

알루미늄 튜브 하이드로포밍에서의 예비 굽힘 공정의 효과에 관한 연구

Study on the Influence of Pre-bending in an Aluminum Tube Hydroforming

임 희 택* 박 경 창** 김 형 종*** 김 현 영****
Lim, Hee-Taek Park, Kyoung-Chang Kim, Hyung-Jong Kim, Heon-Young

Abstract

Recently social demands of fuel economy and environmental regulations require the development of lightweight components and new manufacturing technologies. The aluminum tube hydroforming is a manufacturing process which can provide lightweight components as automotive parts. In this paper, the hydroformability of aluminium tube in different condition of bending process is presented. An investigation has been conducted on how to control the deformed shape and its effect on thinning distribution after hydroforming by using finite element simulation. Finite element simulation of tube hydroforming for automotive trailing arm is carried out to explore the effect of 2-dimensional and 3-dimensional bending.

키워드 : 예비굽힘, 알루미늄, 관재액압성형
Keywords : *pre-bending, aluminum, tube hydroforming*

1. 연구배경과 내용

최근 자동차 업계는 기업간의 인수, 합병으로 국제적인 경계가 없어지고 있다. 세계 자동차 회사들은 생산 비용을 줄이기 위해 구조조정과 부품조달 체계의 개선 및 경량화, 고품질을 통하여 가격 경쟁력 및 기술력의 확보를 위해 노력하고 있다. 미국, 일본, 유럽과 같은 선진국을 중심으로 경량화 및 공정감소를 위해 하이드로포밍(hydroforming), 레이저 용접관재(tailor welded blanks:TWB)를 적용한 성형 및 고장력 강관의 적용이 그 사례이다[1].

하이드로포밍 공정은 1960년대에 도입되어 배

기 부품이나 세면대 배관 부품등에 사용되었으나 자동차 부품 산업에 적용된 1990년대 들어서 급속히 발전하기 시작하였다. 하이드로포밍 기술은 여러 관재로 이루어진 부품을 한번의 공정으로 생산함으로써 금형의 개수를 줄일 수 있으며 공정수를 단축할 수 있고 공정간의 이동시 소요되는 인력 및 시간단축을 할 수 있어 생산에 매우 유리하다. 이 외에도 하이드로포밍 공정은 (a) 균일한 제품 두께, (b) 성형 후 재료의 좁은 경화 영역, (c) 정밀한 제품 생산 가능, (d) 가격 경쟁력 향상, (e) 부품 개수 감소에 의한 경량화, (f) 용접 플랜지의 삭제 및 하이드로 포밍에서 가공경화 현상으로 인한 강도 및 강성의 증가, (g) 강도의 증가로 인한 적용관재의 두께를 감소하여 얻는 경량화등의 장점을 가지고 있다[2]~[5].

본 연구의 목적은 튜브 하이드로포밍 기술을 이용하여 자동차용 알루미늄 트레일링 암을 개발하고자 한다. 알루미늄 트레일링 암의 제품 설계 및

* 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스 공학과 박사 과정
** 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스 공학과 석사 과정
*** 강원대학교 기계메카트로닉스 공학부 교수, 공학박사
**** 강원대학교 기계메카트로닉스 공학부 부교수, 공학박사

금형 설계를 위하여 성형해석을 수행하였다. 특히 예비 굽힘 방안에 따른 최종 하이드로포밍 공정의 성형성을 평가하였으며, 성형 해석 결과를 바탕으로 예비 성형 및 최종 하이드로포밍 공정에 대한 굽힘 설계안을 제시하고자 한다.

2. 예비성형을 적용한 알루미늄 튜브 하이드로포밍 공정해석

2.1 단힘해석을 이용한 단면 성형성 평가

Fig. 1은 트레일링 압의 제품도를 이용한 유한요소 금형모델 제작의 과정을 나타낸다. Fig. 2는 유한요소 해석에 필요한 금형의 구성을 보여준다.

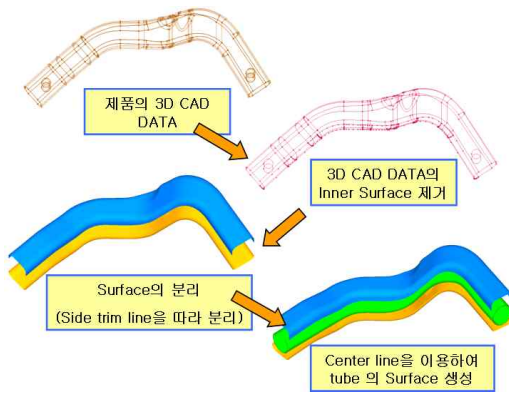


Fig. 1 Process of making finite element model from CAD data

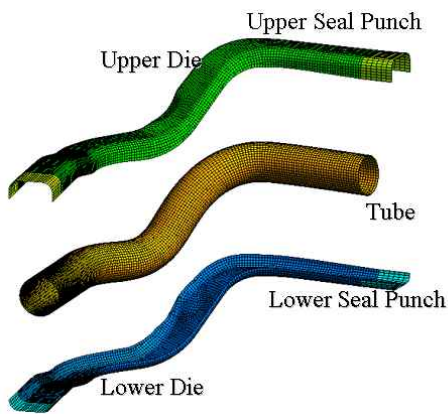


Fig. 2 Finite element model for die closing simulation

단힘 해석을 이용한 단면 성형성 평가는 하이드로포밍 공정 해석을 시작하기 전에 제품도로 구성된 금형만으로 튜브가 제대로 안착되는가를 평가하는 해석이다. 이 해석을 위해서 Fig. 2와 같이 금형의 중심선을 따라 튜브를 구성하였으며, 굽힘은 전혀 고려하지 않았다.

튜브의 확관율을 계산하는 식은 식(1)과 같다.

$$E_p = \frac{(P_d - P_t)}{P_t} \times 100 \quad (1)$$

E_p : Expansion Percentage

P_d : Die Cavity Perimeter

P_t : Tube Outer Perimeter

Fig. 3은 확관율이 3%일 때 금형 단힘 해석 결과와 변형된 단면 형상이다. 제품에서 튜브 직경에 비해 폭이 좁은 부분에서 금형이 단힘 때 튜브가 제대로 안착되지 못하고 있다.

Fig. 4는 각 확관율별 단힘 해석결과이다. 확관율이 높아서 성형 해석시에 문제 발생이 예견되는 구간을 15%로 하였다. 실제 제품을 고려할 때 확관율 3%의 튜브를 사용하는 것이 유리하지만, 단힘 해석의 단면 형상을 살펴보았을 때, 확관율이 클수록 주름이 심하게 발생하여 최종적인 제품형상에 문제를 나타낼 수 있다고 판단되었다. 이 결과를 통하여 현재의 제품도를 이용하여 만든 하이드로포밍 다이만으로 해석을 진행할 경우 문제가 발생함을 확인 할 수 있었다.

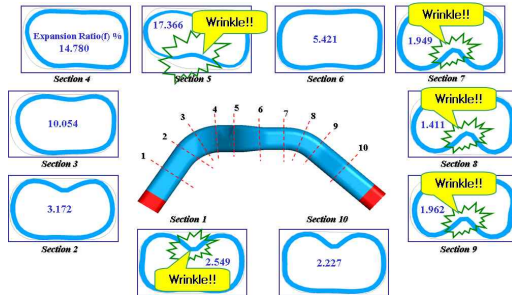


Fig. 3 2D section formability check at expansion ratio 3%

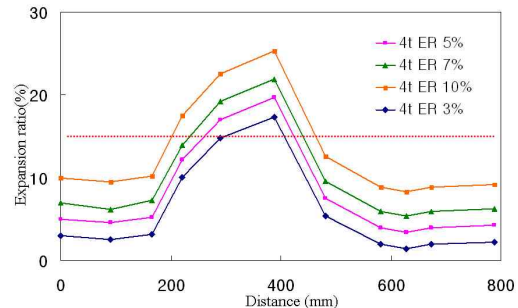


Fig. 4 Result of die closing simulation

선형 단립 해석을 이용하여 제품의 확관율이 높은 구간을 수정하여 전체적으로 확관율이 5%내외가 되도록 금형 형상을 변경하였으며, 이에 대한 단립 성형성 평가를 실시하였다. Fig. 5는 변경된 제품의 형상을 보여준다.

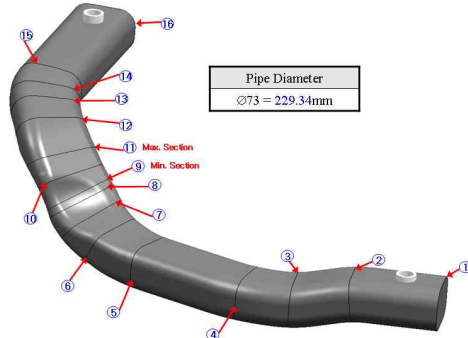


Fig. 5 Modified product

Fig. 6은 확관율 3%, 5%, 7%의 변형형상을 비교한 그림이다. 확관율이 낮은 경우(3%)에는 금형 캐비티(cavity)내로 안착이 잘 일어났으나 튜브의 입구 쪽에서 주름이 발생하였고, 확관율이 높은 경우(7%)에는 수직방향만으로 안착이 잘되었으며, 확관율 5%의 경우는 주름 없이 금형 캐비티 내로 잘 안착되었음을 확인 할 수 있었다. 이 단립 해석 수행 결과로 확관율 5%인 지름 75mm의 튜브를 최종적으로 결정할 수 있었다.

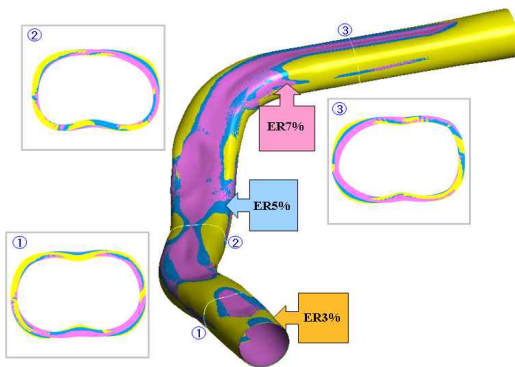
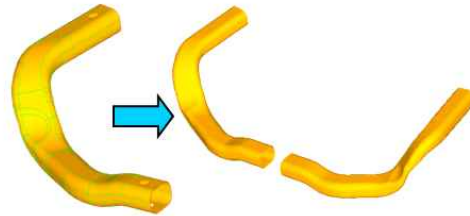


Fig. 6 Comparison ER3%, ER5%, ER7% for deform shape

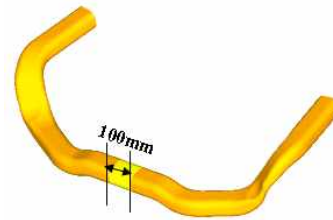
2.2 금형설계

대칭이 되는 제품을 연결하여 하나의 공정에서 생산할 경우 설비기기의 감소 및 생산 공정 감소로 인한 생산비 절감의 효과를 볼 수 있으므로, 하나의 금형에서 두가지 제품을 동시에 생산할 수 있는 듀얼 타입의 금형을 고려하였다. Fig. 7은 제

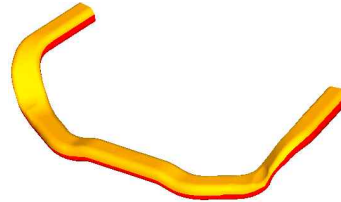
품도를 이용하여 듀얼 타입의 유한요소 모델을 만드는 과정을 나타낸 것이다. Fig. 8은 유한요소 모델을 나타낸다.



(a) Elimination of inner surface (b) Reflection of die geometry



(c) Connection for die geometry



(d) Separation for die geometry

Fig. 7 Process of making the dual type die

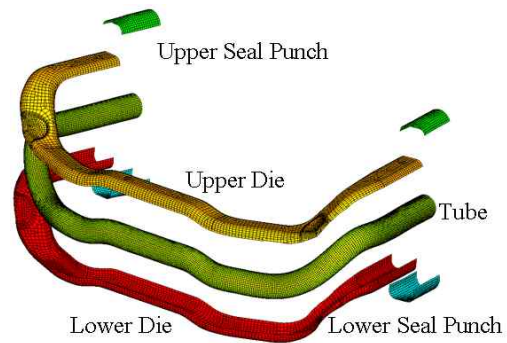


Fig. 8 Finite element model of dual type

트레일링 압의 성형에 사용되는 프레스의 용량이 2500톤이고 하이드로포밍 공정에서 튜브가 확장되는 양상은 원주방향 응력(Hoop stress)과 같으므로, 재료의 소성에 필요한 힘(항복강도-파단강도)을 고려하여 제품 성형에 필요한 압력을 계산하

여 보았다. 면적은 다이가 이동되는 수직방향과 만나는 x-y 평면에 투영된 다이의 면적을 계산한 값이다. 원주방향의 응력은 축방향의 응력의 2배이므로 원주방향의 응력을 기준으로 소성력을 고려하였으며, 파단강도에 대하여 적용한 계산식은 다음과 같다.

$$\sigma_u = \frac{pd}{2t} \quad (2)$$

$$p = \frac{2\sigma_u}{d} = \frac{2 \times 4\text{mm} \times 245.97\text{Mpa}}{75\text{mm}} = 26.24\text{MPa}$$

$$F_u = Ap \quad (3)$$

$$= 453215.431\text{mm}^2 \times 26.24 \times 10^6\text{N}/10^6\text{mm}^2$$

$$\approx 1214\text{tonf}$$

위의 계산식에 의하면 듀얼 타입의 금형을 이용하여 성형하여도 프레스의 압력이 더 높아서 성형 압력의 여유를 가지므로 제품 성형에 무리가 없다고 판단된다. 이를 근거로 차후의 모든 성형 해석 과정에서는 듀얼 타입의 금형을 적용하며, 특정한 언급이 없는 한 듀얼 타입의 금형(또는 다이)을 금형(또는 다이)로 지칭하기로 한다. 본 논문은 금형의 형상에 따른 예비 굽힘 공정을 실시하였다

2.3 예비 굽힘 공정 해석

하이드로포밍 공정을 원활히 수행하기 위해서 소재가 다이 캐비티(cavity) 내에 안착될 수 있도록 굽힘 공정을 거치게 된다. 이는 일종의 예비성형 공정이며 튜브 굽힘 공정의 신뢰성과 재현성은 하이드로포밍에 있어 매우 중요한 요소이다. 굽힘 공정을 거치면서 소재는 상당한 소성 변형을 받게 된다. 특히 소재와 제품간의 둘레 길이 변화가 별로 없는 경우에는 굽힘 공정에서의 변형이 성형 한계를 결정하는 요인이 될 수도 있다[6].

각각의 회전속도 변수에 따라 굽힘 해석을 수행한 결과 해석시간에 큰 차이를 나타냈다. Fig. 9의 곡선을 살펴보면 관성력을 무시할 수 있는 굽힘 다이의 회전속도는 5mm/msec이하라는 것을 알 수 있었다[7],[10].

또한 본 연구에서는 예비 굽힘 성형의 효과를 확인하기 위하여 2차원(z축으로만 회전시킴) 굽힘 성형과 3차원(z축과 더불어 x축도 회전시킴) 굽힘 성형의 두 가지 굽힘 성형 해석을 실시하였다. 제품의 도면 형상은 Fig. 10, Fig. 11과 같다. 튜브는 이방성, 탄소성 재료로 가정하였으며, 물성치는 Table 1과 같다. Fig. 12는 재료의 진응력-진변형률 선도를 보여주고 있다. 이 재료는 스위스의 VAW사에서 개발한 AlMg3.5Mn 합금이다.

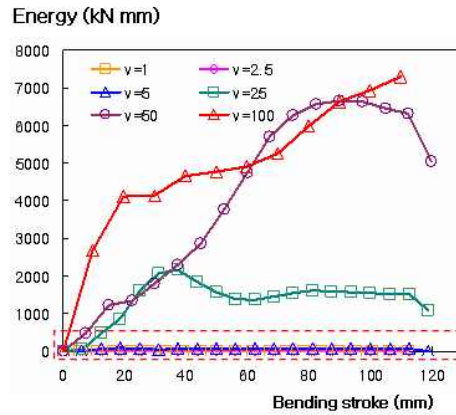


Fig. 9 Kinetic energy curve of bending simulation

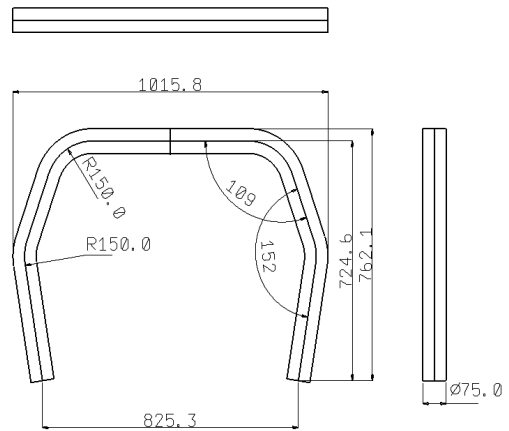


Fig. 10 2D bending geometry

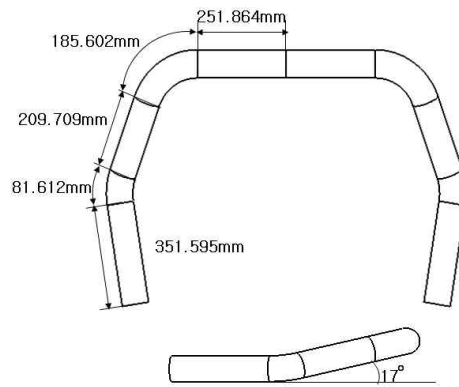


Fig. 11 3D bending geometry

Table 1 Material property of AlMg3.5Mn aluminium alloy

Density	2.66e - 6 kgf/mm ³	
Number of integration point	3	
Young's modulus	71 GPa	
Poisson's ratio	0.33	
Thickness	4mm	
Anisotropy constant	90°	0.64
	45°	0.83
	0°	0.63

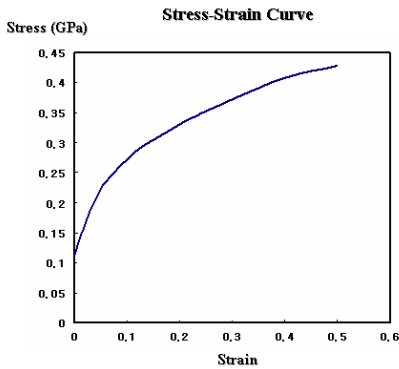


Fig. 12 Stress-strain curve of AlMg3.5Mn aluminium alloy

2D 굽힘 성형해석의 경우, Fig. 10을 살펴보면 4개소의 굽힘이 필요함을 알 수 있다. 금형의 입구와 출구쪽의 폭이 매우 좁기 때문에 정확한 굽힘을 하지 않을 때는 굽힘한 튜브를 금형에 안착시키기가 어렵게 된다.

Fig. 13는 연속적인 굽힘 성형해석의 결과이다. 총 4단계로 이루어 졌으며 최종 결과는 Fig. 14(d)와 같다.

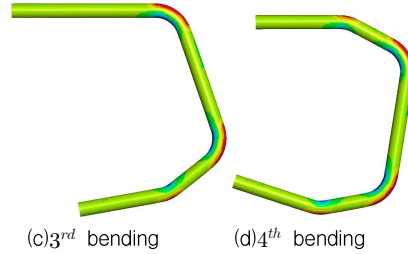
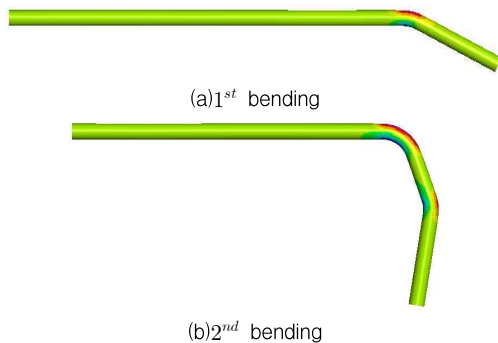


Fig. 13 Continuous bending simulation

3D 굽힘 성형해석의 경우, Fig. 11을 살펴보면 Fig. 10과 마찬가지로 4개소의 굽힘이 필요함을 알 수 있으나, 굽힘 성형시 2차 굽힘 성형에서 3차 굽힘 성형까지의 구간이 튜브 입구로부터 1차 굽힘 성형이 되는 부분에서 17도 경사를 이루고 있어서 3D 굽힘 성형을 고려하였다.

Table 2에서 2D 굽힘 성형해석과 3D 굽힘 성형 해석결과와 최대 두께 변형률을 비교하였다. 2D 굽힘 성형과 3D 굽힘 성형의 해석결과 값의 차이가 없는 이유는 굽힘 거리(Bending stroke)가 거의 같기 때문이며, 2차 벤딩 이후의 최대 두께 변형률 값이 같은 것은 2차 벤딩에서 최대 두께 변형이 일어난 상태로 연계해석이 이루어졌기 때문이다.

Table 2 Comparison 2D bending with 3D bending

Bending Order	Maximum Thinning	
	2D	3D
1 st bending	0.0867	0.0689
2 nd bending	0.1145	0.1141
3 rd bending	0.1145	0.1141
4 th bending	0.1145	0.1141

2.4 하이드로포밍 공정 해석

Fig. 14(a)는 2D 굽힘 성형결과를, Fig. 14(b)는 3D 굽힘 성형결과를 이용한 하이드로포밍 공정해석을 위해 구성된 틀을 나타낸 그림이다. 상형 금형의 연결부분은 튜브를 미리 잡아주어 하이드로포밍 공정 및 소재를 유입 할 때, 소재가 밖으로 빠져 나가는 것을 방지하기 위하여 고정금형(Holding die)을 구성하였다[8],[9].

본 연구에서는 2D 굽힘 성형결과와 3D 굽힘 성형결과에 피딩 거리를 20mm, 40mm, 60mm, 80mm씩 각각 주어 성형양상을 살펴보았다. Fig. 15는 프레스가 줄 수 있는 최대의 유체압력곡선, 피딩거리 및 Tool의 이송거리를 나타낸 그래프이다. 유체압력은 최대 1200바(bar)로 제한하여 저압 성형방법을 적용하였다.

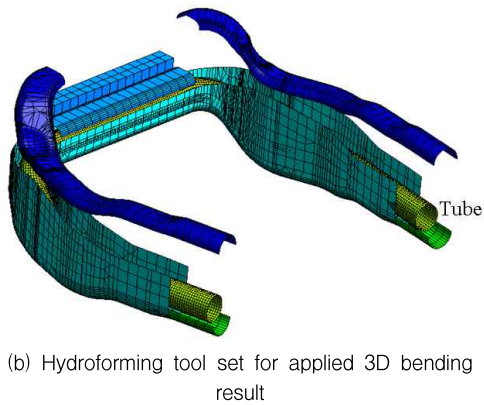
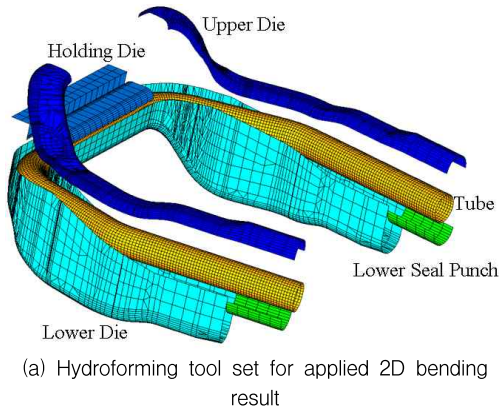


Fig. 14 Hydroforming simulation condition with die stroke order

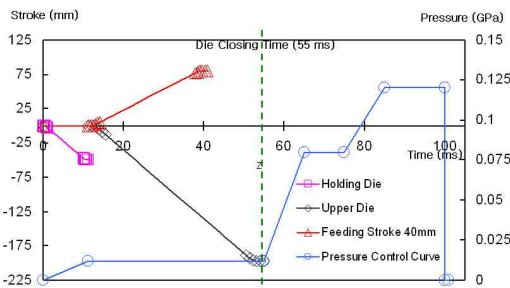


Fig. 15 Example of hydroforming simulation condition for using curves at feeding stroke 40mm

2D 굽힘 성형을 이용한 하이드로포밍 해석결과를 살펴보면, 20mm와 40mm의 피딩거리를 준 경우에는 주름이 생기지는 않았으나, 2차와 3차 굽힘 성형 구간의 코너부에 의하여 소재가 원활히 유입되지 않았다. 60mm와 80mm의 피딩거리를 준 경우 또한 소재가 원활히 유입되지 않았으며, 소재 유입의 가중으로 인하여 금형에 안착이 되지 않고 주름이 생겼다. 하이드로포밍 해석 결과에 따른 두께감소율을 Table 3에 정리하였다.

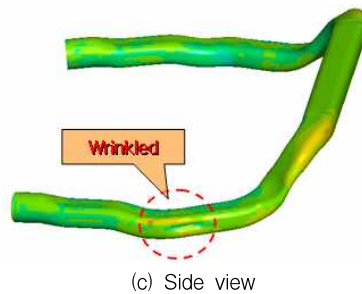
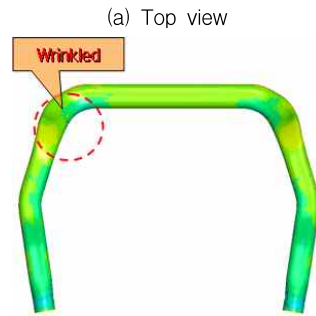
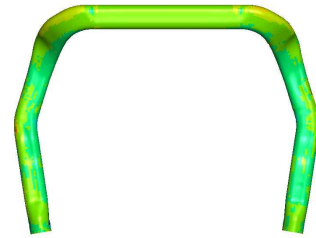


Fig. 17 Thinning distribution of hydroforming product at feeding 80mm

Table 3 Maximum thinning table for each hydroforming simulation

		Thinning at each initial pressure		
		0GPa	0.006GPa	0.012GPa
Feeding stroke	20mm	0.7250	0.7373	0.6881
	40mm	0.6678	0.6769	0.6500
	60mm	0.6250	0.5264	0.3364
	80mm	0.4837	0.3526	0.3280

3D 굽힘성형을 이용한 하이드로포밍 해석 결과 피딩 거리가 20mm인 경우 2차와 3차 굽힘 성형이 되었던 코너부위가 국부적으로 매우 얇아짐을 알 수 있었다. 반면 피딩 거리가 60mm, 80mm의 경우는 2차와 3차 굽힘 성형 구간의 코너부에 의한

여 소재가 원활히 유입되지 않았고, 그러한 상태에서 소재 유입의 가중으로 인하여 금형에 안착이 되지 않고 주름이 생겼으나, 2D 굽힘 성형을 이용한 하이드로포밍 해석결과와 비교하여 두께감소율이 확연히 감소하였다. 피딩 거리가 40mm일때, 두께변형률도 감소하고, 주름도 생기지 않았으며, 두께감소율도 2D 굽힘 성형을 이용한 하이드로포밍 해석결과와 비교하여 확연히 줄어들었음을 알 수 있었다. 전체적인 해석 결과, 초기 압력이 낮았을 때 보다는 높았을 때 두께 감소율이 감소하는 성향을 나타냈다. 이 결과에 의거하여 초기 압력은 0.012GPa만 주고 피딩거리 45mm, 50mm, 55mm에 대하여 하이드로포밍 해석을 수행하였으며, 해석결과 주름이 발생하여, 적정 피딩거리는 40mm, 초기 압력은 0.012GPa임을 알 수 있었다. 하이드로포밍 해석 결과에 따른 두께감소율을 Table 4에 정리하였다.

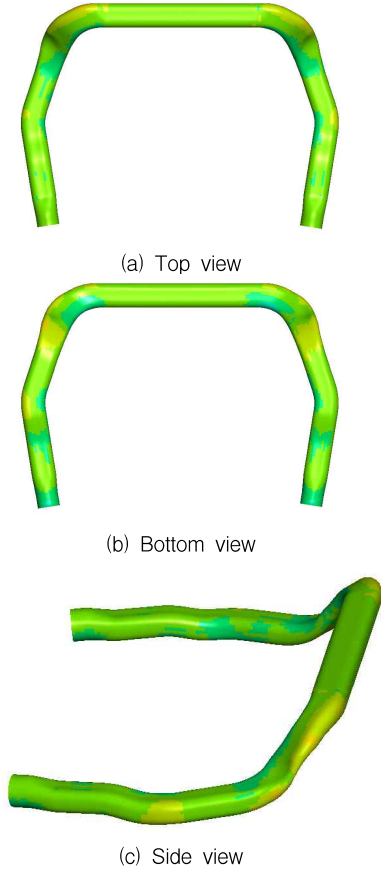


Fig. 18 Thinning distribution of hydroforming product at feeding 40mm

Table 4 Maximum thinning table for each hydroforming simulation

		Thinning at each initial pressure		
		0GPa	0.006GPa	0.012GPa
Feeding stroke	20mm	0.6355	0.5901	0.5605
	40mm	0.3089	0.2580	0.2414
	45mm	X	X	0.2316
	50mm	X	X	0.2152
	55mm	X	X	0.2068
	60mm	0.2617	0.2232	0.1875
	80mm	0.2170	0.1680	0.1572

3. 결론

본 연구에서는 유한요소프로그램을 이용하여 알루미늄 튜브 하이드로포밍에서의 예비 굽힘 공정의 효과에 관한 연구를 수행해 보았다. 굽힘 속도, 초기압력, 굽힘 성형시의 피딩력, 하이드로포밍시의 피딩거리와, 2D 굽힘 해석결과와 3D 굽힘 해석결과를 각각 적용하여 변수에 대한 영향을 알아보았으며, 연속적인 공정 해석에서의 공정수를 줄이기 위한 제안을 하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 하이드로포밍 공정해석에서 상형금형이 닫히는 동안 발생시켜주는 초기압력은 재질이 알루미늄인 것을 고려해 볼때, 큰 영향을 주었다고 할 수 있다. 제품의 형상이 복잡하지 않아서, 프리포밍공정을 생략하였기 때문에 초기압력에 의해서 재료가 코너쪽으로 이동하는 효과가 발생하였기 때문이라고 예상된다.

2. 하이드로포밍 공정에서 튜브의 성형성을 가장 높여주는 인자는 피딩 거리(feeding stroke)이다. 피딩 거리를 이용하여 두께변형률을 작게 할 수 있으며 소재의 유입이 적절히 이루어져 파단이 많이 억제 되었다. 하지만 피딩 거리를 과도하게 주면 주름이 발생하고 안착이 잘되지 않게 되어 역효과가 발생할 수도 있으므로 금형형상에 따른 적절한 피딩 거리가 필요하다.

3. 2D 예비 굽힘 성형 결과를 이용한 하이드로포밍 해석결과와 3D 예비 굽힘 성형 결과를 이용한 하이드로포밍 해석결과를 살펴보았을 때, 2D에서는 금형의 굴곡에 따른 위상차를 보정하지 못하였으나 3D에서는 위상차를 보정하여 소재의 유입을 원활하게 하였다. 그러므로 동일형상의 금형에 대해서 2D 예비 굽힘 성형 보다는 3D 예비 굽힘 성형이 제품의 성형성을 좋게 해준다고 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] Kim, H. J., Jeon, B. H., Kim, H. Y. and Kim, J.J., 1993, "Finite Element Analysis Liquid Bulge Forming Process of T-Shaped Pipe by An Explicit Code", *Advanced Technology of Plasticity*, pp.545~550.
- [2] 신용승, 김현영, 전병희, 오수익, 박병철, 이우식, 2001, "용접관재 유압성형을 이용한 자동차 서브프레임의 트리아아웃과 금형설계", *춘계학술대회 논문집* pp.59~62.
- [3] 김현영, 신용승, 홍춘기, 전병희, 오수익, 2001, "자동차 엔진마운트 브래킷의 관재 및 용접관재 유압성형에 대한 성형해석", *한국소성가공학회 논문집*, Vol 10. num 1 , pp.3~14.
- [4] 양재봉, 전병희, 오수익, 2000, "민감도 해석을 이용한 Tube hydroforming의 성형공정 최적화에 대한 연구", *한국소성가공학회지*, 제9권 제7호, pp.723~730.
- [5] 강대철, 윤석만, 전병희, 오수익, 전한수, 2000 "Weld line 위치에 따른 Hydroforming 특성에 관한 연구", *한국소성가공학회지*, 제9권 제5호, pp.504~511.
- [6] 김현영, 임회택, 서창희, 이우식, 2003, "예비굽힘 및 예비성형공정의 효과를 고려한 자동차 서브 프레임의 관재액압성형", *춘계학술대회 논문집* pp.402~408.
- [7] 임회택, 2003, "예비성형을 적용한 자동차 서브 프레임의 관재액압성형해석", *강원대학교 공학 석사학위논문*
- [8] H.-U. Lücke, Ch. Hartl, T. Abbey, 2001, "Hydroforming", *Journal of Materials Processing Technology* 115, pp.87~91.
- [9] Sokolowski, T., Gerke, K., Koc, M., Ahmetoglu, M. A. and Altan, T., 1998, "Evaluation of Tube Formability and Material Characteristics in Tube Hydroforming", Report No. ERC/NSM-R-98-25, pp.1-20.
- [10] 김현영, 임회택, 서창희, 이우식, 2003, "예비굽힘 및 예비성형공정의 효과를 고려한 자동차 서브 프레임의 관재액압성형", *한국소성가공학회지, 춘계학술대회 논문집*, pp402~408.