

Weld line 위치에 따른 Hydroforming 특성에 관한 연구

강대철* · 윤석만** · 전병희** · 오수익*** · 전한수****
(2000년 4월 4일 접수)

A Study on the Weld Line Position for Hydroforming

D. C. Kang, S. M. Youn, B. H. Jeon, S. I. Oh and H. S. Jeon

Abstract

Hydroforming is a forming process enabling circular metal tubes to be produced in complex cross sections along curved axial paths. This forming process is widely used to manufacture parts in automotive industry. This paper presents bending and forming results to following angle of weld line positions. These compare to good bending, bad bending and without weld line model case. And then this result of after forming compare to each forming cases. The purpose of this paper is found that adaptive weld line position for bended final shape.

Key Words : Hydroforming, Tube, Cross Section, Axial Paths, Weld Line

1. 서론

오늘날 판재성형 공업은 에너지와 원자재의 사용을 줄이기 위해서 많은 노력을 하고 있으며 이런 노력의 결과로 Tailor Welded Blanks(TWB), 하이드로포밍(hydroforming)과 같은 새로운 기술을 적용한 성형법이 개발되었다.⁽¹⁾ 이러한 기술은 자동차 공업에 있어서 경량화, 고속화, 인건비 절감, 재료수율의 향상을 가져왔다.⁽²⁾

하이드로포밍 기술은 기존 내·외관으로 구성된 판재 성형 제품을 튜브를 이용하여 한번의 공정으로 생산함으로써 생산이 용이하고, 두께분포가 균일한 제품을 얻을 수 있으며, 성형 후 재료의 가공경화 영역이 좁다. 그리고 정밀한 제품의 생산이 가능하며, 제품의 강성 및 가

격경쟁력 향상되고, 부품의 개수 감소에 의한 경량화 등의 잇점이 있다.⁽³⁾

현재 하이드로포밍 기술을 이용하여 생산되고 있는 자동차 부품에는 사이드레일, 서브프레임, 데시 판넬, 배기관, 크로스 멤버, 데시보드 판넬, 필라, 레일 루프, 패키지 트레일등의 승용차 부품 및 트럭용 부푸에 이르기까지 다양한 종류가 있다.^(4,5,6)

하이드로포밍으로 어떤 부품을 생산하기 위해서는 부품의 선정, 프레스 용량 결정, 가압 장치설계, 시스템 통합등과 같은 장치분야의 연구와 생산될 부품의 개수, 가공압력, 금형 결합력, 유입량 및 한 개당 생산시간 등과 같은 소프트웨어적인 분야의 연구를 필요로 한다.^(7,8,9)

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학과
** 인덕대학교 기계설계과
*** 서울대학교 기계항공공학부
**** 한국산업기술평가원

본 연구에서는 하이드로포밍 성형 시 튜브 용접선의 위치에 따른 성형성을 파악하기 위하여 컴퓨터를 이용한 연구를 수행하였다. 해석에 사용된 모델은 주행 시 노면에서 전달되는 진동방지, 급정지·출발 시 엔진의 회전방지, 충돌 시 승객 몸 공간의 확보를 통한 승객 보호 등과 같은 기능을 담당하는 서브프레임으로 현재 많은 연구가 이루어지고 있는 부품이다.

2. 본 론

2.1 재료시험

본 연구에서는 사용한 소재는 STKM 11A, 두께 2.8mm 를 롤 포밍 후에 용접한 튜브를 이용하였다. 와이어 방전가공에 의하여 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 튜브로부터 시편을 채취하였으며, 소재의 변형률-응력 관계는 $\sigma = K(\epsilon + \epsilon_0)^n$ 으로 표현되는 Krupkowsky의 경화식으로 근사화 하였다. 4회의 시험을 행한 후 평균을 통해 구한 기계적 성질은 Table 1과 같다.

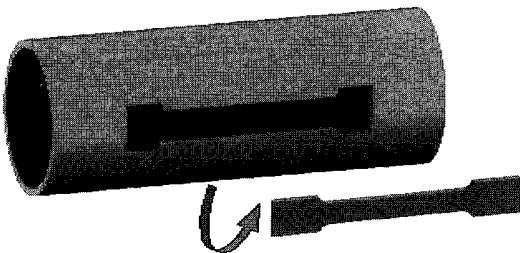


Fig. 1 Test specimen of tube

Table 1 The properties of STKM 11A

Density	7,800 Kg/m ³
Young's modulus	206,000 MPa
Poisson's ratio	0.3
Yield stress	215.1 MPa
K	468.3 MPa
n	0.206
ϵ_0	0.02186

2.2 튜브의 굽힘

하이드로포밍을 위하여서는 CNC, 다이(die), 롤(roll), 3점 굽힘 등을 이용하여 원하는 형상의 예비 성형품을 만든다. 본 연구에서는 튜브를 CNC 벤딩 작업을 통해서

"ㄷ"자 형태로 성형품을 제작 하였다.^(10,11) Fig. 2는 굽힘 해석에 필요한 공구와 소재의 초기 위치를 나타낸 것이다.

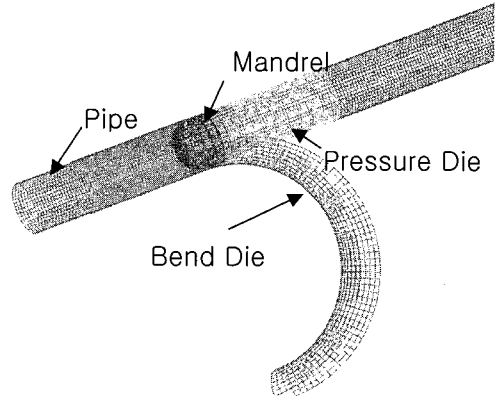


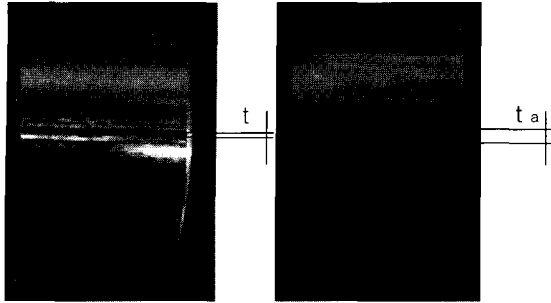
Fig. 2 Initial setting of tools

2.3 경계조건 및 용접부 모델링

성형 시 용접선의 위치에 따른 튜브의 거동을 살피기 위하여 아래와 같은 해석을 수행하였다. 굽힘 시 변형이 가장 적은 중심선을 기준으로 시계방향을 "+", 반 시계 방향을 "-"로 하여 10° 간격으로 용접선의 위치를 변경하면서 10가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

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

용접부의 모델링은 위의 Fig. 3에서 보이듯이 실제 사용되는 튜브의 비커스 경도를 Fig. 4와 같이 측정하여 그 결과를 사용하여 용접부 물성치에 입력하였다. 일반적으로 용접부 주위의 경도는 비 용접부에 비하여 2~2.5배^[12] 높은 값을 갖는 것으로 알려져 있으며 용접 시 발생하는 고열로 인하여 Fig. 3(b)에 나타난 것과 같은 열 영향부(t_a)가 존재하게 된다. 열 영향부는 용접시 발생하는 열에 의해 경화되어 연신을 값이 저하된 부분이다. 비커스 경도계를 통하여 측정된 용접부의 경도 값을 Fig. 4에 나타내었다. 용접부 주위의 열영향부의 경도값이 연신율의 저하로 용접재료와 비슷한 값을 나타냄을 볼 수 있다.

굽힘 해석에서는 벤드렐과 압력금형(pressure die)을 고정하고, 굽힘 금형(bend die)은 원하는 각도만큼 회전하였으며 마찰계수는 일반적인 금속 마찰계수인 0.15^[16]를 사용하였다.

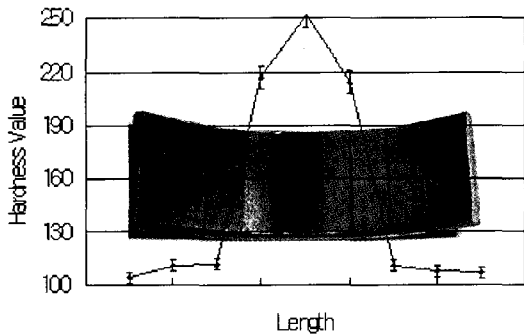


Fig. 4 Vickers hardness value

2.4 굽힘해석 결과

Table 2를 기초로 하여 굽힘 해석을 수행한 결과 Fig. 5에 나타나있는 굽힘부 A, B의 두께분포를 Fig 6, Fig 7에 나타내었다

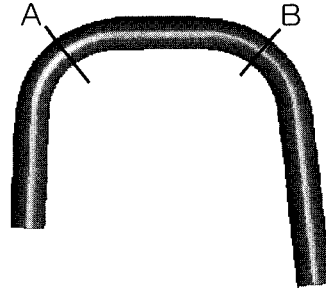


Fig. 5 Measurement positions

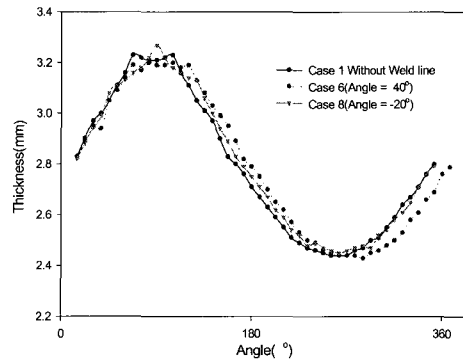


Fig. 6 Thickness distribution of section A

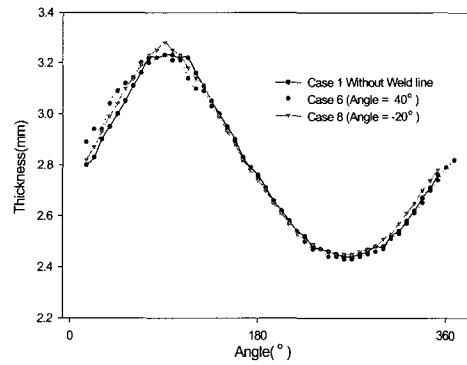


Fig. 7 Thickness distribution of section B

위의 Fig. 6과 7에 나타난 것과 같이 용접선을 포함한 모델이 포함하지 않은 모델에 비하여 두께가 두꺼워진 것을 볼 수 있다. 즉, 열영향부는 모재보다 소재의 항복 응력이 크므로 적게 성형이 되었고, Table 3에 보이듯이 case 1이 나머지 경우에 비하여 두께변화가 작았음을 알 수 있다. 이는 벤딩 시 소재가 바깥부분에는 인장, 안쪽은 압축을 받으나 중립면에서 소재의 이동이 없었기 때문이다. 두께분포 결과에서 볼 때 성형 시 내부압력이 작용하게 되면 빠른 변형으로 인하여 내부곡률 보다 외

부곡률 부분에서 성형이 실패할 가능성이 높음을 의미한다. 이는 유한요소해석으로 튜브 재료의 성형성을 평가할 때 용접선을 포함한 모델링과 함께 해당되는 부위의 정확한 물성치를 사용하여야 한다는 것을 의미한다. 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 용접선의 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. 이는 포밍과정에서 튜브내의 압력상승으로 인하여 외부곡률에서 성형불량이 발생할 우려가 case 7~10 보다 높다.

그리고 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, 6 의 순서로 좋은 결과를 보였다.

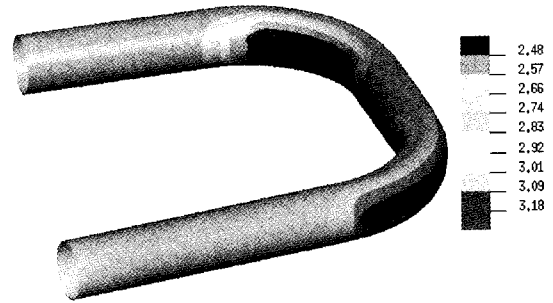


Fig. 9 Thickness distribution of tube

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	3.22	0.73
Case 8	2.49	3.23	0.74
Case 9	2.49	3.20	0.71
Case10	2.49	3.18	0.69

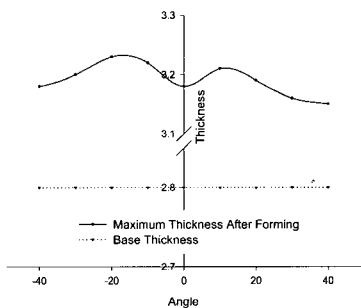


Fig. 8 Maximum thickness distribution of each position

2.5 하이드로포밍 성형해석 경계조건

본 연구에서는 성형에 사용된 금형과 유압의 제어 기법에는 시퀀스제어를 사용하였다.^(10,14,15)

Fig. 10은 예비 성형품을 시퀀스 방법에 의하여 생산된 서브프레임 각 단면의 확관율을 나타내는 것이다. 제품의 확관율은 최대 3.09%로서 크지 않기 때문에 성형에 어려움이 없을 것으로 예측된다. 그러나 확관율의 최대값 및 최소값의 범위 차가 큼으로서 성형시 내부압력, 축 방향 힘, 금형과 소재의 초기 접촉점 등과 같은 성형 인자들의 적절한 선정이 성형을 좌우한다고 할 수 있다.

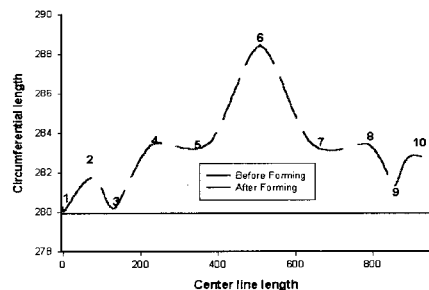


Fig. 10 Circumferential length of the bent tube after forming

3-D 해석은 2-D 단면해석에서 찾아낸 성형인자를 기초로 하여 해석을 수행했다, 금형의 분할선은 최종 제품의 형상에 따라 아래와 같이 여러 종류로 분류할 수 있다. 첫째, 중심선을 기준으로 분할선의 위치를 위쪽과 아래쪽으로 각각 위치하는 방법, 둘째, 중심선을 기준으로 위·아래로 대칭이되게 분할하는 방법, 셋째, 분할선을 중심선상에 위치시키는 방법 등이 있다. 첫 번째 경우는 파이프와 최초 접촉점을 기준으로 적은 확관율을 갖고 제품의 형상이 복잡하지 않을 때 사용한다. 두 번째 경우는 확관율이 크며 파이프 중심축을 기준으로 원주 방향으로 고른 신장을 보이며 형상이 복잡할 때 사용한다. 세 번째 경우는 가장 일반적인 경우로서 제품의 확관율이 가장 적고 최종제품의 형상이 비교적 단순할 때 사용한다. 이외에, 위의 3가지 방법을 변형시키는 경우도 있는데, 이는 제품의 형상과 확관율로써 결정한다.

제품의 성형은 먼저 튜브 내에 성형유체를 공급함으로써 시작된다. 튜브 내에 존재하는 기포는 성형유체가 고압에 이르면 압축됨으로써 압력 부족으로 인한 성형불량을 발생시킨다. 그러므로 튜브내에 성형유체를 주입할 때는 너무 빠른 유속으로 인해 성형유체에 기포가 발생하지 않도록 유속을 조절하여야 한다. 성형이 시작되면 상부 금형은 하강을 시작하고 튜브내의 압력은 상승하기 시작한다. 그리고 튜브의 선단에 부착된 2개의 기밀 플런저가 블랭크의 끝에서 금형 안으로 이동하여 기밀을 유지한다. 성형유체의 압력이 상승함에 따라 금형 내의 제품이 성형되어 지는데, 일반적으로 시퀀스 방법에서는 100~1100bar 정도의 압력을 사용한다. 성형과정이 끝난 후에 유체의 압력은 "0"으로 내려가고 기밀 플런저는 초기 위치로 되돌아간다. 금형이 다시 열린 후에 성형된 부품은 금형으로부터 분리된다.⁽¹⁷⁾ Fig.11 과 Fig. 12에 하이드로포밍공정을 위한 유한요소 모델과 각각의 성형인자들에 대한 그래프를 나타내었으며 이들 인자는 최대 압력, 램 속도, 금형 안착속도, 시간을 최대값으로 각각 나누어 도식화 하였다.

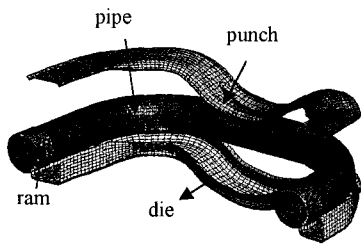


Fig. 11 Die shape and FE model

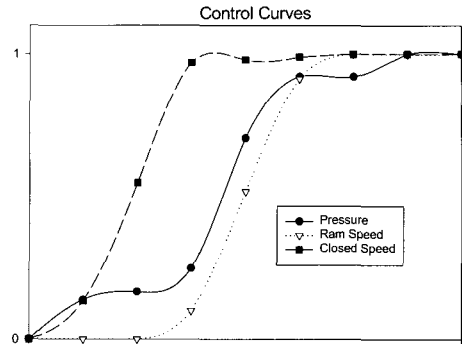


Fig. 12 Forming factors for FE analysis

2.6 해석 결과

튜브의 성형공정은 용접부가 존재하면 성형성이 떨어진 다. 따라서 튜브 하이드로포밍 공정에 서 용접선의 위치 선정이 중요한 성형인자가 된다. 원형 튜브가 사각튜브로 성형될 때 용접선이 위치할 수 있는 경우에 대하여 Fig.13 에 표시하였다.

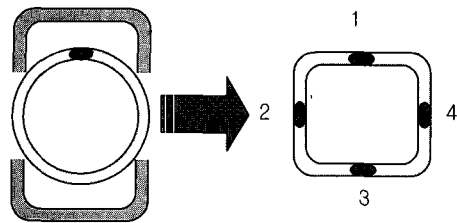


Fig. 13 Forming concept for weldline position

용접선의 위치는 성형 중 용접선의 이동이 최소로 하는 곳에 위치하는 것이 가장 좋은 것으로 판단된다. 성형중 초기에 금형과 접촉하여 슬라이딩이 발생하는 2, 4부분 보다는 성형이 완료되는 시점에서 금형과 접촉하는 1, 3 부분에 용접선을 위치하게 하는 것이 성형에서 불량을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 그러므로 Fig.14 에 나타낸 비교적 단면의 변화가 심하고 확관율이 큰 세 단면에 대하여 두께 스트레인을 측정하여 하이드로포밍 성형시 용접선의 위치를 정하는 근거로 삼았다.

Fig.14에 용접선을 포함하지 않고 해석한 경우의 (case1) 두께방향 스트레인 분포를 나타내었다. 튜브의 두께방향 스트레인 값은 상·하·좌·우 4면 중에서 상부의 스트레인 값이 가장 작은 값을 나타내므로 용접선의 위치는 윗면에 위치하는 것이 좋은 것으로 판단된다.

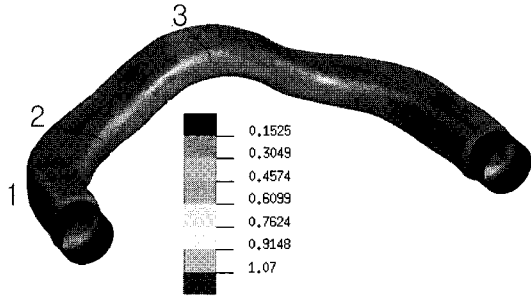
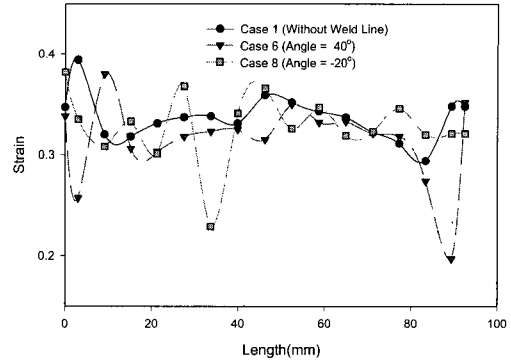


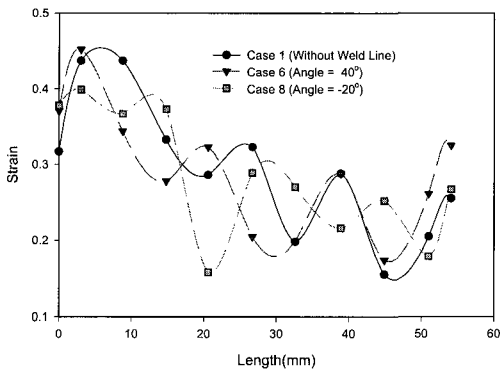
Fig. 14 Plastic thickness strain distribution(case 1)

Fig. 15에 용접선을 포함하여 해석한 경우에 대하여 단면 1, 2, 3의 윗면 두께방향 스트레인 값을 나타내었다. 그래프에 의하면 1, 2, 3 단면의 윗면(0~100mm)에서 40~45mm 사이의 두께 스트레인 값이 낮은 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 ϵ_1 과 ϵ_2 의 값이 낮으며, 재료의 변형량이 작음을 의미한다.

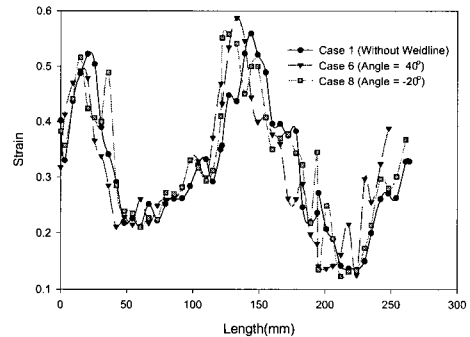


(c) Section 3
Fig. 15 Plastic thickness strain distribution

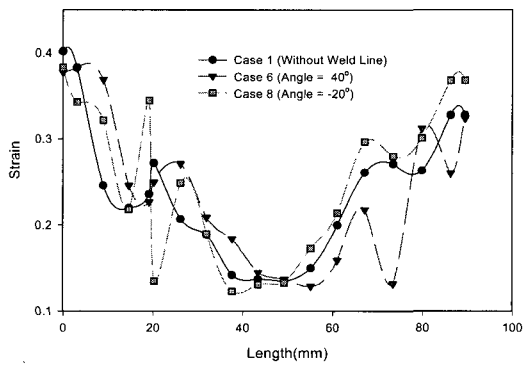
Fig. 16은 단면 2의 성형 후 원주방향 두께 및 두께 스트레인 값을 나타낸 것이다. 140mm~150mm 사이의 두께 스트레인 값을 비교하면 case 8의 경우가 case 6의 경우보다 5% 낮은 두께 스트레인 값을 나타내고 있다. 또한 case 8의 경우가 용접선의 이동이 보다 적음을 알 수 있으나, 이는 굽힘 시 용접선의 초기 위치가 성형에 영향을 미치고 있음을 의미한다.



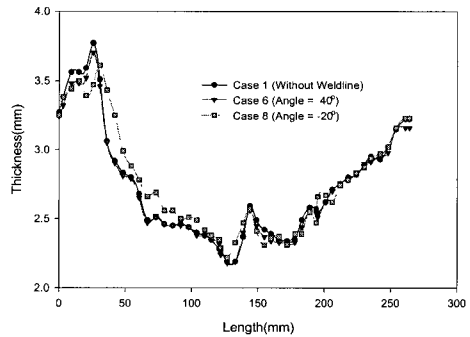
(a) Section 1



(a) Plastic thickness strain distribution



(b) Section 2

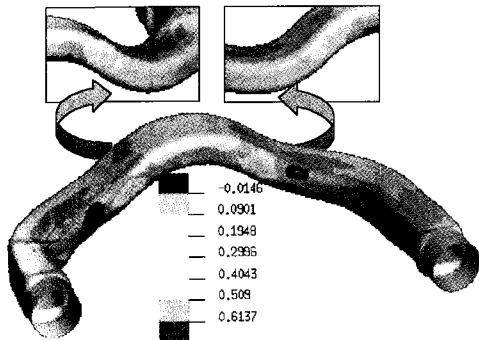


(b) Thickness distribution

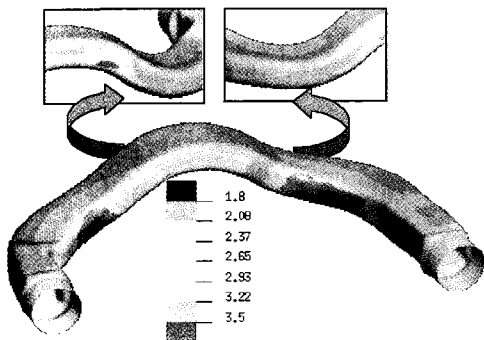
Fig. 16 Result of section 2

Fig. 17은 case 6, 8의 경우에 대하여 성형 후 서브프레임의 두께 및 두께 스트레인 분포를 나타낸다. 두께 분포를 살펴보면 case 6의 경우 단면 2의 하단부 두께가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 용접선이 굽힘부 내측에 위치할 때 성형 시 금형과 초기에 접촉하여 소재의 변형율이 떨어지기 때문에 용접선과 반대편에 위치한 굽힘부 외측의 하단부에서 두께가 얇아진 것으로 나타났다. 두께 스트레인 값의 분포에서도 굽힘부 외측의 하단부 스트레인이 증가함을 볼 수 있다. 따라서 성형중 재료의 파단이 발생할 경우 굽힘부 외측 하단부에서 튜브의 터짐이 발생할 것으로 예측된다.

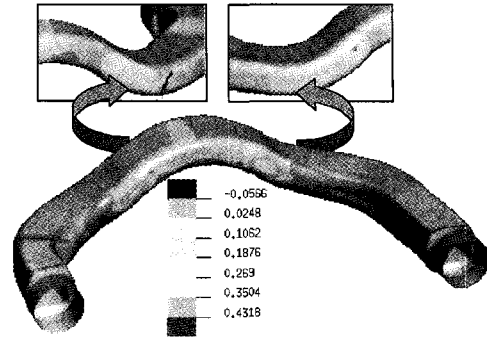
Fig. 18은 case 6의 경우 하이드로포밍으로 성형된 서브프레임의 실제 모습이다. 성형해석으로 예측된 것과 같이 굽힘부 외측 하단부에서 터짐이 발생한 것을 볼 수 있으며, 이러한 성형불량을 제거하기 위해서 용접선의 위치를 굽힘부 외측으로 이동해야 함을 알 수 있다.



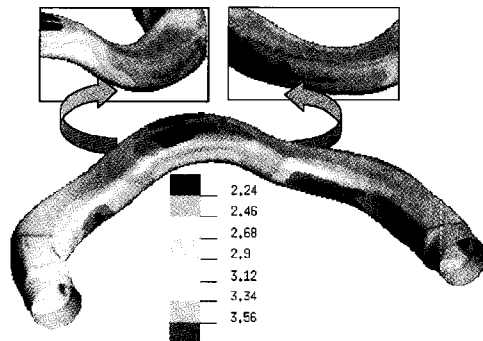
(a) Principal strain distribution of case 6



(b) Thickness distribution of case 6



(c) Principal strain distribution of case 8



(d) Thickness distribution of case 8

Fig. 17 Principal strain and thickness distribution of case 6 and case 8



Fig. 18 Prototype of subframe (case 6)

3. 결론

본 연구에서는 하이드로포밍 성형시 용접선의 위치에 따른 성형성을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 하이드로포밍 해석을 위한 튜브의 굽힘해석 시는 용접선의 위치가 외부 곡선부에 위치하는 것이 균일한 두께분포를 나타내는 것으로 나타났다.
- (2) 튜브의 터짐을 방지하기 위한 용접부의 위치는 두께방향의 스트레인값을 통하여 결정할 수 있다.
- (3) 튜브 굽힘후의 곡률 부분의 두께분포는 성형 시에 영향을 미치고, 이를 굽힘공정에서 방지하기 위해서는 용접선을 회전하여 가공함으로써 해결할 수 있다.
- (4) 용접선을 굽힘부 외측에 위치하는 것이 재료의 두께가 얇아지는 것을 막아 성형불량을 줄일 수 있다.

참고 문헌

- (1) H.J. Kim, B.H. Jeon, H.Y. Kim, and J.J. Kim, 1993, "Finite Element Analysis of the Liquid Bulge Forming Processes", *Advanced Technology of Plasticity 1993*, pp.545~550.
- (2) S. C. Tang, J. Gress and P. Ling, 1988, "Sheet Metal Forming Modelling of Automotive Body Panels," *Proc 15th Biennial Congress of IDDRG*, pp.185~193,
- (3) F. Dohmann and Ch. Hartl, 1994, "Liquid Bulge Forming as a Flexible Production Method", *Journal of Materials Processing Technology*, v.45, pp.377~382.
- (4) Frank Horton, 1997, "An Introduction to Recognizing Potential Applications and Product Design" 2nd Annual Automotive Tube Conference TPA
- (5) Longwu Wu and Yong Yu, 1996, "Computer Simulations of Forming Automotive Structural Part by Hydroforming Process", pp.326~329. NUMISHEET'96.
- (6) D. Schmoeckel, C. Hessler, and B. Engel, 1992, "Pressure Control in Hydraulic Tube Forming", *Annals of the CIRP*, v. 41/1, pp.311~314.
- (7) F. Klaas, U. Lücke, and K. Kaehler, 1993, "Developments of the Internal High-Pressure Forming Process", SAE, International Congress and Exposition, Detroit, Michigan.
- (8) F. Dohmann, and Ch. Hartl, 1997, Tube hydroforming-research and practical application", *Journal of Materials Processing Technology*, v.71, pp.174~186,
- (9) Fritz Dohmann, 1997, "Tube Hydroforming Research and Practical Applications", TPA 2nd International Conference on Innovations in Hydroforming Technology, pp.3~4.
- (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, 백홍전, 전병희, 오수익, 1998 "Hydroforming을 위한 예비 굽힘 성형의 해석", 한국소성가공학회 98추계학술대회논문집, pp.27~31.
- (12) Dusseldorf, 1996, "Tube Hydroforming Advancements Using Sequenced Forming Pressures" FEA, Automotive/Transportation Tube Fabricating Conference.
- (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, 1999, "Tube hydroforming-state-of-the-art and future trends", SAE, International Congress and Exposition, Detroit, Michigan.
- (15) 오수익, 전병희, 1997, "Hydroforming 기술을 적용한 승용차용 부품개발" 서울대학교 정밀기계설계공동연구소.
- (16) 이승희, 전병희, 오수익, 1998, "Forming Parameters Study on the Tube Hydroforming", 한국소성가공학회 98 추계학술대회논문집, pp. 32~36.