

나노임프린트 장비용 대면적 열판 열설계를 위한 수치 연구

박 규 진,^{†1} 이 재 종,² 곽 호 상^{*3}

¹금오공과대학교 대학원 기계공학과

²한국기계연구원, 나노융합기계연구본부

³금오공과대학교 기계시스템공학과

A NUMERICAL STUDY ON THERMAL DESIGN OF A LARGE-AREA HOT PLATE FOR THERMAL NANOIMPRINT LITHOGRAPHY

G.J. Park ^{†1}, J.J. Lee² and H.S. Kwak^{*3}

¹Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Kumoh National Institute of Technology

²Research Division for Nano Convergence Mechanical Systems, Korea Institute of Machinery and Materials

³Dept. of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology

A numerical study is conducted on thermal performance of a large-area hot plate specially designed as a heating and cooling tool for thermal nanoimprint lithography process. The hot plate has a dimension of 240 mm × 240 mm × 20 mm, in which a series of cartridge heaters and cooling holes are installed. The material is stainless steel selected for enduring the high molding pressure. A numerical model based on the ANSYS Fluent is employed to predict the thermal behavior of the hot plate both in heating and cooling phases. The PID thermal control of the device is modeled by adding user defined functions. The results of numerical computation demonstrate that the use of cartridge heaters provides sufficient heat-up performance and the active liquid cooling in the cooling holes provides the required cool-down performance. However, a crucial technical issue is raised that the proposed design poses a large temperature non-uniformity in the steady heating phase and in the transient cooling phase. As a remedy, a new hot plate in which heat pipes are installed in the cooling holes is considered. The numerical results show that the installation of heat pipes could enhance the temperature uniformity both in the heating and cooling phases.

Key Words : 열판(Hot Plate), 열설계(Thermal Design), 급속 가열과 냉각(Rapid Heating and Cooling), 온도균일도(Temperature Uniformity), 열확산계수(Thermal Diffusivity), 열경화 방식 나노임프린트(Thermal Nanoimprint Lithography), 히트파이프(Heat Pipes)

1. 서 론

열판(hot plate)은 면가열 방식으로 재료에 간접적으로 열을 가하는 가열장치로 요리용 철판에서부터 온도 균일도가 중요한 화학실험용 항온유지 장치나 급속 균일가열 성능이 요구되는 반도체 공정장치 등에 이르기 까지 폭 넓게 사용되고

있다. 일반적인 열판설계는 현재의 산업기술 수준에 비추어 난이도가 높지 않아 이미 용도별로 다양한 제품이 시판되고 있고 최근의 학술연구에서는 거의 다루어지지 않고 있다. 이 논문의 연구대상은 열경화 방식의 나노임프린트(Thermal Nano-Imprint Lithography, 이하 TH-NIL) 장비용 열판이다. 열판이라는 연구주제를 다시 불러낸 것은 TH-NIL 공정이 특수하게 요구하는 기술적으로 도전적인 기능 요건이다.

전자부품의 성능 향상과 고기능화, 제조 생산성 향상에 있어 핵심적인 화두는 다양한 나노 형상을 만드는 양산기술이다. 지금까지 반도체 공정에서 형상의 극초미세화를 주도한 것은 사진식각(Photolithography)이다[1]. 광반응을 하는 수지의 성질을 이용하는 이 제조법은 메모리 반도체 공정에서 10 nm

Received: May 23, 2016, Revised: June 27, 2016,

Accepted: June 28, 2016.

[†] Current Affiliation: Doosan Engine

* Corresponding author, E-mail: hskwak@kumoh.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2016.21.2.090>

© KSCFE 2016

선폭을 구현할 정도로 발전하였으나 제조공정이 복잡하여 생산원가가 비싸고 다양한 형상 제조가 어려우며 빛의 파장이 주는 제약 때문에 소형화 진전이 한계에 부딪히고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로 제안된 것이 나노임프린트인데 폴리머 기판을 유리전이 온도 이상으로 가열하여 연화시킨 후 표면에 극초미세 형상을 가진 스템프로 눌러 반대 형상을 전사하는 기계적 식각 기법이다[2]. 이 제조법은 수지를 고형화하는 방법에 따라 UV 경화성 수지에 자외선을 조사하는 광경화 방식과 수지를 냉각시켜 굳히는 TH-NIL 방식으로 분류된다.

TH-NIL은 광경화 방식의 자외선 파장에 의한 제약을 받지 않아 고세장비 형상 제작이 가능한 제조법[3]이나 가열·가압·냉각이 연속적으로 이어지는 공정 특성상 정밀한 열적 제어를 요구한다. TH-NIL용 열판을 설계하기 위해서는 다음과 같은 요건을 고려하여야 한다. (1) 열판은 수지를 효율적으로 용융시키고 고형화시키는 급속가열과 급속냉각 능력을 가져야 한다. (2) 열판은 대면적 확장성을 가져야 한다. (3) 비균일 열팽창에 따른 변형을 최소화하고 스템프로 분리를 용이하게 하기 위하여 열판은 높은 온도균일도를 유지하여야 한다. (4) 가압시 압력에 의한 변형을 최소화할 수 있도록 열판 재질은 경도와 강도가 커야 한다. (1)과 (2)는 생산성과 관련된 요건이고 (3)과 (4)는 품질과 관련된 요건이다.

Chou et al.[2]의 제안 이후에 TH-NIL 식각에 대한 연구가 본격화되었으나 대부분은 공정에서 발생하는 채움 등 물리 현상, 기관 등 소재의 물성, 스템프로의 제작, 제작된 형상의 품질 및 응용 등을 다루고 있다[4-7]. 한편으로 TH-NIL 장비 개발이 추진되면서 열판에 대한 연구도 진행되었다[8-10].

Kwak et al.[8]은 길이가 긴 봉형의 카트리지 히터와 냉매가 흐르는 냉각공을 상하로 엇갈리게 배치하는 방식으로 냉원과 열원의 수평적 확장이 가능한 열판의 개념을 제안하고 전산해석과 실험으로 개념적 타당성을 검증하였다. 후속연구에서 Park et al.[9]은 선행연구가 제시한 개념모델을 구체화하여 240 mm x 240 mm x 20 mm 크기의 열판을 설계하고 전산해석으로 열거동을 분석하여 이 열판이 설계요구조건에 부합하는 가열 성능과 온도균일도를 제공한다고 보고하였다. 특히 이 연구에서는 실제 피드백 제어가 장착된 열판의 열적 거동을 재현하기 위하여 PID 제어를 모사할 수 있는 부속 프로그램을 작성하여 사용하였다. 이 연구에서는 온도균일도를 보장하기 위하여 열확산계수가 매우 큰 알루미늄을 열판 재료로 사용하였는데 고압의 누름에 노출되는 TH-NIL 공정용으로 표면경도가 작은 알루미늄은 적절한 재료라 볼 수 없다. 이러한 문제의식에서 Yang[10]은 표면경도가 큰 스테인레스강으로 열판을 제작하여 가열시험을 수행하였으나 냉각공에서의 냉매 흐름을 이용한 냉각시험은 수행하지 않아 전체 공정

의 열성능을 평가하지 못하였다.

이 연구에서는 가압공정에 견딜 수 있도록 재료 강도와 경도가 높은 스테인레스강으로 제작한 열판을 대상으로 가열과 냉각 과정의 비정상 열거동을 수치적으로 분석하여 열설계의 적정성을 평가하고자 한다. 이 과정에서 열전도도가 낮은 스테인레스 재질이 유발할 수 있는 열적 문제를 파악하고 이를 해결하기 위한 방안을 모색하고자 한다.

2. 모 델

2.1 물리적 모델

Fig. 1은 이 연구에서 다룬 열판을 보여주고 있는데 기본적인 구조는 이전 연구[9-10]에서 다룬 열판과 동일하다. 열판은 변의 길이가 L 이고 두께가 d 인 정사각형 판형 구조를 가진다. 열판 외곽부의 폭이 g 인 영역을 제외한 한 변의 길이가 $L-2g$ 인 정사각형 영역이 실제 작업이 가능한 작업영역이다. 열판의 측면에는 길이(z) 방향으로 지름이 D 인 원형공이 상하 2열로 엇갈리게 만들어져 있다. 원형공은 수평으로 S 의 간격으로 배치되는데 원형공의 수를 늘리면 쉽게 열판 확대가 가능한 대면적 확장성이 이 열판의 핵심적인 장점이다.

Fig. 1에 도시한 것과 같이 하부의 원형공에는 원형 카트리지 히터를 삽입하여 가열모드에서의 열원을 제공하고 상부의 원형공은 냉각용으로 사용된다. 이 연구에서 고려한 열판의 주요 제원은 다음과 같다. $L = 240$ mm, $D = 6$ mm, $g = 10$ mm, $d = 20$ mm, $S = 12$ mm. 이를 기준으로 하면 하부에는 20개의 카트리지 히터가 장착되고 상부에는 19개의 냉각공이 가공된다. 카트리지 히터 한 개당 가열용량은 300 W이다. 열판의 재질은 스테인레스강 STS304이며 밀도는 8030 kg/m³, 열전도율은 15.1 W/m·K이다. 열확산계수는 3.75×10^{-6} m²/s로 선행연구에서 고려한 알루미늄의 열확산계수 7.10×10^{-5} m²/s보다 상당히 작다.

이 연구에서는 냉각공의 활용방법이 다른 두 가지 열판모형을 고려하였다. 모형 I은 기존 연구[8]에서 다루어진 것과 같이 냉각공을 냉매 유로로 사용하는 모형으로 냉각모드에만 냉매가 흘러 열판을 직접 냉각한다. 모형 II는 냉각공에 히트파이프를 장착한 모형으로 모형 I에서 발생할 수 있는 온도균일도 문제를 개선하기 위한 방안으로 고려하였다. 이 모형에서는 열판보다 길이가 긴 히트파이프를 사용하고 열판 외부로 돌출된 히트파이프 종단부를 냉각하는 방식으로 열판을 간접 냉각한다. 히트파이프의 외경은 6 mm이며 길이는 340 mm이다. 열판 외부로 돌출된 100 mm 부분 중 끝단의 30 mm 부분이 냉각된다.

열판의 온도가 설정온도에 최적으로 접근하여 안정화될 수

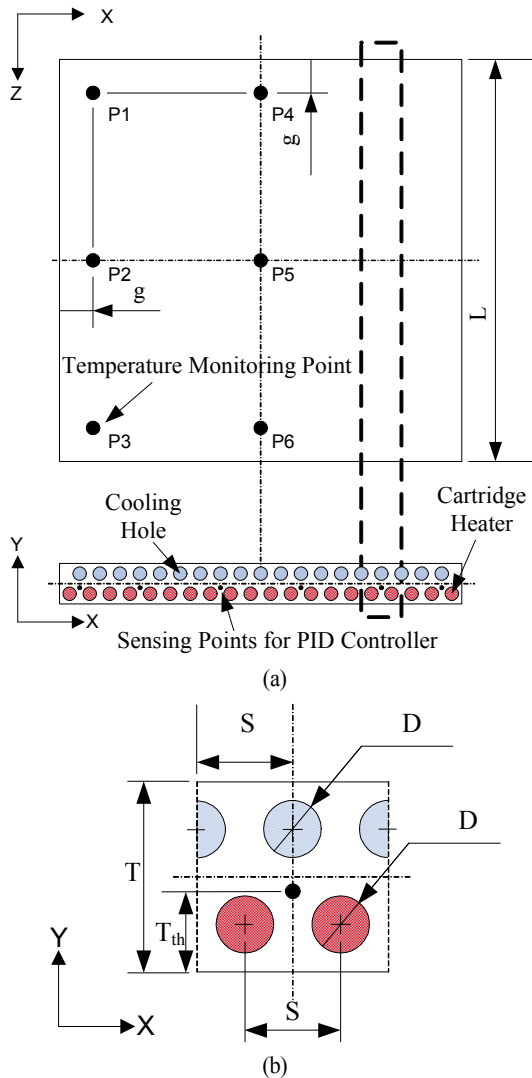


Fig. 1 Schematic illustration of the hot plate: (a) the top view and the front view; and (b) the enlarged front view near the temperature sensing point

있도록 카트리지 히터의 발열량에 대한 피드백 제어가 이루어진다. 선행연구[9]에서 고려한 것과 같은 방식으로 20개의 히터를 제어하기 위하여 총 6개의 PID 제어기가 사용된다. Fig. 1(a)에 도시된 것처럼 6개의 온도 감지점을 배치하였고 외곽부의 온도 감지점 인근 2개의 히터를 한 그룹으로, 내부의 온도 감지점 인근 4개의 히터를 한 그룹으로 묶어 총 6개의 그룹에 대하여 독립적인 온도제어가 이루어진다.

2.2 전산해석 모델

열판의 비정상 열거동을 알아보기 위하여 상용 CFD 코드

인 ANSYS Fluent V15.0를 사용하여 전산해석을 수행하였다. 해석영역은 Fig. 1에 도시된 열판 전체이며 200만개의 격자를 사용하였다. 상온에서 200℃까지 열판의 온도를 올리는 가열 모드와 200℃ 온도에서 상온으로 냉각하는 냉각모드를 따로 계산하였다. 계산조건은 선행연구[10]와 유사하게 설정하였다.

모형 I의 경우 가열모드에는 냉각공이 비어 있다고 가정하였고 냉각모드에는 냉각공에 냉매가 17.2℃의 온도로 유입되는 경우를 상정하여 속도경계조건으로 처리하였다. 온도균일도를 높이기 위하여 이웃하는 냉각공의 냉매 흐름은 서로 반대 방향이 되도록 설정하였다. 냉매로는 질소가스와 물을 고려하였으며 냉매의 난류유동은 RNG k-ε 모델과 증강벽함수 (Enhanced wall function)를 사용하여 계산하였다.

모형 II의 경우에 히트 파이프로 모델링하는 것이 관건이다. 히트 파이프의 축방향 유효열전도율이 구리의 80배 정도임을 고려하여[11] 히트 파이프로 구리의 80배의 열전도계수를 가지는 고체로 단순하게 모사하였다. 냉각모드에서 히트 파이프 중단부 30 mm 부분의 냉각은 대류열전달계수 $h_{\text{heatpipe}} = 1768.4 \text{ W/m}^2\text{K}$, 외부온도 17.2℃의 경계조건으로 처리하였다. 이는 냉각 초기조건을 기준으로 150 W에 해당하는 냉각 용량이며 선행연구[10]에서 구한 6 mm 직경의 히트 파이프의 모세관 한계를 만족하는 최대전열용량[12]을 적용한 것이다.

열판의 밑면은 단열로 처리하였고 윗면과 옆면에는 자연대류 냉각조건을 적용하였다. 사각구조물의 옆면과 윗면의 층류 자연대류 열전달 상관식은 다음과 같다[13].

$$Nu_{\text{side}} = 0.59 Ra_d^{1/4} \tag{1}$$

$$Nu_{\text{upper}} = 0.54 Ra_\delta^{1/4} \tag{2}$$

여기서 Ra_d 와 Ra_δ 는 열판의 높이와 평면특성길이 $\delta = L/4$ 을 사용하여 구한 레이일리(Rayleigh) 수이다. 가열모드 정상상태에서 $Ra_d = 4.4 \times 10^4$, $Ra_\delta = 1.2 \times 10^6$ 이므로 가열판 옆면과 윗면의 자연대류는 층류라 볼 수 있다. 이 값으로부터 구한 대류열전달계수 $h_{\text{side}} = 13.4 \text{ W/m}^2\text{K}$, $h_{\text{upper}} = 9.35 \text{ W/m}^2\text{K}$ 를 이용하여 옆면과 윗면의 냉각 경계조건을 처리하였다. 실제로 열원과 냉원으로부터 열판에 가해지는 가열 및 냉각 열 유속이 이보다 100배 이상이므로 이 경계조건의 영향은 크지 않다.

가열모드에서 제어기에 의해 실시간으로 조정되는 공급열량을 모사하기 위하여 PID 제어 논리를 사용자 정의함수(UDF)로 만들어 Fluent에 동등시켰다. UDF는 Fluent가 제공하는 매크로를 사용하여 작성하였으며 Interpret 방식을 채택하였다. 범용으로 사용되는 PID 제어기와 동일한 방식으로 목표온도를 설정하고 비례제어를 위한 이득지수(Pgain), 적분제

어 이득지수(Igain), 미분제어 이득지수(Dgain) 값을 입력하면 온도감지부에서 획득한 온도를 기준으로 히터에서 공급하는 열량을 제어하도록 하였다. 일반적인 제어기는 전류나 전압을 단속하는 시간을 제어하지만 전산해석에 이를 반영하는 것이 어려워 카트리지 히터에 공급되는 열량을 조절하는 것으로 변형하여 적용하였다. 2.1절에서 설명한 바와 같이 총 6개의 제어기가 Fig. 1에 도시된 6개의 온도 감지점을 중심으로 6개의 영역을 독립적으로 제어하도록 수치모델을 만들었다.

3. 결과 및 토론

3.1 제어변수 설정

본격적인 해석을 수행하기 위해서 먼저 제어기의 제어변수를 설정하여야 한다. 제어변수 설정은 비례이득(Pgain), 적분 이득(Igain), 미분이득(Dgain) 값을 바꾸어가며 계산을 수행하여 기존 실험결과와 가장 근접한 결과를 제공하는 제어변수를 탐색하는 방법으로 진행하였다. 실제 열판은 6개 영역으로 구분되어 6개의 제어기로 제어되는데 제어기의 제어변수는 모두 동일하다고 가정하였다. 제어변수 값 설정을 위한 계산은 효율성을 위하여 전체 열판이 아니라 Fig. 1(b)에 도시된 소영역으로 계산영역을 한정하였다. 여기서 Yang[10]의 실험이 제공한 가열판 중앙에서의 온도거동을 제어값 설정의 참고기준으로 삼았다.

Fig. 2는 가열모드에서 제어변수가 Fig 1(b)의 소영역의 상부 중앙지점의 온도변화에 어떤 영향을 미치는지 보여주고 있다. 이 계산에서 가열목표 온도는 200°C이고 온도제어는 0.5초 간격으로 하는 것으로 설정하였다.

PID 제어에서 가장 큰 영향을 주는 Pgain을 설정하기 위하여 먼저 적분제어와 미분제어 없이 비례제어만 고려한 경우의 온도응답을 알아보았다. Fig. 2(a)는 Pgain 값이 A, 3A, 100A인 경우, 시간에 따른 온도 거동을 보여준다. 그림에서 원은 비교대상으로 정한 Yang[10]의 실험 결과로 열판 상부 중앙 지점의 온도 응답을 나타낸다. 사각형은 또 하나의 비교 기준이 되는 PID 제어가 작동하지 않은 경우, 즉 카트리지 히터 하나당 300 W의 발열량으로 가열이 이루어질 때의 온도 응답이다. 전체적인 온도 응답은 초기의 완만한 온도 적응과 이후의 선형 온도 상승, 그리고 마지막 단계의 정상상태 접근으로 구분된다. 가열모드 초기에 나타나는 완만한 온도 상승은 열판으로의 본격적인 열전도에 앞서 발열에 의해 카트리지 히터 자체의 온도가 상승하는 기동구간으로 볼 수 있다.

Pgain = A인 경우를 제외하면 가열모드 중반까지 온도 상승은 거의 동일한 응답특성을 보여준다. 여기서 상승 A의 값은 1이다. 초기 기동 단계 이후 열판 온도는 100초까지 거의 선형적으로 상승한다. 온도제어가 없는 경우와 온도 상승곡선

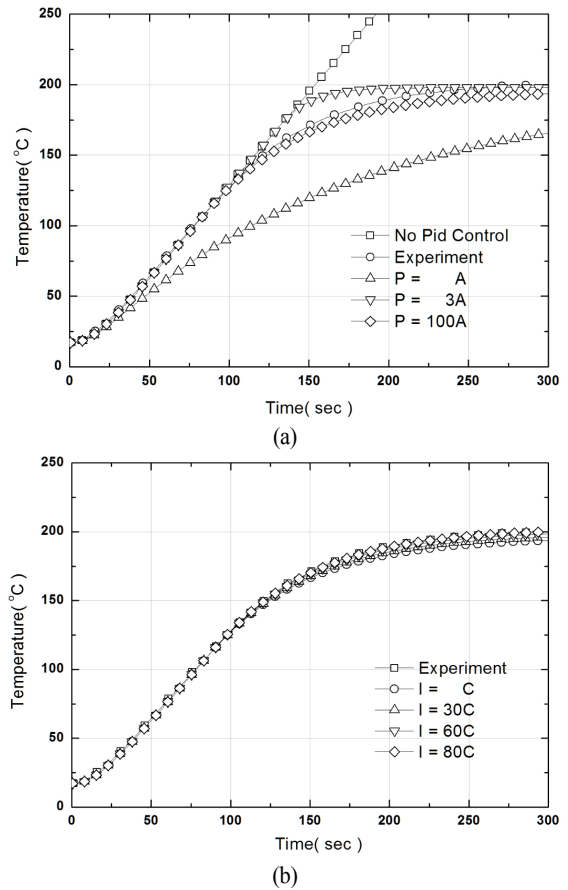


Fig. 2 Effects of control parameters on the time-dependent temperature evolution at the center of the upper surface of the hot plate. (a) Only the proportional gain is considered, and (b) the integral gain is also considered (Pgain = 3A). The circles represent the experimental data by Yang[10] and the other symbols do the results of present numerical simulation

의 기울기가 일치하는 것은 이 구간에서는 히터의 최대 발열 용량인 300 W가 모두 사용되고 있다는 것을 의미한다. Pgain = A인 경우에는 온도상승이 매우 완만하게 이루어지는데 비례제어 변수 값을 작게 설정하면 히터의 발열용량을 충분히 활용하지 못하여 300초 내에 목표온도에 도달하지 못할 수 있다는 것을 알려주고 있다. Pgain = 3A의 경우와 Pgain = 100A인 경우의 중반까지의 온도응답이 거의 유사하다. 안정적 제어의 관점에서는 Pgain이 작은 것이 유리하므로 Pgain은 3A로 결정하였다.

다음으로 정상상태에서 상대오차를 줄여 목표 온도를 정확하게 맞추기 위하여 적분제어를 고려하였다. Fig. 2(b)는 Pgain = 3A로 고정하고 Igain = C, 30C, 60C, 90C의 값으로 적분제어를 추가한 경우의 열판 상부 중앙지점의 온도 응답을 그린

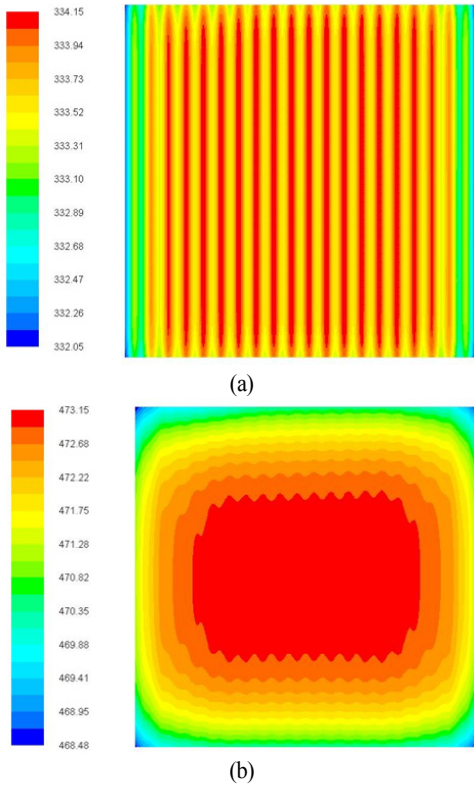


Fig. 3 Temperature distribution on the upper surface of the hot plate model I at (a) $t = 50$ s; and (b) $t = 300$ s after heating. The temperature is in unit of K

것이다. 여기서 상수 C의 값은 0.2이다. I_{gain} 값에 상관없이 중반까지의 응답은 동일하며 I_{gain} 의 값이 커질수록 정상상태 오차가 줄어 실험결과에 가깝게 근접함을 알 수 있다. 이 연구에서는 I_{gain} 의 값은 정상 상태 오차 $\pm 0.02^\circ\text{C}$ 를 만족하는 값으로 설정하였다.

가열모드의 열판 온도제어에서는, 위치제어 시 나타나는 관성력에 의한 오버슈트가 없고, 외부로의 열전달은 자연대류에 의해서만 이루어지기 때문에 가열량에 비하여 크기가 매우 작아 온도의 요동 또한 잘 발생하지 않는다. 따라서 미분 제어는 큰 의미가 없는 것으로 판단되어 고려하지 않았다.

3.2 냉각공이 있는 모형 I의 온도 거동

앞 절에서 설정한 제어변수 값을 사용하여 냉각공이 비어 있는 열판 모형 I을 가열하는 과도거동에 대한 수치계산을 수행하였다. Fig. 3는 가열모드의 초반(50초)과 정상상태(300초)의 열판 표면의 온도분포를 그린 것이다. 열판의 외곽부를 제외한 작업영역의 온도는 과도 단계는 물론 정상상태에서도 비교적 균일하게 유지되고 있음을 알 수 있다.

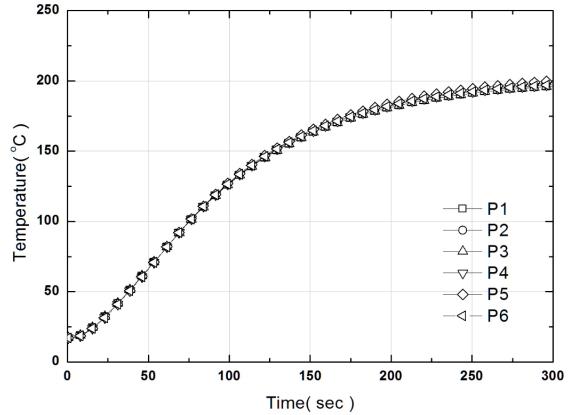


Fig. 4 Results of heating test showing time-dependent temperature evolution at the 6 points of the upper surface of the hot plate model I

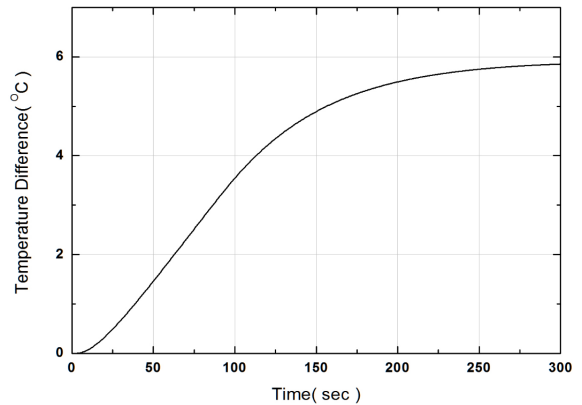


Fig. 5 Temporal variation of the maximum temperature difference occurred in the working area on the hot plate model I in heating phase

열판 표면의 온도응답을 정량적으로 평가하기 위하여 Fig. 1에 도시한 열판 표면의 6개의 대표지점에서 취득한 시간에 따른 온도 거동을 Fig. 4에 도시하였다. P5 지점은 열판의 중심이며 P2, P5는 작업영역 경계의 중간지점이고 P1과 P3는 모서리 지점이다. 여기서 카트리지 히터는 P1-P2-P3의 방향으로 배치된다. 각 지점에서의 온도는 초기 기동단계와 선형적 온도 상승단계 그리고 정상상태 접근까지 Fig. 2에서 나타난 것과 동일한 거동을 보인다. 열판의 여섯 지점의 온도가 목표 온도에 가까운 198.0°C 에 도달하는데 걸린 시간은 291초이다. 필요한 가열성능을 확보한 것으로 판단되나 발열용량이 더 큰 히터를 채용하면 추가적인 가열시간 단축도 가능하다.

열판의 온도 균일도를 정량적으로 평가하기 위하여 열판의 작업영역에서 발생하는 최대 온도차의 시간에 따른 거동을 Fig. 5에 도시하였다. 정상상태에 해당하는 300초에서의 온도

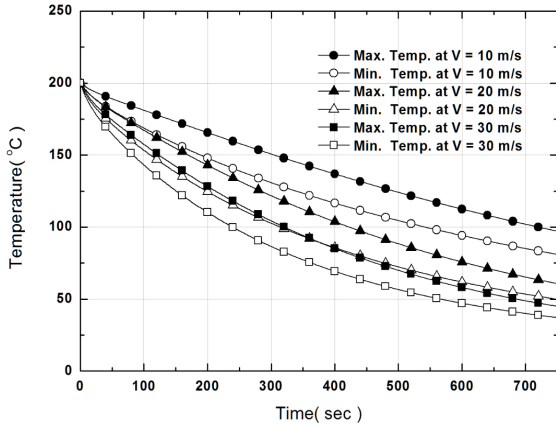


Fig. 6 Results of cooling test showing time-dependent variation of the maximum temperature and that of the minimum temperature in the working area of the hot plate model I. Cooling is achieved by the N₂ flow in the cooling holes. The average velocity of coolant flow is given in the frame

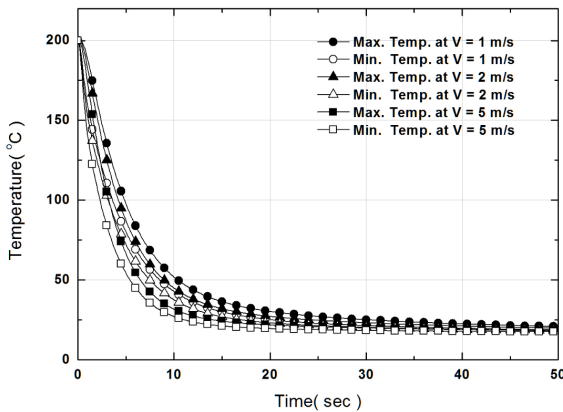


Fig. 7 Same as in Fig. 6 except for the fact that water is used as coolant instead of N₂

편차는 5.85℃이며 주된 온도 편차는 주로 히터의 길이방향으로 발생하는 것으로 나타난다. TH-NIL용 열판이 가압공정에서 2℃ 미만의 온도편차를 요구함을 고려하면 선행연구[9]에서 다룬 알루미늄 재질의 열판과 달리 내압성을 고려하여 선정된 스테인레스 재질의 열판에서는 온도 균일도 향상이 중요한 해결과제로 등장하였다.

이번에는 200℃로 가열된 열판을 냉각하는 냉각 모드에서의 열판의 열적 거동을 살펴보기로 한다. 냉각은 냉각공에 유입되는 17.2℃의 냉매에 의한 강제대류 방식으로 이루어지며 이때 제어기는 작동하지 않는다.

Fig. 6는 반도체 장비에서 냉각용으로 많이 사용되는 질소 가스를 냉매로 사용한 경우, 열판의 작업 영역에서 발생하는

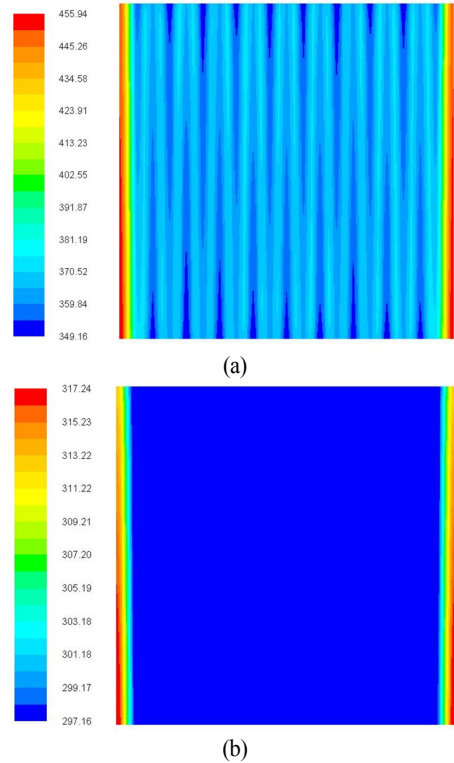


Fig. 8 Temperature distribution on the upper surface of the hot plate model I at (a) t = 2 s; and (b) t = 50 s after switching on water cooling. The flow velocity is 1 m/s and the temperature is in unit of K

최고 온도와 최소 온도의 시간에 따른 변화를 보여준다. 냉매의 유입속도가 커지면 대류열전달에 의한 냉각용량이 커져 온도하강이 빨라지지만 냉매의 평균유속이 30 m/s인 경우에도 열판이 냉각되는데 10분 이상의 시간이 소요되어 냉각용량이 다소 부족함을 알 수 있다. 더 큰 문제는 모든 경우에 열판의 최고 온도와 최저 온도의 차이가 매우 크게 유지된다는 것이다. 열판 표면에 이처럼 큰 온도편차가 생기면 TH-NIL의 디몰딩 공정에서 불균일 열수축에 의한 나노 패턴의 변형이 생기거나 수지와 스탬프의 안정적 분리가 이루어지지 않을 수 있다[3]. Fig. 6는 질소를 이용한 공냉방식의 열판은 TH-NIL 공정용으로 채용하기 어려움을 지적한다.

Fig. 7은 냉매로 물을 사용한 경우의 열판 작업영역의 최고 온도와 최저 온도의 시간에 따른 변화를 보여주고 있다. 열판의 온도는 매우 급격하게 떨어져 30초 이내에 열판이 상온으로 냉각되는데 열질량이 큰 액체를 냉매로 사용한 효과로 볼 수 있다.

열판에서 발생하는 온도 편차를 시각적으로 확인하기 위하여 냉각과정 중의 열판의 표면 온도분포를 Fig. 8에 도시하였

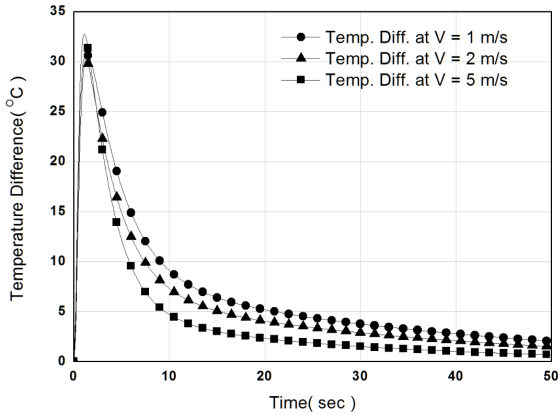


Fig. 9 Temporal variation of the maximum temperature difference estimated from data in Fig. 8

다. 유입속도 1 m/s로 냉각이 이루어지는 경우 2초 후의 열판 표면에 상당히 큰 온도차가 발생하지만 시간이 지나 열판이 충분히 냉각된 50초 후에는 열판의 온도가 매우 균일해졌음을 알 수 있다.

열판 표면의 온도 편차를 정량적으로 확인하기 위하여 수냉을 하는 경우 열판 작업 영역의 최고온도와 최저온도의 차가 시간에 따라 어떻게 변화하는지 Fig. 9에 정리하였다. 열판이 급속히 냉각되는 초기 과도상태에서 30°C 이상의 큰 온도 편차가 발생하고 정상상태에 접근하면서 온도편차가 줄어들고 있다. 초정밀 TH-NIL 장비의 특성을 고려할 때 과도거동에 발생하는 큰 온도 편차가 문제를 발생시킬 소지가 있다. 결론적으로 수냉 방식의 열판 냉각은 충분한 냉각성능을 보장하지만 과도 상태에 큰 온도 편차를 만들어 나노패턴 품질에 나쁜 영향을 초래할 가능성을 내포하고 있다.

3.3 히트파이프 장착한 모형 II의 온도 거동

앞 절에서 논의한 바와 같이 가열 및 냉각모드에서 나타난 온도 균일도 문제를 해결하기 위한 방안으로 냉각홀에 히트파이프를 삽입한 열판 모형 II의 열적 특성을 평가하였다.

Fig. 10은 가열모드에서 히트 파이프를 장착한 열판의 온도 거동을 보여주고 있다. 열판의 6개 대표 지점의 온도 거동은 모형 I의 가열시험 결과와 거의 동일하며 온도편차는 줄어든 것으로 보인다. 온도편차를 정확하게 평가하기 위하여 열판의 작업영역 내의 최대온도와 최저온도의 차이가 시간에 따라 어떻게 변하는지 Fig. 11에 도시하였다. 히트 파이프를 장착한 모형에서는 가열모드 전체적으로 온도차가 2°C 이하로 유지되며 정상상태에서는 1°C 이하로 유지됨을 알 수 있다. 모형 I의 경우 온도편차는 주로 카트리지 히터의 길이 방향으로 발생하는데 유효열전도도가 매우 큰 히트 파이프가

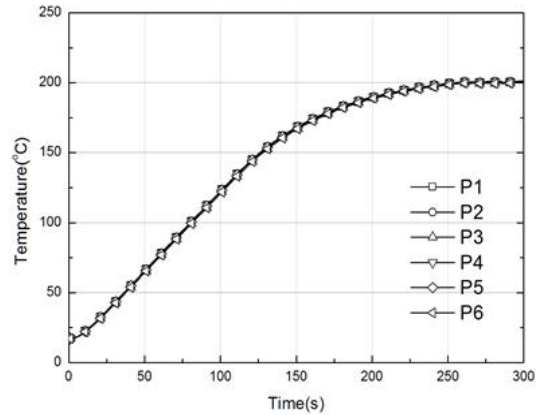


Fig. 10 Same as in Fig. 4 except for the heating test with the hot plate model II

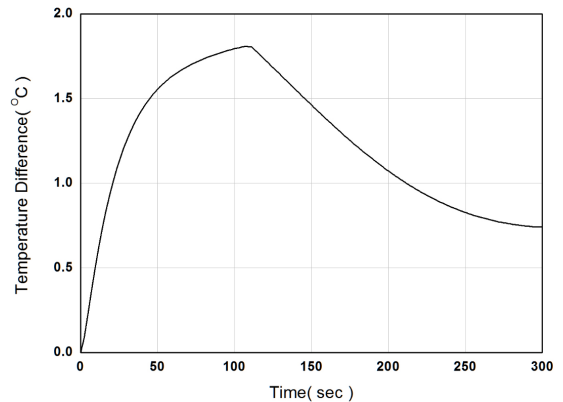


Fig. 11 Same as in Fig. 5 except for the heating test with the hot plate model II

이 방향의 온도편차를 줄여주는 긍정적 역할을 수행한 것으로 보인다.

이번에는 모형 II를 이용한 냉각시험을 수행하였다. 전술한 바와 같이 냉각은 열판 외곽으로 돌출된 히트 파이프의 중단부 30 mm 부분을 냉각하는 간접적인 방식으로 이루어진다. Fig. 12는 열판 작업영역 내에서의 최고 온도와 최저 온도의 시간에 따른 거동을 보여준다. 히트 파이프에 의한 간접 냉각을 채택하는 경우 열판이 상온까지 냉각되는 데에는 10분 이상의 시간이 걸림을 알 수 있다. 실제 공정에서 냉각이 유리전이 온도 이하인 90°C 정도로 냉각하는 것을 상정하더라도 6분 정도의 시간이 소요되어 냉각용량 면에서는 수냉방식보다 불리하다.

모형 I에서 문제가 되었던 온도 균일도를 평가하기 위하여 히트 파이프를 장착한 모형 II의 작업영역 내의 최대 온도편

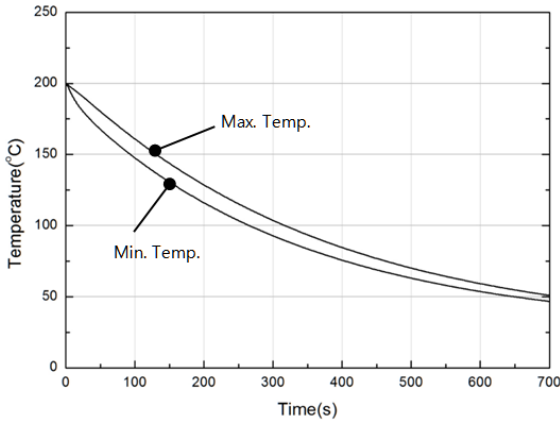


Fig. 12 Same as in Fig. 6 except for the cooling test with the hot plate model II

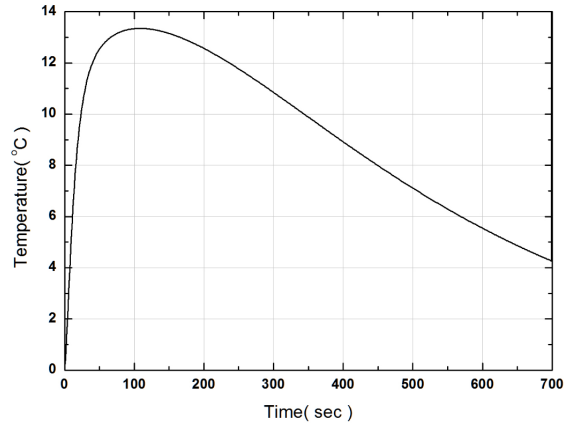


Fig. 13 Temporal variation of the maximum temperature difference estimated from the data in Fig. 12

차를 Fig. 13에 도시하였다. 냉각공에 물을 흘려 직접 냉각하는 모형 I의 경우 냉각 과도기중에서 발생한 최대 온도편차가 32.5°C였던 것과 비교하여, 히트 파이프를 사용하는 경우 냉각모드에서 발생하는 최대 온도 편차가 13.2°C로 낮아져 온도 균일도가 많이 향상 되었다.

이상의 결과는 열확산계수가 작은 스테인레스강을 재료로 만든 열판에서 발생하는 온도 편차를 줄이기 위해 냉각공에 히트 파이프를 장착하는 방안의 가능성을 보여준 것이다. 아직 냉각 용량과 온도 균일도 면에서 추가적인 개선이 필요하며 최적 히트 파이프의 선정 등을 고려한 후속 연구가 필요하다.

4. 결 론

냉매가 흐르는 냉각공과 일자형 카트리지 히터가 상하로 배치된 작업면적 240 mm x 240 mm의 대면적 열판의 열거동을 전산해석적 방법으로 조사하였다. 열확산계수가 작지만 표면경도가 크고 내압성이 강한 스테인레스강 재질로 만든 열판이 TH-NIL 장비용 열판의 요구조건에 부합하는 열적 특성을 가지는지 전산해석적 방법으로 평가하였다. PID 제어가 이루어질 경우, 300 W의 발열성능을 가지는 카트리지 히터 20개를 병렬로 배치하면 5분 내에 열판을 목표온도 200 °C로 안정적으로 가열할 수 있으나 정상상태의 열판내의 온도편차가 다소 크게 나타났다. 냉각시험에서는 냉각공을 이용한 공냉과 수냉 모두 과도상태에서 온도편차가 크게 나타나 공정요건을 충족시키지 못하였다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 냉각공에 히트 파이프를 장착하고 냉각모드에서 히트 파이프의 일부를 냉각하는 방식

의 새로운 열판 모형을 제안하고 그 열특성을 평가하였다. 히트 파이프를 장착한 열판의 경우 가열모드에서 온도편차가 허용범위 이내로 줄었으며 냉각모드에서도 냉각공을 이용한 직접 냉각 방식의 열판에 비해 온도편차가 크게 감소하였다. 이 연구를 통하여 온도 균일도 면에서 히트 파이프를 장착한 열판의 유용성과 함께 히트 파이프 최적화를 통한 냉각 성능 및 온도 균일도의 추가적인 향상의 필요성을 확인하였다.

후 기

이 연구는 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의해 이루어졌다. 전산해석 모델 검증용 실험 데이터를 제공한 양진호에게 감사한다.

Reference

- [1] 2003, Gary, S.M. and Simon, M.S., *Fundamentals of Semiconductor Fabrication*, John Wiley & Sons, New York.
- [2] 1996, Chou, S.Y., Krauss, P.R. and Renstrom, P.J., "Nanoimprint Lithography," *J. Vac. Sci. Technol.*, Vol.14, No.6, pp.4129-4133.
- [3] 2000, Becker, H. and Heim, U., "Hot Embossing as a Method for the Fabrication of Polymer High Aspect Ratio Structures," *Sensors and Actuators A, Physical*, Vol.84, pp.130-135.
- [4] 1998, Pang, S.W., Tamamura, T., Nakao, M., Ozawa, A. and Masuda, H., "Direct Nano-Printing on Al Substrate Using a SiC Mold," *J. Vac. Sci. Technol.*, Vol.16,

- pp.1145-1149.
- [5] 2001, Hirai, Y., Fujiwara, M., Okuno, T., Tanaka, Y., Endo, M., Irie, S., Nakagawa, K. and Sasago, M., "Study of the Resist Deformation in Nanoimprint Lithography," *J. Vac. Sci. Technol.*, Vol.19, pp.2811-2815.
- [6] 2002, Beck, M., Graczyk, M., Maximov, I., Sarwe, E.L., Ling, T.G.I., Keil, M. and Motelius, L., "Improving Stamps for 10 nm Level Wafer Scale Nanoimprint Lithography," *Microelectron. Eng.*, Vol.61-2, pp.441-448.
- [7] 2004, Khang, D.Y., Kang, H., Kim, T. and Lee, H.H., "Low-Pressure Nanoimprint Lithography," *Nano Lett.*, Vol.4, pp.633-637.
- [8] 2006, Kwak, H.S., Park, G.J., Son, B.C., Lee, J.J. and Park, H.C., "Design of a Hot plate with Rapid Cooling Capability for Thermal Nanoimprint Lithography," *Proc. SICE-ICASE Int. Joint Conf.*, Busan, pp.4897-4901.
- [9] 2007, Park, G.J., Kwak, H.S., Shin, D.W. and Lee, J.J. "Numerical Simulation of Thermal Control of a Hot Plate for Thermal Nanoimprint Lithography Machines," *Proc. 3rd Int. Conf. on Heating Cooling Technol.*, pp.321-327.
- [10] 2008, Yang, J.H., "An Experimental Study on the Thermal Performance of a Hot Plate for Thermal Nanoimprint Lithography," *Master Thesis*, Kumoh National Institute of Technology.
- [11] 1995, Faghri, A., *Heatpipe Science and Technology*, Taylor & Francis.
- [12] 2012, Wallin, P., "Heat Pipe, selection of working fluid," *Heat and Mass Transfer Project Report*, MVK160, pp.1-7.
- [13] 2012, Y.A. Cengel, *Heat and Mass transfer*, McGraw-Hill, Chapter 9, pp.521-527.