

## 냉연 작업인자와 edge drop의 상관관계

여원구\* · 황상무\*\* · 정제숙\*\*\* · 김종근\*\*\*

### The Relation between Cold Rolling Factors and the Edge Drop

W. K. Yeo, S. M. Hwang, J. S. Chung, J Kim

#### Abstract

In this study, it was investigated the influence of cold rolling factors on the edge drop. Edge drop was highly affected by the shape of work roll, the amount of work roll shift and the crown of hot strip, but the effect of bending force at the front stand was relatively small. The used numerical model was examined by comparing to the result of measured field data, and it showed a qualitative agreement with each other.

**Keywords :** Edge Drop, Cold Rolling, Numerical Model

#### 1. 서 론

냉연 제품의 품질지표중 압연공정에서 결정되는 품질로서는 두께편차와 형상이 있다. 두께편차는 길이방향의 판두께정도와 폭방향의 두께 프로파일로 나누어서 생각할 수 있는데 강판을 적층하여 사용하는 전기강판이나 드로잉 가공을 하는 D&I재등에 있어서는 폭방향의 두께 편차가 중요한 품질 결정요소가 된다. 폭방향 두께편차는 특히 판edge에서 발생하는 edge drop에 의해서 결정이 된다. 본 연구에서는 수식모델을 이용하여 판의 폭방향 두께 프로파일을 예측하고, 냉연 작업인자와 edge drop의 상관관계를 조사하였다. 대부분의 작업인자들은 자동계산을 통하여 실시간으로 결정되지만 초기 설정값으로 주어지는 조건들은 작업중에는 변경할 수 없다. 따라서 on-line 제어와 더불어 off-line에서의 결과 예측은 대단히 중요한 기술이다.

압연공정에서 판 두께 및 압연하중을 예측하는 일은 각 stand 별 압하율, 장력, 벤더력, 속도, work roll 형상 등의 여러 가지 공정 변수들에 의해 결정되며 초기 설정 값 결정을 위하여 필수적인 일이다. 압연재의 소성변형 조건과 롤의 탄성변형을 연립하여 해를 구하는 방법은 컴퓨터가 개발된 이후인 1968년경 shohet & Townsend [1]에 의해 발표되었다. 그 후 현재와 같이 컴퓨터가 발달하기 전에는 역학적인 힘 균형에 바탕을 둔 지배방정식을 바탕으로 3차원 현상을 2차원으로 간략화 한 수식을 이용하여 수식모델을 만들어 사용하였고, 실제 현상과 차이가 나는 부분은 실험치를 바탕으로 결과를 보정하였다. 수식 모델을 이용하면 국부적인 변형이나 응력 값의 예측 등은 불가능하지만 전체적인 판 두께의 분포나 압연하중 등을 실시간에 실제 값과 유사하게 예측할 수 있으므로 현장에서 공정을 설계하고 결과를 예측하는데 많이 사용되어 왔다.

\* 포항공과대학교 철강대학원  
\*\* 포항공과대학교 기계공학과  
\*\*\* 포항산업과학연구원 설비자동화연구센터

본 연구에서는 최근 판 폭 변화를 고려한 새로운 수식 모델 가운데 하나인 Generalized 2-Dimensional Theory[2-4]에 바탕을 둔 방법을 이용하여 냉연 공정의 공정 변수들과 edge drop의 상관관계를 조사하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 폭방향 판두께 예측 모델

냉연 공정 중 edge drop을 예측하기 위해서는 판 두께 프로파일을 정확히 계산할 수 있어야 한다. 압연 하중의 경우 압연기 측면에서 본 2차원 가정을 통하여 비교적 근사한 값을 유추할 수 있는 반면, 판 두께 프로파일의 경우 3차원 현상을 해석하여야 정확한 값을 계산할 수 있다. 그러나 3차원 현상을 해석하기 위한 유한요소법은 많은 계산 시간이 소요되어 정밀한 계산 결과를 얻기 위한 off-line 기법으로 많이 사용되고 있다. 수식모델의 경우는 평면 변형을 가정을 통하여 이러한 3차원 현상을 이차원 현상으로 간략화 시켜 해석한다. 본 연구에서 사용한 Generalized 2-Dimensional Theory에 바탕을 둔 수식모델의 경우 기존의 수식모델이 가지는 몇몇 단점을 개선하여 보다 정밀도 높은 결과를 얻는 방법이다.

기존 수식모델에서는 판 두께, 압연 하중, 장력 등을 연계하여 계산할 뿐 폭 방향으로의 소재 거동은 무시한다. 냉간 압연의 경우 폭 변화가 미미하지만 판 가장자리에서의 거동을 살펴볼 때 폭 변화가 장력분포나 압연 압력분포 등에 많은 영향을 미치므로 폭 변화를 고려하여야 정확한 판 두께 분포를 계산할 수 있고, 따라서 edge drop도 정확히 예측할 수 있다. 또한 장력값도 폭 방향으로 분포를 예측할 수 있으므로 기존의 수식모델과는 차이가 있다.

컴퓨터 성능이 발전하기 이전인 초기 수식모델의 경우 압연하중을 계산할 때 임밀해를 사용하지 않고 Bland&Ford[5] 식이나 Sims[6] 식처럼 공정에 따라 근사화된 식을 사용하였다. 그러나 최근 컴퓨터 성능의 비약적인 발전에 따라 계산 속도가 현저히 빨라졌으므로 Generalized 2-Dimensional Theory에서는 근사식 대신 임밀해[7]를 사용하여 하중예측의 정밀도를 높였다.

### 2.2 모델 검증

사용된 수식 모델의 신뢰도를 검증하기 위하여 현장조업 결과와 계산값을 비교하였다. 압연기는 5개의 stand로 구성되어 있고, 1번부터 4번까지는 4 high mill이며 마지막 stand는 6 high mill이다. 1번과 2번 stand는

work roll shift가 가능하며, 특히 1번과 2번 stand의 work roll에는 edge drop을 개선하기 위하여 Fig.2-1과 같이 round가공이 되어 있다. 사용된 입력값은 setup값이 아니라 실제 측정된 값이며, 입력 판 프로파일의 경우 열연에서 측정된 프로파일을 이용하였다.

Fig.2-2에는 판 두께 분포의 측정값과 계산값을 비교하여 도시하였다. 계산에 사용된 현장 자료는 총 30가지 경우로 wedge가 5um 이하인 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 두께의 경우 최고 4  $\mu\text{m}$  이내 오차범위에서 예측할 수 있었으며, 압연하중의 경우 Fig.2-3에 도시한 바와 같이 최고 6%이내에서 예측할 수 있었다. 해석에 사용된 입력 판 두께 프로파일의 경우 열연에서 측정된 값을 Fig.2-4와 같이 근사화하여 사용하였다. Fig.2-5에는 work roll에 taper가 가공된 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 판 두께 프로파일을 비교한 것으로 work roll taper가 가공된 경우 edge drop이 현저히 줄어들었음을 알 수 있다.

## 3. 결과 및 검토

Edge drop에 비교적 많은 영향을 줄 것으로 예상되는 work roll 형상, work roll shift 양, 벤더력, 입측 판 크라운 등의 공정 변수들이 edge drop에 미치는 영향을 조사하였다.

먼저 edge drop에 미치는 work roll edge부 형상의 영향을 조사하기 위하여 현재 사용하고 있는 work roll taper를 기준으로 Fig.2-1의 h 값이 1/2배, 2배, 3배로 바뀌었을 경우에 대하여 edge drop의 변화를 비교하였다. 해석은 각각의 경우에 대하여 work roll shift양을 달리 하면서 수행하였다. Fig.3-1에서 보듯이 work roll taper 값 및 work roll shift 양 등이 edge drop에 많은 영향을 미쳤으며, 각각의 work roll taper 값에 따른 최적의 work roll shift 양에는 차이가 있음을 알 수 있다. 현재 사용하고 있는 work roll taper의 경우(Fig.3-1(b)) work roll shift 양이 60 ~ 80mm일때 edge drop결과가 최적인 것으로 예측되었다. 또한 work roll taper의 높이가 증가할수록 최적의 shift양은 감소하는 경향을 보이며, work roll shift에 따른 edge drop의 변화 민감도가 커짐을 알 수 있다.

벤더력이 edge drop에 미치는 영향을 조사하기 위하여 1번과 2번 stand의 벤더력을 변화시켜 계산하였다. Fig.3-2에 도시한 바와 같이 1번과 2번 stand의 벤더력이 edge drop에 미치는 영향은 없는 것으로 예측되었다.

입측 판 프로파일이 edge drop에 미치는 영향을 조사

하기 위하여 여타 조건은 동일하고, 입측 판 크라운이 10, 20, 30, 40  $\mu\text{m}$ 로 바뀔 경우에 대하여 냉연판 프로파일 변화를 조사하였다. Fig.3-3에 도시한 바와 같이 판edge로부터 약 80 mm지점에서 판중양까지는 열연 판 크라운의 변화가 냉연판 프로파일에 동일 비율로 영향을 미치고 있지만, 판edge부로부터 80mm까지는 열연 판 크라운과 관계없이 냉연의 작업조건에 따라서만 변화하였다. 즉 판 중앙부위는 열연에서 넘어온 판 크라운에 의존하므로 전체 폭방향 두께분포의 개선을 위하여는 냉연공정의 작업인자와 더불어 열연공정에서 결정되는 소재 크라운의 관리가 매우 중요함을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 Generalized 2-D Theory 에 바탕을 둔 수식모형을 이용하여 각종 공정 변수들이 edge drop 에 미치는 영향을 조사하였다. 실제 측정값과 결과를 비교하여 모델의 신뢰도를 검증하였다. Edge drop은 work roll의 형상 및 shift양에 따라 민감하게 영향을 받았고, 벤더력에 의해서는 상대적으로 적은 변화를 보였다. 또한 열연크라운에 따라 냉연 프로파일이 변하므로 이를 고려한 해석이 이루어져야 한다. 이상의 결과는 압연공정의 해석 및 설계에 매우 유용하리라 기대되며, 본 연구결과 및 해석 기법과 최적설계 이론을 연계하면 최적의 setup값을 설정할 수 있을 것으로 생각한다.

#### 참고 문헌

- [1] K. N. Shohet et al. Journal of the Iron and Steel Institute, pp. 1088~1098, 1968.
- [2] H. Matsumoto, ISIJ International, Vol. 31, No. 6, pp. 550~558, 1991.
- [3] H. Matsumoto et al. 塑性과 加工, vol. 37, No. 430, pp. 1162~1167, 1996.
- [4] H. Matsumoto et al. 塑性과 加工, vol. 37, No. 430, pp. 1168~1173, 1996.
- [5] D. R. Bland et al. Proceedings of Institute of Mechanical Engineers, pp.144~153, 1948.
- [6] R. B. Sims, Proc. of Inst. Mech. Eng., pp. 191, 1954.
- [7] E. Orowan, Proc. of Inst. Mech. Eng., pp. 140~167, 1943.

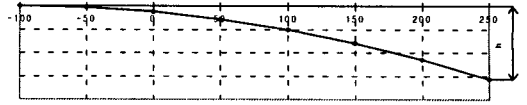


Fig. 2-1 Edge shape of #1, #2 stand work roll

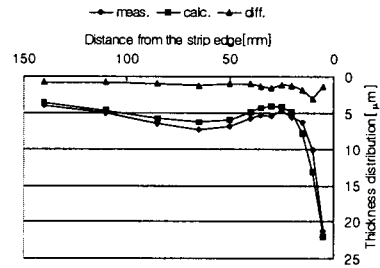


Fig. 2-2 Comparison of calculated and measured data

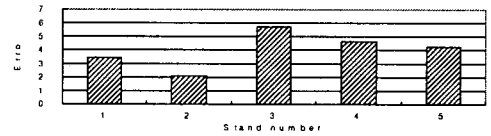


Fig. 2-3 Error of calculated and measured roll force

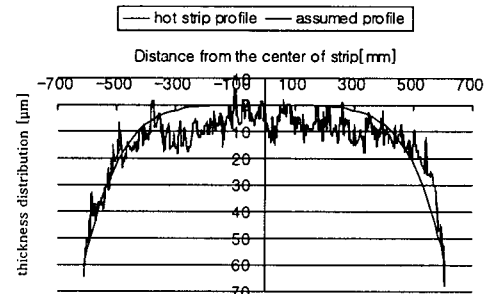


Fig. 2-4 Thickness profile of the hot coil

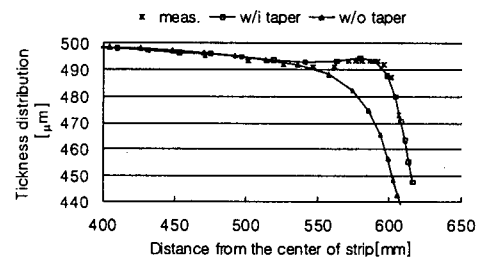


Fig. 2-5 Comparison of thickness profile with and without tapered roll

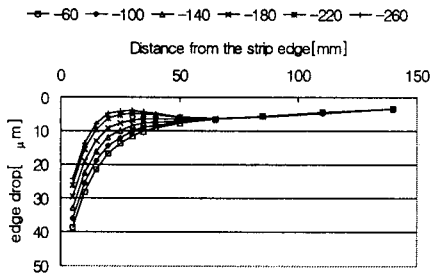


Fig. 3-1 (a) Edge drop with work roll shift and  $h=0.625 \times 0.5$

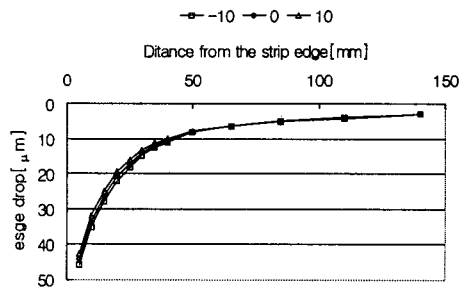


Fig. 3-2 Edge drop with bender force

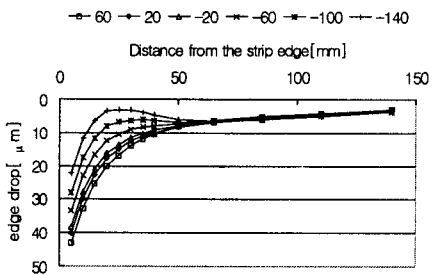


Fig. 3-1 (b) Edge drop with work roll shift and  $h=0.625$

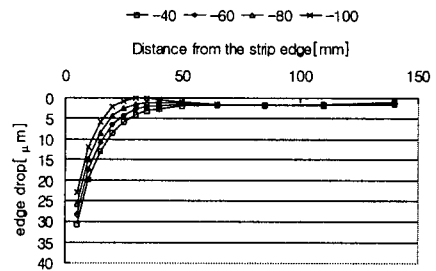


Fig. 3-3 (a) Edge drop with 10  $\mu m$  crown

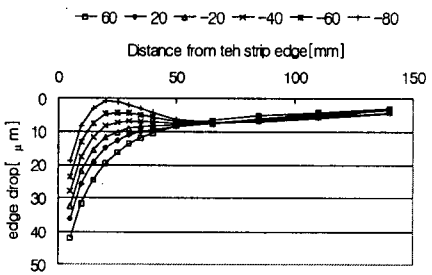


Fig. 3-1 (c) Edge drop with work roll shift and  $h=0.625 \times 2$

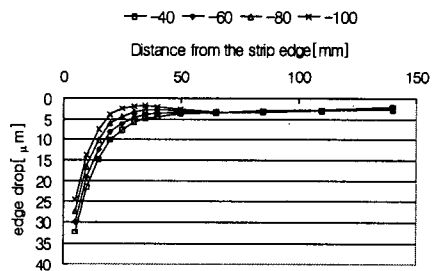


Fig. 3-3 (b) Edge drop with 20  $\mu m$  crown

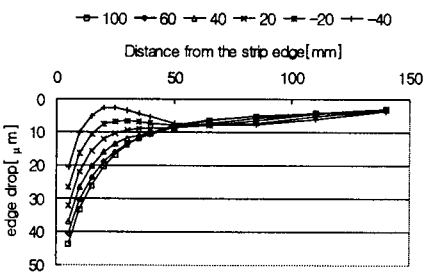


Fig. 3-1 (d) Edge drop with work roll shift and  $h=0.625 \times 3$

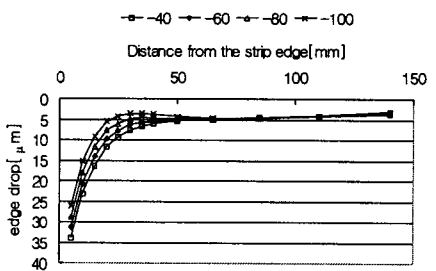


Fig. 3-3 (c) Edge drop with 30  $\mu m$  crown

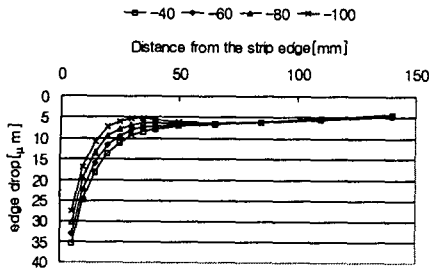


Fig. 3-3 (d) Edge drop with 40  $\mu m$  crown