

# 액압 성형 공정 시 플랜지부 형성을 위한 FE 해석

최민규<sup>1</sup> · 주병돈<sup>1</sup> · 문영훈<sup>#</sup>

## FE Analysis of Hydroforming Process for Flange Forming

M. K. Choi, B. D. Joo, Y. H. Moon

(Received November 26, 2009 / Revised December 10, 2009 / Accepted December 14, 2009)

### Abstract

Hydroforming has attracted a great deal of attention in the manufacturing industries for vehicles and transportation systems. Hydroforming technology contributes to weight reduction, increased strength, improved quality and reduced tooling cost. Hydroformed automotive parts used as structure components in vehicle body frame often have to be structurally joined at some point. Therefore it is useful if the hydroformed automotive parts can be given a localized attachment flange. For a given flange shape, a parting plane for the dies is established relative to which the various surfaces of the flange shape, in cross section, have no significant reverse curvature. In this study, hydroforming process for flange forming was proposed. FE analysis to form flanged circular shape and flanged rectangular shape was performed with Dynaform 5.5. To accomplish successful hydroforming process design, thorough investigation on proper combination of process parameters such as tool geometry and hydraulic pressure has been performed and optimized. The results show that flanged automotive parts can be successfully produced with tube hydroforming.

**Key Words** : FE Analysis, Flange, Tube Hydroforming, Flanged Tubular Part

### 1. 서 론

액압 성형 공정은 경량화 부품에 대한 수요가 증가함에 따라 자동차 부품 분야에서 경량화를 위한 신가공 공정기술로서 폭넓게 이용되고 적용 범위를 넓혀가고 있는 소성가공 기술이다[1~4]. 액압 성형 공정 기술은 부품경량화 이외에도 기존 공정을 대체하는 동시에 공정을 간소화하여 부품의 일체화를 구현 할 수 있다[5~8]. 이와 같은 부품의 일체화는 무게 감소와 더불어 강도의 향상을 만족시킬 수 있기 때문에 원자재 이용량 절감 등의 효과도 아울러 기대할 수 있다. 액압 성형 공정을 통해 생산될 수 있는 차체 부품으로는 사이드레일(side rail), 서브프레임(subframe) 등이 있

다[9]. 이러한 차체부품의 특성상 다른 부품과의 체결이 필요하다는 제약사항으로 인하여 액압 성형 공정의 적용분야가 한정될 뿐만 아니라 부가적인 추가공정을 통하여 체결함으로써 차체 중량 증가 및 비용증가, 생산성 감소 등의 악영향을 받고 있다. 따라서 본 연구는 플랜지 부착형 부품 제작을 위한 액압 성형 공정을 제안, 선택하였으며 원형 단면 형상 및 사각 단면 형상에 대한 FE 해석을 수행하고 분석하였다.

### 2. 플랜지 액압 성형 공정의 제안

2.1 FE해석을 이용한 시스템 공정 제안  
플랜지 형성 액압 성형 공정은 pre-bulging, flange

1. 부산대학교 기계공학부/정밀정형 및 금형 가공 연구소  
# 교신저자: 부산대학교 기계공학부,  
E-mail: yhmoon@pusan.ac.kr

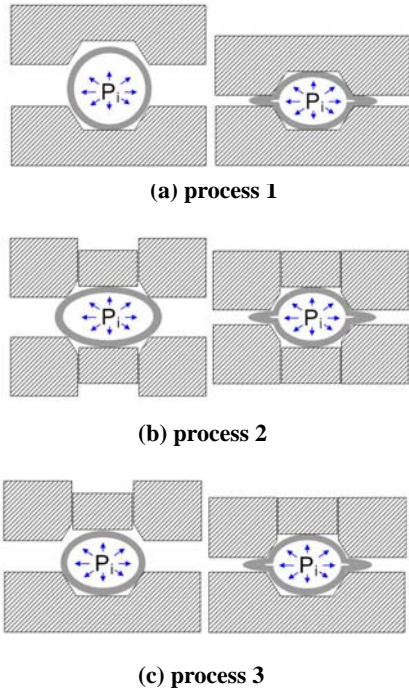


Fig. 1 Schematic drawing of proposed process

forming, conforming shape의 3단계로 이루어져 있다. Pre-bulging 단계에서는 액압 부여시 실링(sealing)을 위한 펀치(punch)구동부를 제외한 금형이 개방된 상태에서 튜브가 세팅(setting)되며 플랜지부로의 확관을 유도하기 위해 튜브 내부에 액압이 가해진다. Flange forming 단계에서는 내압이 가해진 상태에서 금형이 구동되어 금형이 닫히게 되며 이때 플랜지부가 형성된다. Conforming shape 단계에서는 내압에 의해 코너부가 충전되고 공정이 끝나게 된다.

Fig. 1에서 플랜지 형성을 위한 3가지 공정을 나타내었다. (a) process 1의 경우 일체형 금형 공정으로 피딩부의 경우 실링을 위하여 튜브의 외경과 동일한 치수를 가지는 원형 형상이며 피딩부를 제외한 상부금형 전체가 플랜지부 성형을 위하여 구동되는 형태이다. (b) process 2는 상하부 플랜지부 분리형 금형 공정으로 피딩부의 경우 일체형 금형과 동일한 치수 및 형상이며 상하부의 플랜지부가 구동이 가능한 형태의 금형이다. (c) process 3은 상부 플랜지부 분리형 금형 공정으로 상부의 플랜지부만이 구동이 가능한 형태이다. 3가지의 공정 중 원형형상 플랜지 제작공정에 맞는 공정을 채택 후, 채택된 공정의 실험적 검증은 수행하

Material	DP500
Tube diameter (mm)	65.0
Tube thickness (mm)	2.0
Internal pressure (bar)	100~2000
Die parting angle (°)	15, 30, 45, 60
Circumferential expansion ratio (%)	0, 10, 20



Fig. 2 Change of tube section during hydroforming process for flanged tubular parts

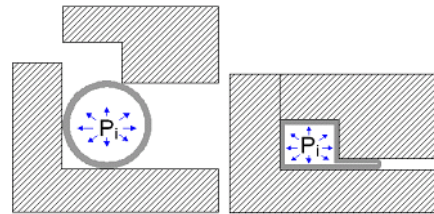


Fig. 3 Schematic drawing of proposed process



Fig. 4 Change of tube section during hydroforming process for the flanged tubular parts

기 위한 금형 설계를 위해 확관을 및 과팅 위치에 따른 성형성을 분석하였다. 해석에는 상용 유한요소해석 코드인 DYNAFORM 5.5를 이용, 1/4 모델을 적용하였으며 해석조건은 Table 1에 나타내었다. 초기 원형 단면을 가지던 튜브는 내부에 작용하는 압력과 금형의 구속에 의해 Fig. 2에 나타난 형태로 순차적으로 변형되어 2개의 플랜지를 가지는 원형 형상의 단면으로 성형되게 된다.

## 2.2 사각형상 플랜지 제작 공정

실제 차량 구조용 부품의 적용 가능성을 검토하기 위하여 실제 부품 형성으로 많이 이용되고 있는 사각 폐단면 형상에 플랜지를 제작하기 위

한 공정을 분석하였다. 상용 유한요소해석 코드인 DYNIFORM 5.5를 이용하여 1/2 모델을 적용하여 유한요소해석을 수행하였으며 해석에 사용된 소재는 DP500, 소재의 직경은 65.0mm, 두께는 2.0mm이다. 형상의 특성을 감안하여 피딩부를 제외한 상부금형 전체가 플랜지부 성형을 위하여 구동되는 형태의 공정(일체형 금형 공정)을 채택하였다. 초기 원형 단면을 가지던 튜브는 내부에 작용하는 압력과 금형의 구속에 의해 Fig. 4에 나타난 형태로 순차적으로 변형되어 1개의 플랜지를 가지는 사각 형상의 단면으로 성형되게 된다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 FE 해석을 이용한 시스템 공정 설계

Fig. 5에 각 공정의 최종 형상 및 FLD 결과를 나타내었다. 일체형 금형 공정의 경우 상부 12시 방향에서 파단이 발생하였으며 상하부 플랜지부 분리형 금형 공정의 경우 파단 없이 상하 대칭으로 성형이 이루어 졌다. 상부 플랜지 분리형 금형 공정의 경우 파단은 발생하지 않았으나 소재의 변형은 상부에 집중되었다. 이러한 결과는 Fig. 6에 나타난 각 공정 별 두께분포에서도 확인할 수 있다. 일체형 금형 공정의 경우 금형의 제작 및 구동은 용이하나 상부의 집중적인 확장으로 인하여 파단이 발생하여 플랜지부의 형성이 불가능하며 상하부 플랜지부 분리형 금형 공정의 경우 상하부 대칭인 균일한 확장거동을 보여 성형성 측면에서는 가장 유리할 것으로 판단되나 하부 플랜지부 금형을 위한 추가적인 장치가 필요하다. 세 번째 상부 플랜지부 분리형 금형 공정의 경우 상부에 상하부 비대칭인 확장거동을 보이나 플랜지부가 형성이 가능하고 추가적인 장치의 구성없이 플랜지부 금형의 구동이 가능하다는 장점이 있다. 상부 플랜지부 분리형 금형 공정을 채택하여 추가적인 분석을 수행하였다.

#### 3.2 FE 해석을 이용한 금형 설계

확관율에 따른 해석 결과를 Fig. 7 및 Fig. 8에 나타내었다. 확관율이 0%일 때 두께는 소재의 확관은 제한되어 있지만 피딩에 의해서 소재가 밀려 들어가게 됨으로써 전체적인 두께는 원소재의 두께인 2mm보다 두껍게 나타났다. 상부금형과 하부금형쪽 소재는 2.05~2.10mm로 일정한 두께분포를 나타내었다. 확관율이 10%, 20%일 때는 들러

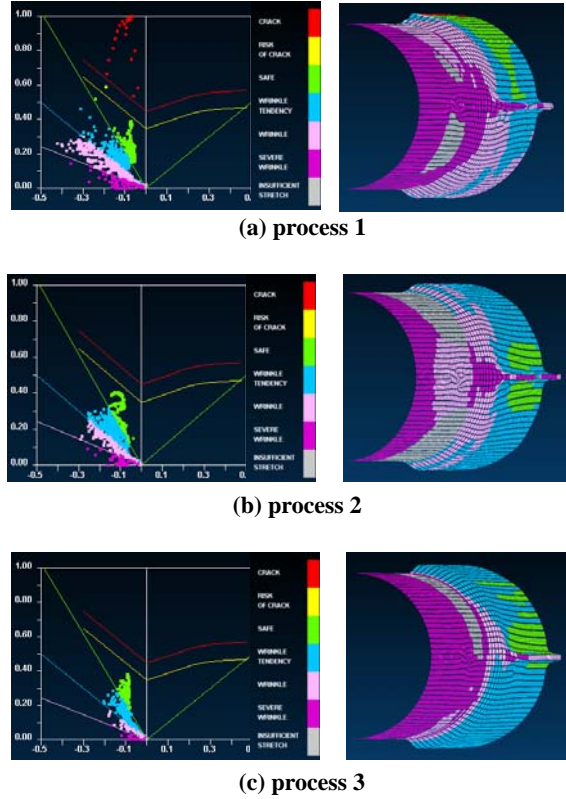


Fig. 5 FE analysis results of flanged tubular parts

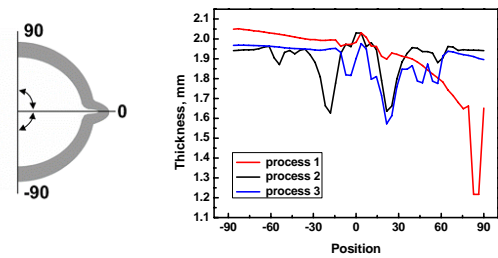


Fig. 6 Tube thickness for proposed process

있는 상부금형 쪽에서 국부적인 확관과 상부금형의 구동으로 소재에 연신이 일어남으로써 두께의 분포는 일정하지 않게 나타났고, 플랜지부가 시작되는 0° 근처부분에는 플랜지부로 국부적인 확관과 금형이 단힐 때 소재의 연신 때문에 다른부분에 비해 두께가 감소하는 것으로 나타났다. 취약부의 두께는 0%, 10%, 20%일 때 각각 1.99mm, 1.47mm, 1.39mm로 나타났다. 확관율에 따른 플랜지부 길이는 0%일 때는 5.20mm의 플랜지부를 형성하였고, 10%일 때 4.80mm로 가장 짧은 플랜지부를 형성하였고, 20%일 때는 5.40mm로 가장 긴

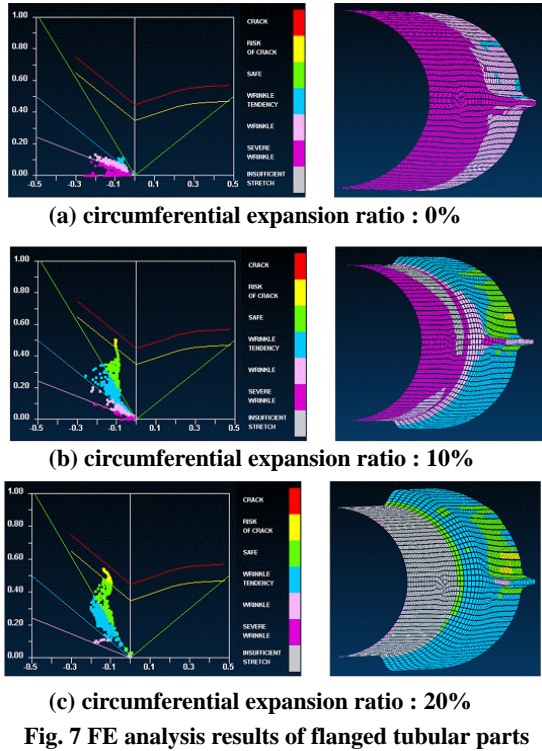


Fig. 7 FE analysis results of flanged tubular parts

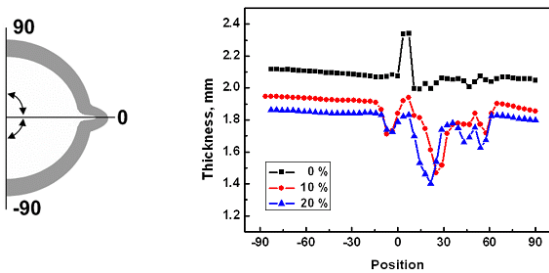


Fig. 8 Thickness variation at various circumferential expansion ratios

플랜지부를 형성하였다. 20%일 때 플랜지부의 길이가 가장 길게 나타났지만 취약부의 두께가 1.39mm로 파단 가능성이 높은 것으로 나타났다.

Fig. 9에서 파팅위치의 모식도를 나타낸것이다. 파팅위치에 따른 분석 결과를 Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12에 나타내었다. 파팅위치가 15°인 경우 플랜지가 형성되지 않았으며 플랜지가 형성된 경우 파팅위치에 상관없이 두께분포는 비슷한 경향을 나타내었다. 하부금형쪽 소재에서는 금형의 구동이 없는 단순 확관이 일어나기 때문에 두께 분포는 일정하게 나타났으며 플랜지가 만들어지는 0°에서

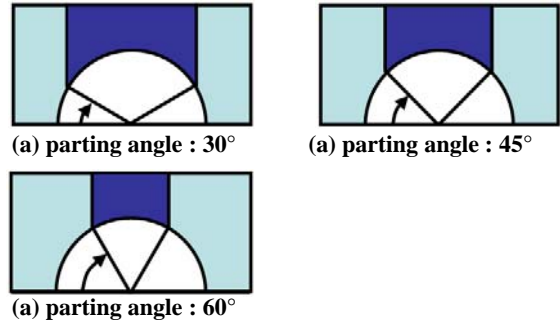


Fig. 9 Schematic drawing of parting angle

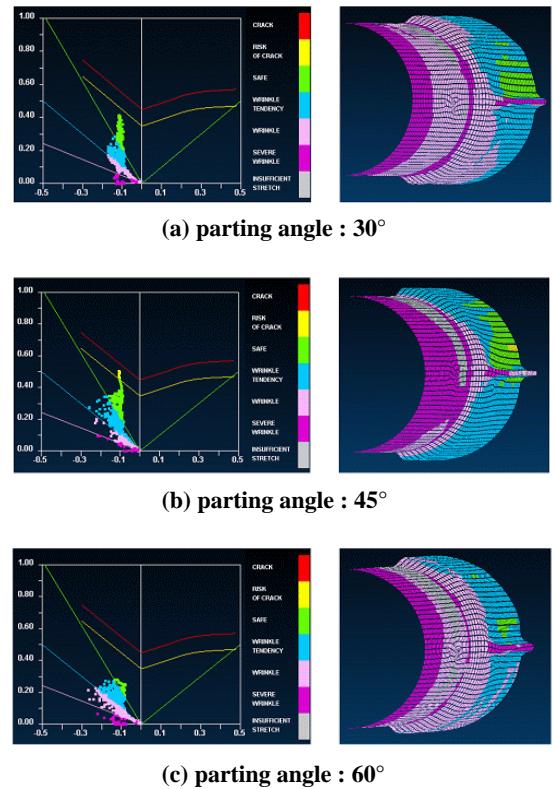


Fig.10 FE analysis results of flanged tubular parts

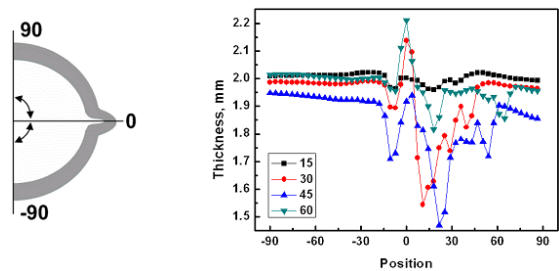


Fig.11 Thickness variation at various parting angles

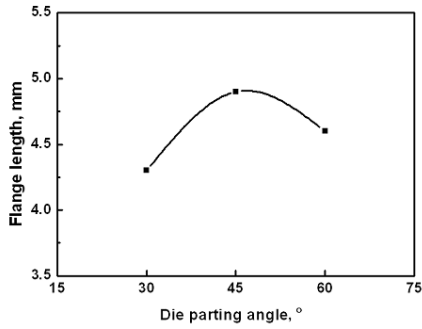


Fig.12 Flange length at various parting angles



Fig. 13 Flanged tube part by experiment

가장 두꺼운 두께가 나타났다. 상부금형쪽 소재는 플랜지부로의 국부적인 확관과 상부금형이 완전히 닫혀지는 구동에 의해 소재의 연신이 일어나게 되어 두께분포는 일정하지 않게 나타나는 경향을 보였고 플랜지부가 시작되는 곡률부 부근에서 국부적인 연신이 일어나게 됨으로써 두드러진 두께감소가 나타났다. 파팅위치에 따른 플랜지부의 길이는 30°, 45°, 60°일 때 각각 4.3mm, 4.9mm, 4.6mm로 나타났으며 파팅위치가 45°일 때 플랜지부 길이는 가장 길었다. 그 이유는 플랜지부의 길이는 파팅위치가 높은 경우 플랜지부로의 집중적인 확관보다 다른 영역으로의 확관이 일어나게 되어 짧은 플랜지부의 길이를 나타냈으며 파팅위치가 낮을 경우 플랜지부로의 확관이 제한되기 때문에 플랜지부의 길이는 짧게 나오는 것으로 판단된다.

해석을 바탕으로 확관율이 10%이고 파팅위치가 45°인 금형을 제작하였고, 이 금형을 이용하여 800bar의 내압조건에서 실험한 시편을 Fig. 13에 나타내었다.

### 3.3 사각형상 플랜지 제작 공정

플랜지부를 제외한 폐단면의 형상이 가로 49mm,

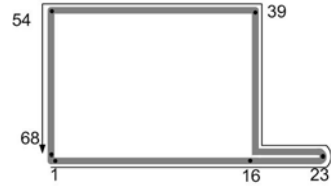


Fig.14 Measuring points

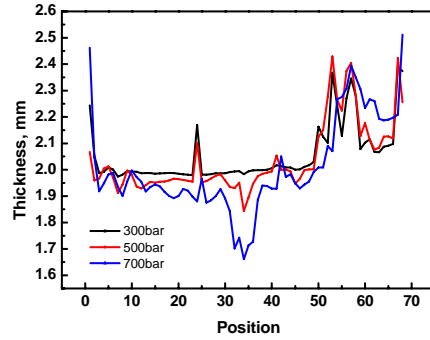


Fig.15 Tube thickness at various final pressures (Aspect-Ratio : 0.67)

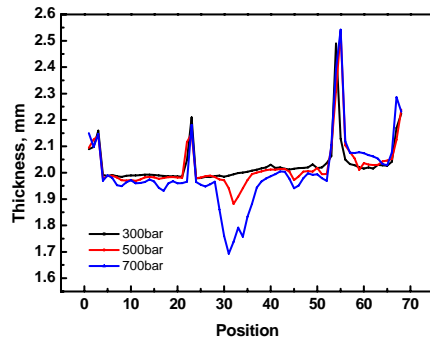


Fig.16 Tube thickness at various final pressures (Aspect-Ratio : 0.8)

세로 33mm인 형상을 설계하고 해석을 수행 하였다. 내압을 변경하며 해석을 수행한 결과 최종압력이 200bar보다 작을 경우 소재는 금형형상을 따라 성형되지 못하고 좌굴이 발생하여 사각형상의 단면이 형성되지 않았으며 최종압력이 800bar 이상일 경우 파단이 발생하였다. 금형이 내려올 때 내부에 일정 이상의 액압이 존재해야 튜브가 솔리드처럼 거동하여 풍선을 누르는 것과 같이 열린 공간으로 확관하게 되나 압력이 낮을 경우는 이처럼 거동하지 못하고 주름이 생기게 된다. 또한 압력이 지나치게 높은 경우 소재의 는 지나친 연

신 및 네킹으로 인해 파단이 발생하게된다. 성형 가능 영역인 200~700bar의 구간에서 플랜지 길이는 15.6~19.2mm로 나타났으며 압력 의 증가와 함께 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 14는 소재의 두께분포를 확인하기 위해 둘레방향으로 측정포인트를 지정한 것이다. Fig. 15에서는 압력에 따른 성형품의 두께분포를 나타내었다. 압력이 증가함에 따라 플랜지의 두께는 불균일해지고 특히 플랜지가 형성되는 반대쪽 구간의 경우 두께가 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이 구간은 금형의 닫히게 되면서 소재의 압축이 일어나게 되고 공간 내에서 소재가 확장할 곳이 없어짐에 따라 주름이 발생한 것을 알 수 있다. 이를 방지하기 위해 최종 성형품의 세로길이를 늘려 중형비를 증가시켜 해석을 수행하였다. Fig. 16에는 두께분포를 나타냈다. 중형비가 기존의 0.67에서 0.80으로 증가함에 따라 벽면부의 두께증가가 줄어들었으며 초기 소재의 두께 2mm에 근접하게 나타났으며, 폐단면의 둘레를 커짐으로 인해 소재가 유동이 활발해져 사각 단면형상은 주름 없이 우수하게 성형되었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 플랜지 부착형 부품 제작을 위한 액압성형 공정을 제안하였으며 원형 단면 형상 및 사각 단면 형상에 FE 해석을 수행하여 검증하였다. 이를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 원형 단면 형상 플랜지 제작시 상부 플랜지부 분리형 공정, 사각 단면 형상 플랜지 제작시 일체형 금형 공정을 적용하여 플랜지 부착 액압 성형 공정을 개발하였다.
- (2) 상부 플랜지부 분리형 금형 공정에서는 플랜지부 금형이 구동되는 상부에 소재의 변형이 집중되고 이로 인해 하부에는 비교적 고른 두께 분포가, 상부에는 상대적으로 큰 두께편차가 나타난다.
- (3) 사각형성 플랜지 제작공정에서 발생한 주름은 최종형상의 중형비를 늘림으로서 제거할 수 있으며 이 공정을 이용한 성형품의 플랜지 길이는 압력이 증가 할수록 길어진다.

#### 후 기

이 논문은 교육과학기술부/한국과학재단 국가핵심 연구센터사업 및 지식경제부 산업기술개발사업의 일부 지원으로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] H.-U. Lücke, Ch. Hartl., T. Abbey., 2001, Hydroforming, J. Mater. Process. Technol., Vol. 115, pp. 87~91.
- [2] M. Koc., T. Altan., 2002, Prediction of forming limits and parameters in the tube hydroforming process, Int. J. Mach. Tools Manuf, Vol. 42 , pp. 123~138.
- [3] Debin Shan, Y. S. Kim, Yan Lu, S. T. Kim, Cheng Lu Wang, 2000, Characteristics of Tee Tube Forming Deformation Zone using Plastic Pressure-Building Medium, Met. Mater. Int., Vol. 6, pp. 519~524.
- [4] J. H. Oh, H. H. Choi, S. H. Park, 2008, The optimization of rear suspension using hydroforming, Trans. Mater. Process., Vol. 17, No. 7, pp. 481~485.
- [5] Woo-Jin Song, Seong Chan Heo, Tae Wan Ku, Jeong Kim, Beom Soo Kang, 2007, Evaluation of Formability on Hydroformed Part for Automobile Based on Finite Element Analysis, Trans. Mater. Process., Vol. 17, No. 1, pp. 52~58.
- [6] M. Koc, T. Altan, 2001, An Overall Review of the Tube Hydroforming(THF) Technology, J. Mater. Process. Technol. 108(3), pp. 384~393.
- [7] T. Altan, 1999, Recent Status and Trend of Tube Hydroforming in USA, Proc. of International Seminar on Recent Status & Trend of Tube Hydroforming, July 2, pp. 1~10.
- [8] M. Ahmetoglu, T. Altan, 2000, Tube hydroforming: state-of-the-art and future trends. J. Mater. Process. Technol., Vol. 98, pp. 25~33.
- [9] F. dohmann, Ch. Hartl, 1997, Tube hydroforming research and practical application, J. Mater. Process. Technol., Vol. 71, pp. 174~186.