

온간액압성형특성에 미치는 압출제조공정과 열처리 조건의 영향

이혜경¹ · 권승오¹ · 박현규¹ · 임홍섭¹ · 이영선² · 문영훈^{1, #}

Effect of process type and heat treatment conditions on warm hydroformability

H.K Yi, S. O Kwon, H.K Park, H.S Yim, Y. S Lee, Y. H Moon

Abstract

In this study, hydroformability and mechanical properties of pre- and post- heat treated Al6061 tubes at different extrusion type were investigated. For the investigation, as-extruded, full annealed and T6-treated Al 6061 tubes at different extrusion type were prepared. To evaluate the hydroformability, uni-axial tensile test and free bulge test were performed at room temperature and 250 °C. Also mechanical properties of hydroformed part at various pre- and post-heat treatments were estimated by tensile test. And the tensile test specimens were obtained from hexagonal prototype hydroformed tube at 250 °C. As for the heat treatment, hydroformability of full annealed tube is 25% higher than that of extruded tube. The tensile strength and elongation were more than 330MPa and 12%, respectively, when hydroformed part was post-T6 treated after hydroforming of pre- full annealed tube. However, hydroformed part using T6 pre treated tube represents high strength and low elongation, 8%. Therefore, the T6 treatment after hydroforming for as-extruded tube is cost-effective. Hydroformability of Al6061 tube showed similar value for both extrusion types. But flow stress of seam tube showed 20~50MPa lower value.

Key Words : Warm hydroforming, Al 6061, hydroformability, free bulge test, extrusion

1. 서론

액압성형은 튜브형상의 원소재를 금형에 장착한 후 튜브 내부에 높은 액압을 부가하여 원하는 형상으로 성형하는 기술이다. 액압성형 공정을 자동차 부품의 제조에 이용하게 되면 기존에 금속 판재를 스탬핑, 용접, 조립하는 공정을 한 단계의 성형공정으로 대체할 수 있으므로 공정 단순화에 따른 경제성 향상과 차체 경량화를 동시에 달성할 수 있다. 액압성형 기술은 자동차 차체(Subframe) 부품 제조에서 매우 활발하게 적용되어 미국, 일본 및 최근 일본의 자동차 업계에서도

활발히 적용되는 추세이다. 지금까지 액압성형이 적용되어진 소재는 성형성이 비교적 우수한 철계 소재에 국한되고 있는데 이것은 알루미늄이나 마그네슘과 같은 경량 금속들의 상온 성형성이 비교적 낮아서 액압성형 공정을 적용하기 어렵기 때문이다. 액압성형을 고강도 알루미늄 합금에 적용하기 위해서는 적절한 성형성의 확보가 필수적인데, 알루미늄 합금의 성형성을 높이는 방안으로서 성형온도를 높여주는 온간성형 방법을 고려할 수 있다[1-2]. 일반적으로 금속의 변형온도가 증가하면 유동응력은 감소하고 연신율은 증가한다. 따라서 액압성형 공정 중의 소재 온도를 상승시켜

1. 부산대학교 기계공학부

2. 한국기계연구원 재료연구소 소재성형센터

교신저자: 부산대학교, E-mail:yhmoon@pusan.ac.kr

적정한 성형성을 확보함으로써 액압성형공정을 고강도 알루미늄 부품의 제조에 적극적으로 적용할 수 있을 것으로 생각된다. 알루미늄의 온간 액압성형은 상온에서의 알루미늄의 연신율이 기타 소재, 특히 철계 소재보다 현저히 떨어지기 때문에 이를 보완하기 위하여 개발되고 있는 기술이다. 온간 액압성형에 따른 성형 온도의 증가는 풀림 처리(Annealing)된 알루미늄 튜브의 성형성 뿐만 아니라 열처리 된 고강도 알루미늄 튜브의 성형성도 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다. 석출 열처리 된 고강도 알루미늄 튜브를 온간에서 성형할 경우, 미세한 석출물의 조대화로 기계적 특성의 열화(Degradation)가 발생할 수 있다. 그러나 승온-성형-냉각에 이르는 일련의 성형공정 시간을 최대한 단축할 수 있다면 온간 성형시 발생할 수 있는 기계적 특성의 열화를 상당 부분 억제할 수 있을 것으로 생각되며 기타 다양한 전처리 조건 및 냉각 조건을 연구함으로써 최종 부품에 요구되는 기계적 특성을 만족시킬 수 있는 공정조건의 최적화를 이루어 낼 수 있을 것이다. 이러한 온간액압성형 공정에서는 목표 특성을 만족하면서 경제성 높은 전처리-성형조건-후처리 공정을 포함하는 전 제조 공정을 설계하는 것이 중요한 만큼 본 연구에서는 경제성을 고려하여 제조공정을 달리한 Al 6061 튜브를 다양하게 전처리 한 다음 자유확관 시험을 통해 온간액압성형성에 대해 고찰하였고, 또한 전처리된 튜브로 액압성형을 한 후 액압성형품의 다양한 후처리를 통해 기계적 특성에 미치는 전, 후처리의 영향에 대해서도 평가하고자 하였다.

2. 실험 방법

연구에 사용된 Al6061 튜브의 종류와 전처리 및 후처리 조건은 Table 1 과 같다. 우선, 튜브를 압출 공정으로 제조할 수 있는 방법은 직접압출(direct extrusion)방식과 간접압출(indirect extrusion)방식이 있다. 직접압출 방식은 펀치 진행 방향으로 튜브가 압출되는 방식을 말하고, 그와는 반대로 간접압출 방식은 펀치 진행 방향과 반대 방향으로 튜브가 압출되는 방식을 말한다. 간접압출된 무접점(Seamless)튜브와 직접압출된 접점(seam)튜브의 크기는 모두 외경 50.8mm, 두께 5mm 이다. 압출방식에 따른 튜브의 특성차이와 함께 성형성에 영향을 미칠 수 있는 부분에는 열처리 조건이 있다. 따라서 열처리 조건에 따른 영향을 분석하기 위

Table 1 Various heat treatment conditions

	Pre-treatment	Post-treatment
A	As extruded (F)	→ As hydroformed
B	As extruded (F)	→ T6 treated
C	Full annealed (O)	→ As hydroformed
D	Full annealed (O)	→ T6 treated
E	T6 treated (T6)	→ As hydroformed

해 성형 전 열처리 조건을 미열처리(F), 완전 풀림(O), T6 처리의 세가지로 하였다. 튜브의 액압성형의 경우에는 소성변형을 일으키는 응력이 길이 방향과 함께 원주 방향으로도 변형이 일어나게 된다. 따라서 일축인장시험만으로는 액압성형성을 평가하는 것이 적절하지 못하기 때문에 자유확관 시험을 통해 실 성형시 파단 발생 방지를 위한 성형한계를 나타내는 확관율을 구하였다. 먼저 80T 프레스를 이용한 튜브 액압성형 시스템에서는 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 이용하여 파단이 일어날 때까지 내부 압력을 가하게 된다. 이 때 파단된 튜브의 확관율을 측정함으로써 튜브의 전처리 조건에 따른 액압성형성을 평가하였다. 전·후처리 조건에 따른 액압성형품의 기계적 특성을 알아보기 위해서는 육각형상의 확관 모델을 자체적으로 설계하여 시험하였다. 성형 전 튜브는 미열처리(F), 완전풀림(O), T6 처리의 세가지 전처리를 거치고 육각형상으로 액압성형 된 후 미열처리와 완전 풀림된 튜브의 성형품에 대해서는 T6 후처리하여 튜브의 전, 후처리 조건에 따른 기계적 특성의 변화를 관찰하였다. 기계적 특성은 육각형상 성형품의 각 면에서 인장시험편을 채취하여 상온인장시험을 통해 고찰되었다.

3. 실험 결과 및 고찰

온간 액압 성형 통해 일체형 튜브 구조물을 제조하기 위해서는 제품 성형에 필요한 수준의 충분한 연신율이 필요하다. 상온에서의 낮은 성형성을 극복하기 위해 온간 온도로 성형 온도를 상승시키는 것도 마찬가지로 목적이다. 무엇보다도 원하는 형상으로 결함없는 제품을 성형하는 것은

중요한 전제조건이므로 성형품의 열처리를 통한 기계적 성질 확보 문제 또한 중요한 사항이지만, 우선은 사용 소재에 대한 성형 한계의 규명은 중요한 설계 변수이다. 성형한계는 성형성이라고 불리는 소재의 물성치로서 단순하게는 1 축 응력 상태의 인장특성을 들 수 있다. 그러나, 실제 소재가 액압성형 공정을 거치는 동안 다축 응력 상태에 놓이게 되므로 성형한계를 1 축 응력만으로 규명하기는 곤란하다. 따라서, 본 연구에서는 다양한 소재 조건(전처리, 압출공정)에 따른 성형성 분석을 위해 250℃에서 자유확관시험(Free Bulging Test)을 수행하였다. 직접압출재와 간접압출재를 각각 미열처리(F), 완전풀림(O) 그리고 T6 처리한 다음 자유확관시험을 수행하여 각각 파단에 이르는 튜브를 Fig. 1 에 나타내었다. 액압을 가함에 따라 확관되어 최대 확관율에 이르면 길이 방향으로 파단이 일어났음을 관찰할 수 있다. 또한, 완전풀림된 튜브가 미열처리된 튜브에 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. 구체적으로 확관율을 측정해 본 결과, 직접압출재인 경우 F, O, T6 의 순으로 26, 32, 27%로 나타났고, 간접압출재인 경우에는 F, O, T6 의 순으로 29, 33, 25%로 나타나 제조공정에 따라서는 큰 차이를 나타내지 않음을 알 수 있다. Fig. 2 에는 직접 압출재와 간접압출재를 이용하여 축방향 압입(feeding) 양과 온도를 달리한 다양한 조건하에서 자유확관 시험 후 확관율을 측정된 결과를 나타내었다. 보는 바와 같이 제조 조건에 따라서는 뚜렷한 차이를 나타내지 않았다. 여기서 특이한 점은 직접 접점(Direct Seam) 튜브의 특성이다. 직접 접점 튜브의 경우는 포트 홀(Porthole) 다이를 이용하여 생산되는 만큼 매우 경제적으로 소재를 제조할 수 있는 장점이 있지만, 소재가 포트홀을 지나는 동안 분류되었다가 다시 모여지기 때문에 그 부위에서 결합력 부족현상 발생의 가능성이 있다는 단점이 있어 고려하기 곤란했었다. 그러나 Fig. 3(b)에 나타낸 바와 같이 확관되어 파단에 이르는 튜브의 단면을 관찰해보면 파단이 접점 부위에서 나타나지

않음을 알 수 있다. 온간 액압 성형시 결합 부위가 취약하면 모재의 성형성을 충분히 활용하지



(a) indirect extrusion type



(b) direct extrusion type

Fig. 1 Bulged tubes at different pre-heat treatment

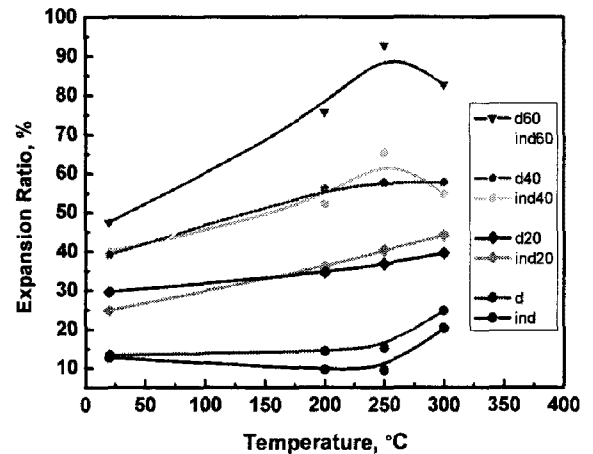
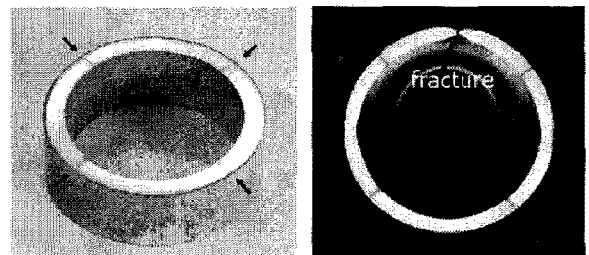


Fig. 2 Expansion ratio of bulged tubes at different pre-heat treatment and extrusion type



(a) before forming (b) after forming

Fig. 3 Cross section of seam direct tube

못한 상태에서 결함이 발생할 수 있는데 결함부위(seam mark)에서 크랙 발생이 나타나지 않아 분류되었던 소재가 다시 결합된 부위에서의 결합력이 충분한 것으로 판단된다. 후처리 조건에 따른 기계적 특성을 분석하기 위해 육각형상으로 확장한 액압성형품의 기계적 특성을 Fig. 4에 나타내었다. F와 O로 전처리한 튜브의 액압성형품은 강도는 성형전과 유사한 결과를 나타낸 반면 연신율은 성형 후 3~8%정도 감소하는 결과를 나타내었다. F 튜브의 액압성형품을 다시 T6 후 처리한 경우에는 강도가 150MPa, 연신율이 5%정도 증가하는 결과를 나타내어 경제성을 고려한 공정설계에 충분히 고려될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 간접압출재의 경우 높은 확장율을 나타내었던 완전 풀림된 튜브는 T6 후 처리를 통해 강도를 336MPa, 연신율을 11.8%까지 증가시킬 수 있어 높은 성형성과 강도를 요구하는 부품에 적합할 것으로 예상된다. 반면, 아주 낮은 성형성을 보여 주었던 T6 전처리한 튜브의 액압성형품의 경우에는 강도가 340MPa, 연신율이 8%정도로 나타나고 있어 적정한 설계 및 부품 조건하에서는 성형 후 후열처리 공정을 제거할 수 있는 경제적 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 간접압출재의 경우 특이한 사항은 풀림 처리 후 성형을 거쳐 T6

열처리를 수행한 경우의 특성과 성형 전 T6 열처리를 한 후 후처리를 생략한 경우가 동일한 기계적 성질을 나타내고 있다는 사실이다. 이는 경제성을 고려한 공정의 실효성을 입증해주고 있는 것이기 때문에 현장 적용에 많은 가능성을 부여하고 있는 것이라 사료된다.

4. 결론

- (1) 제조공정과 전처리를 달리한 Al6061 튜브의 액압성형성을 평가하기 위해 자유확관시험 후 확장율을 측정하여 결과 완전풀림(O)된 튜브의 확장율이 T6 나 미열처리(F) 튜브에 비해 4~8% 정도 높게 나타났고, 미열처리와 T6 처리한 튜브는 25~29%의 확장율로 비슷한 경향을 나타내었다. 또한 제조공정에 따른 차이는 미흡한 것으로 나타났다.
- (2) F, O, T6로 전처리한 액압성형품과 액압성형 후 T6로 후처리한 액압성형품의 기계적 특성을 평가한 결과 간접압출재의 경우는 F-240Mpa, O- 125MPa으로 액압성형중에 떨어진 강도를 T6 후처리함으로써 340MPa이상으로 회복할 수 있었고, T6전처리한 튜브의 액압성형품의 경우에는 강도는 340MPa로 유지되었지만 연신율은 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 직접압출재의 경우에도 열처리 별로 간접압출재와 유사한 경향을 나타내었고, 간접압출재에 비해 상대적으로 20~80MPa정도 낮은 강도를 갖는 것으로 나타났다.

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] Latham, D.J. and Cockroft, M.G., Feb, 1966, The effect of stress system on the workability of metals, NEL Report No.213
- [5] 박재현, 최이천, 오영근, 2001, side member 관재 하이드로포밍 성형해석, 한국소성가공학회 2001년도 춘계학술대회 논문집, pp. 54~58

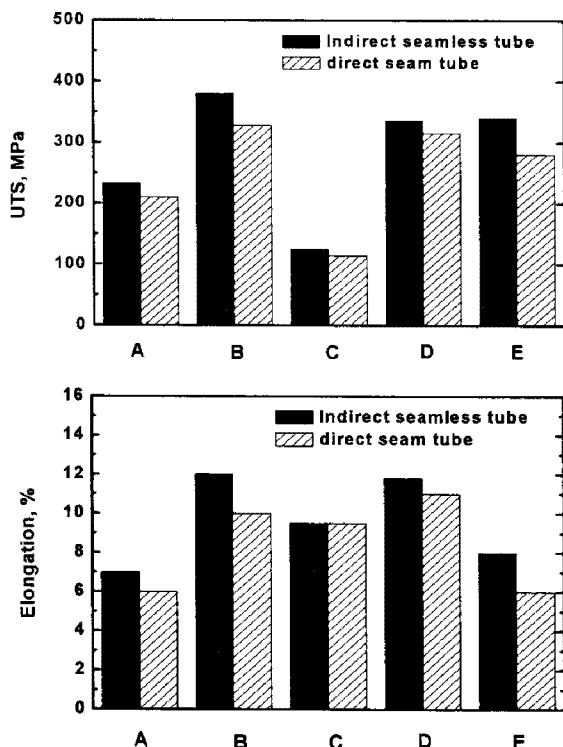


Fig. 4 Comparison of mechanical property with different extrusion type and heat treatment