

## 후판 압연중 발생하는 판의 하향벤딩시 선단부 판 형상의 고찰 및 곡률예측

이중형\*, 황상무  
포항공과대학교 기계공학과

### Strip Shape Analysis and Curvature Prediction of Front End Downward Bending in Plate Rolling by Finite Element Method

J. H. Lee , S. M. Hwang  
Department of Mechanical Engineering  
Pohang University of Science and Technology (POSTECH)

#### ABSTRACT

The major object in this report is the curvature prediction of front end downward bending in plate rolling. Because of relations front end shape and curvature in plate, many simulations were carried out to obtain empirical model. Simulation conditions, for example the position and the size of bottom stripper or roller table etc. , were limited to the POSCO conditions. Though the result in this report can be applied to the special case, the tendency of this result is similar to the many cases. So the empirical model equation can be improved or expanded to many simulation conditions.

#### 1. 서론

후판압연중 발생하는 판 선단부의 굽힘현상은 주로 상하롤의 주속차, 판의 상하면 온도차, 판과상하롤 사이의 마찰계수차, 롤 픽업 등의 비대칭적인 압연조건에 의해서 발생한다. 이러한 요인들이 판의 굽힘에 미치는 영향은 이미 자세히 밝혀져 있고 신경회로망을 이용한 모델식으로 제시, 적용되고 있다[1]. 하지만 이 모델식은 판의 상향굽힘에만 제한되어 적용되고 있다. 판의 굽힘제어는 이전단계에서의 곡률을 측정하여 다음단계에서의 제어정보로 활용하게 된다. 하지만 하향벤딩시에는 판이 스케일 제거기, 롤러테이블등에 부딪힘으로 곡률을 측정하는데 어려움을 겪게되고 다음단계에서 적용할 제어정보를 상실하게된다. 유일하게 이용할수 있는 정보는 판의 변형된 형상이며 이를 이용해 곡률을 예측한다. 본 연구에서는 판의 형상에 큰 영향을 미치는 압연기 및 주변요소의 위치 및 크기를 포스코(POSCO)의 그것과 일치시켰다. 사용된 판의 재료는 저탄소강(low carbon steel)을 사용했으며[2] 굽힘을 유발시키는 요인으로 판의 상하롤 주속차를 이용하였다. 주속차는 다음과 같이 정의한다.

$$\Delta V(\%) = \frac{\text{빠른워크롤의접선속도} - \text{느린워크롤의접선속도}}{\text{느린워크롤의접선속도}} \times 100$$

## 2. 이론적 배경

### 2.1 소성이론의 기초

금속 성형공정과 관련된 소성유동의 경계치 문제는 다음과 같이 주어진다.

- c,m:재료상수    - f<sub>i</sub>:체적력    - Γ<sub>u<sub>i</sub></sub>:자연경계    - Γ<sub>h<sub>i</sub></sub>:기하경계    - Γ<sub>h<sub>i</sub>'</sub>:기하경계
- μ:쿨롱마찰계수    - ξ:벌칙상수    - u<sub>i</sub>:속도    - u<sub>t</sub>, u<sub>n</sub>:속도의접선,법선성분
- m':전단마찰계수    - T:온도    - p:정수압    - k:전단항복응력
- σ̄, ε̄: 상당응력, 상당변형을    - σ<sub>ij</sub>', ε<sub>ij</sub>':편차응력, 편차변형을
- 평형방정식 : σ<sub>ij</sub> + f<sub>i</sub> = 0

- 속도와 변형률속도 사이의 관계식 : ε̇<sub>ij</sub> = 1/2 (u<sub>i,j</sub> + u<sub>j,i</sub>)

- 구성방정식 : σ<sub>ij</sub> = -pδ<sub>ij</sub> + σ<sub>ij</sub>' ,    σ<sub>ij</sub>' = 2σ̄/3ε̄ ε̇<sub>ij</sub>

여기서 σ̄ = c(ε̄, T) ε̄<sup>m(ε̄, T)</sup>,    ε̄ = √(2/3 ε̇<sub>ij}ε̇<sub>ij</sub>)</sub>

- 비압축성조건 : u<sub>i,i} = 0</sub>
- 경계조건 : σ<sub>ijn<sub>j</sub></sub> = h<sub>i</sub> on Γ<sub>h<sub>i</sub></sub>, u<sub>i</sub> = ū<sub>i</sub> on Γ<sub>u<sub>i</sub></sub>, σ<sub>n</sub> = -ξ(u<sub>n</sub> - ū<sub>n</sub>) on Γ<sub>c</sub>
- 쿨롱마찰조건 : σ<sub>t</sub> = -μσ<sub>n</sub>g(u<sub>t</sub>) on Γ<sub>c</sub>
- 일정전단마찰조건 : σ<sub>t</sub> = m'kg(u<sub>t</sub>) on Γ<sub>c</sub>    g(u<sub>t</sub>) = -2/π tan<sup>-1</sup>(u<sub>t</sub> - ū<sub>t</sub>)/a

여기서 a는 매우작은 양의 상수이다[3].

### 2.2 유한요소 수식화

앞서 기술한 소성유동에 관한 경계치문제의 해(속도와 정수압)는 경계 Γ<sub>u<sub>i</sub></sub>상에서 기하경계조건을 만족해야하고, 임의함수(test function) q와 경계 Γ<sub>u<sub>i</sub></sub>상에서 영의 값을 가지는 임의함수 ω<sub>i</sub>에 대해 아래의 적분식을 만족해야한다.

$$\int_{\Omega} (\sigma_{ij,i} + f_i) \omega_i d\Omega + \sum_i \int_{\Gamma_i} (h_i - \sigma_{ijn_j}) \omega_i d\Gamma + \int_{\Gamma_c} \{ -\xi(u_n - \bar{u}_n) - \sigma_n \} \omega_n d\Gamma + \int_{\Omega} u_{i,t} q d\Omega - \int_{\Gamma_c} \{ \sigma_t - \mu \xi(u_n - \bar{u}_n) g(u_t) \} \omega_t d\Gamma = 0$$

윗식을 정리하여 Weak Form으로 바꾼후 요소에 관한 유한요소근사를 행하면 다음과 같은 비선형 대수 방정식을 얻는다.

$$u_i = N_{iL} V_L, \quad p = H_M P_M, \quad \omega_i = N_{iL} W_L, \quad q = H_M Q_M$$

V<sub>L</sub>, W<sub>L</sub>은 절점값, P<sub>M</sub>, Q<sub>M</sub>은 요소값 그리고 N<sub>iL</sub>, H<sub>M</sub>은 보간함수이다.

$$\mathbf{h}(\mathbf{V}, \mathbf{P}, \mathbf{X}, \mathbf{C}) = 0$$

여기서, 벡터 **V, P, X**의 성분은 각각 V<sub>L</sub>, P<sub>M</sub>, X<sub>L</sub>이며, 기하학 **X**, 벡터 **C**는 공구속도, 마찰조건, 작동온도와 같은 공정조건들을 나타낸다.

### 3. 선단부 판 형상과 곡률간의 관계

판의 하향굽힘시 시간에 따른 모양변화가 그림1에 나타나 있다. 판은 압연기요소에 부딪히면서 형상이 변하게되고 원래의 곡률(압연기요소에 부딪히지 않고 하향굽힘했을 경우)을 상실하게된다. 이러한 형상변화는 판이 워크롤을 빠져나와 첫 번째 이송 테이블의 상단에 올때까지 발생하며 앞으로 더 진행하더라도 판 선단부 형상에 큰 변화가 없다고 가정한다. 이러한 가정아래 해석의 종료시점과 대략적인 형상을 그림2에 나타내었다. 보는바와 같이 판의 형상은 대략 2차곡선의 형태로 나타낼 수 있으며 최고점의 좌표(x,y)로 대표될 수 있다. 판의 형상이 곡률과 관계가 있으므로 그 형상을 대표하는 최고점의 좌표(x,y)를 이용 곡률을 구할 수 있다. 해석결과 최고점의 x 좌표와 곡률을 2차 함수적으로 연관시킬 수 있었으며 그림3에서 보는바와같이 판의 두께가 두꺼워질수록 그래프가 위쪽으로 이동함을 볼 수 있었다. 이로부터 다음과 같은 모델식을 얻었다. 곡률 C는

$$C = a \times x^2 + b \times x + d$$

$$a = 1.48 \times 10^{-7} \times H_i^2 - 1.469 \times 10^{-5} \times H_i + 6.37913 \times 10^{-4}$$

$$b = -1.69 \times 10^{-4} \times H_i^2 + 1.8163 \times 10^{-2} \times H_i - 8.13342 \times 10^{-1}$$

$$d = 4.75 \times 10^{-2} \times H_i^2 - 5.5396 \times H_i + 257.2249$$

$$H_i: 25mm \sim 55mm$$

상수 a, b, d는 판의 초기두께 H<sub>i</sub>에 따라서 정해진다.

### 4. 결론 및 향후계획

본 연구를 통해 판의 하향벤딩시 곡률은 판형상 최고점의 x 좌표와 2차함수적인 관계에 있음을 알 수 있었고 2차함수의 계수들은 판의 초기두께에 의존한다. 하지만 압연기기의 주변장치의 위치 및 크기에 따라서 판의 형상이 영향을 받기 때문에 이에 대한 고찰 및 연구가 필요하고 판의 상하면의 온도를 고려한 해석이 필요하다. 이러한 고려들이 본 연구의 결과를 크게 벗어나지는 않는다. 즉, 적어도 경향성 자체는 변하지 않음을 추측할 수 있었다.

### 5. 참고문헌

- [1]. B.H Park, "Analysis of Front End Bending in Plate Rolling by Finite Element Method," Department of Mechanical Engineering, POSTECH, 1993
- [2]. S. Shida, "Emprical formula of flow-stress of carbon steels resistance to defromation of carbon steels at elevated temperature. 2nd report," Journal of the Japan society for technology of plasticity, 1969, Vol.10, pp.610-617
- [3]. S.M. Hwang, M.S. Joun and J.S. Park, "A penalty Rigid-Plastic Finite Element Method for the Determination of Stress Distributions at the Tool-Workpiece Interfaces in Metal Forming," Proc, 18th NAMRC, University Park, Pennsylvania, 1990, pp.13

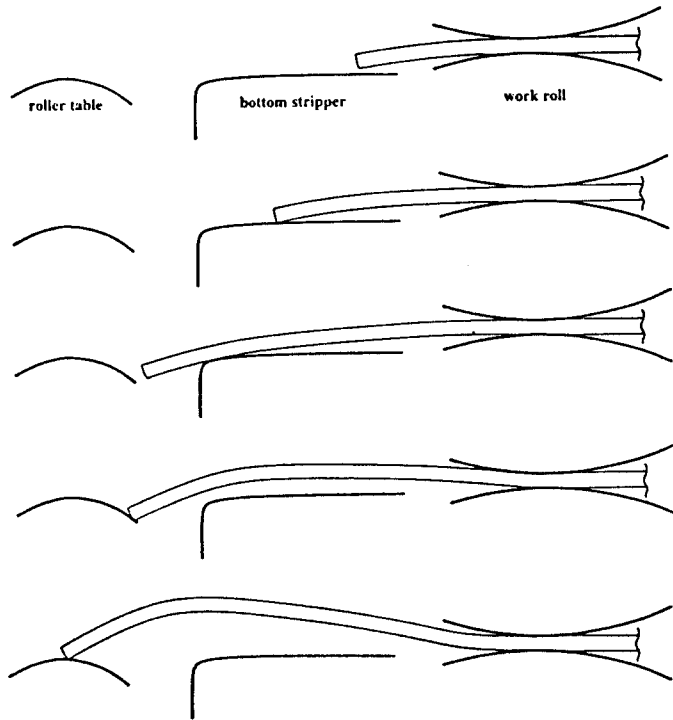


그림 1 : 시간에 따른 판 선단부형상 변화추이

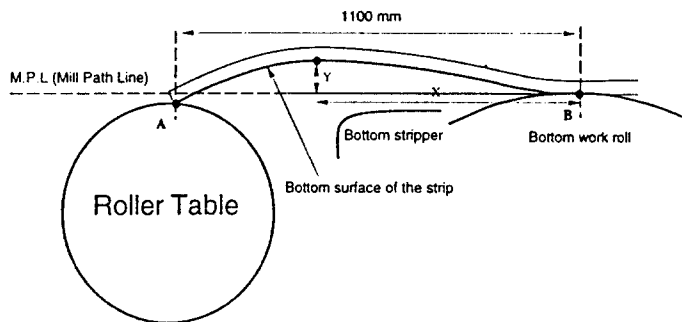
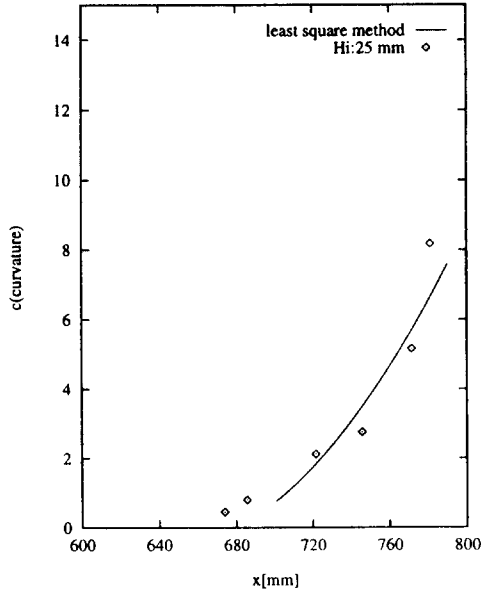
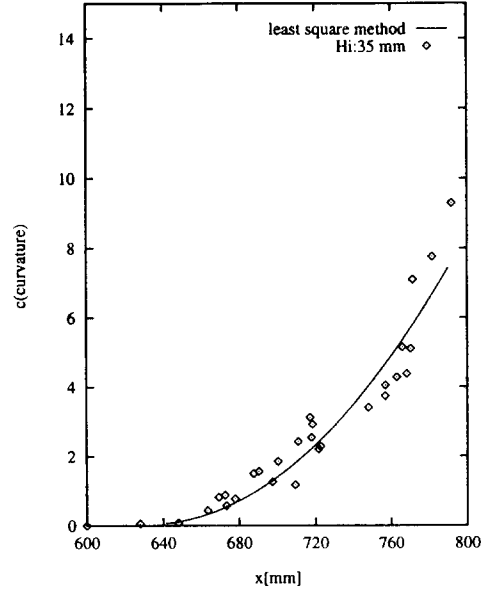


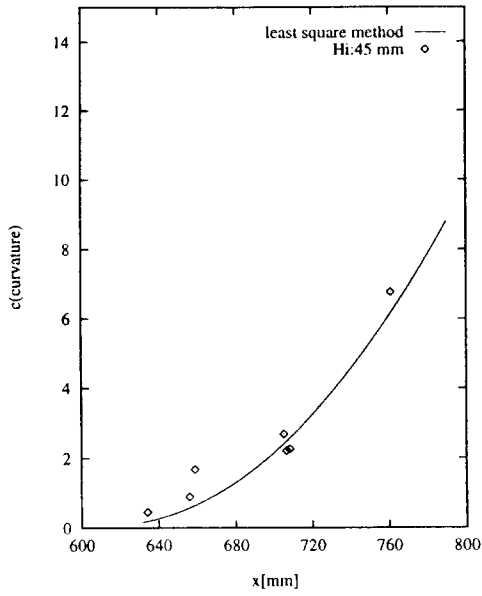
그림 2 : 해석 종료후의 판의 형상



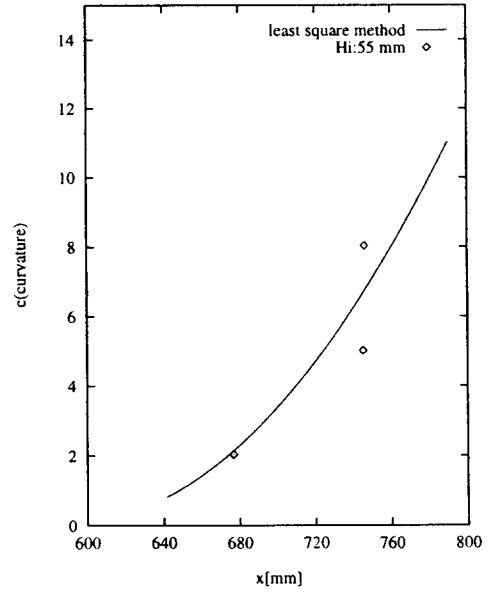
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3 : 판의 두께에 대한  $x$  좌표와 곡률간의 관계 (a)  $H_i : 25$ mm, (b)  $H_i : 35$ mm, (c)  $H_i : 45$ mm, (d)  $H_i : 55$ mm