

힘다각형선도법을 이용한 세롤에 의한
파워스피닝공정의 해석

유 동 진*·양 동 열**

Analysis of the Three-Roll Power Spinning Process by using the
Method of Force Polygon Diagram

Dong-Jin Yoo and Dong-Yol Yang

Abstract

The study is concerned with the analysis of the required loads and torque in the Three-Roll Power Spinning Process by using the Method of Force Polygon Diagram.

Experiments are carried out using pure lead billets at room temperature. The radial force, the axial force and the torque occurring during the process are calculated theoretically and are compared with the experimental data. An approximate load distribution is known by the Force Polygon Diagram.

약어 및 기호설명

f.p.d. : 힘다각형 선도 (force polygon diagram)	N_{ij} : 전단면에 작용하는 수직력
J^* : 상계일률 (upper bound energy rate)	P : 반경 방향힘
J^*_{min} : 최소 상계일률 (least upper bound energy rate)	Q : 축 방향힘
K_{ij} : 굴곡성 계수 (flexibility coefficients)	Q_F : 롤과 소재사이의 축 방향 마찰력
L_1 : 원주방향 접촉 길이 (circumferential contact length)	R_1 : 롤의 반지름
L_2 : 축 방향 접촉 길이 (axial contact length)	R_f : 변형된 후의 소재 반지름
\bar{L}_1 : 평균 원주방향 접촉 길이	R_m : 평균 소재 반지름
N : 소재 회전수 (rpm)	R_0 : 소재의 원래 반지름
	T : 토오크 (torque)
	T_{ij} : 전단면에 작용하는 전단력
	t.v.d.: 접선 속도 불연속 (tangential velocity discontinuity)
	\dot{U}_0 : 롤 홀더 (roll holder) 이송속도

* 기아산업생 산기술부

** 과학기술원 생산공학과

- y : 축 방향좌표축(axial coordinate)
 α : 접촉각(contact angle)
 β : 롤 앵글(roll angle)
 r : 소재축 접촉각
 δ : 롤축 접촉각
 θ : 롤 비틀림각(lead angle)
 $\bar{\sigma}$: 유효 응력
 $\bar{\epsilon}$: 유효 변형도

1. 서 론

최근 금속성형공정이 발전됨에 따라 많은 신공정이 연구개발되고 있는데 Three-Roll Power Spinning도 그러한 공정의 하나이다. Three-Roll Power Spinning 공정은 환봉을 어떠한 지름으로부터 그 보다 작은 지름으로 성형하는 공정인데 그 성형특성이 압출, 압연등의 다른 공정과는 전혀 다르다. 소재인 환봉은 척(chuck)에 고정되어 회전하고 120° 의 등각도로 설치된 세개의 롤(roll)은 환봉에 접촉되어 환봉과 같이 돌면서, 이송장치에 의하여 롤 홀더(roll holder)가 축 방향으로 진진하면서 앞서의 공정을 수행하는 것이다. 즉, 압출(extrusion)과 압연(rolling)의 복합형태의 공정이라 할 수 있겠다. 사실 이러한 공정은 1960년대 구미, 일본, 소련등에서는 이미 연구개발되어 실용적 단계까지 와 있다.

1964년 소련의 경우, Grechkin, Sichevoi 및 Brezhnev¹⁾ 등에 의하여 Three-high 120 mill이라는 이름으로 생산품의 결함(defect), 금속조직등이 연구되었다. 같은 해에 Nefedov, Brezhnev, Sichevoi 및 Bystrikov²⁾ 등은 Transverse Helical Rolling이라는 이름으로 공정시 발생하는 금속의 변형, 유동등에 관하여 연구하였다. 1967년 일본의 경우, Kudo와 Yokai³⁾ 등에 의하여 Helical Rolling이라는 이름으로 연구되었는데 공정시 롤이 받는 힘, 토크(torque) 등을 실험적으로 구하였다.

본 논문의 Three-Roll Power Spinning 과 Helical Rolling, Transverse Helical Rolling 과 크게 다른점은 다음 두가지이다.

1. Helical Rolling, Transverse Helical Rolling의 경우 세개의 롤(roll)이 구동(driv-

en)인 반면 Three-Roll Power Spinning에서는 롤이 공전(idle)하며 소재가 척(chuck)에 물려 구동된다.

2. Helical Rolling, Transverse Helical Rolling의 경우 척(chuck)에 물린 소재가 척(chuck)에 의하여 이송되는 반면에 Three-Roll Power Spinning에서는 세개의 롤(roll)이 고정된 롤 홀더가 이송된다.

그러나 우리나라에서는 아직 미개발 분야로서 Helical Rolling보다 융통성은 작으나 실험방법이 용이하기 때문에 Three-Roll Power Spinning이라는 과도기적인 이름으로 본 공정을 해석을 시도하였다. 본 공정의 해석방법으로는 힘다각형 선도법(Force Polygon Diagram Method)^{4,5)}을 이용하였는데, 힘다각형 선도법은 성형특성과 힘의 평형으로부터 공정에 필요한 하중이나 하중의 분포를 근사적으로 구하는 기하학적인 방법으로서 오래전부터 절삭공정(machining process)의 절삭력등을 구하는데에 사용되어왔다. 본 논문에서는 공정을 수행하는데 있어 발생하는 반경방향힘, 축방향힘, 토크를 $t.v.d.$ 패턴(tangential velocity discontinuity pattern)과 이에 상응하는 힘다각형 선도를 이용하여 이론적으로 구하고 실험을 통해 이론결과와 실험결과를 비교 분석해 보고자 한다.

2. 이론 해석

2-1. 세 다이에 의한 환봉단조 (Three-die forging)

본 공정을 해석하기 앞서 본 논문 해석방법의 근간이 된 세 다이(die)에 의한 환봉단조⁶⁾에 대하여 잠시 살펴보기로 한다. 환봉을 단조(forging)하여 그 지름을 줄이는 방법으로서 두개의 다리로 하는 종래의 flat-faced anvil 방식에서는 중앙에 생기는 결함이 문제가 되었다. 이의 보완책으로 중앙의 결함을 없애기 위하여 V-anvil을 사용하게 되었는데 이는 환봉을 120° 세 방향의 평면다리로써 단조하는 것으로, 이로 말미암아 앞서의 flat-faced anvil 보다 안정성있는 성형을 할 수 있게 되었다. Fig 1.은 세다이에 의한 환봉단조를 나타내는 것인데 이로부터 이 경우의 반경방향힘 P 를 구하는 과정은 다음과

같다. 세 곳이 동일한 조건이므로 세 곳중 한곳의 t. v. d. 패턴만 생각하면 Fig. 2와 같다. 이러한 t. v. d. 패턴에 대응하는 호도그래프(hodograph)는 Fig. 3에 나와 있으며 힘의 평형을 고려한 힘 평형도는 Fig. 4와 같다. 이러한 힘 평형도로부터 힘다각형선도가 Fig. 5와 같이 작성된다. 이때의 P가 반경방향힘(단위길이당)이 되는 것이다.

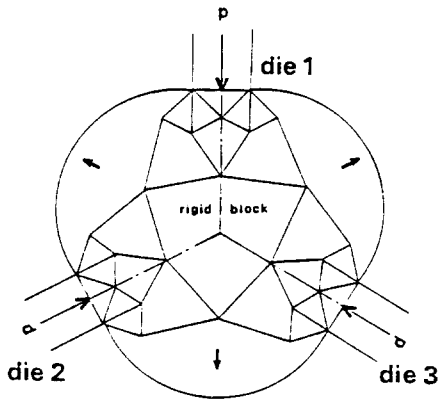


Fig. 1. Radial Forging of a rod by three symmetrically located dies

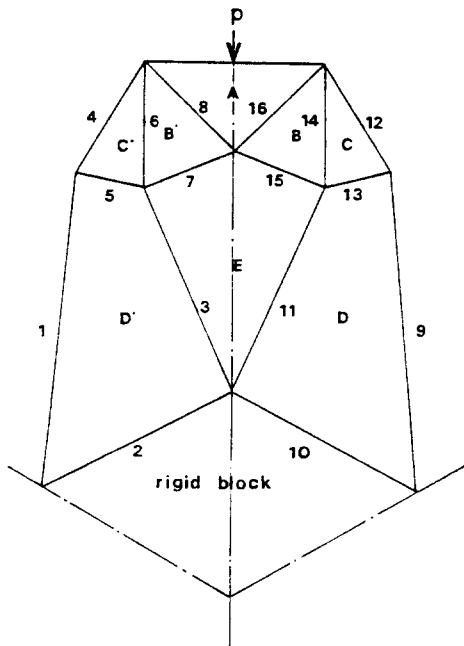


Fig. 2. t. v. d. pattern for three-die radial forging

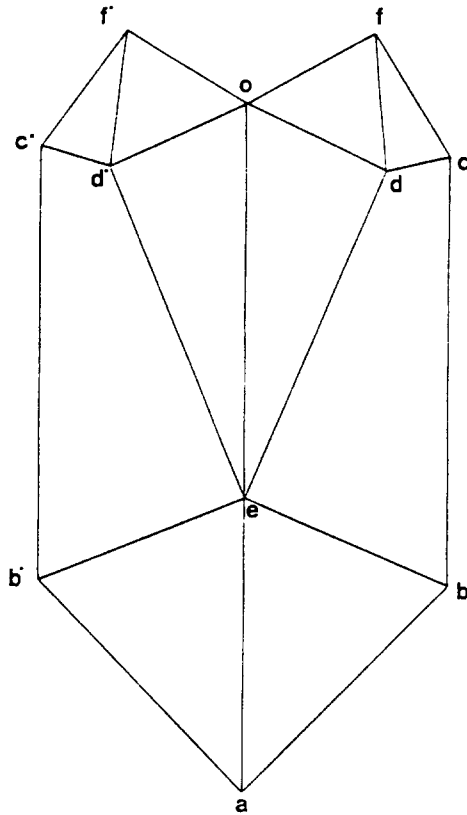


Fig. 3. Hodograph for three-die radial forging

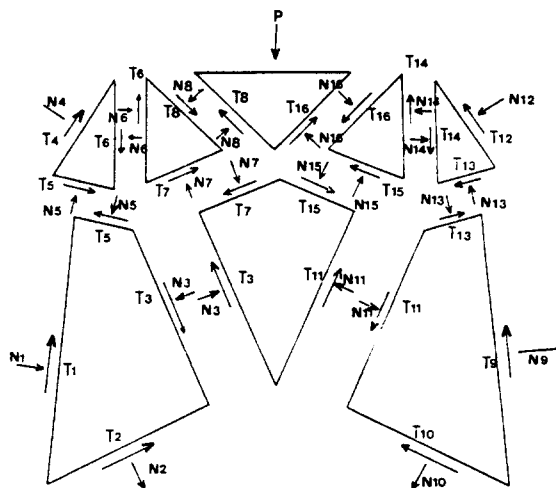


Fig. 4. Diagrams for force equilibrium for three-die radial forging

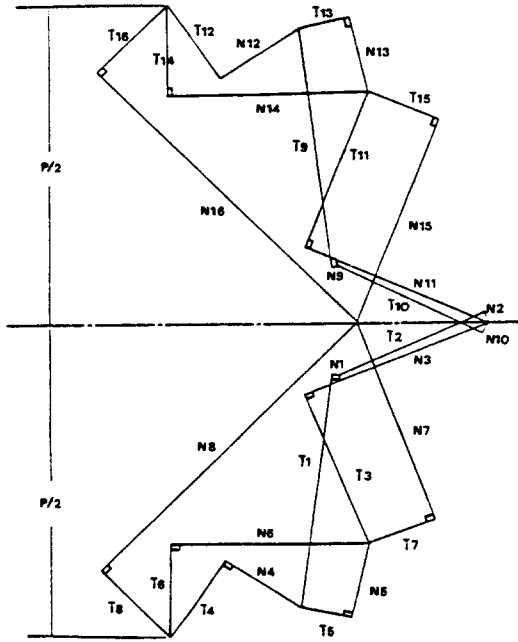


Fig. 5. Force polygon diagram for three-die radial forging

2 - 2. 반경방향힘과 토오크의 이론적 해석

2-2-1. Three-Roll Power Spinning 공정의 변형영역의 기하학적 형상

이 공정을 살펴보면 두가지의 공정이 혼합된 형태라는 것을 알 수 있다.^{7,8)} 즉, 축방향으로는 압출 (extrusion)의 성격을 갖고, 소재의 접선방향으로는 압연 (rolling)의 성격을 띠는데 이 두가지의 공정중 어느것이 더 지배적인가 하는 문제는 L_1 (circumferential contact length), L_2 (axial contact length)에 의하여 결정된다. 즉 L_1 이 L_2 보다 상당히 크다면 축방향의 금속유동이 증가하여 압출형태의 공정이 이루어질 것이며 L_2 가 L_1 보다 크게 되면 접선방향의 금속유동 증가에 의하여 압연의 효과가 커질 것이다. 그러나 실제공정은 이 두가지 형태의 공정의 적절한 배합으로 이루어지므로 롤 (roll)과 소재사이의 접촉길이와 형상은 중요한 문제가 된다. 해석의 단순화를 위하여 롤과 소재사이의 접촉길이를 직선으로 가정하면, 원주방향 접촉길이는

$$L_1 = 2 R_1 \sin \left[\frac{1}{2} \cos^{-1} \frac{2 R_1 R_0 (R_f + R_1) + R_0 R_f^2 - R_0^3}{2 R_1 (R_0 \cdot R_f + R_0 \cdot R_1)} \right] \dots \dots \dots (1)$$

으로 표시된다.

축방향 접촉길이는 롤의 형상과 밀접한 관계가 있는데 롤 앵글 β 에 대하여

$$L_2 = \frac{R_0 - R_f}{\sin \beta} \dots \dots \dots (2)$$

으로 나타낼 수 있다.

그리고 접촉각 α , 물측 접촉각 δ , 소재측 접촉각 γ 는 각각 다음과 같이 표시된다.

$$\alpha = \frac{\delta}{2} = \frac{1}{2} \cos^{-1} \frac{2 R_1 R_0 (R_f + R_1) + R_0 R_f^2 - R_0^3}{2 R_1 (R_0 \cdot R_f + R_0 \cdot R_1)} \dots \dots (3)$$

$$\gamma = \cos^{-1} \frac{R_0^2 + 2 R_1 \cdot R_f + R_f^2}{2 (R_0 \cdot R_f + R_1 \cdot R_0)} \dots \dots \dots (4)$$

위에서 구한 L_1 은 롤의 형상, 이송속도등 다른 공정변수의 영향등을 감안하여 다음 식으로 확장될 수 있다.

$$L_1' = (R_1 - y \tan \beta) \cdot \cos^{-1} \left\{ \frac{2(R_1 - y \tan \beta) \cdot \left(\frac{\dot{U}_0}{n} \cdot \tan \beta + R_f + y \tan \beta \right) \cdot (R_f + R_1) + \left(\frac{\dot{U}_0}{n} \cdot \tan \beta \right)}{2(R_1 - y \tan \beta) \left[\left(\frac{\dot{U}_0}{n} \cdot \tan \beta + R_f + y \tan \beta \right) \cdot (R_f + y \tan \beta) \right.} \right. \\ \left. \left. + R_f + y \tan \beta \right) \cdot (R_f + y \tan \beta)^2 - \left(\frac{\dot{U}_0}{n} \cdot \tan \beta + R_f + y \tan \beta \right)^2 \right\} \cos \theta \dots \dots \dots (5)$$

$$+ \left(\frac{\dot{U}_0}{n} \cdot \tan \beta + R_f + y \tan \beta \right) \cdot (R_1 - y \tan \beta) \left. \right\}$$

2-2-2. Three-Roll Power Spinning

정에 대한 t.v.d. 패턴의 가정

앞에서 서술한 V-anvil 에 의한 성형도중 형성되는 t. v. d. 패턴을 몇가지의 가정을 가지고 본 공정의 해석에 도입하였다. 즉, 대칭성을 가진 세 다이에 의한 환봉단조의 t. v. d. 패턴에 대칭성에서 비대칭성으로의 문제 성격의 전환에 상응하는 몇가지의 가정을 세우고 2 차원 평면 문제로 단순화시켜 비대칭문제인 본 공정의 해석을 위한 t.v.d. 패턴 설정을 시도하였다. 축방향에서 보았을때의 공정형태는 Fig.6과 같다.

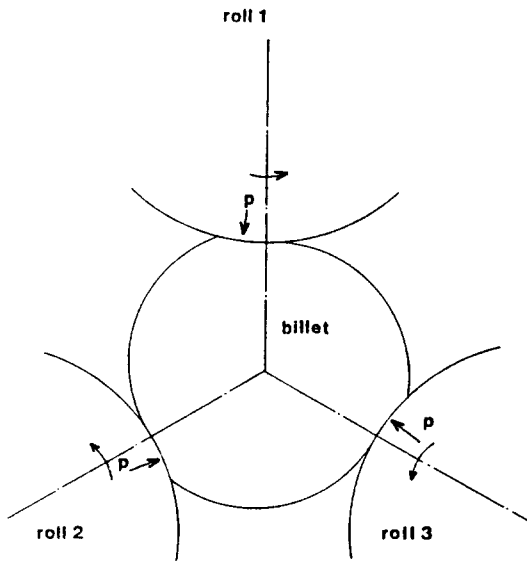


Fig. 6. Three-roll power spinning

세개의 롤은 소재와 같이 돌고 소재는 구동장치에 의하여 회전한다. 이때 반경방향힘 P는 그림에서와 같이 경사된 각(α)으로 접촉길이 L_1 에 작용한다. 세곳중 한곳의 확대된 그림이 Fig 7이다. 이러한 상황에서 t.v.d. 패턴을 구하기 위하여 몇가지의 가정을 세우는데 가상도는 Fig.8과 같다.

[가정]

1. 세곳의 120° 선은 θ' 만큼 회전된다.
2. 중앙의 rigid block 은 서로 연결되어야 한다.
3. 롤과 소재 사이의 접촉길이는 직선으로 가정한다.
4. 축방향 이송속도는 회전에 의한 접선방향속

도에 비해 작다.

5. 세곳의 바깥쪽 rigid block 유동방향은 120° 선의 방향과 무관한 것으로 호도그래프 (hodograph) 작성시 결정된다.

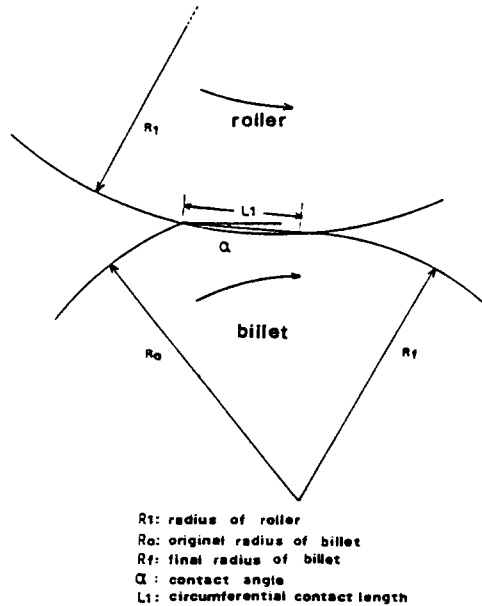


Fig. 7. Geometric configuration of deforming region

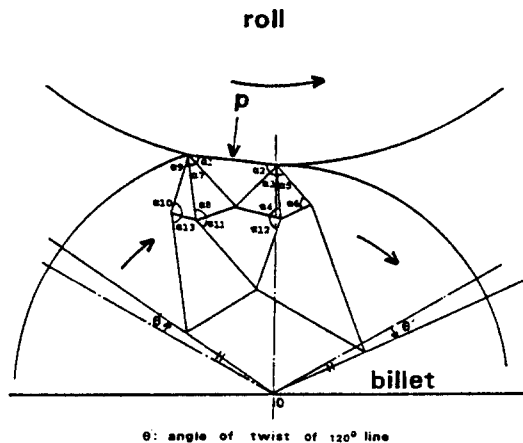


Fig. 8. Assumed t. v. d. pattern for three-roll power spinning

2-2-3. 최적화와 힘다각형 선도의 구성

Fig.8의 t.v.d. 패턴을 앞에서의 가정을 만족하면서 에너지 소비가 최소가 되게 최적화 기법을 이용하여 최적화 시킨다. 이때 변수 (α_1) 는

모두 14 개인데 제안된 t.v.d. 패턴을 결정하는데 충분한 요소들의 독립적인 구성각도들 13개와 120°선의 회전각 θ 가 그것이다. 이러한 변수로써 t.v.d. 패턴상의 좌표와 hodograph 상의 좌표를 구하고, 구한 좌표들 간의 거리를 14개의 변수의 함수로 나타낸 후에 다음과 같이 최적화시킨다.

$$J^* = \min J^*(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{14}) \\ = \sum_i \tau S_i U_i \dots \dots \dots (6)$$

여기서 τ 는 yield shear stress K의 값을 가지고

S_i 는 각각의 전단면의 단면적

U_i 는 hodograph 상의 상대속도를 나타낸다.

최적화된 t.v.d. 패턴은 Fig.9에 나와 있다.

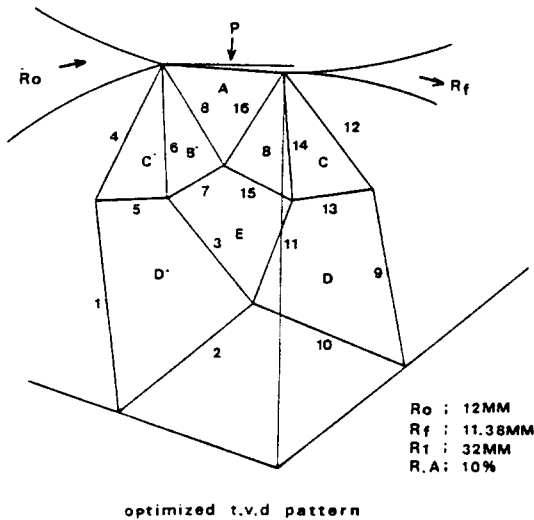


Fig. 9. Optimized t. v. d. pattern for cross-section

이와같이 합리적인 t.v.d. 패턴이 구해졌다 하더라도 이에 상응하는 hodograph의 구성은 용이한 일이 아니며, 전단면상의 하중분포 또한 미지수이다. 힘다각형 선도법은 제안된 t.v.d. 패턴으로부터 힘의 평형과 성형 특성에 의하여 공정에 필요한 하중과 전단면상의 하중분포를 구하는 방법이다. Fig.10은 Fig.9에 대한 hodograph이다. Fig.11은 전단면상에 작용하는 힘들간의 평면관계를 나타내는 힘평형도이고, Fig.12가 Fig.11에 의한 힘다각형 선도이다.

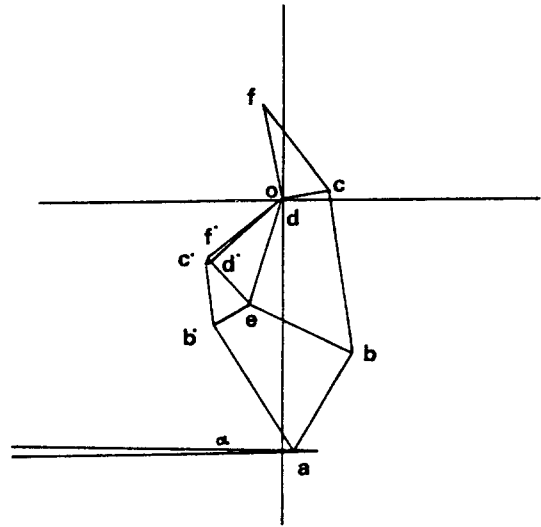


Fig. 10. Hodograph for three-roll power spinning

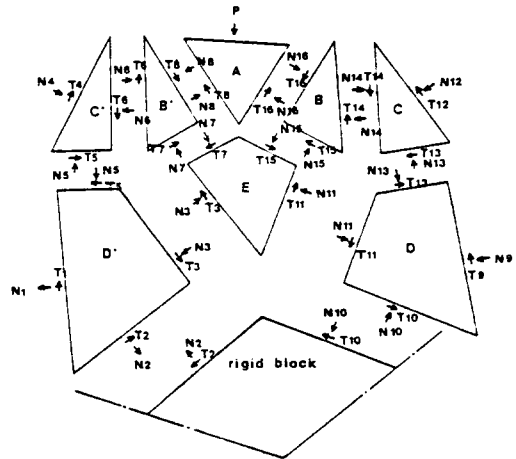


Fig. 11. Diagrams for force equilibrium for three-roll power spinning

Fig.12에서 N은 수직력(normal force), T는 전단력(shear force)을 나타낸다. 전단력의 크기는 전단면의 면적에 항복전단응력 k를 곱한 것으로 Fig.12의 T의 길이에다 k를 곱하면 전단력이 되게끔 Fig.12는 구성되었다. 이때 Fig.12의 P가 단위길이당(축방향) 반경 방향힘이 되는 것이다. 그리고 토크는 물이 구동기 아니므로 베어링의 마찰을 무시하면 P의 중심이

각 롤의 중심을 지나야 한다. 이와같은 기하학적인 관계에서 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$T (\text{torque}) = R_m \cdot P \cdot \sin \alpha \dots\dots\dots (7)$$

여기서 $(R_m = \frac{R_o + R_f}{2})$ 이다.

이상에서 구한 반경방향힘과 토크를 축방향 접촉길이 L_2 로 곱해주면 전체 접촉면적에 작용하는 힘과 토크가 되는 것이다.

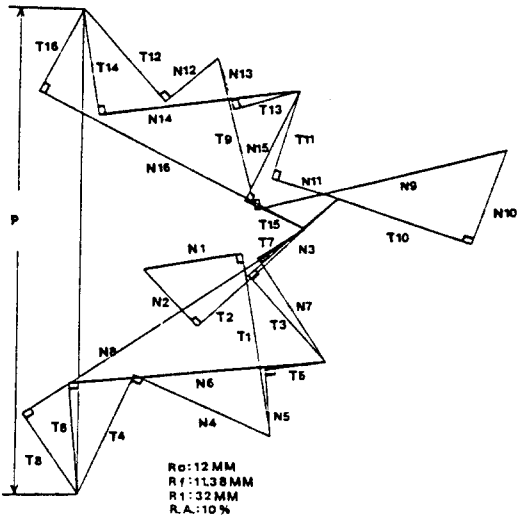


Fig. 12. Force polygon diagram for three-roll power spinning

2 - 3. 축방향힘의 근사적인 이론해석

공정시 발생하는 축방향힘은 여러 공정변수, 접촉면적의 복잡성등 여러 문제 때문에 정확한 이론치를 구한다는 것은 어려운 일이지만 첫번째 근사해로서 다음과 같은 방법으로 구하였다.

Fig.13 과 같은 형태의 t.v.d. 패턴을 가정하였다. 앞에서와 같이 최적화 하는데 이때 독립적인 변수 (β_i) 는 7개로서 t.v.d 패턴상의 요소들의 구성 각도들이다.

$$J^* = \min J^*(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_7) \dots\dots\dots (8)$$

$$= \sum_i \tau S_i U_i$$

여기서 τ 는 접촉면에서는 mk, 내부금속에서는 k
 S_i 는 각각의 전단면의 단면적
 U_i 는 hodograph 상의 상대속도

를 나타낸다.

최적화된 t.v.d. 패턴은 Fig.13에 나와 있다.

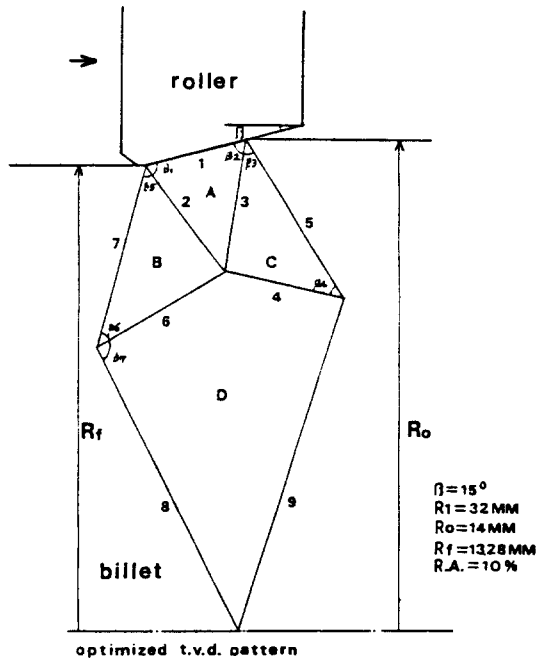


Fig. 13. Optimized t.v.d. pattern for longitudinal section

이상에서 구한 t.v.d. 패턴에 대응하는 힘평형도는 Fig.14와 같으며 이로부터 작성된 힘다각형 선도는 Fig.15에 나와있다. Fig.15에서 N은 전단면상에 작용하는 수직력이고 T는 전단력을 뜻한다. 그리고 그 길이는 힘의 크기를 의미하는 것으로 각점을 잇는 선분의 길이이다 k(yield shear stress)를 곱하면 그 전단면상의 힘들의 크기를 나타낸다. 그림의 P'는 반경방향힘과 간단한 기하학적 관계로부터 구한 것으로 다음과 같이 표시된다.

$$P' = \frac{L_2}{L_1} \cdot \cos \alpha \cdot \cos^2 \beta \cdot P \dots\dots\dots (9)$$

Fig.15의 작성원리는 다음과 같다. 공정의 특성에 비추어 볼때 N_8, T_8, N_7, T_7 의 순서로 따라가면 시점과 종점을 연결한 선은 그림에서 보는 바와 같이 수직선이 되는데 그것은 롤의 전진 방향 반대편으로 빠져나가는 금속에 작용하는 수평력이 없다는 것이다. 그리고 요소들을 따라

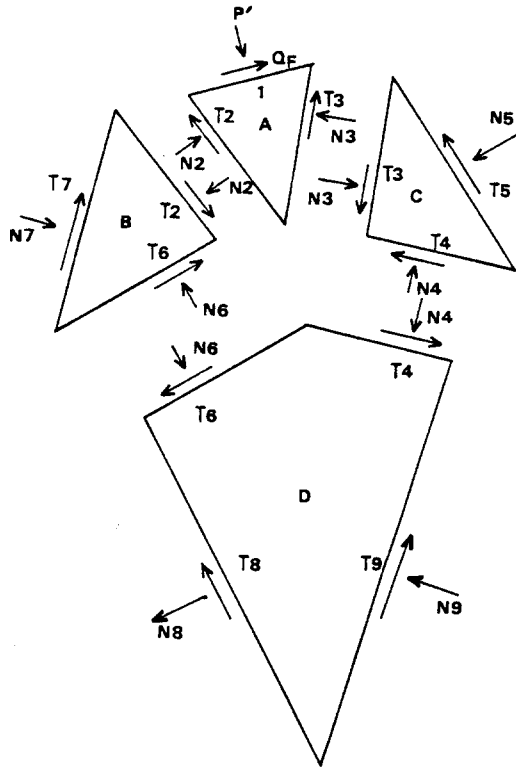


Fig. 14. Diagrams for force equilibrium on transverse section of Fig. 13.

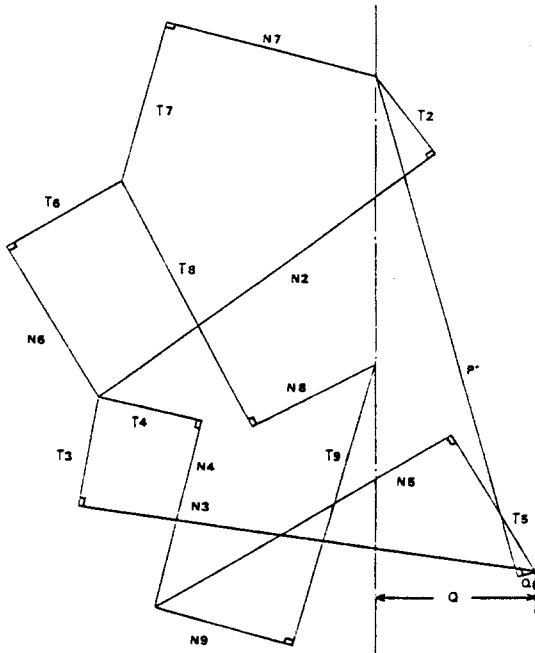


Fig. 15. Force polygon diagram for Fig. 14.

힘을 합성해 나갈때 힘의 평형에 의하여 페다각 형이 형성되어야 한다. 이상의 원리로 Fig.15 가 완성되었으며 그림에서의 Q가 물 하나에 미치는 단위길이당 축방향힘이 되는 것이다. 즉 P'와 QF의 합성력의 수평성분을 뜻하는 것으로 QF의 합성력의 수평성분을 뜻하는 것으로 QF는 물과 소재간의 마찰력이다.

이상에서 구한 Q에다 원주방향 접촉길이의 평균값 L_1 를 곱하면 전체 접촉면적에 작용하는 축방향힘이 된다.

$$\bar{L}_1 = \int_0^{R_o - R_f} \frac{R_o - R_f}{\sin \beta} \cdot \cos \beta \frac{L_1'}{\frac{R_o - R_f}{\sin \beta} \cdot \cos \beta} dy \dots\dots\dots (10)$$

3. 실험

3-1. 실험장치

Three-Roll Power Spinning 공정의 실험을 위해서 실험장치들이 설계 제작되었다. Fig.16은 본 장치의 개략도이며 주요 부분은 다음과 같다.

1. 롤 가이드 (roll guide)
2. 롤 이송나사 (roll feeding thread)
3. 롤 홀더 (roll holder)
4. 롤 (roll)
5. 120°세 롤 홀더
6. 로우드 셀 (load cell)

롤은 공정기능상 가장 중요한 부분으로 설계시 가장 많은 주의를 기울였다. 재질은 흔히 쓰이는 S 45C로서 가공후 열처리를 하였고 연삭을 하여 표면을 다듬질 하였다. 롤의 형상중 가장 중요한 것은 롤 앵글 β 인데 본 실험에서는 15°, 30° 두 종류의 롤을 사용하였다. 그리고 롤은 양쪽에 단을 두어 베어링과 함께 롤 홀더에 고정시킬 수 있게끔 설계되었다. 이렇게 고정된 롤은 롤 가이드 ②를 따라 롤 전진나사 ⑦에 의하여 상, 하로 전후진 할 수 있도록 설계하였고 롤 가이드는 롤의 흔들림이 없도록 제작하였다. 롤 홀더는 상부, 하부 두 부분으로 나누어져 있는데 하부는 상부에 대하여 롤 비틀각 θ 만큼 회전할

수 있도록 설계 되었다. 이렇게 회전된 하부를 두개의 핀과 하나의 보울트로 상부에 고정시켰다.

이러한 하부 홀더에 롤을 베어링과 함께 부착시켜 롤 비틀 각 θ 만큼 회전할 수 있도록 하였다. 이상과 같이 제작된 롤과 롤 홀더를 120° 의 세 방향으로 고정시킬 수 있게 120° 세 롤 홀더를 그림 16(b)와 같이 설계 제작하였다. 이 육각형 모양의 120° 세 롤 홀더는 선반의 이송장치에 의하여 전진할 수 있게끔 개리지의 연결요소들에 의하여 공구대를 제거한 곳에 설치되었다. 이문에서 해석한 반경방향힘, 토오르크, 축방향힘을 실험적으로 구하기 위하여 세개의 로우드 셀로 설계 제작되었다.

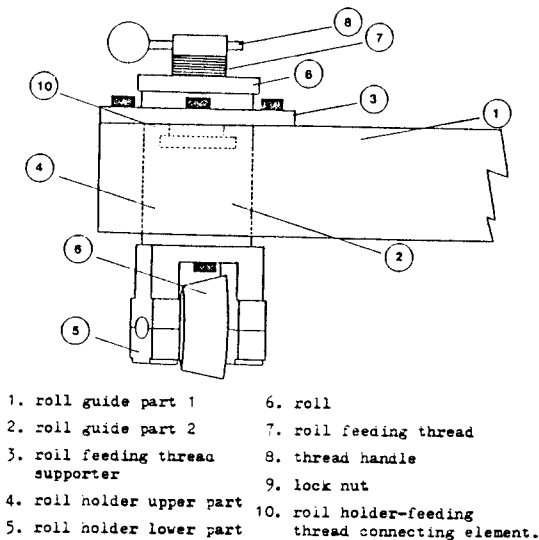


Fig. 16. a. Schematic diagram for a roll-load cell assembly

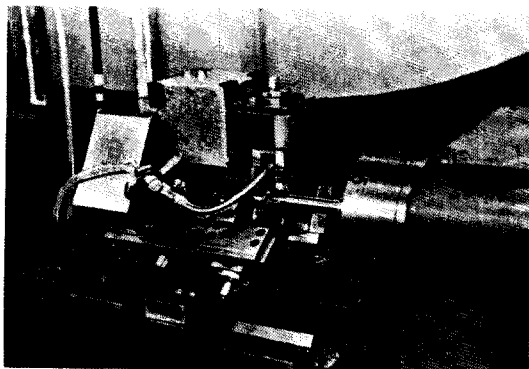


Fig. 16. b. picture for experimental setup

세 종류의 힘을 측정해야 하므로 로우드 셀 보정 (load cell calibration) 은 다음과 같은 아홉 경우에 대해서 행하였다.

- K_{11} : 반경방향힘에 대한 셀 1의 굴곡성계수 (flexibility coefficient)
- K_{12} : 축방향힘에 대한 셀 1의 굴곡성계수
- K_{13} : 원주방향힘에 대한 셀 1의 굴곡성계수
- K_{21} : 반경방향힘에 대한 셀 2의 굴곡성계수
- K_{22} : 축방향힘에 대한 셀 2의 굴곡성계수
- K_{23} : 원주방향힘에 대한 셀 2의 굴곡성계수
- K_{31} : 반경방향힘에 대한 셀 3의 굴곡성계수
- K_{32} : 축방향힘에 대한 셀 3의 굴곡성계수
- K_{33} : 원주방향힘에 대한 셀 3의 굴곡성계수

보정시험 결과 9개 계수들의 선형성은 매우 좋게 나타났다. 측정장치로는 변형도 증폭기 (bridge amplifier meter) 와 X-Y 레코더 (X-Y recorder, Hewlett Packard) 를 사용하였다.

3-2. 실험

3-2-1. 시편제작 및 압축시험

소재로서는 연질의 순납을 사용하였다. 시편의 끝부분에는 롤 앵글만큼의 각도의 단을 단면감소율에 따라 가공하여 세 롤의 센터 (center) 를 맞추는데 유의하였다. 시편으로는 $\phi 20\text{ mm}$, $\phi 24\text{ mm}$, $\phi 28\text{ mm}$ 세 종류를 선정하여 가공하였다.

재료의 기계적 성질을 나타내는 응력-변형도의 관계를 알기 위해서는 압축시험이나 인장시험을 해야 하는데 소성가공의 실험을 위한 시험으로는 압축시험이 많이 쓰인다. 압축시험에 사용한 시편은 본 실험에 사용된 순납을 $\phi 25 \times 25$ 로 가공하였다. 시험은 150ton 유압프레스에서 하였으며, 벌징 (bulging) 현상을 방지하기 위해 그리스와 테프론 테이프를 시편의 상, 하부에 부착시켰다.

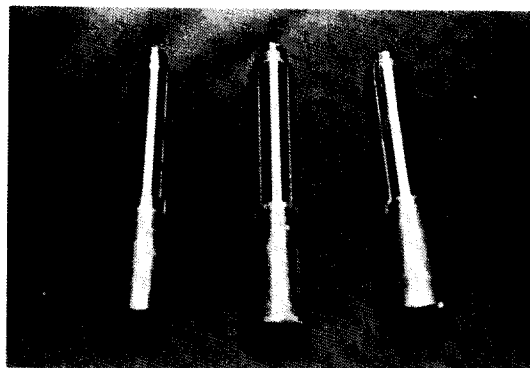


Fig. 17. Experimental billets

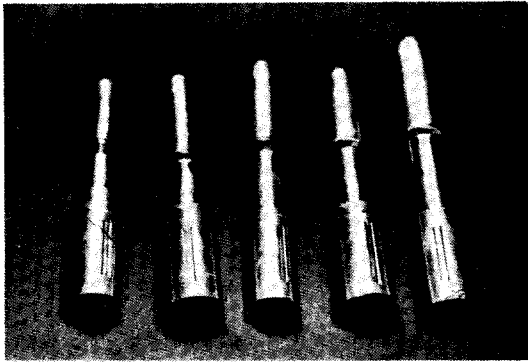


Fig. 18. Rolled specimens

3-2-2. 실험 및 데이터처리

실험은 앞에서 말한 측정장치와 설계 제작된 장치를 이용하여 세물의 센터맞춤에 유의하여 단면감소율, 소재의 크기, 롤 앵글등의 공정변수에 따라 실행되었다. 실험결과는 X-Y레코더에 기록되도록 하였고 실험의 정확성을 위하여 각 경우마다 여러번의 실험을 하여 평균값을 취하였다. 이렇게 하여 나온 실험결과는 다음과 같은 과정을 거쳐 처리되었다.

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}_{(mv)} = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P \\ Q \\ T \end{pmatrix}_{(kg)} \dots (11)$$

- 여기서 u_1 : 셀 1로부터 나오는 측정값
- u_2 : 셀 2로부터 나오는 측정값
- u_3 : 셀 3으로부터 나오는 측정값
- P : 반경방향힘
- Q : 축방향힘
- T : 원주방향힘

$K_{11} \sim K_{33}$: 3-1의 굴곡성계수를 나타낸다.
식 (11)로부터

$$Q = \frac{K_{21} \cdot u_1 - K_{11} \cdot u_2 + \frac{K_{11} \cdot K_{23}}{K_{33}}}{K_{12} \cdot K_{21} - K_{11} \cdot K_{22} + \frac{K_{11} \cdot K_{23} \cdot K_{32}}{K_{33}}} \dots (12)$$

$$P = \frac{u_1 - K_{12} \cdot Q}{K_{11}} \dots (13)$$

$$T = \frac{u_3 - K_{32} \cdot Q}{K_{33}} \dots (14)$$

와 같이 표시된다.

여기서 굴곡성 행렬 (flexibility matrix) 은

$$= \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{pmatrix} (mv/kg) \dots (15)$$

$$= \begin{pmatrix} + 0.118 & -0.242 & 0 \\ + 0.024 & -0.101 & -0.014 \\ 0 & -0.007 & -0.431 \end{pmatrix} (mv/kg)$$

으로 얻어졌다.

실험결과로부터 나오는 u_1, u_2, u_3 를 (12), (13), (14) 식에 대입함으로써 반경방향힘, 축방향힘, 토오르크를 분리해 낼 수 있었다.

4. 결과 및 토론

본 공정을 해석하기 위하여 두가지의 t.v.d 패턴을 제안해, 이로부터 힘다각형 선도법을 사용하여 반경방향힘, 축방향힘, 토오르크를 근사적으로 구했고, Three-Roll Power Spinning 실험장치를 사용하여 순납을 소재로 단면감소율, 롤 앵글, 소재의 직경등의 공정변수를 변화시켜가면서 실험하였다. 초기 실험에서는 경험과 자료의 부족으로 인하여 공정이 성립되지 않았으나 여러 원인을 규명함으로써 양질의 제품을 얻을 수 있었다. 공정과 관련된 몇가지의 결합과 그 원인은 다음과 같다. 롤의 사면을 타고 금속이 찢겨 올라가는 현상인 fish skin은 스피닝(Spinning)공정에서 많이 발생하는 불안정 현상으로 롤 앵글, 이송속도, 회전속도를 작게하고 단면감소율은 크게, 그리고 10°의 롤 비틀각을 줌으로써 해소되었다. 다음으로 많이 발생하는 결합으로는 Squaring 현상이 있는데 이는 공정시 원형의 제품이 나오는 것이 아니라 불규칙한 형태의 네모지거나 세모진 형상으로 빠져나오는 것으로 세 물의 센터가 일치하지 않아 힘들의 균형이 파괴되는데에 기인하는 것으로 생각되어 지는데 본 실험에서는 시편의 끝부분에 단면감소율별로 미리 단을 줌으로써 이런 결합을 방지하였다. 별칭(bulging) 현상은

소재가 너무 큰 압축력을 받을 시 생기는 현상으로 롤 앵글이 크고 이송속도가 다소 빠르면 자주 발생하는데 롤 앵글을 작게하고 이송속도를 낮춤으로써 발생을 방지하였다. 마지막으로 pulling out 결함이 있는데 이는 소재가 성형되면서 뒤로 빠져 나오는 것이 아니라 나사자국만 생기면서 빠져 나오는 것으로 이송속도에 비하여 롤 비틀각 θ 가 너무 크거나 단면감소율이 너무 작을때 생기는 현상으로 단면감소율과 이송속도를 다소 크게 하고 롤 비틀각을 작게 함으로써 해소하였다.

다음으로 이론결과와 실험결과를 살펴보기로 한다. Fig.19는 반경방향힘의 소재크기, 단면감소율에 따른 이론과 실험결과인데 단면감소율이다 소 클수록 이론과 실험치의 차이가 다소 증가하는 경향을 보인다. 이것은 단면감소율이 30% 이상의 실험에서는 여러 공정상의 결함이 조금씩 나타나는 까닭에 정확한 실험 데이터를 얻지 못하였기 때문이라 생각된다. Fig.20은 토오크의 소재크기, 단면감소율에 따른 이론과 실험결과인데 다소 큰 차이를 보이고 있다. 이는 반경방향힘과 토오크 사이의 관계를 단순히 기하학적인 관계에서 식(7)과 같이 근사적으로 정의할 내린데 원인이 있다고 생각된다. Fig.21과 Fig.22는 롤 앵글과 단면감소율에 따른 이론과 실험결과인데 앞에서와 같이 반경 방향임은 잘 맞는 반면 토오크는 최대 40%의 오차를 보였다. 그리고 Fig. 21과 Fig. 22에 나타난 것처럼 P와 T는

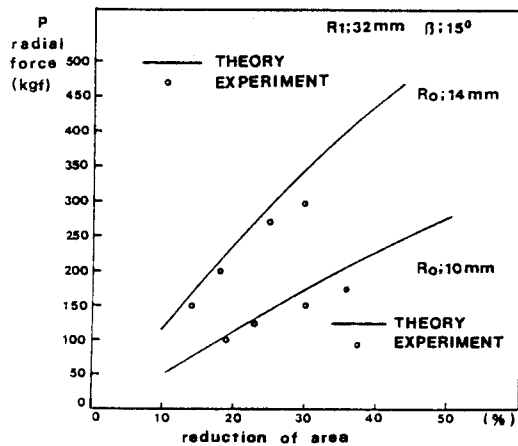


Fig. 19. Comparison between theory and experiment for radial forces with respect to billet radius and reduction of area

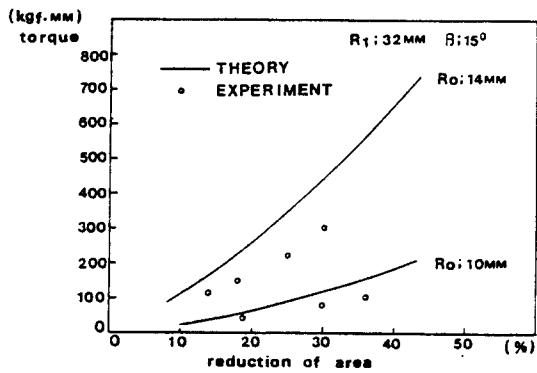


Fig. 20. Comparison of theoretical torque with the experimental torque with respect to billet radius and reduction of area

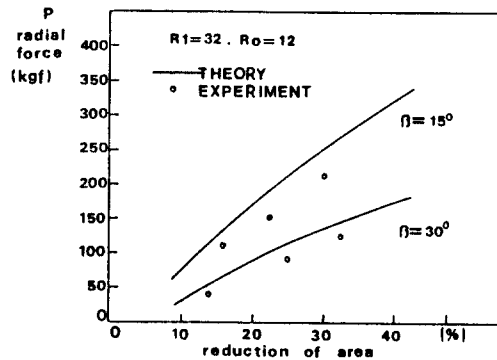


Fig. 21. Effect of roll angle on radial force

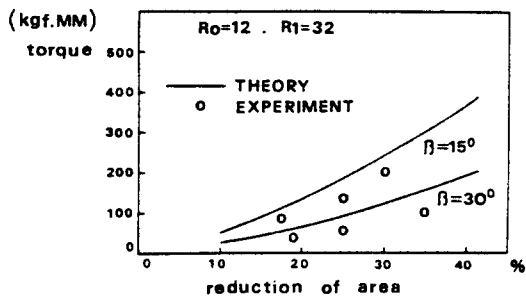


Fig. 22. Effect of roll angle on torque

β 가 감소하면 증가하게 된다. 이는 축방향 접촉 길이의 증가가 큰 원인이라 생각된다. 반면 축방향힘은 Fig. 23에 보이는 것처럼 롤 앵글에 따라 증가하는 경향을 보였다. 그리고 이론과 실험결과는 최대 30%의 오차를 보였는데 이는 근사적인 이론해석을 하기 위하여 도입된 여러 가정들에

기인된다고 생각되어지며 정성적으로는 비교적 잘 일치하고 있다.

참 고 문 헌

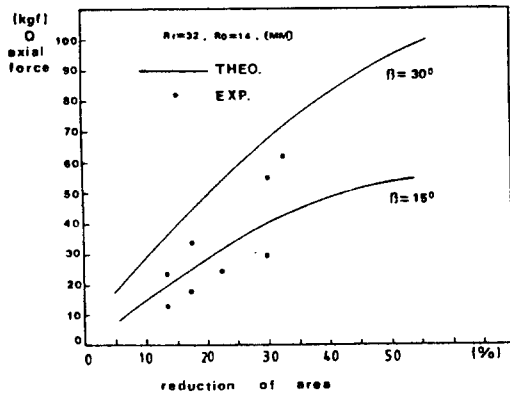


Fig. 23. Effect of roll angle on axial force based on Fig. 13.

5. 결 론

힘다각형 선도법을 이용하여 Three-Roll Power Spinning 공정을 해석하였다. 공정시 발생하는 반경방향힘, 축방향힘, 토오크를 이론적으로 구하고 실험결과와 비교해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 반경방향힘은 이론과 실험결과가 비교적 잘 일치함을 보였고 높은 단면감소율에서는 다소 차이가 나타났는데 이는 단면감소율이 증가함에 따라 공정상의 결함이 조금씩 나타나는 까닭이라 생각된다.
2. 토오크는 이론과 실험결과 사이의 차이가 좀 크게 나타났고 축방향힘도 다소 차이를 보였는데 정성적으로 비교적 잘 일치하고 있다.
3. 반경방향힘과 토오크는 소재의 직경, 단면감소율의 증가에 따라 증가하나 롤 앵글이 커지면 감소하는 경향을 보였다.
4. 축방향힘은 반경방향힘의 크기에 비하여 작은 것으로 나타났고, 소재의 크기, 단면감소율, 롤 앵글의 증가에 따라 증가하는 경향을 보였다.
5. 힘다각형 선도예에 의하여 근사적인 하중분포를 구할 수 있었다.

1. N.A. Grechkin, A.P. Sichevoi, and L.A. Brezhnev, "The Three-High 120 Mill at the Dzerzhinskii Works for Rolling Circular Periodic Sections", *Stal in English*, 5, 369-371. 1964
2. A.A. Nefedov, L.A. Brezhnev, A.P. Sichevoi, O.P. Bystrikov, "A Study of Metal Deformation under Transverse Helical Rolling", *Stal in English*, 5, 371-374. 1964
3. H. Kudo, M. Yokai, "Investigations into the Helical Rolling Process", *MTDR*, Pt 1, 1021-1038. 1967
4. W. Johnson and A.G. Mamalis, "Some Force Plane Diagrams for Plane Strain Slip Fields", *Int. J. Mech. Sci*, 20, 47-56. 1977
5. J.S. Ryoo, D.Y. Yang, W. Johnson, "Lower Upper Bound Analysis of the Ring Rolling Process by using Force Polygon Diagram and Dual Velocity Field", *Proc, 1st ICTP Conf, Tokyo*, 1292-1298. 1984
6. W. Johnson, "Indentation and Forging and the Action of Nasmyth's Anvil", *The Engineer*, March 7, 348-350. 1958
7. S. Kalpakcioglu, "Maximum Reduction in Power Spinning of Tubes", *ASME Journal of Engineering for Industry*, 86, 49-54. 1964
8. M. Gur and J. Tirosh, "Plastic Flow Instability under Compressive Loading during Shear Spinning Process", *ASME Journal of Engineering for Industry*, 104, 17-22. 1982