

## 하이드로 피어싱된 튜브 부위의 변형해석

최성기\* · 김동규\* · 문영훈\*

(2003년 11월 18일 접수)

### Analysis of Deformation Surrounding the Pierced Hole in the Tube Hydro-Piercing Process

S. K. Choi, D. K. Kim and Y. H. Moon

#### Abstract

Deformation surrounding the hole in the tube during the hydro piercing process has been investigated in this study. The tube is expanded and internally pressurized between upper and lower dies, and a piercing punch is driven forcefully through a cross passage in the die and through the wall of the tube. The pressurized fluid within the tube provides support to the wall of the tube during a piercing step to form a hole in the tube having less deformation surrounding the hole in the tube. The deformation area may be fully retracted to a substantially flat form or partially retracted to a countersunk form. In this study, a mathematical model that can predict deformation surrounding the hole has been proposed and experimentally verified by actual hydro piercing test.

**Key Words** : Tube Hydro-Piercing, Hydroforming, Deformation, Rollover, Internal Pressure

#### 1. 서론

튜브 하이드로 포밍 공정<sup>(1-4)</sup>으로 다양한 형상의 부품을 최소 공정수로 성형하기 위해서는 밴딩<sup>(5-6)</sup>과 같은 예비성형공정과 피어싱<sup>(7-10)</sup>과 같은 후처리공정을 하이드로 포밍기술과 병행하는 기술이 필요하며, 이러한 병행공정기술은 하이드로 포밍기술의 생산성 제고 효과뿐만 아니라 하이드로 포밍기술의 적용개소를 증가시키는데도 필수적으로 요구되는 기술이다.

튜브 하이드로 피어싱 공정의 경우 튜브 반경 방향에 수직하게 누르는 펀치의 힘을 튜브 내부에 가해진 압력에 의해 지지한 상태에서 전단이 일어나므로 피어싱된 구멍 주변에 변형이 발생하게 되며, 이러한 변형은 하이드로 피어싱 성형 전

전성의 주요 척도가 된다.

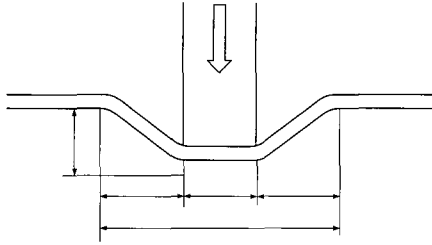
따라서 본 연구에서는 튜브 하이드로 피어싱 공정시 발생하는 구멍 주변의 변형에 공정인자들이 미치는 영향도를 엄밀하게 분석함으로써 하이드로 피어싱시 피어싱 홀 주변의 변형을 정확하게 예측하고자 한다. 이를 위해 피어싱 공정에 영향을 미치는 내압, 펀치직경, 소재두께, 소재강도 등의 인자들의 함수로 롤오버 및 변형반경 예측모델을 개발하였으며 이론해석과 병행하여 하이드로 피어싱 실험을 실시함으로써 해석모델의 신뢰도를 제고시켰다.

#### 2. 이론 해석 모델

하이드로 피어싱 공정시 피어싱 펀치의 전단력

\* 부산대학교 정밀기계공학과/정밀금형 및 금형가공연구센터

이 튜브 내부의 유체에 의해 전달되는 저항력을 초과하는 시점에서 전단이 일어나므로 이러한 관계로부터 피어싱시 주요 공정변수가 하이드로 피어싱후 구멍주변의 변형거동을 분석하였다.



**Fig. 1 A sectional view showing the punching operation -n immediately prior to shear stress failure of the material**

Fig. 1은 전단 직전의 펀치 및 튜브의 변형상태를 나타내고 있다. 피어싱 펀치의 전단력( $F_p$ )이 튜브 내부의 유체에 의해 전달되는 전단저항력( $F_d$ )을 초과하는 시점에서 전단이 일어나므로 피어싱이 일어나기 위한 조건은,  $F_p = F_d$  피어싱 펀치의 전단력은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_p = \pi D_p t \tau + P \pi \left(\frac{D_p}{2}\right)^2 \quad (1)$$

여기서,  $D_p$  : punch diameter  
 $t$  : thickness of tube  
 $\tau$  : shear strength  
 $P$  : internal pressure

튜브 내부의 유체에 의해 전달되는 전단저항력은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_d = P \pi \left(\frac{D_p}{2}\right)^2 + CP 2 \pi \int_b^a \left(\frac{b+x}{a}\right) \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2} dx$$

$$= \frac{P \pi}{4} [D_p^2 + 4C \sqrt{a^2 + b^2} (b + D_p)] \quad (2)$$

여기서,  $a$  : roll over  
 $b$  : deformation radius  
 $C$  : calibration factor

식 (1)과 식 (2)로부터

$$CP \sqrt{a^2 + b^2} (b + D_p) = D_p t \tau \quad (3)$$

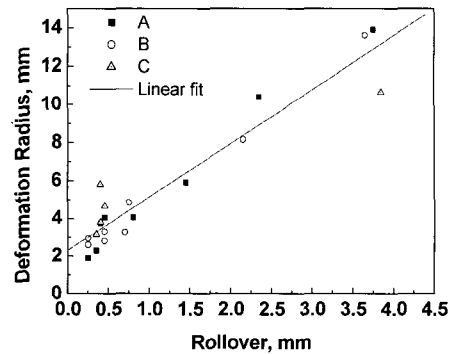
위 식에서 보면 변형거동( $a, b$ )에 영향을 미치는 인자로서 소재변수( $t, \tau$ ), 장치변수( $D_p$ ) 및 공정변수( $P$ )가 서로 관련되어 있음을 알 수 있으며 소재 및 장치변수를 고정시키면 내부압력  $P$ 가 변형영역을 결정하는 주요변수임을 알 수 있다.

식 (3)를 이용하여 튜브 하이드로 피어싱공정시 발생하는 구멍 주변의 변형에 공정인자들이 미치는 영향도를 분석하기 위해서는 여러 독립변수( $t, \tau, D_p, P$ )들에 대한 종속변수( $a, b$ )를 하나로 나타내기 위해 실험을 통해 얻어진 Fig. 2의 롤오버 ( $a$ )와 변형반경 ( $b$ )를 변형부 절단 및 이미지 해석을 통해 측정하여 다음의 1차원 회귀분석식을 얻었다.

$$b = 7.138a + 2.799 \quad (4)$$

따라서 식 (4)를 식 (3)에 대입하면 식 (5)와 같은 하나의 종속변수,  $a$ 로 나타내어진 식을 얻을 수 있다.

$$CP \sqrt{a^2 + (7.138a + 2.799)^2} (7.138a + 2.799 + D_p) = D_p t \tau \quad (5)$$



**Fig. 2 Experimental relationship between rolover and deformation zone**

식 (5)로부터 롤오버  $a$ 를 구하는 식으로 정리하면 식 (6)을 얻게 된다.

$$P = \frac{D_p t \tau}{C \sqrt{a^2 + (7.138a + 2.799)^2} (7.138a + 2.799 + D_p)} \quad (6)$$

또한 식 (4)로부터

$$a = 0.1401b - 0.3921 \quad (7)$$

식 (5)와 식 (7)로부터 변형반경  $b$  를 구하는 식으로 정리하면 식 (8)을 얻게 된다.

$$P = \frac{D_p t \tau}{C \sqrt{(0.1401b - 0.3921)^2 + b^2 (b + D_p)}} \quad (8)$$

### 3. 실험 방법

본 연구를 위해 사용된 세 가지 튜브소재의 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of test materials

Material	TS (kg/mm <sup>2</sup> )	YS (kg/mm <sup>2</sup> )	E total (%)	E uniform (%)	n- value
A	42.0	36.5	31.7	17.1	0.15
B	41.7	33.7	33.0	17.9	0.16
C	37.0	27.6	37.1	22.3	0.22

본 연구에서 사용되어지는 하이드로포밍용 프레스의 도식도를 Fig. 3에 나타내었는데 4주 하향식 80 톤급유압 프레스로서 2000bar의 내압을 부여할 수 있는 증압기가 장착되어 있다.

Fig. 4에 하이드로 피어싱 실험을 위한 금형과 실린더, 펀치에 대한 도식도를 나타내었다. 그림에 보인 바와 같이 하이드로 피어싱용 실린더는 상부 금형의 접촉면에 장착하였다.  $\phi 50.8$ 의 초기 직경을 갖는 관재를 22% 확관율로 성형하여 확관된 직경이  $\phi 62$ 가 되도록 하이드로포밍한 상태에서 피어싱 펀치가 구멍을 뚫을 수 있도록 하였다. 금형의 표면과 펀치의 표면은 고주파 열처리를 하였다. 실린더의 경우, 실린더에 공급되는 유압은 16.5Mpa 이며 펀치가 관재에 작용할 수 있는 최대압력은 337Kn 으로 설정하였다. 실린더의 스트로크는 20mm로 일정하게 유지하였다.

소재의 형상을 동일하게 적용하기 위하여 모든 시편에 Fig. 5와 같이 40MPa의 내압과 7mm의 축

압입량을 적용하여 하이드로 포밍을 한 후 다시 내압을 가한 상태에서 하이드로 피어싱을 하였다.

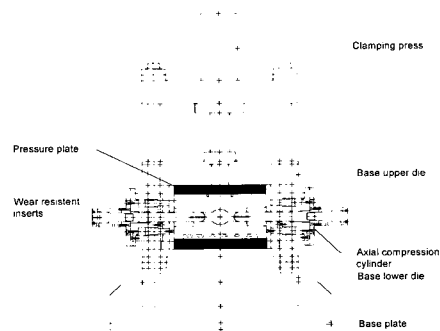


Fig. 3 Schematic drawing of tube hydroforming machine

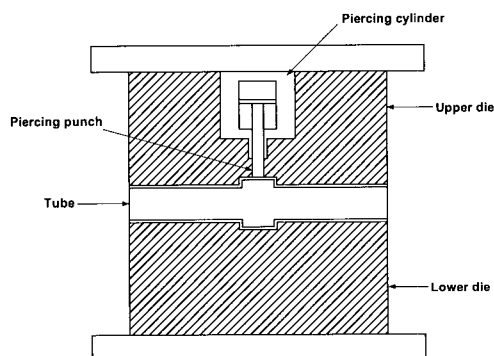


Fig. 4 Schematic drawing of hydro-piercing die system

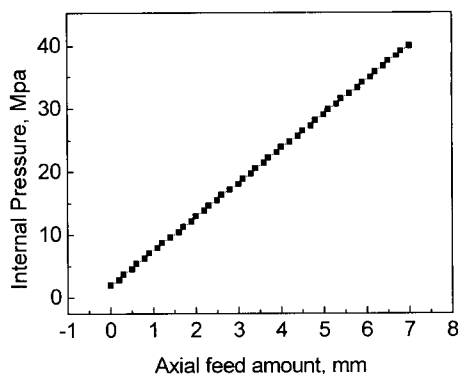


Fig. 5 Loading path for the hydroforming of initial tube

4. 결과 및 고찰

각각의 소재별로 내압을 변화시켜가며 하이드로 피어싱시험을 하여 얻어진 튜브변형형상을 Fig. 6에 나타내었고 여러 조건별로 측정된 롤오버와 변형반경을 아래 Table 2에 나타내었다.

Table 2에 나타낸 바와 같이, 세 소재 모두 튜브 내부에 압력을 가해주지 않은 경우(0MPa) 롤 오버 및 변형반경이 크고 내압이 증가할수록 롤 오버 및 변형반경이 감소함을 알 수 있으며, 소재별로는 강도가 낮은 소재일수록 롤 오버 및 변형반경이 낮게 나타났다. 특히 15MPa 부근에서 롤오버 및 변형반경이 가장 낮았으며 이 압력보다 낮으면 내압이 부족하여 롤오버 및 변형반경이 늘어나고, 이 압력보다 높으면 높은 내압으로 인한 누수의 증가로 롤오버 및 변형반경이 다시 증가하는 것으로 사료된다.

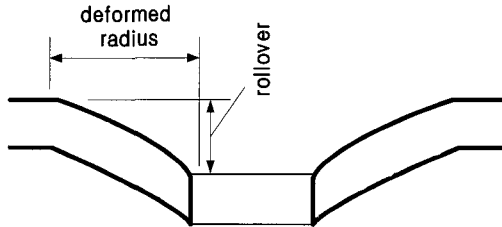


Fig. 6 Cut edge of hydro-pierced part

Table 2 Variation of roll-over and deformation zone with increasing internal pressure

internal pressure (MPa)	rollover(mm)		
	material-A	material-B	material-C
0	3.75	3.65	3.85
5	2.05	2.15	0.4
10	1.45	0.75	0.4
15	0.4	0.25	-
20	0.8	0.45	0.45
25	0.45	0.7	-
30	0.35	0.25	0.35
35	0.25	0.45	-

internal pressure (MPa)	Deformation Radius (mm)		
	material-A	material-B	material-C
0	18.9	17.6	15.65
5	15.4	13.2	10.8
10	10.9	8.7	7.8
15	8.8	8.0	-
20	9.1	8.3	8.0
25	9.1	8.2	-
30	7.3	7.6	7.7
35	7.9	7.8	-

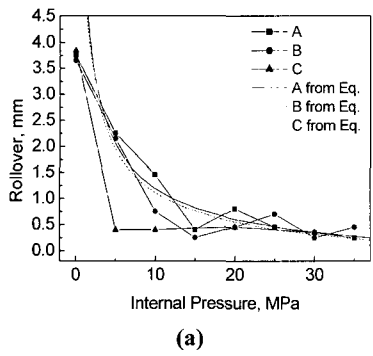
실험을 통해 얻어진 Table 2의 결과를 식 (6)을 통해 계산된 롤오버와 식 (8)을 통해 계산한 변형반경과 비교하였다.

식 (6)과 식 (8)의 예측모델을 이용하여 하이드로 피어싱시 발생되는 롤오버와 변형반경을 구하기 위해 '3절'의 실험조건과 동일한 10mm 직경의 원형 피어싱 펀치를 이용하여 2mm 두께의 튜브를 가정하여 롤오버와 변형반경을 계산하였다. 보정계수 C는 예비실험결과를 통해 3으로 정하였고, 전단강도  $\tau$ 는 Von Mises 기준을 따라 식 (9)를 이용하여 구했다.

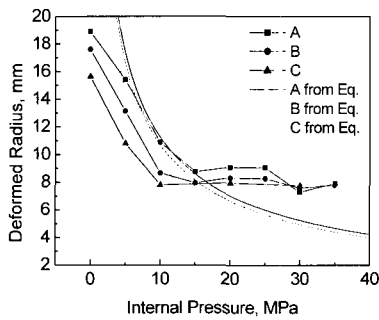
$$\tau = \frac{Y_s}{\sqrt{3}} \tag{9}$$

여기서  $Y_s$ 는 항복강도 Fig. 7에 보인 바와 같이 이론해석을 통해 예측된 롤오버와 변형반경도 실험치와 동일한 경향을 보여, 내압증가와 함께 롤오버 및 변형반경이 감소하고 소재별로는 소재강도가 작을수록 롤 오버 및 변형반경이 낮게 나타났다. 따라서 본 연구에서 얻어진 하이드로 피어싱시 변형예측모델이 실제 하이드로 피어싱시 일어나는 변형현상을 잘 반영하고 있음을 확인할 수 있다.

본 연구의 변형해석 모델을 이용하여 구한 튜브 두께별 롤오버 및 변형반경을 Fig. 8에 나타내었고, Fig. 9에는 본 연구의 변형해석 모델을 이용하여 구한 펀치 직경별 롤오버 및 변형반경을 나타내었다.

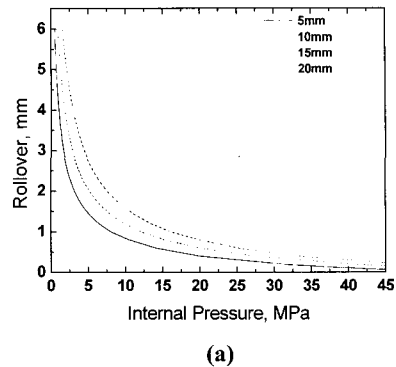


(a)

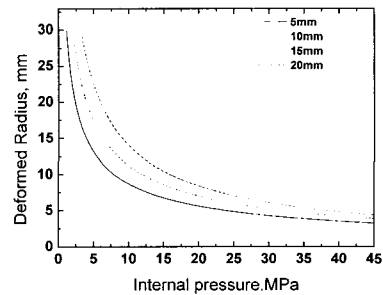


(b)

Fig. 7 Comparison of predicted value with experimental value, (a) roll over and (b) deformation radius

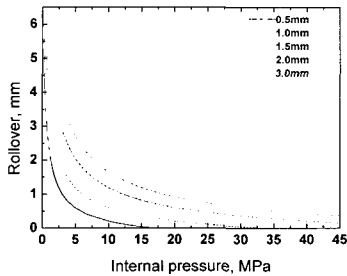


(a)

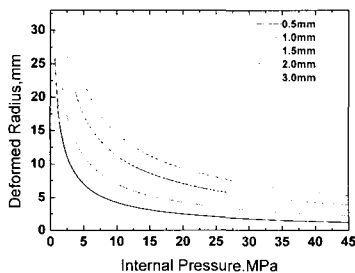


(b)

Fig. 9 Predicted (a) roll over and (b) deformation radius at various punch diameter radius at various tube thickness



(a)



(b)

Fig. 8 Predicted (a) roll over and (b) deformation

## 5. 결론

튜브 하이드로 피어싱 공정은 펀치의 힘을 튜브 내부에 가해진 압력에 의해 지지한 상태에서 전단이 일어나므로 피어싱된 구멍 주변에 변형이 발생하게 되며, 이러한 변형은 하이드로 피어싱 성형 건전성의 주요 척도가 된다. 따라서 본 연구에서는 튜브 하이드로 피어싱공정시 발생하는 변형현상을 해석하기 위해 피어싱 공정에 영향을 미치는 내압, 펀치직경, 소재두께, 소재강도 등의 인자들의 함수로 롤오버 및 변형반경 예측모델을 개발하였으며 실험을 통해 모델의 예측정밀도가 우수함을 확인하였다

## 후기

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구 되었음. (KRF-2001-041-E00093)

### 참 고 문 헌

- (1) M. Ahmetoglu, K. Sutter, X. J. Li and T. Altan, 2000, "Tube hydroforming: current research, applications and need for training", Journal of materials processing technology, Vol. 98, pp. 224~231.
- (2) M. Koc, A. Yinyot and T. Altan, 2001, "On the characteristics of tubular materials for hydroforming-experimentation and analysis", International Journal of machine Tools and Manufacture, Vol. 41, pp. 761~772.
- (3) Y. S. Kim, Y. M. Lee, C. Kim and S. M. Hwang, 2002, "Collapse characteristics of hydroformed tubes", Metals and Materials International, Vol. 8, No.4, pp. 359~365.
- (4) N. Asnafi and A. Skogsgardh, 2000, "Theoretical and Experimental analysis of stroke controlled tube hydroforming", Materials Science and Engineering, Vol. A279, pp. 95~110.
- (5) K. Brewster, K. Sutter, M. Ahmetoglu and T. Altan, 1996, "Hydroforming tube" , The Tube and Pipe Quarterly, Vol. 7, No. 4, pp. 34~40.
- (6) S. Shah and C. Bruggemann, 1997, "Hydroforming products and process requirements and implementation" , Proceedings of the 2nd Annual Automotive Tube Conference, Dearbon, Michigan, 13-14 May, p. 85.
- (7) US Patent NO 5,974,846,, Nov. 2,1999, "Method of forming and piercing a tube".
- (8) US Patent NO 5,398,533,, Mar. 21,1995, "Apparatus for piercing hydroformed part".
- (9) US Patent NO 5,890,387,, Apr. 6,1999, "Apparatus and method for forming and hydrofopiercing a tubular frame member".
- (10) Etienne Taupin, Jochen Breitling, Wei-Tsu Wu, Taylan Altan, 1996, "Material fracture and burr formation in blanking results of FEM simulation and comparison with experiments", J. of Materials processing technology, Vol.59, pp. 68~78.