

극미세 Mold 및 패턴 제작을 위한 나노변형의 기초연구

이정우*(부산대 대학원 정밀기계공학과), 윤성원*(부산대 대학원 정밀기계공학과),
강충길** (부산대 기계공학부)

Fundamental Study on Deformation Behavior of the Nano Structure for Application to the Hyper-fine Pattern and Mold Fabrication

L. W. Lee(Dept. of Mechanical & Precision Eng. Pusan National University), S. W. Youn(Dept. of Mechanical & Precision Eng. PNU), C. G. Kang (School of Mechanical Eng. Pusan National University)

ABSTRACT

In this study, to achieve the optimal conditions for mechanical hyper-fine pattern fabrication process, deformation behavior of the materials during indentation was studied with numerical method by ABAQUS S/W. Polymer (PMMA) and brittle materials (Si, Pyrex glass) were used as specimens, and forming conditions to reduce the elastic restoration and bur was proposed. The indenter was modeled a rigid surface. Minimum mesh sizes of specimens are 1-10nm. The result of the investigation will be applied to the fabrication of the hyper-fine pattern and mold.

Key Words : Hyper-fine pattern (극미세 패턴), Bur (버), Elastic restoration (탄성복원), Nanoindentation (나노인덴테이션), Si (실리콘)

1. 서론

MEMS 부품의 미세화와 더불어 극미세패턴의 필요성이 증대되고 있다. 현재 BT 분야에서 가장 각광 받고 있는 랩온어칩(Lab-on-a-chip, LOC)의 개발에 있어서 핵심이 되는 기술은 극소량의 시료가 지나갈수 있는 미세한 관(채널)을 만드는 것이다[1].

이러한 연구의 목적은 궁극적으로 단분자의 조작과 분석을 가능하게 하기 위해서이다. 극미세 채널은 IT 분야에서도 중요성이 부각되고 있는데, 시스템온칩(SoC)의 개발을 위해서는 나노급 미세회로 공정기술의 확보가 선행되어야한다.

현재까지 연구되어온 LOC 나 SoC 내의 채널의 폭은 μm 정도 였으며, 주로 반도체 공정과정에 의하여 제작되고 있다. 현재 가장 많이 사용되고 있는 미세패턴 및 구조물 제작기술로서는 LIGA, 광학이나 고에너지 이온빔, X 선 등을 이용하는 리소그라피 기술을 들 수 있다[2]. 리소그라피 기술에 의하여 제작 가능한 최소선폭의 물리적 한계로 인하여 마찰력현미경(FFM)이나 원자력현미경(AFM)을 이용한 극미세 패턴의 형성 기술들이 다양하게 연

구되어 오고 있다.

초미세 프로브를 이용하여 직접 소재의 표면형상을 변형시키는 기계적 가공공정은 현재 연구중인 여러 미세구조물 제작기술 중에서 가장 설계변경이 용이하고, 초기설비가 간단하며, 공정속도가 빠르다는 장점이 있으나, 가공 후 패턴 주위에 발생하는 버(burr) 및 기타 잔류물에 의하여 패턴의 재현성이 나 정밀도가 나쁘다는 단점이 있다. 그러나 이러한 단점들은 식각공정을 통한 화학적 방법으로 개선될 수 있다. 위의 장점 때문에 국내에서도 기계-화학적 방법을 이용하여 극미세패턴을 제작하려는 연구가 활발히 진행되고 있다[3].

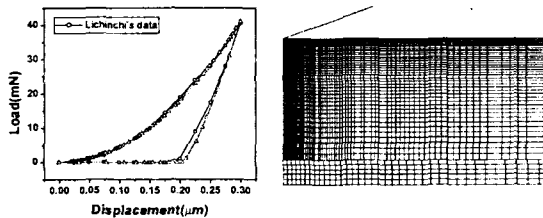
따라서 본 연구에서는 기계적인 방법에 의한 극미세 패턴을 제작하기 위하여 유한요소 시뮬레이션으로 나노스케일의 압입과정이 소재의 변형거동에 미치는 영향을 파악하였다. 기계적으로 극미세패턴 및 몰드를 제작하기 전에 소재의 특성을 알아보기 위해 ABAQUS S/W 로 나노인덴테이션 공정을 시뮬레이션하여 소재의 특성 즉 탄성복원을 알아보았다.

본 연구결과는 나노인덴테이션의 스크래치 기능을 활용하여 극미세패턴을 제작할 때 기초연구로써

활용되어질 것이다.

2. FEM 모델링

본 연구에서 사용한 소재는 실리콘, PMMA, 파 이렉스 글라스 세가지이다. 이 재료에 대한 나노인 덴테이션 공정을 해석한 다음 한 소재를 선택하여 극미세 몰드 및 패턴 제작 시 팁 두개를 동시에 압 입하였을 경우 팁 사이에 생기는 버를 감소시키기 위한 변수를 조사하였다. 나노인덴테이션 공정 해 석에는 여러가지 팁형상을 사용하여 해석하였다. 특히 Berkovich, 반구형상 팁보다 형상변화 즉 라운 드 가공이 쉽기 때문에 두 팁 사이의 버 해석에는 내각이 130°인 콘 모양의 팁을 사용하였다. 해석에 대한 검증을 Fig. 1 에 보여주고 있다. Lichinchi 의 데이터와 비교하여 거의 비슷한 결과를 보이고 있 다[4].



(a) Comparison with Lichinchi's data [4] (b) FEM Modeling

Fig.1 Verification for analysis data

2.1 나노인덴테이션 축대칭 모델

나노인덴테이션 공정을 해석하기 위하여 축대칭 모델을 사용하여 해석을 실시하였다. 팁은 Fig. 2 에 서 보여주는바와 같이 콘형상, 반구형상, Berkovich 형상 세가지로 콘은 반쪽의 각이 $\alpha = 65^\circ$ 이고, 반구 는 $R = 2 \mu\text{m}$, Berkovich 는 2D 로 하였기 때문에 팁형 상함수만 같게한 $\beta = 70.30^\circ$ 로 하였다. 해석을 할 때 팁은 강체로 하고, 시편은 Table 1 과 같이 세가 지 벌크소재를 이용하였다. 시편 모델은 4-노드 1281 개, 축대칭요소(CAX4R element type [5]) 1200 개 로 구성하였다. 메쉬크기는 1~10nm 이고 대칭축에 가까워질수록 작아지며, 해석단계는 로딩단계와 언 로딩단계로 나누어진다. Fig. 3 은 인덴테이션 공정에 대한 경계조건과 노드와 요소 구성을 나타낸 그림 이다. 축대칭 부위에는 y 축으로만 움직이게 x 축을 고정시키고 시편의 아래부위에는 모든 방향으로 완 전고정을 시켰으며, 또한 강체인 팁도 x 축만 고정 했다. 팁과 시편표면사이에는 접촉조건을 사용하였 고, 마찰력은 1 로 가정하여 해석을 실시하였다. 나 노인덴테이션 해석은 ABAQUS/Standard 를 사용한 탄소성 해석으로 하였으며, 탄성복원에 대한 해석

으로써 압입깊이, 팁형상, 팁 반경을 변경하여 해석 을 하였다. 첫번째, 팁형상에 따른 탄성복원. 두번 째, 콘형상 팁을 사용할 경우 팁의 반경(40, 100, 200nm)에 따른 탄성복원을 조사해보았다. 시편의 두께는 $2 \mu\text{m}$ 이고, 폭은 $6 \mu\text{m}$ 로 하였다.

실리콘을 제외한 나머지 소재는 소재의 탄성복원 만 알아보고 팁형상 및 깊이변화에 대한 해석에는 이용하지 않았다.

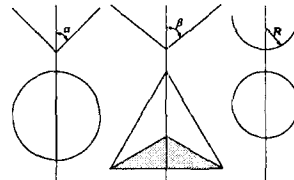
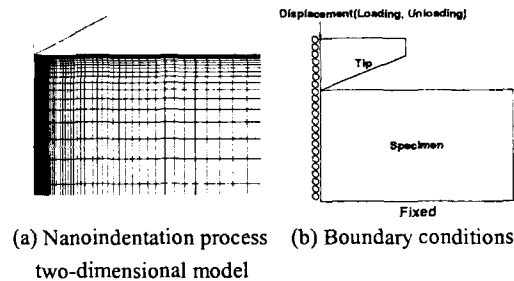


Fig. 2 Shape of Indenters



(a) Nanoindentation process (b) Boundary conditions two-dimensional model

Fig. 3 FEM model and Boundary condition

2.1 나노인덴테이션 멀티팁 모델

멀티팁을 사용한 나노인덴테이션은 기계적인 패 턴 제작시 동시에 여러 채널을 만드는데 사용할 수 있다. 멀티팁 작업시 생기는 팁과 팁사이의 시편표 면 버를 줄이기 위해 멀티팁모델을 제안하였다. Fig. 4 는 시편표면 버를 예측하기 위해 만든 모델이다. 경계조건은 나노인덴테이션 축대칭 모델과 유사하 지만 축대칭은 아니다. 팁 두개를 $2 \mu\text{m}$ 간격으로 하고 로딩단계와 언로딩단계로 하였다. 축대칭모델 과 같이 팁과 시편 표면사이에는 접촉조건을 사용하 였고, 마찰력은 1 로 가정하였다.

Fig. 4 의 모델은 실리콘소재로 4-노드 5151 개, plane strain 요소(CPE4R element type[5]) 5000 개로 구성하였다. 팁은 내각이 130°인 콘형상을 사용하였 고, 시편의 두께는 $10 \mu\text{m}$, 폭을 $20 \mu\text{m}$ 로 하였다. 멀티팁 모델의 시편표면에서 버를 줄이기 위한 변 수로 팁 반경을 변화 시키는 것이다. 지금 현재 가 장 정밀하게 만들 수 있는 팁 반경은 40nm 이기 때 문에 본 연구에서는 팁 반경이 40, 100, 200nm 일 때 시편표면에서의 버를 조사하였다.

3. 결과 및 검토

Table 1 Elastic and plastic properties of silicon, PMMA and pyrex glass

Materials	Young's modulus (Gpa)	Yield strength (Gpa)	Poisson's ratio
Silicon[6]	127	4.4	0.278
PMMMA[7]	3.0	0.07	0.40
Pyrex glass (JMC glass Co. INC)	63	0.063	0.17

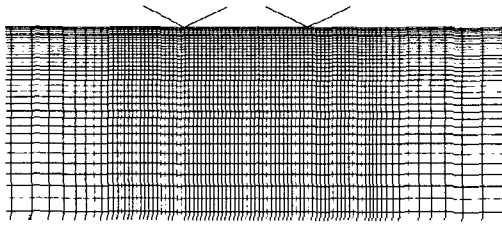
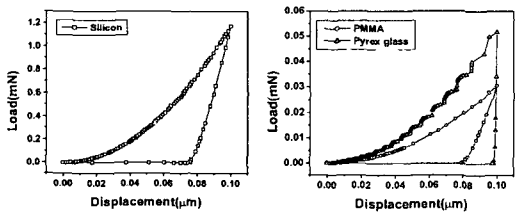


Fig. 4 Multi-tip nanoindentation process two-dimensional model

3.1 소재의 특성

실리콘, PMMA, 파이렉스 글라스 소재에 대하여 100nm 를 압입하였을 때 하중-변위 그래프를 구해 보았다. 하중-변위 그래프를 이용하여 경도 및 탄성 계수 등을 계산하는 것이 목적이지만 본 연구에서는 극미세 패턴의 가공 정밀도 문제를 예측하기 위하여 탄성복원을 조사해보았다. 세가지 소재에 대한 결과는 Fig. 5 에 나타내었다.



(a) Load-displacement curve of Silicon (b) Load-displacement curves of PMMA and Pyrex glass

Fig. 5 Load-displacement curves for each materials

Fig. 5 (a)는 실리콘의 하중-변위 그래프인데 언로딩부분에서 탄성복원을 알 수 있다. 실리콘의 탄성복원은 언로딩이 76nm 에서 끝나므로 24nm 정도까지 탄성복원 된다는 것을 알 수 있다. Fig. 5 (b)는 PMMA 와 파이렉스 글라스의 하중-변위 그래프이다. 로딩시 많은 하중을 요하지 않는다. 이 그래프에서 파이렉스 글라스는 언로딩시 거의 탄성복원이 되지 않음을 알 수 있고, PMMA 는 언로딩이 80nm 에서 끝나므로 20nm 탄성복원됨을 알 수 있다.

3.2 팁형상에 따른 소재의 특성

팁형상 즉 콘형상, 반구형상, Berkovich 형상을 이용하여 실리콘 소재의 특성을 알아보았다. 압입 깊이는 100nm 로 하고 팁의 형상만 변경하였다.

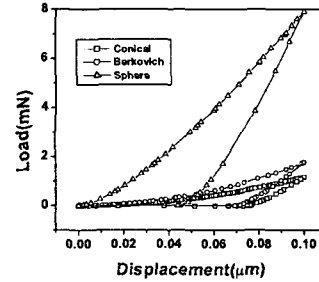


Fig. 6 Load-Displacement curves on silicon with different tip shape

Fig. 6 은 팁형상에 따른 실리콘 시편의 하중-변위 그래프를 나타낸 것이다. 반구형상이 다른 소재들보다 하중이 높고, 탄성복원 또한 심하다. 콘형상은 24nm, Berkovich 는 26nm 이고, 반구형상은 50nm 의 탄성복원을 보이고 있다. Fig. 6 의 그래프를 보면 정밀한 패턴이나 구조물을 제작할 때는 반구형상을 사용하지 않는 것이 좋을 것으로 예측된다.

3.3 팁 반경변화에 따른 소재의 특성

팁 반경변화에 대한 소재의 특성을 알아보기 위해서 콘형상의 뾰족한 부위에 라운드를 40nm, 100nm, 200nm 로 변화시켜 해석하였다. 압입깊이는 100nm 이다. 라운드의 크기에 따라 탄성복원이 얼마만큼 생기는지를 예측하였다.

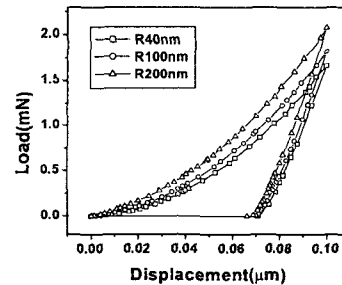


Fig. 7 Load-Displacement curves on silicon with different tip radius

Fig. 7 은 팁 반경에 따른 하중-변위 그래프로써 반경이 커질수록 하중이 증가함을 알 수 있었고, 탄성복원도 증가함을 알 수 있었다. Fig. 7 의 그래프는 Lu 와 Bogy[6] 결과와 유사한 형태를 보이고 있다. Fig. 8 은 팁 반경에 따른 로딩, 언로딩시 발생하는 응력분포를 나타내고 있다.

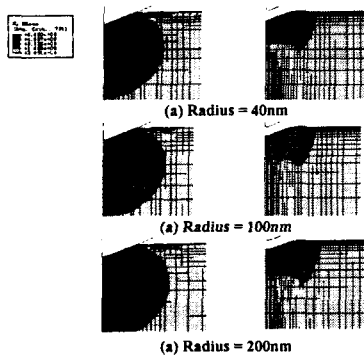


Fig. 8 Von-mises stress distribution for different tip radius

반경이 커질수록 시편의 응력분포가 점점 커짐을 알 수 있다. 반경이 커질수록 시편과 팁 사이의 접촉면적이 커지기 때문에 넓은 응력분포를 보이고 있다. 그래프와 응력분포를 보면 팁에 반경이 적을수록 탄성복원이 적고, 작은 하중으로도 가공이 가능하다고 판단된다.

3.4 멀티 팁을 이용한 시편의 버 조사

두개 팁 이상을 동시에 압입시켜 패턴을 제작할 때 생기는 버를 나노인덴테이션 공정 시뮬레이션으로 예측하였다.

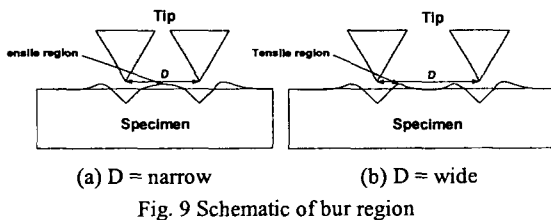


Fig. 9 Schematic of bur region

Fig. 9 는 두개 팁 이상으로 패턴을 제작했을 때 생기는 시편의 버를 예상하여 그림으로 나타내었다. 팁반경의 변화에 따른 시편의 버를 조사해보았다. 해석에서 D 는 $2\mu\text{m}$ 로 하고, 압입깊이는 100nm 로 하였다. 2D 축대칭요소와 아니고 2D plane strain 요소를 사용하여 해석을 하였다.

Fig. 10 은 압입하여 생기는 버 최고점의 값을 팁 반경 변화에 대한 비교 데이터이다. 팁반경이 커질수록 버의 최고점 값이 높아짐을 알 수 있다. 또한 시뮬레이션을 통해 팁과 팁 사이의 거리(D)가 좁아지면 Fig. 9 (a)처럼 양쪽의 버가 만나 반원모양을 형성함을 예측할 수 있었고, 최고점이 높아짐을 예측할 수 있었다.

따라서 팁 반경이 작을수록 패턴 제작시 정밀하게 만들 수 있다고 할 수 있다. 이런 버는 기계적인 방법으로 어느 정도까지는 줄일 수 있지만 완전히 제거할 수 없음을 알 수 있었다. 버를 제거하기

위하여 양팁에서의 가압속도 및 시간 제어등이 필요한 것으로 사료된다.

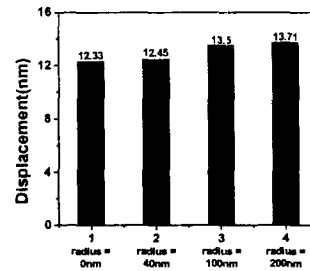


Fig. 10 Max bur region node for different multi-tip radius

4. 결론

본 연구에서는 팁 반경이 없으며, 팁 내각이 작은 콘형상에서 탄성복원이 작음을 알 수 있었다. 그리고 멀티팁을 사용하여 몰드 및 패턴 제작시 팁과 팁 사이에 생기는 버를 조사한 시뮬레이션을 하였다. 그 결과 콘형상 팁 사용시 팁반경이 작을수록 버의 최고점이 감소함을 알 수 있었다. 따라서 몰드 및 패턴 제작시 팁반경이 작고, 팁내각이 작은 팁을 사용할 경우 정밀한 채널을 만들 수 있다고 예측하였다.

유한요소해석을 이용한 몰드 및 패턴 제작을 위한 기초연구는 나노인덴테이션 공정해석으로 소재의 특성을 알아보았고, 향후에 스크래치 공정해석을 통하여 버 발생을 예측해보겠다. MEMS 소재는 고가이기 때문에 이러한 시뮬레이션으로 미리 예측한다면 소재 낭비없이 정밀하게 구조물을 제작할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 김태송, "침속에 들어간 생물학실험실진단, 처치장비가 캡슐에 담긴다.", 과학동아 2월호 특집
2. 이석한, "초미세 기계가 일으키는 초대형 혁명 반도체 제조공정에서 탄생한 신기술", 과학동아 2월호 특집
3. 성인하, 김진산, 김대은 "Non-lithography 방법에 의한 마이크로 999 구조물제작 및 응용", 한국정밀공학회 2002년도 춘계학술대회, pp. 956-959, 2002
4. M. Lichnichi, C. Lenardi, J. Haupt, R. Vitali, "Simulation of Berkovich nanoindentation experiments on thin films using finite element method.", Thin Solid Films, Vol. 333, pp. 278-286, 1998
5. Hibbitt, Karlsson and Sorensen, ABAQUS Standard/Explicit rel. 6.2, 2001
6. Chung-Jen. Lu, D. B. Bogy, "The effect of tip radius on nano-indentation hardness tests.", Int. J. Solid Structures, Vol. 32, No. 12, pp. 1759-1770, 1995
7. CRC PRESS, "The MEMS Handbook", pp. 18-11,12, 2001