

DP980강판의 레이저 조사에 따른 굽힘 변형특성 연구

송정한¹ · 장야징¹ · 이종섭¹ · 박성준² · 최두순³ · 이근안[#]

Bending Characteristics of DP980 Steel Sheets by the Laser Irradiation

J. H. Song, Y. Zhang, J. S. Lee, S. J. Park, D. S. Choi, G. A. Lee

(Received July 3, 2012 / Revised August 20, 2012 / Accepted September 4, 2012)

Abstract

Laser forming is an advanced process in sheet metal forming in which a laser heat source is used to shape the metal sheet. This is a new manufacturing technique that forms the metal sheet only by a thermal stress. Analyses of the temperature and stress fields are very important to identify the deformation mechanism in laser forming. In this paper, temperature distributions and deformation behaviors of DP980 steel sheets are investigated numerically and experimentally. FE simulations are first conducted to evaluate the response of a square sheet in bending. The effects of process parameters such as laser power and scanning speed are then analyzed numerically and experimentally. It is observed that experimental and numerical results are in good agreement. These results provide a relationship between the line energy and the angles for laser bending of DP980 steel sheets.

Key Words : Laser Bending Process, DP980, Thermo-Mechanical FE Analysis, Line Energy

1. 서 론

최근 레이저는 용접, 절단, 마킹 등 전통적인 가공분야에서부터 IT, BT 분야의 미세가공에 이르기까지 다양한 산업분야에서 그 응용이 확대되고 있다. 이 중 레이저를 이용한 판재 성형기술은 Fig. 1과 같이 초점을 맞추지 않은 레이저 빔을 판재의 한쪽 면에만 조사하면서 이동시켰을 때 레이저가 조사된 면과 그렇지 않은 면 사이에 발생하는 온도차이에 의해 생기는 열응력을 이용해 변형을 가하는 방법으로[1], 1980년대 후반 2차원 형태의 성형 관련 기술이 처음 제시된 이후에 2000년대 들어서 3차원 임의형상 성형을 위한 공정 및 시스템 기술이 활발히 진행되고 있다[2].

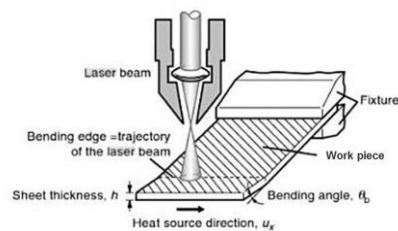


Fig. 1 Schematic description of the laser forming[2]

레이저 성형기술은 기존 접촉식 프레스성형과 비교하여 금형의 제작이 필요 없으며, 판재의 굽힘변형 시 발생하는 스프링백이 없다는 장점으로 인해 다품종 소량생산 및 빈번한 제품 사양 변경에 적합한 판재 부품뿐만 아니라, 고강도 강판의

1. 한국생산기술연구원
2. 한국교통대학교
3. 인하공업전문대
교신저자: 한국생산기술연구원, E-mail:galee@kitech.re.kr

성형 후 스프링백에 따른 형상보정에까지 그 적용범위를 넓히고 있다. EU에서는 자동차 및 부품 회사를 중심으로 PROFORM이란 프로젝트를 통하여 780MPa급 고강도 강판의 가변롤성형(Flexible Roll Forming)후 형상보정에 레이저 성형기술을 응용하는 연구를 진행하고 있으며[3], 국내에서는 Shim 등이[4] 고강도 강판 범퍼 레일의 스탬핑 성형 후 레이저 조사를 통한 형상보정기술을 제시하였다.

레이저 성형은 판재 두께 방향으로의 불균일한 온도구배에 의한 열팽창 차이에 따라 발생하는 열응력의 차이를 이용하기 때문에 원하는 굽힘 각도로 성형하기 위한 레이저 출력, 레이저 빔 이송속도 등의 공정변수 설정이 매우 중요하다. 레이저 성형에 있어서 공정변수와 레이저 성형 각도 사이의 관계를 실험적으로 규명하는 연구가 많이 진행되어 왔다[5,6]. 하지만 이러한 실험적 연구결과들은 재료 및 레이저 광원의 변화에 따라 적용하기 힘든 단점이 있어서, 유한요소법을 이용한 수치해석적 방법과 이론적 모델(analytical model)을 통해 레이저 성형 각도를 예측하는 연구도 이루어지고 있다[7~12]. 그러나 이러한 대부분의 연구들이 성형성이 좋은 연강(mild steel)소재나 티타늄 합금과 같은 난성형소재를 대상으로 원하는 형상을 성형하는데 초점이 맞추어져 있으며, 스프링백에 따른 형상보정에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

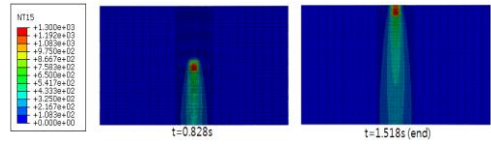
본 논문에서는 DP980 초고강도 강판의 레이저 성형 공정기술 개발을 목적으로 기초적인 레이저 굽힘 변형에 대한 유한요소해석 및 실험을 수행하여 레이저 조사출력, 이송속도 등 입력에너지에 따른 온도구배와 응력 및 굽힘 각도 등의 변형특성을 분석함으로써 레이저 성형공정의 적용가능성을 살펴보았다.

2. 레이저 성형공정의 유한요소 해석

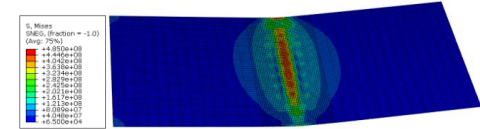
2.1 유한요소 해석조건

본 논문에서는 길이 100mm, 폭 50mm, 두께 1.4mm를 갖는 DP980 소재를 대상으로 Fig. 1의 레이저 성형공정의 유한요소해석을 상용프로그램인 ABAQUS/Standard를 이용하여 수행하였다.

레이저 조사출력 1000W, 빔 직경 5.2mm, 빔 이송속도는 2.0m/min의 조건에서 레이저 강도 분포는 Gaussian 모드를 따르는 분포로 가정하였다.



(a) Temperature contour at heating process



(b) Deformed shape and stress distribution

Fig. 2 Temperature and deformation of the specimen

Gaussian 모드의 레이저 빔에 의해 판재 표면으로 전달되는 열속(heat flux)의 밀도 I 는 다음의 식(1)로 표현된다.

$$I = \frac{2\eta P}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{R^2}\right) \quad (1)$$

여기서 I 는 열속의 밀도(W/m^2), P 는 레이저의 출력(W)이며, R 과 r 은 레이저 빔의 반경 및 중심으로부터 특정지점까지의 거리, η 는 열흡수 계수이다. 본 연구에서는 위 식(1)을 적분하여 반경범위 내의 평균 열속밀도를 계산하고 이를 요소 절점에 부가하였다. 또한 재료는 등방성이며, 시편 내부의 열전도와 시편 상부와 하부에서 주위 공기의 자유대류에 의한 열전달만 고려하고, 열복사는 무시하였다.

레이저조사 공정은 열의 집중도가 높기 때문에 레이저빔이 조사되는 곳에서는 용융점부근까지 온도가 올라갈 수 있으므로 열전달 및 탄소성 연계해석 시 해석의 정확도를 높이기 위하여 소재의 탄성계수, 항복강도 및 열전달 계수, 열팽창 계수 등은 Shim 등[4]의 연구결과에 명기된 대로 JMatPro 에 의한 온도의존 예측값을 사용하였으며, 레이저 열원에 의한 재료의 상변태는 고려하지 않았다.

2.2 해석결과 및 변형 메커니즘 분석

DP980소재에 대하여 1000W의 출력을 갖는 직경 5.2mm의 레이저 빔이 시편의 폭 방향 중앙을 따라 2.0m/min의 속도로 이송함에 따라 시간에 따른 온도분포를 Fig. 2(a)에 도시하였다. 그리고 레이저가 1회 조사된 후 냉각되어 정상상태에 도

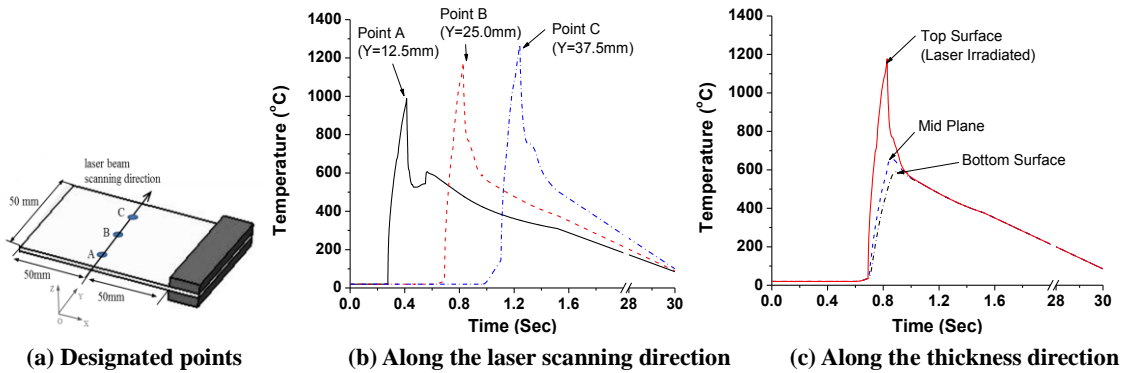
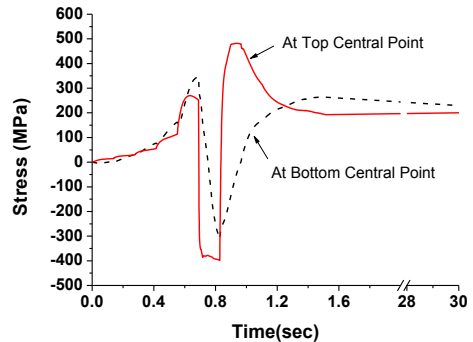


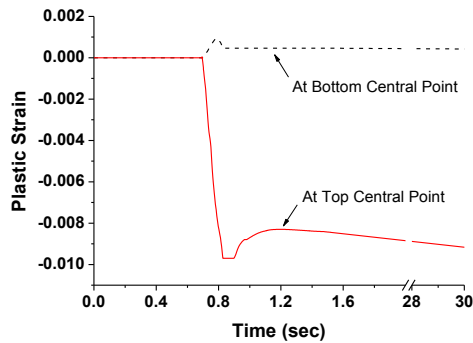
Fig. 3 Temperature histories of the specimen at designated points (P=1000 kW, v=2.0 m/min)

달했을 때의 변형형상과 응력은 Fig. 2(b)와 같다. 레이저가 이송됨에 따라 빔 직경부위에서 온도가 집중되며, 이러한 열응력에 의해서 최종적으로 레이저 조사방향으로 1.14°의 굽힘 변형이 발생함을 확인할 수 있다. 이러한 레이저 성형에서의 온도 이력과 이에 따른 변형메커니즘을 고찰하기 위하여 Fig. 3(a)에 도시한 바와 같이 레이저가 이동하는 방향에 대한 온도이력과 시편의 중앙(Point B)에서 시편 두께방향의 온도이력을 각각 Fig. 3(b)와 Fig. 3(c)에 도시하였다. Fig. 3(b)와 같이 레이저의 열원이 시편을 따라 이송하면서, 순간적인 열입이 발생하여 온도가 급격하게 증가한 후에 전도 및 대류에 의해 냉각되어 온도가 감소됨을 확인할 수 있다. 또한 시편의 중앙점에서 두께방향으로의 온도변화를 살펴보면 레이저가 조사될 때 레이저 빔이 닿는 상부에서는 약 1200°C 까지 온도가 증가하나 아랫면에서는 약 600°C의 온도를 보여 상하면의 온도차이가 약 600°C 까지 나타나는 극심한 온도구배를 보여주고 있다.

레이저 성형과정에서 온도구배에 따른 변형메커니즘을 살펴보기 위해 시편 중앙점에서 Fig. 3(a)의 길이방향 (X-direction)에 대한 응력과 소성변형률의 변화이력을 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4(a)에 도시한 길이방향의 응력을 살펴보면 주변의 온도 증가에 따른 팽창에 의해 인장응력이 작용하다가, 열원이 도달해 감에 따라 온도가 급격한 온도 증가에 따른 팽창을 주변이 구속하여 압축응력이 급격하게 작용하게 되며, 이러한 압축응력의 증가가 Fig. 4(b)와 같이 탄성한계를 넘어 소성변형을 유발하게 됨을 확인할 수 있다. 이후 레이저 열원이 중앙점을 지나 냉각이 발생함에 따라 시편의 수축을 주변이 구속하여 시편에는 인장응력이



(a) Longitudinal stress



(b) Longitudinal plastic strain

Fig. 4 Longitudinal(x-direction) stress and strain histories of the specimen at the center point

작용하며, 최종적으로 시편의 상부와 하부는 각각 압축과 인장의 소성변형률을 보이며 레이저가 조사되는 방향으로 시편의 굽힘 변형이 발생하는 TGM(Temperature Gradient Mechanism) 모드[7]가 나타난다. 레이저 성형에서는 이러한 변형메커니즘 이외에도 시편의 두께, 레이저 조사조건에 따라 레이저 조사방향의 반대로 굽힘이 발생하는 경우

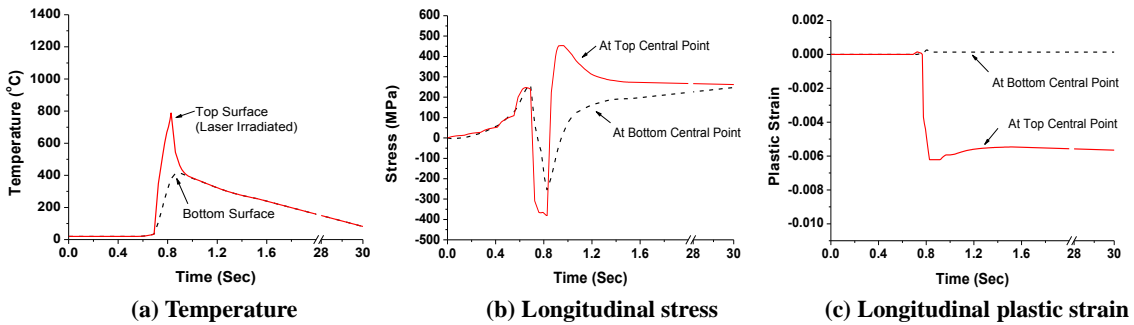


Fig. 5 Temperature, stress and strain histories of the specimen at the center point (P=750W, v=2.0 m/min)

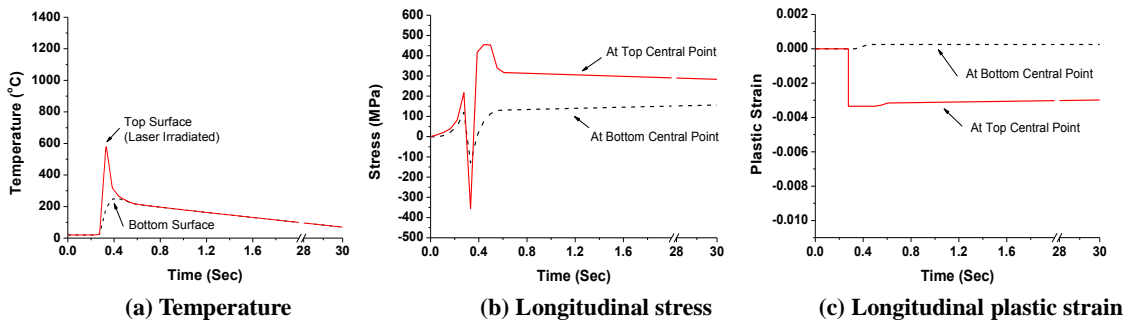


Fig. 6 Temperature, stress and strain histories of the specimen at the center point (P=1000 W, v=5.0 m/min)

(BM: Buckling Mechanism)나 길이가 변화하는 메커니즘(UM: Upsetting Mechanism)이 발생할 수 있다고 보고되어 있다[7, 8].

3. 공정변수 영향분석 및 고찰

3.1 출력 및 이송속도에 따른 영향분석

앞 장에서 살펴본 바와 같이 레이저 성형은 열응력에 의한 소성변형 메커니즘을 보이기 때문에 열속(heat flux)와 관계된 레이저의 출력과 이송속도가 중요한 공정변수가 된다. 이러한 공정변수의 영향을 고찰하기 위하여 앞 장에서와 동일한 조건에서 레이저 출력을 750W로 변화시킨 경우에 대하여 유한요소 해석을 수행하여 중앙점에서의 온도, 길이방향의 응력 및 소성변형을 변화를 Fig. 5에 도시하였다. 레이저 출력이 750W인 경우에 최대온도 및 두께방향의 온도구배가 각각 800°C와 400°C로 1000W 출력과 비교하여 낮은 온도구배를 보인다. 이에 따라 길이방향의 응력과 소성변형률도 상대적으로 감소하여 최종적으로 0.72°의 굽힘 변형이 발생하였다.

레이저 출력을 1000W로 고정하고 이송속도를

2.0m/min에서 5.0m/min으로 증가시킨 경우의 결과는 Fig. 6과 같다. 이송속도를 증가시킨 경우에 소재로 유입되는 열속(heat flux)의 시간이 짧기 때문에 최대온도 및 온도구배가 감소하며, 이에 따른 시편의 굽힘각이 0.22°로 작게 나타났다. 이러한 결과를 토대로 레이저의 출력이 증가하고, 이송속도가 감소할수록 시편의 굽힘각이 증가할 것임을 예측할 수 있다.

3.2 선 에너지에 따른 변형특성 분석

앞 절의 결과를 통해 DP980 판재의 레이저 성형을 통해 원하는 굽힘각을 얻기 위해서는 적절한 레이저의 출력 및 이송속도를 결정하여야 한다. 그러나 출력과 이송속도 두 가지 변수의 조합을 동시에 고려하기에는 어려운 점이 많기 때문에 본 논문에서는 레이저 출력을 이송속도로 나눈 선 에너지(line energy)의 개념[2]을 도입하여, DP980 판재의 굽힘각과 선 에너지와의 관계를 해석 및 실험적으로 살펴보았다.

750W 및 1000W의 레이저 출력을 기준으로, 이송속도의 범위를 1.0m/min에서 5.0m/min로 달리하여 Table 1에 기술한 선 에너지 범위에서 해석 및

Table 1 Bending angles obtained from experiments and simulations with various line energies

Laser power (W)	Scanning speed (m/min)	Line energy (J/mm)	Bending angle (°)	
			Experiment	Simulation
750	1.0	45.0	Melt	Melt (1680°C)
750	1.5	30.0	1.2°, 1.3°, 1.2°	1.11°
750	2.0	22.5	0.7°, 0.6°, 0.7°	0.72°
750	5.0	9.0	No deformation	0.00°
1000	1.0	60.0	Melt	Melt (1850°C)
1000	2.0	30.0	1.2°, 1.3°, 1.2°	1.14°
1000	5.0	12.0	0.2°, 0.2°, 0.2°	0.22°
1000	10.0	6.0	No deformation	0.00°

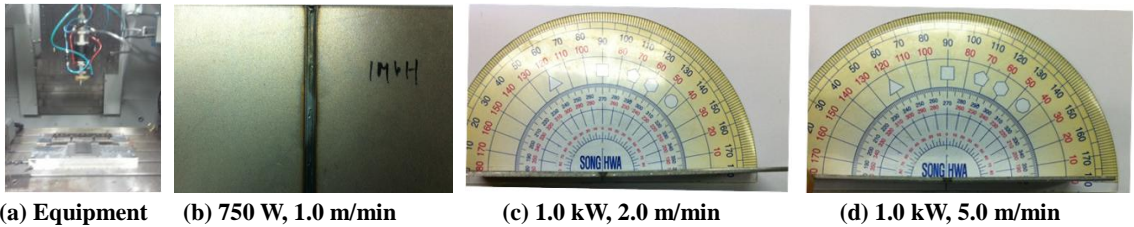


Fig. 7 Experimental results with various laser powers and scanning speeds

실험을 수행하였다. 레이저 성형 실험은 Fig. 7(a) 사진과 같은, 최대 3000W 출력을 갖는 IPG 사의 Fiber 레이저를 발진장치로 갖는 레이저 용접장치를 이용하였으며, 해석조건과 동일하게 시편은 고정상태에서 레이저 헤드가 이동하도록 하였다. 각 조건에서의 시편의 변형형상과 굽힘각을 Fig. 7과 Table 1에 도시하였다. 실험 및 해석결과를 살펴보면 이송속도가 낮거나, 출력이 높은 경우에 시편의 용융이 발생하였으며, 반대로 이송속도가 높거나, 출력이 낮은 경우에는 시편의 온도구배에 따른 열응력이 소성변형을 일으키지 못하여 변형이 발생하지 않는 결과를 보인다.

선 에너지에 따른 DP980 판재의 변형결과를 고찰하기 위해 Fig. 8에 선 에너지 변화에 따른 변화를 도시하였다. 이를 자세하게 살펴보면 레이저 출력을 이송속도로 나눈 선 에너지의 단일변수로 시편의 변형영역이 구분됨을 확인할 수 있다. 우선 DP980 시편의 굽힘 변형을 유발할 수 있는 약 10J/mm의 에너지 임계값(threshold energy)이 존재하여, 이보다 작은 선 에너지에 대해서는 시편의 변형이 발생하지 않았으며, 약 35~40J/mm 이상의 높은 선 에너지가 시편에 부가되는 경우에는 시편의 용융이 발생하여 레이저 성형공정 적용이 불가능한 결과를 보인다. 그리고 두 영역 사이, 즉 시편의 굽힘 변형이 발생하는 영역에서는 실험 및 해석결과 모두 선 에너지 변화에 따라 굽

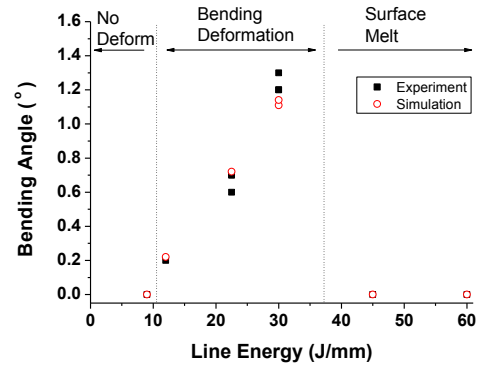


Fig. 8 Relationship between bending angle and line energy in DP980

힘각이 거의 선형적으로 비례하여 증가하는 양상을 보이며 1회 조사 시 최대 약 1.2°의 굽힘 변형을 얻을 수 있었다. 이러한 결과를 통하여 굽힘 변형이 발생하는 영역에서 원하는 굽힘각을 얻기 위한 선 에너지 값을 유추할 수 있으며, 이를 토대로 DP980 판재의 레이저 성형을 위한 적절한 출력과 이송속도를 결정할 수 있다고 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 DP980 강판의 레이저 성형 공정 기술 개발을 목적으로 레이저 굽힘 변형에 대한

유한요소해석 및 실험을 수행하여 레이저 출력, 이송속도 등 공정변수에 따른 변형 메커니즘을 분석하고, 굽힘 변형이 발생하는 선 에너지 영역을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) DP980 강판은 레이저 빔에 의해 가열된 부분이 팽창할 때 주변부의 구속으로 소성변형이 발생하고, 냉각 시 열팽창 부위가 수축하면서 레이저 조사방향으로 변형하는 TGM이 발생하게 된다.

(2) 시편의 굽힘변형은 판재에 전달되는 에너지량과 관계되며, 레이저 출력을 증가시키거나 빔이 이송속도를 작게할수록 변형량이 증가하는 결과를 얻었다.

(3) DP980 시편의 경우 시편의 변형에 필요한 약 10J/mm의 선 에너지 임계값(threshold energy)이 존재하여, 약 35~40J/mm 이상의 높은 선 에너지에서는 용융이 발생하였다.

(4) 굽힘 변형이 발생하는 선 에너지 영역에서는 판재의 굽힘량이 선 에너지에 거의 선형적으로 비례하여 증가하였으며 1회 조사 시 최대 약 1.2°의 굽힘각을 보였다.

후 기

본 논문은 지식경제부 산업원천기술개발사업(과제번호: 10040078)의 지원으로 수행된 연구결과이며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] J. Magee, J. Sidhu, R. L. Cooke, 2000, A Prototype Laser Forming System, *Opt. Laser Eng.*, Vol. 34, No. 4-6, pp. 339~353.
- [2] J. Kim, S. J. Na, 2005, Feedback Control for 2D Free Curve Laser Forming, *Optics and Laser Technol.*, Vol. 37, No. 2, pp. 139~146.
- [3] PROFORM, 2010, PROFORM publishable activity report, <http://www.proform-ip.org>.
- [4] H. B. Shim, D. W. Kim, 2009, A Study on the Shape Correction of Stamped Parts by the Irradiation of Laser, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 18, No. 7, pp. 519~530
- [5] D. J. Majumdar, A. K. Nath, I. Manna, 2004, Studies on Laser Bending of Stainless Steel, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 385, No. 1-2, pp.113~122.
- [6] J. Cheng, Y. L. Yao, 2004, Process Design of Laser Forming for Three-Dimensional Thin Plates, *ASME J. Manuf. Sci. Eng.*, Vol. 126, No. 5, pp. 217~225.
- [7] F. Vollertsen, 1994, An Analytical Model for Laser Bending, *Lasers Eng.*, Vol. 2, No. 1, pp. 261~276.
- [8] A. K. Kyrsanidi, T. B. Kermanidis, S. G. Pantelakis, 2000, An Analytical Model for the Prediction of Distortions caused by the Laser Forming Process, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 104, No. 1-2, pp. 94~102.
- [9] L. Zhang, P. Michaleris, 2004, Investigation of Lagrangian and Eulerian Finite Element Methods for Modeling the Laser Forming Process, *Finite Elem. Anal. Des.*, Vol. 40, No. 4, pp. 383~405.
- [10] W. Shichun, J. Zhong, 2002, FEM Simulation of the Deformation Field during the Laser Forming of Sheet Metal, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 121, No.2-3, pp. 269~272.
- [11] H. S. Hsieh, J. Lin, 2004, Thermal-Mechanical Analysis on the Transient Deformation During Pulsed Laser Forming, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 44, No. 2-3, pp. 191~199.
- [12] H. Shen, J. Hu, Z. Yao, 2010, Analysis and Control of Edge Effect in Laser Bending, *Opt. Laser Eng.*, Vol. 48, No. 3, pp. 305~315.