

가변 단면을 가지는 비대칭 얇은 관 부품의 액압성형 연구

강형석¹ · 주병돈¹ · 황태우¹ · 문영훈[#]

Hydroforming of a Non-axisymmetric Thin-walled Tubular Component with Variable Cross Sections

H. S. Kang, B. D. Joo, T. W. Hwang, Y. H. Moon

(Received July 21, 2015 / Revised August 5, 2015 / Accepted August 13, 2015)

Abstract

Hydroforming of a non-axisymmetric thin-walled tubular component with variable cross sections was analyzed. In order to solve the sealing problem which occurred due to the thin and non-axisymmetric shape, the use of a lead patch on the punch, which had been successful in hydroforming of thin tubes, was evaluated. A lead patch was attached to the punch to solve the sealing problem, which was caused by the stress gradient in the non-axisymmetric shape. FEM and experiments were also performed to analyze these sealing problems associated with the punch shape and non-axisymmetric shape. Finally, the lead patch was attached at tube surface where intensive local strain concentration would occur to enhance the hydroformability. These methods were successfully used to fabricate non-axisymmetric thin-walled tubular component with variable cross sections that had previously failed during traditional hydroforming.

Key Words : Hydroforming, Thin-wall Tube, Non-axisymmetric Shape, Variable Cross Sections, Sealing Problem, Lead Patch

1. 서 론

액압성형 공정은 경량화 부품에 대한 수요가 증가함에 따라 자동차 부품 분야에서 경량화를 위한 신가공 공정 기술로서 폭넓게 이용되고 적용 범위를 넓혀가고 있는 소성가공 기술이다[1,2]. 액압성형 공정은 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 사이드레

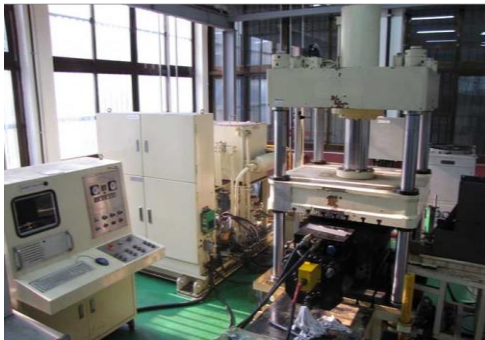
일(side rail), 서브프레임(subframe), 대시패널(dash panel), 레일루프(rail roof), 패키지 트레일(package trail) 등 다양한 종류가 있다[7~11]. 자동차의 충돌 시 충격 흡수를 위한 부품은 여러 가지가 있다. 고속 충돌 시 운전자의 생명을 지키기 위한 고강도의 부품부터 저속 충돌 시 차체의 변형만을 막기 위한 부품들이 있다. 저속 충돌에 사용되는 여러 부품 중 범퍼는 국내 규정으로 시속 2.5mile에서 충격을 흡수하면서 파괴가 일어나 차체의 변형을 막을 수 있게 설계되어 있다. 범퍼는 범퍼빔(bumper beam), 범퍼스테이(bumper stay), 스테이플레이트(stay plate), 프론트사이드멤버(front side member) 등으로 구성되어 있다.

1. 부산대학교 정밀기계공학과

Corresponding Author: School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan609-735, Korea, E-mail:yhmoon@pusan.ac.kr

Table 1 Dimensions and material properties of the tube

Outer diameter (mm)	83.0
Inner diameter (mm)	80.2
Tube thickness (mm)	1.4
TS (MPa)	282
YS (MPa)	178
EL (%)	49

**Fig. 1 Hydroforming machine**

본 연구는 충돌 시 변형에 의한 충격 흡수로, 범퍼 빔을 비롯한 다른 부품들의 변형을 방지하기 위해 쓰이는 부품인 범퍼스테이의 액압성형에 관한 것이다. 현재의 범퍼스테이는 스탬핑(stamping) 과 스팟(spot)용접으로 이루어진 다공정 접합 방식으로 생산되고 있다. 이에 본 연구에서는 액압성형 공정을 이용하여 범퍼스테이를 성형하였으며, 액압성 형시 발생하는 실링 문제점을 분석 및 개선하였다.

또한 국부적 변형 집중 저감을 통해 액압성형성을 개선하고자 하였으며, 성형성 개선효과를 평가하기 위해 액압성형 실험과 병행하여 유한요소해석을 실시하였다[12]. 또한 본 연구에서 제시된 방법론을 이용한 실부품 제작을 통해 결과를 검증하였다.

2. 연구 방법

2.1 액압성형 실험

본 연구에서는 가변 단면을 가지는 비대칭 얇은 관 부품의 액압성형 실험을 수행하기 위해 Table 1의 물성을 가지는 SPCUD소재를 사용하였으며, 실험적 검증을 위한 장비의 특성을 고려하여 두께 1.4mm, 길이 505mm의 튜브를 사용하였다.



(a)



(b)

Fig. 2 Hydroforming die for complex and non-axisymmetric model part; (a) upper, (b) lower die**Table 2 Analysis condition for FEM**

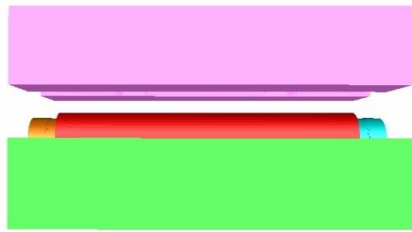
Simulation model	Full model
Friction coefficient between die and tube (μ)	Coulomb 0.02
Number of elements	about 100,000
Mesh type	tetra

액압성형장치는 4주형 하향식 80ton급에 최대성형 압력 200MPa로 성형이 가능한 장치를 이용하였으며, Fig. 1에 나타내었다.

또한 Fig. 2에는 액압성형 실험에 사용될 비대칭 복합 형상의 금형을 나타내고 있다.

2.2 유한요소해석

상기 실험에서 나타난 현상을 예측하기 위하여 상용유한요소해석 코드인 Forge™ 를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 비대칭 복합 형상의 금형과 제품의 해석모델은 CATIA V5 에서 모델링을 하였으며, Fig. 3 에 나타내었다. Fig. 3 (a)는 유한요소해석 모델을 나타낸 것이며, Fig. 3 (b)는 가변 단면을 가지는 비대칭 복합형상의 최종 부품을 나타낸 것이다. 유한요소 해석조건은 Table 2 에 나타내었다.

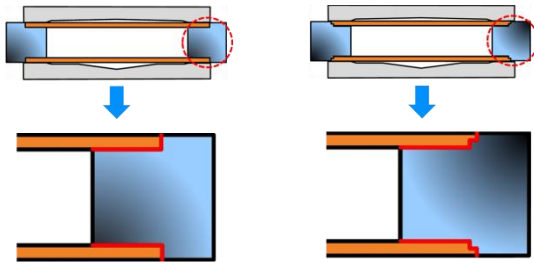


(a)



(b)

Fig. 3 (a) FE analysis model, (b) model part



(a)

(b)

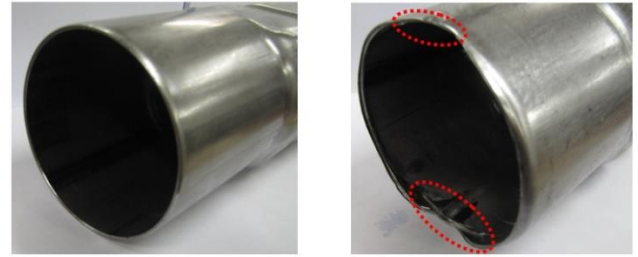
Fig. 4 Schematic drawings of cross section of punch; (a) one step punch, (b) two step punch

3. 결과 및 고찰

3.1 펀치 설계

관재 액압성형 공정은 튜브형상의 원소재를 금형에 장착한 후 튜브 내부의 높은 액압과 축 방향의 피딩을 부여하여 원하는 형상으로 성형하는 기술이다.

얇은 튜브에 높은 내부액압을 부여하기 위해서는 유체가 새어나가지 않게 실링 효과를 향상시키는 것이 중요하다. 기존의 액압성형 실험에서는 실링 효과를 향상시키기 위해 Fig. 4 (b)와 같이 다단 펀치를 주로 사용하여왔다. 다단 펀치를 사용할 경우, 펀치와 튜브 사이에 단면 접촉뿐만 아니라 측면 접촉이 발생하게 되고, 소재 또한 단이 형성되어 실링 효과를 향상시켜주고 있다. 하지만 두께가 얇은 소재의 경우, 하중을 견디는 힘 부족으로 파이프 끝단부에 결함이 발생 할 것이라 판단하여 액압성형 실험을 실시하여 펀치 형상에 따른 결함발생 유무를 분석하였다.



(a)

(b)

Fig. 5 Experiment result according to punch shape; (a) one step punch, (b) two step punch

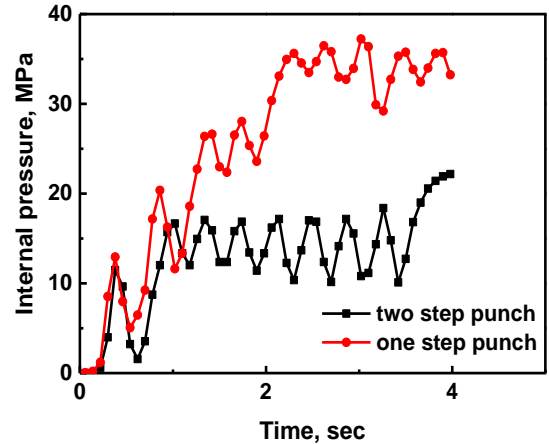


Fig. 6 Comparison of internal pressure between one step and two step punches

Fig. 5 에는 액압성형 실험한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 5 (a)와 같이 1 단 펀치를 사용하였을 경우에는 튜브 끝단부에 결함이 발생하지 않았다. 이와 반대로 2 단 펀치 에서는 Fig. 5 (b)와 같이 결함이 발생하였고, 결함이 발생한 곳에서 유체가 새어나가는 현상이 발생하여 높은 내부액압을 얻을 수 없었다. 2 단 펀치에서 결함이 발생하는 이유는 튜브 끝단부와 펀치가 접촉하는 부분의 단면적 감소로 인해 하중을 견디는 힘이 부족하였고, 그로 인해 항복 현상이 발생하였기 때문이다. 1 단 펀치의 경우에는 2 단 펀치에 비해 튜브 끝단부와 펀치가 접촉하는 부분의 단면적이 증가하게 되어 하중을 견디는 힘 증가로 인해 결함이 발생하지 않았다. Fig. 6 은 1 단 펀치와 2 단 펀치의 최대 내부액압을 비교한 그래프이다. 1 단 펀치가 2 단 펀치에 비해 최대 내부액압이 대략 13MPa 상승한 것을 확인 할 수 있었다. 이를 통해 1.4mm 처럼 얇은 튜브를 액압성형 할 경우, 1 단 펀치가 2 단 펀치에 비해 실링

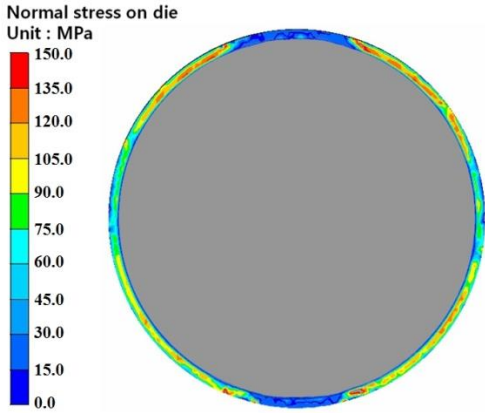


Fig. 7 FE analysis result of stress distribution occurred on punch

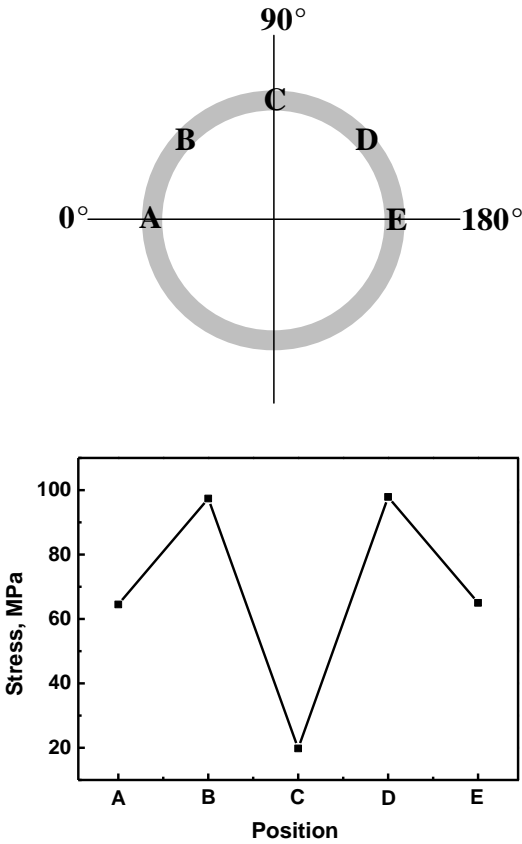


Fig. 8 Stress distribution on punch of complex and non-axisymmetric die

효과가 우수하다는 결론을 얻게 되었다.

3.2 Leak prevention 분석

제품의 최종 모델이 Fig. 3 (b)와 같이 비대칭 복합형상 일 때, 튜브와 펀치 사이의 접촉면에서 응력

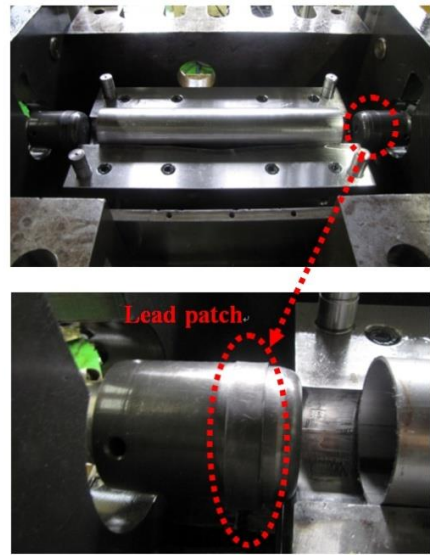


Fig. 9 Attaching lead patch at punch

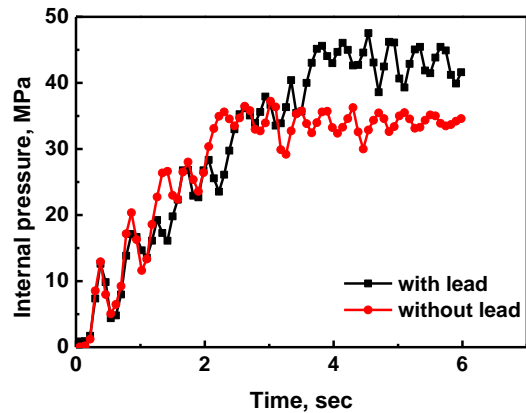


Fig.10 Comparison of internal pressure between punch with lead patch and without lead patch

구배가 발생하게 된다. 그러므로 응력이 낮은 펀치 구간으로 유체가 새어 나갈 것이라 판단 하였으며, 이러한 실링 문제를 분석하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 7 은 펀치에서 응력구배가 발생한 것을 나타낸 것이다. Fig. 8 에 나타낸 것처럼 복합형상으로 인해 A, B, C, D, E 영역에서 각각 64.5MPa, 97.4MPa, 19.8MPa, 97.9MPa, 65.0MPa 의 응력이 발생하게 되었으며, 상대적으로 응력이 낮은 구간인 A, C, E 영역에서 유체가 새어 나가는 실링 문제가 발생한 것이다.

응력구배 때문에 발생하는 실링 문제를 해결하기 위해 납 패치를 Fig. 9 와 같이 펀치에 부착하였다. 액압성형 실험을 수행하기 전에, 납 패치를 튜브와

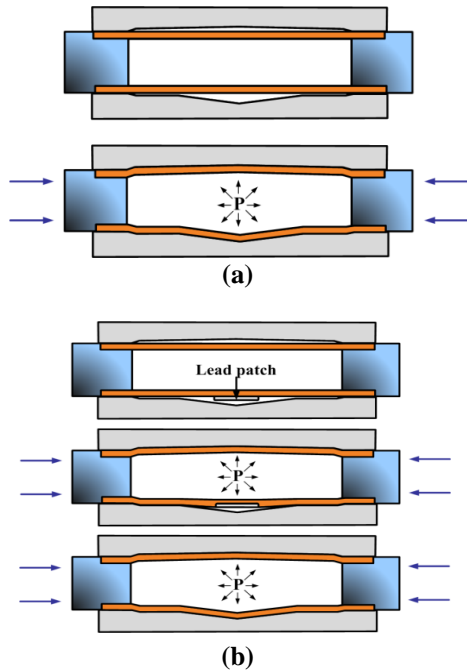


Fig.11 Schematic drawing of hydroforming test; (a) Non-restricted, (b) restricted by lead patch

펀치 사이의 접촉 영역에 부착 시켰다. 비압축성 물질인 납 패치가 응력이 낮은 펀치 구간으로 새어나가는 유체를 막아줄 것이라 판단하였고, 실링 문제의 개선 여부를 확인하기 위해 실험을 수행하였다. Fig. 10 은 납 패치 부착 유무에 따른 내부액압을 비교한 그래프이다. 납 패치를 펀치에 부착한 경우, 대략 10MPa 정도의 내부액압 상승이 발생한 것을 확인 할 수 있다. 이를 통해, 펀치에 납 패치를 부착하는 것은 비대칭 복합 형상에서 발생하는 실링 문제를 해결해 줄 수 있다는 결론을 얻을 수 있다.

3.3 국부적 변형 집중 저감을 통한 액압 성형성 개선

액압성형성을 개선하기 위해 국부적 변형집중 저감 방법을 적용하였다. 국부적 변형집중 저감은 변형이 집중되는 부위에 강제적으로 변형을 억제시키는 방법으로 액압성형성을 향상시키는 방법이다 [12]. Fig. 11 (b)와 같이, 변형이 집중되는 부위에 납 패치를 부착하여 1 차 액압성형 후, 납 패치를 제거하고 2 차 액압성형을 통해 성형성을 향상시키는 것이다. Fig. 11 (a)의 단순 액압성형 공정과 Fig. 11 (b)의 납 변형 분산 후 공정의 액압성형성을 비교하기

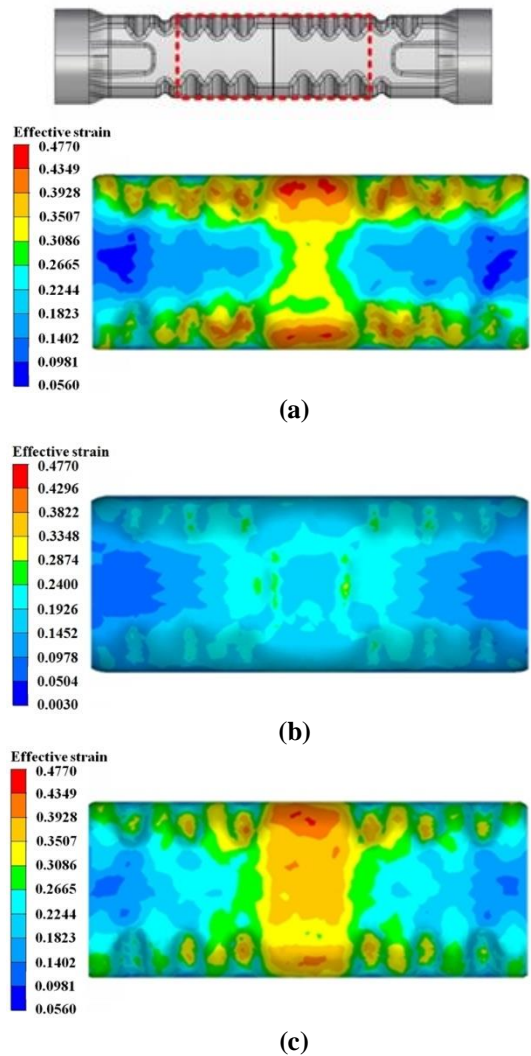


Fig.12 FE analysis results; (a) free hydroforming, (b) restrictive hydroforming with Pb patch, (c) free hydroforming of restrictive hydroformed tube

위해 유한요소해석을 수행 하였으며, Fig. 12 에 나타내었다.

Fig. 12 (a)에 나타난 단순 액압성형 공정에 대한 해석결과를 보면, 소재 가운데 부분에 변형이 집중됨을 알 수 있다. 결국 최대 변형 집중부 에서 파단이 일어나게 되며, 이 때의 변형률은 47.7%로 나타났다. Fig. 12 (b)는 납 패치를 부착하여 액압성형 시험을 한 결과를 나타내고 있다. 납 패치가 변형을 분산 시켜줌으로써 Fig. 12 (a)와는 달리 가운데 부분에 변형이 집중되지 않고 비교적 균등하게 분산된 모습을 볼 수 있다. 이 때의 변형률은 31.8%이다. Fig. 12 (c)는 Fig. 12 (b)의 납 변형 분산 후 소

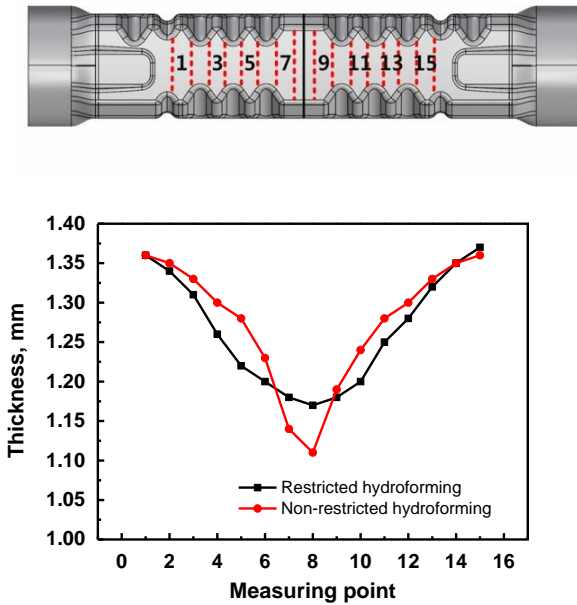


Fig.13 Comparison of thickness variation between preformed hydroforming and non-preformed hydroforming

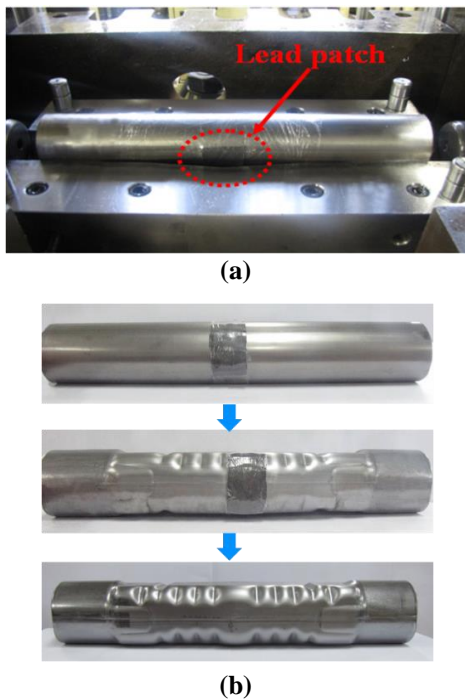


Fig.14 Hydroforming experiments; (a) attaching lead patch, (b) hydroforming test

재를 이용하여 액압성형한 결과이다. Fig. 12(a)의 단순 액압성형만 하였을 때에 비해 변형이 분산되어

변형률이 44.8%로 감소함을 알 수 있다. 즉 성형성이 개선된 것을 확인 할 수 있다. 또한 Fig. 13은 단순 액압성형 시험을 했을 때의 튜브의 두께변화와 납 변형 분산 후 공정으로 해석을 했을 때의 두께변화를 비교한 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 단순히 확관만 하였을 때보다 분산 확관 공정을 적용하였을 때 파단 지점에서의 두께가 상대적으로 더 균일하고 두껍게 성형이 되어 성형성이 개선된 것을 확인할 수 있다.

유한요소해석으로부터 얻어진 결과를 바탕으로 실험을 수행하였다. Fig. 14 (a)에 보인 바와 같이 비압축성 납(Pb) 패치를 이용하여 변형 집중을 분산시키고자 하였다. 균열 발생이 예상되는 변형 집중부위에 일정 두께의 납 판을 미리 부착시킨 상태에서 1 차 액압성형을 하면 납 판이 부착된 부분에서 확관이 되지 않으면서 튜브변형이 억제되게 된다.

반면 납 판과 인접된 주변부로 변형이 분산되게 되는데 이렇게 1 차 확관된 튜브에서 납을 제거한 후 2차 액압성형을 하면 Fig. 14 (b)에 보인 바와 같이 성형성이 개선된 양호한 액압성형품을 얻을 수 있다. 이러한 결과는 예상 변형 집중 부에 미리 변형을 분산시킨 후 액압성형을 하게 되면 높은 성형성 개선 효과를 얻을 수 있음을 잘 보여준다.

4. 결론

유한요소해석과 실험을 통해 가변 단면을 가지는 비대칭 얇은 관 부품에 대한 액압성형 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

- (1) 1.4mm처럼 얇은 튜브를 액압성형 할 경우, 1 단 펀치가 2 단 펀치에 비해 실링 효과가 우수하다는 결론을 얻게 되었다.
- (2) 비대칭, 복합 형상으로 인해 펀치에 발생하는 응력구배가 실링 문제의 원인이 되었으며, 펀치에 납 패치 부착이 비대칭, 복합 형상으로 인해 발생하는 실링 문제를 개선시켜 주었다는 결론을 얻게 되었다.
- (3) 납 패치 부착을 통한 국부적 변형 집중 저감을 통해 액압성형성을 개선하였다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재

원으로 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.
- [12] S. G. R. Shin, B. D. Joo, C. J. Van Tyne, Y. H. Moon, 2014, Enhancing Tube Hydroformability by Reducing the Local Strain Gradient at Potential Necking Sites, *J. Mech. Sci. Technol.*, Vol. 28, No. 10, pp. 4057~4062.