

사상 압연 공정에서 꼬임 발생 메커니즘에 대한 기초 연구

신기현(건국대학교 기계항공공학부), 권순오, 이창우, 안영세*(건국대학교 대학원 기계설계학과)
정동택(한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부), 홍완기(RIST)

Fundamental Study on Pinching Mechanism in Hot Strip Mill

K. H. Shin(Mecha. Eng. Dept. KKU), S. O. Kwon, C. W. Lee, Y. S. An*(Mecha. Design Dept., HKU)
D. T. Jeong (Mecha. Eng. Dept. KUT), W. K. Hong(RIST)

ABSTRACT

It is very important to find out causes of strip pinching for the high quality of products and for the stable operation of hot rolling system. We have examined the strip pinching from three points of view to find out the causes of strip pinching in hot rolling system: strip shape, rolling operation conditions, and behavior of strip. Wedge, off center, and difference of rolling force through CMD are found to possibly provide major initial causes of strip pinching. Generally strip pinching occurred in the tail of strip. Thus, computer simulations by using a FEM code were also carried out to find out the initial mechanism of strip pinching depending upon the force and geometric boundary conditions at the time of strip tail rolling. The strong compression force effect due to the sudden release of strip tail from the work roll and non-uniform strip tail shape (ex. Tongue tail) across the CMD were found to provide possible major causes of strip pinching.

Key Words : 꼬임(Pinching), 웬지(Wedge), 오프센터(Off-center), 장력(Tension), 압연(Rolling), 혀 형상 끝단(Tongue tail), 물고기 꼬리 형상 끝단(Fish tail), 폭 방향(Cross machine direction)

1. 서론

연속공정 시스템의 각 기계 단위 공정 중 압연 공정이 수행되는 동안 소재는 두께가 점점 얇아지며 최종적으로 원하는 두께의 소재를 생산한다. 이러한 압연공정에서 발생하고 있는 꼬임현상은, 압연공정을 거친 소재가 폭 방향의 양 끝 단에서 소재의 진행방향으로 과도한 변형량의 차이로 인해, 다음 압연공정이 시작 될 때 늘어난 쪽 소재가 겹쳐서 롤 바이트(Roll bite) 부로 들어가게 되는 현상을 말한다.

꼬임현상은 소재의 생산성과 품질에 큰 영향을 주고 있으며 잦은 시스템의 정비와 교체를 요구하게 되므로 경제적인 손실을 가져오고 있다. 이러한 꼬임현상에 대해 그 원인을 규명하고 꼬임 방지를 위한 제어방안 도출이 요구되고 있다. 그러나 꼬임의 발생원인 뿐만 아니라 이에 대한 해결방안에 대해 보고된 바가 거의 없다. 현재 꼬임의 구체적인 발생원인에 대하여 보고된 바는 없지만 스트립 캠버(Strip camber)의 발생으로 인하여 나타나는 현상

중의 하나로 꼬임이 나타나고 있는 것으로 유추되므로, 스트립 캠버의 발생원인들 중에 꼬임을 유발시키는 요인이 존재할 수 있다고 가정하였다. 캠버를 발생시키는 원인^{4,5}으로는 소재 폭 방향으로의 변형량의 차이, 웬지, 오프센터, 작업 롤(Roll)의 마모, 밀 계수의 변화, 소재 폭 방향으로의 온도차이, 롤 갭(Gap) 차이 등이다. 스트립 캠버로 나타나는 현상들이 Fig. 1에 나타나 있다.

본 논문에서는 꼬임현상에 대한 기존 연구 내용을 바탕으로 소재의 형상, 압연 작동조건, 소재의 거동의 관점에서 압연되는 소재의 폭 방향으로의 속도분포와 장력분포를 알아보고자 하였으며, 폭 방향으로 미소 소재간의 상호작용(Interaction)을 고려한 경우의 장력 분포 등을 통하여 꼬임 메커니즘(Mechanism)을 알아보고자 하였다. 꼬임은 소재의 형상, 압연 작동조건(Operating condition) 그리고 소재의 거동 등의 결합에 의해 나타날 수 있음이 밝혀졌다. 마지막으로 꼬임이 흔히 소재 끝단 압연시에 발견되므로, 끝단 소재의 형상과 장력분포 등에 따른 소재의 형상변화에 대하여 유한요소해석법

(FEM)을 이용하여 시뮬레이션(Simulation)연구를 수행하였다. 시뮬레이션 결과, 물고기 꼬리 모양(Fish tail)의 소재 끝단을 압연할 때에, 꼬임이 발생 확률이 가장 높은 것으로 나타났다.

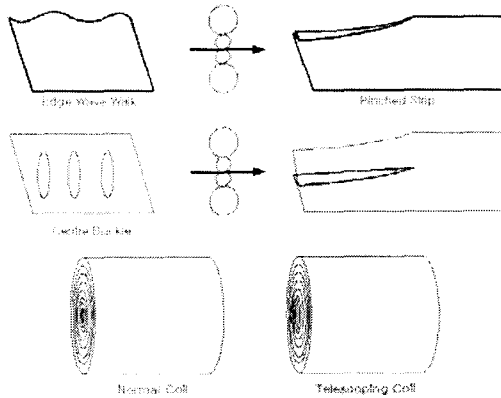


Fig. 1 Various bad strips

2. 주요 꼬임 발생 요인에 따른 꼬임 해석

2.1 해석 접근 방법 및 수학적 모델

꼬임 해석을 단순화 하기 위하여, Fig. 2 와 같이 전체 소재를 폭이 좁은 여러 개의 미소체의 합으로 구성되어있다고 가정하였다.

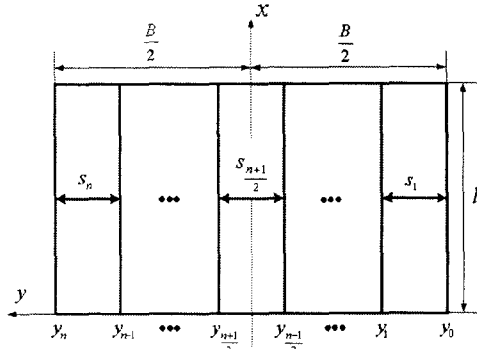


Fig. 2 The strip element division in the deformation zone

본 절에서의 해석에서는 미소체 간의 폭 방향 상호작용은 고려되지 않으며 각 미소체 내에서는 폭 방향으로 두께가 일정하다고 가정하였다. 웬지, 오프센터의 요인들이 소재의 길이 및 폭 방향의 변형에 미치는 영향을 살펴보기 위해 전체 소재의 변형을 각 미소체들의 선형적 합으로 가정하였다.

Fig. 3 은 압연공정을 도식적으로 표현한 것으로 소재가 소성변형하여 두께가 h_i 에서 h_o 로 변하는 과정을 나타낸 것이다. 이때 소성변형하는 소재의

반발력을 압하력이라 하고, 압하력, 소재응력, 소재 두께, 롤 반경 등 주요 파라메타에 대한 관계식²은 식 (1), (2)와 같다.

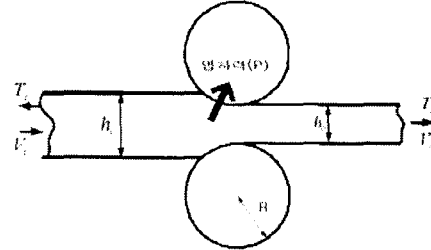


Fig. 3 Thickness variation in rolling

$$P = \bar{K} \left(1 - \frac{\sigma_t}{\bar{K}}\right) \sqrt{R'(h_i - h_o)} f(arb) \quad (1)$$

$$R' = R \left(1 + \frac{cP}{W(h_i - h_o)}\right) \quad (2)$$

식 (1), (2)에서 T 는 소재의 장력, V 는 소재의 이송속도, R 은 롤의 반경, R' 은 변경된 롤 반경, W 는 소재의 폭, \bar{K} 는 평균 변형저항, σ 는 소재의 길이 방향 응력, $f(arb)$ 는 압하력 함수(Rolling force function)이다. 각 미소체 내에서는 폭 방향으로 두께 변화가 없다고 가정하였으므로, 변수간의 관계식으로 식 (1), (2)를 적용하였다.

2.2 주요 꼬임 발생 요인이 꼬임에 미치는 영향 예측

2.2.1 소재 형상

폭 방향으로 두께가 일정하지 않은 소재를 웬지를 지닌 소재라고 한다. 웬지를 지닌 소재의 압연 시에, 압연 후 롤 출측의 소재 속도를 규명하기 위하여 롤 갭 제어에 의해 소재의 출측 두께는 일정하게 유지된다고 가정한다.

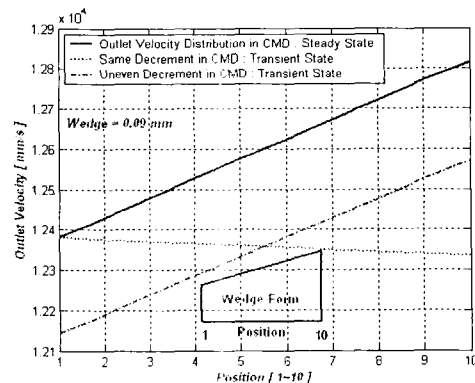


Fig. 4 Outlet velocity of wedge strip in transient state

Fig. 4는 롤 갭 제어 시, 과도구간에서 나타나는 압연기 출측에서의 폭 방향 속도분포이다. 압연과정 중 과도 상태에서 발생하는 소재의 폭 방향 속도 분포가 Fig. 4에서처럼 두께 감소량이 균일한 경우(Same decrement in CMD)와 불 균일한 경우(Uneven decrement in CMD)처럼 서로 다른 경향을 지닐 수 있으며, 소재의 폭 방향으로 각 포지션에서 정상상태로 이르기까지 소재가 겪는 속도 변화량은 매우 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 속도 변화는 인터스탠드(Inter-stand) 소재의 장력에 큰 영향을 미친다.

2.2.2 압연 운용조건

오프센터는 소재의 중앙부와 롤 중앙부 간의 차이를 의미한다.

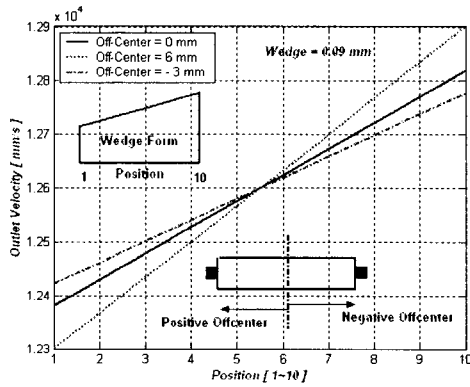


Fig. 5 Outlet velocity of off-center strip in transient state

Fig. 5는 과도구간에서 오프센터가 존재하는 경우의 출측 속도 분포를 나타낸 것이다. Fig. 5에 점선과 일점쇄선으로 나타난 바와 같이 오프센터는 크기에 따라서 소재의 폭 방향으로의 속도 분포 차이를 악화하기도 하고 그와 반대로 상쇄하기도 한다.

2.2.3 소재 거동

Fig. 6은 압연 시 두 개의 스탠드 사이에서 소재두께와 장력간의 관계를 나타낸다.

압연 시 소재의 두께 감소량과 출측 속도는 인터스탠드에서의 소재의 장력에 영향을 주며, 이에 대한 장력모델^{1,2,3}은 식 (3)에 나타내고 있으며, A 는 단면적, E 는 탄성계수이다.

$$\frac{d}{dt}[T_1(t)] = -\frac{v_{120}}{L} T_1(t) + \frac{v_{10}}{L} \frac{A}{A_0} \frac{E_1}{E_0} T_0(t) + \frac{A E_1}{L} \left[\frac{V_2 h_{20} + v_{20} H_2 - v_{120} H_1}{h_{10}} - \frac{V_0 h_{010} + v_{010} H_{01} - v_{01} H_1}{h_{10}} \right] \quad (3)$$

Fig. 7은 압연 과정의 과도구간에서 웬지로 인해 Fig. 4와 같은 출측 폭 방향 속도분포를 지니는 경우에 나타나는 인터스탠드에서의 소재 폭 방향 장력 분포이다.

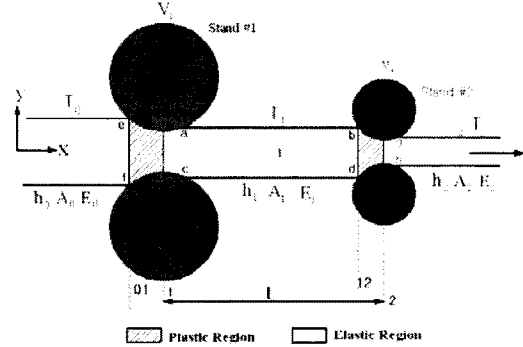


Fig. 6 Strip tension between two stand in rolling

또한 Fig. 7는 과도구간에서 폭 방향으로 두께 감소량이 균일한 경우와 폭 방향으로 두께 감소량이 불 균일한 경우에 대한 결과를 비롯하여 과도구간을 거친 후 정상상태에서 나타나는 폭 방향 장력분포를 나타내고 있다.

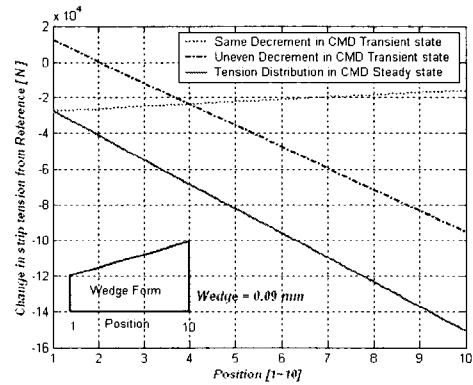


Fig. 7 Tension variation across CMD of wedge strip

Fig. 7을 통해서 폭 방향으로 두께 감소량이 불 균일한 경우는 두께 감소량이 균일한 경우보다 소재 폭 방향으로의 장력 변화가 매우 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉, 소재 형상에 따라 압연이 이루어지는 동안에 소재가 겪는 두께 변화 과정에 따라 특정 위치에서 장력의 변화가 크게 일어날 수 있다.

3. 소재의 CMD 방향 거동 관점에서의 꼬임 해석

3.1 Strip Element Method

기존연구에서 압연 시에 발생하는 폭 방향에 대한 장력분포에 대한 연구는 Three-dimensional finite different method, Three-dimensional finite element method, Lateral displacement function⁷ 으로 수행되어 왔으나, 최근 압연되는 제품들의 특성이 두께에 비해 소재의 폭이 매우 크기 때문에 연산결과와 실제 측정치와의 거리가 매우 크게 나타났다. 그래서, 소재의 폭 방향 장력분포를 얻기 위해, 소재의 횡 방향 변형을 고려한 Strip element method 를 적용하였다.

소재의 소성변형구간에 대해 Fig. 2 와 같이 소재를 폭 방향으로 여러 개의 요소로 분리하여 Strip element method 를 적용한다. Fig. 2 에서 l 은 소재의 변형구간, B 는 소재의 폭을 나타낸다. 소재를 폭 방향에 따라 여러 개의 미소요소로 나눈다. 이러한 요소들간의 상호영향을 고려하기 위하여 Lateral displacement function 은 식 (4)와 같다. $f(x)$ 는 식 (5)와 같이 표현되며, 소재의 변형구간의 출측 ($x=l$)에서 Third power spline 는 식 (6)와 같이 표현된다. 기존연구⁶에서 실제실험데이터와 연산데이터와의 에러가 Third-power spline 으로 구성된 Lateral displacement function 을 사용할 경우 가장 적게 나타나는 것으로 보고되었기에 Lateral displacement function⁶ 을 Third-power spline 으로 구성하였다.

$$W(x, y) = f(x)u(x) \quad (4)$$

$$f(x) = 1 + 4\left(\frac{x}{l} - 1\right)^3 + 3\left(\frac{x}{l} - 1\right)^4 \quad (5)$$

$$u(x) = \frac{(y-y_0)^2}{s_1^2} [3s_1 - 2(y-y_0)]u_1 + \frac{(y-y_1)^2}{s_2^2} [3s_2 - 2(y-y_1)]u_2 + \frac{(y-y_2)^2}{s_3^2} [s_3 - (y-y_2)]u_3 \quad (6)$$

3.2 Front Tension Stresses

압연과정 이전과 이후에 대하여, 질량보존법칙으로부터 Front tension stresses 는 식 (7)과 같은 수학적 모델^{7,8}로 표현될 수 있다

$$\sigma_1 = \frac{T_1}{Bh_1} + \sigma_{00} + \frac{E}{1-\nu^2} \left[\frac{h_1(y)}{h_1} - \frac{h_0(y)}{h_0} + u'(y) - \frac{u_1 - u_2}{B} \right] \quad (7)$$

식 (7)에서 σ_1 은 Front tension stress, T_1 은 Total front tension, \bar{h}_1 와 \bar{h}_0 는 소재의 출측과 입측 평균 두께, $h_1(y)$ 와 $h_0(y)$ 는 폭 방향(y)에 따른 소재의 출측과 입측의 두께, B , E , ν 는 각각 소재의 폭, 탄성계수, 포아송비를 나타내며, σ_{00} 는 진행방향으로 초기 소재의 잔류 응력이다.

식 (7)의 수학적모델을 통하여 소재의 폭 방향에 따른 두께 감소량의 차이가 존재할 때, 소재의 폭 방향으로의 장력분포형태를 예측할 수 있다.

3.3 시뮬레이션

압연공정 중 소재의 형상에러인 웬지가 폭 방향 장력분포에 미치는 영향을 살펴보고자 하며, 이로 인해 발생한 소재의 폭 방향에 따른 장력의 차이가 소재의 횡 방향으로 모멘트를 유발할 수 있음을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

출측 소재의 두께가 폭 방향으로 동일할 때, 웬지를 지닌 소재가 압연구간으로 입력되는 경우에 소재의 폭 방향에 따라 두께 감소량의 차이가 발생한다. 이는 폭 방향으로 장력 차를 유발하고 있다.

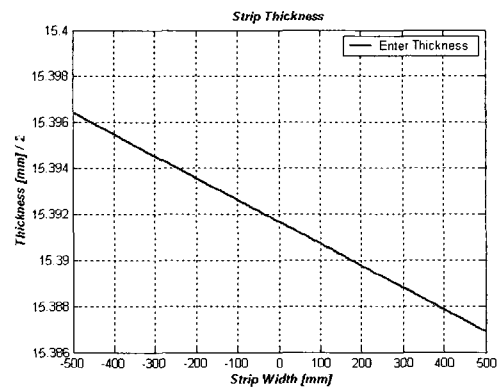


Fig. 8 Entry Thickness of Wedge Strip

Fig. 8 에서 소재에 존재하는 웬지량은 평균두께에 대해 -0.06% 이며, 정량적인 수치로는 $20\mu m$ 의 웬지량을 지닌다.

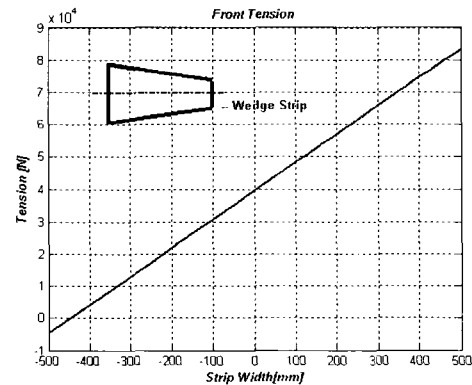


Fig. 9 Transverse distribution of front tension

Fig. 8 에서의 소재에 대하여 장력 분포는 Fig. 9 에 나타나고 있다. 소재의 두께 감소량이 증가할 경우 이에 따라 소재의 장력 값은 감소하고 있다.

Fig. 9 의 결과로부터 Fig. 10 과 같이 소재의 중심점(o)에 대해 반 시계방향으로 모멘트가 작용함을 알 수 있으며, 컴퓨터 연산에 의한 모멘트의 정

양적인 수치는 $3.77 \times 10^7 N$ 이다.

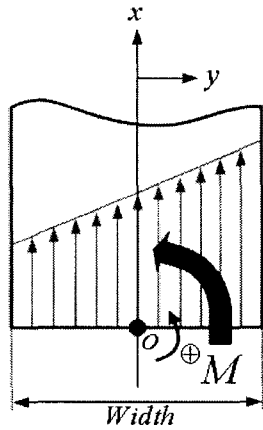


Fig. 10 The existing of moment

이와 같이 소재의 횡 방향으로의 모멘트는 결국 소재의 꼬리부가 압연 롤을 빠져나가는 순간 발생하는 소재의 진동현상에 대한 초기조건으로써 큰 영향을 미칠 것으로 사료된다.

압연구간으로 입력되는 소재에 웬지가 존재할 때, 출측소재는 폭 방향에 걸쳐 서로 다른 장력값을 지니게 된다. 이러한 폭 방향으로의 장력값의 차이로 인해, 압연공정 중 소재의 중심점을 기준으로 소재는 모멘트의 영향을 계속 받게 된다. 이러한 현상은 소재의 꼬리부가 압연 롤을 빠져 나오는 순간에 소재에 작용하고 있던 모멘트의 영향으로 인해 소재는 횡 방향으로의 힘을 받게 된다. 즉 소재의 꼬리부의 형상과 소재에 작용하는 모멘트가 특정 경계조건에서 횡 방향으로 매우 큰 힘이 발생한다.

4. 소재 형상 변화 해석

4.1 사상 압연 공정에서의 꼬임의 요인 분석

인장상태의 소재가 롤을 빠져 나오는 순간 소재의 경계조건(Boundary condition)이 압연기에 의해 압연된 상태에서 압연기를 빠져나온 상태로 변화한다. 즉 인장력이 가해져 있는 소재의 끝단에 순간적으로 압축응력이 걸리게 된다. 이로 인해 압축응력파가 발생하고 결국 파장 길이(Wave length)가 짧은 소재방향과 수직한 방향으로 주름이 발생할 수 있다. 이러한 국부적인 주름은 시간이 증가하면서 응력파가 전파되고 반사되면서 진동모드를 발생시킨다. 또한 소재 끝단에 발생한 압축응력파가 균일한 값 대신에 변화한 값을 가지는 경우에는 주름의 방향 자체는 변화가 없으나 폭 방향의 분포가 균일하지 않게 된다. 이럴 경우에는 최종 진동모드

가 상하진동모드와 길이방향의 비틀림 진동모드가 혼합된 진동을 하게 된다. 진동에 의한 폭의 변화가 심할 경우에 소재는 꼬임이 발생함을 확인하였다.

4.2 다양한 경계조건에 따른 꼬임발생 해석

소재 끝단(Strip tail) 이 압연기를 빠져나가는 순간, 소재 끝단의 형상, 즉 다양한 경계조건에 의해서 꼬임이 발생할 수 있음을 예측하고 이에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

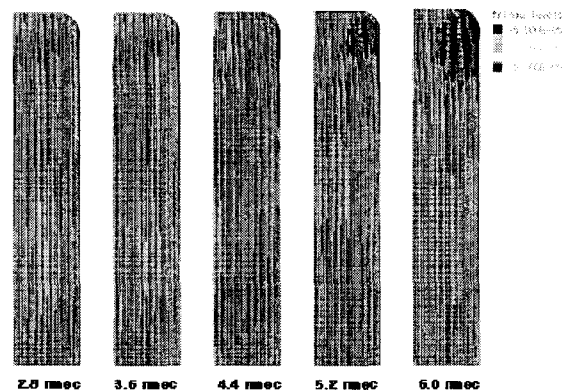


Fig. 11 Profile of z displacement

소재가 압연기를 빠져나갈 경우 소재의 75%부분만이 압연기에서 압연이 이루어지고 나머지 25%부분은 소재가 압연기로부터 빠져 나온 상태가 된 경우에 발생하는 z 방향의 변위에 대하여 Fig. 11에 나타나고 있다. 소재가 압연기로부터 빠져 나온 상태에 놓인 부분에서 폭 방향으로의 인장 및 압축으로 인해 z 방향으로의 변위가 발생하고 있다.

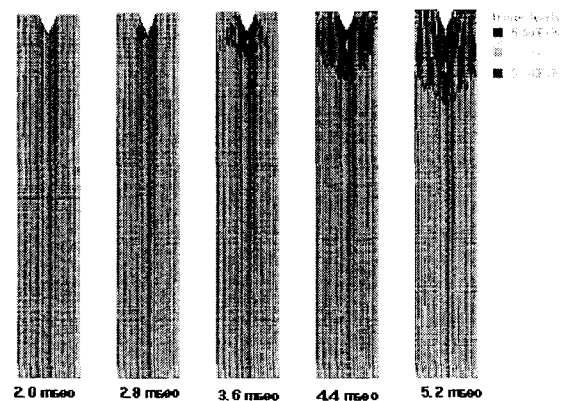


Fig. 12 Profile of z displacement

Fig. 12 는 소재가 물고기 꼬리 형상 끝단을 지나는 경우에는 z 방향으로의 변위의 크기뿐만 아니라

라 발생범위도 매우 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 여러 가지 경우를 비교해 볼 때, 물고기 꼬리 형상 끝단을 지나는 소재의 꼬리부가 압연기를 빠져나가는 순간, 소재의 꼬임이 발생할 확률이 가장 큰 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 사상압연 공정에서 발생하는 꼬임현상에 대하여, 기존 연구를 바탕으로 소재의 형상, 압연 조건(Operation condition), 소재의 거동 관점에서 꼬임을 유발하는 기본 원리를 밝히기 위한 기초연구를 수행하였다. 웬지와 오프센터로 인하여 소재의 특정부분에서 장력변화가 크게 발생하여, 짧은 시간동안 소재가 접혀지는 현상이 발생할 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 증명하였다. 또한 소재의 형상이 소재 두께의 1% 정도의 작은 웬지를 지닌 경우에도 폭 방향으로 큰 장력차가 발생하며 이러한 소재가 스탠드(Stand)를 빠져나갈 경우 꼬임이 유발 될 수 있는 모멘트(Moment)가 소재에 발생한다. 위에서 밝혀진 소재의 형상, 압연조건, 장력의 변화를 경계조건으로 사용하여, 유한 요소법(FEM)을 통한 소재 형상변화 해석을 수행하였다.

소재의 형상과 압연 조건 및 소재의 거동은 꼬임발생의 초기 원인을 제공함을 확인 하였으며, 꼬임 발생 현상에 대한 경계조건으로써 소재의 끝단 형상이 소재의 꼬임에 매우 중요한 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 다양한 소재의 끝단 형상들 중에서도 물고기 꼬리 형상 끝단을 지닌 소재가 압연기를 빠져나가는 순간에 소재의 폭 방향으로 접히는 꼬임현상이 발생할 확률이 가장 크게 나타나고 있음을 시뮬레이션 결과를 통해 확인하였다.

후 기

본 연구는 포항산업과학연구원(RIST)의 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Kee-Hyun Shin , Wan-Kee Hong. "Real-Time Tension Control in a Multi-Stand Rolling System". KSME . Vol 12 . No1 . pp.12-21 . 1998
2. 신기현 , 홍완기 . "압연공정에서의 판 두께 제어". 한국자동제어학술회의 논문집. Pp1141-1146. 1993
3. Kee-Hyun Shin, "Tension control". 2000. TAPPI Press
4. D.L. Biggs, S.J. Hardy, and K.J. Brown . "Finite element modeling of camber development during hot rolling of strip steel". 1998

5. D.L. Biggs , S.J. Hardy and K.J. Brown . "Influence of process variables on development of camber during hot rolling of strip steel " . 2000
6. H.Liu , J. Lian , Yan Peng, " Third-power spline function strip element method and its simulation of the three-dimensional stresses and deformations of cold strip rolling ", Journal of materials processing technology, 116, 2001, 235-243
7. H.Liu , J. Lian, " Transverse distribution of front and back tension stresses in cold strip rolling ", Chin.J.Met.Sci.Technol., Vol8, 1992
8. H.Liu , J.Lian , " Linear strip element method analyzing lateral flow of metal and transverse diction of tension stress of cold rolling ", Iron Steel Res, 4(3)(1992) 37-44