

# 액압성형 시험을 통한 알루미늄 튜브 재료의 성형한계도

김정선<sup>1</sup>, 이진규<sup>1</sup>, 박종연<sup>2</sup>, 이동재<sup>3</sup>, 김현영<sup>4</sup>, 김형종<sup>4</sup>

## Forming Limit Diagram of an Aluminum Tube from Hydroforming tests

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

### Abstract

A tube hydroformability testing system was designed and fabricated so as to observe the forming process and to apply forming condition along arbitrarily pre-programmed internal pressure-axial feed path. The forming limit diagram of A6063 extruded tube, of 40.6 mm outer diameter and 2.25 mm thickness, was successfully obtained through free bulging and T-forming tests except the region of high positive minor strain. It is found that the data points marked on the FLD are mostly located near the strain paths from the finite element analysis excluding the cases of large axial feed. There exist data points even in the area beyond the uniaxial tension mode, since the reduction in thickness decreases due to the axial feed. The forming limit from T-forming test was considerably lower than that from free bulge test. It seems because the deformation is localized at the pole.

**Key Words** : Tube Hydroforming(튜브 액압성형), Aluminum Tube(알루미늄 튜브), Forming Limit Diagram(성형한계도), Finite Element Analysis(유한 요소 해석)

### 1. 서론

연료소비 및 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 지금까지 철강 소재를 기반으로 축적해온 관재액압성형 기술을 알루미늄 소재에 적용하는데는 많은 어려움이 따른다[1]. 원하는 제품의 성형에 성공하기 위하여는 무엇보다도 금형설계 및

성형공정설계에 앞서 소재의 물성치와 성형한계에 대한 자료의 확보가 선행되어야 한다[2]. 따라서 최근 수년간 이 분야에 관한 연구의 상당수는 재료의 기계적 성질과 성형한계의 평가에 초점이 맞춰져 있다[1~7].

액압성형과 같이 양축인장상태에서 성형되는 소재를 해석함에 있어, 단축인장시험으로부터 얻은 소재의 물성치를 이용하게 되면, 오류가 발생하게 된다. 이러한 점을 고려하여 Sokolowski 등[3]은 튜브의 물성치를 근사화하는 방법을 제안하고, 유한 요소 해석을 통하여 얻은 물성치와 실험을 통하여 얻은 값을 비교하였다. Kim 등[4,5]과 Koc 등[6]은 터짐이나 주름이 발생하는 성형한계를 이론적으로 예측하고, 이방성에 의한 영향을

1. 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과

2. 인천기능대학

3. (주) 윤영

4. 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

과약하였다. Kulkarni 등[7]은 단순확관시험에서 유한요소해석으로부터 예측한 성형한계선과 M-K 이론을 이용하여 얻은 성형한계선을 비교하였다.

관재의 액압성형성 평가에 관한 이론적, 실험적 연구는 지금까지 많이 수행되어 왔으나, 다양한 변형모드에서의 성형한계를 나타내는 성형한계도(forming limit diagram)를 구한 예는 찾기 어렵다. 본 연구에서는 압출공정으로 제조된 알루미늄(A6063) 관재의 성형한계도를 작성하기 위하여, 단순확관 시험과 T-성형 시험을 수행하였다. 다양한 변형모드에서의 과단을 유도하기 위하여 내압과 좌우축압축량의 9 가지 조합에 대한 유한요소해석과 실험을 수행하고 그 결과를 비교하였다.

## 2. 실험 및 유한요소해석

Fig. 1 은 본 연구에서 설계·제작한 액압성형 시험장비의 개략도이다. 이 장비는 상하 금형을 클램핑하기 위한 1,000 kN 용량의 수직실린더, 좌우축압축량을 주기 위한 500 kN 용량의 수평실린더 2 개, 100 MPa 까지의 고압을 발생시킬 수 있는 부스터, 그리고 내압과 좌우 축압축량을 제어하기 위한 3 개의 서보밸브를 포함한 유압제어 회로 등으로 구성되어 있다. 수평실린더에 연결되어 소재를 밀폐하고 축방향 압축을 담당하는 플런저의 최대행정은 좌우 각각 120 mm 이다. 전용 제어 프로그램은 시간 함수로 입력된 내압 및 좌우 축

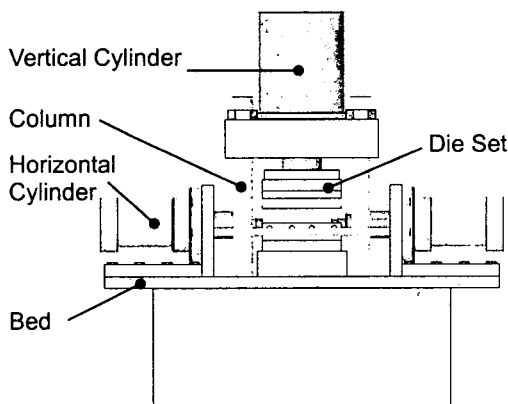
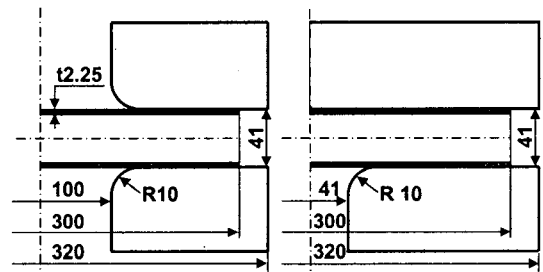


Fig. 1 Schematic of the hydroforming machine

압축량 그래프를 따라 고분해능의 피드백 제어가 가능하도록 구성되었으며, 실험 종료 시 실험 동안 0.1 초 간격으로 측정된 내압, 플런저 행정(축

압축량) 및 하중 데이터를 자동으로 저장한다. 단순확관 시험과 T-성형 시험에 사용된 금형 재료는 SM50C 탄소강이며, 표면경도를 높이기 위하여 열처리 후 사용하였다. 그 주요 치수는 Fig. 2 에 표시하였다.

Fig. 3 은 단축인장시험으로부터 얻은 A6063 재료의 응력-변형률 선도이다. 소재 외경이 40.6 mm 로 원주방향으로 규격 시편을 채취하기에는 너무 작아 길이방향으로만 KS B 0801 14B 및 14C 규격 시편을 준비하였다. 14B 는 폭 10 및 12.5 mm, 표점거리 25 및 50 mm 인 'dog-bone' 형상의 시편으로 변형 영역은 관재와 같은 곡률을 가지고 있으며, 14C 는 길이 500 mm 의 관재 시편으로 양단에 맨드릴을 삽입하여 척에 고정하였다. 모두 5 개의 시편으로 인장시험을 실시한 결과는 Fig. 3 에서 보는 것과 같이 거의 일치하는 것으로 나타났다.



(a) Bulge test dies (b) T-forming test dies

Fig. 2 Geometry of the tooling

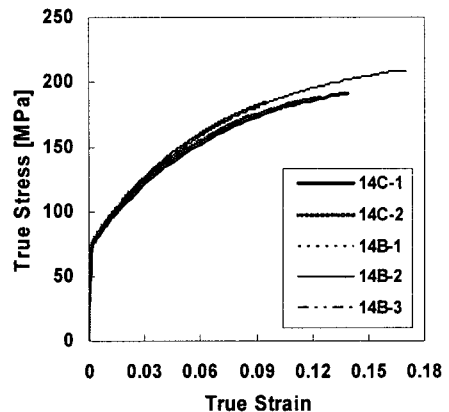


Fig. 3 Stress-strain curve from tensile test

외연적(explicit) 유한요소 코드 PAM-STAMP[8]를 사용하여 액압성형 공정을 해석하기 위해 필요한 물성치는 이들을 평균하여 Swift 경화식으로 곡선

근사하여  $\bar{\sigma} = 373.1(0.0018 + \bar{\epsilon}_p)^{0.3134}$  로 입력하였다.

단순확관 시험에서 내압만 증가시킨 경우, 소재가 확장됨에 따라 자연적으로 길이가 감소하여, 파단 시에는 약 3.8 mm의 축압축량이 발생하였다. Table 1은 0~0.15 범위에서 마찰계수를 바꾸어가면서 유한요소해석을 수행하고 축압축량에 대한 결과를 비교한 것이다. 실험과 가장 근접한 결과를 준 마찰계수 0.04를 이후의 성형공정 해석에 적용하였다.

다양한 변형모드에서 파단이 일어나도록 유도하기 위하여 Fig. 4에 나타난 9가지의 내압-축압축량 조합을 고려하였다. 그림에서 내압의 크기는 단순확관 시험의 경우 P1 = 10 MPa, P2 = 25 MPa, T-성형 시험의 경우 P1 = 16 MPa, P2 = 40 MPa이며, 축압축량은 S1 = 15 mm, S2 = 30 mm로 2가지 시험이 동일하다.

Fig. 5는 파단될 때까지 성형된 몇 가지 시편의 실물 사진이다. 액압성형 시험 전에 튜브 소재의 표면에 2.54 × 2.54 mm의 정사각형 격자를 전기 화학적 부식방법으로 인쇄하고, 성형 후 자체 개발한 자동곡면정보분석시스템 'ASIAS'[9]를 사용하여 파단부 근처의 변형률을 측정하였다.

Fig. 6 파단부 화상 위에 구성된 격자망에 '파단(×)'과 '안전(●)'을 표시한 사진이다. 각 경로의

시편들로부터 얻은 데이터를 종합하여 성형한계도를 작성한다.

관재 액압성형에서 성형한계도의 개념은 판재 성형 분야에서만 널리 사용되고 있지 않다. 이는 우선 관재의 성형한계도를 실험적으로 구하는 작업이 매우 어려운데다, 관재와 형상이 전혀 다르고 표면적 대비 두께가 훨씬 두꺼운 관재에 성형한계도 개념을 적용하는 것이 타당한가에 대한 검증이 아직 이루어지지 않았기 때문이다.

Fig. 7은 몇 가지 경로에 대하여 측정된 파단부 근처의 변형률과 유한요소해석으로 예측한 관재의 중심부 요소의 변형경로를 주변형률-부변형률 평면에 함께 나타낸 그림이다. 실험으로 얻은 파단부 변형률은 대체로 해당 변형경로 상에 위치하는 것으로 나타났으나, 경로 A3나 C3 등 내압에 비하여 축압축량이 커서 주름이 발생하는 경우에는 상당히 떨어져있는 것을 알 수 있다. 이는 해석에서 과도한 주름의 성형과정과 소재-금형 간

Table 1 Axial feeds for various friction coefficients

Friction coefficient	Axial feed(mm)
0	8.77
0.03	4.05
0.04	3.42
0.05	2.98
0.10	1.11
0.15	0.01

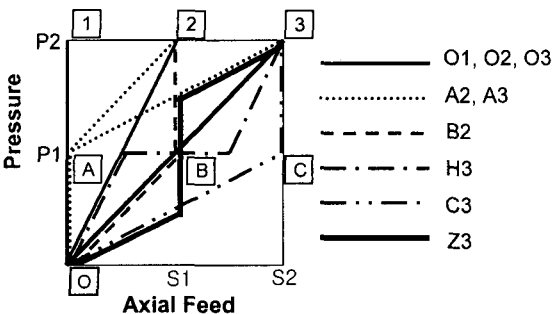


Fig. 4 Internal pressure vs. axial feed paths

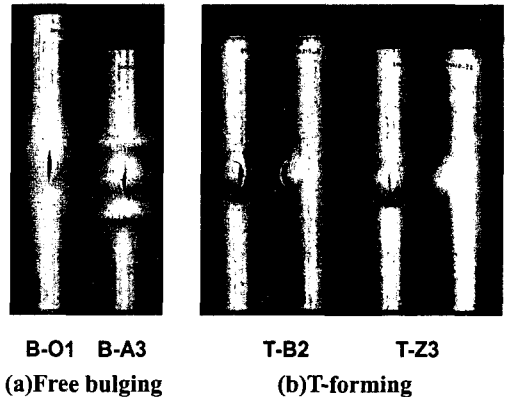


Fig. 5 Tubes under free bulging and T-forming tests along several paths



Fig. 6 Strain measurement using ASIAS

의 마찰 거동이 실제와 다르게 구현되기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 8 은 최종적으로 구한 A6063 관재의 성형한계도이다. 측정된 변형률 데이터는 주로 부변형률이 음인 제 2 사분면에 나타났다. 또한 액압성형 공정에서는 소재의 공급으로 인해 두께 감소율이 작아지기 때문에 단축인장 상태보다 아래 부분 ( $\epsilon_2 < -\epsilon_1/2$ )에도 나타나는 것을 볼 수 있다.

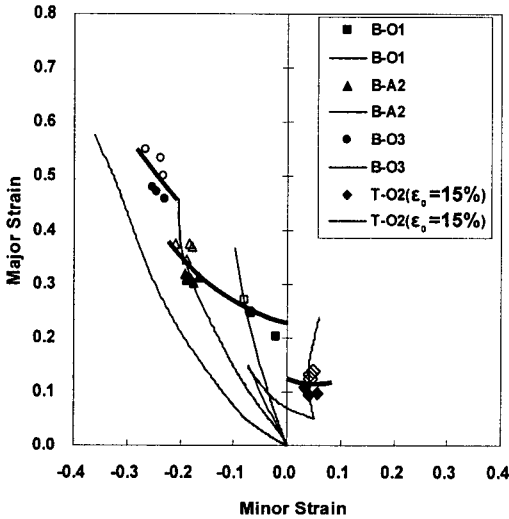


Fig.7 Strain paths plot on the FLD

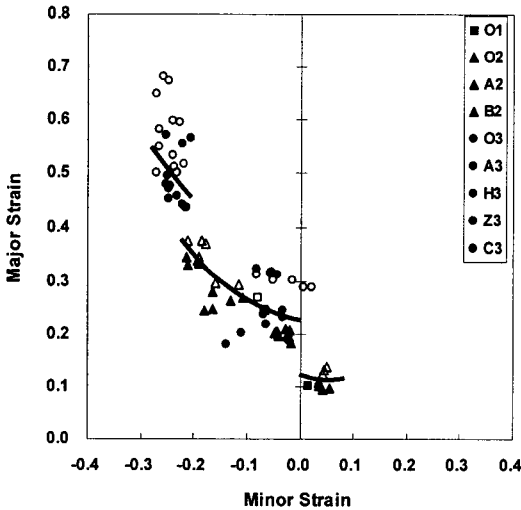


Fig.8 FLD of A6063 extruded tube

과단 시 주변형률은 단순확관 시험에서보다 T-성형 시험에서 측정된 값이 대체로 낮게 측정되

었는데, 그 이유는 단순확관 시험의 경우 원주방향으로 균일하게 확관되는 반면 T-성형 시험에서는 불룩하게 튀어나오는 코 부분에서 국부적인 확관이 일어나기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

직접 설계·제작한 액압성형 시험 장비를 사용하여 다양한 변형경로를 따른 단순확관 시험과 T-성형 시험을 수행하였다. 과단부 근처에서의 변형률을 측정하여, 유한요소해석 결과로 얻은 변형경로와 비교하였다. 본 연구에서 얻은 주요 결과를 간추리면 다음과 같다.

- (1) A6063 압출 관재의 성형한계도를 작성하였다.
- (2) 축압축량이 과다한 경로 외에는, 과단부에서의 변형모드가 실험과 해석이 잘 일치하였다.
- (3) 1 사분면에서의 성형한계선은 2 사분면에서보다 현저히 낮게 나타나 연속적인 성형한계선을 도출하기 어려웠다.
- (4) 본 연구에서 얻어진 성형한계도를 실제 액압성형 제품의 금형 및 공정 설계에 적용해봄으로써 관재에 대한 성형한계도 적용의 타당성을 검증할 수 있을 것이다.

#### 참고 문헌

- [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] T. Sokolowski, K. Gerke, M. Ahmetoglu, T. Altan, 2000, Evaluation of tube formability and material characteristics : hydraulic bulge testing of tubes, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 98, pp. 34~40.
- [4] S. T. Kim, Y. S. Kim, 2002, Analytical study for tube hydroforming, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 128, pp. 232~239.
- [5] 김영석, 조홍수, 박춘달, 김영삼, 조완제, 2000, Tube Hydroforming 공정의 성형성 평가, 한국소

성가공학회지, 제 9 권 제 6 호, pp. 604~614.

- [6] 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.
- [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] Pam System International S. A., 2001, PAM-STAMP User's Guide, Version 2001.
- [9] 김두수, 김형중, 1999, 비전을 이용한 곡면변형을 측정의 정확도 및 정밀도 향상에 관한 연구, 한국소성가공학회지, 제 8 권 제 3 호, pp. 294-305.