

## ◎ 논문

## 플립칩 본더용 가열기의 열특성 해석을 위한 수치모델

이 상 현<sup>1</sup>, 곽 호 상<sup>2</sup>, 한 창 수<sup>3</sup>, 류 도 현<sup>4</sup>A Numerical Model to Analyze Thermal Behavior of a Radiative Heater  
Designed for Flip-Chip Bonders

S. H. Lee, H. S. Kwak, C. S. Han and D. H. Ryu.

This study presents a numerical model to analyze dynamic thermal behavior of a hot chuck designed for flip-chip bonders. The hot chuck of concern is a heater which has been specifically developed for accomplishing high-speed and ultra-precision soldering. The characteristic features are radiative heat source and the heating tool made of a material of high thermal diffusivity. A physical modeling has been conducted for the network of heat transport. A simplified finite volume model is devised to simulate time-dependent thermal behavior of the heating tool on which soldering is achieved. The reliability of the proposed numerical model is verified experimentally. A series of numerical tests illustrate the usefulness of the numerical model in design analysis.

**Key Words:** 플립칩 본더(Flip-Chip Bonder), 복사형 가열기(Radiative Heater), 고전도율 가열판(Heating Tool of High Conductivity), 열적 모델링(Thermal Modeling), 자연대류(Natural Convection), 열기둥(Thermal Plume)

## 1. 서 론

통신수요의 지속적인 증가에 따라 차세대 통신산업은 초고속 광대역 통신을 보장하는 광통신을 중심으로 발전하리라는 것이 일반적인 예측이다. 그러나 광통신이 상용화되기까지는 여러 가지 해결해야 할 과제가 상존하는데 그 중 하나가 저가의 광통신 제품을 대량생산할 수 있는 장비의 개발이다. 이 연구는 다가오는 광통신시대를 대비하여 광선과 광소자를 정렬한 후 접합시키는 초정밀 플립칩 본더(flip-chip bonder)를 개발하

기 위한 작업의 일환으로 수행되었다.

연구대상은 플립칩 본더에서 실제 접합작업이 이루어지는 핫척(hot chuck)이라고 불리는 장치이다. 핫척은 고휘점착제인 솔더(solder)를 녹이는데 필요한 열을 제공하는 가열기로서 크기는 작지만 전체 장비의 성능과 수율을 결정하는 핵심 요소이다. 이 연구의 목적은 핫척의 열전달 특성을 분석하고 모델링하여 가열부위의 열적 거동을 해석할 수 있는 수치모형을 개발하고 이를 설계의 타당성을 시험검증하기 위한 도구로 활용하는 것이다.

플립칩 본더용 핫척 설계에서 열해석의 필요성은 일차적으로 정밀도 요구에서 제기되었다. 1 μm 수준의 고정밀도가 요구되는 광모듈 접합에서 열변형은 무시할 수 없는 오차요인이기 때문에 핫척의 열적 거동 해석은 변형량 예측을 위한 기본 자료를 제공하는 것이다. 열해석의 중요성은

\* 2003년 9월 23일 접수

\*1 학생회원, 금오공과대학교 대학원 기계공학과

\*2 정회원, 금오공과대학교 기계공학부

\*3 기계연구원

\*4 (주)탐엔지니어링 기술연구소

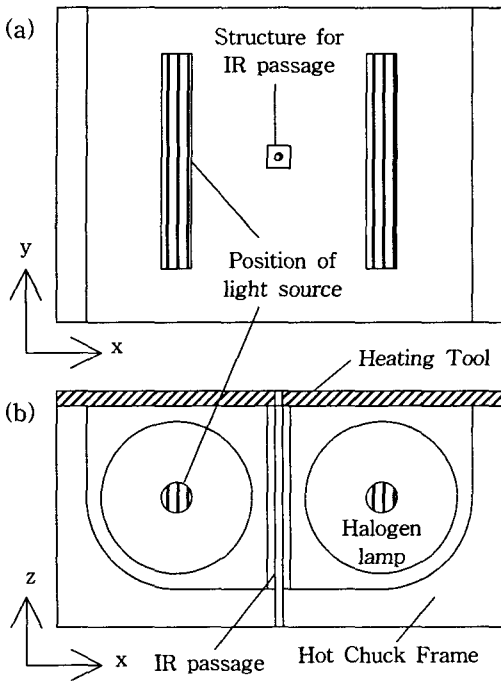


Fig. 1 Schematic illustration of the hot chuck. (a) Plane view; (b) front view.

장비의 생산성 제고라는 현실적 요구에서 더욱 강조된다. 현재 실험실 규모에서 활용되고 있는 수동방식의 플립칩 본더에서 하나의 광모듈을 접합하는데 보통 수분 정도의 시간이 소요된다. 공정시간 단축을 위해서는 장비의 자동화와 함께 접합의 사전·사후 공정인 가열판의 가열·냉각 시간의 단축이 필수적이다. 급속 가열·냉각 능력을 지닌 핫척의 구현은 고성능 플립칩 본더 개발의 핵심적인 관건이 되는 것이다.

이 논문에서는 초고속 가열을 실현하기 위하여 개발한 복사형 열원을 가지는 핫척의 열특성을 분석할 수 있는 설계해석 모델에 대하여 논의하고자 한다. 먼저 핫척의 열전달 기구에 대한 단순화 모델링을 수행하고 이를 바탕으로 핫척의 핵심부인 가열판의 온도거동을 모사할 수 있도록 작성한 간이수치 모델을 소개할 것이다. 실제 시제품을 대상으로 한 실험결과와 비교분석을 통하여 수치모델의 타당성을 검증한 후 수치모델을 이용한 다양한 가상실험을 통해 설계해석의 유용성을 확인할 것이다.

## 2. 해석 모델

### 2.1 물리적 모형

Fig. 1은 연구대상 핫척의 구조를 개략적으로 나타낸 것이다. 핫척의 상단에는 박판형 구조를 가지는 가열판(heating tool)이라 불리는 작업대가 위치하고 있다. 실제 광모듈의 접합은 가열판의 중심부에서 이루어지며 이 부분의 급속가열과 정밀온도제어가 핫척 개발의 기술적 과제이다. 이 핫척은 급속가열을 위하여 할로겐 램프를 장착하여 복사열을 활용하는 방안을 채택하고 있다. 할로겐 램프는 크기에 비해 발열량이 매우 크면서 열관성은 매우 작아 가열지연을 최소화하면서 가열속도를 극대화할 수 있는 효과적인 열원이다. 지지대(frame)는 가열판을 지지하며 할로겐 램프의 빛이 외부로 유출되는 것을 차단하는 핫척의 외형틀에 해당한다. 지지대의 내면은 경면가공하여 할로겐 램프로부터 나오는 복사열을 가열판 쪽으로 집중시키는 반사판의 역할을 수행한다.

연구대상 핫척의 특이점은 핫척 내부에 중심부를 관통하는 사각봉형 구조물이 존재한다는 것이다. 개발중인 플립칩 본더장비는 적외선을 이용하여 실리콘 광도파로와 LD 칩의 정렬상태를 상시 감시하고 제어하여  $1\mu\text{m}$ 의 접합정밀도를 구현하는 독창적인 아이디어를 기반으로 하고 있다. 여기서 정렬에 쓰이는 광을 만드는 적외선 발생장치가 핫척의 하부에 위치하고 있다. 중앙에 원형 구멍이 만들어져 있는 사각봉 모양의 구조물은 핫척 하부에서 만들어진 적외선 광이 가열판 중앙의 구멍을 통하여 광도파로에 도달할 수 있도록 도와주는 보호관 역할을 한다. 이 구조물 때문에 가열판 중앙의 하부에 할로겐 램프를 설치할 수 없어 대칭성을 고려하여 두 개의 할로겐 램프를 대칭형으로 장착하였다.

급속가열과 온도균일도 제고를 위해서는 가열판은 흑체에 가깝고 열확산계수가 큰 재질로 만들어야 한다. 반면에 핫척에서 발생한 열이 하부의 초정밀 스테이지로 전달되는 것을 차단해야 하므로 지지대는 열전도계수가 낮은 단열재를 사용해야 한다. 또한 초정밀 요구에 부응하기 위해서는 가열판과 지지대 모두 열팽창계수가 작은 재질로 만드는 것이 유리하다. 이러한 요구조건을 고려하여 복사흡수율과 열전도성이 뛰어난 실리콘카바이드(SiC)와 단열성이 뛰어난 지르코니

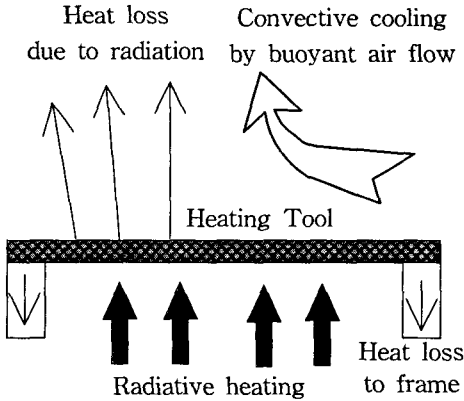


Fig. 2 Heat transfers from and to the heating tool.

아를 가열판과 지지대의 재료로 채택하였다. 모두 열팽창계수가 매우 작은 세라믹 재질이다.

2.2 단순화 모델

앞절에서 기술한 핫척은 재질이 다른 여러 가지 구성 요소로 이루어진 3차원 구조물이며 복사, 전도, 대류의 열전달 기구가 혼재된 가열장치이다. 이렇듯 복잡하고 난해한 해석대상에 효과적으로 접근하기 위하여 핫척의 열적 거동을 특징적으로 모사할 수 있는 단순화 모델링을 실시하였다. 단순화의 근간은 해석대상을 핫척 전체가 아니라 핫척에서 핵심적인 열적 제어대상인 가열판으로 국한시키는 것이다. Fig. 2는 가열판을 중심으로 이루어지는 열전달 기구를 개념적으로 도시한 것이다.

가열판의 내부에서는 열전도가 유일한 열전달 기구이므로 지배방정식은

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

여기서  $T$ 는 온도이며  $x, y, z$ 는 수평면의 가로와 세로, 높이 방향의 좌표이고  $t$ 는 시간이다.  $\rho, C, k$ 는 각각 가열판의 밀도, 비열, 열전도계수이다.

가열판은 하부에서 할로젠 램프로부터 복사열  $q''_{rad}$ 을 흡수하고 지지대와의 접촉부에서 전도에 의해  $q''_{cont}$  만큼 열을 빼앗기고 상부의 대기중으

로 복사와 자연대류에 의해 각각  $q''_{em\dot{u}}$ 와  $q''_{conv}$  만큼 열을 방출한다. 가열판 상부와 하부에서의 열유입과 유출은 경계조건으로 표현된다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = q''_{rad} - q''_{cont} \quad \text{at } z=0, \quad (2a)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial z} = -q''_{em\dot{u}} - q''_{conv} \quad \text{at } z=h, \quad (2b)$$

여기서  $h$ 는 가열판의 두께이다.

가열판의 수평방향의 특성길이에 비해 두께가 매우 작은 박판형 구조임을 고려하면 문제를 더욱 단순화할 수 있다[1]. 방정식 (2)를 높이방향으로 적분하면

$$\rho Ch \frac{\partial \theta}{\partial t} = kh \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) + q''_i - q''_o, \quad (3)$$

$$\theta(x, y) = \int_0^h T(x, y, z) dz/h, \quad (4)$$

$$q''_i = q''_{rad}, \quad (5a)$$

$$q''_o = q''_{cont} + q''_{em\dot{u}} + q''_{conv}. \quad (5b)$$

여기서 가열판에서 수평방향과 수직방향으로 열전도되는데 걸리는 시간  $\tau_h$ 와  $\tau_v$ 를 평가하면

$$\tau_v/\tau_h = (h/l)^2 \ll 1. \quad (6)$$

수평방향에 비해 수직방향으로는 열전도는 매우 빨리 일어나기 때문에 수직방향으로는 거의 균일한 온도분포를 가진다고 볼 수 있도 따라서 온도는 다음과 같은 2차원 함수로 단순화하여 묘사할 수 있다.

$$T(x, y, z) \cong \theta(x, y). \quad (7)$$

결과적으로 가열판내의 온도거동은 (3)식에 주어진 2차원 전도방정식으로 모사할 수 있다. 남은 과제는 (5)식에서 주어진 유입열과 방출열을 평가하는 것이다.

2.3 복사 모델링

가열판 상부에서 대기중으로 방출되는 표면방

사열량은 조셉-스테판(Joseph Stefan)식으로 손쉽게 평가할 수 있다 [2].

$$q''_{emit} = \epsilon\sigma(T^4 - T_\infty^4). \quad (8)$$

여기서  $\epsilon$ 은 표면방사계수이고  $\sigma$ 는 스펜-볼츠만상수이며  $T$ 와  $T_\infty$ 는 가열판과 실내 공기의 절대온도이다.

보다 복잡한 모델링이 요구되는 것은 가열판 하부에서 흡수하는 열복사량  $q''_{rad}$ 이다. Fig.1에서 볼 수 있는 바와 같이 할로젠 램프는 가열판과 일정거리 떨어진 위치에 선형의 복사광원을 가지고 있기 때문에 가열판의 위치에 따라 복사 흡입량이 달라진다. 이 연구에서는 선형구조의 복사광원을 분산광원으로 가정하고 각각의 분산광원과 미소면적사이의 입사계수(view factor)를 구하여 복사흡수율  $q''_{rad}$ 는 다음과 같이 평가하였다 [3-4].

$$q''_{rad} = \sum_{i,j}^n F_{i,j} q_{input} \quad (9a)$$

$$Q_{input} = \sum_{i,j}^n q_{input} \quad (9b)$$

위 식에서  $F_{i,j}$ 는 미소체적별 입사계수이고  $Q_{input}$ 은 할로젠 램프로부터 나오는 총열량을 나타내며  $q_{input}$ 은 분산광원에서 나오는 열량을 대표한다.

## 2.4 자연대류 모델링

가열판이 뜨거운 경우 주위의 공기 또한 열을 공급받아 온도가 상승하게 된다. 이에 반하여 핫체에서 떨어져 있는 상층부의 공기는 상온을 그대로 유지하고 있어 수직방향으로 불안정한 밀도구배가 형성된다. 가열판과 외기의 온도차가 커지면 불안정한 밀도구배가 유동을 유발하는데 핫체과 같이 대기중에 노출된 국소평면형 가열구조물의 경우 가열판 부근의 가벼운 고온공기가 급격히 상승하는 열기동형 기류가 생성되어 이에 의해 가열면에서의 열전달 특성이 결정되는 것으로 알려져 있다 [5-7].

이러한 자연대류에 의한 가열판의 열손실은 대류열전달계수  $h$ 를 이용하여 평가할 수 있다.

**Table 1** Correlations for the Nusselt number from the heated horizontal surface [6-8].

| Authors                    | Value of $C$ for eq.(14) | Applicable range of $Ra$             |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------------------|
| Fishenden and Saunders [6] | 0.54                     | $10^5 < Ra < 2 \times 10^7$          |
| Al-Arabi and El-Riedy [7]  | 0.70                     | $2 \times 10^5 < Ra < 4 \times 10^7$ |
| Yousef et al. [8]          | 0.622                    | $3 \times 10^6 < Ra < 4 \times 10^7$ |

$$q''_{conv} = h(T - T_\infty), \quad (10)$$

$$h = Nu(k_\infty/d). \quad (11)$$

$Nu$ 는 열전달효율을 대표하는 누셀(Nusselt)수이고  $d$ 는 가열판의 수력반지름,  $k_\infty$ 는 공기의 열전도계수이다.

이와 같은 자연대류 문제에서 열전달의 특성을 결정하는 무차원수는 레일리(Rayleigh)수는

$$Ra = \beta g \Delta T d^3 / \nu_\infty \kappa_\infty. \quad (12)$$

$g$ 는 중력가속도이고,  $\Delta T$ 는 가열판과 외기의 온도차,  $\beta$ ,  $\kappa_\infty$ ,  $\nu_\infty$ 는 각각 공기의 열팽창계수, 열확산계수, 동점성계수이다. 연구대상 핫체에서 가열판 변길이가 50mm 미만이며 최대온도차가 300K 정도임을 감안하면  $Ra$ 는  $10^6$ 보다 작다. 유동은 층류라고 볼 수 있으며 이 경우,  $Nu$ 는 다음과 같은 상관식을 따르는 것으로 보고되고 있다.

$$Nu = C Ra^{1/4} \quad (13)$$

개방된 공간에 노출된 수평 가열면에서의 열전달율에 대하여 여러 연구자가 실험적으로 제시한 상관계수를 Table 1에 정리하였다. 연구자에 따라 비례상수  $C$ 의 값이 30%의 편차를 보이고 있는데 이는 실제 실험에 사용된 가열면 형상과 구조의 차이에서 기인한 것으로 판단된다.

이 연구에서는 적절한 상관식을 찾기 위하여 상용코드인 FLUENT 6.0를 이용한 전산해석을 실시하였다. 실제 핫체의 가열판이 등온으로 유

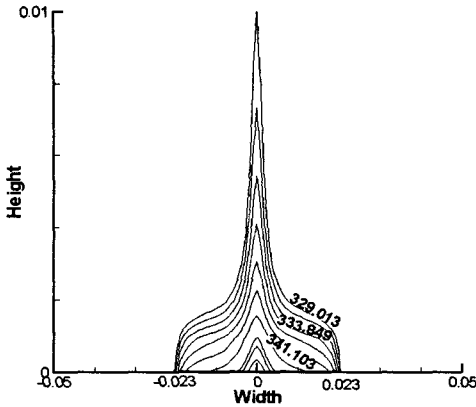


Fig.3 Thermal plume formed above the heated surface.  $Ra=3.34 \times 10^5$ .

지된다고 가정하고 정상상태의 유동장과 온도장을 구하였다. Fig. 3는 대표적인 경우의 온도장을 그린 것인데 개방된 공간의 수평면 가열시 나타나는 전형적인 열기둥 현상을 잘 보여주고 있다. 가열판 온도를 바꾸어가면서  $Ra < 10^6$ 의 범위에서 계산을 수행하였다.

전산해석을 통해 얻은 수치결과를 처리하여 얻은 상관식은

$$Nu = 0.576 Ra^{0.25} \quad (14)$$

이 식은 선행연구와 비교할 때 평균열전달율을 비교적 낮게 예측하고 있다. 복사열 유입이 가열판의 온도거동을 지배하는 가열모드에서는 자연대류에 의한 손실이 부차적이므로 어느 상관식을 사용해도 큰 영향을 받지 않을 것이다. 그러나 열공급이 없는 접합후 냉각모드에서는 자연대류가 지배적인 열전달 기구이므로 적절한 상관식의 선택이 매우 중요하다. 이 연구에서는 핫칩의 가열 및 냉각 성능을 확실히 보장하기 위하여 열전달 효율에서 보수적인 결과를 제공하는 (14)식을 자연대류의 영향을 대표하는 기본상관식으로 채택하였다.

## 2.5 접촉부 열손실에 대한 고려

핫칩 가열모드에서 열확산계수가 큰 가열판은 온도는 빠르게 증가하지만 단열체로 만들어진 지지대는 상대적으로 낮은 온도를 유지한다. 이 온도차에 의해 가열판과 지지대의 접촉부에서 열전

달이 일어나는데 이것이 가열판의 온도분포에 무시할 수 없는 영향을 주는 것으로 판명되었다. 이 연구에서는 열저항 개념을 도입하여 지지대와 접촉부로 빠져나가는 열손실을 다음과 같이 표현하였다 [9].

$$q''_{cont} = (T - T_B)/R, \quad (15)$$

여기서  $R$ 은 가열판과 지지대사이의 유효접촉저항 이고  $T_B$ 는 지지대의 온도이다.

접촉저항은 재질, 접촉압력, 접촉면 상태 등 다양한 요소에 의해 결정된다. 실제 핫칩에서 가열판은 구속되어 있지 않으며 지지대 위에서 미끌어질 수 있도록 자연스럽게 놓여있고 접합작업 중에만 진공식 흡착으로 고정된다. 이러한 조건에서 접촉저항을 정확하게 평가하는 것은 매우 어려운 작업이다. 더욱이 이 수치모델에서 지지대의 온도분포는 미지함수이므로 이를 독립변수로 본다면 모델이 매우 복잡해진다. 이 연구에서는 단열체인 지지대의 온도변화가 상대적으로 작다고 보고  $T_B$ 를 상온이라 가정하여 모델을 단순화하였다. 남은 과제는 유효접촉저항  $R$ 을 결정하는 일이다.  $R$ 의 값은 해석을 통해 구할 수 없기 때문에 실제 모델에 대한 실험결과를 기준으로 역공학적인 방법으로 결정하였다.

## 2.6 기동시간에 대한 고려

핫칩의 열원으로 사용되는 할로겐 램프도 다른 전열기와 마찬가지로 전원공급후 정상출력에 도달할 때까지 일정 정도의 기동시간이 소요된다. 전열기의 안전을 고려한 제어기의 부하조절과 할로겐 램프의 필라멘트가 가열되는데 걸리는 시간이 주 원인이다. 할로겐 램프의 기동시간은 전도형 세라믹 전열기에 비해 현저히 짧지만 초를 다루는 플립칩 본더에서는 무시할 수 없는 요소이다. 이 연구에서는 전열기 기동시의 가열지면을 가열판이 받는 총복사열량을 시간의 함수로 표현함으로써 묘사하였다.

$$Q_{in,put} = Q_o(1 - e^{-at}), \quad (16)$$

$Q_o$ 는 정상출력시 총복사열량이다. 시상수  $\alpha$ 는 할로겐 히터의 특성치로 실험을 통해 결정하였다.

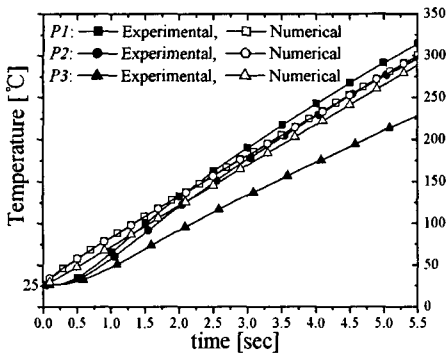


Fig. 4 Transient variation of the temperatures at three sampling points. The numerical prediction does not include the effects of contact heat loss and initial start-up delay.

### 3. 수치모델의 보정과 검증

2장에 제시한 단순화된 해석모형에 대하여 수치해석을 수행하기 위한 유한체적 모델을 제작하였다. 격자는 균일격자를 사용하였고 공간적으로는 중심차분법을 시간전진은 오일러 음해법으로 처리하였다[10]. 수치모델의 타당성을 확인하기 위하여 초기시험용으로 설계제작된 핫척 모델을 대상으로 검증시험을 실시하였다.

시험대상은 가로( $x$ ) 46mm, 세로( $y$ ) 42mm, 두께가 2mm인 실리콘카바이드 재질의 가열판으로 물성치는 열전도율이  $k=450\text{W/mK}$ , 열확산계수  $\kappa=2.11\times 10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$ , 표면방사율이  $\epsilon=0.85$ 이다. 복사광원으로는 I형의 초소형 대용량 할로젠 램프가 사용되었는데 외경이 13.5mm이고 개당출력이 800W이다. 실제 발열량은 히터 용량의 72%이다. 핫척의 구조와 열적 조건이 대칭이므로 대칭조건을 이용하여 가열판의 반만을 해석대상으로 삼았다. 계산에는 0.5mm 간격으로 격자점을 배치한  $46\times 84$ 개의 유한체적격자를 사용하였다.

수치모델의 조정과 검증을 위하여 동일한 모형에 대하여 실물시험을 수행하였다. 가열판의 정중앙인 P1, 할로젠 램프의 광원중심부에 해당하는 P2, 가열판과 지지대가 접촉하는 부분의 중앙에 해당하는 P3의 세 지점에서 시간에 따른 온도변화를 측정하고 이 데이터를 가공하여 수치 계산에 필요한 인자들을 결정하였다. 일차적으로 결정하여야 할 것이 수치계산 입력변수인 가열판

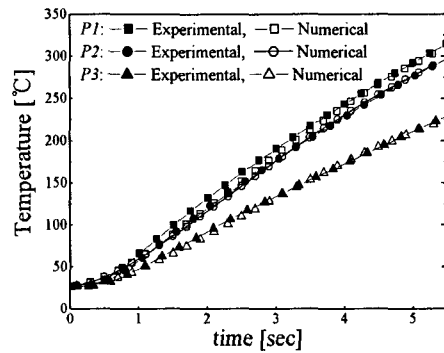


Fig. 5 Legends are the same as in Fig.4 except for the fact that the numerical model includes all the effects described in Chap. 3.

으로 유입되는 총복사열량이다. 반복실험을 통해 전열기 출력과 가열판의 온도상승율과 선형적 상관성이 있음을 확인하였다. 이를 기준으로 평가한 결과, 제작된 핫척 모델에서는 가열판으로 향하는 열량은 할로젠 히터에서 나오는 발열량의 64.2%인 것으로 평가되었다.

Fig.4은 복사효과와 자연대류 효과만을 고려한 초기 수치해석 모델을 이용한 해석결과를 보여주고 있다. 실험과 비교하여 중심부의 온도상승율은 비슷하나 가열초기 단계의 거동과 P3 지점의 온도거동이 실험 데이터와 큰 편차를 보이고 있다.

이를 보정하기 위하여 식 (15)와 (16)를 이용하여 접촉부 열손실과 초기 기동시간의 영향을 고려하였다. 접촉저항과 시상수는 반복계산을 통한 시행착오 방법으로 결정하였다. 이러한 과정을 거쳐 얻은 시험대상 핫척의 접촉저항과 시상수는  $R=1.25\times 10^{-4}\text{m}^2\text{K/W}$ ,  $\alpha=0.6/\text{s}$ 이다.

Fig. 5는 수정된 수치모델의 계산결과를 보여주고 있다. P1 지점의 온도가 작업온도인  $300^\circ\text{C}$ 에 도달할 때까지 수치모델을 이용한 해석결과는 실험결과와 최대  $7^\circ\text{C}$ 의 오차내에서 일치하는 결과를 보여주고 있다. 실제 열전쌍을 이용한 실험의 온도취득 오차가  $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 임을 감안하면 수치모델이 전체적인 정성적 경향뿐 아니라 정량적 측면에서도 가열판의 온도거동을 신뢰할 만한 수준으로 예측하고 있다고 평가할 수 있다.

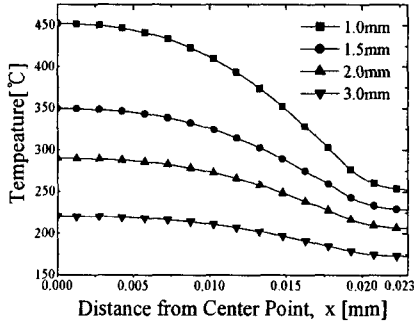


Fig. 6 Effects of the thickness of heating tool on the temperature distribution along the midplane (P1-P3) on the tool at  $t=5s$ .

#### 4. 설계해석

이 연구에서 논의하고 있는 복사가열 방식 핫칩의 구조와 크기는 초정밀 정렬을 위한 적외선 통로와 할로젠 램프의 크기에 의해 일차적인 제약을 받으며 가열판의 구조와 재질이 변경 가능한 설계인자이다. 여기서는 앞장에서 신뢰성이 입증된 수치모델을 활용하여 적절한 가열판의 구조와 재질을 결정하기 위해 수행한 설계해석 결과를 소개하기로 한다.

##### 4.1 가열판 두께의 결정

초기시험용 핫칩 제작시 가열판의 두께는 경험적 판단으로 2mm로 설정하였다. 그러나 가열판의 열관성은 두께에 비례하므로 가열속도 제고의 관점에서 보면 두께가 얇을수록 유리하다. 반면 가열판은 접합이 이루어지는 작업대로서 두께가 지나치게 얇아지면 작업시 발생하는 기계적 열적 충격에 의한 파손의 위험이 있다. 이 연구에서는 가열판의 적정두께를 결정하기 위하여 가열판의 두께가 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm, 3mm인 네 가지 경우에 대해 전산해석을 실시하였다.

Fig.6는 가열시작 5초후에 P1-P3 선상에서의 가열판 온도분포를 그린 것이다. 가열판의 두께가 감소할수록 가열속도가 증가함을 알 수 있다. 실제 작업이 이루어지는 P1 지점의 온도를 기준

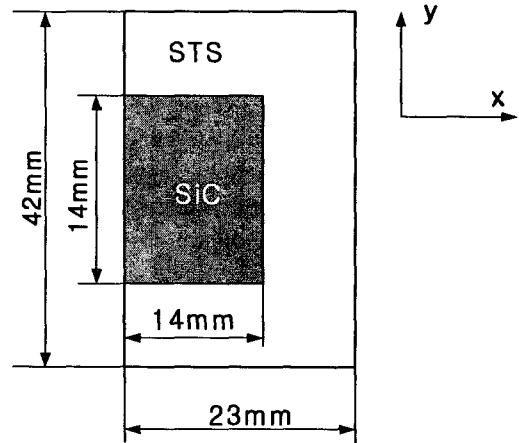


Fig. 7 Schematic illustration of the modified heating tool with two components made of SiC and STS, respectively

으로 계산한 가열속도는 두께가 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm, 3.0mm인 경우, 각각  $84.6^{\circ}\text{C/s}$ ,  $64.6^{\circ}\text{C/s}$ ,  $52.1^{\circ}\text{C/s}$ ,  $39.6^{\circ}\text{C/s}$  이다. 이 수치시험 결과를 토대로 가열판의 구조적 건전성을 보장하면서 가열속도에 대한 내부적 기술목표인 선형온도증가율  $60^{\circ}\text{C/s}$ 를 달성하기 위한 적정 가열판의 두께를 1.5mm로 결정하였다.

##### 4.2 복합형 가열판의 타당성 검토

Fig.6에서 기존 핫칩 모델이 지닌 중대한 문제점을 발견할 수 있는데 가열판 내부의 상당한 온도차가 존재한다는 것이다. 온도편차가 크면 가열판의 불균형 팽창이 발생하여 접합정밀도에 악영향을 주며 일부 실험에서 실제로 나타난 것처럼 가열판의 파손이라는 심각한 결과 초래하기도 한다. 두께가 두꺼우면 편차는 줄어들지만 가열속도가 저하되므로 대안이 되지 않는다. 이 연구에서는 이 문제를 해결하기 위한 방안으로 초기설계의 일체형 가열판을 두 개의 재질을 사용하는 복합체형 가열판으로 대체하는 방안을 제안하였다.

Fig.7은 새롭게 제안된 가열판의 반면을 보여주고 있다. 가열판의 중심작업대는 기존 모델과 마찬가지로 실리콘카바이드 재질로 만들고 그 외곽부는 스테인레스강으로 둘러싼 이체형 구조의 가열판이다. 두 구조물은 강제 접합된 것이 아니

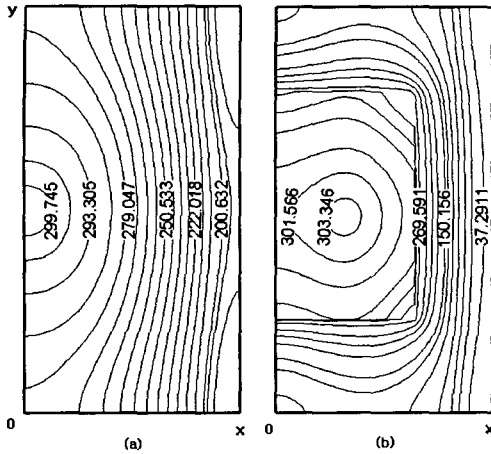


Fig. 8 Temperature distribution on the heating tool when the temperature at the P1 reaches 300°C. (a) Original single-body model made of SiC; (b) modified two-body model made of SiC and STS.

]라 외곽 스테인레스 구조물 안쪽부분에는 작은 단차가 있어 여기에 중앙작업대를 올려놓게 된다.

실제 접합 작업은 가열판 중심 반경 1cm 정도의 공간내에서 이루어진다. 가열판의 크기가 커진 것은 복사열원을 제공하는 할로겐 램프의 크기에 맞추기 위함이다. 따라서 이러한 설계변경에 의해 실제 작업영역이 영향을 받지 않는다.

설계개선의 타당성을 확인하기 위하여 복합형 가열판에 대한 전산해석을 실시하여 일체형의 가열판에 대한 해석결과와 비교하였다. 계산에 사용된 스테인리스강의 열전도도와 열확산계수는 각각 15.1W/m.K,  $3.02 \times 10^{-6}$ 이다. Fig.8은 작업대 중심부 온도가 300°C에 도달했을 때 가열판의 온도분포를 보여주고 있다. 가열판에서 온도편차를 유발하는 일차적 원인은 지지대와와의 접촉부를 통한 열손실이다. 개선모형에서는 가열판 중심부의 작업영역이 그 영향을 직접받지 않기 때문에 비교적 균일한 온도분포를 유지하고 있다. 온도편차는 외곽부에서 집중적으로 주로 발생하지만 이 부분은 열충격에 매우 강한 스테인레스강으로 만들어져 파손의 위험이 없다. 개선 가열판에서 볼 수 있는 특징점은 온도최고점이 가열판의 중앙에서 할로겐 램프 광원이 있는 방향으로 다소 치우쳐 나타나는데 편차가 크지 않기 때문에 크게 의미는 없다.

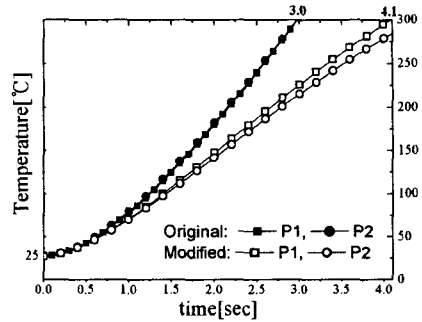


Fig. 9 Time-dependent variation of the temperatures at the points P1 and P2 on the original and modified heating tools.

Fig. 9은 일체형 가열판과 복합형 가열판의 시간에 따른 온도응답을 도시한 것이다. 개선된 모델인 복합형 가열판의 경우, P1 지점과 P2 지점의 온도차가 거의 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 가열성능면에서도 복합형 가열판이 월등히 우수한 가열속도를 보여주고 있다. 이는 SiC로 만들어진 중앙작업대를 둘러싼 스테인레스강 주변부도 복사열을 흡수하여 높은 온도를 유지하고 있어 전도에 의한 열손실이 최소화되었기 때문인 것으로 판단다. 이상의 논의에서 복합형 가열판을 채용함으로써 가열판의 온도편차를 줄일 수 있음은 물론 가열성능에서도 이득을 볼 수 있음을 확인하였다.

## 5. 결론

복사가열 방식에 기반한 플립칩 본더용 핫척에서 가열판의 열적 거동을 모사하기 위한 수치 모델을 개발하였다. 실험시험 결과와의 비교검토를 통해 수치모델에 채용된 열전달 모형을 보완하여 핫척의 열특성 분석용으로 신뢰할 수 있는 가상시험도구를 확보하였다. 개발된 수치모델을 이용한 설계해석을 통해 가열판의 적정두께를 제안하고 이중 구조를 가지는 복합형 가열판의 채용이 온도편차 감소와 가열속도 향상을 도모할 수 있는 방안임을 확인하였다.



## 후기

이 연구는 과학기술부의 첨단기계류부품개발 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드린다. 검증시험을 위한 실험에 도움을 주신 (주)탑엔지니어링의 김태현, 김종욱씨에게도 감사의 말씀을 전한다.

## 참고문헌

- [1] Schlittiching, H., *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill, Korea (1986).
- [2] Cengel, Y.A., *Heat Transfer: A Prctical Approach*, McGraw-Hill, (1996).
- [3] Turner, T.L., "Numerical and Experimental Analysis of the Radiant Net Flux Produced by Quartz Heating Systems," *NASA Technical Paper No.3387*, Langley Research Center, Virginia (1994).
- [4] Sparrow, E.M., "A New and Simpler Formulation for Radiative Angle Factors," *Trans. ASME J. Heat Transfer*, Vol.85, (1963), p.81.
- [5] Robinson, S.B. and Liburdy, J.A., "Prediction of the Natural Convective Heat Transfer from a Horizontal Heated Disk," *Trans. ASME J. Heat Transfer*, Vol.109, (1987), p. 906.
- [6] Fishenden, M. and Saunders, O.A., *An introduction to Heat Transfer*, Clarendon Press, Oxford, (1968), p.89.
- [7] Al-Arabi M. and El-Riedy, M.K., "Natural Convection Heat Transfer from Isothermal Horizontal Plates of Different Shapes," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.19, (1976), p.1399.
- [8] Yousef, W.W. and Tarasuk, J.D., "Free Convection Heat Transfer from Upward-Facing Isothermal Horizontal Surfaces," *Trans. ASME J. Heat Transfer*, Vol.104, (1982), p.493.
- [9] Swartz, E.T. and Pohl, R.O., "Thermal Boundary Resistance," *Rev. Modern Phys.* Vol.61, (1989), p.605.
- [10] Patankar, S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill,(1980).