

후판 압연공정에서 선단부 굽힘 예측을 위한 롤 바이트 형상맵 기법에 관한 연구

변상민[#] · 이재현¹ · 김상륙¹

A Roll-Bite Profile Map Approach for the Prediction of Front End Bending in Plate Rolling

S. M. Byon, J. H. Lee, S. R. Kim

(Received February 16, 2011 / Revised May 25, 2011 / Accepted May 26, 2011)

Abstract

The front end bending(FEB) behavior of material that usually occurs in plate rolling is investigated. In this paper, a roll-bite profile map approach that systematically predicts the FEB slope is presented. It is based on the concurrent use of shape factors and reduction ratios to ensure an accurate value of the FEB and its slope. In order to obtain the unit roll-bite profile map, the FEB slope model was decomposed into a temperature deviation component and a roll-velocity deviation component. By mapping the results of a series of finite element analyses to the unit functions of the roll-bite profile map, it was possible to obtain a realistic prediction of the FEB slope applicable to an actual plate rolling process. Thereby, the usefulness of the present approach is clearly demonstrated.

Key Words : Roll-Bite Profile Map, Front End Bending, Plate Rolling, Shape Factor, Reduction Ratio

1. 서 론

후판 압연공정에서 상하롤의 원주 속도편차, 판 두께방향 온도편차 등은 판의 두께 방향 변형편차를 유발한다. 이 요인들은 압연되는 동안 판의 선단부(front end)를 위쪽 혹은 아래쪽으로 휘게 한다. 우리는 이것을 선단부 굽힘이라고 부른다. 선단부 굽힘은 후판 압연 중에 생산성과 제품 품질에 큰 장애 요인이 되고 있다. 발생된 선단부 굽힘의 성장은 상하롤 사이에 물려 압연되고 있는 소재의 롤 바이트 형상(roll-bite profile)에 크게 의존한다. 롤 바이트 형상은 롤 바이트에 들어오는 소재의 두께, 압연되어 나가는 소재의 두께 그리고 롤의 직경을 지칭한다. 본 연구는 두께 방향 변형편차가 주어졌을 때, 롤 바이트 형상 특성에 따라 선단부 굽힘의 성장 정도를 예측할 수 있는

방법론을 개발하는데 초점을 두고 있다.

많은 연구자들[1~6]은 롤 바이트 형상에 따라 압연하중, 응력, 변형율 등의 변화를 기술하였다. 그들은 롤 바이트 형상의 특성화된 무차원 변수로 형상지수(shape factor)를 도입하였다. 이것은 롤 바이트에서 평균 판 두께에 상대적인 평균 접촉 길이의 비로 정의된다. 그러나, 형상지수는 롤 바이트에 취입되어 있는 판의 상대 비를 단지 나타내고 있을 뿐이고 절대적인 롤 바이트 형상을 나타내고 있지 않다. 말하자면, 두 압연공정 사이에 롤 바이트 형상이 같으면 반드시 형상지수가 같지만, 형상지수가 같다고 항상 롤 바이트 형상이 같은 것(혹은, 닮은 것)은 아니다.

형상지수에 의해 선단부 굽힘 거동을 기술한 경우는 다양한 문헌에서 찾아볼 수 있다. Yoshii 등[1]은 상하롤의 원주 속도 차이, 판의 두께 방

1. 동아대학교 기계공학과
교신저자: 동아대학교 기계공학과, E-mail:smyon@dau.ac.kr

향 온도 차이 그리고 판과 상하롤 사이의 마찰 계수 차이에 의해 발생하는 선단부 굽힘 거동을 형상지수의 함수로 나타내었다. Park and Hwang[2]은 선단부 굽힘 거동에 미치는 형상지수, 입측 판 두께, 압하율의 영향을 각각 고찰하였다. Lu 등[3]은 상하롤 직경이 다른 경우에, 선단부 굽힘 거동을 조사하기 위한 평균 형상지수를 정의하였다. Nilsson[4]은 파이롯트 압연 실험과 수치해석을 통해서 상하롤의 원주 속도 차이에 의해 발생하는 선단부 굽힘 거동을 형상지수의 함수를 사용하여 분석하였다. Philipp 등[5]은 상하롤의 원주 속도 차이에 의한 선단부 굽힘 곡선의 방향이 판의 두께에 따라 다르게 나타남을 유한요소법을 이용하여 보여주었다. Mousavi 등[6]은 냉간압연에서 상하롤의 각속도 차이로 인해 박판의 선단부 굽힘이 형상지수에 의존성이 있음을 수치적 방법으로 고찰하였다.

본 연구에서 우리는 같은 형상지수라도 다른 롤 바이트 형상이 형성되는 것을 기하학적으로 증명하였다. 이것을 근거로, 선단부 굽힘을 완전하게 기술하기 위해서 형상지수뿐만 아니라, 또 다른 하나의 무차원 기하학 변수인 압하율(reduction ratio)을 도입하였다. 선단부 굽힘은 하나의 무차원 기하학 변수에 기술될 수 없고 두 개의 무차원 기하학 변수 즉, 맵(map) 형태로 표현되어야 하는 것에 착안하여 롤 바이트 형상맵(roll-bite profile map) 기법을 제시하였다. 두께 방향 변형편차가 주어졌을 때, 본 방법을 이용하여 선단부 굽힘의 성장 정도를 예측할 수 있는 수식모델 및 형상맵을 개발하였다.

2. 선단부 굽힘과 롤 바이트 형상

2.1 롤 바이트 형상의 기하학적 변수

Fig. 1은 상·하 롤 접선속도(V_u, V_l) 차이로 인해 선단부 굽힘이 발생했을 때, 롤 바이트 형상과 기하학 변수들을 상세하게 기술한 것이다. 그림에서 기하학 변수는 $l_u, l_l, h_i, h_o, R_u, R_l$ 이다. l_u, l_l, h_i, h_o 는 상·하 롤과 판의 접촉길이 및 입·출측 판의 두께를 나타낸다. R_u, R_l 는 상·하 롤의 반경을 나타낸다. ω 는 선단부 굽힘의 기울기를 나타낸다.

상·하 비대칭 압연조건에 의해 선단부 굽힘이 발생했을 때, 롤 바이트의 형상을 정의하기 위해서 평균 기하학 변수가 필요하다. 따라서, 우리는

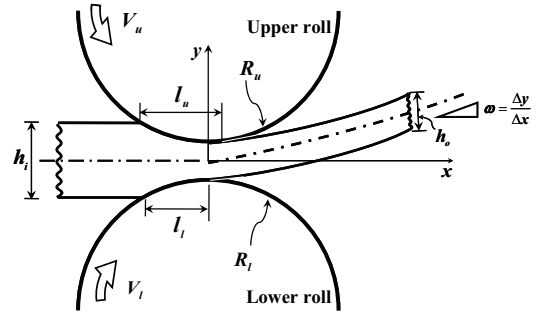


Fig. 1 Definition of roll-bite profile and its parameters related to the front end bending

평균 접촉길이를 $l_m = (l_u + l_l)/2$ 를, 평균 롤 반경으로 $R_m = (R_u + R_l)/2$ 를, 그리고 평균 판 두께로 $h_m = (h_i + h_o)/2$ 를 각각 정의하였다.

선단부 굽힘은 롤 바이트에서 압연되는 소재의 변형구배에 의존하기 때문에 이것을 구체적으로 나타내기 위한 롤 반경과 판 두께가 포함된 관계식이 필요하다. 이를 위해 평균 접촉길이(l_m)를 $\sqrt{R_m(h_i - h_o)}$ 로 근사화하였다. 롤 바이트에서 변형구배를 나타내는 변수들 사이의 관계식을 도출하기 위해서 평균 접촉길이(l_m)와 평균 두께(h_m)를 형상지수(s)의 정의[7]에 대입하면, 아래와 같은 관계식을 도출할 수 있다.

$$\frac{s^2}{4(R_m/h_i)} = \frac{r}{(2-r)^2} \quad (1)$$

$$\text{where, } s = l_m / h_m \quad (2)$$

$$r = (h_i - h_o) / h_i \quad (3)$$

Eq. (1)은 무차원 기하학 변수인 $s, r, R_m/h_i$ 사이의 관계를 나타낸다. s 와 r 은 형상지수 및 압하율을 나타내는 변수이다.

2.2 롤 바이트 형상을 나타내는 독립적인 무차원 변수

기하학 무차원 변수는 형상적인 닮음(혹은, 기하학적 상사)의 정도를 나타내는 지표이다. 한 개의 무차원 변수로 롤 바이트 형상의 닮음을 나타낼 수 있는지 고찰하기 위해, 대표적인 롤 바이트 형상의 무차원 변수인 형상지수를 대상으로 선정하였다. Fig. 2는 형상지수가 같은 4가지 경우의 롤 바이트 형상을 보여 주고 있다. 형상지수가 평균 판 두께에 상대적인 평균 접촉길이 (l_m/h_m)

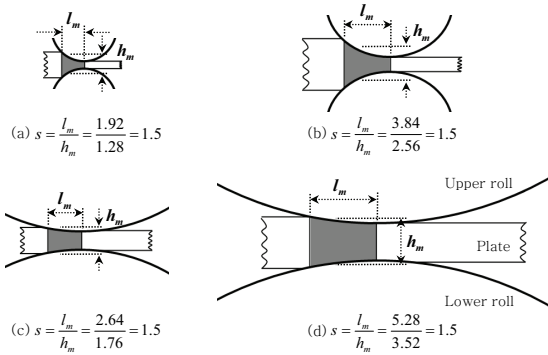


Fig. 2 Various shapes of roll-bite profile when the same shape factor, s , is 1.5

로 정의되기 때문에 같은 비율을 만족하는 다양한 경우가 존재할 수 있다.

Fig. 2(a)는 형상지수(s)가 1.5인 롤 바이트 형상의 한 예를 보이고 있다. Fig. 2(b)의 경우에는 l_m 및 h_m 의 값이 똑같이 2배가 증가하여 같은 형상지수 값을 보이고 있다. 형상지수의 값이 1.5가 되는 l_m 및 h_m 의 조합이 한 가지만 있는 것이 아니다. Fig. 2(c)에 나와있는 바와 같이 l_m 이 2.64이고 h_m 이 1.76인 경우에도 s 값은 1.5이다. 그리고, 이 경우의 l_m 및 h_m 이 2배 증가한 Fig. 2(d)도 있다.

롤 바이트 형상을 고찰하면, Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)는 기하학적 상사가 성립하는 것을 알 수 있다. 마찬가지로, Fig. 2(c)와 Fig. 2(d)의 경우도 기하학적 상사가 성립한다. 그러나, Fig. 2(a)와 Fig. 2(c)를 비교해 보면, 기하학적 상사가 성립하지 않는다는 것을 알 수 있다. 즉, 롤 바이트 형상이 서로 전혀 닮지 않았다. 따라서, 형상지수만으로 롤 바이트 형상의 닮음을 나타내는 것은 불가능하고 또한 대응되는 선단부 굽힘을 유일하게 기술하는 것도 어렵다는 것을 알 수 있다.

Eq. (1)에서, 롤 바이트 형상을 나타내는 세 가지 무차원 기하학 변수(즉, $s, r, R_m/h_i$)가 하나의 관계식으로 연결되어 있다. 따라서, 독립적인 무차원 기하학 변수는 두 개인 것을 알 수 있다. 롤 바이트 형상을 특성화하기 위해서는 형상지수에 추가적인 무차원 기하학 변수가 하나 더 필요하다. 본 연구에서는 압연해석 중 가장 일반적으로 많이 사용되는 압하율을 롤 바이트 형상을 정의하기 위한 추가적인 무차원 기하학 변수로 선정하였다. Fig. 2에서, Fig. 2(a)와 (b)는 압하율이 72%로 같고 Fig. 2(c)와 (d)는 24%로 같다. 형상지수 뿐만 아니라 압하율까지 같으면, 롤 바이트 형상

이 완전히 상사 하다는 것을 알 수 있다. 형상지수와 압하율의 이중적 사용은 형상지수만 사용했을 때 발생할 수 있는 롤 바이트 형상의 상사성(similarity) 결여 문제를 극복할 수 있다.

2.3 롤 바이트 형상맵 기법

Fig. 3에 변형편차가 원인이 되어 선단부 굽힘이 발생하는 원리를 개념적으로 나타내었고, 그 사이에 롤 바이트 형상이 중요한 역할을 하는 것을 아울러 나타내었다. 두께방향 변형편차가 존재할 때 어떤 롤 바이트 형상에서 선단부 굽힘이 상대적으로 증폭 혹은 축소될 수 있는지 명시적으로 제시한 것이 롤 바이트 형상맵이다.

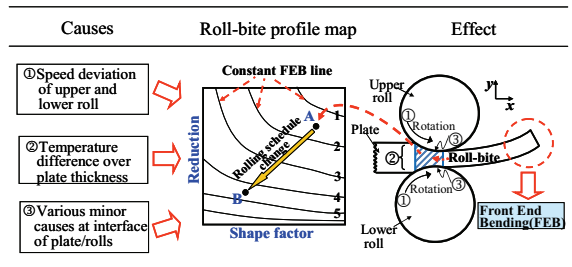


Fig. 3 Schematic of roll-bite profile map composed of shape factor and reduction

Fig. 3에서 롤 바이트 형상맵의 횡축과 종축은 2.2절에서 기술한 것과 같이 롤 바이트 형상과 일대일 대응이 되는 독립적인 두 무차원 변수인 형상지수와 압하율이다. 형상맵 내의 등고선(contour)은 일정한 선단부 굽힘량이 존재하는 형상지수와 압하율의 영역을 나타낸 선이다. 예를 들어, Fig. 3의 가장 오른쪽에 빗금되어 있는 롤 바이트 형상은 맵 상에서 한 점 A로 대응되고 이 때의 선단부 굽힘의 크기는 1.0과 2.0사이의 값을 가진다. 만약, 압연 패스(pass)가 진행되어 롤 바이트 형상이 B 지점으로 이동하는 경우는 이 형상에 해당하는 선단부 굽힘량을 맵을 통해서 바로 파악할 수 있다. 롤 바이트 형상이 무차원 변수들로 대응되므로 판의 두께방향 변형편차 변수(즉, 온도편차, 롤 속도편차 등)만 무차원으로 표현되면 압연 조건에 관계없이 선단부 굽힘을 예측 할 수 있는 기법을 완성할 수 있다.

롤 바이트 형상맵 기법을 수식으로 나타내면, 아래 Eq. (4)와 같이 판의 두께방향 변형편차는 입력변수(input variables)에 해당되고 롤 바이트는 변

형계(deformation system) 특성, 선단부 굽힘량은 출력변수(output variables)로 표현될 수 있다.

$$\omega = C(s, r) \mathbf{x} \quad (4)$$

여기서, ω , $C(s, r)$, \mathbf{x} 는 선단부 굽힘 기울기, 형상 지수(s)와 압하율(r)로 표현된 롤 바이트 형상 행렬, 두께방향 변형편차 벡터를 각각 나타낸다. \mathbf{x} 의 성분은 다양하지만 그 중에서 ω 에 미치는 영향이 가장 지배적인[1, 2] 판의 상하면 온도편차와 상하롤의 주속(tangential speed) 편차를 \mathbf{x} 의 성분으로 선택하였다. Eq. (5)는 무차원화된 입력변수 성분 및 롤 바이트 형상 행렬 성분으로 정리하여 나타낸 것이다.

$$\omega = \left[C_1(s, r) \quad C_2(s, r) \right] \left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta T}{T_m} \\ \frac{\Delta V}{V_m} \end{array} \right\} \quad (5)$$

여기서, $\Delta T/T_m, \Delta V/V_m$ 는 판의 평균온도(T_m)로 무차원화된 판의 상하면 온도편차와 상하롤의 평균 주속(V_m)으로 무차원화된 상하롤의 주속 편차를 각각 나타낸다. $C_1(s, r), C_2(s, r)$ 는 온도편차가 발생할 때 선단부 굽힘에 미치는 롤 바이트 형상의 영향도와 롤 속도편차가 발생할 때 선단부 굽힘에 미치는 롤 바이트 형상의 영향도를 각각 나타낸다. $C_1(s, r)$ 및 $C_2(s, r)$ 는 각각 형상 지수와 압하율의 함수로 작성되는 분할된 단위 롤 바이트 형상맵이다.

3. 선단부 굽힘해석을 위한 유한요소모델

실제 압연기에서는 다양한 외란 및 설비적 구속조건으로 인해 공정인자를 일정한 값으로 제어하기 힘들다. 따라서, 본 연구에서는 실제 압연공정을 가장 잘 모사할 수 있는 유한요소모델을 도입하여 형상맵에 영향을 미치는 각 인자 별 영향을 평가하였다.

본 연구에서는 ABAQUS®를 도입하여 일련의 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 4(a)는 유한요소모델의 격자 및 경계조건을 보여주고 있다. 두께방향 변형편차로 인한 판의 선단부 굽힘 현상을 모사하는 것이 해석의 목적이므로 폭방향 변화는 없는 것으로 가정하여 평면변형모델을 채용하였다.

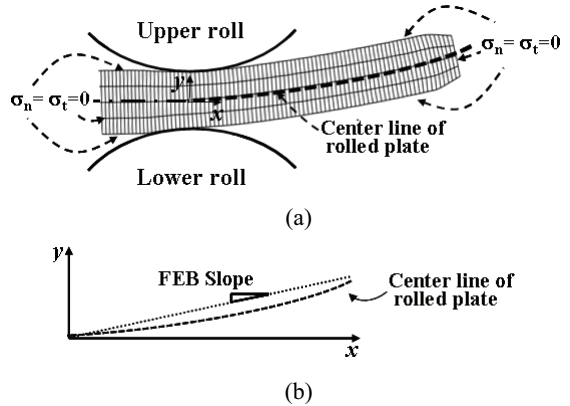


Fig. 4 Finite element model: (a) meshes and boundary conditions (b) definition of FEB (front end bending) slope

판이 소재에 취입하여 취출하는 비정상상태(non-steady state)를 내연적(implicit) 방법으로 해석을 수행하였다. 후판공정을 대상으로 하기 때문에 판의 전후방 인장 분포력은 없으므로 롤과 판의 접촉면 이외에는 표면에 작용하는 외력이 없는 ($\sigma_n = \sigma_t = 0$) 것으로 경계조건을 주었다.

선단부 굽힘을 예측할 수 있는 함수를 도출하기 위해 공정조건 변화에 따른 유한요소해석을 무수히 반복해야 하기 때문에 계산시간을 줄이기 위해 최소한의 격자가 요구된다. 두께방향 격자수 변화에 따른 판 선단부 높이변화를 고찰하여 이전 격자수 대비 3% 이내로 변화는 최소한의 격자수를 선정하였다. 전체적으로 선형사변형(bilinear quadrilateral) 요소를 약 4000개 사용했고 축소 적분법(reduced integration)이 요소 수치적분에 채용되었다.

주어진 롤 바이트 형상에 취입되는 판의 두께에 따라 압연에 의해 신장량이 달라지게 된다. 즉, 두께가 두꺼운 판은 같은 형상지수와 압하율 조건하에서 상대적으로 두께가 얇은 판보다 더 많이 늘어나게 된다. 이로 인해 가시적인 선단부 굽힘량은 크게 보이나, 신장량이 많아서 굽힘의 양이 많아진 것으로 선단부 굽힘의 세기(intensity)가 커진 것은 아니다. 이와 같은 이유로 선단부 굽힘의 세기를 선단부 굽힘의 평가 기준으로 선택하는 것이 합리적이다. 본 연구에서는 Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이, 선단부 굽힘의 세기 지표로 압연후 판의 선단부 중심선 굽힘 기울기를 선정하였다.

Table 1 Cases to investigate the dependence of shape factor and reduction on the slope of FEB

Cases	Shape factor	Reduction Ratio (%)	Inlet Thickness (mm)	Roll Radius (mm)
A	1.0	4.8	20.0	400.0
A*	1.0	4.8	30.0	600.0
B	1.0	11.1	20.0	160.0
B*	1.0	11.1	30.0	240.0
C	1.5	15.9	20.0	240.0
C*	1.5	15.9	30.0	360.0
D	1.5	22.2	20.0	160.0
D*	1.5	22.2	30.0	240.0

4. 결과 및 논의

4.1 선단부 굽힘에 형상지수와 압하율의 이중적 의존성

선단부 굽힘 거동이 두 가지 무차원 기하학 변수 즉, 형상지수와 압하율에 의해 기술되는 것을 보이기 위해 일련의 유한요소해석을 수행하였다. 본 해석을 수행하기 위한 공정조건은 Table 1에 나타나 있다. 형상지수 2가지 경우에 대해 압하율 2가지 경우를 고려하였다. 형상지수와 압하율은 같지만 롤에 투입되는 판의 크기에 따른 선단부 굽힘의 영향을 고찰하기 위해서 크기가 다른 2가지 경우를 고려하였다. 따라서, 총 8가지 경우를 해석의 대상으로 고려하였다.

Fig. 5는 형상지수가 1.0으로 모두 같은 4가지 경우(즉, Case A, A*, B, B*)에 대해 유한요소해석을 통해 계산한 판의 선단부 중심선을 비교한 것이다. 형상지수는 같지만 소재의 입측두께와 압하율이 각 경우마다 다양하기 때문에 압연후 판의 신장량이 다르게 나타난다. 따라서, 판의 선단부 형상으로는 선단부 굽힘 세기의 수준을 평가할 수 없다. Fig. 4(b)에서 정의된 판의 선단부 중심선 굽힘 기울기(slope of FEB)를 기준으로 4가지 경우를 관찰하면 2그룹으로 나누어 지는 것을 알 수 있다. Case A와 A*의 선단부 굽힘 기울기가 동일하고 Case B와 B*의 선단부 굽힘 기울기가 같다. Case A와 A*(혹은, Case B와 B*)의 소재두께가 다름에도 불구하고 선단부 굽힘의 세기를 동일하게 평가할 수 있다. 이것으로부터 판의 선단부 중심선 굽힘 기울기를 이용하면 소재 및 롤 크기에 관계없이 선단부 굽힘의 거동을 유용하게 평가할 수 있다는 것을 알 수 있다.

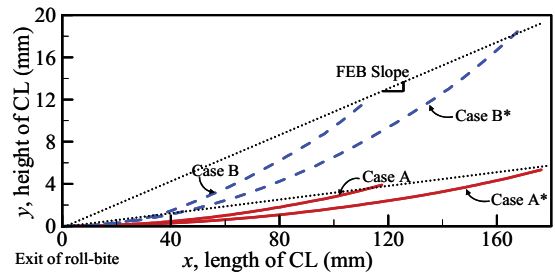


Fig. 5 FEB shapes toward the upper roll direction for Case A, A*, B, B*. The FEB slope indicates a secant slope of FEB with respect to the center line(CL) of the plate from the exit of roll-bite

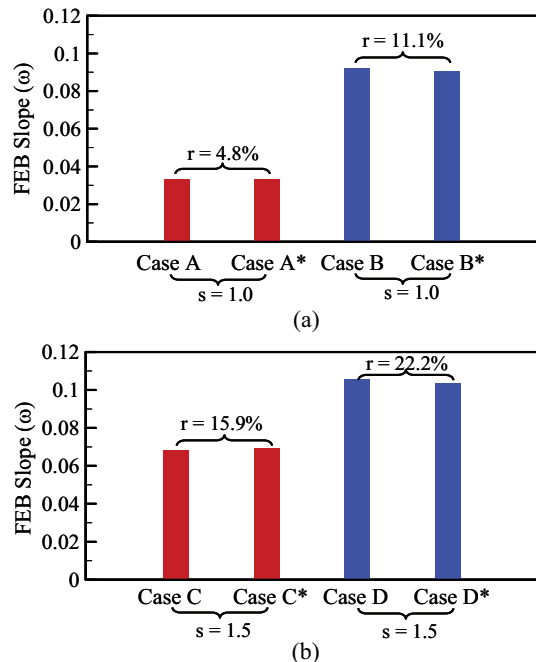


Fig. 6 FEB slopes for the cases represented in Table 1: (a) the cases that shape factor is 1.0 (b) the cases that shape factor is 1.5

Fig. 6은 Table 1에 제시된 형상지수가 1.0인 경우(Fig. 6(a))와 1.5인 경우(Fig. 6(b))에 대해 판의 선단부 중심선 굽힘 기울기를 나타낸 그래프이다. Fig. 6(a)에서 형상지수는 모두 1.0으로 동일하나 압하율은 Case A와 A*의 경우에는 4.8% 그리고 Case B와 B*의 경우에는 11.1%로 차이가 있다. 형상지수와 압하율이 모두 같은 Case A와 A*의 굽힘 기울기가 동일하고 마찬가지로 Case B와 B*의 굽힘 기울기가 동일하였다.

형상지수가 1.5로 동일한 Case C, C*, D, D*의 경우에 대해 선단부 굽힘 기울기를 Fig. 6(b)에 나타내었다. 형상지수가 1.0인 Fig. 6(a)의 경우와 마찬가지로 형상지수와 압하율이 모두 같을 경우에 굽힘 기울기가 일치하는 것을 알 수 있다. 이것으로부터 선단부 굽힘 기울기는 형상지수와 압하율에 이중적으로 의존한다는 것을 알 수 있다. 압하율 측면에서 고찰하면, 같은 형상지수 내에서 압하율이 커질수록 선단부 굽힘 기울기가 현저하게 상승한다는 것을 알 수 있다.

4.2 롤 바이트 형상맵

선단부 굽힘 기울기(ω)는 Eq. (4) 및 (5)에 나타낸 바와 같이 형상지수(s)와 압하율(r)에 이중적으로 의존하는 두 함수 $C_1(s, r)$ 및 $C_2(s, r)$ 로 구성될 수 있다. $C_1(s, r)$ 는 판의 두께방향 온도편차가 발생할 때 선단부 굽힘에 미치는 롤 바이트 형상맵 함수를 나타내고 $C_2(s, r)$ 는 롤 속도편차가 발생할 때 선단부 굽힘에 미치는 롤 바이트 형상맵 함수를 나타낸다. $C_1(s, r)$ 과 $C_2(s, r)$ 을 구성하기 위해서는 형상지수, 압하율, 판의 두께방향 변형편차로 구성된 무차원 변수 조합이 필요하다. 본 형상맵 구성에 사용된 공정변수 조합은 Table 2에 나타나 있다. 롤 바이트 형상 관련하여 형상지수 및 압하율 각각 3가지 경우와 두께 방향 변형편차 관련하여 온도편차 및 롤 속도편차 각각 3가지 경우를 고려하였다.

앞의 3절에서 언급한 유한요소모델을 이용하여 Table 2의 조합에 대해 일련의 수치해석을 수행하여 선단부 굽힘 기울기를 도출하였다. 이것을 Eq. (5)로 전사시켜 Eq. (6)~(7)과 같은 롤 바이트 형상맵 함수를 구하였다. 유한요소모델로 구한 선단부 굽힘 기울기와 본 함수를 통해 구한 선단부 굽힘의 편차는 $\pm 10\%$ 이내에 있다.

Table 2 Combinations of non-dimensional parameters to make roll-bite profile map

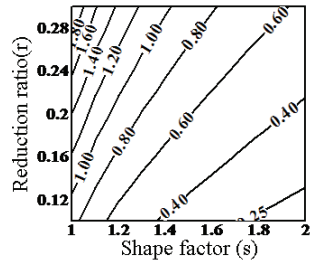
Non-dimensional geometric parameters		Non-dimensional asymmetric process parameters	
Shape factor	Reduction (%)	Plate temp. deviation(%)	Roll vel. deviation(%)
1.0	10.0	5.0	2.0
1.5	20.0	10.0	3.0
2.0	30.0	15.0	4.0
3 Cases	3 Cases	3 Cases	3 Cases
Combinations: 81 Cases			

$$C_1(s, r) = 0.28s^{-6.19} + 10.62[(s(2-r))^{-1.6}r^{0.81}] \quad (6)$$

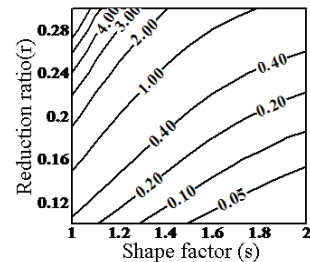
$$C_2(s, r) = 13964.8s^{9.28}[(s(2-r))^{-9.11}r^{4.55}] + 1769.6[(s(2-r))^{-4.8}r^{2.4}] \quad (7)$$

Fig. 7에 롤 바이트 형상맵 함수 $C_1(s, r)$ 과 $C_2(s, r)$ 를 그래프로 나타내었다. 각 그림은 횡축에 형상지수, 종축에 압하율로 이루어져 있다. 형상맵 내의 등고선은 해당 굽힘 원인에 의해 발생된 선단부 굽힘 분량이 존재하는 형상지수와 압하율의 영역을 나타낸 선이다.

Fig. 7(a)에 보는 바와 같이, $C_1(s, r)$ 의 최대치는 형상지수가 작고 압하율이 큰 영역에 있을 것을 알 수 있다. 또한 이 영역으로 갈수록 등고선의 밀도는 더 조밀해지는 것을 알 수 있다. 형상지수(l_m/h_m)는 판 두께에 상대적인 롤 직경 크기를 나타내므로 형상지수가 작은 영역은 롤에 비해 판의 두께가 두꺼운 영역을 나타낸다. 따라서, 판의 두께가 상대적으로 두꺼울수록 온도편차 ($\Delta T/T_m$)에 의한 선단부 굽힘의 영향이 더 커짐을 나타낸다. 그리고, 압하율이 상승함에 따라 판 두께 증가가 선단부 굽힘에 미치는 영향이 더욱 커지는 것을 또한 파악할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 7 Roll-bite profile map: (a) 1st map, $C_1(s, r)$ for temperature deviation ($\Delta T/T_m$) (b) 2nd map, $C_2(s, r)$ for roll velocity deviation ($\Delta V/V_m$)

$C_2(s, r)$ 의 등고선 분포를 고찰하면, $C_1(s, r)$ 과 경향이 유사하다는 것을 Fig. 7(b)로부터 파악할 수 있다. 그러나, $C_2(s, r)$ 의 경우에는 압하율의 효과가 형상지수보다 현저하다는 것을 압하율이 큰 영역에서의 등고선 수치 및 밀도의 조밀성으로부터 파악할 수 있다. 상하 롤 속도편차 ($\Delta V/V_m$)에 의한 선단부 굽힘은 상대적으로 판의 두께가 두껍고 특히 압하율이 큰 롤 바이트 형상에서 크게 증폭되는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 판의 두께 방향 비대칭 압연요인이 존재할 때 빈번하게 발생하는 선단부 굽힘을 체계적으로 모델링하는 방법에 대해 고찰하였다. 소재의 두께와 롤의 직경 크기에 무관하게 롤 바이트 형상을 특징 지을 수 있도록 무차원화 모델링에 주안점을 두었다. 그리고, 각 두께 방향 비대칭 요인이 롤 바이트 형상을 통해 선단부 굽힘에 얼마만한 영향을 미치는지 고려되도록 고안하였다. 본 방법은 롤 바이트 형상맵 기법으로 요약될 수 있고 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 통상적으로 많이 사용하는 형상지수로는 롤 바이트 형상을 유일하게 나타낼 수 없기 때문에 별도의 무차원 변수인 압하율을 같이 사용해야 한다. 일대일 대응되는 선단부 굽힘을 예측하기 위해서는 형상지수와 압하율로 이루어진 롤 바이트 형상맵을 사용해야 한다.

(2) 유한요소해석을 통해 구한 선단부 굽힘과 비교하여 정확하게 예측할 수 있는 두께방향 온도편차에 해당하는 롤 바이트 형상맵과 롤 속도편차에 해당하는 롤 바이트 형상맵을 도출하였다. 본 형상맵을 통해서 압연 기하학 특성별 두께 방

향 비대칭 요인이 선단부 굽힘에 미치는 정도를 체계적으로 분석할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2008-314-D00021).

참 고 문 헌

- [1] M. Yoshii, et al., 1991, Analysis of warping phenomenon in plate rolling, ISIJ Int., Vol. 31, pp. 973~978.
- [2] B. H. Park, S. M. Hwang, 1997, Analysis of front end bending in plate rolling by the finite element method, J. Manuf. Sci. Eng., Vol. 119, pp. 314~323.
- [3] J. S. Lu, et al., 2000, Analysis of the bending of the rolling material in asymmetrical sheet rolling, Int. J. Mech. Sci., Vol. 42, pp. 49~61.
- [4] A. Nilsson, 2001, Front-end bending in plate rolling, Scan. J. Metall., Vol. 30, pp. 337~344.
- [5] M. Philipp et al., 2007, Front end bending in plate rolling influenced by circumferential speed mismatch and geometry, J. Mater. Process. Technol., Vol. 184, pp. 224~232.
- [6] S. A. A. Mousavi, S. M. Ebrahimi, R. Madoliat, 2007, Three dimensional numerical analyses of asymmetric rolling, J. Mater. Process. Technol., Vol. 187-188, pp. 725~729.
- [7] M. Pietrzyk, J. C. Lenard, 1991, Thermal-Mechanical Modelling of the Flat Rolling Process, Springer-Verlag, Berlin.