

자동차 연료탱크용 링 플레이트의 신 제조공법

채명수¹, 임용희², 서영성³, 김영석[#]

A New Manufacturing Process for the Ring Plate of Automobile Fuel Tank

M. S. Chae, Y. H. Lim, Y. S. Suh, Y. S. Kim

Abstract

Currently, in automobile industry, the efforts to reduce the manufacturing cost by changing the process of manufacturing are continually performed. In this paper, we proposed a new manufacturing process, the roll bending of a ring plate of automotive fuel tank instead of conventional press blanking process to reduce material loss and manufacturing cost. Finite element analysis was used to optimize the roll bending process to assure rectangular cross-section of the ring plate. Also, spring-back analysis after the roll bending was performed and dimension of the bending die considering spring-back was analyzed. Finally, we verified a possibility for realization of the proposed method shape with prototypes.

Key Words : New manufacturing process (신 제조공법), Ring plate (링 플레이트), Special cross-section (이형단면), Finite element analysis (유한요소해석), Spring-back (스프링 백), Prototype (시제품).

1. 서론

현재 자동차 산업은 원자재 가격 및 유가상승으로 인하여 원가부담 가중과 수익률 악화에 직면해있다. 따라서 이의 타개를 위해 원가절감, 인수합병, 품질향상, 마케팅 활동강화 등 여러 노력들을 기울이고 있다. 그 중 각 기업은 자동차 기업간 가격경쟁력을 강화하고 경쟁우위를 점유하기 위해 제조원가 절감을 위한 제조기술의 혁신 연구들을 지속적으로 수행해오고 있다.

본 연구에서는 자동차 연료 탱크를 대상으로 사용되는 부품, 특히 연료 탱크에 부착되어 잔류 연료 측정게이지, 공기배출구, 연료배출구 등을 부착할 수 있도록 지지대 역할을 하는 부품인 링 플레이트(Fig. 1)의 제조공정의 개선을 통해 부품사의 가격 경쟁력을 확보하고자 하였다.

현재 링 플레이트의 제조 방법은 Fig. 2 (a)와 같이 판재를 블랭킹(Blanking) 후 피어싱(Piercing)하는 프레스 성형방식이다. 이로 인해 막대한 재료

손실이 발생하고 원가상승의 주 원인이 됨으로써 가격경쟁력을 저하시킨다. 따라서 재료손실을 줄여 가격경쟁력을 강화시키기 위해 기존의 프레스 성형방식과 달리 Fig. 2 (b)와 같이 이형단면 스트레이트 바를 롤 벤딩 가공 후 제품의 끝단면을 용접하는 롤 벤딩 공정[1-3]으로 개선하고자 한다.

본 제품에 대한 연구는 아직 국내외에서 시도된 바가 없으며, 관련자료 또한 보고된 바가 없다. 롤 벤딩 공정에 의해 제조되는 부품으로는 스프링 와셔(Spring washer), 코일 스프링(Coil spring) [4]등이 있다.

벤딩 공법의 대표적 예로는 파이프 벤딩, 튜브 하이드로포밍용 벤딩[5-6] 등이 있으며, 여기서는 주로 멘드렐(Mandrel)을 사용하여 파이프의 형상과 두께를 제어하고 있다. 지금까지의 연구들은 대부분 파이프를 사용하는 벤딩 공정에 대한 연구들이었으며, 사각 소재에 대한 롤 벤딩 기술은 보고된 바가 적다. 사각 소재의 벤딩 시에는 멘드렐과 같은 보조 금형을 사용할 수 없기 때문에

1. 경북대학교 기계공학과

2. 신화

3. 한남대학교 기계공학과

교신저자: 경북대학교 기계공학부, E-mail: caekim@knu.ac.kr

원하는 단면형상을 정밀하게 제어하기 어려운 단점이 있다. 사각 소재의 롤 벤딩 공정 설계에서는 성형 시 발생하는 두께 변화를 고려하여 초기의 단면 치수를 외측과 내측이 다른 이형단면을 가지는 소재를 사용하여야 한다. 또한 벤딩성형 시 발생하는 스프링 백(Spring-back)을 정밀하게 예측해서 이를 반영한 성형공정 변수들이 선정되어야 한다.

롤 벤딩 해석 시 스트레이트 바는 중립축을 기준으로 인장과 압축을 동시에 받기 때문에 가공 후 균일한 단면을 얻기 위해서는 초기 이형단면을 가진 스트레이트 바를 필요로 한다.

본 연구에서는 내경이 140.6 mm, 외경이 162.6 mm, 두께가 6.0 mm 이고, 내·외경의 치수공차가 ± 0.2 mm 이내 이면서 두께가 ± 0.1 mm 이내로 품질관리 되고 있는 연료탱크용 링 플레이트의 제조 공정(롤 벤딩)을 대상으로 ABAQUS Version 6.5 를 이용한 유한요소 해석을 통해 롤 벤딩용 소재인 스트레이트 바의 이형단면을 도출하였다. 또한 롤 벤딩 해석 후 스프링 백 해석을 수행하였고, 롤 벤딩 다이의 내경을 변경시켜 스프링 백을 고려한 벤딩 다이의 적절 치수를 도출하였다. 마지막으로 시제품을 제작하여 이론 및 유한요소해석 결과와 비교함으로써 제품의 형상구현이 가능함을 확인하였다.

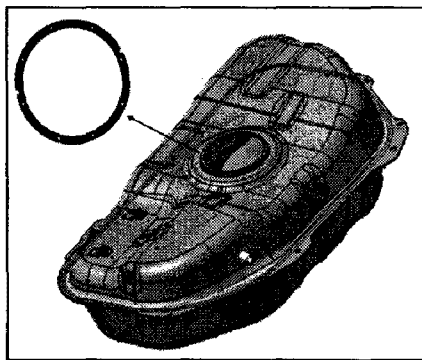


Fig. 1 Ring-plate of the fuel tank

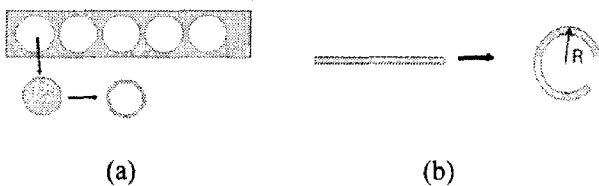


Fig. 2 Comparison between conventional press process (a) and designed roll bending process of straight bar (b)

2. 이론적 배경 및 유한요소 모델링

2.1 이론적 배경

롤 벤딩 시 직사각형 스트레이트 바는 중립축을 기준으로 인장과 압축을 동시에 받는다. 따라서 롤 벤딩 후 링 플레이트의 내주면과 외주면의 두께 치수를 이론적으로 계산하였다.

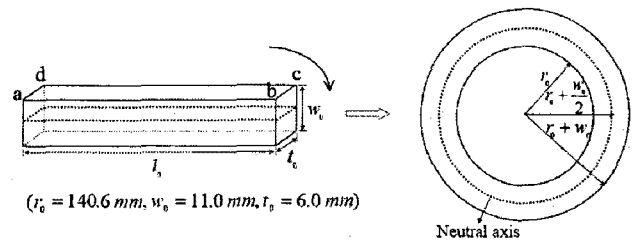
Fig. 3 과 같이 스트레이트 바를 롤 벤딩 할 경우 중립축은 중앙면에 위치하고 항복응력이 인장과 압축에서 동일하다고 가정하였다. 이를 이용하여 식 (1), (2), (3)과 같이 초기 표면적(A_0), 롤 벤딩 후 내주면 표면적(A_1), 롤 벤딩 후 외주면 표면적(A_2)을 정의하였다.

$$A_0 = abcd = l_0 t_0 = 2\pi \left(r_0 + \frac{w_0}{2} \right) \times t_0 \quad (1)$$

$$A_1 = 2\pi(r_0) \times t_1 \quad (2)$$

$$A_2 = 2\pi(r_0 + w_0) \times t_2 \quad (3)$$

초기 표면적과 롤 벤딩 후 내·외주면의 표면적이 동일하다고 가정하면 식 (1)과 식 (2), 식 (1)과 식 (3)을 등가로 놓을 수 있다. 따라서 이들로 부터 식 (4), 식 (5)와 같이 내주면 두께(t_1)와 외주면 두께(t_2)의 방정식을 유도할 수 있고, Fig. 3 (a)에 나타낸 바와 같이 초기 스트레이트 바의 치수(r_0, w_0, t_0)를 대입하면 롤 벤딩 후 내주면과 외주면의 평균 두께를 각각 $t_1 = 6.235$ mm, $t_2 = 5.782$ mm 으로 구할 수 있다. 이론으로 구한 값들은 실험과 해석의 결과 비교를 위한 자료로 사용된다.



(a) Straight bar

(b) After roll bending

Fig. 3 Schematic view of the roll bending process

$$t_1 = \frac{r_0 + \frac{w_0}{2}}{r_0} \times t_0 \quad (> t_0) \quad (4)$$

$$t_2 = \frac{(r_0 + \frac{w_0}{2})}{(r_0 + w_0)} \times t_0 \quad (< t_0) \quad (5)$$

2.2 유한요소 모델링

링 플레이트 제품에 사용되는 SS41P 소재에 대한 인장시험을 수행하였으며, 시편은 KS13B 규격에 맞추어 제작하였다. 인장 시험으로 얻어진 진응력-진변형률 선도를 Fig. 4에 나타내었다. 시험결과 항복강도는 284 MPa, 인장강도는 385 MPa, 탄성계수는 210 GPa, 파단 연신률은 27%로 측정되었다.

롤 벤딩 해석은 범용 CAE 소프트웨어인 ABAQUS Version 6.5 Explicit를 이용하여 해석하였다. 링 플레이트의 롤 벤딩 공정 해석 모델을 Fig. 5와 같이 나타내었고, 해석에 사용된 입력 값은 Table 1에 나타내었다.

본 해석에서는 이형단면 치수와 벤딩다이의 내경 치수가 변수로 설정되었으며, 마찰계수 및 벤딩 속도 등에 대한 영향은 배제하였다. 해석에 사용된 초기 스트레이트 바는 두께 6.0 mm, 폭 11.0 mm, 길이 472.0 mm이며 8 절점 사각형 솔리드 요소(C3D8R)를 사용하였고 등방성(Isotropy)으로 가정하였다. 벤딩다이 또한 강체(Rigid body)로 가정하였다.

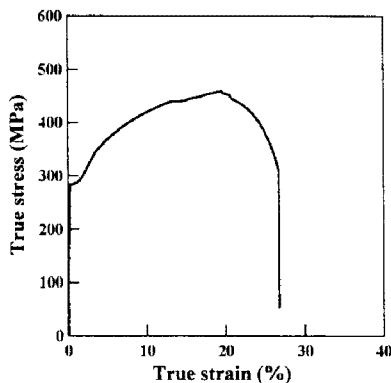


Fig. 4 Stress-Strain curve of SS41P

Table 1 Parameters used in simulation

Young's modulus	210 GPa
Poisson's ratio	0.3
Flow stress	Obtained from tensile test
Density	7800 kg/m ³
Friction coefficient	0.12
Bending velocity	2 radian/sec

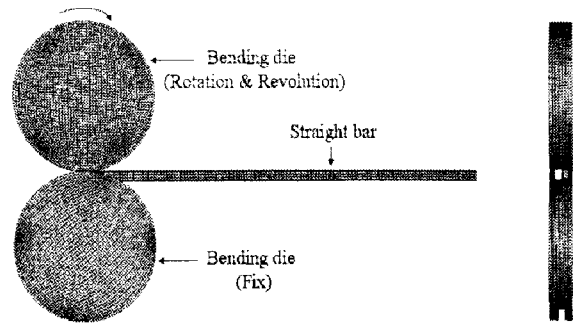


Fig. 5 Finite element analysis model of roll bending process

3. 유한요소해석 및 실험

3.1 이형단면

최적의 이형단면을 도출하기 위해서 실제 제품 단면의 치수를 기준으로 롤 벤딩 해석을 수행하였다.

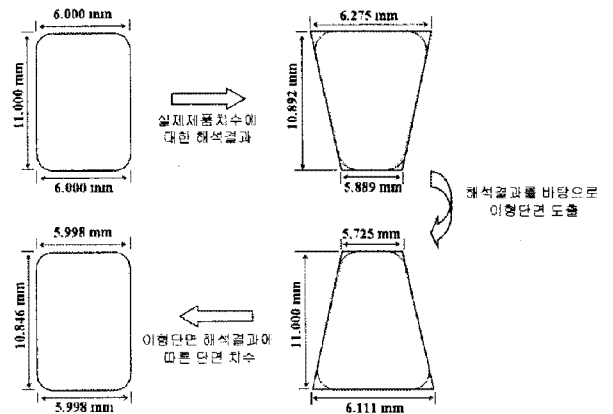


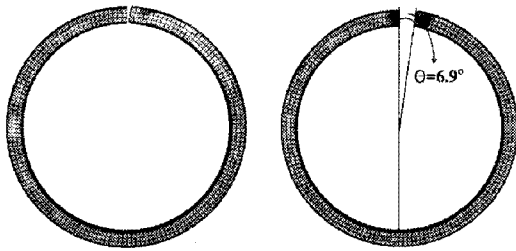
Fig. 6 Process for determining the section geometry of the bar

Fig. 6과 같이 초기 두께 6.0 mm, 폭 11.0 mm를 가진 직사각형 스트레이트 바의 롤 벤딩 해석 후 내주면은 두께가 6.275 mm로 인장되어 늘어나며 외주면은 두께가 5.889 mm로 압축되어 줄어드는 것을 알 수 있다. 이를 보완하기 위해 초기 치수에 인장량과 압축량을 역으로 적용하여 계산함으로써 내측과 외측의 치수가 다른 이형단면을 도출하였다. 도출된 이형단면에 대한 롤 벤딩 해석 후 내측과 외측이 균일한 단면의 형상을 얻었다.

3.2 스프링 백을 고려한 롤 벤딩 다이내경 선정

Fig. 7은 이형단면 롤 벤딩 해석에 대한 스프링 백 해석결과이다. 해석결과 원주방향으로 약 6.9°

의 스프링 백이 발생함을 보였고, 성형 후 완벽한 링 형상을 얻기 위해서는 스프링 백을 고려한 최적화 프로세스가 필요함을 보여주고 있다. 그러나 본 연구에서는 다이의 내경 치수만을 변수로 선택하여 해석하였고 향후 롤링속도, 마찰계수 등의 변수들을 고려한 다구찌 직교 배열 기법(Taguchi orthogonal array method)을 이용해 최적화 해석을 수행할 예정이다.



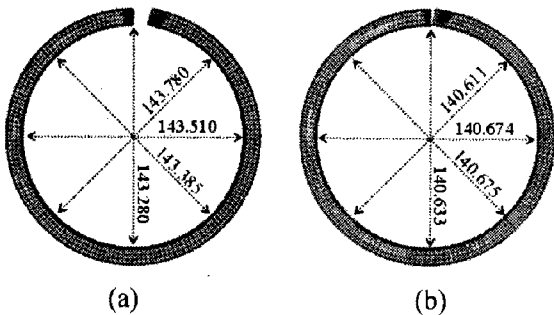
(a) Before spring-back (b) After spring-back

Fig. 7 Spring-back analysis after the roll bending process

Fig. 8 은 치수 별 다이내경 해석 결과를 보여주고 있다. 스프링 백을 고려한 다이내경 치수를 결정하기 위해 다이내경 140.6 mm 에 대한 스프링 백 해석 후 원주 방향에 대해 스프링 백 량 ($\theta = 6.9^\circ$)을 계산하였고, 식 (6)에 대입함으로써 다이내경(D) 137.9 mm 의 값을 구하였다.

$$D = \frac{\left\{ 2\pi r \left(1 - \frac{\theta}{360} \right) \right\}}{\pi} \quad (6)$$

이에 대한 해석 결과 Fig. 8 (b)에 나타낸 바와 같이 링 플레이트 제품의 내경 허용 치수공차(± 0.2 mm)를 만족하고 있음을 알 수 있다.



(a)

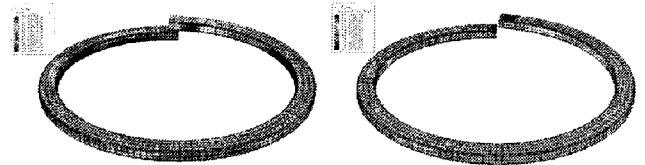
(b)

Fig. 8 Spring-back analysis considering die inner diameter

(a) Result for inner diameter of 140.6 mm ($\Delta = 2.89$ mm)

(b) Result for inner diameter of 137.9 mm ($\Delta = 0.048$ mm)

Fig. 9 는 다이내경 137.9 mm 에 대해서 롤 벤딩 후 끝단에서 면외 방향으로 발생한 단차가 스프링 백 후 줄어들어 원활한 양단의 용접이 가능하다는 것을 보여준다.



(a) Before spring-back

(b) After spring-back

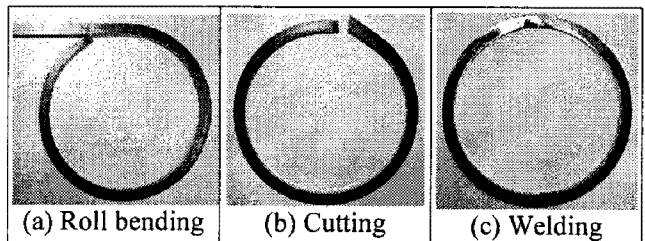
Fig. 9 Spring back analysis for inner diameter of 137.9 mm

3.3 실험방법

맨드렐의 영향력이 전혀 없는 순수 롤 벤딩 장비를 제작한 후 실험을 실시하였다. 롤 벤딩 다이의 내경은 140.6 mm 로 제작되었으며, 실험은 Fig. 10 에 나타낸 바와 같이 두께 6.0 mm, 폭 11.0 mm 를 가진 사각 스트레이트 바를 이용하여 Fig. 10 (a)에서와 같이 링 형태로 롤 벤딩한 후 Fig. 10 (b)의 커팅공정을 거쳐 Fig. 10 (c)와 같이 끝단부를 용접하였다. 용접 후 잔류응력에 의한 휨 현상을 고려하여 별도 지그(Jig)를 제작 하여 용접하였으며, 마지막으로 프레스를 이용한 사이징(Sizing)공정이 이루어졌다.

성형된 링 플레이트의 치수 정확도를 평가하기 위해 버니어 캘리퍼스(Vernier calipers)를 이용하여 단면치수를 원주방향 15° 간격마다 측정하고 내경 및 외경치수를 각 방향 별(0°, 45°, 90°, 135°)로 측정하여 평균값을 구하였다.

본 연구에서는 시간상 이형단면에 대한 실험은 수행되지 않았지만, 이형단면 제작을 통해 실험을 수행하고 해석결과와 비교해 발표할 예정이다.



(a) Roll bending

(b) Cutting

(c) Welding

Fig. 10 Shape of formed ring plate at each process

4. 실험결과 및 고찰

유한요소해석결과를 실험 및 이론 결과와 비교하였다. 그 결과 Table 2 에 나타낸 바와 같이 단면

치수(a) 및 내경 치수(b)는 각 결과들과 잘 일치함을 확인하였다. 이형단면에 대한 실험은 수행하지 못했지만, 초기 스트레이트 바의 해석과 실험결과와의 비교를 통해 이형단면에 대한 실험 결과 또한 해석과 잘 일치할 것으로 판단된다. 그러나 실험상의 외경치수(c)는 개발 허용 치수공차(± 0.2 mm)를 벗어나고 있다. 실제 제품에 있어 외경 치수가 차지하는 비중은 그리 큰 편은 아니지만, 이는 마찰계수 및 롤링속도 등과 관련이 있을 것으로 생각되며, 향후 실험 프로세스 보안을 통해 추가적으로 검토되어야 할 것으로 판단된다.

Table 2 Comparison of results

	(a) Dimension of cross section (mm)		(b) Inner diameter (mm)	(c) Outer diameter (mm)
	Compression	Tension		
Analysis	5.889	6.275	140.654	162.422 ($\Delta = 0.178$)
Experiment	5.872	6.252	140.590	162.258 ($\Delta = 0.342$)
Theory	5.782	6.235	-	-

Fig. 11 은 해석과 사이징공정 전 실험에 대한 링 플레이트의 단면 형상 및 치수를 나타내고 있다.

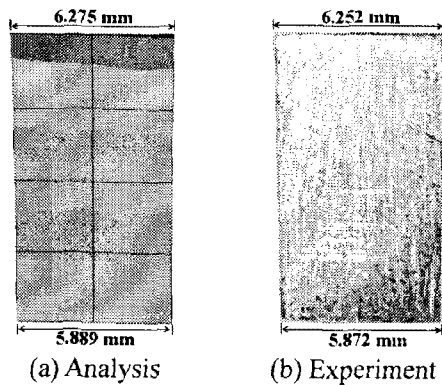


Fig. 11 Shape and dimension of the cross-section

5. 결론

본 연구에서는 제조원가 절감을 위한 자동차 연료탱크용 링 플레이트의 신 제조 공법을 제시하였다. 유한요소해석을 통해 스트레이트 바의 이형단면을 도출하였고, 롤 벤딩 해석에 적용되었다. 해석결과와의 검증을 위해 이론 및 실험결과와 비교하였다. 이 결과로부터 해석결과는 이론 및 실험

결과와 잘 일치함을 확인하였고, 신 제조 공법을 적용한 자동차 연료 탱크용 링 플레이트의 제품 제조가 가능함을 확인하였다.

본 연구는 향후 유사 형상 및 제품 생산에 있어 유용한 아이디어로 활용 될 수 있을 것이다.

향후 유한요소해석에서 여러 변수들을 고려한 벤딩 다이에 대한 최적화 해석과 이형단면에 대한 실험이 수행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 산학연공동 기술개발컨소시엄 사업(과제번호: 200705190800)으로 진행된 결과이며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Weilong Hu and Z. R. Wang, 2001, Theoretical analysis and experimental study to support the development of a more valuable roll-bending process, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 41, pp. 731-747
- [2] Jun Zeng, Zhaoheng Liu and Henri Champlaud, 2008, FEM dynamic simulation and analysis of the roll-bending process for forming a conical tube, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 198, pp. 330-343
- [3] M. Hua, K. Baines and I. M. Cole, 1999, Continuous four-roll plate bending: a production process for the manufacture of single seamed tubes of large and medium diameters, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 39, pp. 905-935
- [4] Jin-Young Kim, Hoon Huh, 2000, Finite Element Stress Analysis of Coil Springs using a Multi-level Substructuring Method II, 한국자동차공학회, 제8권 제3호, pp. 151-162.
- [5] 김현진, 이춘만, 2007, 정밀 파이프 성형을 위한 벤딩공정 개발에 관한 연구, 한국정밀공학회지, 24권, 6호, pp. 58-65
- [6] 양재봉, 전병희, 오수익, 2000, Tube Hydroforming 을 위한 굽힘공정해석, 한국소성가공학회지, 9권, 3호, pp 249-256