

중공품 성형시 삼중관의 액압성형성에 미치는 압력경로의 영향

한상욱¹ · 김상윤¹ · 주병돈¹ · 문영훈[#]

Effect of Loading Path on the Hydroformability of a Three-layered Tube for Fabrication of a Hollow Part

S. W. Han, S. Y. Kim, B. D. Joo, Y. H. Moon

(Received December 19, 2012 / Revised December 23, 2013 / Accepted January 22, 2013)

Abstract

Tube hydroforming is a technology that utilizes hydraulic pressure to form a tube into desired shapes inside die cavities. Due to its advantages, such as weight reduction, increased strength, improved quality, and reduced tooling cost, single-layered tube hydroforming is widely used in industry. However in some special applications, it is necessary to produce multi-layered tubular components which have corrosion resistance, thermal resistance, conductivity, and abrasion resistance. In this study, a hollow forming process to fabricate a part from multi-layered tubes for structural purposes is proposed. To accomplish a successful hydroforming process, an analytical model that predicts optimal load path for various parameters such as tube material properties, thickness of tubes, diameter of holes and the number of holes was developed. Tubular hydroforming experiments to fabricate a hollow part were performed and the optimal loading path developed by the analytical model was successfully verified. The results show that the proposed hydroforming process can effectively produce hollow parts with multi-layered tube without defects such as wrinkling or fracture.

Key Words : Hydroforming, Three-layered Tube, Hollow-part, Loading Path

1. 서론

튜브 액압 성형 공정은 액압을 이용하여 튜브를 성형하여 원하는 형상을 얻는 공정으로[1] 성형 후 재료의 국부적인 경화영역 부여, 제품의 강성증가, 정밀한 제품 생산 가능, 부품 감소에 의한 경량화 등의 장점이 있다[2, 3]. 액압 성형 공정은 자동차 부품, 석유화학, 발전설비, 기계설계, 파이프 시스템 등의 여러 분야에 지속적으로 활용되고 있으며[4~6] 최근에는 단일관의 액압 성형 공정뿐만 아니라 이중관, 삼중관의 액압 성형 공정 연구가 활발히 진행되고 있다[7,8]. 단일관을

이용한 튜브 액압 성형품은 제한된 특성만을 나타내는데 비하여 다중관, 즉, 두 종류의 이상의 소재를 적용하면 내식성, 강도, 성형성, 내마모성 등의 필요한 특성을 선택적, 복합적으로 부여함으로써 용도에 따라 폭넓게 사용될 수 있다[7-9]. 따라서 본 연구에서는 다중관 튜브의 액압성형 공정을 통하여 구조용 중공부품을 제작하기 위한 일련의 연구를 수행하였다. 외부튜브를 제외한 내부튜브에 홀 가공을 하여 이를 유로로 활용함으로써 중공 성형품을 제작하는 액압성형 공정을 제안 하였으며 중공 액압성형 공정시 최적의 압력경로를 설정하기 위하여 소재 물성, 소재 두께,

1. School of Mechanical Engineering, Pusan National University
Corresponding Author: ERC/Net Shape Die Manufacturing, Pusan National University, E-mail: yhmoon@pusan.ac.kr

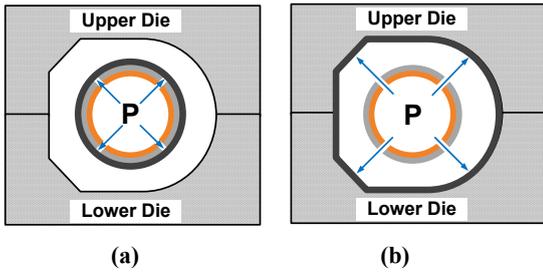


Fig. 1 Schematic drawing of proposed hollow forming process to a part: (a) tube positioning and filling stage, (b) hollow-forming stage

홀 직경, 홀 개수 등의 인자를 반영한 수식 모델을 제안 하였다. 자유 확관 실험을 수행하여 확관을 분석 하였으며 이 결과를 바탕으로 금형을 설계, 제안 공정 및 수식 모델에 대한 실험적 검증 을 수행 하였다

2. 중공 액압 성형 공정 설계

Fig. 1 에 삼중관 중공 액압 성형의 개략도를 나타내었다. 공정의 시작시에는 금형과 소재가 Fig. 1(a)와 같이 거치되며 금형이 닫힌 후 소재의 내부에 유체가 공급된다. 공급된 유체는 Fig. 1(b) 에 나타난 바와 같이 가공된 홀을 통해 빠져나가게 되며 외부튜브의 내측에 압력이 가해져 확관을 시작한다. 공정이 진행됨에 따라 외부튜브는 금형 벽면을 따라 성형되며 최종적으로 중관과 외관 사이에 중공을 가지며 원하는 형태의 외관으로 성형된 중공품을 얻게 된다.

3. 압력 경로 설정 수식 모델

중공 액압 성형 시의 주요 결함은 Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 내부튜브로 공급되는 유량과 홀을 통해 빠져나가는 유량 사이의 차이로 인한 내부튜브의 주름 발생이다. 소재의 내부로 공급된 유량과 홀을 통해 빠져나간 유량의 차이는 내부와 외부에 압력차이를 발생시키게 되고 이로 인해 야기된 힘이 소재의 항복 응력보다 클 경우 결함이 발생 하게 된다. 이러한 특성을 활용하여 수식 모델을 설정 하였으며 수식 모델 설계에 반영된 인자는 Fig. 3 에 나타낸 바와 같다.

액압 성형시 내부압력과 소재의 항복강도와와의 상관관계는 Von Mises 식에 근거하여 다음과 같이



Fig. 2 Internal wrinkles around holes of hydroformed inner tube

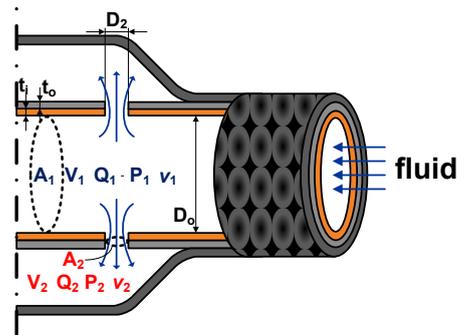


Fig. 3 Deformation behavior of a three-layered tube

나타 낼 수 있으며

$$P = \frac{2 \cdot (\sigma_y \cdot t)}{D_o} \quad (1)$$

삼중관의 내관 및 중관에 홀 가공된 경우 결함이 발생할 때, 즉, 항복시 내부 압력은 아래와 같이 표현된다.

$$P_y = \frac{2 \cdot (\sigma_{yi} \cdot t_i + \sigma_{ym} \cdot t_m)}{D_o} \quad (2)$$

단, σ_{yi} : 내관의 항복강도

σ_{ym} : 중관의 항복강도

t_i : 내관 두께

t_m : 중관 두께

내관 및 중관에 발생하는 주름은 소재 내부와 외부 중공부의 압력차이 ΔP 에 의해 발생함으로 주름 발생 조건은 아래와 같이 표현된다.

$$\Delta P (= P_1 - P_2) \geq P_y \quad (3)$$

구멍을 통해 빠져나가는 유체의 속도 v_2 는

Bernoulli 식에 의해 다음과 같이 표현 될 수 있으며

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (4)$$

- 단, P_1, P_2 : 소재 내부 압력 및 중공부 압력
- v_1, v_2 : 공급되는 유체의 유속 및 구멍을 통해 빠져 나가는 유체의 유속
- z_1, z_2 : 높이항
- γ : 비중량
- g : 중력가속도

$D_o \gg D_2$ 이므로 $v_1 = 0$ 로 표현되며, 액압 성형시 $Z_1 = Z_2$ 이므로 식 (4) 는 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{P_1}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (5)$$

$\gamma = \rho \cdot g$ 이므로 v_2 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{P_1 - P_2}{\rho \cdot g} &= \frac{v_2^2}{2g} \Rightarrow \frac{P_1 - P_2}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} \\ \Rightarrow v_2^2 &= \frac{2 \cdot (P_1 - P_2)}{\rho} \end{aligned} \quad (6)$$

주름방지를 위한 최대속도 v_{2max} 는 식 (3)으로부터 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{2max} < \sqrt{\frac{2 \cdot (P_1)}{\rho}} \quad (7)$$

V_2 가 0에서 v_{2max} 까지 선형적으로 증가한다고 가정하면 항복 시 내부압력까지 증가하는 시간 t_p 와 중공부의 체적 V_2 의 상관관계는 구멍의 수 n , 구멍의 직경 D_2 를 포함하여 다음의 식으로 나타낼 수 있으며

$$n \cdot \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} \cdot \frac{v_{2max}}{2} \cdot t_p = V_2 \quad (8)$$

식(7)과 식 (8)로부터 결함 방지를 위한 t_p 는

$$t_p > \frac{2 \cdot V_2}{n \cdot \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_1}{\rho}}} \quad (9)$$

로 나타낼 수 있다.

4. 실험적 검증



Fig. 4 Tube hydroforming machine

Table 1 Dimensions of tubes

Material	AISI304	Al6061	C1220
Inner diameter, mm	60.5	54.0	50.6
Outer diameter, mm	63.5	60.0	54.0
Length, mm	240	240	240

Table 2 Material properties

Material	AISI304	Al6061	C1220
Density, g/cm ³	7.93	2.70	8.96
Poisson's ratio, v	0.28	0.33	0.35
Yield strength, MPa	375	127	57
Strength coefficient, MPa	1495.9	412.3	487.9
Strain hardening exponent	0.550	0.207	0.367

4.1 실험 장치 및 소재

액압 성형 실험에는 4주형 하향식 80톤급 액압 성형 프레스와 최대성형압력 200MPa, 1.5liter/stroke 용량의 증압기(intensifier), 펀치의 구동을 위한 좌우 양쪽의 펀치구동 실린더가 장착 되어진 액압 성형 실험장치를 이용 하였으며 Fig. 4 에 실험장치를 나타내었다. 실험 소재로는 최종 성형 대상인 삼중관과 비교를 위한 이중관 및 단일관이 사용되었다. 삼중관은 AISI304/Al6061O/C1220으로 구성되었으며 이중관의 경우 AISI304/Al6061O, 단일관은 AISI304가 사용되었다. Table 1에 실험에 이용된 튜브의 치수를 나타내었으며 Table 2에 각 소재의 물성을 나타내었다. 중공 성형을 위하여 외관을 제외한 내부의 관들에 5mm 직경의 홀을 가공 하였으며 홀들의 위치는 시험편의 양쪽 끝단으로부터 75mm의 지점에 90°의 간격으로 각각 4개의 홀, 즉 총 8개의 홀을 가공 하였다.

4.2 실험 방법

중공 성형 금형 설계를 위하여 자유 확관 실험을 수행 하였다. 실험은 충분히 확관되어 파단이 일어날 수 있도록 내부압력을 100MPa까지 선형적으로 증가시키도록 설정하였으며 단순확관(no feeding) 조건으로 수행 하였다. 자유 확관 실험에서 측정된 확관율을 바탕으로 중공품 성형을 위한 금형을 설계 하였으며 중공품 액압 성형을 위한 실험을 수행 하였다. 실 치수 및 물성을 압력 경로 설정 수식 모델에 적용하여 최적의 압력 경로를 예측 하였으며 이를 기준으로 실험을 수행, 중공 액압 성형 공정을 검증하였다

5. 실험 결과 및 고찰

5.1 자유 확관 실험

자유확관 실험에 의한 파단 단면을 Fig. 5에 나타내었다. 내부의 관들은 설계 의도와 같이 홀이 유로의 역할을 하여 성형이 이루어 지지 않았으며 파단은 외관에서만 발생 하였다. 단일관, 이중관, 삼중관의 확관율은 각각 35.7%, 35.8%, 37.8%로 나타나 확관율의 차이는 거의 없었으며 파단 압력에 도달하는 시간은 각각 5.2초, 4.8초, 4.2초로 나타나 여러 겹의 관계를 사용할수록 파단 압력에 도달하는 시간이 빨랐다. 이는 내부 튜브 소재의 체적 증가로 인해 외부 튜브가 파단 압력에 도달하기 위한 총 유량이 줄어 파단압력 도달 시간이 빠른 것으로 판단된다.

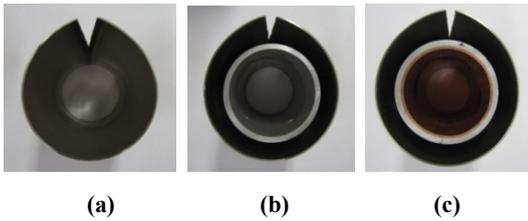
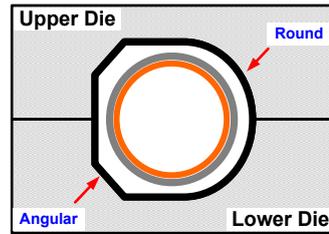


Fig. 5 Cross section of the free bulged product: (a) AISI304, (b) AISI304-Al6061O, (c) AISI304-Al6061O-C1220

5.2 중공품 액압 성형 실험

Fig. 6 (a)에 중공품 액압 성형을 위한 목표 단면 형상을 나타내었다. 목표 단면은 최종 형상에 따른 확관 및 충전 거동을 분석하기 위하여 각진 단면과 원형 단면을 함께 배치 하였으며 Fig. 6 (b)

에 목표 단면 형상 성형을 위한 금형을 나타내었다. 식 (9)의 최적 압력 경로 설정을 위해 필요한 인자들은 내관의 내경, 항복강도 및 두께, 외관의 항복강도 및 두께, 구멍의 수 및 직경, 유체의 밀도가 있으며 이들의 값을 이용하여 계산한 최적 압력 경로 예측값은 $P_y = 19.5\text{MPa}$, $t_p = 8.6\text{초}$ 로 나타났다. 최종 성형 압력을 65MPa로 고정한 후 최종 성형 압력까지의 도달시간을 9, 18, 27, 35초의 4가지 압력 경로를 따라 실험을 수행하였으며 압력이 시간에 따라 선형적으로 증가하지 않음을 고려, 각각의 경우 19.5MPa까지의 도달 시간(t_p)을 측정 한 후 분석을 수행하였다. Table 3에 압력 경로별 t_p 를 나타내었다.



(a)



(b)

Fig. 6 Schematic drawing of target section and die sets for hollow forming: (a) Schematic drawing of target section, (b) die sets for hollow forming

Table 3 Time to yield pressure(t_p) for pressure-time paths

Path	Time to final pressure(65MPa), s	t_p , s
Path A	9	4.1
Path B	18	7.9
Path C	27	13.8
Path D	36	19.3

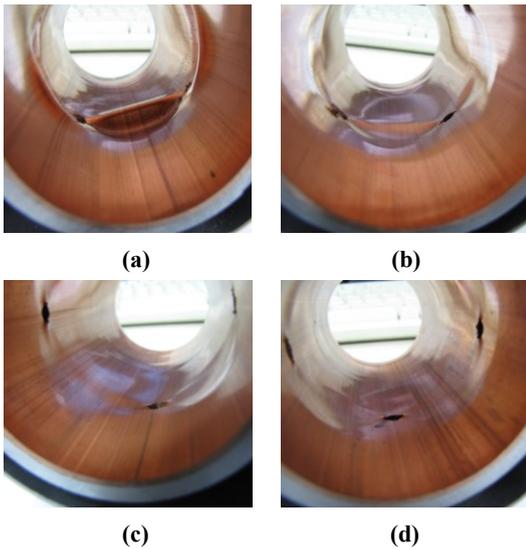


Fig. 7 Internal shapes of the hollow parts: (a) path A, (b) path B, (c) path C, (d) path D

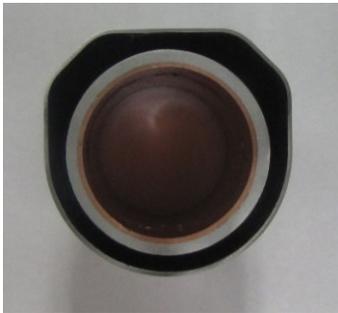


Fig. 8 Cross section shape of the successful product

Fig. 7에 압력 경로에 따른 내부 형상을 나타내었다. 내부의 주름은 총 성형시간 및 항복압력 도달시간이 가장 짧은 path A가 가장 심하였으며 path B, path C 의 순으로 총 성형 시간 및 항복압력 도달시간이 증가할수록 양호해졌다. path D의 경우는 path C 와 같이 상대적으로 양호한 형상을 나타내었다. path C 와 path D의 항복압력 도달시간은 각각 13.8초, 19.3초로 압력 경로 설정 수식 모델에 의한 값 8.6초 보다 큰 경우로 수식 모델은 실제 중공 성형을 위한 압력경로 설정 시 적합한 것으로 판단된다. Fig. 8은 최적화된 압력 경로에서 성형된 중공 성형품의 단면으로 내부의 튜브는 변화가 없으며 외부의 튜브는 각진 단면 및 원형 단면 모두 균형을 따라 우수한 형상으로 성형

되었음을 확인 할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 액압 성형 공정을 이용한 중공 부품 제작을 위한 연구를 수행하였으며 이를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 외관을 제외한 내부의 튜브에 홀을 가공하여 액압 성형을 수행함으로써 중공품을 성공적으로 제작 할 수 있다.

(2) 튜브로 공급되는 유량이 홀을 통해 빠져 나가는 유량보다 클 경우 튜브 내부와 외부에 압력차가 발생하며 이 압력차에 의해 야기된 힘이 홀가공된 튜브의 항복 응력보다 클 경우 주름이 발생한다.

(3) 적합한 압력 경로를 설정하기 위하여 소재 관련 인자, 홀 관련 인자, 유체 관련 인자가 반영된 수식모델을 제안 하였으며 실험적 검증 결과가 모델은 적합한 것으로 판단된다.

(4) 내관의 내경이 감소함에 따라, 소재의 강도 및 두께가 증가함에 따라, 홀의 개수 및 직경이 증가함에 따라, 유체의 밀도가 감소함에 따라 중공 액압 성형 시 공정 시간은 단축될 수 있다.

후 기

본 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] D. E. Green, T. S. Angara, M. Nurcheshmeh, T. Wormald, 2012, A Practical Method to Evaluate the Forming Severity of Tubular Hydroformed Parts, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 62, No. 9-12, pp. 965~980.
- [2] 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.
- [3] 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, , Vol. 21, No. 1, pp. 42~48.
- [4] H. K. Yi, H. S. Yim, G. Y. Lee, S. M. Lee, G. S.

- Chung, Y. H. Moon, 2011, Experimental Investigation of Friction Coefficient in Tube Hydroforming, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, Vol. 21, Suppl. 1, pp. 194-198.
- [5] J. H. Jang, S. O. Kwon, B. J. Kim, Y. H. Moon, 2008, Investigation on the Hydroforming Characteristics of Double-layered Tubes, Steel Res. Int., Vol. 79, No. 5, pp. 371-375.
- [6] L. H. Lang, Z. R. Wang, D. C. Kang, S. J. Yuan, S. H. Zhang, J. Danckert, K. B. Nielsen, 2004, Hydroforming Highlights: Sheet Hydroforming and Tube Hydroforming, J. Mater. Process. Technol., Vol. 151, No. 1-3, pp. 165~177.
- [7] M. D. Islam, A. G. Olabi, M. S. J. Hashmi, 2006, Feasibility of Multi-layered Tubular Components Forming by Hydroforming and Finite Element Simulation, J. Mater. Process. Technol., Vol. 174, No. 1-3, pp. 394~398.
- [8] S. Richard, ME. E. Norek, May 23, 2006, Forming Gas Turbine Transition Duct Bodies without Longitudinal Welds, US Patent 7047615.