

알루미늄 관재의 액압성형성에 미치는 열처리의 영향

이문용* · 강창룡**

*주성우하이텍 기술연구소, **부경대학교 신소재공학부

Effect of Heat Treatments on the Hydroformability of Aluminum Tubes

M. Y. Lee*, C. Y. Kang**

*Sungwoo Hitech Technical Institute, Busan 619-961, Korea

**Metallurgical Engineering, Pukyong University, Busan 608-737, Korea

Abstract Because of the social needs for energy saving and the rigid environmental regulation, the development of light materials and new economical manufacturing technologies have been actively investigated. Recently, the hydroforming of high strength aluminum tube has attracted great interest due to its good strength-to-weight ratio, which could play an important role in lightweighting of automobile. However, the limited formability of high strength aluminum alloys is considered to hinder the active application of the hydroforming process. In this paper, the hydroformability of aluminum tubes with different heat treatments was investigated as the basic research of the hydroforming process for the high strength aluminum tubes.

(Received 9 March 2004; accepted 12 May 2004)

Key Words: Hydroforming, Hydroformability, Aluminum tube, Heat treatment, Mechanical properties

1. 서 론

최근 자동차 산업분야에서는 안전성 향상과 더불어 연비향상, 공해물질 배출 저감 등에 대한 관심이 전 세계적으로 고조되고 있으며, 국내 자동차 제작사에서 자동차의 고강도 및 경량화를 위한 신기술 개발에 주력하고 있다. Tailor welded blank와 액압성형(hydroforming)과 같은 일체화 성형에 대한 연구가 현재 활발히 진행 중이거나 양산 적용단계에 있으며, 또한 고장력 강판과 알루미늄 합금 등이 자동차 외판 및 샤시와 프레임 등에 적용되고 있다¹⁾.

국내에서 액압성형 기술을 이용한 자동차부품의 개발은 대부분 성형성이 우수한 철계 소재를 적용하여 이루어지고 있다. 하지만 독일, 미국 등의 선진 자동차 업체에서는 알루미늄 합금에 대한 액압성형 기술을 자동차 샤시 프레임 및 배기계통 등에 적용을 검토하고 있으며 일부 부품은 이미 적용되고 있는 것으로 알려져 있다^{2~4)}.

철계 소재의 액압성형에 비해 알루미늄 합금의 액압성형이 어려운 이유는 알루미늄 합금의 경우 요구 강도 수준에서의 성형성이 기본적으로 철계 소재에

비해 낮기 때문이다. 알루미늄 소재는 종류, 액압성형 중의 가공도와 성형 전, 후의 열처리에 따라 성형 특성 및 기계적 성질이 민감하게 영향을 받기 때문에 소재 종류 및 열처리 상태에 따른 액압성형성의 체계적인 평가가 필수적이다. 또한 현재 자동차 차체구조가 스페이스 프레임(space frame)화 하는 추세에서 필요 강도 수준을 만족하기 위하여 알루미늄의 경우 두께 증가가 따르게 되는데 이와 같은 두께 증가를 최소화하기 위해 소재 측면에서의 고내압 성형 특성 및 기계적 성질에 대한 체계적인 데이터의 확보는 필수적이다.

그러나 아직까지 알루미늄의 액압성형 기술의 적용은 철계 소재에 비해 아직 초기단계로 그 적용을 위한 기초적인 연구가 필요한 실정이지만, 국내 시장의 경우 액압성형 기술의 초기 도입단계로 그 적용이 철계 소재에 국한되어 아직 알루미늄 액압성형에 관한 본격적인 연구결과 및 데이터는 절대적으로 부족한 실정이다. 선진국에서도 철계 소재의 액압성형에 대한 기초데이터는 충분히 존재하지만 알루미늄 소재의 차체 부품 적용을 위한 액압성형 기술에 대해서는 기초 데이터가 매우 적거나 공개가 극히 제

한되어 있어 선진국과의 기술격차 해소와 국제 경쟁력을 확보하기 위해서는 철계 소재의 액압성형 기술과 함께 체계적인 알루미늄 합금의 액압성형 기술 개발의 수행이 절실히 요구된다.

따라서 본 연구에서는 알루미늄 소재의 액압성형 공정 적용을 위한 기초 연구로서 열처리용 알루미늄 합금(wrought aluminum alloy) 인 A2024, A6063, 그리고 A7075 관재를 이용하여 액압성형 전의 조건별 열처리가 액압성형성에 미치는 영향을 조사하였다. 액압성형성은 최대 60%의 확관율을 측정할 수 있도록 설계된 별지 성형기를 이용하여 평가하였으며 또한 액압성형 전, 후의 기계적 특성을 평가하기 위하여 인장시험을 실시하였다.

2. 실험방법

2.1 알루미늄 관재의 열처리

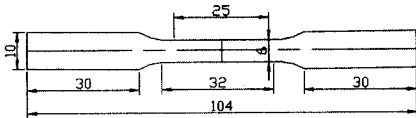


Fig. 1. Schematic of ASTM E8 tensile specimen.

Table 1. Chemical composition of aluminum tubes (wt. %)

Materials	Composition						
	Al	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
A2024	bal.		4.4	0.6	1.5		
A7075	bal.		1.6		2.5	0.23	5.6
A6063	bal.	0.4			0.7		

압출공정에 의해 생산된 A2024, A6063, A7075 소재의 화학적 조성을 Table 1에 나타내었다. 실험에 사용된 관재는 직경50 mm, 두께5 mm, 길이 235 mm의 무접점 관재(seamless tube)를 사용하였고, 방전가공 및 기계적 가공에 의해 인장시편을 각각 관재에서 채취하였다. Fig. 1에 인장시편 채취 위치와 ASTM E8형 인장시편의 규격을 나타냈다.

압출공정 후의 소재를 Table 2와 같이 각 소재별로 풀림(full annealing: O)과 T4처리를 하였고, 자연시효는 상온에서 일주일 동안 유지하였다⁵⁾.

2.2 알루미늄 관재의 액압성형

Fig. 2은 80ton급 수직형 액압성형 금형의 개략도로서 최대 내압은 150MPa이며, 원형단면형상의 확관부 직경은 80 mm로 최대 60% 확관율을 얻을 수 있다. 실험과정은 금형 내에 관재를 장착하고 상

Fig. 2. Schematic diagram of vertical type hydroforming equipment.

Table 2. Heat treatment conditions of aluminum tubes

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

* Furnace cooling to 260°C → Air cooling

** Water quenching → Natural aging for a week

부 실링펀치(upper sealing punch)가 아래로 전진하면서 관재를 금형 내부로 압축시키고, 동시에 하부 실링펀치를 관통하고 있는 압력공급 라인을 통하여 관재 내부에 유체를 고압으로 가압하여 금형과 밀착시켜 원하는 형상으로 성형한다.

2.3 성형 후 열처리

원활히 성형된 A2024-O-H/F, A6063-O-H/F, A6063-T4-H/F 성형품의 기계적 특성을 평가하기 위하여 각각의 액압성형품에 대하여 인장시험을 실시하고, 또한 강도를 향상시키기 위해 액압성형 후 열처리하여 인장시험을 실시하였다. 인장시험시 확관을 46%에서 파단이 발생한 액압성형된 A2024-O-H/F와 A6063-O-H/F 시편에 대해서는 파단부 반대편에서 인장시험편을 채취하여 인장시험을 실시하였다.

각 시편의 성형 후 열처리 사이클을 Fig. 3에 나타냈다. 액압성형 후 열처리 조건은 A6063-O-H/F와 A6063-T4-H/F는 520°C에서 A2024-O-H/F는 495°C에서 2hr 유지 후 상온의 냉각수에서 급냉하여 용체화 처리(solution treatment)하였다. 용체화처리 후 A6063-O-H/F와 A6063-T4-H/F는 185°C에서 9hr, A2024-O-H/F는 177°C에서 6hr 유지 후 공냉하여 인공시효(artificial aging) 하였다⁵⁾.

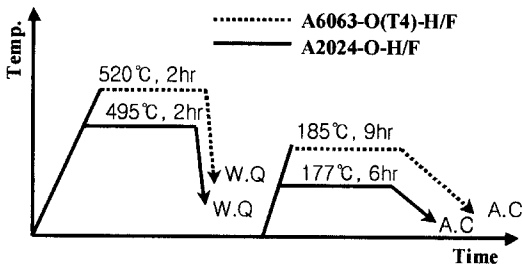


Fig. 3. Heat treatment conditions of aluminum tubes after hydroforming

3. 실험결과

3.1 알루미늄 관재의 액압성형성

일반적으로 액압성형 공정에 있어서는 내부압력과 축압축량을 조절함으로써 국부변형에 의한 파열이 방지되어 성형이 가능하게 된다. 본 연구에서는 액압성형의 초기 내부 압력을 설정하기 위하여 성형 전

열처리 공정을 거친 관재에 대하여 축압축량(axial feeding)이 없는 조건에서 성형하는 단순 확관(free bulge) 실험을 실시하였다. 축압축량이 없는 조건에서 소재 자체의 연신에 의한 확관 한계까지 내부압력을 상승시켜 소재가 파열되지 않는 한계 내부압력을 액압성형을 위한 초기내압으로 설정하고, 축압축량과 내압에 대한 액압성형성을 평가하였다. Fig. 4(a)는 각 재질에 대한 대표적인 성형과정의 내압-축압축량 관계를 나타낸 것이며, Fig. 4(b)는 이러한 성형경로에 의해 성형된 성형품 형상을 보여주고 있다.

Fig. 4(b)에 나타낸 각 시편은 최대 확관율을 파악하기 위하여 파단될 때까지 성형한 것이며, 각 시편의 성형경로에 대한 성형 특성은 다음과 같다. A2024-O와 A6063-O는 46%의 확관율에서 파단되었고, A6063-T4는 약 80MPa까지 파단되지 않고 성형된 후 금형에 완전히 밀착되는 교정 단계까지

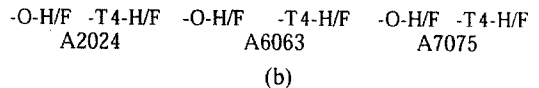
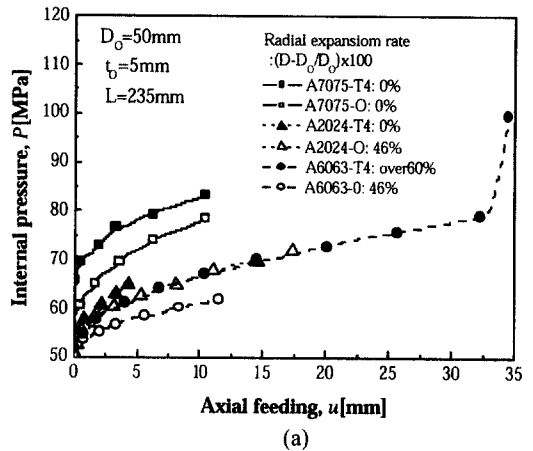


Fig. 4. Results for different aluminum tubes on hydroforming: (a) relationships between internal pressure and axial feeding, (b) shapes of crack formation after hydroforming in each heat treated specimen.

성형되어 60% 이상의 확관이 가능하였다. 그러나, A2024-T4, A7075-O, A7075-T4 관재는 내압을 증가함에 따라 국부변형이 발생하여 파단 되었으며, 또한 국부변형을 억제하기 위하여 금형의 확관부로 재료를 축방향 압축시켰을 경우에는 축 하중에 의해 파괴되었다. 알루미늄 소재의 액압성형을 위한 성형 변수(내압-축압축량)의 설정이 이와 같이 어려운 것은 일반적으로 알루미늄 소재의 특성상 철계 소재에 비하여 성형성이 낮으며, 또한 본 실험에서 사용된 A2024-T4, A7075-O, A7075-T4 재질의 연신율이 매우 낮기 때문에 판단된다.

본 실험에서는 비교적 높은 성형성을 나타낸 A2024-O-H/F, A6063-O-H/F, A6063-T4-H/F 성형품의 원주방향 두께분포를 비교하여 성형품의 결합으로 작용할 수 있는 국부변형에 대하여 파악하고자 하였다. Fig. 5에 각 조건 별 액압성형품의 두께 분포를 나타내었으며 A6063-O-H/F와 A2024-O-H/F의 두께 편차량은 각각 최대 47%와 20%로 나타났다. A6063-T4는 60%의 확관율을 나타낸 것을 고려할 때 두께 편차가 크지 않았으며 비교적 균일한 변형이 이루어졌음을 알 수 있다.

시편에 대한 인장시험 결과를 각각 Table 3, Fig. 6 및 Fig. 7에 각 재질 별로 나타내었다. 액압성형

Table 3. Mechanical properties obtained from the each aluminum alloys according to heat treatment before hydroforming

Materials	Heat treatments	YS [MPa]	TS [MPa]	El. [%]
A2024	annealing(O)	84	210	25.1
	T4	246	422	19.7
A6063	annealing(O)	36	96	38.3
	T4	78	177	31.3
A7075	annealing(O)	173	324	15.4
	T4	375	547	19.1

Fig. 6. Mechanical properties of A2024 tube according to each process step ('O' condition, hydroformed condition of '2024-O' and 'T6' treated condition after hydroforming 2024-O).

Fig. 5. Wall thickness distributions along the circumferential direction.

3.2 액압성형에 의한 기계적 성질의 변화

각 공정별 기계적 특성을 파악하기 위하여 액압성형 전의 열처리(O, T4)만 된 관재와 액압성형(H/F)된 성형품 및 액압성형 후 열처리(T6) 공정을 거친

Fig. 7. Mechanical properties of A6063 tube according to each process step ('O' condition, hydroformed condition of 6063-O, 'T6' treated condition after hydroforming 6063-O, 'T4' condition and hydroformed condition of 6063-T4).

전의 열처리(O, T4) 만 한 소재의 경우 A6063-O의 연신율이 38.3%, A7075-O 시편이 15.4%로 가장 큰 차이가 있었으며, 인장강도는 A7075-T4시편이 547MPa로써 가장 높게 나타났다.

액압성형 후의 특성 변화를 보면, A2024-O는 성형 전에 비하여 액압성형 후 인장강도가 약 28% 증가되었고, 또한 성형 후 열처리를 통하여 인장강도 483MPa, 연신율 36%의 우수한 기계적 특성을 나타내었다.

A6063-O 관재의 경우 액압성형 후에 인장강도는 55% 향상되고 연신율은 50% 정도 감소하였으며, 성형 후 열처리를 통하여 인장강도 222MPa, 연신율 51%의 기계적 성질을 나타내었다. 그러나 일반적으로 알려진 A6063-T6의 인장강도는 240MPa, 연신율은 12%로써 연신율에서 위의 결과와 큰 차이를 나타내고 있다. 따라서 성형 후 열처리 조건 및 인장시험 과정 등에 대한 확인과 추가실험을 통한 고찰이 필요하다고 생각된다. 액압성형 후 인장시험 결과를 요약하면, 성형 후 열처리를 통하여 A2024-O는 인장강도 483MPa과 연신율 36%, A6063-O는 222MPa, 51%의 인장강도와 연신율을 얻을 수 있었다. 그러나, A6063-T4는 성형 후 열처리(T6) 공정을 거치지 않은 상태에서도 255MPa, 24%의 인장강도와 연신율을 나타내었다.

4. 결 론

무접점 알루미늄 관재(seamless aluminum tube)의 성형 전 열처리에 따른 액압성형성과 성형 전·후의 기계적 성질에 대한 연구 결론은 다음과 같다.

(1) 시험소재 중 액압성형성이 가장 우수한 소재는 A6063-T4로서 파열되지 않은 상태에서 60%의 확률

을 얻을 수 있었다. 또한 성형 후 열처리공정을 생략하고도 우수한 기계적 특성과 균일한 두께 분포를 나타내어 액압성형성이 우수한 것으로 나타났다.

(2) 성형 후 T6 열처리에 의해서 기계적 특성이 가장 우수하게 나타난 소재는 A2024-O로서 하이드로포밍 시 46%의 높은 확률율을 가질 뿐만 아니라 성형 후 T6 열처리를 추가함으로써 인장강도를 483MPa, 연신율을 36%까지 향상시킬 수 있었다.

(3) A6063-O는 액압성형 후 T6 열처리를 통하여 222MPa, 51%의 인장강도와 연신율을 얻을 수 있었으나 A6063-T4는 성형 후 열처리(T6) 공정을 거치지 않고 255MPa, 24%의 인장강도와 연신율을 나타내었다.

(4) A2024-T4, A7075-O, A7075-T4 소재는 내압, 축압축량과 같은 성형변수를 제어하여도 확관 성형이 불가능하였으며 그 파단면은 취성파괴 단면의 양상을 나타내어 액압성형성이 매우 낮은 것으로 평가되었다.

참고문헌

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.