

Nd:YAG 레이저 맞대기 용접의 비드형상 예측에 관한 유한요소해석

김관우* · 남기정** · 이제훈*** · 서 정*** · 조해용†

(원고접수일 : 2007년 10월 12일, 심사완료일 : 2008년 1월 21일)

Finite element analysis for prediction of bead shape of Nd:YAG laser butt welding

Kwan-Woo Kim* · Gi-Jeong Nam** · Jae-Hoon Lee*** · Jeong-Suh*** · Hae-Yong Cho†

Abstract : Nd:YAG pulse laser welding of stainless steel plate was simulated to find welding condition by using commercial finite element code MARC. Due to geometric symmetry, a half model of AISI 304 stainless steel plate was considered and user subroutines were applied to boundary condition for the heat transfer. Material properties such as conductivity, specific heat, mass density and latent heat were given as a function of temperature. As results, Three dimensional heat source model for pulse laser beam conditions of butt welding has been designed by the comparison between the finite element analysis results and experimental data on AISI 304 stainless steel plate. Nd:YAG laser welding for AISI 304 stainless steel was successfully simulated and it should be useful to determine optimal welding condition.

Key words : Bead shape(비드형상), FEM(유한요소법), Heat source(열원), Pulse laser welding(펄스 레이저 용접), Nd:YAG laser(Nd:YAG 레이저)

1. 서 론

Nd:YAG 레이저에는 CW(continuous welding)형, PW(pulse welding)형 등이 있고 빔의 파워, 이송속도, 조사반경 등의 적절한 값 설정을 통하여 레이저 용접이 된다. 특히, PW형은 빔이 펄스형으로 조사되기 때문에 앞의 레이저 변수들에 펄스 주파수, 형태 등이 추가된다. 그러므로 다양한 재료와 용접형태 및 조건에서 적절한 빔 변수값의 설정

에 어려움이 있으며, 새로운 제품개발 등에서 용접 조건 설정과 장비구축에 많은 시간과 비용이 소비되고 있다. 따라서 실험을 통한 시행착오를 줄일 수 있는 해석적 연구가 필요하다.

해석적 연구로서 Rosental⁽¹⁾이 점과 선 열원에 관한 열 유속 식을 처음 제시한 이후, Westby⁽²⁾, Friedman⁽³⁾ 등이 용접의 온도분포에 관한 수치해석적인 모델을 제시하였고, Mazumder⁽⁴⁾ 등이 이동 가우시안 열원을 사용한 3차원 열전달 모델을

† 교신저자(충북대학교 기계공학부/중전기 미래기술개발 연구센터), E-mail:hycho@cbnu.ac.kr, Tel: 043)261-2464

* 충북대학원 정밀기계과

** (주)한라이비텍

*** 한국기계연구원 정보장비연구센터

제시 하였다. 또한 Kim⁽⁵⁾ 등은 펄스 레이저의 출력제어 변수가 용접변수인 파워밀도, 펄스에너지, 초점 심도 등에 미치는 영향과 용입에 미치는 용접 특성에 대하여 연구하였고, Byeon⁽⁶⁾ 등은 Nd:YAG 펄스 레이저 실험을 통해 용접조건이 용접특성에 미치는 영향을 분석하여 적정 조건을 제시하였다. Kim⁽⁷⁾ 등은 알루미늄 도금이 된 저탄소강의 CW형 Nd:YAG 레이저용접에서 도금조건에 따른 용접성 및 용접부내 알루미늄의 거동과 그 영향에 대해 연구하였다. Yoo⁽⁸⁾ 등은 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용하여 SM45C와 오스테나이트계 304 스테인리스강의 용접에 중요한 영향을 미치는 레이저 출력, 빔 이송속도, 초점위치 등을 변화시켜 특성비교를 하였고, Lee⁽⁹⁾ 등은 표면열원 2가지 방법을 적용하여 기홀 발생 시 재료 내 온도예측을 하였다.

본 연구에서는 상용유한요소 프로그램인 MARC를 이용하여 펄스 레이저 용접을 시뮬레이션 하였고, 그 결과를 동일조건 실험과 비교분석하였다. 용접 중 기홀 발생에 의한 열전달이 고려될 수 있는 3차원 이동 열원모형을 설계하였고, 해석의 입열조건으로 적용시켰다. 빔 파워 변화에 따른 맞대기용접 해석결과 분석을 통하여 용접 중 재료의 온도분포 및 용융부를 예측하였으며, 이를 실험적으로 비교·검증함으로써 해석적 방법을 통한 적정 용접조건 설정의 타당성을 검토하고자 하였다.

2. 해석 방법

상용유한요소 프로그램인 MARC를 사용하여 펄스 레이저 용접에 관한 열 해석을 하였다. 해석과정으로 동일조건 용접시뮬레이션과 실험 시편의 용융부 단면크기를 비교분석함으로써 열원의 형상변수 및 최대 에너지밀도 값을 결정하여 이동형 3차원 가우시안 열원을 설계하였다. 다음으로 설계된 열원을 해석에 적용시켜 펄스 레이저 용접의 빔 파워 및 재료 두께에 따른 용융부 및 용접소재의 온도변화를 예측하고, 동일조건 실험시편 용융부와 비교분석하여 예측된 결과를 검증하였다.

2.1 용접실험 및 해석 모델

Nd:YAG 펄스 레이저 용접기(SUMITOMO사 JK701)를 사용하여 가로 50mm, 세로 20mm, 두께 1~3mm의 AISI 304 스테인리스 강판을 맞대기 용접하였으며 두께별 빔 파워 변화조건은 Table 1과 같다. 이때 레이저 빔의 속도는 1mm/sec, 펄스 주파수는 5Hz, 펄스 당 빔 조사시간은 8ms였으며 빔의 포커스는 조사표면에 일치시켰다. 두께 1mm 조건에서 빔파워 20W, 25W의 빔 파워변화에 따른 각각의 용접시편 용융부 단면을 기준으로 열원의 형상변수(Xe, Xm, Xi, Re, Rm, Ri) 및 최대 에너지밀도(Q₀, Q₁)를 결정하고 빔파워 변화에 따른 형상변수와 최대 에너지밀도 변화의 비례적 상관관계를 정립하였다. 이를 이용하여 Table 1의 두께별 빔파워 조건에 대한 열원모델링과 열 해석을 하였다. 그리고 실험 후 조건별로 다량의 시편을 마운팅한 후 폴리싱, 에칭, 이미지 애널라이저(image analyzer)를 통한 치수측정을 반복하여 용융부 깊이가 최대로 나오는 단면사진들을 얻었고 해석결과와 비교분석 하였다. 예측된 용융부의 비교는 Fig. 7과 같이 용접선 횡단면을 이용했기 때문에 시편의 용융부 횡단면사진 촬영방법은 위와 같이 하였고, Fig. 11의 빔 파워변화에 따른 용접선 종방향 단면사진에서 최대 용융깊이 편차는 약 50 μ m 이내임을 볼 수 있다.

Table 1 Experimental conditions of Nd:YAG pulse laser welding

Thickness (mm)	Beam power(W)				
	20	25	30	33	35
1	20	25	30	33	35
2	30	35	40	45	-
3	30	35	-	-	-

Fig. 1은 해석모델과 레이저빔의 조사위치 및 이동방향을 나타낸 것으로 용접선을 기준으로 좌우 대칭임을 고려하여 1/2모델링 하였다. 빔의 조사부는 순간적인 가열과 냉각의 복잡한 열 이력을 겪게 됨으로 조밀하게 요소 분할하였고, 해석모델의 크기는 용접실험 시편 크기와 동일하다.

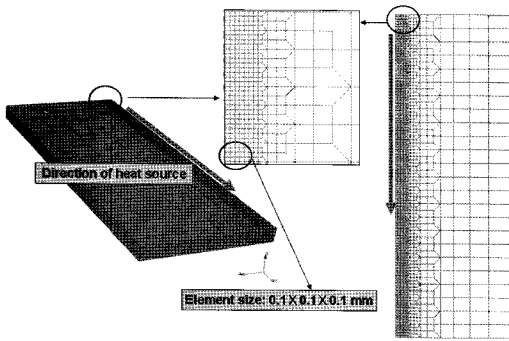


Fig. 1 A half of Model of AISI 304 stainless steel plate

2.2 3차원 이동열원 모델

Fig. 2(a)는 입열의 경계조건으로 사용된 3차원의 콘형 가우시안 열원모델을 나타낸 것이다. 그림

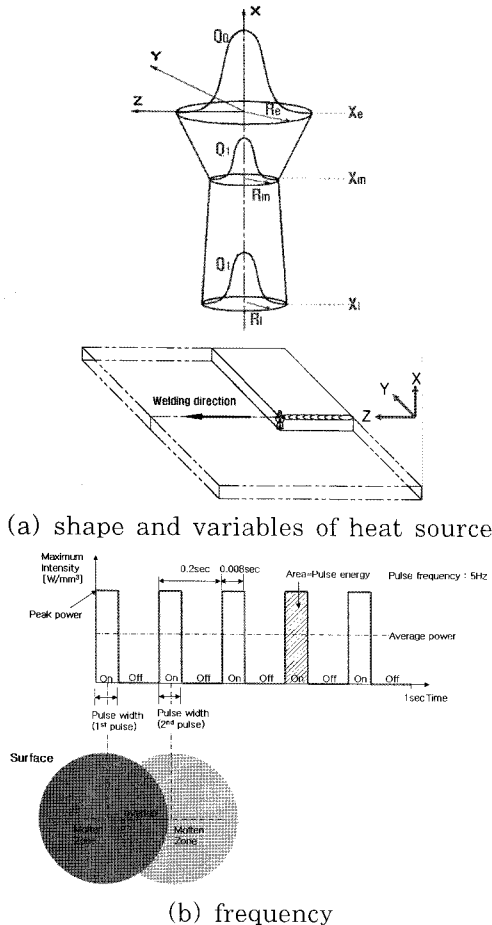
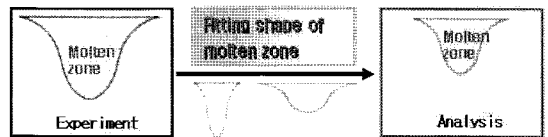


Fig. 2 Assumed Moving heat source for Nd:YAG pulse laser

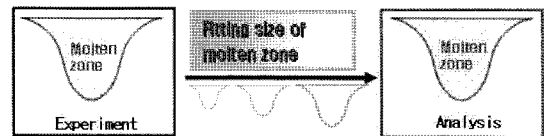
에서 열원중심으로부터 위치에 따른 단위체적당 입열량은 열원의 적용범위인 형상변수 X_e (3차원 열원 윗면의 X축 좌표 값), X_m (3차원 열원 중간면의 X축 좌표 값), X_i (3차원 열원 밑면의 X축 좌표 값), R_e (열원 윗면의 가우시안 분포반경), R_m (열원 중간면의 가우시안 분포반경), R_i (열원 밑면의 가우시안 분포반경) 값과 최대 에너지밀도 (Q_0, Q_1) 값에 따라 달라진다. 따라서 열해석 후 용융부의 크기 및 형상은 열원모델에 지배된다. 이러한 3차원 콘형 가우시안 열원의 단위면적당 입열량을 수식적으로 간단히 표현하면 다음 식과 같다.

$$Q = Q_0 \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) \quad (1)$$

여기에서 Q 는 단위 체적당 입열량, Q_0 는 3차원 가우시안 열원의 단위 체적당 최대입열량, r 은 열원 중심에서 입열 지점까지의 거리, r_0 는 열원의 X방향 임의깊이에서 가우시안 정규분포의 반경 값이고 Q_0 와 r_0 는 Fig. 3(a)의 형상변수 변화에 따라 그 값이 결정되어진다. 또한 Fig. 2(b)와 같은 주파수를 갖는 펄스 레이저 열원을 입열조건으로 주기 위하여 서브프로그램을 작성하였다. 이 서브프로그램을 이용하여 펄스의 형태 적용시킬 수 있다.



(a) changing shape variables($X_e, X_m, X_i, R_e, R_m, R_i$) of heat source



(b) changing maximum intensity(Q_0, Q_1) of heat source

Fig. 3 Procedure of heat source modeling

열원 모델의 형상변수($X_e, X_m, X_i, Re, R_m, Ri$)와 최대에너지밀도(Q_0, Q_1)값을 결정하기 위해 입열조건에서 빔파워를 고정변수(20W, 25W)로 놓고 형상변수 및 최대에너지밀도 값들을 변화 시키면서 시뮬레이션 하였다. 수화의 해석과정에서 용접시편과 시뮬레이션 결과를 비교분석하여 용융부의 형상이 거의 일치되는 조건을 찾을 수 있으며 이때 열원 형상변수 및 최대에너지밀도 값을 결정한다. Fig. 3은 열원모델링 과정의 형상변수 및 최대에너지밀도 값 결정의 과정을 도식적으로 나타낸 것이다. 두께 1mm에 대한 두 가지 빔파워(20W, 25W)조건에서 형상변수 및 최대에너지밀도 값 변화를 선형의 비례관계로 정립하여 빔파워 변화에 따른 열원의 형상변수 및 최대에너지밀도 값 들을 결정한다. 이렇게 설계된 열원을 이용하여 재료 두께 및 빔파워 변화에 따른 열 해석을 하고 동일조건의 용접시편과 비교분석하여 열원모델의 적합성을 검증하였다.

2.3 경계조건 및 물성치

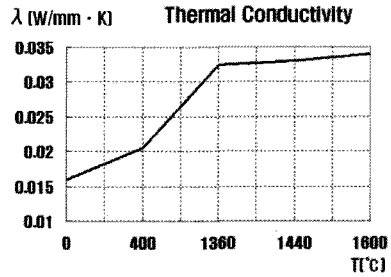
열 해석의 경계조건은 펄스 레이저빔에 의한 입열조건과 재료의 냉각조건으로 나누어 볼 수 있다. 펄스형 Nd:YAG 레이저의 열원 각부 치수, 빔 파워 및 속도, 펄스 주파수 등의 입열조건을 변화시키며 시뮬레이션 할 수 있는 서브프로그램을 작성하여 해석에 적용시켰다. 그리고 냉각조건으로 복사사에 의한 열전달과 상온의 공기와 가열된 용접재료 사이의 대류 열전달이 고려된 서브프로그램을 작성하였다.

Table 2 Material properties of AISI 304

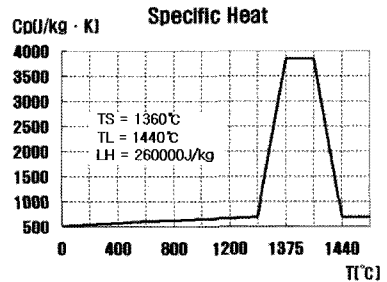
Thermal property	Value
Conductivity(W/(mm·K))	Temperature dependent
Specific heat(J/(kg·K))	Temperature dependent
Mass density(kg/mm ³)	7.912×10^{-6} (constant)
Emissivity	0.14(constant)

고밀도 에너지를 이용한 레이저 용접에서 용접부는 순간적으로 가열되어 온도가 급상승됐다가 국부 가열 후에는 급속도로 냉각된다. 이렇게 큰 온도변

화를 겪는 재료의 열적 물성은 온도에 따라 큰 차이를 나타내며, 열 해석을 위해서는 온도에 따른 데이터로 적용되어야만 한다. Table 2와 Fig. 4는 해석에 적용된 방법과 물성치를 나타낸 것이다.



(a) conductivity



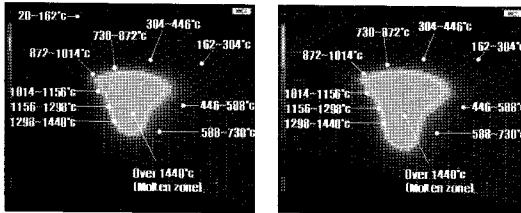
(b) specific heat

Fig. 4 Thermal properties

3. 해석결과 및 고찰

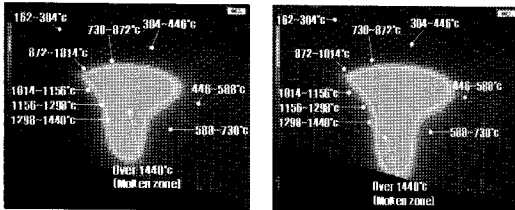
Fig. 5는 두께 1mm 평판의 용접 시작 후 1.808 초 경과지점 즉 해석모델에서 총 용접거리 50mm 중 열원중심이 1.808mm에 위치했을 때의 온도분포를 나타낸 것이다. 용융부는 실제와 유사한 역 종형이고 레이저 출력 증가에 따라 용융 깊이 및 범위가 넓어지는 것을 볼 수 있다. Fig. 5(a)는 레이저 출력 20W에 대한 해석결과이다. 용융부는 폭 0.72mm, 깊이 0.48mm이고, 용융부에서 약 300 °C까지의 거리는 약 0.3~0.4mm정도로 매우 작았다. 이는 레이저용접의 특성인 좁은 열영향부를 잘 나타내고 있다. Fig. 5(b)는 레이저 출력을 25W로 적용하여 해석한 결과로, 레이저 출력이 증가한 만큼 비드 폭이 0.84mm, 깊이는 0.64mm로 20W일 때 보다

미소하게 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 5(c)는 레이저 출력 30W로 해석한 결과이다. 레이저 출력이 증가 할수록 온도 분포 범위가 넓어지는 것을 알 수 있으며 용융부의 비드 폭은 0.99mm, 깊이는 약 0.8mm였다. Fig. 5(d)는 레이저 출력을 33W로 해석한 결과로서 비드 폭은 1.08mm, 용융부 깊이는 0.96mm이며 Fig. 5(c)에 비하여 450~590°C 온도범위 분포는 확연히 넓어지는 모습을 볼 수 있다. Fig. 5(e)는 레이저 출력을 35W인 해석결과로서 두께 1mm의 맞대기 용접인 경우 35W에서 완전 용입이 되었다. 따라서 두께 1mm인 평판의 펄스 레이저 용접의 빔 출력은 35W 정도가 적당할 것으로 생각된다.



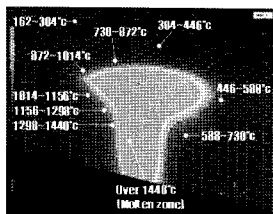
(a) 20W

(b) 25W



(c) 30W

(d) 33W



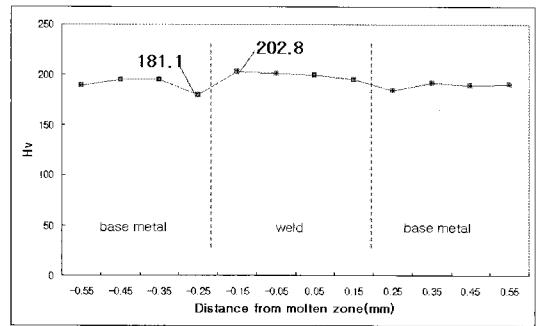
(e) 35W

Fig. 5 Temperature distributions for 1mm thick plate

Fig. 6은 미소경도 측정 위치 및 값들을 나타낸 것이다. Fig. 6(b)에서 모재와 용융부 사이 경도



(a) locations of indented points



(b) Micro-Vicker's hardness

Fig. 6 Measuring points of Micro-Vicker's hardness of butt welding specimen

값이 저하되는 열영향부의 범위는 약 0.05 mm로써 Fig. 5의 온도분포 결과와 비교했을 때 열영향부의 온도범위는 약 1298~1440°C로 예측된다. 이때 온도 범위 폭 값은 약 0.03 mm로 좁은 열영향부를 갖는 펄스 레이저 특성과 잘 일치하였다.

Fig. 5의 해석결과를 검증하기 위한 동일 조건 실험 시편의 용접 진행방향에 수직단면 사진들을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)는 두께 1mm, 레이저 출력 20W인 실험과 해석결과를 비교하여 나타낸 것으로, 이때 Fig. 2의 형상 변수 값들은 $Re=0.8$, $Rm=0.18$, $Ri=0.2$, $Xe=0.0$, $Xm=-0.05$, $Xi=-0.53$, 최대에너지 밀도 값들은 $Q_0=4250$, $Q_1=4000(W/mm^3)$ 으로 결정되었다. Fig. 7(b)는 레이저 출력 25 W인 경우에 해석과 실험을 비교하여 나타낸 것이다. 실험과 해석결과는 거의 일치하였고, 형상 변수 값들이 $Re=0.9$, $Rm=0.18$, $Ri=0.2$, $Xe=0.0$, $Xm=-0.05$,

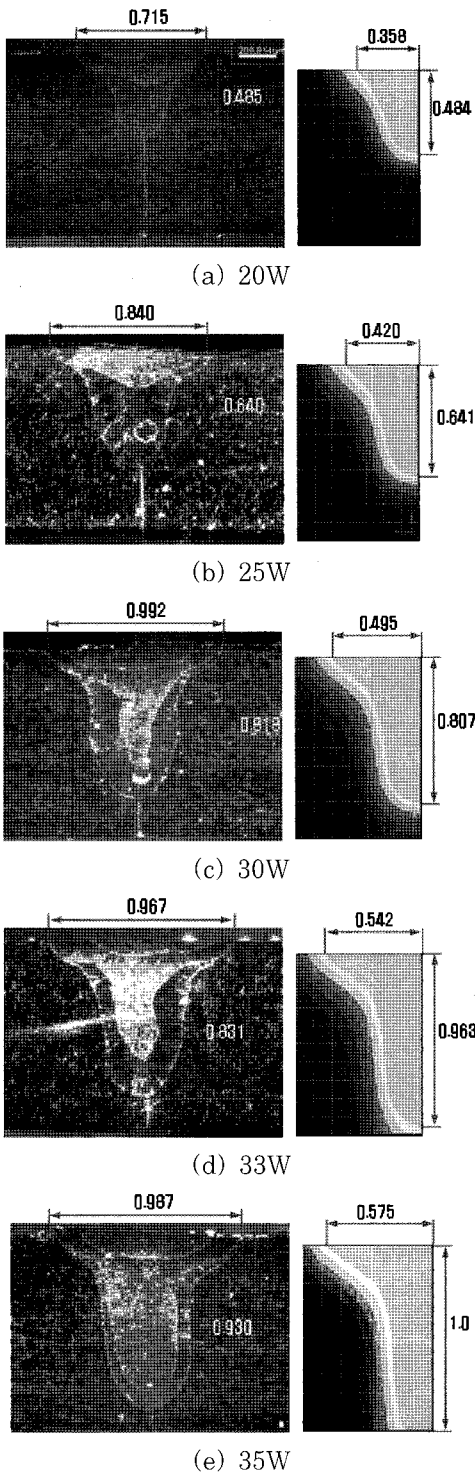
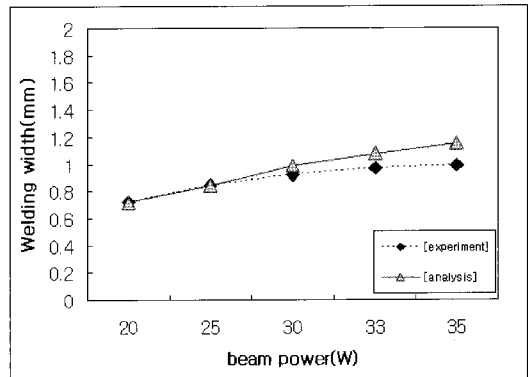
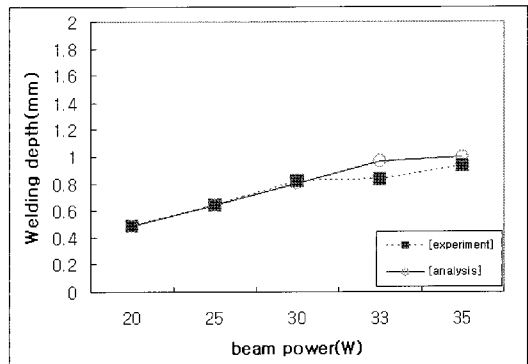


Fig. 7 Comparisons of molten zone of simulated and experimental results for 1mm thick plate

$X_i = -0.67$ 일 때 잘 일치 하였고, 최대에너지밀도 값들은 $Q_0 = 4650$, $Q_1 = 4050 (W/mm^3)$ 으로 결정되었다. Fig. 7(a)와 (b)의 두 레이저 출력 변화량에 대한 각 변수들이 변화되는 기울기 값을 이용하여 나머지 레이저 출력에 대한 입열 열원의 형상 변수 및 최대에너지 밀도 값은 계산되며 해석의 입열 조건으로 적용되었다. Fig. 7(c)는 레이저 출력 30W일 때 해석과 실험을 비교하여 나타낸 것이다. 폭과 깊이에 대한 비교오차 범위는 30W일 때 약 7% 이내로 Fig. 8에서 해석과 실험이 잘 일치함을 볼 수 있다. Fig. 7(d), (e)는 레이저 출력 33, 35W일 때 비드 폭과 용융 깊이를 비교하여 나타낸 것으로 해석과 실험결과에서 약간의 차이가 있음을 볼 수 있고, 그 비교오차 정도는 약 7~14%이다. 이는 Fig. 7(d), (e)에서 완전 용입에 가까



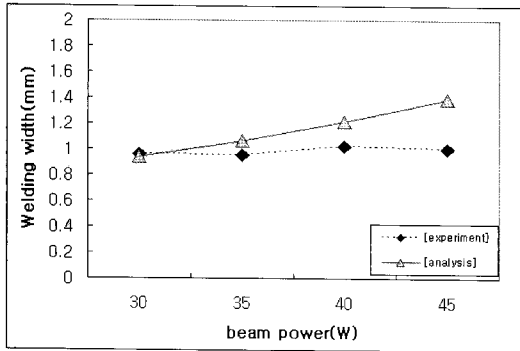
(a) width of molten zone



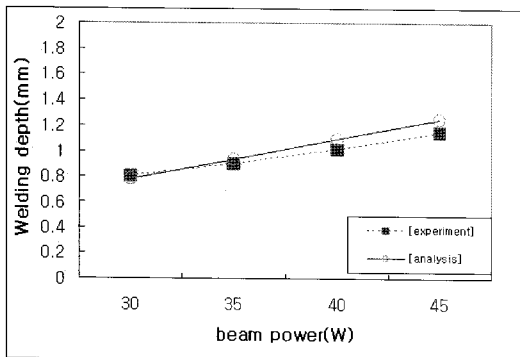
(b) depth of molten zone

Fig. 8 Molten zone size of butt welded 1 mm thick plate for each beam power

위질수록 깊이방향으로의 열전도에 의한 열전달량이 작아지고 축적되는 열의 양이 많아졌기 때문이며, 소재를 고정하고 있는 용접 지그로의 열전달이 해석에 반영되지 못한 것이 그 원인으로 생각된다.



(a) width of molten zone



(b) depth of molten zone

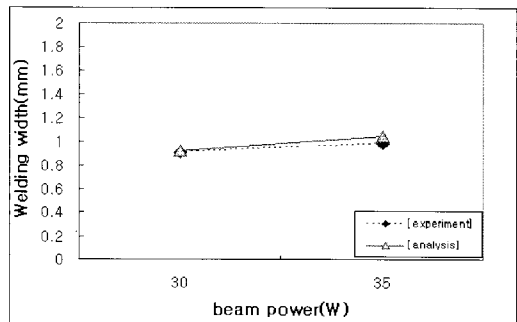
Fig. 9 Molten zone size of butt welded 2 mm thick plate for each beam power

Fig. 8(a)는 두께 1mm 평판의 맞대기 용접에서 레이저 출력 변화에 대한 용융부 비드 폭을 나타낸 것이다. 레이저 출력의 증가에 따라 오차의 범위가 약간 증가하지만 실제 용접 보다 해석의 경우가 폭이 커진 것은 실제 용접상황에서는 문제시 되지 않을 것으로 생각된다. Fig. 8(b)를 Fig. 7의 해석과 실험의 용융부 사진과 함께 비교해보면 앞서 기술한 내용과 같이 완전 용입에 가까워질수록 오차 정도가 커지는 경향을 그래프에서 볼 수 있으며 용접시편 고정 지그를 해석모델에 추가하여 지그 쪽으로의 열전달 부분을 해석에 포함시키면 보다 정

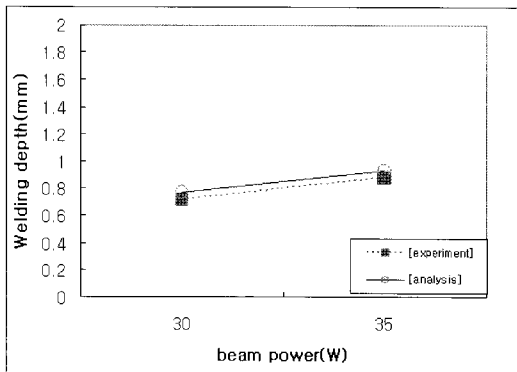
확한 용융부 및 소재 내 온도분포 예측이 가능할 것으로 생각된다.

Fig. 9(a)는 두께 2mm 평판의 맞대기 용접에서 레이저 출력 변화에 대한 용융부 폭을 나타낸 것으로 레이저 출력의 증가에 따라 오차의 범위가 약간 증가하는 경향을 나타냈다. 이 차이는 실험 및 실험시편의 처리에서의 오차가 있었던 것으로 생각되며 Fig. 8(a), Fig. 10(a)에서의 레이저 출력 증가에 따른 용융부 폭 변화에 대한 실험 데이터가 선형에 가까운 증가 곡선인 반면에 Fig. 9(a)의 경우는 그렇지 않음을 볼 수 있다. Fig. 9(b)는 레이저 출력 변화에 대한 깊이를 나타낸 것으로 실험과 해석이 비교적 잘 일치하였다.

Fig. 10(a)는 두께 3mm 평판의 맞대기 용접에서 레이저 출력 변화에 대한 용융부 폭을 나타낸 것이고 Fig. 10(b)는 용융깊이에 대한 실험과 해

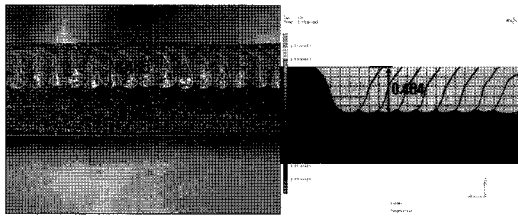


(a) width of molten zone

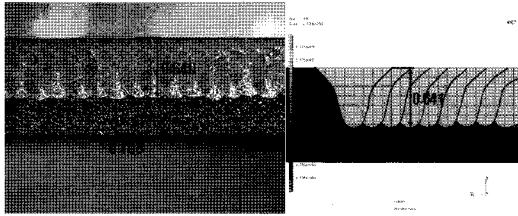


(b) depth of molten zone

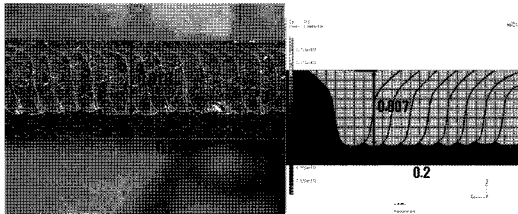
Fig. 10 Molten zone size of butt welded 3 mm thick plate for each beam power



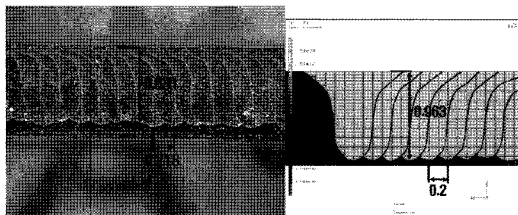
(a) 20W



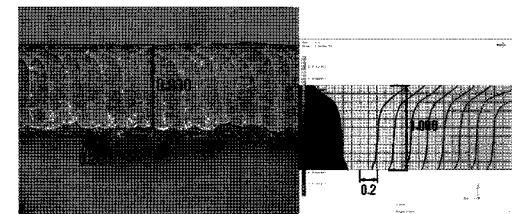
(b) 25W



(c) 30W



(d) 33W



(e) 35W

Fig. 11 Longitudinal sections of butt welding for each beam power and 1 mm thick plate

석결과를 비교한 그래프이다. 실험과 해석의 결과가 매우 잘 일치하였다. 레이저 출력과 소재 두께 변화에 있어서 용융부 폭 및 깊이에 대한 Fig. 8~Fig. 10을 비교해 볼 때 해석을 통해 예측된 용융부 크기는 전반적으로 실험값보다 약간 큰 경향을 보였지만 각각의 조건에서 그 오차는 비교적 작았다. 따라서 열원모델링을 이용하여 맞대기와 같은 평판 레이저용접에서 레이저 출력, 용접속도, 재질, 소재 두께, 용접선 유형 등의 변화에 따른 용융부 및 소재 내 온도분포 예측이 가능함으로 본 연구는 관련 산업분야에 유용할 것으로 생각된다.

Fig. 11은 맞대기 용접에서의 용접 진행 방향 단면의 광학 현미경 사진과 해석결과를 비교하여 나타낸 것이고, 펄스폭에 해당하는 때 순간의 해석결과를 그대로 각각을 이미지저장하고 합하는 방법을 사용하여 표현하였다. 펄스레이저 용접의 경우 펄스 당 재료 내 용입의 중첩을 통해 모재 간 접합이 이루어지고, Fig. 11의 용접단면 사진에서 중첩의 최저 깊이가 실제 용접 깊이가 된다. 따라서 빔의 속도 및 출력 등에 따라 중첩된 정도가 다르게 되므로 적정 중첩도의 조절이 필요하다. 시편처리를 통해 Fig. 11의 용접단면 사진을 얻는 데는 절단, 연마, 경면처리, 에칭 등의 많은 반복된 과정이 요구되므로 해석을 통한 중첩도의 예측은 용접 조건설정에 소요되는 시간을 줄일 수 있다. 중첩도는 Fig. 2(b)에서와 같이 한 펄스의 표면 용융부에 대해 중첩된 부분의 면적비율로 계산된다. Fig. 11(a) 레이저 출력 20W의 경우의 해석과 실험을 통한 용융부 중첩도는 각각 약 46%, 약 45%, Fig. 11(b) 25W인 경우의 해석과 실험의 중첩도는 약 49%, 약 47%, Fig. 11(c) 30W인 경우의 중첩도는 각각 약 55%, 53%, Fig. 11(d) 33W인 경우의 중첩도는 해석에서 약 56%, 실험에서 약 55%였고, Fig. 11(e)의 35W의 출력인 경우에 중첩도는 각각 약 58%, 약 57%로 서로 매우 잘 일치함을 볼 수 있다. Fig. 11에서 레이저 출력 증가에 따라 중첩도는 커지는 것을 알 수 있고, 실험과 해석의 중첩도 비교오차를 보면 4%로 내외로 잘 일치하였다. 재료의 두께, 빔파워 변화에 따른 용융부 중첩도의 예측은 해석을 통해 가능함을 알

수 있었고 해석적 방법을 통한 용접조건의 설정은 실험을 통한 방법의 많은 시행착오를 줄여줄 수 있을 것임으로 이를 산업현장에 적용시킨다면 장비 구축 및 제품 개발에 있어서 시간과 비용을 절감시킬 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결 론

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

(1) AISI 304 스테인리스 강판의 맞대기 용접 실험과 유한요소 해석결과의 비교분석을 통해 펄스 레이저빔 조건설정에 유용한 열원 모델을 설계하였으며, 열 해석결과는 동일조건의 실험과 잘 일치하였다.

(2) 빔 파워 및 두께변화에 대해서 설계된 열원 모델을 이용한 용융부 및 온도분포 예측은 실험을 통해 검증됨으로써 본 연구방법은 펄스 레이저용접 변수변화에 따른 레이저빔의 적정조건 설정에 유용할 것이다.

(3) 두께 1mm 시편의 맞대기 용접에서 양호한 용입 상태를 나타낸 35W 조건인 경우 미소경도가 가장 작게 측정된 위치와 열 해석의 온도분포 결과를 비교 분석했을 때 열영향부로 생각되는 온도범위는 1298~1440°C로 생각되며 이때 온도 범위 폭 값은 약 0.03mm로 좁은 열영향부를 갖는 펄스 레이저 특성과 잘 일치하였다.

(4) 레이저 출력 증가에 따라 중첩도는 커지는 것을 알 수 있었고, 실험과 해석의 중첩도 비교오차를 보면 4%로 내외로 잘 일치하였다. 따라서 재료두께, 빔파워 등에 따른 적정 용접속도 및 펄스 주파수 설정이 가능할 것으로 생각된다.

(5) 펄스 레이저 용접에서 해석적 방법을 통한 적정 용접조건 설정이 가능하며 실험의 시행착오를 줄일 수 있으므로, 이를 산업현장에 적용시킨다면 장비 구축 및 제품 개발에 있어서 시간과 비용절감 및 생산성향상이 기대된다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 대학전력연구센터 지원 육성사업의 지원으로 이루어 졌으며, 이에 관계자분들에게 감사드립니다.

참고문헌

- [1] D. Rosental, "Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting", *Welding J.*, Vol. 20, No.5, pp. 220-234, 1941.
- [2] O. Westby, "Temperature Distribution in the Workpiece by Welding", Dept. of Metallurgy and Metals Working, The Technical Univ. of Norway, Ph.D Dissertation, 1968.
- [3] E. Friedman, "Thermo-mechanical Analysis of the Welding Process using the Finite Element Method", *Trans. ASME, J. Vessel Techno*, pp. 206-213, 1975.
- [4] J. Mazumder and W. M. Steen, "Heat Transfer Model for CW Laser Material Processing", *J. Appl. Phys.*, Vol.51, No. 2, pp. 941-947, 1980.
- [5] D. H. Kim, S. S. Kim and C. J. Kim, "A study on the pure Al weldability using a pulsed Nd:YAG laser", *Journal of the Korean Welding Society*, Vol. 11, No. 1, pp. 52-61, 1993.
- [6] J. G. Byeon, K. S. Park, W. J. Han and S. H. Shim, "Welding Characteristics of Inconel Plate Using Pulsed Nd:YAG Laser Beam", *The Journal of Korean Society of Laser Processing*, Vol. 3, No. 1, pp. 12-20, 2000.
- [7] J. D. Kim, J. H. Lee and S. H. Kim, "Weldability of Low Carbon Steel with

Al Coating Condition by Nd:YAG Laser", Journal of the society of marine engineering, Vol. 31, No. 6, pp. 736-743, 2007.

- [8] Y. T. Yoo, Y. S. Oh, K. B. Ro and K. G. Lim, "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, pp. 58-67, 2003.
- [9] G. T. Lee and J. W. Kim, "A Study on the Three-Dimensional Heat Flow Analysis in the Laser Welding for Deep Penetration", Journal of Korean Welding Society, Vol. 18, No. 3, pp. 76-82, 2000.



서 정(徐廷)

1960년생, 1982년도 부산대학교 기계설계학과 졸업(학사), 1984년도 부산대학교 기계설계학과 졸업(석사), 1992년도 포항공과대학 기계공학과 졸업(박사), 1993년~현재 한국기계연구원 지능형생산시스템 연구본부 레이저공정연구팀 책임연구원



조해용(趙海龍)

1957년생, 1983년 부산대학교 기계공학과 졸업(공학사), 1985년 부산대학교 기계공학과 졸업(공학석사), 1991년 부산대학교 기계공학과 졸업(공학박사), 1993~현재 충북대학교 기계공학부 교수, 2007~현재 중전기 미래 기술 개발 연구센터 연구센터장(산업자원부지정)

저 자 소 개



김관우(金寬佑)

1974년생, 1997년도 충북대학교 공과대학 정밀기계공학과 졸업(공학사), 2001년 충북대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 충북대학교 정밀기계공학과 박사과정



남기정(南基晶)

1968년생, 1997년도 대전대학교 기계설계공학과 졸업(학사), 1999년 충북대학교 기계공학과 졸업(석사), 2007년도 충북대학교 정밀기계공학과 졸업(박사), 현재 (주)한라이비텍 선임 연구원



이제훈(李濟薰)

1956년생, 1990년도 독일 Stuttgart 기계공학과 졸업(석사), 1996년도 독일 Stuttgart 기계공학과 졸업(박사), 1996년~현재 한국기계연구원 지능형생산시스템 연구본부 레이저공정연구팀 책임연구원