

## 나노 인덴테이션 공정의 유한요소해석 및 실험적 검증

이정우\* · 윤성원\* · 강충길\*\*

### Finite Element Analysis of Nanoindentation Process and its Experimental Verification

L.W. Lee, S.W. Youn and C.G. Kang

#### 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. Brittle materials (Si, Pyrex glass) were used as specimens, and forming conditions to reduce the elastic restoration and pile-up was proposed. The indenter was modeled a rigid surface. Minimum mesh sizes of specimens are 1-10nm. Comparison between the experimental data and numerical result demonstrated that the finite element approach is capable of reproducing the loading-unloading behavior of a nanoindentation test. The result of the investigation will be applied to the fabrication of the hyper-fine pattern.

**Key Words** : Nanoindentation(나노인덴테이션), Hyper-fine pattern(극미세 패턴), Pile-up(파일업), Elastic recover (탄성회복)

#### 1. 서론

박막의 기계적 특성을 측정하는 방법 중 가장 쉬운 방법은 박막을 매우 작은 범위에서 변형시키는 것이다. 뾰족한 팁(indenter)를 매우 작은 하중으로 압입하며 마이크로메타 이하 깊이로 변형시켜서 박막의 기계적 특성을 측정하는 방법인 나노인덴테이션(nanoindentation) 방법은 이와 같은 목적을 달성하는데 가장 유리한 방법으로 최근 십 여년 사이에 많은 연구가 이루어지고 있다. 아직 표준화는 아직 표준화는 되지 않았으나 현재 세계

적으로 일반화되어가고 있는 방법이다.<sup>(1)</sup>

또한, 나노인덴테이션은 스크래치 공정으로 수 nm의 두께를 가진 박막까지 마찰계수 측정이 가능하다. 이 공정을 응용하여 극미세 패턴을 제작하려고 한다.

현재 가장 많이 사용되고 있는 미세패턴 및 구조물 제작기술로서는 리소그라피 기술을 들 수 있다. 리소그라피기술에 의하여 제작 가능한 최소선폭의 물리적 한계로 인하여 원자력현미경(AFM) 등의 기계적 방법을 이용한 반도체 표면 위에 극미세 패턴을 제작하기 위한 많은 실험들이 행해져 왔다.<sup>(2)</sup>

\* 부산대학교 정밀기계공학과

\*\* 부산대학교 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공연구소

본 연구에서는 나노 스크래치 공정으로 실리콘 웨이퍼, 파이렉스 글라스 7740에 패틴을 제작하기 전 입력해야 할 하중을 압입깊이, 팁라운드, 소재종류에 따라 예측하였고, 탄성복원과 가공 후 생기는 파일업(Pile-up)을 제어하는 변수를 나노인덴테이션 공정 시뮬레이션으로 미리 예측해 보았다.

유한요소해석은 FEM패키지인 ABAQUS 6.2를 사용하였고, 본 연구결과는 나노인덴테이션의 스크래치 기능을 활용하여 극미세 패틴을 제작할 때 기초연구로서 활용되어질 것이다.

## 2. FEM 모델링

### 2.1 나노인덴테이션 유한요소해석 모델

본 연구에서는 나노인덴테이션 팁 종류 중에 삼각형 피라미드 형태인 Berkovich만을 사용하였고, 입체적으로 파일업이나 탄성회복을 보기위해 3차원으로 모델을 만들어 해석하였다. 저자는 나노변형에 필요한 소재의 변형 거동을 2차원 유한요소법으로 해석하여 실험데이터와 비교 검토하였고 해석 결과의 타당성을 검증하였다. 하지만 2차원 나노인덴테이션 공정 모델에 사용한 팁은 Berkovich 팁의 면적합수를 같게한 축대칭 Conical 팁으로 하였기 때문에 정확한 파일업이나 탄성회복을 예측하기 힘들었다.<sup>(3)</sup> 3차원 해석은 2차원 해석에 비해 시간은 많이 걸리지만 입체적 즉 여러 방향으로 파일업을 프로파일하여 소재의 정확한 변형을 알 수 있는 장점이 있다. Fig. 1은 팁들의 3차원 형상으로써 Nano-indenter XP(MTS) 매뉴얼의 치수정보를 참고하여 모델링하였다. Fig. 1(a)는 Berkovich 팁으로써  $\beta=77.05$ ,  $\phi=65.3$ 이고, Fig. 1(b)는 2차원해석에 사용된 Berkovich 팁의 면적합수만 같게한 축대칭 Conical 팁으로써  $\alpha=70.3$ <sup>(4)</sup>이다.

Fig. 2은 자세한 모델링 정보와 해석에 사용할 Mesh 정보, 경계조건을 알 수 있다. Berkovich 팁해석으로써 축대칭이 어려워 전체로 모델링하였고, Mesh는 12320개 8노드 reduced integration 요소(C3D8R element type<sup>(5)</sup>)와 14728개 노드를 사용하였다. 또한 팁이 압입되는 부분만 Mesh 크기를 작게 한 Local Mesh를 사용하였고, 시편 중심에서 멀어질수록 해석에 거의 영향을 미치지 않으므로 Mesh를 크게 하였다. 팁은 663개 강체요소(R3D4 element type<sup>(6)</sup>)를 사용한 강체이다. 시편의 바닥은 회전 및 이동의 6자유도를 완전고정하였고, 팁은 Y축 이동만 가능하게 하였다.

나노인덴테이션 공정 해석을 위해서 팁을 Master, 시

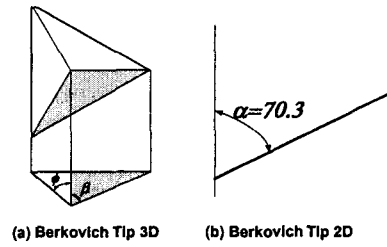


Fig. 1 Schematic of indenters

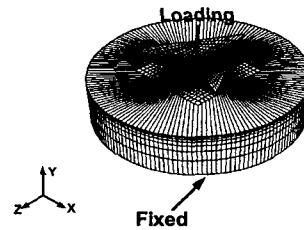


Fig. 2 Finite element model

편을 Slave로 한 접촉조건을 사용하였고, 접촉에 대한 마찰계수를 해석의 편의를 위해 1로 가정하였다. 그리고 이 해석은 로딩과 언로딩의 2단계로 해석하였고, ABAQUS/Standard를 이용한 탄소성 해석을 하였다.

Table 1은 나노인덴테이션 공정해석에 입력될 기계적 성질로써 탄성계수와 경도는 나노인덴테이션 실험으로 구한 값들이고, 항복강도와 프와송비는 참고문헌을 인용하였다. Table 1의 세가지 재료 중 실리콘 웨이퍼는 반도체공정에 많이 사용되고, 파이렉스 글라스는 MEMS 부품을 만들 때 실리콘 재료를 본딩하는데 사용한다.

## 3. 결과 및 검토

### 3.1 해석적 데이터와 실험적 데이터 비교

해석의 검증은 나노인덴터의 calibration에 사용되는 시편인 Fused Silica로 검증하였다. 해석에 입력될 Fused Silica의 물성치는 탄성계수 73GPa, 프와송비 0.17, 항복강도 7.1GPa을 사용하였다.<sup>(4)</sup> 실험에는 Berkovich 팁을 사용하였고, 100nm를 압입하였다. Fig. 3은 나노인덴테이션 공정을 묘사한 2차원, 3차원 유한요소해석과 실험의 비교를 나타낸 하중-변위 그래프이고, 거의 유사함을 알 수 있다. 이 결과에 대한 오차가 생기는 이유는 유한요소해석시 팁라운드와 표면거칠기를 0으

**Table 1 Elastic and plastic properties of silicon wafer<sup>(6)</sup>, and Pyrex glass 7740(JMC)**

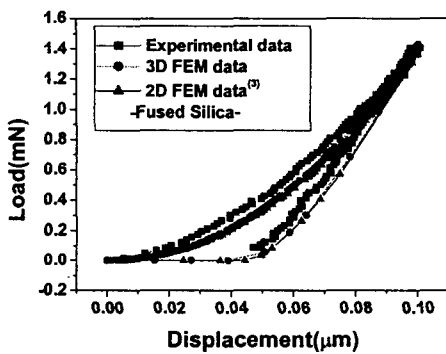
Material	Young's modulus (GPa)	Hardness (GPa)	Yield strength (GPa)	Poisson's ratio
Silicon wafer	168±2	13±1	7	0.278
Pyrex glass 7740	63±2	10±0.5	6.1	0.17

로 가정하였으나 실제 실험에서 존재하였고, 가공경화를 고려하지 않았기 때문이다. 이렇게 해서 유한요소 해석 모델의 정당성을 검증하였다.

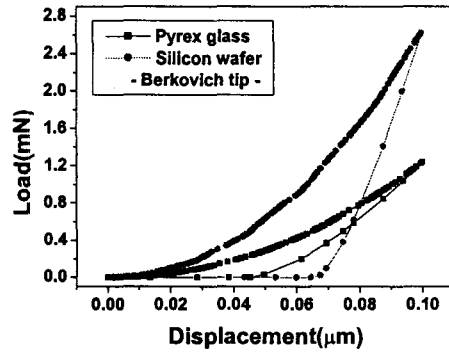
### 3.2 나노인덴테이션 공정 유한요소해석

Fig. 4는 실리콘웨이퍼와 파이렉스 글라스의 유한요소 해석하중-변위 결과로써 언로딩 부분에서 탄성회복을 알 수 있다. 실리콘, 파이렉스 글라스의 탄성회복은 총 압입 깊이에 각각 26%, 50%정도임을 알 수 있었고, 재료마다 탄성회복의 차이를 보이는 것은 탄성계수 대 항복강도 비( $E/\sigma_y$ )가 작을수록 탄성회복이 커지기 때문이다. 재료에 대한 100nm 압입까지의 하중을 알 수 있었다. Fig. 5는 로딩과 언로딩시 실리콘, 파이렉스 글라스 시편에 생기는 응력 분포를 나타낸 것이다.

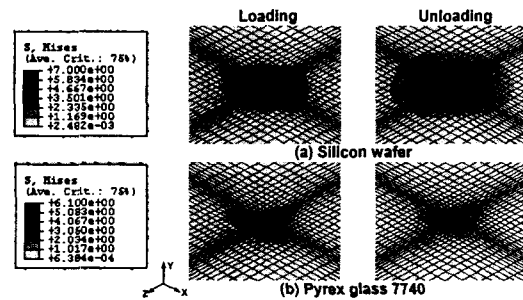
압입할 때마다 경도와 탄성계수값이 변하는 것은 팁 라운드 즉 팁 면적합수 변화 때문이다. 보통 팁 라운드 때문에 Indentation Size Effect(ISE)가 발생하게 된다. Fig. 6은 팁 라운드에 따른 하중-변위 그래프로써 팁 라운드가 커질수록 하중이 증가하고, 탄성회복도 증가함을 알 수 있었다. Fig. 7은 팁 라운드에 따른 실리콘웨이퍼



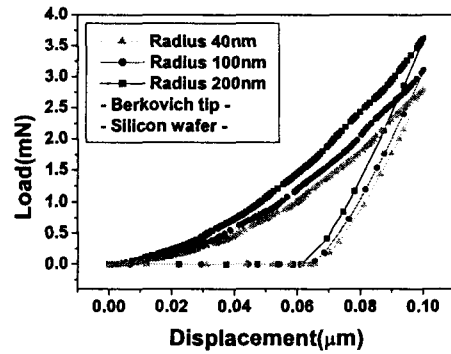
**Fig. 3 Comparison of finite element analysis result with experimental data for fused silica material**



**Fig. 4 Load-displacement curve of Silicon and Pyrex glass**



**Fig. 5 Von-mises stress distribution of each materials (Depth 100nm)**



**Fig. 6 Load-displacement curves on silicon wafer with different tip radius (Depth 100nm)**

표면의 파일업을 프로파일한 결과이다.

Fig. 8은 실리콘웨이퍼 소재에 Berkovich 팁을 100, 200, 300nm 압입시 발생하는 하중-변위 그래프이다. 압입깊이가 점점 커질수록 탄성회복이 감소함을 알 수 있

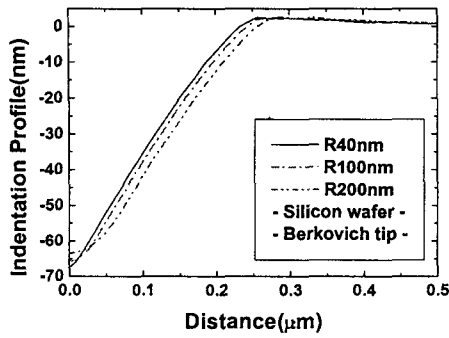


Fig. 7 Indentation profiles on silicon wafer with different tip radius

었다. Fig. 9는 압입깊이 변화에 대한 파일업을 프로파일한 결과이다. 압입 깊이가 깊어질수록 파일업의 높이가 커짐을 알 수 있었다.

팁라운드와 압입깊이 변화에 대한 해석 결과로 실리콘 웨이퍼는 탄성회복과 파일업 높이의 관계는 반비례함을 알 수 있었다. 이러한 결과들로 스크래치 공정에 사용할 하중 값과 파일업 높이, 탄성회복을 예측하여 스크래치 공정으로 나노패턴 제작 시 기초 데이터로 활용할 것이다.

#### 4. 결론

본 연구는 극미세 패턴 제작시 생기는 시편의 탄성회복이나 파일업을 나노인덴테이션 유한요소해석으로 예측해 보는 기초 연구이다. 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 나노인덴테이션 3D 유한요소해석은 Berkovich 팁을 이용하여 Fused Silica에 압입한 실험의 하중-변위 그래프와 비교하여 해석의 타당성을 검증하였다.
2. Berkovich팁과 실리콘웨이퍼, 파이렉스글라스 7740을 이용하여 압입하중, 탄성회복, 파일업 높이를 예측하였고, 그 결과 탄성회복과 파일업 높이의 관계는 반비례함을 알 수 있었다.
3. 나노인덴테이션 공정 해석으로 나노패턴 제작을 위한 나노스크래치 공정시 입력하는 하중을 선택할 수 있고, 그에 대한 탄성회복과 파일업을 예측할 수 있다.

향후 3차원 스크래치 공정해석 모델을 만들어 정확한 공정 변수를 적용시켜 보다 정밀한 패턴 제작 조건을 조사할 것이다.

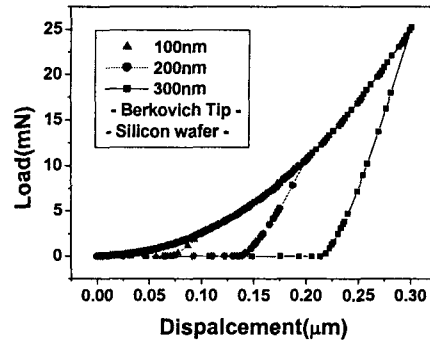


Fig. 8 Load-displacement curves on silicon wafer with different indentation depth

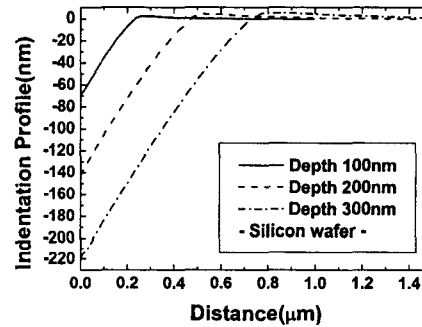


Fig. 9 Indentation profiles on silicon wafer 100 with different indentation depth

#### 참고 문헌

- (1) 한준희, 이광렬, 김광석, 이상울, 2002, "나노인덴테이션 시험의 원리 및 응용" 한국정밀공학회지 제19권, 제 3호, pp. 19-26.
- (2) Snow, E. S., Campbell, P. M., 1994, "Fabrication of Si nanostructure with an atomic force microscope", Appl. Phys. Lett., Vol. 64, pp. 1932-1934.
- (3) 이정우, 윤성원, 김충길, 2003, "나노인덴테이션을 이용하여 극미세 패턴을 제작하기 위한 나노변형의 유한요소해석", 한국정밀공학회, Vol. 20, No. 5.
- (4) J. A. Knapp, D. M. Follstaedt, S. M. Myers, J.C. Barbour, T. A. Friedmann, 1999, "Finite-element modeling of nanoindentation", J. Appl. Phys., Vol. 85, No. 3, pp. 1460-1474.
- (5) Hibbitt, Karlsson and Sorensen, 2001, ABAQUS Standard/Explicit rel. 6.2.
- (6) CRC PRESS, 2001, MEMS Handbook, pp. 18-11,12.