

# 알루미늄 튜브 하이드로포밍에 대한 2D 와 3D 예비 굽힘 공정의 효과 비교

김현영\*\*, 김형종\*\*, 임희택\*, 박경창\*, 박창수\*\*\*, 이동재\*\*\*

## Comparison of 2D and 3D Pre-bending in a Aluminum Tube Hydroforming Process

H. Y. Kim, H. J. Kim, H. T. Lim, K. C. Park, C. S. Park and D. J. Lee

### Abstract

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.

**Key Words** : Pre-bending, Aluminum, Tube Hydroforming

### 1. 서 론

최근 자동차 업계는 기업간의 인수, 합병으로 국제적인 경계가 없어지고 있다. 세계 자동차 회사들은 생산 비용을 줄이기 위해 구조조정과 부품 조달 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 용접판재(tailor welded blanks:TWB)를 적용한 성형 및 고장력 강관의 적용이 그 사례이다.<sup>(1)</sup>

하이드로포밍 공정은 1960 년대에 도입되어 배기 부품이나 세면대 배관 부품 등에 사용되었으나 자동차

부품 산업에 적용된 1990 년대 들어서 급속히 발전하기 시작하였다. 하이드로포밍 기술은 여러 판재로 이루어진 부품을 한번의 공정으로 생산함으로써 금형의 개수를 줄일 수 있으며 공정수를 단축할 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 하이드로포밍에서 가공경화 연상으로 인한 강도 및 강성의 증가, (g) 강도의 증가로 인한 적용판재의 두께를 감소하여 얻는 경량화등의 장점을 가지고 있다.<sup>(2~5)</sup>

본 연구의 목적은 튜브 하이드로포밍 기술을 이용하여 자동차 알루미늄 트레일링 암을 개발하고자 한다.

\* 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스 공학과

\*\* 강원대학교 기계메카트로닉스 공학부 교수

\*\*\* ㈜윤영

알루미늄 트레일링 암의 제품 설계 및 금형 설계를 위하여 성형해석을 수행하였다. 특히 2D와 3D 예비 굽힘 방안에 따른 최종 하이드로포밍 공정의 성형성을 평가하였으며, 성형 해석 결과를 바탕으로 예비 성형 및 최종 하이드로포밍 공정에 대한 굽힘 공정 설계안을 제시하고자 한다.

## 2. 예비성형을 적용한 알루미늄 튜브 하이드로포밍 공정해석

### 2.1 단힘해석을 이용한 단면 성형성 평가

Fig. 1는 트레일링 암의 제품 형상을 보여준다. Fig. 2는 트레일링 암의 제품도를 이용한 유한요소 금형모델 제작의 과정을 나타낸다.

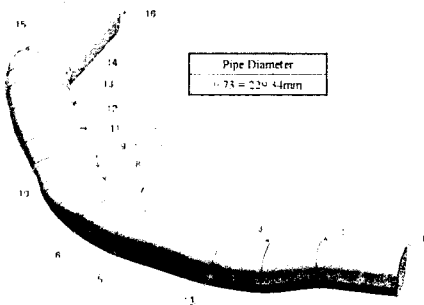


Fig. 1 Product design of trailing arm

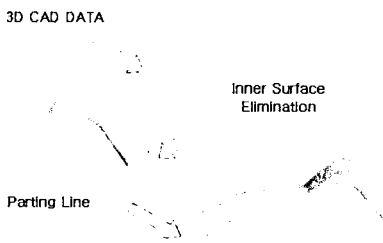


Fig. 2 Process of making finite element model from CAD data

Fig. 3은 확관율 3%, 5%, 7%의 단힘해석 결과의 변형형상을 비교한 그림이다. 확관율이 낮은 경우(3%)에는 금형 캐비티(cavity)내로 쉽게 안착되었으며, 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 단힘 해석 수행 결과로 확관율 5%인 지름 75mm의 튜브를 최종적으로 결정할 수 있었다.

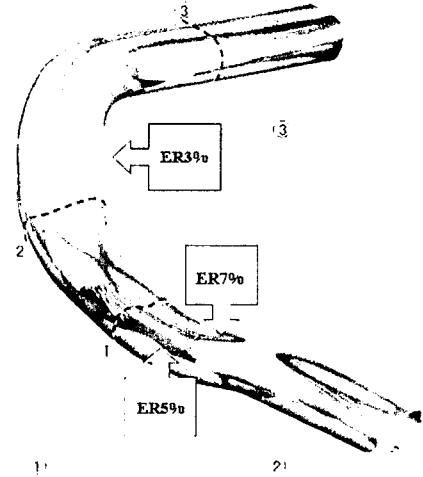


Fig. 3 Comparison ER3%, ER5%, ER7% for deform shape

### 2.2 금형설계

대칭이 되는 제품을 연결하여 하나의 금형에서 두 가지 제품을 동시에 생산할 수 있는 듀얼 타입의 금형을 고려하였다. Fig. 4는 유한요소 모델을 나타낸다.

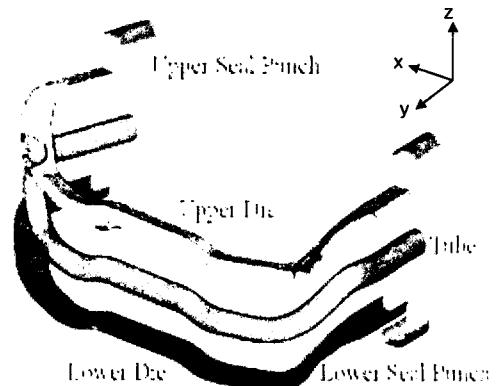


Fig. 4 Finite element model of dual type

### 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 소성변형을 받게 된다. 특히 소재와 제품간의 둘레 길이 변화가 별로 없는 경우에는 굽힘 공정에서의 변형이 성형한계를 결정하는 요인이 될 수도 있다.

회전속도에 따른 굽힘 해석을 수행한 결과, 관성력을 무시할 수 있는 굽힘 다이의 회전속도는 5mm/msec 이하라는 것을 알 수 있었다.<sup>(4)</sup>

또한 본 연구에서는 예비 굽힘 성형의 효과를 확인하기 위하여 2 차원(z 축으로만 회전시킴) 굽힘 성형과 3 차원(z 축과 더불어 x 축도 회전시킴) 굽힘 성형의 두 가지 형태의 굽힘공정에 대하여 유한요소 해석을 수행하였다. 각각에 대한 형상도 Fig. 5에 보였다. 재료는 스위스의 VAW사에서 개발한 AIMg3.5Mn 합금이다.

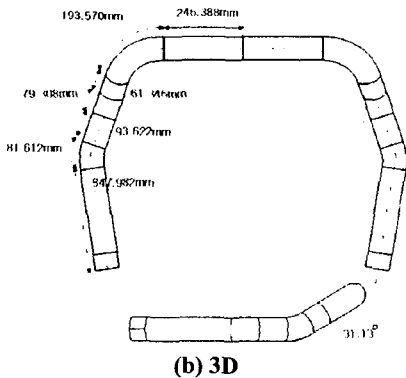
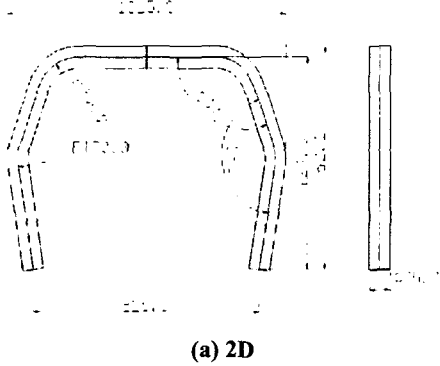


Fig. 5 Bending geometry

2D 굽힘 성형해석의 경우, Fig. 5(a)를 살펴보면 4 개소의 굽힘이 필요함을 알 수 있다. 금형의 입구와 출구 쪽의 폭이 매우 좁기 때문에 정확한 굽힘을 하지 않을 때는 굽힘한 튜브를 금형에 안착시키기가 어렵게 된다.

Fig. 6은 연속적인 굽힘 성형해석의 결과이다. 총 4 단계로 이루어 졌으며 최종 결과는 Fig. 6(d)와 같다.

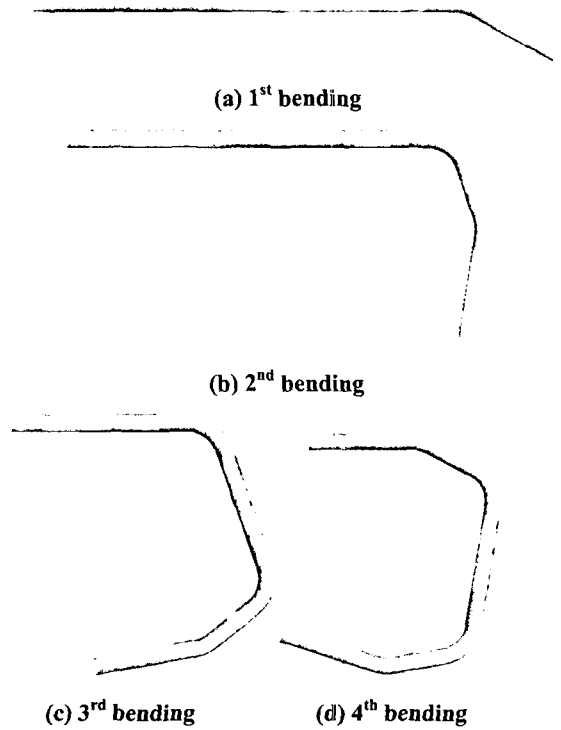


Fig. 6 Continuous 2D bending simulation

3D 굽힘 성형해석의 경우, Fig. 5(b)를 살펴보면 6 개소의 굽힘이 필요함을 알 수 있으며, 굽힘 성형시 3 차 굽힘 성형에서 4 차 굽힘 성형까지의 구간까지 두 번의 경사를 나눠서 2D 굽힘 성형시보다 금형에 안착이 더욱 잘되도록 고려하였다.

Table 1에서 2D 굽힘 성형해석과 3D 굽힘 성형 해석결과의 최대 두께 변형률을 비교하였다. 2D 굽힘 성형과 3D 굽힘 성형의 해석결과 값의 차가 생기는 이유는 굽힘 거리(Bending stroke)에 의한 영향이 크기 때문이며, 2 차 벤딩 이후의 최대 두께 변형률 값이 같은 것은 2 차 벤딩에서 최대 두께 변형이 일어난 상태로 연계해석이 이루어졌기 때문이다.<sup>(10)</sup>

**Table 2 Comparison 2D bending with 3D bending**

Bending order	Maximum thinning	
	2D	3D
1 <sup>st</sup> bending	0.0867	0.0847
2 <sup>nd</sup> bending	0.1145	0.0935
3 <sup>rd</sup> bending	0.1145	0.1164
4 <sup>th</sup> bending	0.1145	0.1164
5 <sup>th</sup> bending	X	0.1164
6 <sup>th</sup> bending	X	0.1164

**2.4 하이드로포밍 공정 해석**

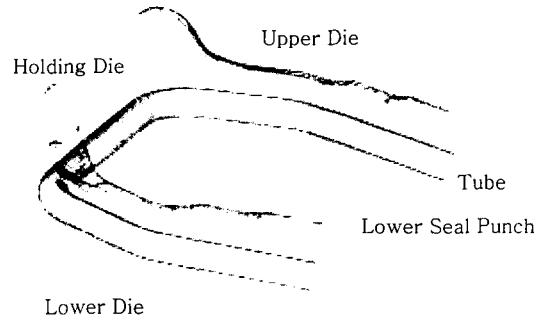
Fig. 7(a)는 2D 굽힘 성형결과, Fig. 7(b)는 3D 굽힘 성형결과를 이용한 하이드로포밍 공정해석을 위해 구성한 틀을 나타낸 그림이다. 상형 금형의 연결부분은 튜브를 미리 잡아주어 하이드로포밍 공정 및 소재를 유입 할 때, 소재가 밖으로 빠져 나가는 것을 방지하기 위하여 고정금형(Holding die)을 구성하였다.<sup>(5-6)</sup>

본 연구에서는 2D 굽힘 성형결과와 3D 굽힘 성형결과에 피딩 거리를 20mm, 40mm, 60mm, 80mm 씩 각각 주어 성형양상을 살펴보았다. Fig. 8 은 프레스가 줄 수 있는 최대의 유체압력곡선, 피딩 거리 및 Tool 의 이송거리를 나타낸 그래프이다. 유체압력은 최대 1200bar 로 제한하여 저압성형방법을 적용하였다.<sup>(9)</sup>

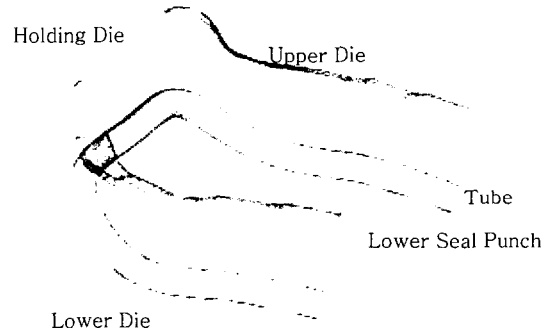
2D 굽힘 성형을 이용한 하이드로포밍 해석결과를 살펴보면, 20mm 와 40mm 의 피딩거리를 준 경우에는 주름이 생기지는 않았으나, 2 차와 3 차 굽힘 성형 구간의 코너부에 의하여 소재가 원활히 유입되지 않았다. 60mm 와 80mm 의 피딩거리를 준 경우 또한 소재가 원활히 유입되지 않았으며, 소재 유입의 가중으로 인하여 금형에 안착이 되지 않고 주름이 생겼다.<sup>(7-8)</sup>

하이드로포밍 해석 결과에 따른 두께감소율을 Table 3 에 정리하였다.

2D 굽힘 성형을 이용한 해석 결과, 초기 압력이 낮았을 때보다는 높았을 때 두께 감소율이 감소하는 성향을 나타냈으므로, 초기압력이 높은 경우에 대해서만 3D 굽힘 성형을 이용한 하이드로포밍 해석을 수행하였다. 3D 굽힘 성형을 이용한 하이드로포밍 해석 결과 피딩 거리가 20mm인 경우 3차와 4차 굽힘 성형이 되었던 코너부위가 국부적으로 매우 얇아짐을 알 수 있었다. 반면 피딩 거리가 60mm, 80mm의 경우는 3차와 4차 굽힘 성형

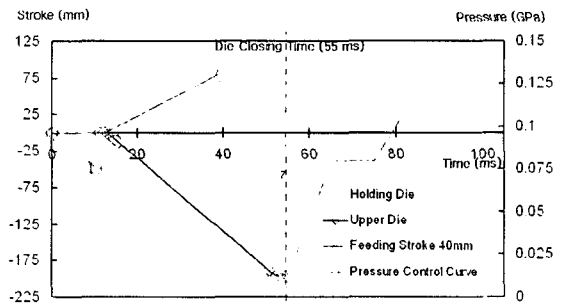


**(a) Hydroforming tool set for applied 2D bending result**



**(b) Hydroforming tool set for applied 3D bending result**

**Fig. 7 Hydroforming simulation condition with die stroke order**



**Fig. 8 Example of hydroforming simulation condition for using curves at feeding stroke 40mm**

구간의 코너부에 의하여 소재가 원활히 유입되지 않았고, 그러한 상태에서 소재 유입의 가중으로 인하여 금형에 안착이 되지 않고 주름이 생겼으나,

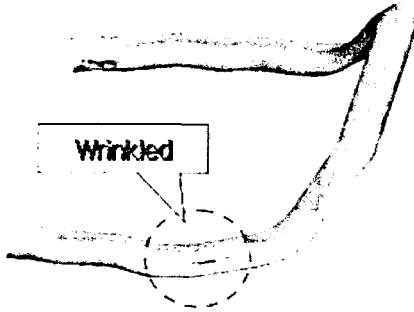


Fig. 9 Thinning distribution of hydroforming product at feeding 80mm

Table 3 Maximum thinning W.R.T. feeding stroke (2D bending)

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

2D 굽힘 성형을 이용한 하이드로포밍 해석결과와 비교하여 두께감소율이 확연히 감소하였다. 피딩 거리가 40mm 일때, 두께변형률도 감소하고, 주름도 생기지 않았으며, 두께감소율도 2D 굽힘 성형을 이용한 하이드로포밍 해석결과와 비교하여 확연히 줄어들었음을 알 수 있었다.

하이드로포밍 해석 결과에 따른 두께감소율을 Table 4 에 정리하였다..



Fig. 10 Thinning distribution of hydroforming product at feeding 40mm

Table 4 Maximum thinning W.R.T. feeding stroke (3D bending)

		Thinning at each initial pressure		
		0GPa	0.006GPa	0.012GPa
Feeding stroke (mm)	20	X	X	0.3017
	40	X	X	0.2277
	60	X	X	0.1852
	80	X	X	0.1693

### 3. 결론

본 연구에서는 유한요소프로그램을 이용하여 알루미늄 튜브 하이드로포밍에서의 예비 굽힘 공정의 효과에 관한 연구를 수행해 보았다. 굽힘 속도, 초기압력, 굽힘 성형시의 피딩력, 하이드로포밍시의 피딩 거리와, 2D 굽힘 해석 결과와 3D 굽힘 해석 결과를 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 볼 때, 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 거리이다. 피딩 거리를 이용하여 두께변형률을 작게 할 수 있으며 소재의 유입이 적절히 이루어져 파단이 많이 억제되었다. 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) Y. S. Shin, H. Y. Kim, B. H. Jeon, S.I. Oh, 2002, "Prototype and die design for automotive parts using welded blank hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 103~131, pp.121~127.
- (3) 김현영, 신용승, 홍춘기, 전병희, 오수익, 2001, "자동차 엔진마운트 브래킷의 관재 및 용접판재 유압성형에 대한 성형해석", *한국소성가공학회 논문집*, Vol 10. num 1, pp.3~14.
- (4) H. Y .Kim, H. T. Lim, C. H. Suh, W.S.Lee, 2003, " Numerical Modeling of Tube Hydroforming Process considering Prebending and Preforming Effect", *International Workshop on Tube Hydroforming Proceedings of the TUBEHYDRO 2003*, pp115~121.
- (5) H.-U. Lücke, Ch. Hartl, T. Abbey, 2001, "Hydroforming", *Journal of Materials Processing Technology* 115, pp.87~91.
- (6) 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.
- (7) 조완제, 손현성, 박춘달, 김영석, 2001, "관재 액압성형에 의한 성형성 및 성형품 특성에 관한 실험적 연구", *추계학술대회 논문집* pp.54~57.
- (8) Jeong Kim, Li-Ping Lei, Beom-Soo Kang, 2003, "Preform design in hydroforming of automotive lower arm by FEM", *Journal of Materials Processing Technology*, 138(2003), pp.58~62.
- (9) Muammer Koc, 2003, "Investigation of the effect of loading path and variation in material properties on robustness of the tube hydroforming process", *Journal of Materials Processing Technology*, 133(2003), pp.276~281.
- (10) Kristoffer Trana, "Finite element simulation of the tube hydroforming process-bending, performing and hydroforming", *Journal of Materials Processing Technology*, 127(2002), pp.401~408.