

딥 드로잉 공정에서 Binder-Wrap 해석

정 동 원 · 황 재 신*

제주대학교 기계에너지생산공학부, *제주대학교 대학원

Binder-Wrap analysis at Deep Drawing 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. Did correction of deformities public decision simulation to esteemed daughter benevolent person who influence in transformation that Binder Wlap has being formed using dynamic extensive method. In this work, brief descriptions of the formulation and the factor study are presented. 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, binder wrap

서 론

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, 공구(핀치, 다이 및 블랭크 홀더 등의 집합체) 각부의 조합, 표면 및 윤활상태, 성형속도 등이 변형에 영향을 미치기 때문

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

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 신

회성 있고 경제적인 해석방법이 요구되고 이런 효율적인 알고리즘을 개발하기 위해선 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 답드로잉 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 외연적 동적 알고리즘은 내연적 정적 알고리즘에 비해서 몇가지 중요한 이점들을 갖고 있다. 첫째, 뉴우톤-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 블랭크호를 더로 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 바인더랩이 형성되면서 갖게 되는 변형을 시뮬레이션 하였다.

본 론

외연적 시간 적분법의 운동 방정식 수식화

외력에 의해 행해진 일(W^{ext})과 내력, 관성력 및 점성력에 의한 일(W^{int})은 같아야 한다는 일평형(work balance)으로부터(정동원 등, 1995)

$$\int_V \delta U^T \Psi dV + \int_S \delta U^T \Phi dS + \sum_{i=1}^n \delta U_i^T F_i = \int_V (\delta \epsilon^T \sigma + \delta u^T \rho \ddot{u} + \delta u^T k_d \dot{u}) dV \quad (1)$$

이 성립된다.

여기서

$\delta u, \delta \epsilon$: 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

이다.

형상 함수(shape function) N 을 도입하면

$$u = Nd, \quad \dot{u} = N\dot{d}, \quad \ddot{u} = N\ddot{d} \quad (2)$$

이 되고 이를 (1)식에 대입하고 정리하면 다음과 같이 동적힘 평형식(dynamic force balance equation)을 구할 수 있다.

$$M\ddot{d} + C\dot{d} + R^{int} = R^{ext} \quad (3)$$

여기서 M 과 C 는 각각 질량과 점성 행렬을 나타내며,

$$M = \int_V \rho N^T N dV$$

$$C = \int_V k_d N^T N dV \quad (4)$$

R^{int} 와 R^{ext} 는 각각 내력과 외력을 나타내는 벡터이다.

$$R^{int} = \int_V B^T \alpha dV$$

$$R^{ext} = \int_V N^T \Psi dV + \int_S N^T \Phi dS + \sum_{i=1}^n F_i \quad (5)$$

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 질

량 M 행렬을 정의한다.

$$M = \sum_e m_e = \begin{cases} \frac{1}{n} \int_{V^e} \rho dV^e & : \text{대각 요소} \\ 0 & : \text{비대각 요소} \end{cases} \quad (6)$$

여기서 n 은 한 요소의 절점수이다.

외연적 시간적분법(explicit time integration method)

계산의 편리를 위해 (3)식에서 점성 행렬 C 를 무시한다. 그러면 외연적 시간 적분 절차는 절점에서와 요소에서의 계산을 번갈아 수행하는 형태가 된다. 이를 요약하여 Fig. 1에 나타내었다(정동원 등 1995).

I. Calculation at joint of framework

(1) $d^{(i)} = M^{-1}(R^{ext(i)} - R^{int(i)})$

(2) $\dot{d}^{(i+1/2)} = \dot{d}^{(i-1/2)} + \frac{\Delta t^{(i+1)} + \Delta t^{(i)}}{2} \ddot{d}^{(i)}$

II. Calculation in factor

(1) Incremental strain calculation

$$\Delta \epsilon = B \Delta d^{(i+1)}$$

(2) Stress and state variable calculation and renewal

$$\sigma^{(i+1)} = f(\Delta \epsilon, \sigma^{(i)}, S^{(i)})$$

$$S^{(i+1)} = g(\Delta \epsilon, \sigma^{(i)}, S^{(i)})$$

(3) Calculation of internal force

$$R^{int(i+1)} = \sum B^T \sigma^{(i+1)}$$

III. $i + 1 \rightarrow$ Put by i and repeat calculation from I

Fig. 1. Algorithm of extensive time integration.

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 동일한다. 이를 Fig. 2처럼 도식적으로 나타낼 수 있다(정동원 등 1995).

즉, 모든 계산은 변형률로부터 출발하여 응력을 계산해 나가는 방식이다.

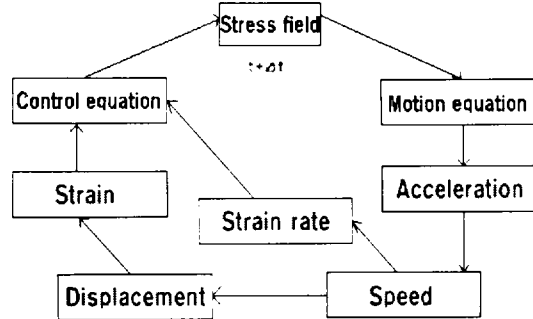


Fig. 2. Transmission process of stress wave in material.

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).

$$f_s = -h k n \quad (7)$$

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).

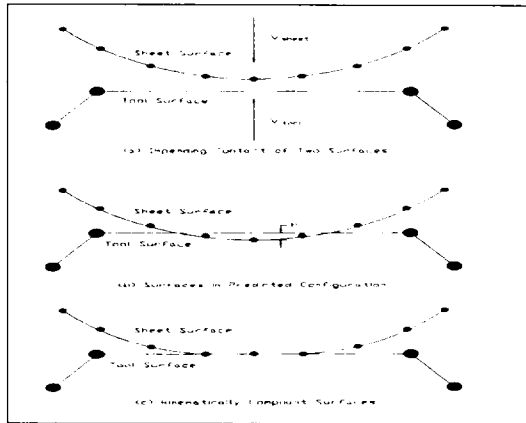


Fig. 3. Schematic diagram about contact technique.

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,

$$\Delta t_c = L_s / C \quad (8)$$

L_s : 요소의 특성 길이

$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$: 응력 전파 속도

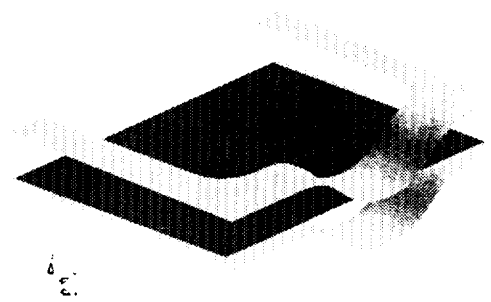
E : 영계수

ρ : 밀도

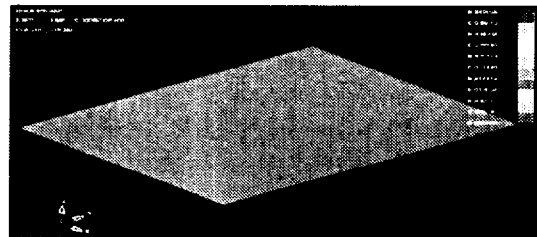
가 된다.

성형해석 결과

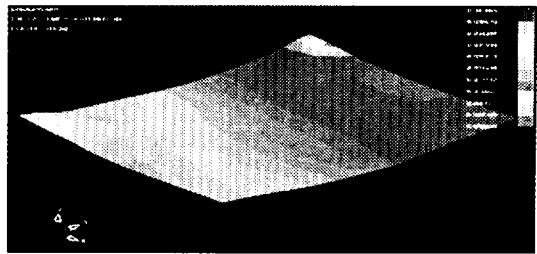
수식화 된 결과에 따라 유한요소해석 프로그램을 작성하여 성형품의 각 단면들을 성형단계에 따라 두께감소율, 성형한계곡선(주름경향), 잔류응력분포도, 이 3가지를 3차원으로 나타내 보았다. 결과들은 다음과 같다.



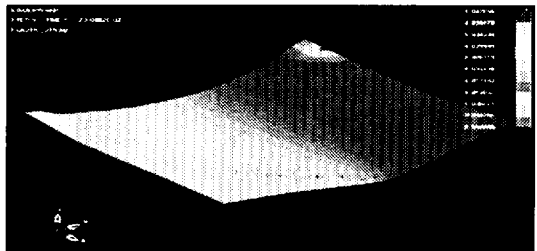
(a) Metallic pattern at dip drawing process



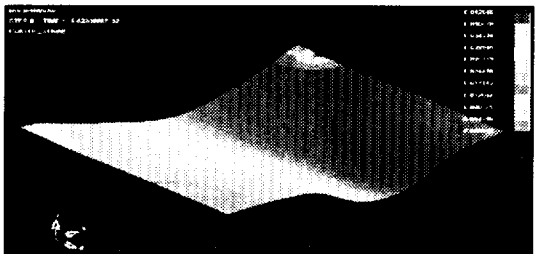
(b) Thickness distribution chart in first step



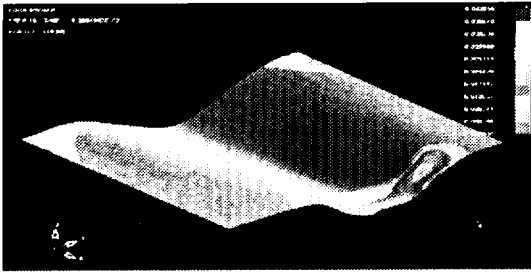
(c) Thickness distribution chart in step 2



(d) Thickness distribution chart in step 3

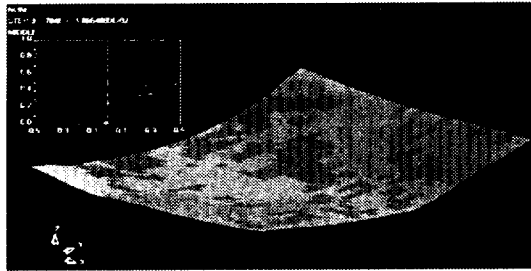


(e) Thickness distribution chart in step 4

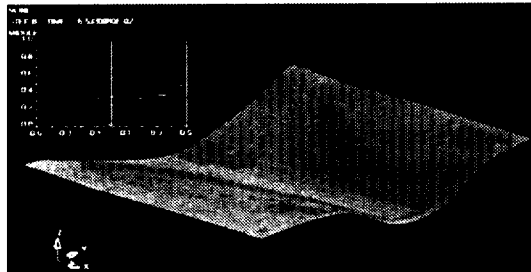


(f) Thickness distribution chart in finally step

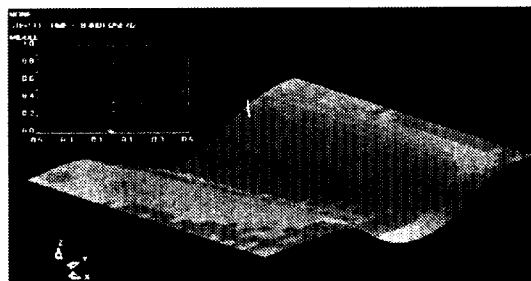
Fig. 4. Thickness distribution chart by punch stroke.



(a) Forming limit curved line distribution chart in step 3

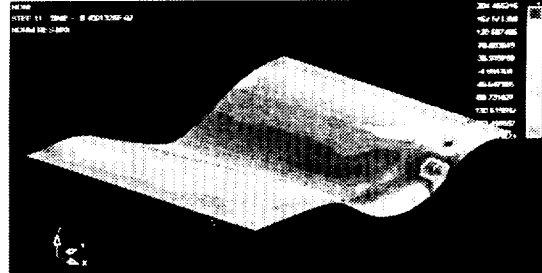


(b) Forming limit curved line distribution chart in step 8

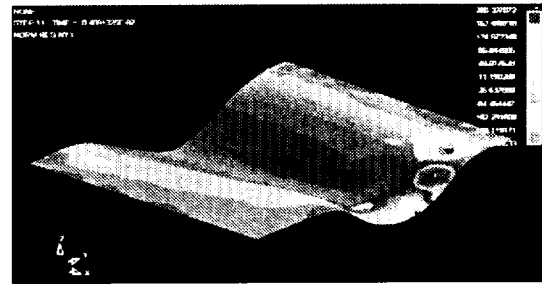


(c) Forming limit curved line distribution chart in finally step

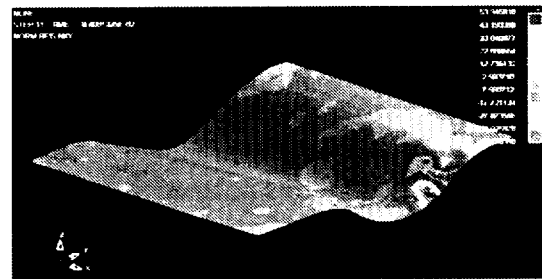
Fig. 5. Forming limit curved line distribution chart by punch stroke.



(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. Esidual stress distribution by punch stroke.

결론

동적 외연적 유한요소법을 사용하여 딥 드로잉 공정에서 Binder-Wrap 대해 해석하였다. 많은 수의 격자를 가진 복잡한 형상의 해석에는 외연적 방법이 내연적 방법보다 효과적이다. 성형해석결과 잔류응력분포도와 성형한계곡선(FLD), 그리고 두께감소율의 시뮬레이션 해 본 결과를 볼 때 성형완료 후 변형, 주름경향, Clack 발생의 예측을 할 수 있다. 동적 외연

적 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. 해의 신뢰도에 영향을 크게 주지 않는 범위 내에서 적절히 밀도를 증가시켜 해의 신뢰도와 경제성을 동시에 만족시켜야 한다.

본 연구에서는 동적 외연적 방법을 이용한 차체판넬 성형해석 시뮬레이션을 통해 바인더랩 해석과 편치속도에 관한 여러 가지 결과들을 알아보았으며 현장적용의 다당성을 검토하여 보았다.

후 기

이 논문은 2003년도 제주대학교발전기금 청봉학술연구기금의 지원에 의해서 연구되었음.

참고문헌

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