

하이브리드 박막/굽힘 방법을 이용한 드로비드력의 예측

이명규¹ · 정관수² · 김영탁[#] · R. H. Wagoner¹

Prediction of Drawbead Restraining Force by Hybrid Membrane/Bending Method

M. G. Lee, K. Chung, Y. T. Keum, R. H. Wagoner

(Received October 12, 2006)

Abstract

A simplified numerical procedure to predict drawbead restraining forces(DBRF) has been developed based on the hybrid membrane/bending method which superposes bending effects onto membrane solutions. As a semi-analytical method, the new approach is especially useful to analyze the effects of various constitutive parameters. The present model can accommodate general anisotropic yield functions along with non-linear isotropic-kinematic hardening under the plane strain condition. For the preliminary results, several sensitivity analyses for the process and material effects such as friction, drawbead depth, hardening behavior including the Bauschinger effect and yield surface shapes on the DBRF are carried out.

Key Words : Drawbead, Hybrid Method, Bauschinger Effect, Isotropic-Kinematic Hardening, Anisotropic Yield Function

1. 서 론

자동차용 판재 성형 시 초기 금형 디자인 단계에서 정확한 드로비드력의 계산은 금형 설계자로 하여금 판재가 금형으로 유입되는 양을 정확하게 판단케하는 중요한 요인으로 작용한다. 이 때, 정밀한 드로비드력을 계산하기 위해서는 판재의 물성, 드로비드의 형상 및 마찰에 관한 영향을 고려해야만 한다. 최근 컴퓨터의 발달로 인하여 금형 설계 시 유한요소해석등 전산모사법을 도입함으로써 기존의 단순 실험에 의한 반복적인 시행착오를 줄이려는 노력이 계속되고 있다. 하지만, 유한요소에 의한 해석을 위해서는 마찰 및 블랭크 홀더력 등 프로세스에 대한 최적화도 필요하지만, 성형에 이용되는 판재 자체의 물성에 대한 연구도 매우 필요한 실정이다. 예를 들면, 드로비드력을 예측하기 위해 일반적으로 이용되고 있는 Stoughton

모델[1~3]의 경우 해석해(analytical solution)를 얻기 위하여 판재의 물성을 최대한 단순화 하였다. 즉, 판재는 인장과 압축성질이 서로 대칭적(symmetric)이고 항복함수는 수직 이방성(normal anisotropy)으로 가정하였다. 하지만, 최근 자동차용 판재로 많이 연구되고 있는 2상 고강도 판재(DP-Steel) 및 알루미늄 합금 판재의 경우 Bauschinger 효과 및 항복함수의 비등방성이 매우 큰 것으로 알려져 있어 기존의 단순화된 모델은 정확한 드로비드력의 계산을 위해서는 상당히 제한적이라 할 수 있다.

본 연구에서는 드로비드력을 계산하기 위하여 평면변형률에 기초한 하이브리드 membrane/bending 수치해석법이 개발되었다. 수치해석에 사용되는 구성방정식은 Bauschinger 및 transient 효과를 설명할 수 있는 혼합 등방-이동 경화규칙과 비등방성을 고려하기 위하여 최근 개발된 Barlat의 Yield2000-2d[4]이 이용되었다.

1. Dept. Materials Sci. & Eng., Ohio State University

2. 서울대학교 재료공학부, ITRC

교신저자 : 한양대학교 기계공학부

E-mail :ytkeum@hanyang.ac.kr

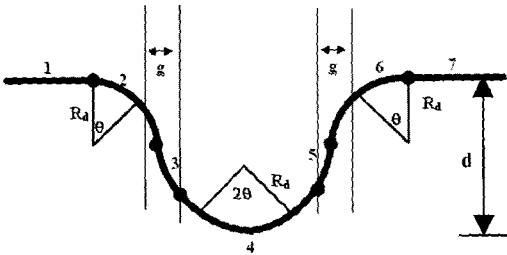


Fig. 1 Geometrical parameters for a circular drawbead

2. 하이브리드 방법(Hybrid method)

Membrane/bending 하이브리드 방법은 굽힘 해 (bending solution)가 Fig. 1에서 보이는 드로비드의 형상에 의해 계산된 각 구간에서의 인장력 (Tension)에 의한 membrane 해와 더해질 수 있다는 가정을 적용한다. 굽힘에 의한 변형율은 드로비드의 형상에서 직접적으로 구해지며, 인장에 의한 변형율은 각 드로비드 위치에서의 판재의 단면력과 단면에서의 응력에 의한 힘의 평형에서 구해지며 이는 비선형 방정식에 의해 표현된다. 즉, 단면에서의 응력은 굽힘 및 인장에 의해 중첩된 전체 변형율 및 적절한 구성방정식에 의하여 구해진다.

2.1 Tangential strain distribution

먼저 드로비드의 각 요소들은 두께 방향으로 N개의 섹션으로 나눌 수 있다. 이때 각 요소의 초기 넓이는 A_0 이다. 1 번째 요소의 현재 두께는 다음과 같이 일정부피조건(incompressibility)를 이용하여 구해진다(Fig. 2 참조).

$$\Delta z_{i-1} = \sqrt{R_i + 2 \frac{R A_0}{S N} - R_i} \quad (\text{중립면 위}) \quad (1)$$

$$\Delta z_i = R_i - \sqrt{R_i - 2 \frac{R A_0}{S N}} \quad (\text{중립면 아래}) \quad (2)$$

여기서 R 및 S 는 각각 중립면의 곡률반경 및 길이를 나타낸다. 그러므로 tangential 변형률의 증분은 아래와 같다.

$$\Delta \epsilon_{ps,l} = \ln \left(\frac{S_l}{S_i} \right) \quad (3)$$

$$S_l = (1 + z_l/R) S$$

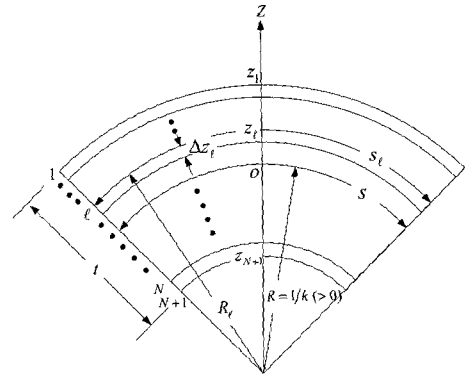


Fig. 2 Definition of N-layers through the thickness

여기서 $^o S_l$ 는 l 번째 섹션의 초기 길이를 나타낸다.

다음 장에서 설명될 구성 방정식을 적용하여 다음과 같이 각 점에서의 인장력이 정의 된다.

$$T = \sum_{i=1}^N \langle \sigma(z_i) \rangle \cdot \Delta z_i W \quad (4)$$

여기서 $\langle \sigma(z_i) \rangle = \frac{\sigma(z_i) + \sigma(z_{i+1})}{2}$ 는 인접한 두 섹

션의 평균값을, W 는 판재의 폭을 나타낸다.

2.2 Distribution of forces

주어진 드로비드의 형상에 의해 성형 후 얻어진 판재의 각 구간에서의 인장력은 판재가 드로비드위로 당겨질 때의 일과 그 동안 판재의 굽힘, 퍼짐, 그리고 마찰힘을 극복하는데 필요한 일의 등가원리에 의하여 구해진다[1]. 먼저 구간 1 에서는 블랭크홀더력과 마찰에 의하여 인장력(T_{BHF})이 증가하고 판재가 드로비드에 유입되는 순간 굽힘에 의하여 인장력의 증가(ΔT_{2B})와 마찰에 의하여 $e^{\mu\theta}$ 배 만큼 더욱 증가한다. 이때 μ 와 θ 는 마찰 계수 및 원형 드로비드의 i-번째 섹션에서의 접촉각을 나타낸다. 그러므로 구간 2 의 i-번째 섹션에서의 인장력은 다음과 같다.

$$T_{2i} = (T_{BHF} + \Delta T_{2B}) \cdot e^{\mu\theta_i} \quad (5)$$

원형 드로비드와 판재사이의 접촉 각도(θ)는 형상(geometry)에 의해 결정되며 이는 Stoughton 이 제안한 값을 사용하였다 [1].

$$\theta = \tan^{-1} \left(q \frac{\left((1-p)^2 + p(2-p) \left(\frac{1-q^2}{1-q^2} \right)^{1/2} - 1 + p \right)}{(1-q^2)} \right) \quad (6)$$

위의 식에서 $p = \frac{d}{(2R_d+t)}$, $q = \frac{(2R_d+t)}{(2R_d+g)}$ 이며 d 와

g 는 각각 드로비드 깊이와 bead gap 을 나타낸다.

식 (5)에서 굽힘에 의한 힘의 증가분은 판재를 드로비드 표면위로 당길 때 필요한 일과 이때 증가해야하는 단위 폭에 대한 힘의 관계로부터 아래와 같이 구해진다 [1].

$$\Delta T_{2B} / W = \left[\int (\sigma \cdot d\epsilon) dV \right]_{\text{tension } T_{BHF} \text{ and bending}} - \left[\int (\sigma \cdot d\epsilon) dV \right]_{\text{tension } T_{BHF}} \quad (7)$$

위의 식에서 변형율은 굽힘에 의한 변형율(드로비드의 곡률에 의하여 결정) 과 membrane 변형율로 나누어진다. Membrane 변형율(또는 현재 요소의 중립면의 길이) 은 각 점에서의 힘의 평형에 의하여 얻어지게 된다.

위에서 서술한 방법에 의하여 다른 모든 구간에서의 인장력 및 응력 분포를 구할 수 있다. 예를 들어 구간 4 에서의 판재는 BHF 에 의한 인장, 구간 2 에서의 굽힘 및 마찰, 구간 3 에서의 퍼짐 (unbending) 그리고 구간 4 에서의 굽힘에 의한 전체 인장력의 증가를 겪게 된다.

재료의 물성과 드로비드 형상에 의하여 각 구간의 인장력이 구해지면, 식 (4)와의 맴브레인 변형율에 대한 비선형 방정식이 성립하며 이는 bi-section 법에 의하여 해가 구해진다.

2.3 구성방정식(Constitutive equations)

선형탄성식에 의하여

$$d\sigma_{ps} = E^{ps} (d\epsilon_{ps} - d\epsilon_{ps}^p) \quad (8)$$

여기서 $E^{ps} = \frac{E}{1-\nu^2}$ 이며 (E: Young's modulus, ν :

Poisson ratio) 'ps'는 평면변형조건에서의 값들을 의미한다. 소성일 등가원리에 의하여

$$\bar{\sigma}_{iso} d\bar{\epsilon} = \left| \sigma_{ps} - \alpha_{ps} \right| \cdot \left| d\epsilon_{ps}^p \right| \quad (9)$$

여기서 바(bar)는 유효값(equivalent)을 나타내며 'iso'는 항복함수의 크기를 나타내는 등방경화 (isotropic hardening)를, α 는 항복함수의 이동 (kinematic hardening) 및 위치를 나타내는 back 응력이다. 특정 항복함수가 정해지면 $\left| \sigma_{ps} - \alpha_{ps} \right|$ 와 $\bar{\sigma}_{iso}$ 의 비인 β 가 평면변형을 조건에서 구해지게 된다. 예를 들어 Von Mises항복함수의 경우 β 는 $2/\sqrt{3}$ 이다. 그러므로 식 (9)에 의하여

$$\left| \sigma_{ps} - \alpha_{ps} \right| = \beta \bar{\sigma}_{iso}, \left| d\epsilon_{ps}^p \right| = \frac{1}{\beta} d\bar{\epsilon} \quad (10)$$

본 연구에서는 판재의 Bauschinger effect 와 transient 거동을 나타내기 위하여 [5], Back 응력의 증가는 평면변형을 조건에서 다음과 같은 비선형 등방-이동 경화규칙을 따른다.

$$d\alpha_{ps} = C_1 \left| d\epsilon_{ps}^p \right| \frac{\beta^2 (\sigma_{ps} - \alpha_{ps})}{\left| \sigma_{ps} - \alpha_{ps} \right|} - C_2 \alpha_{ps} \beta \left| d\epsilon_{ps}^p \right| \quad (11)$$

여기서 C_1 및 C_2 는 물질 상수로서 일반적으로 일축 인장-압축 실험에 의하여 얻어진다.

위에서 서술된 구성방정식 및 변형률 증분 $d\epsilon_{ps}$ 가 주어질 때 시간 증분에 따른 응력은 아래의 비선형 방정식을 뉴턴법에 기초한 predictor-corrector 방법으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{iso} - \bar{\sigma}_{iso} \left(\beta \int \left| d\epsilon_{ps}^p \right| \right) = \\ \left| \sigma_{ps} - \alpha_{ps} \right| / \beta - \bar{\sigma}_{iso} \left(\beta \int \left| d\epsilon_{ps}^p \right| \right) = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

위의 탄소성에 기초한 응력적분법에 대한 자세한 내용은 다음의 참고문헌에 잘 나타나 있다[5].

3. 감도 실험(Sensitivity Tests)

본 연구에서 개발된 하이브리드 수치해석 방법의 해석능력을 검증하고 판재의 물성이 드로비드력에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 감도 실험 (sensitivity tests)를 수행하였다. 본 연구에서는 재료의 물성 중 특히 경화거동 및 항복함수의 형태에 대한 드로비드력의 변화를 중점적으로 다루었다. 항복함수는 Barlat 의 평면응력함수인 Yld2000-2d 를 사용하였으며, 모든 이방성 상수들은 1 로 두어 등방성 항복함수로 가정하였다. 드로비드 및

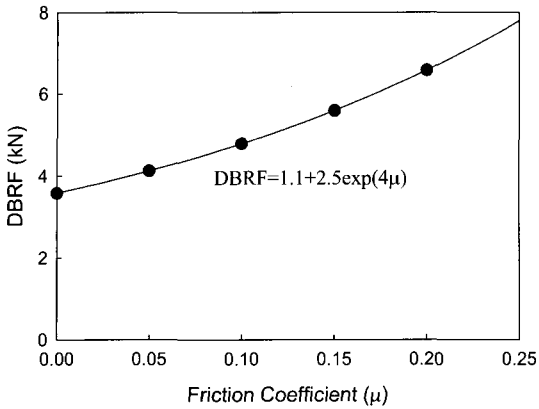


Fig. 3 Drawbead restraining forces(DBRF) with respect to the friction coefficient

판재의 치수는 $R_d=5.5\text{mm}$, $t=0.81\text{mm}$, $g=t+0.08\text{mm}$, $\mu=0.18$, w (판재의 폭)= 50mm 이다. 판재는 두께방향으로 20 개의 섹션으로 나누었으며 굽힘과정에서는 200 개의 증분을 사용하였다. 또한 드로비드 깊이 $d=2R_d+t$ 이다. 사용된 경화 곡선은 Voce fitting 함수로서 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_{iso} + \bar{\sigma}_{kine} = \left\{ \bar{\sigma}_0 + \xi q \left(1 - e^{-b\bar{\epsilon}} \right) \right\} + (1 - \xi) q \left(1 - e^{-b\bar{\epsilon}} \right) \quad (13)$$

여기서 q 및 b 는 물질 상수이고 ξ 는 항복함수의 등방경화와 이동경화의 비이다. 예를 들어, $\xi=1$ 일 경우 완전등방경화, $\xi=0$ 은 완전이동경화를 나타낸다. 식 (11)을 적분하여 위의 식 (13)의 이동경화 부분인 두번째 항과 비교하면 $C_2=b$, $C_1=(1-\xi)qC_2$ 가 됨을 알 수 있다. 본 감도실험에 사용된 경화변수는 $\bar{\sigma}_0=166.2\text{MPa}$, $q=215.8\text{MPa}$, $b=8.9$ 이다.

먼저 Fig. 3에 판재와 드로비드 사이의 마찰력이 드로비드력에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 0 에서 0.2 사이의 마찰 계수에 따른 값을 본 방법에 의하여 나타내었다. 이는 마찰력이 클수록 판재와 bead 사이의 미끄러짐에 대한 저항력이 식 (5)와 같이 증가함에 따른 것으로 이 그림에서 나타나듯이 exponential 형태의 증가 함수를 보여주고 있다.

Fig. 4에서는 드로비드 깊이 d 에 따른 드로비드력의 변화를 나타내었으며, d 가 증가함에 따라 드로비드력이 S형상으로 증가함을 보여주고 있다.

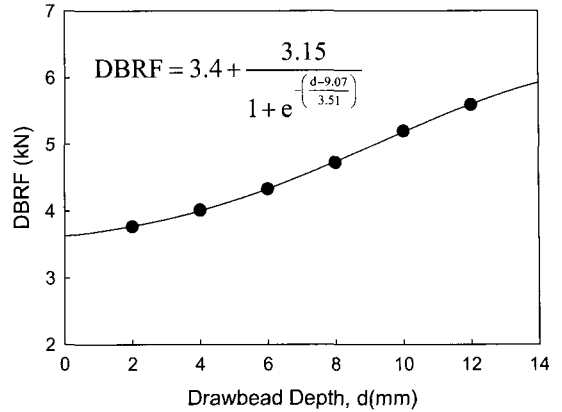


Fig. 4 Drawbead restraining forces(DBRF) with respect to drawbead depth(d)

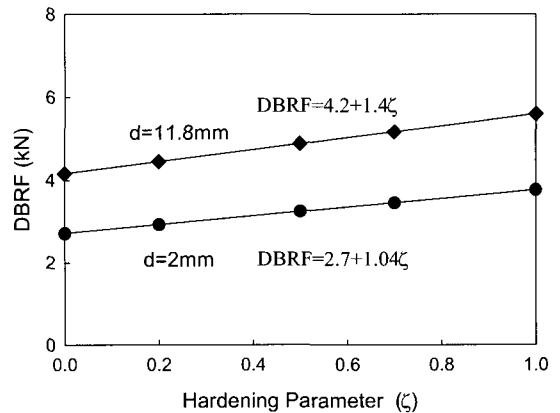


Fig. 5 Drawbead restraining forces (DBRF) with respect to the hardening type (ξ)

이는 깊이가 커짐에 의해 bead와 판재사이의 접촉각이 증가함에 따른 것이다.

Fig. 5에 경화 규칙에 따른 드로비드력(DBRF)을 $d=2$ 및 11.8 에 대하여 나타내었다. 동등한 조건에서 등방경화의 경우 최대의 드로비드력이, 이동경화의 경우 최소의 값을 나타냄을 알 수 있으며, 약 25%의 차이를 보인다. 실제 알루미늄합금과 같은 자동차 판재의 경우 약 60~70%의 Bauschinger 비를 나타낸다고 알려져 있으므로[6] 위의 결과에 의해 정확한 경화곡선의 사용이 드로비드력에 상당한 영향을 끼침을 알 수 있다.

판재가 드로비드를 통과하기까지의 재료의 응력 상태를 알아보기 위하여 Fig. 6에 구간 6에서의

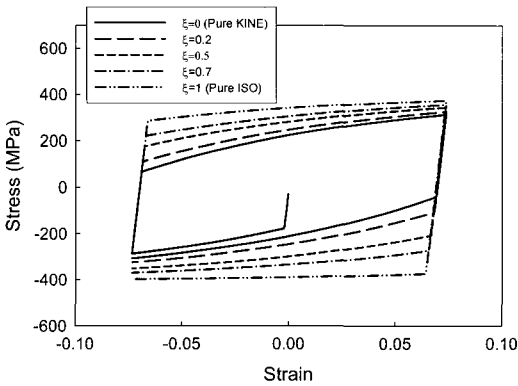


Fig. 6 Stress-strain history of a sheet element at the outer fiber with respect to the hardening type(ξ)

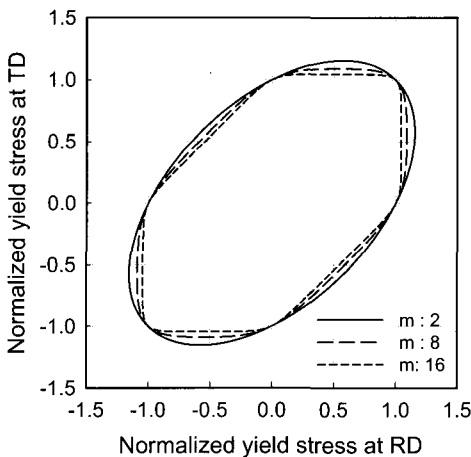


Fig. 7 Yield locus for three different exponents

판재 두께 최하단에서의($y=-t/2$) 응력변화를 경화규칙에 대하여 나타내었다. 판재의 변형이 드로비드를 통과하면서 인장-압축을 반복하므로 Bauschinger 효과에 의한 굽힘 에너지의 차이가 드로비드력의 차이로 나타나게 됨을 알 수 있다.

Yld2000-2d에서 항복함수의 차수(m)는 재료의 미세구조에 따라 결정된다. 예를 들어, BCC의 경우는 6을 FCC의 경우는 8이 주로 이용된다[4]. Fig. 7 및 Fig. 8에서 차수에 따른 항복함수의 형상과 이에 따른 드로비드력의 차이를 나타내었다. Yld2000-2d의 경우 항복함수 차수가 작을 수록 드로비드력이 커짐을 알 수 있다. 이는 차수가 커질 수록 평면 변형률에 상응하는 응력값이 작아지기 때문으로 해석된다.

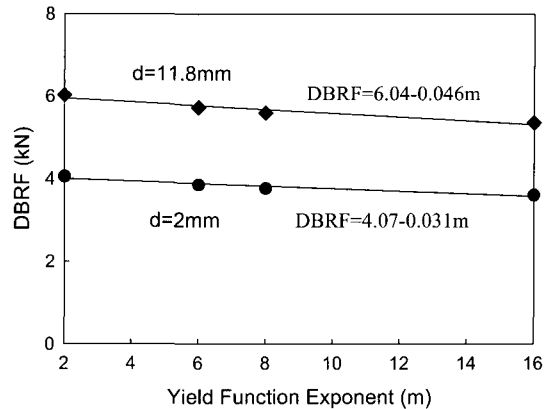


Fig. 8 Drawbead restraining forces(DBRF) with respect to yield function exponent(m)

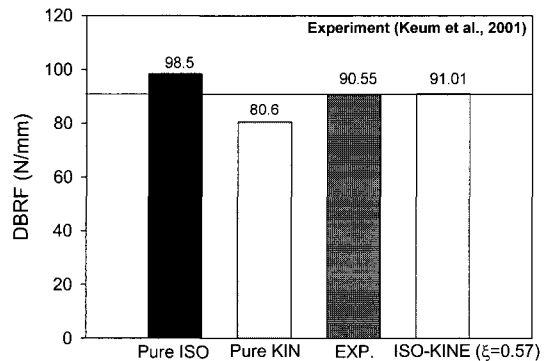


Fig. 9 Comparison of predicted results with measurement

본 논문에서 제안된 수치해석법의 검증을 위하여 원형드로비드 실험값과 세가지 경화모델을 적용한 예측값과의 비교를 Fig. 9에 나타내었다. 사용된 재료는 SPCC 판재이며 일축인장 실험에 의해 결정된 경화변수는 $\bar{\sigma}_0 = 165\text{MPa}$, $q = 193\text{MPa}$, $b = 12.8$ 이다. 본 재료의 경우 이방성이 크지 않으므로 Yld2000-2d 항복함수의 이방성 계수들을 모두 1로 두었으며 항복함수 차수는 6으로 가정하였다. 실험과 수치해석에 사용된 공정변수는 BHF = 165N/mm, $\mu = 0.17$, $R_d = 4.5\text{mm}$, $g = 1.2\text{mm}$, $d = 3\text{mm}$ 이며 판재의 초기 크기는 45mm(폭)×300mm(길이)×0.8mm(두께)이다. Fig. 9의 비교에서 완전 등방경화 및 이동경화는 각각 드로비드 저항력을 높게 또는 낮게 예측함을 보이고 있다. 본 재료에 대한 인장-압

후 기

축 실험결과가 부재하여 정확한 Bauschinger 비를 알 수 없으므로 실험값과 일치하는 ξ 값을 역으로 계산하였다. 그림에서 나타내듯이 이 값이 0.57일때 실험값과 일치함을 보였으며 이는 이 전 문헌에서 보고 된 고강도 판재의 값과 비교적 일치함을 알 수 있다.

이 논문연구는 한국과학재단에서 지원하는 MOST/KOSEF (R11-2005-065)의 SRC/ERC 프로그램의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

4. 결 론

참 고 문 헌

(1) 본 연구에서는 드로비드 저항력을 계산하기 위해 평면변형을 변형의 가정하에 준해석적(semi-analytic) membrane/bending 하이브리드 방법을 개발하였다.

(2) 개발된 모델은 비선형 등방-이동경화 및 비이차 비등방 항복함수를 적용할 수가 있어 실제 판재의 Bauschinger 효과, transient 거동 및 비등방성질을 정확하고 효과적으로 나타낼 수가 있다.

(3) 감도 실험(Sensitivity test)를 통하여 판재의 물성 중 경화규칙 및 항복함수의 형상이 드로비드력에 미치는 영향을 고찰하였다. 그 결과 실제 판재에서 나타나는 Bauschinger 효과를 고려할 경우 기존의 등방경화 모델을 사용했을때에 비해 약 10~25% 정도 드로비드 저항력을 낮게 예측함을 알 수 있었다. 또한, 판재의 비등방성질을 고려함으로써 기존의 이차 등방항복함수를 이용한 드로비드력의 계산이 금속의 미세구조를 고려한 항복함수를 도입할 경우 드로비드 저항력을 높게 예측할 수 있음을 확인하였다.

(4) 본 연구에서 제안된 수치해석법의 결과와 실제 SPCC 판재를 이용한 원형드로비드 실험값과의 비교를 통해 정확한 구성방정식을 사용한 드로비드력의 예측은 유한요소 등을 이용한 성형해석의 정확성을 높이는데 매우 중요한 요인으로 작용할 것으로 사료된다.

- [1] T. B. Stoughton, 1988, Model of Drawbead Forces in Sheet Metal Forming, Proceedings of the 15th IDDRG, Dearbon, USA, p. 205.
- [2] Y. T. Keum, J. H. Kim, B. Y. Ghoo, 2001, Expert Drawbead Models for Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Processes, International Journal of Solids and Structures, 38, pp. 5335~5353.
- [3] 금영탁, 김준환, 차지혜, 2002, 3 차원 박판성형 공정 유한요소해석용 드로비드 모델, 한국소성가공학회지, 11 권, pp. 294~404.
- [4] F. Barlat, J. C. Brem, J. W. Yoon, K. Chung, R. E. Dick, S. H. Choi, F. Pouboghrat, E. Chu, D. J. Lege, 2003, Plane stress yield function for aluminum alloy sheets, Int. J. Plasticity 19, p. 1297.
- [5] K. Chung, M.G.Lee, D.Kim, C.Kim, M.L.Wenner, F. Barlat, 2005, Springback evaluation of automotive sheets based on isotropic-kinematic hardening laws and non-quadratic anisotropic yield functions, part I: Theory and formulation, Int. J. Plasticity 21, pp. 861~882.
- [6] M. G. Lee, D. Kim, C. Kim, M. L. Wenner, R. H. Wagoner, K. Chung, 2005, Springback evaluation of automotive sheets based on isotropic-kinematic hardening laws and non-quadratic anisotropic yield functions, part II: Characterization of material properties, Int. J. Plasticity 21, pp. 883~914.