

이중튜브 강관의 액압 성형 특성 연구

권승오¹, 이해경¹, 장정환¹, 전동현², 문영훈[#]

Study on the hydro-formability of double layered tube

S. O. Kwon¹, H. K. Yi¹, J. H. Jang¹, D.H. Jeon², Y. H. Moon[#]

Abstract

In this study, hydroforming characteristic of the double-layered tube was investigated in the hydroforming process. The double-layered tube can be made outer surface on the stainless steel by only one processing. The free bulging test was performed to analysis optimized pressure and axial feeding amount of the double layered tubes. And the experimental results between stainless/carbon and carbon/carbon double-layered tube were compared with the forming data. Moreover analysis model that can be hydroformability and predictable forming pressure of double-layered tube was presented.

Key Words : Hydroforming, Double layered tube, Free bulging test

1. 서론

이중튜브의 현 연구는 대부분 비용을 줄이기 위한 다양한 부식 상황에 적용되고 있다. 예를 들어 외부튜브를 스테인레스로 교체하면 해저 파이프 시스템에 사용할 수 있으며, 스테인레스를 내부로 하고 탄소강이 외부로 되어있는 이중튜브는 파이프 내부의 내식성을 요하는 이송관에 사용될 수 있다. 이로써 이송관의 사용 기간을 늘릴 수 있고, 재료비용도 절감 할 수 있다.[1] 내·외부 각 층의 두께가 비슷하고(전체 두께의 1/2 정도) 같은 재료인 이중튜브를 사용하면 장거리 및 고 압력에 적합한 이송관을 만들 수 있다.

이중 튜브의 제조 방법에는 용접, 기계적 압출, 롤링, 폭발성형, 하이드로 포밍 등 여러 방법이 있다. 하이드로 포밍 기술은 다음과 같은 이점이 있다. 첫째로, 유압을 균일하게 가할 수 있고 직접적인 측정과 예측이 가능하다. 둘째로, 하이드로 포밍 성형 과정을 기계적 해석 및 수치적 시뮬레이션 구현이 쉬우며, 유압에만 의존하므로

제어가 쉽다. 추가적으로, 하이드로 포밍 기술은 최종 성형 이후의 수압 실험이 불필요한 장점이 있다.[2,3]

따라서 본 연구에서는 이러한 하이드로 포밍 기술을 이용한 스테인레스/탄소강 이중튜브와 탄소강/탄소강 이중튜브의 하이드로 성형시험을 통해 공정변수의 영향도를 분석하고자 한다.

2. 연구 내용 및 방법

2.1 이중튜브 하이드로포밍에 사용된 소재

본 실험에 사용된 소재는 외부튜브 스테인레스 강관(STS 304) Φ 50.8, 두께 1.5mm, 길이 220mm 이고, 내부튜브는 탄소강관 (STKM11A) Φ 45, 두께 1.4mm, 길이 300mm 이다. 그리고, 비교 목적으로 외부튜브를 탄소강관으로 바꿔 실험 하였다. 외부튜브의 탄소강관(STKM11A)은 Φ 50.8, 두께 1.5mm, 길이 220mm 로 내부튜브와 동일한 소재이다. 내부와 외부 튜브의 틈사이 간격은 1.4mm 이며 외부 튜브는 내부튜브의 중앙에 위치하도록 하였다.

1. 부산대학교 정밀기계시스템공학과
2. 현대하이테크 기술연구소 연구개발팀
교신저자: 부산대학교 정밀기계시스템공학과
E-mail: yhmoon@pusan.ac.kr

2.2 이중튜브의 하이드로 포밍 해석 모델 개발

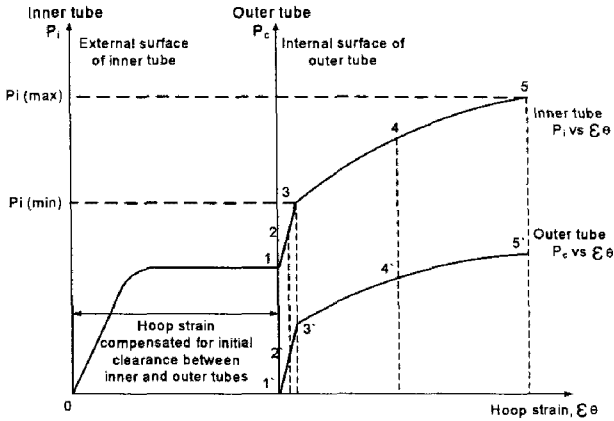


Fig. 1 Hydroforming principle of double-layered tube

초기에 이중튜브는 내부의 탄소강관과 외부의 스테인레스 강관이 느슨하게 끼워져있는 상태이므로 내부의 탄소강관이 내부압력으로 원주변형이 일어나는 동안에는(0~1 구역) 스테인레스 강관에서는 변형이 일어나지 않는다. 압력이 증가함에 따라 탄소강관과 스테인레스강관 사이의 초기간격(clearance)이 없어지게 되면 그 이후부터 내부튜브의 변형 이력은 외부튜브에 영향을 받게 된다.(1~5 구역) 여기서 중요한 점은 내·외부튜브는 서로 다른 응력(압력)-변형이력을 따르므로, 외부튜브의 탄성영역 구간에 해당되는 압력을 가해준 후 제거하게 되면(1~3 구역) 내·외부 강관의 탄성회복량 차이로 인해 이중튜브 사이에 간격이 발생할 수도 있고 성형 후 형상치밀도가 떨어질 수 있을 것으로 예상된다.[4] 그러므로 본 연구에서는 소재의 인장데이터로부터 탄성영역 이상(3~5 구역)의 최소 확관압력(P_{min})을 설정하고 외부튜브를 최대 확관 시키기 위한 최대 확관압력(P_{max})을 기준으로 성형한계를 평가하였다.

2.3 하이드로 포밍 성형 실험

2.3.1 인장 실험

인장 시편은 KS 13 호 B 규격으로 하였다. 인장 실험 결과 내부튜브인 탄소강의 항복강도는 353N/mm^2 , 최대 인장강도 474N/mm^2 , 연신률 23.78%로 나타났고, 외부튜브인 스테인레스는 항

복강도 284N/mm^2 , 최대 인장강도 1065N/mm^2 , 연신률 50.9%로 측정되었다.

2.3.2 자유 확관실험

스테인레스/탄소강 이중튜브의 최대 압력과 적정 압입량을 알아보기 위해 자유 확관실험을 실시하였다. 또한 외부튜브를 내부튜브와 같은 재질인 $\Phi 50.8$ 를 갖는 탄소강으로 바꿔 비교실험하였다. 압입량의 변수로 단순확관(No Feeding), 축압입량(20mm, 30mm, 40mm, 50mm, 60mm)을 기준으로 실험하였고 확관율은 최대 확관된 부분에서의 직경증가율로 평가하였다.

3. 실험 결과

3.1 자유확관 실험 결과

3.1.1 스테인레스강-탄소강 이중튜브의 성형성 평가

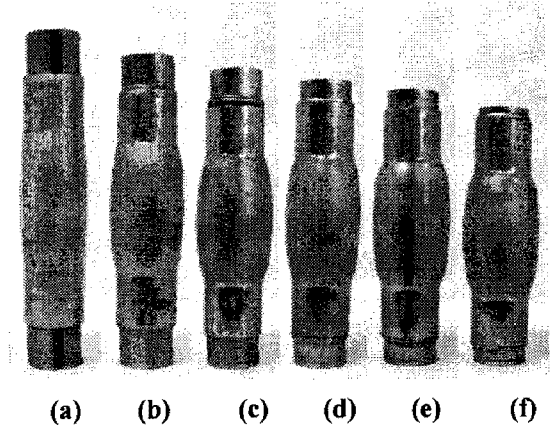


Fig. 2 Bulged stainless/carbon double-layered tube at maximum pressure (a) No feeding (b) 20mm (c) 30mm (d) 40mm (e) 50mm (f) 60mm

자유 확관실험을 실시한 결과 축압입이 증가함에 따라 최대 확관압력도 증가하는 것을 확인하였다. 그러나 축압입이 30mm 이상일 때는 최대압력이 470bar 를 넘지 못하였는데 그 이유는 내부튜브에만 압력과 축압입이 가해지기 때문에 더 많은 축압입이 가해지더라도 내부튜브의 한계압력에 달하면 터짐이 발생한다. 또한 축압입 50mm 이상에서는 최대압력에서 성형을 하여도 내부튜브의 과도한 압입량에 의해 내부에 주름이 발생(Wrinkling)하였으며, 확관됨에 따라 외부튜브의 길이 감소에 의해 튜브 입구에 틈이 발생하게 되고

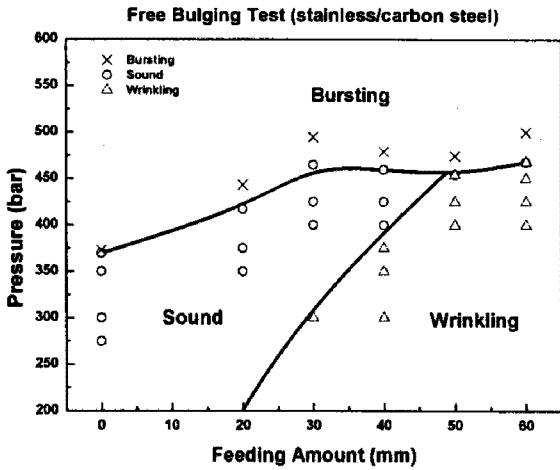


Fig.3 Forming diagram of stainless/carbon double-layered tube

그 틈으로 내부튜브가 접히는 결함(Fording back)이 발생하였다. 본 실험에서 사용된 스테인레스/탄소강 이중튜브의 최적 성형조건은 최대압력 465bar 이내에 축압입량 30mm 일 때가 가장 안정적인 성형성을 나타내는 것으로 확인되었다.

3.1.2 탄소강-탄소강 이중튜브의 성형성 평가

외부튜브를 내부와 같은 재질인 탄소강을 사용하였을 경우 외부튜브가 스테인레스일 때 보다 최대 확관압력이 현저히 낮음을 알 수 있었다. 상대적으로 스테인레스 보다 낮은 강도와 연신률을 가지므로 380bar 이내에서 최대 성형성을 나타내었다. 스테인레스/탄소강 이중튜브의 경우와 마찬가지로 내부튜브에만 확관압력과 축압입을 받아 외부튜브를 확관시키므로 외부튜브의 확관은 내부튜브의 거동에 의존한다는 것을 알 수 있다. 축압입량 별 최대압력에서의 확관률은 축압입량 60mm 일 때 34.55%로 가장 높았지만, 축압입 40mm 이상이 되면 내부튜브의 주름현상이 일어나므로 안정적인 확관이 되지 못했다. 그러므로 탄소강/탄소강 이중튜브에서는 최대 380bar 이내, 축 압입 30mm 일 때가 가장 안정적인 성형성을 나타내었다. 외부튜브가 탄소강일 때가 연신율이 높은 스테인레스강일 때의 확관률 보다 현저히 낮을 것으로 예상하였으나 측정결과 비슷한 확관율은 나타내었다.

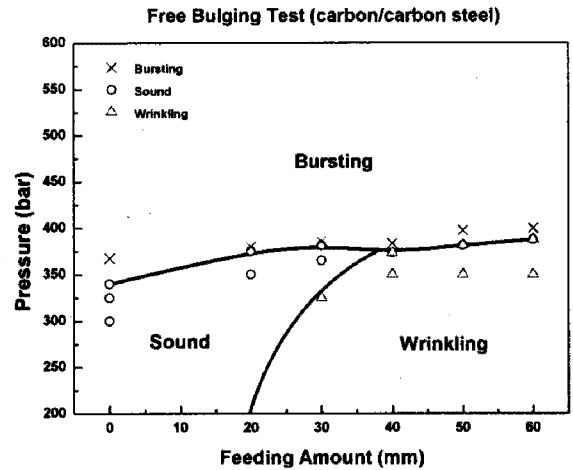


Fig.4 Forming diagram of carbon/carbon double-layered tube

이는 실제적으로 압력 및 축압입을 받아 확관되는 것은 내부튜브이므로 확관량은 내부튜브의 성형성에 크게 영향을 받는 것으로 판단된다.

3.4 이중튜브의 하이드로 포밍 성형성 예측

이중튜브가 확관됨에 따라 내·외부 튜브는 각각의 물성에 따라 그 특성이 변화 되고, 두께 변화 또한 달라지게 된다. 또한 내·외부 튜브에는 변형에 의한 마찰력도 작용할 것이다.

1) 압력에 따른 응력 변화

소재의 두께가 얇다고 한다면 항복응력을 구하기 위해 다음과 같이 3 개의 주응력 성분으로 나눌 수 있다.

$$\sigma_1 = \frac{P \cdot r}{t} \quad (\text{원주 방향})$$

$$\sigma_2 = 0 \quad (\text{두께 방향})$$

$$\sigma_3 = -\frac{P \cdot r}{t} \quad (\text{축 방향})$$

$$\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{1/2}$$

$$\sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_0 = \frac{P \cdot r}{t}$$

$$\therefore P = \frac{\sigma_0 \cdot t}{\sqrt{3} \cdot r} = \frac{2\sigma_0 \cdot t}{\sqrt{3} \cdot D} \cdot k$$

2) 축압입량과 확관 시 두께 변화

(1) 내부튜브의 두께 변화율(k_i)

축압입은 내부튜브에만 적용되고, 확관됨에 따라 균일 연신이 일어난다고 가정한다면 두께 변화율은 체적 일정의 법칙에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_i = \frac{(t_0 + D_0) \cdot L}{\left(\frac{t_0 \cdot D_0}{D_f} + \frac{D_0 + D_f}{2}\right) \cdot (L - F)}$$

(2) 외부튜브의 두께 변화율(k_o)

외부 튜브는 축압입량과 관계가 없으며, 확관률이 증가하는 만큼 소재두께도 감소한다고 가정한다면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_o = \frac{t_f}{t_0} = \frac{t_0 + D_0}{\frac{t_0 \cdot D_0}{D_f} + \frac{D_0 + D_f}{2}}$$

그러므로 위의 인자를 이중튜브 압력예측 식에 적용해보면 다음과 같다.

$$\therefore P = \frac{2(\sigma_i \cdot t_i \cdot k_i + \sigma_o \cdot t_o \cdot k_o)}{\sqrt{3} \cdot D_o}$$

4. 결 론

4.1 스테인레스/탄소강 - 탄소강/탄소강 이중튜브 비교

스테인레스/탄소강 이중튜브의 자유확관 실험에서는 최대압력 465bar 이내에서 축압입량 30mm 일 때, 탄소강/탄소강 이중튜브의 자유확관 실험에서는 최대압력 380bar 에서 축압입량 30mm 일 때 결함 발생없이 안정적이며, 높은 확관률을 나타냈다. 내부튜브가 같은 소재이므로 축압입량은 같으며, 외부튜브의 차이에 의해 확관압력의 차이가 나는 것으로 판단된다.

4.2 이중튜브의 하이드로 성형성 예측 모델

이중 튜브 하이드로 포밍에서의 성형 압력 식을 설정하여 실제 성형압력과 비교한 결과 실제 성형압력과 유사한 압력을 얻을 수 있었다. 하지만, 내부튜브가 확관됨에 따른 내·외부튜브간의 마찰은 고려되지 않았기 때문에 실제 압력보다 다소 낮게 계산된다.

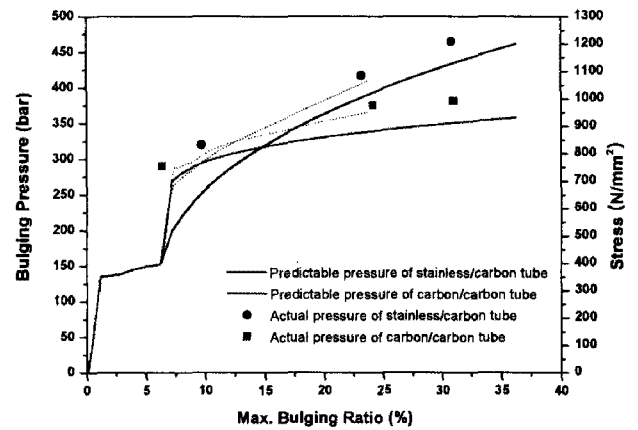


Fig.5 Predicted forming pressure curve of double-layered tube

참 고 문 헌

1. J. L. Alcaraz, J. Gil-sevillano, 1996, An analysis of the extrusion of Bimetallic tubes by numerical simulation, Int. J. Mech. Sci. Vol. 38, No. 2, pp. 157-173
2. F. Dohmann, Ch. Hartl, 1997, Tube hydroforming - research and practical application, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 71, pp.174-186
3. G. Morphy, 1998, Hydroforming : Dimensional capability analysis of a high-volume automotive structural component production process, SAE Transaction, Vol. 107, pp. 298-307
4. F. Liu, J. Zheng, P. Xu, M. Xu, G. Zhu, 2004, Forming mechanism of double layered tubes by internal hydraulic expansion, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 81, pp.625-633