

유한요소법을 적용한 하이드로포밍 공정 해석 및 성형한계 예측

김정* · 강성종** · 강범수***

Analysis of Hydroforming Process and Forming Limit Prediction by FEM

J. Kim, S. J. Kang and B. S. Kang

Abstract

Tubular hydroforming has attracted increased attention in the automotive industry recently. In this study, a professional finite element program for analysis and design of tube hydroforming processes has been developed, called HydroFORM-3D, which is based on a rigid-plastic model. With the developed program, several hydroforming processes such as a tee extrusion, an automotive rear axle housing and lower arm are analyzed and designed. And also, the Oyane's ductile fracture integral I was calculated from the histories of stress and strain according to every element and then the forming limit of the hydroforming process could be evaluated. The prediction of the bursting failure and the plastic deformation during typical hydroforming processes shows to be reasonable so that this approach can be extended to other various tube hydroforming processes.

Key Words : Hydroforming Process, Ductile Fracture Criterion, Finite Element Analysis.

1. 서 론

원형 강관을 이용한 하이드로포밍 공정(hydroforming)은 성형 공정 수 및 부품 개수를 줄일 수 있고, 무게 대비 강성을 높일 수 있다는 장점으로 인하여 최근 들어서 자동차 구조용 부품을 생산하는 데 있어 새로운 공법으로 자리잡고 있다.^(1~4) 하이드로포밍 공정은 원형 강관을 사용하여 축 방향에 따라 다양한 단면 형상을 지닌 부품을 생산하는데 주로 사용된다. 하이드로포밍 공정으

로 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. 하이드로포밍을 위한 초기 블랭크의 형상으로는 직관과 굽힘 공정을 거친 원형 강관 등이 사용된다.⁽¹⁾ 직관을 초기 블랭크로 사용하는 하이드로포밍 공정의 경우, 관의 양 끝단부에 축방향으로의 힘과 내부 압력을 동시에 작용시키게 된다. 이와 같은

* 부산대학교 항공우주공학과 대학원
** 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부
*** 부산대학교 항공우주공학과

성형 과정에서는 좌굴(buckling), 주름(wrinkling), 터짐(bursting) 등의 성형 불량에 유발 될 수 있다. 좌굴은 성형 초기에 낮은 압력에서 축 방향으로의 소재 유입이 많은 경우에 발생하기 쉽지만, 원형 강관의 소재 치수로부터 좌굴을 방지할 수 있는 내부 압력과 축 방향으로의 힘과의 관계를 이론적으로 결정할 수 있다. 반면, 주름 발생은 축방향으로 힘이 과도한 경우 벌짐(bulging)으로 인한 소재 두께가 감소한 부분에서 발생하기 쉽다.⁽²⁾

하이드로포밍 전에 굽힘 공정을 거친 원형 강관을 소재로 사용하는 경우에는 축 방향으로의 소재 유입량을 조절하는 것이 까다로우며, 이로 인하여 터짐 현상이 발생할 가능성이 직관에 비하여 상대적으로 높다. 따라서 적절한 성형 조건의 선택이 굽힘 강관을 이용하는 하이드로포밍 공정에서는 중요한 요소이다. 좌굴과 주름 발생에 비하여 터짐 현상은 복원(recover)이 힘든 파손이다. 그러므로 하이드로포밍 공정시 터짐과 관련된 공정 인자에 대한 연구가 무엇보다도 중요하다. 그러나 지금까지 터짐과 관련된 연구는 주로 실험에 의존되어져 왔으며, 이론적인 연구 수행은 미미하였다.^(4,5)

본 연구에서는 하이드로포밍 공정 해석을 위하여 자체적으로 개발한 HydroFORM-3D 프로그램에 Oyane이 제안한 연성 파괴 모델을 적용하여 T자 압출, 자동차 리어 엑슬 하우징, 로어 암 등의 하이드로포밍 공정 중에 터짐 현상이 발생할 가능성이 높은 부분을 예측하였다. 그리고 공정 설계에 요구되는 비용과 시간을 줄이기 위해서 다양한 성형 조건 하에서 얻어진 해석결과로부터 최적화된 성형 인자들을 결정하고자 하였다.

2. 연성 파괴 모델

연성 파괴는 큰 소성 변형을 수반하여 가늘게 늘어나면서 파괴가 일어나는 현상을 일컫는다. 그 동안 금속 성형 과정 중 발생하는 연성 파괴 현상의 규명을 위하여 실험과 이론에 대한 많은 연구가 수행되어져 왔으며, 성형 한계를 평가하기 위한 여러 가지 기준들이 제안되었으나, 다양한 성형 공정에 모두 적용될 수 있는 기준은 확립되지 못하였다. 특히 하이드로포밍 공정은 변형 경로에 크게 의존하는 것으로 알려져 있기 때문에, 응력과 변형률 이력이 파괴 모델에 고려되어야만 한다. Oyane에 의해서 제안된 연성 파괴 모델은 Takuda 등에 의해서 수행된 박판 금속 성형에 적용하여 성형 한계를 성공적으로 예측할 수 있음을 보였다.^(6,7) 많은 연구가들이 Oyane의 연성 파괴 모델이 파괴 전에 뚜렷한 국소

네킹(necking)을 보이지 않는 알루미늄 합금부터 다양한 금속 성형 공정에 이르기까지 성형 한계를 평가하는데 잘 적용될 수 있음을 보였다.

본 연구에서도 이러한 Oyane의 연성 파괴 모델을 근거로 하여 파괴의 발생 여부를 예측하였다. Oyane의 연성 파괴 모델은 정수압 응력의 경로가 연성 파괴에 영향을 미친다고 가정하고 있으며, 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$I = \frac{1}{b} \int_1^{\bar{\epsilon}_f} \left(\frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} + a \right) d\bar{\epsilon} \quad (1)$$

여기서, $\bar{\epsilon}_f$ 는 파괴가 발생하는 시점에서의 한계 유효 변형률을, σ_m 는 평균 응력을, $\bar{\sigma}$ 는 상당 응력을, $\bar{\epsilon}$ 유효 변형률, 그리고, a, b 는 각각 단축 인장 시험과 평면 변형률 인장 시험을 수행한 후 한계 변형률로부터 산출되는 재료 물성치이다. 식 (1)로부터 각 요소들에 있어서 응력, 변형률뿐만 아니라 연성 파괴 적분 지수 I 가 계산되어지며, I 가 1에 이르면 파괴가 발생하는 것으로 판단한다.

3. 하이드로포밍 공정 해석 및 성형 한계 예측

3.1 T자 압출 하이드로포밍

T자 압출 하이드로포밍은 주로 위생 기구를 제조하는 산업에서 사용되는 대표적인 공법이다. 해석에 사용된 T자 압출 소재는 외경 64mm, 두께 1.6mm, 그리고 길이 240mm의 원형 강관을 사용하였다.

Fig. 1, 2는 일정한 압력 18.9MPa의 성형 조건에 대한 연성 파괴 지수 I 값 및 두께 분포를 각각 보여준다. 잠재적으로 파괴가 일어날 가능성이 높은 부위는 벌짐이 일어나는 끝단부이며, 이곳은 Fig. 2의 두께가 최소인 부분과 일치한다.

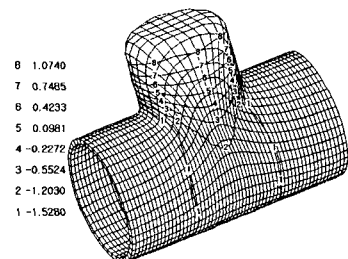


Fig. 1 Distribution of ductile fracture integral I value

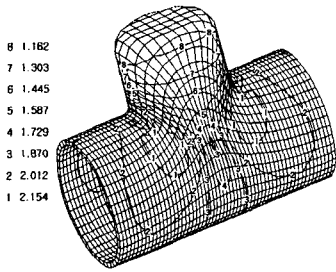


Fig. 2 Distribution of thickness

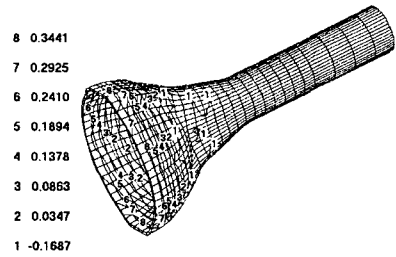


Fig. 4 Distribution of ductile fracture integral I after the second hydroforming operation

3.2 자동차 Rear Axle Hosuing의 하이드로포밍

리얼 액슬 하우징은 하이드로포밍 공법을 사용하여 제작할 필요가 있는 대표적인 자동차용 부품 중 하나이다. 기존의 스탬프-용접 공정과 비교할 때, 하이드로포밍 공정은 용접 공정 없이 하나의 원형 강관을 이용하여 제작할 수 있으므로 부품의 집적화와 개발 기간을 단축시킬 수 있다는 장점을 지니고 있다. 해석에 사용된 소재는 외경 89.1mm, 두께 4.5mm, 그리고 길이 900mm의 SPCC 원형 강관을 사용하였다. 연성 파괴 모델 상수는 $a = 0.22$, $b = -0.043$ 이다.⁽⁸⁾

단일 하이드로포밍 공정을 통하여 리얼 액슬 하우징 부품을 성형할 경우, 큰 양의 소성 확관 변형으로 인하여 터짐 현상이 발생하기 쉽다. 따라서 성형 불량인 제품을 제작하기 위해서는 최소한 2단계의 하이드로포밍 공정이 요구되며, Fig. 3과 4는 각각 1, 2단계 하이드로포밍 후의 연성 파괴 지수 I 값의 분포를 보여준다. 1, 2 단계가 완료된 이후의 연성 파괴 지수 I 값은 모두 1 이하였으며, I 의 최대값은 상, 하부 채널 중심부에서 나타나는 것으로 예측되었으며, 이것은 실험결과와 잘 일치한다.

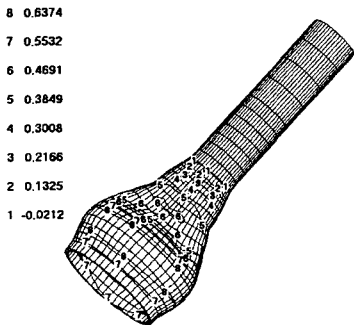


Fig. 3 Distribution of ductile fracture integral I after the first hydroforming operation

3.3 자동차 Lower Arm의 하이드로포밍

로어 암은 자동차 앞(front) 하단부에 장착되어 크로스 멤버(cross member) 등과 조립되어 타이어의 회전 중심 기능을 수행하고, 부쉬(bush)등이 조립되어 주행 중에 발생하는 진동을 흡수, 완화시켜주는 부품이다. 하이드로포밍 공법을 통하여 로어 암을 제작할 경우 공정수의 감소에 따른 비용 절감과 동시에 고강도의 부품으로서 기존의 스탬프-용접 공정에 의한 부품들을 대체할 수 있다. 해석에 사용된 소재는 외경 63.5mm, 두께 2.6mm, 그리고 길이 600mm의 STKM-11A 원형 강관을 사용하였다.⁽⁹⁾

로어 암을 제작하기 위해서는 하이드로포밍 전에 예비 굽힘과 예비 성형 단계가 요구된다.⁽¹⁰⁾ 따라서 하이드로포밍 공정해석은 예비 성형 단계가 완료된 블랭크를 사용하게 되며, 스탬핑 공정에서의 동일한 금형을 사용한다. 성형조건은 내압을 40MPa에서 최종적으로 80MPa로 부가하고, 축방향의 소재 유입량은 50mm로 하였다. 하이드로포밍 해석 후의 로어 암 변형 형상과 단면별 형상을 Fig. 5에 나타내었으며, 성형이 잘 이루어 졌음을 알 수 있다.

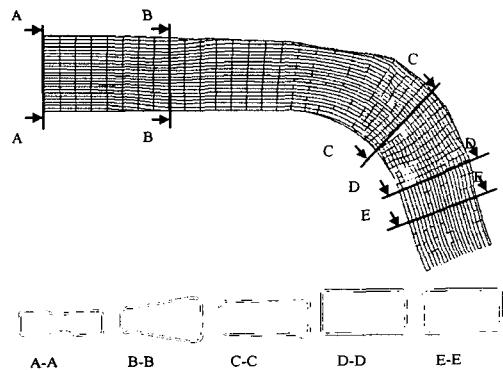


Fig. 5 Deformed shapes and cross-sections after hydroforming process

참 고 문 헌

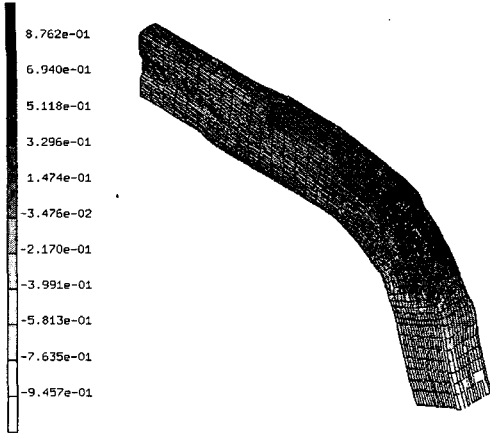


Fig. 6 Distribution of ductile fracture integral I

하이드로포밍 중에 발생하는 터짐 불량 부위를 예측하기 위하여 Fig. 6에서 보는바와 같이 연성 파괴 지수 I 값 계산하였다. 본 성형과정에서는 I 값이 1보다 작으므로 터짐 현상이 나타나지는 않겠지만 우측 상단의 환관 부위가 상대적으로 터짐 불량 가능성이 가장 높음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 하이드로포밍 성형공정 해석을 위해 자체 개발한 유한 요소 해석 프로그램인 HydroFORM-3D를 활용하여 T자형 압출, 리얼 액슬 하우징, 로어 암에 대한 하이드로포밍 공정 해석을 수행하였으며 아울러 Oyane의 연성 파괴 이론을 도입하여, 연성 파괴 지수 I 값을 각 단계, 각 요소에 대하여 응력과 변형률로부터 계산하였다. 연성 파괴 지수값을 토대로 하이드로포밍 성형 중에 터짐 가능성이 높은 부위를 예측할 수 있었고 따라서 설계자로 하여금 시행 착오법에 따른 비용과 시간을 줄이고 부품 설계의 효율성을 높일 수 있음을 잘 보여주었다.

후 기

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

- (1) Dohmann F. and Hartl C., 1997, "Tube Hydroforming Research and Practical Application", J. of M at. Proc. Technol., Vol.71, pp.174~186.
- (2) Schmoeckel D. and Hielscher C., 1999, "Metal Forming of Tubes and Sheet with Liquid and Other Flexible Media", Annals of CIRP, Vol.48, No.2, pp.497~513.
- (3) 손성만, 이문용, 이상용, 2000, "자동차용 범퍼레일의 하이드로포밍 기술 연구", 한국소성가공학회지, 제9권, 제6호, pp.561~566.
- (4) Liu J. and Hahn D., 2000, "Optimization of Process and Tool Development for Tube Hydroforming Using Computer Simulation", Innovations in Tube Hydroforming Technology International Conference.
- (5) Lei L. P., Kim D. H. and Kang B. S., 2000, "Analysis and Design of Hydroforming Processes by the Rigid-plastic Finite Element Method", Twenty Eighth North American Manufacturing Research Conference, XXVIII, pp.45~50.
- (6) Takuda H., Mori K. and Hatta N., 1999, "The Application of Some Criteria for Ductile Fracture to the Prediction of the Forming Limit of Sheet Metals", J. of Materials Processing Technology, Vol.95, pp.116~121.
- (7) Mori K., Takuda H., 1996, "Prediction of Forming Limit in Deep Drawing of Finite Element Simulation and Criterion for Ductile Fracture", Transaction of NAMRI/SME XXIV, pp.143~148.
- (8) Lei L. P., Kim J. and Kang B. S., 2000, "Analysis and Design of Hydroforming Process for Automobile Rear Axle Housing by FEM", Int. J. of Machine Tools & Manufacture, Vol.40, pp.1691~1708.
- (9) Kim J., Lei L. P. and Kang B. S., 2000, "Preform Design in Hydroforming of Automobile Lower Arm by FEM", International Manufacturing Conference in China., Hong Kong,
- (10) Yang J. B., Jeong B. H. and Oh S. I., 1999, "Tube Bending Technology of Hydroforming Process for an Automotive Part", Proc. of AFD99, Pusan Korea, pp.557~562.