

# 초고속 이송 방식 3차원 Bending Machine 개발에 관한 연구

임상현\*, 이춘만#

## A Study on the Development of a High Speed Feeding Type Three-Dimensional Bending Machine

Sang Heon Lim\* and Choon Man Lee#

### ABSTRACT

This study has been focused on the development of a high speed feeding type three-dimensional bending machine. It is designed for manufacture of copper pipe for heat exchangers. For the purpose of design of the machine, analysis of bending process, structural analysis and reliability evaluation of the machine by a laser interferometer are carried out. The analysis is carried out by FEM simulation using commercial softwares, DEFORM, MARC and CATIA V5. In addition, the machine has attained high accuracy and repeatability. In order to improve the accuracy of this machine, the maximum speed, positioning accuracy and repeatability of feed are measured by the laser interferometer. The final results of analysis are applied to the design of a high speed feeding type three-dimensional bending machine and the machine is successfully developed.

**Key Words** : Three-Dimensional Bending Machine (3차원 벤딩기), FEM (Finite Element Method : 유한요소법), Performance and Reliability Evaluation (성능·신뢰성 평가)

### 1. 서론

초고속 이송 방식 3차원 벤딩기(High-speed feeding type three-dimensional bending machine)는 오늘날 여러 산업분야에서 중요 배관 자재로 막대한 수량이 사용 되는 동관 및 비철 금속관을 3차원으로 가공하는 관재 가공기계이다. 현재, 국내 산업현장의 배관 생산 시스템은 부분적으로 자동화 시스템이 도입되어 있지만 이것은 2차원 벤딩 가공이 대부분이며 이로 인해 점점 다양한 형상을 갖춘 3

차원 벤딩 가공 부분에 있어서는 노동집약적인 방법에 의존하여 제품을 생산하고 있다. 이러한 방식으로 인해 각 가공 공정마다 별도의 벤딩 머신과 그것을 운용하기 위한 작업자가 배치되어 단순하고 반복적인 작업을 함으로서 공정 추가 및 불량품의 발생으로 인한 생산 단가가 상승하는 요인을 나타낸다. 이러한 이유로 전체적인 시스템의 자동화가 선행 되어야 한다. 오늘날 3차원 벤딩기는 이탈리아의 Pedrazzoli-ibp사와 미국의 BLM사 등에서 개발되어 국내에서 수입하여 생산 현장에 도입하고

접수일: 2005년 1월 17일; 게재승인일: 2005년 9월 9일

\* 창원대학교 기계설계공학과 대학원

# 교신저자: 창원대학교 기계설계공학과

E-mail cmlce@sarim.changwon.ac.kr Tel. (055) 279-7572

있다. 특히 관재의 사용이 많은 에어컨의 경우에는 전 세계 생산량의 18% 이상을 차지하고 있으나 국내에서는 이러한 3차원 가공에 대한 연구가 미비한 실정이며 3차원 벤딩기 자체가 매우 고가이므로 초기 투자의 비용이 높고 금형 기술 및 설계 기술의 미비로 인하여 개발에 많은 어려움이 있기에 이에 대한 연구가 시급한 실정이다.<sup>1-4</sup>

지금 국내에서는 관재의 벤딩 가공에 대하여 정밀한 형상을 제작하거나 맨드릴을 사용하여 곁힘 성형가공을 하는 등 다양한 연구들이 이루어지고 있는 추세이다.<sup>5, 6</sup> 이러한 연구들을 토대로 본 연구에서는 DEFORM을 이용하여 성형 공정을 시뮬레이션 하였고 이때 발생한 설계 변수들을 설계에 적용하였으며 MARC를 이용하여 스프링 백(Spring-back)에 대한 시뮬레이션을 하여 벤딩 공정에 있어 중요한 초과 각도의 선정을 시행하였다. 또한 설계된 3차원 벤딩기의 모드해석 및 구조해석을 CATIA V5를 이용하여 실시하였다. 이러한 해석을 통하여 3차원 벤딩기를 설계하였고 시제품의 개발을 하였으며 마지막으로 그 성능 및 신뢰성 평가를 통해 개발되어진 초고속 이송 방식 3차원 벤딩기의 타당성을 검증하였다.

## 2. 3차원 벤딩기의 구성

본 연구에서 개발된 3차원 벤딩기는 크게 4부분으로 구성 되어 있다. 즉 관재가 감겨있는 롤에서부터 관재를 공급시킬 때 지지를 해 주는 Pipe holder 유닛, 공급된 관재를 직선화 시켜주는 직선 교정기, 벤딩을 하기위해 필요한 관재의 길이만큼 제어를 해 주는 길이 제어 이송 유닛, 마지막으로 3차원으로 벤딩을 하기 위한 각도 제어, 회전 구동 유닛의 4부분이다. Fig. 1에 3차원 벤딩기의 주요 구성도를 나타내고 있고 Fig. 2에 각 유닛들을 3차원으로 모델링한 형상을 나타내었으며 각 절에서 각각의 구성에 대해 설명을 하였다.

### 2.1 Pipe holder 유닛

Pipe holder 유닛은 감겨있는 롤에서부터 풀어진 관재를 잡아주는 부분으로 공압을 이용하여 관재를 잡아주고 있으며 길이 제어 또한 담당하고 있다. Fig. 2의 (a)가 Pipe holder 유닛을 나타낸다.

### 2.2 직선교정기 및 이송 유닛

직선 교정기 및 이송 유닛은 Fig. 2의 (b)에 나

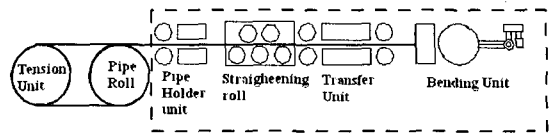


Fig. 1 Schematic of a three dimensional bending machine

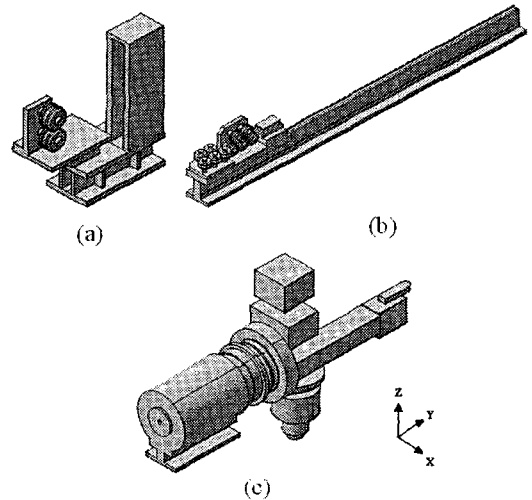


Fig. 2 Graphic modeling of the units

타내어졌다. 롤에서 풀려나온 관재는 곧바른 직선이 아니므로 벤딩기는 관재를 직선화시켜 주어야 하는데 이때 사용되어지는 것이 직선 교정기이다. 직선 교정기는 5쌍의 소형 롤러를 이용하여 수평 방향과 수직 방향으로 교정을 할 수 있게 설계되어졌다. 또한 이송 유닛은 벤딩시 필요한 길이만큼 이송을 담당한다. 본 벤딩기는 체인을 이용하여 고속으로 이송 유닛이 구동되는데 그 속도는 1500 mm/s에 이른다.

### 2.3 각도제어, 회전구동 유닛

각도제어, 회전구동 유닛은 본 3차원 벤딩기의 핵심 부분이라고 할 수 있다. 이것은 Fig. 2의 (c)에 모델링 되어진 형태로 나타내었으며, 여기에는 벤딩을 하기 위한 다이가 유닛의 끝단에 장착되어 있다. 본 벤딩기는 로터리 드로우 벤더형(Rotary draw bender type)으로 회전 다이의 Z축을 중심으로 한 회전 운동에 의해 벤딩을 수행하게 구성되었다. 즉, 유닛의 끝단에 설치된 벤딩 다이와 회전 다이가 서

로 상대 운동에 의해 벤딩을 수행할 수 있는 것이다. 또한 Y축을 중심으로 각도 및 회전구동을 할 수 있게 설계되어 3차원 형상을 구현할 수 있게 하였다.

### 3. 성형공정 시뮬레이션

#### 3.1 Pre-processing

본 연구에서는 열교환기에 사용되어지는 동(Copper)으로 재료를 설정하고 해석을 수행하였다. 동은 열전도율이 높으며, 또한 강도와 가공특성이 우수하여 열교환기에 많이 적용되어지는 재료이다. 또한 열전달 표면적을 증가시키기 위해서 나선의 홈(Inner groove)으로 가공이 되어 있는데 홈이 0.03 mm이하로 미세하기 때문에 평동관으로 설정하였다. 튜브의 외경은 12 mm이고 두께는 0.4 mm이다. 또한 해석에 사용되어지는 벤딩 반경은 20 mm로 설정하였다. 또한 실제로 사용되는 재료의 응력 변형률 선도(Stress-strain curve)를 인장시험으로부터 구하고, DEFORM에 입력하였다. 또한 해석을 위해 몇 가지 사항을 가정하였다. 먼저 열전달과 열변형은 무시하였고 소재 이외에는 모두 강체(Rigid body)로 간주하였으며 다이와 소재사이의 마찰 상수는 냉간 성형이기 때문에 0.1로 하였다. 본 벤딩기가 요구하는 최대 벤딩 속도는 1초에 180°를 가공하는 것이기 때문에 Primary 다이는 3.14 rad/s로 회전하며 다이의 이송방향 벡터값은 (0,0,1)로 놓고 해석을 수행하였다. 다음 Fig. 3은 DEFORM을 이용한 성형공정을 정리한 것이다. 우선 전처리 공정에서 모델링을 하고 각각의 물성치들을 입력한다. 여기서 소재는 4000개의 육면체 Mesh로 구성을 하였고 시뮬레이션을 위한 총 Step 수는 25개로 하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이후 시뮬레이션을 거쳐 마지막으로 그 결과를 나타내는 순서로 이루어진다.

본 시뮬레이션에서는 Effective stress와 Effective strain의 관계를 다음 식 (1)과 같이 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

$$\bar{\sigma} = K(\bar{\epsilon})^n \quad (1)$$

여기서  $\bar{\sigma}$ 는 Effective stress이고,  $\bar{\epsilon}$ 은 Effective strain,  $K$ 와  $n$ 은 상수로 다음 Table 1에서 정의된 값을 사용하였다.

Table 1 Material property

Alloy	Composition (% , Min)				K (MPa)	n
	Cu	Ag	Pb	Sn		
C1010	99.99	0.0025	0.0005	0.0002	451.6	0.328

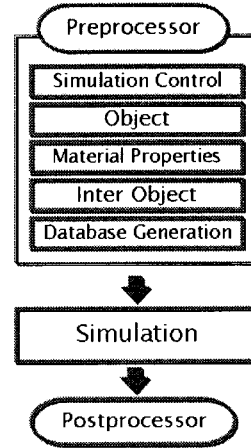


Fig. 3 Processing of forming analysis

#### 3.2 Post-processing

Fig. 4의 (a)에 DEFORM에서 모델링을 하고 시뮬레이션을 하기 전 형상을 나타내었고 (b)에 시뮬레이션을 완료한 후 형상 변화를 소재에 대하여 나타내었다. 이렇게 형상변화를 일으키고 있을 때 X축과 Y축에 대하여 소재에 가해지는 시간에 따른 하중을 다음 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 또한 가공 중에 소재에 발생하는 Effective Stress를 가공 초기와 가공 말기로 구분하여 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다.

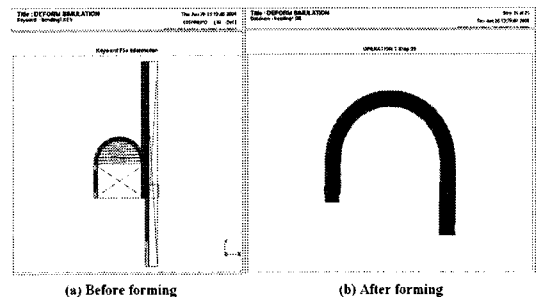


Fig. 4 Shapes of before(a) and after forming(b)

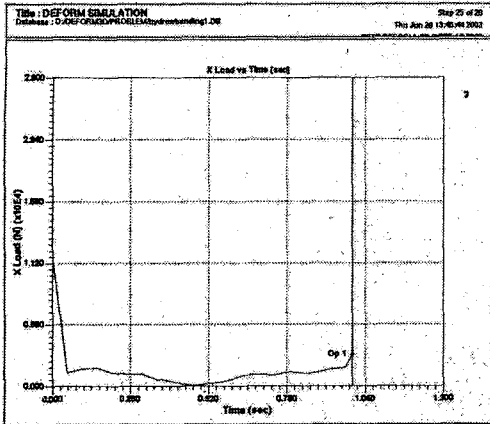


Fig. 5 Result of X-load in bending process

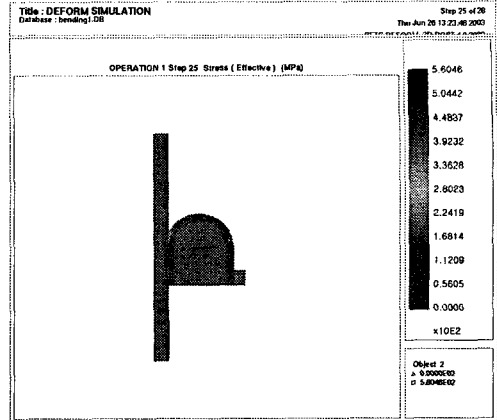


Fig. 8 Result of effective stress at final bending process

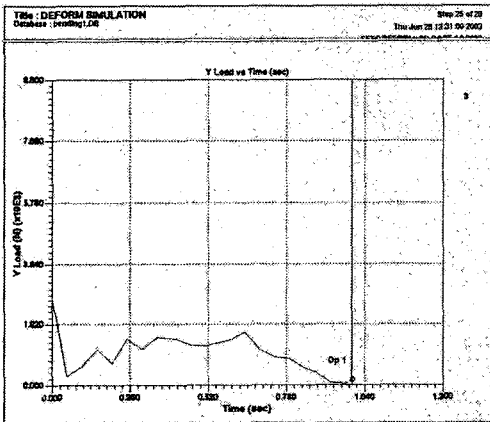


Fig. 6 Result of Y-load in bending process

이상과 같은 해석을 통하여 얻어진 X축과 Y축에 가해지는 하중을 Table 2에 정리하였다.

Table 2 Result of forming analysis

Direction	Maximum Load (N)
X-axis	$1.124 \times 10^4$
Y-axis	$2.683 \times 10^3$

본 시뮬레이션을 통하여 얻어진 X축과 Y축의 최대 하중을 이용하여 각 축의 벡터적 합력을 구하면  $11.556 \times 10^3$  N이 되고 다음 식 (2)의 간략화 과정을 통해 모터의 동력을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau &= F \times r = 11.556 \times 10^3 \times 0.032 \\ &= 369.79 \\ w &= 180^\circ / 1s = \pi \text{ rad/s} \\ \therefore P &= \tau \times w = 369.79 \times \pi \\ &= 1.16 \text{ kW} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $F$ 는 가해지는 최대 힘,  $r$ 은 동관의 전체 곡률 반지름,  $P$ 는 모터의 힘이다. 식 (2)에서 Torque는 시간에 따라 변하는 성분이지만 본 연구에서는 안전 계수만을 고려한 벤딩기 설계에 적용을 위해 간단히 최대 하중만으로 계산을 수행하였으며 이상과 같은 방법으로 구해진 모터의 힘을 벤딩기 설계에 적용하였다.

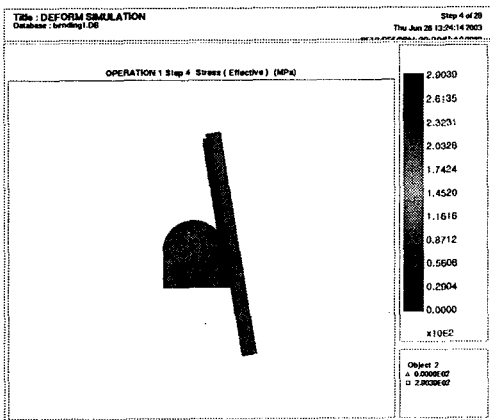


Fig. 7 Result of effective stress at initial bending process

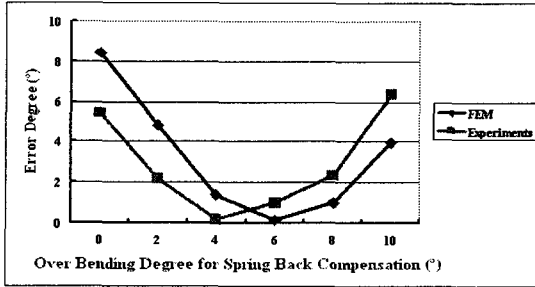


Fig. 9 FEM simulation vs. experimental result for analysis of spring back effect (12.7 mm, 90°)

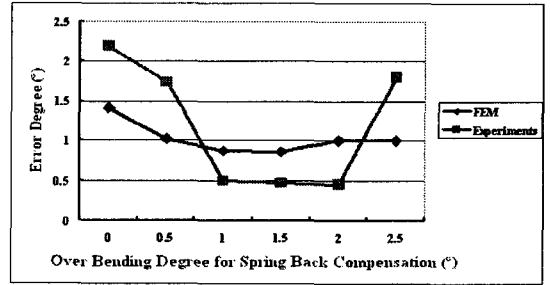


Fig. 11 FEM simulation vs. experimental result for analysis of spring back effect (4.7 mm, 90°)

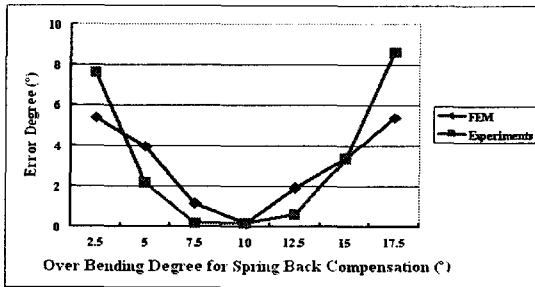


Fig. 10 FEM simulation vs. experimental result for analysis of spring back effect (12.7 mm, 180°)

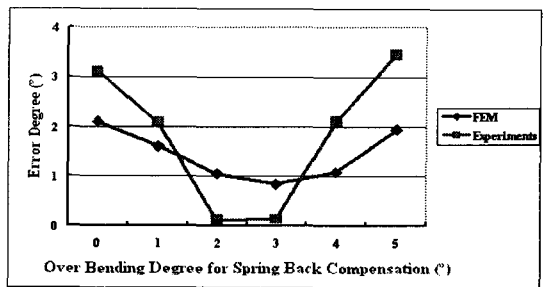


Fig. 12 FEM simulation vs. experimental result for analysis of spring back effect (4.7 mm, 180°)

### 3.3 스프링 백 효과 분석

본 벤딩기는 관재의 벤딩을 목적으로 하는 기계이므로 스프링 백 효과에 대하여 고려되어야 한다.<sup>7-9</sup> 본 연구에서는 MARC 소프트웨어를 이용한 해석과 실험을 병행하여 스프링 백 효과에 대하여 고려하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 동관 지름 12.7 mm에 대하여 해석을 통한 스프링 백 결과와 실험을 이용한 결과를 나타내고 있으며 Fig. 11과 Fig. 12는 동관 지름 4.7 mm에 대한 결과를 나타내고 있다. 여기서 가로 축은 스프링 백 보상을 위해 목표값에 대한 초과 벤딩을 실시한 각도를 나타내고 있고 세로 축은 가로 축의 각 값에 대하여 오차 각도를 나타내고 있다. 그리고 90°회전과 180°회전에 대하여 스프링 백 크기를 정리한 것을 Table 3에 제시하였다. 결과로부터 알 수 있듯이 동관의 지름이 작으면 스프링 백 효과가 작게 나타남을 알 수 있으며 이러한 스프링 백 효과로 인해 초과 벤딩각을 적용해야만 원하는 각의 벤딩 결과물을 얻을 수 있다. 또한 해석대비 실험의 결과 오차가 발생하는 것을 결과로부터 알 수 있는데 이것은 해석을 수행하면서 가

정한 다이와 소재의 마찰계수 및 소재의 특성에 기인한 것이라 판단되며 오차를 줄이기 위해 반복 실험을 통한 데이터의 축적이 요구된다. 하지만 본 해석의 결과에 기초를 두고 스프링 백의 효과를 예측하여 벤딩 공정에 적용을 하면 가공품의 정밀도 향상을 얻을 수 있다 판단된다.

Table 3 Result of spring back angle on bending angle and pipe diameter

Diameter of pipe [mm]	Bending angle [°]	Spring back angle [°]	
		FEM	Experiment
12.7	90	FEM	8.4
		Experiment	5.78
	180	FEM	5.71
		Experiment	7.87
4.7	90	FEM	1.46
		Experiment	2.2
	180	FEM	2.08
		Experiment	3.03

#### 4. 구조해석

CATIA V5를 이용하여 3차원 벤딩 머신을 3차원으로 모델링하고 구조해석을 실시하였다. 그 결과를 Fig. 13과 Fig. 14에 나타내었으며 3차원 벤딩 머신 각 부의 변위와 응력 및 안전율을 계산하여 설계조건에 충족여부를 검토하였고 동적 모드 해석을 수행하여 공진영역과 채터 진동 주파수 대역을 조사하였다. 또한 최대한 실물에 근접하게 모델링을 실시하여 유한요소해석의 연산 에러를 줄이고자 노력하였으며 벤딩 유닛의 끝에 성형을 위한 최대 하중을 정적하중으로 포함시켜 경계조건을 선정하였다.<sup>10</sup>

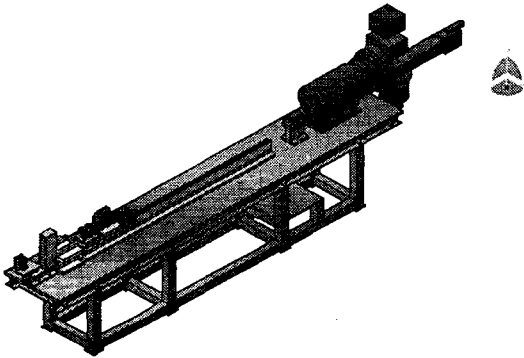


Fig. 13 Modeling of the bending machine

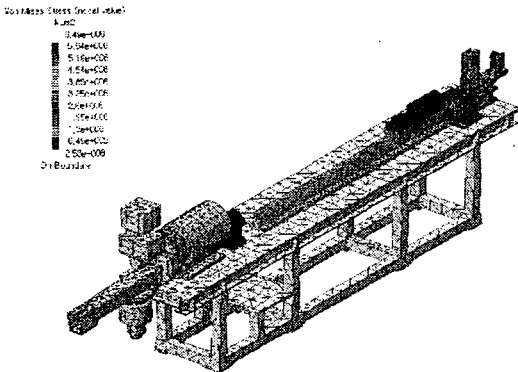


Fig. 14 Result of static stress for the bending machine

결과에서 나타난 바와 같이 최대 처짐은 각도제어, 회전구동 유닛의 끝에서 나타났고 최대 응력은

각도제어, 회전구동 유닛 및 기타 유닛을 받치고 있는 프레임 부분에서 나타남을 알 수 있다. 이상으로부터 구해진 결과를 이용하여 안전율을 계산한 결과를 다음 Table 4에 정리하였다. 또한 고유진동에 대하여도 해석을 실시하였는데 그 결과 1차 모드에서는 Y축 방향으로 굽힘 모드가 발생하여 X축 방향으로 병진 운동함을 알 수 있고 2차와 3차 모드에서는 각도제어, 회전구동 유닛 끝단이 X축 방향으로 굽힘 모드가 발생하여 Z축 방향으로 병진 운동하는 것을 알 수 있다. Table 5에 3차원 벤딩기의 고유진동에 대한 결과를 정리하였다. 본 머신에서는 앞서 수행한 DEFORM의 해석결과를 토대로 2000 RPM의 서보모터를 설계에 적용하였다. 여기서 2000 RPM에서 발생하는 진동수를 구해보면 33.33 Hz가 된다는 것을 알 수 있다. Table 4에서 나타낸 벤딩기의 동적해석 결과로 볼 때 벤딩기에는 진동에 의한 변형은 고려치 않아도 됨을 알 수 있다.

Table 4 Result of static analysis

Bending machine total length [mm]	Maximum displacement [mm]	Maximum stress [MPa]	Safety factor
3730	0.107	6.49	30.97

Table 5 Results of dynamic analysis

Mode number	Frequency [Hz]	Mode number	Frequency [Hz]
1	6.1479e+001	6	1.2676e+002
2	7.6257e+001	7	1.6405e+002
3	7.9358e+001	8	2.0363e+002
4	8.6449e+001	9	2.7892e+002
5	1.1528e+002	10	3.4948e+002

#### 5. 성능 및 신뢰성 평가

앞서 실행한 성형 공정 시뮬레이션과 구조해석 등을 토대로 개발된 3차원 벤딩기를 Fig. 15에 나타내었다. Fig. 15에 보여진 3차원 벤딩기의 이송에 관한 성능 평가를 위해 본 연구에서는 레이저 측정기를 이용하여 측정을 하였다. 3차원 벤딩기의 이송 부분을 레이저 측정기로 측정된 결과를 Fig. 16

에 나타내었고 이것은 실험의 정확성을 위해 5번의 반복 실험을 한 결과이다. 이 결과로부터 각 측정점에서의 반복 정밀도를 Fig. 17에 나타내었다.

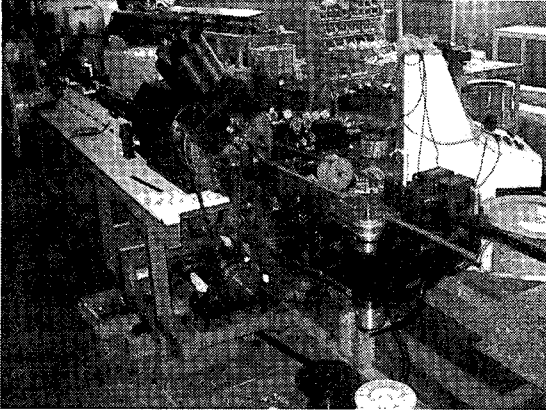


Fig. 15 Prototype of the high speed feeding type three dimensional bending machine

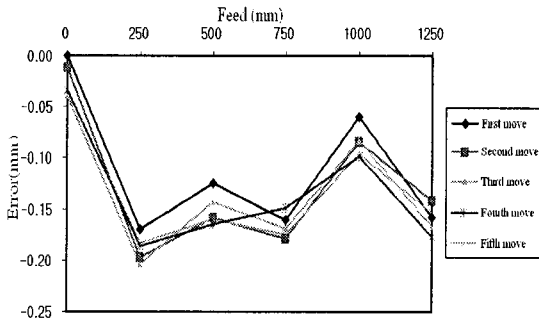


Fig. 16 Results of positioning accuracy

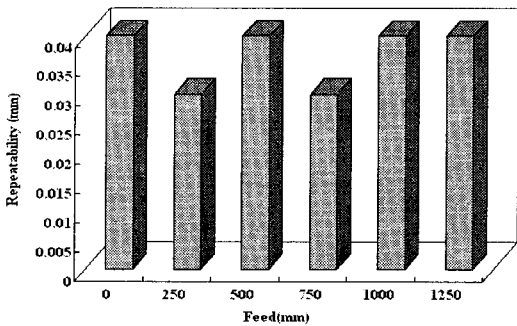


Fig. 17 Results of repeatability

Fig. 16에서 보는 바와 같이 위치정밀도는 0.2 mm 이내로 나타남을 알 수 있고 이것은 수입되는 벤딩기의 위치정밀도인 0.5 mm를 상회하는 것이다. 또한 Fig. 17에 보여진 바와 같이 개발된 벤딩기의 반복정밀도는 0.04 mm로 기존 0.05 mm의 반복 정도에 비해 우수한 정밀도를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 18은 3차원 벤딩 머신의 동관 이송 속도를 나타낸 결과를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 평균 최고 속도가 1500 mm/s의 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

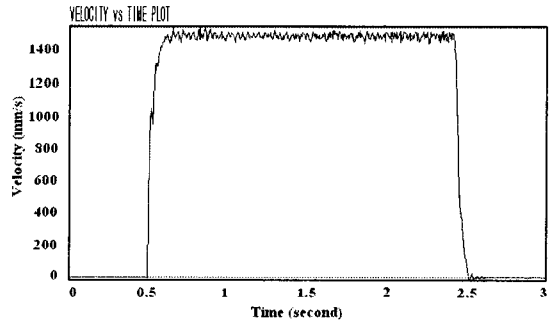


Fig. 18 Result of developed machine's feeding speed

마지막으로 가공품의 형상 정밀도를 벤딩각에 대하여 평가하였다. 동관 지름 12.7mm의 시편으로 90°, 120°, 150°, 180°로 스프링 백 효과를 고려하여 가공한 결과를 다음 Table 6에 나타내었으며 결과로부터 180° 가공시 0.25%의 오차를 가짐을 알 수 있다. 이는 수입되는 벤딩기의 0.5% 오차보다 우수한 오차율을 나타내는 것이다.

Table 6 Results of shape measurement

Bending angle [°]	Measurement data [°]	Difference [%]
90	90.18	0.2
120	120.25	0.208
150	150.37	0.247
180	180.45	0.25

## 6. 결론

본 연구에 의해 특히 에어컨 등 열 교환기에 많이 사용되어지는 배관 자재를 3차원으로 벤딩 할

수 있는 3차원 벤딩기를 개발하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 상용 소성 변형 해석 소프트웨어인 DEFORM을 이용하여 성형공정 시뮬레이션을 실시하여 본 결과 최대 하중이 X축에는  $1.124 \times 10^4$  N, Y축에는  $2.683 \times 10^3$  N이 나타남을 알 수 있었다. 이 결과를 이용하여 벤딩에 필요한 모터를 선정하였고 그것을 설계에 반영하여 3차원 벤딩기를 개발하였다.

(2) 탄·소성 거동의 분석을 위해 MARC 소프트웨어를 이용하여 스프링 백의 존재를 시뮬레이션 하였고 실험을 실시하였다. 그 결과 동관의 지름이 작을수록 스프링 백의 효과가 작게 나타남을 발견할 수 있었고 해석을 기초로 하여 벤딩 공정의 최적화를 수행할 수 있었다.

(3) CATIA V5를 이용한 구조해석의 실시로 각 구조물의 안전율을 검토할 수 있었고 이로 인해 설계의 타당성을 검증할 수 있었다.

(4) 앞서 실시한 성형공정 시뮬레이션과 3차원 벤딩 머신의 구조해석에 대한 자료를 바탕으로 시제품의 개발을 완료하였고 그에 필요한 성능·신뢰성 평가를 통해 1500 mm/s의 고속이송속도와 0.3% 이내의 형상 정도 오차율을 갖는 기계의 우수성을 입증할 수 있었다.

이상과 같은 결과를 통해 개발되어진 3차원 벤딩기로 인해 인력난 해소 및 생산성 향상을 통한 원가 절감 및 가공품 품질 향상으로 그 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

## 후기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI 04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Suh, Y. S., Kim, Y. W. and Kim, J. I., "A Study on the Control of Spring Back for the Precision Forming of the Steam Generator Helical Tube," Transactions of Materials Processing, Vol. 11, No. 3, pp. 238-245, 2002.
2. Yang, J. B., Jeon, B. H. and Oh, S. I., "Tube Bending Analysis for Hydro-forming Process," Transactions of Materials Processing, Vol. 9, No. 3, pp. 249-256, 2000.
3. Nakamura, S., Sugiura, H., Onoe, H. and Ikemoto, K., "Hydro-mechanical drawing of automotive parts," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 46, pp. 491-503, 1994.
4. 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," Proceedings of the KSPE Spring Conference, pp. 1705-1708, 2003.
5. Ryu, K. H., Lee, D. J., Kim, D. J., Kim, B. M. and Kim, K. H., "Process Design of the Hot Pipe Bending Process Using High Frequency Induction Heating," J. of the KSPE, Vol. 18, No. 9, pp. 110-121, 2001.
6. Kim, K. Y. and Yun, D. P., "Deformation analysis of copper pipe for hair pin under the bending forming using the Mandrel," Proceedings of the KSPE Spring Conference, pp. 1630-1633, 2003.
7. Kim, D. S., Moon, C. Y., Kim, S. W., Choi, H. T., Jeong, Y. D. and Kim, Y. S., "A Study in the PA12 Tube Spring-back," Proceedings of the KSPE fall Conference, pp. 300-304, 1997.
8. Hu, Z., "Elasto-plastic solutions for spring-back angle of pipe bending using local induction heating," J. of Materials Processing technology, Vol. 102, pp. 103-108, 2000.
9. Al-Qureshi, H. A., "Elastic-plastic analysis of tube bending," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 39, pp. 87-104, 1999.
10. Pytel, A. and Kiusalaas, J., "Engineering Mechanics Dynamics SI Edition," HarperCollins Publishers Inc., pp. 415-521, 1996.