

## 변형률누적에 의한 결정립미세화를 응용한 압연 패스 스케줄의 설계

박종진<sup>†</sup> · 이상주<sup>\*</sup>  
(2002년 10월 16일 접수, 2003년 2월 4일 심사완료)

### Design of Rolling Pass Schedule utilizing Grain Refinement by Strain Accumulation

Jong-Jin Park and Sang-Joo Lee

**Key Words:** Dynamic Recrystallization(동적 재결정), Hot Rolling(열간압연), Static Recovery(정적 회복), Grain Refinement(결정립 미세화), Austenite Grain Size(AGS, 오스테나이트 결정립도), Process Design(공정설계)

#### Abstract

Among various methods to acquire high strength in plain carbon steel, the method of grain refinement by controlling thermo-mechanical processing parameters has gained a great attention in steel rolling industries. In the present study, three different rolling pass schedules are proposed to obtain fine grains which are based on combined results of recrystallization modelling, finite element analysis and experiment. Since meta-dynamic or dynamic recrystallization has been found to be very effective in producing fine grains, reduction ratio and interpass time in the proposed rolling pass schedules were determined in order to invoke such recrystallization as often as possible.

#### 1. 서론

최근 구조용 강재의 강도를 향상시키고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(1~3)</sup> 특히 환경문제로 인하여 강재의 효과적인 재활용에 관심이 모아지면서, 합금성분이 단순하면서도 강도가 높은 강재의 개발이 필요하게 되었다. 이에 따라 결정립을 미세화하여 강도를 향상시키는 방법이 관심을 모으고 있다. 열간압연은 다른 기술에 비하여 결정립 미세화의 관점에서는 열세이지만 대량생산이 가능하므로 현재의 열간압연 기술을 체계적으로 분석하여 결정립을 미세화할 수 있다면 고

강도의 구조용 강재를 실용적으로 생산할 수 있다.

강재의 결정립도는 일반적으로 변형온도, 변형률, 변형률 속도, 냉각속도 등에 의존하는데 압연 중 변형온도, 변형률, 변형률 속도를 적절히 조절하면 오스테나이트 결정립이 미세하게 되고, 압연 후 냉각과정에서 냉각속도를 적절히 조절하면 페라이트 결정립도 더욱 미세하게 될 수 있다는 사실<sup>(4,5)</sup>에 주목하여 열간압연의 패스 스케줄을 재고찰하는 연구가 필요하게 되었다.

본 연구에서는 합금성분이 매우 간단한 0.1C-0.25Si-1.5Mn 강의 후판을 대상으로 오스테나이트 결정립을 미세화하기 위한 열간압연 패스 스케줄을 설계하여 보았다. 이를 위하여 오스테나이트 재결정 거동은 Sellar 식을,<sup>(6,7)</sup> 오스테나이트 유동 응력은 Hernandez 식을<sup>(8,9)</sup> 이용하여 수식화하였으

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 홍익대학교 기계·시스템디자인공학과  
E-mail : jjpark@wow.hongik.ac.kr

TEL : (02)320-1030 FAX : (02)332-5693

<sup>\*</sup> 홍익대학교 대학원

며, 이러한 수식화를 통하여 오스테나이트 재결정 및 유동응력 예측 프로그램을 개발할 수 있었다. 그리고 정적회복 현상과 냉각속도 계산에 관한 연구<sup>(10~12)</sup>도 병행하여 예측의 정확성을 향상시켰다. 특히 잔류 변형률을 누적시켜 동적 또는 준동적 재결정을 유도함으로써 결정립을 미세화시키는 방법에 중점을 두었다.<sup>(13,14)</sup> 이러한 연구결과들을 연계하여 오스테나이트 결정립 미세화를 위한 세 가지의 열간압연 패스 스케줄을 설계하고 상호 비교하였으며, 예측결과를 실험으로 검증하였다.

## 2. 오스테나이트 결정립도 예측 및 압연 패스 스케줄 설계 프로그램

열간압연에서 강재의 오스테나이트 결정립도는 변형을 받는 기간 중에 발생하는 동적재결정과 변형을 받지 않는 기간 중에 발생하는 준동적 및 정적 재결정과 정적회복 그리고 결정립 성장에 의하여 결정된다. 일반적으로 열간압연은 다수의 압연 패스로 구성되어 있으므로 압연공정 중에는 이러한 재결정과 결정립 성장 현상이 반복되어 나타난다.

Sellars는 오스테나이트 조직의 재결정과 결정립 성장을 온도, 변형률 속도, 변형률, 시간을 변수로 하여 정량적으로 수식화하였다. 반면에 Hernandez는 오스테나이트 조직의 유동응력을 온도, 변형률, 변형률 속도, 결정립도를 변수로 하여 정량적으로 수식화하였다. 본 연구에서는 Sellars 식과 Hernandez 식을 연계하여 주어진 압연온도, 변형률, 변형률 속도, 시간경과에 대한 오스테나이트 조직의 결정립도와 유동응력을 예측하는 알고리즘을 개발하였다. 그리고 이를 응용하여 주어진 압연공정 중 오스테나이트 결정립도의 변화를 계산할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 소재의 화학조성, 관재의 초기 결정립도, 초기 온도, 초기 두께, 로울 반경, 총 패스 수, 패스 당 압하율, 변형률 속도, 휴식기간(interpass time), 휴식기의 냉각속도 등의 입력에 따라 압연공정 중 발생하는 결정립도, 온도, 두께, 로울 하중, 로울 토크의 변화 등을 계산한다. 따라서 이 프로그램의 출력 결과를 이용하여 미세한 결정립을 얻기 위한 압연 패스 스

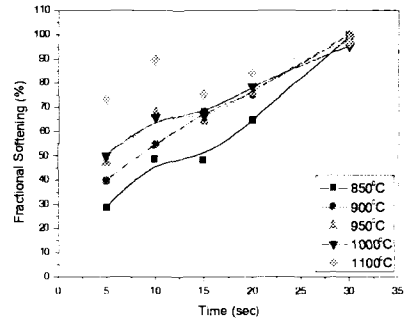


Fig. 1 Softening vs. time curves at various temperatures

케줄의 조정과 최적화가 가능하게 되었다.

## 3. 정적회복과 냉각속도

### 3.1 정적회복의 측정

열간압연시 소재에 변형을 누적시켜 동적 재결정을 발생시키기 위해서는 휴식기간 동안 발생하는 정적회복을 정량화 하여야 한다. 이러한 정적회복 현상은 다단압축변형 또는 비틀림 실험을 통하여 측정할 수 있다. 연화도 X는 초기 변형시의 가공경화 크기에 대한 이차 변형시 응력저하 크기의 비로 다음과 같이 표시된다.

$$X = \frac{\sigma_m - \sigma_r}{\sigma_m - \sigma_u}$$

여기서  $\sigma_u$ 는 초기 변형시의 항복응력을,  $\sigma_r$ 은 이차 변형시의 항복응력을, 그리고  $\sigma_m$ 은 재하중(unloading) 직전의 유동응력을 나타낸다.

본 연구에서는 시편을 1100°C로 가열하고 3분간 유지시킨 후, 여러 온도로 냉각시켜 10/sec로 압축하였다. 첫 번째 변형에서 가한 압축변형률은 10%. 두 번째 변형에서는 20%를 가하였으며, 두 변형사이에 5~30초의 휴식기를 허용하였다. Fig. 1의 실험결과에서 나타나듯이, 1000°C 이하의 경우 약 5초까지는 정적회복이 50% 이하로 발생하며, 5~10초에는 활발하게 진행되고, 10~15초 사이에는 매우 둔하게 진행된다. 이 후 다시 활발히 진행되어 30초 후에는 완료되어 소재는 무변형(strain free) 상태로 된다. 따라서 압연 중 변형률을 누적시켜 동적 재결정을 발생시키기 위해서는 소재의 온도가 900°C 이하로 되어야 하

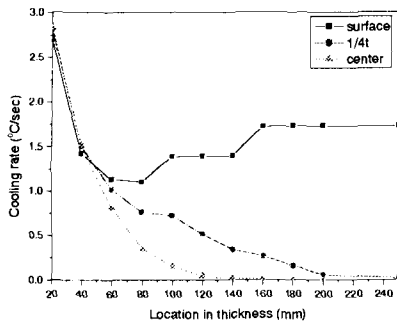


Fig. 2 Cooling rates at different locations in thickness direction

며, 패스 사이의 시간(interpass time)을 15초 이내로 줄여 잔류변형률이 약 30~50% 정도 남아있게 하는 것이 바람직하다.<sup>(10)</sup> 실제 후판 공정에서도 10초 이상의 interpass time이 존재하기 때문에 잔류변형률의 50%이상이 감소한다.

### 3.2 냉각속도 해석

압연 중 결정립 미세화를 위해서는 정확한 온도제어와 냉각속도를 파악하여야 한다. 이를 위하여 냉각속도 측정실험을 수행하였으며, 측정결과를 기본으로 여러 차례 FEM 온도해석을 수행한 결과, 대류계수(convection coefficient)가 0.02 [N/mm<sup>2</sup>s°C]에 근사함을 알게 되었다. 실험에서는 지름 30mm, 높이 3mm의 시편을 사용하여 시편 내부와 표면의 온도 차이를 작게 하였다. FEM 해석에서 사용한 방사율(emissivity)은 0.79, 열용량(heat capacity)은 3.62346N/mm<sup>2</sup>°C, 그리고 전도계수(conductivity coefficient)는 0~900°C까지 10°C 간격으로 59.3~33.7W/m·k의 값을 사용하였다.

FEM 해석에서는 여러 가지의 두께를 갖는 동일소재에 초기 온도를 주고 냉각조건을 적용한 후, 시간경과에 따라 두께방향의 여러 위치에서 발생하는 온도변화를 구하였다. 이렇게 구하여진 900°C~1200°C에서의 냉각속도를 Fig. 2에 도시하였다. 냉각속도는 소재의 두께, 온도 그리고 냉각 시간에 따라 다르게 나타나므로 위의 냉각속도는 압연 패스 스케줄의 기초 작업에 사용하며, 압연 패스 스케줄의 구체화 과정에서는 FEM 해석을 수행하여 정확한 온도변화를 구하여야 한다.

Table 1 Schedule 1

pass no.	reduction (%)	strain rate (/sec)	interpass time (sec)
1	7	5	10
2	9	5	10
3	13	5	10
4	15	10	10
5	15	10	10
6	17	10	10
7	17	10	20
8	15	15	11
9	15	15	11
10	15	20	12
11	15	20	12
12	15	20	12
13	20	30	14
14	25	30	14

## 4. 압연 패스 스케줄의 설계와 검증

스케줄의 설계에 사용된 여러 조건은 다음과 같다. 로울 직경은 1000mm, 판재의 초기두께와 최종두께는 각각 200mm와 20mm, 최종 압연온도는 850°C~900°C, 변형률속도는 판재가 얇아질수록 증가하므로 2/sec~30/sec 사이의 값을 사용하였다. 그리고 제한조건으로써 최대압연하중은 1.4ton/mm, 로울과 판재의 접촉면에서의 마찰계수  $\mu$ 은 0.25로 가정하였다.

일반적으로 1000°C이상의 조압연(roughing mill) 단계에서는 오스테나이트가 급속하게 조립으로 재결정하므로, 조직의 정상화는 이루어지지만 오스테나이트 및 페라이트 세립화는 이루어지지 않는다.<sup>(15)</sup> 따라서 본 연구에서 제안한 압연 패스 스케줄의 검증 실험에서도 조압연 단계를 제외한 마무리 압연(finishing mill) 단계만을 고려하였다.

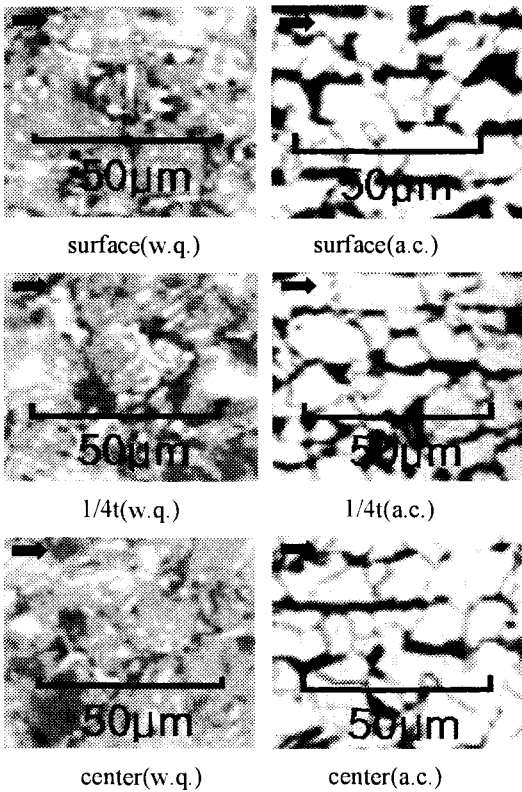
### 4.1 스케줄 1

스케줄 1은 패스 당 압하율을 가능한 높게 가하여 총 패스 수를 최소화하는 방향으로 작성되었다. 따라서 소재를 1020°C로 가열하고 25초간 공냉 후 첫 패스를 시작하는 조건으로 Table 1과 같이 설계하였다.

이 스케줄을 압연 패스 스케줄 설계 프로그램에 적용하여 보았다. 최종 압연패스 후 오스테나이트 평균 결정립도는 약 20 $\mu$ m로 나타났다. 하지만 높은 압하율을 적용함으로 인하여 변형열이

**Table 2** Variation of grain size in Schedule 1

location	cooling condition	prediction	experiment
surface	water quenching (austenite)	12.4 $\mu\text{m}$	22.1 $\mu\text{m}$
	air cooling (ferrite)		8.5 $\mu\text{m}$
1/4t	water quenching (austenite)	19.3 $\mu\text{m}$	26.4 $\mu\text{m}$
	air cooling (ferrite)		9.2 $\mu\text{m}$
center	water quenching (austenite)	23.5 $\mu\text{m}$	29.4 $\mu\text{m}$
	air cooling (ferrite)		10.1 $\mu\text{m}$



**Fig. 3** Optical microstructures of locations and cooling conditions in Schedule 1 (An arrow indicates the rolling direction)

크게 발생하였으며, 따라서 최종 압연패스 후 두께방향으로의 온도편차는 약 60℃로, 결정립도 편차도 11 $\mu\text{m}$ 으로 크게 나타났다.

스케줄 1을 Gleeble 장치에서 압축실험을 통하여 검증해 보았다. 실험에서 측정된 결정립도와 예측값을 Table 2에 비교하였다. 최종 패스가 완

료된 후, 두께방향으로의 결정립도 편차는 7 $\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 그러나 AGS의 측정값은 표면, 1/4t, 중앙의 순서로 예측값보다 각각 9.7 $\mu\text{m}$ , 7.1 $\mu\text{m}$ , 5.4 $\mu\text{m}$  정도 크게 나타났다. 이러한 결과는 최종 패스가 끝나는 시점의 온도가 표면, 1/4t, 중앙의 순서로 798℃, 835℃, 855℃인데, 이것은 본 연구에서 사용한 Sellas의 정적 재결정 모델링식의 적용한계온도인 1200~850℃를 벗어나고 있으므로 예측에서의 오차라고 판단된다.

최종 패스까지 압축한 후 공냉시킨 시편의 평균 페라이트 결정립도는 9.3 $\mu\text{m}$ 로 AGS의 약 1/3로 작아졌으며, 두께 방향의 편차도 2 $\mu\text{m}$ 으로 AGS에 비해 현저히 작아졌다. 이에 대한 결정립도 사진을 Fig. 3에 나타내었다. 수냉(w.q.)하여 얻은 오스테나이트 결정립은 재결정에 의한 등축정의 모양을 나타내는데 비해 공냉(a.c.)하여 얻은 페라이트 조직은 압연 방향으로 결정립이 정렬해 있는 것을 볼 수 있다.

#### 4.2 스케줄 2

스케줄 2에서는 일반적으로 적용되는 압연온도를 사용하고 압하량을 분산시켜 변형열에 의한 온도편차 효과를 적게 하고자 하였다. 즉, 재결정을 매우 느린 속도로 진행하도록 하여 이전 패스에서 발생하였던 변형률의 일부를 잔류변형률로 누적시켜 차기 패스에서 동적 재결정을 발생시키는 개념으로 구성되었다. 따라서 소재를 1200℃로 가열하고 25초 간 공냉한 후 첫 패스를 시작하는 조건으로 Table 3과 같이 설계하였다.

Table 3의 16~17패스 부분과 Fig. 4의 결정립도 변화를 보면 16패스에서 5%의 작은 압하율이 재결정을 일으키지 못하고 17패스로의 변형률 누적이 이루어져 동적 재결정을 발생시키는 현상을 볼 수 있다. 이로 인하여 결정립도가 현저히 작아지고 두께방향의 결정립도 편차도 줄어드는 것을 알 수 있다.

이 스케줄을 압연 패스 스케줄 설계 프로그램에 적용하여 보았다. 초기온도가 높음으로 인하여 초기 결정립은 상대적으로 조대하였지만, 최종 패스 후에는 약 34 $\mu\text{m}$  정도로 감소하였다. 이 스케줄에서는 최종 패스에서 두께방향으로 10℃의 온도 편차와 6 $\mu\text{m}$  정도의 오스테나이트 결정립도 편차가 예측되었다.

이것을 Gleeble 장치에서 압축실험을 통하여

Table 3 Schedule 2

pass No.	reduction (%)	strain rate (/sec)	interpass time (sec)
1	6	5	10
2	8	5	15
3	9	5	15
4	15	10	13
5	15	10	15
6	10	15	15
7	9	15	25
8	12	20	12
9	12	20	11
10	15	20	11
11	13	20	12
12	13	20	13
13	13	25	13
14	14	25	13
15	13	25	14
16	5	30	14
17	14	30	15
18	15	30	15
19	6	30	15

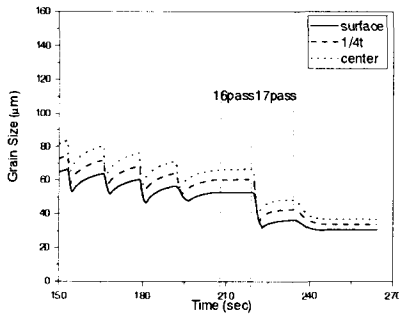


Fig. 4 Predicted austenite grain size at different locations

Table 4 Variation of grain size in Schedule 2

location	cooling condition	prediction	experiment
surface	water quenching (austenite)	30.5µm	29.2µm
	air cooling (ferrite)		11.5µm
1/4t	water quenching (austenite)	33.7µm	30.3µm
	air cooling (ferrite)		11.4µm
center	water quenching (austenite)	36.7µm	32.4µm
	air cooling (ferrite)		12.0µm

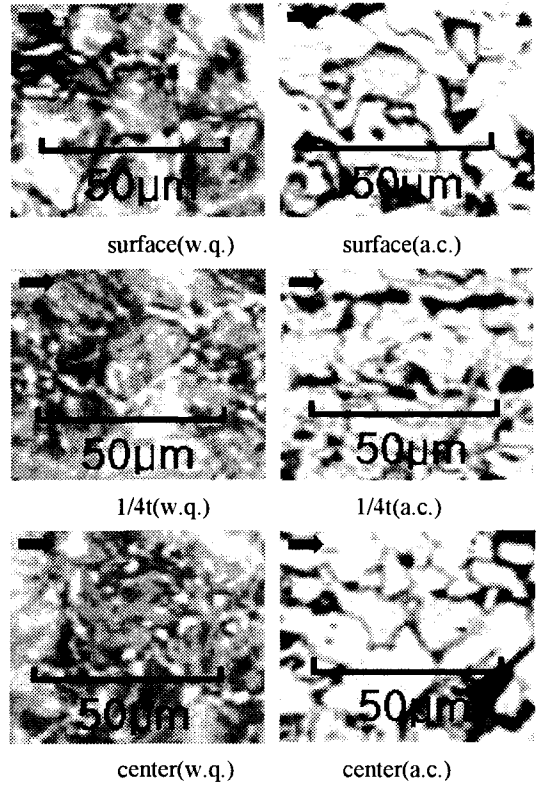


Fig. 5 Optical microstructures of locations and cooling conditions in Schedule 2 (An arrow indicates the rolling direction)

검증해 보았다. 실험에서 측정된 결정립도와 예측값을 Table 4에 비교하였다. 최종 패스까지 완료된 경우의 AGS는 두께방향으로 약 3µm의 편차를 보이고 있다. 그리고 최종 AGS는 표면, 1/4t, 중앙의 순으로 예측보다 1.3µm, 3.4µm, 4.3µm 정도 작게 나타났다. 이는 본 연구에서 개발된 압연 패스 스케줄 설계 프로그램의 타당성을 보여주는 것으로 판단된다. 최종 패스까지 압축하고 공냉시킨 페라이트 조직의 평균 결정립도는 11.6µm로 AGS의 약 1/3로 작아졌으며 두께 방향의 편차도 0.5µm으로 AGS의 경우에 비하여 매우 작아졌다. 이에 대한 결정립도 사진을 Fig. 5에 나타내었다. 수냉(w.q.)하여 얻은 오스테나이트 결정립은 등축정을 보이고, 공냉(a.c.)에 의한 페라이트 결정립은 압연 방향으로 정렬해 있는 것을 볼 수 있다. 페라이트 조직이 비등축정 형상을 나타내는 것이 특징이다.

Table 5 Schedule 3

pass No.	reduction (%)	strain rate (/sec)	interpass time (sec)
1	6	2	10
2	8	2	13
3	9	2	13
4	12	3	13
5	15	3	13
6	15	3	120
7	15	3	20
8	12	3	20
9	10	3	10
10	11	4	10
11	14	4	25
12	13	5	21
13	10	5	12
14	12	5	11
15	11	5	10
16	10	5	15
17	10	6	13
18	11	6	14
19	10	6	15

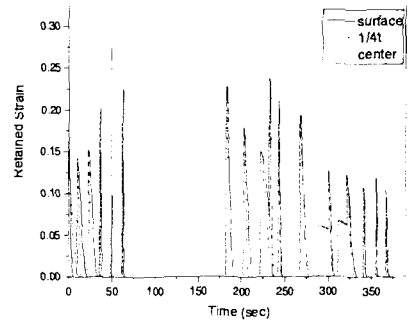


Fig. 8 Variations of retained strain at three locations in Schedule 3

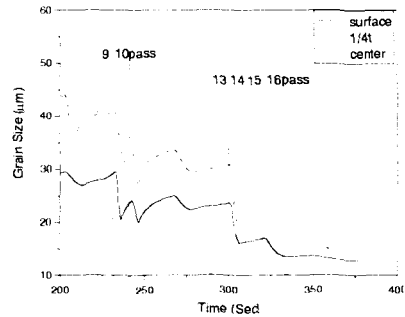


Fig. 9 Predicted austenite grain size at different locations

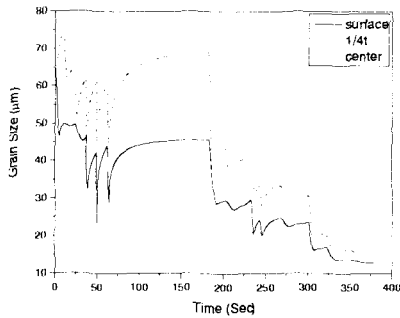


Fig. 6 Variations of austenite grain size at three locations in Schedule 3

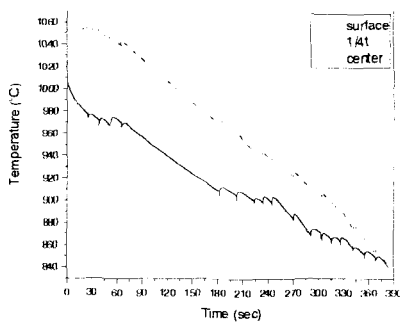


Fig. 7 Variations of temperature at three locations in Schedule 3

### 4.3 스케줄 3

스케줄 3은 압연 시작 온도를 1050℃로 낮추고 마무리 압연이 900℃ 이하에서 이루어지도록 Table 5와 같이 설계되었다. 마무리 압연에서 변형률의 누적을 최대한 많이 발생시켜 결정립도 미세화 및 두께 방향 결정립도 편차의 최소화에 중점을 두었다. 이를 위하여 6패스 후 120초 동안의 interpass time을 주어 압연온도를 900℃이하로 낮춘 후 마무리 압연이 시작되도록 하였다. 그리고 스케줄 3에서는 압연 패스 스케줄 설계 프로그램에 정적회복을 반영하였다. 정적회복 계수는 실험을 통하여 얻은 0.5를 사용하였다.

압연 패스 스케줄 설계 프로그램을 이용하여 구한 결정립도, 온도, 잔류변형률의 변화를 각각 Figs. 6~9에 나타내었다. 스케줄 3에서는 잔류변형률의 누적이 패스 9, 13, 15에서 발생하였다. Fig. 9는 마무리 압연 부분의 결정립도 변화를 상세히 나타낸 것으로 패스 10, 14, 16에서 결정립이 매우 미세화되는 것을 볼 수 있다. 이때 패스 10에서는 동적 재결정, 패스 14, 16에서는

Table 6 Variation of grain size in Schedule

location	cooling condition	prediction	experiment
surface	water quenching (austenite)	12.8 $\mu$ m	15.4 $\mu$ m
	air cooling (ferrite)		6.3 $\mu$ m
1/4t	water quenching (austenite)	14.3 $\mu$ m	17.8 $\mu$ m
	air cooling (ferrite)		7.1 $\mu$ m
center	water quenching (austenite)	14.9 $\mu$ m	18.6 $\mu$ m
	air cooling (ferrite)		7.8 $\mu$ m

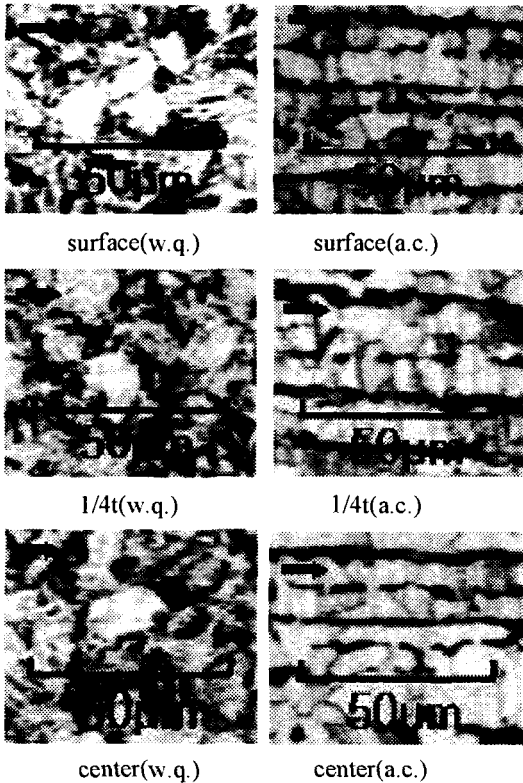


Fig. 10 Optical microstructures of locations and cooling conditions in Schedule 3(An arrow indicates the rolling direction)

준동적재결정이 발생하였다. 이렇듯 잔류변형율을 누적시켜 동적 또는 준동적 재결정을 유발시키는 것이 결정립 미세화와 두께 방향으로의 결정립도 편차를 줄이는데 기여하는 것으로 나타났다.

스케줄 3에서는 최종 패스에서 AGS의 평균은 약 13 $\mu$ m로 예측되었고 두께 방향으로의 편차는 약 2 $\mu$ m로 작게 나타났다. 이때 두께방향으로의 온도편차는 약 5 $^{\circ}$ C이었다.

이것을 Gleeble 장치에서 압축 실험을 통하여 검증해 보았다. 결정립도의 예측과 실험 값들을 Table 6에 나타내었다. 최종 패스까지 완료된 AGS의 두께방향으로의 편차는 약 3 $\mu$ m으로 나타났다. 그리고 최종 AGS의 측정치는 표면, 1/4t, 중앙 순으로 예측치보다 2.6, 3.5, 3.7 $\mu$ m 정도 크게 나타났다. 이와 같이 예측과 유사한 실험 결과가 도출된 데에는 잔류변형률의 누적을 이용한 재결정에 기인된 것으로, 이러한 방법은 결정립 미세화 및 두께방향으로의 결정립도 편차 최소화에 유용하게 응용될 수 있을 것이다.

마지막 패스까지 압축하고 공냉시킨 페라이트 조직의 평균 결정립도는 7.0 $\mu$ m로 AGS의 약 40%로 작아졌으며, 두께 방향으로의 편차도 약 1.5 $\mu$ m로 매우 작아졌다. 이에 대한 결정립도 사진을 Fig. 10에 나타내었다. 스케줄 1과 2에 비해 결정립이 매우 미세화 된 것을 볼 수 있다. 오스테나이트 결정립은 등축정 형상을, 페라이트 결정립은 압연 방향으로 정렬해 있는 특징을 잘 보여주고 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 오스테나이트 결정립도 예측 프로그램과 FEM 해석 프로그램의 연계에 의한 결정립도 변화의 예측과 Gleeble 장치를 이용한 압연모사 실험을 수행하였다. 이를 통하여 결정립 미세화와 두께방향으로의 결정립도 편차의 최소화를 위하여 세 가지의 후관 압연패스 스케줄을 제안하고 검토하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 후관 압연 공정에서 패스 당 압하률과 휴식기 시간의 제어를 통하여 결정립 미세화와 두께방향 결정립도 편차의 최소화를 이룰 수 있었다.

(2) 재결정 속도가 매우 느린 경우, 예측치와 실험 결과는 큰 차이를 나타내었다. 이 영역에서는 재결정이 진행 중인 결정, 재결정이 완료되고 성장하는 결정 그리고 재결정이 발생하지 않은 결정들이 혼합되어 나타나므로, 본

연구에서 사용한 평균 결정립도 모델링의 적용한계를 벗어나는 것으로 판단된다.

(3) 잔류변형률과 정적회복의 측정을 위한 이단 압축실험을 수행하였는데, 950°C~850°C 사이에서 10~15초의 휴식기 동안에 변형률의 약 50%가 감소함을 알 수 있었고, 이를 근거로 정적회복 계수를 0.5로 근사화하여 압연 스케줄 작성에 이용하였다.

(4) 스케줄 1의 경우, 압연 종료 온도가 850°C 이하로 내려가면서 최종 패스에서의 예측치가 실험결과와 차이를 나타내었다. 결정립도 미세화를 위해서는 저온영역에서의 마무리 압연이 중요하므로, 저온영역에서의 거동에 대한 모델링식의 개발이 매우 필요하다.

(5) 스케줄 2와 3에서 시도된 잔류변형률의 누적을 이용한 동적 또는 준동적 재결정의 발생이 결정립 미세화와 두께방향 결정립도 편차의 최소화에 매우 유용하다는 것을 알 수 있었다.

(6) 잔류변형률 누적에 의한 동적재결정을 발생시키기 위해서는 정적회복 속도가 느린 Ar3 이하의 온도에서 두 패스 이상에 걸쳐 잔류변형률을 누적하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- (1) Attwood, B. and Miner, R. E., 1998. "Competitive Material Threats and Opportunities." *Steel Rolling '98, Opening Lecture, ISIJ*, pp. 9~18.
- (2) Shin, S. C., 1999. "Recent Trend in Hot Rolling Technology of Steels." *Proc. 3rd Rolling Symposium, Opening Lecture*, pp. 3~9.
- (3) Kwon, O. J., 1999. "Manufacturing Technologies and Applications of steel Strip Products." *Proc. 3rd Rolling Symposium, Opening Lecture*, pp. 10~21.
- (4) POSCO Technical Research Laboratories, 2000. "Development of High Strength Structural Steel with Fine Grain(II)."
  - (6) Sellars, C. M., 1980. "Hot Rolling and Forming Processes." edited by C. M. Sellars and G. J. Davies. Met. Soc., London.
  - (7) Sellars, C. M., 1990. "Modeling Microstructural Development during Hot Rolling." *Material Sci. & Tech.*, Vol.6, pp. 1072~81.
  - (8) Hernandez, C. A. and Medina, S. F., 1996. "Modelling Austenite Flow Curves in Low Alloy and Microalloyed Steels." *Acta. Mater.*, Vol.44, No.1, pp. 155~163.
  - (9) Hernandez, C. A. and Medina, S. F., 1992. "Modelling of the Dynamic Recrystallization of Austenite in Low Alloy and Microalloyed Steels." *Mem. Scient. Revue Metall.*, Vol.66, pp. 217~225.
  - (10) Jonas, J. J., 1990. "Dynamic Recrystallization in Hot Strip Mills." In *Recrystallization '90* (Edited by Chandra, T.), TMS-AIME, Warrendale, PA, pp. 27~36.
  - (11) Djaic, R. A. P. and Jonas, J. J., 1972. "Static Recrystallization of Austenite between Intervals of Hot Working." *Journal of the Iron and Steel Institute*, Vol.210, pp. 256~264.
  - (12) Petkovic, R. A., Luton, M. J. and Jonas, J. J., 1977. "Flow Curves and Softening Kinetics in High Strength Low Alloy Steels." *the Hot Deformation of Austenite* (Edited by Ballance, J. B.), AIME, New York, pp. 68~75.
  - (13) Hong, C. P. and Park, J. J., 2001. "Design of Rolling Path Schedule for Refinement of Austenite Grain." *Transactions of the KSME, A*, Vol.25, No.11, pp.1844~1853.
  - (14) Hong, C. P. and Park, J. J., 2001. "Design of Rolling Pass Schedule for a Thick Plate by Using Recrystallization Modeling." *Proc. 4th Rolling Symposium*, pp. 375~383.
  - (15) Kobayashi, S., Oh, S. I. and Altan, T., 1989. *Metal Forming and the Finite Element Method*, pp. 30~33.
  - (16) Isao, K., 1997. Controlled Rolling and Controlled Cooling, Chijin Shokan Co. pp. 17~54.
- (5) POSCO Technical Research Laboratories, 2001. "Development of High Strength Structural Steel with Fine Grain(III)."