

이중튜브의 액압 성형특성 연구

권승오¹ · 이해경¹ · 정기석² · 문영훈[#]

Hydroforming Characteristics of Double Layered Tube

S. O. Kwon, H. K. Yi, G. S. Chung, Y. H. Moon

(Received April 19, 2007)

Abstract

Double layered tube is assembled with an inner tube and an outer tube, similar in material or not, contacting closely and deforming simultaneously when subjected to external force. For the manufacturing of double layered tube, the hydroforming assembly technology has several advantages. Therefore in this study, hydroforming characteristics of double layered tube was investigated. The free bulge test was performed to produce formability diagrams of double layered tubes at various forming pressure and feeding amounts. The hexagonal shape hydroforming test was also performed to estimate the dimensional accuracies of double layered tube through the corner filling ratio and the gap between inner and outer tube. Besides experimental analyses, the analytical model that can predict internal pressure for the hydroforming of double-layered tube was proposed and experimentally validated.

Key Words: Hydroforming, Double Layered Tube, Free Bulge Test, Hexagonal Shape Hydroforming, Corner Filling Ratio

1. 서 론

파이핑 시스템(piping system)은 신뢰성, 경제성, 편리성 등의 이점으로 인해 천연가스, 액화 석유 등의 이송수단으로 많이 사용되고 있다. 그러나 파이프 내부에서의 자연 부식, 파이프의 노화, 국부 파손 등으로 빈번히 사고가 발생하게 되며 이로 인한 많은 비용이 지출되게 된다. 현재 대부분의 파이핑 시스템은 단일 튜브 구조로 되어있고, 이송거리가 길기 때문에 안전을 위한 검사와 모니터링은 어렵고 비용 또한 많이 든다[1]. 이중튜브는 이러한 단일튜브의 안전성과 신뢰성 확보를 위해 유용한 구조적 장점을 가지고 있다.

현재 이중튜브의 연구는 대부분 비용을 줄이기 위한 다양한 부식 상황에 적용되고 있다. 예를 들어 외부튜브를 스테인레스로 교체하면 해저 파이

핑 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[2]. 또한 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 튜브는 동중 또는 이중튜브를 내·외부로 결합되며, 외부 힘이 가해졌을 때 내·외부 튜브가 접촉되면서 동시에 변형이 일어난다. 그러므로 외부튜브는 내부튜브에 누설이 발생하였을 때 파이프 파열을 막을 수 있어서, 그에 따른 시간적 여유와 누설의 사고를 피할 수 있다. 단일 튜브와 비교하면, 이중튜브는 기밀성, 신뢰성, 파열 저항성, 온라인 검출 등의 측면에서 아주 우수하므로

1. 부산대학교, 정밀기계공학과

2. 포스코, 자동차 가공연구 그룹

교신저자: 부산대학교 기계공학부,

E-mail: yhmoon@pusan.ac.kr

석유화학, 발전설비, 기계부품 등에 폭넓게 사용될 수 있다[3~4].

이중 튜브의 제조 방법에는 용접, 기계적 압출, 롤링, 폭발성형, 하이드로 포밍 등이 있으며[4~5] 하이드로 포밍 기술은 다음과 같은 이점이 있다. 첫째로, 유압을 균일하게 가할 수 있고 압력의 측정과 예측이 가능하다. 둘째로, 하이드로 포밍 성형 과정을 기계적 해석 및 수치적으로 시뮬레이션이 쉬우며, 유압에만 의존하므로 제어가 쉽다. 추가적으로, 하이드로 포밍 기술은 최종 성형 이후의 수압 실험이 불필요한 장점도 있다[6~7].

따라서 본 연구에서는 이러한 하이드로 포밍 기술을 이용한 스테인레스/탄소강 이중튜브(STS/CS)와 탄소강/탄소강 이중튜브(CS/CS)의 하이드로 성형시험을 통해 공정변수의 영향도를 분석하고자 한다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 시험 소재

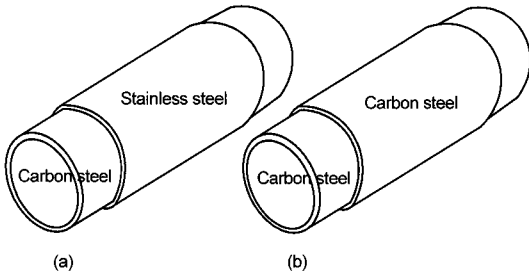


Fig. 1 Schematic view of double-layered tubes (a) STS/CS (b) CS/CS

시험에 사용된 소재는 Fig. 1 과 같은 형태로써 STS/CS 소재의 경우 외부튜브는 스테인레스 강관(STS 304) $\Phi 50.8$, 두께 1.5mm, 길이 220mm 이고, 내부튜브는 탄소강관(STKM11A) $\Phi 45$, 두께 1.4mm, 길이 300mm 이다. 또한 CS/CS 소재의 경우 외부튜브인 탄소강관(STKM11A)은 $\Phi 50.8$, 두께 1.5mm, 길이 220mm 로 내부튜브는 전술한 STS/CS 소재와 동일한 소재이다. 내부와 외부 튜브의 틈 사이 간격은 1.4mm 이며 외부튜브는 내부튜브의 중앙에 위치하도록 하였다.

2.2 하이드로 포밍 성형 실험

2.2.1 인장 실험

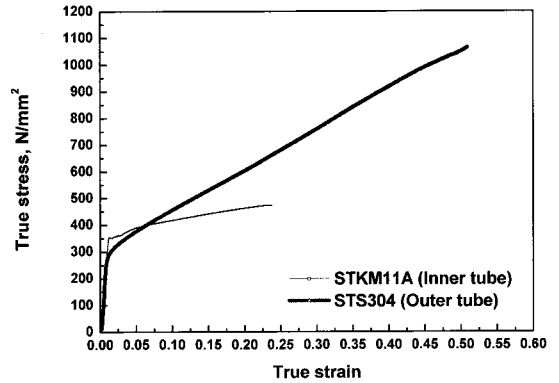


Fig. 2 Stress-strain curve of inner and outer tube

소재의 인장물성은 해석모델을 구성하는데 중요한 데이터이므로 먼저 각 소재의 인장실험을 수행하였다(Fig. 2). 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 항복강도 284N/mm^2 , 최대 인장강도 1065N/mm^2 , 연신률 50.9%로 측정되었다.

2.2.2 자유 확관실험

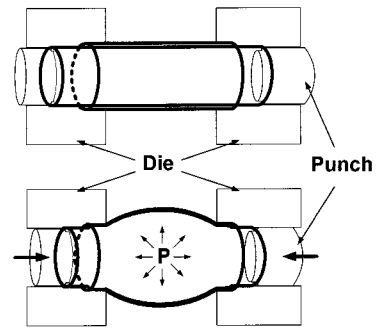


Fig. 3 Schematic drawing of free bulge test

이중튜브의 최대 압력과 적정 압입량을 알아보기 위해 자유 확관실험을 실시하였다. 압입량의 변수로 단순확관(No Feeding)과 축압입 확관(20mm, 30mm, 40mm, 50mm, 60mm Feeding) 조건에서 실험하였고 확관되는 부위의 길이는 120mm 이며 확관율은 최대 확관된 부분에서의 원주증가율로 평가하였다. Fig. 3 은 자유확관 실험의 모식도를 나타낸다.

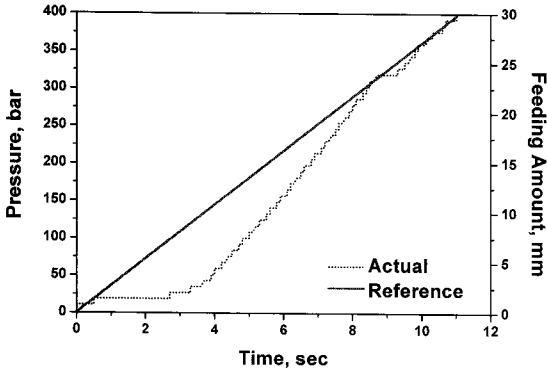


Fig. 4 Example of the feeding and loading path at 30mm, 400bar

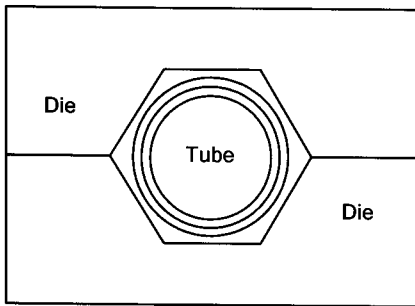


Fig.5 Schematic of hexagonal forming die

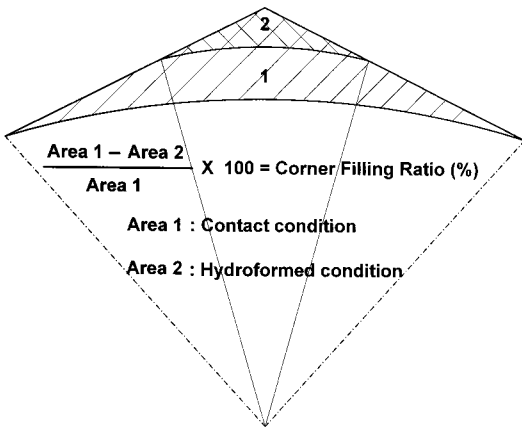


Fig. 6 Corner geometry for hexagonal shape forming

또한 시간에 따른 성형압력 증가 및 축압입량은 그 설정 방법에 따라 많은 성형 변수로 작용될 수 있다. 따라서 본 실험에서는 시간이 증가함에 따라 성형 압력 및 축압입량도 증가하도록 즉, 1:1 로 증가하도록 설정하였다. Fig. 4 는 성형압력 400bar, 축압입 30mm 일 때의 시간에 따른 설정 값과 실제 값을 나타내는 예시이다.

2.2.3 육각 성형실험

이중튜브의 성형 형상치밀도를 평가하기 위해 육각 성형 실험을 하였다. 본 실험에서 사용된 육각 금형의 크기는 튜브 외경에 10%의 확장률을 갖도록 설계하였다(Fig. 5). 축압입량 변수는 자유확관에서와 동일하고, 성형압력은 자유확관에서 얻어진 최적압력을 기준으로 성형한 뒤 코너부의 성형성을 증대시키기 위해 마지막 압력단계에서 성형압력을 1000bar 로 상승시켰다[8].

육각성형에서의 성형 형상치밀도는 코너충진율 (corner filling ratio)로 평가하였다. Fig. 6 은 성형 후 코너부 충진율을 계산하는 방법을 모식적으로 나타낸다. 또한 육각 성형 후 내부 튜브의 성형성을 평가하기 위해 시편을 절단하여 코너부 성형 형상평가 및 축압입의 영향을 알아보았다.

3. 실험 결과

3.1 자유확관 실험

자유 확관실험을 실시한 결과 축압입이 증가함에 따라 최대 확관압력도 증가하는 것을 확인하였으나(Fig. 7), 축압입이 30mm 이상일 때는 최대압력이 470bar 를 넘지 못하였다. 그 이유는 내부 튜브에만 압력과 축압입이 가해지기 때문에 더 많은 축압입이 가해지더라도 내부튜브의 한계압력에 달하면 가장 취약한 부분인 용접 열영향부에서 터짐이 발생하였다.

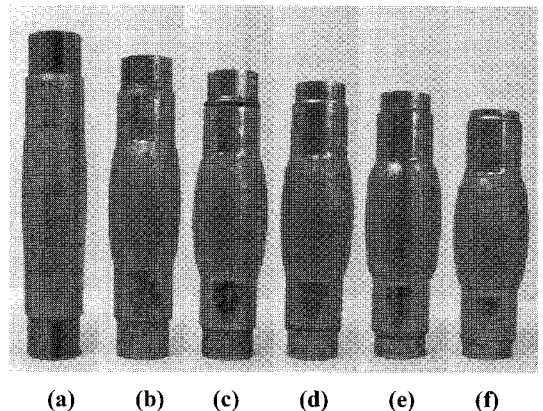


Fig. 7 Bulged STS/CS double-layered tube: (a) No feeding (b) 20mm (c) 30mm (d) 40mm (e) 50mm (f) 60mm

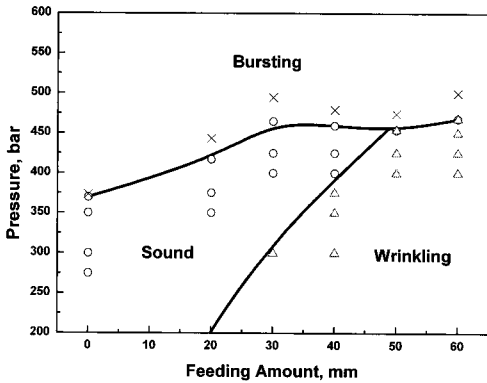


Fig. 8 Formability diagram of STS/CS double-layered tube

또한 축압입 40mm 이상에서는 최대압력에서 성형을 하여도 내부튜브의 과도한 압입량에 의해 내부에서 주름이 발생(Wrinkling)하게 되었다.

스테인레스/탄소강 이중튜브의 자유확관 실험 결과를 통해 Fig. 8에서 보인 바와 같은 형태의 성형그래프를 얻었다.

외부튜브를 내부와 같은 재질인 탄소강을 사용하였을 경우 외부튜브가 스테인레스일 때 보다 확관압력이 현저히 낮게 나타났는데 이는 상대적으로 스테인레스강 보다 낮은 강도와 연신률을 가지므로 낮은 압력(380bar 이내)에서 최대 성형성을 나타내기 때문이다. 스테인레스/탄소강 이중튜브의 경우와 마찬가지로 내부튜브에만 확관압력과 축압입을 받아 외부튜브를 확관시키므로 외부튜브의 확관은 내부튜브의 거동에 의존하게 된다.

탄소강/탄소강 이중튜브의 자유확관 실험 결과를 통해 Fig. 9 에서와 같은 형태의 성형그래프를 얻을 수 있다.

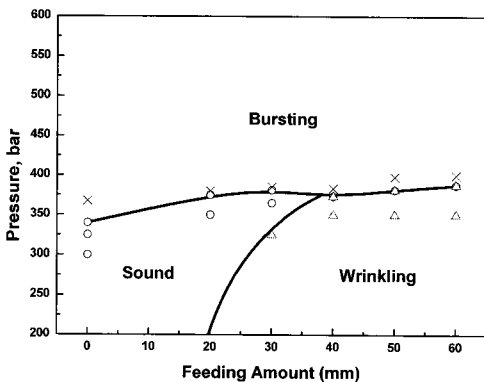


Fig. 9 Formability diagram of CS/CS double-layered tube

Table 1 Comparison of bulging ratio at given feeding amounts

Feeding amount	0mm	20mm	30mm
STS/CS	9.71 %	23.17 %	30.81 %
CS/CS	6.38 %	24.11 %	30.96 %

최대 확관압력에서 축압입량이 증가할수록 확관률도 증가하는 경향을 보였으나 내부튜브의 주름 발생으로 인하여 축압입 40mm 이상에서는 적합하지 않다고 판단된다.

외부튜브가 탄소강일 때가 연신율이 높은 스테인레스강일 때의 확관률 보다 낮을 것으로 예상하였으나 측정결과 Table 1과 같이 비슷한 확관율을 나타내었다. 그러므로 이중튜브의 확관률은 내부튜브의 확관률에 크게 의존하며 이중튜브의 성형압력은 내·외부 튜브의 강도와 두께에 영향을 받는다.

3.2 육각성형 실험 결과



(a) (b) (c) (d) (e) (f) (g)

Fig.10 Hexagonal shape formed STS/CS double-layered tube: (a) No feeding (b) 10mm (c) 20mm (d) 30mm (e) 40mm (f) 50mm (g) 60mm

Table 2 Comparison of corner filling ratio

	0mm	10mm	20mm	30mm	40mm	50mm	60mm
STS/CS	71.7	72.78	76.01	78.95	82.62	83.89	87.14
CS/CS	69.38	69.42	73.55	77.24	81.32	84.45	86.14

Fig. 10에 육각금형에서 성형한 시편을 나타낸다. 자유확관에서 보인 내부튜브 주름현상은 높은 압력에 의해 제거 되었지만 높은 압력에도 불구하고

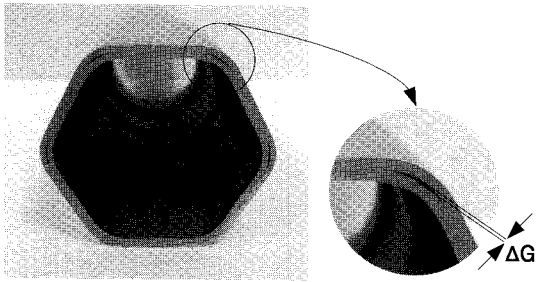


Fig.11 Gap between inner and outer tube in hexagonal shaped corner section

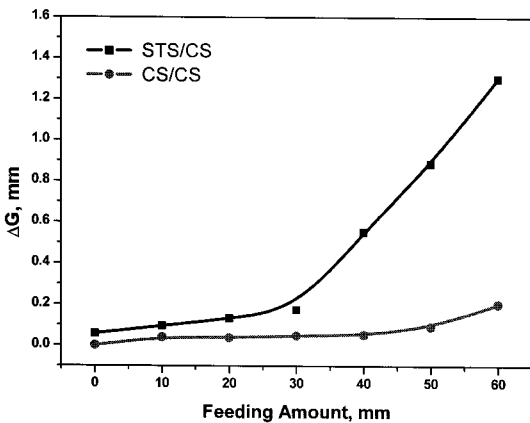


Fig.12 Measured gap between inner and outer tube

고 금형의 코너부를 완벽하게 채우지는 못하였다.

육각성형 실험 결과 축압입이 증가할수록 외부 튜브의 코너충진율도 증가하였으며, 최대 코너 충진율은 Table 2에 보인 바와 같이 스테인레스/탄소강 이중튜브와 탄소강/탄소강 이중튜브 모두 비슷하게 나타났다. 이는 자유확관 실험에서 확인했듯이 확관율은 내부튜브의 확관율에 크게 의존하므로 내부튜브가 동일한 상태에서는 외부튜브의 코너 충진율도 유사한 수준임을 의미한다.

내부와 외부튜브의 형상 동결성을 평가하기 위해 Fig. 11과 같이 성형 시편의 중앙부를 절단하여 관찰하였다. 스테인레스/탄소강 이중튜브의 시편에서는 축압입이 없을 때 내·외부 튜브가 일체형인 것처럼 확관되어 빈틈이 없었다. 하지만 축압입이 가해지면 내·외부 튜브에 틈이 발생하였으며 축압입이 증가할수록 그 틈의 양(ΔG)도 증가하는 경향을 나타내었다(Fig. 12). 탄소강/탄소강 이중튜브의 시편에서도 축압입량이 증가할수록 틈이 발생하였으나 스테인레스/탄소강 이중튜브경우보다는 틈이 작았다.

이는 내·외부 튜브가 서로 다른 압력을 받아 확관되어 압력이 제거될 때 서로 다른 기울기로 탄성 회복을 하기 때문에 내·외부 튜브 사이에 틈이 발생하는 것이라고 판단된다. 그리고 내·외부 튜브가 동일한 재료물성을 가질 경우에는 그 회복량이 비슷하기 때문에 그 틈의 양도 적은 것이다.

4. 이중튜브의 하이드로 포밍 성형성 해석

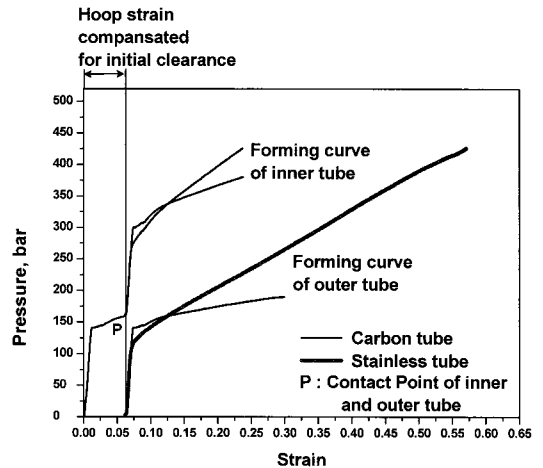


Fig.13 Forming pressure curve of double-layered tube

Fig.13 은 이중튜브의 인장 데이터로 실제 확관 압력을 예측한 그래프이다.

초기에 내부튜브가 압력을 받아 확관되고 외부 튜브의 내측에 접촉하게 되면 그때의 압력이 P 점이다. 이 P 점의 계산은 내·외부튜브의 초기간격 (Δ :clearance)만큼 내부튜브가 확관되므로 P 점에서의 원주확관률을 구해보면, $2\Delta/D_0$ 가 되고 그때의 압력이 접촉압력이다. 내부튜브가 외부튜브와 접촉되면 그 이후부터 내부튜브는 외부튜브의 응력(압력)-변형 이력을 따르게 된다. 여기서 중요한 점은 내·외부튜브는 서로 다른 응력(압력)-변형 이력을 따르므로, 외부튜브의 탄성영역 구간에 해당되는 확관압력을 가해준 후 압력을 제거하게 되면 내·외부 강관의 탄성회복량 차이로 인해 이중 튜브 사이에 간격이 발생할 수도 있고 성형 후 형상치밀도가 떨어질 수 있을 것으로 예상된다[9]. 또한, 내부튜브의 연신률이 한계에 달하면 내부튜브의 국부변형에 의해 결국 튜브 터짐이 발생한다. 이와 같은 이중튜브의 변형기구를 이용하여 이중튜브가 확관되기 위한 확관압력 예측 식을 설정하였다.

내부튜브가 외부튜브에 접촉되기 직전까지는 내부튜브에만 확관이 일어난다. 그 이후에는 내·외부 튜브가 동시에 확관되므로 단일 튜브의 거동과 유사하다고 볼 수 있다(Fig. 14).

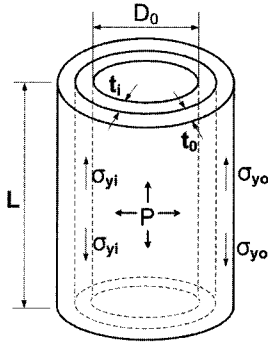


Fig.14 Schematic drawing of double-layered tube

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[10].

$$P = f(\text{Stress}) + f(\text{Feeding}) + f(\text{friction}) + \dots$$

1) 변형 응력을 고려한 확관 압력

튜브소재의 두께가 얇다고 한다면 다음과 같이 3개의 주응력 성분으로 나눌 수 있다.

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

$$\sigma_2 = 0 \quad (\text{두께 방향})$$

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

여기서 P는 내부압력, r은 반지름, t는 두께이다. 튜브의 항복이 Von Mises 항복조건을 따른다면

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

$$\sigma_y = \frac{1}{\sqrt{2}} (6\sigma_1^2)^{1/2}$$

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

$$\therefore P = \frac{\sigma_y \cdot t}{\sqrt{3} \cdot r} = \frac{2\sigma_y \cdot t}{\sqrt{3} \cdot D_o} \quad \text{과 같이 나타낼 수 있다.}$$

단일 튜브가 확관이 되기 위해서는 위의 압력 이상이 가해져야 한다. (σ_y 는 1축 인장시의 항복응력이다.) 따라서 위의 식을 이중튜브에 적용한다면 항복응력(σ_y)에 해당하는 부분은 내·외부 튜브의 응력의 합과 같으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \frac{2(\sigma_{yi} \cdot t_i + \sigma_{yo} \cdot t_o)}{\sqrt{3} \cdot D_o}$$

P: 확관 압력(또는 내부 압력)

σ_{yi} : 내부 튜브의 항복응력

σ_{yo} : 외부 튜브의 항복응력

t_i : 내부 튜브의 두께

t_o : 외부 튜브의 두께

D_o : 내·외부 튜브 접촉 시 내경

2) 내·외부 튜브의 두께 변화율

각각의 내·외부 튜브가 확관됨에 따라 그리고 내부튜브에 가해진 축압입량에 따른 소재의 두께 변화도 고려되어야 한다.

- 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.

$$\int_0^L \pi \left\{ \left(\frac{2t_{i0} + D_o}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_o}{2} \right)^2 \right\} dL = \int_0^{L-F} \pi \left\{ \left(\frac{2t_{if} + \left(\frac{D_o + D_f}{2} \right)}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_o + D_f}{2} \right)^2 \right\} dL$$

$$k_i = \frac{t_{if}}{t_{i0}} = \frac{(t_{i0} + D_o) \cdot L}{\left(t_{if} + \frac{D_o + D_f}{2} \right) \cdot (L - F)}$$

또한 최종 성형 후 확관되는 만큼 두께(t_{if})도 감소한다면

$$t_{if} \approx t_{i0} \cdot \frac{D_o}{D_f} \quad \text{이므로,}$$

$$\therefore k_i = \frac{(t_{i0} + D_0) \cdot L}{\left(\frac{t_{i0} \cdot D_0}{D_f} + \frac{D_0 + D_f}{2}\right) \cdot (L - F)}$$

- t_{i0} : 초기 내부튜브 두께
- t_{if} : 최종 성형 후 내부 튜브 두께
- D_0 : 내부 튜브 직경
- D_f : 최종 성형 후 내부 튜브 직경
- L : 내압을 받는 내부 튜브의 길이
- F : 축압입량

- 외부튜브의 두께 변화율(k_o)

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

$$k_o = \frac{t_{of}}{t_{o0}} = \frac{t_{o0} + D_0}{\frac{t_{o0} \cdot D_0}{D_f} + \frac{D_0 + D_f}{2}}$$

- t_{o0} : 초기 외부튜브 두께
- t_{of} : 최종 성형 후 외부 튜브 두께
- D_0 : 내부 튜브 직경
- D_f : 최종 성형 후 내부 튜브 직경

그러므로 위의 인자를 이중튜브 압력예측 식에 적용해보면 다음과 같다.

$$P = \frac{2(\sigma_{yi} \cdot t_i \cdot k_i + \sigma_{yo} \cdot t_o \cdot k_o)}{\sqrt{3} \cdot D_o}$$

Fig. 15에 보인 것과 같이 예측 식에 의한 압력이 실제 성형압력과 동일한 경향을 나타내었다. 이를 통해 이중튜브의 확관 압력은 소재의 두께가 두꺼울수록, 변형응력이 클수록 확관 압력은 높을 것이라고 예상할 수 있다. 위의 이중튜브 압력 예측 식에서는 확관됨에 따른 내·외부 튜브의 마찰 영향 및 다른 인자들은 고려 되지 않았으므로 실제 실험에 의한 압력보다 낮게 예측 되었다.

5. 결론

(1) 이중튜브의 자유확관 실험을 통하여 성형압력과 축압입량에 따른 성형성을 평가하였으며, 이중튜브의 확관률은 내부튜브의 확관률에 의존되

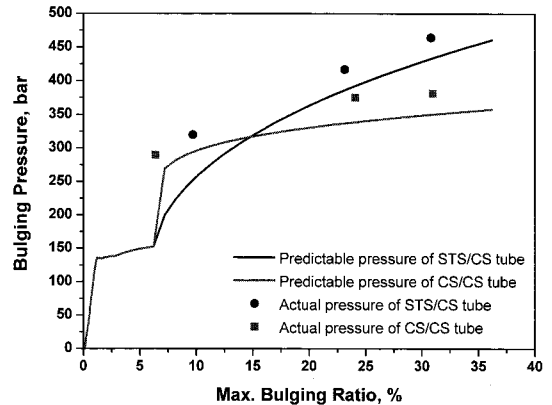


Fig.15 Predicted forming pressure curve of double-layered tube

며 이중튜브의 성형압력은 내·외부 튜브의 강도와 두께에 영향을 받는다.

(2) 축압입이 증가할수록 이중튜브의 코너충진율이 증가하였으며, STS/CS 튜브의 경우 CS/CS 튜브에 비해 코너부 탄성회복량 및 서로 다른 변형특성의 차이로 인해 내·외부 튜브 사이에 틈이 관찰되었다.

(3) 이중튜브의 성형압력 예측 식을 제시하였으며 이중 튜브 하이드로 포밍에서의 성형 압력 식을 설정한 결과 실제 성형압력과 유사한 압력을 얻을 수 있었다.

후 기

이 논문은 2005 년 정부(교육인적 자원부)의 재원으로 학술 진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (KRF-2005-041-D00071)

참 고 문 헌

- [1] K. Kolowrocki, 2003, Asymptotic approach to reliability evaluation of large multi-state systems with application to piping transportation, Int. J. Pressure Vessels and Piping, Vol. 80, pp. 59~73.
- [2] 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.
- [3] H. Wright, T. Oduyemi, H.R. Evans, 1991, The experimental behavior of double skin composite

- element. J. Construct steel research, Vol. 19, pp. 91~110.
- [4] J. L. Alcaraz, J. Gil-Sevillano, J. M. Martinez-Esnaola, 1996, A fracture condition based on the upper bound method for the extrusion of bimetallic tubes, J Material process technology, Vol.61, No.3, pp. 265~274.
- [5] X. Gomez, J. Echeberria, 2003, Microstructure and mechanical properties of carbon steel A210-superalloy Sanicro 28 bimetallic tubes, Material science engineering, Vol.348, No.1-2, pp. 180~191.
- [6] F. Dohmann, Ch. Hartl, 1997, Tube hydroforming - research and practical application, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 71, pp. 174~186.
- [7] G. Morphy, 1998, Hydroforming : Dimensional capability analysis of a high-volume automotive structural component production process, SAE Transaction, Vol. 107, pp. 298~307.
- [8] G. T. Kridli, L. Bao, P. K. Mallick, Y. Tian, 2003, Investigation of thickness variation and corner filling in tube hydroforming, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 133, pp. 287~296.
- [9] 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.
- [10] 김영석, 손현성, 한수식, 2002, 튜브 하이드로포밍 공정에서의 마찰특성에 관한 연구, 한국소성가공학회지, Vol. 11. No. 6, pp. 475~481.