

## 3차원 Bending Machine 설계에 관한 연구

이춘만\*·임상현†·박동근\*\*

### A Study on the Design of Three-Dimensional Bending Machine

Choon-Man Lee, Sang-Heon Lim and Dong-Keun Park

**Key Words:** Three-Dimensional Bending Machine(3차원 벤딩 머신), FEM simulation(유한요소 시뮬레이션), Structural Analysis(구조해석), Copper-tube(동 튜브재)

#### Abstract

This study is concerned about the development of three-dimensional bending machine for heat exchanger. Recently, three-dimensional bending is required for various heat exchanger. The purpose of this study is design of three-dimensional bending machine by analysis of bending process and structural analysis simulation. The analysis is carried out by FEM simulation using DEFORM and CATIA V5 software. The copper-tube is modeled by shell elements and the machine is modeled by placing proper shell and solid finite elements and fictitious mass properties to represent the real one. The final results of analysis are applied to the design of three-dimensional bending machine and the machine is successfully developed.

#### 1. 서론

동관 및 기타 비철금속관은 오늘날 여러 산업 분야에서 중요 배관 자재로서 활용되고 있다. 이러한 관재들은 다양한 형태로 사용되어지고 있으며 또한 그 수량이 막대하다. 이러한 형태들로 가공하기 위해 전용 벤딩 머신(Bending Machine)을 사용하고 있다. 국내 산업 현장의 배관 생산 시스템은 부분적으로 자동화 시스템이 도입되어 있지만 이것은 2차원 Bending이 대부분이며 이로 인해 점점 다양한 형상을 갖춘 3차원 Bending 부분에 있어서는 노동집약적인 방법에 의존하여 제품을 생산하고 있는 추세이다. 이러한 방식으로 인해 각 공정마다 별도의 Bending Machine과 작

업자가 배치되어 단순, 반복 작업함으로써 공정 추가 및 불량발생으로 생산 단가가 상승되고 있다. 이에 전체적인 시스템의 자동화가 시급한 과제로 남아 있다. 현재 3차원 Bending Machine은 이탈리아의 Pedrazzoli-ibp사, 미국의 BLM사 등에서 개발되어 국내에서 수입하여 생산현장에 도입하고 있다. 특히 관재의 사용이 많은 에어컨의 경우에는 전 세계의 생산량 18% 이상을 차지하고 있으나 국내의 경우에 이에 관련된 기술은 전무한 상태이며, 고가의 장비로 인해 초기 투자의 비용이 높고 금형 기술 및 설계 기술의 미비로 인하여 개발에 어려움이 있기에 이에 대한 연구가 시급한 실정이다. [1-4]

현재 국내에서는 관재의 굽힘 가공에 대해 정밀한 형상을 제작하거나 맨드릴을 사용하여 굽힘 성형 가공을 하는 등 다양한 연구들이 이루어지고 있다. 이러한 연구들을 기초로 하여 본 연구에서는 DEFORM을 이용하여 성형 공정을 시뮬레이션 하였고, 이때 발생한 설계 변수들을 설계에 적용하였으며, CATIA V5를 이용하여 설계된 3차

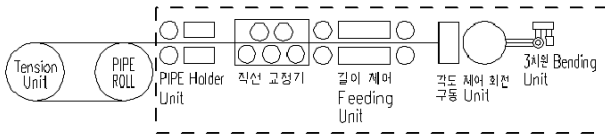
† 창원대학교 기계설계공학과 대학원

E-mail : lsh0815@mail.changwon.ac.kr

TEL : (055)267-1108 FAX : (055)267-1108

\* 창원대학교 기계설계공학과

\*\* 창원대학교 기계설계공학과 대학원



**Fig. 1** Schematic of three dimensional bending machine

원 Bending Machine의 모드해석 및 구조해석을 실시하여 설계된 3차원 Bending Machine의 타당성을 검증하였다.

이러한 연구를 토대로 다양한 관재 가공 공정을 통합하고 무인화 작업이 가능한 3차원 Bending Machine의 설계를 하는데 본 연구의 목적이 있다.

## 2. 3차원 Bending Machine의 구성

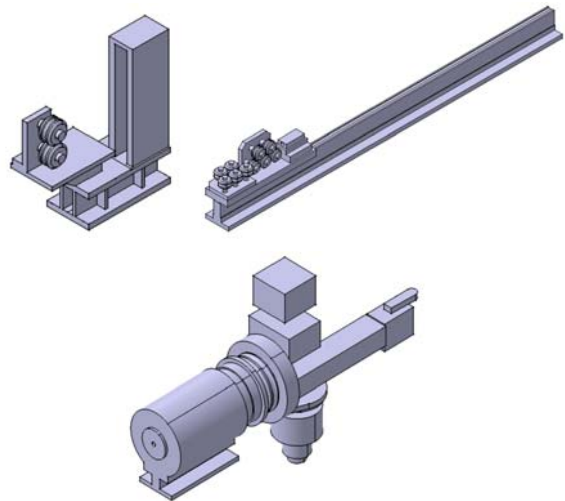
본 연구에서 개발된 3차원 Bending Machine은 크게 4부분으로 구성 되어 있다. 즉 관재가 감겨있는 Roll로부터 관재를 공급시킬 때 지지를 해주는 Pipe Holder Unit, Roll로부터 공급된 관재를 직선화 시켜주는 직선교정기, Bending을 하기 위해 필요한 관재의 길이만큼 제어를 해 주는 길이 제어 Feeding Unit 마지막으로 3차원으로 Bending을 하기 위한 각도 제어, 회전 구동 Unit의 4부분이다. Fig. 1에 3차원 Bending Machine의 주요 구성도를 나타내고 있고, Fig. 2에 3차원 모델링된 형상을 나타내었으며 각 절에서 구성에 대해 설명을 하였다.[5]

### 2.1 Pipe Holder Unit

Pipe Holder Unit은 감겨있는 관재 Roll로부터 풀어진 관재를 잡아주는 부분이다. 공압을 이용하여 관재를 잡아주고 있으며 길이 제어 또한 담당하고 있다.

### 2.2 직선 교정기

Roll에서 풀려나온 관재는 곧바른 직선이 아니다. 이러한 이유로 인해 Bending Machine에서는 관재를 직선화시켜 주어야 하는데 이때 사용되는 것이 직선 교정기이다. 직선 교정기는 5개의 소형 Roller를 이용하여 수평 방향과 수직 방향으로 교정을 할 수 있게 설계되어졌다.



**Fig. 2** Units of three dimensional bending machine

### 2.3 길이 제어 Feeding Unit

길이 제어 Feeding Unit은 표현된바와 같이 Bending을 함에 있어서 필요한 길이만큼 이송을 담당하는 부분이다. 이것은 체인으로 구동이 되며 공압을 사용하여 관재를 잡고 이송을 할 수 있게 구성되어 졌다.

### 2.4 각도 제어, 회전 구동 Unit

각도 제어, 회전 구동 Unit은 3차원 Bending Machine의 핵심부분 이라고 할 수 있다. Bending을 하기 위한 Die가 장착이 되어 있으며 각도 제어 및 회전 구동이 가능하게 설계하여 3차원 형상을 구현할 수 있게 설계 되어졌다.

## 3. 성형해석

본 연구를 통해 개발되어지는 3차원 Bending Machine은 구리 및 알루미늄 관재를 Bending하는데 사용되어지는 기계이다. 다음 Fig. 과 같이 Bending은 소성 변형에 의한 가공이므로 소성 변형이 일어나는데 필요한 제반적인 사항을 상용대변형, 탄소성 거동 분석 프로그램인 DEFORM을 이용하여 분석하고, 변형동작을 시뮬레이션 하였다. DEFORM을 이용한 성형해석 과정은 다음 Fig. 3 과 같이 정리할 수 있다.

### 3.1 DEFORM을 이용한 전처리 과정

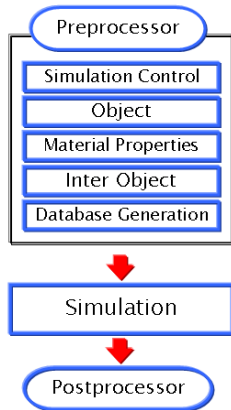


Fig. 3 Processing of forming analysis

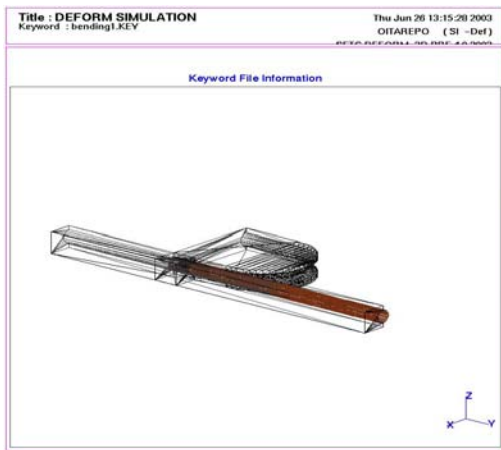


Fig. 4 Modeling of bending process

본 연구에서는 열교환기에 사용되어지는 동으로 재료를 설정하고 해석을 수행하였다. 동은 열전도율이 높으며, 또한 강도와 가공특성이 우수하여 열교환기에 많이 적용되어지는 재료이다. 또한 열전달 표면적을 증가시키기 위해서 나선상을 홈(inner groove)으로 가공이 되어 있는데 홈이 0.03 mm 이하로 미세하기 때문에 평동관으로 설정하였다.

튜브의 외경은 12 mm 이고, 두께는 0.4 mm 이다. 또한 해석에 사용되어지는 Bending 반경은 20 mm 로 설정하였다. 또한 실제로 사용되는 재료의 응력 변형률 선도(Stress-strain curve)를 인장시험에서 구하고, DEFORM에 입력하였다. Fig. 4는 CATIA와 Hypermesh로부터 모델링한 데이터를 DEFORM에서 불러들인 결과이다. 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 Machine이 요구하는 최대 Bending 속도는 1초에 180°를 가공하는 것이기 때문에 Primary 다이는 3.14 rad/s로 회전하고, 그리고 다이의 이송방향 벡터값은 (0,0,1)로 놓고 해석을 수행하였다.

3.2 해석 결과 및 고찰

DEFORM을 이용한 해석 결과는 다음 Fig. 5에서 보여 지는 바와 같이 얻을 수 있다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 소재의 형상 변화가 일어남을 알 수 있으며 이렇게 형상변화를 일으키고 있을 때 X축과 Y축에 대하여 소재에 가해지는 시간에 따른 하중을 다음 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 또한 가공 중에 소재에 발생하는 Effective Stress를 가공 초기와 가공 말기로 구분하여 Fig. 8에 나타내었으며 가공 후 소재에 발생한 Damage를 Fig. 9에 나타내었다.

이상과 같은 해석을 통하여 얻어진 X축과 Y축에 가해지는 하중은 다음 Table 1에 정리하였다.

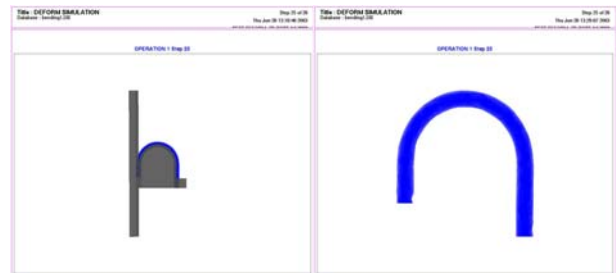


Fig. 5 Deformed shape of pipe (25 step)

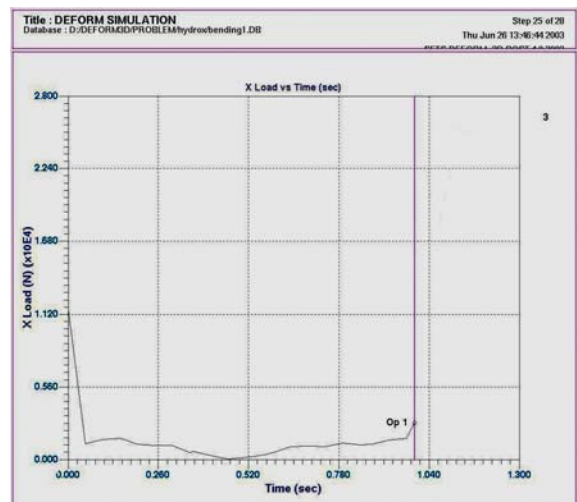


Fig. 6 Result of X-load in bending process



Fig. 7 Result of Y-load in bending process

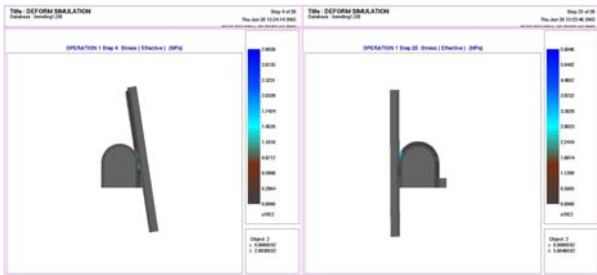


Fig. 8 Result of effective stress

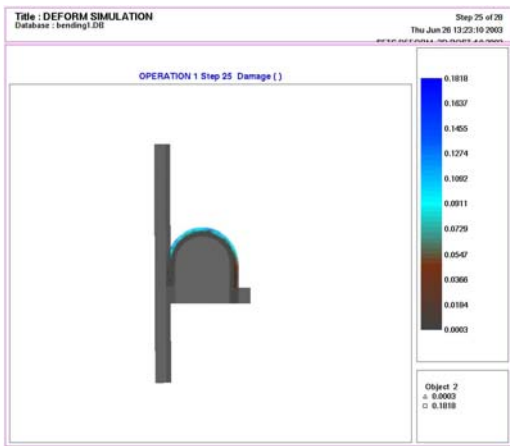


Fig. 9 Damage of pipe material

Table 1 Result of forming analysis

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

#### 4. 구조 해석

CATIA V5를 이용하여 Fig. 2에서 보여준 부분을 3차원으로 모델링하고 구조해석을 실시하였다. 3차원 Bending Machine 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 노력하였다.[5]

##### 4.1 Main frame

우선 3차원 Bending Machine에서 중요한 4부분을 받쳐주고 있는 Main Frame을 모델링하고 구조해석을 실시하였다. Fig. 10은 Main Frame의 자중만을 고려하여 해석하였을 때 정적 최대 변위를 나타낸 그림이고, Fig 11은 Main Frame에 생성되는 최대 응력을 나타낸 결과이다. 자중만을 고려하였을 경우 Fig. 10에서 보는 바와 같이 최대 변위가 발생하는 부분은 Main Frame의 정 중앙 부분에서 발생한다는 것을 알 수 있고, 최대 응력

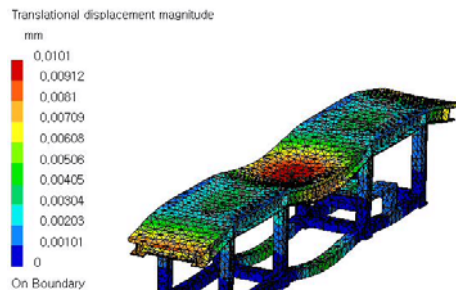


Fig. 10 Static displacement of main frame

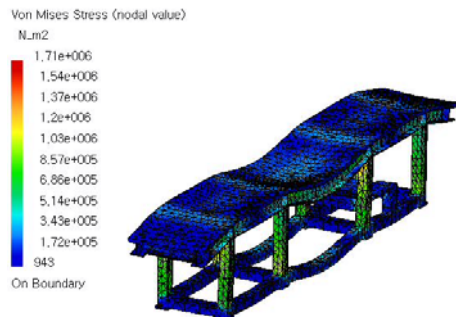


Fig. 11 Static stress of main frame

**Table 2** Result of static analysis (Main frame)

Frame 사이 X축 길이[mm]	최대 변위 [mm]	최대 응력 [MPa]	안전율
3730	0.0101	1.71	117.54

**Table 3** Result of dynamic analysis (Main frame)

Mode number	Frequency [Hz]	Mode number	Frequency [Hz]
1	4.9108e+001	6	1.8727e+002
2	5.3417e+001	7	2.1165e+002
3	5.4948e+001	8	2.5595e+002
4	1.8484e+002	9	2.6690e+002
5	1.8705e+002	10	2.6743e+002

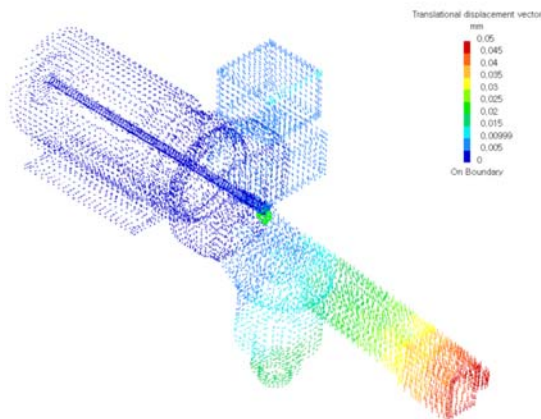
이 발생하는 곳은 Main Frame의 상단을 받쳐주고 있는 지지대 부분에서 발생함을 알 수 있다.

Table 2에서 보는 바와 같이 최대 변위는 0.0101 mm, 최대 응력은 1.71 MPa 이고, 안전율은 117.54로 본 Machine의 Frame이 안전함을 알 수 있다.

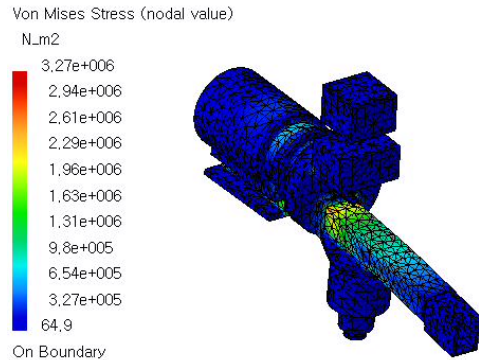
본 Machine에서는 앞서 수행한 DEFORM의 해석결과를 토대로 2000 RPM의 서보모터를 설계에 적용하였다. 2000 RPM에서 발생하는 진동수를 구해보면 5.305 Hz 가 된다는 것을 알 수 있다. Table 3에서 Main Frame의 동적해석 결과로 볼 때 Main Frame에는 진동에 의한 변형은 고려치 않아도 됨을 알 수 있다.

4.2 각도 제어, 회전 및 3차원 Bending Unit

3차원 Bending Machine에서 가장 중요시 되는 Unit이라 할 수 있는 각도 제어, 회전 및 3차원 Bending Unit에 대하여 별도로 해석을 수행하였



**Fig. 12** Static displacement of bending unit



**Fig. 13** Static stress of bending unit

**Table 4** Result of static analysis (Bending unit)

Bending unit 끝단 길이[mm]	최대 변위 [mm]	최대 응력 [MPa]	안전율
835	0.05	3.27	61.46

**Table 5** Result of dynamic analysis (Bending unit)

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

다. 3차원 Bending Unit은 Machine의 핵심적인 부분으로 Bending이 일어나는 최종적인 부분이다. Fig. 12는 3차원 Bending Unit의 자중만을 고려한 최대 변위가 나타난 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 최대 처짐은 Bending unit의 끝단에서 일어나고 있음을 알 수 있고 응력은 Bending unit 끝단을 지지하고 있는 각도 및 회전 제어부와 만나는 지점에서 발생함을 Fig. 13을 통해서 알 수 있다. 정적 해석의 결과는 Table 4에 정리해 놓았다. 또한 고유진동에 대하여도 해석을 실시하였는데 그 결과 1차 모드에서는 Y축 방향으로 굽힘 모드가 발생하여 X축 방향으로 병진 운동함을 알 수 있고, 2차와 3차 모드에서는 Bending unit 끝단이 X축 방향으로 굽힘 모드가 발생하여서 Z축 방향으로 병진 운동하는 것을 알 수 있다. Table 5에 3차원 Bending Unit의 고유진동에 대한 결과를 정리하여 놓았고, 결과에서도 알 수 있듯이 고유진동에 의한 3차원 Bending Unit의 변형은 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

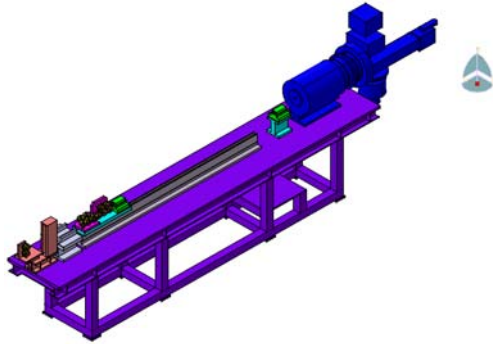


Fig. 14 Modeling of bending machine

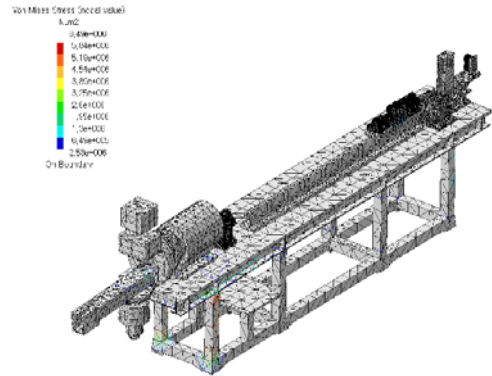


Fig. 15 Result of static stress for bending machine

Table 6 Result of static analysis

Bending machine 끝단 길이[mm]	최대 변위 [mm]	최대 응력 [MPa]	안전율
3730	0.107	6.49	30.97

4.3 전체 구조 해석

본 절에서는 각 Unit을 모두 조합하여 Machine에 일어나는 영향을 파악하여 보았다. Fig. 14는 각각의 Unit을 모두 3차원으로 모델링하여 Main Frame 위에 조립을 한 결과를 나타낸 것이다. 정적 해석을 수행하여 나타난 결과를 Fig. 15에 나타내었다. 결과에서 나타난 바와 같이 최대 처짐은 Bending unit의 끝에서 나타났고 최대 응력은 회전 및 Bending unit을 받치고 있는 Frame 부분에서 나타남을 알 수 있다. 이상으로부터 구해진 결과를 다음 Table 6에 정리하였다.

5. 결론

본 연구에 의해 특히 에어컨 등 열 교환에 사용되어지는 배관 자재를 3차원으로 Bending할 수 있는 3차원 Bending Machine을 설계하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 상용 소성 변형 해석 Software인 DEFORM을 이용하여 해석을 실시하여 본 결과 최대 하중이 X축에는  $1.124 \times 10^4$  N, Y축에는  $2.683 \times 10^3$  N이 나타남을 알 수 있었다.

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

이상과 같은 결과에 의해 현재 Prototype의 3차원 Bending Machine의 설계를 마치고 현재

Machine의 제작을 하고 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부-한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- (1) Y. S. Suh, Y. W. Kim, J. I. Kim, 2002, "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.
- (2) J. B. Yang, B. H. Jeon, and S. I. Oh, 2000, "Tube Bending Analysis for Hydro-forming Process", Transactions of Materials Processing, Vol. 9, No. 3, pp. 249 ~ 256.
- (3) S. Nakamura, H. Sugiura, H. Onoe, K. Ikemoto, 1994, "Hydro-mechanical drawing of automotive parts", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 46, pp. 491 ~ 503.
- (4) H. S. Kang, D. S. Kim, S. Hur, S. I. Hong, 2003, "A study about shape processing for the bend of the Copper-Tube that use Hair Pin Bending Machine", Proceedings of the KSPE Spring Annual meeting, pp. 1705 ~ 1708.
- (5) 산업기반기술개발 중간요약보고서, 2003, "3차원 BENDING M/C 개발", Hydrox Korea.