

## Al6061압출재를 이용한 온간액압성형품의 성형성 및 물성에 미치는 열처리조건의 영향

이혜경\* · 권승오\* · 장정환\* · 이영선\*\* · 문영훈\*<sup>†</sup>  
\*부산대학교 기계공학부, \*\*한국기계연구원 소재성형센터

### Effect of Heat Treatment Conditions on Formability and Property of Warm Hydroformed Parts for Al 6061 Extruded Tube

Hyaе-Kyung Yi\*, Seung-O Kwon\*, Jeong-Hwan Jang\*,  
Young-Seon Lee\*\*<sup>†</sup>, Young-Hoon Moon\*<sup>†</sup>

\*School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

\*\*Materials Processing Research Center, Korea Institute of Machinery and  
Materials, Changwon 641-010, Korea

**Abstract** Effect of heat treatment conditions on formability and property of warm hydroformed parts for Al 6061 extruded tubes was investigated in this study. For the investigation, as-extruded, fully annealed and T6-treated Al 6061 seamless tubes were prepared. To evaluate the warm hydroformability, uni-axial tensile test and free bulge test were performed at various pre- and post-heat treatment conditions. And the tensile test specimens were obtained from hexagonal prototype hydroformed parts at 250°C. As a result, hydroformability of fully annealed tube is 25% higher than that of extruded tube. The tensile strength and strain of hydroformed part reach to 330 MPa and 12%, respectively, when the part was T6 treated after warm hydroforming. However, the hydroformability of T6 pre-treated tube is relatively low due to the decreased elongation, 8%.

(Received June 3, 2007; accepted June 26, 2007)

**Key words:** Warm hydroforming, Al 6061, hydroformability, free bulge test, heat treatment

### 1. 서 론

차체 경량화가 매우 중요한 이슈가 되고 있는 자동차 업계에서는 알루미늄 또는 마그네슘과 같은 경량 금속의 부품 제조 기술이 매우 중요한 전략적 기술이라고 할 수 있다. 현재 전 세계적으로 알루미늄 자동차 부품의 제조에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며 현가, 조향 장치 그리고 배기장치를 중심으로 고강도 알루미늄 합금 부품을 적용하고자 하는 노력들이 가속화되고 있다. 최근 TWB (Tailored Welded Blank)와 액압성형(Hydroforming)과 같은 일체화 성형 기술이 차체 구조 단순화와 경량화의 수단으로서 많은 연구가 진행되고 있는데, 이러한 일체화 성형 기술이 알루미늄과 마그네슘 같은 경량금속 부품의 제조에 적용될 수 있다면 차체 경량화 효과를 보다 극대화 할 수 있을 것으로 기

대된다[1, 2]. 튜브 액압성형은 튜브형상의 원소재를 금형에 장착한 후 튜브 내부에 높은 액압을 부가하여 원하는 형상으로 성형하는 기술이다. 튜브 액압성형 공정을 자동차 부품의 제조에 이용하게 되면 기존의 금속판재를 스탬핑, 용접, 조립하는 공정을 한 단계의 성형공정으로 대체할 수 있으므로 공정 단순화에 따른 경제성 향상과 차체 경량화를 동시에 달성할 수 있다. 그러나 액압성형 공정은 공정상 재료의 높은 성형성 요구로 인해 현재까지 주로 철계 재질이 적용되어왔다. 반면, 우수한 비강도로 현재 대표적인 경량재료로 사용되고 있는 알루미늄은 통상적으로 상온에서 낮은 성형성을 보여 액압성형공정의 적용에 많은 제한을 받아왔다. 이러한 상온에서의 낮은 성형성 문제를 보완하여 고강도 알루미늄 튜브에 대한 액압성형 적용 가능성을 높이는 방법으로 온간 액압성형 공정을 고려할 수 있다. T6처리된 고강도

<sup>†</sup>E-mail : yhmoon@pusan.ac.kr

알루미늄을 온간에서 성형할 경우 석출물의 조대화로 기계적 특성의 저하가 발생할 수 있다. 그러나 승온-성형 냉각에 이르는 일련의 공정시간을 단축할 수 있다면 온간성형시 발생할 수 있는 기계적 특성의 열화를 상당부분 억제할 수 있을 것으로 생각되며 기타 다양한 전처리 조건 및 후처리 조건을 연구함으로써 최종부품에 요구되는 성형성이나 기계적 특성을 만족시킬 수 있는 공정조건의 최적화를 이루어낼 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서는 Al6061 튜브를 온간액압성형공정에 적용함에 있어서 소재의 전처리 조건과 온도에 따른 자유확관시험을 통해 액압성형성을 분석하고 또한 성형 후 열처리 조건에 따른 액압성형품의 기계적 특성을 분석하여 전체 제조 공정 설계에 미치는 열처리의 영향에 대해 고찰하고자 하였다.

2. 실험 방법

연구에 사용된 Al6061 튜브는 무접점 간접압출(Seamless indirect extrusion) 공정에 의해 제조된 것으로 크기는 외경 50.8 mm, 두께 5 mm이다. 열처리 조건에 따른 영향을 분석하기 위해 성형 전 열처리 조건을 미열처리(F), 완전 풀림(O), T6처리의 세가지로 하였고, 각각의 열처리 조건을 Table 1에 나타내었다. 일축인장시험을 위한 인장시편은 ASTM E8 규격을 따랐으며, 사용된 시험기는 승온에 따른 변형특성평가를 위해 외부에 가열 챔버를 부착하였다. 승온 속도는 0.3°C/s이며 시편은 각각의 시험온도에서 온도 편차를 줄이기 위해 20분간 유지되었다. 온도와 변형률 속도에 따른 변형거동을 평가하기 위해 상온~300°C의 온도범위에서 0.1/s, 0.01/s, 0.001/s로 각각 시험을 수행하였다.

튜브의 전처리 조건과 온도에 따른 액압성형성은 비구속 형태의 자유확관 시험을 통해 분석하였다. 먼저 80T 프레스를 이용한 튜브 액압성형 시스템을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에 보는 바와 같이 튜브의 급속한 가열을 위해 유도가열과 내부의 액체 가열 시스템을 동시에 이용하여 시험 온도까지 균일 승온시켰다. 자유확관 시험은 소재의 양 끝단을 펀치로 실링(sealing)하고 튜브의 내부를 액체로 채운 다음, 시험 온도까지 승온시킨 후 증압기(intensifier)를

Table 1. Heat treatment conditions of Al6061 tube (5t)

| Treatment          | Temperature, °C |
|--------------------|-----------------|
| Full annealing     | 413°C           |
| Solution treatment | 529°C           |
| Artificial aging   | 177°C           |

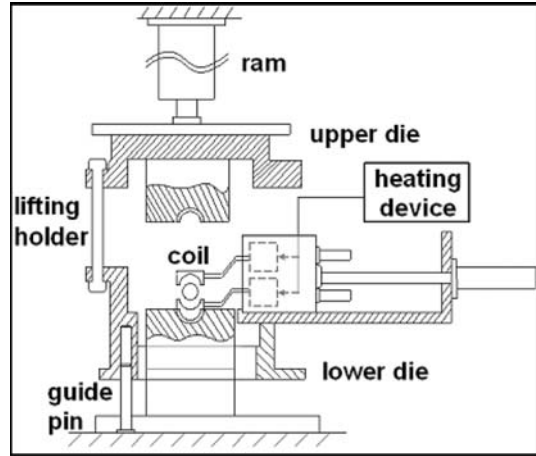


Fig. 1. Schematic drawing of warm hydroforming System.

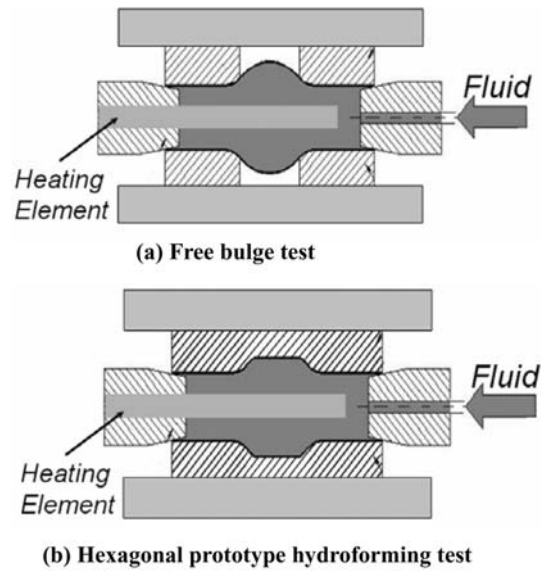


Fig. 2. Schematic drawing of hydroforming model.

이용하여 파단이 일어날 때까지 내부 압력을 가하게 된다(Fig. 2(a)). 이 때 파단된 튜브의 확관율을 측정함으로써 튜브의 전처리 조건에 따른 액압성형성을 평가하였다.



Fig. 3. Hexagonal prototype hydroformed parts.

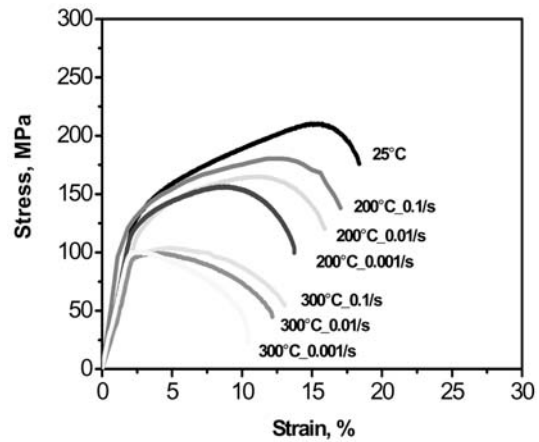
Table 2. Pre- and post- heat treatment conditions

|   | Pre treatment | Forming       | Post treatment |
|---|---------------|---------------|----------------|
| A | F             | Hydro-forming | -              |
| B | F             |               | T6             |
| C | O             |               | -              |
| D | O             |               | T6             |
| E | T6            |               | -              |

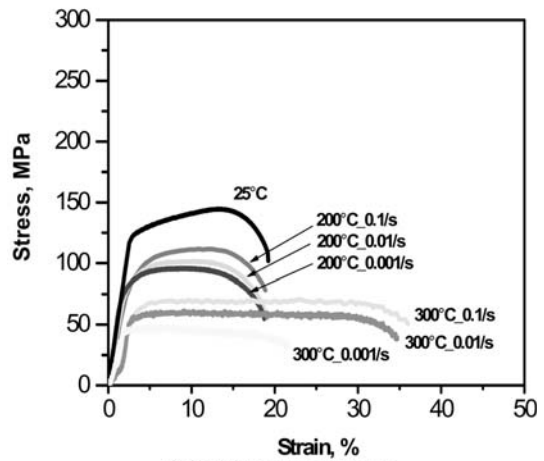
전·후처리 조건에 따른 액압성형품의 기계적 특성을 알아보기 위해서는 육각형상의 확관 모델을 자체적으로 설계하여 시험하였고 육각형상의 확관 모델을 Fig. 2(b)와 Fig. 3에 나타내었다. 성형 전 튜브는 미열처리(F), 완전풀림(O), T6처리의 세가지 전처리를 거치고 육각 형상으로 액압성형한 후 미열처리와 완전풀림된 튜브의 성형품에 대해서는 T6 후처리하였고, 이 때의 전·후 열처리 조건을 Table 2에 나타내었다. 튜브의 전·후처리 조건에 따른 기계적 특성의 변화를 관찰하였다. 기계적 특성은 육각형상 성형품의 각 면에서 인장시험편을 채취하여 상온인장 시험을 통해 고찰되었다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

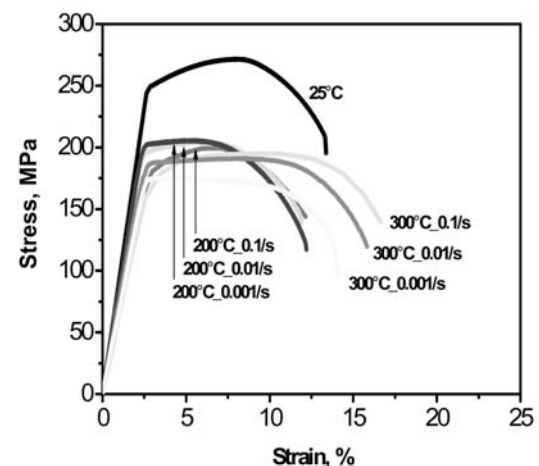
Al 6061 압출재의 열처리에 따른 온간변형거동을 평가하기 위해 온간인장시험을 수행한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 열처리 조건은 경제성과 성형성 그리고 기계적 특성을 고려하여 압출 후 미열처리(F), 완전풀림(O), 그리고 T6처리의 세가지 종류로 이루어졌다. 각 종류 별로 열처리된 튜브에 대해 성형온



(a) As extruded tube



(b) Full annealed tube



(c) T6 treated tube

Fig. 4. Flow stresses of Al 6061 tubes at different temperature and heat treatment conditions.

도인 200°C에서의 변형거동을 살펴보면 완전폴립된 튜브의 경우, 미열처리된 튜브에 비해 가공경화지수가 매우 낮은 것으로 나타났고, 항복강도 또한 50 MPa 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 완전폴립된 튜브가 미열처리된 튜브에 비해 우수한 온간변형거동을 보이는 것으로 판단된다. 반면 T6 열처리된 튜브의 경우 Fig. 4의 (c)에서 보는 바와 같이 200°C에서 아주 높은 항복강도와 더불어 심한 연화현상을 보이는 것으로 나타났다. 300°C의 유동특성을 살펴보면 완전폴립 처리 및 T6 열처리를 한 튜브의 경우에는 200°C에 비해 총연신율이 늘어나고 유동응력도 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 그러나 미열처리한 튜브의 경우에는 Fig. 4 (a)에서 보는 바와 같이 200°C의 유동응력에 비해서 총연신율도 낮고 연신율이 증가함에 따라 인장강도가 감소하는 연화현상이 심하게 나타나는 것을 알 수 있다.

한편, 튜브의 액압성형의 경우에는 소성변형을 일으키는 응력이 길이 방향과 함께 원주 방향으로도 변형이 일어나게 된다. 따라서 일축인장시험만으로는 액압성형성을 평가하는 것이 적절하지 못하기 때문에 자유확관시험을 통해 실 성형시 파단 발생 방지를 위한 성형성 데이터를 구축하였다. 전처리된 튜브의 양 끝단을 펀치로 실링한 후 소재의 유입없이 파단이 발생할 때까지 압력을 가한 시험편을 온도 별로 Fig. 5에 나타내었다. 액압을 가함에 따라 확관되어 최대 반경에 이른 후 길이 방향으로 파단이 일어났음을 관찰할 수 있다. 확관율은 200°C에서는 F, O, T6의 순서대로 14, 20.5, 9.6%의 순으로 나타났고, 250°C에서는 15.3, 23.5, 11.2% 그리고 300°C에서는 13, 28.2, 10.1%의 순으로 나타났다. 대체적으로 200°C보다는 250°C에서 확관율이 1.6~3% 정도 더 높게 나타났고, 미열처리와 T6처리한 튜브의 경우에는 오히려 300°C에서 확관율이 0.9~2.3% 정도 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 완전폴립된 튜브의 경우에는 300°C에서 확관율이 가장 높았지만 시험온도가 높아짐에 따라 오일이 끓게 되어 실험상 위험

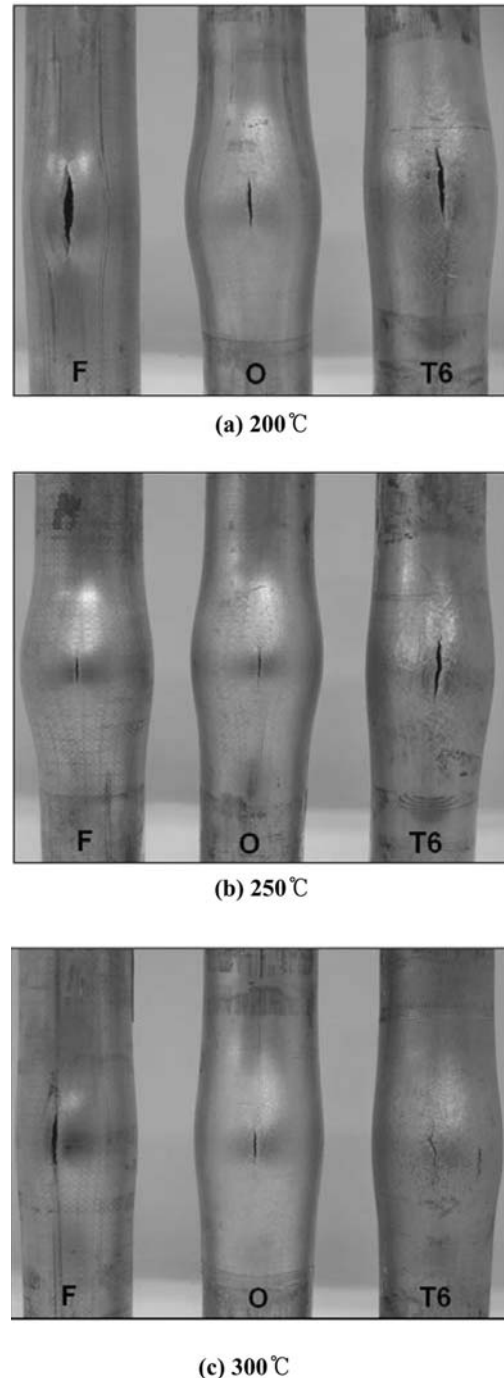


Fig. 5. Bulge tested tubes at different temperature and pre-heat treatment conditions.

하다는 단점이 있다. Fig. 5의 확관된 튜브에서 보는 바와 같이 완전폴립된 튜브가 미열처리된 튜브에

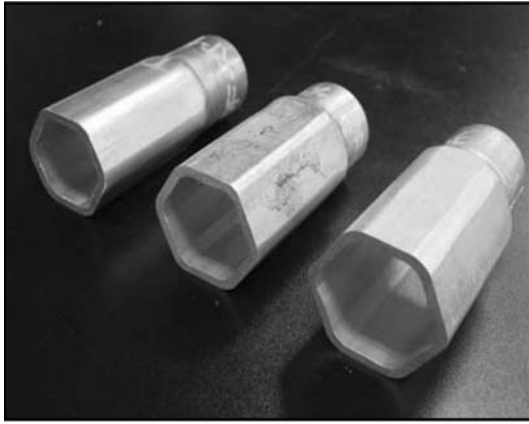


Fig. 6. Hexagonal prototype hydroformed part.

비해 확관율이 높을 뿐 아니라 균일한 변형이 일어났음을 알 수 있다. 반면, T6 처리된 튜브는 확관율도 좋지 않을 뿐 아니라 가장 불균일한 변형형태를 보이는 것으로 나타났다. 하지만 그다지 높은 성형성을 요구하지 않고 강성이 중요시되는 부품에 적용될 경우에 성형 후 후열처리공정을 줄일 수 있어 후열처리 시 발생하는 공정증가와 제품의 뒤틀림현상등을 방지할 수 있는 장점이 있다고 판단된다.

열처리 조건에 따른 성형성 연구와 함께 전 후처리 조건에 따른 기계적 특성을 분석하기 위해 육각형상으로 확관된 액압성형품을 Fig. 6에 나타내었다. 육각형상으로 확관된 액압성형품의 각 면에서 시편을 채취해 상온인장시험을 통해 기계적 특성을 평가하였다. 열처리 종류는 Table 2에서 보는 바와 같이 미열처리(F), 완전풀림(O), T6로 전처리한 튜브의 액압성형품과 미열처리, 완전 풀림처리된 액압성형품을 다시 T6로 후처리한 액압성형품에 대해 평가하였고 각 성형품의 강도와 연신율을 Fig. 7, 8에 나타내었다. 미열처리와 완전풀림으로 전처리한 튜브의 액압성형품은 강도는 성형전과 유사한 결과를 나타낸 반면 연신율은 성형 후 3~8% 정도 감소하는 결과를 나타내었다. 미열처리된 튜브의 액압성형품을 다시 T6후 처리한 경우에는 강도가 150 MPa, 연신율이 5% 정도 증가하는 결과를 나타내어 경제성을 고려한 공정설계에 충분히 고려될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 높은 확관율을 나타내었던 완전 풀림된 튜브의 액압성형품의 경우 T6후 처리를 통해 강도를 336 MPa, 연신율을 11.8%까지 증

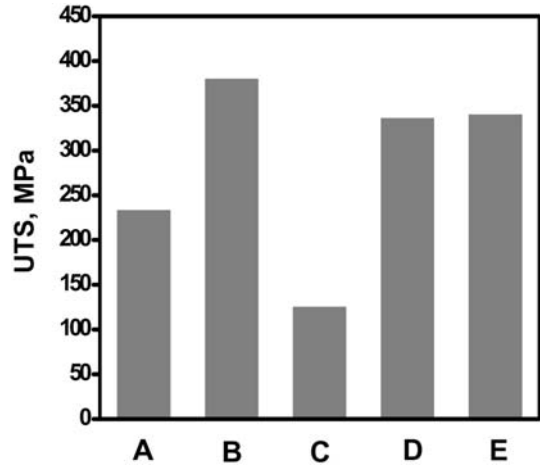


Fig. 7. Tensile strength of hydroformed parts at various pre- and post- heat treatments.

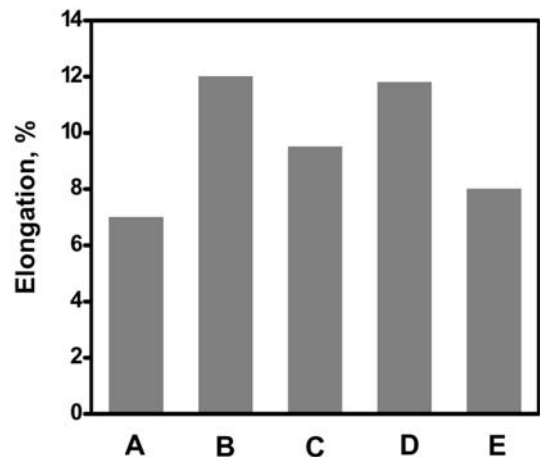


Fig. 8. Elongation of hydroformed parts at various pre- and post-heat treatments.

가시킬 수 있어 높은 성형성과 강도를 요구하는 부품에 적합할 것으로 예상된다. 반면, 아주 낮은 성형성을 보여주었던 T6전처리한 튜브의 액압성형품의 경우에는 강도가 340 MPa, 연신율이 8% 정도로 나타나고 있어 적절한 설계 및 부품 조건하에서는 성형 후 후열처리 공정을 제거할 수 있는 경제적 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 두께가 얇은 튜브의 경우, 성형 후에 T6와 같은 후열처리 공정을 거치게 되는 동안 성형품의 형상이 변형되거나 치수가 변형될 수 있기 때문에 그러한 측면에서는 T6전처리된 튜브가 아주 유용하게 이용될 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 한국과학기술연구원 부산대학교 국가핵심 연구센터의 지원에 의한 것입니다.

## 4. 결 과

1. 열처리 별 튜브의 온간인장시험 결과 완전풀림 된 튜브가 상대적으로 유동응력은 낮고 균일연신율은 높아 액압성형성이 가장 높은 것으로 나타났고, 반면 T6 처리된 튜브는 높은 항복강도와 심한 연화현상을 나타내었다.

2. 전처리를 달리한 A16061 튜브를 200, 250, 300°C에서 확관율을 측정한 결과 200°C보다는 250°C에서 확관율이 1.6~3% 정도 더 높게 나타났고, 미열처리와 T6처리한 튜브의 경우에는 오히려 300°C에서 확관율이 0.9~2.3% 정도 줄어들었지만 완전풀림된 튜브의 경우에는 300°C에서 28.2%로 가장 높게 나타났다.

3. 미열처리, 완전풀림, T6로 전처리한 액압성형품과 미열처리, 완전풀림으로 전처리한 액압성형품을 다시 T6로 후처리한 액압성형품의 기계적 특성을 평가한 결과 미열처리지 240 Mpa, 완전풀림시 125

MPa으로 액압성형중에 떨어진 강도를 T6 후처리함으로써 340 MPa 이상으로 회복할 수 있었고, T6 전처리한 튜브의 액압성형품의 경우에는 강도는 340 MPa로 유지되었지만 연신율은 다소 감소하는 경향을 나타내었다.

## 참고문헌

1. S. Novotny and P. Hein : J. Mater. Proc. Tech. **115** (2001) 65.
2. S. Novotny and M. Geiger : J. Mater. Proc. Tech. **138** (2003) 594.
3. D. G. Seo, S. H. Chang and S. M. Lee : Met. & Mater. Int. **9** (2003) 497.
4. R. E. Reedhill and R. Abbashian : Physical Metallurgy Principles (PWS-KENT, USA 1992).
5. M. Y. Lee, S. M. Sohn, C. Y. Kang, D. W. Suh and S. Y. Lee : J. Mater. Proc. Tech., **155-156** (2004) 1337-1343.
6. D. Li and A. Ghosh : Mat. Sci. & Eng. **A352** (2003) 279.
7. Y. V. R. K. Prasad and S. Sasidhara : Hot Working Guide (ASM International, USA 1997).
8. T. Altan, H. Kim, M. Yamanaka : Proceeding of the NAMRC Society of Manufacturing Engineers, Houghton, MI (1995) 63.