며, C점과 F점은 771.9℃로 같게 나타났다. 변형률과 변형률속도는 선단부와 거의 동일하게 나타났다.

Fig. 7은 후단부의 온도 변화를 나타낸 것이다. 판재의

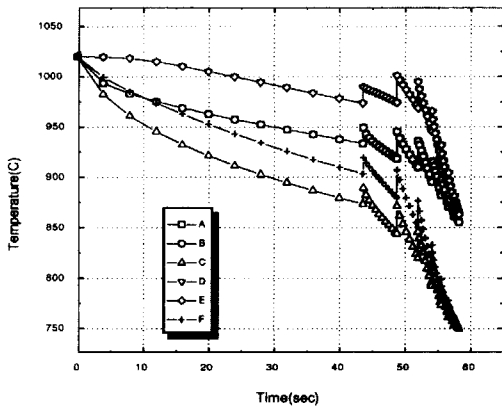


Fig. 7 Predicted temperatures at six points in the end portion

길이방향으로 38.5 m되는 지점을 후단부로 간주하면 이 부분이 F1 까지로 이송되는데 소요되는 시간은 43.5초가 된다. 이 시간동안 온도가 낮아져 F1에 들어가기 직전의 온도는 A점과 B점은 933.6°C, D점과 E점은 973.6°C, C점은 873.4°C, F점은 903.6°C가 되었다. F7 후의 온도는 A점과 B점은 855.3°C, D점과 E점은 862.8°C로 차이가 작게 나타났으며, C점은 749.8°C, F점은 750.1°C로 나타났다. 변형률과 변형률속도는 선단부, 중단부와 거의 동일하게 나타났다.

3. 재결정 모델링

열간가공에서 금속재료는 재결정을 발생시키면서 불안정한 에너지상태에서 안정한 에너지상태로 이동한다. 이러한 재결정거동은 주로 변형이 심한 입계에서 발생한다. 생성된 결정핵은 무변형 상태로써 전위밀도가 매우 낮으므로 주위의 결정들에 대한 전위밀도 차이로 인하여 입계가 이동하는 결정핵 성장이 발생하게 된다. 재결정이 완료된 후에는 표면에너지가 구동력이 되어 결정립이 성장하게 된다. 재결정현상 중 변형 중에 발생하는 것을 동적재결정, 변형 후에 발생하는 것을 정적 또는 준동적재결정이라고 부른다.⁽¹²⁻¹⁴⁾ 고온에서 금속재료의 유동응력은 온도와 변형률속도에 의하여 결정되는 Zener-Holloman 변수 Z에 의존한다.⁽¹⁵⁾

$$Z = \epsilon \exp\left(\frac{Q_d}{RT}\right) \quad (1)$$

여기서 Q_d 는 변형 활성화에너지, R은 기체상수, T는

절대온도를 나타낸다. Z가 크면, 즉 온도가 낮거나 변형률속도가 큰 경우에는 회복이나 재결정에 의한 연화가 가공경화보다 적어 변형이 증가함에 따라 유동응력이 증가한다. 그러나 Z가 작으면, 즉 온도가 높거나 변형률속도가 작은 경우에는 연화가 가공경화보다 크게 되어 유동응력이 증가하다가 감소하게 된다. 따라서 동적재결정은 변형률속도와 온도에 의존함을 알 수 있다. 이러한 관계에서 $\epsilon \geq \epsilon_c$ 일 때 동적재결정이 시작되며, $\epsilon \geq \epsilon_p$ 일 때는 동적재결정에 의한 연화의 효과가 더 크므로 응력이 감소하며, $\epsilon \geq \epsilon_s$ 일 때는 계속적인 가공경화와 연화가 평형상태를 이루게 되어 정상상태를 유지한다고 간주한다.

많은 연구가들에 의해 열적-기계적 변수들을 인자로서 동적, 정적 재결정거동을 모델링하려는 연구가 진행되고 있다.⁽¹⁶⁻¹⁸⁾ 이러한 모델링 식들은 주로 C-Mn 강을 기준으로 개발되었고, 재결정분률, 정적재결정입도, 결정립성장의 식들로 구성되는데, 사용되는 입력변수는 온도, 변형률, 변형률속도 그리고 초기결정립크기이다. 본 연구에서는 Table 2에 나타낸 Sellars 식을 사용하여 재결정거동을 예측하였다.⁽¹⁸⁾ 이 식은 초기 결정립크기와 Z값으로 결정되는 최고변형률 ϵ_p 의 80%를 기준으로 준동적재결정과 정적재결정으로 구분된다. 이 경우 재결정 완료시간은 각각 변형률속도, 온도, 그리고 초기 결정립크기, 온도, 변형률에 의하여 결정된다. 재결정 완료시 결정립크기는 초기 결정립크기와 ϵ_p 의 곱의 57%를 기준으로 결정되는 ϵ^* 에 따라 식을 선택하게 되어 있다. 두 식에 의하여 예측되는 결정립크기는 각각 변형률속도, 온도, 그리고 초기결정립도, 변형률에 의하여 결정된다.

열간압연에서는 변형에 의한 온도상승, 공냉과 수냉에 의한 온도강하등으로 온도변화가 발생하게 된다. 본 연구에서는 재결정거동 예측시 이러한 온도변화를 고려하기 위하여 additivity rule을 적용하였다. ϵ_p 의 계산에 사용되는 Z는 압연 출측 판재의 온도와 압연 평균 변형률속도를 사용하였으며, $t_{0.5}$ 와 d_{rex} 의 계산에 사용되는 Z는 각각 계산하고자 하는 시점에서의 온도와 변형 후 재결정 완료 시점까지의 평균온도를 사용하였다. 변형률속도는 평균 변형률속도를 사용하였다.

4. 재결정거동 예측

사상압연전의 판재는 크기가 84 μm 인 결정립들이 균일하게 분포되어 있다고 가정하였다. 재결정분율이 95% 이상 되면 재결정이 완료된 것으로 간주하고 그 후에는 결정

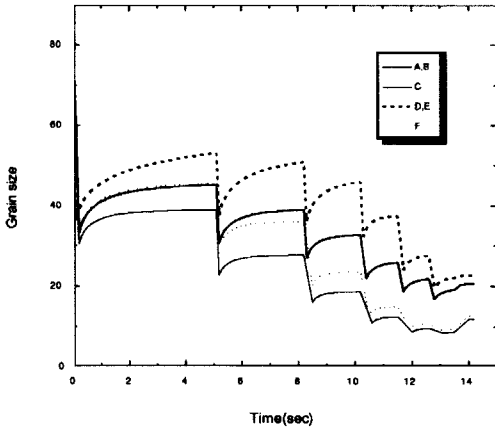


Fig. 8 Predicted grain sizes at six points in the front portion

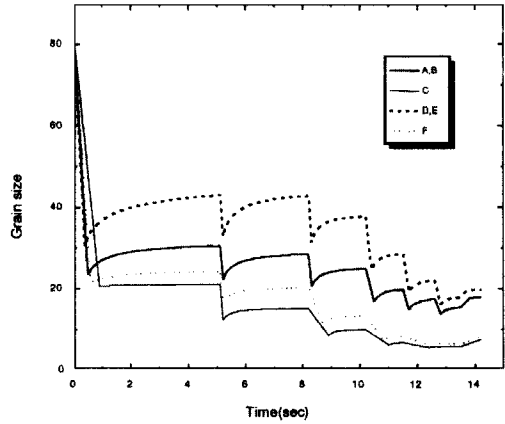


Fig. 10 Predicted grain sizes at six points in the end portion

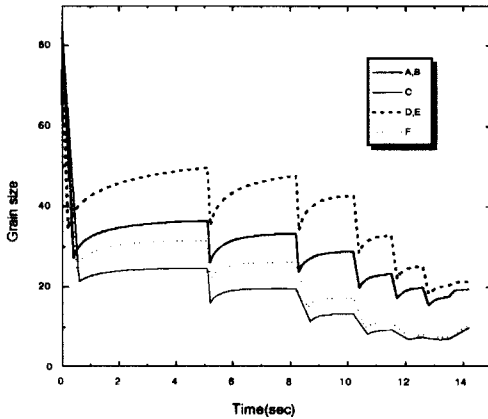


Fig. 9 Predicted grain sizes at six points in the middle portion

립 성장을 계산하였다. 스탠드간의 이송시간이 재결정 완료에 필요한 시간보다 작은 경우에는 부분재결정의 경우로서 재결정된 부분과 재결정되지 않은 부분이 공존한다고 가정하였다. 재결정된 부분은 재결정식에 의한 크기를 갖으며 변형률이 없는 반면에, 재결정되지 않은 부분은 초기 결정립크기를 유지하며 변형률을 갖음으로 유효 결정립크기는 $\bar{d} = X^{4/3}d_{rex} + (1-X)^2d_0$, 잔류변형률은 $d\epsilon = \epsilon(1-X)$ 로 계산하였다. 다음 스탠드의 압연에서 잔류변형률은 누적변형률로, 유효 결정립크기는 초기 결정립크기로 사용하였다.

Fig. 8은 선단부에서 결정립크기의 변화를 예측한 결과이다. 압연이 진행되면서 재결정과 결정립성장이 반복되

어 결정립이 미세화되고 있으며, 재결정속도는 무척 빨라서 전 구간에서 A, B, D, E점들은 0.1~0.2초, C점과 F점은 0.1~0.5초 사이에 재결정이 완료되었다. 경사진 곡선부분은 재결정이 시작되어 완료될 때까지를 나타낸다. A점과 B점, 그리고 D점과 E점의 결정립크기는 각각 동일하게 나타났는데 이는 이 점들의 온도, 변형률과 변형률속도가 거의 같았기 때문이다. 또한 이 점들은 온도가 높아 결정립크기가 크고 C점과 F점은 온도가 낮아 결정립크기가 상대적으로 작게 예측되었다. F7 후 재결정이 일어났음에도 불구하고 결정립이 작아지지 않았는데, 이는 재결정완료시의 결정립크기가 크게 예측된 뒤 남은 구간에서 성장하여 F6에서보다 크게 나타난 것이다. 즉, F7이 F6보다 온도는 낮지만 변형률이 작기 때문에 결정립크기가 커진 것으로 판단되며, 만일 F7에서의 변형률을 크게 한다면 결정립 크기를 작게 할 수 있을 것이다. 선단부에서 두께방향으로의 결정립크기는 A점과 B점은 20.7 μm , D점과 E점은 22.7 μm 로 약 2 μm 차이가 있었다. C점은 11.9 μm , F점은 12.7 μm 으로 0.8 μm 차이가 있었다. 따라서 폭방향으로의 결정립크기는 표면에서 8.8 μm , 내부에서 10 μm 정도 차이가 있다.

Fig. 9는 중단부에서 결정립크기의 변화를 나타낸 것이다. A, B, D, E점들은 0.1~0.4초 사이에 재결정이 완료되었으며, C점과 F점은 0.1~0.6초 사이에 재결정이 완료되었다. F7에서는 온도가 낮고 압연시간이 짧아 재결정이 일어나지 않은 것으로 판단되었다. 중단부에서도 역시 A점과 B점, D점과 E점의 결정립크기가 같게 나타났다. 또한 F7 후의 결정립크기도 F6보다 크게 나타났다. 두께방향으로의 결정립크기를 비교하여 보면 A점과 B점

은 19.6 μm , D점과 E점은 21.5 μm 로 0.9 μm 차이가 있으며, C점은 10.1 μm , F점은 10.7 μm 로 0.6 μm 차이가 있다. 따라서 폭방향으로의 결정립크기는 표면에서 9.5 μm 정도 차이가 있으며, 내부에서 10.8 μm 정도 차이가 있다.

Fig.10은 후단부에서 결정립크기의 변화를 나타낸 것이다. A, B, D, E점은 0.1~0.5초 사이에 재결정이 완료되었으며, C점과 F점은 0.1~0.9초 사이에 완료되었다. F7 에서는 온도가 낮고 압연시간이 짧아 재결정이 일어나지 않았다. A점과 B점, D점과 E점의 결정립크기가 같게 나타났다. F7 후의 결정립크기도 F6 보다 크게 나타났다. 두께방향으로의 결정립크기는 A점과 B점은 17.8 μm , D점과 E점은 19.7 μm 로 1.9 μm 차이가 있었다. C점은 7.6 μm , F점은 8.2 μm 로 0.6 μm 차이가 있었다. 따라서 폭방향으로의 결정립크기는 표면에서 10.2 μm 정도 차이가 있으며, 내부에서 11.5 μm 정도 차이가 있었다.

5. 결론

강판재의 사상압연과정 중 발생하는 재결정거동을 예측하였다. 압연 중 발생하는 변형은 삼차원 슬래브-유한요소 혼합법으로 해석하였으며, 스텝간 이송 중 발생하는 열전달은 판재단면에서의 이차원 열전달 유한요소법으로 해석하였다. 해석결과로 구한 온도, 변형률, 변형률속도를 Sellars가 제안한 재결정식에 적용하여 재결정거동을 예측하였다. 본 연구에서 구한 F7 후 선단부, 중단부, 후단부의 온도, 결정립크기, 분포의 예측결과는 다음과 같다.

(1) A(B)점의 온도는 각각 880.5 $^{\circ}\text{C}$, 871.4 $^{\circ}\text{C}$, 855.3 $^{\circ}\text{C}$ 로 선단부와 후단부간의 차이는 25.2 $^{\circ}\text{C}$ 이었으며, 결정립크기는 각각 20.7 μm , 19.6 μm , 17.8 μm 로 선단부와 후단부간의 차이는 2.9 μm 정도 이었다.

(2) D(E)점의 온도는 각각 888.4 $^{\circ}\text{C}$, 879.2 $^{\circ}\text{C}$, 862.8 $^{\circ}\text{C}$ 로 선단부와 후단부간의 차이가 25.6 $^{\circ}\text{C}$ 이었으며, 결정립크기는 각각 22.7 μm , 21.5 μm , 19.7 μm 로 선단부와 후단부간의 차이는 3 μm 정도 이었다.

(3) C점의 온도는 각각 792.0 $^{\circ}\text{C}$, 771.9 $^{\circ}\text{C}$, 749.8 $^{\circ}\text{C}$ 로 선단부와 후단부간의 차이는 42.2 $^{\circ}\text{C}$ 이었으며, 결정립크기는 11.9 μm , 10.1 μm , 7.6 μm 로 선단부와 후단부간의 차이는 4.3 μm 정도 이었다.

(4) F점의 온도는 각각 792.3 $^{\circ}\text{C}$, 771.9 $^{\circ}\text{C}$, 750.1 $^{\circ}\text{C}$ 로 선단부와 후단부간의 차이가 42.2 $^{\circ}\text{C}$ 이며, 결정립크기는 12.7 μm , 10.7 μm , 8.2 μm 로 선단부와 후단부간의 차이는 4.5 μm 정도 이었다.

(5) 선단부에서 두께방향으로의 온도 차이는 0.3 $^{\circ}\text{C}$ ~7.9 $^{\circ}\text{C}$, 결정립크기 차이는 0.8 μm ~2 μm 이었다. 중단부에서는 각각 7.8 $^{\circ}\text{C}$ 와 0.6 μm ~0.9 μm , 후단부에서는 각각 0.3 $^{\circ}\text{C}$ ~7.5 $^{\circ}\text{C}$ 와 0.6 μm ~0.9 μm 이었다.

(6) 선단부에서 폭방향의 온도 차이는 88.5 $^{\circ}\text{C}$ ~96.1 $^{\circ}\text{C}$, 결정립크기 차이는 8.8 μm ~10 μm 이었다. 중단부에서는 각각 99.5 $^{\circ}\text{C}$ ~107.3 $^{\circ}\text{C}$ 와 9.5 μm ~10.8 μm , 후단부에서는 각각 105.5 $^{\circ}\text{C}$ ~112.7 $^{\circ}\text{C}$ 와 10.2 μm ~11.5 μm 이었다.

변형률과 변형률속도는 각 단면마다 거의 균일하였으므로 결정립크기의 불균일분포는 온도의 차이에 기인하였다. 두께방향의 온도차이는 선단부, 중단부, 후단부에서 8 $^{\circ}\text{C}$, 길이방향의 온도차이는 25.2 $^{\circ}\text{C}$ ~42.2 $^{\circ}\text{C}$, 그리고 폭방향의 온도차이는 88.5 $^{\circ}\text{C}$ ~112.7 $^{\circ}\text{C}$ 이었다. 따라서 보열커버를 사용하여 길이방향의 온도저하를 방지하고, 에지히터(edge heater)를 사용하여 가장자리를 가열하여주면 더 균일한 조직을 얻을 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 1997년 교육부 학술연구조성비(기계공학 ME97-C-38)에 의하여 연구되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다. 또한 본 연구를 위해 많은 도움을 주신 (주)포항종합제철의 권오준, 이경중 두 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 권오준, 강기봉, 이근수, 장래웅, "재질예측제어기술의 물리야금학", 대한금속학회, 제1회 상변태 심포지엄, 1988, pp.21~31.
- (2) 권오준, 신수철 "재질예측기술의 개발현황 및 전망", 대한금속학회보, Vol.4, No.1, 1991, pp.15~25.
- (3) 권오준, 이경중, "탄소강의 온라인 열연 재질예측 시스템 개발", 대한금속학회지, 30, 1992, p.1335.
- (4) 조현중, 유한요소법을 이용한 열간압연공정의 모델링 및 미세조직 예측, 석사논문, 홍익대학교 대학원, 1995.
- (5) 곽우진, 이경중, 권오준, 황상무, "열간단조공정중 강재의 재결정거동 유한요소해석", 한국소성가공학회지, 제5권, 제4호, 1996, pp.305~319.
- (6) R. Kopp, K. Karhausen and R. Schneiders,

- “Application of FEM to the prediction of microstructure in hot forming of metals”, Proc. of 4th ICTP, pp.1203~1211, 1993.
- (7) G. Shen, “Modeling of microstructural development in the forging of Waspaloy turbine engine disks”, Ph.D Dissertation, The Ohio State University, 1994.
- (8) S. Xu, K. J. Weinmann, S. A. Majlessi and Q. Cao, “Computer modeling of microstructural evolution in the block upsetting of hot steel”, Trans. of NAMRI/SME, Vol.XXIII, 1995.
- (9) 박종진, 유한요소법을 이용한 스택드간 열간압연하중 계산, 산업과학기술연구소, 최종보고서, 1996.
- (10) 신현우, 김낙수, 박종진, “유한요소법에 의한 H형강 압연공정의 해석”, 대한기계학회 논문집(A), 17권, 5호, 1993, pp.1095~1105.
- (11) 박종진, 송정훈, “압연해석을 위한 슬래브-유한요소법에 대한 연구”, 대한기계학회 논문집(A), 20권, 11호, 1996, pp.3454~3462.
- (12) F. E. White and C. Rossard, “Deformation under hot working conditions”, Iron Steel Inst., London, 1968, pp.14~20.
- (13) C. M. Sellars and J. A. Whiteman, “Recrystallization and grain growth in hot rolling”, Metal Sci., 1979, pp.187~194.
- (14) H. J. McQueen and J. J. Jonas, “Recovery and recrystallization during high temperature deformation”, ?, pp.394~490.
- (15) C. Zener, and J. H. Hollomon, Journal of Applied Physics, 1979, p.187.
- (16) H. Yada, “Prediction of microstructural changes and mechanical properties in hot strip rolling”, Trans. ISIJ, 23, 1983, pp.100~109.
- (17) H. Yada, “Structure of austenite of carbon steels in high speed hot working process”, 鐵と鋼, 제15호, 1984, pp.322~329.
- (18) C. M. Sellars, “Modelling microstructural development during hot rolling”, Materials Science and Technology. Vol.6., Nov. 1990, pp.1072~1081.