

플립칩 본더용 복사형 히터의 열특성 해석 및 시험

이상현* · 곽호상† · 한창수** · 류도현***

Numerical and Experimental Investigation of Thermal Behavior of a Radiation Heater for Flip-Chip Bonders

Sanghyun Lee, Ho Sang Kwak, Chang Soo Han, Do Hyun Ryu

Key Words : Flip Chip Bonder(플리칩 본더), Radiative Heater(복사형 가열기), Thermal Modeling(열적 모델링), Numerical Analysis(수치해석), High-Speed Heat-up(급속가열), Thermal Experiment(열시험).

Abstract

A numerical and experimental study is made of thermal behavior of a hot chuck which is specially designed for flip-chip bonders. The hot chuck consists of radiant heat sources and a heated plate of very high conductivity, which is for achievement of high-speed heat-up. A simplified numerical model is developed to simulate unsteady thermal behavior of the heated plate. Parallel experimental work is also conducted for a prototype of the hot chuck. Based on the experimental data, the numerical model is tuned to improve the reliability and accuracy. Design analysis using the numerical model is conducted. The results of numerical computations illustrate that the radiant heater system adopted in this study satisfies the key design requirements for a high-performance hot chuck.

1. 서 론

통신수요의 지속적인 증가에 대응하기 위하여 차세대 통신산업은 초고속 광대역 통신을 보장하는 광통신을 중심으로 발전하리라 것이 일반적인 예측이다. 그러나 광통신을 상용화되기까지 아직 풀어야 할 여러 가지 과제가 있는데 그 중 하나가 저가의 광통신 제품의 대량생산을 실현하는 것이다. 이 연구는 다가오는 광통신시대를 대비하여 광선과 광소자를 접합하는 플립칩 본더(flip chip bonder) 장비를 개발하기 위한 작업의 일환으로 수행되었다. 연구대상은 플립칩 본더의 다양한 구성품 중 실제 접합이 이루어지는 핫척(hot chuck)이다. 핫척은 접착제인 솔더(solder)를 녹이는데 필요한 열을 제공하는 가열기로서 크기는 작지만 전체 장비의 성능과 효율을 결정하는 핵심 요소이다.

이 연구의 목적은 핫척의 열전달 특성을 분석하고 단순화 모델링하여 가열부위의 열적 거동을 해석할 수 있는 수치모형을 개발하고 이를 활용하여 핫척 설계의 타당성을 시험검증하는 것이다. 플립칩 본더용 핫척 설계에 있어서 열해석의 필요성은 일차적으로 장비의 정밀도 요구에서 제기된 것이다. 1 μm 수준의 고정밀도가 요구되는 광모듈 접합에서 열변형은 무시할 수 없는 오차요인이기 때문에 열원이 있는 핫척 부위에서의 열전달 해석은 변형량 예측을 위한 필수요소이다. 그러나 열해석의 절실함은 장비의 생산성 제고라는 현실적 측면에서 더욱 강조된다. 현재 실험실에서 활용되고 있는 수동방식의 광모듈 접합장치로 하나의 모듈을 접합하는데 소요되는 공정시간은 수분정도이다. 공정시간 단축을 위해서는 장비의 자동화와 함께 접합의 사전·사후 공정인 작업대의 가열·냉각 시간의 단축이 필수적이다. 급속 가열·냉각 능력을 지닌 핫척의 구현은 고성능 플립칩 본더 개발의 핵심적인 관건이다. 이 논문에서는 먼저 광모듈 접합장비가 갖추어야 할 요건을 분석하고 간단한 열전달 이론을 적용하여 핫척의 초고속 가열을 실현하기 위해 채택한 복사형 가열기구에 대하여 설명할 것이다.

* 금오공과대학교 기계공학과 대학원

† 금오공과대학교 기계공학부

E-mail : hskwak@kumoh.ac.kr

TEL: (054)467-4229 FAX: (054)467-4472

** 한국기계연구원

*** (주)탐엔지니어링

Table 1 Estimation of the required heating capacity and diffusion time for several materials.

의 가열성능을 보장하기 위한 가열용량 q"를 평가 Material	Density [kg/m ³]	Specific Heat [J/kg-K]	Conductivity [W/mK]	q", Required heating capacity [W/cm ²]		Diffusion time τ [second]	
				δ =2mm	δ =4mm	l =5mm	l =10 mm
				Starvax	7800	460	23
Berilium Oxide	3000	1030	272	18.5	37.0	0.28	1.14
Aluminum Alloy	2790	883	168	14.8	29.6	0.37	1.37
Silicon Carbide	3160	675	150	12.8	25.6	0.36	1.42

다음으로 복사형 핫척 모형의 열전달 특성을 단순화하여 작업이 이루어지는 가열판의 비정상 열거동을 분석할 수 있도록 개발된 간이 수치모델에 대하여 논의할 것이다. 또한 핫척에 대한 간이시험 모형을 만들어 실험을 실시하여 수치모델의 타당성을 검증하고 실험 데이터를 통한 모델개선을 통하여 수치모사의 정확도를 높일 것이다. 끝으로 이 수치모델을 이용하여 설계된 핫척의 열적 거동을 분석하여 설계의 타당성을 분석할 것이다.

2. 물리적 모델

2.1 가열기구

이 연구에서 개발하고자 하는 플립칩 본더용 핫척이 충족시켜야 할 열적 조건은 다음과 같다. 먼저 공정시간 단축을 위하여 접합이 이루어지는 작업판의 온도를 30°C/s 이상 급속 상승시킬 수 있는 가열능력을 보장하여야 한다. 또한 열변형시 구조적 건전성을 보장하기 위해서는 작업대에서의 온도편차를 최대한 줄여야 한다. 급속가열을 이루기 위한 기술적인 조건을 도출하기 위하여 핫척의 가열판의 온도응답특성을 평가하기 위한 단순 이론모형을 고려하기로 한다. 밀도가 ρ, 비열이 Cp, 열전도율이 k 인 재질로 만든 두께 δ, 단면적 A 의 박판에 시간당 Q 의 열량이 주어지는 경우를 상정하자. k 의 값이 상당히 큰 전도성 물질을 가정하고 일괄용량근사법(lumped capacity approach)⁽¹⁾을 적용하면

$$\rho C_p A \delta \frac{dT}{dt} = Q \quad (1)$$

여기서 가열판의 시간에 따른 온도상승율은 설계요건에 의해 규정된다.

링하여 정렬상태를 파악하고 능동제어함으로써 1 μm

$$\frac{dT}{dt} > 30^\circ C/s \quad (2)$$

결과적으로 박판을 가열하는데 필요할 단위면적당 가열량은

$$q'' = \frac{Q}{A} \rho C_p A \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

가열판으로 활용 가능한 열전도율이 높은 몇 가지 재질에 대하여 두께가 2mm, 4mm 인 경우 30°C/s 하여 Table 1 에 정리하였다. 두께 2mm 의 초박형 구조를 선택하는 경우에도 모든 경우에 12W/cm² 이상의 가열용량을 요구하고 있다. 금속이나 세라믹 재료의 전기저항을 이용하는 접촉식의 히터는 가열용량이 최대 20W/cm² 정도이다⁽²⁾. 따라서 이와 같은 전도형 히터를 채용하면 설계여유가 거의 없게 되어 설계목표를 충족시키기 어렵다. 실제로 반도체용 본더에 사용되는 세라믹 히터의 경우 열관성이 매우 커 가열시간이 1 분정도 소요된다는 것이 참고가 될 것이다.

이 연구에서 대안으로 선택한 것이 열관성이 매우 작아 가열지연시간이 매우 작은 것으로 알려진 할로겐램프의 복사열을 이용하는 방안이다. 구조를 간단히 설명하자면 4 각 입방체내 할로겐 램프를 장착하고 상부에 접합이 이루어지는 가열판을 덮는 것이다. Table 1 에서 예측한 가열용량을 바탕으로 작업판의 크기 및 두께에 따른 할로겐램프의 용량을 근사해 볼 수 있다.

2.2 가열판의 구조와 재질

본 연구에서 개발하고자 하는 광모듈 본더장비에서 초정밀을 구현하기 위한 핵심적인 아이디어는 적외선 모니터링 기법이다. 접합공정중에도 적외선을 이용, 기판과 광소자의 정렬마크를 모니터링의 정밀도를 확보하겠다는 것이다. 이를 위해서는

핫척 하부에 적외선 발생장치를 장착하여야 하며 핫척의 중심부에는 적외선이 방해받지 않고 핫척 부위를 통과할 수 있는 통로가 보장되어야 한다. 이것이 핫척 열설계에 있어 불리한 제약조건으로 작용한다. 적외선 통로를 위한 구조물 때문에 정중앙에 할로겐램프를 설치할 수 없기 때문이다. 따라서 중심에서 어느 정도 떨어진 위치에 할로겐램프를 배치할 수밖에 없고 대칭성을 위해서 두 개의 할로겐램프를 설치해야 한다. 비교적 작은 작업대를 가열하기 위하여 대용량 할로겐램프를 두개나 써야 하는 이유가 여기에 있다. 현재 제작 가능한 최소크기의 고성능을 가지는 할로겐램프를 수배하여 두개를 배치해도 핫척에서 작은 공간이 가능한 1 자형, 800W 의 할로겐램프⁽³⁾가 선정되었고 이 두개의 할로겐램프로부터 열을 받는 복사면적을 고려하여 가열판의 크기를 선정하였다. Fig. 1 은 가열판 및 할로겐램프의 배치를 간단히 도시한 것이다. 접합대상이 되는 광모듈은 크기가 매우 작기 때문에 본딩이 이루어지는 작업영역은 중심에서 1 cm×1 cm 면적이 해당된다. 이 정도 면적의 작업대를 효율적으로 가열하기 위해서는 할로겐램프를 작업대 하부에 바로 배치하고 두개의 할로겐램프가 적외선통로구조물을 기준으로 최소한의 거리를 유지하게 배치되는 것이 이상적이다. 800W 할로겐램프 두 개의 가열용량을 기준으로 열손실이 없는 이상적인 경우의 단위면적당 가열량은 82.8W/cm² 에 해당한다. 두께가 2mm 인 경우에도 70%의 열손실을 감수하더라도 모든 후보 재질에 대해 설계목표를 만족시킬 수 있는 가열용량이다. Fig. 2 는 Fig. 1 을 위에서 본 모습으로 점선부분이 직접복사열을 취하는 부분이다. P1 에서 P3 으로 온도편차가 클 것이라 예상되는 방향으로 P1, P2, P3 를 온도취득점으로 선정하였다. 작업대의 중심부는 적외선통로 구조물로 인해 직접적으로 복사를 받지 못하는 부분이므로 주변부로부터의 전도가 유일한 열전달 기구이다. 문제는 열전도는 일정한 시간을 요구한다는 것이다. 전도에 의해 열이 1만㎝의 거리를 전달되는데 걸리는 지연시간은 다음과 같이 평가할 수 있다.

$$\tau = l^2 / \kappa \quad (4)$$

여기서 열확산계수 ($\kappa = k / \rho C_p$)이다. 앞 절에서 고려한 몇 가지 재질과 전도거리 l 에 대하여 평가한 지연시간을 Table 1 에 정리하였다. 설계목표를 기준으로 할 때 요구되는 가열시간이 수초 이내인 점을 고려하면 전도거리가 길어지면 치명적인 열응답지연이 발생함을 알 수 있다. 이는 가능하면 자외선 통로용 구조물을 작게 하여 전도거리를

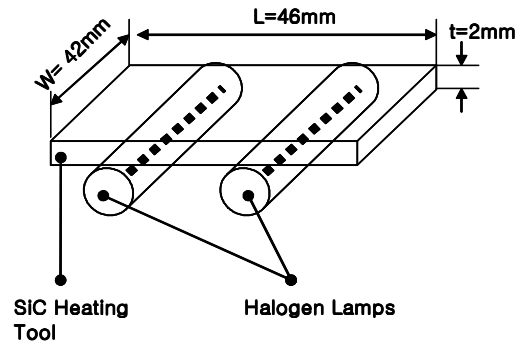


Fig. 1 Schematic diagram of the heating system.

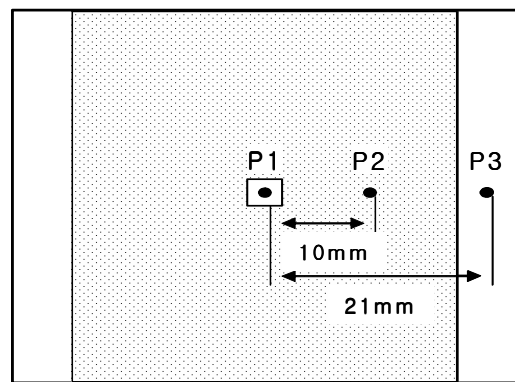


Fig. 2 Top-view of the heating tool. The shadow indicates the area heated by radiation.

최소화하고 열확산율이 큰 재질을 사용하여야 함을 지적하고 있다.

실제로 Table 1 에 제시된 재질은 스테인레스 계열의 Starvax 를 제외하고는 열확산계수가 매우 큰 것들이다. 재료의 열확산계수가 커지면 열전도 속도가 빨라지기 때문에 가열판내에 열이 고루 확산되어 온도편차가 줄어든다. 열확산계수가 큰 재질을 채용함으로써 가열시 열응답지연의 최소화와 함께 가열판의 온도분포의 균일화라는 부수적인 효과를 얻을 수 있다. 가열판의 재질을 결정하는데 또 하나의 고려사항은 가열효율을 높이기 위하여 복사흡수율이 높은 재질을 채용하여야 한다는 점이다. 이 연구에서는 이러한 조건에 가장 적절한 재질로 실리콘 카바이드(SiC)를 가열판과 작업대의 재질로 선택하였다.

3. 수치해석 모델

3.1 단순화 모형

핫척은 재질이 다른 여러 가지 구조물로 구성

되어 있으며 복사, 전도, 대류의 열전달 기구가 혼재되어 상호결합되어 있다. 이처럼 난해한 해석대상에 효과적으로 접근하기 위하여 이 연구에서는 핫척의 열거동을 분석하는데 필요한 주요 구성요소를 단순 모델링하는 방법을 채택하였다.

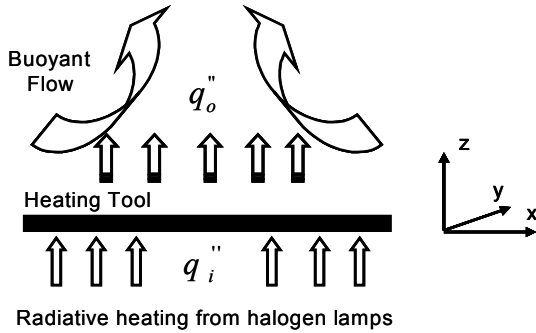


Fig. 3 A simplified model to predict unsteady thermal behavior of heating tool.

단순화의 근간은 해석대상을 핫척 전체가 아니라 온도거동의 제어가 이루어져야 하는 가열판으로 축소하는 것이다. Fig. 3 은 가열판을 중심으로 이루어지는 열전달 특성을 개념적으로 도시한 것이다. 가열판의 하부에서는 할로겐램프로부터 복사열의 흡수가, 내부에서는 전도가, 상부에서는 대기의 자연대류에 의한 냉각이 이루어진다. 이때 복사열 흡수 q_i'' 와 자연대류에 의한 냉각 q_o'' 을 경계조건으로 처리하면 가열판 내부의 유일한 열전달 기구는 전도이므로 다음과 같은 지배방정식으로 표현된다.

$$\rho C_p a \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

여기서 x, y, z 는 가로, 세로, 높이 방향의 좌표이다. 가열판 밀면과 윗면의 경계조건은

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = q_i''(x, y) \quad \text{at} \quad z = 0 \quad (6a)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = q_o''(x, y) \quad \text{at} \quad z = a \quad (6b)$$

이 식에서 a 는 가열판의 높이를 나타내며 q_i'' 와 q_o'' 는 각각 가열판으로 열이 들어오는 경우와 빠져나가는 경우를 양으로 정의하였다. 가열판의 높이 a 가 수평방향의 길이 L 보다 매우

작다는 박판 특성을 적용하면 수직방향과 수평방향의 열전도 소요시간 τ_v 와 τ_h 의 비는

$$\frac{\tau_v}{\tau_h} = \left(\frac{a}{L} \right)^2 \ll 1 \quad (7)$$

수평방향에 비하여 수직방향은 전도가 매우 빨리 일어나 거의 균일한 온도분포를 가지게 됨을 의미한다. 이를 이용하여 (5)식을 z 방향으로 적분하면 다음과 같은 단순화된 2차원 방정식을 얻게 된다.

$$\rho C_p a \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q_i'' - q_o'' \quad (8)$$

3.2 복사와 대류 영향의 고려

남은 과제는 복사와 대류의 영향을 대표하는 q_i'' 와 q_o'' 를 구하는 것이다. 복사에 의한 가열량을 나타내는 q_i'' 를 제대로 평가하기 위해서는 할로겐램프와 가열판을 비롯한 이를 둘러싼 구조물을 전부 고려한 3차원 복사열전달 해석을 하여야 하는데 매우 어려울 뿐 아니라 상당한 불확실성을 동반하는 작업이다. 이 연구에서는 복사열을 직접 취하는 가열판 부위는 할로겐램프와 떨어진 거리, 빛의 입사각에 따라 미소체적에서 받는 양을 다르게 계산하였으며 할로겐램프가 발산하는 복사열은 다음과 같이 평가하였다.

$$q_i'' = f \frac{Q}{A} \delta(x, y) \quad (9)$$

Q 는 할로겐 램프의 가열용량이며 A 는 복사열을 받는 부위의 면적이고 δ 는 복사열을 받는 부분에서만 1 의 값을 갖는 델타함수이다. 여기서 f 는 할로겐램프에서 가열판으로 전달되는 유효전달효율을 나타내고 $(1-f)$ 열손실율을 의미한다.

작업중에 280-320°C 를 유지하고 있는 가열판은 상온의 대기중에 노출되어 있기 때문에 가열판 주위에는 불안정한 밀도분포가 형성되어 자연대류가 이루어진다. 또한 뜨거운 가열판은 복사에 의해 주위로 열을 빼앗기게 되므로 열손실 효과는 다음과 같이 묘사할 수 있다.

$$q_o'' = q_{conv}'' + q_{emit}'' \quad (10)$$

$$q_{conv}'' = h(T_s - T_\infty) \quad (11-1)$$

$$q_{emit}'' = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (11-2)$$

(11-1)의 h 는 실험에 의해 구해진 다음과 같은 상관식을⁽⁴⁾ 이용하여 평가하였다.

$$h = Nu(k/d) \tag{12}$$

$$Nu = CRa^m \tag{13}$$

$$Ra = \beta g \Delta T d^3 / \nu \alpha \tag{14}$$

$$C = 0.54, m = 1/4 \quad \text{for } Ra = 10^4 \sim 10^7$$

$$C = 0.15, m = 1/3 \quad \text{for } Ra = 10^7 \sim 10^{11}$$

d 는 가열관의 수력반경이고 β 는 열팽창계수, g 는 중력가속도, ΔT 는 가열관과 대기의 온도차, ν 는 동점성계수이다. (11-2)의 ϵ 은 방사율로 실리콘 카바이드는 0.85 의 값을 가지며 σ 는 스테판 - 볼츠만 (Stefan - Boltzmann) 상수로 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ 이다.

복사로 유입되는 열과 복사 및 대류로 인한 열손실 고려한 지배방정식 (8)을 풀기 위하여 유한체 적법에 기초한 2 차원 수치모델을 작성하였다⁽⁵⁾. 균일격자를 사용하였으며 공간적으로 중심차분법을 시간전진에는 오일러 음해법을 적용하였다. 또한 가열관의 온도변화는 할로겐램프에 전원이 인가한 후 순간적으로 반응 하지 않는 응답지연시간이 존재하고 가열관은 자체 두께로 인한 전도시간을 가질 것이다. 실제로 모든 가열기의 온도변화는 전원을 인가한 후 지수적으로 증가하는 특성을 가지고 있다

따라서 본 연구에 적용한 수치모델에도 이와 같은 물리적 특성을 고려할 수 있도록 비정상 가열 조건을 적용하였다

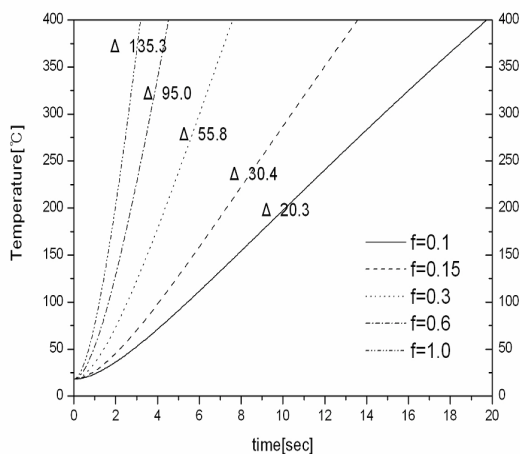


Fig. 4 Time-dependent variation of the temperature at the center of heating tool.

4. 검증시험 결과 및 고찰

3 장에서 설명한 수치모델을 이용하여 Fig.1 에 도시한 실리콘 카바이드 재질의 가열관 모형에 대한 수치실험을 실시하였다. 실제 시스템에서 가열관에 전달되는 유입열량을 평가하기 어렵다. 따라서 열손실에 의한 유입열량을 고려하기 위하여 히터용량 $Q=1600\text{W}$ 에 대하여, f 를 0.1, 0.15, 0.3, 0.6, 1.0 로 바꾸어 가면서 다시 말하면 히터용량의 10%, 15%, 30%, 60%, 100%가 가열관으로 전달되는 경우를 가정하여 수치계산을 수행하였다. 계산에서는 대칭조건을 활용하여 가열관의 1/2 만을 계산 영역으로 하였고 0.5mm 간격으로 하나의 격자를 배치한 46x84 의 등간격 격자를 사용하였다. Fig. 4 는 가열관 정중앙(P1)에서의 온도가 400°C 에 도달할 때 시간에 따른 온도변화를 도시한 것이다. 모든 경우에 약간의 초기 지연시간을 가진 후에 온도가 거의 선형적으로 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 히터용량을 충분히 크게 고려하고 형상과 재질면에서 가열관의 열관성을 최소화한 결과이다. 히터용량의 15%만 가열관으로 전달되더라도 30°C/s 의 가열속도가 달성될 수 있음을 보여주고 있다. 핫척 하부에 위치한 반사대가 제 기능을 발휘하여 30%가 가열관에 집열되는 경우에는 55.8°C/s 의 가열속도도 만족시킬 수 있음을 알 수 있다. 급속가열 능력과 함께 또 하나의 설계요건은 본딩이 이루어지는 가열관의 중심부에서 온도편차가 작아야만 본딩효율을 높일 수 있게 된다. Fig. 5 는 설계상 온도상승시간을 만족하는 최소의 환경인 $f=0.15$ 에서 P2 의 온도를 500°C 까지 가열할 때 온도분포를 보여주는 그림으로 할로겐램프가

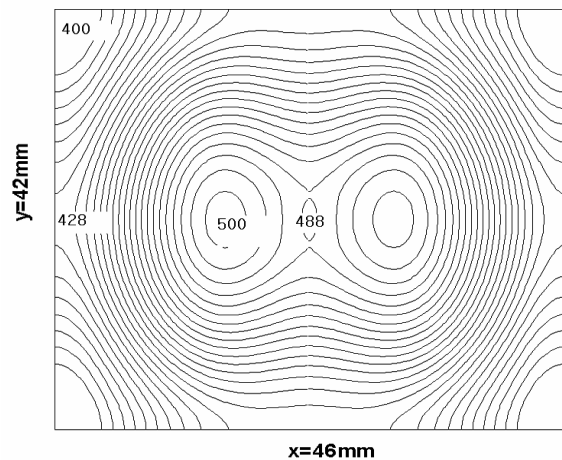


Fig.5 Temperature distribution on the heating tool when the temperature at P2 reaches at 500°C. $f=0.15$.

위치한 부분이 높은 온도를 보여주고 있으며 그 부분을 기준으로 중심부보다 주변방향으로 등고선밀도가 매우 큰 것을 볼 수 있다. 따라서 중심부의 온도분포는 본딩작업이 이루어지는데 중요문제가 되지 않는다는 것을 알 수 있다. 반면 전체 가열판의 최대 온도차가 100°C 를 보여주고 있는데 이 크기의 온도차는 재질의 열팽창계수가 작다 하더라도 열팽창으로 인한 재질의 손상을 충분히 줄 수 있을 것이라는 판단을 할 수 있다.

따라서 가열판의 건전성을 높이기 위해 가열판내의 최대온도차를 줄이는 문제가 앞으로 해결해야 될 과제가 될 것이다. 수치모델의 타당성을 검증하기 위하여 실제 프로토타입을 제작하여 실증시험을 수행하였다. Fig.6 는 실험결과와 수치계산의 결과를 비교한 것으로 Fig.2 에 도시된 3 개의 측정지점에서의 온도변화를 보여주고 있다.

이 비교는 다음과 같은 두 가지 중요한 논점을 제기하고 있다. 먼저 이 그림에서 수치계산은 유효가열 280W 인 경우, 즉 $f=0.18$ 의 결과이다. 다시 말하면 램프용량의 20%에 못 미치는 열만이 가열판에 전해지고 나머지 80%이상이 손실로 사라진다는 것이다. 가열속도를 향상을 위해서는 가열판에 도달하는 유효가열량은 증가시켜야 하며 이를 위해서는 램프하단부가 받는 복사열을 상부로 되돌려 보내는 반사대의 설치를 고려할 필요가 있다. 다음으로 가열판의 중앙부의 온도거동은 실험과 수치계산이 잘 일치하고 있으나 외곽부에 해당하는 P3 의 온도거동에는 큰 편차가 존재함을 발견할 수 있다. 실제로 이 지점은 가열판을 지지하는 세라믹 재질의 구조물과 만나는 위치로 세라믹 지지대는 두께가 두껍고 열전도율이 매우 낮은 단열

재료 상대적으로 온도가 낮은 상태로 유지되기 때문에 이 부분에서 전도에 의한 열손실이 발생한다. 그러나 이 연구의 수치모델에서는 단열재쪽에서의 열손실을 고려하지 않았기 때문에 실험과의 오차를 발생한 것으로 판단된다. 이를 개선하기 위해서는 가열판과 단열지지대와의 접촉저항을 이용하여 단 열지지대로의 열손실을 고려하는 추가적인 모델링이 필요하다.

5. 결 론

고속가열을 구현하기 위하여 복사형 가열방식을 채용한 플립칩 본더용 핫척을 설계하고 가열판의 열적 거동을 모사하기 위한 단순화된 수치모델을 개발하였다. 이 모델을 이용한 수치해석을 통하여 설계목표인 30°C/s 이상의 열응답특성을 실현하기 위한 가열조건을 분석하였다. 핫척 프로토타입을 이용한 시험을 통하여 수치모델 및 설계의 타당성을 검증하고 가열판의 열거동 분석을 통하여 기존 설계의 문제점과 수치모델의 개선 방향을 분석하였다.

후 기

이 연구는 과학기술부의 첨단기체류부품개발사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드린다.

참고문헌

- (1) A. Bejan, 1987, Heat Transfer, John Wiley & Sons , pp.146-148.
- (2) Watlow, 2002, Your Heat Solution Resources, COR-LC-0601, Watlow Electric Manufacturing Company.
- (3) <http://www.osram.co.kr/>.
- (4) Y. A. Cengel, 1999, Heat Transfer; A practical approach, McGraw-Hill.
- (5) S. V. Patankar, 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill.

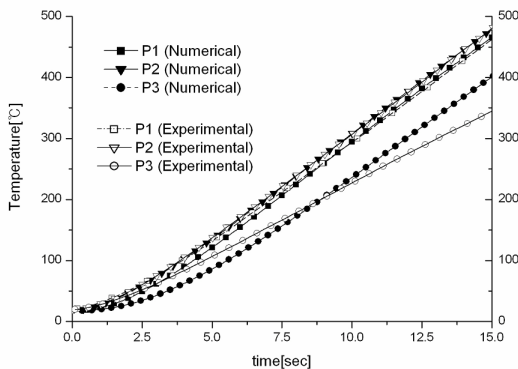


Fig. 6 Comparison of numerical results and experimental results.