

다구찌 직교배열을 이용한 트레일링 암 튜브 벤딩 공정 변수 최적화

윤철호¹ · 채명수¹ · 문기준² · 김영석[#]

Optimization of the Tube Bending Process of Taguchi's Orthogonal Matrix

Z. H. Yin, M. S. Chae, K. J. Moon, Y. S. Kim

(Received December 5, 2008)

Abstract

This paper covers finite element simulations to evaluate tube bending process of auto chassis component i.e. trailing-arm product. The rear of the auto chassis structure is primarily composed of CTBA and trailing-arm. When a car rolls into a corner, the trailing arm reacts to roll in the same degree as the car body. During the bending process of trailing arm the tube undergoes significant deformation. Thus forming defects such as excessive thinning and flattening of the tube will be formed in the outside of the tube. In this paper, we analyzed the effect of process parameters in rotary draw bending process and searched the optimized combination of process parameters using orthogonal arrays method to minimize the forming defects. In this process we analyzed several parameters which are displacement of pressure die, boosting force, initial position of mandrel bar, dimensions of mandrel in regarding to the thinning and flattening of the tube.

Key Words: Trailing Arm, FEM, Rotary Draw Bending Process, Orthogonal Array, Thickness Thinning

1. 서 론

현가장치(automotive chassis system)는 노면으로부터 전달되는 충격으로부터 승차자나 프레임을 보호하는 고유의 기능뿐만 아니라 조종안정성을 확보하기 위한 장치로 매우 중요시 되고 있는 샷시 장치의 하나이다. 현가장치는 차의 특성 및 용도에 따라 형식이 결정되며 전, 후의 현가장치의 배열도 승차감 및 조종안정 또는 진동, 소음의 성능에 영향을 미치고 있다. 현가장치 중에서 후륜 현가장치로 많이 이용되는 트레일링 암(trailing arm)은 CTBA(coupled torsion beam axle)장착되어 차량의 선회 또는 재동 시 토우아웃을 줄이도록 하는 역

할을 하며 횡강성이 높고 설계 자유도가 높은 장점이 있다. 이러한 현가장치는 극악한 운행조건하에서도 견딜 수 있는 강도를 갖고 있어야 하며 최근에는 경량화에도 관심을 기울이고 있다[1].

차량 후륜 현가장치의 부품인 트레일링 암은 튜브 벤딩(Tube bending) 공정작업에 의해 생산되고 있다. 튜브 벤딩을 위한 공정으로 현재 연구가 진행되고 있는 방법 중 대표적인 것이 로터리 드로우 벤딩(rotary draw bending) 공정이다. 이 공정은 기존 장치를 그대로 사용할 수 있어 설비에 대한 부담이 적고 단일관 벤딩의 기술적 노하우를 살릴 수 있는 장점이 있다[2~4].

튜브의 벤딩 작업은 현재 수작업 또는 양산의

1. 경북대학교 기계공학과 대학원

2. ㈜화신 기술연구소

교신저자: 경북대학교 기계공학부

E-mail: caekim@knu.ac.kr

경우에는 CNC 설비에 급함 위치 및 각도를 입력시켜 자동적으로 작업하고 있다. 실제적으로 이러한 과정에서 튜브는 상당한 변형을 수반하는 것이 보통이며 또한 튜브 바깥쪽은 인장을 받아 두께가 현저하게 감소하며 이러한 두께 감소 변화는 차량의 운행 시에 발생하는 반복적인 진동내구에 견디지 못하고 재료적 피로를 유발하여 튜브가 파단되는 현상이 발생하게 된다[5].

본 연구에서는 이러한 문제점에 입각하여 튜브 벤딩 시 성형결함 즉 두께 감소변화를 최소화 할 수 있는 최적조건을 찾고자 한다. 따라서 차체 후륜 샷시에 사용되는 트레일링 암 부품을 대상으로 로터리 드로우 벤딩 공정에 대하여 유한요소해석 [6-9]을 수행하였고, 공정 변수 중 맨드릴 볼 간격, 맨드릴 바의 초기위치, 프레스 다이 이동거리, 부스팅 력을 변수로 하여 다구찌기법(Taguchi method)의 L_9 직교배열 실험에 의해 이들 변수가 튜브 두께 변화에 미치는 영향을 평가하여 최적 공정 변수를 도출하였다. 튜브 및 벤딩 공구에 대한 모델 설계는 CATIA V5R16 를 이용하였고 유한요소해석은 CAE 프로그램인 ABAQUS Version 6.5[10]를 이용하여 튜브 벤딩 공정 해석을 수행하였다.

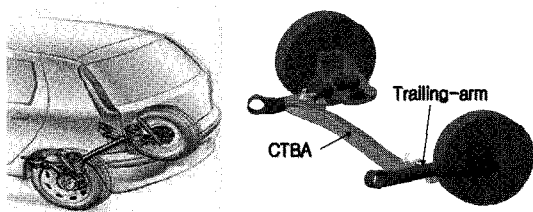


Fig. 1 Trailing arm of the auto chassis component

2. 튜브 벤딩 공정 유한요소해석

2.1 트레일링 암 설계 형상

본 연구에서는 아래와 같은 벤딩 조건을 따른 트레일링 암 모델을 대상으로 튜브 벤딩 성형 해석을 수행하였다

- 중립 축 곡률반경: R120mm
- 벤딩 각도: 34°
- 튜브 두께: 4mm
- 튜브 외경: 60.5mm

2.2 로터리 드로우 벤딩

튜브 벤딩을 위한 로터리 드로우 벤딩 공정은

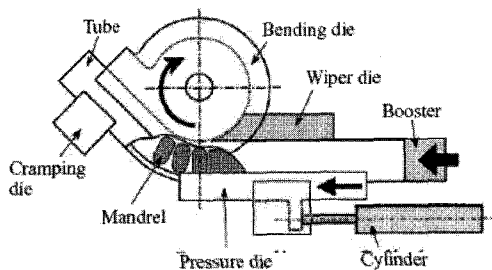


Fig. 2 Schematic diagram of rotary draw bending

Fig. 2 와 같이 벤딩 시 튜브의 좌굴 발생을 방지하기 위해 튜브의 내관에 맨드릴(mandrel)을 삽입하게 되고 튜브를 벤드 다이(bend die)와 클램프 다이(clamp die)로 고정시킨 상태에서 벤드 다이를 회전시킴으로써 튜브를 드로잉과 동시에 벤딩 되도록 한다. 한편 소재의 주름 방지를 위한 와이퍼 다이(wiper die)와 두께 감소현상을 방지하기 위해 벤드 다이 회전의 접선 방향으로 힘을 작용시키는 프레스 다이(pressure die)를 사용한다[11].

맨드릴과 와이퍼 다이를 선정함에 있어서 벤딩 공정 변수 WF 및 BF 에 따른 것이 경험적으로 널리 사용되고 있다.

$$WF = OD / t \tag{1}$$

$$BF = R / OD \tag{2}$$

식(1)은 튜브의 두께(t)에 대한 외관의 외경(OD)의 비를 나타내며 두께 인자(WF)로 정의한다. 식(2)은 외관의 외경(OD)에 대한 벤딩 중심선의 곡률 반경(R)의 비를 나타낸다.

본 연구에서의 공정 변수 $WF = 15, BF = 2$ 로 정의되고 있다. 따라서 맨드릴과 와이퍼 다이 선정 차트[12]에서 살펴보면 M2 로 선정되고 있다. M2 에서 M 은 볼 맨드릴, 2 는 볼 맨드릴이 2 개 임을 의미하며, W 가 없는 것은 와이퍼 다이 필요 없는 다는 것을 의미한다.

2.3 유한요소모델링

트레일링 암 제품에 사용되는 STKM 13B 관재 소재에 대한 인장시험을 수행하였으며, 시편은 KS13B 규격에 맞추어 제작하였다. 인장 시험으로 얻어진 응력-변형을 선도를 Fig. 3 에 나타내었다. 시험 결과, 항복강도는 350MPa, 인장강도는 480MPa,

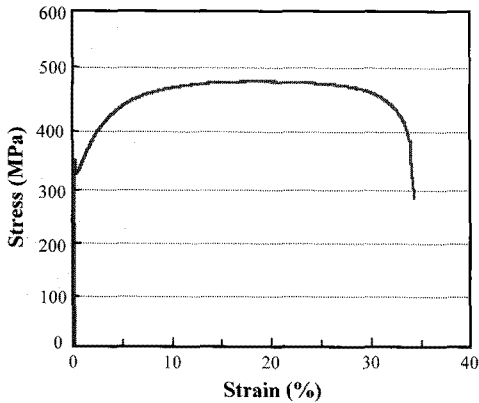


Fig. 3 Stress-strain curve of STKM13B

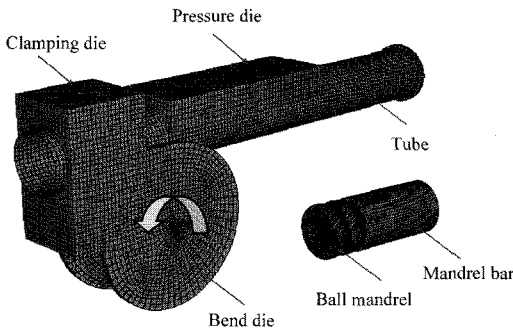


Fig. 4 Finite elements analysis model of rotary draw bending process

탄성계수는 210GPa, 연신율은 35%로 측정되었다. 또한 전용 조관공정에서 제조된 관재는 관재상태에서와 기계적 특성의 차이가 크지 않으므로[13] 관재의 장출 실험을 통해 성형한계곡선을 구하였다. 실험에서 구한 관재 FLC_0 값은 21%이었다.

트레일링 압 튜브 로터리 드로우 벤딩 공정 해석 모델을 Fig. 4 에 나타내었고, 해석에 사용된 입력 값을 Table 1 에 나타내었다. 유한요소해석은 4 절점 사각형 선형 저감 적분 쉘 요소(S4R)를 사용하였고 재료는 등방성(Isotropy)으로 가정하였으며, 벤딩 공구는 강체(Rigid body)로 설정하였다.

3. 직교배열실험

3.1 제어인자와 수준의 결정

실제 공정에서의 많은 공정 변수를 제외하고 Table 2 와 같이 성형 특성이 규명되지 않은 4 개의

Table 1 Parameters used in simulation

Young's modulus	210GPa
Poisson's ratio	0.3
Flow stress	From tensile test
Density	7800kg/m ³
Friction coefficient	0.1
Bending velocity	0.15radian/sec

Table 2 Level of process parameters

Parameter	Level 1	Level 2	Level 3
Mb(mm)	4	2	0
Bf(MPa)	10	15	20
Ls(mm)	100	120	140
Dc(mm)	4	4	4
WF=15		BF=2	

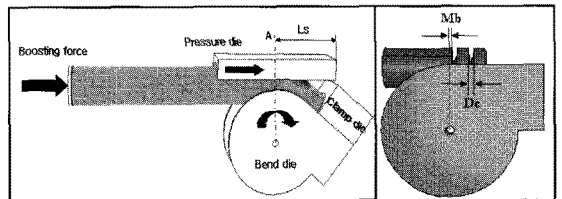


Fig. 5 Definitions of design parameters

공정 변수-멘드릴 볼 간격(Dc), 멘드릴 바의 초기 위치(Mb), 부스팅력(Boosting force) 그리고 프레서 다이 이동거리(Ls)에 대해 각각 3 수준으로 설정하고 Table 3 과 같이 직교배열 표를 작성하였다. 각 설정 인자에 대한 정의를 Fig. 5 에 나타내었다. 또한 해석에 사용된 튜브의 WF 은 15로 하고, BF 은 2의 공정 조건으로 해석을 실시하였다.

그리고 다구찌 실험 후 확인실험을 실시함으로써 제어인자들 사이의 교호작용의 존재여부를 파악할 수 있다. 만일 양자가 잘 맞으면, 다구찌 직교배열실험이 적절했음을 의미한다.

3.2 품질특성과 최소화할 목적함수의 선정

트레일링 압 벤딩 성형 시 튜브 중립축의 바깥쪽은 인장을 받아 두께가 얇아지고 중립축의 안쪽은 두께가 두꺼워진다. 벤딩 성형 된 트레일링 압에 CTBA 가 장착되며 자동차 후륜 현가장치로 내구성능을 만족하여야 하다. 이때 트레일링 압 벤딩 부의 내, 외쪽면의 과도한 두께 변화는 후륜 현가장치의 품질을 크게 떨어뜨린다.

트레일링 압 바깥쪽 두께 감소율(Δt)이 작을수

록 좋은 내구성특성을 나타내므로 식(3)의 다구찌 기법 망소특성(smaller-the-better)인 손실함수를 적용하여 S/N 비(signal-to-noise ratio)를 비교하여 최적의 수준을 도출하였다.

$$\eta_i(dB) = -10 \log_{10}(\Delta t^2) \quad (3)$$

위의 식을 최소화하는 것은 튜브 바깥쪽 두께 감소율을 최소화하여 향후 CTBA 와의 용접에서의 파단 발생을 방지하기 위한 조건을 찾는 것이다.

4. 결과와 고찰

각 경우에 측정된 튜브 바깥쪽 두께 감소율로부터 망소특성 문제에 대해 계산한 결과를 Table 4 에 나타내었다. 각 인자의 수준변동에 따른 목적함수의 변화를 보여주는 평균분석(Analysis of Mean, ANOM)결과는 Fig. 6 에 도시하였다.

그림에서 알 수 있듯이 멘드릴 바의 초기 위치 (Mb)는 3 수준, 프레스 다이 이동거리(Ls)는 2 수준, 부스팅력(Bf)는 2 수준에서 튜브 바깥쪽 두께 감소율의 최적목적함수가 얻어짐을 알 수 있다. 또한 변수 중에서 부스팅력 수준변동에 따라 목적함수의 값이 크게 바뀌는 것을 알 수 있다.

분산분석(Analysis of Variance, ANOVA)의 결과는 Table 5 에 나타내었다. 각각의 인자에 대해 3 수준으로 결정되는 제곱합(Sum of square)은 식(4) 에 의해 계산된다.

$$3(m_{j1} - m)^2 + 3(m_{j2} - m)^2 + 3(m_{j3} - m)^2 \quad (4)$$

여기서, m 은 $m = 1/9 \sum \eta_i = -18.52(dB)$ 정의되는 9 회 해석결과로부터 계산되는 η_i 의 평균값이 되고, $m_{ji} = 1/3 \sum (\eta_j)_i$ 로 주어지며, j 인자에 대해 i 수준 ($i=1,2,3$)에서의 평균 η 값이고, η_j 는 평균제곱(mean square) 을 나타낸다. Table 5 의 분산분석결과를 보면 B 인자 (부스팅력, Bf) 는 전체 제곱합(total sum of squares)에 대하여 83%의 영향을 미치고 A 인자 (멘드릴바 초기위치, Mb) 와 C 인자(프레스 다이 이동 거리, Ls) 를 포함한 것은 17%의 영향을 미친다. 이와 같이 분산분석을 하는 목적은 목적함수에 미치는 각 인자의 영향에 대한 상대적 크기를 결정하고 오차를 고려하여 그 정도를 평가하는데 있다. 상기 분석 결과, 최적인자의 조합이 $A_3B_2C_2D_1$ 이 되었다. 따라서 최적조건에서

Table 3 $L_9(3^4)$ orthogonal array for simulation

Simulation	A(Mb)	B(Bf)	C(Ls)	D(Dc)
1	1(4)	1(10)	1(100)	1(4)
2	1(4)	2(15)	2(120)	1(4)
3	1(4)	3(20)	3(140)	1(4)
4	2(2)	1(10)	2(120)	1(4)
5	2(2)	2(15)	3(140)	1(4)
6	2(2)	3(20)	1(100)	1(4)
7	3(0)	1(10)	3(140)	1(4)
8	3(0)	2(15)	1(100)	1(4)
9	3(0)	3(20)	2(120)	1(4)

Table 4 Comparison of SN ratio for thinning

Simulation No.	Δt	$\eta(dB)$
1	11%	-20.82
2	5%	-13.97
3	13.75%	-22.76
4	10.5%	-20.42
5	6%	-15.56
6	10.25%	-20.21
7	9.5%	-19.55
8	6.25%	-15.91
9	7.5%	-17.50

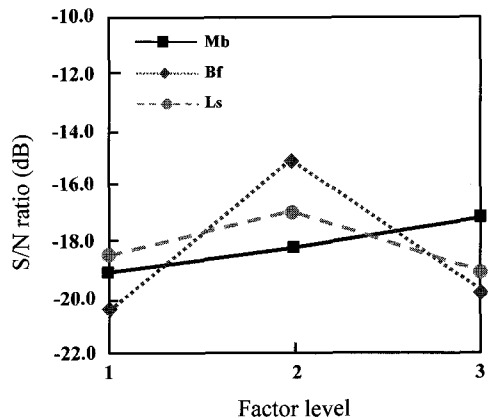


Fig. 6 SN ratio of parameter level

η_{opt} 는 Table 4 의 평균분석 결과로부터 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$\eta_{opt} = m + (m_{B2} - m) + (m_{C2} - m) = -13.93(dB) \quad (5)$$

Table 5 ANOM and ANOVA Table for the rotary draw bending simulation

Factor	Average η by Level			Sum of squares	D.O.F	Sum of mean squares	Contribution
	1	2	3				
A	-19.18	-18.73	-17.65*	3.59**	2	1.795**	0.0583
B	-20.26	-15.14*	-20.15	51.25	2	25.625	0.8299
C	-18.98	-17.29*	-19.29	6.91	2	3.455	0.1118
D	—	—	—	—	—	—	—
Total	—	—	—	61.75	6	30.875	—

*Indicates the optimum level.

**Indicates the sum of squares added to estimate the pooled error sum of squares in parentheses.

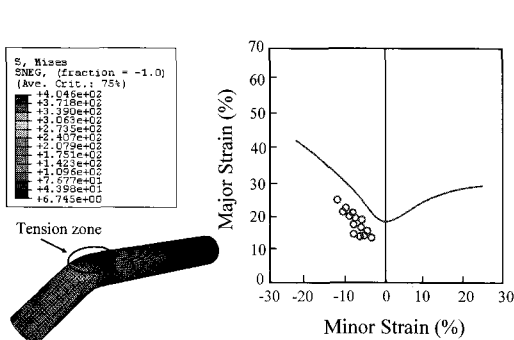


Fig. 7 Stress and strain in outside of the tube

여기서, m 은 η 의 전체 평균, m_{B2}, m_{C2} 는 B, C 인자가 2 수준 경우의 η 의 평균이다. A 인자에 의한 제곱합(sum of square)은 작고, 분산분석에서 오차로 포함시켰기 때문에 이들에 따른 개선 양은 최적조건에서의 η 에 포함시키지 않았다.

직교배열실험에서 최적의 인자조건을 찾고, 이 조건에서의 실험결과를 예측한 후에 이와 같은 조건에서 실험을 수행하였다. 또한 결과를 예측한 값과 비교하여 예측한 값과 실험에서 비교한 값이 거의 비슷하다면 실험이 여러 인자에 η 에 미치는 영향을 알아보는데 적절하였다고 할 수 있다.

실험계획법을 통하여 최적화된 $A_3B_2C_2D_1$ 경우의 해석 결과 미세스 응력 분포와 변형율 분포를 Fig. 7 에 나타내었다. 튜브 바깥쪽 인장 부의 최대 응력은 405MPa 이고 변형률은 성형한계곡선 상에서 성형 안전 영역에 분포되어 있다. 이는 튜브 벤딩시 파단 발생 없이 성형 할 수 있음을 보여주고 있다.

또한 벤딩 부 단면 형상 및 진원도 계산 결과를

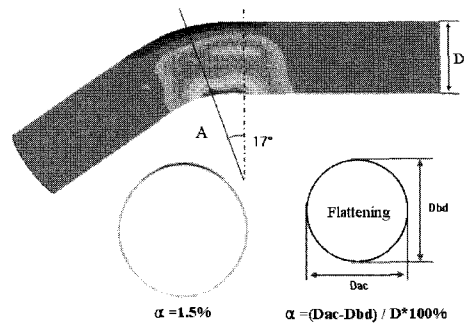


Fig. 8 Cross section view of the tube bending section

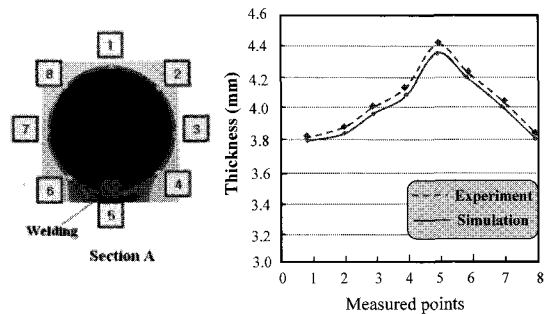


Fig. 9 Compare between simulation and experiment

Fig. 8 에 나타내었다. 그림에서 표시된 계산식을 이용하여 계산 한 결과 진원도는 1.5%이며 벤딩 부 단면 형상은 원형을 잘 유지하고 있음을 알 수 있다. 해석 결과와 실제 제품과의 튜브 벤딩 부 두께 비교 값을 Fig. 9 나타내었다. 해석 값과 실험 값이 잘 일치하는 것을 볼 수 있는데, 이는 본 연구에서 최적화된 튜브 벤딩 공정 변수가 타당함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 로터리 드로우 벤딩 공정 이용한 트레일링 암 제품 성형에 있어서 튜브 벤딩 시 내구성 향상을 위한 벤딩 부 바깥쪽 두께 감소율을 최소화하는 목적으로 다구찌기법을 적용한 유한요소해석을 수행하였다. 그리고 해석결과의 검증을 위해 실제 제품과의 두께 변화 값을 비교하였다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 다구찌기법을 적용한 결과 공정변수 중 부스팅 력(Bf)인자가 다른 변수에 비해 가장 큰 영향을 미치는 것을 알게 되었다.

(2) 유한요소해석 결과 멘드릴 바의 초기 위치 (Mb) 0mm, 부스팅 력(Bf) 15MPa, 프레스 다이 이동거리(Ls) 120mm, 멘드릴 볼 간격(Dc) 4mm에서 튜브 벤딩 공정 변수를 최적화하였다.

(3) 실험 결과 벤딩 부 두께 변화 값이 해석결과와 잘 일치하였다.

후 기

본 연구는 경북대학교 BK21사업의 일환으로 (주)화신 기술연구소 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] K. H. Lee, N. K. Lee and M. S. Lee, 1998, Multi-stage shape optimization of semi-trailing arm, Korean Society of Mechanical Engineers, 98S114, pp. 667~671.
- [2] Kristoffer Trana, 2002, Finite element simulation of the tube hydroforming process-bending, performing and hydorforming, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 127, pp. 401~408.
- [3] Kristoffer Trana, 2002, Finite element simulation of the tube hydroforming process-bending, performing and hydorforming, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 127, pp. 401~408.
- [4] M. Zhan, H. Yang, Z.Q. Jiang, Y Lin, 2002, A study on a 3D FE simulation method of the NC bending process of thin-walled tube, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 129, pp. 273~276.
- [5] H. Yang, Y. Lin, 2004, Wrinkling analysis for forming limit of tube bending processes, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 152, pp. 33~369.
- [6] S. G. Jeon, J. H. Kim, J. Y. Shin and S.G. Lee, 2004, A study on improvements of residual stress of pipe bending by x-ray diffract meter test, Korean Society of Automotive Engineers, 04-F0177, pp. 1111~1116.
- [7] H. A. AL-Qureshi, 1999, Elastic-plastic analysis of tube bending, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 39, pp. 87~104.
- [8] X. M. Chen, S. D. Liu, 2000, Experimental and Simulation Study on Tube Bending and Hydroforming, SAE SP, Sheet Metal Forming, pp. 165~172.
- [9] H. Y. Kim, H. T. Lim, C. H. Suh and W. S. Lee, 2003, Tube Hydroforming Process of Automotive Sub frame Considering Preforming and Prebending Effect, KSTP, Spring Conference Proceeding, pp. 402~408.
- [10] ABAQUS Version 6.5 Document Getting Started with ABAQUS.
- [11] Z. Jin, S. Luo, X. Daniel, 2001, KBS-aided design of tube bending processed, Eng. App. Artif. Intel., Vol.14, pp. 599~606.
- [12] H. J. Kim, B. W. LEE, 2002, Technical information of bending process, HWAJIN PF CO., Ltd.
- [13] Y. S. Kim, H. S. Chos, C. D. Park, Y. S. Kim and Y. J. Jo, 2000, Evaluation of tube hydroformability, KSTP, Vol. 9, pp. 604~614.