

# 미세성형공정에서의 폴리머 레올로지의 정량화

김병희<sup>†</sup> · 김현영<sup>\*</sup> · 김호<sup>\*\*</sup> · 김광순<sup>\*\*</sup> · 강신일<sup>\*\*\*</sup>

## Quantitative rheology of polymers in high resolution structuring

Byeong-hee Kim, Heon-young Kim, Ho Kim, Kwang-soon Kim and Shin-ill Kang

**Key Words :** Hot embossing(핫 엠보싱), Micro/Nano rheology(마이크로/나노 레올로지), PMMAs(PMMAs), Quantitative analysis(정량적해석), Throughput(재료처리량)

### Abstract

The hot embossing process has been mentioned as one of major nanoreplication techniques. This is due to its simple process, low cost, high replication fidelity and relatively high throughput. As the initial step of quantitating the embossing process, simple parametric study about embossing time have been carried out using high-resolution masters which patterned by the DRIE process and laser machining. Under the various embossing time, the viscous flow of thin PMMA films into microcavities during compression force has been investigated. Also, a study about simulating the viscous flow during embossing process has planned and continuum scale FDM analysis was applied on this simulation. With currently available test data and condition, simple FDM analysis using FLOW3D was made attempt to match simulation and experiment.

### 1. 서론

현재 100 nm이하의 나노 구조물(nanostructures)제조 방법들은 전자빔(e-beam), 이온빔(ion-beam), SPM, X-ray 리소그래피(lithographies)나 표면의 무작위 패터닝(random patterning) 결과를 공정에 응용한 것이다[1]. 전자빔 리소그래피 공정의 경우는 5 nm이하의 선폭(linewidths)을 구현하는데까지 성공하였다[2]. 그러나 X-ray 나 이온빔 리소그래피와 같은 기술들은 비용이 너무 고가이고, 이러한 결과들은 실험실 단계의 성과로 재료 처리량의 한계가 있기 때문에 산업현장에서 적용하기에는 무리가 있다. 나노 리소그래피(nano lithography)을 산업현장에 적용하기 위해서는 100 nm이하의 구조물을 대량 생산할 수 있는 저가이며 높은 재료 처리량을 가지는 적절한 제조 기술이 필요하다[3].

이러한 이유로 기술적으로도 간단하고 경제적인 비광학 리소그래피 기술이 대두 되고 있다[4]. 최근 개발된 이 기술들은 잘 알려진 프린팅(printing)과 엠보싱(embossing)을 바탕으로 한다. 임프린트 리소그래피(imprint lithography)는 ULSI(Ultra Large-Scale Integration)시스템을 제조할 수 있는 유망한 기술 중의 하나로 순수 방법과 응용을 포함한 많은 논문들이 발표되었다. ULSI는 두개의 주된 방법으로 분류할 수 있다. Chou의 공동 연구자들에 의해 제안된 폴리머 필름의 열적경화 방법과 Colburn의 공동연구자들에 의해 제안된 UV(ultraviolet)경화 방법이다[5,6]. 전자의 공정은, 절연(resist) 폴리머를 유리전이온도(Tg)이상으로 가열하여 몰드 형성 후, 이를 압축하여 폴리머를 변형시키는 것이고, 반면에 후자는 몰드의 깊숙한 홈으로 액체와 같은 폴리머를 유동시켜 UV노광에 의해 경화시키는 방법이다[7].

나노 임프린트 리소그래피(NIL, Nano Imprint Lithography)로도 알려진 열간 엠보싱 리소그래피(HEL, Hot Embossing Lithography)는 전자에 속한다. 열간 엠보싱은 마스터(master)와 열가소성 플라스틱과의 열적·기계적 물성의 차이를 이용한다[8]. 열간 엠보싱 공정은 다른 기술들에 비해 몇 가지 장점을 가진다. 광학 리소그래피의 경우는 빛의

<sup>†</sup> 강원대학교 기계메카트로닉스공학부  
E-mail : kbh@kangwon.ac.kr  
TEL : (033)250-6374 FAX : (033)257-4190

<sup>\*</sup> 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

<sup>\*\*</sup> 강원대학교 기계메카트로닉스대학원

<sup>\*\*\*</sup> 연세대학교 기계공학부

회절한계로 인해 대략 100 nm의 분해능의 한계를 가지고 있지만, 열간 엠보싱은 10 nm이하의 분해능을 가질 수 있다. 물론, 최근 MIT 링컨 연구소에서는 광학 리소그래피를 이용하여 25 nm의 게이트 구현에 성공한 바 있으나 비용이 상당히 고가가 될 것으로 보인다. 열간 엠보싱은 복제 방법을 사용하므로 제조가 간단하고 재현성이 뛰어나며 재료 처리량도 크고 매우 경제적이다.

그러나 구조물이 점점 작아지고 스텝프 형상도 복잡해지고 있기 때문에, 몰딩(molding)과 디몰딩(demolding)이 이루어지는 동안 불완전 충전(non-fill), 불연속(dis-continuity), 침식(abrasion), 스트레치(stretch)등 많은 문제점들이 나타나게 되었다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안은 아직까지 명확하게 제안되지 않았으며 대부분 시험적인 결과에서 나온 경험을 바탕으로 부분적으로만 제안되었다. 나노 패턴 성형 공정의 문제점을 근본적으로 해결하기 위해서는 성형과정에서 폴리머의 유동 특성을 파악할 필요가 있다. 폴리머 유동의 더 나은 이해를 통해 엠보싱 조건과 스텝프 디자인이 최적화 될 수 있고, 마이크로·나노 구조물의 제조를 위한 좋은 복제 정밀도가 확보될 수 있다.

본 연구는 나노 유동특성 파악의 초기 연구 단계로 열간 엠보싱 공정에 대한 기초 시험 결과와 매크로(macro) 스케일의 유한차분법을 이용한 시험적인 유동해석을 수행하였다. 본 논문은 기존의 나노 성형에 대한 문헌자료를 분석하여 연구의 진행상황과 기술 수준, 문제점을 파악하여 언급하였으며, 시험적으로는 엠보싱 공정 중 RIE를 제외한 열간 엠보싱 공정을 사용하여 공정 시간을 변수로 마이크로 단위의 시험을 통해 데이터를 정량화 시키고 그 결과를 바탕으로 폴리머의 유동특성을 관찰하였다. 나노 성형 해석에서는 기존의 상용 유동해석 프로그램(FLOW-3D)에 기초적인 경계조건 및 물성치를 사용하여 해석 결과와 실제의 유동특성을 비교 분석하였다.

## 2. 연구 동향

Chou 외 공동 연구자들은 1995년 최초로 나노 임프린트기술을 발표한 이래 그 적용분야를 넓혀가고 있으며 그 대표적인 분야가 나노 CD나 QMD(quantum magnetic disk)등과 같은 정보저장 매체이다[9].

40 nm의 피치(pitch)를 가지는 10 nm이하의 형상 패턴 성형이 성공적으로 보고되었으며 나노 CD를 기준으로 400Gbit/in<sup>2</sup>의 기억 용량을 확보하였다. 이는 기존 CD의 용량이 0.68Gbit/in<sup>2</sup>임을 감안한다면 괄목 할 만한 발전이다.

전형적인 광 리소그래피의 분해능 한계는 PR

에서의 빛의 회절(diffraction)과 산란(scattering), 간섭(interference)과 기층에서의 빛의 후방산란(backscattering)때문이다. 따라서, 마스터는 전자빔 리소그래피에 의해 제작되었으며 불산 RIE 에칭으로 실리카에 10 nm이하의 기둥을 성형하는데 성공하였다. 동일한 기술을 이용하여 6 nm의 형상을 획득하기도 하였다.

나노 유동 특성을 연구하기 위해 형상크기가 20 nm에서 50 μm까지인 사각홀 형상을 가지는 마스터를 제작되어 PMMA 재료의 엠보싱 공정 시험이 수행하였다. 그 결과 45 nm 이하인 경우는 코너 부분이 성형 되지 않았음이 관찰되었고 30 nm 이하에서는 분리 시 찢어짐(tear-off) 현상도 발생하였다. 찢어짐 현상은 홀의 측면 형상, 언더컷(undercut)등, 이나 이형 메커니즘으로부터 기인하는 문제로 추가적인 연구의 필요성이 제기되었다 [10-13].

PSI(스위스 연방 연구소)의 Schiff 외 공동연구자들은 1998년 열간 엠보싱 공정에 추가적인 O<sub>2</sub> RIE 또는 Direct RIE를 통하여 10 cm<sup>2</sup>의 영역에 걸쳐 50 nm의 패턴을 성공적으로 성형하였다. PMMA를 사용하였으며 50 nm패턴과 2~3 정도의 종횡비(aspect ratio)를 가지는 형상의 마스터를 완벽하게 전사(transfer)하였다[14-16].

마스터의 경우 음각(negative profile)이 양각(positive profile)에 비해 전사가 용이함이 밝혀졌고 테프론 계통의 필름을 증착시킴으로서 마스터의 표면 에너지를 최소화 시켜, 그 결과 중간 세척 과정을 거치지 않고도 적어도 50 회 이상의 엠보싱이 가능하다고 보고되었다. 대부분의 파괴(degradation) 원인은 마스터와 폴리머 사이의 먼지 입자에서 기인 하는 결과로 진공 상태에서의 엠보싱을 권장하였다. 또한 HEL에 의한 나노 구조물들의 대면적 제조 능력을 검증하기 위해 나노 구조의 IDEAs (interdigitated electrode arrays)를 제조하였다.

열간 엠보싱의 경우 몰딩 도구(tool)와 마스터, 폴리머는 모두 열적 평행상태에 머물러야 하므로 공정속도가 느린편이다. 이론적으로 엠보싱 시간을 줄이기 위한 방법으로 온도를 증가시켜 폴리머의 점성을 감소 시키거나 엠보싱 압력을 높여주는 방법이 고려되었다. 빠른 엠보싱 시간은 유리 전이 온도 보다 100℃이상의 온도에서 300에서 3000Pa·s의 점성을 가지고 얻어졌다. 또한, 열간 엠보싱이 이루어지는 동안 마이크로 공동으로의 PMMA 점성유동이 몰딩 공정을 최적화 하기 위해 조사되었다. 마이크로 단위 공동의 경우는 폭과 간격에 상관없이 공동의 외벽을 타고 2 μm폭으로 상승하는 모세관 현상이 일어남이 밝혀졌다. 엠보싱 공정과 다른 공정을 혼합한 공정도 발표되었다. 열간 엠보싱과 결합한 전자기성형(electro-forming)의 가능성이 증명 되어 50 nm이하의 형상들이 120

nm이하의 간격으로 복제되었다.

이에 비해, 사출성형은 고온의 용해물(hot melt)이 몰드의 공동(cavity) 속으로 주입(injection)되며 몰드 공동은 유리 전이 온도 보다 낮은 상태에서 유지되어 용해물은 주입이 이루어지는 동안에 몰드의 외벽에서 굳기 시작해 공정속도가 빠르다. 사출성형으로 100 nm이하의 복제 정밀도를 가지는 CD의 제작은 현재기술에서 3.5 초의 성형시간을 가지고 얻어진다. CD 사출 성형으로, 폭 25 mm와 거의 2:1 정도의 종횡비를 가지는 구조물은 4 초 이내로 성형 가능하다. 가장 좋은 결과는 몰드 온도가 폴리머의 유리 전이 온도 바로 아래에서 얻을 수 있으며, 더 작은 구조물과 큰 종횡비를 위해서는 몰드 온도가 유리 전이 온도 보다 높아야 한다. 하나의 마스터로 대략 600 개 이상의 구조물들이 복제될 수 있다고 알려져 있다.

나노 단위의 컴퓨터 시뮬레이션 기술은 1953년 미국의 Los Alamos 국립연구소에서 MANIAC으로 불리는 컴퓨터의 성능을 시험하기 위한 도구로 액체에 대한 컴퓨터 시뮬레이션이 MC(Monte Carlo)의 기법으로 처음 사용된 후, 분자동역학(MD: Molecular Dynamics)을 이용하는 방법과 분자의 크기가 작은 경우 입자의 파동성을 고려한 양자역학(QMD: Quantum Molecular Dynamics)을 이용하는 방법으로 발전해 왔다. 1990년대까지 여러 분자들에 대한 포텐셜 모델이 개발되어 다양한 분자에 대한 시뮬레이션이 가능해졌지만 계산가능 분자개수가 수만 개 이하, 그리고 수 나노초 범위 이내였다.

최근들어 컴퓨터의 연산능력이 비약적으로 향상되어 수백만개의 분자에 대한 시뮬레이션이 가능해져 수 나노에서 수십 나노의 스케일까지 계산이 수행되었다. 그렇다 해도, 수십 나노의 스케일 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 병렬처리 시스템이나 슈퍼 컴퓨터 급의 컴퓨팅 파워가 필요하며 50 나노 이상의 스케일에서는 아직도 계산능력이 불충분하다. 또한, 실제 제품의 제작을 위한 성형 해석 측면을 고려하면 근간에 산업 현장에서 사용은 불가능하다고 할 수 있다. 이로 인해 기존의 매크로 스케일에서 사용하던 유한요소법을 이용하여 마이크로에서 나노 단위까지의 엠보싱 공정 시뮬레이션을 적용하고자 하는 노력이 이루어져 왔다[7]. Yoshihiko Hirai 등은 상용 유한요소해석프로그램인 MARC와 고무 초탄성 재료식을 사용하여 나노 단위의 엠보싱 성형 공정을 가시화하여 시험과 근사한 결과를 얻었다고 보고한 바 있다. 그러나, 이는 극히 단편적인 결과로 마이크로와 나노 단위에서의 성형 공정에 대한 PMMA의 유동특성을 밝히기에는 불충분 하였다.

### 3. 기초 성형 시험

본 시험에서는 Schiff 외 공동연구자들에 의해 검증되어진 모세관 효과(capillary effect)를 관찰하고 충전 과정을 확인하기 위해 다른 공정 변수들은 그대로 유지한 상태에서 엠보싱 시간만을 변화시켜 그 결과를 관찰하였다.

#### 3.1 조 건

엠보싱 온도는 130℃, 압력은 3bar 로 고정하였고,  $10^{-2}$  Torr의 진공 조건을 사용하였다. 엠보싱 시간은 10s, 20s, 30s, 1min, 2min, 3min, 5min 으로 각각 변화시켜 시험하였다.

사용한 엠보싱 머신은 핫엠보싱 전용이 아닌 유리·웨이퍼 본딩기로 그 형태는 열간 엠보싱 머신과 거의 유사하다. Fig. 1에 사용된 웨이퍼 본딩기를 나타내었다. 가열과 냉각 시스템을 갖추고 있고 공압에 의한 압축(press)시스템, rotary 펌프에 의한 저진공 시스템도 갖추고 있다. 그러나 냉각 방식이 챔버를 냉각시키는 소극적 냉각방식이기 때문에 냉각시간이 상당히 소요된다는 단점이 있다.

#### 3.2 마스터 제작

레이저 가공기를 이용하여 1.1mm 두께의 내열 유리(pyrex)위에 대략 100  $\mu$ m 크기의 홀을 200  $\mu$ m깊이로 300  $\mu$ m씩 간격을 두고 10x10 음각 원형 기둥 배열을 배치하였다. Fig.2에 제작된 마스터를 나타내었다. 가공시 레이저 가공기의 전압과 전류는 각각 22.2 kV, 0.028 A를 사용하였다.

#### 3.3 엠보싱 공정

제작된 마스터를 이용하여 엠보싱 시간을 변화시켜가며 시험을 수행하였다. 공정 시간을 줄이는 방향으로 온도와 압력을 변화 시켜 가며 시험을 수행해야 하나 이번 연구에서는 미세 성형에서의 폴리머 유동을 관찰하기 위해 공정시간 만을 변화시켜 그 형상을 관찰하였다. 일반적인 열간 엠보싱에서는 PMMA를 기판(substrate)에 스펀 코팅(spin coating)하여 사용하였지만 본 시험에서는 단지 판재의 PMMA를 기판위에 올려 놓고 시험을 수행하였다.

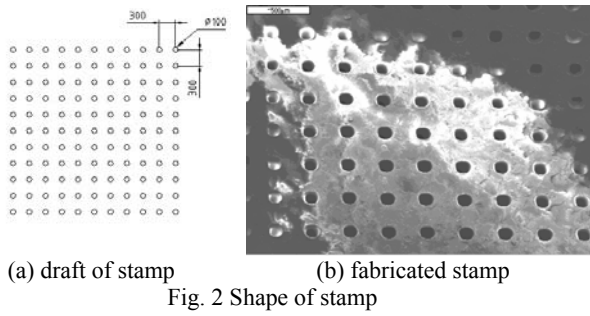


(a) Wafer bonding machine



(b) Inner chamber

Fig. 1 Shape of bonding machine



(a) draft of stamp (b) fabricated stamp  
 Fig. 2 Shape of stamp

전체적인 시험 공정은 일반적인 열간 엠보싱 공정과 동일하게 PMMA 필름을 유리전이온도 이상으로 가열 및 압축시킨 후 일정 시간이 경과하면 온도를 유리전이온도 이하로 하강시켜 마스터를 디몰드 하는 순서로 수행하였다. Fig. 3 에 개략적인 공정을 나타내었다.

3.4 결과 분석

성형 시간에 따른 시험 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 시간에 따른 형상의 변화로부터 미세성형시의 폴리머의 유동이 확인 되었다. 완전하지는 않지만 schift 가 증명한 공동의 측벽에서 발생하는 모세관현상도 발견되었다.

본 연구에서는 100  $\mu\text{m}$ 의 시험을 하였음에도 불구하고 디몰딩시 많은 문제점이 발생하였다. 나노 단위의 임프린트나 열간 엠보싱에서는 고착(sticking), 점착(adhesion) 문제가 심각하기 때문에 반드시 SAM 이나 테프론계통의 필름과 같은 반응착층(anti-adhesion layer)을 증착시키는 것으로 알려져 있으나, 본 시험에서는 마스터의 표면에 어떠한 처리도 하지 않았다. 그러나 이는 반응착층의 영향이라기 보다 레이저 가공에 의한 마스터 벽면의 거칠기에서 오는 결과로 보인다. 또한 시험기의 용량 한계에 따른 성형 압력의 부족도 하나의 원인으로 판단되었다.

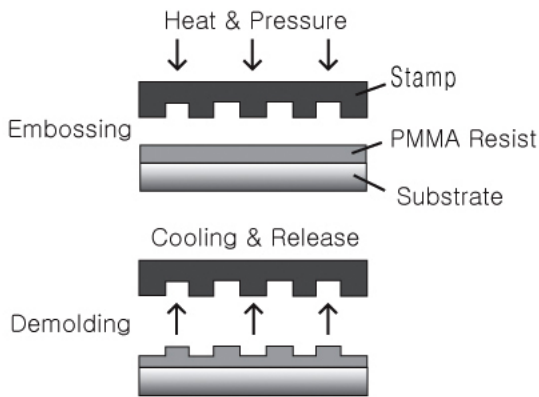


Fig. 3 Schematic representation of Hot embossing

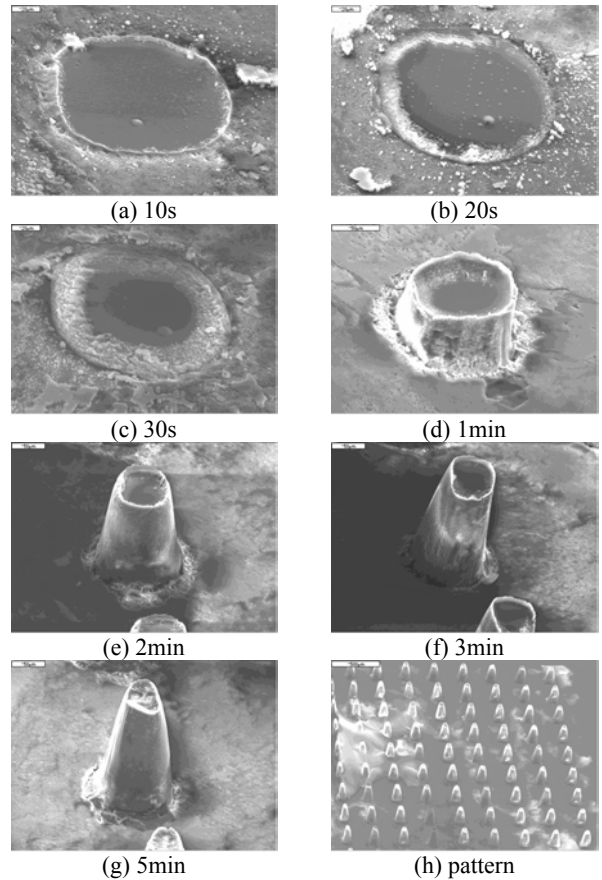


Fig. 4 SEM images of different stages of fill of 100  $\mu\text{m}$  circle pillars with 200  $\mu\text{m}$  height

4. 기초 성형 해석

나노 단위의 성형해석을 수행하기 위한 방법으로는 MD 를 이용한 분자 단위의 해석이 최선의 결과를 얻기 위한 방법으로 대두 되었지만 현 단계의 컴퓨팅 파워와 산업 현장의 현실을 감안하면 수 10 년 이후에 도입 가능한 방법으로 여겨지며, 현 단계에서는 기존의 FEM 이나 FDM 해석 기술을 이용한 나노 성형 해석 방안을 찾는 것이 하나의 대안으로 떠오르고 있다. 현재까지, 완벽히 검증된 해석 사례는 보고된 바 없어 해석의 정확성을 논의하기가 불가능하다. 나노 패턴 성형 공정의 해석적인 접근을 수행하기 위하여 본 논문에서는 기존의 FEM 과 FDM 해석 방법 중 먼저 FDM 을 이용한 해석적인 접근을 시도하였다. 사용 소프트웨어는 Flow-3D 유동해석 프로그램을 사용하였다.

4.1 해석 모델 정의

기존 시험 결과와의 비교를 위하여 종횡비가 낮은 유로의 단면 형상을 사용하였으며, 폴리머 유동 현상을 관찰하기 위하여 스케일(scale)과 점



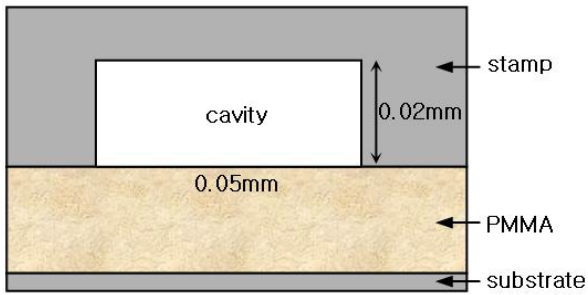


Fig. 5 Cross-sectional shape of flow channel

점성계수 값을 변경하면서 유동해석을 실시하였다. 스케일의 변화에 따른 유동을 관찰하기 위해서 마이크로 단위에서 나노 단위까지 스케일을 변경하였다. 마이크로 단위의 단면 형상을 Fig. 5에 나타내었다. 또한 공동의 개수 및 간격의 변화에 따른 채워짐 형상을 관찰하기 위해 폭 50  $\mu\text{m}$ , 두께 20  $\mu\text{m}$ 의 단면 형상을 이용, 공동의 개수가 2 개이며 각기 다른 공동 사이의 간격을 가지는 모델을 작성하였다. PMMA의 두께는 공동 깊이의 1.5 배로 설정하였다. 스탬프에 속도를 가해 성형하는 방식을 채택하였으며 성형시간을 실제 공정과 유사하게 2~9 분으로 설정하였다. 성형 온도는 해석에서 고려하지 않고 시험적으로 결정된 각 온도에서의 점성계수를 사용하였다. 점성계수는 190 $^{\circ}\text{C}$ 에서 230 $^{\circ}\text{C}$ 사이에서 측정되었으며 유체의 특성으로는 점성(viscos flow), 비압축성(incompressible flow), 층류(laminar flow) 조건을 사용하였다. 사용단위는 mm, g, sec이며 경계 조건을 Table 1에 나타내었다.

4.2 해석 결과

50  $\mu\text{m}$ 에서 50nm 까지 스케일의 변경과 점성계수 값을 변화 시켜 유동 양상을 관찰하였다. Fig. 6에 각 시간에 따른 50  $\mu\text{m}$  폭 형상의 엠보싱 공정 해석 결과를 나타내었다. 해석의 초기에 표면 장력으로 보이는 공동의 벽면을 타고 올라가는 현상이 미약하게 나타났으나 이후의 공정에서는 보이지 않았으며 점성의 영향으로 공동의 외벽 부근의 흐름은 고정되었고 중심부에서 먼저 채워지는 일반적인 층류의 전형적인 흐름 현상을 확인할 수 있었다. 그림에서 화살표는 속도 벡터를 의미하며 유동의 흐름 방향을 나타낸다. 이러한 흐름의 경향은 50nm 나노 스케일로 변화시켰을 때까지 이어졌으며, 해석과 동일한 유동 양상은 기존 연구 자료에서 시험적으로 나타낸 mm 나 nm 단위의 유동현상과 유사하였다. 그러나, 마이크로 단위의 유동현상에서 나타날 수 있는 Fig. 7의 공동의 벽면을 타고 올라가는 현상은 해석에서 관찰할 수 없었다 [17]. 점성계수값을 온도를 증가함에 따라 변화시켰을 경우에는 점성계수가 높아질수록 스탬프에 작용하는 압력이 증가하는 경향을 나타내었으며,

점성에 따른 유동 양상의 변화는 확인할 수 없었고 모든 점성계수 범위에서 동일한 유동양상을 나타내었다.

일반적으로 거시적인 스케일에서는 유체의 부피가 표면적보다 커 유체 표면의 영향이 흐름에 많은 영향을 끼치지 않는 반면 마이크로나 나노 단위에서는 나노 입자의 크기가 커짐에 따라 유체 표면적이 부피보다 커지게 된다. 스케일과 점성에 따른 유동 양상의 차이와 마이크로 단위의 유동양상 특징을 확인할 수 없었던 것은 표면 장력과 같은 표면적의 영향이 해석에 적용이 안되었던 하나의 원인으로 판단되었다.

Table 1 Boundary condition

Item	Detail
unit	mm/g/sec
flow type	laminar incompressible
viscosity	acquired from test 190 - 230 $^{\circ}\text{C}$
scale	width : 50 $\mu\text{m}$ - 50 nm height : 20 $\mu\text{m}$ - 20 nm
embossing time	2 min
gravity	9.8 $\text{m/s}^2$
density	constant uniform density
surface tension	-

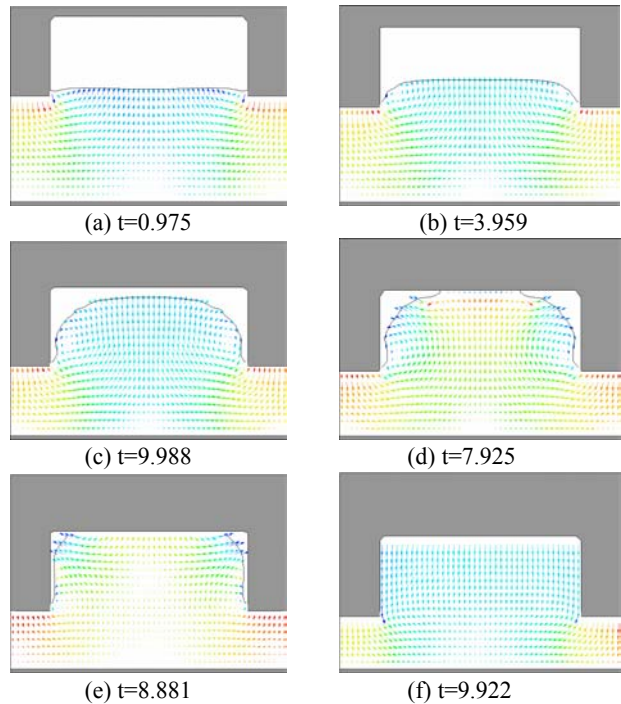


Fig. 6 simulation result of hot embossing process using 50  $\mu\text{m}$  width, 20  $\mu\text{m}$  height, 190 $^{\circ}\text{C}$  temperature, 110000 Pa·s viscosity coefficient

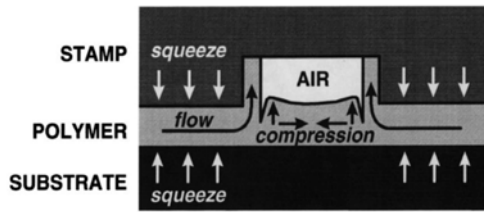


Fig. 7 quoted schematic representation showing filling of a stamp cavity in micro scale (by PSI Schiff et al.)

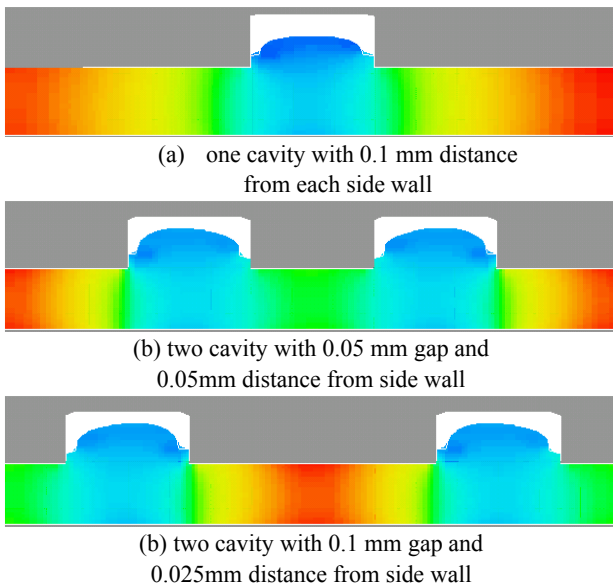


Fig. 8 simulation result by changing the number of cavity and its gap, distance.

공동과 외벽사이의 거리와 공동과 공동 사이의 간격에 따른 유동 양상도 해석을 통하여 관찰하였다. 0.15mm 길이의 스탬프에 폭 50 μm, 높이 20 μm의 공동 형상을 사용하였으며 1 개의 공동만을 사용하였을 경우와 2 개의 공동과 공동 사이의 간격을 달리한 경우를 고려하였다. 해석 결과 공동과 스탬프 외벽의 거리가 길어짐에 따라 외벽을 따라 올라가는 현상이, 거리가 짧을 경우보다 많이 관찰 되었으며 공동과 공동 사이의 간격이 작을 경우 고압력이 스탬프 외벽에서 발생하여 공동의 바깥면 방향에서 폴리머가 먼저 채워지는 현상과 공동 사이의 간격이 길 경우 고압력은 공동 사이의 간격 중심부에서 발생하여 공동의 안쪽면 방향에서 폴리머가 먼저 채워지는 현상을 확인하였다. Fig. 8 에 해석 결과를 나타내었다.

## 5. 결론

본 연구는 나노 유동특성 파악의 초기 연구 단계로 기존에 발표되었던 문헌의 조사를 통한 나노 성형의 현단계 기술과 문제점을 조사하고, 열간 엠보싱 공정에 대한 기초 시험 결과와 매크로 스케일의 유한차분법을 이용한 시험 단계의 유동해석을 수행하였다.

마이크로 단위의 폴리머 유동을 관찰하기 위해 200 μm의 높이를 가지는 100 μm 지름의 원형 기둥을 300 μm씩 간격을 두고 10×10 배열하여 마스터를 제작하였으며 웨이퍼 본딩기를 이용하여 공정 시간 만을 변화시켜 간단한 열간 엠보싱 공정을 수행하였다. 개략적인 폴리머의 유동특성을 관찰할 수 있었으며 완전하지는 않지만 Schiff 가 증명한 공동의 측벽에서 발생하는 모세관현상도 발견되었다. 본 연구에서는 100 μm의 시험을 하였음에도 불구하고 디몰딩시 고착, 점착 등과 같은 문제가 발생하였다. 이는 반응착층의 영향이라기 보다 레이저 가공에 의한 마스터 벽면의 거칠기에서 오는 결과이며 또한 시험기의 용량 한계에 따른 성형 압력의 부족도 하나의 원인 판단되었다.

나노 패턴 성형공정을 기존의 해석적인 방법으로 접근하기 위하여 유한차분법을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 기존 시험 결과와의 비교를 위하여 중형비가 낮은 유로의 단면 형상을 사용하였으며, 폴리머 유동 현상을 관찰하기 위하여 스케일(scale)과 점성계수 값을 변경하면서 유동해석을 실시하였다. 50 μm에서 50nm 까지 스케일의 변경과 점성계수 값을 변화 시켜 해석한 결과 동일한 유동 양상을 관찰하였으며, 스케일의 변화와 점성의 변화에 따른 유동 양상의 변화와 마이크로 단위의 유동 특징인 모세관 현상은 관찰할 수 없었다. 이는 나노 단위에서 영향이 지대한 표면 장력과 같은 표면적의 영향이 해석에 적용이 안되었기 때문에 이 후 표면적의 영향을 해석에 적용하여 유동 양상을 관찰할 필요가 있다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 21C 프론티어 사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 나노메카트로닉스 기술개발 사업의 세부과제인 “나노패턴 성형 공정기술”의 위탁과제 수행결과의 일부로 세부과제 주관기관인 연세대학교와 ETRI의 도움에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) L.Piraux, J.M.George, J.F.Despres, C.Leroy, E.Ferain, R.Legras, K.Ounadjela, A.Fert, 1994, "Giant magnetoresistance in magnetic multilayered nanowires", *Applied Physics Letters*, vol.65, issue19, 2484-2486
- (2) Yasin S, Hasko DG, Ahmed H, 2001, "Fabrication of <5 nm width lines in PMMA resist using a water:isopropyl alcohol developer and ultrasonically-assisted development", *Applied Physics Letters*, vol.78, 2760-2762
- (3) Frank Gottschalch, Thomas Hoffmann, Clivia M. Sotomayor Torres, Hubert Schulz, Hella-Christin Scheer, 1999, "Polymer issues in nanoimprinting technique", *Solid-State Electronics*, vol.43, 1079-1083
- (4) Hongwei Li, Wilhelm T. S. Huck, 2002, "Polymers in nanotechnology", *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol.6, 3-8
- (5) Stephen Y. Chou, Peter R. Krauss, Preston J. Renstrom, 1995, "Imprint of sub-25 nm vias and trenches in polymers", *Applied Physics Letters*, vol.67, 3114
- (6) Colburn M., Johnson S., Stewart M., Damle S., Bailey T., Choi B., Wedlake M., Michaelson T., Sreenivasan S.V., Ekerdt J., Willson C.G., 1999, "Step and flash imprint lithography: A new approach to high-resolution patterning", *Proc. SPIE*, vol.3676, 379
- (7) Yoshihiko Hirai, Masaki Fujiwara, Takahiro Okuno and Yoshio Tanaka, 2001, "Study of the resist deformation in nanoimprint lithography", *Journal of Vacuum Science and Technology B*, vol.19, issue6, 2811-2815
- (8) H.Schift, R.W.Jaszewski, C.David and J.Gobrecht, 1999, "Nanostructuring of polymers and fabrication of interdigitated electrodes by Hot Embossing Lithography", *Microelectronic Engineering*, vol.46, 121-124
- (9) Stephen Y. Chou, Peter R. Krauss, 1996, "Quantum magnetic disk", *Journal of Magnetism and Materials*, vol.155, 151-153
- (10) Stephen Y. Chou, Peter R. Krauss, Wei Zhang, Lingjie Guo and Lei Zhuang, 1997, "Sub-10 nm imprint lithography and applications", *Journal of Vacuum Science and Technology B*, vol.15, 2897
- (11) Stephen Y. Chou, Peter R. Krauss and Preston J. Renstrom, 1996, "Nanoimprint Lithography", *Journal of Vacuum Science & Technology B*, vol.14, Issue 6, 4129-4133
- (12) Chou, Stephen Y; Krauss, Peter R; Renstrom, Preston J, 1996, "Imprint Lithography with 25-nanometer resolution", *Science*, vol.272, issue 5258, 85
- (13) Stephen Y. Chou and Peter R. Krauss, 1997, "Imprint Lithography with Sub-10nm Feature Size and High Throughput", *Microelectronic Engineering*, vol.35, 237-240
- (14) R.W.Jaszewski, H.Schift, J.Gobrecht and P.Smith, 1998, "Hot embossing in polymers as a direct way to pattern resist", *Microelectronic Engineering*, vol.41/42, 575-578
- (15) H. Schift, C. David, M. Gabriel, J. Gobrecht, L.J. Heyderman, W. Kaiser, S. Köppel and L. Scandella, 2000, "Nanoreplication in polymers using hot embossing and injection molding", *Microelectronic Engineering*, vol.53, 171-174
- (16) L.J. Heyderman, H. Schift, C. David, B. Ketterer, M. Auf der Maur, J. Gobrecht, 2001, "Nanofabrication using hot embossing lithography and electroforming", *Microelectronic Engineering*, vol.57-58, 375-380
- (17) L.J. Heyderman, H. Schift, C. David, J. Gobrecht, T. Schweizer, 2000, "Flow behavior of thin polymer films used for hot embossing lithography", *Microelectronic Engineering*, vol.54, 229-245