

셸 요소를 이용한 박판성형공정의 유한요소해석

정동원#, 고희훈*, 이찬호**, 유호영***

Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Process Using Shell Element

Dong-Won Jung#, Hyung-Hoon Ko*, Chan-Ho Lee**, Ho-Young You***

ABSTRACT

The AutoForm previously used the membrane element and it accomplished sheet metal forming analysis. The membrane analysis has been widely applied to various sheet metal forming processes because of its time effectiveness. However, it is well-known that the membrane analysis can not provide correct information for the processes which have considerable bending effects. In this research experimental results were compared with the analysis results obtained by using the shell element which is applied newly in the AutoForm commercial software. The shell element is a compromise element between continuum element and membrane element. The Finite element method by using shell element is the most efficient numerical method. From this research, it is known that FEA by using shell element can predict accurately the problems happened in actual experimental auto-body panel.

Key Words : Sheet metal forming(박판성형), AutoForm(오토포), Shell element(셸요소), Membrane element(박막요소), Bending effects(굽힘효과)

1. 서론

박판성형공정은 가공 중 소재의 손실이 적고 짧은 가공시간과 저가의 생산 단가의 장점을 가지고 있어 자동차 산업에서부터 주방용품 산업까지 폭넓게 적용되고 있다. 드로잉, 스트레칭, 굽힘, 아이어닝 및 이들의 조합으로 구성된 복잡한 변형모드를 포함하고 있는 박판 성형 공정은 재료 자체의 성형성(formability), 이방성(anisotropy) 등의 기계적 성질이나, 두께의 불균일, 표면 및 윤활상태 등

이 변형에 영향을 미치기 때문에 그 물리적 현상을 정량적으로 파악하기는 매우 어려워 실질적인 산업현장 문제들을 해석하기 위하여 보다 신뢰성 있고 경제적인 해석방법이 요구 되고 있다.¹ 굽힘(bending)보다는 대부분 인장(stretching)에 의하여 성형이 이루어지기 때문에 그 해석에서는 굽힘과 판 두께 방향의 전단응력을 무시하는 박막 해석법(membrane analysis method)이 널리 사용되고 있다. 하지만 딥 드로잉과 굽힘 가공 공정과 같이 공정의 특징상 굽힘의 효과가 무시될 수 없는 공정이

☞ 접수일: 2005 년 5 월 2 일; 게재승인일: 2005 년 11 월 10 일

교신저자: 제주대학교 기계에너지시스템공학부

E-mail jdwcheju@cheju.ac.kr Tel. (064) 754-3625

* 제주대학교 기계공학과 대학원

** ㈜오토포엔지니어링코리아

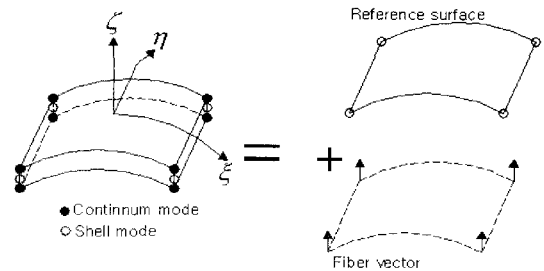
*** 울산과대학 기계공학부

있어 이러한 공정의 해석에서는 적절한 방법으로 굽힘의 효과를 고려한 필요가 있다. 이번 연구는 굽힘이 지배적인 공정에 적용할 경우 부정확한 정보를 제공할 가능성이 큰 박막 해석법과 굽힘을 고려할 수 있고 수식화가 간단하다는 장점이 있으나 3 차원 문제를 해석할 경우 계산시간이 과도하게 소요되고, 기억용량이 매우 크게 요구되어 주로 축 대칭이나 평면변형과 같은 2 차원 문제에 사용되는 연속체 해석 법(continuum analysis method) 이 두 가지 방법의 타협적인 해석방법인 셸 해석 법(shell analysis method)을 사용하여 성형해석한 결과와 실제 실험한 성형 판넬과의 비교를 통해 셸 해석법의 불량 예측 정확도와 신뢰도를 평가해 보았다.²⁻⁵ Wang 과 Budiansk 는 수직이방성 재료에 대한 박막수식을 유도하였고, 반구형 편치에 의한 스트레칭을 해석하였다. Nakanmachi 등은 굽힘 효과를 고려하기 위해 굽힘의 주곡률을 박판의 주곡률로 사용하여 스트레칭과 딥드로잉을 해석하였으며, Onate 와 Zienkiewicz 는 점소성 유동을 이용하여 마찰과 이방성을 고려한 축대칭 스트레칭을 해석하였다. Wang 과 Tang 은 Total Lagrangian 수식을 이용 축대칭과 평면-변형 문제를 해석하였고 굽힘 효과를 고려하기 위해서는 셸 요소를 써야 한다는 사실을 알았다.⁶ 본 연구의 유한요소해석에서 사용된 상용 소프트웨어인 AutoForm 은 종전 박막 요소에 의해 해석이 수행 되었으나 이번에 새롭게 셸 요소(shell element)에 의한 해석방식을 도입하였으며, 또한 스텝핑 공정과 같은 준정적 해석에 물리적으로 타당하고 보다 정확한 결과를 도출해 낼 수 있는 정적 내연적 방법을 사용하는 상용 소프트웨어이다.

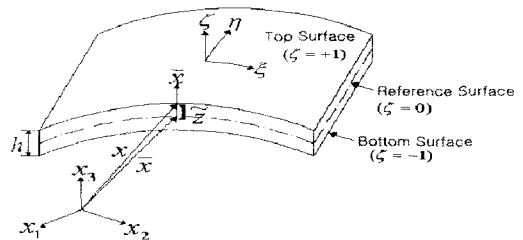
2. 기존 셸 이론에 대한 고찰

본 연구에서의 셸요소의 이론적 배경은 기존연구⁷를 참고로 하였다.

수식화는 전 스텝에서의 수렴 결과를 현재 스텝 계산을 기준으로 하는 개량 라그랑지안 방법으로 Yoon 등⁸⁻¹²의 수식화에 기초하고 있다.



(a) Construction of a typical shell element



(b) Shell geometry

Fig. 1 Continuum-base shell element

셸 요소에서 재료의 좌표는 Fig. 1 과 같이 자연 좌표계 ξ, η, ζ 로 나타낼 수 있으며, 일반적으로 셸의 기준면(reference laminar surface) $\bar{x}(\xi, \eta)$ 는 아래면과 윗면의 중간면으로 할 수 있다. 즉 셸의 기준면은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{x}(\xi, \eta) = x(\xi, \eta, \zeta = 0) \quad (1)$$

셸 요소 방정식 유도를 위해 동적 가정(kinematic hypothesis)과 정적 가정(static hypothesis)을 도입하여 변분식을 유도하면 식(2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 동적 가정이란 소재의 수직벡터가 변형 중에 직선으로 남아있다는 것이고, 정적 가정은 박판 소재의 두께 방향으로 응력과 응력 증분이 '0'이라는 가정으로, 소재의 두께가 길이나 폭에 비해 매우 작은 박막이론에서 광범위하게 채택되고 있는 가정이다.

$$K^m(\Delta u) + K^s(\Delta u) = F^e(u) - F^i(u) \quad (2)$$

여기서 K^m, K^s 그리고 F^i, F^e 는 각각 선형강성 행렬(linear stiffness matrix or material stiffness

matrix), 기하학적 강성행렬, 그리고 내력 벡터와 외력벡터를 나타 내고 다음과 같이 정의 한다.

이 때, 유한 요소식 유도를 위해 셀의 두께가 곡률반경에 비해 매우 작다는 조건이 만족해야 자코비안이 두께 방향으로 일정하다고 볼 수 있으며, 또한 면 방향과 두께 방향의 자코비안 분리를 위한 미분을 수행하기 위해 셀 각 층(layer)의 윗면과 아래면이 평행하다는 테이퍼(taper)가정과 수직성(normality) 가정이 필요하다.¹³

여기서 K^m , K^g 그리고 F^i 는 다음과 같이 정의 된다.

$$K^m = \int_s \delta e^T D_1 \Delta e ds \quad (3)$$

$$K^g = \int_s \delta g_i^T S_2 \Delta g_i ds \quad (4)$$

$$F^i = \int_s \delta e^T S_1 ds \quad (5)$$

여기에서 e 는 변형을 벡터, S_1 은 응력 벡터, D_1 은 구성계수 행렬, g_i 는 변위 구배 벡터, 그리고 S_2 응력 행렬이다. 여기에서 모든 행렬과 벡터 는 두께 방향으로 적분이 수행된 결과 식 형태를 취한다.

3. 성형해석결과

실험에 사용된 재료는 CHSP35R 로 고장력 강 판중 가공용 강판이다. P 가 첨가된 고용 경화 강으로 가공성이 우수하여 자동차 판넬(center floor 와 bracket)등의 강도보강을 위해 사용한다. 소재의 두께는 0.7mm 로 R 값이 0, 45, 90 에서 각각 1.14, 0.82, 1.70 인 이방성 재료로 프아송비는 0.3 으로 Table 1 은 적용소재의 특성표이다.

Table 1 material property

Young's modulus : 2.1e+05 Mpa
Poisson ratio : 0.30
R-values : r_0 : 1.14
r_{45} : 0.82
r_{90} : 1.70
Thickness : 0.7mm

이 실험은 프론트 팬더(front fender)에 대해 드로잉, 트리밍, 플랜징(flanging)의 총 3 단계의 성형 해석이 행하여 졌으며, Fig. 2 는 각 단계의 툴 셋팅 상태를 보여주고 있다

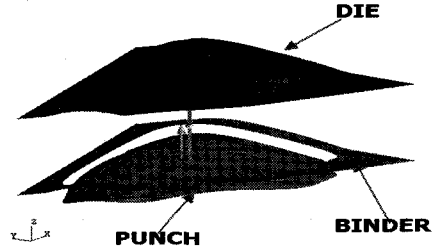


Fig.2 (a) Drawing

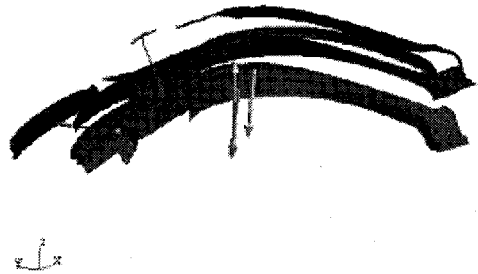


Fig.2 (b) Trimming

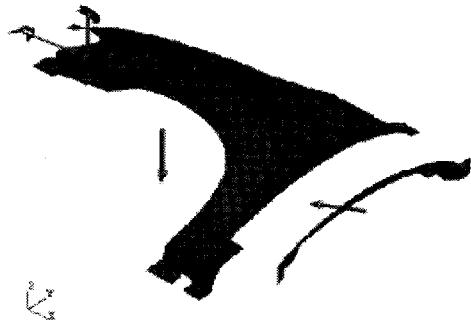


Fig.2 (c) Flanging

Fig. 3 은 해석결과 그림으로 두께 분포도에서의 적색구간은 소재가 과도하게 얇아진 부분이며, 주름 분포도의 적색 구간은 성형 완료 후 주름이 발생한 구간이다.

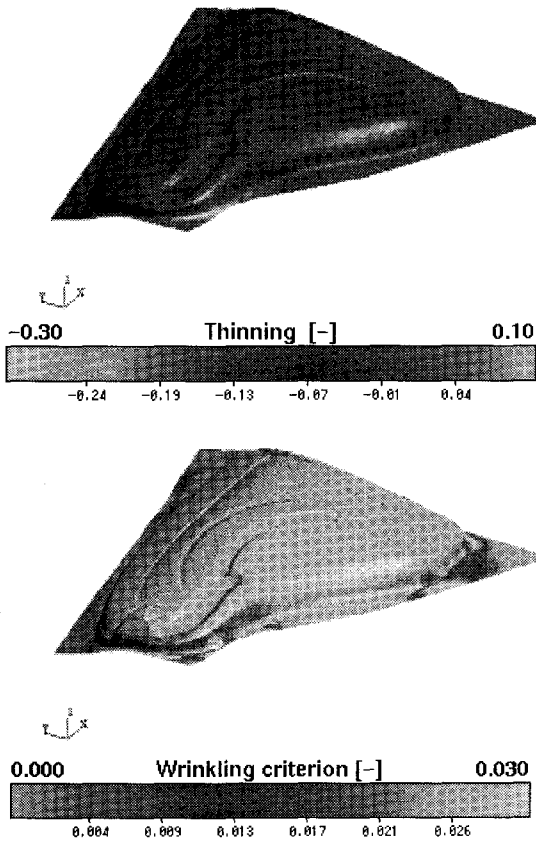


Fig. 3 Analysis result of whole panel

4. 성형해석결과와 실험결과의 비교 및 고찰

최종적으로 성형해석에서 나타난 불량위험 부분 및 불량 부분을 실제 실험한 성형제품과 비교하여 보았다. 성형해석결과 주름 발생 및 주름 발생 위험 지역인 적색과 청색구간은 실제 실험 성형제품에서도 주름이 발생하는 것을 Fig. 4 ~ Fig. 9 에서 확인 할 수 있었다. 특히 Fig. 4 와 Fig. 5 에서 확인 할 수 있듯이 셸 요소를 사용한 경우가 박막 요소를 적용한 경우보다 보다 정확하고 신뢰할 수 있는 해석결과를 얻어 낼 수 있었다. 특히 플랜징 및 벤딩 과정에서의 주름경향에 대한 신뢰성 향상이 두드러지게 확인되었다.

Fig. 4 와 Fig. 5 는 실제 실험 결과물과 셸요소와 박막 요소를 사용한 경우 각각의 해석 결과로서, 셸 요소를 사용한 경우가 박막 요소를 사용한 경우가 실제 실험 결과에 더욱 가까운 해석 결과가

도출 됨을 확인 할 수 있다. 이는 박막 요소는 굽힘에너지와 판 두께 방향의 전단응력을 무시하고 해석을 수행 하는 데 반해 셸 요소는 두께 정보를 그대로 적용 함으로서 두께 방향의 전단응력과 굽힘 에너지의 적용이 가능하기 때문이라 판단된다.

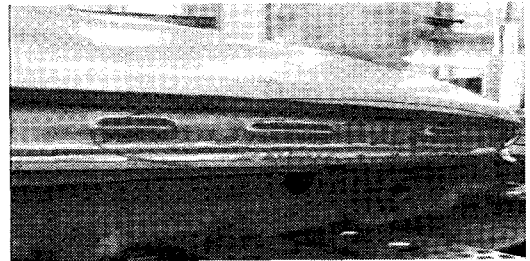


Fig. 4 (a) Experiment result

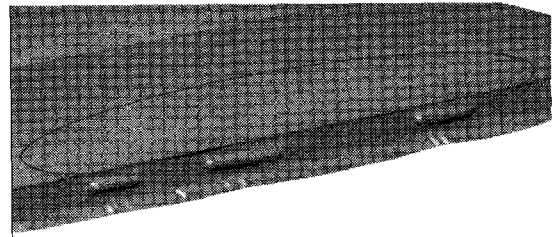


Fig. 4 (b) Analysis result - shell element

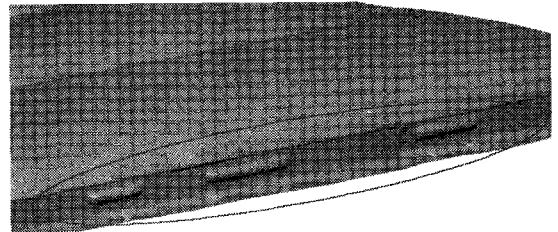


Fig. 4 (b) Analysis result - membrane element



Fig. 5 (a) Experiment result

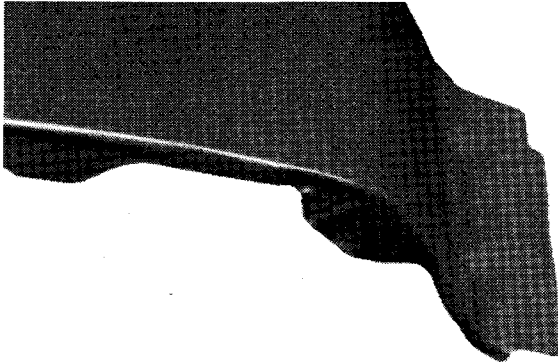


Fig. 5 (b) Analysis result – shell element

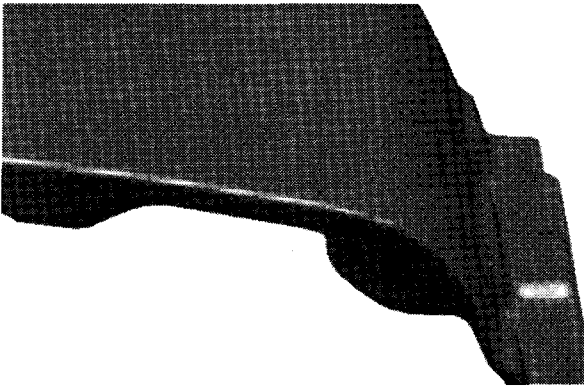


Fig. 5 (c) Analysis result – membrane element

Fig. 6~Fig. 8 은 셸 요소를 사용한 해석 결과와 실제 실험 결과를 비교한 것이다.

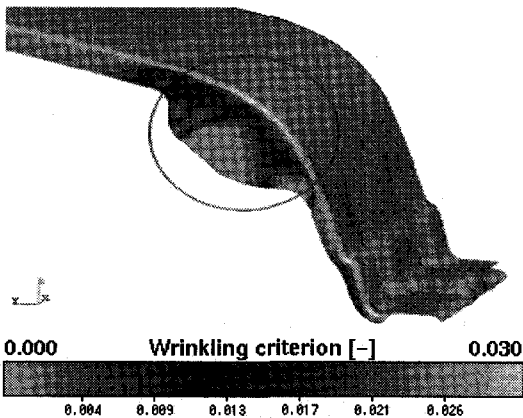


Fig. 6 Analysis result

Fig. 6 은 굽힘이 심한 부위로 성형해석결과 실제 실험한 제품(Fig. 5 (a))에서 발생 하는 주름이 비

교적 정확하게 예측되고 있으며, 성형해석의 중간 과정에서는 박막 요소를 이용한 성형해석에서는 예측되기 힘들었던 주름의 변화까지도 상세히 예측할 수 있었다.

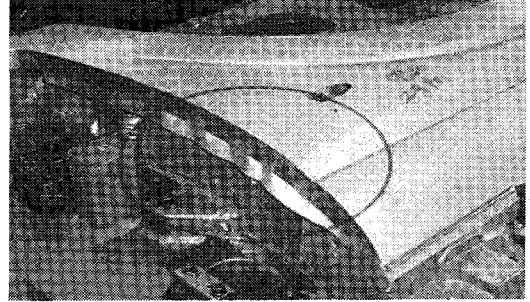


Fig. 7 (a) Experiment result

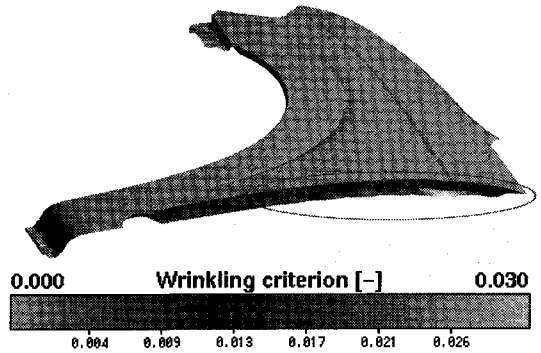


Fig. 7 (b) Analysis result

Fig. 7 에서는 실제 실험한 제품의 플렌징 측벽 부위에 발생한 주름들을 셸 요소를 이용한 성형해석결과가 정확히 예측할 수 있음을 알 수 있으며, 박막요소를 이용한 성형해석 보다 신뢰도가 높게 평가 되었다.

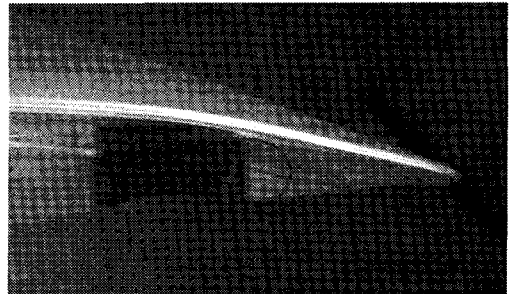


Fig. 8 (a) Experiment result

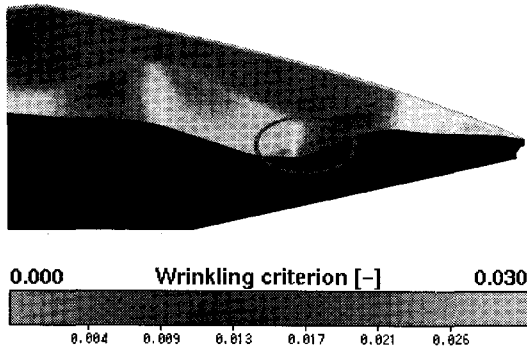


Fig. 8 (b) Analysis result

Fig. 8 에서 측벽 부위에서 성형해석결과가 터짐을 예측하고있으며, 실제 실험에서도 예측된 부위에서 정확히 터짐이 발생하고 있는것을 확인할 수 있었다.

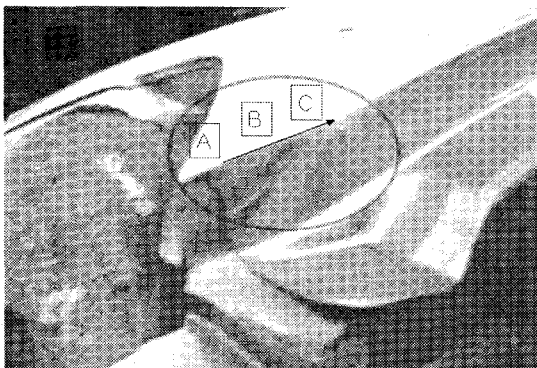


Fig. 9 (a) Experiment result

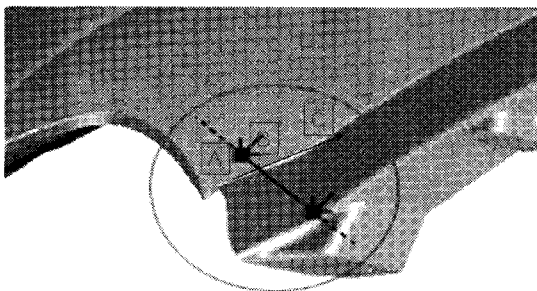


Fig. 9 (b) Analysis result

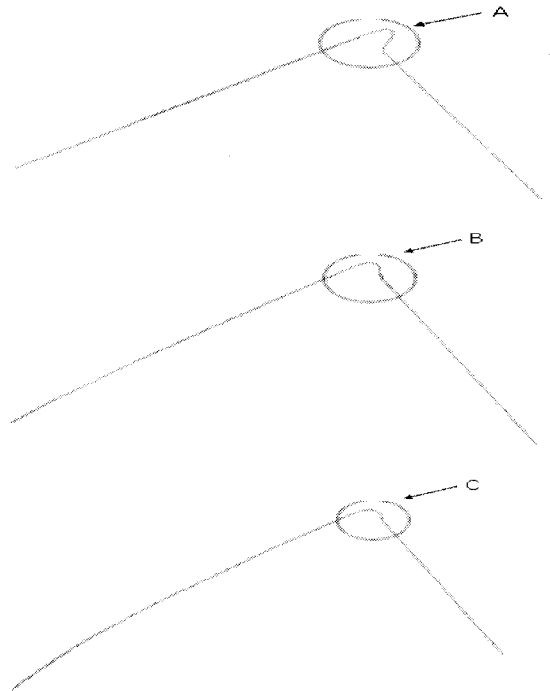


Fig. 9 (c) Section view

Fig. 9 에서 (a)는 실제 실험한 결과이고 (b)는 성형해석 결과, (c)는 해석결과의 A, B, C 부분의 단면으로, 굽힘 발생시 바로 굽혀지지 않고 굽힘 저항으로 인해 볼록 튀어나오면서 굽혀 지는 현상인 사쿠레 현상이 쉘 요소를 사용한 해석결과에서 잘 예측되어지고 있다. 기존의 박막 요소를 사용한 해석에서는 굽힘에 대한 정확한 예측이 힘들었으나, 쉘 요소를 적용한 본 해석에서는 실험결과와의 유사한 해석결과를 얻을 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 쉘 요소가 새롭게 적용된 AutoForm 상용소프트웨어를 통해 박관성형 공정을 해석해 보았으며, 신뢰성 평가를 위하여 실제 실험한 판넬 제품과 비교, 검토해 보았다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 박막 요소 해석의 경우는 굽힘 영역이 있는 경우 적당하지 않으며, 연속체 요소 해석의 경우는 굽힘 영역이 있는 경우도 정밀 해석이 가능하나 과도한 계산시간의 필요로 인해 극히 정밀한 해석을 요구하지 않는다면 쉘 요소 해석법을 사

용하는 것이 경제적이며, 정확도도 충분하다고 판단된다.

(2) 굽힘 영역이 포함된 성형해석결과와 실제 실험한 제품과의 비교를 통하여, 쉘 요소 해석법을 이용한 해석결과와 실제 실험한 결과가 불량부위가 비교적 정확하게 일치하고 있어, 쉘 요소 해석법이 굽힘이 심한 박판성형공정 해석에 적합함을 알 수 있다.

(3) 하지만, 굽힘이 심하지 않은 단순 인장 공정에서는 여전히 박막 요소 해석법을 사용하는 것이 계산 시간 면에서 효율적이다. 따라서, 박판성형공정을 해석함에 있어, 기존의 박막 요소 해석법과 쉘 요소 해석법을 병행하는 것이 해석의 효율성과 정확성을 함께 극대화 시킬 수 있다고 본다.

참고문헌

- Jung, D. W., Ahn, H. G., "study of analyzing roof panel using static implicit finite element method," Korea society of precision engineering, Vol. 22, pp. 78-85, 2005.
- Jung, D. W., Yoo, D. J. and Yang, D. Y., "a dynamic explicit/rigid-plastic finite element formulation and its application to sheet metal forming processes," Engineering Computations, Vol. 12, pp. 707-722, 1995.
- Jung, D. W., Hwang, J. S. and Ahn, H. G., "a first study of developing stamping die of REF SILL OTR-R/L auto-body panel stamping processes," Reprinted from Bulletin of the Marine and Environmental Research Institute Cheju National University Jeju, Korea., Vol. 28, No. 1, 2004.
- Yang, D. Y., Jung, D. W., Song, I. S., Yoo, D. J. and Lee, J. H., "comparative investigation into implicit, explicit and iterative implicit/explicit, schemes for the simulation of sheet-metal forming process," J. Materials Processing Technology, Vol. 50, pp. 39-53, 1995.
- Shim, H. B., Yang, D. Y., "an elastic-plastic finite element analysis on hydrostatic bulging of rectangular diaphragms by using layered degenerated shell element," Int. J. Mech. SDI, Vol. 32, pp. 49-64, 1990.
- Yang, K. B., "rigid-plastic finite element analysis of sheet metal forming processes using membrane, shell and continuum elements," department of mechanical engineering graduate school cheju national university, june, 2000.
- Kim, J. B., Kim, T. J., Yang, D. Y. and Yoo, D. J., "An efficient analysis of wrinkling in the door inner stamping process by global analysis and subsequent local analysis," Transactions of Materials Processing, Vol. 9, No. 6, pp. 653-662, 2000.
- Mattiaso, K., "Numerical Simulation of Stretching Processes," SIMOP-I, Editor Lange. K., Proc. of the 1. Int. Workshop, Stuttgart, pp. 170-213, 1985.
- Wang, N. M., Tang, S. C., "analysis of bending effects in sheet forming operations," Int. J. for Num. Mech. in Engng, Vol. 25, pp. 253-367, 1988.
- Stanley, G., "continuum-based shell elements," Ph.D Thesis, Stanford University, 1985.
- Bathe, K. J., "finite element procedures in engineering analysis," Prentice-Hall, 1982.
- Hughes, T. J. R., "the finite element method: linear static and dynamic finite element analysis," Prentice-Hall, 1987.
- Yoon, J. W., Yang, D. Y. and Chung, K., "A elasto-plastic finite element method based on incremental deformation theory and continuum based shell elements for planar anisotropic sheet materials," Comput. Meths. Appl. Mech. Engrg, Vol. 1, pp. 23-56, 1999.