

국부적 변형 집중 저감을 통한 액압 성형성 개선연구

신세계로¹ · 주병돈¹ · 문영훈[#]

Enhancement of Hydroformability Through the Reduction of the Local Strain Concentration

S. G. R. Shin, B. D. Joo, Y. H. Moon

(Received May 9, 2014 / Revised June 23, 2014 / Accepted July 8, 2014)

Abstract

Bursting during tube hydroforming is preceded by localized necking. The retardation of the initiation of necking is a means to enhance hydroformability. Since high strain gradients occur at the necking sites, a decrease in local strain gradients is an effective way to retard the initiation of necking. In the current study, the expansion at potential necking sites was intentionally restricted in order to reduce the strain gradient at potential necking sites. From the strain distribution obtained from FEM, it is possible to determine strain concentrated zones, which are the potential necking sites. Prior to the hydroforming of a trailing arm, an incompressible material (such as lead) is attached to the tube where the strain-concentrated zone would contact the die. Due to the incompressibility of lead, the tube expansion is locally restricted, and the resultant strain extends to adjacent regions of the tube during hydroforming. After the first stage of hydroforming, the lead is removed from the tube, and the hydroforming continues to the final targeted shape without any local restriction. This method was successfully used to fabricate a complex shaped automotive trailing arm that had previously failed during traditional hydroforming fabrication.

Key Words : Tube Hydroforming, Hydroformability, Local Strain Concentration, Free Bulging, Trailing Arm

1. 서론

액압성형 공정은 경량화 부품에 대한 수요가 증가함에 따라 자동차 부품 분야에서 경량화를 위한 신 가공 공정 기술로서 폭넓게 이용되고 적용 범위를 넓혀가고 있는 소성가공 기술이다[1, 2]. 액압성형 공정 기술은 부품경량화 이외에도 기존 공정을 대체하는 동시에 공정을 간소화하여 부품의 일체화를 구현할 수 있다. 이와 같은 부품의 일체화는 무게 감소와 더불어 강도의 향상을 만족시킬 수 있기 때문에 원자재 절감 등의 효과도 기대할 수 있다[3~6].

액압성형 공정을 통해 생산될 수 있는 차체 부품으로는 사이드레일(side rail), 서브프레임(subframe), 대시패널(dash panel), 레일루프(rail roof), 패키지 트레일(package trail) 등 다양한 종류가 있다[7~11].

본 연구에서는 국부적 변형 집중 저감을 통해 액압 성형성을 개선하고자 하였으며, 변형 집중 저감 효과 검증을 위해 자유 확관시험과 실제품 성형시험을 실시하였다. 액압성형시 변형분산을 통한 성형성 개선효과를 평가하기 위해 액압성형실험과 병행하여 유한요소해석을 실시하였다. 유한요소해석 결과로부터 얻어진 변형을 분포와 확관율에 근거하여

1. 부산대학교 정밀기계공학과

Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea, E-mail: yhmoon@pusan.ac.kr

Table 1 Dimensions of specimen

Outer diameter(mm)	65.0
Inner diameter(mm)	60.0
Tube thickness(mm)	2.5



Fig. 1 Hydroforming machine

검증시험을 실시함으로써 성형성 개선 효과의 신뢰성을 더욱 높이고자 하였다. 또한 본 연구에서 제시된 방법론을 이용한 실부품 제작을 통해 결과를 검증하였다.

2. 연구 내용 및 방법

2.1 시험소재 및 장치

시험에 사용된 소재는 단일관 형태의 HF440을 사용하였고 Table 1 에 소재의 치수를 나타내었다.

액압성형장치는 4주형하향식유압프레스 80ton급에 최대 압력 200MPa로 성형이 가능한 장치를 이용하였으며 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 액압 성형 실험

2.2.1 확관 실험

본 연구에서는 변형 집중 저감 효과를 알아보기 위하여 Fig. 2 에 나타난 두 가지 방법으로 자유 확관 실험을 수행하였다. Fig. 2 (a)는 기존과 같은 자유 확관 실험이며 Fig. 2 (b)는 2단계를 거쳐 분산 확관 공정을 적용한 실험을 하였다. 변형 집중부의 변형을 분산시키기 위해 링을 이용하여 확관부의 변형을 주변부로 분산시키는 1차 성형후 링을 제거하고 2차 자유 확관을 하였다. 자유 확관시험을 통해 얻어진 시편의 확관율을 비교함으로써[10], 국부적 변형 집중 저감을 통해 액압 성형성 개선효과를 평가하였다. Fig. 3에는 시험에 사용 될 금형을 나타내고

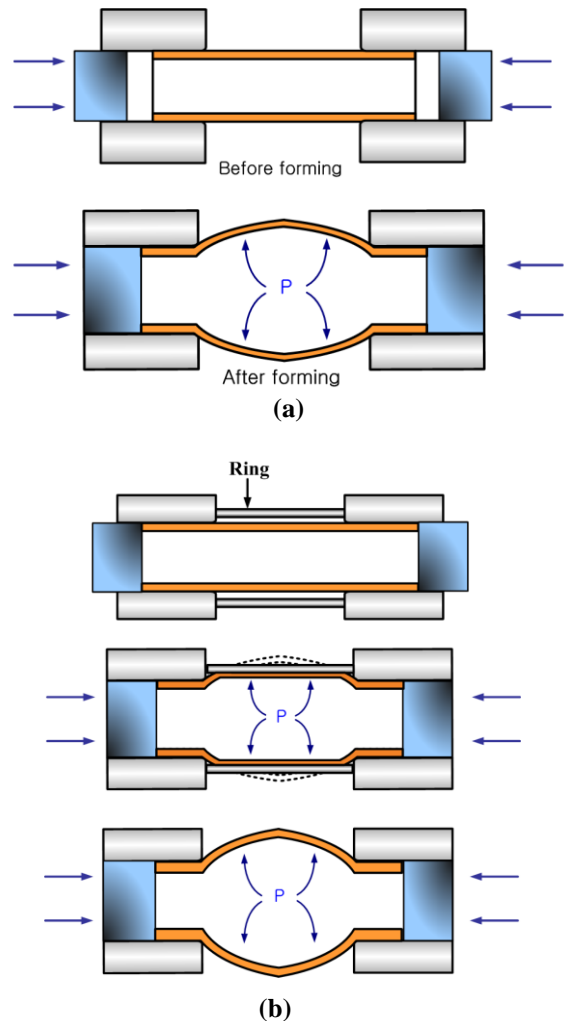


Fig. 2 Schematic drawings of test process; (a) free hydroforming, (b) restrictive bulging with ring insert

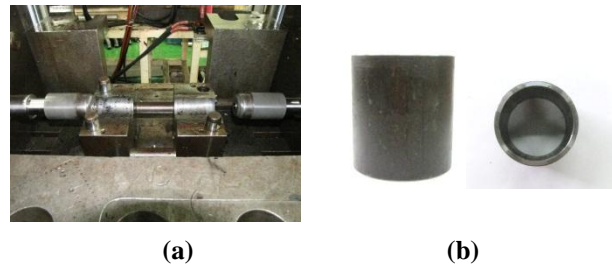


Fig. 3 Die set for free bulging test; (a) die, (b) ring

있다. Fig. 3 (a)는 자유 확관에 사용된 금형이며 Fig. 3 (b)는 분산 확관에 사용된 링으로서 링의 치수는 원소재의 외경 65mm가 20% 확관 되었을 때의 외경 치수인 내경 78mm를 사용하였다.

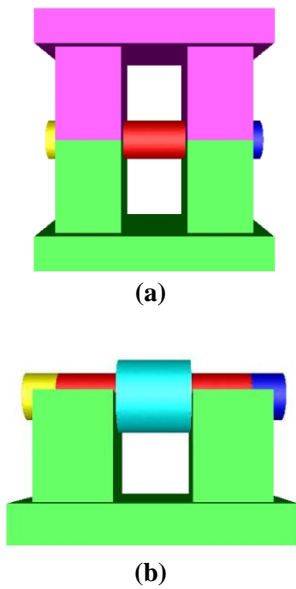


Fig. 4 Shape for FE analysis; (a) free hydroforming, (b) restrictive bulging with ring insert

Table 2 Analysis conditions for FEM

Simulation model	Full model
Friction coefficient (μ)	0.02
Number of elements	100,000
Mesh type	tetra
Maximum pressure (MPa)	80
Axial feeding (mm)	0

2.2.2 유한요소 해석 조건 및 방법

자유 확관 공정과 링 변형 분산 확관 공정의 비교를 위한 유한요소해석을 실시하였다. 자유 확관 공정의 해석모델은 CATIA V5에서 모델링을 하여 상용 유한요소 해석코드인 FORGE™을 이용하였으며 Fig. 4에 모델형상을 나타내었다.

Fig. 4 (a)는 자유 확관 해석 모델을, Fig. 4 (b)는 링 변형 분산 확관 공정을 위한 해석모델을 나타내고 있다. 유한요소해석조건은 Table 2 에 나타내었다.

2.2.3 검증을 위한 모델성형시험

본 연구의 효과를 검증하기 위한 목적으로 자동차 주행 시 현가장치에 발생하는 비틀림을 흡수하여 복원력을 발생시키는 장치인 트레일링암을 성형하였다(Fig. 5).

비대칭복합형상을 갖는 트레일링암을 본 연구에서

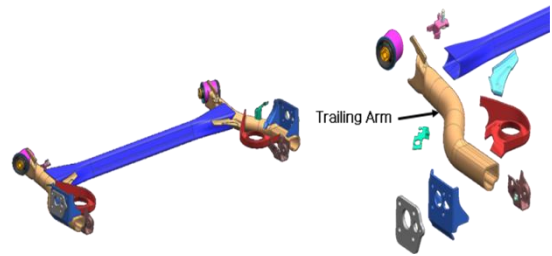


Fig. 5 Schematic drawing of trailing arm

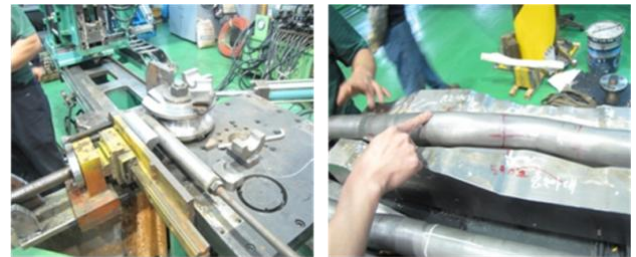


Fig. 6 Pre-bending for trailing arm hydroforming

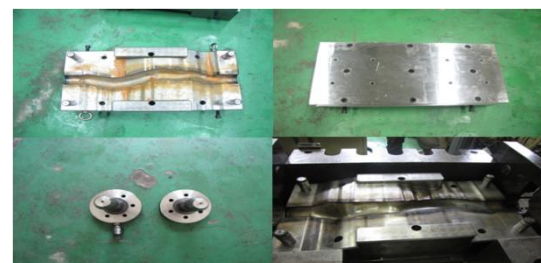


Fig. 7 Die set for trailing arm forming test

의 변형 집중분산효과를 이용하여 액압성형함으로써 그 효과를 검증 하고자 한다. 실험에 사용된 튜브는 자유 확관 시험에 사용한 소재와 동일한 HF440 을 사용하였고 외경 65mm, 두께 2.5mm, 길이 720mm 의 파이프를 사용하였다. Fig. 6 은 직선형의 파이프소재를 복합형상 금형안에 체결할 수 있도록 벤딩공정을 진행한 모습이다. Fig. 7 에는 검증실험에 사용 될 금형을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 링 확관실험을 통한 변형분산효과

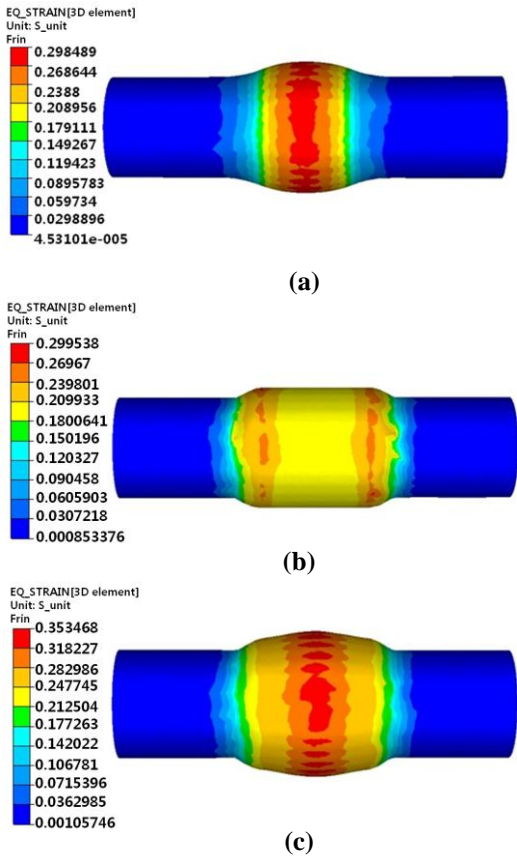


Fig. 8 FE analysis result of Free bulging test; (a) free bulging, (b) restrictive bulging with ring insert, (c) free bulging of restrictive bulged tube

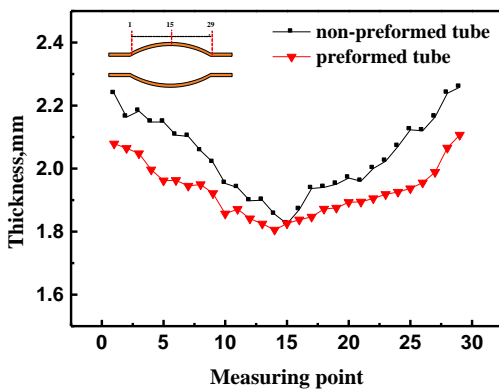


Fig. 9 Thickness variation of FE analysis result

Fig. 4의 유한요소모델을 바탕으로 유한요소해석을 수행한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8 (a)에 나타난 자유 확관 공정에 대한 해석결과를 보면, 소재 가운데 부분에 변형이 집중됨을 알 수 있다. 결국 최대 변형 집중부에서 파단이 일어나게 되며 데미

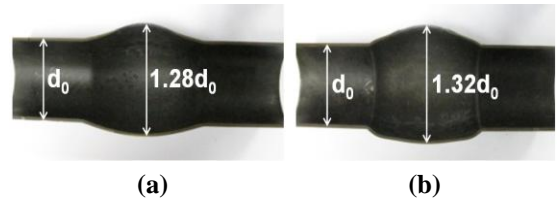


Fig.10 Expansion ratio of free bulging test; (a) non-preformed tube, (b) pre-formed tube

지값(damage value) 0.38기준으로 파단시 확관율은 28.8%로 나타났다. Fig. 8 (b)는 링을 체결하여 확관시험을 한 결과를 나타내고 있다. 링이 변형을 분산시켜줌으로써 Fig. 8 (a)와는 달리 가운데 부분에 변형이 집중되지 않고 비교적 균등하게 분산된 모습을 볼 수 있다. 이 때의 확관율은 링의 내경치수인 78mm에 국한되므로 20.0%이다. Fig. 8 (c)는 Fig. 8 (b)의 링 확관 소재를 이용하여 소재를 자유 확관한 결과이다. Fig. 8 (a)에 보인 자유 확관의 경우와 비교해 보면 변형이 분산되어 확관율이 33.6%로 증가함을 알 수 있다.

Fig. 9는 확관 실험을 했을 때의 튜브의 두께변화와 분산 확관 공정으로 실험을 했을 때의 두께변화를 비교한 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 단순히 확관만 하였을 때보다 분산 확관 공정을 적용하였을 때 파단 지점에서의 두께가 상대적으로 더 균일하게 성형이 된 것을 확인할 수 있다.

전술한 유한요소해석조건과 동일하게 실제 실험을 해본 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 자유 확관을 하였을 때는 확관율이 28.0%로 측정되었으며, 링을 이용하여 분산 확관 하였을 때는 32.0%가 얻어져 유한요소해석과 유사한 결과를 얻었다.

3.2 트레일링암 성형을 통한 검증

트레일링암 성형을 위한 유한요소해석 결과를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11에서 볼 수 있듯이 소재의 중앙곡선 부분에 변형이 집중되어 파단이 일어나는 것을 볼 수 있으며, 실제 성형실험에서도 Fig. 12에 보인 바와 같이 유한요소해석 결과와 유사하게 소재파단이 발생하였다. 이러한 결과는 자유 확관실험과 마찬가지로 변형 집중부위에서 파단이 발생함을 잘 보여주고 있으며, 이러한 파단을 줄이기 위해서는 변형분산이 필요하다는 것을 의미한다. 실 조업에서는 목표형상을 위한 액압성형을 실시하므로 자유 확관 시험처럼 링을 사용할 수가 없다.

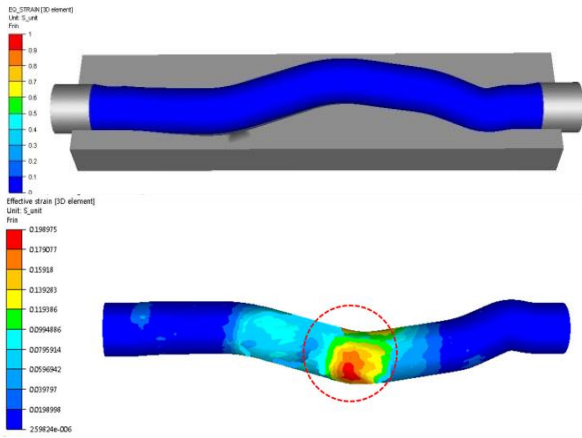
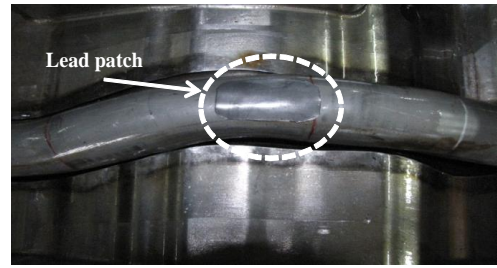


Fig.11 FE analysis of trailing arm forming test



(a)



(b)

Fig.13 Trailing arm hydroforming test; (a) attaching lead patch, (b) hydroformed tube without crack



Fig.12 Defects at trailing arm shape

따라서 본 연구에서는 자유 확관 실험에서 사용된 링 대신 Fig. 13 (a)에 보인 바와 같이 비압축성 납(Pb)판을 이용하여 변형 집중을 분산시키고자 하였다. 균열 발생이 예상되는 변형 집중부위에 일정 두께의 납 판을 미리 부착시킨 상태에서 1차 액압 성형을 하면 납 판이 부착된 부분에서 확관이 되지 않으면서 튜브변형이 억제되게 된다. 반면 납 판과 인접된 주변부로 변형이 분산되게 되는데 이렇게 1차 확관된 튜브에서 납을 제거 한 후 2차 액압성형을 하면 Fig. 13 (b)에 보인바와 같이 파단 없는 양호한 액압성형품을 얻을 수 있다. 이러한 결과는 예상 변형 집중부에 미리 변형을 분산시킨 후 액압성형을 하게 되면 높은 성형성 개선 효과를 얻을 수 있음을 잘 보여준다. Fig. 14에 튜브 끝단부를 절단, 제거한 후 얻어진 트레일링암 최종 제품을 나타내었다.



Fig.14 Hydroformed trailing arm after end cutting

4. 결론

본 연구에서는 국부적 변형 집중 저감을 통한 액압 성형성 개선을 위해 잠정적인 파단예상부위에서의 변형 집중완화 효과를 유한요소해석과 액압 성형실험을 통해 평가하였다. 파단 예상부위에서의 변형 집중을 줄이기 위해 일정 수준이상의 확관을 강제적으로 억제시키는 방법을 자유 확관공정과 모델 시험공정에 모두 적용시켜 성형성 개선효과를 확인하였다. 본 연구에서 제안된 방법을 이용하여 비대칭복합형상을 갖는 트레일링암을 성공적으로 제작함으로써 국부적인 변형저감이 액압 성형성 개선에 효과적인 방법임을 검증하였다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2012R1A5A1048294).

REFERENCES

- [1] H. L. Xing, A. Makinouchi, 2001, Numerical Analysis and Design for Tubular Hydroforming, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 43, No. 4, pp. 1009~1026.
- [2] M. Koc, T. Altan, 2002, Prediction of Forming Limits and Parameters in the Tube Hydroforming Process, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 42, No. 1, pp. 123~138.
- [3] H. K. Park, H. K. Yi, C. J. Van Tyne, Y. H. Moon, 2009, Strain Hardening Behavior during Manufacturing of Tube Shapes by Hydroforming, *Met. Mater. Int.*, Vol.15, No. 6, pp. 897~902.
- [4] M. Koc, T. Altan, 2001, An Overall Review of the Tube Hydroforming(THF) Technology, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 108, No. 3, pp. 384~393.
- [5] F. dohmann, Ch. Hartl, 1997, Tube Hydroforming Research and Practical Application, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 71, No. 1, pp. 174~186.
- [6] Y. Y. Qian, D. Cattran, M. Karima, 1998, Towards Further Understanding of the Mechanics of Tube Hydroforming, *SAE.*, p. 982276.
- [7] S. J. Yuan, C. Han, X. S. Wang, 2006, Hydroforming of Automotive Structural Components with Rectangular-sections, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 46, No. 11, pp. 1201~1206.
- [8] I. K. Lee, J. M. Lee, Y. K. Son, C. J. Lee, B. M. Kim, 2011, Experiment and FE Analysis of Hot Curvature-Forming for Aluminum Thick Plate using Grid-typed Hybrid Die, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 20, No. 4, pp. 316~323.
- [9] S. O. Kwon, H. K. Yi, G. S. Chung, Y. H. Moon, 2007, Hydroforming Characteristics of Double Layered Tube, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 16, No. 8, pp. 567~574.
- [10] S. H. Kim, S. Y. Kim, C. H. Jeon, B. D. Joo, Y. H. Moon, 2012, Effect of Process Parameters on Hydroforming Characteristics of a Rectangular Shape Flange, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 21, No. 1, pp. 42~48.
- [11] H.-U. Lücke, Ch. Hartl, T. Abbey, 2001, Hydroforming, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 115, No. 1, pp. 87~91.