

관재 액압성형에 의한 성형성 및 성형품 특성에 관한 실험적 연구

조원제* · 손현성* · 박춘달** · 김영석***

Experimental Studies on Formability and Characteristics of Tube Hydroforming

Y. J. Jo, H. S. Son, C. D. Park and Y. S. Kim

Abstract

Hydroforming is core production techniques for the super light weight and high safety of the vehicle body. In order to establish and understand hydroforming, the tube hydroforming simulator which could control an axial compression and high internal pressure with computer operation was developed in tube bulging. This paper presents experimental investigation for process parameters, such as internal pressure and axial compression. In addition, the mechanical properties, such as strain hardening and energy absorption ability of hydroformed part, is discussed.

Key Words : Hydroforming, Internal Pressure, Axial Compression, Mechanical Properties

1. 서 론

최근 자동차의 경량화와 고안전화 추세에 따라 자동차 차체의 주요부품의 성형방식인 관재의 프레스 가공과 구분되는 관재 액압성형기술(tube hydroforming technology, THF)에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 관재 액압성형 기술은 고압의 액체를 매개로 관재를 외부의 금형에 확관(bulge) 및 밀착시켜 원하는 단면형상으로 성형하는 가공방법으로서, 자동차의 고품질·고안전을 요구하는 사회적인 분위기를 만족시키며 가격 경쟁력도 뛰어나기 때문에 해외 자동차업체에서는 이미

차체 프레임, 배기 시스템 등의 부품양산^(1~2)에 널리 적용하고 있으며, 국내에서도 선진국과의 격차를 줄이기 위하여 많은 기술개발이 수행되고 있다.^(3~5)

본 연구에서는 자체 관재 액압성형 장비를 개발하여 성형성에 미치는 공정변수-내압(internal pressure)과 축압축량(axial compression)-의 영향을 파악하였다.

성형품 특성을 파악하기 위하여 성형부에 대하여 인장시험을 실시하였고, 또한 자동차 구조물의 특성상 성형품에 대한 충돌특성에 대한 신뢰성 확보가 필요하므로 준정적인 상태에서 압축시험⁽⁷⁾을 통하여 액압성형부의 압축붕괴특성을 비교 평가하였다.

* 경북대학교 대학원 기계공학과
** 현대자동차 금형기술개발팀
*** 경북대학교 기계공학과

2. 관재 액압성형 공정제어 및 성형성 평가

2.1 실험장비 개발

Fig. 1은 본 연구실에서 자체 개발한 PC제어형 관재 액압성형 실험장비의 개략도이다. 본 장비는 수평식 액압성형 장비로서 내압은 부스터 형식의 증압기에 의해 가해지며, 실링용 수평 실린더와 금형 체결용 수직 실린더에 의해 축압축량과 금형의 압력이 가해지는 구조이다. 또한 주요 작동부는 PC에 의해서 제어되며 각종 센서에 의해 내압-축방향 변위 선도가 PC모니터에 실시간 출력된다. 주요 사양으로서는 최대 내압 120MPa, 수직 방향 최대하중 100Ton, 축방향 최대하중이 각 50Ton이다.

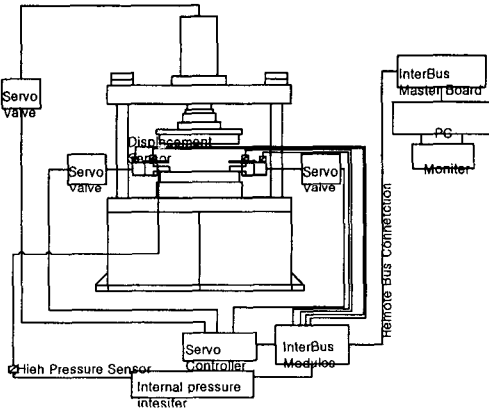


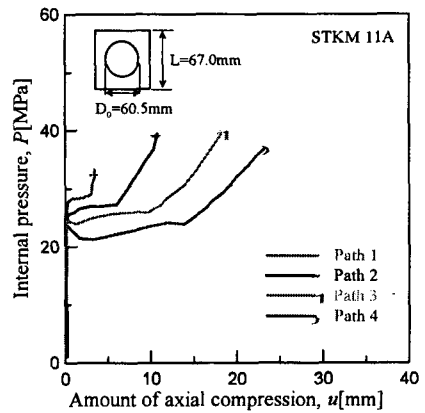
Fig. 1 Configuration of tube hydroforming equipment

2.2 액압성형성에 미치는 공정변수의 영향

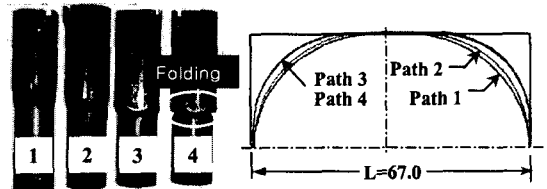
본 연구에서는 자체 개발한 장치(Fig. 1)를 이용하여 구조용 강관 STKM11A (D_o 60.5, t 1.8, L 650)에 대한 성형실험을 통하여 내압과 축압축량에 대한 성형특성을 파악하고, 액압 성형 시스템의 신뢰성을 검토하였다.

Fig. 2는 내압-축압축량 선도와 성형된 시편형상 및 원주방향 시편단면이다. 본 성형실험은 한번의 길이가 67.0mm인 정사각형 단면모양의 금형을 사용하였다. 초기압력을 약 25MPa로 높은 상태에서 각 성형경로(path) 1~4에 따라 파단(bursting)될 때까지 성형하였다. Fig. 2에서 성형경로 1의 경우는 축압축량이 매우 작기 때문에 관재와 금형의 접촉면적이 일부분인 상태에서 성형되어 조기에 파단이 발생하고 있음을 알 수 있다. 그러나 성형경로 2~4와 같이 축압축량이 커질수록 많은 확관이 가능해지고 금형의 코너부분에 재료가 잘 충전되어 가는 것을 알 수 있다. 그러나 성형경로 3, 4의 경우와 같이

어느 이상의 축압축량은 성형성에 영향을 미치지 못하고 코너부의 성형정도가 거의 일치한다는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 금형과 관재가 내압에 의해 완전히 밀착되어 완전한 형상으로 성형하는 교정단계(calibration)에서 축압축량(Path 4)은 Fig. 2(b)에 타원으로 표시한 부분과 같이 금형의 단면형상이 급격히 변하는 부분에서 접힘(folding) 발생 가능성이 높아지는 것을 확인 할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 2 Influence of loading path : (a) relationship between internal pressure and amount of axial compression, (b) deformed shapes of specimen

3. 액압 성형부품의 기계적 특성

3.1 액압 성형부품의 인장특성

액압 성형부품의 기계적 특성을 분석하기 위해 성형전의 원관(as-received tube: A/R)과 다양한 확관률로 액압성형된 관재(hydroformed tube: H/F)들로부터 인장시편을 채취하여 인장시험을 실시하였다.

액압성형 과정 중 발생한 소재의 변형경로를 파악하기 위하여 외면에 원형 그리드를 마킹한 구조용 강관 STKM11A(D_o 60.5, t 1.8)를 사용하였다. 관재의 확관률에 따른 인장특성을 파악하기 위하여 금형의 사각단면 확관부 한번의 치수를 63.3, 65.0, 67.0, 71.2mm로 달리하여 액압성형한 후, 관재와 금형이 밀착된 평면부위에서 인

장시편을 채취하였다. 채취한 인장시편들의 변형률을 측정한 결과 대부분 평면변형 조건 하($e_t=0$)에서 변형되었음을 확인하였다.

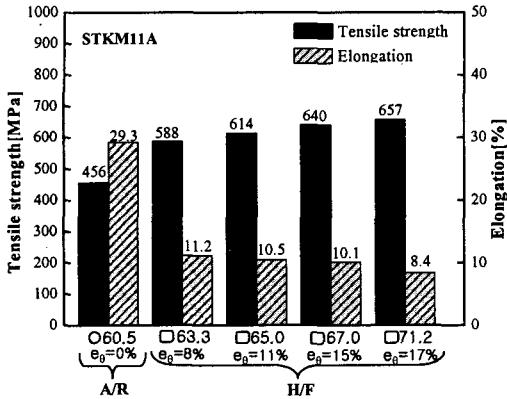


Fig. 3 Mechanical properties of as-received tube and hydroformed tubes with different radial expansion rate

액압성형된 제품들과 성형전의 원관으로부터 채취한 시편의 인장시험 결과를 Fig. 3에 나타내으며, 관재의 확관율이 증가할수록 인장강도는 증가하고 연신율은 감소하고 있음을 알 수 있다. 특히 원주방향의 예변형률이 $e_\theta=0.17\%$ 인 경우는 액압성형과정의 가공경화로 인하여 인장강도는 최대 45%정도 증가하고 연신율은 약 30%로 낮아졌다.

3.2 성형공정별 압축특성

에너지 흡수능력(energy absorption)과 압괴모드(collapse mode)는 구조부재의 단면형상과 재질 및 하중형태 등에 따라 달라진다고 알려져 있으나,⁽⁶⁻⁷⁾ 본 실험에서는 단면형상과 하중형태 등에 의한 영향은 고려하지 않고 성형공정별 성형품의 재질에 대한 에너지 흡수능력만을 비교하였다.

Table 1은 압축시험에 사용된 각각의 시편 종류 및 치수와 시험 전·후의 사진이다. 즉, 다양한 확관률로 액압성형된 관재(H/F)들과 액압성형 되지않은 원관(A/R) 및 스탬핑(S) 공정에 대한 관재형태의 시편을 제작하여 압축시험 하였다. 여기서 스탬핑 공정의 관재는 구조용 강관에 사용되는 조관용 판재를 한변의 길이가 71.2mm가 되도록 굽힘가공한 후 용접하여 제작하였다.

최대 용량 200Ton 유압식 압축시험 장비에서 3mm/s의 압축속도로 H=130mm인 시편을 약 45mm까지 압축하였다. 압축시험 전·후의 시편사진(Table 1)에서 확인

할 수 있듯이 성형전의 원관(A/R)은 축대칭 모드(axisymmetric mode)의 압괴주름이 2~3개 생성된 후 다이아몬드 모드(diamond mode)로 변형되는 혼합모드(mixed mode)⁽⁷⁾로 압괴되었으며, 액압성형(H/F) 관재는 대칭모드와 유사하였으나 성형과정에서 완전히 채워지지 않은 코너부위 부분에서는 다이아몬드 모드와 유사하였다. 스탬핑(S) 관재는 완전한 대칭 모드(symetric mode)로 압괴되었다.

Table 1 Tube types and dimensions used in compression test

tube types and dimensions (Material: STKM 11A) [mm]	original shape	deformed shape
As-received(:A/R) D _o 60.5×H130		
Hydroformed(:H/F) □ 63.3, 65.0, 67.0, 71.2 ×H130		
Stamping(:S) □ 71.2×H130		

Fig. 4에 다양한 확관률로 액압성형된 시편들(H/F)의 압괴강도-변위 선도와 에너지 흡수능력을 비교하였다. 확관율에 대한 최대 압괴강도는 확관율에 비례하는 경향을 나타내지만 에너지 흡수능력은 불규칙적인 경향을 보인다. 이는 최대 압괴강도는 확관률에 따른 관재의 항복응력의 증가와 비례하지만 에너지 흡수능력은 항복응력(σ_y), 단면형상 등 여러 인자에 기인하기 때문에 단순히 항복응력의 증가가 에너지의 흡수능력과 비례한다고 판단하기 어렵다는 것을 의미한다.

Fig. 4의 원주방향 변형율이 $e_\theta=11\%$ 로 액압성형된 시편의 경우 최대 압괴하중 이후의 하중변화가 다른 확관율의 시편에 비하여 매우 작게 나타났는데, 이것은 불안정한 변형모드로 압괴된 것에 기인한다고 생각된다. Fig. 5에 성형전의 원관(A/R)과 액압성형된 시편(H/F) 및 스탬핑(S)된 시편의 실험 결과를 비교하였다. 액압성형된 시편(H/F)의 최대 압괴강도는 원관(A/R)과 스탬핑(S)에 비하여 약 85%정도 증가하였고 에너지 흡수능력은 약 30%정도 증가한 것으로 나타났다. Table 3은 압

축실험의 결과를 요약한 것이다. 보다 자세한 데이터를 위해서는 단면형상과 압괴모드를 고려한 추가적인 시험과 고찰이 필요하다고 생각된다.

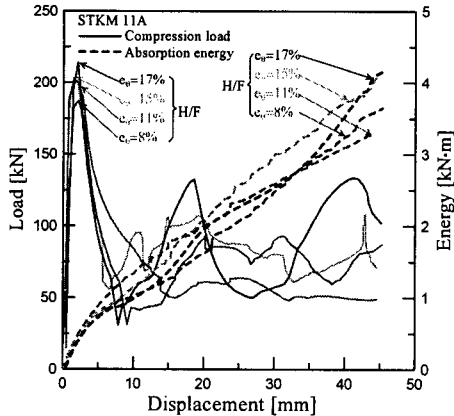


Fig. 4 Load/Energy-Displacement curve for hydroformed tubes with different radial expansion rate

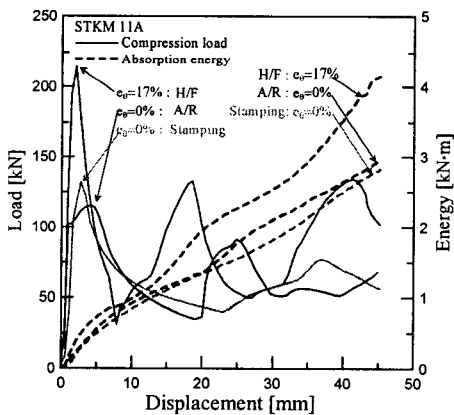


Fig. 5 Load/Energy-Displacement curve for different type tubes

Table 2 Experimental result of compression test for different type tubes

Material (STKM11A t1.8)	δ_{comp} [mm]	P_{max} [kN]	P_{mean} [kN]	E [kJ·m]	
As-received tube(:A/R)	44.9	115.17	62.33	2.93	
Hydroformed tube(:H/F)	□ 63.3° ($\epsilon_r=8\%$)**	45.3	187.18	74.58	3.64
	□ 65.0° ($\epsilon_r=11\%$)**	44.5	201.11	53.30	3.27
	□ 67.0° ($\epsilon_r=15\%$)**	44.6	203.07	86.86	4.09
	□ 71.2° ($\epsilon_r=17\%$)**	45.2	213.86	86.22	4.15
Stamping(:S)	45.2	131.75	60.77	2.81	

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

4. 결론

- (1) 자체 개발한 관재 액압성형 장비를 이용하여 내압과 축압축량에 대한 액압성형성의 영향을 파악하였다.
- (2) 성형공정에 대한 인장 및 압축시험을 통하여 성형품의 기계적 특성-인장강도, 연신율, 에너지 흡수능력-에 대하여 파악하였다.

후 기

본 연구는 (주)현대자동차의 관재액압 컨소시엄 연구비와 2001 두뇌한국 21 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 제위께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) S. Fuchizawa and H. Takeyama, 1979, "Study on bulge forming of thin-walled cylinder(3rd report)-experiment and comparison between experiment and analysis", J. Japan Soc. Precision Eng., Vol. 45, No. 1, p. 106
- (2) Muammer Koc, Taylan Altan, 2001, "An over review of the tube hydroforming", J. Mat. process. Technol., Vol. 108 pp. 384-393
- (3) 김영석, 조홍수, 박춘달, 김영삼, 조완제, 2000, "Tube Hydroforming 공정의 성형성 평가", 한국소성가공학회지, Vol. 9, No. 6, pp. 604-614
- (4) 김성태, 임성언, 이택근, 김영석, 2000, "관재 하이드로포밍에 의한 성형공정의 실험적 연구", 한국소성가공학회지, Vol. 9, No. 1, pp. 35-42
- (5) 김봉준, 김정운, 문영훈, 2001, "관재 하이드로포밍시 공정인자 영향도에 관한 연구", 한국소성가공학회 2001년도 춘계학술대회 논문집, pp. 49-53
- (6) 김천욱, 한병기, 임재홍, 1995, "박판4각튜브의 압괴 메카니즘 해석", 대한기계학회 1995년 춘계학술대회 논문집(I), pp. 615-620
- (7) S.R. Guillow, G. Lu, R.H. Grzebieta, 2001, "Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminum tubes", Int. J. of Mech. Sci., Vol. 43, pp. 2103-2123