

# 예비굽힘 및 예비성형공정의 효과를 고려한 자동차 서브 프레임의 관재액압성형

김현영\*·임희택\*·서창희\*\*·이우식\*\*

## Tube Hydroforming Process of Automotive Subframe considering Preforming and Prebending Effect

H.Y. Kim, H.T. Lim, C.H. Suh, and W.S. Lee

### Abstract

Currently tube hydroforming has many studies and applications in manufacturing industry, especially in automotive industry. But tube hydroforming was applied to the automotive component with simple shape. So the manufacturer and the researcher proposed additional processes to form the automotive component with complex shape. It is prebending and preforming. Prebending is to crush bend or rotary draw bend a tubular blank into a shape that facilitates placement into the next forming tool. Preforming is where the prebent tube is crushed into a shape that facilitates placement into the final forming tool. This paper analyzed and compared to the tube hydroforming process to using of general and preformed bending tube, also explained the importance of tube bending and preforming process. The explicit finite element program PAM-STAMP<sup>TM</sup> was used to simulate the tube hydroforming operations.

**Key Words** : Finite Element Modeling, Flanging Process, Hemming Process, Automotive Panel

### 1. 서론

최근 자동차 업계는 기업간의 인수, 합병을 통하여 국제적인 경계를 없애고 있다. 이런 노력들은 자동차의 생산비용을 줄이기 위한 구조조정과 부품 조달체계의 개선 및 경량화, 고품질화 등으로 나타나고 있다. 특히 미국, 일본, 유럽과 같은 선진국은 경량화 및 공정 감소를 위해 하이드로포밍(hydroforming), 레이저 용접판재(tailor

welded blanks:TWB)를 적용한 성형 및 고장력 강판을 적용하고 있다.<sup>(2)</sup>

초기 하이드로포밍 공정은 약 40년 전에 도입되었다. 처음 적용된 1960년에는 간단한 배기 부품이나 세면대 배관 부품등을 제작하는데 사용되었다. 그러나 자동차 부품 산업에 적용된 1990년대에 들어서부터 빠르게 발전하기 시작하였다. 자동차 업체는 경량화 자동차에 대한 요구로 하이드로포밍 기술을 적용시키기 위한 많은 노력들

\* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

\*\* (주) 화신 연구소

이 있었다. 현재 하이드로포밍 기술을 적용하여 생산하고 있는 자동차 부품에는 사이드 레일(side rail), 서브프레임(subframe), 데시판넬(dash panel), 배기관(exhaust manifold), 크로스 멤버(cross member), 데시보드 판넬(dash board panel), 필라(pillar), 레일 루프(rail roof), 패키지 트레일(package trail) 등의 승용차 부품 및 트럭용 부품에 이르기까지 다양한 종류가 있다. 유럽, 미국의 기술 선진국은 차체 및 새시의 다양한 제품에 하이드로포밍 공정이 이용되고 있으나 국내에서는 일부 부품에서 적용되고 있는 실정이며 체계적인 자체 기술력의 확보가 필요한 상황이다.<sup>(3)</sup>

하이드로포밍 기술은 여러 판재로 이루어진 부품을 한번의 공정으로 생산함으로써 금형의 개수를 줄일 수 있으며 공정수를 단축할 수 있다. 또한 공정간 이동시 소요되는 인력 및 시간단축을 할 수 있어 생산에 매우 유리하다는 장점을 갖는다. 이 외에도 하이드로포밍 공정은 (a) 균일한 제품 두께, (b) 정밀한 제품 생산 가능, (c) 부품 개수 감소에 의한 경량화, (d) 용접 플랜지의 삭제 및 공정시 가공경화 현상으로 인한 강도 및 강성의 증가, (e) 강도증가로 인한 적용판재의 두께감소에 의한 경량화 등 많은 장점이 있다.<sup>(4)(5)</sup>

이렇게 많은 장점을 갖는 하이드로포밍 공정이지만 많은 한계를 가지고 있다. 고압을 발생시키는 튜브 하이드로포밍 장비의 가격은 매우 고가이며 한 개의 제품을 생산하는 제조시간이 스탬핑(stamping) 공정에 비해 길다. 뿐만 아니라, 국내에는 성형장비가 충분하지 않아 기술 개발에 많은 제약을 가지고 있다. 첫째, 소재기술이 필요하다. 튜브가 성형에 필요한 충분한 연신율과 강도를 가져야 한다. 둘째, 설계기술이 필요하다. 적용부품의 설계시 성형해석, 구조해석 등을 통한 예비성형의 적용여부, 튜브의 직경, 재질, 두께, 길이, 최소반경 등을 고려해야 한다. 셋째, 성형공정기술이 필요하다. 내부압력, 축압축력 및 압축량, 금형체결력 등의 인자가 고려되어야 한다. 실제 성형에서 내부압력과 축압축량은 성형을 결정하는 주요인자로 이들의 조합이 맞지 않으면 파열(bursting), 주름(wrinkling), 좌굴(buckling) 등의 가공 불량 발생하게 된다. 넷째, 금형기술이 필요하다. 고압의 내부압력을 고려한 금형 소재 및 가공방법의 설정, 부품의 성형성 향상 및 원활한 수출을 위한 금형 분할 라인의 설정, 축압축 효과의 최대화 및 마모방지를 위한 곡면의 설계 및 도금 방법의 설정 등을 고려해야 한다.<sup>(1)</sup>

이와 같은 하이드로포밍 공정의 한계를 해결하기 위해 유한요소법(finite element method)을 이용한 연구가 많이 수행되고 있다. 유한요소프로그램을 이용하여 하이드

로포밍 공정해석을 수행함으로써 최적의 성형조건을 도출하는 것이 가능하기 때문이다. 주름이나 미성형, 터짐 등의 가공 불량 없이 성형할 수 있는 적정 성형압력을 구하기 위해 최대압력을 조정하여 해석하거나 하이드로포밍된 제품의 두께가 얇아지는 현상을 줄이기 위해 축압축의 피딩량을 조절하면서 해석하는 것도 가능하다.

본 연구에서는 유한요소프로그램을 이용하여 예비 굽힘(prebending)과 예비성형(prefforming) 공정을 적용한 튜브 하이드로포밍 공정해석에서 발생하는 문제점을 살펴보고, 굽힘속도, 피딩력, 마찰계수와 같은 변수에 의한 영향 등을 알아보았다. 또한 실제공정과 유한요소해석의 차이로 나타나는 문제점을 해결하기 위한 방안을 제안하였다. 유한요소프로그램은 성형전용 외연적코드 프로그램(explicit-code program)인 PAM-STAMP<sup>TM</sup>을 이용하였다.

## 2. 예비성형의 필요성

단면 성형성 평가는 금형의 중심선을 따라 튜브를 구성하여 금형 단면 공정을 수행하는 것으로 하이드로포밍 공정해석을 시작하기 전에 튜브가 금형에 제대로 들어갈 수 있는가를 평가한다.

Fig. 1은 단면 해석의 결과이다. 제품에서 튜브 직경에 비해 폭이 좁은 부분에서 금형이 단면할 때 튜브가 제대로 안착되지 못하고 있다. 이 결과를 통하여 제품과 동일한 형상의 하이드로포밍 금형만을 이용할 경우 성형불량이 발생할 것임을 확인할 수 있었다. 일반적으로 이런 문제

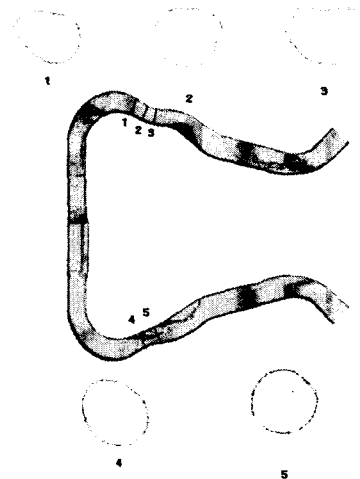


Fig. 1 2D section formability check

를 해결하기 위하여 예비굽힘과 예비성형 공정을 적용한다.

### 3. 예비 굽힘 공정

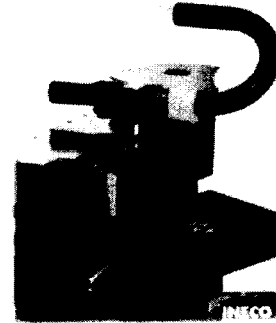
하이드로포밍 공정을 원활히 수행하기 위해서 소재가 다이 캐비티(cavity) 내에 안착될 수 있도록 굽힘공정을 거치게 된다. 이는 일종의 예비성형 공정으로 튜브 굽힘공정의 신뢰성과 재현성은 튜브 하이드로포밍 공정에 있어 매우 중요한 요소이다. 굽힘공정을 거치면서 소재는 상당한 소성변형을 받게 되므로 소재와 제품간의 둘레길이 변화가 별로 없는 경우에는 굽힘공정에서 변형이 성형한계를 결정하는 요인이 되기도 한다.

관재 굽힘가공의 대표적인 방법으로는 압축굽힘(compressive type), 신장굽힘(ram type), 드로우굽힘(draw type)이 있으며, 대부분의 CNC 벤딩머신은 복잡한 형상의 관재부품을 생산하는데 있어 가장 우수한 품질의 부품을 생산할 수 있는 드로우 굽힘 방식을 널리 채용하고 있다. Fig. 2는 드로우 벤딩 머신과 맨드릴(mandrel) 벤딩에 사용되는 틀을 나타낸 것이다.

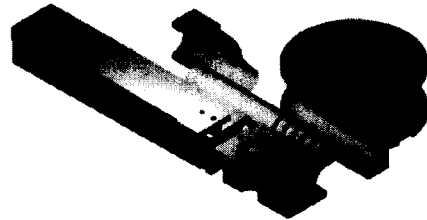
먼저 드로우 굽힘을 시뮬레이션하기 앞서 성형변수에 해당하는 다음의 사항을 점검해 보아야 한다. 첫째, 굽힘 해석시 맨드릴을 사용할 것인지 아닌지를 결정하여야 한다. 이것은 간단한 방법으로서 식 1을 사용하여 결정하였다. 둘째, 해석시 사용할 굽힘회전속도를 결정하여야 한다. 해석시 굽힘다이의 회전속도가 크면 외연적 유한요소법의 특성상 관성효과(inertia effect)가 발생하여 관재에 과도한 좌굴이 발생할 수 있기 때문이다. 이것은 내부에너지(internal energy)와 운동에너지(kinetic energy)를 비교하는 변수연구해석을 통하여 결정하였다. Fig. 3은 운동에너지가 거의 0이 되는 굽힘회전속도가 0.029rad/msec라는 것을 보여준다. 단, 여기서 굽힘다이의 반경은 170mm이다. 셋째, 축압축(axial feeding)을 적용할 것인지 만약에 적용한다면 어느 정도의 힘을 사용할 것인지 결정해야 한다. 축압축력을 적용할 경우 굽힘부의 바깥쪽에서 두께 감소율이 작아지며 FLD 성형성 평가가 좋아진다.

뿐만아니라 연속적인 굽힘해석이 진행되면서 굽힘다이에 의해 회전하는 부분이 길어질 때 관성효과 때문에 좌굴이 발생하게 된다. 이것을 고려하여 굽힘속도를 결정해도 되지만 이럴 경우 너무 많은 해석시간이 소요될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이 문제점을 해결하기 위해 Fig. 4에서처럼 굽힘해석시 굽힘과 상관이 없는 튜브를 리지드 바디(rigid body)로 구속하는 방법을 제안하였다.

$$\text{Bend Factor} = \frac{\text{Wall Factor}}{\text{Degree of Bend}} = \frac{\text{OD/Wall Thickness}}{\text{Bend Radius/OD}} \quad (\text{식 1})$$



(a) Draw bending machine



(b) Tool for mandrel bending

Fig. 2 Draw bending machine & Tool for mandrel bending

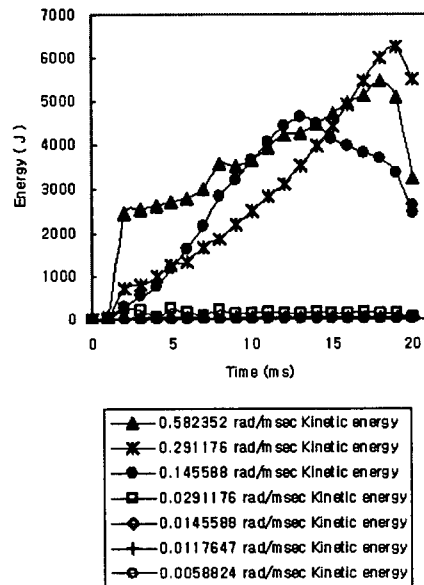


Fig. 3 Kinetic energy curve of bending simulation

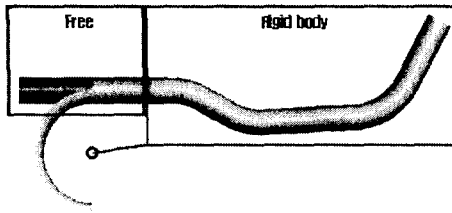
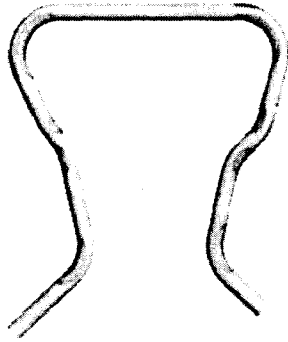
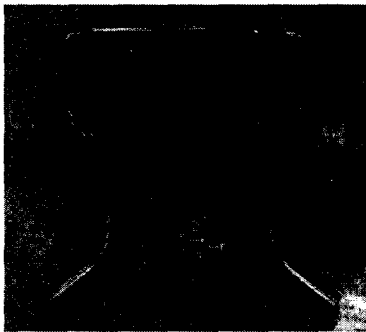


Fig. 4 Boundary condition of tube with rigid body



(a) Simulation



(b) Tryout

Fig. 5 The end form of tube after bending

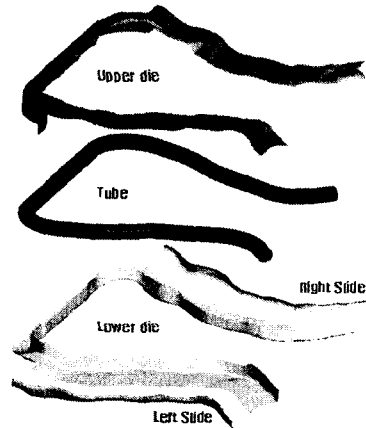
Fig. 5는 예비굽힘으로 만들어진 최종 형상이다. 이 제품을 원활히 제작하기 위하여 8개소의 굽힘을 수행하였다.

#### 4. 예비 성형 공정

일반적으로 형상이 간단한 제품이나 확관률이 큰 제품은 예비굽힘후 바로 하이드로포밍을 수행한다. 그러나 점차 튜브 하이드로포밍 공정을 복잡한 형상의 제품에 적용하기 시작하면서 예비굽힘만으로는 충분한 성형이 불가능하게 되었다. 최근 선진국에서는 이런



(a) Tryout tool



(b) Simulation tool

Fig. 6 Tools set for preforming simulation

문제점을 해결하기 위해서 예비성형 공정을 추가하고 있는 실정이다. 예비성형이란 하이드로포밍(main hydroforming)을 수행할 때 튜브의 금형 안착이나 단합 등이 용이하도록 미리 제품의 형상으로 성형을 해주는 공정이다.

Fig. 6는 상형금형과 하형금형, 2개의 슬라이더로 이루어진 예비성형을 위해 구성된 틀이다. 슬라이더는 금형에 안착된 튜브를 안쪽으로 밀어주고 성형하는 역할을 한다.

Fig. 7은 예비성형 후 트라이 아웃과 성형해석결과를 보여준다. 그리고 Fig. 8은 슬라이더를 사용한 예비성형 해석의 순차적인 단면변화를 보여준다. 튜브의 직영에 비해서 금형의 폭이 좁지만 상형금형으로 누른 후 슬라이더를 이용하여 안쪽으로 밀어주기 때문에 복잡한 제품 형상대로 성형하는 것이 가능하다.

#### 5. 하이드로포밍 공정

예비성형을 통하여 제품의 형상과 거의 일치하는 모양이 되었으며 코너의 미세한 부분이 제대로 성형되지 않았고 주름이 많은 상태이다. 이렇게 예비성형이 포함된 하이드로포밍 공정에서는 튜브를 제품형상으로 성형하는 역할이 줄어든다. 단지 튜브형 블랭크에 액압을 불어넣어 예비성형시 발생한 주름과 코너부를 확관을 통하여 최종제품 형상을 만들어 준다.

Fig. 9는 액압성형공정해석을 위해 구성한 틀이다. 상형금형과 하형금형으로 구성되며 피딩을 위해서 셀 펀치를 구성하였다. Fig. 10은 하이드로포밍 후 트라이 아웃과 성형해석결과를 보여준다. Fig. 11은 하이드로포밍해석의 연속적인 단면 변화를 보여준다.

최종 하이드로포밍 공정해석을 완료한 제품의 여러부분에서 파단 가능성이 발견되었다. 이를 개선하기 위해서 다음과 같은 방법을 사용하였다. 첫째, 예비성형 공정해석에서부터 마찰계수를 작게 변화시켜 주었다. 윤활을 더 좋게 해주면 발생하는 마찰력을 줄일 수 있다고 판단하였다. 두 번째, 액압 유입부에 축압축력을 적용하여 보았다. 액압으로 인한 확관을 축압축력으로 보상하여 두께가 얇아지는 것을 줄일 수 있기 때문이다.

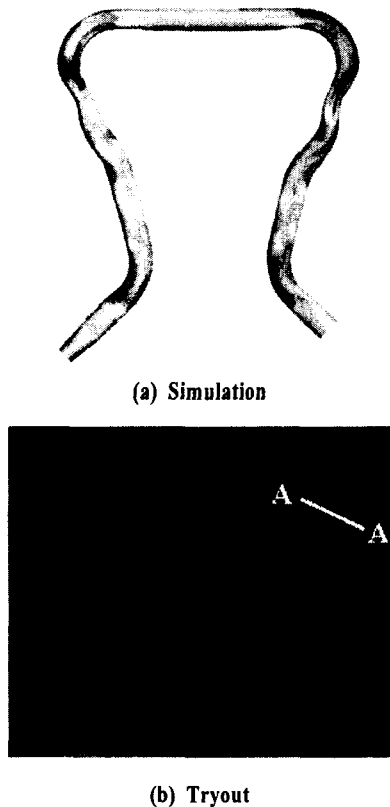


Fig. 7 The end form of tube after preforming

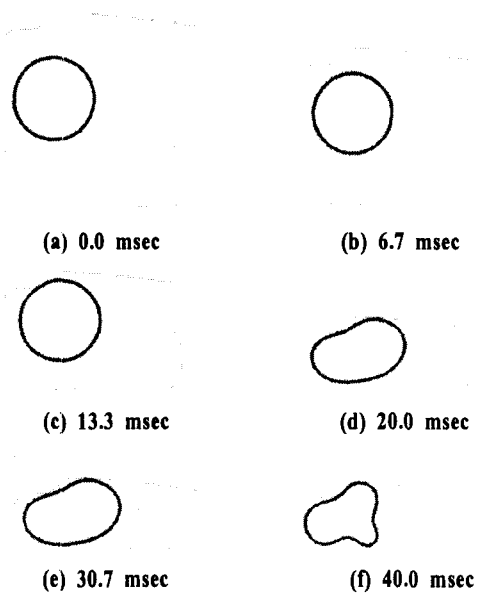


Fig. 8 AA Section view of preforming simulation

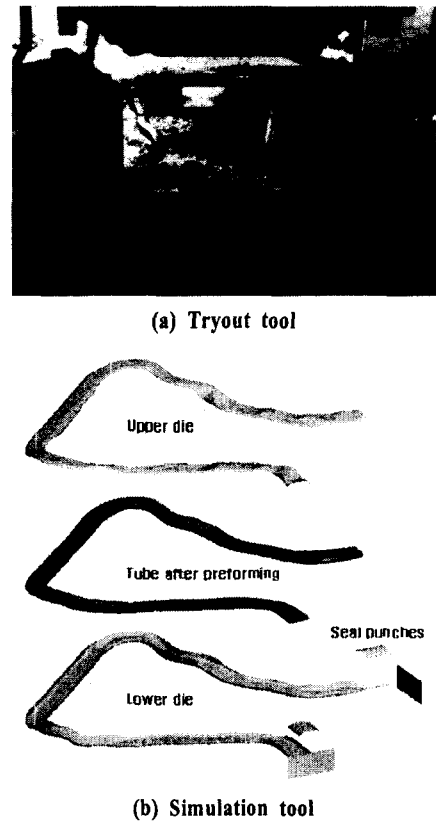


Fig. 9 Tools set for hydroforming simulation

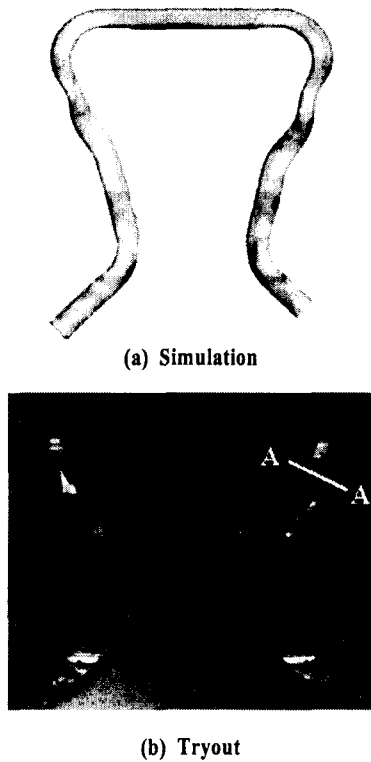


Fig. 10 The end form of tube after hydroforming

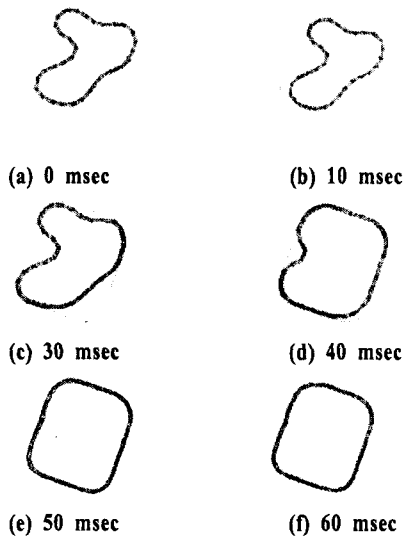


Fig. 11 AA Section view of hydroforming simulation

첫 번째 방법은 슬라이더를 이용하기 때문에 금형과

튜브 사이의 마찰계수가 큰 영향을 줄 것이라고 생각했으나 크게 영향을 주지 않음을 확인하였다. 두 번째 방법은 예비굽힘에서 처럼 가장 효과가 큰 인자였다. 축압축부 가까운 곡면부에서 발생하는 파단은 축압축으로 충분히 막을 수 있었다.

## 6. 결론

본 연구에서는 유한요소프로그램을 이용하여 예비굽힘과 예비성형을 적용한 튜브 하이드로포밍에 대하여 살펴 보았다. 굽힘속도, 축압축력, 마찰계수와 같은 변수에 영향을 알아보았으며 연속적인 공정 해석에서 발생하는 문제점을 해결하기 위한 제안을 하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 단면 성형성 평가를 통하여 예비성형공정의 필요성 여부를 결정한다.
2. 굽힘성형시 회전속도는 내부에너지와 운동에너지의 비교를 통하여 결정한다.
3. 굽힘성형시 튜브의 성형성을 가장 높여주는 인자는 축압축력(Axial Feeding Force)이다.
4. 드로우 벤딩 머신을 이용한 연속적인 굽힘해석시 발생하는 관성효과를 해결하기 위하여 Rigid body를 이용한 경계조건을 제안하였다.
5. 하이드로포밍 공정해석에서 튜브의 성형성을 가장 높여주는 인자는 축압축력(Axial Feeding Force)이다.
6. 튜브 하이드로포밍 공정에서 복잡한 형태의 제품을 제작할 경우, 초기 굽힘 공정부터 축압축력을 이용하여 튜브의 성형성을 높여주어야 최종 하이드로포밍 공정까지 파단 없는 제품을 생산하는 것이 가능하다.

## 후 기

본 연구는 차세대 소재성형 기술개발사업단 연구 개발사업단의 연구 자금을 지원 받아 수행된 과제로 이에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Kim, H. J., J., Jeon, B. H., Kim, H. Y. and Kim, J. J., 1993, "Finite Element Analysis Liquid Bulge Forming Process of T-Shaped Pipe by using Explicit Code", Advanced Technology of Plasticity, pp.545-550.
- (2) 신용승, 김현영, 전병희, 오수익, 박병철, 이우식,

- 2001, "용접판재 유압성형을 이용한 자동차 서브프레임의 트라이 아웃과 금형설계", 춘계학술대회논문집, pp.59-62.
- (3) 김현영, 신용승, 홍춘기, 전병희, 오수익, 2001, "자동차 엔진마운트 브래킷의 판재 및 용접판재 유압성형에 대한 성형해석", 한국소성가공학회 논문집, Vol 10. num1, pp.3-14.
- (4) 양재봉, 전병희, 오수익, 2000, "민감도 해석을 이용한 Tube hydroforming의 성형공정 최적화에 대한 연구", 한국소성가공학회지, 제9권 제7호, pp.723-730.
- (5) Bobbert, S., Bischer, M., Ahmetoglu, M. A. and Altan, T., 1997, "Tool and Process Design for Tube Hydroforming a State of the Art Review and Applications of Compute Simulations", Report No. ERC/NSM-R-97-2. pp.3-51.
- (6) Morphym G., 1998, "Pressure-Sequence and High-Pressure Hydroforming", Tube & Pipe Journal, 28-135, September/October 1998, pp.90-96.
- (7) 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.
- (8) Brewster, K., Sutter, K., Ahmetoglu, M. A. and Altan, T., 1996, "Hydroforming Tube", The Tube & Pipe Quarterly, vol. 7, no. 4, pp. 34-40.
- (9) Leitloff, F. U., 1997, "Hydroforming - From Feasibility Analysis to Series Production", Proceedings of the Conference on Innovations in Hydroforming Technology, Columbus, Ohio, September 15-17, 1997.
- (10) Derek, B., 1998, "Tube Testing for the Hydroforming Industry", Tube & Pipe Journal, pp. 69-76.
- (11) Dohmann, F., Hartl, C., 1996, "Hydroforming - A Method to Manufacture Lightweight Parts", Journals of Materials Processing Technology, vol.60, pp. 669-676.
- (12) Taylan Altan, 2002, "R&D Update : Sheet hydroforming in automotive applications", March-April 2002 Stamping Journal.