

압연 공정에서 꼬임 발생 메커니즘에 대한 기초 연구

이창우*, 신기현#, 홍완기**, 정동택***

Fundamental Study on Mechanism of Strip Pinching in Rolling

Chang Woo Lee*, Kee Hyun Shin#, Wan Kee Hong** and Dong Taek Jung***

ABSTRACT

It is very important to find out causes of strip pinching for the high quality of products and for the stable operation of rolling system. We have examined the strip pinching from three points of view to find out the causes of strip pinching in rolling system: strip shape, rolling operation conditions, and behavior of strip. Wedge, off center, and difference of rolling force through CMD(Cross machine direction) 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. Fish tail) across the CMD were found to provide possible major causes of strip pinching.

Key Words: Cross machine direction(폭 방향), FEM(유한요소법), Off-center(오프센터), Strip pinching(꼬임), Strip tail(소재끝단), Tension(장력), Wedge(웬지)

1. 서론

연속공정 시스템의 각 기계 단위 공정 중 압연공정이 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 접혀서 롤 바이트(Roll bite) 부로 들어가게 되

는 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 꼬임방지를 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

접수일: 2004 년 10 월 7 일 ; 게재승인일 : 2004 년 10 월 7 일

* 건국대학교 기계설계학과
교신저자, 건국대학교 기계항공공학부
Email: khshin@konkuk.ac.kr Tel. (02) 450-3072
** POSCO 기술연구소 공정제어그룹
*** 한국기술교육대학교 메카트로닉스 공학부

나타나는 현상 중의 하나로 꼬임이 나타나고 있는 것으로 유추되므로,^{1,2} 스트립 캠버의 발생원인들 중에 꼬임을 유발시키는 요인이 존재할 수 있다고 가정하였다.^{3,4} 캠버를 발생시키는 원인으로는 소재 폭 방향으로의 변형량의 차이, 웬지, 오프센터, 작업 물의 마모, 밀 계수의 변화, 소재 폭 방향으로의 온도차이, 롤 갭(Gap) 차이 등이다. 스트립 캠버로 나타나는 현상들이 Fig. 1 에 나타나 있다.^{2,3,4,5,11}

본 논문에서는 꼬임현상에 대한 기존 연구 내용을 바탕으로 소재의 형상, 압연 작동조건, 소재의 거동의 관점에서 압연되는 소재의 폭 방향으로의 속도분포와 장력분포를 알아보려고 하였으며, 폭 방향으로 미소 소재간의 장력 분포 등을 통하여 꼬임 발생 메커니즘을 알아보려고 하였다. 본 연구를 통하여, 꼬임은 소재의 형상, 압연 작동조건 그리고 소재의 거동 등의 결합에 의해 나타날 수 있음이 밝혀졌다. 마지막으로 꼬임현상은 주로 소재의 끝단(Strip tail) 압연 시에 발견되므로, 소재 끝단의 형상과 장력분포 등에 따른 소재의 형상변화에 대하여 유한요소해석법(FEM)을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과, 물고기 꼬리 모양(Fish tail)의 소재 끝단을 압연 시, 꼬임 발생 확률이 가장 높은 것으로 나타났다.

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.^{6,7}

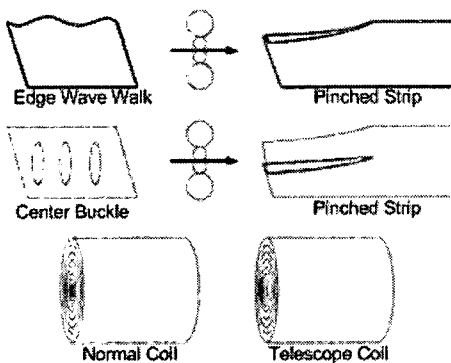


Fig. 1 Various bad strips

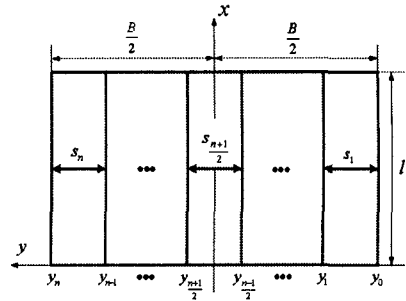


Fig. 2 The strip element division in rolling

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-1} 에서 h_i 로 변하는 과정을 나타내고 있으며, Fig.4 는 압연과정 중 발생하는 변경된 롤 반경에 대해 나타내고 있다. 소성 변형하는 소재의 반발력을 압하력(P)이라 하며, 압하력, 소재응력, 소재두께, 롤 반경 등 주요 파라메타에 대한 관계식⁸ 은 식 (1), (2)와 같다.

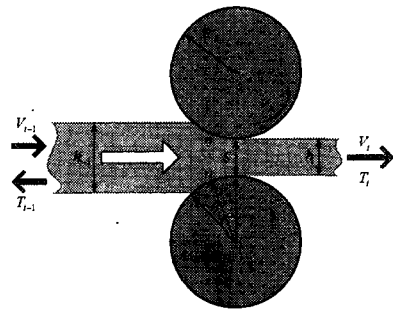


Fig. 3 Thickness variation in rolling

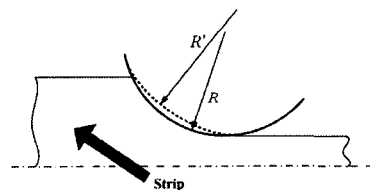


Fig. 4 Schematic of elastic deformation of a roll

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

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

식 (1), (2)에서 P 는 압하력, 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, 미소체 내에서 변수간의 관계식으로 식 (1), (2)를 적용하였다.

2.2 꼬임 발생에 대한 주요 변수 해석

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. 5는 롤 갭 제어 시, 과도구간에서 나타나는 압연기 출측에서의 폭 방향 속도분포이다. Fig.5에서, 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 정상 상태에 이르기까지 소재가 겪는 속도 변화량은 매우 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 속도 변화는 인터스탠드(Inter-stand) 소재의 장력에 큰 영향을 미친다.

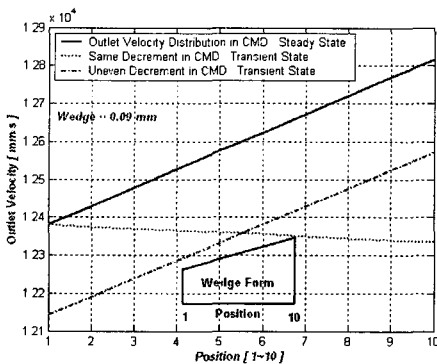


Fig. 5 Outlet velocity of wedge strip in transient state

2.2.2 압연 운용조건

오프센터는 소재의 중앙부와 롤 중앙부 간의 차이를 의미한다.

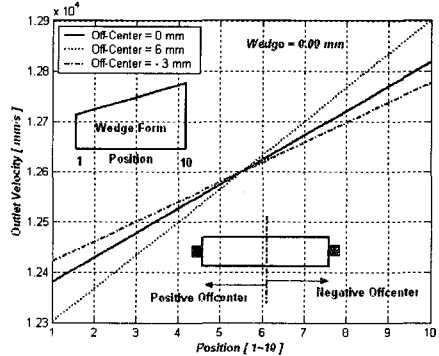


Fig. 6 Outlet velocity of off-center strip in transient state

Fig.6은 과도구간에서 오프센터가 존재하는 경우의 출측 속도 분포를 나타낸 것이다. Fig.6에 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. 7은 압연 시 두 개의 스탠드 사이에서 소재두께와 장력간의 관계를 나타낸다. 압연 시 소재의 두께 감소량과 출측 속도변화는 인터스탠드에서의 소재의 장력에 영향을 주며, 이에 대한 장력모델^{9,10}은 식 (3)에 나타내고 있으며, A 는 단면적, E 는 탄성계수, ϵ 은 소재의 변형률이다.

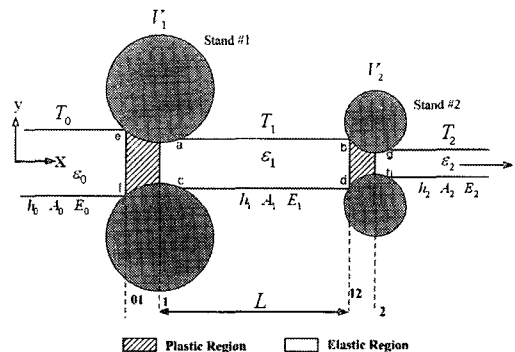


Fig. 7 Strip tension between two stands

$$\frac{d}{dt}[T_i(t)] = -\frac{v_{i20}}{L} T_i(t) + \frac{v_{i0}}{L} \frac{A_i E_i}{A_0 E_0} T_0(t) + \frac{A_i E_i}{L} \left[\frac{V_2 h_{20} + v_{20} H_2 - v_{120} H_1}{h_{i0}} - \frac{V_0 h_{010} + v_{010} H_{01} - v_{01} H_1}{h_{i0}} \right] \quad (3)$$

식(3)에서, h_{i0} 은 정상상태에서의 소재 두께이며, H_i 은 소재의 두께 변화량, v_{i0} 은 정상상태에서의 소재의 이송속도, V_i 은 소재의 이송속도의 변화량을 나타내고 있다.

Fig.8 은 압연 과정의 과도구간에서 웬지로 인해 Fig.5 와 같은 출측 폭 방향 속도분포를 지니는 경우에 나타나는 인터스탠드에서의 소재 폭 방향 장력 분포이다. Fig. 8 에서 소재의 폭 방향으로 두께 감소량이 불 균일한 경우는 두께 감소량이 균일한 경우보다 소재 폭 방향으로의 장력 변화가 매우 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉, 입측 소재 형상에 따라, 압연 시 소재는 폭방향으로 서로 다른 두께변화를 겪게 된다. 이로 인하여 특정 위치에서 극심한 장력 변화가 발생할 수 있다.

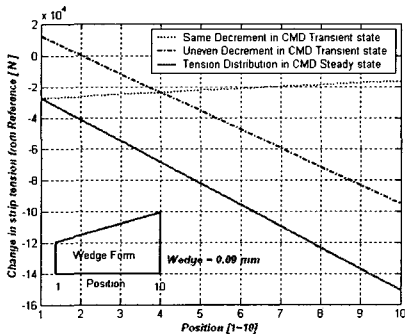


Fig. 8 Tension variation across CMD of strip wedge

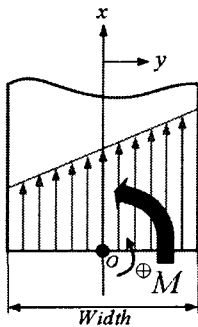


Fig. 9 The occurrence of moment

소재의 폭방향에 대해 발생한 장력차이는 Fig.9 와 같이 모멘트를 발생 시킨다. 이러한 소재의 횡 방향으로의 모멘트는 결국 소재의 꼬리부가 압연 롤을 빠져나가는 순간 발생하는 소재의 진동 현상에 대한 초기조건으로써 큰 영향을 미칠 수 있다.

3. 소재 형상 변화 해석

3.1 압연공정에서의 꼬임 요인 분석

인장상태의 소재가 롤을 빠져 나오는 순간 소재의 경계조건이 압연기에 의해 압연된 상태에서 압연기를 빠져 나온 상태로 변화한다. 즉 인장력이 가해져 있는 소재의 끝단에 순간적으로 압축응력이 걸리게 된다. 이로 인해 압축 응력파가 발생하고 결국 파장 길이(Wave length)가 짧은 소재 방향과 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 방향으로의 분포가 균일하지 않게 된다. 이럴 경우에는 최종 진동모드가 상하진동모드와 길이방향의 비틀림 진동모드가 혼합된 진동을 하게 된다. 진동에 의한 폭의 변화가 심할 경우에 소재는 꼬임이 발생함을 확인하였다.

3.2 다양한 경계조건에 따른 꼬임발생 해석

소재 끝단이 압연기를 빠져나가는 순간, 소재 끝단의 형상, 즉 다양한 경계조건에 의해서 꼬임이 발생할 수 있음을 예측하고, FEM 코드를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

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.10 에 나타내고 있다. 소재가 압연기로부터 빠져 나온 상태에 놓인 부분에서 폭 방향으로의 인장 및 압축으로 인해 z 방향으로의 변위가 발생하고 있다.

Fig.11 에서, 소재가 물고기 꼬리 형상 끝단을 지나는 경우에는 z 방향으로 변위의 크기뿐만 아니라 발생범위도 매우 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

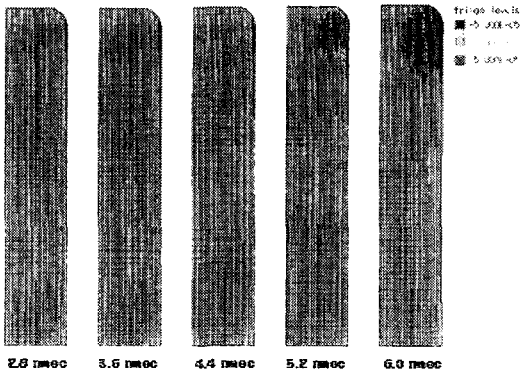


Fig. 10 Profile of z displacement

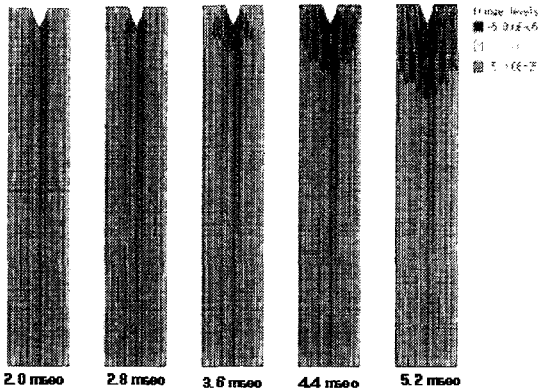


Fig. 11 Profile of z displacement

위의 시뮬레이션결과로부터, 물고기 꼬리 형상 끝단(Fish tail)을 지나는 소재의 꼬리부가 압연기를 빠져나가는 순간, 소재의 꼬임이 발생할 확률이 가장 큰 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 압연 공정에서 발생하는 꼬임 현상에 대하여, 기존 연구를 바탕으로 소재의 형상, 압연 조건, 소재의 거동 관점에서 꼬임을 유발하는 기본 원리를 밝히기 위한 기초연구를 수행하였다. 웬지와 오프센터로 인하여 소재의 특정부분에서 장력변화가 크게 발생하여, 짧은 시간 동안 소재가 접혀지는 현상, 즉 꼬임(Strip pinching)이 발생할 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 증명하였다. 또한 소재의 형상이 소재 두께의 1% 정도의

작은 웬지를 지닌 경우에도 폭 방향으로 큰 장력차가 발생하며 이러한 소재가 스탠드를 빠져나갈 경우 꼬임이 유발 될 수 있는 모멘트가 소재에 발생한다. 위에서 밝혀진 소재의 형상, 압연조건, 장력의 변화를 경계조건으로 사용하여, 유한 요소법을 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(Fish tail)을 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 감사 드립니다.

참고문헌

1. Biggs, D. L., Hardy, S. J. and Brown, K. J., "Finite element modeling of camber development during hot rolling of strip steel," *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 25, No.1, pp.81-89, 1998.
2. Biggs, D. L., Hardy, S. J. and Brown, K. J., "Influence of process variables on development of camber during hot rolling of strip steel," *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 27, No.1, pp.55-62, 2000.
3. Toshikazu, S., Haruhiro, I., Atsuo, M., Shingo, N., Eiji, Y. and Kiyoshi, H., "Relation between Camber and Wedge in Flat Rolling under Restrictions of Lateral Movement," *ISIJ International*, Vol.31, No.6, pp.583-587, 1991.
4. Tanaka, Y., Omori, K., Miyake, M., Nishizaki, K., Inoue, M., Tezuka, S., "Camber control techniques in plate rolling," *Kawasaki Steel Technical Report*, No.16(June), pp.12-20, 1987.
5. Takashi, I., Yasuhisa, T. and Jun, N., "Fundamental Study on Snacking in Strip Rolling," *Transactions ISIJ*, Vol.28, pp.485-490, 1988.

6. Liu, H., Lian, J., Peng, Y., "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, pp.235-243, 2001.
7. Liu, H., Lian, J., "Linear strip element method analyzing lateral flow of metal and transverse diction of tension stress of cold rolling," *Iron Steel Res*, 4(3), pp.37-44, 1992.
8. Ginzberg, V. D., "High quality steel rolling," Marcel Dekker, New York, pp.162-248, 1993.
9. Shin, K. H., Hong, W. K., "Real-Time Tension Control in a Multi-Stand Rolling System," *KSME International Journal*, Vol.12, No.1, pp.12-21, 1998.
10. Shin, K. H., "Tension control," TAPPI Press, 2000.
11. Kim, D. H., Kim, B. M., Lee, Y. S., "Adjustment of Roll Gap for The Dimension Accuracy of Bar in Hot Bar Rolling Process," *Journal of KSPE*, Vol.19, No.6, pp.96-103, 2002.