

< 論 文 >

강소성 유한요소법에 의한 중실 원통봉 업세팅의 변형 특성 해석

백 남 주* · 최 재 찬** · 윤 동 진***

(1985년 7월 25일 접수)

Rigid-Plastic Finite Element Analysis for the Characteristics of Deformation in Upsetting Solid Cylinders

N. J. Paik, J. C. Choi and D. J. Yoon

Key Words: Rigid-Plastic Material(강·소성재료), Finite Element Analysis(유한요소해석),
Upsetting(업세팅), Solid Cylinders(中實棒)

Abstract

In this study the rigid-plastic finite element method is used in order to study the deformation characteristics of solid cylinder upsetting.

The effects of friction and aspect ratios on the effective strain distribution, axial stresses at the die-material interface, radial displacements, strain components, grid distortion on the meridional cross-section and gradual changes of outer profile are studied analyzed and compared with the experiments for commercially pure aluminum and α -brass.

The agreement between numerical (or theoretical) and experimental results is shown to be acceptable for the engineering purpose.

기 호 설 명

V : 물체의 총 체적
 S : 물체의 총 표면적
 S_F, S_v : 각각 힘과 속도가 미리 규정된 표면
 S_c : 마찰응력 f 가 작용하는 표면
 f : 마찰응력
 σ_{ij} : 실제 응력텐서
 v : 실제속도장
 \underline{u}^p : 금형의 속도
 $\dot{\epsilon}_{ij}$: 변형률 속도텐서
 $\bar{\sigma}$: 유효응력
 $\dot{\bar{\epsilon}}$: 유효변형률 속도

F_r : 전인력
 n_i : 의향 단위법선 n 의 방향여현
 Y_0 : 초기압축 항복응력
 $\dot{\epsilon}_0$: 체적변형률 속도
 V^* : 임의의 가용속도장
 \underline{t} : 금형과 가공물 접촉면에 따른 기본 단위벡터
 λ : Lagrange 승수
 η : 감속계수, $0 < \eta \leq 1$
 m : 마찰계수, $0 \leq m \leq 1$
 K : 전단항복응력
 N : 총 절점수
 p : 절점당 미지수의 수
 \bar{w}_i : 절점변수(변위)
 H_0 : 시편의 초기높이
 D_0 : 시편의 초기직경

* 정회원, 부산대학교 공과대학 생산기계공학과

** 정회원, 부산대학교 공과대학 기계설계학과

*** 부산대학교 대학원

- H_0/D_0 : 형상비
- $\epsilon_r, \epsilon_\theta, \epsilon_z$: 원통좌표계에서의 반경 및 원주 그리고 길이 방향의 변형률
- σ_m : 평균응력
- σ_{ii} : 주응력 성분
- $\Delta \bar{w}$: 변위증분 벡터
- n : 수렴을 하기 위한 반복횟수
- $*$: 체적일정의 법칙과 속도경계조건을 만족하는 임의의 가용속도장에 사용된다.
- \sim : 벡터성분을 나타낸다

1. 서 론

본 연구에서 행해지는 평행한 두 금형 사이의 원형 기둥의 압축은 아주 간단한 공정이다. 특히 짧은 봉재의 압축시험에서는 불안정(instability)이 없기때문에 큰 변형이 요구되는 재료에 대한 응력-변형 성질을 알기 위해 유용하게 적용된다. 그러나 금형과 시편 접촉면 사이에 마찰이 존재할때는 이 간단한 공정은 복잡한 변형으로 바뀌게되며 압축 응력분포는 일정하지 않게 된다. 또한 배불림 현상(barrelling)이나 초기 자유 표면이 압축공정동안, 금형 표면사이로 들어가게되는 접철현상(folding)이 존재하게 된다.

이 원형기둥의 압축해석에 대해서는 이전 연구에서 여러가지 해석방법으로 행하여져 왔으나 70년대 초반 Nagamatsu등⁽¹⁾에 의해 평면 변형 업세팅 및 마찰 연구 해석으로 F.E.M.이 적용되어졌고 좀더 자세한 연구가 Lee 와 Kobayashi⁽²⁾에 의해 F.E.M.이 사용되었다. 특히 탄성영역의 비편함을 덜어버린 강소성 유한요소법(matrix method)이 Lee 와 Kobayashi^(3,4)에 의해 적용됨으로서 큰 변형에의 해석이 가능하게 되었다. 즉 탄소성 유한요소법의 장점을 그대로 유지하면서 재료의 강소성 운동을 가정함으로써 큰 증분의 변형을 공업적으로 유용하게 해석하고 또한 계산 시간도 단축시키게 되었다.

Shah⁽⁵⁾에 의해서는 원형 장주, 즉 높이-직경비(H_0/D_0)가 2.0 과 2.5에 대해 강소성 유한요소해석이 행해졌고 Lee 와 Kobayashi에 의해서는 낮은 높이-직경비에 대해 여러가지 변형 특성과 가공성까지도 조사되어졌다.

본 연구에서는 Chen, Kobayashi⁽⁶⁾에 의한 강소성 유한요소법 프로그램을 이용하여 마찰조건^(7,8) 및 형상비(H_0/D_0)가 0.75, 1.0, 1.5에 따른 금형 접촉면상의 응력분포 및 반경방향 증분량 그리고 변형률 분포 등

을 고찰하고 실제로 알루미늄과 α -황동의 두 종류 재료를 사용하여 이론과 동일한 마찰조건과 형상비에 대해 실험함으로써 그 변형 특성을 F.E.M. 결과와도 비교 고찰하였다. 또한 시편 실험에서 파괴시까지 실험하여 그 형상도 살펴보았으며 이전 연구와도 비교하여 보았다.

2. 이론 해석

2.1 기초 이론

여기서 전제되는 물체(body)는 Von Mises 항복 조건과 그에따른 유동 법칙(flow rule)을 만족하는 강소성 재료로 구성되며 체적력은 없다고 가정한다.

물체의 부피 V 는 표면 S_F 한 부분위의 견인력 F 와 표면 S_u 위의 속도 V 로 이루어진다. 그리고 마찰응력 f 가 작용하는 나머지 표면을 S_c 로 하며 금형의 접촉 표면 속도는 u^p 로 주어진다. 이때 실응력 σ_{ij} 와 속도장 V 는 응력의 평형조건, 속도와 변형률속도의 적합조건(Compatibility) Von Mises의 항복조건과 이와 관련된 유동법칙을 만족시키고, 응력과 속도의 경계조건도 만족한다.

이제 V^* 를 체적 일정의 법칙 $\epsilon_v^*=0$ 와 미리 정해진 속도 경계조건을 만족하는 가용 속도장이라 하면 가상일의 원리는 다음과 같다.

$$\int_V \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^* dV = \int_{S_F} F \cdot V^* dS + \int_{S_c} f \cdot (V_R^* + u^p) dS + \int_{S_u} (\sigma_{ij} n_j) V_i dS \quad (1)$$

또한 마찰응력 f 가 전단 항복응력 K 와 일정한 비율을 유지한다고 가정하는 경우 f 는 아래와 같다.

$$f(V_R) = -mK \frac{V_R}{|V_R|} \quad (0 \leq m \leq 1) \quad (2)$$

여기서 식(1)과 유동법칙을 종합하여 식(3)과 같은 범함수 Φ 를 정의한다⁽⁶⁾.

$$\Phi = \int_V \bar{\sigma}_{ij}^* \dot{\epsilon}_{ij}^* dV - \int_{S_F} F \cdot V^* dS - \int_{S_c} f(V_R)^* \cdot V_R^* dS \quad (3)$$

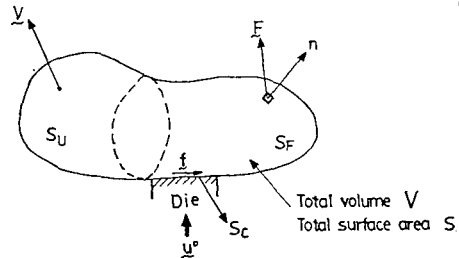


Fig. 1 A body of total volume V , bounded by a surface of total area S

이 범함수 Φ 가 유한요소의 공식으로 사용되며 실제 해는 이 범함수 Φ 의 최소값으로 주어진다.

이제까지 언급한 최소원리는 단지 전체 물체가 소성적으로 변형하고 있고 강성 영역이나 무부하가 변형과정 동안 존재하지 않는다는 조건하에 적용된다. 그러나 실제 문제에 있어서는 이들이 포함되는 경우가 발생한다. 만약 이들 부분이 제어체적내에 포함된다면 유효 변형률이 영(零)으로 근접할때 이 미확정값때문에 범함수 Φ 의 미분이 유일하게 결정될 수 없다. 그러므로 여기서는 이를 변형하여 수정된 범함수를 구하면

$$\Phi' = \int_V \frac{1}{2} \bar{\sigma}^* \dot{\epsilon}^* dV - \int_{S_p} \underline{F} \cdot \underline{V}^* dS - \int_{S_c} f(V_R^*) \cdot \underline{V}_R^* dS, \quad (\dot{\epsilon} < 10^{-3}) \quad (4)$$

이 된다.

그리고 가용 속도장 \underline{V}^* 의 비 압축성 구속조건을 제거하기 위하여 Lagrange 승수를 도입함으로써 최소원리에서 정류치 문제로 바뀌게 된다. 즉 수정된 범함수 Φ' 은

$$\Phi' = \int_V \bar{\sigma} \dot{\epsilon} dV + \int_V \lambda \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_p} \underline{F} \cdot \underline{u} dS - \int_{S_c} f(V_R) \cdot \underline{V}_R dS \quad (5)$$

여기서의 속도장 \underline{u} 는 속도 경계조건은 만족하나 반드시 비 압축성 조건을 만족하지는 않는 임의의 속도장이며 이 속도가 실제 속도가 될 때 Lagrange 승수의 값은 아래와 같이 표시된다.

$$\lambda = \sigma_m = \frac{1}{3} \sigma_{ii} \quad (6)$$

2.2 수렴 조건

새로 얻어진 해는 감속계수 η 에 의해 다음식 $\underline{W}_k(n) = \underline{W}_k(n-1) + \eta \Delta \underline{W}_k(n)$ 으로 조절되므로 수렴 기준은 빠른 수렴을 위해 감속계수의 적절한 값을 결정할 수 있어야 한다. 그래야만 계산 시간도 단축되기 때문이다. 그러나 본 연구에서는 다음 수렴 조건을 사용하며 감속계수는 일정하다고 해놓고 수렴기준은 n 번째 반복(iteration)에서의 error norm $\|\Delta \underline{W}\| / \|\underline{W}\|$ 이 앞의 반복에서의 것보다 작도록 했다.

여기서 $\|\underline{W}\| = \sqrt{\sum_{i=1}^{N \times P} \underline{W}_i^2}$, N 은 총절점수이고 P 는 각 절점에 대한 미지수의 갯수이다.

본 연구에서는 이 수렴치가 8×10^{-5} 이 될때 수렴된다고 보았다. 또한 초기 추측값이 실제것과 많이 틀릴 경우 위 조건은 발산을 막는데 매우 도움이 되나 한번 얻어진 반복해가 실제해와 근사할때는 다음식이 사용되어 효과적인 감속계수값을 선택할 수 있는 잇점으로서 더 빠른 수렴이 행해진다.

$$\text{즉, } g = \sqrt{\sum_{i=1}^{N \times P} \left[\frac{\partial \Phi}{\partial \underline{W}_i} \right]^2}$$

2.3 계산 조건

여기서 채택한 가공 경화식 $\bar{\sigma} = Y_0 \left(1 + \frac{\bar{\epsilon}}{b}\right)^a$ 의 계수 a , b 값을 압축 시험에서 얻어진 응력-변형선도에서 그 값들을 최소자승법을 이용해서 위식을 만족하는 a, b 값을 구하였다. 그 결과는 아래 Table에 나타내었다.

Table

Material	Work-hardening property	Initial yield stress
Aluminum	$\bar{\sigma} / Y_0 = \left(1 + \frac{\bar{\epsilon}}{0.006}\right)^{0.22}$	10.86 (kg/mm ²)
α -Brass	$\bar{\sigma} / Y_0 = \left(1 + \frac{\bar{\epsilon}}{0.084}\right)^{0.682}$	17.41 (kg/mm ²)

사용된 요소 분할도의 형상비는 각 재료에 대해 $H_0/D_0 = 3/4, 1/1, 3/2$ 의 세가지로 하고 또 $m = 0.06, 0.2, 0.4$ 의 세가지 마찰조건을 주어 수행하였다.

총 요소수는 각 형상비에 대해 모두 81개로 잡았으며 총 절점수는 모두 100개이다. 그리고 금형 접촉면과 자유 표면쪽의 메시(mesh)를 좀더 좁은 간격으로 그리는 형태를 취하였다(Fig. 2 참조).

초기 속도장은 균일한 속도 분포의 경우를 넣어 계산하였으며 여기서 경계조건으로서 금형과의 접촉면상의 절점의 z -방향 속도는 금형 속도와 같게 잡았으며 중앙 축상의 절점은 r -방향 속도가 영(零)이며 시편 가로 방향 중앙부는 z -방향 속도가 영(零)이 되게 하고 또 자유 표면은 힘이 작용하지 않는 부분으로 r, z 방향 힘이 모두 영(零)이 되게 입력하였다.

아래에는 형상비 $H_0/D_0 = 3/4$ 때의 전 물체의 1/4인 요소 분할도를 나타내었다.

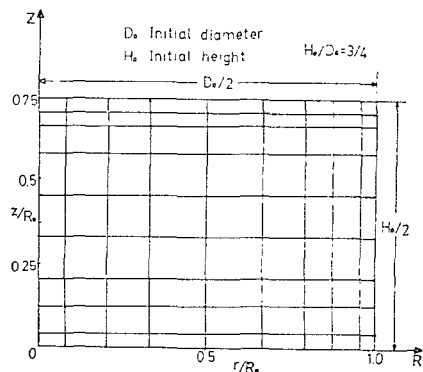


Fig. 2 Mesh system used for program

을 검토하였다.

3. 실험

3.1 실험장치 및 시편

실험은 AC-S/200/300 Type 200-ton Hydraulic Compression Testing Machine을 사용하였다.

시편의 변형 증분을 관찰하기 위해 크로스헤드(cross head)와 아래 금형 사이에 마그네틱 다이얼 게이지를 설치하였고 P형 pendulum dynamometer에 설치된 load 밸브를 사용하여 속도를 조절해서 압축속도 1.5 mm/min로 하였다.

금형은 표면거칠기 10μ 정도의 평균형으로써 SNC M8 강을 로크웰경도 $HRC 40\sim 45$ 로 담금질한 것을 사용하였다.

시편은 산업용 순수 알루미늄과 α -황동의 두 종류를 형상비 (H_0/D_0)가 3/4, 1/1, 3/2의 비율로 직경을 일정하게 30mm로 두고 높이를 바꾸었다. 선반 가공한 시편은 알루미늄은 $340^\circ C$ 에서 α -황동은 $550^\circ C$ 에서 모두 1시간 30분씩 풀림 열처리를 한뒤 실험을 하였다. 그리고 시편의 중앙수평면 반경부분 자유 표면의 변형을 측정하기 위해 90° 방향으로 각각 중앙수평면에 $1\times 1mm^2$ 의 사각형 그리드(grid)를 그려 넣었다.

3.2 실험 방법

앞에서 준비된 시편을 형상비 각각에 대해 세가지의 마찰상태 즉 건마찰 상태(dry), 그리이스(grease)윤활 테프론 시이트(teflon sheet)를 사용한 것으로 나누어 실험하였다.

측정 방법은 압축 증분 5%마다 시편을 빼내어 중앙수평면에 그은 격자의 변형과 시편 높이 그리고 금형 접촉면과 중앙수평면에서의 직경을 측정하고 실험 전 반에 걸쳐 균일한 윤활을 주기위해 또다시 같은 조건으로 매 단계마다 윤활을 해주었다. 건마찰상태는 매 단계마다 아세톤으로 시편과 금형을 닦아주어 건조 상태를 유지하였다.

측정기기는 시편의 중앙수평면 부근의 사각형 격자의 변형을 5/1000mm 까지 잴 수있는 공구현미경과 높이와 직경측정의 마이크로미터와 버니어 캘리퍼스 등이 사용되어 비교적 정확히 측정하였다.

본 실험에서 구하고자하는 원주방향과 축 방향 변형은 초기 격자의 폭과 높이가 각각 w_0, h_0 이고 변형후의 격자 길이가 각각 w, h 이라면 $\epsilon_\theta = l_n(w/w_0)$, $\epsilon_z = l_n(h/h_0)$ 의 식에 의해 각각 구했다. 여기서 ϵ_θ 값은 $\epsilon_\theta = l_n(D/D_0)$ (D_0 : 초기 중앙수평면직경)의 식으로 ϵ_θ 의 값

4. 결과 및 고찰

Fig. 3, 4에서 보는 것처럼 실험에 의한 건마찰상태 그리이스윤활, 테프론시이트 윤활상태와 F.E.M.결과 의 $n=0.4, 0.2, 0.06$ 일때의 축방향 변형 ϵ_z 에 대한 원주 방향 변형 ϵ_θ 를 비교하여 나타내었다. 두 재료 모두 잘 일치하는 편이나 압축 증분이 클수록 황동은 알루미늄에 비해 잘 맞지 않음을 볼 수가 있다. 여기서 나타나는 실험치의 마지막 값은 파괴될 때의 값으로써 본 실험 재료에 대해 Lee와 Kuhn⁽⁹⁾에 의한 파괴 기준식⁽¹⁰⁾을 만들어 비교해 본 결과 이 선에 도달하면 파괴가 일어남을 잘 볼 수가 있었다. 그리고 취성이 있는 황동보다는 알루미늄이 많은 압축 증분이 가능하며 이론치에의 비교에서도 큰 증분에서는 알루미늄이 잘 일치함을 볼 수가 있다.

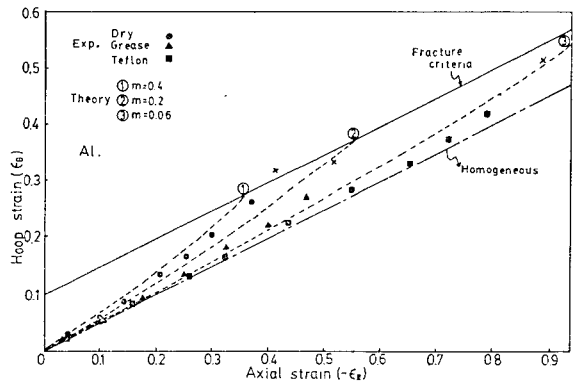


Fig. 3 Comparison of experimental and theoretical strain paths of a point on the meridional cross-section for Al

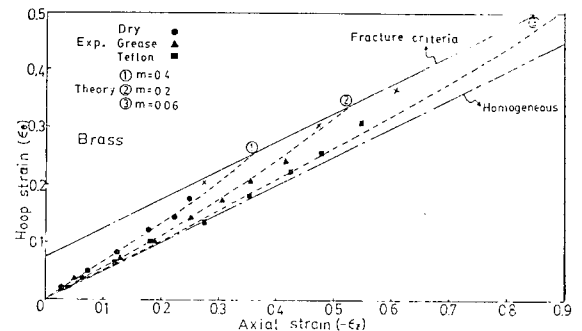


Fig. 4 Comparison of experimental and theoretical strain paths of a point on the meridional cross-section for Brass

Fig. 5에서는 알루미늄시편의 배불린 중앙수평면상에서의 높이 감소율에 대한 변형 $\epsilon_r, \epsilon_z, \epsilon_\theta$ 의 값을 실험치와 비교하여 나타내었는데 여기서의 점선은 균일 변

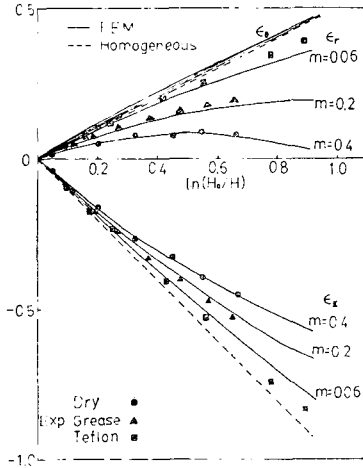


Fig. 5 Variation of strains on the equatorial free surface for Al

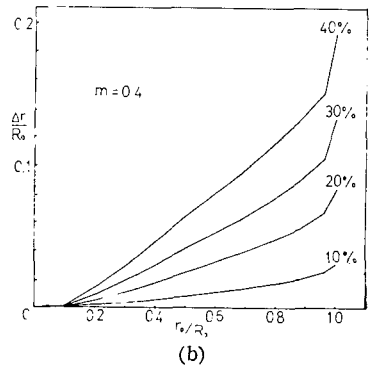
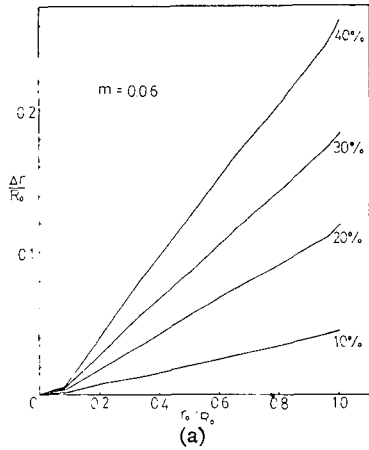


Fig. 6 Radial displacement distributions at the interface as functions of initial radial position for Al

형의 경우를 나타내며 그 편차량은 마찰이 커질수록 배부름 현상(barrelling)에 의해 커지며, 윤활이 좋을수록 균일변형과 거의 일치해짐을 알 수가 있다. 또한 마찰이 커질 경우 ϵ_r 의 값은 균일변형에 비하여 감소하는 값을 가지게 되며, 이 역시 실험과도 잘 일치함을 볼 수 있다.

Fig. 6(a), (b)에서는 금형 접촉면 상에서의 반경 방향 변위를 초기 반경값에 대한 높이 감소율에 대해 그

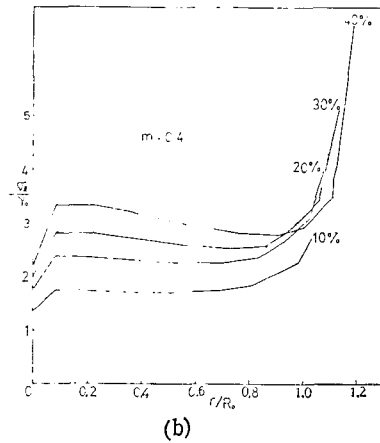
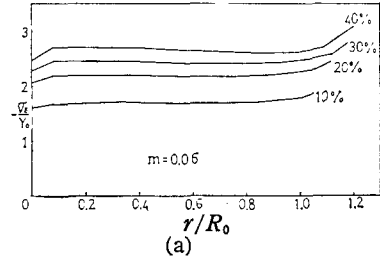


Fig. 7 Pressure distribution at the die interface for Al

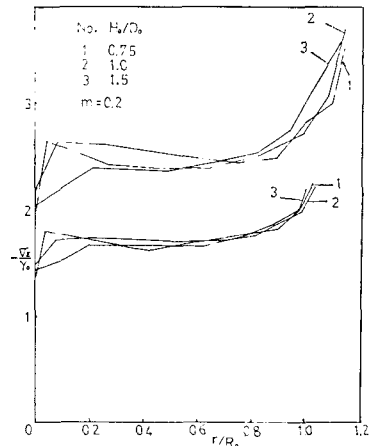


Fig. 8 Pressure distribution on the die interface for height-diameter ratios of Al

려보았다. 눈에 뜨이는 현상은 초기 반경의 약 8%까지는 반경 변화가 거의 없었으며 이것은 업셋팅에서 발생하는 고착영역(sticking zone)이 존재함을 알 수 있었다. 그리고 마찰이 클 때보다 적을 때 그 변위 증분량은 매우 커짐을 알 수 있고 또한 큰 마찰일때는 가장자리 부근에서 급격한 변위를 볼 수 있다.

역시 금형 접촉면상에서의 수직응력을 압축률과 형상비에 대해 Fig. 7(a), (b)와 Fig. 8에 나타내었는데 마찰이 적은 경우는 그 응력상태가 일정하게 분포되어 있음에 반해 마찰이 큰 경우는 가장자리 부근에서의 응력집중과 중앙으로 갈수록 차차 증가하는 현상을 보여주고 있다. 그러나 참고문헌(4, 5)에서의 형상비에 대한 수직응력의 차이와는 달리 본 연구에서의 형상비 (H_0/D_0) 0.75, 1.0, 1.5에 대한 그 분포는 거의 변화 없이 서로 비슷한 형태로 분포되고 있음을 볼 수 있다. Fig. 9(a), (b)에서는 압축률에 대해 중앙배출된 표면상에서의 축방향 응력을 나타내었는데 압축이 진행됨에 따라 그 값이 커지다가 차차 작아져 마찰이 클 경우에는 그 값이 양의 값을 가지게되는 경향을 볼 수 있다. 이 사실은 Kobayashi의 연구⁽¹¹⁾에서 파괴 형상에 관한 고찰에서와 같이 잘 일치함을 보여준다. 즉 본 실험에서도 본 연구 마찰 상태에 대해서는 모두 45°전단 파괴가 일어났고 마찰이 큰 상태에서는 수직 파괴 현상의 모습이 조금 나타나는 것도 있었다. 이들의 모습과 변형 형상이 Fig. 10, 11에서 볼 수 있으며 이들은 균열이 발생될 때까지 압축한 시편들이다.

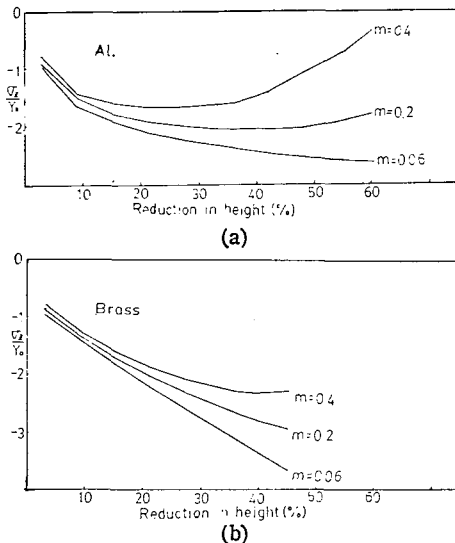


Fig. 9 Variations of the axial stress component on the equatorial surface as functions of reduction in height

마지막으로 Fig. 12와 13에서는 40% 압축에서의 격자 구조와 유효 변형률 분포를 그려 보았는데 그 분포는 대체로 표면 테두리 부근의 큰 변형과 반경 중심부근에서의 큰 변형이 나타났으며 중앙금형 접촉면 부근

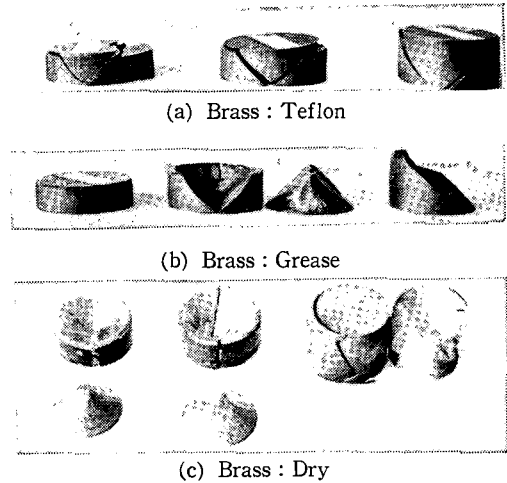


Fig. 10 Deformation shape of Brass at fracture H_0/D_0 (0.75—1.0—1.5)

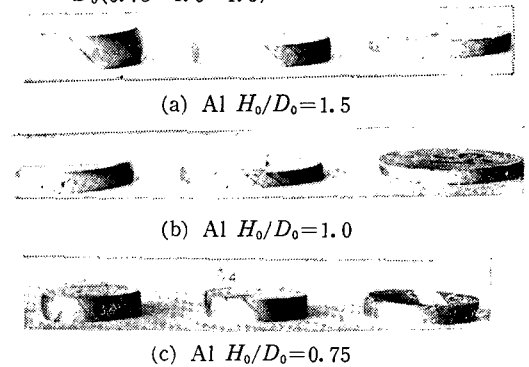


Fig. 11 Deformation shape of Al at fracture(Dry—Grease—Teflon)

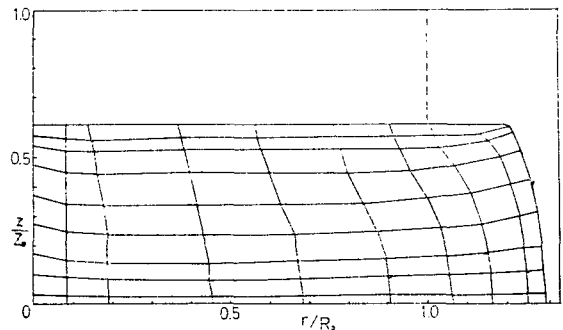


Fig. 12 Grid distortion at 40% reduction in height ($H_0/D_0=0.75$, Al, $m=0.4$)

엔 항상 적은값을 가지고 있었다. 그리고 여기서 접침 현상(folding)이 생기기 시작하는데 가장자리부근의 격자를 좀 더 자세하게 요소를 만들어 계산하면 일찍부터 접침 현상을 관찰할 수가 있을 것이다.

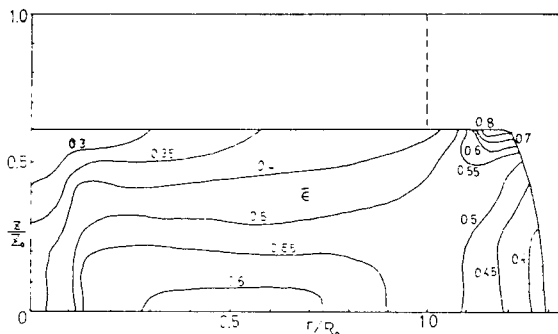


Fig. 13 Effective strain distribution at 40% reduction in height ($H_0/D_0=0.75$, Al, $m=0.4$)

5. 결 론

중실(中實) 원통형의 업세팅을 강소성 유한요소법으로 해석하였으며 실험에 의하여 알루미늄과 α -황동에 대하여 세가지 마찰조건과 세가지 형상비 즉 $H_0/D_0=0.75, 1.0, 1.5$ 에 따라 실험함으로써 그 결과와 이론치를 비교 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유한요소해가 중간 정도의 형상비 0.75~1.5에 대해서도 실험과 잘 일치함을 보이며 큰 변형에서는 황동보다 알루미늄이 이론치와의 비교값에서 그 차이가 더 작음을 알 수 있다.

(2) 본 연구에서 사용한 0.75~1.5 정도의 형상비에 대한 수직응력 분포는 거의 형상비에 영향을 받지 않았다.

(3) 금형 접촉면 가장자리의 응력집중 및 변형량 증가는 실험시 표면테두리에서의 균형 발생에 영향을 미침을 알 수 있다.

참 고 문 헌

(1) A. Nagamatsu, T. Murota, and T. Jimma, "On the Nonuniform Deformation of Material in Axially Symmetric Compression Caused by Friction", Bulletin of the JSME, Vol. 14, pp. 331~338, 1971

(2) C.H. Lee and S. Kobayashi, "Analysis of Axisymmetric Upsetting and Plane-Strain Side-Pressing of Solid Cylinder by F.E.M.", Trans. ASME, J of Engrg. for Ind., Vol. 93, pp.445~454, 1971

(3) C.H. Lee and S. Kobayashi, "Deformation Mechanics and Workability in Upsetting Solid Circular Cylinder", Proc. North. Amer. Metal-working Res. Conf., Hamilton, Canada, Vol. 1, pp. 185~204, May 1973

(4) C.H. Lee, S. Kobayashi, "New Solutions to Rigid-Plastic Deformation Problems using a Matrix Method", Trans. ASME. J. of Eng. for Ind, pp. 865~873, 1973

(5) S.N. Shah, "Numerical Analysis of Metal-Forming Processes", University of California, Berkeley, Ph. D. 1975

(6) C.C. Chen and S. Kobayashi, "Rigid Plastic Finite Element Analysis of Ring Compression", Applications of Numerical Methods to Forming Processes, ASME, Vol. 28, pp.163~174, 1978

(7) W. Schroeder and D.A. Webster, "Press-Forging Thin Sections: Effect of Friction, Area, and Thickness on Pressures Required", Trans of ASME, J. of Applied Mech., pp. 289~294, Sept. 1949

(8) A.T. Male and M.G. Cockroft, "A Method for the Determination of the Coefficient of Friction of Metals", Vol. 93, pp. 38~46, 1964~1965

(9) P.W. Lee and H.A. Kuhn, "Fracture in Metal Working Processes", Technical Report to American Iron and Steel Institute, April, 1972

(10) S.I. Oh and S. Kobayashi, "Workability of Aluminum Alloy 7075-T6 in Upsetting and Rolling", Trans. of ASME, J. of Engrg. for Ind, pp. 865~873, Aug. 1976

(11) S. Kobayashi, "Deformation Characteristics and Ductile Fracture of 1040 Steel in Simple Upsetting of Solid Cylinders and Rings", Trans. ASME, J. of Engrg. for Ind. Vol. 92, pp. 391~399, 1970