

유한요소해석을 이용한 테일파이프의 튜브하이드로포밍 공정 개발 연구

한수식^{1, #}

Development of Tube Hydroforming for a Tail Pipe Using FE Analysis

S. S. Han

(Received February 15, 2016 / Revised March 29, 2016 / Accepted May 2, 2016)

Abstract

The exhaust tail pipe is the only visible part of the exhaust system on a vehicle. The conventional way to make the tail pipe is welding after stamping. There are various problems that occur during the stamping of stainless steel sheets such as scratching and local fracture. Problems during welding can also occur due to poor weldability. Tube hydroforming can be a solution, which eliminates these problems. The current study deals with the development of tube hydroforming for a vehicle tail pipe using finite element analysis for a free-feeding method. The current study focuses on the development of a proper load path for the tail pipe hydroforming and how bending influences the subsequent processing steps. The FE analysis results were compared with experimental results. This study shows the importance of bending and the necessity of considering bending when performing a tube hydroforming analysis.

Key Words : Bending, Loading Path, Axial Feeding, Free Feeding, Buckling

1. 서 론

테일파이프는 승용차 후단의 배기 토출구를 구성하는 부품으로 배기가스를 대기 중으로 유도할 때의 배기 토출음 저감과 범퍼와의 기하학적 조화 등을 고려하여 복잡한 3차원 곡면 형상을 가지며 그 기능성에 비하여 외관에 대한 요구가 매우 까다로운 부품이다. 테일파이프는 복잡한 형상 때문에 일반적인 가공 방법으로는 일체형 제작이 곤란하여 2개의 부품으로 분리 성형한 후 용접 작업으로 결합하여 완성한다.

테일파이프 생산에 사용되는 스테인레스 소재는 프레스 가공시 표면에 흠(scratch)이 발생하기 쉽고 다른 소재에 비하여 용접성이 나쁘다. 기존의 가공

방법으로 테일파이프를 생산하는 경우 프레스 작업 과정에서 표면에 흠이 빈번하게 발생하고 후속되는 용접 작업에서도 제품 형상 변형과 용접부 비드 형상 불량 등이 자주 발생한다. 이러한 외관 불량 등을 수정하는 재작업으로 인한 생산성 저하와 이에 따른 생산 단가 상승 그리고 품질 불량 증가 등은 테일파이프 생산에 있어서 해결하여야 할 과제이다.

튜브를 복잡한 3차원 형상으로 가공하는 튜브하이드로포밍 기술은 튜브를 이용하여 폐 단면 구조를 갖는 제품을 생산할 수 있는 기술로 굽힘 공정과의 조합을 통하여 다양한 종류의 폐단면 구조의 자동차 부품 생산에 널리 적용되고 있다[1~3]. 튜브하이드로포밍은 성형시 튜브 소재와 금형 사이의 상대 운동량이 적어 소재 표면의 흠 발생이 적고

1. 금오공과대학교 기계공학과

Corresponding Author : Department of Mechanical Engineering Kumoh National Institute of Technology, E-mail:sshan@kumoh.ac.kr

튜브를 소재로 사용하기 때문에 폐단면을 만들기 위한 후속 용접 공정이 필요없어 테일파이프의 생산 공정에 적용할 경우 기존 생산 방식의 문제점을 해결해 줄 수 있다.

튜브하이드로포밍에서 굽힘등에 의한 예비성형과 압력 선도는 성형의 성패를 결정하는 매우 중요한 요소이다[4~6]. 최적화 기법등을 적용하여 압력선도를 도출하는 연구들이 활발히 진행되고 있으나 아직까지는 그 적용은 단순한 형상에 국한되고 있다[7, 8].

본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 스테인레스 테일파이프를 튜브하이드로포밍으로 성형할 수 있는 공정을 개발하고자 한다. 다만 굽힘 공정을 해석하여 굽힘 공정의 효과를 분석하였으며 Free-Feeding 해석 기법이 압력 선도의 도출에 유용함을 확인하였다. 테일파이프 성형 공정의 해석결과를 실험 결과와 비교하여 본 연구를 통하여 개발된 공정 조건의 유효성을 검증하였다.

2. 튜브하이드로포밍 공정의 유한요소해석

튜브하이드로포밍으로 성형하고자 하는 테일파이프의 형상을 Fig. 1(a)에 나타내었다. 테일파이프는 2곳의 굽힘 부분이 있으며 부품의 끝부분에서 최대 확관이 발생하고 이 부분의 확관률은 14.2%이다. 부품 형상의 대칭성으로 인해 Fig. 1(b)와 같이 하이드로포밍으로 성형한 후 가운데 부분을 절단하여 사용한다.

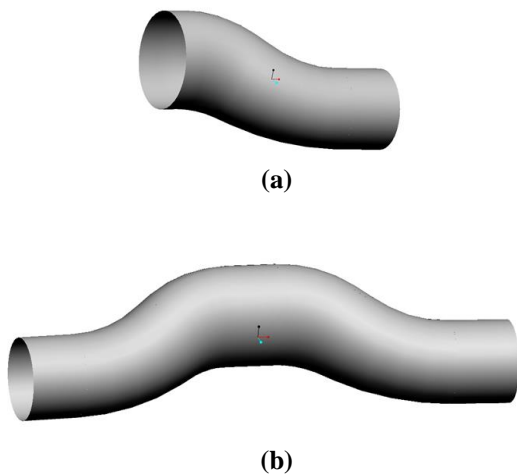


Fig. 1 Tail pipe part design, (a) original part design (b) part design for tube hydroforming

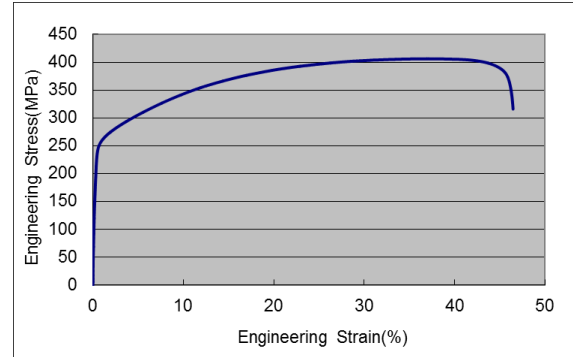


Fig. 2 Flow curve of SUS439L tube

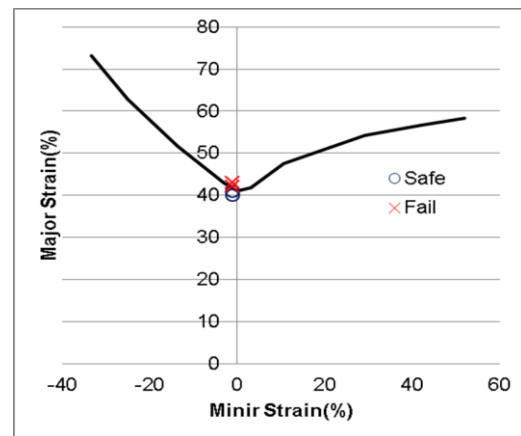


Fig. 3 FLD of SUS439L tube

2.1 재료의 기계적 성질

테일파이프의 성형에는 SUS439L, OD28.6mm, 1.4t의 튜브가 사용된다. 용접선이 포함되지 않는 부분에서 튜브의 길이 방향으로 인장시험을 채취하여 인장시험을 시행하였다. 튜브 소재의 응력-변형률 곡선을 Fig. 2에 나타내었다. 소재의 균일연신율은 37.2%, 총연신율은 44.9%로 나타났다.

성형해석에서 파단 발생을 판단하기 위한 소재의 성형한계선도는 평판형 벌지 시험법[9]을 통하여서 FLD0 값을 구한 후 철강 재료의 일반적인 FLD 형상을 FLD0 만큼 평행 이동하는 방식을 이용하여 결정하였다. 이 방법을 통하여서 구한 FLD를 Fig. 3에 나타내었다.

2.2 굽힘 공정 해석

제품의 중심선으로부터 도출된 굽힘 형상은 Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이 총 4곳의 굽힘 부위를 갖는다. 그러나 튜브를 CNC 튜브 굽힘 장치를 이용하여 굽힘하기 위해서는 튜브를 고정하기 위한 최소

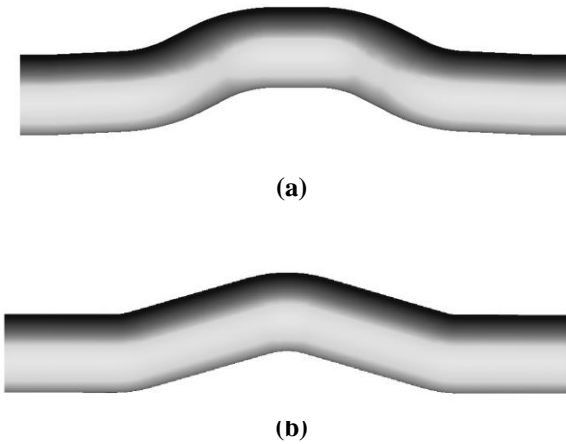


Fig. 4 Geometry of bent tube for tube hydroforming (a) part design from center line of tube hydroforming part (b) modified part design considering CNC bending process

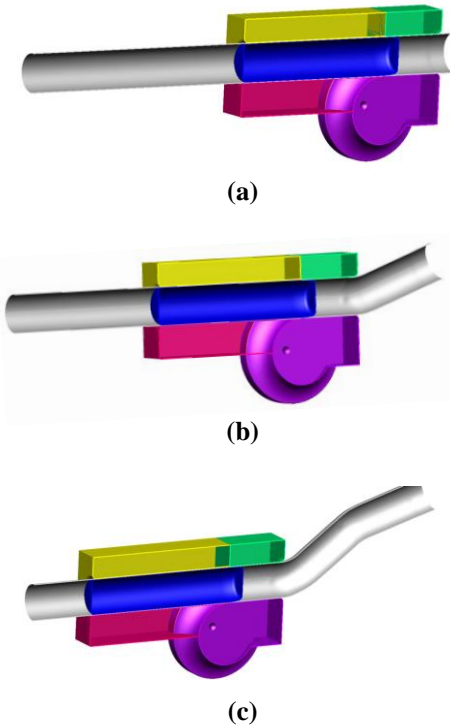


Fig. 5 FE model for tube bending process (a) first bending (b) second bending (c) third bending

한의 직선부가 필요하기 때문에 Fig. 4(b)와 같이 굽힘 형상을 변경하였다. 이때 굽힘 각도는 각각 20°, 40°, 20°이며 굽힘 반지름은 65mm이다. 굽힘 가공에는 맨드릴이 사용되었다.

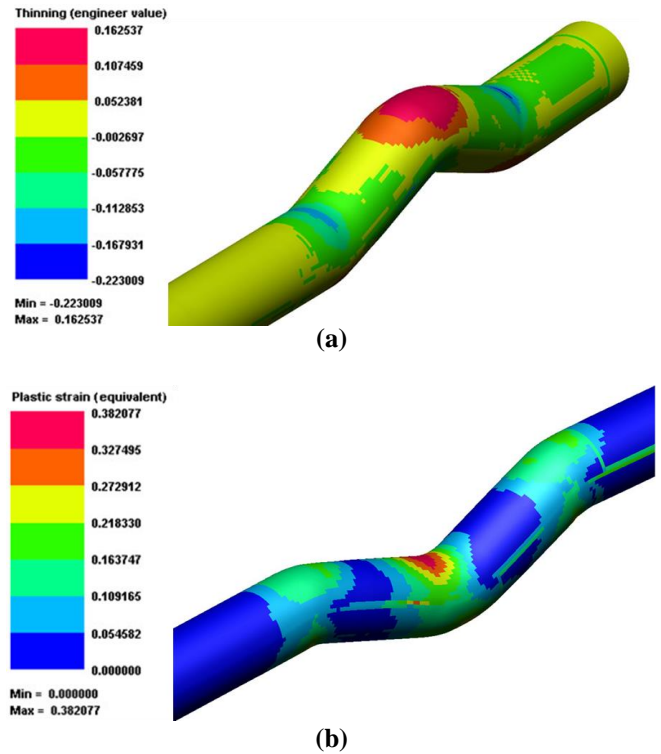


Fig. 6 Strain distribution of bent tube for tube hydroforming (a) distribution of thinning strain (b) distribution of effective strain

Fig. 5는 각각의 굽힘 단계를 해석하기 위한 해석 모델을 나타내었으며 Fig. 6에는 굽힘 성형 해석 결과를 나타내었다. 해석 결과로부터 두께가 가장 얇아지는 최대 두께 감소율이 발생하는 부분과 최대 유효 변형률이 발생하는 부분의 위치가 동일하지 않음을 알 수 있다. 그리고 굽힘 성형된 제품의 형상은 좌우 대칭이지만 변형률의 분포가 비대칭으로 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 굽힘 공정 자체가 대칭공정이 아니란 점을 생각하면 쉽게 이해할 수 있다. 이러한 변형률 분포의 비대칭성은 후속되는 튜브하이드로포밍 공정에도 영향을 미친다. 해석 결과에서 알 수 있듯이 굽힘에 의한 최대 두께 감소율이 22.3%로 나타나 튜브 소재의 균일 연신율이 37.2%인 점을 고려할 때 굽힘 성형에 의하여 매우 많은 변형이 발생하였음을 알 수 있다.

2.3 튜브하이드로포밍 공정해석

굽힘 공정 해석 결과를 이용하여 튜브하이드로포밍 공정을 해석하였다. 굽힘에 의한 변형률이 매우 크기 때문에 굽힘 튜브를 풀림처리한 경우와 풀림

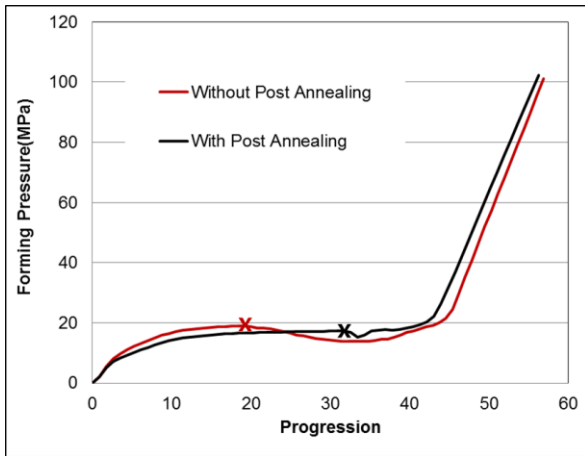


Fig. 7 Variation of forming pressure versus process progression that generated from free-feeding analysis

처리하지 않은 경우에 대하여 각각 해석을 수행하였다. 이때 풀림처리 효과는 하이드로포밍 공정 해석시 굽힘 튜브의 유효 변형률을 Zero로 다시 설정하는 방식으로 고려하였다. 튜브하이드로포밍에서 성형압력과 축방향으로의 튜브 끝단 유입량의 관계를 나타낸 압력선도는 하이드로포밍 공정을 성공적으로 이루기 위해 매우 중요한 공정 변수이다. Free-Feeding 해석 기법을 적용하여 테일 파이프의 성형을 위한 압력 선도를 구하였다. Free-Feeding 해석 기법은 일정한 속도의 유량을 튜브 내부에 지속적으로 공급하여 시간에 따른 내부 압력 변화와 이때 발생하는 튜브 양단의 유입량을 구하는 것이다. 이를 통하여 공정 진행에 따른 요구 성형 압력 변화와 튜브 양 끝단의 요구 최소 유입량에 대한 정보를 구할 수 있다. Free-Feeding 해석을 통하여서 구한 하이드로포밍 공정 진행에 따른 요구 성형 압력 변화를 Fig. 7에 나타내었다.

풀림처리한 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 FLD로 판단된 파단이 발생하는 시점을 각각 그림에 x 표로 나타내었다. 풀림처리하지 않은 경우에 파단이 보다 일찍 발생하는 것으로 관찰되었다. 하이드로포밍 공정 해석에서는 Free-Feeding 해석으로 구한 압력 곡선을 지속적으로 압력이 조금씩 증가하는 형태로 변형하여 사용하였다. 변형된 압력 곡선으로 압력을 작용하면서 시행착오법으로 성형에 필요한 튜브 양단의 유입량을 결정하였다. Fig. 7의 결과로부터 풀림처리 않은 굽힘튜브를 하이드로포밍 할

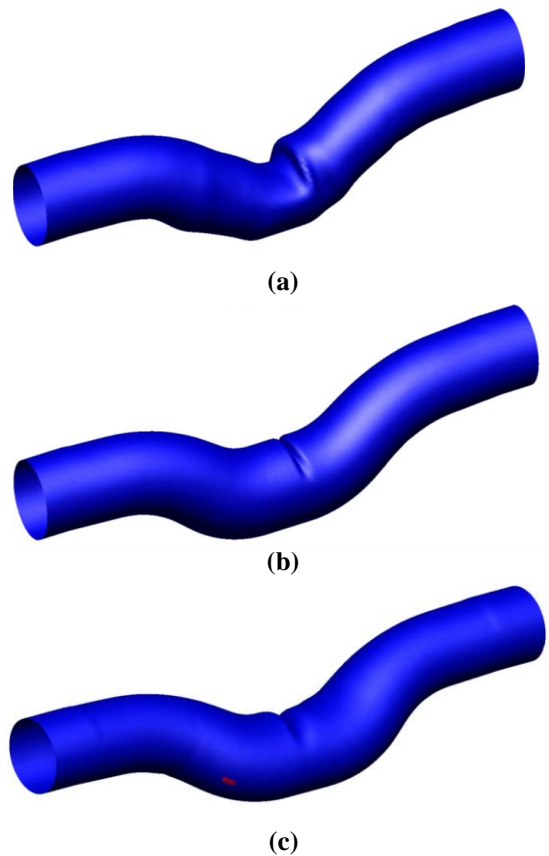


Fig. 8 Deformed shapes during hydroforming with non-post annealed bent tube (a) buckling after initial axial feeding (b) final shape with large axial feeding (c) final shape with small axial feeding

경우 축 방향으로 소재유입을 가하는 시점이 보다 일찍 시작되어야 한다는 것을 알 수 있다. 풀림처리 않은 굽힘튜브를 하이드로포밍할 경우 초기 소재 유입량이 많으면 Fig. 8에 나타난 바와 같이 성형초기에 가운데 부분에서 좌굴이 한쪽에 치우쳐 발생되고 파단은 발생하지 않지만 성형이 끝난 시점에서 초기에 발생한 주름이 완전히 제거되지 않고 남아 있었다. 초기 소재 유입량이 적으면 성형 후에 한쪽에 치우쳐서 파단이 발생하고 주름도 여전히 남아있다. 따라서 테일파이프의 하이드로포밍을 위하여 굽힘 후 풀림처리가 필요한 것을 알 수 있다.

풀림처리된 굽힘튜브를 사용하여 하이드로포밍을 시행하였다. Fig. 8의 결과로부터 알 수 있듯이 부품형상이 성형초기에 축방향으로 소재를 유입시키면 좌굴이 발생하기 쉬운 형태이기 때문에 부품의 가

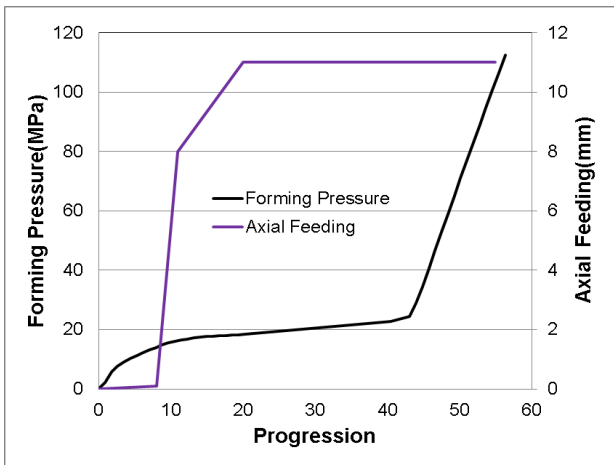


Fig. 9 loading path for tube hydroforming with post annealed bent tube

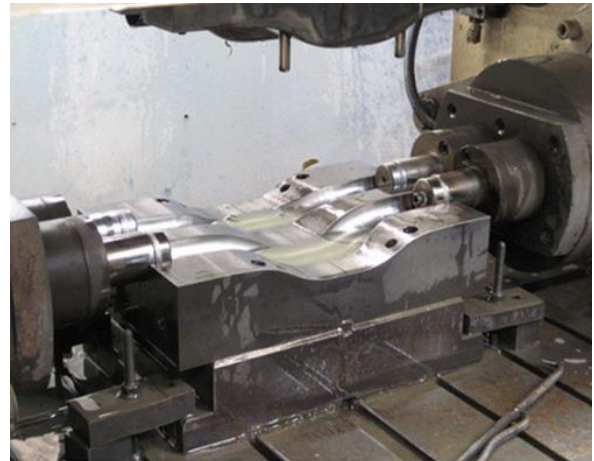


Fig.11 Tube hydroforming die for tail pipe

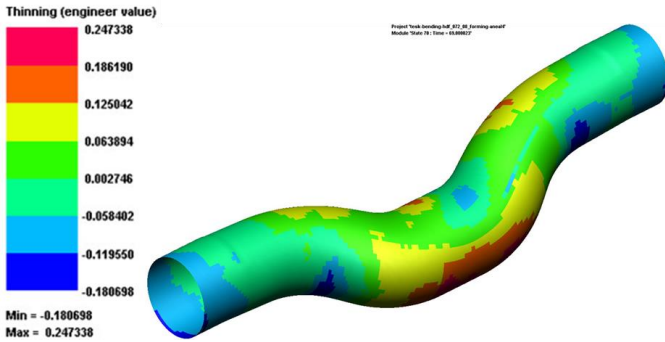


Fig.10 Deformed shape and its thinning strain distribution

운데 부분이 좌굴에 견딜 수 있을 정도로 충분히 확보된 후에 축방향으로의 소재 유입을 가하여야 한다. Fig. 7에서 나타난 바와 같이 풀림처리된 튜브를 성형하는 경우 파단 발생이 늦게 나타나기 때문에 제품 가운데 부분을 충분히 확보시킨 후 축방향으로의 소재 유입을 가할 수 있다. 이러한 점을 고려하여 주름과 파단이 발생하지 않는 조건이 되도록 도출한 압력선도를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9의 압력선도를 이용하여 성형 해석한 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

해석결과에 나타난 바와 같이 변형분포가 좌우대칭이 아님을 알 수 있다. 그리고 풀림처리된 굽힘튜브를 사용하면 주름과 파단이 없이 테일파이프를 하이드로포밍할 수 있는 것을 알 수 있다. 하이드로포밍된 제품의 최대 두께 감소율은 24.7%로 굽힘 바깥부분에서 발생하였으며 굽힘 후 튜브의 최대 두께 감소율 22.3%를 고려할 때 하이드로포밍에 의

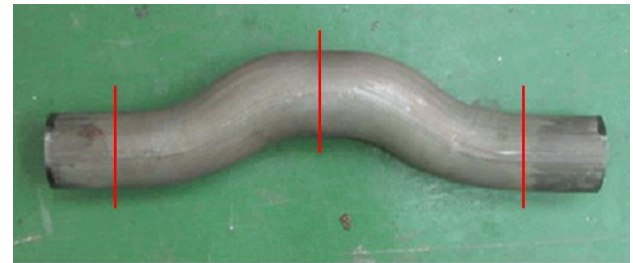


Fig.12 Tube hydroformed tail pipe before cutting

하여서는 두께 감소가 거의 발생하지 않은 것을 알 수 있다.

3. 튜브하이드로포밍

성형해석을 통하여 도출한 압력선도를 이용하여 튜브하이드로포밍을 시행하였다. Fig. 11은 튜브하이드로포밍에 사용된 금형을 나타내었으며 성형된 제품을 Fig. 12에 나타내었다. 최종 제품은 Fig. 12에 나타난 붉은 선을 따라서 절단하여 완성한다.

성형해석 결과와 하이드로포밍시험 결과를 비교하기 위하여 굽힘 전의 튜브 표면에 원형그리드 에칭을 실시하였으나 굽힘후 풀림처리로 인하여 원형그리드 에칭한 부분이 손상되어 관독하기 매우 어렵게 되었다. 그래서 제품에서 가장 확보가 많이 발생하는 끝단 부분의 두께 감소율을 측정하여 해석결과와 시험 결과를 서로 비교하였다. Fig. 13에 나타난 바와 같이 50~100mm구간에서 차이가 발생하는데 이 위치는 성형 초기에 약간의 주름이 발생한 후 성형 후기에 제거되는 곳이다. 주름이 제거되는

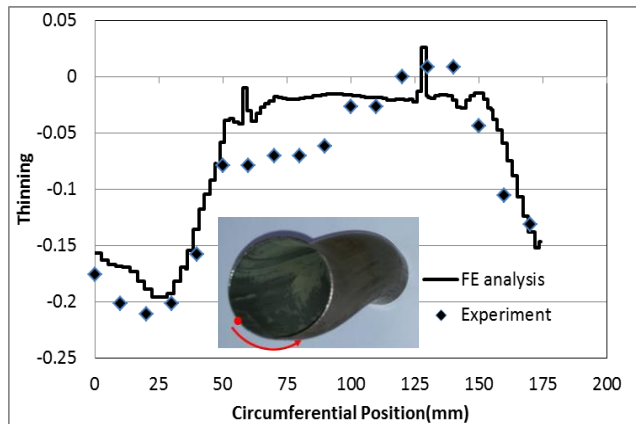


Fig.13 Distribution of thinning along circumferential direction at the edge of hydroformed tail pipe

시점에 대한 해석과 실험의 미세한 차이가 이러한 두께 분포의 차이를 나타내는 것으로 판단된다. 그러나 전체적인 두께 감소율의 분포 경향은 두 결과가 서로 유사하게 나타나 해석에 사용된 조건들이 적절하였음을 알 수 있다.

4. 결론

테일파이프의 튜브하이드로포밍 공정을 개발하고 그 결과를 시험으로 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 굽힘 가공된 제품의 형상이 대칭을 이루더라도 굽힘 공정이 대칭이 아니기 때문에 변형률의 분포는 다르게 나타났고 그 영향은 튜브하이드로포밍에서도 그대로 나타났다.

(2) Free-Feeding 해석기법은 공정진행에 따른 하이드로포밍에 필요한 압력 변화와 축방향으로의 소재 유입 작용 시점에 대한 유용한 정보를 제공해 줄 수 있다.

(3) Free-Feeding 해석을 이용한 공정에 대한 사전 정보 습득과 이를 토대로한 압력선도 도출 방법은 주어진 제품에 대한 최적의 값을 제공하지는 못하더라도 비교적 단순한 형상의 제품에 대하여 유용한 도구가 될 수는 있다.

(4) 해석 결과와 실험 결과를 비교한 결과, 개발된 테일파이프의 튜브하이드로포밍 공정이 적절함을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다.

REFERENCES

- [1] S. H. Zhang, 1999, Developments in Hydroforming, J. Mater. Process. Technol., Vol. 91, No. 1, pp. 236~244.
- [2] S. M. Sohn, M. Y. Lee, S. Y. Lee, 2000, A Study on the Hydroforming Technology of an Automotive Bumper Rail, Trans. Mater. Process, Vol. 9, No. 2, pp. 561~566.
- [3] H. Y. Kim, 2002, Hydroformig Process for Automotive Application, Trans. Mater. Process., Vol. 11, No. 4, pp. 285~294.
- [4] F. K. Chen, S. J. Wang, R. H. Lin, 2007, A Study of Forming Pressure in the Tube-hydroforming Process, J. Mater. Process. Technol., Vol.192-193, pp. 404~409.
- [5] W. J. Song, S. C. Heo, J. Kim, B. S. Kang, 2006, Investigation on Preformed Shape Design to Improve Formability in Tube Hydroforming Process using FEM, J. Mater. Process. Technol., Vol. 177, No. 1, pp. 658~662.
- [6] S. T. Kim, S. E. Lim, T. K. Lee, Y. S. Kim, 2000, Experimental Studies of the Forming Process for the Tubular Hydroforming Technology, Trans. Mater. Process., Vol. 9, No. 1, pp. 35~42.
- [7] Yingyot A. U. L., G. Ngaile, T. Altan., 2004, Optimizing Tube Hydroforming Using Process Simulation and Experimental Verification, J. Mater. Process. Technol., Vol. 146, No. 1, pp. 137~143.
- [8] [8] A. Ghosh, K. Deshmukh, G. Ngaile, 2011, Database for Real-time Loading Path Prediction for Tube Hydroforming using Multidimensional Cubic Spline Interpolation, J. Mater. Process. Technol., Vol. 211, No. 1, pp. 150~166.
- [9] S. S. Han, K. C. Park, 2000, Development of Formability Test for Tube, Hydroforming, Trans. Mater. Process, Vol. 9, No.6, pp. 631~637.