

# 나노스크래치 공정을 이용하여 극미세 패턴을 제작하기 위한 나노 변형의 유한요소해석

이정우\*, 윤성원#, 강충길\*\*

## Finite Element Analysis of Nano Deformation for Hyper-fine Pattern Fabrication by Application of Nano-scratch Process

Jung Woo Lee\*, Sung Won Youn# and Chung Gil Kang\*\*

### ABSTRACT

In this study, to achieve the optimal conditions for mechanical hyper-fine pattern fabrication process, deformation behavior of the materials during indentation scratch test was studied with numerical method by ABAQUS S/W. Brittle materials (Si, Pyrex glass 7740) were used as specimens, and forming conditions to reduce the elastic recovery and pile-up were proposed. The indenter was modeled as a rigid surface. Minimum mesh sizes of specimens are 1-10nm. Variables of the nanoindentation scratch test analysis are scratching speed, scratching load, tip radius and tip geometry. The nano-indentation scratch tests were performed by using the Berkovich pyramidal diamond indenter. Comparison between the experimental data and numerical result demonstrated that the FEM approach can be a good model of the nanoindentation scratch test. The result of the investigation will be applied to the fabrication of the hyper-fine pattern.

**Key Words** : Nanoindentation (나노인덴테이션), Scratch test (스크래치 실험), Pile-up (과일업), Hyper-fine pattern (극미세 패턴), Elastic recovery (탄성회복)

### 기호설명

P = Scratching load

V = Scratching velocity

$\beta, \phi$  = Angles of Berkovich tip

### 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. 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 선행되어야 한다<sup>1,2</sup>

접수일: 2003년 7월 3일; 게재승인일: 2003년 11월 14일  
\* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과  
# 교신저자, 부산대학교 정밀기계공학과  
Email wonny@hitel.net Tel. (051) 510-3936  
\*\* 부산대학교 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공연구소

현재까지 연구되어온 LOC 나 SoC 내의 채널의 폭은  $\mu\text{m}$  정도였으며, 주로 반도체 공정에 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<sup>3,4</sup>. 이러한 리소그라피 기술들은 자외선, X 선, 레이저 등의 광시스템 및 aligner 등 시설에 대한 초기 투자비용이 너무 높고, 공정특성상 다단계의 마스크 공정과 에칭공정 중 복잡한 공정을 필요로 하며 제작시간이 많이 소요될 뿐만 아니라, 패턴변경 등 디자인 변화를 위해서는 새로 마스크를 제작해야 하는 문제가 있어 단품종 생산에는 적합하나 다품종 생산에는 부적합하다. 또한, 가공 가능한 재료가 대부분 실리콘 기반재료에 한정되어 있다는 단점을 가진다. 리소그라피 기술에 의하여 제작 가능한 최소선폭의 물리적 한계로 인하여 마찰력현미경(FFM)이나 원자력현미경(AFM)을 이용한 극미세 패턴의 형성 기술들이 다양하게 연구되어 오고 있다<sup>5-9</sup>.

극미세 패턴의 제작공정에서 나노인덴테이션의 스크래치 공정을 이용할 경우 원자력현미경을 이용했을 때에 비하여 수직하중의 조절범위가 넓으며(max. 1N), 가공면이 넓고(수  $\text{cm}^2$ ), 수평하중의 조절이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 공정 사이클 소요시간이 길고 가공시 발생하는 탄성복원이나 파일업(pile-up)이 심하여 패턴의 재현성과 정밀도가 나쁘다는 단점이 있다.<sup>10</sup>

본 연구는 나노인덴터의 스크래치 옵션을 이용하여 극미세 패턴가공 후 발생하는 파일업과 탄성회복 즉 소재의 나노변형거동을 유한요소해석으로 예측해 보았고, 실험적으로 검증하였다. 저자는 우선 압입공정을 2 차원, 3 차원 유한요소해석으로 압입하중과 파일업, 탄성회복을 예측하였고, 이 결과를 토대로 스크래치 공정의 해석을 수행하였다<sup>11-12</sup>.

나노인덴테이션 스크래치 공정의 유한요소해석은 ABAQUS 6.2 를 사용하였고 스크래치 속도, 스크래치 하중을 변수로 탄성회복과 파일업을 예측하였다. 본 연구결과는 나노인덴테이션의 스크래치 기능을 활용하여 극미세 패턴을 제작할 때 기초연구로써 활용되어질 것이다.

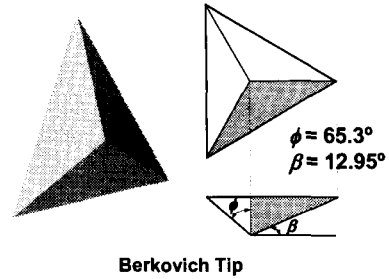


Fig. 1 Schematic of indenter shape

나노인덴테이션 스크래치 공정을 이용한 유한요소해석에 사용한 팁은 소재에 대한 스크래치 해석, 스크래칭 하중 변화에 대한 해석, 스크래칭 속도 변화에 대한 해석시 팁 라운드가 없는 완전 뾰족한 Berkovich 팁을 사용하였다. Berkovich 팁에 대한 구체적인 치수는 Fig. 1 에 나타내었다. Berkovich 팁의 치수정보는 Nanoindenter XP(MTS) 매뉴얼<sup>10</sup> 을 참고하였으며 스크래치 방향은 Berkovich 팁의 꼭지점 세개 중 한 개를 선택했다. 스크래치 공정 해석에 사용한 시편은 벌크로써 비정질 재료인 파이렉스 글라스 7740 과 비정질 실리콘이다. 이 재료에 대한 기계적인 물성치는 Table 1 에 자세히 나타내었다. 탄성계수와 경도값은 Nanoindenter XP 장비를 이용하여 CSM 모드로  $1\mu\text{m}$  압입하여 20 회 실험한 평균값으로 하였고, 프와송비와 항복강도는 문헌을 참조하였다. 스크래치 해석시 Table 1 의 값을 입력하여 해석을 했다.

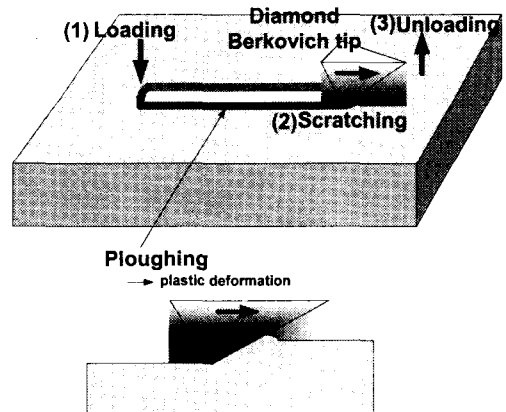


Fig. 2 Schematic illustration of scratching mechanism

## 2. 나노스크래치 실험 및 FEM 모델링

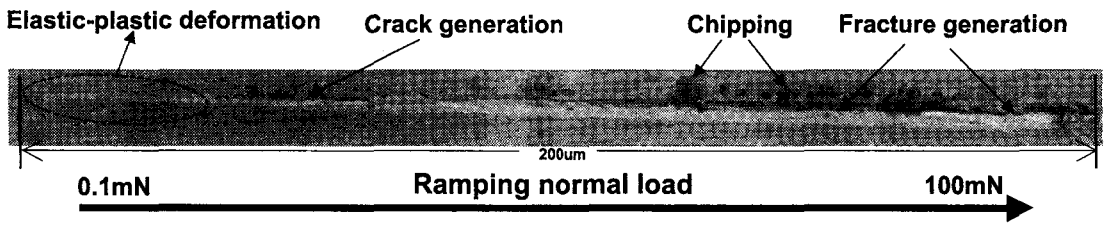


Fig. 3 Ramping load scratch test by using nanoindenter after microscope(1000X) image on silicon

Fig. 2 는 나노인덴테이션 스크래치 공정의 메커니즘을 그림으로 설명한 것이다. 1 단계 압입, 2 단계 스크래칭, 3 단계 언로딩 순으로써 3 단계로 나누어 해석을 실시하였다.

Fig. 3 은 나노인덴터를 사용해 실리콘에 증가 하중을 가하여 생긴 스크래치 이미지이다. 처음 작은 하중에서는 탄소성변형만 일어나고 점점 수직하중이 증가할수록 크랙이 발생하고 칩도 생긴다. 임계수직하중을 넘어서면 파괴가 일어나게 된다. 본 연구에서는 일정한 깊이의 극미세 패턴을 만들기 위해서는 일정하중을 사용하고, 미소하중을 가하기 때문에 탄소성변형만 일어나게 된다. 하지만 가공정확도를 고려하지 못하여 스크래치 공정 해석은 탄-완전소성변형 해석으로 하였다.

Fig. 4 는 스크래치 하는 동안 재료에 따른 변형을 나타낸 그림이다. Fig. 4(a)는 금속재료와 같은 강소성재료에 대한 변형 예측 그림인데 스크래치를 한 후 탄성회복은 거의 없고, 스크래치 방향의 팁 주위에 파일업이 일어난다. Fig. 4(b)는 유리나 실리콘 웨이퍼와 같은 탄소성재료에 대한 변형 그림인데 스크래치 한 후 탄성회복이 많이 생기고, 스크래치 방향의 팁 주위에 싱킹인(sinking-in)이 일어난다. 본 논문은 탄소성재료인 파이렉스 글라스 7740 과 실리콘을 사용했기 때문에 Fig. 4(b)와 같은 현상이 일어난다.

Fig. 5 는 나노스크래치 공정해석시 사용한 유한요소해석 모델과 경계조건으로 3 단계로 나누어서 해석을 하였는데 1 단계는 -Y 축 방향으로 수직하중을 가하는 압입 과정이고, 2 단계는 -Y 축의 수직하중이 계속 작용하면서 -Z 축방향으로 수평하

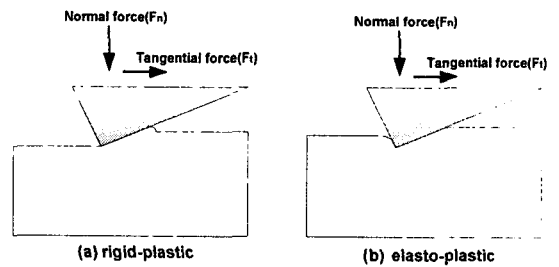


Fig. 4 Schematic scratching for rigid and elasto-plastic materials<sup>15</sup>

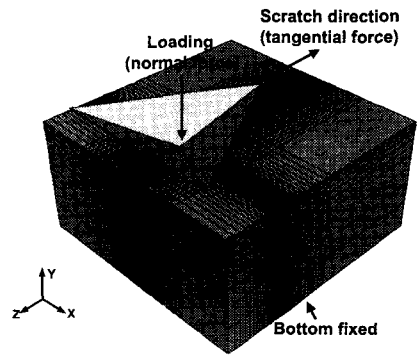


Fig. 5 Nanoscratch process 3D model and boundary conditions for FEM analysis

중을 가하는 스크래칭 과정이다. 3 단계는 스크래칭을 마치고 팁의 원위치로 복귀한다. 실험에서 팁은 강체로 가정하였다.

시편의 크기는 가로세로가  $6\mu m$  이고, 두께는 보통 압입 깊이에 8~10 배 정도 되어야 시편 바닥

Table 1 Elastic and plastic properties of silicon<sup>13-14</sup>, and pyrex glass 7740

Materials	Young's modulus (Gpa)	Hardness (Gpa)	Yield Strength (Gpa)	Poisson's ratio
Silicon	168±2	13±1	7	0.278
Pyrex glass7740 <sup>JMC</sup>	63±2	10±0.5	6.1	0.17

까지 응력의 영향이 미치지 않는다고 보고되고 있다<sup>16-17</sup>. 그래서 두께는 충분히 3 $\mu$ m로 하여 직육면체로 모델링하였다. 메시는 스크래칭 부위에 집중되는 로컬 메시를 사용하였고, 최소 메시 크기는 1~10 nm로 하였다. 메시 구성은 시편에 노드 29106 개와 25420 개의 8 노드 축소 적분요소(C3D8R element type)로 구성하였고, 틱은 196 개의 강체요소(R3D4 element type)로 구성하였다<sup>18</sup>.

팁과 시편사이의 마찰계수 0.16 인 접촉조건을 사용했으며 이것은 Fig. 6의 나노인덴터 장비를 이용하여 얻은 마찰계수 그래프에서 평균값을 사용하였다. Fig. 6은 파이렉스 글라스와 실리콘에 대한 스크래치 마찰계수 값으로써 두 시편 모두 평균 마찰계수가 0.16이다. 이 값을 스크래칭 공정 해석 시 접촉조건에 입력하였다.

스크래치 공정 해석에 사용한 재료는 균일한 등방성 재료이며, 가공경화를 고려하지 않았고, 표면거칠기, 초기잔류응력, 온도 및 공기저항이 없다고 가정하였고, 팁끝은 완전히 뾰족하다고 가정하였다.

### 3. 결과 및 검토

#### 3.1 스크래치하중 변화에 대한 유한요소해석

스크래치 수직하중에 대한 스크래치 공정 해석은 나노인덴테이션 공정 해석으로 구한 하중-변위 곡선을 이용하여 스크래치하중을 선택하였다<sup>10-11</sup>. 스크래치하중선택은 압입깊이가 20 nm, 30 nm, 40 nm 일 때의 하중을 스크래치 해석에 적용하였고, 이에 대한 파이렉스 글라스 7740의 스크래치하중(P)은 각각 0.05 mN, 0.1 mN, 0.2 mN으로 하여 스크래칭 동안 일정수직하중을 가하였고, 실리콘은 각각 하중을 0.1 mN, 0.3 mN, 0.5 mN으로 하였다.

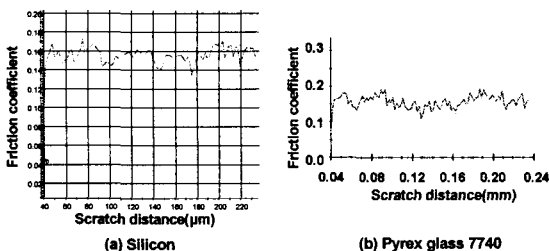


Fig. 6 Friction coefficients measured by using nanoindenter

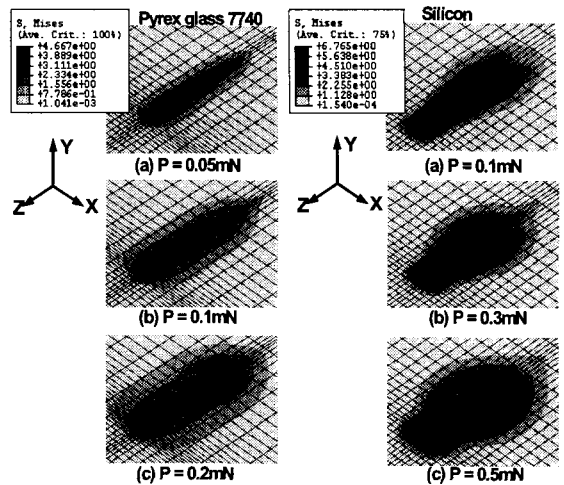


Fig. 7 von-Mises stress distributions for different scratch load obtained by 3D FEM ( $V=10\mu\text{m/s}$ )

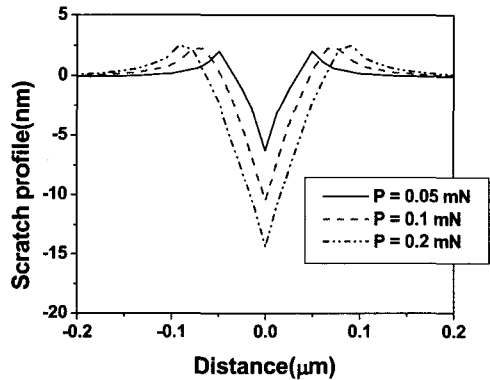


Fig. 8 Scratch profile of pyrex glass 7740 with different scratch load obtained by 3D FEM ( $V=10\mu\text{m/s}$ )

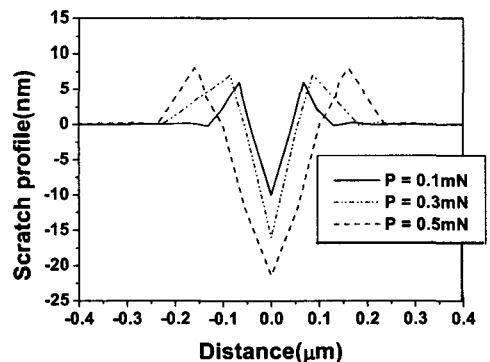


Fig. 9 Scratch profiles on silicon with different scratch load obtained by 3D FEM ( $V=10\mu\text{m/s}$ )

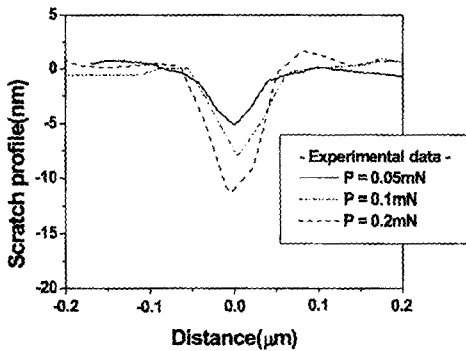


Fig. 10 Scratch profile on pyrex glass 7740 with different scratch load obtained by experiment (V=10μm/s)

스크래치 속도(V)는 10μ m/s 로 하였고, 스크래치 길이는 500 nm 로 하였다. 하중별 스크래치 공정을 해석하였고, 그에 대한 파일업을 프로파일한 다음 실험데이터와 비교 검증하였다.

Fig. 7 은 파이렉스 글라스 7740 과 실리콘재료의 하중별 스크래치 공정 해석 후 변형과 응력분포를 보여주고 있다. 탄성회복은 파이렉스 글라스 7740 인 경우 스크래치 하중이 0.05 mN 일 때 약 20 nm 압입되고 스크래칭 후 깊이는 약 7 nm 가 된다. 따라서 탄성회복량은 압입깊이에 약 65 % 정도이다. 하중이 0.1 mN 일 때 탄성회복량은 압입깊이에 약 60 %, 하중이 0.2 mN 일 때 탄성회복량은 약 55 % 가 됨을 알 수 있었다. 파일업은 각 하중별 2~3 nm 높이로 형성되었다. 그 결과 재료가 파이렉스 글라스 7740 인 경우 스크래치 하중이 클수록 탄성회복은 감소하고 파일업은 증가함을 알 수 있었다.

Fig. 8 은 스크래치 공정 해석 후 스크래치 길이의 중간에서 X-Y 단면의 결과 프로파일이다. 스크래치 하중이 증가할수록 파일 업이 높아지고 넓어짐을 알 수 있었다. 파이렉스 글라스 7740 은 스크래칭 후 변형이 작고 일정하게 되었지만 실리콘은 변형이 크게 형성되었음을 알 수 있었다. 그 이유는 E/σ<sub>y</sub> 가 크기 때문에 변형이 많이 일어나고 탄성회복 또한 작다. 파이렉스 글라스 7740 과 실리콘의 E/σ<sub>y</sub> 값은 각각 10.3 과 24 이다.

Fig. 9 는 일정한 스크래칭 속도에 대해 스크래치 하중을 변수로 하여 해석한 실리콘 소재의 스크래치 후 프로파일이다. 파일업은 스크래치 하중

이 증가할수록 높아지고 넓어짐을 알 수 있었다. 탄성회복은 실리콘인 경우 스크래치 하중이 0.1 mN 일 때 약 20 nm 압입되고 스크래칭 후 깊이는 약 10 nm 가 된다. 따라서 탄성회복량은 압입깊이에 약 50% 정도이다. 하중이 0.3mN 일 때 탄성회복량은 압입깊이에 약 47%, 하중이 0.5mN 일 때 탄성회복량은 약 45%가 됨을 알 수 있었다. 파일업은 각 하중별 5~8 nm 높이로 형성되었다. 그 결과 재료가 비정질 실리콘인 경우 스크래치 하중이 클수록 탄성회복은 감소하고 파일업은 증가함을 알 수 있었다.

### 3.2 스크래치하중 변화에 대한 실험

스크래치 공정 해석에 이용한 속도 10 μm/s, 하중 0.05 mN, 0.1 mN, 0.2 mN 을 그대로 나노인덴터 스크래치 옵션에 입력하고 길이는 40 μm 로 입력한다. 원래 나노인덴테이션 스크래치 옵션에서 Pre 와 Post 기능이 있는데 모두 수행하지 않았다. 왜냐하면 Pre 와 Post 수행 중 스크래치 트랙 주위에 미세한 트랙이 생기기 때문이다. 스크래치 방향은 0° 로써 V 형 그루브가 생길 수 있는 압자 방향을 선택한다. 이렇게 실험 후 파이렉스 글라스 7740 표면에 생긴 스크래치 트랙을 AFM 으로 프로파일 하면 Fig. 10 과 같은 그래프를 볼 수 있다. 파일업이나 탄성회복이 유한요소해석 결과와 정확하게 일치하지는 않지만 Fig. 8 과 비슷한 양상을 보이고 있다. 이렇게 일치하지 않는 이유는 첫 번째, 팁 조립시 팁 정렬문제 때문이다. 즉 팁이 약간 틀어져 있다는 것이다. 두 번째, 해석 시 재료는 균일하고 등방성이며, 가공경화, 표면거칠기, 초기잔류응력, 주위환경변화, 팁 라운드 등이 없다고 가정하였기 때문에 나타나는 오차이다.

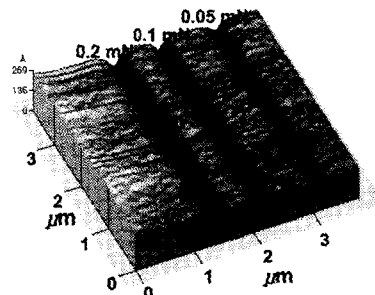


Fig. 11 AFM image of scratched surface on pyrex glass 7740 with different scratch load

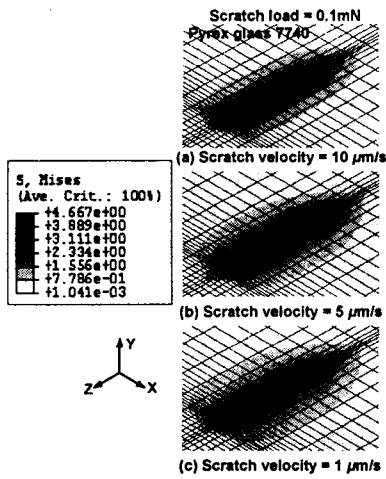


Fig. 12 Von-mises stress distribution for different scratch velocity obtained by 3D FEM (P=0.1 mN)

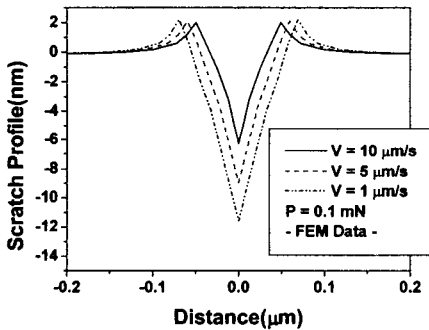


Fig. 13 Scratch profiles on pyrex glass 7740 with different scratch velocity obtained by 3D FEM

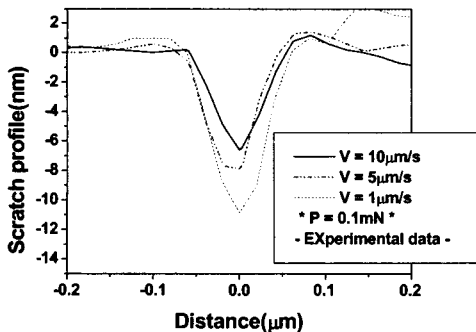


Fig. 14 Scratch profiles on pyrex glass 7740 with different scratch velocity obtained by experiment

차후 이러한 오차발생 이유를 고려한다면 정확한 파일업과 탄성회복을 예측할 수 있을 것이다.

Fig. 11 은 파이렉스글라스 7740 소재에 나노인덴터 스크래치 옵션을 이용하여 0.05 mN, 0.1 mN, 0.2 mN 하중별 스크래치 실험 후 AFM 으로 관찰한 이미지이다. 하중별 스크래치 깊이를 시각적으로 볼 수 있다.

### 3.3 스크래치속도 변화에 대한 유한요소해석

스크래치 속도 변화에 대한 스크래치 공정 해석은 파이렉스 글라스 재료에만 적용시켰고, 스크래치 하중을 일정하게 고정시킨 다음 스크래치 속도만 변화시켜 해석을 수행하였다.

Fig. 12 는 파이렉스 글라스 7740 에 대해 스크래치 하중 0.1mN 을 가하고, 스크래치 속도를 10 μ m/s, 5μ m/s, 1μ m/s 로 변화시켜 스크래치 해석해서 얻은 응력분포와 소재변형을 나타낸 그림이다.속도가 감소할수록 스크래치 깊이가 깊어지고, 파일업은 높아짐을 시각적으로 알 수 있었다.

Fig. 13 은 스크래치 속도 변화에 대한 스크래칭 후 프로파일한 그래프이다. 그래프를 보면 속도가 감소할수록 파일업의 높이는 많은 차이를 보이지 않지만 스크래치 깊이는 많은 차이를 보이고 있다. 이러한 이유는 속도가 감소하면 팁과 소재와의 접촉시간이 길어지기 때문에 소재의 소성변형이 증가하게 된다.

### 3.4 스크래치속도 변화에 대한 실험

Fig. 14 는 스크래치 유한요소해석과 같이 0.1mN 의 스크래치 하중을 입력하고, 스크래치 속도를 10μ m/s, 5μ m/s, 1μ m/s 로 변화시켜 나노인덴터 스크래치 옵션을 이용하여 실험한 결과를 AFM 으로 프로파일한 그래프이다. 고려하지 않은 소재조건과 팁 조건 때문에 Fig. 13 의 해석결과 프로파일과 약간의 오차를 보이지만 속도변화에 대한 소재 변형 양상은 비슷하였다.

Fig. 13 와 Fig. 14 의 결과를 정리해보면 같은 스크래치 하중에 속도만 변화시키면 속도가 감소할수록 스크래치 깊이는 증가하고, 파일업은 높게 나타났다. 그 이유는 스크래치 속도가 감소할수록 탄성회복이 감소하기 때문이다. 즉, 팁이 스크래치 하는 동안 소재와 접촉하는 시간이 길어지기 때문에 스크래치 깊이가 깊어진다. 그리고, 탄성회복이 감소하면 파일업은 증가하게 된다. 나노인덴테이

선 공정에서 최대 로딩시 유지시간(Holding time)을 주었을 때 계속 압입되어 탄성회복이 감소하는 현상과 같은 현상이다.

Fig. 15 는 파이렉스 글라스 7740 소재를 이용하여 스크래치 속도 변화에 대한 스크래치 실험 후 소재의 표면을 AFM 으로 측정한 이미지이다. Fig. 11 의 유한요소해석 결과와 같이 시각적으로 속도변화에 대한 스크래치 깊이나 파일업을 볼 수 있다. 속도가  $1\mu\text{m/s}$  인 경우 스크래치 깊이가  $10\mu\text{m/s}$  인 경우보다 현저하게 깊음을 알 수 있다.

본 연구는 스크래치 공정 해석에 대한 여러가지 변수 즉 팁라운드, 팁형상 등을 고려하지 못했다. 하지만 나노인텐터를 이용하여 극미세 패턴을 제작할 때 스크래치 하중, 탄성회복, 파일업, 스크래치속도 등을 선택할 수 있는 기초데이터를 제시하였다.

나노인텐터를 이용한 극미세 패턴 제작 공정에서 탄성회복을 고려한다면 팁각도가 작은 콘팁이나 Berkovich 팁각도를 축소시킨 Cube corner 를 사용하는 것이 고종횡비의 패턴을 제작할 수 있을 것으로 예상되어진다.

#### 4. 결론

나노인텐테이션 스크래치 공정을 이용하여 극미세 패턴을 제작하기 위한 나노변형의 유한요소해석과 실험적 검증을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 나노인텐터를 이용한 스크래치 시  $E/\sigma_y$  값이 적을수록 스크래치에 의한 소재변형이 작으며,  $E/\sigma_y$  값이 크면 소재의 변형이 크다는 것을 유한요소해석으로 알 수 있었다. 정밀한 패턴 제작시  $E/\sigma_y$  값에 대한 소재특성을 잘 고려해야 한다.

(2) 스크래칭 후 소재의 탄성회복이 증가하면 파일업은 감소하고, 탄성회복이 감소하면 파일업은 증가하였다. 정밀한 극미세 패턴 제작 시 탄성회복과 파일업의 반비례관계를 잘 고려해야 한다.

(3) 스크래치 속도를 고정시키고, 스크래치 하중을 변화시켜 실시한 나노스크래치의 유한요소해석 해석결과와 실험결과 하중이 증가할수록 파일업의 폭과 높이가 증가하였고, 탄성회복은 감소하였다.

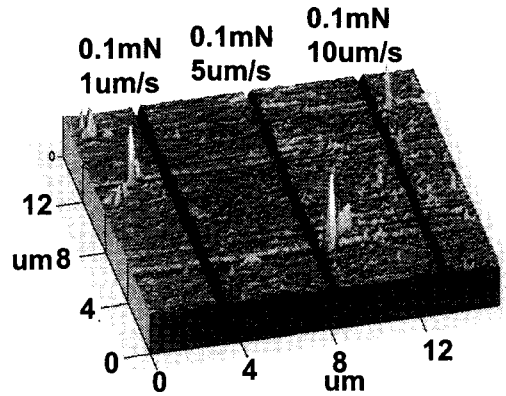


Fig. 15 AFM image of scratched surface on pyrex glass 7740 with different scratch velocity obtained by experiment

따라서 극미세 패턴을 제작할 때 파일업의 영향을 축소시키려면 스크래치 하중을 감소시켜야 한다.

(4) 스크래치 하중을 고정하고 스크래치 속도를 변화시킴으로써 스크래치 속도에 대한 파일업과 탄성회복을 유한요소해석과 실험결과 스크래치 속도가 감소하면 파일업은 증가하고, 탄성회복은 감소함을 알 수 있었다. 극미세 패턴을 제작할 때 고종횡비를 원한다면 스크래치 속도를 감소시켜야 한다.

#### 후기

본 연구는 한국학술진흥재단에서 주관하는 선도연구자지원사업인 “나노인텐테이션을 이용한 극미세 패턴의 Maskless 제작기법 개발”의 지원연구비와 부산대학교 연구비의 지원으로 이루어진 것으로 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Jeong, J. H., Shin, Y. J., Lee, E. S., Whang, K. H., “Trends of Nanoimprint Lithography Technology,” J. of KSPE, Vol. 20, No. 3, pp. 15-22, 2003.
2. Shin, Y. J., Cho, J. D., Lee, E. S., “Trends of Soft Lithography Technology,” J. of KSPE, Vol. 20, No. 4, pp. 5-11, 2003.
3. Menz, W., “LIGA and Related Technologies for

- Industrial Application,” *Sensor. Actuat. A-phys.*, Vol. 54, pp. 785-789, 1997.
4. Ashida, K., Morita, N., and Toshida, Y., “Study on Nano-machining Process using Mechanism of a Friction Force Microscope,” *JSME International Journal Series C*, Vol. 44, No. 1, pp. 51-60, 2001.
  5. Ashida, K., Morita, N., and Toshida, Y., “Study on Nano-machining Process using Mechanism of a Friction Force Microscope,” *JSME International Journal Series C*, Vol. 44, No. 1, pp. 51-60, 2001.
  6. Minne, S. C., Adams, J. D., Yaralioglu, G., Manalis, S. R., Atalar, A., and Quate, C. F., “Centimeter Scale Atomic Force Microscope Imaging and Lithography,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 73, pp. 1742-1744, 1998.
  7. Chang, W. S., Shin, B. S., Whang, K. H., “Nanoprobe Application Technologies,” *J. of KSPE*, Vol. 20, No. 3, pp. 5-14, 2003.
  8. Hamamaka, H., Ono, T., and Esashi, M., “Fabrication of Self Supported Si Nano-Structure with STM,” *Proc. IEEE MEMS '97*, pp. 153-156, 1997.
  9. Snow, E. S., Campbell, P. M., “Fabrication of Si Nanostructure with an Atomic Force Microscope,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 64, pp. 1932-1934, 1994.
  10. MTS, *Nanoindenter XP Manual*, 2002.
  11. Lee, J. W., Youn, S. W., Kang, C. G., “Finite Element Analysis of Nano Deformation for the Hyper-Fine Pattern Fabrication by using Nanoindentation,” *J. of KSPE*, Vol. 20, No. 5, pp. 210-217, 2003.
  12. Lee, J. W., Youn, S. W., Kang, C. G., “Analysis of Material Deformation Behavior in Nanoindentation Process by using 3D Finite Element Analysis and its Experimental Verification,” *Proceeding of the KSPE Spring Annual Meeting 2003*, pp. 405, 2003.
  13. Lu, Chung-Jen., Bogy, D. B., “The Effect of Tip Radius on Nano-indentation Hardness Tests,” *Int. J. Solid Struct.*, Vol. 32, No. 12, pp. 1759-1770, 1995.
  14. Gad-el-Hak, M., *The MEMS Handbook*, CRC PRESS, pp. 18-11,12, 2001.
  15. Bucaille, J. L., Felder, E., Hochstetter, G., “Mechanical Analysis of the Scratch Test on Elastic and Perfectly Plastic Materials with the Three-dimensional Finite Element Modeling,” *Wear*, Vol. 249, pp. 422-432, 2001.
  16. Holmberg, K., Laukkanen, A., Ronkainen, H., Wallin, K., Varjus, S., “A Model for Stresses, Crack Generation and Frature Toughness Calculation in Scratched TiN-coated Steel Surfaces,” *Wear*, Vol. 254, pp. 278-291, 2003.
  17. Lichnichi, M., Lenardi, C., Haupt, J., Vitali, R., “Simulation of Berkovich Nanoindentation Experiments on Thin Films using Finite Element Method,” *Thin Solid Films*, Vol. 333, pp. 278-286, 1998.
  18. Hibbitt, Karlsson and Sorensen, “ABAQUS Standard /Explicit rel. 6.2,” 2001