

박판쌍 하이드로포밍 공정의 유한요소해석

김정* · 장유철* · 옥충석** · 강범수***

Finite Element Analysis for the Hydroforming Process of Sheet Metal Pairs

J. Kim, Y. C. Chang, C. S. Ok and B. S. Kang

Abstract

The use of sheet material for the hydroforming of a closed hollow body out of two sheet metal blanks is a new class of hydroforming process. By using a three-dimensional finite element program, called HydroFORM-3D, the hydroforming process of sheet metal pairs is analyzed. Also the comparison of conventional deep-drawing and hydroforming process was conducted. The simulation has concentrated on the influences of the various forming conditions, such as the unwelded or welded sheet metal pairs and friction condition, on the hydroforming process. This computational approach can prevent time-consuming trial-and-error in designing the expensive die sets and hydroforming process of sheet metal pairs.

Key Words : Hydroforming Process, Sheet Metal Pairs, Finite Element Analysis

1. 서 론

일반적으로 하이드로포밍(hydroforming) 공법을 통하여 부품을 제작하기 위해서는 소재(workpiece)인 원형 강관을 하부 금형 내부에 장착하고 소재의 양끝을 두 개의 수평 실린더로써 밀봉을 시킨 후, 금형 내부 형상과 동일한 성형이 되도록 소재 내부에 작동 유체에 의한 압력을 작용시킨다. 이러한 하이드로포밍 공법은 성형 공정 수 및 부품 개수를 줄일 수 있고, 무게 대비 강성을 높일 수 있는 장점으로 인하여 자동차 구조용 부품을 생산하는 데 있어 새로운 공법으로 자리잡고 있다. 최근들어서는 강관을 사용하지 않고 박판을 소재로 사용하는 새로운 하이드로포밍 공법에 대한 연구가 관심을 끌고

있다. 원형 강관을 사용하는 경우보다 단면 형상이 더욱 더 복잡한 경우에도 성형이 가능한 것으로 알려져 있어, 연료탱크, 루프 레일(roof rail), 스페이스 프레임(space frame) 등과 같은 자동차 부품 제작에 활용할 수 있을 것으로 기대하고 있다.⁽¹⁻³⁾

본 논문에서는 자체적으로 개발한 3차원 강소성 유한요소해석 프로그램인 HydroFORM-3D를 사용하여 기존의 드로잉공정과 박판 하이드로포밍 공정을 비교 평가하였다. 또한 용접되지 않은 두 개의 박판 소재를 사용한 경우와 용접한 소재를 사용하는 경우에 대한 해석을 수행하였으며, 두 소재 및 소재와 금형 사이의 마찰 계수가 성형 특성에 미치는 영향을 파악하였다.

* 부산대학교 항공우주공학과 대학원

** (주)동희산업 기술개발연구소

*** 부산대학교 항공우주공학과

2. 이론적 배경

2.1 강소성 유한요소법

강소성 재료의 1차 변분 방정식은 극값 정리(extremum principle)에 기초를 두고 비압축성, 속도 경계조건을 만족할 때 (1)식과 같이 표현될 수 있다.

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i dS = 0 \quad (1)$$

여기서, $\bar{\sigma} = \sqrt{3/2}(\sigma'_{ij}\sigma'_{ij})^{1/2}$, $\bar{\epsilon} = \sqrt{2/3}(\dot{\epsilon}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij})^{1/2}$, $\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_{ii}$ 이고 σ'_{ij} , $\dot{\epsilon}_{ij}$, F_i , u_i 는 편차응력 텐서(d- eviatoric stress tenor), 변형률 텐서(strain rate tensor), 표면력(surface traction), 속도(velocity) 성분 그리고 K 는 상대적으로 매우 큰 양의 값을 가지는 벌칙 상수(penalty constant)를 나타낸다. 식(1)은 유한요소의 기본방정식이며, 이산화통하여 선형화된 형태의 방정식으로 나타낼 수 있다. 이러한 지배 방정식의 하중 벡터에 절점에 가해지는 압력 하중을 부가하기 위해서는 다음과 같은 수식화가 필요하다.

$$\frac{\partial \pi_{S_F}}{\partial v_n} = - \int_{S_F} p q_n dS \quad (2)$$

여기서, p 는 하이드로포밍 공정에서의 내부 압력, q_n 은 n 번째 절점에서의 형상함수(shape function)를 나타낸다. 압력값은 강성행렬에 영향을 미치지 않으며 식(2)의 적분식은 압력이 작용하는 면적에 대한 5×5 가우스 수치적분(Gaussian quadrature)을 사용하여 계산한다. 압력 하중의 방향은 압력이 가해지는 요소의 법선 방향과 일치한다.

2.2 마찰 효과

소재 내부에 부과되는 높은 압력으로 인하여, 마찰조건은 하이드로포밍 공정에 영향을 미치게 되며, 특히 국부적인 두께 변화에 큰 영향을 미친다. 급형과 변형이 발생하는 소재간에는 상대속도가 0(zero)이 되는 중립점(neutral point)이 존재하는데, 해석시 마찰력의 갑작스런 변화로 불안정한 값이 보여지는 이 중립점에서의 강성값을 계산하기 위해 속도의존성 마찰력의 가정을 채택하였다. Chen과 Kobayashi⁽⁴⁾가 제시한 마찰력 계산법은 2차원 문제에 대해서는 적용 가능하지만 3차원 문제에서는 마찰력의 방향을 정확하게 표현할 수 없는 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 다음과 같은 새로운 마찰력 계산 방법을 제시하였다.⁽⁵⁾

$$f_r \cong -\mu N \frac{u_r}{\sqrt{u_r^2 + u_t^2 + u_0^2}} \quad (3)$$

여기서, N 은 수직방향 성분의 힘, μ 는 마찰상수이며, u_0 는 작은값을 가지는 양의 상수이며 u_r 와 u_t 는 금형 표면에서 정의된 국부 좌표계에서 상대속도 벡터 \mathbf{u}_r 의 s , t 방향으로의 성분들이다. 이러한 마찰력 항에 대한 1차 변분치를 구하면 다음 식(4)와 같다.

$$\delta\pi_f = -f_r \delta u_r = \mu N \frac{u_r}{\sqrt{u_r^2 + u_t^2 + u_0^2}} \delta u_r \quad (4)$$

식(4)의 1차 도함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial \pi_f}{\partial u_{r_i}} = \mu N_i \frac{u_{r_i}}{\sqrt{u_{r_i}^2 + u_{t_i}^2 + u_0^2}}$$

$$\frac{\partial \pi_f}{\partial u_{t_i}} = \mu N_i \frac{u_{t_i}}{\sqrt{u_{r_i}^2 + u_{t_i}^2 + u_0^2}}$$

$$\frac{\partial^2 \pi_f}{\partial u_{r_i}^2} = \mu N_i \left(\frac{1}{\sqrt{u_{r_i}^2 + u_{t_i}^2 + u_0^2}} - \frac{u_{r_i}^2}{\left(\sqrt{u_{r_i}^2 + u_{t_i}^2 + u_0^2}\right)^3} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_f}{\partial u_{t_i}^2} = \mu N_i \left(\frac{1}{\sqrt{u_{r_i}^2 + u_{t_i}^2 + u_0^2}} - \frac{u_{t_i}^2}{\left(\sqrt{u_{r_i}^2 + u_{t_i}^2 + u_0^2}\right)^3} \right)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_f}{\partial u_{r_i} \partial u_{t_i}} = -\mu N_i \frac{u_{r_i} u_{t_i}}{\left(\sqrt{u_{r_i}^2 + u_{t_i}^2 + u_0^2}\right)^3}$$

3. 유한요소해석

본 논문에서는 단일 박판을 사용하여 기존의 도로잉 공정과 하이드로포밍 공정을 비교하고, 두 개의 박판 소재를 용접한 경우와 용접하지 않은 경우의 박판상 하이드로포밍 공정, 그리고 마찰 효과에 의한 플랜지 부의 영향 등을 유한요소해석을 통하여 고찰하였다.

박판 소재는 8-절점 육면체요소로 분할하였으며, 사용된 재료는 A5052로서 응력-변형률 관계는 $\bar{\sigma} = 400 \bar{\epsilon}^n$ 이다. 각 경우의 해석은 강소성 유한요소해석 프로그램인 HydroFORM-3D를 사용하였다. 소재와 금형, 소재과 소재사이의 마찰은 쿨롱마찰 법칙을 적용하였다.

3.1 단일 박판에 대한 기존 도로잉과 하이드로포밍

일반적으로 하이드로포밍 공정은 기존의 도로잉 공법과 비교하여 상대적으로 큰 법선방향의 접촉 응력과 마찰력으로 인하여 코너 주위의 소재가 코너 반경 부위의 유입이 방해받는다. 최종 가압 단계에서는 코너부 두께가 상당히 줄어들게 되어 코너 면적을 형성하기도 전에 터짐 현상이 발생할 수도 있다.

Fig. 1은 기존의 도로잉 공정과 하이드로포밍 공정 후의 두께 분포를 서로 비교하여 보여준다. 하부 금형 내부 치수는 인입량과 두께 감소량을 비교하기 위하여 두 경우 모두 50×50×2mm로 하였다. 도로잉 공정에서는 펀치와 하부 금형사이의 간극을 소재 두께의 10%로 하였다. Fig. 1(a)에 의하면 블랭크 홀더와 펀치와의 마찰력에 의하여 소재 유입의 원활하지 못하게 되어 소재 측면 벽 부위에서 가장 큰 두께 감소를 보이고 있음을 알 수 있다. 반면 하이드로포밍 공정에서는 최종 가압으로 인하여 코너부위의 두께가 줄어들면서 코너 반경부위로

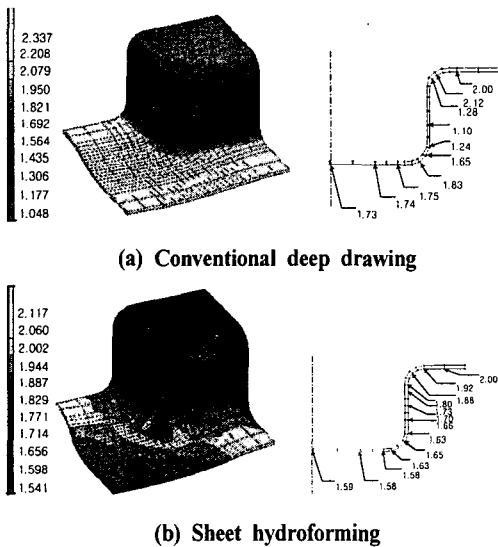


Fig. 1 Thickness distribution in corner areas during deep drawing and hydroforming process

소재 유입시켜 주게 되므로 최소 두께는 바닥면이 됨을 알 수 있다. 최소 두께는 도로잉 공정이 47.6% 감소한 1.048mm, 하이드로포밍의 23% 감소한 1.541mm이다. 한편, 도로잉 공정에서는 최종부품에서 굽힘 불량 발생 가능성이 높은 반면 하이드로포밍 공정은 높은 표면 품질을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다.

3.2 박판쌍 하이드로포밍

본 절에서는 두 개의 박판 소재를 사용하여 하이드로포밍(이하 박판쌍 하이드로포밍) 공정해석을 수행한 내용으로서 두 소재의 용접 유무와 금형 깊이의 차이에 따른 영향을 평가하고자 한다. Fig. 2는 박판쌍 하이드로포밍 공정해석을 위한 유한요소 모델을 나타낸다. 상하 두 개의 소재 치수는 100×70×2mm로 동일하다. 두 소재를 용접한 경우에는 용접부의 재질이 원 소재의 재질과 동일하다고 가정하였고 상하 소재의 절점들을 일치시켜 모델링하였다. 소재와 금형 사이의 마찰계수는 0.05, 두 소재간은 0.1로 가정하였다. 상하 금형의 깊이는 각각 40mm, 20mm이다.

Fig. 3은 하이드로포밍 공정이 완료된 이후 단축방향으로의 플랜지부 길이를 보여준다. 소재가 금형 내부와 접촉이 발생하기 전까지 단계에서는 플랜지부의 길이는 선형적으로 감소되며 감소폭도 큼을 알 수 있다. 금형과 접촉한 이후에는 감소율이 낮아지고 완전한 성형이 이루어질 때까지는 거의 일정하게 유지된다. 내부 압력이 55MPa일 때 두 소재가 용접된 경우는 단축방향으로 15.5% 감소하는데 반하여 용접되지 않은 경우는 상부 소재가 78.9%, 하부 소재는 44.2% 감소함을 알 수 있다. 또한 용접한 소재는 내부 압력이 65MPa, 용접하지 않은 소재는 55MPa에서 성형이 완전히 이루어졌다.

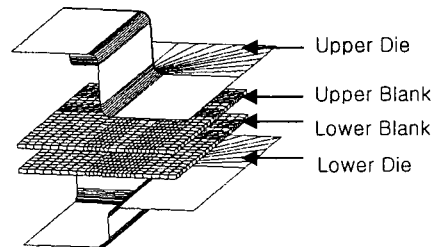


Fig. 2 Schematic view of finite element model for hydroforming of sheet metal pairs

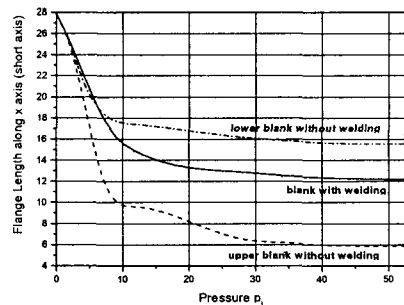


Fig. 3 Flange length during hydroforming process

3.3 플랜지부의 마찰 효과

박판쌍 하이드로포밍에서 마찰을 고려해야 하는 부분은 상부 소재와 하부 소재, 상부 소재와 상부 금형, 하부 소재와 하부 금형 등의 세 부분이다. 이것은 블랭크 홀더에 의해 구속되는 소재의 전체적인 거동을 주의 깊게 해석할 필요가 있음을 의미한다. 본 절에서는 이러한 다양한 마찰 효과를 고찰하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 두 소재 사이의 마찰계수와 비교해 볼 때 소재와 상, 하부 금형 사이의 마찰계수는 상대적으로 작고 동일하다고 가정할 수 있다. Fig. 4는 해석에 사용된 소재와 금형의 기본적인 치수를 보여주고 있다. 여기서는 소재와 금형 사이의 마찰계수가 0.05, 두 소재 사이의 마찰계수가 0.1인 경우(Fig. 5에서 0.05/0.1로 표기)와 각각 0.1, 0.2인 경우(Fig. 5에서 0.1/0.2로 표기)에 대해 해석을 수행하였다. Fig. 5는 마찰계수를 변화시킴에 따라 상, 하부 소재의 플랜지 길이 변화를 보여준다. 마찰계수가 증가함에 따라 소재 인입량이 감소하여 플랜지부의 길이가 증가함을 알 수 있다.

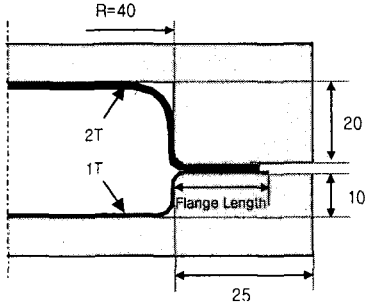


Fig. 4 Specification for simulation

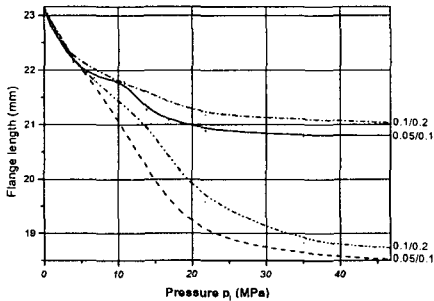


Fig. 5 Influence of friction on the flange length

소재와 금형 내부가 접촉하지 않는 초기 공정에서는 하부 소재보다 상대적으로 두께가 두꺼운 상부 소재가 마찰에 의한 영향을 덜 받게 되는데, 이것은 두꺼운 소재

를 성형함에 있어서는 마찰력보다 성형을 발생시키는 외력의 영향이 더 큼을 의미한다.

4. 결론

본 연구는 박판쌍 하이드로포밍 성형 공정해석을 위해 자체 개발한 프로그램인 HydroFORM-3D를 활용하여 기존 도로잉과 하이드로포밍 공정을 비교하였다. 단일 박판을 소재로 사용한 경우는 기존의 도로잉 공법보다 하이드로포밍 공법에 의해서 더 균일하고 양호한 두께 분포를 얻을 수 있음을 보였다. 아울러 박판쌍 하이드로포밍 공정해석을 수행하여 소재의 용접 유무와 마찰 효과에 따른 영향을 평가하였다.

따라서 본 수치적 해석기법을 활용하면 설계자로 하여금 시행 착오법에 따른 비용과 시간을 줄이고 부품 설계의 효율성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 부산대학교의 정밀정형 및 금형가공 연구센터와 두뇌한국21 사업 핵심 분야에서 지원 받아 수행된 연구로서 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Hein P. and Vollertsen F., 1999, "Hydroforming of sheet metal pairs", J. of Materials Processing Technology, Vol.87, pp.154~164.
- (2) Zhang S. H., 1999, "Developments in hydroforming", J. of Materials Processing Technology, Vol.91, pp.236~244.
- (3) Hsu T. C. and Chu C. H., 1995, "A finite element analysis of sheet metal forming processes", J. of Materials Processing Technology, Vol.54, pp.70~75.
- (4) Chen C. C. and Kobayashi S., 1978, "New Solution to Rigid Plastic Deformation Problems Using a Matrix Method", Trans. ASME, J. Eng. Ind., Vol. 95, pp.865~873.
- (5) Lei L. P., 2000, "Analysis and Design of Hydroforming Process by the Rigid-Plastic Finite Element Method", Ph.D. Thesis in Pusan National University.