

## Bending Machine의 서보제어에 의한 고정도 굽힘가공에 관한 연구

\*송충현, \*\*김성식, \*\*\*김경석

### A Study on High Accuracy Bending Work using Servo Control of Bending Machine

\*조선대 대학원, \*\*목포과학대학, \*\*\*조선대 기계공학부

#### ABSTRACT

Recent general press brake has many problems in cutting high accurate products in the progress of industry. Previous hand-operated press brake needs many pre-processing works to adjust bending angle and marking-off works to calculate bending length. Also, The hand-operating work makes many geometric errors and has difficulty for variety-mass production. To solve these problems, this paper proposes Computer Numerical Control (CNC) general press brake and development of servo-control system based on database for reduction of geometric errors and pre-processing work time and high accuracy bending work.

Key Word : Bending(굽힘), Press Brake(절곡기), Spring Back(스프링 백), Cutting force(절삭력), Servo Control(서보제어), Positioning(위치결정), Database(데이터베이스), Bend Angle(벤드 각)

#### 1. 서 론

프레스 가공은 금속판재를 이용하여 이어 붙임 없이 소성변형에 의하여 필요한 형상으로 성형하는 가공방법으로서 판재성형으로도 불린다. 박판 성형공정은 판에 인장력을 가함으로써 변형을 유발한다는 것을 주의해야 한다. 현재 박판 금속의 수가공은 기계를 이용하는 가공에서 남은 결함을 사상하는 작업, 그리고 소량의 시작업무에 이용되고 있는 정도이다. 양산 박판 가공은 대부분 유압식 혹은 기계식 프레스에서 행한다. 금속가공에 사용되는 기본공구는 펀치(Punch)와 다이(Die)이다. 펀치는 대체로 볼록한 면을 가졌고, 오목한 면을 가진 다이와 결합하게 된다. 하나의 다이와 펀치에서 연속적으로 작업할 수 있도록 여러 개의 다이와 펀치를 갖추어서 작업하는 경우를 순송식 가공

(progressive forming)이라 부른다. 복합다이는 몇 개의 작업이 한 번의 행정에서 동시에 작업될 수 있도록 설계된 것이다. 이 경우 다이가 복잡하므로 비싸고 개개의 작업에 비하여 작동이 좀 느리다. 한 개의 프레스에서 각 행정마다 각 단으로 이동되는 이송식 다이(transfit die)를 사용하기도 한다. 길고 좁은 베드(bed)를 가진 단동식 프레스를 프레스 브레이크(press brake)라 부른다. 이것은 소형의 단품 제작에서부터 대형이며 복잡한 자동차의 차체, 비행기의 기체, 선박의 선체부품, 산업기계, 컴퓨터의 케이스 등의 제작에 이용된다.

박판 성형중 굽힘가공은 얇은 철판 등을 원하는 각도에 따라 주로 절곡기(Press brake)를 이용하여 굽히는 가공법이다. 굽힘가공이 수작업에서 프레스가공으로 바뀔에 따라 수작업에 의한 생산보다 생산성과 정도가 향상되었다. 하지만 현재까지 주류를 이루고 있는 벤딩머신은 범용성이 높기 때

문에 최근 산업 발달과 더불어 제품의 정밀도 향상의 요구에 부응하기에는 부족함이 많다. 일반적으로 굽힘가공이 어려운 것은 굽힘작업 후 원하는 형상이 제대로 나오지 않기 때문이다. NC화의 목적은 굽힘기술의 정확도 향상과 생산 스피드면에서 비약적인 진보라 할 수 있다. 하지만 범용성의 벤딩머신은 이동축(Stroke & Back gauge)을 수동 핸들(handle)에 의해 조작하기 때문에 1회에 정확한 굽힘각도를 맞추기는 거의 어렵고 수 회 반복굽힘을 실시한 샘플작업을 통해야 하고, 금구기 작업에 의한 굽힘길이의 산출 등 아직까지 대부분 수작업에 의하여 가공을 하는 실정으로 치수 및 형상오차가 크기 때문에 다품종 다량생산에는 매우 부적합하다. 따라서 다품종 대량생산에 대응하기 위해서는 NC화가 필수적이라 할 수 있다.

본 연구에서는 굽힘가공의 체계적인 정립을 통한 범용 벤딩기의 NC화를 꾀하고, 표준화된 데이터에 의해 작업 할 수 있도록 데이터 베이스화하고 서보제어를 실시함으로써 굽힘가공 제품의 품질과 생산성을 향상시킬 수 있는 CNC 벤딩머신의 서보 제어 및 고정도 굽힘가공에 관하여 연구하였다.

## 2. 굽힘가공

### 2.1 굽힘작업시 고려사항

굽힘가공 중 응력-변형을 분포를 예측하고, 굽힘문제의 최대과제인 최소굽힘반경과 스프링백을 고려하여야 한다. 최소굽힘반지름은 굽힘작업시 소재를 파괴하지 않고 굽힐 수 있는 최소의 굽힘내 반경을 나타낸다. 스프링 백(Spring back)과 스프링고우(스프링백의 현상과 반대방향이며, 마이너스 스프링백이라고도 한다.)는 소재에 외력을 가한 후 그 외력을 제거하면 소재 내부에 잔류하는

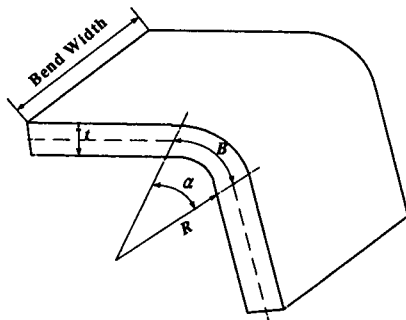


Fig. 1 Bend angle and bend radius

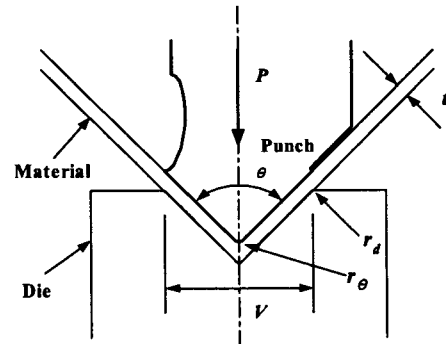


Fig. 2 Bending device for press work

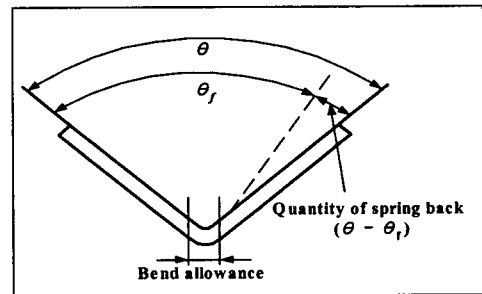


Fig. 3 spring back and bend allowance

탄성복원력에 의하여 원래상태로 되돌아가려는 성질이다. 스프링백에 영향을 미치는 인자로는 피가공재의 탄성한도, 탄성계수, 굽힘 반지름의 크기, 판두께, 펀치선단 반지름, 다이의 쇼울더 폭, 굽힘각 등으로 요약할 수 있다. Fig. 1에 굽힘각과 굽힘반경, Fig. 2에 V-벤딩가공을 위한 굽힘장치, Fig. 3에 스프링백과 굽힘여유를 나타내었다. 벤딩머신의 펀치에서 힘을 제거하기 전 굽힘반경을  $R_0$ , 제거한 후를  $R_f$ 라 하면 굽힘각의 변화와 탄성복원 전후의 굽힘여유(Bend allowance),  $B$ 의 변화는 다음과 같다.

$$\theta_f = \theta \times \Delta a = \theta \times (a_f - a) \quad (1)$$

$$B = \left( R_0 + \frac{t}{2} \right) a_0 = \left( R_f + \frac{t}{2} \right) a_f \quad (2)$$

$$K_s = \frac{a_f}{a_0} = \frac{R_0 + \frac{t}{2}}{R_f + \frac{t}{2}} = \frac{\frac{2R_0}{2} + 1}{\frac{2R_f}{2} + 1} \quad (3)$$

식 (3)은 펀치에 힘을 주기 전과 후의 굽힘각에 대한 탄성복원비,  $K_s$  를 나타내고 탄성복원비의 추

정식은 다음과 같다.

$$\frac{R_0}{R_f} = 4 \left( \frac{R_0 S_y}{Et} \right)^3 - 3 \left( \frac{R_0 S_y}{Et} \right) + 1 \quad (4)$$

여기서,  $E$ ,  $S_y$ 는 각각 재료의 탄성계수와 내력강도(yield strength)를 나타낸다.

한편, 탄성복원을 상쇄시키는 가장 일반적인 방법은 굽힘작업에서 요구되는 곡률반경보다 작은 곡률로 굽혀서 탄성복원 후에 요구되는 반경을 얻는 방법이다.

굽힘반경  $R$  주위를 길이  $L$ 만큼 굽히는데 소요되는 힘  $P_b$ 는 굽힘에 사용되는 재료의 인장강도를  $\sigma_0$ 라 할 때 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$P_b = \frac{\sigma_0 L t^2}{2(R+t/2)} \tan \frac{\alpha}{2} \quad (5)$$

일반적으로 굽힘작업은 V-굽힘을 많이 이용하고 있으며 스프링백 현상을 줄이기 위하여 V-굽힘에서 오버밴딩(Over Bending), 보토밍(Bottoming), 스트레칭(Stretch Bending) 등의 방법을 이용한다. 프레스를 이용하여 굽힘가공을 할 때 높은 하중을 내기 위하여 유압력을 이용하며, 밴딩머신의 펀치(Punch)가 다이홀더(Die holder)에 올려진 소재를 가압 함으로써 굽힘작업이 가능하게 된다. 판재성형(Sheet forming)에서 프레스에 의한 굽힘가공은 주로 한 쌍의 펀치와 다이에 의한 형굽힘(Die bending)을 실시한다. V-굽힘에서 굽힐 수 있는 피가공재(Work)의 판두께는 보통 0.5 mm ~ 30 mm 정도이고 펀치의 종류와 다이의 폭, 굽힘방법에 따라 크게 퍼어셜(Partial) 굽힘, 보토밍(bottoming), 코이닝(Coining)의 3가지 종류로 분류한다. Fig. 4에 V-굽힘의 종류를 나타내었다.

## 2.2 CNC 밴딩머신의 구상

NC시스템이라 함은 수치와 기호로서 구성된 정보를 매개수단으로 하여 기계의 운전을 자동제어하는 것이다. NC공작기계는 작업자가 손동작으로 움직였던 기계의 조작을 NC시스템이 대신 처리하여 손동작으로 불가능했던 복잡한 모양 및 정

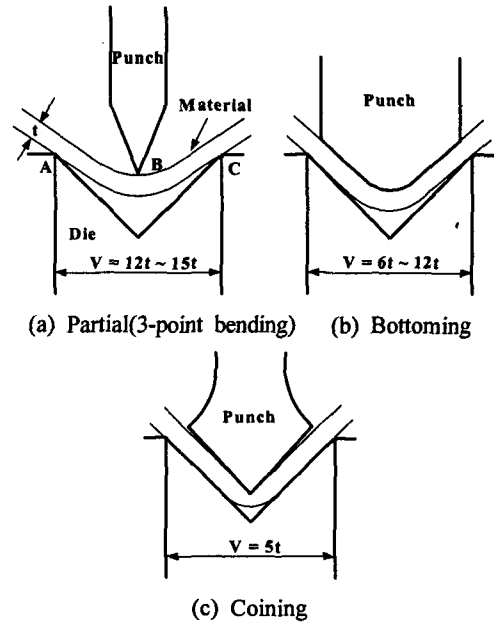


Fig. 4 various V-bending

밀도가 높은 제품을 자동화하여 생산할 수 있다. 지령만으로 가공을 하는 NC 시스템에 스프링백을 감안한 데이터베이스의 운영으로 CAD/CAM 장비의 효과를 노릴 수 있도록 구상한다. 또한 스프링백이나 스프링고우 현상을 줄이고 고품질의 제품을 생산하기 위한 굽힘이론과 현장경험을 토대로 재료의 특성, 소재의 두께를 포함한 형상, 치공구(펀치와 다이) 등에 대한 데이터베이스를 작성하고 NC 가공을 위하여 개발된 소프트웨어에서 형상을 모델링하고 NC 가공 코드를 생성한다. 이 결과 값을 수치제어 장치에 전달함으로써 밴딩머신의 NC화를 촉진시키고 범용성 대비 품질과 생산성을 향상시킬 수 있게 된다. 데이터베이스는 PC에서 운영되고, 그 값은 서보제어를 통하여 CNC 밴딩머신의 각 이동축인 램이송, 스트로크축, 백게이지축의 위치결정량으로 결정되어진다. 위치결정량으로 굽힘가공을 진행할 수 있으며 데이터베이스에 입각한 정확한 굽힘 각의 산출이 가능해진다.

## 3. 밴딩기의 서보제어

### 3.1 서보제어 시스템

밴딩머신을 서보제어하기 위해서는 첫째, 밴딩기 몸체(Frame)의 구조 설계, 둘째, NC 작업이

가능한 Controller의 설계, 그리고 경험적인 설계지침들과 노하우를 체계화 한 데이터베이스를 기반으로 제작되어진 서보제어가 가능한 프로그램의 설계 등이다. 이상의 세 가지 조건을 만족시키는 벤딩머신의 제작으로 정밀도 높은 제품을 생산할 수 있다.

벤딩머신을 이용한 굽힘작업에서 가공품질과 생산성의 향상에 있어 가장 중요한 관건은 정확한 굽힘 각의 산출이다. 또한 벤딩머신의 최소이송단위 및 최대이송속도, 위치 정밀도, 반복 정밀도, 최대 제어 축 등이 된다.

데이터베이스의 정리는 SB34P V-벤딩 초기 세팅에 의해 정해 놓은 벤딩 각을 기준 각으로 하고 굽힘의 폭, 길이, 두께의 종류를 달리하며 각각의 조건에 따라 산출되는 굽힘 각을 정리하였다.

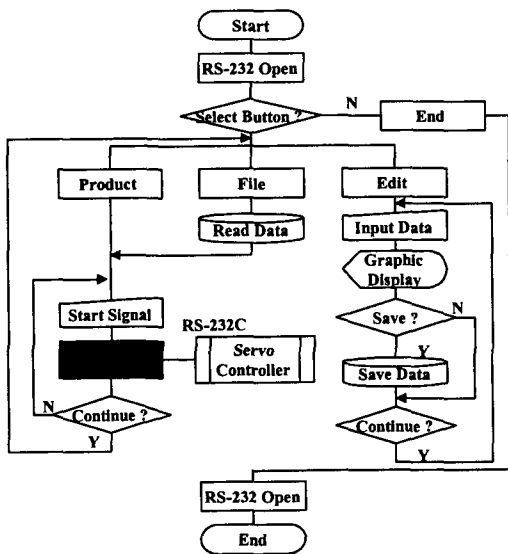


Fig. 5 Flowchart of servo control

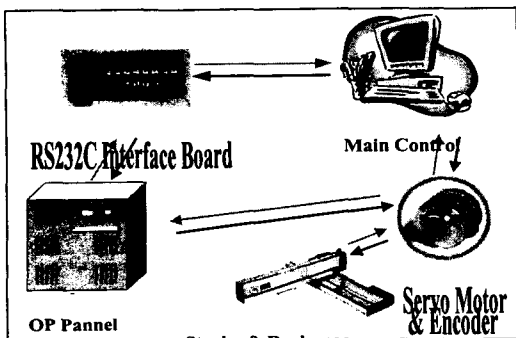


Fig. 6 Schematic of Bending Machine

데이터의 입력방식은 굽힘형상, 인선모양, 길이, 폭 등의 단편적인 내용을 대화형 입력방식에 의해 행하고 그 결과 값은 기계어로 변환된 후 RS-232C 인터페이스보드를 통하여 각 이송축으로 전달되어진다. Fig. 5에 서보제어시스템의 흐름도를 나타내었고, Fig. 6에 벤딩머신의 시스템 간략도를 나타내었다.

### 3.2 장치의 설계

벤딩기의 서보제어를 위해서 구동원은 서보모터를 이용하였고, 벤딩머신의 백게이지 축과 스트로크 축 외에 램이송이나 소재 공급장치 등에 이용될 수 있는 부가 축을 고려하여 단일 축 운전의 시스템으로 설계하고 최대 8 축 운전까지 가능하도록 고려하였다. 또한 종래의 범용절곡기나 NC 벤딩기의 기능을 갖게 되고, 대화형 입력방식 및 데이터베이스를 PC와 연결하여 운전이 가능하도록 하는 기능을 지녔다.

설계, 제작된 축이송유니트를 범용절곡기에 탑재하여 고정도 굽힘가공 실현을 위해 개발 목표 값을 잡고 이를 Table. 1에 나타내었다.

Table. 1 Item of evaluation in positioning device

	Feeding unit	Positioning	Repeat ability	Feeding speed	Pressure
Unit	mm	mm	mm	mm/min	ton/m
Set Point	0.002	0.003	±0.003	15,000	6

### 3.3 프로그램

PC에서 굽힘하고자 하는 형상과 작업을 행하기 위하여 정리된 데이터베이스의 적용에 의하여 백게이지와 스트로크축의 이동량을 계산하게 되고 기계데이터로 변환한다. PC에 정리된 기계데이터는 RS-232C 인터페이스보드를 통하여 서보드라이브에 전송되어 구동하게 된다. 굽힘작업을 행하기 위하여 데이터를 대화형 방식으로 입력받게 되고, 간단히 입력받은 이 형상은 데이터베이스와 이론적 계산을 통하여 고정도 굽힘제품을 얻을 수 있도록 알고리즘과 프로그램을 개발하였다. NC 벤딩 프로그램은 이송 축유니트의 특징인 최대 8 축의 제어에 대하여 각각 단 축으로 독립된 작업을 수

행하도록 하였으며 현재 2 축 제어를 감안하여 메인 화면에 스트로크와 백게이지를 2 축으로 하여 서보모터의 속도에 따라 원하는 위치로 수동지령 및 자동지령을 수행 할 수 있으며 위치추종장치의 진행상태를 눈으로 직접 확인 할 수 있다. 화면의 구성은 EDIT, FILE, AUTO, END로 구성되어 있고, EDIT 화면을 통하여 이론과 현장경험을 바탕으로 작성된 데이터의 정리가 가능하고, 정리된 데이터 베이스는 FILE 화면 및 AUTO 작업과 연계하여 저장되어진다. 저장된 FILE을 메인화면 또는 AUTO 화면에 불러내어 작업자의 선택된 지령에 따라 순차적으로 이동하여 굽힘이 진행되게 된다. 특히 본 프로그램은 연속적으로 작업을 행하고자 할 때 각각의 공정을 시간차, 혹은 신호처리에 의해 행할 수 있도록 설계하였다. Fig. 6과 Table. 2에 굽힘작업의 과정을 설명하였다. SB34P 재질의 두께를 1.0 mm, 가압력을 6 ton/mm로 선정하여 고정시키고 굽힘각을 90°, 110° 로 하여 굽힘가공을 진행하였다. 램이송에 의하여 벤딩머신의 편치가 다이를 향하여 전후진을 반복하고 정리된 스프링 백 등을 감안하여 정리된 데이터베이스에 의하여 스트로크 축과 백게이지 축이 이동을 하여 가공을 진행하게 되고 센서에 의하여 작업을 감지하게 된다. Fig. 7과 8에 각각 대화형 입력의 메인화면과 데이터베이스 입력화면을 나타내었다. 숫자로 표시된 부분은 각 조건에 따라 정해진 백게이지와 스트로크 축의 이동량을 나타내고 있으며 데이터 베이스 입력화면은 작업 오류를 줄일 수 있도록 정리된 데이터베이스를 바탕으로 가공형상을 시뮬레이션할 수 있도록 할 수 있으며, SB34P, SUS 등의 두께, 길이, V-블럭의 폭 등에 따라 이동량을 정리할 수 있게 되어있다.

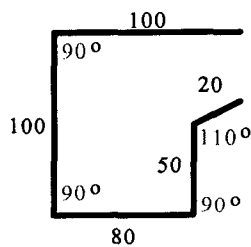


Fig. 6 An example of work

Table. 2 Process of work

	Back Gauge (mm)	Stroke (Deg)	Note
Start		110°	1 Process
Approach	20		Sensor
Bending	55	90°	2 Process
Approach	55		Sensor
Bending	80	90°	3 Process
Approach	100		Sensor
Bending		90°	4 Process

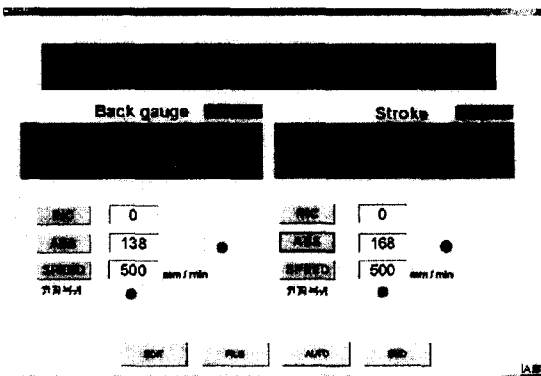


Fig. 7 Main Display of Servo Control Program

No	Degree	Length	Wash	Push Type	Resolution	Position	Speed	Time	Backgauge	Speed
01	90	100.0	13	SCM	12.5	32283320	600	1	1601.00	600
02	270	100.0	13	SCM	22.3	18.30	600	1	1601.00	600
03	270	100.0	13	SCM	24.5	18.30	600	1	1601.00	600
04	270	80.0	13	SCM	23.3	17.30	600	1	1601.00	600
05	110	80.0	13	SCM	21.3	21.10	600	1	1601.00	600
06	0	200.0	13	SCM	18.3					

Code: CBU-2008  
Date: 01.08.08  
Name: BEND\_MAT  
Type: 0.1 mm  
Width: 13 mm  
Material: SUS304

Fig. 8 Database Input Display

#### 4. 실험방법의 제시

범용절곡기를 수년간 사용해 온 전문가의 경험을 토대로 데이터베이스를 작성하고자 하였으나 전문가라 할 지라도 최소 2회 이상의 반복작업을 필수적으로 행하여야 하며 이 부품들은 정밀도에 있어서 많은 오차를 안고 있었다. 따라서 다이의 인선과 유압력을 한 가지로 고정시키고 가공재료 (Work)인 SB34P와 SUS304 재료에 대해서 폭과 두

계 등을 변경하며 V-굽힘을 실시해 보았다. 그 결과 재료의 두께가 두꺼울수록, 경질일수록, 굽힘각이 클수록, 굽힘반경이 같을 때 두께가 얇을수록 스프링백량이 많음을 알 수 있었다. 이에 데이터베이스의 설계 및 검증을 위하여 다수의 변수에 대한 실험을 행하고 이론치 대비 편차량을 보정하여 CAD/CAM화 함으로써 단일공정이 아닌 다단의 절곡공정을 행하고자 할 때 범용절곡기 대비 큰 효과를 얻을 수 있으리라 판단된다.

Fig. 9에 데이터베이스 구축에 따른 Edit 부위의 흐름도를 나타내었다.

그림에서처럼 굽힘가공시 재료의 각 조건별로 여러 가지 실험을 실시해야 하며 이는 곧 데이터베이스의 정리를 의미한다.

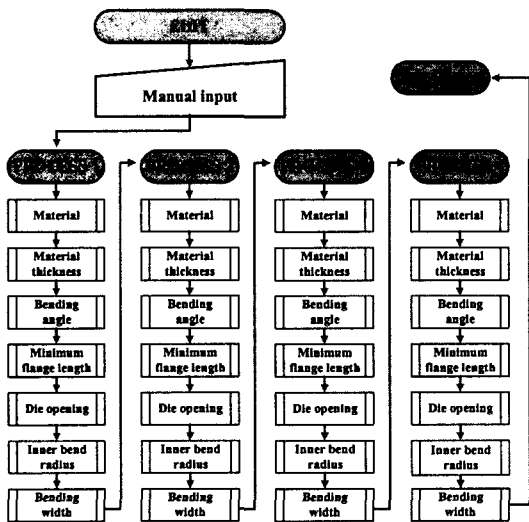


Fig. 9 Flowchart of edit part

### 5. 결론

본 연구는 절곡기의 스트로크축과 백게이지축으로 구성된 축이송 장치를 설계·제작하고 NC화하며 CAD/CAM 기능을 탑재한 장치를 종래의 범용절곡기에 부가하여 서보제어를 기본으로 한 CNC 절곡기 개발에 관하여 연구하였다. 그 결과 스프링백에 영향을 주는 모든 인자들에 대하여 이론값에 준하지 않고 다수의 실험을 통하여 그 편차를 보정함으로써 다공정 다량작업이 불가능한 범용절곡기의 성능을 향상시킬 수 있고, 이는 품질

과 생산성에도 크게 기여할 것으로 판단된다.

### 후기

본 논문은 “2000~2001년도 한국과학재단 지정 조선대학교 지역 협력 연구센터인 수송기계 부품 자동화 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었습니다.”

### 참고문헌

1. Y. Alitintans and A. J. Lane, "Design of an Electro-Hydraulic CNC Press Brake," *Int J. Mach. Tools Manufact*, vol. 37, No. 1, pp 45-59, 1997
2. Kerry L. Elkins and Robert H. Sturges, "Design of a Sensor for on-line Measurement of Loaded Bend Angle for Pressbrake Control", *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 17, pp. 329-340, 2001
3. Anon., "Sheet metal bending methods", *Accurate Manufacturing Company News Release*, EM-105, 1989
4. 정완진, "박판성형시 탄성복원에 대한 유한요소 해석", *대한기계학회논문집 A권*, Vol. 23, No 12, pp. 2197-2208, 1999
5. 양동열, 이상숙, 윤정환, 유동진, "박판성형에서의 스프링백 해석과 산업적 응용", *한국소성가공학회지*, Vol. 8 No. 1, pp. 22-28, 1999
6. 조웅식, "프레스 금형설계기술", *기전연구소*, 1999
7. 류제구, 이종구, "프레스 금형설계일반", *학문사*, 1997
8. (주)다사테크, "Robot& Motion Controller DMC-A1 Series," operating manual Ver1.2 Catalog.
9. T.X. Yu, L.C. Zhang, "Plastic Bending-Theory and Applications", *World Scientific*, 1995
10. KSB 0804-1997, 금속재료 굽힘시험방법