

◆ 특집 ◆ 직선 · 회전모터 구동 이송 · 회전체 연구 X

Nd:YAG 레이저를 이용한 하스텔로이 박판의 겹치기 이음 용접 특성

Welding Characteristics of Lap-Joint Hastelloy C-276 Sheet Metal Using Nd:YAG Laser

김찬규¹, 정윤교¹, 조영태^{1,✉}

Chan Kyu Kim¹, Yoon Gyo Jung¹, and Young Tae Cho^{1,✉}

¹ 창원대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Changwon National University)
✉ Corresponding author: ytcho@changwon.ac.kr, Tel: +82-55-213-3609

Manuscript received: 2015.6.29. / Revised: 2015.7.7. / Accepted: 2015.7.16.

Hastelloy C-276 composed of Cr, Mo, and Ni is a versatile, corrosion-resistant alloy with numerous industrial applications including its use in nuclear reactors, general chemical plants, and as a superconducting base material. Of especial significance, it can be used as a thin-sheet type whereby lap-joint welding is occasionally necessary. The main welding problems for thin-sheet metals are deformation and burn-through from an excessive heat input. Laser welding can minimize these problems because it has a high energy density and low heat effect on the base material. In this study, the laser-welding characteristics of lap-joint Hastelloy C-276 sheet metal were determined. The criteria of the laser-welding variables were chosen using a heat-conduction analysis, and the optimal welding parameters were selected by experimenting with an Nd:YAG laser.

KEYWORDS: Hastelloy C-276 (하스텔로이 C-276), Sheet weld (박판 용접), Nd:YAG laser (Nd:YAG 레이저), Lap joint (겹치기 이음 용접)

1. 서론

Hastelloy C-276은 내부식성 및 내열성이 우수한 Ni 합금으로써 화학공장에서부터 초전도 선재, 차세대 원자로 등의 다양한 분야에 적용되고 있다.¹ Hastelloy C-276 소재의 용접 시 입열량이 과도한 경우 용접부의 조성이 불균일해지거나 용락 및 기공과 같은 결함이 발생하기 쉽다.^{2,3} 일반적인 아크 용접에서 HAZ(Heat Affected Zone)부는 균열을 발생

시키는 요인이 되므로 이를 최소화하는 것이 용접부의 강도를 증가시키는 방법이 된다.⁴

레이저 용접은 낮은 입열량, 고밀도 에너지, 높은 정밀도를 가지는 기술로 우주항공 및 자동차산업에 널리 쓰이고 있는 기술이다.⁵ 매우 작은 spot size에서 방출되는 고밀도의 에너지는 좁은 HAZ부 및 모재의 최소 변형을 발생시키는 이점이 있다.⁶ 또한 high penetration을 가지는 레이저는 두께 1 mm 이하의 모재에 적용 가능하기 때문에 박판의

lap joint 용접 시 그 효과가 더 커질 수 있다.^{7,8}

레이저를 이용하여 박판을 용접할 때에는 입열량에 따라 모재의 열변형이 크게 차이가 나며 겹치기 이음 용접 시에는 열변형으로 인해 박판 사이의 gap이 변화하게 되어 결국 용접 결함으로 이어질 수 있다.^{9,10}

본 연구의 목적은 Hastelloy C-276 박판 소재의 겹치기 이음 용접 시 적절한 용접부 강도를 얻을 수 있도록 레이저 용접 공정 조건을 최적화 하는 것이다. 이를 위해 먼저 열전도 해석을 수행하여 단면의 온도 분포를 파악하고 Hastelloy C-276 박판의 겹치기 이음 용접 변수의 범위를 선정하였다. 해석을 통해 선정된 용접 변수를 기반으로 하여 실제 Nd:YAG 레이저를 이용한 박판 겹치기 이음 용접을 수행 한 후 인장 시험을 통해 최적의 용접 조건을 선정하였다..

2. 겹치기 이음 용접 공정

2.1 시뮬레이션

본 연구에서 고려한 박판의 겹치기 이음 레이저 용접 공정의 개략도를 Fig. 1에서 보여주고 있다.

실험에 앞서 FEM 방식의 해석프로그램인 COMSOL을 이용하여 박판의 열전도 해석을 수행하였다. 박판의 경우 레이저 기호 용접이 이루어지지 않고 레이저가 닿는 면에서 단순 열전도만 이루어 진다고 볼 수 있으므로 가우시안 형태의 열입력을 고려하여 열전도 해석만 수행하여도 적절한 해석 결과를 얻을 수 있다. 열전도 해석에 사용된 식은 다음과 같다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (1)$$

여기서 C_p 는 비열, ρ 는 밀도, k 는 열전도도이다.

해석에 사용된 물성치는 Table 1에 나타내었다. 가우시안 분포의 열입력이 상면에 가해지고 매우 짧은 시간에 용접이 이루어지므로 열유동은 고려하지 않았으며 Nd:YAG laser의 파장인 $1.06 \mu\text{m}$ 의 빛에 대한 Ni 합금의 에너지 흡수율은 0.7로 하였다.

겹치기 이음에서 상판과 하판의 두께는 0.05 mm로 하였고 두 박판 사이의 gap은 없는 것으로 하여 해석하였다. 초점에서의 spot size는 직경 80 μm 로 하였고 주파수는 50 kHz로 고정하였으며 용접속도는 3 mm/s, 펄스폭은 5 μs 로 한 후 레이저의 파워를 변화시켜 가면서 해석을 수행하여 Fig. 2와

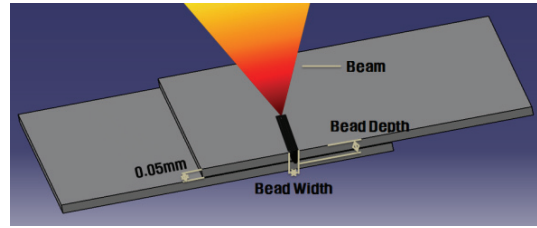


Fig. 1 Configuration of lap joint welded sheet

Table 1 Properties of Hastelloy C-276 sheet

Density (kg/m ³)	Thermal conductivity (W/m-k)	Specific heat capacity (J/kg-k)	Melting point (K)
8890	15.0	427	1596-1649
Ultimate strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation at beak (%)	Modulus (GPa)
792.2	355.8	56	195

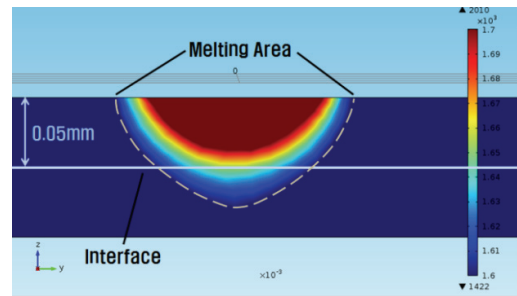


Fig. 2 Temperature distribution of 9 W laser power

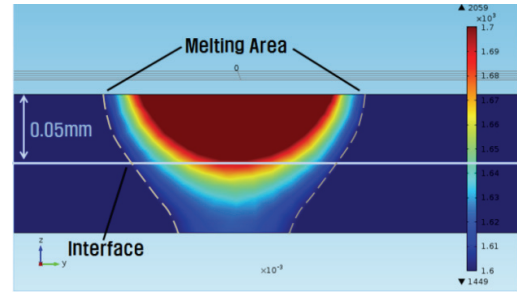


Fig. 3 Temperature distribution of 12 W laser power

Fig. 3에 각각 결과를 나타내었다.

Hastelloy C-276의 녹는 점인 1596 K에 대한 line을 점선으로 나타내었다. 9 W의 레이저 파워를 사용한 경우 박판의 용융이 하판의 중간 부분까지 형성되어 원활한 용접 수행이 가능할 것이라 판단된다. 반면, 12 W의 경우 용융 영역이 하판을 관통

하였음을 확인할 수 있는데 이 조건에서는 용융풀의 표면 에너지와 중력의 영향으로 용락이 발생할 가능성이 있음을 알 수 있다.

이와 같은 COMSOL을 이용한 열전도 해석을 통해 Hastelloy C-276박판의 레이저 용접 시 온도분포경향을 파악하였고 해석결과를 토대로 실제 용접 실험의 범위를 정하였다.

2.2 실험 방법

두 박판 사이의 gap을 최소화하는 간단한 방법으로 Fig. 4와 같이 모재를 tape를 사용하여 고정하였다. 레이저 빔이 조사되는 부분을 기준으로 양 옆 2.5 mm 위치에 두 박판이 고정될 수 있도록 taping을 하여 변형에 의한 영향을 최소화 하였다.

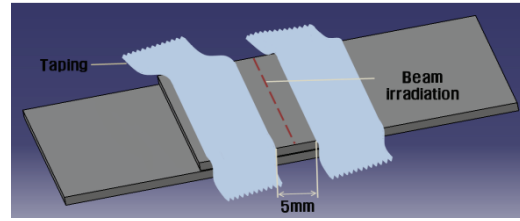


Fig. 4 Lap joint of sheet

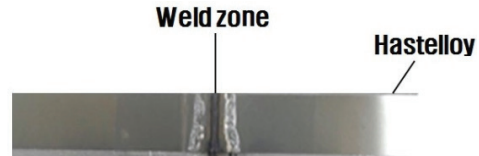


Fig. 5 Result of laser welded sheet

3. 실험 조건 및 결과

용접 조건은 장비의 사양을 고려하여 파워 9.4 W, 12 W, 속도 2 ~ 5 mm/s, 펄스폭 1, 5, 10 μs의 범위에서 진행하였으며 주파수는 50 kHz로 고정하고 보호가스는 사용하지 않았다. 실험 결과 Fig. 5와 같은 용접 결과를 얻을 수 있었다.

박판의 열전도 해석을 통해 구한 조건을 바탕으로 Table 2와 같은 18가지의 겹치기 이음 용접 조건을 선정하였다. 실험 결과 상으로 레이저 파워를 9 W이하로 더 낮추거나 속도를 5 mm/s 이상으로 증가 시키거나 하여 단위 시간당 모재로 전달되는 입열량을 더 줄이게 되면 모재가 녹지 않아 용접이 이루어지지 않았다. 또한 레이저 파워를 12 W 이상으로 하게 되면 입열이 과다하여 오히려 cutting이 일어났다. 따라서 용접이 이루어질 수 있는 최소한의 조건에서 입열이 과다하여 용접이 되지 않는 조건 이하까지로 레이저 변수를 조절하였다. 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 각 조건당 반복 실험을 3번씩 하여 총 54개의 인장시편을 제작한 후 인장강도를 측정하였다.

Figs. 6와 7은 Stress - Strain 그래프로 각각의 속도, 펄스폭 조건에서 인장강도가 가장 높게 측정된 결과만을 표시하였다. 레이저 파워가 9.4 W일 경우 대략 90 MPa까지 유사한 거동을 보이다가 용접 속도가 낮은 경우 가장 먼저 파단이 일어 났으며 용접 속도가 4 mm/s일 때 가장 높은 인장강도를 보였다. 이러한 결과를 보면 박판 용접의 경우 미세한 입열량의 차이에도 용접부는 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. 레이저 파워가 12 W인 경우 속도를 5

Table 2 Experimental conditions

Number	Power (W)	Speed (mm/s)	Pulse duration(μs)
1	9.4	2	1
2	9.4	2	5
3	9.4	2	10
4	9.4	3	1
5	9.4	3	5
6	9.4	3	10
7	9.4	4	1
8	9.4	4	5
9	9.4	4	10
10	12	3	1
11	12	3	5
12	12	3	10
13	12	4	1
14	12	4	5
15	12	4	10
16	12	5	1
17	12	5	5
18	12	5	10

mm/s로 하였을 때 가장 높은 인장 강도를 보였으나 속도 조건의 변화에 따른 차이는 크지 않았다. 이 조건에서는 높은 입열량에 의해 상판의 용락 및 하판의 과도한 용융으로 인해 9.4 W의 레이저 파워를 사용하여 용접하는 경우 보다 오히려 강도가 낮게 나타나는 것으로 추측된다. Fig. 8에는 펄스폭의 변화에 따른 인장 강도의 변화를 도시하였다. 펄스폭이 커질 수록 모재에 가해지는 입열량이 증가한다고 볼 수 있는데 박판 용접의 경우 오히려 입열량을 크게 하는 것이 인장 강도를 저하시키는 요인이 될 수 있다는 것을 알 수 있다.

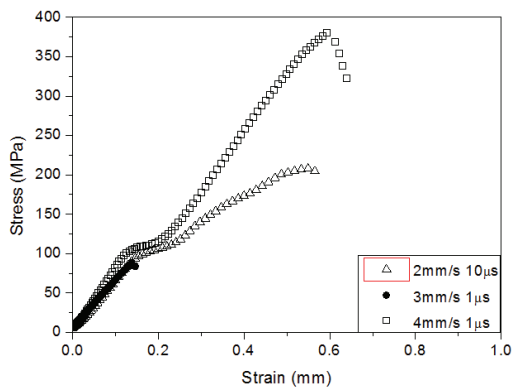


Fig. 6 Result of tensile test for power 9.4 W

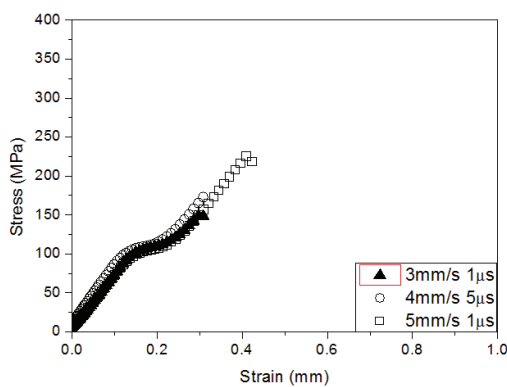


Fig. 7 Result of tensile test for power 12 W

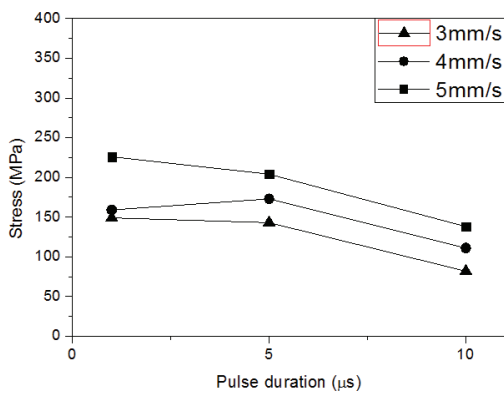


Fig. 8 Relationship between stress and pulse duration for 12 W laser power

4. 결론

본 연구에서는 두께 0.05 mm의 Hastelloy C-276 박판을 Nd:YAG 레이저를 이용하여 겹치기 용접할

때 용접 후 인장 강도를 가장 크게 할 수 있는 레이저의 공정 변수 조건을 찾아 내었다. 이를 위해 먼저 Hastelloy 박판에 대한 열전도 해석을 수행하여 용접이 가능한 공정 변수의 범위를 찾아 내고 이를 바탕으로 Nd:YAG 레이저 용접을 수행한 결과 미세한 입열량의 차이가 용접부의 품질에 큰 영향을 준다는 것을 확인하였다. 모재를 녹일 수 있는 최소한의 조건 이상의 에너지를 가하게 되면 상, 하부 모재가 과다하게 녹아 오히려 용접부 품질 저하를 가져 오게 됨을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 0.05 mm Hastelloy C-276 박판의 겹치기 이음 용접 시 최적의 용접 조건은 모재를 용융시킬 수 있는 최소한의 조건인 Nd:YAG 레이저 파워 9.4 W, 용접 속도 4 mm/s, 펄스폭 1 µs로 한 경우이며 이 때 최대 인장강도 380 MPa의 결과를 얻을 수 있었다.

후 기

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2014년도 산학연협력 기술개발사업(No. C0210756)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

REFERENCES

1. Wu, D., Ma, G., Guo, Y., and Guo, D., "Study of Weld Morphology on Thin Hastelloy C-276 Sheet of Pulse Laser," *Physics Procedia*, Vol. 5, No. 6, pp. 99-105, 2010.
2. Haemers, T. A., Rickerby, D. G., Lanza, F., Geiger, F., and Mittemeijer, E. J., "Laser Cladding of Stainless Steel with Hastelloy," *Advanced Engineering Materials*, Vol. 3, No. 4, pp. 242-245, 2001.
3. Hashim, M., Babu, K. S. R., Duraiselvam, M., and Natu, H., "Improvement of Wear Resistance of Hastelloy C-276 through Laser Surface Melting," *Materials & Design*, Vol. 46, pp. 546-551, 2013.
4. Ahmad, M., Akhter, J., Akhtar, M., Iqbal, M., Ahmed, E., et al., "Microstructure and Hardness Studies of the Electron Beam Welded Zone of Hastelloy C-276," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 390, No. 1, pp. 88-93, 2005.
5. Cho, S.-K., Yang, Y.-S., Son, K.-J., and Kim, J.-Y., "Fatigue Strength in Laser Welding of the Lap Joint," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 40, No. 9, pp. 1059-1070, 2004.

6. Moraitis, G. and Labeas, G., "Residual Stress and Distortion Calculation of Laser Beam Welding for Aluminum Lap Joints," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 198, No. 1, pp. 260-269, 2008.
7. Chen, W., Ackerson, P., and Molian, P., "CO₂ Laser Welding of Galvanized Steel Sheets Using Vent Holes," *Material & Design*, Vol. 30, No. 2, pp. 245-251, 2009.
8. Apalak, M. K., Aldas, K., and Sen, F., "Thermal Non-Linear Stresses in an Adhesively Bonded and Laser-Spot Welded Single-Lap Joint during Laser-Metal Interaction," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, No. 1, pp. 1-19, 2003.
9. Yang, Y. S., Park, E. K., Lee, K. R., and Yoo, Y. T., "Characteristics of Fiber Laser Lap Welding of Pure Aluminum Multi-Thin Plate," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 30, No. 9, pp. 931-942, 2013.
10. Yih-Fong, T., "Gap-Free Lap Welding of Zinc-Coated Steel Using Pulsed CO₂ Laser," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 29, No. 3-4, pp. 287-295, 2006.