

## S-Rail 공정에서 성형해석에 관한 연구

정 동 원 · 황 재 신\*

제주대학교 기계에너지생산공학부, \*\*제주대학교 대학원

### A Study of Forming Analysis in S-Rail Stamping Process

Dong-Won Jung and Jae-Sin Hwang\*

*Faculty of Mechanical, Energy and Production Engineering, Cheju National University,*

*Jeju-Do, 690-756 Korea*

*\*Graduate School, Cheju National University, Jeju-Do, 690-756, Korea*

In the present work a finite element formulation using dynamic explicit time integration scheme is used for numerical analysis of S-Rail stamping processes. The lumping scheme is employed for the diagonal mass matrix and linearizing dynamic formulation. Analyzed S-Rail stamping process correction of forming using common use software called Dynaform using dynamic extensive method. The developed algorithm is also capable of calculating the curved black shapes as the initial state of binder wrap condition for large scale parts such as a fender or a rear quarter part. Further, the simulated results for the total S-Rail stamping processes are shown and discussed. Its application is being increased especially in the automotive industrial area for the cost reduction, weight saving, and improvement of strength.

**Key words** : dynamic explicit time integration scheme, S-Rail stamping, binder wrap, dynaform

### 서 론

오늘날에는 단순한 접촉면의 미소 변화가 있는 박판 성형 공정을 수치적으로 정확하게 사전 예측하는 것이 가능해지면서 복잡하고 불규칙적인 곡선형상들과 박판과 다이 사이의 비교적 큰 상대적인 변위 실질적인 산업현장 문제들을 해석하기 위하여 보다 신뢰성 있고 경제적인 해석방법이 요구되고 이런 효율적인 알고리즘을 개발하기 위해선 아직도 많은 노력이 필요하다(정동원 등, 1995).

일반적인 박판 금속성형 과정은 고차원의 비선형 문제로 규정지을 수 있는데, 이것은 대상물의 기하학적 형상과 재질이 비선형일 뿐만 아니라 접촉 현상이 비선형이기 때문이다. 게다가 주름의 형성과 네킹 등

이 전형적인 딥드로잉 과정 중에 나타나 비선형 효과를 더하기도 한다. 이러한 강한 비선형 효과들로 인해서 내연적 방법은 때론 수렴하지 못하는 경우가 일어나지만 외연적 적분방법은 항상 해를 이끌어 낼 수 있다. 박판 성형이 산업부문에서 차지하는 비중은 매우 크며 또한 많은 영향을 미치고 있다. 박판성형공정은 가공 중에 소재의 손실이 적고 가공시간이 짧아 낮은 가격으로 대량생산이 가능하며 무게에 비해 강도가 높고 표면특성이 우수한 장점이 있으므로 자동차산업, 항공산업, 전자부품산업과 주방용품산업 등에서 중요한 제조공정중의 하나이기 때문이다. 박판성형은 드로잉, 스트레칭, 굽힘, 아이어닝 및 이들의 조합으로 구성된 복잡한 변형모드를 포함하고 있을 뿐만 아니라, 재료 자체의 성형성(formability), 이방성(anisotropy)등의 기계적 성질이나, 두께의 불균일, 공

구(편치, 다이 및 블랭크 홀더 등의 집합체) 각부의 조합, 표면 및 윤활상태, 성형속도 등이 변형에 영향을 미치기 때문에 그 물리적 현상을 정량적으로 파악하기는 매우 어렵다. 복잡한 박판부품들이 공정과 금형의 설계와 제작에서 수많은 시행착오를 피하여 공정과정을 적절히 설계하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 해석이 시도되고 있다. 다양한 접촉과 마찰조건들뿐만 아니라 기하학적 비선형과 재료학적 비선형을 포함하는 어려운 문제들을 해결하기 위하여 신뢰할 만한 시뮬레이션 방법이 요구되어진다. 이러한 방법들 중 가장 널리 쓰이는 것이 유한요소 해석법인데 박판 성형공정의 2차원 해석이 시작되면서 크게 외연적 방법과 내연적 방법으로 나누어졌다(정동원 등, 1995).

박판 금속성형과정을 해석함에 있어 외연적 동적 알고리즘은 내연적 정적 알고리즘에 비해서 몇가지 중요한 이점들을 갖고 있다. 첫째, 뉴우튼-랩슨법과 같은 비선형 해석법이 필요 없다. 둘째, 대변형, 미끄러짐, 3차원 접촉 구속들은 외연적 방법에서 처리하는 것이 상대적으로 쉽다. 하지만 이러한 장점도 있는 반면에 정적문제에 동적 방법을 적용함에 따른 해의 정적 불안정을 일으킬 수 있다는 외연적 동적 방법의 가장 큰 단점도 있다. 동적해석에서는 보다 경제적인 해석을 위하여 해의 정확도에 큰 영향을 미치지 않는 범위 내에서 실제보다 훨씬 빠른 편치속도와 Mass Scaling 방법을 사용하고 있으며, 차체판넬을 성형하는 과정에서 박판을 블랭크호울더로 고정시키게 되면, 바인더랩(Binder Wrap)이 형성된다. 바인더랩이 형성되면서 갖게 되는 이러한 변형은 차체판넬을 성형하기 위한 박판의 초기상태에 영향을 미치게 되므로 올바른 차체판넬 성형 공정 설계를 위해서는 바인더랩의 해석이 선행되어야만 한다.

본 연구는 동적 외연적 방법을 이용하여 S-Rail 공정에서 Dynaform 상용소프트웨어를 사용하여 성형해석하였다.

## 본 론

### 외연적 유한요소(Explicit FEM) 수식화

비선형 유한요소 운동 방정식은 평형방정식의 약형

으로 표현되는 가상일의 원리로 부터 얻어진다. 성형 가공중에 발생하는 내부응력, 접촉력, 관성력, 감쇄력, 외부힘과 경계조건을 모두 포함하는 평형방정식의 약형은 다음과 같이 표현된다.

$$\int_{V_0} S \delta E dv + \int_{V_0} \rho_0 \ddot{u} \delta u dv - \int_{V_0} \rho_0 b \delta u dv - \int_S F_0 \delta u ds + \sum_{i=1}^m \int_{S_i} (P_i^c \delta g_n^i + \tau_i^c \delta g_t^i) ds \quad (1)$$

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

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

위 식으로부터 시간중분 n+1에서의 해를 얻기 위해 다음과 같은 중간차분법을 사용한다.

$$\ddot{u}_n = \frac{\dot{u}_{n+1/2} - \dot{u}_{n-1/2}}{\Delta t} = \frac{u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}}{2\Delta t^2}$$

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

위 식을 (2)식에 대입하고 정리하면 간단한 계산에 의해 지속적인 해를 얻을 수 있는 형태가 된다.

$$\left(\frac{M}{\Delta t^2} + \frac{C}{2\Delta t}\right) u_{n+1} = F_n - P_n - R_m + \frac{M}{\Delta t^2} u_n - \left(\frac{M}{\Delta t^2} - \frac{C}{2\Delta t}\right) u_{n-1} \quad (4)$$

중간차분법은  $\Delta t$ 의 크기에 따라 선택적인 수렴성을 가지며, 정확성과 수렴성은  $\Delta t$ 의 제곱에 비례한다(정동원 등, 1995). 식(4)에 의해 시간 중분 n+1에서의 절점 변위가 구해지면 변형영역을 수정(update)하고 그에 따라 수렴성이 보장되는 새로운 시간 중분의 크기를 결정해야 한다. 전체적인 시간중분의 크기

는 모든 요소들에 대해 각각의 시간증분의 크기를 계산한 후 다음과 같은 식에 의해 결정한다.

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

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

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

위 식에서  $L_s$ 는 요소의 면적을 최대변의 길이로 나타는 특성 길이이며  $C$ 는 소재 내에서의 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 해석가능하므로 스텝핑 공정에도 적용하고 있다. 실제 스텝핑공정의 편치속도는 1 m/sec정도인데 재료의 음속에 비하여 훨씬 느리다. 강의 음속은 대략 5000 m/sec정도이므로 관성효과가 해에 영향을 크게 주지 않는 범위 내에서 실제보다 편치속도를 높여 해석하는데 경제적 해석을 위하여 해의 정확도에 큰 영향이 없는 가능한 최대 편치속도로 해석한다.

### Lumping scheme

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

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

위 식에서  $[M]$ 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. 동적해석에서는 집중질량법(lumping mass scheme)이 연속질량법보다 해의 정확도가 우수하다(정동원 등 1995).

본 연구에서 사용한 집중법은 아래와 같다.

$$m_{\text{eq}}^e = \begin{cases} \alpha \delta_{ij} \int_{\Omega} \rho N_i^2 d\Omega, & a=b \\ 0, & a \neq b \end{cases} \quad (9)$$

단, 위 식에서  $a$ 와  $b$ 는 질량행렬의 행과 열로  $a=b$ 일 경우는 대각선 성분

또, 여기서

$$\alpha = \frac{\int_{\Omega} \rho d\Omega}{\left( \sum_{i=1}^{n_n} \int_{\Omega} \rho N_i^2 d\Omega \right)}$$

*total element amount of diagonal entries of consistent mass*

즉, 위 식의  $\alpha$ 는 총 요소질량을 대각선 성분의 질량합으로 나눈 것이다. 이 방법의 아이디어는 집중 질량 행렬은 연속질량행렬의 대각선 부분에 비례한다는 것이고 항상 양의 값을 갖는 집중질량을 만들 수 있다. 위 식에서 상수  $\alpha$ 는 총 요소질량을 보존하기 위하여 선택되어진다.

### 동적외연적 해석에 대한 효율적인 접촉 및 마찰 처리법

외연적 접촉알고리즘은 안정성 제한에 의한 작은 시간증분 때문에 내연적 해석에 비해 유리하다(정동원 등, 1995). 작은 편치행정증분은 접촉처리수행을 매우 간단하고 쉽게 할 수 있는 잇점이 있다. 본 연구에서는 접촉과 마찰처리를 경사경계조건(skew boundary condition)과 직접적 시행착오법(정동원 등, 1995)을 결합한 형태로 사용하였다. 먼저 접촉을 고려하지 않고 가속도, 속도, 변위를 계산하였다. 다음은 Fig. 1처럼 금형을 파먹은 거리  $h$ 와 접촉된 점들의 금형과 박판의 수직방향을 계산한다. 위의 계산결과로부터 경사경계조건이 적용되어지고 절점의 금형침투를 방지하기 위한 저항력이 아래와 같이 계산되어진다.

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

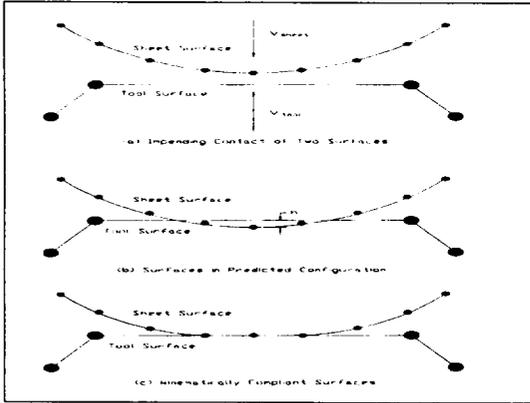


Fig. 1. Schematic description for the contact scheme.

여기서  $m$ 은 절점의 집중질량이고  $n$ 은 수직벡터이다. 만약 금형의 운동이 접촉자체에 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 계산되어진다.

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

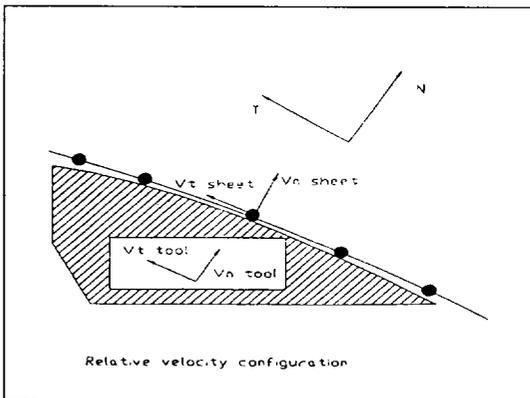


Fig. 2. Schematic description for friction and stick/slip check.

마찰에 대해서는 처음에 중분이 마찰을 고려하지 않고 계산되어지고 경사경계조건이 Fig. 2와 같이 적용되어진다. 경사경계조건상태에서는 미끄러짐중분  $r_c$ 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 미끄러짐 중분이다.

따라서 마찰력은 아래와 같이 계산되어진다.

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

저항력  $|T_c|$ 가 임계력  $T_{cr} = \mu|N|$ 과 비교하여 저항력이 임계력보다 작으면 접촉조건이 적용되어지고 저항력이 임계력보다 크면 미끄러짐 조건이 적용되어 마찰력이 쿨롱마찰법칙(Coulomb's friction law)을 따른다고 가정한다. Fig. 3에 마찰력계산과 접촉/미끄러짐 체크과정이 요약되어 있다.

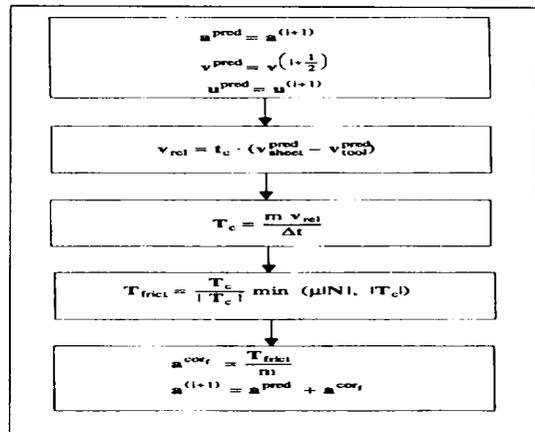
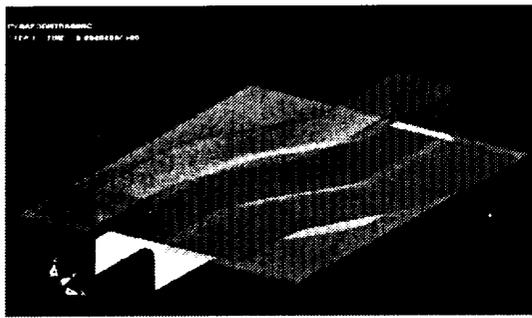


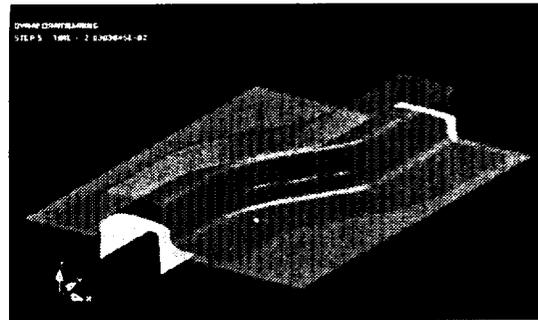
Fig. 3. Flow chart for friction force calculation and stick/slip check.

### 성형해석 결과

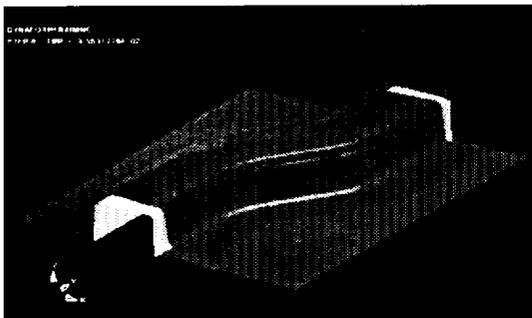
수식화된 결과에 따라 유한요소해석 프로그램을 작성하여 성형품의 각 단면들을 성형단계에 따라 두께 감소율, 성형한계곡선(주름경향), 잔류응력분포도, 이 3가지를 3차원으로 나타내 보았다. 결과들은 다음과 같다.



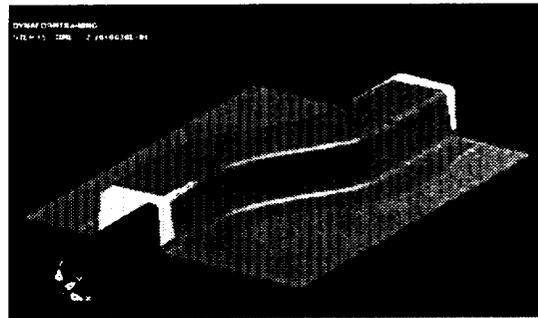
(a) Metallic pattern in the first step



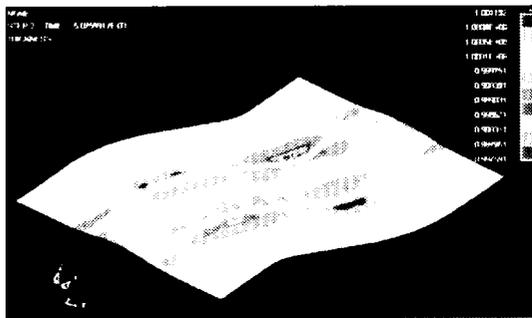
(b) Metallic pattern in step 5



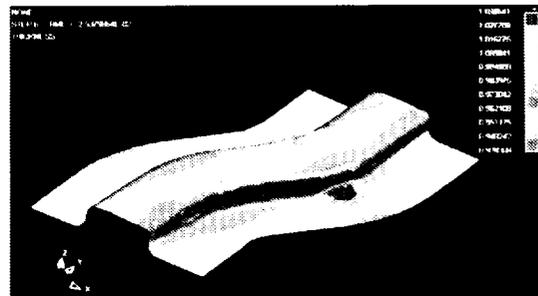
(c) Metallic pattern in step 8



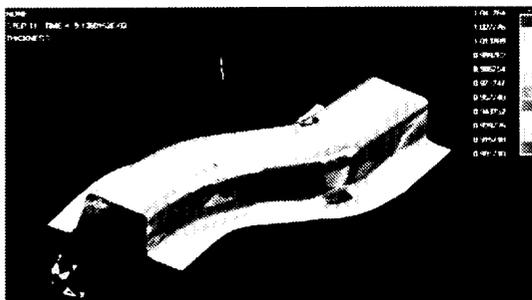
(d) Metallic pattern in finally step



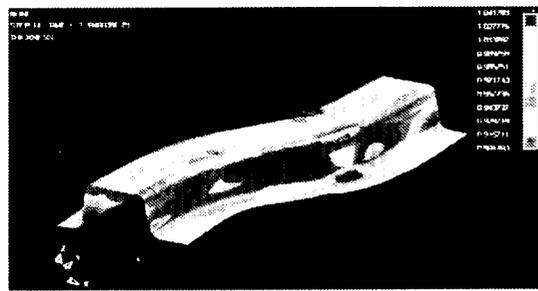
(e) Thickness distribution chart in step 2



(f) Thickness distribution chart in step 6

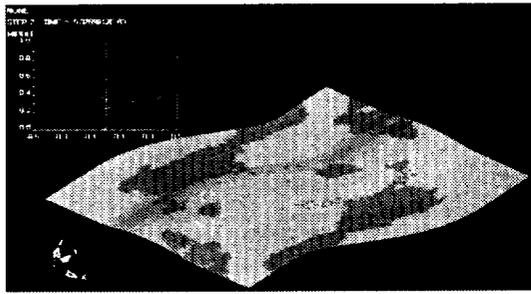


(g) Thickness distribution chart in step 11

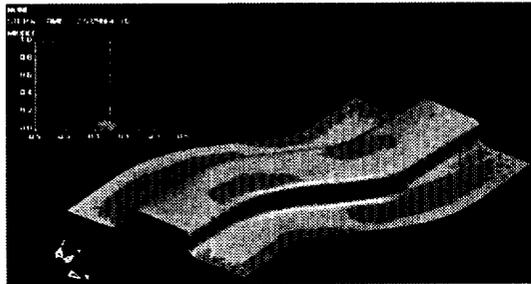


(h) Thickness distribution chart in step 14

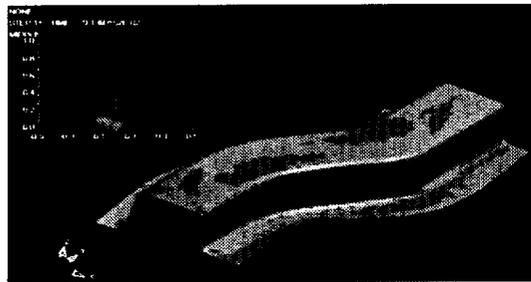
Fig. 4. Thickness distribution chart by punch stroke.



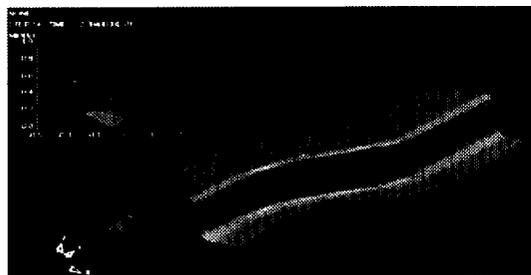
(a) Forming limit curved line distribution chart in step 2



(b) Forming limit curved line distribution chart in step 6

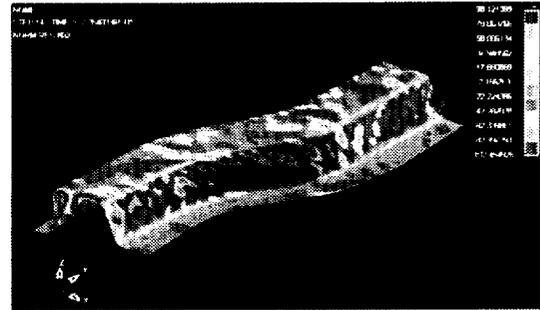


(c) Forming limit curved line distribution chart in step 11



(d) Forming limit curved line distribution chart in finally step

Fig. 5. Forming limit curved line distribution chart by punch stroke.



(a) x-x coordinate residual stress distribution in finally shape



(b) y-y coordinate residual stress distribution in finally shape



(c) x-y coordinate residual stress distribution in finally shape

Fig. 6. Residual stress distribution by punch stroke.

### 결론 및 고찰

본 연구는 동적 외연적 방법을 이용하여 S-Rail 공정에서 Dynaform 상용소프트웨어를 사용하여 성형해석 해 보았다. 많은 수의 격자를 가진 복잡한 형상의

해석에는 외연적 방법이 내연적 방법보다 효과적이라는 것을 알 수 있었다. 펀치 스트로크에 따라 성형해석결과 성형한계곡선(FLD)과 두께감소를 나타내어 보았으며 최종형상의 잔류응력분포도를 시뮬레이션 해 보았다. 성형완료 후 변형, 주름경향, 터짐(crack) 발생의 예측을 할 수 있었으며 동적 외연적 해석에서는 해석시간을 줄이기 위해 펀치속도를 실제 속도보다 훨씬 증가시키는데 이에 반해 해의 신뢰도는 떨어지기 쉬우며 해의 신뢰도에 영향을 크게 주지 않는 범위 내에서 적절히 밀도를 증가시켜 해의 신뢰도와 경제성을 동시에 만족시켜야하며 적절한 펀치 속도로 해석시간과 신뢰도에 있어서 타협하여야 하며 동적 해석에서 관성효과를 적절히 제어할 수 있어야 할 것이다.

이러한 점들을 볼 때 동적 외연적 방법은 대형 차체판넬해석이나 금형설계에서 개발 트라이아웃 기간과 경비를 제품이 요구하는 고품질에 맞게 줄여 줄 수 있을 것이며 정확하고 효율적인 다양한 결과를 제공할 것으로 보여진다.

## 후 기

이 논문은 2003년도 제주대학교발전기금 청봉학술연구기금의 지원에 의해서 연구되었음.

## 참고문헌

- 정동원 · 양동열 · 안동규. 1993. "박관성형공정의 시뮬레이션을 위한 내연적, 외연적 및 내외연적 유한요소해석법의 비교연구". 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp.572-576.
- Abaqus/Explicit: User's Examples and Theory manuals. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 1991.
- 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. Tompson et al., Fort Collins, Colorado.
- E. Hinton, T. Rock, and O. C. Zienkiewicz. 1976. "A Note on Mass Lumping and Related Processes in the Finite Element Method." Earthquake Engng. Struct. Dynamics. 4(3) 145-149.
- Jung, D. W., Yoo, D. J. and Yang, D. Y. 1995. A dynamic explicit/rigid-plastic finite element formulation and its application to sheet metal forming processes. Engineering Computations, 12: 707-722.
- Jung, D. W., Song, I. S. and Yang, D. Y. 1995. An improved method for application of blank holding force considering sheet thickness in deep drawing simulation of planar anisotropic sheet. J. Materials Processing Technology, 52: 472-488.
- Jung, D. W., Yoo, D. J. and Yang, D. Y. 1995. A dynamic explicit/rigid-plastic finite element formulation and its application to sheet metal forming processes. Engineering Computations, 12: 707-722.
- Jung, D. W. and Yang, D. Y. 1998. Step-wise combined implicit-explicit finite-element simulation of autobody stamping processes. J. Materials Processing Technology, 83: 245-260.
- 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, 7(4): 479-490.
- Kim, Y. S. and Jung, D. W. 1998. A study on deformation characteristics of the plane strain punch stretching test. Int. J. of KSME, 12(4): 544-552.
- K. S.Surana. 1978. "Lumped Mass Matrices with Non-Zero Inertia for General Shell and Axisymmetric Shell Elements." Int. J. Num. Meth. Engng., 12(11): 1635-1650.
- Lee, H. S., Jung, D. W., Jung, J. H. and Im, S. Y. 1994. Finite element analysis of lateral buckling for beam structures. Computers & Structures, 53: 1357-1371.
- Moss, W.C., 1984. "On the Computational Significance of the Strain Space Formulation of Plasticity Theory". Int. J. Num. Met. Engr., 20: 1703-1709.
- 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.  
Yang, D. Y., Jung, D. W., Song, I. S., Yoo, D. J. and Lee, J. H. 1995. Comparative investigation

into implicit, explicit and iterative implicit/explicit schemes for the simulation of sheet-metal forming processes. J. Materials Processing Technology, 50: 39-53.