

미니밀에서의 고압하울과 형상변화 최적화 방안에 관한 연구

최병우* · 김태효** · 황상무***

The Optimization of Shape Control in High Reduction Rolling in Minimill Process

B. W. Choi and T. H. Kim and S. M. Hwang

Abstract

In hot rolling process, new rolling mills have been apated to strip rolling but we can usually experience the problem of snaking of strip. This phenomenon was arisen by nonsymmetric rolling and off-centering and cambering of a strip and other mill conditions. Three dimensional analysis for strip rolling predicted the influence of nonsymmetric rolling, off-centering and pair crossing system. This study evaluated the fundamental characteristics of snaking of a strip to optimize the operating condition for trouble free rolling.

Key Words : Snaking of a Strip, Shape Control, Nonsymmetric Rolling, Off-Center, Crown of Strip, Wedge, Pair Cross, Finite Element Method, Free Surface

1. 서 론

열간 판재 압연 공정에서는 높은 품질의 제품을 생산하기 위한 새로운 형상제어 설비들이 개발되어지고 관련 기술이 적용되어지고 있다. 이론적으로도 롤의 탄성변형과 소재의 소성변형을 해석하는 3차원 해석 연구[1]와 판압연의 사행특성에 관한 해석[2]들이 발표되어 왔다. 이러한 해석은 소재의 비중심(Off-center) 압연이나 비대칭압연을 해석하여 그 영향도를 예측하고 있다. 또한 판압연에서의 캠버제어방법의 기초적 검토[3]가 시도되어 실제적으로 사행발생에 의한 품질의 이상과 사고 발

생에 의한 설비 손상을 사전에 차단하기 위한 노력이 점점 증가되고 있으며, 이에 대한 관심도 증대되고 있다. 그러나, 실제 사행 발생을 제어하는데는 계측장비와 제어 장비가 필요한 실정이다. 또한 압연과정에서 발생하는 사행발생의 원인이 복잡적이고 서로 교호작용까지 겹쳐져 사행발생억제를 위한 조사가 부족한 실정이다. 본 연구에서는 이 사행 발생 인자들을 알아 보고 이 인자들간의 영향도를 우선 파악하여 현장 조업 조건에 대처하고자 한다.

2. 사행 발생 Mechanism

* 포항공대 철강대학원
** 포항공대 기계공학과
*** 포항공대 기계공학과

2.1 사행 발생 해석

일반적으로 판이 롤의 바렐 중심에서 약간 벗어나서 진입을 하게 되면, 롤 바렐 양쪽의 롤갭이 다르게 되고, 따라서 판의 연신이 판의 폭 방향으로 변하게 된다. 이 연신의 차이는 롤 출구에서 전방 진행량과 입구에서의 후방 진행량이 변하게 된다. 따라서 입구에서 기울어져서 롤갭 출구에서 캠버를 유발한다. 이 현상이 압연기 사이에서 연속적으로 발생하게 되면 사행이 발생된다. 결국 사행 해석에서는 롤, 판, 압연기 하우징의 비대칭 변형과 압연기 간의 판의 운동과 캠버를 포함하게 된다. 사행을 유발하는 폭방향에 걸친 길이 방향 연신을 차는 두께와 지금까지의 해석에서는 무시되어 온 횡측 연신, 이 양쪽 모두에 따라 좌우된다. 이 사행량을 예측하기 위해 롤 갭내에서의 소재의 3차원 해석을 시행하고 압연 출구측에서의 mass center의 거동을 분석함으로써 그 사행량을 추정해 볼 수 있다.

2.2 사행 발생량 계산

일반적으로 롤 갭내에서의 소재의 metal flow의 계산에 의한 3차원 해석을 시행하고 압연 출구측에서의 mass center의 거동을 통해 (2.1)식과 같이 사행량을 산정하였다.

$$Z_c = \left\{ \frac{z_1 - z_0}{x_1 - x_0} \right\} * (5500) - z_0 \quad (2.1)$$

여기서 z_c 는 압연출구측 5.5M 지점의 판의 사행발생 계산치이며, x_1, z_1 은 Fig.1과 같이 출구측 소재의 Mass center의 압연방향과 폭방향의 위치와 x_0, z_0 는 롤직하에서의 소재의 압연방향과 폭방향의 위치이다.

3. 유한요소 수식화

3.1 유한요소 수식화

소성 변형되고 있는 소재는 내부 Ω , 표면 경계 Γ 로 나타낸다. 소재의 변형 속도 $u_i = \overline{u}_i$ 로 주어진 경계 Γ_{u_i} , 표면력이 h_i 로 주어진 경계 Γ_{h_i} , 롤과 소재가 접촉하는 경계를 Γ_c 로 나타내면, 소재의 소성 유동과 관련된 문제는 다음과 같이 속도장 u_i 와 정수압 p 를 구하는 경계치 문제가 된다. 이 경계치 문제는 일반적인 강소성 유한요소법을 적용하여 다음의 경계조건을 사용하였다.

$$\sigma_{ij}n_j = h_i \text{ on } \Gamma_{h_i} \quad (3.1)$$

$$u_i = \overline{u}_i \text{ on } \Gamma_{u_i} \quad (3.2)$$

$$\sigma_n = -\xi(u_n - u_n^D) \text{ on } \Gamma_c \quad (3.3)$$

$$\sigma_t = -\mu\sigma_n g(\Delta u^n) \text{ on } \Gamma_c \quad (3.4)$$

여기서 n 과 t 는 각각 롤의 속도에 대한 소재의 상대속도 벡터 Δu^n 의 방향에 수직 성분과 접선 성분을 나타낸다. 식 (3.4)에서 함수 g 는 중립점이 존재하여 롤과 소재의 상대적인 미끄럼 방향이 미리 알려지지않은 경우의 미끄럼마찰을 취급할 수 있게 하기위하여 Chen과 Kobayashi에 의하여 제안된 g 에 대한 다음식(3.5)을 사용하였다.

$$g(\Delta u^n) = -\frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{|\Delta u^n|}{a} \right) \quad (3.5)$$

위의 경계치 문제를 적분식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\int_{\Omega} \sigma'_{ij} \omega'_j d\Omega - \int_{\Omega} p \omega_i d\Omega - \int_{\Omega} f_i \omega_i d\Omega - \int_{\Omega} u_{i,j} q d\Omega - \sum_{\Gamma_n} \int_{\Gamma_n} h_n \omega_n d\Gamma - \int_{\Gamma_c} \xi(u_n - u_n^D) \omega_n d\Gamma - \int_{\Gamma_c} \mu \xi(u_n - u_n^D) g(\Delta u^n) \omega_t d\Gamma = 0 \quad (3.6)$$

$$\omega_{ij} = \frac{1}{2} (\omega_{i,j} + \omega_{j,i}), \quad \omega'_{ij} = \omega_{ij} - \frac{\omega_{kk}}{3} \delta_{ij}$$

3.2 유선 추적과 자유 표면 해석

입의 속도장에서 유선을 추적하기 위해 공간좌표계상의 속도장을 요소 좌표계로 치환하여 요소 좌표계상에서 유선을 구할 경우 좌표계상의 속도를 구하기가 쉽고, 경계를 찾는 것 역시 단순해 지게 된다[4].

먼저 초기 점에서의 속도를 이용하여 요소 경계면까지의 거리를 계산하고 경계면까지 도달하는데 걸리는 시간을 구한 후 그 값을 초기치로, Bulirsch-Stoer법[5]을 사용하여 요소내부의 속도장을 적분해 나간다.

추적점이 요소의 경계를 벗어나는 경우, 그 위치에서의 속도를 이용, 경계까지 돌아가는데 필요한 시간을 계산하여 마지막 추적에 소요된 시간에서 뺀 후 추적을 반복하며 요소의 경계에는 선형구간을 두어 경계에서 추적 이 반복되는 것을 막는다.

압연공정은 소재와 구동하는 롤 사이의 마찰력에 의한 것으로 소재상의 모든 변형은 소재와 롤의 접촉에 기인한다. 따라서 소재와 롤과의 접촉에 따라 3부분으로 나눌 수 있으며 자유 표면이 존재하는 부분은 롤과 소재가 직접 접하는 부분을 제외한 나머지 모든 표면에서이다. 롤과 소재의 접촉영역이 정해지면 자유표면을 비롯한 소재의 모든 변형 또한 정해지게 되므로 소재 표면상의 유

선이 롤과 접하는 점을 찾아 유선이 롤과 접하는 양을 결정하면 그때의 유선이 바로 자유표면이 된다.

유표면 보정이 일정 오차내에 들어 갈 때까지 보정을 계속한다.

4. 결과 및 고찰

POSCO 미니밀 공장에서의 실제 조업 실적을 기준으로 하여 사행발생에 영향을 주리라 예상되는 인자를 Table 1 과 같이 실험을 하였다. 실험계획에 의해 1차적으로 64 개의 경우에 대하여 실험을 하고 2차적으로는 롤갭에 변동을 주어 실험을 하였다.

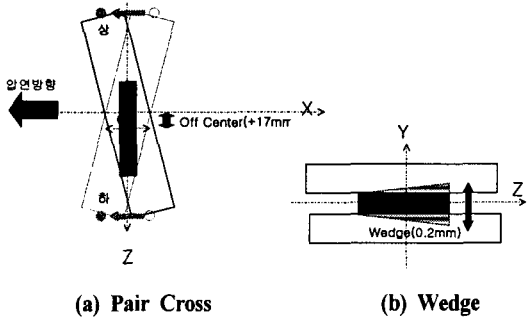


Fig. 1 Operation Condition

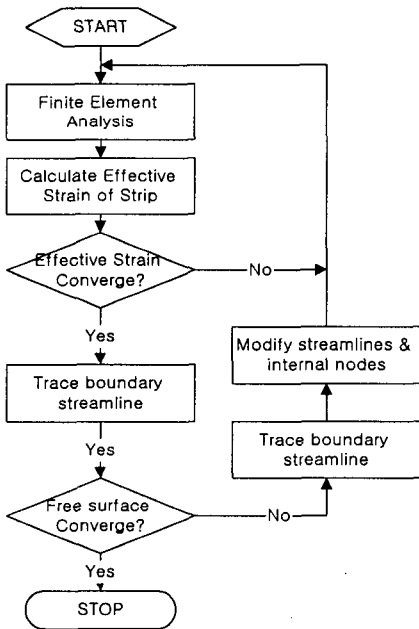


Fig. 2 Algorithm of free surface prediction

Fig. 2는 자유표면 알고리즘의 순서도이다. 유동해석에 의해 구해진 소재내부의 속도장을 앞서 제시한 유선추적법을 이용, 표면상의 유선을 추적하여 롤과의 접점을 찾는다. 찾은 접점과 가정한 접점과의 오차를 이용하여 새 접점을 결정하고 현재의 유선이 새 접점을 지나도록 보정한다. 표면상의 모든 유선의 추적 및 보정이 끝나면 변형된 새 요소 격자를 이용, 다시 유동해석을 하며, 자

Table 1 Simulation Case study

실험계획 [수준2, 인자6] ; 속점값(사행량)				01-09-09
[Step1]	항목\수준	0	1	비고
	두께	3.45	2.93	2.25/1.42 mm(29% 40%이하기준)
	폭	910	1,230	F3 Stand 기준 mm
	off-Center	0	17	mm
	PC 각도	상	1	°
		하	1	°
	소재 Wedge	0	200	μm
	Fricton차	상	0.25	0.25±0.1 Kg/mt
		하	0.25	0.25±0.1 Kg/mt

4.1 size별 경향

Fig. 3은 압하율 29%인 두께 3.45mm재와 40%인 2.93mm재를 F3 Stand에서 적용한 결과이다. 여기에서 mass center가 Wedge +0.2mm재인 경우 압하에 의해서 Wedge가 없어지면서 약 0.3mm, Off Center 17mm일 때 약 0.5mm정도 이동하고 있으며, PC 및 Wedge, Off Center가 모두 적용되었을 경우 0.8mm로 합성되는 결과를 나타내고있다. Fig. 4에서는 Wedge +0.2mm의 경우에서의 각 Size별 영향이다. 압하율과 상관없이 폭이 증가함에 따라 발생 방향으로 계속 증가되는 결과를 얻을 수 있다.

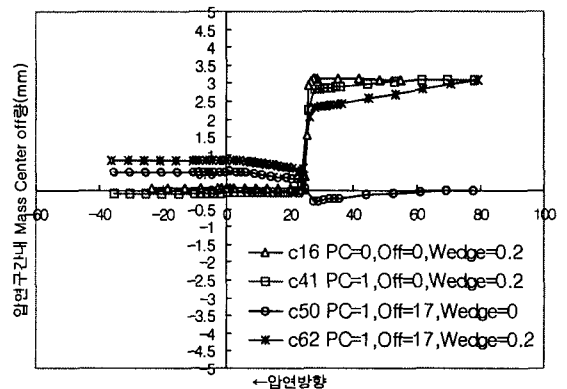


Fig. 3 Off mass center (t=2.93, W=910mm)

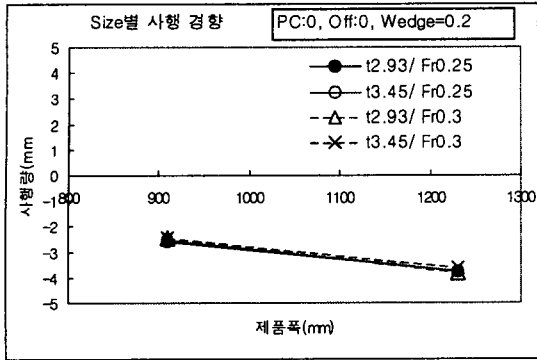


Fig. 4 Snaking in each size(Wedge=+0.2mm)

4.2 조업형태별 경향

동일한 Size의 작업제에 대하여 Fig.5과 같이 조업 조건이 다른 모든 경우에서 Wedge량 증가에 따른 사행량은 증가하고(-방향으로), PC적용시 Off-Center 17mm의 영향이 Wedge가 없는 경우에도 크게 발생하고 있으며, Wedge가 있는 경우에는 오히려 그 영향도가 감소하는 것으로 나타났다.

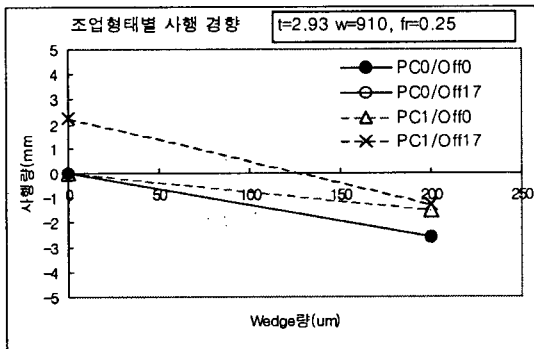


Fig. 5 Snaking in each condition(t=2.93, w=910)

5. 결론

압연 작업중 비대칭 압연 및 조업조건의 변화에 따른 판의 사행 발생경향을 실험해 보고 그 결과를 해석을 하였다. 여기에서 예측된 사행량의 절대량은 실제 현장 조업에서 실측에 의해 보상되어야 하겠지만, 현장에서의 실제 사행량의 실측은 어렵고 다만 압연기의 출측에서의 폭계에 반영된 판 선단부 Off-Center량에 의해서만 실측되어 질 수 있다. 압연시 발생하는 판이 사행하는 문제에 대한 요인의 정량적 비교가 가능하여 현장 조업조건에 적용 가능하게 되었다.

참고 문헌

- (1) Takashi Ishikawa,1988, "Fundamental Study on Snaking in Strip Rolling" Transactions IISI, Vol. 28, pp.485-490
- (2) 西澤 純, 1985, "판압연의 사행특성에 관한 해석" 소성가공춘계강연회, pp.1-4
- (3) 佐藤 準治, 1986, "판압연에 있어서의 캠버 제어방법의 기초적 검토" 소성가공춘계강연회, pp.251-254
- (4) 김태효, 황상무, 1988, "유선추적법을 이용한 자유표면 예측기법" '98춘계 학술대회, 한국소성가공학회, pp.175-178
- (5) J.Stoer, R.Bulirsch,1980, "Introduction to Numerical Analysis", New York, Springer-Verlag