

사각형상 플랜지 액압성형 공정 시 결합특성 분석

신세계로¹ · 주병돈¹ · 한상욱¹ · 이철환¹ · 문영훈[#]

Analysis of Defect Characterization in a Rectangular Shape Flange Hydroforming Process

S. G. R. Shin, B. D. Joo, S. W. Han, C. H. Lee, Y. H. Moon

(Received June 26, 2013 / Revised July 10, 2013 / Accepted July 15, 2013)

Abstract

The tube hydroforming process has received much attention in the automotive industry because of its advantages compared to conventional manufacturing technologies. A wide range of products such as sub-frames, camshafts, radiator frames, axles and crankshafts are made by hydroforming process. The hydroformed parts often need to be structurally joined to other components during assembly. Therefore, these automotive parts need to be manufactured with a localized attachment flange. In this study, FE forming analyses of a part with a rectangular flanged shape was performed with Dynaform 5.5. Using the optimized conditions determined numerically, hydroforming experiments were performed. Then, the characterization of defects was analyzed. Finally, the accuracy of the optimized internal pressure condition as well as that of the initial ram position were evaluated. The results demonstrated that flanged parts can be successfully produced using the tube hydroforming process.

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

1. 서론

액압성형 공정은 경량화 부품에 대한 수요가 증가함에 따라 자동차 부품 분야에서 경량화를 위한 신가공 공정 기술로서 폭넓게 이용되고 적용 범위를 넓혀가고 있는 소성가공 기술이다[1, 2]. 액압성형 공정 기술은 부품경량화 이외에도 기존 공정을 대체하는 동시에 공정을 간소화하여 부품의 일체화를 구현할 수 있다. 이와 같은 부품의 일체화는 무게 감소와 더불어 강도의 향상을 만족시킬 수 있기 때문에 원자재 이용량 절감 등의 효과도 아울러 기대할 수 있다[3~6]. 액압성형 공정을 통해 생산될 수 있는 차체 부품으로는 사이드레일(side rail), 서브프레임(subframe), 대시패널(dash panel), 필라(pillar), 레일루프(rail roof),

패키지 트레일(package trail) 등 다양한 종류가 있다[6~8]. 이러한 차체부품의 특성상 다른 부품과의 체결이 필요하다는 제약사항으로 인하여 액압성형 공정의 적용분야가 한정될 뿐만 아니라 부가적인 추가공정을 통하여 체결함으로써 차체 중량 증가 및 비용증가, 생산성 감소 등의 악영향을 받고 있다[9~12].

본 연구에서는 플랜지 부착형 부품을 제작하기 위한 액압성형 공정 변수 중 상부 금형 초기위치 및 내부 압력을 변경하면서 해석을 수행, 결합 특성을 분석하였고 그에 따른 성형 예측선도를 작성하였다. 또한 실험을 통하여 상부 금형 초기위치 및 내부 압력을 변경하면서 결합을 분석하였고 성형 예측선도를 이용한 사각형상 플랜지 성형시 결합 제거 방안을 제시, 검증하였다.

1. 부산대학교 정밀기계공학과

Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea, E-mail: yhmoon@pusan.ac.kr

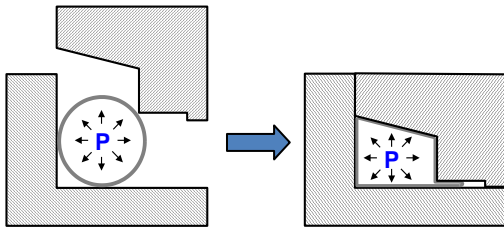


Fig. 1 Schematic drawing of flange hydroforming process

2. 연구 내용 및 방법

2.1 사각 플랜지 성형 시스템 공정

Fig. 1은 플랜지 액압성형 공정의 모식도를 나타낸 것이다. 성형을 위한 튜브 내부압력은 상부 금형의 구동 시작과 함께 선형적으로 증가하도록 설정 하였으며 상부 금형이 닫힐 때 동시에 최종압력(Pf)에 도달하도록 하였다. 피딩 또한 상부 금형이 구동됨과 함께 증가하기 시작하여 선형적으로 증가, 상부 금형이 닫힐 때 최종 목표 피딩량에 도달하도록 설정하였다.

2.2 유한요소 해석 조건 및 방법

플랜지 일체화 튜브 액압성형 공정을 이용한 사시부품 제작을 위하여 door fillet을 대상 부품으로 설정하고 공정 설계 및 특성 분석, 금형 설계를 수행하였다. 사각형상 플랜지 액압성형 공정의 해석모델은 CATIA V5에서 모델링을 하여 상용 유한요소 해석 코드인 DYNAFORM 5.5을 이용하였으며 해석조건은 Table 1에 나타내었다. 공정의 적용성 및 확장성을 검증 하고자 Fig. 2에 나타난 바와 같이 금형 중심축을 기준으로 한쪽에는 A 형상을 반대쪽은 B 형상을 가지는 제품을 대상으로 설정하였다.

2.3 실험 장비 및 조건

유한 요소 해석의 결과를 바탕으로 부품 형상에 맞게 금형을 제작하였고 실험을 수행하였다. 액압성형 장치는 4주형 하향식 유압프레스 80ton급에 최대압력 200MPa로 성형이 가능한 장치를 이용하였으며 Fig. 3에 나타내었다. 실험 조건은 위의 FE 해석조건과 동일하게 수행하였다. 소재로는 액압성형에 일반적으로 많이 이용되는 HF440을 이용하였고 실험 장비특성을 고려하여 두께 2mm, 길이 300mm의 튜브를 사용하였다. 물성은 Table 2에 나타내었다.

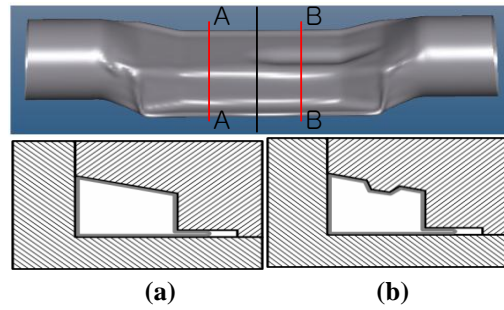


Fig. 2 Target shape for FE analysis; (a) Cross section A-A, (b) Cross section shape B-B

Table 1 FE analysis conditions

Material	HF440
Tube diameter(mm)	65.0
Tube thickness(mm)	2.0
Aspect ratio	0.73
Feeding(mm)	5
Internal pressure(MPa)	20~90
Initial ram position(mm)	0~40



Fig. 3 Hydroforming machine

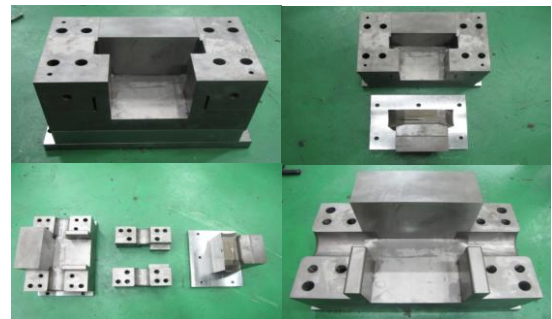


Fig. 4 Die set for experiments

Table 2 Material properties of HF440

TS (MPa)	YS (MPa)	Total EL(%)	Uniform EL(%)	n-value
466	397	32	21.8	0.11

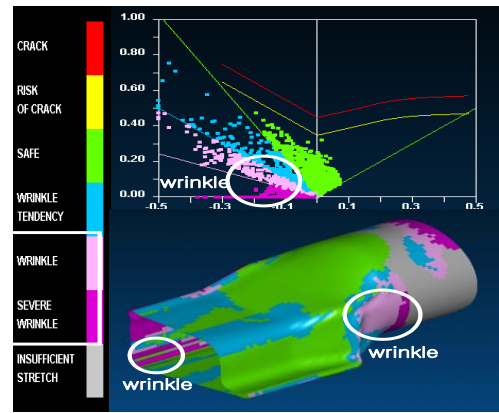
3. 결과 및 고찰

3.1 FE해석을 통한 결함 예측

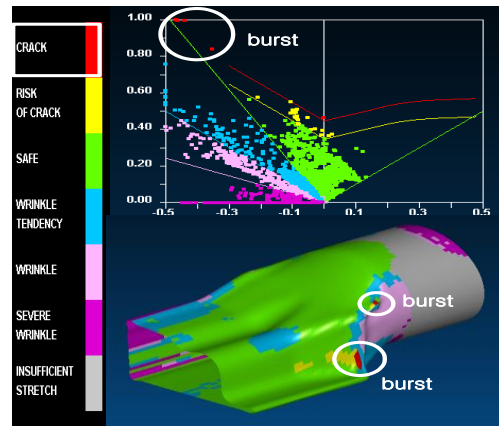
Fig. 2의 목표 형상을 바탕으로 금형 중심축을 기준으로 한쪽에는 A 형상을 반대쪽은 B 형상을 가지는 금형을 설계하였고 상부 금형 초기 위치를 0, 10, 20, 30, 40, 50mm로, 압력은 30, 50, 70, 90MPa의 조건으로 FE해석을 하였다. Fig. 6은 위의 조건들 중 초기 상부 금형 위치 40mm, 압력은 70, 90MPa에서의 FE해석결과를 나타낸 것이다.

70MPa에서는 플랜지부의 성형은 가능하였으나 제한된 금형 내부공간에서의 과도한 연신으로 인해 플랜지 반대 측면부에 주름(wrinkling)이 발생했으며 900MPa에서는 파단(burst)의 위험성이 존재했다. 압력이 증가할 경우 좌측면의 주름, 이후 파팅라인 부근에서의 파단과 같은 결함이 발생할 것으로 예상된다.

Fig. 7은 앞의 FE 해석 결과들을 이용하여 성형예측 선도를 그린 것이다. 초기 상부 금형 위치가 0mm, 즉 상부 금형이 하부 금형과 맞닿은 상태에서는 주름이 발생한다. 이는 튜브가 상부 금형이 내려오면서 일정량의 압력을 받아서 확관이 되며 상부 금형이 닫히면 확관량에 따라 플랜지부가 형성이 되는데 0mm 일 때는 초기에 플랜지부가 형성되지 않기 때문에 내부 소재가 플랜지부 쪽으로 확관되지 못하고 내부에서만 확관이 일어나 주름이 발생한 것으로 판단된다. 10~30mm구간에서는 성형이 가능하지 않았으며 30~70MPa 사이의 압력에서는 주름, 70MPa 이상의 압력에서는 파단이 발생하였다. 0mm 위치 일 때 보다 플랜지부가 형성되는 시간이 길어졌기 때문에 파단이 늦춰졌다고 판단된다. 40mm일 때의 성형여부를 보면 플랜지부가 형성되는 시간이 충분히 주어졌기 때문에 30~55MPa 사이의 압력에서는 성형이 가능하였고, 55~70MPa 구간에서는 주름이 70MPa 이상의 압력에서는 파단이 발생하였다. 50mm 일 때를 보면 성형 가능한 구간이 존재하지 않았다. 앞의 0~30mm에서는 부족한 초기 확관으로 인하여 플랜지부가 형성되지 못하여 내부에서 확관이 일어나 주름 또는 파단이 발생하였다면 50mm의 경우는 오히려 초기 확관이 일어나는 시간이 늘어나 플랜지부가 과도하게 확관하여 플랜지부 쪽에 주름이 발생하였고 70MPa 이상의 압력에서는 파단이 발생하였다.



(a)



(b)

Fig. 6 FLD at various internal pressure; (a) Pf = 700bar (wrinkle), (b) Pf = 900bar (burst)

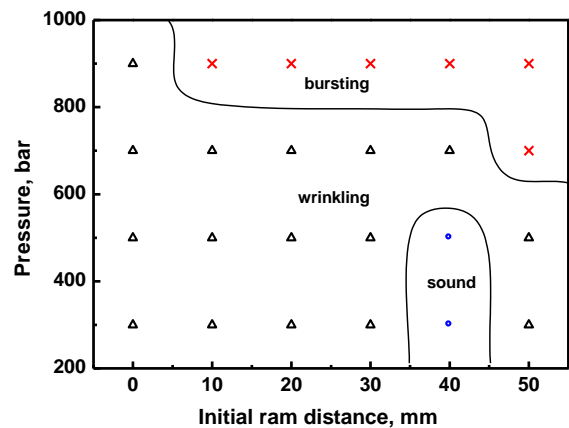
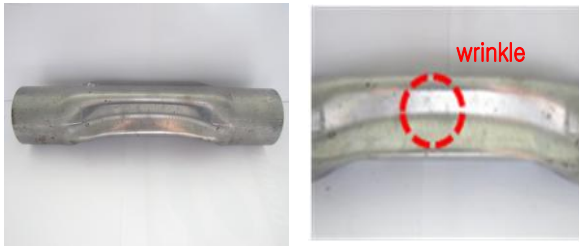
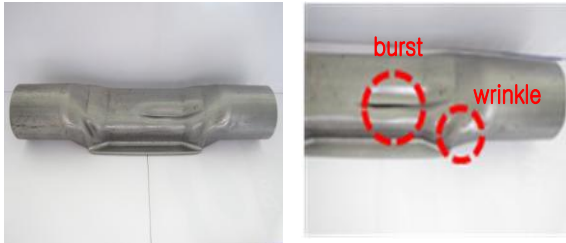


Fig. 7 Formability diagram for final shape

이 결과를 보면 FE해석을 이용한 사각형상 플랜지 형성을 위한 최적의 초기 상부 금형 위치는 40mm이며 압력은 30~55MPa의 범위이다.



(a)



(b)

Fig. 8 Defects at hydroformed flanged part; (a) wrinkle, (b) burst and wrinkle

3.2 실험적 검증을 통한 결함 분석

앞의 FE해석결과들을 검증하기 위해 FE해석 조건과 동일하게 실험을 수행하였으며 Fig. 8에 사각형상 플랜지 액압성형시 나타나는 A, B 형상의 결함들을 나타내었다.

(a)의 경우 초기 상부 금형 위치 20mm에서 수행을 하였으며 압력을 올림과 동시에 상부 금형을 서서히 내리면서 상부 금형이 닫힌 후 50MPa까지 성형을 한 결과이다. 상부 금형이 닫히기 전에 충분한 플랜지부가 형성되지 못하여 제한된 금형 내부공간에서의 과도한 연신으로 인해 플랜지 반대 측면부에 주름과 같은 결함이 발생하였다. 앞의 Fig. 6의 성형 예측 선도에서도 20mm, 50MPa에서는 주름영역이었으므로 실험과 해석이 일치하는 경향을 보였다.

(b)의 경우는 초기 금형 위치 0mm에서 수행을 하였으며 압력을 70MPa 까지 압력을 올려 실험을 한 결과이다. 앞의 (a)와 마찬가지로 충분한 플랜지부가 형성되지 못하였고 금형 내부공간에서의 과도한 연신으로 인해 주름이 발생하였고 FE해석으로 얻은 성형 한계 압력인 50MPa 이상의 압력을 받아 B 형상부분의 리브(rib)부분에 파단도 발생한 것을 알 수 있다. 이 결과 또한 Fig. 6의 성형 예측 선도의 0mm, 70MPa 조건의 파단 영역과 일치하는 경향을 보였다



Fig. 9 Sound flanged part

Fig. 9는 앞의 성형 예측선도에서의 sound 영역인 초기 상부 금형 위치 40mm, 내부 압력 30MPa에서 실험한 결과이며 그림과 같이 성형이 성공적으로 수행되었고 해석결과와 일치하였다.

실험을 수행해본 결과 사각형상 플랜지부를 형성하기 위한 최적의 조건은 상부 금형 초기위치 40mm, 압력은 20~50MPa 범위였으며 이 결과들을 앞의 성형 예측 선도와 비교하였을 때 모두 일치하는 경향을 보여 실험적으로 검증되었고 Fig. 6의 예측 선도를 이용한다면 결함 없는 사각형상 플랜지 형상을 성형할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 사각형상 플랜지 일체화 튜브 액압성형 공정을 이용한 사시 부품 제작을 위한 공정을 설계하였고, 금형 구동시점 및 내부 압력에 따른 결함특성을 해석 및 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 상부 금형 구동을 이용하여 사각형상 플랜지를 가지는 액압성형 공정을 설계하였고 FE해석을 이용하여 상부 금형 초기위치, 압력 등의 조건들에 대한 성형 예측 선도를 그렸다.

(2) FE해석을 이용하여 얻은 성형 한계압력인 50MPa 이상의 압력이 작용하면 주름이나 파단과 같은 결함이 발생하는 것을 실험을 통해 확인하였다.

(3) 상부 금형 초기위치 0~30mm 범위에서는 결함이 발생하는 것을 실험을 통해 확인하였다.

(4) FE해석을 이용한 성형 그래프를 실험에 적용한 결과, FE 해석과 유사한 경향을 나타냈으며 결함을 해결할 수 있었다. 본 실험에서의 적정 성형 압력 조건은 20~50MPa이며 초기 상부 금형의 위치는 40mm이다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2012R1A5A1048294).

REFERENCES

- [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, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 43, No. 4, pp. 1009~1026.
- [3] H. K. Park, H. K. Yi, C. J. Van Tyne, Y. H. Moon, 2009, Strain Hardening Behavior during Manufacturing of Tube Shapes by Hydroforming, *Met. Mater. Int.*, Vol. 15, No. 6, pp. 897~902
- [4] F. dohmann, Ch. Hartl, 1997, Tube Hydroforming Research and Practical Application, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 71, No. 1, pp. 174~186.
- [5] Y. Y. Qian, C. Dave, K. Medhat, 1998, Towards Further Understanding of the Mechanics of Tube Hydroforming, *SAE*, p. 982276.
- [6] M. Koc, T. Altan, 2001, An Overall Review of the Tube Hydroforming (THF) Technology, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 108, No. 3, pp. 384~393.
- [7] S. J. Yuan, C. Han, X. S. Wang, 2006, Hydroforming of Automotive Structural Components with Rectangular-sections, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 46, No. 11, pp.1201~1206.
- [8] 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.
- [9] H. -U. Lücke, Ch. Hartl, T. Abbey, 2001, Hydroforming, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 115, No. 1, pp. 87~91.
- [10] H. J. Lee, B. D. Joo, M. K. Choi, Y. H. Moon, 2010, Effect of Process Parameters on Forming Characteristics of Flange Hydroforming Process, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 19, No. 2, pp. 113~119.
- [11] H. L. Xing, A. Makinouchi, 2001, Numerical Analysis and Design for Tubular Hydroforming, *J. Mech. Sci.*, Vol. 43, No. 4, pp. 1009~1026.
- [12] S. H. Kim, S. Y. Kim, C. H. Jeon, B. D. Joo, Y. H. Moon, 2012, Effect of Process Parameters on Hydroforming Characteristics of Rectangular Shape Flange, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 21, No. 1, pp. 42~48.