

알루미늄 합금 박판 스탬핑 공정의 단면 성형 해석

이광병*, 이승열**, 김영탁***

*한양대학교 대학원, **동부제강, ***한양대학교 정밀기계공학과

Sectional Forming Analysis of Stamping Processes of Aluminum Alloy Sheet Metals

K. B. Lee*, S. Y. Lee**, Y. T. Keum***

*Graduate School, Hanyang University

**Dongbu Steel Co.

***Dept. of Precision Mechanical Engineering, Hanyang University

ABSTRACT

Sectional analysis program for plane strain or axisymmetric geometry of aluminum alloy sheet metals was developed. For modeling the anomalous behavior of aluminum alloy, Barlat's strain rate potential and Hill's 1990 non-quadratic yield theory arranged under the plane stress assumption were employed. 2-D rigid-viscoplastic FEM formulation based on the bending-augmented membrane theory was derived, solving simultaneously force equilibrium as well as non-penetration condition. Isotropic hardening law was also assumed for yielding behavior. To verify the validity and availability of the developed program, 2-D stretch/draw forming process for plane strain geometry and cylindrical cup deep drawing process for axisymmetric geometry were simulated.

Key words : Sectional Analysis, Strain Rate Potential, Aluminum Alloy Sheet Metals

1. 서 론

최근 항공기나 자동차용 성형소재의 경량화 추세에 따라 수요가 점차 증가되고 있는 알루미늄 합금 박판은 비철금속의 이상거동(anomalous behavior) 현상^[1]으로 인하여 성형해석이 까다로운 것으로 알려져 있다. 따라서 비철금속의 이상거동을 수용할 수 있는

이방성 항복조건과 이 항복조건을 도입한 성형공정의 유한요소 해석이 중요한 연구과제가 되고 있다.

박판 성형 해석에서 가장 널리 이용되고 있는 평면 이방성 항복이론은 1948년에 Hill^[2]이 제안한 2차 이방성 항복조건으로, Mises의 항복조건식에 이방성을 나타내는 6개의 상수를 도입하여 일반화한 것이다. 그러나, Hill의 이론은 R값이 1보다 작은 금속에 대해서는 이론으로부터 예측되는 등이축 인장에서의 항복응력값이 실험에 의한 결과값보다 항상 낮게 나타나는 것으로 알려져 있다^[3]. Hill^[4]은 1979년에 판재의 수직이방성을 묘사하는 보다 일반적인 M차식 항복조건을 발표하였는데, 실험에 의해서 지수 M값을 결정하기 때문에 그 실험의 하중경로 주위에서는 실험결과와 잘 일치하는 것으로 알려져 있어 평면 등방성을 가정한 성형해석에서 많이 사용되고 있다.

최근 들어 비철금속의 이상거동을 보다 정확히 모델링하기 위하여 비2차 평면 이방성 항복조건에 대한 몇몇 연구가 보고되고 있다. Hill^[5]은 1990년에 자신의 2차 이방성 항복조건과 M차 수직이방성 항복조건을 일반화하여 응력장에서 표현한 비2차 이방성 항복조건을 제시하였다. 한편, Barlat^[6~8]은 비철금속의 이상거동을 응력장에서 표현하는 비2차 이방성 항복조건과 강·점소성 유한요소 수식화에 적합한 변형 속도장의 비2차 이방성 항복조건을 제시하였다. Barlat의 항복이론은 금속의 결정조직에 기초를 두고 구성되었기 때문에 단축인장 및 등이축인장 상태에서 작은 곡률 반경의 항복면을 갖는 것으로 알려진 FCC 금속의 항복거동을 잘 묘사한다고 보고된 바 있다^[9].

본 연구에서는 Barlat이 제시한 변형 속도장에서의 항복이론과 Hill이 1990년에 제시한 비2차 이방성 항복이론을 도입하여 박막이론에 기초한 2차원 강·점소성 유한 요소 방정식을 정식화하고, 평면변형 혹은 축대칭 성형공정을 해석을 할 수 있는 단면 성형 해석 프로그램을 개발하였다.

2. 소성 구성 방정식

박판재를 성형할 때 미소시간 동안 이루어진 소성일을 최소로 하는 소성경로를 따라 변형이 일어나는 것으로 가정하고, Barlat의 이론으로부터 유효변형률 증분 $\Delta\bar{\epsilon}$ 을 다음과 같이 정의하였다^[10].

$$\Delta\bar{\epsilon} = \frac{1}{x} \left(\frac{\Psi}{2} \right)^{\frac{1}{M}} = \frac{1}{x} \left[\frac{(|\xi_1|^M + |\xi_2|^M + |\xi_1 + \xi_2|^M)}{2} \right]^{\frac{1}{M}} \quad (1)$$

여기서, x 는 Barlat의 변형 속도 포텐셜이 평면변형 상태에서 표현되기 때문에 단축인장 시험에서 구한 응력-변형률 관계식을 사용하기 위한 수정인자이다.

식(1)에서 $\xi_{k=1,2}$ 는 다음 식(2)에서 정의되는 행렬 L 의 주값(principal value)이다.

$$L = \begin{bmatrix} \frac{c_3(\Delta\varepsilon_{xx} - \Delta\varepsilon_{yy}) - c_2(\Delta\varepsilon_{zz} - \Delta\varepsilon_{xx})}{3} & c_6\Delta\varepsilon_{xy} \\ c_6\Delta\varepsilon_{xy} & \frac{c_1(\Delta\varepsilon_{yy} - \Delta\varepsilon_{zz}) - c_3(\Delta\varepsilon_{xx} - \Delta\varepsilon_{yy})}{3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

변형률 증분 텐서 $\Delta\varepsilon$ 은 주축방향에 대해 구해진 변형률 증분을 x, y, z 좌표계 (rolling, transverse, normal direction)에 대한 값으로 변환하므로써 구할 수 있다. 평면 변형 조건을 가정한 선요소를 적용하면 $\Delta\varepsilon_2=0$ 이 되고, 비압축성 조건으로부터 $\Delta\varepsilon_3=-\Delta\varepsilon_1$ 이 된다. 따라서, 주축이 압연방향과 이루는 각도를 θ 라고 하면, $\Delta\varepsilon$ 은 좌표 축 변환에 의하여 다음과 같이 나타내어진다.

$$[\Delta\varepsilon_{ij}] \equiv \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_{xx} \\ \Delta\varepsilon_{yy} \\ \Delta\varepsilon_{xy} \\ \Delta\varepsilon_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_1 \cos^2\theta \\ \Delta\varepsilon_1 \sin^2\theta \\ \Delta\varepsilon_1 \sin\theta\cos\theta \\ -\Delta\varepsilon_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

축대칭 문제를 2차원적으로 해석하기 위해서 Fig.1의 축대칭 요소를 도입하였다. 각 요소에서 반지름 방향의 변형률과 원주 방향의 변형률을 정의하면, 다음과 같이 표현된다.

$$\varepsilon_r = \ln \frac{l_r}{L_r}, \quad \varepsilon_\theta = \ln \frac{l_\theta}{L_\theta} = \ln \frac{r}{R} = \ln \frac{x_i + x_j}{X_i + X_j} \quad (4)$$

여기서, L_r, L_θ 는 Fig.1에서 보듯이 각각 시간 t 에서 요소의 반지름 방향과 원주방향의 길이가 되며, l_r, l_θ 는 시간 $t+\Delta t$ 에서의 길이가 된다.

축대칭 문제에서는 평면변형 문제와는 달리 두방향의 변형률이 모두 존재하므로 변형률 증분 텐서는 좌표축 변환에 의하여 다음과 같다.

$$[\Delta\varepsilon_{ij}] \equiv \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_{xx} \\ \Delta\varepsilon_{yy} \\ \Delta\varepsilon_{xy} \\ \Delta\varepsilon_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_r \cos^2\theta + \Delta\varepsilon_\theta \sin^2\theta \\ \Delta\varepsilon_r \sin^2\theta + \Delta\varepsilon_\theta \cos^2\theta \\ (\Delta\varepsilon_r - \Delta\varepsilon_\theta) \sin\theta\cos\theta \\ -\Delta\varepsilon_r - \Delta\varepsilon_\theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

따라서, 평면변형 해석과 축대칭 해석에서 각각의 유효변형률 증분은 식(4)와 식(5)의 변형률 증분을 식(2)에 대입하여 주값을 구하고, 이 주값을 식(1)에 대입함으로써 구할 수

있다.

한편, Hill의 비2차 이방성 항복이론을 변형 속도장에 대해 나타내고, 평면변형 상태를 가정하면, 유효변형률 증분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \bar{\epsilon} = \frac{1}{2} \left[\frac{(2+2R_{45}-2a+b) \left\{ (1+2R_{45})^{\frac{1}{M^*-1}} + 1 \right\} (1-A)}{1+2R_{45}} \right]^{\frac{1}{M^*}} \cdot |\Delta \epsilon_1| \quad (6)$$

여기서, M^* 은 비2차 항복 파라미터로서 실험에 의해 결정되어지는 값이다. 식(6)에서 a , b 는 각각 R_0 , R_{45} , R_{90} 및 M^* 으로 이루어진 상수들이고, A 는 다음과 같다.

$$A = 1 - \frac{B}{B + |1+C^2|^{\frac{M^*}{2}-1} \{-2a(1-C^2) + b(1-C^2) \cos 2\theta\} \cos 2\theta} \quad (7)$$

여기서, B 와 C 는 다음과 같다.

$$B = |1+C|^M + (1+2R_{45}) |1-C|^M \quad (8)$$

$$C = \frac{(1+2R_{45})^{\frac{1}{M^*-1}} - 1}{(1+2R_{45})^{\frac{1}{M^*-1}} + 1} \quad (9)$$

식(7)에서 A 는 주방향이 압연방향과 이루는 각도 θ 를 포함하고 있으므로 각도에 따른 평면 이방성을 묘사할 수 있게 된다.

본 연구에서 사용한 변형 경화 법칙은 등방성 경화로 가정되고, 변형률 속도항을 고려하여 강·점소성 유한요소 수식화에 주로 사용되며, 실험치로부터 결정되는 대표적인 응력-변형률 관계식으로 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = K(\bar{\epsilon} + \epsilon_0)^n \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\gamma}} \right)^m \quad (10)$$

3. 유한 요소 수식화

가상일의 원리로부터 유도된 접촉절점에서 평형 방정식과 금형 내부로의 박판의 비침투 조건인 기하학적 구속조건을 포함하는 통합 지배 방정식의 구성은 다음과 같다^[11].

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} & \boldsymbol{\Gamma} \\ \mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \mathbf{u} \\ \delta P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{n+1}\mathbf{F}_E - {}^{n+1}\mathbf{F}_I \\ {}^{n+1}D^p \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서, \mathbf{F}_I 는 소성변형에 의한 내부 저항력 벡터이고, \mathbf{F}_E 는 금형과의 접촉에 의한 외부 접촉력 벡터이다. D^p 는 편치와 박판 사이의 유한요소 기초 접촉오차로 다음과 같이 정의된다^[12].

$$D^p = \mathbf{n} \cdot (\mathbf{x}^p - \mathbf{x}^s) \quad (12)$$

여기서, ${}^{n+1}\mathbf{x}^s$ 는 유한요소 절점의 위치벡터이고, ${}^{n+1}\mathbf{x}^p$ 는 이 절점에서 유한요소 기초 법선 벡터 방향으로 편치면과 만나는 점의 위치벡터이다.

식(11)에서 \mathbf{K} 는 시도 변위증분($\Delta \mathbf{u}^*$)으로 표현되는 강성행렬로서

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_I - \mathbf{K}_E = \left(\frac{\partial \mathbf{F}_I}{\partial \Delta \mathbf{u}} - \frac{\partial \mathbf{F}_E}{\partial \Delta \mathbf{u}} \right) \bigg|_{\Delta \mathbf{u} = \Delta \mathbf{u}^*} \quad (13)$$

이다. 식(11)에서 $\delta \mathbf{u}$ 는 평형상태에서 “0”인 값을 갖는 수정변위 증분벡터이고, \mathbf{F}_I 와 \mathbf{F}_E 는 시도변위 증분의 항으로 나타내진다.^[11] 또한 $\boldsymbol{\Gamma}$ 와 \mathbf{C} 는 다음과 같이 각각 표현된다.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Gamma} &= -\frac{\partial (\mathbf{F}_E - \mathbf{F}_I)}{\partial P} = -\frac{\partial \mathbf{F}_E}{\partial P} = -\frac{\partial}{\partial P} [(\mathbf{n} - \mu \mathbf{t})P] \\ &= -(\mathbf{n} - \mu \mathbf{t}) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\mathbf{C} = -\frac{\partial D^p}{\partial \Delta \mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \frac{Z_x}{ZN} + (Z_x Z_{xx})D^p / ZN^2 \\ \frac{-1}{ZN} + (Z_x Z_{xz})D^p / ZN^2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서, Z_{xx} , Z_{xz} 는 변위증분 $\Delta \mathbf{u}$ 에 관한 Z_x 의 미분값들이다.

4. 수치해석 사례

4.1 2-D stretch/draw Test

2-D stretch/draw 실험은 블랭크 홀더의 가압력을 조절하여 stretch와 draw의 두 모드를 구현한 평면변형 실험이다. 단면의 형상은 Fig.2와 같으며, 그림과 같은 시편을 제작하여 실험을 수행하였다. 단면은 대칭형이므로 우측 반만을 모델링 하였으며, 해석에 사용된 유한 요소 모델의 수는 31개이다. 경계 조건으로 힘은 우단에 스트레치의 경우 300N/mm를, 드로우의 경우 170N/mm를 부여하였고, 좌단은 고정 조건을 부여하였다. 마찰계수는 드로우비드 마찰 실험을 통해 얻은 결과를 이용하여 $\mu = 0.18$ 로 하였다. 실험과 해석에 사용된 박판재료는 SKY-AL TG25로 박판의 재료 물성치는 인장시험을 통해 구하였고, 이 값들을 이용하여 이방성 계수를 구하였다. 박판의 기계적 물성치는 다음과 같다.

$$c_1 = 1.116, c_2 = 0.875, c_3 = 0.983, c_6 = 1.006, M = 1.35$$

$$\bar{\sigma} = 535.7 (\bar{\epsilon} + 0.0001)^{0.296}, t = 1.0\text{mm}$$

스트레치 공정은 펀치 이동 거리를 파단이 일어나기 전인 13mm로하여 실험을 수행하였다. Fig.3은 스트레치 공정을 평면변형 해석하여 예측한 변형률 분포를 Hill의 1990년 이론을 이용하여 예측한 값 및 실험값과 비교한 그림이다. 그림에서 보듯이 전반적으로 실험값과 잘 일치함을 볼 수 있다.

드로우 공정은 펀치 이동 거리를 24mm로 하였으며, 이에 따라 드로우인 12.5mm 발생하였다. Fig.4는 드로우 공정을 해석한 후 변형률 분포를 비교한 것으로 해석 결과가 실험치와 유사함을 알 수 있다. 여기서, Hill의 1990년 이론에서 예측 편차는 비2차 항복 파라미터값을 변화시킴에 따른 것으로 본 실험에 대해서는 $M^* = 2.07$ 일 때 보다 잘 일치함을 알 수 있었다.

4.2 원통컵 딥드로잉 공정 해석

축대칭 해석으로 원통컵의 딥드로잉 공정을 해석하였다. 원통컵의 딥드로잉 공정은 박판의 평면 이방성을 가장 잘 묘사하는 대표적인 공정의 하나로 개발된 프로그램의 타당성을 검증하는데 이용하였다. 해석에는 Al2090-T3와 Al2008-T4가 이용되었다.

Al2090-T3는 주로 항공기에 사용되며, 이방성이 매우 심한 소재로 알려져 있다. Fig.5는 원통컵 딥드로잉 공정의 개략도를 나타낸다. 해석에 사용된 유한요소 모델은 대칭형이므로 중심으로부터 오른쪽 반만 이용하였다. 왼쪽에는 고정 경계 조건을 주었고, 오른쪽에는 최소한의 힘을 주어 펀치 행정과 함께 바로 드로우인이 일어나도록 하였다. 해석

에 사용된 기계적 성질은 다음과 같으며 마찰계수는 $\mu = 0.1$ 로 하였다^[14].

$$c_1 = 0.995, c_2 = 1.220, c_3 = 0.930, c_6 = 0.799, M = 4/3$$

$$\bar{\sigma} = 646 (\bar{\epsilon} + 0.025)^{0.227}, t = 1.6\text{mm}$$

Fig.6은 최종 성형 후에 컵 높이와 귀발생을 예측한 것으로 3차원 해석 및 실험값과 비교하였다. 그림에서 보듯이 45도 방향에서 큰 귀가 발생하였으며, 예측된 값이 실험치와 비교적 잘 일치한다. 그러나, 전반적으로 3차원의 경우보다는 이방성을 낮게 예측하고 있는데, 이는 2차원 축대칭 해석의 경우, 반지름 방향의 변형과 폭방향의 변형이 독립적으로 발생한다는 가정에 따른 것으로 판단된다. 한편, 압연 방향(0, 180, 및 360방향)과 90도 및 270도 방향 사이에는 측정치와 반대로 예측되었는데, 이는 Barlat의 이론이 드로잉성(drawability)에 큰 영향을 미치는 R값을 잘 예측할 수 없기 때문이다^[14].

Fig.7은 예측된 두께 변형률 분포와 실험값을 비교한 것으로 해석에 의해서는 압연 방향이 가장 높고, 45도 방향이 가장 낮은 것을 관찰할 수 있으며, 실험치와는 다소 반대되는 현상을 나타낸다. 그러나, 크기 면에서 볼 때 비교적 잘 일치하는 경향을 보였다.

다음으로 자동차용 소재로 많이 이용되고 있는 Al2008-T4에 대해서 원통컵 딥드로잉 공정을 해석하였다. 해석에 사용된 Al2008-T4의 기계적 성질은 다음과 같다.

$$c_1 = 0.817, c_2 = 1.004, c_3 = 1.029, c_6 = 1.048, M = 1.3$$

$$\bar{\sigma} = 500.5 (\bar{\epsilon} + 0.0001)^{0.248}, t = 1.24\text{mm}$$

Al2008-T4의 경우 Barlat의 이론이 비교적 R값을 잘 예측하므로^[13] Fig.8에서 보듯이 컵높이 변화가 유사함을 알 수 있다. 실험값에 의하면 90, 180, 270도에서 귀발생이 예측되는데, 해석에 의한 값은 180도에서 귀발생을 예측하지 못하고 있다. 이는 실험에 의한 귀형상에서 보듯이 실제 박판이 직교 이방성이 아니며, 따라서 직교 이방성을 가정한 Barlat의 이론에 한계가 있음을 나타내고 있다.

Fig.9는 압연 방향의 단면에서 두께 변형률 분포를 나타내는데 전반적으로 실험값과 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나, 컵 벽부분에서 실험값보다 다소 높게 평가하는 것은 축대칭 요소가 컵 벽부분의 평면변형 상태를 잘 묘사하지 못하기 때문으로 판단된다.

한편, 개발된 프로그램은 굽힘 효과를 고려하므로^[15], 최외각 경계가 다이반경부를 통과할 때 발생하는 수치적 좌굴현상^[10]은 보이지 않았으며, 따라서 수렴에는 문제가 없었다. 또한, 해석 시간은 IBM PC Pentium-133에서 한 방향에 대해서 1분 30초 정도가 걸렸다.

5. 결 론

본 연구에서는 임의의 형상을 갖는 알루미늄 합금 박판을 대상으로 평면변형 해석과 축대칭 해석을 할 수 있는 단면 성형 해석 프로그램을 개발하였다. 알루미늄 합금 박판의 평면 이방성을 고려하기 위하여 Barlat이 제시한 변형속도장에서의 항복조건과 Hill의 1990년 비2차 이방성 항복조건을 도입하고, 2차원 강·점소성 유한 요소 방정식을 정식화하였다. 개발된 프로그램의 타당성과 유효성을 입증하기 위하여 평면변형 해석으로 2-D stretch/draw 실험을 성형해석하고, 해석값이 측정값과 일치함을 보였다. 축대칭 해석으로는 Al2090-T3, Al2008-T4를 대상으로 원통컵 딥드로잉 공정을 해석하여 귀형상과 두께 분포를 예측하고, 실험값 및 3차원 해석 결과와 비교하여 결과가 유사함을 보였다. 따라서, 단면 성형 해석은 메쉬 생성이 용이하고, 해석 시간이 짧으며, 해석 결과가 유사하기 때문에 실제 산업체에 적용하기에 유용하다고 볼 수 있다.

참고문헌

1. Woodthorpe, J. and Pearce, R., "The Anomalous Behavior of Aluminum Sheet under Balanced Biaxial Tension", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.12, pp.341~347, 1970.
2. Hill, R., "The Mathematical Theory of Plasticity, Clarendon Press", Oxford, 1950.
3. Hosford, W. F., "Limitation of Non-Quadratic Anisotropic Yield Criteria and Their Use in Analysis of Sheet Forming", *ASM International*, pp.163~170, 1988.
4. Hill, R., "Theoretical Plasticity of Textured Aggregates", *Math. Proc. Camb. Phil. Soc.*, 85, pp.179~191, 1979.
5. Hill, R., "Constitutive Modelling of Orthotropic Plasticity in Sheet Metals", *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.38, No.3, pp.405~417, 1990.
6. Barlat, F., Lege, D. J. and Berm, J. C., "A Six-Component Yield Function for Anisotropic Materials", *Int. J. Plasticity*, Vol.7, pp.693~712, 1991.
7. Barlat, F. and Chung, K., "Anisotropic Potentials for Plastically Deforming Metals", *Modelling and Simulation in Mat. Sci. and Eng.*, Vol.1, pp.403-416, 1991.
8. Barlat, F., Chung, K. and Richmond, O., "Strain Rate Potential for Metals and Its Application to Minimum Plastic Work Path Calculations", *Int. J. Plasticity*, Vol.9, pp.51~63, 1993.
9. Chung, K. and Shah, K., "Finite Element Simulation of Sheet Metal Forming for Planar Anisotropic Metals", *Int. J. Plasticity*, Vol.8, pp.453~476, 1992.
10. Chung, K., Lee, S. Y., Barlat, F., Keum, Y. T. and Park, J. M., "Finite Element Simulation of Sheet Forming Based on A Planar Anisotropic Strain-Rate Potential", *Int. J. Plasticity*, Vol.12, pp.93~115, 1996.

11. 금영탁, Wagoner, R. H., "프레스 금형 단면의 성형성 평가를 위한 유한 요소법", 대한기계학회논문집, 제15권, 제4호, pp.1108~1122, 1991.
12. 금영탁, "박판 성형 공정의 유한요소 해석을 위한 마찰접촉 모델", 대한기계학회논문집, 제17권, 제9호, pp.2242~2251, 1993.
13. Lege, D. J., Barlat, F. and Berm, J. C., "Characterization and Modeling of the Mechanical Behavior and Formability of a 2008-T4 Sheet Sample", Int. J. Mech. Sci., Vol.31, No.7, pp.549~563, 1989.
14. 이승열, 금영탁, 정관수, 박진무, "원통컵 디프드로잉 공정의 귀발생 예측", 한국소성가공학회지 제4권 제3호, pp.222~232, 1995.
15. 김준보, 금영탁, "굽힘효과를 고려한 자동차 패널 성형공정의 2차원 유한 요소 해석", 한국자동차공학회, 95년도 춘계학술대회 논문집 1권, pp.124~129, 1994.

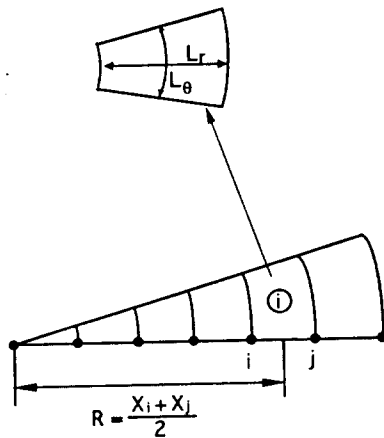


Fig.1 Axisymmetric element for sectional analysis

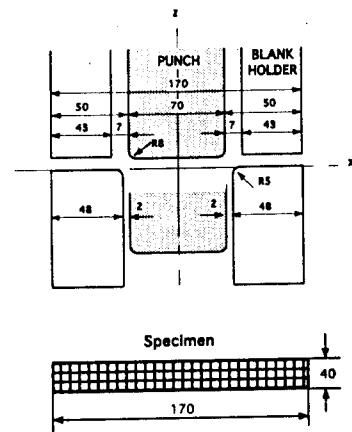


Fig.2 Schematic illustration of 2D stretch/draw test

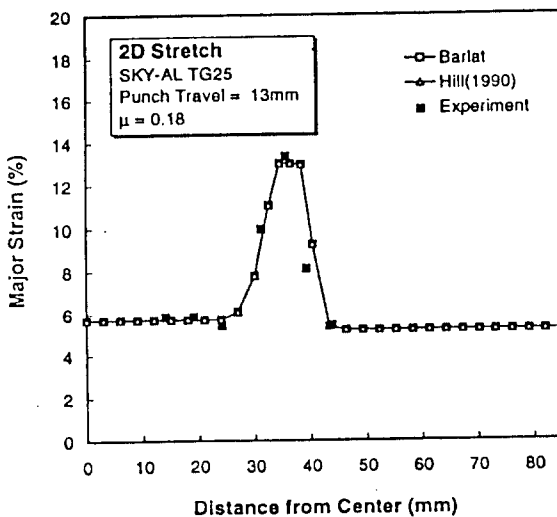


Fig.3 Comparison of major strain distribution of 2D stretch test

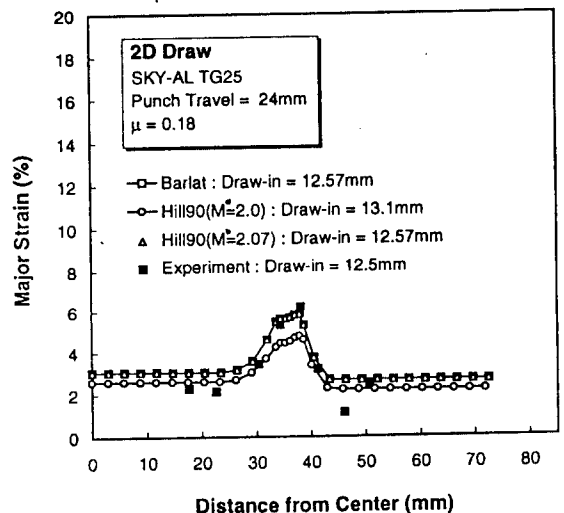


Fig.4 Comparison of major strain distribution of 2D draw test

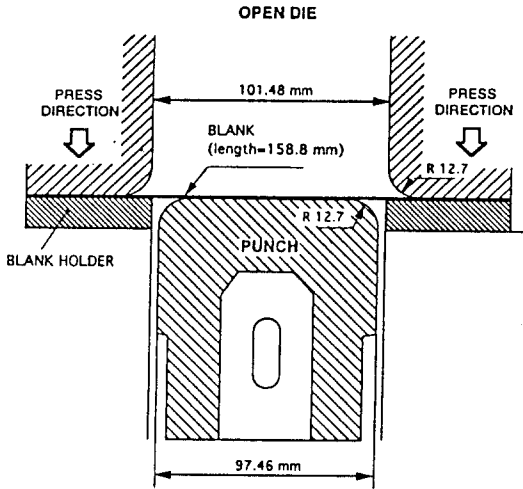


Fig.5 Schematic illustration of cylindrical cup deep drawing process

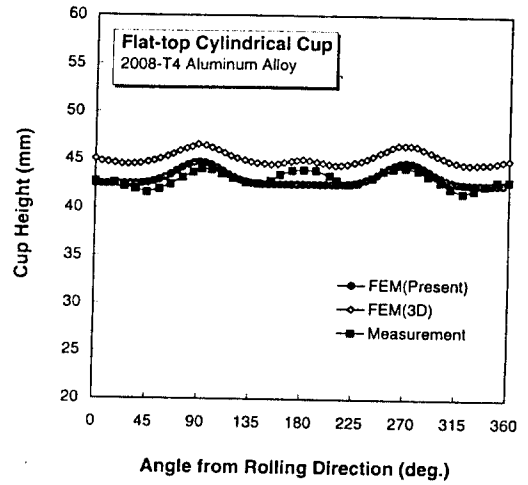


Fig.8 Comparison of predicted cup heights and earing profiles for Al2008-T4

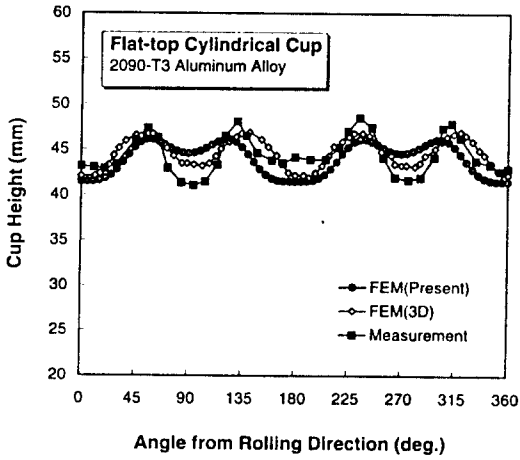


Fig.6 Comparison of predicted cup heights and earing profiles for Al2090-T3

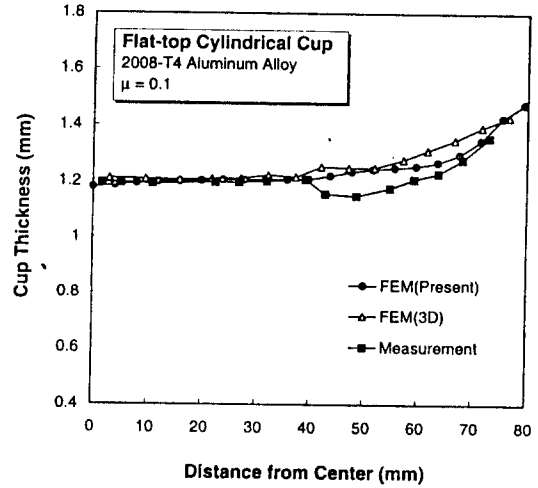


Fig.9 Comparison of predicted and measured thickness distribution for Al2008-T4

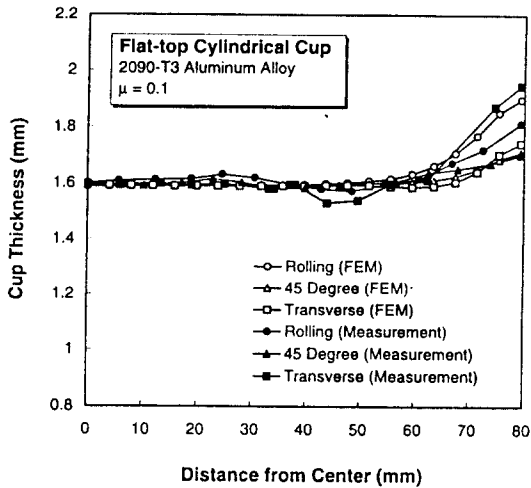


Fig.7 Comparison of predicted and measured thickness distribution for Al2090-T3