

차체판넬 스탬핑공정에서 Hydro-forming 해석에 관한 연구

정 동 원 · 황 재 신*

제주대학교 기계에너지생산공학부, *제주대학교 대학원

A Study of Hydro-forming analysis in Auto-Body 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 auto-body panel stamping processes. The lumping scheme is employed for the diagonal mass matrix and linearizing dynamic forming. Analyzed auto-panel stamping process correction of forming using common use software called Dynaform using dynamic extensive method. Further, the simulated results for the total auto-body panel 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, auto-body panel stamping, lumping scheme, dynaform, binder wrap

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 개발하기위해선 아직도 많은 노력이 필요하다. 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 등이 전형적인 딥드로잉 과정 중에 나타나 비선형 효과를 더하기도 한다. 이러한 강한 비선형 효과

들로 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 가공 시간이 짧아 낮은 가격으로 대량생산이 가능하며 무게에 비해 강도가 높고 표면특성이 우수한 장점이 있으므로 자동차산업, 항공산업, 전자부품산업과 주방용품산업등에서 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, 공구(펀치, 다이 및 블랭크 홀더 등의 집합체) 각부의 조합, 표면 및 윤활상태, 성형속도 등이 변형에 영향을 미치기 때문에 그 물리

적 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 박판성형공정의 2차원 해석이 시작되면서 크게 외연적 방법과 내연적 방법으로 나누어졌다(정동원 등, 1995).

Hydro-forming은 액체의 압력을 이용하여 성형하는 방법으로 전통적인 방식에서 불가능하였던 복잡한 형상의 제품을 일체로 가능하며 일체성형으로 말미암아 용접선이 불필요하다. 그리고 calibration 공정을 통해 제품의 형상과 치수의 정확성을 보장할 수 있으며 비틀림 강성이 크고, 탄성복원의 정도가 작다. 고압의 압력유체 발생에 따른 에너지 비용이 고가라는 점도 알 수 있었다. Hydro-forming의 기술적 및 경제적인 면을 고려하였을 때 장비가격이 고가이나 대상제품과 공정을 잘 선택하면 여타 판재성형공정에 비해 재료 및 생산기간의 단축이 가능한 성형방법이다. 그러므로 장비가격이 고가이고 대상상품과 공정을 잘 선택해야하므로 사전에 미리 예측할 수 있는 프로그램을 필요로 하게 되었다.

본 연구는 동적 외연적 방법을 이용하여 차체판넬 스텝핑공정을 Dynaform 상용소프트웨어를 사용하여 Hydro-forming 성형해석하였다.

본 론

외연적 유한요소(Explicit FEM) 수식화

비선형 유한요소 운동 방정식은 평형방정식의 약형으로 표현되는 가상일의 원리로부터 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 강제요소의 동역학을 가상일의 원리에 도입하면 비선형유한요소 운동방정식을 얻을 수 있다. 비선형 유한요소방정식은 시간 n단계에서 다음과 같은 행렬식으로 쓸 수 있다.

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

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

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

위 식을 (2)식에 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 Δt 의 크기에 따라 선택적인 수렴성을 가지며, 정확성과 수렴성은 Δt 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 크기는 모든 요소들에 대해 각각의 시간중분의 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 N은 총 요소수이며 Δt_i 는 i요소에 대한 시간중분의 크기를 나타낸다. α 는 안정성을 위

한 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 나눈 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 ρ 은 재료의 밀도이다.

재료의 음속은 재료밀도의 평방근(square root)에 반비례하여 밀도를 100배 높이면 Δt_c 가 10배 증가되어 전체 해석시간이 10배 줄어든다. 동적외연적 해석은 원래 빠른 속도의 충돌문제를 해석하기 위하여 개발되었으나 접촉알고리즘이 안정되고 아주 큰 문제도 해석가능하므로 스템핑 공정에도 적용하고 있다. 실제 스템핑공정의 펀치속도는 1m/sec정도인데 재료의 음속에 비하여 훨씬 느리다. 강의 음속은 대략 5000m/sec정도이므로 관성효과가 해에 영향을 크게 주지 않는 범위 내에서 실제보다 펀치속도를 높여 해석하는데 경제적 해석을 위하여 해의 정확도에 큰 영향이 없는 가능한 최대 펀치속도로 해석한다.

집중 질량 행렬(lumped mass matrix)

축차가 없는 외연적 시간 적분을 위해 M 행렬을 대각선 행렬 (diagonal matrix)로 만드는 것이 필수적이다. 이를 위해 (4) 식 대신 다음과 같은 집중 질량 M 행렬을 정의한다.

$$M = \sum_e m_e = \begin{cases} \frac{1}{n} \int_{V_e} \rho dV_e & : \text{대각 요소} \\ 0 & : \text{비대각 요소} \end{cases} \quad (8)$$

여기서 n 은 한 요소의 절점수이다.

외연적 시간적분법(explicit time integration method)

계산의 편리를 위해 (2)식에서 점성 행렬 C 를 무

시한다. 그러면 외연적 시간 적분 절차는 절점에서와 요소에서의 계산을 번갈아 수행하는 형태가 된다. 이를 요약하여 Fig. 1에 나타내었다(정동원 등 1995).

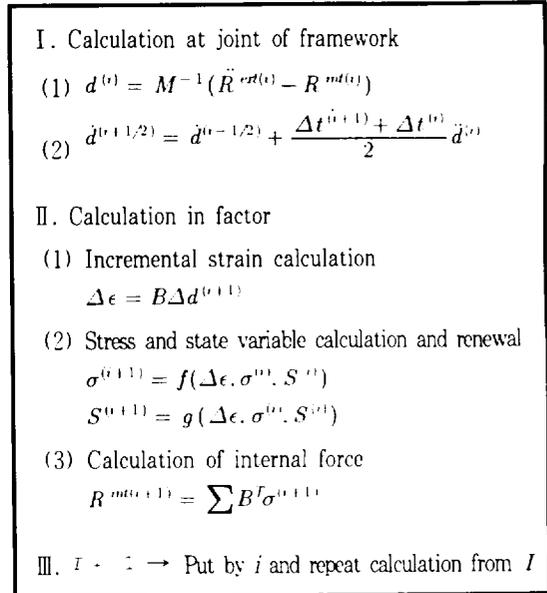


Fig. 1. Algorithm of extensive time integration.

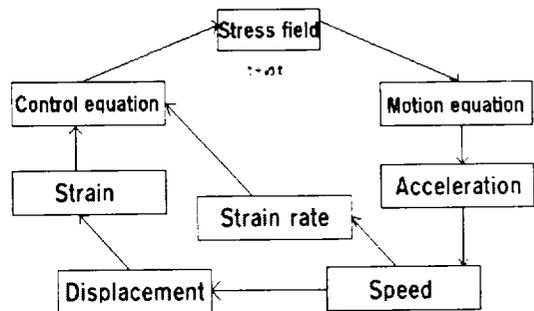


Fig. 2. Transmission process of stress wave in material.

먼저 각 절점에서 구해진 외력과 내력의 차이와 그 질량으로 가속도를 구한 후 이를 중간 차분법 (central difference method)를 이용해 속도 및 변위를 구한다. 구해진 변위로부터 해당 요소의 변형률을 구할 수 있다.

이를 지배방정식에 대입하면 그 요소에서의 응력과 그와 관련한 상태 변수들을 구할 수 있다. 이로부터 다시 내력을 구할 수 있다. 외력은 이미 주어져 있으므로 다음 계산 스텝에 이를 반영하여 계속 반복 계

산하게 된다. 이는 응력파(stress wave)의 전달 과정과 동일한데 이를 Fig. 2처럼 도식적으로 나타낼 수 있다(정동원 등, 1995).

즉, 모든 계산은 변형률로부터 출발하여 응력을 계산해 나가는 방식이다.

접촉 처리

외연적 시간 적분법의 장점을 살리기 위해 벌칙 함수법(penalty method)를 사용한다. 절점이 금형을 ρ 만큼 파고들면 접촉력 f_s 를 절점에 가해준다(정동원 등 1995).

$$f_s = -h k n \tag{7}$$

여기서 h 는 침투량, n 은 수직 벡터(normal vector), k 는 강성 인수(stiffness factor)로서 다음과 같이 정의된다.

$$k = a K A^2 / V$$

여기서

- a : 척도 계수(scale factor)
- K : 체적 탄성 계수
- A : 요소 면적
- V : 요소 부피

이다.

이의 모식도를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 (a)는 두개의 표면이 접촉하기 직전의 모습을 나타내고 있고, (b)는 두개의 표면이 계산상으로 먼저 침투를 허용하는 모습을 나타내고 있다.

이는 벌칙 함수법의 특성이다. 침투를 허용한 후 그 침투량 h 에 해당하는 f_s 를 식(7)과 같이 구하여 이를 양쪽 표면에 대칭적으로 가해주면 (c)와 같이 기하학적으로 맞는 접촉 상태를 가지게 된다(정동원 등, 1995).

시간 증분의 안정 한계

외연적 시간 적분법에서는 축차가 없는 대신 해의 안정성을 보장하기 위한 임계 시간 증분(critical time increment)이 존재하여 시간 증분이 이 값 이하일 것을 요구하고 있다. 점성이 없을 경우 임계 시간 증분은,

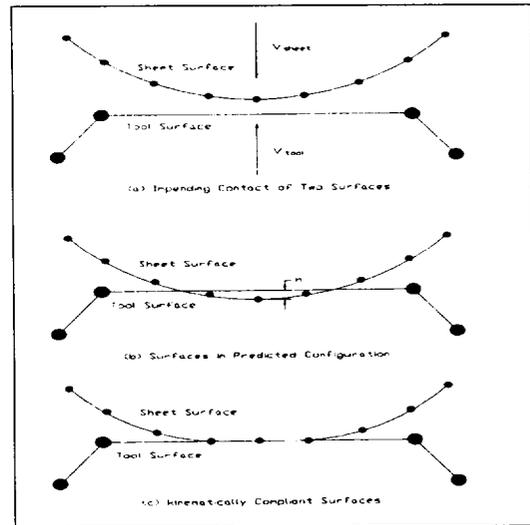


Fig. 3. Schematic diagram about contact technique.

$$\Delta t_c = L_s / C \tag{8}$$

L_s : 요소의 특성 길이

$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$: 응력 전파 속도

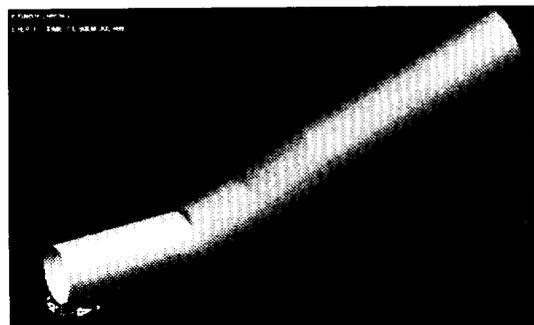
E : 영계수

ρ : 밀도

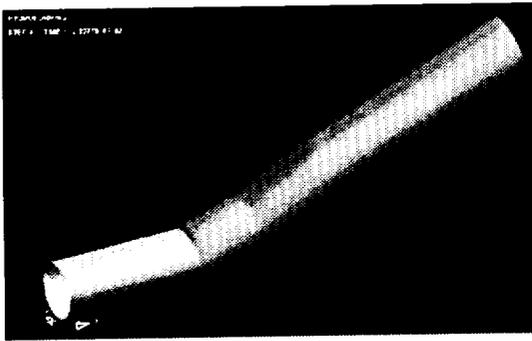
가 된다.

성형해석 결과

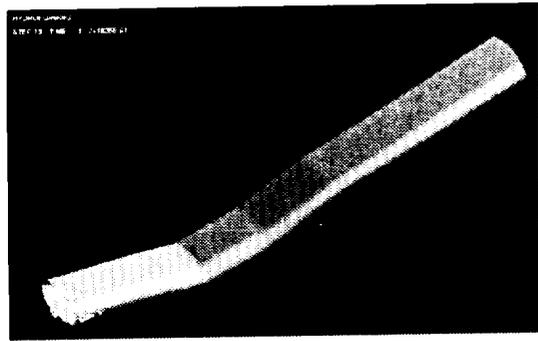
수식화된 결과에 따라 유한요소해석 프로그램을 작성하여 성형품의 각 단면들을 성형단계에 따라 두께 감소율, 성형한계곡선(FLD), 잔류응력분포도를 3차원으로 나타내 보았다. 결과는 다음과 같다.



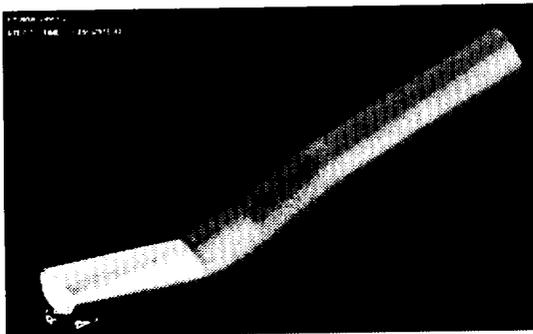
(a) Metallic pattern in the first step



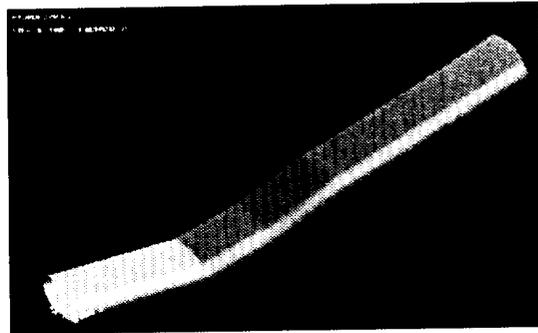
(b) Metallic pattern in step 4



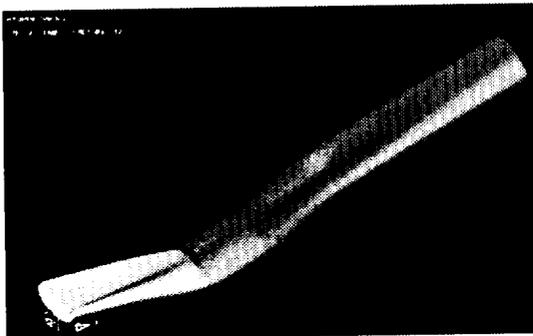
(f) Metallic pattern in step 13



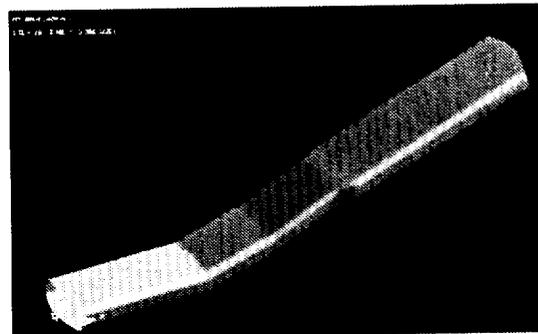
(c) Metallic pattern in step 7



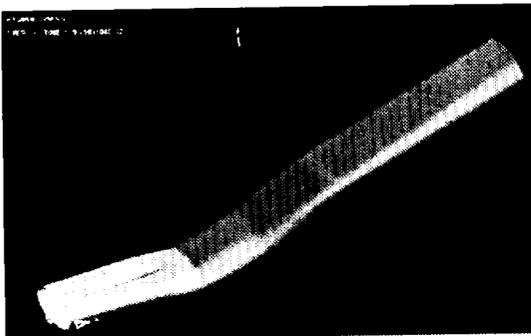
(g) Metallic pattern in step 16



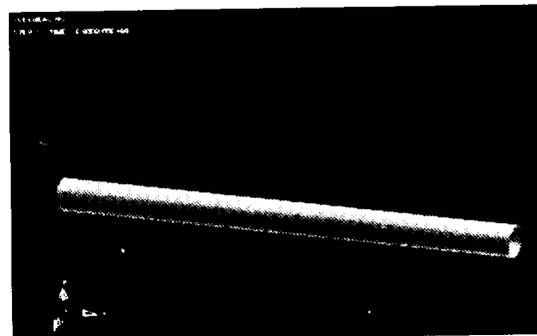
(d) Metallic pattern in step 9



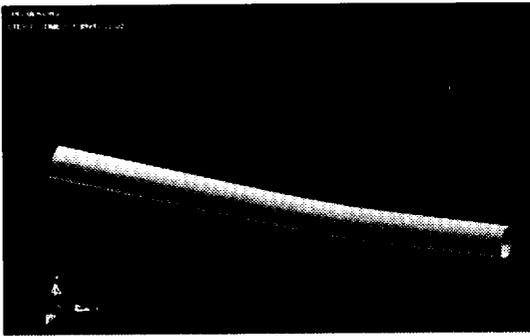
(h) Metallic pattern in finally step



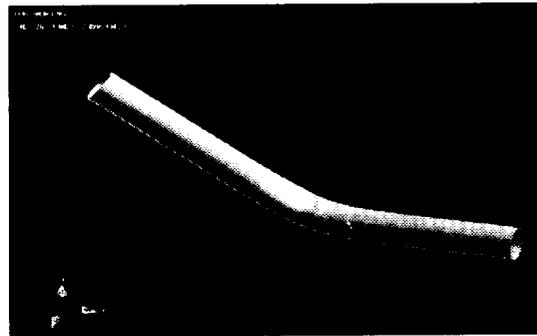
(e) Metallic pattern in step 11



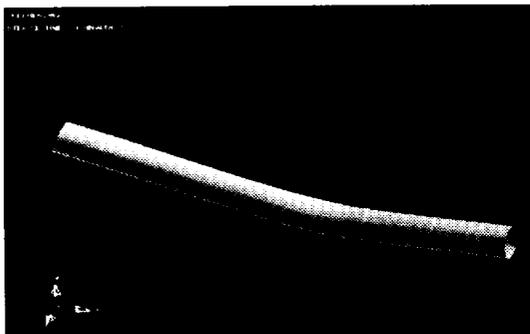
(i) Metallic pattern in the first step



(j) Metallic pattern in step 7



(n) Metallic pattern in step 26



(k) Metallic pattern in step 13

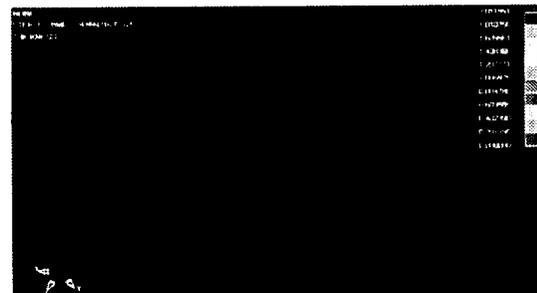


(o) Metallic pattern in finally step

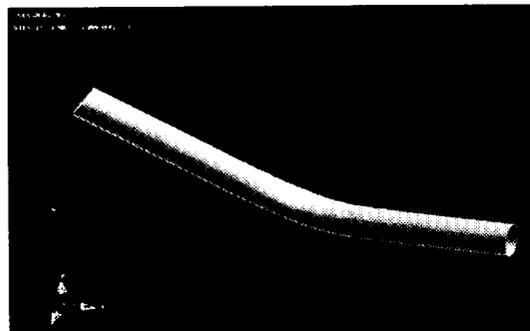
Fig. 4. Metallic pattern by punch stroke.



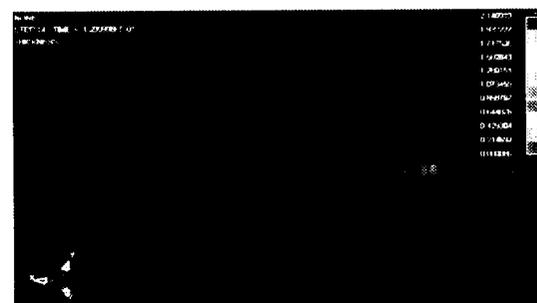
(l) Metallic pattern in step 17



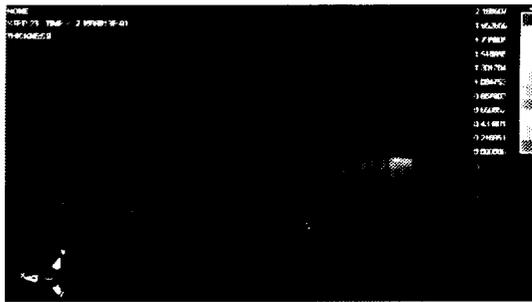
(a) Thickness distribution chart in step 2



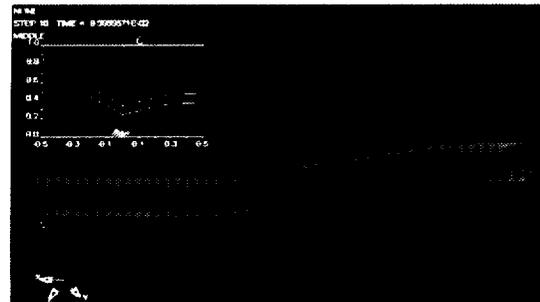
(m) Metallic pattern in step 21



(b) Thickness distribution chart in step 14



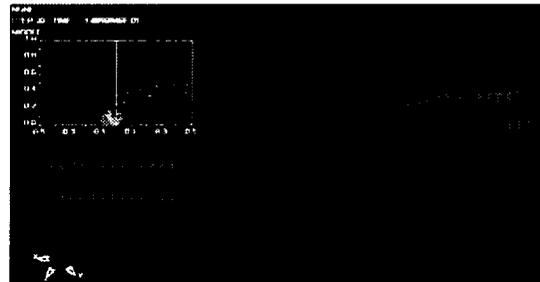
(c) Thickness distribution chart in step 23



(b) Forming limit curved line distribution chart in step 10



(d) Thickness distribution chart seeing over in finally step



(c) Forming limit curved line distribution chart in step 20

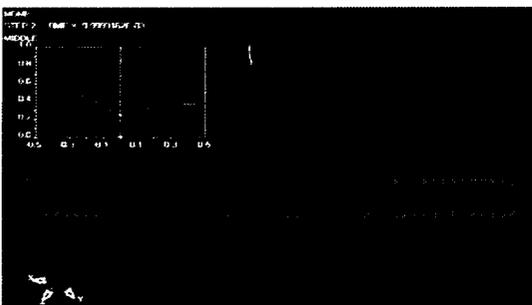


(e) Thickness distribution chart seeing under in finally step

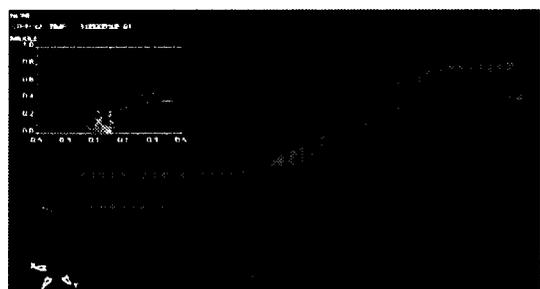


(d) Forming limit curved line distribution chart in step 27

Fig. 5. Thickness distribution chart by punch stroke.



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

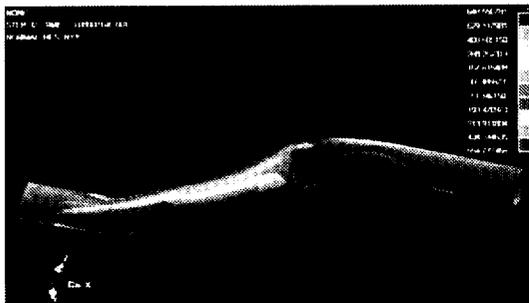


(e) Forming limit curved line distribution chart in finally step

Fig. 6. 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. 7. Residual stress distribution by punch stroke.

결론 및 고찰

본 연구는 동적 외연적 방법을 이용하여 차체판넬 스탬핑공정을 Dynaform 상용소프트웨어를 사용하여 Hydro-forming 해석해 보았다.

Hydro-forming 해석은 공정단축과 경량화, 경제성, 품질 향상, 개발 기간 및 생산에 소요되는 기간의 단

축을 할 수 있다는 것을 볼 때 대형 차체판넬 해석이나 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

- 안동규·정동원·양동열·이장희. 1995. "강소성 외연적 유한요소법을 이용한 자동차 박판제품의 성형 공정에 대한 단면해석 (Sectional forming analysis of automobile sheet metal parts by using rigid-plastic explicit finite element method)". 자동차공학회, 3(3): 19-28.
- 정동원. 2001. "평형해법을 이용한 트렁크 리드의 단면해석과 3차원 형상합성 (The Sectional Analysis of Trunk-lid using the Equilibrium Approach and Three-Dimensional Shape Composition)". 한국해양공학회, 15(2): 66-71.
- 정동원·양동열. 1997. "차체판넬 스탬핑공정의 단면해석과 3차원 형상 합성(The sectional analysis of auto-body panel stamping process and three-dimensional shape composition)". 한국정밀공학회 14(9): 101-107.
- 정동원. 2002. "유한요소법을 이용한 원통형 강편의 자유단조 해석 (Analysis of Free Forging of Cylindrical Billets by Using Finite Element Method)". 한국해양공학회 16(6): 49-54.
- 정동원·양동열·안동규. 1993. "박판성형공정의 시뮬레이션을 위한 내연적, 외연적 및 내외연적 유한요소해석법의 비교연구". 대한기계학회 추계학술대회 논문집. pp.572-576.
- "An Introduction to ABAQUS/ Explicit". 1991. Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc.
- Hallquist, J.O. 1983. "Theoretical Manual for DYNA3D". Lawrence Livermore Laboratory.

- 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.
- 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.
- Meyers, M.A. and Ravichandran, G. 1989. "Lectures on Dynamic Behavior of Materials", University of California, San Diego. 1: 3-10. 1997.
- Moss, W.C. 1984. "On the Computational Significance of the Strain Space Formulation of Plasticity Theory". *Int. J. Num. Met. Engr.*, 20: 1703-1709.
- 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.
- Wang, N.M. and Budiansky, B. 1978. "Analysis of Sheet Metal Stamping by a Finite Element Method". *Journal of Applied Mechanics*, (45): 73-82.