

블랭크 성형해석시 드로우비드 개수가 미치는 영향에 관한 연구

정동원*, 이상제**

The Influence of the Number of Drawbead on Blank Forming Analysis

Dong Won Jung*, Sang Je Lee**

ABSTRACT

In the sheet metal forming process, the drawbead is used to control the flow of material during the forming process. The drawbead provides proper restraining force to the material and prevents defects such as wrinkling or breakage. For these reasons, many studies for designing the effective drawbead have been conducted.

In this paper, the influence of the number of drawbead during the blank forming process will be introduced. For the analysis, the numerical method called the static-explicit finite element method was used. The finite element analysis code for this method has been developed and applied to the drawbead process problems. It is expected that this static-explicit finite element method could overcome heavy computation time and convergence problem due to the increase of drawbeads.

Key Words : Sheet metal forming process (박판 성형공정), Restraining force (구속력), Numerical method(수치적 방법), Elasto-plastic finite element formulation (탄소성 유한요소식), Static-explicit method (정적 외연적방법), Convergence problem (수렴성 문제)

1. 서론

일반적인 박판 성형공정에는 성형과정 중 일어날 수 있는 불안정성을 방지하기 위해서, 블랭크호울더로 박판을 잡아쥘과 동시에 비드가 성형되는 공정이 수반된다. 이러한 바인더랩(binder-wrap)상태가 형성되면서 일어나는 재료의 변형은 제품을 성형하기 위한 박판의 초기상태에 적지않은 영향을 미치게 된다. 따라서 이러한 초기 성형공정에서 생기는 박판의 상태에 대한 고찰없이 변형해석을

하게 된다면 실제결과와 많은 차이를 가져올 수 있다. 그러므로 올바른 블랭크 성형공정 설계를 위해서는 바인더랩의 해석이 선행되어야만 하며, 본 연구에서는 비드의 영향에 관한 해석이 다루어질 것이다.

비드란, 박판을 성형할 때 재료가 금형 안쪽으로 빨려 들어가는 것을 조절하도록 인장 구속력을 제공하여 주름 발생이나 스프링백 현상을 억제하

* 제주대학교 기계공학과

** 제주대학교 기계공학과 대학원

고 적절한 강성(stiffness)과 덴트저항(dent resistance)을 부여하여 원하는 형상의 우수한 제품을 생산하도록 도움을 주는 장치라 할 수 있다. 이러한 비드를 사용하는 주요 목적은 만들고자 하는 형상을 성형하는데 있어서 제품에 결함들이 생기지 않도록 적절한 구속력을 제공하기 위해서이다. 따라서 원하는 만큼의 성형성과 우수한 제품을 얻기 위해서는 재료의 유동을 적절하게 조절해 줄 수 있는 비드의 설계가 필수적이라 하겠다.

그 중요성 때문에 지금까지 비드 해석을 위한 많은 연구들이 진행되어 왔다. Nine^[1]은 드로우비드를 거치면서 금속이 유동할 때 생기는 구속력이 굽힘변형과 마찰에 의한 성분을 가지게 된다고 보고 이 두성분을 나누어 해석함으로써 AK steel의 인발력과 고정력, 변형률분포 및 그때 생기는 소성변형에 대하여 연구하였다. 그리고 Wang 등^[2, 3]은 패널성형 시에 드로우 비드의 형상과 마찰이 주는 영향을 고찰하였다. 또한, Cao와 Teodosiu^[4]에 의해서는 드로우 비드가 있는 딥드로잉 공정이 해석됨으로써 비드에 대한 본격적인 연구가 진행되기 시작하였다. 국내에서도 최근, 실험 및 수치해석을 통하여 비드의 성형 및 인발공정을 해석하려는 연구가 활발히 진행되고 있다^[5-7].

본 연구는 비드의 수를 달리하면서 이때 발생하는 비드에 의한 고정력과 박판 성형에 의한 인발력 등을 관찰함으로써 비드의 개수가 블랭크 성형에 어떠한 영향을 미치는 지에 대해서 알아보고자 한다. 비드 수가 많아지게 되면, 일반적으로 형상과 접촉조건이 복잡해지기 때문에 높은 비선형성이 나타나게 된다. 그러므로 수치해석시 수렴성과 계산시간이 문제가 되는데, 이를위해 기존의 정적 내연적방법(static-implicit method)대신 수렴검사를 하지않고 최소한도의 스텝간격을 찾아서 진행되는 정적 외연적방법(static-explicit method)을 사용하여 계산의 효율성을 높였다. 동적 외연적방법(dynamic-explicit method)을 사용하는 경우에는 수렴성 문제가 없는 대신, 복잡한 접촉현상으로 인하여 해석결과가 심하게 진동(vibration)하여 해의 정확성을 보장하기 힘들지만 본 연구에서는 정적 외연적방법을 도입하여 정확한 결과를 얻을 수 있었다.

해석은 비드 성형공정과 인발공정으로 나뉘서 진행되었으며, 이로부터 얻어진 결과들은 가공전 박판의 초기상태가 중요한 블랭크 공정설계시에 필요한 정보들을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 유한요소 수식화

2.1 구성방정식

본 해석에 사용된 재료는 탄소성의 성질을 가지며, 소성변형은 Prandtl-Reuss 식으로 표현되는 유동이론(Flow Rule)에 따라 일어난다고 가정하였다. 우선, 가상일의 원리에 의하여 평형방정식으로부터 지배방정식의 적분형을 유도하고, 변화하는 기준좌표계에 대해 증분해석을 적용한 개량라그란지 수식화를 연속체요소로 유한근사화하였다. 개량 라그란지 수식화에서는 임의시간 t 에서의 형상 Ω^t 를 기준 좌표계로 지정하여 Δt 동안에 미소변형하는 것으로 가정하였다^[8].

$$\int_{\Omega^t} \Delta T_{ji} \bar{u}_{i,j} d\Omega^t = \int_{\Omega^t} \rho \Delta b_i \bar{u}_i d\Omega^t + \int_{\Gamma_f} \Delta t_i \bar{u}_i d\Gamma^t \quad (1)$$

위 식을 개량 라그란지(updated lagrangian)식이라고 부르며, 여기서 $T(=T_{ji}e_je_i)$ 는 1차 Piola-Kirchhoff 응력텐서로서 증분을 취하여 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$\Delta T_{ji} = \Delta \sigma_{ji} \delta_{ij} + \sigma_{ji} \Delta u_{k,k} - \sigma_{ji} \Delta u_{i,j} \quad (2)$$

위 식은 현상태에 따른 변수의 함수이기 때문에 이력 의존성(history dependence)이 있는 탄소성 재료의 구성방정식을 쉽게 이용할 수 있다.

일반적인 소성문제는 탄성변형과 소성변형이 복합적으로 일어난다. 따라서 본 연구에서는 두가지 현상을 동시에 고려할 수 있는 유동이론을 채택하여 재료의 구성 관계식을 (3)식과 같은 Prandtl과 Reuss가 제안한 식으로 표현하였다^[9].

$$\sigma_{ij}^v = D_{ijkl} \Delta \epsilon_{kl} \quad (3)$$

여기서, D_{ijkl} 은 다음식으로 표시되는 재료의 특성텐서를 의미한다.

$$D_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) - \frac{\alpha^3 \mu (s_{ij} s_{kl})}{\left(\bar{\sigma} \left(1 + \frac{H'}{3\mu} \right) \right)} \quad (4)$$

이로부터 구성방정식을 세운 뒤, 접촉조건 및 마찰 경계조건을 고려하여 최종적으로 (5)식과 같은 유한요소 근사식을 얻었다.

$$\left\{ \sum_e K_{i\alpha\beta}^{\Omega_e} + \sum_e K_{i\alpha\beta}^{r_e} \right\} \Delta u_{i\beta} = \sum_e f_{i\alpha}^{\Omega_e} + \sum_e f_{i\alpha}^{r_e} + \sum_e f_{i\alpha}^{r_e} \quad (5)$$

여기서 좌변항으로 표시되는 $K_{i\alpha\beta}^{\Omega_e}$ 와 $K_{i\alpha\beta}^{r_e}$ 는 요소의 강성행렬(stiffness matrix)을 의미하고, 우변항의 $f_{i\alpha}^{\Omega_e}$, $f_{i\alpha}^{r_e}$ 및 $f_{i\alpha}^{r_e}$ 는 요소의 외력벡터를 나타낸다.

2.2 수치적방법

지금까지 유한요소법을 이용한 해석으로는 계산시간이 오래 걸리지만 비교적 정확한 해석을 할 수 있는 정적 내연적방법이 보다 많이 사용되어 왔다. 그러나 제품의 형상이 다양해지면서 난이한 접촉을 보이거나 형상이 아주 복잡한 대용량의 문제에 있어서는 수렴이 이뤄지지 않고 발산하는 경우가 종종 발생되었다. 또한 수렴을 위한 계산시간도 길어졌기 때문에 정적 내연적방법을 그대로 적용시키기에는 다소 무리가 있었다. 반면, 동적 외연적방법(dynamic-explicit method)이라 불리는 유한요소 방법은 원래 빠른 속도의 동적인 거동에 적합하기 때문에 비드해석과 같은 복잡한 접촉현상을 포함하는 정적인 문제에 적용시킬 경우에는 해석결과에 심한 진동을 야기시키게 된다. 따라서 해의 정확성을 보장할 수 없고 신뢰성 있는 결과를 얻기 힘들다.

이러한 문제점들을 보완하기 위해 본 연구에서는 정적 외연적 유한요소법(static-explicit FEM)을 도입하여 수렴성 문제와 계산시간을 줄이고, 해의 정확성도 확보해 나가고자 한다. 정적 외연적방법은 내연적방법의 기본 구성방정식에 근거하지만, 그와 차이를 보이는 점은 동적 외연적방법과 마찬가지로 수렴검사가 이뤄지지 않는다는 것이다. 즉, 정적 외연적방법은 현 단계에서 축차(iteration)없이 얻어진 해를 바로 다음 단계의 초기 추정값으로 적용하며, 해의 정확도를 높이기 위해서 스텝간격의 크기를 매우 작게 잡는 특징을 가지고 있다. 하지만 계산시간 때문에 스텝간격을 무한정 줄일 수는 없으며, 그 크기를 결정하기 위해서 본 연구에서는

Yamada가 제안한 「r-min」 방법을 이용하였다^[10].

우선, 시험하중이 유한요소로 나누어진 어떤 재료에 작용한다고 가정하자. 해석 초기단계에서 적절한 스텝간격을 정하고 수행한 결과, 단지 하나의 후항복 요소 즉, 어떤 하중에서 최초로 항복이 일어나는 요소가 존재할 것이다. 이때, 전체 요소에 대해서 강성 행렬 [K]를 종합한 후, 적절한 시험 하중증분 $\{\Delta L^T\}$ 를 구한다. 그리고나서, 각 요소에서의 응력증분 $\Delta \sigma_{ij}^T$ 및 변형률 증분 $\Delta \epsilon_{ij}^T$ 을 계산하고, 다음의 식 (6)을 이용하여 탄성상태로 남아있는 모든 요소의 r값을 계산한다.

$$r = \frac{\Pi + \sqrt{[\Pi^2 + 4(\Delta \sigma_{ij}^T)^2 (Y^2 - \bar{\sigma}^2)]}}{2(\Delta \sigma_{ij}^T)^2} \quad (6)$$

$$\Pi = (\Delta \sigma_{ij}^T)^2 - 2\bar{\sigma} \Delta \sigma^T - (\Delta \sigma^T)^2$$

이때, $\bar{\sigma}$ 는 탄성요소의 등가응력이고, Y는 재료의 항복응력, $\Delta \sigma^T$ 는 하중증분 $\{\Delta L^T\}$ 에 의해 정해지는 $\bar{\sigma}$ 의 증분으로 정의된다. (6)식으로 표현되는 r값은 재료의 항복응력값과 각 요소 위에 작용되는 응력과의 비율을 나타내며, 응력이 많이 걸리는 요소일수록 낮은 수치를 보인다. 따라서 최대 응력을 보이는 요소에서 r이 최소값이 되며, 이 r값을 이전 스텝의 펀치행정(punch stroke) 증분값과 곱하여 다음 스텝의 새로운 증분값으로 결정한다.

이와같이 「r-min」 방법은 허용할 수 있는 최대 응력 또는 변형률 증분 등을 고려함으로써 재료에 그 이상 변형이 일어나지 않도록 적절한 스텝간격을 결정해주는 방법이라 할 수 있다. 이렇게 정해진 스텝간격을 정적 외연적방법에 적용시키게 되면 해의 정확도에 거의 영향을 미치지 않고도 축차없이 선형으로 계산할 수 있으며, 높은 비선형 문제인 경우에는 축차과정이 생략되므로 오히려 계산시간이 줄어들게 된다. 그러므로 복잡한 형상이나 난이한 접촉문제, 수렴이 어려운 문제 등과 같은 높은 비선형성을 안고 있는 경우에 있어서 정적 외연적방법이 유용하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

3. 수치해석 결과 및 고찰

3.1 드로우비드 수에 따른 성형공정

본 연구에서는 비드의 수에 따른 박판의 변형형상과 변형률 분포 등 재료에 미치는 영향을 살펴보기 위해서, 비드 성형공정을 평면변형 문제로 가정 한 수치해석이 이루어졌다. 해석에 사용된 비드 형상은 단순 원형단면 비드를 사용했으며, 비드가 한 개일 경우(single bead)와 두 개일 경우(double bead) 그리고 세 개의 비드(triple bead)가 존재할 경우에 대해서 각각 해석해 보았다. 사용된 원형 단면비드의 펀치형상 및 다이형상은 Fig. 1에 보여진 것과 같이 펀치반경이 6mm, 하부다이의 곡률반경이 3mm인 금형형상을 가정하였다. 재료는 탄성계수 (E)가 200GPa이고, 포와송비(ν)가 0.3이며, 초기 항복응력(σ_y)이 179MPa인 강판의 물성치를 적용하였다.

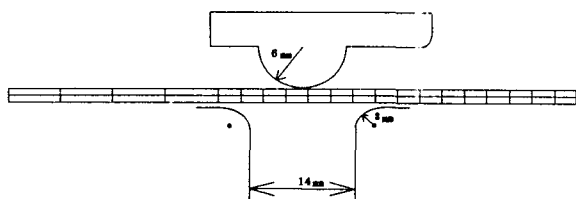
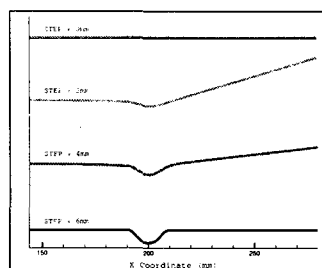


Fig. 1 Schematic of the die and bead shape

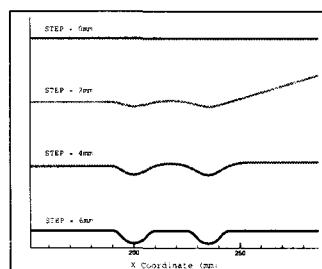
유한요소 모델은 4절점 연속체요소로서 총 453개의 절점과 300개의 요소들로 이루어져 있으며 박판의 초기두께를 0.8mm, 펀치 행정거리는 총 6mm까지 성형이 진행되는 것으로 가정하였다.

Fig. 2(a)는 single 비드일 때, 펀치 진행거리마다 변형되는 박판의 형상을 보여주고 있다. 본 해석에 적용된 변위조건은 재료의 왼쪽 끝 대칭선의 절점들을 x-방향에 대해서 구속하여 재료의 흐름을 억제하였고, 오른쪽 다이와 접촉하고 있는 절점들에 대해서는 구속을 고려하지 않았다. 따라서 펀치가 진행됨에 따라 비드펀치 오른쪽 부분에서 들림이 일어났으며, 차츰 펀치와 함께 다이에 고정되는 현상이 관찰되었다.

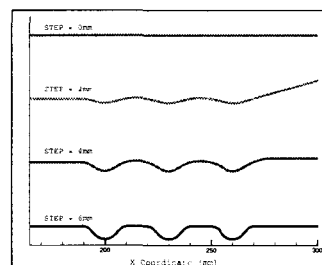
계산시간은 IBM RS/6000 43P workstation에서 총 2397초가 걸렸고, PC/AMD 200MHz기종에서도 3780초가 소요되어 일반 PC에서도 무리없이 사용할 수 있는 가능성을 보여주었다.



(a) Single bead



(b) Double bead



(c) Triple bead

Fig. 2 The forming progress of material according to the bead number

Fig. 2(b)는 double 비드일 때의 펀치 진행에 따른 재료의 변형형상을 나타내고 있다. double 비드는 블랭크 성형공정에서 비드의 구속력을 강화하여 재료가 블랭크 내부로 빨려들어가는 것을 억제하여야 할 필요가 있는 경우에 많이 쓰인다. 비드간의 간격은 펀치의 크기와 다이 곡률반경을 고려하여 35mm로 하였고, 양쪽 비드 사이에 있는 재료는 펀치의 진행에 따라 위쪽으로 굽어지는 현상이 나타나는 것으로 보아 다이와 재료간의 접촉이 적절히 묘사되고 있음을 알 수 있다.

그리고 실제로는 많이 쓰이지는 않지만, 블랭크 성형공정에서 특별히 재료를 강하게 구속하여야 할

경우에 사용되고 있는 triple 비드 공정을 해석하였다. 비드간의 간격은 펀치 크기를 고려하여 30mm로 하였으며, 총 6mm까지 진행되는 것으로 가정하였다. Fig. 2(c)에 비드펀치가 2mm씩 내려감에 따라 지료가 변형되는 형상을 나타내었다. 형상이 복잡해지고, 접촉문제도 난이해 졌지만 정적 외연적방법을 사용함으로써 수렴성에 문제가 없이 원활하게 진행되고 있음을 볼 수 있다.

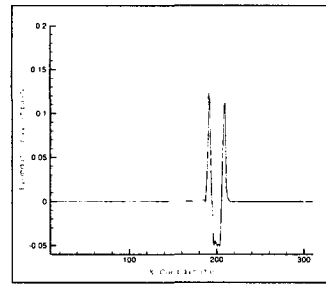
Fig. 3에는 각각의 비드형상에 대해서 펀치행정이 6mm일 때, 박판 윗쪽표면(upper layer)에서의 길이방향 변형률(elongational strain)을 나타내어 보았다. 금형의 기하학적인 형상에서 예상되는 것처럼 지료는 양쪽 다이의 곡률부에서 인장하고, 펀치의 헤드부에서는 압축을 받고 있음을 알 수 있다. 한편, triple 비드에서는 펀치의 진행에 따른 재료의 수동이 심하기 때문에 전체적인 길이방향 변형률이 크게 나타나고 있으며, 실제 블랭크성형이 이루어지는 비드 왼쪽 영역에서도 1%내의 변형이 일어나고 있음을 볼 수 있다.

본 해석에 적용된 정적 외연적방법의 효율성을 살펴보기 위해 똑같은 비드공정을 정적 내연적방법을 사용하여 해석해 보았다. 그 결과, single 비드 일 때의 변형률은 Fig. 4와 같이 거의 같은 수치를 얻을 수 있었지만, 계산시간은 외연적방법일 때보다 더 많은 총 13442초가 소요되었다. double 비드와 triple 비드의 경우에서도 마찬가지로 약 6배에 가까운 계산시간을 보였다. 이러한 결과를 놓고 볼 때, 정적 외연적방법이 빠른 리드타임을 요하는 실제 생산공정에 더 적절하게 적용될 수 있으리라 생각된다.

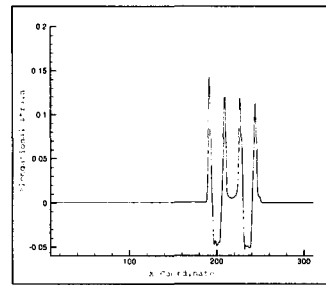
3.2 드로우비드 수에 따른 인발공정

앞 절에서는 비드에 관한 성형공정이 해석되었고, 본 절에서는 그 결과를 이용하여 인발공정을 해석하고자 한다. 비드에 의한 구속력으로 재료의 수동을 적절하게 조절해 주는 것이 비드의 역할이라 할 수 있는데, 원하는 만큼의 성형성을 얻기 위해서는 이 비드부에 관한 정확한 정보를 필요로 한다.

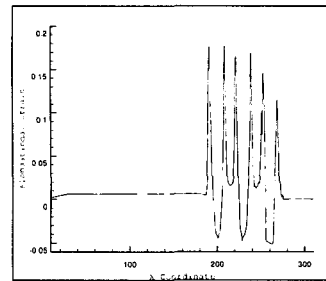
먼저, 앞 절에서 해석한 비드성형의 마지막 단계에서부터 박판을 20mm까지 잡아당기는 공정을 가정하여 해석을 진행하였다. 인발이 일어나는 모습을 살펴보기 위해 5mm마다 변형되는 재료의 형상



(a) Single bead



(b) Double bead



(c) Triple bead

Fig. 3 Distributions of elongational strain on a upper layer

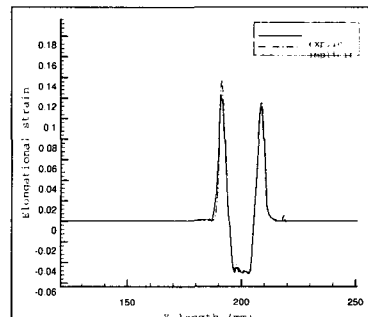
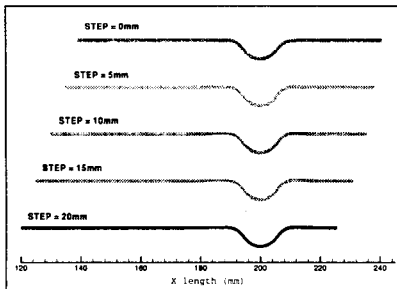


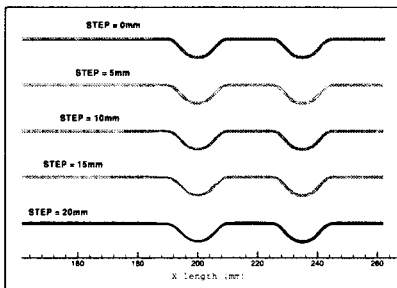
Fig. 4 Comparison between static-implicit and static-explicit methods

을 Fig. 5에 나타내었다. 이때, double 비드와 triple 비드의 경우는 마찰이 거의 없는 상태로 가정하였는데, 마찰이 있는 경우는 재료가 당겨지지 않고 안쪽 편치와 다이 사이의 재료가 국부적으로 심하게 변형되는 현상이 관찰되었다. 이는 비드 수의 증가로 인한 강한 구속력 때문이라 생각된다.

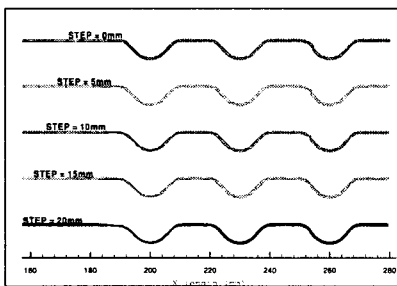
Fig. 5(a)에 보이는 single 비드인 경우, 재료가 왼쪽으로 당겨짐에 따라 비드 바깥쪽에 있던 재료도 함께 이끌려가고 있다. 반면, Fig. 5(b),(c)의 double 비드나 triple 비드인 경우에는 비드의 구속력으로 인해서 재료가 당겨지는 거리가 매우 적음을 확인할 수 있다.



(a) Single bead



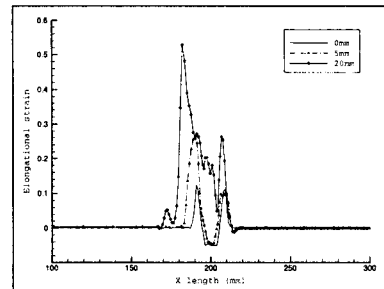
(b) Double bead



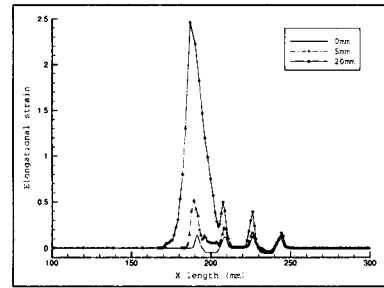
(c) Triple bead

Fig. 5 The drawing process of material according to the bead number

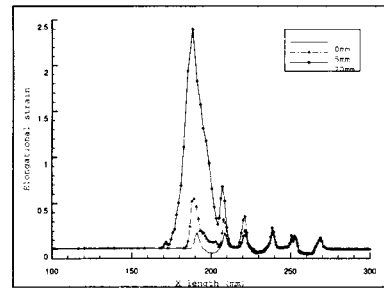
각각의 경우에 대하여 박판 윗쪽 표면에서의 길이방향 변형률을 Fig. 6에 나타내었다. 비드 성형 마지막 단계에서의 변형률을 나타낸 Fig. 3과 비교해 볼 때, 많은 차이를 보이고 있는데 이는 비드 편치와 다이에서만 국한되었던 인장과 압축이 재료가 당겨짐으로써 점차 전체영역으로 발전되기 때문이라 생각된다. 또한 비드의 수가 많아질수록 구속력이 강해지기 때문에 안쪽 비드와 다이 사이의 재료가 심하게 인장되고 있음을 볼 수 있다. 이러한 결과들은 재료의 파손여부를 확인할 수 있어, 제품의 안전성 및 성형정도를 판단하는데 좋은 기초자료가 될 것으로 기대된다.



(a) Single bead



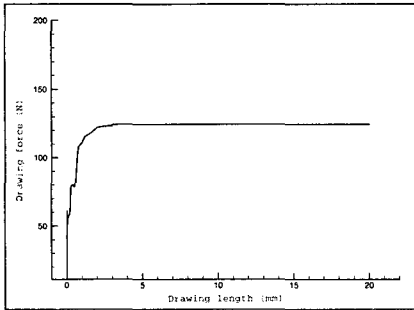
(b) Double bead



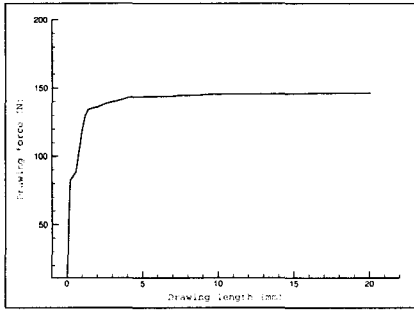
(c) Triple bead

Fig. 6 Distributions of elongational strain according to the bead number after the drawing process

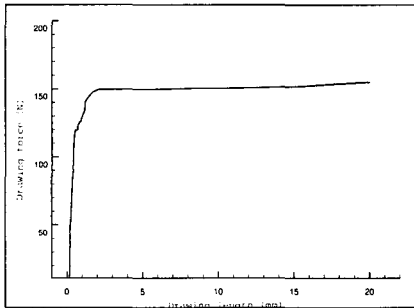
Fig. 7에 재료가 인발되는 양에 따른 인발력의 변화를 나타내었다. 각각의 경우, 모두 초기에 급격한 상승을 보인 후에 일정한 평형상태에 도달함을 볼 수 있다. 이러한 인발력을 예측함으로써 비드의 성형 깊이라든지, 비드의 수, 다이의 곡률반경 등 비드부를 설계하는데 실제적인 도움을 줄 수 있으리라 기대된다.



(a) Single bead



(b) Double bead



(c) Triple bead

Fig. 7 The drawing force according to the drawing displacement

4. 결론 및 향후과제

정적 외연적방법을 이용한 탄소성 유한요소 프로그램을 구성하여 비드성형 및 인발공정을 해석하였다. 이때, 비드의 개수에 따른 박판의 영향을 살펴보았으며 그로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 비드 성형공정을 single, double, triple 비드일 경우에 대하여 각각 해석이 이루어졌다. 성형과정 중 일어나는 박판의 변형형상을 살펴보았으며 이로부터 다이와 펀치, 재료간의 접촉이 잘 묘사되고 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 성형이 완료된 후 재료의 길이방향 변형률을 구해봄으로써 triple 비드일 경우에는 비드의 왼쪽영역 즉, 블랭크성형이 이루어지는 재료에까지 영향이 미침을 관찰할 수 있었다.

2. 비드성형의 마지막 단계로부터 재료가 왼쪽으로 당겨지는 인발공정을 해석하였다. 이 공정은 실제 블랭크 성형에 의한 재료의 유동을 가정한 것이며, 이때 비드가 가지는 구속력과 재료의 변형상태 등을 알아보기 위한 해석이라 할 수 있다. 인발이 진행됨에 따라 재료의 전 영역으로 인장이 확대됨을 관찰할 수 있었고, 비드의 개수가 많아질수록 소요되는 인발력이 크게 나타났다. 이것은 비드수에 따른 구속력의 증가로 재료를 강하게 잡아주고 있기 때문이라 생각된다.

3. 비드의 성형 및 인발공정으로 얻어진 해석결과들은 비드로 인해 발생하는 여러 가지 복잡한 경계조건들이 경험상으로는 적절히 예측하기가 상당히 어렵다는 점을 놓고 볼 때, 산업현장에서 매우 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 정적 외연적방법으로 프로그램을 구성한 결과, 기존의 수치해석 방법에서 문제시되었던 비드수의 증가에 따른 수렴성 문제와 계산시간 등을 충분히 해결할 수 있었다. 이로부터 정적 외연적방법은 수렴된 결과를 얻기 어렵거나 계산시간이 많이 소요되는 복잡한 형상의 대형차체관넬 스템핑공정에도 적용할 수 있는 가능성을 제시하였다. 하지만 앞으로 좀더 다양한 드로우비드 해석결과를 실험과 비교 분석함으로써 효용성을 검증받을 필요가 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Nine, H. D., "Drawbead Forces in Sheet Metal Forming," *Mechanics of Sheet Forming*, Ed. by Koistinen, D. P. and Wang, N.-M., Plenum Press, pp. 179-211, 1978.
2. Wang, N. M. and Somaratna, N., "Numerical Simulation of Industrial Sheet Forming Processes," NUMIFORM'89, Colorado, pp. 75-84, 1989.
3. Wang, N. M. and Shah, V. C., "Drawbead Design and Performance," *J. Mater. Shaping. Tech.*, Vol. 9, pp. 21-26, 1991.
4. Cao, H. L. and Teodosiu, C., "Numerical Simulation of Drawbeads for Axisymmetric Deep-drawing Processes," NUMIFORM'92, pp. 439-448, 1992.
5. 이재우, 금영탁, "박판 성형공정의 유한요소해석을 위한 드로비드 전문모델 개발," *한국소성가공학회지*, 제7권, 제1호, pp. 3-22, 1998.
6. 박원배, 김창만, 김낙수, 서대교, 전기찬, "계단형 드로비드에 의한 판재의 인출특성에 관한 연구," *한국소성가공학회지*, 제5권, 제2호, pp. 130-137, 1996.
7. Kim, C. M., Im, Y. S., Heo, Y. M., Kim, N. S., Jung, G. C., Seo, D. G., "Finite-element analysis and experimental verification for drawbead drawing processes," *J. of Materials Processing Technology*, pp. 188-194, 1997.
8. Cheng, J. H., and Kikuchi, N., "An Analysis of metal forming processes using large deformation elastic - plastic formulation," *Comp. Meth. Appl. Eng.*, pp. 71-108, 1985.
9. Chun, B. K., "Numerical Simulation of Bead Formation by an Elasto-Plastic Finite Element Method," KAIST MS thesis, pp. 7-23 1992.
10. Yamada, Y., and Yoshimura, N., "Plastic Stress-Strain Matrix and its Application for the Solution of Elastic-Plastic Problems by the Finite Element Method," *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 10, pp. 343-354, 1968.