

< 논문 >

# Nd:YAG 레이저 필렛 용접의 비드형상 예측에 관한 유한요소해석

김관우\* · 이재훈\*\* · 서 정\*\* · 조해용†  
(2006년 12월 1일 접수, 2007년 7월 2일 심사완료)

## Finite Element Analysis for Prediction of Bead Shape of Nd:YAG Laser Fillet Welding

Kwan Woo Kim, Jae Hoon Lee, Jeong Suh and Hae Yong Cho

**Key Words:** Bead Shape(비드형상), FEM(유한요소법), Fillet Welding(필렛용접), Laser Welding(레이저용접), Moving Heat Source(이동열원)

### Abstract

Nd:YAG pulse laser fillet welding of stainless steel plate was simulated to find welding condition by using commercial finite element code MARC. Full 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 fillet 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.

### 1. 서 론

펄스형 Nd:YAG 레이저의 광원은 침투출력, 펄스폭, 반복률 등에 따라 레이저 출력의 가변이 용이하고 이를 사용한 용접 시 열 영향부가 매우 작고 정밀접합도 가능하기 때문에 많이 사용되고 있다. 그러나 접합 재료 및 형태에 따른 적정 용접조건 설정을 위해서는 용접속도, 빔의 파워, 초점 위치, 펄스의 폭, 주파수 등의 결정이 필요하고 많은 부분을 실험에 의존하고 있다. 따라서 새로운 제품개발 등에서 용접조건 설정과 장비구축에 많은 시간과 비용이 소비되고 있고 실험을 통한 시행착오를 줄일 수 있는 해석적 연구가 필

요하다.

관련 실험적 연구로서 Kim 등<sup>(1)</sup>은 펄스 레이저의 출력제어 변수가 용입과 용접변수인 파워밀도, 펄스에너지 등에 미치는 영향에 대하여 연구하였고, Lee 등<sup>(2)</sup>은 펄스 레이저를 사용하여 TEM00 모드를 실험적 방법으로 구현해보고, 이론적으로 얻은 TEM00 모드의 출력빔 에너지 강도 분포와 실험 결과를 비교, 검토하였다. 그리고 Hong 등<sup>(3)</sup>은 플래시램프의 전류펄스파형 및 펄스반복율에 따른 레이저 출력 특성에 관하여 연구하였고, Heo 등<sup>(4)</sup>은 알루미늄 합금의 동종 두께 용접에 대해서 실험계획법을 이용하여 펄스 파형에 따른 용접 특성을 분석하였다. 해석적 연구로서 Lee 등<sup>(5)</sup>은 2가지 표면열원을 적용하여 용접시 재료 내 온도분포를 예측하였지만 보다 정확한 용융부 형상 및 크기 예측을 위해서는 체적열원의 적용이 필요할 것으로 생각된다. 또한 Nam 등<sup>(6)</sup>은 BOP 용접에 대하여 콘형 가우시안 열원

† 책임저자, 회원, 충북대학교 기계공학부  
E-mail : hycho@chungbuk.ac.kr  
TEL : (043)261-2464 FAX : (043)263-2448  
\* 충북대학교 대학원  
\*\* 한국기계연구원

을 모델링하여 재료내의 온도분포 및 용융부의 폭과 깊이를 예측 하였으나 그 정확한 형상예측은 못하였고, Cho 등<sup>7)</sup>은 검증된 콘형 가우시안 열원을 초소형 열교환기 용접해석에 적용시켜 용접 시 온도분포결과를 분석하여 Nd:YAG 펄스 레이저 용접 사용가능 여부를 판단하였다. 그러나 예측된 용융부 형상이 역종형인 실제 형상과 다르다는 문제점이 있었다. 이후 Cho 등<sup>8)</sup>은 입열열원을 재수정하여 펄스 레이저 맞대기 용접에 적용하여 실제와 비슷한 형태와 크기의 용융부를 예측할 수 있었다.

본 연구에서는 상용유한요소 프로그램인 MARC를 이용하여 선행된 AISI 304 강판의 펄스 레이저 맞대기 용접해석의 열원모델을 수정, 적용하여 필렛 용접을 시뮬레이션 하였고, 보다 정확한 용융부 크기 및 형상을 예측하고자 했으며, 그 결과를 동일조건인 실험과 비교분석하였다. 펄스 레이저 용접 중 키흔에 의한 열전달이 고려된 새로운 3차원 이동 열원모델을 설계하여 해석의 입열조건으로 적용시켰고, 빔 파워 변화에 따른 열해석결과 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. 해석과정은 동일조건의 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, 동일조건의 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 강판의 필렛 용접을 하였으며 장비의 주요제원은 Table 1과 같다.

Fig. 1은 용접 장치의 전체적인 모식도를 나타

Table 1 Specification of equipment

Equipment	Parameter	Description and specification
Nd:YAG Laser	Model	JK701
	Average laser power	400(W)
	Laser Energy	55(J)
	Pulse Duration	0.5(ms) ~ CW
	Frequency	0.2 ~ 500(Hz)

Table 2 Experimental conditions of Nd:YAG pulse laser fillet welding

Thickness (mm)	Beam power(W)		
	1	30	35
2	30	35	40
3	30	40	50

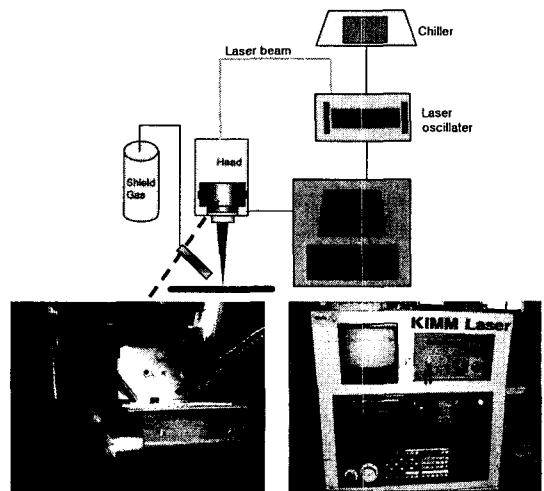


Fig. 1 Aspects of Nd:YAG laser equipment

낸 것으로 발진기에서 발진된 빔은 빔 확대기로 확대된 후 집광렌즈로 집속되고 광파이버를 거쳐 재료 가공위치로 전송된다. 실험에서 레이저 빔의 스폿 사이즈는 약 200 $\mu$ m였고 용접속도에 맞추어 레이저 노즐의 위치를 정밀 제어하였다. 아르곤 가스를 10 l/min의 유속으로 분사시켜 증성분위기에서 용접하였고 두께별 빔 파워 변화조건은 Table 2와 같다. 이때 용접속도는 1mm/sec, 펄스 주파수는 5Hz, 펄스 당 빔 조사시간은 8ms였다. 빔의 포커스는 조사표면에 일치시켰다. 두께 1mm, 빔파워 30W인 조건에서 용접시편 용융부

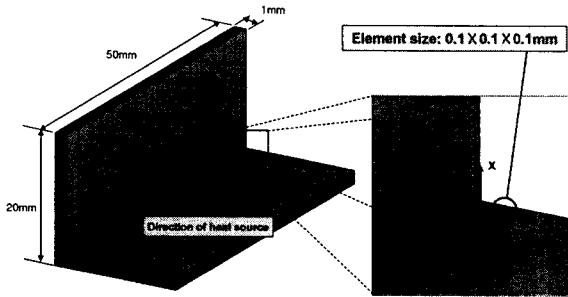


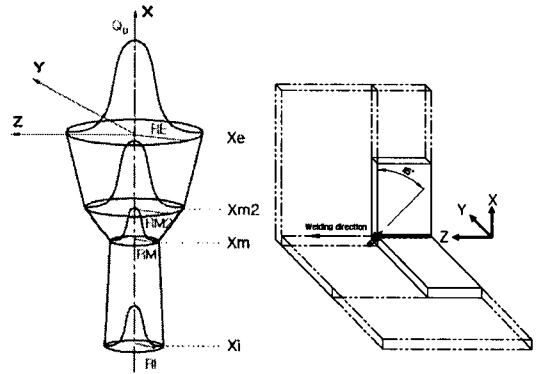
Fig. 2 3D Model of AISI 304 stainless steel plate for thermal analysis

단면을 기준으로 열원의 형상변수( $X_e$ ,  $X_{m2}$ ,  $X_m$ ,  $X_i$ ,  $R_e$ ,  $R_{m2}$ ,  $R_m$ ,  $R_i$ ) 및 최대에너지밀도( $Q_0$ )를 결정하고 35W의 빔파워 변화에 따른 형상변수와 최대에너지밀도 변화의 비례적 상관관계를 정립하였다. 이를 이용하여 Table 2의 두께별 빔파워 조건에 대한 열원모델링을 하였고 열 해석을 하였다. 그리고 실험 후 조건별로 다량의 시편을 마운팅한 후 폴리싱, 에칭, Image analyzer를 통한 치수측정을 반복하여 최대 용입깊이의 빔 이송 종방향 단면을 얻었고, 펄스 당 최대 용입깊이들의 평균값을 구했다. 이때 값들의 편차는 수 십  $\mu\text{m}$ 로 매우 작았다. 다음으로 횡단면 최대 용입깊이가 종단면 평균값에 도달했을 때의 단면사진들을 얻었고 해석결과와 비교분석 하였다.

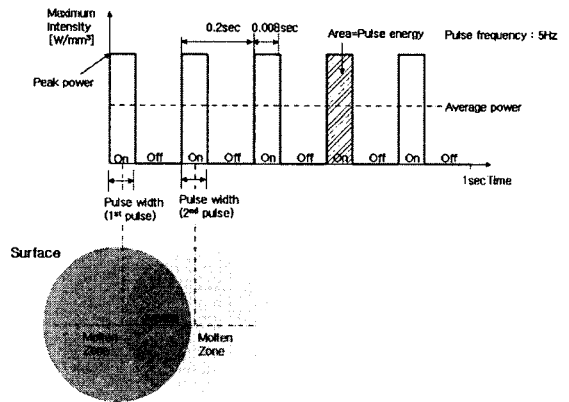
Fig. 2는 두께 1mm 필렛 용접 해석모델과 빔의 조사위치 및 이동방향을 나타낸 것이다. 열원의 이동방향은 Z축이고, “L”자 형태이며 수직평판과 수평평판이 서로 교차할 때 수직평판 옆면에 수평평판의 두께 면이 닿도록 모델링하였다. 이때 절점개수는 16533이고 요소개수는 14520이다. 두께 2mm, 3mm인 경우도 같은 방법으로 모델링하였다. 2mm인 경우의 절점개수는 41583이고 요소개수는 38640이며 3mm인 경우의 절점개수는 98239이고 요소개수는 92520이다. 해석모델의 크기는 용접실험 시편 크기와 동일하다.

2.2 3차원 이동열원 모델

Fig. 3(a)는 입열의 경계조건으로 사용된 3차원의 콘형 가우시안 열원모델을 나타낸 것이다. 그림에서 가장 윗부분의 콘형 열원은 실제 용접에 있어 레이저 초점의 빔 반사에 의한 필렛 벽면에서의 표면부 입열에 대한 경계조건으로 사용되며 그 밑면( $X_{m2}$  지점) 중심이 레이저 빔의 초점위치



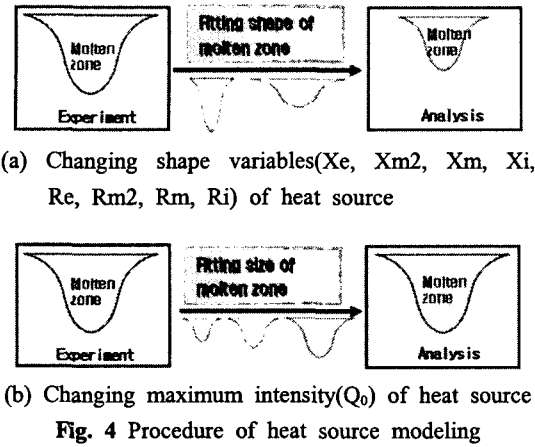
(a) Shape and variables of heat source



(b) Frequency

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

이다. 열원중심으로부터 위치에 따른 단위체적당 입열량은 열원의 적용범위인 형상변수  $X_e$ (3차원 열원 윗면의 x축 좌표 값),  $X_{m2}$ (3차원 열원 비드 폭 윗면의 x축 좌표 값),  $X_m$ (3차원 열원 비드 폭 밑면의 x축 좌표 값),  $X_i$ (3차원 열원 밑면의 x축 좌표 값),  $R_e$ (열원 윗면의 가우시안 분포반경),  $R_{m2}$ (열원 비드 폭 윗면의 가우시안 분포반경),  $R_m$ (열원 비드 폭 밑면의 가우시안 분포반경),  $R_i$ (열원 밑면의 가우시안 분포반경) 값과 최대 에너지밀도( $Q_0$ ) 값에 따라 달라진다. 따라서 열 해석 후 용융부의 크기 및 형상은 열원 모델에 지배된다. 용융부 단면의 형상은 키흐의 발생여부에 따라 전도형과 키흐형으로 나누어 볼 수 있으며 형상변수 들의 값 설정에 따라 두 가지 모두에 대해 열원 모델을 적용 시킬 수 있다. 이러한 3차원 콘형 가우시안 열원의 단위체적당



입열량을 수식적으로 간단히 표현하면 다음 식과 같다. 여기에서  $Q$ 는 단위 체적당 입열량,  $Q_0$ 는

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

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. 3(b)와 같은 주파수를 갖는 펄스 레이저 열원을 입열조건으로 주기 위하여 서브프로그램을 작성하였다. 이 서브프로그램을 이용하여 펄스의 형태 및 주파수 변화에 따른 다양한 입열조건을 해석에 적용시킬 수 있다.

열원 모델링 과정은 첫째로, Fig. 4(a)에서와 같이 특정 빔파워(30W)에서 열원 형상변수 값을 변화시키면서 해석한 결과를 동일조건인 실험시편 용융부와 비교한다. 이를 반복수행하여 용융부 형상이 서로 잘 일치되는 조건에서 열원의 형상변수 값들을 결정한다. 둘째로, Fig. 4(b)에서와 같이 형상변수 값을 고정시키고 빔파워를 조절하여 용융부 크기가 서로 잘 일치되는 조건에서 빔의 최대 에너지 밀도( $Q_0$ )값을 결정한다. 다음으로 결정된 최대 에너지 밀도 값을 이용, 비례식을 적용하여 파워를 증가시킨 35W 조건에서 열 해석을 하여 실험시편 용융부와 일치되는 조건에서 형상변수 값들을 결정하고, 빔파워에 따른 형상변수 값 변화의 상관관계를 정립한다. 이렇게 설계된 열원을 이용하여 레이저 출력 변화(40W, 50W)와 두께(1mm, 2mm, 3mm)에 따른 열전달 해석

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 <sup>3</sup> )	7.912 × 10 <sup>-6</sup> (constant)
Emissivity	0.14(constant)

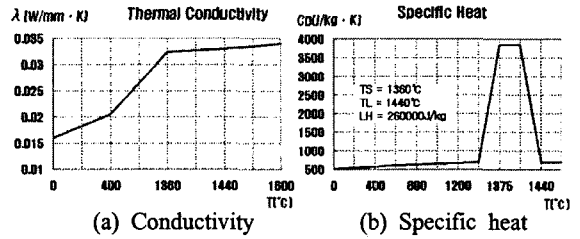


Fig. 5 Thermal properties

을 하고 동일 조건인 용접실험 시편과 비교분석하여 열원모델의 적합성을 검증하였다.

### 2.3 경계조건 및 물성치

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

고밀도 에너지를 이용한 레이저 용접에서 용접부는 순간적으로 가열되어 온도가 급상승했다가 국부가열 후에는 급속도로 냉각된다. 이렇게 큰 온도변화를 겪는 재료의 열적 물성은 온도에 따라 큰 차이를 나타내며, 열 해석을 위해서는 온도에 따른 데이터로 적용되어야만 한다. Table 3과 Fig. 5는 해석에 적용된 방법과 물성치를 나타낸 것이며 그 값들은 상용유한요소 프로그램인 SYSWELD에서 사용되는 물성데이터이다.

### 3. 해석결과 및 고찰

Fig. 6은 Fig. 3의 이동형 3차원 가우시안 열원과 3차원 용접모델을 적용하여 해석한 표면부 온도분포 결과를 나타낸 것으로 두께 1mm 평판의 필렛 용접 시작 후 2.008초 경과지점 즉, 해석 모델에서 총 용접거리 50mm 중 열원 중심이 2.008

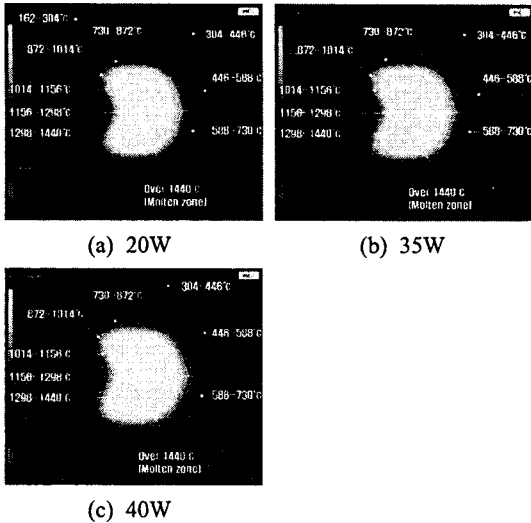


Fig. 6 Temperature distributions of fillet welding for 1 mm thick plate

mm에 위치했을 때의 온도분포이다. 빔 파워의 증가에 따라 온도분포의 범위가 넓어짐을 알 수 있고, 결과분석을 통하여 표면 및 내부의 용융범위 예측이 가능할 뿐만 아니라 가열온도에 민감한 재료의 경우 이에 적절한 용접조건 설정이 가능할 것으로 생각된다. 또한 이러한 해석적 분석의 타당성은 아래의 실험결과와의 비교에서 검증될 수 있다.

Fig. 7(a)는 열원 모델링을 위해 특정 빔파워 30W에 대한 열 해석의 용접단면 온도분포 결과를 동일조건인 실험시편과 비교하여 나타낸 것이다. 해석결과에서 1440°C 이상의 용융부 폭은 약 0.73mm, 깊이는 약 0.78mm로 그 형상 및 치수가 실험시편의 용융부와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 이때 결정된 형상변수 값들은  $Re=0.5$ ,  $Rm2=0.32$ ,  $Rm=0.19$ ,  $Ri=0.21$ ,  $Xe=0.0$ ,  $Xm2=-0.25$ ,  $Xm=-0.28$ ,  $Xi=-1.12$ 였고, 최대 에너지 밀도 값은  $Q_0=5000(W/mm^3)$ 이었다. Fig. 7(b)의 35W조건에서 실험과 해석의 용융부 형상 및 크기가 잘 일치함을 볼 수 있고, 이때 결정된 열원의 형상변수 값들은  $Re=0.5$ ,  $Rm2=0.32$ ,  $Rm=0.19$ ,  $Ri=0.21$ ,  $Xe=0.0$ ,  $Xm2=-0.25$ ,  $Xm=-0.28$ ,  $Xi=-1.238$ 이고, 최대 에너지 밀도 값은  $Q_0=5277.78(W/mm^3)$ 이다. Fig. 7(a)와 (b)에서 두 레이저 출력 변화량에 대한 각 변수들이 변화되는 기울기 값을 이용하여 나머지 레이저 출력에 대한 열원 열원의 형상변수 및 최

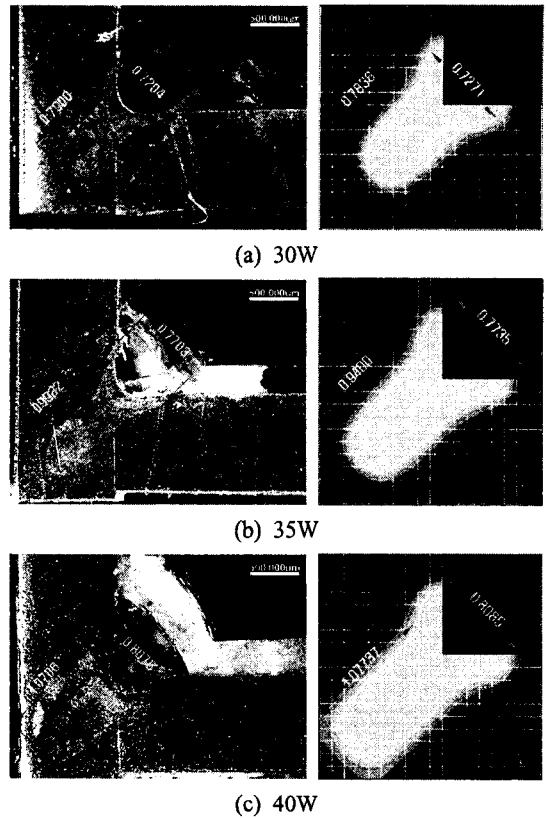
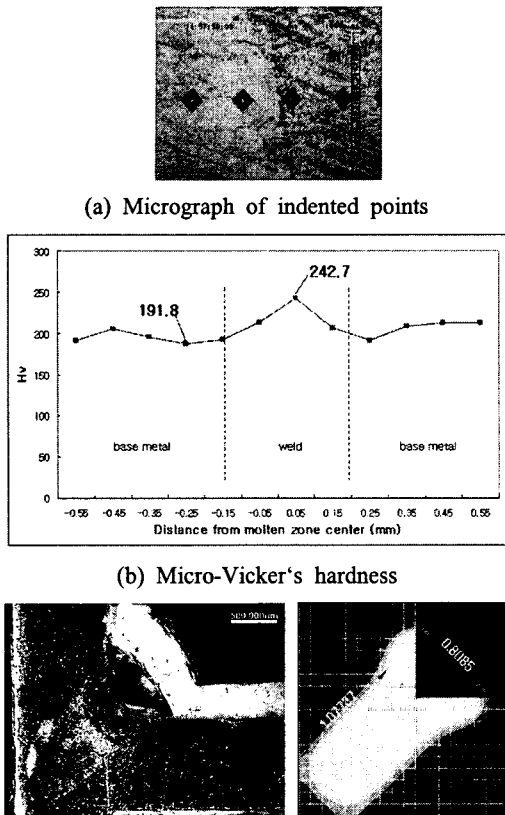


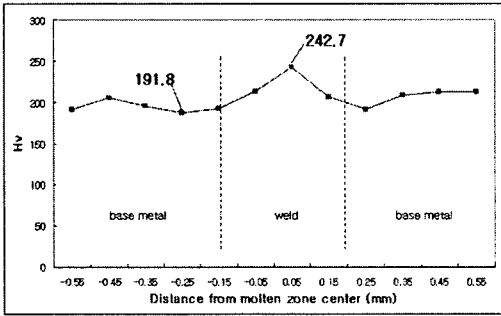
Fig. 7 Comparisons of molten zones of experiment and analysis of fillet welding for 1mm thick plate

대 에너지 밀도 값은 계산되며 해석의 입열 조건으로 적용되었다. Fig. 7(c)는 빔파워 40W일 때의 비교그림으로 레이저 출력력이 증가할수록 온도분포 범위는 더욱 넓어지는 것을 볼 수 있으며, 용융부의 비드 폭은 약 0.81mm, 깊이는 약 1.1mm로 예측 되었다. 동일 조건인 실험시편과의 비교에서 용융부 비드 폭과 깊이의 오차정도는 약 0.6%로 매우 작았다.

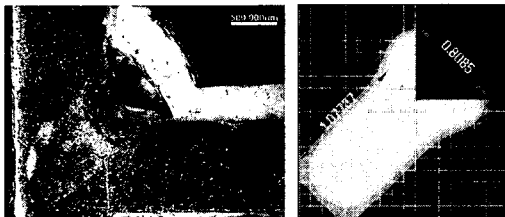
Fig. 8은 용융부, 열영향부, 모재의 조직과 각 부위에서의 미소경도 측정 위치 및 값을 나타낸 것이다. Fig. 8(a)에서 모재와 용융부와의 조직은 명확하게 구분되지 않기 때문에 열영향부의 범위는 매우 협소함을 알 수 있다. 이것은 Fig. 6, Fig. 8(c)에서 열영향부로 판단되는 950°C~1440°C의 폭의 범위가 0.1mm이하로 매우 작게 예측된 해석 결과와도 매우 잘 일치된다. 또한 Fig. 8(b)의 위치에 따른 미소경도 측정값도 용융부 근처 약 0.1mm까지의 범위에서 감소하였다. 따라서 이 부분이 열영향부로 판단되며 그 범위가 매우 협소



(a) Micrograph of indented points



(b) Micro-Vicker's hardness



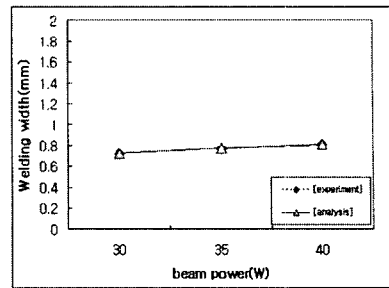
(c) Locations of indented points and temperature distribution of HAZ

Fig. 8 HAZ and Micro-Vicker's hardness of fillet welding specimen

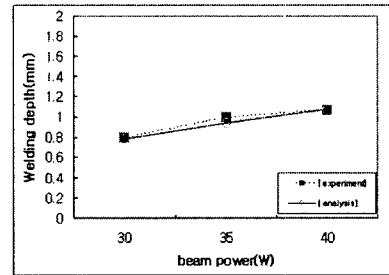
함을 알 수 있었고 모재와 용융부의 경도 값 차이는 약 50정도였다. 따라서 빔 파워변화에 대해서 설계된 열원 모델을 이용한 용융부 및 온도분포 예측은 실험을 통해 검증됨으로써 본 연구방법은 펄스 레이저용접 변수변화에 따른 레이저빔의 적정조건 설정에 유용할 것으로 생각된다.

Fig. 9는 Fig. 7의 실험과 해석 결과를 정리하여 나타낸 것이다. Fig. 9(a)는 각각의 레이저 출력에 따른 용접 비드 폭을 나타낸 것이고 Fig. 9(b)는 용접 깊이를 비교분석한 것이다. 두께 1mm 스테인리스 스틸 강판의 필렛 용접에서 30W, 35W의 실험시편을 이용한 열원모델을 빔 파워 40W인 조건에 적용, 예측한 결과는 실험과 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 10은 앞의 1mm 평판 필렛 용접에서 설계된 열원을 적용하고 재료두께 2mm인 경우 빔파

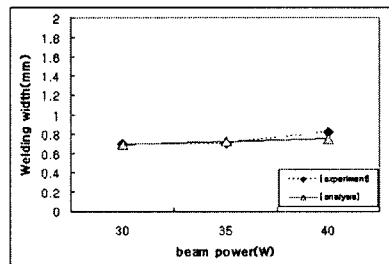


(a) Top bead width

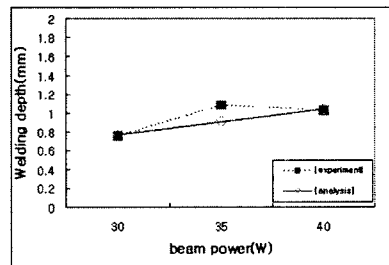


(b) Penetration depth

Fig. 9 Molten zone size of fillet welded 1mm thick plate for each beam power



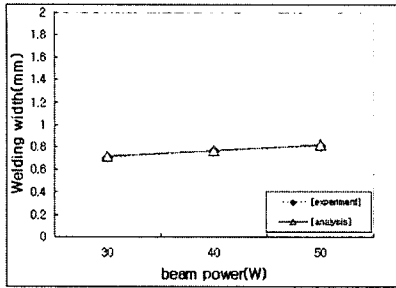
(a) Top bead width



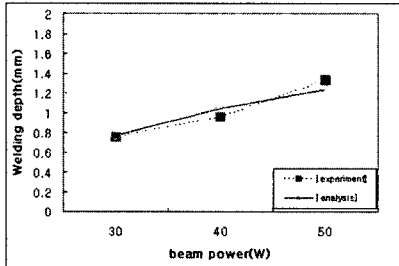
(b) Penetration depth

Fig. 10 Molten zone size of fillet welded 2mm thick plate for each beam power

워변화에 따른 실험과 열 해석 결과를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 10(a)의 각각의 레이저 출력에 따른 용접 비드 폭 비교에서 실험과 해석이



(a) Top bead width

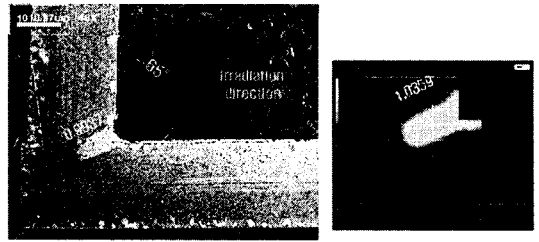


(b) Penetration depth

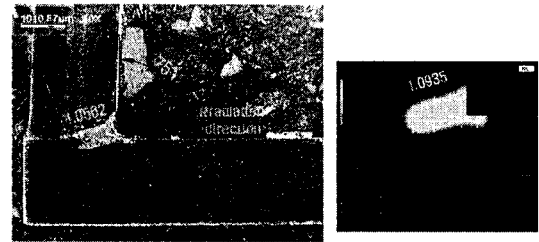
Fig. 11 Molten zone size of fillet welded 3mm thick plate for each beam power

비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. Fig. 10(b)의 빔 파워에 따른 용접 깊이에서 35W일 때 비교오차가 16.4%로 약간 크게 나타났는데 이는 용접 전 시편의 가접 불량으로 생각되며 그 외 나머지 조건에서 결과들은 서로 잘 일치하였다.

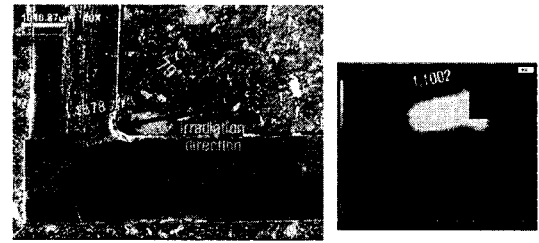
Fig. 11은 3mm 평판의 레이저 필렛 용접의 빔 파워에 따른 해석과 동일조건 실험결과를 비교한 것으로 용융부 폭 및 깊이의 예측 값은 실험을 통해 검증되었다. 따라서 두 빔파워에 대해서 실험시편을 이용한 열원모델링을 한 후 해석에 적용하는 본 연구방법을 통하여 재료 두께에 따른 적정 레이저 용접조건 설정이 가능하며 용접 속도, 빔의 펄스 주파수, 형태 등의 조건변화에 대한 용접 시 재료내의 온도분포 예측도 가능할 것으로 생각된다. 또한 실험의 시행착오를 줄일 수 있으므로, 이를 산업현장에 적용시킨다면 장비 구축 및 제품 개발에 있어서 시간과 비용절감 및 생산성향상이 기대된다. 본 논문은 AISI304 스테인리스강의 펄스 레이저 필렛 용접에 국한되었지만, 이를 기반으로 보다 다양한 재질 및 용접형태 등에 대한 적정 용접조건 설정의 연구가 진행된다면 레이저 장비 구축과 용접성능평가 향상에 보다 기여할 수 있을 것으로 생각되며 열



(a) Angle 65°



(b) Angle 75°



(c) Angle 79°

Fig. 12 Comparisons of molten zones for variation of irradiation angle in fillet welding for 40W and 2mm thick plate

해석을 기반으로 각각의 실험조건에 따른 용접 후 잔류응력을 예측할 수 있는 열응력 해석도 가능하다.

Fig. 12는 필렛 용접의 적정 빔 조사각도를 설정하기 위해서 조사각을 45° 기준으로 10° 간격으로 75°까지 증가시키고 75°~85°까지는 1° 간격으로 해석한 결과 중에 65°, 75°, 79°를 나타내었고, 동일 조건으로의 용접실험을 하여 검증한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 12(a)는 레이저 출력 40W, 수직평판을 기준으로 조사각이 65°인 경우의 비교 결과이다. 예측된 해석결과와 실험은 비교오차 4.07%정도로 비교적 잘 일치하였다. Fig. 12(b)는 동일 빔 파워에서 빔 조사각이 75°일 때의 비교이고 빔 조사각 65°보다는 용접범위가 더 깊고 넓게 됨을 알 수 있었다. 이는 좌측 그림의 실험결과와도 잘 일치함을 볼 수 있고 그 비교오차는 3.4%정도로 작았다. Fig. 12(c)는 빔 파워

40W에서 조사각이 79°일 때의 해석과 실험의 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 용접범위가 가장 깊고 넓게 형성됨이 열 해석의 온도분포 결과분석을 통해 예측 되었고 이는 실험을 통해서 검증되었다. 그림에서와 같은 펄렛 접합형태에서는 빔 조사각이 크면 클수록 용입 깊이는 깊어지고 접합범위가 넓어지는 사실을 알 수 있었다. 하지만 80° 이후는 접합부 깊이가 감소하고 실험에서도 79°이후는 장비의 간섭으로 인해 용접이 불가능하였다. 따라서 열 해석을 통하여 레이저 빔 조사 각에 따른 용융부와 접합 형태 및 정도 예측이 가능하였고, 빔의 적정 조사각 범위는 75°~79°로 생각된다.

#### 4. 결 론

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

(1) AISI 304 스테인리스 강관의 펄렛 용접실험과 유한요소 해석결과의 비교분석을 통해 펄스 레이저빔 조건설정에서 유용한 열원 모델을 설계하였으며, 이를 적용한 열 해석결과는 동일조건 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) 열 해석과 동일조건 실험을 통하여 빔 조사각이 크면 클수록 용입 깊이는 깊어지고 접합범위가 넓어진다는 점이 예측, 확인되었고, 빔 조사 각에 따른 용융부와 접합 형태 및 정도 예측이 가능하였으며, 빔의 적정 조사각 범위는 75°~79°로 생각된다.

(4) 특정 두 빔파워에 대한 실험시편을 이용한 열원모델링을 해석에 적용하는 본 연구방법을 통하여 재료 두께에 따른 적정 레이저 용접조건 설정이 가능하며 용접속도, 빔의 펄스 주파수, 형태 등의 조건변화에 대한 용접 시 재료내의 온도분포 예측도 가능할 것으로 생각된다. 또한 실험의 시행착오를 줄일 수 있으므로, 이를 산업현장에 적용시킨다면 장비 구축 및 제품 개발에 있어서 시간과 비용절감 및 생산성향상이 기대된다.

#### 후 기

이 논문은 2006년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

#### 참고문헌

- (1) Kim, D. H., Kim, S. S. and Kim, C. J., 1993, "A Study on the Pure Al Weldability Using a Pulsed Nd:YAG Laser," *Journal of KWS*, Vol. 11, No. 1, pp. 52~61.
- (2) Lee, D. H. and Kim, H. J., 1997, "A Study on the TEM00 Mode of the Pulsed Nd:YAG Laser with a Single Elliptical Cavity," *Pusan Nat'l Univ., J. Research Inst. Ind. Technol.*, Vol. 53, pp. 159~163.
- (3) Hong, J. H., Kim, B. G., Park, K. R. and Lee, D. H., 1999, "A Study on the Operating Characteristics of Nd:YAG Laser," *Pusan Nat'l Univ., J. Research Inst. Ind. Technol.*, Vol. 56, pp. 145~149.
- (4) Heo, I. S., Kim, B. C., Kim, T. H., Kim, J. S. and Lee, H. Y., 2001, "A Study on the Welding Behavior of A3003 Aluminium Alloy Thin Sheet by Nd:YAG Laser Beam," *The Journal of Korean Society of Laser Processing*, Vol. 4, No. 1, pp. 29~38.
- (5) Lee, T. G. and Kim, J. W., 2000, "A Study on the Three-Dimensional Heat Flow Analysis in the Laser Welding for Deep Penetration," *Journal of KWS*, Vol. 18, No. 3, pp. 76~82.
- (6) Nam, G. J., Kim, K. W., Hong, J. U., Lee, J. H., Suh, J. and Cho, H. Y., 2006, "Finite Element Analysis of Nd:YAG Laser Welding for AISI 304 Stainless Steel Plate," *Journal of KSME(A)*, Vol. 30, No. 4, pp. 428~434.
- (7) Cho, H. Y., Nam, G. J. and Kim, K. W., 2005, "Finite Element Analysis of Nd:YAG Laser Welding of Micro Heat Exchanger," *Journal of Industrial Science and Technology Institute*, Vol. 19, No. 2, pp. 59~64.
- (8) Cho, H. Y., Kim, K. W. and Nam, G. J., 2006, "Finite Element Analysis for Prediction of Bead Shape of Nd:YAG Laser Butt Welding," *Journal of KSME* (submitted).