

사각 형상 플랜지 형성을 위한 액압성형시 공정 조건에 따른 성형특성

김수희¹ · 김상윤¹ · 전찬후¹ · 주병돈¹ · 문영훈[#]

Effect of Process Parameters on Hydroforming Characteristics of a Rectangular Shape Flange

S. H. Kim, S. Y. Kim, C. H. Jeon, B. D. Joo, Y. H. Moon

(Received October 10, 2011 / Revised December 9, 2011 / Accepted December 15, 2011)

Abstract

Hydroforming has attracted the attention of manufacturing industries for vehicles and transportation systems. A wide range of products such as subframes, camshafts, radiator frames, axles and crankshafts are made by the hydroforming process. Hydroformed parts often need to be structurally joined to other components during assembly. Therefore it is useful if the hydroformed automotive parts can be attached with a localized flange. In this study, a hydroforming process to produce a rectangular shape flange is proposed. FE analysis to form the flanged rectangular shape was performed by Dynaform 5.5. The hydroforming characteristics at various die aspect ratios and feeding conditions were analyzed and optimal process conditions which can avoid defects are suggested. For validation purposes, hydroforming experiments to form the flange were conducted with the optimized conditions. The results show that the flanged parts can be successfully formed with a hydroforming process without additional processing steps.

Key Words : Tube Hydroforming, Flange, Flanged Tubular Parts, FE Analysis

1. 서 론

자동차 산업은 고유가와 각종 환경문제의 해결책으로 연료절감을 위한 차량 경량화뿐만 아니라 HSS(high strength steel)를 적용한 차량 바디 부분의 개발이 다양하게 시도되고 있으며 이러한 목적에 적합한 부품 생산 공정 중의 하나로 액압성형 공정이 적용되고 있다[1~3]. 액압성형 공정을 적용하여 생산이 가능한 자동차 부품에는 사이드 레일(side rail), 서브프레임(subframe), 대시패널(dash panel), 필라(pillar), 레일 루프(rail roof), 패키지 트레일(package trail)등이 있으며 이들 부품은 볼팅 또는 용접을 통해 다른 부품과의 체결이 이루어

져야 한다[4~6]. 이러한 체결에 따른 추가공정으로 인하여 액압성형 부품의 적용분야가 한정될 뿐만 아니라 차체 중량 증가 및 비용증가, 생산력 감소 등의 악영향을 받고 있다[7~8]. 이러한 문제를 보완하여 부품 성형시 체결부를 동시에 성형할 수 있는 공정이 요구되어진다. 따라서 본 연구에서는 튜브 액압성형 공정시 플랜지 일체 상태로 체결부를 형성할 수 있는 공정을 사용하여 실제 차량의 구조용 부품으로 많이 이용되고 있는 사각 폐단면 형상에 플랜지를 제작하기 위한 공정 시스템을 제안하였다. 유한 요소 해석을 이용하여 플랜지 액압성형성에 영향을 미치는 인자인 종횡비(aspect ratio)에 따른 단면 형상 및 축방향 압입량

1. 부산대학교 기계공학부/정밀정형 및 금형 가공 연구소
교신저자: 부산대학교 기계공학부,
E-mail: yhmoon@pusan.ac.kr

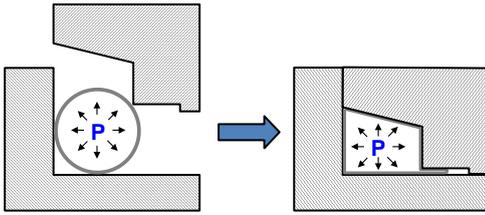


Fig. 1 Schematic drawing of flange hydroforming process

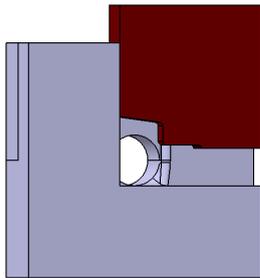


Fig. 2 Die modeling by CATIA V5

(feeding)을 다양하게 변화시켜 각 공정조건에서의 시편의 성형양상과 성형한계 및 결함 발생의 원인을 규명하고, 그 결과를 통해 최적의 성형특성을 검토하였으며, 실험을 통해 성형조건을 검증하였다.

2. 연구 내용 및 해석 방법

2.1 플랜지 성형 시스템 공정 제안

Fig. 1은 플랜지 형성 액압성형 공정의 모식도를 나타내었으며 공정 해석을 위해 Fig. 2와 같이 모델링하였다. 제안된 플랜지 형성 액압성형 공정은 형상의 특성을 감안하여 축방향 압입부를 제외한 상부금형이 플랜지부 성형을 위해 구동하는 금형 공정을 선택하였다. 성형을 위한 튜브의 내부압력은 상부금형의 구동 시작과 함께 선형적으로 증가하도록 설정하였으며 상부금형이 단힐 때 최종 압력에 도달하도록 하였다. 축방향 압입 또한 상부금형의 구동과 동시에 증가하기 시작하여 선형적으로 증가, 상부금형이 단힐 때 최종 목표 압입량에 도달하도록 설정하였다.

2.2 유한 요소 해석 조건

실제 성형품의 플랜지부 위치는 상부 혹은 하

Table 1 FE analysis conditions

Material	HF440
Tube diameter (mm)	65.0
Tube thickness (mm)	2.0
Aspect ratio	1.57, 1.37, 1.29, 1.22
Feeding (mm)	2.5, 5, 7.5
Internal pressure (MPa)	20 ~ 90

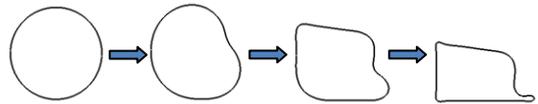


Fig. 3 Change of tube section during hydroforming process

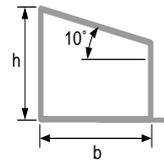


Fig. 4 Definition of aspect ratio(b/h)

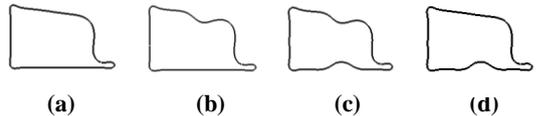


Fig. 5 Schematic drawing of proposed shape; (a) shape A, (b)shape B, (c)shape C, (d)shape D

부측에서 비대칭으로 형성된다. 초기에 원형 단면을 가진 튜브는 내부에 작용하는 압력과 금형의 구속에 의해 차례대로 변형되어 Fig. 3와 같이 플랜지 부착형 사각 형상의 단면으로 성형되게 된다. 해석은 상용 유한 요소 해석 코드인 Dynaform 5.5를 이용, 1/2모델을 적용하였으며 해석조건은 Table 1에 나타내었다. 해석을 통해 내부압력, 압입량, 종횡비에 따른 형상을 공정변수로 하여 성형특성을 분석하였다. Fig. 4에 사각 단면 형상의 종횡비를 도식적으로 나타내었고 종횡비는 폭방향의 길이를 고정하여 높이방향을 변수로 변화시켜 해석을 수행하였다. Fig. 5에서 형상 A가 기본 사각 형상이며 상부면에 리브(rib)형상을 가지는 형상 B, 상하부에 가지는 형상 C, 하부에 가지는 형상 D 총 4가지 최종 단면 형상을 선정하였다.

Table 2 Material property of the tube specimen

Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Uniform-Elongation (%)	Total-Elongation (%)	n-value
466	397	21.8	32	0.11



Fig. 6 Hydroforming machine

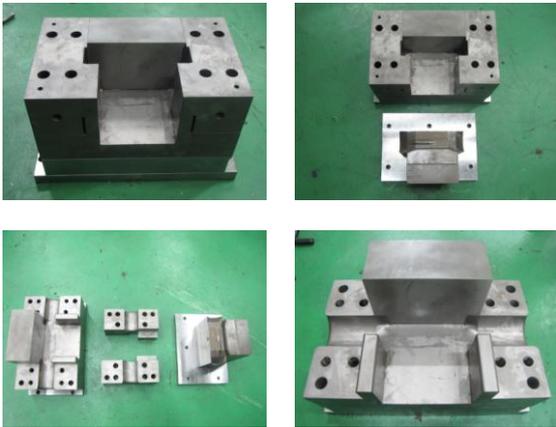


Fig. 7 Die set for experiments

2.3 실험 장치 및 조건

유한 요소 해석의 결과를 바탕으로 부품형상에 맞게 금형을 제작하였고 실험을 수행하였다. Fig. 6에 액압성형 실험장치는 4주형 하향식 유압 프레스 80ton 급에 최대 압력 200MPa로 성형이 가능한 장치를 이용하였으며 Fig. 7에서 제작된 금형을 나타내었다. 실험에 사용된 튜브는 유한 요소 해석에서 사용된 것과 동일한 HF440로서 직경 65.0mm, 두께 2.0mm를 가지며 소재의 기초물성을 Table 2에 나타내었다. 실험은 플랜지 형성에 영향을 미치는 주요인자를 설정하고 변수에 따른 플랜지 액압성형 특성을 분석하고자 수행되었다.

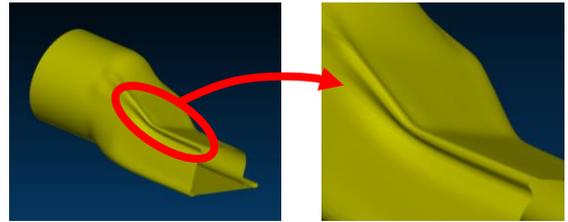


Fig. 8 FE analysis results of aspect ratio 1.57

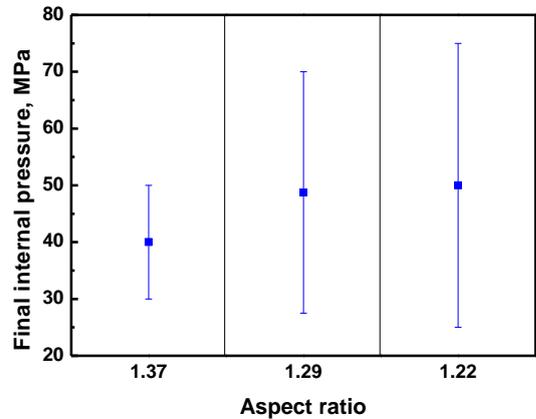


Fig. 9 Process window for aspect ratio

3. 결과 및 고찰

3.1 유한 요소 해석을 이용한 금형 설계

플랜지부를 포함한 폐단면의 형상이 튜브의 둘레와 동일한 $b=55.6\text{mm}$, $h=35.5\text{mm}$ 의 형상으로 설계하고 해석을 수행 하였다.

Fig. 8은 종횡비 1.57에서의 튜브 액압성형시 결합양상을 나타낸 것이다. 내압의 변화에 상관없이 플랜지 반대부에서 주름현상이 발생하였다. 폭방향으로 금형면을 따라 단순 확관이 일어나며 플랜지 반대부 높이방향으로 소재의 확관과 금형이 단허지는 구동으로 소재에 압축현상이 발생하는 것으로 판단된다. 이를 방지하기 위해 높이방향으로 각 5mm, 7.5mm, 10mm의 길이 차이를 두어 종횡비를 1.37, 1.29, 1.22로 감소시켜 해석을 수행 하였다. Fig. 9에 종횡비에 따른 플랜지 액압성형 구간을 나타내었다. 종횡비가 1.37일 때는 25~50MPa, 1.29일 때 27.5~70MPa, 1.22일 때 25~75MPa의 압력범위에서 성형이 이루어졌다. 종횡비가 작아짐에 따라 사각 형상 둘레가 커져 사각단면의 높이 방향의 확관에 의하여 주름현상이 발생되지 않았다.

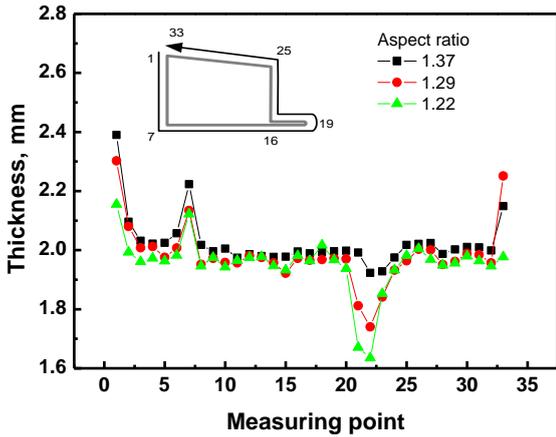


Fig.10 Thickness variation at various aspect ratio

Fig. 10에 종횡비에 따른 액압성형품의 두께변화를 나타내었다. 폭방향으로 두께분포가 균일하지만 높이방향으로는 두께의 분포는 일정하지 않게 나타났다. 플랜지부와 플랜지 반대부에서 금형의 구동으로 압축과 인장이 발생하여 상대적으로 두께가 많이 변화함을 확인할 수 있다. 플랜지부에 근접한 19~25구간에서는 종횡비가 1.29, 1.22일 때가 1.37일 때보다 두께 감소량이 더 많은 것으로 나타났다. 각 확관율이 5%, 7.5%, 10%로 폐공간의 확장으로 인해 소재의 확관율이 증가하여 종횡비가 1.37일 때보다 더 많은 두께가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 종횡비가 1.22일 때는 성형 범위는 상대적으로 넓지만 다른 부분에 비해 취약부의 두께가 1.635mm로 얇아 파단 가능성이 3가지 조건 중 가장 높은 것으로 나타났다. 종횡비의 감소에 따른 플랜지 길이의 변화는 각각 15.31mm, 14.70mm, 13.67mm로 감소하였다. 플랜지부의 길이는 종횡비가 커질 때 다른영역보다 플랜지부로의 확관이 더 일어나게 되어 상대적으로 긴 플랜지 길이를 나타냄을 확인하였고 종횡비 1.37에서 성형시 3가지의 조건 중 최대의 플랜지 길이를 가진다.

종횡비 1.37을 기준으로 축방향 압입량을 변화시켜 성형양상을 보았다. Fig. 11에 축방향 압입량에 따른 성형구간을 나타내었다. 축방향 압입량이 2.5mm일 경우는 25~55MPa의 범위로 상대적으로 넓은 성형범위를 가지지만 실링 불량 발생하였고, 5mm일 경우는 30~50MPa의 범위내에서 플랜지부가 형성되었으며, 7.5mm일 경우는 30~40MPa의 범위로 상대적으로 낮은 범위에서 성형되었다.

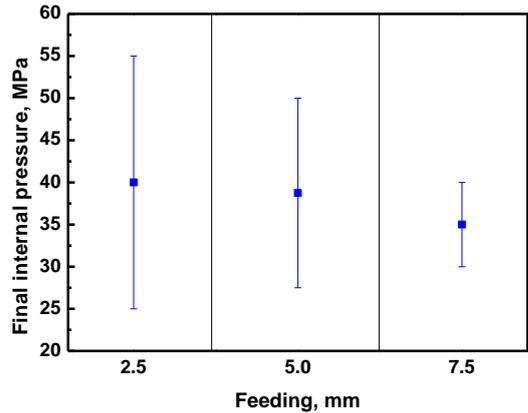


Fig.11 Process window for feeding

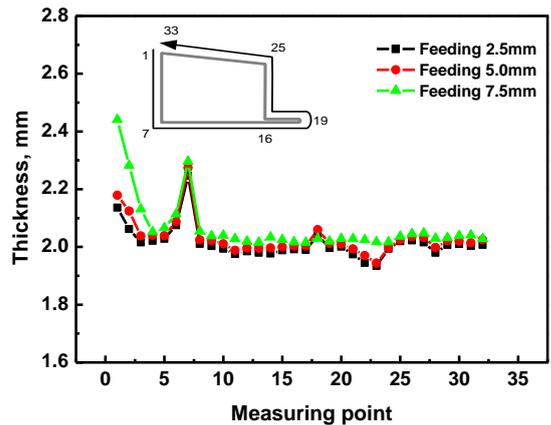


Fig.12 Thickness variation at various feeding amount

축방향 압입량의 증가에 따라 폐공간의 감소에 의해 소재에 압축 및 주름현상이 발생하였고 이로 인하여 성형구간이 감소하였다.

Fig. 12에 축방향 압입량에 따른 두께분포를 나타내었다. 축방향 압입량의 조건에서 평균 두께는 원소재의 두께에 비해 각각 +1.12%, +2.08%, +3.07% 증가하는 것으로 나타났다. 과도한 압입이 될 경우 1~5구간에서 큰 두께증가를 보이며 이로 인한 주름 발생 가능성이 높은 것으로 확인되었다.

3.2 형상 성형 특성

앞서 결함없이 플랜지 길이가 길게 나타난 종횡비 1.37, 축방향 압입량 5mm, 높이 4.6mm의 리브형상을 가지는 사각 형상의 성형특성을 분석하였다. Fig. 13과 Fig. 14에 형상의 변화에 따른 성형구간과 두께분포를 나타내었다. 플랜지 길이는 형

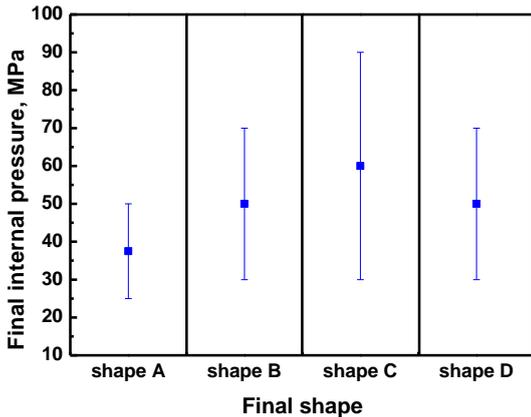


Fig.13 Process window for final shape

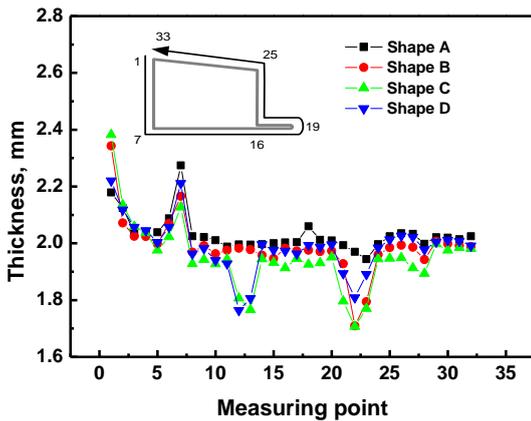


Fig.14 Thickness variation at various shape

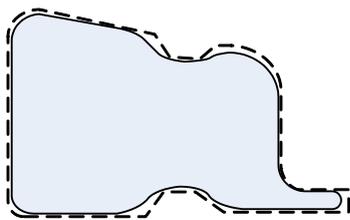


Fig.15 FE analysis results of shape C

상 A, B, C, D 각각 15.31mm, 15.80mm, 17.08mm, 16.51mm로 나타났다. 형상 B, C, D는 금형의 리브형상부 성형공간으로 인해 추가적인 플랜지부의 소재 유동이 발생하였다. 하지만 리브형상부에 따른 미충진부 발생으로 인해 성공적인 형상 성형에는 상대적으로 높은 내압이 필요하였다. Fig. 15에서 보이는 것과 같이 추가적인 확관으로 인해 낮은 내압에서 미충진부가 발생하는 것으

로 판단된다. Fig. 14를 통해 형상 C, D가 10~16구간에서 평균보다 낮은 두께분포를 보임을 알 수 있는데 이는 하부 리브형상부에 의한 두께감소임을 확인할 수 있다. 19~25구간에서는 형상 B, C, D의 두께가 상대적으로 얇은 두께분포를 나타내었다. 리브형상부의 형성에 따라 확관율의 증가 및 두께감소가 나타났다. 형상 변화에 따른 확관율의 증가로 인해 소재 유동이 크게 발생한 것으로 분석된다. 각 형상의 성형 결함양상은 플랜지 반대부의 주름에 의한 결함과 금형의 파팅부, 상부, 리브형상부에서의 파단에 의한 결함을 보였다. 주름에 의한 결함은 높이방향으로 금형이 구동하기 때문에 소재의 유동이 제한되어 플랜지 반대부의 두께 증가로 인해 발생한다. 파단은 파팅부와 리브형상부 및 상부의 국부적인 응력집중과 변형률 집중에 따른 네킹에 의해 발생된다.

3.3 실험적 검증

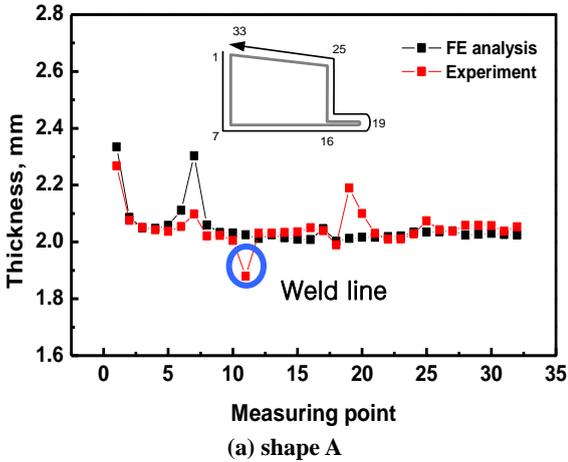
유한 요소 해석 결과를 바탕으로 중형비 1.37으로 하여 shape A와 shape B를 가지는 복합 금형을 설계하였다. 상세한 금형 설계는 CATIA V5를 이용하였고 축방향 압입량이 5mm인 공정조건으로 실험을 수행하였다. Fig. 16은 성형 완료된 플랜지부착형 성형품을 나타내었다. 성형품을 제작시 파단, 주름 등은 유한 요소 해석을 통해 예측된 부분에서 성형불량이 유사하게 나타나 결함 발생 가능성을 예측할 수 있었다[9~11].

Fig. 17에서 해석과 실험의 형상에 따른 두께분포를 나타내었다. 용접부 및 플랜지부를 제외한 두께분포는 유사한 경향을 나타내고 있다. 시편에서 플랜지부의 두께분포는 구동하는 금형과 확관하는 소재 사이의 마찰로 인해 소재의 유동을 억제시켜 두께가 증가되는 것으로 판단된다.

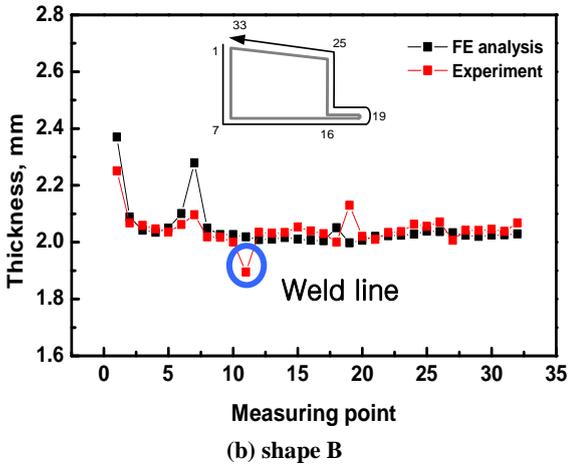
Fig. 18은 최종압력 50MPa에서 성형한 시편의 경도분포를 나타내었다. 각 모서리부, 용접부 및 플랜지부에서 경도가 높게 나타났다. 소재의 굽힘 현상에 따른 두께 변화로 경화되었음을 확인할 수 있다. 형상 B는 19~33구간에서 형상A보다 상대적으로 큰 경도분포를 보이고 있다. 리브형상부으로 인해 상부의 금형면을 따라 추가적인 변형이 일어나서 이로 인한 가공경화로 시편의 경도가 증가한 것으로 판단된다. Fig. 19에서 성형구간이 해석과 유사한 25~50MPa로 나타났고, 이 구간 내에서 플랜지 길이는 13.80~15.44mm로 나타났다.



Fig.16 Hydroformed rectangular flange



(a) shape A



(b) shape B

Fig.17 Thickness variation at measuring point

내부압력의 증가와 함께 플랜지 길이가 증가하는 경향을 보였다.

유한 요소 해석 결과와 실험 결과를 비교했을 때 두께 분포와 성형 가능 압력구간, 플랜지 길이 모두 유사한 양상으로 나타났으며, 플랜지 길이의 비교측정결과 오차가 0.85% 이내로 실험적으로 검증되었다.

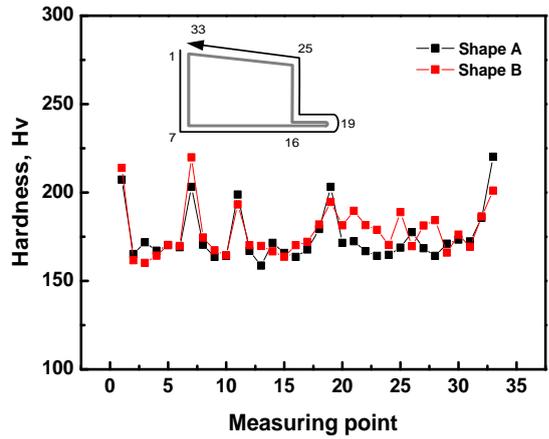


Fig.18 Hardness for measuring point

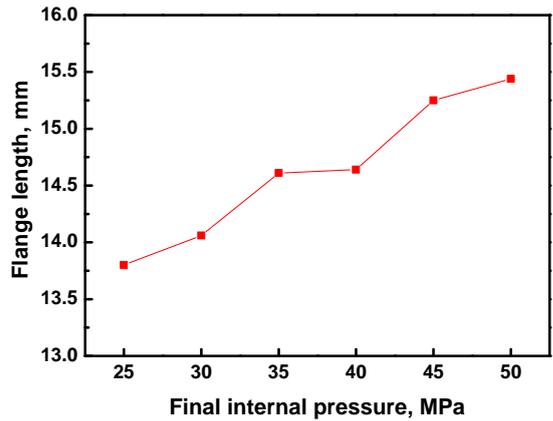


Fig.19 Flange length of hydroforming experiment

4. 결론

본 연구에서는 사각 형상 플랜지 액압성형에 대한 연구를 수행하며 공정에 영향을 미치는 인자들을 살펴보고 형상변화에 따른 성형특성을 분석하였다.

(1) 상부 금형 구동을 이용하여 사각 형상 플랜지를 가지는 액압성형 공정을 제안하였다.

(2) 이 공정을 이용하여 동일한 가로 길이일 경우 중형비의 감소와 함께 다른 영역의 확관이 줄어들고 플랜지부의 확관이 증가하여 플랜지 길이가 길어진다.

(3) 사각 형상 플랜지 형성 공정에서 형상에 따른 추가적인 확관에 의해 리브형상부의 미충진부가 발생하므로 리브형상을 가지는 사각 형상은 사각 형상보다 높은 내압이 필요하고 리브형상부

의 과단 가능성이 높아진다.

(4) 유한 요소 해석과 실제 실험의 성형양상이 아주 유사하게 나타나 이 공정을 이용한 튜브의 액압성형시 액압성형성을 예측할 수 있었다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 선도연구센터육성사업 학제간 융합분야(NCRC) (2011-0006-257) 및 지식경제부 산업 기술개발사업의 일부 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] M. Koc, T. Altan, 2002, Prediction of Forming Limits and Parameters in the Tube Hydroforming Process, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 42, No. 1, pp. 123~138.
- [2] H. L.Xing, A. Makinouchi, 2001, Numerical Analysis and Design for Tubular Hydroforming, *J. Mech. Sci.*, Vol. 43, No. 4, pp. 1009~1026.
- [3] F. dohmann, Ch. Hartl, 1997, Tube Hydroforming Research and Practical Application, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 71, No. 1, pp. 174~186.
- [4] O. Kreis, P. Hein, 2001, Manufacturing System for the Integrated Hydroforming, Trimming and Welding of Sheet Metal Pairs, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 115, No. 1, pp. 49~54.
- [5] L. Lang, G. Gu, T. Li, X. Zhou, 2008, Numerical and Experimental Confirmation of the Calibration Stage's Effect in Multi-operation Sheet Hydroforming using Poor-formability Materials, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 201, No. 1-3, pp. 97~100.
- [6] L. H. Lang, Z. R. Wang, D. C. Kang, S. J. Yuan, S. H. Zhang, J. Danckert, K. B. Nielsen, 2004, Hydroforming Highlights: Sheet Hydroforming and Tube Hydroforming, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 151, No. 1-3, pp. 165~177.
- [7] H. U. Lücke, Ch. Hartl, T. Abbey, 2001, Hydroforming, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 115, No. 1, pp. 87~91.
- [8] F. Dohmann, Ch. Hartl, 1996, Hydroforming a Method to Manufacture Light-Weight Part, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 60, No. 1-4, pp. 669~676.
- [9] H. K. Yi, Y. H. Moon, J. H. Lee, Y. S. Lee, 2007, Prediction for Forming Limit of Tube Warm Hydroforming based on the Ductile Fracture Criteria, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 16, No. 6, pp. 426~431.
- [10] I. K. Lee, J. M. Lee, Y. K. Son, C. J. Lee, B. M. Kim, 2011, Experiment and FE Analysis of Hot Curvature-forming for Aluminum Thick Plate using Grid-typed Hybrid Die, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 20, No. 4, pp. 316~323.
- [11] J. S. Kim, K. S. Kim, S. H. Shim, J. G. Eom, M. S. Joun, 2010, Die System for Avoiding Thickness Reduction Along the Bent Corner in Warm Plate Forging of an Axle Housing, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 19, No. 8, pp. 447~451.