

고온 나노임프린트 장비용 핫플레이트의 열제어에 대한 수치모사

박규진,¹곽호상,²신동원,²이재종³NUMERICAL SIMULATION OF THERMAL CONTROL OF A HOT PLATE
FOR THERMAL NANOIMPRINT LITHOGRAPHY MACHINESG.J. Park,¹ H.S. Kwak,² D.W. Shin,² and J.J. Lee³

Since the introduction of Nanoimprint in the mid-1990s, Nanoimprint lithography, a low-cost, non-conventional method, has been the dominant lithography technology that guarantees high-throughput patterning of nanostructures. Based on the mechanical embossing mechanism, Nanoimprint lithography creates the nanopatterns on the polymer material cast on the substrate. In essence, the process needs nanofabrication equipment for printing with the adequate control of temperature, pressure and control of parallels of the stamp and substrate. This article introduce the possibility and reality of the thermal control on the hot plate using a CFD code. Numerical computation has been conducted for assessing the feasibility of a hot plate(120 X120 mm²). PID control is adopted to ensure high temperature uniformity in several zones. Parallel experiments have also been performed for verifying thermal performance. Not only show the results the optimum number of thermocouples related to controllers but also suggest that the thermal simulation using a CFD code would be an alternative method to design and develop the thermal control equipment in the financial aspect.

Key Words : 열판(Hot plate), 고온 엠보싱(Hot embosing), 극초 미세 식각(Nanoimprint lithography)

1. 서 론

최근 중앙처리장치(CPU)에 집적하는 회로의 미세화 기술의 비약적인 진전은 컴퓨터를 비롯한 전자기기의 성능을 한층 더 높이고 있으며, 전자기기의 시스템 크기도 급속하게 다운사이징(down sizing)화 시키고 있다. 반도체, 디스플레이 소자, 바이오 소자, 광소자의 고기능화 고집적화를 실현하기 위한 기술은 근본적으로 반도체를 만드는 공정 기술을 기초로 하며 그 중에서도 집적 회로 제작을 위한 여러 식각 기술을 핵심으로 한다[1]. 기존의 식각 기술인 광경화 방식의 식각(Photo lithography)은 세장비가 큰 형상이 불가능하며, 가공재료(resin)의 물리적 특성과 광원의 종류에 따라 가공 할 수 있는 모양에 많은 제한이 있다. 최근의 조사에 의하면 이와 같

은 공정에 드는 비용은 반도체 생산 전체 비용의 35%에 육박하고 있는 실정이다. 이와 같은 문제를 극복하면서 반도체 생산 비용을 줄이기 위한 차세대 식각 기술이 극초미세식각(Nanoimprint lithography, NIL)이다. NIL의 매커니즘은 기계적인 엠보싱 공정을 기초로 하여 상부 작업 면에는 나노크기의 구조물이 하부 작업 면에는 폴리머 재료의 재료(resin)가 놓이고 유리전이온도(T_g) 이상으로 가열하여 연화시키고 아랫면과 윗면을 동시에 가압하여 나노크기의 구조물의 형상을 폴리머 재료에 찍은 후, 기판을 냉각하여 극초미세 형상을 기판에 전사하는 기술이다. 단일 공정으로 평면 폴리머 기판에 다양하고 복잡한 구조의 극초미세형상을 제작하는 것이 가능하고 높은 세장비를 구현할 수 있는 것이 장점이다[4]. NIL은 Chou[2] 등이 소개한 이래로 최근 10년 동안 세계적으로 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 대부분의 논문[3-7]은 미세식각을 위한 장비에 관한 연구보다는 엠보싱 공정 동안 일어나는 현상, 사용되는 재료의 종류에 따라 물성치의 변화, 도장(stamp)의 역할을 하는 나노크기의 구조물(mould)의 재료 및 제조, 가압 후 구조물과 형상을 불리하게 용이하게 하기 위한

1 학생회원, 금오공과대학교 대학원 기계공학과

2 정회원, 금오공과대학교 기계공학과

3 한국기계연구원

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

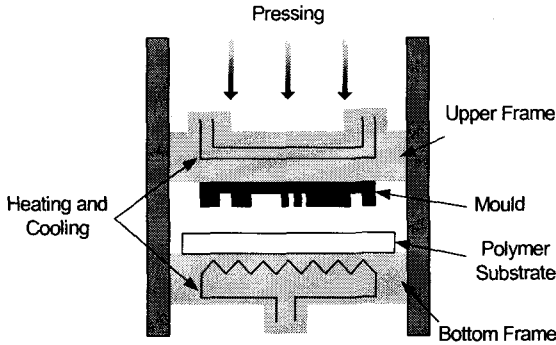


Fig. 1 Schematic illustration of hot embossing equipment.

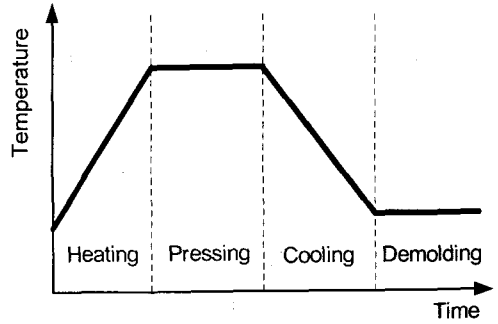


Fig. 2 Temperature temporal sequence of hot plate during NIL-process.

계면활성제의 역할 혹은 제작한 나노구조물에 대한 응용에 대한 것이었다. 많은 기술력이 축적된 광경화 식각 장비에 비해서 NIL 장비에 대한 연구는 아직 시작 단계이며 유럽이나 미국 등 차세대 식각을 위한 기계 장비의 한 대당 가격이 5억(원)을 초과할 것으로 볼 때, 국내적으로 미세식각을 위한 장비에 관한 연구는 시급한 실정이다.

이 연구는 극초미세형상을 제작할 수 있는 양산가능한 수준의 대면적 고온 엠보싱 장비를 개발하기 위한 일환으로 수행되었다. 연구의 대상은 기관과 금형의 온도를 조절하는 열판이다. 열판의 중요성은 다음과 같다. 열판의 온도 변화는 고온 엠보싱 공정 동안에 폴리머의 점성(viscosity)의 변화에 영향을 주며 나아가 사용된 폴리머의 분자량의 영향으로 나노구조물(mould)과 분리 단계에서는 얻고자 하는 나노구조물을 얻을 수 없는 경우가 발생한다[5]. 일반적으로 열판은 작업시간에서 가장 큰 비중을 차지하므로 나노구조물의 생산성을 좌우하는 핵심부품이다.

열판을 이용한 연구는 절연체의 열전도 계수를 정확히 측정할 목적으로 열판과 냉각용 판을 동시에 사용한 연구[9]로부터 급속열공정(Rapid Thermal Processing, RTP)과 플립칩 접합의 적용에 이르기까지 다양한 연구[10-16]가 이루어졌다. 특히 열판에 관한 연구는 웨이퍼 표면에서의 열응력(thermal stress)을 최소화하기 위해 웨이퍼의 온도 균일도의 중요성[10]이 밝혀짐으로서 더욱 활발히 이루어졌다. 특히 Lee[12] 등은 다중 입력과 다중 출력 시스템에 대해서 수치적으로 잘 맞는 N4SID(Numerical algorithms for subspace state space system identification)에 기초를 둔 비정상 선형공간모델과 제어알고리즘인 ILC(iterative learning Control)를 동시에 이용하여 ILC 제어의 타당함을 보여주었다. 실제적인 열판의 온도제어는 제어부에서 측정지점의 온도를 측정하고 목표치 온도와 비교한 후에 열판에 공급되는 전류나 전압의 양을 조절함으로써 이루어진다. 따라서 수치모사를 이용하여 해석하는 경우 열원의 경계조건(온도, 열유속)을 일정하게 하여서는 비정상 물리적

거동을 정확히 모사하기가 불가능하다.

이 연구의 궁극적 목적은 PID 제어가 되고 있는 열판의 열응답 특성을 CFD 코드를 이용하여 해석하여 경계조건이 바뀌는 비정상 물리적 거동을 모사하는데 있다. 이를 위해 먼저 전체모델 중 한 구역에 관하여 PID 제어가 이루어질 때의 열적 거동을 확인하고 100mm 웨이퍼용 열판을 통해 얻은 실험결과를 비교하여 타당한 PID 제어의 결과를 전체모델의 해석에 적용하였다. 다음으로 전체모델에 대하여 다중제어가 이루어 질 때의 열판의 열적거동을 모사하였다. 끝으로 측정지점의 최소 개수를 제시하여, 실제의 제어기를 설계 및 선택 시, CFD 코드를 이용한 예비 모사도 제한된 설계비용을 줄이는 하나의 대안임을 소개하고자 한다.

2. 실험 장비

2.1 NIL 장비

Fig. 1은 일반적인 NIL 장비의 구조를, Fig. 2는 NIL 공정 동안에 나타나는 열판의 온도 변화를 개략적으로 나타낸다. 상부 열판에는 나노구조물형틀(mould)이 하부열판에는 가공재료인 polymer 계열의 물질(substrate)이 올라간 후, 유리전이온도(glass transition temperature, T_g) 이상의 온도까지 가열한다. 일반적으로 T_g 보다 50-90oC 높은 온도에서 두 개의 열판은 유압장치에 의해 압착이 되고 동시에 냉각 된 후, 분리되면 나노구조물형틀에 있는 나노구조는 폴리머 재료에 전사된다. 이와 같은 공정 동안에 열판에 요구 되는 조건은 사용되는 목적에 따라 다르지만 도입부에서 소개한 것과 같이 급속 가열과 온도 균일도이다. 주로 급속 가열을 용이하게 하기 위하여 할로겐램프를 이용하며, 온도 균일도를 유지하기 위해서는 할로겐 램프의 최적화된 배치가 중요하다. 이와 같은 할로겐 램프를 이용한 NIL 장비의 단점으로는 프레스 공정을 수반하면서 가열과 냉각과정을 다 갖추기 위해서는 시스템의 크기

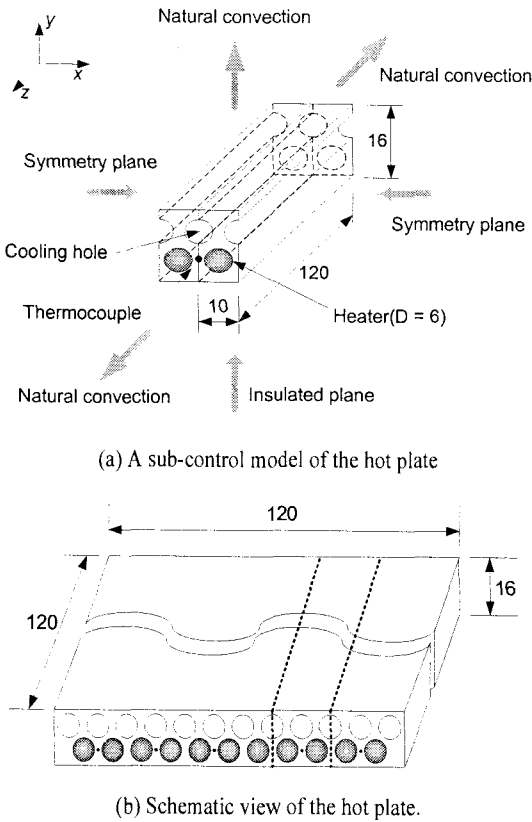


Fig. 3 Numerical model and boundary condition applied to commercial code(FLUENT 6.2).

가 커지며, 이로 인해 전체적인 장비의 개발 비용이 커진다는 것이다. 본 연구진은 카트리지 히터를 이용하여 단 기간 내에 개발할 수 있는 확장성과 실용성이 우수한 열판에 관하여 모델을 제시하고 열적 특성을 분석한 바 있다[16]. 이 논문에서도 열판의 열원으로 카트리지 히터를 이용하여 연구가 이루어졌다.

2.2 전산 해석 모델

Fig. 3은 계산에 적용된 수치적 모델과 경계조건을 나타낸다. 열판의 전체 크기는 가로 120mm, 세로 120mm, 두께가 16mm인 Al 합금을 이용하였다. 히터의 지름은 6mm이며 150W인 스테인리스 재질의 카트리지히터를 하단부에 배치하였다. 상단부의 흡은 냉각을 위하여 냉각 질소가 흐르는 유로이다. NIL 장비는 상부와 하부의 열판이 동시에 가열되고 챔버 속에서 압착공정이 이루어짐으로 상부와 하부의 열판지대로 열손실을 제외하고는 다른 열손실은 거의 없다. 실험실에서 이루어지는 열판성능실험값과 비교를 위하여 상부와 네 개의 측면에서는 자연대류에 의한 열손실을 고려하였다. 우선

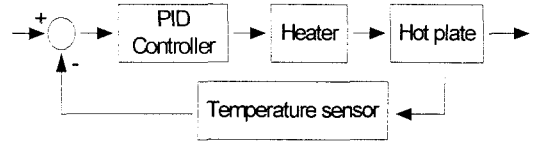


Fig. 4 PID control loop

Fig. 3(a)에서 보인 모델을 이용하여 작은 서브 존에 대한 PID 제어를 이용한 열판의 열적 성능을 검사하였다. 열전대의 의한 제어 위치는 실제의 실험과 같은 두 개의 카트리지 히터 사이이며 히터의 길이방향으로 60mm인 곳에 위치시켰다. 전체 영역과는 다르게 히터의 삽입 방향과 수직 방향으로 symmetry 조건을 적용하였다. 다음으로 Fig. 3(b)의 모델을 이용하여 전체 영역에 걸쳐서 다중 PID 제어가 이루어 질 경우에 열판의 열적 성능을 검사하였다. 열판 전체 영역에 대한 해석의 필요성은 다음과 같다. 첫째, 네 개의 측면에서 자연 대류에 의한 열손실이 발생하고 둘째, 각각의 서브 존에 대해서 PID 제어가 이루어진다고 해도 서브 존 사이에는 열이 전도에 의해 서로 다른 영역으로 전달되기 때문이다. Table 1은 열판 전체 영역의 제어를 위해 필요로 하는 최소한의 열전대 개수를 알기 위해 고려한 3가지 유형을 나타낸다. 여기서 존의 개수는 사용한 제어기의 개수와 같다. 유형 I은 실제로 실험에서 이용된 모델로서 5개의 존으로 나누어 제어가 이루어지며 각각의 존에서 조절하는 히터 개수가 고르도록 하였다. 유형 II와 유형 III은 열전대 2개를 이용한 경우로 왼쪽 벽면에 하나를 배치하고 다음의 위치가 3.2와 4.2cm 떨어진 모델이다. 수치적으로 열판의 비정상 열전달 거동을 분석하기 위하여 상용 전산유체역학 코드인 FLUENT(6.2)를 사용하였다.

2.3 PID 제어 모델

Fig. 4는 수치 및 실험에 적용된 제어모델의 PID 제어 루프를 나타낸다. 제어 루프는 크게 세 부분으로 PID 제어기와 제어 대상인 카트리지 히터와 제어설비(plant)에 해당하는 열판(hot plate)으로 구성된다. 수치해석을 하는 경우, 제어기는 히터 하나에 공급되는 단위 부피당 전력을 측정지점으로부터 일찍진 온도와 비교하여 공급하는 방식으로 제어가 이루어지도록 설계했다. 실험의 경우 PID 열판의 작업영역 온도가 미

Table 1 Three Cases according to different control positions

Class / Case	Number of sub-zones	Distribution of heaters	Min. distance of sensing positions(cm)
Type I	5	2-2-3-2-2	1
Type II	2	1-9-1	3.2
Type III	2	1-9-1	4.2

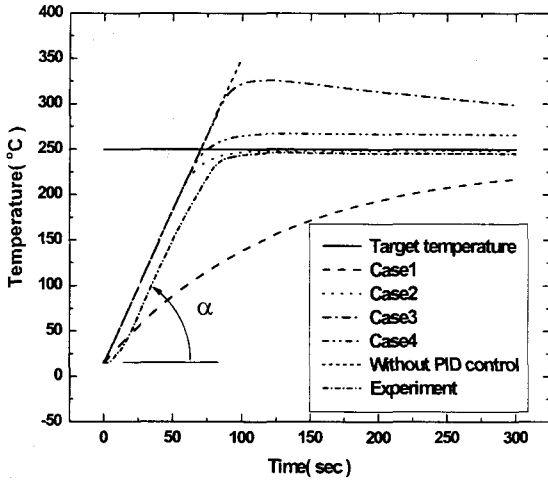


Fig. 5 Temperature variation with PID control and no PID control to a sub-zone

리 설정된 작업범위에 도달하고 유지될 수 있도록 비례성이 우수한 피드백 제어기(TZN4S)와 직류전원 릴레이(WYG 1C 20Z4)가 열전대로부터 읽혀진 측정온도와 피드백 제어가 이루어져 카트리지 히터로 공급되는 전류를 실시간으로 제어하게 된다. 히터 사이에는 응답속도가 빠르고 상온에서 500°C 범위까지 선형응답성을 가지는 0.25mm 지름의 K형 열전대를 사용하였다. 열전대는 항온조를 이용하여 보정하였으며 측정 오차는 1.2°C 이다. 열전대는 초당 250 샘플의 취득과 120채널 동시 측정이 가능한 22비트의 분해능을 가진 계측장비(Agilent 34970A)에 연결된다. 열판 밑면으로 열손실을 줄이기 위하여 열판의 네 모서리에 지름 3mm, 길이 11mm인 지지대를 이용하여, 두께 15 mm 세라믹 단열재 위에 설치하였다.

3. 열판의 열응답 특성

3.1 서브 존에 관한 열응답 특성

Fig. 5는 Fig. 3(a)에 언급한 하나의 서브 존에 대하여 두 가지의 경우로 분류하여 PID 제어가 있는 경우와 없는 경우의 열판 윗면 중앙의 온도 변화를 나타낸다. PID 제어가 이루어지는 경우의 예로 4가지를 나타내었으며, 실선은 목표치 온도인 250°C 를 나타낸다. α 는 온도 곡선의 시간에 따른 온도 구배를 나타낸다. 가는 일점쇄선은 실험에 의하여 얻어진 온도곡선으로 히터에 전원이 부가되면 히터자체의 온도가 상승하는데 필요한 초기 기동시간이 필요하므로 약간의 시간 지연 후 온도의 선형적인 상승이 이루어지고 있다. 가는 파선은 제어가 이루어지지 않는 경우를 나타낸다. 제어가 이루어지는 경우와 비교를 하기 위해서 나타내었으며, 히터 한 개당 150W가 공급됨으로 제어가 이루어지지 않으면 열판의 온도

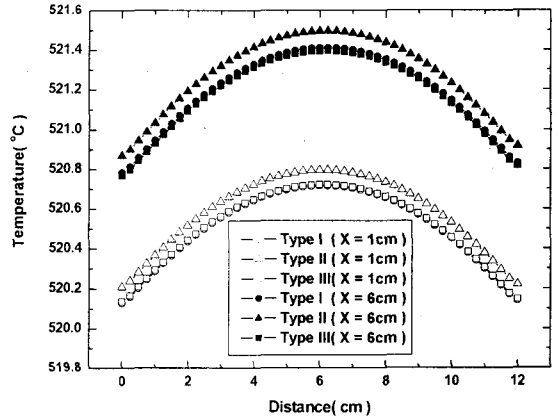


Fig. 6 Temperature variation of upper plate for each type at X=1cm and X=6cm after 200s

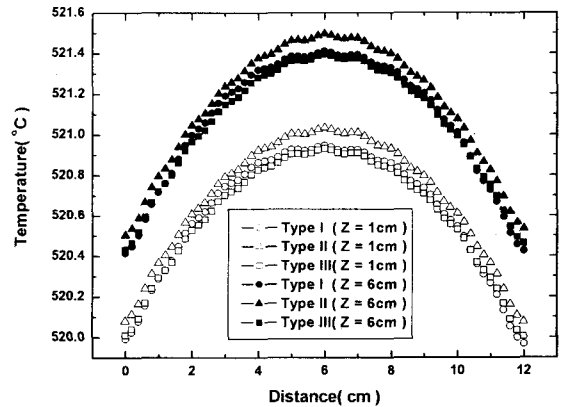


Fig. 7 Temperature variation of upper plate for each type at Z=1cm and Z=6cm after 200s

상승률은 일정하게 계속 올라간다. 다르게 표현하면 히터에 공급될 수 있는 최대의 전력이 공급되는 상태가 되므로 α 가 최대가 된다. 파선(Case1)은 PID 제어기에서 P_{gain} 의 값이 매우 작을 때를 나타낸다. 히터의 한 개당 공급되는 전력이 허용한 전력에 미치지 못하므로 열판 중앙의 측정온도 또한 제한된 시간 안에는 목표치 온도에 도달하지 못함을 알 수 있다. 이것은 α 가 PID 제어가 이루어지지 않는 Case1의 경우와 비교해 작은 것으로 확인 할 수 있다. 점선(Case2)은 파선(Case1)보다 크고, 일점쇄선(Case3)보다 작은 P_{gain} 을 이용한 경우를 나타낸다. D_{gain} 의 영향으로 overshoot되는 현상은 나타나지 않으며, I_{gain} 의 영향으로 시간이 지남에 따라 잔류편차가 줄어들고 있음을 보여준다. 일점쇄선은 매우 큰 P_{gain} 을 이용한 경우를 나타낸다. 다른 경우와 비교해서 D와 I의 제어가 이루어짐에도 불구하고 overshoot가 일어난 후, 목표치의 값보다 100°C도 정도 초과된 열판은 목표온도까지 도달하기 위해

서 다른 냉각 방법을 적용하지 않을 때, 자연대류나 열판 내부의 전도에 의한 열수송이 열판의 온도를 떨어지게 함으로 많은 시간이 요구됨을 알 수 있다. 이점쇄선(Case4)은 Case2와 동일한 P_{gain} 을 이용하고 작은 D_{gain} 을 적용한 경우이다. Case2와 비교하여 온도곡선이 overshoot된 후에 목표온도에 더디게 접근하고 있음을 알 수 있다. Case1을 제외하고는 α 가 일정 한데, 수치적 PID 제어 설계 시 최대의 공급전력량을 150W를 넘지 못하도록 설정해 놓은 결과이다. 위의 주어진 각각의 경우에 대하여 실험에서 얻어진 온도곡선(가는 일점쇄선)과 비교했을 때, 목표치 온도에 빨리 수렴하는 Case2의 게인 값을 전체 모델 해석에 적용하였다.

3.2 열판 전체에 관한 열응답 특성

Fig. 6은 유형 I, II, III에 대하여 열판 전체를 해석 한 후 윗면에서 X의 값이 1cm와 6cm인 곳에서 Z축을 따른 온도 분포를 나타내고, Fig. 7은 Z의 값이 1cm와 6cm인 곳에서의 X축을 따른 온도 분포를 나타낸다. 원은 유형 I을 삼각형은 유형 II를 사각형은 유형 III을 각각 나타내며, 색깔이 없는 부분은 X축이나 Z축에서 1cm인 곳을 색깔이 있는 부분은 6cm인 곳을 각각 나타낸다. 유형 I은 실험에서 이용한 모델로 5개의 존으로 나누어 제어가 되고 있다. 두 개의 히터를 하나의 열전대로 받은 온도로 제어가 이루어지며, 전체 5개의 존이 동시에 제어 될 때, 열판 위에서 얻어진 온도가 균등하게 분포 할 것이라는 예상과는 달리 포물선 형상을 띤다. 이것은 하나의 존과 인접한 존 사이에는 전도를 통하여 열이 전달되고, 네 개의 측면을 통해서는 자연 대류에 의한 열손실이 생김으로 열판의 중앙으로 히터의 열이 증첩하는 효과가 나타나기 때문이다. 이것이 전체 영역에 관한 해석의 필요성을 요구한다. Fig. 7은 Fig. 6에 비하여 온도 곡선에서 기복이 주기적으로 나타난다. 이것은 카트리지 히터의 중심부로부터 열판 윗면까지 거리가 대칭적으로 같지 않기 때문에 나타나는 현상이다. 유형 II와 유형 III은 네 개의 측면으로부터 열손실을 보완하기 위하여 측면에 가장 가까운 히터 2개는 왼쪽 벽면 가까이에 위치한 열전대로, 나머지 9개 히터는 중앙의 한 지점에 위치한 열전대로 제어한 모델이다. 왼쪽 벽면에 있는 열전대 위치는 $X=3\text{mm}$, $Y=3\text{mm}$ 이며, 두 번째 열전대 위치는 유형 II의 경우는 $X=3.5\text{cm}$, 유형 III의 경우는 $X=4.5\text{cm}$ 이다. 두 번째 열전대로 들어온 값으로 히터 9개를 제어함으로 두 번째의 열전대의 측정 위치는 상당히 중요하다. 유형 I에서 알 수 있듯이 중간에는 온도의 증첩이 일어남으로 중간 지점에 두 번째 열전대를 두는 것은 적합하지 않다. 또한 주어진 모델에서 첫 번째 히터는 왼쪽 벽면에서 자연 대류에 의한 열손실을 보상하기 위하여 히터로의 전력공급이 클 것이며 인접한 두 번째 히터는 이와 같은 영향력을 받을 것이므로 두

번째 히터와 세 번째 히터 사이의 위치도 적합하지 않을 것이다. 따라서 이와 같은 범위를 피하면 두 번째 열전대의 위치는 위의 두 경우가 가장 적합하다. 유형 II와 유형 III에서 얻어진 온도 곡선도 유형 I과 같은 경향성을 보인다. 유형 I, II 모두 기존 모델에 비하여 최고 온도가 0.3°C 정도 증가했으며, 온도 편차는 유형 I은 1.44°C , 유형 II는 1.42°C , 유형 III은 1.39°C 를 보였다. 따라서 열전대의 개수를 2개만 이용하여도 기존의 열판과 동일한 효과를 낼 수 있다는 결론이다.

4. 결 론

경계 조건이 바뀌는 문제의 하나로 PID 제어를 이용한 열판의 열응답 특성을 알기 위해서 수치해석과 실험을 병행하였다. 서브 존에 대하여 PID의 게인 값을 바꿀 때 나온 결과와 실험에서 얻은 결과를 비교하여 수치적으로 PID 제어가 이루어짐을 보였다. 전체 열판에 대하여 제어가 다중으로 이루어질 때, 최소한의 측정 개수를 보여 실제의 NIL 장비를 만들 때도 원가 절감을 차원에서 상용코드를 이용한 수치적 방법이 하나의 대안임을 제시하였다.

참고문헌

- [1] Gary, S.M. and Simon M.S., 2003, *Fundamentals of Semiconductor Fabrication*, John Wiley & Sons, New York.
- [2] Chou S.Y., Krauss P.R. and Renstrom P.J., 1996, "Nanoimprint lithography," *J. Vac. Sci. Technol.*, Vol.14(6), pp.4129-4133.
- [3] Pang S.W., Tamamura T., Nakao M., Ozawa A and Masuda H., 1998, "Direct nano-printing on Al substrate using a SiC mold," *J. Vac. Sci. Technol.*, Vol.16, pp.1145-1149.
- [4] Becker H., and Heim U., 2000, "Hot Embossing as a Method for the Fabrication of polymer high aspect ratio structures," *Sensors and Actuators A, Physical*, Vol.84, pp.130-135.
- [5] Hirai Y., Fujiwara M., Okuno T., Tanaka Y., Endo M., Irie S., Nakagawa K. and Sasago M., 2001, "Study of the resist deformation in nanoimprint lithography," *J. Vac. Sci. Technol.*, Vol.19, pp2811-2815.
- [6] Beck M., Graczyk M., Maximov I., Sarwe E.L., Ling T.G.I., Keil M., and Motelius L., 2002, "Improving stamps for 10nm level wafer scale nanoimprint lithography," *Microelectron. Eng.*, Vol.61-2. pp.441-448.
- [7] Khang D.Y., Kang H., Kim T. and Lee H.H., 2004, "Low-Pressure Nanoimprint Lithography," *Nano lett.*, Vol.4,

pp.633-637.

- [8] Kimerling T.E., Liu W., Kim B.H., 2006, "Rapid hot embossing of polymer microfeatures," *Microsyst. Technol.*, Vol.12 pp.730-735.
- [9] Siu M.C.I. and Bulik C., 1981, "National Bureau of Standards line-heat-source guarded-hot-plate apparatus," *Review of Scientific Instruments*, Vol.52 No.11, pp.1709-1716.
- [10] Lord H.A., 1988, "Thermal and stress analysis of semiconductor wafers in a rapid thermal processing," *IEEE Trans. Semiconduct. Manufact.*, Vol.1, pp.105-114.
- [11] Overschee P.V. and Moor B.D., 1993, "N4SID : Subspace Algorithms for the Identification of Combined Deterministic-Stochastic Systems," *Automatica*, Vol.30, No.1, pp.75-93.
- [12] Lee K.S., Lee J.h., Chin I.S. and Choi J.h., 2001, "Control of Wafer Temperature Uniformity in Rapid Thermal Processing using an Optimal Iterative Learning Control Technique," *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol.40, pp.1661-1672.
- [13] Park Y.H., 2003, "New Design Approach for the Uniform Temperature of Precision Hot plate," *Transaction of KSME(B)*, Vol.27, No.11, pp.1525~1533.
- [14] Lee S.H., Kwak H.S., Han C.S., and Ryu D.H., "A Numerical Model to Analyze Thermal Behavior of a Radiative Heater Designed for Flip-Chip Bonder," *Journal of Computational Fluid Engineering*, Vol.8. No.4, pp.41-49.
- [15] Lee S.H., Kwak H.S., Han C.S., Park S.H., Ryu D.H., and Han C.S., 2006, "Thermal design and Experimental test of a High-performance Hot chuck for Ultra-Precision Flipchip Bonders," *submitted to Trans. KSME(B)*.
- [16] Kwak H.S., Park G.J., Son B.C., Lee J.J., and Park H.C., 2006, "Design of a Hot plate with Rapid cooling Capability for Thermal Nanoimprint Lithography," *SICE-ICASE Int. Joint Conf.*, pp.4897-4901.