

알루미늄 튜브 하이드로포밍 성형 해석 및 성형성 평가

임희택[#] · 김현영¹ · 김형종¹ · 이동재²

Forming Analysis and Formability Evaluation for Aluminum Tube Hydroforming

H. T. Lim, H. Y. Kim, H. J. Kim and D. J. Lee

Abstract

A tube hydroformability testing system was designed and manufactured to observe the forming steps and to provide arbitrary combination of internal pressure and axial feed. The forming limit diagram of an aluminum tube was obtained from the free bulge test and the T-shape forming test using this system, giving the criteria for predicting failure in the hydroforming process. The hydroformability of aluminum tube according to different conditions of a prebending process was discussed; based on the finite element analysis and the forming limit test. The effects of 2D and 3D prebending on the tube hydroforming process of an automotive trailing arm were evaluated and compared with each other.

Key Words : Tube Hydroforming(튜브 하이드로포밍), Forming Limit Diagram(성형한계도), Hydroformability(하이드로포밍 성형성), Finite Element Analysis(유한요소해석), Aluminum Trailing Arm(알루미늄 트레일링 암), 2D/3D Prebending(2D/3D 예비굽힘)

1. 서 론

현재 자동차업체들은 연료소비 및 배출가스감소, 그리고 높은 충돌 안전성 등의 소비자 요구를 만족시키기 위해 고강성 및 경량화 설계에 역량을 집중하고 있다. 이런 추세에 맞춰 고장력 강판, 알루미늄 합금, 레이저 용접판재(tailor welded blank: TWB) 등의 고강성 및 경량화 소재들의 사용이 점진적으로 증가하고 있는 실정이다. 또한 자동차 부품의 경량화 및 공정감소를 위해 판재를 사용하는 하이드로포밍 공법 등의 새로운 제조 기술 개발을 위해 노력하고 있다[1,2]. 하이드로포밍 공법을 적용하여 생산하고 있는 자동차 부품에는 사이드 레일(side rail), 서브 프레임(subframe), 배기관(exhaust manifold), 크로스 멤버(cross member), 대시보드 패널(dashboard panel), 필

라(pillar), 레일 루프(rail roof), 패키지 트레일(package trail), 트레일링 암(trailing arm) 등이 있으며 승용차 부품 및 트럭용 부품에 이르기까지 다양한 종류가 생산되고 있다. 특히 알루미늄 판재 하이드로포밍은 자동차의 경량화를 위해 많은 적용이 이루어지고 있다. 비록 강재가 자동차 제작에 대부분을 차지하고 있지만 알루미늄 하이드로포밍도 경량화 자동차 생산을 위해 많은 연구가 이루어지고 있다[3]. 하지만 알루미늄은 강철에 비해 낮은 연성, 높은 스프링백(springback), 낮은 용접성 등의 낮은 성형성을 극복하기 위해 더 많은 연구가 필요한 실정이다. 여러 연구자들은 알루미늄 재료의 성형성 평가를 위해 분석적인 방법과 유한요소해석, 실험 등을 수행하였다[4,5].

본 연구에서는 임의의 내압과 축압축량을 조합할 수 있고 성형 단계를 관찰할 수 있는 판재 하

1. 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부

2. ㈜ AUSTEM

강원대학교, E-mail: limong@kangwon.ac.kr

이드로포밍 성형성 평가 장비를 설계/제작하였다. 그리고 이 시스템으로 단순확관시험(free bulge test)과 T 성형시험(T-shape forming test)을 수행하여 알루미늄 관재의 성형한계도(forming limit diagram: FLD)를 구하였다. 성형한계도는 알루미늄 관재 하이드로포밍 공정에서 파단을 예측할 수 있는 기준을 제시하였다. 본 연구에서 알루미늄으로 제작한 자동차 트레일링 암 시제품은 성형한계도의 임계과단영역 아래에서 성형됨을 확인하였다. 그리고 2D/3D 예비굽힘(prebending)에 따른 하이드로포밍의 성형성 차이를 외연적(explicity) 유한요소 해석과 트라이아웃(try-out)의 비교/분석으로 평가하였다.

2. 성형한계도

2.1 하이드로포밍 성형성 평가 시스템

Fig.1 은 본 연구에서 설계/제작한 튜브 하이드로포밍 성형성 평가 시스템이다. 이 시스템은 미리 프로그램된 내압 및 축압축량의 성형조건을 적용할 수 있도록 설계되었다. 또한 튜브의 양 끝단에서 좌/우 축압축량을 주기 위해 2 개의 500kN 수평 실린더(horizontal cylinder)가 구성되었다. 좌/우 각각 120mm 의 축변위를 가지고 있으며 상하 금형을 클램핑하기 위해 1,000kN 용량의 수직 실린더가 있다. 그리고 증압기(pressure intensifier)가 발생시킬 수 있는 최대 압력은 100MPa 이며 내압과 좌/우 축압축량을 제어하기 위한 3 개의 서보밸브를 포함한 유압제어 회로 등으로 구성되어 있다. 내압과 축압축량 곡선은 제어 프로그램에서 시간에 대한 함수로 입력해 줄 수 있다. Fig.2 는 내압과 피딩량의 9 가지 조합에 의한 단순확관시험과 T 성형시험에서 터진 관재 사진이다.

2.2 성형한계도

관재의 성형한계도 개념은 판재의 경우처럼 일반적으로 사용되지 않았다. 관재 FLD 는 실험으로 구하기 어렵고 판재와 달리 표면적에 비해 두께 더 두꺼운 관재에 사용 가능한지 증명하지 못했기 때문이다. 본 연구에서 Al 6063 관재 재료의 FLD 는 높은 양(high positive)의 부변형률(minor strain)의 영역은 제외하고 성공적으로 얻을 수 있었다. 관재 하이드로포밍 공정에서 주변형률(major strain)은 일반적으로 원주 방향을 나타낸다. 반경 방향 확관이 축방향 신장에 비교하여 우세하다.

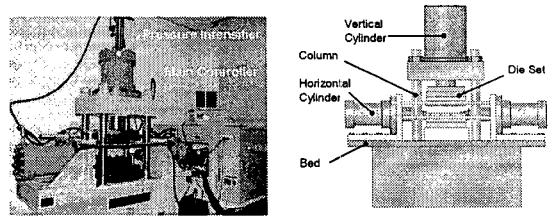


Fig. 1 Photo and schematic of the tube hydroformability testing system

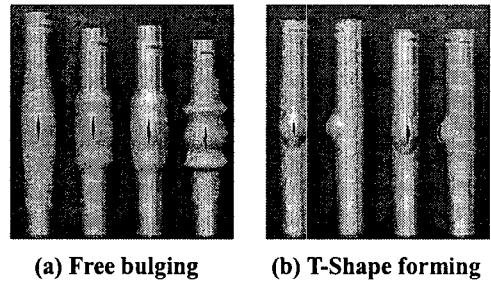
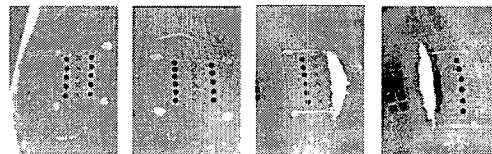
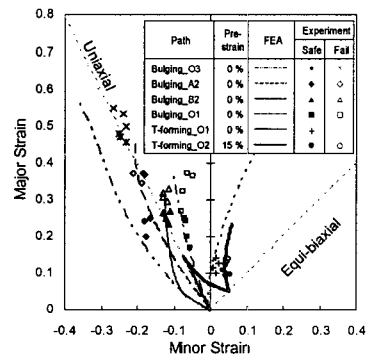


Fig. 2 Photos of burst tubes under free bulging and T-forming tests



(a) Detected grid images



(b) Strain paths and forming limits

Fig. 3 FLD plotting from deformed grid images

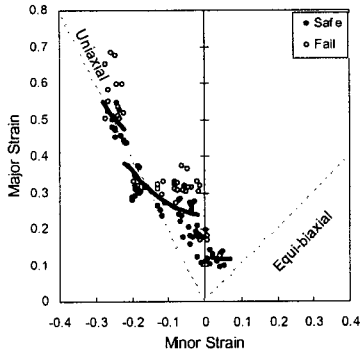


Fig. 4 FLD of A 6063 tube

하이드로포밍 전공정인 예비 굽힘 공정은 굽힘 부 바깥쪽에 높은 부변형률을 발생하게 할 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 가능한 높은 부변형률에서 FLD 를 얻기 위해 축방향으로 예비굽힘을 대신하여 예변형(pre-tension)을 주었다. 변형률은 파단 주위의 변형된 격자에서 자동적으로 측정되었으며 측정 시스템은 자체 개발된 ASIAS 이다[6]. Fig.3(a)는 격자 이미지에서 변형률을 측정하는 과정을 보여준다. Fig.3(b)에서 유한요소해석의 변형률 경로와 가까운 곳에 실험값이 위치된다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 축압축량이 큰 곳은 해석과 많은 차이를 보이고 있다. 이것은 해석이 주름 발생을 현실적으로 표현할 수 없기 때문이라고 예상된다. 최종 Al 6063 튜브의 FLD 는 Fig.4 에서 보여진다. 데이터들이 한쪽으로 치우쳐 있는 것은 대부분 음(negative)의 부변형률이 나타나는 단순확관과 T 성형으로부터 측정하였기 때문이다. 데이터들은 대부분 단축인장을 넘어선 영역에서 존재하며 파단과 안전영역 사이에 일정한 성형한계곡선을 찾을 수 있지만 불연속적으로 나타난다.

3. 트레일링 암의 관재 하이드로포밍

Fig.6 은 자동차 후륜 현가장치의 트레일링 암을 보여준다. 하이드로포밍 공정에 앞서 굽힘에 안착이 쉽도록 일반적으로 예비굽힘을 수행한다. 관재는 예비굽힘과정 동안에 상당한 소성 변형을 받아 하이드로포밍 성형성에 영향을 미치게 되는데 특히 관재의 확관률이 거의 없는 경우에 예비굽힘은 하이드로포밍 성형성을 결정할 수도 있다. 2D/3D 예비굽힘은 성형성 비교를 통해서 Fig.7 처

럼 평면굽힘인 2D 모델과 공간굽힘인 3D 모델을 구성하였다. Fig.8 은 내부압력과 홀딩(holding)굽힘, 상형굽힘, 축압축의 움직임을 제어하는 곡선을 나타낸다.

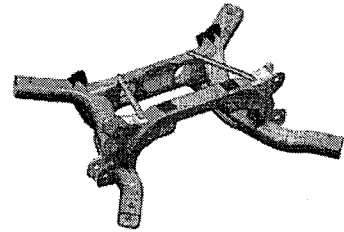


Fig. 6 Trailing arm of rear suspension

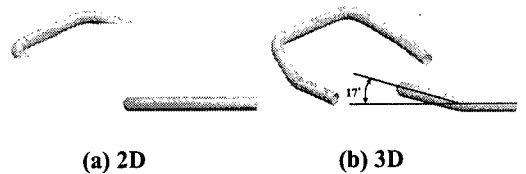


Fig. 7 Geometries for 2D and 3D prebending model

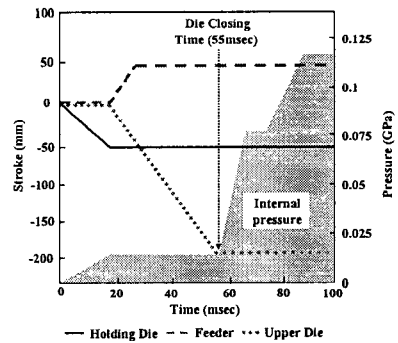


Fig. 8 Hydroforming simulation condition

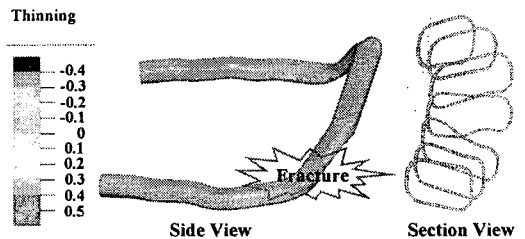
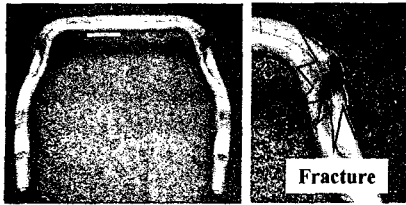
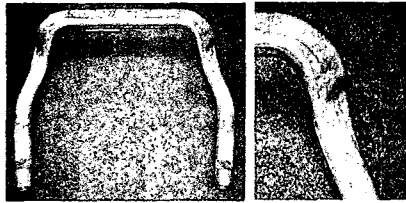


Fig. 9 Thinning distribution in hydroforming simulation with axial feeding 40mm



(a) 2D prebending model



(b) 3D prebending model

Fig. 10 Tryout result of tube hydroforming

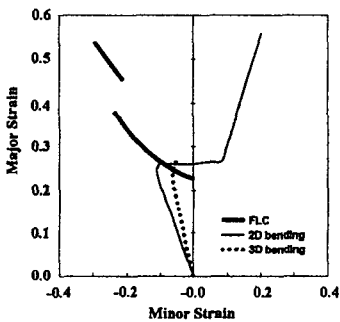


Fig. 11 FLD comparison of 2D and 3D model

Fig. 9, 10 은 2D 예비굽힘 모델을 이용한 하이드로포밍에서 관재는 축압축에 영향을 받지 않는 앞 굽힘부에서 터짐이 발생했으나 3D 예비굽힘 모델은 터짐이 발생하지 않았으며 이 결과는 트라이아웃에서도 마찬가지로 보여준다. 트라이아웃의 성형조건은 내압 100 MPa 이며 축압축은 40mm 이다. Fig.11 은 성형한계도에 해석에서 측정 한 코너부 요소의 변형률 경로를 나타낸 것이며 요소 변형이 양의 부변형률 방향으로 계속됨을 보여준다. 이것은 2D 모델의 경우 확관이 계속되고 3D 모델은 확관 없이 성형한계곡선 주위에서 성형이 종료되기 때문이다. 따라서 앞서 구한 성형한계도에 의해 해석결과를 평가하는 것이 가능함을 확인할 수 있었다.

4. 결론

관재 하이드로포밍 성형성 평가 시스템은 성형 단계를 관찰하고 내압과 축압축량의 제어가 가능하도록 설계/제작되었다. 그리고 알루미늄 관재 재료의 성형한계도를 단순확관시험과 T 성형시험에 의해 구하였으며 하이드로포밍 공정에서 파단을 예측할 수 있는 실험적인 데이터를 제공하였다. 또한 자동차 트레일링 암을 대상으로 2D/3D 예비굽힘 효과가 하이드로포밍 공정에 미치는 영향을 트라이아웃과 유한요소해석에 의해 비교/분석하였다. 이것은 알루미늄 관재의 FLD 에서 예비굽힘과 하이드로포밍의 연속적인 해석에서 해당 요소의 변형률 경로에 의해 증명되었다.

참고 문헌

- [1] Kim, H. J., Jeon, B. H., Kim, H. Y. and Ki, J. J., 1993, Finite Element Analysis Liquid Bulge Forming Process of T-Shaped Pipe by an Explicit Code, Advanced Technology of Plasticity, pp. 545~550.
- [2] Bobbert, S., Bischer, M., Ahemtoglu, M. A. and Alta, T., 1997, Tool and Process Design for Tube Hydroforming a State of the Art Review and Applications of Computer Simulations, ReportNo. ERC/NSM-R-97-2, pp. 3~51
- [3] Lang, L., Yuan, S., Wang, X., Wang, Z. R., Fu, Z., Dankert, J. and Nielsen, K. B., 2004, A study on numerical simulation of hydroforming of aluminum alloy tube, journal of Materials Processing Technology vol. 146, pp. 377~388.
- [4] Sokolowski, T., Gerke, K., Ahmetoglu, M. and Altan, T., 2000, Evaluation of Tube Formability and Material Characteristics: Hydraulic Bulge Testing of Tubes, Journal of Materials Processing Technology vol. 98, pp. 34~40.
- [5] Kim, S. T. and Kim, Y. S., 2002, Analytical Study for Tube Hydroforming, Journal of Materials Processing Technology vol. 128, pp. 232~239.
- [6] Kim, D. S. and Kim, H. J., Development of a Surface-Strain Measurement System Using the Image Processing Technique, 1998, Transactions of Materials Processing Vol. 7 No. 6, pp. 575-585.