

## 탄소성 유한요소법에 의한 드로우비드 성형 해석

최태훈<sup>\*</sup>, 허 훈<sup>\*</sup>, 이장희<sup>\*\*</sup>, 박춘달<sup>\*\*</sup>

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 현대자동차 프레스기술부

### Numerical Simulation of Drawbead Formation in a Binder Wrap Process by an Elasto-Plastic Finite Element Method

Tae Hoon Choi<sup>\*</sup>, Hoon Huh<sup>\*</sup>, Jang Hee Lee<sup>\*\*</sup>, Chun Dal Park<sup>\*\*</sup>

\* Dept. of Mechanical Engineering, KAIST

\*\* Dept. of Tool MFG., HMC

#### ABSTRACT

Drawbead formulation is the first process together with a binder wrap process in a sheet metal forming process. The purpose of a drawbead is to control the flow of the metal into the die in panel press forming. To simulate the drawbead formation process, an elasto-plastic finite element formulation is derived from the equilibrium equation and related boundary conditions considering the proper contact conditions. The developed finite element program is applied to drawbead formation in the plane strain condition.

The simulation of drawbead formation produces the distribution of stress and strain along the bead and the resultant elongation of the sheet in the cavity region with respect to various cavity dimensions of the sheet as well as the punch force of a drawbead and the amount of draw-in with respect to the stroke of a drawbead. The numerical results provides the fundamental information as a boundary condition to analyze the complex binder wrap phenomena and panel press forming in a simple way.

**Key Words :** Drawbead, Binder Wrap, Elasto-Plastic Finite Element Method, Updated Lagrangian Formulation, Directional Reduced Integration

#### 1. 서 론

박판금속성형의 다이설계에 있어서 드로우비드의 설계는 매우 중요한 역할을 차지하고있다. 성형시에, 드로우비드는 블랭크호울더와 바인더 사이에 위치하여 재료가 금형안쪽으로 빨려들어가는 것을 조절하도록 인장구속력을 제공함으로써 주름발생이나 스프링백 현상을 억제하고 원하는 형상의 제품을 생산하는데 크게 기여한다. 드로우비드는 바인더랩 상태에서도 인장구속력을 발생시킴으로써 성형전에 이미 박판내부에 변형을 유발하며, 이러한 바인더랩 상태에서의 변형은 판넬성형의 초

기상태에 영향을 미치게 되므로 잘못된 드로우비드의 설계는 도리어 판넬성형에 치명적인 악영향을 미칠 수도 있다. 따라서 비드성형공정시에 박판내부에 발생하는 변형과 응력분포에 관한 해석은 박판금속재료의 생산성과 성형성, 제품의 품질 등의 개선에 크게 기여하고, 블랭크성형해석시 경계조건을 대체할 수 있는 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

지금까지의 드로우비드에 관한 연구를 고찰해 보면, Nine[1]이 드로우비드의 형상을 간략화하여 드로우비드가 발생시키는 인장구속력에 영향을 미치는 인자들에 관한 연구를 수행하였으며 Triantafyllidis등[2,3]은 일차원탄소성셀모델을 써서 드로우비드의 영향을 고려하였다. 또한 Wang등[4,5]은 판넬성형시에 드로우비드의 형상과 마찰이 주는 영향을 고찰하였으며, Cao와 Teodosiu[6]는 드로우비드가 있는 디프드로잉공정을 해석하였다.

본연구에서는 가상일의 원리에 의하여 평형방정식으로 부터 지배방정식의 적분형을 유도하고, 변화하는 기준좌표계에 대해 증분해석을 적용한 개량라그랑지수식화를 연속체요소로 유한근사화하였다. 이때 재료의 성질을 탄소성으로 보고, 소성변형은 Prandtl-Reuss 식으로 표현되는 유동이론에 따라 일어난다고 가정하였다. 또한, 항복여부는 von Mises 식으로 판정되며 가공경화는 등방적으로 일어난다고 가정하였다. 계산의 수렴성과 해의 성질을 좋게 하기 위해 선향적저감적분(Directional Reduced Integration)법을 적용하였다. 그리고 벌칙기법을 써서 다이와 재료간의 접촉을 고려하였다.

논문에서는 유도된 유한요소이론을 바탕으로 하여 구성한 프로그램을 이용하여 드로우비드성형공정을 해석하였다. 본실험실의 앞선 연구에서, Huh와 Chun[7]은 선저감적분법을 이용한 탄소성유한요소프로그램으로 드로우비드성형공정을 해석하였는데 드로우비드 안쪽과 바깥쪽의 박판재료가 다이에 계속 붙도록하는 과도한 경계조건을 부과하여 실제의 드로우비드성형공정과 는 다소의 차이가 있었다. 따라서, 접촉과 마찰에 대한 처리를 개선하여 드로우비드 안쪽과 바깥쪽의 박판재료가 다이에서 떨어지도록하여 실제와 유사한 해석이 되도록 하였다. 드로우비드성형시 바인더랩상태에서 드로우비드 안쪽의 판넬부분에 발생하는 응력과 변형을 계산하였으며, 드로우비드가 형성되면서 박판재료가 빨려들어오는 양을 산출하였다. 박판재료가 드로우비드로 빨려들어오는 양은 스트레칭공정의 해석에 있어서 경계조건으로 사용하여 드로우비드의 영향을 대체할 수 있으리라고 기대된다. 드로우비드성형시 드로우비드 주변에 대부분의 변형이 집중되므로 이부분에서의 변형률분포를 계산하고, 펀치행정에 따른 드로우비드펀치에 작용하는 반력을 얻어내었다. 또한 성형할 판넬전체의 크기와 드로우비드의 곡률반경의 비를 달리하여 각각에 대한 드로우비드성형공정을 해석하고, 그 영향을 고찰하였다.

## 2. 탄소성유한요소수식화 및 접촉기법

가상변위벡터  $\bar{u}$ 를 변위가 규정된 경계면  $\Gamma_D$ 에서  $\bar{u}_i=0$ 인 임의의 벡터라 할 때, 평형 방정식에 발산정리를 적용하고 경계조건을 대입하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\int_{\Omega} \sigma_{ij} \bar{u}_{i,j} d\Omega = \int_{\Omega} \rho b_i \bar{u}_i d\Omega + \int_{\Gamma_F} t_i \bar{u}_i d\Gamma, \quad \forall \bar{u}_i \quad (1)$$

이때  $\bar{u}_i=0$  on  $\Gamma_D$

여기서,  $\sigma$ 는 변형된 형상  $\Omega$ 에서 정의되는 Cauchy응력텐서이고,  $\rho$ 는 물체의 밀도를 나타내며  $b$ 는 물체력벡터이다. 또한  $u$ 는 변위벡터이고  $t$ 는 표면력벡터이다.

개량라그랑지수식화에서는 임의의 시간  $t$ 에서의 형상  $\Omega^t$ 를 기준좌표계로 지정하여  $\Delta t$ 동안에 미소변형을 하는 것으로 가정하므로 적분식은 다음과 같게 된다.

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

식 (2)에서 1차 Piola-Kirchhoff 응력텐서  $T_{ji}$ 와,  $\Delta t$  동안  $T_{ji}$ 의 증분  $\Delta T_{ji}$ 는,  $T_{ji} = JX_{j,k} \sigma_{ki}$ 인 관계식으로부터  $\sigma_{ki}$ 로 나타낼 수 있으므로, 식 (2)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\int_{\Omega^t} (\Delta \sigma_{ki} \delta_{jk} + \sigma_{ji} \Delta u_{k,k} - \sigma_{ki} \Delta u_{j,k}) \bar{u}_{i,j} d\Omega^t = \int_{\Omega^t} \rho \Delta b_i \bar{u}_i d\Omega^t + \int_{\Gamma_f} \Delta t_i \bar{u}_i d\Gamma^t, \quad \forall \bar{u}_i \quad (3)$$

또한, 유한회전효과를 고려하면서 강체회전운동에 대하여 객관성을 갖게하는 Zaremba-Jauman응력증분( $\sigma_{ij}^\nabla = \Delta \sigma_{ij} - \sigma_{ik} \omega_{kj} - \sigma_{jk} \omega_{ki}$ )을 Cauchy응력텐서에 도입한다. 재료의 항복은 von Mises식으로 결정되며, 재료의 유동을 표현하는 식은  $\Delta \epsilon_{ij}^p = \Lambda \dot{f}(\sigma_{ij})$ 을 이용한다.

금형과 재료와의 접촉처리는 수직방향의 접촉조건과 법선방향의 접촉조건을 나누어 고려하였다. 수직방향의 접촉조건은

$$\sigma_n(\Delta u_n - \Delta g_n) = 0 \quad (4)$$

으로 표시되고, 수평방향의 접촉조건은

$$\sigma_{Ti}(\nu_{Ti} - u_{Ti}) - \mu \sigma_n(\nu_{Ti} - |u_{Ti}|) \geq 0, \quad \forall \nu_{Ti} \quad (5)$$

으로 나타낼 수 있다. 상기식은 실험수해석과 벌칙기법을 사용하여 유한요소수식화에 침입하면 결과식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega^t} (L_{ijkl} \Delta u_{k,l}) \bar{u}_{i,j} d\Omega^t + \int_{\Gamma_c^*} \{k_n (\Delta u_n - \Delta g_n)^+ \bar{u}_n + \mu \sigma_n \frac{u_{Ti}}{|u_{Ti}|} \tanh(\alpha \frac{u_{Ti}}{|u_{Ti}|}) \bar{u}_{Ti}\} d\Gamma_c^t \\ & = \int_{\Omega^t} \rho \Delta b_i \bar{u}_i d\Omega^t + \int_{\Omega_f^t} \Delta t_i \bar{u}_i d\Gamma^t, \quad \forall \bar{u}_i (= \delta u_i) \text{ such that } \bar{u}_i = 0 \text{ on } \Gamma_D^t \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $L_{ijkl} = \hat{D}_{ijkl} - \sigma_{ik} \delta_{jl} - \sigma_{jk} \delta_{il}$ 이고,  $\hat{D}_{ijkl}$ 은 Prandtl-Reuss관계식에 따르는 구성방정식  $\sigma_{ij} = D_{ijkl} \epsilon_{kl}$ 을 대입하고 강성행렬을 대칭으로 만든 결과이며, 마찰을 고려한 적분항에서는 마찰력의 급격한 변화를 완화하기 위해서 유연함수로  $\tanh$ 함수를 사용하였다.

### 3. 수치해석 및 고찰

드로우비드성형공정을 해석하기 위하여 Table 1과 같은 재료의 물성치를 이용하였다. 이러한 물성치는 본실험실에서 현대자동차(주)와의 협력연구에 의하여 얻어진 결과로, 현장에서 실제로 사용

되는 박판의 물성치이다. Fig.1에 해석에 사용된 다이의 형상을 나타내었다. 드로우비드의 펀치반경은 4.5 mm이며, 하부다이의 곡률반경은 2mm로 하였다. L1은 판넬성형의 크기를 나타내는 것으로서, 드로우비드성형이 기하학적인 대칭을 이룬다고 할때, 드로우비드의 중심과 대칭축과의 거리를 나타낸다. 해석을 위하여 4절점연속체요소를 사요하였으며, 총 160개의 요소와 243개의 절점을 사용하였다. L1과 드로우비드반경(R)과의 비를 10,30,50,70,100,200으로 변화시켜가면서 각경우에 대하여 펀치행정이 6mm일때까지 해석하였다. 계산시간은 각각의 경우에 따라서 달라지지만, HP715 Workstation을 이용하였을때 대략 6000초의 시간이 소요되었다.

Fig.2에 L1과 드로우비드펀치반경과의 비가 30일때, 드로우비드성형공정시의 변형형상을 펀치가 2mm씩 내려감에 따라 도시하였다. 드로우비드펀치와 다이에 근접해 있는 재료의 접촉이 적절하게 처리되고 있음을 알 수 있다. Fig.3에는 L1/R이 30인 경우의 해석에서, 드로우비드 주변에 있는 박판윗쪽면에서의 길이방향변형률분포를 도시하였다. 다이와 펀치주변에 변형집중이 일어나고 있으며, 최대변형률은 펀치주변에서 나타나고 있다.

Fig.4에는 L1/R이 30인 경우의 해석에서 펀치행정에 따른 펀치반력을 도시하였다. 펀치행정이 2mm정도 진행되었을 때부터 펀치반력이 급속히 증가하는데, 이것은 이시기에 하부다이와 재료가 밀착되면서 재료의 곡률반경이 작아져서 드로우비드바깥쪽에서 유입되는 재료의 양이 적어지므로, 드로우비드안쪽으로부터의 유입이 증가되기 때문이다. Fig.5에 L1과 R의 비를 달리하면서 펀치행정에 따른 드로우비드안쪽에 있는 재료의 드로우비드쪽에서의 유입량을 도시하였다. L1과 R의 비가 달라짐에 따라 다소 다른 경향을 보이나 대부분 펀치행정이 2mm정도에서부터 유입량이 급격히 증가함을 알 수 있다. 또한 L1과 R의 비가 커짐에 따라 유입량이 커지는 경향을 나타내고 있는데, 이러한 결과로부터 블랭크의 크기가 달라져도 드로우비드성형시에 드로우비드안쪽의 변형률과 응력은 거의 일정할 것임을 예측할 수 있다. 또한 최대유입량이 0.6mm정도이므로 비드성형중에 대부분의 변형은 드로우비드바깥쪽으로부터 유입된 재료에 의한 것임을 알 수 있다. 드로우비드성형시 블랭크호울더와 하부다이가 완전히 닿을 때까지 성형하지 않고, 최종펀치행정거리보다 작은 행정거리에서 성형을 완료할 수도 있으므로 해석된 결과중 펀치행정이 약 5mm가 되었을 때의 박판의 드로우비드로의 유입량도 유용하게 쓰일 수 있다. 따라서, Table 2에 펀치행정이 5mm와 6mm일때의 L1과 R의 비에따른 재료의 유입량을 나타내었다. 또한 각경우에 대하여 최종상태에서의 드로우비드안쪽에 있는 재료에 작용하는 응력을 나타내었다. 해석에 이용한 재료의 항복응력이 161 MPa이므로, 해석된 결과에 있어서 드로우비드성형후 판넬내부에 있는 재료가 탄성역에 있음을 예측할 수 있다.

#### 4. 결 론

개량라그란지수식화를 통하여 탄소성유한요소프로그램을 구성하고 다이와 재료간의 접촉기법을 침입하여, 드로우비드성형공정을 해석하였다. 블랭크의 크기와 드로우비드펀치반경의 비를 달리하면서 각경우에 대하여 해석하고, 드로우비드성형시 박판재료의 드로우비드쪽에서의 유입량과 펀치의 반력, 드로우비드 주변의 박판의 변형률, 성형후의 드로우비드안쪽의 재료에 작용하는 응력값을 계산하였다. 수치해석결과로부터, 드로우비드성형시 드로우비드안쪽에 있는 재료의 변형률은 블랭

크의 크기와 드로우비드펀치반경의 비에 크게 영향을 받지않는다는 것을 알 수 있었다.

### 참고문헌

- (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, pp21~26
- (6) Cao, H.-L. and Teodosiu, C., 1992, "Numerical Simulation of Drawbeads for Axisymmetric Deep-drawing Processes", NUMIFORM'92, pp. 439~448
- (7) 천병관, 허훈, 1992, "탄소성유한요소법을 이용한 비드성형의 수치해석", 대한기계학회 '92년도 춘계학술대회논문집 1권, pp. 381~384

Table 1 Mechanical Properties

E	$\sigma_Y$	$\nu$	k	n	$\epsilon_0$
200	161	0.33	492	0.19	0.0033

#### Elastic constants

E : Young's modulus (GPa)  
 $\sigma_Y$  : initial yield strength (MPa)  
 $\nu$  : Poisson's ratio

#### After yielding, $\sigma_Y = k(\epsilon_p + \epsilon_0)^n$

k : material hardening coefficient (MPa)  
n : material hardening exponent  
 $\epsilon_0$  : prestrain

Table 2 Value of Draw-in distance and stress inside the drawbead with various L1/R

punch stroke		L1/a	10	30	50	70	100	200
		5mm	0.0357	0.0914	0.1294	0.1925	0.2831	0.5191
Draw-in distance(mm)	6mm	0.0324	0.0973	0.1733	0.2243	0.3070	0.5586	
	6mm	134	140	153	145	140	126	

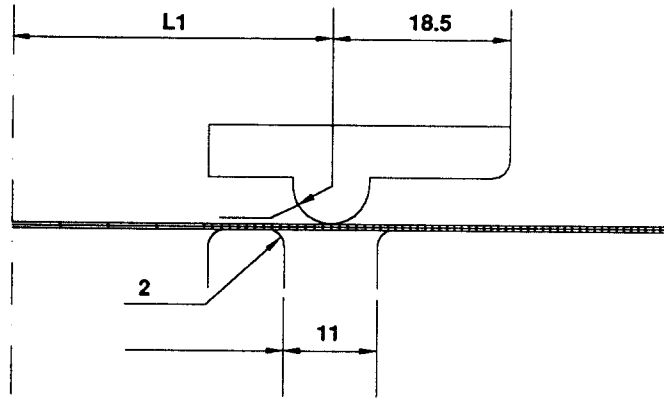


Fig.1 Drawbead and die geometry

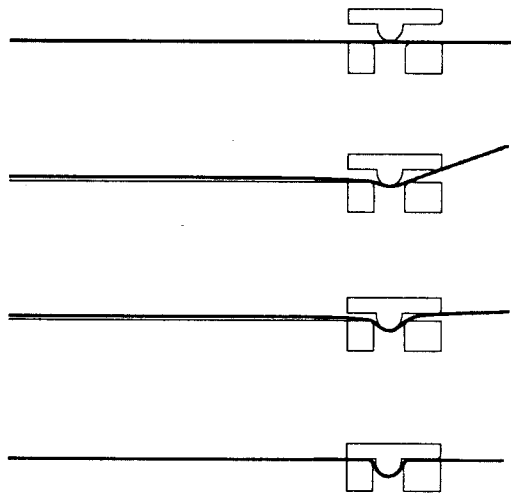


Fig.2 Deformed shape of the sheet metal at every 2mm punch stroke when  $L1/R$  is 30

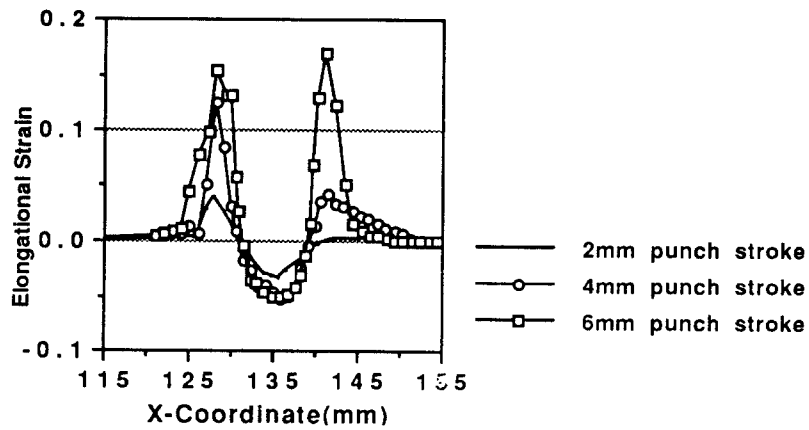


Fig.3 Elongational Strain Distribution in the upper surface of the sheet metal near the drawbead at every 2mm punch stroke when  $L1/R$  is 30

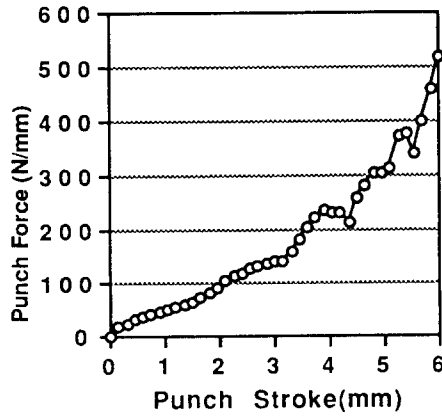


Fig.4 Punch reaction force with respect to punch stroke when L1/R is 30

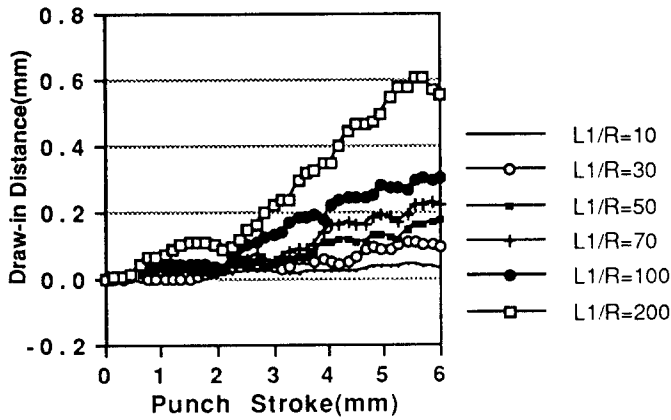


Fig.5 Draw-in distance of sheet metal from the inside of drawbead with various L1/R