

알루미늄 튜브의 열처리 조건에 따른 액압 성형성 연구

이문용* · 손성만* · 조완제** · 이상용***

Effects of Heat Treatment on Hydroformability of Aluminum Tubes

M. Y. Lee, S. M. Sohn, Y. J. Jo and S. Y. Lee

Abstract

Recently social demands of fuel economy and environmental regulation require the development of light materials and new manufacturing technologies. In this point, aluminum tube hydroforming, which is satisfied with good strength-to-weight ratio and recyclability, is new innovative concept. but, up to now the level of that is relatively low. In this paper, we studied formability of different aluminum tubes in different heat treatments under internal pressure and axial feeding, and mechanical properties of aluminum tubes before and after hydroforming.

Key Words : Hydroforming, Aluminum Tube, Heat Treatment, Hydroformability, Mechanical Property

1. 서 론

최근 전세계적으로 자동차 산업분야에서는 안전성 향상과 더불어 연비향상, 공해물질 배출 저감 등에 대한 관심이 고조되고 있으며, 국내 자동차 제작사에서도 자동차의 고강도 및 경량화를 위한 신기술 개발에 주력하고 있다. 이러한 예로 Tailor Welded Blank와 액압성형(Hydroforming)에 대한 연구가 활발히 진행 중이거나 양산에 적용단계에 있으며, 또한 고장력 강판과 알루미늄 합금 등이 자동차 외판, 샤시와 프레임 등에 적용되고 있다.⁽¹⁾

국내에서의 액압성형 기술을 이용한 자동차부품 개발은 대부분 스틸소재로 제한되어 진행 중이다. 하지만 독

일, 미국, 일본 등의 선진 자동차 업체에서는 알루미늄 합금에 대하여 액압성형 기술을 이미 적용 중이거나 개발단계에 있는 실정이다.^(2~4)

따라서, 본 연구에서는 차량의 고강도 및 경량화를 위한 신기술로서 알루미늄 A6063, A2024, A7075 재질의 무접점 관재(Seamless tube)의 성형전 열처리에 따른 액압성형성(Hydro-formability)과 공정별 기계적 특성에 대하여 파악하고자 하였다.

2. 알루미늄 튜브의 열처리 특성

압출공정에 의해 생산된 A2024, A6063, A7075 재질

* (주)성우하이텍 기술연구소

** 경북대학교 기계공학부

*** 한국기계연구원 재료공정연구부

(Table 1)의 직경50mm, 두께5mm 무접점 관재에서 인장 시편을 각각 채취하였다. 성형전 열처리는 연신율을 향상시키기 위하여 풀림(Full annealing: O) 열처리와 성형 후 열처리 공정(T6)을 생략하기 위해서 T4(Solution treatment+natural aging)열처리를 하였고, 자연시효(natural aging)는 상온에서 일주일 동안 유지하였다 (Table 2).⁽⁵⁾

Table 1 Composition of aluminum tubes

Material	Composition [%]						
	Al	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
A2024	93.5		4.4	0.6	1.5		
A7075	90.0		1.6		2.5	0.23	5.6
A6063	98.9	0.4			0.7		

Table 2 Heat treatment conditions of aluminum tubes before hydroforming

Material	Treatment	Temperature [°C]	Holding Time [hr]	Cooling
A2024	annealing	420	3	A.C*
	T4	495	2	W.C**
A6063	annealing	420	3	A.C*
	T4	512	2	W.C**
A7075	annealing	420	3	A.C*
	T4	465	2	W.C**

주) *: Furnace Cooling to 260°C → Air Cooling
 **: Water Quenching → natural aging (for a week)

성형전 열처리(Table 2)된 시편의 인장시험 결과를 Table 3에 나타내었다. A6063-O 시편의 연신율이 39.3%, A7075-O 시편이 15.4%로 가장 큰 차이가 났다. 인장강도는 A7075-T4가 547MPa로서 인장강도가 가장 높게 나타났다. 한편, 가공경화 지수(work-hardening exponent, n)와 소성이방성 계수(plastic anisotropy parameter, r)에 대한 액압성형성을 파악하기 위하여 각 시편에 대한 n, r 값을 구하였다.^(6, 7)

Table 3 Mechanical properties of heat treated specimen for different aluminum alloys.

Material	Treatment	TS [MPa]	El. [%]	n	r
A2024	annealing	210	25.1	0.31	0.64
	T4	422	19.7	0.17	0.69
A6063	annealing	96	38.3	0.31	0.46
	T4	177	31.3	0.18	0.36
A7075	annealing	324	15.4	0.20	0.43
	T4	547	19.1	0.13	0.40

3. 알루미늄 튜브의 액압성형성

3.1 실험방법

Fig 1은 80ton급 수직형 하이드로포밍 금형의 개략도로서 최대 내압은 150MPa이며, 원형단면의 확관부 직경은 80mm로서 최대 60%확관율을 얻을 수 있다. 실험과정은 원형단면의 금형 내에 튜브를 위치하고 Upper sealing punch가 아래로 하향하면서 튜브를 금형내로 압축시키며, 동시에 튜브내부로 유체를 고압으로 가압하여 금형과 밀착되어 확관성형된다.

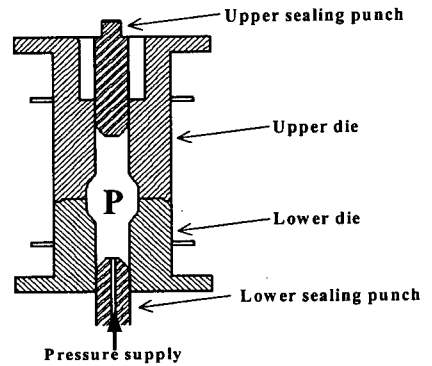


Fig. 1 Schematic diagram of vertical type hydroforming equipment

3.2 실험결과

성형전 열처리(Table 2)된 튜브의 단순확관(free bulge) 실험을 통하여 초기내압을 설정한 후 축압축량-내압에 대한 성형실험을 하였으며, Fig. 2는 각 시편에 대한 대표적인 내압-축압축량 선도를 나타낸 것이다. 성형시편의 형상은 Fig. 3에서 보여주고 있다.

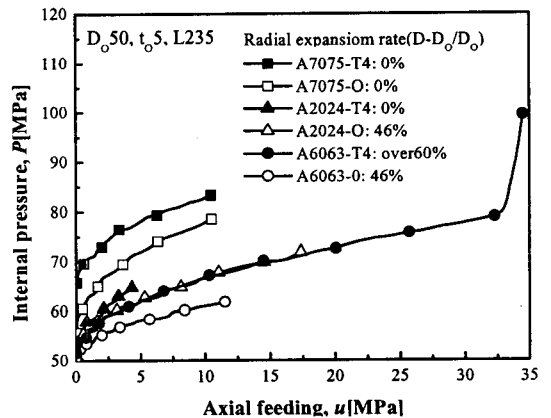


Fig. 2 Feeding-pressure curve for aluminum tubes H/F

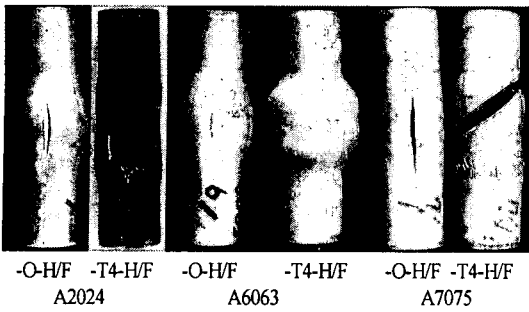


Fig. 3 Tube shapes bulged by tube hydroforming

A2024-O는 초기내압(P_i)을 50MPa, $\Delta P/\Delta u=1.26$ 일 때 46%, A6063-O는 $P_i=50$ MPa, $\Delta P/\Delta u=1$ 일 때 46%의 확관율을 최종 파단(Bursting)되었으며, A6063-T4는 $P_i=50$ MPa, $\Delta P/\Delta u=0.9$ 일 때 파단되지 않고 금형에 완전히 밀착되는 교정(Calibration)단계까지 성형되어 60% 이상의 확관율을 나타내었다.(Fig. 2). 그러나 A2024-T4, A7075-O, A7075-T4 튜브는 초기내압과 축압축량을 변화시켜 여러 조건에서 성형하였으나 Fig 3에 나타낸 것과 같이 초기에 파단(Bursting) 또는 좌굴(Buckling)되었다. 즉, 저연신율의 소재는 내압-축압축량의 관계에 민감하기 때문에 축압축량을 증가시킬 경우 좌굴에 의하여 파괴되었고, 내압을 증가시킬 경우 거의 성형되지 않고 파단되는 결과를 나타내었다. 각 시편에 대한 정확한 성형한계를 평가하기 위해서는 초기내압과 성형과정에서의 내압-축압축량에 대한 추가실험이 필요하다고 생각되며, 본 실험으로서 저연신율 소재(A2024-T4, A7075-O, A7075-T4)에 대한 액압성형은 성형경로의 제어가 매우 어렵고 액압성형성이 낮은 것으로 판단된다.

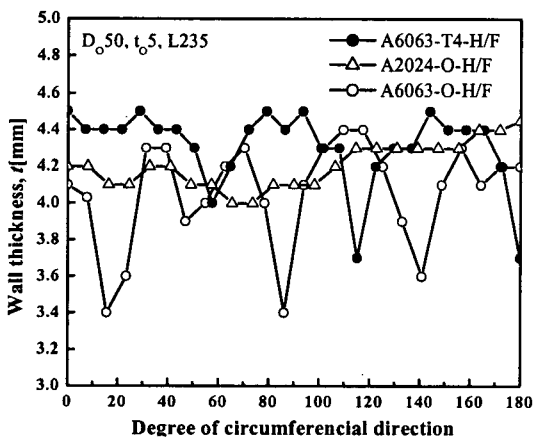


Fig. 4 Wall thickness distributions along the circumferential direction

Fig. 3은 액압성형결과(Fig. 2)의 대표적인 시편을 나타내고 있으며, 비교적 높은 성형성을 나타낸 A2024-O, A6063-O, A6063-T4 튜브의 원주방향 두께분포를 비교하였다(Fig. 4). 각 시편의 원관(As-received) 두께(t_0)는 5mm이며 A6063-O의 경우 두께편차가 가장 크고, A6063-T4, A2024-O 순으로 성형품의 두께편차를 나타냈다. 즉, 두께편차가 큰 성형품에서 국부변형(local strain)이 일어난 부분의 결합 작용가능성에 대한 고려가 필요하다. 한편, 성형전 열처리된 시편의 인장시험 결과(Table 3)에 나타낸 것과 같이 A2024-O의 인장강도와 연신율이 A6063-O에 비하여 높은값을 나타냈지만, 동일한 확관율을 얻을 수 있었던 것은 상대적으로 n, r값이 큰 것에 기인하고, 또한 성형품의 두께편차가 작은 것도 이런 영향에 따른 것으로 판단된다.

4. 액압성형후 알루미늄 튜브의 기계적 성질

4.1 성형후 열처리 조건

원활히 액압성형된 성형품의 기계적 특성을 파악하기 위하여 인장시편을 채취하고, 또한 강도를 증가시키기 위하여 성형 후 열처리(Fig. 5)후 인장시편을 채취하였다. 각 시편의 성형 후 열처리 조건은 A6063-O(T4)-H/F는 520°C에서 A2024-O-H/F는 495°C에서 2hr유지 후 상온의 냉각수에서 급냉하여 용체화 처리(Solution treatment)하고, 다시 A6063-O(T4)-H/F는 185°C에서 9hr, A2024-O-H/F는 177°C에서 6hr 유지 후 공냉하여 인공시효(Artificial aging)시켰다.⁽⁵⁾

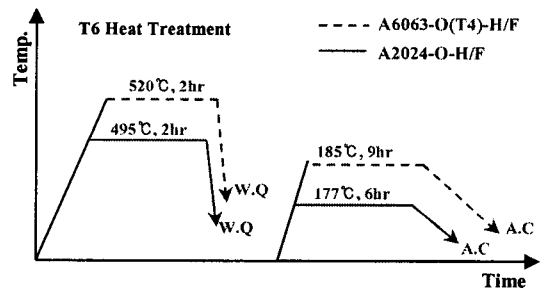


Fig. 5 Heat treatment conditions of aluminum tubes after hydroforming

4.2 인장시험 결과

성형 전 원관, 성형튜브 및 성형 후 열처리된 튜브에 대한 인장시험 결과를 Fig. 6(A2024)과 Fig. 7(A6063)에 비교하였다.

A2024-O의 인장강도는 성형전에 비하여 액압성형 후 (H/F) 27.7%, 성형후 열처리(T6)된 것은 126.8%의 큰 폭으로 증가하였다. 한편 연신율은 성형후(H/F) 26% 정도 감소하였으나 성형후 열처리(T6)된 것은 36%의 연신율로 높게 나타났다.

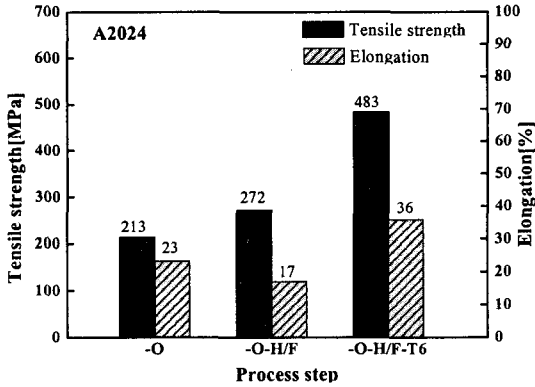


Fig. 6 Mechanical properties of A2024 tube for processes

A6063-O의 인장강도는 성형전에 비하여 액압성형 후 (H/F) 54.6%, 성형후 열처리(T6)된 것은 128.9% 정도로 큰 폭으로 증가하였다. 한편 연신율은 성형후(H/F) 50% 정도 감소하였으나, 성형후 열처리(T6)된 것은 51%로 매우 높게 나타났으며, 추가실험을 통한 고찰이 필요하다고 생각된다. A6063-T4의 인장강도는 성형전에 비하여 액압성형 후(H/F) 44%증가하였고, 연신율은 24%로써 양호한 결과를 나타내었다.

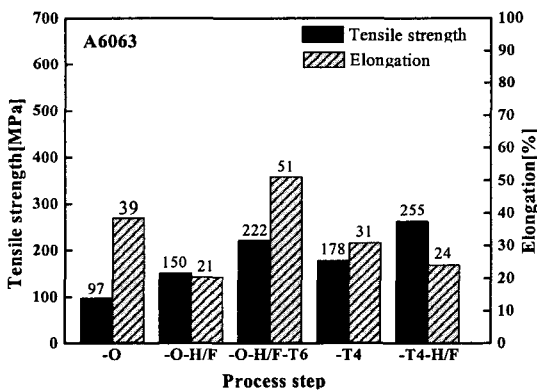


Fig. 7 Mechanical properties of A6063 tube for processes

인장시험결과, 성형후 열처리(-H/F-T6)를 통하여 A2024-O는 483MPa, 36%, A6063-O는 222MPa, 51%의 인장강도와 연신율을 얻을 수 있었다. 그러나, A6063-

T4는 성형후 열처리(T6) 공정을 거치지 않고 255MPa, 24%의 인장강도와 연신율을 나타내었다.

5. 결론

Seamless 알루미늄 튜브의 성형전·후 열처리에 따른 액압성형성과 기계적 성질에 대한 실험의 결론은 다음과 같다.

(1) 액압성형성이 가장 높은 소재는 A6063-T4로서 60%이상의 확관율을 얻을 수 있었으며, 또한 공정단축, 성형품의 우수한 기계적 성질 및 균일한 두께분포 등의 결과로서 액압성형에 적합한 소재이다.

(2) 기계적 성질이 가장 우수한 소재는 A2024-O로서 인장강도 483MPa, 연신을 36%를 나타냈다. 그러나 성형후 열처리 공정이 추가되는 단점이 있다.

(3) A2024-T4, A7075-O, A7075-T4 소재는 경한 (Brittle) 소재로서 성형공정을 제어하기 어렵고, 액압성형성이 매우 낮은 것으로 판단된다.

참고 문헌

- (1) 손성만, 이문용, 이상용, 2000, "자동차용 범퍼레일의 하이드로포밍 기술 연구", 한국소성가공학회지, 제9권 제6호, pp. 561~566
- (2) Christian Kunz, 1997, "Aluminum Light Weight Components made by Internal High Pressure Forming", The International Conference NNS'97, pp. 121~128
- (3) Muammer Koc, Taylan Altan, 2001, "An overall review of tube hydroforming technology", J. Material Processing Technolog, Vol. 108, p. 384
- (4) S. Fuchizawa, 1995, "Deformations of Aluminum Alloy Tubes under Forming of T-Fitting", Journal of the JSTP, Vol. 36 no.408, p. 80
- (5) ASM, 1973, "Heat treatment", Metal Handbook ninth edition, vol. 4, p. 675
- (6) S. Fuchizawa, 1987, "Influence of Plastic Anisotropy on Deformation of Thin-Walled Tubes in bulge Forming", Advanced Technology of Plasticity, vol. 2, p. 727
- (7) S. Fuchizawa, 1984, "Influence of Strain-Hardening Exponent on the Deformation of Thin-Walled Tube in Finite Length Subjected to Hydrostatic Internal Pressure", Advanced Technology of Plasticity, vol. 1, p. 297