

# 하이드로포밍 제품의 가공경화를 가지는 벤딩공정에 의한 영향분석

김광순<sup>1</sup>, 김윤규<sup>1</sup>, 박두수<sup>#</sup>

## The study of effect for bending operation having working hardening on hydroforming parts

Kwang.Soon Kim<sup>1</sup>, Yun.Gyu Kim<sup>1</sup>, Du.Su Park<sup>#</sup>

### Abstract.

This study is concerned with working hardening of bending operation on hydroforming parts. Generally, hydroforming parts having the complicated shape of the automobile, require a 3-dimensional bending operation. This operation involves several variations in the tube which are the thickness, the mechanical characteristics, the hardness, the circumference etc., on original tube. So, we study those variations and the affect on the hydroforming operation and hydroforming parts. We used two methods, one of which was computer simulation and the other the actual test in the plant.

**Key words:** Bending Operation, Hydroforming Operation, Working Hardening, Hardness, Mechanical Characteristic.

### 1. 서 론

최근 자동차 산업은 초고강도 강판의 개발, 자동차 부품의 새로운 제조 기술 및 IT 산업의 성장과 함께 급속한 발전을 이루었다. 특히 자동차 철강부품의 새로운 제조 공법에는 TWB, 하이드로포밍, 핫프레스포밍, 핫가스블로잉포밍 공법들이 연구 진행중이며, 일부 공법은 양산 적용되고 있

다. 하이드로포밍 공법은 최근 몇 년 전부터 자동차 부품의 여러 파트에 양산 적용되면서 차량의 경량화, 성능 향상, 연료 효율 개선 및 어셈블리 부품의 조립공법에 많은 개선을 이루었다.

하이드로포밍 공법은 하이드로포밍 금형내의 끝단 피딩영역(30% 확관 가능)을 제외하고는 튜브 직경의 약 7% 전후의 튜브 확관을 통한 제품을 만드는 것으로 알려져 있다. 그러나 복잡한 형상의 최종 하이드로포밍 된 제품을 얻기 위해서는 벤딩 공정을 필연

1. 현대하이스코 기술연구소

# 교신저자: 현대하이스코 기술연구소, dspark@hysco.com

적으로 거쳐야 하지만, 튜브의 단순한 확관과 비교하여 벤딩 공정을 가지는 제품의 성형성은 벤딩 공정의 가공경화에 의한 많은 차이를 가져온다.

본 연구에서는 이런 벤딩 공정의 가공경화에 의한 튜브에 어떤 변화들이 발생하며 이 변화들이 하이드로포밍 제품을 성형하는데 어떤 영향을 주는지 연구하였다.

## 2. 후륜 서스펜션

본 연구에서는 프론트 서스펜션보다는 제품 길이가 짧지만 복잡한 형상을 가진 후륜 서스펜션의 사이드 멤버를 대상으로 연구를 하였다. 이 부품 형상은 Fig. 1 과 같이 후륜 서스펜션 양쪽에 대칭으로 위치하며, 멀티 링크타입의 각종 링크류들이 연결되어 차량이 안전하고 편안한 운행이 이루어질 수 있도록 보조 구조물 역할을 한다.

기존 프레스 포밍으로 4 개의 파트로 이루어진 부품을 하이드로포밍에 의해 2 개의 부품으로 별도의 상하 제품을 용접하는 공정이 제거되었다.

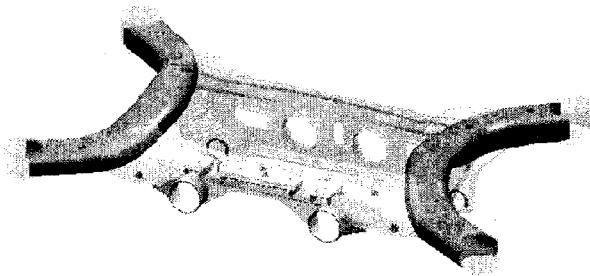


Figure. 1 Rear suspension

이 부품은 전체 부품 길이에 비해 3 포인트 벤딩으로 이루어져 있다. 아울러 Table 1 에서 확인할 수 있듯이 벤딩 공정간의 직선 거리 또한 충분하지 않음을 확인할 수 있다.

벤딩 공정 후 하이드로포밍 제품을 예비 성형하기 위한 프리포밍 공정과 최종 제품형상을 성형하는 고압의 내압을 이용하는 하이드로포밍 공정으로 이루어진다.

Table 1 The bending data of part

No.	distance (mm)	Angle (°)	Rotation (°)	Radius (mm)
1	218.65	39.6	-	150
2	86.3	44.69	-40.67	150
3	20.43	44.0	63.71	150
4	243.55	-	-	-

## 3. 벤딩 성형 결과

### 3.1 소재의 물성치

이 연구에서 사용한 소재는 HF440 으로 현재 국내에서 고장력강으로 많이 사용되는 소재이다. 이 소재의 물성은 Table 2 와 같다.

Table 2 Material properties of tube

Property	Value
Tensile stress, Ts	46.3 Kg/mm <sup>2</sup>
Yield stress, Yp	34.9 Kg/mm <sup>2</sup>
Elongation, El	36.5 %
Work hardening exponent, n	0.14
Young's modulus, E	21.0X10 <sup>6</sup> Kg/mm <sup>2</sup>
Poisson's ratio, v	0.3

### 3.2 두께의 변화

후륜 서스펜션의 사이드 멤버와 같은 복잡한 형상의 하이드로포밍 제품을 만들기 위해서는 우선 Table 1 과 같은 데이터를 가진 벤딩 공정에서 기본 프로파일을 만들어야 다음 공정인 프리포밍 공정에서 예비 성형이 가능하다. 그러나 벤딩공정에서 벤딩각도가 30 °이상이 되면 다른 후공정에서 발생하는 두께 변화보다 더 큰 변화율을 가지게 된다.

사이드 멤버의 3 포인트 벤딩후의 두께 변화 결과는 Figure. 2 와 같이 2.0 mm 의 소재가 최대 2.418 mm (+20.9%), 최소 1.709 mm (-14.5%) 로 두께 변화가 발생하였다.

이런 두께 변화는 후공정인 하이드로포밍 공정에서 좋지 않은 영향을 주게 된다. 두께가 두

꺼워진 부분은 벤딩에 의한 가공경화와 함께 다른 부위보다 상대적으로 높은 성형내압이 필요하게 된다. 이런 성형 압력차이에 의해 주름발생의 원인이 되기도 한다.

두께가 얇아진 부위는 하이드로포밍 공법에서 가장 큰 문제가 될 수 있는 터짐 문제의 근본적인 원인이 된다. 하이드로포밍 제품의 두께 변화율의 한계를 25% 가정한다면 벤딩 공정에서 이미 15%의 두께 변화가 생겼기 때문에 하이드로포밍

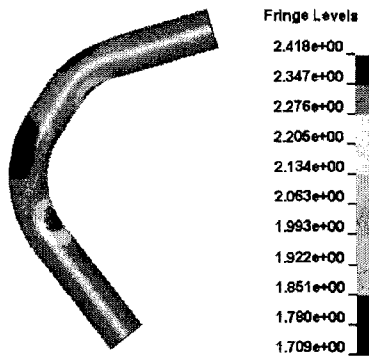


Figure. 2 Thickness change of bent tube

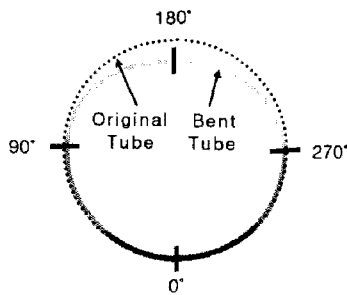


Figure. 3 Collapsed shape of bent tube

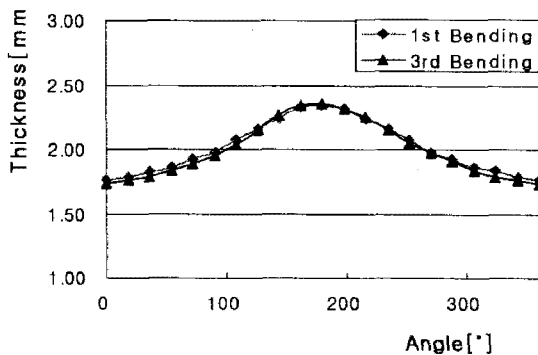


Figure. 4 Thickness change in the bent tube

공정에서는 남은 10%내에서 최종 형상을 위한 성형이 이루어져야 한다.

두께 변화와 함께 벤딩 공정에 의해 발생하는 “Infall” 현상은 Figure. 3 처럼 튜브의 원주가 적어지는 현상이다. 이로 인해 하이드로포밍 공정에서 7%의 확관이 이루어져야 하지만, 벤딩 구간에서 원래의 튜브에 대한 7% 확관은 이 구간에서는 10%가 넘는 확관이 발생하기 때문에 터짐현상이 발생할 가능성이 커진다. 이 문제를 방지하기 위해서는 확관률을 0~2% 수준으로 낮추어야 했다.

Figure. 4 에서는 벤딩 지점에서의 원주방향으로 두께 분포를 보여주고 있다.

### 3.3 가공 경화 발생

후륜 서스펜션의 사이드 멤버와 같은 벤딩 구간이 다른 제품들에 비해 비교적 짧고 벤딩 포인트가 많은 제품은 Figure. 5 에서 나타내는 것처럼 제품의 전구간에 걸쳐 발생한다.

벤딩 공정에 의해 발생한 가공경화는 첫번째 벤딩의 클램핑 영역을 제외하면 제품 전 구간에 걸쳐 발생하였으며, 이는 제품의 성형성을 예측하는데 많은 어려움을 준다.

가공경화는 주로 벤딩 내측과 외측에서 크게 발생하였으며, 주변 영역에도 영향을 미치고 있다. 내측과 외측에 발생한 큰 가공경화는 튜브의 인장강도 및 항복강도는 높이지만, 연신율은 낮추기 때문에 이 영역들이 성형되기 위해서는 다른 부위보다 높은 압력에서 소성변형이 시작되며 또한 낮은 연신율로 인한 소성변형 가능한 영역이 다른 구간에 비해 상대적으로 적어진다.

따라서 이 영역에 대해서는 나중에 다시 설명하겠지만 가공경화가 일어나지 않은 구간과 다른 제품 설계 및 제품 제작 공법이 주어져야 하이드로포밍 제품을 주름, 터짐, 제품 미성형 같은 문제점이 발생하지 않고 양호한 제품을 만들 수 있었다.

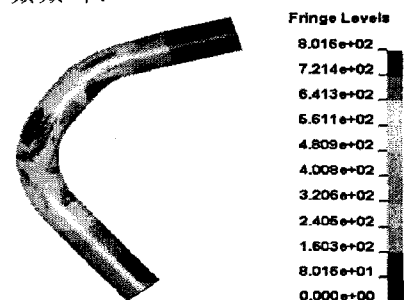


Figure. 6 Stress distribution of bent tube

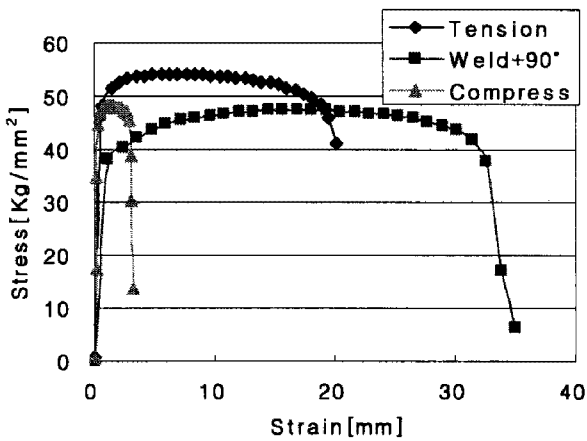
### 3.4 기계적 특성 변화

후륜 서스펜션의 사이드 멤버의 벤딩 부위에서의 기계적 특성을 조사하였다. Table 4 에 나타난 것처럼 벤딩 구간의 안측, 바깥측에서 큰 기계적 특성의 변화를 나타낸다. 안측의 경우, 벤딩전의 튜브상태와 비교할 경우 인장강도 +3.3%, 항복강도 +32.0%, 연신율 -91.1%의 변화와 바깥측의 경우 인장강도 +16.4%, 항복강도 +25.1%, 연신율 -44.2%의 변화가 나왔다.

인장강도와 항복강도의 경우, 벤딩에 의한 가공경화와 함께 +3 ~ +32%까지 상승하였고 이와 반대로 연신율의 경우, 바깥측은 -44%로 소성변형 가능성이 거의 절반으로 줄었고 안측은 -91%로 이 부분의 소성변형은 거의 미세하거나, 일어나지 않는다고 판단할 수 있다. 따라서 이 부분에 다소 복잡한 형상이 배치되지 않도록 모델 변경 혹은 벤딩 포인트의 이동이 필요하다.

**Table 4 Mechanical characteristics of bent tube**

Classify	Thick. ( mm )	TS (Kg/mm <sup>2</sup> )	0.2%YP (Kg/mm <sup>2</sup> )	T_EL ( % )
Weld+90°	2.0	46.52	35.56	35.61
Inner	2.34	48.07	46.96	3.18
Outer	1.75	54.15	44.48	19.88



**Figure. 7 Stress-strain curves of bent tube**

### 3.5 튜브 조직 변화

후륜 서스펜션의 사이드 멤버에 사용되는 튜브의 조직은 Table 5 와 같은 페라이트 조직으로 구성되어 있다. 벤딩 공정 후 튜브에 열처리나 어떤 화학적인 처리를 한 것은 아니기 때문에 같은 페라이트 조직이며 다만 기계적인 특성 변화에서 살펴본 것과 같이 조직의 균질성이나 금속 조직의 크기에서 변화가 일어난 것을 알 수 있었다.

벤딩된 튜브의 안측면에서는 성형 과정에서 압축력을 받으며 소재의 두께가 두껍워지고 금속조직 또한 조밀하지만 불균일한 구조를 나타내며, 바깥측면에서는 반대에 성형 과정에서 인장력을 받으며 소재의 두께는 얇아지고 금속조직은 커지면서 불균일한 구조로 변경됨을 알 수 있었다.

벤딩공정에 의한 발생한 두께변화, 가공경화 발생, 기계적 특성의 변화, 튜브 조직의 변화 등 이런 변화들은 독립적으로 발생하는 것이 아니라 상호 연관성을 가지고 있다.

이런 변화들이 발생함에도 불구하고 양호한 제품을 만들기 위한 여러가지 방법들이 사용되었다.

**Table 5 The structure picture of bent tube**

	Structure (X 500)	Organi- zation	Homo- geneity
Tube		Ferrite	Good
In- side		Ferrite	Bad
Out- side		Ferrite	Bad

#### 4. 변화들에 대한 대책

앞장에서 설명한 것처럼 벤딩 공정에 의한 튜브에 발생한 변화들에 의해 일어날 수 있는 문제점들을 해결하기 위해 Table 6 과 같은 여러가지 대책들을 사용하였다.

본 연구에서는 이런 현상들에 대한 가장 근본적인 대책은 확관률 조정이었다. 가공경화나 기계적 특성의 변화를 고려할 때 벤딩 부분에서의 확관은 미세함으로 확관률을 약간의 마이너스 혹은 플러스 확관으로 형상에 따라 조정하였다.

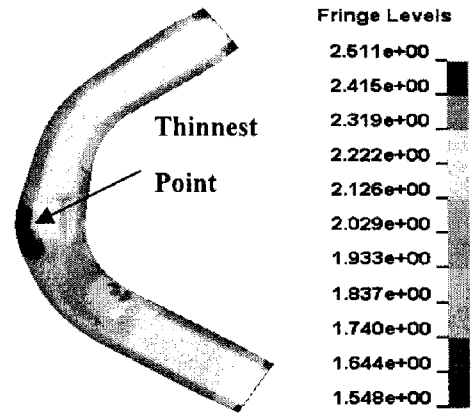


Figure. 8 Thickness result by hydroforming

Table 6 Counterplans for those conditions

	Sources	Counterplans
B u r s t i n g	① Thickness change on outer surface	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lower expansion rate on bent surface</li> <li>Add end feeding</li> </ul>
	② Infall occurrence on outer surface	<ul style="list-style-type: none"> <li>Adjust feeding-pressure curve</li> </ul>
	③ Low elongation on bent surface	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modify for perform die</li> </ul>
	④ Forming stress on bent surface	<ul style="list-style-type: none"> <li>Adjust bending data</li> <li>Increase boosting power</li> </ul>
	⑤ Die setup in bending operation	<ul style="list-style-type: none"> <li>Adjust mandrel position</li> </ul>
W r i n k l e	① Thickness change on inner surface	<ul style="list-style-type: none"> <li>Raise expansion rate on bent surface</li> <li>Lessen end feeding</li> </ul>
	② Low elongation on bent surface	<ul style="list-style-type: none"> <li>Adjust feeding-pressure curve</li> </ul>
	③ Forming stress on bent surface	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modify for perform die</li> <li>Adjust bending data</li> </ul>

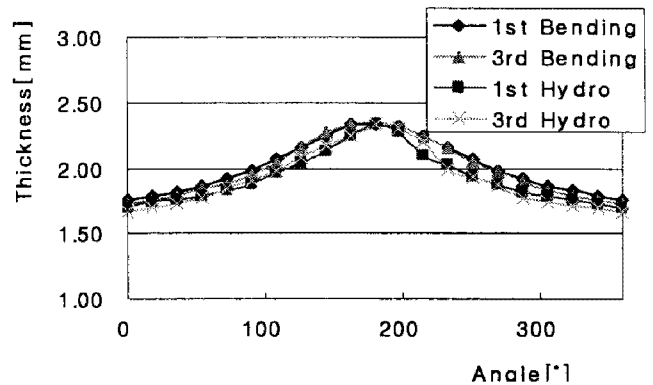


Figure. 9 Thickness change around bending points by hydroforming

#### 5. 하이드로포밍 성형 결과

4 장에서 설명한 것처럼 벤딩 공정에 의해 발생한 많은 변화들에 대한 Table 6 의 대책들을 사용함으로써 Figure. 8 과 같은 해석 결과와 동시에 현장에서 유사한 양호한 하이드로포밍 제품을 만들 수 있었다. 그림에서 확인할 수 있듯이 벤딩의 바깥측에서 가장 두께가 얇은 부위가 나타났으며 안측면 또한 하이드로포밍으로 어느 정도 확관이 발생이 발생하였지만 다른 부위보다는 훨씬 확관량이 적어 벤딩공정에서 두껍워진 부위가 하이드로포밍 공정후에도 여전히 두꺼운 두께 분포를 보여주고 있다.

이를 Figure. 9 에서도 하이드로포밍 후 두께 비교를 통해 확인할 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 후륜 서스펜션의 사이드 멤버와 같은 벤딩 구간이 다른 제품들에 비해 비교적 짧고 벤딩 포인트가 많은 제품에 대해 벤딩 공정에 의한 여러가지 튜브에서의 변화들을 조사하여 이에 적합한 여러가지 대책들을 수립하여 양호한 하이드로포밍 제품을 만들수 있었다.

벤딩 공정에 의한 변화들은 다음과 같다.

### (1) 벤딩 부위에서의 두께 변화

두께 변화는 벤딩품의 내측과 외측에 다른 경향을 보인다. 내측은 압축력을 받아 두꺼워지고, 바깥측은 인장력에 의해 얇아진다.

### (2) 벤딩 공정에 의한 가공 경화 발생

벤딩 공정에 의한 가공경화는 벤딩의 안측과 바깥측, 벤딩의 시작점과 끝나는 지점을 포함하는 넓은 구간에 영향을 미친다. 사이드 멤버처럼 벤딩 사이의 거리가 짧고 벤딩 포인트가 많은 제품에는 전 영역에 걸쳐 가공경화가 발생하여 튜브의 성형에 영향을 미친다.

### (3) 기계적 특성의 변화

벤딩 공정은 소재의 인장강도, 항복강도, 연신율을 모두에 영향을 미친다. 인장강도, 항복강도는 올라 제품상으로는 좋은 영향이 될 수 있지만, 반면 연신율에 큰 변화가 발생하여 성형성 측면에서는 좋지 않은 영향을 미친다.

### (4) 튜브 조직의 변화

벤딩 공정에 의해 기계적인 특성 및 두께 변화 뿐만 아니라 금속 조직도 변화를 가져온다. 벤딩의 안측은 불균일한 조밀 조직, 바깥측은 불균일하지만 조직이 커진 변화를 확인 할 수 있었다.

이런 변화들에 대한 대책으로는 다음과 같다.

- (1) 벤딩이 발생하는 지점에 대한 확관률 조정
- (2) 하이드로포밍 공정에서의 피딩-압력 곡선 조정
- (3) 프리포밍 금형에서 포밍형상 추가
- (4) 제품의 벤딩 데이터 조정
- (5) 하이드로포밍 공정에서 엔드 피딩량 조절
- (6) 벤딩공정에서 맨드릴 위치 조정

위와 같은 대책들을 사용함으로써 벤딩공정에서 발생한 여러가지 변화들이 심각한 문제점들을 발생하지 않도록 하이드로포밍 제품을 최종 성형할 수 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] Xia, Z. C, 2003, "Failure Prediction of Tubular Hydroforming Process Following Pre-Bending", International mechanical engineering Congress, pp. 135~136
- [2] Bardelcik, A., Worswick, M. J., "Numerical Investigation into the Effects of Bending Boost and Hydroforming End Feed on the Hydroformability of DP600 Tube", Sheet/Hydro/ Gas Forming Technology and Modeling 2005, pp.93~104
- [3] Yuan Shijian, Han Cong, 2004, "Hydroforming of an Engine Cradle", Forging & Stamping Technology, pp.41~44
- [4] Granelli, T., 1999, "Fundamentals of Bending for Hydroforming", Automotive Tube Fabricating Conference, pp.J1~J15
- [5] Gantner, Peter, Bauer, Herbert, Harrison, David K, De, Silva, Anjali K.M, 2005, "A New Bending Technique in the Hydroforming Process Chain", Journal of Materials Processing Technology, pp.302