

Nano-indentation 실험과 유한요소 해석을 연계한 재료의 탄소성 물성 평가법 개발

김윤재(고려대), 송태광*(고려대 대학원), 박준협(동명대), 한준희 (표준연구원)

A Method to Estimate Tensile Properties using Combined Nano-Indentation Tests and Finite Element Simulations

Y.J Kim (Korea Univ.), T.K Song (Korea Univ.), J-H Park (Tongmyung Univ.), J-H Hahn (KRISS)

ABSTRACT

Determination of elastic properties of nano-scale materials using nano-indentation tests is well established, but that of plastic properties is not yet clear. This paper presents a method to extract plastic properties from nano-indentation test, together with results from detailed elastic-plastic FE analysis. It shows that the plastic properties determined from this method are not unique, in the sense that a number of different plastic properties can give the same load-displacement response from nano-indentation test. Possible ways to overcome such problems are discussed.

Key Words : Nano-indentation(나노인덴테이션), FE Analysis(유한요소해석), elastic-plastic property (탄소성물성)

1. 서론

여러 산업에 큰 파급효과를 가져 올 MEMS기술에 입각한 초소형 제품 개발은 현재 신뢰성과 관련된 문제로 인해 MEMS제품 상용화에 많은 어려움이 있으며 이를 위해 MEMS 재료의 기계적 물성 평가가 중요하게 대두되고 있다. 현재 제시된 많은 방법들 중 효과적인 나노인덴테이션 방법은 탄성물성을 구할 수는 있으나⁽¹⁾, 항복강도, 변형경화율과 관련한 소성물성을 얻기에는 많은 어려움이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 나노인덴테이션과 유한요소해석을 연계한 접근이 필요하며 이 논문에서는 이와 같은 접근법을 통해 재료의 탄소성 물성을 예측하는 방법을 제시하고자 한다.

2. Nano-indentation 실험

MTS 사의 Nano-indentation 실험기를 이용하여 Si (111) 과 Al 3106 재료에 대한 나노인덴테이션 실험을 수행하였으며, 실험을 통해 구한 하중-변위선도(최대 압입 깊이= 300nm)는 그림(1)과 (2)에 보인 바와 같다. 실험에서는 4 면체의 Berkovich 형상의 다이아몬드 압입자를 사용하였다. 또한 Oliver, Pharr⁽¹⁾ 등이 제시한 방법에 따라 시편에 눌렀다가 (loading) 뺄 때(unloading) 나타나는 깊이에 따른 힘, 최초 unloading 때의 기울기(깊이에 따른 힘의 변화, 앞입깊이 h_c (total depth)에서의 contact stiffness, S로 정의)를 이용하여 두 재료에 대한 탄성계수를 구한 결과, Si (111) 과 Al 3106 의 탄성 계수는 각각 182 GPa 과 86 GPa로 구해졌다.

3. 유한요소 해석

유한요소법을 이용한 nano-indentation 모델링은 상용프로그램인 ABAQUS 를 이용하였으며 압입 실험시 소성변형을 포함한 대변형이 예상되므로 대변형(non-linear geometry) 해석을 수행하였다. 그림(3)은 해석에 사용한 요소로 압입자와 시편은 2 차원 축대칭 요소를 사용하여 모델링하였으며 시편의 크기가 깊이-하중선도에 영향을 미치는 것을 방지하기 위해 시편바닥과 외경부분을 무한요소로 나타내어 경계의 영향을 제거하였다. 해석에 사용된 재료의 물성은 탄성 및 탄소성 물성을 식(1)과 같은 형태로 가정하였으며, Si (111) 과 Al 3106 의 프와송비는 각각 0.36 과 0.33 으로 해석하였다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (\sigma \leq \sigma_0)$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (\sigma \geq \sigma_0)$$

식(1)

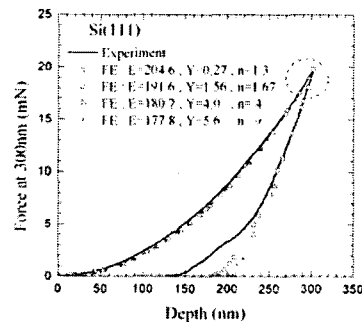


Fig.1 FE and experimental load-depth result of Si(111)

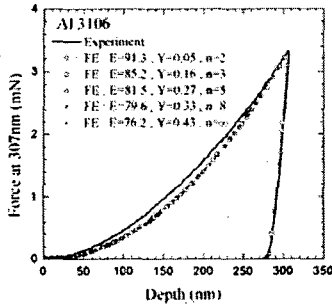


Fig.2 FE and experimental load-depth result of Al3106

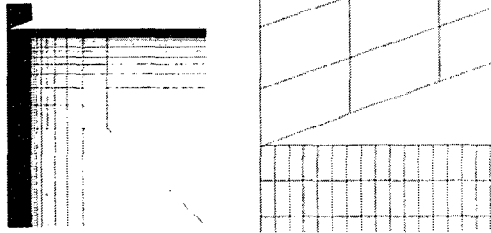


Fig. 3 FE mesh of indenter and micro-scale material

참고로 식(1)을 결정하기 위해서는 3 가지의 변수 (탄성계수, E ; 항복강도, σ_0 ; 경화지수, n)이 필요하다.

4. 재료의 탄소성 물성 예측

원론적으로 유한요소 해석 결과와 나노인덴테이션 실험 결과를 비교함으로써 재료의 탄소성 물성을 구할 수 있을 것이다. 하지만 실험의 하중-변위 선도로 부터는 최대하중(F)과 S 등 두 값만을 구할 수 있으나, 재료 물성 (식(1) 참고)을 구하기 위해서는 세 변수가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 주어진 경화지수 n 에 대해, Knapp⁽⁵⁾이 제안한 방법을 사용하여 재료의 탄성계수와 항복강도를 결정하였다. 이 방법은 몇 개의 유한요소 해석 결과를 통해 다음과 같은 선형 내삽으로 물성을 구하는 방법이다.

$$E = a_1S + b_1F + c_1 \quad \text{식(2)}$$

$$Y = a_2S + b_2F + c_2$$

그림(1)과 (2)에 유한요소 해석으로부터 구한 하중-변위 선도를 실험값과 비교하였다. 해석은 4 개 혹은 5 개의 변형경화지수에 대해 수행하였고 각 변형경화지수에 대해 실험값을 잘 모사하는 항복응력 및 탄성계수를 구하였다. 그림에서 보는 바와 같이, 하나의 실험 하중-변위 선도에 대해 다양한 탄성계수, 항복강도 및 가공경화지수의 조합이 가능하며, 재료의 물성을 unique 하게 구할 수 없다는 문제점이 있다. 그러나 그림(4),(5)에서 알 수 있듯이 재료의 물성으로 예측되는 물성의 조합은 특정 소성변형률 및 응력을 가진다는 점을 알 수 있다. 이러한 특성을 이용한다면 나노인덴테이션 실험 결

과로부터 탄소성 물성을 효과적으로 구할 수 있는 방법을 도출할 수 있으리라 사료된다.

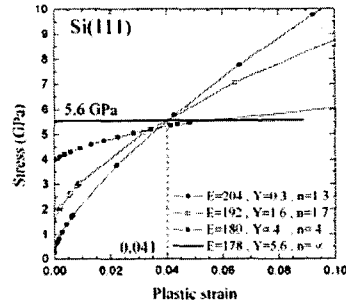


Fig.4 candidate stress-plastic strain curve of Si(111)

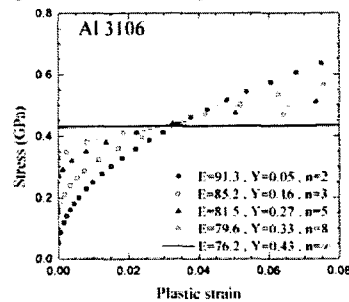


Fig.5 candidate stress-plastic strain curve of Al3106

5. 결론

본 논문은 nano-indentation 실험과 연계하여 유한요소해석을 통해 재료의 탄소성 물성을 예측하는 방법에 있어서의 한계점을 지적한 후, 이를 극복할 수 있는 방법을 제시한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2005-000-10400-0)지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. W.C Oliver and G.M. Pharr, "An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments", Journal of Material Research, vol.7, pp.1564, 1992
2. H. Hertz, "On the contact of elastic solids", J.Reine Angew. Math. 92, pp.156, 1881
3. Ian N. Sneddon, "The relation between load and penetration in the axisymmetric boussinesq problem for a punch of arbitrary profile", international Journal of Engineering Science, Vol.3, pp.47, 1965
4. K.L. Johnson, "Contact Mechanics", Cambridge University Press, Cambridge, 1985
5. J.A Knapp, D.M. Follstaedt, S. M. Myers, J. C. Barbour, and T. A. Friedmann, "Finite-element modeling of nanoindentation", Journal of Applied Physics, Vol.85, No.3, pp.1460, 1999,