

하이드로포밍 성형성에 미치는 공정인자 영향도 해석

김봉준* · 김정운* · 문영훈**

(2001년 8월 27일 접수)

Effects of Process Parameters on the Tube Hydroformability

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

Abstract

The purpose of the present paper is to investigate the effect of process parameters such as internal pressure, amount of axial feeding, and frictional condition between the die and the material on the tube hydro formability. For carbon steel tubes(STKM 12A, STBH 410 and SPS 290), simple bulging, circular bulging and Tee fitting tests are performed to evaluate the hydro-formability of these materials which is determined by deformation characteristics such as thickness distribution, forming height and branch dome shape. The formabilities obtained from these tests are analysed and compared with the results of the numerical simulation.

Key Words : Hydro-Formability, Internal Pressure, Axial Feeding Amount, Frictional Condition, Thickness Distribution, Forming Height, Branch Dome Shape

1. 서 론

세계적인 차체 경량화 추세에 따라 차체 설계 및 생산 기술 측면에서 여러 가지 신기술이 적용되고 있다. 관재(tube) 하이드로포밍(hydroforming) 기술은 기존의 차체(body)를 성형하는 스탬핑 성형공정과는 완전히 다른 개념으로 차량 구조물의 폐단면 형상을 원형 강관의 내부에 압력을 가하여 확장시켜 외부 금형 형상에 따라 성형하여 원하는 모양의 차체 골격을 만드는 방식으로, 성형품이 무게에 비교하여 높은 구조 강성을 가지며, 복잡한 형상의 부품을 하나의 다이(die)로 생산이 가능하며, 소

재 회수율이 높다는 장점이 있다. 하지만 하이드로포밍 기술은 종래의 프레스(press) 방법과는 달리 튜브의 기계적 물성 평가 방법, 소재와 금형간 마찰 특성, 금형 소재 선택 및 설계 기술, 기본적인 소재의 변형 거동에 대한 종합해석이 이루어져야만 최적의 성형이 가능하므로 기술적으로 고려인자가 많은 기술이기도 하다.

따라서 본 연구에서는 기계구조용 탄소강관 STKM 12A와 일반구조용 강관인 STBH 410, SPS 290을 사용하여 단순확관시험, 원통형 단면 성형실험, T-fitting hydroforming 등의 실험을 행하였다. 그 결과로부터 하이드로포밍시 관재의 변형 특성과 성형성 개선을 위한

* 부산대학교 정밀기계공학과

** 부산대학교 ERC/NSDM

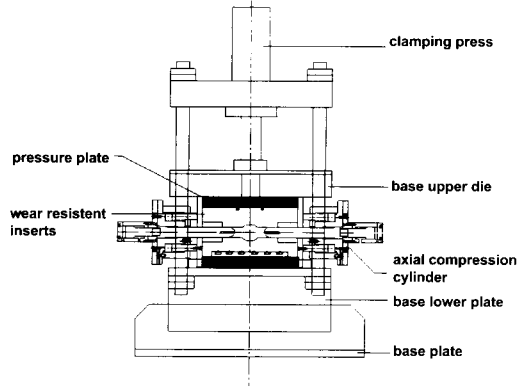


Fig. 1 Schematic drawing of the tube hydroforming machine

공정인자의 영향도를 분석했으며, 실험 전후에 행한 시뮬레이션 결과와 비교, 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 단순확관시험

본 실험에서는 축방향 feeding을 가하지 않고, 내부압력의 변화에 따른 시편의 bulging height를 측정하여, 관재의 압력구간에 따른 확관속도의 차이를 확인하였으며, 이 결과를 축방향 feeding이 작용하는 실험에서 관재의 액압성형성을 개선시키는데 응용하였다.

하이드로포밍실험에 사용된 실험장치는 4주형 하향식 hydraulic press 800kN의 고압생성장치로 증압기 (intensifier 200MPa)가 있으며, 좌우에 800kN의 hydraulic feeding cylinder가 장착되었고, 유압을 공급하는 servo hydraulic unit 등으로 구성된다.(Fig. 1) 본 실험에 사용된 관재는 기계구조용 탄소강관 STKM 12A(외경 ϕ 50.8, 두께 2.6t, 길이 300mm)를 선택하였다.

2.2 원통형 단면 성형실험

본 실험에 사용된 급형 cavity 형상은 자동차의 collector로 사용되는 원통형 단면으로 단순확관실험에서 얻은 data를 기본으로 축방향 feeding을 가하여 최적의 loading path를 잡고, 관재의 변형 특성을 파악하는 것이 본 실험의 목적이다.

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

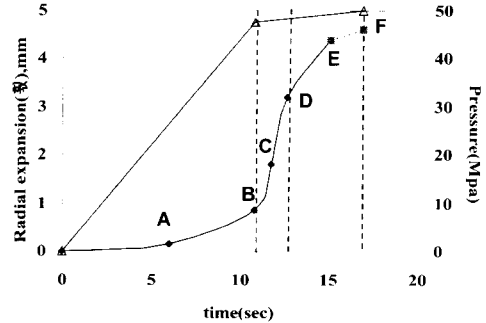


Fig. 2 The variation of the radial expansion with the internal pressure

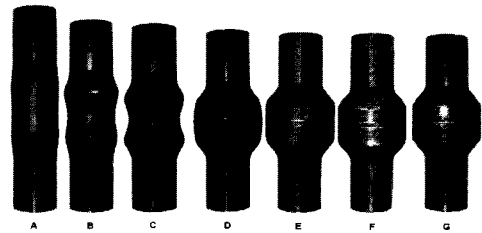


Fig. 3 Sequential view of the circular tube hydroforming

실험하였다. 본 실험에 사용된 급형의 확관부 직경은 ϕ 80mm, 길이는 40mm이고 transition zone에서의 반경은 10mm이다.

2.3 T-fitting hydroforming 실험

T자 형상은 비대칭적 복합튜브연결 부품에 관련하여 가장 기본적인 형태로서 하이드로포밍의 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 각각의 공정 조건에 따른 시편의 변형 특성을 파악하는 것이 본 실험의 목적이다. 본 실험에 사용된 소재는 일반구조 용 탄소강관 STBH 410(외경 ϕ 63.5, 두께 3.2t, 길이 220mm)를 선택하였다.

주요 공정변수인 축방향 feeding양과 내부압력에 따라 branch부의 bulging height와 끝단부 형상이 어떻게 변하는지 확인하기 위해 feeding양은 일정하게 유지하면서 압력 변화량을 달리하거나 최대 내부압력을 고정하고 feeding양은 12, 37, 52mm로 증가시키면서 실험하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 단순확관시험

본 실험에서는 임의의 구간을 나누어 각각의 압력에 따른 radial expansion 양을 측정하였다. Fig. 2의 결과에서 보이듯이 내압이 증가함에 따라 서서히 확관되다가 특정 압력 47.5MPa에 이르면 확관부내의 radial expansion 양의 증가 속도가 급격히 빨라진다. 그 후 관재의 가공 경화로 인해 확관속도가 감소하게 된다.⁽¹⁾

3.2 원통형 단면 성형실험

3.2.1 시편의 변형양상

이 실험에 적용된 공정을 간략히 설명하면 die와의 접촉이 없이 성형되는 free forming, axial feeding만이 증가하는 단계, 그리고 calibration 단계로 구성된다.(Fig. 3) 즉, Table 1에서 알 수 있듯이 공정시 내부압력과 axial feeding이 동시에 증가하다가(free forming), 확관 중심부가 die에 닿이게 되면 압력이 89.2MPa에서 크게 변화가 생기지 않고 axial feeding 양만이 계속 증가한다.

그 후 feeding 양이 38mm에 달하게 되면 압력이 94.8 MPa에서 150.8MPa로 급증하는 calibration 과정을 거친다.

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	calibration
F	15.8	38.0	94.8	80.0	
G	19.1	38.0	150.8	80.0	

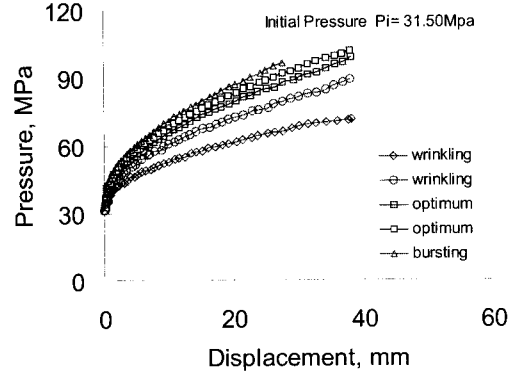


Fig. 4 Pressure-displacement curves at initial pressure of 31.5MPa

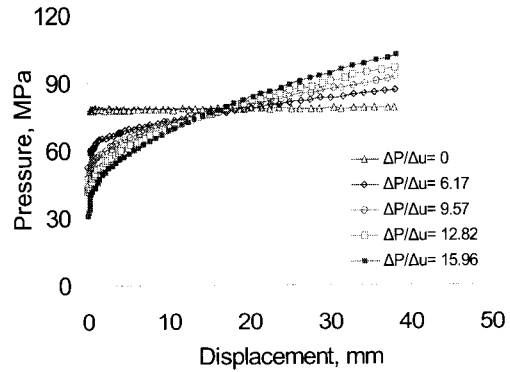


Fig. 5 Optimal pressure-displacement curve at various initial pressures

3.2.2 최적의 축방향 feeding 시작 지점

본 실험은 feeding이 시작되는 압력을 각각 31.5, 40.1, 47.5, 57.96MPa로 두고, 여러 기울기의 loading curve를 사용하였다.(Fig. 4) Feeding이 시작하는 초기압력이 40.1MPa일 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 47.5MPa에 도달하기 직전부터 feeding을 해주면, feeding 양이 확관량으로 원활하게 전환하게 된다. Fig. 5는 feeding이 시작되는 초기압력에 대한 여러 loading path 중 최적의 성형품이 나오는 loading curve를 한 graph에 나타낸 것이다. 이 curve들은 공통적으로 feeding 양이 17mm를 지날 때 내부압력이 78MPa에 이르는 것을 알 수 있다. 따라서 이 그래프를 이용하여 실험 전에 임의의 loading curve에 대한 성형품의 변형 양상을 미리 예측할 수 있다.⁽²⁻³⁾

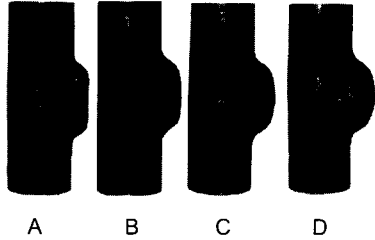


Fig. 6 (a) Sequential view of T-fitting forming with increasing internal pressures

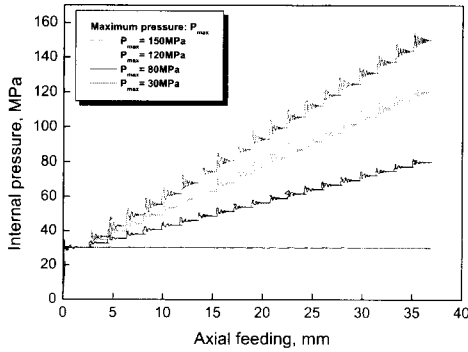


Fig. 6 (b) The loading curves at various internal pressures

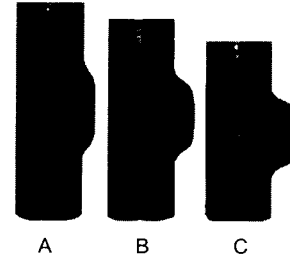


Fig. 7 (a) Sequential view of T-fitting forming with increasing axial feeding amount

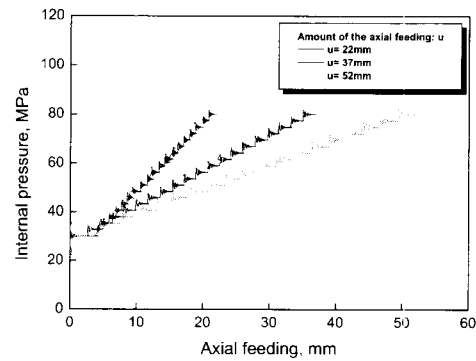


Fig. 7 (b) The loading curves at various axial feeding amount

3.3 T-fitting forming 실험

3.3.1 일정한 feeding이 작용시 압력 변화에 의한 시편의 변형 양상

T자형 하이드로포밍 성형은 원통형과 비교하여 확관 부위가 branch부에 한정되어 있어서 관재의 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. 6(a)과 같이 dome형상을 갖는다. 반대로 낮은 압력이 작용할 경우의 끝단 형상이 평평한 것을 알 수 있다. 이는 관재의 원주방향 변형률은 내부압력에 의해 생기는 원주방향 응력과 금형과 관재와의 마찰력에 의해 결정되기 때문이다. 압력이 높을 경우 축방향으로 feeding된 소재가 branch부로 이동하는 것이 원활해지나, 금형과 관재와의 마찰력도 같이 커져서 확관부로의 소재

유동이 어려워진다. 즉 T-fitting hydroforming은 관재와 금형의 마찰면적이 커서 마찰력에 영향을 크게 받으며, 높은 압력이 작용시 관재의 국부적인 thinning 현상이 생기게 된다. 반면에 압력이 낮은 경우 branch 끝부분의 형상변형이 컸는데, 이것은 관재의 국부적인 소성변형이 크지 않았기 때문이다. 결과적으로 압력이 증가하면 branch부에 놓인 소재의 확관을 돕기는 하나, 금형간의 마찰력을 증가시켜, guided zone과 branch부 반대 방향의 소재가 branch부로 유입되기 어렵게 되어 thinning 현상과 wrinkling 현상이 공존하게 된다.⁽⁴⁾

3.3.2 축방향 feeding량의 차이에 의한 시편의 변형 양상

Forming height와 길이방향, 원주방향의 반경은 소재의 확관상태를 확인하는 중요한 지수이다. 즉 forming

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. 7), 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.¹⁵⁾

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

3.4 시뮬레이션 분석

관재의 기계적인 물성치를 측정하기 위해 관재의 길이 방향으로 weld line측과 그 반대측에서 JIS 13B 규격의 (Fig. 8) 시편을 각각 추출하여, 인장시험을 수행하였으며, 이 값을 시뮬레이션에 응용하였다.

Fig. 9와 Fig. 10은 원통형 단면 성형실험에서의 관재의 변형 양상을 PAM STAMP로 해석한 것이며, 이를 실제 실험에 적용하면, 여러 공정 조건에 따라 각각 다르게 나타난 성형 모드를 각각 A type(bursting), B type (sound workpiece), C type(wrinkling)으로 구분 짓

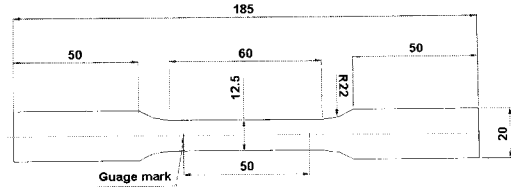


Fig. 8 Standard for tensile test(JIS 13B)

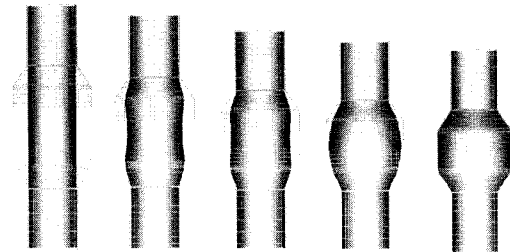


Fig. 9 Prediction of deformation in the hydroforming process at various internal pressures (axial feeding 36mm)

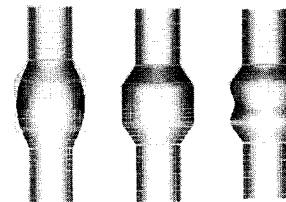


Fig. 10 Predicted tube shape for different loading curves

고 각각의 성형양상에 대해 분석해 보았다.(Fig. 11)

Fig. 11에서 A type은 초기성형과정부터 내부 압력이 높아서 확관부를 중심으로 좌우 양단에 굽힘부가 거의 생기지 않고 확관된다. 그러나 높은 내부 압력으로 인해 확관속도가 너무 빠르기 때문에 확관부로 들어가는 소재 유입량이 작아서 국부적인 소성변형이 심하게 일어나 과정 2,3으로 변형하다가 확관 중심부가 다이에 접하는 과정 5에 도달하지 못한 채 bursting이 일어나게 된다.

B type은 성형 초기에 축방향 feeding양에 의해 확관 중심부를 기준으로 양단에 굽힘이 생기게 되나, 내부 압력이 점차 증가하게 되어 결국 과정 5에서와 같이 중심부가 먼저 다이에 닿게 된다. C type도 B type과 마찬가지로 성형 초기부터 굽힘부가 생기지만, 성형중 압력 증가량이 작아서 중심부의 확관이 제대로 일어나지 못하

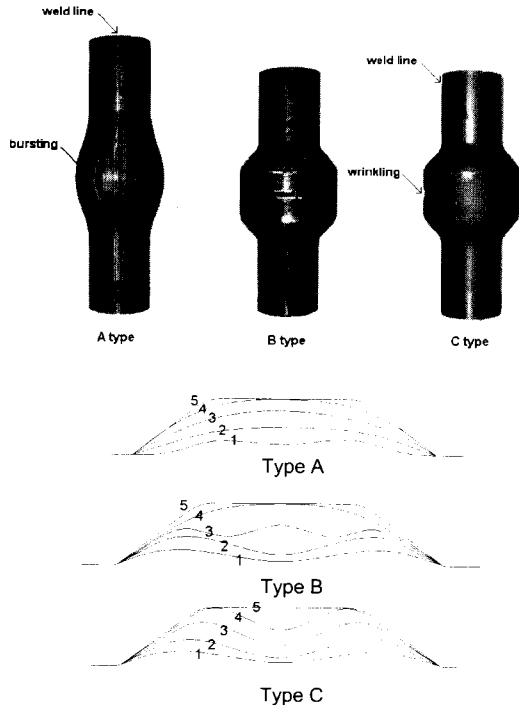


Fig. 11 Deformation mode and intermediate shape of the deforming tube

기 때문에 결국 굽힘부가 다이에 먼저 접하게 된다. 결국 주름을 펴지 못하여 결합(wrinkling)이 남게 된다.⁽⁶⁾

Fig. 12는 T-fitting 성형시 금형과 관재간의 마찰 조건의 차이로 인해 생기는 소재의 변형 양상의 차이를 시뮬레이션으로 분석한 것이다. 여타 성형 공정 조건은 동일하게 주고, coulomb friction coefficient를 각각 0.08, 0.15, 0.22로 다르게 준 후 해석을 수행한 결과, 마찰계수가 작을 수록 feeding으로 인한 소재의 이동이 원활해져 중심부의 두께가 두꺼웠으나, 반면에 마찰계수가 클수록 중심부로의 소재 유입이 어려워져 관재 끝부분의 두께 증가가 두드러지게 나타났다. 이것은 마찰계수가 큰 경우 축방향 feeding force에 의한 압축응력이 관재의 끝부분과 중심부에서 차이가 나기 때문이며, 이 때 내부압력과 마찰계수가 더 증가할 경우 그 차이는 더 커진다. 따라서 하이드로포밍시 국부적인 두께 감소없이 성형하기 위해서는 금형과 관재간의 마찰계수를 줄여서 확산부로의 소재 유입량이 많아야 한다. 그러나 실제로 하이드로포밍 성형의 압력매체인 물(비압축성)에 절삭제를 첨가하여 금형의 부식을 막으면서, 윤활 기능도 가지고 있으나, 그 효과는 미미한 편이다. 또한 주로 박판 성형에 사용되는 비수용성 윤활제는 압력매체에 끼치는 영향을

Table 4 Properties of the low carbon steel tubing (W: weld line, B: base metal)

material	TS (kgf/mm ²)	YS (kgf/mm ²)	K (kgf/mm ²)	n-value
STKM 12A (W)	53.32	46.09	70.30	0.09
STKM 12A (B)	56.59	46.27	69.89	0.14
STBH 410 (W)	58.42	33.35	82.83	0.23
STBH 410 (B)	58.33	33.37	82.55	0.23

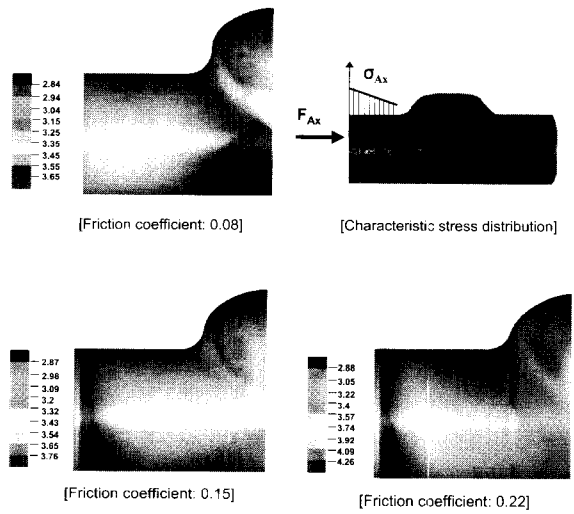


Fig. 12 Thickness distribution when expanding under the various coulomb friction coefficients

려하여, 사용되지 않는다. 그 외에 금형과 관재의 사용 소재와 workpiece 형상, sliding velocity 등에 따라 마찰 상태의 영향도가 다르므로, 이에 관련한 마찰조건 개선을 위한 다각적인 연구가 진행되어야 할 필요가 있다.

4. 결론

STKM 12A와 STBH 410 탄소강관을 이용하여 주요 공정변수인 축방향 feeding양과 내부압력, 금형과 관재간의 마찰조건이 하이드로포밍성에 미치는 영향도는 다음과 같다.

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

(2) 원통형 단면 성형실험의 경우 환관 중심부가 성형 초기에 터짐현상 없이 다이에 먼저 닿으면 결함 없는 성형품을 얻을 수 있으며, 결함없는 성형품을 얻기 위해서는 feeding 개시를 위한 특정압력이 존재하였다. 시뮬레이션 해석 결과 최종 성형품의 형상은 공정 중의 관재의 변형 양상 추이에 따라 다르며, 특정 deformation mode 에서 결함없는 성형품을 얻을 수 있다.

(3) T-fitting hydroforming 실험의 경우 내부압력이 클 경우, branch부의 끝단에 thinning 현상이 발생하여 길이방향, 원주방향의 형상 반경이 작아져 dome 형상을 가지나 낮은 압력이 작용할 경우 끝단 형상은 평평해진다. axial feeding 양이 branch부로 유입되는 소재의 환관량을 결정하며, 내부압력은 크기가 클 경우 환관을 돕기는 하나, branch 내부의 소재들이 국부적인 thinning 현상이 생기도록 한다. 또한 시뮬레이션 결과 마찰계수가 클수록 소재의 환관부로의 유입량이 작아서 국부적인 thinning 현상이 발생한다.

참 고 문 헌

- (1) 김주신, 조영만, 노인호, 노재홍 : " 하이드로포밍을 이용한 자동차 부품 개발 ", 제 3회 박관성형 심포지엄 논문집, pp.50~58(2000).
- (2) F.Dohmann, Ch.Hartl : " Tube hydroforming research and practical application " , Journal of Material Processing Technology, v71, pp.174~186 (1997).
- (3) Nader Asnafi, Anders Skogsgardh : " Theoretical and experimental analysis of stroke-controlled tube hydroforming ", MATERIAL SCIENCE & ENGINEERING A279 pp.95~100(2000).
- (4) H.Mizukoshi, H.Okada, H.WAKABAYASHI, " Tee fitting hydraulic formability of aluminum alloy tubes ", Advanced Technology of Plasticity, vol.II, pp.1189~1194(1999).
- (5) Hong Shen-zhang Wang Guo-xiang and Zeng Zhen-peng, " Technological analysis and engineering calculation on hydraulic extrusion bulge forging of multi-way tube joint ", Advanced Technology of Plasticity, vol.II, pp.1235~1240(1999).
- (6) 김봉준, 김정운, 문영훈, " 관재의 하이드로 포밍 성형시 공정인자 영향도에 관한 연구 ", 대한소성가공학회 2001년 춘계학술대회, pp.49~53.