

Hydroformed 튜브 소재의 압축특성에 관한 연구(Ⅱ)

박세승* · 손현성* · 이영선** · 이우식*** · 김영석****

Study of compression characteristics for hydroformed tubes(Ⅱ)

S. S. Park, H. S. Son, Y. S. Lee, W. S. Lee and Y. S. Kim

Abstract

Recently tube hydroforming technology has been one of the most important technology in automotive industry in the point of saving weight and high quality for collision accidents. In this paper, experimental studies for axial compression tests of hydroformed tubes are performed to investigate the collapse absorption characteristics. The collapse absorption abilities are discussed and compared for as-received, hydroformed, and press formed tubes.

Key Words : Hydroformed Tube, Axial Compression Test, Collapse Absorption Energy, Collapse Load

1. 서론

최근 자동차 산업에 경량화, 고품질, 고안전성 등의 관심증대로 인하여 튜브 하이드로 포밍 기술(tube hydroforming technology, THF)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. THF는 자동차 차체의 서브 프레임(sub-frame), 배기 다기관(exhaust manifold)⁽¹⁾ 등에 적용되며, 유압을 매개로 관재에 고압을 발생시켜 원하는 단면형상인 금형형태로 확관(bulging)하는 기술이다. 이 공정에서 내압에 의해 튜브의 두께가 줄어드는 것을 축 압축에 의해 보상한다. 또한, 튜브의 확관에 따라 재료의 가공경화 증가와 두께감소가 수반된다.^(2,3,6)

Wierzbiciki 등⁽⁴⁾과 김천욱 등⁽⁵⁾은 박판4각튜브의 다양한 압괴모드에 대하여 소성붕괴 과정의 메카니즘 규명과

붕괴하중 예측에 대한 연구를 하였다. 본 논문에서는 하이드로 포밍된 튜브의 기계적 특성파악과 축 압축실험(axial compression test)을 통한 압괴하중과 압축특성을 파악하는데 있다. 축 압축실험은 충돌실험에 대한 신뢰성 확보를 위해 준 정적인 상태에서 압축실험을 하였다. 시편 종류는 성형전 튜브(as-received tube)와, 하이드로 포밍된 튜브(hydroformed tube) 그리고, 프레스 가공된 튜브(press formed tube)를 비교하였다.

2. 실험 조건 및 기계적 특성

2.1 튜브 하이드로 포밍 실험

본 연구실에서 자체 개발한 하이드로 포밍 장비는 PC 제어에 의해 내압(internal pressure)과 축압축량(axial co

* 경북대학교 대학원 기계공학부
** 한국기계연구원 재료공정연구부
*** (주) 화신 기술연구소
**** 경북대학교 기계공학부

-mpressure)을 제어하도록 구성되었다. 금형체결용 수직 실린더가 하강 후 에어부스터에 의한 내압에 의해 확관이 진행되는 동안 내압-축압축량선도 등 모든 주요 작동은 PC모니터에 실시간으로 출력된다.⁽⁶⁾

사용한 소재는 일반 구조용 강관 STKM11A(D_o60.5, t1.8)와 POSCO에서 개발한 하이드로 포밍용 강관 HF370(D_o54.0, t2.6)이다. STKM11A 튜브는 한번이 63.3mm, 67.0mm, 71.2mm으로 확관하였고, HF370은 61.0mm, 65.0mm으로 하였다.

2.2 튜브 하이드로 포밍의 기계적 특성

Table 1은 성형전 튜브(A/R)와, 하이드로 포밍된 튜브(H/F) 그리고, 원 소재 판재(S/M)에 대한 기계적 특성을 나타낸다. 하이드로 포밍된 튜브의 인장시편은 금형과 접촉하여 생긴 평면부위에서 채취하였다.

하이드로 포밍된 튜브의 예 변형률은 STKM11A가 $\bar{\epsilon}=0.19$ 일 때 인장강도는 약 45%증가하였고, 연신율은 약 30%정도 낮아졌으며, HF370이 $\bar{\epsilon}=0.19$ 일 때 인장강도는 약 55%증가하였고, 연신율은 약 70%정도 낮아졌다. 튜브의 확관율이 증가할수록 항복강도 및 인장강도가 증가하였으나 연신율은 성형전 튜브에 비하여 큰 폭으로 감소함을 알 수 있었다. 이런 하이드로 포밍된 튜브의 기계적 특성의 변화는 성형전 튜브와 비교하였을 때 압축특성 평가에 영향을 미친다.

3. 공정별 압축특성 비교

3.1 튜브 하이드로 포밍 압축 특성

일반적으로, 구조 부재의 붕괴흡수능력은 압괴모드(collapse mode) 및 압괴하중(collapse load) 등에 의해 튜브의 하중형태와 단면형상이 달라지는 것으로 알려져 있다.⁽⁴⁻⁵⁾ 그러나, 본 논문의 주 관심사는 하이드로 포밍된 튜브의 기계적 특성과 압축특성에 있다.

압축실험용 튜브의 시편의 높이는 130mm, 압축붕괴 길이는 45mm이다. 압축 실험은 최대용량 250ton, 최대 압축속도 200mm/min인 유압식 압축실험 장비에 의해 행해졌다. 프레스 가공된 사각튜브는 원 소재인 판재를 굽힘가공한 후 용접을 한 것으로 STKM11A은 두께는 1.8mm이고 한번의 길이는 71.2mm이며, HF370은 두께 2.6mm이고 한번의 길이는 61.0mm와 65.0mm이다.

압축실험 전·후 시편을 Table 2에 나타내었다. 붕괴형태를 보면 STKM11A의 압괴 모양은 성형전 튜브는 혼합모드(mixed mode)로써 축대칭 모드(axi-symmetric

mode)에서 다이아몬드 모드(diamond mode)로 변형되었고, 사각 하이드로 포밍된 튜브는 다이아몬드 모드(diamond mode)로, 프레스 가공된 튜브는 대칭 모드(symmetric mode)로 나타났다. HF370은 성형전 원형튜브가 축대칭 모드로, 사각 하이드로 포밍된 튜브와 프레스 가공된 튜브는 대칭 모드로 나타났다.

3.2 공정별 하중 및 흡수 에너지 비교

Fig. 1은 대표적인 시편에 대한 하중-변위와 흡수 에너지(absorption energy)선도로 성형전 튜브(A/R), 하이드로 포밍된 튜브(H/F) 그리고, 프레스 가공된 튜브(P/F)를 비교하였다.

한번이 71.2mm와 65.0mm로 확관된 STKM11A와 HF370이 처음 200KN, 270KN 가까이에서 소성 좌굴모드로 압괴주름이 형성되며, 최대 압괴하중(L_{max})이 지난 후 계속 튜브가 붕괴되어 Table 2에서 보는 것처럼 붕괴모드가 나타나게 된다. 하이드로 포밍된 튜브의 최대 압괴하중은 성형전 튜브와 프레스 가공된 튜브를 비교하였을 때 STKM11A는 약 80%, HF370은 약 45% 정도 증가하였다.

튜브의 확관을 증가는 가공경화 특성에 의해 항복응력이 증가한 것과 같으므로 최대 압괴하중 또한 비례적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

흡수 에너지 E 는 하중-변위선도의 면적에서 구하며, 하이드로 포밍된 튜브의 확관율이 클수록 높음을 알 수 있다. 각 성형품에 대한 흡수 에너지는 하이드로 포밍된 튜브가 다른 튜브에 비하여 STKM11A는 약 30%, HF370이 약 15% 정도 증가하였다

Table 3은 여러 형태의 튜브에 대한 붕괴에너지 흡수능력을 실험에서 구한 값이다.

3.3 실험값과 이론값 비교

하이드로 포밍된 튜브를 4각튜브의 붕괴하중에 대한 이론식^(4,5,7,8)으로 널리 알려진 다음의 식(1)에 의하여 두께와 한번의 길이(또는 직경)(D/t)에 대한 (정적) 평균 압괴하중 L_{mean} 을 무차원화하여 Fig. 2에 나타내었다.

$$\frac{L_{mean}}{M_p} = C_1 \left(\frac{D}{t}\right)^N + C_2 \quad (1)$$

여기서, $M_p = \sigma_{ys} \left(\frac{t^2}{4}\right)$

C_1 , C_2 와 N 값은 실험에 의해 결정되는 값으로 여기서는 $C_1=63.30$, $C_2=0.0$ 그리고, $N=0.33$ 값

으로 하였다. 본 실험결과는 튜브의 재질 및 직경에 상관없이 식(1)에 의한 예측과 잘 일치하고 있다. 따라서 식(1)은 하이드로 포밍에 의한 변형된 튜브의 평균 압괴하중 값을 예측하는데 이용 될 수 있는 것으로 생각 된다.

4. 결 론

튜브 하이드로 포밍의 여러 확관율에 따른 STKM11A 와 HF370의 기계적 특성을 파악하였다. 또한, 준 정적압 축실험을 통하여 압축특성과 붕괴흡수능력에 관하여 연구하였다. 본 논문을 요약하면 다음과 같다.

(1) 각 소재에 대한 기계적 특성과 준 정적 압축실험으로 하중-거리 및 흡수에너지의 관계와 평균 압괴하중을 구하여 이론값과 실험값을 비교하였다.

(2) 하이드로 포밍된 튜브가 성형전 튜브와 프레스 가공된 튜브보다 압축붕괴특성이 좋음을 알 수 있었다

후 기

본 연구는 2002년도 두뇌한국 21사업의 연구비에 의해 행해졌으며 이에 관계자 제위께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Muammer Koc, Taylan Altan, 2001, "An overall review of the tube hydroforming(THF) technology", J. Mat. Process. Technol., Vol. 108 pp. 384~393.
- (2) 김성태, 임성언, 이택근, 김영석, 2000, "관재 하이드로포밍에 의한 성형공정의 실험적 연구", 한국소성가공 학회지, Vol. 9, No. 1, pp. 35~42.
- (3) 김영석, 조홍수, 박춘달, 김영삼, 조완제, 2000, "Tube Hydroforming 공정의 성형성 평가", 한국소성가공 학회지, Vol. 9, No. 6, pp. 604~614.
- (4) Wierzbiciki,T. and Abramowicz,W., 1983, "On the crushing mechanics of thin-walled structures" J. Applied Mechanics, Vol.50, pp.727~734.
- (5) 김천욱, 한병기, 임채홍, 1995, "박판4각튜브의 압괴 메카니즘 해석", 대한기계학회 1995년 춘계학술 대회 논문집(I), pp. 615~620.
- (6) 조완제, 손현성, 박춘달, 김영석, 2001, "관재 액압성형에 의한 성형성 및 성형품 특성에 관한 실험적 연구", 한국소성가공학회 2001년도 춘계학술대회 논문

집, pp, 54~57.

- (7) S.R. Guillow, G. Lu, R.H. Grzebieta, 2001, "Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminum tubes", Int. J. Mech. Sci., Vol. 43, pp. 2103~2123
- (8) Y.S.Kim, S.H.Yang, S.H.Son, S.S.Han, S.M.Hwang, 2002, "Evaluation of collapse absorption capability for hydroformed tubes", submitted in Metal. Trans. A.

Table 1 Mechanical properties of the as-received and hydroformed tubes, STKM11A and HF370, with various bulging strains

Material	t [mm]	YS [MPa]	TS [MPa]	El [%]	n-value	R-value	
A/R D ₀ 60.5	1.80	406.1	455.5	29.3	0.154	1.20	
S T K M 1 1 A / H / F	○ 63.3* ε̄=0.10**	1.65	550.4	587.5	11.2	0.125	-
	○ 67.0* ε̄=0.14**	1.57	602.3	640.4	10.1	0.106	-
	○ 71.2* ε̄=0.19**	1.53	622.3	657.2	8.4	0.086	-
S/M	1.80	391.4	450.7	31.8	0.152	1.23	
H F 3 7 0 / H / F	A/R D ₀ 54.0	2.60	379.5	391.6	35.2	0.096	1.01
	○ 61.0* ε̄=0.15**	2.40	517.1	542.3	6.4	-	-
	○ 65.0* ε̄=0.19**	2.31	571.4	605.1	5.3	-	-
S/M	2.60	291.5	282.0	36.8	0.203	1.13	

t : Thickness, YS : Yield strength, TS : Tensile strength, El : Elongation, A/R : As-received tube, H/F : Hydroformed tube, P/F : Press formed tube, S/M : Sheet material

*: length of square section, **: amount of prestrains

Table 2 Schematic view of tube specimen and the collapsed shapes after compression tests

Material	Schematic view	STKM11A		HF370	
		original shape	collapse shape	original shape	collapse shape
A/R					
H/F					
P/F					

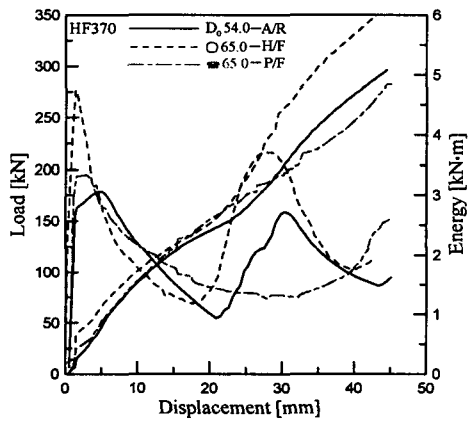
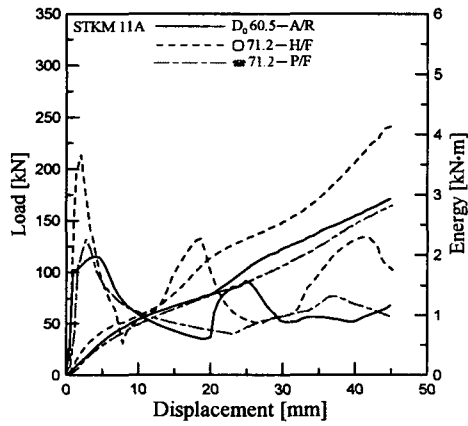


Fig. 1 Collapse load/Energy-Displacement curves for different type of tubes:(a)STKM11A (b)HF370

Table 3 Experimental result of collapse absorption energies for different type of tubes

Material		L_{max} [kN]	L_{mean} [kN]	E [kJNm]
STKM11A	A/R D_0 60.5	115.17	62.33	2.93
	H/F ϕ 63.3* $\bar{\epsilon} = 0.10^{**}$	187.18	74.58	3.64
	H/F ϕ 67.0* $\bar{\epsilon} = 0.14^{**}$	203.07	86.86	4.09
	H/F ϕ 71.2* $\bar{\epsilon} = 0.19^{**}$	213.86	86.22	4.15
P/F	\square 71.2	131.75	90.77	2.81
HF370	A/R D_0 54.0	178.86	111.00	5.08
	H/F ϕ 61.0* $\bar{\epsilon} = 0.15^{**}$	270.48	132.05	6.13
	H/F ϕ 65.0* $\bar{\epsilon} = 0.19^{**}$	276.84	133.87	6.25
	P/F \square 61.0	200.90	97.30	4.62
P/F	\square 65.0	195.00	105.94	4.84

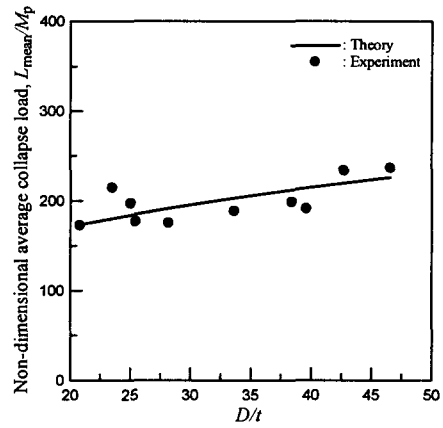


Fig. 2 Non-dimensional average collapse load L_{mean}/M_p - D/t curve