

후판 압연공정에서 폭방향 비대칭 변형거동 예측 및 설정모델에 관한 연구[§]

변 상 민*†

*동아대학교 기계공학과

Prediction of Width-Direction Asymmetric Deformation Behavior and Its Setup Model in Plate Rolling

Sang Min Byon*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A Univ.

(Received May 18, 2011 ; Revised August 22, 2011 ; Accepted August 23, 2011)

Key Words: Asymmetric Deformation(비대칭 변형), Setup Model(설정모델), Plate Rolling(후판압연), Finite Element Analysis(유한요소해석), Non-dimensional(무차원화), Pilot Rolling(시험압연)

초록: 선박 건조를 위한 기본 자재인 후판은 압연공정을 통해 생산된다. 본 논문에서는 후판압연 중에 발생하는 폭방향 휨을 일으키는 비대칭 요인들을 제어할 수 있는 설정모델을 제시한다. 일련의 삼차원 유한요소해석을 통해서 휨과 비대칭 요인 사이의 관계를 예측한다. 그 관계를 무차원 변수로 이루어진 선형 방정식으로 수식화 시킴으로써 설정모델을 도출한다. 소재 폭방향으로 두께 편차와 온도차이가 있는 경우에 대해서 파이롯트 압연 시험으로 통해서 설정모델의 정도를 검증한다. 본 모델에 의해 예측된 휨 곡률이 각각의 비대칭 요인들에 의해 측정된 휨 곡률과 상당히 일치하는 결과를 보여 주었다.

Abstract: Thick plates produced by the rolling process are used as the basic elements of ship structures. In this paper, we present a setup model for controlling the asymmetric factors causing plate bending in the width direction during plate rolling. A series of three-dimensional finite element analyses is conducted to predict the relationship between various asymmetric factors and plate bending. The setup model is developed by performing regression on the relationship to produce linear equations with several nondimensional parameters. The setup model is verified with a pilot rolling test in which variations in thickness and temperature differences in the width direction exist. The results show that the bending curvatures predicted by the model are in fairly good agreement with the measured results for those asymmetric factors.

1. 서 론

후판압연은 연주공정(씻물을 압연하기 적당한 크기로 연속 주조하는 공정)에서 나온 강괴를 롤(Roll)을 이용하여 두께와 폭을 순차적으로 변형가공 시키는 공정이다. 후판 제품은 조선소와 같이 판 두께가 두꺼운 철강 구조물이 필요한 업체에 공급된다. 후

판 제품은 조선업의 경기와 맞물려 수요와 공급에 있어서 심한 불균형이 초래된다. 후판공장 건설에는 막대한 비용이 소요되고 후판수요 변화에 따라 투자 위험성이 극심하므로 기존설비를 최상으로 활용하는 기술이 절실히 요구된다.

후판관련 연구는 크게 정상변형을 가정하여 가공 스케줄을 연구하는 분야⁽¹⁻⁷⁾와 불균형 공정요인에 의해 비정상(혹은, 비대칭) 변형이 발생했을 때 이것에 대처하는 연구 분야⁽⁸⁻¹⁴⁾로 나누어진다. 본 연구는 설비효율을 높이는 방법론 개발에 있으므로 후자 연구 분야에 해당된다. 대표적인 비대칭 변형은 판의 상하 휨과 폭방향 휨이다. 상하 휨에 대한 연구는 변형이 복잡하기 때문에 유한요소법과 같은 수치해석법을 이

§ 이 논문은 2011년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계 학술대회(2011. 5. 19.-20., 서울과기대) 발표논문임

† Corresponding Author, smbyon@dau.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

용하여 일반적으로 연구되어져 왔다.⁽⁸⁻¹¹⁾ Salimi⁽¹²⁾는 이것을 수학적 모델로 나타내어 계산시간을 줄였다. 폭방향 힘에 대한 연구^(13,14)는 상하 힘에 비해 상대적으로 연구가 많이 이루어지지 않았다. 상하 힘은 이차원 해석으로 가능하지만 폭방향 힘은 삼차원해석이 수반되어야 하기 때문에 좀 더 복잡하고 많은 계산시간이 필요한 연구이다.

조업 중에 비대칭 압연 요인이 감지되면 이로 인해 발생될 비대칭 변형량을 제어 설정모델식으로부터 예측하여 미리 보상제어를 할 수 있다. 본 연구에서는 폭방향 비대칭 압연 요인과 이로 인해 발생하는 비대칭 변형 사이의 인과 관계를 나타내는 제어 설정모델식을 개발하는데 목적이 있다. 폭방향 비대칭 변형은 간단한 수식모델로 해석이 불가능하므로 유한요소모델을 기초로 하여 해석을 수행하였다. 각 발생요인별 제어 설정모델식을 개발하기 위해 먼저, 폭방향 비대칭 압연변형을 모사하기 위한 삼차원 유한요소모델을 구축하였다. 이것을 통해 나온 비대칭 요인과 폭방향 비대칭 휨 사이의 관계를 파이롯트(Pilot) 압연 실험을 통해 검증하였다. 일련의 유한요소해석을 통해 압연중 가장 빈번하게 발생하는 폭방향 비대칭 요인과 후판의 폭방향 힘에 대한 무차원화된 제어 설정모델식을 제시하였다.

2. 폭방향 비대칭 압연 해석모델

2.1 삼차원 유한요소해석모델

비대칭 압연 요인과 이로 인한 판의 폭방향 휨에 대한 인과관계를 모두 실험적으로 파악하기 어렵다. 그 이유는 파이롯트 압연기가 구조적인 측면에서 많이 단순화 되어 있기 때문에 구현하기 힘든 비정상 압연 요인이 다수 존재하고 상당한 비용과 노력이 수반되므로 다양한 발생요인 수준별 테스트가 어렵기 때문이다. 이러한 점 때문에 유한요소해석을 통해 다양한 발생요인 종류별 그리고 각 발생요인의 수준별 비대칭 압연 결과를 산출하여 그 인과관계를 파악할 수 있다.

본 연구에서는 ABAQUS[®]를 도입하여 일련의 유한요소해석을 수행하였다. 판이 소재에 취입하여 압연되고 유출하는 비정상상태(Non-steady state) 해석을 실시하였다. Fig. 1은 본 해석에 사용된 유한요소모델을 보여주고 있다. 격자구조는 8-절점 선형 육면체 요소(8-node linear brick element)로 이루어진 2300 개의 요소들로 구성되어 있다. 두께가 두꺼운 판재(후판) 압연 시 롤의 탄성변형에 의한 소재 두께 변화 차이는 크지 않고 더욱이 소재가 고온일 때에는 그 영향성이 더욱 줄어들기 때문에 본 해석에서 롤은 강체로 모델링하였다.

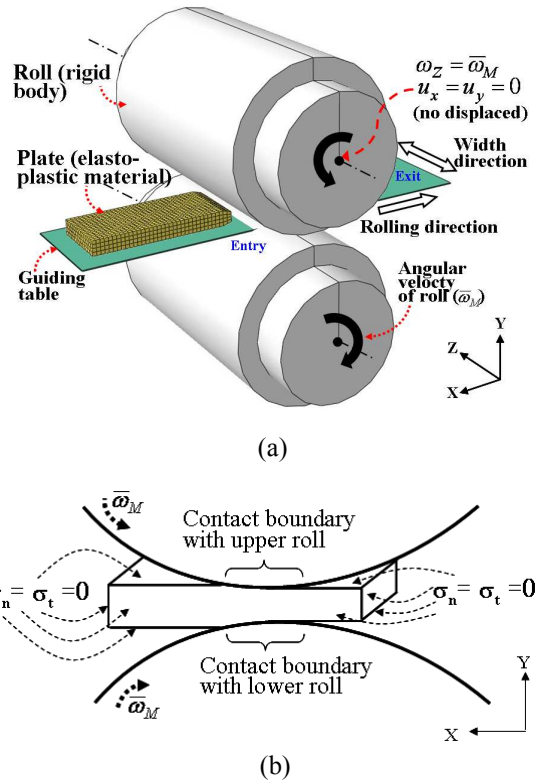


Fig. 1 Finite element model: (a) three dimensional geometry of plate and rolls (b) mechanical boundary conditions of plate during rolling

Fig. 1(a)는 본 유한요소모델의 3 차원 기하학을 보여주고 있다. 롤과 판의 치수는 실험에 사용된 파이롯트 압연기(Pilot rolling mill)에 기초하였다. 상세한 치수 및 압연조건은 3.1 절의 압연 실험장치에 상세하게 기술하였다. Fig. 1(b)는 압연중인 판의 역학적 경계조건을 나타내고 있다. 상부롤과 하부롤로 이루어져 있는 롤 바이트(Roll bite)영역에서 판의 접촉경계가 형성되고 판의 나머지 부분은 자유표면이므로 무부하조건(Traction free condition; $\sigma_n = \sigma_t = 0$)을 주었다.

본 연구는 비대칭 요인이 입력으로 주어졌을 때 압연 중 소재의 폭방향 변형 휨량을 예측하는 제어모델 개발이 목적이다. 소재내의 온도 편차 요인도 변형 해석에 입력으로 주어지는 값이기 때문에 별도의 온도해석은 본 유한요소모델에 포함 되지 않는다.

소재 내에서 온도 편차에 의한 압연 후 소재의 형상변화를 고찰하기 위해서 각 요소마다 온도값을 지정하도록 모델링 하였다. 본 연구에서의 소재는 일반탄소강(S10C)를 대상으로 하였다. 식 (1)은 온도변화에 따라 소재의 변형저항 거동이 나타나도록 도입된 탄소강의 유동응력식($\bar{\sigma}$)⁽¹⁵⁾이다.

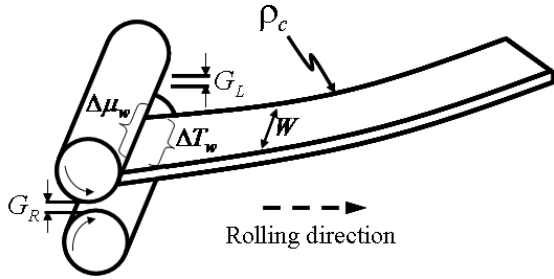


Fig. 2 Rolling parameters and notations related to the width directional asymmetric bending

이것은 탄소함량($C < 1.2\%$), 온도($700^{\circ}\text{C} < T < 1200^{\circ}\text{C}$), 변형률속도($0.1 < \dot{\epsilon} < 100\text{s}^{-1}$)에 따라 소재의 응력($\bar{\sigma}$)-변형률($\bar{\epsilon}$) 거동을 나타내는 탄소강의 재료물성곡선이다. 본 식을 유한요소해석모델에 반영함으로써 소재내의 비대칭 온도분포가 존재할 때 구속조건이 같더라도 온도 차이로 인한 유동응력 변화에 의해 변형량 및 압력값이 변화하여 비대칭 변형을 유발한다.

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= 9.8 \times 10^{-3} \sigma_f \cdot f \cdot \left(\frac{\dot{\epsilon}}{10}\right)^m \quad (\text{kN/mm}^2) \\ \sigma_f &= 0.28 \exp\left(\frac{5}{t} - \frac{0.01}{C+0.05}\right) \quad (t \geq t_d) \\ \sigma_f &= 0.28 g(C, t) \exp\left(\frac{5}{t_d} - \frac{0.01}{C+0.05}\right) \quad (t \leq t_d) \quad (1) \\ g(C, t) &= 30.0(C+0.9) \left(t - 0.95 \frac{C+0.49}{C+0.42}\right)^2 + \left(\frac{C+0.06}{C+0.09}\right) \\ f &= 1.3 \left(\frac{\bar{\epsilon}}{0.2}\right)^n - 0.3 \left(\frac{\bar{\epsilon}}{0.2}\right) \end{aligned}$$

식 (1)에서, $t = T/1000$, $t_d = 0.95(C+0.41)/(C+0.32)$, $n = 0.41 - 0.07C$ 를 나타내고 또한, $m = -(0.019C + 0.126)t + (0.075C - 0.050)$ ($t \geq t_d$), $m = (0.081C - 0.154)t + (-0.019C + 0.207) + 0.027/(C+0.320)$ ($t \leq t_d$)를 나타낸다. C 는 등가 탄소함유량 퍼센트(%)를 나타낸다. 본 유동응력 식은 탄소강의 오스테나이트 영역 (Austenitic region), 페라이트 영역(Ferritic region), 그리고 이것의 2 상 영역(Two-phase region)에서의 소성변형에 대한 소재의 변형저항⁽¹⁵⁾을 나타낸다. 마르텐사이트 시작 온도인 700°C 이하에서는 냉각속도에 따라 민감하게 다양한 조직 분화가 시작된다. 위 식은 온도가 700°C 이상의 열간 소성변형 상태에서만 적용되는 식이다.

2.2 압연변수 무차원화 수식모델

유한요소법은 각각의 비대칭 압연 유발인자와 이로 인해 발생하는 판의 폭방향 휨량을 정량적으

로 제공한다. 그러나, 이러한 인과관계를 실제 압연설비의 제어 중에 사용되도록 하기 위해서는 간단한 수식모델 형태로 구현해야 한다. 또한, 개발된 수식모델의 효용가치를 높이기 위해서는 롤의 크기 혹은 판의 크기와 관계없이 적용가능한 무차원화된 수식모델로 개발되어야 한다.

판의 폭방향 휨의 경우에는 Fig. 2 에서 보는 바와 같은 변수들이 관련되어 서로 인과관계를 형성한다.

$$\rho_c = g(l_m, h_m, \Delta H_w, W, \Delta T_w, T_m, \Delta \mu_w) \quad (2)$$

여기서, ρ_c 는 판의 폭방향 휨 곡률반경, l_m 은 판 폭 중심에서 압연방향의 판과 롤의 접촉길이, h_m 은 판 폭 중심에서 판의 압연 진후 평균두께, ΔH_w 는 롤의 폭방향 롤갭 편차($|G_R - G_L|$) 혹은 판의 폭방향 두께편차, W 는 판폭, ΔT_w 는 판의 폭방향 온도 편차, T_m 은 판의 평균온도, $\Delta \mu_w$ 는 판과 롤 사이의 폭방향 마찰계수 편차를 나타낸다.

차원 변수를 체계적으로 무차원 변수로 변환시켜주는 방법론인 PI 이론⁽¹⁶⁾을 도입하여 식 (2)를 다음식과 같이 유도하였다.

$$s \frac{\rho_c}{h_m} = g^* \left(\frac{\Delta H_w}{W}, \frac{\Delta T_w}{T_m}, \Delta \mu_w \right) \quad (3)$$

여기서, s 는 l_m/h_m 을 나타내며 통상적으로 형상지수(shape factor) 라고 알려져 있는 무차원 변수이다. 그리고 g^* 는 무차원 변수로 구성되는 함수를 의미한다. g^* 의 구체적 형태는 분석결과에 기초하여 결정된다. 실제 압연설비는 선형제어이론에 기초한 PID(Proportional Integral Differential) 제어가 사용된다. 따라서, 관련 제어모델은 각 요인별 선형식으로 구성하고 이 식들의 중첩으로 복잡 요인에 의한 비대칭 압연이 구현되도록 하였다. 판의 폭방향 휨에 대한 선형제어모델식은 다음과 같다.

$$s \cdot \begin{pmatrix} \frac{\rho_c^a}{h_m} \\ \frac{\rho_c^b}{h_m} \\ \frac{\rho_c^c}{h_m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & 0 & 0 \\ 0 & M_{22} & 0 \\ 0 & 0 & M_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\Delta H_w}{W} \\ \frac{\Delta T_w}{T_m} \\ \Delta \mu_w \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_{11} & 0 & 0 \\ 0 & B_{22} & 0 \\ 0 & 0 & B_{33} \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서, $\rho_c = \rho_c^a + \rho_c^b + \rho_c^c$ 의 관계가 있다. M_{ii} 및 B_{ii} 는 모델 상수를 나타낸다.

3. 폭방향 비대칭 압연실험

3.1 열간압연 실험장치

Fig. 3 은 파이롯트 열간압연 실험장치를 나타내

고 있다. 실험에 사용한 파이롯트 압연기는 Fig. 3(a)에 보는 바와 같이 보강롤이 없고 작업롤만 있는 2 단 단동 가역식 스탠드(2-high single reversible stand) 형태를 가지고 있다. 압연 모터의 최대 동력은 11kW 이고 감속기를 통해서 최대 토크를 5433.2 Nm 및 회전 각속도를 19.3 rpm 으로 롤에 전달할 수 있도록 설계되어 있다. 상하 롤의 직경은 160 mm 이고 롤 폭은 236mm 이다.

Fig. 3(b)에 나와 있는 가열로는 단위 분당 10°C 올릴 수 있는 사양으로써 상온 상태에서 로내 온도를 1100°C 까지 상승시키는데 약 2 시간이 소요된다. 가열로의 전열 방식은 전기 저항열을 이용한 복사 열전달 방식이고 열 발생은 로내 6 면 중 가열로 밀면과 커버면을 제외한 전면에서 이루어 지도록 되어있다. 로내에서 시편 전체에 걸쳐 전열이 균일하게 되도록 하고 또한, 시편을 짧은 시간내에 로내에서 외부로 이동하기 쉽게 하기 위해서 내화벽돌을 이용하여 거치대로 장착하였다.

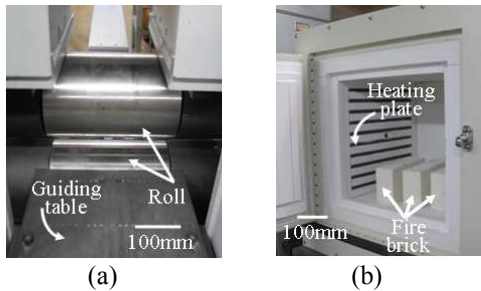


Fig. 3 Pilot apparatus for hot plate rolling: (a) two high rolling mill (b) heating furnace

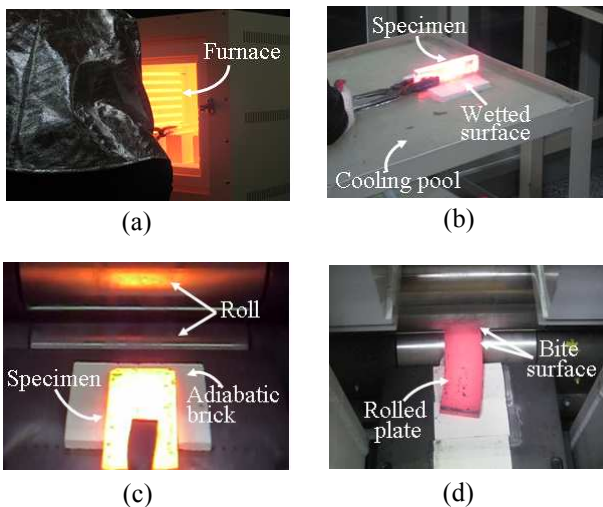


Fig. 4 Experimental steps: (a) heating by furnace (b) cooling by water pool (c) biting by rolls (d) width directional bending during hot rolling

3.2 폭방향 비대칭 압연실험 절차

파이롯트 압연기에서 실험적으로 폭방향 비대칭 압연을 실현할 수 있는 인자는 판의 폭방향 두께 편차 및 판의 폭방향 온도 편차이다. 판의 폭방향 두께 편차 실험은 폭방향으로 두께 편차가 있도록 시편을 가공한 다음 가열로에서 판을 1100°C 까지 가열한 후 그대로 압연기에 투입하면 된다.

그러나, 폭방향 온도편차 압연실험은 가열로에서 소재를 꺼내어 별도의 냉각효과를 부여해야 하므로 실험 방법이 좀 더 복잡하고 신속하게 이루어져야 한다. 아래 절차는 판의 폭방향 온도 편차에 의한 폭방향 비대칭 압연실험 절차를 나열한 것이다.

(i)압연시편 준비 및 가열과정: 판이 롤갭에 원활하게 투입되도록 하기 위해 판 선단을 테이퍼 가공하여 압연시편을 준비한다. Fig. 4(a)에 보는 바와 같이, 압연 시편을 1100°C 에 도달해 있는 가열로에 잠입한 다음 20 분 정도 경과시켜 판의 전체 온도가 로내 온도까지 충분히 상승되도록 한다. 가열을 과도하게 하면 고온 스케일이 발생하기 때문에 판 전체가 균일 온도에 도달하는 목표시간을 정해 놓고 이것을 준수하는 것이 중요하다.

(ii)부분 냉각과정: 판의 폭방향 온도 편차를 유발하기 위해서 Fig. 4(b)에 보는 바와 같이, 판 폭의 절반 부분을 냉각수에 침수시켜 압연 시편의 폭 중심선을 기준으로 판의 하부 온도를 강하시킨다. 목표 강하 온도를 달성하기 위해 몇 번의 예비 실험을 거쳐서 침수시간을 결정하고 열화상카메라를 이용하여 판의 실제 온도를 확인한다. 이때 판의 표면에 존재하는 고온 스케일을 반드시 제거하고 측정해야 한다.

(iii) 압연기에 소재 투입 및 압연과정: Fig. 4(c)에 보는 바와 같이, 부분 냉각된 시편을 집게로 집은 다음 압연기의 안내판 위에 올려놓는다. 안내판과 고온의 판 사이에 열전달이 일어나는 것을 방지하기 위해 내화벽돌 재질로 만든 단열판을 안내판 위에 장착하도록 하였다. 단열판의 두께가 있으므로 이것을 고려하여 안내판의 높이를 조절하여 압연시편이 수평상태로 롤갭에 투입되도록 하였다. Fig. 4(d)는 본 실험절차에 의해 롤갭 내에서 판의 폭방향 굽힘이 발생한 모습을 보여주고 있다. 판을 충분히 공랭시킨 다음 변형된 판의 전체 형상 및 폭 방향 중심선의 휨 형상을 투사지(Tracing paper)를 이용하여 발췌한다. 발췌된 형상은 스캐너 및 이미지 프로세서를 통해서 디지털 데이터로 저장한다.

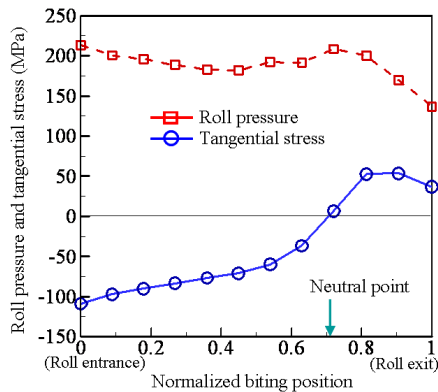


Fig. 5 Roll-pressure and tangential stress distribution along the arc of contact

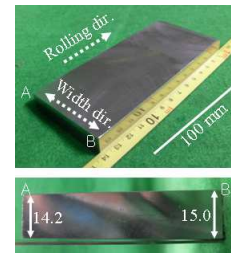
4. 결과 및 고찰

4.1 비대칭 압연 해석결과와 실험의 비교

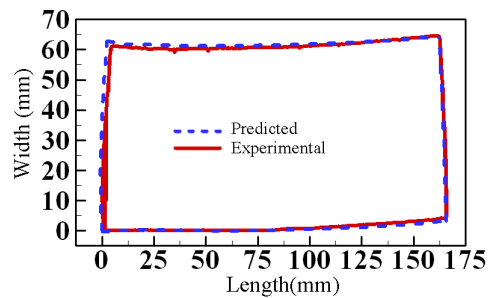
Fig. 5 는 2.1 절에서 설명한 유한요소모델로 해석한 롤과 판 사이의 롤 압력 및 접선 응력을 그래프로 나타낸 것이다. 롤을 마스터(Master)로 판을 슬레이브(Slave)로 설정하여 접촉을 모사하였다. 마찰모델은 쿨롱모델을 도입하였고 마찰계수는 열간압연 중에 일반적인 유효조건에서 사용하는 0.35 를 채용하였다⁽¹⁷⁾. 압연공정에서 판이 취입(Roll entrance) 영역에서는 판의 속도가 롤의 속도보다 상대적으로 늦고(후진역), 판이 유출(Roll exit) 영역에서는 소재의 속도가 롤의 속도보다 상대적으로 빠르기(선진역) 때문에 접선응력의 방향이 다르다. Fig. 5 에서 보면 물리적 현상과 일치하는 접선응력의 거동이 나타나고 중립점(Neutral point)이 분명히 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 6 는 판의 폭방향 두께편차(ΔH_w) 가 존재할 때(Fig. 6(a)), 압연 후 폭방향 휨을 실험적으로 측정했을 경우와 해석을 통해서 예측한 경우를 서로 비교한 그림이다. Fig. 6(b)에서와 같이, 실선으로 표시된 형상이 실험적으로 측정된 형상이고 파선으로 표시된 형상이 유한요소모델로부터 예측된 형상이다. 두 결과로부터 얻은 형상이 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 두께가 더 두꺼운 에지(Edge)가 그 반대쪽 에지보다 같은 롤갭에서 소재량이 더 많기 때문에 압연에 의해 더 늘어나고 이로 인해 두께가 얇은 쪽으로 휘어지게 된다. 유한요소모델이 이러한 폭방향 비대칭 물리적 현상을 정량적으로 잘 구현하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 7 은 압연후 폭방향 휨 발생 원인 중에 소재의 폭방향 온도 편차가 존재할 때, 압연후 판의 압연면 중심선(Center line)을 실험적으로 측정했을

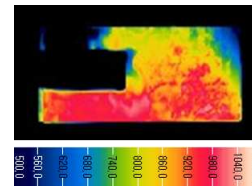


(a)

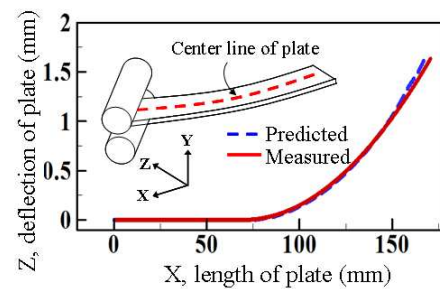


(b)

Fig. 6 Verification of the proposed 3-D FE model: (a) thickness variation of plate in the width direction (b) predicted and measured shapes of rolled plate



(a)



(b)

Fig. 7 Verification of the proposed 3-D FE model: (a) temperature deviation of plate in the width direction (b) predicted and measured center line of rolled plate

경우와 해석을 통해서 예측한 경우를 서로 비교한 그림이다. Fig. 7(a)는 3.2 절에서 실험적으로 구현한 소재의 폭방향 온도 편차를 열화상 카메라를 이용하여 측정된 것이다. 이 온도 편차가 존재할 때 실제 압연을 통해서 얻어진 변형 후 판 중심선을 Fig. 7(b)에 실선으로 나타내었다. 이 온도 편차를 유한요소격자에 입력으로 주어서 해석을

Table 1 Model constants in linear setup equation

Asymmetric parameters	M_{ii}	B_{ii}
$\Delta H_w/W$	-11320.0	311.4
$\Delta T_w/T_m$	-2191.0	645.8
$\Delta \mu_w$	-186.5	47.7

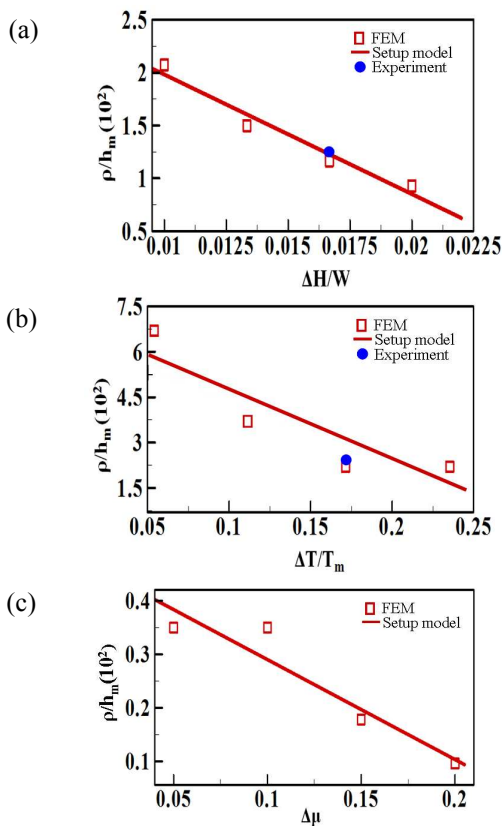


Fig. 8 Setup models fitted from the results of FEA: (a) ρ_c/h_m vs. $\Delta H_w/W$ (b) ρ_c/h_m vs. $\Delta T_w/T_m$ (c) ρ_c/h_m vs. $\Delta \mu_w$

통해 얻어진 판 중심선을 좌선으로 나타내었다. 두 선이 매우 잘 일치하고 있어서 구축한 유한요소모델이 온도 변화에 따른 변형저항 및 이로 인한 변형편차를 잘 반영하고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 온도가 더 높은 쪽 에지(950°C avg.)가 냉각조 수냉(Fig. 4(b))에 의해 상대적으로 낮은 온도의 반대쪽 에지(800°C avg.)보다 같은 압하율에서 더 많이 연신이 발생하기 때문에 온도가 낮은 에지쪽으로 휘어지게 되는 현상이 나타났다. 실험과 해석 모두가 정량적으로 일치된 결과를 보여주고

있다.

4.2 판의 폭방향 힘에 대한 제어 설정모델식

Fig. 8 은 판의 폭방향 무차원 두께편차($\Delta H_w/W$), 판의 폭방향 무차원 온도 편차($\Delta T_w/T_m$), 판과 롤 사이의 폭방향 마찰계수 편차($\Delta \mu_w$)에 의한 판의 폭방향 휨 무차원 곡률반경(ρ_c/h_m)을 각 요인 수준별로 나타낸 것이다. 그림에서 사각 기호로 표시된 것은 유한요소해석 결과이고 직선으로 표시된 것은 유한요소해석 결과를 토대로 설정모델을 나타낸 것이고 원형 기호로 표시된 것은 실험을 통해서 측정된 결과를 각각 나타내고 있다. 설정모델식은 식 (4)에 기초하여 도출되었으며 모델상수 값은 Table 1 에 요약되어 있다. 여기서, M_{ii} 는 각 비대칭요인이 판의 폭방향 힘에 미치는 민감도를 나타내고 B_{ii} 는 셋업모델의 제어 기준상수를 나타낸다.

판의 폭방향 휨 곡률반경(ρ_c)은 휨의 기울기와 반비례의 기하학적 관계가 있으므로(Fig. 2) 곡률반경이 클수록 작게 휘는 것을 나타낸다. 물리적으로 예상되는 바와 같이(Fig. 8), 각 요인량의 수준이 증가함에 따라 폭방향 곡률반경은 작게 되어 휨의 기울기가 점차적으로 커지는 것을 알 수 있다. 폭방향 힘을 일으키는 요인 중 판의 폭방향 두께편차에 의한 영향도가 온도편차에 의한 영향도 보다 3 배 이상 큰 것을 알 수 있다. 이것은 폭방향 두께편차가 발생했을 때 소재가 많은 쪽 에지의 소재가 직접적으로 신장량으로 전달되어 곡률을 상승시키는 효과가 온도 편차에 의해 발생된 신장량 차이보다 훨씬 더 폭방향 힘에 지배적이라는 것을 나타내고 있다.

판의 폭방향 마찰계수 편차 비대칭 요인의 경우에는 소재의 폭방향 변형량 편차에 의한 휨이 아니라 판의 진행방향 회전에 의한 것으로 나타났다. 폭방향 휨 요인 중 판의 폭방향 두께편차 및 온도 편차에 의한 해석결과에서는 판의 중심선이 압연 후 확연히 휘어진 것을 관찰할 수 있는데 비해, 폭방향 마찰계수 편차에 의한 해석결과에서는 판 중심선이 거의 일직선을 유지하면서 방향만 회전된 것을 알 수 있었다. Fig. 8(c)에 나타나 있는 곡률반경은 압연후 판의 회전에 의한 것을 의미한다.

Fig. 8(a) 및 (b) 에서는 파이롯트 압연기에서 실험적으로 측정된 곡률반경을 유한요소 예측결과 및 설정모델식과 같이 비교하여 놓았다. 그림에서 보는 바와 같이 유한요소해석 및 설정모델로 예측한 곡률반경이 실험결과와 일치함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 폭방향 비대칭 압연 인자과 이로 인해 발생하는 비대칭 변형 사이의 인과 관계를 나타내는 제어설정 모델식을 개발하였다. 이를 위해서 유한요소해석과 무차원화 방법이 도입되었다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 개발한 제어 설정모델식은 폭방향 두께편차 및 폭방향 온도편차에 의한 폭방향 휨 파이프먼트 압연 테스트 결과와 상당히 일치하였다. 이것으로부터 본 모델의 적합성을 분석할 수 있었다.

(2) 무차원으로 폭방향 비대칭 압연인자와 폭방향 휨 사이의 설정모델식을 개발하였으므로 크기가 다른 실제 후판 압연공정에 본 제어설정모델을 적용하여 발생하는 비정상변형을 대처할 수 있다.

후 기

이 논문은 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Hu, X., Zhang, Q., Zhao, Z., Tian, Y., Liu, X. and Wang, G., 2006, "Application of Approximation Full-Load Distribution Method to Pass Scheduling on Plate Mill with Hydro-bending System," *J. Iron and Steel Res. Int.*, Vol. 13, pp.22~26.
- (2) Mantyla, P., Korhonen, R. and Jonsson, N. G., 1992, "Improved Thickness and Shape Accuracy with Advanced Pass Scheduling in Plate Rolling," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 34, pp.255~263.
- (3) Chun, M. S., Yi, J. J. and Moon, Y. H., 2001, "Application of Neural Networks to Predict the Width Variation in Plate Mill," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 111, pp.146~149.
- (4) Chun, M. S. and Moon, Y. H., 2000, "Optimization of the Amount of Edging to Increase Rolling Yields in a Plate Mill," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol.104, pp.11~16.
- (5) Park, J. J. and Lee, S.J., 2003, "Design of Rolling Pass Schedules to Improve Grain-size Uniformity in Thickness," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol.140, pp.454~459.
- (6) Hong, C. P. and Park, J. J., 2003, "Design of Pass Schedule for Austenite Grain Refinement in Plate Rolling of a Plain Carbon Steel," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol.143-144, pp.758~763.
- (7) Dyja, H. and Korczak, P., 1999, "The Thermal-mechanical and Microstructural Model for the FEM Simulation of Hot Plate Rolling," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol.92-93, pp.463~467.
- (8) Philipp, M., Schwenzfeier, W., Fisher, F. D., Wodlinger R. and Fishcher, C., 2007, "Front End Bending in Plate Rolling Influenced by Circumferential Speed Mismatch and Geometry," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol.184, pp.224~232.
- (9) Nilsson, A., 2001, "Front-end Bending in Plate Rolling," *Scan. J. Metal.*, Vol.30, pp.337~344.
- (10) Park, B. H. and Hwang, S. M., 1997, "Analysis of Front End Bending in Plate Rolling by the Finite Element Method," *J. Manuf. Sci. Eng.*, Vol.119, pp.314~232.
- (11) Dyja, H., Korczak, P., Pilarczyk, J. W. and Grzybowski, J., 1994, "Theoretical and Experimental Analysis of Plates Asymmetric Rolling," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol.45, pp.167~172.
- (12) Salimi, M. and Sassani, F., 2002, "Modified Slab Analysis of Asymmetrical Plate Rolling," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 44, pp.1999~2023.
- (13) Li, X., Du, F., Wang, M. and Wu, J., 2005, "FEM Analysis of Geometry Control of the Plate Head in the Vertical-horizontal Rolling Processes," *China Mech. Eng.*, Vol.16, pp.712~715.
- (14) Yoshiharu, D., Michihiko, H., Hidehito, F., Daisuke, M., Hirokazu, T. and Toshiro, N., 2000, "Development of Camber Meter in Plate Rolling," *Papers of Tech. Meeting on Metal Indus. Div.*, pp.29~32.
- (15) Shida, S., 1969, "Empirical Formulation of Flow-stress of Carbon Steels Resistance to Deformation of Carbon Steels at Elevated Temperature. 2nd Report," *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, Vol.10, pp.610~617.
- (16) Buckingham, E., 1914, "On Physically Similar Systems: Illustrations of the Use of Dimensional Equations," *Phys. Rev.*, Vol. 4, No. 4, pp.345~376.
- (17) Ginzburg, V.B., 1989, *Steel-Rolling Technology - Theory and Practice*, Marcel Dekker Inc., New York and Basel.