

〈 논문 〉

AISI 304 스테인리스 강판의 Nd:YAG 펄스 레이저 용접에 관한 유한요소해석

남기정* · 김관우* · 홍진욱* · 이제훈** · 서 정** · 조해용†
(2005년 10월 5일 접수, 2006년 2월 20일 심사완료)

Finite Element Analysis of Nd:YAG Pulse Laser Welding for AISI 304 Stainless Steel Plate

Gi Jeong Nam, Kwan Woo Kim, Jin Uk Hong,
Jae Hoon Lee, Jeong Suh and Hae Yong Cho

Key Words: Pulse Laser(펄스 레이저), Welding(용접), Stainless Steel(스테인리스 강), FEM(유한요소법), Heat Transfer(열전달), Moving Heat Source(이동열원)

Abstract

Pulse laser welding of AISI 304 stainless steel plate was simulated to find optimal welding conditions 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. 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.

1. 서 론

Nd:YAG 펄스 레이저는 평균 출력이 CO₂ 레이저에 비해 작지만 첨두출력은 수kW 이상으로 대형 CO₂ 레이저에 버금갈 뿐만 아니라 첨두출력과 펄스폭의 적절한 조절로 순간적인 국부 가열이 가능하며 보다 작은 열 영향부위를 얻을 수 있어 용접에 많이 사용되고 있다.⁽¹⁾ 그러나 펄스 레이저 용접 시 형태, 재질, 경로 등과 같은 변수들의 변화에 적합한 빔 파워, 속도, 펄스 주파수 등이 다르므로 산업현장에서 적정 조건 설정을

위해서는 장비구축, 재료준비, 반복된 실험 및 검사 등으로 인한 비용 및 시간소비가 발생되고 있다.

현재까지의 펄스 레이저 용접에 관한 연구는 주로 실험에 기초를 두고 있으며 시편의 분석과 검토를 통한 용접조건설정, 변수에 따른 용접특성 및 품질비교 등으로 진행되고 있다.⁽²⁻⁴⁾ 이러한 실험적 연구결과들은 다양한 변수에 따른 적정 조건 설정의 문제해결 방법 측면에서 그 한계가 있다. 이에 반하여 해석적 연구에서는 다양한 변수에 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. 해석적 연구는 점과 선 열원에 관한 열유속 식을 Rosenthal⁽⁵⁾이 처음 제시한 이후, Westby,⁽⁶⁾ Friedman⁽⁷⁾ 등이 용접 온도분

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

* 충북대학교 대학원

** 한국기계연구원

포에 관한 수치해석적인 모델을 제시하였고, Mazumder 등⁽⁸⁾이 이동 가우시안 열원을 사용한 3차원 열전달 모델을 제시 했으며, Kim 등⁽⁹⁾이 CO₂ 레이저를 이용한 겹치기 용접의 유한요소해석을 하는 등으로 진행되고 있다.

본 연구에서는 상용유한요소 프로그램인 MARC를 이용하여 펄스 레이저 용접을 시뮬레이션 하였고, 그 결과를 동일조건인 실험과 비교분석하였다. 입열조건으로 펄스 레이저 빔에 대한 3차원 이동 열원모델을 설계하여 시뮬레이션에 적용시켰고, 빔 파워 변화에 따른 해석결과를 통하여 용접 중 재료의 온도분포 및 용융부를 예측하였고, 이를 실험적으로 비교·검증함으로써 해석적 방법을 통한 적정 용접조건 설정의 타당성을 검토하고자 하였다.

2. 해석 방법

상용유한요소 프로그램인 MARC를 사용하여 펄스 레이저 용접에 관한 시뮬레이션 하였으며, 전체적인 해석과정은 Fig. 1과 같다.

전처리 과정에서는 열전달 해석을 위한 평판모델의 요소분할, 이동형 3차원 열원에 의한 입열과 대류 및 복사의 열적 경계조건 설정, 용접 전 재료의 초기온도 설정, 재료의 열적물성들이 입력된다.

해석과정은 동일조건인 용접시뮬레이션과 실험시편의 용융부 단면크기를 비교분석함으로써 열원의 형상변수(Ze, Zi, Re, Ri) 및 최대 에너지밀도(Q₀) 값을 결정하여 이동형 3차원 가우시안 열원을 설계하였다. 다음으로 설계된 열원을 해석

에 적용시켜 펄스 레이저 용접의 빔 파워 및 속도 변화에 따른 용융부 및 용접소개의 온도변화를 예측하고, 동일조건인 실험시편 용융부와 비교분석하여 예측된 결과를 검증하였다.

2.1 용접실험 및 해석 모델

Nd:YAG 펄스 레이저 용접기(SUMITOMO사 JK701)를 사용하여 가로 60mm, 세로 50mm, 두께 1mm의 AISI 304 스테인리스 강판을 맞대기 용접하였다. 실험조건은 Table 1과 같다. 빔의 포커스를 조사표면에 일치시켰고 빔 파워 및 속도를 변화시키며 실험하였다. 빔파워 20W로 용접된 시편을 이용하여 열원을 모델링하였고 22, 27.5W의 조건변화로 실험하였다. 또한 펄스레이저 빔파워 27.5W, 용접속도 1, 1.5, 2mm/sec로 실험하여 해석결과와 비교분석하였다.

Fig. 2는 해석모델과 레이저빔의 조사위치 및 이동방향을 나타낸 것으로 용접선을 기준으로 좌우 대칭임을 고려하여 1/2모델링 하였다. 빔의 조사부는 순간적인 가열과 냉각의 복잡한 열 이력

Table 1 Experimental conditions of Nd:YAG pulse laser welding

Velocity (mm/sec)	frequency (Hz)	irradiation (ms)	Power (W)
1	5	8	20
1	5	8	22
1	5	8	27.5
1.5	5	8	27.5
2	5	8	27.5

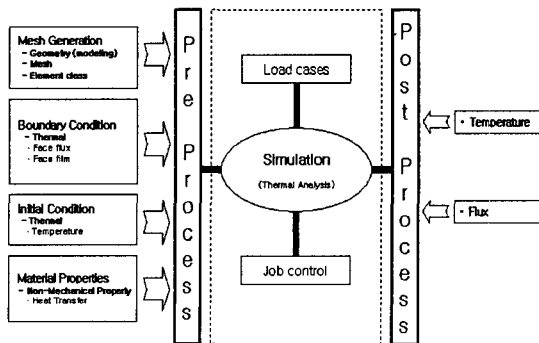


Fig. 1 The procedure of analysis

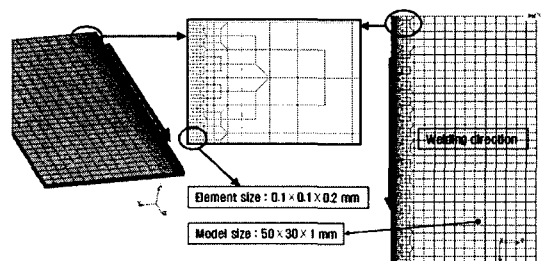


Fig. 2 A half of Model of AISI 304 stainless steel plate

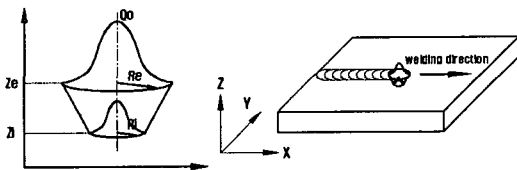
을 겪게 됨으로 조밀하게 요소 분할하였고, 해석 모델의 크기는 용접실험 시편 크기와 동일하다.

2.2 3차원 이동열원 모델

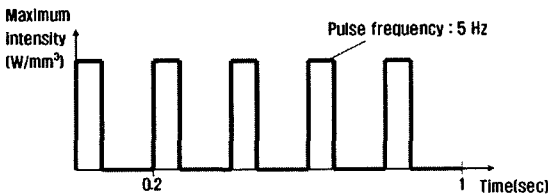
Fig. 3(a)는 입열의 경계조건으로 사용된 3차원의 콘형 가우시안 열원모델을 나타낸 것이다. 그림에서 열원중심으로부터 위치에 따른 단위체적당 입열량은 열원의 적용범위인 형상변수 Ze (3차원 열원 윗면의 Z축 좌표 값), Zi (3차원 열원 밑면의 Z축 좌표 값), Re (열원 윗면의 가우시안 분포반경), Ri (열원 밑면의 가우시안 분포반경) 값과 최대 에너지밀도(Q_0) 값에 따라 달라진다. 따라서 용접해석 후 용융부의 크기 및 형상은 열원 모델에 지배된다. 이러한 3차원 콘형 가우시안 열원의 단위면적당 입열량을 수식적으로 간단히 표현하면 다음 식과 같다. 여기에서 Q 는 단위

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

체적당 입열량, Q_0 는 3차원 가우시안 열원의 단위 체적당 최대입열량, r 은 열원 중심에서 입열 지점까지의 거리, r_0 는 열원의 Z방향 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 주기위하여 서브프로그램을 작성하였다. 이 서브프로



(a) Shape of heat source



(b) Frequency

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

그램을 이용하여 펄스의 형태 및 주파수 변화에 따른 다양한 입열조건을 해석에 적용시킬 수 있다.

열원 모델의 형상변수(Ze, Zi, Re, Ri)값을 결정하기 위해 입열조건에서 빔파워를 고정변수(20W)로 놓고 형상변수 값들을 변화 시키면서 시뮬레이션 하였다. 수회의 해석과정에서 용접시편과 시뮬레이션 결과를 비교분석하여 용융부의 형상이 거의 일치되는 조건에서 열원 형상변수 값을 결정한다. 다음으로 용융부 크기가 서로 잘 일치되는 레이저 빔의 최대 에너지밀도(Q_0)를 결정한다. 이렇게 설계된 열원을 이용하여 빔파워 변화(22W, 27.5W)에 따른 열해석을 하고 동일조건의 용접시편과 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, 빔 파워 및 속도, 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, 열해석을 위해서는 온도에 따른 데이터로 적용되어야만 한다. Table 2와 Fig. 4는 해석에 적용된 방법과 물성치를 나타낸 것이다.

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)

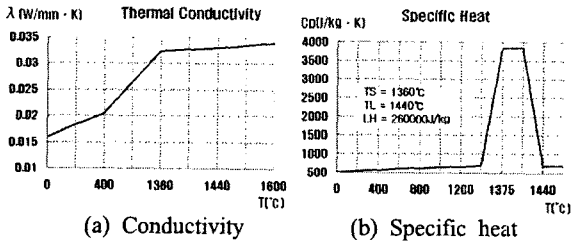


Fig. 4 Thermal properties

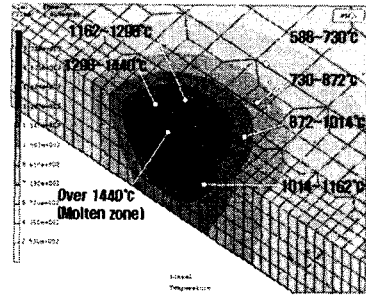
3. 해석결과 및 고찰

3.1 빔파워 변화에 따른 해석결과

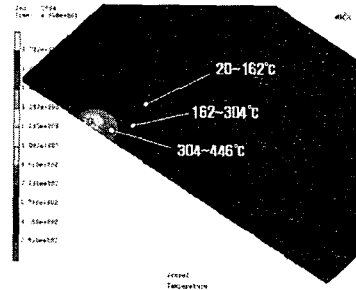
Fig. 5는 시뮬레이션의 첫 단계로 기준용접조건 (20W, 5Hz, 1mm/sec)에 대한 해석결과이고 펄스 레이저 빔이 총 용접거리 50mm 중 40mm 지점에 위치했을 때의 용융부 및 재료 내 온도분포를 나타낸 것이다. AISI 304의 용융온도 1440°C를 기준으로 나타낸 Fig. 5(a)의 온도분포를 통해 열영향부가 용융부 주변의 좁은 범위에서 형성될에 예측되었고 이는 Nd:YAG 펄스 레이저용접이 협소한 열영향부를 갖는 특징과 잘 일치되었다. 또한 열원이 일정 펄스 주파수를 가지고 이동하므로 Fig. 5(b)에서와 같이 긴 꼬리를 갖는 형태의 온도분포가 형성되었다.

Fig. 6은 기준 용접시편의 용융부 단면(a)와 동일조건에서의 해석결과(b)를 나타낸 것이다. 그 크기를 비교했을 때 용융부 표면직경과 깊이가 서로 거의 일치하였고, 그 때 용접해석의 열원조건을 가지고 펄스형 레이저 열원의 형상변수($Re=0.3$, $Ri=0.1$, $Ze=0.0$, $Zi=-0.65$) 및 최대 에너지밀도 ($Q_0=1300\text{W/mm}^3$)를 결정함으로써 열원을 모델링하였다. 이렇게 하여 결정된 열원의 형태에서 빔파워를 변화시켜 해석함으로써 열원을 결정할 수 있다.

Fig. 7은 기준 용접변수(20W, 5Hz, 1mm/sec)에서 빔 파워를 22W로 변화시켜 해석한 결과이다. 열원모델링을 위한 이전 해석의 형상변수 값 ($Re=0.3$, $Ri=0.1$, $Ze=0.0$, $Zi=-0.65$)이 사용되었고 비례식으로써 22W를 열원의 최대 에너지밀도 값 (1430W/mm^3)으로 환산하여 해석에 적용시켰다. Fig. 5의 20W인 경우와 비교했을 때 빔 파워가 증가함으로써 Fig. 7(a)와 같이 용융부 및 열영향부가 그 만큼 커졌고 Fig. 7(b)와 같이 가열 온도

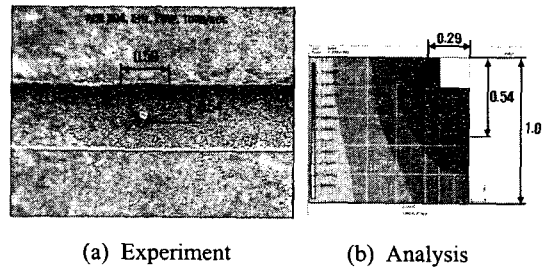


(a) Molten zone



(b) Temperature distribution

Fig. 5 Simulated results(20W)



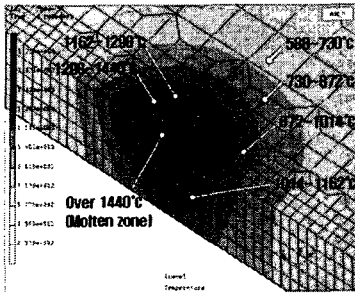
(a) Experiment

(b) Analysis

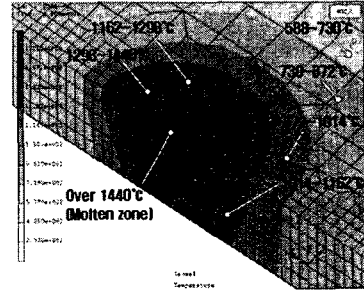
Fig. 6 Comparisons of molten zone of simulated and experimental results(20W)

분포도 넓어졌다. Fig. 5와 Fig. 7의 해석결과를 비교하면 빔파워 증가와 재료 가열 정도의 상호관계를 추정할 수 있다. 따라서 해석결과는 용접조건 설정에 매우 유용할 것이다.

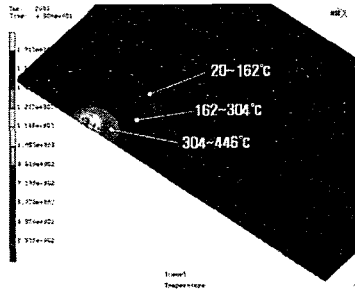
Fig. 8에서 용접시편 단면(a)와 동일조건에서의 해석결과(b)의 용융부를 비교했을 때 용융부 표면직경과 깊이가 서로 거의 일치하였다. 따라서 전 단계에서의 펄스형 레이저 열원설계는 빔 파워 변화에 따른 용접결과(용융부 크기, 온도분포 등) 예측에 적합한 것으로 판단되며 해석을 통한 용접조건 제시가 가능하다.



(a) Molten zone

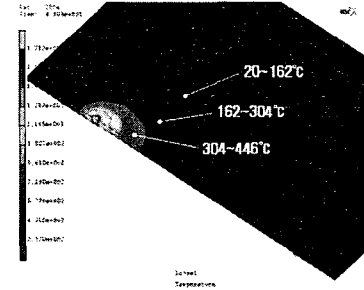


(a) Molten zone



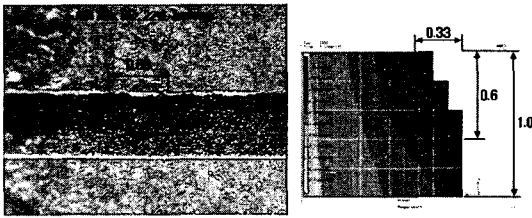
(b) Temperature distribution

Fig. 7 Simulated results(22W)



(b) Temperature distribution

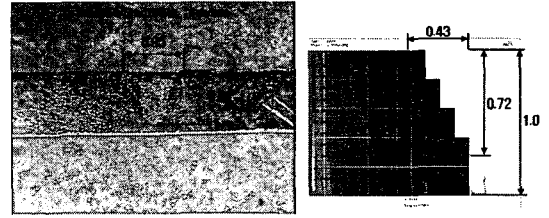
Fig. 9 Simulated results(27.5W)



(a) Experiment

(b) Analysis

Fig. 8 Comparisons of molten zone of simulated and experimental results(22W)



(a) Experiment

(b) Analysis

Fig. 10 Comparisons of molten zone of simulated and experimental results(27.5W)

Fig. 9는 검증된 열원모델을 사용하고 빔파워를 27.5W로 변화시켜 해석한 결과이다. 빔파워 증가에 따라 가열범위는 넓어졌지만 커진 용융부에 비해서 열영향부의 확장정도는 작았다. 27.5W의 빔파워는 앞에서와 같은 비례식에 의해 1787 W/mm³로 환산된 최대 에너지밀도 값으로 적용되었다. 이러한 에너지밀도 값은 이론적으로 정확히 환산될 수 없으며, 이는 레이저용접에서의 열전달이 보통의 대류, 복사, 전도에 의한 것과 달리 재료의 용융과 기화 생성 등과 같이 매우 복잡한 형태를 취하기 때문으로 생각된다. 따라서 용융부의 복잡한 물리적 현상들을 이론적으로 열

원모델링에 정확히 적용시키는 것은 곤란하다.

Fig. 10에서 용접시편 단면(a)와 동일조건인 해석결과(b)를 비교했을 때, 실제 용접부와 약간의 형상차이가 있으나 직경과 깊이는 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다. 따라서 빔 파워 변화에 대한 실험과 해석결과를 검토해 볼 때 본 연구방법은 용접변수 변화에 따른 적정 레이저 빔 조건 설정에 있어서 매우 유용할 것으로 생각된다.

3.2 빔속도 변화에 따른 해석결과

Fig. 11은 빔파워 27.5W, 빔속도 1mm/sec의 실험시편 용접선 방향 용융부 단면(a)와 해석결과

(b)를 나타낸 것이다. 펄스 주파수(5Hz)와 빔속도가 같음으로 용융부 사이간격은 서로 일치되었다. 또한 특정 펄스 용융부에 뒤 이은 용융부들의 중첩정도는 펄스 레이저 용접의 유효깊이(용융부 중첩부분에서의 최대깊이)에 영향을 주는데 이는 Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13의 동일 펄스주파수(5Hz)에서 속도변화(1, 1.5, 2mm/sec)에 따른 실험 및 해석결과에서 유효용접 깊이 값이 작아는 것으로 확인할 수 있다. 따라서 빔속도에 따른 적정 빔조사 반경과 펄스 주파수의 설정이 필요하고 해석을 통한 중첩도의 예측은 매우 유용할 것으로 생각된다. Fig. 11에서 빔조사 표면의 용접부에서 중첩된 원형 용융부들 중 기준 원에 중첩

되는 원들의 범위를 중첩도로 고려할 때, 그 값이 실험시편은 약 73%, 해석결과는 약 78%로 비교적 잘 일치됨을 볼 수 있다.

Fig. 12는 Fig. 11과 동일조건에서 빔 속도만을 1.5mm/sec로 변화시킨 실험시편의 용융부 단면(a)와 해석결과(b)를 비교한 것으로 Fig. 11에서와 같이 펄스 주파수가 같기 때문에 용융부 사이간격은 일치되었다. 그리고 해석을 통해 예측된 용융부의 중첩도는 약 63%, 실험시편 용융부들의 중첩도는 약 59%로 비교적 잘 일치되었다.

Fig. 13은 Fig. 11, Fig. 12와 동일조건에서 빔속도만을 2mm/sec로 변화시킨 결과로서 해석의 용융부 사이 간격은 0.4mm로 실험과 일치되었으며 레이저 빔 조사표면에서 용융부의 중첩도는 약 51%로 예측되었고 실험결과는 약 48%였다.

위의 Fig. 11~13에서 빔속도가 1, 1.5, 2mm/sec로 증가함에 따라 용융부의 간격이 넓어짐을 확인할 수 있었고 예측된 용융부의 유효깊이, 사이간격 등의 값은 실험을 통해 검증되었다. 따라서 펄스레이저 용접조건 설정에서 주어진 빔 파워에 적합한 속도설정도 열해석을 통해 가능할 것으로 생각된다. 그리고 중첩도가 3~5%정도 차이가 남을 볼 수 있는데 이는 해석과 실험의 용융부 단면 형상차이에 기인한 것으로 생각된다. 따라서 열원 모델의 재수정이 요구되며 이를 해결하기 위한 새로운 형태의 열원구상, 열원의 수학적 표현, 서브프로그램 작성 등이 필요할 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 용접실험과 유한요소 해석결과의 비교분석을 통해 펄스 레이저 빔 조건설정에 유용한 열원 모델을 설계하였으며, 열 해석결과는 동일조건 실험과 잘 일치되었다.

(2) 빔 파워 및 속도변화에 대해서 설계된 열원 모델을 이용한 용융부 및 온도분포 예측은 실험을 통해 검증됨으로써 본 연구방법은 펄스 레이저 용접 변수변화에 따른 레이저빔의 적정조건 설

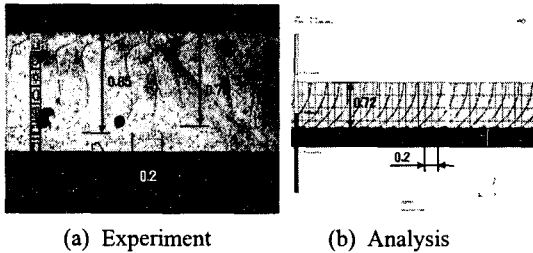


Fig. 11 Comparisons of molten zone of simulated and experimental results(27.5W, 1mm/sec)

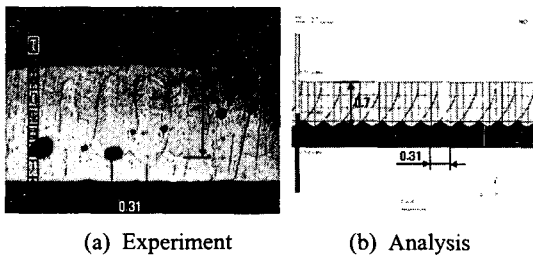


Fig. 12 Comparisons of molten zone of simulated and experimental results(27.5W, 1.5mm/sec)

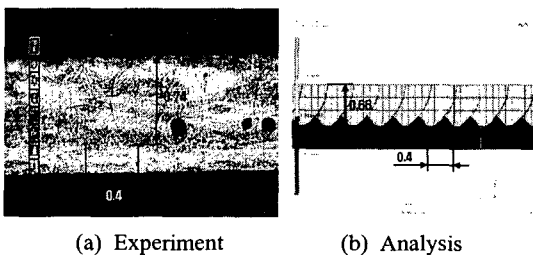


Fig. 13 Comparisons of molten zone of simulated and experimental results(27.5W, 2mm/sec)

정에 유용할 것이다.

(3) 빔속도에 따른 열 해석결과를 통해 용융부의 중첩도 및 유효 용접 깊이가 예측됨으로써 빔속도와 파워의 상호관계가 정립될 수 있고 이를 이용한 펄스 레이저 용접조건설정은 실제 현장에서 유용할 것이다.

(4) 용접시편과의 용융부 단면 형상차이로 열원 모델의 재수정이 요구되며 이를 위한 새로운 열원형태의 구상, 열원의 수학적 표현, 서브프로그램 작성 등이 필요할 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구지원 사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Kim D. H., Chung C. M., Kim C. J. and Lee J. M., 1991, "Development of a Pulsed Nd:YAG Laser Materials Processing System," *Journal of the Korean Welding Society*, Vol. 9, No. 1, pp. 32~39
- (2) Yoo Y. T., Oh Y. S., Ro K. B. and Lim K. G., 2003, "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
- (3) 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 the Korean Welding Society*, Vol. 11, No. 1, pp. 52~61
- (4) Kim J. D., Chang W., Chung J. M. and kim C. J., 1999, "Welding of Inconel Tube with Pulsed Nd:YAG Laser," *Journal of KWS*, Vol. 17, No. 1, pp. 82~87
- (5) Rosental, D., 1941, "Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting," *Welding J.*, Vol. 20, No. 5, pp. 220~234.
- (6) Westby, O., 1968, "Temperature Distribution in the Workpiece by Welding," Dept. of Metallurgy and Metals Working, The Technical Univ. of Norway, Ph.D Dissertation
- (7) Friedman, E., 1975, "Thermo-mechanical Analysis of the Welding Process using the Finite Element Method.," *Trans. ASME, J. Vessel Techno*, pp. 206~213.
- (8) Mazumder, J. and Steen W. M., 1980, "Heat Transfer Model for CW Laser Material Processing," *J. Appl. Phys.*, Vol. 51, No. 2, pp. 941~947
- (9) Jang G. B., Kim H. K. and Kang S. S., 1999, "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, pp. 88~96