

레이저 브레이징에서의 열유동 해석에 관한 연구

A study on analysis of heat flow in laser brazing

전민규*, 김원배**, 한국찬***, 나석주***

* 삼성중공업(주), ** LG전선(주), *** 한국과학기술원 기계공학과

1. 서론

레이저 브레이징은 이종재료 미소접합에 매우 효율적인 공정으로서 비접촉식 가열원을 이용하기 때문에 접합공정 중 기계적 변형이 없고, 레이저 빔을 국부가열원으로 하여 매우 좁은 부분에 제한적으로 열을 가할 수 있어서 강한 급속적 결합이 요구되는 소형 부품의 접합에 이용될 수 있을 뿐만 아니라 공정변수들을 변화시켜 실제 접합부에 들어가는 입열량을 쉽게 제어 할 수 있다는 등 많은 장점들을 가지고 있다[1,2].

본 연구에서는 레이저 브레이징 공정을 모델링하고 스테인레스 핀과 알루미늄 플레이트간의 열유동을 유한요소법에 의한 해석을 수행하여 접합부에서의 온도 분포를 예측하였고, 그 결과를 기초로 접합에 필요한 레이저 브레이징의 적정 공정변수를 제안 하였다. 또한 열전대 및 적외선 센서 시스템을 실제 접합공정에 적용하여 레이저 브레이징 접합공정에 대한 해석결과를 검증하였다.

2. 열유동 해석

2.1 레이저 브레이징 공정 모델링

본 연구에서는 Fig.1(a)에 나타낸 바와 같이 두께 1.2mm의 알루미늄 평판에 직경 3mm인 스테인레스 핀을 접합시키는 레이저 브레이징 공정을 연구대상으로 하였다. 원주방향으로의 열전달이 균일하다고 가정한 축대칭 2차원(r-z plane)영역에서 해석을 하였다(Fig.1(b)).

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.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (kr \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) + Q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

먼저 용가재가 용융되기 전 초기 조건은 전 구역에서의 온도가 상온이므로 $T(r, \theta, z, 0) = T_0(r, \theta, z), \theta = 0$ 으로 표현된다. 용가재의 용융 이후에는 용융된 용가재로 채워진 간극 부분의 초기 온도는 용가재의 용융온도인 T_m 과 동일하다고 하였다. 경계조건은 레이저빔의 유효직경에 해당하는 표면에 대한 입열과 대기와의 대류로 인한 열전달로 나타냈다. 위 식들로부터 Galerkin방법에 의해 유한요소 수식화를 전개 및 정리하면 다음과 같다[6].

$$[C] \left[\frac{dT}{dt} \right] + ([K_c] + [K_h])[T] = [R_q][K_h] \quad (2)$$

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 conductance matrix)

$[K_h] = \int_{\Gamma} h [N]^T [N] d\Gamma$ (Element convection matrix)

$$[R_q] = \int_{\Gamma_1} q_s [N] d\Gamma \quad (\text{Heat load vector})$$

$$[K_h] = \int_{\Gamma_2} h [N]^T [N] d\Gamma \quad (\text{Heat load vector})$$

$$[B] : \quad (\text{Jacobian matrix})$$

본 연구에서는 시간 적분을 하기 위하여 Wilson의 θ 방법 중 θ 를 2/3 로 하는 Galerkin 방법을 이용하였다[4].

2.3 열원

열원으로 이용되는 열입력 강도분포를 TEM₀₀ 모드와 TEM₀₁* 모드로 나누고, 이용되는 레이저 빔은 CW인것으로 하였다.

2.4 경계조건

레이저 브레이징 공정의 유한요소 해석을 위해 본 연구에서 적용한 해석영역 및 경계조건은 Fig.2와 같다. 경계조건은 크게 용가재의 용융전(Fig.2(a))과 용융후(Fig.2(b))로 나눌 수 있다. 용가재는 88Al - 12Si(wt%)의 조성을 갖는 용가재를 이용하였는데, 이 때 수치해석에서 사용하는 물성치는 자료부족으로 인해 동일 성분의 알루미늄 계열의 물성치를 이용하였다.

2.5 흡수율

본 연구에서는 핀의 재질인 STS304의 레이저 빔 흡수율을 결정하기 위해 실험과 계산을 통해 모재의 경우 10%의 흡수율로 일정하게 적용하고 용가재는 용융전에는 10%, 일단 용융된 이후에는 90%의 흡수율을 적용하였다[5].

2.6 용가재의 용융에 따른 접열고려

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[3].

3. 레이저 브레이징 실험

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°C) 부근에서 응답성이 우수한 PbSe계열의 광전도방식 적외선 온도 센서를 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

Figure 3은 레이저 출력 500W로 3초간 레이저 빔을 조사했을 경우의 수치해석 결과와 적외선 센서에 의한 측정결과를 나타낸 것이며, Figure 4는 접합 공정 변수 중 레이저 빔 모드의 변화에 따른 해석영역내에서의 접합부 온도분포를 나타낸 것이다. Figure 5(a)는 3간레이저 빔을 조사하여 접합을 수행한 경우 접합공정중의 적외선 센서로 측정한 온도결과를 유한요소법에 의해 계산된 표면 평균온도와 비교한 결과이며, Fig.5(b)는 해석 영역에서의 최고 온도 분포를 유한요소법으로 예측한 결과이다. Fig.6(b)에서 알 수 있는바와 같이, 접합부 간극부분에 비교적 고른 입열이 이루어짐에 따라 접합부의 간극부분의 온도가 용가재 용융온도로 유지됨에 따라 용융된 용가재가 쉽게 스며들게 하여 보다 양호한 접합품질을 얻을 수 있을것으로 기대할 수 있다. Fig.7은 TEM₀₁* 모드에서 적정 조건으로 선정된 레이저 출력 600W와 빔조사시간 3초에 대한 브레이징 실험 결과이다.

참고문헌

1. 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
2. C.E.Witherell, "Laser micro-brazing to join small parts", *Laser focus*, Nov. 1981, p.73-80
3. N.Kikuchi, *Finite element methods in mechanics*, 1985, Cambridge university press, New York
4. D.S.Burnett, *Finite element analysis*, 1987, Addison-Wesley, New York
5. T.H.Kim, K.C.Chong, B.Y.Yoo, J.S.Lee and K.H.Hwang, "Absorptance calculation of CO₂ laser beam on stainless steel and carbon steel by numerical method", *Proceedings of LAMP'92*, Nagaoka, Japan, Jun. 7-12, 1992, pp.287-292

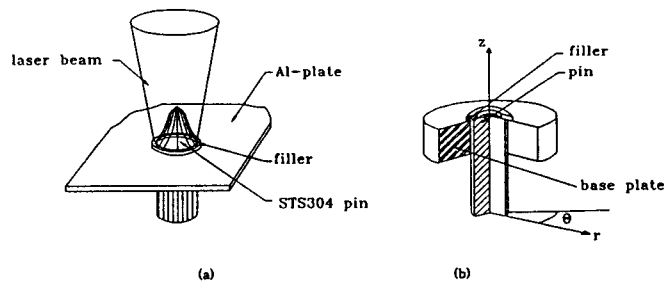


Fig.1 Schematic diagrams of (a)laser brazing process and (b)solution domain

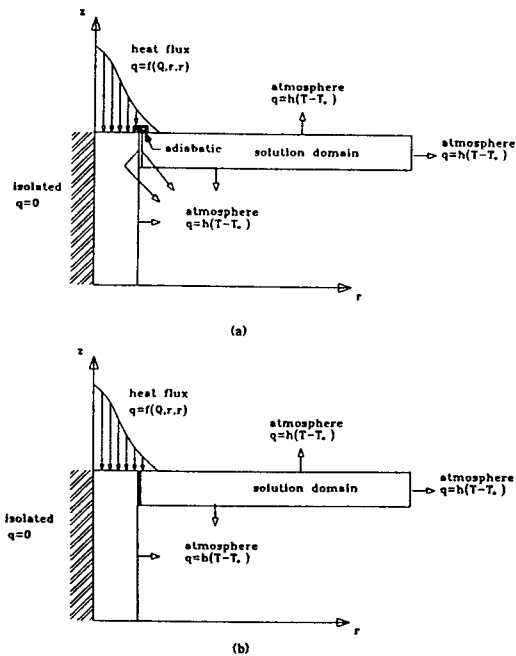


Fig.2 Boundary conditions of solution domain for (a)before melting of filler metal and (b)after melting of filler metal

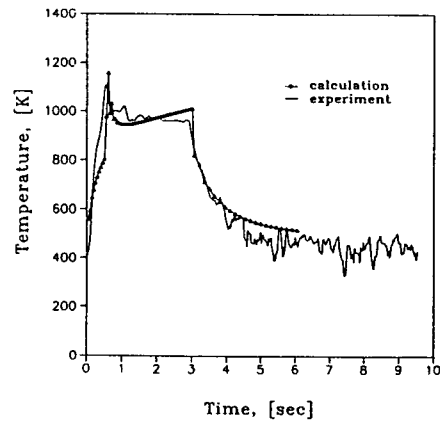


Fig.3 Comparison between calculated and experimented temperature history

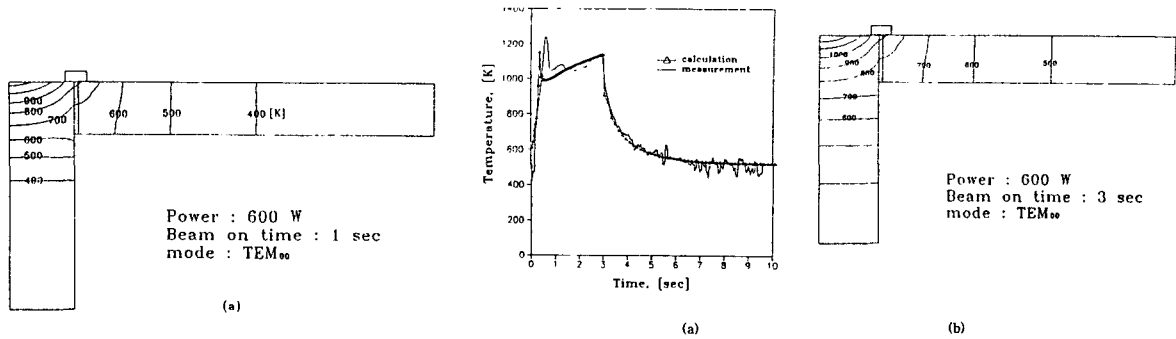


Fig.5 Temperature characteristics after laser brazing with TEM₀₀ mode
 (a)Comparison between calculated and experimental results
 (b)Temperature distribution in solution domain

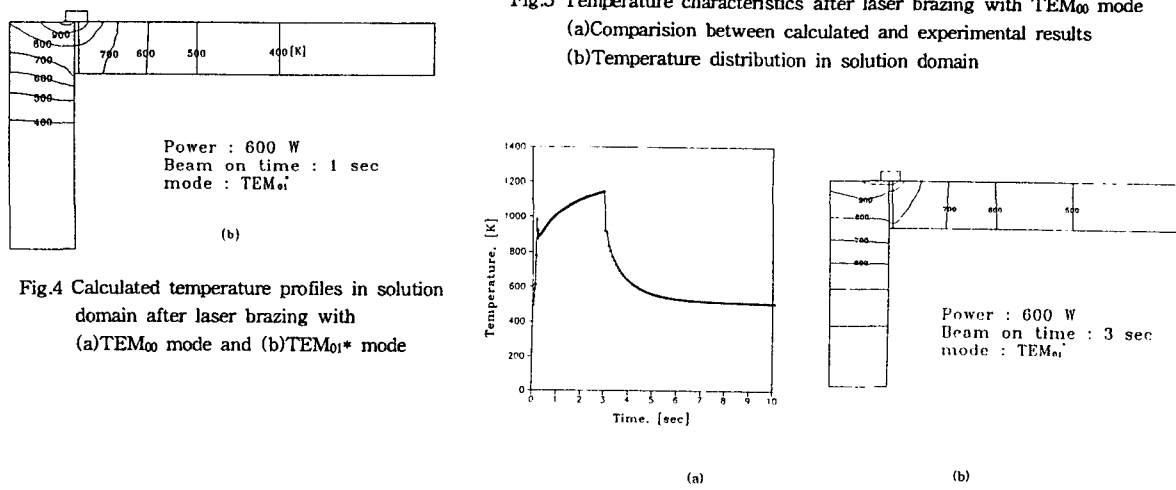


Fig.4 Calculated temperature profiles in solution domain after laser brazing with
 (a)TEM₀₀ mode and (b)TEM₀₁* mode

Fig.6 Temperature characteristics after laser brazing with TEM₀₀* mode
 (a)calculated results (b)temperature distribution in solution domain

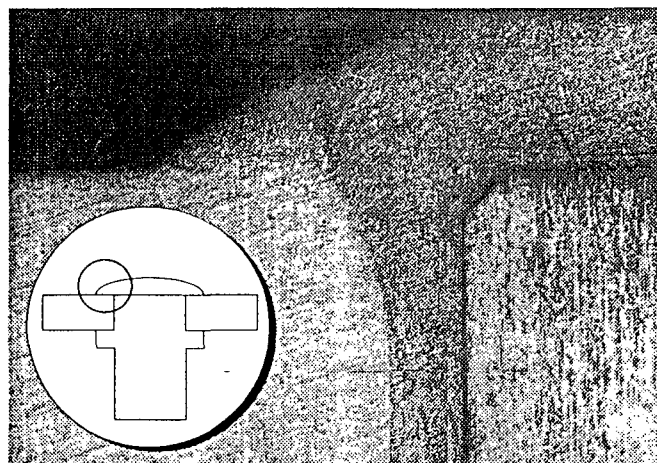


Fig.7 Cross-section view of laser brazed part