

냉연 강판의 폭방향 판두께 제어 기술

배 원 병* 박 해 두** 최 계 찬*

* 부산대학교 공과대학 기계설계과

** POSCO 기술연구소 광양연구팀

ABSTRACT

The cold rolled strip meets continuously rising demands on the less deviation of thickness at the width direction of their rolled products. Especially, the special interest has been to find the methods to reduce the edge drop which influences seriously on the yield losses and the quality of the rolled products.

In this study, the influence of hot coils on the thickness profile of cold rolled strip was analyzed. For obtaining the tapered work roll shift conditions, the thermal crown and the flattening between the work roll and the strip were calculated, and the main parameters which have mostly effects on the edge drop were simulated. Also the obtained conditions from the simulation were applied to Tandem Cold Rolling Mill to investigate the change of the edge drop and the crown ratio depending on the amount of work roll taper and the length of contact of taper. The results of the application led to better thickness profile than conventional one.

1. 서 론

최근 수 년간 판재의 냉간압연 분야에서 압연판재의 치수정도 및 평활도에 대한 수요가의 요구가 점점 엄격해짐에 따라 판의 균일성에 관한 연구가 활발히 진행되어 길이방향 판두께 정도에 관한 연구는 상당한 진보를 이루었으며, 자동 판 두께 제어 (Automatic Gauge Control) 등의 여러가지 기술적 수단이 현장에 적용되어 큰 효과를 나타내고 있다.

그러나 최근 수요가들은 길이방향 뿐만아니라 폭방향의 두께 보종의 요구가 점점 더 엄격해 지고 있다. 냉간압연 판의 폭방향의 판두께에 영향을 주는 인자들은 소재의 크라운, 에지 드롭(edge-drop), 엡지(wedge) 등에 영향을 받는다. 소재의 크라운(폭방향의 판두께 편차 분포)은 냉간압연을 원활하게 하며 출측 판의 양호한 형상을 얻기 위해서는 냉연판과 열연판의 크라운비가 같게 압연되어야 하기 때문에 통상 소재의 크라운이 높을수록 냉연판의 폭방향의 판두

께 편차는 점점 더 커진다. 소재의 엡지 드롭은 당연히 냉연판의 에지 드롭으로 유도되며 엡지(좌우 가장자리 두께 편차)는 한쪽편의 웨이브(wave)를 발생시키는데 냉간압연의 작업성을 저하시킬뿐 아니라 두꺼운 쪽은 코일로 감은 후 불룩하게 높아지는 걸림(build-up)을 유발시킬 가능성이 높고, 얇은 쪽은 엡지드롭을 발생시킬 수 있다. 특히, 에지 드롭에 대해서는 판 두께의 품질, 실수율(實收率) 등에 큰 영향을 미치기 때문에 그의 개선이 강하게 요망되고 있다.^{1,2)}

폭방향 판두께 정도에 관한 연구는 입구측 판두께 불균일의 원인 및 그 제어법에 대한 여러가지 기술이 고려되고 있다. 그러나 작업중 폭방향 판두께 분포의 정확한 측정이 곤란하고 판두께 정도에 미치는 인자가 많기 때문에 미세결점이 많다. 이같은 이리유용 극복하기 위하여 자동 형상 제어 시스템 (Automatic Shape Control System) 및 판 크라운 (Strip Crown)의 제어능력이 큰 6단 압연기, CVC (Continuously Variable Crown) 압연기, VC (Variational Crown) 압연기 등 여러종류의 압연기가 개발¹⁾⁻³⁾되어 사용

되고 있다.

D & I 강판은 열연코일 두께 2.0 또는 2.2mm 로부터 제품 최소두께 0.264mm 까지 입연해야함은 물론 길이방향 및 폭방향의 두께편차기 최소로 (현재 4 μ m이내) 관리되어야 하기 때문에 냉간압연 기술의 대표적인 강판으로 주목받고 있다. Drawn and Ironed Process의 유리한 점은 사용 용기의 바닥두께는 제품 원래 두께와 같지만 벽은 원래 두께의 30-40% 까지 얇게 만들 수 있다는 점을 들 수 있다. 또한, 탄소강을 이용하여 two-piece can을 제조함으로써 저렴한 가격으로 제품을 생산할 수 있게 되었다.

본 연구는 냉연강판의 폭방향의 판두께가 소재인 Hot-coil에 따른 영향도를 분석하고, 냉간압연중에 발생하는 에지 드립을 방지하기 위해 작업롤(work roll: WR)에 적외선 테이퍼를 주고 또 연속냉간압연기에서 폭의 변화에 대응하게 하기 위해 작업롤 이송하여 에지드립에 영향을 주는 부위의 두께를 보충하는 방법으로 접근하여 좋은 결과를 얻었다.

2. 이론적 해석

2.1 압연제와 작업롤 사이의 편평량

Fig. 1.과같이 접촉부영길이 l_d , j 는 압연하중이 작용되는 점이라 할 때, 롤 길이의 중앙에서 X_i 만큼 떨어진 점 A의 편평량을 다음과 같이 반무한체의 가정으로 계산한다.⁴⁾

$$\delta(i, j) = \frac{1 - \nu_s^2}{\pi E_s} \cdot p(j) \cdot \{F(Y_1) + F(Z_1)\} \dots (1)$$

여기서, $F(Y_1)$, $F(Z_1)$ 는 반무한체 표면의 집중하중 함수이고, 하중 작용점의 위치 Y_1 와 Z_1 는 각각 아래와 같다.

$$Y_1 = |X_i - \eta j|$$

$$Z_1 = X_i + \eta j$$

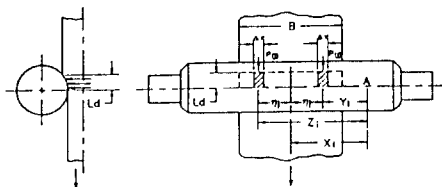


Fig. 1. Scheme for work roll flattening.

위 식에서 대부분이 미지수이기 때문에 일부의 값을 계산할 수 있으며 접촉선하중과 각 롤의 치짐량 및 편평량이 미지수이며 서로의 값에 영향을 미치므로 시행착오법으로 해를 구한다.^{5),6)}

2.2 냉간압연에 있어서 작업롤 열 크라운 예측 모델

냉간 압연에 있어서, 압연제의 현열, 가공열 및 압연제의 마찰열등에 의해 작업 Roll은 열팽창된다. 이 열팽창의 Profile을 열 크라운이라고 한다. 열 크라운의 예측은 해석적 방법 외에 수치 해법에 의한 계산 예가 많이 보고되고 있으나, 비교적 복잡한 과정이 수반된다.

본 연구에서는 열팽창 Profile의 예측을 위해서 실제 현상을 단순 Model화 하여, 해석적 근사법이라 할 수 있는 적분법을 통하여 접근한다. 즉, 열팽창량에 대한 온도 계개변수들도 입력하여 평균 온도를 구하고, 이 평균 온도의 축방향 분포로부터 그것에 대한 열팽창 Profile을 구한다.

Roll 반경 R의 단면에 대하여, 반경 방향의 온도분포를 θ 라 하면, 축대칭 평면 비형윤 조건하에서 원주표면의 열팽창 u 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.^{7),8)}

$$U = \frac{2\alpha}{R} \int_0^R \theta dr \dots (2)$$

여기서 α 는 선 팽창 계수이다. 따라서 평균 온도분포 θ_m 에 대하여

$$\theta_m = \frac{2}{R^2} \int_0^R \theta(r) dr \dots (3)$$

을 이용하면 (2)식의 u 는 다음과 같이 된다

$$u = R \theta_m \dots (4)$$

이때, 축방향에서의 탄성적 구속을 무시하기 위해서 (4)식에서 구한 열 Crown은 매우 빠르게 형성되는 것으로 가정되었다

Fig. 2.은 평균온도 Model을 나타낸다. 이때 반경 R, 축방향으로 무한히 긴 원주를 따라서 온도는 반경방향으로 동일하고, 축방향 x 의 함수로 가정한다. 여기에서 위열 대신에, 판폭 B에 해당하는 내부 발열의을 가지고, 온도 θ_0 의 냉매와 열전달계수 H로 열교환한다고 하자.

Roll의 온도에 관한 기초식은

$$v = \theta - \theta_0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

라 하면 다음식으로 나타낸다.

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \begin{cases} x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \nu v + q & (0 \leq x \leq S/2) \\ x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \nu v & (B/2 \leq x) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (6)$$

단, 대칭성을 고려하여 $x \geq 0$ 에 대하여만 나타냈다. (6)식의 경계조건 및 초기조건은 다음과 같다.

$$x = 0 \text{ 에서 } \partial v / \partial x = 0$$

$$t = 0 \text{ 에서 } \theta = \theta_0$$

(6)식에서 t 는 시간이고, x, ν 및 q 는 다음 식으로 정의한다.

$$x = \frac{K}{C\gamma}$$

$$\nu = \frac{2H}{RC\gamma} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$q = \frac{q_r}{C\gamma}$$

개수, q_r 는 단위 체적당의 발열량으로 된다.

따라서, 압연시의 열팽창 Profile u 는 (3)식과 (6)로부터, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_R = \alpha R \theta_m T_R(x) \quad \dots\dots\dots (8)$$

여기서 온도분포 함수 $T_R(x)$ 는 Fig. 3의 침투깊이로 적분법으로 구할수 있다.

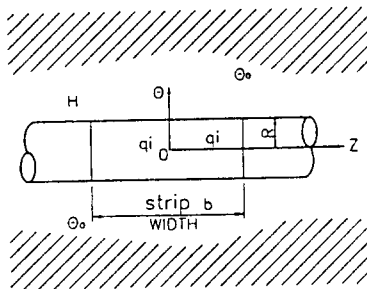


Fig. 2. Mean temperature model.

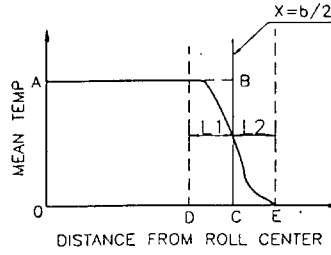


Fig. 3. Temperature distribution using permeated depth.

2.3 폭방향 판두께 편차 개선 방법

Taper 작업률을 적용할 경우 어느 스탠드에 적용시키게 것이 가장 효율적인가를 검토할 필요가 있다. 현재 압연기의 발전에 따라 Fig. 4. 6단 압연기에는 작업률 이송 기능을 갖춘 압연기가 개발되어 판 폭의 변화에 따라 작업률II의 shifting량을 각 stand별로 변화시키 적절한 profile의 강판을 압연하고 있다.

에지 드류 방지 대책¹¹⁾은 작업률의 양단에 taper부분을 만들어 스트립의 양 끝부분에서의 두께를 두껍게 하는 방법이다. 이 방법은 판 폭이 일정한 경우에만 사용할 수 있으며 판 폭이 변한 경우에는 대응성이 없다. 따라서 다양한 폭을 압연할 경우에는 Fig. 5와 같이 WR에 적당한 taper부분을 만들어 스트립 폭에 따라 적당히 shifting할 수 있는 기능이 있는 압연기의 도입이 필요하다. 연구자에

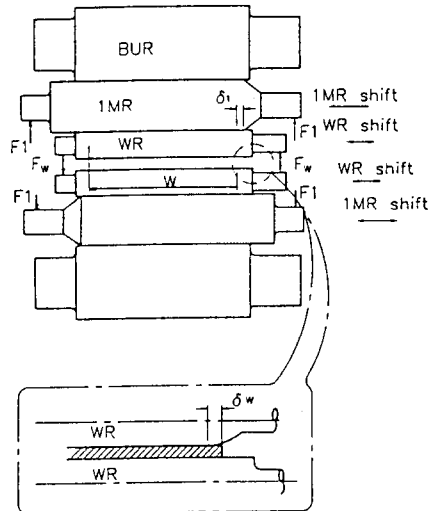


Fig. 4. Configuration of 6-high cold rolling mill.

따라서 taper부의 모양이 선형 또는 곡선인 형태가 제안되고 있다. 판폭에 대응하여 Fig. 6. Tapered work roll의 shifting pattern 은 다음과 같은식으로 적용 했다.

$$\delta w = B/2 - EL + \Lambda - BL / 2 \dots\dots\dots(9)$$

여기서 δw : W.R Shift 위치, B : 판폭, EL/EH : Strip 과 W.R 접촉 길이/높이(목표 EL :100 mm), Λ : Taper량 (360 mm), BL : Barrel Length(1510 mm)

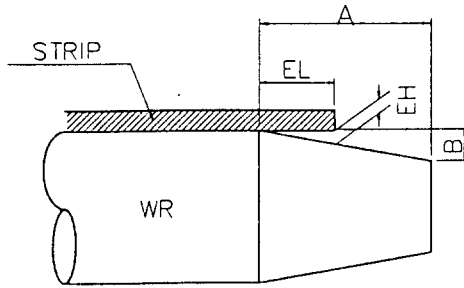


Fig. 5. Notations of tapered work roll.

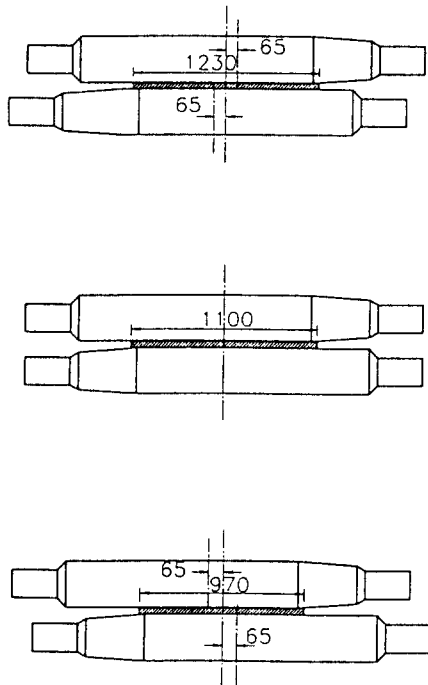


Fig. 6. Configuration of work roll shifting method.

3. 결과 및 고찰

3.1 핀평량과 Thermal crown 영향도 Simulation 결과

이론적 고찰에서의 핀평량과 thermal crown 영향도 계산을 행하였다. Fig. 7.은 Work roll 의 핀평량을 계산한 것으로 후단으로 갈수록 핀평량이 커지는 것을 나타내고 있다. 이 핀평량이 Edge부의 약 25 mm 까지의 Drop 에 큰 영향을 미치고 있다. Strip과 roll이 접촉하는 부분에 flattening이 0.13~0.19정도로 나타나 있다.

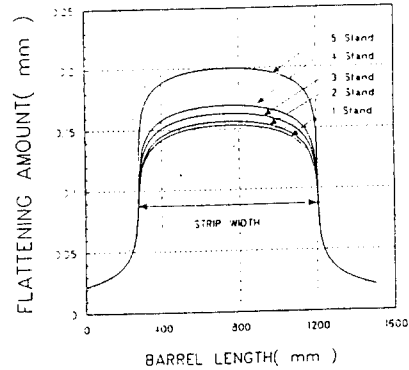


Fig. 7. Distributions of work roll flattening in Tandem Cold Rolling Mill.

Fig. 8.은 압연한 코일배수에 따른 work roll의 평균온도의 추이를 보인 것이다. 20코일 이후에서는 평균온도가 거의 일정함을 알 수 있다. 각 stand별로 온도차이가 5~10℃ 정도 존재한다. 그리고 마지막 Stand의 평균온도는 약 80℃ 정도 되는것으로 계산되었다. 압연시간은 5 ~ 6 분으로 계산하였고, FGC 구간의 냉각시간은 30 초 정도로 하여 계산한 결과이며 대체로 문헌의 평균온도와 잘 일치하고 있다.

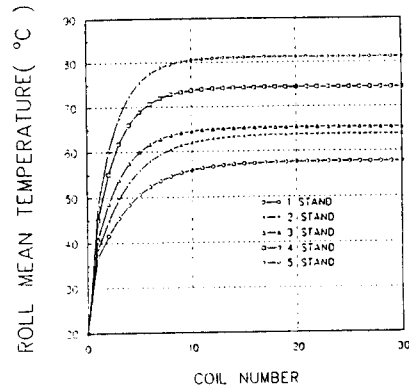


Fig. 8. Variation of work roll mean temperature during rolling

Fig. 9.은 Stand 번호 Roll의 평균온도가 거의 일정할 때의 Thermal Profile 을 나타낸 것으로 후단으로 갈수록 Thermal Crown 이 커지는 것을 나타내고 있다. 최고의 Thermal Crown 량은 5 스탠드의 130 μ m 정도이다.

Fig. 10.는 롤중심부에서 떨어진 거리에 따른 Edge-drop factor들의 profile을 그린 것이다. 출구Strip의 profile에 영향을 미치는 인자로 flattening profile, thermal profile, taper profile, 입구strip profile, roll 표민 profile이 있다. 이 경우 Taper 량은 30/100 mm 이며 taper부의 점축 길이 EL = 50mm이다. Taper길이에 상당하는 부분에 두께 편차가 감소 하고 있는 것을 나타내고 있다. crown상승이 있음을 알 수 있다.

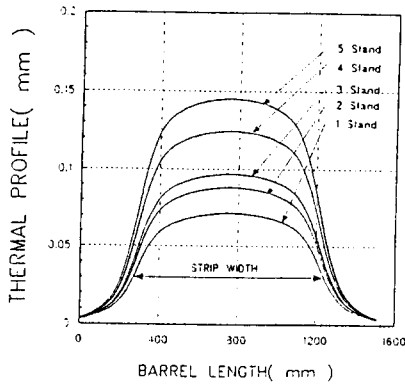


Fig. 9. Variations of thermal expansion profile.

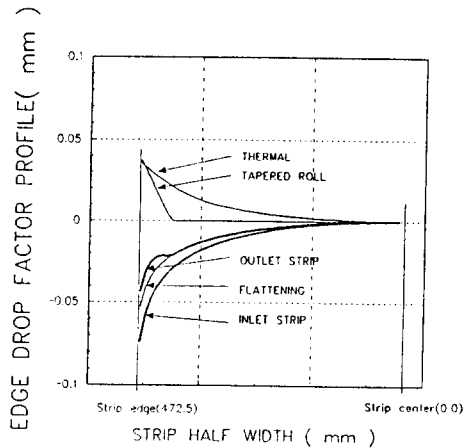


Fig. 10. Edeg-drop factors profile. (EL=50 mm).

Fig.11.은 1, 2, 스탠드에 Taper부위가 EL = 100 mm, Taper 량 30/100 mm 를 부여한 작업을 부여하여 판재를 입인했을 때의 판 Profile 를 Simulation 한 결과이다. 1, 2 스탠드를 통과함에 따라 판 Edge부의 두께가 보상됨을 나타내고있고, 3,4,5 스탠드에서는 자연 감쇄의 형태로 Edge부의 두께보상은 거의 없다.

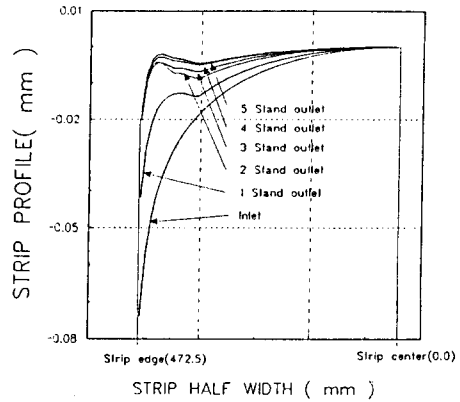


Fig. 11. Strip profiles after each stand rolling (EL = 100 mm).

3.2 Tapered 사용 않은 경우 판 profile 변화 Test

Fig. 12.는 Taper 작업량을 적용하지 않았을 때의 Strip 폭방향에 대한 두께편차를 크라운 비로 열연코일, 1 스탠드 출측, 그리고 4 스탠드의 출측 크라운비를 나타내고 있다. 크라운 비는 거의 같은 값을 갖는 경향이며

다만 압연이 거듭될수록 에지부분의 드롭현상이 커지는 것을 나타내고있다. 이는 열연코일의 크라운 비에 맞춰 냉간압연기가 작업되는 것으로 만일 크라운 비가 심하게 변동되면 판에 Wave 가 발생하게 된다. 이실험으로 보인 열연의 crown 량과 Edge-drop 량의 표준화가 가능하며 다음과 같이 생각 할 수 있다.

$$C_{1H} / I_{1H} - C_{4H} / h_4 = 0 \dots\dots\dots(10)$$

여기서, C_{1H} : 열연코일 크라운, I_{1H} : 열연코일 두께,
 C_{4H} : 냉연코일 크라운, h_4 : 냉연코일 두께이다.
 그리고, C_{1H} / I_{1H} : 열연코일 크라운비, C_{4H} / h_4 : 냉연코일 크라운 비를 나타낸다.

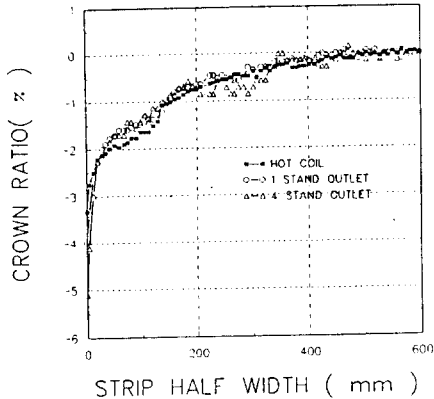


Fig. 12. Distributions of crown ratio without tapered work roll.

3.3 Tapered 작업롤 사용한 결과

냉연 PCM 의 1 스텐드에 테이프량 0.3 mm , 2 스텐드에 테이프량 0.2 mm , 테이프길이 360 mm의 작업롤을 투입하여 test 실시한 결과인 Fig. 13를 보면 Edge 부의 Drop 이 거의 회복되는 것을 엿보이며 궁극적인 1.5 % 내의 두께 적중율을 얻을 수 있었다. 이때의 냉연 작업롤의 테이프량은 1 스텐드는 30/100 mm , 2 스텐드는 20/100mm 이다.

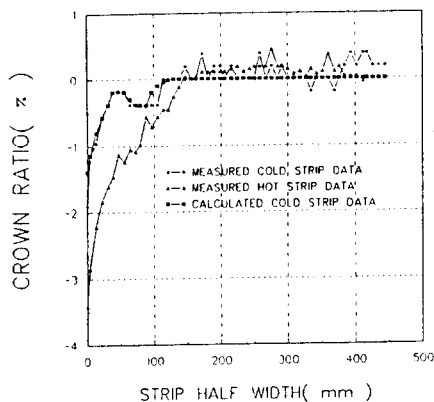


Fig. 13. Distributions of crown ratio with tapered work roll.

4. 결 론

냉연 강판의 폭방향의 두께 편차 영향을 주는 제반 인자들인 flattening profile, thermal profile, taper profile, 입구strip profile을 분석하여 현장 실험조건을 만들고 현장실험을 실시하였으며 이 과정의 결론은 다음과 같다.

1) Work roll 의 편평량은 후단으로 갈수록 커지는 것으로 나타나고 있다. 이 편평량이 Edge부의 약 25 mm 까지의 Drop에 큰 영향을 미치고 있다. Strip과 roll이 접촉하는 부분에 flattening이 0.13~0.19정도로 나타나 있다.

2) Thermal Profile은 후단으로 갈수록 Thermal Crown 이 커지는 것을 나타내고 있다. 최고의 Thermal Crown 량은 5 스텐드의 130 μ m 정도이다.

3) Taper 량 0.3 mm의 Work roll을 1 stand에 투입하고 0.2 mm의 Tapered work roll을 2 stand에 투입하면 \pm 1.5%의 폭방향 두께편차내의 냉연판 Profile 을 Simulation 으로 얻었다.

4) Test 결과인 Edge 부의 Drop이 거의 회복되는 조건은 냉연 Work roll의 Taper 량 은 1 stand 는 30/100 mm , 2 stand 는 20/100mm 이다.

5. 参 考 文 献

- 1) 日本鐵鋼協會：'板壓延 理論と 實際', (1983)
- 2) 北村 邦雄 外：'薄板壓延において刑狀とprofileの制御', 川崎製鐵期報, Vol.11, No.1(1979)
- 3) 鈴木 弘：'壓延百話(11)', 機計の研究, 제42권, 제2호, pp.81-8(1990)
- 4) 水野 外：'Roll의接觸變位および板の刑狀', 塑性と加工, Vol.22, No.243,(1981)
- 5) 戶澤 外：'Rollの變形および壓力分布におよぶRoll Crownの影響', 塑性と加工, Vol.16, No.171(1975)
- 6) 鈴木 弘：'壓延百話(12)', 機計の研究, 제42권, 제3호, pp.77-84(1990)
- 7) 배원병, 박해두, 이상진, 최재찬: 1993 "열간 판재압연에서 판 crown 해석", 한국소성 가공학회지, 제2권, 3호, pp51-63
- 8) 박해두, 김진욱, 최재찬, 백남주, 1990, "열간 사상압연에서의 열 및 마멸크라운에 관한 연구", 한국정밀공학학회지, 제7권, 제3호, pp. 14-25.