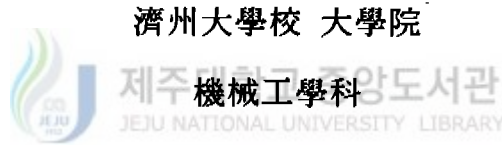


碩士學位論文

정적 외연적방법을 이용한
드로우비드 공정의 유한요소해석



李 相 帝

1999年 12月

정적 외연적방법을 이용한 드로우비드 공정의 유한요소해석

指導教授 林 鍾 桓

李 相 帝

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



1999 年 12 月

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

李相帝의 工學 學士學位 論文을 認准함

審査委員長

김기식



委
員

조경호



委
員

임증환



濟州大學校 大學院

1999 年 12 月

Finite Element Analysis of Drawbead Process using Static-Explicit Method

Sang-Je Lee

(Supervised by professor Jong-Hwan Lim)



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING**

**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY**

1999. 12.

목 차

NOMENCLATURE	1
SUMMARY	2
I. 서 론	3
1.1 연구개요	3
1.2 연구의 목적과 범위	6
II. 수치적 방법	8
2.1 탄소성 유한요소 수식화	8
2.2 정적 외연적 해석방법	11
III. 해석결과 및 고찰	17
3.1 비드 편치 스트로크에 따른 영향	17
3.1.1 스트로크에 따른 성형 및 인발 해석	17
3.1.2 스프링 백(spring-back) 해석	24
3.2 비드 수에 따른 영향	30
3.2.1 성형공정 해석	30
3.2.2 인발공정 해석	36
3.3 비드 형상에 따른 영향	42
3.3.1 사다리꼴단면 비드 해석	42
3.3.2 사각단면 비드 해석	47
IV. 결 론	52
V. 참고문헌	54

NOMENCLATURE

- σ_{ij} : Cauchy stress tensor
- ρ : density of material
- \mathbf{b} : material force vector
- Γ_F : surface applied surface force
- Γ_D : surface restricted displacement
- \mathbf{f} : surface force vector applied to Γ_F
- $\bar{\mathbf{u}}_1$: virtual displacement vector
- \mathbf{T}_{ij} : the first Piola-Kirchhoff stress tensor
- $\Delta \mathbf{T}_{ij}$: increment of the first Piola-Kirchhoff stress tensor
- σ_{ij}^v : Zaremba-Jauman increment of Cauchy stress tensor
- λ : Lamé constant
- μ : surface friction coefficient
- δ : Kronecker delta
- α : $\alpha = 0$ at plastic strain or unloading state
 $\alpha = 1$ at elastic strain or loading state
- \mathbf{s}_{ij} : deviation stress tensor ($= \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_{kk} / 3$)
- H'_0 : slope of true-algebraic elastic strain rate curve
 $H' = H'_0 / (1 - H'_0 / E)$
- f : yield function

SUMMARY

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.

The existing approaches can be divided into the experimental methods and the numerical ones. In case of the experimental methods, there is a heavy burden in time and cost because they are basically trial and error approaches. The numerical methods also suffer from convergence problem as well as heavy computation time. The existing methods, therefore, are insufficient to be applied to the practical process.

In this study, the numerical method called the static-explicit finite element method will be introduced. The finite element analysis code for this method has been developed and applied to the drawbead process problems. In result, convergence problem and computation time due to large non-linearity in the existing numerical analysis methods were no longer a critical problem. Furthermore, this approach could treat the contact friction problem easily by applying very small time intervals.

It is expected that various results from the numerical analysis will give very useful information for the design of tools in sheet metal forming process.

I. 서 론

1.1 연구 개요

박판 금속성형이란, 금속 판재를 이용하여 다양하고 비교적 복잡한 형상의 제품을 만드는 공정을 말한다. 박판 성형에 의한 제품은 저렴한 소재의 가격, 제품의 높은 비강도 및 양호한 표면, 그리고 대량 생산성 등의 특징을 가지고 있기 때문에 무게를 중요시하는 항공산업이라든지 자동차 산업, 전자 산업, 심지어 주방용기에 이르기까지 다양한 산업 분야에 널리 이용되고 있다.

하지만 대부분의 박판 성형물은 재료의 물질적 특성 및 금형의 기하학적 형상, 금형과 재료간의 마찰 특성 등 여러 가지 공정 변수들에 의해서 복합적인 영향을 받기 때문에 제조공정 중에 커다란 소성변형을 수반하게 된다. 따라서, 판재의 파단이라든지 형상불량 등의 가공 결함이 발생되기 쉽다. 이러한 물리적 결함을 수반하지 않는 우수한 박판 성형물을 얻기 위해서는 합리적인 가공공정의 설계가 필수적이라 하겠다.

지금까지 실행되어 온 공정 설계 방법은 대부분 실험을 통해서 직접 정보를 얻는 방법을 취해 왔다. 그러나 이러한 과정은 수많은 시행착오를 거쳐야 하기 때문에 많은 시간과 노력이 필요하며, 짧은 리드타임(lead time)을 요하는 실제 생산 공정에 적용하기에는 매우 비효율적인 면이 있었다. 이러한 이유로, 해석적인 모델링 방법을 도입하여 시행 착오를 줄이고, 공정 변수들의 영향을 명확히 규명함으로써 보다 정확한 공정 설계를 하는 작업이 필요하게 되었다.

본 논문에서는 박판 금속성형의 다이 설계에 있어서, 매우 중요한 역할을 차지하고 있는 드로우비드에 관하여 고찰해 보고자 한다. 드로우비드라 함은 박판을 성형할 때 재료가 금형 안쪽으로 빨려 들어가는 것을 조절하도록 인장 구속력을

제공하여, 주름 발생이나 스프링 백(spring-back) 현상을 억제하고 적절한 강성(stiffness)과 덴트저항(dent resistance)을 부여하여 원하는 형상의 우수한 제품을 생산하도록 도움을 주는 장치라 할 수 있다.

일반적인 박판 성형공정에는 성형과정 중에 일어날지 모르는 불안정 요소를 방지하기 위해서 Fig. 1과 같이 블랭크홀더로 재료를 잡아줌과 동시에 비드가 성형되는 공정이 수반되고 있다. 이때, 재료에는 두께변화라든지 내부응력의 변화, 심지어는 재료의 손상까지 일어나는 등 박판의 초기상태에 적지않은 영향을 미치게 된다. 이러한 초기 성형공정에서 생기는 박판의 상태에 대한 고찰없이 그대로 실제품 성형해석을 하게 된다면 실제 나타나는 결과와는 많은 차이를 보이게 될 것이다. 그러므로 올바른 블랭크 공정설계를 위해서는 반드시 비드에 관한 적절한 사전 해석이 선행되어야만 할 것이다.

그동안 비드 해석을 실험적 또는 수치적 방법으로 접근하기 위한 연구들이 많이 진행되어 왔다. 지금까지의 드로우비드에 관한 연구를 살펴보면, Nine[1]이 드로우비드를 거치면서 금속이 유동할 때 생기는 구속력이 굽힘변형과 마찰에 의한 성분을 가지게 된다고 생각했다. 따라서 이 두성분을 나누어 해석함으로써 AK steel의 인발력과 고정력, 변형률분포 및 그때 생기는 소성변형에 대하여 연구가 이루어졌다. 그리고 1991년에는 Wang 등[2,3]이 패널성형 시에 드로우비드의 형상과 마찰이 주는 영향을 실험적으로 고찰하여 비드 설계의 방향을 제시한 바 있다. 또한, 블랭크홀더력을 무시하는 실험적 방법으로 구속력(restraining force)과 비드를 거쳐서 유동하는 재료의 양과의 상관관계 그리고 마찰에 따른 민감도를 구하였다.

수치적인 방법을 사용한 경우로는 Triantafyllidis 등[4]이 비드 성형공정을 1차원 탄소성 쉘 요소를 사용하여 해석하고 실험치와 비교해 보는 연구를 수행하였다. 또한, Cao와 Teodosiu[5]에 의해서는 드로우비드가 있는 덩드름 공정 해석됨으로써 비드에 대한 본격적인 연구가 활발히 진행되기 시작하였다[6,7].

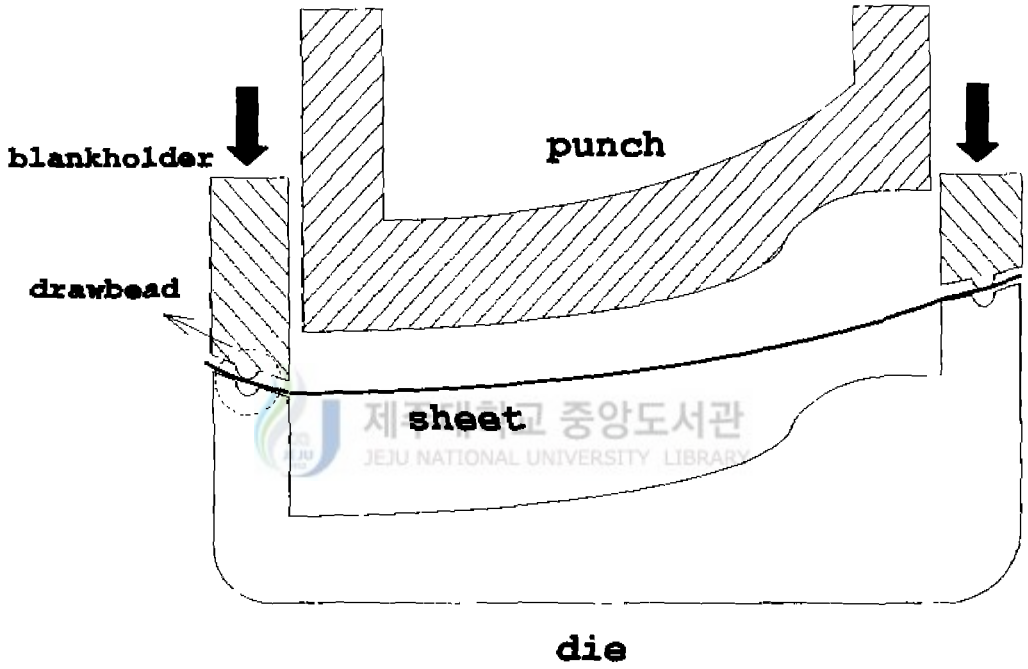


Fig. 1 Schematic diagram of a general blank forming process

1.2 연구의 목적과 범위

박판 성형공정에서 재료의 유입을 조절할 수 있는 방법에는 크게 두 가지 방법이 있다. 그중 한가지는 블랭크홀더에 의해서 재료를 잡아주는 것이고, 다른 하나는 비드에 의한 구속력으로 재료의 흐름을 제어하는 방법이다. 일반적으로 큰 차체 패널에서 블랭크홀더만으로 재료의 유입을 제한하고자 할 경우에는 홀더를 제어할 만한 큰 힘이 요구된다. 따라서 원하는 홀딩력을 가할 수 있는 용량이 커다란 프레스 장치가 필요하기 때문에 효율성과 경제적 측면에서 볼 때, 매우 비생산적이며 경우에 따라서는 현재 기술로는 불가능한 작업상황까지도 발생하게 된다.

따라서 비드로 조절하는 것이 가장 용이하지만, 아쉽게도 아직까지 비드에 의한 제한력을 체계적으로 조절할 수 있는 기술은 개발되어 있지 못한 실정이다. 심지어 어떤 경우에는 원하는 형상을 얻기 위해서 금형을 수정해야 하는 불가피한 상황이 종종 발생되기도 한다.

그러므로 이러한 비드의 제한력을 원하는 대로 조절할 수 있도록 하는 연구가 절실히 요구되고 있으며, 이를 위해서 본 연구에서는 여러 가지 영향인자를 고려한 수치해석을 통하여 필요로 하는 비드 제한력을 얻을 수 있는 방법을 모색하였다. 즉, 비드의 개수에 따른 영향과 펀치 스트로크에 따른 재료의 변화 그리고 비드의 형상에 따라서도 박판에 미치는 영향이 다를 것으로 보고, 이를 위한 전제 연구로서 수치해석을 통하여 그 타당성을 살펴보고자 한다.

비드에 관한 수치적인 연구는 국외뿐만 아니라 국내에서도 많은 시도가 이루어져 왔다. 하지만 지금까지 보고된 바에 의하면 아직까지 비드공정에 대한 명확한 결과를 얻어낸 연구는 드문 실정이다. 그 이유로는 비드가 갖는 커다란 비선형으로 인한 수렴성 문제로 계산시간이 오래 걸릴 뿐만 아니라, 수렴이 이뤄지지 않고 계산도중 발산해 버리는 경우도 종종 발생되었기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 기존에 사용되어 왔던 정적 내연적방법(static-implicit method) 대신 수렴검사를 하지 않고 최소한도의 스텝간격을 찾아서 진행되는 정적 외연적방법(static-explicit method)이라는 새로운 수치기법을 도입하여 계산의 효율성을 높이고자 한다. 여기서 동적 외연적방법 역시 수렴성에 관한 문제가 없고 계산시간도 빠르게 해석할 수 있지만, 이 방법 또한 비드해석과 같은 복잡한 접촉현상을 보이는 정적인 문제에 적용할 경우에는 심한 진동을 야기시키게 되어 정확도를 신뢰할 수 없는 해석결과를 얻게 된다. 그러므로 본 연구에서는 이러한 단점들을 서로 보완하기 위해서 정적 외연적방법을 비드공정 문제에 새롭게 적용시키고자 한다.

전체적인 해석과정은 우선, 비드 펀치의 진행으로 인한 성형공정을 먼저 살펴 보고, 이어서 실제 블랭크 성형으로 인하여 재료가 안쪽으로 빨려 들어가는 인발 공정, 두 부분으로 구분하여 해석해 보고자 한다. 이로부터 재료의 두께변화 및 변형을 분포, 내부 응력 등의 결과들을 살펴볼 수 있으며, 이러한 해석결과들은 가공 전 박판의 초기상태를 예측하는데 매우 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

II. 수치적 방법

2.1 탄소성 유한요소 수식화

비드 공정을 탄소성 유한요소법으로 해석하기 위해서 우선, 가상일의 원리에 의하여 지배방정식의 적분형을 유도한다. 그리고 변화하는 기준 좌표계에 대해서 증분해석을 적용한 개량 라그랑지 수식화를 연속체요소로 유한근사화 한다. 이때 재료의 성질을 탄소성으로 보고, 소성변형은 Prandtl-Reuss 식으로 표현되는 유동이론에 따라 일어난다고 가정한다[8,9].

형상이 Ω 이고 경계표면이 Γ 인 Fig. 2와 같은 자유물체에서, 이 자유물체가 평형상태에 있을 때 σ_{ij} 는 다음의 평형방정식을 만족하는 임의의 응력장으로 볼 수 있다.

$$\sigma_{ij,j} + \rho b_i = 0 \quad (1)$$

위 식에서 $\sigma (= \sigma_{ij} \mathbf{e}_j \mathbf{e}_i)$ 는 변형된 형상 Ω 에서 정의되는 Cauchy 응력텐서이고, ρ 는 물체의 밀도, 그리고 $\mathbf{b} (= b_i \mathbf{e}_i)$ 는 물체력 벡터를 의미한다. 한편 경계표면은 표면력이 작용하는 Γ_F 와 변위가 규정된 Γ_D 의 부분으로 나눌 수 있으며, \mathbf{f} 는 Γ_F 에 작용하는 표면력 벡터를 의미한다.

가상 변위벡터 $\bar{\mathbf{u}} (= \bar{u}_i \mathbf{e}_i)$ 를 변위가 규정된 경계면 Γ_D 에서 $\bar{\mathbf{u}}_i = 0$ 인 임의의 벡터라 할 때, 평형 방정식에 발산정리를 적용하고 경계조건을 대입하면 식 (2)와 같은 지배방정식의 적분형을 얻을 수 있다.

$$\int_{\Omega} \sigma_{ij} \bar{u}_{i,j} d\Omega = \int_{\Omega} \rho b_i \bar{u}_i d\Omega + \int_{\Gamma_F} t_i \bar{u}_i d\Gamma, \quad \forall \bar{u}_i \quad (2)$$

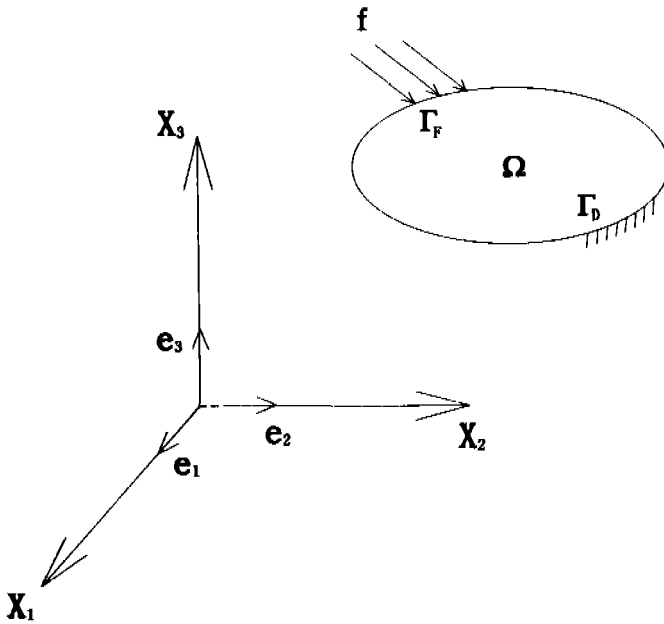


Fig. 2 Deformation of material and reference coordinates

식 (2)는 변형이 작고, 변형하는 동안 재료의 성질과 같은 변형계통이 선형일 경우에만 바로 적용할 수 있다. 하지만 변형량이 클 경우에는 변형된 형상 Ω^t 가 초기의 형상 Ω^0 와 차이가 크기 때문에, (2)식을 변형시켜서 초기 형상 Ω^0 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, 시간중분 Δt 동안에 미소변형을 하는 것으로 가정하므로 적분식은 다음과 같이 표현된다[10].

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

위 식을 개량 라그랑지 식이라고 부르며, 여기서 $T (= T_{\bar{u}} e_i e_j)$ 는 1차 Piola-

Kirchhoff 응력텐서로서 Cauchy 응력텐서 σ_{ij} 와의 관계식으로부터 증분을 취하여 (4)식과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$\Delta T_{ij} = \Delta \sigma_{ij} \delta_{ij} + \sigma_{ij} \Delta u_{k,k} - \sigma_{ij} \Delta u_{j,i} \quad (4)$$

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

일반적인 소성문제는 탄성변형과 소성변형이 복합적으로 일어난다. 따라서 본 연구에서는 두가지 현상을 동시에 고려할 수 있는 유동이론을 채택하여 재료의 구성 관계식을 (5)식과 같은 Prandtl과 Reuss가 제안한 식으로 표현하였다[11,12].

$$\sigma_{ij}^{\nabla} = D_{ijkl} \Delta \epsilon_{kl} \quad (5)$$

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

$$D_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) - \frac{3\alpha\mu(s_{ij}s_{kl})}{\sigma^2 \left(1 + \frac{H'}{3\mu}\right)} \quad (6)$$

이로부터 구성방정식을 세운 뒤, 접촉조건 및 마찰 경계조건을 고려하여 최종적으로 (7)식과 같은 유한요소 근사식을 얻었다.

$$\left\{ \sum_{\epsilon} K_{ij\alpha\beta}^{\alpha} + \sum_{\epsilon} K_{ij\alpha\beta}^{\Gamma_{\alpha}} \right\} \Delta u_{j\beta} = \sum_{\epsilon} f_{i\alpha}^{\alpha} + \sum_{\epsilon} f_{i\alpha}^{\Gamma_{\alpha}} + \sum_{\epsilon} f_{i\alpha}^{\Gamma_{\alpha}'} \quad (7)$$

좌변항으로 표시되는 $K_{ij\alpha\beta}^{\alpha}$ 와 $K_{ij\alpha\beta}^{\Gamma_{\alpha}}$ 는 요소의 강성행렬(stiffness matrix)을 의미하고, 우변항의 $f_{i\alpha}^{\alpha}$, $f_{i\alpha}^{\Gamma_{\alpha}}$ 및 $f_{i\alpha}^{\Gamma_{\alpha}'}$ 는 요소의 외력벡터를 나타낸다[13].

2.2 정적 외연적 해석방법

비선형 유한요소해석법(finite element method)은 타 방법에 비해서 적용범위가 넓고, 비교적 정확한 해석을 할 수 있다는 특징 때문에 대부분의 박판 성형공정 해석에 주로 사용되고 있다. 이러한 유한요소를 이용한 해석에도 수치적 기법에 따라 여러 가지로 구분되어지는데, 크게 정적 내연적방법(static-implicit method)과 동적 외연적방법으로 분류해 볼 수 있다. 그 중에서 정적 내연적방법은 큰 시간간격을 가지고 각 단계마다 힘평형을 맞추며 여러번 축차(iteration)를 통해 수렴시켜 나가는 방법으로서 수렴에 의한 계산시간이 오래 걸리는 단점이 있지만 비교적 정확한 해석을 할 수 있다는 특징을 가지고 있다.

반면, 동적 외연적방법은 작은 시간간격을 가지고 각 단계에서 동적 평형방정식을 만족시키며 해를 구하는 방법이다. 이것은 원래 빠른 속도의 동적인 거동에 적합하기 때문에 비드해석과 같은 복잡한 접촉현상을 포함하는 정적인 문제에 적용시킬 경우에는 해석결과에 심한 진동을 야기시키게 된다. 따라서 해의 정확성을 보장받기 힘들고 신뢰성 있는 결과는 얻기 힘들다. 정적 내연적방법 또한, 제품의 형상이 복잡해지면서 난이한 접촉을 보이거나 형상이 아주 복잡한 대용량의 문제에 있어서는 수렴이 이뤄지지 않고 정량적 해를 얻을 수 없는 단점을 보인다[14-17].

이와같은 수치해석 진행 과정에서 일어나는 문제점들을 보완하기 위해서 본 연구에서는 정적 외연적 유한요소방법(static-explicit FEM)이라는 새로운 수치적 기법을 도입하여 드로우비드 공정해석에 처음으로 적용시켜 보았다. 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 시간간격의 크기를 매우

작게 정하는 특징을 가지고 있다.

의연적 유한요소해석에서 시간간격은 해의 정확도와 안정도에 가장 크게 영향을 미치는 요소이다. 수렴 검사가 이뤄지지 않는 대신, 정확도를 높이기 위해서는 시간간격을 매우 작게 설정해주어야만 한다. 여기서 일정기준 없이 간격을 무한정 작게 줄일 수는 없기 때문에 그 크기를 결정할 수 있는 방법이 필요하다. 이에 본 연구에서는 Yamada[18]가 제안한 $r-min$ 이라 불리는 방법을 이용하여 시간간격을 결정하고 해석에 적용시키고자 한다. 다음은 $r-min$ 방법에 대한 수식과정을 정리한 것이다.

우선, 탄성 요소에서 정의되는 강성행렬 $[k^e]$ 은 (8)식과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$[k^e] = [B]^T [D^e][B]tA \quad (8)$$

여기서 t 는 상수로 가정된 요소의 두께를 의미하며, A 는 삼각형 요소의 면적을 의미한다. 마찬가지로 소성 요소들의 강성행렬 $[k^p]$ 도 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[k^p] = [B]^T [D^p][B]tA \quad (9)$$

이때, 강성행렬 $[k^e]$ 와 $[k^p]$ 는 전체 요소에 대한 행렬 $[K]$ 로 조합할 수 있으며, 전체 행렬 $[K]$ 는 식 (10)과 같이 절점 하중중분 $\{dL\}$ 과 절점 변형중분 $\{dU\}$ 으로 연관되어 진다.

$$\{dL\} = [K] \{dU\} \quad (10)$$

해석 초기단계에서 적절한 스텝간격을 정하고 수행한 결과 단지 하나의 후항복 요소 즉, 어떤 하중에서 최초로 항복이 일어나는 요소가 존재할 것이다. 이

때, 전체 요소에 대해서 강성 행렬 [K]를 종합한 후, 적절한 시험 하중중분 $\{\Delta L\}^T$ 을 식 (10)으로부터 구한다. 그리고나서 각 요소에서의 응력중분 $\Delta \sigma_y^T$ 및 변형률 중분 $\Delta \epsilon_y^T$ 을 계산하고, 다음의 식 (11)을 이용하여 탄성상태로 남아있는 모든 요소의 r값을 계산한다.

$$r = \frac{\Pi + \sqrt{[\Pi^2 + 4(\Delta \bar{\sigma}_y^T)^2(Y^2 - \bar{\sigma}^2)]}}{2(\Delta \bar{\sigma}_y^T)^2} \quad (11)$$

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

이때, $\bar{\sigma}$ 는 탄성요소와 등가응력이고, Y는 재료의 항복응력, $\Delta \bar{\sigma}^T$ 는 하중중분 $\{\Delta L\}^T$ 에 의해 정해지는 $\bar{\sigma}$ 의 중분으로 정의된다. (11)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) 중분값과 곱하여 다음 스텝의 새로운 중분값으로 결정한다[19].

r-min 방법의 물리적 의미는 이 값을 사용하여 구해진 펀치행정 중분으로 유한요소계산을 하게 되면 가장 큰 변형률을 나타내는 탄성영역의 요소가 항복응력 값을 절대 넘지 않게 된다. 즉, 재료의 비선형성을 선형으로 간주하여 축차(iteration) 없이 계산할 수 있는 펀치행정 중분값을 구할 수 있다. 그러나 실제 응용에 있어서는 r-min 방법에 의한 펀치행정 중분값이 너무 작은 경향을 나타내므로 높은 정확도에도 불구하고 지나치게 많은 계산시간을 요한다. 따라서 경험적으로 구한 변형률 임계값(보통 0.002)을 이용하여 이 임계값보다 작은 변형률이 되도록 펀치행정 중분값을 결정하는 방법도 계산의 효율성을 위하여 많이 이용되고 있다.

이와같이 *r-min* 방법은 허용할 수 있는 최대 용력 또는 최대 변형률 증분 등을 고려함으로써 재료가 그 이상 변형이 일어나지 않도록 적절한 스텝간격을 결정해주는 방법이라 할 수 있다. 이렇게 정해진 스텝간격을 정적 외연적방법에 적용시키면 비선형성에도 불구하고 해의 정확도에 거의 영향을 미치지 않고도 축차없이 선형으로 계산할 수 있으며, 높은 비선형 문제인 경우는 축차과정이 생략되므로 오히려 계산시간이 줄어들게 된다. 그러므로 형상이 복잡하거나 난이한 접촉을 보이는 문제, 또는 수렴이 어려운 문제 등과 같은 높은 비선형성을 안고 있는 경우에 있어서 정적 외연적방법이 유용하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 3에는 앞서 언급된 구성방정식과 정적 외연적방법을 사용하여 구성된 유한요소 수치해석 프로그램의 전체 구조를 나타내었다. 기존의 내연적 유한요소 해석 코드와 비교해 볼 때 수렴성을 검사하는 부분이 없으며, 입력 ④와 출력 ⑤로 연결된 계산과정에서 *r-min* 방법을 사용하여 다음 스텝에 적용시키기 위한 새로운 스텝증분을 결정하게 된다.

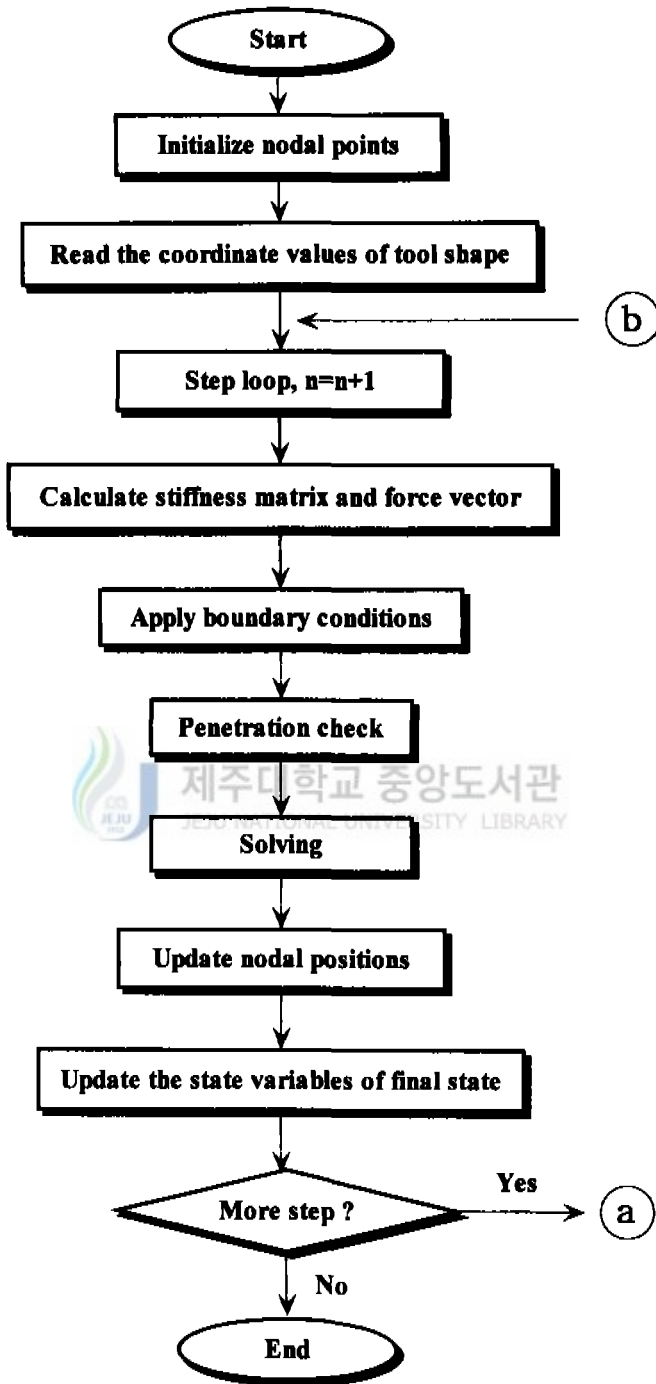


Fig. 3 Flow chart of drawbead analysis with the static-explicit FEM

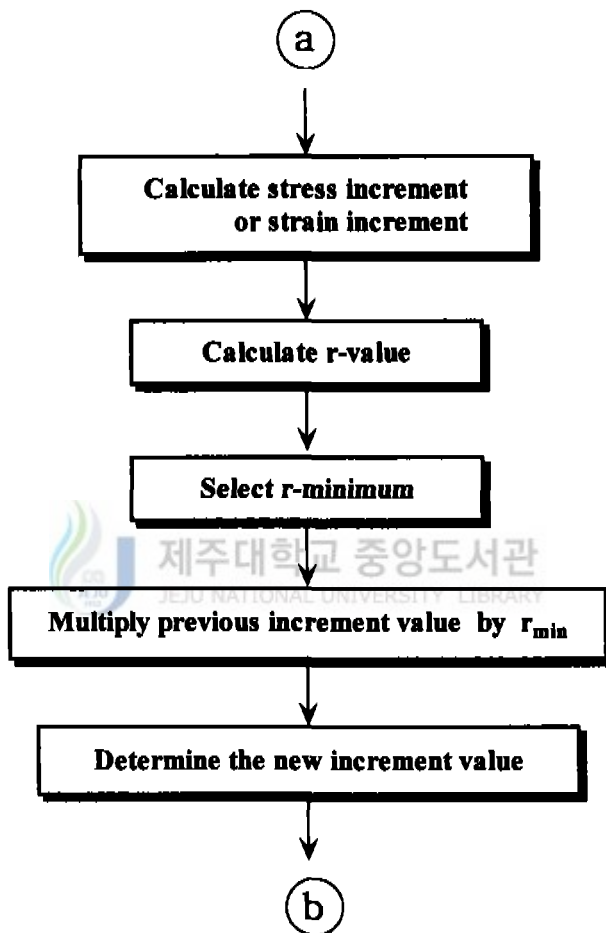


Fig. 3 (Continued)

III. 해석결과 및 고찰

3.1 비드 펀치 스트로크에 따른 영향

3.1.1 스트로크에 따른 성형 및 인발 해석

개발된 탄소성 유한요소 프로그램을 사용하여 평면 변형문제로 가정된 비드 성형공정에 적용시켜 보았다. 먼저, 필요로 하는 비드 제한력을 얻기 위해서 펀치 스트로크를 바꾸면 가장 쉽게 비드 제한력을 조절할 수 있을 것으로 보고, 이를 위한 전제 연구로 수치해석을 통하여 그 타당성을 살펴보고자 한다. 해석에 사용된 비드 형상은 Fig. 4에 보이는 것처럼 펀치반경이 6mm인 단순 원형단면 비드와 곡률반경이 3mm인 하부다이를 사용하였다. 재료는 탄성계수(E)가 280GPa이고, 포와송비(ν)가 0.3이며, 초기 항복응력(σ_y)이 179MPa인 두께가 0.8mm의 강판을 가정하였다. 또한, 해석에 사용된 유한요소 모델은 4절점 연속체요소로서 총 453개의 절점과 300개의 요소들로 구성되었다.

펀치 스트로크가 2mm, 4mm, 6mm일 경우에 대하여 각각 조건을 설정하고 해석이 이루어졌으며, Fig. 5는 펀치 진행에 따라 변하는 박판의 변형형상들을 보여주고 있다. 진행 초기에 재료의 오른쪽 부분에서 들림이 일어나는 현상이 보이는데, 이것은 오른쪽 다리와 접촉하고 있는 재료의 끝 절점들에 대해서는 y-방향으로의 구속을 고려하지 않았기 때문이다. 4mm 진행 후, 차츰 성형이 진행되면서부터는 재료의 들림이 없어지고 펀치와 함께 하부다이에 고정되는 현상을 볼 수 있다. 반면, 왼쪽 끝 대칭선의 절점들에 대해서는 x-방향으로 구속을 설정하여 대칭축으로써 재료를 고정시키는 효과를 얻었다.

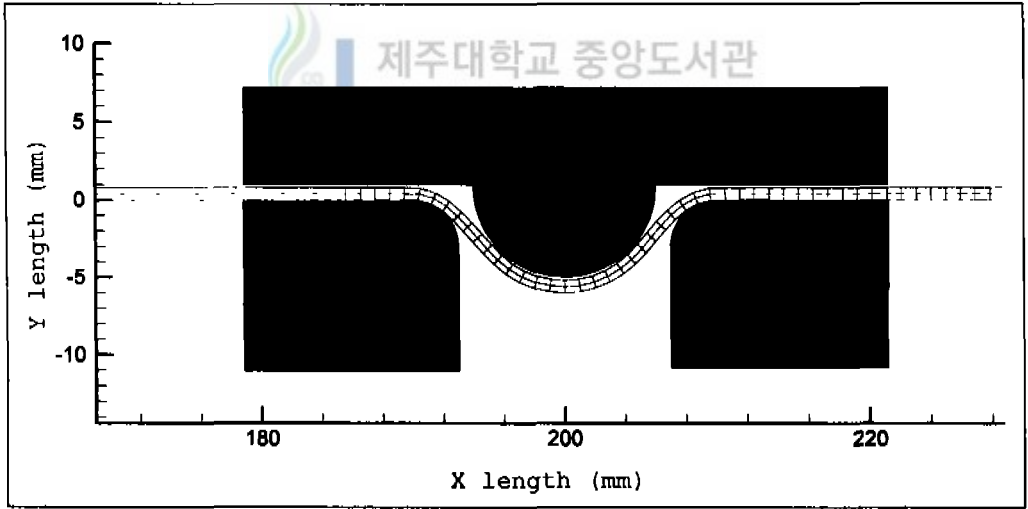
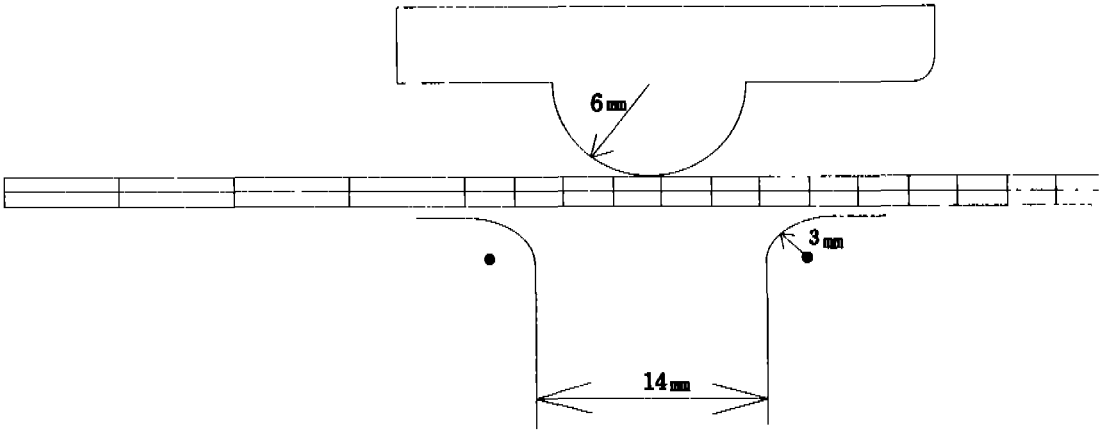
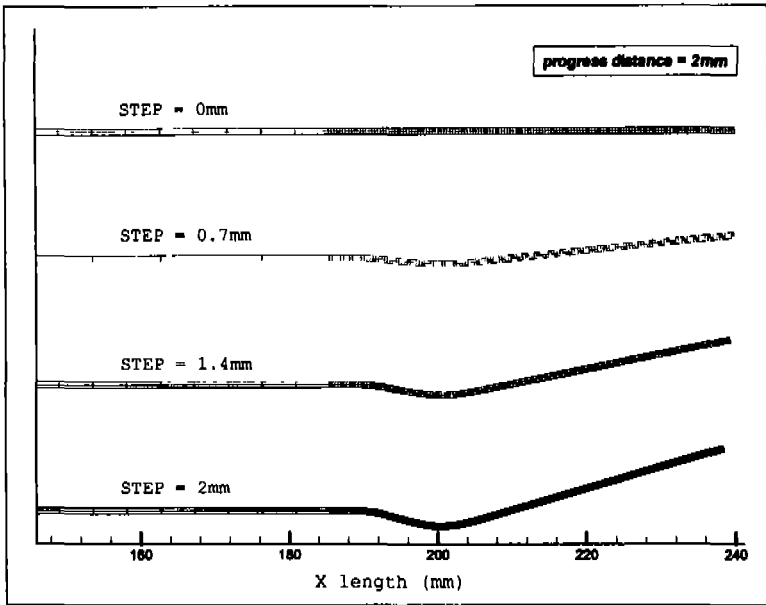
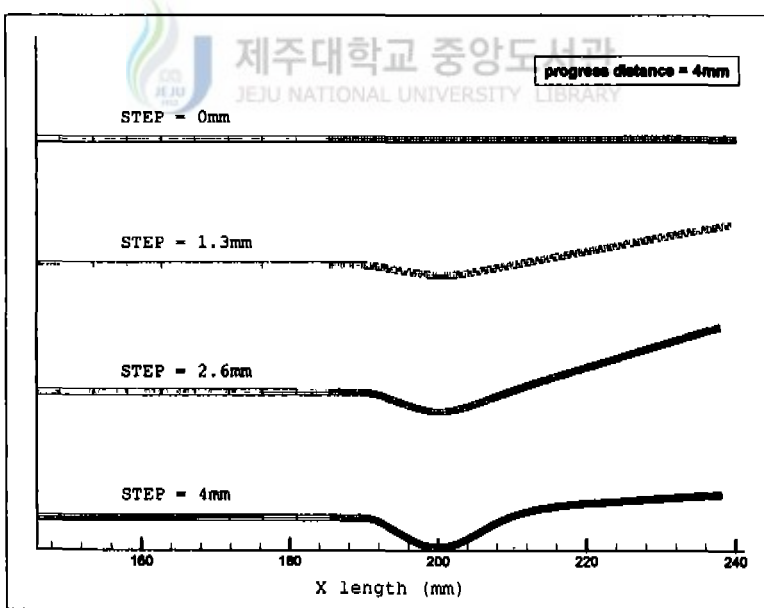


Fig. 4 Schematic diagram of the die and the bead shape

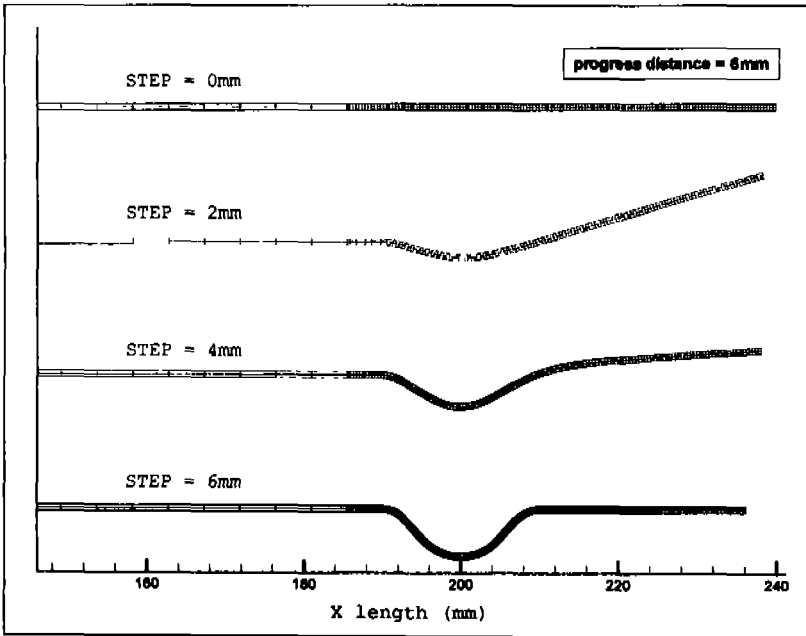


(a) 2mm



(b) 4mm

Fig. 5 Deformation process of sheet according to the punch stroke



(c) 6mm



Fig. 5 (Continued)

2mm 진행의 경우, 계산시간은 332MHz workstation에서 총 962 CPUsec가 소요되었다. 또한, PC/AMD 200MHz기종에서도 약 1690초가 소요되어 일반 PC에서도 무리없이 사용할 수 있는 가능성을 보였다. 4mm와 6mm 진행의 경우에서도 각각 1557초와 2397초의 비교적 빠른 계산시간이 걸렸다.

펀치 스트로크에 따른 진행이 이뤄진 후, 박판 위쪽 표면(upper layer)에서의 가로방향 변형률은 Fig. 6과 같은 변형 분포를 보였다. 2mm 진행에서는 왼쪽 다이부근에서 5%정도의 변형 이외에는 전체적으로 재료에 커다란 변형을 보이지 않지만, 스트로크가 깊어질수록 차츰 펀치와 다이 사이에서의 변형률이 크게 나타나고 있음이 관찰된다.

다음은 이러한 결과를 바탕으로 인발공정에 관한 해석이 이루어졌다. 비드에

의한 구속력으로 재료의 유동을 적절하게 조절해 주는 것이 비드의 역할이라 할 수 있는데, 원하는 만큼의 성형성을 얻기 위해서는 비드의 인발공정에 대한 해석을 통해서 정확한 정보를 얻을 수 있다.

진행과정은 비드성형의 마지막 단계에서부터 시작하여 박판을 20mm까지 왼쪽으로 잡아당기는 공정을 해석하였다. 그 결과, 인발에 따른 박판 위쪽 표면에서의 길이방향 변형률은 Fig. 7과 같은 모습을 보였다. 이는 비드 성형 마지막 단계에서의 변형률을 나타낸 Fig. 6과 비교해 볼 때 현저한 차이를 보이고 있는데, 비드 펀치와 다이에서만 국한되었던 인장과 압축이 재료가 당겨짐으로써 점차 전체영역으로 발전되기 때문이라 생각된다.

Fig. 8에는 재료가 인발되는 양에 따른 인발력의 변화를 나타내었다. 인발력이란 재료가 당겨질 때 비드에 의해서 실질적으로 구속되는 힘의 세기를 의미한다. 초기에 급격한 상승을 보인 후에 일정한 평형상태에 도달함을 볼 수 있는데, 이것은 인발에 의한 재료의 흐름이 초기에는 비드 안쪽 재료에서 어느정도 감당을 해 주지만, 그 이상의 인발이 진행되면 비드에 의한 구속력으로 인발력이 급격히 상승하기 때문인 것으로 판단된다.

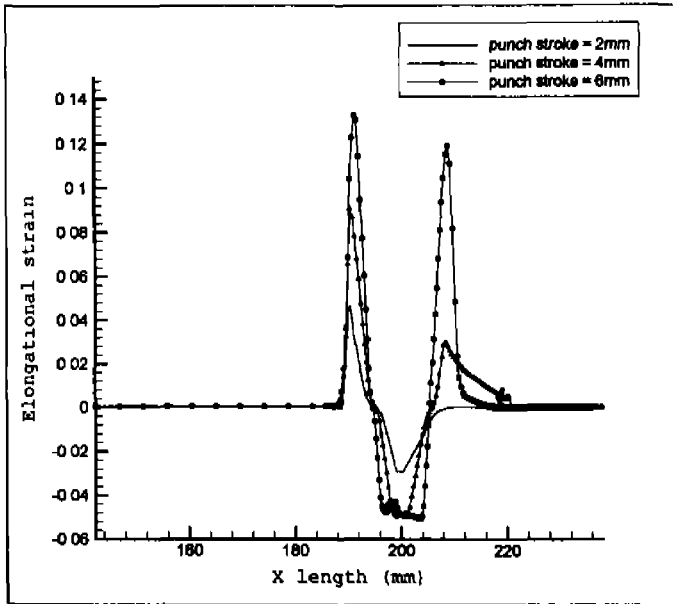


Fig. 6 Elongational strain rate according to the punch stroke on the upper layer of sheet

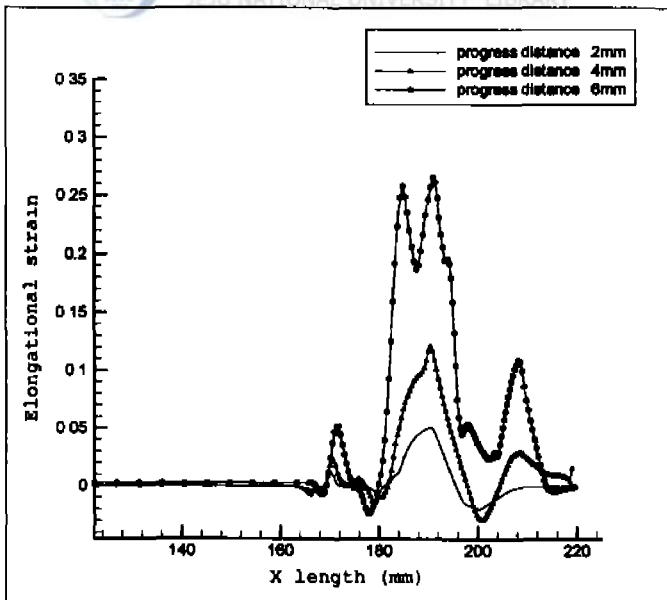
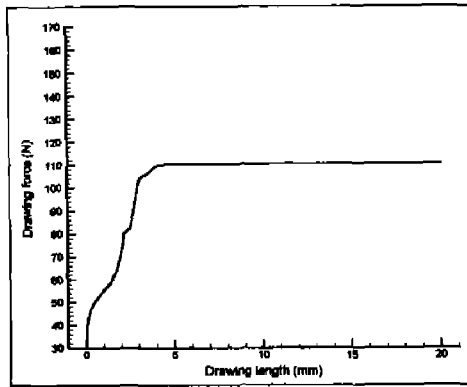
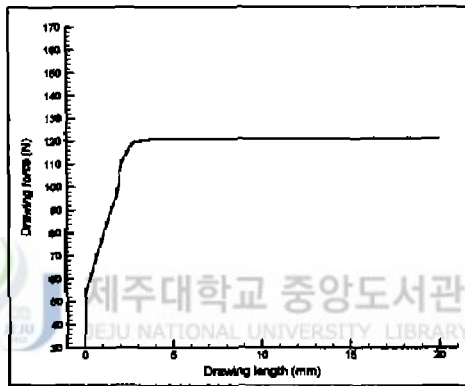


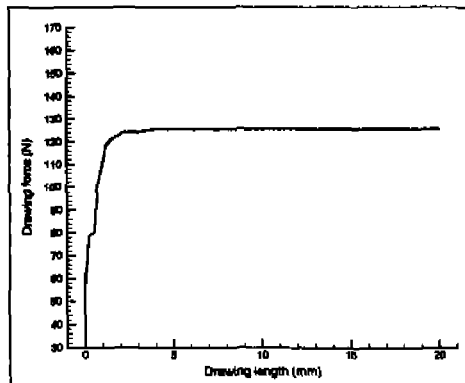
Fig. 7 Distributions of elongational strain after the drawing process



(a) 2 mm progress



(b) 4 mm progress



(c) 6 mm progress

Fig. 8 Variation of drawing force according to the drawing displacement

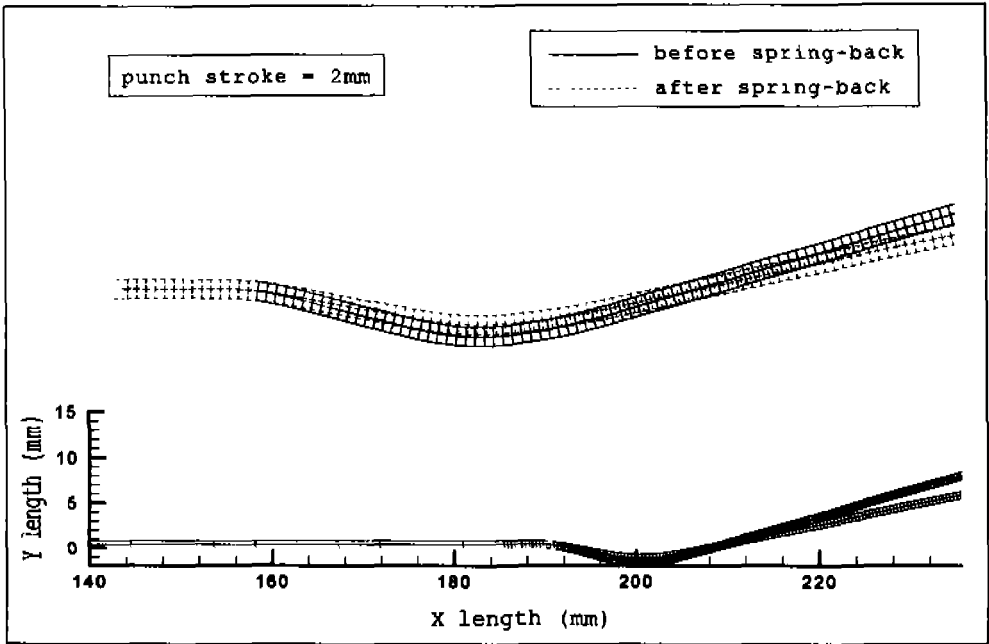
3.1.2 스프링 백(spring-back) 해석

스프링 백 현상이란, 펀치에 의해서 재료가 성형되고 난 뒤 펀치를 제거하였을 때, 재료의 잔류 탄성에너지로 인해서 제품에 2차 변형이 생기는 현상을 의미한다. 그러므로 스프링 백은 성형된 박판 제품의 질과 기하학적 치수 정밀도를 결정하는데 중요한 영향을 미치는 요인들 중의 하나이며, 설계시에 이 현상을 충분히 고려하지 않으면 실제로 원하는 형상과는 오차가 심한 제품이 생산될 우려가 있다. 특히, 오늘날과 같은 보다 정교한 박판 성형품을 요하는 스템핑 공정에서는 스프링 백 해석이 무시되어서는 안될 중요한 해석 요건이 되고 있다.

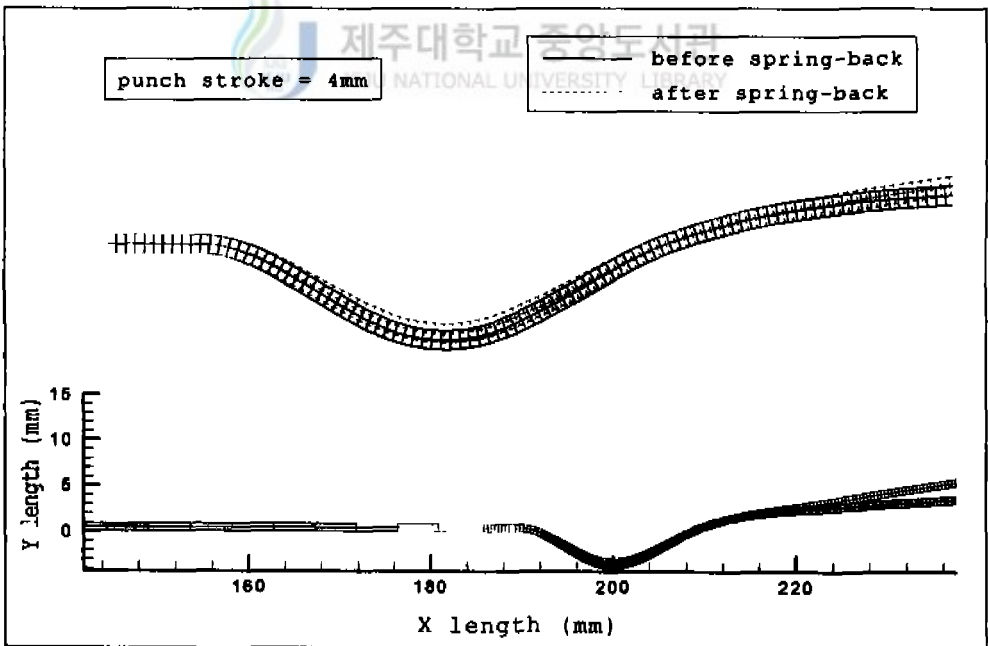
이러한 이유로 그동안 스프링 백 해석에 관한 연구들이 많이 이루어져 왔다. 그 중에서 Queener와 Angelis[20]는 굽힘과 스프링 백이 고려된 수식화를 이끌어내었으며, 스프링 백 후의 잔류응력분포 등을 예칭기법을 도입하여 실험적으로 얻어내기도 하였다. 또한 Karafillis 등[21]은 축대칭 성형품을 이용하여 여러 가지 스프링 백 보정 방법을 개발하였고, Stevenson[22]에 의해서는 여러 형태의 바인더를 이용하여 축대칭 성형품의 스프링 백 실험을 수행하였다.

본 연구에서는 드로우비드의 성형과 인발공정이 이뤄지고 난 후의 데이터를 바탕으로 정적 외연적방법을 적용하여 비드의 스프링 백 현상을 해석해 보았다. Fig. 9는 펀치가 상승함에 따라 일어나는 재료의 변형형상을 보여주고 있다. 실선은 스프링 백이 일어나기 전의 형상이고, 점선으로 표시된 그림이 스프링 백 후 변형된 박판의 형상을 나타내고 있다. 비드 펀치부를 좀더 확대하여 윗부분에 나타내 보았다.

펀치가 제거됨에 따라서 재료가 위쪽으로 들려지는 현상이 보이고 있으며, 펀치 진행거리가 깊을수록 변형되는 양은 적음을 볼 수 있다. 이것은 성형이 깊어질수록 재료와 다이 사이의 접촉면적이 증가하므로 소성변형에 의한 형상 동결효과가 일어나게 되어 그만큼 탄성복원이 일어나는 재료를 고정시켜주고 있기 때문이라 생각된다. Fig. 9(c)의 경우는 펀치가 상승함에 따라, 재료가 일정길이 동안 같이 부착되어 올라간 것으로 단지 위치의 이동만이 일어난 것으로 보여진다.

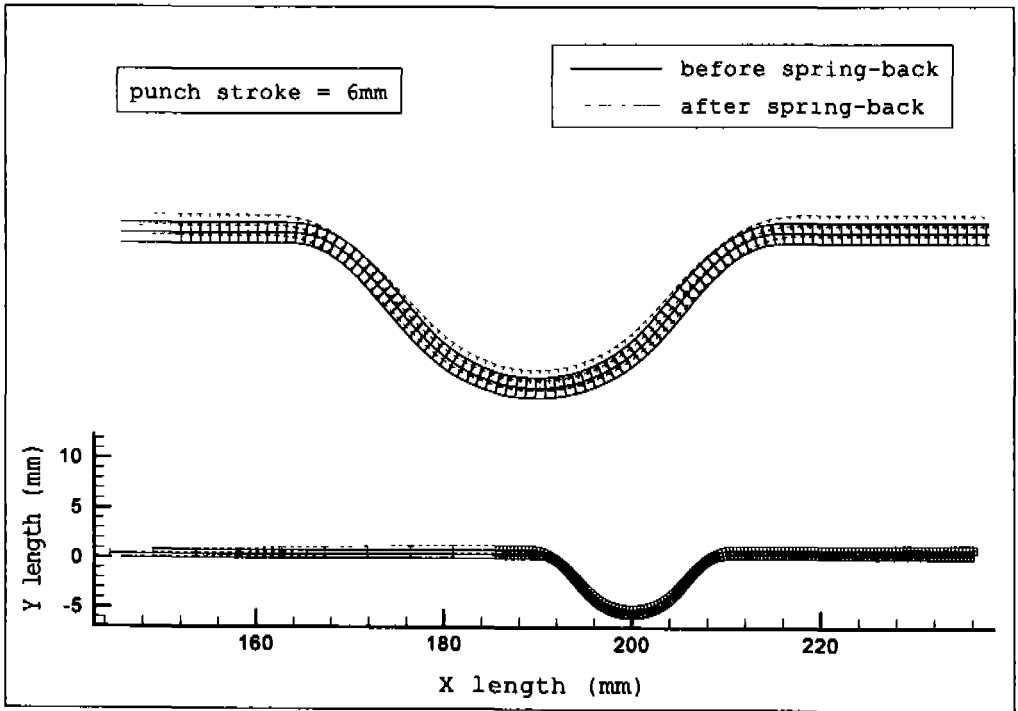


(a) 2mm progress



(b) 4mm progress

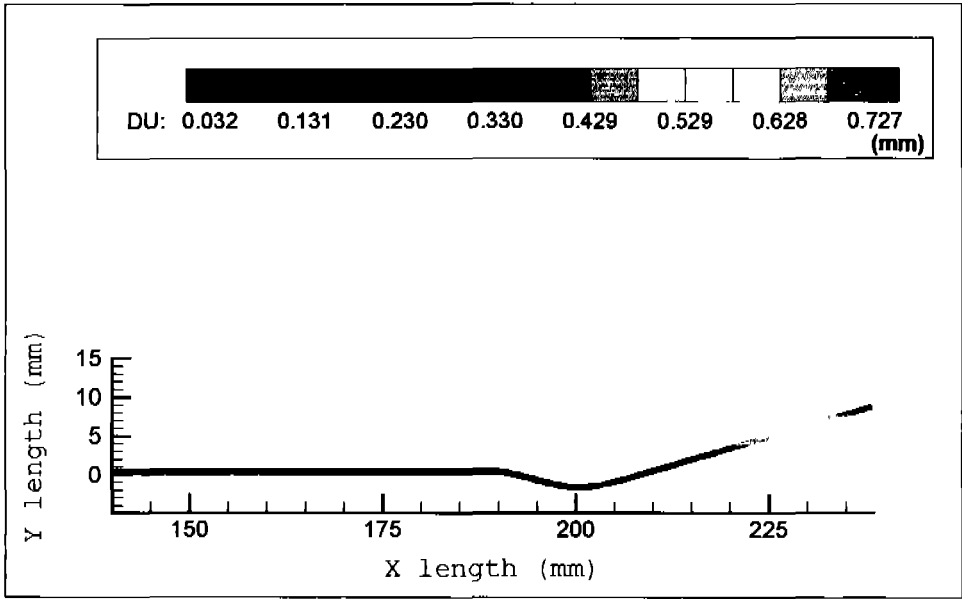
Fig. 9 Spring-back phenomenon appeared after the drawbead forming



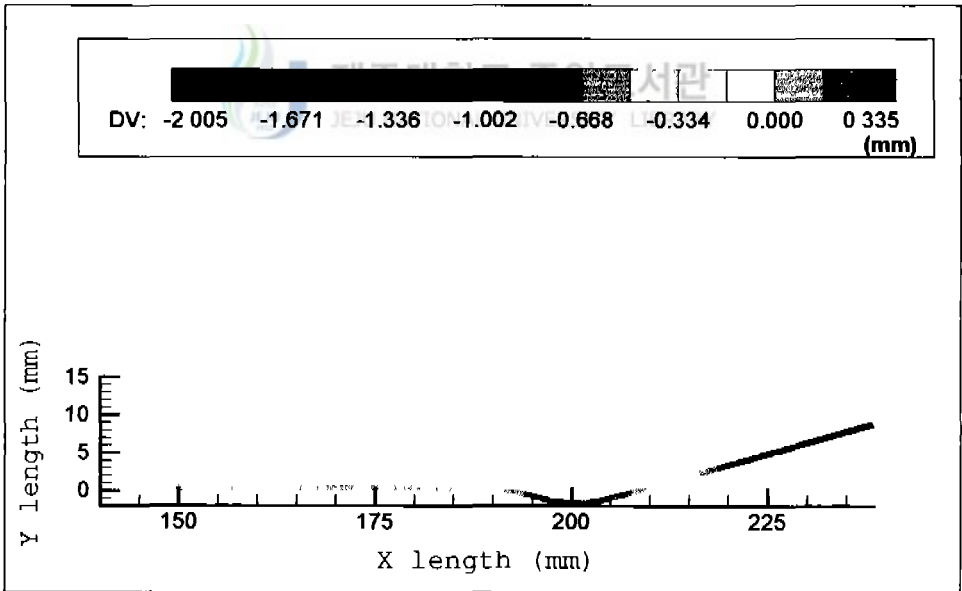
(c) 6mm progress

Fig. 9 (Continued)

Fig. 10에는 진행거리 2mm일 때, 스프링 백이 일어난 후 x축 및 y축을 따라 이동된 변형량의 분포를 식별이 가능하도록 색상에 따라 나타내 보았다. Fig. 10(a)로부터 빨간색 계통으로 표시된 오른쪽 끝 영역으로 갈수록 x축 방향으로의 이동이 심하게 일어나고 있으며, 반면 y축 방향으로의 이동은 펀치헤드 중심부에서 크게 일어나고 있음을 볼 수 있다. 마찬가지로, 진행거리 4mm와 6mm일 경우에도 x축 및 y축 방향으로의 변형을 각각 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내 보았다. 6mm 진행일 경우에 특히 y축 방향의 변형이 많이 일어나고 있음을 볼 수 있다.

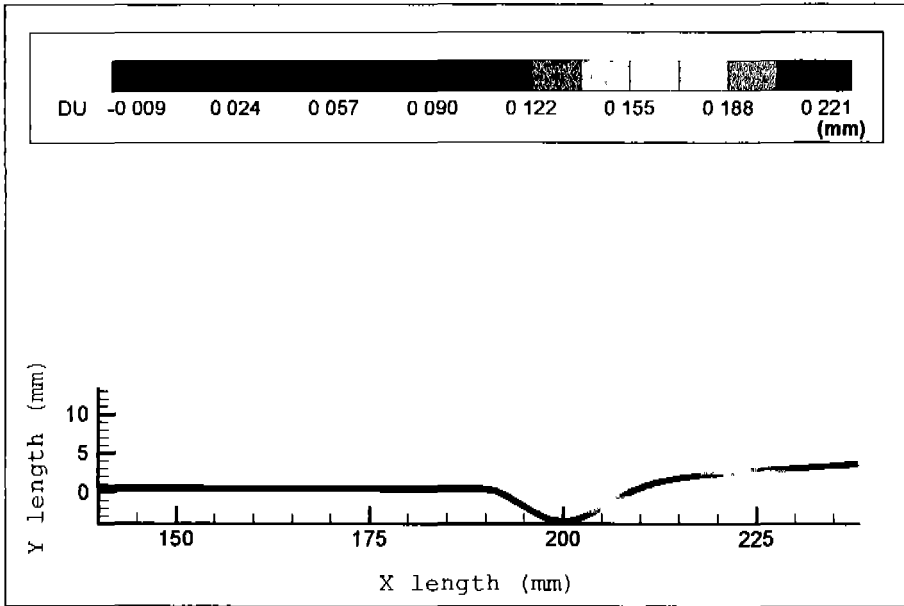


(a) x axis displacement

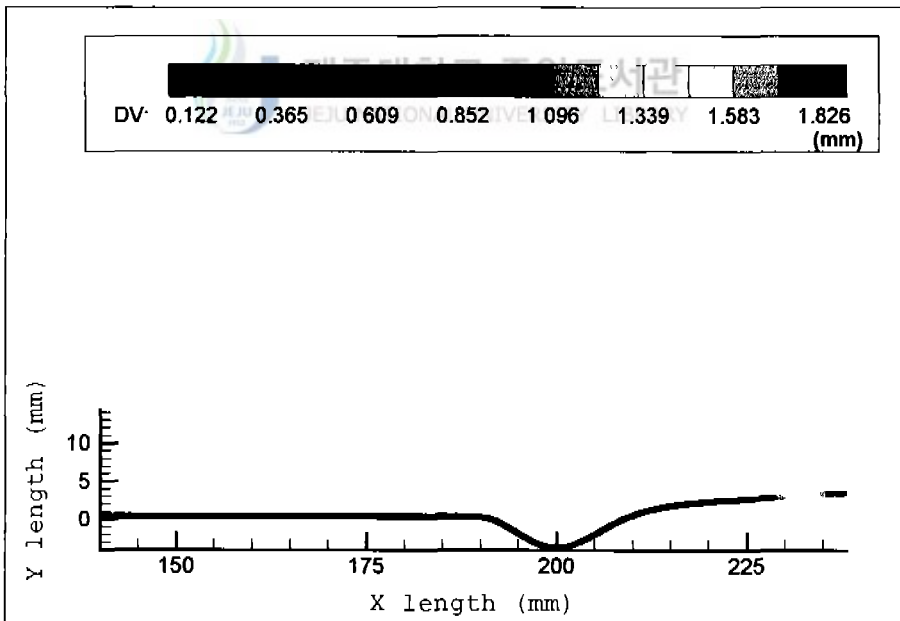


(b) y axis displacement

Fig. 10 Deformation quantity of material after spring-back (at 2mm process)

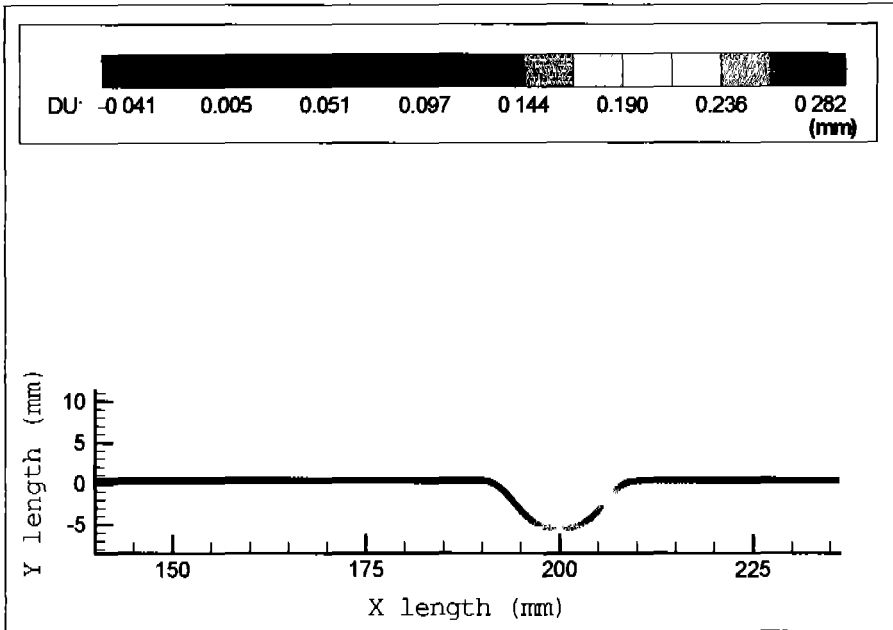


(a) x axis displacement

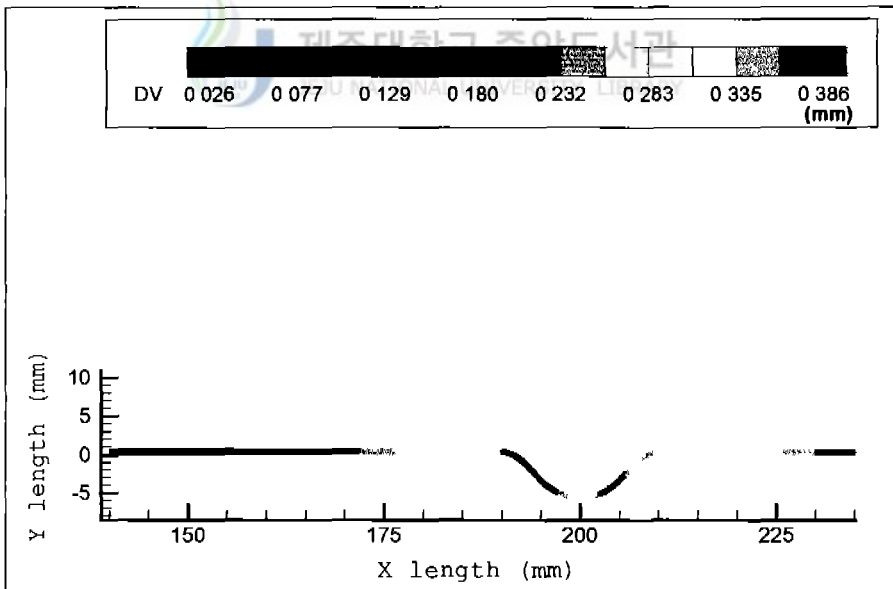


(b) y axis displacement

Fig. 11 Deformation quantity of material after spring-back (at 4mm process)



(a) x axis displacement



(b) y axis displacement

Fig. 12 Deformation quantity of material after spring-back (at 6mm process)

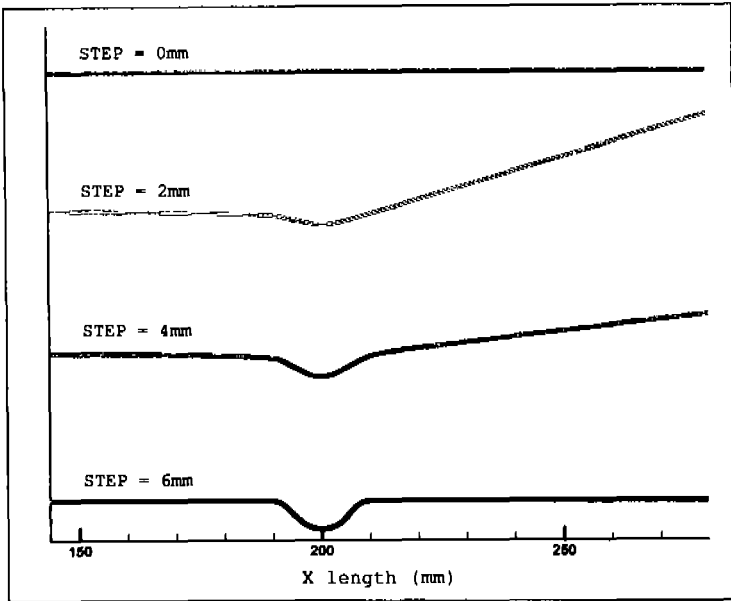
3.2 비드 수에 따른 영향

3.2.1 성형공정 해석

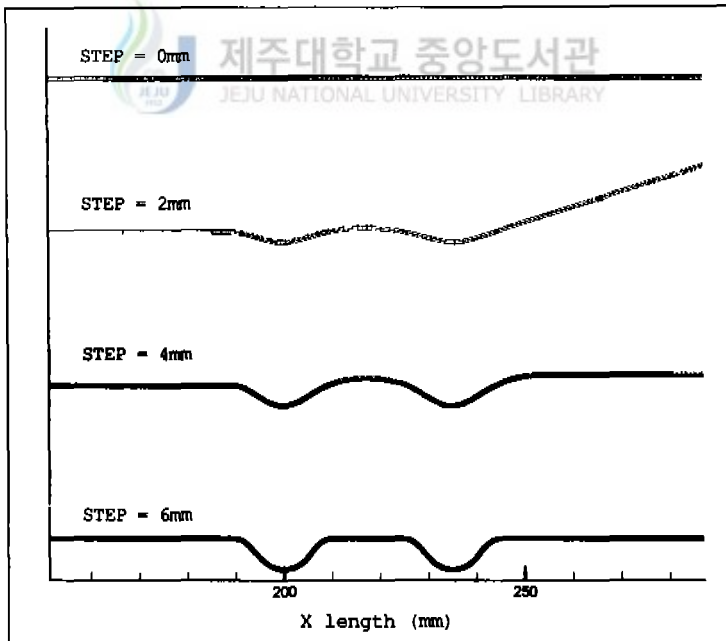
이번 절에서는 비드의 수에 따른 박판의 변형형상과 변형률 분포 등 재료에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 해석에 사용된 비드 형상은 앞절과 마찬가지로 단순 원형단면 비드를 사용했으며 재료는 탄성계수(E)가 200GPa이고, 포와송비(ν)가 0.3이며, 초기 항복응력(σ_Y)이 160MPa인 강판을 가정하였다.

비드가 한 개일 경우(single bead)와 두 개일 경우(double bead) 그리고 세 개의 비드(triple bead)가 존재할 경우에 대해서 각각 경계조건을 설정하고 해석이 이루어졌다. Fig. 13는 펀치 진행거리에 따라 변형되는 박판의 모습들을 보여주고 있다. Fig. 13(b)의 이중 비드는 블랭크 성형공정에서 비드의 구속력을 강화함으로써 재료가 블랭크 내부로 빨려 들어가는 것을 억제시키는 경우에 많이 사용된다. 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 삼중 비드 공정을 해석하였다. 비드간의 간격은 펀치 크기를 고려하여 30mm로 하였으며, 총 6mm까지 펀치가 진행되는 것으로 가정하였다. Fig. 13(c)에 비드펀치가 2mm씩 내려감에 따라 변형되는 재료의 형상을 나타내었다. 형상이 복잡해지고 접촉문제도 난이해 졌지만 정적 외연적방법을 사용함으로써 수렴성에 문제없이 원활하게 진행되고 있음을 볼 수 있다.

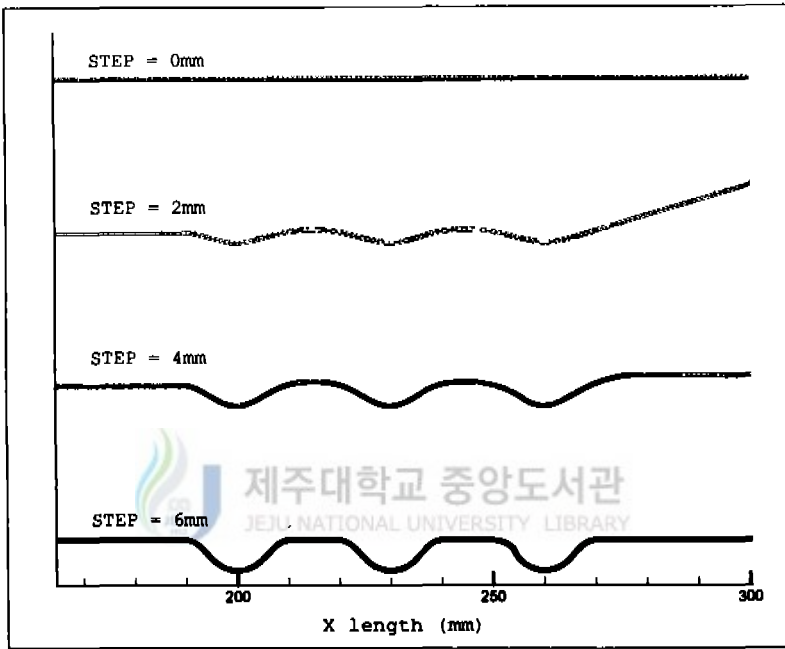


(a) Single bead



(b) Double bead

Fig. 13 The forming process of sheet according to the bead number

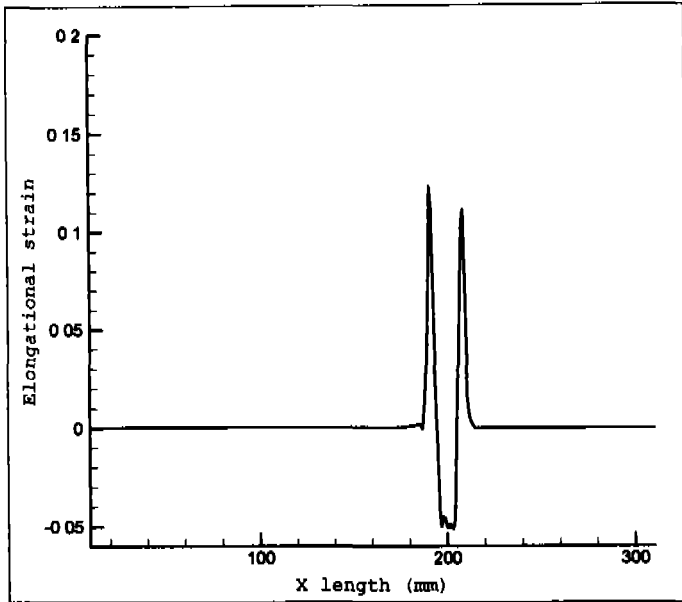


(c) Triple bead

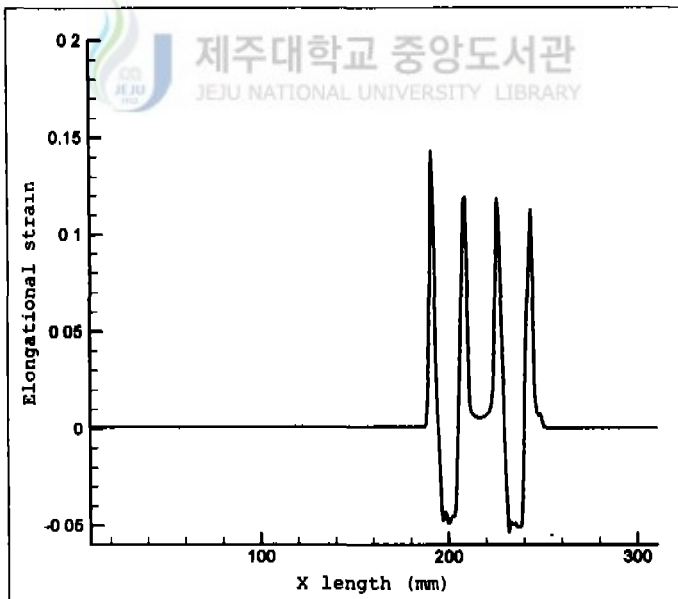
Fig. 13 (Continued)

Fig. 14에는 각각의 비드 수에 대해서 펀치행정이 6mm일 때, 박판 위쪽 표면에서의 길이방향 변형률을 나타내어 보았다. 금형의 기하학적인 형상에서 예상되는 것처럼 재료는 양쪽 다이의 곡률부에서 인장하고, 펀치의 헤드부에서는 압축을 받고 있음을 확인할 수 있다. 한편, 삼중 비드에서는 펀치의 진행에 따른 재료의 유동이 심하기 때문에 전체적인 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, 단일 비드일 때 성형되는 과정은 Fig. 13(a)와 같은 변형 양상을 보였으며, 변형률도 Fig. 15에 보이는 바와 같이 정적 외연적방법과 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 계산시간은 332MHz workstation에서 총 3시간 40분으로써 외연적방법일 때보다 약 6배에 가까운 시간이 더 소요되었다. 이중 비드와 삼중 비드의 경우에서도 마찬가지로 해석된 결과는 거의 유사하게 측정되었지만 계산시간에서 많은 차이를 보였다.

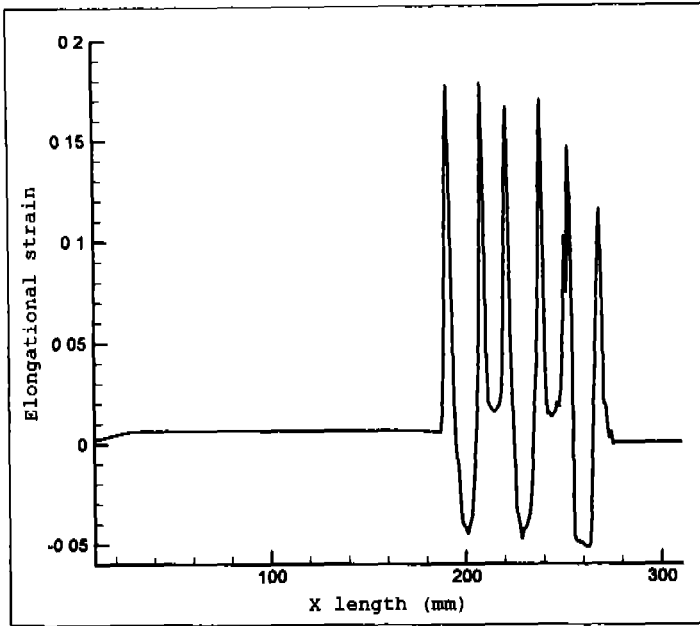


(a) Single bead



(b) Double bead

Fig. 14 Distributions of elongational strain according to the bead number



(c) Triple bead

Fig. 14 (Continued)

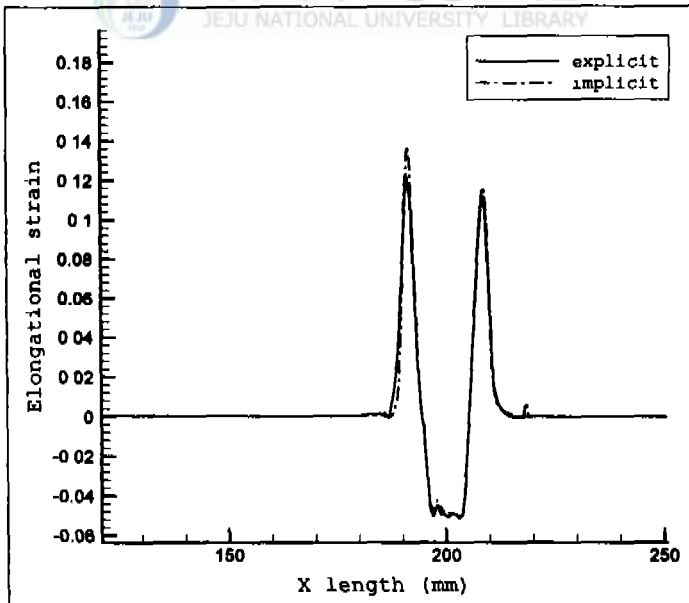


Fig. 15 Comparison between static-implicit and static-explicit methods

3.2.2 인발공정 해석

앞 절에서는 비드에 관한 성형공정이 해석되었고, 본 절에서는 그 결과를 이용하여 재료가 인발되는 과정을 해석하고자 한다. 먼저, 앞 절에서 해석한 비드 성형의 마지막 단계에서부터 박판을 왼쪽으로 20mm까지 잡아당기는 공정을 가정하여 해석을 수행하였다. 진행되는 공정을 살펴보기 위해 5mm마다 변형되는 재료의 형상을 Fig. 16에 나타내었다. 이때, 이중 비드와 삼중 비드의 경우는 마찰이 거의 없는 상태로 가정하였는데, 마찰이 있는 경우에는 재료가 당겨지지 않고 안쪽 펀치와 다이 사이의 재료가 국부적으로 심하게 변형되는 현상이 관찰되었다. 이는 비드 수의 증가로 인한 강한 구속력 때문이라 생각된다.

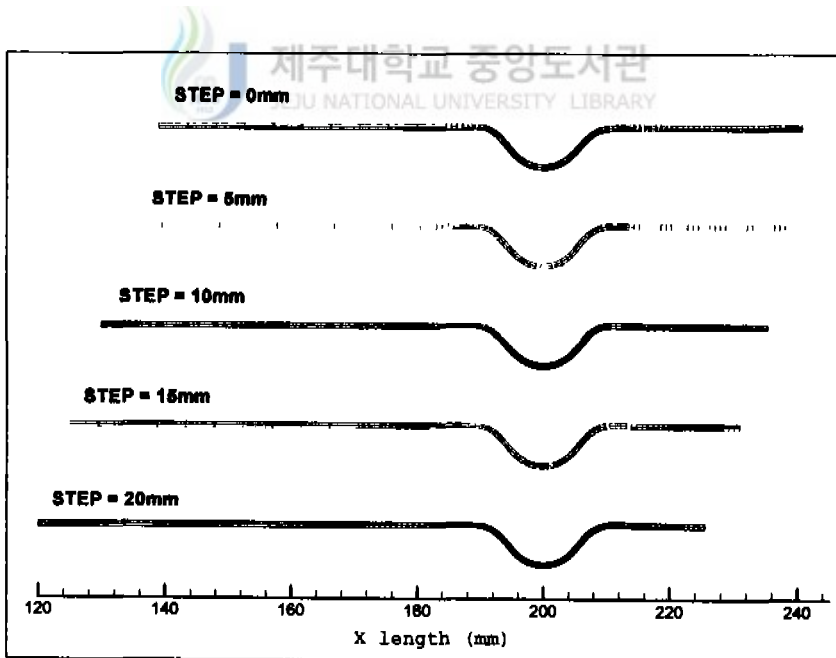
Fig. 16(a)에 보이는 단일 비드인 경우, 재료가 왼쪽으로 당겨짐에 따라 비드 바깥쪽에 있던 재료도 함께 이끌려가고 있다. 반면, Fig. 16(b),(c)의 이중 비드나 삼중 비드인 경우에는 비드의 구속력으로 인해서 재료가 거의 당겨지지 않고 있음을 확인할 수 있다.

각각의 경우에 대하여 인발이 이뤄지고 난 후, 박판 위쪽 표면에서의 길이방향 변형률을 나타내었다. Fig. 17에 보여지는 것처럼 비드의 수가 많아질수록 구속력이 강해지기 때문에 안쪽 비드와 다이 사이의 재료가 심하게 인장되고 있음을 볼 수 있다. 특히, 이중 비드와 삼중 비드에서는 원래 길이의 두 배 이상 인장되는 부분이 관찰되고 있어서 실제 공정이 진행되면 재료의 파손까지 일어날 것으로 보인다. 이러한 결과들은 앞으로 제품의 안전성 및 성형정도를 판단하는데 있어 좋은 기초자료가 될 것으로 기대된다.

Fig. 18에는 재료가 인발되는 양에 따른 인발력의 변화를 나타내었다. 각각의 경우에 있어서 모두 초기에 급격한 상승을 보인 후에 일정한 평형상태에 도달함을 볼 수 있다. 또한, 비드수가 많아질수록 재료를 잡아주는 접촉면적이 증가하기 때문에 소요되는 인발력도 점차 증가되고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 인

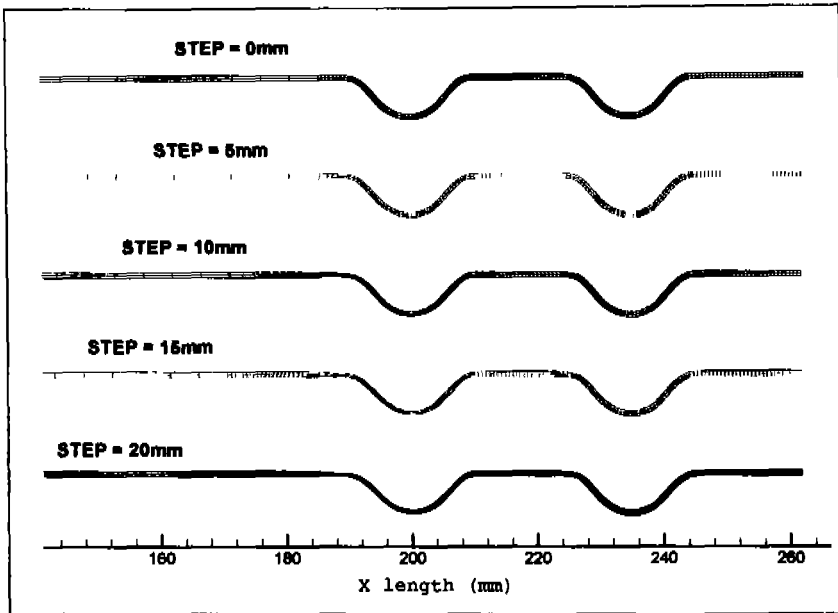
발력 수치를 정확히 예측할 수 있다면, 실제 공정에서의 편차 용량을 적절히 선택할 수 있을 뿐만 아니라 비드의 개수라든지 다이의 곡률반경 등 비드부를 설계하는데 매우 중요한 자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

인발 공정에서도 정적 내연적방법을 사용하여 외연적방법과의 비교를 수행해 보았다. 단일 비드인 경우 해석결과는 인발되는 형상 및 변형률, 인발력 등의 변화가 정적 외연적방법으로 해석했을 경우와 마찬가지로 거의 같은 결과를 얻을 수 있었지만, 이중 비드와 삼중 비드에서는 진행 도중 수렴이 되지 않는 현상이 발생되었다. 따라서 원하는 길이까지 인발되는 결과를 얻지 못하였는데, 이것은 비드 수의 증가로 인해서 마찰과 접촉이 극대화되어 이로 인한 비선형성이 커지기 때문에 발생하는 현상으로 생각된다. 이러한 결과를 놓고 볼 때, 정적 외연적방법이 빠른 리드타임을 요하는 실제 생산공정에서 더 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

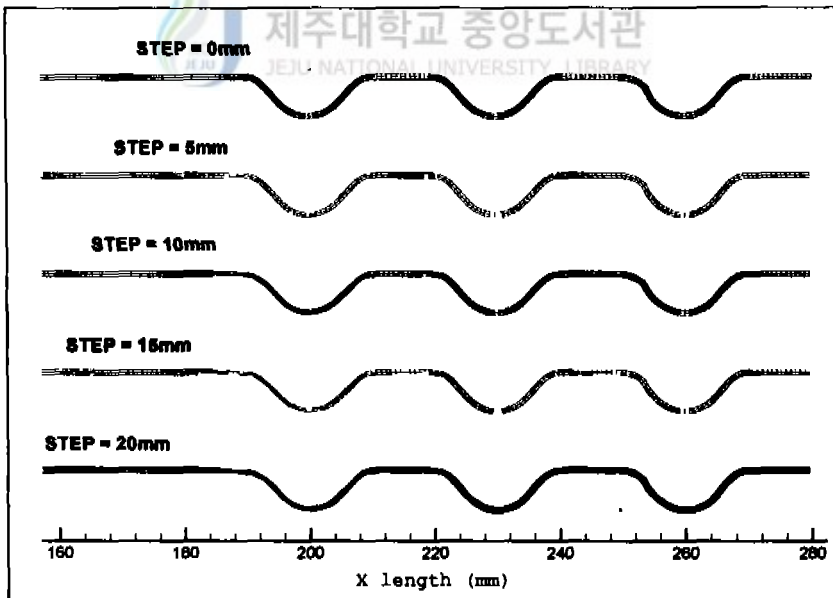


(a) Single bead

Fig. 16 The drawing process of material according to the bead number

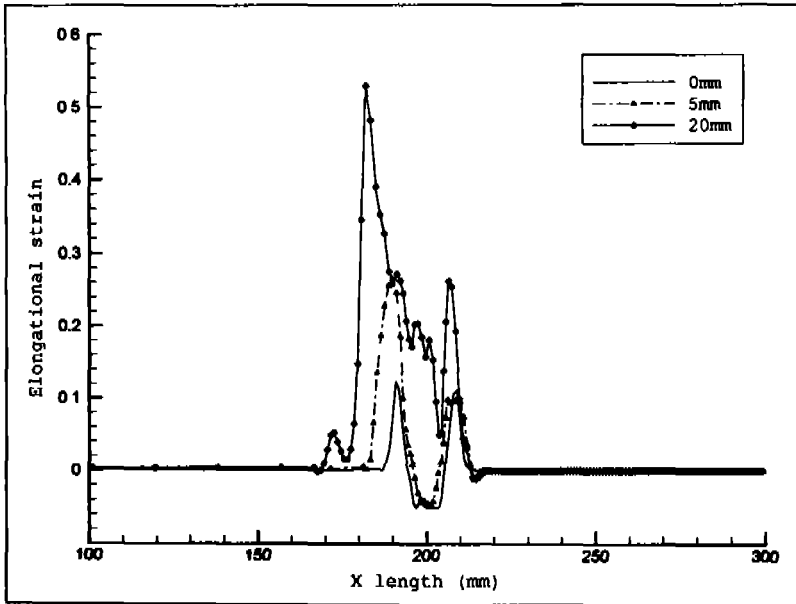


(b) Double bead

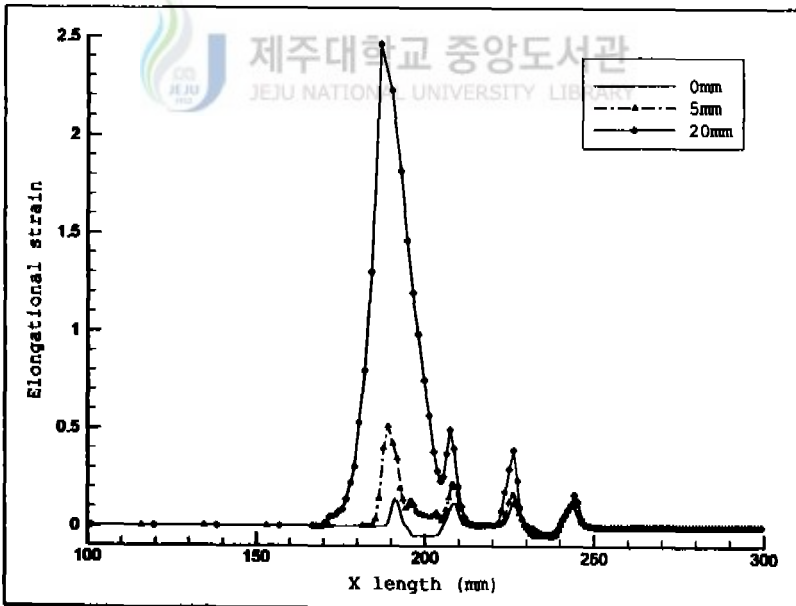


(c) Triple bead

Fig. 16 (Continued)

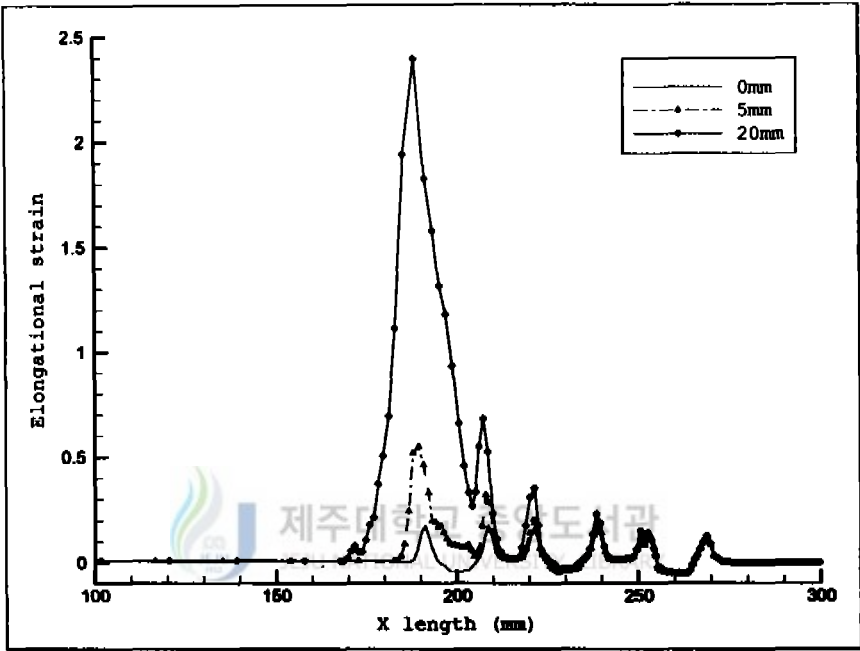


(a) Single bead



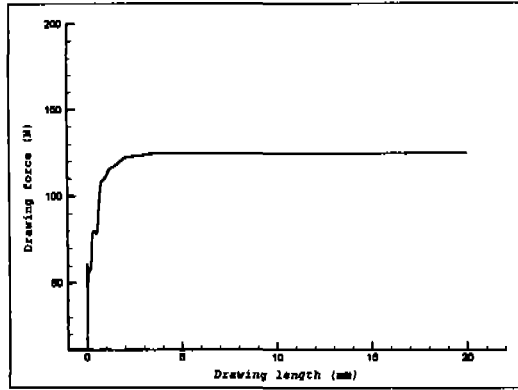
(b) Double bead

Fig. 17 Distributions of elongational strain according to the bead number after the drawing process

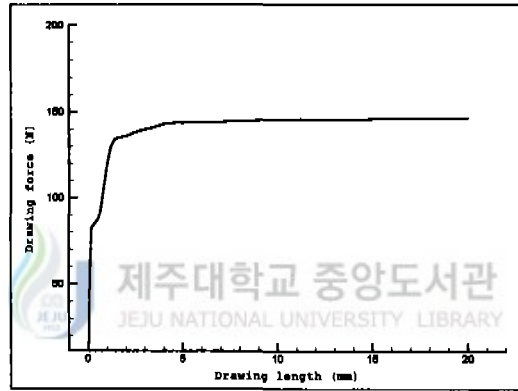


(c) Triple bead

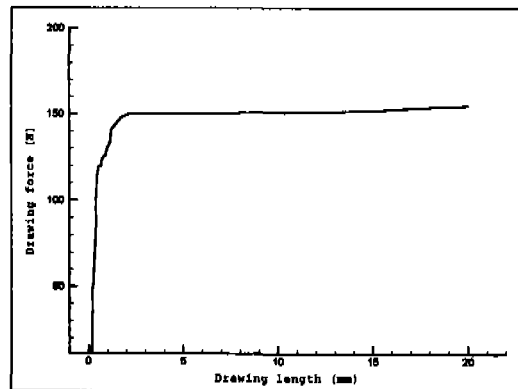
Fig. 17 (Continued)



(a) Single bead



(b) Double bead



(c) Triple bead

Fig. 18 The drawing force according to the drawing displacement

3.3 비드 형상에 따른 영향

본 절에서는 비드의 형상에 따라서 재료에 미치는 영향을 살펴보기 위해 원형 단면 비드, 사각단면 비드, 사다리꼴단면 비드 등 실제 공정에 주로 사용되는 세 가지 비드 형상에 대해서 각각 해석이 이루어졌다. 원형단면 비드의 경우는 앞 절의 비드 수에 따른 영향에서 단일 비드로 해석된 결과에 따르기로 한다.

3.3.1 사다리꼴단면 비드 해석

Fig. 19에 보이는 바와같이, 사다리꼴 형상의 비드에 관해서 성형 및 인발공정 해석이 이루어졌다. 비드 펀치는 중심축으로부터 최대 6mm 떨어진 길이를 가지며 펀치 곡률반경이 1.5mm, 다이의 곡률반경이 3mm인 금형을 가정하였다. 그리고 펀치와 다이쪽 빗면의 접촉을 고려하기 위하여 경사각도를 약 45°로 정하고, 펀치와 재료의 최단거리를 매 단계마다 계산하여 펀치 진행에 대한 거리보정이 이루어졌다.

비드 펀치가 2mm씩 내려감에 따른 재료의 변형형상을 Fig. 20에 나타내었다. 원형단면 비드와 마찬가지로 비드 바깥쪽 재료에 들림이 일어나는 현상을 가정했으며, 경사진 영역에서의 접촉이 원만하게 적용되고 있음을 볼 수 있다.

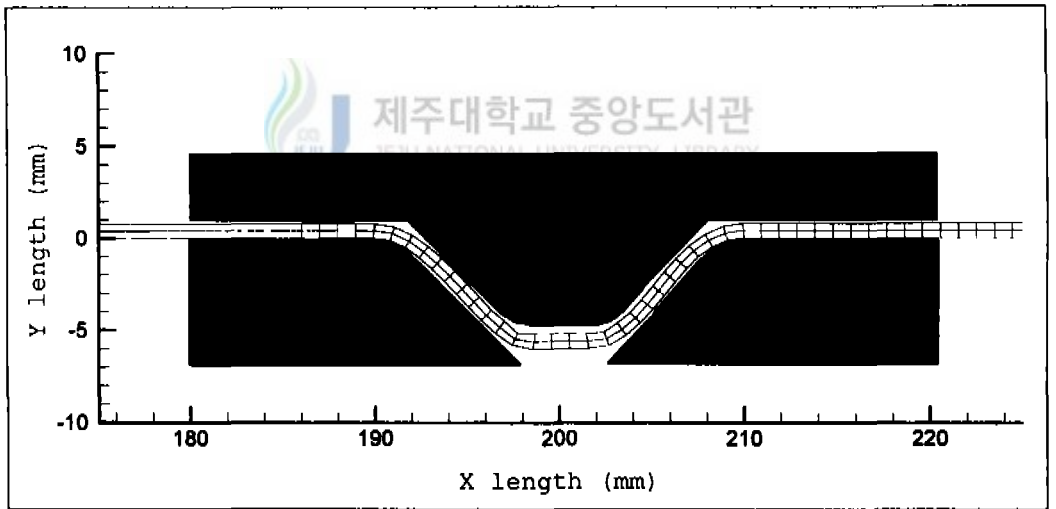
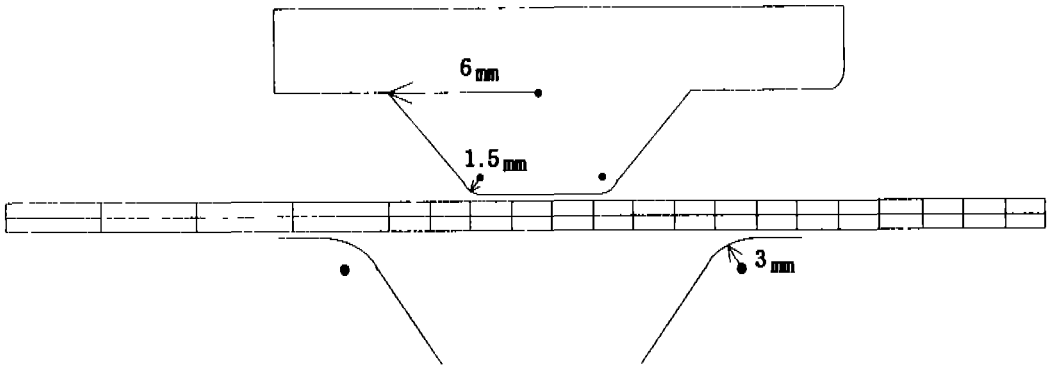


Fig. 19 Shape of the die and the trapezoid bead punch

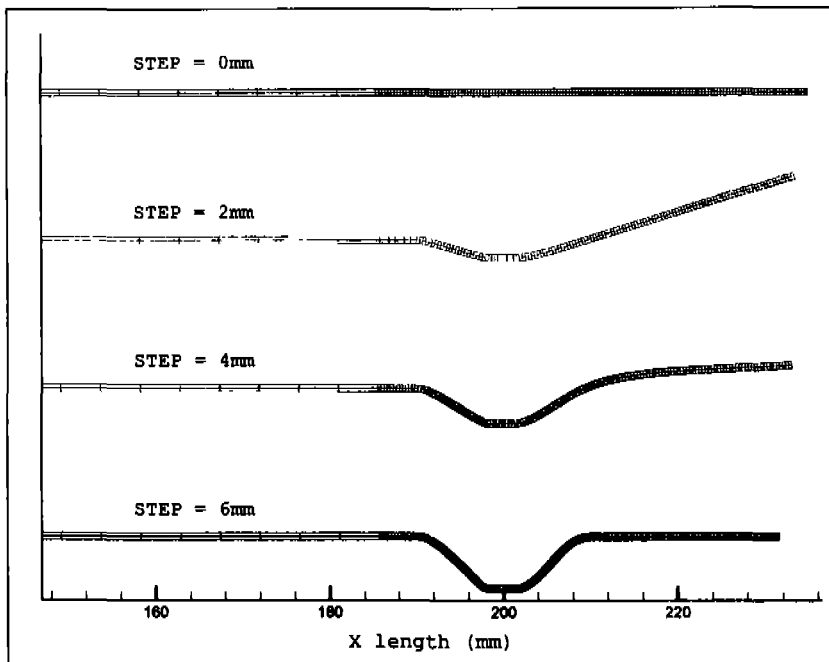


Fig. 20 Forming process of the drawbead with a trapezoid section

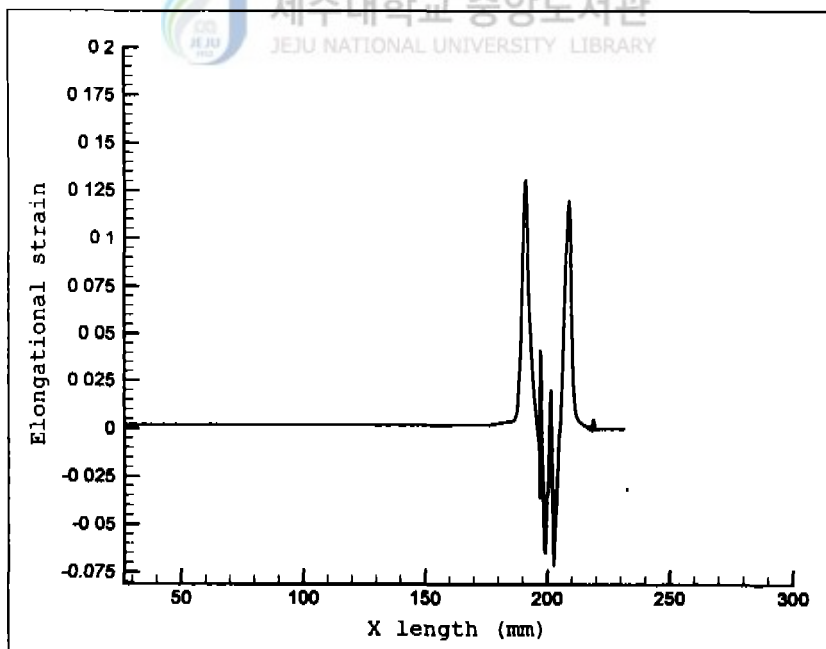


Fig. 21 Distributions of elongational strain after the forming process

Fig. 21에는 펀치행정이 6mm일 때, 박판 위쪽 표면에서의 길이방향 변형률을 나타내어 보았다. 앞서 해석된 원형단면 비드의 경우보다는 높은 변형률을 보이고 있으며, 그림으로부터 성형시에 펀치 곡률부 등에서 재료의 변형이 상대적으로 많이 일어날 것으로 예측된다.

사다리꼴단면 비드에서도 실제 블랭크 성형이 이뤄졌을 때 비드의 구속 정도를 알아보기 위하여 인발공정이 수행되었다. 성형의 마지막 단계에서부터 시작하여 박판을 왼쪽으로 잡아당기는 공정을 해석하였으며, 진행되는 과정은 Fig. 22와 같은 모습을 보였다. 전체 진행거리는 10mm까지 인발되는 것으로 가정하였는데 그 이상으로는 재료가 파손되는 결과를 보였다. 그림에서 비드 바깥쪽에 있던 재료는 이동에 거의 변화가 없음을 볼 수 있다. 따라서 비드 안쪽에 있던 재료만이 국부적으로 인장되는 결과를 낳았고, 인발이 더 진행되었을 경우에는 이 부분에서 파손이 일어남을 볼 수 있었다.

Fig. 23에는 진행과정에 따른 인발력의 변화를 나타내었다. 원형단면 비드형상과 마찬가지로 초기에 급격한 상승을 보이다가 차츰 평형상태를 유지하고 있으며, 인발력은 약 145 N/mm 정도의 힘이 비드에 의해 걸리는 것으로 측정되었다.

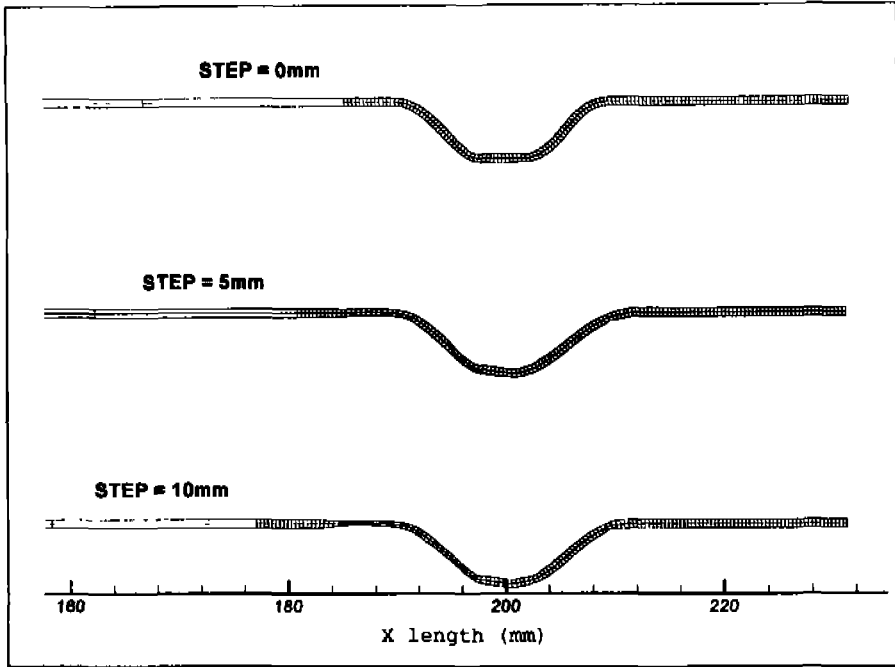


Fig. 22 Drawing process of the drawbead with a trapezoid section

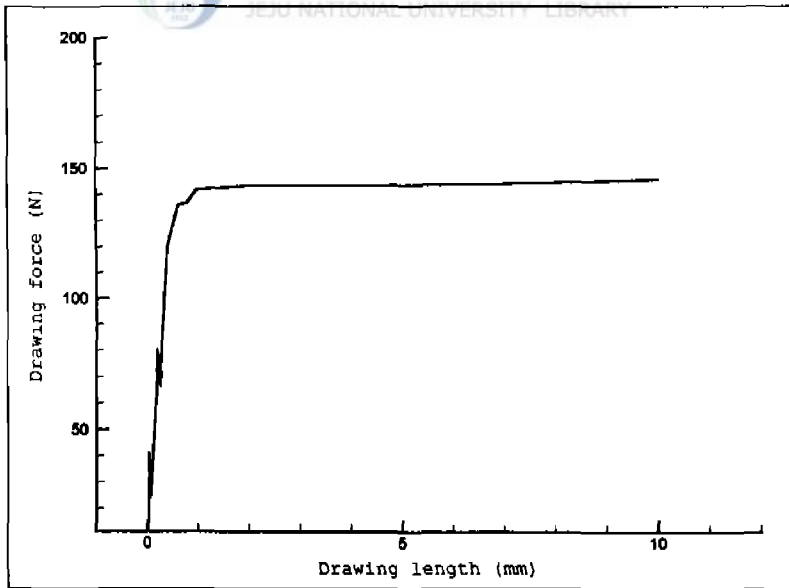


Fig. 23 Variation of drawing force according to the drawing displacement

3.3.2 사각단면 비드 해석

다음은 사각단면 비드일 때의 성형공정 및 인발공정에 대해서 해석이 이루어졌다. 사각단면 비드는 블랭크 성형공정에서 비드의 구속력을 좀더 강화할 필요가 있는 경우에 사용되며, 이로 인해 대형 차체 패널성형과 같은 유동량이 큰 공정에서 재료가 블랭크 내부로 빨려 들어가는 것을 억제하기 위해 주로 사용되고 있다. 해석에 사용된 사각단면 비드의 펀치 및 다이형상은 Fig. 24와 같다. 비드 펀치는 중심축으로부터 6mm의 길이를 가지며, 곡률반경은 1.5mm, 다이의 곡률반경은 3mm로 가정하였다. 그리고 펀치와 다이 사이의 여유공간(clearance)은 재료의 두께를 고려하여 1mm의 간극을 주었다.

전체 성형거리는 앞의 예제들과 마찬가지로 6mm까지 진행되는 것으로 가정하였고, 그 결과 재료의 변형형상은 Fig. 25와 같이 나타났다. 그림에서 사각단면 비드는 펀치와 맞닿는 재료의 면적이 넓고 벽면이 수직이기 때문에 성형되는 동안 다이 벽면부위에서 파단이 일어날 가능성이 있다. 그러므로 펀치크기와 재료 특성에 맞는 적절한 곡률반경을 가진 비드의 선택이 중요하며, 이것을 수치해석적으로 미리 예측할 수 있다면 설계시에 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

Fig. 26은 성형이 진행되고 난 후, 박판 위쪽 표면에 나타난 길이방향 변형률을 보여주고 있다. 원형단면 비드 및 사다리꼴단면 비드의 결과와 비교해 보더라도 다이 벽면부위에서 높은 변형률 수치를 보이고 있다는 것을 알 수 있으며, 이 부근에서 인장되는 재료의 양이 많음을 짐작할 수 있다. 또한 사각단면 비드에서는 실제 블랭크성형이 이루어지는 비드 안쪽 영역에서도 약 1% 내의 변형이 일어나고 있음이 확인된다. 이러한 결과는 실제 블랭크성형이 이뤄지는 영역에 적잖은 영향을 미칠 것으로 사료되며, 블랭크 해석시에 충분히 고려되어야 할 것으로 판단된다.

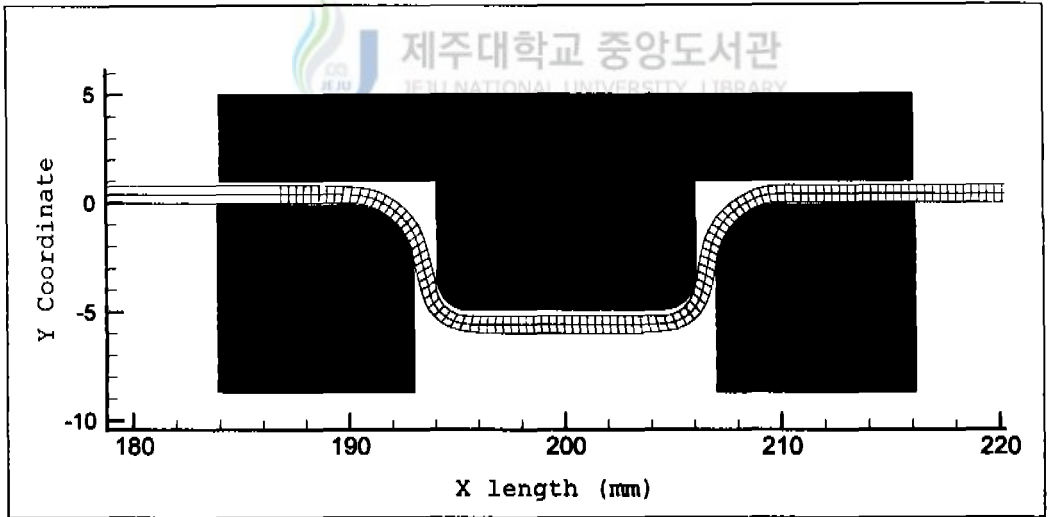
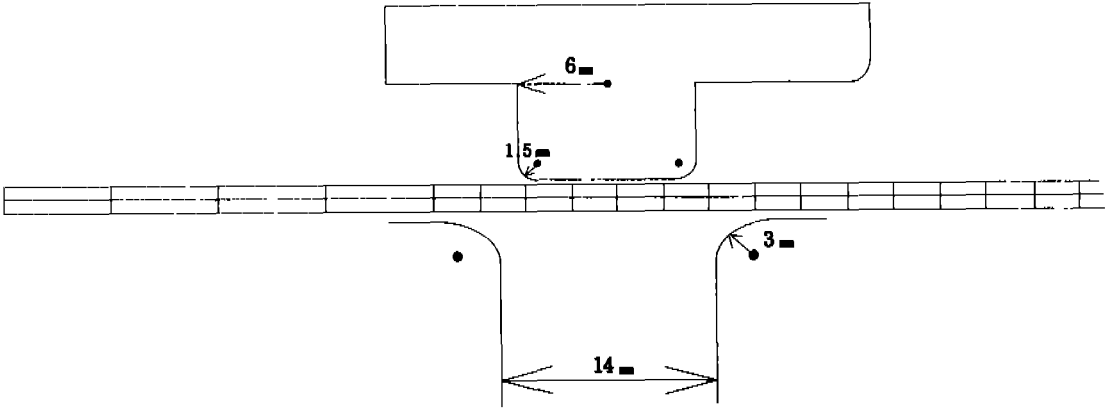


Fig. 24 Shape of the die and the quadrilateral bead punch

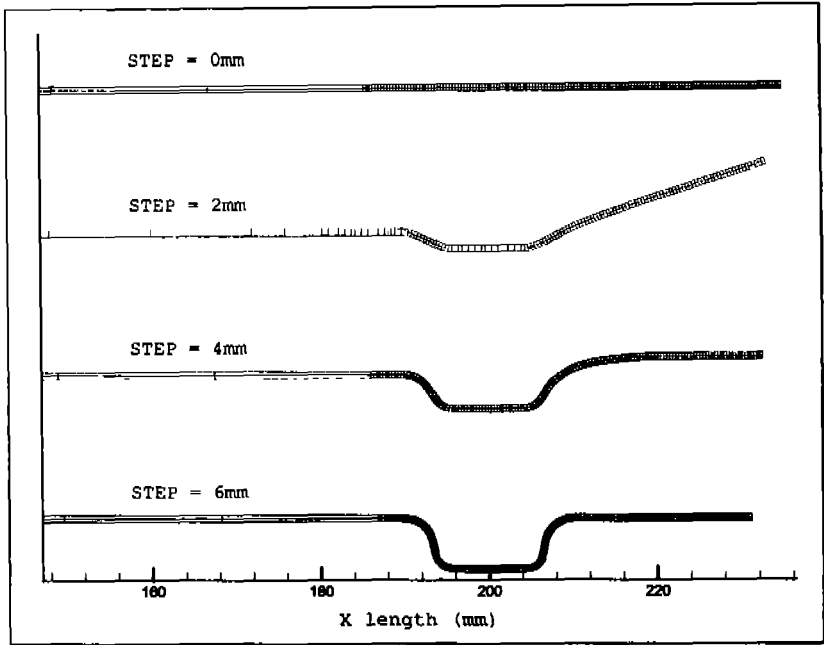


Fig. 25 Forming process of the drawbead with a quadrilateral section

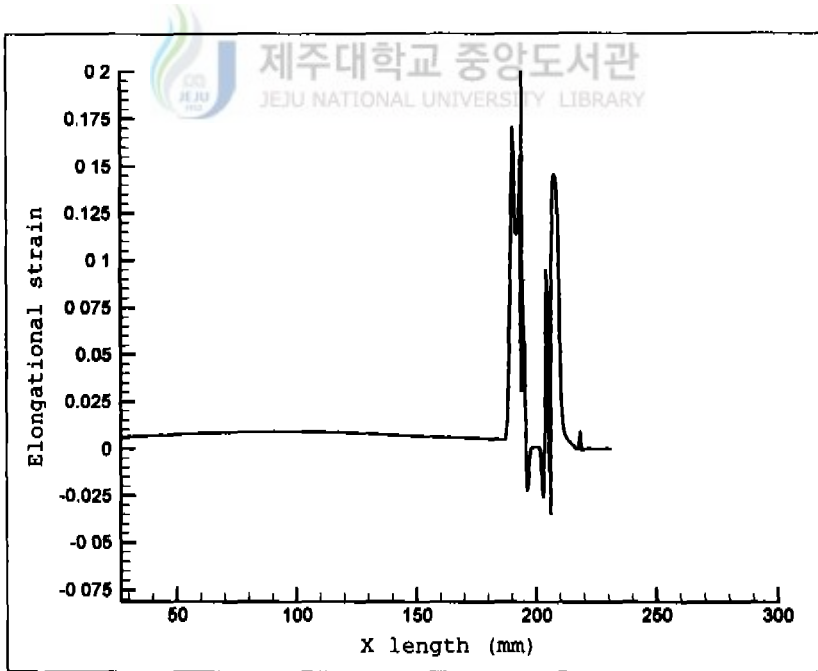


Fig. 26 Distributions of elongational strain on the upper layer after the forming process

사각단면 비드의 경우에서도 성형공정에 이어, 재료가 실제 작업공간으로 빨려 들어가는 인발공정을 해석해 보았다. 그 과정을 나타낸 Fig. 27에는 재료가 왼쪽으로 이동함에 따라 변화되는 모습들이 보여지고 있으며, 인발이 진행될수록 비드 왼쪽의 재료가 심하게 인장되는 현상이 관찰된다. 이는 사다리꼴단면 비드와 마찬가지로 사각단면 비드가 갖는 강한 구속력으로 인해서 비드 바깥쪽에 있던 재료가 왼쪽으로 당겨지지 않았기 때문이라 생각되는데, 그로 인해서 비드 안쪽에 있던 재료에서만 인발에 의해 늘어나는 결과를 초래하였다. 이 부분에서는 실제 성형이 진행되면 국부적으로 파단이 일어날 가능성이 클 것으로 보인다.

인발량에 따른 인발력의 크기변화는 Fig. 28과 같이 나타났다. 원형단면 비드의 인발력과는 약 20 N/mm의 차이를 보이고 있어, 그만큼 재료를 잡아주는 힘이 사각단면 비드의 경우가 크다는 것을 짐작해 볼 수 있다.



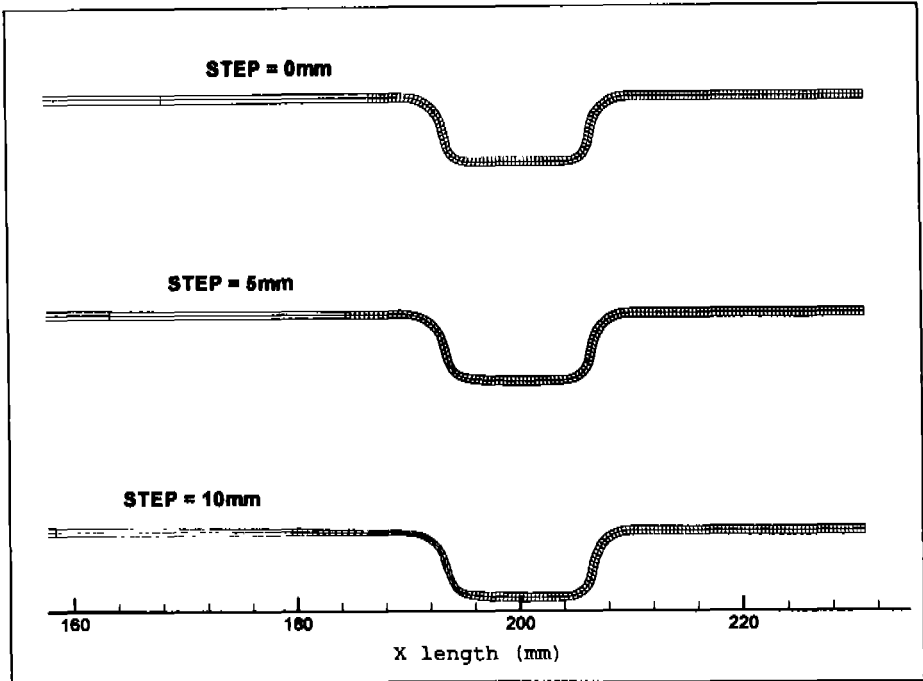


Fig. 27 Drawing process of the drawbead with a quadrilateral section

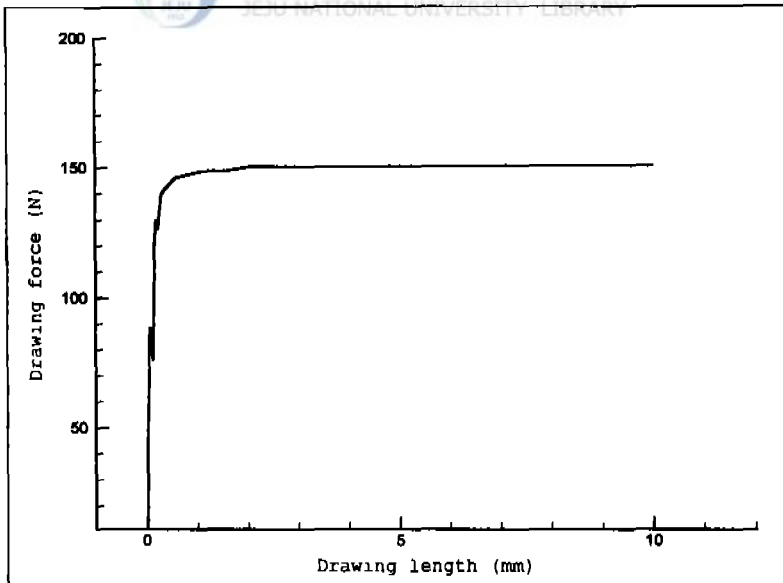


Fig. 28 Variation of drawing force according to the drawing displacement

IV. 결 론

본 연구에서는 정적 외연적방법을 사용하여 유한요소 프로그램을 구성하고 드로우비드의 성형 및 인발공정에 적용시켜 보았다. 그로부터 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

1. 정적 외연적방법으로 수치해석 프로그램을 구성하고 비드 공정에 적용시킨 결과, 기존의 수치해석 방법에서 문제시되었던 커다란 비선형성에 따른 수렴성 문제와 계산시간 등을 충분히 해결할 수 있었다. 또한, 대형 차체 패널 스탬핑 공정과 같은 수렴된 결과를 얻기 어렵거나 계산시간이 많이 소요되는 복잡한 형상에도 효과적으로 적용시킬 수 있는 가능성을 보였다.
2. 비드 성형공정에서 펀치의 진행거리가 깊어질수록 다이와 펀치, 재료간의 접촉이 심해지기 때문에 재료에 발생하는 변형도 함께 증가하였다. 이는 실제 블랭크성형 이전에 재료에 심한 변형을 야기시켜서 성형후 제품불량의 원인이 될 수 있으므로, 적절한 깊이의 비드 성형을 조절하는 것이 중요하리라 생각된다.
3. 비드의 개수에 따라 박판에 미치는 영향에 대해서 살펴보았다. 비드의 수가 많아질수록 성형이 완료된 후 재료에 나타나는 길이방향 변형률은 비드의 왼쪽 영역 즉, 블랭크성형이 이루어지는 재료에까지 영향을 미쳤다. 또한, 구속력의 증가로 재료를 강하게 잡아주고 있기 때문에 비드수에 따라 소요되는 인발력도 크게 나타남을 볼 수 있었다.
4. 비드의 형상에 대한 해석이 이루어짐으로써 각각 형상에 대한 특성을 살펴보았다. 비드펀치와 재료 사이의 마찰이 크게 작용하는 형상일수록, 성형에 의한 변형률과 소요되는 인발력 등이 비드의 강한 구속력으로 인해서 크게 나타나고

있음을 알 수 있었다.

이상과 같은 결과들은 실제 공정에서 필요로 하는 비드의 선택 및 성형 깊이를 결정하는데 많은 도움을 줄 것이며, 비드로 인해 발생하는 여러 가지 복잡한 경계조건들을 가정할 때 실제 산업현장에 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 앞으로 더 진행되어야 할 연구과제로는 본 수치해석을 바탕으로 한 실험적 검증이 뒷받침되어야 할 것이며, 좀더 다양한 예제를 통하여 효용성을 검증받을 필요가 있을 것으로 사료된다. 나아가서 이를 실제 생산 공정에 적용하여 성형성을 극대화시킬 수 있는 실험장치도 함께 개발할 계획이다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

V. 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] Wang, N. M. and Shah, V. C., 1991, "Drawbead Design and Performance", J. Mater. Shaping. Tech., Vol. 9, pp. 21-26.
- [3] Wang, N. M. and Somarata, N., 1989, "Numerical Simulation of Industrial Sheet Forming Processes", NUMIFORM'89, Colorado, pp. 75-84.
- [4] 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.
- [5] Cao, H. L. and Teodosiu, C., 1992, "Numerical Simulation of Drawbeads for Axisymmetric Deep-drawing Processes", NUMIFORM'92, pp. 439-448.
- [6] Karima, M. and Tse, W., 1989, "Formability and Uniformity Aspects in Drawbead Controlled Geometries", J. Materials Shaping Technology, Vol. 6, No. 3, pp. 181-193.
- [7] 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.
- [8] Cheng, J. H. and Kikuchi, N., 1985, "An Analysis of Metal Forming Processes using Large Deformation Elastic - Plastic Formulation", Comp. Meth. Appl. Eng., pp. 71-108.

- [9] Choi, T. H., 1993, "Numerical Simulations of Sheet Forming Processes by an Elasto-Plastic Finite Element Method", KAIST MS thesis, pp. 6-18.
- [10] Chun, B. K., 1992, "Numerical Simulation of Bead Formation by an Elasto-Plastic Finite Element Method", KAIST MS thesis, pp. 7-23.
- [11] 김동원, 1997, "소성학", 청문각, pp. 87-108.
- [12] Kim, C. M., Im, Y. S., Heo, Y. M., Kim, N. S., Jung, G. C., Seo, D. G., 1997, "Finite-element analysis and experimental verification for drawbead drawing processes", J. of Materials Processing Technology, pp. 188-194.
- [13] 이재우, 금영탁, 1998, "박판 성형공정의 유한요소해석을 위한 드로비드 전문 모델 개발", 한국소성가공학회지 제 7권 제 1호, pp. 3-22.
- [14] 박원배, 김창만, 김낙수, 서대교, 전기찬, 1996, "계단형 드로비드에 의한 판재의 인출특성에 관한 연구", 한국소성가공학회지 제 5권 제 2호, pp. 130-137.
- [15] Jung, D. W., 1995, "Rigid-plastic Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Processes Using Explicit Time Integration Scheme", Ph. D. Thesis, KAIST, pp. 16-76.
- [16] Jung, D. W. and Yang, D. Y., 1998, "Step-Wise Combined Implicit-Explicit Finite-Element Simulation of Autobody Stamping Processes", J. Materials Processing Technology, Vol. 83, pp. 245-260.
- [17] Jung, D. W., 1998, "Study of Dynamic Explicit Analysis in Sheet Metal Forming Processes using Faster Punch Velocity and Mass Scaling Scheme", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 7, No. 4, pp. 479-490.

- [18] Yamada, Y. and Yoshimura, N., 1968, "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.
- [19] Nakamachi, Eiji, 1988, "A Finite Element Simulation of the Sheet Metal Forming Process", Int. J. Numerical Methods In Eng., Vol. 25, pp. 283-292.
- [20] Queener, C. A. and De Angelis, R. J., 1968, "Elastic Spring-Back and Residual Stresses in Sheet Metal Formed by Bending", Trans. ASM, Vol. 61, pp. 757-768.
- [21] Karafilis, A. P. and Boyce, M. C., 1992, "Tooling Design in Sheet Metal Forming using Spring-Back Calculations", Int. J. Mech. Sci., Vol. 34, pp. 113-131.
- [22] Stevenson, R., 1993, "Spring-Back in Simple Axisymmetric Stampings", Metallurgical Transactions A, Vol. 24A, pp. 925-934.

감사의 글

드디어 길고도 짧은 석사과정 2년의 생활이 끝나갑니다. 되돌아보면 모두 아쉬운 시간들이었지만, 이렇게 작은 결실 하나를 남기게 되었습니다.

우선, 그동안 논문이 완성되기까지 부족한 저에게 끊임없는 지도와 격려를 베풀어주신 정동원 교수님께 진심으로 감사드립니다. 모르는 것이 있을 때 마다 친절히 가르쳐 주셨고, 때론 형님처럼 선배님처럼 다정하게 따뜻한 격려와 조언을 아끼지 않으신 교수님께 감사를 드립니다. 그리고 서투르고 부족한 내용을 마지막까지 하나하나 자상하게 고쳐주신 임종환 교수님께도 머리 숙여 감사를 드립니다.

또한, 연구활동으로 바쁘신데도 불구하고 훌륭한 조언으로 부족한 점을 일깨워주신 김귀식 교수님과 조경호 교수님께 깊은 감사의 말을 전합니다. 강의의 통해서, 그리고 그 외의 여러 가지 면에서 많은 가르침을 주신 권기린 교수님, 현명택 교수님, 허종철 교수님께도 이 글을 통해 감사하는 마음을 전하고 싶습니다. 이 분들이 계셨기에 부족하지만 제 작은 결실을 마무리 지을 수 있었던 것 같습니다.

같은 연구실 생활 속에서 2년여 가량 같이 지내온 실험실 선배님들이신 경부형과 형일이형에게도 고마움을 전합니다. 제가 비록 실험실의 막내였지만 항상 친절하게 대해주시고, 연구하는데 깊은 배려를 해 주심에 진심으로 감사를 드립니다. 앞으로 형님들이 하시는 모든 일이 잘 이루어지기를 바라며, 큰 축복의 날들이 이어지기를 바랍니다.

그리고 2년전, 석사과정에 같이 입학하여 옆에서 많은 도움이 되어 주셨던 명범이형과 용의형, 창수형과 동현이형, 양훈이형, 성환이형에게도 깊은 감사의 마음을 전하며 이번 졸업하심을 미리 축하드립니다.

마지막으로 옆에서 항상 힘이 되어주시고 부모님처럼 저를 아껴주셨던 형님과 누나들에게 깊은 감사를 드리며, 무엇보다도 오늘의 제가 있기까지 항상 저를 믿어주시고 자신보다 더 저를 사랑해주신 부모님. 그 은혜는 절대 잊지 못할 것이며 부족하지만 이 작은 결실을 두 분께 바칩니다.

그리고 저에게는 부모님만큼이나 소중한 분이 계십니다. 자기에게 인생의 스승이 되며, 믿고 따를 수 있는 자가 세상에 단 한명이라도 있다면 그 사람은 엄청난 행운아일 것입니다. 인생을 어떻게 살아야되는지 가르쳐 주시고, 직접 생활가운데 보여주시는 정명석 선생님. 그분께 진심으로 감사를 드리며, 저도 그 가르침에 어긋나지 않는 삶을 살도록 노력하겠습니다. 선생님 감사합니다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY