

# 다중 특성을 가지는 레이저 빔 제어를 통한 열영향 해석

최해운\*.#

\*계명대학교 기계공학전공

## Analysis of Thermal Effects by a Dual Mode Laser in Welding Applications

Hae-Woon Choi\*.#

\*Dept. of Mechanical Engineering Keimyung Univ.

(Received 27 October 2021; received in revised form 1 December 2021; accepted 3 December 2021)

### ABSTRACT

A computer simulation was performed to investigate the heat source distribution and temperature distribution of a laser having multiple characteristics. To simulate the actual size of a welding specimen, the temperature distributions at 0 s, 1 s, and 2 s were analyzed by increasing the domain size to 50 mm in length and 25 mm in width in a material of the same thickness. As indicated by the results, because of the characteristics of metals with high thermal conductivity, the temperature at the welding center line and the temperature distribution at the offset position were not significant. When the core part was cooled by irradiating with a laser, it cooled at a rate of up to 500 °C /s. In contrast, when the laser was irradiated to the ring part, the cooling proceeded at a rate of over 1800 °C /s. Comparing the relative numerical values rather than the absolute values, it was found that the cooling rate was approximately 3.6 times faster when the laser was irradiated through the ring than when the laser was irradiated through the core. As a result of irradiating with the same heat source (at 100 W) into the core, ring, and ring + core, it was confirmed that the highest temperature was irradiated to the ring part and the lowest temperature was irradiated to the core part.

**Keywords :** Laser Welding(레이저용접), Dual Mode Laser(다중 특성 레이저), Computer Simulation(컴퓨터 시뮬레이션), Dissimilar Material(이종재료)

### 1. 서 론

친환경 전기자동차용 배터리, 모터 및 정밀 부품 용접을 위해서 레이저 용접기술이 많이 활용이 되고 있다. 특히 파이버 레이저는 높은 집속도로 고밀도 에너지를 순간적으로 금속 용융풀에 조사되어 금속

증기를 만들고 기홀 형태로 좁은 용합 영역을 만들게 된다<sup>[1]</sup>. 따라서 열 영향 구역은 제한적이며, 재료의 변형도 작고 깊은 용입깊이로 인해서 용접에서 많은 장점을 얻을 수 있다. 또한 자동화가 쉬워서 고속생산 및 품질관리가 가능하여, 그 활용도가 많이 증가하고 있다. 자동차 제조사들은 저공해 친환경 자동차에 대한 개발을 지속적으로 하고 있는데, 이러한 문제를 해결하기 위해서 경량스틸 즉 고장력강(AHSS)을 사용하거나 알루미늄 등의 경량금속을 사

# Corresponding Author : hwchoi@kmu.ac.kr  
Tel: +82-53-580-5216, Fax: +82-53-580-6725

용하는 경우가 많다<sup>[1,3]</sup>.

특히 이러한 특수 소재의 경우는 기존 용접법으로는 높은 신뢰도를 가지는 용접품질 달성이 어려울 수 있어서 레이저 기술을 이용한 접합방법이 많이 적용되고 있다.

레이저 용접은 크게 저밀도 용접과 고밀도 용접 영역으로 나뉜다. 비교적 저밀도 레이저 용접에는 열전도도 모드의 용접이 이루어지는 반면, 고밀도 레이저 용접에서는 깊은 침투 모드 즉 키홀 모드로 용접이 이루어지게 된다. 특히 키홀 모드 용접에서는 높은 중형비를 달성할 수 있어서 효율적인 용접이 이루어진다<sup>[2]</sup>.

레이저 용접은 통상적으로 행해지는 열전도에 의한 특성 뿐만 아니라 용융풀 내에서의 대류가 발생하면서 균질한 형태의 용융풀이 형성된다. 특히, 고밀도 레이저 용접에서는 용접시 발생하는 높은 증기압 발생 및 키홀 닫힘 등의 공정반복을 통해서 매우 강한 금속재료학적 특성을 얻을 수 있다<sup>[1,3]</sup>.

키홀 레이저 용접으로의 전환은 금속 기화(metal vaporization)의 천이영역인 약  $10^6\text{W/cm}^2$ 에서 발생하며, 높은 증기압(vapor pressure) 또는 반동압(recoiling pressure)을 크게 증가시켜 용융된 금속을 더 깊이 있게 용접할 수 있어서 높은 신뢰도를 요구함과 동시에 좁은 영역 용접이 요구되는 응용분야에 많이 사용되고 있다<sup>[3,5]</sup>.

이러한 레이저 용접기술은 자동차 산업에 많이 사용되면서 기존에 용접법에서 얻지 못했던 다양한 결과들을 얻을 수 있게 되었다. 이러한 장점에 더불어 최근 개발된 다양한 레이저는 빔을 적용분야에 맞게 자유롭게 컨트롤(모듈레이션)함으로써 좀 더 다양한 형태의 용접법을 구현할 수 있게 되었다. 레이저를 이용한 키홀제어는 지난 수십년 간 많은 연구자들에 의해서 분석되어 왔으며, 레이저 공급사에서 다양한 키홀제어 기법들을 상용화 해왔다<sup>[4,5]</sup>.

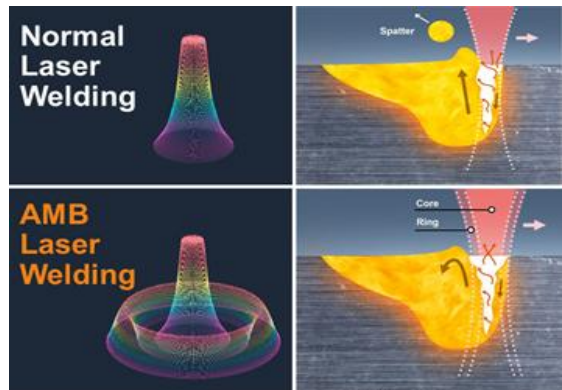
최근에는 레이저 빔을 전송하는 광섬유(fiber optics)기술의 눈부신 발전으로 인해서 하나의 광섬유에서 두 가지 형태의 빔을 전송하는 기술이 소개되고 있다<sup>[7,8]</sup>. 이러한 기술의 장점은 빠른속도로 용접되는 공정에서 순간적으로 예열, 용접 및 후열처리 등에 대한 직접적인 제어가 가능하고, 독립적인 에너지 조절을 통해서 다양한 금속재료학적 장점을 이룰

수 있다.

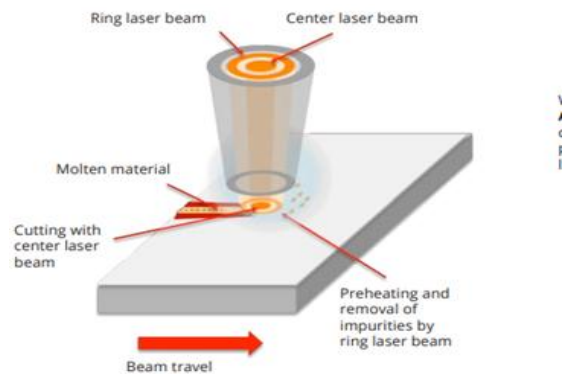
용접 전 금속표면을 클리닝 하거나 예열할 수 있어서 깨끗한 용접품질을 얻을 수 있으며, 절단시 절단 효율성과 높은 생산성을 얻을 수도 있다<sup>[6]</sup>. 무엇보다도 박판 소재와 후판 소재를 동일한 광학계로 용접 및 절단하면서, 온도 및 온도 구배 또는 냉각속도 제어도 자유롭게 할 수 있는 잇점이 있다.

하지만, 정량화된 결과가 보고 되지 않았고, 빠른속도로 이동되는 레이저공정에서 실험적으로 정량적인 분석결과를 얻기가 쉽지가 않다. 본 연구에서는 이중 빔의 특성을 가지는 레이저를 컴퓨터 시뮬레이션 한 결과를 보고한다.

또한, 레이저 빔 분기 및 제어에 따라서 소입되는 에너지의 강도 및 소재에 발생하는 온도 분포 그리



(a) Dual core laser welding, Case #1



(b) Dual core laser welding, Case #2

Fig. 1 Dual laser heat source (a) Case #1 (b) Case #2<sup>[10,11]</sup>

고 냉각특성을 계산하였으며, 이를 통해서 각 제어 모드에 따른 다양한 에너지 소입 특성에 대해서 알아 보았다.

## 2. 컴퓨터 시뮬레이션

용접 시 일어나는 다양한 온도분포 및 시뮬레이션 변수에 따른 온도분포를 예측하기 위하여 유한요소 해석 소프트웨어인 COMSOL Multiphysics를 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 사용된 열원은 다음 식과 같이 3D Gaussian beam의 형태로 가정하였다<sup>[7-8]</sup>.

$$Q(x, y, z) = Q_0(1 - R_c) \frac{1}{\pi\sigma_x\sigma_y P_{dp}} e^{-sf \left[ \frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2} \right]} e^{-\left| \frac{z}{P_{dp}} \right|}$$

여기서,  $Q_0$ 는 열원의 최대출력,  $x, y, z$ 는 공간좌표,  $R_c$ 는 표면반사도,  $sf$ (Shape factor)는 레이저빔의 형상계수,  $\sigma_x, \sigma_y$ 는  $x$ 축,  $y$ 축 방향의 빔 반경,  $P_{dp}$

(Skin depth)는 레이저 빔의 침투깊이 이다. 시뮬레이션에서 사용된 소재는 Aluminium 소재이며, 시뮬레이션에 사용한 소재의 물성치 및 유효화 검증에 관한 상세한 내용은 선행연구를 참고 하였다 [9].

Fig. 2는 시뮬레이션용 도메인이며, 모델링은 레이저 빔이 지나가는 영역에 Fine meshing을 하기 위해서 0.25mm 간격으로 Parametric curve(가상 라인)를 생성하였다 (Fig. 2a). 이러한 가상 라인을 기반으로 메쉬를 생성시킨 결과가 Fig. 2(b)에 도시 되었다.

도메인은 레이저 빔의 열원 분포를 명확히 관찰하기 위해서 폭 5mm, 길이 10mm, 두께 0.25mm로 설정하였다. 또한 온도측정은 모델의 정중앙, 0.75mm offset 그리고 1mm offset의 위치에서 측정 및 분석하였다. 시뮬레이션의 경계조건은 강제 대류 조건을 사용하여 설정하였으며, 출력은 100 Watt를 기준으로 하여 이송속도는 20mm/sec로 설정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 3 ~ 5는 두께 0.25mm, 폭 5mm 그리고 길이 10mm 크기의 도메인에 Core 빔과, Ring 빔 그리고 합성 빔(Ring + Core)을 조사한 사례를 나타내고 있다. 동일조건에서 열영향을 비교 분석하기 위해서 레이저 출력 총 100Watt를 20mm/s의 진행속도로 도메인에 조사하였다.

시뮬레이션에서는 3가지 Case에 대해서 결과를 분석하였는데, Case #1은 Core 빔에 100Watt, Case #2는 Ring 빔에 100Watt 그리고 Case #3은 100Watt의 출력을 Core와 Ring에 각각 50Watt로 동일 분기하여 조사(irradiation)하였다. 각 Case 별 레이저 빔의 3차원 형태는 Fig. 3-5의 좌측상단에 표기되었다.

Fig. 3(a)은 출력 100Watt이고 직경(1/e)이 2mm 크기의 가우시안 분포 형태의 Core 빔을 조사한 결과를 나타내고 있다. 통상적인 열원의 분포를 보이고 있으며 시뮬레이션 도메인이 충분히 큰 것을 확인할 수 있었다. Fig. 3(b)의 경우 열원의 진행방향으로 온도의 구배가 크고 편중 된 것을 알 수 있으며 최고 온도는 159°C로 계산되었다.

정량적인 평가 및 비교를 위해서 각 Case 별 레이저 열원의 분포 및 레이저 조사로 인한 온도 분포를 도식화 한 후 이를 분석 하였다. Fig. 4(a)은 출력

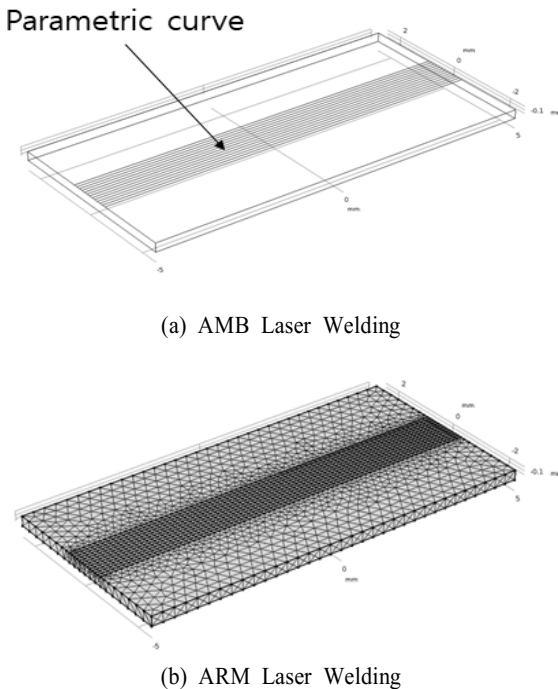


Fig. 2 Simulation domain (a) Parametric curve (b) Mesh

100Watt이고 내경이 1mm이고 외경이 2mm 크기의 플랫폼(flat top)형태의 레이저가 조사되었을 때의 열원의 분포를 보여 주고 있다. Fig. 3(a)와 마찬가지로 시뮬레이션 도메인이 충분히 큰 것을 확인할 수 있었으며, Fig. 4(b)에서 나타난 바와 같이, 열원이 빔의 내경으로도 진행이 되어서 가운데 부분의 경우 최고 온도가 412°C로 상승하는 것으로 계산이 되었다.

Fig. 5(a)은 50Watt 출력의 Ring 레이저와 50Watt 출력의 Core레이저가 동시에 조사된 경우의 열원의 분포를 보여 주고 있다.

Fig. 5(a)에서 나타난 바와 같이 레이저 빔이 링의 형태와 가우시안 형태를 동시에 나타내고 있다.

온도의 분포도 Fig. 5(b)에서 보여진 바와 같이 균일하게 나타났다. 다만, 최고온도는 285°C로 Case #1과 Case #2의 중간 값으로 나타났다. 이는 출력이

50%로 낮아졌기 때문이며, 가운데 부분의 온도상승 보다는 조사 영역 전반에서 골고루 분포 된 것으로 판단이 된다.

Fig. 3~5의 결과를 분석한 결과 전체적인 열원의 분포와 온도 분포의 형태는 서로 유사함을 알 수 있었다. 다만 최고온도는 빔의 형태에 따라서 2배 이상의 큰 차이가 발생하였으며, 조합된 빔의 형태의 경우 중간 값으로 나타났다.

다시 말하면, 빔 모듈레이션으로 인해서 충분히 열원의 분포를 제어 할 수 있음이 시뮬레이션 결과 분석을 통해서 도출 되었다.

Fig. 6은 실제 용접시편의 크기로 시뮬레이션 하기 위해서 동일 두께의 소재에서 도메인 크기를 길이 50mm와 폭 25mm로 변경하여 해석한 결과를 각각 0sec, 1sec 그리고 2sec일 때로 구분하여 보여 주고

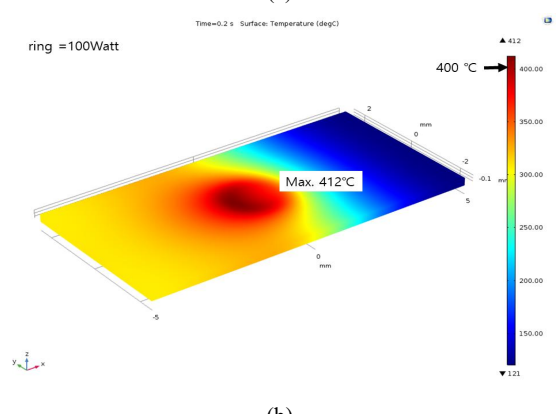
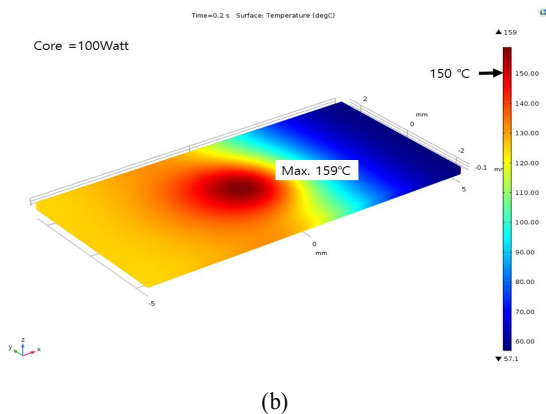
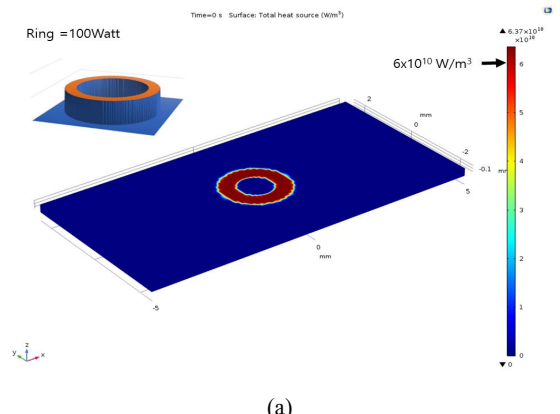
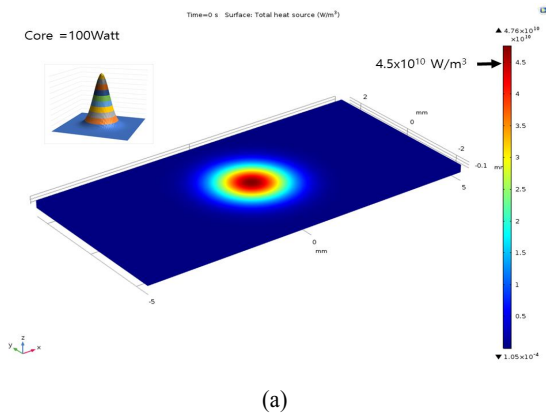


Fig. 3 Case #1 Core 100Watt (a) heat distribution (b) Temperature distribution

Fig. 4 Case #2 Ring 100Watt (a) heat distribution (b) Temperature distribution

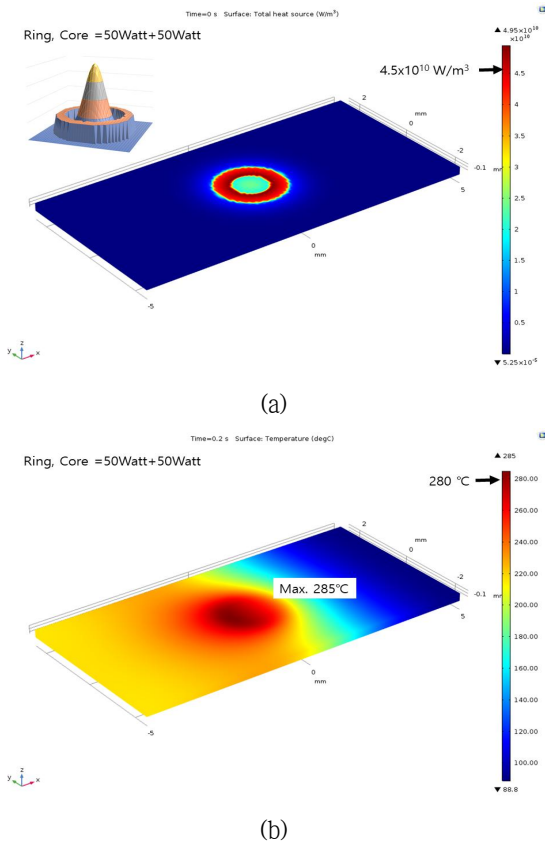


Fig. 5 Case #3 Ring/Core 50Watt (a) heat distribution (b) Temperature distribution

있다. 세부적인 온도차이는 발생하였으나, 전반적인 온도분포 패턴은 유사하였다. 정량적인 분석을 위해서 각 case 별 온도를 추적하였다(Fig. 7).

결과를 분석하기 위해서 용접중심선, 중심선에서 0.75mm offset 위치, 그리고 중심선에서 1mm offset 위치에서의 온도 분포를 추적하였다.

결과에서 나타난 바와 같이 높은 열전도도를 가진 금속의 특성으로 인해서 용접 중심선에서의 온도와 offset 위치에서의 온도 분포가 크게 나타나지 않았다. 최고온도는 앞선 실험에서와 동일하게 Ring beam일 때가 가장 높았고, Core 빔에서 가장 낮았으며, Ring 빔과 Core 빔이 결합된 경우가 중간의 온도 분포를 보였다.

용접 후 용접부위의 냉각속도는 금속의 재결정화 및 취성에 영향을 주기 때문에 각 경우별 냉각속도

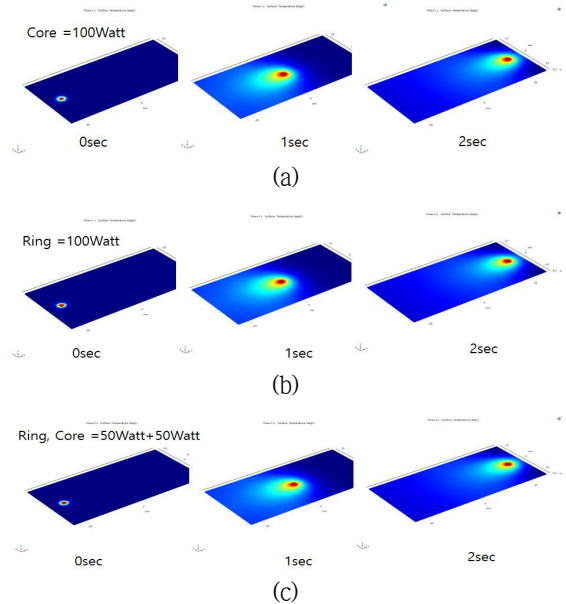
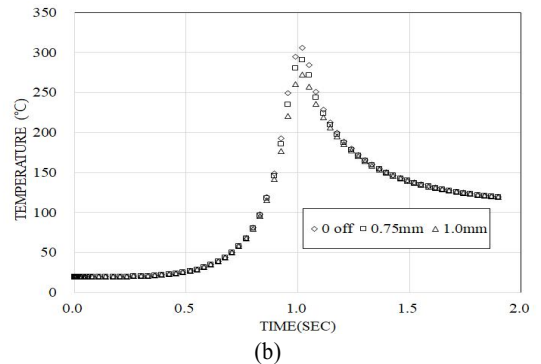
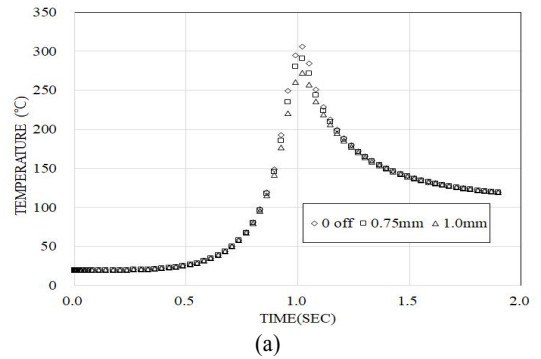


Fig. 6 - Heat distribution in travel with respect to time 0sec, 1sec, 2sec (a) Case #1 Core 1000 Watt (b) Case #2 Ring 100 Watt (c) Case #3, Ring/Core 50Watt + 50 Watt



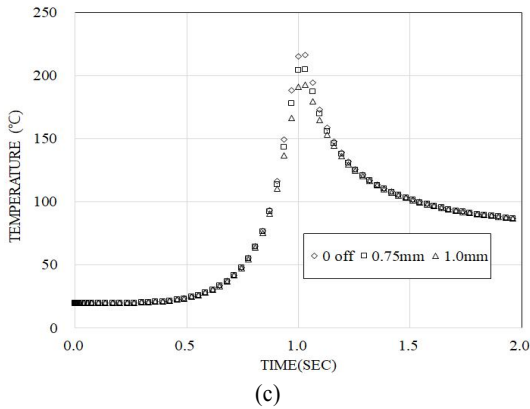


Fig. 7 Temperature distribution (a) Case #1 (b) Case #2 (c) Case #3

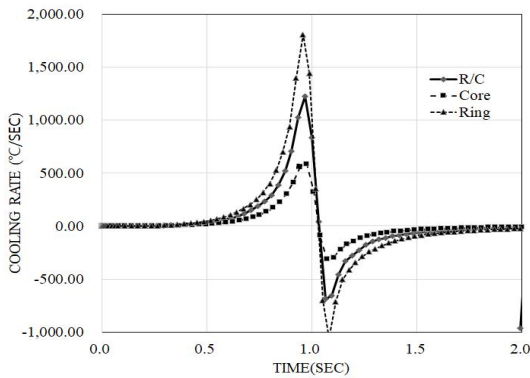


Fig. 8 Cooling rate for Case #1, #2, #3

를 추적하였다. Fig. 8은 용접 중심선에서의 냉각속도를 비교한 것으로 각 Case 별 냉각속도를 시간별로 구분하여 추적하였다. 가장 완만한 냉각속도 분포는 Case #1의 경우이고, 앞서 온도분포의 분석과 마찬가지로 가장 급속한 냉각속도 분포는 Case #2의 경우였다. Core부분에 레이저를 조사하여 냉각을 한 경우 최대 500°C/sec의 속도로 냉각이 되었지만, Ring 부분에 레이저를 조사한 경우 최대 1800°C/sec가 넘는 속도로 냉각이 진행이 되었다. 절대적인 수치보다는 상대적인 수치비교를 했을 때, Ring 부분을 통해서 레이저를 조사한 경우가 Core 부분을 통해서 레이저를 조사한 경우 보다 냉각속도가 약 3.6배 정도 빠른 것으로 분석이 되었다.

## 4. 결 론

다중 빔 제어를 통한 열원분포를 컴퓨터 시뮬레이션으로 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 동일한 열원 100 Watt를 Core 부분, Ring 부분, 그리고 Ring+Core으로 분기하여 조사한 결과, 최고 온도는 Ring 부분에 조사하는 것이며, 최저 온도는 Core 부분에 조사하는 것으로 확인되었다.
- 2) Ring 과 Core에 레이저를 분기하여 동일하게 조사하는 경우 각 경우의 중간 값의 열원 분포를 가지는 것으로 확인 되었다.
- 3) 냉각특성을 나타내는 Cooling rate 를 분석한 결과 1)과 2)의 경우와 같은 경향을 나타냈다.
- 4) Ring 과 Core 분기를 적절히 함으로서 레이저 열원을 최적 제어할 수 있으며, 이로 인해서 용접품에 소입되는 온도도 최적 제어 가능성이 확인 되었다.
- 5) Core beam의 에너지 밀도가 높아서 국부적인 온도 상승이 예측이 되나, 시뮬레이션 메쉬설정의 한계로 인해서 정확한 계산에서는 한계가 있었다.

## 후 기

“이 논문은 한국연구재단 연구비 지원 (2019R1F1A1-062594)에 의하여 연구되었음.”

## REFERENCES

1. Guo, S., Zou, J., Xu, J. Wu, Q. and Xiao, R., “Multi-stage keyhole evolution in fiber laser welding: An experimental study and theoretical analysis,” Results in Physics, Vol. 31, 2021.
2. Zou, J., Wu, Y., Huang, T. and Xiao, R., “Experimental and theoretical characterization of deep penetration welding threshold induced by 1-um laser,” Applied Surface Science, Vol. 357, pp. 1522-1527, 2015.
3. Rossini, M., Spina, R., Cortese, L., Matteis, P. and Firrao, D., “Investigation on dissimilar laser

- welding of advanced high strength steel sheets for the automotive industry,” *Materials Science & Engineering A*, Vol. 628, pp. 288-296, 2015.
4. Fernandes, F., Oliveira, D. and Pereira, A., “Optimal parameters for laser welding of advanced high-strength steels used in the automotive industry,” *Procedia Manufacturing*, Vol. 13, pp. 219-226, 2017.
  5. Svenungsson, J., Choquet, I. and Kaplan A., “Laser welding process – a review of keyhole welding modelling”, *Physics Procedia*, Vol. 78, pp. 182-191, 2015.
  6. Punzel, E., Hugger, F., Dorringer, R., Dinkelbach, T. and Burger, A., “Comparison of difference system technologies for continuous wave laser beam welding of copper,” *Procedia CIRP*, Vol. 94, pp. 587-591, 2020.
  7. Kim, T. and Choi, H., “Study on Laser Welding of Al-Cu Dissimilar Material by Green Laser and Weld Quality Evaluation by Deep Learning,” *Journal of Welding and Joining*, Vol. 39, No. 1, pp. 67-73, 2021.
  8. Choi, H., “Analysis of Heat Transfer by Various Laser Beam Patterns in Laser Material Process,” *Journal of the Korea Society of Manufacturing Process Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 37-44, 2018.
  9. Choi, H., “Analysis of Laser Heat Distribution in Al-Cu Welding in Laser Material Process,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineering*, Vol. 20, No. 2, pp. 1-7, 2021.
  10. web resource of [www.ipgphotonics.com](http://www.ipgphotonics.com)
  11. web resource of [www.coherent.com](http://www.coherent.com)