열간조압연 공정에서의 폭 압하 공정시 슬래브의 변형 특성

허수진†· 이상호*· 변상민**· 박해두**· 이종빈**· 김병민***

Plastic characteristic analysis of width reduction process in hot roughing mill

Su-Jin Heo, Sang-ho Lee, Sang-Min Byun, Hae-do Park, Jong-Bin Lee and Byung-Min Kim

Key Words : Roughing mill process(조압연), Rolling (압연), Edger-mill(폭압연기), Sizing press(사이징 프레스), Width reduction(폭압하), Hot strip mill(열간압연)

Abstract

In general, final width of hot strip should be accomplished in this stage because width reduction of strip hardly appears during typical finishing mill. However, it is difficult to control the width of strip in the roughing mill process as the horizontal rolling of strip is subsequently performed after the vertical rolling. It is therefore important to obtain the deformation of rolling direction on strip width to minimize the width spread of strip during horizontal rolling after vertical rolling. Generally there is Sizing press type and Edger-roll type. The width reduction process in sizing press has small amount of width spread compared with the edger. However, productivity by the sizing press process is much lower than those of the edger. In this study, sizing press and Edger-roll process parameters in a sheet rolling mill were set at specified values and the effect of the change in these parameters on product quality and process performance were evaluated.

기호설명

L_r : 경사부 길이(mm)
L : 접촉길이(mm)
L_p : 슬래브의 이송 길이(mm)
η : 폭압하 효율
ΔR : 폭압하량(mm)
W_0 : 초기 슬래브의 폭 길이(mm)
W_1 : 폭 압하된 폭 길이(mm)
W_2 : 수평압연 후 폭길이(mm)
θ_1, θ_2 : 경사부 각도

1. 서 론

조압연 공정(roughing mill process)은 압연(rolling)전 초기 슬래브의 두께 및 폭을 제어하는 공정으로 폭 압연과 수평 압연롤(horizontal roll)로 구성되어 있다. 또한, 조압연 공정은 최종공정(finishing mill)에서 작업이 가능하도록 슬래브(slab)의 두께를 감소시키고, 원하는 폭으로 제어하는 압연 공정이다. 기존의 조압연 설비는 공장의 길이와 생산성 향상을 감안하여 대부분의 경우 3~4 개의 압연 스탠드로 구성되어 있으며, 정확한 코일의 폭을 확보하기 위해 엣저(edger)가 압연기 입출측에 부착되어 있다.

최근 판재의 두께가 얇아지면서 압연되는 동안 소재의 폭 변화가 거의 없기 때문에 조압연 공정에서 미리 폭 제어가 완료되어야 한다. 때문에 기존의 엣저 방식과는 다른 단조 방식의 사이징 프레스에 의한 폭 압하 공정이 개발되었다. 그러나 열간 조압연에서는 사이징 프레스(sizing press)방식 및 엣저(edger)에 의한 폭 압연(width rolling)방식 이후 수평압연이 진행되기 때문에 슬래브의 폭 변화가 발생하여 폭 제어가 어렵다.

† 비회원, 부산대학교 대학원 정밀가공시스템
E-mail : hursujin78@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-3074 FAX : (051)510-3075
* 부산대학교 대학원 정밀가공시스템
** 포항종합제철㈜
*** 부산대학교 대학원 정밀가공시스템

따라서 조압연에서 수평압연시 폭 변화를 최소화하기 위하여 길이 방향으로 변형을 유발하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 이와 같은 열간 조압연 공정에서의 슬래브의 폭 변형을 개선하기 위해 사이징 프레스와 엣저에 의한 폭 압연 후 수평압연에 의한 슬래브의 변형거동 비교하였으며, 이때 슬래브의 폭 변형을 제어하기 위한 사이징 프레스 엔빌의 형상을 제안하였다.

2. 폭압연 & 수평압연시의 폭변화 거동

2.1 사이징 프레스 및 엣저 압하

사이징 프레스 압하방법은 반복적인 사이클에 의해 일정한 이송피치로 슬래브의 폭을 압하해 가는 방식이다. 엔빌과 슬래브간의 접촉길이가 증가하여 폭 압하량을 증대시킬 수 있는 장점이 있다. Fig. 1 은 사이징 프레스 압연과 엣저압연의 개략도를 나타낸 것이다. 사이징 프레스에 의한 압하는 슬래브가 엔빌에 의해 압하되고 엔빌이 오픈(often)되면서 일정한 이송피치로 이동된 후 다시 압하되는 방법이다.

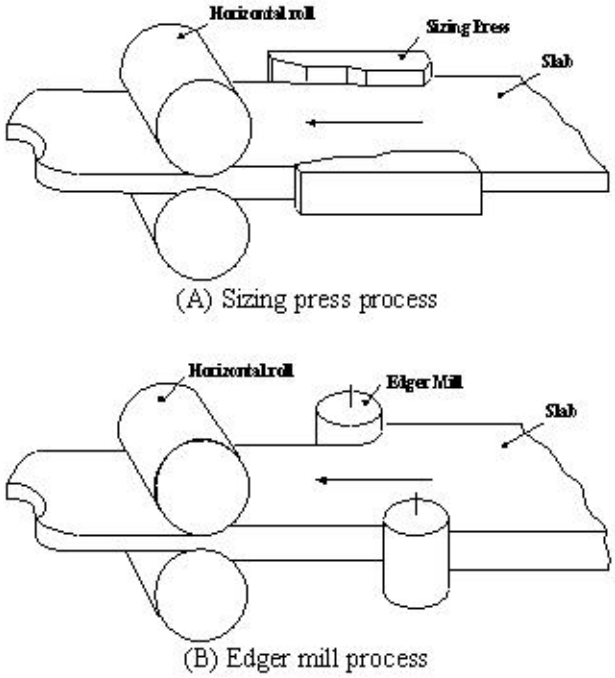

Fig. 1 Width reduction process

엣저압연에 의한 압하방법은 슬래브의 후단부가 압연기의 롤을 통과하여 나올 때 소성변형으로 인하여 압연후의 판은 엣지(edger)부에 불 균일한 변형상태로 존재하게 된다. 이와 같은 불균일한 변형부를 크롭(crop)이라 하고, 수평압연(horizontal process)공정에서 발생하는 비정상변형부인 크롭을 줄이기 위해 고안된 평면형상제어 압연방법이 엣저압연 방법이다. 폭압연 후 수평압연시 선, 후단부의 폭변화 거동을 보면 슬래브의 선, 후단부의 좌우 엣지부에는 폭퍼짐(width spread)이 발생되어 있다. 이러한 현상은 정상부에서는 롤 바이트(roll bite)전후의 미변형부에 의해 폭퍼짐이 구속을 받는 반면, 선, 후단부에서는 구속력이 상대적으로 작아져서 압연방향으로의 연신이 감소되기 때문에 폭퍼짐 현상이 발생하는 것이다.

Fig. 2 는 사이징 프레스의 엔빌(anvil)과 슬래브와의 관계를 나타낸 것이다. 엔빌의 경사각에 따라 사이징 프레스에 작용하는 하중이 증가한다. 아래의 식은 경사부 길이와 접촉길이를 구하는 계산식이다.

경사부 길이 $$L_r = \frac{\Delta R}{2\cos(90-\theta)} \quad (1)$$

접촉길이

$$L = 2L_p + \frac{\Delta R_1}{2\cos(90-\theta_1)} + \frac{\Delta R_2}{2\cos(90-\theta_2)} + L_{s2} \quad (2)$$

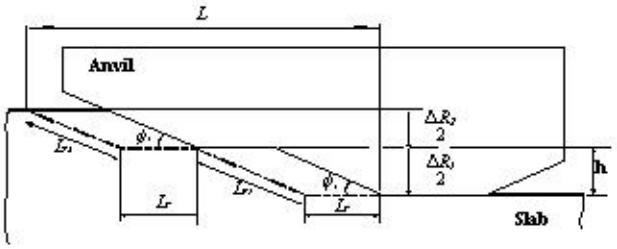

Fig. 2 Relationship between sizing press and slab

2.2 수평압연

사이징 프레스 압하와 엣저 압하를 통과한 슬래브는 후속 공정인 수평압연을 실시하게 되면 이후 폭압연 공정과 수평압연공정이 몇 패스를 반복하여 제품의 폭과 일정두께를 제조한다.

3. 해석방법

3.1 해석조건

Table 1 은 사이징 프레스공정에 대한 해석조건이다. 슬래브 폭 1000, 슬래브 두께 200, 폭 압하량 50, 300 조건으로 시뮬레이션을 실시하였다. 다수의 시뮬레이션 수행시 오차를 줄이기 위하여 실험계획법을 이용하여 해석조건을 간이화 하였다.

Table 2 는 엣저 압연을 이용한 폭 압연공정의 해석조건을 나타낸 것이다. 엣저 압연을 이용한 조압연 공정해석은 폭 압하량(width reduction)의 변화만 주어 해석하였다. 엣저 압연 롤의 크기는 대폭압연기를 선택하였고 소재는 저탄소강인 AISI 1010 을 사용하였다. 사이징 프레스와 엣저 압연을 이용한 폭압연 공정을 해석하기 위한 유한요소코드는 DEFORM 을 이용하였으며 슬래브의 초기온도는 1100℃로 균일하다고 가정하여 해석을 수행하였다

Table 1 Sizing press and edger roll conditions used in FEM analysis

Slab	Material	AISI 1010
	Thickness (mm)	200
	Width (mm)	1,000
	Length (mm)	8,300
	Wdith reduction(mm)	50, 300
Sizing press	Anvil speed(mm/s)	380
	Anvil angle (°)	$\theta_1 = 21, 12$ $\theta_2 = 20, 18$
Edger	Roll diameter (mm)	ϕ=2,000
Horizontal roll	Roll diameter (mm)	ϕ=900, L=1,500

3.2 Shida's 모델식

해석에 사용한 응력-변형률 관계식은 일반탄소강에 적합한 시다(Shida) 모델을 사용하였으며 식은 아래와 같다.

$$\sigma = \sigma_s(C,T)\, f_w(\varepsilon)\, f_r(\dot{\varepsilon}) \tag{1}$$

$$\sigma_s = 0.28\exp\left(\frac{5.0}{T} - \frac{0.01}{C+0.05}\right) \tag{2}$$

$$T[K] = \frac{T[^\circ C]+273}{1000} \tag{3}$$

$$f_w(\varepsilon) = 1.3\left(\frac{\varepsilon}{0.2}\right)^n - 0.3\left(\frac{\varepsilon}{0.2}\right) \tag{4}$$

$$n = 0.41 - 0.07C \tag{5}$$

$$f_r(\dot{\varepsilon}) = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{10}\right)^m \tag{6}$$

$$m = (-0.019C + 0.126)T + (0.076C - 0.05) \tag{7}$$

이 공식은 탄소함유량: 0.07–1.2% ,온도: 700–1200℃, strain ~0.7 그리고 strain rate: ~100$_s^{-1}$ 의 범위 안에서 적용 가능하다.

4. 결과 및 고찰

4.1 도그본 프로파일

Fig. 3 은 동일한 두께와 폭을 가진 슬래브를 사이징 프레스를 사용하여 압하한 경우와 엣저롤을 사용하여 압한 경우의 슬래브의 두께방향 변위분포를 비교한 그림이다. 도그본 양은 정상부를 기준으로 선, 후단으로 향할수록 점점 작아진다. 그림에서 보듯이 엣저롤에 의한 슬래브의 변형량이 사이징 프레스보다 더 크다. 엣저롤에 의한 슬래브의 변형거동은 대부분 두께방향으로 변형을 하였다.

사이징 프레스에 의한 슬래브의 변형거동은 슬래브의 길이방향으로 유동하기 때문에 상대적으로 두께방향의 변형량이 작다는 것을 알 수 있다. 따라서 두께방향의 변형량이 작은 사이징 프레스의 경우가 후속공정의 수평압연을 실시하게 되면 폭방향으로의 회복량이 작기 때문에 폭 압하 효율측면에서 효과적이라 할 수 있다.

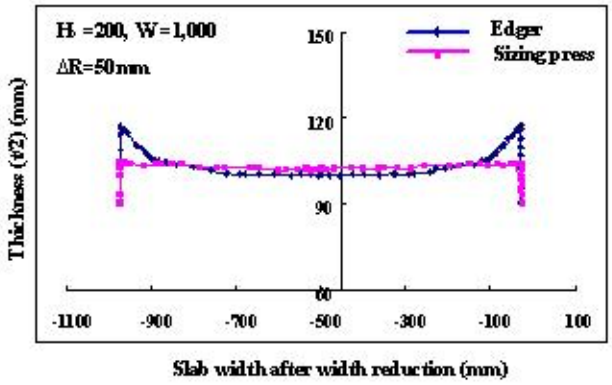

Fig. 3 Comparison with flat edger and sizing press for thickness displacement

Fig. 4 는 엔빌 형상에 따른 슬래브 폭 압하후 두께 분포를 비교하여 나타낸 것이다. 슬래브를 사이징 프레스 압하 후 슬래브의 두께 분포를 비교해본 결과 엔빌의 앵글 $\theta_1 = 21,\ \theta_2 = 20$ 일 때 최고두께와 최저두께의 차가 가장 적었다. 또한, 후공정인 수평압연을 가하였을 때 폭 퍼짐 현상이 가장 작게 나타난다. 동일한 슬래브의 폭을 50 *mm* 의 압하를 가하였을 경우도 동일한 결과가 나타난다

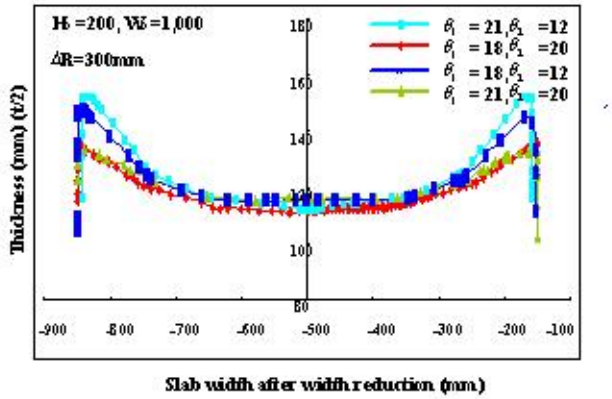

Fig. 4 Dog-bone profile according to anvil shapes

4.2 수평압연 결과

Table. 2 는 폭 압하공정 후 수평압연시 슬래브의 폭 퍼짐 길이를 측정한 것이다. 측정결과 $\theta_1 = 21,\ \theta_2 = 20$ 의 폭 퍼짐이 가장 작은 것으로 관찰되었다.

Table 2 Width spread of horizontal rolling

Case	Slab width (W0)	Width reduction	θ_1	θ_2	Slab Width (W1)	Slab Width (W2)
Sizing press						
1	1,000	50	21	20	950	950.14
2	1,000	50	18	12	950	958.72
3	1,000	300	21	12	700	725.207
4	1,000	300	18	20	700	735.80
5	1,000	50	21	12	950	956.97
6	1,000	50	18	20	950	956.79
7	1,000	300	21	20	700	728.944
8	1,000	300	18	12	700	756.19
Edger						
1	1,000	50	1050	1500	950	972.70
2	1,000	300	2000	1500	700	772.30

4.3 폭 압하 효율

폭 압연시 선단부와 후단부의 폭은 정상부를 기준으로 선단부 쪽 또는 후단부 쪽으로 갈수록 점점 작아지는 현상이 발생하는데 이를 폭 수축이라 한다. 폭 압하 효율은 엔빌에 의해 폭 압하된 후 두께방향으로 도그 본(dog-bone) 형상이 후속공정인 수평압연을 실시 하였을 때 폭 방향으로 미 회복률을 나타낸다. 수식은 아래와 같다.

$$\eta = \frac{W_0 - W_2}{W_0 - W_1} \tag{1}$$

Table 2 는 폭 압하 효율을 비교한 결과를 나타낸 표이다. 효율을 비교한 결과 $\theta_1 = 21,\ \theta_2 = 20$ 인 엔빌이 가장 효율이 높은것으로 나타났다.

사이징 프레스 압하 후 수평압연공정이 엣저 압하 후 수평압연공정을 수행한 것보다 폭 회복량이 더 작다. 폭 회복량이 작은 사이징 프레스에 의한 폭 압하효율이 우수함을 알 수 있다. 해석 후 슬래브의 폭증가량에 있어, 폭 변경량이 증가함에 따라 폭 수축 발생량의 증가와 함께 폭 수축길이도 증가하며 선단부가 후단부보다 크다.

Table 3 Width reduction efficiency of horizontal rolling

Sizing press					
Case	Slab width (Wi)	Width reduction	θ_1	θ_2	η
1	1,000	50	21	20	0.9972
2	1,000	50	18	12	0.8254
3	1,000	300	21	12	0.9140
4	1,000	300	18	20	0.8807
5	1,000	50	21	12	0.8724
6	1,000	50	18	20	0.8442
7	1,000	300	21	20	0.9083
8	1,000	300	18	12	0.8127
Edger					
1	1,000	50	1050	1500	0.546
2	1,000	300	2000	1500	0.739

5. 결 론

5.1 엣저 롤을 이용한 폭 압연 공정은 롤의 회전에 의해 슬래브의 엣지부를 성형하는 방법으로 폭 압하량에 제약을 받으며 롤과 소재간의 접촉길이가 짧아 폭 방향을 기준으로 양 엣지부에 국부적인 두께 변위를 유도하므로 폭 압연 효율을 저하시키는 문제점이 있다.

5.2 폭 압연 후 두께를 측정한 결과 엔빌각 $\theta_1 = 21$, $\theta_2 = 20$ 일 때 도그본의 양이 가장 작게 측정되었다.

5.3 폭 압연 방법 중 사이징 프레스 폭 압연방법이 엣저 폭 압연 방법보다 후공정인 수평 압연을 실시하였을 때 폭 회복량이 적으며, 폭 압하 효율이 우수하다.

후 기

이 논문은 부산대학교의 POSCO 석좌교수연구 기금에 의해 지원되었다.

참고문헌

(1) M, S, Chen. and J, S, Jeong., 2002, "Deformation behaviour of slab sizing press in hot strip mill", *Trans. of materials processing*, Vol.1, pp. 183~186.

(2) Takaaki Hira., Kunio Isobe., Hideo Abe., Hideyuki Nikaido., Takeshi Fujitsu., Susumu Zuyama., 1990, "Deformation of Slab under Heavy Reduction of Width by Sizing Press" *Kawasaki steel technical report*, No. 22, pp. 188~194.

(3) Shigeru SHIDA., 1969, "Empirical formula of flow stress of carbon steels-resistance to deformation of carbon steels at elevated temperature 2nd Report," *J. JSTP*, Vol. 10, No. 103, pp. 610~617.

(4) Myung, Sik, Chen., Joon, Jeong, Yi. and Young, Hoon, Moon., 1999, "Dynamic Edger control for the precise width control at the head and tail ends of hot strip," *Trans. of materials processing, Part A*, Vol. 23, No. 7, pp. 1196~1204.

(5) S, I, Kim., Y, Lee. and S, M, Byon., 2003, "Study on constitutive relation of AISI 4140 steel subject to large strain at elevated temperatures," *Journal of materials processing technology*, Vol. 140, pp. 84~89.

(6) Jong, Yeob, Jung. and Yong, Taek, Im., 2000, "Improvement of rolling load prediction with consideration of spread in hot rolling," *Proceedings of the KSME spring annual meeting*, Part A, Vol. 24, No. 11, pp. 2836~2844.

(7) D, C, Ko., S, H, Lee., D, H, Kim., S, M, Byon, H, D, Park. and B, M, Kim., 2007, "Design of sizing press anvil for decrease of defect in hot strip" *Journal of materials processing technology*,