

선재압연공정의 소재 자유표면 형상에측

이영석*, 김영호**, 진영은***

Prediction of Stress Free Surface Profile of Workpiece in Rod Rolling Process

Youngseog Lee*, Young-Ho Kim**, and Young-Eun Jin***

ABSTRACT

A reliable analytic model that determines the cross sectional shape of a workpiece (material) in round-oval (or oval-round) pass sequence has been developed. The cross sectional shape of an outgoing workpiece is predicted by using the linear interpolation of the radius of curvature of an incoming workpiece and that of roll groove to the roll axis direction. The requirements we placed on the choice of the weighting function were to ensure boundary conditions specified.

The validity of the analytic model has been examined by hot rod rolling experiment with the roll gap and specimen size changed. The cross sectional shape and area of a workpiece predicted by the proposed analytic model were good agreement with those obtained experimentally. It was found that the analytic model has not only simplicity and accuracy for practical usage but also save a large amount of computational time compared with finite element method.

Key Words : Rod rolling (선재압연), Cross sectional shape (단면형상), Analytic model(해석모델), Groove design (공형설계)

기호설명

B_x : x-coordinate of cross point of cross sectional shape and oval caliber
 B_y : y-coordinate of cross point of cross sectional shape and oval caliber
 C_x : x-coordinate of cross point of cross sectional shape and round caliber
 C_y : y-coordinate of cross point of cross sectional shape and round caliber
D: Roll depth

D_c : Distance between the center of caliber and that of the cross sectional shape
G: Roll gap
 H_i : Maximum height of incoming workpiece
 W_i : Maximum width of incoming workpiece
 H_p : Pass height
 R_i : Radius of curvature of oval caliber or oval workpiece incoming
 R_f : Radius of final cross sectional shape in oval caliber
 R_r : Radius of curvature of round caliber

* 포항제철 기술연구소, 후관연구그룹
** 부산대학교 기계공학부
*** 부산대학교 대학원

R_s : Radius of stress free cross sectional shape of workpiece at a pass

W_f : Face width of oval caliber

W_{max} : Maximum spread of workpiece at a pass

α : Relief angle of round caliber

1. 서론

연속압연에서 스탠드간 소재의 입측과 출측의 무게균형(mass balance)을 유지하는 게 가장 중요하다고 할 수 있다. 이 때 입측과 출측의 무게균형은 각 패스(pass)의 단면적과 압연속도의 곱으로 표현되는데 압연속도는 롤 직경과 롤 rpm 을 알면 쉽게 얻어질 수 있다. 단면적 계산은 일반적인 판압연의 경우 판의 폭이 판의 두께보다 상대적으로 매우 작아서 자유면 형상의 중요성이 떨어지기에 패스 단면적은 판 폭과 판 두께의 곱으로서 간단하게 표현되지만 선재 압연에서는 공형을 사용하여 압연하기에 자유면 형상의 정확한 수식모델이 없이는 매우 어렵다. 이때 자유면은 소재가 롤 갭(roll gap) 통과시 롤과 소재가 접촉하지 않는 부분으로 정의된다.

선재 압연에서 자유면 형상을 알기 위한 시도는 주로 유한요소법을 사용하여 많이 시도되었다(1-4). 유한요소법은 패스단면적(pass area)을 계산하는데 매우 효과적이지만, 선재 압연의 특성상 3차원 해석을 요구하기에 시간이 많이 걸린다. 단일패스 모의실험(simulation)시 work station 급 컴퓨터(computer)에서도 적어도 2 시간 이상 걸리기에 선재 압연 line 의 많은 패스수 (20 ~ 29) 를 감안하면 비경제적이고 보다 정확한 3 차원 모의 실험을 하기 위해서는 많은 요소의 숫자가 필요하기에 현장시험(mill test)에 대한 빠른 응답성에 문제가 제기 될 수도 있다. 특히 초기 압연공장 배치도 설계시 많은 패스수의 공형을 설계할 때 유한요소법이 결정적으로 취약점을 가진다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 자유면 형상에 관한 해석식(analytic equation) 개발이 필요하다.

본 연구에서는 원형(Round) - 타원(Oval) 패스와 타원(Oval) - 원형(Round) 패스에 있어서 자유면 형상의 이론적 수식모델이 제안되었다. 원형 - 타원 패스와 타원 - 원형 패스압연은 현재 전세계 선재압연공정에서 가장 많이 사용되고 있는 공정이고 특히 최종제품의 형상이 결정되는 사상공정

(Finishing Block mill)에서는 전부 이 압연공정을 사용하고 있다. 제안된 모델은 간단하고 일반성이 있고 결과에 대한 응답성에 있어서는 유한요소법 보다는 매우 뛰어나다고 할 수 있다. 자유면 형상은 압연 전 소재의 형상과 압연롤 형상의 선형보간(linear interpolation)을 근거로 하여 얻어진다. 이 때 사용되는 무게함수(weighting function)는 해석식(analytic equation)의 경계치 조건을 만족시키고 최대 폭퍼짐량을 기초로 하여 계산되며 사용되는 최대 폭퍼짐 수식은 Shinokura and Takai(5)의 모델을 기본으로 하고 있다. 본 연구에서 개발된 자유면 형상의 수식모델에서는 소재와 롤의 마찰계수, 소재의 온도 변화는 고려되지 않고 있다. 이는 소재의 형상과 압연 롤의 형상이 자유면의 형상결정에 대부분을 차지한다는 가정에 근거로 한 것이다.

2. 자유면 형상 수식모델

2.1 타원(Oval) - 원형(Round) 패스

그림 1에서는 차입되는 타원(Oval) 형상의 소재와 원형공형(Round caliber) 보여주고 있다.

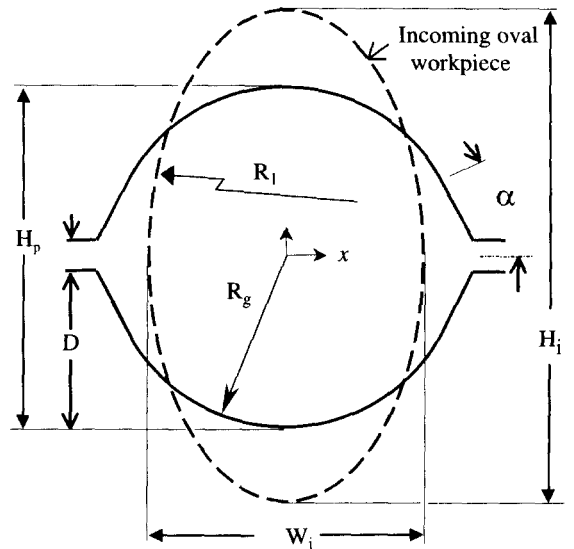


Fig. 1 An oval workpiece incoming and a round groove

R_1 은 압연되는 타원 소재의 곡률반경 또는 타원형공형(Oval caliber)의 곡률반경을 의미하고 R_g

는 공형의 반경이다. 일반적으로 원형(Round) 패스의 단면적을 계산할 때 습관적으로 간단한 면적식, πR_g^2 , 을 사용하는데 이는 최대 폭퍼짐이 공형의 반경하고 일치한다는 조건 아래에서만 가능하다 ($2R_g = H_p$). 만약 최대 폭퍼짐이 공형의 반경보다 작으면 면적식, πR_g^2 , 사용은 실제 단면적보다 큰 계산 결과를 줄 것이다. 그림 2에서는 원형공형(Round caliber) 압연을 하고 난후 예상되는 자유표면형상을 도식적으로 나타내었다. 여기서 R_s 는 소재 자유표면형상의 곡률반경이며 이의 중심은 항상 x 축 선상에 있다.

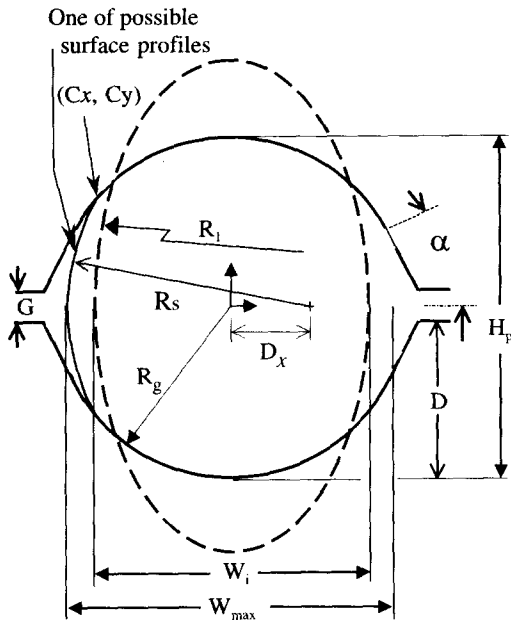


Fig. 2 Geometrical designation of the radius of stress free surface profile, R_s , of a workpiece in round pass rolling.

최대 폭퍼짐, W_{max} , 이 Shinokura and Takai⁽⁵⁾ 의 수식으로부터 계산되면 R_s 는 R_1 과 R_g 의 선형보간(linear interpolation) 으로 수식화 될 수 있다. 즉

$$R_s = R_1 \cdot W_i + (1 - W_i) \cdot R_g \quad (1)$$

$$\text{여기서 } W_i = \frac{2 \cdot R_g - W_{max}}{2 \cdot R_g - W_i} \quad (2)$$

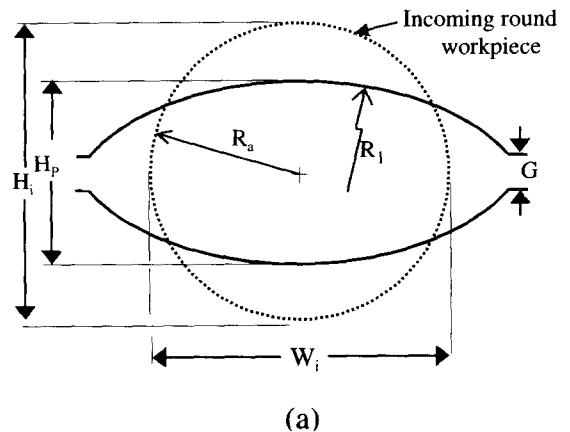
여기서 W_i 는 R_1 과 R_g 의 무계함수(weighting function) 이며 W_i 는 치입되는 소재의 폭이다. R_s 가 계산되면 원형공형(Round caliber)의 중심과 자유표면형상 중심과의 거리는 다음식에 의해 얻어진다.

$$D_x = R_s - W_{max} / 2. \quad (3)$$

여기서 D_x 의 위치는 항상 x 축 선상에 있다. 식(1)과 (2)의 적합성을 확인하기 위해 제안된 식의 경계조건들이 검사되었다. 만약 치입되는 소재가 압연이 되지 않는다면 압연 후 소재의 최대 폭은 치입되는 소재의 폭과 같다. 이는 식(2)에서 $W_{max} = W_i$ 가 되며 $W_i = 1.0$ 이 된다. 이는 곧 식(1)에서 알 수 있듯이 $R_s = R_1$ 이 되므로 물리적인 경계조건과 적합하다. 반면에 최대 폭퍼짐이 원형공형(Round caliber)의 직경과 같을 때는 $W_{max} = 2R_g$ 가 되며 $W_i = 0.0$ 이 된다. 이는 곧 식(1)에서 명확하듯이 $R_s = R_g$ 가 되므로 물리적인 경계조건과 일치한다. 여기서 주의해야 될 사항은 식(1)과 (2)는 압연후 소재의 최대 폭퍼짐이 원형공형의 직경보다 작거나 같다는 조건에서 이들 식이 성립한다는 사실이다.

2-2. 원형(Round) - 타원형(Oval) pass.

그림 3(a)는 원형 - 타원형 패스의 압연을 보여주고 있다. 그러나 원형 - 타원형 패스에서는 R_g 가 원형 패스에서와 같이 명확하게 정의되지 않기에 식(1)과 (2)식을 적용할 수가 없다. 그래서 타원형공형(Oval caliber) 에서 R_g 는 R_1 로 대체되고 그림 3(b) 와 같이 정의된다고 가정한다.



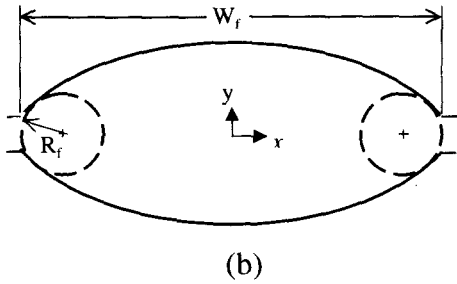


Fig. 3 (a) A round workpiece incoming and an oval groove (b) Concept of the radius of the final stress free surface profile, R_f , in oval pass rolling.

즉 소재가 압연되면서 소재의 자유표면형상이 타원형공형의 최대폭($=W_f$) 에서 만나고 반경은 R_f 가 된다는 것이다. 다음순서는 가정된 R_f 를 구하는 것이다.

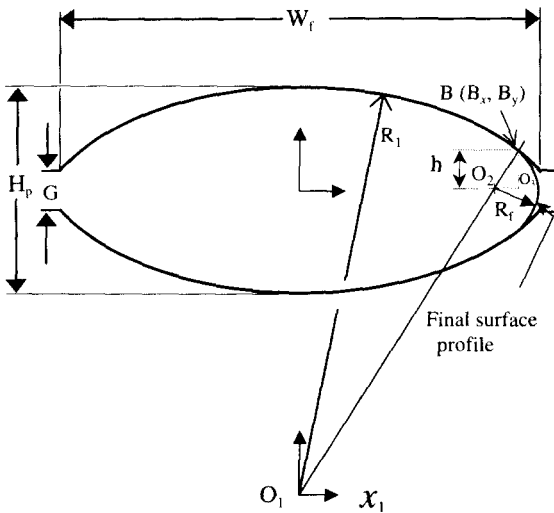


Fig. 4 Geometrical designation of oval groove and the radius of final stress free surface profile, R_f , in oval pass rolling.

그림 4 의 x_1 - y_1 좌표계에서 일직선 A 는 다음의 식으로 표현된다

$$y = a x_1 \quad (4)$$

$$\text{여기서 } a = \frac{R_1 - H_p / 2}{W_{\max} / 2 - R_f} \quad (5)$$

타원형공형의 위쪽부분 호(arc) 에 대한 수식은 식 (6)으로 표현된다

$$x_1^2 + y^2 = R_1^2 \quad (6)$$

식(4)을 식(6)에 대입하면 교점 B_y 가 얻어진다

$$B_y = \left(\frac{R_1^2 a^2}{1 + a^2} \right)^{1/2} \quad (7)$$

B_y 는 두 삼각형의 상사조건으로부터도 구할 수 있다

$$B_y = h + (R_1 - H_p) / 2, \quad (8)$$

$$\text{여기서 } h = \frac{R_f (R_1 - H_p / 2)}{R_1 - R_f}$$

식(8)는 다음과 같이 다시 쓰여질 수 있다

$$\begin{aligned} B_y &= (R_1 - H_p / 2) \left(\frac{R_f}{R_1 - R_f} + 1 \right) \\ &= (R_1 - H_p / 2) \left(\frac{R_f}{R_1 - R_f} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

식(7)과 (9) 으로부터

$$\frac{(R_1 - H_p / 2)^2}{a^2} \frac{R_f^2}{(R_1 - R_f)^2} = \frac{R_f^2}{1 + a^2} \quad (10)$$

식(5)를 사용하여 다시 전개하면

$$\frac{(W_{\max} / 2 - R_f)^2}{(R_1 - R_f)^2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{R_1 - H_p / 2}{W_{\max} / 2 - R_f} \right)^2} \quad (11)$$

식(11) 를 다시 정리하면

$$(W_{\max} / 2 - R_f)^2 + (R_1 - R_f)^2 = (R_1 - R_f)^2$$

(12)

그러므로 R_f 는 R_1 , H_p 및 W_{max} 의 함수로 표현될 수 있다.

$$R_f = \frac{R_1 H_p - \frac{1}{4}(W_{max}^2 + H_p^2)}{2R_1 - W_{max}} \quad (13)$$

일단 R_f 가 얻어지면 타원형공형 - 원형공형 패스에서 사용한 선형보간(linear interpolation) 기법을 그대로 사용할 수 있다. 즉 타원형공형 패스(pass)에서 소재 자유표면형상의 반경 R_s 는 R_g 와 R_f 의 선형보간으로 수식화 된다

$$R_s = R_g \cdot W_t + (1 - W_t) \cdot R_f \quad (14)$$

여기서
$$W_t = \frac{W_f - W_{max}}{W_f - W_i} \quad (15)$$

W_t 는 R_g 과 R_f 의 무계함수이며 W_i 는 치입되는 소재의 폭이다. R_s 가 계산되면 Oval 공형의 중심과 자유표면형상과의 거리, D_x 는 쉽게 얻어진다. 식(14) 과 (15)의 적합성을 확인하기 위해 제안된 식의 경계조건들을 검사하였다. 만약 치입되는 소재가 압연이 되지 않는다면 압연 후 소재의 최대폭은 치입되는 소재의 폭(= R_g) 과 같다. 이는 식(15)에서 $W_{max} = W_i$ 가 되며 $W_t = 1.0$ 이 된다. 이는 곧 식(14) 에서 알 수 있듯이 $R_s = R_g$ 가 되므로 물리적인 경계조건과 적합하다. 반면에 최대 폭퍼짐이 타원형공형의 최대폭과 같을 때는 $W_{max} = 2W_f$ 가 되며 $W_t = 0.0$ 이 된다. 이는 곧 식(14) 에서 명확하듯이 $R_s = R_f$ 가 되므로 물리적인 경계조건과 일치한다.

3. 결과 및 토의

3-1. 실험

열간 단일 스탠드 시험압연기의 평롤을 공형롤로 가공후 교체하여 선재압연실험을 하였다. 압연 온도는 1000°C 로 고정 하였다. 물과 소재사이에 냉각수는 투입되지 않았다. 이유는 평롤 실험압연시 냉각수를 투입여부에 따라서 압연소재형상에 변화를 찾아 볼 수 없었기 때문이다. 이는 소재와 공형사이의 마찰계수가 압연후의 소재형상

결정에 큰 영향이 없다는 것이다.

롤의 재질은 DCI(Ductile Casting Iron) 이고 롤 직경은 310mm 이며 롤 축 방향길이는 320mm 이다. 시편은 일반탄소강(0.1%C)를 선택하였고 빌렛(billet) 를 채취하여 원형으로 가공하여 시편으로 사용하였다. 실험시 사용한 타원형 과 원형 공형의 도면이 그림 5 에 나타나있다. 압연온도를 측정하기 위하여 thermocouple 을 소재의 후단 중앙에 삽입하여 압연시의 온도를 측정하였다. 실험순서는 원형의 소재를 가열로에 넣어 1030°C 로 맞춘 다음 1000°C 에서 압연하는데, 소재가 타원(Oval)의 공형에 먼저 압연되고 다시 압연된 oval 형태의 소재를 재가열 하여 1000°C 에서 90 도 회전하여 원형공형 패스에서 압연한다. 그리고 각 패스마다 압연시 소재의 회전이 방지하도록 정적입구 가이드(static entry guide)가 설치 되어 있다.

각 패스 압연후 시편을 공냉시키고 시편의 중간부분을 10mm 두께로 절단하여 소재의 경계좌표를 Boundary extraction program 을 사용하여 구하였다. 열간 압연이기에 표면에 스케일(scale)이 발생되나 scale 두께가 매우 작아서 실험결과에는 영향이 거의 없는것으로 나타났다.

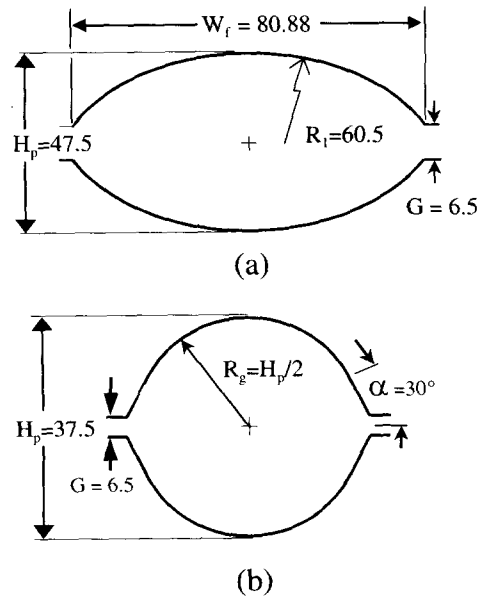


Fig. 5 Two passes rolling sequence designed for the first hot rod rolling experiment. (a) Oval pass (b) Round pass.

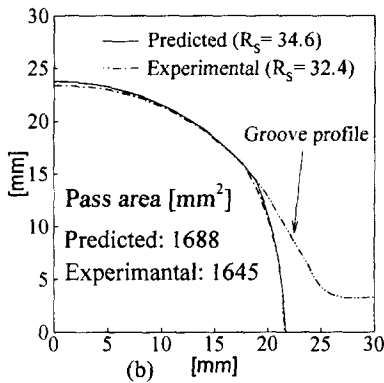
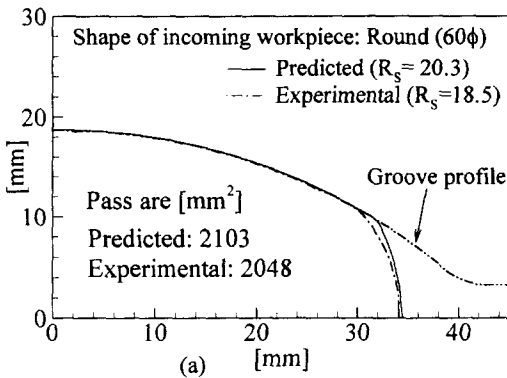


Fig. 6 Predicted and measured cross sectional shape of workpiece in oval-round pass rolling (specimen size=60mm)

3-2. 형상 및 단면적의 계산과 실험 비교

그림 6에서는 기준 롤 간극(G)이 6.5mm로 정해졌고 60mm 직경의 소재를 압연했을 때 예측한 소재의 단면형상과 실험으로 구한 단면형상이 비교되어져 있다. 대쉬-닷-닷 (dash-dot-dot)은 공형을 나타내고 실선(solid line)은 예측된 형상을 나타낸다. 실험으로 구한 표면형상은 대쉬-닷(dash dot) 모양의 선으로 표시되어 있다. 좌우 및 상하대칭이기에 1/4 만 그림에 나타내었다. 보이는 봐와 같이 예측된 자유표면 반경 R_s 는 실측치보다 약간 더 크지만, 해석식으로 예측한 결과와 실험적으로 구한 결과가 전반적으로 잘 일치하고 있다는 것을 알 수 있다.

그림 7에서는 시편의 크기가 10% 증가한 66mm 직경의 소재를 압연하였을 때의 압연소재의 형상을 보여준다. 예상한대로 시편의 직경이 증가하면 최대 폭퍼짐은 증가하였고 초기 시편의 크

기가 변해도 압연되는 소재의 형상은 실험치와 예측치가 잘 맞다는 것을 알 수 있다.

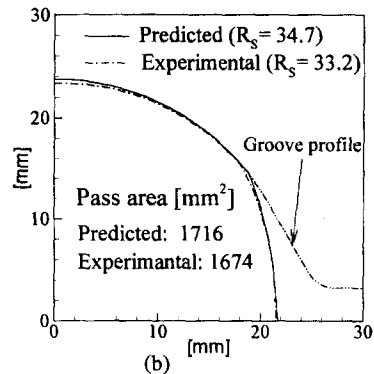
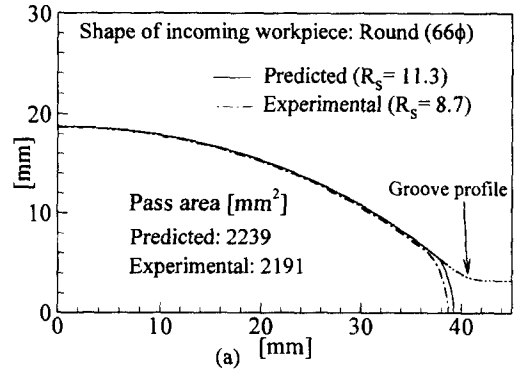


Fig. 7 Predicted and measured cross sectional shape of workpiece in oval-round pass rolling (specimen size=66mm)

그림 8에서 타원형공형의 롤갭 (roll gap)이 변할 때 실험적으로 구한 자유표면의 곡률반경과 계산으로 구한 자유단면 곡률반경이 비교되어져 있다. 롤 갭(롤 간극)이 감소할수록 측정치와 예측치의 차이가 작게 나왔고 롤 갭이 클수록 측정치와 예측치의 차이가 크게 나왔다.

한편 롤 갭 증가 또는 감소에 따른 단면적 변화(예측치/실험치)가 그림 9에 나타나 있다. 롤 갭(롤 간극)이 변화 할 때, 실험치와 측정치 차이가 1.5% ~ 3.0% 이내에 들어 온다는 것이 보여진다. 여기서 우리가 알아야 될 사항중의 하나가 타원형 공형설계의 핵심인 타원형 공형의 Face width(W_f) (그림 5 참조)와 공형높이(Section height, H_p)의 적정 비(ratio)를 본 연구를 통해 짐작할 수 있다는 것이다. $W_f/H_p=2.0$ 정도가 타원형-원

형패스 스타일의 공형설계에 좋다는 것을 알 수 있다.

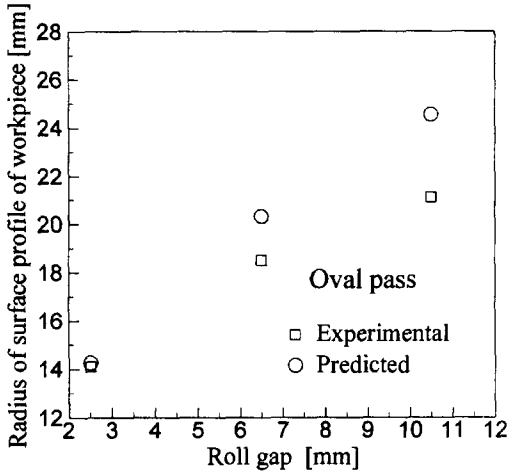


Fig. 8 Predicted and measured radius of stress free surface profile (SFSP) of workpiece when the roll gap is changed at oval pass.

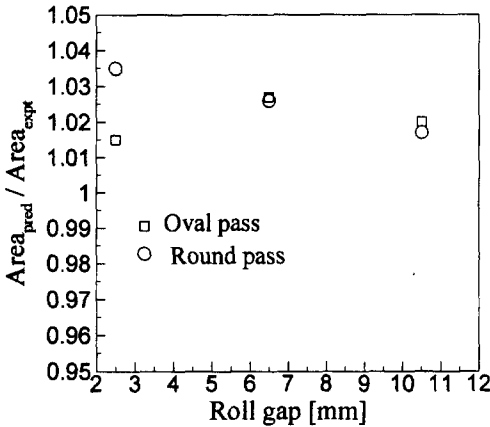


Fig. 9 Normalized cross sectional area when the roll gap is changed.

4. 결론

본 연구에서는 타원형(Oval) - 원형(Round) 및 원형(Round) - 타원형(Oval) 선재압연시의 자유표면형상을 계산하는 수식 모델을 제안하였다. 제

안된 모델은 공형과 소재의 경계조건을 만족하는 해석식(analytic equation)이다. 본 연구에서 제안된 수식은 유한요소법에 의한 소재내의 변형량/변형률 및 온도분포계산을 제외하고 순수 소재형상 예측측면에서만 보면 시간적인 면에 있어서 많이 경제적이라는 것을 알 수 있다. 그리고 원형공형(Round caliber)에서의 최대폭퍼짐이 원형공형의 직경보다 크지 않으면 본 연구에서 제안된 수식이 현장 압연 line에 적용가능 하리라 생각된다.

참고문헌

1. Park, J.J. and Oh, S.I., "Application of Three Dimensional Finite Element Analysis to Shape Rolling Process," J. Engineering for Industry, Vol. 112, pp. 36-46, 1990.
2. Karhausen, K., Kopp, K. and De Souza, M.M., "Numerical Simulation Method for Designing Thermomechanical Treatments illustrated by Bar Rolling," Scan. J. Metallurgy, Vol. 20, pp. 351-363, 1991
3. Shin, W., Lee, S.M., Shivpuri, R. and Altan, T., "Finite-Slab Element Investigation of Square-to Round Multi-Pass Shape Rolling," J. Material Processing Technology, Vol. 33, pp. 141-154, 1992.
4. Komori, K., "Simulation of Deformation and Temperature in Multi-Pass Caliber Rolling," J. Material Processing Technology, Vol. 71, pp. 329-336, 1997.
5. Shinokura, T. and Takai, K.A., "A New Method for Calculating Spread in Rod Rolling," Proc. of Experimental verification of process models, ASM, Cincinnati, USA, pp. 175-188, 1983.
6. Kim, H.J., Kim, T.H. and Hwang, S.M., "A New Free Surface Scheme for Analysis of Plastic Deformation in Shape Rolling," J. of Materials Processing Technology, Accepted for publication.