

하이드로포밍에 의한 튜브 확관에 대한 해석

이재원* · 박종진†

(2002년 1월 9일 접수, 2002년 9월 16일 심사완료)

Analysis of Tube Expansion by Hydroforming

Jae-Won Lee and Jong-Jin Park

Key Words: Finite Element Analysis(유한요소해석), Hydroforming(액압성형), Tube Expansion(튜브 확관), Welding Zone(용접부), Heat Affected Zone(열영향부), Bursting(버스팅)

Abstract

Recently the hydroforming technology has drawn a lot of attention because of its capability to produce high quality and light weight parts. In the present study, the tube expansion - one of the simplest hydroforming processes, has been investigated in order to understand fundamental phenomena such as deformation characteristics and effect of process parameters. As a result, the most important process parameters, which determine the state of stress at the expanded zone, were found to be pressure and die displacement. If the stress becomes equi-axial tension at the zone, necking occurs at some distance from the weld line and develops into a crack along the axial direction. Some aspects of mechanical property measurements as well as distributions of hardness and microstructure are also discussed in this paper.

1. 서론

자동차 산업에서는 생산성 향상, 고강도, 경량화 등을 추구하고 가격경쟁력 및 기술력을 갖추기 위해 TWB(Tailor Welded Blank) 응용과 레이저 용접등과 더불어 하이드로포밍(hydroforming) 기술에 대해 활발한 연구와 적용이 진행되고 있다. 하이드로포밍 기술은 자동차 산업에서 차체 및 샤시부품에 이미 적용되고 있으나 부분적인 적용으로써 전체적인 적용을 위해서는 앞으로도 더욱 많은 연구가 필요하다.^(1~8)

하이드로포밍 기술은 크게 판재 하이드로포밍과 튜브 하이드로포밍으로 구분되는데 판재 하이드로포밍의 경우는 대용량의 프레스가 요구될 뿐

아니라 적용분야도 튜브 하이드로포밍의 경우보다 적다. 튜브 하이드로포밍 기술은 판재를 이용한 일체성형이므로 가공경화를 통하여 일반적인 스탬핑 기술보다 강도 및 강성이 높은 고품질의 부품을 얻을 수 있다. 또한 보강재 및 용접부의 감소로 인하여 경량화를 꾀할 수 있으며 후속 가공시에 발생하는 치수불량이나 탄성회복 등의 문제가 작게 나타나는 장점이 있다. 반면에 장비가 매우 고가이며, 성형시간이 스탬핑에 비하여 길고, 성형공정기술에 대한 기초지식이 부족하다는 단점을 가지고 있다. 하지만 경량화와 고강도 제품을 추구하는 추세에 따라 하이드로포밍에 대한 지속적인 연구가 진행되고 있다.^(9~12)

본 연구에서는 비교적 간단한 하이드로포밍 공정을 대상으로 기초연구를 수행하였다. 이 공정에서는 원통형 튜브를 축방향으로 압축하며 동시에 수압을 가하여 튜브 중앙부위를 확관한다. 축방향 압축속도와 수압이 적절히 조절되지 않으면 튜브는 축방향으로 주름이 잡히거나 과대하게 확

* 홍익대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 홍익대학교 기계·시스템디자인공학과

E-mail : jjpark@wow.hongik.ac.kr

TEL : (02)320-1637 FAX : (02)322-7003

관되어 버스팅(bursting 또는 crack)이 발생하게 된다. 이러한 현상을 규명하기 위하여 다음과 같은 연구를 수행하였다. 첫째, 튜브의 용접부와 비용접부의 기계적 성질과 미세조직을 파악하였다. 둘째, 판재 성형해석 전용 프로그램인 PAM-STAMP와 강소성 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM을 이용하여 여러 가지 조건하에서 튜브의 변형을 해석하였다. 셋째, 성형 중 튜브의 버스팅 현상을 분석하기 위하여 시편의 두께 분포 측정과 유한요소해석을 수행하였다. 특히 유한요소 해석에 필요한 튜브의 유동응력을 구하기 위하여 인장실험 외에 링 측방 압축실험(ringside-pressing)을 수행하였다.

2. 튜브의 물성치

2.1 인장실험

본 연구에서 사용된 튜브는 기계구조용 강관인 STKM 12A이며 화학조성은 Table 1에 나타내었다. 하이드로포밍에서 발생하는 튜브의 불균일한 변형에 대한 이해와 이에 대한 유한요소해석을 수행하기 위해서는 튜브의 여러 위치에서의 기계적 성질을 파악하여야 한다.

Fig. 1에 나타낸 시편 채취 위치는 다음과 같다: (1) 용접선의 반대 부위가 표점거리인 원주방향 시편, (2) 용접선이 표점거리에 포함되는 원주방향 시편, (3) 용접선이 표점거리에 포함되는 축방향 시편, (4) 용접선으로부터 90° 회전된 축방향 시편, (5) 용접선으로부터 180° 회전된 축방향 시편, (6) 용접선으로부터 270° 회전된 축방향 시편. 이 위치에서 ASTM B 557M 표준규격의 인장시편을 방전 와이어 절단기(EDM wire cutter)를 사용하여 채취하였다. 원주 방향으로 채취된 시편은 평편하게 펴서 사용하였다. 이 때 발생하는 변형을 해석하여 본 결과 인장시편 표점거리 중심부의 상하표면만 유효변형률이 약 7.3%로 나타났으며, 이 표면을 제외한 부분에서는 0으로 나타나는 것을 알 수 있었다; 이에 대한 추가적인 설명은 2.2장에 있다. 이러한 해석결과로부터 평편하게 펴진 시편에는 예비변형이 거의 없는 것으로 간주하여 인장실험을 수행하였다.

인장실험으로부터 구한 유동응력 곡선은 Fig. 2에, 측정된 항복강도, 인장강도, 연신률은 Table 2

Table 1 Chemical composition of STKM 12A

C	Si	Mn	P	S
0.20	0.35	0.60	0.040	0.040

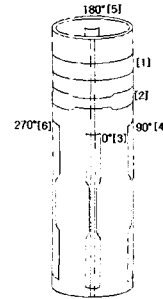


Fig. 1 Locations of specimens

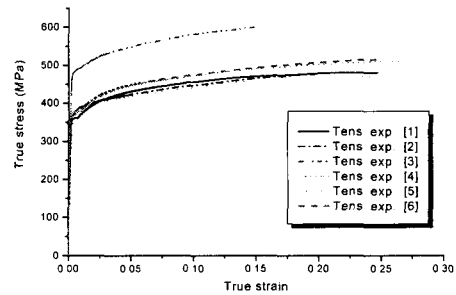


Fig. 2 Flow curve from tensile test

Table 2 Mechanical properties

	항복강도	인장강도	연신율
No. 1(원주방향: 용접선반대면)	362.9MPa	470.3MPa	24.3%
No. 2(원주방향: 용접선면)	361.6MPa	456.4MPa	19.6%
No. 3(길이방향: 용접선0도면)	476.6MPa	553.3MPa	15.2%
No. 4(길이방향: 용접선90도면)	372.9MPa	496.8MPa	24.7%
No. 5(길이방향: 용접선180도면)	358.3MPa	480.8MPa	24.7%
No. 6(길이방향: 용접선270도면)	371.7MPa	503.6MPa	26.8%

에 나타내었다. 시편 (1)과 (2)의 기계적 성질을 비교하여 보면, 항복강도와 인장강도는 거의 유사하나, [2]의 연신률이 4.7% 작게 나타났다. 즉, 용접선은 원주방향으로의 강도에는 거의 영향을

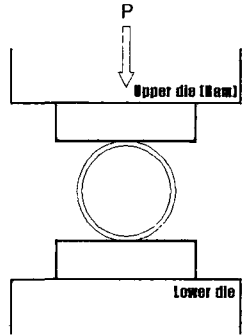


Fig. 3 Ring side-pressing

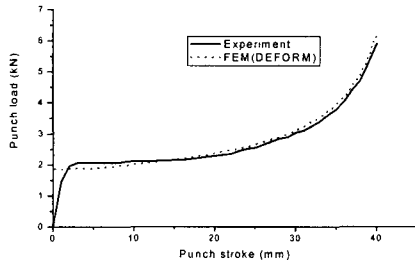


Fig. 4 Flow curve from experiment vs. simulation

미치지 않으나 원주방향으로의 연신률에는 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 시편 (3), (4), (5), (6)의 기계적 성질을 비교하여 보면 (3)이 (4), (5), (6)에 비하여 항복강도와 인장강도는 높으나 연신률은 9-10% 낮게 나타났다. 즉, 용접선으로의 강도와 축방향으로의 연신률에 모두 영향을 크게 미치고 있음을 알 수 있다. 전체적으로 보면 시편 [2]는 낮은 연신률을, 시편 [3]은 높은 항복강도와 인장강도, 낮은 연신률을 나타내었다.

2.2 링 시편의 축방 압축실험

일반적으로 부피재료(bulk material)의 유동응력은 압축실험을 통하여 구하는 반면, 박판재료(sheet material)의 유동응력은 인장실험을 통하여 구한다. 하지만 인장실험에서는 넥킹 발생 이후의 값을 정확하게 구하기 어렵다. 본 연구에서 사용한 튜브는 두께가 2.6mm로써 비교적 두꺼우므로 인장실험과 더불어 압축실험을 수행할 수 있었으며, 따라서 보다 넓은 변형률 범위에서 유동응력을 구할 수 있었다. 즉, 튜브를 원주방향으

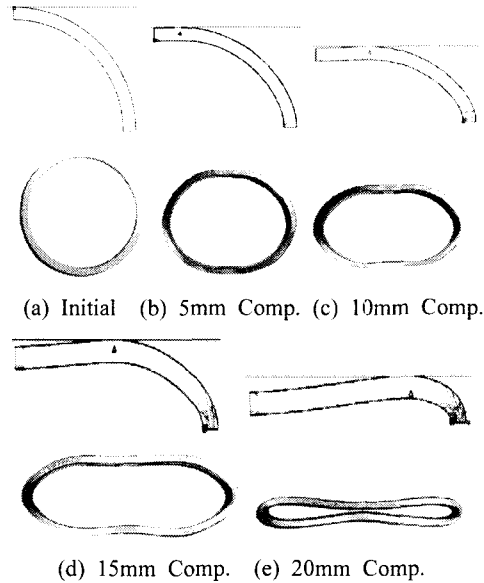


Fig. 5 Comparison of test and simulation

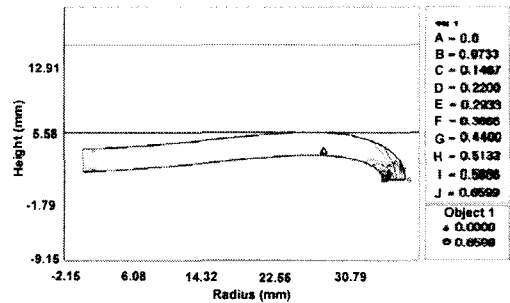


Fig. 6 Distribution of effective strain

로 절단하여 링 시편을 만들고, Fig. 3과 같이 이 시편을 축방에서 압축하는 실험을 수행하였다.

이 실험으로부터 구한 하중-변위 선도에 링 축방 압축의 유한요소해석으로부터 구한 하중-변위 선도를 맞추었다. 이 방법을 몇 차례 반복하면서 유동응력을 수정하였으며, 최종적으로 실험으로 구한 하중-변위 선도에 잘 맞는 유동응력을 도출할 수 있었다. Fig. 4에 최종 수정된 유동응력을 사용하여 구한 하중-변위 선도와 실험 결과를 비교하였다.

위와 같은 과정 중 유한요소해석으로 예측된 변형 모양과 실험결과를 Fig. 5에 비교하였다. 이 경우에 링의 변형은 좌우 및 상하 대칭을 이루므로 유한요소해석에서는 링의 사분의 일 부분만

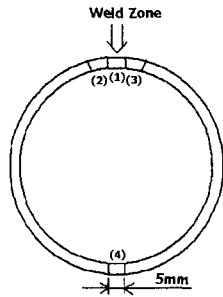


Fig. 7 Locations of microstructure

을 사용하였다. 실험과 예측 결과가 서로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 압축 최종 단계(20mm 압축)에서 링의 유효변형률 분포를 Fig. 6에 나타내었는데, 굽힘이 심하게 발생하는 오른쪽 부위의 표면에 7.3% 정도 발생하며, 나머지 부분에서는 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 특히 튜브에서 원주방향으로의 인장시편을 채취할 경우에는 우선 링 형상의 시편을 채취한 후 축방 압축을 하고, 이를 다시 평편하게 펴서 인장시편을 만들게 된다. Fig. 6에 나타나 있는 시편의 왼쪽 부위가 인장시편의 표점거리로 사용되는데, 이 부위에서의 변형률은 매우 작게 발생하였으므로 인장실험에서 얻은 유동응력에 특별한 수정을 고려할 필요가 없음을 알 수 있다.

2.3 미세조직 관찰 및 경도 측정

본 연구에서 사용한 튜브의 제작에는 먼저 판재를 롤 포밍(roll forming)으로 튜브 형태로 말고 전기저항용접을 사용하였다. 용접시 접합을 용이하게 하기 위하여 압력을 가하므로 용융 부분은 밖으로 밀려나고 열영향부(HAZ; heat affected zone)가 용접선 또는 접합부위를 이루게 된다. 대개 이 용접선은 접합 후 바로 수냉된다. 따라서 튜브 내 재료의 위치에 따라 미세조직이 다르게 되며, 따라서 Table 2의 불균일한 기계적 성질이 나타나게 된다.

광학현미경으로 미세조직을 관찰하기 위하여 Fig. 7과 같은 위치에서 시편을 채취하였다: (1) 용접선, (2) 용접선의 좌측 1mm 위치, (3) 용접선의 우측 1mm 위치, (4) 용접선의 반대부위. 관찰 결과는 다음과 같다. 위치 (1)에서는 Fig. 8(a)와

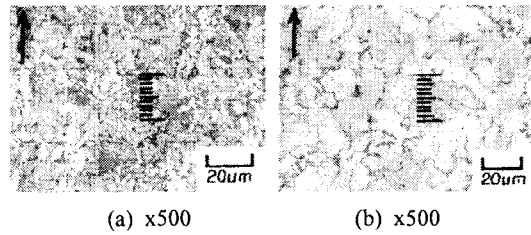


Fig. 8 Microstructure of ring(Arrows indicate the axial direction): (a) Weld zone(1), (b) Other zones (2), (3), (4)

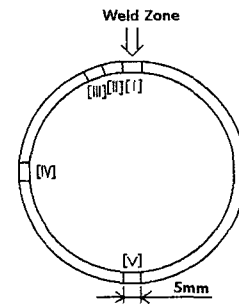


Fig. 9 Locations of measurement

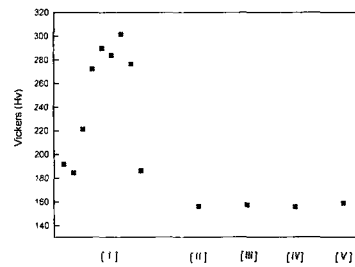


Fig. 10 Distribution of Vickers hardness

같은 베이나이트 조직이 발생하였다. 용융 부분의 최고 온도는 약 1450℃인데, 위에서 언급한 바와 같이 용융된 부분은 튜브 접합시 압력에 의해 외부로 밀려나게 되고, 대신 열영향부가 접합되면서 이러한 베이나이트 조직이 관찰되는 것으로 판단된다. 나머지 위치 (2), (3), (4)에서는 거의 동일하게 Fig. 8(b)와 같은 퍼얼라이트와 α-페라이트 조직이 관찰되었다.

Fig. 9에 나타난 순서로 튜브 소재의 원주방향으로의 경도 분포를 비커스 경도기를 이용하여 측정하였다. Fig. 10에 나타난 것과 같이 용접선

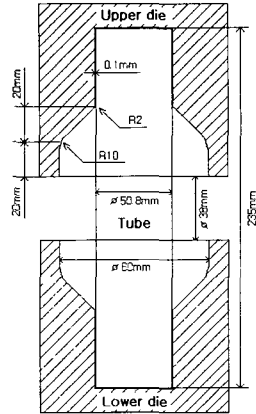


Fig. 11 Dimensions of initial tube and die

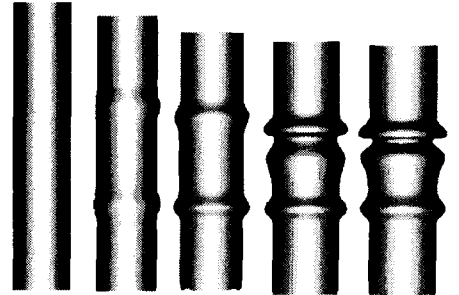
에서 301.5로 가장 높게 나타났고, 좌우 방향으로 급격히 낮아져 옆 부위에서는 180~250 정도로, 그 외의 부위에서는 158로 나타났다. 따라서 이러한 정도 분포를 갖는 튜브를 확관할 경우, 용접선에서는 변형이 거의 발생하지 않지만 용접선에서 일정 거리의 위치에서는 인장 변형이 심하게 발생하여 넥킹으로 또는 버스팅 현상으로 발달될 것으로 예측된다.

3. 튜브 확관 변형에 대한 분석

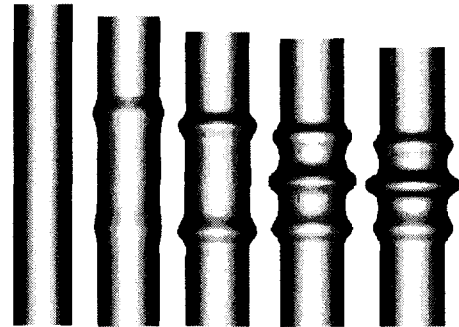
3.1 변형해석을 위한 모델

본 연구의 대상인 하이드로포밍 튜브 확관 공정은 다음과 같다. 원통형 튜브를 급형 내부에 장착하고 튜브 내로 물을 채워 일정한 압력에 도달하면 상부와 하부 급형이 동일속도로 하강과 상승하면서 튜브를 압축한다. 급형의 동작에 따라 물의 양을 조절하여 적절한 압력을 튜브 내에 작용시켜 중앙부를 확관시킨다. 만약 압력이 부족하면 좌굴현상에 의하여 튜브에는 주름이 잡히게 된다. 반면에 압력이 과다하면 확관이 지나쳐 튜브의 중앙부가 상부와 하부 급형 사이에 끼우게 되거나, 경우에 따라서는 튜브가 터지는 현상(또는 버스팅)이 발생하게 된다. 따라서 이 공정에서 적절한 압력이란 좌굴은 방지하되 중앙부에 과대한 확관은 발생시키지 않는 압력을 의미한다.

Fig. 11에 튜브와 급형의 치수를 나타내었다.



(a) No liquid in the tube



(b) Constant volume of liquid in the tube



(c) Excessive volume of liquid in the tube



(d) Controlled volume of liquid in the tube

Fig. 12 Varying simulation results of hydroforming

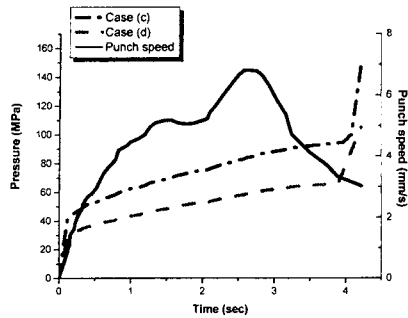


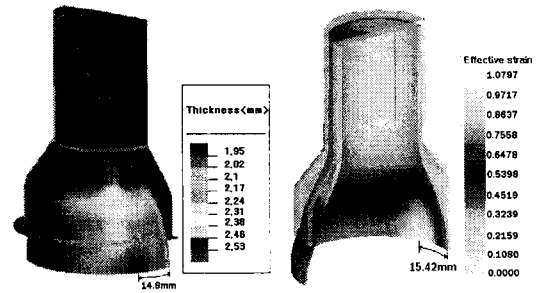
Fig. 13 Pressure and punch-speed curve

초기 튜브의 외부직경은 50.8 mm이며 길이는 235 mm, 두께는 2.6 mm이다. 급형과 튜브와의 간격(또는 갭)은 0.1 mm이다. 성형된 튜브는 길이가 197 mm, 확장된 중앙부의 외경은 80 mm이다. 이러한 성형과정에서 튜브에 발생하는 변형을 해석하기 위하여 상용 유한요소해석 프로그램인 PAM-STAMP를 이용하였다. 용접부와 변형의 상하 및 좌우 대칭성을 고려하여 튜브의 4분의 1을 모델링 하였다. 이 모델의 유한요소해석을 위하여 길이방향으로 118개의 유한요소를, 원주방향으로 20개의 유한요소를 사용하였다. 사용한 유한요소는 4절점, 감차적분을 적용한 쉘요소이며 두께방향으로 3개의 적분점을 설정하였다.

3.2 유한요소해석

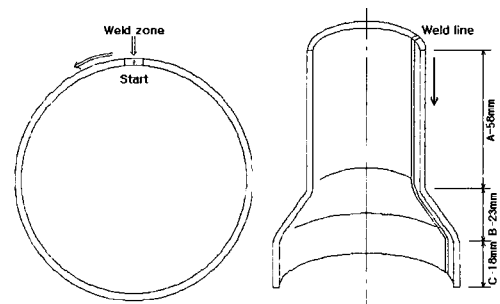
위에서 언급한 인장실험과 링 축방압축 실험으로 구한 기계적 물성치를 사용하여 유한요소해석을 수행하였으며, 결과로 여러 공정조건에서 발생하는 변형의 차이점을 분석할 수 있었다. 해석에서 사용한 여러 공정조건은 다음과 같다: (a) 튜브만 압축한 경우(튜브내 유체 없음), (b) 튜브내 유체를 유지하고 압축한 경우, (c) 과도한 유압을 적용한 경우, (d) 적절한 유압과 급형속도를 적용한 경우.

해석 결과는 Fig. 12 (a)~(d)에 나타내었다. (a)는 튜브만 압축한 경우의 결과인데, 튜브내에 유체가 없으므로 튜브 벽에 발생한 축방향 압축력에 의하여 좌굴이 발생하였으며 심한 주름으로 나타났다. (b)는 튜브 내에 일정한 유체를 유지하였으나, 튜브가 축방향으로 압축되면서 중앙부가 원활히 확장되지 못하였다. 따라서 압축시 튜브



(a) PAM-STAMP (b) DEFORM-3D

Fig. 14 Results of FEM simulations



(a) Circumferential direction (b) Axial direction

Fig. 15 Directions of thickness measurement

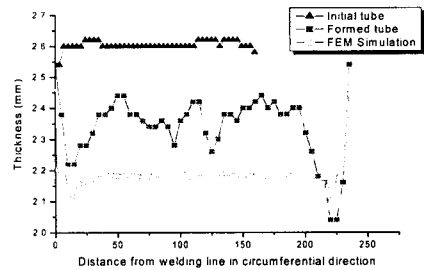


Fig. 16 Comparison of thickness distribution between measurement and prediction (Circumferential direction)

내의 유압을 증가시켜야 좌굴을 방지할 수 있다는 것을 알 수 있다. (c)는 튜브 내의 유압이 너무 과도하게 작용하여 튜브의 중앙부가 조기에 너무 확장되었으며 따라서 상부와 하부의 급형이 닫히면서 이 부분이 접히는 현상을 보여주고 있다. (d)는 급형의 변위에 대한 적절한 압력을 가하여 결함없이 성형된 모양을 보여주고 있다.

Fig. 13은 Fig. 12의 성형해석에 사용된 급형의 속도선도 및 (c)와 (d)에 사용된 압력선도를 나타낸 것이다. Fig. 14에는 상용 유한요소해석 프로그램인 PAM-STAMP와 DEFORM-3D를 사용하여 구한 두께 분포와 유효변형률을 보여주고 있다. (a)에 나타난 두께 분포를 보면 용접선은 2.38 mm, 용접선에서 원주방향으로 14.8 mm 떨어진 위치에서 1.95 mm로 가장 얇아진다. (b)를 보면 용접선은 2.38mm, 용접선에서 15.4 mm 떨어진 위치에서 1.08로 가장 높은 변형률을 나타냈다. 두 프로그램에서 예측된 두께 분포 및 변형률을 보면 성형된 소재의 가장 얇아지는 곳의 위치는 거의 일치하고 있다.

3.3 성형중 발생한 두께 변화

성형된 튜브에 발생된 변형을 측정하기 위하여 Fig. 15에 도시된 것과 같은 위치에서 두께를 측정하였다. (a)는 중앙부 확관된 부위를 원주방향으로 절단하고 용접선을 시점으로 시계반대방향으로 측정하였다. (b)는 성형된 튜브를 축방향으로 절단하고 튜브의 상부에서 아래 방향으로 측정하였으며 튜브의 상단부를 (A), 경사부를 (B), 확관부를 (C)로 구분하였다.

Fig. 16에는 초기 튜브와 성형된 튜브의 확관된 중앙부 원주방향으로의 두께분포 측정결과와 PAM-STAMP를 사용하여 구한 해석결과를 비교하였다. 초기 튜브의 두께는 용접선 부위만 2.54 mm이며, 나머지 부위는 거의 일정하게 2.6 mm로 측정되었다. 성형 후 튜브의 두께를 보면 용접선 부위는 2.54 mm로 변함이 없고, 용접선으로부터 약 15 mm 떨어진 위치에서 2.04 mm로 가장 얇게 나타났으며, 그 외의 부위에서는 평균 2.36 mm로 측정되었다. 유한요소해석 결과를 보면 측정 결과보다 전반적으로 작게 예측되었으나, 가장 얇아지는 지점은 용접선 좌우 15mm의 위치로 나타났으며, 이는 측정결과와 일치하고 있다.

Fig. 17에는 성형된 튜브의 용접선 옆 15 mm 부위와 용접선 반대편 부위의 축방향 두께 측정 결과를 비교하였다. (A) 부분에서는 평균 2.62 mm으로 두 부위가 거의 같게 나타났지만, (B) 부분의 첫 번째 코너에서는 용접선 부위가 2.88 mm, 반대편은 2.88 mm로 나타났다. (B) 부분에서는 아래로 갈수록 두께가 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 (c)부분에서도 계속적으로

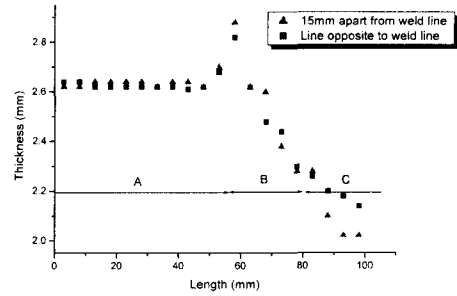


Fig. 17 Thickness distribution(measurement)

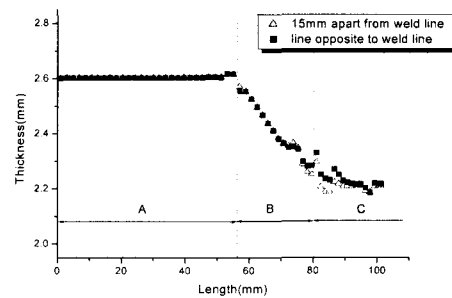


Fig. 18 Thickness distribution(PAM-STAMP)

두께가 감소하여 용접선 부위는 최하점에서 2.02mm로 가장 얇게 나타났고, 반대편 부위에서는 2.14 mm로 나타났다. Fig. 18은 축방향으로의 FEM 해석결과를 나타낸 것으로 (A) 부분에서는 2.6mm의 초기상태를 유지하였고 (A)와 (B) 부분이 만나는 코너에서는 2.62mm로 약간 두꺼워지는 것으로 나타났다. (B) 부분과 (C) 부분에서는 확관으로 인해 두께가 급격히 감소하는 것으로 나타났다.

4. 넥킹 발생

튜브 확관 성형에서 압력이 과대하게 적용되면 Fig. 19와 같은 크랙(또는 버스팅)이 발생한다. 발생위치는 용접선에서 원주방향으로 약 15~17mm 떨어진 지점이다. 이러한 크랙 발생 현상을 규명해보기 위하여 PAM-STAMP 해석결과를 분석하여 보았다.

Fig. 20에 급형의 변위에 따른 중앙부 확관부위의 원주방향으로의 두께 예측결과를 나타내었다.



Fig. 19 Bursting during expansion

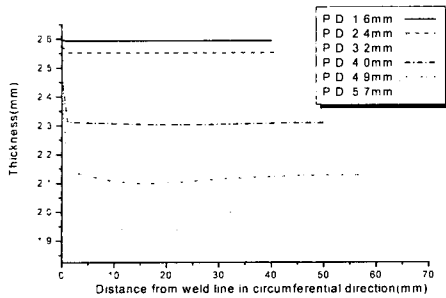
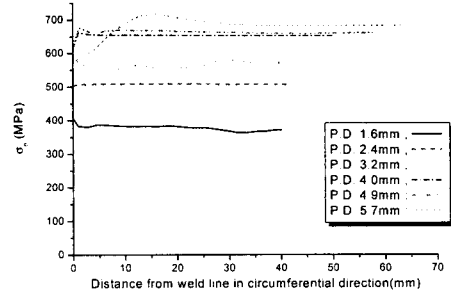


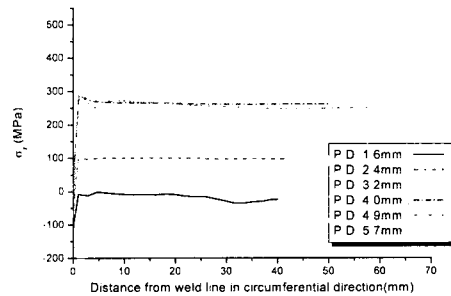
Fig. 20 Thickness distribution vs. Punch displacement(PAM-STAMP)

변위가 4.9 mm에 도달할 때까지는 두께는 균일하게 얇아지지만 변위가 5.7 mm에 이르러서는 불균일한 두께 분포를 나타내며 용접선에서 약 17 mm 떨어진 위치에서 1.9 mm 이하로 얇아지는 결과를 볼 수 있다. Fig. 21에는 금형의 변위에 따른 중앙부 환관부위의 응력 예측결과를 도시하였다. 우선 (a)를 보면 원주방향 응력은 모두 양의 값을 나타내며 변위가 증가할수록 크기가 균일하게 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 변위가 5.7 mm에 도달하게 되면 용접선에서 약 17 mm 떨어진 위치에서 약 700 MPa로 가장 큰 값을 나타내며 불균일한 분포를 나타내고 있다. (b)를 보면 금형의 변위가 1.6 mm에 도달할 때까지는 음의 값을 나타내다가, 이 후로는 양의 값을 보이고 있다. 변위가 5.7 mm에 도달하게 되면 17 mm 떨어진 위치에서 약 400 MPa로 가장 큰 값을 나타내고 있다.

따라서 본 연구에서 관찰된 크랙 발생의 원인



(a) Circumferential stress



(b) Axial stress

Fig. 21 Stress distribution vs. Punch displacement (PAM-STAMP)

은 다음과 같이 판단된다: (1) 튜브의 용접부와 나머지 부위의 상이한 기계적 성질, (2) 금형의 변위에 대한 압력이 과다하게 적용되어 환관부에 이축 인장응력(biaxial tension)이 발생, (3) 이로인하여 특히 용접선 좌우 15~17 mm 위치에 넥킹이 발생하고 크랙으로 진전.

5. 결론

본 연구에서는 튜브 환관 공정을 대상으로 하이드로포밍에 대한 기초연구를 수행하였다. 튜브에 불균일하게 분포된 기계적 성질을 분석하기 위하여 인장실험, 미세조직 관찰, 경도실험을 수행하였다. 특히 링 축방압축 실험을 수행하여 보다 넓은 변형률 범위에서의 유동응력을 도출할 수 있었다. 상용 유한요소해석 프로그램을 사용하여 여러 가지 공정조건에 튜브의 환관 변형에 미치는 영향을 파악하였으며, 크랙의 발생원인을

분석하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 튜브의 제작시 변형, 가열 및 냉각 등으로 인하여 기계적 성질이 불균일하게 나타난다. 성형 중 발생하는 변형특성을 파악하기 위해서는 특히 항복강도와 연신률의 불균일성을 파악하여야 한다.

(2) 원주방향의 인장시편은 링 형상의 시편을 채취하고 평편하게 펴서 사용할 수 있다. 그 이유는 펴는 과정에서의 변형은 표점거리의 기계적 성질에 거의 영향을 미치지 않기 때문이다.

(3) 용접선의 미세조직은 베이나이트로써 주로 열영향부로 이루어져 있음을 알 수 있었다.

(4) 튜브 확관에서 중요한 공정변수는 금형의 변위에 따른 압력이다. 즉 압력이 과다하면 크랙이, 과소하면 주름이 잡히는 현상이 발생된다.

(5) 결합이 없이 성형되는 경우에도 중앙부 확관부위의 두께는 일정하지 않다. 즉 용접선에서 좌우로 약 15~17mm 떨어진 곳에서 가장 얇게 나타나는데, 원인은 이 위치에서 가장 큰 이축인장응력이 발생하기 때문이다.

(6) 본 연구에서와 같이 용접선으로 인한 불균일한 기계적 성질이 존재하게 되면 중앙부 확관부에서 넥킹이 발생하게 되나, 공정조건을 조절하여 크랙으로 진전되는 것은 방지할 수 있다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터(한국과학재단; ERC/NSDM)에서 지원하는 “액압 및 미소 성형법에서의 성형성에 관한 연구” 과제로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Zhang, S.H., 1999, "Developments in Hydroforming," *Journal of Materials Processing Technology* 91, pp. 236~244.
 (2) Thiruvardchelvan, S. and Lewis, W., 1999, "A Note on Hydroforming with Constant Fluid Pressure," *Journal of Materials Processing Technology* 88, pp. 51~56.
 (3) 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* 98, pp. 224~231.
 (4) Dohmann, F. and Hartl, Ch., 1997, "Tube Hydroforming - Research and Practical Application," *Journal of Materials Processing Technology* 71, pp. 174~186.
 (5) Nader Asnafi, Anders Skogsgardh, 2000, "Theoretical and Experimental Analysis of Stroke-Controlled Tube Hydroforming," *Materials Science and Engineering*, A279, pp. 95~100.
 (6) Kim, J. S., Cho, Y. M., Noh, I. H. and Nho, J. H., 2000, "Development of Automotive Parts using Hydroforming Technology," *Sheet Metal Forming 2000*, pp. 50~58.
 (7) Han, S. S. and Park, K. C., 2000, "Development of Formability Test for Tube Hydroforming," *Trans. of Materials Processing*, Vol. 9, No. 6, pp. 631~637.
 (8) Sohn, S. M., Lee, M. Y. and Lee, S. Y., 2000, "A Study on the Hydroforming Technology of an Automotive Bumper Rail," *Trans. of Materials Processing*, Vol. 9, No. 6, pp. 561~566.
 (9) Choi, Y. H., Heo, Y. M., Kim, H. Y. and Seo, D. G., 1999, "Weld-Line Dislocation Investigations for the Deep Drawing Process of Welded Sheet," *Trans. of the KSME, A*, Vol. 23, No. 8, pp. 1346~1352.
 (10) Baek, U. B., Yoon, K. B., Suh, C. M. and Lee, H. M., 2000, "An Experimental Study on High Temperature Material Properties of Welded Joint," *Trans. of the KSME, A*, Vol. 24, No. 12, pp. 3096~3103.
 (11) Kim, Y. S., Cho, H. S., Park, C. D., Kim, Y. S. and Jo, Y. J., 2000, "Evaluation of Tube Hydroformability," *Trans. of Materials Processing*, Vol. 9, No. 6, pp. 604~614.
 (12) Park, B. C., Lee, W. S., Kim, Y. S. and Kim, Y. S., 2000, "Development of Formability Evaluation Method of Tube for Tube Hydroforming Process," *Sheet Metal Forming 2000*, pp. 115~123.