

보강롤 구동 냉간압연기에서의 적정 작업롤 수평위치 설정기법 개발

변상민* · 이원호**

Prediction of Proper Horizontal Position of Work Roll in Backup Roll Driven-type Cold Rolling Mill

S. M. Byon and H. W. Lee

Abstract

For the purpose of rolling hard metals such as silicon steel and non-ferrous metals, the backup roll driven-type mill has been widely used in cold rolling industry. Since the backup roll drive results in horizontal bending of the work rolls and therefore exerted reciprocal action on the roll gap contour, the selection of slim work rolls is very restricted. In this paper, we present an analytic equation based scheme to determine a proper horizontal position of work roll minimizing the horizontal force subject to mechanical constraints.

Key Words : Backup Roll Driven-type Mill, Cold Rolling, Horizontal Position, Horizontal Force

1. 서론

최근 들어, 다양한 목적의 고품질 판재가 여러 산업계에서 요구되고 있다. 이러한 판재의 공통적 특징을 살펴보면, 높은 수준의 강도, 내부식성, 광택도, 전자기적 특성, 성형성, 야금학적 특성으로 요약된다. 가공적인 측면에서 위와 같은 특성을 가진 재료를 압연하기 위해서는 매우 큰 압연하중이 필요하다. 압연기 설계자는 주어진 구속조건 하에서 큰 압연하중을 얻기 위해서 작은 작업롤을 선택하게 된다. 그러나, 작은 작업롤을 선택하게

되면 필연적으로 비틀림 및 휨 강성이 약하므로 자체 구동에 의한 압연 토크 전달이 어렵게 된다. 이것을 극복하기 위해서 보강롤을 구동시켜 토크를 일으키고 마찰로 작업롤에 토크를 전달시켜 압연을 가능하게 하는 보강롤 구동 압연기가 출현하게 되었다. 작업롤의 크기를 작게함으로써 압연할 수 있는 최소 압연 두께를 더 줄일 수 있으므로 최근 들어, 관심이 높은 극박재 생산을 또한 가능하게 한다. 이와 같은 보강롤 구동방식 압연기는 보통, 가역식으로 제작되며 실리콘스틸, 고강도 비

* 포스코 기술연구소 계측제어연구그룹

** 포스코 기술연구소 계측제어연구그룹

철금속, 스테인레스 스틸등의 재료의 냉간압연기로 사용된다[1].

보강롤 구동 압연기는 여러면에서 우수한 특성을 나타내지만, 보강롤 구동에 의해 발생한 토크를 마찰에 의해 작업롤에 전달하는 고유의 특성 때문에 작업롤에 불필요한 수평력을 유발한다. 수평력은 롤갭의 형상을 변화시키므로 압연중인 판형상을 비정상적으로 만들고 또한 작업롤 네크부에 과도한 지지력을 일으켜 롤 수명을 저하시킨다. 이와 같은 보강롤 구동방식에 의한 압연시 발생하는 작업롤의 힘을 방지하기 위해서 HS(Horizontal Stabilization) System 이 도입되었다[2]. 이 방식은 작업롤의 위치를 수평방향으로 이동함으로써 수평력을 최소화하는 것을 기본 원리로 가지고 있다. 본 연구에서는 해석적인 방법으로 압연하중, 토크, 작업롤에 작용하는 수평력을 계산하고 이것에 기초하여 작업롤 네크에 적절한 지지력을 유지할 수 있을 정도의 수평력을 갖게 하는 적정 작업롤의 설정위치 결정기법을 제시하였다. 이 기법을 이용하여 실리콘스틸 가역식 냉간압연공정에 적용하여 그 실효성을 보였다.

2. 냉간압연 해석모델

2.1 압연하중 및 압연토크의 계산

본 연구에서는 압연하중(F_w) 및 압연토크(M_w) 예측을 위해서 냉간압연에서 일반적으로 많이 사용하는 다음과 같은 Hill[3]의 식을 이용하였다.

$$F_w = W \cdot L(R', h_i, h_o) \cdot K(k_s, k_d) \cdot f_1(K, \sigma_f, \sigma_b) \cdot f_2(\mu, r, R', h_i) \quad (1)$$

$$M_w = W \cdot K(k_s, k_d) \cdot R \cdot (h_i - h_o) \cdot f_G + R \cdot W \cdot h_o \cdot (\sigma_b - \sigma_f) \quad (2)$$

여기서, W 는 폭, L 은 롤의 투영접촉길이, K 는 변형저항, f_1 은 장력보정계수, f_2 는 마찰보정계수, f_G 는 토크의 마찰보정계수를 나타낸다. 나머지 변수명은 Table 1.에 정리하였다.

Table 1 Notation of symbolic parameters in analytic model of cold rolling

h_i	입측두께	r	패스 압하율
h_o	출측두께	μ	마찰계수
k_s	정적변형저항	σ_f	전방 인장응력
k_d	동적변형저항	σ_b	후방 인장응력

2.2 롤 변형 예측모델

롤에 압연력을 가하면 롤은 탄성변형을 한다. 롤의 탄성변형은 롤과 판사이의 접촉길이를 변화시켜 식 (1)에서 보는 바와 같이 압연하중을 또한 변화시킨다. 따라서, 변형된 롤 반경 및 이 때의 압연하중을 구하기 위해서 변형 전 롤 반경을 초기치로 가정하여 압연하중 계산식과 반복적인 방법으로 계산을 수행해야 한다. 이 계산에 사용된 롤 변형 예측모델은 Hichcock[4] 식을 이용하였다.

$$R' = R \left[1 + 16(1 - \nu^2) F_w / \pi W E (h_i - h_o) \right] \quad (3)$$

여기서, R' 는 변형 후 작업롤의 반경을 나타내고, R 은 변형 전 작업롤의 반경, E 는 종탄성계수, ν 는 프와송비를 나타낸다.

3. HS 시스템의 역학모델

3.1 개요

HS(Horizontal Stabilization) 시스템은 소형 작업롤을 사용해서 보강롤 구동방식으로 압연시 필연적으로 발생하는 작업롤의 수평 벤딩을 막기 위해서 개발된 시스템이다. 작업롤 수평 안정화는 작업롤의 중심을 압연 진행방향으로 보강롤 중심과 적정량 만큼 편심을 주는 방식으로 이루어진다. 이렇게 함으로써 작업롤에 작용하는 수평력을 영에 가깝게 최소화 할 수 있다. 실제 수평 편심위치 설정은 다음과 같은 구속조건을 만족하는 범위 내에서 이루어진다. :

- (1) 보강롤과 작업롤 사이의 좌굴을 고려한 최대 수평 편심량
- (2) 작업롤 네크부가 안정적으로 베어링과 접촉하기 위한 적정 지지력

3.2 역학모델

작업롤에 작용하는 수평력과 보강롤에 상대적인 작업롤의 수평편심량 사이의 정량적 관계를 도출하기 위해서는 작업롤과 보강롤에 작용하는 모든 힘들을 고려한 자유물체도에 기초한 역학식 유도가 필수적이다. Fig. 1에 보강롤과 작업롤에 작용하는 모든 힘들을 기술한 자유물체도를 나타내었다. 여기에 사용된 각각의 변수명은 Table 2.에 정리하였다.

3.2.1 접촉 기하학

Fig. 1에는 작업롤의 수평이동 거리가 과장해서

나타나 있지만 실제로는 보강롤 직경의 2% 미만이므로, 보강롤의 중심과 작업롤의 중심이 이루는 각도는 매우 적다고 가정할 수 있다. 따라서, 다음과 같이 기하학적 관계를 단순화할 수 있다.

$$\cos \theta \approx 1 \quad (4)$$

$$\sin \theta = s / (r_{sw} + r_{aw}) \approx \theta \quad (5)$$

3.2.2 평형방정식

롤의 속도가 변화가 없는 정상상태에 도달했다고 가정하여 힘 평형관계를 다음과 같이 얻을 수 있다.

(i) 보강롤에서의 모멘트 평형과 y 방향 힘평형

$$T = M^{\#} / r_{sw} \quad (6)$$

$$N = F_A - (M^{\#} / r_{sw}) \theta \quad (7)$$

(ii) 작업롤에서의 x 방향 힘평형

$$H_{aw} = T - N \theta + (Z_E - Z_A) / 2 \quad (8)$$

식 (6)과 (7)을 식 (8)에 대입하면,

$$H_{aw} = M^{\#} / r_{sw} - F_A \cdot s / (r_{sw} + r_{aw}) + (Z_E - Z_A) / 2 \quad (9)$$

위의 식으로부터 작업롤에 작용하는 수평력과 보강롤에 상대적인 작업롤의 수평편심량 및 작업롤과 보강롤의 기하학, 압연하중, 토크, 장력 사이의 유기적인 관계를 알 수 있다.

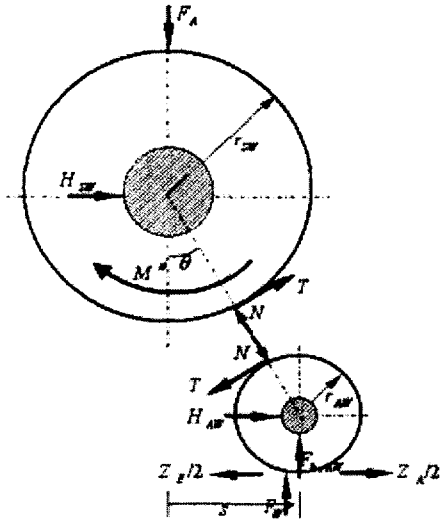


Fig. 1 Free body diagram of HS system

Table 2 Notation of symbolic parameters in HS system

F_A	압연기 분리력	N	접촉 수직력
$F_{b,aw}$	작업롤 밴더력	T	접촉 접선력
H_{aw}	작업롤 수평력	s	작업롤 편심량
H_{sw}	보강롤 수평력	Z_A	전방 인장력
$M^{\#}$	보강롤 토크	Z_E	후방 인장력

4. 적정 작업롤 수평위치 설정절차

적정 작업롤 수평위치 설정을 위해서는 먼저 다음과 같은 정보가 알려져 있어야 한다.

- (i) 작업롤이 견딜 수 있는 가용 하중
- (ii) 작업롤 넥크부의 안정적 수평 지지력 범위
- (iii) 작업롤의 가용 이동거리

위와 같은 정보가 알려져 있을 때, 앞에서 제시한 식들을 이용하여 다음과 같은 방식으로 적정 작업롤의 수평위치를 설정할 수 있다.

- (i) 작업롤 넥크부 추천 안정적 수평지지력(H_{aw})을 식 (9)에 대입해서 해당 이동거리(s)를 계산한다.
- (ii) 계산된 이동거리가 가용 이동거리에 들어가는지 판단한다. 들어가지 않는다면 (i)로 되돌아가서 다른 추천 수평지지력을 선택한다.
- (iii) 계산된 이동거리를 사용했을 때, 비정상적인 경우($M^{\#} = 0, Z_A = 0, Z_E = 0$)에 수평력이 가용하중 범위 내에 들어가는지 판단한다. 들어가지 않는다면 (i)로 되돌아간다.
- (iv) 모든 조건을 만족하는 이동거리를 최종값으로 선택한다.

공정조건에 따라 다르겠지만, 과도하게 높은 압연력 및 토크가 걸리지 않는 대부분의 경우는 (ii), (iii)에서 피드백 되지 않고 추천 수평지지력에 해당되는 작업롤 이동거리를 직접적으로 계산할 수 있다.

5. 결과 및 논의

본 연구에서 제시한 방법을 실리콘스틸 생산용 가역식 냉간 압연기에 적용하여 적정 작업롤 수평위치 설정에 활용하였다. 일반적인 압연공정의 패스 스케줄을 살펴보면, 전단패스에서 부하배분율이 높고 후단패스에서 부하배분율이 작은 것이 일반적이다. 본 논문에서는 제시된 방법의 적합성을 고찰하기 위해서 특징적인 두 경우 즉, 전단패스의

경우로 첫번째 패스를 선정했고 후단패스의 경우로 다섯번째 패스를 선택하였고, 계산에 사용된 공정조건은 Table 3 에 나타내었다. 적정 작업롤 이동거리를 계산하는 단계를 각 패스별로 Fig. 2 와 3 에 나타내었다.

첫번째 패스의 경우를 Fig. 2 에서 살펴보면, 먼저 작업롤 추천 지지력이 -40kN 인 경우 해당하는 이동거리는 22.25mm 로써 작업롤의 가용 이동거리 ($1\text{mm}\sim 20\text{mm}$)를 벗어난다. 따라서, 다음 추천 지지력 40kN 을 사용하면 해당하는 이동거리는 16.20mm 로써 가용 이동거리 범위내에 들어간다. 그리고, 비정상적인 하중상태에서 수평력을 계산하면 역시 작업롤 가용 하중 범위내에 존재함으로(4 장의 (iii) 참조) 최종적인 작업롤 이동거리는 16.20mm 가 되고 이때의 작업롤의 수평력은 40kN 이 된다.

다섯번째 패스의 경우를 Fig. 3 에서 살펴보면, 작업롤 추천 지지력이 -40kN 인 경우 해당하는 이동거리는 14.34mm 로써 작업롤의 가용 이동거리 내에 있으므로 적합하다. 그러나, 수평력의 절대치가 같은 40kN 의 경우를 한번 더 계산함으로써 작은 이동거리를 선택하는 것이 바람직하다. 왜냐하면 이동거리가 작을수록 패스마다 압연방향으로의 작업롤 이동에 따른 작업지연 시간을 단축할 수 있기 때문이다. 실제로 40kN 의 경우 작업롤의 이동거리는 6.68mm 로써 앞의 경우 보다 작은 값이다. 따라서, 다섯번째 패스의 경우 최종적인 작업롤의 이동거리는 6.68mm 이고, 이때의 작업롤의 수평력은 40kN 이 된다.

Table 3 Process condition used in HS analysis

	Pass 1	Pass 5
Entrance Thickness[mm]	2.3	0.43
Delivery Thickness[mm]	1.5	0.285
Front Tensile Force[kN]	119.5	55.7
Back Tensile Force[kN]	90.2	68.9
Separating Force[kN]	9844.2	7781.0
Backup Roll Torque[kNm]	169.3	65.0

6. 결론

본 연구에서는 통상 강도가 높은 판재를 압연할 때 사용되는 보강롤 구동 압연기에서 압연하기 전에 미리 셋업해야 하는 작업롤의 수평이동량 값을 계산하는 방법을 체계적으로 정립하였다. 제시된 절차에 의해 냉연판재 실제 공정에 적용하여 본 방법의 유효성을 예시하였다. 이와 같은 방법을 확장하여 다양한 형태의 보강롤 구동방식 압연기 설정 모델 개발에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

효성을 예시하였다. 이와 같은 방법을 확장하여 다양한 형태의 보강롤 구동방식 압연기 설정 모델 개발에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

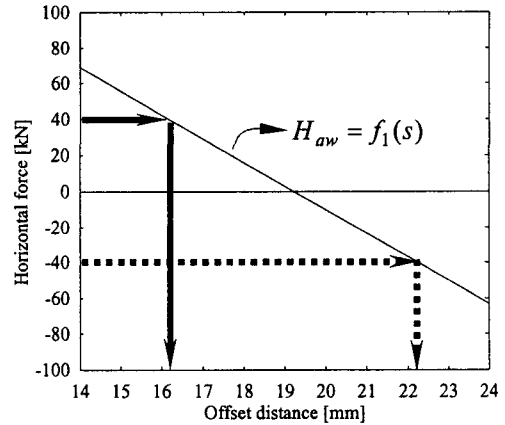


Fig. 2 Offset distance in the case of Pass 1

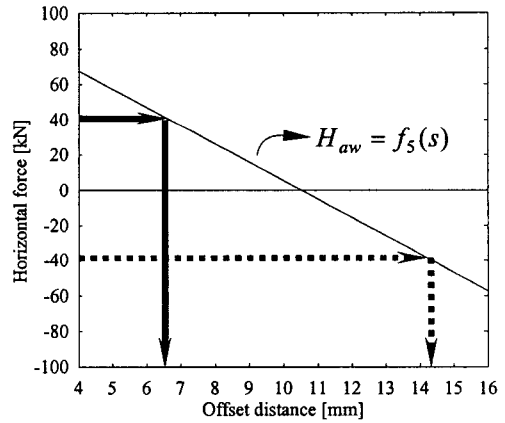


Fig. 3 Offset distance in the case of Pass 5

참고 문헌

- (1) Hilbert, H. G., Roemmen, H. J. and Boucke, K. E., 1976, "MKW cold mill – rolling silicon steel strip", Iron and Steel Engineer, Sept., pp. 25~31.
- (2) Espenhahn, M. and Giermann, G., 1988, "Modernization of a cold rolling mill for high-alloy Si Strips", Metall. Plant Technol., Vol. 11, no. 5, pp. 70.
- (3) Hill, R., *The mathematical theory of plasticity*, Oxford Univ. Press, 1950.
- (4) Hitchcock, J.H., 1935, "Roll neck bearings", ASME Res. Publ.