

평판형 히트파이프의 표면온도 분포에 관한 실험적 연구

주 상 현, 이 영 수[†], 나 호 상, 조 성 환*

한국에너지기술연구원(KIER) 신·재생 에너지연구센터

*전주대학교 기계자동차공학과

An Experimental Study of surface temperature distribution in Flat-Plate Heat Pipe

Sang-Hyun Joo, Young-Soo Lee[†], Ho-Sang La, Sung-Hwan Jo

Unutilized and Geothermal Energy Research Center, Korea Institute of Energy Research(KIER),
Yoosung P.O Box 103, Taejon 305-600, Korea

ABSTRACT: In this study, optimal design and test of flat-plate heat pipe were carried out in order to improve both thermal response and surface temperature uniformity of heating plate. Experimental results show that the thermal response of flat-plate heat pipe is faster than that of a conventional heating type ones along with less weight and cost. The surface temperature uniformity is also improved.

Key words: Heat Pipe (히트파이프), Thermal Resistance (열저항), Surface Temperature (표면온도) thermal insulation (단열)

기 호 설 명

A	: 전열면적	[m ²]
L	: 길이	[m]
h	: 열전달계수	[kW/m ² ·K]
k	: 열전도율	[kW/m·k]
h _{fg}	: 증발잠열	[kJ/Kg]
Q	: 전열량	[kW]
U	: 총괄열전달계수	[kW/m ² ·K]
C _p	: 비열	[kJ/Kg·K]
T _a	: 주변온도	[°C]
T _p	: 히트파이프 표면온도	[°C]
U _L	: 열손실계수	[W/m ² °C]

1. 서 론

Heat pipe는 내부의 밀폐된 공간에서 순환하는 작동유체가 연속적으로 상변화를 수행할 때 동반하는 잠열을 이용하여 열을 이동시킴으로써 단일상의 작동유체를 이용하는 기존의 열전달 기기에 비해 매우 큰 열전달 성능을 발휘한다. 히트파이프에 대한 기본 원리, 특성 그리고 대표적 응용 등은 참고문헌에 잘 나타나 있는데, 외벽의 재료 및 작동유체의 종류, 모세관 구조물의 종류, 액체의 귀환방법, 내부의 기하학적 형태, 작동온도 등에 따라 다양하게 분류될 수 있으며, 본 연구에서는 기존의 열전달 기기에 비해 중량과 부피의 감소와 대량의 열전달 특성을 가지는 Heat pipe의 특징을 현재 반도체 웨이퍼 공정에 적용되는 가열 플레이트의 대안으로서 히트파이프를 적용시켜 현재 시스템의 대안으로서의 가능성을 도출하고자 한다. 현재 반도체 웨이퍼의 공정시 웨이퍼 전체온도의 균일화 및 온도제어 정밀도는

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-860-3161; fax: +82-42-860-3133

E-mail address: yslee@kier.re.kr

Critical Dimension 형성(반도체 pattern 형성)에 결정적인 역할을 하기 때문에 목표온도의 정밀도 및 균일성이 무엇보다 중요하다. 현재 웨이퍼 공정에 사용되는 가열용 플레이트는 여러 개의 코일 히터 모듈들이 하나의 단위 가열시스템으로 합체되어 웨이퍼 제작 공정에 적용되며 표면온도 균일화를 위해 각 모듈당 각각의 온도 조절용 컨트롤러가 장착되며 정밀한 온도제어를 위해 가열 플레이트의 두께가 필요 이상으로 두꺼워지기 때문에 시스템의 중량 증가는 물론 재료비 상승을 초래한다. 웨이퍼 전열 플레이트의 열전달 속도 향상을 통한 가열속도를 증가시키고, 표면온도 균일화 향상을 위한 기술로서 평판형 히트파이프를 적용한 가열 시스템이 필요하다.

본 연구에서는 웨이퍼 가열 플레이트 표면의 우수한 열 응답성과 온도 균일성을 확보하기 위해서 사각 평판형 히트파이프의 최적 설계, 제작 및 시험을 수행 하여 기존의 단위 가열 시스템의 대안으로서의 가능성 도출을 목표로 한다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험장치 구조 강도 및 성능 해석

Table 1은 평판형 히트파이프의 제원을 나타낸 것으로 본 실험에 앞서 수행 되어진 평판형 히트파이프의 성능을 예측하기 위해 수행 되어진 시뮬레이션 Parameter이며 유한요소해석 프로그램 (ANSYS Workbench 10.0) 이 사용 되어 졌으며 시뮬레이션 수행 결과 작용 압력을 2.5bar 로 가정 할 경우 최대 전단 응력은 77.1Mpa 로서 인장강도 기준 안전율은 1.6 이며 최대 변 형량은 $102\mu\text{m}$ 로 히트 파이프와 웨이퍼 간극의 10.2%에 해당하므로 이설계안을 평판형 히트파이프에 적용 할 경우 안전성이 확보 된다고 볼 수 있다.

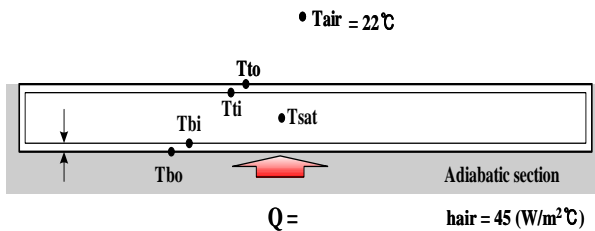


Fig. 3 Flate-Plat Heat Pipe.

Table 1 Parameter of Flate-Plat Heat Pipe

규격	Parameter
크기 및 형상	$D_1 = 70\text{mm}$, $D_o = 70\text{mm}$ Thickness = 8mm
재질	al6061
작동유체	H_2O
작동 경사각	0° (수평모드)

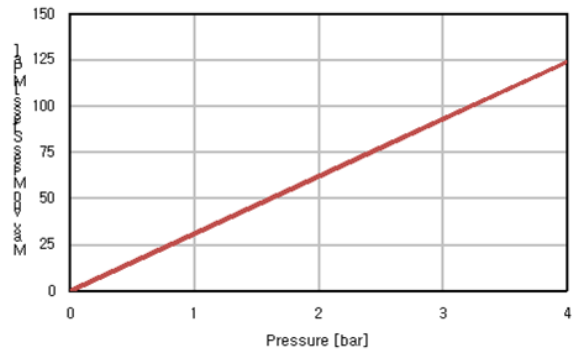


Fig. 1 Max Shear Stress.

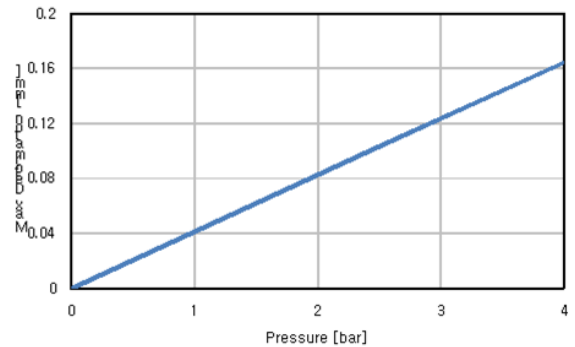


Fig. 2 Safety Factor.

2.1.1 성능 해석을 위한 계산식

열저항은 다음과 같다.

$$R1 = \frac{\text{Thick}_{plate}}{K[AL, \frac{T_{bo} + T_{bi}}{2}] \cdot A_{Plate}}$$

$$R2 = \frac{1}{h_e \cdot A_{Plate}}$$

$$R3 = \frac{1}{h_c \cdot A_{Plate}} \quad (1)$$

$$R4 = \frac{Thick_{Plate}}{K[Al, \frac{T_{bi} + T_{bo}}{2}] \cdot A_{Plate}}$$

$$R5 = \frac{1}{h_{air} \cdot A_{Plate}}$$

계산식(1)은 각 부의 열저항을 값을 계산하기 위한 식으로 히트파이프 내부의 열저항은 응축 열전달계수 및 증발열전달계수를 사용하여 계산 되어 졌다. Fig.3의 가정에 의하여 계산 되어진 평판형 히트 파이프의 열저항 결과는 Table 2에 나타난바와 같이 20W의 경우 조금 더 낮은 열저항 값을 보여 주고 있다. 프로그램은 미국 F-Chart Software사의 EES(Engineering Equation Solver) Ver. 6.646을 사용하여 작성 하였다.

Table 2 Thermal Resistance

	R1	R2	R3	R4	R5
10W	0.00243	0.03858	0.04823	0.00243	4.287
20W	0.002416	0.03858	0.04823	0.002417	4.287
30W	0.002423	0.03858	0.04823	0.002422	4.287

2.2 실험장치

본 연구에서 사용한 평판형 히트 파이프는 지표와 수평한 상태로 설치하였고 한 변의 길이가 70mm, al6061의 재질로 정사각형의 형태로 제작하였고 작동 유체로는 H_2O 를 사용 하였다. 평판형 히트파이프의 내부는 10^{-3} torr로 충분히 진공 시킨 후 작동유체인 증류수를 평판형 히트파이프 내부 체적의 10%, 20%, 30%로 주입 하였다. Fig. 4는 평판형 히트파이프의 성능 실험을 위한 실험장치의 전체 구성도이며 본 실험에서 사용된 실험 장치는 크게 평판형 히트파이프, 데이터 수집 장치의 두 가지로 나누어진다. 실험 장치는 가변 전압 조절기를 이용하여 조정된 전기를 공급하면 평판형 히트파이프하부의 히터에서 발열이 되어 열량이 공급 된다. 이것을 단열재로 단열함으로서 외부 대기로의 열손실을 최소화 하였다 응축부는 대기에 노출 시켜 자연 냉각이 이루어

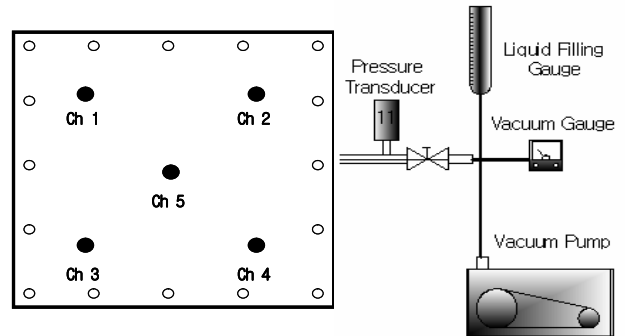


Fig. 4 Flat-Plat heat pipe experiment Apparatus.

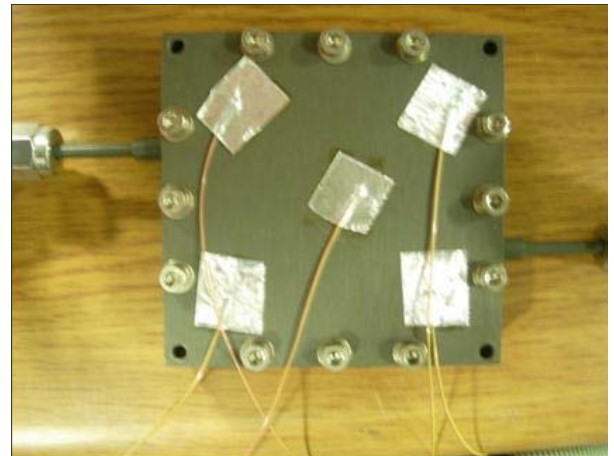


Fig. 5 Flat-Plat heat pipe.

어지도록 하였고 외기 순환에 의한 간섭을 줄이기 위하여 상하부가 개방된 커버를 제작하여 주위를 간섭요소를 차단 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 작동유체 주입량에 따른 특성

Fig. 6은 9가지 조건의 실험 결과로 동일한 가열 열량이 주어지면 20W, 30W, 40W 세 가지 실험 케이스 모두 30%(4.4cc)의 작동유체 주입량을 갖는 경우 목표 온도에 빠르게 도달 하고 있음을 보여주고 있다. 따라서 최적의 작동 유체 주입량은 30%가 될 것이다.

Fig. 7은 작동 유체 30%의 평판형 히트파이프와 단일 히트플레이트의 온도 상승 곡선과 표면온도 분포 편차를 보여주는 것으로 평판형 히트파이프의 경우 큰 잠열을 갖는 히트 파이프의

특성을 보여주는 것으로 나타났으며, 전 구간 고온에 근접할수록 단일 히트플레이트에 비하여 빠른 열전달 능력으로 인하여 표면온도가 낮은 것을 보여 주고 있다.

3.2 공정 적용 온도 구간 비교

Fig. 8은 현재 반도체 공정에 요구 되어지는 목표온도인 150℃ 구간에서의 온도 분포를 나타내는 것으로 작동유체 H_2O , 30%(4.4cc)의 주입량의 특성과 단일 히트 플레이트의 특성을 보여 주고 있다. 동일한 조건에서의 실험 결과 기존 적용 되어 사용되는 단일 히트플레이트의 표면 온도 분포 편차 보다 히트 파이프의 경우 보다 적은 온도 편차를 갖는 것으로 기존에 비하여 더 나은 표면온도 분포를 기대 할 수 있다.

3.3 표면온도 비교

Fig. 9는 150℃ Point에서의 단일 히트플레이트 와 30%의 작동유체 주입량과 히터로부터 전달 된 열량에 따른 평판형 히트파이프의 표면 온도 편차를 나타내는 것으로 표면 온도 편차는 20W 가열시 최소 0.04℃와 30W 열량 전열시 최대 0.39℃의 표면 온도 분포를 보여 주는 결과로서 평판형 히트파이프의 반도체 웨이퍼 공정에 적용 되어질 때 기존 시스템에 비하여 더 높은 표면온도 균일정도와 빠른 열 응답으로 인한 온도 제어 정밀도 향상에 기여 할 수 있어 반도체 웨이퍼 생산에 정밀도를 향상시킬 수 있을 것이다.

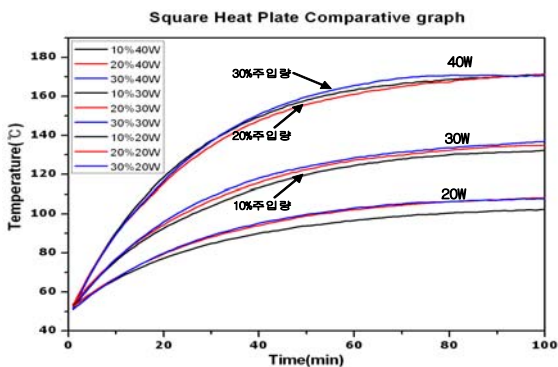


Fig. 6 Working Fluid pouring volume comparative graph.

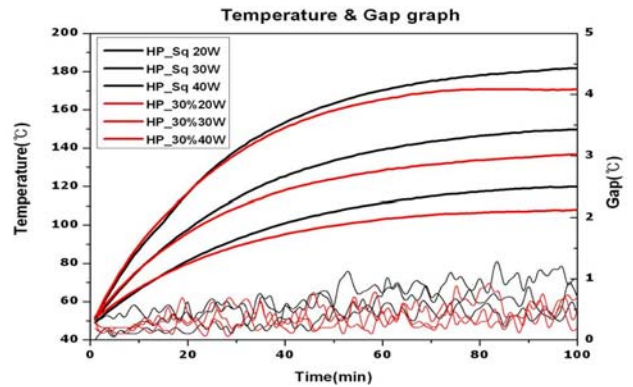


Fig. 7 Comparison between Working Fluid 30% experimental results and uniformity Flat Surface Temperature Gap results.

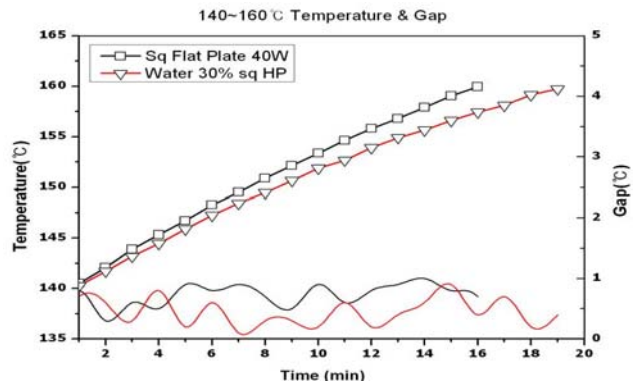


Fig. 8 Surface Temperature Gap graph.

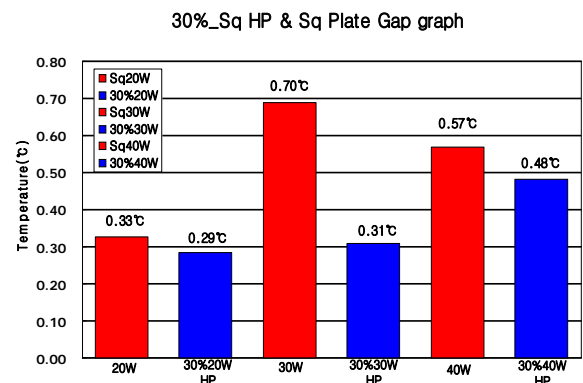


Fig. 9 Comparison between Working Fluid 30% experimental results and uniformity Flat Surface Temperature Gap results.

참고문헌

4. 결 론

본 실험에서는 반도체 웨이퍼 공정시 적용 되는 가열 히트 플레이트를 대체하기 위한 평판형 히트 파이프를 설계 제작 하였고 실험을 수행하여 공정 적용에 가능성에 대한 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 동일한 열량이 주어진 경우 히트파이프의 빠른 열 전달량 효과로 인하여 표면 온도가 기존 단일 히트 플레이트에 비하여 낮게 나타났다.

(2) 단일 히트 플레이트에 비하여 평판형 히트파이프의 설정온도 도달 시간 증가는 작동 유체의 상변화시 소요되는 잠열로 인한 열용량의 증대에 따라 소요되는 시간으로서 기존의 시스템에 비하여 열용량이 크므로 부하 발생시 단시간에 큰 열전달이 가능 할 것이다.

(3) 150℃ Point에서 30%의 작동유체 주입량의 평판형 히트 파이프는 기존 단일 가열 플레이트 형식의 표면 온도 편차 보다 0.39℃ 정도의 편차가 줄어드는 것을 확인 하였다.

- (1) Y. S. Lee et al., 2003, Heat Recovery System using High Efficiency Heat Pipe Heat Exchanger for Industrial Exhaust Gas, Final Report of Ministry of Commerce, Industry and Energy, pp.35-42
- (2) Hong, J. K., Boo, J. H. and Chung, W. B., 1999, "Experimental study on the working characteristic of a heat pipe with combined wick", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 11, No. 2, pp.236-243.
- (3) Y. S. Lee, 1992, For Air-conditioning Heat Exchanger Using Heat Pipe, Air-conditioning and Refrigeration Engineering, SAREK, Vol. 21, No. 5, pp.423-438.
- (4) Y. S. Lee and Y. S. Jang, 1990, A Study on the Characteristics of Heat Exchanger Using Heat Pipe for Various Working Condition, Journal. of Airconditioning and Refrigeration Engineering, SAREK, Vol. 2, No. 3, pp. 155-165.