

## 알루미늄 튜브 하이드로포밍의 성형한계

조완제\*·이상영\*·김영석\*\*·이상용\*\*\*

### Forming limits of aluminum tubes in tube hydroforming

Y.J. Jo, S.Y. Lee, Y.S. Kim and S.Y. Lee

#### Abstract

Recently social demands of fuel economy and environmental regulations require the development of light materials and new manufacturing technologies. In this point, the aluminum tube hydroforming process which is satisfied with good strength-to-weight ratio and recyclability is innovative concept. However the level of the aluminum tube hydroforming technology is low in comparison with that of steel tube hydroforming. In this paper, the hydroformability of aluminum tubes in different heat treatments is presented. Theoretical results for forming limits of the wrinkling and bursting are compared with experimental results of aluminum tubes.

**Key Words** : Aluminum tube, Hydroforming, Forming limit, Bursting, Wrinkling

#### 1. 서론

최근 전세계적으로 자동차 산업분야에서는 안전성 향상과 더불어 연비향상, 공해물질 배출 저감 등에 대한 관심이 고조되면서 고장력 강판, 알루미늄 합금, 마그네슘 등의 소재에 대한 기술과 테일러 웰드 블랭크(tailor welded blank), 하이드로포밍(hydroforming) 등의 신생산 공법에 대한 연구가 활발하게 진행 되고 있다.

특히 하이드로포밍은 기존의 판재 프레스 가공방법에 비해서 복잡한 3차원 단면형상을 한번의 성형으로 가공할 수 있어 생산 공정수를 줄일 수 있고, 넥 발생이 없는 균일한 변형경화를 통해 구조강도 및 강성이 높은 부품을 생산할 수 있는 장점이 있어 활발한 연구가 진행되고 있으며, 또한 알루미늄 합금은 스틸 소재에 비하여

비강도와 재활용성이 우수하기 때문에 차량의 경량화와 환경문제에 대한 사회적 요구에 크게 기인할 수 있기 때문에 알루미늄 튜브에 대한 하이드로포밍 기술이 선진국에서는 이미 프레임, 흡배기 계통 등에 적용<sup>(1,2)</sup> 되고 있으며 국내에서도 저강도 알루미늄 합금 범퍼레일에 대하여 연구되었다<sup>(3,4)</sup>.

알루미늄 합금은 스틸 소재에 비하여 성형이 까다로우며, 이러한 단점을 보완하기 위하여 다양한 열처리가 효과적이며 이에 대한 하이드로포밍 연구<sup>(5,6)</sup>와 성형의 매개체인 튜브 내부의 액체를 고온으로 가열하여 성형하는 온간 하이드로포밍에 대하여 연구된 바가 있다<sup>(7)</sup>.

튜브 하이드로포밍 공정은 파단(bursting)이나 주름(wrinkling), 좌굴(buckling)등과 같은 결함이 발생하게 되는데, 이러한 결함을 억제하고 성형성을 높이기 위해

\* 경북대학교 기계공학부 대학원

\*\* 경북대학교 기계공학부

\*\*\* 한국기계연구원 공정연구부

서는 성형내압(internal pressure)과 축압축량(axial feeding)의 적절한 균형이 요구되며, 이에 대한 연구<sup>(8-11)</sup>와 알루미늄 튜브의 성형한계에 대하여 Hill의 2차 항복조건식을 이용한 연구<sup>(12)</sup>가 있다.

본 연구에서는 압출공정에 의해 생산된 A6063, A2024, A7075 seamless 튜브의 열처리에 따른 하이드로포밍 특성을 파악하고, Hosford의 항복조건식을 이용한 주름(wrinkling)과 파단(bursting) 등의 이론적 성형한계에 대하여 실험결과와 비교하고자 한다.

## 2. 이론

### 2.1 기초 관계식

내압에 의한 원형 튜브의 확관가공에서는 원주방향 응력  $\sigma_\theta$ , 축방향 응력  $\sigma_l$ , 두께방향 응력  $\sigma_r$ 가 작용한다. 얇은 튜브의 경우  $\sigma_r$ 는 매우 작아 무시할 수 있고 ( $\sigma_r=0$ ), Hosford의 이방성 항복조건식, 재료의 유동법칙을 이용하고 응력-변형률 관계는 식 (1)을 따른다고 가정하면 내압( $p$ )과 변형률 성분의 관계식 그리고 원주방향 변형률은 식 (2)와 (3)으로 각각 표현된다<sup>(10)</sup>.

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \quad (1)$$

$$p = \frac{t}{r} K \bar{\epsilon}^{n-\frac{1}{a-1}} \left( \frac{1+R}{1-R|\alpha-1|^{a-1}} \epsilon_\theta \right)^{\frac{1}{a-1}} \quad (2)$$

$$\epsilon_\theta = \frac{1-R}{(1+R)^{\frac{1}{a}}} \frac{|\alpha-1|^{a-1}}{(1+|\alpha|^a + R|\alpha-1|^a)^{\frac{a-1}{a}}} \bar{\epsilon} \quad (3)$$

여기서 성형과정의 튜브 두께( $t$ )와 반경( $r$ )은 식 (4)와 (5)로 표현되고, 체적일정 조건은  $d\epsilon_l + d\epsilon_\theta + d\epsilon_r = 0$  과 같으며 응력비( $\alpha$ )와 변형률비( $\gamma$ )가 일정하다고 가정하면 식 (6)과 (7)과 같이 각각 표현할 수 있다. 또한  $R$ 은 소성이방성 계수이고, 지수  $a$ 는 일반적으로 FCC 금속과 BCC 금속 대해서 각각  $a=6$ ,  $a=8$ 의 값이 실험결과를 잘 나타내는 것으로 알려져 있다.

$$t = t_0 \exp(\epsilon_l) = t_0 \exp\{-(\gamma+1)\epsilon_\theta\} \quad (4)$$

$$r = r_0 \exp(\epsilon_\theta) \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_l}{\sigma_\theta} \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{d\epsilon_l}{d\epsilon_\theta} = \frac{|\alpha|^{a-1} + |\alpha-1|^{a-1}}{1-R|\alpha-1|^{a-1}} \quad (7)$$

한편 원형 튜브가 내압과 축압축력을 받아 확관될 때 힘의 평형관계를 이용하여 원주방향과 축방향 응력은 다음과 같이 각각 표현된다.

$$\sigma_\theta = \frac{pr}{t} \quad (8)$$

$$\sigma_l = \frac{pr}{2t} - \frac{F}{2\pi r t} \quad (9)$$

### 2.2 내압과 축압축력이 작용하는 원형 튜브의 소성 불안정(넉 발생) 해석

내압  $p$ 에 의해 원주방향에 수직인 넉(파단)이 발생하기 위한 소성불안정 조건식 (10)과 가공 경화식 (1)을 이용하면 파단발생 시 유효 변형률은 식(11) 그리고 파단 압력  $p_{cr}$ 은 식 (2)로부터 식 (12)와 같이 표현할 수 있다<sup>(10)</sup>.

$$dp = d\left(\frac{\sigma_\theta t}{r}\right) = 0 \quad (10)$$

$$\bar{\epsilon}_{\max} = \frac{n}{(\gamma+2)} \frac{(1+R)^{\frac{1}{a}} (1+|\alpha|^a + R|\alpha-1|^a)^{\frac{1}{a}}}{1-R|\alpha-1|^{a-1}} \quad (11)$$

$$p_{cr} = \frac{t}{r} K \bar{\epsilon}_{\max}^{n-\frac{1}{a-1}} \left( \frac{1+R}{1-R|\alpha-1|^{a-1}} \epsilon_{\theta, \max} \right)^{\frac{1}{a-1}} \quad (12)$$

파단발생 시 각 방향의 변형률은 다음과 같이 각각 표현된다.

$$\epsilon_{\theta, \max} = \frac{n}{\gamma+2} \quad (13)$$

$$\epsilon_{l, \max} + 2\epsilon_{\theta, \max} = n \quad (14)$$

$$\epsilon_{l, \max} = -\frac{\gamma+1}{\gamma+2} n \quad (15)$$

### 2.3 주름 발생 한계 해석

원관이 내압과 축력을 받아 축대칭 주름을 발생시킬 때 주름발생시 한계 축응력  $\sigma_{cr}$ 은 다음과 같이 표현된다<sup>(12)</sup>.

$$\sigma_{cr} = -\frac{t_0}{r_0} \frac{2E_s}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{\sqrt{n}}{\sqrt{n+1}} \quad (16)$$

여기서,  $E_s$ 는 할선계수(secant modulus)로서  $E_s = \bar{\sigma}/\bar{\epsilon} = K \bar{\epsilon}^{n-1}$ 로 정의된다.

윗 식을 Hosford 항복조건식과 가공 경화식 (1)을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_{cr} = -A_c^n K \left[ \frac{1}{1+R} \left\{ 1 + \frac{1}{\alpha^a} + R \left( 1 - \frac{1}{\alpha} \right)^a \right\} \right]^{\frac{n-1}{a}} \quad (17)$$

여기서  $A_c = \frac{2t_0}{r_0 \sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{\sqrt{n}}{\sqrt{n+1}}$ 이다.

이 식으로부터 내압과 축압축력이 작용할 때의 관재의 주름발생 한계응력을 구할 수 있으며 여기서 만약  $\alpha = \infty$  이라면 축 압축력만이 작용할 때의 주름 발생 한계응력이 된다.

### 3. 실험 방법 및 시편

본 연구에서는 압출공정에 의해 생산된 A2024 (Al-Cu-Mg 합금계), A6063 (Al-Mg-Si 합금계), A7075 (Al-Zn-Mg-Cu 합금계) 재질의 직경50mm, 두께5mm seamless 튜브를 사용하였다.

Table 1 Heat treatment conditions of aluminum tubes before hydroforming

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

\*: Furnace cooling to 260°C → Air cooling

\*\* : Water quenching → Natural aging for a week

Table 2 Mechanical properties of different aluminum alloys on different heat treatments

Material	Treatment	Y.S. [MPa]	T.S. [MPa]	El. [%]	K [MPa]	n	R
A2024	O	80	213	23.3	346	0.328	0.660
	T4	250	425	17.6	686	0.158	0.605
A6063	O	38	96	37.7	160	0.285	0.502
	T4	76	175	30.5	288	0.192	0.524
A7075	O	172	316	14.9	479	0.208	0.507
	W	341	546	19.5	899	0.142	0.438

알루미늄 합금은 스틸소재에 비하여 성형성이 떨어지는 반면 각 재질에 대한 열처리를 이용하여 기계적 성질을 향상시킬 수 있다. 따라서 열처리에 따른 알루미늄 튜브의 하이드로포밍 특성을 파악하기 위하여 성형 전 Table 1과 같은 조건에서 각 재질에 대하여 풀림(full annealing: O), T4(solution treatment + natural aging) 그리고 W(solution treatment)처리를 하였고, 자연 시효(natural aging)는 상온에서 1주일 동안 유지하였으며 인장시험 결과를 Table 2에 나타내었다.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 원형단면 형상의 금형과

성형 과정에 대한 개략도로써 확관부 반경  $r$ 은 40mm로서 최대 60% 확관률을 얻을 수 있고, 실험 장비의 내압은 최대 150MPa, 축하중 80ton급을 사용하였다.

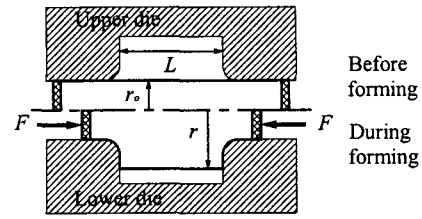


Fig. 1 The principle of tube hydroforming(original tube shape and intermediate shape of the tube)

### 4. 실험 및 이론 결과

#### 4.1 성형 실험 결과

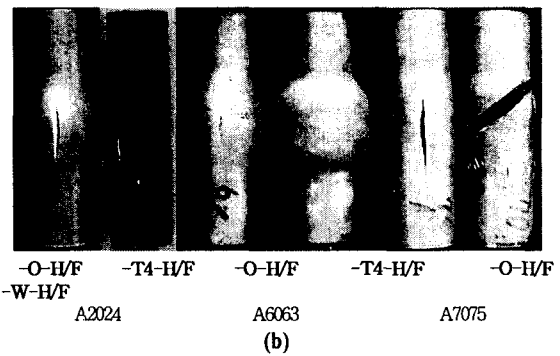
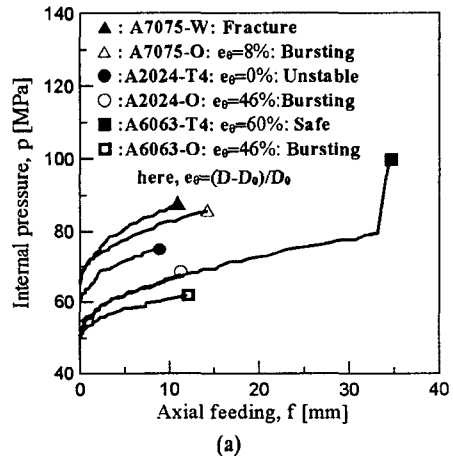


Fig. 2 Results of different aluminum tubes in hydro-forming: (a) relationships of internal pressure and axial feeding, (b) deformed shapes of specimens

Fig. 2(a)는 Table 2의 각 시편에서 대표적인 성형과

정의 내압-축압축량 관계를 나타낸 것이며 Fig. 2(b)는 이러한 성형조건에 의해 성형된 성형품 형상을 보여주고 있다. 각 시편은 최대 확관률을 파악하기 위하여 A6063-T4를 제외한 모든 튜브는 파단(bursting) 될 때까지 성형한 것으로서 A2024-O와 A6063-O는 각각 46% 확관률을 보였고, A6063-T4는 약 80MPa까지 파단되지 않고 성형된(safe) 후 약 100MPa까지 내압이 상승하여 급형에 완전히 밀착되는 교정(calibration)단계까지 성형되어 60%의 확관률로 매우 높은 성형성을 보였다.

그러나 A7075-O 튜브는 약 8%의 확관률을 나타냈었고 7075-W 튜브는 거의 성형되지 않고 Fig. 2(b)에 나타낸 것과 같이 과도한 축압축 하중에 의해 파괴(fracture)되었다. 또한 A2024-T4 튜브는 성형과정에서 국부변형과 균열이 발생하여 매우 불안정한(unstable) 상태로서 내압을 상승시킬 수 없었다. 즉, A7075-O, A7075-W 그리고 A2024-W 같이 고강도 소재는 내압-축압축량에 대한 설정이 쉽지 않다는 것을 알 수 있다.

Table 3은 각 시편에 대하여 다양한 내압-축압축량의 조건에서 실험한 결과를 정리한 것으로서 파단압력( $P_{burst}$ ), 축압축량( $f$ ), 성형 후 튜브반경( $d$ ) 그리고 확관률( $e_{\theta}$ )을 정리하였다.

Table 3 Results of aluminum tube hydroforming on different internal pressure and axial feeding

Material	$P_{burst}$ [MPa]	$f$ [mm]	$d$ [mm]	$e_{\theta}$ [%]
A2024-O	75/71/66	13/17/23	67/73/73	34/46/46
A2024-T4	80/75/65	5.7/8.7/4.3	73/-/-	46/-/-
A6063-O	62/58/50	12/13/13	73/69/67	46/37/34
A6063-T4	80/100/100	19/34/34	75/80/80	50/60*/60*
A7075-O	87/83/79	11/11/11	54/-/-	8/-/-
A7075-W	86	4	-	-

\*: safe, -: unformed(unstable or fracture)

#### 4.2 이론 및 실험 결과 비교

Fig. 3~5는 A2024, A6063 A7075 튜브에 내압과 축압축력이 작용할 때의 성형한계(주름 및 파단 발생한계)를 각 변형모드에 따라 원주방향 응력과 축방향 응력으로 각각 나타내었다. 항복이 시작될 때의 응력상태는 식 (2)와 (8)을 이용하여 나타내었고, 파단발생과 주름발생한계는 식 (8)과 식 (12) 및 (17)을 각각 이용하여 나타내었다. 한편 Table 3에 나타낸 실험결과를 이용하여 각 시편에 대한 응력비를 나타내었으며 원주방향의 응력은 파단압력을 이용하였고 길이방향의 응력은 각 시편의 내압

-축압축량의 조건을 고려하여 단축인장, 순수전단 및 평면변형 변형모드로 가정하여 각 시편의 항복강도와 인장강도 값을 사용하였다.

Fig. 3~5에서 이론식을 이용하여 나타낸 주름발생한계는 응력비가 작아질수록 축방향 압축응력이 작아짐을 알 수 있다. 또한 파단 발생시의 응력관계는 응력비가 증가할수록 파단 발생시의 축방향 응력은 계속 증가하는 것에 반해 원주방향 응력은 평면변형 상태에서 최대가 되고 점차 감소하는 경향을 보인다.

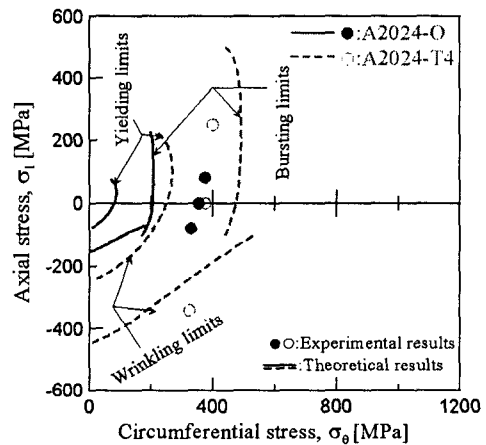


Fig. 3 Comparison between theoretical analysis and experimental results of different heat treated A2024 tubes at the occurrence of the wrinkling and the bursting

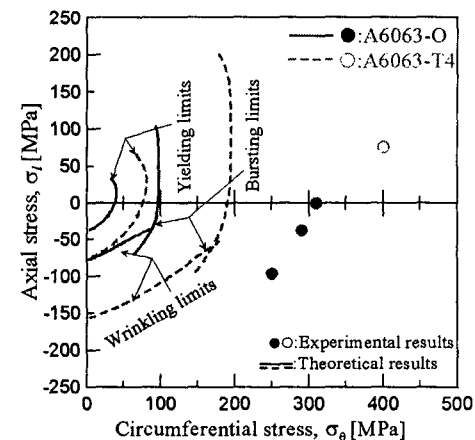


Fig. 4 Comparison between theoretical analysis and experimental results of different heat treated A6063 tubes at the occurrence of the wrinkling and the bursting

특히 Fig. 3의 A2024-T4 및 Fig. 5의 A7075-O와 A7075-W에 대하여 주름한계 응력비가 최소일 때 주름 발생한계는 파단한계의 오른쪽에 위치해서 다소 큰 응력을 타내고 있으며, 이러한 경향은 연신율이 크고 두께가

얇은 튜브 경우에는 주름이 발생하였다 하더라도 내압을 상승시켜 원활하게 성형할 수 있지만, 튜브의 두께가 얇지 않고 연신율이 작은 A2024-T4 및 A7075-O와 A7075-W는 순수전단 모드를 얻기 위하여 적극적으로 축압축량을 증가시킬 경우 주름이 발생하기 이전에 과도한 축하중에 의하여 튜브가 파괴 될 수 있다는 것을 의미하며 실험결과(Fig. 2)와 같이 내압-축압축량의 설정이 까다롭다는 것을 뒷받침하고 있다.

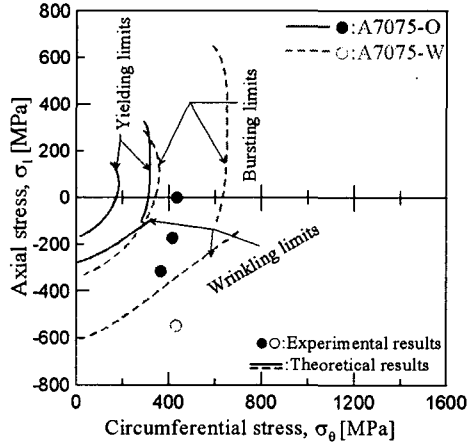


Fig. 5 Comparison between theoretical analysis and experimental results of different heat treated A7075 tubes at the occurrence of the wrinkling and the bursting

한편, 성형이 불가능하였던 A2024-T4(Fig. 5)를 제외한 각 실험결과는 이론 결과와 상당한 차이가 있으며, 그 원인의 한가지로서 알루미늄 합금의 특성인 시효경화를 생각할 수 있는데, 이것은 알루미늄 합금에 따라 그 정도는 차이가 있지만 상온에서 자연시효가 발생하여 일정기간동안 시간이 경과 할수록 강도는 증가하고 연신율은 낮아지는 경향을 보인다. 본 연구에서는 각 시편에 대한 열처리 후 인장시험과 하이드로포밍 실험이 실시되기까지의 기간이 서로 같이 않았으며 이에 따라 각시편의 물성치에는 차이가 있을 것으로 생각되며, 각 시편에 대한 추가실험을 통하여 최적의 성형조건을 찾고 이론적 해석과의 비교 검토가 필요하다고 생각된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 압출공정에 의해 생산된 A6063, A2024, A7075 seamless 튜브의 열처리에 따른 하이드로포밍 특성을 파악하고, Hosford의 항복조건식을 이용한 주름(wrinkling)과 파단(bursting) 등의 이론적 성형한계에 대하여 실험결과와 비교하였다.

## 참고 문헌

- (1) M. Koc, T. Altan, 2001, "An overall review of the tube hydroforming (THF) technology", J. Mater. Proc. Tech., Vol. 108, pp. 384~393.
- (2) H. U. Lucke, Ch. Hartl, T. Abbey, 2001, "Hydroforming", J. Mater. Proc. Tech., Vol. 115, pp. 87~91.
- (3) S. Y. Lee, Y. J. Jo, S. M. Shon, M. Y. Lee, Y. S. Kim, 2001, "Characteristics of strain profile at hydroformed al tube", Proc. 2nd Int. Conf. LIMAT-2001, pp. 343~348
- (4) L. P. Lei, B. S. Kang, S. J. Kang, 2001, "Prediction of the forming limit in hydroforming process using the finite element method and a ductile fracture criterion", J. Mater. Proc. Tech., Vol. 113, pp. 673~679.
- (5) Ch. Kunz, R. Machler, P. J. Uggowitzer, M. O. Speidel, 1997, "Aluminum light weight components made by high pressure forming(IHPF)", Competitive Advantages by Near-Net-Shape Manufacturing (NNS'97), pp. 121~128.
- (6) S. Fuchizawa, K. Kazuyuki, M. Narazaki, 1995, "Deformation of aluminum alloy tubes under forming of T-fitting", J. JSTP, Vol. 36 No.408, pp. 80~86
- (7) 이문용, 손성만, 류성지, 이기웅, 이상용, 2002, "고강도 알루미늄 튜브의 온간 하이드로포밍 특성", 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, p. 41.
- (8) N. Asnafi, A. Skogsgardh, 2000, "Theoretical and experimental analysis of stroke-controlled tube hydroforming", Mater. Sci. Eng., Vol. A297, p. 95.
- (9) 김성태, 임성언, 이택근, 김영석, 2000, "관재 하이드로포밍에 의한 성형공정의 실험적 연구", 한국소성가공학회지, 제9권, 제1호, p. 35.
- (10) 임성언, 2000, "튜브 하이드로포밍 공정에서의 성형성 한계에 대한 실험 및 해석적 연구", 경북대학교 대학원 학위논문
- (11) 김봉준, 김정운, 문영훈, 2002, "하이드로포밍 성형성에 미치는 공정인자 영향도 해석", 한국소성가공학회지, 제11권, 제1호, p. 54.
- (12) S. T. Kim, Y. S. Kim, 2002, "Analytical study for tube hydroforming", J. Mater. Proc. Tech., Vol. 128, pp. 232~239.