

형상제어를 위한 새로운 보강롤의 개발

이 원 호*

(2002년 10월 11일 접수, 2003년 1월 6일 심사완료)

Development of New Back-Up Roll for Strip Shape Control

Won-Ho Lee

Key Words : Steel Rolling(철강압연), Crown(크라운), Wave(평탄도 불량), Strip Shape Control(판의 형상제어), Back-up Roll(보강롤)

Abstract

Most of shape defects in steel strip are originated from the structure of rolling mill itself. For instance, strip crown occurs when the work roll is deformed by the bending moment induced on roll chocks. To get rid of the shape defects, it is necessary to increase the stiffness of rolling mill. The structure change of back-up roll is one of alternative ways to increase the mill stiffness without facility revamping from 4 high mill to 6 high mill. In this research work, the new back-up roll was developed and can be used in any type of 4 high mill to reduce the strip shape defects. The developed back-up roll consists of sleeve, arbor and phase angle adjusting system for arbor. The circumference of arbor is specially machined to adapt the strip width change during rolling. The experimental cold rolling test was done to prove the effectiveness of newly developed back-up roll. The experimental rolling results show that the new back-up roll has more powerful performance in reducing the shape defects than conventional back-up roll. It was also found that the new back-up roll has higher stability for shape control. In addition to, the only sleeve surface needs to be reground and changed in most cases, so that the maintenance cost can be greatly reduced.

1. 서론

판 크라운(crown)과 평탄도 불량(wave)은 압연공정에서 생산되는 강판의 품질을 평가하는 가장 중요한 지표들이다. 판 크라운은 폭 방향으로의 두께 분포를 의미하며, 평탄도 불량은 이름 그대로 압연이 완료된 판이 길이방향으로 얼마나 평탄한가를 나타내는 지표이다. 따라서 이들 두 가지 형상관련 지표는 작으면 작을수록 좋다고 할 수 있다.

압연판의 형상을 나쁘게 하는 요인은 대단히 많으나 근본적으로는 압연력을 가하는 수단인 롤(roll)이 압하력에 의해 굽힘변형이 발생하는 현상 때문이라고 설명할 수 있다.(Ishikawa⁽¹⁾) 그리고

O'Connor,⁽²⁾ Tozawa,⁽³⁾ Yukawa⁽⁴⁾ 등에 의하면, 롤의 굽힘변형은 압연판의 폭을 따라서 발생하는 압연 압력 분포의 불균일을 초래하고 이에 따라, 판크라운이나 평탄도 불량등의 형상불량이 발생하는 것이다따라서, 균일한 형상의 압연판을 얻기 위해서는 롤의 굽힘변형을 줄이도록 해주어야 한다. 이와 같은 개념에서 개발된 압연기로는 4단, 6단, 20단 압연기 등이 있다. 이것은 작업롤 외에도 보강롤, 중간롤 등을 사용하여 압연롤의 강성(stiffness)을 높이려고 하는 방식이다.⁽⁵⁾

또 다른 방법의 롤변형 억제 방식은 압연력을 가하는 보강롤을 제외한 작업롤이나 중간롤의 초오크(chock)에 유압시스템을 설치하여 이들 롤을 역방향으로 휘게 하는 방법이다. Stone,⁽⁶⁾ Sheppard,⁽⁷⁾ Yasuda⁽⁸⁾ 등에 의하면 이와 같은 방식을 롤 벤더(roll bender)에 의한 형상제어라고 한다. 한편, 최근에는 이들과는 다른 형태의 형상제어방법이 개발되어 실용화 되고 있다. 그것은 보강롤의 변형에

* 회원, POSCO 기술연구소 계측제어연구그룹
E-mail : leegyber@posco.co.kr
TEL : (054)220-6315 FAX : (054)220-6914

의한 폭방향 압연압력 조절 방식이다. 이와 같은 범주에 속하는 것으로는 독일 SMS 사의 Shape Control Roll(Morel⁽⁹⁾)과 일본 스미토모 금속의 Variable Crown Roll (Tomizawa⁽¹⁰⁾) 그리고 프랑스 VAI Clecim 의 Dynamic Shape Roll (Finck⁽¹¹⁾) 등이 있다.

그러나 이들 대부분의 특수 보강롤은 일단 압연을 실시해 본 후 압연판내에 크라운이라든가 평탄도가 불량하게 되면, 해당 보강롤 속에 내장된 유압시스템을 구동하여 압연압력의 분포를 교정하는 방식을 채택하고 있어서, 롤의 변형이라고 하는 근본적인 원인 처방으로는 미흡한 점이 있다. 또한 롤 내부에 복잡한 구조의 유압시스템을 내장되어 있어서 고가일 뿐만 아니라 사용중의 유지보수에도 많은 어려움이 뒤따르고 있다.

본 연구에서는 앞서 설명한 여러 가지 형태의 형상제어 설비의 문제점을 개선하면서, 보다 간단하고 효과적인 새로운 개념의 형상제어수단을 제안하였다. 이것은 아아버(arbor)와 슬리브(sleeve)의 이중 구조를 갖는 보강롤을 의미한다. 아아버는 압연중 판폭 변화에 대응될 수 있도록 특수한 구조로 제작되었다. 그리고, 개발된 보강롤을 사용하여 냉간압연실험을 실시하였으며, 압연된 결과를 통상의 보강롤을 사용했을 때와 비교 분석해 보았다.

2. 이론적 고찰

2.1 압연판의 형상불량 발생 기구

전술한 바와 같이 판 크라운은 판폭 방향으로의 두께불량을 의미하며, 강판의 중심부 두께와 가장자리 부분의 두께차를 크라운이라 정의한다. 그리고 평탄도 불량이라고 하는 것은 압연판의 길이방향으로 발생된 굴곡형태의 불량을 의미하며, 강판의 가장자리에 발생된 굴곡을 엣지 웨이브(edge wave), 중심부에 발생된 굴곡은 센터 웨이브(center wave)라고 부른다.

압연판의 형상을 불량하게 만드는 요소는 대단히 많으나 그 근본적인 원인은 압연롤의 탄성변형에 기인한다고 할 수 있다. Fig. 1 은 2 단 압연기로 압연할 때, 작업롤(work roll)의 탄성변형과 강판의 소성변형을 나타내는 그림이다.

압연판에 생성된 크라운의 크기, C 는 다음식으로 계산한다.

$$C = h_c - h_e \quad (1)$$

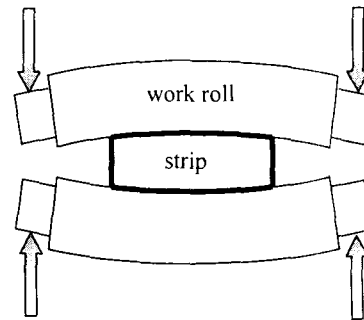


Fig. 1 Elastic deformation of roll in strip rolling

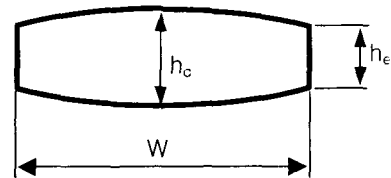


Fig. 2 Definition of crown in steel strip

여기서 Fig. 1 에 정의되어 있는 바와 같이 h_c 는 중심부의 두께, h_e 는 가장자리부의 두께이다. 한편, W 는 강판의 폭을 의미한다. 한편, Fig. 2 에 나타낸 바와 같은 폭방향 두께 편차의 발생은 압연판의 길이방향의 연신에도 영향을 주게 된다. 예를 들어, 압연전에는 폭방향으로 두께가 균일하던 강판이 압연후에 Fig. 2 와 같이 중심에 비해 가장자리의 두께가 얇게 되었다면, 가장자리부의 길이가 중심부에 비해 길어지게 될 것이다.

그러나 압연판의 특성상 특정부분이 일방적으로 길게 늘어날 수 없으므로, 최종 압연판에는 Fig. 3 과 같은 엣지 웨이브가 발생하게 된다.(日本塑性加工學會⁽¹²⁾) 이와 같이 압연판에 생성된 웨이브의 크기를 정량적으로 표현하기 위해 다음과 같은 급준도(steeptness)를 정의하여 사용하고 있다.

$$\lambda = \frac{\delta}{l} \cdot 100(\%) \quad (2)$$

여기서 δ 는 웨이브의 파고이고, l 은 웨이브의 파장이다.

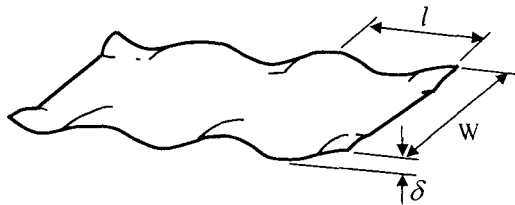


Fig. 3 Edge wave in steel strip

2.2 압연기의 강성이 판형상에 미치는 영향

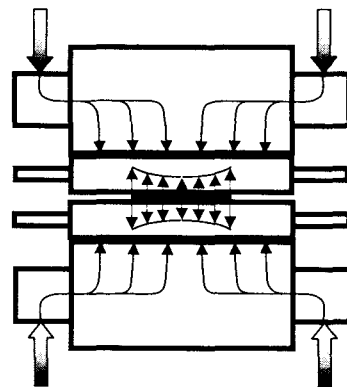
전술한 바와 같이 압연판에 발생하는 크라운과 평탄도 불량은 작업롤의 탄성변형에 기인한다. 따라서 압연판의 형상불량을 줄이기 위해서는 롤의 탄성변형을 줄여주어야 하며, 그렇게 하기 위해서는 롤의 강성을 크게 해주어야 한다. 롤의 강성을 크게 하기 위한 가장 간단한 방법은 롤의 직경을 크게 하는 것이지만, 이럴 경우 압연기의 크기가 지나치게 커지는 문제점이 있다.

롤의 굽힘 변형량, 즉 휨량은 동일한 하중일 때는 롤의 강성이 큰 쪽이 작게 된다. 따라서 작업롤만 있는 2 단 압연기에 비해, 작업롤과 보강롤(back-up roll)로 구성된 4 단 압연기의 강성이 크므로 당연히 동일한 압연하중에서는 4 단 압연기로 생산된 압연판의 폭방향 두께가 균일하게 되는 것이다. 이와 같은 이유로 최근에는 극히 일부를 제외하고는 철강공정에서 2 단 압연기를 사용하는 경우는 거의 없다. 같은 원리로 4 단 압연기보다 6 단 압연기가 강성이 크므로, 판형상이 보다 중요시되는 냉간압연기에는 강성이 높은 6 단 압연기를 채택하는 추세이다. 또한 스텐레스강처럼 강도가 대단히 높은 소재를 압연하기 위해서는 보다 높은 강성을 갖는 압연기를 필요로 하게 되어 20 단 압연기도 개발되어 사용되고 있다.

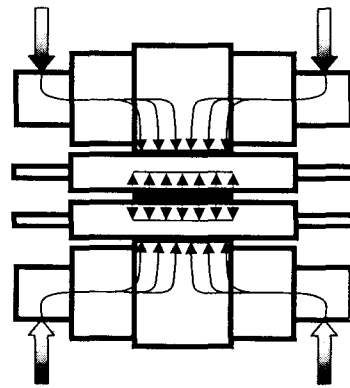
3. 보강롤을 이용한 형상제어

3.1 보강롤에 의한 형상제어 개념

6 단 압연기나 20 단 압연기는 4 단 압연기에 비해 형상제어의 측면에서 많은 기술적 장점을 가지고 있으나, 가격이 대단히 높고 구조가 복잡하여 유지보수가 까다롭다는 단점이 있다. 이에 따라, 4 단 압연기를 사용하면서도 기존의 압연기 구조에 기인한 형상불량의 문제점을 해소할 수 있는 방안에 대한 연구가 시도되었다. 즉, 보강롤의 구조를 변경함으로써 작업롤의 굽힘변형을 줄여보고자 하는 시도이다. 이와 같은 방식의 형상제어 개념을 그림으로 나타내어 보면 Fig. 4 와 같다.



(a) Conventional back-up roll



(b) Modified back-up roll

Fig. 4 Pressure distributions in 4-high rolling mill

Fig. 4 의 (a)는 기존에 사용되는 보강롤을 사용한 경우인데, 작업롤의 동체 길이와 보강롤의 동체 길이가 같아서 압연력이 강판에 전달되는 과정에서 작업롤의 굽힘변형을 피할 수 없게 된다. 그리고, 이와 같은 상황 하에서는 압연판에 작용하는 롤의 압력은 판의 가장자리로 갈수록 커지게 될 것이므로 판의 가장자리가 많이 변형이 되어 판크라운을 발생시키는 요인이 될 것이다.

이에 반해 Fig. 4 의 (b)에 나타난 바와 같이 보강롤의 형태를 변경시켜 보강롤과 작업롤 사이의 접촉길이를 줄인 구조하에서는 보강롤의 굽힘변형은 여전히 발생되지만, 작업롤의 굽힘변형은 최소화할 수 있게 된다. 이것은 보강롤을 통해 전달된 압하력을 작업롤의 중심부에 집중시킴에 따라 얻어지는 결과이다.

보강롤의 구조변경에 있어서는 작업롤과 접촉하게 된 보강롤의 동체길이를 판폭과 일치되도록

하는 것이 작업롤의 굽힘변형을 최소화하는 방법이 될 것이다. 이와 같이 보강롤의 구조를 변경함에 따라 압연중에 강판과 작업롤 사이에 작용되는 롤압력분포는 기존의 보강롤에 비해 훨씬 고르게 분포하게 된다. 이에 따라 압연관의 크라운 발생량은 크게 줄어들게 될 것이고 판의 평탄도도 개선할 수 있게 되는 것이다.

3.2 새로운 형상제어용 보강롤의 제안

앞서 제시한 보강롤에 의한 형상제어에 관련된 종래의 기술 중 특히 등록된 것으로는 日立製作所⁽¹³⁾에 의한 일본 特開 昭 51-103058 호, 三菱重工業株式會社⁽¹⁴⁾에 의한 일본 特開 昭 55-10366 호, Gronbeck⁽¹⁵⁾에 의한 미국특허 제 4,407,151 호, Feldmann⁽¹⁶⁾에 의한 미국특허 제 4,479,374 호 등이 있으나 이들은 모두 제작 혹은 정비상의 문제점으로 인해 실용화되지 못하고 있다. 특히, 이들이 실용화될 수 없었던 근본적인 이유는 압연중에 수시로 변하는 압연관의 폭변화에 적절히 대응하지 못하였던 것이다. 따라서 본 연구에서는 압연관의 판폭 변화에 대응할 수 있으며, 구조가 간단하여 제작은 물론 유지보수에도 유리한 새로운 개념의 형상제어용 보강롤을 제안하였다.

본 연구에서 제안한 새로운 보강롤의 구조는 Fig. 5 와 같다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 원주방향으로 사다리꼴 형태의 돌출부를 갖도록 특수하게 가공된 아아버와 아아버에 외접하여 조립되는 원통형 슬리브(sleeve)를 기본으로 하는 이중 구조의 보강롤인 것이다.

특히, 슬리브는 아아버와 접촉하면서 회전을 해야 하므로 슬리브의 내부에는 아아버와의 마찰을 최소화하기 위한 윤활매체를 사용하게 된다. 윤활 매체로는 베어링이나 유막형 베어링(oil film bearing) 등이 될 수 있다.

개발된 새로운 보강롤은 기존에 사용되던 롤 고정장치(roll chock)에 조립하여 4 단 압연기의 보강롤로 사용될 수 있다. 통상적으로 4 단 압연기는 작업롤 구동방식이므로, 작업롤과 접촉하고 있는 보강롤의 슬리브는 작업롤과의 접촉력에 의해 회전하게 된다. 그리고, 압연중에는 고정되어 회전하지 않는 아아버는 새로운 압연관이 압연을 시작하기 전에 적절히 조정되어야 한다. 이것은 압연관의 폭이 달라지게 되면 달라진 판폭에 대응되도록 식 (3)으로 계산된 아아버의 회전각도, ϕ 를 조정하는 것을 의미한다.

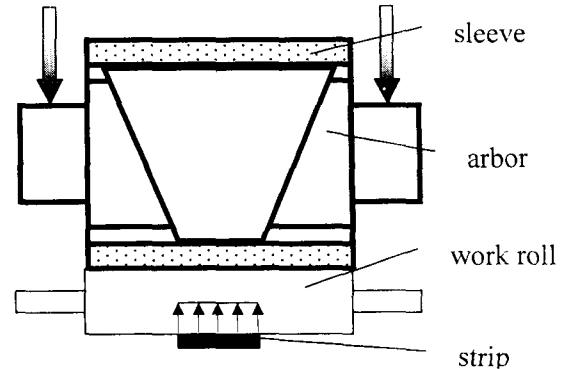


Fig. 5 Concept drawing of new back-up roll

$$\phi = \cos^{-1} \left(1 - \frac{2(W - W_2)}{(W_1 - W_2)} \right) \quad (3)$$

여기서 W_1 은 압연가능한 최대 판폭을 W_2 는 압연가능한 최소 판폭을 의미한다. 따라서, 새로 개발된 보강롤을 실제로 사용하기 위해서는 아아버의 각도를 조정하는 별도의 유압장치도 필요하게 된다.

4. 형상제어 효과분석을 위한 실험압연

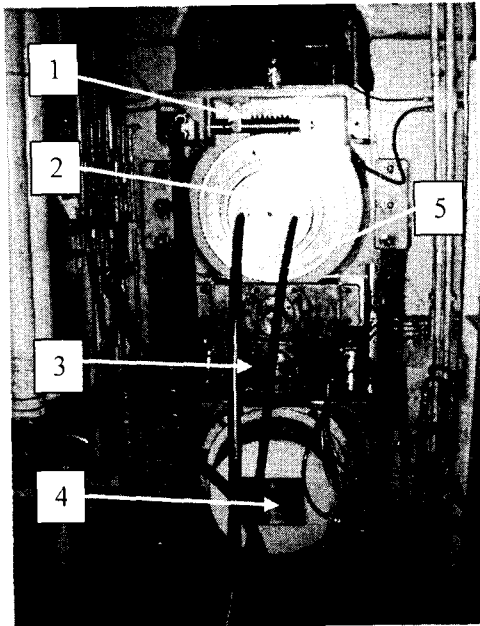
4.1 실험장치

Fig. 6 은 제작된 실험압연용 보강롤과 보강롤의 각도조정 장치를 내간 실험압연기에 설치 완료한 상태의 사진이다. 제작 여건상 상부 보강롤만을 새로 개발된 보강롤로 교체하였고, 하부에는 기존의 보강롤을 사용하였다. 실험압연기는 완전자동화되어 있고, 실험중 얻어지는 각종 데이터는 컴퓨터에 저장되어 압연후에 실험결과를 분석할 수 있도록 되어 있다. 한편, 실험압연에 사용된 소재의 판두께는 0.8mm, 판폭은 300mm, 항복강도는 15.9 kg/mm²인 일반 냉연강판이다.

4.2 실험결과

4.2.1 압연관의 형상변화 사진

Fig. 7 은 압하율을 달리하면서 실험압연한 결과, 압연관에 형성된 옛지 웨이브의 모양을 나타내는 사진이다. 사진의 우측은 기존의 보강롤로 압연한 시험편이고 좌측은 새로운 보강롤로 압연한 시험편을 나타내고 있다.



1: phase angle controller of arbor, 2: new back-up roll, 3: work roll, 4: conventional back-up roll
5: hydraulic piping line for new back-up roll

Fig. 6 Photograph of the new back-up roll installed in an experimental cold rolling mill

Fig. 7 의 사진으로부터, 기존의 보강롤에 비해 새로 개발된 보강롤이 우수한 형상제어 성능을 보이고 있음을 알 수 있다.

이론적으로는 판의 폭에 맞는 최적의 arbor 각도에서 극단적으로 평탄한 압연판이 얻어져야 함에도 사진에서 볼 수 있는 바와 같이 약간의 웨이브가 잔류되어 있는 것은 신규로 개발된 보강롤을 압연기의 상부에만 사용했기 때문이다. 따라서, 상하부 모두 신규 보강롤을 사용한다면 보다 우수한 형상제어 성능을 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

4.2.2 보강롤별 평탄도 측정 결과

동일한 압연조건하에서 기존의 보강롤과 새로운 보강롤을 사용한 경우에 대해 평탄도 불량 발생 크기를 비교해 보았다. 압연된 판의 평탄도 측정에는 압연판에 형성된 웨이브의 파장과 파고를 측정 후, 이를 식 (2)에 대입하여 급준도를 나타내었다. Fig. 8 은 시험편에 발생된 급준도를 측정하고 이를 압하율별로 정리한 것이다.

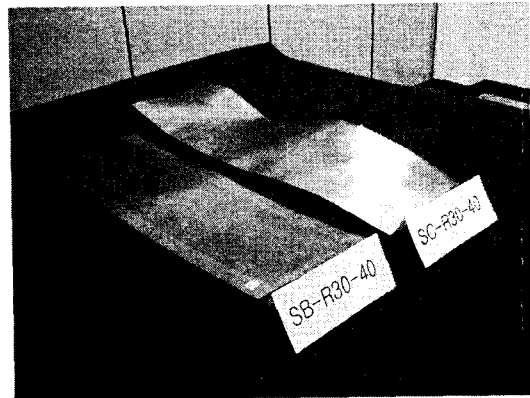


Fig. 7 Comparison of strip shape using different types of back-up roll (reduction ratio = 40%)

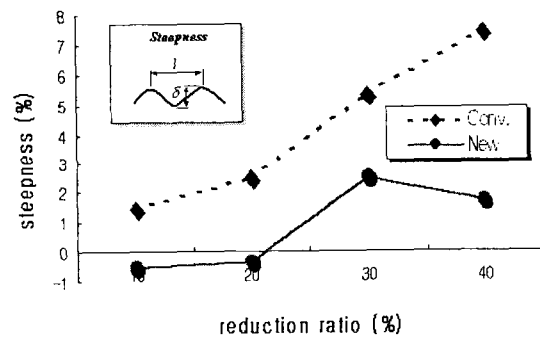


Fig. 8 Relationship between steepness and reduction ratio

Fig. 8 에서 볼 수 있는 바와 같이 새로 개발된 보강롤로 압연한 판에 발생된 평탄도가 기존의 보강롤에 비해 대폭 감소했음을 볼 수 있다. 신규 개발롤을 사용하여 10 내지 20%로 압연하는 경우에는 기존 보강롤과는 달리 센터 웨이브의 발생 속 식 (2)로부터 계산되는 급준도 λ 가 음의 값을 가짐을 볼 수 있다. 이것은 동일한 조건으로 실험하기 위해 기존의 보강롤에서와 같이 적용된 벤더 압력이 신규 보강롤에서는 지나치게 커서 센터 웨이브를 발생시키는 역할을 한 것이다.

한편, 신규 보강롤을 이용한 압하율 30 내지 40%의 압연시에 여전히 엷지 웨이브가 잔류되고 있는 것은 실험압연시 상부에만 신규 보강롤을 사용했기 때문이며, 상하부 모두 신규 보강롤을 사용한다면 이론적으로는 거의 완벽히 평탄한 압연판을 얻을 수 있을 것이다.

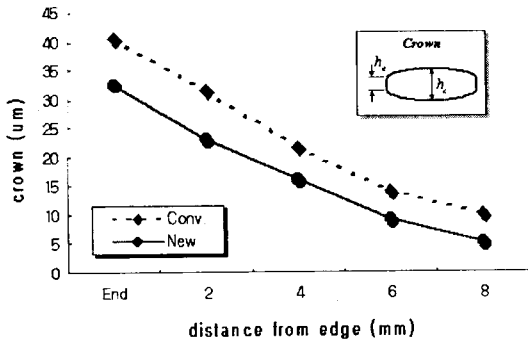


Fig. 9 Variation of crown with the distance from strip edge (reduction ratio = 30%)

기존의 보강롤은 압하율이 증가할수록 평탄도가 급격히 나빠짐을 볼 수 있으나, 신규 보강롤은 압하율의 변화에 따른 평탄도의 증가가 뚜렷하지 않고, 압하율이 40%일 때의 평탄도가 30% 때의 그것에 비해 오히려 줄어들음을 볼 수 있다. 이것은 신규 보강롤의 특징을 잘 보여주는 결과로서, 신규 보강롤은 압하율이 클수록, 즉 압하력이 클수록 기존의 보강롤에 비해 큰 효과를 얻을 수 있음을 나타내는 결과이다.

4.2.3 보강롤별 판크라운 측정 결과

일반적으로 판 크라운의 측정점은 가장자리로부터 25mm 되는 지점이어야 하나, 본 실험에서 사용된 판의 폭은 300mm 로 비교적 작았기 때문에 가장자리로부터 판의 중심부 방향으로 2mm 간격으로 판두께를 측정하고 식 (1)을 이용하여 계산된 크라운 값으로 나타나 보았다.

Fig. 9 는 압연판에 발생된 판의 크라운 측정결과를 보강롤 별로 비교한 것이다. 예상했던 바와 같이, 신규 보강롤이 기존 보강롤에 비해 판 크라운의 크기를 약 30-50% 정도 감소시킬 수 있음을 볼 수 있다.

4.2.4 보강롤별 엣지드롭 측정 결과

엣지드롭(edge drop)이라는 것은 압연판의 가장자리에서 발생하는 급격한 판두께 변화를 의미하며, 이 양이 크게 되면 가장자리 부의 일정량을 제거해 주어야 하므로 제품의 수율(yield ratio) 저하를 초래하게 된다. 엣지드롭의 측정은 판의 가장자리로부터 일정 거리가 떨어진 지점에서의 판두께와 가장자리의 판두께 차이로 나타낸다.

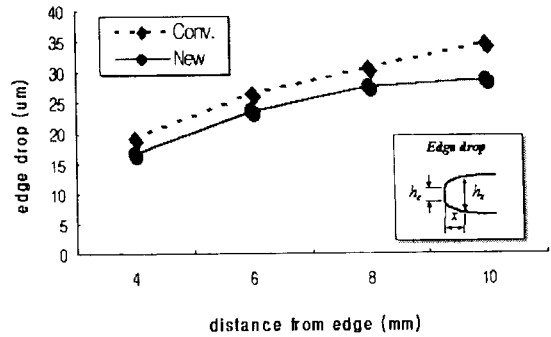


Fig. 10 Variation of edge drop with the distance from strip edge (reduction ratio = 30%)

Fig. 10 은 압연실험 결과중 엣지드롭의 변화를 나타낸 것이다. 앞서의 다른 결과에서와 마찬가지로 신규 보강롤이 엣지드롭을 감소시키는 효과를 나타냄을 볼 수 있다. 신규 보강롤의 엣지드롭 저감 효과는 평탄도 불량이나 크라운 감소효과에 비해 다소 미흡한 것으로 나타나고 있다. 그러나 이 결과는 판폭을 300mm 이하로 해야 하는 실험 압연의 제약 조건에 기인한 것으로 보여지고, 판폭이 900mm 이상인 실제의 압연기에서는 보다 큰 효과를 보일 것으로 생각된다.

4.3 신규 보강롤의 형상제어 효과

4.2 절에서 동일한 조건에서 진행된 압연실험을 통해 기존의 보강롤에 비해 새로운 보강롤이 강판의 형상을 양호하게 만들 수 있음을 보여 주었다.

이번에는 신규 개발된 보강롤이 형상제어 수단으로서 사용 가능한 지를 실험해 보았다. 새로운 보강롤은 아아버와 슬리브의 이중 구조이며, 아아버의 각도 조절에 따라 형상이 달라질 것이다.

Fig. 11 은 아아버의 각도를 변경했을 때 판형상이 어떻게 변하는 지를 보여주는 실험 결과이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 아아버의 각도가 180도(기존의 보강롤에 해당)로부터 판폭 300mm 에 해당하는 각도 78 로 변화시킴에 따라 급준도가 점점 감소함을 볼 수 있다. 이와 같은 결과로부터 새로 개발된 보강롤은 아아버의 회전각을 임의로 조절함으로써 원하는 형상을 얻을 수 있어서, 압연판의 형상제어 수단으로 사용이 가능하다는 것을 알 수 있다.

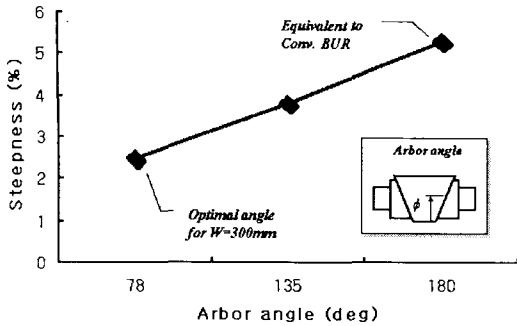


Fig. 11 Strip shape changes according to arbor angle(reduction ratio = 30%)

5. 결론

4 단 압연기의 구조에 기인한 형상불량을 감소시킬 목적으로 수행된 본 연구를 통해 얻어진 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 압연판에 작용되는 압연압력의 분포를 일정하게 하여야 판의 형상불량을 줄일 수 있다.

(2) 압연압력의 분포를 일정하게 하기 위한 수단으로 아아버와 슬리브의 이중 구조로 된 신개념 형상제어용 보강롤을 개발하였다.

(3) 개발된 새로운 보강롤을 이용한 실험압연 결과, 새로운 보강롤은 기존의 보강롤에 비해 평탄도, 크라운, 엣지드롭 등을 모두 크게 줄일 수 있으며, 아아버의 각도조절에 따라 형상이 변화되므로 형상제어 수단으로 사용 가능함을 보여주었다.

(4) 새로운 보강롤은 구조가 간단하여 제작은 물론 정비면에서도 기존에 상업화된 유사 설비에 비해 우수함을 알 수 있었다.

(5) 신규 보강롤은 아아버와 슬리브가 분리되므로 일정기간 사용 후 전체를 폐기처분 해야 하는 기존의 보강롤에 비해 슬리브만을 교체하고 아아버는 반영구적으로 사용할 수 있으므로 원가절감에 크게 기여할 수 있다.

참고문헌

- (1) Ishikawa, T., 1980, "Three Dimensional Analysis for Rolling Taken Elastic Deformation of Rolls into Consideration," *Journal of the JSTP*, Vol. 21, No. 237, pp. 902~908.
- (2) O'Connor, H. and Weinstein, A., 1972, "Shape and Flatness in Thin Strip Rolling," *Journal of Engineering for Industry*, November, pp. 1113~1123.
- (3) Tozawa, K., 1986, "Three Dimensional Analysis of Strip Rolling," *Journal of the JSTP*, Vol. 27, No. 300, pp. 81~88.
- (4) Yukawa, N., 1987, "Initiation of Buckling of Strip Caused by Internal Stress," *Journal of the JSTP*, Vol. 28, No. 314, pp. 251~256.
- (5) Shiozaki, H., 1969, "The Calculation of Roll Bending Effects," *Ishikawa-zima-Harima Technical Reports*, Vol. 2, pp. 44~50.
- (6) Stone, M. and Gary, R., 1965, "Theory and Practical Aspects in Crown Control," *Iron and Steel Engineer*, August, pp. 73~83.
- (7) Sheppard, T. and Roberts, J., 1973, "Shape Control and Correction in Strip and Sheet," *International Metallurgical Reviews*, Vol. 18, pp. 1~18.
- (8) Yasuda, K. and Shida, S., 1980, "Simulation of Shape Control in Cold Tandem Mill," *Journal of the JSTP*, Vol. 21, No. 230, pp. 225~233.
- (9) Morel, M. and Bosch, M., 1992, "Shaperoll Actuator-Results of Hot and Cold Mill Applications," *Iron and Steel Engineer*, April, pp. 74~77.
- (10) Tomizawa, A., 1994, "Recent Applications of The Variable Crown Roll," *METEC congress 94*, Vol. 2, pp. 289~294.
- (11) Finck, R., 2000, "Developments in Cold Rolling Mills for Aluminum and Steel," *MTP International*, pp. 40~51.
- (12) 日本塑性加工學會 編, 1990, "板壓延," *塑性加工技術 Series 7*, pp. 164~168.
- (13) 日立製作所, 1976, "壓延機," *日本特許廳 公開特許公報*, 特開昭 51-103058, pp. 1~7.
- (14) 三菱重工業株式會社, 1980, "壓延機," *日本特許廳 公開特許公報*, 特開昭 55-10366, pp. 1~7.
- (15) Gronbeck, 1983, "Rolling Mill," *United States Patent 4,407,151*, pp. 1~10.
- (16) Feldmann, 1984, "Strip-Rolling Method and Apparatus," *United States Patent 4,479,374*, pp. 1~14.