

고강도 알루미늄 튜브의 온간 하이드로포밍 특성

이문용* · 감창룡** · 이상용***
(2003년 10월 22일 접수)

Warm Hydroforming Characteristics of High Strength Aluminum Tubes

M. Y. Lee, C. Y. Kang and S. Y. Lee

Abstract

Hydroformability of 6061 and 7075 aluminum tube materials was studied by warm hydroforming experiments. A special tooling and heating system was designed and manufactured in order to perform warm hydroforming between room temperature and 300°C. The control of tube temperature for warm hydroforming was made by the control of temperature of oil medium. Warm hydroformability was analyzed by tube appearances, tube elongation and hardness values. Hydroforming characteristics of 6061 and 7075 tubes showed different temperature dependence between room temperature and 300°C. The difference in hydroformabilities of 6061 and 7075 at elevated temperatures was interpreted by the different sensitivity to dynamic strain aging of both aluminum materials.

Key Words : High Strength Aluminum Tubes, Warm Hydroforming, Expansion Ratio, Elongation

1. 서 론

알루미늄 합금은 철계 소재 다음으로 많이 응용되고 있는 소재이며 용도에 따라 수많은 합금이 개발되어 있다. 일반적으로 알루미늄은 철계 소재에 비해 강도 및 성형성이 낮은 것으로 알려져 있으며 특히 경량화를 위해 철계 소재를 대체하는데 필요한 고강도 합금의 경우 성형성은 상온에서는 철계 소재에 비해 크게 떨어진다. 차체용으로 흔히 적용되는 6000 계 합금의 경우 T6 상태에서 상온 연신율(강도:300MPa 수준)은 약 20% 내외이며, 더 높은 강도를 나타내는 7000 계 합금은 10% 내외(강도:500MPa 수준)로 연신율은 더욱 떨어진다.⁽¹⁾

그러나 알루미늄 합금은 철계 소재에 비해 낮은 온도의 변화에 대해 강도 및 연성의 변화가 상대적으로

크다. 대부분의 알루미늄 합금은 어느 일정한 정도로 온도를 올리면 상온에 비해 강도는 저하 되면서 연성은 증가하게 되는 경향을 나타낸다. 일반적으로 하이드로포밍은 상온에서 이루어지며, 알루미늄 하이드로포밍의 가장 큰 목적인 경량화를 위해서는 철계 소재의 기계적 특성을 고려하여 고강도 알루미늄 합금의 적용이 필수적이기 때문에 상온 하이드로포밍에 알루미늄 합금을 적용하는 것은 성형성 측면에서 크게 제한을 받을 수 밖에 없다.⁽²⁾

차체 부품은 치수가 크고 부위별로 균일한 형상이 없고 또한 부위별로 변형의 정도가 크게 차이가 난다. 차체부품의 하이드로포밍에서는 변형량이 최대인 부위를 고려하여 사용소재를 고려할 수 밖에 없다. 따라서 알루미늄 차체부품 하이드로포밍에서는 요구되는 성형성을 얻기 위해 성형

* ㈜성우하이텍 기술연구소

** 부경대학교 재료공학부

*** 한국기계연구원 소성용융그룹

전에 연화처리를 해주어야 하는데, 이는 강도의 저하와 공정의 추가로 인해 생산성에 부정적인 영향을 미치게 되고 적용 가능한 부품의 종류가 제한을 받게 된다.⁽³⁾

이와 같은 알루미늄 하이드로포밍의 제한요건을 해결할 수 있는 하나의 방안으로 알루미늄의 온도에 따른 특성을 활용하여 온간 하이드로포밍 기술을 적용하여 그 가능성을 확인하고자 하였다. 하이드로포밍에서 변형하고자 하는 소재의 온도를 양산측면에서 효과적으로 제어하는 것은 용이하지 않은 것으로 알려져 있어 지금까지 거의 시도되지 않았다. 그러나 약 300℃ 이하에서는 액체 매질(liquid medium)을 적절하게 선정하고 시스템을 구성할 경우 생산성을 크게 저해하지 않는 것이 가능하기 때문에 이를 알루미늄 합금에 적용하는 것은 알루미늄 합금의 온도에 따른 기계적 특성과 하이드로포밍용 부품의 변형량 수준에 비추어 볼 때 매우 효과적일 수 있을 것이라 판단되었다.⁽⁴⁾ 이와 같은 개념을 구체화하여 온간 하이드로포밍 실험이 가능한 금형시스템을 설계, 제작하고 고강도 알루미늄 합금 튜브에 대한 단순형상의 하이드로포밍 실험을 통하여 온간 하이드로포밍 기술의 가능성을 검토할 수 있는 기초실험을 수행하고 분석하였다.

2. 인장특성 및 실험방법

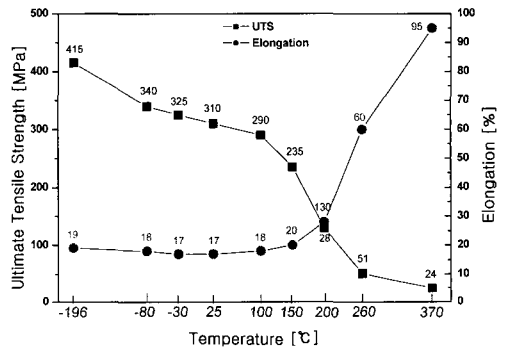
2.1 고강도 Al 합금의 온도별 인장특성

본 실험을 위하여 6061 및 7075 알루미늄 합금 조성을 갖는 외경 50.8mm, 길이 235mm, 두께 5mm의 튜브(seamless tube)가 열간 압출에 의해 제작 되어 공급되었으며 실험에 사용되기에 앞서 모든 튜브는 풀림처리(annealing treatment) 되었다. 6061의 경우에는 두께 3mm와 5mm의 seam tube도 제작하여 비교용으로 활용하였다.

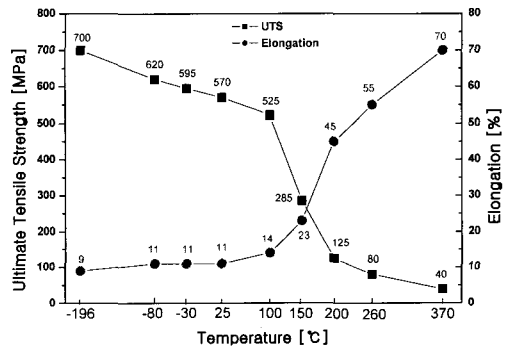
6061 및 7075 합금들의 시효경화열처리(T6) 상태에서 온도에 따른 강도 및 연신율 변화의 양상은 Fig. 1과 같다.⁽⁵⁾ 두 합금 모두 사용온도가 증가할 때 강도가 떨어지고 특히 100~260℃ 사이에서 급격한 강도하강을 나타낸다. 반대로 같은 온도범위에서 연신율은 급격히 증가하는 양상을 나타낸다. 온도증가에 따른 강도 감소폭은 7075 합금의 경우가 더 큰 반면 연신율 증가폭은 6061 합금의 경우가 크다. 극저온(cryogenic)상태에서는 온도감소에 따라 두 합금 모두 강도가 증가하지만 연신율의 경우는 차이가 있다. 즉, 7075는 극저온으

로 갈수록 연신율이 떨어지지만 6061의 경우는 미소하게 다시 증가하는 경향을 보인다.

본 실험에서 중요한 온도 범위는 상온에서 300℃까지의 온도범위이며 이 범위에서 6061과 7075 합금의 온도에 따른 강도 및 연신율 특성에는 차이점이 있다. 즉, 7075 경우 급격한 강도 및 연신율 변화는 100℃ 정도에서 나타나는 반면, 6061은 200℃ 이상에서 나타난다. 이는 6061 합금이 온간 동적변형시효(dynamic strain aging) 현상이 더 두드러지게 나타나는 합금이라는데 기인한다. 즉, 온간 동적변형 시효 현상은 재료의 일반적인 현상인 온도증가에 따른 연화를 저해하는 현상이기 때문이다.⁽⁶⁻⁷⁾



(a) 6061 - T6



(b) 7075 - T6

Fig. 1 Temperature dependence of strength and elongation values of 6061 and 7075 alloys

상기한 바와 같이 온간 하이드로포밍에서는 알루미늄 튜브를 사전에 열처리를 통해서 연화

시키지 않고 튜브를 금형에 장착 시킨 상태에서 튜브의 온도를 변화(증가)시켜 연성을 높인 다음에 성형을 수행한 후 냉각시키면 상온에서의 기계적 특성을 다시 유지할 수 있는 것이 가능하다는 점을 활용하는 기술이다.

2.2 실험장비 및 실험방법

Fig. 2는 본 실험에 사용된 튜브 온간 하이드로포밍 시험장치의 구조도를 나타내었다. 하이드로포밍에서 성형용 소재의 온도를 짧은 시간 안에 상승시키고 효과적으로 제어할 수 있으며 장치구조도 간단하게 할 수 있도록 고안되었다. 금형은 단순 확관 실험을 수행할 수 있도록 하였으며 사용합금의 연신율 범위를 고려 최대 확관율을 60%가 가능하도록 설계하였다. 소재온도제어는 300℃까지의 고온에서 사용이 가능한 오일을 매체로 하였다. 금형 안에 튜브를 설치한 후 오일을 채우고 튜브안에 설치되어 있는 가열장치를 이용 급속가열이 되도록 하였다. 사용된 가열장치의 용량으로 200℃까지 약 10분 이내에 도달할 수 있었다. 온도제어는 튜브 내부에 장착된 K-Type 열전대를 통해 측정 및 제어를 하도록 하였다.

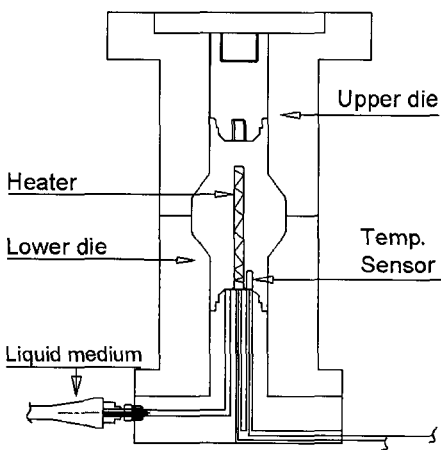


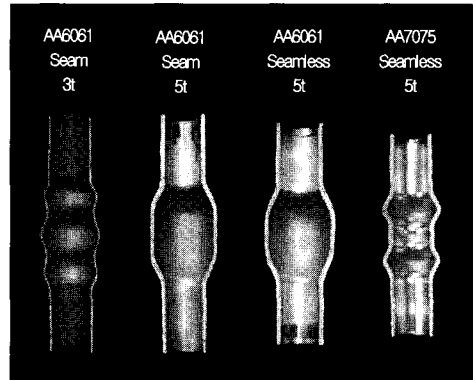
Fig. 2 The warm tube hydroforming system

3. 온간 하이드로포밍 성형성 분석결과 및 해석

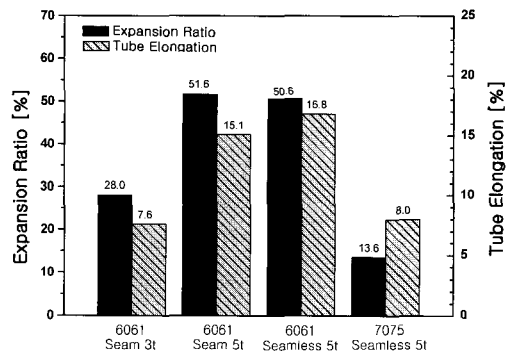
3.1 온간 하이드로포밍 성형성 분석 방법

본 실험에서의 알루미늄 합금의 온간하이드로포밍 성형성은 온도에 따른 형상차이, 확관율및연

신율, 두께분포 및 경도를 측정하여 비교하였다. 확관율과 연신율의 측정은 성형전과 성형후를 비교측정했다. 확관율은 지름을 중심으로 측정하였고 연신율은 길이를 측정하여 그 값을 구하였으며, 두께분포는 성형후의 소재를 대상으로 일정한 길이에 대해 위치를 선정하여 두께전용 마이크로미터로 측정했다.



(a)



(b)

Fig. 3 Maximum expansion ratio and tube elongation of aluminum tubes at room temperature

Fig. 3은 상온에서 하이드로포밍된 성형품에 대해서 소재종류에 따른 확관형상과 확관율 및 연신율을 비교하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 6061/5t/seamless가 확관성형성이 우수하였고 6061/3t, 7075/5t의 순으로 성형성이 떨어짐을 알 수 있었다. 두께 분포에 있어서는 Fig. 4와 같이 제조상태에 관계없이 6061 소재와 7075 소재에서 다른 분포를 보였다. 정상적인 확관이 이루어진 6061의 경우에는 확관부위의 두께가 감소한 반면 7075 합금의 경우는 증가한 경향을 나타냈다.

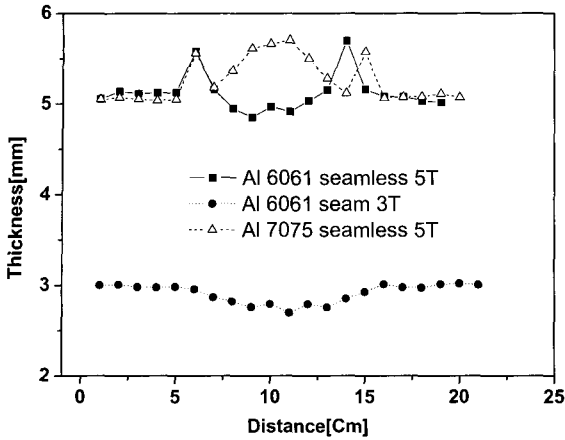


Fig. 4 Thickness distribution of aluminum tubes at room temperature

3.2 소재 및 온도에 따른 하이드로포밍 성형성

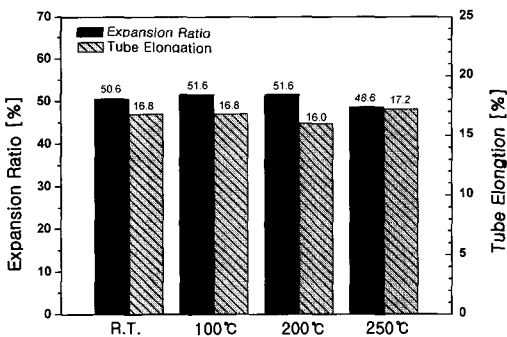
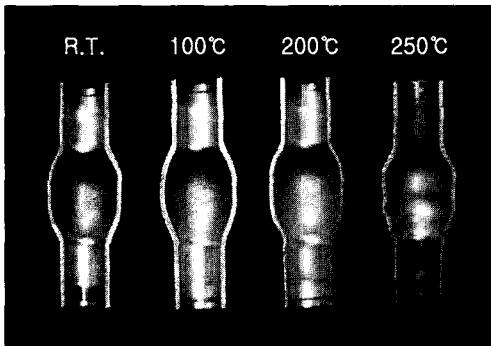


Fig. 5 Expansion ratio and elongation of 6061 tubes after hydroforming at various temperatures

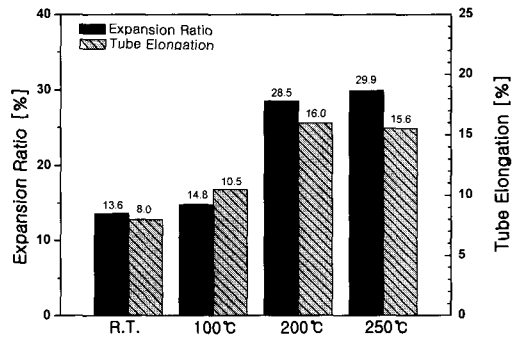
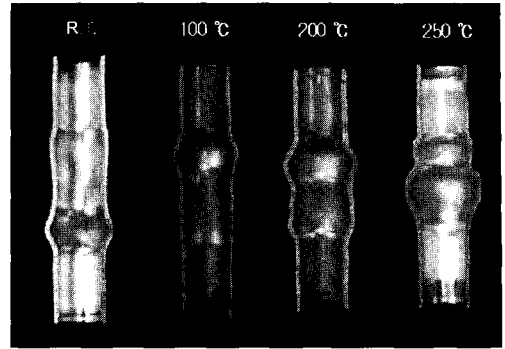


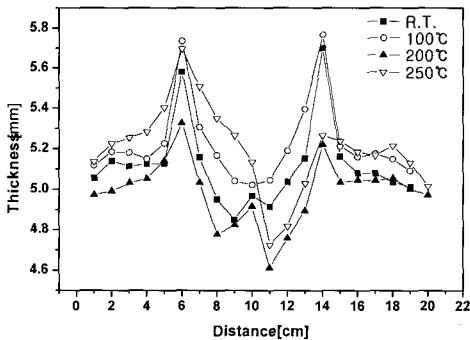
Fig. 6 Expansion ratio and elongation of 7075 tubes after hydroforming at various temperatures

6061과 7075 소재의 온도에 따른 하이드로포밍 성형성의 차이점은 Fig. 5와 Fig. 6의 결과에서 비교할 수 있다. 6061에서는 확관율과 연신율 데이터에서 볼 수 있듯이 온도에 따른 성형성의 변화가 거의 나타나지 않았다. 반면 7075 튜브의 경우 온도의 증가에 따라 성형성이 증가함을 알 수 있었다. 특히 200°C 이상에서는 100°C 이하에서 보다 2배정도의 성형성을 나타내었는데 이는 Fig. 1의 온도에 따른 인장특성의 경향과 잘 일치하는 결과라고 할 수 있다. 즉 7075의 경우 약 150°C 이상에서 강도와 연성이 온도에 따라 급격히 변화하는 양상과 일치하는 경향을 보여주고 있다.

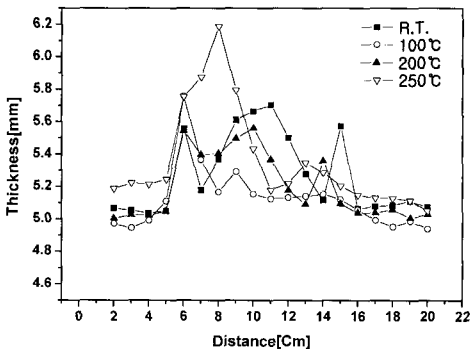
6061의 경우 상온에서 250°C까지의 실제 튜브를 이용한 하이드로포밍 실험에서 확관율과 연신율에 있어 뚜렷한 온도의 영향을 나타내지 않고 있다. 상대적으로 변화가 없거나 미소한 변화를 보였다. 이 결과도 Fig. 1의 온도에 따른 인장특성의 경향과 비교하여 설명할 수 있다. 200°C까지의 성형결과는 6061의 동적변형시효 특성의 영향으로 온도증가가 뚜렷한 연신율의 증가를 나타내

지 않는 것으로 설명할 수 있다.⁽⁸⁾ 반면 250℃에서의 튜브 확관을 및 연신율 값이 큰 변화를 보이지 않은 것은 이 온도범위에서 실험장치 온도 제어 정밀도에 한계에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 7에는 두 합금 튜브의 온도에 따른 두께 분포를 비교하였다. 앞 절에서 언급한 바와 같이 6061에서는 확관 부위에서 두께 감소가 일어난 반면 7075에서는 두께의 증가가 관찰되었다. 두 합금에서 모두 온도에 따른 두께변화에 있어서 뚜렷한 경향을 보일만한 결과를 발견하지 못하였다. Fig. 8의 7075 튜브의 길이방향의 경도 값 분포에서는 확관 중심 부위로 갈수록 경도값이 증가하는 양상을 보였다. 이는 부위별 변형량의 차이인 것으로 판단되며 즉 변형량의 차이는 강도 및 경도에 영향을 미치는 것과 관계가 있다. 경도 값에 의해서는 온도의 영향을 분석하기가 용이하지 않음을 알 수 있었다.



(a) 6061



(b) 7075

Fig. 7 Thickness distribution of 6061 and 7075 tubes at various temperatures

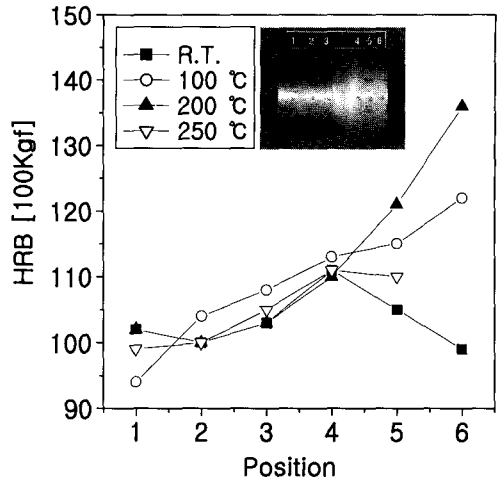


Fig. 8 Hardness values along the length of 7075 tubes at various temperatures

4. 결론

상온에서의 성형성이 크게 떨어지는 고강도 알루미늄 하이드로포밍의 문제점을 해결할 수 있는 방안으로 온간 성형 기술을 적용하여 그 가능성을 확인하고자 하였다. 단순형상 튜브 온간 하이드로포밍 성형이 가능한 시스템을 설계, 제작하여 장치상의 가능성을 검토하였고 6061 및 7075 튜브를 활용하여 상온에서 300℃ 까지 50℃ 간격의 성형 실험을 수행한 후 다양한 방법으로 성형성을 분석하였다.

(1) 오일매체를 이용한 튜브 가열 및 온도제어를 통해 튜브의 온간 하이드로포밍 성형실험이 효과적으로 이루어졌으며 60% 확관 및 상온-300℃ 온도범위에서 200℃/10분의 가열속도로 성형이 가능하였다.

(2) 튜브의 온도에 따른 확관을 및 연신율에서 6061은 상온에서 250℃ 까지 두드러진 변화를 보이지 않은 반면 7075는 100℃ 이상에서 온도에 따라 뚜렷이 증가하는 경향을 보여 두 합금의 온도에 따른 성형성의 차이가 있음이 나타났다. 6061 및 7075 합금의 상온-300℃ 온도범위에서의 성형성의 차이는 두 합금의 온도에 따른 동적변형시효 반응의 차이로 해석되었다.

(3) 본 실험에서 수행된 6061 및 7075 튜브를 이용한 고강도 알루미늄 온간 하이드로포밍의 다

양한 성형성 분석결과는 두 합금의 온도에 따른 정적 인장시험 특성과 많이 일치하는 양상을 보였다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 생산기반기술개발사업 과제 중 “고강도 Al 튜브의 온간 하이드로포밍을 이용한 자동차 차체부품 제조기술개발” 과제로 연구개발 수행 중이며 이에 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) W. Leitemann, K.-H. von Zengen and P. Dick, “Innovative Forming Technologies for Space Frames”, Proceedings of 6th ICTP, Vol.II, 1999, p. 1165.
- (2) S. Novotny and M. Geiger, “Process Design for Hydroforming of Lightweight Metal Sheets at Elevated Temperatures, J. of Materials Processing Technology, 3596 (2003), p. 1.
- (3) S. Y. Lee, Y. J. Jo, S. M. Sohn, M. Y. Lee and Y. S. Kim, “Characteristics of strain propile in hydroforming Al tubes” Proceedings of LiMAT 2001, 2001, p. 343.
- (4) M. Y. Lee, S. M. Sohn, C. Y. Kang, D. W. Suh and S. Y. Lee, “Effects of Pretreatment Conditions on Warm Hydroformability of 7075 Aluminum” Proc. of the Int. Conf. on AMPT 2003, 8-11 July 2003, Dublin, Ireland, Vol.1, p. 147.
- (5) 일본경금속학회, “알루미늄의 조직과 성질”, 1991.
- (6) P. G. McCormick, “The Portevin-Le Chatelier Effect in An Al-Mg-Si Alloy”, Acta Met., Vol.19, May 1971, p. 463.
- (7) P. R. Cetin, A. S. Gulec and R. E. Reed-Hill, “Serrated Flow in Aluminum 6061 Alloys”, Met. Transactions, Vol.4, Feb. 1973, p. 513.
- (8) 이상용, 이정환, “Al-Mg 합금의 고온소성 변형 특성에 미치는 동적 변형시효의 영향”, 한국소성가공학회지, 제5권 4호, 1996, p. 327.