

〈논 문〉

형상압연시 연성파괴의 탄소성 유한요소해석

원 영 목* · 오 규 환*

(1996년 1월 19일 접수)

The Elasto-Plastic Finite Element Analysis of Ductile Fracture in Shape Rolling

Young Mok Won and Kyu Hwan Oh

Abstract

During the shape rolling process, the influence of reduction ratio and taper of shape roller on deformation and limit of ductile fracture such as free surface cracks developing in the workpiece has been studied. The deformation behaviours were analyzed by the 3-dimensional elasto-plastic finite element method, and the conditions of ductile fracture were determined from 3-dimensional elasto-plastic finite element method and modified Cockcroft-Latham criterion. The deformed geometry and prediction of ductile fracture by 3-dimensional elasto-plastic finite element method are compared with experimental results. The calculated results are in good agreements with experimental data. The analysis used in the study was found to be effective in predicting the shape rolling process.

Key Words : Shape Rolling Process, 3-D Elasto-Plastic Finite Element Method, Ductile Fracture, Modified Cockcroft-Latham Criterion

1. 서 론

최근에 연속주조로부터 열간형상압연까지 하나의 공정으로 동선(copper wire)을 생산하는 산업현장이 증가하고 있다. 주로 결함은 열간형상압연시 발생하며 결함이 없는 제품을 생산하기 위하여 열간형상압연에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 결함발생을 최소화하는 최적화된 형상압연공정조건(압하율, 압연속도, 압연온도 및 압연률의 설계기술)은 산업현장에서 설계자의 경험적, 시행착오에 의해 발전해 왔다. 경험적 방법은 많은 시간과 비용이 필요하기 때문에 컴퓨터를 이용한 수치해석적 방법이 개발되어 왔다. 형상압연은 변형전과 변형후의 형상의 비대칭성에 의해 필연적으로

3차원 해석을 해야하므로 많은 계산량이 필요하고, 형상압연률을 3차원으로 표현하는데 있어서의 어려움 등으로 실제 연구에서 적용이 제한적이었다. 최근 컴퓨터의 용량 증가에 따라 3차원 수치해석법을 이용하여 형상압연에 대한 공정해석에 많은 도움을 주고 있다⁽¹⁻⁴⁾. 형상압연공정은 열간에서 행하여지므로 변형해석과 열전달 해석으로 재료의 변형거동 및 온도분포를 예측하는 연구^(5,6)가 진행되었다. 또한 김낙수⁽⁷⁾는 열간압연공정의 모델링 방법으로 3차원 강소성 유한요소법을 이용하여 속도장을 구하고, 이로부터 변형되는 소재의 형상을 구하였다. 열전달해석시에는 2차원 유한요소법으로 온도분포를 구하였다. 그러나, 이러한 방법은 압연 혹은 압출방향으로 속도분포의 차가 큰 경우에는 정확한 해를 구할 수 없는 단점이 있고, 이에 대한 체계적인 실험결과는 아직 미미하다.

연성파괴를 예측하기 위한 기준식은 일반적으로

*서울대학교 금속공학과 및 신소재 공동연구소

응력과 변형률의 적분형태로 나타내며, 적분된 값이 임의의 값에 도달하게 되면 연성파괴가 시작한다고 고려한다. McClintock⁽⁸⁾는 파괴가 일어나는 과정을 기공생성 및 성장에 근거를 두고 연성파괴기준을 제안하였다. Cockcroft와 Latham^(9,10)은 연성파괴시 소성변형률 경로에 대한 최대 주인장응력의 영향을 고려한 연성파괴기준식을 제안하였다. 특히, Oh와 Kobayashi⁽¹¹⁾ 등은 McClintock의 연성파괴기준과 수정된 Cockcroft-Latham의 연성파괴기준을 이용하여 두가지 연성파괴기준식의 상호 관계로부터 축대칭 압출과 인발공정에 대하여 강소성 유한요소법으로 연성파괴를 예측하였다. 수정된 Cockcroft-Latham의 연성파괴기준식은 최대주인장응력을 고려하는 것이 아니라 기공성장의 관점으로부터 응력비(최대주인장응력/유효응력)를 고려하는 것이 더욱 적합하다는 것이다. 또한 최재찬⁽¹²⁾ 등은 Cockcroft-Latham의 연성파괴기준과 강소성 유한요소법을 이용하여 금속성형공정에서 변형해석 및 연성파괴예측을 동시에 수행할 수 있는 해석기법을 제시하여 알루미늄의 압출과 업셋팅공정을 해석하고 실험결과와 비교하였다.

이 연구에서는 3차원 탄소성 유한요소법을 이용하여 압하율 및 압연률의 기울기에 따른 형상압연 공정의 변형거동에 대하여 해석하였다. 수정된 Cockcroft-Latham의 연성파괴기준식을 기초로하여 현재 산업현장에서 가동중인 동(copper)의 형상압연공정으로 생산한 재료의 결함분포와 계산에서 예측된 결함분포를 비교하였다.

2. 이론

2.1 응력-변형해석⁽¹³⁾

재료의 체적력과 관성을 무시하면 어떤시간 t에서 가상일의 원리에 의해 물체의 평형상태는 아래와 같이 표시된다.

$$\int_V \sigma_{ij} \delta e_{ij} dV = \int_{S_F} P_i \delta U_i dS_F \quad (1)$$

여기서 σ_{ij} 는 Cauchy 응력텐서, e_{ij} 는 Eulerian 미소변형률텐서, P_i 는 표면하중, U_i 는 변위, V 는 시간 t에서의 부피, S_F 는 시간 t에서의 표면적이다. 이 식을 대변형 문제에 적용하기 위해서 원래 부피와 표면적에 대하여 나타내면

$$\int_{V_0} T_{ij} \delta \epsilon_{ij} dV_0 = \int_{S_{F_0}} t_i \delta U_i dS_{F_0} \quad (2)$$

여기서, T_{ij} 는 2차 Piola-Kirchhoff 응력텐서, ϵ_{ij} 는 Green-Lagrange 변형률텐서, t_i 는 원래 표면적 S_{F_0} 에서 기술되는 표면하중이다. 윗 식을 충분형태로 바꾸고 각 절점으로 이산화시키면 다음과 같은 행렬식을 얻는다.

$$K \underline{dU} = \underline{F} \quad (3)$$

여기서 K 는 강성행렬, \underline{F} 는 하중벡터이고, \underline{dU} 는 구하고자 하는 변위벡터이다. 소성변형의 경우 식 (3)은 비선형식이므로 뉴튼반복법으로 변위벡터 \underline{dU} 를 구한다. 구해진 \underline{dU} 로부터 변위-변형률 관계식을 이용하여 변형률을 구한다. 또한 변형률로부터 다음 식을 이용하여 응력을 구한다.

$$\sigma^{t+\Delta t} = \sigma^t + C^{EP} d\epsilon \quad (4)$$

여기서, $\sigma^{t+\Delta t}$ 와 σ^t 는 t에서의 응력텐서, $d\epsilon$ 는 변형률 충분텐서이며, C^{EP} 는 구성방정식에서 주어지는 탄소성 응력-변형률 행렬이다.

2.2 연성파괴조건

다양한 하중조건과 공정조건에 적용될 수 있고, 실험적 접근 및 수치적 계산이 용이한 수정된 Cockcroft-Latham의 연성파괴기준식⁽⁹⁻¹¹⁾은 다음과 같다.

$$\int_0^{\epsilon_r} \left(\frac{\sigma_r}{\bar{\sigma}} \right) d\bar{\epsilon} = C \quad (5)$$

여기서, σ_r 는 최대인장응력, $\bar{\sigma}$ 는 유효응력, $\bar{\epsilon}$ 는 파괴시 변형률, C 는 재료상수이다. Bridgeman은 단축인장시험에 적용하기 위한 정수압 영향을 고려한 소성유동과 파괴에 대하여 조사하였다. 단축인장시험의 경우 파괴임계위치는 변형상태가 $\epsilon_1 = -2\epsilon_2 = -2\epsilon_3$ 이고, 벡킹이 일어나는 단면에서 좌우 대칭축에서 생기기 때문에 σ_r 는 유효응력과 벡킹부의 반지름 방향응력(σ_r)의 합으로 주어진다^(14,15).

$$\sigma_r = \bar{\sigma} + \sigma_r \quad (6)$$

연성파괴기준식을 유한요소해석에서 사용하기 위해서 식 (5)는 충분 개념으로 다음과 같이 근사화된다.

$$\int_0^{\epsilon_r} \left(\frac{\sigma_r}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \right) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sigma_r}{\bar{\sigma}} \Delta \bar{\epsilon}_i \right) = C \quad (7)$$

여기서, n은 스텝 수, $\sigma_{r(i)}$ 는 변형과 변형사이에 최대인장응력의 평균값이고, $\bar{\sigma}$ 는 단축인장에 대한 Von Mises 항복식을 이용하여 초기항복응력 σ_0 로

근사하였고, $\Delta\bar{\epsilon}_i$ 는 $\bar{\epsilon}_i - \bar{\epsilon}_{i-1}$ 이다. 식 (7)은 재료의 특정한 요소영역에 대하여 각 요소의 적분점에서 계산되고, $\sigma_{T(i)}$ 가 압축응력을 갖게될 때에는 영(0)의 값으로 대체한다. 또한 경로에 따른 적분값의 오차를 줄이기 위하여 임의의 변형과 변형사이에 최대인장응력의 평균값을 사용하였고, 변형의 전 공정동안 식 (7)의 값은 누적되고, 이와 같이 누적된 값, C 가 단축인장시험으로 구한 값을 초과했을 때 연성파괴가 일어나는 것으로 판단하였다.

3. 실험 및 계산방법

3.1 고온인장시험

고온인장시편은 연속주조에 의해 얻어진 연속주조바로부터 연주방향의 시편을 채취하였다. 실험에 사용한 동의 조성은 Table 1에 있다. 동의 연속주조 및 1차 형상압연공정에서 실제 공정온도가 900~920°C로 유지되는 것을 고려하기 위하여 인장시험은 900°C에서, 초기변형속도는 10mm/min로 행하였다. 고온인장시험 결과로부터 얻어진 고온물성치를 Table 2에 나타내었다.

3.2 계산방법

계산에서 사용한 요소는 8절점 요소이고, 900°C에서 인장시험으로 얻어진 동의 고온물성치를 사용하였다. 재료와 압연률 사이의 마찰계수는 0.3으로, 압연률은 탄성체로 가정하여 유한요소법으로 계산하였다. Fig. 1은 압연률과 주조바의 형상을 보여주고 있으며, Table 3은 계산에 사용한 각종 조건의 치수를 보여주고 있다. 연속주조바의 초기 길이는 210 mm이고, 압연률의 각속도는 26 rpm이다. 형상압연공정의 초기요소당을 Fig. 2에 나타내었다. 형상의 대칭성을 고려하여 1/2계만 선택하였고, 계산에 사용된 요소수는 2322개, 절점수는 3240개였다.

유한요소해석은 형상압연공정의 압하율과 압연률의 기울기에 대하여 행하여졌다. 압하율이 30.7%, 25.4%, 20.9% 및 16.6%일 경우에 대하여 압연률의 기울기를 2.64°로 고정하여 계산하였다. 또한 압연률 기울기가 연속주조바의 기울기와 평행할 경우 6°, 압연률의 기울기가 수직할 경우 0°, 이 둘의 중간정도의 기울기인 2.64°에 대하여 압하율을 16.6%로 고정하여 계산하였다. 계산된 결과로부터

Table 1 Chemical composition of tough pitch copper.(unit ; ppm)

Cu	O	Pb	Zn	Sn	Fe	Ni	Zn	Ag	As	Se	Te	Cr	Bi
Bal.	244	443	40	68	19	93	40	72	4.2	8.1	3.1	2.0	1.7

Table 2 Mechanical properties of tough pitch copper at 900°C.

Yield strength(MPa)	Young modulus(GPa)	Hardening modulus(MPa)	Poisson's ratio
10	75	100	0.33

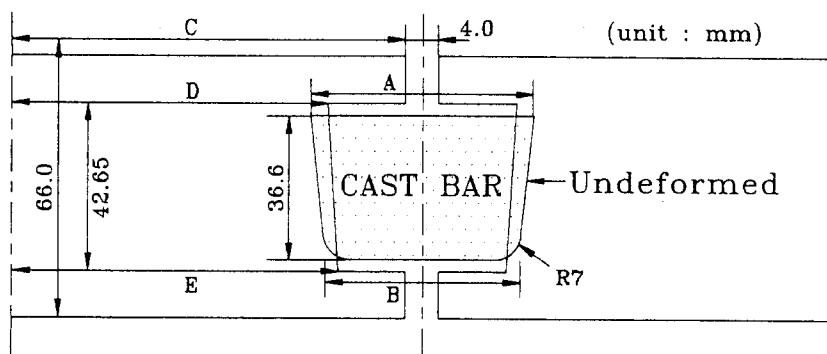
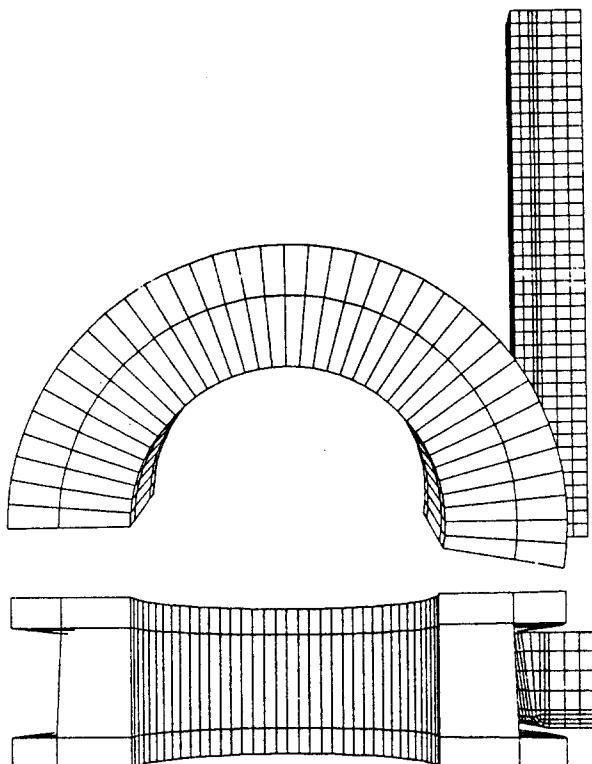


Fig. 1 Schematic diagram of cast bar and shape roller

Table 3 Dimensions of cast bar and roller.

Reductionratio (%) *	Roll taper (°) **	Cast bar		Roller geometry		
		A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)
		upper	lower	outer	inner upper	inner lower
30.7	2.64	57.0	49.3	108.0	90.578	88.615
25.4	2.64				89.163	87.200
20.9	2.64				87.963	86.000
16.6	2.64				86.807	84.844
16.6	6.00				88.068	83.582
16.6	0.00				85.825	85.825

$$* : \text{Reduction ratio (\%)} = \frac{(A+B)/2 - (2C-D-E)}{(A+B)/2} \times 100, \quad ** : \text{Roll taper (°)} = \tan^{-1}\left(\frac{D-E}{42.65}\right)$$

**Fig. 2** Initial FEM mesh for analysis

연성파괴가 일어날 가능성을 예측하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 수정된 Cockcroft-Latham 재료상수의 결정 고온인장시험으로 얻어진 유동곡선으로부터 수정

된 Cockcroft-Latham식의 재료상수 C의 값을 구하기 위해 인장시험의 넥킹영역에서 발생하는 3축 응력상태를 Bridgman 방법으로 보정하여 계산하였다^[14]. Fig. 3은 Bridgman방법에 의해 얻어진 유효응력, 평균응력 및 원주방향응력과 실험으로 얻어진 유효응력을 나타내었다. 수정된 Cockcroft-

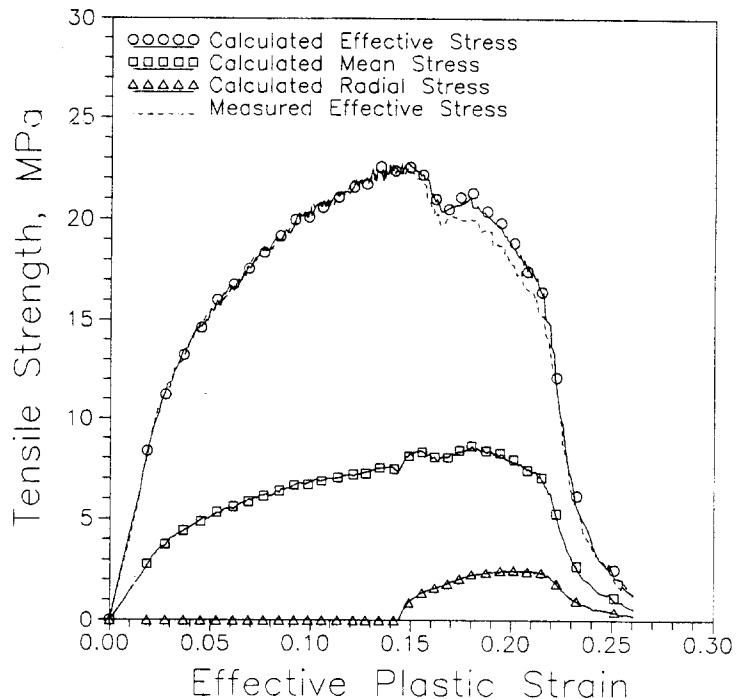


Fig. 3 Calculation of the changing stresses at the centre of the neck of a copper tensile specimen, using Bridgman's method

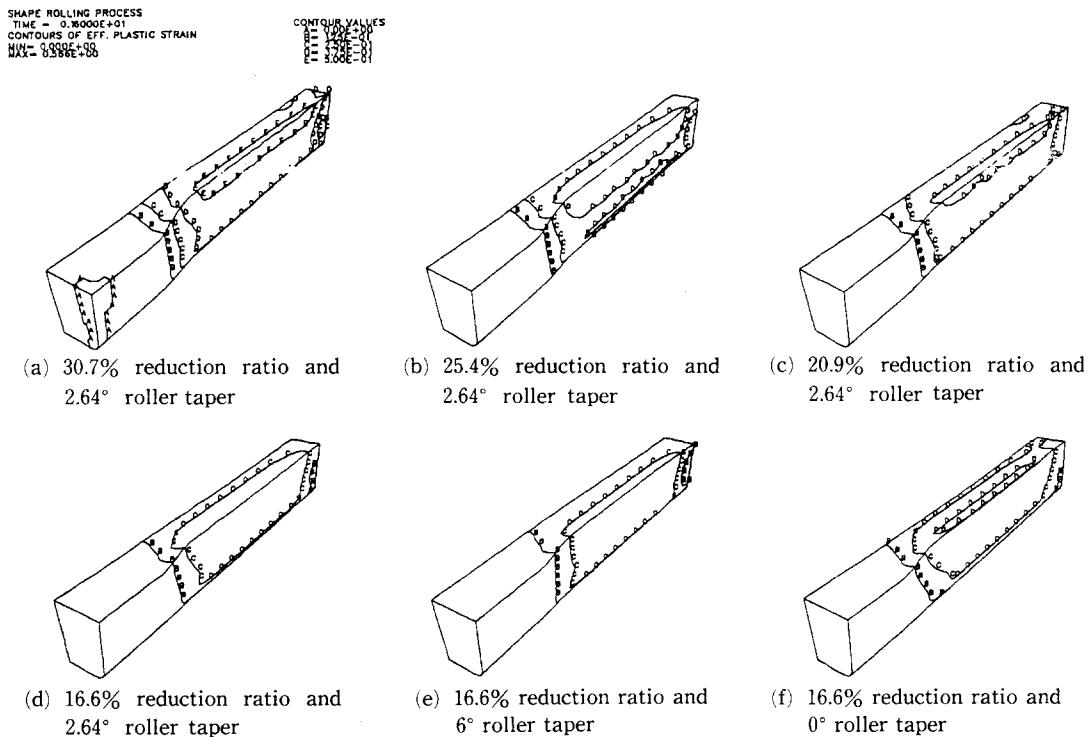


Fig. 4 Distributions of effective plastic strain as a function of reduction ratio and roller taper

- (4) N. Kim, S. M. Lee, W. Shin and R. Shrivastri, ~351.
- (5) J. G. Lenard and M. Pietrzak, 1989, "The predictive capabilities of a thermal model of flat rolling", *Int. J. Plasticity*, Vol. 114, pp. 329~335.
- (6) P. Xim, T. Aizawa and J. Kihara, 1991, "Rolling predictive capabilities of square-to-oval single pass evaluation for hot shape rolling processes", *J. of Materials processing Technology*, Vol. 27, pp. 163~178.
- (7) J. G. Lenard, 1993, *Effect of hole size on ductility of materials*, Vol. 2, No. 3(4), pp. 65~72.
- (8) F. A. McCormick, 1968, "A criterion for ductile fracture by the growth of hole", *J. Appl. Mech.*, Vol. 35, pp. 363~371.
- (9) M. G. Cockcroft and D. J. Latham, 1966, "A simple criterion of fracture for ductile metals", *Report No. 240*.
- (10) M. G. Cockcroft and D. J. Latham, 1968, "Ductility and the workability of metals", *J. Inst. Metals*, Vol. 96, pp. 33~39.
- (11) S. I. Oh, C. C. Chen and S. Kobayashi, 1979, "Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing", *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, Vol. 101, pp. 36~44.
- (12) J. H. Kim, J. H. Kim, J. H. Kim, 1994, *한국학술원*, No. 2, pp. 167~177.
- (13) K. J. Bathe, 1982, "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Prentice Hall, Engl.
- (14) P. W. Bridgeman, 1964, "Studies in Large Plastic Flow and Fracture", Harvard University Press, Cambridge, Mass., pp. 51~57.
- (15) P. F. Thomason, 1990, "Ductile Fracture of Metals", Pergamon Press, University of Salford, UK, pp. 136~143.

- (1) K. Mori and K. Otsuka, 1990, "Finite element simulation of three-dimensional deformation in shape rolling", *Int. J. Numerical Methods in Eng.*, Vol. 30, pp. 1431~1440.
- (2) J. J. Park and S. I. Oh, 1990, "Application of three-dimensional finite element analysis to shape rolling process", *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, Vol. 112, pp. 36~46.
- (3) J. H. Kim, J. H. Kim, 1990, *한국학술원*, pp. 347~351.

参考文献

이번 호에 실린 논문은 저작권법에 의해 보호되는 저작물입니다.

주 71

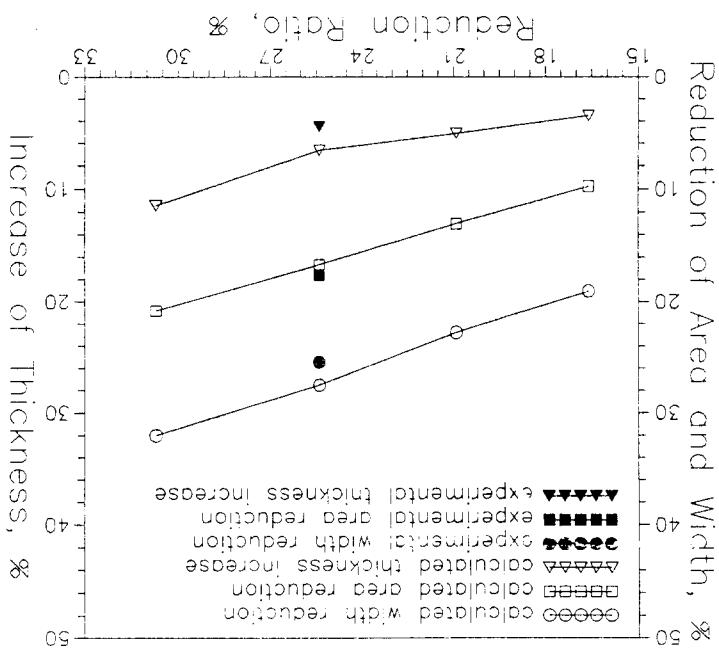
본 주제는 최근 몇 년간 학제적 접근으로 인해 학제적인 특성을 갖는 주제로, 특히 재료학과 기계공학, 전기전자공학, 화학공학, 물리학 등 다양한 분야에서 활발히 연구되고 있다. 특히 재료학과 기계공학의 융합으로, 재료학의 발달과 기계공학의 고도화가 함께 이루어지고 있다. 특히 재료학과 기계공학의 융합으로, 재료학의 발달과 기계공학의 고도화가 함께 이루어지고 있다.

5. 결 롤

본 주제는 최근 몇 년간 학제적 접근으로 인해 학제적인 특성을 갖는 주제로, 특히 재료학과 기계공학의 융합으로, 재료학의 발달과 기계공학의 고도화가 함께 이루어지고 있다. 특히 재료학과 기계공학의 융합으로, 재료학의 발달과 기계공학의 고도화가 함께 이루어지고 있다.

a function of reduction ratio in 2.64° roller taper

Fig. 9 Calculated and measured reduction ratio of area, width and increase ratio of thickness as

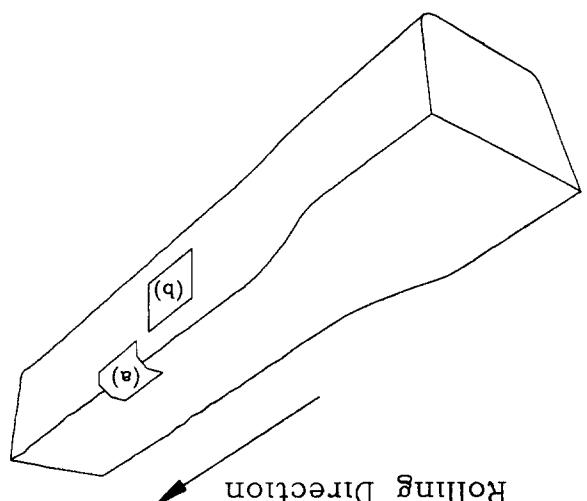
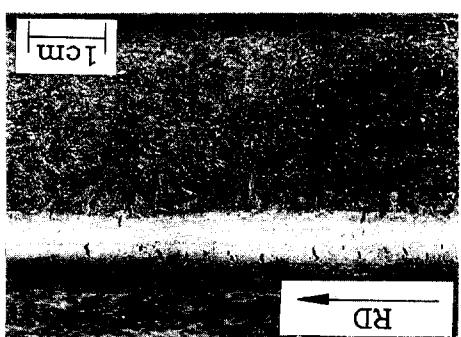


and 2.64° roller taper

Fig. 8 Optical micrographs of ductile fracture of shape rolled material in 25.4% reduction ratio
(a) Ductile fracture of side middle



(a) Ductile fracture of side top



Rolling Direction

Fig. 7 Variation of Modified Latham's Value C at various roller taper and 16.6% reduction ratio

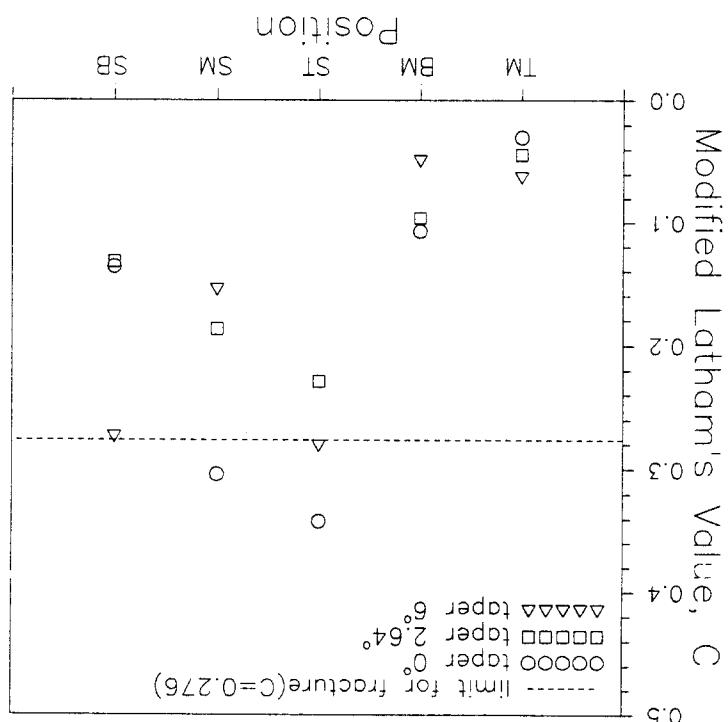


Fig. 6 Variation of Modified Latham's Value C at various reduction ratio and 2.64° roller taper

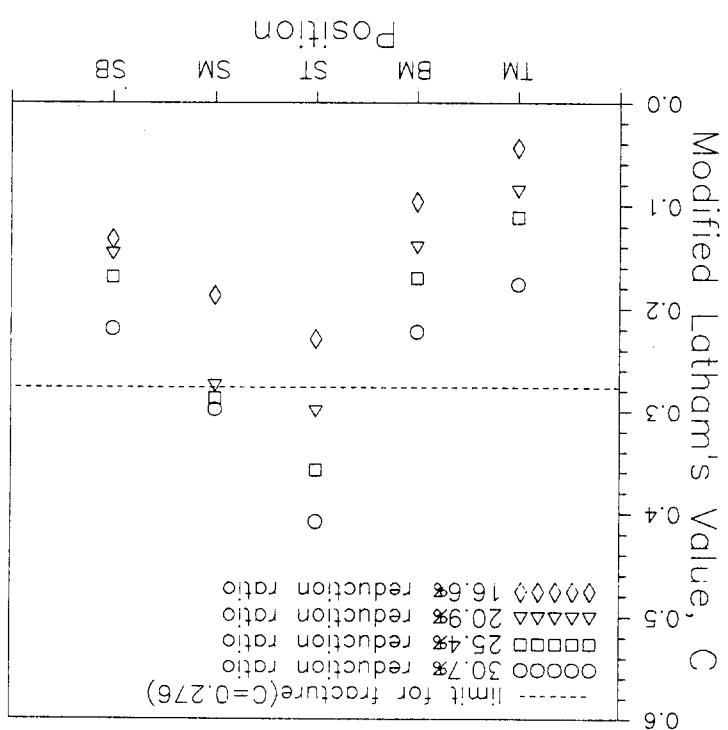


Fig. 5 Geometry of undeformed and deformed state at various reduction ratio and roller taper

(a) 30.7% reduction ratio and 2.64° roller taper
(b) 25.4% reduction ratio and 2.64° roller taper
(c) 20.9% reduction ratio and 2.64° roller taper
(d) 16.6% reduction ratio and 2.64° roller taper
(e) 16.6% reduction ratio and 6° roller taper
(f) 16.6% reduction ratio and 0° roller taper

Fig. 8은 축복률이 25.4%인 축복률의 확률분포이다. Fig. 9는 축복률의 확률분포이다. Fig. 6과Fig. 7은 축복률의 확률분포이다. Fig. 9는 축복률의 확률분포이다.

Fig. 6은 출판률이 70%인 C를 제작한 후 출판률이 30.7%인 ST와 출판률이 25.4%인 SM을 제작한 후 출판률이 2.64%인 C를 제작한 결과이다. 출판률이 2.64%인 C는 출판률이 30.7%인 ST와 출판률이 25.4%인 SM보다 출판률이 낮았지만 출판률이 70%인 C는 출판률이 30.7%인 ST와 출판률이 25.4%인 SM보다 출판률이 높았다. 출판률이 70%인 C는 출판률이 30.7%인 ST와 출판률이 25.4%인 SM보다 출판률이 높았지만 출판률이 2.64%인 C는 출판률이 30.7%인 ST와 출판률이 25.4%인 SM보다 출판률이 낮았다. 출판률이 70%인 C는 출판률이 30.7%인 ST와 출판률이 25.4%인 SM보다 출판률이 높았지만 출판률이 2.64%인 C는 출판률이 30.7%인 ST와 출판률이 25.4%인 SM보다 출판률이 낮았다. 출판률이 70%인 C는 출판률이 30.7%인 ST와 출판률이 25.4%인 SM보다 출판률이 높았지만 출판률이 2.64%인 C는 출판률이 30.7%인 ST와 출판률이 25.4%인 SM보다 출판률이 낮았다.

卷之三

4.2. 음악을 위한 디렉션

Latham's 4H 磷酸半叶酸 0.276 克/毫升。