

## 온간액압성형공정에서 Al 6061 튜브의 소성변형특성에 관한 연구

이혜경<sup>1</sup>, 이영선<sup>1</sup>, 이정환<sup>1</sup>, 손성만<sup>2</sup>, 문영훈<sup>3</sup>

### A study on the formability in warm hydroforming of Al 6061 seamless tube

H. K. Yi, Y. K. Lee, J. H. Lee, S. M. Sohn, Y. H. Moon

#### Abstract

In this study, the free-bulge test and FE analysis have been used to define the fracture criteria based on the Cockcroft and Latham's criterion in warm hydroforming of Al 6061 tube. Full annealing and T6 treatment for heat treatment of Al 6061 tube were used in this study. As-extruded, full annealed and T6-treated Al 6061 seamless tubes were prepared. To evaluate the hydroformability, uni-axial tensile test and bulge test were performed between room temperature and 200°C. And measured flow stress was used to simulate the warm hydroforming. A commercial FEM code, DEFORM-2D™, was used to calculate the damage value. A forming limit based ductile fracture criteria has been proposed by the results of experimental and FE analysis. The calculated values for fracture criteria will be efficient to predict the forming limit in hydroforming for real complex shaped part.

**Key Words** : Tube warm hydroforming, Hydroformability, Bulge test, Al 6061 seamless tube, ductile fracture

#### 1. 서론

최근 자동차 업계에서는 차체경량화를 목적으로 Al 합금, Mg 합금과 같은 경량금속들을 중요한 전략적 기술로 개발하고 있다. 현재 전 세계적으로 알루미늄 자동차 부품의 제조에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며 현가, 조향장치 그리고 배가장치를 중심으로 고강도 Al 합금 부품을 적용하고자 하는 노력들이 가속화되고 있다. 공정면에서 본다면 일체형 성형기술이 차체구조 단순화와 경량화 수단으로 많은 연구가 진행되고 있는데

이러한 일체형 성형기술로서 주목받고 있는 액압 성형 기술(hydroforming)은 공정상 소재의 높은 성형성 요구로 인해 현재까지 주로 철계 소재에 국한되어 왔다. 반면, 우수한 비강도로 현재 대표적인 경량재료로 사용되고 있는 알루미늄은 상온에서의 낮은 성형성으로 인해 액압 성형 적용에는 한계가 있었다. 이러한 문제를 보완하여 고강도 알루미늄에 대한 액압 성형 적용 가능성을 높이는 방법으로 온간액압성형 방법을 고려할 수 있다. 성형온도 상승에 따른 기계적 특성 저하를 사전에 완전풀림 처리 또는 T6 열처리를 통해 보

1. 한국기계연구원 소재성형센터  
2. 성우하이텍(주) 기술연구소  
3. 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소  
# 교신저자: 한국기계연구원 소재성형센터  
E-mail: lsy1668@kmail.kimm.re.kr

완한다면 온도 상승에 따른 성형성 증가로 액압 성형의 적용이 가능할 것으로 기대된다. 본 연구에서는 이러한 고강도 알루미늄 합금의 온간 액압성형 적용 가능성을 시험하기 위한 기초연구로서 Al6061 튜브의 고온인장시험과 자유 확장 시험을 통해 온간 성형성을 분석하고, 분석된 데이터를 이용하여 유한요소해석을 수행하여 파단 발생의 기준을 마련하고자 하였다. 이렇게 설정된 파단 기준은 실험상 부품 성형 시 파단 발생의 가능성을 예측할 수 있으므로 공정 및 금형 설계 시 유용한 정보로 이용될 것이라 기대된다.

## 2. 실험 방법

연구에 사용된 Al6061 튜브는 무접점 간접압출 (Seamless indirect extrusion) 공정에 의해 제조된 것으로 사이즈는 외경 50.8mm, 두께 5mm이다. 열처리 조건에 따른 영향을 분석하기 위해 성형 전에 소재를 완전 풀림(full annealing)처리와 T6 처리하였고, 각각의 열처리 조건을 Table 1에 나타내었다. 일축인장시험을 위한 인장시편은 ASTM E8 규격을 따랐으며, 사용된 시험기는 승온에 따른 변형 특성평가를 위해 외부 가열 챔버를 부착하였다.

Table 1 Heattreatment condition of Al 6061 tube (AMS 2770E)

Full annealing	413°C/1hr, furnace cooling to 260°C, air cooling
Solution treatment	529°C/ 50min
Artificial aging	177°C/ 8hrs

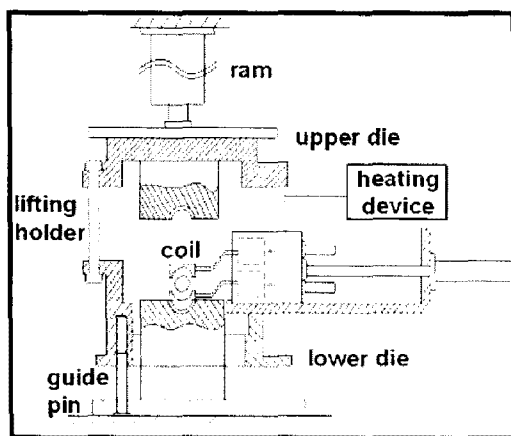


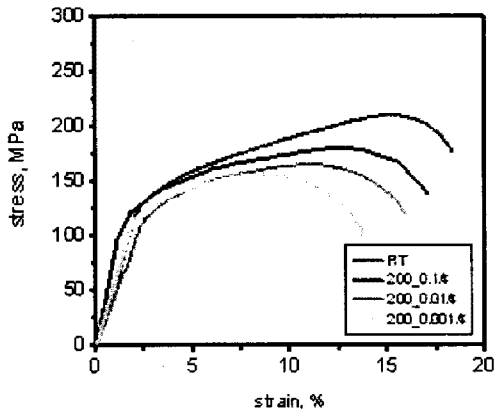
Fig. 1 Schematic showing induction heating hydroforming system

승온 속도는 0.3°C/s이며 시편은 각각의 시험 온도에서 시편 온도 편차를 줄이기 위해 20분간 유지 되었다. 온도와 변형률속도에 따른 변형거동을 평가하기 위하여 상온, 200°C에서 0.1/s, 0.01/s, 0.001/s로 각각 시험을 수행하였다. 실제 액압성형은 비구속형태의 자유 확장시험과 육각형확관시험으로 이루어졌고, 80T press에서 튜브의 양 끝단을 편치로 실링(sealing)한 후 증압기(intensifier)를 이용하여 튜브가 파단될 때까지 액압을 가하였다. 이 때, 튜브의 효율적인 가열을 위해 30KHz, 10kw사양의 유도가열 장치를 사용하였으며, 사용된 액압성형 시스템의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 성형한계를 예측하기 위한 컴퓨터 해석은 DEFORM-2D™를 이용하여 강소성 유한요소 해석을 수행하였고, 실제 액압성형 시험과 비교 분석하여 Al 6061 튜브의 온간액압성형시 성형 한계의 기준을 설정하였다.

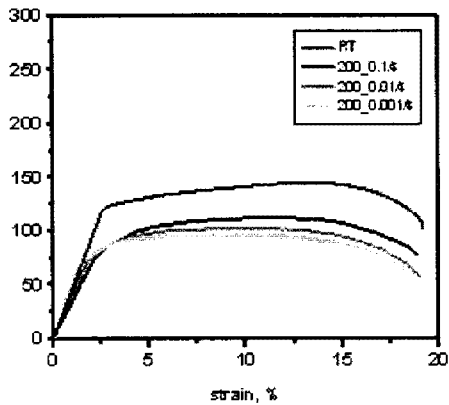
## 3. 실험 결과 및 고찰

Al 6061 튜브의 열처리에 따른 성형성을 평가하기 위해 고온인장시험을 수행한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 열처리 조건은 경제성과 성형성, 그리고 기계적 특성을 고려하여 미열처리, 완전풀림(full annealing), 그리고 T6 처리의 세가지 종류로 이루어졌다. 각 종류별로 열처리된 튜브에 대해 성형온도인 200°C에서의 변형거동을 살펴보면 완전풀림된 튜브의 경우, 미열처리된 튜브에 비해 가공경화지수가 매우 낮은 것으로 나타났고, 항복강도 또한 50MPa 이상 낮은 것으로 나타났다. 일반적으로 소재의 유동응력이 낮을수록 변형저항이 작고, 소성안정영역 즉 소재가 변형에 대한 안정화를 유지할 수 있는 영역에서의 변형율인 균일 연신율이 클수록 성형성이 좋은 것으로 알려져있다[3]. 따라서 성형성 측면에서는 완전풀림된 튜브가 미열처리된 튜브에 비해 우수한 고온변형거동을 보이는 것으로 판단된다. 반면 T6 열처리된 튜브의 경우 Fig. 2의 (c)에서 보는 바와 같이 성형온도인 200°C에서 아주 높은 항복강도와 더불어 심한 연화현상을 보이는 것으로 나타나 매우 낮은 성형성을 가지는 것으로 판단되지만 그다지 높은 성형성을 요구하지 않는 부품에 적용될 경우에 성형 후 후열처리공정을 줄여줄 수 있다는 잇점이 있다고 하겠다. 두께가 얇은 튜브의 액압성형의 경우, 성형 후에 T6와

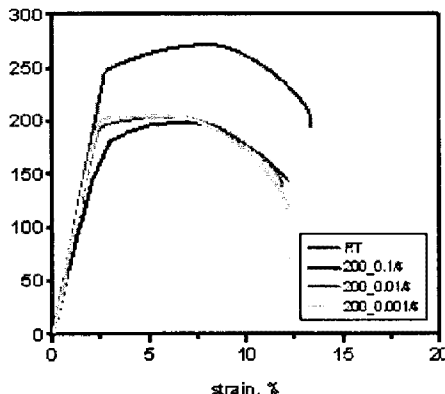
같은 후열처리 공정을 거치게되는 동안 성형품의 형상이 변형되거나 치수가 달라질 수 있기 때문에 그러한 측면에서는 T6 전처리된 튜브가 아주 유용하게 이용될 것으로 판단된다.



(a) As extruded tube



(b) Full annealed tube

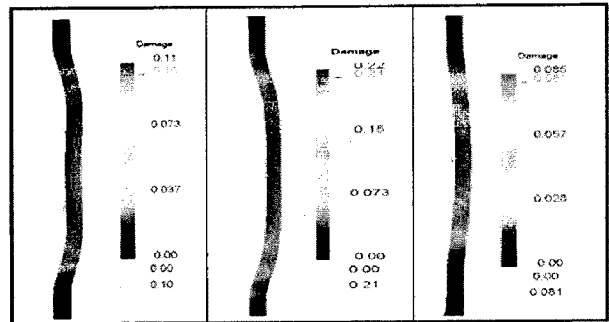


(c) T6-treated tube

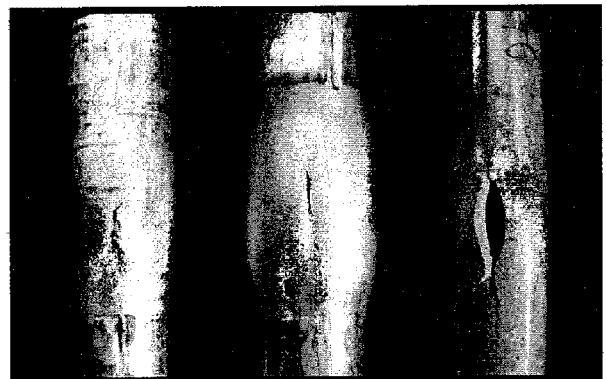
**Fig. 2 Flow stress of Al 6061 tube with the various heat-treatment**

튜브의 액압성형과 같은 경우는 소성변형을 일으키는 응력이 원주방향과 길이방향의 응력으로

2 축변형이 일어나게 된다. 따라서 일축인장시험 결과만으로는 액압성형성을 적절하게 평가하기 어렵다. 성형온도 200 °C에서 자유확관시험을 통해 파단에 이른 튜브를 Fig. 3의 (b)에 나타내었다. 튜브는 액압을 가함에 따라 확관되고 최대반경에 이른 후 길이 방향으로 파단된다. 파단되었을 때의 최대반경으로 액압성형성을 고려할 수 있다. 각 소재의 최대 반경은 완전풀림된 튜브가 30.6mm 로 가장 높게 나타났고, 미열처리 튜브가 29.1mm 그리고 T6 처리된 튜브가 27.8mm 로 나타나 고온인장거동과 유사한 경향을 나타내었다. Fig. 3의 (b)에서 보는 바와 같이 완전풀림된 튜브가 미열처리된 튜브에 비해 현저하게 확관율이 높고 균일한 변형이 일어났음을 알 수 있다. 반면, T6 처리된 튜브는 성형성도 좋지 않을 뿐 아니라 가장 불균일한 변형형태를 보이는 것으로 나타났



(a) Damage values calculated by FE analysis



(b) Bursting fractures of bulge test

**Fig. 3 Bulge test and FE analysis of each heat treated tube**

일반적으로 소성가공 시 파단은 소재에 가해지는 변형이 소재의 변형한계를 초과하게 될 경우 발생한다. 액압성형시 인장에 의한 변형이 한계

값을 초과할 때 파단이 발생하게 되고 이와 같은 인장에 의한 연성과괴는 수정된 Cockcroft-Latham 식에 잘 적용된다. 다시말해서 소재가 특정한 데미지(damage)값에 이르렀을 때 연성과괴가 일어나는 것이다[8]. 본 연구에서는 온간액압성형에서 성형한계를 평가하기 위하여 고온인장시험에서 구한 각 소재의 응력-변형률 곡선을 DEFORM-2D™의 소재 물성으로 활용하고 각각의 조건에 대한 자유확관시험을 수행하였다. 그리고 각 조건에 대해 실제 자유확관시험에서 구한 확관율과 동일한 확관율에서의 데미지값을 계산하였다. 도출한 데미지 값은 완전풀림된 튜브가 0.2로 가장 높았고, 미열처리된 튜브 T6 처리된 튜브가 각각 0.1, 0.08로 확관율과 유사한 경향을 나타내었다. 이러한 데미지값은 소재 상수로 고려될 수 있다. 해석에서 산정한 데미지값이 실험상 부품 성형 시 파단발생의 가능성을 예측할 수 있는

지 확인하기 위해 육각형상 확관 시험을 수행하고 FEM 해석과 비교분석하였다. DEFORM-3D™를 이용하여 각 조건에 대해 실제 시험과 같은 성형 조건을 입력하고 마찬가지로 Cockcroft-Latham 식에 의한 데미지값을 해석으로부터 계산하였다. 그리고 실제 시험 후 파단이 일어난 육각확관튜브와 육각형상이나 파단된 부위를 비교한 결과 앞서 자유확관시험을 통하여 도출한 한계 데미지값이 나타난 부위와 실제로 파단이 일어난 부위가 아주 유사한 것으로 나타난 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

(1) 열처리별 튜브의 고온인장시험 결과 완전 풀림된 튜브가 상대적으로 유동응력은 낮고 균일 연신율은 높아 액압성형성이 가장 높은 것으로 나타났고, 반면 T6 처리된 튜브는 높은 항복강도와 심한 연화현상을 나타내었다.

(2) 실제 자유확관시험과 FE 해석을 통하여 파단에 이르는 한계 데미지값을 도출할 수 있었다.

(3) 도출된 데미지값은 실제 육각확관시험과 FE 해석을 통하여 액압성형시 파단발생의 가능성을 예측할 수 있는 것으로 확인되었다.

#### 참고 문헌

- [1] S. Novotny and P. Hein, 2001, J. Mater. Proc. Tech. Vol.115, p.65
- [2] S. Novotny and M. Geiger, 2003, J. Mater. Proc. Tech. Vol.138, p.594
- [3] M.Y. Lee, S.M. Sohn, C.Y. Kang, D.W. Suh and S.Y. Lee, 2004, J. Mater. Proc. Tech., Vol 155-156, p.1337
- [4] D.G. Seo, S.H. Chang and S.M Lee, 2003, Met. & Mater. Int. Vol.9, p.497
- [5] R. E. Reedhill and R. Abbashian, 1992, Physical Metallurgy Principles (PWS-KENT)
- [6] D. Li and A. Ghosh, 2003, Mat. Sci. & Eng. Vol.A352, p.279
- [7] Y.V.R.K. Prasad and S. Sasidhara, 1997, Hot Working Guide (ASM International)
- [8] O. D. Sherby and J. Wadsworth, 1989, Prog. Mater. Sci., Vol.33, p169

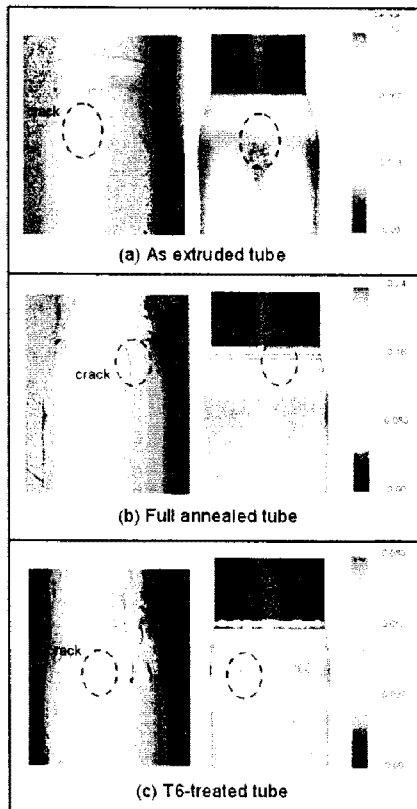


Fig. 4 Comparison of experimental and FE analysis to the forming limit