

## 하이드로 피어싱에서의 변형 특성 연구

최성기\*, 안익태\*, 문영훈\*\*

### A study on deformation characteristics of tube hydro-piercing process

S.K. Choi, I.T. Ahn, 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 포밍공정으로 다양한 형상의 부품을 최소 공정수로 성형하기 위해서는 피어싱과 같은 후처리공정을 하이드로 포밍기술과 병행하는 기술이 필요하며, 이러한 병행공정기술은 하이드로 포밍 기술의 생산성 제고 효과뿐만 아니라 하이드로 포밍기술의 적용개소를 증가시키는데도 필수적으로 요구되는 기술이다.

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

드로 피어싱 성형 건전성의 주요 척도가 된다.

따라서 본 연구에서는 튜브 하이드로 피어싱공정시 발생하는 구멍 주변의 변형에 공정인자들이 미치는 영향도를 분석함으로써 하이드로 피어싱시 홀 주변의 변형을 예측하고자 한다. 이를 위해 피어싱 공정에 영향을 미치는 인자들의 함수로 롤오버 및 변형반경 예측모델을 개발하였으며 이론해석과 병행하여 하이드로 피어싱 실험을 실시함으로써 해석모델의 신뢰도를 제고시켰다.

#### 2. 이론해석모델

하이드로 피어싱 공정시 피어싱 펀치의 전단력이 튜브

\* 부산대학교 정밀기계공학과

\*\* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

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

Fig.1 은 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 Eq.(1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

$$F_d = p \pi \left(\frac{D_p}{2}\right)^2 + C P 2 \pi \int_0^a \left(\frac{b}{a} x + \frac{D_p}{2}\right) \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2} dx$$

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

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

Eq.(1)과 Eq.(2)로부터

$$C P \sqrt{a^2 + b^2} (b + D_p) = D_p t \tau \quad \text{-----(3)}$$

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.

Eq.(3)를 이용하여 튜브 하이드로 피어싱 공정시 발생되

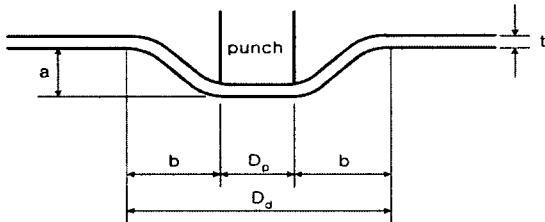


Fig.1 A sectional view showing the punching operation immediately prior to shear stress failure of the material

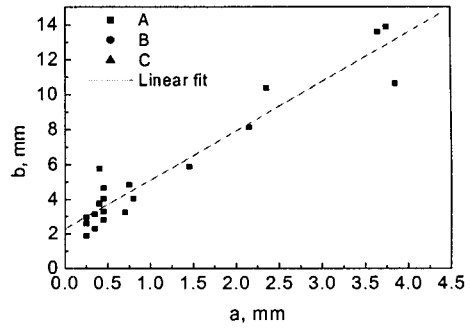


Fig.2 Experimental relationship between rollover and deformation zone

는 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( $b$ )의 상관관계로부터 다음의 관계식을 얻었다.

$$b = 7.138a + 2.799 \quad \text{-----(4)}$$

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

$$C P \sqrt{a^2 + (7.138a + 2.799)^2} (7.138a + 2.799 + D_p) = D_p t \tau \quad \text{-----(5)}$$

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

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

또한 Eq.(4)로부터,

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

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

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

Table 1 Mechanical properties of test materials

Material	tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	yield strength (kg/mm <sup>2</sup> )	total el. (%)	uniform el. (%)	n-value
A	42.0	36.5	31.7	17.11	0.146
B	41.7	33.7	33.0	17.95	0.160
C	37.0	27.6	37.1	22.31	0.221

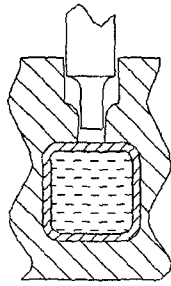


Fig.3 Schematic drawing of hydro-piercing die system

### 3. 실험방법

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

Fig.3 에 하이드로 피어싱 실험을 위한 금형과 실린더, 펀치에 대한 도식도를 나타내었다. 그림에 보인 바와 같이 하이드로 피어싱용 실린더는 상부 금형의 접촉면에 장착하였다.  $\varnothing 50.8$ 의 초기직경을 갖는 관재를 22% 확장율로 성형하여 확장된 직경이  $\varnothing 62$ 가 되도록 하이드로포밍한 상태에서 피어싱 펀치가 구멍을 뚫을 수 있도록 하였다. 금형의 표면과 펀치의 표면은 고주파 열처리를 하였다.

실린더의 경우, 실린더에 공급되는 유압은 16.5Mpa이며 펀치가 관재에 작용할 수 있는 최대압력은 337kN으로 설정하였다. 실린더의 스트로크는 20mm 로 일정하게 유지하였다.

소재의 형상을 동일하게 적용하기 위하여 모든 시편에 40Mpa의 내압과 7mm의 축압입량을 적용하여 하이드로포밍을 한 후 다시 내압을 가한 상태에서 하이드로 피어싱을 하였다.

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

internal pressure (Mpa)	rollover(mm)			deformation radius(mm)		
	A	B	C	A	B	C
0	3.75	3.65	3.85	18.90	17.60	15.65
5	2.35	2.35	1.40	15.40	13.15	10.80
10	1.45	0.75	0.45	10.90	8.65	7.80
15	0.45	0.25	-	8.75	7.95	-
20	0.8	0.45	0.40	9.05	8.30	7.95
25	0.45	0.7	-	9.05	8.26	-
30	0.35	0.25	0.35	7.30	7.60	7.75
35	0.25	0.45	-	7.90	7.80	-

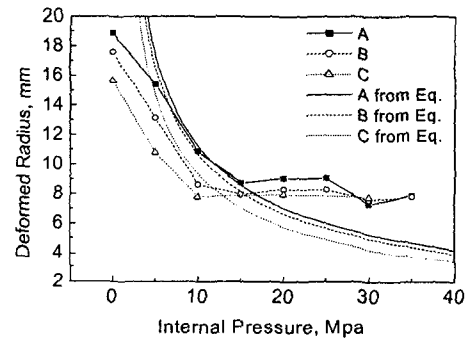
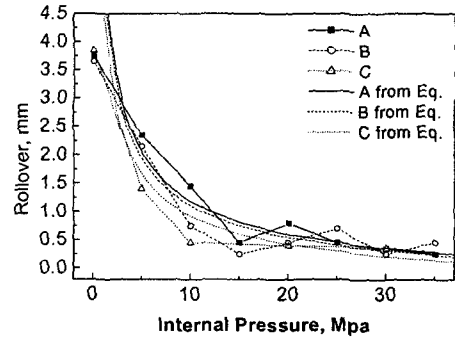


Fig.4 Comparison of predicted value with experimental value, (a) roll over and (b) deformation radius

### 4. 결과 및 고찰

각각의 소재별로 내압을 변화시켜가며 하이드로 피어싱 실험을 하여 얻어진 시편에서 측정된 롤오버와 변형반경을 아래 Table 2 에 나타내었다.

Table 2 에 나타난 바와 같이, 세 소재 모두 튜브내부에 압력을 가해주지 않은 경우(0 Mpa) 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.

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

Eq.(6) 과 Eq.(8)의 예측모델을 이용하여 하이드로 피어싱시 발생하는 롤오버와 변형반경을 구하기 위해 '3 절'의 실험조건과 동일한 10mm 직경의 원형 피어싱 펀치를 이용하여 2mm 두께의 튜브를 가정하여 롤오버와 변형반경을 계산하였다. 보정계수 C 는 예비실험결과를

## 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 피어싱 공정시 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.

## 참고 문헌

- (1) F. Dohmann and C. Hardt, 1996, "Hydroforming-A method to manufacture lightweight parts", Journal of materials processing technology, Vol. 60, pp. 669-676
- (2) N. Asnafi, A. Skogsgardh, 2000, "Theoretical and Experimental analysis of stroke- controlled tube hydroforming", Materials Science and Engineering, Vol. A279, pp.95-110
- (3) K. Brewster, K. Sutter, M. Ahmetoglu, T. Altan, 1996, "Hydroforming tube", The Tube and Pipe Quarterly, Vol. 7, No. 4, pp. 34-40
- (4) S. Shah, C. Bruggemann, 1997, "Hydroforming products and process requirements and implementation", Proceedings of the 2nd Annual Automotive Tube Confernce, Dearbon, Michigan, 13-14 May, p.85
- (5) US Patent NO 5,974,846,, Nov. 2, 1999, "Method of forming and piercing a tube"
- (6) US Patent NO 5,398,533,, Mar. 21, 1995, "Apparatus for piercing hydroformed part"
- (7) US Patent NO 5,890,387,, Apr. 6, 1999, "Apparatus and method for forming and hydrofopiercing a tubular frame member"

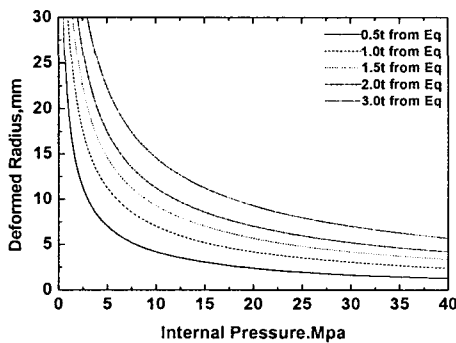
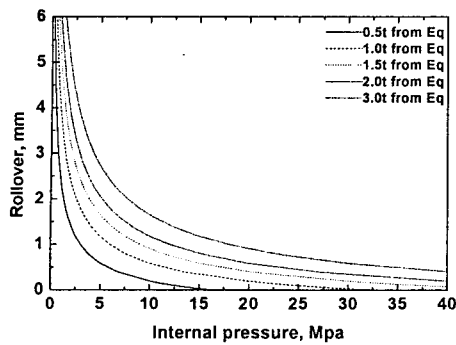


Fig.5 Predicted (a) roll over and (b) deformation radius at various tube thickness

통해 3 으로 정하였고, 전단강도  $\tau$  는 Von Mises 기준을 따라 Eq.(9) 를 이용하여 구했다.

$$\tau = \frac{Y_s}{\sqrt{3}} \quad \text{-----(9)}$$

단, 여기서  $Y_s$  는 항복강도

Fig.4 에 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.5 에 나타내었다.