

초정밀 가열판의 온도 균질화를 위한 새로운 설계방법

박 용 환*

(2002년 10월 9일 접수, 2003년 8월 26일 심사완료)

New Design Approach for the Uniform Temperature of Precision Hot Plates

Yong-Hwan Park

Key Words: Hot Plate(가열판), Heat Transfer(열전달), Modeling(모델링), Uniform Temperature(균일온도), Wafer Processing(웨이퍼공정)

Abstract

In the precision hot plate for wafer processing, uniform temperature of the upper plate is one of key factors affecting the quality of wafers. The state-of-the-art precision hot plates require temperature variations less than $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ during heating to 150°C , which is difficult to be obtained only by the improvement of manufacturing techniques alone. In this study, computer aided heat transfer analysis was carried out to obtain the temperature distribution of the currently used reference hot plate for 200mm wafer. The analysis on the reference model assuming constant heat generation rate and uniform heating area showed total variation of 0.926°C at 150°C . One of the new design approaches based on the change of heating location together with different heat generation rate resulted in total variation of 0.297°C which is a 68% improvement compared to that of the reference model.

1. 서 론

20세기 후반 이후 국내 반도체 산업은 급속한 성장을 거듭하여 왔으며, 현재에는 세계 최대용량의 D램 기억소자를 자체적으로 설계, 생산하는 세계 최고의 수준에 이르고 있다. 이에 따라 생산설비 확장이나 차세대 웨이퍼 기술 구현을 위한 반도체 제조장비에 대한 설비투자 규모도 매년 수천억원 이상에 달하고 있으나, 반도체 제조장비의 국산화율은 약 26%의 매우 낮은 수준에 머물러 있어 장비 수입액 또한 만만치 않다.

반도체 핵심 제조장비의 하나인 가열장치(Hot

Plate Oven)는 주로 웨이퍼 제조과정에서 필요한 박막 코팅의 가열경화나 세척공정 후 건조를 위해 사용되는 가열 장비로서 코팅층의 우수한 특성과 웨이퍼의 비틀림 방지 등 고품질을 얻기 위해서는 가열판(Hot Plate)의 매우 정확한 온도 제어 및 정밀한 온도 분포가 요구되고 있다.^(1,2) 그러나, 동 부품에 대한 국내 기술 수준이 미약하여 거의 수입에 의존하고 있으며, 국산화에도 큰 애로를 겪고 있다.

이에 본 논문에서는 열전달 전산해석 기술을 이용하여 기존의 외산 제품에 비해 보다 우수한 온도분포 성능을 확보할 수 있는 초정밀 가열판의 설계기술 및 제품화 모델을 제시하였다. 이를 위하여 국내 A사에서 사용하고 있는 200mm 웨이퍼용 가열판 샘플을 기준 모델로 선정하고, 해석을 수행하였다.

* 회원, 호서대학교 환경안전공학부
E-mail : yhpark@office.hoseo.ac.kr
TEL : (041)540-5733 FAX : (041)540-5728

2. 이론적 배경

일반적으로 열전달 해석에서 유한차분법에 의한 모델링이 가장 많이 활용되고는 있지만, 기하학적 형상 및 경계조건이 복잡하거나 여러 물질을 다루는 경우에는 그 정확도가 떨어질 수 있으며, 이 경우 유한요소법이 오히려 유리한 측면이 있어 최근에는 열전달 해석에 많이 활용되고 있는 실정이다.

통상 열이 전달되는 방식에는 크게 세 가지 형태가 있으며, 전도, 대류, 복사가 그것이다. 3차원 정상상태 열 이동에서의 열전도 지배방정식은 다음 식으로 표현된다.⁽³⁻⁵⁾

$$\frac{\partial}{\partial x}(k \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k \frac{\partial T}{\partial z}) + \dot{q} = 0 \quad (1)$$

여기서, \dot{q} 는 열원, k 는 열전도계수, T 는 온도이며, 1차원일 경우 열전도식은

$$q_d = -k(\partial T / \partial n) \text{ W/m}^2 \quad (2)$$

로 표시된다. n 은 등온선에 수직인 열 방향의 좌표계이다. 열전도계수 k 는 물질의 종류, 온도, 압력 등으로 정하여지며, 열유속(heat flux) q_d 자신의 크기에는 영향을 받지 않는 것으로 본다. 대류는 물체와 물체를 둘러싸고 있는 주위 유체와의 온도차에 의한 에너지 교환 현상을 말하며, 이 때의 열유속은 다음 식으로 주어진다. 통상 물체 표면에서의 경계조건에 해당하는 경우가 많다.

$$q_v = h(T_s - T_\infty) \quad (3)$$

여기서, h 는 대류 열전달계수, T_s 는 물체의 표면온도, T_∞ 는 주위온도이다. 복사는 매질의 도움 없이 복사체로부터 방출되는 전자기장 파에 의한 에너지 전달 현상으로 비 투과성 물체 사이의 복사 열전달은 다음 식으로 표현된다.

$$q_r = F_{12} \epsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (4)$$

여기서 σ 는 스테판-볼츠만 상수, ϵ 은 매질

의 방사율, T 는 복사체의 절대온도, F_{12} 는 복사체 두 표면의 방위, 크기 및 거리를 반영한 형상계수이다.

3. 가열판 구조 및 온도 성능

3.1 가열판 구조

Fig. 1은 본 해석의 기준 모델로서 사용된 200mm 웨이퍼용 가열판의 사진과 개략적인 단면 구조를 나타낸 것으로, 직경 약 230mm, 높이 30mm의 납작한 원통형이다. 가열판의 내부 구조를 보면, 그림에서 보는 바와 같이 맨 위쪽에는 웨이퍼를 가열하는 상판이 있고, 그 아래쪽에는 히터와 히터를 지지하기 위한 하판이 있으며, 맨 아래에는 히터를 감싸고 보호하고 있는 하우징이 있다.

상판 가열 방법으로는 전기적 저항가열인 발열 히터를 사용하는 간접가열방식을 채택하고 있으며, 상판은 열 분포를 고르게 하기 위하여 하판에 비해 두께가 훨씬 두껍게 되어 있다. 상, 하판 재질은 열전도성이 좋은 AI 합금으로 되어 있고, 하우징은 내식성이 좋은 스테인레스계 재질로 되어 있으며, 상판과 하우징 사이에는 열전도를 차단하기 위한 단열 가스켓이 설치되어 있다.

발열 히터는 도넛 모양의 환형 판에 얇은 띠 모양의 발열체가 양면으로 촘촘히 감겨 있는데 저항가열 방식이므로 상하판과의 전기적인 절연을 위해 히터 양쪽에 절연층을 두고 있다. 기준 모델의 발열 히터는 배열되어 있는 환형 면적

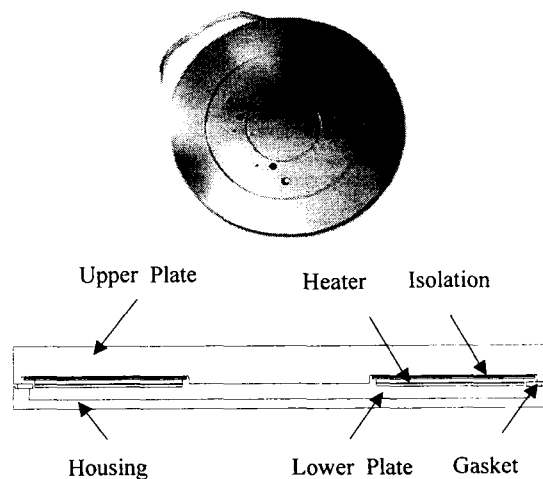


Fig. 1 Hot plate for wafer processing

Table 1 Temperature variation requirements in precision hot plates

Specification		
Heating range		50℃ ~ 180℃
Temperature variation requirements	50℃ ~ 120℃	R ≤ ±0.2℃
	121℃ ~ 150℃	R ≤ ±0.4℃
	151℃ ~ 180℃	R ≤ ±1.5℃

전 구간에서 일정한 발열량으로 가열되는 것으로 가정하였다.

3.2 온도 성능

전기적 저항가열에는 피가열물에 전류를 흘려 직접 열을 발생시키는 직접 저항가열과 발열체에 전류를 흘려 그 발생열로 피가열물을 가열시키는 간접 저항가열이 있으나 웨이퍼 제조용 가열판은 웨이퍼의 손상을 최소화하기 위하여 간접 저항가열 방식을 사용하고 있다. 저항가열 방식의 경우 발열부에 발생하는 발열량은 $P(kW) = I^2R$ 로 표시되며, 이때 발열량을 조절함으로써 발열체의 온도를 제어하게 된다.

Table 1은 현재 사용되고 있는 200mm 웨이퍼용 초정밀 가열판의 성능 사양을 나타낸 것이다. 가열판 온도의 범위를 대략 50℃ ~ 180℃ 사이로 할 때, 온도 150℃ 이하에 대한 온도편차 범위는 최고 ±0.4℃ 이하, 151℃ 이상은 ±1.5℃ 이하로 매우 정밀한 온도분포가 요구되고 있다.

4. 열전달 해석

열전달 해석에서는 어떠한 수치 해석적 접근 방법을 사용하느냐에 따라 모델링 방법이 다르게 된다.⁽⁶⁻¹⁰⁾ 본 연구에서는 가열판의 온도분포를 구하기 위한 열전달 해석의 보편성, 정확성과 편이성을 위하여 상용화되어 있는 열전달 해석 전용 프로그램(ANSYS Version 5.6)을 이용하여 해석을 수행하였다. 우선, 기준 모델에 대한 열전달 해석을 실시하여 열평형이 이루어진 정상상태에서의 상판에서의 온도 분포 및 편차를 구하였으며, 해석 결과를 제조업체의 실험적 성능 사양과 비교하여 모델링 해석의 신뢰성을 검증토록 하였다.

아울러 가열판의 성능을 개선하기 위하여 내부구조나 발열부 히터의 위치 및 발열량 등을 제어하는 새로운 설계 모델을 제시하고 이에 대한 해석을 실시하여 그 결과를 상호 비교하였다.

4.1 기준 모델

4.1.1 모델링

가열판에 대한 열전달 해석 모델링은 내·외부 구성요소의 기하학적 형상이 Fig. 1에서 보는 바와 같이 360도 축 대칭형으로 되어 있으므로, 해석의 편이성을 위해 열해석 요소(thermal solid)인 4절점 평면요소를 사용하여 반경부분에 대해서만 축대칭 2차원 해석을 수행하였다. 요소망 생성은 자동 메쉬 기능을 이용하였으며, 해석의 오차 정밀도가 1% 이하가 되도록 요소망 밀도의 등급을 3으로 설정하였다. 생성된 요소 수는 모델에 따라 약 3200~3400개 정도로 나타났다.

발열부 구성 부품간의 열전도 및 주변 공기와 대류에 의한 열손실 현상이 발생함에 따라 각 재질에 대한 열전도율과 상하판 표면에서의 공기와의 대류 열전달계수가 필요한데, 직접적인 실험 데이터가 없기 때문에, D/B 상의 통상적인 값을 조사하여 해석에 사용하였다. 또, 상판의 경우 실제로는 Al 모재 표면에 특수 코팅이 되어 있지만 그 두께가 매우 작기 때문에 이에 대한 영향은 무시하였다. 이와 같이 불완전한 데이터 값과 여러 가정 때문에 온도 결과 값에 대한 약간의 오차는 있을 수는 있겠지만 상호 비교를 위한 상대적 분포에는 큰 영향이 없는 것으로 간주하였다. 가열판 외부의 대류 경계 조건은 약 10℃ 정도의 공기(또는 질소가스)가 1m/s 이하의 저속 강제대류 형태로 공급되는 것으로 가정하였으며, 웨이퍼에 의한 영향은 무시하였다.

Table 2는 본 모델링에 사용된 재질의 주요 물성치를 표로 나타낸 것이다. 여기서 물질의 열전도계수는 실제로는 온도 변화에 따라 그 값도 조금씩 변화하지만, 본 연구에서는 최대온도가 약 150℃까지 이므로 이 구간에서의 물성치 변화는 미미한 것으로 보고 이를 무시하였다.

4.1.2 해석 결과

Fig. 2와 Fig. 3은 기준모델에 대한 정상상태 해석결과 가열판 반경부 전체에 대한 온도분포와

열유속의 크기를 각각 나타낸 것이다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 본 가열판에서는 상판의 중심온도가 설정온도 약 150℃에 도달하였을 때, 상판 전체적으로 150℃ 내외의 비교적 균일한 온도분포를 나타내고 있으며, 발열부 하부의 하우징 온도도 균일하기는 하지만, 상판 온도에 비해서는 크게 낮은 것으로 나타났다. 하우징의 온도가 이처럼 낮게 나타난 것은 단열 가스켓에 의한 열전도 방지 효과와 히터와의 사이에 있는 공기층 때문

문에 열이동이 억제된 때문으로 생각된다. 이 모델링에서의 단위면적 당 발열량은 약 11,000W/(mm²·℃·hr)였다.

Table 2 Thermal properties of component materials

Material Properties	Al-alloy	STS	gasket mat'l	N ₂ /Air
Thermal conductivity (W/m℃)	202	16.3	0.01	0.024
Convection coefficient (W/m ² ℃)	5~15	5~15	5~15	-

Fig. 3의 열유속 분포에서 보듯이 열전달이 가장 빨리 일어나는 곳은 상판 중심부보다는 가열판 측면의 상하판 접촉부 주변에서 상대적으로 크게 발생하고 있다는 것을 알 수 있다. 이 부분은 발열부 측면에 위치하고 있고, 또 상판의 측면 두께가 얇아서 열전달률이 더욱 크기 때문으로 분석되었다.

Fig. 4는 균일하다고 보여 지는 상판에서의 보다 자세한 온도분포곡선을 나타내고 있는데, 그림에서 보는 바와 같이 상판 위치에 따라서 미세한 온도차가 있음을 알 수 있다. 그림에서 상판 최대온도가 발열부 중앙이 아니라 상판 모델의 중앙부로 나타난 것은 제작사에서 기준 모델의 설계 시 열적특성을 비교적 잘 고려하여 제작하였던 것으로 판단된다.

Fig. 5는 상판 표면에서의 위치별 온도 크기를 그래프로 나타낸 것으로, 상판 중심온도가 기준 온도 150℃에 도달하였을 때 중심에서부터 멀어질수록 온도가 크게 상승하다가 반경 약 60mm 부분에서 최고온도 150.486℃에 도달한 후 가장자리로 가면서 다시 온도가 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 상판 표면에서의 최대 온도 편차는 기준온도 대비 +0.486℃, -0.440℃인 것으로 나타났다.

이러한 해석 결과는 Table 1에서 요구하는 초정밀 가열판의 최대 온도 편차 성능에 비해서는 약 간 큰 값을 보이고 있지만, 모델링 시의 단순화 과정을 고려해 볼 때에는 상당히 근사한 편차

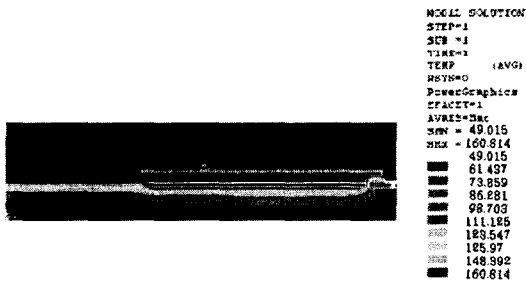


Fig. 2 Overall temperature distribution of the reference model

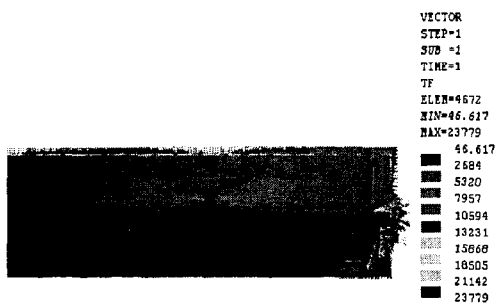


Fig. 3 Heat flux of the reference model



Fig. 4 Temperature distribution contour in the upper plate of the reference model

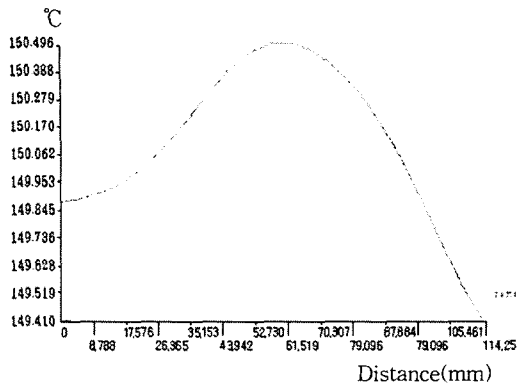


Fig. 5 A graph showing surface temperature distribution of the upper plate

수준을 나타내고 있으며, 이는 곧 본 해석의 신뢰성을 뒷받침하는 것이라고 볼 수 있다.

4.2 설계 모델

4.2.1 모델링

앞에서의 기준 모델에 대한 해석 결과를 볼 때, 현 가열판의 온도분포 특성은 더욱 개선의 필요성이 있다고 판단되었으며, 이를 위해서는 웨이퍼나 가열시스템에 영향을 주지 않는 범위 내에서 가열판의 내부 구조를 약간 변경하거나 히터 발열부(heating element)의 위치와 발열량을 적절히 조절하는 등의 새로운 설계 기법을 적용할 필요가 있다고 보았다.

이에 따라 기준 모델의 히터 발열부를 반경방향으로 7mm 간격의 동일한 길이로 10등분하고(H1~H10으로 명명함), 새로운 설계 모델에는 열집중이 많다고 생각되는 상판 중간 부위의 발열부 일부분을 적당히 제거하거나, 열손실이 많은 곳에는 발열부를 추가하는 방법과 발열부를 두 구간(section)으로 나누어 발열량을 서로 다르게 공급하는 새로운 설계 기법을 적용하였다.

가) A 모델

이 모델링은 발열부가 균일하게 분포되어 있는 기준 모델에서의 발열부 중앙부의 열집중을 해소하기 위해 발열부의 일부를 적당히 제거한 경우이다. 이를 위해 발열부 중앙에 위치한 H3~H7 발열부의 일부를 제거하고 각각에 대하여 열전달 해석을 수행하였다. 이 때 발열부 일부를 제거함

으로써 전체 발열량이 감소하는 것을 방지하기 위하여 상판 중심온도가 역시 150°C가 될 때까지 단위면적당 발열량을 적절히 증가시켜 주었다.

나) B 모델

이 모델링은 앞의 A(발열부 부분제거) 모델들에서 보이는 상판 중심부의 급격한 온도저하를 보상하기 위하여 발열부 위치를 상판 중심 쪽으로 1 구간만큼 더 추가한 것이다(H0로 명명함). 이 경우 발열부 구간은 H0에서 H10까지 모두 11개로 늘어나게 되며, 발열부 중심부에서의 열집중을 감소시키기 위하여 A 모델에서처럼 중앙의 일부 발열부를 제거하는 기법을 병행하였다.

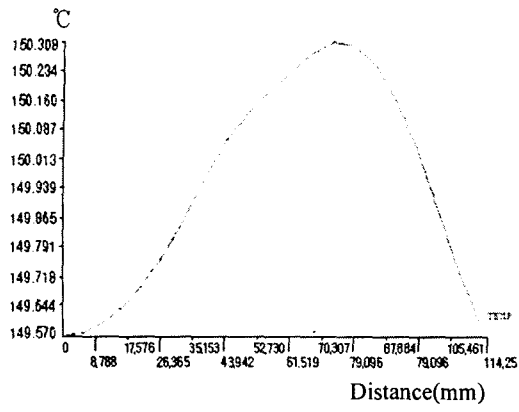
다) C 모델

이 모델링은 현재의 기준 모델이나 A, B 설계 모델들에 있어서, 발열부에서의 단위면적당 발열량이 위치에 관계없이 동일하게 주어지는 것에 비하여, 발열부를 반경 방향으로 크게 두 섹션으로 나누고, 온도 피크가 있는 쪽은 적은 발열량을, 없는 쪽은 많은 발열량을 줌으로써 보다 균일한 온도분포를 얻을 수 있을 것으로 판단하였다. 발열량 제어 방식은 지금까지 제시된 모델에 대하여 다시 적용하였다.

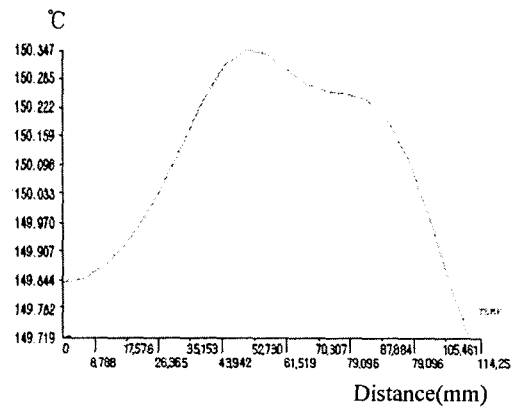
4.2.2 해석 결과

Fig. 6(a)~(f)는 A 모델 중 기준모델에 비해 온도편차가 더 작게 나타난 6가지 모델에 대하여 상판 표면에서의 온도 변화를 각각 그래프로 나타낸 것이다. 전체적으로 발열부가 제거됨에 따라 온도 피크는 반대쪽으로 이동하는 현상이 관찰되었는데, 안쪽의 발열부가 제거될 경우 피크가 바깥쪽으로 이동하면서 바깥쪽의 온도구배는 더욱 심해지는 양상을 보였고, 바깥쪽의 발열부가 제거될 경우 피크가 안쪽으로 이동하면서 바깥쪽 온도구배는 완만해지고 전체적으로도 온도편차가 작아지는 양상을 나타내었다.

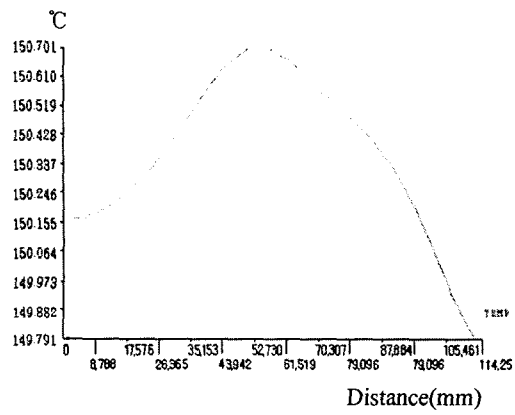
d)의 경우 상판 중심부에서 약간의 열집중을 보이고는 있으나 온도분포가 비교적 균일한 것으로 나타났으며, e) 및 f)의 경우는 오히려 발열부를 너무 많이 제거함으로써 실제 발열부 면적이 좁아진 탓에 온도분포가 한 쪽으로 더욱 쏠리는 경향을 나타내었다. 온도 편차가 가장 적은 것은 d), e), f)로 각각 0.628°C, 0.720°C, 0.707°C의 총



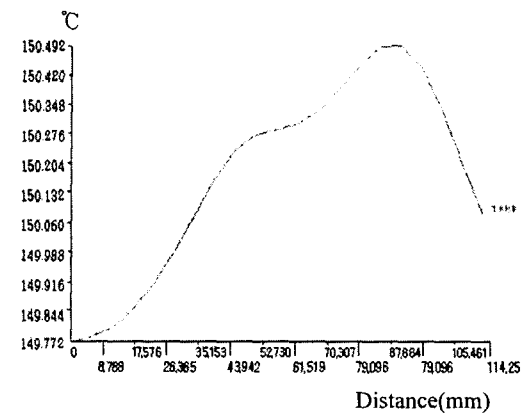
(a) Heating element H3, H4 removed



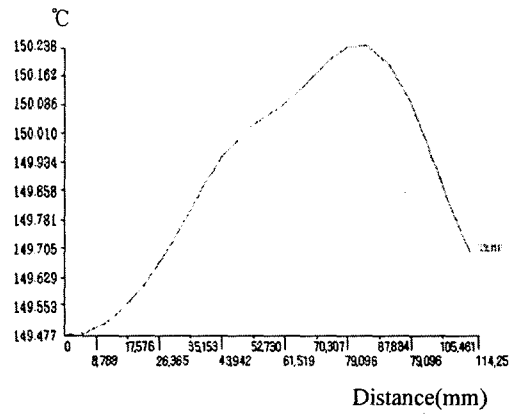
(d) Heating element H4, H5, H6 removed



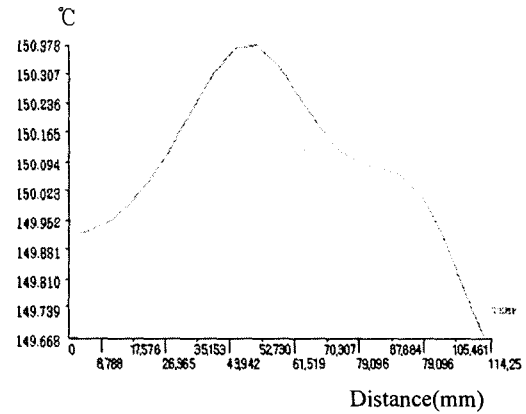
(b) Heating element H5, H6 removed



(e) Heating element H3, H4, H5, H6 removed



(c) Heating element H3, H4, H5 removed



(f) Heating element H4, H5, H6, H7 removed

Fig. 6 Surface temperature on the upper plate of A model

온도편차를 나타내고 있다. 이들 온도편차는 기준 모델에 비하여는 0.2~0.3℃ 정도 감소하였으나, 초정밀 가열판의 성능 기준에 비추어 볼 때는 여전히 그 값이 크다고 볼 수 있다.

Fig. 7은 B 모델의 여러 가지 해석 결과 중 가장 온도편차가 작은 경우를 나타낸 그래프로 온도 피크가 바깥쪽으로 치우치는 경향을 보이고 있다. 최대 온도편차가 0.619℃로 기준 모델보다는 0.307℃나 감소하였으나, 이 경우도 여전히 150℃ 기준온도의 편차성능 0.4℃에는 못 미치고 있다.

이상의 두 설계기법에 의한 모델링 결과를 분

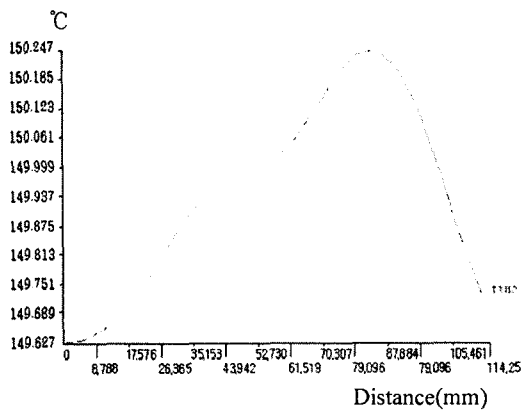


Fig. 7 Surface temperature on the upper plate of B-a model - heating element H0 added & H3, H4, H5, H6 removed

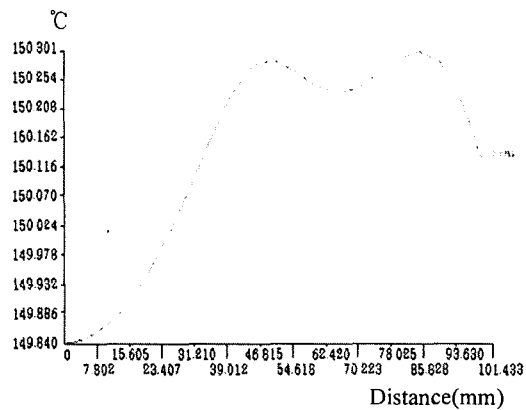


Fig. 8 Surface temperature on the upper plate of C-a models with different heat generation rate - heating element H3, H4, H5, H6 removed

석하여 볼 때, 단순한 발열부의 위치나 구조 변경 등, 발열부의 면적을 제어하는 설계 방법으로는 성능 개선에 한계가 있음을 알 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 앞의 A-e 모델과 B-a 모델에 대해 각각 발열부를 두 섹션으로 나누고, 안쪽과 바깥쪽의 발열량을 서로 다르게 가열하였을 때의 해석 결과를 나타낸 그래프이다. 양쪽 모두 비슷한 크기의 온도 정점이 2개씩 발생하고 있으며, 상판 가장자리의 온도도 상판 중심부보다 높

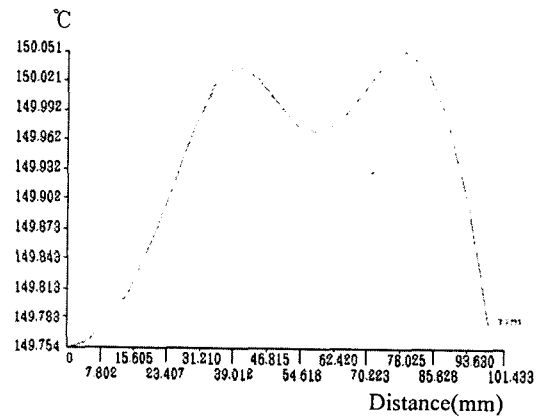


Fig. 9 Surface temperature on the upper plate of C-b models with different heat generation rate - heating element H0 added & H3, H4, H5, H6 removed

Table 3 Summary of analysis results

Model	Item	vs. reference model		Temperature variation (°C)
		Heating area	Total heat	
Ref. model		-	-	0.926
A	a	16% ↓	0.1% ↑	0.738
	b	20% ↓	0.3% ↑	0.910
	c	26% ↓	0.1% ↑	0.761
	d	29% ↓	0.2% ↑	0.628
	e	36% ↓	0.4% ↑	0.720
	f	40% ↓	0.2% ↑	0.707
B	a	28% ↓	0.2% ↑	0.619
C	a	36% ↓	13.3% ↑	0.463
	b	28% ↓	22.9% ↑	0.297

* ↓: decrease, ↑: increase

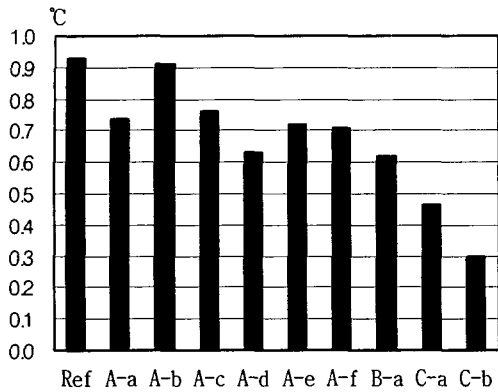


Fig. 10 Maximum temperature variation of the surface of the models

거나 비슷하여 전체적으로 온도분포가 상판의 넓은 범위에 걸쳐 균일하게 분포하고 있음을 알 수 있다. 본 모델의 경우 수치적으로도 상판 표면에서의 최대 온도편차가 각각 0.463, 0.297°C 를 나타냄으로써, 기준 모델뿐만 아니라 A, B 어느 해석 모델보다도 우수한 온도편차 특성을 나타내었다. 이들 값은 요구 성능기준과 비슷하거나 훨씬 작은 값이어서 매우 우수한 온도 정밀도를 나타내는 것으로 분석되었다.

이상의 설계모델에 대하여 그 결과를 기준모델의 경우와 비교하여 Table 3에 정리하여 나타내었다. 표에서와 같이 상판 표면에서의 온도분포 정밀도를 나타내는 총 온도편차는 발열부의 위치를 조정된 A 설계모델의 경우 기준모델에 비해 최고 0.206°C, 구조변경을 통하여 발열부 면적을 확대한 B-a 모델의 경우 최고 0.307°C, 그리고 발열부를 안쪽과 바깥쪽의 2 섹션으로 나누어 발열량을 다르게 제어한 C 모델의 경우 최고 0.627°C 만큼 작아지는 것으로 나타났다.

특히 C 모델의 경우는 총 온도편차가 기준모델 대비 각각 약 50%와 68% 가량 줄어들어 개선 효과가 가장 큰 것으로 나타났다. 또한 이 경우 발열면적도 기준 모델에 비해 약 30% 정도 감소하여, 향후 가열판을 C-a 또는 C-b 모델로 설계할 경우, 핵심부품인 히터의 제조 원가를 줄일 수 있어 가열판의 가격경쟁력을 제고시킬 수 있음을 보여준다. Fig. 10은 각 모델에서의 최대 온도편차를 비교 차트로 나타낸 것이다.

Fig. 11은 본 해석 결과 중 가장 우수한 온도

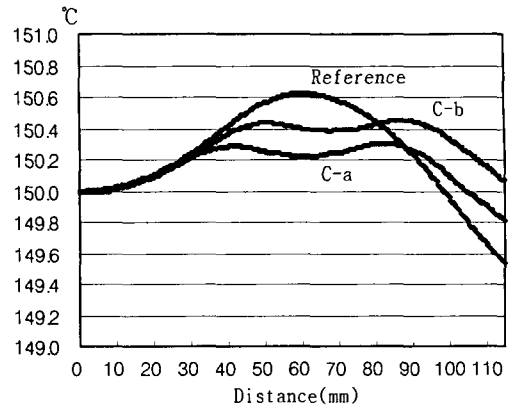


Fig. 11 Comparison of most improved design models with the reference model

분포 성능을 보이고 있는 C-a, C-b 모델과 기준 모델의 표면온도 분포를 비교하여 나타낸 그림이다. 두 모델의 경우 동일한 기준온도에 대해서 온도 분포가 매우 균일하고, 측면 가장자리에서의 온도 구배가 상당히 줄어드는 등 상판의 온도 분포가 크게 개선된 것을 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구는 거의 외국기술에 의존하고 있는 반도체 웨이퍼 제조용 가열장치의 핵심 부품인 핫플레이트에 대한 수치 해석적 열전달 해석을 실시하여 온도분포 특성 및 그 성능기준을 평가하고 이에 따른 문제점을 제시하였으며, 이를 바탕으로 핫플레이트의 온도분포 성능을 개선하기 위한 효과적인 설계 기술과 새로운 설계모델을 제시하였다. 다음은 본 연구의 핵심적인 해석 결과를 요약한 것이다.

(1) 실제 사용 중인 기준모델의 경우 상, 하판에서 모두 매우 균일한 온도분포를 나타내었으며, 150°C에서의 총 온도편차는 약 0.926°C로 나타났다. 이는 목표 성능 기준인 ±0.4°C를 약간 상회하였지만 입력 데이터와 해석상의 여러 가지 단순화를 고려할 때 어느 정도 신뢰성을 부여할 수 있다고 판단되었다.

(2) 상판 중앙부를 기준온도로 하였을 때, 발열체 중앙부는 이보다 훨씬 높았고, 상판 가장자리

로 갈수록 온도는 급격히 감소하는 것으로 나타났다는데, 이는 상판 측면이 발열이 없는 반면, 두께는 상대적으로 매우 얇아서 열손실이 컸기 때문으로 분석되었다.

(3) 히터 발열부의 위치를 단순 제어하는 A 모델의 경우 총 온도편차는 최대 약 0.628℃ 수준까지 낮아졌다.

(4) 기준모델의 상판 내부 구조를 변경하여 히터 발열부 면적을 안쪽으로 확대한 B-a 모델의 경우 최소온도편차는 약 0.619℃ 수준으로 약간 더 개선되었다.

(5) 이에 비해 발열부 위치 제어 모델과 구조 변경 모델 각각에 대하여 2구간으로 나누고 발열량을 차등화 하여 제어한 C 모델의 경우는 총 온도편차가 각각 약 0.463℃ 및 0.297℃ 수준으로 크게 감소하는 것으로 나타나 제시한 설계모델 가운데 가장 우수한 균일 온도분포를 나타내는 것으로 분석되었다.

참고문헌

- (1) Park, H. Y., 2000, "Reliability Test Equipments for Core Parts of Semiconductor Equipments," *Journal of the KSME*, Vol. 40, No. 9, pp 39~43.
- (2) Hiroi, M., 1997, "Hot Plate 加熱 維持の劣化とその防止," *日本油化学會誌*, Vol. 46, No. 10, pp. 1147~1158.
- (3) Choi, D. H., 1999, "3-D Heat Transfer Analysis for the Mixed Convection of Heating Block Uniformly Arrayed on the PCB," KOSEF Repert.
- (4) Park, S. H, Shin, D. J., 2002, "A Study on the Heat Transfer Characteristics Near the Forced Air-Cooled Module According to the Flow Angle," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 26, No. 9, pp. 1267~1275.
- (5) Lee, J. U., Ashley, F. E., 1998, "A Numerical Study for Natural Convective Heat Transfer by Finite Element Method," *Trans. of the KSME*, Vol. 7, No. 1, pp. 113~121.
- (6) Hirasawa S. and Uchino T., 1990, "Analysis on Temperature Distribution in A Semiconductor Wafer during Rapid Thermal Annealing with Lamp Heaters," *Trans. of the JSME*, Tokyo, Part B, Vol. 56, No. 525, pp. 1511~1515.
- (7) Yokoyama K. and Ichimiya R., 1990, "FEM Temperature Analysis of Workpiece with Shape Change Shortening of CPU Time by Calculation Involving Nodes Movement," *Trans. of the JSME*, Tokyo, Part C, Vol. 56, No. 524, pp. 1034~1040.
- (8) Hirasawa S. Kieda S., 1991, "Analysis on Temperature Distribution in Semiconductor Wafers Heated in A Vertical Diffusion Furnace," *Trans. of the JSME*, Tokyo, Part B, Vol. 57, No. 543, pp. 3938~3943.
- (9) Mori M. and Kondo M., 1993, "Temperature and Thermal Stress Analysis in A Structure with Uncertain Heat Transfer Boundary Conditions," *Trans. of the JSME*, Tokyo, Part A, Vol. 59, No. 562, pp. 1514~1518.
- (10) Kazeminejad, H., Ghamari, 1996, "Numerical Study of Convective Heat Transfer from A Blunt Plate at Low Reynolds Number," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Oxford, UK, Elsevier Science. Ltd, Vol. 39, No. 1, pp. 125~133.