한국소성가공학회 2005년도 추계학술대회 논문집 pp. 255~258

Al6061 tube의 열처리조건과 온도에 따른 액압성형성에 관한 특성 연구

이혜경[1]· 이영선[1]· 문영훈[2]· 이정환[1]

A study on the formability with heat treatment and deformation temperature in warm hydroforming of Al 6061 tube

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

Abstract

In this study, the effect of heat treatment conditions and deformtation temperature on the formability were investigated in warm hydroforming of Al 6061 tube. Full annealing and T6-treatment for heattreatment of Al6061 tube were used in this study. To evaluate the hydroformability, uniaxial tensile test and bulge test were performed between room temperature and 300℃. And measured flow stress was used to simulate the hydroforming of Al 6061. A commercial FEM code, DEFORM2D, was used to calculate the damage and strain variation. The calculated values were efficient to predict the forming limit in hydroforming for real complex shaped part.

Key Words : Warm hydroforming, Al 6061 tube, hydroformability, uniaxial tensile test

1. 서 론

Al 합금, Mg 합금과 같은 경량금속 소재들은 자동차의 차체 경량화를 목적으로 자동차 업계에서 매우 중요한 전략적 기술로 개발되고 있다. 현재 전 세계적으로 알루미늄 자동차 부품의 제조에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며 현가, 조향장치 그리고 배가장치를 중심으로 고강도 Al합금 부품을 적용하고자 하는 노력들이 가속화되고 있다. 최근에는 일체형 성형기술이 차체구조 단순화와 경량화 수단으로 많은 연구가 진행되고 있는데 이러한 일체형 성형기술로서 주목받고 있는 액압성형 기술은 공정상 재료의 높은 성형성 요구로 인해 현재까지 주로 철계 소재에 국한되어 적용되어 왔다. 반면, 우수한 비강도로 현재 대표적인 경량재료로 사용되고 있는 알루미늄은 통상적으로 상온에서 낮은 성형성을 보여 액압 성형 적용에는 한계가 있었다. 이러한 상온에서의 낮은 성형성 문제를 보완하여 고강도 알루미늄에 대한 액압성형 적용 가능성을 높이는 방법으로 성형온도를 높여주는 온간액압성형 방법을 고려할 수 있다. 성형온도 상승에 따른 기계적 특성 저하는 사전에 완전풀림 처리 또는 T6 열처리를 통해 보완하고 온도 상승에 따라 알루미늄의 성형성도 증가하여 액압성형의 적용이 가능할 것으로 기대된다. 본 연구에서는 이러한 고강도 알루미늄 합금의 온간 액압성형 적용 가능성을 시험하기 위한 기초연구로서 A16061튜브의 고온인장시험과 자유 확관 시험을 통해 온간 성형성을 분석하고, 분석된 데이터를 이용하여 유한요소해석을 수행하여 파단 발생의 기준을 마련하고자 하였다. 이렇게 설정된 파단 기준은 실형상 부품 성형 시 파단 발생의 가능성을 예측할 수 있으므로 공정과 금형 설계 시 유용한 정보로 이용될 것이라 기대된다.

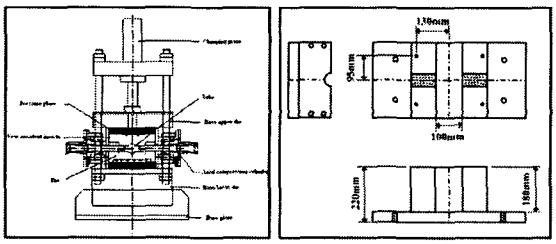
1. 한국기계연구원 소재성형센터
2. 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소
1. 교신저자: 한국기계연구원 소재성형센터

2. 실험 방법

실험에 사용 된 Al6061 소재는 무접점 압출(Seamless tube extrusion) 공정에 의해 제조된 것으로 외경 50.8mm, 두께 5mm 로서 열처리 조건에 따른 영향을 분석하기 위해 완전 풀림(full annealing)처리와 T6 처리하였다. 각각의 열처리 조건을 표 1 에 나타내었다. 일축인장시험을 위한 인장시편은 ASTM E8 규격을 따랐으며, 사용된 일축인장 시험기는 승온에 따른 변형특성평가를 위해 외부 가열 챔버를 부착하였다. 승온 속도는 0.3℃/s 이며 시편은 각각의 시험온도에서 시편 온도 편차를 줄이기 위해 20 분간 유지되었다. 온도와 변형률속도에 따른 변형거동을 평가하기 위하여 상온, 200℃, 300℃에서 0.1/s, 0.01/s, 0.001/s 로 각각 시험을 수행하였다. 액압성형성 평가를 위한 비구속형태의 자유 확관시험은 80T press 에서 시험하였고, 튜브의 양 끝단을 펀치로 실링한 후 증압기(intensifier)를 이용하여 튜브가 파단될 때까지 액압을 가하였다. 튜브의 효율적인 가열을 위해 30KHz,10kw 사양의 유도가열 장치를 사용하였다. 이 때 사용한 성형시스템과 확관금형의 개략도를 그림 1 에 나타내었다. 또한 성형한계를 예측하기 위한 기준을 설정하기 위해 동일 모델에 대해 DEFORM-2D™ 를 이용하여 강소성 유한요소 해석을 수행하였다.

Table 1 Heat treatment condition of Al 6061 (thickness : 5mm)

Full annealing	413℃/1hr, 260℃까지 최대 28℃/hr로 노냉 후 공냉
Solution treatment	529℃ / 50min
Artificial aging	177℃ / 8hrs



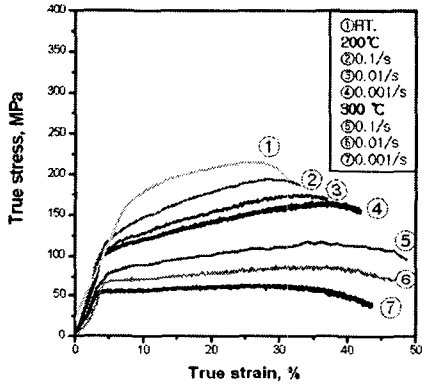
(a) (b)

Fig. 1 Schematic showing (a) Tube hydroforming system (b) Bulgy test die set

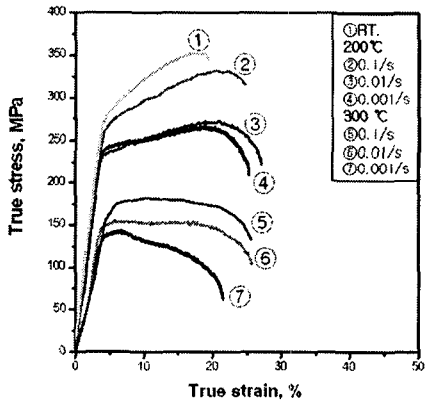
3. 결과 및 고찰

3.1 Al 6061 튜브소재의 성형성

완전 풀림과 T6 열처리 된 Al 6061 튜브의 고온 변형거동을 그림 2 에 나타내었다. 온도 변화에 따른 변형거동은 시편의 열처리 상태에 따라서 차이를 보이고 있는데 완전 풀림 된 상태의 튜브의 경우, 변형온도가 200℃를 넘어서면서 총 연신율이 30%부터 점차로 증가하여 변형온도가 300℃에 이르면 연신율이 50%에 이를 때까지 파단이 관찰되지 않았다. 200℃에서의 유동응력은 가공경화 현상을 나타내고 있지만 300℃에서의 유동응력은 상대적으로 균일 응력상태를 유지하며, 균일 연신율이 43%이상으로 200℃에 비해 10%이상 향상된 것을 관찰할 수 있다.



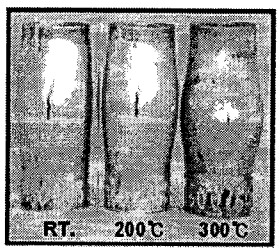
(a) full annealed Al 6061 tube



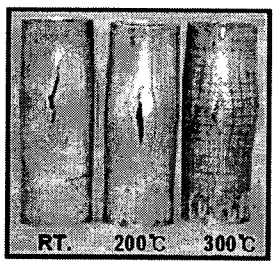
(b) T6-treated Al 6061 tube

Fig. 2 Changes of flow stress with the various temperatures and strain rate.

T6 열처리된 튜브의 경우, 변형률 속도의 변화에 따른 총 연신율의 변화를 살펴보면 변형온도가 200℃인 경우에는 변형률 속도가 감소하여도 총연신율은 크게 변화하지 않고 있다. 풀림 처리된 튜브의 경우 총 연신율이 30%~50%정도를 보이고 있는 것과 비교하여 보았을 때 T6 처리된 튜브의 총 연신율은 약 27%내외로 석출열처리에 의해서 감소된 연성이 변형온도의 증가에 의해서 그다지 향상되지 않고 있음을 나타내고 있다. 완전 풀림처리된 튜브가 300℃에서 50%정도의 총 연신율을 나타내고 있는 것과 비교하면 Al6061 튜브의 경우 열처리 상태가 온간 영역의 변형온도에서 연성의 변화에 미치는 영향이 매우 크다고 할 수 있다. 한편 소재의 성형성 측면에서는 유동응력이 낮을수록 변형저항이 작고, 소성안정영역 즉 소재가 변형에 대한 안정화를 유지할 수 있는 영역에서의 변형율인 균일 연신율이 클수록 성형성이 좋은 것으로 알려져있다. 완전풀림된 상태의 튜브의 경우 T6 처리로 석출경화 된 튜브에 비해 같은 온도에서의 유동응력이 100MPa 정도 낮은 것으로 나타나고, 앞서 언급하였듯이 총 연신율은 T6 처리된 튜브보다 5~25%정도 더 큰 것으로 나타났다. 또한 응력상태에 있어서도 완전풀림된 튜브의 경우 상대적으로 균일 응력, 균일 연신상태를 보이는 것으로 관찰되었다.



(a) full annealed tube



(b) T6-treated tube

Fig. 3 Hydroformed tube after bulge test

그러나 튜브의 액압 성형의 경우에 튜브의 소성변형을 일으키는 응력은 원주방향과 길이 방향의 응력이다. 이러한 튜브소재의 액압 성형성을 적절하게 평가하기 위해 자유 확관 시험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 장비는 튜브를 빠른 시간에 가열하고 온도를 효과적으로 제어하기 위해 고주파 유도가열 장치를 사용하였다. 유도가열 코일이 튜브를 감싼 후 가열시키기 위해 유압 잠금장치가 상승 시 상승홀더로 연결된 하부 볼스터가 같이 들어올려지는데, 이 때 하부 금형은 원래 위치에 안착되어 있어 코일이 튜브를 감싸게 될 경우 금형과의 간섭이 일어나지 않고 성형할 수 있게 하였다. 이때 온도는 평균 10 분 이내에 튜브 표면부가 320℃까지 도달이 가능하도록 하였으며 설정온도까지 가열 후 코일을 제거하고 상부금형을 안착시켜 확관 시험을 실시하였다.

확관 시험 후 변형된 튜브의 형상을 그림 3 에 나타내었고, 이 때의 확관율과 파단 압력을 표 2 에 나타내었다. 일축인장시험 결과 늦은 유동응력과 높은 균일 연신율을 보인 완전풀림된 튜브의 경우 확관율도 높게 나타난 것을 관찰할 수 있다.

완전 풀림 된 튜브의 경우 일축인장시험에서 온도가 높아질수록 균일 연신율이 증가하는것과 마찬가지로 확관 시험 후 확관율에 있어서도 비슷한 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히 상대적으로 균일 응력, 균일 연신상태의 거동을 보인 300℃의 경우에서 확관율도 급격히 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. T6 열처리 된 튜브의 경우에는 일축인장시험 결과 변형온도에 따라 미소한 차이의 연신율을 나타내고 있으며 확관 시험 후 확관율에 있어서도 큰 차이를 나타내지 않고 있음을 알 수 있다. 그러나 가공연화현상을 뚜렷이 보인 300℃의 경우에는 확관율이 다소 높게 나타난 것을 관찰할 수 있었다.

Table 2 Expansion ratio and bursting pressure of tube after bulge test

	확관율(%)	파단 압력 (MPa)
O_RT	15.4	22.2
O_200℃	18.4	18.9
O_300℃	30.6	12.4
T6_RT	3.6	45.3
T6_200℃	4.5	33
T6_300℃	7.8	18

3.2 Al 6061 튜브소재의 성형한계 평가

일반적으로 소성가공에서 파괴는 소재에 가해지는 변형이 소재의 변형한계를 초과하게 될 경우 발생한다. 액압성형에서 원주방향 및 길이방향의 인장에 의한 변형이 한계값을 초과할 때 파손이 발생된다. 이와 같이 인장파괴에 관한 파괴조건은 수정 Cockroft-Latham 식이 잘 적용된다.

본 연구에서는 온간 액압성형에서 성형한계를 평가하기 위하여 고온인장시험에서 구한 응력-변형률 곡선을 DEFORM-2D 에 입력하고 각각의 조건에 대한 확관해석을 수행하여 수정 Cockroft-Latham 조건식에 의한 데미지(damage) 값을 해석으로부터 계산하였다. 또한 각 조건에 대해 실제 확관시험에서 구한 확관율을 이용하여 해석 결과 대칭면 외경의 확관율이 동일한 위치에서 성형한계 데미지값을 구하였다.

실제 확관시험의 확관율을 기준으로 해석결과의 변형률과 한계 데미지값을 표 3에 나타내었다. 완전 풀림 된 상태의 튜브의 경우, 데미지 값이 0.098~0.137으로 나타났고, T6열처리된 튜브의 경우 데미지 값은 0.012~0.02로 완전풀림 상태의 튜브의 데미지 값의 약 4.5~11배 정도인 것으로 같은 온도에서 확관율의 비와 유사한 것으로 나타났다. 해석에서 산정한 데미지 값은 향후 실제 실형상 부품 성형 시 파단 발생의 가능성을 예측할 수 있으므로 공정과 금형 설계 시 유용한 정보로 이용될 것이라 기대된다.

Table 3 Damage value with Expansion ratio

	확관율 (%)	Damage value
O_RT	15.4	0.097
O_200℃	18.4	0.121
O_300℃	30.6	0.137
T6_RT	3.6	0.012
T6_200℃	4.5	0.020
T6_300℃	7.8	0.023

4. 결 론

본 연구에서는 온간 액압성형 적용 가능성을 시험하기 위한 기초연구로서 A16061튜브의 고온인장시험과 자유 확관 시험을 통해 온간 성형성을 분석하고, 분석된 데이터를 이용하여 유한요소해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 완전풀림 된 튜브의 경우 T6 열처리된 튜브에 비해 상대적으로 유동응력은 낮고, 균일 연신율은 큰 것으로 나타났다. 특히 300℃에서는 균일응력, 균일연신 상태를 나타내었다. T6 열처리된 튜브의 경우에는 온도에 따른 총연신율은 큰 차이를 나타내지 않은 것으로 나타났다.

(2) 자유 확관 시험 결과 성형성에 있어서 온도에 따른 일축인장시험 결과와 유사한 거동을 나타내었다.

(3) 일축인장시험을 이용한 FEM 해석을 통해 파단발생의 기준을 마련하고자 하였다. 향후 실형상 부품 성형 시 공정과 금형설계에 있어서 성형한계를 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 "2010 생산기반혁신기술개발사업"의 지원으로 수행된 바, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

[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: Physical Metallurgy Principles (PWS-KENT, USA 1992)

[6] D. Li and A. Ghosh, (2003), Mat. Sci. & Eng. Vol.A352, p.279

[7] Y.V.R.K. Prasad and S. Sasidhara: Hot Working Guide (ASM International, USA 1997).

[8] O. D. Sherby and J. Wadsworth, (1989), Prog. Mater. Sci., Vol.33, p169