

수중 레이저 굽힘시 SUS430/Cu/SUS430 복합판재 성형 특성 분석

박성환¹ · 오일영¹ · 한상욱¹ · 우영윤¹ · 황태우¹ · S. M. H. Seyedkashi² · 문영훈[#]

Parameter Characterization for Underwater Laser forming of SUS430/Cu/SUS430 Laminated Composite Layer

S. H. Park, I. Y. Oh, S. W. Han, Y. Y. Woo, T. W. Hwang, S. M. H. Seyedkashi, Y. H. Moon

(Received October 11, 2016 / Revised January 12, 2017 / Accepted January 16, 2017)

Abstract

Laser forming is an advanced process in sheet metal forming in which thermal stress originated from the laser heat source is used to shape the metal sheet. However, substantial waiting time is normally necessary for the workpiece to cool down between consecutive scans so that a steep temperature gradient can be reestablished in the next scan. In order to solve this drawback, laser bending characteristics are experimentally implemented in underwater condition. Laser forming effects under various conditions, including different laser power, scanning velocity, beam diameter, number of passes and material, are investigated. The results show that the underwater laser forming facilitates deliberate forming. The bending angle per respective laser scan is decreased with increasing the number of passes and scanning velocity.

Key Words : Laser Bending, Laminated Composite Layer, Underwater Laser Forming

1. 서론

레이저 굽힘(laser bending)은 레이저 빔이 판재 표면에 주사될 때 두께 방향으로 불균일한 온도구배에 의해 발생하는 열 응력을 이용하여 판재를 성형하는 기술이다[1,2]. 열 응력은 레이저 주사 시에 주사된 부분이 열 영향으로 국부적으로 굽힘이 발생하고, 이 열 영향부가 냉각되면서 열적 수축을 일으켜 굽힘 각도의 증가로 이어진다.

이 기술은 다른 성형기술과 비교해 보았을 때, 많은 성형 장비를 요하지 않고 직선형이나 곡선형을 쉽게 성형할 수 있으며, 치수에 제한 없이 성형할 수 있는 장점을 가지고 있다[3]. 또한, 고강도 소재인 티타늄 합금이나 니켈 합금, 세라믹도 성형할 수 있다[4]. 이러한 이점으로 선박, 자동차, 반도체, 우

주항공과 같은 제조분야에 다양하게 적용가능한 기술이다[5~7].

금속 단일판재는 기계적 물성 및 성형성과 같은 물리적 성질을 향상시키는데 한계가 있다. 따라서 이러한 금속 단일판재의 한계를 극복하기 위하여 이종물성 이상의 성질을 가지는 다층 복합판재의 연구가 진행되고 있다. 복합판재를 구성하고 있는 클래드층(clad layer) 및 중심층(core layer)재료의 적절한 선택은 다기능 특성을 갖는 제품을 제조하는데 있어 매우 중요한 부분을 차지하고 있다[8~11]. SUS430/Cu/SUS430 복합판재는 SUS430소재에 의해 높은 내식성을 가지고 있으며, 구리에 의해 높은 전기 전도도를 가지고 있어 전자분야와 반도체 분야에서 많은 응용이 될 수 있는 가능성이 있다.

복합판재의 기계적 특성 차이로 인하여 소성 가

1. 부산대학교 정밀기계공학과

2. The University of Birjand, Department of Mechanical Engineering

#Corresponding Author: School of Mechanical Engineering, Pusan National University, E-mail: yhmoon@pusan.ac.kr

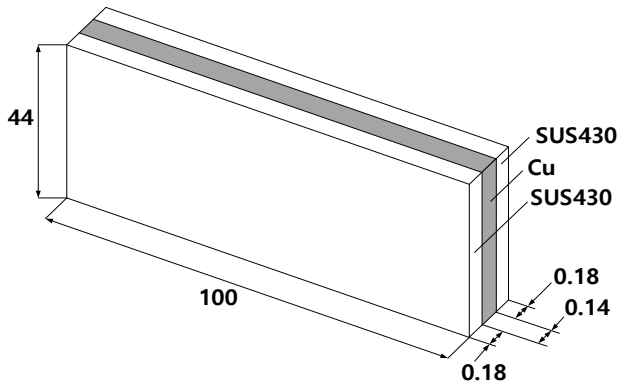


Fig. 1 Schematic drawing of SUS430/Cu/SUS430 laminated composite

공이 진행됨에 따라 층상을 구성하는 소재에 국부적으로 너무 과한 에너지를 가하면 소재가 용해되어 성형을 제대로 할 수 없는 문제가 발생한다[11]. 따라서 이런 문제를 해결하기 위하여 적절한 제조 공정 변수를 확립하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 물속에 침지시킨 수중 레이저 굽힘 공정을 수행하였다. 레이저 굽힘에서 사용되는 소재와 공정시의 레이저 주사횟수, 빔의 직경, 주사 속도, 레이저 출력에 변수가 판재에 미치는 영향에 대해서 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 소재

연구에 사용된 소재는 SUS430과 99.9% 순수한 구리인 C1100을 사용하였다. 수중 레이저 성형공정의 특성을 비교하기 위해서 시편은 SUS430, 구리 단일 판재와 SUS430/Cu/SUS430로 구성된 복합판재의 레이저 성형특성을 비교하기 위해서 두 가지를 이용하였다. 실험에 사용된 시편은 직사각형 형상으로 100mm × 44mm × 0.5mm 의 크기로 진행하였다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 복합판재에서 SUS430/Cu/SUS430의 각각의 두께는 0.18mm, 0.14mm, 0.18mm로 구성하였다. 두 소재의 기계적, 물리적 특성은 Table 1에 나타내었다.

2.2 실험장비 및 방법

Fig. 2는 실험에 사용된 장비의 개략도이다. 파이버 레이저출력장치는 IPG 사의 YLG-200 기종으로 최대 출력은 200W, 파장 1.07 μ m의 파장을 가지고 있으며 0.08mm의 초점크기를 가지는 레이저 장비로 실험을

Table 1 Material properties

Parameter	SUS430	C11000
Density (kg/m ³)	7750	8900
Ultimate tensile strength (MPa)	515	250
Yield strength (MPa)	345	195
Modulus of Elasticity (GPa)	200	117
Thermal conductivity (W/m.K)@500°C	26.3	350
Melting Point, °C	1425	1065
Electrical Resistivity (n Ω .m)@20°C	600	17.1

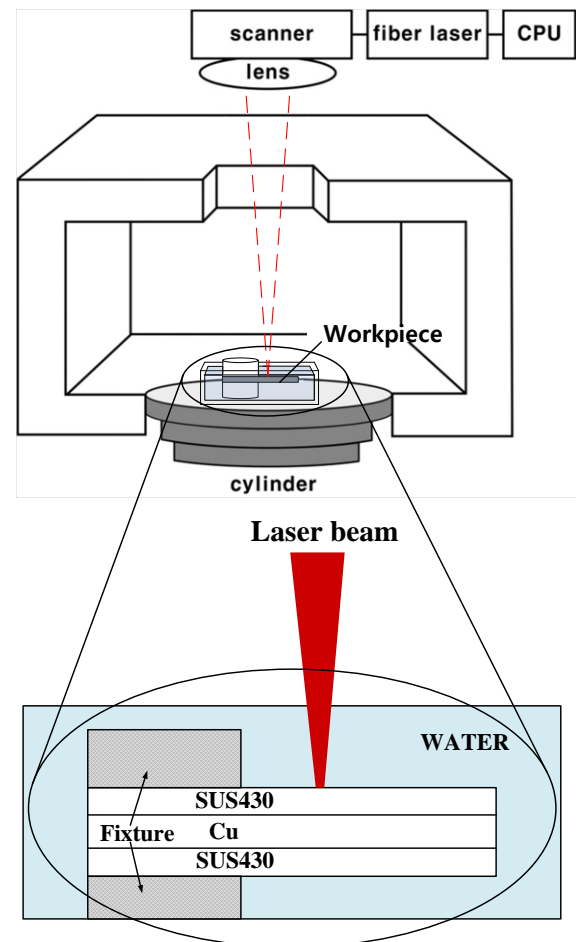


Fig. 2 Schematic drawing of workpiece under water

진행하였다. 레이저 빔의 직경을 조절하기 위해서 주사 높이를 조절하여 실험을 진행하였다. 스캐너 (hurrySCAN 20, SCANLAB, Germany) 를 통해서 레이

Table 2 Summary of process parameters investigated in laser bending of SUS430/Cu/SUS430 laminate

Parameter	Value
Scanning velocity, v (mm/s)	3.66, 7.32, 10.98
Beam diameter, D (mm)	0.5, 0.7, 0.9
Laser power, P (W)	160, 180, 200
Number of passes, N	1~100

저의 주사 경로를 조정하였다.

시편은 Fig. 2와 같이 한 쪽 끝을 고정하고 다른 한 쪽 끝은 자유롭게 위치시킨 후 시편의 중앙에서 단축방향으로 레이저를 주사하였으며, 시편은 물에 1mm 깊이로 침지시킨 후 실험을 진행하였다. 시편에 레이저가 반사를 저감하고 효율적으로 주사되도록 표면에 그라파이트 코팅 후 실험을 진행하였다. 실험에서는 소재와 Table. 2에 나타난 것과 같이 레이저 빔의 직경, 주사 속도, 레이저 출력을 변수로 하였다. 레이저 주사로 인한 시편의 굽힘 각도의 측정은 레이저 주사 위치를 기준으로 각도기를 이용하였으며, 일정 횟수가 주사된 한 굽힘 시편에 대해 각도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3 에 대기 분위기와 수중 분위기에서 주사 횟수에 대한 복합판재의 굽힘 각도의 효과를 나타내었다. 대기 분위기에서 200W의 출력, 0.5mm의 레이저 직경과 3.66mm/s의 주사속도로 40회 주사 시, 그 굽힘의 최대 각도는 64° 였다. 처음 1회 주사하는 동안 굽힘 각도는 3° 증가 하였으나, 40회 주사 시의 증가 폭은 1° 였다. 40회 레이저를 주사하였을 때, 국부적인 열 에너지로 인해서 소재에 용융이 발생하였다. 대기 분위기에서 레이저 굽힘 시 굽힘 각도는 선형으로 증가하지 않았고, 그 증가 폭도 점진적으로 감소하였다. 수중 분위기에서 200W의 출력, 0.5mm의 레이저 직경과 3.66mm/s의 주사속도로 100회 주사 시, 최대 굽힘 각도는 32.5° 였다. 처음 5회 주사하는 동안 굽힘 각도는 3.7° 증가 하였으며, 95회에서 5회 더 주사하는 동안 굽힘 각도는 1° 증가 하였다. 수중 분위기에서 레이저 굽힘 시에도 굽힘

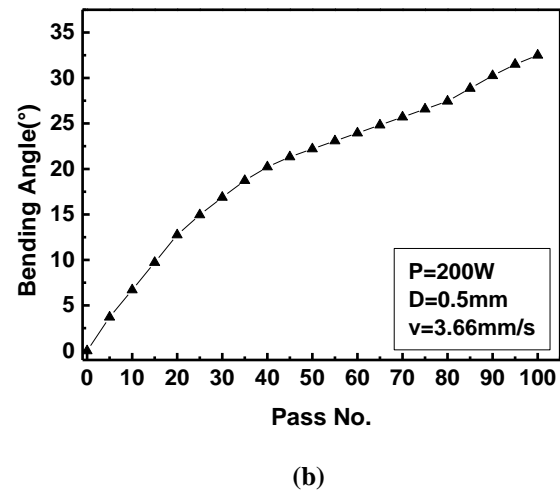
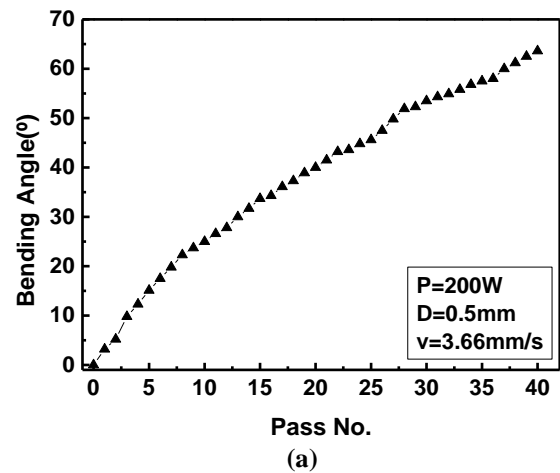


Fig. 3 Comparison of effect of ambient condition on bending angle; (a) air, (b) water

각도는 선형으로 증가하지 않았으며, 그 증가 폭도 점진적으로 감소하였다. 대기 분위기에서는 레이저 굽힘은 큰 각도를 성형할 때 효율적이지만, 성형이 급격하게 이루어지고 국부적인 열 에너지로 인해서 소재에 용융과 주사 부분이 과열 또는 증발되는 문제점을 가지고 있다. 반면, 수중 레이저 굽힘을 실시할 때는 점진적인 성형이 가능하며, 용융이 적고 목표형상을 정밀하게 성형할 수 있는 장점이 있다.

레이저 굽힘에 의한 굽힘 각도의 증가 폭의 변동은 여러 가지 이유 때문에 발생할 수 있다. Cary[12]에 의해 보고된 바에 의하면 주사하는 동안 시편 표면의 그라파이트가 흡수됨으로 인한 에너지 흡수 저하가 이러한 변동을 만들어내는 것도 이 이유 중 하나이다. 다른 이유로는 레이저 빔이 소재에 주사되면서 굽힘이 발생해야 할 에너지가 소재를 녹이

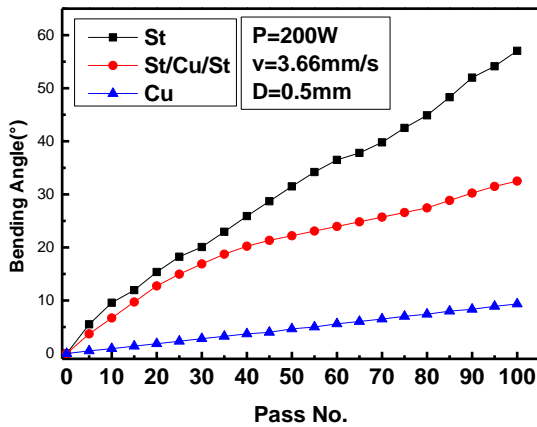
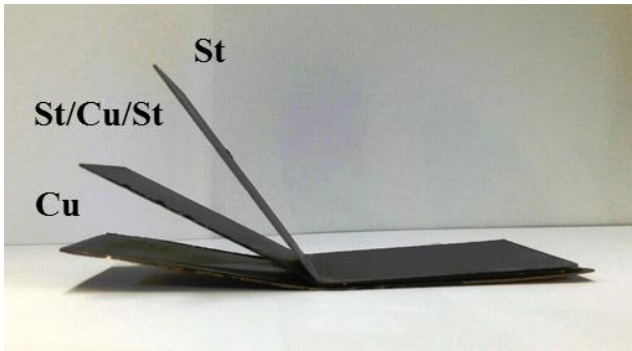


Fig. 4 Comparison of St/Cu/St laminated composite on bending angle

는데 이용되어 발생한다. 또한, 상층부의 SUS430의 용융으로 인하여 레이저가 두 번째 층에 있는 구리에 직접적으로 주사되는데, 구리는 레이저 에너지를 잘 흡수하여 국부적 열 에너지로 인해 성형되어야 하는 레이저 굽힘에서는 효과가 떨어진다. 그래서 복합판재의 레이저 성형을 실시할 때는 상부의 SUS430층이 국부적으로 용해되지 않도록 레이저 출력을 잘 조절하는 것이 중요하다.

Fig. 4 에 수증 분위기에서 단일판재와 복합판재의 레이저 성형에 따른 굽힘 각도의 효과를 비교하였다. 200W의 출력, 3.66mm/s의 주사속도, 0.5mm의 레이저 직경으로 실험을 진행하였을 때, 100회 주사하는 동안 구리 단일 판재의 굽힘은 10° 이하로 성형되었고 단일 스테인리스 강 판재의 굽힘은 50° 이상까지 성형되었다. 구리 시편의 굽힘은 스테인리스 강의 시편의 굽힘의 약 16% 정도의 효과를 보이는데 반해, 3가지 소재를 겹친 복합판재의 경우 56%의 효과를 보였다.

얇은 구리 판을 중간에 위치시킨 복합판재는 단일 스테인리스 강 판재의 굽힘과 비교하였을 때 굽

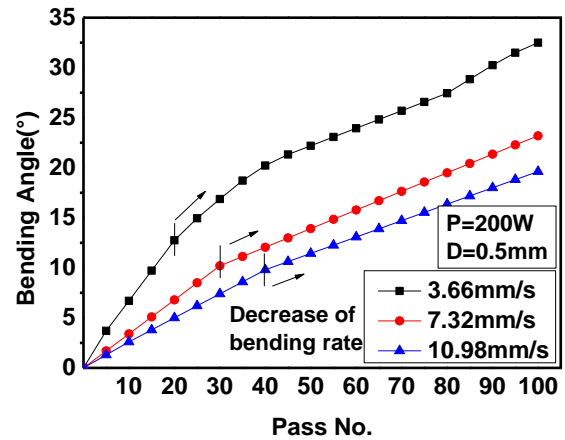


Fig. 5 Effect of scanning velocity on bending angle

힘 각도가 감소함을 확인하였다. 이런 현상이 발생하는 이유는 복합판재가 레이저 주사로 열에 영향을 받을 때, 구리 층에서 그 온도가 급격하게 감소하기 때문이다. 구리는 스테인리스 강에 비해서 열전도도가 높아, 중간 층에 위치한 구리에 열이 가해졌을 때 구리 전체에 균일하게 열이 전파되어 온도가 급격하게 감소된 것으로 생각된다. 이러한 현상으로 구리와 하단부의 SUS430은 열 응력이 많이 발생하지 않았으며, 이로 인해 열 영향에 의한 압축응력이 많이 발생하지 않아 굽힘이 덜 발생하였다. 복합판재는 물리적, 기계적 성질이 달라 목적형상을 성형하기 위해서는 적절한 설계가 필요하다.

주사속도는 굽힘 각도에서 또 다른 중요한 변수이다. 주사속도는 레이저 주사 시 열이 판재에 충분히 전달할 수 있는지에 대한 변수이다. Fig. 5는 수증 분위기에서 주사속도의 차이에 따른 복합판재의 굽힘 각도의 효과로 높은 주사속도는 소성가공에 필요한 충분한 에너지를 효과적으로 전달하지 못해 소재를 많이 굽힐 수 없었다. 3.66mm/s의 속도에 비해 10.98mm/s의 주사속도 일 때는 굽힘 효율은 40% 감소하였다. 3.66mm/s의 주사 속도일 때는 4번의 레이저 주사 이후 굽힘의 증가 폭이 감소하였으나, 7.32mm/s의 경우 6번, 10.98mm/s의 주사속도일 때는 8번의 레이저 주사 이후 굽힘의 증가 폭이 각각 감소하였다. 굽힘의 증가 폭의 감소의 이유는 레이저의 수직 방향에서의 주사로 인한 효과와 그라파이트 코팅의 흡수 때문이다. 이러한 효과를 보아 그라파이트 코팅의 흡수에 의한 감소도 굽힘에 중요한 요소로 생각된다.

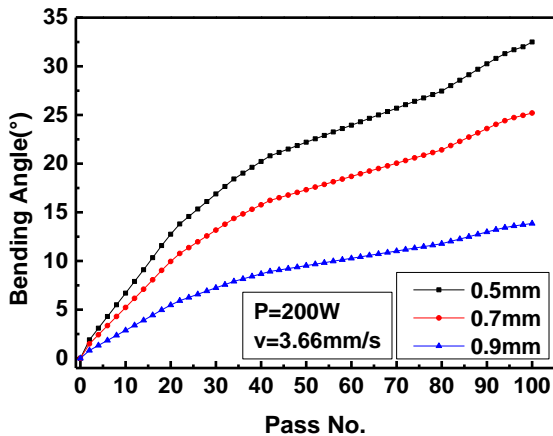


Fig. 6 Effect of beam diameter on bending angle

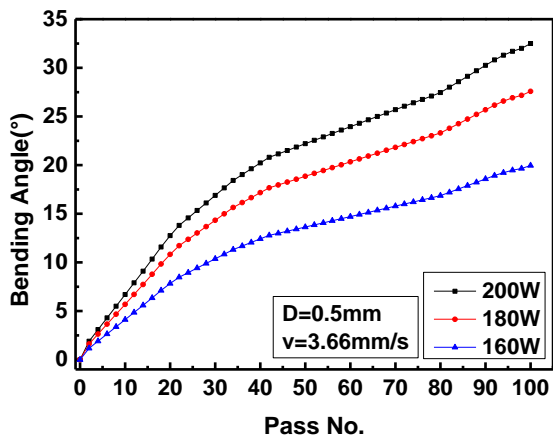


Fig. 7 Effect of laser power on bending angle

온도 구배 메커니즘은 레이저 성형에서 가장 일반적으로 발생하는 메커니즘으로 레이저 빔의 직경을 소재의 두께에 따라 알맞게 사용하여야 한다. 또한, 굽힘은 소재의 표면이 소성가공을 하기에 충분히 연해졌을 때 변형을 시작한다. 그래서 소재가 용해되지 않도록 출력조절과 레이저 빔의 직경조절이 고려되어야 한다. 이번 실험에서는 시편에 0.5mm, 0.7mm, 0.9mm의 직경을 가진 레이저 빔으로 실험을 진행하였다. Fig. 6은 레이저 직경에 따른 복합판재의 굽힘 각도 효과를 나타낸 그래프이다. 큰 직경을 가진 레이저를 주사하였을 시 적은 굽힘 효과를 보였다. 0.5mm에서 0.9mm로 직경의 크기를 증가시켜 100번 주사하였을 때, 레이저 빔에 대한 굽힘 효과는 58% 감소하였다. 국부적으로 레이저가 주사될수록 더 큰 굽힘 각도를 가졌다. Fig. 7은 레이저 출력에 따른 복합판재의 굽힘 효과를 나타낸 그래프이다. 레이저의 출력은 160W, 180W, 200W로 실험을

진행하였다. 레이저 출력이 증가할수록 굽힘 효과는 증가하였다. 레이저 출력이 25% 증가시켜 100번 주사하였을 때 굽힘 효과는 62% 증가하였다. 레이저 출력을 증가시켰을 때 굽힘 각도가 증가되었다. 하지만 용융되지 않도록 소재와 두께에 따라 알맞은 레이저 출력과 레이저 빔의 직경을 설정하여야 한다. Fig. 6과 Fig. 7을 통해 두 조건은 레이저 굽힘에서 비슷한 경향을 보였다. 레이저 빔 직경과 레이저 파워를 조절하여 시편에 주사되는 열 에너지를 조절할 수 있음을 확인하였다. 시편에 레이저가 직접 주사되어 온도가 높은 판재의 상면은 하면에 상대적으로 큰 열팽창을 일으키게 된다. 레이저 주사 후, 상면의 급속 가열부가 주변으로의 열손실로 인해 냉각이 되면 하면에 비해 상대적으로 큰 열수축이 일어나면서 압축소성변형이 수반되게 된다. 즉, 레이저 가열부가 냉각함에 따라 열수축이 일어나고 이때 발생하는 수축응력이 판재를 열원(heat source)이 있는 방향으로 굽힘변형을 일으킨다. 굽힘각도가 변화함에 따라 레이저열원에서 전달되는 열과 가열부의 냉각효율이 점진적으로 변하게 되므로 레이저 주사수에 따라 선형적으로 증가하지는 않는다. 80 패스 이후에 굽힘각도의 기울기가 증가하는 경향을 보이는 것은 굽힘각도가 증가함에 따른 판재 상하면의 냉각효율 차이가 증가함에 기인하는 것으로 판단된다. 레이저 주사로 인한 굽힘변형이 일어나면 평면형상에 비해 굽힘상면에서의 냉각효율은 낮아지는 반면 하면에서의 냉각효율은 증가하게 되므로 이로 인해 수축응력이 증가하게 된다.

다양한 변수로 레이저 굽힘을 실시하였다. 수중 분위기 또한 굽힘 각도 증가율의 선형 제어가 어려울 것으로 생각되지만, 그 폭이 대기 분위기에 비해 매우 작으므로 대기 분위기에서의 제어보다는 용이할 것으로 판단된다. 또한, 대기 중에서 많은 횡수의 레이저를 주사 시 시편의 주사 부분이 과열 또는 증발되는 문제가 발생하므로, 수중 분위기 주사 시 이 문제를 방지할 수 있다. 그리고 레이저 굽힘 공정 시 냉각에 필요한 대기 시간이 필요한 반면 수중 분위기에서는 대기 시간이 불필요하므로 공정 시간에도 큰 차이가 없었다.

4. 결론

SUS430/Cu/SUS430 복합판재를 이용한 수중 레이

저 굽힘 공정에서 성형 특성을 분석하였다.

대기 분위기에서 40 회 주사 시 64° 의 굽힘 각도를 보였으나, 국부적 열 에너지로 인해 소재에 용융이 발생하였다. 수중 분위기에서는 100 회 주사 시 32.5° 의 굽힘 각도를 보였지만 소재의 용융이 발생하지 않았고 패스별 굽힘량이 적어서 정밀하게 성형되었다. 수중 조건에서 소재에 따른 레이저 성형성을 비교하였을 때, 구리 시편의 굽힘은 스테인리스 강의 시편의 굽힘의 약 16% 정도의 효과를 보이는데 반해, 복합판재의 경우 56%의 효과를 보였다. 복합판재의 주사횟수에 대한 굽힘 각도 증가는 선형으로 증가하지 않았고, 그 증가 폭도 점진적으로 감소하였다. 다양한 변수로 레이저 굽힘을 실시한 결과 수중 분위기 또한 굽힘각도 증가율의 선형제어가 어려울 것으로 생각지만, 그 폭이 대기 분위기에 비해 매우 작으므로 대기 분위기에서의 제어보다는 용이할 것으로 판단된다. 또한, 대기 중에서 많은 횟수의 레이저를 주사 시 시편의 주사 부분이 과열 또는 증발되는 문제가 발생하지만, 수중 분위기 주사 시에는 이 문제를 방지할 수 있다. 그리고 레이저 굽힘 공정 시 냉각에 필요한 대기 시간이 필요한 반면 수중 분위기에서는 대기 시간이 불필요하므로 공정시간에도 큰 차이가 없었다.

따라서 수중 레이저 굽힘 공정은 대기 중 레이저 굽힘 작업의 마무리 각도 조정에 적용하면 각도 제어의 정밀도를 향상시키는데 유용할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2012R1A5A1048294).

REFERENCES

- [1] 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, pp. 269~272.
- [2] J. Magee, J. Sidhu, R. L. Cooke, 2000, A Prototype Laser Forming System, *Opt. Lasers Eng.*, Vol. 34, No. 4, pp. 339~353.
- [3] M. H. Gollo, S. M. Mahdavian, H. M. Naeini, 2011, Statistical Analysis of Parameter Effects on Bending Angle in Laser Forming Process by Pulsed Nd:YAG Laser, *Opt. Laser Technol.*, Vol. 43, No. 3, pp. 475~482.
- [4] M. Riahi, M. H. Gollo, S. N. A. Kalkhoran, 2015, Study the Effect of Gaussian and Uniform Heat Flux on Laser Forming of Bi-layer Sheets, *Mech. Ind.*, Vol. 16, No. 4, pp. 1~9.
- [5] J. Kim, S. J. Na, 2009, 3D Laser-forming Strategies for Sheet Metal by Geometrical Information, *Opt. Laser Technol.*, Vol. 41, No. 6, pp. 843~852.
- [6] T. Hennige, S. Holzer, F. Vollertsen, M. Geiger, 1997, On the Working Accuracy of Laser Bending, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 71, No. 3, pp. 422~432.
- [7] F. G. Arcella, F. H. Froes, 2000, Producing Titanium Aerospace Components from Powder using Laser Forming, *JOM*, Vol. 52, No. 5, pp. 28~30.
- [8] Y. B. Kim, J. S. Lee, G. A. Lee, S. M. Lee, 2011, An Overview and Prospects for Hybrid Materials, *Trends Met. Mater. Eng.*, Vol. 24, No. 4, pp. 24~30.
- [9] C. H. Lee, K. C. Kim, Y. S. Kim, 2012, Study on the Mechanical Properties and Thermal Conductive Properties of Cu/STS/Cu Clad Metal for LED/semiconductor Package Device Lead Frame, *J. Weld. Joining*, Vol. 30, No. 3, pp. 32~37.
- [10] S. E. Fred, T. Gessmann, J. K. Kim, 2005, *Light Emitting Diodes*, John Wiley & Sons Inc., p. 13.
- [11] D. J. Lee, D. H. Ahn, E. Y. Yoon, S. I. Hong, S. H. Lee, H. S. Kim, 2013, Estimating Interface Bonding Strength in Clad Metals using Digital Image Correlation, *Scr. Mater.*, Vol. 68, No. 11, pp. 893~896.
- [12] C. Carey, W. J. Cantwell, G. Dearden, K. R. Edwards, S. P. Edwardson, J. D. Mullett, C. J. Williams, K. G. Watkins, 2007, Effects of Laser Interaction with Graphite Coating, *Proc. Laser Assisted Net Shape Eng.*, Vol. 5, pp. 673~686.