

축대칭 액압벌지 성형공정의 유한요소해석에 관한 연구

윤선홍* · 진인태** · 구양** · 류인일**

A Study on the Finite Element Analysis of Axisymmetric Hydrostatic Bulge Forming Processes

S. H. Yun, I. T. Jin, Y. Gu and I. I. Ryoo

Abstract

This paper presents development of a Finite Element Analysis program. The program was developed on the based of second-dimensional plane strain rigid plasticity finite element analysis and an implicit program is coded. The program was tested by being applied to the axisymmetric hydrostatic bulge forming processes using the circle dies. By the Finite Element Analysis at the fluid in chamber and at the blank material, we could know that the hydrostatic bulge forming processes can be influenced of material, the diameter of product and the forming velocity. The developed Finite Element Analysis program was approved by the analysis results about forming variables.

Key Words : Finite Element Analysis, Axisymmetric, Hydrostatic bulge forming processes

1. 서 론

액압벌지 성형법은 소재에 액압실(chamber)의 액압을 직접 가하여 성형하는 방법으로 스탬핑공정에서 편치역할을 액압실이 대신할 수 있도록 고안된 성형법이다. 액압을 증가시키면 그 액압이 소재에 직접 전달되고 소재는 금형의 형상에 맞게 성형이 진행된다. 액압벌지 성형법을 도입하면 제품형상이 복잡하더라도 다이형상과 같은 제품을 점진적으로 성형시킴으로써 공정수를 줄일 수 있고 스탬핑공정에서 필연적으로 발생하는 비접촉부의 국부적 변형을 증가를 억제할 수 있다. 또한, 금형과 소재의 직접적 접촉을 줄임으로써 제품표면의 굵은 자국 등을 줄여 표면품질이 우수한 제품을 생산할 수 있는 장

점이 있다. 본 논문에서는 재료 내부의 유동속도, 변형형상, 접촉부의 내부압력분포 등을 알 수 있는 축대칭 액압벌지 유한 요소해석 프로그램을 작성하여 액압벌지 성형과정 중에 발생하는 유동속도분포, 소재의 응력을 확인하고자 한다. 그리고 소재의 두께, 제품의 직경, 가공속도, 변형률속도 의존성 민감도 지수에 따른 가공하중의 변화와 소재표면의 유동속도 차이를 축대칭을 사용하여 비교하여 보았다.

2. 액압벌지 성형에서의 해석방법

2.1 소재와 액압부분의 구성식

소재성분은 등방성 강소성체로서 다음식에서 표시되는

* 부경대학교 정밀기계공학과 대학원

** 부경대학교 기계공학부

Lavy-Mises의 구성식과 체적일정의 법칙을 만족하여야 한다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\epsilon}}{\sigma} \sigma_{ij} \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij} = 0 \quad (2)$$

그리고 본 연구에서 도입한 변형 경화 법칙은 변형률 속도항을 고려하는 강점소성 유한요소 수식화에 주로 사용되는 응력-변형률 관계식이다.

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 (a + b \bar{\epsilon})^n \dot{\epsilon}^m \quad (3)$$

$\dot{\epsilon}_{ij}$: 변형률속도성분 σ_{ij} : 편차응력성분

$\dot{\epsilon}$: 상당변형률속도 $\bar{\sigma}$: 상당응력

$\bar{\epsilon}$: 상당변형률 σ_0 : 항복응력

n : 가공경화지수 a, b : 재료정수

m : 변형률속도 의존성 민감도 지수

2.2 유한요소해석을 위한 해석조건

Table 1 The analysis condition for the axisymmetric hydroforming bulge forming process

소재의 두께	5 ~ 20 mm
제품의 직경	70 ~ 140 mm
가공속도	1 ~ 50 mm/sec
유체의 물성치	$\bar{\sigma} = 1(1 + \bar{\epsilon})^{0.0} \dot{\epsilon}^m$ $m = 0.01 \sim 1.00$
소재의 물성치	$\bar{\sigma} = 144.6(1 + \bar{\epsilon})^{0.0}$
총 압하율	5 %
총 요소수	400 개
총 절점수	451 개

2.3 유한요소해석의 모델형상과 제품형상

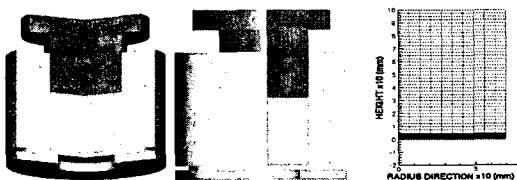


Fig. 1 The experiment tool and the analysis model for hydrostatic bulge forming process

Fig. 1은 실험장치를 모델링한 것과 실험장치 안의 액압실과 소재를 축대칭액압벌지 유한요소해석을 하기 위한 해석모델 형상을 나타낸 그림이다. 제품의 반경이 56mm이고, 소재의 두께가 5mm일 때 요소수 400개와 절점수 451개로 요소분할 한 기준모델형상이다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 소재의 두께변화에 따른 해석결과 및 고찰

Fig. 2은 제품의 반경 56mm, 가공속도가 10mm/s, 액압을 가하는 유체의 변형률 속도 의존성 민감도 지수 $m=1.0$, 소재두께가 5mm, 10mm, 15mm, 20mm일 때 압하율 5% 최종 5단계에서의 내부압력분포이다. 소재두께가 가장 얇을 때는 벌지되어 인장이 일어나지만 두께가 두꺼워질수록 인장에 의한 벌지 성형보다 굽힘에 의해 변형되는 것을 알 수 있다. 어느 일정한 두께 범위에서는 벌지 성형이 되고, 두께가 두꺼울수록 굽힘에 의해 변형이 일어나는 것을 볼 수 있다. 그리고 액압실은 액체가기 때문에 거의 동일한 압력분포를 보이고 있다.

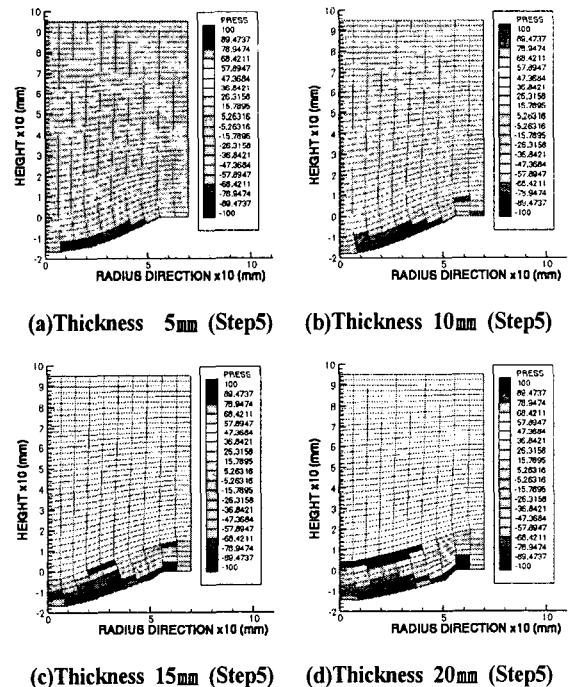


Fig. 2 The contour plot of the pressure distribution

Fig. 3는 같은 조건에서의 내부유동속도분포이며, 압축 방향에 대한 유동속도를 등고선 형태로 나타낸 것이며 두께가 두꺼울수록 벌지성형의 인장력에 의한 길이 신장

보다는 다이의 끝단면에서의 소재의 전단 변형으로 인하여 속도분포의 차이를 나타내고 있다. 두께가 얇을 때는 벌지되면서 속도벡터가 부드럽게 내려가는데 반해서 두께가 두꺼울 때는 전단 면이 발생하여 속도벡터가 밑으로 향하는 것을 확인 할 수 있다.

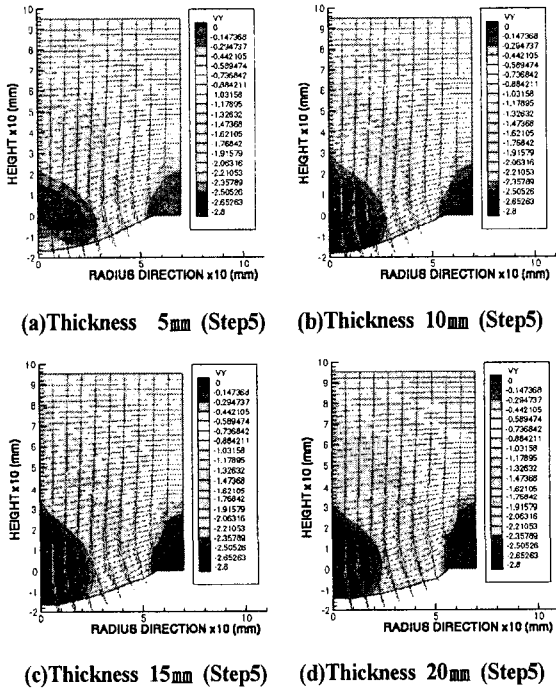


Fig. 3 The contour plot of the velocity distribution

Fig. 4은 각 단계별 소재두께변화에 따른 가공하중변화와 소재표면부분의 제품반경방향의 길이에 따라 나타난 것이며, 소재두께가 커질수록 가공하중이 증가하는 것과 대체로 대칭축과 다이끝단면 사이에서 최대속도 분포를 나타내고, 최대속도는 두께가 두꺼워질수록 중심부 쪽으로 이동하는 것을 보여주고 있고, 두께가 두꺼울 때는 굽힘에 의해 속도가 빨라지나 두께가 너무 두꺼울 때에는 다이끝부분에서 전단변형이 생겨서 속도가 느려지는 것을 볼 수 있다.

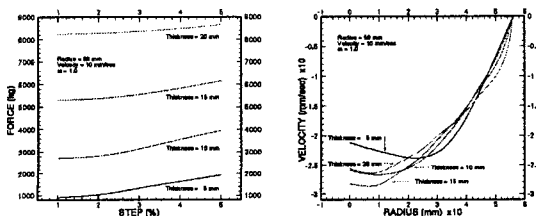


Fig. 4 The relation of force and velocity

3.2 제품의 직경변화에 따른 해석결과 및 고찰
Fig. 5 가공속도 10mm/sec, 소재의 두께 5mm, 변형률 속도 의존성 민감도 지수 $m=1.0$ 일 때 각각 제품의 반경이 35mm, 42mm, 56mm, 70mm의 압하율 5%일 때 내부 압력분포를 나타내고 있다. 제품의 직경에 비해 깊이가 깊은 제품일수록 중심부에서 급격한 인장이 발생하여 두께가 얇아져서 벌지 성형을 할 수가 없게되고, 적당한 직경일 때에 균일한 인장력으로 벌지성형에 의해 제품을 만드는 것이 가능한 것을 보여주고 있다.

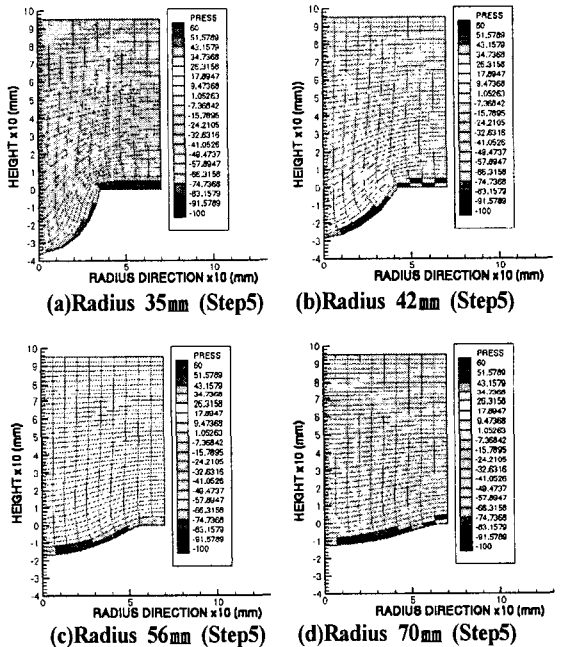
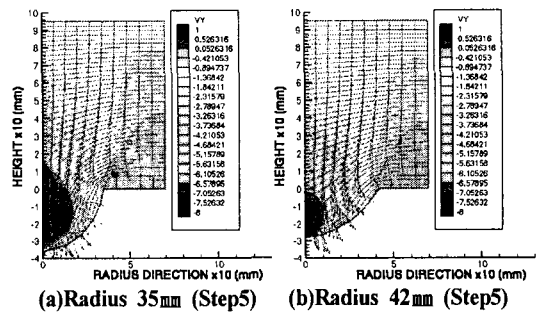
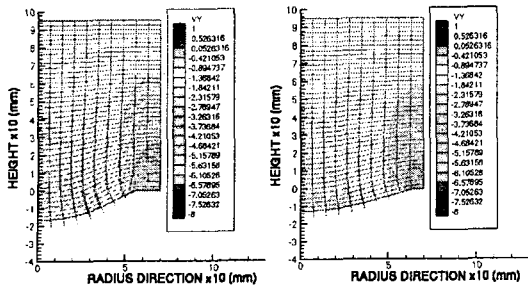


Fig. 5 The contour plot of the pressure distribution

Fig. 6은 압축 방향의 내부유동속도분포를 나타내는 그림으로 직경에 비해 깊이가 깊은 제품일수록 축부근에 내부유동속도 분포가 빠르게 나타나며, 벌지되면서 소재 내부의 유동 속도 벡터가 외부로 향하는 것을 확인할 수 있다.





(c) Thickness 15mm (Step5) (d) Thickness 20mm (Step5)

Fig. 6 The contour plot of the velocity distribution

Fig. 7는 반경의 변화에 따른 가공하중을 표시한 것과 압하율 4%일 때의 제품 반경의 변화에 따른 출구부분의 소재 표면 유동속도를 나타낸 것이다. 제품의 직경에 비해 깊이가 깊은 제품일수록 가공하중이 급격하게 증가하고 급격한 유동속도변화를 알 수 있다. 반경이 35mm일 때의 가공하중이 줄어드는 것은 제품의 중심부가 파단이 일어나서이다.

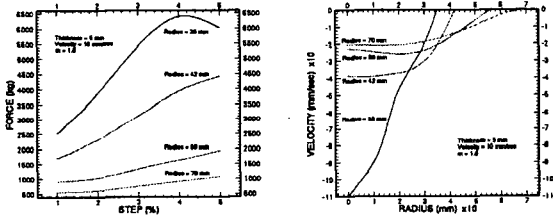
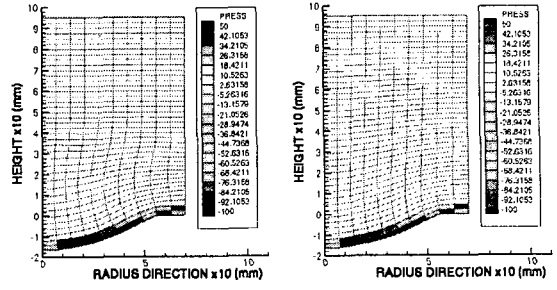
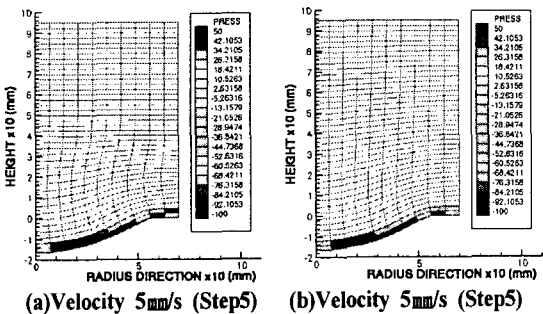


Fig. 7 The relation of force and velocity

3.3 액압부분 변형률속도 의존성 민감도 지수와 가공속도 변화에 따른 해석결과 및 고찰

Fig. 8, Fig. 9은 제품의 반경 56mm, 소재의 두께 5mm 일 때 가공속도가 5mm/sec, 50mm/sec와 변형률속도 의존성 민감도 지수 m 이 0.01, 1.0일 때의 내부압력분포와 내부속도분포를 나타내는 그림으로 액압실부분은 거의 같은 압력분포를 가지고 있는 것을 볼 수 있다.

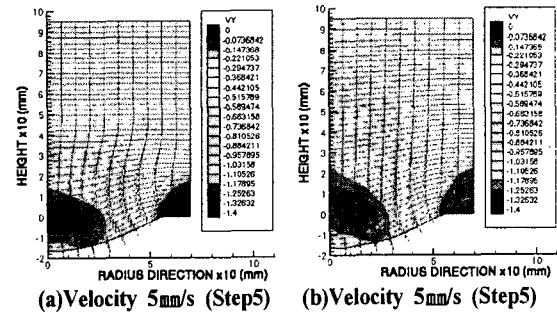


(c) Velocity 50mm/s (Step5) (d) Velocity 50mm/s (Step5)

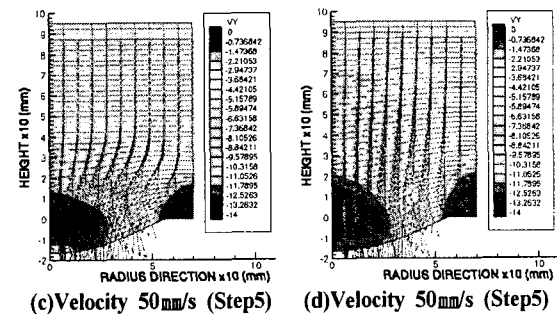
Fig. 8 The contour plot of the pressure distribution

내부변형을 보면 $m=0.01$ 일 때 즉, 점성이 클 때는 윗부분은 변형이 거의 없지만 벌지성형이 일어나는 부근에서 변형이 크고, $m=1.0$ 일 때 즉, 점성이 작을 때는 전체적으로 변형이 일어나는 것을 알 수가 있다.

내부유동속도분포 역시 민감도 지수가 작을 때는 윗부분 유동은 압축방향과 같고, 벌지성형이 일어나는 부근에 유동이 큰 것을 볼 수 있고, 민감도 지수가 클 때는 윗부분부터 유동이 중심을 향하는 것을 볼 수 있다. 따라서 민감도 지수가 클 때 유동분포가 넓게 나타나는 것을 알 수가 있다.



(a) Velocity 5mm/s (Step5) (b) Velocity 5mm/s (Step5)



(c) Velocity 50mm/s (Step5) (d) Velocity 50mm/s (Step5)

Fig. 9 The contour plot of the velocity distribution

Fig.10은 제품의 반경에 따른 출구부분 소재표면의 유동속도분포를 나타낸 것이며, 가공속도가 빠른 만큼 출구부분의 소재표면의 유동속도 역시 빠른 것을 볼 수 있

다. 각각의 변형률 속도 의존성 민감도 지수에 따라 가공속도가 변할 때의 가공하중을 나타낸 것으로 가공속도가 클수록 가공하중이 커지는 것을 알 수가 있고, 대체로 액압부분의 변형률속도 의존성 민감도 지수가 클수록 가공속도 의존성이 큼을 알 수 있다.

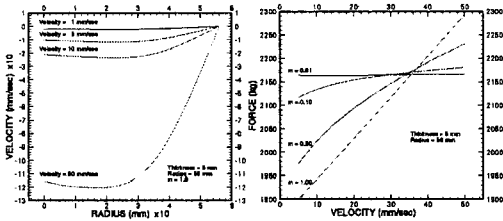


Fig. 10 The relation of velocity and force

4. 결론

축대칭 액압벌지 성형에 대한 유한요소 프로그램을 구성하여 소재의 두께, 제품의 직경, 가공속도, 액압부분의 변형률속도 의존성 민감도 지수에 변화를 줌으로써 소재 내부의 평균응력, 액압부분의 압력, 내부속도, 가공하중에 대해 해석이 가능하였다. 상기의 가공공정에 공정변수의 영향은 다음과 같다.

(1) 소재가 일정두께 범위에서는 벌지성형이 되고, 두께가 일정두께 이상이 되면 인장력에 의한 벌지성형이 되기보다는 다이끝부분과 대칭축 부분에서 굽힘에 의한 변형이 생긴다.

(2) 제품 직경이 적당할 때는 균일한 인장력으로 제품 가공이 가능하지만, 제품의 직경에 비해 깊이가 깊은 제품은 중앙부분에서 급격한 인장으로 인해 대칭축부분에서 두께가 아주 얇아져 파단이 일어난다.

(3) 액압부분의 변형률 속도 민감도 지수가 작을 때는 벌지되는 부분에서 국부적인 유동이 일어나고, 민감도 지수가 클 때는 액압실 내의 모든 영역에서 전반적인 유동이 일어난다.

(4) 액압부분의 변형률속도 민감도 지수가 클 때는 가공속도가 빠를수록 가공하중도 크게 작용한다.

위와 같이 액압부분과 소재부분을 일체로 한 유한요소 해석을 통하여 소재의 두께, 제품의 직경, 가공속도, 액압부분의 변형률속도 민감도 지수에 따른 액압벌지 성형성을 알 수 있었다. 그리고 액압벌지 성형에 관한 상기 결과를 바탕으로 액압부분과 소재부분을 일체로 한 유한요소해석을 위한 프로그램을 구성할 수 있었으며, 액압벌지 성형 해석에 활용할 수 있게 되었다.

참고 문헌

- (1) H. M. Shang, F. S. Chau, C. J. Tay, and S. L. Toh, 1985, "Hydroforming Sheet Metal into Axisymmetrical Shells with Draw-in of Flange Permitted", Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, Vol.107, pp.372~378,
- (2) 정완진, 양동열, 한규택, 백남주, 김용진, 1988, "강소성 유한요소법을 이용한 타원벌지시험의 이론 및 실험적 연구", 대한기계학회논문집, 제12권, 제3호, pp.397~408.
- (3) H. Amino and T. Nakagawa, 1988, "Application of Hydraulic Counterpressure Fluid Forming into Car Body Sheet Metal Forming", SAE 880365, pp.35~48.
- (4) N. Bay, S. S. Jensen, M. P. Malberg, and S. Grauslund, 1994, "Forming Limits in Hydromechanical Deep Drawing", Annals of the CIRP, Vol.43, pp.253~256.
- (5) C. Ni, 1994, "Stamping and Hydroforming Process Simulation with 3D Finite Element Code", SAE 940753, pp.512~534.
- (6) G. Ziaja, 1996, "A Shapeability Testing of the Counter-Pressing Deep-Drawing", 19th IDDRG Biennial Congress, pp.425~432.
- (7) T. Hsu and S. Hsieh, 1996, "Theoretical and Experimental Analysis of Failure for the Hemisphere Punch Hydroforming Process", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transaction of the ASME, Vol.118, No.3, pp.434~438.
- (8) 정상권, 1994, 유한요소법, 대우학술총서,
- (9) Kobayashi. S., Oh. S. I. and Altan. T., 1989, "Metal Forming and the Finite Element Method", Oxford Univ. Press.
- (10) C. H. Lee, S. Kobayashi, 1973, "New solution to rigid-plastic deformation problems using a matrix method", Trans. ASME, J. of Eng. for Ind., Vol.95, pp.865~873.
- (11) O. C. Zienkiewicz, P. N. Godbole, 1975, "A penalty function approach to problems of plastic flow of metals with large surface deformation" J. of Strain Analysis, Vol. 10, NO3.,