

AISI 304 스테인리스 강판의 Nd:YAG 펄스 레이저 용접비드 형상에측을 위한 유한요소해석

조해용* · 김관우* · 홍진욱* · 이제훈** · 서 정**

*충북대학교 기계공학부

**한국기계연구원 레이저응용시스템그룹

Finite element analysis for prediction of weld bead shape of Nd:YAG pulse laser welding for AISI 304 stainless steel plate

Haeyong Cho*, Kwanwoo Kim*, JinukHong*, Jaehoon Lee** and Jeong Suh**

*Dept. of Precision Mechanical Engineering, Chungbuk National University

**Laser Application Group, Korea Institute of Machinery & Materials

Abstract

Pulse laser welding of AISI 304 stainless steel plate was simulated to optimize welding conditions by using commercial finite element code MARC. Due to geometric symmetry, a half model of AISI 304 stainless steel plate was considered. For the heat transfer analysis, user subroutines were applied to boundary condition. The material properties such as conductivity, specific heat, and mass density were given as a function of temperature and the latent heat associated with a given temperature range was considered. A moving heat source was designed on the basis of experimental data. As a result, Nd:YAG laser welding for AISI 304 stainless steel was successfully simulated and it should be useful to determine optimal welding condition.

Key words : Pulse, Nd:YAG laser, FEM, AISI 304, Laser welding, Heat source

1. 서 론

Nd:YAG 펄스 레이저는 평균 출력이 CO₂ 레이저에 비해 작지만 첨두출력은 수 kW 이상으로 대형 CO₂ 레이저에 버금갈 뿐만 아니라 첨두출력과 펄스폭의 적절한 조절로 순간적인 국부 가열이 가능하며 보다 작은 열 영향부위를 얻을 수 있어 용접가공에 많이 사용되고 있다¹⁾. 그러나 펄스 레이저 용접 시 용접 형태, 재질, 경로 등과 같은 용접변수들의 변화에 적합한 빔 파워, 속도, 펄스 주파수 등이 다르므로 산업현장에서 적정 용접조건 설정을 위해서는 장비 구축, 재료준비, 반복된 실험 및 검사 등으로 인한 비용 및 시간소비가 발생되고 있다.

현재까지의 펄스 레이저 용접에 관한 연구는 해석적 방법보다 대부분 실험에 기초를 두고 있으며 실험조건에 따른 시편의 분석과 검토를 통한 용접조건설정, 용접변수에 따른 용접특성 및 품질비교 등으로 진행되고 있다²⁻⁴⁾. 이러한 실험적 연구결과들은 다양한 용접변수 변화에 따른 적정 용접조건 설정의 문제해결 방법 측면에서 그 한계가 있다. 이에 반하여 해석적 연구에서는 다양한 용접변수 변화에 대한 해석결과의 비교분석으로 적정 용접조건을 예측할 수 있다. 그러나 용접 및 열전달 이론, 재료물성, 경계조건 등의 적용 방법 및 값에 따라 실제실험과 해석결과의 오차가 커질 수 있다는 문제점이 있다. Rosenthal⁵⁾이 점과 선 열원에 관한 열유속 식을 처음 제시한 이후, Westby⁶⁾, Friedman⁷⁾ 등이 용접의 온도분포에 관한 수치해석적인 모델을 제시하였고, Mazumder 등⁸⁾이 이동 가우시안 열원을 사용한 3차원 열전달 모델을 제시 했으며, Kim⁹⁾등이 CO₂ 레이저를 이용한 겹치기 용접의 유한요소해석을 시도 하는 등의 해석적 연구가 진행되고 있다.

용접해석과 실험이 병행된 본 연구에서는 상용유한요소 프로그램인 MARC를 이용하

여 펄스 레이저 용접시물레이션을 시도하였고, 그 결과를 동일조건외 실험과 비교분석하였다. 입열조건으로 펄스 레이저 빔에 대한 3차원 이동 열원모델을 설계하여 해석에 적용시켰고, 빔 파워 변화에 따른 온도분포 결과를 분석하여 용융부 및 열영향부를 예측하였다. 또한 주어진 용접변수에 적합한 용접조건 설정을 시도하였으며, 그 타당성을 실험을 통해 검증 하고자 하였다.

2. 해석 방법

본 연구에서는 용접시물레이션을 위해 상용유한요소 프로그램인 MARC를 사용하였고, MARC의 열 해석 전, 후 처리과정을 포함한 전체적인 해석과정은 Fig. 1과 같다.

전처리 과정에는 입열과 냉각의 열전달 해석에 적합한 해석모델의 요소분할, 이동형 3차원 열원에 의한 입열, 대류, 복사에 대한 열적 경계조건, 상온의 초기재료 온도설정, 재료의 열적물성 입력이 있다. 용접시물레이션 후 해석결과로서 온도분포와 외부로부터의 열유속을 분석한다. 열유속은 펄스 레이저 빔의 조사에 의한 재료의 가열 정도를 나타내며 설계된 이동형 3차원열원에 의한 재료 내 단위체적당 입열량을 뜻한다. 온도분포의 분석을 통해 스테인리스강의 녹는점을 기준으로 용융부 및 열영향부 크기와 함께 용접과정 동안 재료내부의 온도분포를

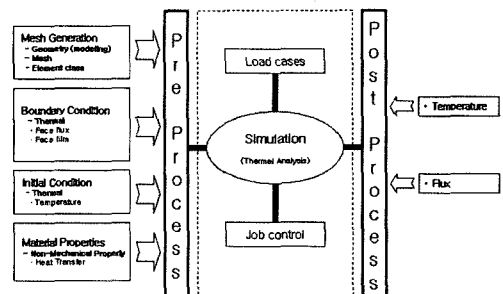


Fig. 1 The procedure of analysis

예측할 수 있다. 그리고 용접시물레이션과 실험 시편의 용융부 단면크기의 비교분석을 통하여 이동형 3차원 열원의 형상변수 및 최대 에너지밀도 값을 결정한다.

2.1 용접실험 및 해석 모델

SUMITOMO 중공업의 JK701 Nd:YAG 펄스 레이저를 이용한 가로 60mm, 세로 50 mm, 두께 1mm의 AISI 304 스테인리스 강판의 맞대기용접에 관한 실험조건은 Table 1 과 같다. 빔의 포커스는 조사표면에 일치시켰고 빔 파워의 용접조건만을 변화시키며 용접실험을 수행하였다.

Fig. 2는 해석모델과 레이저빔의 이동 위치 및 방향을 나타낸다. 용접선을 기준으로 좌우 대칭임을 고려하여 1/2모델링 하였다. 빔의 조사부는 순간적인 가열과 냉각의 복잡한 열 이력을 겪음으로 조밀하게 요소 분할되었고, 해석모델의 크기는 용접실험 시편 크기와 동일하다.

Table 1 Experimental data of Nd:YAG pulse laser welding

Velocity (mm/sec)	frequency (Hz)	irradiation (sec)	Power (W)
1	5	0.08	20
1	5	0.08	22
1	5	0.08	27.5

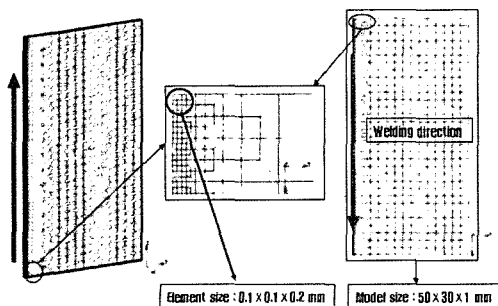


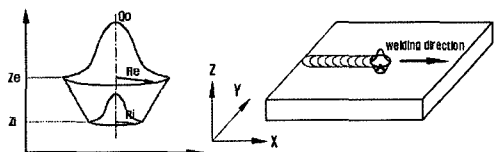
Fig. 2 A half of Model of AISI 304 stainless steel plate

2.2 3차원 이동열원 모델

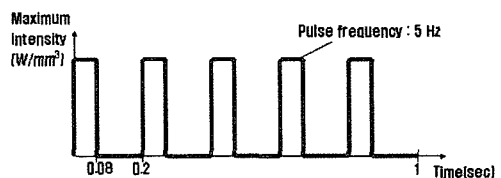
Fig. 3 (a)는 입열의 경계조건으로 사용된 3차원의 콘형 가우시안 열원모델을 나타낸다. 그림에서와 같이 열원중심으로부터 위치에 따른 단위체적당 입열량은 열원의 형상변수(Z_e, Z_i, R_e, R_i)와 최대 에너지밀도(Q_0)값에 따라 달라진다. 따라서 용접해석 후 용융부의 크기 및 형상은 열원모델에 지배된다. 이러한 3차원 콘형 가우시안 열원의 단위면적당 입열량을 수식적으로 표현하면 다음 식과 같다. 여기에서

$$Q = Q_0 \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right)$$

r 은 열원의 중심부터 입열되는 지점까지의 거리이고, r_0 는 재료의 임의 깊이에서의 가우시안 정규분포 반경을 뜻한다. 또한 Fig. 3의 (b)와 같이 특정 펄스형태 및 주파수를 갖는 레이저를 용접시물레이션의 입열 경계조건으로 주기위해서 서브프로그램을 작성하였고 펄스의 형태 및 주파수 변화에 따른 다양한 입열조건을 해석에 적용시킬 수 있다.



(a) Shape of heat source



(b) Frequency

Fig. 3 Assumed Moving heat source for Nd:YAG pulse laser

열원 모델의 형상변수(Z_e, Z_i, R_e, R_i)값을 결정하기 위해 입열조건에서 빔파워를 고정 변수(20W)로 놓고 형상변수를 변화 시키면서 용접시뮬레이션을 하였다. 수회의 해석 과정에서 용접시편과 해석결과의 용융부 비교분석을 통해 용융부의 형상이 거의 일치되는 열원 형상변수 값을 결정한다. 다음으로 용융부 크기가 서로 잘 부합되는 용접열원의 최대 에너지밀도(Q_0)를 결정한다. 이렇게 설계된 용접열원을 이용하여 빔파워 변화(22W, 27.5W)에 따른 용접해석을 하고 동일조건의 용접시편과 용융부를 비교 분석하여 열원모델의 적합성을 검증하였다.

2.3 경계조건 및 물성치

열전달 해석의 경계조건은 펄스 레이저빔에 의한 입열조건과 용접 후 재료의 냉각조건으로 나누어 볼 수 있다. 입열조건으로 펄스형 Nd:YAG 레이저의 열원의 각부 치수, 빔 파워 및 속도, 펄스 주파수 등을 변화시키며 시뮬레이션 할 수 있는 서브프로그램을 작성하여 용접해석에 적용시켰고, 냉각조건으로는 용접 시 용접부의 복사에 의한 열전달과 상온의 공기와 용접재료 사이의 대류에 의한 열전달이 고려된 서브프로그램을 작성하여 적용시켰다. 위에 서술된 내용을 표로 간략히 정리하면 Table 2와 같다.

레이저 빔의 고밀도 에너지는 용접부를 순간적으로 가열시켜 온도를 급상승시키고 국

Table 2 The boundary conditions of the analysis

Heat transfer	Boundary condition of FEM
Irradiation of beam	Using sub-programming
Radiation	Using sub-programming
Convection	Using sub-programming
Latent heat	boundary condition option

부가열 후 용접부는 급속도로 냉각된다. 이렇게 큰 온도변화를 겪는 재료의 열적 물성은 온도에 따라 큰 차이를 나타낸다. 따라서 열해석에 필요한 물성들이 온도에 따른 데이터로 적용되어야만 한다. Table 3과 Fig. 4에 열적 물성이 해석에 적용된 방법과 내용을 나타내었다.

Table 3 Material properties of AISI 304

Thermal property	Value
Conductivity(W/(mm·K))	Temperature dependent
Specific heat(J/(kg·K))	Temperature dependent
Mass density(Kg/mm ³)	7.912×10^{-6} (constant)
Emissivity	0.14(constant)

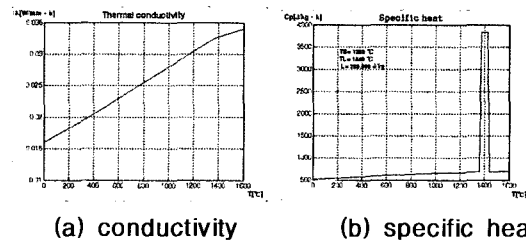


Fig. 4 Thermal properties according to temperature

3. 해석결과 및 고찰

Fig. 5~8은 열원 모델링 및 검증을 위한 용접 시뮬레이션에서 AISI 304 스테인리스강판의 용접해석결과와 용접실험 시편의 용융부 단면을 나타낸다.

Fig. 5~6은 용접시뮬레이션의 첫 단계로 기준 용접조건(20W, 5Hz, 1mm/sec)에 대한 실험시편과 해석결과의 용융부를 비교분석한 결과이고, 펄스 레이저 빔이 총 용접길이 50mm 중 용접거리 40mm 지점에 위치했을 때의 온도분포를 나타낸다. 일정 펄스 주파수를 가지고 이동하므로 Fig. 5의 (b)와 같이 용접열에 의한 온도분포의 꼬리가 형성되어 있는 결과를 나타내었다.

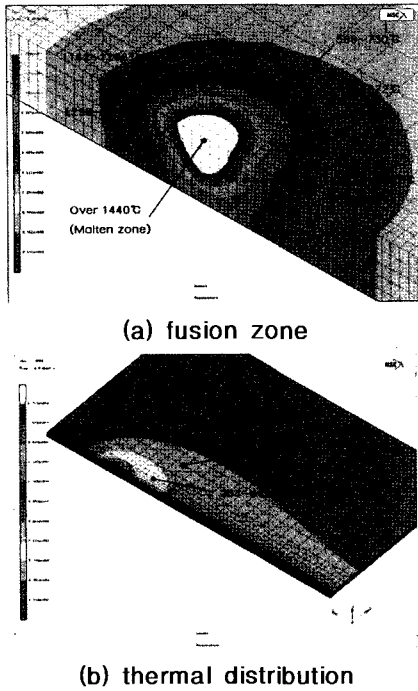
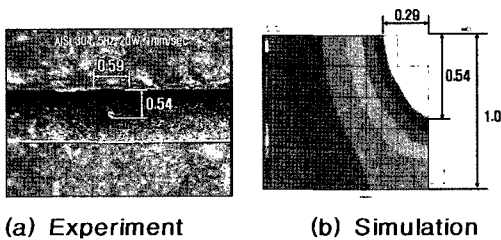


Fig. 5 The simulated results(20W)

Fig. 6에서 기준 용접시편의 용융부 단면 (a)과 동일조건인 해석결과(b)는 그 크기를 비교했을 때 용융부 표면직경과 깊이가 서로 거의 일치하였고 그 때 용접해석의 열원 조건을 가지고 펄스형 레이저 열원의 형상 변수($Re=0.3$, $Ri=0.1$, $Ze=0.0$, $Zi=-0.65$) 및 최대 에너지밀도($Q_0=1300W/mm^3$)를 결정함으로써 열원의 모델링을 수행하였다.

Fig. 7~8은 기준 용접변수에서 빔 파워만을 22W로 변화시킨 용접 해석결과와 실험시편 단면의 용융부를 나타낸다. 앞의 열원모델링을 위한 해석에서의 결정된 형상변



(a) Experiment (b) Simulation

Fig. 6 Comparisons of fusion zone of simulated and experimented results(20W)

수 값($Re=0.3$, $Ri=0.1$, $Ze=0.0$, $Zi=-0.65$)을 사용하였고 비례식을 통하여 22W의 빔파워를 열원의 최대 에너지밀도 값($1430W/mm^3$)으로 환산하여 해석에 적용시켰다. Fig. 7에서 빔 출력 증가로 인해 온도분포 및 용융부가 Fig. 5에서보다 넓게 형성 되었다.

Fig. 8에서 용접시편 단면(a)와 동일조건인 해석결과(b)의 용융부를 비교했을 때 용융부 표면직경과 깊이가 서로 거의 일치하였다. 따라서 전 단계에서 설계된 펄스형 레이저 열원은 빔 파워 변화에 따른 용접결과(용융부 크기, 온도분포 등)예측에 적합하였다고 판단되며 해석적 방법을 통한 용접 조건 제시가 가능하다.

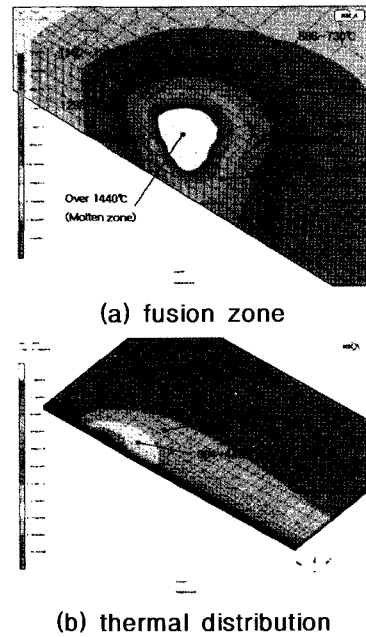
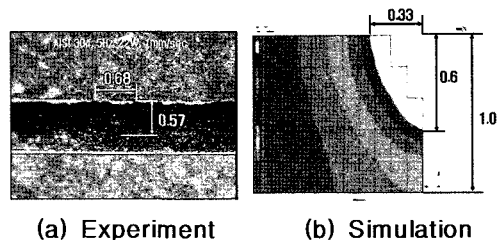


Fig. 7 The simulated results(22W)



(a) Experiment (b) Simulation

Fig. 8 Comparisons of fusion zone of simulated and experimented results(22W)

Fig. 9~10은 검증된 열원모형을 사용하고 빔파워 변화에 대한 열해석과 실험결과를 나타낸다. 27.5W의 빔파워는 앞에서와 같이 비례식을 사용하여 1787W/mm³의 최대 에너지밀도 값으로 환산될 수 있다. 이러한 빔파워의 환산은 이론적 계산으로 정확히 수행할 수 없었는데 이는 레이저용접에서의 열전달은 보통의 대류, 복사, 전도에 의한 것과 달리 재료의 용융과 키홀 생성 등의 매우 복잡한 형태를 취하기 때문이다.

Fig. 10에서 해석결과(b)와 동일조건인 용접시편 단면(a)를 비교했을 때 용융부 표면 직경과 깊이가 약간 차이가 있었다. 그러나 그 불일치 정도가 심하지 않았고 두 번의 빔 파워 변화에 대한 용접실험과 용접시물레이션 결과를 검토해 볼 때 본 연구방법은 용접변수 변화에 따른 적정 용접조건 설정에 있어서 매우 유용할 것으로 생각된다.

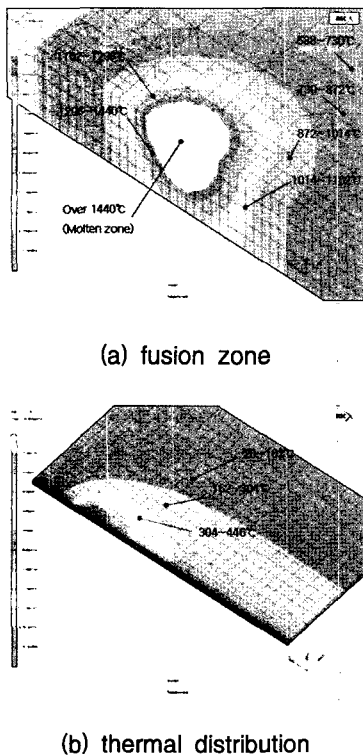
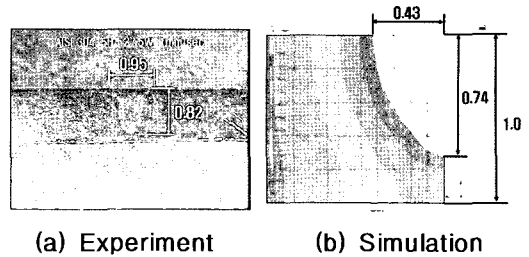


Fig. 9 The simulated results(27.5W)



(a) Experiment (b) Simulation
Fig. 10 Comparisons of fusion zone of simulated and experimented results(27.5W)

4. 결 론

상용 유한요소 프로그램인 MARC를 이용하여 AISI 304 스테인리스 강판의 펄스 레이저 용접에 관한 유한요소 해석을 하였고 용접실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. AISI 304 스테인리스 강판의 용접실험과 유한요소 해석결과의 비교분석을 통해 펄스 레이저 용접해석에 적합한 열원 모델설계가 가능하였다.
2. 설계된 열원 모델을 이용하여 빔 파워 변화에 따른 펄스레이저 용접의 용융부 및 온도분포를 예측할 수 있었고 실험을 통해 검증됨으로 용접시물레이션을 통해 용접 변수 변화에 대한 적정 용접조건 설정이 가능할 것으로 생각된다.
3. 용융부 형상 및 크기차이를 줄일 수 있는 열원설계를 위하여 보다 다양한 조건의 용접실험과 시물레이션을 통한 연구 진행이 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. D. H. Kim et al., "Development of a Pulsed Nd:YAG Laser Materials Processing System", Journal of the Korean Welding Society, Vol. 9, No. 1, 1991

2. Young-Tae Yoo et al., "Comparison of Welding Characteristics of Austenitic 304 Stainless Steel and SM45C Using a Continuous Wave Nd:YAG Laser", Transaction of the Korean Society of Machine tool Engineers, Vol. 12, No. 3, 2003
3. D. H. Kim et. al., "A study on the pure Al weldability using a pulsed Nd:YAG laser", Journal of the Korean Welding Society, Vol. 11, No. 1, 1993
4. J. D. Kim et al., "Welding of Inconel Tube with Pulsed Nd:YAG Laser", Journal of KWS, Vol. 17, No. 1, 1999
5. Rosental, D., "Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting", Welding J., Vol. 20, No.5, 1941, pp.220-234
6. Westby, O., "Temperature Distribution in the Workpiece by Welding", Dept. of Metallurgy and Metals Working, The Technical Univ. of Norway, Ph.D Dissertation, 1968,
7. Friedman, E., "Thermo-mechanical Analysis of the Welding Process using the Finite Element Method.", Trans. ASME, J. Vessel Techno, 1975, pp. 206-213
8. Mazumder, J. et al., "Heat Transfer Model for CW Laser Material Processing", J. Appl. Phys., Vol.51, No. 2, 1980
9. H. K. Kim et al., "Effect of Root Gap on Residual Stresses and Deformation in the Multi-pass Weld of Thick Plates for steel Bridge", Journal of KWS. Vol. 17, No. 1, 1999

