

튜브 하이드로 피어싱시 롤 오버의 실험적 분석

최성기*·안익태*·문영훈†

(2003년 11월 17일 접수, 2004년 5월 24일 심사완료)

Analysis on Roll Over in the Tube Hydro-Piercing Process

Sung-Ki Choi, Ick-Tae Ahn and Young-Hoon Moon

Key Words: Hydro-Piercing(하이드로 피어싱), Tube Hydroforming(튜브 하이드로포밍), Roll Over(롤오버), Internal Pressure(내부압력)

Abstract

During the tube hydropiercing, the region adjacent to the pierced hole will be deformed and will be drawn away from the die block as the punch advances through the wall of the tube. The deformation in the region may range from a substantially flat form to a countersunk form, so called rollover. In this study, the effects of material properties, shape of piercing punches, roundness of tube surface and internal pressure within the tube during piercing on the rollover have been investigated experimentally. The results provide the quantitative variation of rollover at given hydropiercing parameters, and a relationship between the deformed radius and the rollover caused by the deformation has been established.

1. 서 론

하이드로포밍 기술⁽¹⁻³⁾은 기존의 스탬핑 성형공정과는 완전히 다른 개념으로 차량 구조물의 폐단면 형상을 원형 강관의 내부에 압력을 가하여 확장시켜 외부 금형 형상에 따라 성형하여 원하는 모양의 차체 골격을 만드는 방식으로, 성형품이 무게에 비해 높은 구조강성을 가지며, 복잡한 형상의 부품을 하나의 다이로 생산이 가능하며, 소재 회수율이 높다는 장점이 있다. 하지만 하이드로포밍 기술은 종래의 프레스방식과는 달리 튜

브의 기계적 물성 평가 방법, 소재와 금형간 마찰 특성, 금형 소재 선택 및 설계 기술, 기본적인 소재의 변형 거동에 대한 종합해석이 이루어져야만 최적의 성형이 가능하므로 기술적으로 고려인자가 많은 기술이기도 하다.

튜브 하이드로포밍 공정으로 다양한 형상의 부품을 최소 공정수로 성형하기 위해서는 밴딩⁽⁴⁻⁵⁾과 같은 예비성형공정과 피어싱⁽⁶⁻⁸⁾과 같은 후처리공정을 하이드로포밍 기술과 병행하여 성형하면 공정수를 줄일 수 있다. 따라서 하이드로포밍 기술의 생산성 제고를 위한 이러한 병행공정의 개발은 하이드로포밍 기술의 적용개소를 증가시키는 데 필수적인 기술로 부각되고 있다.

튜브 하이드로 피어싱 공정의 경우 튜브 반경 방향에 수직하게 누르는 펀치의 힘을 튜브 내부에 가해진 압력에 의해 지지한 상태에서 전단이 일어나므로 롤 오버가 발생하게 되며, 이러한 롤

† 책임저자, 회원, 부산대학교 정밀기계공학과
E-mail : skchoi1303@hotmail.com
TEL : (051)510-1672 FAX : (051)512-1722

* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과/정밀금형 및 금형가공 연구센터

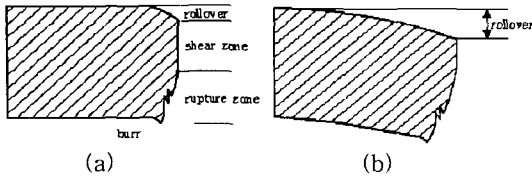


Fig. 1 Schematic draw of cut edge of (a) blanked part (b) hydro-pierced part

오버는 하이드로 피어싱 성형 건전성의 주요 척도가 된다. 따라서 본 연구에서는 튜브 하이드로 피어싱공정시 발생하는 롤 오버에 영향을 미치는 튜브소재의 물성, 피어싱 펀치형상 및 피어싱 표면의 곡률 등의 영향도를 실험적으로 분석하고자 한다.

2. 실험 방법

하이드로 피어싱공정은 튜브 내부의 유압이 작용하면서 끝단이 날카로운 펀치가 금형의 가이드를 따라 이동하면서 튜브 반경방향으로 압축하중을 가하여 그 펀치 단면을 따라 소재에 전단응력을 발생시켜서 구멍을 뚫는 것이다. 이 때 튜브 내부의 고압의 유체는 펀치의 끝단이 튜브를 밀어내면서 소성변형 시킬 때 지지대 역할을 하여 소재가 전단이 일어나도록 한다. 그러나 피어싱시 생기는 누수현상으로 인해 유압 실린더의 제어가 어려우며, 튜브 내부의 유체압력과 피어싱 펀치의 하중, 속도에 대한 최적 공정인자를 파악하지 못하면 피어싱된 구멍 둘레로 롤오버(roll-over)가 발생하게 된다.

아래의 Fig. 1(a)에는 금형을 사용한 블랭킹(blanking)공정에 의해 얻어지는 횡단면의 형상을 도식적으로 나타내었고 Fig. 1(b)에는 하이드로 피어싱 공정에 의해 얻어지는 횡단면의 형상을 도식적으로 나타내었다. 하이드로 피어싱의 경우, 블랭킹 공정에 비해 아랫면을 지지해주는 금형이 없고 튜브 내부에 가해준 압력에 의해 지지되기 때문에 롤 오버가 블랭킹 공정에 비해 넓고 깊어 일어남을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 피어싱시 주요 공정변수인 내부압력, 펀치의 형상, 튜브재질 및 튜브 표면형상이 하이드로 피어싱시 롤오버에 미치는 영향도를 분석하고자 한다.

Table 1 Mechanical properties of test materials

Material	T.S (kg/mm ²)	Y.S (kg/mm ²)	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

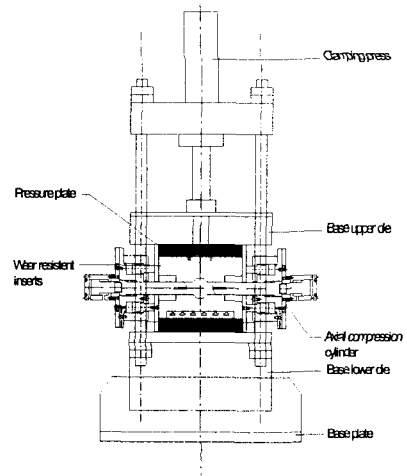


Fig. 2 Schematic drawing of tube hydroforming machine

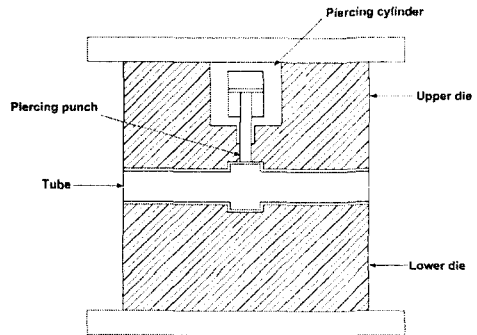


Fig. 3 Schematic drawing of hydro-piercing die system

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

본 연구에서 사용되어지는 하이드로포밍용 프레스의 도식도를 Fig. 2에 나타내었는데 4주 하향식 80 톤급유압 프레스로서 2000 bar의 내압을 부여할 수 있는 증압기가 장착되어 있다.

Fig. 3에 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 초기직경을 갖는 관재를 22% 확관율로 성형하여 확관된 직경이 $\phi 62$ 가 되도록 하이드로포밍 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 최대 압력은 337kN으로 설정하였다. 실린더의 스트로크는 20mm 로 일정하게 유지하였다. 피어싱 펀치를 작동시키는 유압실린더의 조립전 부품사진을 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 5는 실린더에 조립할 수 있게 설계된 직경 $\phi 10\text{mm}$ 의 원형 펀치, 대각선의 길이가 10mm인 사각 펀치, 직경 $\phi 10\text{mm}$ 의 경사 절단된 원형 펀치형상을 나타낸다. 원형 및 사각펀치를 이용한 피어싱 공정에서는 피어싱이 되면서 슬러그가 떨어져 나오게 되는데, 하이드로포밍 공정은 밀폐된 금형 안에서 이루어지고 성형이 된 후에도 금형에 작동유체가 남아있기 때문에 슬러그를 제거하기가 용이하지 않다. 슬러그가 금형에 남아 있게 되면 관재와 금형 혹은 관재와 펀치사이에 끼어 불량률 발생시킬 뿐만 아니라 장비의 고장을 유발할 수 있다. 하이드로포밍을 자동화된 양산장비로 적용할 때 피어싱에 의해 발생한 슬러그에 대한 문제를 고려해야 한다. 따라서 본 연구의 경사 절단된 원형 펀치는 피어싱 이후 슬러그가 완전히 떨어지지 않고 관재 내부에 일부 붙어있게 하려는 의도로 제작되었다.

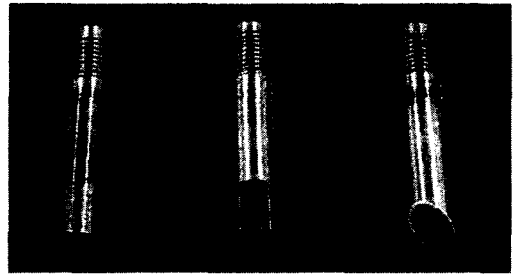
소재의 형상을 동일하게 적용하기 위하여 모든 시편에 Fig. 6과 같이 40MPa의 내압과 7mm의 축압입량을 적용하여 하이드로 포밍을 한 후 다시 내압을 가한 상태에서 하이드로 피어싱을 하였다.



Fig. 4 Piercing equipment (a)punch(b)cylinder(c)cap

3. 결과 및 고찰

Fig. 7은 하이드로 피어싱 공정을 통해 얻어진 시편의 예를 보여주고 있는데, 피어싱된 구멍 주위로 상당량의 소성변형과 함께 툴 오버가 관찰되고 있음을 알 수 있다.



(a)Round (b)Rectangular (c)Taper-round

Fig. 5 Piercing punch

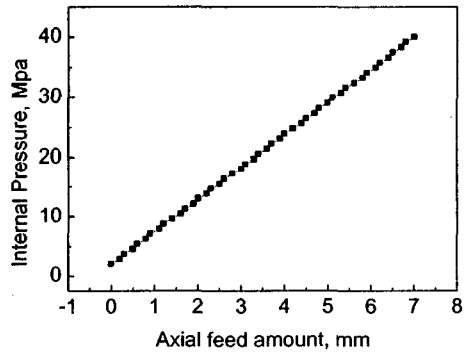


Fig. 6 Loading path for the hydroforming of initial tube

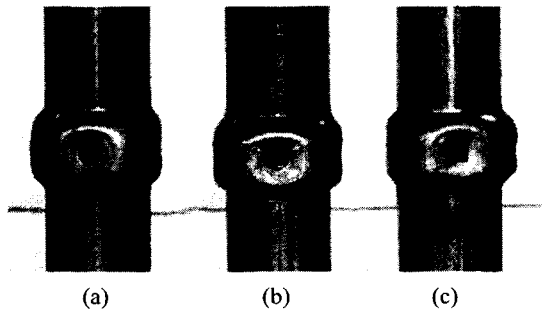


Fig. 7 Example of hydro-pierced tube: (a) Round (b) Taper-round (c) Rectangular punch

3.1 소재물성이 롤 오버에 미치는 영향

소재의 기계적 성질이 롤 오버에 미치는 영향도를 알아보기 위해 하이드로 포밍을 통해 얻어진 편평한 면에 각각의 소재별로 내압을 변화시켜 원형편치로 하이드로 피어싱을 하였다. Table 2에 A소재의 경우를 예로 들어 가해준 내압 별로 하이드로 피어싱한 후 발생한 롤 오버를 측정한 결과를 나타내었다. Table 1에 나타낸 세 가지 시험소재에 대해 하이드로 피어싱 후 발생한 내압 별 롤 오버를 Fig. 8에 나타내었다.

세 소재 모두 튜브내부에 압력을 가해주지 않은 경우(0 MPa) 롤 오버가 가장 크고 내압이 증

Table 2 Variation of roll-over with increasing internal pressure(A-material)

internal pressure(MPa)	rollover(mm)
0	3.75
10	1.45
20	0.8
30	0.35

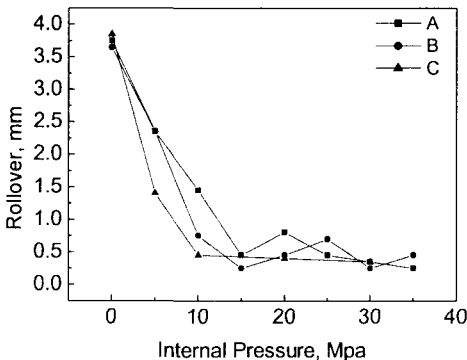
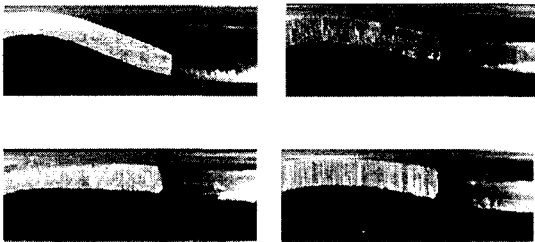


Fig. 8 Variation of roll over with increasing internal pressure

가할수록 롤 오버가 감소함을 알 수 있다. 15 MPa 이하의 낮은 내압범위에서는 내압이 증가함에 따라 롤 오버가 크게 감소하며 소재의 강도가 낮을수록 롤 오버가 줄어드는 경향을 더욱 뚜렷이 나타내었다. 15MPa 부근에서 최소의 롤오버를 나타낸 후 그 이상의 내압에서는 롤 오버가 크게 변하지 않았다. 강도가 가장 낮은 C소재의 경우 튜브내부에 압력을 가해주지 않은 경우에서는 다른 소재와 비슷한 롤 오버를 발생시키지만 5 MPa 정도의 내압 하에서 가장 작은 롤 오버를 유지시켜줌으로서 피어싱 성형시 변형영역이 가장 낮게 나타났다.

Fig. 9에 하이드로 피어싱이 되는 단계별 과정을 도식적으로 나타내었다. 대체로 튜브의 내부 압력이 너무 낮거나 높으면 Step 2에서 Step 3으로 가는 과정에서 소재가 파단 되는 동시에 누수가 되어 내부압력이 크게 감소될 수 있다. 그러나 피어싱 편치의 압입으로 인한 체적증가분에 의한 내부 압력이 상승효과가 증가된 내압으로 인해 증가되는 누수보다 클 경우에는 롤 오버를 감소시키는 효과가 명확하게 나타난다. Step 4에서 보는 바와 같이 이렇게 상승된 압력은 소재를 균형에 밀착시켜서 Step 3까지 발생한 롤 오버를 줄여주는 역할을 하게 된다. 실험에서 B소재와 A소재 모두 15 MPa에서 롤 오버가 현격히 줄어들었는데, 이 압력에서 누수가 가장 적은 것으로 사료된다. 15 MPa보다 낮으면 소재를 받치는 힘이 적어 소재와 편치 사이의 틈새로 누수가 되어 내부압력이 감소하게 되고, 15 MPa보다 높으면 받치는 힘이 충분해서 소재를 편치에 밀착시켜 누수될 수 있는 틈이 줄긴 하지만 내부 유체가 빠져나가려는 힘 또한 증가하게 되므로 내부압력이 충분히 증가되지 않는 것으로 관찰되었다. 하지만 15 MPa이상의 압력에서는 Step 3에서 발생되는 초기 롤 오버가 작게 형성되므로 최종 롤 오버 또한 크지 않았다.

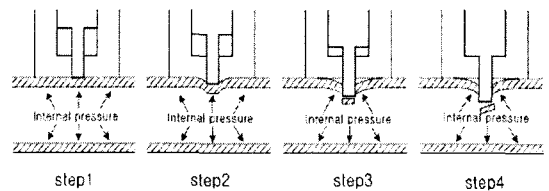


Fig. 9 Schematic drawing of hydropiercing procedure

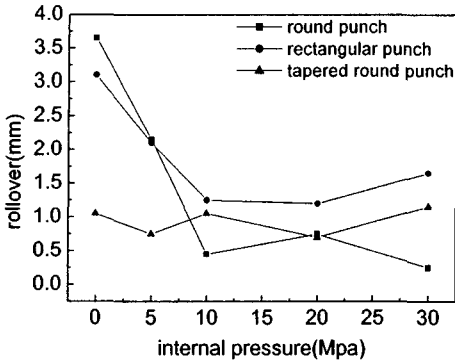


Fig. 10 Variation of roll-over at different punch shapes

강도가 가장 낮은 C소재는 Table 1에 보인 바와 같이 연성이 크기 때문에 소재와 펀치의 밀착성이 우수하여 5 MPa의 낮은 압력에도 롤 오버가 현저히 감소하는 현상을 보였으며 계속되는 내압의 증가에도 낮은 롤 오버를 유지하였다.

3.2 피어싱 펀치형상이 롤 오버에 미치는 영향
 피어싱 펀치형상이 롤 오버에 미치는 효과를 알아보기 위해 B소재를 대상으로 원형펀치, 사각펀치, 경사 절단된 원형 피어싱 펀치를 이용한 하이드로 피어싱 시험을 실시하였다. Fig. 10에 펀치형상별 롤 오버를 비교하였다.

Fig. 10에서 알 수 있듯이, 사각 피어싱펀치를 사용한 경우 원형펀치보다 내압이 가해지지 않은 경우(0 MPa)를 제외하면 롤 오버가 원형펀치에 비해 크게 나타나는데, 이는 형상적인 요인 이외에도 사각형상이 원형형상에 비해 소재와 펀치사이의 누수 가능성이 높는데 기인한 것으로 판단된다.

경사 절단된 원형 펀치는 한쪽 끝이 먼저 전단하면서 점진적으로 전단되므로 피어싱이 되기 직전에는 각각 주어진 압력을 관재가 받고 있지만 펀치가 들어가는 순간 내부유체는 누수 되어 내압이 떨어지고 피어싱이 진행되는 대부분의 시간 동안 내부압력으로 인한 지지효과를 기대할 수 없으며 결과적으로 피어싱시의 내압에 상관없이 롤오버가 현저하게 발생한다.



Fig. 11 Cut edge of the tube hydro-pierced by tapered round punch

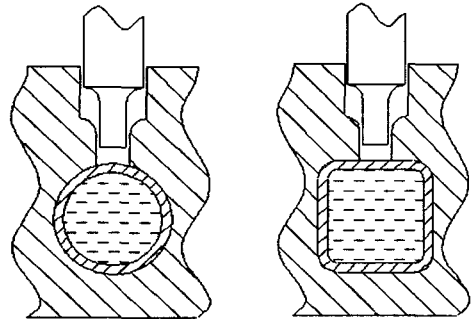


Fig. 12 Cross-sectional view of tube having (a) Flat (b) Round hydroformed surface

그러나 원형이나 사각형상의 펀치에 비해 튜브 내부에 압력을 가해주지 않은 경우(0 MPa)의 롤 오버가 상대적으로 적으며 이는 점진적으로 전단해 들어가는 경사 절단된 원형 펀치의 최대전단력이 전단면을 동시에 전단하는 다른 펀치의 최대 전단력보다 월등히 작기 때문에 롤 오버를 적게 발생시킨 것으로 판단된다. 또한 경사 절단된 원형 펀치로 피어싱을 했을 때 Fig.11에 보인 바와 같이 슬러그가 떨어지지 않고 관재의 한쪽에 매달려 있음을 관찰할 수 있다.

3.3 피어싱면의 곡률이 롤 오버에 미치는 영향
 피어싱면의 곡률이 롤 오버에 미치는 효과를 알아보기 위해 Fig. 12에 보인 바와 같은 편평면과 둥근면을 갖는 예비성형 튜브를 대상으로 원형펀치를 이용한 피어싱 시험을 실시하였다.

B 소재를 사용하여 얻어진 편평면과 둥근면에서의 롤오버 측정결과를 Fig. 13에 나타내었다. 곡률을 갖는 둥근면에 하이드로 피어싱을 하는 경우, Fig. 9의 Step 2에서 Step 3으로 가는 과정에서 편평한 면에 비해 전단효율이 낮아 롤 오버가 많이 생기게 되며 Step 4에서의 롤 오버 감소효과는 편평한 면에 피어싱을 했을 때에 비해 도리어 누수가 쉽게 일어나게 되어 결과적으로 큰 롤 오버를 보인다.

3.4 롤오버와 변형반경의 상관성

하이드로 피어싱의 경우, 피어싱 펀치의 하강시 튜브 내부에 가해준 압력에 의해 지지되기 때문에 Fig. 14에 보인 바와 같이 롤 오버의 발생과 함께 피어싱 홀의 반경 방향으로 넓은 변형영역이 생기는데 이러한 변형영역의 크기 또한 하이드로 피어싱의 성형치밀도의 평가항목으로 볼 수 있다.

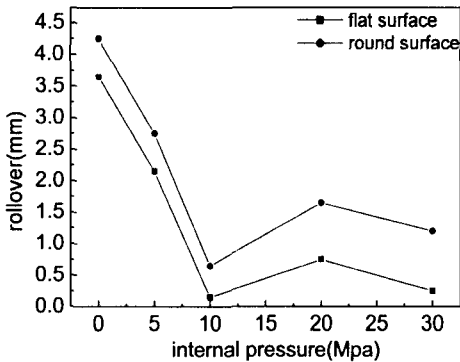


Fig. 13 Variation of roll-over at different tube surface shapes

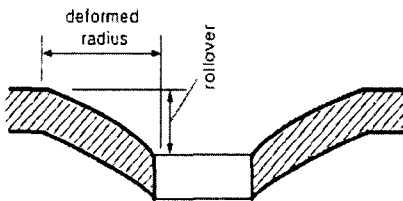


Fig. 14 Cross-sectional view of tube deformation after hydropiercing

원형 펀치를 이용하여 세 가지 튜브를 대상으로 피어싱 시험을 실시한 후 얻어진 변형반경을 Fig. 15에 나타내었다.

세 소재 모두 튜브내부에 압력을 가해주지 않은 경우(0 MPa) 변형반경이 가장 크고 내압이 증가할수록 변형반경이 감소함을 알 수 있다. 15 MPa 이하의 낮은 내압범위에서는 내압이 증가함에 따라 변형반경이 크게 감소하며 소재의 강도가 낮을수록 변형반경이 작았다. 롤 오버의 경우와 유사하게 15MPa 부근에서 최소의 변형반경을 보인 후 그 이상의 내압에서는 변형반경이 크게 변하지 않았다. 따라서 롤오버와 변형반경은 근사적으로 직선적인 상관관계를 보이며 롤오버가 증가함에 따라 변형반경도 증가하는 경향을 보였다.

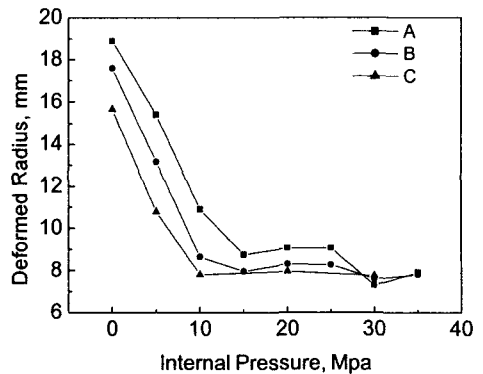


Fig. 15 Variation of deformation radius with increasing internal pressure

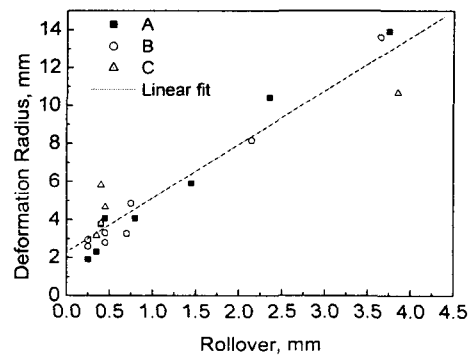


Fig. 16 Experimental relationship between rollover and deformation zone

Fig. 16에 롤 오버와 변형반경사이의 상관관계를 나타내었으며 재료의 강도에 무관하게 롤오버의 증가에 따라 변형반경도 선형적으로 증가하므로, 롤 오버와 함께 하이드로 피어싱공정 성형건전성의 척도로 볼 수 있다.

4. 결 론

(1) 하이드로 피어싱의 경우 반경방향에 수직하게 누르는 펀치의 힘을 튜브 내부에 가해준 압력에 의해 지지하기 때문에 롤 오버가 발생하게 되며, 이러한 롤 오버는 하이드로 피어싱 성형 건전성의 주요 척도로 볼 수 있다.

(2) 소재측면에서 볼 때 강하고 연성이 작은 소재일수록 롤 오버가 크게 발생하며 이를 줄이기 위한 내압도 상대적으로 많이 필요하다.

(3) 튜브내부에 압력을 가해주지 않고 피어싱을 한 경우의 롤 오버는 원형, 사각, 사선펀치 순으로 컷으나, 내압이 가해지는 경우 사각펀치의 경우 누수로 인해 원형펀치에 비해 롤오버가 크게 발생하였다.

(4) 경사 절단된 원형 펀치로 피어싱을 함으로써 슬러그가 관재 내부에 붙어있는 특성을 보이지만 점진적인 전단과정동안 내부 유체가 누수되어 내압에 따른 롤 오버 감소효과를 기대할 수 없다.

(5) 둥근 면에서 피어싱을 하면 평평한 면보다 전단효율이 낮고 소재와 펀치사이의 누수가 많아 롤 오버가 많이 발생한다.

(6) 롤 오버의 발생과 함께 피어싱 홀의 반경 방향으로 넓은 변형영역이 생기는데 이러한 변형영역의 크기는 롤 오버에 근사적으로 비례하므로 하이드로 피어싱의 성형건전성의 척도로 볼 수 있다.

후 기

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2001-041-E00093)

참고문헌

- (1) Ahmetoglu, M., Sutter, K., Li, X.J. and Altan, T., 2000, "Tube Hydroforming: Current Research, Applications and Need for Training," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 98, pp. 224~231.
- (2) JAE-WON, LEE. and JONG-JING, PARK., 2002, "Analysis of Tube Expansion by Hydroforming," *KAME*, Vol. 26, No. 11, pp. 2253~2261.
- (3) Asnafi, N. and Skogsgardh, A., 2000, "Theoretical and Experimental Analysis of Stroke-controlled Tube Hydroforming," *Materials Science and Engineering*, Vol. A279, pp. 95~110.
- (4) Brewster, K., Sutter, K., Ahmetoglu, M. and Altan, T., 1996, "Hydroforming Tube," *The Tube and Pipe Quarterly*, Vol. 7, No. 4, pp. 34~40.
- (5) Shah, S. and Bruggemann, C., 1997, "Hydroforming Products and Process Requirements and Implementation," *Proceedings of the 2nd Annual Automotive Tube Conference*, Dearbon, Michigan, 13-14 May, p. 85.
- (6) US Patent NO 5,974,846, Nov. 2, 1999, "Method of Forming and Piercing a Tube."
- (7) US Patent NO 5,398,533, Mar. 21, 1995, "Apparatus for Piercing Hydroformed Part."
- (8) US Patent NO 5,890,387, Apr. 6, 1999, "Apparatus and Method for Forming and Hydroformed Piercing a Tubular Frame Member."