

# 후판 압연공정에서 상·하 비대칭 변형거동의 수치적· 실험적 예측 및 설정모델에 관한 연구

변상민<sup>#</sup>, 이영석<sup>\*\*</sup>, 전언찬<sup>\*</sup>

## Numerical and Experimental Prediction of Asymmetric Deformation Behavior and Its Setup Model in Plate Rolling

Sang-Min Byon<sup>#</sup>, Young-Seog Lee<sup>\*\*</sup>, Eon-Chan Jun<sup>\*</sup>

(Received 16 March 2011; received in revised form 23 March 2011; accepted 11 April 2011)

### ABSTRACT

The thick plate produced by rolling process is used as the basic members of a ship structure. In this paper, we present a setup model to control the asymmetric factors causing plate bending in the upper or lower direction during rolling. A series of finite element analysis are conducted to predict the relationship between various asymmetric factors and plate bending. The setup model is developed by regressing the relationship to the linear equations with several non-dimensional parameters. The setup model is verified by a pilot rolling test and applied to actual rolling conditions. Results show that the model is substantial to predict the asymmetric deformation in the plate rolling process.

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

### 1. 서 론

후판압연은 연주공정(첫물을 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 분야와 불균형 공정요인에 의해 비정상(혹은, 비대칭) 변형이 발생했을 때 이것에 대처하는 연구 분야로 나누어진다. 본 연구는 설비효율을 높이는 방법론 개발에 있으므로 후자 연구분야에 해당된다. 대표적인 비대칭 변형은 판의 상·하 휨(warp)과 좌·우 휨(camber)이다. 상·하 휨에 대한 연구

\* 동아대학교 기계공학과

\*\* 중앙대학교 기계공학부

# 교신저자 : 동아대학교 기계공학과

E-mail : smbyon@dau.ac.kr

는 변형이 복잡하기 때문에 유한요소법과 같은 수치 해석법을 이용하여 일반적으로 연구되어져 왔다<sup>[1]</sup>. Salimi<sup>[2]</sup>는 이것을 수학적 모델로 나타내어 계산시간을 감소시켰다.

조업 중에 비대칭 압연 요인이 감지되면 이로 인해 발생될 비대칭 변형량을 제어설정 모델식으로부터 예측하여 미리 보상제어를 할 수 있다. 본 연구에서는 상·하 비대칭 압연 요인과 이로 인해 발생하는 비대칭 변형 사이의 인과 관계를 나타내는 제어설정 모델식을 개발하는데 목적이 있다. 비대칭 변형은 간단한 수식모델로 해석이 불가능하므로 유한요소모델을 기초로 하여 해석을 수행하였다. 각 발생요인별 제어설정 모델식을 개발하기 위해 먼저, 비대칭 압연변형을 모사하기 위한 유한요소모델을 구축하고 이것을 통해 나온 결과를 비대칭 변형 파이프릿(pilot) 압연 실험을 통해 검증하였다. 일련의 유한요소해석을 통해 판의 상·하 휨에 대한 제어설정 모델식을 제시하였다.

## 2. 비대칭 압연 해석모델

### 2.1 유한요소해석모델

비대칭 압연 요인과 이로 인한 판의 상·하 휨에 대한 인과관계를 모두 실험적으로 파악하기 어렵다. 그 이유는 파이프릿 압연기가 구조적인 측면에서 많이 단순화 되어 있기 때문에 구현하기 힘든 비정상 압연 요인이 다수 존재하고 상당한 비용과 노력이 수반되므로 다양한 발생요인 수준별 테스트가 어렵다. 이러한 점 때문에 유한요소해석을 통해 다양한 발생요인 종류별 그리고 각 발생요인의 수준별 비대칭 압연 결과를 산출하여 그 인과관계를 파악해야 한다.

Fig. 1은 본 해석에 사용된 유한요소모델을 보여주고 있다. 상·하 휨은 두께방향 비대칭 휨 현상이므로 폭이 두께에 비해 상당히 큰 후판압연에서는 그 림과 같이 2차원 평면변형으로 가정해도 무방하다. 따라서, 본 연구에서는 상·하 휨 비대칭 거동을 고찰하기 위해 계산시간이 훨씬 적게 소요되는 2차원 모델을 구축하여 해석을 수행하였다.

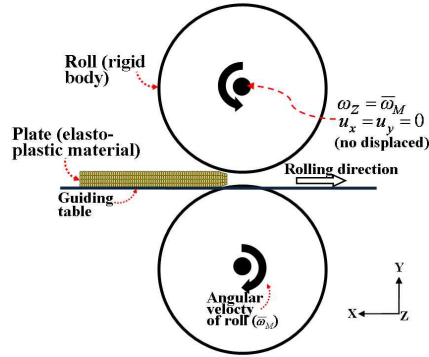


Fig. 1 Finite element(FE) model to analyze the front end bending during plate rolling

제시한 유한요소모델에서 롤은 강체로 모델링하였고 소재는 탄·소성 재료로 모델링하였다. 후판과 같이 두께가 두꺼운 소재를 압연할 경우, 롤의 탄성변형에 의한 소재 두께 변화 차이는 크지 않고 더욱이 소재가 고온일 때에는 그 영향성이 더욱 줄어들기 때문에 본 연구에서 롤은 강체로 모델링하였다. 소재 내에서 온도 편차에 의한 압연 후 소재의 형상변화를 고찰하기 위해서 각 요소마다 온도값을 지정하도록 모델링 하였다. 식 (1)은 온도변화에 따라 소재의 변형저항 거동이 나타나도록 도입된 유동응력식( $\bar{\sigma}$ )<sup>[3]</sup>이다. 본 식을 유한요소해석모델에 반영함으로써 소재내의 비대칭 온도분포가 같은 기하학적 구속 조건에서도 변형량 및 압력값에 큰 차이를 유발하여 비대칭 변형을 일으킨다.

$$\bar{\sigma} = 9.8 \times 10^{-3} \sigma_f \cdot f \cdot \left( \frac{\dot{\epsilon}}{10} \right)^m \quad (kN/mm^2)$$

$$\sigma_f = 0.28 \exp\left( \frac{5}{t} - \frac{0.01}{C+0.05} \right) \quad (t \geq t_d)$$

$$\sigma_f = 0.28g(C;t) \exp\left( \frac{5}{t_d} - \frac{0.01}{C+0.05} \right) \quad (t \leq t_d) \quad (1)$$

$$g(C;t) = 30.0(C+0.9)(t - 0.95 \frac{C+0.49}{C+0.42})^2 + \frac{C+0.06}{C+0.09}$$

$$f = 1.3 \left( \frac{\bar{\epsilon}}{0.2} \right)^n - 0.3 \left( \frac{\bar{\epsilon}}{0.2} \right)$$

식 (1)에서  $t = T/1000$ ,  $t_d = 0.95(C+0.41)/(C+0.32)$ ,  $n = 0.41 - 0.07C$  를 나타내고 또한,  $m = -(0.019C + 0.126)t + (0.075C - 0.050) \quad (t \geq t_d)$ ,  $m = (0.081C - 0.154)t + (-0.019C + 0.207) + 0.027/(C+0.320) \quad (t \leq t_d)$ 를 나타낸다. C는 등가 탄소함유량 퍼센트[%]를 나타낸다.

## 2.2 압연변수 무차원화 수식모델

유한요소법은 각각의 비대칭 압연 유발인자와 이로 인해 발생하는 판의 상·하 휨량을 정량적으로 제공한다. 그러나, 이러한 인과관계를 실제 압연설비의 제어 중에 사용되도록 하기 위해서는 간단한 수식모델 형태로 구현해야 한다. 또한, 개발된 수식모델의 효용가치를 높이기 위해서는 물의 크기 혹은 판의 크기와 관계없이 적용 가능한 무차원화된 수식모델로 개발되어야 한다.

Fig. 2에 보는 바와 같이, 상·하 휨(warp)의 경우에 다음과 같은 변수들이 관련되어 서로 인과관계를 형성한다.

$$\rho_w = f(l_m, h_m, \Delta V_t, V_m, \Delta T_t, T_m, \Delta \mu_t) \quad (2)$$

여기서,  $\rho_w$ 는 판의 상·하 휨 곡률반경,  $l_m$ 은 판 폭 중심에서 판과 물의 접촉길이,  $h_m$ 은 판 폭 중심에서 판의 압연전후 평균두께,  $\Delta V_t$ 는 상·하물의 주속 차이,  $V_m$ 은 상·하물의 평균속도,  $\Delta T_t$ 는 판의 두께 방향 온도 편차,  $T_m$ 은 판의 평균온도,  $\Delta \mu_t$ 는 판과 물 사이의 상·하면 마찰계수 편차를 나타낸다.

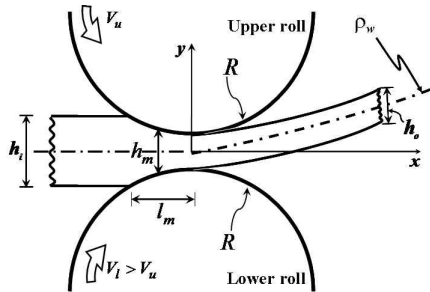


Fig. 2 Rolling parameters and notations related to roll-bite profile and front end bending

차원 변수를 체계적으로 무차원 변수로 변환시켜 주는 방법론인 PI 이론<sup>[4]</sup>을 도입하여 식 (2)를 다음 식과 같이 유도하였다.

$$s \frac{\rho_w}{h_m} = f^* \left( \frac{\Delta V_t}{V_m}, \frac{\Delta T_t}{T_m}, \Delta \mu_t \right) \quad (3)$$

여기서,  $s$ 는  $l_m/h_m$ 을 나타내며 통상적으로 형상지

수(shape factor) 라고 알려져 있는 무차원 변수이다. 그리고  $f^*$ 는 무차원 변수로 구성되는 함수를 의미한다.  $f^*$ 의 구체적 형태는 분석결과에 기초하여 결정된다. 실제 압연설비는 선형제어이론에 기초한 PID(proportional integral differential)제어기가 사용된다. 따라서, 관련 제어모델은 각 요인별 선형식으로 구성하고 이 식들의 중첩으로 복잡 요인에 의한 비대칭 압연이 구현되도록 하였다. 판의 상·하 휨에 대한 선형제어모델식은 다음과 같다.

$$s \cdot \begin{pmatrix} \frac{\rho_w^a}{h_m} \\ \frac{\rho_w^b}{h_m} \\ \frac{\rho_w^c}{h_m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & 0 & 0 \\ 0 & R_{22} & 0 \\ 0 & 0 & R_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\Delta V_t}{V_m} \\ \frac{\Delta T_t}{T_m} \\ \Delta \mu_t \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서,  $\rho_w = \rho_w^a + \rho_w^b + \rho_w^c$ 의 관계가 있다.  $R_{ii}$ 와  $A_{ii}$ 는 모델 상수를 나타낸다.

## 3. 상·하 비대칭 압연실험

### 3.1 열간압연 실험장치

Fig. 3은 파이롯트(pilot) 열간압연 실험장치를 나타내고 있다. 실험에 사용한 파이롯트 압연기는 Fig. 3(a)에 보는 바와 같이 보강롤이 없고 작업롤만 있는 2단 단동 가역식 스탠드(2-high single reversible stand) 형태를 가지고 있다. 압연 모터의 최대 동력

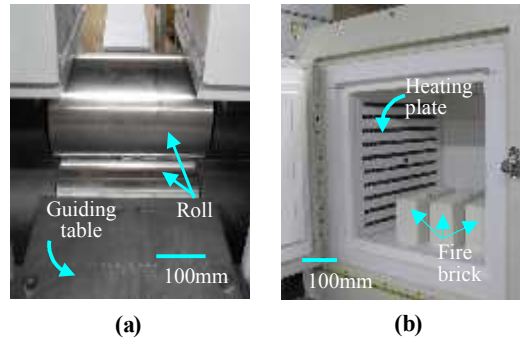


Fig. 3 Pilot apparatus for hot plate rolling: (a) two high rolling mill (b) heating furnace

은 11kW이고 감속기를 통해서 최대 토크를 5433.2 Nm 및 회전 각속도를 19.3rpm으로 롤에 전달할 수 있도록 설계되어 있다. 상·하 롤의 직경은 160mm 이고 롤 폭은 236mm 이다.

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

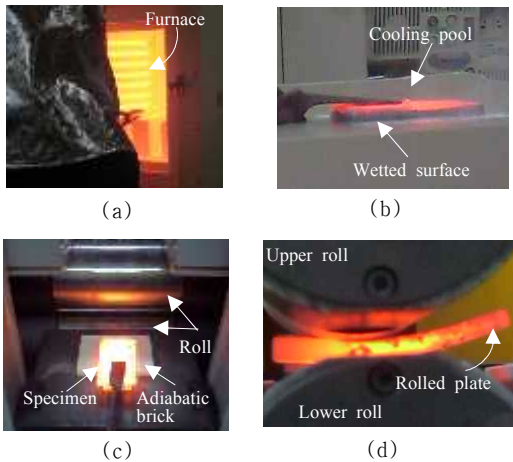


Fig. 4 Experimental steps: (a) heating by furnace (b) cooling by water pool (c) biting by rolls (d) front end bending during hot rolling

### 3.2 상·하 비대칭 압연실험 절차

파이롯트 압연기에서 실험적으로 상·하 비대칭 압연을 실현할 수 있는 인자는 판의 두께 방향 온도 편차이다. 아래 절차는 판의 두께 방향 온도 편차에 의한 상·하 비대칭 압연실험 절차를 나열한 것이다.

(i) 압연시편 준비 및 가열과정: 판이 롤갭(roll gap)에 원활하게 투입되도록 하기 위해 판 선단을 테이퍼(taper) 가공하여 압연시편을 준비한다. Fig. 4(a)에 보는 바와 같이, 압연 시편을 1100℃에 도달

해 있는 가열로에 잠입한 다음 20분 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 두께 방향 온도 편차를 유발하기 위해서 Fig. 4(b)에 보는 바와 같이, 판 두께의 절반 부분을 냉각수에 침수시켜 압연 시편의 두께 중심선을 기준으로 판의 하부 온도를 강하시킨다. 목표 강하 온도를 달성하기 위해 몇 번의 예비 실험을 거쳐서 침수시간을 결정하고 열화상카메라를 이용하여 판의 실제 온도를 확인한다. 이 때 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 뒤집어서 압연기의 안내판 위에 올려놓는다. 냉각된 부분이 위쪽으로 오도록 하여 시편을 밀어 넣어 롤에 투입했을 때 상향 굽힘이 발생되도록 한다. 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 상향 굽힘이 발생하는 모습을 보여주고 있다.

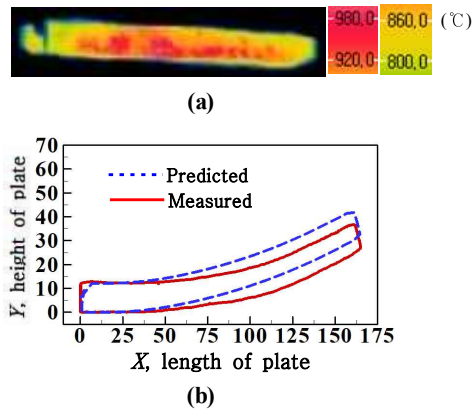


Fig. 5 Verification of the proposed 2-D FE model : (a) temperature distribution of plate measured by thermal imaging camera before rolling (b) predicted and measured shapes of rolled plate

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 비대칭 압연 해석결과와 실험의 비교

Fig. 5는 소재의 두께방향 온도 편차가 존재할 때(Fig. 5(a)), 압연 후 소재의 굽힘 형상을 실험적으로 측정했을 경우와 해석을 통해서 예측한 경우를 서로 비교한 그림이다. Fig. 5(b)에서와 같이, 실선으로 표시된 경우가 측정된 형상이고 파선으로 표시된 경우가 예측된 형상이다. 두 형상이 비교적 잘 일치하고 있으므로 구축한 유한요소모델이 두께 방향의 변형 편차 거동을 잘 모사하고 있는 것을 알 수 있다. 예측과 측정 사이에 다소간의 형상 차이가 발생하는 것은 시편의 두께 방향 온도 편차를 유한요소모델에 구현할 때 시편 두께방향으로 불규칙한 측정온도를 두께 중심선을 기준으로 측정 평균값인 800℃와 950℃로 양분하여 모델링한 영향이 반영된 결과이다.

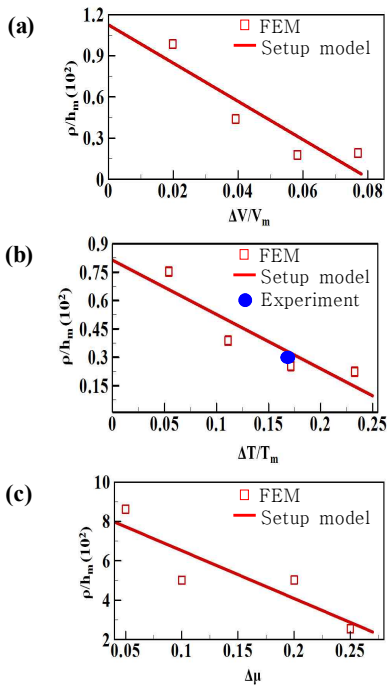


Fig. 6 Setup models fitted from the results of FEA:  
 (a)  $(\rho_w/h_m)$  vs.  $\Delta V_t/V_m$  (b)  $(\rho_w/h_m)$  vs.  $\Delta T_t/T_m$   
 (c)  $(\rho_w/h_m)$  vs.  $\Delta\mu_t$

### 4.2 판 상·하 휨에 대한 제어설정 모델식

Fig. 6은 상·하롤의 무차원 주속차이( $\Delta V_t/V_m$ ), 판의 두께방향 무차원 온도 편차( $\Delta T_t/T_m$ ), 판과 롤 사이의 상·하면 마찰계수 편차( $\Delta\mu_t$ )에 의한 판의 상·하 휨 무차원 곡률반경( $\rho_w/h_m$ )을 각 요인 수준별로 유한요소 해석한 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 기호(symbol)로 표시된 것은 유한요소 해석 결과의 무차원량이고 직선으로 나타난 것은 무차원화된 선형 제어설정 모델이다. 식 (4)에 따라, 각 선형 제어설정 모델의 상수(constants)는 Table 1에 요약되어 있다.

Table 1 Model constants in linear setup equation

Asymmetric parameters	$R_{ii}$	$A_{ii}$
$\Delta V_t/V_m$	-1393.0	112.5
$\Delta T_t/T_m$	-286.5	81.3
$\Delta\mu_t$	-2429.0	894.4

곡률반경은 휨의 기울기와 반비례 관계가 있으므로 곡률반경이 클수록 작게 휨는 것을 나타낸다. 물리적으로 예상되는 바와 같이(Fig. 6), 각 요인량이 증가함에 따라 곡률반경은 작게 되어 휨의 기울기가 점차적으로 커지는 것을 알 수 있다. 특이한 점은 휨를 일으키는 요인 중 롤 주속편차와 온도편차에 비해 마찰편차는 그 영향도가 10분의 1 정도 밖에 되지 않는 것으로 나타나고 있다. 이것은 롤 주속편차와 온도편차는 소재 전체에 영향을 미치는 인자이지만 마찰편차는 소재 표면에만 국부적으로 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 6(b)에서는 파이롯트 압연기에서 실험적으로 측정된 곡률반경을 유한요소 예측결과와 같이 비교하여 놓았다. 그림에서 보는 바와 같이 유한요소 해석으로 예측한 곡률이 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

### 4.3 제어설정 모델식의 실제 공정 적용

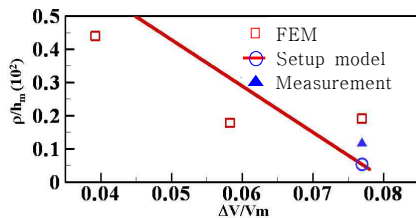
무차원 선형 제어설정 모델식 (4)를 실제 후판 압연공정에 적용하였다. Table 2는 POSCO 제 2후판 공장에서 생산되는 압연공정을 나열한 것이다. 이 압연공정은 상·하 비대칭 압연을 일으키는 조건

(상·하 주속차이: 7.7%)이 포함되어 있고 또한 실제 휨 곡률반경도 측정되어 있어 제어설정 모델의 정확도를 고찰할 수 있다.

**Table 2 Actual rolling conditions causing the front end bending during plate rolling**

Plate		Rolls	
Properties	Values	Properties	Values
Entry thickness	100mm	Diameter	1050mm
Exit thickness	80mm	Velocity of upper roll	2000mm/s
Temperature	1000 °C	Velocity of lower roll	2160mm/s

Fig. 7은 세가지 방법(현장 실측, 유한요소해석, 제어설정 모델)으로 구한 휨 무차원 곡률반경을 비교한 선도이다. 제어설정 모델의 무차원 곡률반경이 현장 실측보다 조금 작게 예측되어 판의 비대칭 휨이 약간 큰 것으로 예측하고 있다. 제어설정 모델은 실제 제어시 기준 신호를 제공하는 역할을 하기 때문에 극부적인 정확도 보다는 전체적인 제어영역에서 경향성이 중요하다. 이러한 측면에서 제시한 제어설정 모델은 비대칭 압연 유발요인에 의한 휨 발생 수준을 낮추는데 있어서 적용 효과가 있는 것으로 판단된다.



**Fig. 7 Comparison of non-dimensional bending radius predicted by setup model with that measured on the shop floor**

## 5. 결론

본 연구에서는 상·하 비대칭 압연 인자와 이로 인해 발생하는 비대칭 변형 사이의 인과 관계를 나타내는 제어설정 모델식을 개발하였다. 이를 위

해서 유한요소해석과 무차원화 방법이 도입되었다. 본 방법을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 개발한 제어설정 모델식은 두께 방향 온도 편차에 의한 상향 휨 파이롯트 압연 테스트의 결과와 상당히 일치하였다. 이것으로부터 본 모델의 정확성을 분석할 수 있었다.
2. 크기가 다른 실제 후판 압연공정에 본 제어설정 모델을 적용했을 경우에 무차원 변수의 상사성에 의해 모델 예측 휨량과 실측 휨량 사이의 값이 비교적 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

## 후 기

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

## 참고문헌

1. Park, B.H. and Hwang S.M., "Analysis of front end bending in plate rolling by the finite element method," Trans. ASME J. Manuf. Sci. Eng., Vol. 119, pp. 314-323, 1997.
2. Salimi, M. and Sassani F., "Modified slab analysis of asymmetrical plate rolling," Int. J. Mech. Sci., Vol. 44, pp. 1999-2023, 2002.
3. Shida, S., "Empirical formulation of flow-stress of carbon steels resistance to deformation of carbon steels at elevated temperature 2nd report," J. JSTP, Vol. 10, pp. 610-617, 1969.
4. Buckingham, E., "On physically similar systems: illustrations of the use of dimensional equations," Phys. Rev., Vol. 4, pp. 345-376, 1914.