

## 후판압연에 있어서의 변형률 분포예측에 관한 연구

문창호<sup>1</sup> · 이덕만<sup>1</sup> · 박해두<sup>1</sup>

### Study for Prediction of Strain Distribution in Heavy Plate Rolling

C. H. Moon, D.M.Lee, H. D. Park

#### Abstract

The microstructure with fine and uniform AGS (austenite grain size) along thickness direction over no recrystallization temperature is strongly required for production of the high strength steels. The previous AGS prediction only based on the average strain improves to find the rolling conditions for accomplishment of the fine grain, but cannot find those for uniform grain. In this paper, an integrated mathematical model for prediction of the strain distribution along thickness direction is developed by carrying out finite element simulation for a series of rolling conditions. Also, the AGS distribution after rough rolling is predicted by applying the proposed model with AGS prediction model.

**Key Words** : Heavy Plate, Strain Distribution, Austenite Grain Size, Finite Element Method

#### 1. 서론

최근 원유나 천연가스의 장거리 경제적 수송, 사용환경의 변화(심해저화, 한냉지화) 및 선박의 대형화에 따라 후판재는 고강도, 고인성, 후물화로의 특성변화를 요구받고 있다. 이러한 요구특성을 만족하기 위해 후판압연 공정에서 일어나는 금속학적 현상을 해석하고, 그것을 설비능력이 허용하는 범위내에서 조업인자(압연온도, 압연속도, 압하량, 압연하중 등)를 제어할 필요가 있다.

가열로에서 조대한 결정립은 조압연을 거치면서 짧은 패스간 시간 및 높은 압연온도 등에 따라 정적재결정이 발생하여 미세화된다. 또한, 사상압연공정중의 결정립은 미세결정온도  $T_{NR}$  이상에서 잔류변형률의 누적에 따른 재결정에 의해 미세화하나, 그 이하에서는 재결정없이 압연방향으로 길게 변형되며, 결정립내 전위밀도 증가만이 나타난다. 이러한 결정립내 전위밀도가 높을수록 압연후 냉각에 의한 상변태를 거치면서 새로운

상의 핵생성이 용이하게 되어 최종적인 요구특성을 만족하게 된다.

또한, 요구특성확보를 위한 기존의 제어방법은 두께방향의 평균변형률에 기초한 평균결정립 미세화에 근거하였다. 그러나, 가열로 추출후 두께방향으로 조대한 결정립과 미세립이 혼재할 경우  $T_{NR}$  이상에서 부분 재결정에 따른 결정립크기 차이가 나타나게 되므로, 최종적으로 인성 및 강도의 하락을 가져오게 된다. 또한, 후물화될수록 이러한 혼재는 증가하는 것으로 알려져 있다.[1] 따라서,  $T_{NR}$  이상에서의 결정립 크기를 예측하고, 두께방향으로의 균일화 여부를 판단할 필요가 있다.

이를 위해 본 연구에서는 2차원 유한요소법을 이용하여 압연조건변화에 따른 압연출측에서의 변형률분포를 예측하고, 변형률 분포에 영향을 미치는 유효인자만으로 표현된 변형률 분포 예측모델을 개발하였다. 또한, 이를 일반C-Mn강 및 Nb 첨가강의 결정립예측식에 적용하여 두께방향의 결정립 변화를 살펴보았다.

1. POSCO 기술연구소 공정제어연구그룹

## 2. 변형률 예측모델

### 2.1 변형률 예측모델

후판 압연중 소재의 변형 및 물로의 열전달 특성변화에 따른 압연출측변형률을 살펴보기 위해 정상상태 2차원 강소성 유한요소법을 표1과 같은 압연인자들에 적용하였다.

**Table 1 Simulation conditions in thick plate rolling**

Rolling speed, $V=0.5D\omega$	1~7m/s
Reduction ratio, $r$	2.5~40%
Thickness, $H$	6~400mm
Diameter of work roll, $D$	900~1200mm
Friction coefficient, $\mu$	0.1~0.5
Temperature of entrance, $T$	700~1250°C
Contact heat transfer coeff., $h_{lub}$	0.025~0.25 $W/mm^2K$

김[2] 등은 열연공정의 변형률 분포 예측모델 개발을 위해 그림1의 분포를 가정하고, 하기식(1~2)를 제시하였다.

$$y \leq \delta :$$

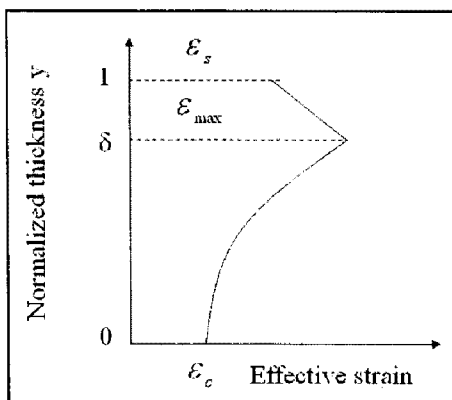
$$\varepsilon = \varepsilon_{max} + (\varepsilon_{max} - \varepsilon_c) \tan^{-1}[A(\delta - y)] / \tan^{-1}(A\delta) \quad (1)$$

$$y > \delta : \varepsilon = (\varepsilon_{max} - \varepsilon_s)(y - 1) / (\delta - 1) + \varepsilon_s \quad (2)$$

여기서

$$\varepsilon_{max} = (\varepsilon_{mean} - B\varepsilon_c - 0.5(1 - \delta)\varepsilon_s) / (0.5 - B + 0.5\delta)$$

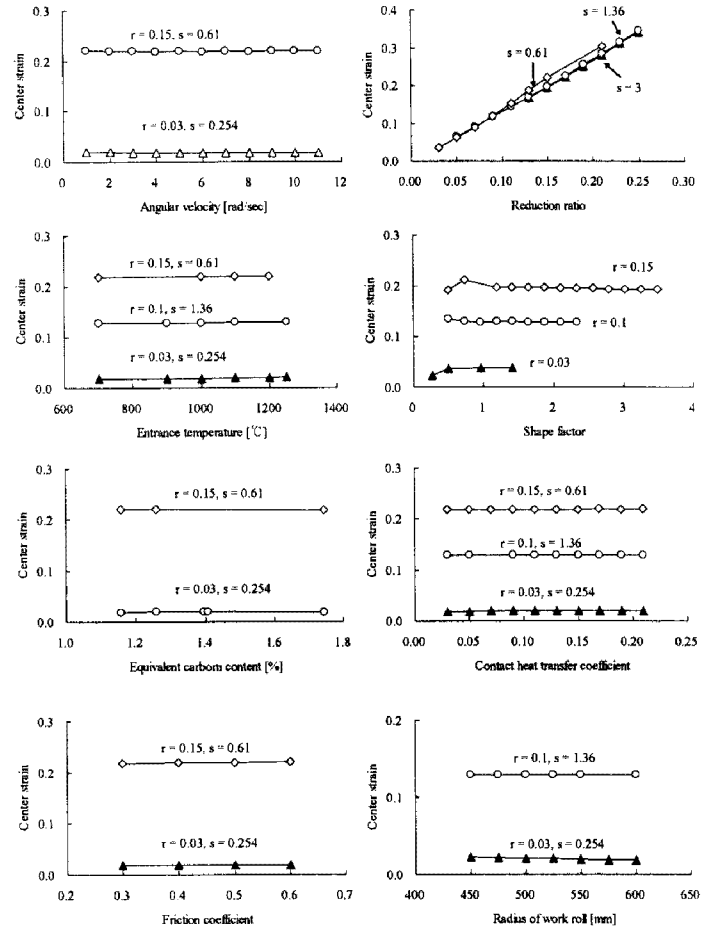
$$B = \delta - \ln(1 + (A\delta)^2) / (2A \tan^{-1}(A\delta))$$



**Fig. 1 Effective strain distribution along thickness direction [2]**

본 연구에서는 상기식(1~2)의 변형률 분포를 가정하고,  $\varepsilon_{mean}, \varepsilon_c, \varepsilon_s, A, \delta$  등의 변수에 대한 압연인자들의 영향을 살펴보았다. 그림 2는 중심부 변형률  $\varepsilon_c$ 를 나타낸 것으로써 중심부 변형률은 각속

도, 압연온도, 물과의 접촉열전달, 작업롤경, 마찰계수 등에 무관하며, 주로 압하율과 형상비(두께)에 의해 영향을 받음을 알 수 있다.



**Fig. 2 Effect of various rolling parameters on the center effective strain**

식(1~2)의 각 변수에 대해 도출된 유효인자들만으로 표현된 변형률 분포예측 간이모델식은 다음과 같다.

$$\varepsilon_c = f(r, s, \beta_1)$$

$$\varepsilon_{mean} = f(r, s, \mu, \beta_1)$$

$$\varepsilon_s = f(r, s, \mu, \omega, \beta_1, \beta_2, h_{lub}, \varepsilon_c, \varepsilon_{mean})$$

$$A = f(r, s, \mu, \omega, \beta_1, \beta_2, h_{lub}, \varepsilon_c, \varepsilon_{mean}), \quad s \leq 1.1$$

$$A = f(r, s, \mu, \omega, \beta_1, \beta_2, \varepsilon_c, \varepsilon_{mean}), \quad s > 1.1$$

$$\delta = f(r, s, \omega, \beta_1, \beta_2, h_{lub}, \varepsilon_{mean}, H)$$

여기서  $\beta_1 = Q_{def} / Power$ ,  $\beta_2 = Q_{die} / (Q_{def} + 2Q_{fric})$ 이며, 소성변형에 사용된 에너지와 압연동력의 비 및 물로의 접촉열전달 에너지 및 압연중 소재에서 발생한 총에너지의 비를 나타낸다. [3]

### 2.2 변형률 예측모델의 검증

그림3에서 나타낸 바와 같이 개발된 변형률 예측모델의 검증을 위해 압하율(35%, 3%)에 따른 유한요소해석결과와 비교한 결과 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한, 동일압하율에서 입측두께가 클수록 표면에서의 surface chilling 효과 및 전단변형에 의해 최대변형률과 중심부 변형률의 차이가 증가하며, 압하율이 증가함에 따라 두께방향 변형률이 증가함을 알 수 있다.

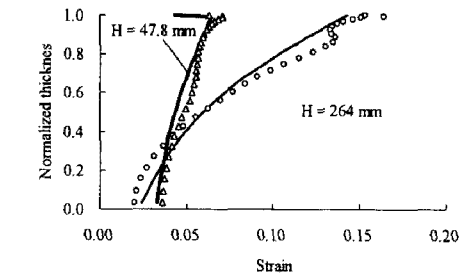
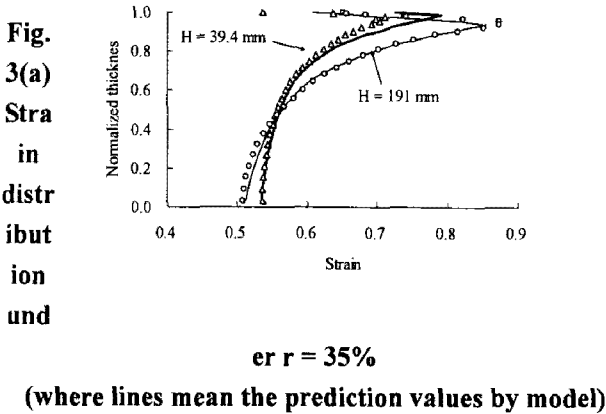


Fig. 3(c) Strain distribution under  $r = 3\%$

### 3. 결정립도 예측

#### 3.1 결정립도 예측모델

가열로에서 추출된 후 소재는 오스테나이트상을 유지하므로 이때 발생하는 재결정 및 결정립 성장 등의 금속학적 변화를 기술하기 위해 본 연구에서 사용된 재질예측모델은 아래와 같다.

- 1) 가열로 ~ 조압연 입측까지의 결정립 예측 [4]
- 2) 재결정, 결정립성장(C-Mn강 [5,6], Nb-첨가강[7])
- 3) 미재결정온도  $T_{NR}$  [6]
- 4) 잔류변형률 및 미재결정분을 결정식 [8]

#### 3.2 압연실적을 이용한 결정립도 예측

일반 C-Mn강에 대해 표2와 같은 후판압연실적으로부터 두께방향 결정립분포를 예측한 결과는 그림4와 같다. 그림4(a~b)에서 보는 바와 같이 평

균변형률을 이용한 결정립도는 일반적으로 알려진바와 같이 표면으로부터 1/4 두께에서의 결정립도와 동일하며, 폭내기 6패스이후부터 판중양에서는 부분재결정에 의해 결정립도가 미세화되나, 최대변형을 가지는  $\delta$ 근방에서는 재결정 완료후 결정립 성장에 의해 결정립의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 또한, 조압연 종료후 사상압연 입측까지 소재가 이송되는 동안 결정립도는 균일해짐을 알 수 있다.

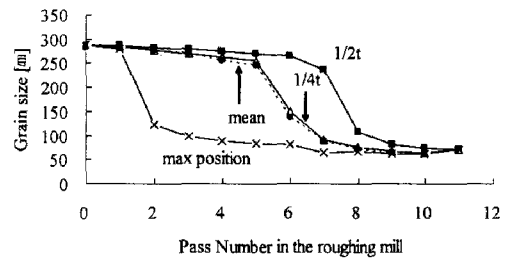


Fig. 4(a) Grain size distribution along pass (1/2t : center, max position : position at  $\delta$ )

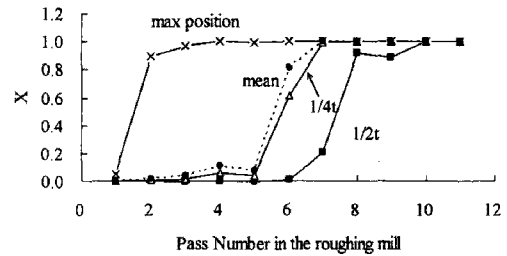


Fig. 4(b) Fraction of recrystallization after rolling of each pass in roughing mill

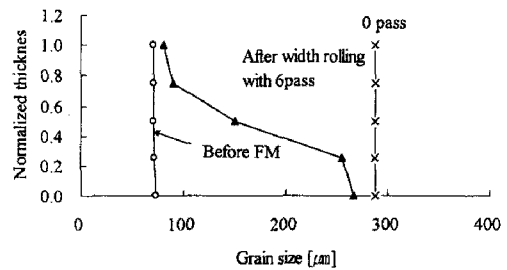


Fig. 4(c) Distribution of grain size along thickness direction for 0.15% C-Mn steel

Nb첨가강의 경우(그림5) 일반강과 동일하게 평균변형률을 이용한 결정립도는 1/4두께에서의 값과 유사하며, 일반강과는 달리 폭내기 압연공정에서부터  $\delta$ 근방의 결정립도는 결정립성장으로 인해 초기결정립도보다 성장하며, 조압연이 끝날때까지 다른 위치보다 결정립이 큼을 알 수 있다. 또한,

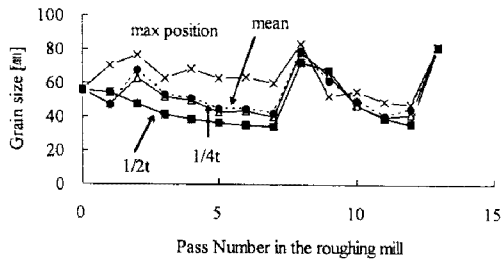


Fig. 5(a) Grain size distribution along pass for Nb alloyed steel

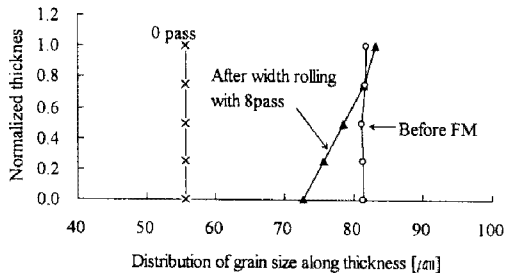


Fig. 5(b) Distribution of grain size along thickness direction for Nb alloyed steel

Table 2 draft scheduling data for grain size prediction

Pass	0.15%C-Mn ( $T_{nr}=856^{\circ}\text{C}$ )			Nb alloyed ( $T_{nr}=974^{\circ}\text{C}$ )		
	H [mm]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	time [sec]	H [mm]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	time [sec]
1	302	1118	6.9	302	1147	7.9
2	286	1115	9.8	280	1145	10.8
3	272	1111	7.8	257	1141	6.7
4	258	1106	8.7	236	1138	9.5
5	243	1104	6.6	217	1133	7.4
6	229	1099	23.5	198	1130	8.3
7	215	1090	8.3	181	1124	8.1
8	191	1085	11.0	166	1119	24.9
9	168	1080	7.8	150	1105	9.2
10	148	1074	8.4	135	1097	10.0
11	130	1068	35	120	1089	9.7
12	112			106	1078	9.3
13				92	1067	428
				79		

관중양부의 경우 부분재결정에 의해 잔류된 변형률이 차기패스에 축적됨에 따라 결정립이 미세화

됨을 알 수 있으며, 조압연 종료후 결정립 성장에 따라 두께방향의 결정립도가 조대화되고, 균일해짐을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 유한요소법에 근거한 압연출측에서의 두께방향 변형률분포 예측식이 개발되었으며, 유한요소해석결과와 잘 일치함을 보였다. 또한, 이를 결정립도 예측모델과 연계함으로써 실압연공정에서의 두께방향 결정립변화를 살펴보았다. 이를 통해 후판압연 공정에서 일어나는 금속학적 현상을 해석하고, 후물화/고강도화/고인성화 등의 강재요구특성에 부합할 수 있는 후판압연제조조건 최적화에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고 문헌

- [1] C.Ouchi, 1980, Int. Steel Rolling Conf. pp 1272.
- [2] S.H.Kim, J.H.Lee, W.J.Kwak, and S.M.Hwang, 2005, Dimensional analysis of hot strip rolling for on-line prediction of thermo-mechanical behavior of roll-strip system, ISIJ International, pp 199~208.
- [3] C.H.Moon, H.D.Park, 2006, Integrated on-line model for the prediction of roll force and temperature in thick plate rolling, Int. Steel Rolling Conf.
- [4] S.D.Choo, W.Y.Choo, 2000, 42<sup>th</sup> MWSP Conf. Proc., pp. 407.
- [5] C.M.Sellas, 1990, Modelling microstructural development in hot rolling, Material Science and Technology, Vol. 6., pp. 1072
- [6] J.G.Lenard, M.Pietrzyk, L.Cser, 1999, Mathematical and physical simulation of the properties of hot rolled products, BOOK., pp. 163
- [7] J.Majta, J.G.Lenard, M.Pietrzyk, 1996, A study of the effect of thermomechanical history on the mechanical properties of a high niobium steel, Materials Science and Engineering, pp. 249
- [8] K.Esaka, 1986, The development of the precise model predicting and controlling mechanical properties, 제철연구 제32호, pp.92