

# Hydroforming을 위한 Weld line 최적배치에 관한 연구

이승희\*, 전병희\*\*, 오수익\*\*\*

## A Study on the Weld Line Position Optimization for Hydroforming

Seung Hee Lee\*, Byung Hee Jeon\*\*, Soo Ik Oh\*\*\*

### Abstract

Hydroforming is a metal forming process that enables circular metal tubes to be formed into the parts with the complex cross sections along the curved axial direction. Recently, this hydroforming process is largely used for the production of the automotive parts. This paper presents the results of tube bending and hydroforming simulations in cases of the varying weld line positions of the tube. Ten cases of prebending and hydroforming simulations are carried out to find the optimal weld line position.

**Key Words :** Hydroforming(하이드로포밍), Optimal position(최적위치), Simulation(해석), Axial path(축 방향), Weld line position(용접선 위치)

## 1. 서 론

최근의 자동차 공업의 발전 추세는 소형·경량화, 고성능화라는 인적 요구와 더불어 자동차 부분에서 속도, 연비 등 많은 발전을 가져왔다. 이러한 추세는 선진외국에서는 부품의 경량화 및 공정감소를 위하여 자동차 부품의 하이드로포밍(hydroforming), 레이저 용접판재를 이용한 성형 및 고장력 강판의 적용이 그 사례이다.<sup>1)·2)·3)</sup>

하이드로포밍을 이용한 기술은 기존 내·외판으로 구성된 판재성형 제품을 튜브를 이용하여 하나의 공정으로 생

산함으로써 생산이 용이하고, 제품의 강성이 향상되는 장점이 있다. 하이드로포밍 기술을 이용할 경우의 장점<sup>4)</sup>을 열거하면 다음과 같다.

- (1) 두께분포가 균일한 제품을 얻을 수 있다.
- (2) 성형 후 재료의 가공경화 영역이 좁다.
- (3) 강성 및 가격 경쟁력 향상된다.
- (4) 정밀한 제품의 생산이 가능하다.
- (5) 부품의 개수 감소, 경량화가 가능하다.

그밖에 하이드로포밍을 이용한 생산 시의 열 영향부의

\* 강원대학교 대학원  
\*\* 인덕대학 기계설계과  
\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부

존재로 용접선의 위치는 성형성에 많은 영향을 끼치므로 이에 대한 최적배치를 찾기 위하여 유한요소법프로그램을 이용하여 성형해석을 하였다. 하이드로포밍으로 제품을 생산하기 위해서는 제품의 선정, 프레스 용량 결정, 가압 장치설계, 시스템 통합(integration) 등의 하드웨어 적인 분야와 한 공정에서 생산될 제품의 개수, 가공압력, 금형 결합력, 유입량등의 성형인자에 대한 연구가 필요하다.<sup>15,16,17)</sup>

본 연구에서는 하이드로포밍<sup>11,18,19)</sup> 성형법을 적용하여 승용차용 서브프레임(subframe)의 성형공정 및 용접부 위치에 따른 공정특성을 파악하여 성형성이 양호하도록 용접선 배치를 최적화 하였다.<sup>11)</sup> 이는 용접선 배치에 따라서 제품의 성형 성패가 결정되기 때문에 제품생산에 있어 중요한 성형인자가 된다.

## 2. 본 론

### 2.1 재료시험

본 연구에서는 튜브 재료로 사용되는 STKM 11A를 물포밍 후에 파이프로 성형된 제품을 이용하여 Fig. 1에 나타난 바와 같이 인장 시험편규격 ASTM (American Society for Testing and Materials) B 557M-84를 사용하였다.

시험은 와이어 방전가공에 의하여 튜브로부터 채취하였으며 소재의 변형률-응력 관계는  $\sigma = K(\epsilon + \epsilon_0)^n$ 으로 표현되는 Krupkowsky의 경화식으로 근사화 하였다. 시험을 행한 후 평균을 통해 구한 기계적 성질은 Table 1과 같다.

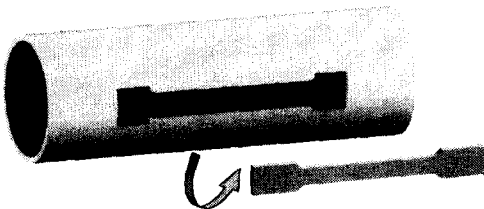


Fig. 1 Test specimen of tube

Table 1 The properties of STKM 11A

|                 |                         |
|-----------------|-------------------------|
| Density         | 7,800 Kg/m <sup>3</sup> |
| Young's modulus | 206,000 MPa             |
| Poisson's ratio | 0.3                     |
| Yield stress    | 215.1 MPa               |
| K               | 468.3 MPa               |
| n               | 0.206                   |
| $\epsilon_0$    | 0.02186                 |

### 2.2 튜브의 벤딩

하이드로포밍을 위하여서는 일반적으로 CNC, Die, Roll, 3-Point bending 등을 이용하여 소재를 원하는 형상으로 성형한다. 본 연구에서 사용된 승용차용 서브프레임은 소재를 “ㄷ”자 형태로 서브프레임으로 성형하기 위해서 두번의 CNC벤딩 작업과 한번의 성형 작업을 통하여 완성되도록 가공법을 선정하였다.<sup>11)</sup> 본 해석모델에 사용된 서브프레임은 두번의 CNC 드로우 벤딩기를 통한 예비성형이 필요하다.<sup>12)</sup> Fig. 2는 벤딩시 필요한 tool과 소재의 초기 위치를 유한요소 모델링한 것이다.

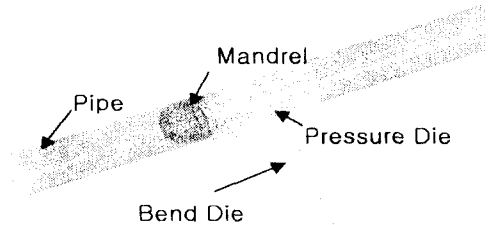


Fig. 2 Initial setting of tools

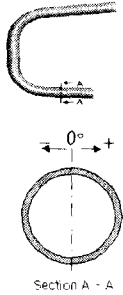
### 2.3 경계조건 및 용접부 모델링

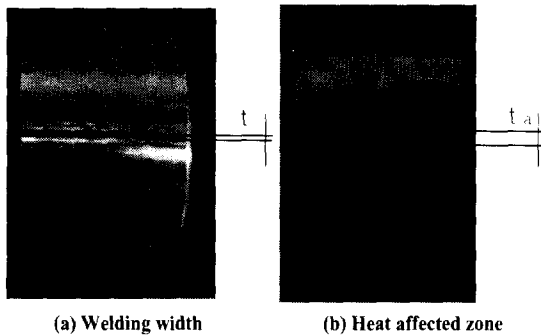
성형시 용접선의 위치에 따른 튜브의 거동을 살피기 위하여 아래와 같이 해석의 종류를 분류하였다. 기준선을 기점으로 시계방향을 “+”, 반 시계 방향을 “-”로 하여 10° 간격으로 용접선의 위치를 변경하면서 10가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

용접부의 모델링은 위의 Fig. 3에서 보이듯이 실제 사용되는 튜브를 측정된 결과를 사용하였고, 용접부의 물성치는 모재에 비하여 2~2.5배 높게 나타났다. 그리고 용접시에 발생하는 고열로 인하여 Fig. 3(b)에 보이듯이 열영향부(heat affected zone,  $t_a$ )가 존재하게 된다. 열 영향부는 용접선 주위가 경화되어 연신율이 감소하게 되며 이는 제품의 성형성에 영향을 주게 된다. 용접부 모델링을 하기 위하여 micro Vickers 경도시험을 통하여 실제의 값을 측정하여 사용하였으며 이 결과는 Fig. 4에 나타내었다.

벤딩 시의 가공 경계조건은 맨드릴과 압력금형(pressure die)은 고정되어 있고, 굽힘 금형(bend die)은 중심축을 중심으로 회전하여 원하는 각도만큼의 벤딩을 하였으며 마찰 계수는 0.15를 사용하였다.

Table 2 FE analysis cases

|         | Angle | Weld Line Position  |
|---------|-------|---|
| case 1  | 0°    | Without Weld Line   |
| case 2  | 0°    |  |
| case 3  | +10°  |   |
| case 4  | +20°  |   |
| case 5  | +30°  |   |
| case 6  | +40°  |   |
| case 7  | -10°  |   |
| case 8  | -20°  |   |
| case 9  | -30°  |   |
| case 10 | -40°  |   |



(a) Welding width (b) Heat affected zone

Fig. 3 Weld line of tube

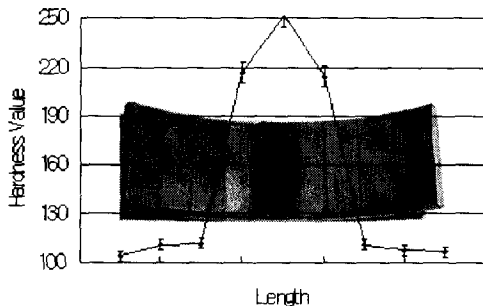


Fig. 4 Vickers hardness value

### 2.4 벤딩해석 결과

Table 2를 기초로 하여 벤딩해석을 한 결과 아래 Fig. 5에 보이듯이 단면변화가 가장 심한 A, B에 해당하는 곳의 두께 분포를 Fig. 6, Fig. 7에 나타내었다.

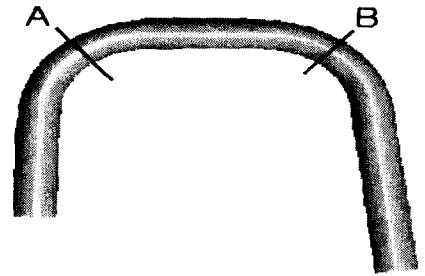


Fig. 5 Measurement positions

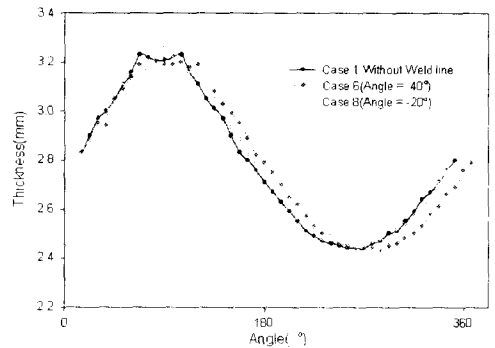


Fig. 6 Thickness distribution of section A

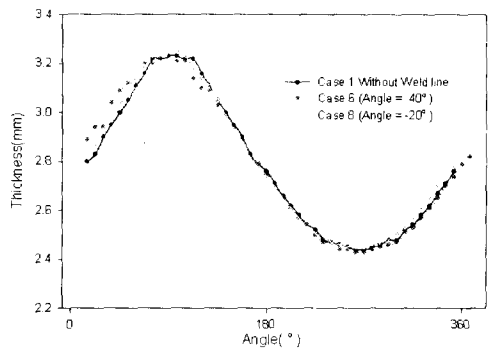


Fig. 7 Thickness distribution of section B

위의 Fig. 6과 7에 보이듯이 용접선을 포함한 모델이 포함하지 않은 모델에 비하여 두께가 두꺼워진 것을 볼 수 있다. 즉, Fig. 4에서 측정된 용접부와 열영향부는 모재보다 소재의 항복응력이 크기 때문에 적게 성형이 되었고, Table 3에 보이듯이 case 1이 나머지 경우에 비하여 두께 변화가 작았음을 알 수 있었으며, Fig. 8은 이들의 결과 도식화 한 것이다.

Table 3 Analysis results

|         | Thickness (mm) |        | Difference (mm) |
|---------|----------------|--------|-----------------|
|         | Outside        | Inside |                 |
| Case 1  | 2.48           | 3.16   | 0.68            |
| Case 2  | 2.48           | 3.18   | 0.70            |
| Case 3  | 2.49           | 3.21   | 0.72            |
| Case 4  | 2.48           | 3.19   | 0.71            |
| Case 5  | 2.47           | 3.16   | 0.69            |
| Case 6  | 2.47           | 3.15   | 0.68            |
| Case 7  | 2.49           | 3.23   | 0.73            |
| Case 8  | 2.49           | 3.23   | 0.74            |
| Case 9  | 2.49           | 3.20   | 0.71            |
| Case 10 | 2.49           | 3.18   | 0.69            |

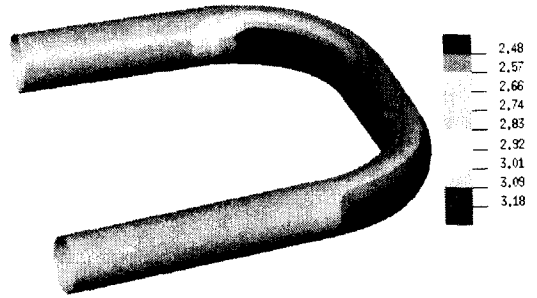


Fig. 9 Thickness distribution of tube

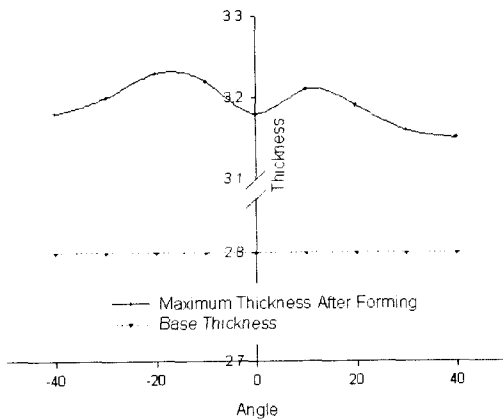


Fig. 8 Maximum thickness distribution of each position

벤딩시 소재가 바깥부분에는 인장 안쪽에는 압축을 받으나 중립면에서 소재의 이동이 없었기 때문이다. 두께분포 결과에서 볼 때 성형시 내부압력이 작용하게 되면 빠른 변형으로 인하여 내부곡률보다 외부곡률 부분에서 성형이 실패할 가능성이 높음을 의미한다. 이는 유한요소해석으로 튜브 재료의 성형성을 평가할 때 용접선을 포함한 모델링과 함께 해당되는 부위의 정확한 물성치를 사용하여야 함을 알 수 있다. 그리고 용접선이 인장모드가 발생하는 음의 방향(case 7, 8, 9, 10)으로 회전할수록 소재의 안쪽두께(내부곡률)는 용접선과 멀리 위치할수록 소재가 균일한 팽창을 하여 두께가 점점 얇아지는 현상을 볼 수 있다. 외부곡률 부분은 인장모드가 발생하는 부분으로서 용접선 주위의 경도가 높기 때문에 연신을 저하로 용접선

의 위치에 따라 두께 변화를 보이지 않는 것으로 나타났다. 반대로 용접선이 압축 모드가 발생하는 양의 방향(case 3, 4, 5, 6)으로 회전할수록 소재의 바깥쪽(외부곡률) 두께는 용접선과 멀리 위치하고 인장 모드가 발생하기 때문에 두께가 얇아지는 것을 볼 수 있다.

압축 모드가 발생하는 내부곡률 부분의 두께가 용접선의 회전각이 증가함에 따라서 얇게 나타났다. 이것은 소재의 기본적인 두께는 2.8mm로서 용접선의 회전각이 증가함에 따라 용접선 주위의 소재가 경도가 높기 때문에 압축모드가 발생하는 곳임에도 불구하고 두께가 얇게 나타났다.

이상의 튜브 벤딩 결과를 소재의 두께 분포측면에서 살펴보면 용접선의 위치는 압축모드가 발생하는 “+”방향보다는 인장모드가 발생하는 “-”방향으로 위치되는 case 8, 7, 9, 10, 3, 4, 2, 5, 6의 순서로 좋은 결과를 보였다.

### 2.5 성형시의 경계조건

본 연구에서는 성형 시 sequence제어를 사용하여 서브프레임을 해석하였으며 사용된 성형인자에 대한 제어 또한 sequence방법을 선택하였다.<sup>(12-13-14)</sup>

서브프레임의 단면 해석에 앞서 3-D해석에 사용될 성형인자의 크기를 시간에 따른 함수로 표현하기 위하여 제품의 확관율을 계산하였다. Fig. 10에서 보이듯이 전체적으로 제품의 기본 원주길이에 대한 성형후 원주길이 비(比)인 확관율이 최대 3.09%로서 값이 크지 않음으로 성형에는 어려움이 없을 것으로 예측된다. 그러나 고압이 아닌 sequence에 의한 제어로 인하여 확관율 최대값 및 최소값의 범위 차가 크므로서 3-D성형 시에는 성형인자들 사이에 상호 조정뿐만 아니라 금형과 소재의 초기 접촉점이 성형성공의 관건이라 할 수 있다.

3-D 해석은 2-D 단면 해석에서 찾아낸 성형인자를 기초로 하여 해석을 수행<sup>(15)</sup> 하였으며, 해석을 수행 할 때는 최종 제품의 형상에 따라 다음과 같이 상·하 금형 분할 선을 선택할 수 있을 것이다.

첫 번째, 파이프와 최초 접촉점을 기준으로 적은 확관율을 갖고 제품의 형상이 복잡하지 않을 때 중심선을 기준으로 분할 선의 위치를 위쪽과 아래쪽으로 구분할 수 있다.

두 번째, 확관율이 크며 파이프의 중심 축을 기준으로 원주 방향으로 고른 신장을 보이며 형상이 복잡할 때 중심선을 기준으로 위·아래로 대칭이 되게 분할하는 방법을 사용한다.

세 번째, 가장 일반적인 경우로서 제품의 확관율이 가장 적고 최종 제품의 형상이 비교적 단순할 때 분할선을 중심선상 위에 위치시킨다.

이외에, 위의 3가지 방법을 변형시키는 경우도 있는데 이는 제품의 형상과 확관율로서 결정한다.

제품의 성형은 다이의 상·하형이 완전히 닫히기(closing) 전에 튜브 내에 성형액체를 공급함으로써 시작된다.

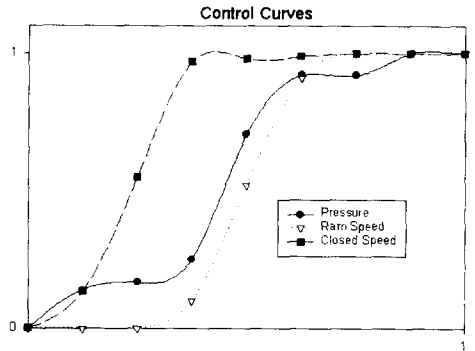


Fig. 11 Forming factors for FE analysis

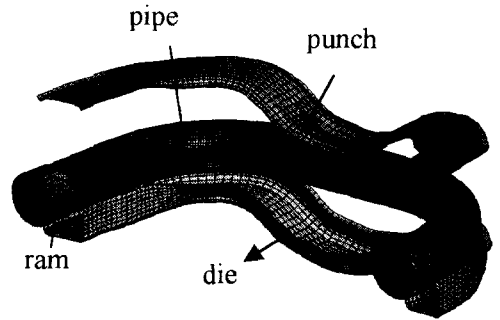
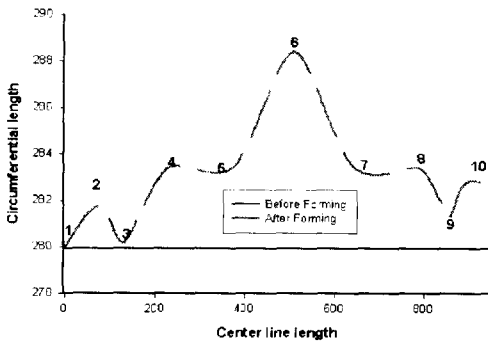
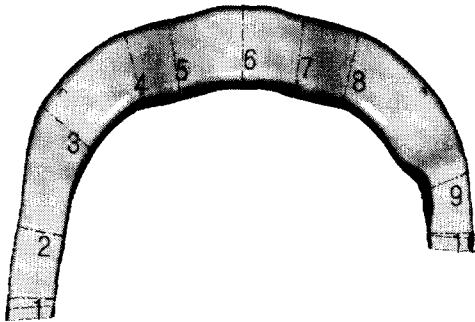


Fig. 12 Die shape and FE model



(a) Circumferential vs. center length



(b) Definition of section

Fig. 10 Circumferential length after forming

튜브내의 공기는 압축성 유체로서 성형유가 고압에 이르면 압축되어 압력 부족으로 인한 성형불량이 발생하게 된다. 그러므로 성형액체가 주입될 때 기포가 발생되지 않도록 유속을 조절하여야 한다.

1차 기밀작업을 종료한 후 상형 금형이 상·하 방향으로 이동함으로써 성형이 시작되며, 상부 금형은 하강하고 튜브 내 압력은 상승한다. 이 상태에서 램은 압력 상승으로 인한 튜브가 완전하게 기밀유지를 하지 않은 상태이다. 이때 튜브의 선단에 부착된 두개의 램이 블랭크의 끝에서 다이 내부로 이동하게 된다. 금형 내부의 압력이 상승함에 따라 캐비티 내의 제품이 성형되어 지는데 일반적으로 sequence 하이드로포밍의 내압은 100~1100bar 까지 순차적으로 증가한다. 성형을 위한 유한요소 모델과 각각의 성형인자들에 대한 관계를 Fig. 11과 12에 나타내었다.<sup>(16)</sup>

### 2.6 성형해석 결과

하이드로포밍에 사용되는 튜브는 용접부가 있으며, 이로 인하여 성형성이 저하되는 원인이 되므로 성형을 할

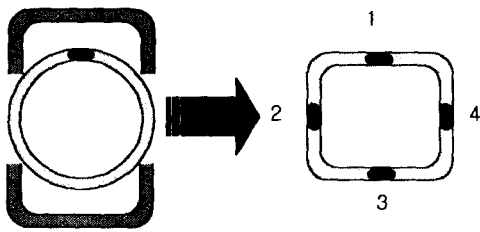


Fig. 13 Forming concept for weldline position

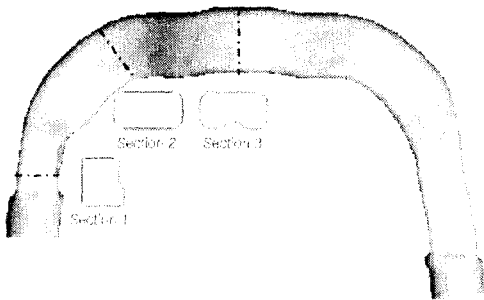


Fig. 14 Measurement section after forming

때에는 용접선의 위치를 최적에 배치하여야 한다.

Fig. 13에 보이는 원형 튜브가 사각튜브로 성형될 때 성형 시 용접선의 위치는 다이와 초기에 접촉하는 2, 4면에 존재할 경우가 1, 3면에 위치한 것보다 성형성이 나쁠 것이다.

성형중 용접선의 위치는 성형 후에도 이동이 없는 것이 좋으나, 실제의 공정에서는 기대할 수 없으므로 이동량을 최소로 하는 가공 조건을 찾는 것이 적합한 성형조건으로 판단된다. 그러나 성형 특성상 램의 기밀 작용으로 인하여 정확한 용접선의 이동량을 알 수 없고 튜브내의 고압으로 소재는 x, y, z 모든 방향으로 이동을 한다. 그리고 성형실패의 원인은 대부분 고압의 성형으로 인해 튜브가 터짐으로서 발생한다. 즉 성형중 초기에 금형과 접촉하여 슬라이딩이 발생하는 좌·우측부분 보다는 성형이 완료되는 시점에서 용접라인의 이동이 성형방향(z)으로만 발생하는 부분을 선택하여 용접라인을 위치하게 하는 것이 성형에서 불량률을 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

그러므로 Fig. 14에 보이듯이 비교적 단면의 변화가 심하고 확관을이 큰 세 단면에 대하여 두께 스트레인을 측정하여 하이드로포밍 시 용접선의 최적위치를 찾는 근거로 삼았다. 성형 시에 문제가 되는 용접선의 최적 위치를

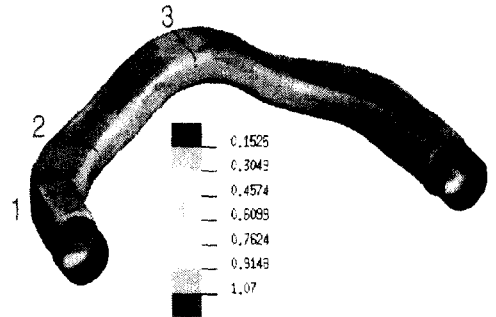


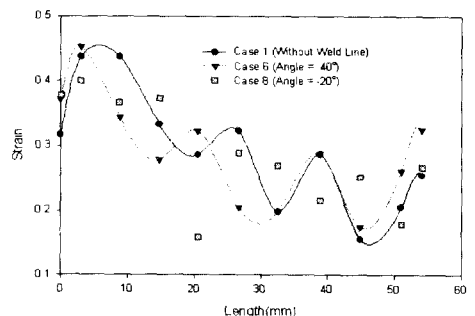
Fig. 15 Plastic thickness strain distribution of case 1

파악하기 위하여 용접선을 고려하지 않은 case 1의 성형 해석을 통하여 성형후의 용접선의 위치에 대한 개념을 파악하였다.

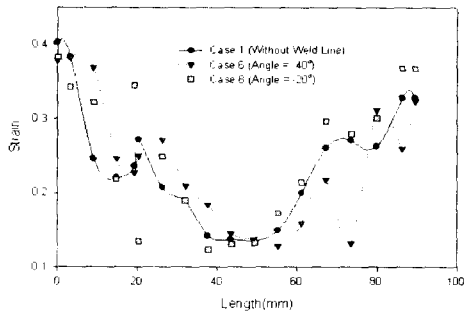
Fig. 15에서 보이듯이 튜브재료의 두께방향의 스트레인 값은 상·하·좌·우 4방향 중에서 상부의 스트레인 분포가 가장 작은 값을 나타냄으로 용접선의 위치는 윗면에서 성형조건, 충만조건 및 제품의 형상조건에 따라 결정한다.

Fig. 16에 나타난 그래프에서 보이듯이 1, 2, 3단면의 윗면에서 두께방향 스트레인 값을 길이에 따라 나타내면 40~50mm 사이에서 두께 스트레인 값이 낮은 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는  $\epsilon_1$  과  $\epsilon_2$  의 값이 낮음을 의미하며 재료의 신장이 작음을 의미한다. 즉, 성형상의 문제가 없을 경우 원주 방향으로 각 요소들의 스트레인 값을 비교하여 용접라인을 배치할 수 있다. 벤딩에서 좋은 두께 분포 결과를 나타냈던 case 8과 가장 좋지 않은 결과를 보였던 case 6의 결과를 용접선이 없는 경우와 비교하였다.

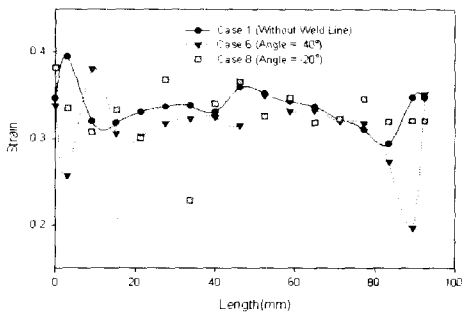
Fig. 17은 성형후의 원주 방향을 따라서 두께 변형율을 나타낸 것으로서 140~150mm 사이의 값을 보면 알 수 있



(a) Section 1

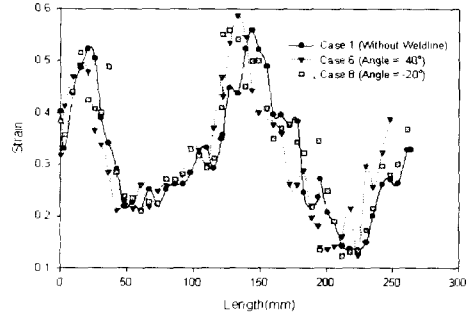


(b) Section 2

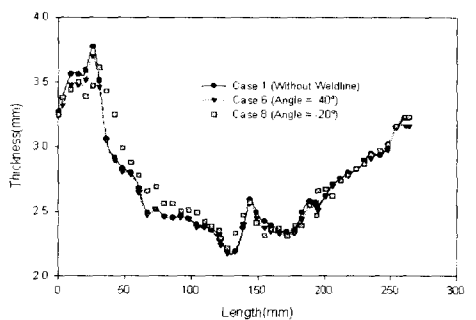


(c) Section 3

Fig. 16 Plastic thickness strain distribution of each section



(a) Plastic thickness strain distribution



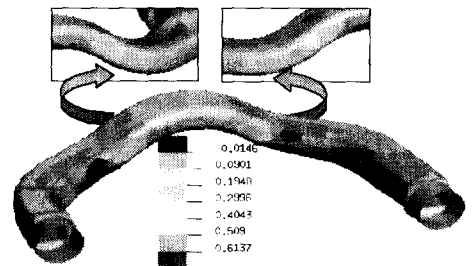
(b) Thickness distribution

Fig. 17 Result of section 2

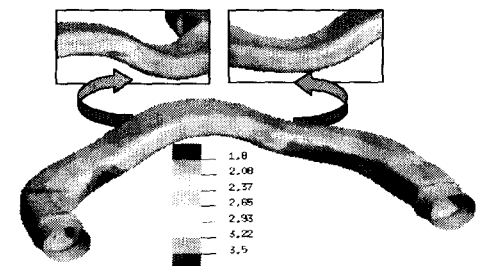
듯이 case 8( $\text{angle} = -20^\circ$ )이 case 6( $\text{angle} = 40^\circ$ )보다 낮은 두께 스트레인 분포( $\approx 5\%$ ) 값을 나타내고 있으며 이는 성형중 용접선의 이동이 보다 적음을 나타낸다. 이것은 벤딩시 용접선의 초기 위치가 성형에 영향을 미치고 있음을 의미한다.

하이드로포밍에서 곡률 부분이 금형 내부면과 접촉하게 되면 성형이 진행되어도 비접촉부에 비하여 소재의 유동이 적다. 그리고 초기의 두께 및 응력은 성형시 시간에 따른 접촉면적이 각각 다르기 때문에 서로 다른 결과가 나타난 것으로 보인다. 같은 부분에서 두께 분포를 살펴보면 벤딩에서의 결과와 동일한 양상으로 두께분포가 나타난 것을 알 수 있다.

Fig. 18에서 보이듯이 두께분포는 용접선이  $+40^\circ$  (case 6)부근에 위치할 경우 단면2의 하단부의 두께분포 값이 떨어짐을 볼 수 있다. 용접선이 내부 곡률부에 위치하고 금형과 초기에 접촉하여 소재의 유동이 떨어지기 때문에 용접선과 반대편에 위치한 외부곡률 하단부에서 두께가 얇아진 것으로 나타났다. 그리고 변형을 분포에서도 나타나 있듯이 외부곡률의 하단부에서 변형율이 증가함을 알



(a) Principal strain distribution



(b) Thickness distribution

Fig. 18 Principal strain and thickness distribution of case 6

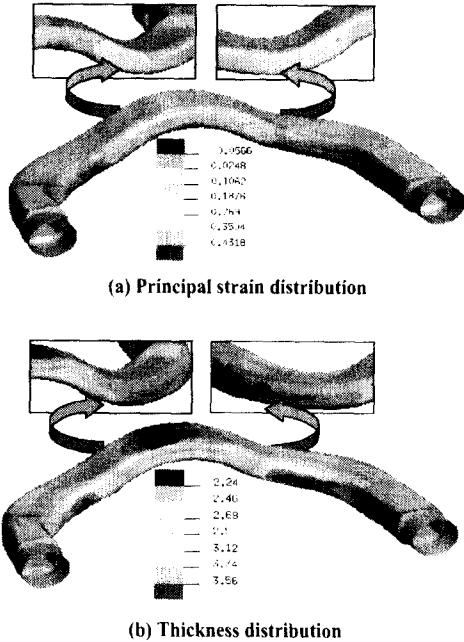


Fig. 19 Principal strain and thickness distribution of case 8

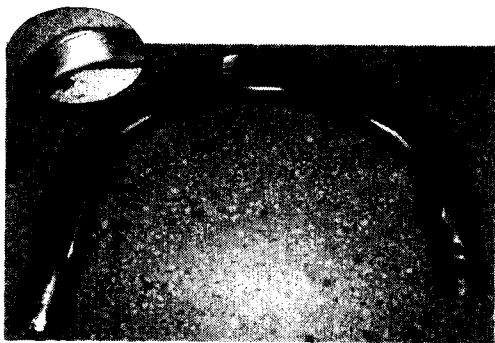


Fig. 20 Hydroforming specimen of case 6

수 있으며 성형 중 재료의 파단이 발생할 경우 인장 모드가 발생하는 외측 하단부에서 튜브의 터짐이 발생할 것으로 예측된다.

Fig. 19에 나타내었듯이 case 8(-20°)의 경우는 용접선이 인장모드가 발생하는 부분으로 이동되어 있는 경우로서 내부압력에 의하여 소재가 팽창될 때 외부곡률의 변형률 분포가 3%정도 작게 나타나고 있다.

Fig. 20은 용접선의 위치가 인장 모드가 발생하는 case

6(+40°)에서의 성형 후 튜브의 터짐이 발생한 경우이다. 해석결과에서도 알 수 있듯이 외부곡률 하단부에서 터짐 (failure)이 발생한 것을 볼 수 있으며 이러한 문제를 예방하기 위해서는 용접선의 위치가 "+"방향보다는 "-"방향으로 위치 해야함을 알 수 있다.

### 3. 결론

본 연구에서는 성형시 최적의 용접선의 위치를 찾기 위해 용접선의 초기위치를 복잡한 단면의 회전각도에 따라 배치를 하고, 이에 따른 성형해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 하이드로포밍 공정해석 시에는 용접부를 고려하는 것이 성형여부를 자세히 예측할 수 있다.
- (2) 튜브의 터짐을 방지하기 위한 용접부의 위치는 성형 각도 및 제품두께에 영향을 많다는 것을 알 수 있었다.
- (3) 용접선의 위치는 외부곡률 부근에 위치 하는 것이 인장 모드가 발생하는 재료의 두께가 얇아지는 것을 막아 성형 후에도 좋은 결과가 얻어졌다.
- (4) 압축모드가 발생한 부분의 용접선 배치로 인하여 외부곡률 하단부에 터짐이 발생한 경우 이것을 해결하기 위해서는 용접선의 위치를 바꾸어 줌으로서 해결할 수 있다.

### 참고 문헌

- (1) H.J. Kim, B.H. Jeon, H.Y. Kim, and J.J. Kim, "Finite Element Analysis of the Liquid Bulge Forming Processes", Advanced Technology of Plasticity 1993, pp. 545~550, 1993.
- (2) S. C. Tang, J. Gress and P. Ling, "Sheet Metal Forming Modelling of Automotive Body Panels," Proc 15th Biennial Congress of IDDRG, pp. 185~193, 1988.
- (3) F. Dohmann and Ch. Hartl, "Liquid Bulge Forming as a Flexible Production Method", Journal of Materials Processing Technology, v.45, pp. 377~382, 1994.
- (4) Frank Horton, "An Introduction to Recognizing Potential Applications and Product Design" 2nd Annual Automotive Tube Conference TPA, 1997.



- (5) Longwu Wu and Yong Yu, "Computer Simulations of Forming Automotive Structural Part by Hydroforming Process", pp. 326~329. NUMISHEET '96, 1996.
- (6) D. Schmoeckel, C. Hessler, and B. Engel, "Pressure Control in Hydraulic Tube Forming", Annals of the CIRP, v. 41/1, pp. 311~314, 1992.
- (7) F. Klaas, U. L. lcke, and K. Kaehler, "Developments of the Internal High-Pressure Forming Process", SAE, International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, 1993.
- (8) F. Dohmann, and Ch. Hartl, "Tube hydroforming - research and practical application", Journal of Materials Processing Technology, v.71, pp. 174~186, 1997.
- (9) Fritz Dohmann, "Tube Hydroforming Research and Practical Applications", TPA 2nd International Conference on Innovations in Hydroforming Technology, pp. 3~4, 1997.
- (10) J. M. Story, G. W. Jarvis, H. R. Zonker, and S. J. Murtha "Issues and Trends in Automotive Aluminum Sheet Forming" 930277
- (11) 김의석, 백홍진, 전병희, 오수익, "Hydroforming을 위한 예비 굽힘 성형의 해석", 한국소성가공학회 98추계학술대회논문집, pp. 27~31, 1998.
- (12) Dusseldorf, "Tube Hydroforming Advancements Using Sequenced Forming Pressures" FEA, Automotive/Transportation Tube Fabricating Conference, 1996.
- (13) Murry Mason, "Hydroforming of High Strength Steel Tubes for Body and Frame Applications" Advances in manufacture of Sheet Auto Bodies June 1996, 96NM147.
- (14) M. Ahmetoglu, and T. Altan, "Tube hydroforming - state-of-the-art and future trends", SAE, International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, 1999.
- (15) 오수익, 전병희, "Hydroforming 기술을 적용한 승용차용 부품개발" 서울대학교 정밀기계설계공동연구소, 1997.
- (16) 이승희, 전병희, 오수익, "Forming Parameters Study on the Tube Hydroforming", 한국소성가공학회 98 추계학술대회논문집, pp. 32~36, 1998.