研究論文

레이저 브레이징에서의 열유동 해석에 관한 연구

전민규* · 김원배** · 한국찬*** · 나석주***

A Study on analysis of heat flow in laser brazing

M. K. Jeon*, W. B. Kim**, G. C. Han*** and S. J. Na***

Key Words : Laser brazing(레이저 브레이징), Beam mode(빔 모드), Temperature distribution (온도분포), Infrared temperature sensing system(적외선 온도 측정 시스템), Joining quality(접합품질)

Abstract

An advantage offered by brazing over fusion welding is that strong joints may be produced at relatively low heat input. To minimize the thermal effects and maintain the desired dimension of assemblies, the CO_2 laser beam can be applied to the brazed joint of pin and plate as a micro heat source. This paper presents a analysis model of the laser brazing process considering the laser beam mode and heat flow in brazed parts by using the finite element method. The simulation results were compared with the experimental results obtained from the infrared temperature sensing system. Based on these results, the proper process parameters were investigated to get a good joining quality. The influence of the beam mode change was examined with respect to the temperature distribution and joint quality.

1. 서 론

레이저는 1960년대 초반 실험실 환경에서 처음 개발된 이후로 레이저의 직진성을 이용한 얼라인먼트(alignment)용도에서 부분 조명 및 고출력 파워를 이용한 재료 가공용에 이르기까지 매우 다양한 분야에서 응용되고 있다[1,2]. 레이저 가공은 기존의 열가공 공정에 비하여 고밀도(high density), 응집성(coherence), 단파장성(monochromaticity)등의 특징을 가지고 있으므로 주로 열에 민감한 재료나 제품의 특성상 과열을 피해야 할 부분의 접합 및 절단등에 매우 이용되고 있으며, 최근 미소부품의 용접 및 접합 공정분야에 많은 연구가 진행되고 있는 실정이다. 레이저 브레이징은 이종재료 미소접합에 매우 효율적인 공정으로서 비접촉

* 비회원, 삼성중공업(주)
** 비회원, LG 전선(주)
*** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

식 가열원을 이용하기 때문에 접합공정 중 기계적 변형이 없고, 레이저 빔을 국부가열원으로 하여 매우 좁은 부분에 제한적으로 열을 가할 수 있어서 강한 금속적 결합이 요구되는 소형 부품의 접합에 이용될 수 있다. 또한 빔의 유효 반경이나 출력, 빔 조사시간 등의 공정변수들을 변화시켜 실제 접합부에 들어가는 입열량을 쉽게 제어할 수 있고, 고밀도 에너지를 입열시킴으로 접합 공정시간을 단축 시킬 수 있는 장점이 있다[3-5].

본 연구에서는 이러한 레이저 가공의 장점들을 이용하여 비데오 데크의 핀 접합 공정에대한 레이저 브레이징 공정을 해석하였다. 비데오 데크는 좁은 플레이트(plate)위에 많은 핀들이 접합되어 있는 형상으로 접합후 플레이트와 핀(pin)과의 수직도 및 접합 강도가 접합 품질을 결정하게 된다. 따라서 본 연구에서는 레이저 브레이징 공정을 모델링하고 스테인레스 핀과 알루미늄 플레이트간의 열유동을 유한요소법에 의한 해석을 수행하여 접합 영역에서의 온도 분포를 예측하였고, 그 결과를 기초로 접합에 필요한 레이저 브레이징의 적정 공정변수를 제안하였다. 또한 열전대 및 적외선 센서 시스템을 실제 접합공정에 적용하여 레이저 브레이징 접합공정에 대한 해석결과를 검증하였다.

2. 열유동 해석

2.1 레이저 브레이징 공정 모델링

레이저 브레이징에서는 집광된 레이저 빔을 접합부 표면에 조사하여 용가재를 용융시키고, 모재와 핀과의 좁은 간극 사이의 모세관 현상으로 용융된 용가재가 순간적으로 빨려들어가 간극을 채우게 되어 접합을 이루게 된다. 본 연구에서는 Fig. 1(a)에 나타낸 바와 같이 두께 1.2㎜의 알루미늄 평판에 직경 3㎜인 스테인레스 핀을 접합시키는 레이저 브레이징 공정을 연구대상으로 하였다. 브레이징 접합공정은 링 형상의 고체 용가재를 알루미늄 플레이트와 핀사이에 있는 간극의 상단에 두고 그 위에 레이저 빔을 조사하였으며 용가재가 용융 즉시 핀과 모재사이의 간극으로 스며들어 간다고 가정하였다. 용융되어 간극으로 스며든 용가재의 초기온도는 용가재의 용융온도로 두었으며, 용가재가 용융되어 스며든 이후 간극에서의 재 응고에 이르기까지의 과정으로 모델링하였다. 본 연구에서 수행한 레이저 브레이징의 경우, 원형인 핀의 단면 형상과 열원인 레이저 빔의 단면 형상으로 인하여 Fig.1(b)와 같이 원주방향으로의 열전달이 균일하다고 가정한 축대칭 2차원(r-z plane)영역에서 해석을 하였다.

2.2 유한 요소 수식화

레이저 브레이징시 접합에 필요한 열 에너지는 레이저 빔의 조사로 인한 입열로 용가재에 전달된다. 이때 열전달 지배 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{\gamma}\frac{\partial}{\partial\gamma}\left(k\gamma\frac{\partial T}{\partial\gamma}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+Q=\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

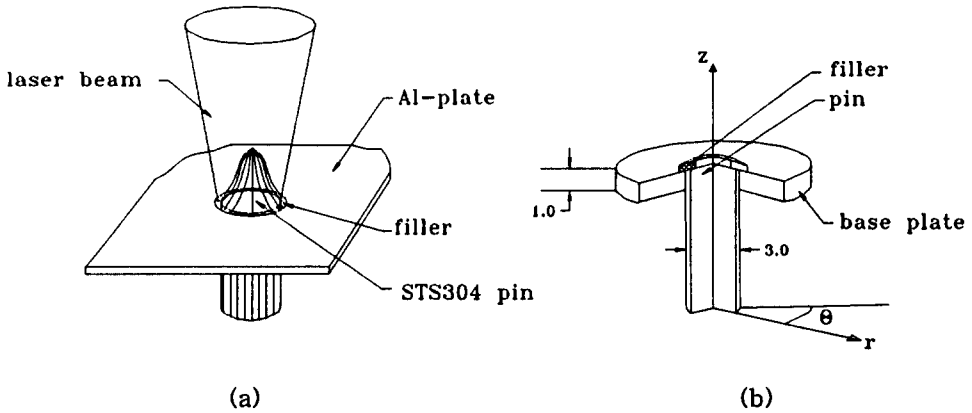

Fig. 1 Schematic diagrams of (a) laser brazing and (b) solution domain

여기서 T : 온도[K]
k : 열전도도[W/mK]
Q : 단위 체적당 열 발생량[W/㎥]
ρ : 밀도[kg/㎥]
C_p : 비열[J/kgK]
t : 시간[sec]

식 (1)의 해를 구하기 위한 해석영역 내부의 초기조건과 경계조건은 다음과 같다. 먼저 용가재가 용융되기전 초기 조건은 전 구역에서의 온도가 상온이므로 다음과 같이 표현된다.

$$T(\gamma, \theta, z, 0)=T_0(\gamma, \theta, z),\ t=0 \qquad (2)$$

여기서 T_0 : 초기 온도[K]

용가재의 용융 이후에는 용융된 용가재로 채워진 간극 부분의 초기 온도가 용가재의 용융온도인 T_m과 동일하다고 하였다. 경계조건은 레이저빔의 유효직경에 해당하는 표면에 대한 입열과 대기와의 대류로 인한 열전달로 나타냈다. 위 식들로부터 Galerkin방법에 의해 유한요소 수식화를 전개하고 정리하면 식(4)과 같이 나타낼 수 있다[6].

$$[C]\left[\frac{dT}{dt}\right]+([K_c]+[K_h])[T]=[R_q][K_s] \qquad (3)$$

여기서 $[C]=\int_\Omega \rho C[N]^T[N]d\Omega$: (Element capacitance matrix)

$[K_c]=\int_\Omega [B]^T[K][B]d\Omega$: (Element cconductance matrix)

$[K_h]=\int_{\Gamma_2} h[N]^T[N]dI$: (Element convection matrix)

$[R_q]=\int_{\Gamma_1} q_s[N]dI$(Heat load vector)

[B] : (Jacobian matrix)

본 연구에서는 시간 적분을 하기 위하여 Wilson의 방법중 θ를 2/3 로 하는 Galerkin 방법을 이용하였다[7].

2.3 열 원

레이저 가공에서 이용되는 레이저 빔의 transverse mode는 이용되는 공정에 따라 매우 중요한 의미를 갖고있다. 그 예로 절단이나, 용접, 그리고 드릴링 같이 집적된 고밀도의 에너지가 요구되는 공정에서는 일반적으로 빔의 발산이 적은 Gaussian 강도분포의 TEM_{00} 모드가 적합하고, 반면 균일한 강도분포를 요구하는 레이저 열처리공정 같은 경우에는 고차의 모드가 적합하다[1]. 레이저 브레이징에서는 용가재의 용융온도가 낮고, 증기압이 높기 때문에 용가재의 적절한 용융과 유동을 위하여 일반적으로 레이저 재료 가공에서 많이 이용되는 TEM_{00} 모드와 함께 Fig.2(a)와 같이 강도 분포가 도우넛 형상을 가지는 TEM_{01}^* 모드를 이용할 수 있다[3]. 본 연구에서는 열원으로 이용되는 열입력 강도분포를 위에서 언급한 TEM_{00} 모드와 TEM_{01}^* 모드로 나누어 수치해석에 이용하였으며, TEM_{00} 모드에 대해서는 실험결과와 비교 분석하였다. 이용되는 레이저 빔은 CW(continuous wave)인 것으로 하였다. 먼저 TEM_{00} 모드에 관한 입열분포는 Fig. 2(b)과 같으며 레이저 빔 강도분포는 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q(r)=\frac{3Q}{\pi\bar{r}^2}\exp\left(-3\left(\frac{r}{\bar{r}}\right)^2\right) \qquad (4)$$

여기서 $q(r)$: 반경 r에서의 빔 강도
Q : 레이저 출력
$\bar{r}$: 강도가 최고치의 5%일때의 레이저빔의 유효반경

TEM_{01}^*모드에 관한 입열분포를 식 (5)과 같이 모델링 하였다[5], Fig. 2(b).

$$q(r)=\frac{3Q}{\pi\bar{r}^2}\exp\left(-3\left(\frac{r-r_{sh}}{\bar{r}}\right)^2\right) \qquad (5)$$

여기서 $q(r)$: 반경 r에서의 빔 강도
Q : 레이저 출력
$\bar{r}$: 강도가 최고치의 5%일때의 레이저빔의 유효반경
r_{sh} : $\bar{r}/2$

TEM_{01}^* 모드는 TEM_{00} 모드에 비하여 높은강도가 보다 넓은면적에 걸쳐있어서 레이저 표면처리와 같이 재료가공부에 균일한 입열을 요구하는 공정에 적당한 빔 모드로써 레이저 브레이징에 유용한 빔 모드임을 예상할 수 있다.

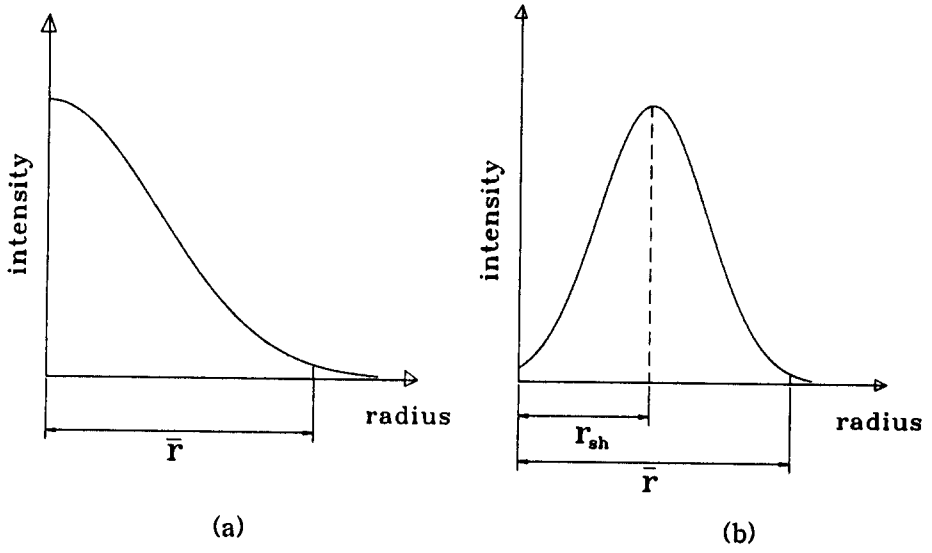

Fig. 2 Intensity distribution of (a) TEM_{01}^{*} mode (b) TEM_{00} mode

2.4 경계조건

레이저 브레이징 공정의 유한요소 해석을 위해 본 연구에서 적용한 해석영역 및 경계조건은 Fig. 3과 같다. 경계조건은 크게 용가재의 용융전(Fig.3 (a))과 용융후(Fig.3(b))로 나눌 수 있다. 외부에서 가해지는 레이저 빔의 조사는 용가재의 용융전에는 고상의 용가재 표면과 레이저빔에 직접 노출되어 있는 모재 및 핀의 표면에 유입되는 heat flux로 모델링했고 용가재 용융후에는 핀과 모재의 표면, 그리고 레이저 빔에 노출되어 있는 간극사이에 스며들어간 용가재 표면위로 가해지는 heat flux로 모델링 했다. 핀의 대칭축면은 단열로 두고 용가재 용융전의 고상 용가재와 핀 및 모재와의 경계면은 불완전한 접촉으로 인하여 열전달이 거의 이루어지지 않는다고 가정하여 단열로 가정하였다. 또한 대칭면이외의 모든 면에서는 용가재의 용융전후에 각각 대기에 노출된 면과 대류 열전달 현상이 일어나는 것으로 하였다. 또한 접합시 가해지는 입열로 인한 열변형은 없는것으로 가정하였다. 모재인 알루미늄과 스텐레스 핀의 화학적성분은 Table 1에 나타냈으며, 용가재는 88Al−12Si(wt %)의 조성을 갖는 용가재를 이용하였는데, 이때 수치해석에서 사용하는 물성치는 자료부족으로 인해 성분이 동일한 알루미늄 합금 계열의 물성치을 이용하였다[9].

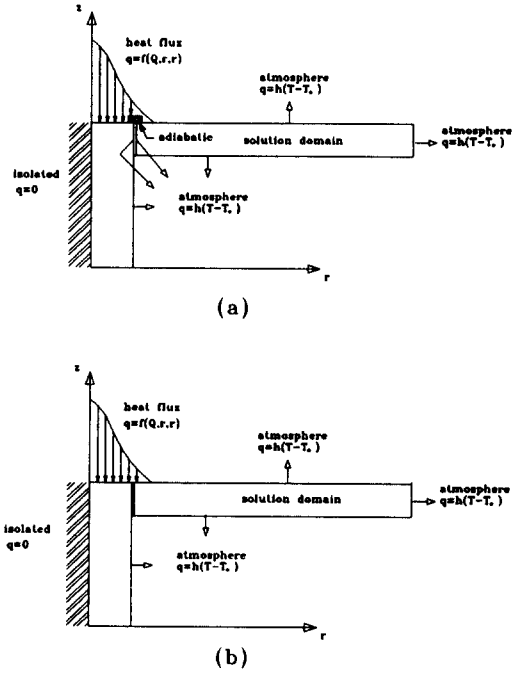

Fig. 3 Boundary conditions of solution domain for (a) before melting of filler metal and (b) after melting of filler metal

Table 1. Chemical compositions of Al5052 and STS 304

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Al
Al5052 P-H34	0.07	0.21	0.01	0.02	2.45	0.21	bal.

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
STS304	⟨0.15	⟨1.0	⟨2.0	⟨0.2	⟨0.15	8-10	17-19	bal.

2.5 흡수율

레이저 가공 공정중 입열량을 알기 위해서는 재료 표면에서의 빔 흡수율을 정확히 아는것이 매우 중요하다. 일반적으로 흡수율은 재료의 표면조도 조건과 레이저 파장 그리고 재료의 표면온도등에 많은 영향을 받는다[10] 본 연구에서는 핀의 재질인 STS304의 레이저 빔 흡수율을 결정하기 위해 Fig. 4(a)와 같은 실험을 하였다. STS304 평판에 레이저빔을 조사하여 일정거리 만큼 떨어진 곳에서 시편의 온도를 열전대로 측정하여 구한 값과 실험에서와 같은 조건에서 수치해석적으로 구한 평판에 대한 온도 분포의 시간에 따른 온도변화를 비교하여 시행착오법으로 CO_2 레이저빔의 흡수율을 예측하였다. 본 연구에서는 접합공정에서 접합부를 덮는 용재가 레이저 빔의 흡수율에 미치는 영향을 고려하기 위하여 STS304 평판의 빔 조사부분에 용재를 이용한 경우와 그렇지 않은 경우에 각각 열전대 신호를 받아 온도를 측정하였다. Fig.4(b)는 열전대로 측정한 온도와 온도 측정부위에서의 수치해석으로 구한 온도와의 비교로서 용재를 덮었을 경우와 그렇지 않은 경우가 각각 35%, 10%의 흡수율로 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 일반적으로 알루미늄계열의 모재와 용가재는 낮은 흡수율을 갖는 한편 보통 레이저 빔을 조사 받는 재료가 융융되거나 고온으로 올라갈 경우에는 급격히 흡수율이 향상되므로 본 연구에서는 모재의 경우 10%의 흡수율로 일정하게 적용하고 용가재는 용융전에는 10%, 일단 용융된 이후에는 90%의 흡수율을 갖는 것으로 하여 계산 하였다[10, 11]

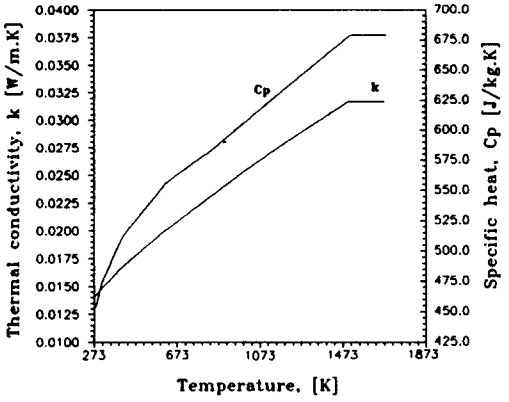

Fig. 4 Temperature dependent thermal properties of (a) STS304 and (b) Al5052

2.6 용가재의 용융에 따른 잠열고려

본 연구에서는 외부에서의 열입력에 의한 용가재의 상변화(phase change)는 잠열을 이용하여 고려하였다. 본 연구에서 이용된 용가재는 Al88%-Si12%의 합금으로 용가재의 상변화가 상변화 온도범위(phase-change interval)없이 단일온도에서 이루어진다[6]. 위의 경우와 같이 단일온도에서 상변화를 보이는 Stefan문제를 풀기 위하여 본 연구에서는 고정격자 유한요소법(fixed-grid method)중 엔탈피(enthalpy)법을 이용하였다[12, 13]. Stefan문제를 임의의 상변화 범위 문제로 바꾸어 풀기 위해서 상변화 범위를 실제문제에 접근할 수 있도록 충분히 작은 값인 0.1℃로 두었다.

3. 레이저 브레이징 실험

레이저 브레이징 접합부에서 일어나는 레이저 빔으로 인한 용가재의 용융, 간극으로의 유입 및 응고 등의 제반 접합 기구에 따른 접합부의 온도

변화를 알기 위하여 실제 레이저 브레이징을 수행하였다. Fig.5는 TEM_{00}의 빔 모드와 최대출력이 700 W인 CO_2 레이저 가공 시스템과 브레이징 실험을 위해 구성한 전체적인 개략도를 나타내고 있다. 접합공정은 스텐레스 핀을 알루미늄 평판에 지그를 이용하여 고정하고 용가재와 용재를 접합부 상부에 위치시킨뒤 레이저 빔을 조사시켰으며, 접합 공정중의 온도를 측정하기 위하여 적외선 온도 센서 시스템을 이용하여 표면 온도를 측정하고 해석결과와 비교하였다. 본 실험에서 이용한 적외선 온도센서는 용가재의 용융온도(850K/577℃) 부근에서 응답성이 우수한 PbSe계열의 광전도방식 적외선 온도 센서이다. 적용된 센서의 제원은 500−1300℃까지 온도 감지가 가능한 것으로 채택하였으나,

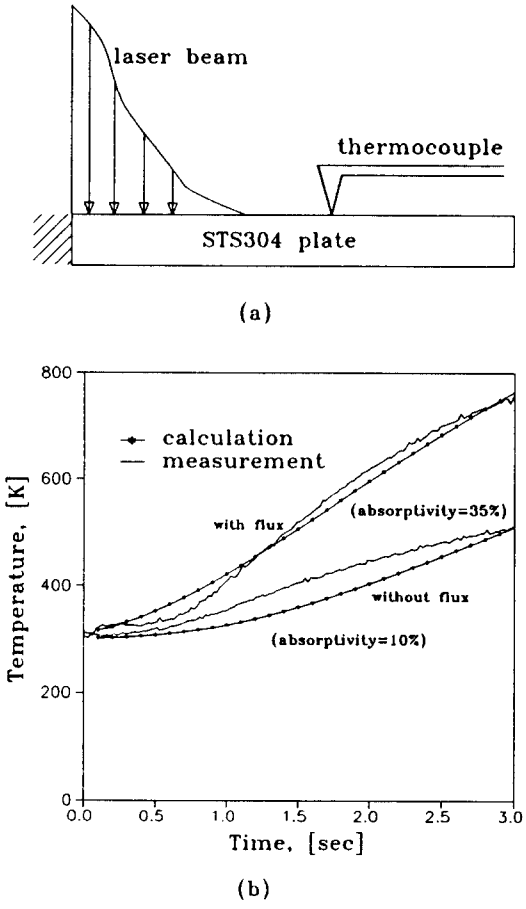

Fig. 5 Determination of absorptivity with TEM_{00}.
(a) Experimental configuration
(b) Temperature comparisons

Calibration을 통해 400−1000℃까지 선형성을 확보할 수 있었다.

적외선 온도 센서의 출력전압으로부터 온도를 도출해내기 위해 선형성이 우수한 열전대를 이용하여 calibration을 하였다. 센서 출력전압은 온도의 4제곱에 해당하는 방사에너지에 비례하며, 복사에너지와 온도와의 관계를 나타내는 Stefan's law를 적용하면 온도 T와 출력 전압 V와의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V-V_0=\mu(T^4-T_0^4) \tag{6}$$

이때 μ는 상수이며, 온도 T가 673K/400℃ 이상일 때 임의의 온도 T에서의 센서 출력전압 V는 다음식에 의해 근사화 할 수 있다.

$$V-V_0=\mu T^4 \tag{7}$$

4. 결과 및 고찰

레이저 브레이징 접합공정의 적정 공정변수를 설정하기 위하여 본 연구에서는 수치해석 결과중 Fig.6에서와 같이 접합부의 세 영역에서의 계산된 각각의 온도와 직경 5㎜의 표면 평균온도를 분석하여 레이저 브레이징 공정의 접합부 신뢰성을 확보하도록 하였다. 브레이징의 공정 특성상 양호한 접합을 위해서 레이저 빔을 조사받는 간극 위의 용가재는 완전히 녹아서 모재와 핀과의 간극에 충분히 스며들어야 하므로 용가재의 완전한 용융을 확인하기 위하여 용가재 부분의 온도를 분석하였으며, 또한 레이저 빔 조사로 모재의 용융이 일어

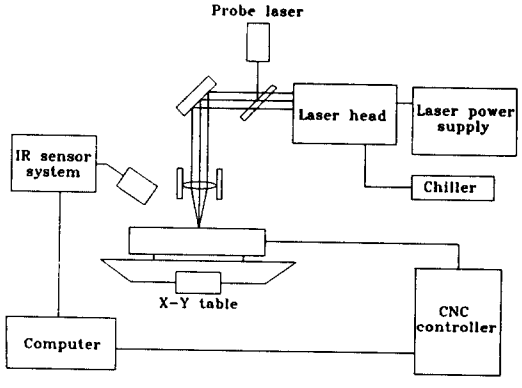

Fig. 6 Schematic diagram of laser brazing system

나서는 안되기 때문에 모재의 모서리 부분, 그리고 용가재 용융이후 간극에 스며든 용가재 하단 부분의 온도 분포를 분석하였다. 즉, 고상 용가재가 위치하는 영역 4에서의 온도는 용가재 용융온도 이상이어야 하고, 모재 부분에 해당하는 영역 2에서의 온도는 모재의 용융온도 이하로 접합을 마쳐야 하며, 용융후 간극으로 스며든 용가재 부분인 영역 3에서의 온도가 용가재 용융온도 부근에서 접합을 수행 할 경우 양호한 접합 품질을 기대할 수 있다. 본 연구에서는 전술한 세 부분의 온도를 고려하여 공정변수들이 열유동에 미치는 영향과 우수한 접합 품질을 위한 적절한 공정변수 선택영역을 결정하였다. 한편 수치해석 결과의 신뢰성을 위하여 유한요소해석 결과중 접합부 표면의 평균온도를 계산하고 이를 적외선 온도센서에 의해서 측정되는 온도측정 결과와 비교하였다.

Fig.7은 레이저 출력 500W로 3초간 레이저 빔을 조사했을 경우의 수치해석 결과와 적외선 센서에 의한 측정결과를 나타낸 것으로 수치해석 결과와 실험 결과값이 상당히 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 레이저 빔이 조사되기 시작하는 접합공정 초기에는 표면온도가 급격히 상승한 후 일단 온도가 떨어지는 경향을 보이고 있으며, 공정이 진행됨에 따라 어느 수준에서 유지되거나 서서히 상승하는 것을 알 수 있다. 이와같은 초기온도의 변화는 접합부를 덮고 있는 용재로 인한 레이저 흡수율의 증가와 용가재와 알루미늄 모재간의

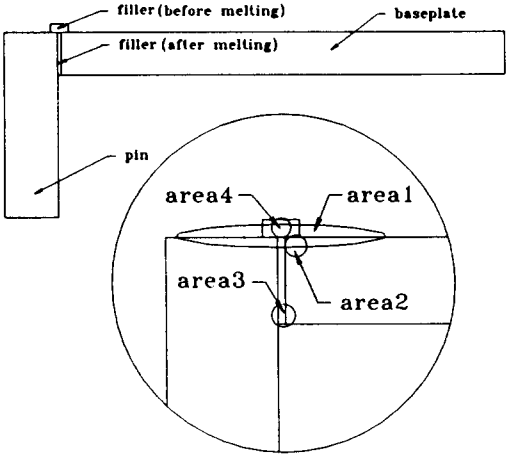

Fig. 7 Selected positions for analysis of temperature histories

불완전한 접촉으로 인해 조사된 열량이 용가재 내부에 축적되어 빔 조사 직후 간극 위의 용가재가 용융되기까지 고온으로 올라가기 때문으로 판단된다. 이후 용융된 용가재는 모재간의 간극으로 빨려 들어가고, 이에 따라 핀과 알루미늄 판재사이의 접촉저항이 감소되어 핀 부분에 집중되어 있던 열량이 알루미늄 판재로 방출될뿐 아니라, 흡수율에 큰 영향을 미치는 용재는 반응과 함께 가열, 증발되므로 모재표면의 레이저 흡수율이 다시 감소하게 됨에 따라 표면온도는 감소하게 되는 것으로 생각된다.

Fig.8은 접합 공정 변수 중 레이저 빔 모드의 변화에 따른 해석영역내에서의 접합부 온도분포를 나타낸 것이다. TEM_{00} 모드의 경우 집적된 에너지 분포를 가지는 관계로 핀과 용가재부분이 먼저가 열이 이루어지며 이후 핀으로 부터의 열전도로 알루미늄 모재부를 가열시켜 나가므로 집적된 레이저 빔의 강도분포와 핀의 낮은 열전도도로 인하여 핀 부분이 과열되거나 간극부의 불균일한 온도분포로 용입불량 등의 결함이 발생할 수 있을 것으로 생각된다. 반면 TEM_{01}^{*} 모드의 경우 TEM_{00} 모드에 비해 접합부의 온도에 있어서 낮은 온도구배를 보일 뿐 아니라 용융된 용가재가 스며들 간극부분의 온도 분포를 균일하게 하여 용융된 용가재을 잘 스며들게 하여 보다 향상된 접합 품질을 기대할 수 있다. 또한 TEM_{01}^{*} 모드의 경우 용가재 부위에서의 에너지 밀도가 가장 높은 강도분포를 가지기 때문에 다른부분을 가열시키지 않고 용가재를 쉽게 용융시킬 수 있어서 TEM_{00} 모드에 비해 낮은 레이저 출력으로도 접합이 가능하고 접합시간 또한 줄일 수 있는 장점이 있을것으로 판단된다. 실제 모세관 현상을 고려한 브레이징의 경우에 있어서도 용융된 용가재의 유동성을 유지하기 위해서는 무엇보다도 용가재의 유동장 주위의 균일한 온도 분포가 필수조건이기 때문에 레이저 빔 모드 변화로 인한 접합부의 온도분포 차이는 큰 의미를 가진다고 할 수 있다. 레이저 접합 공정 변수에는 앞서 기술한 바와 같은 레이저 출력, 레이저 빔 모드, 빔 유효 반경과 더불어 레이저 빔 조사시간이 입열량을 결정하는 중요한 변수로 작용한다. 그러므로 레이저 빔 조사 중에 영역 2와 3에 대한 시간에 따른 계산된 온도변화의 결과로부터 레이저 빔 조사 시간을 결정하였다. 실제 양호한 접합을 위해서는 용가재 부분이 모두 용가재

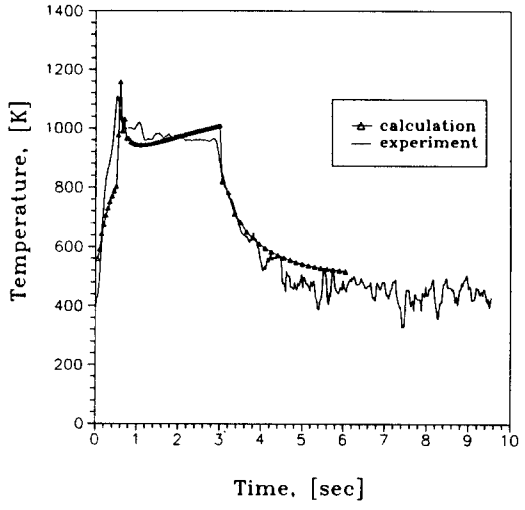

Fig. 8 Comparison between calculated and experimental temperature history

용융온도 이상이 되는 빔 조사시간을 선정하여야 한다. 그러나 TEM_{00} 모드의 경우는 온도구배가 핀에 집중되는 관계로 스며드는 용융 용가재의 하단부 온도(영역3)가 용가재의 용융온도 이상으로 되기 어려울 뿐 아니라, TEM_{01}^{*} 모드의 경우 역시 낮은 강도 분포와 용가재의 용융시 용재가 이미 증발되어 모재표면의 흡수율이 낮아지기 때문에, 용융된 용가재가 간극으로 충분히 스며들 시간을 되도록 많이 주기 위하여 빔 조사 시간을 알루미늄 모재가 용융되기 직전까지의 시간으로 선정하였다.

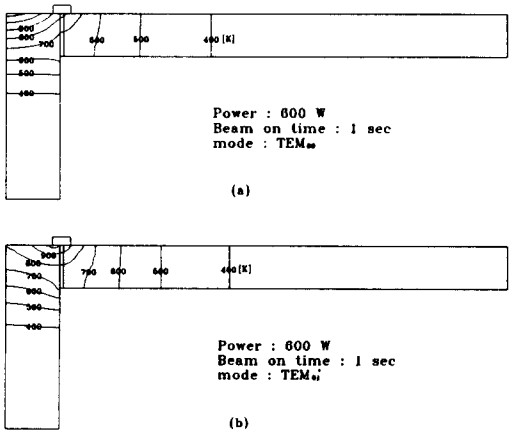

Fig. 9 Calculated temperature profiles in solution domain after laser brazing with (a) TEM_{00} mode and (b) TEM_{01}^{*} mode

Fig.9는 TEM_{00} 모드에서 빔 유효직경 5㎜, 레이저 출력 600℃에서의 접합 가능한 빔 조사 시간을 구하기 위해 유한요소법을 이용하여 계산된 표면 평균온도와 모재 및 용가재의 두 영역에서의 시간에 따른 온도변화를 나타낸 그림이다. 해석결과에서 알 수 있는바와 같이 알루미늄 모재(영역2)의 온도가 용융온도까지 상승하는 시간이 3초로 예상됨에 따라 빔의 조사시간을 3초로 결정하고 이에 따라 실험을 수행하였다.

Fig.10(a)는 Fig.9에서 결정한 빔 조사 시간동안 레이저 빔을 조사하여 접합을 수행한 경우 접합공정중의 적외선 센서로 측정한 온도결과를 유한요소법에 의해 계산된 표면 평균온도와 비교한 결과이며, Fig.10(b)는 해석 영역에서의 최고 온도 분포를 유한요소법으로 예측한 결과이다. 이 그림에서 알 수 있는바와 같이 접합부 간극부분의 온도분포가 각 부분별로 상당한 온도차이를 나타내고 있을 뿐 아니라 영역3의 경우에는 800K/527℃이하로 용가재가 간극에 완전하게 채워지기 어려운 상황임을 예측할 수 있다. 이에 비해 TEM_{01}^{*} 모드의 빔 모드를 이용하여 동일한 빔 조사 시간동안 접합을 할 경우에는, Fig.11(a)에서 볼 수 있듯이 용가재 부위의 강도분포가 높기 때문에 용가재가 용융되는 시간 또한 TEM_{00} 모드의 경우보다 짧아 용융된 용가재가 간극으로 스며드는 시간을 늘일 수 있을 뿐 아니라 전체 공정시간을 줄일 수 있을 것

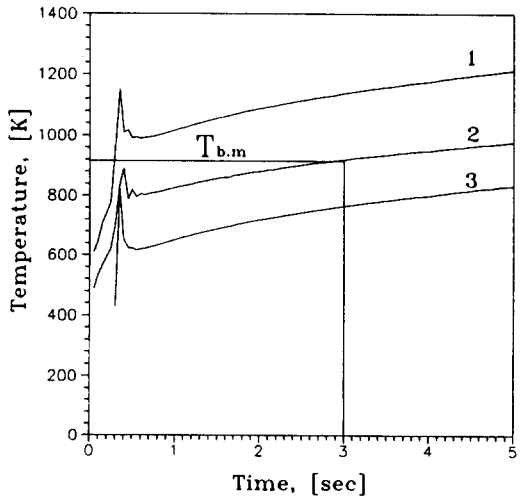

Fig. 10 Calculated temperature histories at selected positions from Fig.8($T_{b.m}$: base plate melting temperature)

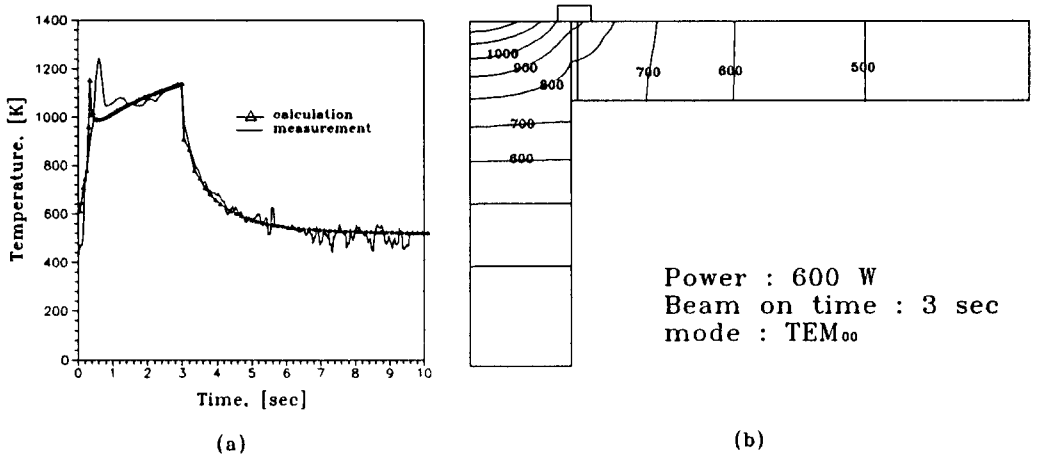

Fig. 11 Temperature characteristics after laser brazing with TEM_{00} mode
(a) Comparison between claculated and experimental results
(b) Temperature distribution in solution domain

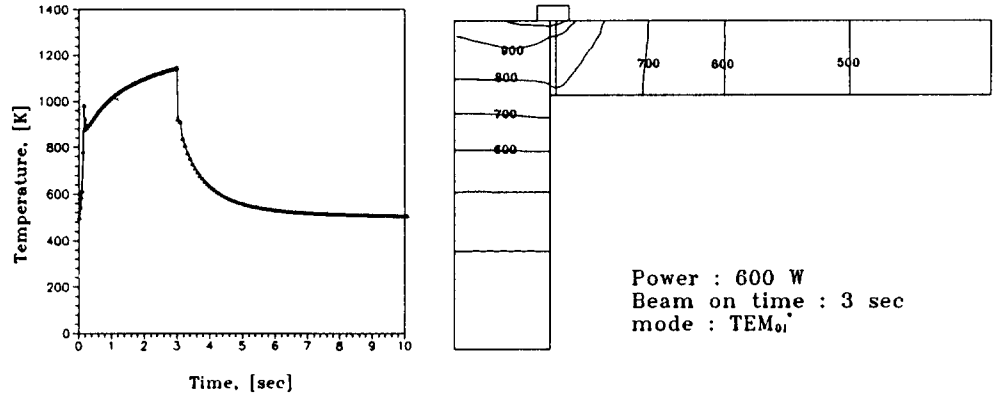

Fig. 12 Temperature characteristics after laser brazing with TEM_{01}^{*} mode
(a) Claculated results
(b) Temperature distribution in solution domain

으로 생각된다. 또한 Fig.11 (b)에서 알 수 있는바와 같이, 접합부 간극부분에 비교적 고른 입열이 이루어짐에 따라 접합부의 간극부분의 온도가 용가재 용융온도로 유지됨에 따라 용융된 용가재가 쉽게 스며들어 보다 양호한 접합품질을 얻을 수 있을것으로 기대할 수 있다. Fig.12는 TEM_{00} 모드에서 적정 조건으로 선정된 레이저 출력 600℃와 빔 조사시간 3초에 대한 브레이징 실험 결과이다. 용융된 용가재가 간극 사이로 잘 스며들어 비교적 양호한 접합부 단면을 보이고 있다. 그러나 접합면 상단에 존재하는 용가재의 형상이 비대칭적이라는 것이 자주 관찰 되는데 이는 간극위에 고정시킨 링 형상의 고체 용가재 자체의 비대칭성과 용접조건의 비대칭성에 기인한다고 볼 수 있다.

5. 결 론

레이저 브레이징 접합공정시 접합부의 온도분포를 유한 요소법을 이용하여 해석하고 적외선 온도센서를 이용한 표면온도 측정결과와 비교하고, 이

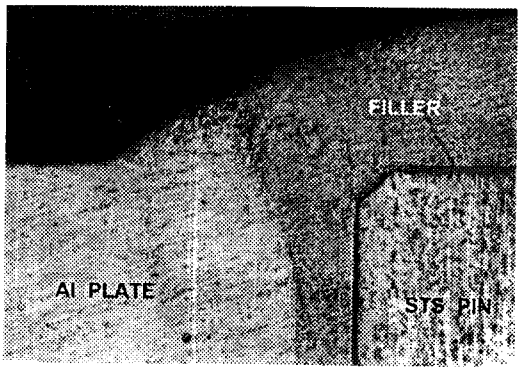

Fig. 13 Cross-sectional view of laser brazed part

를 이용하여 접합부의 온도에 미치는 공정변수들의 영향을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 레이저 브레이징 공정을 모델링하고 이를 이용하여 유한요소 해석을 수행한 결과 적외선 센서를 이용한 측정결과와 상당히 잘 일치함을 알 수 있었다.

2. 레이저 브레이징시 초기에 나타나는 최고온도는 용가재와 모재와의 불완전한 접촉에 의한 열량의 축적 및 브레이징 용재에 의한 흡수율의 증가가 원인으로 판단되며, 이후 용가재가 간극에 채워짐에 따라 핀에 축적된 열량이 열전도에 의하여 알루미늄 모재로 방출되어 온도의 강하가 일어나고 있었다.

3. 레이저 빔 모드에 따른 접합부 온도분포를 해석한 결과 TEM_{01}^{*} 모드가 TEM_{00} 모드에 비하여 접합부의 온도구배가 작게 나타나고 있었으며 접합부 간극부분의 균일한 가열상태를 얻을 수 있음에 따라 양호한 접합 품질을 기대할 수 있음을 알 수 있었다.

4. 수치 해석결과 분석을 통하여 양호한 접합품질을 얻을 수 있는 공정변수를 선정할 수 있었다.

본 연구를 통하여 양호한 접합을 위한 공정 변수중 빔 모드의 전환의 유용성을 제시하고, 적외선 온도센서를 이용한 공정 모니터링에 있어서 품질예측기의 준비단계를 마련했다고 하겠다. 그러나 정확한 접합품질 예측을 위해서는 브레이징 접합의 구동력인 모세관 현상에 대하여 좀 더 심도있는 연구가 계속되고 입열에 의한 접합부의 열변형에 대한 연구가 계속 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. W.M.Steen : *Laser material processing,* 1991, Springer-Verlag, p.23－64
2. J.Wilson and J.F.B.Hawkes : *Laser principles and applications,* 1987, PreticeHall, New York, p.128－163
3. C.E.Witherell and T.J.Ramos : "Laser brazing", *Welding Journal,* Vol.59, 1980, p.267s－277s
4. T.A.Jones and C.E.Albright : "Laser beam brazing of small diameter copper wires to laminated copper circuit boards", *Welding Journal,* Vol.63, 1984, pp.34－47
5. C.E.Witherell : "Laser micro-brazing to join small parts", *Laser focus,* Nov. 1981, p.73－80
6. N.Kikuchi : *Finite element methods in mechanics,* 1985, Cambridge university press, New York
7. D.S.Burnett : *Finite element analysis,* 1987, Addision-Wesley, New York
8. A.J.Russo, R.L.Akau and J.L.Jellison : "Thermocapillary flow in pulsed laser beam weld pools", *Welding Journal,* Vol.69, p.23s－29s
9. B.P.Bardes : *Metal Handbook,* 9th edition Vol.2, 1978, American Society for Metals, pp.101－122
10. G.Sten : "Absorptivity of cw CO_2, CO and YAG-laser beams by different metallic alloys", *Proceeding of the ECLAT'90,* Erlangen, Germany, Sep. 17－19, 1990, p.25－35
11. T.H.Kim, K.C.Chong, B.Y.Yoo, J.S.Lee and K.H. Hwang : "Absorptance calculation of CO_2 laser beam on stainless steel and carbon steel by numerical method", *Proceedings of LAMP'92,* Nagaoka, Japan, Jun. 7－12, 1992, pp.287－292
12. A.B.Crowley : "Numerical solution of Stefan problems", *Intl. J. Heat Mass Transfer,* Vol.21, pp. 215－219
13. A.J.Dalhuijsen and A.Segal : "Comparison of finite element techniques for solidifiction problems", *Intl. J. for numerical methods in engineering,* Vol.23, pp.1807－1829