

베르코비치 나노인덴테이션에 대한 3차원 유한요소해석과 탄소성 변형에 관한 연구

양현윤*, 조상봉#, 김지수**, 윤준도***

A Study on Elastic-Plastic Deformation and 3-D FEA for the Berkovich Nano-Indentation

Hyeon-Yun Yang*, Sang-Bong Cho#, Ji-Soo Kim**, Jon-Do Yun***

ABSTRACT

The Berkovich nano-indentation is an indentation test method analyzing mechanical properties of materials such as hardness and elastic modulus. The length scale of the penetration is measured in nanometers. Therefore, this method becomes widely useful for analyzing the mechanical property of thin film which can not be measured before. In this paper, comparing two results of the load-displacement curve obtained by the Berkovich nano-indentation and the 3-D finite element analysis, it was confirmed that the 3-D finite element analysis is useful. The phenomenon of pile-up and sink-in due to material properties was discussed by the finite element analysis.

Key Words : Nano-indentation(나노 압입), 3-D FEA(3차원 유한요소해석), Berkovich-Indenter(베르코비치 압자), Pile-up(파일 업), Sink-in(싱크 인)

1. 서론

나노인덴테이션 실험장비는 μ N의 하중으로 재료를 nm범위로 변형시켜 재료의 특성을 평가할 수 있는 장비이다. 그 활용범위는 넓으며, 활발히 이루어지고 있는 나노-박막재료 연구에 적합하다. 나노인덴테이션에 관한 실험적 연구와 수치 해석적 연구는 세계적으로 많이 이루어지고 있지만, 국내에서는 아직 미흡한 분야라 말할 수 있다. 이러한 의미에서 나노압입과 재료 거동의 기본적인 원리를

파악하는 것은 중요한 연구일 것이다.

나노인덴테이션 실험의 큰 장점은 깊이 감지기에 의해서 재료의 거동을 직접적으로 관찰할 수 있으며, 하중-변위 선도로부터 탄성계수 E와 경도 H를 실험 후에 바로 도출할 수 있다는 것이다.¹

Tajjat²는 구형 인덴테이션에 관하여 2차원 유한요소해석으로 E/Y 비와 가공경화지수에 따른 파일업과 싱크인 현상에 관한 연구를 하였다.

나노인덴테이션 문제에 관한 유한요소해석과 실험에 의한 연구로는 Sun et al.³, Cai와 Bangert⁴,

* 접수일: 2005년 3월 15일; 게재승인일: 2005년 8월 9일

* 경남대학교 대학원 기계설계학과

교신저자: 경남대학교 기계자동화공학부

E-mail: sbcho@kyungnam.ac.kr Tel. (055) 249-2620

** 경남대학교 대학원 재료공학과

*** 경남대학교 신소재공학부

Pelletier et al.⁵ 등의 결과가 있다. Pelletier et al.⁵는 2차원 유한요소해석 결과와 실험에 의한 결과를 비교하여 연구를 행하였다. 국내의 연구로서 Lee et al.^{6,7}은 극미세 패턴을 제작하기 위한 나노인덴테이션 스크래치 공정에 대한 연구로서 먼저 나노인덴테이션에 대한 유한요소해석을 통한 압자의 형상, 라운딩, 압입깊이 등의 공정변수에 따른 기초적 연구를 하였다.

본 논문에서는 베르코비치 나노인덴테이션 실험으로 얻은 하중-변위선도와 3차원 유한요소해석 결과를 비교하여 유한요소해석의 신뢰성을 검증하고, 재료의 특성에 따른 파일업(pile-up)과 싱크인(sink-in) 현상을 연구하고자 한다.

2. 나노인덴테이션 실험

시험편의 재료로는 다결정 봉상 알루미늄과 석영유리를 선택하였다. 알루미늄 시험편은 직경 10mm, 높이 10mm로 가공하였고, 표면을 SiC 2000 번 연마지로 연마하고, 3 μ m, 1 μ m 다이아몬드 페이스트로 경면 연마한 후에 나노인덴테이션 실험에 필요한 표면거칠기를 위해서 50nm 다이아몬드 컴파운드를 사용하여 최종 기계연마를 한 후 350 $^{\circ}$ C에서 1시간 30분 동안 어닐링 열처리를 하였다. 열처리 시의 노 내부의 분위기는 질소가스를 사용하여 알루미늄의 산화를 막고자 하였다. 압자는 베르코비치(Berkovich)압자를 사용하였고 실험에 사용한 장비는 나노인덴테이션 트리보스코프(하이저트론, 미국)와 주사탐침 현미경(SPM), 오토프로브(CP) 리서치 시스템(서모마이크로스코프스, 미국)으로 나

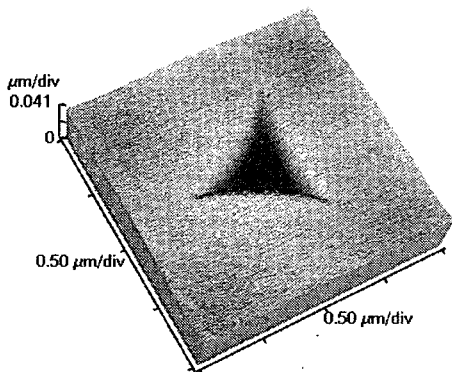


Fig. 1 AFM images after nanoindentation for silica-glass

노인덴테이션실험과 압흔의 이미지를 얻었으며, 주사전자현미경으로 표면의 압흔을 관찰하였다. Fig. 1은 압흔의 이미지를 나타내는 것이다

3. 나노인덴테이션의 유한요소해석

본 연구에서는 나노인덴테이션의 압자 중에 피라미드 형태인 베르코비치 압자만을 사용하였으며, Fig. 2는 베르코비치 압자의 형상을 나타낸다. 베르코비치 압자의 형상이 기하학적으로 축대칭 문제가 아니므로 유한요소해석은 3차원으로 모델링하여 해석해야 한다.

베르코비치 압자의 대칭조건을 고려하면 Fig. 3과 같이 1/6만 모델링하여 해석할 수 있다. 압자는 강체요소를 사용하였으며, 압자와 시편 사이의 접촉면에서 서로 접촉이 발생하도록 ANSYS⁸ 유한요소 해석 프로그램 상의 조건을 부여하였다. 압입 시에 관심의 대상이 되는 접촉부는 국부적으로 작은 요소로 분할하고 다른 부분은 요소크기를 크게 하여 요소수를 줄임으로써 해석 시간을 단축하고 정밀도를 높일 수 있었다. 경계조건은 Fig. 3에서의 아랫면과 대칭조건에 의해 나누어진 옆면에 수직인 방향만을 구속하였다. 총 9,000 여개의 요소를 사용

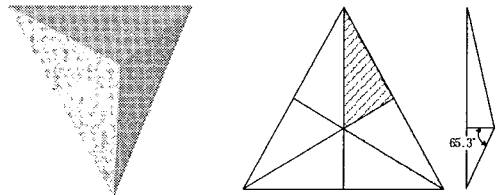


Fig. 2 Schematic of indenter

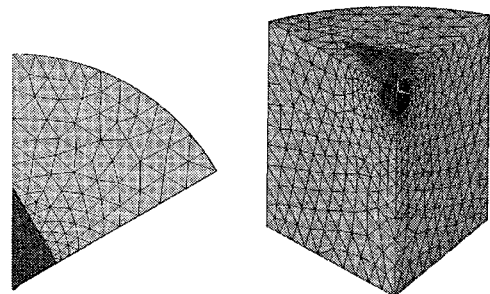


Fig. 3 Finite element model

하였고, 소프트웨어는 유한요소해석 범용 프로그램인 ANSYS⁸를 사용하였다.

4. 결과 및 검토

4.1 실험과 유한요소해석의 비교

나노인덴테이션 장비의 보정(calibration)에 사용되는 석영유리 시편을 사용하여 유한요소해석과 실험의 하중-변위 선도의 결과를 검증하였고 또한 알루미늄, 니켈, 티타늄으로도 검증하였다. 석영유리와 알루미늄의 하중-변위 선도는 본 연구에서 직접 실험한 것이고, 니켈과 티타늄의 하중-변위 선도는 Pelletier et al.⁵의 실험 결과를 이용한 것이다.

해석에 사용된 재료의 물성치는 Table 1과 같으며 응력-변형률선도는 Fig. 4와 같이 2선형(bilinear) 구성법칙을 따른다고 가정하였다. 여기서 E는 탄성구간의 탄성계수를 나타내고 E_T는 소성구간의 소성강도계수(plastic strength coefficient)를 나타낸다.

나노인덴테이션 실험과 유한요소해석의 압입 하중-변위 선도를 비교한 도표로 Fig. 5는 알루미늄에 대한 결과이고, Fig. 6는 석영유리에 대한 결과이다. Fig. 7과 8은 Pelletier et al.⁵의 니켈과 티타늄에 대한 실험결과와 본 연구의 유한요소해석 결과를 비교한 도표이다.

Fig. 5~8에서 보면 실험결과와 해석결과는 다소의 차이는 있지만 거의 유사하다고 말할 수 있을 정도이다. 실험과 해석결과에서 차이가 생기는 원인은 소재의 표면 거칠기, 팁 라운드, 마찰계수 등이라고 생각된다. 석영유리에 대한 결과는 거의 잘 일치하고 있지만 특히 알루미늄의 결과는 다소 차이가 크다. 알루미늄은 공기 중에 보관하면 표면에 나노미터 스케일의 산화층이 형성되어 팝인 현상을 일으키는 원인이 된다. 알루미늄의 경우에 로

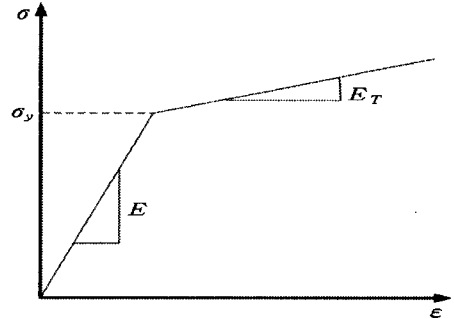


Fig. 4 Schematic representation for the bilinear constitutive law

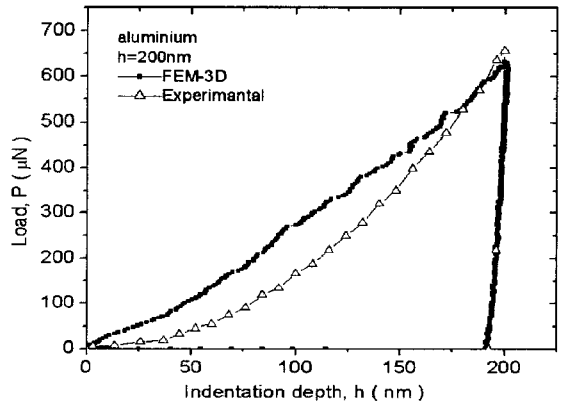


Fig. 5 Experimental and simulated load-displacement curves of a nanoindentation test for aluminium

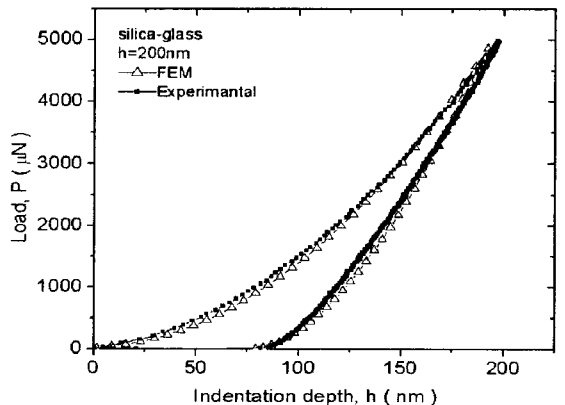


Fig. 6 Experimental and simulated load-displacement curves of a nanoindentation test for silica-glass

Table 1 Properties of material

Material	Young's modulus (GPa)	Yield strength (GPa)	Plastic strength coc.(GPa)	Poisson's ratio
Aluminium	70	0.175	0.057	0.33
Silica Glass	70	1.1	35	0.17
Nickel ⁵	240	0.53	19	0.3
Titanium ⁵	130	0.6	36	0.3

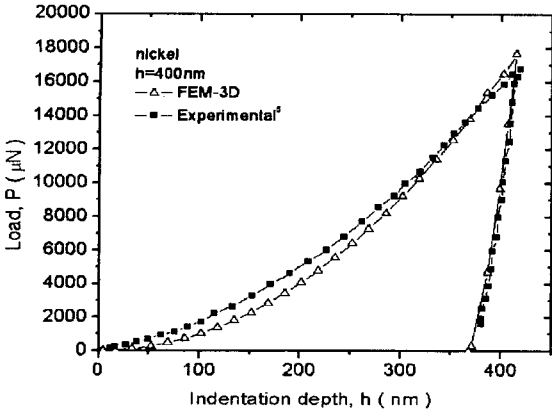


Fig. 7 Experimental and simulated load-displacement curves of a nanoindentation test for nickel

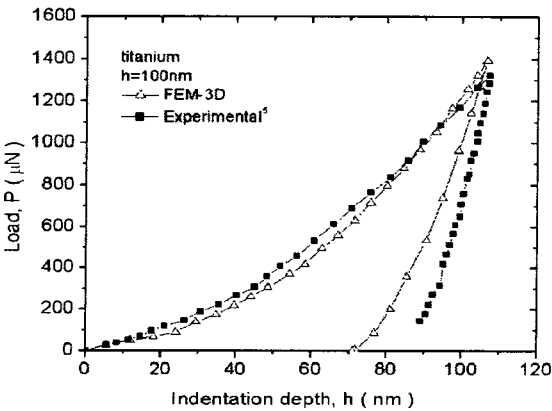


Fig. 8 Experimental and simulated load-displacement curves of a nanoindentation test for titanium

딩선도(loading curve)에서 차이가 크게 나타나는 것은 이러한 팝인 현상 등에 기인된 것으로 생각된다. 언로딩 선도(unloading curve)를 보면 소성강도 계수(E_T)가 큰 재료는 탄성회복을 많이 하고 작은 재료는 탄성회복을 작게 하는 것을 알 수가 있다.

이상으로 실험 결과와 해석 결과가 거의 유사하므로 유한요소해석의 신뢰성을 검증하였다.

4.2 파일업과 싱크인 현상

나노인덴테이션 방법의 압입시험에 의해 얻은 압입하중 P , 표면으로부터의 압입깊이 h , 시간 등의 데이터로부터 탄성계수 E 와 경도 H 를 산출할 수 있다. 파일업이 일어날 경우에 접촉투영면적 A 가

커지므로 탄성계수나 경도는 과소평가되며, 싱크인이 일어날 경우에는 접촉투영면적 A 가 작아지므로 탄성계수나 경도는 과대평가된다. 유한요소해석으로 여러 가지 재료의 특성에 따른 파일업과 싱크인 현상에 대한 연구를 하고자 한다. Fig. 9 (a)는 파일업과 싱크인 현상을 설명해 주는 그림이며 S 는 파일업이나 싱크인의 높이이며 h 는 최대 압입깊이이다. 또한, S/h 는 파일업계수(pile-up parameter)를 나타내고, 파일업계수가 양수이면 파일업이고 음수이면 싱크인이다.² Fig. 9 (b)와 (c)는 각각 싱크인과 파일업의 압흔을 나타낸다. Fig. 10과 11은 알루미늄과 석영유리를 압입깊이 200nm로 압입하여 유한요소해석한 결과의 하나로서 Fig. 9(c)에서 보는 바와 같이 r 방향의 단면에 대한 로딩과 언로딩 시의 탄소성 변형 형상을 나타낸 것이다. 알루미늄은 파일업을 일으키고 석영유리는 싱크인을 일으키는 것을 알 수 있으며, 언로딩 시에 알루미늄은 탄성복원을 거의 하지 않고 석영유리는 탄성복원을 많이 일으키는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 항복응력에 대한 탄성계수의 비(E/Y)와 탄성계수에 대한 소성강도계수의 비(E_T/E)

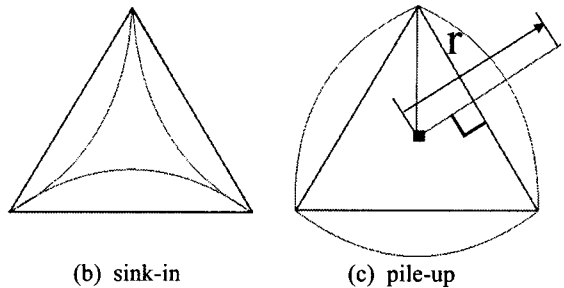
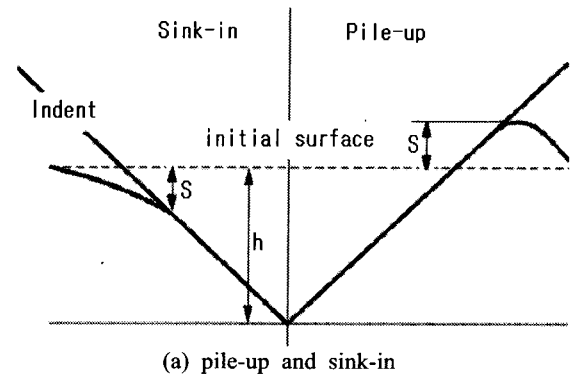


Fig. 9 Schematic of pile-up and sink-in⁹

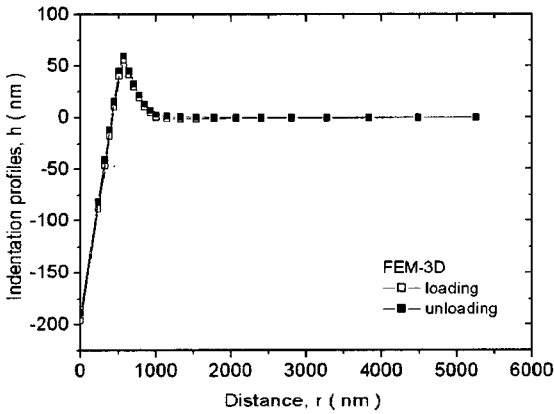


Fig. 10 Indentation profiles of aluminium

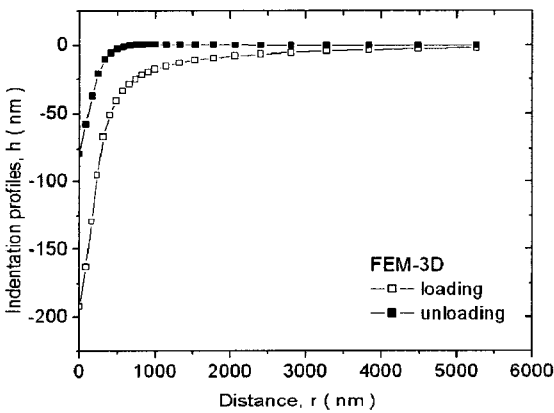


Fig. 11 Indentation profiles of silica-glass

가 파일업이나 싱크인을 예측하는 측도가 되는지를 검토하고자 한다. 유한요소해석 결과로부터 항복응력에 대한 탄성계수의 비(E/Y)와 파일업계수 (S/h)의 관계를 석영유리, 알루미늄, 티타늄, 니켈에 대하여 로딩과 언로딩 시에 따라 Fig. 12에 도시하였다. Fig. 12에서 보면 석영유리, 티타늄, 니켈은 로딩과 언로딩 시에 모두 싱크인이 나타나고, 알루미늄은 로딩과 언로딩 시에 모두 파일업이 나타난다. 2선형 구성법칙을 따르는 재료에서는 항복응력에 대한 탄성계수의 비(E/Y)만으로 파일업이나 싱크인을 예측할 수 없음을 보여주고 있다. 또한, 알루미늄과 니켈은 석영유리와 티타늄 보다 언로딩 시에 하중-변위 선도에서와 마찬가지로 파일업계수도 복원되는 양이 적음을 알 수가 있다.

Fig. 13은 탄성계수에 대한 소성강도계수의 비

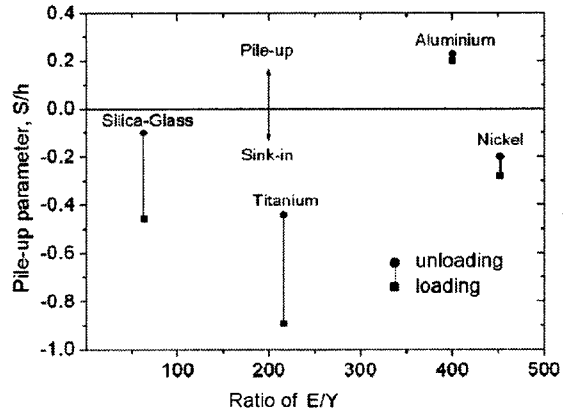


Fig. 12 Pile-up parameter according to the ratio of E/Y

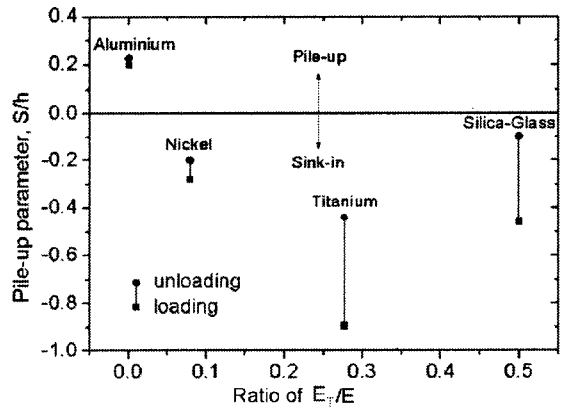


Fig. 13 Pile-up parameter according to the ratio of E_T/E

(E_T/E)와 파일업계수 관계를 석영유리, 알루미늄, 티타늄, 니켈에 대하여 나타낸 도표이다. 탄성계수에 대한 소성강도계수의 비(E_T/E)가 작은 재료가 파일업을 일으키고 탄성복원 양도 작고, 탄성계수에 대한 소성강도계수의 비(E_T/E)가 큰 재료는 싱크인을 일으키고, 탄성복원 양도 크다는 것을 보여주고 있다. Fig. 13에서 보면 알루미늄, 니켈과 티타늄은 탄성계수에 대한 소성강도계수의 비(E_T/E)가 증가함에 따라 싱크인이 증가하지만 석영유리의 경우는 다소 다른 경향을 보여주고 있으며, 탄성계수에 대한 소성강도계수의 비(E_T/E)만으로 파일업이나 싱크인의 증감을 예측할 수 없음을 알 수가 있다.

좀 더 항복응력에 대한 탄성계수의 비(E/Y)와

탄성계수에 대한 소성강도계수의 비(E_T/E)가 파일업이나 싱크인에 어떤 영향을 미치는 지를 조사하기 위하여 임의의 재료 물성치를 설정하여 유한요소해석한 후에 로딩과 언로딩 시의 파일업계수를 Fig. 14~17에 도시하였다.

Fig. 14, 15는 압입깊이가 200 nm이고, 푸아송비가 $\nu=0.3$ 으로 일정한 경우에 탄완전 소성재료의 항복응력에 대한 탄성계수의 비(E/Y) 변화에 따른 파일업계수를 나타내는 도표이다. Fig. 14는 탄성계수를 일정하게 하고 항복응력 Y 를 변화시킨 경우이고, Fig. 15는 항복응력을 일정하게 하고 탄성계

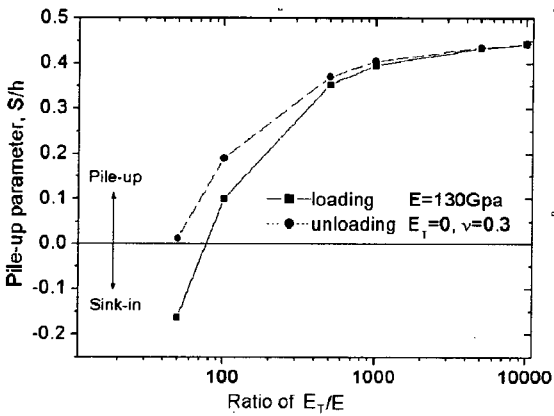


Fig. 14 Effects of E_T/E on the pile-up parameter for an elastic perfectly plastic material with $E=130$ GPa

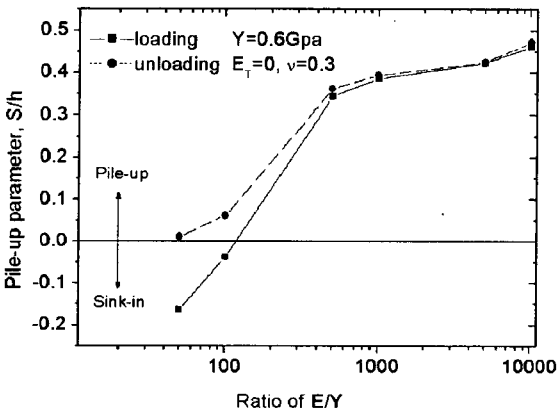


Fig. 15 Effects of E/Y on the pile-up parameter for an elastic perfectly plastic material with $Y=0.6$ GPa

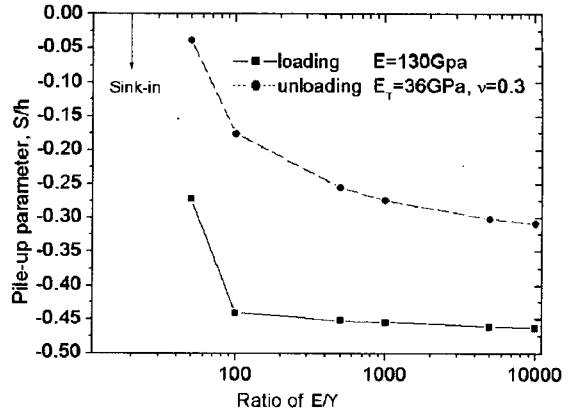


Fig. 16 Effects of E/Y on the pile-up parameter for an elastic-plastic material with $E=130$ GPa and $E_T=36$ GPa

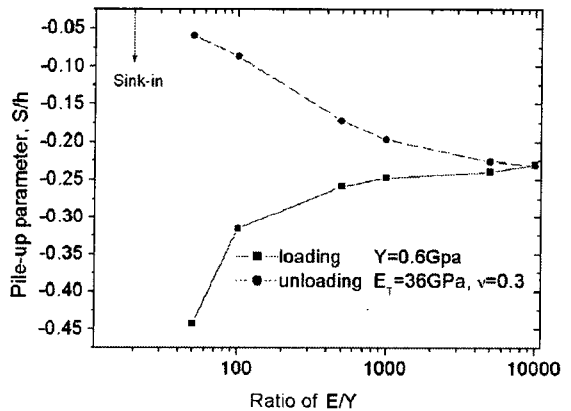


Fig. 17 Effects of E/Y on the pile-up parameter for an elastic-plastic material with $Y=0.6$ GPa and $E_T=36$ GPa

수 E 를 변화시킨 경우이다. Fig. 14와 15에서 보는 바와 같이 탄완전 소성재료에서는 탄소성재료의 항복응력에 대한 탄성계수의 비(E/Y)가 클수록 파일업이 일어나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 16, 17은 압입깊이가 200 nm이고, 푸아송비 $\nu=0.3$, 소성강도계수 $E_T=36$ GPa로 일정한 경우에 탄소성재료의 항복응력에 대한 탄성계수의 비(E/Y) 변화에 따른 파일업계수를 나타내는 도표이다. Fig. 16은 탄성계수 $E=130$ GPa로 일정하게 하고 항복응력 Y 를 변화시킨 경우이고, Fig. 17은 항복응력 $Y=0.6$ GPa로 일정하게 하고 탄성계수 E 를

변화시킨 경우이다. Fig. 16과 17에서 보는 바와 같이 탄소성재료에서는 항복응력에 대한 탄성계수의 비(E/Y)에 큰 영향 없이 싱크인이 일어나고 있다. 이는 Fig. 13에서 보는 바와 같이 소성강도계수가 크면 싱크인이 일어나고 있음을 알 수 있다.

또한, Fig. 14~17의 결과를 보면 탄소성재료나 완전 소성재료 모두가 항복응력에 대한 탄성계수의 비(E/Y)가 작을수록 로딩 시의 파일업계수가 언로딩 시에 많이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 항복응력에 대한 탄성계수의 비(E/Y)가 작을수록 탄성복원을 많이 함을 알 수 있고, 소성강도계수가 작을수록 파일업을 일으키고, 클수록 싱크인을 일으키는 것으로 보인다.

5. 결론

나노인덴테이션 시의 압흔에 발생하는 파일업과 싱크인 현상의 기초연구로서 다음의 결론을 얻었다.

(1) 알루미늄, 석영유리, 티타늄, 니켈의 나노인덴테이션 실험의 하중-변위 선도와 유한요소해석의 결과를 비교하여 유한요소해석의 신뢰성을 검증하였다.

(2) 탄완전 소성재료는 항복응력에 대한 탄성계수의 비(E/Y)가 증가하면 파일업 현상이 일어나기 쉬운 경향을 보인다.

(3) 탄소성재료에서는 소성강도계수가 큰 재료는 항복응력에 대한 탄성계수 비에 관계없이 싱크인이 일어나고, 항복응력에 대한 탄성계수 비가 작을수록 탄성복원을 많이 일으켜 로딩 시와 언로딩 시에 파일업계수의 차가 커지는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2005년도 경남대학교 교내학술조성연구비에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Han, J. H., Lee, K. R., Kim, K. S., Lee, S. Y., "Principal and Applications of Nanoindentation Test," J. of the KSPE, Vol. 19, No 3, pp. 19-26, 2002.
2. Taljat, B., Zacharia, F., Pharr, G. M., "Pile-up behavior of spherical indentations in engineering materials," Materials Research Society, Vol. 522, pp. 33-38, 1998.
3. Sun, Y., Bell, T., Zheng, S., "Finite Element Analysis of the Critical Ratio of Coating Thickness to Indentation Depth for Coating Property measurements by Nanoindentation," Thin Solid Films, Vol. 258, pp. 198-204, 1995.
4. Cai, X., Bangert, H., "Hardness Measurements of Thin Films-determining the Critical Ratio of Depth to Thickness using FEM," Thin Solid Films, Vol. 264, pp. 59-71, 1995.
5. Pelletier, H., Krier, J., Cornet, A., Mille, P., "Limits of bilinear stress-strain curve for finite element modeling of nanoindentation response on bulk materials," Thin Solid Films, Vol. 379, pp. 147-155, 2000.
6. 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 the KSPE, Vol. 20, No 5, pp. 210-217, 2003.
7. Lee, J. W., Youn, S. W., Kang, C. G., "Finite Element Analysis of Nano Deformation for Hyper-fine Pattern Fabrication by Application of Nanoindentation Process(II)," J. of the KSPE, Vol. 20, No 9, pp. 47-54, 2003.
8. Swanson Analysis Systems, Inc. "Ansys user's manual for revision 5.0," 1994.
9. Fischer-Cripps, Anthony C., "Nanoindentation," Springer, 2002.