

관재 하이드로포밍시 공정인자 영향도에 관한 연구

김봉준* · 김정운* · 문영훈*

A Study on the Effects of the Process Parameters for the Tube Hydroforming Process

K. J. Kim, J. W. Kim and Y. H. Moon

Abstract

Recently hydroforming process became a process which is increasingly applied in the automotive industry. As the hydroforming process is a new technology, there is no abundant data to assist manufacturing the products. To investigate the effects of process parameters on the tube hydroforming process, simple bulging, circular bulging and Tee-fitting tests are performed. The optimal loading path to escape the failure modes(bursting, wrinkling) is determined and the effects of the process parameters, the internal pressure and axial feeding on the product quality, such as thickness distribution, forming height and branch dome shape are investigated.

Key Words : Hydroforming, Loading Path, Formability, Hydraulic Bulge, T-fitting Forming

1. 서 론

현재 자동차의 발전 추세는 환경오염 억제를 위해 엔진 출력 향상, 공기 저항 감소를 위한 최적의 형상 설계, 자동차의 경량화로 나아가고 있다. 최근 각국 자동차 제조업체에서는 차체 경량화를 위해 부품소재를 기존 철강제품에서 밀도가 낮은 알루미늄이나 마그네슘으로 대체하고 있으며, TWB, Hydroforming 등과 같은 최신의 박판 성형 기술이 이용되고 있다. 그러나 기존의 관재 성형기술과 비교하여 하이드로포밍기술은 공정의 최적조건을 찾기 위해 많은 변수가 고려되어야 하지만 실제 가공에서는 실험적, 이론적 자료가 부족하여 국내관련업계에서 많은 어려움을 겪고 있다.

따라서 본 연구에서는 내부압력에 의한 관재의 변형양상을 확인하고 이 결과를 이용하여 관재의 원통형 단면 성형실험시 인자의 영향도 해석을 통해 최적의 공정조건을 규명하였다. 그리고 각각의 성형조건에 따라 성형된 부품의 결함 특성에 대해서도 고찰해 보았다.

2. 본 론

2.1 단순벌징시험

본 실험에서는 축방향 feeding을 가하지 않고, 내부압력의 변화에 따른 시편의 bulging height를 측정하여, 소재의 압력구간에 따른 확산속도의 차이를 확인하였으며, 이 결과를 축방향 feeding이 작용하는 실험에서 tube의

* 부산대학교 정밀기계공학과

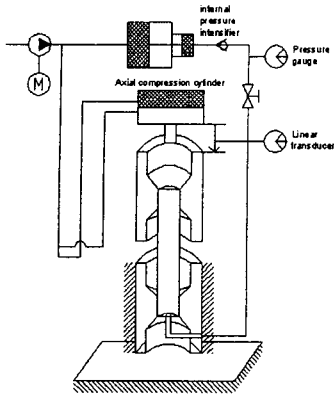


Fig. 1 Schematic view of tube hydroforming tooling

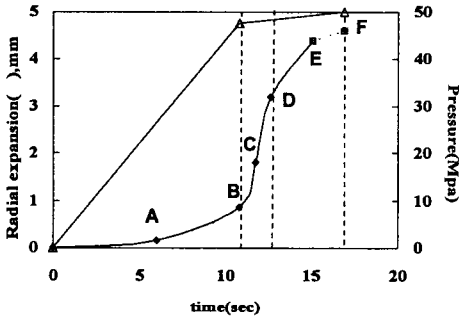


Fig. 2 The variation of the radial expansion with the internal pressure

액압성형성을 개선시키는데, 응용하였다.

2.1.1 실험방법

하이드로포밍실험에 사용된 실험장치는 4주형 하향식 vertical hydraulic press 800kN의 고압생성장치로 증압기(intensifier 200MPa)가 있으며, 좌우 양쪽에 800kN의 hydraulic feeding cylinder 2대가 장착되었고, 유압을 공급하는 servo hydraulic unit 등으로 구성된다.(Fig. 1) 본 실험에 사용된 소재는 기계구조용 탄소강관 STKM 12A를 선택하였다.

2.1.2 결과 및 고찰

본 실험에서는 임의의 구간을 나누어 각각의 압력에 따른 radial expansion양을 측정하였다. Fig. 2의 결과에서 보이듯이 expansion 변화량에 따라 대략 3개의 구간(초기, 중기, 말기 확관)으로 특징지을 수 있었다. 초기확관 구간(A~B)에서는 그 변화가 크게 나타나지 않았으나,

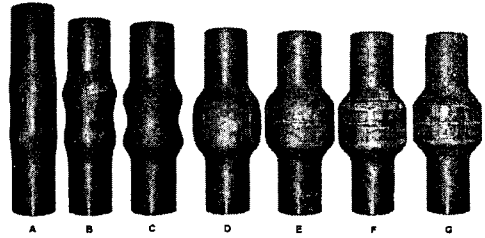


Fig. 3 Sequential view of circular tube hydroforming

중기확관구간(B~D)에서는 확관속도가 훨씬 빨라졌으며, 말기(D~F)에서는 그 변화량이 약간 낮아졌다. 이것은B 지점($P_i=47.2\text{MPa}$)에서부터 radial expansion양이 큰 폭으로 증가하기 시작하다가 소재의 가공경화로 인해 변화량이 낮아지기 시작한 것으로 생각된다.

2.2 원통형 단면 성형실험

본 실험에 사용된 금형 cavity 형상은 자동차의 collector로 사용되는 원통형 단면으로 단순벌징실험에서 얻은 data를 기본으로 축방향 feeding을 가하여 최적의 loading path를 잡는 것이 목적이다.

2.2.1 실험방법

전체 축방향 feeding양을 38mm, feeding이 시작되는 압력을 각각 31.5, 40.1, 47.5 57.96MPa로 두고, 각 초기 압력에 따른 여러 기술기의 loading curve를 이용하여 실험하였다.

Table 1 Typical deformation aspect under circular die forming

	time (sec)	amount of feeding (mm)	Pressure (MPa)	Diameter (mm)	Remarks
	the diameter of unformed tube is 50.8mm				free forming
A	5.9	9.5	68.9	54.0	
B	8.2	16.7	78.1	55.5	
C	10.3	24.2	85.4	58.3	variation of internal pressure is reduced
D	12.8	31.4	89.2	79.9	
E	13.1	34.0	91.4	80.0	
F	15.8	38.0	94.8	80.0	
G	19.1	38.0	150.8	80.0	calibration

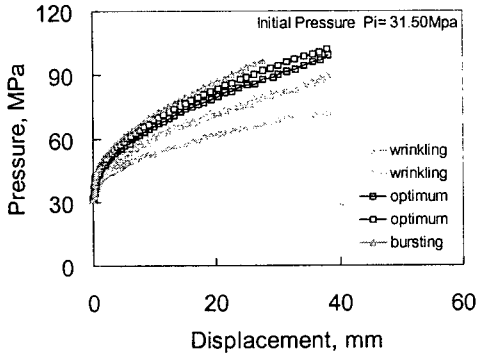


Fig. 4 Pressure-displacement curves at initial pressure of 31.5MPa

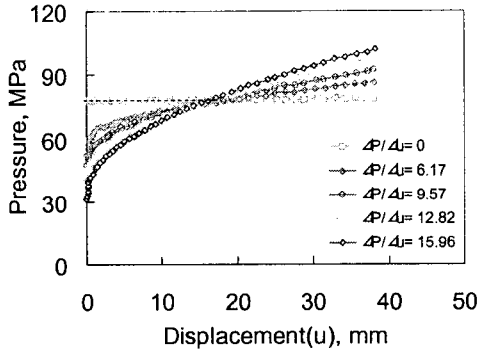


Fig. 5 Optimal pressure-displacement curve at various initial pressures

본 실험에 사용된 금형의 확관부 직경은 $\phi 80\text{mm}$, 길이는 40mm 이고 transition zone에서의 반경은 10mm 이다.⁽¹⁾

2.2.2 결과 및 고찰

2.2.2.1 시편의 변형양상

이 실험에 적용된 공정을 간략히 설명하면 die와의 접촉이 없이 성형되는 free forming, axial feeding만이 증가하는 단계, 그리고 calibration 단계로 구성된다. 즉, Table 1에서 알 수 있듯이 공정시 내부압력과 axial feeding이 동시에 증가하다가 (free forming), 별정 중심부가 die에 닿이게 되면 압력이 89.2MPa 에서 크게 변화가 생기지 않고 axial feeding양만이 계속 증가한다. 그 후 feeding양이 38mm 에 달하게 되면 압력이 94.8MPa 에서 150.8MPa 로 급증하는 calibration 과정을 거친다.

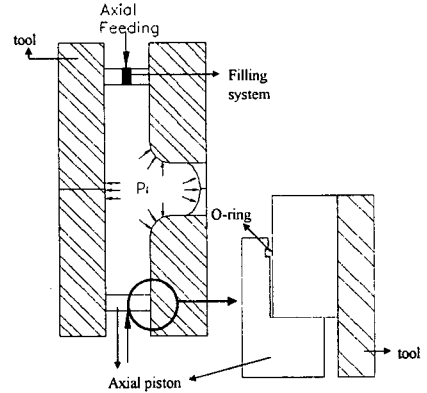


Fig. 6 Hydroforming of T-fitting (P_i : internal pressure)

2.2.2.2 최적의 축방향 feeding 시작 지점

본 실험은 feeding이 시작되는 압력을 각각 31.5 , 40.1 , 47.5 , 57.96MPa 로 두고, 여러 기울기의 loading curve를 사용하였다. (Fig. 4) feeding이 시작하는 초기압력이 40.1MPa 일 때 loading curve의 최적 경로의 범위가 가장 넓었고, pressure가 feeding에 대해 일정할 때 가장 좁았다. 이 결과를 미루어 보면 초기에 확관 속도가 빨라지기 시작할 때, 즉 내부압력이 47.5MPa 에 도달하기 직전부터 feeding을 해주면, feeding양이 확관량으로 원활하게 전환하게 된다. Fig. 5는 feeding이 시작되는 초기압력에 대한 여러 loading path중 최적의 성형품이 나오는 loading curve를 한 graph에 나타낸 것이다. 이 curve들은 공통적으로 feeding양이 17mm 를 지날 때 내부압력이 78MPa 에 이르는 것을 알 수 있다. 이 그래프를 이용하여 실험 전에 임의로 initial pressure를 잡은 경우 final pressure와 압력 변화량 기울기를 미리 예측할 수 있다.

2.3. T-fitting hydroforming 실험

T자 형상은 비대칭적 복합튜브연결 부품에 관련하여 가장 기본적인 형태로서 하이드로 포밍의 주요 생산품들의 기본이 된다. 이에 본 연구에서는 T-fitting forming 실험을 통해 확관부가 좁고 비대칭적 구조로 인해 내부압력과 축방향 feeding양, 그리고 마찰력 등의 공정변수들이 어떠한 영향을 끼치는지 확인하고 최적의 loading path를 찾는 것이 목적이다.

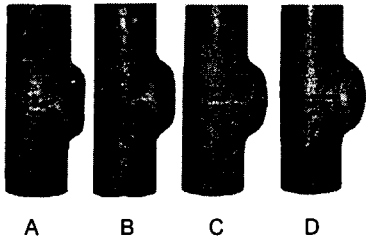


Fig. 7 (a) Sequential view of T-fitting forming with increasing internal pressures

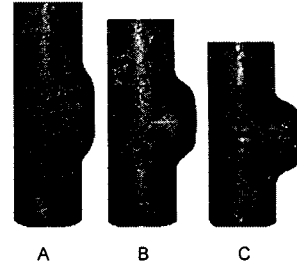


Fig. 8 (a) Deformation profiles at various amount of axial feedings

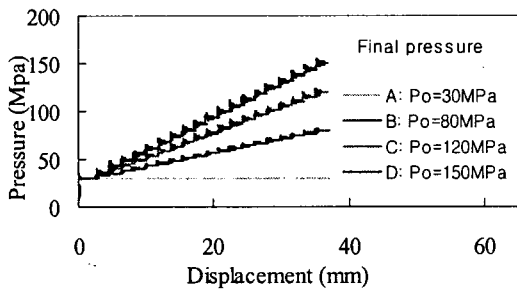


Fig. 7 (b) The loading curves at various internal pressures

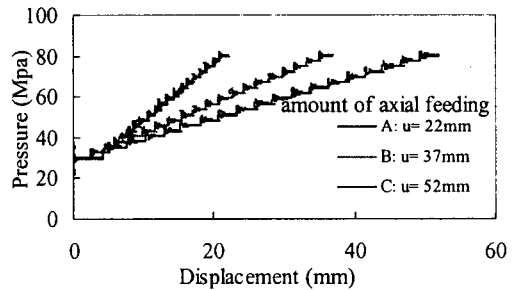


Fig. 8 (b) The loading curves at various amount of axial feedings

2.3.1 실험방법

본 실험에서 사용된 소재는 STBH 410소재(외경 ϕ 63.5, 두께 t3.2, 길이 220mm)를 사용하였고, 주요 공정 변수인 축방향 feeding양과 내부압력에 따라 branch부의 bulging height와 끝단부 형상이 어떻게 변하는지 확인하기 위해 Fig. 7에서 처럼 feeding양은 일정하게 유지하면서 압력 변화량을 달리하거나 Fig. 8과 같이 최대 내부압력을 고정하고 feeding양은 12, 37, 52mm로 증가시키면서 실험하였다.

2.3.2 결과 및 고찰

2.3.2.1 일정한 feeding이 작용시 압력 변화에 의한 시편의 변형 양상

T자형 hydroforming 성형은 원통형과 비교하여 벌징부위가 branch부에 한정되어 있어서 tube의 자유단이 상대적으로 좁다. 따라서 이 부위에 국부적인 소성변형이 심하게 일어날 수 있으며, Table 2에서 알 수 있듯이 만약 큰 내부압력이 작용할 경우 branch부의 끝단에 thinning 현상이 발생하여, 길이방향, 원주방향의 반경이 작아져 Fig. 7(a)과 같이 dome형상을 갖는다. 반대로 작은 압력

이 작용할 경우의 끝단 형상을 평평한 것을 알 수 있다. 이는 소재의 원주방향 변형률은 내부압력에 의해 생기는 원주방향 응력과 금형과 소재와의 마찰력에 의해 결정되기 때문이다. 압력이 높을 경우 축방향으로 feeding된 소재가 branch부로 이동하는 것이 원활해지나, 금형과 소재와의 마찰력도 같이 커져서 확관부로의 소재 유동이 어려워진다. 즉 T-fitting hydroforming은 소재와 금형의 마찰면적이 커서 마찰력에 영향을 크게 받으며, 높은 압력이 작용시 소재의 국부적인 thinning 현상이 생기게 된다. 반면에 압력이 낮은 경우($P_o=300\text{MPa}$) branch 끝부분의 형상반경이 컸는데, 이것은 소재의 국부적인 소성변형이 크지 않았기 때문이다. 결과적으로 압력이 증가하면 branch부에 놓인 소재의 확관을 돕기는 하나, 금형 간의 마찰력을 증가시켜, guided zone과 branch부 반대 방향의 소재가 branch부로 유입되기 어렵게 되어 thinning 현상과 wrinkling 현상이 공존하게 된다.^(2, 3)

2.3.2.2 축방향 feeding양의 차이에 의한 시편의 변형 양상

forming height와 길이방향, 원주방향의 반경은 소재의 확관 상태를 확인하는 중요한 치수이다. 즉 forming

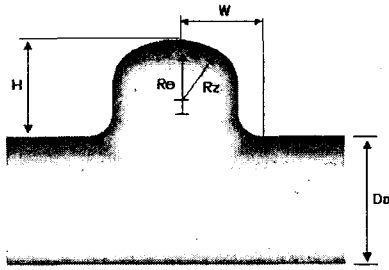


Fig. 9 Dimensional notation of the formed specimen

Table 2 Dimensional difference at various internal pressures

maximum pressure (MPa)	forming height (H)	width (w)	circumferential radius (R_θ)	longitudinal radius (R_z)
30	14.5	41.10	36.95	479.5
80	18.9	46.76	35.75	122.5
120	21.45	48.55	34.15	111.35
150	25.4	49.65	33.25	52.3

Table 3 Dimensional difference at various feeding amounts

axial feeding (mm)	forming height (H)	width (w)	circumferential radius (R_θ)	longitudinal radius (R_z)
22	8.9	43.6	34.75	132.5
37	19.45	44.8	34.35	130.95
52	24.95	45.1	32.6	130.5

height가 높더라도 원주방향과 길이방향의 반경이 작다면 확관량이 많은 것이 아니라 국부적으로 thinning 현상이 일어난 것이며, 반대로 forming height가 낮더라도 두 반경값이 크다면 branch로의 소재 이동이 많은 것을 뜻한다. Table 3에서 알 수 있듯이 feeding에 대한 압력 변화량을 일정하게 하고 feeding양만을 증가시키면, (Fig. 8) 원주방향과 길이방향의 반경이 약간 감소할 뿐이며, forming height는 24.95mm까지 증가한다.

즉 axial feeding양이 branch부로 유입되는 소재의 확관량을 결정하며, 내부압력은 크기가 클 경우 확관을 돕기는 하나, branch 내부의 소재들이 국부적인 thinning 현상이 생기도록 한다.

3. 결론

(1) 단순벌정시험의 경우 확관율은 radial expansion 변화량에 따라 대략 3개의 구간으로 특징지을 수 있으며, 특정압력에 이르면 radial expansion양이 큰 폭으로 증가하다가 소재의 가공경화로 인해 변화량이 낮아지기 시작한다.

(2) 원통형 단면 성형시험의 경우 확관 중심부가 성형 초기에 터짐현상 없이 다이에 먼저 닿으면 결함 없는 성형품을 얻을 수 있으며, 결함없는 성형품을 얻기 위해서는 feeding 개시를 위한 특정압력이 존재하였다.

(3) T-fitting hydroforming 실험의 경우 내부압력이 클 경우, branch부의 끝단에 thinning 현상이 발생하여 길이방향, 원주방향의 형상 반경이 작아져 dame 형상을 가지나 낮은 압력이 작용할 경우 끝단 형상은 평평해진다. 또한 axial feeding양이 branch부로 유입되는 소재의 확관량을 결정하며, 내부압력은 크기가 클 경우 확관을 돕기는 하나, branch 내부의 소재들이 국부적인 thinning 현상이 생기도록 한다.

참고 문헌

- (1) Nader Asnafi, Anders Skogsgardh, 2000, "Theoretical and experimental analysis of stroke-controlled tube hydroforming", Material Science& Engineering A279, pp. 95~100.
- (2) Sadakatsu, Fuchizawa, 2000, "Experimental Research on Hydraulic Tube Bulge Forming", 박관성형 심포지엄 논문집, pp. 1~11.
- (3) H. Mizukoshi, H. Okada, H. Wakabayashi, 1999, "Tee Fitting hydraulic Formability of Aluminum Alloy Tubes", Advanced Technology of Plasticity, vol II, pp. 19~24.