

동적-외연적 유한요소법을 이용한 Hydro-forming 공정에 관한 연구

정 동 원* · 황 재 신**

A Study of Hydro-forming process by using Dynamic-explicit finite element method

Dong-Won Jung* · Jae-Sin Hwang**

ABSTRACT

In the present work, 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 has been analyzed by using dynamic-explicit finite element method. Further, the simulated results for 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.

Key Words : Dynamic-explicit time integration scheme, Hydro-forming process, Auto-body panel stamping processes, Lumping scheme

1. 서 론

오늘날에는 단순한 접촉면의 미소 변화가 있는 박판 성형 공정을 수치적으로 정확하게 사전 예측하는 것이 가능해지면서 복잡하고 불규칙적인 곡선 형상들과 박판과 다이 사이의 비교적 큰 상대적인 변위 실질적인 산업현장 문제들을 해석하기 위하여 보다 신

뢰성 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 딥-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 성형이 산업부문에서 차지하는 비중은 매우 크며 또한 많은 영향을 미치고 있다. 박판성형공정은 가공 중에 소재의 손실이 적고

* 제주대학교 기계·에너지·생산공학부, 첨단기술연구소
Faculty of Mechanical, Energy & Production Eng., Cheju Nat'l Univ., Res. Inst. of Adv.d Tech.

** 제주대학교 대학원
Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

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(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 요구되진다. 이러한 방법들 중 가장 널리 쓰이는 것이 유한요소 해석법인데 박판성형공정의 2차원 해석이 시작되면서 크게 외연적 방법과 내연적 방법으로 나누어졌다.[1-7]

하이드로-포밍은 액체의 압력을 이용하여 성형하는 방법으로 전통적인 방식에서 불가능하였던 복잡한 형상의 제품을 일체로 가능하며 일체성형으로 말미암아 용접선이 불필요하다. 그리고 캐리브레이션 공정을 통해 제품의 형상과 치수의 정확성을 보장할 수 있었으며 비틀림 강성이 크고, 탄성복원의 정도가 작다. 그러나 고압의 압력유체 발생에 따른 에너지 비용이 고가라는 단점도 있다. 하이드로-포밍의 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 해석기술이 절실히 필요하다.

본 연구는 동적 외연적 방법을 이용하여 차체판별 성형공정을 위한 Hydro-forming 성형해석을 하였다.

II. 본 론

2.1. 외연적 유한요소 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]

$$\int_{V_c} S \delta E dv + \int_{V_c} \rho_0 \ddot{u} \delta u dv - \int_{V_c} \rho_0 b \delta u dv - \int_S F_0 \delta u ds + \sum_{i=1}^m \int_{S_i} (P^i_c \delta g^i_n + \tau^i_c \delta g^i_t) ds \quad (1)$$

- $\delta u, \delta \epsilon$: 임의의 변위 및 변형률
- ϕ : 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

위 식 좌변은 순서에 따라 내부일, 관성력에 의한 일, 중력에 의한 일, 응력 경계조건 및 접촉과 마찰에 의한 일을 나타낸다. 위 식을 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 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.

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

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

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

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

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

중간차분법은 Δt 의 크기에 따라 선택적인 수렴성을 가지며, 정확성과 수렴성은 Δt 의 제곱에 비례한다.[9] 식(4)에 의해 시간 증분 n+1에서의 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 N은 총 요소수이며 Δt_i 는 I요소에 대한 시간증분의 크기를 나타낸다. α 는 안정성을 위한 상수로 통상 0.9이하의 값을 선택한다. 시간 증분 크기는 다음과 같은 식으로 결정한다.

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

위 식에서 L_s 는 요소의 면적을 최대변의 길이로 나눈 특성 길이이며 C는 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 스템핑 공정에도 적용하고 있다. 실제 스템핑 공정의 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.

2.2. 집중 질량 행렬

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 n은 한 요소의 절점수이다.

2.3. 외연적 시간적분법

계산의 편리를 위해 (2)식에서 점성 행렬 C를 무시한다. 그러면 외연적 시간 적분 절차는 절점에서와 요소에서의 계산을 번갈아 수행하는 형태가 된다. 이를 요약하여 Fig. 1에 나타내었다.[10] 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 응력파(stress wave)의 전달 과정과 동일한데 이를 Fig. 2처럼 도식적으로 나타낼 수 있다.[11]

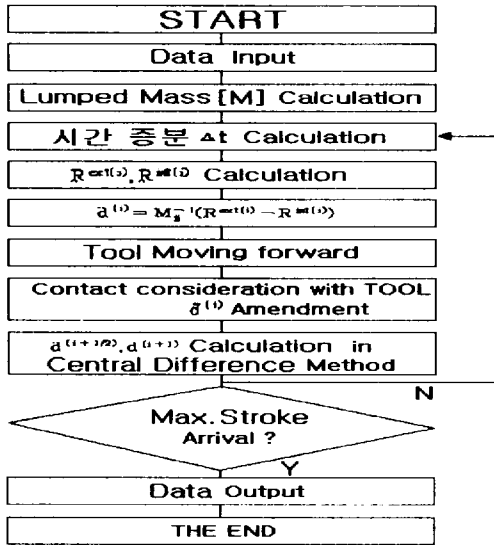


Fig. 1 Flow chart

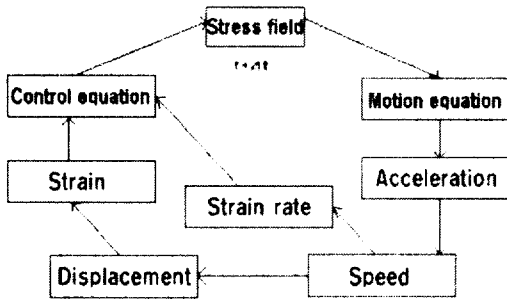


Fig. 2. Transmission process of stress wave in material

2.4. 접촉 처리

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

$$f_s = -h k n \tag{9}$$

여기서 h는 침투량, n은 수직 벡터(normal vector),

k는 강성 인수(stiffness factor)로서 다음과 같이 정의된다.[12]

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

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

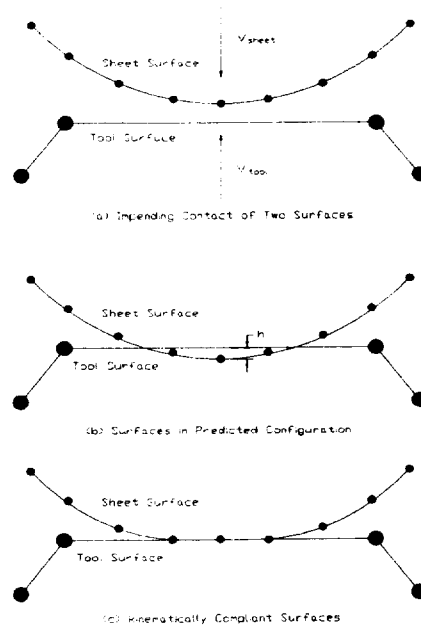


Fig. 3. Schematic diagram about contact technique

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 이 값 이하일 것을 요구하고 있다. 점성이 없을 경우 임계 시간 증분은,

$$\Delta t_c = L_s / C \quad (10)$$

가 된다.[13]

여기서,

L_s : 요소의 특성 길이
(characteristic length)

$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$: 응력 전파 속도

E : 영계수(Young's modulus)

ρ : 밀도

이다.

III. 성형해석결과

동적-외연적 유한요소해석 프로그램을 이용하여 성형품들의 각 단면들을 성형단계에 따라 두께감소를, 성형한계곡선(FLD), 잔류응력분포도를 3차원으로 나타내 보았는데 해석결과는 다음과 같다.

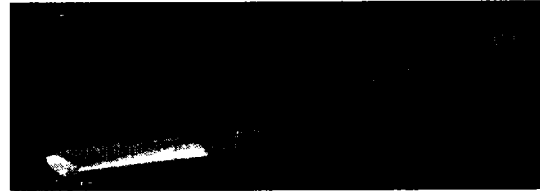
3.1. 첫 번째 증공관 해석



(a) Metallic pattern in the first step



(b) Metallic pattern in step 4



(c) Metallic pattern in step 7

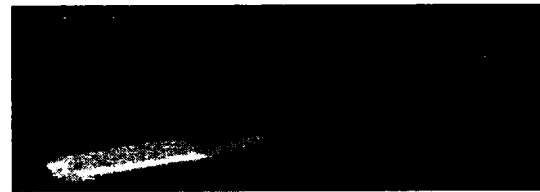
Fig. 4. Metallic pattern by punch stroke



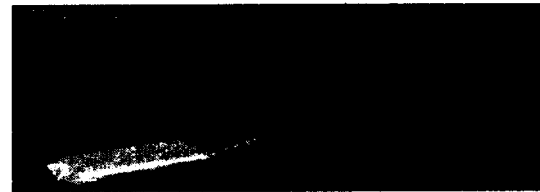
(d) Metallic pattern in step 9



(e) Metallic pattern in step 11



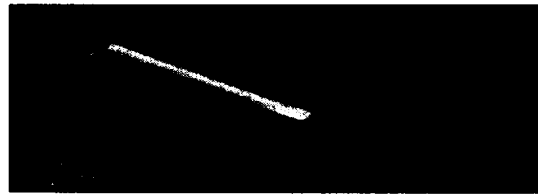
(f) Metallic pattern in step 13



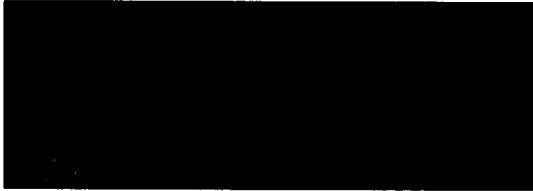
(g) Metallic pattern in step 16



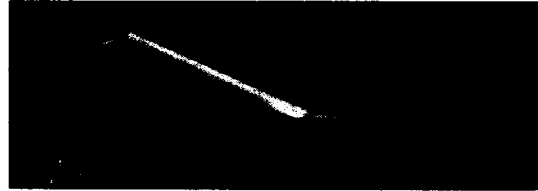
(h) Metallic pattern in finally step



(n) Metallic pattern in step 26



(i) Metallic pattern in the first step



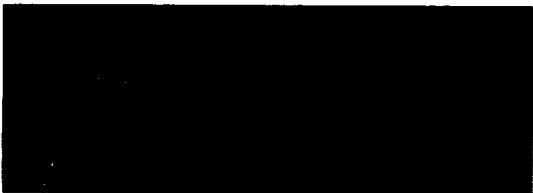
(o) Metallic pattern in finally step



(j) Metallic pattern in step 7

Fig. 4. (Continued)

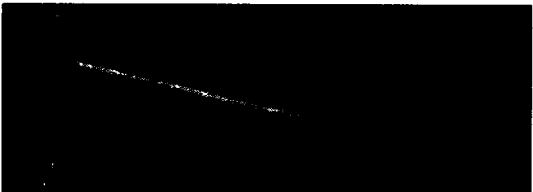
Fig. 4는 중공관을 펀치 행정에 따른 step 별로 형상을 보여주고 있으며 관의 성형 시초부터 마지막 형상까지 시뮬레이션으로 나타내고 있으며 펀치가 올라가면서 최종단계에서는 관체의 가운데 부분에서 주름이 생기는 것을 발견할 수 있었다.



(k) Metallic pattern in step 13



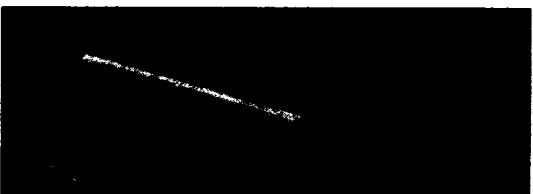
(a) Thickness distribution chart in step 2



(l) Metallic pattern in step 17



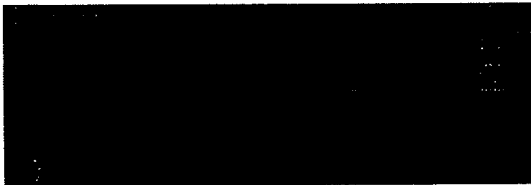
(b) Thickness distribution chart in step 14



(m) Metallic pattern in step 21



(c) Thickness distribution chart in step 23



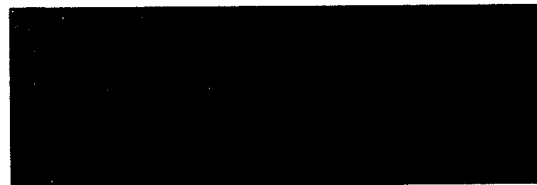
(d) Thickness distribution chart seeing over in finally step



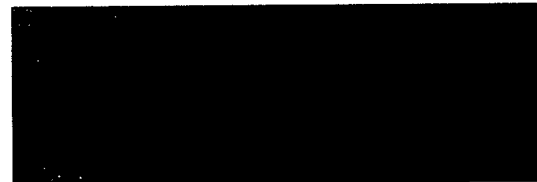
(e) Thickness distribution chart seeing under in finally step

Fig. 5. Thickness distribution chart by punch stroke

Fig. 5에서는 초기변형상태에서부터 두께의 변화가 일어나는 것을 볼 수 있다. 빨간색으로 표현된 관에서의 노란색 부분을 볼 때 성형이 진행 될수록 초기 상태에서의 두께의 분포보다 두께변화의 정도가 증가하고 있다. 최종변형단계에서의 두께 분포도에서 보는 것과 같이 심한 주름부분과 파단발생의 가능성이 있을 것으로 보인다. 국부적인 주름과 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

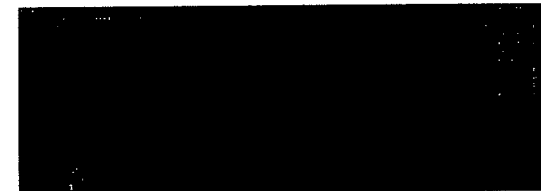
Fig. 6 Forming limit diagram distribution chart by punch stroke



(e) Forming limit diagram distribution chart in finally step

Fig. 6 (Continued)

Fig. 6은 펀치행정진행에 따른 중공관의 성형한계 곡선으로 펀치스트로크에 성형이 진행될수록 판넬의 몇 군데에서 파단이 일어날 가능성을 보여주고 있다. 파단한계선인 노란색 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 탄성 한계를 낮추며 차후의 기계가공에 문제점을 일으키는데 이런 점은 바람직하지 못하므로 잔류응력의 예측은 제품설계과정에서 필요하다.

3.2. 두 번째 증공관 해석



(a) Early binding



(b) Before lower post point 50mm



(c) Before lower post point 25mm



(d) Before lower post point 5mm

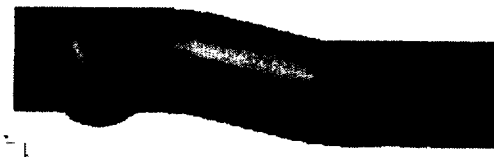
Fig. 8 Deformed shape

Fig. 8을 보면 펀치행정이 시작하면서 초기성형에서부터 최종형상까지 3차원 시뮬레이션으로 성형과정을 보여주고 있다.

Fig. 9에서는 최종형상에서 두께 감소율을 보여주고 있다. 증공관의 모서리부분의 도출부분에서 파단의 가능성이 보인다.



(a) Thickness distribution from top part



(b) Thickness distribution from bottom part

Fig. 9 Thickness distribution

Fig. 10에서는 증공관의 주름경향을 보여주고 있다. 도출이 일어나면서 밑 부분에서 주름이 발생하고 있으면 굽힘이 일어나는 부분에서 심한 주름이 발생하고 있다.



Fig. 10 Formability distribution

Fig. 11에서는 최종 중공관의 측면에서 보이는 모습을 보여주고 있다.



(a) Early binding



(b) Before lower post point 25mm



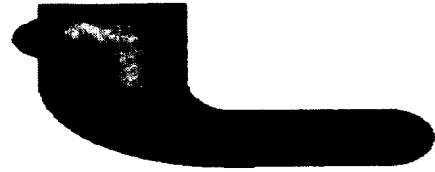
(c) Before lower post point 5mm

Fig. 11. Deformed shape

Fig. 12에서는 중공관의 측면에서 보는 두께 감소율의 분포를 보여주고 있다. 중공관의 끝 부분의 도출부분에서 두께의 감소가 심하다.



(a) Thickness distribution from bottom part



(b) Thickness distribution from side part

Fig. 12. Thickness distribution

Fig. 13에서는 중공관의 측면에서 보는 주름경향을 본 결과 주름이 심각하게 발생하고 있다.

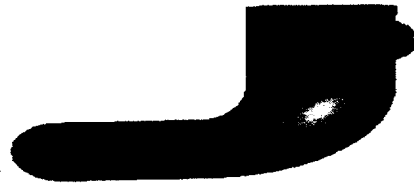


Fig. 13. Formability distribution

IV. 결론 및 고찰

본 연구는 동적 외연적 방법을 이용하여 차체관별 성형을 위한 중공관들을 하이드로-포밍을 해석해 보았다. 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 동적-외연적 유한요소법이 하이드로-포밍 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. 하이드로-포밍 공정개발과 같은 신기술 개발을 위해서는 해석기술의 적용이 절실함을 알 수 있다.
4. 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.

참고문헌

- 1) D. Y. Yang, D. W. Jung, I. S. Song, D. J. Yoo and J. H. Lee, 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) D. W. Jung, 2001, The Sectional Analysis of Trunk-lid using the Equilibrium Approach and Three-Dimensional Shape Composition, *The Korean Committee Ocean for Resources and Engineering*, Vol. 15, No. 2 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, D. W. Jung, J. H. Jung and S. Y. Im, 1994, Finite element analysis of lateral buckling for beam structures, *Computers & Structures*, Vol. 53, pp.1357-1371.
- 5) D. G. Ahn, D. W. Jung and D. Y. Yang and J. H. Lee, 1995, Sectional forming analysis of automobile sheet metal parts by using rigid-plastic explicit finite element method, *The Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 3, No. 3, pp.19-28.
- 6) D. W. Jung, D. J. Yoo, 1997, The sectional analysis of auto-body panel stamping process and three-dimensional shape composition, *Korean Society of precision Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp.101-107.
- 7) N. M. Wang and B. Budiansky, 1978, Analysis of Sheet Metal Stamping by a Finite Element Method, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 45, 73-82.
- 8) D. W. Jung, 2002, Analysis of Free Forging of Cylindrical Billets by Using Finite Element Method, *The Korean Committee Ocean for Resources and Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp.49-54.
- 9) D. W. Jung, D. Y. Yang, D. G. Ahn, 1993, Contrast study of implicit, explicit finite element analysis method for simulation of sheet-metal forming process, *Annual fall Conferences of the Korean Society of Mechanical Engineers*, pp.572-576.
- 10) 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.
- 11) R. D. Cook, Malkus, D.S., Plesha, M.E., 1989, *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, 3rd ed., Wiley, pp 367-381.
- 12) J. O. Hallquist, 1983, *Theoretical Manual for DYNA3D*, Lawrence Livermore Laboratory.
- 13) M. A. Meyers, G. Ravichandran, 1997, *Lectures on Dynamic Behavior of Materials*, University of California, San Diego. No. 1, pp.3~10.