

〈論 文〉

각재의 냉간 2단 압연에 있어서의 폭 증가율에 관한 연구

윤상건* · 김동원** · 인정제***

(1989년 8월 11일 접수)

A Study on Width Spread in 2-High Rolling of Rectangular Bars

Sang-Geun Yoon, Dong-Won Kim and Jeong-Je In

Key Words : Width Spread(폭 퍼짐), Barrelling(배럴링), Energy Method(에너지법), Friction Factor(마찰비), Kinematically Admissible Velocity Field(동적 가용 속도장)

Abstract

It was found that the effect of the friction between the roll and the workpiece on the spread ratio in flat rolling processes varies with the width-to-height ratio and the reduction in height by Tozawa, Oh and Kobayashi numerically. In the present study, the barrelling profile accompanying the width spread was predicted by using the energy method proposed by Kato, which is known to be one of the most advanced method for the three dimensional analysis of the rolling process. The modified velocity field was applied to compute the width spread and the result was verified by experiments. The analysis by the energy method gave the result that the spread ratio increases with the friction factor when the width-to-height ratio is 1 and decreases when the ratio is larger than 2, being consistent with the results of Tozawa and Oh. Nevertheless the cold rolling experiment for pure aluminium showed that the spread ratio decreases with the increasing friction factor irrespective of the width-to-height ratio.

기 호 설 명

- $\dot{E}_d, \dot{E}_f, \dot{E}_p$: 속도 불연속, 마찰, 소성 변형에 의한 에너지 소비율
- h, h' : 소재의 두께 및 x 에 관한 1차 도함수
- h_0 : 소재의 압연전 두께
- \bar{k} : 접촉 길이에 걸친 전단 항복 응력의 평균값
- m : 마찰비
- \bar{P}_e : 실험에서 구한 평균 압연 압력
- $V_{xIII}, V_{yIII}, V_{zIII}$: 모우드 III의 x, y, z 방향속도
- w : 좌표 (x, z) 에서의 소재의 나비
- x, y, z : 압연 방향, 나비 방향, 두께 방향 좌표

- α : 전체 변형에 대한 압연 방향 변형(모우드 I)의 배분비
- γ_1, γ_2 : 배럴(barrel)의 크기를 나타내는 변수
- μ : 마찰 계수
- Φ : 범함수 $\Phi = \dot{E}_d + \dot{E}_f + \dot{E}_p$

1. 서 론

유한 폭의 비교적 두꺼운 판재의 평 압연에서는 재료가 나비방향으로도 변형하여 폭 증가율을 예측하는 것은 압연 조업상 중요하다.

재료의 판폭비(나비/두께)는 압연시 폭 증가율(폭증가량/나비×100%)에 영향을 미치는 중요한 인자의 하나이다. 이 판폭비가 큰 경우 Tozawa⁽¹⁾와 Oh⁽²⁾의 계산에 따르면 마찰계수가 클수록 폭 증가

* 정회원, 한국산업안전공단 산업안전보건연구원

**정회원, 서울대학교 공과대학 기계설계과

*** 서울대학교 대학원

율은 감소한다. 그러나 Pomp⁽³⁾의 열간 압연실험과 Yanagimoto⁽⁴⁾등의 실용식에 따르면 마찰계수가 클수록 폭 증가율은 증가한다.

본 연구에서는 이에 대한 검토를 하기 위하여, Kato⁽⁵⁾의 속도장을 수정하여 수치계산한 폭 증가율과 알루미늄을 재료로 실험한 결과를 비교하고, 마찰비와 관폭비 및 압하율의 변화에 따른 폭 증가율의 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 이 론

Fig. 1의 압연시 재료 형상에 대하여 변형양식 모드 I(압연 방향의 변형만 있는 모드), 모드 II(나비 방향의 폭퍼짐 변형만 있는 모드), 모드 III(나비 방향에 배럴 형상만 생기는 모드)을 생각하여 각 속도장을 합성시켜 가용 속도장으로 채용하였다. 모드 I, 모드 II는 Kato⁽⁵⁾의 속도장과 동일하므로 모드 III의 속도장을 살펴보자.

모우드 III의 압연방향 속도는,

$$V_{xIII} = 1 \tag{1}$$

또한, 두께 방향 속도는 불균일 변형을 고려하여,

$$V_{zIII} = \frac{h'}{h} \left\{ \gamma_1 \cos \frac{\pi y}{2w} \sin \frac{\pi z}{h} + \gamma_2 \cos \frac{\pi y}{w} \sin \frac{\pi z}{h} \right\} \tag{2}$$

따라서 V_{yIII} 는 V_{xIII} 와 V_{zIII} 를 이용하여

$$V_{yIII} = -\frac{h'}{h} \left\{ \gamma_1 \frac{2w}{h} \cos \frac{\pi z}{h} \sin \frac{\pi y}{2w} + \gamma_2 \frac{w}{h} \cos \frac{\pi z}{h} \sin \frac{\pi y}{w} \right\} \tag{3}$$

이상의 속도장 중에서 나비 방향의 변형 모드

II, III은 중첩시키고, 압연 방향의 변형 모드 I과 $(1-\alpha) : \alpha$ 의 배분비로 다시 합성시키면 최종적인 가용속도장은 다음과 같이 된다.

$$V_x = \frac{ho\alpha}{h} + 1 - \alpha \tag{4}$$

$$V_z = \frac{hoah'z}{h^2} + (1-\alpha) \frac{h'}{h} \left\{ z + \gamma_1 \cdot \cos \frac{\pi y}{2w} \sin \frac{\pi z}{h} + \gamma_2 \cos \frac{\pi y}{w} \sin \frac{\pi z}{h} \right\} \tag{5}$$

$$V_y = \left(\alpha' - \frac{ho\alpha'}{h} \right) y + (\alpha-1) \frac{h'}{h} \left\{ y + \gamma_1 \frac{2w}{h} \cdot \cos \frac{\pi z}{h} \sin \frac{\pi y}{2w} + \gamma_2 \frac{w}{h} \cos \frac{\pi z}{h} \sin \frac{\pi y}{w} \right\} \tag{6}$$

최소화할 범함수 Φ 는 마찰에 의한 에너지 소비율 \dot{E}_f , 소성변형 에너지 소비율 \dot{E}_p , 속도 불연속에 의한 에너지 소비율 \dot{E}_a 로 구성되며 아래 식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} \Phi = & 4 \int_0^l \int_0^{w(x,h)} mk \Delta u \sqrt{1+h'^2} dx dy \\ & + 4 V_o \int_0^l \int_0^{w(x,z)} \int_0^h \sqrt{3} k \sqrt{\frac{2}{3}} \left[\dot{\epsilon} x^2 + \dot{\epsilon} y^2 + \dot{\epsilon} z^2 \right. \\ & \left. + \frac{\dot{\gamma}_{xy}^2}{2} + \frac{\dot{\gamma}_{xz}^2}{2} + \frac{\dot{\gamma}_{yz}^2}{2} + \frac{\dot{\gamma}_{xy}^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} dx dy dz \\ & + 4 V_o \int_0^{w_0} \int_0^{h_0} k \sqrt{V_y^2 + V_z^2} |_{x=0} dx dy \tag{7} \end{aligned}$$

3. 수치 계산

Fig. 2는 수치 계산의 흐름도(flow chart)를 나타내며 수치 계산의 간략한 순서는 다음과 같다.

먼저 압연기의 제원, 압연재의 치수 및 로울과 소재 접촉면 사이의 마찰비 등을 입력하고, 변수의 초기치를 가정하여 에너지 소비율을 계산한다. 범함수 Φ 를 최소화한 후 측면의 배럴 형상으로부터 폭 증가율을 구한다. 마찰비 m 은 평면 변형을 가정한 Bland와 Ford식에 따라 마찰계수 μ 를 구한 다음 아래 식에 의해 근사적으로 구하였다.

$$\mu \bar{P}_e = m \bar{k} \tag{8}$$

범함수 Φ 를 최소화할 때 n 개의 변수를 갖는 함수의 전체 최솟치를 구하는 IMSL 루틴 ZXMWDL을 이용하였다. 계산은 VAX 11/750으로 수행하였으며 계산에 요하는 연산 시간은 평균 1시간 30분이었다.

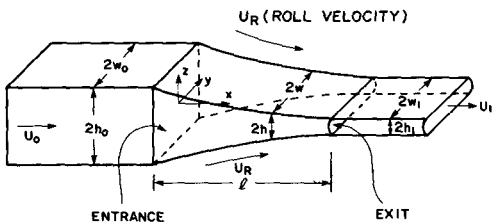
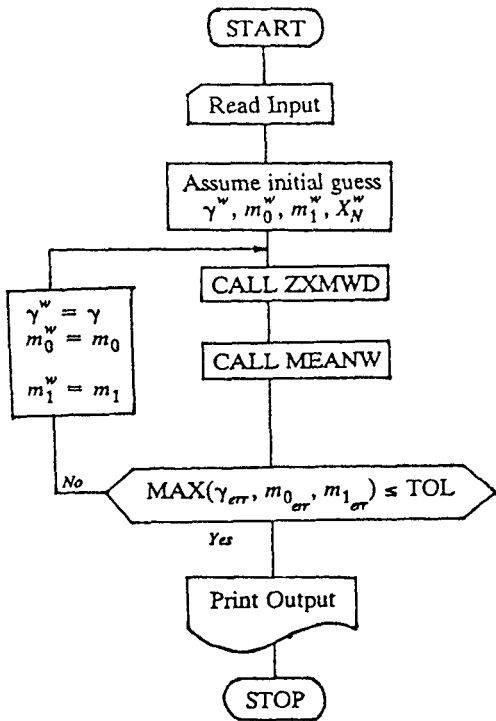
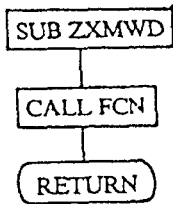


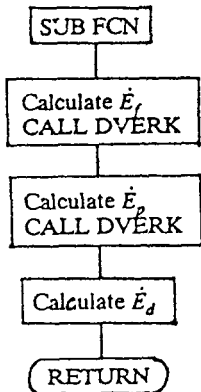
Fig. 1 Schematic workpiece geometry for energy method



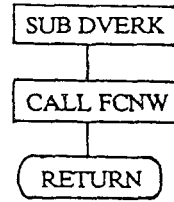
(a) Main program



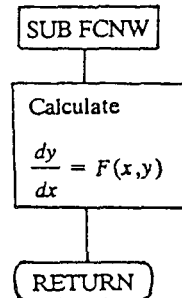
(b) Subroutine ZXMWD



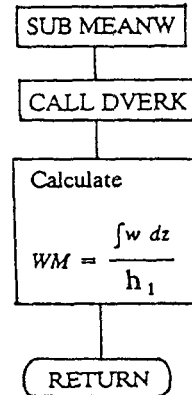
(c) Subroutine FCN



(d) Subroutine DVERK



(e) Subroutine FCNW



(f) Subroutine MEANW

Fig. 2 Flow chart for numerical calculation by energy method

Table 1 The specifications of rolling mill

Mill	Type	2-high
	Max. roll gap	20mm
	Rolling speed	1m/min-10m/min
	Rolling force	Maximum 43ton
		Ordinary 25ton
	Measuring device	Load cell & torque measuring device
	Power	30kW
Roll	Dimension	$\phi 155 \times L254$
	Surface hardness	Hs 95
	Surface roughness	1.2s
	Cylindricity	3/1000
	Material	SUJ-2

4. 실험

실험에 사용된 압연기 및 로울의 제원은 Table 1에 보인 바와 같다. 소재는 두께 8mm와 10mm의 상업용 순 알루미늄으로 폭비 1, 2의 2가지(두께 8mm일때)와 폭비 1, 2, 3의 3가지(두께 10mm일때)로 하였다.

시편은 측면을 밀링으로 가공하고 전기로를 사용하여 400°C에서 1시간 동안 풀림 처리한 후 상온에서 공냉하였다.

시편의 두께 및 나비는 마이크로 측정기와 좌표 측정기를 사용하여 측정하였고 윤활제로는 무윤활, Johnson wax, SAE #30 엔진오일, 그리이스, 와세린의 5가지로 하였다. 압연 하중 및 토오크는 로드셀과 토오크 측정기에 토오크 미터, 중계상자(junction box), X-Y 레코더와 동적 변형률 증폭기(dynamic strain amplifier)를 연결하여 측정하였다.

5. 결 과

Fig. 3은 압연전 소재 두께 8mm, 압하율 10%일 때, 폭비 1, 2의 경우에 대하여 폭 증가율에 미치는

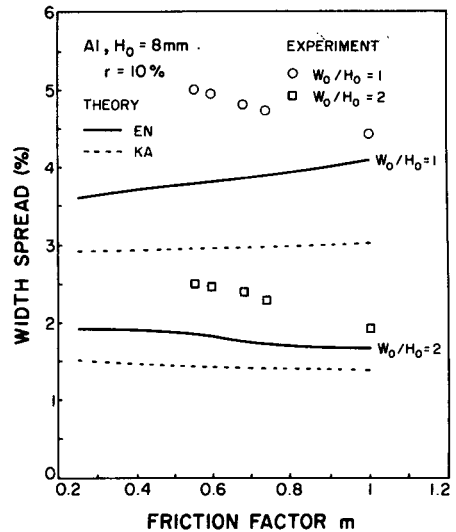


Fig. 3 Effect of friction factor on spread ($h_0=8\text{mm}$, $r=10\%$, 5 lubricants)

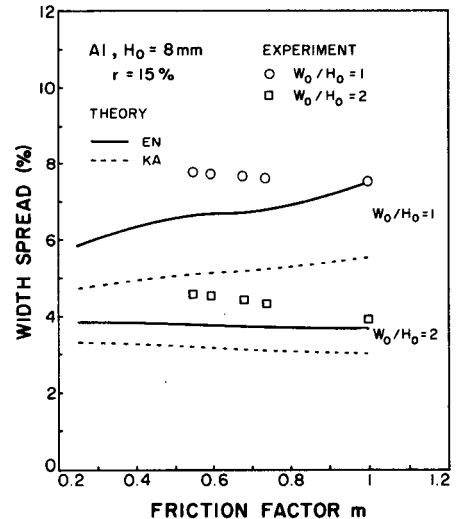


Fig. 4 Effect of friction factor on spread ($h_0=8\text{mm}$, $r=15\%$, 5 lubricants)

마찰비의 영향을 나타낸다. 여기서 점선은 Kato⁽⁵⁾의 속도장으로 폭 증가율을 계산한 경우이고, 실선은 수정한 속도장 식 (4), (5), (6)으로 폭 증가율을 계산한 경우이다.

실험에서는 마찰비가 커질수록 폭 증가율은 감소하였으나, 계산결과 폭비 1의 경우는 실험과 반대의 경향을 보여주고 있다. 이러한 경향은 Fig. 4의

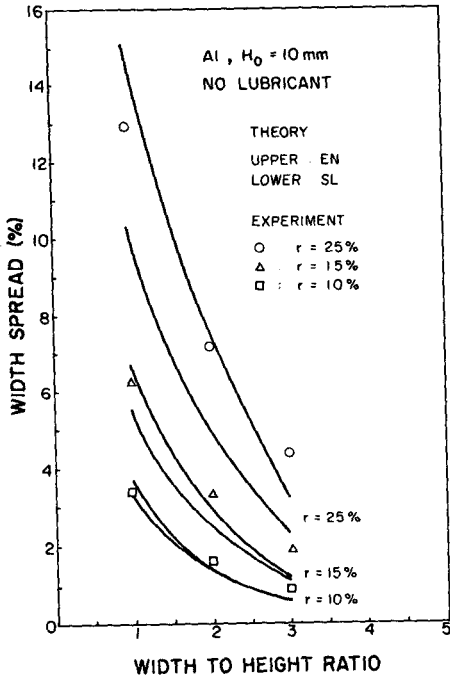


Fig. 5 Effect of width/height ratio on spread ($h_0=10$ mm, no lubricant)

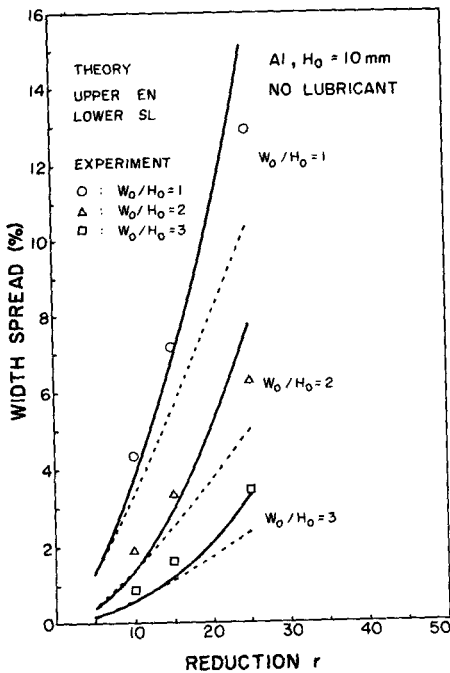


Fig. 6 Effect of reduction on spread ($h_0=10$ mm, no lubricant)

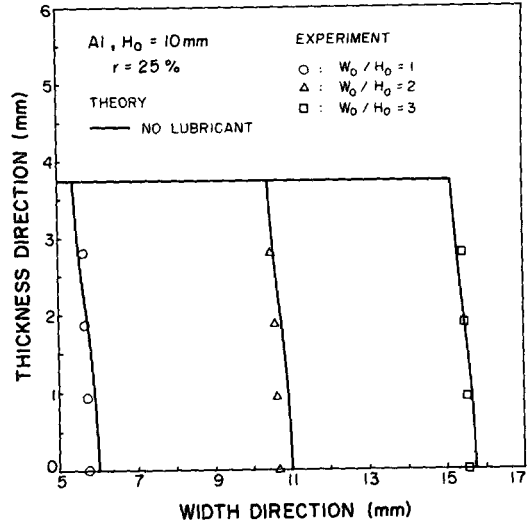


Fig. 7 Effect of width/height ratio on barrelling of side surface ($h_0=10$ mm, $r=25\%$, no lubricant)

압하율 15%일 때도 동일함을 알 수 있다.

Fig. 5는 폭 증가율에 대한 판폭비의 영향을 나타내며, Fig. 6은 폭 증가율에 대한 압하율을 영향을 나타낸다. 여기서 EN은 에너지법 (Kato⁽⁵⁾를 수정한 속도장 식 (4), (5), (6)을 사용)으로 폭 증가율을 계산한 경우이고, SL은 슬래브법으로 계산한 경우이다. 전체적으로 압하율이 커질 수록 또한 판폭비가 작을 수록 폭 증가율은 증가하였다.

폭 증가를 결정하는 주요 인자로 로울 접촉면의 형상이 있는데 그 예를 들면 Fig. 5에 있어서 압하율을 증가 시키면 로울 접촉호의 길이가 크게 되고, 접촉면의 폭과 접촉호 길이의 비는 감소하여 폭 증가율은 증가하였다.

Fig. 7은 소재 두께 10mm, 압하율 25%, 무윤활 일때 소재 측면의 배럴 형상에 미치는 판폭비의 형상을 나타낸다. 실선으로 표시한 것이 계산치이며 소재의 상하 대칭성에 의해 두께의 1/2에 대해 표시하였다. 계산치는 폭비가 증가할 수록 배럴의 크기가 감소하며, 실험치와 계산치 모두 밖으로 볼록한 배럴 형상이 된다.

6. 결 론

각재의 냉간 평압연의 폭퍼짐에 대하여 수치 해

석을 수행하고 실험으로 검증한 결과 아래와 같은 사실을 알 수 있었다.

(1) 수치 해석 결과에서는 폭비 1인 경우에는 마찰비가 클수록 폭 증가율이 증가하고, 폭비 2이상인 경우는 마찰비가 클수록 폭 증가율이 감소하여 Tozawa와 Oh의 결과와 정성적으로 일치하였으나, 순 알루미늄으로 실험한 결과에서는 폭비에 상관없이 마찰비가 클수록 폭 증가율은 감소하였다.

(2) 폭 증가를 결정하는 주 인자는 로울 접촉면의 형상이며, 접촉면의 폭과 접촉호 길이의 비가 감소하면 폭 증가율은 늘어난다.

참 고 문 헌

- (1) Tozawa, Y. et al., 1976, J. Jap. Soc. Tech. Plasticity, Vol. 17, No. 191, p. 980.
- (2) Oh S. I. et al., 1975, Int. J. Mech. Sci., Vol. 17, p. 293.
- (3) Pomp, A., 1936, Mitt Kaiser-Wilhelm Inst. Eisenforsch, 18, p. 183.
- (4) Yanagimoto, S., 1964, J. Jap. Soc. Tech. Plasticity Vol. 5, p. 315.
- (5) Kato, K. et al., 1980, J. Jap. Soc. Tech. Plasticity Vol. 21, No. 231, p. 359.