한국정밀공학회지 제 24 권 제 6 호 (2007 년 6 월)
Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 6, June 2007

정밀 파이프 성형을 위한 벤딩 공정 개발에 관한 연구

김현진*, 이춘만#

A Study on the Bending Process for Precision Pipe Forming

Hyun Jin Kim* and Choon Man Lee#

ABSTRACT

The arbitrarily-bended pipe is widely used in a heat exchanger system. Thus, the pipe bending process has important role in performance and productivity of heat exchanger system. The purpose of this study is to investigate the bending process for manufacturing of sound pipe. And, the spring-back effect and the variation of pipe thickness should be controlled effectively. The change of spring-back ratio and the thickness variation of pipe according to the change of bending radius, bending angle and pipe thickness are analyzed by FEM analysis. The analytic results are compared with the experimental data, accordingly the results show good agreement. The method of the analysis can be applied for manufacturing of precision bended pipe.

Key Words : Pipe bending (파이프 굽힘), Spring back (스프링백), Variation of the pipe thickness (파이프 두께 변화), FEM (유한요소해석), Elastic-plastic analysis (탄소성 해석), Contact analysis (접촉 해석)

1. 서론

파이프의 굽힘 공정은 자동차, 항공기, 조선, 유공압기기, 보일러, 열 교환기 등 여러 산업분야에서 각종 부품 제조에 널리 이용되고 있다.

그 중 열교환기는 내부에서 순환하는 냉매와 외부공기와의 열 교환이 일어나는 장치로 일상생활에서 널리 사용하고 있는 에어컨의 핵심 부품이다. 에어컨에 사용되는 열교환기의 생산 시스템은 부분적으로 자동화 시스템이 도입되어 있지만 많은 부분이 노동집약적인 방법에 의존하고 있다. 그렇기 때문에 전체적인 시스템의 자동화와 성형기술의 국산화 방안이 시급한 과제로 남아있다. 파이프를 가공하는 장비들의 정확한 설계와 굽힘 가공 기술은 열교환기의 성능 향상과 생산성을 향상시키는데 중요한 역할을 하므로 정밀한 굽힘 가공 연구가 필요시 된다.

소성 변형에 의한 형상가공을 설명하기 위해서는 이론적인 배경을 바탕으로 오랫동안 축적된 가공기술에 대한 경험과 이에 따른 충분한 실험적 자료가 필요하다. 탄소성 거동이 적용되는 굽힘 가공의 경우에는 이론적인 접근 방법으로 해결하기 힘든 현상이 발생하여 실제 생산에 적용하기 위해서는 많은 시행오차가 필요하다. 즉 가공후의 하중제

☞ 접수일: 2006년 1월 13일; 게재승인일: 2007년 3월 14일
* 창원대학교 기계설계공학과 대학원
# 교신저자: 창원대학교 기계설계공학과
E-mail: cmlee@sarim.changwon.ac.kr Tel. (055) 279-7572

거에 따른 재료의 복원능력이 발생하여 원래의 요구하는 형상에서 벗어나는 모양을 갖게 되는 경우가 많이 발생한다. 이러한 현상을 스프링백(Spring-back) 현상이라 한다. 또한, 굽힘 공정 중에는 스프링백 뿐만 아니라, 파이프의 두께와 단면형상의 변화가 발생하며, 이는 성형 제품의 품질에 큰 영향을 미친다.

굽힘 가공에 대한 연구는 순수한 이론적 접근에 의한 기초 모델링과 실험에 의한 자료 분석, 그리고 실험값의 해석에 의한 모델링과 유한요소법등에 의한 수학적 해석방법이 병행되어 발표되고 있다.

보와 판재의 순수 굽힘의 경우 전통적으로 많은 연구들이 수행되었다. 형강의 굽힘과 가공 경화된 재료의 굽힘에서 발생하는 스프링백 현상에 대해 여러 문헌에서 이론적으로 해석되었다.[1,2] 특히 Al-Qureshi[3]는 상계법(Upper-bound approach)을 바탕으로 이론식을 제시하여 굽힘 반경, 파이프 두께, 재료의 응력-변형율 특성을 고려한 스프링백과 잔류응력 값을 예측할 수 있도록 하였으며 실험을 통해 검증하였다. 양재봉[4]은 STKM 11A 소재의 파이프를 가지고 FEM 해석을 수행하여 굽힘 후 파이프의 두께분포, 단면 형상, 스프링백 등을 구하여 그 특성을 파악하였다. 김광영[5]은 열교환기용 Hair Pin 가공에서 굽힘 시 단면 형상 유지 및 주름 방지 역할을 하는 맨드릴의 위치 및 크기에 따른 파이프의 변형형상과 굽힘 응력을 분석하였다. 강홍식[6]은 열교환기용 동파이프 성형에서 굽힘 속도와 맨드릴 위치에 따라 파이프 두께 분포를 유한요소해석과 굽힘 시험 결과를 비교분석하였다.

본 연구의 목적은 열교환기용 파이프의 굽힘 공정을 시뮬레이션하여 성형후의 스프링백 비, 파이프의 두께 변화를 분석하여 정밀한 파이프 생산을 위해 성형공정 조건을 제시하는데 있다. 시뮬레이션은 유한요소해석 프로그램인 Marc를 이용하여 탄소성 해석 및 접촉 해석을 수행하였다. 재료의 굽힘 반경, 굽힘 각도 및 파이프 두께에 따른 스프링백 비를 분석하고, 성형 후의 파이프 굽힘부의 변화율을 계산하여 양질의 파이프 생산을 위한 공정 조건을 설정할 수 있었다. 수행한 해석 결과는 실험을 통해 타당성을 검토하였다.

2. 굽힘 공정 해석

2.1 파이프의 굽힘 장치

열교환기용 파이프를 생산하기위한 벤딩 머신은 여러 굽힘 방법들 중 파이프의 주름을 억제할 수 있고 우수한 성형력을 가진 와이퍼 드로우 벤더에 의한 방법을 선택하였다. 기본적으로 사용되는 금형은 Fig. 1에서 보는바와 같이 고정된 굽힘 다이(Bending die), 회전 다이(Rotating die), 고정 다이(Clamp)로 이루어져 있다. 와이퍼 드로우 벤더에 의한 성형 방법은 파이프를 금형에 위치시키고 고정 다이로 소재를 고정한 후, 파이프을 일정 반경으로 굽히기 위한 굽힘 다이를 중심으로 원하는 각도만큼 회전 다이가 회전하면서 굽힘을 진행하는 방법이다. 굽힘 반경이 작거나 소재의 두께가 얇은 경우에는 맨드렐(Mandrel)이라 불리는 봉을 튜브의 내측에 삽입하여 좌굴이 발생하지 않도록 지지하는 역할을 하도록 한다. 맨드렐의 사용은 생산비용을 증가시키는 요인이 되므로 가능한 한 이의 사용은 회피하는 것이 바람직하다.

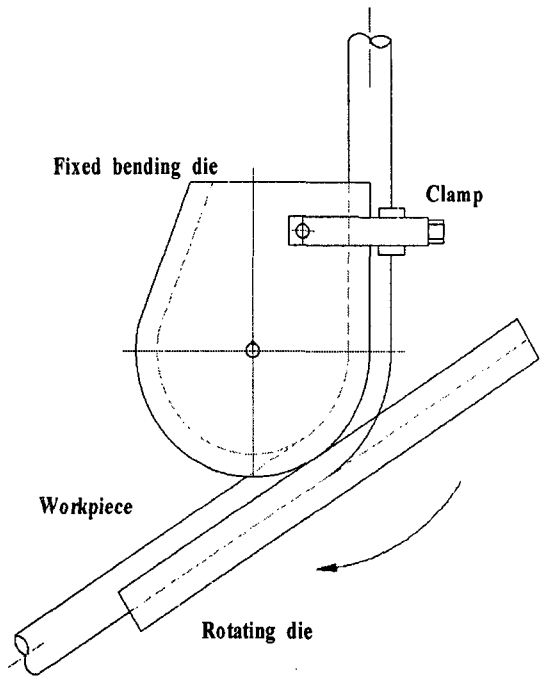

Fig. 1 Method of bending process by wiper draw bender

Fig. 2에 나타낸 벤딩 머신이 이번 연구에 사용한 굽힘 장치이다.[7] 이 머신은 파이프 공급 장치, 파이프 홀더 유닛, 직선교정기, 길이 제어 피딩 유

닛, 각도 제어·회전 구동 유닛, 벤딩 유닛, 파이프 컷팅 유닛 등으로 구성되어 있다. 파이프가 감겨있는 롤에서부터 파이프를 공급받아 파이프 홀더 유닛으로 지지하고, 직선교정기를 통과시킴으로써 공급된 파이프를 직선화하여 길이 제어 피딩 유닛으로 필요한 길이만큼 조절한 후 마지막으로 굽힘을 하기 위한 각도 제어를 한 금형을 회전시켜 파이프를 굽히고 컷팅하면 부품가공이 완료된다. 이 머신을 바탕으로 굽힘 가공 공정 데이터를 수집하였으며, 그 결과를 생산 라인 중 각도 제어 유닛 및 벤딩 유닛의 셋팅에 반영하였다.

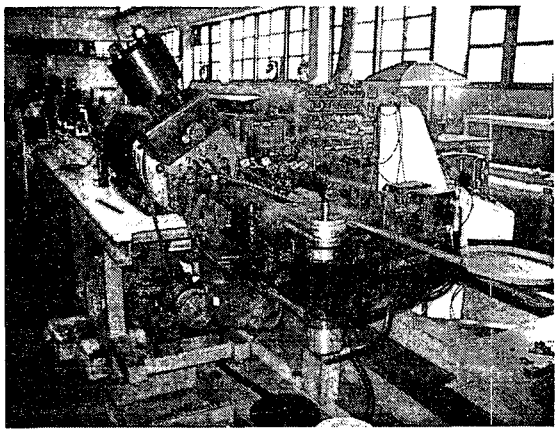

Fig. 2 Pipe Bending Machine

2.2 유한 요소 모델링

Fig. 3은 파이프 굽힘 장치의 유한요소모델이다. 다이는 소재와 접하는 면을 모델링하여 간략화 하였고, 굽힘 다이는 파이프의 굽힘 각 조절을 용이하도록 하기 위해 원형으로 모델링 하였다. 굽힘 다이와 회전 다이는 모두 공구강이므로 굽힘 소재인 동파이프(Copper pipe)보다 매우 강성이 크기 때문에 변형이 발생하지 않는다고 가정을 하여 강체(Rigid body)요소로 모델을 정의하였다. 파이프는 비선형해석이 가능한 쉘(shell) 요소로 메쉬(Mesh)를 하였다. 다이와 파이프 사이에는 접촉조건을 주어 기계적 거동이 이루어지도록 하였으며, 파이프에 비해 상대적으로 강성이 높은 회전 다이를 굽힘 다이를 따라 강제 회전 변위시킴으로써 파이프의 굽힘 성형이 일어날 수 있도록 하였다. 파이프를 고정하는 클램프는 따로 모델링하지 않고 파이프의 왼쪽 끝부분의 절점(Node)의 각 방향 변위를 고정하였다. 해석을 수행하기 위해서 몇 가지 가정을 하였는데 가공 시 발생하는 열변형 및 열전달은 무시하였고, 소재와 다이 사이에 발생하는 마찰은 쿨롱 마찰(Coulomb friction)로 설정하여 냉간 가공에 일반적으로 적용하는 0.1을 마찰 계수로 사용하였다.[8] Table 1에 해석에 적용한 조건을 정리하여 나타내었다. 굽힘 해석은 회전 다이를 원하는 각도만큼 강제 회전 변위시킨 후 다이를 해제시켜 스프링백이 발생하도록 하였다. 해석방법은 유한요소법을 적용한 탄소성 접촉해석을 수행하였다.

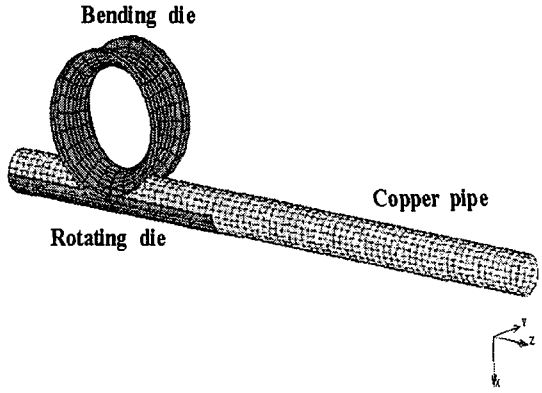

Fig. 3 Finite element model of pipe bending unit and workpiece

Table 1 Input parameter for analysis

Analysis classification	Elasto-plastic & Contact
Element type	Shell
Friction factor	0.1
Computational approach	Updated Lagrangian Fomulation 9,10

2.3 재질 특성

실험에 사용된 열교환용 파이프는 일반적인 동파이프 물성치의 적용이 맞지 않아 유한요소해석을 수행하기 위해 필요한 재질특성을 인장시험을 통해 파악하였다. 인장시편[11]은 KS B 0801에서 정해진 기준에 따라 와이어 방전가공에 의하여 파이프로부터 채취하였다. Fig. 4에 인장시편의 형상을 나타내었다. 시편이 파이프 형상이므로 그립으로 고정했을 때 찌그러짐을 방지하기 위해 파이프의 양쪽에 플러그를 넣어 시편을 제작하였고, 중심선을 그어

시편의 수직, 수평 방향으로 스트레인 게이지를 부착하였다. Instron 시험기를 이용하여 인장시험[12]을 수행하였으며, 7회의 시험을 행한 후 최대, 최소의 값은 버리고 5회의 결과를 이용하여 진 응력-변형률을 구하여 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5의 결과를 평균하여 유한요소해석에 적용할 동파이프의 물성치를 구하였고, Table 2에 나타냈었다. 탄소성 해석을 수행하기 위해서는 진 응력-변형률 선도(True stress- strain curve)도 필요하며, Fig. 6에 그래프로 나타내었다.

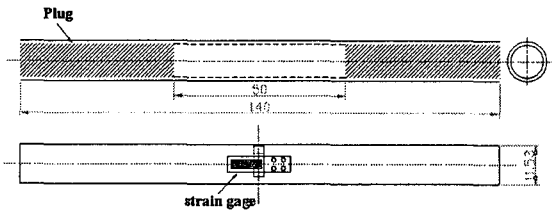

Fig. 4 Specimen of copper pipe

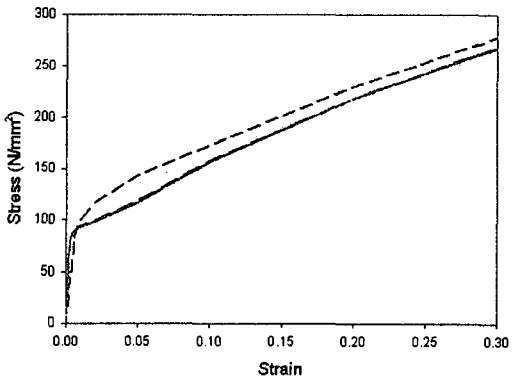

Fig. 5 True stress-strain curve for specimens

Table 2 Property of specimen

Young's modulus	28,370 N/mm^2
Poisson's ratio	0.31
Yield stress	59 N/mm^2

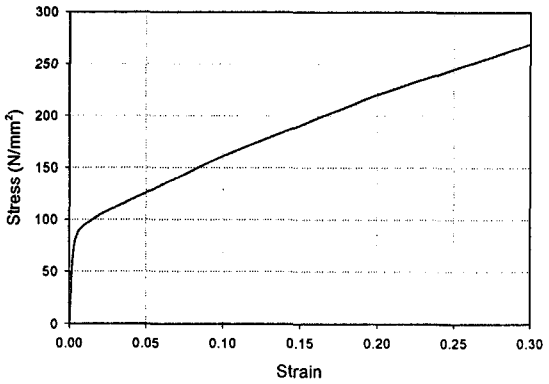

Fig. 6 True stress-strain curve for copper

2.4 굽힘에 따른 스프링백 해석

굽힘 가공에서 스프링백 크기에 영향을 줄 수 있는 요인은 다이 반경, 굽힘 각도, 가공하는 소재의 재질, 직경, 두께 등 여러 가지가 있다. 본 연구에서는 인자를 다이의 반경, 굽힘 각도, 소재의 직경과 두께로 두고 각각의 경우별로 유한요소해석을 수행하였다. 해석 결과는 다이 해제 전의 각도를 θ_L, 다이 해제 후의 각도를 θ_U라 했을 때 각각의 각도를 측정하여 두 각도사이의 비, 즉 θ_U/θ_L를 계산하였고 이를 스프링백 비(Spring-back Ratio)라 하였다.[13]

2.4.1 굽힘 각도에 따른 스프링백 비 비교

직경이 12 mm이고 두께가 0.6 mm, 0.8 mm인 파이프를 20 mm, 40 mm의 반경을 가진 굽힘 다이에서 가공할 경우를 해석하여 그 결과를 굽힘 각도에 따라 정리하였다. Fig. 7에 나타난 그래프는 직경이 12 mm이고, 두께가 0.6 mm인 시편을 굽힘 해석 했을 때, 굽힘 각도에 따른 스프링백 비를 나타내고 있다. 그래프에 의하면 굽힘 각도에 따라 스프링백 비는 증가하는 것으로 보인다. 굽힘 반경이 동일할 때 굽힘 각도에 따른 스프링백 비는 조금씩 증가하여, 90° 굽힘 시와 180° 굽힘 시의 차이는 약 0.01이다. Fig. 8의 그래프는 시편이 직경 12 mm, 두께가 0.8 mm일 때의 굽힘 해석 결과이다.

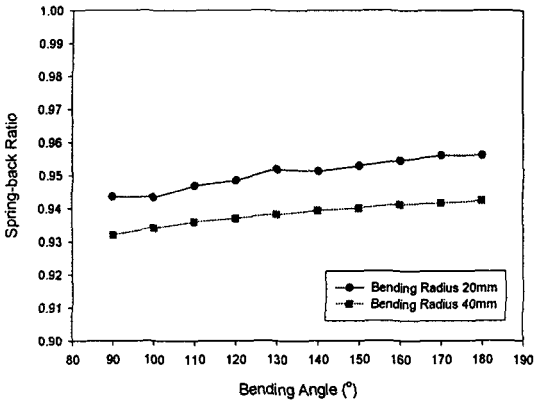

Fig. 7 Spring-back ratio according to bending angle of pipe with thickness 0.6 mm

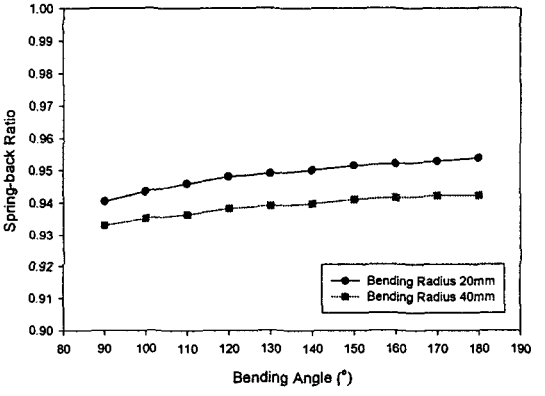

Fig. 8 Spring-back ratio according to bending angle of pipe with thickness 0.8 mm

2.4.2 굽힘 반경에 따른 스프링백 비 비교

직경이 12 mm이고 두께가 0.6 mm인 시편을 가지고 굽힘 반경을 달리하여 굽힘 해석을 수행하였다. 굽힘 다이는 반경이 각각 *20 mm, 30 mm, 40* mm 3가지 종류를 사용하였다. Fig. 9의 그래프에 나타난 결과를 보면 굽힘 반경이 커질수록 스프링백 비는 작아지는 것을 확인할 수 있었다. Table 3은 굽힘 반경에 따른 스프링백 비와 스프링백 양, 즉 스프링백 전후의 각도변화를 나타내었다. 각도 변화량을 보면 굽힘 반경이 클수록 스프링백 각도도 크게 나타나며, *180°* 굽힘에서 굽힘 다이 *20 mm* 와 40 mm 일 경우를 비교했을 때 2.52°의 차이가 나타났다.

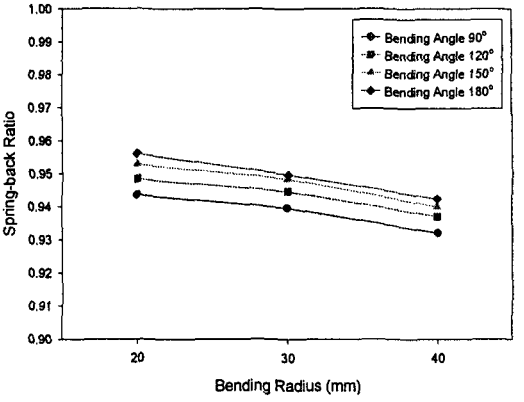

Fig. 9 Spring-back ratio according to bending radius of pipe

Table 3 Comparison of spring-back ratios and $\Delta\theta$ according to bending radius

Bending angle (°)	Bending radius (mm)	Spring-back ratio	$\Delta\theta = \theta_L - \theta_U$
90	20	0.9435	5.21
	30	0.9400	5.50
	40	0.9320	6.19
120	20	0.9484	6.30
	30	0.9446	6.70
	40	0.9370	7.62
150	20	0.9528	7.16
	30	0.9484	7.79
	40	0.9400	9.05
180	20	0.9561	8.02
	30	0.9497	9.11
	40	0.9424	10.54

2.4.3 파이프 두께에 따른 스프링백 비 비교

직경이 12 mm이고 두께가 0.6 mm, 0.8 mm, 1.0 mm인 시편을 굽힘 반경이 40 mm일 때 굽힘 해석을 수행하여, 그 결과를 Fig. 10의 그래프에 나타내었다, 그래프에 의하면 파이프의 두께가 두꺼울수록 굽힘 반경이 커질수록 스프링백 비가 커지는 것을 확인할 수 있었다.

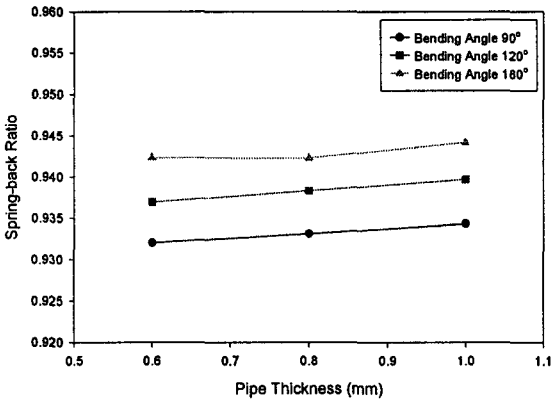

Fig. 10 Spring-back ratio according to pipe thickness

Table 4에서는 두께 변화에 따른 스프링백 비를 나타내었다. 그 결과를 보면, 굽힘 각도별로 파이프 두께 변화에 따른 스프링백 비는 거의 일정하고, 최대 스프링백 비 변화량이 굽힘 각도 120° 일 때 나타났으나, 값의 변화는 0.0027로 미미하다. 그러므로 스프링백 발생에서 파이프 두께가 미치는 영향은 거의 없다고 생각할 수 있다.

Table 4 Comparison of spring-back ratio according to pipe thickness

Thickness (mm)	Spring-back ratio		
	90°	120°	180°
0.6	0.9320	0.9370	0.9424
0.8	0.9331	0.9383	0.9423
1	0.9343	0.9397	0.9442

3. 결과 및 고찰

3.1 파이프 굽힘 실험 결과

벤딩 머신을 이용하여 가공한 파이프의 굽힘 각도를 측정하고 스프링백이 일어난 각도를 계산하였다. 각도의 측정은 접촉식 3차원 측정기를 이용하였고, 측정방법은 굽힘 가공한 파이프를 정반위에 올려놓고 수직으로 투영시켜 평면데이터를 얻은 후에 프로브(Probe)로 포인트를 찍어 직선 데이터를 얻어 그 사이의 각도를 측정하는 방법이다.

실험에 사용한 재료는 직경이 12 mm이고, 두께가 0.6 mm인 파이프이고, 180°에서 90°까지 굽힘을 수행하여 각각의 경우에 대하여 굽힘각도를 측정하였다. Fig. 11에서 그래프로 굽힘 시험 결과를 나타내었다. 각도별로 3번의 굽힘을 수행하여 결과값을 나타내었고, 유한요소해석 결과와 비교하였다. 그래프를 보면 시험에 의한 스프링백 비가 해석에 의한 비보다 큰 것을 알 수 있고, 굽힘 각도가 커질수록 그 차이가 크게 나타났다. 이 차는 실제와 해석 간에 마찰력이나 전단력 차이 때문인 것으로 판단된다. Table 5에서는 실험 결과와 해석 결과의 차를 백분율로 나타내었다. 각도별로 3번의 굽힘 가공한 결과의 스프링백 비를 평균하여 실험값 k_e라 하고, 해석에 의한 스프링백 비를 k_a라 하여 그 값을 나타내었고, 실험값을 기준으로 두 값의 차를 계산하였다. 차는 굽힘 각도가 커질수록 증가하는 경향을 보이며, 최대차는 2.71% 이므로 5% 이내이다.

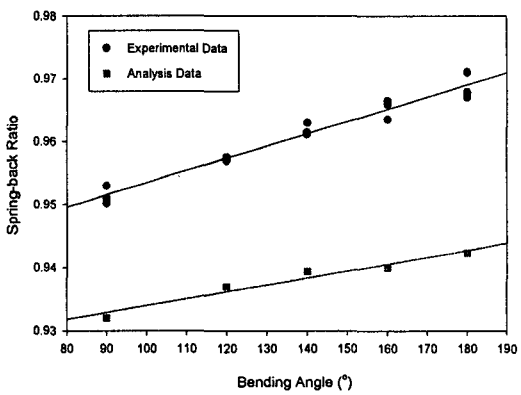

Fig. 11 Spring-back ratio according to bending angle

Table 5 Comparison of spring-back ratio of experiment and analysis

Bending angle (°)	Spring-back ratio		Difference (%)
	Experiment	Derivation	
90	0.9514	0.9320	2.04
120	0.9572	0.9370	2.11
140	0.9619	0.9394	2.33
160	0.9653	0.9412	2.50
180	0.9686	0.9423	2.71

3.2 굽힘 공정 관계식 유도

Marquardt-Levenberg Algorithm를 이용하여 굽힘 반경과 굽힘 각도에 따른 스프링백 비를 구하는 함수를 구하였다. 이 알고리즘은 독립변수에 대해 주어진 데이터값과 추정값의 차의 제곱값들의 합이 최소인 curve를 찾는 fitting법이며, 수식으로 표현하면 식 (1)과 같이 나타낸다. 먼저 이론식과 해석결과를 분석하였을 때 결과값이 선형적으로 변한다는 것을 확인하였으므로, 공차를 0.0001로 주고 100번 반복계산을 수행하여 linear curve fitting을 하였다. 생성된 함수는 식 (2)와 같고 95% 신뢰도를 가진다. 여기서 R_L과 θ_L은 굽힘 반경과 굽힘 각도를 말하며, 파이프의 두께에 대한 스프링백의 크기변화는 거의 없기 때문에 무시하였다.

$$SS = min\{\sum_{i=1}^{n}(y_i - y_i')^2\} \quad (1)$$

$$k_f = -6.85 \times e^{-4} R_L + 1.101 \times \theta_L + 0.949982 \quad (2)$$

여기서,

y_i : 주어진값
y_i' : 추정값
k_f : 스프링백 비
R_L : 굽힘 반경
θ_L : 굽힘 각도

3.3 각도 계산 프로그램 개발

앞 절에서 유도한 관계식을 바탕으로 실제로 벤딩 머신 운용자가 손쉽게 굽힘 각도를 계산하기 위한 프로그래밍을 하였다. 굽힘 반경과 원하는 굽힘 각도를 입력하여 스프링백을 고려한 실제 굽힘 각도를 출력하는 프로그램이다. Fig. 12은 개발된 프로그램을 보여주고 있으며, Table 6는 경우에 따른 제어 굽힘 각도이다.

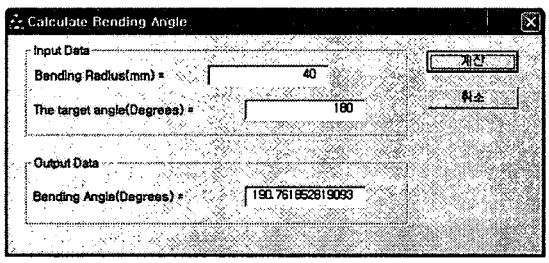

Fig. 12 Program for control of bending angle

Table 6 Output for control of bending angle

Bending radius (mm)	Target angle (°)	Bending angle (°)
40	90	96.44
40	180	190.76
20	90	95.06
20	180	188.09

4. 결론

본 논문에서는 굽힘 가공에 영향을 미치는 인자들의 특성을 파악하여 벤딩 머신에 적용하기 위해 굽힘 공정을 개발하고자 하였다. 이를 위해 유한요소 모델을 제시하고 굽힘 반경, 굽힘 각도, 파이프 두께를 달리하여 해석을 수행하였다. 굽힘 실험을 통하여 해석 결과를 검증하였고, 검증된 해석결과를 바탕으로 굽힘 공정 관계식을 유도하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서 유한요소모델은 실험 결과와 비교하였을 때 오차율 5% 이내의 신뢰할 수 있는 데이터를 제시하였다. 이 데이터를 바탕으로 벤딩 머신에서 굽힘 가공시 각도 제어를 위한 참고자료로 활용할 수 있도록 굽힘 반경과 굽힘 각도에 따른 스프링백 비를 구할 수 있는 식을 제시하였다.
2. 본 연구에서 제시한 관계식을 벤딩 머신에 적용하여 생산한 동파이프에 대한 정밀도에 관한 연구는 이후 과제이다.
3. 본 연구에서 제시한 관계식은 해석 및 실험에서 고려한 변수 조건에서 유효한 값이므로, 사례 연구를 더욱 확대하여 범용성 있는 데이터로 오차율을 줄일 필요성이 있다.

후 기

본 연구는 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Hosford, W. F. and Caddell, R. M., "Metal Forming," Prentice-Hall, 1983.
2. Johnson, W. and Meller P. B., "Engineering Plasticity," Ellis Horwood, 1983.
3. Al-Qureshi, H. A., "Elastic-plastic analysis of tube bending," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 39, pp. 87-104, 1999.
4. Yang, J. B., Jeon, B. H. and Oh, S. I., "Tube Bending Analysis for Hydroforming Process," Transactions of Materials Processing, Vol. 9, No. 3, pp. 249-256, 2000.
5. Kim, K. Y. and Yun, D. P., "Deformation analysis of copper pipe for hair pin under the bending forming using the Mandrel," Spring Annual Conference of the KSPE, pp. 1630-1633, 2003.
6. Kang, H. S., Kim, D. S., Hur, S. and Hong, S. I., "A study about shape processing for the bend of the Copper-Tube that use Hair Pin Bending Machine," Spring Annual Conference of the KSPE, pp. 1705-1708, 2003.
7. Paper for Korea Science and Engineering Foundation, "A Study on the Development of Three Dimensional Bending Machine," Hydrox Korea Co., Ltd., 2004.
8. Taylan, A., Oh, S. I. and Harold, L. G., "Metal Forming," American Society for Metals, 1983.
9. Jung, D. W., "Total Lagrangian Finite Element Analysis of Lateral Buckling for Thin Beam Structures," Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 11, No. 4, pp. 7-22, 1997.
10. Program Manual, "MSC.Marc Volume A : Theory and User Information," MSC.Software Corporation, 2003.
11. Korean Standards Association, "Test pieces for tensile test for metallic materials," Korean Standards Association, 1981.
12. Korean Standards Association, "Method of tensile test for metallic materials," Korean Standards Association, 2003.
13. Kim, Y. W., Kong, S. Y. and Nam, J. Y., "Measurement of Springback Ratio Using Bend Rig," Spring Annual Conference of the KSMTE, pp. 410-415, 2002.