

Hydroforming 공정변수의 영향

권재욱* · 명노훈* · 이경돈*
(2000년 9월 7일 접수)

Effect of Process Parameters on Hydroforming

J. W. Kwon, N. H. Myoung and K. D. Lee

Abstract

The industrial application of hydroforming has a great potential in saving cost and achieving dimensional accuracy in automotive industry presently. The aim of the following article is to investigate the effect of process parameters on hydroformed part. Firstly, we have to investigate the change of mechanical properties for sheet and pipe material according to various radius/thickness ratio(r/t). The change of mechanical properties affects the yield stress more than the total elongation. Increase of yield stress for pipe has a bad influence on formability of hydroforming. Among the roll-forming process, the sizing process didn't change mechanical properties. The process parameters such as the initial pressure, mandrel shape and friction have seriously influenced on formability of hydroforming. Therefore we need to check formability of given material through the FE analysis in the beginning stage of process design and the predicted hydroforming process parameters are generally a good starting point for the prototype tryout stage. The results of prebending, hydroforming analysis using FE model are good agreement with experimental results.

Key Words : Hydroforming, Roll Forming, Bending, Sizing, Anisotropy, Pressure, Yield Stress

1. 서 론

세계적인 차체 경량화 추세에 따라 차체 설계 및 생산기술 측면에서도 여러 가지 신기술이 적용되고 있다. 이 중에서도 전세계의 철강회사를 중심으로 한 초경량차체 개발(Ultra Light Steel Automotive Body)에 있어서 Tailored Blank, 액압성형 (Hydroforming, 이하 H/F) 기

술과 같은 신기술이 최근에 들어 소개되고 있다. 이 개발계획은 알루미늄과 플라스틱과 같은 경량 소재의 개발에 대응하여 종래의 강판을 사용하여 차체 구조를 최적화 함으로 현재의 차체 중량을 30% 감소시키면서 차체 강성을 증가시키는 목적으로 세계의 철강회사들이 주축이 되어 포르쉐 엔지니어링사에 연구 개발을 의뢰하여 진행하고 있고 개발 계획중에서 Phase 1에서는 CAE에

* 고등기술연구원 제품시스템연구실 CAD/CAM팀

기초한 경량차체 설계를 수행하였고 Phase 2단계가 끝나는 97년 말에는 BIW(body in white) 5대를 개발하였으며 계속적으로 ULSAB AVC과제가 추진 중에 있다.⁽¹⁾ 이 연구개발은 세계 유수의 철강회사와 자동차 회사가 지대한 관심을 갖고 내용을 주시하고 있으며 자동차 회사 나름대로 신기술 습득에 많은 시간과 자금을 투자하며 대응하고 있는 실정이다.

초경량차체 개발연구에서의 핵심기술은 Tailored Blank 기술과 H/F기술로 알려져 있으며 이 H/F 기술은 종래의 차체 바디(body)를 성형하는 프레스 성형방식과는 완전히 다른 개념으로 원형 강관의 안쪽에서 수압을 가함으로써 강관을 팽창 성형하여 원하는 모양의 차체 골격을 제작하는 방식으로 기존의 프레스 제품에서 얻을 수 없었던 차체 강성의 증가, 용접 공정의 감소, 금형의 절감 등의 다양한 이점이 있다. 또한 언급한 차체구조 부품뿐만 아니라 exhaust manifold나 down pipe류도 H/F 공법을 사용함으로써 베기가스 규제에도 적절히 대처할 수 있다고 보고되고 있다.^(2~4)

H/F의 요소기술은 제품설계, 공정설계 기술로 나뉘어 질 수가 있으며 공정설계에도 굽힘, pre forming, H/F, piercing등의 다양한 분야가 있으며^(5~9)에 대한 국내의 연구와 경험이 아직 절대 부족한 실정이다. 특히 재료특성에 대한 평가나 H/F 공정의 해석 결과에 대한 평가 등의 일반적인 내용에 대한 자료조차 부족하다. 따라서 본 연구에서는 H/F에 관련한 재료분야 및 굽힘과 H/F 시의 공정변수들이 성형성에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 본 론

H/F에 있어서의 특징은 파이프를 성형한다는 점이 일반적인 판재성형과 크게 다른 점이다. 따라서 파이프를 제조하는데 있어서의 특성을 살펴보는 것은 이후의 공정, 즉 H/F성형의 분석에 크게 도움이 된다. 따라서 우선 파이프 제조시의 가공경화 현상을 살펴보자.

2.1 H/F용 판재 및 파이프 재료

H/F에 필요한 재료는 압출재나 전기용접 강관 모두 가능하다. 일반적으로 강관은 강관을 roll forming방법을 이용하여 원형 형상으로 만들고 이를 전기용접을 통하여 강관으로 제조한다. 그러나 알루미늄 파이프는 이와 같은 방법을 통하여 튜브재(5000계열)를 만들기도 하고 압출(6000계열)에 의해 제조되기도 한다. 알루미늄의 경우 전기용접을 통하여 tube를 제작하고 이를 H/F한 예는 BMW의 front, rear suspension을 그 예로 들 수 있다.

그리고 강관의 경우는 냉연강관이나 열연강관을 사용하는 데 적용 부품에 따라 일반강관에서 400MPa 고강도 강관까지 그 적용사례는 많이 볼 수 있다.^(10,11) 또한 열처리도 필요에 따라 적용하기도 하지만 비용의 증가로 인해 일반적으로 무 열처리 재료를 사용함이 바람직하다. H/F시의 파이프 재료의 선정은 H/F의 공정을 고려하여 선정하는 것이 바람직하다. 현재 미국에서 흔히 사용되고 있는 파이프의 규격은 1008/1010인데 이의 한국 규격은 STKM 11A로 되어있다. 그러나 현재 국내 파이프 업체가 생산하고 있는 STKM 11A 파이프의 물성은 H/F용 성형관점에서는 만족하지 못하므로 전용 재료개발이 필수적이다. 따라서 여러 가지의 파이프 직경 및 두께를 고려하여 파이프를 제작하였다. 파이프 용접에는 전기용접방법을 사용하였다. 이때 사용된 판재의 기계적인 물성과 조관 하는 파이프의 반경을 아래에 나타내었다. 판재의 기계적 물성 평가는 인장시험기 (MTS Sintech 30G)를 이용하여 cross head speed를 10mm/min로 하여 항복강도, 인장강도, 총연신율, 강도계수(K) 및 균일연신율을 측정하였다. 파단 시의 연신율은 강도의 75%에서 결정하였고 가공경화지수는 연신율 범위 5~15%값을 사용하여 최소자승법 ($\sigma = K\epsilon^n$)으로 구하였다. 판재시편은 KS 13B, 파이프는 12A, B의 규격을 사용하였다. 모든 시편은 3회 이상의 시험을 평균한 결과이다. 한편 여러 가지 r/t의 비율을 얻기 위해 두께와 굽힘반경을 다양하게 하여 표 1의 3 경우의 비를 갖는 파이프를 제작하였고 제작된 파이프에서의 기계적 물성 또한 측정하였다. 파이프에서의 물성평가를 위한 인장시편은 Fig. 1와 같은 위치에서 채취를 하였다. 이와 같이 부분별로 시편을 채취한 이유는 용접부에서의 물성 평가 및 위치별 특성을 파악함이다. Table 1에서 파이프의 물성은 용접부의 물성을 제외한 부분에 대한 평균값이다.

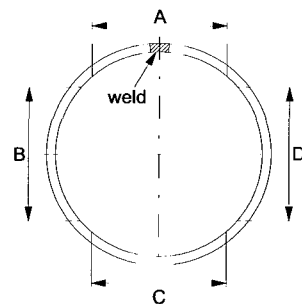


Fig. 1 Location of specimen for pipe tensile test

Table 1 Mechanical properties in sheet steel using pipe forming

material		Yield stress (kg/mm ²)	Tensile stress (kg/mm ²)	EI (%)	n	Pipe diameter (mm)	r/t
HR A (2.0t)	sheet	20.9	29.7	47.7	0.20	47.6	11.9
	pipe	27.0	30.6	48.2	0.15		
HR B (2.8t)	sheet	24.1	32.1	45.3	0.18	89	15.9
	pipe	26.9	31.9	48.3	0.17		
HR C (3.0t)	sheet	26.8	32.2	44.4	0.15	50	8.30
	pipe	31.4	32.7	43.2	0.13		

2.2 파이프의 가공경화인자

파이프 재료를 생산하기 위해서는 Fig. 2에서도 나타낸 바와 같이 강판을 roll forming하게 된다. 따라서 초기의 강판과 roll forming-후의 강판의 기계적인 성질은 차이가 나게 된다. 또한 파이프 조관 공정의 특성상 최종적인 파이프의 지름을 균일하게 하기 위한 사이징(sizing)공정으로 인해 물성의 저하가 있을 수 있다. 파이프의 조관시에 발생할 수 있는 재료의 강도증가 인자는 다음과 같다.

- (1) 판재의 roll forming으로 인한 파이프 원주 방향으로의 판재 굽힘 변형
- (2) 전기 용접부의 열 영향으로 인한 용접부 가공경화
- (3) 파이프 용접후의 사이징 공정으로 인한 길이 및 원주 방향으로의 변형

이를 간략하게 도시하면 Fig. 2와 같다.

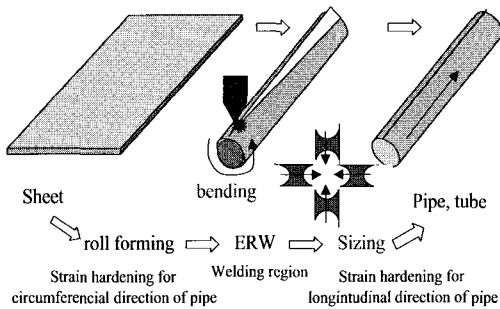


Fig. 2 Schematic drawing of deformation behavior for tube rolling process

또한 H/F중의 변형이력을 인장 곡선 상에 나타내면 아래 Fig. 3과 같다.⁽¹²⁾ Fig. 3에서 보면 H/F시의 변형은 약 10%정도의 영역을 차지하고 있다. 이는 H/F성형시의

변형보다는 재료의 조관(약 10%) 및 굽힘 변형(약 20%)으로 인한 재료의 가공경화가 더욱 큰 부분을 차지한다는 것을 말한다. 보고된 자료에 의하면 roll forming, bending, hydroforming 각 단계별 변형정도는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 조관시 5~15% 정도이며 파이프 굽힘으로 인한 변형시 20%정도 최종단계인 H/F시에는 약 5~15%정도라는 보고가 있다. 그러나 roll forming시의 변형정도는 탄소의 함량, 관의 두께 및 지름에 따라서도 변할 수 있으나 일반적으로 재료의 지름대 두께의 비가 클수록 판재 굽힘으로 인한 변형이 작기 때문에 기계적인 물성의 감소가 작을 것으로 예상된다.

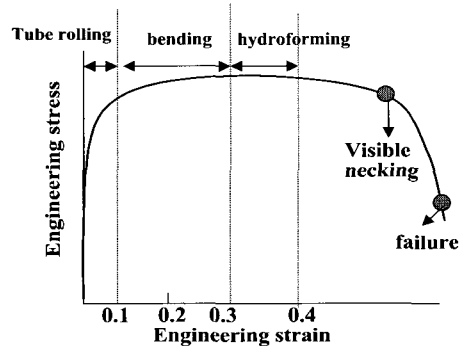


Fig. 3 Typical stress-strain curve for tube H/F

굽힘으로 인한 가공경화정도를 파악하여 보면 다음과 같다. Fig. 4와 같이 굽힘변형을 받고 있는 한 체적요소의 힘 평형으로부터 다음과 같은 미분방정식을 얻을 수 있다.

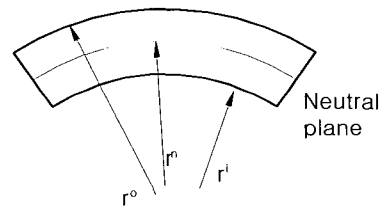


Fig. 4 Geometric description of bending segment

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} = \sigma_\theta - \sigma_r \quad (1)$$

여기서 r은 체적요소의 곡률 반경, σ_r 은 반경 방향 응력, σ_θ 의 원주방향 응력이다. 소재의 굽힘이 일어날 때 소재의 바깥부는 인장을 받으며 안쪽은 압축을 받는다. 인장을 받는 부분을 영역 1이라 하고 압축을 받는 부분을 영역 2로 하고 경계인 중립면의 곡률반경을 r_n 로 표시하자. 이 두 영역에서의 유효응력 σ_{eff} 과 유효변형

를 ϵ_{eff} 는 다음과 같다.

$$\sigma_{eff} = \pm \frac{\sqrt{3}}{2} (\sigma_{\theta} - \sigma_r) \quad \begin{array}{l} + : \text{영역1} \\ - : \text{영역2} \end{array} \quad (4)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{2}{\sqrt{3}} \epsilon_{\theta}, \quad \begin{array}{l} \text{여기서 } \epsilon_{\theta 1} = \ln \frac{r}{r_n} : \text{영역1} \\ \epsilon_{\theta 2} = \ln \frac{r_n}{r} : \text{영역2} \end{array} \quad (5)$$

여기서 r_n 은 $\sqrt{r_o r_i}$ 이다. 이 굽힘 변형률을 굽힘 반경 r 과 재료의 두께 t 의 관계로 나타내면 아래 Fig. 5와 같다. Fig. 5는 두께가 작을수록, 굽힘 반경이 클수록 굽힘 변형에 의한 재료의 가공경화가 작다는 것, 즉 연신율의 감소가 적을 것이라는 것을 말한다. 이를 활용하면 대강의 파이프 굽힘시의 가공경화정도를 유추할 수 있다. 만약 판재상태의 연신율을 알고 있다면 굽힘 변형으로 인한 파이프에서의 연신율 감소를 유추할 수 있다. 그러나 이 식은 파이프의 인장 시험시 시편의 채취에 따른 스프링백은 고려하지 않았고 조관시의 물과의 마찰에 의한 변형등의 인자를 고려하지는 못해 절대적인 예측값은 될 수 없으나 경향을 평가할 수 있다. 이론적인 파이프 굽힘시의 평균 유효변형률을 제작된 파이프에 적용하여 나타내면 Table 2와 같다.

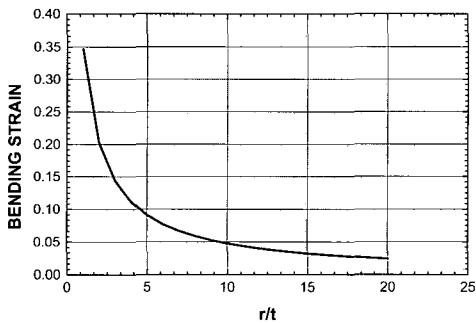


Fig. 5 Bending strain(on convex surface) as a function of r/t ratio in plane strain bending

Table 2 Average effective strain by bending through thickness for several r/t

Material	r/t	Average effective strain
HR A(2.0t)	11.9	0.025
HR B(2.8t)	15.9	0.018
HR C(3.0t)	8.3	0.037

Table 2에서 유효변형률은 판 두께 방향으로의 변형률의 평균값이다. 당연한 결과지만 r/t 의 값이 클수록 굽힘으로 인한 유효 변형률이 감소함을 알 수 있다. Fig. 6, 7에는 3가지 r/t 의 조건에서 이론적으로 계산된 값과 판재와 파이프에서의 총연신율과 항복강도의 차이를 나타내었다.

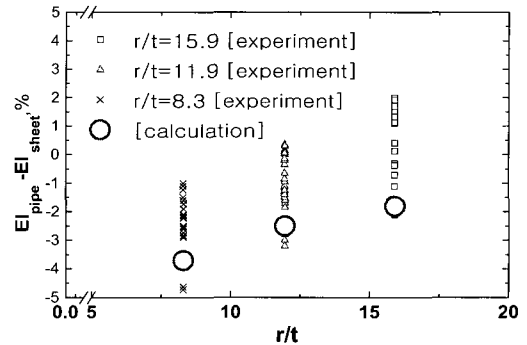


Fig. 6 Difference of total elongation between sheet and pipe

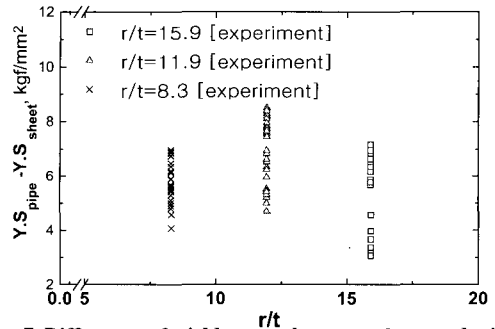


Fig. 7 Difference of yield stress between sheet and pipe

Fig. 6에서 보면 r/t 가 증가할수록 조관에 의한 연신율의 감소가 적어지는 것을 알 수 있다. 그러나 전반적으로 예상했던 것보다는 연신율의 감소정도가 0~4% 정도로 작게 나타났으며 이로써 파이프의 성형성이 판재의 것과 크게 다르지 않을 것임을 미루어 짐작할 수 있다. 한편 이론적으로 예상한 연신율 값보다는 실험 값이 적게 나타난다. 이는 예측 값이 파이프에서 인장시험용 시료를 채취했을 경우의 반경방향에 스프링 백을 고려하지 못하고 있기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 파이프의 항복응력은 4~8kg/mm²로 크게 증가한 것으로 나타났으며 상대적으로 인장강도의 증가는 1~2kg/mm² 정도의 증가가 나타나 전체적인 가공경화지수의 감소가 나타난다. 초기의 항복강도가 증가하는 것은 재료의 가공경화능력을 상실시키는 효과를 발생하여 국부적인 마찰로 인한 변형 집중시 가공경화에 의한 네킹 저항성이 작아져

쉽게 파단이 발생할 수 있다. 적용 부품에 따라 다르긴 하겠지만 r/t의 값을 크게 하는 것이 판재의 기계적 성질을 크게 저하시키지 않고 H/F성형하는데 유리할 것이다.

한편 연신율의 감소는 항복응력과 인장강도의 증가와도 같은 현상인데 성형시에 문제가 되는 것은 항복응력의 증가이다. 항복응력이 증가함으로 재료의 가공경화능력이 저하되어 한 부분에 변형이 집중하면 경화효과에 의한 재료의 저항력이 저하되어 빠르게 국부네키를 일으키게 된다. 따라서 조관 시에 재료의 가공경화를 적게 할 수 있는 roll forming die의 설계가 필요하다. 이미 국외의 조관업체들에서는 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나⁽¹³⁾ 국내의 실정은 그렇지 못하다. Fig. 8에는 원형강관을 만들 경우의 다양한 roll forming 형상을 나타내었다. 순차적인 roll form die의 공정설계는 최종적인 원형강관의 가공경화를 적게 하여 판재의 물성의 유지시킬 수 있다고 보고된바 있다. 그리고 H/F시에 재료의 연신을 뿐만 아니라 재료의 인장강도도 매우 중요하다. 강도가 작다면 약간의 내부압력에도 변형을 시작하여 국부적인 변형으로 진파되어 파단에 이를 수 있기 때문에 재료의 강도도 재료의 선정시 중요한 인자이다.



Fig. 8 Examples of a various process die design at roll forming

항복응력이 H/F 변형거동에 미치는 영향을 살펴보기 위해 간단한 모델링을 통한 해석을 수행하였다. 재료물성은 Fig. 9와 같이 초기항복응력이 각각 25, 29kg/mm² 이고 인장강도와 같은 물성들은 동일하게 하여 Fig. 10과 같은 금형 내에서 별정 시험하였다. 이 때의 압력은 540bar까지 선형적으로 증가시켰고 다이와의 마찰계수는 0.1로 하였으며 공정 해석에 사용된 소프트웨어는 PAM-STAMPTM이다. 이때 항복응력이 작은 재료의 경우, 즉 가공경화성이 좋은 것은 변형초기 파이프가 확관이 되어 금형에 다이에 접촉을 하면서 전체적으로 항복응력이 큰 경우보다 균일한 변형을 하는 반면 항복응력이 큰 재료는 초기에는 확관이 잘 안되다가 금형면에 접촉을 함으로서 균일한 변형을 하지 못하고 접촉한 부위 바로 옆쪽에서 국부적인 변형집중이 생겨 파단에 다다르게 된다. 이 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

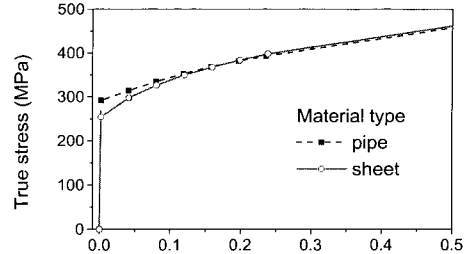


Fig. 9 Stress-strain curves from F.E. analysis

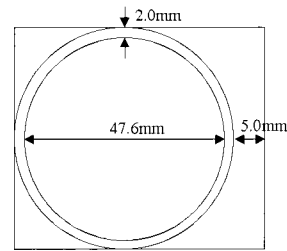


Fig. 10 Schematic drawing of model die

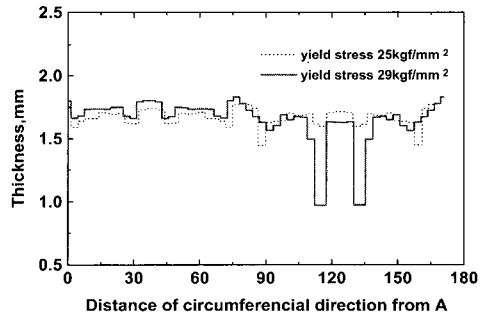


Fig. 11 Effect of yield stress for hydroforming

한편 파이프 가공 공정 중에 굽힘 변형 이외의 다른 가공경화 인자로 들 수 있는 것이 조관 사이징 공정이 있다. 이는 조관 공정 중 파이프의 진원도 및 치수정밀도를 맞추기 위해 파이프의 모든 원주방향으로 수직롤로 가공하는 공정이다. 이 공정에서는 파이프 길이 방향으로의 가공경화 효과가 있을 것으로 판단되어 사이징 공정 전후의 파이프 시료를 채취하여 기계적 물성을 평가하였다. 그 결과를 Fig. 12에 나타내었다. (a)는 r/t가 8.3인 재료의 사이징 공정 전후의 인장강도, 항복강도와 총 연신율의 변화를 나타낸 것이고 (b)는 15.9인 결과를 나타내었다. 분석을 위한 시편의 위치는 가장 품질이 안정적인 코일판재의 길이와 폭 방향의 중심부위에서 채취하였다. 결과를 보면 사이징 공정으로 인한 기계적 물성 변화는 거의 없는 것으로 결론지을 수 있다. r/t=15.9인 시료의 원주방향의 물성중 용접선에서의 연신율의 감소

가 나타날 뿐 전체적으로 사이징 공정은 파이프 재료의 가공경화와 성형성에 영향을 주지 못한다는 사실을 알 수 있었다.

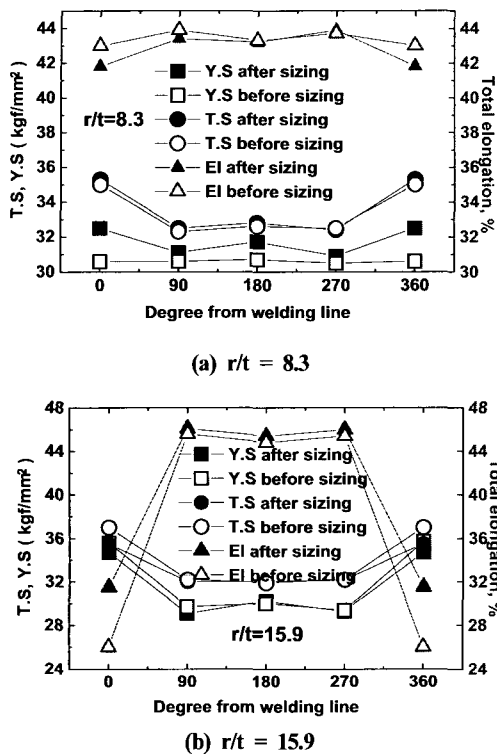


Fig. 12 Effect of sizing process at roll forming process

2.3 Pre-bending 공정

다음으로 파이프의 pre-bending시 공정변수의 영향에 대해 살펴보자. 다음과 같은 형상의 제품의 경우 U형상을 이루고 있기에 직선 파이프를 금형에 넣을 수 없다. 그러므로 반드시 제품 형상에 가깝게 파이프를 pre-bending해야 한다. 파이프를 굽힘 가공하는 방법은 여러 가지가 있는데 H/F에 가장 많이 적용하는 방법이 로터리 드로우 벤딩(rotary draw bending)이다. 이것은 파이프에 인장력을 가해 굽힘 내측에서의 주름발생을 억제하고 작은 굽힘 반경에도 대응할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또 중요한 것이 파이프 굽힘시 굽힘 장치중 하나인 맨드렐의 선택이다. 가장 많이 사용되는 맨드렐(mandrel)형상은 피치 형상(Pitch type)과 플러그형상(Plug type)이다. (Fig. 13) 피치 형상은 파이프의 굽힘 후에 굽힘부의 형상이 원형을 유지하는 장점이 있다. 하지만 피치형상의 맨드렐은 굽힘부의 형상을 유지하려 하

기 때문에 굽힘부 바깥 면의 변형률이 커지는 단점도 있다. 반면 플러그 형상 맨드렐은 굽힘부의 형상을 유지하지 못하지만 굽힘부 바깥 면이 안쪽 면으로 들어오면서 굽힘부의 변형률을 감소시키는 장점이 있다.

맨드렐 형상에 따른 변형거동을 살펴보기 위해 직경 89mm, 두께 2.8mm의 90° 굽힘 공정을 해석하여 Fig. 13에 성형한계와 함께 나타내었다. 그 결과를 보면 피치형상의 맨드렐을 사용할 경우가 플러그 형상의 맨드렐을 사용할 경우가 변형률이 더 크게 나타났다. 이는 파이프 형상을 유지하면서 성형되는 맨드렐의 형상에 기인하는 당연한 결과이나 성형한계도 상의 평면변형부분으로 변형이 집중되는 점이 흥미롭다. 이와 같이 변형이 될 경우 그 이후의 H/F공정에서의 추가 변형이 어렵다는 것을 예상할 수 있다. 특히 이축 인장 변형이나 추가적인 평면 변형률 상태로의 변형은 극히 제한 될 것이다, 이와 달리 플러그 형상의 변형률 분포는 일축인장 변형모드를 나타낸다. 이는 추가적인 이축 인장변형이나 평면 변형 상태로의 계속적인 변형에도 여유가 있다. 따라서 H/F 성형시 굽힘 공정의 맨드렐 형상 결정은 이후 공정에서 많은 변형률 변화를 가져올 수 있는 여지가 있으므로 최종적인 제품의 형상에 따라 신중히 결정되어야 한다. 이밖에도 굽힘시의 마찰, pressure die의 압력, wiper die의 유무에 따라 굽힘 변형은 큰 영향을 받는다.

2.4 초기압력의 영향

pre-bending공정이 끝나고 H/F공정이 시작될 때 금형에 투입된 파이프는 축방향의 실린더에 의해 실링(sealing)이 되고 내부에 압력이 가해지게 된다. 이는 장비의 특성에 따라 변하기도 하지만 통상적으로 상형 금형이 하강시에 파이프에 초기 압력이 가하는 것이 성형적으로 유리하게 작용한다.

따라서 이때 가해지는 초기압력에 따라 제품의 성형에 미치는 영향을 살펴보자. 성형해석시 사용한 시간과 압력과의 관계를 Fig. 14에 나타내었다. 초기 압력을 75, 125bar 두 가지로 하여 상, 하형의 금형이 단힌 후 최종 성형 압력 1200bar로 성형해석을 실시하여 Fig. 14에 나타내었다. 이때 금형과 파이프 사이의 마찰계수는 0.1로 하였다. 해석 결과를 보면 초기 압력이 75bar인 경우는 금형이 단힌 후 금형과 제품사이의 공간으로의 재료 유입이 이루어지지 않아 압력 증가시 파단이 발생한다. 반면 압력이 125bar 정도이면 금형하강에 의해 적절히 재료가 코너쪽으로 이동하여 파단이 발생하지 않는다. 한편 이 보다 더 큰 초기 압력이 가해지면 금형의 하강에 따라 재료의 소성변형이 과대하게 발생하여 파단에 이르

Hydroforming 공정변수의 영향

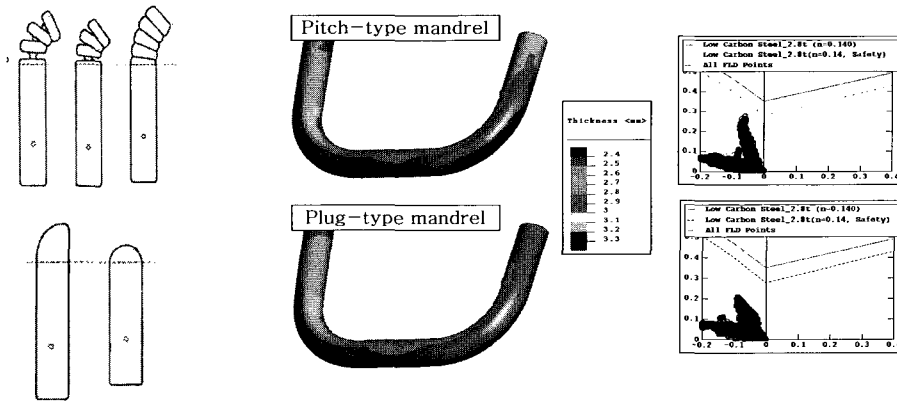


Fig. 13 Strain distribution according to mandrel type at bending process

게 된다. 이와 같은 결과로 보면 제품의 물성과 성형시 초기 압력은 불가분해 관계가 있을 것으로 예상되며 초기 압력이 성형에 직접적인 영향을 줄 수 확인할 수 있다. 또한 초기 압력이 작을 경우 제품에는 주름이 나타나 최종성형시에 제품 불량률의 원인이 된다. 이 초기 압력은 실제 트라이 아웃에서 적절히 선정되어야 하나 제품의 공정 및 금형설계에 성형해석을 통하여 초기 압력 범위를 셋팅하는 것이 시간을 단축시킬 수 있다.

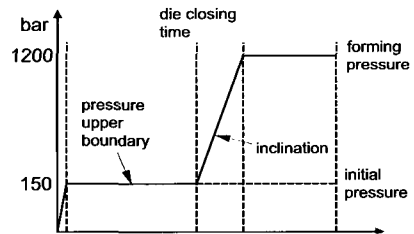


Fig. 14 Relationship of forming time vs. pressure

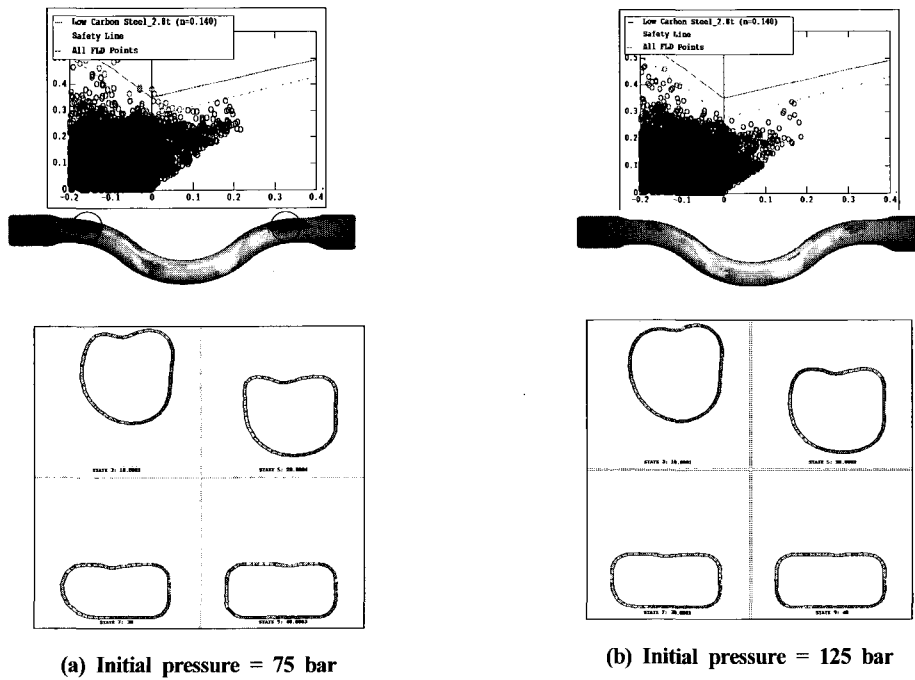


Fig. 15 Effect of initial pressure for hydroforming

2.5 해석의 신뢰성 검증

파이프의 pre-bending시 형상과 두께 분포, 변형률 분포에 대해 예측하기 위해 성형해석을 실시하였고, 해석결과와 실제 파이프 굽힘 후 주요 부위의 형상과 두께 분포를 비교한 결과를 Fig. 16에 나타내었다. 파이프 두께는 2.8mm이고 맨드릴은 플러그 형상을 사용하였다. 파이프 굽힘부에서의 두께분포는 Fig. 16과 같이 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 그러므로 성형해석을 통한 파이프 굽힘 해석은 신뢰할만하다고 볼 수 있다. 한편 파이프와 장치 사이의 마찰력을 정확하게 측정할 수 없어 CAE에서 0.1로 가정하였다. 또한 pre-bending후에 H/F 성형한 결과와 제품의 주요단면의 형상과 두께분포를 해석결과와 함께 Fig. 17, 18에 나타냈다.

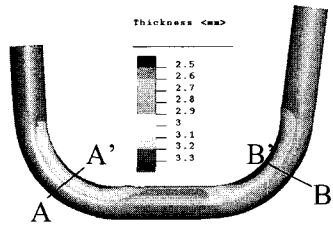


Fig. 16 Comparison of experiment & calculation values for section after prebending

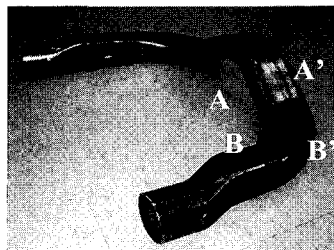
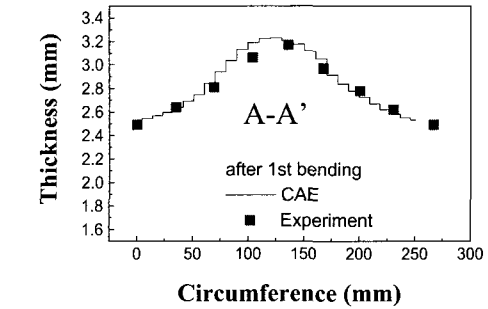


Fig. 17 Specific section for hydroformed part

Table 3 Dimension of typical sections for H/F part

Section	Length of section(mm)	Ratio of expansion(%)
A-A'	288.29	3.0
B-B'	283.47	1.3
C-C'	281.39	0.5

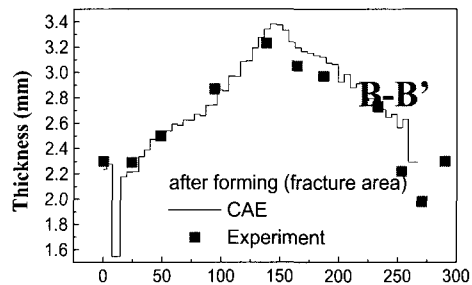
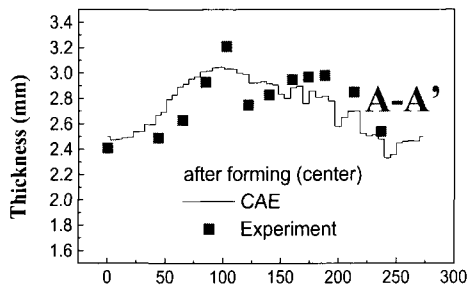


Fig. 18 Comparison of experiment & calculation values after hydroforming

3. 결론

(1) 파이프 두께 t , 반경 r 인 경우 r/t 가 증가할수록 굽힘에 의한 유효변형률값이 작아 판재의 기계적 성질을 크게 저하시키지 않는다. 기계적성질의 저하는 연신율의 감소는 크지 않고 초기 항복강도의 증가가 크게 나타났다.

(2) 항복응력이 큰 경우 재료의 가공경화능력이 저하되어 한 부분에 변형이 집중하면 경화효과에 의한 재료의 저항력이 저하되어 빠르게 국부네킹을 일으키게 된다. 따라서 조관 시에 재료의 가공경화를 적게 할 수 있는 roll forming die의 설계가 필요하다.

(3) 파이프 가공 공정 중에 굽힘 변형 이외의 다른 가공경화 인자인 조관 사이징 공정으로 인한 기계적 물성 변화는 거의 없는 것을 알 수 있었다.

(4) H/F 성형시 굽힘 공정의 맨드릴 형상 결정은 이후 공정에서 많은 변형률 변화를 가져올 수 있는 여지가 있으므로 최종적인 제품의 형상에 따라 신중히 결정되어야 한다.

(5) H/F 성형시 초기압력에 따라 최종성형에 상당한 영향을 준다. 초기압력이 작으면 주름이나 파단이 발생하게 되며 제품 형상에 따라 적절한 초기 압력의 설정이 필요하다.

(6) H/F 공정에 성형해석의 신뢰성을 검증하였으며 실험 값과 해석 결과가 잘 일치하고 있다.

후 기

본 연구는 1999년도 국가중점 연구개발사업 "자동차 경량화 재료개발 사업" 과제의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Koehr R., 1997, "Ultra Light Steel Auto Body: From Concept to Hardware", IBEC
 (2) Van Schaik, M., 1997, "The Use of Hydroforming

in The ULSAB Project", IBEC
 (3) Bruggemann, B., 1997, "Hydroformed Body Side Structure in Buick Park Avenue: Introducing New Technology To Current Production in a complex Product Environment", pp. 1~5, IBEC
 (4) F. Dohmann and C. Hartl, 1996, "Hydroforming - A method to manufacture lightweight parts", Journal of materials processing technology, Vol 60, pp.669~676.
 (5) Proceedings of TPA's 2nd annual Automotive tube conference, 1997, Tube and Pipe Association, International, MAY 13-14, Detroit, MI, USA.
 (6) Proceedings of TPA's 3rd annual Automotive tube conference, 1998, Tube and Pipe Association, International, MAY 12-13, Detroit, MI, USA.
 (7) Proceedings of TPA's 4th annual Automotive tube conference, 1999, Tube and Pipe Association, International, April 26-27, Dearborn, MI, USA.
 (8) 1st International Hydroforming congress, 1997, Nov 4-5, Bochum, Germany.
 (9) 2nd International Hydroforming congress, 1998, Nov 18-19, Opryland Hotel/Nashville, USA.
 (10) Gary Morphy, 1997, "Hydroforming and expanding high strength tube for automotive structural applications", Proceedings of IBEC-body assembly & manufacturing, p103.
 (11) Schaik, M.V., et al., 1998, "The hydroforming Technology seen through the Eyes of a Material Supplier and a Hydroformer", Proceedings of the IBEC on Body Manufacturing, Assembly, and Advanced Manufacturing, Vol. 5, pp. 109~118,
 (12) Harry Singh, 1999, "Tube Hydroforming Process and Tool Design Optimization Using Computer Simulation", Fourth Annual Automotive Tube Conference Focus on Hydroforming.
 (13) Kiuchi. M et. al, 1996, "Development of simulation model of roll forming processes", J of JSTP, 27-306, pp. 874~881.