

# 마이크로 열교환기 레이저 용접의 FEM해석

## Finite element analysis of laser welding of micro heat exchanger

충북대학교 기계공학부 조해용

충북대학교 대학원 김관우

한국기계연구원 레이저응용시스템그룹 이제훈, 서정

(주)스펙 최민수

### I. 서론

Nd YAG 펄스 레이저는 평균 출력이 CO<sub>2</sub> 레이저에 비해 작지만 침투출력은 수kW 이상으로 대형 CO<sub>2</sub> 레이저에 버금갈 뿐만 아니라 침투출력과 펄스폭의 적절한 조절로 순간적인 국부 가열이 가능하며 보다 작은 열 영향부위를 얻을 수 있어 용접가공에 많이 사용되고 있다<sup>1)</sup> 재질이 AISI 304 스테인리스 스틸인 초소형 열교환기 생산에 있어서 적층된 마이크로 채널부와 연결부 사이의 접합가공으로 Nd YAG 펄스 레이저 용접이 적용될 수 있다 그러나 열교환기의 핵심 부분인 마이크로 채널은 열에 매우 민감하기 때문에 용접 열에 의해 쉽게 손상될 수도 있다 따라서 Nd YAG 펄스 레이저 용접의 사용 가능여부 판단 및 적정 용접조건의 설정이 필요하다

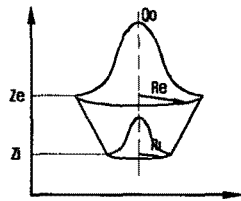
이에 펄스 레이저 용접에 대한 현재까지의 연구는 해석적 방법보다 대부분 실험에 기초를 두고 있으며 실험조건에 따른 시편의 분석과 검토를 통한 용접조건설정, 용접변수에 따른 용접특성 및 품질비교 등으로 진행되고 있다<sup>2-4)</sup> 이러한 실험적 연구결과들은 적정 용접조건을 설정하는데 신뢰할 수 있는 많은 참고데이터를 제공해준다 하지만 다양한 용접변수 변화에 따른 문제해결 방법 측면에서 그 한계가 있다 이에 반하여 해석적 연구에서는 다양한 용접변수 변화에 대한 해석결과의 비교분석으로 적정 용접조건을 예측해 볼 수 있다 그러나 용접 및 열전달 이론, 재료물성, 경제조건 등의 적용 방법 및 값에 따라 실제실험과 해석결과의 오차가 커질 수 있다는 문제점은 있다 Rosenthal<sup>5)</sup>이 점과 선 열원에 관한 열유속 식을 처음 제시한 이후, Westby<sup>6)</sup>, Friedman<sup>7)</sup> 등이 용접의 온도분포에 관한 수치해석적인 모델을 제시하였고, Mazumder 등<sup>8)</sup>이 이동 가우시안 열원을 사용한 3차원 열전달 모델을 제시 했으며, Kim<sup>9)</sup>등이 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 접이기 용접의 유한요소해석을 시도 하는 등의 해석적 연구가 진행되고 있다

용접해석과 실험이 병행된 본 연구에서는 상용유한요소 프로그램인 MARC를 이용하여 펄스 레이저 용접시뮬레이션을 시도하였고, 그 결과를 동일조건 실험과 비교분석하였다 즉, 입열 조건으로 펄스 레이저 빔에 대한 3차원 이동형 열원모형을 설계함에 있어 용접해석과 실험 결과의 비교분석을 통해 그 타당성을 검증하였다 또한 설계된 3차원 열원을 마이크로 열교환기 용접해석에 적용시켜 용접 시 온도 분포결과를 분석하여 Nd YAG 펄스 레이저용접의 사용가능 여부를 판단해 보았다 그리고 마이크로 열교환기의 적정 용접조건을 설정하고자 하였다

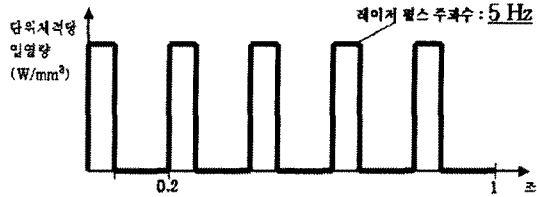
### II. 해석방법

상용 유한요소 프로그램인 MARC를 이용하여 열 해석을 수행하였다 Nd YAG 레이저 용접에서 비교적 깊은 용입과 재료표면에 조사되는 빔 형상이 원형이라는 것을 감안해 Fig 1 (a)와 같은 3차원의 콘형 가우시안 열원을 모델링 하여 용접해석의 입열 경계조건으로 적용시켰다 또한 Fig 1의 (b)와 같이 특정 펄스형태 및 주파수를 갖는 레이저를 용접시뮬레이션의 입열 경계조건으로 주기위해서 서브프로그램을 작성하였고 펄스의 형태 및 주파수 변화에 따른 다양한 입열조건을 해석에 적용시킬 수 있다

이동형 펄스레이저 열원을 이용한 용접해석결과가 실제 용접실험의 결과와 잘 부합되기 위해서는 반드시 실험을 통한 열원 모델의 검증과정이 필요하다 따라서 본 연구의 열원모델링 단계에서 두께 1mm 의 AISI 304 평판의 용접실험을 병행하여 Fig 2와 같이 용융부 단면형상의 폭과 깊이 값 들을 비교분



(a) 3차원 입열 열원모델 및 변수



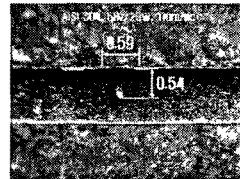
(b) Nd YAG 레이저의 펄스형태 및 주파수

Fig 1 3차원 펄스형 이동열원

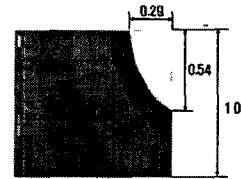
석하였고, Table 1과 같이 열원의 형상변수 및 단위체적당 최대 입열량 값이 결정되었다 또한 빔파워 변화에 따른 설계된 용접열원의 적합정도를 검토하였으며, 이를 이용하여 초소형 열교환기(micro heat exchanger)의 채널부와 채널연결부의 용접조건(적정 빔파워)을 설정하고자 하였다

Table 1 펄스형 레이저 열원의 형상변수 값 및 단위체적당 최대 입열량

Conical type 원형열원			
형상변수	단위체적당 최대 입열량 (용접시험의 빔파워 20W에 대한)		
Ze	0	Qo (W/mm <sup>3</sup> )	1300
Zi	-0.65		
Re	0.3		
Ri	0.1		



(a) Experiment



(b) Simulation

Fig 2 Comparisons of fusion zone(20W)

Fig 3은 초소형 열교환기의 해석모델을 나타내고, Fig 4는 해석모델을 위해 구상하고 설계한 초소형 열교환기를 도식적으로 나타낸다 초소형 열교환기의 생산 공정에서 마이크로 채널부와 채널 연결부의 접합이 필요하며 접합부는 채널을 통과하는 유체의 압력을 견뎌야 하고 기밀도 확실하게 유지되어야 한다 이에 접합방법으로 가장 좋은 것이 용접이고 그 중에 용접 시 열 영향부가 가장 작고 미세한 정밀접합도 가능한 펄스형 Nd YAG 레이저의 용접이 채널과 연결부 접합에 가장 적합하다 하지만 용접 중 발생된 열이 마이크로채널에 손상을 주는 문제가 발생될 수 있으므로 사용적합 여부판단과 레이저 용접의 적정 조건설정이 필요하다 따라서 본 연구에서는 앞의 AISI 304 평판의 용접에서 설계된 열원을 이용하여 초소형 열교환기의 채널부 접합에 관한 용접시뮬레이션을 하였고 고정 용접조건(용접속도 1mm/sec, 펄스주파수 5Hz, 입열시간 0.08sec)에 적합한 빔파워를 설정해 보았으며 온도분포 분석을 통해 마이크로 채널에 대한 용접열의 영향정도를 예측, 판단하였다

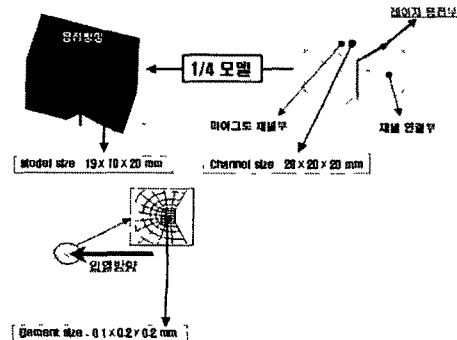


Fig. 3 초소형 열교환기 용접해석 모델

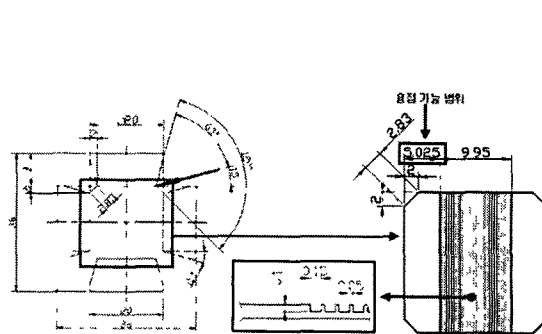


Fig 4 초소형 열교환기 및 마이크로 채널부의 구상 및 설계

레이저 빔의 고밀도 에너지는 재료를 순간적으로 가열시켜 온도를 급상승시키고 가열된 재료의 열적 물성은 온도분포에 따라 큰 차이를 나타낸다 따라서 AISI 304의 펄스형 Nd YAG 레이저 용접시뮬레이션을 위해서는 열 해석에 필요한 주요 물성들이 Table 2와 같은 온도에 따른 데이터로 적용되어야만 한다 또한 열전달 해석의 경계조건은 펄스 레이저빔에 의한 입열 조건과 용접 후 재료의 냉각에 대한 조건으로 나누어 볼 수 있다 열원조건으로 펄스형 Nd YAG 레이저의 열원의 각부 치수, 빔파워 및 속도, 펄스 주파수 등을 변화시키며 시뮬레이션 할 수 있는 서브프로그램을 작성하여 용접해석에 적용시켰고, 냉각조건으로 용접 시 용접부의 복사에 의한 열전달과 상온의 공기와 용접재료 사이의 대류에 의한 열전달이 고려된 서브프로그램을 작성하여 적용시켰다 위에 서술된 경계조건 내용을 표로 간략히 정리하면 Table 3과 같다

Table 2 AISI 304 스테인리스 스틸의 재료물성치

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)

Table 3 펄스형 레이저 용접해석의 경계조건

열전달	경계조건 설정방법
레이저 빔의 조사	서브프로그램 작성
복사	서브프로그램 작성
대류	서브프로그램 작성
장열	MARC의 경계조건 옵션사용

### III. 해석결과 및 고찰

초소형 열교환기 채널부 용접에 관한 열 해석의 온도분포 결과를 Fig 5와 6에 나타내었다 Fig 5, 6은 채널부의 총 용접길이 20mm 중 레이저 빔이 16mm 지점에 위치했을 때의 용융부 및 온도분포인데 그림에서 회색의 컨투어밴드(contour band)부분으로 용융부 크기를 예측할 수 있고, 그 외의 부분에 열영향부가 위치된다 Fig 5 (a)는 열교환기 표면 전반의 온도분포인데 두께 1mm인 평판의 용접해석과는 달리 온도분포의 꼬리가 길게 형성되지 않았다 이는 재료깊이 방향으로의 열전도가 그 만큼 많이 일어났기 때문으로 판단된다 수축의 빔파워 변화에 따른 시뮬레이션 결과를 비교분석 했을 때 온도분포 중심의 용융부 표면직경이 약 0.6mm이기 위한 적정 빔파워는 약 31W로 예측할 수 있었다

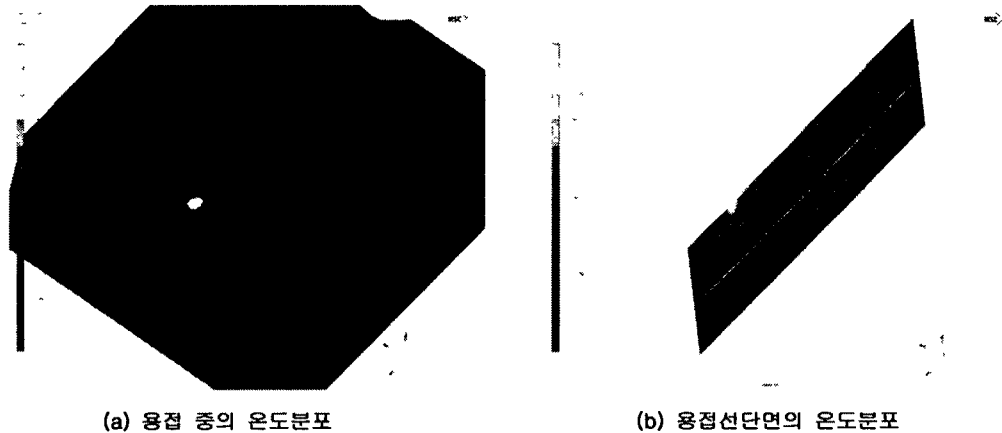
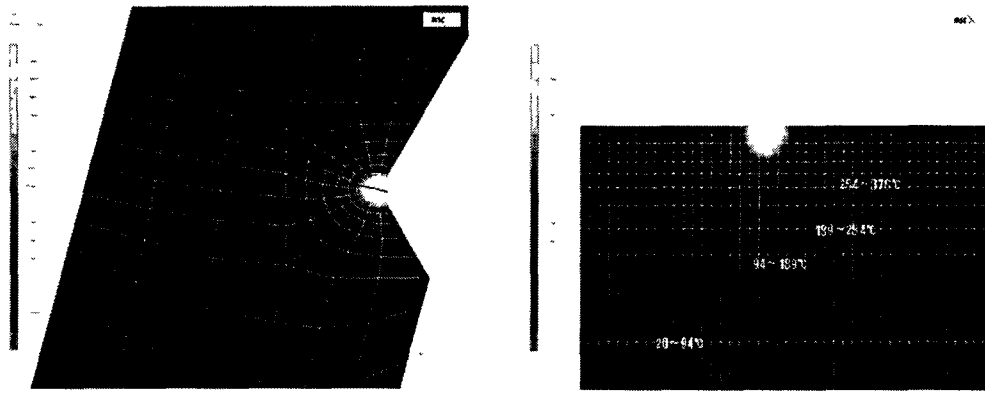


Fig 5 용접거리 16mm에서 온도분포(약 31W)

Fig 5 (b), Fig 6 (a)는 채널 용접부의 용접선방향 및 수직단면의 온도분포이고 용접열에 의한 깊이방향으로의 전도는 크지 않음을 나타내었다 Fig 6 (b)의 용접선단면에서 깊이방향으로의 온도분포를 살펴보면 열영향부의 범위가 매우 협소함과 깊이에 따른 온도의 감소가 급격함을 알 수 있다 따라서 Nd YAG 펄스 레이저 용접열이 마이크로 채널부 손상에 끼치는 영향정도는 매우 작을 것으로 생각된다



(a) 용접선 수직단면 (b) 용접선 단면  
 Fig 6 용접거리 16mm에서의 용융부 및 온도분포(약 31W)

Fig 7은 용접 시작점에서 15.7mm 떨어진 지점의 깊이와 타임스텝에 따른 온도변화 그래프이다 여기서의 깊이방향은 Fig 8에서 빔조사 및 용융부 깊이방향과 일치한다 그래프에서와 같이 깊이 1mm에서 2.7mm의 온도이력은 매우 큰 차이가 났고, 깊이 1.7mm이하의 온도변화는 매우 작을 것으로 예측된다 이 깊이는 마이크로 채널부에서는 깊이에 sin과 cos 값이 되고 온도분포의 해석결과를 분석해 볼 때, 펄스형 Nd YAG 레이저를 이용한 초소형 열교환기 채널부 용접은 가능할 것으로 생각되며 해석을 통해 설정된 용접조건으로의 실험결과와 비교분석을 통한 검증이 필요하다 보다 다양한 재질, 용접형태 (맞대기, 필렛, 겹침 등) 및 두께 등에 대한 용접실험과 이를 통해 각 조건에 맞는 열원 모델링에 대한 연구진행이 계속된다면 실제 용접조건에 보다 가까운 펄스 레이저 용접조건 설정이 용접시뮬레이션을 통해 가능할 것이고, 이를 산업현장에 적용시킨다면 많은 비용절감과 개발시간 단축, 생산성 향상 등의 효과를 가져 올 것으로 생각된다

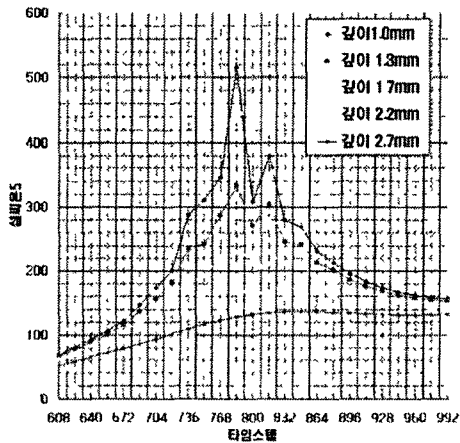


Fig 7 용접 시작점에서 15.7mm 떨어진 지점의 깊이와 타임스텝에 따른 온도변화

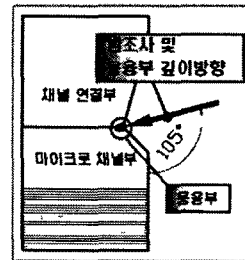


Fig 8 레이저빔의 조사방향 및 용융부의 깊이방향

#### IV. 결론

동일조건에서의 용접실험을 토대로 펄스 레이저 용접열원을 모델링하고 이를 적용한 초소형 열교환기 채널부 용접에 대한 열 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다

- 1 온도분포를 분석했을 때 용접열의 전도에 의한 채널 안쪽의 가열 정도는 마이크로 채널의 열적 손상에 크게 영향을 주지 못할 것으로 판단된다
- 2 Nd YAG 펄스 레이저 용접가공은 마이크로 채널부와 채널연결부의 접합에 적용 가능할 것이고 기밀유지 및 접합강도, 가공효율 등의 측면에서도 매우 적합할 것으로 생각된다
- 3 다양한 재질, 용접형태(맞대기, 필렛, 겹침 등) 및 두께 등에 대한 용접실험과 이를 통해 각 조건에 맞는 열원 모델링에 대한 연구진행이 계속된다면 실제 용접조건에 보다 가까운 펄스 레이저 용접조건 설정이 용접시뮬레이션을 통해 가능할 것으로 사료된다

## V. 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, No5, 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