

셸 요소를 적용한 전체 스탬핑 공정의 성형 해석에 관한 연구

정동원*, 김동홍⁺, 김봉천⁺

(논문접수일 2011. 05. 04, 심사완료일 2011. 05. 21)

A Study on Forming Analysis of Overall Stamping Process Apply Shell Element

Dong-Won Jung*, Dong-Hong Kim⁺, Bong-Chun Kim⁺

Abstract

The characteristic of sheet metal process is the few loss of material during process, the short processing time and the excellent price and strength. The static implicit finite element method is applied effectively to analyze stamping processes from using AutoForm software. The simulation analysis can be applied to the membrane elements and shell elements. Membrane elements can be applied to good efficiency, but lower than the accuracy of shell elements. Therefore, simple drawing process applies membrane element, and spring-back and analysis of stamping process are judged that it is most efficient that apply shell element. This study, the simulated results for stamping processes are shown and discussed.

Key Words : Sheet metal forming(박판 성형), AutoForm(오토폼), Shell element(셸 요소), Bending effects(굽힘 효과)

1. 서론

박판 성형(sheet metal forming)은 금속 판재를 사용하여 소성변형을 통해 이어붙임 없이 필요한 형상으로 성형하는 것을 말한다. 박판 성형 공정은 다른 가공 공정에 비하여 제품의 대량생산 뿐만 아니라 경량화와 자원 절약을 통한 비용 절감 장점을 가지고 있어서 다양한 산업 분야에서 이용되고 있다^(1~4). 박판 성형은 다양하고 여러 공정으로 이루어져 있어 성형 시 소재의 기계적 성질 및 성형조건시험에 근거한 시행착오 법에 의 의존도가 높아 많은 시간과 경비가 소요되어 왔으나, 근래 들어 다양한 유한요소 소프트웨어의 개발과 발전으로 금형 완성 전에 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 사전 성형해석이 가능해져 손실이 최소화 되고 있다⁽⁵⁾.

이러한 컴퓨터 시뮬레이션의 방법중에 하나인 정적-내연적 방법(static-implicit method)은 해의 정확도는 높으나 비선형

문제에서 해를 도출해내지 못하는 경우가 발생하는 문제와 많은 계산 시간이 필요하다는 단점이 있으며⁽⁶⁾, 동적-외연적 방법(dynamic-explicit method)은 항상 해를 도출한다는 장점이 있으나, 해의 정확도는 정적-내연적 방법에 비해 떨어진다⁽⁷⁾. 이러한 내연적, 외연적 방법은 다시 적용 요소의 종류에 따라 막막(membrane), 셸(shell), 연속체(continuum) 요소로 나눌 수 있으며, 그중에 셸 요소는 계산 시간이 막막 요소에 비해 많이 걸리며 소요되는 기억 용량이 크다는 단점이 있지만 굽힘 효과를 볼 수 있다는 장점이 있다⁽⁸⁾. Onate와 Zienkiewicz⁽⁹⁾는 점 소성 유동 이론을 이용하여 마찰과 이방성을 고려한 축대칭 스트레칭, 사각형 박판의 스트레칭을 해석하였다. Wang과 Tang⁽¹⁰⁾은 Total Lagrangian 수식을 이용하여 축대칭과 평면-변형 문제를 해석하였고 굽힘 효과를 고려하기 위해서는 셸 요소를 써야 한다는 사실을 기술 하였으며, 이를 통하여 막막 요소보다는 셸 요소를 적용하는 것이 유리하다는 것을 알

* 제주대학교 기계공학과 (jdweheju@jejunu.ac.kr)
주소: 690-756 제주특별자치도 제주시 아라1동 1
⁺ 제주대학원 에너지융용시스템학부 기계공학전공

수가 있었다⁽¹¹⁾.

본 연구에서는 쉘 요소를 적용한 전체 스펙팅 공정을 해석을 하였다.

2. 유한 요소 수식화

쉘 요소는 표현 방법에 따라 다양하게 분류되며, Autoform에 적용된 mindlin 쉘은 전단 응력 효과를 고려하기 위해 RM (reissner-mindlin) 가정을 도입하였으며, 도입된 과정을 정리하면 다음과 같다.

판의 전체 영역(Ω)은 중앙면을 기준으로 한 영역과 두께 방향의 영역으로 이루어져 있으며 다음과 같이 정의 할 수 있다 (12-13)

$$\Omega = \left\{ (x_1, x_2, x_3) \in R^3 \mid (x_1, x_2) \in \Omega_0, x_3 \in \left[-\frac{h}{2}, \frac{h}{2} \right] \right\} \quad (1)$$

여기서 Ω_0 는 중앙면($x_1 \otimes x_2$)을 나타내고 h 는 판의 두께를 나타낸다. Autoform에서는 Ω 영역으로 정의된 판에 작용하는 횡전단변형의 효과를 고려하기 위해 RM(reissner-mindlin) 가정을 도입하였으며, 이를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 중앙면에 수직인 법선은 변형 후에도 직선을 유지한다.
그러나 변형 후 중앙면에 반드시 수직일 필요는 없다.
- 2) 중앙 면에 수직인 법선 방향의 응력은 0이라고 가정한다.
- 3) 처짐 값은 판의 두께에 비해서 작다

첫 번째 가정은 판이 C^0 연속성을 가지게 하는데 이를 도시하면 Fig. 1와 같다. 그리고 판의 변위장은 다음과 같이 정의 된다.

$$\begin{aligned} u_1(x_1, x_2, x_3) &= x_3 \theta_1(x_1, x_2) \\ u_2(x_1, x_2, x_3) &= x_3 \theta_2(x_1, x_2) \\ u_3(x_1, x_2, x_3) &= w(x_1, x_2) \end{aligned} \quad (2)$$

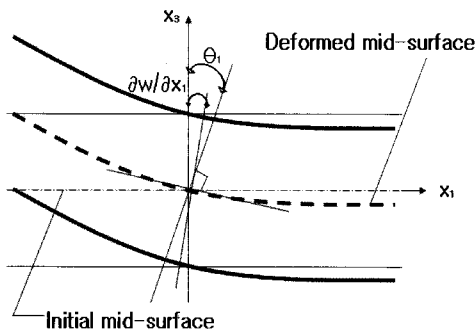


Fig. 1 Reissner-mindlin assumption

여기서는 방향에 대한 변위이고, θ_1 와 θ_2 각각 x_1-x_3 면과 x_2-x_3 면내의 회전을 나타낸다. 판에 작용하는 변형도는 식 (2)에서 정의한 변위장의 미분값을 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

식 (3)에 정의된 변형도는 판의 경우 다음과 같이 다섯 가지 성분을 가진다.

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= x_3 \frac{\partial \theta_1}{\partial x_1} = x_3 \epsilon_{11} \\ \epsilon_2 &= x_3 \frac{\partial \theta_2}{\partial x_2} = x_3 \epsilon_{22} \\ \epsilon_{12} &= x_3 \left(\frac{\partial \theta_1}{\partial x_2} + \frac{\partial \theta_2}{\partial x_1} \right) = x_3 \epsilon_{12} \\ \epsilon_{13} &= \frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} = \theta_1 = \frac{\partial w}{\partial x_1} \\ \epsilon_{23} &= \frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} = \theta_2 = \frac{\partial w}{\partial x_2} \end{aligned} \quad (4)$$

위에서 정의된 변형도 성분은 면내 방향의 변형도 벡터 $\epsilon_p = \{\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_{12}\}$ 와 면외 방향의 변형도 벡터 $\epsilon_s = \{\epsilon_{13}, \epsilon_{23}\}$ 로 나누어 정리할 수 있으며, x 는 모멘트에 대한 변형(곡률)을 나타낸다. 판이 등방성 물질로 이루어져 있을 경우 판의 응력-변형도 관계는 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_p \\ \sigma_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_p & 0 \\ 0 & D_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_p \\ \epsilon_s \end{Bmatrix} \quad (5)$$

여기서 $\sigma_p = \{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_{12}\}$ 와 $\sigma_s = \{\sigma_{13}, \sigma_{23}\}$ 는 각각 면내 방향의 응력벡터와 면외 방향의 응력벡터를 나타내며 이들에 관련된 강도행렬 D_p 와 D_s 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D_p &= \begin{bmatrix} \bar{\lambda} + 2 & \bar{\lambda} & 0 \\ \bar{\lambda} & \bar{\lambda} + 2\mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \\ D_s &= \begin{bmatrix} k_x \mu & 0 \\ 0 & k_s \mu \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $\bar{\lambda}$ 는 일반 평면 응력 상태에 있는 물질의 Lamé 상수이고, μ 는 전단강성계수, 그리고 k_s 는 전단수정계수이다. 식 (6)에서 정의한 응력은 두께방향으로 적분하면 힘의 항으로 나타나며 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$M = \{M_1, M_2, M_{12}\}^T = \int_{-h/2}^{h/2} \{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_{12}\}^T dx_3 \quad (7)$$

$$Q = \{Q_{13}, Q_{23}\}^T = k_s \int_{-h/2}^{h/2} \{\sigma_{13}, \sigma_{23}\}^T dx_3$$

여기서 휨 강도 행렬 \hat{D}_x 과 횡 전단 강도행렬 G 의 성분은 다음과 같다.

$$M = \hat{D}_x \epsilon_s, \quad Q = G \epsilon_s \quad (8)$$

식 (7)를 행렬식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\hat{D} = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1-\nu & 0 \\ \nu & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$G = \frac{k_s Eh}{2(1+\nu)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서 E 는 탄성계수, h 는 판의 두께 그리고 ν 는 프와송 비를 나타낸다. 본 연구에서는 전단수정계수 k_s 은 균일상의 사각형 단면에서의 값인 5/6을 사용하였다. 그리고 위에서 정의한 힘의 성분에 대한 부호 규약은 Fig. 2에 도시하였다.

식 (9)에서 정의한 강도행렬은 자연좌표계에 준하는 형태로 나타낼 수 있으며 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \tilde{Q}_{13} \\ \tilde{Q}_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{G}_{11} & \tilde{G}_{12} \\ \tilde{G}_{21} & \tilde{G}_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{\epsilon}_{13} \\ \tilde{\epsilon}_{23} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

여기서 강도행렬의 성분 \tilde{G}_{ij} 는 다음과 같다.

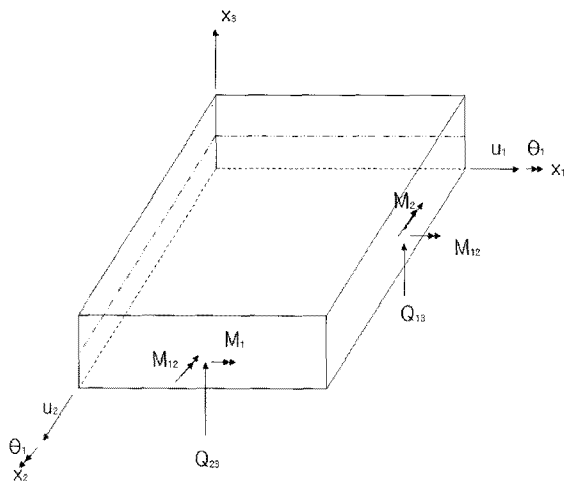


Fig. 2 Plate of sign agreement

$$\tilde{G}_{12} = \frac{\partial \xi_1}{\partial x_i} \frac{\partial \xi_2}{\partial x_i} \frac{k_s Eh}{2(1+\nu)}$$

$$\tilde{G}_{22} = \frac{\partial \xi_2}{\partial x_i} \frac{\partial \xi_2}{\partial x_i} \frac{k_s Eh}{2(1+\nu)} \quad (11)$$

$$\tilde{G}_{21} = \tilde{G}_{12}$$

3. 성형 해석 결과

셀 요소를 적용하여 전체 스펀핑 공정에 대한 성형 해석을 수행하였다.

Table 1은 이번 해석에 적용된 소재의 물성치를 나타내는 표로, 소재는 SPCC이며 R(이방성 계수)값이 0, 45, 90에서 각각 1.87, 1.30, 2.14인 이방성 소재로 적용 두께는 0.95mm이다.

Fig. 3는 적용된 소재의 성형 한계 곡선(forming limits curve)이다. 박판 성형 중 재료에 넥킹(necking) 및 파괴(crack)가 발생하게 될 때 그 부분을 새롭게 설계 하거나 성형방법을 바꾸어 변형율의 상태가 재료의 성형 한계를 넘지 않도록 주의하는 것이 좋다⁽¹⁴⁾. 성형 한계 곡선은 실험을 통해 결정되며, 제품 성형 시 성형 조건 변경 및 방법 개선에 기초 자료로 사용되는 곡선이다

Table 1 Material property

name	SPCC	
young modules	2.1e+05	
specific weight	7.8e-05	
poisson rate	0.30	
thickness	0.95mm	
R-value	R ₀	1.87
	R ₄₅	1.30
	R ₉₀	2.14

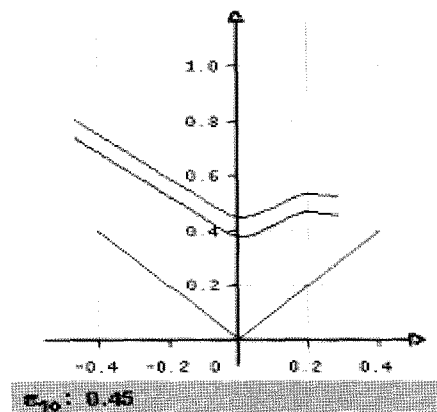


Fig. 3 FLC(forming limit curve) diagram

Fig. 4은 이번 성형 해석에서 최종적으로 완성시킬 제품 형상으로서 최종 형상을 통해 성형 해석 혹은 실제 제품 생산에서 필요한 공정을 구상해 볼 수 있다. 본 실험에서는 전체적인 형상을 성형하기 위한 드로잉 공정과 A부위의 피어싱 공정, 소재의 불필요한 부위를 잘라내는 트림 그리고 B와 C 부위의 플랜지 공정이 필요하다.

Fig. 5은 드로잉 공정에 대한 성형 해석 결과이다. B부위는 제품의 두께 및 성형 상태가 안정적인 부위로서 제품의 형상이 나타나는 부위가 드로잉 공정 시 불량 없이 성형이 될 수 있음을 보여주고 있다. 중심부 오목한 부위의 모서리 부위(A부위)는 차후 터짐으로 나타날 위험이 있음을 보여주고 있어 R 크기 확대가 필요하다, C와 D부위는 주름 발생 위험 부위 및 주름 발생 부위이며, 드로우비드(draw bead)추가 등 성형조건이 변경이 요구 되었다.

Fig. 6는 전체 공정 중 트림 공정과 피어싱 공정에 대한 성형 해석 결과이다. 트림 공정 이후에도 원으로 표시한 부위에 소재가 과다 유입되어 주름으로 발생할 위험이 나타나고 있어

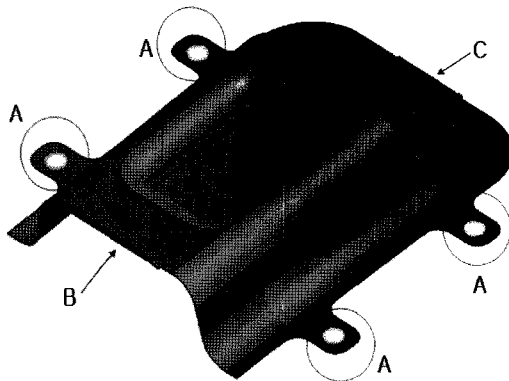


Fig. 4 Final shape of panel

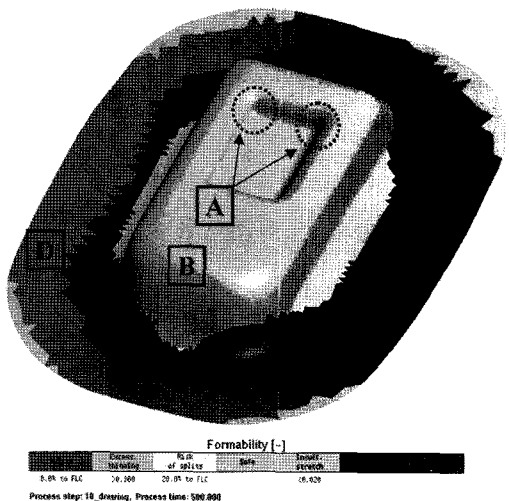


Fig. 5 Wrinkle tendency and crack after drawing process

성형 조건의 수정이나 금형 및 소재 형상 및 크기의 변경이 필요함을 예상해 볼 수 있다.

Fig. 7은 fig. 5의 B와 C부위의 플랜지 공정에 대한 해석 결과이다. C부위는 드로잉과 트리밍 작업 후에도 소재의 인장 부족 등의 원인으로 차후 주름으로 발전할 가능성이 있었던 부위였으며, 플랜징 작업 후 주름으로 발생하지는 않아 제품 생산에 큰 문제는 발생하지 않을 수 있으나, 금형 상태 및 성형 조건 등의 조정을 통해 소재 유입을 좀 더 원활하게 해줄 필요성이 있는 부위로 판단된다. Fig. 5의 B부위는 90°에 가깝게 수직으로 굽힘 작업을 수행한 부분으로, 해석 결과 굽힘 부위에 주름 및 파단의 위험이 보이지 않고 안정적인 성형이 이루어져 본 공정이 실제 제품 생산을 위한 수정 작업을 거치지

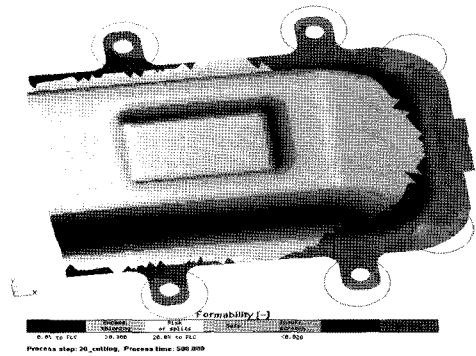


Fig. 6 Wrinkle tendency and crack after trim & piercing process

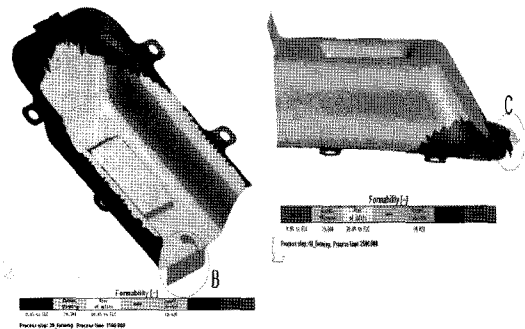


Fig. 7 Wrinkle tendency and crack after flanging process

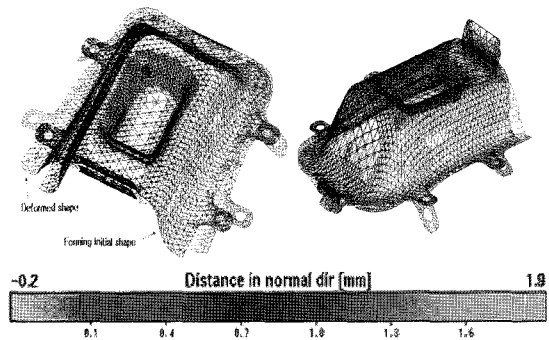


Fig. 8 Deformed for spring-back(30:1 ratio)

않아도 됨을 알 수 있다.

Fig. 8는 스프링-백에 의해 형상이 변형된 모습을 메쉬(mesh) 형태로 보여주고 있다. 스프링-백 발생에 의한 형상 변화를 좀 더 상세히 알아볼 수 있도록 하기위하여 30배로 확대한 형상

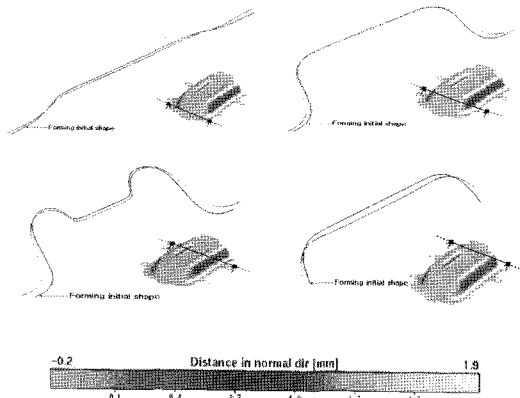
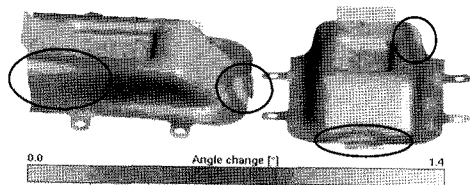
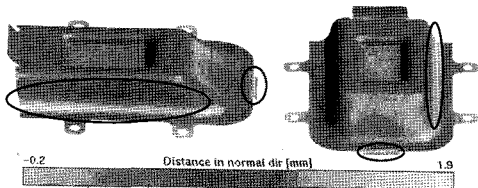


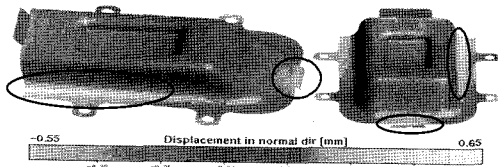
Fig. 9 Section view after spring-back analysis



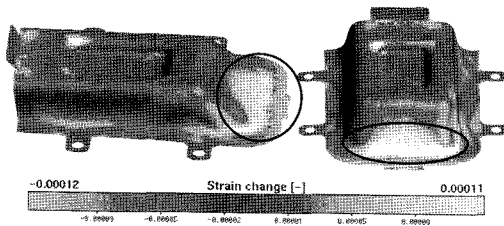
(a) Angle change



(b) Distance change of normal direction



(c) Displacement change of normal direction



(d) Strain change after spring-back

Fig. 10 Deformed shape after spring-back

으로 스프링-백에 의한 형상 변형에 의해 제품이 완성된 후 치수불량에 의한 조립의 문제가 발생 할 수 있다는 것을 그림에서 예측할 수 있다.

Fig. 9는 스프링-백으로 인한 각 구역별 변형 상태의 단면도이다. 그림에서 화살표로 표시한 단면이 성형 완료 후 금형에서 이탈되기 전 형상이고, 다른 한 단면이 금형으로부터 제품이 이탈 된 후 스프링-백이 발생한 형상이다. 각 단면의 스프링-백양을 그래픽으로 나타냄으로서 굽힘 각 변경 등과 같은 과도한 스프링-백으로 인한 불량 발생 및 스프링-백에 대한 대안을 마련해 볼 수 있다.

Fig. 10은 스펀핑 전체 공정의 스프링백 해석결과를 각각의 경우로 나누어 나타내고 있다.

4. 결론

스펀핑 전체 공정에 대한 성형 해석에서 스프링-백 해석 시 셀 요소를 적용한 해석 결과의 신뢰도를 바탕으로 하여 실제 산업 현장에서의 적용 가능성 평가를 위해 성형 해석을 수행하였다. 드로잉 공정 및 트리밍 공정에 대한 성형 해석 결과를 통해 불량 발생 부위를 사전 예측해 볼 수 있었으며, 발생 문제의 해결을 위해 블랭크 사이즈 및 성형 조건의 수정에 대해 고려해 보았다. 또한 스프링-백의 사전 성형 해석을 통해 각도, 법선 방향의 거리와 위치, 변형률의 변화에 미치는 스프링-백의 영향을 살펴보고 조립 불량으로 이어질 수 있는 부위를 사전 예측해 볼 수 있었다. 이를 산업 현장에 적용함으로써 제품 생산 기간의 단축과 설계 완성 단계에서의 신뢰도를 높일 수 있을 것이라 생각이 되며, 위의 셀 요소를 적용한 스펀핑 공정의 결론은 다음과 같다.

- (1) 셀 요소를 적용함으로써 굽힘 부위의 주름 발생에 대해 해석 과정 전반에 걸쳐 불량 발생 과정의 확인이 가능해짐.
- (2) 경험적 방법의 의존도가 높던 스프링-백 해석이 굽힘이 고려된 셀 요소를 적용한 성형 해석을 통해 스프링-백 발생 성형 해석의 정밀도가 증가함.
- (3) 셀 요소의 경우 박막 요소에 비해 해석 수행 시간이 많이 요구되므로 드로잉 공정과 같이 단순 인장 공정에는 박막 요소를, 굽힘 현상이 지배적인 스프링-백 및 플랜지공정의 해석에는 셀 요소를 적용하여 생산의 경제성과 효율성을 동시에 극대화 시킬 필요가 있음.

후 기

이 논문은 2008년도 제주대학교 학술연구지원사업에 의하여 연구 되었음.

참고 문헌

- (1) Ahn, D. G., Jung, D. W., Yang, D. Y., and Lee, J. H., 1995, "Sectional Forming Analysis of Automobile Sheet Metal Parts by Using Rigid-Plastic Explicit Finite Element Method," *Journal of Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 3, No. 3, pp. 19~28.
- (2) Jung, H. S., and Lee, S. S., 2002, "Automatic Design Supporting System for Automobile Stamping Tool," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 19, No. 8, pp. 194~202.
- (3) Yang, D. Y., Kim, T. J., and Yoon, S. J., 2003, "Recent Trend in numerical simulation of 3-D Sheet Forming Process," *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 217, No. 11, pp. 1553~1570.
- (4) Ryu, H. Y., Kim, S. S., Kim, H. J., Hong, Y. M., and Park, J. H., 2007, "Development of the Progressive Inner Transfer Die for the Productivity Improvement of the Press," *KSMTE Spring Conference 2007*, pp. 467~472.
- (5) Park, C. D., No, H. C., and Youn, K. T., 2010, "Recent Developments of Sheet Metal press processing-related technologies," *The Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 19, No. 1, pp. 5~25.
- (6) Chung, T. H., 2004, "Effect of Out-of-Plane Stress on the theoretical Forming Limit Strain of Sheet Metals," *KSMTE Spring Fall Conference 2004*, pp. 162~169.
- (7) 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*, Vol. 12, No. 8, pp. 707~722.
- (8) Kim, Y. W., Park, G. S., and Min, O. K., 1991, "Stiffener Elements of Eccentrically Stiffened Plate/Shell," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 15, No. 3, pp. 771~788.
- (9) Onate, E., and Zienkiewica, O. C., 1983, "A Viscous Shell Formulation for the Analysis of Thin Sheet Metal Forming," *Int. J. Mech Sci.*, Vol. 25, No. 5, pp. 305~335.
- (10) Wang, N. M., and Tang, S. C., 1986, "Analysis of Bending Effects in Sheet Forming Operations," *Proc. NUMIFORM'86*, pp. 71~76.
- (11) Shim, H. B., and Suh, E. K., 1995, "An Elastic-Plastic FE Analysis of Deep Drawing Processes with a Shear Energy Augmented Membrane Element," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 19, No. 11, pp. 2853~2862.
- (12) Reissner, E., 1945, "The Effect of Transverse Shear Deformation on the Bending of Elastic Plate," *ASME J. Appl. Mech.*, Vol. 12, No. 2, pp. 69~76.
- (13) Lee, S. J., 2011, "A Four-Node Assumed Strain Plate Element for Explicit Dynamic Transient Analysis," *Computers & Structures*, Vol. 14, No. 3, pp. 349~359.
- (14) Jung, D. W., and Ahn, H. G., 2005, "Study of Analyzing Roof-panel Using Static Implicit Finite Element Method," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 22, No. 3, pp. 78~85.