

## 플랜지 형성 액압성형시 공정변수에 따른 성형 특성

이호진<sup>1</sup> · 주병돈<sup>1</sup> · 최민규<sup>1</sup> · 문영훈<sup>#</sup>

# Effect of Process Parameters on Forming Characteristics of Flange Hydroforming Process

H. J. Lee, B. D. Joo, M. K. Choi, Y. H. Moon

(Received December 4, 2009 / Revised February 22, 2010 / Accepted February 23, 2010)

### Abstract

Hydroforming is the technology that utilizes hydraulic pressure to form tube or sheet materials into desired shapes inside die cavities. Tube hydroforming provides a number of advantages over the conventional stamping process, including fewer secondary operations, weight reduction, assembly simplification, adaptability to forming of complex structural components and improved structural strength. In many case, hydroformed parts have to be structurally joined at some point. Therefore it is useful if the hydroformed automotive parts can be given a localized attachment flange. In this study for the numerical process design FE analysis was performed with DYNAFORM 5.5. Die parting angle and circumferential expansion ratio was optimized. With optimized condition, bulge and hydroforming experiments to form flange were performed. Forming characteristic at various pressure conditions was analyzed and optimized internal pressure condition was evaluated. The results show that flanged parts can be successfully produced by tube hydroforming process.

**Key Words** : FEM, Flange, Tube Hydroforming, Flange Hydroforming, Flanged Tubular Parts

### 1. 서 론

최근 들어 지구 대기 오염 및 온난화 등의 환경 문제로 인하여 자동차의 오염물질 배출에 대한 규제가 점차 강화되어 가고 있는 추세이다. 이로 인하여 세계의 우수 자동차 업체들은 차량경량화와 이를 통한 연비 향상에 막대한 개발비와 노력을 투입하고 있고 이러한 노력의 하나로 액압 성형 공정이 주목 받고 있다[1~3]. 액압 성형 공정은 성형 후 재료의 국부적인 경화영역, 정밀한 제품 생산 가능, 제품의 강성 증가, 가격 경쟁력 향상, 부품 개수 감소에 의한 경량화 등의 장점이 있다. 현재 액압 성형 기술을 적용하여 생산하고 있는 자동차 부품에

는 사이드레일(side rail), 서브프레임(subframe), 대시패널(dash panel), 필라(pillar), 레일루프(rail roof), 패키지 트레일(package trail)등 다양한 종류가 있다[4~6]. 이러한 차체 부품은 특성상 볼트체결 또는 용접을 통해 다른 부위와 체결이 이루어져야 한다는 제약 사항이 있다[7~10].

본 연구에서는 플랜지부를 형성하기 위한 액압 성형 공정변수 중 확관률 및 파팅각도(parting angle)의 값을 변경하면서 해석을 수행하고 그에 따른 특성을 분석 하였다. 그리고 해석결과를 바탕으로 금형을 설계 제작하였다. 또한 실험을 통해 압력에 따른 플랜지부 형성 특성을 분석하고 플랜지 형성 액압 성형 최적화를 위한 방안을 제시, 검증하였다.

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

## 2. 연구 내용 및 방법

### 2.1 플랜지 형성 액압 성형 공정 설계

Fig. 1 에 플랜지 형성 액압 성형 공정의 개략도를 나타내었다. 공정의 편의성 및 현장 적용성을 위하여 상부의 금형만이 액압성형 공정 중 구동 되도록 하였으며 공정은 예비성형(pre-forming), 플랜지성형(flange forming), 마무리성형(conforming shape)의 3단계로 이루어진다. 예비성형단계에서는 상부 외부 금형이 완전히 닫히지 않은 상태에서 튜브 내부에 액압이 가해지고 열려있는 플랜지부로의 확관이 유도된다. 플랜지성형 단계에서는 열려있던 상부 외부 금형이 닫히며 플랜지가 형성되고 마무리성형 단계에서는 추가적인 내압이 가해지고 코너부가 충진되며 공정이 끝나게 된다.

플랜지 형성 액압 성형 공정의 해석모델은 Fig. 2 와 같이 CATIA V5 에서 모델링 후 상용 유한요소해석 코드인 DYNAFORM 5.5 에서 해석을 진행하였다. 대칭 조건이기 때문에 시간절약을 위하여 1/4 모델을 이용하였으며, 해석에 사용된 소재는 탄소강인 DP500을 사용하였다. 확관률 및 파팅각도를 공정 변수로 설정하여 해석을 수행하고 그에 따른 특성을 분석 하였다.

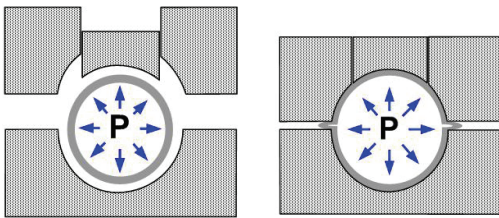


Fig. 1 Schematic cross-sectional view of the proposed hydroforming process

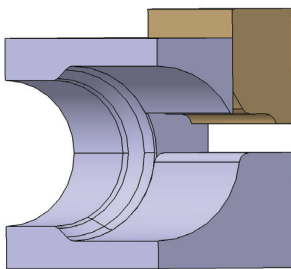


Fig. 2 Mold modeling by CATIA V5

Table 1 FE analysis condition

feeding (mm)	9.0
tube diameter (mm)	65.0
tube thickness (mm)	2.0
internal pressure (bar)	100~2000
parting angle (°)	15, 30, 45, 60
circumferential expansion ratio (%)	0, 10, 20

### 2.2 압력조건에 따른 플랜지부 형성 특성

DYNAFORM 5.5를 이용한 FE해석의 결과를 바탕으로 소재의 직경 대비 10%의 확관율, 45°의 파팅각도로 금형을 제작하고 실험을 수행하였다. 액압 성형 실험장치로는 4주형 하향식 유압 프레스 80ton 급에 최대 압력 2000bar로 성형이 가능한 장치를 이용하였으며 시험소재로는 인장강도 466Mpa, 직경 65.0mm, 두께 2.0mm의 탄소강 튜브를 이용하였다. 공정의 특성상 최종 압력(P<sub>f</sub>)뿐만 아니라 플랜지부 금형이 구동되는 시점의 압력(P<sub>i</sub>) 또한 주요인자로 작용하기 때문에 식 (1)을 이용해 압력조건을 설정하고 변수에 따른 플랜지부 형성 특성을 분석 하였다.

$$P_i = \frac{P_f}{10} \times i \quad (i = 1, 2, \dots, 9, 10) \quad (1)$$

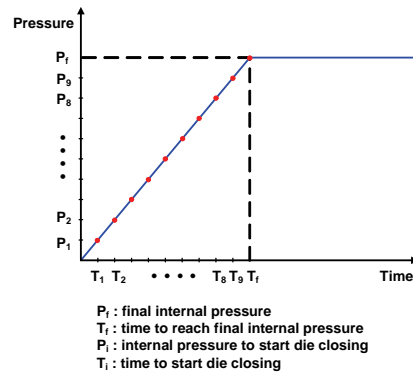


Fig. 3 Pressure condition of hydroforming process for flanged tubular parts

Table 2 Material property of the tube specimen

tensile strength (Mpa)	yield strength (Mpa)	total elongation (%)	uniform elongation (%)	n-value
466	397	32	21.8	0.11

Table 3 Experimental condition

feeding (mm)	6.0
tube diameter (mm)	65.0
tube thickness (mm)	2.0
$P_f$ (bar)	200~900
$P_i$ (bar)	$0.1 P_f \sim 1.0 P_f$

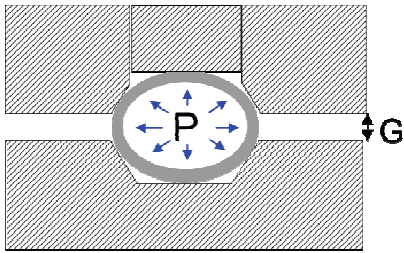


Fig. 4 Schematic cross-sectional view of gap

### 2.3 플랜지부 형성 액압 성형을 위한 압력 조건의 최적화

플랜지 액압 성형 공정의 최적화를 위한 추가적인 분석을 수행하였다. 하부 금형과 상부 외부 금형과의 간격(G)을 0mm, 4mm, 8mm, 12mm 로 일정하게 유지한 상태에서 내부 압력을 증가시켜 간격에 따른 파단 압력을 확인하였다. 이 결과와 플랜지 형성 액압성형 결과와의 비교 분석을 수행하여 상관관계를 파악하고 압력조건을 최적화를 위한 방안을 제시하였다. 이를 바탕으로 최적화 조건에서의 플랜지 형성 부품을 제작하고 부품의 특성을 분석 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 공정 설계를 위한 FE해석

확관율과 파팅각도에 따른 플랜지부 형성여부를 알아보기 위해 플랜지 금형의 구동 시점( $P_i$ )을  $0.2P_f$  로 고정하고 최종압력( $P_f$ )을 100~2000bar 범위로 조절하여 해석을 수행하였다.

#### 3.1.1 확관율에 따른 FE해석

Fig. 5 는 확관율에 따른 플랜지 형성구간을 나타낸 것이다. 0% 의 경우는 700bar, 10% 의 경우는 500~800bar 의 최종압력 범위에서 플랜지부가 형성되었으며 20% 의 경우는 최종압력 1100~1500bar의 범위에서 플랜지부가 형성되어 상대적으로 고압의 조건을 나타내었다. 확관률이 증가함에 따라

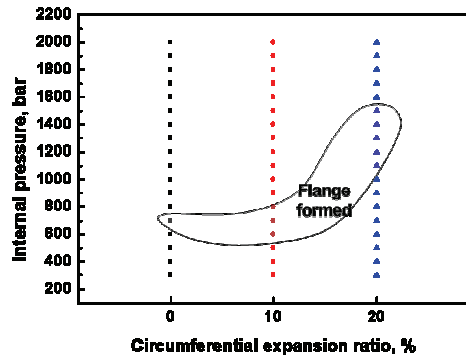


Fig. 5 Process window for circumferential expansion

소재의 유동이 자유로워 성형 가능 범위가 증가하는 것으로 판단되나 확관률 20% 의 경우 금형의 충진 및 플랜지부 형성을 위해 많은 변형이 필요하고 이를 위해서 상대적으로 높은 내압이 가해져야 함을 확인 할 수 있다. 확관율의 조건(0%, 10%, 20%)에서 플랜지부의 평균 두께는 원소재의 두께에 비해 각각 +4.01%, -7.44%, -11.09% 증가, 감소하는 것으로 나타났다. 0% 일 때는 축압입에 의해 소재가 밀려들어가게 되지만 소재의 확관은 제한되어 두께의 증가가 나타났고 확관률의 증가에 따라 소재의 두께는 감소하였다. 이는 앞서 언급한 확관률의 증가에 따라 많은 변형이 가해져야 하고 이로인해 상대적으로 높은 내압이 필요함을 보여 준다.

#### 3.1.2 파팅각도에 따른 FE해석

Fig. 6 은 파팅각도에 대한 정의를 나타낸 것이다. Fig. 7 는 파팅각도가 15°, 30°, 45°, 60° 일 때 내압에 따른 플랜지부 형성여부를 나타내었다. 파팅각도가 15° 일 때 플랜지는 형성이 되지 않았으며 30° 일 때의 최종압력( $P_f$ )은 1300~1500bar, 45° 일 때 500~700bar, 60° 일 때 1000~1200bar 사이에서 플랜지부가 형성이 되는 것을 알 수 있다. 파팅각

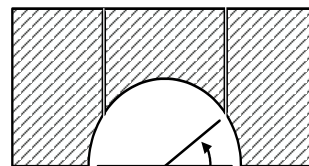


Fig. 6 Definition of parting angle

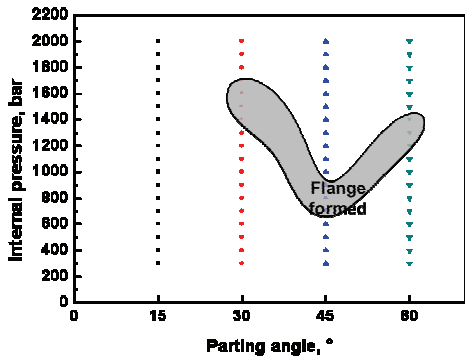


Fig. 7 Process window for parting angle

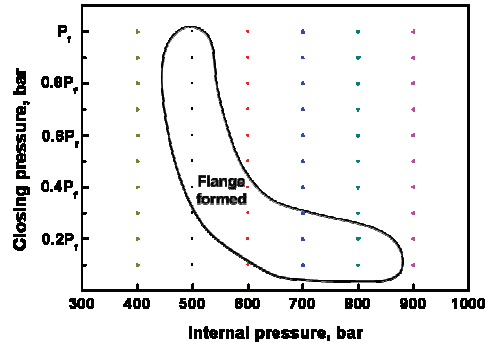


Fig. 8 Process window for pressure condition

도가 작을 경우 플랜지부로 확관이 일어나는 부분은 작아지게 되고, 제한된 공간 내에서 플랜지 형성을 위한 충분한 확관이 일어나기 위해서는 높은 내압을 필요하게 된다. 파팅각도가 클 경우에는 플랜지부의 확관뿐만 아니라 동시에 불필요한 확관(구동되는 플랜지 금형과 구동되지 않는 금형 사이의 확관)까지 함께 일어나게 되어 높은 내압을 필요로 한다. 45°의 경우 플랜지부의 확관만 일어나게 되고 불필요한 확관이 일어나지 않기 때문에 낮은 압력에서 플랜지부 성형 영역이 나타남을 볼 수 있다.

플랜지부의 길이를 비교하기 위해 파단이 일어나지 않은 가장 높은 최종압력( $P_f$ )을 최적의 조건으로 잡아 플랜지부의 길이를 측정하였다. 플랜지부의 길이는 30°, 45°, 60° 일 때 각각 4.3mm, 4.9mm, 4.6mm 로 나타났으며 45° 일 때 플랜지부의 길이가 가장 길게 나타났다. 이 결과는 앞서 언급한 45°의 파팅각도가 최적이라는 경향과 일치한다.

### 3.2 압력조건에 따른 플랜지부 성형 특성

FE해석 결과를 바탕으로 하여 확관을 10%, 파팅각도 45°의 금형을 설계하여 실험을 수행하였다. Fig. 8 에서 압력조건에 따른 플랜지부 형성범위를 나타내었다.  $P_f$  가 500~800bar 인 경우 플랜지 금형의 구동시점을 조절함에 따라 플랜지부가 형성이 됨을 알 수 있다.  $P_f$  가 500bar 인 경우 플랜지가 형성이 되는  $P_i$  의 범위는  $0.3 P_f \sim 1.0 P_f$  의 영역으로 나타났으며  $P_f$  가 800bar 인 경우 플랜지가 형성이 되는  $P_i$  의 범위는  $0.1 P_f \sim 0.2 P_f$  의 영역으로 나타났다.  $P_f$  가 증가 할수록 플랜지가 형성이 되는  $P_i$  의 영역은 줄어들고, 플랜지 금형의

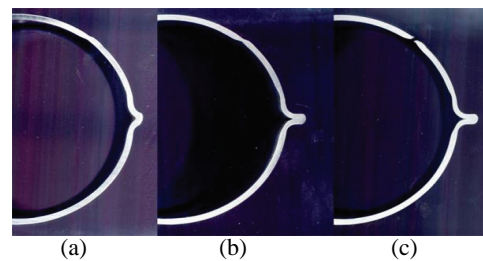


Fig. 9 Sectional images of flanged tube part;  $P_i = 200\text{bar}$ , (a)  $P_f = 400\text{bar}$ , (b)  $P_f = 700\text{bar}$ , (c)  $P_f = 1000\text{bar}$

구동시점은 빨라지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 금형이 닫혀지지 않은 상태에서 성형이 시작되고 성형 중 내압이 증가하는 공정의 특성에서 찾을 수 있다. 플랜지 금형과 하부 금형과의 간격을 12mm,  $P_f$ 를  $0.5P_f$ 로 두고 성형을 수행할 경우 간격이 6mm로 줄었을 시점의 내부 압력을 살펴보면  $P_f$ 가 500bar일 경우 375bar,  $P_f$ 가 800bar 일 경우에는 600bar가 된다. 일정한 금형 간격에서의 소재 파단 압력은 변하지 않는 상수임을 감안하면 최종압력  $P_f$ 가 증가할수록 파단을 방지하기 위해서는 더욱 낮은  $P_i$ 에서 플랜지 금형을 구동 시켜야 함을 확인할 수 있다. Fig. 9는 동일한 200bar의 플랜지금형 구동내압 조건에서 최종압력에 따른 단면 형상을, Fig. 10은 동일한 최종압력조건에서 플랜지금형구동내압에 따른 단면 형상을 나타낸 사진이다. 200bar의 플랜지구동내압이 작용할 때 400bar, 700bar, 1000bar의 최종내압조건에서 플랜지의 길이는 각각 2.2mm, 5.2mm, 5.4mm였고 500bar의 최종내압이 작용할 때 플랜지금형 구동내압이 200bar에서 300bar로

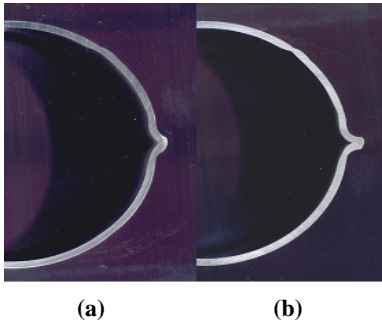


Fig.10 Sectional images of flanged tube part;  $P_f = 500\text{bar}$ , (a)  $P_i = 200\text{bar}$  (b)  $P_i = 300\text{bar}$

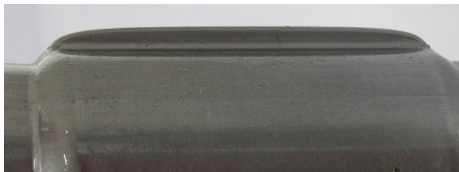


Fig.11 Flanged tube part ( $P_i = 200\text{bar}$ ,  $P_f = 800\text{bar}$ )

증가함에 따라 플랜지의 길이는 2.1mm, 3.9mm 로 증가하였다. 즉,  $P_f$  및  $P_i$  가 증가하여 파단역에 근접할수록 플랜지 길이가 길어짐을 확인 할 수 있었다. 성형시 취약부위는 모든 압력조건에서 파팅 각도 45° 부근에서 가장 얇은 두께를 나타내었으며  $P_i = 200\text{bar}$ ,  $P_f = 1000\text{bar}$  의 조건에서는 파단이 발생하였다.

### 3.3 플랜지부 성형을 위한 압력 조건의 최적화

플랜지 형성 액압 성형 공정에서 파단영역을 구하기 위하여 구동되는 플랜지 금형을 고정하고 자유확관 실험을 시행하였고 Fig. 12 에 나타낸 파단역 곡선을 얻었다. 간격이 0mm, 4mm, 8mm, 12mm 의 경우 파단압력은 각각 1200bar, 800bar, 500bar, 400bar 부근에서 나타났고 간격이 작아짐에 따라 파단 압력이 비선형적으로 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 파단부의 위치는 0mm, 4mm 의 경우 하부금형의 코너부에 의해 파단이 일어났으며 8mm, 12mm 인 경우에는 상부 금형의 파팅위치에서 파단이 일어났다. 파팅위치에서 파단이 일어나는 것인 전체 금형에서 이 부위가 곡률이 가장 작은 부분이기 때문이며 간격이 작은 경우 소재는 외부 플랜지 금형에 의해 유도되

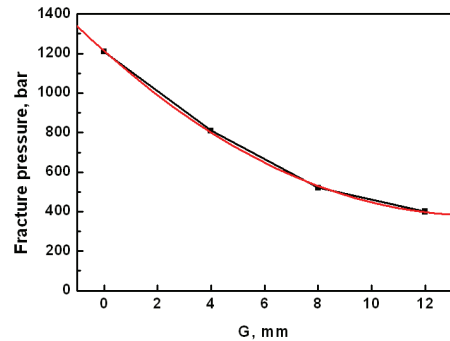


Fig.12 Fracture pressure of bulge test

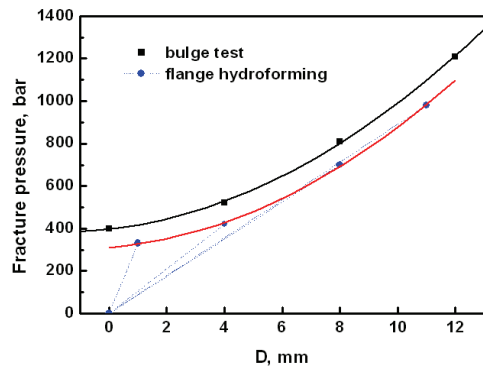


Fig.13 Fracture pressure of flange hydroforming process

어 파팅각도의 영향을 받지 않게 되고 하부금형의 코너부에서 파단이 일어나는 것으로 판단된다. Fig. 13 은 플랜지 금형이 구동 될 때의 파단역의 곡선을 나타낸 것으로 초기의 간격은 12mm 이다. 변위(D)와 간격(G)의 상관관계를 식 (2)에 나타내었다.

$$D = 12 - G \quad (2)$$

플랜지 액압 성형 공정 시 파단압력은 자유확관 실험에서 얻어진 파단압력보다 50bar~100bar 낮은 구간에서 형성 됨을 알 수 있다. 이는 플랜지 금형이 구동을 하게 됨에 따라 소재와 접촉이 일어나게 되고, 소재와 금형의 마찰과 소재의 국부적인 연신이 발생하기 때문이라고 예측된다.

플랜지 형성 액압성형 공정을 최적화하기 위한 압력 조건을 Fig. 14에 나타내었다. 변위가 0~8mm 인 구간에서 앞선 실험을 통한 파단역 곡선보다 50bar 낮은 압력을 유지하도록 지속적으로 제어 하였으며 최종변위인 12mm 에서 200bar가 낮은

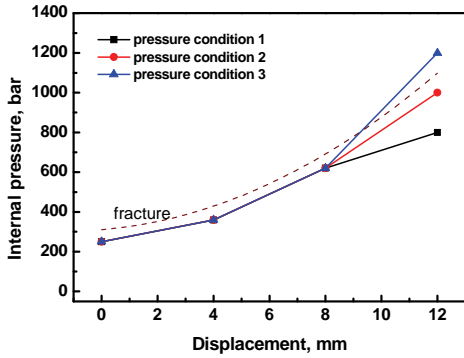


Fig. 14 Hydroforming process for pressure condition

경우(pressure condition 1), 50bar가 낮은 경우(pressure condition 2), 100bar 높은 경우(pressure condition 3)와 같은 조건으로 실험을 수행 하였다. Pressure condition 1의 경우 플랜지부의 길이는 5mm 부근에서 형성이 되었지만 내압이 과단역 곡선을 따라 비선형적으로 제어된 경우 플랜지 길이는 7mm 부근으로 월등히 길게 형성이 됨을 알 수 있다. 이는 과단역 부근으로 지속적으로 제어함으로써 플랜지 형성 액압성형 부품을 성공적으로 제작할 수 있음을 보여준다.

### 3.4 플랜지 형성 액압 성형품의 두께 및 경도

Fig. 15에  $P_f = 700\text{bar}$ ,  $P_i = 200\text{bar}$ 에서 성형한 시편의 두께와 경도 분포를 나타내었다. 플랜지부 금형이 구동되는 상부의 두께변화가 단순 확산만이 작용하는 하부의 두께변화보다 크게 나타났다. 특히 플랜지부가 형성이 되는  $+15^\circ \sim -15^\circ$  부근과 파팅각도인  $+45^\circ$  부근의 두께가 급격히 감소하였고 플랜지 끝단의 경우 증가하여 나타났다. 액압 성형 전 164HV를 나타내던 시편의 경도는 성형 후 200HV~260HV로 증가하였다. 초기 튜브의 직경 65.0mm 보다 10% 증가한 71.5mm의 직경을 가지는 금형면을 따라 성형이 이루어지며 전체적으로 소성변형이 발생하였고 이로 인한 가공경화로 시편의 경도가 증가한 것으로 판단된다. 또한  $+15^\circ \sim -15^\circ$  부근과 파팅각도인  $+45^\circ$  부근의 경도가 다른 부분에 비해 높은 것으로 나타나 두께의 증감에 상관없이 두께 변화 폭이 큰 부분에서 경도가 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 이것 또한 앞서 언급한 바와 같이 가공경화의 효과로 설명 할 수 있다.

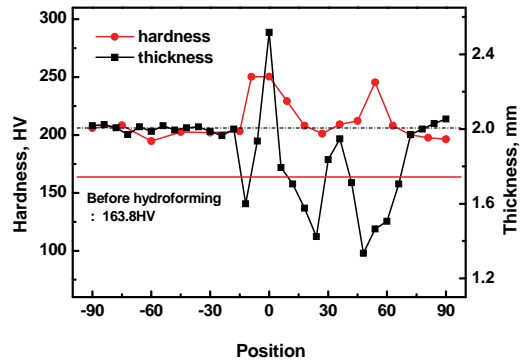


Fig.15 Thickness and hardness of flanged tube parts ( $P_f = 700\text{bar}$ ,  $P_i = 200\text{bar}$ )

## 4. 결론

본 연구에서는 플랜지 형성 튜브 액압 성형품 제작을 위한 공정을 제안하였고 FE 해석 및 실험적 검증을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 상부 분리형 금형을 이용한 튜브 액압 성형 공정을 통해 플랜지가 부착된 성형품을 얻을 수 있다.

(2) 최종압력( $P_f$ )뿐만 아니라 플랜지부 금형이 구동되는 시점의 압력( $P_i$ ) 또한 플랜지부의 성형에 큰 영향을 미치며 성형가능구간 내에서 과단역에 근접한 조건일수록 플랜지의 길이는 증가한다.

(3) 제안한 플랜지 형성 액압성형 공정의 과단 압력은 별지 시험을 수행하여 예측할 수 있다. 수행된 조건의 경우 액압성형공정의 과단 압력이 별지 시험의 과단압력보다 약 100bar 낮게 나타났다.

(4) 내압을 과단역에 근접하도록 지속적으로 제어함으로써 플랜지부의 길이를 증가시킬 수 있다.

## 후 기

이 논문은 교육과학기술부/한국과학재단 국가핵심 연구센터사업 및 지식경제부 산업기술개발사업의 일부 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

[1] M. Koc, T. Altan, 2002, Prediction of forming limits and parameters in the tube hydroforming

- process, J. Machine Tools and Manufacture, Vol. 42, pp. 123~138.
- [2] H. L. Xing, A. Makinouchi, 2001, Numerical analysis and design for tubular hydroforming, J. Mech. Sci., Vol. 43, pp. 1009~1026.
- [3] J. H. Oh, H. H. Choi, S. H. Park, 2008, The optimization of rear suspension using hydroforming, Trans. Mater. Process., Vol. 17, No. 7, pp. 481~485.
- [4] F. dohmann, Ch. Hartl, 1997, Tube hydroforming research and practical application, J. Mater. Process. Technol., Vol. 71, pp. 174~186.
- [5] H. Mizukoshi, H. Okada, H. Wakabayashi, 1999, Tee fitting hydraulic formability of aluminum alloy tubes, Advanced Technology of Plasticity, Vol. 2, pp. 1189~1194.
- [6] Yuan-Yao Qian, Dave Cattran and Medhat Karima, 1998, Towards further understanding of the mechanics of tube hydroforming, SAE p. 982276.
- [7] O. Kreis, P. Hein, 2001, Manufacturing system for the integrated hydroforming, trimming and welding of sheet metal pairs, J. Mater. Process. Technol., Vol. 201, pp. 49~54.
- [8] 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, pp. 97~100.
- [9] 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, pp. 165~177.
- [10] N. Asnafi, A. Skogsgardh, 2000, Theoretical and experimental analysis of stroke-controlled tube hydroforming, Mater. Sci. Eng., A, Vol. 279, pp. 95~110.