

6 단 압연기의 극박 압연공정에서 3 차원 판 형상 예측

이상호* · 송길호** · 이성진** · 김병민***†

* 부산대학교 정밀가공시스템, ** POSCO 압연공정연구그룹, *** 부산대학교 기계공학부

Prediction of Three-Dimensional Strip Profile for 6-High Mill in Thin-Strip Rolling

Sang Ho Lee*, Gil Ho Song**, Sung Jin Lee** and Byung Min Kim***†

* Dept. of Precision Manufacturing Systems Engineering, Pusan Nat'l Univ.,

**Rolling technology research group, POSCO,

** School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

(Received September 30, 2010 ; Revised March 15, 2011 ; Accepted May 23, 2011)

Key Words : 6 High-Mill(6 단 압연기), Rolling Force(압연하중), Thin Cold Rolling(극박 압연), 3-Dimensional Strip Profile(3 차원 판 형상), Hertz Theory(Hertz 이론)

초록: 본 연구에서는 극박 압연 이론과 6 단 압연기 수식 모델을 이용하여 압연 후 판 형상 예측에 대하여 제안하였다. 폭 방향에서 롤 사이의 접촉 압력과 판과 워크롤 사이의 압연하중은 6 단 압연기의 형상학적 구조와 경계조건을 이용한 수식모델을 통하여 계산된다. 그리고 압연 방향의 압연하중 분포는 Fleck 의 극박 압연 이론을 이용하여 계산하였다. 워크롤의 3 차원 탄성 변형량은 폭 과 압연방향의 압력분포에 의하여 계산된다. 이때, 3 차원 판 형상은 워크롤의 탄성변형에 의하여 얻어진다. 또한 3 차원 판 형상은 극박 압연 실험과 유한요소해석을 통하여 검증하였다.

Abstract: We predict the rolled-strip profile for a 6-high mill using thin rolling theory and a numerical model. In the numerical model, we calculate the distributions of the contact pressures between the rolls and the rolling pressure between the strip and the work roll in the transverse direction using the geometric structure of the 6-high mill and the boundary conditions. We determine the distribution of the rolling pressure in the rolling direction via a thin-foil rolling model using Fleck's theory. We calculate the three-dimensional elastic deformation of the work roll using the pressures of the width and rolling directions. We then obtain the three-dimensional strip profile via the elastic deformation of the work roll during the rolling process. The profile is verified by a thin cold-rolling test and FE simulation.

1. 서 론

냉간압연공정은 한 쌍 이상의 롤 사이에 상온의 슬래브를 넣고 롤에 회전을 주어 슬래브와 롤 사이의 마찰을 이용하여 판재를 더욱 얇은 판재로 가공하는 소성가공 공정 중 하나이다.

극박 압연(Thin foil rolling)은 보통 최종 판 두께 50 μ m이하, 압하율 50%이상의 압연공정을 의미한다. 특히, 이와 같은 조건에서는 압연 하중에 의하여 워크롤이 탄성변형 받게 될 때, 기존의 박판 압연과 다르게 원형이 아닌 형태(Non-circle)로 변

형하게 된다. 따라서 기존의 박판 이론을 적용하기 어렵고, 압연 후 판 형상을 예측할 수 없다.

기존의 극박 냉간압연에서 압연 후 판 형상 예측은 Fleck⁽¹⁾에 의하여 제안된 롤 갭 내의 탄성 및 소성구간으로 접촉구간을 여러 개로 나눠 워크롤(work roll) 편평변형을 통하여 스트립의 변형을 예측하였다. 그러나 극박 압연의 경우 압연 방향의 2차원 판 형상을 예측하기 때문에 폭 방향의 판 형상을 예측하는데 어려움이 크고, 또한 워크롤의 압연하중 및 탄성변형만을 고려하기 때문에 워크롤 상부에 지지하고 있는 중간롤(Intermediate roll)과 백업롤(Back-up roll)에 의한 접촉하중 및 탄성 변형을 고려하지 못한다.

기존의 연구에서 판 형상 예측에 관한 연구가 많이 수행 되었다. Lee⁽³⁾는 워크롤의 테이퍼(Taper)형

† Corresponding Author, bmkim@pusnu.ac.kr
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

상과 시프트량(Shift)을 조합하여 5스탠드 압연기에서 실험을 통해 엣지 드롭(Edge drop)을 최소화하는 조건을 도출하였고, Shi⁽⁴⁾는 4단 압연에서 유한요소해석법을 이용하여 판 형상을 예측하였다. 그리고 Han⁽⁵⁾은 연속압연에서 두께 프로파일 향상을 위해 테이퍼 롤의 형태와 적용스탠드에 관점을 두고 조사하였으며, Yu⁽⁶⁾는 젠지미어(Sendzimir mill) 압연기에서 중간롤의 테이퍼의 형상, 중간롤의 이송량(Shifting), 롤 초기 크라운 등 영향인자가 엣지 드롭에 미치는 영향을 분석하여 판 형상을 예측하였다. Song 등⁽⁷⁾은 워크롤의 시프트량에 대한 제어 출력값을 제시해줄 수 있는 수식모델을 개발하여 판 형상을 예측하였다.

이와 같은 연구는 4단이나 6단 이상 압연기에서 워크롤을 보강하는 롤이 있을 경우, 폭 방향 압연하중을 결정하고 이를 이용하여 판 형상을 예측하였다. 그러나 극박 압연의 경우, 워크롤과 스트립은 Hertz접촉에 의하여 변형되기 때문에 기존의 연구와 같이 판 형상을 예측하면 정밀도가 떨어지게 된다.

따라서 본 논문에서는 극박 압연공정에서 판 형상 예측의 정밀도 향상을 위하여 압연 방향에서 Hertz 접촉이론과 폭 방향에서 롤 변형 및 접촉하중 분포를 고려하여 3차원 형상의 롤 변형을 예측하였다. 그리고 이를 이용하여 6단 압연기를 이용한 극박 압연공정에서 판 형상을 예측하는 방법을 제안하였다.

2. 6단 냉간 압연기

극박 압연공정에 사용된 압연기는 Fig. 1에서 나타난 바와 같이 6단 압연기를 사용하였다. 압연기의 구조는 소성변형을 통하여 스트립을 압연하는 워크롤(WR), 워크롤을 지지하는 중간롤(IMR)과 백업롤(BUR)로 구성된다.

중간롤과 워크롤은 각각 롤 벤더력(F_i, F_w)을 부여할 수 있고, 스트립의 소성변형에 의하여 워크

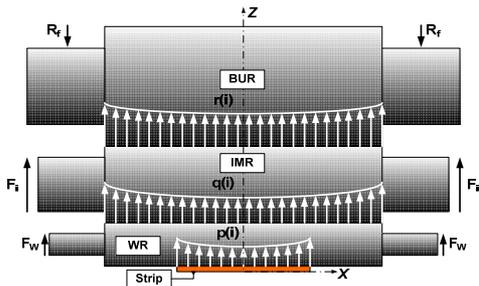


Fig. 1 Schematic of 6 high-mill for cold rolling process

롤과 스트립 사이에 발생하는 $p(i)$ 와 워크롤을 지지하는 중간롤과 백업롤에 발생하는 $q(i), r(i)$ 의 폭 방향 접촉 하중이 각각의 롤에 발생한다. 그리고 롤에 작용하는 힘은 최종적으로 백업롤에 반력(R_f)의 형태로 나타난다.

3. 냉간 압연에서 폭 방향 판 형상 예측

3.1 폭 방향 접촉하중 및 압연하중 예측

6단 압연기를 이용하여 냉간 압연공정을 수행함에 있어 각각의 롤에 발생하는 하중 분포를 예측하고 이를 이용하여 최종적으로 판의 형상을 예측한다.

Fig. 2는 롤의 기하학적인 구조를 나타낸다. 롤의 전체 길이는 L_4 , 배럴의 길이는 L_1 이며, 베럴부가 끝나는 곳에서 발생하는 반력 및 벤더력을 부여하는 곳까지의 거리를 L_2, L_3 으로 나타내었다.

압연하중은 초기 판 두께의 변화에 따라 Bland와 Ford⁽⁸⁾의 식 (1)을 이용하여 도출하였다.

$$P = R' \int_0^{\phi_n} p^+ d\phi + R' \int_{\phi_n}^{\phi_a} p^- d\phi \quad (1)$$

R' 는 Hitchcock의 식에 의하여 편평화된 롤 반경, ϕ_n 는 중립점에 대응하는 중립각을 나타낸다.

식 (2)는 백업롤과 중간롤 사이에서의 접촉하중, $r(i)$ 를 2차식으로 가정하였고, 식 (3)과 (4)에서 힘과 모멘트 평형을 나타낸다.

$$r(i) = ax^2 + bx + c, \quad \frac{\partial r(i)}{\partial x} = 0 \text{ at } x = \frac{L_1}{2} \quad (2)$$

$$\sum r(i) \cdot \Delta x = p + 2F_w + 2F_i \quad (3)$$

$$\sum r(i) \cdot \Delta x \left\{ L_2 + (i - 0.5) \Delta x \right\} = L_1 \left(\frac{p}{2} + F_w + F_i \right) \quad (4)$$

그리고 중간롤과 워크롤 사이의 접촉하중, $q(i)$ 는 2차식으로 가정하였고 식 (5)에 나타내었다. 그리고 힘과 모멘트 평형은 식 (6)과 (7)에 나타내었다.

$$q(i) = ax^2 + bx + c, \quad \frac{\partial q(i)}{\partial x} = 0 \text{ at } x = \frac{L_1}{2} \quad (5)$$

$$\sum (q(i) - r(i)) \Delta x = -2F_i \quad (6)$$

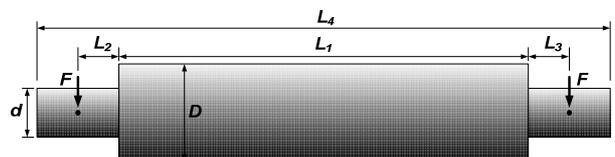


Fig. 2 Geometric structure of each roll

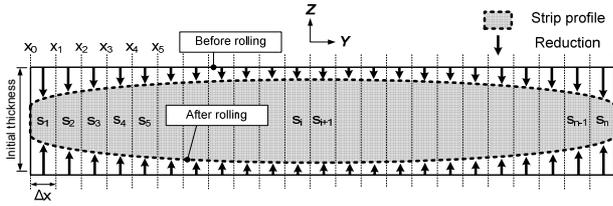


Fig. 3 Slab model for calculation of $p(i)$ in the transverse direction

$$\sum q(i)\Delta x \{L_2 + (i-0.5)\Delta x\} + L_1 F_i = \sum r(i)\Delta x \{L_2 + (i-0.5)\Delta x\} \quad (7)$$

Fig. 3은 폭 방향에서 압연하중을 계산하기 위한 모델을 나타내는 그림이다. 기존의 연구와 다르게 먼저 폭 방향으로 일정한 간격(Δx)으로 나누어, 각각의 파트(S_i)에 따라 계산된 하중분포, $p(i)$ 를 이용하여 판 형상을 예측하였다. 이와 같은 방법을 통하여 연속압연공정에서 초기 판 형상 및 이전 스텐드에서 예측된 판 형상을 적용함으로써 좀더 정확한 판 형상을 예측할 수 있다.

3.2 롤 탄성 변형

3.2.1 롤 굽힘 변형

롤 굽힘 변형은 양단 자유지지보에 단위하중이 작용할 경우 축심 휨 영향계수 α 를 이용하여 롤의 굽힘 및 전단력을 고려하여 식 (8)에 의하여 계산된다.⁽²⁾

$$EI \frac{d^4 Y}{dx^4} = p(i) - q(i)$$

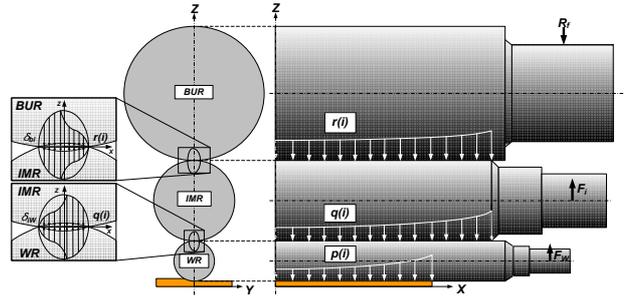
$$\frac{3}{4} GA \frac{d^2 Y}{dx^2} = -(p(i) - q(i))$$

$$Y = \sum p(i) \cdot \Delta x \cdot \alpha - \sum q(i) \cdot \Delta x \cdot \alpha \quad (8)$$

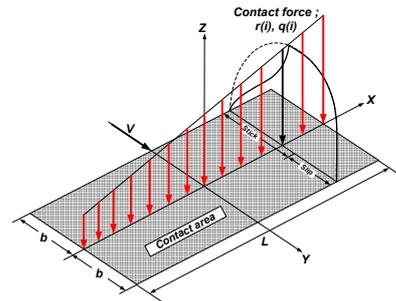
E 는 롤의 탄성계수, I 는 롤의 단면 2차 모멘트, G 는 종탄성계수, A 는 단면적, Y 는 롤 벤딩량을 나타낸다.

3.2.2 롤 편평변형

롤 편평변형은 롤과 롤 사이 접촉압력과 롤과 판 사이로부터 발생하는 압연하중에 의해 나타나는 것으로 구분된다. Fig. 4는 6단 압연기에서 롤 사이의 편평변형을 나타내는 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 폭 방향 접촉하중 분포 변화에



(a) Schematic of roll flattening between rolls



(b) Roll flattening at contact area

Fig. 4 Roll flattening between rolls in 6 high-mill

따라서 롤 편평변형을 다르게 적용하였다. 기존에 주로 두 원주의 편평변형량을 구하는 Föppl⁽⁷⁾식을 많이 사용하였지만 본 연구에서는 정밀도의 향상을 위하여 롤과 롤 사이 매끄러운 상태에서의 롤의 변형을 나타낸 식 (9)를 사용하였다.⁽⁸⁾

$$\delta_1 + \delta_2 = \frac{2P}{\pi} \left[\frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} \left(\ln \left(\frac{2R_1}{b} + 0.407 \right) \right) + \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2} \left(\ln \left(\frac{2R_2}{b} + 0.407 \right) \right) \right] \quad (9)$$

$$\delta_f(i, j) = \frac{1-\nu^2}{\pi E_W} p(i) \{F(z_i^1) + F(z_i^2)\} \quad (10)$$

δ_1, δ_2 은 각각의 롤의 변형량, b 는 접촉길이를 나타낸다. 롤과 판 사이 발생하는 압연하중에 의한 편평변형은 반무한탄성체 해에 의해 식 (10)을 이용하여 구한다.⁽⁹⁾

3.3 폭 방향 접촉 압력 및 압연하중 계산 절차

Fig. 5는 2차식으로 가정된 접촉하중 및 압연하중 분포를 구하기 위한 절차를 나타내는 그림이다. 입력된 압연공정조건을 이용하여 초기 압연하중, $p(i)$ 를 계산하고 각각의 경계조건을 이용하여 새로운 $p'(i)$ 를 결정하였다. 그리고 이를 일정조건을 만족하는지 비교하여 그렇지 않을 때 반복 수행하는 방식으로 되어 있다.

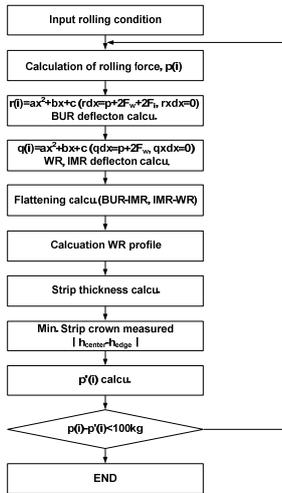


Fig. 5 Flowchart for calculation of contact and rolling forces

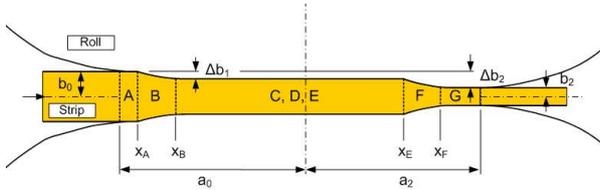


Fig. 6 Elastic deformation of roll in thin foil cold rolling

4. 냉간 압연에서 압연 방향 판 형상 예측

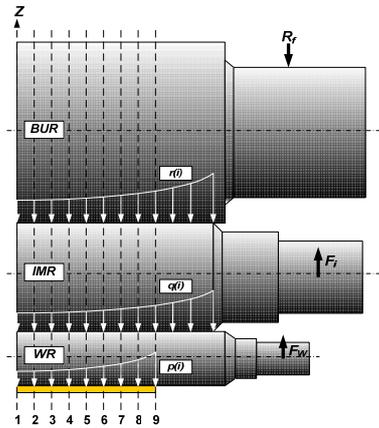
4.1 극박 압연 방향에서 롤 탄성 변형 예측

극박 압연공정에서는 Fig. 6과 같이 압연소재는 탄성영역(A, G zone), 소성영역(B, F zone), no-slip영역(C, D E zone)으로 나뉜다. 일반적인 후판이나 박판 압연공정은 압연 시 압연롤은 원형으로 탄성 변형하는 것으로 가정하지만, $b_0=0.05\text{mm}$ 이하, 압하율 50%의 극박 압연의 경우에는 Fig. 6과 같은 형상으로 변형된다.

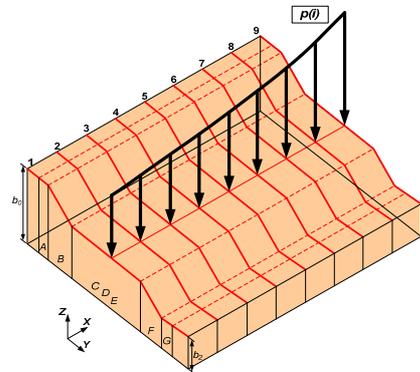
Fleck은 극박 압연에서 롤의 변형을 식 (11)과 같은 Hertz 접촉이론을 적용하여 Fig. 6과 같은 영역으로 구간을 정하여 경계조건을 적용하여 롤 갭 내에서 판 형상을 제안하였다.

$$p(x) = p_0 \sqrt{1 - (x/a_0)^2} - K_p \Delta b \quad (11)$$

p_0 는 최대 압력, K_p 는 비례상수를 나타낸다. 그러나 이와 같은 경우, 워크롤을 지지하는 중간롤과 백업롤의 기능을 나타내지 못하기 때문에 앞선 연구 결과에서 폭 방향에서 6단 압연기의 하중 분포를 이용하여 식 (11)의 p_0 에 적용하여 6단 압연기의 효과를 나타내었다.



(a) Distributions of contact and rolling forces



(b) Deformation of strip in roll gap

Fig. 7 3-dimensional strip profile model using rolling force by numerical model

5. 3차원 판 형상 예측

5.1 해석 방법

Fig. 7은 극박 압연공정에서 3차원 판 형상 예측 모델을 나타낸 그림이다. 3차원 판 형상예측을 위하여 6단 압연롤의 폭 방향 접촉하중 및 압연하중 분포를 힘과 모멘트 평형을 이용하여 결정하였고, 이렇게 구해진 $p(i)$ 를 이용하여 압연 방향으로 극박 압연공정에서 워크롤의 변형을 Hertz 접촉이론을 적용하여 예측하였다.

본 논문에서는 6단 압연기의 폭 방향 압연하중 분포를 이용하여 극박 압연에서 워크롤 탄성변형을 예측하기 때문에 압연 후 판 형상을 좀더 정밀하게 예측하는 것이 가능하다.

6. 해설 결과

6.1 폭 방향 하중 분포 예측

Table 1은 본 논문에 적용된 극박 압연공정조건을 나타낸다. 초기 판 두께 0.1mm의 동합금(Cu-Fe-P)소재를 출구 두께 0.045mm로 압연공정이 진

행되며, 압하율은 55%를 가진다. 압연소재의 판폭은 600mm이며, 롤 벤더력은 각각 128kgf로 설정하였다. 극박 압연에 사용된 압연기는 6단 압연기이며 워크롤, 중간롤, 백업롤로 구성되어 있다.

압연기의 구조적인 특성과 압연소재의 소성변형 특성을 이용하여 폭 방향에서 각각의 롤 간의 접촉하중을 구하였고, 이에 따른 압연하중 분포를 예측하였다.

Table 1 Condition of thin cold rolling process

Condition	Value	
Material	Cu-Fe-P (copper alloy)	
Initial thickness (mm)	0.1	
Target thickness (mm)	0.045	
Strip width length (mm)	600	
IMR bender force (kgf)	128	
WR bender force (kgf)	128	
Roll (mm)	BUR	D630 x L ₁ 835 x L ₄ 2274.2
	IMR	D300 x L ₁ 890 x L ₄ 2550
	WR	D140 x L ₁ 850 x L ₄ 1485

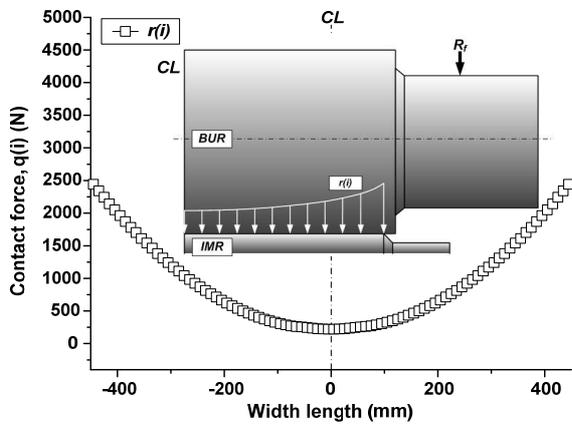


Fig. 8 Distribution of $r(i)$ in the width direction

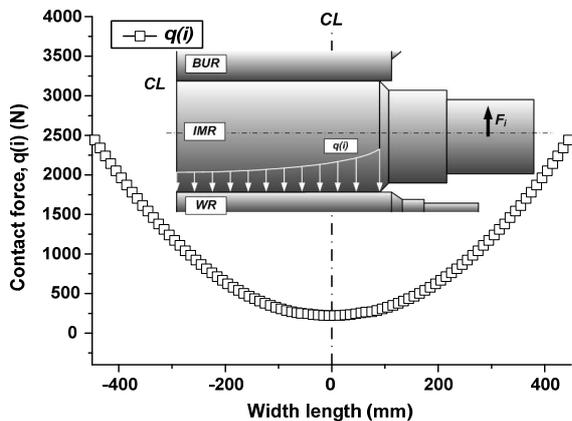


Fig. 9 Distribution of $q(i)$ in the width direction

Fig. 8은 워크롤과 중간롤 사이의 접촉하중 $r(i)$ 를 나타내는 그림이다. 롤 폭 중심을 기준으로 좌우 대칭의 형태로 보이며, 발생된 접촉하중은 백업롤의 축 하우징에 반력(R_r)으로 작용하게 된다. Fig. 9는 중간롤과 워크롤 사이의 접촉하중 $q(i)$ 를 나타내는 결과이다. 결과와 같이 $r(i)$ 와 마찬가지로 좌우 대칭의 형상으로 분포된다. Fig. 10은 앞서 계산된 $r(i)$ 와 $q(i)$ 에 의하여 워크롤과 스트립 사이의 압연하중 분포 $p(i)$ 를 나타내는 결과이다. 판 폭 끝 단부의 하중이 높은 분포를 가지고 있으며, 이는 압연된 스트립의 엣지 드립을 발생시키는 원인이 될 것으로 판단된다.

극박 압연에서의 워크롤 탄성변형을 예측하기 위하여 6단 압연롤의 폭 방향 하중 분포를 이용하여 접촉길이를 계산하였다. Fig. 11은 탄성변형된 롤 반경(R')과 폭 방향 압연하중, $p(i)$ 를 나타낸 결과이다. 판 폭 끝단부가 상대적으로 높은 하중 분포를 가지고 이에 따라 탄성변형된 롤 반경(R')가 판 끝단부로 갈수록 증가하였으며, 이 결과는 접촉길이를 결정함에 있어 반영된다. Fig. 12는 Hertz 이론을 이용하여 접촉길이를 계산한 결과를 나타

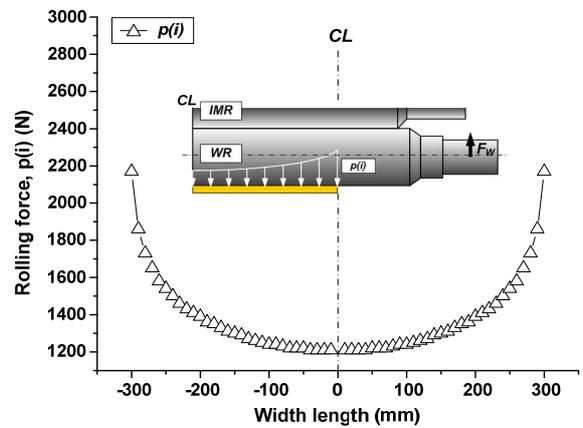


Fig. 10 Distribution of $p(i)$ in the width direction

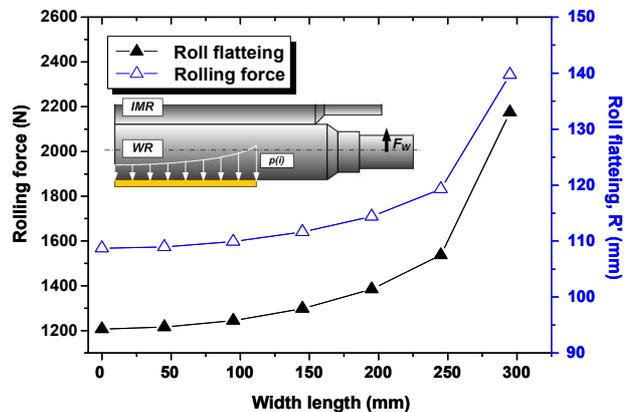


Fig. 11 Comparison of flattening roll radius and rolling force

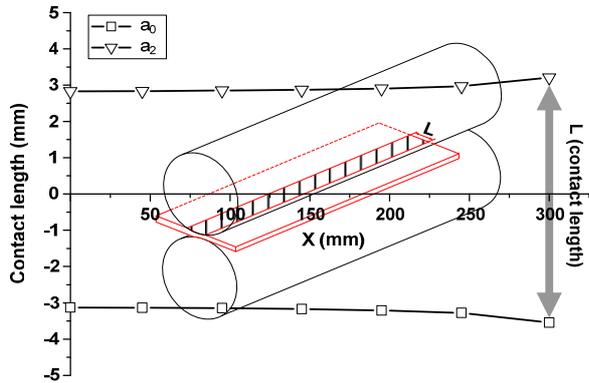


Fig. 12 Contact length according to rolling force, $p(i)$

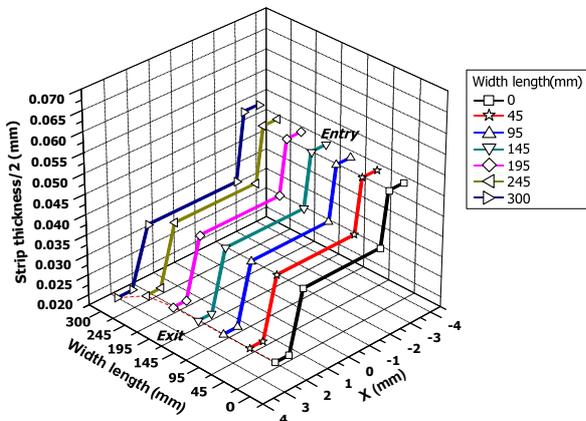


Fig. 13 Result of 3-dimentional elastic deformation of WR in thin cold rolling process

낸다. 판 끝단부로 갈수록 탄성변형된 롤 반경이 증가할수록 접촉길이 또한 증가하였다.

Fig. 13은 극박 압연공정에서 워크롤 3차원 탄성 변형 분포를 나타내는 결과이다. 앞서 계산된 접촉길이를 이용하여 수치해석을 통하여 각각의 영역의 분포를 계산하였다. 각각의 변형 형상을 보면 입구부와 출구부에서 탄성변형구간과 2개의 소성변형구간, 그리고 중심부에서 no-slip구간이 분포하는 것을 확인할 수 있다.

6단 압연롤의 기하학적 형상, 구조 그리고 경계 조건을 이용하여 롤 간 접촉하중을 계산하고, 워크롤과 스트립 사이의 폭 방향 압연하중 분포를 계산하였다. 또한 이를 이용하여 압연 방향에서 롤 갭 내의 판 형상변화를 극박 압연 이론을 이용하여 계산하였다. 따라서 폭 및 압연 방향에서 워크롤 탄성 변형을 예측함으로써 6단 압연기를 이용한 극박 압연 3차원 판 형상 예측이 가능하였다.

7. 극박 압연 실험

6단 압연기를 이용한 극박 압연에서 폭 및 압연

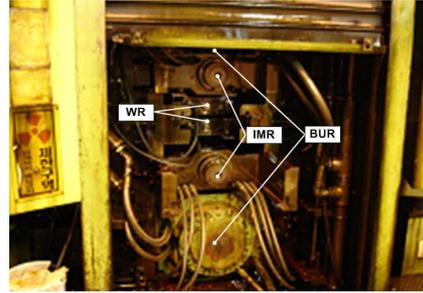


Fig. 14 6 high-mill for thin cold rolling process



Fig. 15 Production of thin copper alloy coil

방향에서 3차원 판 형상의 검증하기 위하여 극박 압연 실험을 수행하였다. 실험조건은 Table 1의 조건과 동일하며, 실험에 사용된 압연기는 Fig. 14에 나타내었다. 압연기는 6단 가역 압연기(Reversing Mill)로 역회전이 가능한 압연기이다.

Fig. 15는 극박 압연 실험을 통하여 생산된 Cu-Fe-P합금 압연 코일을 나타내는 그림이다. 생산속도를 144m/min으로 설정하였으며, 폭 600mm, 두께 45 μ m의 압연된 코일을 생산하였다. 생산된 코일은 수치해석 결과와 비교하기 위하여 폭 방향으로의 판 프로파일을 측정하였다.

Fig. 16은 3차원 판 형상 예측 모델, 극박 압연 실험 그리고 유한요소해석의 압연 후 판 프로파일을 비교한 결과이다. 결과에서 보는 바와 같이 중심부에서 3차원 모델과 유한요소해석 결과는 거의 일치한다. 그러나 판 끝단부에서 판 형상을 비교해보면 유한요소해석 결과의 경우, 미소한 엇지

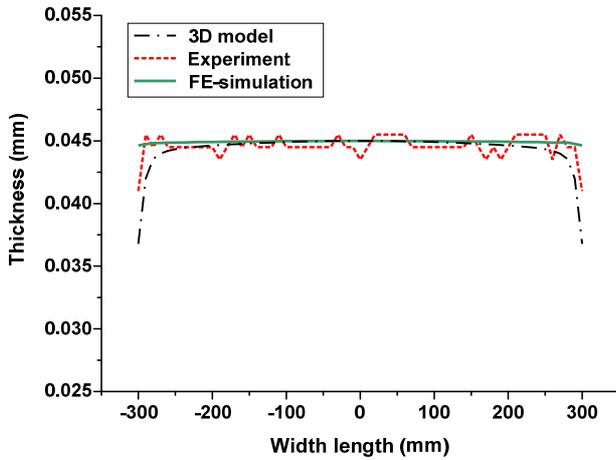


Fig. 16 Comparison of experiment and numerical analysis of thin strip profiles

드롭이 발생하고 3차원 모델의 경우, 실험과 유사하게 엣지부에서 급격히 두께가 감소하는 엣지 드롭이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

결과적으로 6 단 압연기를 이용한 극박 압연공정을 3 차원 판 형상 예측 모델을 통하여 예측한 결과는 실험을 통하여 생산된 판 프로파일과 매우 유사한 분포를 보이는 것으로 나타났으며, 기존의 유한요소해석 결과에 비하여 정밀도가 향상되었음을 확인할 수 있다.

8. 결 론

기존의 6단 압연기의 판 형상 예측 모델은 극박 압연공정에서 정밀도가 떨어지고, Fleck에 의하여 제안된 극박 압연모델의 경우 폭 방향으로의 판 형상 예측이 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 6단 압연기를 이용한 극박 압연공정에서 정밀한 판 형상 예측을 위하여, 3차원 판 형상예측 모델을 제안하였다.

(1) 6단 압연기의 구조적인 형상, 외력 및 경계 조건에 의하여 롤 굽힘변형, 롤 간 탄성 변형을 고려하여 폭 방향 롤 간 접촉하중, $r(i)$, $q(i)$ 및 압연하중, $p(i)$ 를 결정하였다.

(2) 극박 압연공정에서 제안된 압연 방향 워크 롤 탄성 변형을 극박 압연 이론을 이용하여 예측하였다. 그리고 이를 이용하여 압연 후 판 형상을 예측하였다.

(3) 6단 압연롤의 기하학적 형상, 구조 및 경계 조건을 이용하여 롤 간 접촉하중을 계산하고 워크 롤과 스트립 사이의 폭 방향 압연하중분포를 계산하였다. 그리고 이를 이용하여 압연 방향에서 롤 갭 내의 판 형상변화를 극박 압연 이론을 이용하여 계산하였다. 따라서 폭 및 압연 방향에서 워크

롤의 탄성 변형을 예측함으로써 6단 압연기를 이용한 극박 압연 3차원 판 형상을 예측하였다.

(4) 6 단 압연기를 이용하여 극박 압연 실험을 실시하였다. 이를 3 차원 판 형상 예측 모델의 판 프로파일 결과와 비교하였다. 6 단 압연기를 사용한 극박 압연공정에서의 판 형상 예측에 있어 기존의 유한요소해석 및 극박 압연 실험과 비교해 볼 때 엣지 드롭의 발생에서 정밀도가 향상되었다.

후 기

본 연구는 POSCO 석좌교수 연구지원과 산업자원부의 산업혁신기술개발사업 중 "중기거점기술개발사업"의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Fleck, N. A. and Johnson, K. L., 1987, "Toward a New Theory of Cold Rolling Thin Foil," *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 29, No. 7, pp. 507~524
- (2) Park, H. D. and Lee, J. J., 1988, "The Simulating Model to Strip Profile of 6 High Tandem Cold Rolling Mill," *Proceedings of the KSME Spring Annual Meeting*, pp. 170~173
- (3) Lee, H.S., Lee, Y. S. and Sim, W. B., 2001, "Control Technology of Thickness Deviation of Width Direction in Cold Rolling Mill," The 4th Rolling symposium.
- (4) Shi, X., Li, S. Q., Liu, X. H., Wang, G. D. and Xu, J. Y., 2004, "FEM Analysis for Steel Strip Deformation in Cold Rolling Process," *Iron and Steel*, Vol. 39, No. 11, pp. 45~48.
- (5) Han, S. Y., 1996, "Improvement Effect of Thickness Profile by Tapered Work Rolls," *Proceedings of the KSME Fall Annual Meeting*, 96F182, pp. 1094~1099.
- (6) Yu, H. L., Liu, X. H., Lee, G. T. and Park, H. D., 2008, "Numerical Analysis of Strip Edge Drop for Sendzimir Mill," *Journal of a Materials Processing Technology*, Vol. 208, pp. 42~52.
- (7) Song, G. H., Park, H. D., Shin, S. K. and Jin, C. J., 1998, "Analysis of Edge Drop and Development of Numerical Formula for Edge Drop Control of Cold Rolled Sheet," *Trans. Of the KSME, A*, Vol. 22, No. 4, pp. 723~730.
- (8) William, L. R., 1978, "Cold Rolling of Steel," pp. 511~515.
- (9) Han, S. Y., Kim, J. T., Lee, Y. H., Yi, J. J. and Kim, J. K., 1990, "Improvement on Edge Drop by Change of Work Roll Type in Silicon Steel Rolling," *Trans. Of the KSME*, Vol. 14, No. 4, pp. 830~838.