

실험계획법을 이용한 튜브 하이드로 포밍용 이중관 벤딩 공정의 해석적 요인 효과 분석

심도식¹, 정창균¹, 성대용¹, 양동열[#], 박성호², 김근환², 최한호²

Analytic Factor Effects Analysis of Bending Process of Double Pipe for Tube-Hydroforming using Experimental Design

D. S. Shim, C.G. Jung, D. Y. Seong, D. Y. Yang, S. H. Park, K. H. Kim, H. H. Choi

Abstract

This paper covers finite element simulations to evaluate the bending limit of double pipe for tube-hydroforming. The tube-hydroforming process starts with a straight precut tube. The tube is often prebent in a rotary draw bending machine to fit the hydroforming tool. During the bending the tube undergoes significant deformation. So forming defects such as wrinkling, thinning and flattening are generated in the tube. Consequently we analyzed the effect of process parameters in rotary draw bending process and searched the optimized combination of process parameters to minimize the forming defects using orthogonal arrays. The characteristic to evaluate the effects of the process parameters is the bending angle which wrinkling is generated, we define the bending angle at that time as bending limit. Of many process parameters, the process parameters of the bending process such as gap between inner and outer tube, boosting force, dimensions of mandrel were analyzed. And we observed the deformation modes of bent double pipe at specific bending angle in each parameter combination.

Key Words : tube-hydroforming, rotary draw bending, double pipe, wrinkling, orthogonal array

1. 서론

국내외적으로 자동차 배기부품 소재로서 이중관은, 내관과 외관 사이 공간의 영향으로 완전 연소를 유도하여 연비를 향상시키며 배기가스 규제를 만족시킬 수 있을 뿐만 아니라 배기관의 진동이나 소음을 완화할 수 있는 기능을 가진 부품으로서 최근 자동차 제조사의 관심과 채용의지가 높아지고 있다. 그러나 이중관을 제품화하기 위해서 적절한 형상으로의 굽힘이 필요하나 지금까지 이러한 이중관의 굽힘 특성에 대한 연구는 미흡하여 이중관의 채용이 늦어지고 있다. 이중관의 벤딩을 위한 공정으로 현재 연구가 진행되고 있는 방법으로 크게 2가지로 분류할 수 있다.

가장 일반적인 방법은 단일관의 성형기술을 그대로 이중관에 적용하는 것으로 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[1,2,3]. 그러나 이중관이 가지는 특성으로 인해 단일관에 비해 성형제약이 큰 단점이 있으며 이를 해결하기 위한 노력이 진행되고 있다. 한편 제거 가능한 재료 혹은 성형 보조물을 관 사이에 충전 혹은 배치하여 이중관을 성형하는 경우도 있는데, 납과 같은 저온 용융 재료 또는 대변형 허용 재료인 고무 등이 사용되고 있으며 국내외 특허 등에서 찾아볼 수 있다. 그러나 아직까지 확립된

1. 한국과학기술원 기계항공시스템학부 대학원
2. POSCO 기술연구소 자동차가공연구그룹
교신저자: 한국과학기술원 기계항공시스템학부
E-mail: dyyang@kaist.ac.kr

공정이라기 보다는 이중관 벤딩을 위한 초기 시도 수준으로 볼 수 있다.

본 연구에서는 로터리 드로우 벤딩을 이용한 이중관 벤딩 시 발생하는 성형 결함 및 공정 변수 분석을 위해 실험계획법을 이용한 유한요소해석을 실시하고 성형 결함을 최소화할 수 있는 최적 조건을 제시하고자 한다.

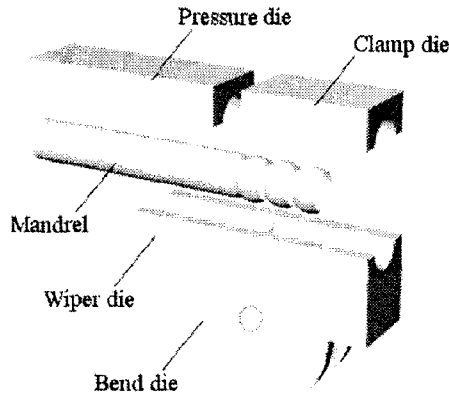


Fig. 1 Components of bending die set

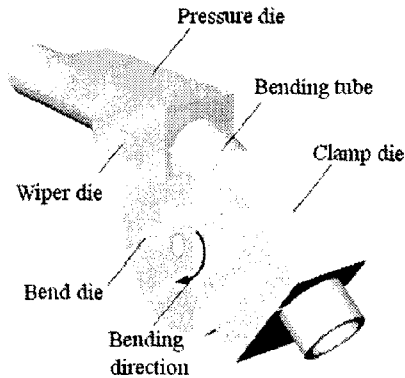


Fig. 2 Rotary draw bending

2. 이중관 벤딩 공정

2.1 로터리 드로우 벤딩

이중관의 벤딩을 위한 가장 일반적인 방법으로 단일관의 성형 원리를 적용한 Fig. 1 과 같은 금형 셋으로 구성된 로터리 드로우 벤딩 공정이 널리 사용된다. 그림과 같이 벤딩 시 이중관의 주름 발생을 방지하기 위해 이중관의 내관에 다양한 종류의 맨드릴(Mandrel)을 삽입하게 되며, Fig. 2 에서처럼 이중관을 벤드 다이(Bend die)와 클램프 다이(Clamp die)로 고정시킨 상태에서 벤드 다이를 회전시킴으로써 이중관을 드로잉(Drawing)과 동시에 벤딩되도록 한다. 한편 소재의 주름

방지를 위한 와이퍼 다이(Wiper die)와 두께 감소 현상을 방지하기 위해 벤드 다이 회전 방향의 접선 방향으로 부스팅력(Boosting force)을 작용시키는 프레스 다이(Pressure die)를 사용한다.

2.2 로터리 드로우 벤딩의 공정 변수

이중관 드로우 벤딩 공정 설계에 있어서는 이중관의 내/외경 치수, 재료 물성, 내외관 간격 및 두께, 맨드릴 설계 치수, 부스팅력, 벤딩 곡률 반경(radius of curvature), 윤활 등 많은 공정 변수들에 의해 영향을 받는다. 특히 기하적으로 복잡한 형상에 있어서는 이중관 벤딩 공정에 대한 최적 공정 설계에는 많은 어려움이 따른다. 공정 변수들 중에서 몇 가지 설계 변수에 대한 조합으로 아래와 같이 정의하며 이는 경험적 그리고 실제적으로 널리 사용되는 설계 요인이라고 할 수 있다[4].

$$WF = OD/t \quad (1)$$

$$BF = R/OD \quad (2)$$

식(1)은 튜브의 두께(t)에 대한 외관의 외경(OD)의 비를 나타내며 두께 인자(Wall factor)로 정의한다. 식(2)는 벤딩 인자(Bending factor)로 정의되며 외관의 외경(OD) 대비 벤딩 중심선의 곡률 반경의 비를 나타낸다. 이 값이 작을수록 주름 발생 시점은 낮은 벤딩 각도에서 나타나게 된다.

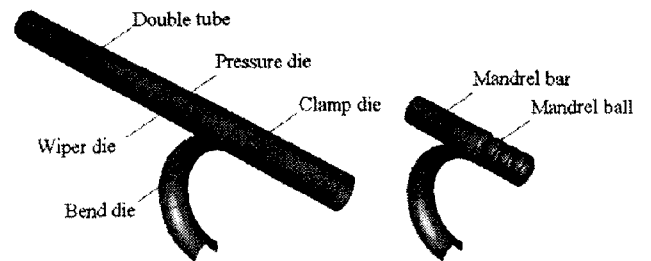


Fig. 3 Finite elements simulation model

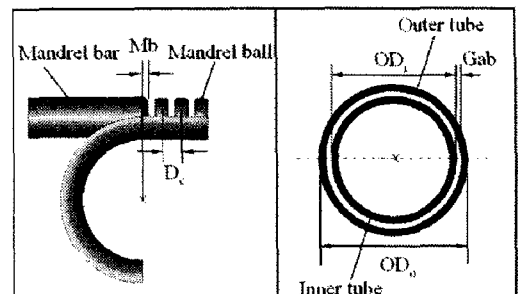


Fig. 4 Definitions of design parameters

3. 실험 계획법을 이용한 요인 효과 분석

3.1 유한요소해석 모델

벤딩 한계 각도를 정량적으로 분석하기 위해 Fig. 3 과 같이 시뮬레이션 모델을 이용하여 유한요소해석을 실시하였다. 드로우 벤딩의 공정 변수에 대한 영향력을 분석하기 위해 실제 공정의 다이(Die)와 툴(Tool)의 공정 조건을 적용하여 실제 공정과 유사하도록 모델링하였다. 그리고 해석에 사용된 맨드릴은 그림과 같이 맨드릴 바와 3 개의 볼(Ball)이 연결된 플렉시블 맨드릴(Flexible mandrel)을 사용하였으며 내외관의 소재는 동일한 스테인리스 스틸(Stainless steel)을 사용하였다. 유한요소해석은 ABAQUS v.6.4(Explicit)에서 선형 저감 적분 쉘 요소(S4R)로 구성하여 해석을 실시하였다.

Table 1 Level of process parameters

Parameter	Level 1	Level 2	Level 3
D_c (mm)	10	15	20
M_b (mm)	5	2.5	0
Boosting(ton)	2	2.5	3
G_{ab} (mm)	0.1	0.3	0.5
WF = 34		BF = 1.8	

Table 2 $L_9(3^4)$ orthogonal array

Sim. No.	D_c (mm)	M_b (mm)	Boosting (ton)	G_{ab} (mm)
S1	10	5	2	0.1
S2	10	2.5	2.5	0.3
S3	10	0	3	0.5
S4	15	5	3	0.3
S5	15	2.5	2	0.5
S6	15	0	2.5	0.1
S7	20	5	2.5	0.5
S8	20	2.5	3	0.1
S9	20	0	2	0.3

3.2 공정 변수 설정

앞서 언급한 것과 같이 실제 공정에서의 많은 공정 변수들 중에서 몇 가지 공정 변수를 제외하고 Table 1 과 같이 성형 특성이 규명되지 않은 4 개

의 공정 변수- 맨드릴 볼 간 간격(D_c), 맨드릴 바의 초기 위치(M_b), 부스팅력(Boosting) 그리고 내외관 사이의 간격(G_{ab})-에 대해 각각 3 수준으로 설정하고 Table 2 와 같이 직교배열표를 작성하였다. 또한 해석에 사용된 내외관의 WF(Wall factor)은 34 로 동일하고, BF(Bending factor) 1.8 의 공정 조건으로 해석을 실시하였다.

3.3 다구찌 기법을 이용한 해석 및 결과

다구찌 기법을 이용한 유한요소해석을 실시한 결과, Table 3 에 주름 발생 시점을 한계 각도로 정의하여 굽힘 한계 각도와 30° 의 벤딩 각도에서 두께 감소율을 내외관 각각에 대해 나타내었고, 한계 각도를 특성치로 하여 설계 변수의 수준에 따른 특성치를 Fig. 5 에 나타내었다. 또한 성형 결함 모드를 관찰하기 위해 Fig. 6 에 시뮬레이션 S5 의 결과 나타내었다.

Table 3 characteristic values

Sim. No.	Limit angle (inner)	Limit angle (outer)	Thickness reduction rate(inner)	Thickness reduction rate(outer)
S1	9.00°	24.0°	16.2%	37.0%
S2	9.00°	28.5°	12.6%	21.1%
S3	9.00°	24.0°	25.0%	40.0%
S4	13.5°	25.5°	13.3%	28.1%
S5	6.05°	40.5°	29.9%	41.1%
S6	16.5°	42.0°	25.6%	36.6%
S7	12.0°	34.5°	26.4%	39.3%
S8	18.0°	18.0°	45.6%	48.9%
S9	18.0°	30.0°	50.2%	40.9%

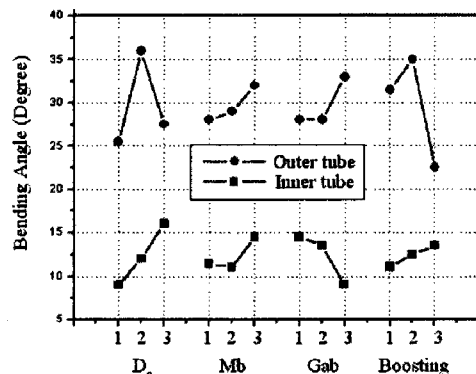


Fig.5 SN ratio of parameter levels

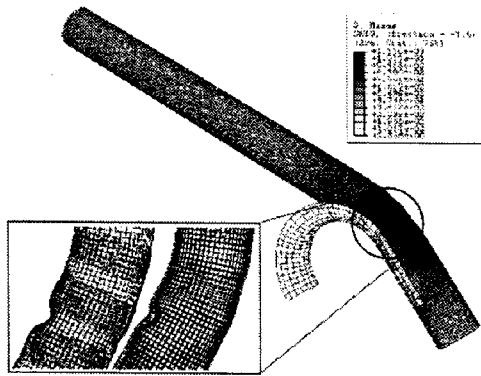


Fig. 6 Simulated result

설계 변수에 따른 SN 비와 Fig. 6의 해석 결과에 따르면 외관에 비해 낮은 벤딩 각도에서 내관의 주름이 먼저 발생되고, 그 때 발생한 내관의 주름은 내외관의 간격이 좁을수록 외관의 주름에 영향을 미치는 것으로 나타났으며 반면에 간격이 클수록 내관의 한계 각도는 낮아지게 된다. 따라서 이중관의 벤딩 한계 각도를 증가시키기 위해서는 내관의 주름에 대비하여야 하는데, Fig. 6의 변형 모드에서 확인할 수 있듯이 내관의 성형 결함의 경우 주로 소재가 맨드릴 볼 사이로 유입하게 되어 주름이 발생되게 되므로 맨드릴 볼 간의 간격을 좁히는 것이 성형 결함 방지에 유리할 것으로 판단된다. 맨드릴 바의 초기 위치(Mb)에 따라서는 특별한 결함 모드가 확인되지 않았으며 한계 벤딩 각도에도 영향을 크게 미치는 요인이 아님을 알 수 있다. 나머지 설계 변수에 대해서는 내외관 사이의 간격(Gab) 2 수준(0.3mm), 부스팅력(Boosting) 3 수준(3ton)이 이중관의 벤딩 한계 각도를 증가시키기 위한 최적의 조건으로 판단된다. 이 때 부스팅력의 경우 굽힘 바깥면에서 소재의 두께 감소 현상(Thinning)을 감소시키기 위한 것이나 최적 수준 이상의 부스팅력이 작용할 경우에는 굽힘 안쪽면에서의 주름 발생을 유발하게 될 것이다. 따라서 벤딩되는 소재의 치수와 벤딩 곡률 반경에 따라, 본 연구에서 분석된 공정 변수 외의 변수에 대해서도 한계 벤딩 각도를 증가시키기 위해서는 각 변수들이 최적의 조건으로 설계되어야 한다.

실험계획법을 통해 설정된 4개 공정 변수의 각 3수준에 대해 도출된 최적 설계 조합을 이용해 유한요소해석을 실시한 결과, Table 4와 같이 내외관 모두 성형성을 개선시킬 수 있었다.

Table 4 Improvement through experimental design

Parameter	Limit angle (outer tube)	Limit angle (inner tube)
before	13.5°	25.5°
after	16.5°	42.0°
Improvement	22%	64.7%

4. 결론

하이드로 포밍용 이중관의 성형에 있어서 로터리 드로우 벤딩 공정을 이용한 벤딩 시 이중관의 성형 한계를 파악하고 공정 변수 분석과 최적 공정 변수 조합을 찾기 위해 실험계획법을 기반으로 유한 요소 해석을 실시하였다. 그 결과 내관의 주름 발생 원인과 내외관의 변형 모드를 파악할 수 있었다. 내외관의 벤딩 한계 각도를 동시에 증가시키기 위해서는 소재 치수 정보인 WF와 공정 조건인 BF에 따라 여러 가지 공정 변수에 대해 최적의 조건으로 설계되어야 한다.

후 기

본 연구는 POSCO 기술연구소 자동차가공연구그룹의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Kristoffer Trana, 2002, Finite element simulation of the tube hydroforming process-bending, performing and hydorforming, J. Mat. Proc. Tech., 127, pp. 401~408.
- [2] 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.
- [3] He Yang, Yan Lin, 2004, Wrinkling analysis for forming limit of tube bending processes, J. Mat. Proc. Tech., 152, pp. 363~369.
- [4] Z. Jin, S. Luo, X. Daniel, 2001, KBS-aided design of tube bending processed, Eng. App. Artif. Intel., Vol. 14, pp. 599~606.