[논문] 한국소성가공학회지, 제 15 권 제 4 호, 2006
Transactions of Materials Processing, Vol.15, No.4, 2006

유한요소해석을 이용한 박판 벤딩용 CO_2 레이저 성형기 제작

고대철 [1]· 이찬주 [2]· 김병민[#]

Production of CO_2 Laser Forming Machine for Bending of Sheet Metal Using the FE-Analysis

D. C. Ko, C. J. Lee, B. M. Kim

(Received February 20, 2006)

Abstract

The laser forming process is a new flexible forming process without forming tools and external force, which is applied to various fields of industry. Especially, applications of the laser forming process focused on cutting, welding and marking process. In this paper, the laser bending process of sheet metal which is heated by laser beam and formed by internal stress is simulated by using thermo elastic-plastic analysis model. Based on the result of FE-analysis, the laser bending machine is made to obtain reliable data for sheet bending. Under the same condition as FE-analysis, the laser bending experiment has been performed to verify the result of FE-analysis and good agreement has been obtained between FE-analysis and experiments. Additional laser bending experiments have been performed to evaluate the laser bending machine.

Key Words : Laser Forming, Sheet Metal Bending, FE-Analysis, Laser Bending Experiment

1. 서 론

최근 몇 년동안 레이저 성형기술은 많은 산업분야에 응용되어 사용되어지고 있으며, 주로 용접, 절단 및 마킹에 관한 연구가 활발히 진행되었다[1]. 레이저를 이용한 성형공정은 금형의 제작이 필요없으며, 성형하중을 요구하지 않는 장점이 있다. 특히 판재 굽힘가공시 발생하는 스프링백이 없으며, 다양한 형상으로 성형이 가능하다. 또한 기존의 금속성형공정과 비교하여 레이저 성형은 다품종 소량생산에 있어서 생산원가가 낮다[2]. 이러한 장점에도 불구하고 레이저 벤딩에 관한 연구는 거의 진행되지 않고 있는 실정이다.

레이저 벤딩공정은 레이저 빔이 판재 표면에 조사될 때 두께 방향으로의 불균일한 온도구배에 의해 발생하는 열응력을 이용하여 성형하는 공정이다. 레이저 벤딩공정의 메커니즘이 매우 복잡하므로 판재를 원하는 벤딩각도로 성형하기 위해서는 해석적 모델을 이용하여 성형조건을 설정하는 것이 필요하다[3].

레이저 벤딩공정에 영향을 미치는 공정변수는 레이저 출력, 레이저 빔 이송속도 및 열흡수계수 등의 에너지 변수와 판재의 두께와 폭 등의 형상변수로 나눌 수 있다. 따라서 본 연구에서는 레이저 출력과 이송조건이 설정된 박판의 레이저 벤딩공정에 대해 유한요소해석을 선행하였다. 해석

1. 부산대학교 동남권부품소재산학협력혁신연구소
2. 부산대학교 대학원 정밀기계공학과
교신저자 : 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소
E-mail : bmkim@pusan.ac.kr

결과를 기초로 레이저 벤딩 성형장치를 제작하고 해석과 동일한 조건하에서 레이저 벤딩실험을 수행하여 유한요소해석 결과의 타당성 및 실공정의 적용성을 검토하였다. 또한 레이저 벤딩공정에서 주요한 공정변수인 레이저 빔의 이송속도 및 조사횟수의 영향을 평가하기 위해 다양한 조건하에서 실험해 보았으며, 레이저 벤딩공정을 응용한 다양한 형상으로의 성형 가능성을 확인하기 위해 임의의 곡률을 가지는 형상으로 성형해 보았다.

2. 유한요소해석

2.1 유한요소해석 조건

레이저 벤딩공정은 박판의 두께 방향으로 불균일한 온도 분포를 가함으로써 발생하는 열응력에 의한 성형공정이므로 열탄소성해석이 필요하다[4]. 본 연구에서는 CO_2 레이저를 이용한 박판 벤딩공정의 유한요소해석을 수행하기 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 를 사용하였다.

레이저 벤딩공정의 유한요소해석에 있어서 다음과 같은 가정을 하였다.

i) 레이저 강도의 분포는 Gaussian 모드를 따른다.
ii) 시험편 내부의 열전도와 주위 공기로의 자유대류만 고려하고, 열복사는 무시한다.
iii) 재료는 등방성이며, 바우싱거 효과는 무시한다.

Gaussian 모드의 원형 레이저 빔은 집광렌즈와 집광거리에 의해 빔의 크기가 결정되며, 레이저 빔에 의해 박판 표면에 전달되는 열속(heat flux)의 밀도는 다음의 식(1)로 표현된다[2,5].

$$I = \frac{2AP}{\pi r^2}\exp(-\frac{2r^2}{r_b^{\ 2}}) \qquad (1)$$

I 는 열속의 밀도(W/m^2), A 는 열흡수계수, P 는 레이저의 출력(W)이며, r_b 는 레이저 빔의 반경(m)이다. 또한 r 은 레이저 빔 중심으로부터의 특정지점까지의 거리(m)이다.

레이저 빔의 반경범위 내에서 평균 열속의 밀도는 다음의 식(2)로 표현된다.

$$I_m = \frac{1}{\pi r_b^{\ 2}}\int_0^{r_b} I(2\pi r)dr$$

$$= \frac{2\pi}{\pi r_b^{\ 2}}\int_0^{r_b}\frac{2AP}{\pi r_b^{\ 2}}\exp(-\frac{2r^2}{r_b^{\ 2}})rdr$$

$$= \frac{0.865AP}{\pi r_b^{\ 2}} \qquad (2)$$

열흡수계수 A 는 소재의 상태에 따라 다르지만 일반적으로 높은 열흡수계수를 얻기 위해 박판의 표면에 탄소층 또는 산화층을 코팅시키며, 0.5~0.7 사이의 값을 가진다[5]. 본 연구에서는 박판 표면에 탄소 코팅처리를 하였으며, 흡수계수 A 의 값은 0.6 으로 가정하였다.

Fig. 1 에 레이저 출력장치, 이송장치 및 성형 후 형상측정장치 등으로 구성된 레이저 벤딩 성형장치의 개략도를 나타내었다. 이동하는 레이저 빔에 의해 박판의 표면이 가열되는 과정을 묘사하기 위해 Fig. 2 과 같이 유한요소해석 모델의 각 요소 절점에 열속를 주어 나타내었으며, 해석의 편의성을 위해 원형의 레이저 빔은 동일한 면적의 사각형 빔으로 단순화하였다. 요소 절점에 주어지는 열속의 크기는 평균 열속 밀도 I_m 과 같으며, 레이저 빔의 이동속도는 0.5~2.2mm/s 로 하였다.

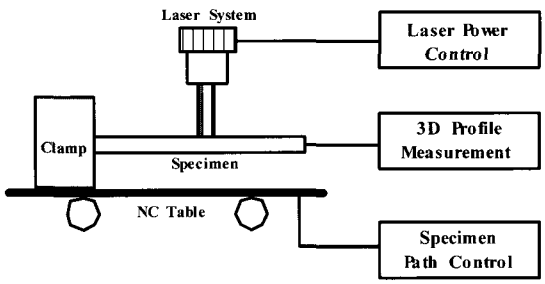


Fig. 1 Schematic drawing of laser bending machine

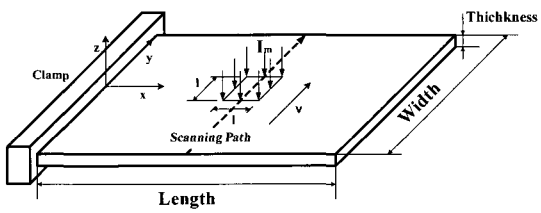


Fig. 2 FE-model of laser bending analysis

레이저 벤딩공정동안 시험편은 주위 공기와의 열전달이 계속 일어나므로, 유한요소해석에서 이를 고려해야 한다. 박판의 표면에서 주위 공기로의 대류 열전달은 다음의 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$-k(\partial T/\partial n) = h(T - T_\infty) \quad (3)$$

여기서 T_∞는 주위 공기의 온도이고, h 는 대류 열전달계수이다. 본 연구에서는 T_∞는 20℃, h 는 21W/m^2℃로 고려하였다. 또한 시험편의 열복사에 의한 열전달량은 그 양이 매우 작으므로 무시하였다[6].

시험편은 AISI 1095 을 사용하였고, AISI 1095 소재의 기계적, 열적 물성치는 Table 1 과 Fig. 3 에 나타내었다.

2.2 유한요소해석 결과

폭 25mm, 길이 75mm, 두께 0.1mm 인 시험편의 표면 위에 레이저 빔을 폭방향으로 2mm/s 의 속도로 1 회 조사하는 레이저 벤딩공정을 해석하였다. 이때 레이저의 출력은 30W 이며, 레이저 빔의 직경은 1mm 이다.

시간에 따른 시험편 표면의 온도변화를 Fig. 4 에 나타내었다. 레이저 빔에 의해 가열되는 5.8 초 동안 시험편 표면의 온도는 급격히 증가하였으며, 5.8 초 후 자유 대류에 의해 냉각됨을 볼 수 있다. Fig. 5 에 시험편 두께방향으로의 온도분포를 나타었다. 가열되는 시험편의 윗면과 아랫면의 온도차이에 의해 두께방향으로 불균일한 온도구배가 형성되었다. 벤딩공정동안의 시험편 최대 온도는 시험편 소재의 용융온도인 1500℃보다 낮은 976℃였다.

Fig. 6 에 레이저 벤딩공정동안 시험편의 변형과정을 나타내었다. 일반적으로 소재의 온도가 증가

Table 1 Mechanical and thermal properties of AISI 1095

Material	AISI 1095
Young's Modulus[GPa]	200
Ultimate Strength[MPa]	665
Thermal Conductivity[W m/℃]	49.8
Specific heat Capacity[J/g ℃]	0.461

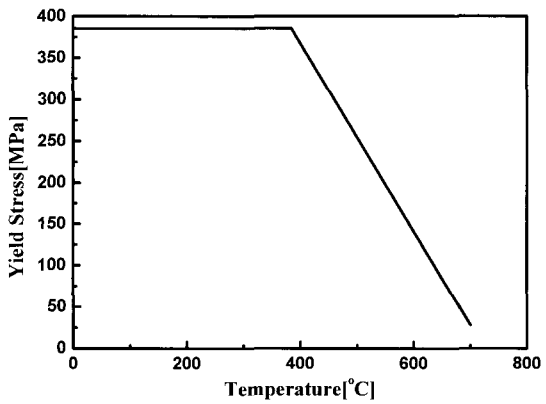


Fig. 3 Variation of yield stress for temperature

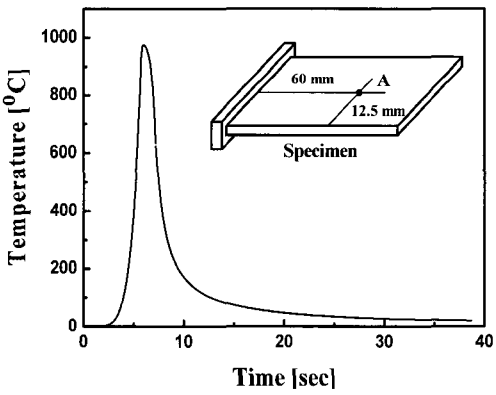


Fig. 4 Specimen temperature during the laser bending at point A

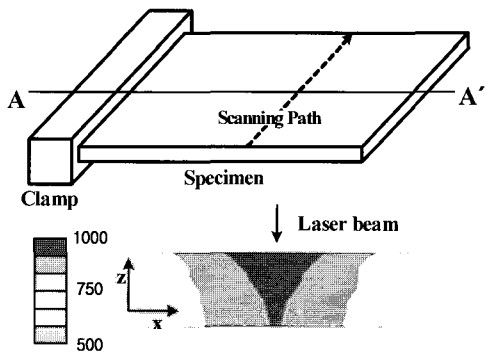


Fig. 5 Distribution of temperature(℃) near the beam center for section A-A'

(a) Initial state of specimen

(b) Final state of specimen after laser bending

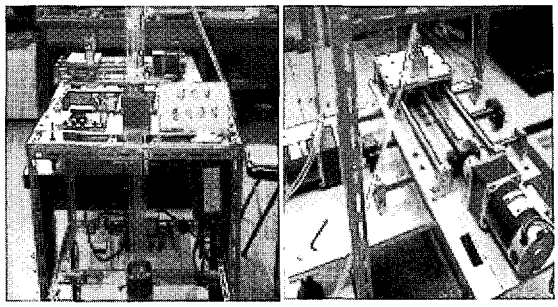
Fig. 6 Deformation of specimen during the laser bending

함에 따라 소재의 항복응력은 감소한다. 시험편이 레이저 빔에 의해 가열되는 동안 길이방향으로의 윗면과 아랫면의 열팽창은 거의 균일하게 일어나지만 냉각이 이루어지는 동안 두께방향으로의 불균일한 온도구배에 의해 부분적으로 항복응력의 저하가 발생하고 열응력이 항복응력을 넘게 되어 소성변형이 발생한다. 냉각되는 동안 원래 상태로 수축되지만 잔류 소성변형에 의해 박판은 굽힘변형을 받는다. 본 연구에서 고려한 시뮬레이션 조건하에서 예측된 레이저 벤딩성형 후 판재의 벤딩각도는 8.1°였다.

3. 레이저 성형실험

3.1 CO_2 레이저 성형장치 제작

레이저 성형실험을 수행하기 위하여 간이 레이저 벤딩장치를 제작하였다. 레이저 벤딩장치는 레이저 출력장치와 이송테이블로 크게 구성된다. 레이저 출력장치는 N_2, He, CO_2의 혼합가스(혼합비 1:12:1)를 매질로 하며, 출력은 최대 50W까지 조절할 수 있다. 레이저 빔의 직경은 1mm이며 초점거리는 100mm이다. 또한 이송장치는 최대 2.4 mm/s까지 이송가능하며, 이송속도는 이송테이블의 서보모터 회전속도를 제어하여 속도의 변화가 가능하도록 하였다. 본 연구에서 제작한 CO_2 레이저 벤딩 성형장치는 Fig. 7과 같고, 그 제원은 Table 2에 요약해 놓았다.



(a) laser system **(b) feeding system**

Fig. 7 Laser bending machine

Table 2 Process parameters of the laser bending

Laser power[W]	Max. 50
Beam spot size[mm]	1.0
Focal distance[mm]	100
Feeding speed[mm/s]	0.5 ~ 2.4

Table 3 Dimension of specimen

Length[mm]	75
Width[mm]	25
Thickness[mm]	0.1

3.2 레이저 벤딩 성형실험

박판의 레이저 벤딩 성형공정에서 원하는 벤딩각도를 얻기 위해서는 레이저 출력과 레이저 빔의 이송속도를 결정해야 한다. 또한 실제 공정에서의 원활한 적용을 위해 이러한 공정변수의 결정을 시행착오법으로 접근하기에는 무리가 있으므로 해석적 접근을 통해 공정변수에 따른 벤딩각도를 예측하고 이를 바탕으로 공정변수를 설정하는 것이 타당하다고 생각된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 관점에서 유한요소해석과 동일한 조건하에서 레이저 벤딩 성형실험을 수행하였다.

시험편의 한쪽 끝단을 클램프에 고정시키고, 레이저 빔은 유한요소해석과 동일하게 클램프 고정부로부터 거리 60mm 인 지점에 조사되었다. 실험에 사용된 시험편은 AISI 1095 이며, 흡수계수를 높이기 위해 탄소 코팅처리를 하였다. 시험편의 제원은 Table 3 과 같다.

레이저 벤딩실험 후 판재의 형상은 Fig. 8 과 같고, 시험편의 벤딩각도는 냉각 후 3 차원 형상측정기를 이용하여 시험편 폭방향 중심부를 측정하

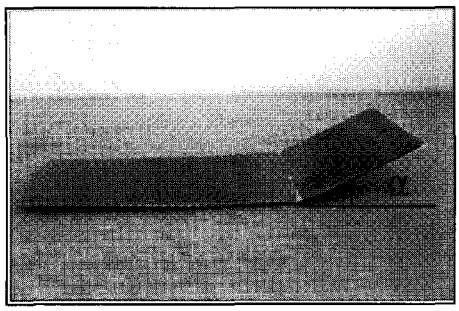


Fig. 8 Result of laser bending experiment(α =7.93 °)

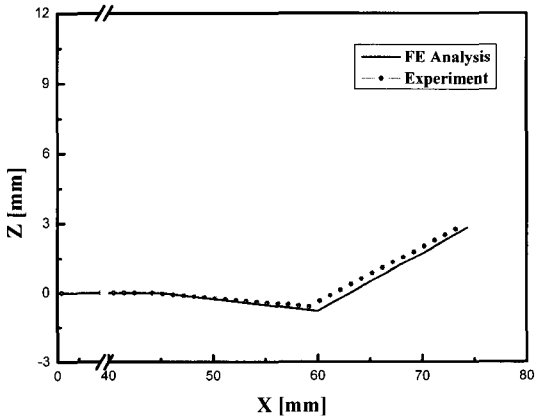


Fig. 9 Comparison of specimen profile between FE-analysis result and laser bending experiment

였다. Fig. 9 에 판재 길이방향으로의 형상을 측정하여 Fig. 6 의 유한요소해석 결과와 비교하여 나타내었다. Fig. 8 에서 실험 후의 판재 벤딩각도는 7.93 ° 로 약 2%정도의 오차를 보였으나, Fig. 9 와 같이 전체적인 판재의 형상은 해석과 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 해석과 실제 벤딩 후의 성형오차를 줄이기 위해서는 실험에서 레이저 출력을 일정하게 유지하고 이송속도의 정밀한 제어가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

3.3 공정변수의 영향

레이저 벤딩공정에서 중요한 공정변수인 레이저 빔의 이송속도 및 조사횟수의 영향을 파악하기 위하여 유한요소해석을 선행하고 해석조건과 동일한 조건하에서 실험을 수행하였다. 이송속도는 0.5 ~ 2.2 mm/s 까지 0.1mm/s 간격으로 변화시키면서 벤딩실험을 수행하였다. 또한 이송속도가 2 mm/s 일때 레이저 빔의 조사 횟수에 따른 영향을

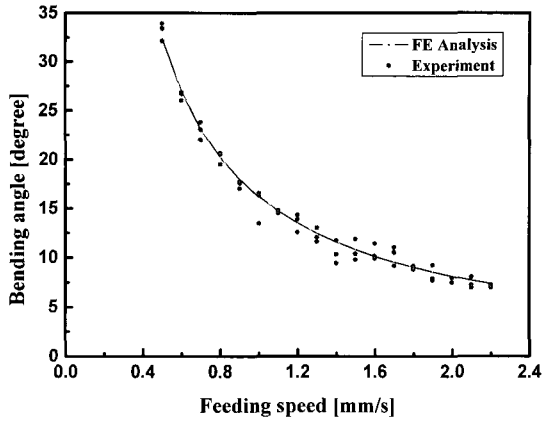


Fig.10 Relationship between feeding speed of laser beam and bending angle

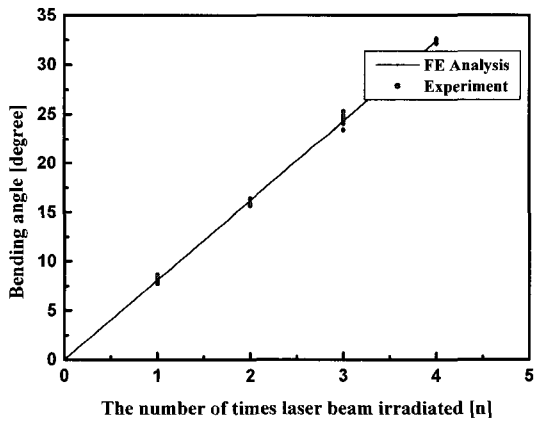


Fig.11 Relationship between the number of times laser beam irradiated and bending angels at feeding speed of 2mm/s

평가하였다

이송속도 변화에 따른 벤딩 각도의 영향을 Fig. 10 에 나타내었다. 벤딩 각도는 이송속도에 반비례하여 증가함을 볼 수 있다. 속도가 느려질수록 시험편에 전달되는 에너지량이 증가하고 이에 따라 열응력에 의한 소성변형 영역이 더욱 커지기 때문에 벤딩각도가 더욱 커지는 것으로 판단된다. 0.5 mm/s 이하의 속도에서는 시험편에 크랙이 발생함을 관찰할 수 있었다.

Fig. 11은 시험편에 레이저 빔을 동일한 이송경로를 따라 조사한 횟수에 따른 벤딩각도를 나타낸 것이다. 이 때 벤딩각도는 조사횟수에 비례하여 증가하였으며, 같은 조건에서는 일정한 각도로

벤딩되었다. 레이저 빔을 4회 조사하여 최대 32.52°의 벤딩각도를 얻었으며, 5회 이상 시험편에 레이저 빔을 조사한 경우 시험편에 크랙이 발생하거나 파단이 되었다. 시험편의 온도가 국부적으로 재결정 온도까지 상승하고 다시 냉각되는 과정이 반복적으로 일어남으로 인해 시험편의 항복강도 및 극한 인장강도가 저하된다. 이 때 벤딩각도가 커짐으로써 시험편의 연성파괴 및 열팽창에 의해 파단되는 것으로 사려된다[7].

레이저 벤딩공정에 있어서 벤딩각도의 재현성에 의해 레이저 벤딩 성형기의 정밀도가 결정되어진다.[8] 본 연구에서는 제작된 레이저 벤딩 성형장치의 성능을 평가하기 위해 레이저 벤딩 공정변수를 고정시키고 레이저 벤딩실험을 5회씩 반복적으로 실시하였다. Fig. 10과 11에서 유한요소해석 결과와 비교해 볼 때 실험결과는 최대 오차 8.9% 범위 내에서 분포함을 알 수 있다. 본 연구에서는 실험실 수준으로 레이저 성형기를 제작하였으므로 레이저 빔 출력 및 이송속도의 정밀제어가 어려워 이러한 성형오차가 발생한 것으로 생각되며, 정밀한 성형기 제작이 이루어진다면 보다 양호한 결과를 얻을 수 있을것으로 판단된다.

3.4 임의 곡률의 벤딩

제작된 레이저 벤딩 성형장치의 다양한 형상으로의 성형 가능성을 확인하기 위하여 유한요소해석결과에서 예측한 벤딩각도를 이용하여 박판을 임의의 곡률로 성형해 보았다. 본 연구에서 고려한 임의 곡률의 성형방법은 다음과 같다.

i) 시험편을 일정한 간격으로 n 개의 구간으로 나누고, 각 구간의 끝점을 성형점으로 지정한다. 이때 성형점 S_1 은 시험편의 바깥쪽에 위치한다.
ii) 성형점 S_1 에서 목표로 하는 곡선과 이루는 접선을 찾고, 이 접선과 시험편이 이루는 각이 벤딩각도(θ_1)가 된다.
iii) 성형점 S_1 에서 각도 θ_1 으로 성형한다.
iv) 성형점 S_2 에서 목표로 하는 곡선과 이루는 접선을 찾고, 이 접선과 시험편이 이루는 각이 벤딩각도(θ_2)가 된다.
v) 성형점 S_2 에서 각도 θ_2 으로 성형한다.
vi) 위의 과정을 반복하여 목표로 하는 곡선으로 성형한다.

Fig. 12에 임의의 곡률로 레이저 벤딩을 위한 절차를 개략적으로 나타내었다.

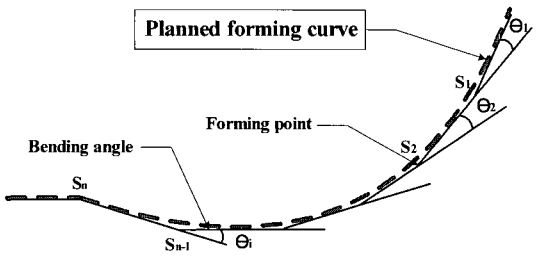


Fig.12 Procedure of free curve laser forming

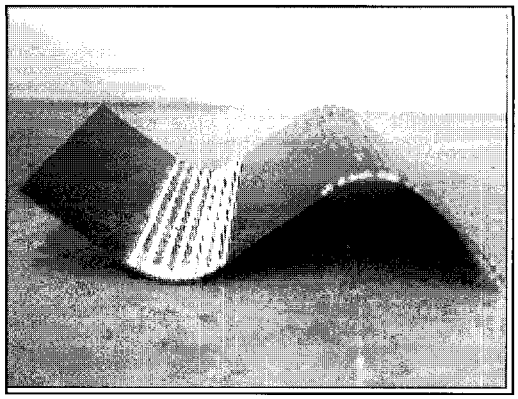


Fig. 13 Result of free curve laser bending

Fig 13은 임의의 곡률을 가지는 곡선으로 레이저 벤딩실험을 한 시험편을 나타낸 것이다. 시험편의 곡선은 곡률반경 30mm로 일정하게 유지하여 양방향으로 성형하였다. 곡률반경을 일정하게 유지하기 위해서 벤딩각도 및 성형점 거리는 각각 8.1°와 5mm로 고정하여 성형하였다. 레이저 벤딩실험 후 곡률의 형상을 측정하여 그 결과를 Fig 14에 나타내었다. 시험편의 곡선은 목표한 곡선에 거의 외접함을 확인할 수 있으며, 오차를 줄이기 위해서는 성형점 사이의 간격을 줄여서 성형하면 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 유한요소해석을 기초로 CO_2 레이저 벤딩 성형장치를 제작하였다. 제작된 장치를 이용하여 벤딩실험을 실시하고 유한요소해석 결과의 검증 및 실공정의 적용 가능성을 평가하였다. 레이저 출력에 대한 레이저 벤딩공정의 주요 공정변수인 레이저 빔 이송속도 및 조사횟수의

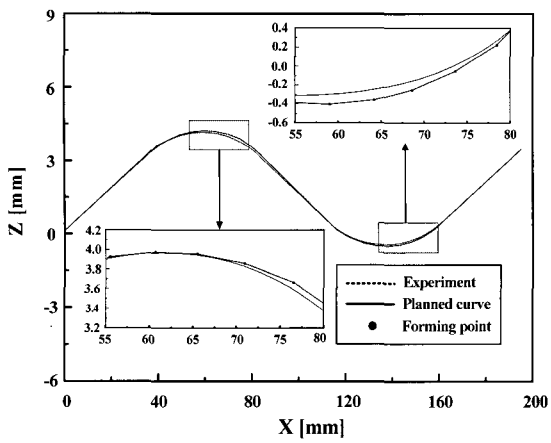


Fig.14 Measurement of specimen profile for free curve laser bending

영향을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유한요소해석으로 설정된 공정조건하에서 레이저 벤딩 성형기를 이용하여 실험을 수행한 결과, 측정된 판재의 벤딩각도는 약 2%정도의 오차를 나타내었으며 전체적인 판재 형상은 비교적 해석과 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

(2) 레이저 벤딩 성형공정의 주요 공정변수인 이송속도와 조사횟수의 영향을 조사하였으며, 레이저 벤딩각도는 레이저 빔의 이송속도에 반비례하고 조사횟수에 비례하여 증가함을 알 수 있었다.

(3) 판재에 전달되는 에너지량을 증가시켜 벤딩각도를 크게하려면 레이저 빔의 이송속도를 작게하거나 레이저 빔을 여러 번 조사하여 성형하면 가능하다. 그러나 재료의 파단으로 인해 한계 벤딩각도가 존재함을 확인할 수 있었다.

(4) 레이저 벤딩공정에서 판재의 벤딩각도 제어는 레이저 빔의 이송속도를 조절함으로써 가능하며, 본 연구에서는 0.5~2.2mm/s 의 이송속도범위에서 7.4~32.52°의 벤딩각도를 얻을 수 있었다.

(5) 동일한 조건하에서 반복실험을 통하여 레이저 벤딩 성형장치의 재현성을 평가하였으며, 최대 오차 약 8.9%이내의 범위에서 벤딩각도의 재현성이 나타났다. 레이저 출력을 일정하게 유지하고 이송속도의 정밀제어가 이루어진다면 오차는 보다 감소할 것으로 판단된다.

(6) 임의의 곡률을 가지는 박판의 성형은 벤딩각도와 성형점 사이의 간격을 제어함으로써 가능하므로 다양한 형상으로의 성형 가능성을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] J. T. Kim, S. J. Na, 2005, Feedback control for 2D free curve laser forming, Optics & Laser Technology, Vol. 37, pp. 137~146.

[2] G. Yanjin, S. Sheng, Z. Guogun, L. Yiguo, 2005, Influence of material properties on the laser forming process of sheet metals, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 167, pp. 124~131.

[3] W. Shichun, J. Zhong, 2002, FEM simulation of the deformation field during the laser forming of sheet metal, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 121, pp. 269~272.

[4] 이장현, 신종계, 노인식, 1994, 후판곡면가공을 위한 과도열탄소성 시뮬레이션, '94 Korea ANYSY User's Conference, pp. 495~528.

[5] Z. hu, M. Labudovic, H. Wang, R. Kovacevic, 2001, Computer simulation and experimental investigation of sheet metal bending using laser beam scanning, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 41, pp. 589~607.

[6] H. S. Hsieh, J. Lin, 2004, Thermal-mechanical analsis on the transient deformation during pulsed laser forming, International Journal of Machine & Tools & Manufacture, Vol. 44, pp. 191~199.

[7] M. Merklen, T. Hennige, M. Geiger, 2001, Laser forming of aluminium alloys-microstructural investigation, Journal of Materials Processing Technology, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 115, pp. 159~165.

[8] T. Hennige, S. Holzer, F. Vollertsen, M. Geiger, 1997, On the working accuracy of laser bending, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 71, pp. 442~432.