

액압성형 시험을 통한 알루미늄 튜브 재료의 성형한계도

김형종[#]· 김정선¹· 이진규¹· 박종연²· 이동재³· 김현영⁴

Forming Limit Diagram of an Aluminum Tube Through Hydroforming Tests

J. S. Kim, J. K. Lee, J. Y. Park, D. J. Lee, H. Y. Kim, H. J. Kim

(Received May 12, 2005)

Abstract

A tube hydroformability testing system was designed and fabricated enabling to apply the forming condition along arbitrarily pre-programmed internal pressure-axial feed path. The free-bulging and T-forming tests were carried out on the extruded aluminum (A6063) tube specimens with 40.6 mm outer diameter and 2.25 mm thickness. Nine different combinations of internal pressure and axial feed, yielding different strain paths from one another, were taken into consideration in order to induce bursting at various deformation modes. Major and minor strains were automatically measured from deformed grids around the fracture using a stereo-vision-based surface strain measurement system, named ASIAs. The forming limit diagram of the A6063 tube material was successfully obtained. Most of the data points acquired from free bulging and T-forming tests appeared in the range of negative minor strain on the FLD and are mostly located near the strain paths calculated from explicit finite element simulations. The forming limit obtained from tests after pre-tension was considerably lower than that from tests without pre-tension, which showed the strain path-dependency of the forming limit as well known in the sheet forming field.

Key Words : Tube Hydroforming, Aluminum Tube, Hydroformability, Forming Limit Diagram, Finite Element Analysis

1. 서 론

연비 향상, 배출가스 감소, 경량화 및 고강성·고안전성, 부식 방지 등 자동차 제조산업에서 점차 강화되고 있는 요구 조건들을 만족시키기 위한 방법으로, 기존의 프레스가공을 대신하는 액압성형(hydroforming) 기술과 철강 소재를 대신하는 알루미늄 소재의 적용이 최근에 널리 확산되고 있다. 그러나 알루미늄은 철강 재료와 기계적 특성이 다르고 일반적으로 성형성이 더 나쁘기 때문에 지금

까지 철강 소재를 기반으로 축적해온 관재 액압성형 기술을 알루미늄 소재에 적용하는 데는 많은 어려움이 따른다[1]. 따라서 원하는 제품을 결함이나 파단이 없도록 성형하기 위해서는 알루미늄 소재의 물성치와 성형한계에 대한 자료가 우선적으로 확보되어야 한다[2].

액압성형과 같이 양축인장상태에서 성형되는 소재를 해석함에 있어 단축인장시험으로부터 얻은 소재의 물성치를 이용하는 데에는 한계가 있다. 이러한 점을 고려하여 단순확관시험으로부터 측정된

교신저자: 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부,

E-mail: khjong@kangwon.ac.kr

1. 강원대학교 대학원 기계·메카트로닉스공학과

2. 인천기능대학 컴퓨터응용금형과

3. ㈜오스텍 기술연구소

4. 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부

데이터로부터 관재의 물성치를 근사적으로 구하는 방법들이 연구되었다[3-5]. Jansson 등[6]은 AA6063-T4 관재를 이용하여 단순확관시험을 한 후 압력과 원주방향 변위의 관계를 이용하여 알루미늄의 이방성을 고려할 수 있음을 보였다. Imaninejad 등[1,2]은 AA6082-T4관재에 대하여 양단의 구속조건을 3가지(*free-end*, *pinched-end*, *fixed-end*)로 분류하고 부분적인 성형한계도를 얻었다. Kulkarni 등[7]은 알루미늄 관재에 대하여 단순확관시험을 하고 유한요소해석으로부터 예측한 성형한계선과 M-K 이론으로부터 얻은 성형한계선을 비교하였다. 김영석 등[8,9]과 Koc 등[10]은 터짐이나 주름이 발생하는 성형한계를 이론적으로 예측하고, 이방성에 대한 영향을 파악하였다. 강범수 등[11,12]은 이방성을 고려한 소성불안정 이론의 액압성형에의 적용가능성을 검토하고 소재의 물성치가 터짐 불량에 미치는 영향을 조사하였다.

관재의 액압성형성 평가에 관한 이론적, 실험적인 연구는 지금까지 많이 수행되어 왔으나, 알루미늄 관재에 대하여 다양한 변형모드에서 성형한계를 나타내는 성형한계도를 구한 예는 드물다. 본 연구에서는 액압성형성(*hydroformability*) 시험장비를 설계·제작하고, A6063 알루미늄 압출관재에 대하여 단순확관시험, T-성형시험 및 예변형 후 액압성형시험을 수행하였다. 이로부터 얻어진 데이터를 이용하여 다양한 변형경로에 대한 성형한계도를 작성하였다.

2. 액압성형성 시험장비

Fig. 1은 본 연구에서 설계·제작한 액압성형성 시험장비의 사진이다. 이 장비는 상하 금형을 클램핑하기 위한 1,000kN 용량의 수직실린더, 좌우 축압축량(*axial feed*)을 주기 위한 500kN 용량의 수평실린더 2개, 100MPa 까지의 고압을 발생시킬 수 있는 부스터, 그리고 내압과 좌우 축압축량을 제어하기 위한, 3개의 서보밸브를 포함한 유압제어 회로 등으로 구성되어 있다. 수평실린더에 연결되어 소재를 밀폐하고 축방향 압축을 담당하는 풀러저의 최대행정은 좌·우 각각 120mm이다. 전용 제어 프로그램은 시간함수로 입력되는 내압 및 좌·우 축압축량 그래프를 따라 고분해능의 피드백 제어가 가능하도록 구성하였다.

금형세트는 상하 베이스 2개에 4개의 단순확관 시험용 블록과 6개의 T성형시험용 블록을 각각

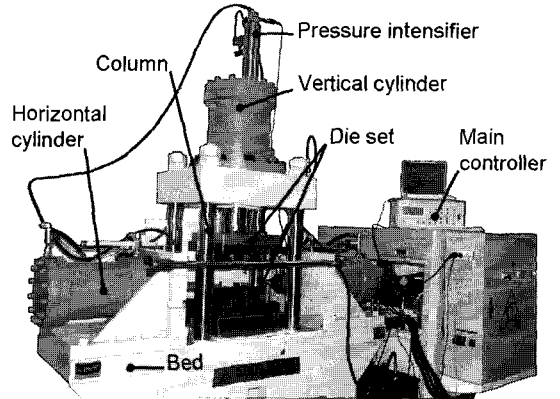
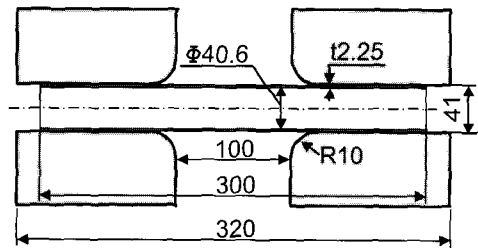
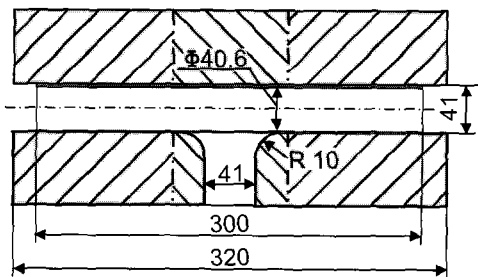


Fig. 1 Hydroformability testing machine



(a) Free bulging die



(b) T-forming die

Fig. 2 Dimension of the dies

조립하여 필요에 따라 사용할 수 있으며, 상형 가운데 1개 블록만 교체함으로써 +자성형시험도 가능하도록 설계하였다.

금형 재료는 STD11 냉간금형용 합금공구강이며, 표면경도를 HRC 55 이상으로 높이기 위하여 열처리 후 경면 연마하였다.

3. 유한요소해석

3.1 재료시험

Fig. 3은 단축인장시험으로부터 얻은 A6063의 응력-변형률 선도이다. 소재 외경이 40.6mm로 원주방향으로 규격시편을 채취하기에는 너무 작아 길이방향으로만 KS B0801 14B 및 14C 규격시편을 준비하였다. 14B는 폭 10.0 및 12.5mm, 표점거리 25 및 50mm인 ‘dog-bone’ 형태의 시편으로 변형 영역은 관재와 같은 곡률을 가지고 있으며, 14C는 길이 500mm의 관재 시편으로 양단에 맨드릴을 삽입하여 척에 고정하였다. 모두 5개의 시편으로 인장시험을 실시한 결과는 거의 일치하는 것으로 나타났다. 외연적 유한요소 코드 PAM-STAMP[13]를 사용하여 액압성형 공정을 해석하는데 필요한 물성치는 이들을 평균하여 Swift 경화식으로 곡선 근사하여 입력하였다. Table 1에 주요 물성치를 나타내었다.

3.2 마찰계수의 결정

단순확관시험에서 축압축력을 가하지 않고 내압만 증가시키면 소재 중심부가 확관됨에 따라 소재 길이가 자연적으로 줄어들게 되며, 그 양은 마찰 조건에 따라 결정된다. 본 연구에서는 이 점에 착안하여, Fig. 4와 같이 0.0~0.15 범위의 몇 가지 Coulomb 마찰계수에 대한 유한요소해석으로부터 얻은 소재 길이 감소량을 실험값과 비교하여 가장 근접한 결과를 준 마찰계수 0.04를 이후의 성형공정 해석에 적용하였다.

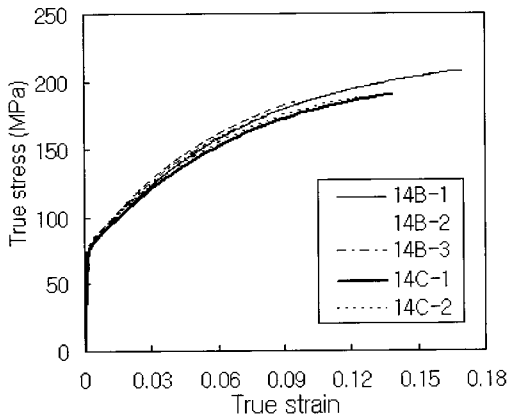


Fig. 3 Stress-strain curves from tensile test

Table 1 Material properties of tubular material

Density	2.7 g/cm ³
Young's modulus	69 GPa
Yield stress	76.2 MPa
Tensile strength	208.3 MPa
Stress-strain curve	$\bar{\sigma} = K(\epsilon_0 + \bar{\epsilon}_p)^n$
Stiffness coefficient, K	373.1 MPa
Offset strain, ϵ_0	0.001814
Hardening exponent, n	0.3135

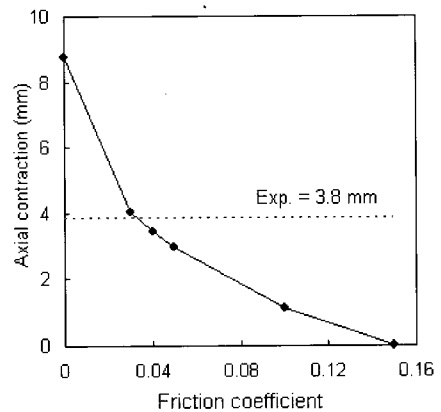


Fig. 4 Axial contraction for various friction coefficients

3.3 공정조건의 설정

Fig. 5(a)와 같이 최대 내압과 축압축량은 같으나 성형조건이 서로 다른 2 가지 경우에 대하여 단순확관성형과 T 성형공정 해석을 수행한 결과, Fig. 5(b)에 보인 바와 같이 변형경로가 일치하였다. 따라서 액압성형에서 중요한 성형인자는 내압-시간 또는 축압축량-시간 관계가 아니라 내압-축압축량 관계임을 알 수 있다. 이러한 고찰을 바탕으로 다양한 변형모드에서 파단이 일어나도록 유도하기 위하여 Fig. 6에 나타낸 9가지의 내압-축압축량 조합을 고려하였다.

내압의 크기는 단순확관시험의 경우 $p_1=10$, $p_2=25$ MPa, T 성형시험의 경우 $p_1=16$, $p_2=40$ MPa 이며, 축압축량은 2가지 시험 모두 $s_1=15$, $s_2=30$ mm 로 동일하다. Fig. 5의 1, 2의 성형조건을 내압-축압축량 조합으로 나타내면 둘 다 Fig. 6의 Z3 경로와 같다. 실험에 앞서 이들 9가지의 조합에 대하여 유한요소해석을 수행한 결과 변형경로가 주변형률과 부

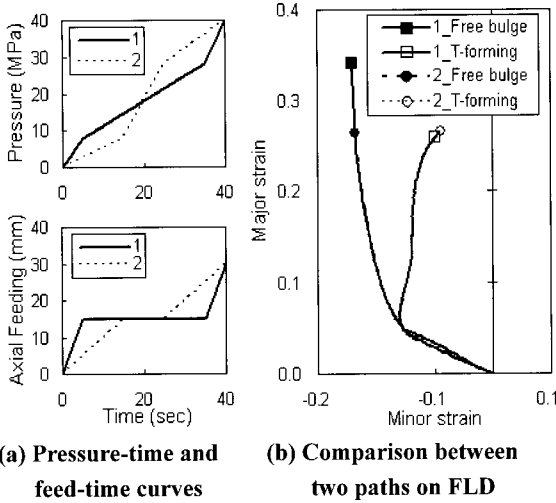


Fig. 5 Comparison between two forming conditions

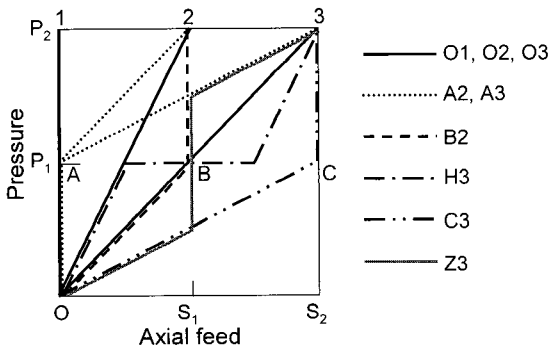


Fig. 6 Combination of internal pressure and axial feed

변형률 평면에 비교적 넓게 분포함을 확인할 수 있었다(Fig. 8 참조).

4. 실험 및 측정

Fig. 7은 파단될 때까지 성형된 몇 가지 시편의 실물 사진이다. 파단은 모든 경우에 소재 둘레방향의 최대주응력으로 인하여 소재 길이방향으로 발생하였다. 단순확관시험의 경우 시편 형상은 거의 대칭적으로 나타났으나, 축압축량이 상대적으로 큰 조합에서 비대칭적으로 성형된 경우도 있었다. 이는 좌우 금형과 소재 사이의 마찰계수, 수평 실린더의 축압축량 제어, 금형 치수 등의 차이에 기인한 것으로 판단된다.

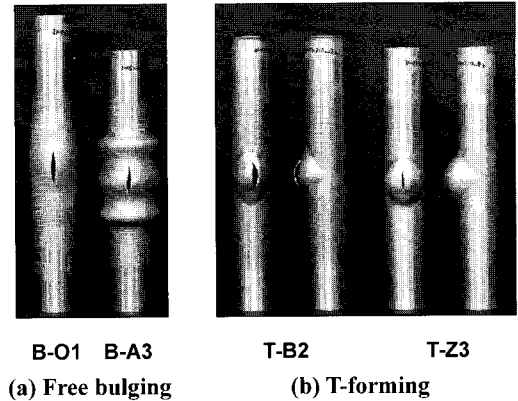


Fig. 7 Photos of burst tubes

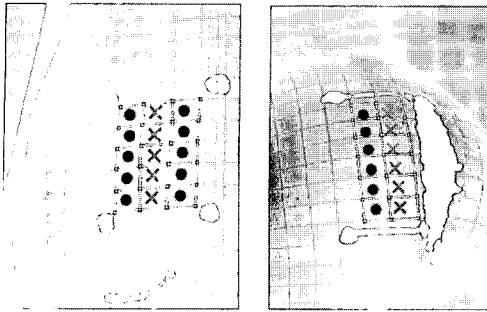
4.1 변형률 측정

액압성형 시험 전에 튜브 표면에 $2.54 \times 2.54\text{mm}$ 의 정사각형 격자를 전기화학적 부식법으로 인쇄한 후 파단될 때까지 성형하였다. 자체 개발한 자동곡면정보분석시스템 'ASIAS'[14]를 사용하여 성형 후 파단부 근처의 주변형률과 부변형률을 측정하였다. 단순확관시험 시편들은 파단부 반대편의 국부 necking이 발생한 부분을, T 성형시험 시편들은 확관부 둘의 파단부 주위를 측정영역으로 하였다.

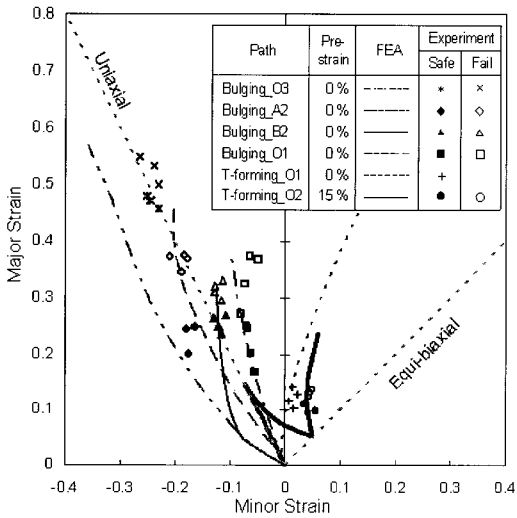
4.2 성형한계도

Fig. 8(a)는 CCD 카메라로 촬영한 화상으로부터 화상치리 및 스테레오 비전 과정을 통하여 구성한 격자망 위에 요소별로 '파단(X)'과 '안전(O)'을 수동으로 구분함으로써 성형한계도를 자동으로 그리는 과정의 일부를 보여준다. Fig. 8(b)는 몇 가지 경로에 대하여 측정된 파단부 근처 변형률과 유한요소해석으로 계산한 튜브 중심부 요소의 변형경로를 주변형률-부변형률 평면에 함께 나타낸 그림이다. 실험으로부터 얻은 파단부 변형률은 대체로 해당 변형경로 상에 위치하는 것으로 나타났다. 9가지 내압-축압축량 조합에 대하여 단순확관시험과 T 성형시험을 수행한 결과로부터 얻은 성형한계도는 대개 부변형률이 음인 2사분면에서 나타났다.

그러나 튜브 액압성형에서 제조되는 자동차 부품의 경우 최종제품 형상에 따라 튜브를 미리 구부리는 예비굽힘공정(pre-bending)을 거치면 부변형률이 양이 되는 경우가 많다. 이러한 성형모드를 모사하기 위하여 미리 5~15%의 인장 예비변형을



(a) Detected grid images



(b) Strain paths and forming limits

Fig. 8 Strain measuring and FLD plotting procedure using ASIAs

가한 후 단순확관시험과 T성형시험을 수행하였다. 예변형이 있는 경우와 없는 경우 각각에 대하여 단순확관시험과 T성형시험을 수행하고 최종적으로 작성한 성형한계도를 Fig. 9에 나타냈다. 측정된 변형률 데이터는 예변형이 큰 일부 경우를 제외하고 거의 2사분면에 나타났으며, 심지어 축압축에 의한 재료 유동으로 두께감소를 현저히 작아지는 경우, 단축인장 상태보다 아래쪽($\epsilon_2 < -\epsilon_1/2$) 계도 나타난 것을 볼 수 있다. 또한, 큰 인장 예변형을 거친 소재로부터 얻어진 1사분면에서의 성형한계선은 2사분면에서보다 현저히 낮게 나타나, 판재성형 분야에서 잘 알려진 바와 같이 성형한계가 변형률 경로에 의존한다는 사실[15]을 확인하였다.

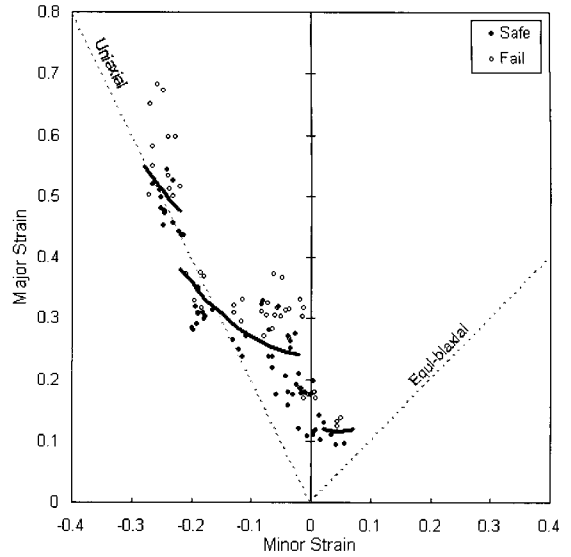


Fig. 9 Forming limit diagram of A6063 tube

5. 결론

액압성형성 시험 장비를 직접 설계·제작하고, A6063 알루미늄 압출관재에 대하여 다양한 변형경로를 따라 단순확관시험, T성형시험 및 예변형 후 액압성형시험을 수행함으로써 성형한계도를 도출하였다. 본 연구에서 얻은 주요 결과를 간추리면 다음과 같다.

(1) 튜브 내부에 약 100MPa의 압력을 가할 수 있는 액압성형성 시험장비와 이를 제어하기 위한 전용 소프트웨어, 그리고 1, 2개의 블록 교체만으로 다양한 실험이 가능하도록 고안한 조립식 금형을 설계·제작하였다. 또한, 변형률을 자동으로 측정하여 성형한계도에 표시할 수 있는 자동곡면정보분석시스템과 연계하여 액압성형성 평가 시스템을 구축하였다.

(2) 다양한 변형모드에서 소재의 파단을 유도하기 위한 9가지의 내압·축압축량 조합을 제안하고, 각 조합에 대하여 유한요소해석을 수행한 결과 주변형률과 부변형률 평면상에서의 변형경로가 다양하게 분산됨을 확인하였다. 이들 경로에 따라 실험을 수행하여 A6063 압출관재의 성형한계도를 작성하였다.

(3) 단순확관시험, T성형시험, 예변형 후 시험으로부터 얻은, 파단부 근처의 변형률을 성형한계도

상에 나타내었을 때, 대체로 유한요소해석으로 예측한 변형경로 상에 위치하는 것으로 나타났다.

(4) 인장 예변형량이 큰 소재로부터 얻어진 1사분면에서의 성형한계선은 2사분면에서보다 현저히 낮으며, 이로부터 성형한계가 변형률 경로에 의존한다는 사실을 확인하였다.

(5) 본 연구에서 얻어진 성형한계도를 실제 액압성형 제품의 급형 및 공정 설계에 적용해 봄으로써 관재에 대한 성형한계도 적용의 타당성을 검증할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] M. Imaninejad, G. Subhash, A. Loukus, 2004, Experimental and numerical investigation of free-bulge formation during hydroforming of aluminum extrusions, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 147, pp. 247~254.
- [2] M. Imaninejad, G. Subhash, A. Loukus, 2004, Influence of end-conditions during tube hydroforming aluminum extrusions, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 46, pp. 1195~1212.
- [3] S. Fuchizawa, M. Narazaki, 1993, Bulge test for detemining stress-strain characteristics of thin tubes, *Advanced Technology of Plasticity*, pp. 488~493.
- [4] H. Tetsumaro, N. Hisashi, 1993, Bulging limit of thin-walled aluminum tubes with a surface defect, *Advanced Technology of Plasticity*, pp. 527~532.
- [5] T. Sokolowski, K. Gerke, M. Ahmetoglu, T. Altan, 2000, Evaluation of tube formability and material characteristics: hydraulic bulge testing of tube, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 98, pp. 34~40.
- [6] M. Jansson, L. Nilsson, K. Simonsson, 2005, On constitutive modeling of aluminum alloys for tube hydroforming applications, *Int. J. Plasticity*, Vol. 21, pp. 1041~1058.
- [7] A. Kulkarni, P. Biswas, R. Narasimhan, A. Luo, R. K. Mishra, T. B. Stoughton, A. K. Sachdev, 2004, An experimental and numerical study of necking initiation in aluminum alloy tubes during hydroforming, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 46, pp.1727~1746.
- [8] 김영석, 조홍수, 박춘달, 김영삼, 조완제, 2000, Tube Hydroforming 공정의 성형성 평가, *한국소성가공학회지*, 제 9 권 제 6 호, pp. 604~614.
- [9] S. T. Kim, Y. S. Kim, 2002, Analytical study for tube hydroforming, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 128, pp. 232~239.
- [10] M. Koc, T. Altan, 2002, Prediction of forming limits and parameters in the tube hydroforming process, *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, pp. 123~138.
- [11] L. Lei, J. Kim, B. S. Kang, 2002, Bursting failure prediction in tube hydroforming processes by using rigid-plastic FEM combined with ductile fracture criterion, *International journal of mechanical sciences*, Vol. 44, pp. 1411~1428.
- [12] 김상우, 김정, 박훈재, 강범수, 2004, 네킹발생 조건에 의한 관재 액압성형공정에서의 터짐 불량 예측, *한국소성가공학회지*, 제 13 권 제 7 호, pp. 629~634.
- [13] Pam System International S. A., 2001, PAM-STAMP User's Guide, Version 2001.
- [14] 김두수, 김형중, 1999, 비전을 이용한 곡면변형을 측정의 정확도 및 정밀도 향상에 관한 연구, *한국소성가공학회지*, 제 8 권 제 3 호, pp. 294~305.
- [15] A. F. Graf and W. F. Hosford, 1993, Calculations of forming limit diagram for changing strain paths. *Metallurgical Transactions A*, Vol. 24, pp. 2497~2501.