

## 차체판넬 스템핑공정의 동적 외연적해석과 동적해석에 미치는 영향인자 분석

정 동 원\*

(1997년 5월 26일 접수)

### The Dynamic Explicit Analysis of Auto-body Panel Stamping Process and Investigating Parameter Affects of Dynamic Analysis

Dong Won Jung

**Key Words :** Dynamic Explicit Time Integration Scheme(동적 외연적 시간적분법), Auto-body Panel Stamping(차체판넬 성형), Lumping Scheme(집중법), Punch Velocity(펀치 속도), Mass Scaling(질량비례)

#### Abstract

In the present work a finite element formulation using dynamic explicit time integration scheme is used for numerical analysis of auto-body panel stamping processes. The lumping scheme is employed for the diagonal mass matrix and linearizing dynamic formulation. A contact scheme is developed by combining the skew boundary condition and direct trial-and-error method. In this work, for economic analysis the faster punch velocity and the mass scaling method are introduced. To investigate the effects of punch velocity and mass scaling, the various values of punch velocity and the various mass scalings are used for numerical analysis. Computations are carried out for analysis of complicated auto-body panel stamping processes such as forming of an oil pan and a fuel tank.

#### I. 서 론

박판성형공정은 가공중에 소재의 손실이 적고 가공시간이 짧아 낮은 가격으로 대량생산이 가능하며, 무게에 비해 강도가 높고 표면특성이 우수한 장점이 있으므로 자동차산업, 항공산업, 전자부품 산업과 주방용품산업 등에서 중요한 재조공정중의 하나이다. 박판성형은 드로잉, 스트레칭, 굽힘, 아이어닝 및 이들의 조합으로 구성된 복잡한 변형모드를 포함하고 있을 뿐만 아니라, 재료 자체의 성

형성(formability), 이방성(anisotropy) 등의 기계적 성질이나, 두께의 불균일, 공구(펀치, 다이 및 블랭크 훌더 등의 집합체) 각부의 조합, 표면 및 윤활상태, 성형속도 등이 변형에 영향을 미치기 때문에 그 물리적 현상을 정량적으로 파악하기는 매우 어렵다. 최근에 들어서 복잡한 박판부품들이 공정과 금형의 설계와 제작에서 수많은 시행착오를 피하여 공정과정을 적절히 설계하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션해석이 시도되고 있다. 다양한 접촉과 마찰조건들뿐 아니라 기하학적 비선형과 재료학적 비선형을 포함하는 어려운 문제들을 해결하기 위하여 신뢰할 만한 시뮬레이션방법이 요구되어진다. 이러한 방법중 가장 널리 쓰이는 것이 유한요소

\*회원, 제주대학교 기계공학과

해석법인데 박판성형공정의 2차원 해석이 시작되면서 크게 외연적 방법과 내연적 방법으로 나누어졌다.<sup>(1~7)</sup> 내연적 방법은 정적인 문제에 적합하여 정확도 높은 해를 얻을 수 있으나, 복잡한 형상이나 대용량의 문제에서는 수렴성과 계산시간이 문제가 된다.<sup>(8~10)</sup> 그러나 외연적 방법에서는 해의 안정성이 문제가 되어 작은 시간간격을 사용함으로 간단한 형상이나 2차원에서는 효율적이지 못하나 복잡한 형상이나 3차원 대용량의 문제에서는 더욱 효율적이다.<sup>(11)</sup> 최근 수년동안 내연적 방법의 발전에 의해 수많은 문제들을 해석함에 따라 계산시간 및 수렴성의 문제가 대두되었다. 이런 문제점들을 해결하고 보다 넓은 해석영역을 가지기 위해 동적해석인 외연적 방법의 적용이 관심의 대상이 되고 있다. 동적해석에서는 보다 경제적인 해석을 위하여 해의 정확도에 큰영향을 미치지 않는 범위내에서 실제보다 훨씬 빠른 편차속도와 Mass Scaling 방법을 사용하고 있다. 본 연구에서는 편차속도와 Mass Scaling의 두 인자가 동적해석에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

## 2. 이론 해석

### 2.1 외연적 유한요소(Explicit FEM) 수식화

비선형 유한요소 운동방정식은 평형방정식의 약형으로 표현되는 가상일의 원리로부터 얻어진다. 성형가공중에 발생하는 내부응력, 접촉력, 관성력, 감쇄력, 외부힘과 경계조건을 모두 포함하는 평형방정식의 약형은 다음과 같이 표현된다.

$$\int_{v_o} S \delta E dv + \int_{v_o} \rho_o \ddot{u} \delta u dv - \int_{v_o} \rho_o b \delta u dv - \int_s F_0 \delta u ds + \sum_{i=1}^m \int_{s_i} (P_c^h \delta g_n^i + \tau_c^i \delta g_f^i) ds = 0 \quad (1)$$

위식 좌변은 순서에 따라 내부일, 관성력에 의한 일, 중력에 의한 일, 응력경계조건 및 접촉과 마찰에 의한 일을 나타낸다. 위식을 유한요소화할 경우 내부일 항에 요소의 종류에 따른 재료 거동 모델과 운동학적 모델이 포함된다. 박막(membrane) 모델, 재료거동 모델, 유한요소 형상함수와 강체요소의 동역학을 가상일의 원리에 도입하면 비선형 유한요소 운동방정식을 얻을 수 있다. 비선형 유한요소방정식은 시간  $n$  단계에서 다음과 같은 행렬식으로 쓸 수 있다.

$$[M]\{\ddot{u}_n\} + [C]\{\dot{u}_n\} + \{P_n\} - \{F_n\} + \{R_{cn}\} = 0 \quad (2)$$

위의 식으로부터 시간증분  $n+1$ 에서의 해를 얻기 위해 다음과 같은 중간차분법을 사용한다.

$$\begin{aligned} \ddot{u}_n &= \frac{\dot{u}_{n+1/2} - \dot{u}_{n-1/2}}{\Delta t} = \frac{u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}}{2\Delta t^2} \\ \dot{u}_{n+1/2} &= \frac{u_{n+1} - u_n}{\Delta t} \\ \text{또는 } \dot{u}_n &= \frac{u_{n+1} - u_{n-1}}{2\Delta t} \end{aligned} \quad (3)$$

위의 식을 식 (2)에 대입하고 정리하면 간단한 계산에 의해 계속적인 해를 얻을 수 있는 형태가 된다.

$$\begin{aligned} \left( \frac{M}{\Delta t^2} + \frac{C}{2\Delta t} \right) u_{n+1} &= F_n - P_n - R_{cn} + \frac{M}{\Delta t^2} u_n \\ - \left( \frac{M}{\Delta t^2} - \frac{C}{2\Delta t} \right) u_{n-1} \end{aligned} \quad (4)$$

중간차분법은  $\Delta t$ 의 크기에 따라 선택적인 수렴성을 가지며, 정확성과 수렴성을  $\Delta t$ 의 제곱에 비례한다.<sup>(12)</sup> 식 (4)에 의해 시간증분  $n+1$ 에서의 절점변위가 구해지면 변형영역을 수정(update)하고 그에 따라 수렴성이 보장되는 새로운 시간증분의 크기를 결정해야 한다. 전체적인 시간증분의 크기는 모든 요소들에 대해 각각의 시간증분의 크기를 계산한 후 다음과 같은 식에 의해 결정한다.

$$\Delta t_{n+1} = \alpha \min \{ \Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_N \} \quad (5)$$

위식에서  $N$ 은 총 요소수이며,  $\Delta t_i$ 는  $i$ 요소에 대한 시간증분의 크기를 나타낸다.  $\alpha$ 는 안정성을 위한 상수로 통상 0.9 이하의 값을 선택한다. 시간증분 크기는 다음과 같은 식으로 결정한다.

$$\Delta t_c = L_s / C \quad (6)$$

위식에서  $L_s$ 는 요소의 면적을 최대변의 길이로 나눈 특성길이이며,  $C$ 는 소재내에서의 음속으로 아래와 같다.

$$C = \sqrt{\frac{E_t}{\rho}} \quad (7)$$

여기서,  $E_t$ 은 접선계수(tangent modulus)이고,  $\rho$ 은 재료의 밀도이다.

재료의 음속은 재료밀도의 평방근(square root)에 반비례하여 밀도를 100배 높이면  $\Delta t_c$ 가 10배 증가되어 전체 해석시간이 10배 줄어든다. 동적외연적 해석은 원래 빠른 속도의 충돌문제를 해석하기 위하여 개발되었으나 접촉알고리즘이 안정되고 아주 큰 문제도 해석 가능하므로 스텝핑공정에도 적용

하고 있다. 실제 스템핑공정의 편치속도는 1 m/sec 정도인데 재료의 음속에 비하여 훨씬 느리다. 강의 음속은 대략 5000 m/sec 정도이므로 관성효과가 해에 영향을 크게 주지 않는 범위내에서 실제보다 편치속도를 높여 해석하는데 경제적 해석을 위하여 해의 정확도에 큰 영향이 없는 가능한 최대 편치속도로 해석한다.

## 2.2 집중집량법

외연적 시간적분법에서 질량행렬을 집중(lumping) 시켜 사용하면 해의 정확도가 증가하고 해석시간을 줄일 수 있다.

$$[M][a]=[F], [a]=[M]^{-1}[F] \quad (8)$$

윗식에서  $[M]$ 을 집중시켜 대각선 행렬로 만들면  $[M]^{-1}$ 을 구할 필요가 없이 바로 선형식  $m_i a_i = f_i$ 을 풀면 된다. 역행렬을 구하는데 많은 시간이 소요되므로 집중법(lumping scheme)을 사용하여 경제적인 해석을 수행할 수 있다. 또 동적해석에서는 집중질량법(lumping mass scheme)이 연속질량법(consistent mass scheme)보다 해의 정확도가 우수하다.<sup>(12~15)</sup>

본 연구에서 사용한 집중법은 아래와 같다.

$$m_{pq}^e = \begin{cases} a \delta_{ij} \int_{\Omega^e} \rho N_a^2 d\Omega & a=b \\ 0 & a \neq b \end{cases} \quad (9)$$

단, 윗식에서  $a$ 와  $b$ 는 질량행렬의 행과 열로  $a=b$ 일 경우는 대각선 성분  
또, 여기서

$$\alpha = \int_{\Omega^e} \rho d\Omega / \left( \sum_{a=1}^{n_{eg}} \int_{\Omega^e} \rho N_a^2 d\Omega \right)$$

total element / amount of diagonal entries  
of consistent mass

즉, 윗식의  $\alpha$ 는 총 요소질량을 대각선 성분의 질량합으로 나눈 것이다. 이 방법의 아이디어는 집중질량행렬은 연속질량행렬의 대각선 부분에 비례한다는 것이고 항상 양의 값을 갖는 집중질량을 만들 수 있다. 윗식에서 상수  $\alpha$ 는 총 요소질량을 보존하기 위하여 선택되어진다.

## 2.3 동적 외연적해석에 대한 효율적인 접촉 및 마찰처리법

외연적 접촉알고리즘은 안정성 제한에 의한 작은

시간증분때문에 내연적해석에 비해 유리하다.<sup>(11, 13)</sup> 작은 편차행정증분은 접촉처리수행을 매우 간단하고 쉽게 할 수 있는 잊점이 있다. 본 연구에서는 접촉과 마찰처리를 경사경계조건(skew boundary condition)과 직접적 시행착오법(direct trial-and-error method)<sup>(11, 12)</sup>을 결합한 형태로 사용하였다. 먼저 접촉을 고려하지 않고 가속도, 속도, 변위를 계산하였다. 다음은 Fig. 1처럼 금형을 파먹은 거리  $h$ 와 접촉된 접들의 금형과 박판의 수직방향을 계산한다. 위의 계산결과로부터 경사경계조건이 적용되어지고 접점의 금형침투를 방지하기 위한 저항력이 아래와 같이 계산되어진다.

$$N = mhn / \Delta t^2 \quad (10)$$

여기서,  $m$ 은 접점의 접종질량이고,  $n$ 은 수직벡터이다. 만약 금형의 운동이 접촉 자체에 의해 영향을 받지 않는다면 가속도를 아래와 같이 수정할 수 있다.

$$a = a_{pred} + a_{corr} = a_{pred} + N/m \quad (11)$$

속도와 변위의 수정은 아래와 같이 계산되어진

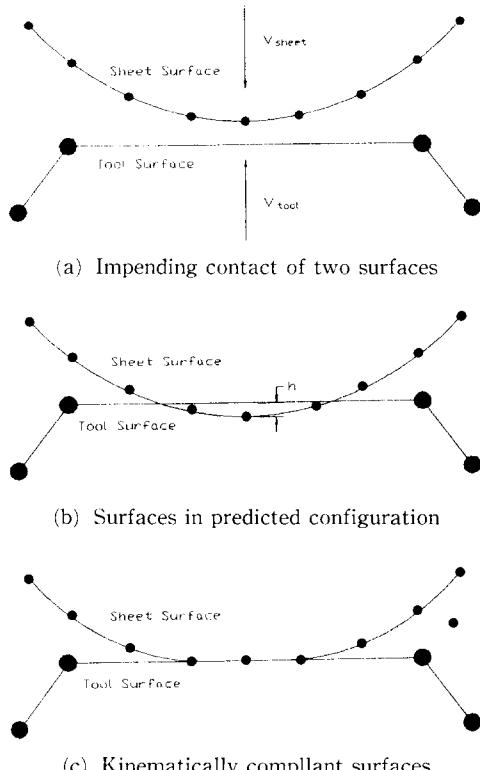


Fig. 1 Schematic description for the contact scheme.

다.

$$V = V_{pred} + a_{corr}\Delta t, \quad u = u_{pred} + V_{corr}\Delta t \quad (12)$$

마찰에 대해서는 처음에 증분이 마찰을 고려하지 않고 계산되어지고 경사경계조건이 Fig. 2와 같이 적용되어진다. 경사경계조건 상태에서는 미끄러짐 증분  $r_c$ 가 측정되어지는 표면접선방향  $t_c$ 를 정의할 필요가 없다. 미끄러짐을 방지하기 위한 저항력  $T_c$ 을 아래와 같은 방법으로 계산할 수가 있다.

$$T_c = -mr_c/\Delta t^2 \quad (13)$$

여기서,  $r_c$ 은 미끄러짐증분이다.

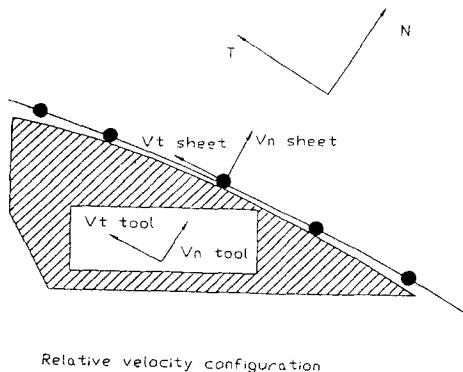


Fig. 2 Schematic description for friction and stick/slip check.

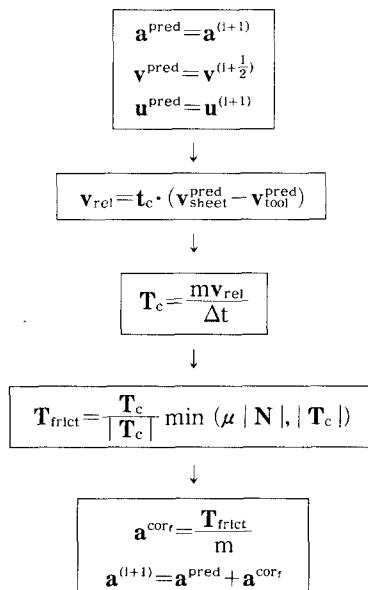


Fig. 3 Flow chart for friction force calculation and stick/slip check.

따라서 마찰력을 아래와 같이 계산되어진다.

$$T_{frict} = \frac{T_c}{|\mathbf{T}_c|} \min(|T_{cr}|, |T_c|) \quad (14)$$

저항력  $|T_c|$ 가 임계력  $|T_{cr}|$ 과 비교하여 저항력이 임계력보다 작으면 접착조건(sticking condition)이 적용되어지고 저항력이 임계력보다 크면 미끄러짐조건이 적용되어 마찰력이 쿨롱마찰법칙(Coulomb's friction law)을 따른다고 가정한다. Fig. 3에 마찰력계산과 접착/미끄러짐 체크과정이 요약되어 있다.

### 3. 계산결과 및 토론

#### 3.1 오일팬 딥드로잉 공정해석

오일팬의 딥드로잉<sup>(7, 11)</sup>은 박판성형 과정중에 복잡한 3차원 변형을 포함한다. 복잡한 기하학적 형

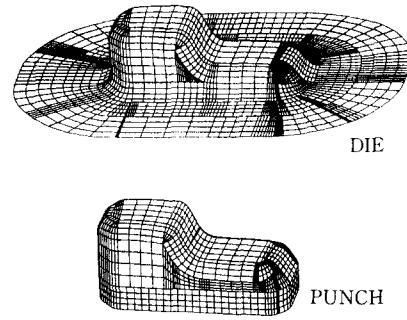


Fig. 4 Schematic view of the parametric tool surfaces for oil pan deep drawing.

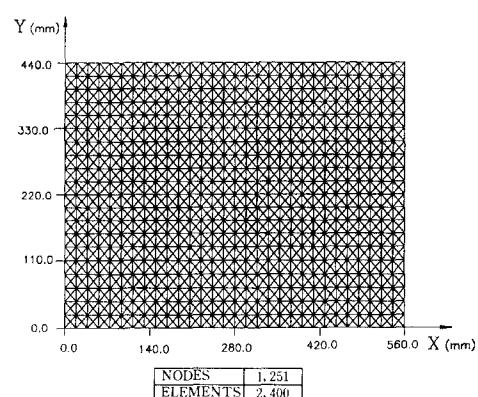


Fig. 5 Finite element mesh used in the analysis of deep drawing of an oil pan.

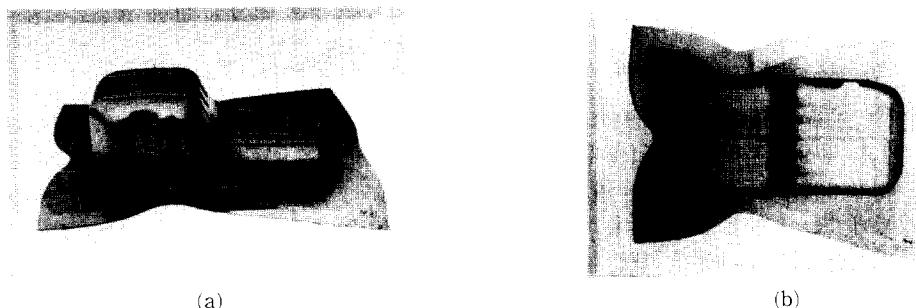
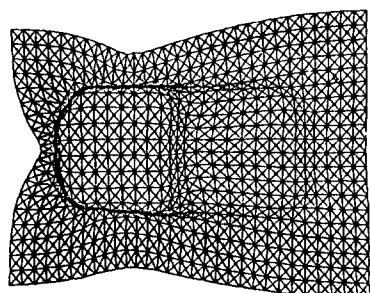
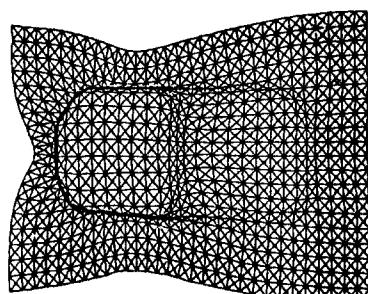


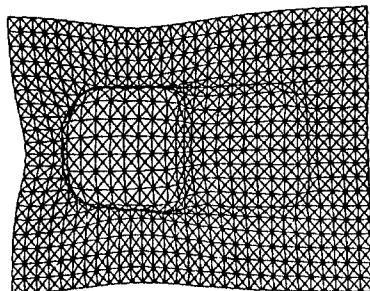
Fig. 6 Photographs of experimental specimens by oil pan deep drawing.



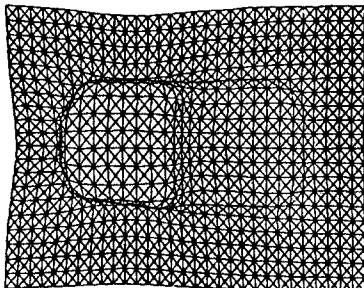
(a) Implicit analysis



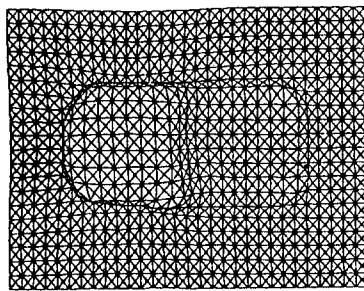
(b) Punch velocity = 15 m/sec



(c) Punch velocity = 25 m/sec



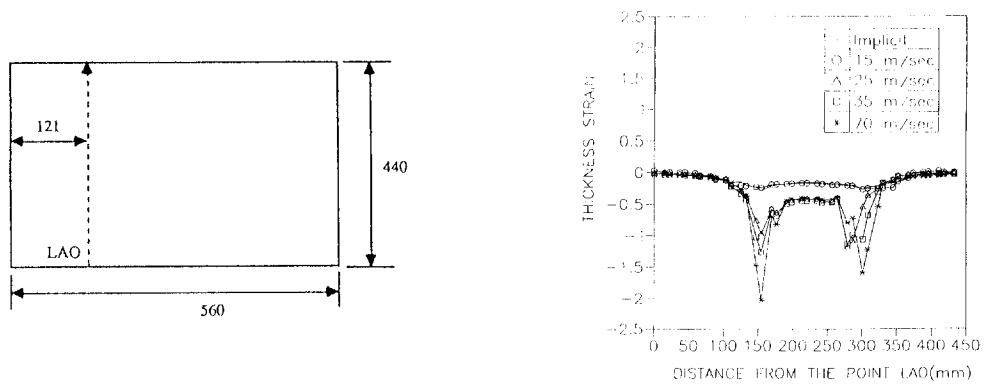
(d) Punch velocity = 35 m/sec



(e) Punch velocity = 70 m/sec

Fig. 7 Comparison of edge contour in oil pan deep drawing with various punch velocity.

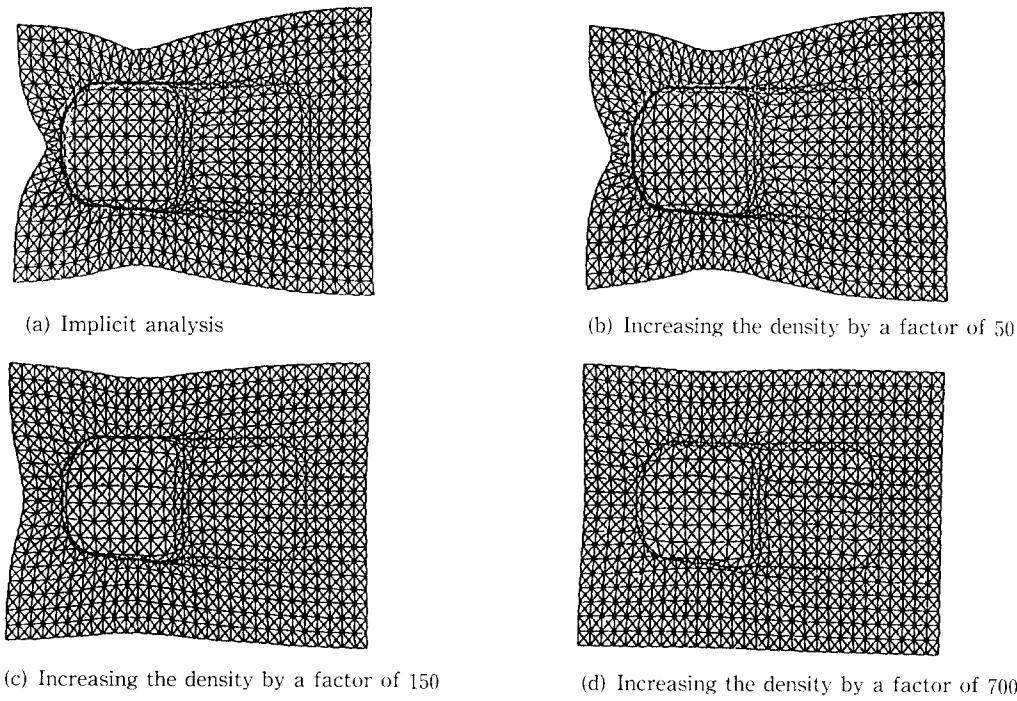
상 때문에 재료의 미끄러짐과 재분배가 어느 영역에서 다른 영역으로 발생한다. 또 오일팬은 소재의 크기에 비해 도로 임 깊이가 깊은 부품으로 성형상의 어려움과 성형한 후 플레이지부분의 평탄도가 잘 유지되어야 하는 부품이다. 해석에 사용된 금형은 CATIA CAD/CAM 시스템으로부터 묘사되었고, 성형해석을 위하여 FERGUSON의 3차 곡면으로 변환하여 사용하였다. Fig. 4는 편치와 다이를 묘사하기 위하여 135 Composite surfaces(271 patches)의 배개면수 배치가 사용되었음을 보여주고 있다. Fig. 5와 같이 블랭크의 초기 직사각형 형상은 560



(a) The base line on initial sheet blank for strain distribution measurement

(b) Comparison of thickness strain distribution on the line

Fig. 8 Thickness strain distribution for the deep drawing of an oil pan with various punch velocity.



(c) Increasing the density by a factor of 150

(d) Increasing the density by a factor of 700

Fig. 9 Comparison of edge contour in oil pan deep drawing with various mass scaling.

num  $\times$  440 mm이고, 2400개의 삼각요소가 사용되었다. 해석에 사용된 재료 및 공정변수는 아래와 같다.

초기 소재두께 : 1.2 mm

응력-변형률관계 :  $\sigma = 451.8(\varepsilon + 0.008)^{0.306}$  MPa

수직 이방성계수 :  $r = 1.984$

Coulomb 마찰계수 :  $\mu = 0.1$

블랭크 훌덩력 : 860 kN

Fig. 6에서는 실제품의 형상을 보여주고 있는데 실제 형상에는 보강을 위한 엠보싱(embossing)이 포함되어 있으나 본 해석에서는 원활한 해석을 위하여 무시하고 금형을 모델링하였다. 이런 간략화 때문에 해석결과를 실험과 비교하는 것이 무리가 있다고 생각되어 신뢰성이 충분히 입증된 내연적 해석결과와 비교하였다. 오일팬은 대칭성이 전혀 없는 제품이므로 전 영역을 해석하였으며, 현재 해

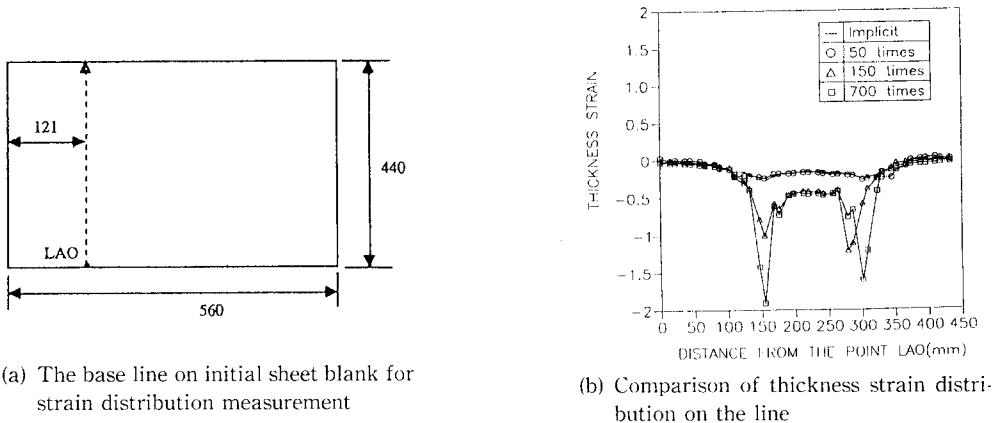


Fig. 10 Thickness strain distribution for the deep drawing of an oil pan with various mass scaling.



Fig. 11 Photographs of experimental specimens by a fuel tank deep drawing.

석에서 블랭크 훌딩력은 플랜지의 외곽끝에 위치한 절점들에 분포시켰다.

동적해석에서 편치속도의 영향을 파악하기 위하여 여러가지 편치속도, 즉 15 m/sec, 25 m/sec, 35 m/sec와 70 m/sec의 편치속도를 이용하여 수치해석을 행하였다. Fig. 7은 여러가지 편치속도일 때 변형형상을 보여주고 있다. 편치속도가 증가됨에 따라 관성효과가 커져서 힘이 블랭크의 외곽에 위치한 절점들에까지 충분히 전달될 수 없어서 플랜지 변형형상이 덜 빨려 들어감을 보여주고 있다. 따라서 Fig. 8에 나타내고 있는 것처럼 편치속도가 증가함에 따라 임의의 단면에서의 두께변형률 분포가 타당한 변형률 분포로부터 많이 벗어남을 알수 있다. 이 예제에서 15 m/sec의 편치속도에 대한 해석결과가 내연적해석의 결과와 거의 같아 이 편치속도가 해의 정확도와 효율성을 동시에 고려한 적절한 편치속도임을 짐작케 한다. 동적해석에서는 경제적인 해석을 위하여 Mass Scaling 방법을 이용하고 있다. Mass Scaling의 영향을 파악하기 위

하여 밀도를 50, 150, 700배 각각 증가시켜 해석을 행하였다. 이때 Fig. 9은 각기 다른 밀도증분에 따른 변형형상을 보여주고, Fig. 10은 임의 단면에서 두께변형률 분포를 보여주고 있다. 편치속도에서와 같이 밀도를 지나치게 증가시키면 타당한 해석결과에서 벗어남을 알수 있다. 이 현상은 밀도가 지나치게 커짐에 따른 지나친 관성에너지의 증가로 설명될 수 있다.

### 3.2 연료탱크의 딥드로잉 공정해석

Fig. 11은 연료탱크(fuel tank)를 성형실험한 최종형상을 보여주고 있는데 기하학적 비선형성이 매우 높아 성형하기 어렵고 또한 유한요소 성형해석하기 곤란한 자동차 차체파넬 부품중의 하나이다. 본 해석에서는 엠보싱을 포함한 실제 금형형상으로 성형 해석하였으며 지금까지 내연적해석으로는 수렴이 되지 않고 있다. 블랭크의 초기 직사각형상은 1020 mm × 700 mm이고, 성형해석에서는 2400 개의 삼각요소를 사용하였다.

실험 및 해석에 사용된 재료 및 공정변수는 아래와 같다.

초기 소재두께 : 0.8 mm

응력-변형도관계 :  $\bar{\sigma} = 526.0(\bar{\varepsilon})^{0.239}$  MPa

수직 이방성계수 :  $r=1.79$

Coulomb 마찰계수 :  $\mu=0.1$

블랭크 훌딩력 : 900 kN

실험에서는 싱글프레스를 사용하여 1 m/sec 정도의 펀치속도로 성형하였다. Fig. 12는 해석에 사용된 금형면인데 총 31,800개의 비매개변수 패치로 묘사되었으며, 펀치의 평평한 윗부분에 엠보싱이 포함되어 있고 비스듬이 경사지어 있다.

이 예제의 동적 외연적해석에서 펀치속도의 영향을 파악하기 위하여 여러가지 펀치속도, 즉 5 m/sec, 10 m/sec, 20 m/sec, 30 m/sec의 펀치속도를 사용하여 수치해석을 행하였다. Fig. 13에서 여러 가지 펀치속도에서의 변형형상을 보여주고 있는데 펀치속도가 증가함에 따라 관성효과가 커져서 플랜지의 변형형상이 덜 뻗려들어감을 보여주고 있다. Fig. 14에서는 임의의 단면에서 두께변형률 분포가 펀치속도가 커짐에 따라 실험결과로부터 멀어짐을 보여주고 있다. 이 예제에서 10 m/sec의 펀치속도에 대한 해석결과가 5 m/sec의 결과와 거의 비슷

하고 실험결과와 잘 일치하므로 이 펀치속도가 해의 정확도와 효율성을 잘 결충한 적절한 속도임을 알 수 있다. 동적해석에서 Mass Scaling의 효과를 파악하기 위하여 밀도를 20, 50, 100, 150배 증가하여 각각 해석을 수행하였다. 이때 Fig. 15에서는

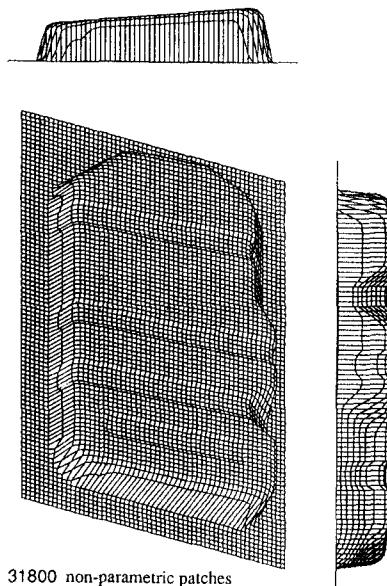
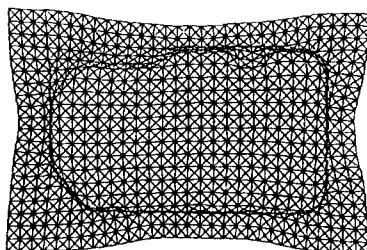
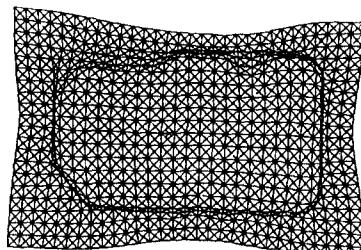


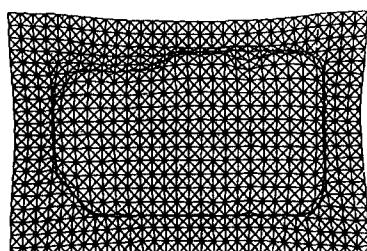
Fig. 12 Schematic view of the non-parametric tool surfaces for fuel tank deep drawing.



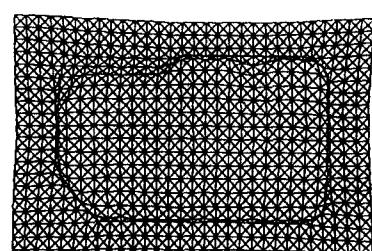
(a) Punch velocity = 5 m/sec



(b) Punch velocity = 10 m/sec

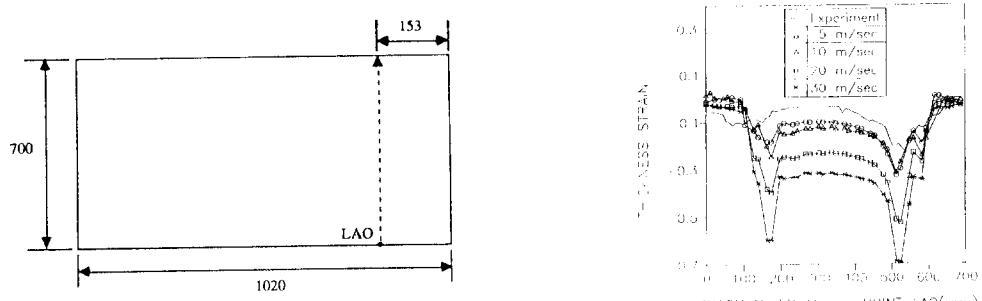


(c) Punch velocity = 20 m/sec

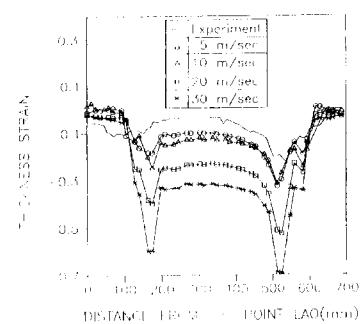


(d) Punch velocity = 30 m/sec

Fig. 13 Comparison of edge contour in fuel tank deep drawing with various punch velocity.

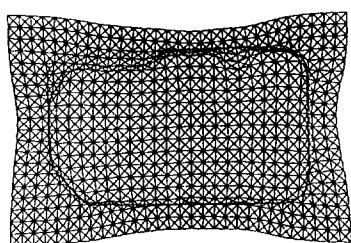


(a) The base line on initial sheet blank for strain distribution measurement

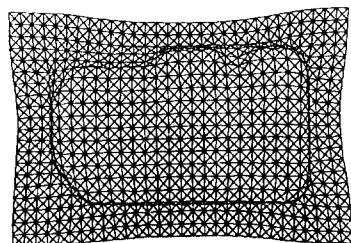


(b) Comparison of thickness strain distribution on the line

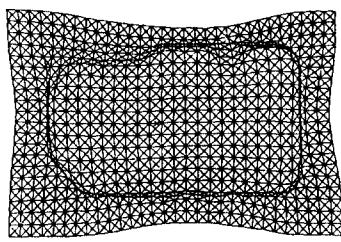
Fig. 14 Thickness strain distribution for the deep drawing of a fuel tank with various punch velocity.



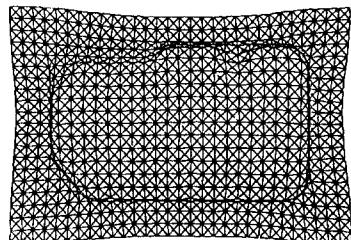
(a) Implicit analysis



(c) Increasing the density by a factor of 150

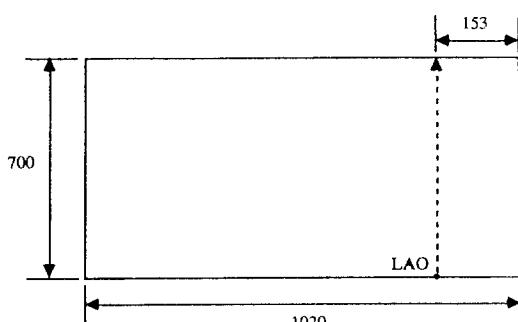


(b) Increasing the density by a factor of 50

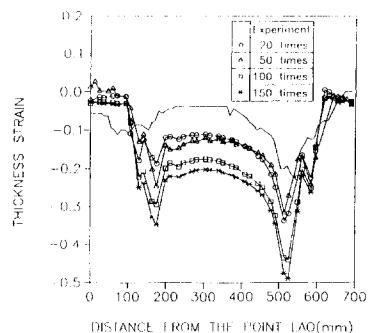


(d) Increasing the density by a factor of 700

Fig. 15 Comparison of edge contour in fuel tank deep drawing with various mass scaling.



(a) The base line on initial sheet blank for strain distribution measurement



(b) Comparison of thickness strain distribution on the line

Fig. 16 Thickness strain distribution for the deep drawing of a fuel tank with various mass scaling.

변형형상들을 각각 보여주고 있고 Fig. 16에서는 임의 단면에서 두께변형률 분포를 나타내고 있다. 편치속도와 마찬가지로 과도한 밀도증가로 타당한 해에서 벗어나게 되는데, 이 현상은 마찬가지로 밀도증가에 따른 과도한 관성에너지 증가로 설명될 수 있다. 50배 밀도를 증가하였을 경우 20배 증가한 경우와 해석결과가 별 차이가 없고 실험결과와도 잘 일치하므로 이 Mass Scaling 값이 해의 정확도와 효율성을 동시에 고려한 가장 적절한 값임을 짐작케 한다. Fig. 14와 Fig. 16에서 적절한 해석결과와 실험과는 여전히 차이를 보이고 있는데 이는 해석에서는 비드를 무시하고 해석하였으며, 놓적해석에서 관성효과를 완전히 제어하지 못하였기 때문인 것으로 짐작된다. 또, 실험에서의 사소한 실수와 측정오차, 해석프로그램의 한계성 등도 원인중의 하나라고 생각된다.

#### 4. 결 론

동적 외연적 유한요소법을 사용하여 차체판넬 성형공정의 해석에 적용하였다. 많은 수의 격자를 가진 복잡한 형상의 해석에는 외연적 방법이 내연적 방법보다 효과적이나 내연적 방법도 우수한 정확성과 신뢰성 때문에 널리 사용되고 있다. 동적 외연적 해석에서는 해석시간을 줄이기 위해 편치속도를 실제 속도보다 훨씬 증가시키는데 이에 반해 해의 신뢰도는 떨어지기 쉽다. 따라서 적절한 편치 속도로 해석시간과 신뢰도에 있어서 타협하여야 하며 동적 해석에서 관성효과를 적절히 제어할 수 있어야 한다. 마찬가지로 동적 외연적해석에서 해석시간을 줄이기 위해 Mass Scaling 방법을 사용하는데 재료의 밀도를 너무 크게 하면 관성에너지가 과도하게 커져서 해의 신뢰도에 나쁜 영향을 주게 된다. 따라서 해의 신뢰도에 영향을 크게 주지 않는 범위내에서 적절히 밀도를 증가시켜 해의 신뢰도와 경제성을 동시에 만족시켜야 한다. 본 연구에서는 동적외연적 해석을 오일팬과 연료탱크의 스템핑공정에 적용시켜 편치속도와 Mass Scaling 방법의 영향을 분석하고 적절한 편치속도와 Mass Scaling 값을 검토하여 보았다.

#### 참고문헌

- (1) Wang, N. M. and Budiansky, B., 1978, "Analysis of Sheet Metal Stamping by a Finite Element Method," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 45, pp. 73~82.

- (2) Key S. W., Krieg R. D. and Bathe K. J., 1978, "On the application of the Finite Element Method to Metal forming Processes," *Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng.*, Vol. 17/18, pp. 597~608.
- (3) Proceedings of the Third International Conference on Numerical Methods in Industrial forming Processes, edited by K. Mattiasson et al., Gothenburg, Sweden, 1986.
- (4) Proceedings of the Third International Conference on Numerical Methods in Industrial forming Processes, edited by E. G. Thompson et al., Fort Collins, Colorado, 1989.
- (5) Proceedings of the 2nd International Conference on the Technology of Plasticity, edited by K. Lange et al, Springer Verlag, Berlin, 1987.
- (6) Proceedings of Euromech Colloquium 233, Modeling of Metal Forming Processes, edited by J. L. Chenot and E. Onate. Kluwer, Dordrecht, the Netherlands, 1988.
- (7) 안동규, 정동원, 양동열, 정완진, 1989, "2차원 박판성형공정 해석을 위한 강소성 외연적 유한요소 수식화," 대한기계학회논문집(A) 제20권, 제1호, pp. 88~99.
- (8) Wood, R. D., Bont, J. and Wargadipurea, A. H. S., 1989, "Simulation of the Superplastic forming of Thin Sheet Components using the Finite Element Method," Proc. 3rd Int. Conf. on Num. Meth. Proc., E. G. Thompson et al., Fort Collins, Colorado.
- (9) Rebelo N., Nagtegaal J. C. and Hibbit H. D., 1989, "Practical Aspects of Modeling Sheet Forming Processes," Proc. 3rd Int. conf. on Num. Meth. in Ind. Forming Proc., E. G. Thompson et al., Fort Collins, Colorado.
- (10) Dalin, J. B. and Onate, E., 1989, "An Automatic Algorithm for Contact Problems: Application to Sheet Metal Forming," Proc. 3rd Int. Conf. on Num. Meth. in Ind. Forming Proc., E. G. Thompson et al., Fort Collins, Colorado.
- (11) 정동원, 양동열, 안동규, 1993, "박판성형공

- 정의 시뮬레이션을 위한 내연적, 외연적 및 내외  
연적 유한요소해석법의 비교연구," 대한기계학회  
추계학술대회 논문집, pp. 572~576.
- (12) *Abaqus / Explicit: User's Examples and Theory manuals*. 1991, Hibbit, Karlsson & Sorenson, Inc..
- (13) Nagtegaal, J. C. and Taylor L. M., 1991, "Comparison of Implicit and Explicit Finite Element Methods for Analysis of the FE-Sim. of 3-D Sheet Metal Forming Processes," in Automotive Ind. Conf., J. Reissner et al, VDI Verlag, Dusseldorf.
- (14) Hinton, E., Rock, T. and Zienkiewicz, O. C., 1976, "A Note on Mass Lumping and Related Processes in the Finite Element Mrthod," *Earthquake Engng. Struct. Dynamics*, Vol. 4, No. 3, pp. 145~149.
- (15) Surana, K. S., 1978, "Lumped Mass Matrices with Non-Zero Inertia for General Shell and Axisymmetric Shell Elements," *Int. J. Num. Meth. Engng.*, Vol. 12, No. 11, pp. 1635~1650.