강소성 유한요소법을 이용한 다단계 디프 드로잉의 공정개선에 관한 연구

전 병 희*, 민 동 균**, 김 형 종***, 김 낙수****
* 인덕전문대학 기계설계과 , **정밀기계설계 공동연구소 ,
*** 강원대학교 기계공학과, **** 홍익대학교 기계공학과

A Study on the Process Improvements of the Multi-stage Deep Drawing by the Rigid-plastic Finite Element Method

Byung-Hee Jeon*,Dong-Kyun Min**, Hyeong-Jong Kim***, Naksoo Kim****
* Induk Institute of Design
** Institute of Advanced Machinery and Design
*** Dept. of Mechanical Engineering, Kangwon University
**** Dept. of Mechanical Engineering, Hong-Ik University

ABSTRACT

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. Computational results on the punch/die loads and thickness distributions were compared with the experiments of the current drawing processes. Deep-drawing processes of the redesigned shell to improve the specific strength and stiffness were simulated with the numerical method developed. With varying several process parameters such as blank size, corner radii of tools, and clearances, the simulation results showed the improvements in reducing the forming loads. Also forming defects were found during simulation and appropriate blank size could be verified.

Key Words: Deep Drawing, Process simulation Reverse-drawing, Redrawing, Rigid-plastic Finite Element Method, Shell forming, Verification of design

1. 서 론

디프드로잉시 소재는 편평한 모양으로부터 제품의 형상에 이르는 동안 소성변형을

겪게 되며, 그 변형의 역학은 판재가 가지고 있는 성형성(formability) 및 이방성(anisotropy)과 결부되어 매우 복잡하다. 성형되는 제품의 모양이 복잡한 경우에는 다단계로 가공하므로 공정해석 및 개선에 어려움이 따른다.

디프드로잉의 유용성과 다양성에 비추어 볼 때, 공구의 설계나 가공공정의 개선에 필요한 조직적인 방법은 아직 부족한 편이다. 특히, 다단계 디프드로잉에는 성형성을 향상시키기 위해서 역드로잉(reverse-drawing)이나 재드로잉(redrawing)과 같은 과정이 포함되므로, 최종 제품의 형상 및 두께분포를 알기 위해서는 일련의 다단계 공정들을 순차적으로 해석하는 것이 필요하다.[1]

유한요소법은 판재의 성형공정 해석에 일반적인 적용이 가능하고, 응력이나 변형에 대하여 다양하고 정도 높은 정보를 제공하기 때문에 널리 사용되고 있다. 최근에 들어서는 컴퓨터의 처리속도 및 자료처리용량의 발전과 자동차산업을 중심으로 판재가공의 삼차원해석이 필요해지면서, 판재가공의 현실적인 해석에 있어서는 유한요소법이 거의 유일한 수단으로 되었으며, 그 활용도에 대한 연구가 광범위하게 진행되고 있다. Kobayashi와 Kim이 축대칭 판재가공문제에 강소성 유한요소법을 사용한 이래[2], 유한요소법을 이용한 많은 연구가 행해졌으며, 특히, Yang 등[3]과 김동원 등[4]은 판재의 평면이방성을 고려하여 해석하였다. 재드로잉 공정의 해석에 대하여는 Teodosiu 등[5]이 공구에 걸리는 압력에 대한 연구를 발표한 바 있다. 복잡한 모양을 가진 축대칭 셸을 제조하는 공정의 해석에 대하여는 심재진 등[6]이 연구를 수행하였다.

최근에 수송기계 부품의 경량화 및 고효율화의 추세에 따라서 판재부품의 크기와 무게를 감소시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 이 경우에는 구조해석을 통하여 판재부품의 크기와 형상을 재설계하므로 재설계된 제품에 대하여 가공공정도 따라서 개선되어야 한다. 본 연구에서는 축대칭 셸 제조공정의 개선을 위하여, 강소성 유한요소법으로 공정을 수치해석하고 개선방향을 제시하고자 한다. 이를 위해서 우선, 기존의 공정을 해석하고 그 결과를 두께의 실측치와 비교하여 해석결과를 검증하며, 변경된 공정에 대하여 타당성 여부를 판정한다. 판재의 변형시 굽힘효과를 고려하기 위해 연속체요소를 사용하고, 재료의 이방성은 수직이방성(normal anisotropy)만을 고려한다.

2. 해 석 이 론

2.1 유한요소 수식화

응력텐서 σ_{ij}로 표시된 평형방정식에 경계조건을 부가하여 미분방정식의 약형으로 만들고 재료의 비압축성을 벌칙상수 k를 써서 첨가하면,

$$\int_V \sigma_{ij}\delta\dot{\varepsilon}_{ij}dV - \int_{S_F}\bar{t}_i\delta v_i dS + \int_V k\dot{\varepsilon}_{kk}\delta\dot{\varepsilon}_{kk}dV = 0 \qquad (1)$$

와 같이된다.[7] 윗식에서 $\dot{\varepsilon}_{ij}$는 변형률속도텐서, $\bar{t}_i$는 소재의 표면 S_F에 작용하는 응력벡터성분, v_i는 속도벡터성분을 각각 나타낸다. 식 (1)에는 소재가 차지하고 있는 영역 V와 표면 S_F에 대한 적분이 있으므로, 변수를 이산화 (discretization)하여

요소에 대하여 일반적으로 적분을 수행하고 미분방정식을 절점변수인 절점속도에 대한 대수방정식으로 변환시킨다. 그 결과는

$$\left\{\int_V \frac{2}{3}\frac{\bar{\sigma}}{\dot{\bar{\varepsilon}}}\hat{\nu}^T B^T DBdV+\int_V k\,\hat{\nu}^T B^T cc^T BdV-\int_{S_F}\bar{t}^T NdS\right\}\delta\hat{\nu}=0 \qquad (2)$$

과 같이 되고, 여기에서 $\bar{\sigma}$는 유효응력으로 소재의 변형 중에는 유동응력과 같으며, $\dot{\bar{\varepsilon}}$는 유효변형률속도, $\hat{\nu}$는절점속도벡터, B는 변형률속도-절점속도행렬(strain-rate-nodal velocity matrix), $\bar{t}$는 표면응력벡터, N은 형상함수행렬을 나타내고, D와 c는 각각 계수행렬 및 벡터이다. $\delta\hat{\nu}$는 임의이므로 식(2)는 다음과 같이 요약된다.

$$\Phi(\hat{\nu})=F(\hat{\nu})\hat{\nu}+G\hat{\nu}-h=0. \qquad (3)$$

여기에서

$$F(\hat{\nu})=\int_V \frac{2}{3}\frac{\bar{\sigma}}{\dot{\bar{\varepsilon}}}B^T DBdV, \qquad (4)$$

$$G=\int_V kB^T cc^T BdV, \qquad (5)$$

$$h(\hat{\nu})=\int_{S_F}\bar{t}^T NdS, \qquad (6)$$

이다.

연립방정식 (3)은 비선형이므로 직접반복법과 Newton-Raphson 반복법을 조합하여 해를 구한다. 직접반복법은 다음 식에서 속도벡터를 직접 구한다.

$$\{F(\hat{\nu})+G\}\hat{\nu}=h. \qquad (7)$$

Newton-Raphson 반복법은 (3)식을 $\hat{\nu}$에 대하여 1차 Taylor전개하여 다음과 같이 선형화시킨 연립방정식을 푼다.

$$K^i_{N-R}\Delta\hat{\nu}=L^i_{N-R}\ . \qquad (8)$$

단, 여기에서

$$K^i_{N-R}=\left.\frac{\partial\Phi}{\partial\hat{\nu}}\right|^i=F(\hat{\nu})+G+\frac{\partial F(\hat{\nu})}{\partial\hat{\nu}}\hat{\nu}-\frac{\partial h(\hat{\nu})}{\partial\hat{\nu}}\ , \qquad (9)$$

$$L^i_{N-R}=-\Phi(\hat{\nu}^i)=-F(\hat{\nu})\hat{\nu}-G\hat{\nu}+h(\hat{\nu})\ , \qquad (10)$$

이고,

$$\frac{\partial F(\hat{\nu})}{\partial\hat{\nu}}\hat{\nu}=\int_V\frac{4}{9}\frac{1}{\dot{\bar{\varepsilon}}^2}\left\{\frac{\partial\bar{\sigma}}{\partial\dot{\bar{\varepsilon}}}-\frac{\bar{\sigma}}{\dot{\bar{\varepsilon}}}\right\}(B^T DB\hat{\nu})(B^T DB\hat{\nu})^T dV \qquad (11)$$

로 계산할 수 있다.

한편, 마찰력은 Coulomb마찰을 사용하여 μ를 마찰계수, p를 표면압력이라 할 때, 다음과 같이 모형화한다.

$$f=-\mu p\left(\frac{2}{\pi}\tan^{-1}\left(\frac{|v_t|}{a}\right)\right)\frac{v_r}{|v_t|} \quad . \tag{12}$$

여기에서 a는 0.001 정도의 작은 상수이고, 소재와 공구간의 상대속도는 소재 경계에서의 형상함수 행렬 $\hat{N}$을 사용하여 다음과 같이 구한다.

$$v_r=\hat{N}\ (\hat{v}-v_{tool}) \quad . \tag{13}$$

해의 수렴여부는 속도norm과 함수norm을 모두 고려하여 판단하며, 해가 수렴하여 절점에서의 속도가 구해지면 시간증분 Δt동안의 형상변경에 따른 경계조건의 변화를 고려하여 새로운 형상을 다음과 같이 구한다.

$$x^{n+1}\leftarrow x^n+\Delta t v^n. \tag{14}$$

해석에는 4절점 사각형 연속체요소(4-node bilinear quadrilateral solid element)를 사용하며, 이 요소는 굽힘에 있어서 기하학적 조건에 구속되므로 실제 재료보다 굽힘에 대한 강성이 다소 높은 것처럼 반응한다.[8]

2.2 이방성의 처리

압연된 판재는 일반적으로 압연방향, 폭방향(압연방향에 수직방향), 두께방향을 이방성의 주축으로 가지며, 방향에 따라서 다른 성질을 보인다. 본 연구에서는 압연방향과 폭방향으로는 성질이 같고 두께방향으로만 성질이 다르다고 가정한하여 수직이방성을 고려하기로 한다. 따라서 식 (2)의 D행렬에서 이방성으로 인한 계수들은 다음과 같은 평균 r 값을 사용한다.

$$r=\frac{H}{F}=\frac{H}{G}=\frac{2N-(F+G)}{(F+G)} \quad . \tag{15}$$

단, F,G,H,N은 Hill의 이방성 항복함수에 사용되는 계수이다.[9] 평균 r 값을 사용하면 D행렬은 다음과 같이 되어 이방성의 효과를 고려할 수 있다.

$$D=\frac{(2+r)}{(1+2r)}\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&r&0\\0&0&0&2\end{bmatrix} \tag{16}$$

여기에서 $r=1$인 경우는 등방성인 경우로 D행렬도 등방성으로 환원된다. 변형이 진행되는 중에도 판재의 두께방향은 항상 이방성 주축이 된다고 가정하면, 유한요소 내의 국부좌표계(local coordinate system)에서 D행렬을 구성할 수 있다.

2.3 블랭크 지지력의 처리

디프드로잉 시에 블랭크 홀더(blank holder)나 쿠션(cushion)에는 일정한 하중을 주어 플랜지부에서 주름이 잡히지 않도록 한다. 만일 블랭크 지지력이나 쿠션 압력이

과대하면, 플랜지부에서 판재의 변형이 심하게 억제되어 컵이 형성되는 과정에서 파단이 일어날 확률이 높아진다. 수치해석에서 블랭크 지지력은 각 절점에 집중하는 절점 외력으로 줄 수 있다. 이때, 절점 외력의 총합은 블랭크 지지력과 같아야 한다. 해를 반복법으로 구하는 과정에서 각 절점에 주어지는 외력의 급격한 변화는 해의 수렴성을 크게 해친다. 본 연구에서는 다음과 같은 알고리즘을 사용하여 블랭크 지지력이 적절하게 각 접촉절점으로 분산시켜서 안정적으로 속도장이 구해지도록 하였다.

블랭크 홀더 표면에서 가까운 거리에 있는 절점들은 블랭크 홀더 표면에 접촉하고 있다고 가정하고 홀더면 내부로 침입한 부피에 비례하여 절점력을 나누어 준다. 즉, Fig. 1에 나타낸 것처럼, 절점 i 에 해당하는 침입 부피를 V_i, 절점 외력을 f_i, 블랭크 지지력을 f_{holder}라 하면 침입 부피의 총합은

$$V_{total} = \sum_i V_i \tag{17}$$

가 되고, f_i는 $f_{holder} = \sum_i f_i$ 가 만족되도록 다음과 같이 가정한다.

$$f_i = \frac{V_i}{V_{total}} f_{holder} \ . \tag{18}$$

이러한 알고리즘을 사용함으로써 지지력을 소재의 절점에 적절히 배분할 수 있게 된다. 본 연구에서 공구는 강체로 가정하여 탄성변형을 무시하지만, 실제로는 공구의 탄성변형이 있을 것이므로, 식 (18)은 블랭크 홀더의 탄성변형량에 비례하여 절점력이 배분되는 것으로 물리적 의미를 찾을 수 있다.

3. 기존 공정의 해석

3.1 해석조건

다단계 디프드로잉의 한 예로 자동차용 Brake Master VAC.의 제조공정을 해석하였다. 그 공정은 Fig. 2 에 나타낸 것과 같이 여러 단계로 이루어져 있으며, 공구의 형상 및 운동이 매우 복잡하다. 기존의 Master VAC.용 front shell은 제 1 공정에서 제 4 공정 동안 모양이 거의 만들어지고, 이후의 공정에서는 주로 전단, 오무리기 등의 공정을 통하여 필요한 최종치수 및 형상으로 만드는 것이므로 이 과정동안 판재의 두께변화는 거의 없는 것으로 간주한다.

Fig. 2(a)에 나타낸 바에 의하면, 제 1 공정에서 블랭크 홀더의 지지력은 공압에 의해 640 kgf 로 일정하게 유지된다. 펀치가 상승하여 15.5 mm에 이르면 backing plate가 밀려올라가게 되고, 펀치가 최종행정(23.5 mm)에 이르기 직전에 전단날에 의해 판재의 중심에 지름 13.0 mm 의 구멍을 뚫게 된다. 제 2 공정과 제 3 공정은 동일한 공구세트를 사용하고, 사용되는 펀치의 지름, 곡률반경, 펀치와 블랭크 홀더의 행정 등만이 다르다. 공정의 초기에는 펀치와 블랭크 홀더가 같이 내려오다가, 블랭크 홀더가 판재에 접촉된 후에는 뒤로 밀리면서 지지 스프링이 압축되어 블랭크 지지력을 전달한다. 블랭크 홀더의 행정은 21 mm (제 3 공정에서는 20.5 mm)이고, 스프링의 압축으로 지지할 수 있는 최대하중은 1050 kgf (제 3 공정에서는 1025 kgf)에 달한다.

Fig. 2(b)에서 볼 수 있듯이, 블랭크 홀더가 한계행정까지 밀려 올라가게 되면, 램에 직접 접촉하게 되어 지지력에 무관하게 펀치의 하강속도와 같은 속도로 움직이게 된다. 제 4 공정에서 서로 다른 운동을 하는 공구는 총 4 개이며, 이들은 Fig. 2(c)에 나타낸 것과 같이 운동한다. 펀치와 본체 다이는 램에 조립되어 있고, 블랭크 홀더의 최대지지력은 825.6 kgf 이다. 블랭크 홀더가 최대행정만큼 밀린 후에는 램에 직접 접촉되므로, 이후에는 지지력에 상관없이 램의 속도로 하강한다. 판재의 쿠션 압력은 공압으로 전달되며, 3770 kgf 로 일정하게 유지된다. 펀치는 다이면에서 20.3 mm 만큼 하강하여 제품을 만들게 된다.

판재는 직경 345.0mm, 두께 1.0mm의 블랭크를 절점 232 개, 요소 115 개로 분할하여 해석하였다. 마찰계수는 0.1로 일정한 것으로 하였으며, 소재는 Al-Killed 강판으로 다음과 같은 재질의 것을 사용하였다.

$$\bar{\sigma} = 59.2\,\bar{\varepsilon}^{0.233}\,(kgf/mm^2),\quad r = 0.988\ .$$

3.2 해석결과

Fig. 3 에 소재가 변형되어가는 과정을 나타내었다. Fig. 3(b)에 나타낸 제 2 공정은 (a)의 제 1 공정에서 만들어진 컵부분을 반대 방향에서 펀치로 가압하는 역드로잉 과정으로서, 그림에서 보는 것처럼 그 변형과정이 복잡하다. 제 2 공정의 초기 단계에서는 펀치가 하강함에 따라서 플랜지부가 들어올려지면서 블랭크 홀더에 접촉하게 되고, 제 1 공정에서 만들어진 컵의 바닥 부분을 지름이 작은 펀치로 가압함에 따라서 반지름 방향으로 두 개 내지 세 개의 큰 주름을 형성하게 된다. 이 때, 가장 안쪽에 생긴 주름은 꺾인 각도가 큰 편으로 제 2 공정의 중간 단계에서 펀치가 하강함에 따라 그 각도는 계속 커지면서 지름이 작은 컵이 잘 형성될 수 있도록 도와준다.

제 3 공정은 Fig. 3(c)에 나타내었으며, 재드로잉 과정으로 제 2 공정에서 만들어진 컵의 지름을 줄이는 작업을 하게 된다. 공정의 초기에 블랭크 홀더는 플랜지부와 접촉하면서 지지스프링이 압축되어 지지력을 전달하고, 펀치가 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 최종행정에 이를 때까지 플랜지부에서는 원주방향으로 높이가 낮은 주름이 3 개 생기며, 이들은 블랭크 홀더의 가압에 의하여 거의 소멸된다.

Fig. 3(d)에 나타낸 제 4 공정은 여러 개의 공구를 사용하여 중심부의 지름이 작은 컵을 최종적으로 성형하고, 외주부에 큰 컵을 만들어서 front shell 의 구체적인 모양을 만든다. cushion 압력은 플랜지부에서 방사상으로 주름이 생기지 않도록 하는 역할을 하고 있다. 펀치의 밑면이 다이면에서 약 22.0 mm 정도 떨어져 있을 때, front shell 의 모서리가 성형되기 시작하며, 이 동안 윗면이 거의 형성된다. 이후의 과정에서는 주로 벽면을 만들고, 중심부의 지름이 작은 컵의 최종 가공을 하게 된다.

제 4 공정이 끝난 후의 공정해석 결과 계산된 두께변형률 분포를 Fig. 4 에 나타내었으며, 실험으로 측정된 값과 비교하였다. 실험에서는 판재에 photo grid를 입힌 후 성형하여 grid의 변형으로부터 두께변형률을 측정하였다. 측정은 서로 다른 각도에서 4회씩 측정하여 평균값을 실험치로 하였다. 제 4 공정 이후에는 판재의 두께분포

가 최종제품에까지 거의 그대로 유지되는데, 예측된 두께변형률분포와 실험치가 비교적 잘 일치하고 있다. 중심축으로부터 약 170.0 mm 떨어진 곳부터는 원래 판재의 두께 1.0 mm 보다 더 두꺼워지고 있으며, 중심부근의 지름이 작은 컵의 밑면은 두께가 0.7 mm 밖에 되지 않지만, 이 부분은 전단에 의 해 잘려나갈 것이므로 제품의 강도에는 큰 영향을 주지 못하게 된다.

3.3 결과에 대한 검토

판재의 이방성을 고려하여 해석할 수 있는 강소성 유한요소법으로 복잡한 모양의 셸을 제조하는 기존의 공정을 해석하였으며, 해석결과는 실험치와 유사한 결과를 주고 있다. 기존의 셸 제조공정을 해석한 결과, 다음과 같은 점을 알 수 있었다.

첫째, 재드로잉과 역드로잉의 역할을 구체적으로 알 수 있었다. 즉, 소재의 직경이 컵의 직경에 비하여 매우 크면 원판의 플랜지부는 변형하지 않고 펀치 및 다이코너 부근에만 국부적으로 변형이 일어나서 결국 파단된다. 본 해석의 모델과 같이 1회의 드로잉공정으로는 만들수 없는 깊은 컵을 성형하는 경우에는 1회 오무린 용기를 보다 지름이 작은 펀치 및 다이로 재차 드로잉을 행하여야 한다. 이러한 목적으로 행하는 역드로잉과 재드로잉은 컵의 벽면의 두께를 일정한도로 유지하기 위해서는 절대적으로 필요한 공정으로, 해석결과로부터 좁고 깊은 컵이 성형될 수 있음을 알 수 있다. 또한, 제 1 공정에서 펀치의 지름 및 코너반경은 제 2 공정의 역드로잉에서 원만하게 컵이 형성되도록 하고 있다.

둘째, 현재 적용되고 있는 지지력은 적정하다. 제품의 설계변경으로 블랭크 홀더의 지지스프링과 쿠션압력이 조정될 경우, 지지력의 조정에는 두 가지 제한조건이 있는데, 그 하나는 지지력이 과소하면 플랜지부에 방사상 주름이 잡히게 되는 것이고, 다른 하나는 지지력이 과대한 경우, 재질의 균일성과 결부되어 제품에 파단이 생기게 된다는 것이다. 그러나, 지지력은 작을수록 가공에 잇점이 있으므로 설계를 변경할 경우, 가급적 블랭크의 크기를 줄이는 것이 좋다.

셋째, 공정해석 결과 계산된 두께분포가 실험치와 잘 일치하고 있으므로, 공정이 변경되어 아직 제품이 만들어지지 않은 경우에도 해석을 통하여 두께분포를 알 수 있다. 두께분포가 구조해석의 입력자료로 활용된다면 보다 실제적인 응력 및 변형률의 계산이 가능할 것이다.

4. 개선된 공정의 해석

4.1 해석조건

구조해석 결과로부터 결정된 개선모델의 특징은 Fig. 5에 나타낸 것과 같이, front shell의 높이를 기존모델의 68.5 mm에서 50.0mm로 18.5mm만큼 감소시켰으며, 어깨부에 곡률(기존모델의 경우 곡률반경 170mm)을 주지 않고 직선으로 하여 모양을 단순화시켰다. 이러한 형상의 변화는 front shell을 최적으로 경량화시킨다는 목표에 따라서 이루어진 것으로 개선모델을 구조해석한 결과 응력이나 변형량에 있어서 설계기준치를 만족하고 있음이 확인된 바 있다.[1] 기존의 제 1, 2, 3 공정 중 어느 한 공정도 생략할 수 없음을 기존공정의 해석결과에서 보인 바 있으므로, 개선모델의 성형에도

제 1, 2, 3 공정의 공구세트를 그대로 사용하기로 한다.

개선된 공정에는 블랭크의 직경만 다를 뿐, 기존의 제 1, 2, 3 공정을 그대로 적용하였으므로, Fig. 5 에는 제 4 공정과 제 5 공정에 사용된 공구형상 및 치수만을 나타내었다. 해석에는 소재를 232개의 절점과 115개의 요소로 분할하여 사용하였으며, 제 5 공정에서 sizing할 때 가장자리의 코너반경이 R 0.5mm정도로 가공되므로 이 부근에서의 요소의 크기를 작게하여 해석을 수행하였다. 판재는 블랭크의 직경 310.0 및 298.0 mm, 두께 1.0 mm 를 사용 하였으며, 소재는 개선된 공정에서 사용된 다음의 식으로 계산하였다.

$$\bar{\sigma}=47.38\,\bar{\varepsilon}^{0.186}\,(kgf/mm^2),\quad r=1.321$$

기존 공정의 계산에서와 본 공정해석에서 재질이 서로 다른것은 개선된 공정에서의 재질의 변화가 있었기 때문이다.

4.2 해석결과

직경 298 mm의 판재를 사용하였을 때, 제 4 공정까지 소재의 변형과정을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 3과 비교해 볼 때, 기존공정에 비하여 변형과정이 크게 다른 점은 없다. Fig. 7 은 직경이 310 mm 및 298 mm 인 블랭크에 대하여, 제 4 공정까지 종료되었을 때의 플랜지부 형상을 대비하여 보여주고 있다. 후속가공에 필요한 플랜지부의 양은 5mm정도이면 충분하므로, 플랜지부분에 남는 재료의 양으로부터, 블랭크의 직경은 298.0mm가 적절함을 알 수 있다.

Fig. 8에는 sizing공정인 제 5 공정이 진행되는 동안, 소재의 변형을 나타내었다. 제 5 공정에서의 다이내경은 237.8mm로 하여 주어진 펀치형상에 대하여 적절한 치수인지를 검토하였다. 그러나, 펀치와 다이사이의 간극(0.9mm)이 너무 작음으로 인하여 공정이 진행됨에 따라서 제 4 공정에서 성형되었던 플랜지부에 과도한 하중이 작용하게 되고 결국 이 부분이 말려올라가는 것을 볼 수 있다. 이는 sizing후에 제품탈착이 용이하도록 펀치의 형상을 형성된 컵부분보다 작게 하였기 때문에 셀의 어깨부분에서 펀치와 다이에 간격이 있음에도 기인한다. 펀치의 형상이 제 4 공정에서 성형된 컵부분에 꽉 끼도록 설계되면 실제작업에서 문제가 되므로, 다이의 내경을 약간 늘려서 펀치-다이 간극이 1.05mm가 되도록 하여 제 5 공정을 다시 해석한 결과, 간극이 과소하여 결함이 발생하였던 경우와는 달리 Fig. 8(c)에서처럼 셀의 sizing이 원만하게 이루어짐을 볼 수 있다.

공정해석 결과 계산된 두께 분포를 Fig. 9 에 나타내었다. 공정이 진행될 수록 중심부의 두께는 얇아지고, 외곽의 플랜지부의 두께는 두꺼워지다가 sizing후에 약간 감소됨을 알 수 있다. 제 4 공정 후의 판재의 계산된 두께는 기존모델의 공정해석결과와 비슷한 양상을 보이고 있으나, 중심부근의 두께가 기존공정의 경우보다 약 0.05mm 정도 더 얇아져 있다. 이는 개선공정에 사용된 재료가 기존공정의 것과 달리 소재의 변형경화지수가 다소 작음에 기인한다. 반면에 블랭크의 직경이 작으므로 제 2 공정 이후에는 플랜지부의 두께의 증가가 기존공정의 경우보다 큰 편이다. 제 4 공정이 종료된 후에는 플랜지부의 두께가 최대 1.1mm정도로 두꺼워지고, 제 5 공정이후에는 최대 1.15mm까지 증가한다.

4.3 공구에 걸리는 하중

Fig. 10 에 각 공정에서 공구에 걸리는 하중을 기존공정과 개선공정에 대하여 도시하였다. 그림에서 행정은 다이면과 펀치밑면의 높이차를 나타낸 것으로 행정이 (-)이면 펀치밑면이 다이면보다 위에 있음을 뜻한다. 제 1 공정에서는 블랭크 지지력이 640 kgf 로 일정하게 유지되었고, 펀치가 상승함에 따라서 펀치에 걸리는 하중은 증가하여 공정의 끝 무렵에는 기존공정의 경우 약 5,500kgf, 개선공정의 경우 약 4,500 kgf 에 달하였다. 이는 개선공정에 사용된 블랭크의 치수가 기존공정의 경우보다 작음에 기인한다.

제 2 공정에서는 펀치가 다이면 아래로 약 5.0 mm 에 이를 때까지는 하중의 증가가 완만하다가, 이후부터 급격히 증가하여, 개선공정의 경우, 최대펀치하중은 약 4,500 kgf, 최대다이하중은 약 7,000 kgf 에 이르고 있다. 이는 기존공정에 비해 각각 1,300 kgf 및 1,500kgf정도 감소된 것임을 알 수 있다. 펀치가 다이면보다 17.5 mm 아래에 도달한 때부터는 블랭크 홀더의 지지 스프링이 완전히 압축되고 직접 램에 의하여 하강되므로 블랭크 지지력이 급격히 증가함을 볼 수 있다.

제 3 공정의 초기 단계에서는 펀치에 별 하중이 걸리지 않다가, 펀치가 다이면보다 아래에 도달한 후부터는 하중이 서서히 증가하기 시작하여, 개선공정의 경우, 최대 3,200 kgf 의 하중을 받는다. 반면에 블랭크 홀더는 지지스프링이 최대로 압축된 상태에서 컵의 지름을 줄이는 작업이 진행되며, 펀치행정 5.0 mm - 12.0 mm 의 구간에서는 컵의 모서리 부분이 만들어지므로 지지력이 일정하게 유지되지만, 이후의 행정에서는 플랜지부를 가압하므로 펀치행정 17.5 mm 이후부터 지지력이 급격히 증가한다. 제 3 공정에서는 개선공정이 기존공정에 비해 하중의 감소효과가 작은데, 그 주된 이유는 재드로잉동안 주로 컵부분만 가공되므로 플랜지부에는 큰 변형이 없기 때문이다.

제 4 공정에서는 1,2,3 공정에서보다 훨씬 큰 하중이 각 공구에 작용하며, 펀치와 본체 다이가 조립된 램에는 개선공정의 경우, 약 15,000 kgf (기존공정의 경우 22,000kgf), 다이면에는 약 12,000 kgf (기존공정의 경우 18,000 kgf)의 하중이 작용하여 하중의 감소량이 6-7,000kgf에 달하여, 펀치에서는 32%, 다이에서는 33%의 하중감소효과를 볼 수 있다.

5 결론

Front shell의 경량화를 위하여 기존모델과 개선모델에 대하여 유한요소해석을 네 공정 또는 다섯 공정에 대하여 연속으로 해석을 수행하였다. 그 결과, 기존공정에 대하여 소재의 변형과정, 공구하중을 잘 이해할 수 있었고, 계산결과를 검증하기 위하여 실험으로 측정한 두께변형률분포를 서로 비교한 결과, 양호한 일치를 얻었으므로 적용한 유한요소해석방법이 타당함을 입증하였다. 구조해석을 통하여 새로 설계된 개선모델에 대하여는 기존공정의 경우보다 치수가 작은 블랭크를 사용하고, 제 4 공정과 제 5 공정에서의 공구형상을 달리하여, 공정해석을 수행하였다. 그 결과 적절한 블랭크 치수와 공구형상(펀치와 다이사이의 간극)을 검토할 수 있었다.

기존모델의 공정해석에서 얻은 자료와 구조해석을 통하여 새로이 설계된 개선모델의 형상을 가공하기 위한 공정해석을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

첫째, 블랭크의 직경은 298.0mm가 적절하고, 제 5 공정의 sizing에서 펀치와 다이 사이의 간극은 1.05mm가 적절하다.

둘째, 개선된 공정에서는 작은 직경의 블랭크를 사용한 관계로 공구에 걸리는 하중이 전반적으로 감소하였고, 특히, 큰 하중이 필요한 4공정의 경우에는 30%이상 감소하였다. 또한, 공구하중이 감소하는 것으로 보아, 블랭크 홀더의 지지스프링과 쿠션압력은 다소 하향조정되어야 할 것이다. 세째, front shell 의 제조 공정에 적용된 역드로잉이나 재드로잉 과정은 컵 벽면의 두께유지에 필수적인 공정이므로 개선모델의 경우에도 생략할 수 없다.

네째, 해석으로 얻어진 소재의 변형과정은 공정설계에 유용한 자료를 주며, 개선공정을 설계하는 경우에 각 공구의 치수 및 지지력의 결정 등에 도움을 줄 수 있다. 공정해석으로 예측된 두께분포는 구조해석의 입력자료로 활용되어 보다 현실적인 응력 및 변형률의 계산이 가능할 것이다.

참고문헌

1. 김동원, 전병희, 김형종, 김낙수, 김형섭, 민동균, 1993, "유한요소법을 이용한 승용차용 BRAKE MASTER VAC.의 설계", 위탁과제 최종연구보고서, 서울대학교 정밀기계설계공동연구소, pp. 61-169.
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. Sci., Vol. 28, No. 28, pp.825-840.
4. 김동원, 김형종, 1992, "강소성유한요소법을 이용한 평면이방성 재료의 디프드로잉 해석", 대한기계학회 논문집, 제16권 2호, pp. 248-258.
5. Teodosiu, C., Daniel, D., Cao, H.-L. and Duval J.-L., 1993, "Modelling and simulation of the can making process by using solid finite elements," NUMISHEET '93(Edited by A. Makinouchi et al.), pp.125-135.
6. 심재진, 전병희, 김형종, 김낙수, 1993, "다단계 디프드로잉의 공정해석에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제17권, 제12호, pp. 2936-2948.
7. Kobayashi, S., Oh, S.I. and Altan, T., 1989, "Metal Forming and the Finite Element Method", Oxford University Press.
8. Hughes, Thomas J.R., 1987, "The Finite Element Method: Linear static and dynamic finite element analysis", Prentice-Hall, pp.242 - 251.
9. Hill, R., 1950, "The Mathematical Theory of Plasticity", Claren Press, Oxford, pp.317-321.

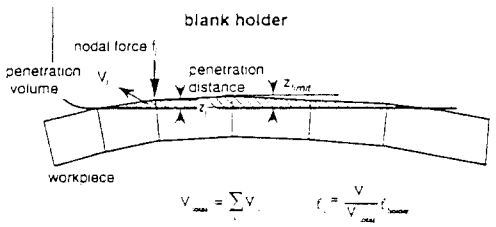


Fig. 1 Model for distributing the blank holding forces.

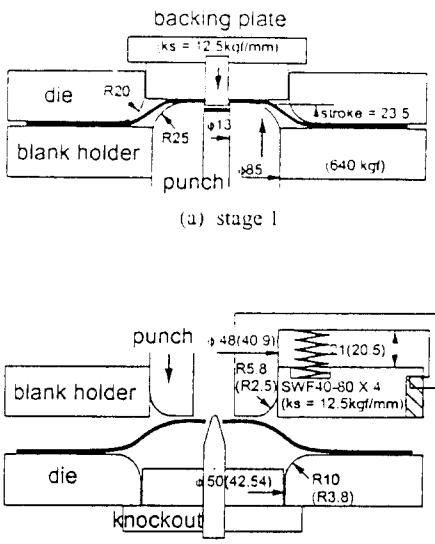


Fig. 2 Geometry and blank holding conditions of the tooling for the multi-stage deep drawing.

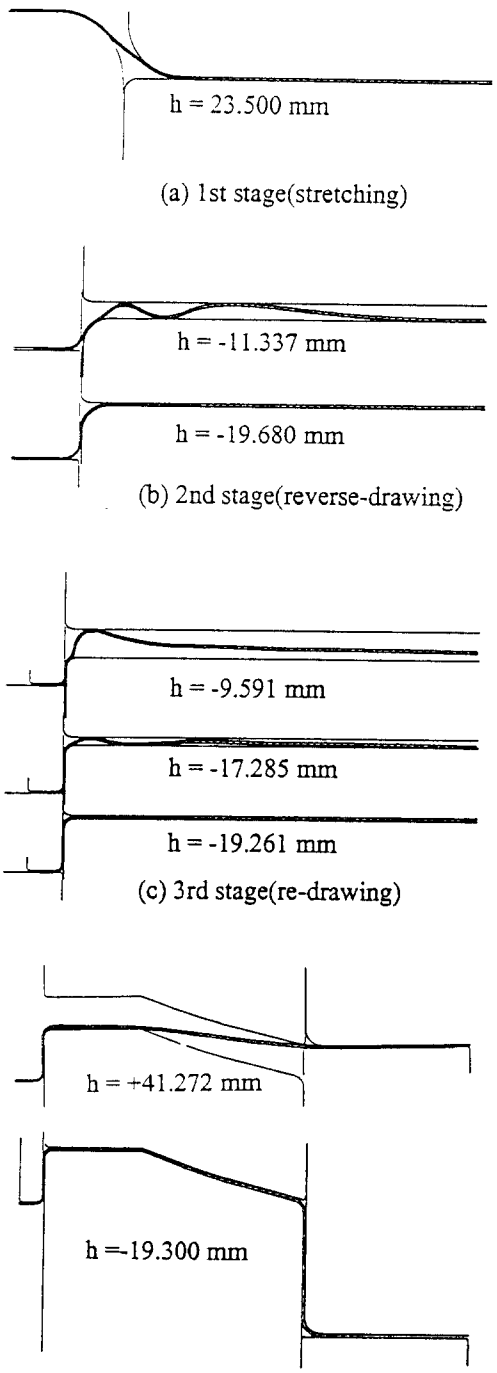


Fig. 3 Deformation of the blank during the current processes (h : distance from the die surface to the bottom of the punch)

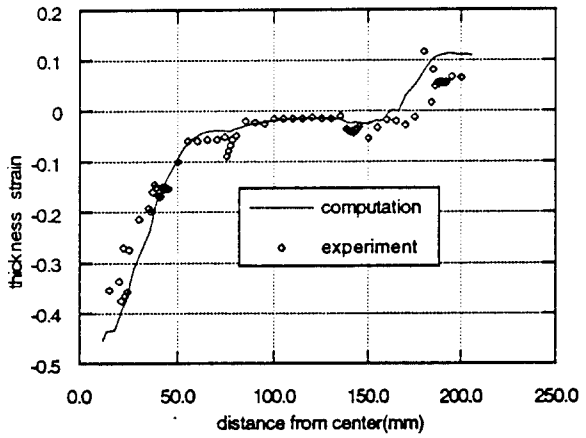
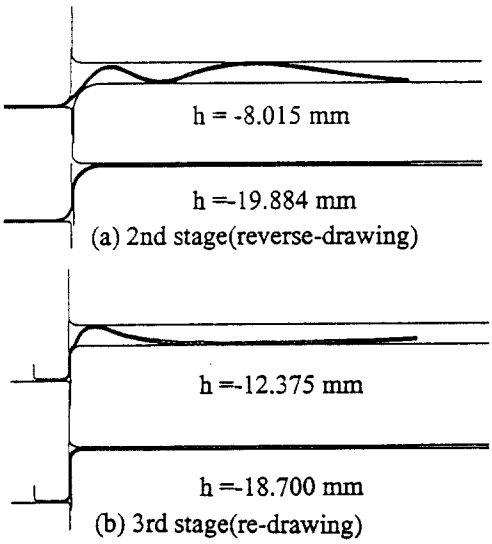
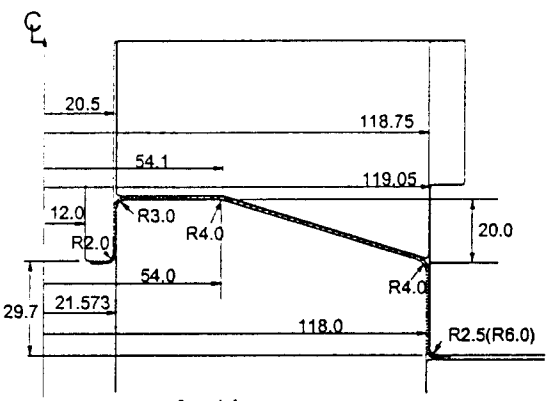
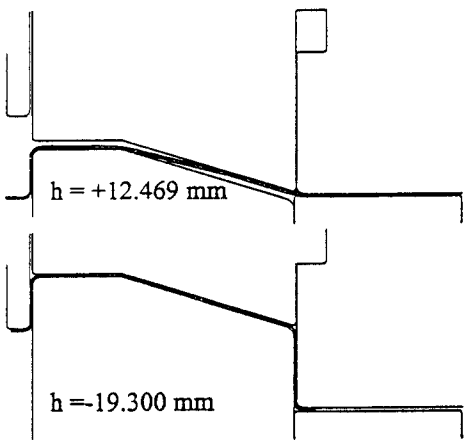


Fig. 4 The thickness strains after 4th stage(main-body drawing).



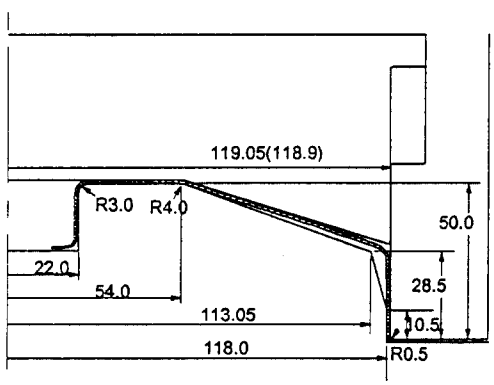


(a) for 4th stage



(c) 4th stage(main-body drawing)

Fig. 6 Deformation of the blank during the modified processes.



(b) for 5th stage

Fig. 5 Geometry of the tooling for the modified processes

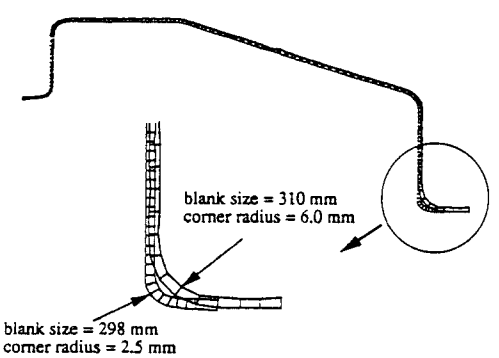
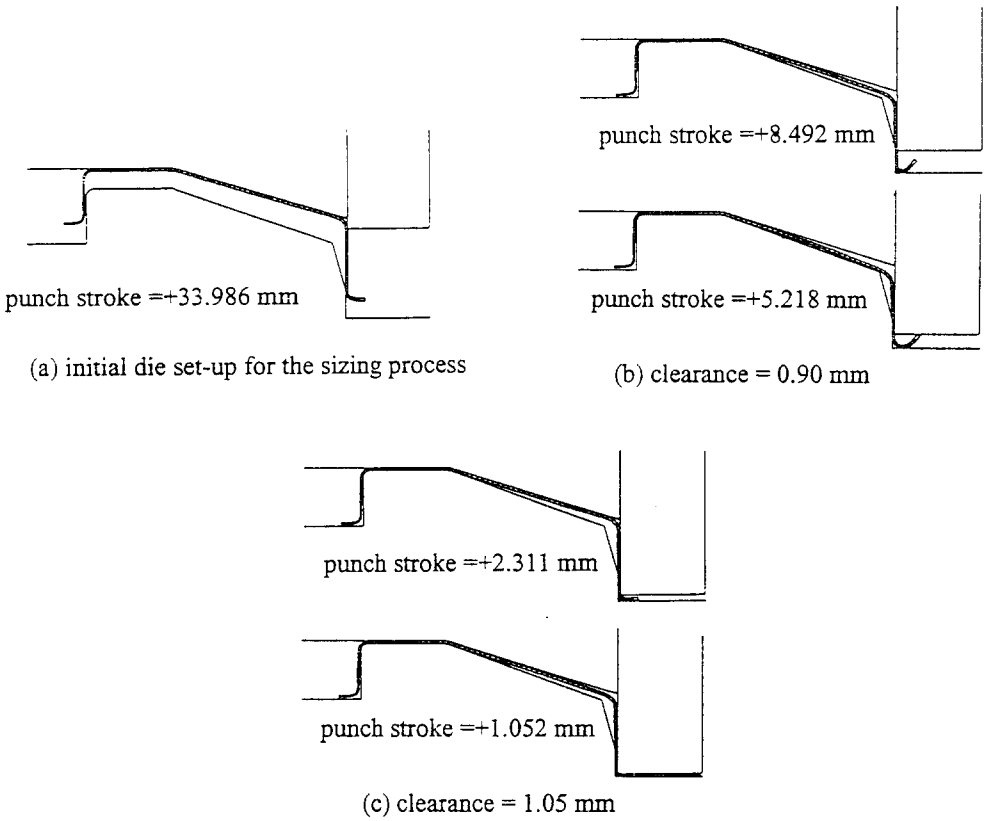


Fig. 7 Final drawn shell with different blank sizes and corner radii.



(a) initial die set-up for the sizing process

(b) clearance = 0.90 mm

(c) clearance = 1.05 mm

Fig. 8 Deformation of the blank during the sizing processes.

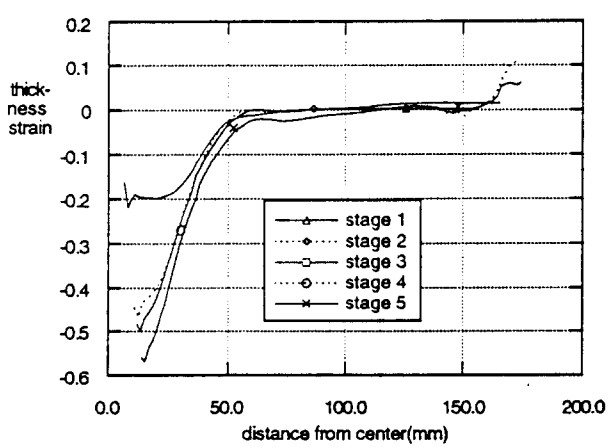
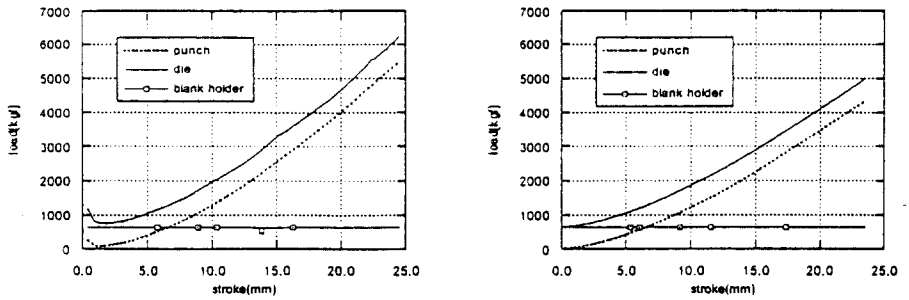
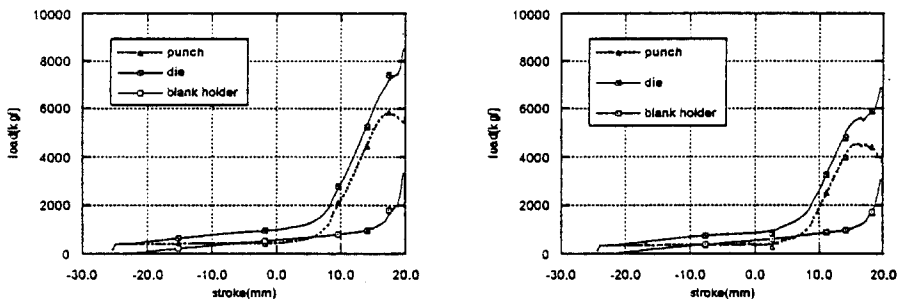


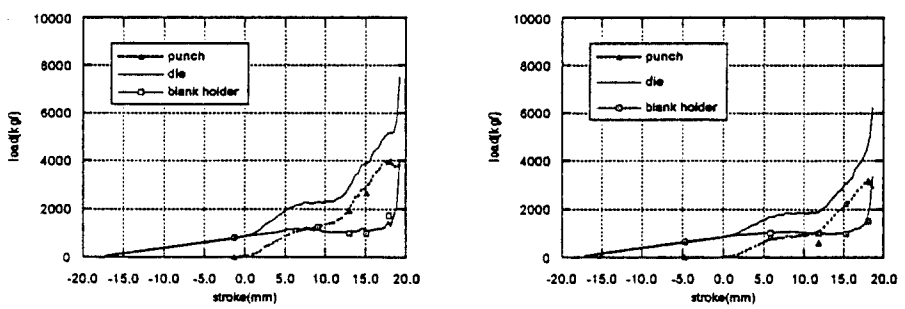
Fig. 9 Predicted variations of the thickness strains at each stage during the modified processes.



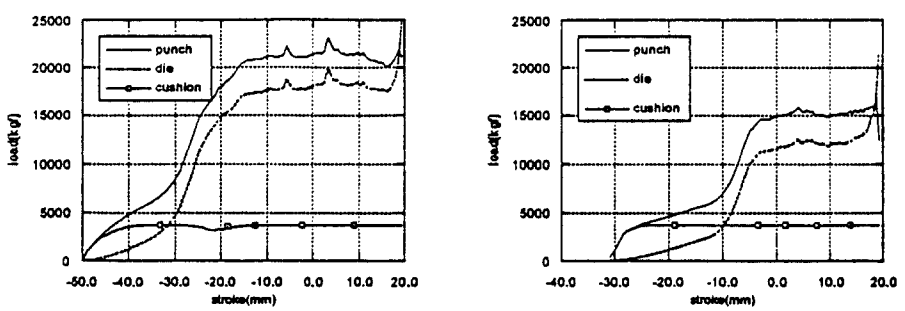
(a) stage 1



(b) stage 2



(c) stage 3



(d) stage 4

Fig. 10 Variations of the forces exerted on the tooling.
(left : current process, right : modified process)