

〈論 文〉

## 탠덤압연설비에서 테이퍼를 채용에 의한 냉연강판 에지드롭 개선

한석영\* · 이준정\*

(1993년 3월 27일 접수)

### Improvement of Edge Drop in Cold Rolled Steel by Tapered Work Roll in Tandem Cold Mill

S. Y. Han and J. J. Yi

**Key Words :** Edge Drop(에지드롭), Tapered Work Roll(테이퍼 작업롤), Incurved Work Roll(인커브 작업롤), Threading(통판성), Cold Rolling(냉간압연)

#### Abstract

In order to improve thickness profile of cold rolled steel strip, a computer simulation and actual cold rolling experiments on a 4-high tandem cold mill were carried out. In this study, tapered barrel end at top work roll and incurved barrel body at bottom work roll were examined for reducing edge drop and threading of strip. Also, the most effective stand of tandem cold mill and magnitude of optimal taper crown at several stand were investigated under a typical rolling condition. From actual rolling experiments, it was verified that thickness deviation over strip width could be improved up to 1.06% by applying tapered and incurved work roll only at the second stand and up to 0.89% by applying them at both the second and the third stand.

#### 1. 서 론

최근 강판의 2차 가공공정의 자동화가 진전됨에 따라 치수불량에 의한 가공불량이 매우 중요한 문제로 등장하게 되었으며, 가공 실수율을 높이려면 절단손실을 최소화시켜야 한다는 판단으로 냉연판의 품질수준에 대해 종전보다 엄격한 기준을 적용하고 있다. 즉, 두께품질의 경우 표준규격이 허용하는 공차( $\pm 5\%$ )보다 월등히 엄격한  $\pm 1\sim 2\%$  이내의 두께 허용공차를 요구하는 용도가 늘어가고 있다. 예를 들면, 변압기 등과 같이 강판을 적층하여 사용하는 경우, 음료수 캔을 D&I(drawing and

ironing) 방식으로 가공하는 경우, 전자제품의 외판과 같이 가공 자동화율이 높고 굽힘각도가 균일해야 하는 경우 등이 대표적인 경우이다.

강판을 압연함에 있어 압연길이방향의 두께 균일도는 자동두께제어(automatic gauge control) 기술의 발달로 박판의 경우 동일 코일내에서 통상  $\pm 1\%$  이내의 두께 적중률을 얻을 수 있기 때문에 크게 문제가 되지 않으나 폭방향으로의 두께 균일도는 최근까지도 그다지 큰 관심의 대상이 되지 못했던 까닭에 폭방향 두께제어기술은 아직도 정립된 수준에 있다고 할 수 없다.

폭방향 두께분포를 결정짓는 인자는 크게 두 가지인데 그 하나는 판 중앙부의 두께와 판단부 두께간의 차로 정의되는 판 크라운(strip crown)량이고 다른 하나는 판단 부근에서 두께가 급격히 감소하

\*정회원, 산업과학기술연구소

는 에지드롭(edge drop)량이다. 따라서 판폭 방향으로 균일한 두께분포를 가지려면 판크라운량이 적고 에지드롭량이 적어야 한다.

냉간압연의 경우 판두께에 비해 판폭의 크기가 매우 크기 때문에 압연중 강판의 소성변형은 2차원 편평변형 조건으로 가정될 수 있어 압연된 판의 판크라운량은 압연전 열연코일의 판크라운량에 비례하여 전이된다<sup>(1)</sup>고 할 수 있다. 반면에 에지드롭량은 작업롤(work roll)과 강판이 접촉한 부위에서 작업롤 표면에 발생하는 탄성변형, 즉 롤의 편평변형(flattening)이 발생한 부위와 판이 접촉하지 않아 편평변형이 발생하지 않은 부위의 경계영역에서 생기는 롤 표면단차량에 의해 결정되는 량<sup>(2)</sup>으로 냉간 압연조건과 압연기의 특성에 의해 결정되는 값이다.

따라서, 에지드롭량을 줄이는 방법은 작업롤의 편평변형량을 줄이는 방법으로 쉽게 생각할 수 있다. 즉, 강성이 큰 작업롤 재료를 사용하거나 작업롤 직경을 작게 하거나 단위 압하량을 적게 하는 등의 방법이 고려될 수 있다. 그러나, 이들 방법들은 설비적 조건이나 통상의 재료조건 및 작업조건에 비해서 큰 변화를 줄 수 없는 제한성을 가진다.

다음으로 에지드롭량을 줄이는 방법으로 롤 표면에 단차가 발생하는 부위를 미리 반대방향으로 단차를 주는 방법을 생각할 수 있다. 즉, 에지드롭

발생이 예견되는 위치로부터 작업롤 동체(barrel) 양단부 방향으로 롤경이 점차 줄어들도록 롤 표면에 경사를 미리 주어 롤을 연마해 주면 롤 편평변형에 기인된 단차가 흡수될 수 있다. 이렇게 작업롤 동체의 양단부를 경사 연마한 롤을 테이퍼롤(tapered work roll)이라 부른다.

테이퍼롤을 활용하여 에지드롭을 감소시키는 방법은 이미 저자들에 의해서 가역식 압연기를 대상으로 그 효과를 확인한 바<sup>(3)</sup> 있다. 본 연구에서는 탠덤압연기와 같이 4, 5 대의 압연기에 연속통과하여 압연하는 조건에서 일부 스탠드에만 테이퍼롤을 채용하는 경우, 어느 스탠드에 적용하는 것이 에지드롭 감소에 가장 효율적인지, 그리고 안정된 작업조건을 확보하기 위한 테이퍼롤의 형태와 적용 스탠드별로 적합한 테이퍼의 크기 결정에 관점을 두고 조사하였으며 그 순수한 효과만을 도출하기 위하여 벤더(bender)를 채용하지 않은 4단 압연기로 구성된 탠덤압연설비를 시험대상으로 하였다.

## 2. 4단 압연기의 형상해석 모델

현재 판 압연에서 가장 기본적으로 이용되고 있는 4단 압연기를 대상으로 형상해석법을 기술하면 압연재의 형상(두께 프로파일)에 영향을 주는 변형은 Fig. 1에 보이는 것과 같이 다음 4가지의 변형

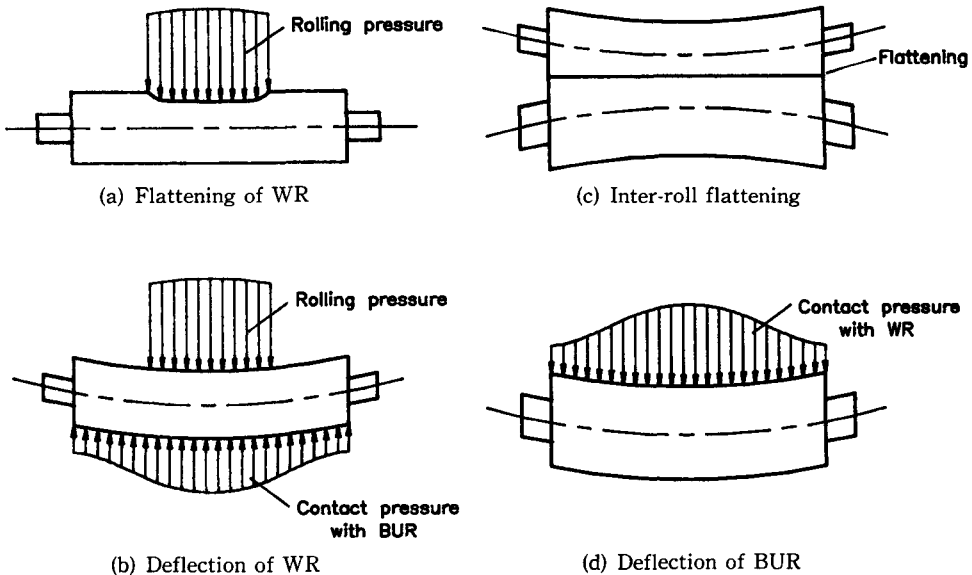


Fig. 1 Elastic deformation of rolls in 4-hi mill

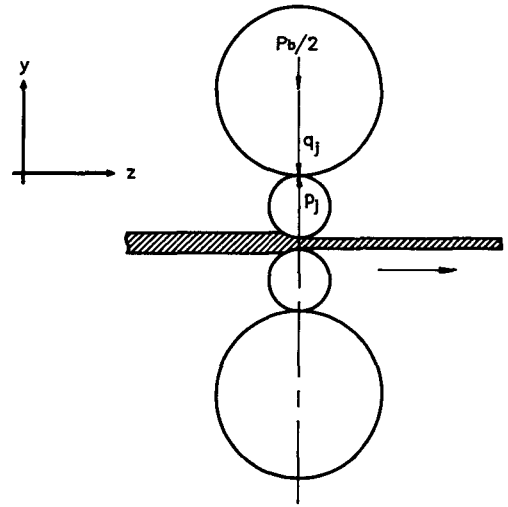
으로 나누어 생각할 수 있다.

- (a) 압연재와의 접촉에 의한 작업롤의 편평변형
- (b) 작업롤의 축심 휨
- (c) 작업롤과 보조롤 접촉부의 편평변형
- (d) 보조롤의 축심 휨

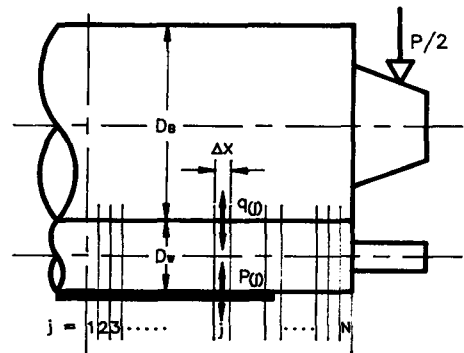
위의 (a)와 (b)는 압연재의 형상을 구하는데 이용되며, (c)와 (d)는 (b)를 구하기 위한 변형이라 할 수 있다. 이들의 편평변형과 축심 휨과 더불어 압연하중, 작업롤과 보조롤간의 접촉하중, 작업롤과 보조롤간의 상대 강체변위들을 구하기 위한 힘의 평형방정식과 작업롤과 보조롤간, 그리고 작업롤과 압연재간의 변위 적합조건식을 이용하여 판재의 형상이 결정되는데 6단 압연기나 젠지미어(sendzimir) 압연기와 같은 다단롤로 구성된 압연기의 경우에도 이들을 응용하여 판의 형상을 구할 수 있다.<sup>(4)</sup>

일반 4단 및 6단 냉간 압연기의 형상해석, 즉 압연재 폭방향 판 형상을 구하기 위한 계산방법에 관한 연구로는 M. D Stone<sup>(5)</sup>의 경우는 보조롤을 탄성 베이스(base)로 놓아 이 위에 탄성보(beam : 작업롤)를 가상한 역학 모델을 이용하여 벤더의 효과를 분석하였으며, 鹽岐<sup>(6)</sup>는 4단 압연기 전체를 하나의 역학적 모델로 놓아 작업롤 및 보조롤에 공통인 식을 유도하였다.

그러나 이같은 방법들은 작업롤에 주어지는 초기 크라운, 열 크라운 및 마모의 변화에 대응한 압연재 형상 예측이 곤란한 단점이 있어, 이를 해결하기 위해 롤동체를 작은 영역으로 분할한 분할 모델이 Shohet,<sup>(7)</sup> 戶澤<sup>(8)</sup> 등에 의해 시도되어 양호한 결과를 얻고 있다. 이들이 소개한 분할모델을 이용한 해석에서는 작업롤과 보조롤 사이를 일정 상수를 갖는 스프링으로 보아 상대적인 롤의 축심 변형 및 상호 강성계수의 크기에 따라 접촉하중이 결정되는데 이때 사용되는 스프링 정수에 대한 해석<sup>(4)</sup>은 Foppl 및 Tsu-Tao Loo 등에 의해 행하여졌다. 한편 압연재 및 작업롤간의 접촉하중에 의한 축심 휨은 롤을 양단지지보로 보아 단위 하중에 대한 영향계수의 식을 이용하여 구하고 작업롤과 압연재의 접촉에 의한 작업롤의 편평변형량의 계산<sup>(4)</sup>은 작업롤을 반 무한체로 가상하여 그 경계면 일부에 작용하는 분포하중에 의한 탄성학의 식을 응용하여 구하고 있다. 본 연구에서는 Shohet과 戶澤 등에 의해 제안된 분할모델을 채택하였으며 위에 기술한 방법에 의하여 형상해석을 수행하였다.



(a) Roll combinations of 4-hi mill



(b) Division model for a roll

Fig. 2 Analytic model for elastic deformation of rolls

먼저, 해석대상인 4단 압연기의 구성은 Fig. 2(a)와 같으며 다음의 가정을 기초로 하여 해석하였다.

- ① 좌우대칭
- ② 롤의 분할모델 (Fig. 2(b))
- ③ 보조롤의 강체변형은 무시
- ④ 판 두께에 따른 장력의 영향 무시

### 2.1 힘의 평형방정식

Fig. 2(a)에서 힘의 평형방정식을 유도하면 다음과 같다.

○ 작업롤의 y방향

$$\sum_{j=1}^N b_j \cdot \Delta x_j = \sum_{j=1}^N q_j \cdot \Delta x_j \quad (1)$$

○ 보조롤의  $y$ 방향

$$\sum_{j=1}^N q_j \cdot \Delta x_j = \frac{P_b}{2} \quad (2)$$

여기서,

$N$ : 분할수

$p$ : 압연재와 작업롤간 압연압력

$q$ : 작업롤과 보조롤간 접촉압력

$P_b$ : 보조롤의 압하력

아래첨자  $j$ : 분할요소번호

### 2.2 롤 중심변위식

○ 작업롤의  $y$ 방향

$$Y_{wy}(i) = \sum_{j=1}^N A_{ij} \cdot p_j \cdot \Delta x_j - \sum_{j=1}^N A_{ij} \cdot p_j \cdot \Delta x_j + L_{bw} \quad (3)$$

○ 보조롤의  $y$ 방향

$$Y_{by}(i) = \sum_{j=1}^N A_{ij} \cdot p_j \cdot \Delta x_j \quad (4)$$

여기서,

$A_{ij}$ : 중심 휨 영향계수

$L_{bw}$ : 작업롤과 보조롤 간의 강체변위

$\Delta x_j$ :  $j$ 분할요소의 분할거리

아래첨자  $i, j$ : 분할요소번호

### 2.3 변위 적합조건식

작업롤 및 보조롤간의 변위 적합조건식은 각각의 분할요소에 대하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{by}(i) - Y_{wy}(i) + q(i)/K_s = -[R_{cw}(i) + R_{cb}(i)]/2 \quad (5)$$

여기서,

$K_s$ : 롤간 접촉에 의한 스프링상수

$R_{cw}$ : 작업롤의 크라운

$R_{cb}$ : 보조롤의 크라운

한편, 압연재의 출측두께에 직접적인 영향을 미치는 작업롤과 압연재 사이의 접촉점(즉,  $i$  분할요소)에서의 변위 적합조건식은 다음과 같다.

$$Y_{ws}(i) = Y_{wy}(i) + d(i) + R_{cw}(i)/2 \quad (6)$$

여기서,

$Y_{ws}(i)$ : 작업롤과 압연재의 접촉점에서의 변위

$d(i)$ : 작업롤과 압연재간의 편평변형량

## 3. 연구방법

### 3.1 소재의 변형저항 측정

실험대상 소재로는 전기강판을 선정하였으며 이의 변형저항을 측정하기 위해서 본 연구에서는 압연인장법을 사용하였다. 먼저 압연소재인 열연코일을 채취하여 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90%의 압하율까지 2단 냉간 압연기를 이용하여 압연한 후 각각의 압하율별로 3~4개의 ASTM 표준인장시험편을 가공하여 정적인 상태(strain rate <math>10^{-3}</math>/sec)에서 인장시험에 의해 각 압하율에서의 항복응력을 구하였다. 이 항복응력 값은 단순인장에 의한 값이기 때문에 실제 압연상태와 유사한 평면변형을 고려하여 측정치에 1.15배하여 정적 구속 변형저항값으로 결정하였다.

### 3.2 압연조건 및 작업롤의 열 크라운 측정

냉간, 압연 작업에 따라 압연재의 소성변형에 의해 발생하는 가공발열 및 압연재와 작업롤 사이의 마찰력에 의한 마찰발열, 그리고 압연유(coolant)에 의한 열손실 등의 결과로 작업롤에 형성되는 열 크라운은 다음과 같은 롤갭(roll gap) 측정방법을 이용하여 측정되었다.

열 크라운의 측정재료로는 아주 작은 압하력으로 소성변형되기 쉬운 직경 10 mm의 납봉을 사용하였으며 납봉들을 고정하기 위한 지지대로는 3 mm 두께의 구멍이 있는 조립식 앵글을 사용하였다. 측정치구는 Fig. 3과 같이 폭 350 mm 간격으로 배치한 후 양측에 지지대를 구성시키고, 길이는 롤 동체를 충분히 측정할 수 있도록 하였다.

측정방법은 먼저 전 스탠드에 걸쳐 상·하부의 작업롤을 교체한 후 측정기구를 각 스탠드의 상·

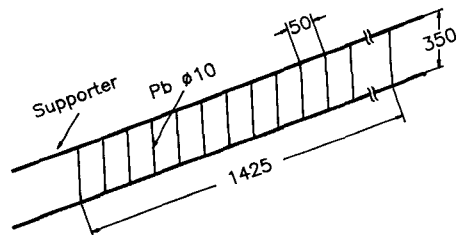


Fig. 3 The measurement apparatus of WR thermal crown(unit : mm)

**Table 1** Rolling condition for measuring thermal crown

Mill type	4-Hi mill
BUR dia.	#1 1360 mm #2 1385 mm #3 1425 mm #4 1325 mm
WR dia.	#1 550 mm #2 553 mm #4 525 mm #4 559 mm
Pass Schedule	18% → 34% → 29% → 25% → 23%
WR crown	5/100 mm(#1, #2), 8/100 mm(#3, #4)
Strip width	945 mm
Barrel length	1425 mm

하 작업롤 사이에 넣고 롤갭을 5 mm까지 압하시킨다. 그리하면 폭방향의 롤갭을 따라 납봉에 압흔이 남게 되고 이 두께를 마이크로미터를 이용하여 측정 후 폭방향 납봉의 두께차이를 중앙부를 기준으로 한 상대두께로 환산하면 그 값이 작업롤 직경당의 초기 크라운 값이 된다. 이와 같은 방법으로 전 스탠드에 걸쳐 작업롤 직경당의 초기 크라운 값을 측정한다.

다음에는 압연을 해가면서 시간별 또는 압연톤수에 따라 열 크라운을 측정하는 것이 필요하나 실제 조업상 전 라인이 자동연속으로 압연되므로 조업 중에 열 크라운의 측정은 불가능하고 후에 이론적인 계산으로 중간상태의 열 크라운의 추정이 가능하므로 열 크라운이 포화상태에 이르기에 충분한 코일을 압연한 후 열 크라운을 측정하였다. 측정방법은 위에 기술한 방법과 같으며 압연이 끝난 직후 측정된 납봉두께에서 초기 크라운 측정시의 두께를 롤 에지부를 기준으로 빼면 압연 후의 열 크라운을 얻게 된다. 이 경우 롤의 프로파일에는 압연 중 압연재와 작업롤간의 마찰에 의한 마모의 영향이 포함될 수 있으나 열연에서와 같은 큰 마모량을 기대할 수가 없기 때문에 마모의 영향은 무시하였고 측정조건은 Table 1과 같다.

### 3.3 테이퍼롤의 적용 스탠드 결정

컴퓨터 시뮬레이션에 앞서 테이퍼롤을 적용할 경우 어느 스탠드에 적용시키는 것이 가장 효율적인가를<sup>(9,10)</sup> 검토할 필요가 있다. 현재 4단 압연기에서 작업롤의 측방향 이동(work roll shifting) 기능

을 갖춘 압연기가 개발되어 판폭의 변화에 따라 작업롤의 이동량을 각 스탠드별로 변화시켜 적절한 형상의 강판을 압연할 수 있게 되었다. 만일, 압연재의 폭이 일정하거나 폭의 차이가 거의 없는 경우에는 이러한 작업롤 이동 기능을 갖춘 압연기의 한 가지 폭의 경우에 해당된다고 볼 수 있다.

Ozaki 등<sup>(9)</sup>은 작업롤 이동기능을 갖춘 실험용 가역식 압연기와 네개의 스탠드로 구성된 탠덤압연기에서 에지드롭을 개선시키기 위한 연구를 수행하였는데 탠덤압연기의 경우 에지드롭의 개선효과를 극대화하기 위해서는 첫째, 둘째, 셋째 스탠드 모두에 테이퍼롤을 적용하여야 하고 만일 한 개의 스탠드에만 적용한다면 가장 판두께가 두꺼울 때 즉, 최전단 스탠드인 첫번째 스탠드에 적용할 때 가장 큰 효과를 얻을 수 있음을 발표하였다. 그러나, 발표된 결과들의 압연조건들이 공정조건들에 따라 상이하기 때문에 본 연구의 실험대상인 탠덤압연기에서도 첫번째 스탠드에 적용하는 경우가 가장 효율적인지에 대해서는 검토해 볼 필요가 있다. 그 이유는 두번째 스탠드에서의 압하량이 첫번째 스탠드의 압하량보다 훨씬 크고, 벤더를 채용하지 않았기 때문에 첫번째 스탠드에서 개선된 프로파일의 후단에서의 에지드롭 발생으로 인하여 그 효과가 감소될 가능성이 다분히 있기 때문이다. 따라서 동일한 테이퍼 크라운으로 가공한 작업롤을 이용하여 예비실험을 수행한 결과 첫번째보다는 두번째와 세번째 스탠드에 적용하는 것이 효과적임을 확인하였으므로 본 연구에서는 두번째와 세번째 스탠드를 대상으로 하였다.

### 3.4 테이퍼롤의 형태 결정

작업롤 형태의 결정은 통판성과 생산성을 고려하여, 처음 판이 통판될 때 판과 롤의 접촉면적이 넓을수록 통판성이 양호하다는 점과 고속 압연중에 판폭방향에 걸리는 장력분포가 판의 중심부분에 크게 분포하고 판단부에 장력이 되도록 작게 걸려야 판단부의 우려가 감소되어 생산성이 양호하다는 판단으로 상부에는 테이퍼롤을 그리고 하부에는 인커브롤(incurved work roll)의 채용<sup>(11)</sup> 가능성을 현장 설비를 이용하여 검토하였다. 그 결과 상하부에 테이퍼롤을 사용하는 경우보다 하부에 인커브롤을 채용하면 동일한 테이퍼량을 줄 때 실험대상설비에서는 훨씬 안정된 통판이 가능함을 확인하였다. 따라서, 본 연구에서는 하부 작업롤에 인커브롤을 채용

하였다.

3.5 컴퓨터 시뮬레이션

상하부에 모두 테이퍼롤을 채용하는 경우에는 압연되는 조건이 상하부 대칭, 그리고 좌우대칭이 되므로 좌 또는 우측의 상부 또는 하부만 해석을 하면 압연재의 형상을 계산하는 데 충분하다. 이 경우에는 힘의 평형방정식(3)과 변위 적합조건식(5)로부터 방정식의 수는  $N+1$ 개가 되고 미지수는 테이퍼롤과 보조롤간의 접촉압력  $q(1) - q(N)$ 의  $N$ 개와 강체변위  $L_{bw}$  1개 등  $N+1$ 개가 되어 1차원 다원 연립방정식으로부터 작업롤과 보조롤간의 접촉압력  $q(i)$ 를 구할 수 있다. 계산하는 과정에서

작업롤과 보조롤간의 접촉압력이 음의 값이 나오는 경우가 있는데 이 경우는 두 롤이 서로 접촉하지 않는 경우를 의미하는 것으로 이때는 음의 값 대신 그 부분에서의 접촉압력 값을 영(zero)으로 하고 다시 매트릭스(matrix)를 풀어 접촉압력을 구할 수 있다.

상하부에 다른 형태의 롤을 적용하는 경우에는 좌우만이 대칭이 되므로 상부와 하부에 대하여 계산을 하여야 하며 그 과정은 위와 비슷하나 수렴시키는 과정이 상부와 하부의 두 가지를 모두 만족해야 된다는 점이 다르다. 즉, 상하부 대칭인 경우는 상부의 모든 조건만 만족시키면 되지만 대칭이 아닌 경우는 상부는 상부의 평형조건식과 변형 적합

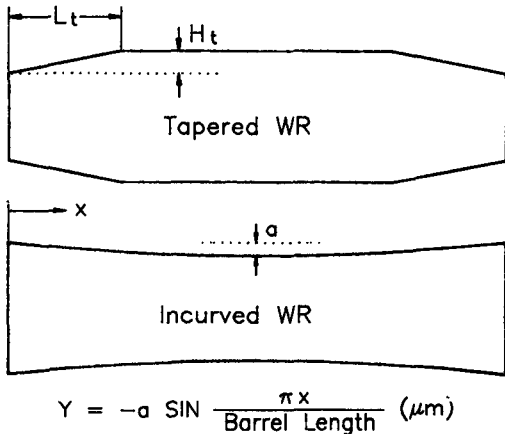


Fig. 4 Definitions of tapered WR and incurved WR

Table 2 Conditions of calculation

Mill type	4-Hi mill
Roll barrel length	1425 mm
Back up roll dia.	1320 mm
Strip width	945 mm
Young's modulus	21,000 kg/mm <sup>2</sup> (WR, BUR)
Poisson ratio	0.3
Roll initial crown	5/100, 8/100(mm)
Roll taper width	345 mm
Roll taper	100~550 μm
Materials	Electrical steel
Tension	2~22 kg/mm <sup>2</sup>

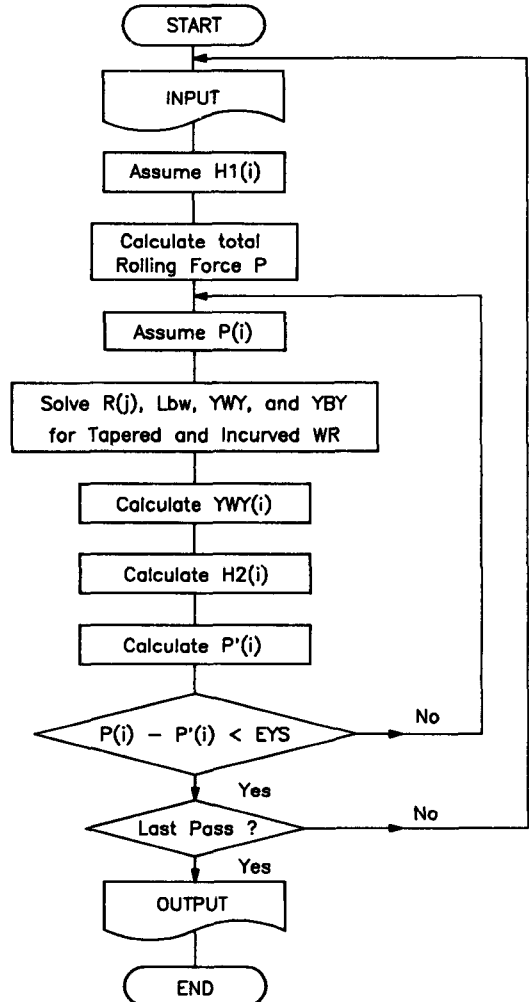


Fig. 5 Flow chart for calculation of strip profile

조건식을 만족시켜야 하고, 하부는 하부의 평형조건식과 변형 적합조건식을 만족시켜야 하며, 전체적으로도 압연하중이 수렴되는 조건을 찾아야 한다. 따라서 대칭인 경우에 수행하는 과정을 상부와 하부에 대하여 각각 수행하는 점이 다르며 압연하중을 수렴시키는 방법은 대칭인 경우와 동일하다.

압연소재 두께는 측정된 열연코일의 프로파일을 입력하고 첫번째 스탠드에서 압연된 판의 폭방향 두께 프로파일을 계산한 후 계산된 출측두께의 프로파일이 다음 스탠드의 입측 프로파일로 입력되도록 하였으며, 계산시 압연재의 두께는 중앙부를 기준으로 하여 폭방향으로 굽힘, 편평변형량 등의 상대적인 변위를 계산하여 중앙부에서는 항상 목표두께를 유지할 수 있도록 하였다.

계산에서 사용한 테이퍼량의 정의는 Fig. 4와 같이 테이퍼의 길이를  $L_t$ (mm)로, 테이퍼의 크기를  $H_t$ ( $\mu\text{m}$ )로 정의하였으며 테이퍼를 제외한 동체 부위는 초기 크라운을 영(flat)으로 주었다. 또한 인커브롤에 대한 크라운은 통관성과 압연시의 장력분포를 고려하여 음의 값(minus)을 주었는데 그 식은 중앙부에서의 크라운을  $a$ 라고 할 때  $Y = -a\{\sin(\pi x/\text{barrel length})\} \mu\text{m}$ 이다.

탠덤압연기의 실험결과를 토대로 하여 테이퍼롤은 두번째와 세번째 스탠드에만 적용하는 것으로 결정하였으며 시뮬레이션을 수행한 계산조건을 Table 2에, 그리고 계산순서도(flow chart)를 Fig. 5에 보인다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 소재의 변형특성

압하율에 따라 측정된 압연소재(0.35-0.45% Si)에 대한 변형저항식은 다음과 같은 회귀식으로 구성하여 4단 압연기를 탄성변형해석의 압연하중 계산시 사용되었으며 변형저항은 압하율의 증가에 따라 지수적으로 증가함을 알 수 있었다.

$$Y_p (\text{Kgf/mm}^2) = 28.695(1.599 + E)^{0.231}$$

여기서,  $Y_p$ 는 항복응력,  $E$ 는 압하율(%)이다.

### 4.2 컴퓨터 시뮬레이션 결과해석

시뮬레이션은 실험대상 강종에 대하여 두번째와 세번째 스탠드의 최적 테이퍼 크라운과 인커브 크라운을 계산하기 위하여 수행되었다.

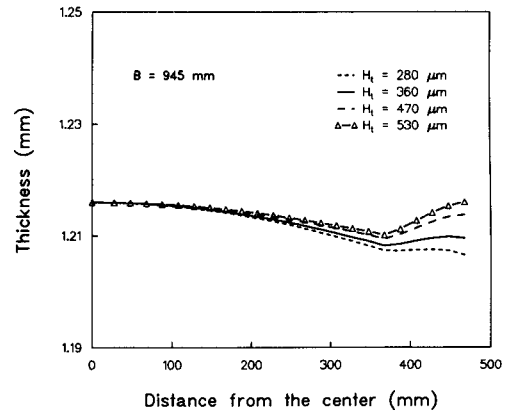


Fig. 6 Effect of tapered crown for electrical steel at #2 stand

Fig. 6은 폭 945 mm의 강판을 압연할 때 두번째 스탠드에서의 상부 테이퍼롤의 적정 크라운의 크기를 계산한 결과이다. 테이퍼 길이는 탠덤압연기에서의 초기 크라운을 가진 작업롤을 적용할 경우 두께가 급하게 감소하기 시작하는 영역이 판단부로부터 100 mm 지점 부근이라는 결과로부터 판의 걸침 길이를 100 mm로 결정할 수 있으나 테이퍼의 경사는 얼마로 함이 최적인지를 결정하기 위하여 본 연구에서는  $L_t = 340$  mm로 하고  $H_t$ 를 100  $\mu\text{m}$  부터 600  $\mu\text{m}$ 까지 변화시키면서 중앙부와 판단부의 두께 편차가 가장 적게되는 조건을 구하였다. 그 이유는 판단부의 두께가 판 중앙부의 두께보다 두꺼워지면 판에 걸리는 장력이 판단부에 과다하게 걸리게 되어 판파단의 우려가 있기 때문이다. 이 그림으로부터  $H_t$ 가 커질수록 판단부의 두께가 두꺼워지고 작아질수록 판단부의 두께가 얇아지는 것을 알 수 있었으며 두번째 스탠드의 적정 크라운은  $H_t = 530 \mu\text{m}$ 로 계산되었다. 이 경우의 하부 인커브롤의 크라운은  $a = 40 \mu\text{m}$ 를 사용하였으며 정확한 수식은  $Y = -40\{\sin(\pi x/\text{barrel length})\} \mu\text{m}$ 이다. 여기서  $x$ 는 작업롤 동체 끝부분에서부터의 거리를 나타낸다.

한편, Fig. 7에는 두번째 스탠드에서의 위와 동일한 조건에서 인커브롤의 크라운을 변화시키는 경우 판 프로파일의 변화를 계산한 결과를 보인다. 테이퍼 크라운은  $H_t = 530 \mu\text{m}$ 를 이용하였으며 인커브 크라운을  $a = 30$ 부터  $a = 50$ 까지 변화시키면서 판 프로파일의 변화를 계산해 보았다. 그 결과  $a$ 의 절대값이 커질수록 판 에지업 효과는 약해지고

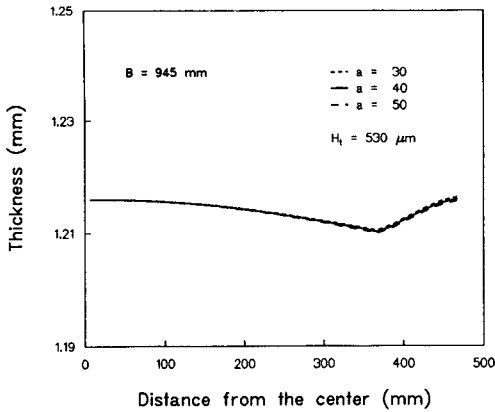


Fig. 7 Effect of incurred crown for electrical steel at #2 stand

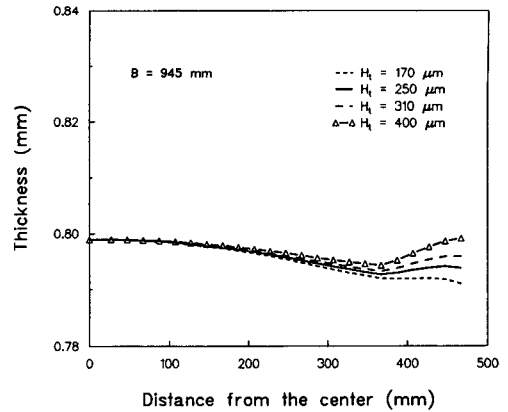


Fig. 8 Effect of tapered crown for electrical steel at #3 stand

$a$ 의 절대값이 작아질수록 판 에지업 효과는 커지는 것을 미약하나마 볼 수 있었다. 그러나,  $a$ 값과 적정 테이퍼의 크기는 테이퍼 크기가 커지면  $a$ 의 값도 커지고 테이퍼 크기가 작아지면  $a$ 의 값도 작아질 때 동등한 효과를 보이는 상관관계에 있고 그 효과 역시 미약하였으므로  $a$ 값의 적정치를 결정할 수는 없지만 탠덤압연기를 이용하여 통관성과 생산성을 검토한 시험결과 고속인 1400 mpm 압연시에도 작업성 등에 문제점이 없음을 확인하여 인커브롤의 적정 크라운은  $a=40 \mu\text{m}$ 으로 판단하였다.

Fig. 8에는 폭 945 mm의 소재강판을 압연할 때 세번째 스탠드에서의 상부 테이퍼롤의 적정 크라운의 크기를 계산한 결과를 보이고 있다. 판 프로파일의 경향은 두번째 스탠드에서의 결과와 동일하였으나 테이퍼 크라운의 크기의 효과는 두번째 스탠드에 비해 크다는 것을 확인할 수 있었다. 이 그림에서는  $H_t$ 가 170  $\mu\text{m}$ 일 때는 에지드롭이 발생하고 있으며  $H_t$ 가 250  $\mu\text{m}$ 에서는 에지업이 아주 미약하게 발생하고 있고  $H_t$ 가 310  $\mu\text{m}$ 에서는 에지업이 약간 발생한 것을 알 수 있다. 세번째 스탠드의 경우 중앙부의 두께와 판단부의 두께가 일치하는 테이퍼 크라운은  $H_t=400 \mu\text{m}$ 로 계산되었다.

4.3 압연실험결과 해석

열연강판의 판 크라운 편차에 의한 두께편차 발생요인을 배제하기 위하여 소재의 판 크라운이  $30 \pm 5 \mu\text{m}$ 인 코일만을 선택하여 10코일씩 압연하였다. 기존의 초기 크라운을 부여한 작업물을 사용하여 시험조건과 같이 압연할 경우에는 소재 판 크라

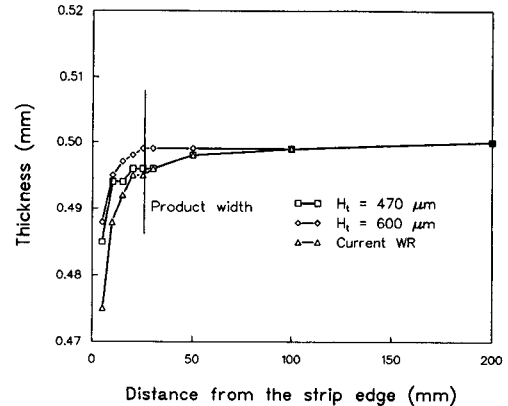


Fig. 9 The profile comparison between tapered WR applied at #2 stand only and current WR at all stands

운 크기의 약 20% 정도가 압연된 후에도 두께편차에 영향을 주는 것<sup>(1)</sup>으로 알려져 있다.

Fig. 9에는 두번째 스탠드에 상부 작업물에는  $L_t=340 \text{ mm}$ ,  $H_t=470 \mu\text{m}$ 과  $H_t=600 \mu\text{m}$ 를, 하부 인커브롤에는  $Y=-40 \sin(\pi x/1425) \mu\text{m}$ 의 작업물을 적용한 경우의 판 형상과 기존 롤을 사용할 경우의 판 형상의 비교를 나타내었다. 이 시험은 두번째 스탠드의 적정 테이퍼롤 크라운의 범위를 검토하기 위한 것이다. 이 시험결과로부터  $H_t=470 \mu\text{m}$  경우의 두께편차는 1.06%로 기존의 1.32%에 비해 상당한 감소를 보여주었으며,  $H_t=600 \mu\text{m}$ 인 경우도 0.73%로 매우 양호한 결과를 주었으나 압연속도가 증가함에 따라 작업성이 나빠 속도를 감



속해야만 했다. 따라서 생산성면에서 크라운량이 다소 과다하다고 판단되었다. 이 경우 적정 크라운의 크기는 470과 600  $\mu\text{m}$ 의 중간값으로 결정되어야 함을 알 수 있었다. 이 결과로 탠덤압연기의 전단 스탠드에 테이퍼롤을 채용하여 에지드롭을 개선하기 위해서는 테이퍼롤을 사용하여 전단 스탠드에서 압연판에 충분한 에지업을 발생시켜 후단 스탠드에서 에지드롭을 감소시킬 수 있다<sup>(2)</sup>는 것을 알 수 있다. 따라서, 어느 정도 에지업이 발생하는 조건이 최종적으로 에지드롭을 감소시키는 효과가 가장 좋은지를 판단하는 것이 중요하다. 이 결과를 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 비교해 보면,  $H_t$ 가 360  $\mu\text{m}$  이하에서는 에지드롭의 향상이 미약하였으며 470  $\mu\text{m}$ 일 때 상당한 효과가 나타난 것은 Fig. 6에서 280  $\mu\text{m}$ 의 경우에는 에지드롭현상이 일어나고 있으며, 360  $\mu\text{m}$ 의 경우에는 에지업현상이 미약하고 470  $\mu\text{m}$ 의 경우에서 에지업이 상당히 발생하였기 때문으로 생각된다.

Fig. 10에는 두번째 스탠드에  $L_t=340\text{ mm}$ ,  $H_t=470\text{ }\mu\text{m}$ 를, 그리고 세번째 스탠드에  $L_t=340\text{ mm}$ ,  $H_t=310\text{ }\mu\text{m}$ 의 테이퍼롤을 적용하고 양 스탠드 하부에는  $Y=-40\sin(\pi x/1425)\text{ }\mu\text{m}$ 의 인커브롤을 적용한 경우와 기존 롤을 사용한 경우의 판형상의 비교를 나타내었다. 이 경우의 두께편차는 0.89%로 기존의 1.22%에 비해 상당히 감소하였으며 고속인 1400 mpm에서의 통관성도 양호하였다. 위의 두 실험결과로부터 두번째 스탠드와 세번째 스탠드에 테이퍼롤과 인커브롤을 동시에 적용하는

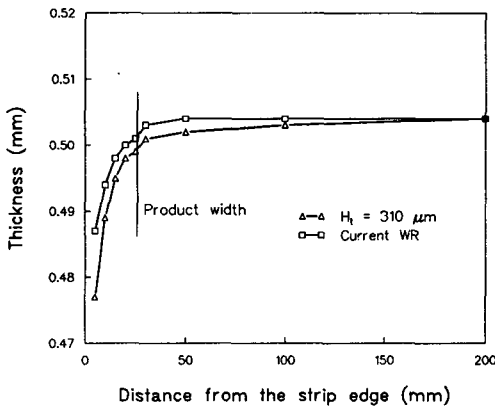


Fig. 10 The profile comparison between tapered WR at both #2 and #3 stand, and current WR at all stands

경우가 에지드롭 감소에 보다 효과적임을 알 수 있었다. 이 결과를 시뮬레이션 결과와 비교해 보면 Fig. 8에서  $H_t$ 가 310  $\mu\text{m}$ 에서 에지업이 약간 발생되어 있는 것으로부터 에지드롭이 다소 개선될 수 있음을 알 수 있으며 따라서, 세번째 스탠드에서의 적정 크라운의 크기는 310  $\mu\text{m}$  보다 다소 클 것으로 예상된다.

## 5. 결 론

탠덤압연시 발생하는 에지드롭을 감소시켜 판 폭 방향 두께편차량을 줄이고자 작업롤에 테이퍼롤을 채용하였으며 테이퍼롤 채용 스탠드 및 테이퍼량에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 및 실기 압연실험을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 탠덤압연시 발생하는 강판의 에지드롭을 감소시키기 위해 일부의 전단 스탠드에 테이퍼롤을 채용하여 판단부에 에지업 프로파일링을 형성시켜 주는 방법이 효과적이며, 이 경우 통관성을 고려하여 하부에는 인커브롤을 채용함이 좋다.

(2) 탠덤압연설비에서 일부의 스탠드에 테이퍼롤을 채용할 경우에는 두번째와 세번째 스탠드에 적용하거나 압하량이 큰 두번째 스탠드에 적용함이 효과적이다.

(3) 탠덤압연설비에서 테이퍼롤을 두번째 스탠드에만 채용할 경우에는 1.06%, 두번째와 세번째 스탠드에 채용할 경우에는 0.89%까지 두께편차를 향상시킬 수 있었다.

(4) 전단 스탠드에만 테이퍼롤을 채용하고 벤더를 사용하지 않는 경우에 적정 테이퍼량은 테이퍼롤 채용 효과로 형성된 에지업 즉, 판단부 두께가 판 폭 중앙부 두께와 같아지는 효과를 갖게 하는 정도의 테이퍼량이다.

## 참고문헌

- (1) 北村邦雄, 1984, "규소강판의 Taper불이 WR 압연에 의한 Edge Drop 개선," 철과강, Vol. 70, A60, pp. 1~2.
- (2) 鈴木 弘, 1990, "壓延百話(26)," 기계의 연구, 제42권, 제2호, pp. 81~86.
- (3) 한석영, 김종택, 이영호, 이준정, 김종근, 1990, "워크롤 타입변화에 의한 전기강판 폭방향 Profile 개선," 대한기계학회논문집, Vol. 14,

- No. 4, pp. 830~838.
- (4) 일본철강협회, 1983, “판 압연의 이론과 실제,” pp. 89~95.
- (5) Stone, M. D., 1953, “Rolling of Thin Strip,” AISE Year Book, pp. 15~128.
- (6)鹽岐 行, 1968, “4단 압연기의 Roll Bending의 해석,” 소성과 가공, Vol. 9, No. 88, pp. 315~323.
- (7) Shohet, K. A., and Boyce, M. F., 1968, “Static Model Teats of Roll Bending Methods of Crown Control,” The Iron and Steel Institute, Vol. 206, pp. 1099~1102.
- (8) 戸澤, 1970, “Roll의 변형과 압력분포에 미치는 Roll Crown의 영향,” 소성과 가공, Vol. 11, No. 108, p. 29.
- (9) Daisuke Ozaki., 1990, “A Technology for Minimizing the Feather Edge in Cold Rolling by Utilization of Work Roll Shifting Mil,” 5th International Rolling Conference, London, UK, Sep 11~13, pp. 270~277.
- (10) 鈴木 弘, 1990, “壓延百話(26),” 기계의 연구, 제42권, 제3호, pp. 77~84.
- (11) 四本 松 雅彦, 1992, “Edge Drop Reduction of Cold Strip Sheet with Tapered Work Roll,” 일본철강협회, 제123회 춘계강연대회, 제5권, pp. 491~494.