



# 나노 압입 시험을 이용한 탄성계수 측정에 관한 리뷰

장서현<sup>1</sup>, 권오민<sup>2</sup>, 박시현<sup>1</sup>, 조현욱<sup>1</sup>, 김종형<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> 국립부경대학교 재료공학전공

<sup>2</sup> SK하이닉스

## A Review on Evaluation of Elastic Modulus Using Nanoindentation

Seo Hyeon Jang<sup>1</sup>, Oh Min Kwon<sup>2</sup>, Si Hyun Park<sup>1</sup>, Hyun Wook Cho<sup>1</sup>, and Jong-hyoung Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

<sup>2</sup> SK Hynix Inc., Icheon 17336, Korea

(Received March 5, 2025; Revised March 20, 2025; Accepted March 21, 2025)

**Abstract:** This review examines the principles, limitations, and recent advancements in elastic modulus measurement using nanoindentation. The importance of accurate contact area prediction is discussed, along with the Oliver-Pharr method and its limitations. The Continuous Stiffness Measurement (CSM) technique is presented as a significant improvement, allowing continuous measurement of mechanical properties throughout the indentation process. For ultra-thin films, the Li and Vlassak method, which incorporates Yu's solution and the concept of effective thickness, is highlighted as a means to correct for substrate effects. Recent developments in artificial neural network-based models for elastic modulus prediction are also explored. These advancements have greatly expanded the applicability of nanoindentation in semiconductor and MEMS device reliability assessment.

**Keywords:** Nanoindentation, Elastic modulus, Continuous stiffness measurement, Artificial neural network

### 1. 서론

오늘날의 전자소자에서 잔류응력의 평가는 매우 중요하다. 잔류응력은 재료와 구조물의 기계적 거동, 성능, 더 나아가 신뢰성에도 큰 영향을 미치기 때문이다 [1]. 잔류응력은 외부 하중이 없는 상태에서도 재료 내부에 존재하는 응력으로, 다양한 제조 공정, 열처리 또는 상변태 과정에서 발생할 수 있다. 이러한 응력은 크기, 분포, 그리고 외부 하중과의 상호작용에 따라 재료 특성에 유익하거나 또는 해

로운 영향을 줄 수 있다. 특히 인장 잔류응력은 균열의 성장속도를 더 가속화하기 때문에 높은 신뢰성의 소자/제품을 얻기 위해서는 이러한 잔류응력의 분포에 대한 이해가 충분히 이루어져야 한다.

오늘날 전자소자의 내부 잔류응력 분포를 예측하는데 있어서 시뮬레이션이 널리 활용된다. ABAQUS, ANSYS, COMSOL 등으로 대표되는 유한 요소 해석 시뮬레이션은 실제 구조와 올바른 재료물성, 경계조건이 주어졌을 때 내부의 응력분포의 유추를 가능케 한다. 재료물성 중에서도 탄성계수(elastic modulus)는 재료의 탄성 거동의 특성을 결정하는 핵심 물성으로, 잔류응력과 밀접하게 연관된다. 소재의 탄성계수를 정확하게 측정하는 것은 잔류응력의 발달과 분포를 예측하고 제어하는 데 필수적이다.

거시적 규모에서는 재료의 탄성계수를 평가하기 위한 여

✉ Jong-hyoung Kim; [jhkim@pknu.ac.kr](mailto:jhkim@pknu.ac.kr)

Seo Hyeon Jang and Oh Min Kwon contributed equally to this work.

Copyright ©2025 KIEEME. All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

러 가지 확립된 측정 기법들이 존재한다. 이러한 방법에는 고주파 음파를 사용해 재료를 통과하는 음속을 측정하는 초음파 검사 [2], 표준화된 시편을 파괴될 때까지 인장하는 인장 시험 [3], 그리고 빔 형태의 시편에 굽힘 하중을 가하는 굴곡 시험 [4] 등이 포함된다. 이러한 기존의 측정 기법은 거시적 규모에서 벌크 재료의 탄성계수를 측정하는 데 신뢰할 만하고 정확한 것으로 입증되었지만, 미소 스케일로 적용대상을 확장할 경우에는 상당한 한계에 부딪힌다. 미소 스케일에서는 시편 크기의 제약, 공간 분해능의 부족, 박막 측정 시 기판의 영향, 표면 민감도 증가, 장비의 측정 분해능의 한계 등의 요인으로 인하여 기존의 탄성계수 측정 기법이 그대로 적용되기 어렵다.

나노 압입 시험(nanoindentation)은 시편의 표면에 압입을 통해 얻어지는 하중-변위 곡선을 분석하여 소재의 역학 특성을 평가하는 시험기법이다 [5,6]. 삼각뿔 또는 사각뿔 형태의 압입자로 단순하게 시편을 누름으로써 시험이 끝나기 때문에 시험이 간편하고, 별도로 시험편의 가공을 요구하지 않는다. 이러한 편의성과 장점에 기반하여 오늘날에는 소재의 국부 탄성거동을 나노 압입 시험을 이용해 평가하는 다양한 연구들이 진행되고 있다.

본 논문에서는 나노 압입 시험을 통한 탄성계수 측정의 원리와 한계를 분석하고, 이를 극복하기 위해 제안된 모델들을 검토한다. 또한 CSM (continuous stiffness measurement) 기법을 중심으로 반도체 및 MEMS 소자 신뢰성 평가 및 다양한 재료에서의 응용을 종합적으로 검토한다.

## 2. 탄성계수 평가를 위한 압입 접촉 면적의 정량적 평가

연속 압입 시험과 유사한 방식으로 소재의 역학거동을 평가하는 Vickers 경도 시험(Vickers hardness test)은 시편에 압입자를 통해 정해진 하중을 인가한 뒤, 광학현미경을 통해 측정된 대각길이를 이용해 소재의 소성거동에 대한 저항성을 나타내 주는 지표인 Vickers 경도를 산출할 수 있게 한다. 연속 압입 시험도 유사한 방식을 통해 소재의 경도를 측정할 수 있다. 다만, 연속 압입 시험은 크게 2가지 관점에서 Vickers 경도시험과 차별점이 있다. 첫째로, Vickers 경도 시험에서는 접촉 면적이 압입자와 시편의 실제 접촉 면적이라 한다면, 연속 압입 시험에서는 투영 면적을 압입 접촉 면적으로 결정한다(그림 1(a)). 두번째로, Vickers 경도 시험에서 접촉 면적은 광학현미경을 통해 측정되지만, 연속 압입 시험에서는 장치에 부착된 하중

센서, 변위 센서로부터 얻어지는 하중-변위 곡선을 분석하여(그림 1(b)) 접촉 면적을 간접적으로 산출하게 된다. 압입 시험 결과로 얻어지는 하중-변위 곡선은 하중인가 곡선(loading curve)과 하중 제거 곡선(unloading curve)으로 크게 구분된다(그림 1(c)). 이 중 하중인가 곡선은 소재의 탄소성 변형 거동을 모두 나타내고, 하중제거 곡선은 소재의 탄성 회복 거동을 보이기 때문에, 일반적으로 소재의 탄성계수는 하중제거 곡선을 활용하여 측정하게 된다. 하중제거 곡선의 초기 기울기를 압입 강성도(indentation stiffness)로 일컬으며, 이는 기존 연구들에 의해 탄성계수와 직접적인 연관이 있음이 밝혀졌다. 이 중 하나인 Sneddon's solution은 탄성 반공간(elastic half-space)에 대해 강체 축대칭 압입자(rigid axisymmetric indenter)의 압입 문제를 해석한 것으로, 식 (1)과 같이 압입 강성도( $S$ )로부터 reduced modulus ( $E_r$ )를 산출하는 식을 나타낸다. 이러한 Sneddon's solution은 축대칭 압입자를 가정하여 유도되었기 때문에 원뿔형, 구형, flat-punch 압입자를 제외한 형상의 압입자에 적용할 때는 오차가 발생할 수 있다. 식 (1)에서  $S$ 는 압입 강성도,  $A_c$ 는 압입 접촉 면적, 그리고  $\beta$ 는 압입자 형상 보정 상수를 의미하며, 이  $\beta$ 가 축대칭 압입자가 아닌 경우에 발생할 수 있는 오차를 보정해줄 수 있다 [5,7,8]. 수십-수백  $\mu\text{m}$ 를 대상으로 하는 매크로압입시험기는 측정 대상 물성에 따라 일반적으로 Vickers 압입자 또는 구형 압입자를 활용한다. 다만, 미소 스케일에서는 4개의 면이 한점에 모여야 하는 Vickers 압입자의 제작이 어렵기 때문에 Berkovich 압입자가 주요하게 활용된다 [9]. Berkovich 압입자는 식 (1)의  $\beta$  값으로 대략 1.0226-1.085의 값을 갖는다 [5]. 이외에도 flat-ended triangular punch 형상의 압입자는 1.058 [8]의 값을 가지며, 완전한 축대칭의 flat-ended punch 형상의 압입자는 1.0의 값을 갖게 된다.

$$E_r = \frac{1\sqrt{\pi} S}{\beta^2 \sqrt{A_c}} \quad (1)$$

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_m^2}{E_m} \quad (2)$$

식 (1)을 통해 산출된 reduced modulus ( $E_r$ )는 식 (2)를 통해 실제 소재의 탄성계수인  $E_m$ 으로 산출된다. 이를 위해서는 압입자의 탄성계수( $E_i$ )와 푸아송 비( $\nu_i$ ), 그리고 소재의 푸아송 비( $\nu_m$ )에 대한 정보를 사전에 알고 있어야 한다.

여기서 탄성계수의 정확한 측정을 위해 중요한 또 하나

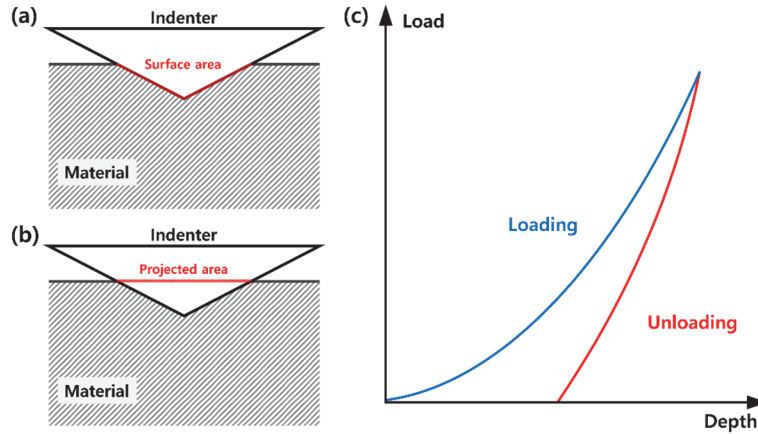


Fig. 1. Indentation contact area for (a) Vickers hardness test, (b) instrumented indentation testing, and (c) indentation load-depth curve.

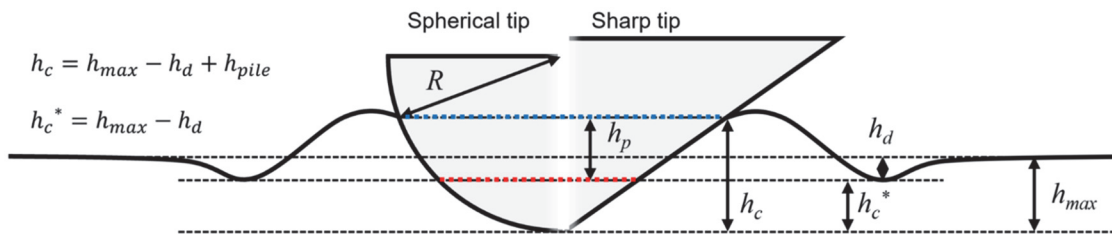


Fig. 2. Indentation contacts morphologies around spherical and sharp indentations [15].

의 요소는 바로 접촉 면적( $A_c$ )의 예측이다. 그림 2에서 보듯이, 압입 시험 시 압입자 주변에는 탄소성 변형이 발생하게 된다. 압입자에서 시편에 주어진 하중으로 인해 압입자 주변에 탄성 침하(elastic deflection)이 발생하게 되고, 또한 금속 소재의 경우에 소성변형은 부피의 변화가 존재하지 않기 때문에 시편에 침투해 들어간 압입자의 부피만큼 재료가 옆으로 밀려 올라가 소성 쌓임(plastic pileup)이 발생하게 된다 [10,11]. 이러한 탄성 침하와 소성 쌓임은 접촉에 의해 발생하는 projected area의 크기에 영향을 주게 되며, 정확히 projected area를 산출하기 위해서는 압입 접촉 깊이(indentation contact depth,  $h_c$ )를 정확하게 평가해야 한다. 오늘날 가장 널리 활용되는 압입 접촉 깊이 평가 기법은 Oliver-Pharr 방법일 것이다 [5]. 해당 기법은 식 (3)과 같이 최대 하중( $L_{max}$ )과 압입 강성도( $S$ ), 그리고 압입자 형상에 따른 상수인  $\epsilon$ 를 가지고 압입 침하 깊이인  $h_d$ 를 예측할 수 있다. 물론 해당 방법은 압입 접촉 시 발생하는 탄성 변형량만을 예측한다는 한계가 있지만, 분명 나노 압입 시험이 박막이나 미세구조와 같이 미소 스케일에서 역학 측정 기법으로 자리잡는데 크게 기여하였다. 이처럼 Oliver-Pharr 방법을 통해 얻어진 압입 접촉

깊이를 일반적으로  $h_c^*$ 로 표기한다. 이후에 탄성 침하뿐 아니라 소성 쌓임 높이를 보정해주고자 하는 여러 예측 모델들이 개발되었지만(식 (4)), 대부분 실험 데이터의 분석 과정에서 피팅 모델에 대한 의존성이 존재하는 한계를 가지고 있다 [10,12-14].

$$h_c^* = h_{max} - h_d = h_{max} - \epsilon \frac{L_{max}}{S} \quad (3)$$

$$h_c = h_{max} - h_d + h_{pile} \quad (4)$$

### 3. 연속 강성 측정법(CSM)을 이용한 탄성계수 측정

연속 강성 측정(continuous stiffness measurement, CSM) 기법은 나노 압입 시험에서 재료의 역학 특성을 보다 더 정밀하게 평가, 분석하기 위한 방법이다. 본 기법의 핵심 원리는 정적 하중에 작은 진폭의 동적 하중을 중첩하여 적용하는 것이다. 기존의 나노 압입 시험 기법은 하중-변위 곡선에서 하중제거 곡선의 초기 기울기를 통해 압입

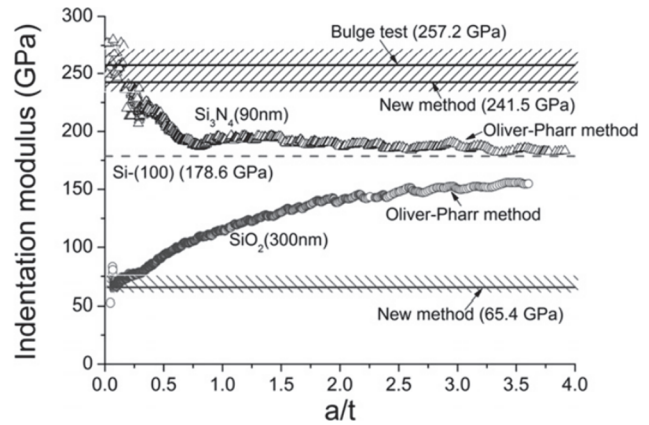
강성도를 평가한다. 다만, 이 방법은 단일 깊이에서의 강성만을 평가할 수 있기 때문에, 재료의 깊이에 따른 특성 변화를 파악하기 어렵다. CSM 기법은 이러한 한계를 극복하여 압입 과정 전반에 걸쳐 연속적으로 강성을 측정할 수 있게 한다. 압입 시험이 진행됨에 따라 압입자에 가해지는 하중이 진동을 하고, 그에 따른 변위 응답을 분석하기에 각 깊이에서의 접촉 압입 강성도를 실시간으로 계산할 수 있다. 이를 통해 매 깊이마다 식 (3)의 압입 접촉 깊이를 평가할 수 있으므로 우리는 궁극적으로 매 깊이의 경도, 탄성계수 값을 산출할 수 있게 되는 것이다.

이러한 CSM 기법은 금속과 세라믹 소재 분야에서 나노 스케일 역학 특성을 연구할 수 있는 기틀을 마련하였다. 특히 CSM 기법은 압입 크기 효과(indentation size effect, ISE)의 연구에 중요한 기여를 하였다. ISE는 나노 스케일에서 압입 깊이가 감소함에 따라 금속소재에서 측정된 경도가 증가하는 현상을 말한다 [16,17]. CSM 기법을 이용하여 연구자들은 압입 과정 전반에 걸쳐서 연속적으로 경도와 탄성계수를 측정할 수 있게 되었고, 이는 ISE를 더욱 정밀하게 관찰하고 분석할 수 있는 기회를 제공하였다.

#### 4. 초박막(ultra-thin film)의 탄성계수 측정

나노 압입 시험법은 국부 역학 특성 평가가 가능하기에 반도체 소자와 같이 기하구조가 복잡하고 다양한 소재가 복합적으로 사용되는 비균질한 소재의 특성 평가에 널리 활용된다. 소재에 압입이 진행되면, 압입자 하부에 탄소성 변형 영역이 형성되는데, 해당 영역들의 크기는 소재의 역학 특성에 따라 다르지만, 일반적으로 최대 압입 깊이의 10 배 정도의 크기이다. 이러한 수치는 압입 시험 시 압흔 간격을 설정하는 기준을 제시해주며 [18], 또한 기판위에 박막이 증착된 시편의 경우에 박막만의 물성을 평가하기 위해서는 박막 두께의 10%만 압입해야 한다는 기준인 10% 규칙(10% rule)을 제시해준다 [19-21].

박막의 두께가 수백 nm 이하로 얇아질 경우, 압입 깊이를 박막 두께의 10% 이하로 제한하는 일반적인 기준은 너무 얇은 영역에서만 측정이 이루어지기 때문에 표면 조도, 장비 센서의 해상도 등으로 인해 신뢰할 만한 역학 특성 데이터를 얻기 어렵다. 이러한 나노 압입 시험의 한계를 극복하기 위해 Li와 Vlassak은 박막 두께의 10% 이상의 압입 깊이로 시험한 결과에 대해, Oliver-Pharr 방법을 확장하여 기판 효과를 보정하고 단일층 박막의 탄성계수를



**Fig. 3.** The indentation modulus obtained with the Oliver-Pharr method as a function of contact radius normalized by film thickness, compared with the results obtained using the new method. The shaded regions represent the ranges of the  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Si}_3\text{N}_4$  indentation moduli reported in the literature [22].

평가할 수 있는 방법을 제시하였다. 이들은 Sneddon's solution 대신 Yu's solution을 활용하였다. Yu's solution은 층을 가진 탄성 반공간에 대해 보다 정밀한 하중-변위 모델을 제공하며, 기판의 영향을 보다 정확하게 반영할 수 있다. 또한 유효 두께(effective thickness) 개념을 도입하여 압입 중 박막 내부에서 발생하는 소성 변형의 영향을 고려하였으며, 기판 효과를 반영한 접촉 반경을 적용함으로써 보다 정밀한 역학 특성 평가가 가능하도록 하였다 [22]. 그림 3은 Si 기판의 위에  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 와  $\text{SiO}_2$ 를 각각 올린 시편들에 대해 CSM 기법으로 깊이 별 탄성계수를 측정할 결과이다. 여기서  $a$ 는 압입 접촉 반경을,  $t$ 는 박막 두께를 의미한다. 압입 초반에는 압입 깊이의 조건이 박막 두께의 10%를 만족하기 때문에 측정된 탄성계수 값이 각 박막의 값과 유사하게 측정되지만, 압입 깊이가 깊어짐에 따라 기판의 효과가 커지면서 Si의 탄성계수 값으로 접근하여 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 해당 결과에 Li와 Vlassak의 방법을 적용하면 New method라고 적힌 박막만의 탄성계수를 측정되는 것을 볼 수 있으며,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 의 경우에는 241.5 GPa로 평가되어 Bulge test [23]로 평가된 참조 값인 257.2 GPa와 상당히 유사한 것을 확인할 수 있다.  $\text{SiO}_2$ 의 경우에도 65.4 GPa로 평가되었으며, 실제  $\text{SiO}_2$  박막의 탄성계수 문헌 값들과 유사함을 확인할 수 있다 [24]. 다만, 해당 기법은 아직 단일 층에만 적용이 가능하기에, 다층 박막 시편의 경우, 추가적인 연구가 필요하다.

### 5. 인공신경망 기반의 탄성계수 측정

Oliver-Pharr의 압입 접촉 깊이 수식과 장비사에 의해 탄성계수 값이 제공된 Fused silica 시편을 이용한 self-calibration으로 접촉 면적 수식(area-function)을 얻게 되면 소성 쌓임이 크게 발생하지 않는 세라믹 소재들에 대해서는 접촉 면적이 상당히 잘 예측되지만, 낮은 가공경화 경향을 보이거나 최대 압입 깊이와 최종 압입 깊이의 비가 0.7이 넘는 경우에는 접촉 면적의 오차가 상당히 크게 날 수 있다 [15,25]. 앞에 언급하였듯이 압입 접촉 면적은 탄성계수 산출에 필수적으로 필요하기 때문에(식 (1)), 이러한 부정확한 압입 접촉 면적은 여러 금속소재에 대한 나노 압입 시험의 탄성계수 측정 오류를 야기할 수 있다. 기존에는 소성 쌓임 높이를 경험적 또는 이론적으로 보완하기 위한 접근방법들이 제시되었지만 [10,12,13,26], 최근에는 이를 넘어서 빅데이터에 기반한 인공신경망 모델로 탄성계수 예측 정확도를 높이려는 시도가 이루어지고 있다(그림 4(a)) [15,27,28]. 기계학습을 위한 압입-인장 데이터베이스를 실험만으로는 구축하는 것에 한계가 있기 때문에 여러 연구에서 유한 요소 해석(finite element analysis, FEA) 시뮬레이션을 활용하여 빅데이터를 구축하였다

[15,27-32]. Vickers, Berkovich로 대변되는 각진 압입자(sharp indenter)의 경우에 압입-인장 변환 문제에서 하나의 압입 하중-변위 곡선이 여러 인장 응력-변형을 곡선에 매칭되는 압입 유일해 문제(indentation non-uniqueness problem)가 존재한다. 항복강도( $\sigma_y$ ), 가공경화지수( $n$ )와 같은 소성물성을 각진 압입자로 예측하기 위해서는 압입 하중-변위 곡선 이외의 추가 정보인, 다른 apex-angle의 각진 압입자 활용 [27] 또는 표면 압흔 높이 분포 [28,32]가 필수로 요구됨이 확인되었다. 다만, 탄성계수의 경우에는 압입 유일해 문제없이 압입 하중-변위 곡선만으로도 탄성계수가 손쉽게 예측되었다 [15,28]. Kim의 연구에서 약 2,000개 수준의 데이터를 가지고도 압입 하중-변위 곡선과 탄성계수의 상관관계 도출이 가능함이 확인되었으며, 구형 압입자를 활용하는 경우 (MAPE=0.65%)에 각진 압입자를 활용하는 경우 (MAPE=1.72%)보다 같은 규모의 빅데이터로 학습 시 근소하게 정확도가 높음을 확인하였다(그림 4(b), 4(c)). 해당 연구에서는 압입-하중 변위 곡선에서 최대 압입깊이가 구형 압입자 반경인  $R$ 의 60% 수준일 때, 최대 압입 깊이의 20, 40, 60, 80, 100%의 5 지점에서 하중 값과 압입 강성도(indentation stiffness)까지 총 6개의 feature를 이용

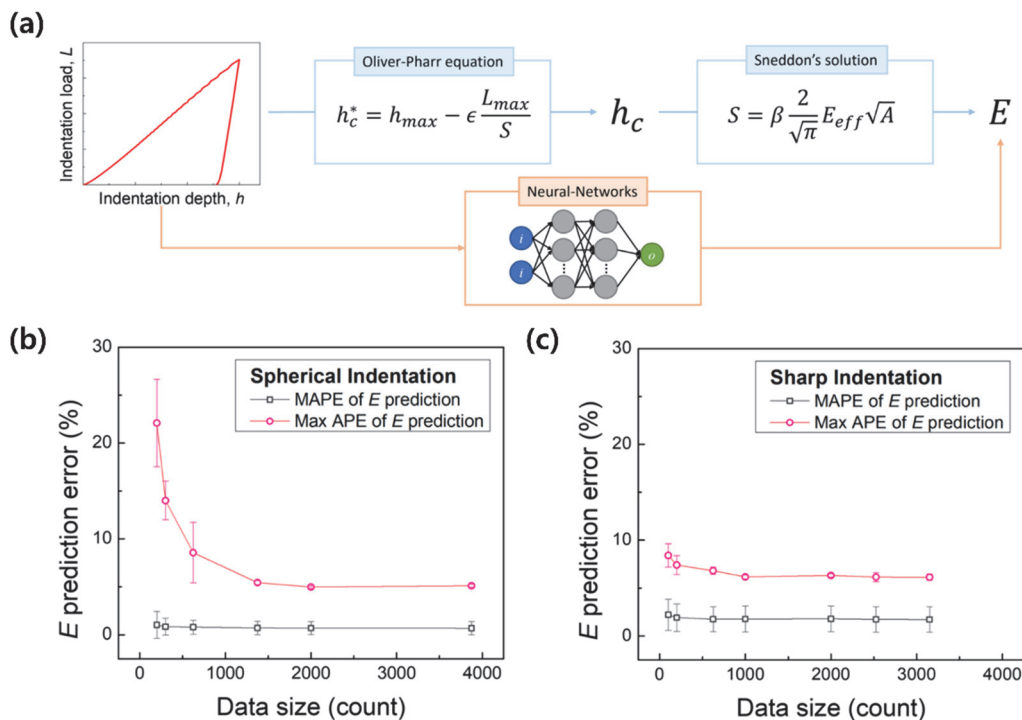
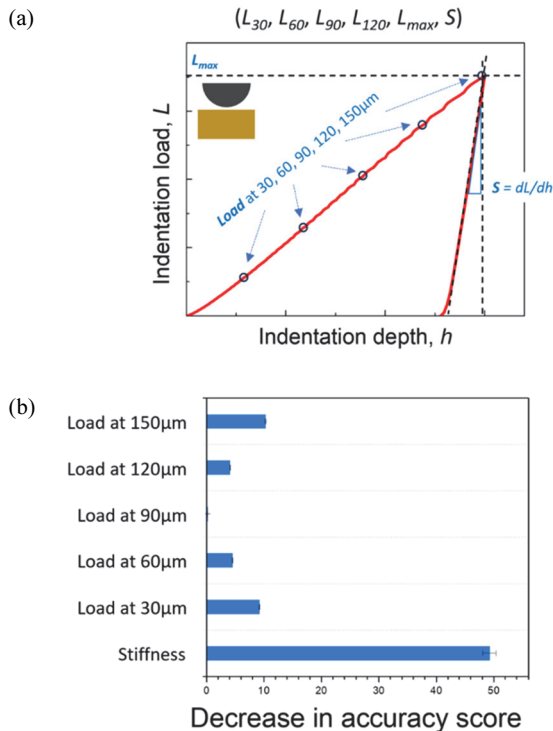


Fig. 4. (a) Prediction of elastic modulus from indentation curve using machine-learning approach [15], performance change depending on training data size for predicting elastic modulus using (b) spherical and (c) sharp indentations [15].



**Fig. 5.** (a) Features for machine learning from spherical indentation [15] and (b) permutation feature importance scores for predicting elastic modulus in a neural network-based model for perfect spherical indentation [15].

하여 탄성계수를 예측하고자 하였다. 이 중 어떤 feature가 탄성계수의 예측에 가장 크게 기여하는지를 확인하기 위하여 permutation feature importance score를 분석하였으며, 기존에 Sneddon's solution에 의해 알려진 대로 압입 강성도(indentation stiffness)가 가장 큰 영향을 미치는 것이 확인되었다(그림 5(a), 5(b)) [15]. 본 인공지능 경망을 활용한 압입 탄성계수 예측 기법들은 접촉 면적의 산출 없이 압입 시험 결과인 압입 하중-변위 곡선으로부터 탄성계수를 직접적으로 바로 예측할 수 있다는 장점이 있으며, 향후 반도체 등 다양한 전자소자 분야에서 활용될 것으로 기대된다.

## 6. 결론

나노 압입 시험은 시험 후에 압입 하중-변위 곡선을 제공하며, 이를 통해 압입 접촉 면적의 예측이 가능하여 소재의 국부 역학 특성을 정량적으로 평가할 수 있고, 오늘날 미소 스케일에서 재료의 역학적 특성을 평가하는 강력한 도구로 자리잡았다. 압입 시 발생하는 탄성 침하는

Oliver-Pharr 방법을 통해 보정되었고, 소성 썪임 현상이 크게 발생하지 않는 소재에 대해 정확한 접촉 면적 예측을 통한 탄성계수의 측정이 가능해졌다. 더 나아가 탄성계수 측정 기술은 연속 강성 측정(CSM) 기법의 도입, Li & Vlassak이 제안한 Yu's solution과 유효두께 도입에 기반한 기판효과 보정방식, 기계학습과 빅데이터에 기반한 인공지능경망 기반 모델의 개발을 통해 반도체 및 MEMS 소자에서 박막소재의 탄성계수 및 역학거동 측정에 대한 활용이 크게 기대된다. 향후 연구 방향으로서는 다층 박막 시스템에 대한 탄성계수 측정 기법의 개발, 인공지능경망 모델의 실제 적용 사례 확대, 그리고 금속뿐 아니라 세라믹, 폴리머 등 다양한 재료에 대한 검증이 필요할 것으로 보인다.

## ORCID

Jong-hyoung Kim

<https://orcid.org/0000-0002-1320-0840>

## 감사의 글

이 논문은 국립부경대학교 자율창의학술연구비(2024년)에 의하여 연구되었음.

## References

- [1] G. S. Schajer, *Practical Residual Stress Measurement Methods* (John Wiley & Sons, Hoboken, 2013). doi: <https://doi.org/10.1002/9781118402832>
- [2] H. Taheri and A. A. Hassen, *Appl. Sci.*, **9**, 1628 (2019). doi: <https://doi.org/10.3390/app9081628>
- [3] ASTM E8, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, ASTM International, 2010. doi: [https://doi.org/10.1520/E0008\\_E0008M-22](https://doi.org/10.1520/E0008_E0008M-22)
- [4] ASTM D790, *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*, ASTM International, 2017. doi: <https://doi.org/10.1520/D0790-17>
- [5] W. C. Oliver and G. M. Pharr, *J. Mater. Res.*, **7**, 1564 (1992). doi: <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>
- [6] D. H. Kim and Y. S. Park, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 588 (2023). doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.6.8>
- [7] W. C. Oliver and G. M. Pharr, *J. Mater. Res.*, **19**, 3 (2004). doi: <https://doi.org/10.1557/jmr.2004.19.1.3>
- [8] J. J. Vlassak and W. D. Nix, *J. Mech. Phys. Solids*, **42**, 1223 (1994).

- doi: [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(94\)90033-7](https://doi.org/10.1016/0022-5096(94)90033-7)
- [9] J. H. Kim, H. Xu, M. J. Choi, E. Heo, Y. C. Kim, and D. Kwon, *J. Mater. Res.*, **33**, 3849 (2018).  
doi: <https://doi.org/10.1557/jmr.2018.329>
- [10] J. Kim, O. M. Kwon, J. Lee, H. J. Son, Y. C. Kim, and S. K. Kang, *Met. Mater. Int.*, **30**, 714 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s12540-023-01535-2>
- [11] X. Hernot and O. Bartier, *J. Mater. Res.*, **27**, 132 (2012).  
doi: <https://doi.org/10.1557/jmr.2011.394>
- [12] S. K. Kang, J. Y. Kim, P. P. Chan, H. U. Kim, and D. Kwon, *J. Mater. Res.*, **25**, 337 (2010).  
doi: <https://doi.org/10.1557/jmr.2010.0045>
- [13] S. K. Kang, J. H. Kim, Y. H. Lee, J. Y. Kim, and D. Kwon, *Mater. Sci. Eng., A*, **535**, 197 (2012).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.12.063>
- [14] H. Xiao, X. Wang, and C. Long, *Materialia*, **17**, 101121 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101121>
- [15] J. H. Kim, D. Y. Kim, J. Lee, S. W. Kwon, J. Kim, S. K. Kang, S. Hong, and Y. C. Kim, *Metals Mater. Int.*, **30**, 2440 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s12540-024-01666-0>
- [16] H. Gao and Y. Huang, *Scr. Mater.*, **48**, 113 (2003).  
doi: [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(02\)00329-9](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00329-9)
- [17] W. D. Nix and H. Gao, *J. Mech. Phys. Solids*, **46**, 411 (1998).  
doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-5096\(97\)00086-0](https://doi.org/10.1016/S0022-5096(97)00086-0)
- [18] P. S. Phani and W. C. Oliver, *Mater. Des.*, **164**, 107563 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.107563>
- [19] G. M. Pharr and W. C. Oliver, *MRS Bull.*, **17**, 28 (1992).  
doi: <https://doi.org/10.1557/S0883769400041634>
- [20] X. Li and B. Bhushan, *Mater. Charact.*, **48**, 11 (2002).  
doi: [https://doi.org/10.1016/S1044-5803\(02\)00192-4](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(02)00192-4)
- [21] S. Zak, C.O.W. Trost, P. Kreiml, and M. J. Cordill, *J. Mater. Res.*, **37**, 1373 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1557/s43578-022-00541-1>
- [22] H. Li and J. J. Vlassak, *J. Mater. Res.*, **24**, 1114 (2009).  
doi: <https://doi.org/10.1557/jmr.2009.0144>
- [23] J. J. Vlassak and W. D. Nix, *J. Mater. Res.*, **7**, 3242 (1992).  
doi: <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.3242>
- [24] G. Carlotti, L. Doucet, and M. Dupeux, *Thin Solid Films*, **296**, 102 (1997).  
doi: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(96\)09346-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(96)09346-7)
- [25] A. Bolshakov and G. M. Pharr, *J. Mater. Res.*, **13**, 1049 (1998).  
doi: <https://doi.org/10.1557/JMR.1998.0146>
- [26] Y. C. Kim, S. K. Kang, J. Y. Kim, and D. Kwon, *J. Mater. Sci.*, **48**, 232 (2013).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6733-3>
- [27] L. Lu, M. Dao, P. Kumar, U. Ramamurty, G. E. Karniadakis, and S. Suresh, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **117**, 7052 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1922210117>
- [28] Q. Jiao, Y. Chen, J. Kim, C. F. Han, C. H. Chang, and J. J. Vlassak, *J. Mech. Phys. Solids*, **185**, 105557 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2024.105557>
- [29] G. Han, B. Lee, S. Lee, C. Jeong, and H. Lee, *Mater. Des.*, **239**, 112745 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112745>
- [30] C. Jeong, Y. Hwang, N. Kim, C. Lee, and H. Lee, *Int. J. Mech. Sci.*, **211**, 106773 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106773>
- [31] K. Jeong, H. Lee, O. M. Kwon, J. Jung, D. Kwon, and H. N. Han, *Mater. Des.*, **196**, 109104 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109104>
- [32] K. Jeong, K. Lee, S. Lee, S. G. Kang, J. Jung, H. Lee, N. Kwak, D. Kwon, and H. N. Han, *Int. J. Plast.*, **157**, 103403 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2022.103403>