

〈論 文〉

다단계 디프드로잉의 공정해석에 관한 연구

심재진* · 전병희** · 김형종*** · 김낙수****

(1992년 12월 8일 접수)

A Study on the Process Analysis of Multi-Stage Deep Drawing

Jae Jin Shim, Byung Hee Jeon, Hyung Jong Kim and Nak Soo Kim

Key Words : Deep Drawing(디프드로잉), Anisotropy(이방성), Reverse-Drawing(역드로잉)
Redrawing(재드로잉), Rigid-Plastic Finite Element Method(강소성 유한요소법)

Abstract

Multi-stage deep drawing is an important sheet metal forming process. The deformation mechanisms of sheet metals during forming processes are complicated mainly due to the geometry and the lubrication of tools involved, the formability and the anisotropic behaviour of the material. The multi-stage deep-drawing processes including normal-drawing, reverse-drawing, and re-drawing are analyzed by use of the rigid-plastic finite element method. The anisotropic behaviour represented by r-value can be incorporated into the formulation. Punch/die loads and thickness distributions were obtained as results of simulating axisymmetric deep drawing processes. The computed results showed good agreements with experiments.

기 호 설 명

B : 변형률행렬	r : Lankford값, 평균 이방성계수
c : 계수벡터	S_U : 속도가 지정된 경계면
D : 계수행렬	S_F : 하중이 지정된 경계면
f : 마찰력벡터	t_i : 응력벡터 성분
f_i : 절점 i 의 외력	\bar{t}_i : 지정된 응력벡터 성분
f_{holder} : 블랭크 지지력	\bar{v} : 절점 속도벡터
$f(\sigma_{ij})$: 항복함수	v_r : 공구면에 대한 상대속도
F, G, H, L, M, N : 이방성계수	v_i : 속도벡터 성분
k : 벌치상수	\bar{v}_i : 지정된 속도벡터 성분
n_i : 단위 법선벡터 성분	V_i : 절점 i 의 침입부피
N : 형상함수 행렬	V_{total} : 침입부피의 총합
p : 압력	x : 절점의 위치벡터
	ϵ_{ij} : 변형률속도 텐서의 성분
	$\bar{\epsilon}$: 유효 변형률
	μ : 유효 변형률속도
	μ : Coulomb 마찰계수
	σ_{ij} : 응력텐서의 성분

*기아정기 기술연구소

**정회원, 인덕전문대학 기계설계과

***정회원, 강원대학교 기계공학과

****정회원, 홍익대학교 기계공학과

σ : 유동응력, 유효응력

1. 서 론

판재가공(sheet metal forming)은 그 종류가 다양하고 응용범위가 넓으며, 생산되는 제품은 가볍고, 비강도(strength-to-weight ratio) 및 비강성(stiffness-to-weight ratio)이 높다는 장점을 갖고 있고 프레스를 이용한 가능한 특징이 있다. 판재가공에서 재료로 사용되는 판재는 압연을 통하여 생산되므로 방향에 따라서 재료의 성질이 다른 이방성(anisotropy)을 필연적으로 갖게 되고 재질의 균일성과 가공조건 등이 제품의 질에 영향을 준다.

디프드로잉은 판재가공의 일종으로 소재는 평편한 모양으로부터 제품의 형상에 이르는 동안 소성변형을 겪게되며, 그 변형의 역학은 판재가 가지고 있는 성형성(formability) 및 이방성과 결부되어 매우 복잡하다. 디프드로잉의 주요 공정변수(process parameter)로는 소재의 형상(두께 및 블랭크의 모양), 공구(펀치, 다이 및 블랭크 홀더)의 형상, 공구-소재간의 윤활상태, 가공속도 등을 들 수 있다. 소재가 갖고 있는 물질상수(material property)로는 변형률(strain)과 변형률속도(strain-rate)에 의존하는 유동응력과 이방성계수 등이 있다.

디프드로잉 시에 성형되는 제품의 모양이 복잡한 경우에는 다단계로 가공하므로 공정해석에 어려움이 따른다. 오늘날의 산업이 기술개발을 바탕으로 한 제품의 고부가가치화를 지향한다는 점에 비추어 볼때 공정의 해석과 설계를 정밀화하여, 제품 및 공구 설계기간과 설치기간을 단축하여 납기를 적시에(JIS, just-in-time)하며 동시에 제품의 불량률을 줄이고 생산라인을 자동화하여 생산성을 높이는 작업이 필요하다. 그러나, 디프드로잉의 유용성과 다양성에 비추어 볼 때, 공구의 설계나 가공공정의 제어에 필요한 정보를 얻기 위한 조직적인 해석은 아직 부족한 편이다.

유한요소법(FEM, finite element method)은 다른 수치해법에 비해 적용이 일반적이고, 응력이나 변형에 대하여 다양하고 정도 높은 정보를 제공하기 때문에 여러 공학분야에서 널리 사용되어 오고 있다. 특히, 최근에 들어서는 컴퓨터의 처리속도 및 자료의 처리용량이 기하급수적으로 발전함에 따라

서 판재가공의 현실적인 해석에 있어서는 거의 유일한 수단으로 되어 있다.^(1,2,3)

본 연구에서는 복잡한 모양을 가진 셀을 제조하는 공정설계를 위하여, 공정을 수치해석하고자 한다. 판재가공을 해석할 수 있는 체계적이고 효율적인 수단으로서 수치해법의 일종인 유한요소법을 사용하여 가공중의 판재는 변형을 해석하고 그 결과를 이용하여 형상이 변경된 제품을 생산하는 공정설계를 한다. 일단계 및 다단계 공정을 해석하여 그 결과를 실험치와 비교하여 해석의 타당성을 검증하며, 판재의 변형양상으로부터 차후의 공정설계에 대한 자료를 축적함으로써 공정설계의 자동화에 기여할 수 있을 것이다.

2. 해석이론

유한요소법을 소성가공에 적용할 때는 재료의 구성식에 따라서 탄소성 유한요소법(elastic-plastic FEM)과 강소성 유한요소법(rigid-plastic FEM)으로 대별한다. 변형중에 소재의 탄성변형을 무시할 수 없을 정도로 크거나 변형후에 스프링백과 잔류응력 등을 알기 위해서는 탄소성 유한요소법을 사용하지만, 대부분의 소성가공에서는 탄성변형의 정도가 소성변형의 정도에 비하여 무시할 수 있을만큼 작으므로 효율이 좋은 강소성 유한요소법을 사용한다. 본 연구에서는 강소성 유한요소법을 이용하여 굽힘의 효과를 고려하기 위해 연속체요소를 사용하고, 재료의 이방성의 수직이방성(normal anisotropy)만을 고려한다.

2.1 강소성 유한요소법의 지배방정식

강소성 유한요소법에서는 다음과 같은 지배방정식들을 사용한다.⁽⁴⁾

(i) 평형방정식

$$\sigma_{ij,j} = 0 \tag{1}$$

(ii) 경계조건

$$\left. \begin{matrix} \nu_i = \bar{\nu}_i \text{ on } S_U \\ \sigma_{ij}n_j = \bar{t}_i \text{ on } S_F \end{matrix} \right\} S_U + S_F = S_{Total} \tag{2}$$

(iii) 유동법칙(응력-변형률 관계)

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} \dot{\lambda} \tag{3}$$

단, 여기서 $f(\sigma_{ij})$ 는 재료의 항복함수로서 일반

적으로 많이 사용하는 것은 다음과 같다.⁽⁵⁾

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 2\bar{\sigma}^2 \quad (4)$$

(iv) 적합방정식(속도-변형률속도 관계)

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(\nu_{i,j} + \nu_{j,i}) \quad (5)$$

(v) 재료의 비압축성

$$\dot{\epsilon}_{kk} = 0 \quad (6)$$

(vi) 유동응력식

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}) \quad (7)$$

여기에서 $\dot{\bar{\epsilon}}$ 은 유효변형률속도로서,

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} D_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl}} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}^T D \dot{\epsilon}} \quad (8)$$

로 정의되며, D 행렬에 관하여는 다음 절에서 설명한다.

2.2 유한요소 수식화

미분방정식(1)과 그 경계조건(2)를 약형으로 풀고 여기에 구속조건(6)을 벌칙상수 k 를 써서 첨가하면,

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV - \int_{S_f} \bar{l}_i \delta v_i dS + \int_V k \dot{\epsilon}_{kk} \delta \dot{\epsilon}_{kk} dV = 0 \quad (9)$$

와 같이된다. 위식에서 소재가 차지하고 있는 영역 V 와 표면 S_f 에 대한 적분이 있으므로 변수를 이산화(discretization)하여 적분이 일반적으로 수행될 수 있도록 한다. 그 결과는

$$\left\{ \int_V \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\dot{\bar{\epsilon}}} \bar{v}^T \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV + \int_V k \bar{v}^T \mathbf{B}^T \mathbf{c} \mathbf{c}^T \mathbf{B} dV - \int_{S_f} \mathbf{t}^T \mathbf{N} ds \right\} \delta \bar{v} = 0 \quad (10)$$

과 같이 되고 $\delta \bar{v}$ 는 임의이므로 다음과 같이 요약된다.

$$\Phi(\bar{v}) = \mathbf{F}(\bar{v}) \bar{v} + G \bar{v} - \mathbf{h} = 0 \quad (11)$$

여기에서

$$\mathbf{F}(\bar{v}) = \int_V \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\dot{\bar{\epsilon}}} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV \quad (12)$$

$$\mathbf{G} = \int_V k \mathbf{B}^T \mathbf{c} \mathbf{c}^T \mathbf{B} dV \quad (13)$$

$$\mathbf{h}(\bar{v}) = \int_{S_f} \mathbf{t}^T \mathbf{N} ds \quad (14)$$

이다.

연립방정식 (11)은 비선형으로 보통 두 가지 방법이 조합되어 사용된다.

(1) 직접반복법 : 다음 식에서 속도벡터를 직접 구한다.

$$\{\mathbf{F}(\bar{v}) + \mathbf{G}\} \bar{v} = \mathbf{h} \quad (15)$$

(2) Newton-Raphson 반복법 : 이 방법에서는 식 (11)을 1차 Taylor 전개하여 다음과 같이 선형화시킨 연립방정식을 푼다.

$$\mathbf{K}_{N-R}^i \Delta \bar{v} = \mathbf{L}_{N-R}^i \quad (16)$$

단, 여기에서

$$\mathbf{K}_{N-R}^i = \left. \frac{\partial \Phi}{\partial \bar{v}} \right|^i = \mathbf{F}(\bar{v}) + \mathbf{G} + \frac{\partial \mathbf{F}(\bar{v})}{\partial \bar{v}} \bar{v} - \frac{\partial \mathbf{h}(\bar{v})}{\partial \bar{v}} \quad (17)$$

$$\mathbf{L}_{N-R}^i = -\Phi(\bar{v}^i) = -\mathbf{F}(\bar{v}) \bar{v} - \mathbf{G} \bar{v} + \mathbf{h}(\bar{v}) \quad (18)$$

이고,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{F}(\bar{v})}{\partial \bar{v}} \bar{v} &= \int_V \frac{4}{9} \frac{1}{\dot{\bar{\epsilon}}^2} \left\{ \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \dot{\bar{\epsilon}}} - \frac{\bar{\sigma}}{\dot{\bar{\epsilon}}} \right\} \\ &\quad (\mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \bar{v}) (\mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \bar{v})^T dV \end{aligned} \quad (19)$$

로 계산할 수 있다.

한편, 마찰력은 Coulomb마찰을 사용하여 다음과 같이 모형화한다.

$$\mathbf{f} = -\mu p \left(\frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{|\mathbf{v}_r|}{\mathbf{a}} \right) \right) \frac{\mathbf{v}_r}{|\mathbf{v}_r|} \quad (20)$$

여기에서 \mathbf{a} 는 0.001 정도의 작은 상수이고, 소재와 공구간의 상대속도는 다음과 같이 구한다.

$$\mathbf{v}_r = \bar{\mathbf{N}}(\bar{v} - \mathbf{v}_{tool}) \quad (21)$$

이차원문제인 경우에는 식(20)은 다음과 같이 간단화된다.

$$\mathbf{f} = -\mu p \left(\frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{\bar{v} - \mathbf{v}_{tool}}{\mathbf{a}} \right) \right) \quad (22)$$

반복법을 통하여 절점에서의 속도가 구해지면 새로운 형상을 다음과 같이 구한다.

$$\mathbf{x}^{n+1} \xleftarrow{\text{b.c. handling during } \Delta t} \mathbf{x}^n + \Delta t \mathbf{v}^n \quad (23)$$

2.3 이방성의 처리

압연된 판재는 일반적으로 압연방향, 폭방향(압

연방향에 수직방향), 두께방향을 이방성의 주축으로 가지며, 방향에 따라서 다른 성질을 보인다. 그러나, 판재가공시에는 압연방향과 폭방향으로는 성질이 같고 두께방향으로만 성질이 다른 수직이방성만을 고려하여도 무방하다. 따라서 식(4)에서 이방성으로 인한 계수들은 다음과 같은 평균 r 값을 사용한다.

$$r = \frac{H}{F} = \frac{H}{G} = \frac{2M - (F+G)}{(F+G)} \quad (24)$$

평균 r 값을 사용하면 D 행렬은 다음과 같이 되어 이방성의 효과를 고려할 수 있다.

$$D = \frac{(2+r)}{(1+2r)} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (25)$$

여기에서 $r=1$ 인 경우는 등방성인 경우로 D 행렬도 등방성으로 환원된다.

수직이방성을 가진 판재를 해석할 때는 이방성의 축이 변하지 않는다고 가정하여 유한요소 내의 국부좌표계(local coordinate system)에서 D 행렬을 사용한다.

2.4 블랭크 지지력의 처리

디프드로잉 시에 블랭크홀더(blank holder)나 쿠션(cushion)에는 일정한 하중을 주어 플랜지부에서 주름이 잡히지 않도록 한다. 만일 블랭크 지지력이나 쿠션압력이 과대하면, 플랜지부에서 판재의 변형이 심하게 억제되어 컵이 형성되는 과정에서 파단이 일어날 확률이 높아진다.

수치해석에서 블랭크 지지력은 각 절점에 집중하는 절점외력으로 줄 수 있다. 블랭크 지지력(또는 쿠션 압력)은 총 합력만을 알고 있기 때문에 이를 적절하게 각 접촉절점으로 분산시켜 주어야 한다.

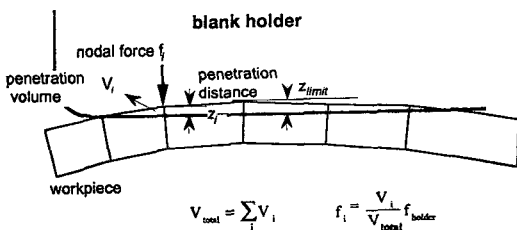


Fig. 1 Model of distributing blank holding forces

본 연구에서 사용된 알고리즘은 다음과 같다.

Fig. 1에서 보는 것처럼 블랭크홀더 표면에서 일정한 짧은 거리(예를 들면 0.1 mm) 내에 있는 절점들은 블랭크홀더 표면에 접촉하고 있다고 가정하고 홀더면 내부로 침입한 부피에 비례하여 절점력을 나누어 준다. 즉, 절점 i 에 해당하는 침입 부피를 V_i , 절점외력을 f_i , 블랭크 지지력을 f_{holder} 라 하면 침입부피의 총합은

$$V_{total} = \sum_i V_i \quad (26)$$

가 되고, f_i 는 다음과 같이 결정된다.

$$f_i = \frac{V_i}{V_{total}} f_{holder} \quad (27)$$

따라서 $f_{holder} = \sum_i f_i$ 가 만족된다.

이러한 알고리즘을 사용함으로써 지지력을 소재의 절점에 적절히 배분할 수 있게 된다.

3. 일단계 디프드로잉의 해석

3.1 해석조건

프로그램의 타당성을 검토하기 위하여, 문헌(1)에 실험자료가 발표되어 있는 간단한 형상이 디프드로잉 공정을 해석하였다. 실험에 사용된 펀치의 반지름은 20 mm, 다이의 반지름은 21.25 mm이었으며, 판재는 두께 0.8 mm인 AL-Killed 강판이었다. 블랭크홀더는 500 kgf의 일정한 하중으로 지지되었고, 각 공구와 소재사이의 마찰조건은 마찰계수가 0.2로 일정한 Coulomb마찰로 가정함이 타당한 것이 실험으로 확인되었다. 공구와 소재의 위치 및 재료의 인장특성을 Fig. 2에 나타내었다.

판재는 96개의 절점과 64개의 사각형 요소로 분

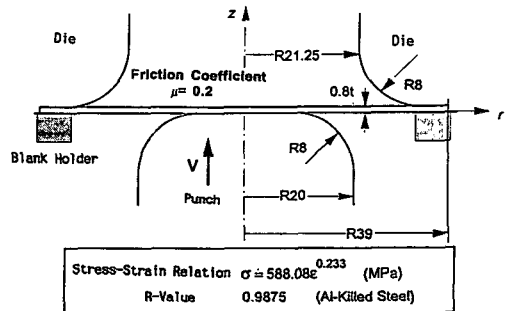


Fig. 2 One-stage axisymmetric cup-drawing

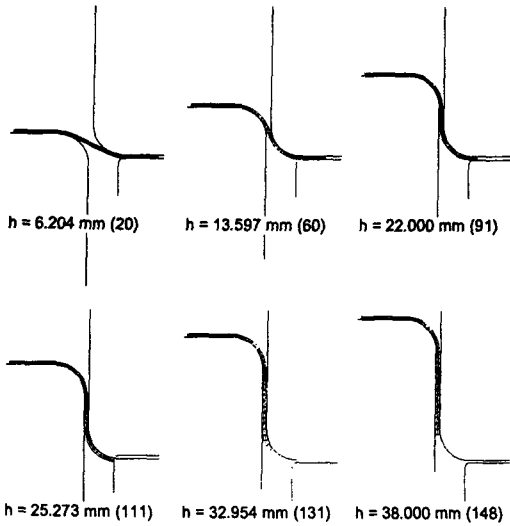


Fig. 3 Deformation of blank one-stage deep drawing(h : punch displacement)

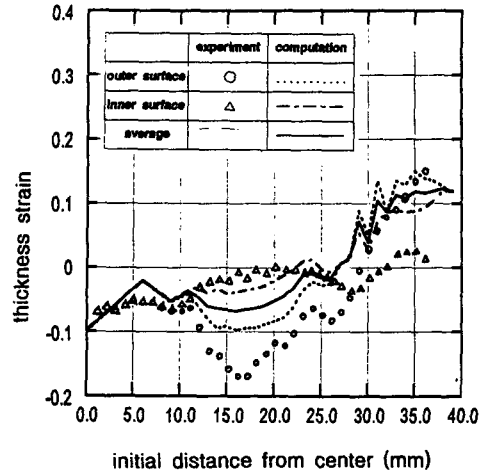
할되어 수치모형화된 뒤, 강소성 유한요소법으로 해석되었다. 펀치가 일정한 속도로 상승함에 따라 원통형 컵이 형성되어 가는 과정이 해석되었으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 펀치행정이 38.0 mm에 이르기까지 총 148시간 단계 (time step)가 사용되었다.

3.2 두께변형을 비교

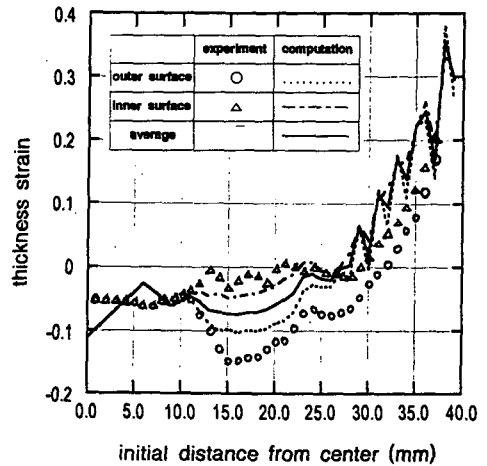
해석결과와 실험결과와 비교되었는데, 비교대상은 두께변형률(thickness strain)과 펀치하중이었다. Fig. 4(a)에는 펀치행정이 22 mm에 달했을 때, 판재의 두께변형률의 분포를 나타낸 것이다. 해석결과와 함께 참고문헌(1)의 실험결과를 같이 나타내었고, 두께변형률의 분포는 원래 판재의 중심으로 부터 떨어진 거리에 대하여 나타내었다.

해석결과와 두께변형률이 실험으로 얻어진 값보다 약간 크게 나타남을 알 수 있으며, 전반적인 분포 경향이 일치하고 있다. 판재의 중심으로부터의 거리가 15.0 mm~20.0 mm인 지점에서 두께변형률은 최소이며, 이 부분은 컵의 모서리 부분에 해당한다.

디프드로잉 공정이 종료되어 컵이 완전히 형성된 후의 두께변형률 분포를 Fig. 4(b)에 나타내었는데, 판재의 중심으로부터의 거리가 25.0 mm 떨어진 곳까지는 해석결과와 실험결과가 잘 일치하는 반면, 25.0 mm 이상인 부분에서는 해석결과 얻어진



(a) Punch displacement : 22 mm



(b) Punch displacement : 38 mm

Fig. 4 Distributions of thickness strain

두께변형률이 실험치보다 다소 크게 나타나는 경향을 보이고 있다.

중심에서부터의 거리가 멀수록, 즉, 컵의 끝부분으로 갈수록 두께가 두꺼워진다. 예를 들면, 판재의 중심으로부터 30.0 mm 이상 떨어진 곳에 서는 두께가 원래 판재보다 10% 이상 증가되어 있음을 볼 수 있다.

3.3 펀치하중의 비교

해석결과를 실험결과와 비교하였을 때, 타당성을 검증할 수 있는 또 하나의 자료는 펀치하중이다. Fig. 5에 펀치행정의 증가에 따라서 펀치에 걸리는

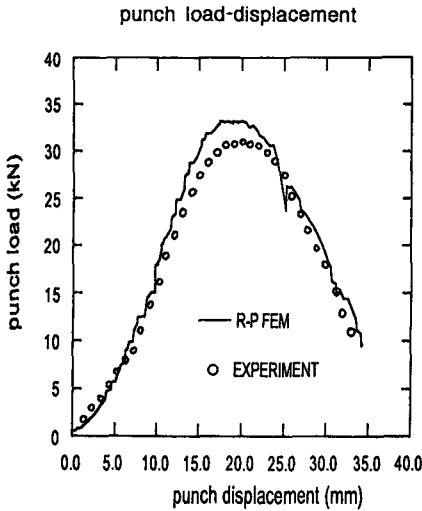


Fig. 5 Punch load during one-stage deep drawing

하중을 도시하였다. 해석결과와 실험치가 잘 일치하며, 행정 13.0 mm~23.0 mm의 구간에서 해석결과 얻어진 하중이 실험치보다 다소 크게 나타남을 볼 수 있다.

3.4 해석방법의 검토

간단한 형상의 디프드로잉 공정을 해석한 결과, 다음과 같은 점을 알 수 있다.

첫째, 공정이 진행되는 동안, 판재의 변형과정과 최종제품의 형상 및 결합유무를 잘 알 수 있다.

둘째, 해석결과로부터 판재의 두께분포를 미리 예측할 수 있으며, 계산된 값은 실험치와 잘 일치한다.

셋째, 실험에서 얻어진 값들과 비교하여 보았을 때, 해석결과와 값들이 다소 크음을 알 수 있었는데, 이로부터 해석시에는 판재가 실제보다 강성(stiffness)이 높은 재료로 취급되었음을 알 수 있다. 그 이유는 4절점 사각형 연속체요소(4-node bilinear quadrilateral solid element)를 사용한데서 기인한 것으로 생각된다. 즉, 해석에 사용된 수치모델은 굽힘에 있어서 기하학적 조건에 구속되므로 실제 판재보다 강성이 다소 높은 것처럼 반응하며, 이는 참고문헌(6)에 설명된 것과 일치한다.

4. 다단계 공정의 해석

다단계 디프드로잉의 한 예로 자동차용 Brake

Master V.A.C.의 셀의 제조공정을 선택하여 해석하였다. 그 공정은 Fig. 6에 나타낸 것과 같이 여러 단계로 이루어져 있으며, 공구의 형상 및 운동이 매우 복잡하다.

기존의 Master V.A.C.이 앞 판은 총 8개의 공정을 통하여 만들어진다. 그 중에서 제1공정에서 제4공정 동안 앞 판의 모양이 거의 만들어지고, 이후의 공정에서 주로 진단, 오무리기 등의 공정으로 국부적으로 필요한 치수로 만드는 것이므로 이 과정동안 판재의 두께변화는 거의 없는 것으로 간주할 수 있다. 따라서, 최종 제품의 두께는 제4공정이 끝난 후의 두께를 그대로 유지할 것이므로, 처음 4공정에만 국한하여 공정해석을 하여 판재의 변형과정을 살펴본다.

4.1 각 공정의 조건

각 공정을 정확하게 수치모델링하기 위해서는 공구들의 동적과 작용하는 하중 등에 대하여 자세하게 검토하여야 한다. 각 공정에 사용되는 공구의 치수 및 하중조건에 대하여는 Fig. 7에 나타내었다.

(1) 제1공정

제1공정에서 블랭크 홀더의 지지력은 공압에 의해 640 kgf로 일정하게 유지된다. 펀치가 상승하여 15.5 mm에 이르면 backing plate가 밀려 올라가게 되고, 펀치가 최종 행정(23.5 mm)에 이르기 직전에 전단날에 의해 판재의 중심에 지름 13.0 mm의 구멍을 뚫게 된다. 이 구멍은 차후의 공정에서 중심을 맞추는데 이용된다.

(2) 제2/3공정

제2공정과 제3공정은 동일한 공구세트를 사용하고, 사용되는 펀치의 지름, 곡률반경, 펀치와 블랭크홀더의 행정 등만이 다르다. 공정의 초기에는 펀치와 블랭크홀더가 같이 내려오다가, 블랭크 홀더가 판재에 접촉된 후에는 뒤로 밀리면서 지지 스프링이 압축되어 블랭크 홀더 지지력을 전달한다.

블랭크홀더의 행정은 21 mm(제3공정에서는 20.5 mm)이고 사용된 스프링은 4개의 SWF40-80으로 스프링상수는 12.5 kgf/mm이므로, 스프링의 압축으로 인해 지지할 수 있는 최대하중은 1050 kgf(제3공정에서는 1025 kgf)에 달한다. 블랭크홀더가 최대 행정거리까지 밀려 올라가게 되면, 램에 직접 접촉하게 되어 지지력에 무관하게 펀치의 하강속도와 같은 속도로 움직이게 된다. 펀치의 하강행정은

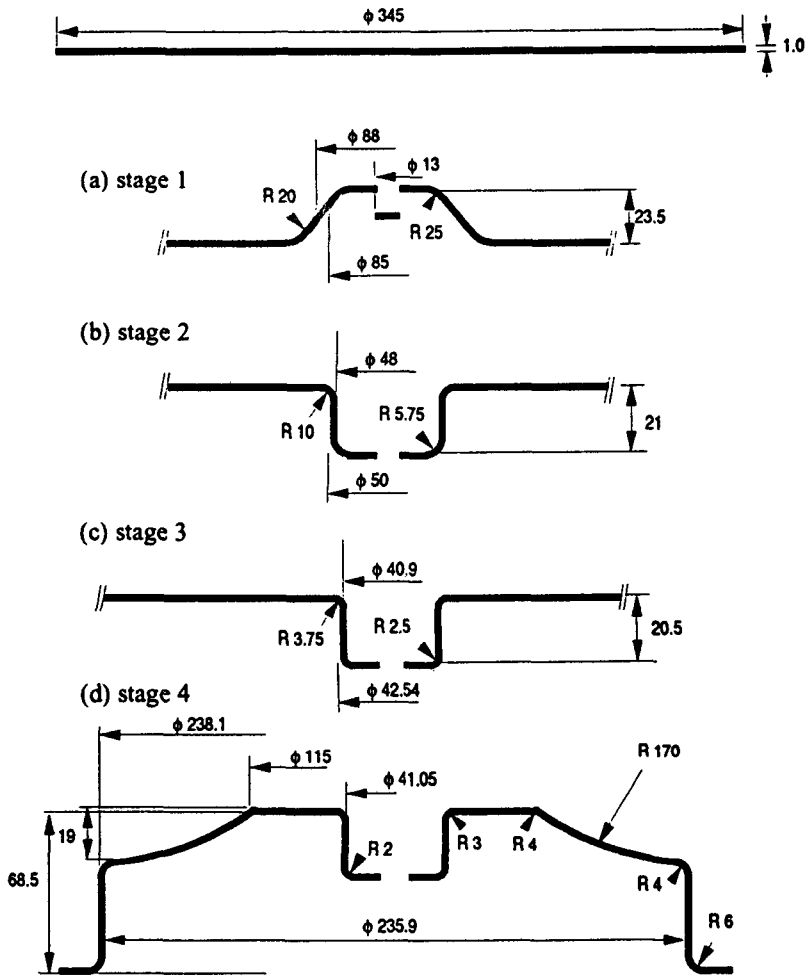


Fig. 6 Dimensions of blank in multi-stage deep drawing

21 mm(제3공정에서는 20.5 mm)이다.

(3) 제4공정

제4공정에서 서로 다른 운동을 하는 공구는 총 4개이다. 펀치와 본체 다이는 램에 조립되어 있고, 블랭크 홀더는 SWF40-125 스프링 4개로 램에 연결되어 있으며, 스프링의 최대 압축량은 48 mm이다. 스프링상수는 4.3 kgf/mm이므로, 스프링에 의한 최대 지지력은 825.6 kgf가 된다. 블랭크홀더가 최대 행정만큼 밀린 후에는 램에 직접 접촉되므로, 이후에는 지지력에 상관없이 램의 속도는 하강한다.

판재의 쿠션압력은 공압으로 전달되며, 3770 kgf로 일정하게 유지된다. 펀치는 다이면에서 20.3 mm만큼 하강하여 제품을 만들게 된다.

4.2 해석조건 및 결과

앞 절에서 설명된 공정조건을 수치모델링하고 판재는 Fig. 6에 나타난 것과같이 지름 345.0 mm, 두께 1.0 mm에 대하여 절점 232개, 요소 115개로 분할하여 강소성 유한요소법으로 변형해석을 하였다. 마찰조건은 마찰계수 0.1로 일정한 것으로 하였으며, 소재는 Al-Killed강판으로 시험 디프트로잉에 사용된 것과 같은 변형 경화성, 이방성을 갖고 있는 것으로 보았다.

(1) 변형과정

Fig. 8에서 제1공정 중 소재가 변형되어가는 과정을 나타내었다. 펀치는 23.5 mm만큼 상승한 후 멈추고, 중심부에 지름 13.0 mm의 구멍을 만들기 위해 절점을 재구성한다.

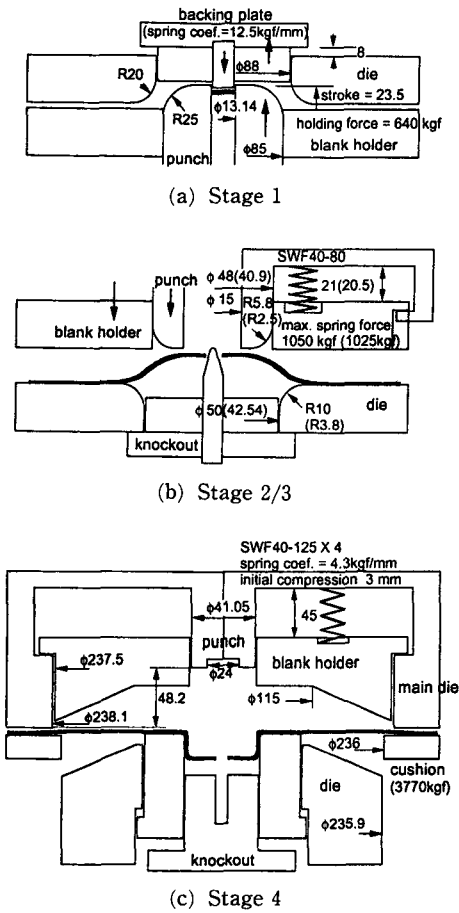


Fig. 7 Dimensions of tools in multi-stage deep drawing

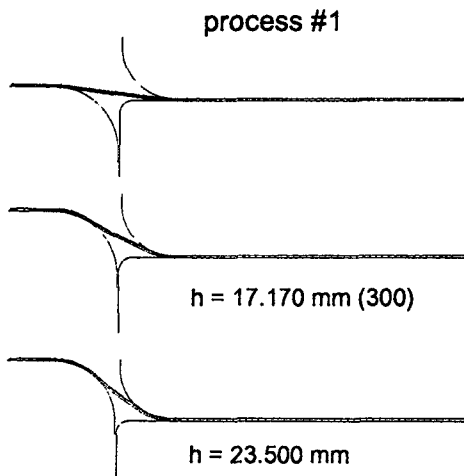


Fig. 8 Deformation of blank during the first stage Process #1

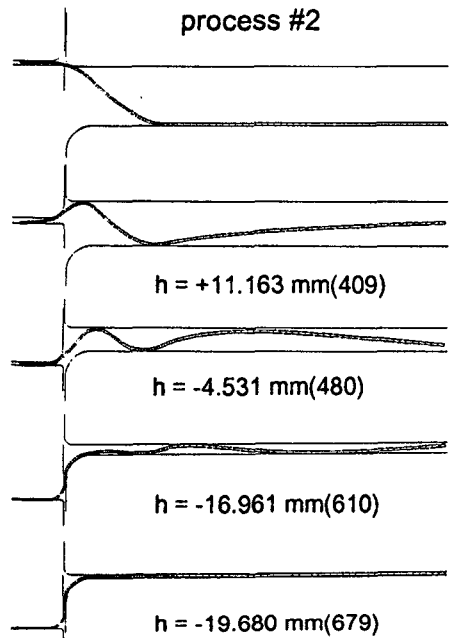


Fig. 9 Deformation of blank during the second stage Process #2

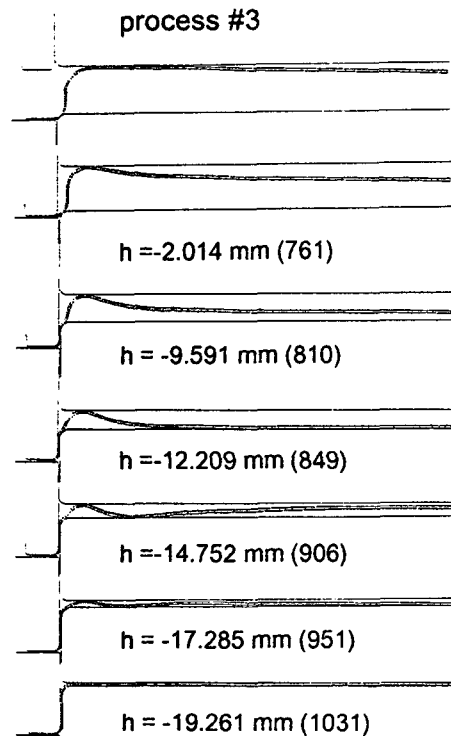


Fig. 10 Deformation of blank during the third stage Process #3

Fig. 9에는 제2공정이 진행되는 동안 소재의 변형과정을 나타내었다. 제2공정은 제1공정에서 만들어진 컵부분을 반대방향에서 펀치로 가압하는 역드로잉(reverse drawing)과정으로서, 그림에서 보는 것처럼 그 변형과정이 복잡하다. 제2공정의 초기 단계에서는 펀치가 하강함에 따라서 플랜지부가 들어올려지면서 블랭크홀더에 접촉하게 되고, 제1공정에서 만들어진 컵의 바닥부분을 지름이 작은 펀치로 가압함에 따라서 반지름 방향으로 세 개의 큰 주름을 형성하게 된다. 이 때, 제일 안쪽에 생긴 주름은 꺾인 각도가 큰 편으로 제2공정의 중간 단계에서 펀치가 하강함에 따라 그 각도는 계속 커지면서 지름이 작은 컵이 잘 형성될 수 있도록 도와준다.

제2공정의 마지막 단계에서는 블랭크 홀더가 펀치와 같은 속도로 하강함에 따라서 지지력이 크게 증가하고, 다이와의 간격이 좁아지면서 높이가 낮은 주름을 최외곽부에 한 개 더 형성한다.

제3공정은 재드로잉(redrawing)과정으로 제2공정에서 만들어진 컵의 지름을 줄이는 작업을 하게 된다. 제3공정 동안 판재가 변형되어 가는 과정은 Fig. 10에 나타낸 것과 같다. 공정의 초기에 블랭크홀더는 플랜지부와 접촉하면서 지지스프링이 압축되어 지지력을 전달하고, 펀치는 계속 하강하여 거의 다이면에 도달했을 때부터 본격적인 드로잉이 시작된다. 이 때, 대부분의 플랜지부는 다이면에 접촉하게 되고, 펀치가 하강하여 다이면보다 15.0 mm 정도 아래에 도달할 때는 플랜지부는 다시 블랭크 홀더면에 접촉하게 된다.

펀치가 최종 행정에 이를 때까지 플랜지부에서는 높이가 낮은 주름이 3개 생기며, 이들은 블랭크홀더의 가압에 의하여 거의 소멸된다.

Fig. 11에는 제4공정에서의 소재의 변형과정을 나타내었다. 제4공정은 여러 개의 공구를 사용하여 중심부의 지름이 작은 컵을 최종적으로 성형하고, 외주부에 큰 컵을 만들어서 front shell의 대략적인 모양을 만든다. cushion 압력은 3770 kgf로 유지되며, 이는 플랜지부에서 방사상으로 주름이 생기지 않도록 하는 역할을 하고 있다. 펀치의 밑면이 다이면에서 약 22.0 mm 정도 떨어져 있을 때, front shell의 모서리가 성형되기 시작하며, 이 동안 윗면이 거의 형성된다. 이후의 과정에서는 주로 벽면을 만들고, 중심부의 지름이 작은 컵의 최종 가공을 하게 된다.

(2) 공구에 걸리는 하중

강소성 유한요소법으로 네 개의 공정에 대하여 해석을 함으로써 각 공구에 걸리는 하중을 계산할 수 있었다. Fig. 12에 각 공정에서 공구에 걸리는 하중을 도시하였다.

제1공정에서는 블랭크 지지력이 640 kgf로 일정하게 유지되었고, 펀치가 상승함에 따라서 펀치에 걸리는 하중은 증가하여 공정의 끝 무렵에는 약 5,500 kgf에 달하였다.

제2공정에서는 펀치가 다이면보다 밑으로 약 8.5 mm에 이를 때까지는 하중의 증가가 완만하다가, 이후부터 급격히 증가하여 펀치에 걸리는 최대하중은 약 6,000 kgf, 다이면에 걸리는 최대하중은 약 8,000 kgf에 이르고 있다. 펀치가 다이면보다 17 mm 아래에 도달한 때부터는 블랭크홀더의 지지스프링이 완전히 압축되고 직접 램에 의하여 하강되므로 블랭크 지지력이 급격히 증가한다.

제3공정은 재드로잉 과정으로 공정의 초기 단계에서는 펀치에 별 하중이 걸리지 않다가, 펀치가 다이면보다 2.0 mm 하방에 도달한 후부터는 하중이 서서히 증가하기 시작하여 최대 4,500 kgf의 하중을 받는다. 반면에 블랭크홀더는 지지스프링이 최대로 압축된 상태에서 컵의 지름을 줄이는 작업이 진행되며, 펀치행정 5.0 mm~10 mm이 구간에서는 컵의 모서리 부분이 만들어지므로 지지력이 증가하지만, 이후의 행정에서는 다시 지지력이 감소하여 플랜지부를 가압하다가 펀치행정 17.5 mm 이후부터 지지력이 다시 증가한다.

제 4공정에서는 앞서의 공정에서보다 훨씬 큰 하중이 각 공구에 작용하며, 펀치와 본체 다이가 조립된 램에는 약 22,000 kgf, 다이면에는 약 17,500 kgf의 하중이 작용한다. 블랭크 홀더의 지지력은 작게 유지되다가 공정의 마지막 단계에서 지지스프링이 완전히 압축된 후에는 급격히 상승한다.

(3) 두께분포

공정해석결과 계산된 두께 분포를 Fig. 13에 나타내었으며, 실험으로 측정된 값과 비교하였다. 그림에서 계산으로 얻어진 두께는 실선으로 나타내었고, 실험치는 반복측정에서의 편차를 고려하기 위해 최대/최소값으로 구분하여 각 지점에서의 범위로 나타내었다.

제1공정 후의 판재의 계산된 두께는 실험치와 비교적 양호하게 일치하고, 특히 중심부에서 25.0 mm 떨어진 컵의 모서리부에서는 상당히 일치하고

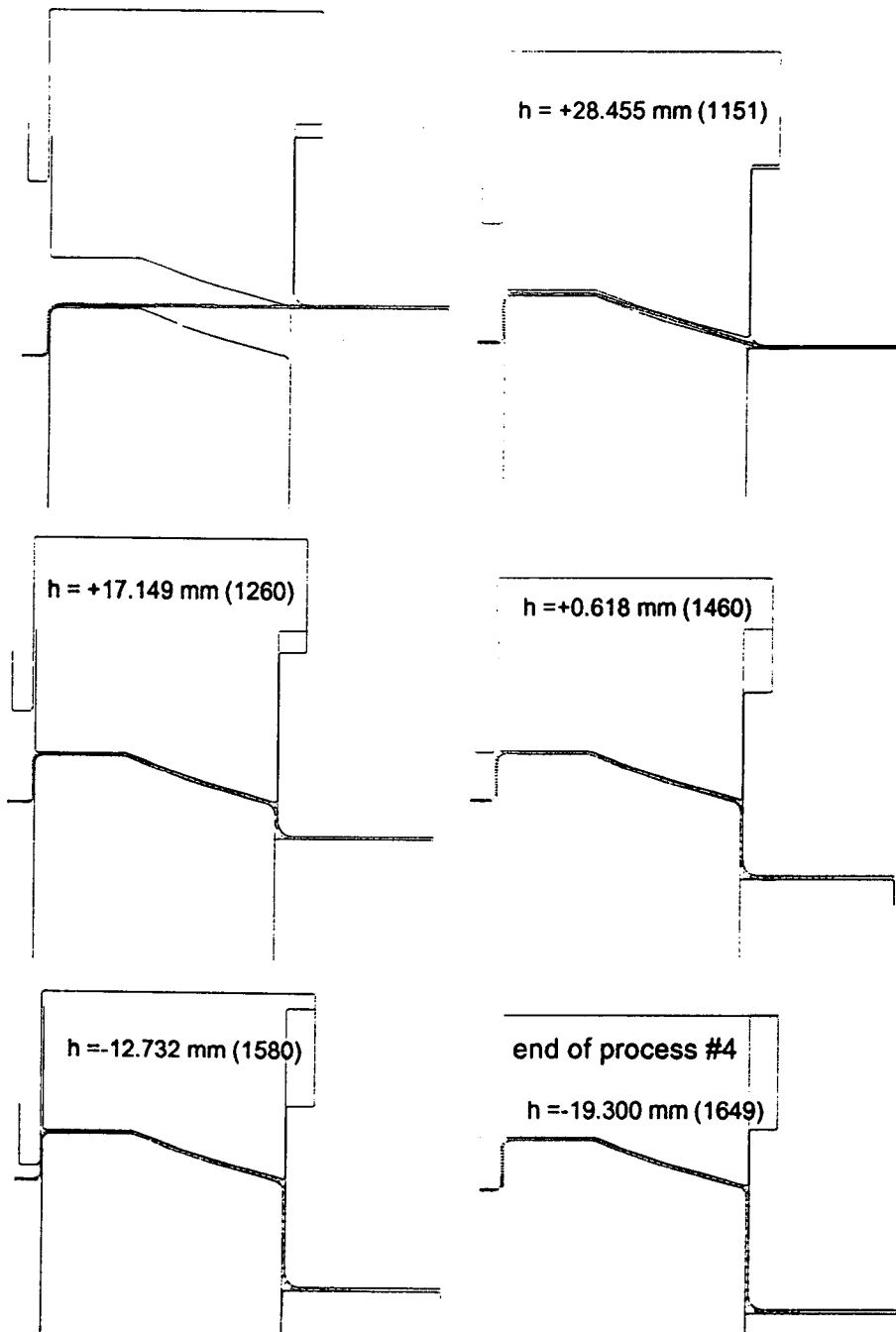


Fig. 11 Deformation of blank during the fourth stage End of process #4

있다. 반면에 플랜지부에서는 계산결과가 실험치보다 다소 크게 나타나고 있는데, 이는 마이크로 미터로 판재의 두께를 측정하는 과정에서 판재가 눌러 과소평가되었거나, 원래의 판재가 정확한 1.0

mm에 약간 미달한 것이 아니었나 추측된다.

제2공정 후에는 계산된 두께가 중심부에서 25.0 mm 이내인 부분에서는 실험치보다 작게, 40.0 mm 이후의 부분에서는 실험치보다 크게 나타나고

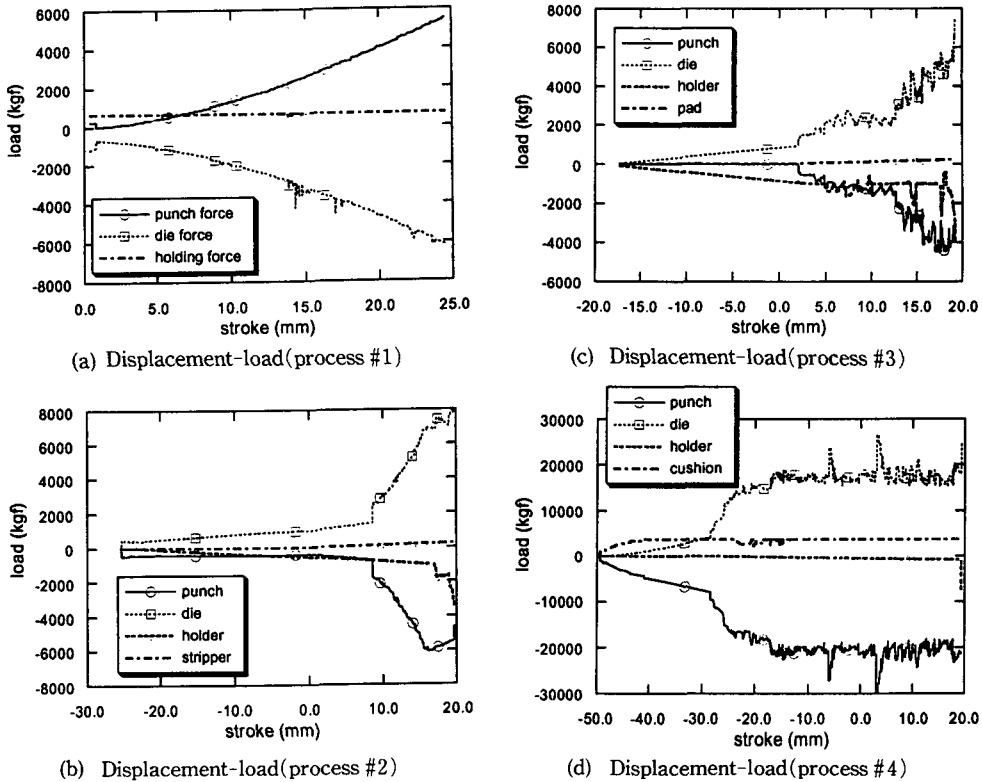


Fig. 12 Loads on the tools in multi-stage deep drawing

있다. 특히, 중심 부근에서는 거의 0.1 mm 정도 작게 예측되고 있는데, 이는 앞서 언급한 바 있는 수치모델의 굽힘에 대한 강성에 기인하는 것으로 여겨진다.

제3공정이 끝난 후, 판재는 중심부분이 더욱 얇아지게 되며, 거의 0.7 mm에 이르게 된다. 중심부에서 약 50.0 mm 떨어진 부분을 제외하면 예측된 두께분포는 실험치와 잘 일치하고 있다.

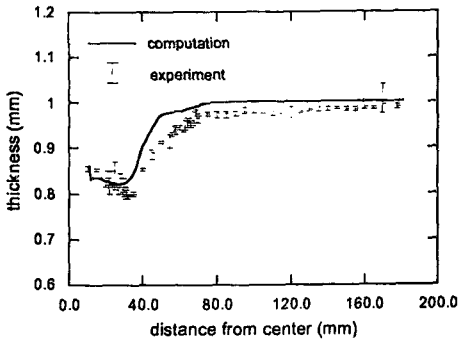
제4공정 이후에는 판재의 두께분포가 최종제품에 까지 거의 그대로 유지되며, 예측된 두께분포와 실험치가 상당히 잘 맞고 있다. 중심축으로부터 약 170.0 mm 떨어진 곳부터는 원래 판재의 두께 1.0 mm보다 더 두꺼워지고 있으며, 중심부근의 지름이 작은 컵의 밀면은 두께가 0.7 mm 밖에 되지 않지만, 이 부분은 전단에 의해 잘려나갈 것이므로 제품의 강도에는 큰 영향을 주지 못하게 된다.

(4) 결과에 대한 검토

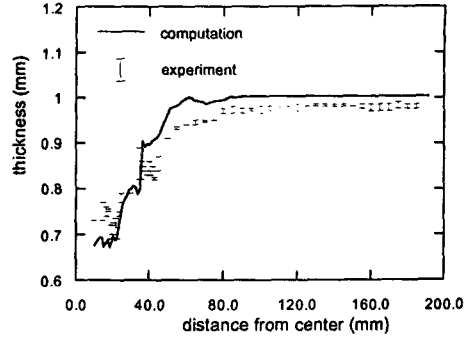
기존의 셀 제조공정을 해석한 결과, 다음과 같은 점을 알 수 있었다.

첫째, 역드로잉과 재드로잉은 중심부 컵의 벽면의 두께를 유지하기 위해서는 절대적으로 필요한 공정이다. 특히, 이 공정동안 사용되는 공구의 설계에 있어서는 소재의 변형과정 해석이 유용한 정보를 줄 수 있다. 예를 들면, 제1공정에서 펀치의 지름은 지금 사용되는 것보다 큰 것이 바람직하다.

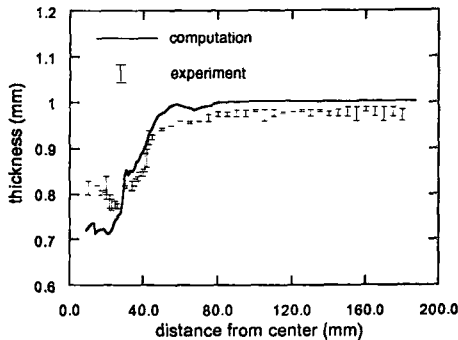
둘째, 현재 적용되고 있는 지지력은 적정하다. 그러나 향후에 제품의 설계가 변경된 경우에는 블랭크 홀더의 지지스프링과 쿠션압력이 조정되어야 할 것이며, 해석결과가 유용하게 이용될 수 있다. 지지력의 조정에는 두 가지 제한조건이 있는데, 그 하나는 지지력이 과소하면 플랜지부에 방사상 주름이 생기게 되는 것이고, 다른 하나는 지지력이 과대한 경우, 재질의 균일성과 결부되어 제품에 과단이 생기게 된다는 것이다. 그러나, 지지력은 작을수록 가공에 잇점이 있으므로 차후의 연구에서는 플랜지부의 좌굴에 근거하여 블랭크 지지력을 계산하는 알고리즘을 만들어서 활용할 예정이다. 플랜



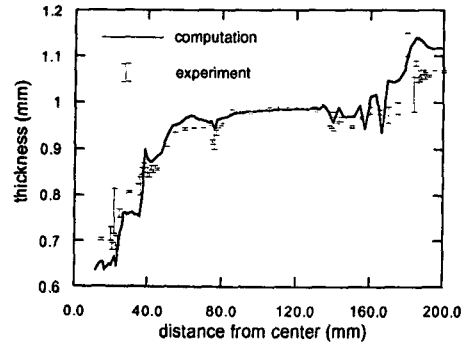
(a) Thickness distribution(process #1)



(c) Thickness distribution(process #3)



(b) Thickness distribution(process #2)



(d) Thickness distribution(process #4)

Fig. 13 Thickness distributions in multi-stage deep drawing

지부의 좌굴에 대하여는 이미 많은 연구자료가 있고 참고문헌(7)에 잘 요약되어 있다.

셋째, 공정해석결과 계산된 두께분포가 실험치와 잘 일치하고 있으므로, 공정이 변경되어 아직 제품이 만들어지지 않은 경우에도 해석을 통하여 두께 분포를 알 수 있다. 두께분포는 구조해석의 입력자료로 활용되어 보다 현실적인 응력/변형률의 계산이 가능할 것이다.

넷째, 판재의 가공 후에는 일반적으로 탄성회복에 의한 스프링백 현상이 수반되어 금형의 설계시에 미리 이 양만큼 보정하여야 한다. 또한 가공으로 인한 잔류응력은 제품의 수명에 영향을 주게 된다. 탄소성 해석을 한다면 잔류응력과 탄성회복 정도가 계산될 수 있겠지만, 공구의 작동 및 형상이 복잡하고, 그 운동이 다양한 V.A.C. 셀의 가공을 탄소성 해석한다는 것은 불가능하므로, 강소성 해석결과 얻어진 응력분포를 토대로 하여 이로부터 하중을 제거하여 가면서 잔류응력 및 스프링백 양을 예측할 수 있을 것이다.

5. 결론 및 향후 연구과제

이상으로부터 연구결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, 판재의 이방성을 고려하여 해석할 수 있는 강소성 유한요소법으로 복잡한 모양의 셀을 제조하는 기존의 공정을 해석하였으며, 해석결과는 실험치와 유사한 결과를 주고 있다.

둘째, 해석으로 얻어진 소재의 변형과정은 공정설계에 유용한 자료를 주며, 독자모델이 확정되어 제조공정을 설계하는 경우에 각 공구의 치수 및 지지력의 결정 등에 도움을 줄 수 있다.

셋째, 셀의 제조공정에 적용된 역 드로잉과 재드로잉 과정은 컵 벽면의 두께유지에 필수적인 공정이므로 생략할 수 없으며, 제품의 설계가 변경된 경우에도 필요하다.

앞으로의 연구과제는 플랜지부에서 원주방향으로 작용하는 압축응력에 의해 판재의 좌굴을 예측할 수 있는 기준식을 채택하여, 이로부터 적절한 지지

력을 계산하고, 강소성 해석으로부터 얻어진 응력 분포를 활용하여 스프링백과 잔류응력을 예측하는 것이 필요하다. 계산된 스프링백 양으로부터 미리 공구의 수치를 보정하여 공구의 제작에 있어서의 시행오차를 최대한 줄일 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) 김형중, 1990, "평면이방성을 고려한 판재성형의 강소성 유한요소해석," 공학박사 학위논문, 서울대학교.
- (2) Kobayashi, S. and Kim, J. H., 1978, "Deformation Analysis of Axisymmetric Sheet Metal Forming Processes by Rigid-Plastic Finite Element Method," *Mechanics of Sheet Metal Forming* (Edited by D.P. Koistinen et al.), Plenum Press, pp. 341~365.
- (3) Yang, D. Y. and Kim, Y. J., 1986, "A Rigid-Plastic Finite Element Formulation for the Analysis of General Deformation of Planar Anisotropic Sheet Metals and Its Applications," *Int. J. Mech. Sck.*, Vol. 28, No. 28, pp. 825~840.
- (4) Kobayashi, S., Oh, S. I., and Altan, T., 1989, "Metal Forming and the Finite Element Method," Oxford University Press.
- (5) Hill, R., 1950, "The Mathematical Theory of Plasticity," Claren Press, Oxford, pp. 317~321.
- (6) Hughes, Thomas J.R., 1987, "The Finite Element Method : Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis," Prentice-Hall, pp. 242~251.
- (7) 김현기, 1983, "Deep-Drawing에서 Flange부의 주름에 관한 연구," 공학석사 학위논문, 서울대학교.