

자동차 엔진마운트 브래킷의 관재 및 용접판재 유압성형에 대한 성형해석

김현영* · 신용승* · 홍춘기* · 전병희** · 오수익***

(2000년 6월 13일 접수)

Analysis on the Tube and Welded Blank Hydroforming of Automotive Engine Mount Bracket

H. Y. Kim, Y. S. Shin, C. K. Hong, B. H. Jeon and S. I. Oh

Abstract

Hydroforming is the technology using hydraulic pressure and forming sheet or tube metals to desired shape in a die cavity. It can be characterized as tube hydroforming and sheet hydroforming depending on the shape of used blank. Due to its process-related benefits, this production technology has been remarkably noticed for great potential for feasible applications and recently gained great attraction from many industrials including automotive and non-automotive. This paper analyzed the tube and the welded blank hydroforming process and compared formability of the processes for automotive engine mount bracket. The mathematical analysis was performed by using the dynamic explicit finite element code, PAM-STAMP. In tube hydroforming, bending, springback, and forming analysis were carried out and the effect of mandrel and axial feeding were examined. In welded blank hydroforming, pressure curve history is determined and the results of forming analysis were evaluated by the comparison of experimental results in the aspects of deformed shape and thickness distribution.

Key Words : Finite Element Analysis, Explicit Finite Element Code, Engine Mount Bracket, Tube Hydroforming, Welded Blank Hydroforming

1. 서 론

유압성형(hydroforming)기술이 처음 보고된 것은 1920년대이며, 1940년대 후반에서 1950년대 초에 걸쳐 소량 생산에 적합한 기술로 개발되었다. 유압성형에 관한 대부분의 연구는 1980년대 초 이후에 이루어졌으며, 자동

차산업에 적용되기 시작한 것은 비교적 최근의 일이지만 컴퓨터 제어기술 및 유압시스템의 발달로 대량 생산이 가능해진 현재 유럽, 미국 및 일본의 자동차 업체를 중심으로 널리 사용되고 있다.⁽¹⁾

유압성형기술은 유압을 이용하여 관재(tube)와 판재(sheet)를 다이 캐비티(die cavity) 내에서 원하는 형상으

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부
** 인덕대학 기계설계과
*** 서울대학교 기계항공공학부

Table 1 Classification of hydroforming

Tube-hydroforming	<ul style="list-style-type: none"> ● Low pressure-hydroforming ● High pressure-hydroforming ● Sequenced pressure-hydroforming
Sheet-hydroforming	<ul style="list-style-type: none"> ● Aquadraw forming ● Welded blank-hydroforming ● Flexforming

로 성형하는 기술로 사용되는 블랭크의 종류에 따라 관재유압성형(tube hydroforming)과 판재유압성형(sheet hydroforming)으로 나눌 수 있다. 관재유압성형과 판재유압성형을 다시 세분하면 Table 1과 같다. 스탬핑(stamping)과 점용접(spot welding)을 통한 기존의 생산 방식과 유압성형기술을 적용한 생산방식을 비교했을 때, 유압성형기술은 공정단축, 부품중량 감소, 부품 강도와 강성의 향상, 부품수 감소를 통한 공구비용 감소, 치수정밀도 및 재료효율 향상 등의 장점이 있다. 반면에 고가의 생산장비, 공정 및 공구설계에 대한 기초적인 지식의 부족, 부품형상의 제한 등의 단점이 있다.^(2,3) 따라서 기존생산방식을 유압성형기술로 대체하기 위해서는 각 부품별로 경제적 타당성이 연구되어야 한다.

관재유압성형기술에 관한 연구로 Srinivasan 등⁽³⁾과 Wu 등⁽⁴⁾은 관재유압성형에 대한 성형해석결과와 실험결과와의 비교를 통하여 유압성형에 관련된 모든 공정단계의 유한요소해석이 가능함을 보여주었으며, Liu 등⁽⁵⁾은 관재유압성형의 성형한계에 관한 연구를 통하여 유압성형시 성형가능 영역 및 파단영역을 성형한계도(FLD)상에 나타내었다. 또한 Dohmann 등⁽⁶⁾은 레이저 용접판재(tailor welded blank)를 적용한 관재를 사용하여 서브프레임(subframe)을 생산하는 연구를 수행하였고, Manabe 등^(7,8)은 예비굽힘가공시 굽힘반경이 관재의 두께분포 및 유압성형과정에서의 국부적인 두께감소에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였으며, 또한 관재유압성형 공정에서의 국부적인 두께감소 발생부위가 축방향의 램의 이동(axial feeding), 마찰계수(friction coefficient)와 같은 공정변수(process variable) 및 가공경화지수(n-value), 이방성계수(r-value)와 같은 재료변수(material variable)에 의해서 결정됨을 보여주었다.

관재유압성형기술에 관한 연구로 Wang⁽⁹⁾은 유압벌지성형(integrated hydro-bulge forming)기술을 적용한 구형용기생산에 관한 연구를 수행하였고, Zhang 등⁽¹¹⁾은 하

이드로메카니컬 딥드로잉(hydromechanical deep drawing)에 관한 연구를 수행했고, Robbert⁽¹⁰⁾은 용접판재(welded blank)와 비용접판재(non-welded blank)를 사용한 유압성형공정의 성형한계에 관한 연구를 수행하였다.

국내에서는 1993년 김형중 등⁽¹²⁾에 의해 T자관의 액압벌지 성형에 관한 연구가 수행되었고, 이후 박석완 등⁽¹³⁾은 로어 암(lower arm)을 판재유압성형기술로 생산할 경우 기존과 동등한 성능을 유지하면서 생산비용절감 및 경량화가 가능함을 보여주었다. 이승희 등⁽¹⁴⁾은 판재유압성형을 위한 성형인자 연구를 통하여 유압성형시 성형인자들이 성형성에 미치는 영향을 분석하였다. 김의석 등⁽¹⁵⁾은 굽힘공정해석을 통하여 굽힘가공시 관재의 단면형상 및 두께분포의 변화 그리고 굽힘가공 후 발생하는 스프링백에 관한 연구를 통하여 유압성형공정을 보다 정확하게 해석하기 위해서는 굽힘공정에서 발생하는 소재변형이 고려되어야함을 제안했다. 양재봉 등⁽¹⁶⁾은 드로우벤딩머신(draw bending machine)과 금형을 이용한 굽힘해석을 수행하였으며, 해석결과인 단면형상과 두께분포를 비교한 결과 금형에 의한 굽힘공정이 드로우벤딩머신을 사용한 경우보다 우수함을 보여주었다. 하이드로포밍기술의 응용분야는 반도체, 항공기, 자동차 등 산업전반에 폭넓게 사용되고 있다. 현재 유럽, 미국, 일본등의 자동차 제조업체들은 유압성형기술을 적용하여 배기매니폴드(exhaust manifold), 캠축(cam shaft), 라디에이터 프레임(radiator frame), 앞/뒤차축(front/rear axle), 크랭크축(crank shaft), 엔진 크레들(engine cradle), 시트 프레임(seat frame), 공간 프레임(space frame)등을 생산하기 위하여 연구를 진행하고 있다. 국내에서는 유압성형기술을 적용하여 인스트루먼트판넬 빔(instrument panel beam), 서브 프레임, 로어 암, 엔진마운트 브래킷을 생산하기 위한 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 서브프레임과 같은 복잡한 형상의 자동차용 부품 성형에 유압성형 기술을 적용하기 위한 초기 단계로서 형상이 간단한 엔진마운트 브래킷(Fig. 1)의 관재 및 용접판재유압성형(welded blank hydroforming)에 대한 성형해석을 수행하였다. 각각의 방법에 대한 성형과정과 성형제품의 성형성을 비교, 평가하며, 성형해석 결과를 토대로 실제 성형을 수행하여 실제제품을 생산하고자 하였다. 관재유압성형해석은 굽힘, 스프링백(spring-back), 유압성형해석 순서로 수행되었다. 굽힘해석은 맨드릴(mandrel)을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 대하여 각각 수행한 뒤 성형해석결과와 굽힘계수(bend factor) 계산을 통하여 굽힘가공시 맨드릴 사용여부를 결정하였다. 성형해석시 유체의 압력변화와 램의 축방향

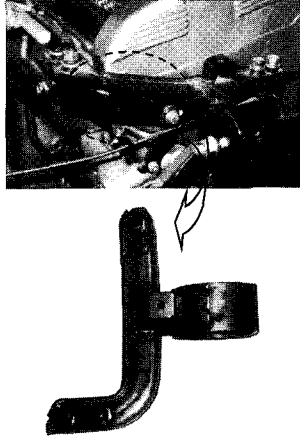


Fig. 1 Engine Mount Bracket

Table 2 Mechanical properties of SAPH38P

Density [kg/mm ³]	7.8E-06
Young's modulus [MPa]	206E+03
Poisson's ratio	0.3
Yield strength [MPa]	276.91
K [MPa]	629.6
n	0.184
ϵ_0	0.002

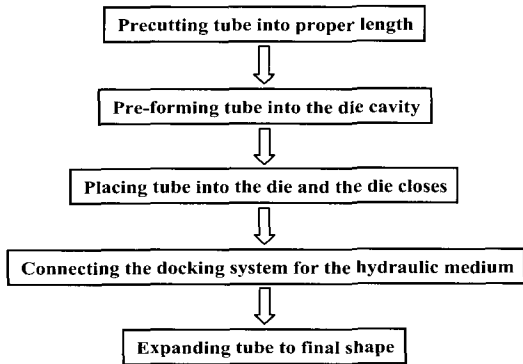


Fig. 2 Tube hydroforming process

이동량의 관재를 규명하고자 이동을 한 경우와 하지 않은 경우에 대하여 각각 해석을 수행하여 비교하였다. 용접관재유압성형해석에서는 용접관재 설계시 확관률

(section-expansion ratio)을 적용하여 용접관재를 결정하고 2차원 단면에 대한 성형해석을 통하여 용접관재의 성형성에 유리한 압력곡선형태를 결정하였다. 또한 성형 후 형상 및 두께 분포를 실제 성형품과 비교하여 해석의 유용성을 검증하였다.

성형해석에서 관재 및 용접관재는 4절점 벨리치코-차이 셸요소(Belytschko-Tsay shell element)로 모델링되었고, 재료의 응력-변형률관계는 $\sigma = K(\epsilon + \epsilon_0)^n$ 을 따르는 평면이방성 탄-소성재료(planar anisotropy elasto-plastic material)로 가정하였다. 성형해석에 사용된 관재 및 용접관재의 재료는 자동차 구조용 열간압연강관인 SAPH38P이며 시편에 대한 단축인장시험을 수행하여 재료의 기계적 성질을 구하였으며, Table 2에 나타내었다. 성형해석에는 관재성형해석 상용프로그램인 PAM-STAMPTM가 사용되었다.

2. 관재유압성형 (Tube Hydroforming)

관재유압성형공정은 Fig. 2와 같다. 성형시 재료는 유압에 의하여 변형되기 시작하여 다이 캐비티에서 확관·팽창되어 최종형상으로 성형된다. 관재유압성형은 성형압력을 기준으로 저압유압성형(low pressure hydroforming)과 고압유압성형(high pressure hydroforming)으로 분류되며 저압유압성형은 성형압력이 80 MPa, 고압유압성형은 700MPa 정도인 경우를 말한다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 두께 2.6mm, 직경 45mm, 길이 500mm의 관재를 사용하여 굽힘, 스프링백, 성형의 순서로 해석을 수행하였으며, 관재 용접부의 물성치는 다른 부분과 동일하게 취급하였다.

2.1 굽힘해석

관재굽힘가공의 대표적인 방법으로는 압축굽힘(compression type), 신장굽힘(ram type), 드로우굽힘(draw type)이 있으며, 대부분의 CNC 벤딩머신(bending machine)은 복잡한 형상의 관재부품을 생산하는데 있어 가장 우수한 품질의 부품을 생산할 수 있는 드로우굽힘방식을 채용하고 있다. 드로우굽힘에 기본적으로 사용되는 공구는 굽힘다이(rotating bend die), 받침다이(pressure die), 클램프다이(clamp die or clamping block)이며 굽힘반경이 작거나 소재의 두께가 얇은 경우에는 소재의 내측에 발생할 수 있는 좌굴을 억제하기 위하여 맨드릴과 와이퍼다이(wiper die)를 사용한다. 드로우굽힘가공은 관재를

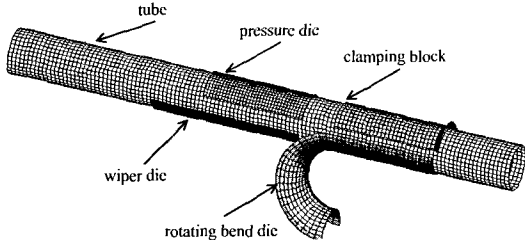


Fig. 3 Finite element model for bending analysis

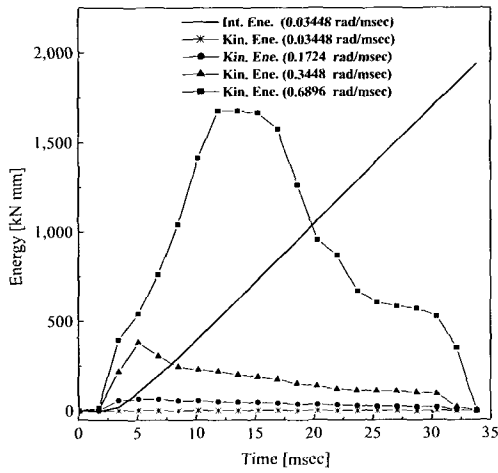


Fig. 4 Internal and kinetic energy curve

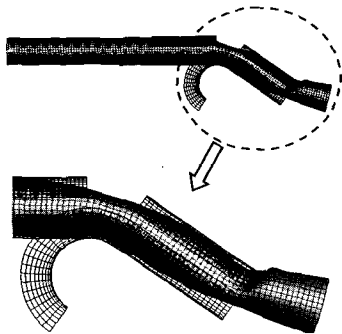


Fig. 5 False buckling($\omega=0.6896\text{rad/msec}$)

벤딩머신에 위치시키고 클램프다이와 받침다이가 소재를 고정 한 후 굽힘다이가 회전하는 순서로 이루어진다. 본 연구에서는 드로우굽힘방식을 기준으로 하여 맨드릴을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 대하여 각각 굽힘해석을 수행하였다.

Fig. 3은 드로우굽힘방식의 굽힘해석을 위한 유한요소 모델을 나타낸다. 굽힘해석시 굽힘다이의 회전속도가 클 경우 외적-유한요소코드(explicit finite element code)의 특성상 관성효과(inertia effect)가 발생하여 관재에 과도한 좌굴(buckling)이 발생할 수 있다. Fig. 4는 굽힘해석시 굽힘다이의 회전속도(angular velocity)가 각각 0.03448, 0.1724, 0.3448, 0.6896rad/msec 일 때 각각에 대한 운동에너지(kinetic energy) 그래프를 나타내며, 굽힘다이의 회전속도가 0.1724rad/msec 보다 클 경우 변형초기에 과도한 관성이 포함됨을 알 수 있다. Fig. 5는 과도한 관성력이 작용한 예로서 굽힘다이의 회전속도가 0.6896rad/msec일 때 관재에 발생된 좌굴을 나타낸다.

본 연구에서 수행한 굽힘해석은 굽힘각 90°, 굽힘 반경 29 mm, 가압다이의 회전속도 0.03448rad/msec인 경우에 대하여 수행하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 굽힘해석 결과 굽힘발생부의 두께분포를 나타낸다. 굽힘해석시 맨드

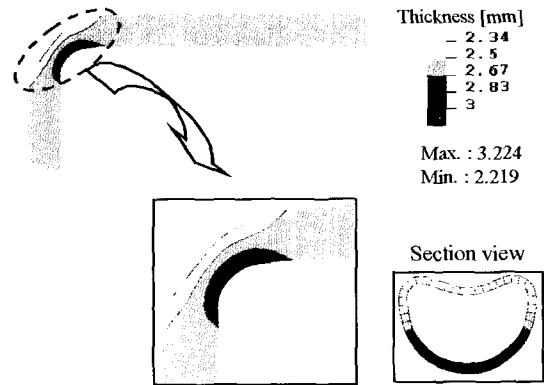


Fig. 6 Thickness distribution without mandrel

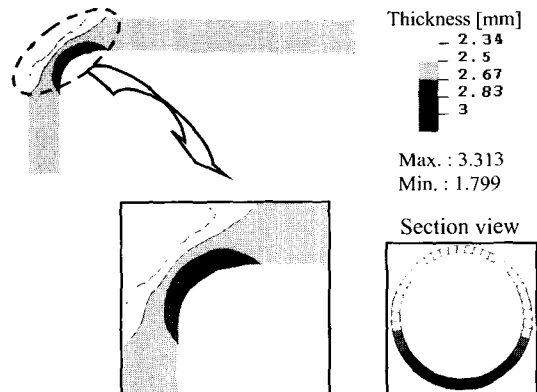


Fig. 7 Thickness distribution with mandrel

Table 3 Results of bending analysis with/without mandrel

	Minimum thickness	Maximum thickness
Without mandrel	2.219 mm	3.224 mm
With mandrel	1.799 mm	3.313 mm
Conditions	- Initial tube thickness: 2.6 mm - Bending radius: 29 mm - Angular vel. of rotating die: 0.3448 rad/msec	

릴을 사용하지않은 경우와 사용한 경우, 굽힘발생부의 두께감소량은 초기 관재두께(2.6t)를 기준으로 각각 14.65%와 30.81%로 나타났다.(Table 3) 따라서 굽힘가공시 맨드릴을 사용할 경우 성형과정에서 관재의 과도한 두께 감소가 문제가 되어 성형성에 불리하게 작용할 것으로 예상된다. 또한 굽힘가공시 식(1)과 같이 관재외경 (outside diameter), 벽두께(wall thickness) 및 굽힘반경 (bend radius)사이의 관계를 이용하여 계산한 굽힘계수 (bend factor)를 기준으로 맨드릴의 사용여부를 판단할 수 있다.

$$\text{Bend Factor} = \frac{\frac{\text{Outside Diameter}}{\text{Wall Thickness}}}{\frac{\text{Bend Radius}}{\text{Outside Diameter}}} \quad (1)$$

- BF < 12 : without mandrel
- 12 < BF < 20 : with or without mandrel
- BF > 20 : with mandrel

식(1)에 의하여 굽힘해석에 사용된 관재의 굽힘계수를 구하면 15.123으로, 굽힘가공시 맨드릴을 사용하지 않아도 되나 심한 단면형상변화가 예상된다. 그러나 유압성형시 굽힘가공으로 인한 단면형상변화는 성형과정에서 회복이 가능하므로 이 경우 맨드릴을 사용하지 않아도 될 것으로 예상된다.

관재는 굽힘가공시 소성변형을 겪게되고 가공 후 하중을 제거하면 탄성복원에 의해 스프링백이 발생한다. 굽힘가공을 거친 관재를 다이 내에 안착시키기 위하여는 굽힘 후의 스프링백을 정확히 예측하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 굽힘 후의 스프링백을 단순한 굽힘 후의 정적 탄성 복원 문제로 가정하여 계산하였다. 즉,

외연적 동적 프로그램(PAM-STAMP)을 이용하여 탄소성문제의 굽힘과정을 해석한 후, 그 결과로부터 내연적 정적 프로그램(PAM-SPRK)을 이용하여 탄성문제로 재하과정을 해석하였다. Fig. 8은 예측된 굽힘가공 후의 스프링백 양상이며, 관재 양 끝단에 각각 0.76mm, 0.79mm의 스프링백이 발생했다.

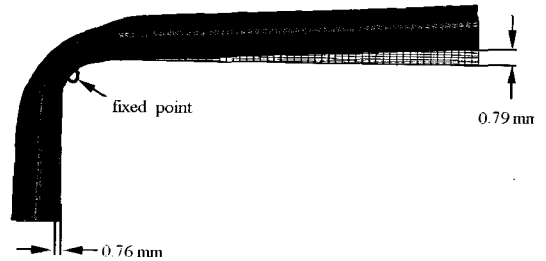


Fig. 8 Deformed shape after springback (scale factor : 3)

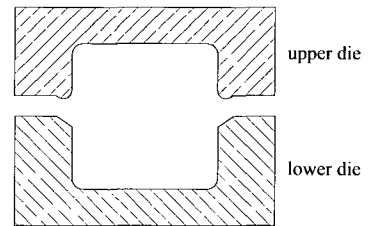


Fig. 9 Die section view of tube hydroforming

본 연구에서는 Fig. 9와 같이 다이 결합과정에서 관재와 접촉이 발생하는 상·하형다이의 다이분할면에 곡률과 경사를 각각 갖도록 설계하여 다이결합시 스프링백이 발생한 관재를 효과적으로 다이 캐비티에 안착시킬 수 있었다.

2.2 유압성형해석

유압성형해석은 하형다이(lower die)와 상형다이(upper die) 사이에 굽힘공정을 거친 관재를 안착시키고 상형다이가 하강한 뒤 유압시스템이 연결되는 순서로 이루어진다.

Fig. 10은 성형해석을 위한 유한요소 모델을 나타낸다. 성형해석시 유체유동율(flow rate)은 해석시간 단축을 위하여 관성효과가 발행하지 않는 범위 내에서 최대로 설정하였다.

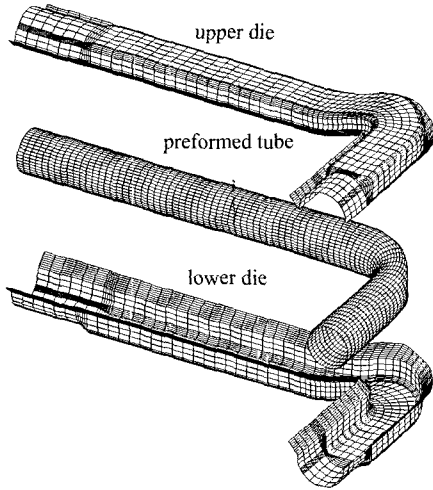


Fig. 10 Finite element model for tube hydroforming

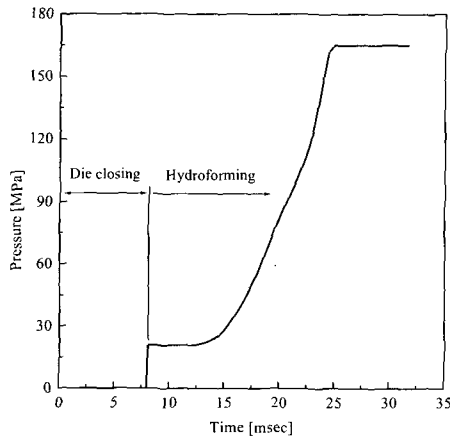


Fig. 11 Internal pressure history during the forming process

Fig. 11은 성형해석에 사용된 성형압력곡선이며, 상·하형 다이가 완전히 밀폐된 후 압력이 작용하며, 관성효과를 배제하기 위하여 14msec까지는 서서히 증가하며, 그 이후 압력이 증가하여 최대 163MPa에서 유지된다. 축방향으로 램의 이동을 한 경우와 하지 않은 경우에 대하여 각각 성형해석을 수행하였다.

Fig. 12는 축방향 이동 없이 성형해석을 수행한 후의 두께분포이며, 최소 0.24mm로 관재의 굽힘발생부에서 두께감소가 크게 나타났으며, 실제 성형시 이 부분에서 터짐발생을 예측할 수 있다.

Fig. 13은 성형해석시 30mm의 축방향 이동을 한 경우의 두께분포이며 최소두께 1.52mm를 나타낸다.

Table 4에 각각의 경우에 대한 최소두께치를 비교하였다. 축방향 이동을 고려한 경우, 굽힘발생부에서 두께 감소가 크게 줄어든 것을 알 수 있다.

본 연구에서 사용한 축방향 이동량은 다이 캐비티의 표면적(55,096mm²)과 팽창 전 관재의 표면적(49,480mm²)의 차를 다시 관재 원주표로 나누어서 결정하였다. 관재 유압성형시 성형한계도상에서 관재가 과도한 음의 주변형률(minor strain) 영역에서 성형 될 경우 회복 불가능한 좌굴이 발생하고, 과도한 양의 주변형률(major strain) 영역의 등이축인장(biaxial strain)상태에서 성형이 이루어지면 파단이 발생하게 된다.

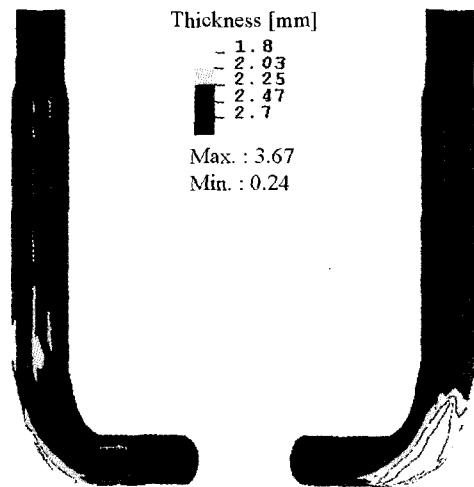


Fig. 12 Thickness distribution (without axial feeding)

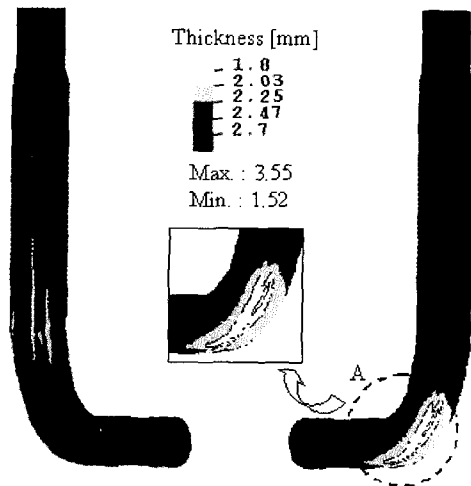


Fig. 13 Thickness distribution (with axial feeding)

Table 4 Results of tube hydroforming analysis with/without axial feeding

	Ram movement	Minimum thickness
Without axial feeding	0	0.24 mm
With axial feeding	30 mm	1.52 mm
Remarks	- Max. pressure : 163 MPa	

한편 이상적인 성형영역은 드로잉(drawing)상태와 단축압축(uniaxial compression)상태 사이로 알려져 있다.⁽⁵⁾ 따라서 유압성형시 관재의 성형성을 향상시키기 위해서는 축방향 이동을 이용하여 이 영역으로 변형모드를 유도하는 것이 필요하다.

3. 용접관재유압성형 (Welded Blank Hydroforming)

용접관재유압성형기술은 예비형상의 용접관재를 다이 캐비티 내에서 유압을 이용하여 원하는 형상으로 성형하는 기술을 말하며 공정단계는 Fig. 14와 같다. 예비형상의 용접관재는 두 관재의 재료와 두께를 서로 같게 또는 각각 달리하여 레이저용접(laser welding)을 통하여 만들어진다. 이 기술을 사용할 경우 플렌지로부터 다이내로 재료가 유동하므로 관재유압성형기술의 성형한계를 넘는 단면형상의 부품을 생산할 수 있다. 용접관재유압성형기술을 이용한 엔진마운트 브래킷 생산공정은 Fig. 15와 같이 용접된 예비형상의 용접관재가 다이 캐비티 내에서 팽창이 완료되면 다이에 장착된 펀치에 의해서 블랭킹(blanking)작업과, 트리밍(trimming)작업이 이루어진 뒤 좌·우 지지용, 좌·우 고정용, 엔진마운트 고정용 브래

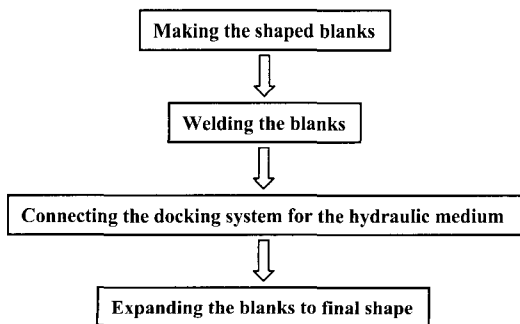


Fig. 14 Welded blank hydroforming process

킷이 조립되어 부품이 완성된다. 본 연구에서는 두께 2.6 mm의 관재를 사용하였으며, 성형해석에서 용접부 물성치는 다른 부분과 동일하게 설정하였고, 용접선이 마찰에 미치는 영향은 고려하지 않았다.

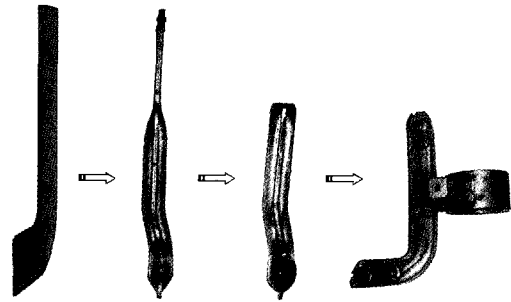


Fig. 15 Engine mount bracket by welded blank hydroforming

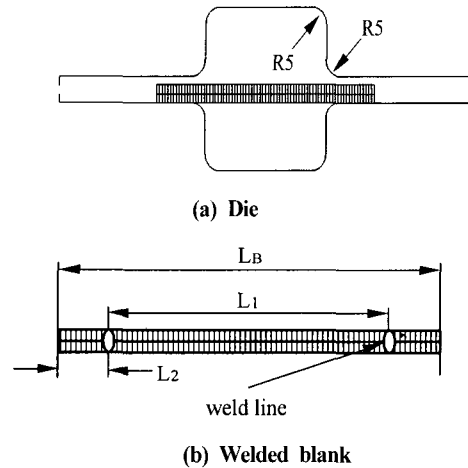


Fig. 16 Geometry of die and welded blank

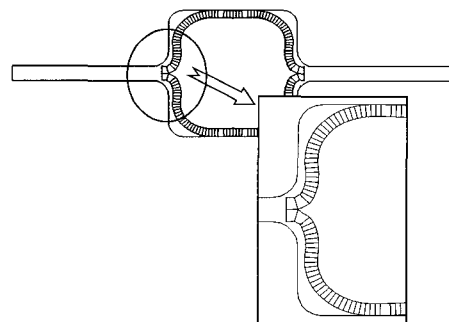


Fig. 17 Deformed shape of welded blank when L_2 is smaller than die radius

3.1 용접판재 설계

Fig. 16은 다이와 용접판재의 단면형상을 나타낸다. L_1 은 좌우 용접선 사이의 길이이고, L_2 는 용접선과 용접판재 외곽선 사이의 길이를 나타낸다. 성형시 팽창이 발생하는 부분 L_1 과 다이캐비티 길이 L 의 관계는 식(2)와 같이 확관률로 나타낼 수 있다.

$$\text{Section Expansion Ratio} = \frac{L - L_1}{L_1} \times 100 \quad (2)$$

용접판재 설계시 다이 유입부 형상반경에 비하여 L_2 가 작거나 같게되면 소재가 완전히 유입된 뒤 다시 팽창하게 되어 다이 파손의 원인이 되며, 성형 중 소재의 위치조정이 어렵게 된다. 따라서 용접판재의 크기는 다이 유입부 형상반경을 고려하여 설계해야한다.

Fig. 17은 용접판재의 플랜지부(L_2)가 다이 유입부 형상반경보다 작아 성형이 완료되기 전에 소재가 다이를 이탈한 상태를 나타낸다.

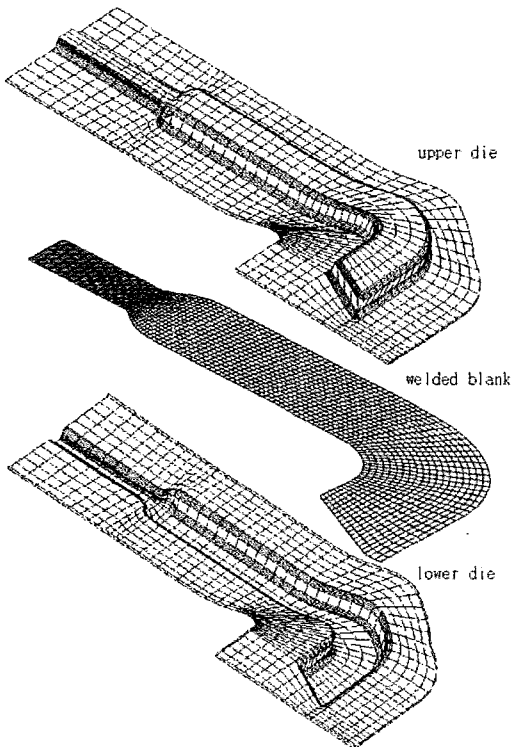


Fig. 18 Finite element model for welded blank hydroforming

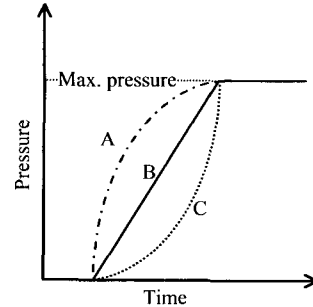
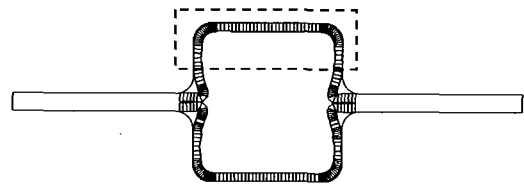
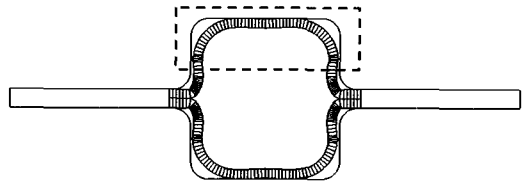


Fig. 19 Three types of pressure curve



(a) Pressure curve type A, B



(b) Pressure curve type C

Fig. 20 Contact patterns according to pressure types

3.2 용접판재 유압성형해석과 트라이아웃(Try-out)

성형해석은 상형다이와 하형다이 사이에 용접판재를 위치시키고 상형다이가 하강한 뒤 유압시스템이 연결되는 순서로 이루어진다. Fig. 18은 성형해석을 위한 유한요소모델을 나타낸다.

용접판재 유압성형시 압력곡선의 형태가 Fig. 19의 A, B인 경우 Fig. 20(a)에 나타난 것처럼 다이 코너부분의 성형이 대부분 소재의 유입에 의하여 이루어진다. 이 경우 코너부분에서의 국부적인 두께감소는 줄어들며, 용접부에 인장력이 가해지므로 파단의 원인이 된다. 압력곡선의 형태가 Fig. 19의 C인 경우 Fig. 20(b)에 나타난 것처럼 다이 코너부분의 성형이 소재의 유입 및 국부적인 두께감소에 의하여 이루어진다. 이 경우 압력곡선의 형태가 A, B인 경우에 비하여 용접부에 가해지는 인장력이

작아 용접관재유압성형시 소재의 성형성에 유리하게 작용할 것으로 예상된다.

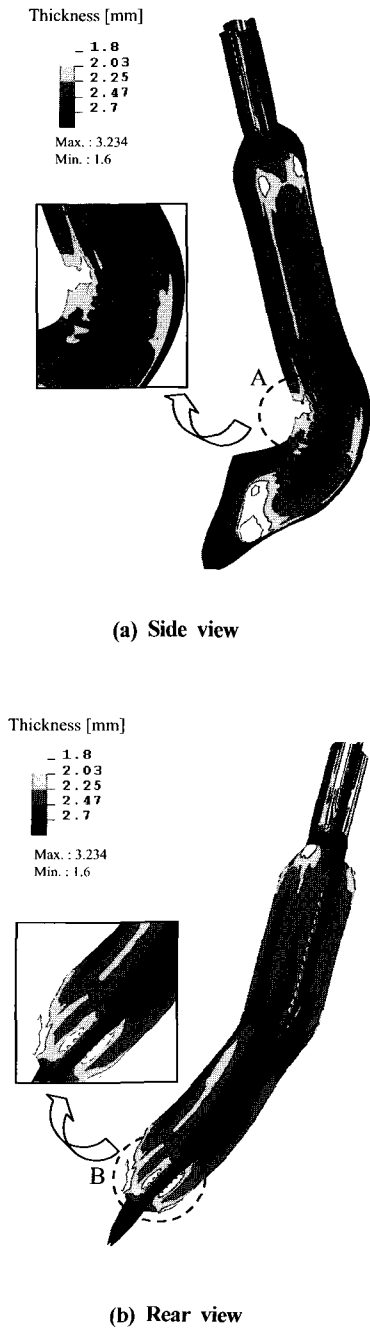


Fig. 21 Thickness distribution at max. pressure 190 MPa

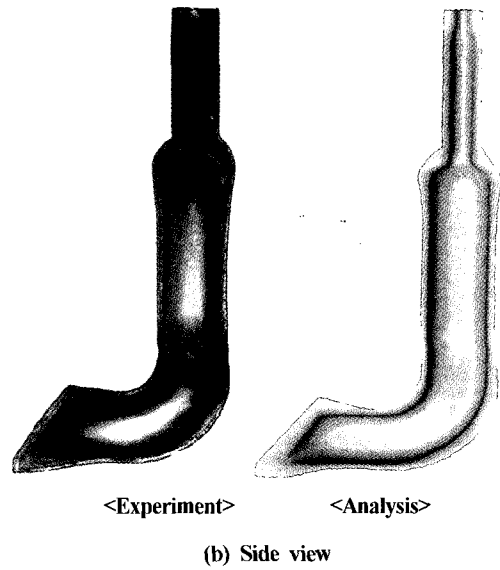
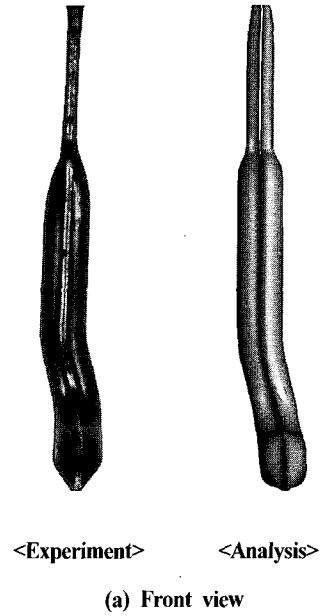


Fig. 22 Comparison of deformed shapes between experiment and analysis at max. pressure 85 MPa

Fig. 21은 성형압력이 최대 190MPa일 때 성형 후의 두께분포를 나타낸다. 최소 두께는 용접선 부분의 플렌지부인 A, B 두 부분이며 최소두께는 1.6mm이다.

Fig. 22는 성형압력이 85 MPa일 때 성형해석결과와 시제품간의 성형 후 형상 비교를 나타낸다.

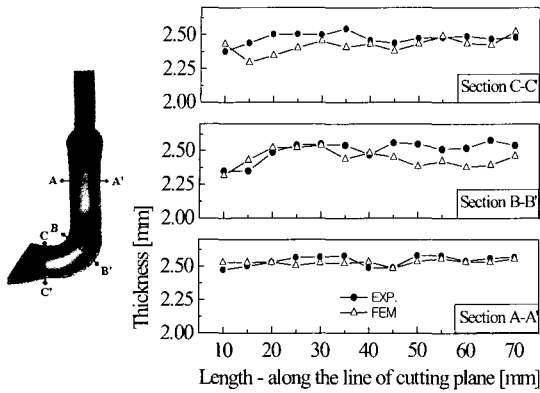
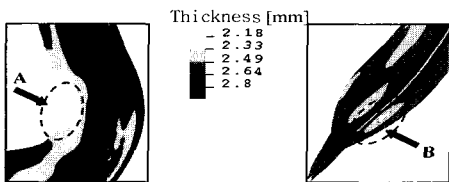


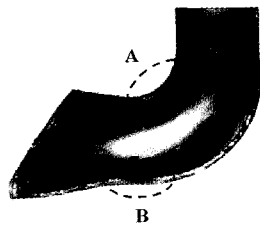
Fig. 23 Comparison of thickness distribution between experiment and analysis at max. pressure 85 MPa

Fig. 23은 단면 A-A', B-B', C-C' 에서 해석과 실제 트라이 아웃된 성형품의 두께분포 비교를 나타낸다. Fig. 22와 Fig. 23에서 알 수 있듯이 성형해석결과와 시제품간의 성형 후 형상, 소재 유입 및 두께분포가 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 24(a)의 A, B 부분은 성형해석결과를 통하여 예상한 파단부를 나타내고, Fig. 24(b)의 A, B는 실제 시제품 성형시의 파단부를 나타낸다. 성형해석을 통한 예상 파단부가 실제 성형품의 파단부와 일치함을 알 수 있다.



(a) Analysis



(b) Experiment

Fig. 24 Comparison of failure zones between experiment and analysis at max. pressure 85 MPa

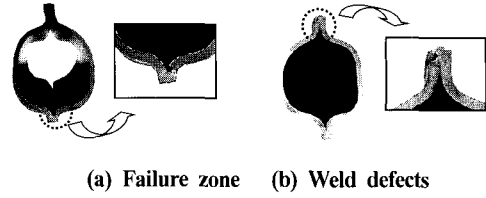
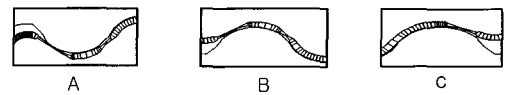
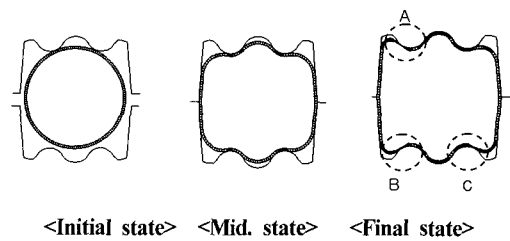
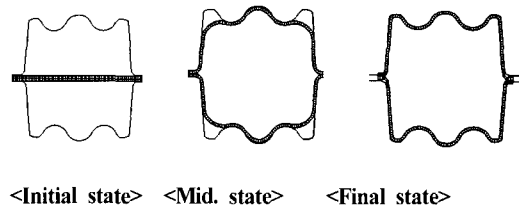


Fig. 25 Section view of failure zone and weld defects



(a) Tube hydroforming



(b) Welded blank hydroforming

Fig. 26 Formability comparison between tube and welded blank hydroforming

Fig. 25(a)는 시제품 성형시 파단부의 단면을 나타낸다. 용접과정에서 용접선 부근의 열영향부(heat affected zone)는 표면경화현상으로 인하여 재료의 항복응력이 저하된다. 따라서 성형과정에서 인장력이 발생할 경우 다른 부분에 비하여 파단이 발생하기 쉬운 부분이다. Fig. 25(b)는 용접판재에서 용접결함이 발생한 부분의 단면을 나타낸다. 용접결함은 용접판재의 성형성을 저하시키는 또 다른 원인이 될 수 있으므로 레이저용접시 용접결함을 최소화 시켜야 한다.

Table 5 Comparison of analysis results between tube and welded blank hydroforming

	Tube hydroforming (with axial feeding)	Welded blank hydroforming
Required pressure	163 MPa	190 MPa
Minimum thickness	1.52 mm	1.60 mm
Predicted fracture position	Point "A" in Fig. 13	Point "A" and "B" in Fig. 24

3.3 관재와 용접관재 유압성형 비교

Fig. 26은 복잡한 단면형상을 갖는 2차원 문제를 관재 및 용접관재유압성형기술로 각각 성형할 경우 성형단계별 단면형상을 나타낸다. 관재를 사용하여 성형할 경우 Fig. 26(a)와 같이 성형이 완료되기 전에 관재의 두께감소가 심한 것을 알 수 있다. 반면 용접관재를 사용할 경우 Fig. 26(b)와 같이 재료의 두께감소가 크지 않고 원하는 제품형상이 성형됨을 알 수 있다. 위의 예와 같이 다이내부형상이 복잡할 경우 관재는 성형방법 자체의 한계와 소재와 다이와의 마찰로 인하여 성형과정에서 심한 국부적 두께감소를 수반하게 된다. 따라서 장치 비용과 초기 소재 제작에 소요되는 번거러움을 고려하더라도 다이내부형상이 관재유압성형기술의 성형한계를 넘을 경우 관재유압성형기술의 적용여부를 고려해 볼 수 있다.

Table 5는 엔진마운트 브래킷에 대한 관재와 용접관재 유압성형 후의 두께분포 및 파단발생 예측부를 비교하였다. 축방향의 램의 이동을 고려한 관재성형의 경우 최소두께는 1.52mm이며, 용접관재성형시는 1.6mm이나, 최대 발생 압력치가 각각 163MPa과 190MPa 일 때의 두께임을 고려한다면 용접관재성형이 성형성의 관점에서 더 유리함을 알 수 있다. 실제 성형시 파단이 예상되는 최소두께 발생부는 관재성형과는 완전히 다른 부분이다. 관재성형의 경우, 파단 예상부가 바깥쪽 굽힘발생부이며, 용접관재 유압성형시는 다이 플랜지로 부터의 소재 유입부이다.

4. 결론

자동차 엔진마운트 브래킷의 관재 및 용접관재유압성형에 대한 성형해석을 수행하였으며, 용접관재유압성형

을 이용한 실제 시제품을 제작하여 성형해석 결과와 비교 분석하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) 관재의 굽힘가공시 맨드릴을 사용한 경우 보다 사용하지 않은 경우가 심한 단면의 변화에도 불구하고 유압성형과정에서 소재의 성형성에 유리한 것으로 나타났다.

(2) 외연적 동적 프로그램을 이용하여 관재의 굽힘가공을 해석한 후, 제하 후의 스프링백은 내연적 정적 탄성문제로 계산되었으며, 스프링백이 발생한 관재의 효과적인 다이 안착을 가능하게 하는 성형다이의 면형상을 제안하였다.

(3) 관재유압성형시 다이 캐비티의 내부 표면적과 초기 관재의 표면적 차를 이용하여 적절한 축방향 이동량을 계산하였다. 내부 유압만으로 성형되는 경우보다 램의 축방향 이동에 의하여 성형모드를 드로잉모드로 유도함으로 성형품의 최소두께가 크게 증가됨을 알 수 있다. 그러나, 지나친 축방향 이동은 오히려 관재에 좌굴을 유발할 수 있으므로 축방향 이동량과 이동속도는 성형압력 증가와 연관지어 결정해야 한다.

(4) 용접관재 유압성형에 대한 성형해석과 실제 시제품의 변형양상, 소재 유입과 두께분포를 비교하였으며, 결과가 잘 일치함을 확인하였다.

(5) 용접관재유압성형의 경우 용접과정에서 재료가 경화된 열영향부가 팽창시 인장력에 취약하게 되어 파단이 발생함을 알 수 있었다. 또한, 성형시 용접관재는 축방향 유입이 없으므로 주로 원주방향과 두께방향의 변형을 통한 즉 평면변형률(plane strain)에 가까운 상태에서 성형이 이루어지므로 용접관재의 예비형상 설계시 소재 유입을 고려한 확관률을 결정해야 한다.

(6) 단면이 복잡한 2차원 문제에 대하여 관재와 용접관재 유압성형 해석을 각각 수행하여 단계별 변형양상을 비교하였다. 용접관재를 사용할 경우 관재에 비하여 재료의 두께감소가 크지 않고 원하는 제품형상이 성형됨을 알 수 있다. 다이내부형상이 복잡할 경우 관재는 성형방법 자체의 한계와 소재와 다이와의 마찰로 인하여 성형과정에서 심한 국부적 두께감소를 수반하게 된다. 따라서 장치 비용과 초기 소재 제작에 소요되는 번거러움을 고려하더라도 다이내부형상이 관재유압성형기술의 성형한계를 넘을 경우 관재유압성형기술의 적용여부를 고려해 볼 수 있다.

(7) 관재성형의 경우, 파단이 예상되는 최소두께 발생부가 바깥쪽 굽힘발생부이며, 용접관재 유압성형은 다이 플랜지로 부터의 소재 유입부이다.

(8) 본 연구에서는 마찰과 용접선의 영향을 고려하지

않고 성형해석을 수행하였다. 따라서 이 요소들이 재료의 성형성에 미치는 영향은 차후 충분한 연구를 통하여 검토되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Hannibal, T. A. and Dieffenbac, J. R., 1998, "Hydroformed Structural Elements An Economics Evaluation of The Technology", SAE Technical paper series, No. 980435, pp.161~165.
- (2) Ahmetoglu, M., Sutter, K., Lee, X. J. and Atlan, T., 1999, "Tube Hydroforming-Current Research, Applications and Need for Training", Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing, The Ohio State University, Columbus, Ohio.
- (3) Srinivassan, T. M., Shaw, J. R. and Thompson, K., 1998, "Tubular Hydroforming : Correlation of Experimental and Simulation Results", SAE Technical paper series, No. 980448, pp.131~137.
- (4) Wu, L. and Yu, Y., 1996, "Computer Simulation of Forming Automotive Structural Patrs by Hydroforming Process", Numisheet'96, pp.324~329.
- (5) Liu, S. D. and Meuleman, K. T., 1998, "Analytical and Experimental Examination on Tubular Hydroforming Limits", SAE Technical paper series, No. 980445, pp.139~150.
- (6) Dohmann, F. and Hartl, C., 1997, "Tube hydroforming-research and practical application", J. of Material Processing Technology, pp.174~186.
- (7) Manabe, K. and Nakamura, S., 1999, "Finite Element Simulation of Hydroforming Process of Pre-bent Circular Tubes", Numisheet'99, pp.503~508.
- (8) Manabe, K., Amino, M. and Nakamura, S., 1999, "FE Analysis on Local Thinning And Fracture Phenomenon in Hydroforming of Tubular Component", Advanced Technology of Plasticity, Vol.II, Proceedings of the 6th ICTP, pp.1229~1234.
- (9) Wang, Z. R., 1999, "Numerical Simulation of Some New Integrated Hydroforming Process", Advanced Technology of Plasticity, Vol.II, Proceedings of the 6th ICTP, pp.1253~1260.
- (10) Robbert, S., 1999, "Process Limits for The Hydroforming of Sheet Metal Pairs", Advanced Technology of Plasticity, Vol.II, Proceedings of the 6th ICTP, pp.1261~1266.
- (11) Zang, S. H., Kang, D. C., Lang, L. H., Danckert, J. and Nielsen, K. B., 1999, "Finite Element Analysis of Hydromechanical Deep Drawing", Numisheet'99, pp.463~466.
- (12) 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.
- (13) 박석완, 권용우, 강대건, 1998, "하이드로포밍 기술의 로어암에의 적용", 한국자동차공학회 '98 추계 학술대회 논문집, pp.730~734.
- (14) 이승희, 전병희, 김의석, 오수익, 1998, "Tube hydroforming을 위한 성형인자 연구", 한국소성가공학회 '98추계학술대회 논문집, pp.32~36.
- (15) 김의석, 백홍전, 전병희, 오수익, 1998, "Hydroforming을 위한 예비굽힘성형의 해석", 한국소성가공학회 '98추계학술대회 논문집, pp.27~31.
- (16) 양재봉, 이한남, 전병희, 오수익, 1999, "Hydroforming을 위한 Tube bending에 관한 연구", 한국소성가공학회 '99추계학술대회 논문집, pp.35~38.
- (17) Lenze, F. J. and Gruszka, T., 1997, "Application of Hydroforming for Body-In-White", Advanced Technologies & Processes IBEC'97, pp.11~20.
- (18) Schmoeckel, D., Hielscher, C. and Prier, M., 1999, "Development And Perspective of Internal High - Pressure Forming of Hollow Sections", Advanced Technology of Plasticity, Vol.II, Proceedings of the 6th ICTP, pp.1171~1182.
- (19) 이우호, 조형석, 1999, "하이드로 포밍 공정의 동특성 해석 및 시뮬레이션", 한국정밀공학회지 제 16권 제 11호, pp.122~132.
- (20) Rama, S. C. and Zhang, J. M., 1999, "A Numerical Approach to Analyze Tubular Hydroforming", Numisheet'99, pp.497~502.
- (21) Siegert, K., Schwager, A., Rieger, R. and Haussermann, M., 1999, "New Machine Concept for Hydroforming Tubes And Extrusions", SAE Technical paper series, No. 1999-01-0678.