

탄소성 유한요소법을 이용한 드로우비드 성형 및 인발공정 해석

정 동 원* · 이 상 제**

Draw-Bead Forming and Traction Process Analysis by an Elasto-Plastic Finite Element Method

Dong-Won Jung* and Sang-Je Lee**

ABSTRACT

During the sheet metal forming, it is often necessary to control the rate of metal flow into the die cavity. The control of metal flow can be achieved through the blankholder, lubricant, draw-bead, or a combination. In this study among the conditions, examines the draw-bead. The role of control or restraining beads is to provide enough tension to deform the material plastically over the punch face, and to ensure proper shape fixing of the part. In this study, an elasto-plastic/static-implicit FE program is used for the analysis. It was assumed the result of numerical analysis is applicable to the practical industrial process by analyzing the draw-bead forming and traction process with erection.

Key words : Sheet metal forming, Lubricant, FE program, Elasto-plastic, Numerical analysis, Forming process, Traction process, Erection

1. 서 론

박판성형은 가공 중에 소재의 손실이 적고 가공시간이 짧아 낮은 가격으로 대량생산이 가능하기 때문에 자동차산업이라든지 항공산업, 전자부품산업 등지에서 많이 쓰이는 중요한 제조 공정 중의 하나이다.

본 논문에서는 박판 금속 성형의 다이 설계에 있어

서, 매우 중요한 역할을 차지하고 있는 드로우 비드에 관하여 고찰해 보고자 한다. 드로우 비드라 함은 박판을 성형할 때 재료가 금형 안쪽으로 빨려 들어가는 것을 조절하도록 인장 구속력을 제공하여, 주름 발생이나 스프링 백 현상을 억제하고 원하는 형상의 제품을 생산하도록 도움을 주는 장치라 할 수 있다. 이러한 드로우 비드는 인장구속력을 발생시키기 위해서 패널성형 전에 이미 박판내부에 변형을 유발하게 된다. 따라서 이 변형은 패널성형의 초기상태에 영향을 미치게 되므로 잘못된 드로우 비드의 설계는 도리어 패널성형에 치명적인 악영향을 미칠 수도 있다.

* 제주대학교 기계공학과
Dept. of Mechanical Eng., Cheju Nat'l Univ.

** 제주대학교 대학원
Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

그러므로 비드성형 공정시, 박판내부에 발생하는 변형과 응력분포에 관한 해석은 박판금속 재료의 생산성과 성형성, 제품의 품질 등의 개선에 크게 기여하고, 패널성형 해석시 경계조건을 대체할 수 있는 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

그러나 이러한 드로우 비드의 중요성에도 불구하고 공정해석이 몇 년 전만해도 단순히 실험이나 관찰을 통한 시행착오적(trial and error)인 방법에 의존해 왔었다. 이에 들어가는 시간과 노력, 비용은 대단했기 때문에 사람들은 컴퓨터를 이용한 수치해석에 관심을 가지기 시작했다. 또한 컴퓨터 하드웨어의 발전과 해석 접근방식의 발달로 근사적인 해에 의한 오차도 상당부분 줄일 수 있게 되어 현재에는 대부분의 박판성형 공정에서 유한요소법을 이용하고 있으며, 그 실효성이 입증되고 있는 실정이다.

지금까지의 드로우 비드에 관한 연구를 살펴보면, 1978년 Nine¹⁾이 드로우 비드의 형상을 간략화하여 드로우 비드가 발생시키는 인장구속력에 영향을 미치는 인자들에 관한 연구를 실험을 통하여 고찰하였다. 그리고 1986년에는 Triantafyllidis 등^{2,3)}이 비드성형 공정을 1차원 탄소성 쉘 요소를 사용하여 해석하고 실험치와 비교하였다. 또한, 1991년에는 Wang 등^{4,5)}이 패널성형시에 드로우 비드의 형상과 마찰이 주는 영향을 실험적으로 고찰하여 비드 설계의 방향을 제시한 바 있다.

본 논문에서는 컴퓨터를 이용한 유한 요소법을 통해서 들림이 있는 경우, 비드성형 공정의 사전 예측 및 분석을 수행하여 비드성형이 박판에 미치는 영향을 두께분포나 변형률 등을 살펴봄으로써 알아보고자 한다. 아울러 성형공정 후의 인발공정도 해석하여 드로우 비드 설계에 중요한 변수가 되는 인발력을 산출해 보고자 한다.

II. 이론해석

본 해석에서는 가상일의 원리에 의하여 평형방정식으로부터 지배방정식의 적분형을 유도하고, 변화하는 기준좌표계에 대해 증분해석을 적용한 개량라그랑지 수식화를 연속체요소로 유한근사화하였다. 이때 재료

의 성질을 탄소성으로 보고, 소성변형은 Prandtl-Reuss 식으로 표현되는 유동이론에 따라 일어난다고 가정하였다. 또한, 항복여부는 Von Mises 식으로 판정되며 가공경화는 등방적으로 일어난다고 가정하였다⁶⁾.

2.1. 탄소성 유한요소 수식화

형상이 Ω 이고, 경계표면이 Γ 인 Fig. 1과 같은 자유물체에서, 이 자유물체가 평형상태에 있을 때 σ_{ij} 는 다음의 평형방정식을 만족하는 임의의 응력장이다.

$$\sigma_{j,i,j} + \rho b_i = 0 \quad \text{in} \quad \Omega \quad (1)$$

윗식에서 $\sigma (= \sigma_{ij} e_i e_j)$ 는 변형된 형상 Ω 에서 정의되는 Cauchy 응력텐서이고, ρ 는 물체의 밀도를 나타내며, $\mathbf{b} (= b_i e_i)$ 는 물체력벡터이다.

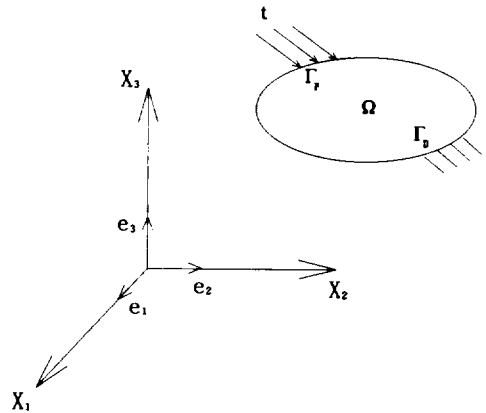


Fig. 1 Deformation of material and reference coordinate.

가상 변위벡터 $\bar{\mathbf{u}} (= \bar{u}_i e_i)$ 를 변위가 규정된 경계면 Γ_D 에서 $\bar{u}_i = 0$ 인 임의의 벡터라 할 때, 평형방정식에 발산정리를 적용하고 경계조건을 대입하면 다음과 같은 지배방정식의 적분형을 얻을 수 있다.

$$\int_{\Omega} \sigma_{j,i,j} \bar{u}_i d\Omega^t = \int_{\Omega} \rho \Delta b_i \bar{u}_i d\Omega^t + \int_{\Gamma_f} \Delta t_i \bar{u}_i d\Gamma^t, \quad \forall \bar{\mathbf{u}}_i \quad (2)$$

이 식은 변형이 작고, 변형하는 동안 재료의 성질 등의 변형기구 계통이 선형일 경우에만 바로 적용할 수 있다. 하지만 변형량이 클 경우에는 변형된 형상 Ω 가 초기의 Ω^0 와 차이가 크므로, (2)식을 변형시켜서 초기 형상 Ω 와 일치하는 기준형상 Ω^R 에 대해 나타낼 필요가 있다. 여기서 임의의 시간 t 에서의 형상 Ω^t 를 기준으로 하는 개량 라그랑지(Updated Lagrangian)법을 사용하게 되면, 시간증분 Δt 동안에 미소변형을 하는 것으로 가정하므로 적분식은 다음과 같게 된다.

$$\Delta T_{ji} \bar{u}_{i,j} d\Omega = \int_{\Omega} \rho \Delta b_i \bar{u}_i d\Omega + \int_{\Gamma_f} \Delta t_i \bar{u}_i d\Gamma, \quad \forall \bar{u}_i \quad (3)$$

소성이론에서 응력과 변형률을 나타내는 방법에는 응력과 변형률 증분을 관계지어주는 흐름이론과 응력과 전 소성 변형률을 관계지어 주는 전 변형률이론이 있다. 전 변형률이론을 적용하면, 소성문제를 해석하는데 있어서 수학적 취급이 용이 하지만, 일반적으로는 하중 경로에 무관한 것으로 취급할 수 없기 때문에 탄성 변형과 소성 변형을 동시에 고려해야 하는 탄소성 영역의 문제를 취급하는 데는 (4)식과 같은 Prandtl과 Reuss가 제안한 식이 사용된다.

$$\sigma_{ij}^{\nabla} = D_{ijkl} \Delta \varepsilon_{kl} \quad (4)$$

여기서,

$$\sigma_{ij}^{\nabla} = \Delta \sigma_{ij} - \sigma_{ik} \omega_{kj} - \sigma_{jk} \omega_{ki}$$

$$D_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) - \frac{\alpha^3 \mu (s_{ij} s_{kl})}{\left(\bar{\sigma} \left(1 + \frac{H'}{3\mu} \right) \right)}$$

III. 수치해석 결과

3.1. 드로우 비드 성형공정 해석

앞서 유도된 유한요소 이론을 바탕으로 구성된 프로그램을 이용하여 드로우 비드 성형공정을 해석하였다. 본 논문에서는 단순원형단면 드로우 비드를 택하

였으며, 그에 대한 재료의 물성치는 Table 1에, 다이 및 펀치의 형상은 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 박판의 초기 두께는 0.8mm, 드로우 비드의 펀치반경은 6mm, 하부다이의 곡률반경은 3mm로 가정하였다.

Table 1 material property

E	σ_Y	ν	k	n	clom
200	179	0.3	492	0.23	0.11

E : 탄성계수[GPa]

σ_Y : 초기항복응력[MPa]

ν : 포와송비

k : 재료경화상수[MPa]

n : 재료경화지수

clom : 마찰계수

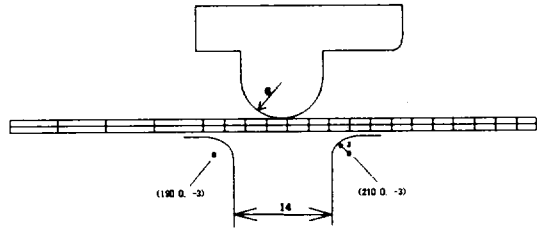


Fig. 2 Schematic of the die and bead.

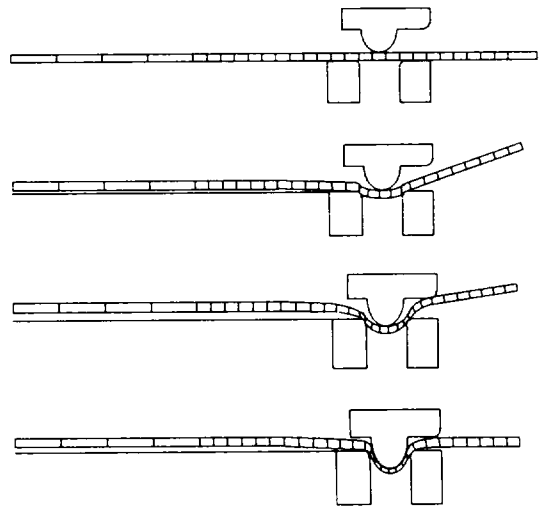
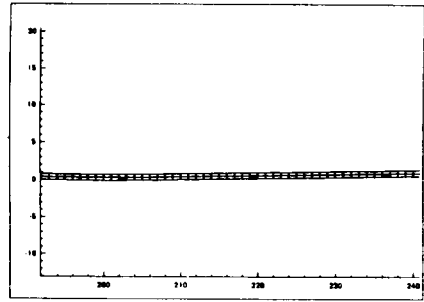
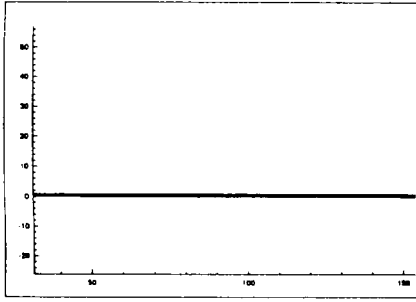
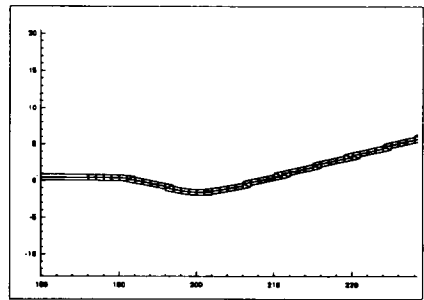
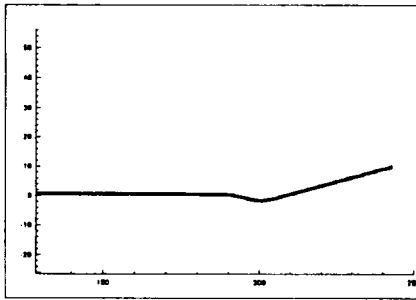


Fig. 3 The deformed shape of blank at every punch stroke.

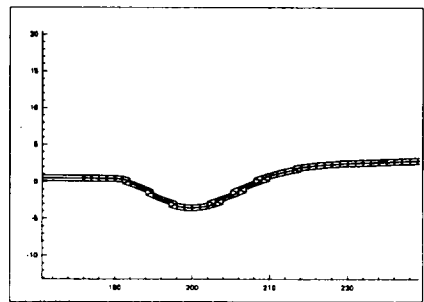
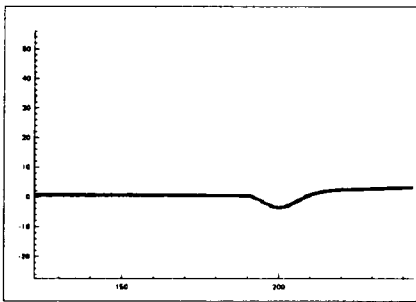
해석을 위해서 4절점 연속체요소를 사용하였으며, 박판을 총 243개의 절점으로 된 160개의 요소로 나누



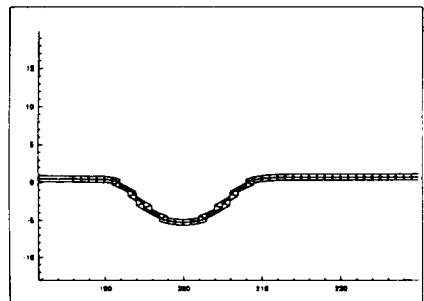
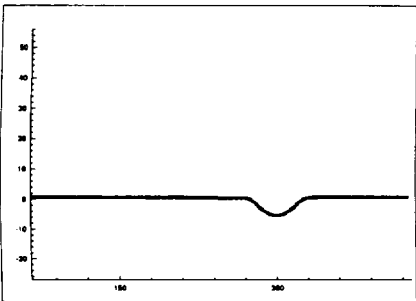
(a) step = 100



(b) step = 2000



(c) step = 4000



(d) step = 5700

Fig. 4 The deformed shapes of blank after numerical analysis.

있다. 성형공정을 위해서 스텝당 편치행정은 0.001mm 를 주었는데 이렇게 작은 편치행정을 택한 이유는 수렴성 문제 때문이었고, 총 편치행정은 편치가 5.7mm정도 내려왔을 때까지 해석하였다. 전체 계산시간은 RS/6000 Workstation에서 약 6.14 시간이 소요되었다. Fig. 3에 편치행정에 따른 예상되는 박판의 변형 형상을 도시해 보았다. 행정이 진행되면서 비드 바깥쪽 박판으로부터 들림이 일어날 것이고, 나중에는 비드편치와 함께 하부다이에 눌릴 것이다. 프로그램 수행결과 Fig. 4와 같은 변형형상이 나타났다. 그림으로부터 초기에 드로우 비드의 바깥쪽 부근에서 들림이 일어나리라 예상했던 것과 수치해석 결과가 잘 맞음을 알 수 있었고, 점차 행정이 지나면서 박판이 꺾이는 현상도 관찰되었다. 그리고 드로우 비드가 닿는 박판부위에서는 두께변화가 일어났는데, Fig. 5에 step에 따른 박판의 두께변화를 나타내었다.

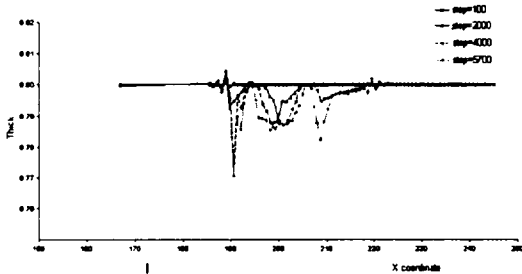


Fig. 5 Distribution of the thickness in each step stage.

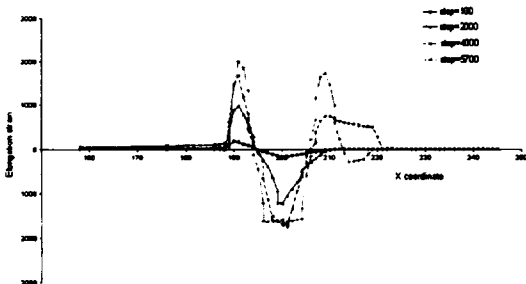


Fig. 6 Distribution of the elongation strain at the near bead (upper layer).

Fig. 6은 드로우 비드 주변에 있는 박판 윗쪽면 (upper layer)에서의 길이방향 변형률 분포를 보여주

고 있다. 다이가 있는 양면에서는 박판이 인장을 받므로 변형률이 증가하지만 반대로 압축을 받는 비드 중심부에서는 압축변형률이 생김을 관찰할 수 있다.

3.2. 드로우 비드 인발공정 해석

드로우 비드의 성형공정 이후에 이루어지는 과정은 실제로 성형할 재품을 만들기 위해 진행되는 패널성형 과정이다. 이때에 인장구속력을 가지고 재료가 다 이구멍 안쪽으로 빨려 들어가는 것을 조절해 주는 것이 드로우 비드의 주된 역할이라고 할 수 있다. 따라서 얼마만큼의 인장구속력을 가지고 재료의 흐름을 적절히 조절해 주느냐가 드로우 비드를 설계하는데 있어서 중요한 관점이 된다.

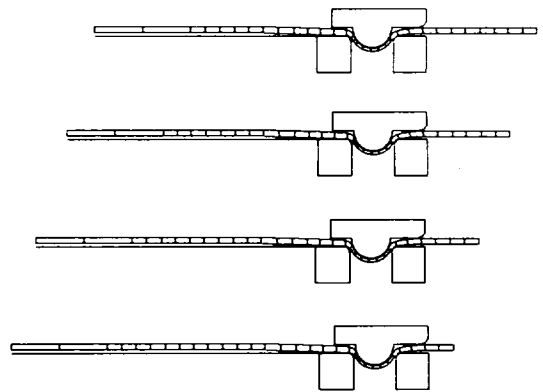


Fig. 7 At the traction process, the deformed shape of blank at each stroke.

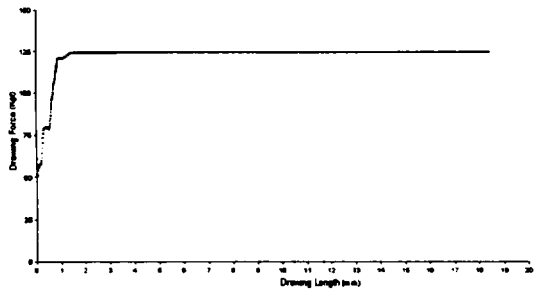


Fig. 8 The traction force which goes with the traction quantity.

본 절에서는 단순원형단면 드로우 비드에 관한 성

형공정에 이어서 그 결과 데이터를 가지고 인발공정을 해석해 보았다. 해석에 사용된 다이 및 비드편치와 재료물성치는 성형공정 때의 데이터를 그대로 사용하였고, 블랭크를 인발시키는 힘은 비드 왼쪽으로부터 0.01mm/s로 잡아 당기는 경계조건을 부여하였다. 전체 계산시간은 RS/6000 Workstation에서 약 4.93시간이 소요되었다.

Fig. 7에 블랭크가 인발됨에 따라 변형되는 형상을 도시하였다. 그리고 Fig. 8에 인발량에 따른 인발력을 나타내었는데 일정량의 인발이 이뤄지고 난 후에, 인발력이 평형상태에 도달함을 알 수 있었다. 본 해석의 조건 하에서는 125 kgf의 평형상태 인발력을 얻을 수 있었는데, 이러한 인발력은 앞으로 패널 성형해석시에 경계조건으로 이용될 수 있는 중요한 자료가 된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 드로우 비드에 관한 탄소성 유한요소 프로그램을 가지고 드로우 비드의 성형 및 인발공정을 해석해 보았다. 다음에 수치해석 수행으로 관찰된 결과들과 앞으로 더 진행되어야 할 과제들을 정리해 보았다.

1. 드로우 비드의 성형시, 들림이 있는 경우에 대해서 해석을 수행해 보았다. 그 결과, 예상했던 변형형상과 잘 일치함을 보였으며 성형단계에 따른 비드 주변의 두께와 변형률의 변화를 예측할 수 있었다. 이것은 앞으로 패널성형 전의 바인더-랩(binder-wrap) 상태에 대한 중요한 정보를 제공하리라 기대된다.

2. 드로우 비드의 인발 공정에 관하여 수치해석을 수행해 보았다. 현장에서 비드설계를 하는 주요 목적은 비드가 박판을 얼마만큼 인장 구속력을 가지고 재료의 흐름을 잘 조절해 주느냐에 달려 있다. 따라서 유한요소 프로그램으로 미리 비드의 인발력을 예측해 봄으로써 비드 설계시에 많은 도움을 줄 수 있으리라 생각된다.

3. 본 유한요소 프로그램을 수행해 본 결과, 여기에

사용된 정적 내연적(static-implicit)방법이 수렴이 잘 이루어지지 않음을 알았다. 이러한 수렴성 문제를 타개하기 위하여 정적 외연적(static-explicit)방법과 동적 외연적(dynamic-explicit)방법, 강소성 유한요소법(rigid-plastic FEM)을 이용하면 수렴성 문제가 해결되리라 예상된다.

본 연구에서는 실제 실험없이 컴퓨터를 통한 수치해석 결과만을 가지고 드로우 비드 공정을 예측해 보았다. 이러한 결과가 실제로 적용되는지는 앞으로 실험을 통한 검증이 함께 이루어져야 한다고 생각된다.

References

- 1) Nine, H. D., 1978 "Drawbead Forces in Sheet Metal Forming". Mechanics of Sheet Forming, Ed. by Koistinen, D. P. and Wang, N.-M., Plenum Press, pp. 179-211.
- 2) Triantafyllidis, N., Maker, B. and Samanta, S. K., 1986 "An Analysis of Drawbeads in Sheet Metal Forming : Part I -Problem Formulation". J. of Eng. Materials and Technology, Vol. 108, pp. 321-327.
- 3) maker, B., Samanta, S. K., Grab, G. and Triantafyllidis, N., 1987 "An Analysis of Drawbeads in Sheet Metal Forming : Part II -Experimental Verification", Transactions of the ASME, Vol. 109, pp. 164-169.
- 4) Wang, N.-M. and Somaratna, N., 1989 "Numerical Simulation of Industrial Sheet Forming Processes", NUMIFORM'89, Colorado, pp. 75-84.
- 5) Wang, N.-M. and Shah, V. C., 1991 "Drawbead Design and Performance", J. Mater. Shaping, Tech., Vol. 9, pp. 21-26.
- 6) 최태훈, 1993 "탄소성 유한 요소법을 이용한 박판 성형공정 해석", 한국과학기술원 석사학위논문.