

예비성형을 적용한 튜브 하이드로포밍 금형설계

김현영· 임희택
 (강원대학교 기계·메카트로닉스공학부)

Die Design for Tube Hydroforming Process Considering Preforming Effect

H. Y. Kim and H. T. Im

1. 서론

최근 자동차 업계는 기업간의 인수, 합병으로 국가간 경계가 사라지고 있다. 이러한 노력들은 자동차의 생산비용을 줄이기 위한 구조 조정과 부품 조달 체계의 개선 및 경량화, 고품질화 등으로 나타나고 있다. 특히 자동차 회사는 경량화 및 공정감소를 위해 레이저 용접판재(tailor welded blanks:TWB), 튜브 하이드로포밍(tube hydroforming) 및 고장력 강판을 적용하고 있다.⁽¹⁾ 초기 튜브 하이드로포밍 공정이 도입된 1960년대에는 배기 부품이나 세면대 배관 부품 등의 간단한 형상을 가진 제품을 만드는데 적용되었다. 본격적으로 발전하기 시작한 것은 자동차 부품 산업에 적용된 1990년대 들어서면서부터 이다. 튜브 하이드로포밍 기술의 가장 큰 특징은 여러 판재로 이루어진 제품을 한 개의 튜브를 이용하여 한 번의 공정으로 생산할 수 있다는 것이다. 이 때문에 제품 제작에 사용되는 금형의 개수를 줄일 수 있으며 공

정수를 대폭 단축할 수 있다. 또한 공정간의 이동시 소요되는 인력 및 시간 단축을 피할 수 있어 제품 생산에 매우 유리하다.

이 외에도 튜브 하이드로포밍은 (a)균일한 제품 두께, (b)정밀한 제품 생산, (c)부품 개수 감소에 의한 경량화, (d)용접 플랜지의 삭제, (e)가공경화 현상으로 인한 강도 및 강성의 증가, (f)강도 증가로 인한 적용 판재의 두께 감소, (g) 적용판재의 무게 감소로 인한 경량화 등 많은 장점을 갖는다.⁽²⁻⁵⁾

2. 하이드로포밍의 종류

하이드로포밍 공정은 사용하는 블랭크의 종류에 따라 크게 3 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째는 튜브(tube)를 이용하는 튜브 하이드로포밍이다. (Fig. 2) 튜브 하이드로포밍은 단면이 원형인 튜브를 금형 내에서 고압의 유체를 불어넣어 원하는 형상을 얻는 방법이다.

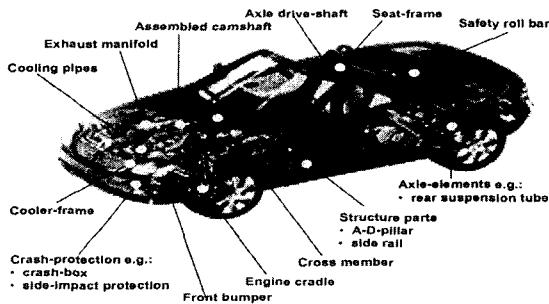
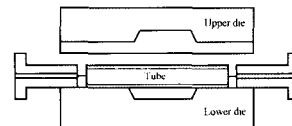
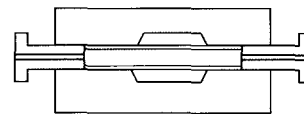


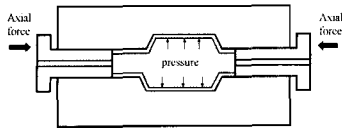
Fig. 1 Hydroformed parts for automotive body



(a) Loading into the hydroforming die

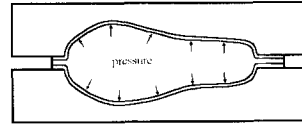


(b) Closing of the hydroforming die



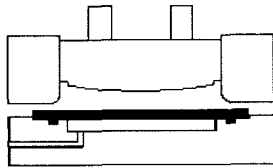
(c) Hydroforming

Fig. 2 Tube hydroforming process

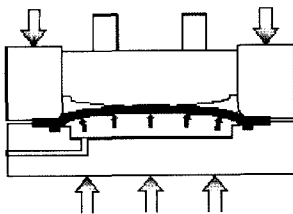


(c) Hydroforming

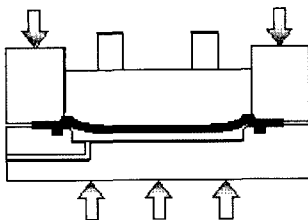
Fig. 4 Welded blank hydroforming process



(a) Loading into the hydroforming die

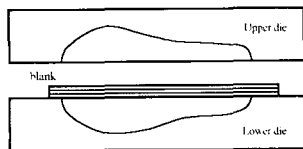


(b) Closing of the hydroforming die

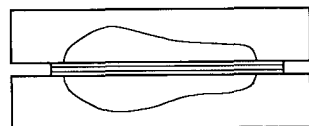


(c) Hydroforming

Fig. 3 Sheet hydroforming process



(a) Loading into the hydroforming die



(b) Closing of the hydroforming die

두번째는 판재를 이용하는 시트 하이드로포밍(sheet hydroforming)이다.(Fig. 3) 시트 하이드로포밍은 판재와 하형 금형 사이에 압력을 가한 후 판재를 펀치로 눌러서 원하는 형상을 얻는 방법이다.

세 번째는 용접한 판재를 이용하는 용접 판재 하이드로포밍(welded blank hydroforming)이다.(Fig. 4) 용접 판재 하이드로포밍은 두 개의 판재 가장자리를 용접한 후 판재 사이에 고압의 유체를 불어넣어 원하는 형상을 얻는 방법이다. 일반적으로 자동차 산업에서는 튜브 하이드로포밍이 가장 많이 이용되며 자동차 외관 등에 시트 하이드로포밍도 이용되고 있다.

3. 튜브 하이드로포밍의 종류

튜브 하이드로포밍은 성형하는 내부 압력이 고압이나 저압이나에 따라 고압 하이드로포밍과 저압 하이드로포밍으로 구분할 수 있다. 고압 하이드로포밍은 유럽에서 많이 사용하고 있는 방법이며 저압 하이드로포밍은 미국에서 주로 사용되고 있는 방법이다. 다음은 각 튜브 하이드로포밍의 성형 방법과 장단점에 대하여 소개하였다.

3.1 고압 하이드로포밍 (HPH : High Pressure Hydroforming)

일반적으로 튜브는 금형 사이에 블랭크가 씹히는 성형 불량을 방지하기 위해 최종 부품의 단면보다 5-15% 작은 원주 길이를 갖는 것을 사용한다 Fig. 5(a)처럼 튜브를 금형에 안착시키고 상형 금형을 닫으면서 예비성형을 수행한다. 금형이 완전히 닫히면 코너부분은 최종 제품 형상으로 완벽하게 성형된 상태가 아니다.(Fig. 5(b)) 따라서 금형이 닫힌 후 코너부가 완벽하게 성형될 수 있도록 튜브 내부에 고압의 유체를 불어넣어 준다.(Fig. 5(c),(d)) 이때 튜브 내부에 가해지는 최고 압력은 보통 140MPa 을 넘어서며 최대690MPa

이상 올라가기도 한다. 이처럼 높은 압력으로 성형하기 때문에 코너부 성형시 튜브 벽 두께가 얇아지는 경향을 가지며 국부적인 파단이 발생할 가능성이 있다는 단점이 갖는다. 하지만 스프링 백 현상을 줄일 수 있어 제품의 치수 정확성을 확보할 수 있다는 장점을 갖게 된다.

3.2 저압 하이드로포밍 (PSH : Pressure Sequence Hydroforming)

Fig. 6(a)처럼 급형이 부분적으로 닫히는 성형 초기에 튜브는 급형 단힘에 의해 성형된다. 어느 정도 급형 단힘이 진행되어 튜브가 급형 안에 들어오면(Fig. 6(b)) 튜브의 밀폐된 양끝을 통하여 저압의 유체가 튜브 내부에 가득차게 된다. 이렇게 튜브는 내부에 유체 압력이 유지된 상태에서 계속 급형 단힘에 의해 성형된다. 급형이 닫히는 동안 유체가 가득찬 튜브는 풍선을 누르는 것과 같은 효과에 의해 급형 형상을 따라 성형된다.(Fig. 6(c)) 상·하 급형이 완전히 닫히면 튜브는 내부 압력 때문에 코너부와 미세부분의 성형이 진행되어 최종 제품 형상과 거의 비슷하게 된다. 코너부와 미세부분의 미성형을 보완하기 위해 추가적으로 더 높은 저압을 발생시켜 성형을 최종 완료하게 된다. 저압 하이드로포밍은 필요 압력보다 낮은 압력으로 복잡한 형상을 성형할 수 있다는 장점이 있다. 일반적으로 필요 압력은 48MPa 이하이다. 또한 급형 단힘이 종료되기 전에 내부 압력을 가해 주기 때문에 코너부에 재료가 유입되면서 성형되어 튜브 벽의 두께 얇아짐이 심하지 않아 국부적인 파단의 발생 가능성도 고압 하이드로포밍에 비해서 작다.

고압 하이드로포밍은 단힘 공정 후 액압성형에 중점을 둔 반면, 저압 하이드로포밍은 단힘 공정 동안 유압을 가해 주어 예비성형에 중점을 두었다. 이처럼 방법의 차이는 있지만 튜브 하이드로포밍에서는 위와 같이 단힘 공정 동안 예비성형을 수행하는 것이 일반적이다.

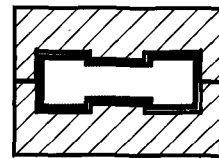
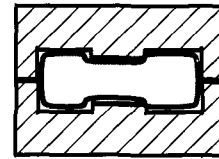
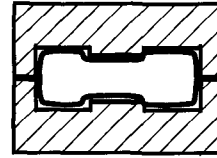
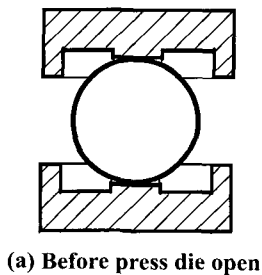
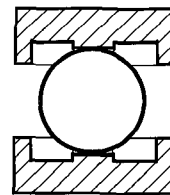
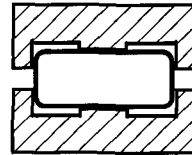


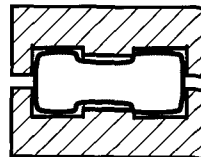
Fig. 5 High-pressure hydroforming process⁽⁶⁾



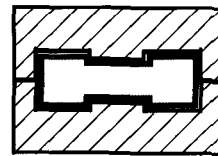
(a) Before press die open



(b) Before press die closing



(c) 1st pressure die closed



(d) 2nd pressure die closed

Fig. 6 Pressure sequence hydroforming process⁽⁶⁾

4. 예비성형공정

튜브 하이드로포밍을 적용한 자동차 구성품은 굽힘성형이 필요하며 때때로 예비성형이 필요할 때가 있다. (굽힘성형은 제품 형상에 따라 튜브를 벤딩하는 공정이며 예비성형은 튜브 하이드로포밍 전에 최종 제품과 거의 비슷한 형상이 되도록 성형하는 공정이다.) 많은 자동차 구성품이 길이 방향으로 굴곡이 있고 단면 변화가 있기 때문에 굽힘성형과 예비성형은 튜브 하이드로포밍 공정에 있어서 매우 중요한 부분이라고 할 수 있다.

튜브 하이드로포밍을 적용할 때 굴곡과 단면 변화가 작은 경우에는 위에서 언급한 고압·저압 하이드로포밍을 이용하여 굽힘성형과 예비성형을 수행하는 것이 가능하다. 하지만 제품의 단면 변화가 클 경우, 특히 제품의 단면 둘레 길이보다 튜브 원주 길이가 크다면 성형시 문제가 발생하게 된다. 첫 번째, 튜브 원주 길이를 작은 단면에 맞추게 되면 단면이 큰 부분에 확관률이 커져서 제품의 두께가 얇아지거나 파단이 발생할 수 있다. 두 번째, 튜브 원주 길이를 단면의 변화에 따라 다르게 제작한다면 튜브의 생산 단가가 매우 상승하게 될 것이다. 세 번째, 튜브 원주 길이를 큰 단면에 맞추게 되면 단면이 작은 부분은 금형에 안착할 수 없어 성형이 불가능하게 될 것이다. 일반적으로 형상이 간단하거나 확관률이 큰 제품은 예비굽힘 후 하이드로포밍 금형을 이용하여 예비성형과 액압성형을 연속적으로 수행한다. 그러나 점차 튜브 하이드로포밍을 복잡한 형상의 제품에 적용하기 시작하면서 하이드로포밍 금형만을 이용한 충분한 성형이 불가능하게 되었다. 이 때문에 최근 유럽과 같은 선진국에서는 튜브 하이드로포밍에 예비성형을 추가하고 있다. 예비성형이란 슬라이더를 이용하여 상대적으로 단면이 작은 부분을 하이드로포밍 금형에 들어갈 수 있도록 미리 성형하여 주는 것이다. 일반적으로 예비성형이 하이드로포밍 금형이 닫히는 것에 의해 이루어지는데 비해서 이 방법은 별도의 예비성형 금형이 있다는 것이 다르다.

금형 닫힘 성형성 평가는 금형의 중심선을 따라 튜브를 구성한 후 굽힘을 고려하지 않고 금형 닫힘 해석을 수행한다. 이 해석은 튜브 하이드로포밍을 시작하기 전에 튜브가 금형에 제대로 안착될 수 있는가를 평가해주는 것이다. Fig. 7 은 금형 닫힘 성형성 평가의 예이다. 예시 모델은 튜브 직경에 비해 폭이 좁은 A, B 부분이 있기 때문에 금

형이 닫힐 때 튜브가 금형에 의해 씹히는 현상이 발생한다. 이 결과를 통해서 하이드로포밍 금형만을 이용하여 예비성형을 수행할 경우 성형 불량 이 발생한다는 것을 알 수 있다.

이런 문제가 발생했을 때 우선 고려해 볼 수 있는 방법은 해당 부분을 수정하는 방법이다. 서브 프레임 같은 경우는 설계에 많은 여유를 주지 않으므로 기존의 모델을 수정하기에는 많은 어려움이 있다. 이처럼 부득이한 사정으로 모델을 수정할 수 없을 때 슬라이더를 이용하는 기계적인 예비성형 공정을 추가하는 것을 고려해 볼 수 있다. Fig. 8 은 기계적인 예비성형을 위해 구성한 트라이아웃 금형과 유한요소모델이다. 슬라이더의 이동을 위하여 상하 금형의 양쪽 끝을 개방하였다. 이 슬라이더는 상형 금형이 완전히 닫힌 후에 금형에 안착된 튜브를 안쪽으로 밀어주어 성형하는 역할을 한다. 슬라이더로 성형한 후 튜브는 거의 최종 제품 형상과 동일한 형상을 갖게 된다. 기계적인 예비성형에서는 튜브를 슬라이더로 밀어 주기 때문에 튜브와 상·하 금형 사이의 마찰력이 작용하여 튜브의 두께가 얇아진다는 것이 단점이다. 그리고 별도의 예비성형 금형을 제작해야 하고 슬라이더를 움직일 수 있는 유압장치가 필요하므로 제품 생산 사이클과 제작비가 높아진다는 단점이 있다. Fig. 9 는 예비성형 후 트라이아웃과 성형해석결과이다. 유한요소해석을 통해서 제품의 주름이 발생하는 부분과 파단 가능 부위를 거의 정확하게 예측할 수 있다. 그리고 Fig. 10 은 슬라이더를 사용한 예비성형해석의 순차적인 단면변화를 보여준다. 튜브의 직경에 비해서 금형의 폭은 좁지만 기계적인 예비성형에 의해서 원하는 단면 형상으로 성형이 가능함을 확인할 수 있다.

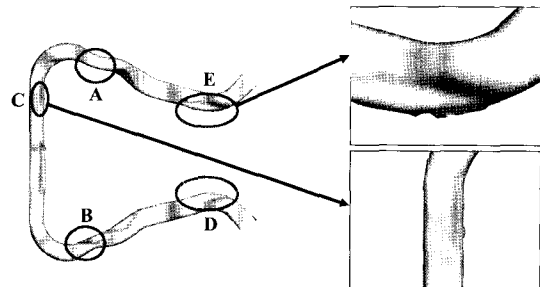
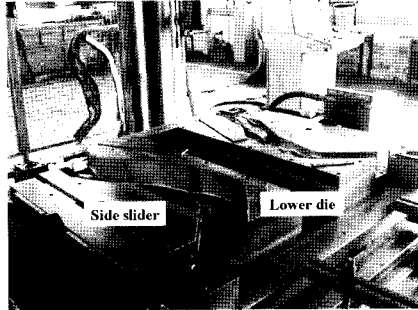
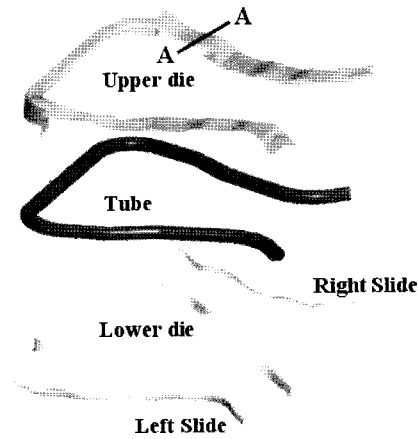


Fig. 7 Defect after closing die simulation



(a) Tryout tool



(b) Finite element model

Fig. 8 Tools set for preforming simulation

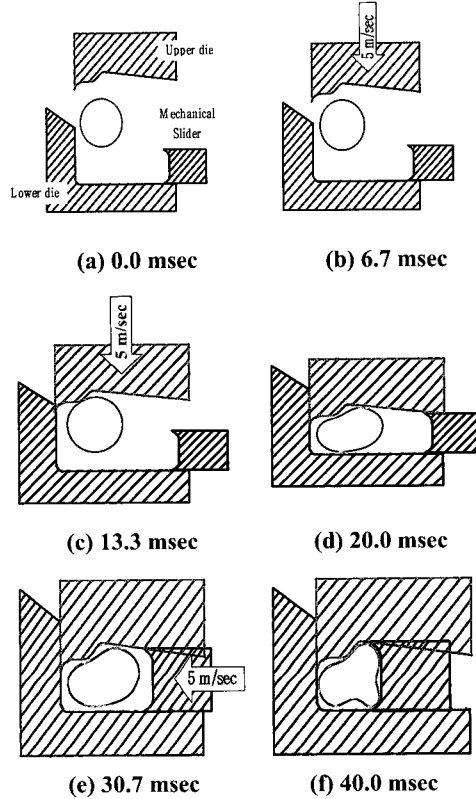
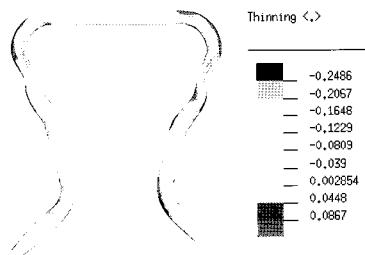
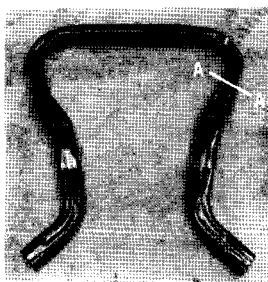


Fig. 10 AA Section view of preforming simulation



(a) Simulation (Thinning distribution)



(b) Tryout

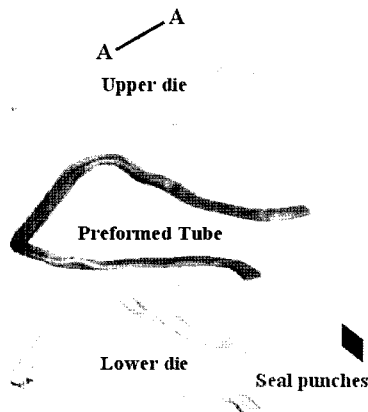
Fig. 9 The end form of tube after preforming

5. 튜브 하이드로포밍 공정

예비성형을 통하여 최종 제품 형상과 거의 일치하는 형상이 되었기 때문에 튜브가 하이드로포밍 금형에 안착하는데 전혀 문제가 없다. 아직까지 코너의 미세한 부분이 완전히 성형되지 않았고 음의 확관률을 갖는 부분을 강제로 슬라이더로 밀어서 성형을 했기 때문에 많은 주름이 발생한 상태이다. 이런 이유로 튜브는 하이드로포밍 금형이 닫히는 동안 성형되지 않는다. 금형이 완전히 닫히면 튜브 내부에 고압을 가하여 코너부의 확관과 기계적인 예비성형에서 발생한 주름을 퍼주는 액압성형을 수행하게 된다. 이처럼 기계적인 예비성형이 포함된 튜브 하이드로포밍에서는 튜브를 제품 형상으로 성형하는 역할이 줄어들게 된다. Fig 11 은 튜브 하이드로포밍을 위해 구성한 트라이아웃 금형과 유한요소모델이다. 상·하 금형과 피딩(feeding)을 위한 씰펀치(seal-punch)로 구성되며 피딩을 적용하는 하이드로포밍 금형과 차이점은 없다.



(a) Tryout tool

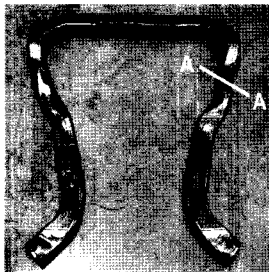


(b) Finite element model

Fig. 11 Tools set for hydroforming simulation



(a) Simulation (Thinning distribution)



(b) Tryout

Fig. 12 The end form of tube after hydroforming

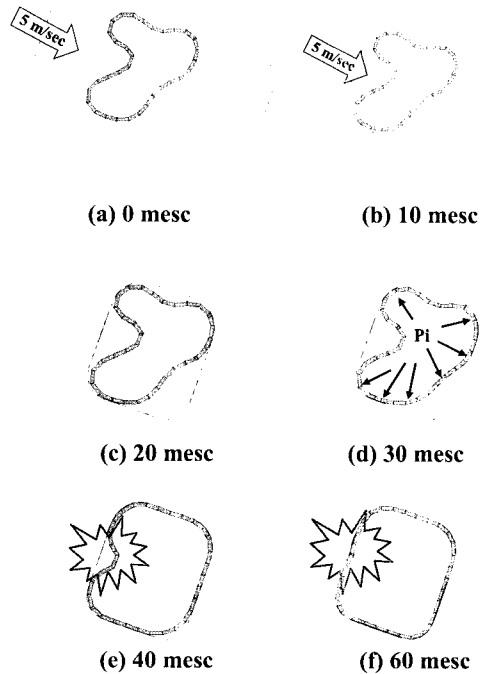


Fig. 13 AA Section view of hydroforming simulation

Fig. 12 는 튜브 하이드로포밍 후 트리아아웃과 성형해석결과를 보여준다. 최종적으로 주름이 남아있는 부분을 정확하게 예측 가능함을 확인할 수 있다. Fig. 13 은 튜브 하이드로포밍의 연속적인 단면 변화를 보여준다. 최종 단면을 보면 예비성형에서 발생한 주름이 최종적으로 완전히 제거되지 못하고 남아 있는 것을 볼 수 있다. 이 결과는 기계적인 예비성형을 통하여 원하는 형상의 제품을 얻을 수 있으나 예비성형에서 발생한 주름을 완전히 개선할 수 없다는 것을 말해준다. 따라서 기계적인 예비성형 공정을 사용하더라도 액압성형을 통하여 주름을 개선할 수 있을 정도의 모델 변경이 수반되어야 문제없는 하이드로포밍 제품을 만드는 것이 가능하다.

6. 맺음말

지금까지 살펴본 바와 같이 예비성형은 모델을 수정하기 곤란하거나 길이방향으로 단면의 변화가 심한 경우 모델 변경 없이 하이드로포밍 성형을 가능할 수 있도록 도와준다. 하지만 기계적인 예비성형은 마찰에 의한 성형성 저하와 강제적인 슬라이더의 성형으로 인해 주름 등의 문제가 발생한다. 그리고 공정수의 증가로 제작 시간과 비용이

상승하게 된다. 이처럼 장점에 비해서 단점도 많이 가지고 있지만 튜브 하이드로포밍이 어려운 부분의 성형을 가능하게 해 준다는 점에서 매우 유용한 방법이라고 할 수 있을 것이다.

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 hydroforming 의 성형공정 최적화에 대한 연구", *한국소성가공학회지*, 제 9 권 제 7 호, pp. 723~730.
- (5) Morphy, G., 1998, "Pressure-Sequence and High-Pressure Hydroforming", *Tube & Pipe Journal*, 28-135, September/October 1998, pp. 90~96.
- (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) 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.
- (8) 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.
- (9) Brewster, K., Sutter, K., Ahmetoglu, M. A. and Altan, T., 1996, "Hydroforming Tube", *The Tube & Pipe Quarterly*, vol. 7, no. 4, pp. 34~40.
- (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*.