

Hydro-forming 공정을 위한 동적-외연적 유한요소해석 A Dynamic-explicit Finite Element Analysis for Hydro-forming Process

정동원 · 황재신

D. W. Jung and J. S. Hwang

Key Words : Dynamic explicit time integration scheme(동적 외연적 시간 적분법), Hydro forming process(액압 성형공정), Auto body panel stamping processes(차체판넬 스템핑 공정), Lumping scheme(집중법)

Abstract : In this paper, a finite element formulation using dynamic-explicit time integration scheme is used for numerical analysis of Hydro-forming processes. The lumping scheme is employed for the diagonal mass matrix and dynamic explicit formulation. Hydro-forming process for auto-body panel forming is analyzed by using dynamic-explicit finite element method. Further, the simulated results of the Hydro-forming 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.

기호 설명

- δ_w, δ_e : 임의의 변위 및 변형률
- ψ : 체적력 (Body force)
- ϕ : 표면력 (Surface traction)
- F_i : 집중 하중
- ρ : 밀도
- k_d : 점성 계수
- u, \dot{u}, \ddot{u} : 변위, 속도, 가속도
- a : 척도 계수(scale factor)
- K : 체적 탄성 계수
- A : 요소 면적
- V : 요소 부피
- L_S : 요소의 특성 길이(characteristic length)
- E : 영계수(Young's modulus)
- C : 탄성과 속도

1. 서 론

오늘날에는 단순한 접촉면의 미소 변화가 있는

박판 성형 공정을 수치적으로 정확하게 사전 예측하는 것이 가능해지면서 복잡하고 불규칙적인 곡선 형상들과 박판과 다이(die)사이의 비교적 큰 상대적인 변위 등의 실질적인 산업현장 문제들을 해석하기 위하여 보다 신뢰성 있고 경제적인 해석방법이 요구되고 이런 효율적인 해석방법을 개발하기 위해선 아직도 많은 노력이 필요하다.^{1)~3)} 일반적인 박판 금속성형 과정은 고차원의 비선형 문제로 규정 지을 수 있는데, 이것은 대상물의 기하학적 형상과 재질이 비선형일 뿐만 아니라 접촉 현상이 비선형이기 때문이다. 게다가 주름의 형성과 네킹 등이 전형적인 답-드로잉 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 금속성형과정을 해석함에 있어 동적-외연적 알고리즘은 종래의 정적-내연적에 비해서 몇 가지 중요한 이점들을 갖고 있다. 첫째, 뉴우튼-랩슨법과 같은 비선형 해석법이 필요가 없다. 따라서 해의 계산시간은 문제의 크기에 따라 2차형(quadratically)으로 증가하지 않고 외연적동적 해석 과정에서는 문제 크기에 따라 선형적으로 증가한다. 둘째, 대변형, 미끄러짐, 3차원 접촉 구속들은 외연적 방법에서 처리하는 것이 상대적으로 쉽다. 운동학적인 접촉 구속은 시행착오법과 같이 직접 외연적으로 처리되어질 수 있는 것이다. 이 같은 장점에

접수일 : 2004년 4월 15일
정동원(책임저자) : 제주대학교 기계공학과
E-mail : jdwcjeju@cheju.ac.kr, Tel : 064-754-3625
황재신 : 제주대학교 대학원 기계공학과

도 불구하고 동적-외연적 방법의 가장 큰 단점은 정적문제에 동적 방법을 적용함에 따른 해의 정적 불안정을 일으킬 수 있다는 것이다.^{4)~7)}

Hydro-forming은 액체의 압력을 이용하여 성형하는 방법으로 전통적인 방식에서 불가능하였던 복잡한 형상의 제품을 일체로 성형가능하며 일체성형으로 말미암아 용접선이 불필요하다. 그리고 캐리브레이션 공정을 통해 제품의 형상과 치수의 정확성을 보장할 수 있으며 비틀림 강성이 크고, 탄성복원의 정도가 작다. 그러나 고압의 압력유체 발생에 따른 에너지 비용이 고가라는 단점도 있다. 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 대상제품과 공정을 잘 선택해야하므로 사전에 미리 예측할 수 있는 해석기술이 절실히 필요하다.

본 연구에서는 동적 외연적 방법을 이용하여 차체판넬 성형공정을 위한 Hydro-forming 성형해석을 하였다.

2. 본 론

2.1 외연적 유한요소(Explicit FEM) 수식화

비선형 유한요소 운동 방정식은 평형방정식의 약형으로 표현되는 가상일의 원리로부터 얻어진다. 성형 가공 중에 발생하는 내부응력, 접촉력, 관성력, 감쇄력, 외부힘과 경계조건을 모두 포함하는 평형방정식의 약형은 다음과 같이 표현된다.⁸⁾

$$\int_{V_0} \delta E t w + \int_{V_0} \rho_0 \ddot{u} \delta u d v - \int_{V_0} \rho_0 \delta \dot{u} d v - \int_S F_0 \delta u d s + \sum_{i=1}^m \int_{S_i} (P_i^t \delta g_n^i + \tau_i^t \delta g_T^i) d s \quad (1)$$

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. 박막모델, 재료거동 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 시간증분 $n+1$ 에서의 해를 얻기 위해 다음과 같은 중간차분법을 사용한다.

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

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

위 식을 (2)식에 대입하고 정리하면 간단한 계산에 의해 계속적인 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 Δt 의 크기에 따라 선택적인 수렴성을 가지며, 정확성과 수렴성은 Δt 의 제곱에 비례한다.⁹⁾ 식(4)에 의해 시간 증분 $n+1$ 에서의 절점 변위가 구해지면 변형영역을 수정(update)하고 그에 따라 수렴성이 보장되는 새로운 시간 증분의 크기를 결정해야 한다. 전체적인 시간증분의 크기는 모든 요소들에 대해 각각의 시간증분의 크기를 계산한 후 다음과 같은 식에 의해 결정한다.

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

위 식에서 N 은 총 요소수이며 Δt_N 는 N 요소에 대한 시간증분의 크기를 나타낸다. α 는 안정성을 위한 상수로 통상 0.9이하의 값을 선택한다. 시간 증분 크기는 다음과 같은 식으로 결정한다.

$$\Delta t_c = L_0 / C \quad (6)$$

위 식에서 L_0 는 요소의 면적을 최대변의 길이로 나는 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 재료 밀도의 평방근(square root)에 반비례하여 밀도를 100배 높이면 Δt_c 가 10배 증가되어 전체 해석시간이 10배 줄어든다. 동적-외연적 해석은 원래 빠른 속도의 충돌 문제를 해석하기 위하여 개발되었으나 접촉알고리즘이 안정되고 아주 큰 문제도 해석 가능하므로 스텝핑 공정에도 적용되고 있다. 실제 스텝핑 공정의 편치속도는 1m/sec정도인데 재료의 음속에 비하여 훨씬 느리다. 강의 음속은 대략 5000m/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.

2.2 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.¹⁰⁾

$$M = \sum_e m_e = \begin{cases} \frac{1}{n} \int_V \rho dV^e & \rightarrow 1 \\ 0 & \rightarrow 2 \end{cases} \quad (8)$$

여기서 n 은 한 요소의 절점수이며, 1은 대각요소이고 2는 비대각요소이다.

2.3 외연적 시간적분법

계산의 편리를 위해 (2)식에서 점성 행렬 C 를 무시한다. 그러면 외연적 시간 적분 절차는 절점에서와 요소에서의 계산을 번갈아 수행하는 형태가 된다. 이를 요약하여 Fig. 1에 나타내었다.¹¹⁾ 먼저 각 절점에서 구해진 외력과 내력의 차이와 그 질량으로 가속도를 구한 후 이를 중간 차분법을 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 계산하게 된다. 이는 응력과(stress wave)의 전달 과정과 동일한데 이를 Fig. 2처럼 도식적으로 나타낼 수 있다.¹²⁾ 즉, 모든 계산은 변형률로부터 출발하여 응력을 계산해 나가는 방식이다.

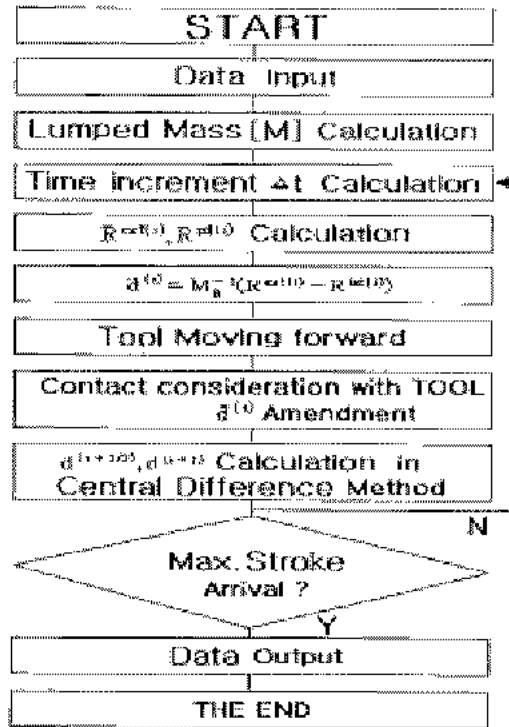


Fig. 1 Flow chart

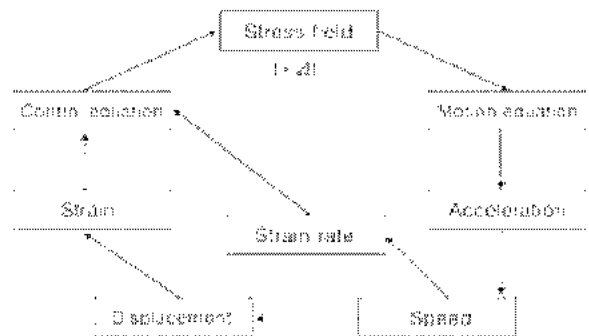


Fig. 2 Transmission process of stress wave in material

2.4 접촉 처리

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

$$f_s = -hkn \quad (9)$$

여기서 h 는 침투량, n 은 수직 벡터(normal vector), k 는 강성 인수(stiffness factor)로서 다음과 같이 정의된다.¹³⁾

$$k = aKA^2/V$$

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_0 를 식(9)과 같이 구하여 이를 양쪽 표면에 대칭적으로 가해주면 (c)와 같이 기하학적으로 맞는 접촉 상태를 가지게 된다.

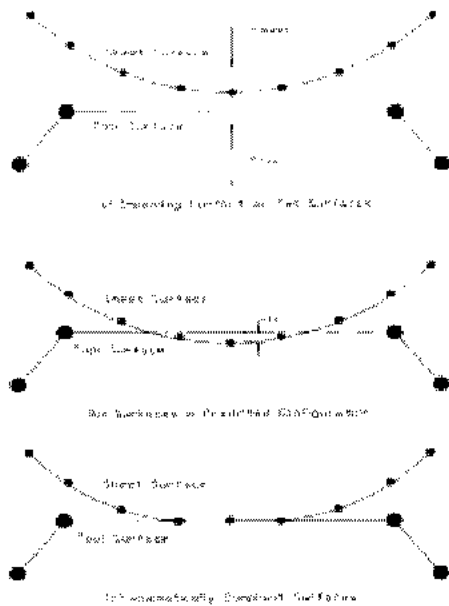


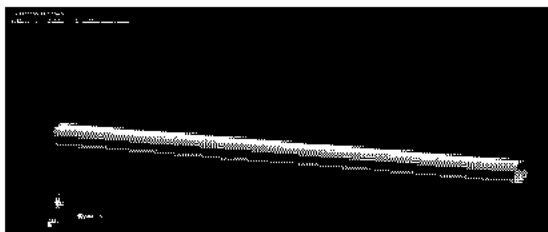
Fig. 3 Schematic diagram about contact technique

2.5 시간 증분의 안정 한계

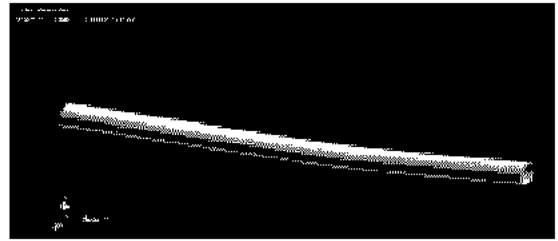
외연적 시간 적분법에서는 축차가 없는 대신 해의 안정성을 보장하기 위한 임계 시간 증분(critical time increment)이 존재하여 시간 증분이, 식 (6)에서 주는 임계시간증분 값 이하일 것을 요구하고 있다.¹⁴⁾

3. 성형해석 결과

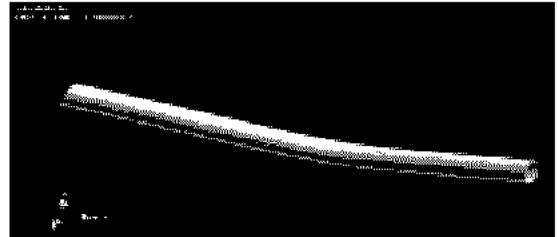
동적-외연적 유한요소해석 프로그램을 이용하여 성형품의 각 단면들을 성형단계에 따른 두께감소를, 성형한계곡선(FLD), 잔류응력분포도의 해석결과는 다음과 같다.



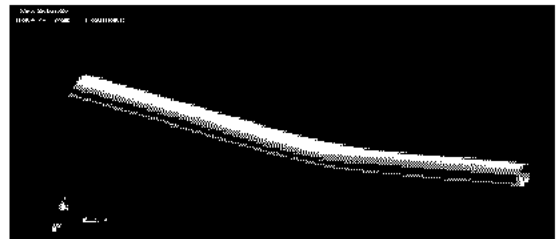
(a) Metallic pattern in the first step



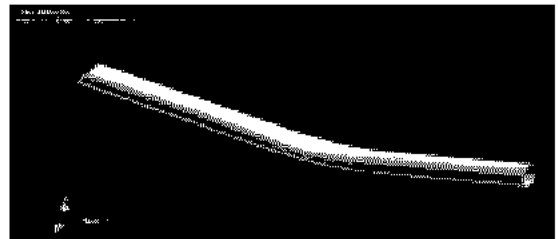
(b) Metallic pattern in step 7



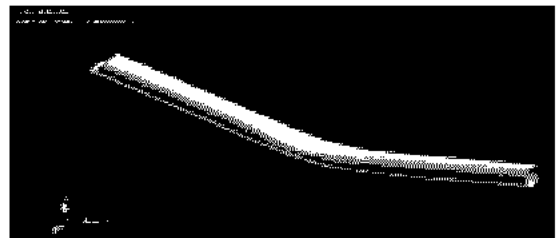
(c) Metallic pattern in step 13



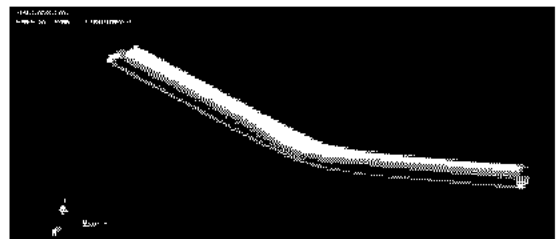
(d) Metallic pattern in step 17



(e) Metallic pattern in step 21



(f) Metallic pattern in step 26



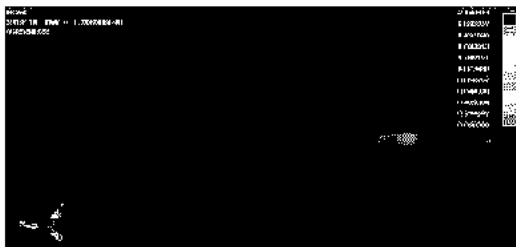
(g) Metallic pattern in finally step

Fig. 4 Metallic pattern by punch stroke

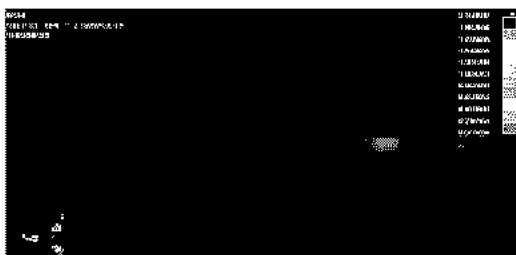
Fig. 4는 중공관을 편치 행정에 따른 step 별로 형상을 보여주고 있으며 관의 성형 시초부터 마지막 형상까지 시뮬레이션으로 나타내고 있으며 편치가 올라가면서 최종단계에서는 관재의 가운데 부분에서 주름이 생기는 것을 발견할 수 있었다.



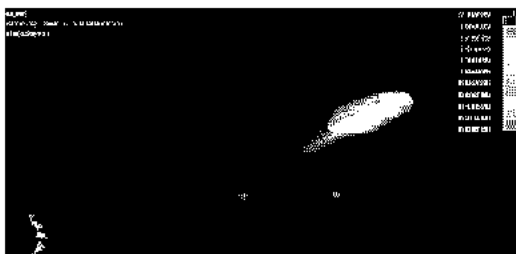
(a) Thickness distribution chart in step 2



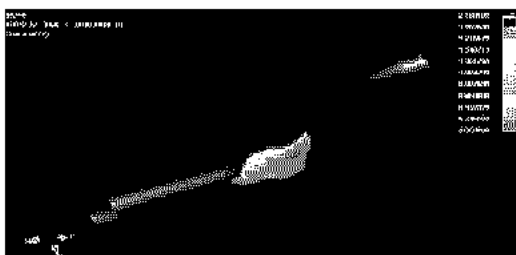
(b) Thickness distribution chart in step 14



(c) Thickness distribution chart in step 23



(d) Thickness distribution chart seeing over in finally step



(e) Thickness distribution chart seeing under in finally step

Fig. 5 Thickness distribution chart by punch stroke

Fig. 5에서는 초기변형상태에서부터 두께의 변화가 일어나는 것을 볼 수 있다. 중공관에서의 원형으로 표시된 부분을 볼 때 성형이 진행 될수록 초기상태에서의 두께의 분포보다 두께변화의 정도가 증가하고 있다. 최종변형단계에서의 두께 분포도에서 보는 것과 같이 벤딩하는 부분에서 심한 인장력을 받고 있으므로 노란색으로 표시된 부분에서 심한 파단발생의 가능성이 있을 것으로 예상된다. 국부적인 파단을 해결하기 위해 추가적인 공정설계변경이 필요할 것으로 보인다.



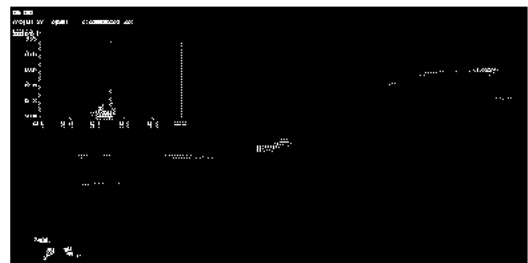
(a) Forming limit diagram distribution chart in step 2



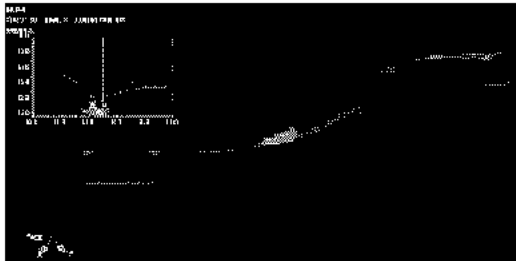
(b) Forming limit diagram distribution chart in step 10



(c) Forming limit diagram distribution chart in step 20



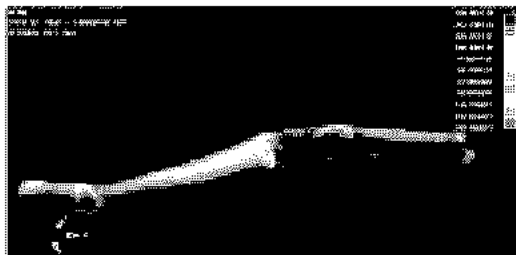
(d) Forming limit diagram distribution chart in step 27



(e) Forming limit diagram distribution chart in finally step

Fig. 6 Forming limit diagram distribution chart by punch stroke

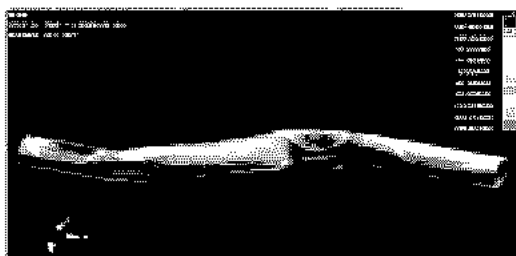
Fig. 6은 펀치행정진행에 따른 중공관의 성형한계 곡선으로 펀치스트로크에 성형이 진행될수록 판넬의 몇 군데에서 파단이 일어날 가능성을 보여주고 있다. Fig. 6에서의 (e)에서 표시된 것과 같이 파단 한계선인 곡선에 가까이 있는 점은 파단의 가능성이 높아지고 있는 부분이다.



(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

Fig. 7에서는 최종형상에서의 잔류응력분포도를 보면 x-x방향의 잔류응력의 분포는 높게 나오고 있는 반면에 y-y방향은 낮게 나타나고 있다. 일반적으로 잔류응력이 존재하는 것은 비틀림과 스프링백 등의 탄성복원현상으로 치수 정밀도를 낮추고 제품의 탄성한계를 낮추며 차후의 기계가공에 문제점을 일으키는데 이런 점은 바람직하지 못하므로 잔류응력의 예측은 제품설계과정에서 필요하다.

4. 결론 및 고찰

본 연구는 동적 외연적 방법을 이용하여 차체판넬 성형을 위한 Hydro-forming을 해석해 보았다. 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 동적-외연적 유한요소법이 Hydro-forming 공정에도 적절히 적용되어 유용함을 알 수 있다.
2. 성형해석을 통하여 주름, 파단, 비틀림, 스프링백 등을 미리 예측하여 공정단축과 경량화, 경제성, 품질 향상, 개발 기간 및 생산에 소요되는 기간의 단축 등의 최적설계를 수행할 수 있는 가능성을 보여주고 있다.
3. Hydro-forming 공정개발과 같은 신기술 개발을 위해서는 해석기술의 적용이 절실함을 알 수 있다.

해석기술의 개발은 금형설계에서 개발 트라이아웃 기간과 경비를 제품이 요구하는 고품질에 맞게 줄여 줄 수 있을 것이며 정확하고 효율적인 다양한 결과를 사전에 제공 할 수 있을 것으로 보여진다.

후 기

이 논문은 2003년도 제주대학교발전기금 청봉학술연구기금의 지원에 의해서 연구되었음.

참고 문헌

1. D. Y. Yang et al, 1995, "Comparative investigation into implicit, explicit and iterative implicit/explicit schemes for the simulation of sheet-metal forming processes", J. Materials Processing Technology, Vol. 50, pp. 39~53.
2. 정동원, 2001, "평형해법을 이용한 트렁크 리드의 단면해석과 3차원 형상합성", 한국해양공학회지, 제15권, 2호 pp. 66~71.

3. D. W. Jung, D. J. Yoo and D. Y. Yang, 1995, "A dynamic explicit/rigid-plastic finite element formulation and its application to sheet metal forming processes", *Engineering Computations*, Vol. 12, pp. 707~722.
4. H. S. Lee et al, 1994, "Finite element analysis of lateral buckling for beam structures", *Computers & Structures*, Vol. 53, pp. 1357~1371.
5. 안동규 외 4인, 1995, "강소성 외연적 유한요소법을 이용한 자동차 박판제품의 성형공정에 대한 단면해석", *자동차공학회논문집*, 제3권, 3호, pp. 19~28.
6. 정동원, 양동열, "차체판넬 스탬핑공정의 단면해석과 3차원 형상합성", *한국정밀공학회지*, 제14권, 9호, pp. 101~107.
7. N. M. Wang, B. Budiansky, 1978, "Analysis of Sheet Metal Stamping by a Finite Element Method", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 45, pp. 73~82.
8. 정동원, 2002, "유한요소법을 이용한 원통형 강편의 자유단조 해석", *한국해양공학회지*, 제16권 6호, pp. 49~54.
9. 정동원, 양동열, 안동규, 1993, "박판성형공정의 시뮬레이션을 위한 내연적, 외연적, 및 내외연적 유한요소해석의 비교 연구", *대한기계학회 추계 학술대회 논문집*, pp. 552~576.
10. "An Introduction to ABAQUS/Explicit," 1991, Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc.
12. W. C. Moss, 1984, "On the Computational Significance of the Strain Space Formulation of Plasticity Theory", *Int. J. Num. Met. Engr.*, Vol. 20, pp. 1703~1709.
13. J. O. Hallquist, 1983, "Theoretical Manual for DYNA3D", Lawrence Livermore Laboratory.
14. M. A. Meyers, G. Ravichandran, 1997, "Lectures on Dynamic Behavior of Materials", University of California, San Diego. No. 1, pp. 3~10.