

<論 文>

원통컵 디프드로잉 공정의 귀발생 예측

이승열* · 김영탁** · 정관수*** · 박진무****

(1995년 3월 15일 접수)

Prediction of Earrings in the Deep Drawing Processes of a Cylindrical Cup

S. Y. Lee, Y. T. Keum, K. S. Chung and J. M. Park

Abstract

The planar anisotropic FEM analysis for predicting earing profiles and draw-in amounts in the deep-drawing process is introduced. An implicit, incremental, updated Lagrangian formulation with a rigid-viscoplastic constitutive equation is employed. Contact and friction are considered through the mesh-based unit vector and normal contact pressure. The consistent full set of governing relations, which is comprising equilibrium and geometric constraint equations, is appropriately linearized. Barlat's strain-rate potential is employed, whose in-plane anisotropic properties are taken into account with anisotropic coefficients and potential parameters. The linear triangular membrane elements are used for depicting the formed sheet. In the numerical simulations of deep drawing processes of a flat-top cylindrical cup for 2090-T3 aluminum alloy sheet show good agreement with experiments, although some discrepancies were observed in the directional trend of cup height and thickness strains.

Key Words : Deep-Drawing Process, Earing Prediction, Aluminum Alloy Sheet Metal, Planar Anisotropy, Barlat's Strain-Rate Potential, FEM Formulation

1. 서 론

원통컵 디프드로잉 공정은 기하학적으로 가장 단순한 박판 성형 공정중의 하나로 프

레스 제품 생산에 널리 이용될 뿐만 아니라 판재의 성형한계(LDR : Limit Draw Ratio)를 평가하기 위한 시험용으로 많이 사용된다. 또한, 이 공정은 3차원 성형해석에서 해석결과의 타당성을 입증하기 위한 모델로 많이 사용되어 왔으며, 판재의 평면이방성을 검토하기에 적합하므로 이들의 영향을 예측하고 평가하는데 주로 이용된다. 압연 공정에서 발생된 판재의 평면 이방성은 컵

*동부제강(주) 기술연구소

**한양대학교 정밀기계공학과

***ALCOA

****고려대학교 기계공학과

드로잉시에 귀발생을 초래한다. 이 때 발생하는 귀는 성형후에 절단되므로 예측하여 초기박판(initial blank sheet) 재단시에 그 영향을 고려함으로써 불필요한 귀의 발생을 억제하고 소재를 절감할 수 있다. 따라서, 이방성이 심한 알루미늄 합금 판재의 컵드로잉시 귀발생에 대한 정확한 예측은 매우 중요하며, 임의형상의 성형공정 시뮬레이션에서도 소재의 평면 이방성에 따른 방향별 변형률 분포 및 드로우인 상태를 예측하여 성형성을 평가하거나 초기박판 재단시에 이용하는 것은 중요한 일이다.

성형공정을 시뮬레이션하기 위한 3차원 유한요소해석은 최근에 괄목할 만큼 성장하여 연강을 대상으로 임의형상의 성형공정을 해석하고 평가한 연구가 국제학술대회^(1,2)에서 다수 발표되어 왔다. 그러나, 자동차나 항공기용의 성형소재로 사용되는 알루미늄 합금(alumimun alloy)에 대한 연구는 부족하여 임의형상의 성형공정 시뮬레이션은 거의 찾아볼 수 없으며, 기하학적으로 단순한 축대칭 형상의 성형해석에 대한 연구도 소수에 불과하다. 이의 주된 원인은 비철금속의 이상거동(anomalous behavior)⁽³⁾을 수용할 수 있는 항복이론에 관한 연구가 부족하였기 때문인 것으로 판단된다.

평면 이방성을 고려한 유한요소 수식화는 1948년 Hill⁽⁴⁾이 2차형 평면 이방성 항복조건을 제시한 이래 Lee와 Kobayashi,⁽⁵⁾ 양동열과 김용진,⁽⁶⁾ Doege and Seydel,⁽⁷⁾ 김형중,⁽⁸⁾ Ohwue et al.⁽⁹⁾ 등에 의해 성형공정 시뮬레이션에 도입되었으며, Gotoh⁽¹⁰⁾는 Hill의 2차형 항복조건을 지적하고 4차형 항복함수를 제안하고, 이를 이용하여 디프드로잉시 플랜지 부분의 변형을 해석한 바 있다.⁽¹¹⁾ 최근에 비철금속의 모델링을 위해 비2차 평면 이방성 항복조건(non-quadratic anisotropic yield criterion)에 관한 연구가 Hill⁽¹²⁾과 Barlat^(13,14)에 의해 발표되었으며, 응력장에서 표현되는 Barlat

⁽¹³⁾의 항복조건식은 Chung 등⁽¹⁵⁾이 ABA-QUS/implicit에 도입하여 2008-T4 알루미늄 합금을 대상으로 컵드로잉 공정을 해석하고 실험치와 비교한 결과 그의 유효성을 입증한 바 있다. 또한, Barlat⁽¹⁴⁾ 응력장의 항복조건과는 별도로 강소성 및 점·강소성 유한요소 해석에 적용할 수 있는 변형률 속도장의 비2차 이방성 항복조건을 제시하였다.

본 연구에서는 비철금속의 성형해석을 위해 최근 Barlat에 의해 제시된 변형률 속도장의 비2차 이방성 항복조건을 유한요소 방정식에 도입하고 강·점소성 재료를 모델링할 수 있는 대표적인 변형 경화 법칙⁽¹⁶⁾을 사용하였다. 또한, 유한요소 기초 법선벡터를 사용한 마찰접촉 조건을 도입하고, 접촉 절점의 기하학적 구속조건인 유한요소 기초 접촉오차를 평형방정식 내에 결합시킴으로써 하나의 시스템 방정식을 풀면 동시에 접촉조건과 평형조건을 만족시키는 통합 지배방정식을 모델링하였다.

끝으로, 개발된 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 2009-T3 알루미늄 합금판을 대상으로 원통컵 디프드로잉 공정을 시뮬레이션하고 컵두께 분포와 귀형상을 실험치와 비교·검토하였다. 해석 결과는 크기면에서 실험치와 비교적 잘 일치하는 편이나, 예측방향에 있어서 다소의 편차를 보였다. 이 예측편차의 원인을 R값(Lankford value) 및 단순압축이론에 의해서 증명하고 Barlat 항복이론의 개선 방향을 제시한다. 한편, 평면 이방성의 영향에 따른 귀발생 거동을 비교할 목적으로 2008-T4 알루미늄 합금 및 연강판의 디프드로잉 공정도 해석하였다.

2. Barlat의 항복조건 및 이방성 주축의 회전

본 연구에서 도입된 Barlat의 이방성 항복조건(Barlat's strain-rate potential)에서 유효 변형률 증분 $\Delta \epsilon$ 는 다음과 같이 표현

된다.

$$\Delta \bar{\epsilon} = \frac{1}{\kappa} \left(\frac{(|p|^M + |q|^M + |p+q|^M)}{2} \right)^{\frac{1}{M}} \quad (1)$$

여기서, p, q 는 다음과 같이 정의된다.

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

식(1)에서 M 은 결정구조와 관련된 포텐셜 파라메타이고, κ 는 Barlat의 항복조건이 평면 변형 상태에서 표현되기 때문에 단축 인장 시험에서 구한 응력-변형률 관계식을 사용하기 위한 수정인자이다. 따라서, 단축 인장 상태의 유효 변형률 증분을 평면 변형 상태의 유효 변형률 증분으로 수정하여 준다. 식(3)에서 $c_{i=1\sim 6}$ 은 이방성 계수로서 결정구조로부터 계산되거나 평면 변형 시험으로부터 산출된다. 식(1)~(3)에 의해서 정의되는 유효 변형률 증분은 점·강소성 유한요소 수식화에 도입되어 평면 이방성을 묘사하게 된다.

한편, 이방성 주축의 회전을 계산하는데 Dienes⁽¹⁷⁾가 제시한 방법은 성형 해석의 매 증분 단계마다 회전을 계산하여 누적시킴으로써 다음 단계의 회전을 계산하는 것으로 지금까지 많이 사용되는 방법중의 하나이다. 그러나, 이것은 다음 단계의 회전량을 계산하는데 이전 단계에서 계산된 회전량들을 누적시켜야 한다. 이것을 피하기 위해서 현 단계에서 최초의 물질각인 좌표계(materially embedded coordinate system)로 역회전을 계산함으로써 다음 단계의 회전량 계산시 이용하는 보다 효율적인 방법을 도입하였다.^(20,21)

3. 유한요소 수식화

박판성형공정중의 시각 $t = t + \Delta t$ 에서 편

$$p = \frac{2\Delta \epsilon_1 - \Delta \epsilon_2 - \Delta \epsilon_3}{3}$$

$$q = \frac{2\Delta \epsilon_2 - \Delta \epsilon_3 - \Delta \epsilon_1}{3} \quad (2)$$

식(2)에서 $\Delta \epsilon_{i=1,2,3}$ 은 아래에서 정의된 행렬 L 의 주값(principal value)이다.

치표면과 접하는 박판 위치로 묘사되는 유한요소 절점의 위치 벡터를 \mathbf{x}^s 라 하고, 이 절점에서 유한요소기초법선벡터 \mathbf{n} 방향으로 편치면과 만나는 점의 위치 벡터를 \mathbf{x}^p 로 정의하면 편치와 접촉하는 운동체의 관점에서 볼 때 힘평형 방정식 이외에도 다음과 같은 기하학적 구속조건을 만족해야 한다.⁽²⁰⁾

$$\mathbf{x}^s \cdot \mathbf{n} = \mathbf{x}^p \cdot \mathbf{n} \quad (4)$$

가상일의 원리로부터 유도된 접촉절점에서 평형방정식^(18,19)과 금형내부로 박판의 비침투조건인 기하학적 구속조건을 포함하는 통합지배방정식의 구성은 다음과 같다.

$$\mathbf{F}_i(\Delta \mathbf{u}) = \mathbf{F}_e(\Delta \mathbf{u})$$

$$\mathbf{x}^s \cdot \mathbf{n} = \mathbf{x}^p \cdot \mathbf{n} \quad (5)$$

여기서, \mathbf{F}_i 는 내력벡터이고 \mathbf{F}_e 는 외력벡터이다. 식(5)를 하나의 방정식으로 통합하여 테일러 급수로 전개한 후 선형화시키고 단순한 행렬 형태로 표현하면 다음과 같은 유한요소 기초 뉴턴랩슨 방정식(mesh-based Newton-Raphson equation)을 얻을 수 있다.

$$[\mathbf{K}_r] \begin{bmatrix} \delta \mathbf{u} \\ \delta P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{\Gamma} \\ \mathbf{C} & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{F}_e - \mathbf{F}_i \\ D^p \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(6)에서 \mathbf{K} 는 시도변위 증분 $\Delta \mathbf{u}^*$ 로 표현되는 접선 강성행렬이고 $\mathbf{\Gamma}, \mathbf{C}$ 및 편치와 박판 사이의 유한요소 기초 접촉오차

(mesh-based contact error) D^p 는 참고문헌 [20]과 같이 정의된다.

4. 단순 압축 이론

컵드로잉시 플랜지(flange)부 변형에 대하여 평면응력(plane stress)하의 단순 압축 이론을 적용하여 컵높이 변화와 림(rim)부의 판두께 변화에 미치는 R 값의 영향을 검토하고자 한다. 블랭크홀딩력과 마찰이 적거나 그들의 영향이 미소하면 딥드로잉 공정중에 플랜지의 변형은 거의 평면 응력 상태에 있다. 평면 응력 조건이 가정되면 림부의 변형은 단순압축(uniaxial compression) 상태가 되므로 비압축성 소재에 대하여 다음과 같은 근사적인 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_\theta : \varepsilon_r : \varepsilon_t \Big|_{at \theta = \theta_0} &= -(R_\theta + 1) : R_\theta : 1 \\ \Big|_{at \theta = \theta_0 + 90^\circ} & \end{aligned} \quad (7)$$

식(7)에서 ε_θ , ε_r 및 ε_t 는 각각 원주, 반경 및 두께 방향의 진변형률(total logarithmic strain)이고, θ 는 압연 방향과 이루는 각도이며, ε_θ 는 다음과 같다.

$$\varepsilon_\theta = \ln\left(\frac{r_{cup}}{r_{blank}}\right) = -C \quad (8)$$

여기서, r_{cup} 과 r_{blank} 는 각각 성형이 완료된 컵과 초기박판의 반경이므로 ε_θ 는 림부에 위치한 모든 요소에 대하여 항상 일정(-C)한 것으로 고려된다. 식(7)에서 변형률비(strain ratio)는 90° 회전된 방향에서 측정된 R 값으로부터 얻어진다는 것을 주목할 필요가 있다. 각 θ 에 의해 정의되는 컵 림부의 임의 위치에서 두께 변형률 및 반경

Table 1 Material properties of the 2090-T3 aluminum alloy sheet

Properties	Values
Anisotropic coefficients	$c_1=0.995, c_2=1.220, c_3=0.930, c_6=1.779$
Barlat's potential parameter	$M=4/3$
Stress-strain relation(MPa)	$\bar{\sigma}=646(\bar{\varepsilon}+0.025)^{0.227}$
Sheet thickness(mm)	$t=1.60$

Table 2 Material properties of the 2008-T4 aluminum alloy sheet

Properties	Values
Anisotropic coefficients	$c_1=0.817, c_2=1.004, c_3=1.029, c_6=1.043$
Barlat's potential parameter	$M=1.30$
Stress-strain relation(MPa)	$\bar{\sigma}=500.5(\bar{\varepsilon}+0.001)^{0.248}$
Sheet thickness(mm)	$t=1.24$

Table 3 Material properties of the mild steel sheet

Properties	Values
Anisotropic coefficients	$c_1=0.350, c_2=1.125, c_3=0.987, c_6=1.147$
Barlat's potential parameter	$M=1.52$
Stress-strain relation(MPa)	$\bar{\sigma}=567.29(\bar{\varepsilon}+0.007127)^{0.2637}$
Sheet thickness(mm)	$t=1.60$

방향 변형률은 식 (7) 과 식 (8)로부터 얻어지며 다음과 같다.

$$\epsilon_t \Big|_{at \theta = \theta_0} = \frac{C}{(R_\theta + 1)} \Big|_{\theta = \theta_0 + 90^\circ} \quad (9)$$

$$\epsilon_t \Big|_{at \theta = \theta_0} = \frac{C \cdot R_\theta}{(R_\theta + 1)} \Big|_{\theta = \theta_0 + 90^\circ} \quad (10)$$

5. 수치해석 및 고찰

개발된 프로그램에 의한 해석결과와 타당성과 유용성을 입증하기 위하여 알루미늄 합금 및 연강 판재를 대상으로 원통컵 디프드로잉 공정을 시뮬레이션하였다. 일부 소재의 시뮬레이션에서 Barlat 항복이론이 다소간의 예측편차를 보였으므로 이에 대한 원인을 규명하고, Barlat 이론이 개선되어야 할 문제점을 제시하고자 한다.

2090-T3 알루미늄 합금(AI2090)은 주로

항공기에 사용되며 평면 이방성이 가장 심한 소재로 알려져 있고, Barlat 이론의 예측편차를 다소 나타낸 소재이다. AI2090의 해석결과는 실험치와 비교 검토되고, R값과 단순압축이론으로부터 Barlat 이론에서 발생된 예측편차의 원인을 고찰한다. 한편, 자동차용 성형소재로 많이 사용되는 2008-T4 알루미늄 합금(AI2008)과 연강판은 동일한 성형조건에서 얻어지는 평면 이방성의 영향을 비교할 목적으로 해석한다. 수치해석에 사용된 AI2090⁽¹⁴⁾과 AI2008 및 연강⁽¹⁾의 이방성 계수는 ALCOA에서 제공한 데이터를 사용하였고 마찰계수는 $\mu=0.1$ 로⁽²¹⁾ 동일하게 주었으며, 기계적 성질은 Table 1~3과 같다.

Fig. 1은 해석에 사용된 금형의 기하학적 형상을 나타낸 것이고, 블랭크홀더력 (blank-holder force : BHF)은 44 kN이 적

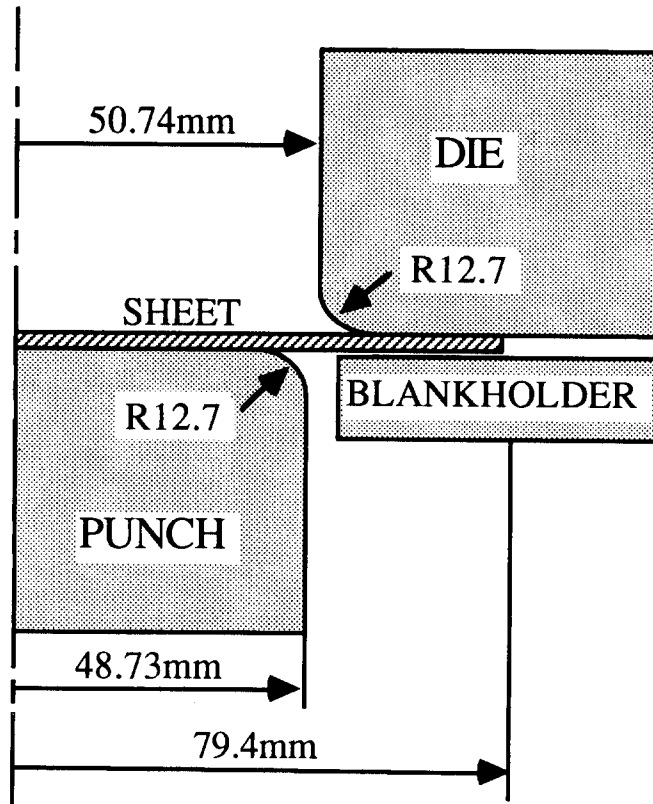


Fig. 1 Tooling geometry for cylindrical cup drawing operation

용되었다. 드로우 시뮬레이션을 위하여 11 kN(1/4 영역)의 BHF에 의해 다이와 박판 및 블랭크홀더와 박판 사이의 접촉영역에서 발생하는 마찰력을 산출하고 최외각 경계절점으로 분산시켜 주었다. Fig. 2는 초기박판의 유한요소와 Al2090의 최종 변형 형상을 나타낸 것이다. 유한요소는 성형소재의 1/4 영역만 모델링한 것으로 151개의 절점

과 254개의 선형 삼각형 박막요소로 구성되었다.

Fig. 3은 개발된 프로그램으로 예측된 Al2090의 컵높이 변화 및 귀형상을 실험치와 비교한 것으로 45°, 135°, 225° 및 315° 방향에서 큰 귀가 발생함을 알 수 있고, 예측된 값은 실험치와 비교적 잘 일치한다. Fig. 4는 예측된 관두께 분포를 실험치와

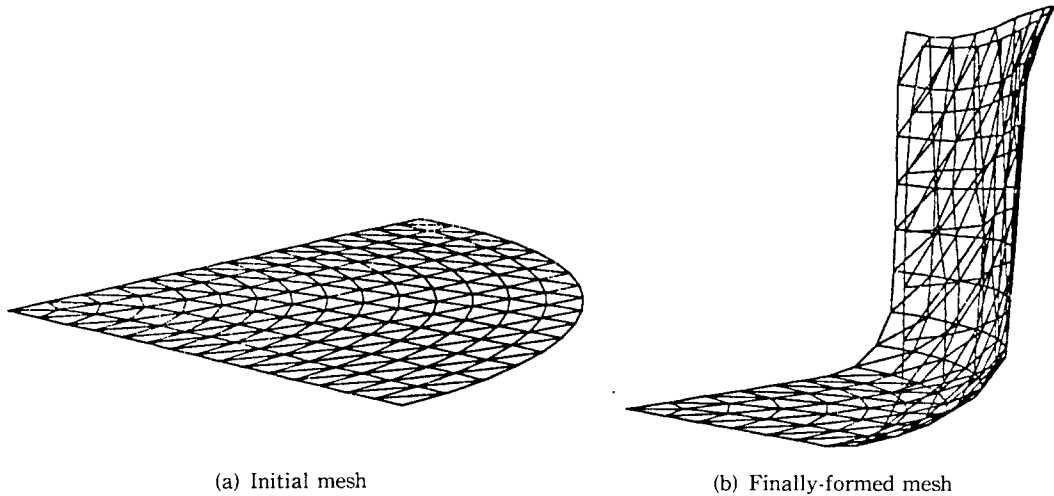


Fig. 2 (a) Initial FEM mesh and (b) finally-formed one for simulating a cylindrical cup drawing operation

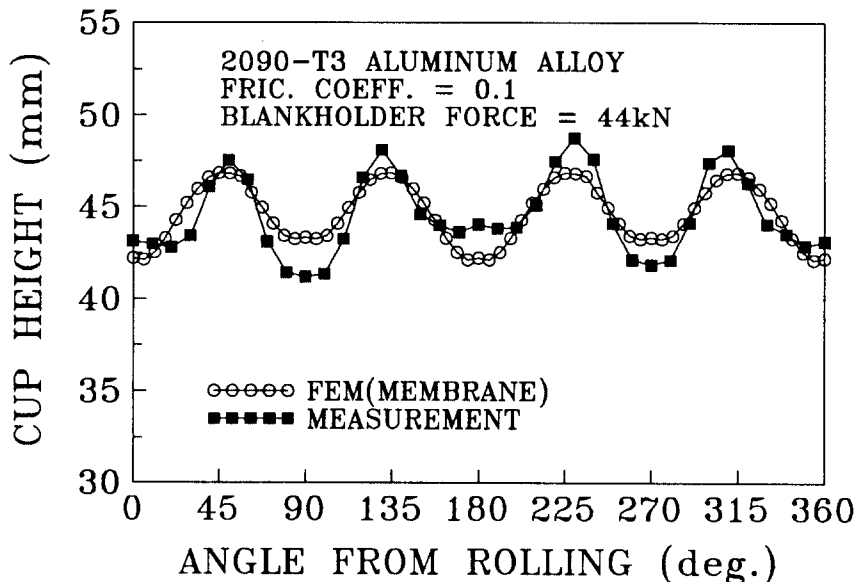


Fig. 3 Comparison of predicted and measured cup heights and earing profiles for the Al2090 cup drawing test

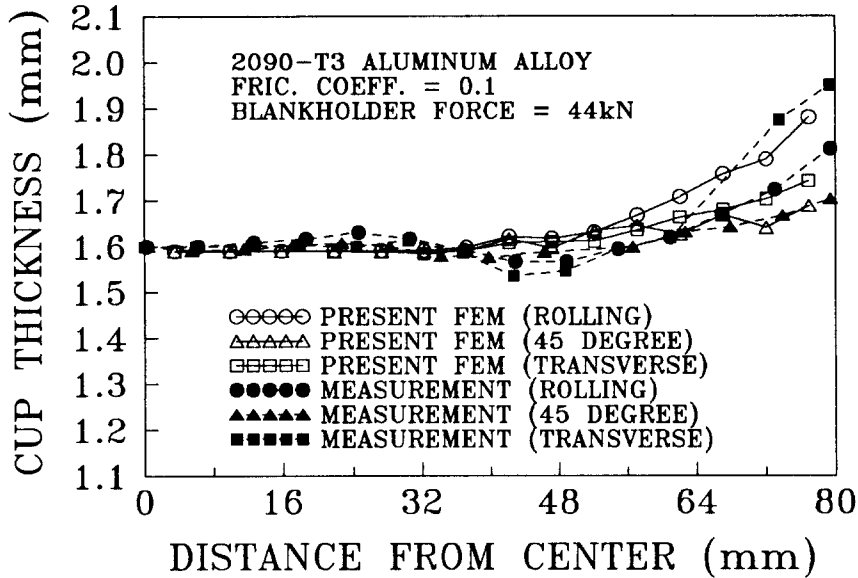


Fig. 4 Comparison of predicted and measured thickness distribution for the Al2090 cup drawing simulation

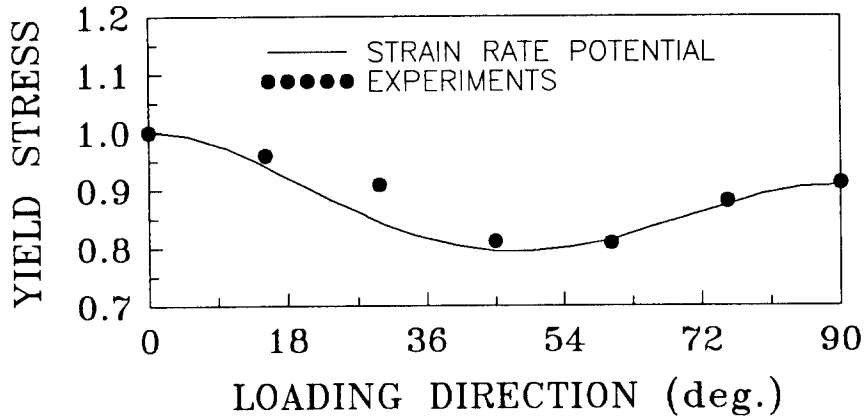


Fig. 5 Normalized yield stress anisotropy measured and predicted with the Barlat's strain-rate potential

비교한 것으로 방향과 관계없이 크기면에서 살펴볼 때 예측된 값은 실험치와 비교적 잘 일치하는 경향을 보였다. 예측된 컵높이 변화와 판두께 분포는 실험치와 잘 일치하는 경향을 나타내고 있지만 압연방향(0°, 180° 및 360° 방향)과 90° 및 270° 방향 사이에는 해석결과가 측정치와 반대로 예측되는 현상이 없어졌다. 이러한 현상이 발생된 원인은 Barlat의 항복이론이 항복응력을 기초로 구성되었으므로 이방성이 매우 심한 일부 소

재에 대해서는 드로잉성에 영향을 미치는 R값을 잘 예측할 수 없기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 5와 6은 각각 항복응력과 R값에 의해 Al2090 판재의 부하방향에 따른 이방성을 보여준 그림으로 Barlat 이론으로부터 예측된 값과 실험치를 비교한 것이다. 그림에서 Barlat 이론으로부터 예측된 항복응력은 실험치와 비교적 잘 일치하는 경향을 나타내고 있으나, R값은 실험치와 일치하지

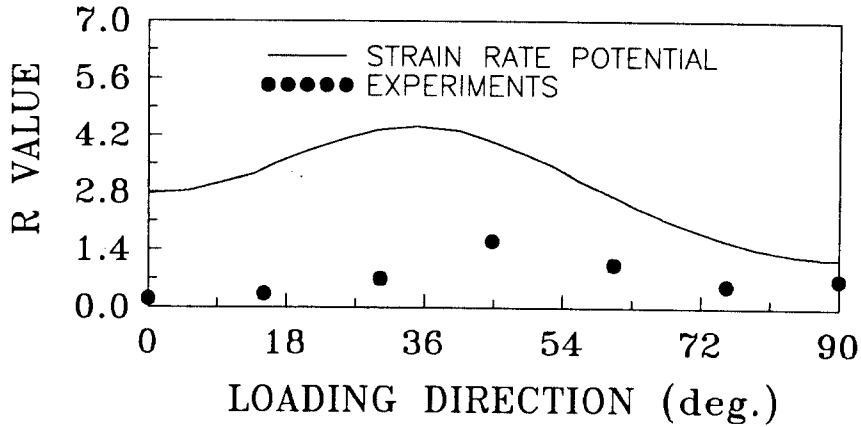


Fig. 6 R(Lankford) value anisotropy measured and predicted with the Barlat's strain-rate potential

않고 경향도 압연방향(0° 방향)과 90° 방향 사이에 반대되는 현상을 나타낸다. 이것은 위에서 고찰된 A12090의 컵높이 변화와 관두께 분포에 대한 Barlat 이론의 예측편차를 입증한다.

한편, 컵드로잉시 플랜지부 변형에 대하여 4장에서 설명된 단순 압축 이론을 적용하여 컵 림부의 두께 변형률 분포 및 귀형상을 검토하면 다음과 같다. Fig. 6에서 예측된 R값은 $R_{45} > R_0 > R_{90}$ 임으로 이 값에 의해 식(9)로부터 결정되는 두께 변형률 분포는 식(11)과 같고, 실험으로부터 얻은 R값은 $R_{45} > R_{90} > R_0$ 임으로 두께 변형률 분포는 식(12)와 같이 결정된다.

$$\epsilon_t |_{45} < \epsilon_t |_{90} < \epsilon_t |_0 \quad (11)$$

$$\epsilon_t |_{45} < \epsilon_t |_0 < \epsilon_t |_{90} \quad (12)$$

식(11)과 식(12)는 각각 Fig. 4에서 보여준 실험치 및 시뮬레이션으로부터 예측된 관두께 분포와 일치하는 경향을 나타냄을 확인할 수 있다. 동일한 방법으로 식(10)을 이용하여 반경 방향의 변형률 분포를 나타내면 다음과 같다. 예측된 R값에서 얻어진 변형률 분포는 식(13)과 같고, 실험치에서 얻어진 변형률 분포는 식(14)와 같다.

$$\epsilon_r |_{45} > \epsilon_r |_{90} > \epsilon_r |_0 \quad (13)$$

$$\epsilon_t |_{45} > \epsilon_t |_0 > \epsilon_t |_{90} \quad (14)$$

식(13)과 식(14)의 변형률은 림부의 값이고, 컵높이 변화는 플랜지 영역의 반경 방향을 따라 발생된 변형률 전체를 누적시킨 것이므로 직접적인 비교는 어렵다. 그러나, 축대칭 문제임을 고려할 때 단순압축이론에서 예측된 변형률 분포는 Fig. 3에서 보여준 실험치 및 시뮬레이션에서 예측된 컵높이 변화와 각각 일치하는 경향을 나타내고 있다. 따라서, 해석에서 발생된 예측편차가 R값의 영향임을 확인할 수 있다.

예측편차에 대한 고찰 내용을 정리하면 Barlat 항복이론은 R값의 영향을 고려할 수 있도록 개선이 요구된다. 그러나, 현재의 상태에서도 귀발생 및 변형률 분포의 크기면에서는 비교적 실험치와 잘 일치하고 있으므로 해석결과를 R값의 분포와 함께 고찰한다면 귀발생 예측 및 성형성 평가수단으로 충분히 사용될 수 있을 것이다.

Fig. 7은 A12090, A12008 및 연강에 대하여 개발된 프로그램으로 예측된 컵높이 변화 및 귀형상들을 상호 비교한 것이다. A12090은 이방성이 매우 심한 소재로 45°, 135°, 225° 및 315° 방향에서 큰 귀가 발생하였다. A12008은 A12090보다는 이방성이 작지만 연강판보다는 크며, 90°와 270° 방

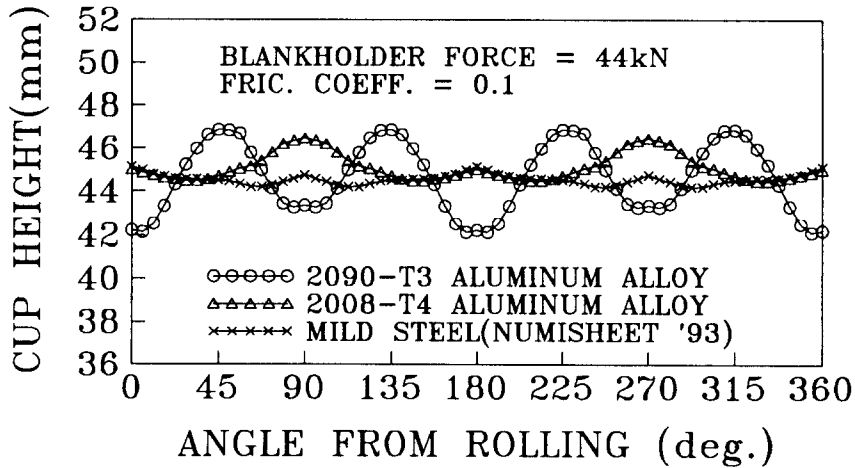


Fig. 7 Comparison of predicted cup heights and earing profiles with the present FEM(AI2090, AI2008 & mild steel)

향에서 비교적 큰 귀가 형성되었고 0° (360°)와 180° 방향에서 작은 귀가 형성되었다. 한편, 연강은 등방성에 가까운 자동차용 성형소재로서 귀 발생의 경향은 AI2008과 유사하지만 0°(360°), 90°, 180° 및 270° 방향에서 매우 약하게 나타났다. 고찰된 바와 같이 귀형상의 예측은 초기박판 설계에 유용하다.

이상의 검토 결과로부터 본 연구에서 개발된 프로그램은 귀형상과 변형률 분포를 비교적 정확하게 예측함으로써 철강 뿐만 아니라 비철을 가공하는 프레스 성형품 생산 현장이나 금형설계 분야에서 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결 론

평면 이방성 박판재의 귀발생 거동을 예측하기 위하여 원통컵 디프드로잉 공정의 3차원 성형 시뮬레이션을 성공적으로 수행하였으며, 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 알루미늄 합금 판재를 대상으로 컵드로잉 공정에서 발생한 귀형상 및 두께 분포를 예측하고, 실험치와 비교함으로써 개발

된 프로그램의 타당성을 입증하였다.

(2) AI2090, AI2008 및 연강판을 대상으로 원통컵의 귀발생 거동을 해석하고 상호간에 비교함으로써 개발된 프로그램의 유용성을 보였다.

(3) AI2090은 평면 이방성이 매우 심한 소재로 45°, 135°, 225° 및 315° 방향에서 큰 귀가 발생하였으며, AI2008은 AI2090보다는 이방성이 작지만 연강판보다는 크며, 90°와 270° 방향에서 비교적 큰 귀가 형성되고 0°(360°)와 180° 방향에서 작은 귀가 형성되었다. 한편, 연강은 AI2008과 유사한 경향을 갖지만 0°(360°), 90°, 180° 및 270° 방향에서 매우 약하게 나타났고 등방성에 가까운 것으로 예측되었다.

(4) AI2090 컵드로잉 해석에서 발생한 컵높이 변화와 판두께 분포에 대한 일부 예측편차의 원인을 규명하고, Barlat 이론이 개선될 필요성을 제시하였다.

참고문헌

(1) Makinouchi, A., Nakamach, E., Onate, E. and Wagoner, R. H., 1993, Proc. of the 2nd Int. Conf. UNMISHEET '93: Numer-

- ical Simulation of 3-D Sheet Metal Forming Processes-Verification of Simulation with Experiment-, Isehara, Japan.
- (2) FE-Simulation of 3-D Sheet Metal Forming Processes in Automotive Industry Proceedings Conference Held May 14 ~16, 1991, Zurich Switzerland, VDI Berichte 894, VDI-Verlag GmbH, Busseldorf, 1991.
 - (3) Woodthorpe, J. and Pearce, R., 1970, "The Anomalous Behavior of Aluminum Sheet Under Balanced Biaxial Tension," Int. J. Mech. Sci., Vol. 12, pp. 341~347.
 - (4) Hill, R., 1950, "The Mathematical Theory of Plasticity," Clarendon Press, Oxford.
 - (5) Lee, C. H. and Kobayashi, S., 1973, "New Solution to Rigid-Plastic Deformation Problems Using a Matrix Method," Trans. ASMER, J. Eng. Ind., Vol. 95, pp. 865~873.
 - (6) Yang, D. Y. and Kim, Y. J., 1986, "A Rigid-Plastic Finite Element Formulation for the Analysis of General Deformation of Planar Anisotropic Sheet Metals and Its Applications," Int. J. Mech. Sci., Vol. 28, No. 12, pp. 835~840.
 - (7) Doege, E. and Seydel, M., 1988, 1988, "Influence of Anisotropic in Sheet Metal Forming," J. L. Chenot and E. Onate(ed.), Modeling of Metal Forming Processes, Kluwer Academic Publishers, Rotterdam, The Netherland, pp. 123~130.
 - (8) 김형중, 1990, "평면 이방성을 고려한 판재성형의 강소성 유한 요소 해석," 박사학위논문, 서울대학교.
 - (9) Ohwue, K., Yoshida, T. and Usuda, M., 1992, "Influence of Material Properties and Work Process Factors in Sheet Metal Forming," Proc. 4th Int. Conf. on Numerical Methods in Industrial Forming Processes-UNMISHEET '92, eds. J-L. Chenot, Wood, R. D. and Zienkiewicz, O. C., pp. 521~525.
 - (10) Gotoh, M., 1977, "A Theory of Plastic Anisotropy Based on a Yield Function of Forth Order(Plane Stress State)- I," Int. J. Sci., Vol. 19, pp. 505~512.
 - (11) Gotoch, M., 1980, "A Finite Element Analysis of the Rigid-Plastic Deformation of the Flange in a Deep Drawing Process Based on a Fourth-Degree Yield Function- II," Int. J. Mech. Sci., Vol. 22, pp. 367~377.
 - (12) Hill, R., 1990, "Constitutive Modelling of Orthotropic Plasticity in Sheet Metals," J. Mech. Phys. Solids, Vol. 38, No. 3, pp. 405~417.
 - (13) Barlat, F., Lege, D. J. and Berm, J. C., 1991, "A Six-Component Yield Function for Anisotropic Meterials," Int. J. Plasticity, Vol. 7, pp. 693~712.
 - (14) Barlat, F. and Chung, K., 1993, "Anisotropic Potential for Plastically Deforming Metals," Modeling and Simulation in Mat. Sci. and Eng., Vol. 1, pp. 403~416.
 - (15) Chung, K. and Shah, K., 1992, "Finite Element Simulation of Sheet Metal Forming for Planar Anisotropic Metals," Int. J. Plasticity, Vol. 8, pp. 453~476.
 - (16) Germain, Y., Chung, K. and Wagoner, R. H., 1989, "A Rigid Visco-Plastic Finite Element Program for Sheet Metal Forming Analysis," Int. J. Mech. Sci., Vol. 31, No. 1, pp. 1~24.
 - (17) Dienes, J. K., 1979, "On the Analysis of Rotation and Stress Rate in Deforming Bodies," Acta Mechanica 32, pp. 217~232.

- (18) Keum, Y. T., Nakamachi, E., Wagoner, R. H. and Lee, J. K., 1990, "Compatible Description of Tool Surfaces and FEM Meshes for Analyzing Sheet Forming Operations," *Int. J. Num. Meths Engrg.*, Vol. 30, pp. 1471~1502.
- (19) 금영탁, 1993, "박판 성형 공정의 유한요소 해석을 위한 마찰접촉 모델," *대한기계학회논문집*, 제17권, 제9호, pp. 2242~2251.
- (20) 이승열, 금영탁, 정관수, 박진무, 1994, "평면 이방성 박판성형공정의 3차원 유한요소 해석," *대한기계학회논문집*, 제18권, 제8호, pp. 2113~2122.
- (21) 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*(Accepted).