

선재압연 공정에서 압하력 근사해석방법

정 동 원* · 이 영 석**

Approximate Analysis of Roll Force in Round-Oval-Round Pass Rolling Sequence

Dong-Won Jung* and Young-Seog Lee**

ABSTRACT

This paper presents a semi-analytical method for the prediction of roll force in oval-round (or round-oval) pass rolling sequence most commonly employed in present continuous rod (or bar) mills. Introduced was a concept of a *weak* plane strain deformation taking into account of the deformation characteristics of workpiece (material) in the roll grooves when the equation for the roll force was formulated. Flow stress (deformation resistance) of the workpiece was characterized by Shidas constitutive equation. Hot rod rolling experiment was conducted to examine the proposed semi-analytical method. Result reveals that using the *weak* plane strain deformation condition was found to be appropriate in solving three-dimensional problems, where it was often necessary to reduce the cost of computation by simplification. For low plain carbon steel, the roll forces predicted were in good agreement with those obtained experimentally with the rolling temperature changed (800 ~ 1100C).

Key words : Rod rolling, roll force, semi-analytical method, weak plane strain condition

1. 서 론

선재 Pass schedule 설계시 꼭 필요한 부분중의 하나가 압하력(roll force) 과 토오크 계산이다. 특히 신강

종 개발할 때 생산라인의 각 스탠드에서 건디는 최대 압하력과 토오크 을 미리 예측하지 못하면 강종개발 후에 생산을 못하는 일이 발생되어 강종개발에 들인 노력이 수포가 될 수 있기에 온도 및 강종의 변화에 대한 압하력과 토오크 계산능력 확보는 매우 중요하다고 말할 수 있다.

판 압연(plate rolling)공정에 있어서의 압하력과 토오크 계산모델들은 이미 많이 발표되었고 현장의 판 압연 공정에서 많이 쓰이고 있다¹⁾. 압하력과 토오크 계산방법에 관한 연구는 유한요소법(Finite Element Method)이 많이 알려져 있다. 그러나 유한요소법은

* 제주대학교 기계에너지생산공학부, 산업기술연구소
Faculty of Mechanical, Energy & Production Engineering,
Res. Inst. Ind. Tech., Cheju Nat'l Univ.

** 후판연구그룹, 포항제철 기술연구소
Plate, Rod and Welding Group, POSCO Technical Research
Laboratories

계산시간이 많이 걸리고 선재압연 해석시 필요한 기계적, 열적 경계조건이 복잡하기에 많은 pass (stand) 를 가지고 있는 선재공정특성을 감안하면 Analytic model의 개발이 요구된다고 할 수 있다.

완전한 Analytic model의 개발은 선재압연해석이 3차원에서 수행되어야 한다는 점을 감안하면 아주 어려운 일이 된다. 그래서 근사화된 모델(approximate model)을 구하는 방향으로 연구를 많이 해왔다. 하지만 지금까지 선재압연 공정용으로 사용되는 근사모델은 판압연 공정에서 사용되는 압하력 및 토크 모델을 바탕으로, 경험에서 나오는 보정계수들을 도입하여 사용해 왔다. 선재 압연용의 압하력과 토크 계산모델은 Shinokura and Takai²¹가 처음으로 제안하였고 그 이후에는 새로운 모델에 대한 발표가 없다. 1986년에 Shinokura 와 Takai²¹가 처음으로 선재 압연용의 압하력과 토크 계산 모델을 발표하였다. 기본적인 생각은 공형압연 실험에 의한 압하력 parameter를 도입이었다. 이 parameter는 압하력 실측치와 계산치를 비교 하고 얻어진 data의 회귀분석 방법에 의해 구했다. 온도별 유동응력은 광범위한 단축압축 실험을 통해 얻어진 Shida³¹의 수식을 사용하여 구했다. 이 수식을 다른 말로 하면 소재의 구성방정식(Constitutive Equation)을 말하는 것이다.

본 연구에서는 준해석모델(semi-analytical model)을 제시하는데 이는 압연되는 소재가 약한 평면변형(weak plane strain deformation)이라는 가정 아래서 출발하였다. 제안된 모델은 선재압연중의 소재를 자세히 관찰하여 수식화 되었다. 이 모델의 주된 목적은 선재압연실험을 통한 data regression을 제거하는데 있다. 제안된 모델은 사각형 근사법에 의해 압연 소재의 단면을 사각형으로 근사화 시키고 소재가 평면변형(plain strain)하에서 압연된다고 가정하는 것이다. round 혹은 oval 형태의 공형내에서 3차원 변형을 하는 소재를 쉽게 다루기 위한 것이다. 계산결과를 검증하기 위하여 Round-Oval-Round 패스압연의 실험을 하였다. 열간 선재압연시험기에 장착된 load cell을 이용하여 저탄소강 압연실험을 했고, 온도별(800°C, 950°C, 1100°C)의 압하력을 측정하였다. 하지만 토크는 시험압연기에 Torque-meter가 없어서 측정할 수 없기에 연구대상에서 제외 되었다.

II. 압하력 계산모델

압하력을 계산하기 위해서는, 소재의 온도는 우리가 알고 있다고 가정하면 먼저 소재가 패스를 통과할 때 롤 출구에서의 소재의 단면 형상예측, 소재가 받는 변형량, 변형률, 그리고 변형저항을 먼저 알아야 한다. 소재의 변형저항은 Shida³¹의 수식을 사용하여 구했다. 그래서 먼저 롤 출구에서의 소재의 단면형상 예측 방법, 변형량, 변형률 계산방법에 대해 기술한다.

2.1. 소재형상 예측

선재 압연에서 자유면 형상을 알기 위한 시도는 주로 유한요소법을 사용하여 많이 시도 되었다. 유한요소법은 패스단면적(pass area)을 계산하는데 매우 효과적이지만, 선재 압연의 특성상 3차원 해석을 요구하기에 시간이 많이 걸린다. 단일패스 모의실험(simulation)시 work station급 컴퓨터(computer)에서도 적어도1시간 이상 걸리기에 선재 압연line의 많은 패스수 (20 ~ 29)를 감안하면 비경제적이고 보다 정확한 3차원 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.

최근의 연구^{41, 51}에서 원형(Round) 타원(Oval) 패스와 타원(Oval) 원형(Round) 패스에 있어서 자유면 형상의 이론적 수식모델이 제안되었다. 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 계산된다.

Fig. 1은 압연실험시 사용된 공형을 나타내고 있다. 롤의 재질은 DCI(Ductile Casting Iron) 이고 롤 직경은 310mm이며 롤 축 방향길이는 320mm이다.

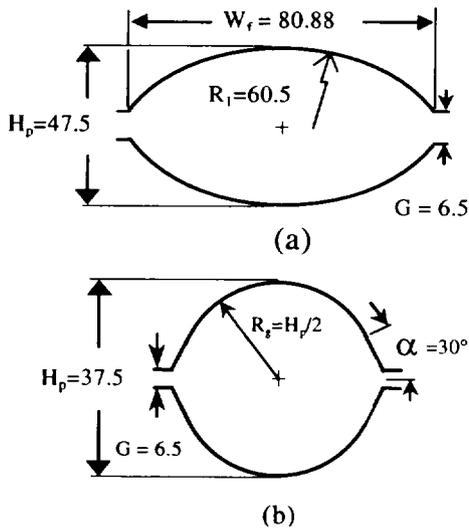


Fig. 1. Oval round pass sequence employed in hot rod rolling experiment.
 (a) Oval pass and
 (b) Round pass (unit: mm).

시편은 일반탄소강(0.1% C)를 선택하였고 빌렛(billet)를 채취하여 원형으로 가공하여 시편으로 사용하였다. 실험시 사용한 타원형과 원형 공형의 도면이 Fig. 5에 나타나있다. 압연온도를 측정하기 위하여 thermocouple을 소재의 후단 중앙에 삽입하여 압연시의 온도를 측정하였다. 실험순서는 원형의 소재를 가열로에 넣어 1030°C로 맞춘 다음 1000°C에서 압연하는데, 소재가 타원(Oval)의 공형에 먼저 압연되고 다시 압연된 oval형태의 소재를 재가열하여 1000°C에서 90도 회전하여 원형공형 패스에서 압연한다. 그리고 각 패스마다 압연시 소재의 회전이 방지하도록 정적 입구 가이드(static entry guide)가 설치되어 있다.

Fig. 2에서는 기준 롤 간극(G)이 6.5mm로 정해졌고 60mm 직경의 소재를 압연했을 때 예측한 소재의 단면형상과 실험으로 구한 단면형상이 비교되어져 있다. 접선은 공형을 나타내고 실선은 예측된 형상을 나타낸다. 실험으로 구한 표면형상은 둥근 모양의 마크로 표시되어 있다. 보이는 바와 같이 예측된 자유 표면 반경은 실측치보다 약간 더 크지만, 해석식으로 예측한 결과와 실험적으로 구한 결과가 전반적으로 잘 일치하고 있다는 것을 알 수 있다.

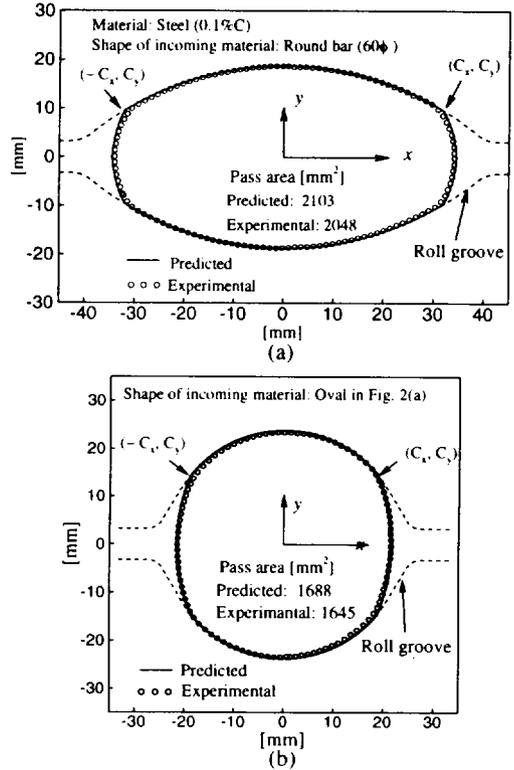


Fig. 2. Predicted and measured surface profiles when a specimen with 60mm diameter is rolled into (a) Oval pass and (b) Round pass, as described in Fig. 1.

2.2. 변형량 계산

공형압연에서 압연소재의 단면형상은 판압연에서처럼 사각형이 아니므로, metal flow를 예측하는데 많은 어려움을 겪고 있다. 이를 극복하는 방법으로 압연소재의 단면형상과 동일한 면적을 갖는 등가사각형(equivalent rectangle)으로 근사하는 방법이다. 평균 유효 변형량과 변형율은 등가사각형으로 근사된 압연소재로부터 계산되어진다.(Fig. 3) 압연중인 소재의 연신량, 두께감면량 및 폭퍼짐량의 비선형적 변화도 변형인자 계산시 반드시 포함되어져야 한다. 이들 문제를 극복하기 위해서 굴곡진 소재변형을 평행육면체 변형으로 가정하였다. 이런 단순화가 변형인자계산시 극복할 수 없었던 문제를 해결가능 하게 함을 알 수 있었다.

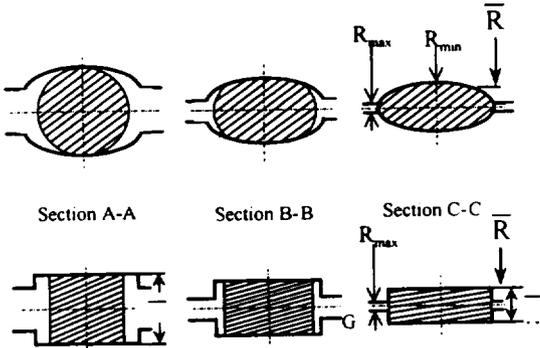


Fig. 3. Schematic description of equivalent rectangle approximation to round oval pass rolling and effective roll radius, \bar{R} , and equivalent cross sectional heights, \bar{H}_i and \bar{H}_p .

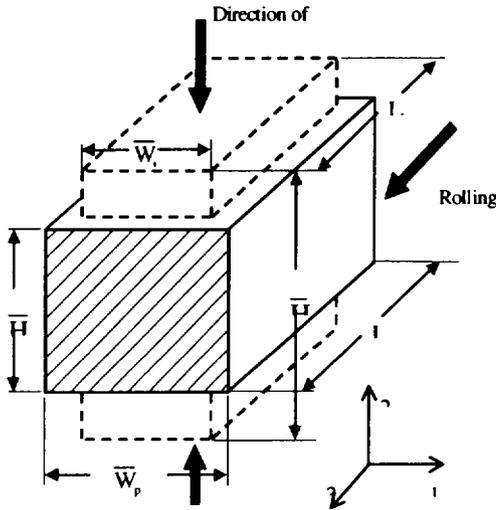


Fig. 4. Schematic representation of parallelepiped deformation of equivalent rectangular section $\bar{W}_i \times \bar{H}_i$, for an oval section (before pass) and equivalent rectangular section, $\bar{W}_p \times \bar{H}_p$, for a round section (after pass).

Fig. 4에서 보이는 바와 같이 공형압연중 소재변형을 평행육면체 변형으로 가정함에 따라, 주축의 소성 변형량의 증가분은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$d\epsilon_1 : d\epsilon_2 : d\epsilon_3 = \epsilon_1 : \epsilon_2 : \epsilon_3 \quad (1)$$

Fig. 4에서와 같이 각 주축에 대한 소성변형량은 다음과 같이 정의할 수 있다. 첫번째 주축에 대해서는,

$$\epsilon_1 = \ln(\bar{W}_i / \bar{W}_p) \quad (2)$$

두번째 주축에 대해서는,

$$\epsilon_2 = \ln(\bar{H}_i / \bar{H}_p) \quad (3)$$

마지막 주축에 대해서는,

$$\epsilon_3 = \ln(L_i / L_p) \quad (4)$$

따라서, 평균 유효 변형량은 비압축성 조건하에서 다음과 같이 구해진다.

$$\bar{\epsilon}_p = \frac{2}{\sqrt{3}} \epsilon_2 \left[1 + \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right)^2 + \left(\frac{\epsilon_3}{\epsilon_2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

방정식 (5)에서 공형압연시 평균 유효 변형량은 $(\epsilon_1 / \epsilon_2)$ 항이 무시된다면 판압연에서 사용되는 평균 유효 변형량 계산수식과 동일해짐을 알 수 있다.

2.3. 평균 유효 변형율 계산

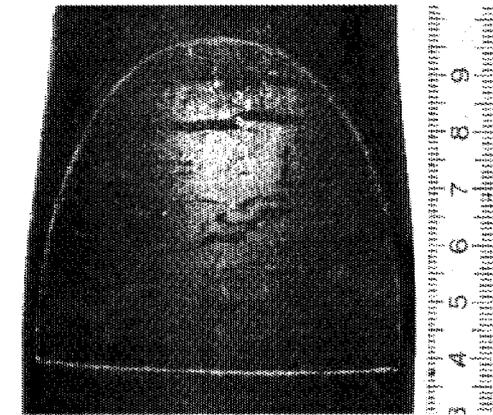
평균 유효 변형율은 앞에서 언급한 평균 유효 변형량을 압연시간으로 나눈 값으로 정의되어진다.

$$\dot{\bar{\epsilon}}_p = \bar{\epsilon}_p / t_p \quad (6)$$

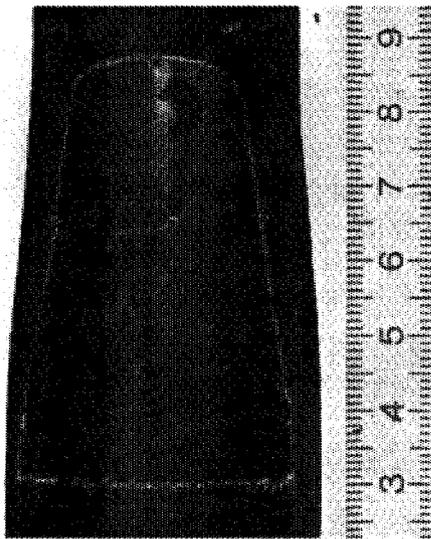
압연시간 간격은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_p = \frac{60\bar{L}}{2\pi N R_{mean}} \quad (7)$$

\bar{R} , \bar{L} , 및 N 은 각각 유효롤반경, 소재와 공형롤의 유효 투영접촉길이, 압연속도(roll rpm) 이다. 유효 투영접촉길이는 다음과 같이 표현된다.



(a) Round-oval pass designation



(b) Oval-round pass designation

Fig. 5. Shape of projected contact area of workpiece deformed at the inside of the roll groove and its geometric (a) Round-oval pass and (b) Oval-round pass designation (Unit: mm).

$$\bar{L}_d = \sqrt{\left[R_{max} - \left(\frac{\bar{H}_p - G}{2} \right) \right] (\bar{H}_i - \bar{H}_p)} \quad (8)$$

2.4. 투영접촉면적

변형 파라미터 (변형량, 변형률) 계산시 적용된 근

사해석방법과 일치하기 위해, 투영접촉면적을 계산하기 위한 수식도 해석적으로 적분가능한 형태의 식으로 만들었다. Fig. 5에서는 압연중 소재와 롤이 접촉되는 모양을 실험으로 구한 것을 보여주고 있다. 이 그림은 실험압연기를 비상정지 하여 구했다. 그러면, 투영접촉면적, A_d , 은 다음과 같이 표현된다.

$$A_d = 2 \cdot \int_0^{c_x} L_{max} \cdot \left(1 - \frac{x}{c_x} \right)^m dx \quad (9)$$

$$= \frac{3}{2} \cdot L_{max} \cdot C_x$$

여기서 m 은 무차원 산수이다. $m=1/3$ 이 본 연구에서 선택되었다. 여기서 C_x 와 $-C_x$ 는 소재와 롤이 서로 접촉하지 않는 점이다(Fig. 2 참조). L_{max} 은 압연방향으로 최대길이를 나타낸다. Table 1에서 보이는 바와 같이, 예측된 투영접촉면적은 실측치보다 약간 높게 나타난다. 흥미있는 사실은 oval 및 round 패스 공형 모두 식(9)의 적용이 가능하다는 것이다.

Table 1. Comparison of projected contact area predicted and one measured

Pass sequence	Measured	Present work	Shinokura and Takai ⁽²⁾
Round - Oval	3036 mm ²	2843 mm ²	3507 mm ²
Oval - Round	1651 mm ²	1633 mm ²	1710 mm ²

2.5. 압하력 모델

일반적으로 판압연에서는 Roberts⁽¹⁾의 수식을 사용하여 압하력 P 을 산출하고 식(10)으로 표현된다.

$$P_{plate} = K_{fm} A_d \exp \left[\left(\mu \frac{\bar{L}_d}{t_m} - 1 \right) \right] \quad (10)$$

μ : 롤과 소재사이의 마찰계수.

K_{fm} : 롤 갭 내에서 소재의 평균유동응력 (2축 인장 상태).

\bar{L}_d : 롤과 소재의 접촉 길이.

A_d : 롤과 소재의 투영접촉면적.

$$t_m = (\bar{H}_1 + \bar{H}_p) / 2 : \text{압연중 소재의 평균높이}$$

여기서 우리가 선재압연에서 압하력을 예측하기 위해서 상기의 수식을 수정하기로 하였다. 이에 필요한 새로운 용어를 도입하기로 한다. 판압연에서 일반적으로 3차원으로 변형되는 소재를 2차원변형으로 가정하면서 plane strain condition 이라는 용어를 사용한다. 그러면, 선재압연에서 3차원으로 변형되는 소재를 2차원변형으로 가정하면서 weak plane strain condition 이라는 용어 사용이 가능하다. 이에 대한 근거는 소재가 압연(변형) 되면서 소재가 공형에 구속되면서 폭퍼짐 방향으로 소재의 유동이 억제되기에 일반 판압연 보다는 약하게 2차원 변형조건으로 근사화 시킬 수 있다는 것이다.

Fig. 4를 참조하면, 도입된 용어를 다음과 같이 설명할 수 있다.

Plane strain condition : $\epsilon_1 = 0$.

Weak plane strain condition : $\epsilon_1 \neq 0$

그러면, 선재압연에서 압하력, P_{rod} , 은 다음의 식으로 표현된다.

$$P_{rod} = (1 - \epsilon_1) \frac{2}{\sqrt{3}} Y_{avg} A_d \exp \left[\mu \frac{\bar{L}}{\bar{h}_m} - 1 \right] \quad (11)$$

여기서 Y'_{avg} : 롤 갭 내에서 소재의 평균유동응력

(1축 인장 상태).

A_d : 롤과 소재의 투영접촉면적.

$\bar{L} = \sqrt{(R_{max} - (\bar{H}_p - G) / 2)(\bar{H}_1 - \bar{H}_p)}$: 롤과 소재의 유효 접촉길이.

$\bar{h}_m = [(\bar{H}_1 + \bar{H}_p) / 2]$: 압연중 소재의 유효 평균높이

여기서 식 (11)의 파라미터가 판압연에서의 압하력모델과 선재압연에서의 압하력모델의 차이점을 극명하게 잘 드러낸다. 파라미터도입은 두 공정의 압하력의 차이를 공형내에서 변형되는 소재를 간단하게 해석할 수 있게 하자는데 있고 변형률과 온도에 상관 없는 1개의 파라미터로 표현하고자 하는데 있다.

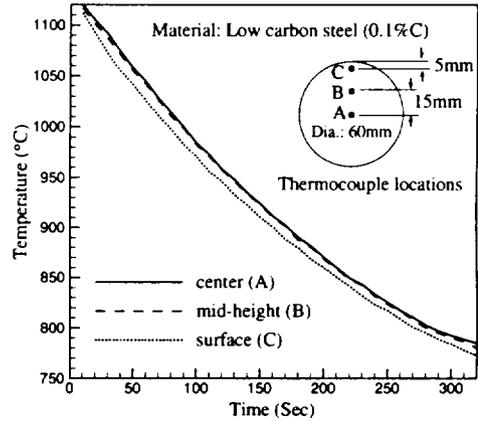


Fig. 6. Temperature history of the specimen cooled in air when it is removed from the furnace.

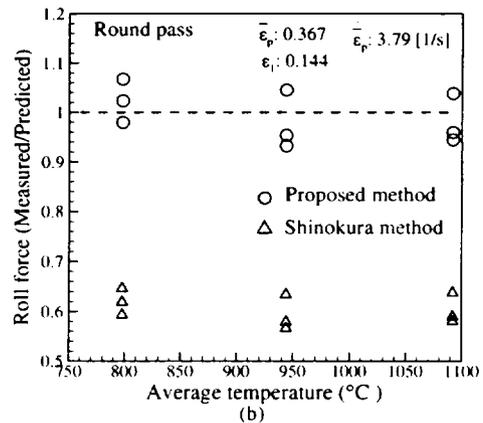
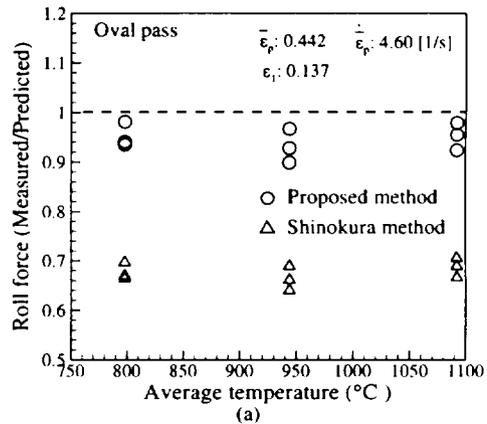


Fig. 7. Comparison of the predicted and measured roll forces for (a) Oval pass and (b) Round pass.

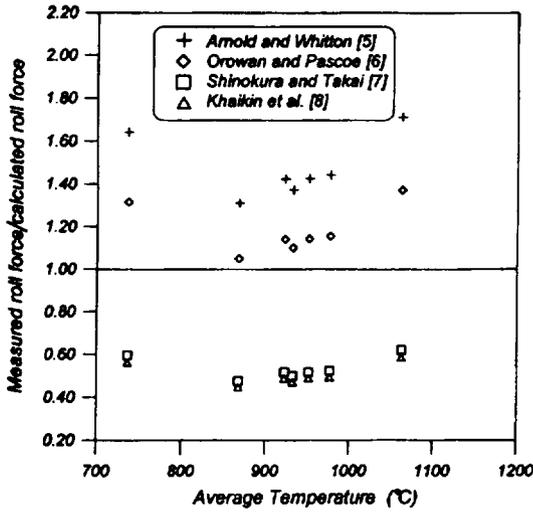


Fig. 8. Comparison of the predicted and measured roll forces for square-diamond pass rolling. (Reprinted from Said, et al.⁴⁾, Fig. 6, p. 152).

III. 결과 및 토의

가열로 안에서 시편의 온도분포는 일정하지만 일단 가열로에서 꺼내면 소재 단면의 온도 분포는 달라진다. 소재단면의 온도 분포는 압하력 측정결과에 영향을 미치므로 실험시에는 소재단면의 평균온도를 기준으로 실험을 해야 한다. 소재단면의 평균온도를 구하기 위해 세개의 thermocouples가 Fig. 6에 보이는 바와 같이 꽂혀 있다. 하나는 표면에 가까운 곳이고 또 하나는 중심 그리고 마지막 하나는 표면과 중심의 중간에 위치하고 있다. 전형적인 온도강하 곡선이 Fig. 6에서 보이고 있다. 세 부분의 온도 강하률은 거의 차이가 없는 것을 알 수 있다.

VI. 결론

본 연구의 초점은 round-oval (or oval-round) 패스 압연에서 압하력을 예측할 수 있는 준 해석모델을

개발하는 것이었다. 공형내에서 소재의 변형상태를 고려하여 weak plane strain deformation 개념을 도입하였다. 모델의 예측능력을 검증하기 위하여 소재의 온도를 변화 시키면서 공형압연실험을 하였다. 측정치와 예측치가 잘 일치하는 결과를 얻었다. 그러므로 본 연구에서 제안된 준 근사모델은 계산하기 간단하고 선재공장 현장에 적합한 것을 알 수 있고 특히 유한 요소법에 비교하면 계산시간이 아주 많이 절감된다는 것을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2001년도 제주대학교발전기금 청봉학술연구기금(효천연구비 : 효천학술연구기금)의 지원에 의해서 연구되었음.

참고 문헌

- 1) Wusatowski, Z., 1969. Fundamentals of rolling. Pergamon Press, U.K.
- 2) Shinokura and Takai, 1986. Mathematical models of Roll force and Torque in Steel Bar Rolling. ISIJ, Vol.72, pp.58-64.
- 3) S. Shida, 1969. Empirical formulae of flow stress of carbon steels. J. JSTP, pp.610-615
- 4) Y. Lee and S. Choi, 2000: *ISIJ Int.*, Vol.40, pp.624-626
- 5) Y. Lee, S. Choi and Y.H. Kim, 2000: *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol.81, pp.87-96.
- 6) W.L. Roberts, 1983. Hot Rolling of Steel, Marcel Dekker press, USA.
- 7) A. Said, J.G. Lenard, A.R. Ragab, M.A. Elkhier, 1999. The Temperature, roll force and roll torque during hot bar rolling. *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol. 88, pp.147-153.