

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2024.10.6.697>

JCCT 2024-11-85

## 계장화압입시험 측정 물성으로부터 고분자 코팅막의 연신율 산출

# Calculation of the Elongation for a Polymer Coating Film from Mechanical Properties Measured by Instrumented Indentation Test

신성환\*

Seong-Whan Shinn\*

**요약** 계장화압입시험은 기체 위에 코팅 또는 도금 등의 방식으로 가공된 마이크로 또는 나노 스케일 박막의 기계적 물성 측정에 유용한 분석 기술이다. 본 연구는 계장화압입시험의 가장 대표적인 시험기라고 할 수 있는 나노인덴터를 사용하여 웨이퍼에 코팅된 고분자 필름의 기계적 물성을 측정하고, 이렇게 얻어진 측정값으로부터 인장강도, 연신율을 산출하는 방법에 대해서 논의 해 보고자 한다. 일반적으로 나노인덴터로 부터 측정 할 수 있는 기계적 물성은 복합경도, 소성경도, 탄성계수, 탄성을 등으로 전통적인 인장시험기를 통하여 얻을 수 있는 인장강도 또는 연신율의 측정이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 경도(Hardness)와 연신율(Elongation)과의 상관성을 분석 해 보고, 분석 결과를 통하여 나노인덴터로 측정 한 기계적 물성 데이터를 이용하여 연신율을 산출하는 방법에 대해서 연구 하고자 한다.

**주요어** : 계장화압입시험, 나노인덴터, 기계적물성, 경도, 연신율

**Abstract** The instrumented indentation test(IIT) is a useful analytical technique for measuring the mechanical properties of micro or nanoscale thin films processed via coating or plating on substrates. This study aims to measure the mechanical properties of a polymer film coated on a wafer using a nanoindenter, the most representative instrument for the instrumented indentation test. We will discuss how to derive tensile strength and elongation from the obtained measurements. Typically, mechanical properties measurable by a nanoindenter include composite hardness, plastic hardness, elastic modulus, and elasticity, whereas measuring tensile strength or elongation, achievable with traditional tensile testing machines, is not possible. Therefore, this study will analyze the correlation between hardness and elongation, and based on the results, we will explore a method to derive elongation from the mechanical property data measured by the nanoindenter.

**Key words** : Instrumented indentation test(IIT), Nanoindenter, Mechanical property, Hardness, Elongation

### 1. 서 론

현대 사회는 급속한 산업 발전으로 다양한 산업에서 다양한 제품군들이 생겨나고 있다. 최근의 다양화되고

있는 제품의 특징을 보면, 사용되는 재료가 점점 경량화, 소형화 그리고 박막화 특징을 볼 수 있고, 따라서 재료의 기계적 물성이 특히 더 중요 해 지고 있다. 이와 같은 나노 스케일 제품군의 기계적 물성이 중요한 이유는 먼

\*정회원, 한라대학교 화학공학과 교수  
접수일: 2024년 8월 22일, 수정완료일: 2024년 9월 27일  
게재확정일: 2024년 11월 10일

Received: August 22, 2024 / Revised: September 27, 2024

Accepted: November 10, 2024

\*Corresponding Author: swshinn@halla.ac.kr

Dept. of Chemical Engineering, Halla Univ, Korea

저 재료 특성의 변화 때문이다. 나노 스케일에서는 재료의 물리적, 화학적 특성이 매크로 스케일과 달라질 수 있으며, 따라서 나노 소재는 기계적 강도나 경도의 크기에 큰 영향을 받을 수 있으므로 보다 정확한 기계적 물성 측정이 필요하다. 다음으로는 나노 소재의 다양한 기능적 활용(내구성, 내마모성 등) 측면에서 기계적 물성과 밀접하게 연결되어 정확한 기계적 물성 측정이 필요하기 때문이다. 뿐만 아니라 제품의 신뢰성 및 내구성 측면에서 나노 스케일 소재는 외부 환경에 쉽게 영향을 받을 수 있기 때문에 정확한 기계적 물성 측정이 필요하다고 말할 수 있다. 마지막으로 나노 기술은 아직 발전 중인 분야로, 새로운 재료의 물성 분석과 공정 및 품질 관리 측면에서 정확한 기계적 물성 측정은 필수적이고, 이를 통하여 나노 제품의 성능을 극대화하고, 이를 통한 시장 경쟁력 확보를 위해 기계적 물성 등 제품 성능에 대한 객관적인 평가가 필요하다고 볼 수 있다.

이와 같은 이유들로 인하여 나노 스케일의 제품군에서 기계적 물성 측정이 특히 중요한 역할을 하고 있다. 전통적으로 재료의 기계적 물성 측정은 주로 인장시험기가 사용되었고, 비커스 경도시험법 등을 통하여 경도가 측정되어 왔다. 그러나 고분자 필름과 같은 나노 스케일 소재가 기체 위에 코팅 또는 도금 등의 방식으로 형성된 상태의 막의 경우 기체 위에 코팅된 박막을 기체로부터 분리하기가 매우 어려울 뿐만 아니라 분리가 되더라도 박막의 물성이 변할 수 있고, 박막 시편을 시험기에 고정하기 어려운 이유로 전통적인 방법으로 측정이 불가능한 것으로 알려져 있다. 이와 같은 이유로 나노 스케일의 다양한 물질에 표면 및 표층의 물성을 측정하기 위한 시험기로서 정확도와 신뢰성을 갖춘 기계적 물성 측정 방법으로 계장화압입시험이 활용되고 있다. 이와 같

은 관점에서 최근에 계장화압입시험과 관련하여 계장화압입시험의 원리와 다양한 소재를 대상으로 주어진 측정 조건(압입 하중, 압입 시간 등)에서 기계적 물성을 측정하고 해석하는 연구 논문이 발표되었다[1-7].

일반적으로 계장화압입시험으로 부터 측정 할 수 있는 기계적 물성은 복합경도, 소성경도, 탄성계수, 탄성율, 크립율 등으로 소성경도의 경우에는 일반적인 비커스 경도계로 측정된 경도와의 경향이 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 전통적인 인장시험기를 통하여 얻을 수 있는 인장강도 또는 연신율에 대한 평가는 불가능한 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 경도(hardness)와 강도(strength) 또는 연신율(elongation)의 상관성을 분석 해 보고, 분석 결과를 통하여 계장화압입시험으로부터 획득한 측정 데이터를 이용하여 연신율을 산출하는 방법에 대해서 논의 해 보고자 한다. 실제 사례를 통하여 웨이퍼 위에 코팅된 고분자 필름에 대한 기계적 물성을 측정하고, 측정된 데이터로부터 연신율을 산출, 그 결과를 해석 해 보고자 한다.

## II. 나노소재 물성, 계장화압입시험

일반적으로 재료의 기계적 물성 측정은 인장시험기가 널리 사용되어왔다. 프리 막의 경우에는 인장시험기를 사용하여 인장강도, 탄성계수 등을 구할 수 있으나, 기체 위에 코팅 또는 도금 방식으로 형성된 박막의 경우에는 막을 기체로부터 분리하기가 매우 어려울 뿐만 아니라 분리가 되더라도 박막의 물성이 변할 수 있고, 박막 형태의 시편을 시험기에 고정하는 데 문제가 발생하여 측정자체가 불가능하게 된다. 경도 측정의 경우 비커스 경도계나 연필을 통하여 경도를 측정 할 수 있으나, 측정자에 따라 결과 값이 달라지는 경우가 자주 발생하여 결과 값의 신뢰성에 문제가 발생하고 있다.

계장화압입시험은 나노 복합 소재의 국부적 특성이나 박막(thin film)과 같은 두께가 얇은 코팅 소재의 표면 특성을 분석 할 수 있는 유용한 분석 기술로 최근 나노 스케일의 소재를 사용하는 첨단산업에서 널리 활용되고 있는 측정 방법으로 알려져 있다. <그림 1>은 계장화압입시험의 일반적인 기기 구성을 나타내고, 측정 방법은 ISO 14577 시리즈에 규정되어 있다[1]. 계장화압입시험의 기본 원리는 <그림 2>와 같이 일정한 기하학적 형상을 갖고 있는 압입자를 이용하여 측정

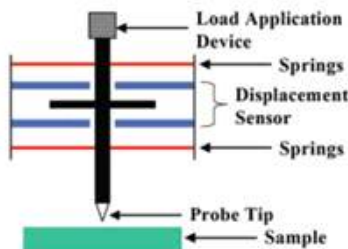


그림 1. 계장화압입시험 측정기기의 구성  
Figure 1. Components of an Instrumented Indentation Tester

시료 표면에 하중을 인가하고, 제거하는 과정 중에 하중과 압자의 깊이를 연속적으로 측정하여 얻어지는 압입하중-변위 곡선의 해석을 통하여 시료의 기계적 물성을 측정하게 된다. <그림 3>은 계장화압입시험을 통하여 얻어지는 압입하중-변위 곡선의 예를 보여주고 있으며, 이렇게 얻어진 압입하중-변위 곡선을 분석하여 복합경도, 소성경도, 탄성계수, 탄성율, 크립을 등 나노 스케일 소재의 기계적 물성을 측정하는 가장 유용한 방법이라고 말할 수 있다[1, 2]. 계장화압입시험의 측정 물성인 소성경도의 경우 일반적인 비커스 경도계로 측정된 경도와는 경향이 대체로 일치하는 것으로 나타났지만, 그러나 전통적인 인장시험기를 통하여 얻을 수 있는 인장강도 또는 연신율에 대한 평가는 불가능한 것으로 알려져 있다.

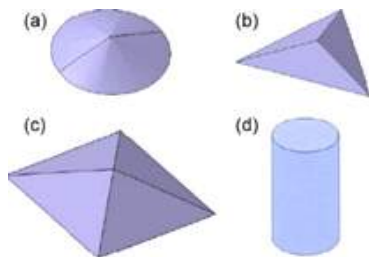
### III. 경도와 강도, 그리고 연신율

일반적으로 재료에 인장력, 압축력, 전단력, 비틀림 등의 하중을 가하면, 재료는 어느 정도의 변형이 발생하게 되고, 이와 같은 변형의 정도를 분석하기 위해 여러 가지 기계적인 물성이 측정되고 있으며, 재료의 기계적 특성을 평가하는 물성 중 가장 대표적인 물성으로 경도(hardness)와 강도(strength)가 있다. 경도는 표면의 단단한 정도를 나타내는 척도로 재료의 표면에 가해지는 힘에 대한 저항력의 크기를 나타낸다. 과거에는 브리넬 경도 시험법, 로크웰 경도 시험법, 비커스 경도 시험법 등으로 측정이 되었으나, 최근에는 측정 재료의 특성에 따라 박막 측정을 위한 계장화압입

시험법이 유용하게 사용되고 있다.

이에 반하여 강도는 재료에 힘이 주어졌을 때 변형하지 않기 위해 저항하는 정도를 나타내는 척도로써 재료가 외력을 받았을 때 파괴되기까지 버티는 저항력의 크기를 나타낸다. 즉 재료의 강한 정도를 나타내는 것으로 전통적인 측정법으로는 보통 인장시험기를 통하여 측정이 가능하였다. 그러나 인장시험기의 경우 재료가 프리 막의 경우에만 측정이 가능하다. 기재 위에 코팅이나 도금 등의 방식으로 형성된 박막의 경우 막을 기재로부터 분리하기가 대단히 어려울 뿐만 아니라 분리된다 하더라도 박막의 물성이 변할 수 있고, 박막 특성 상 시편을 시험기에 고정하기 어려운 이유로 전통적인 방법으로 측정하는 것은 거의 불가능한 것으로 알려져 있다.

연신율(elongation, 또는 파단 연신율 또는 변형율)은 재료가 외력에 노출되었을 때 파손되기 전에 소성 변형을 겪을 수 있는 능력을 측정된 것으로 재료가 원래 길이에 비해 얼마나 늘어나거나 연장될 수 있는지를 나타낸다. 즉 연신율은 재료의 변형 능력과 소성 변형 능력의 지표가 될 수 있다. 변형 능력이란 재료가 파손되기 전에 얼마나 늘어날 수 있는지를 의미하며, 이는 재료의 유연성과 연성(ductility)을 평가하는 중요한 지표가 된다. 마찬가지로 연신율은 재료가 소성 변형(plastic deformation)에 얼마나 잘 견딜 수 있는지의 지표가 되기도 한다. 높은 연신율을 가진 재료는 큰 변형에도 불구하고 파손되지 않고 잘 견딜 수 있다. 따라서 연신율은 다양한 응용 분야에서 재료를 선택할 때 중요한 고려 요소가 된다. 예를 들어, 구조물이나 기계 부품 들은 높



(a) Cone (b) Berkovich (c) Vickers (d) Cylindrical flat punch  
 그림 2 계장화압입시험을 위한 압입자의 형태  
 Figure 2. Shape of the indenter

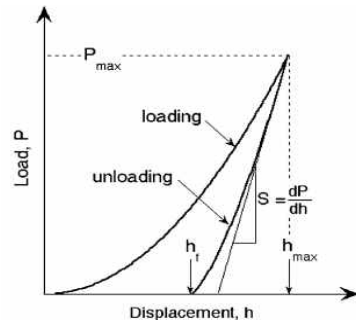


그림 3. 압입하중-변위곡선  
 Figure 3. Load-Displacement Curve

은 연신율을 가져야 충격이나 변형을 흡수할 수 있다. 따라서 연신율은 구조물이나 기계 부품들의 설계를 최적화하고 안전성을 평가하기 위한 중요한 요소가 될 뿐만 아니라 연신율이 높은 재료의 경우 반복적인 변형에도 잘 견딜 수 있는 능력으로 반복되는 피로에 의해 파괴되기 쉬운 환경에서 제품 수명에 중요한 역할을 한다. 따라서 잦은 충격에 의해 발생하는 급격한 하중 변화에 대한 충격 저항성을 필요로 하는 자동차, 항공기, 건축 분야에 중요한 요소이다. 또한 가공성 측면에서 높은 연신율을 가진 재료는 더 쉽게 성형되고, 복잡한 형상을 용이하게 만들 수 있는 능력으로 금속 가공이나 플라스틱 성형 공정에서 중요한 고려 요인이 되고 있다. 이와 같은 이유로 연신율은 재료의 성능과 안전성을 평가하는 중요한 지표로서, 다양한 산업 및 연구 분야에서 필수적인 역할을 한다.

일반적으로 경도와 강도(연신율) 사이에는 상관성이 존재한다. 많은 금속 재료의 경우 경도가 높은 재료가 일반적으로 더 높은 강도를 갖는다. 이 관계는 주로 금속의 변형 거동과 관련이 있으며, 금속의 결정 구조와 밀도가 경도와 강도 모두에 영향을 미치기 때문이다. 이와 같은 경도와 강도 사이의 관계는 금속 재료의 경우에는 잘 적용되기도 하지만, 모든 재료에 대해서 일반적으로 적용되는 것은 아니다. 특히 세라믹, 고분자 및 복합 재료의 경우에는 다른 기계적 특성이 경도와 강도에 영향을 미칠 수 있으므로 일반적인 연관 관계를 예측할 수 없다. 따라서 실제 재료의 선택과 공정의 설계 및 품질관리 측면에서 경도와 강도 또는 연신율을 모두 고려해야 할 필요가 있음을 알 수 있다.

#### IV. 사례 분석

경도와 강도(연신율)의 상관성 분석을 통하여 기재의 영향을 받지 않는 재료의 연신율 데이터를 얻기 위하여 다음과 같은 실험을 진행하였다. 측정은 가장 대표적인 계장화압입시험기인 Helmut Fisher 사의 나노인덴터를 사용하여 웨이퍼 위의 코팅된 고분자 하드 코팅 막에 대한 기계적 물성을 측정하고, 구해진 측정 데이터로부터 연신율을 구하는 과정을 사례를 통하여 제시 해 보고자 한다.

측정에 사용한 시료는 국내 웨이퍼 제조사로부터 웨이퍼에  $8\mu\text{m}$ 의 고분자 필름을 코팅한 시료를 취하여 측정을 진행하였다. 측정은 <그림 4>에 제시한 Helmut Fischer 사의 Fischerscope HM2000S 를 사용하여 측정하였고, 실온에서 비커스압입자와 지름  $0.4\text{ mm}$ 의 불압입자를 사용하여 측정하였다. 고분자 필름의 연신율에 대한 고유 물성을 측정하기 위하여 먼저 비커스압입자를 사용하여 기재의 영향을 받지 않고, 재료 표면 조도에 영향을 최소화하는 최적 압입 깊이(최적 압입하중)를 선정 할 필요가 있다. 본 연구에서는 최적 압입 깊이가 결정되었다는 가정 하에 해당 필름의 유의미한 연신율을 추정하는 과정을 제시하였다. <그림 5>는 비커스압입자로부터 측정된 경도와 압입하중의 그래프로 최적 압입하중은 가장 안정적인 구간인  $2.3\mu\text{N}$ 으로 결정하였다. 또한 압입하중과 압입깊이 데이터로부터 해당 압입깊이를  $0.53\mu\text{m}$ 로 추정 할 수 있었다. 다음은 연신율 계산을 위한 기초 데이터 수집을 위하여 불압입자를 사



그림 4. 시료 측정 사례  
Figure 4. Example of a sample measurement

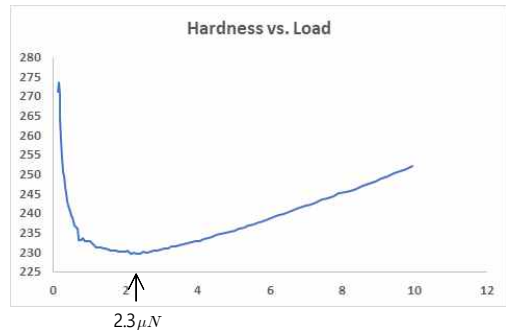


그림 5. 압입하중 vs. 경도  
Figure 5 Load vs. Hardness for Sample test

용하여 최대 하중  $180\mu N$  으로 20회 연속 측정을 수행 (2) 소재나 사용 인덴터의 따른 함수(압입깊이  $h$ 의 함

표 1. 연신율 산출 결과( $\varnothing 0.4mm$  Ball Indenter)

Table 1. Test Results for Elongation by  $\varnothing 0.4mm$  Ball Indenter

No	$F$ (mN)	$h_m$ ( $\mu m$ )	$h_c$ ( $\mu m$ )	a ( $\mu m$ )	a/R	Elongation(%)
1	0.971266	0.1404	0.0983	6.269796	0.031349	3.134898
2	2.66387	0.2458	0.1861	8.625855	0.043129	4.312927
3	5.21554	0.3396	0.2658	10.30773	0.051539	5.153866
4	8.62622	0.4209	0.3335	11.54508	0.057725	5.772538
5	<b>12.8953</b>	<b>0.5005</b>	<b>0.3986</b>	<b>12.62066</b>	<b>0.063103</b>	<b>6.310331</b>
6	18.023	0.5714	0.462	13.58626	0.067931	6.793132
7	24.0094	0.637	0.5186	14.39344	0.071967	7.196719
8	30.8541	0.6982	0.561	14.96948	0.074847	7.484739
9	38.5573	0.7541	0.6065	15.56381	0.077819	7.781905
10	47.1188	0.8078	0.6589	16.22115	0.081106	8.110577
11	56.5387	0.8577	0.702	16.74238	0.083712	8.371189
12	66.817	0.9044	0.7402	17.19105	0.085955	8.595524
13	77.9534	0.949	0.778	17.6237	0.088118	8.811849
14	89.9482	0.9913	0.8128	18.01276	0.090064	9.006378
15	102.801	1.0333	0.8416	18.32844	0.091642	9.16422
16	116.512	1.0729	0.8766	18.70485	0.093524	9.352427
17	131.081	1.1145	0.906	19.01524	0.095076	9.507618
18	146.509	1.1533	0.9345	19.31131	0.096557	9.655655
19	162.794	1.1925	0.9704	19.67786	0.098389	9.838932
20	179.937	1.2308	0.9931	19.90612	0.099531	9.953062

하였고, 측정 결과는 <표 1>과 같다.

볼압입자를 사용하여 측정된 물성 데이터로부터 연신율을 구하는 방법은 다음의 절차를 따른다.(그림 6 참조)

(1) 나노인덴터 측정에 적용한 압입하중( $P$ )과, 압입깊이( $h$ )를 얻는다.

수)로부터 컨택깊이( $h_c$ )를 결정한다.

(3) 사용한 볼인덴터의 반지름( $R$ )과 컨택깊이( $h_c$ )로부터 인덴터 압입 면의 반지름( $a$ )을 구하고, 압입면적( $A$ )을 구한다.

$$\text{반지름}(a) = \sqrt{2Rh_c - h_c^2}$$

(4) 다음과 같이 연신율을 산출한다.

$$\text{변형률/Strain-indentation} = a/R$$

이와 같은 방법으로 산출한 고분자 시료의 연신율은 <표 1>과 같이 나타났다. <표 1>은 최대 하중  $180\mu N$  까지 총 20회 측정된 결과로 시료의 가장 유의미한 연신율은 최적 깊이  $0.5\mu m$  에 해당하는 연신율인 6.31%로 추정이 가능하다. 압입 깊이가  $0.5\mu m$  보다 적은 경우에는 시료의 조도에 영향을 받은 결과로 무의미한 값으로 판단되고, 더 큰 하중으로 더 깊은 압입 깊이의 경우에는 기체의 영향을 어느 정도 반영한 것으로 예측할 수 있다. 따라서 해당 박막의 사용 목적(용도)에 따라 적합한 압입 깊이를 결정하고, 연신율을 해석 할 수 있다.

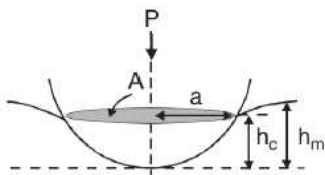


그림 6 볼압입자에 따른 소재의 변형 단면도  
 Figure 6. Material deformation by Ball-indenter

연신율(elongation)은 재료가 선형 탄성 영역과 소성 변형 영역을 지나 파단 되었을 때의 총 변형률로 재료의 연성을 나타내는 중요한 척도이다. 일반적으로 강한 재료는 높은 항복 강도와 최대 강도를 갖고 있는 재료이고, 연성재료는 높은 연신율을 가져, 큰 변형을 잘 견디는 재료를 의미한다. 이에 반하여 취성 재료는 낮은 연신율과 작은 소성변형 영역으로 선형 탄성 영역과 소성 변형 영역의 경계인 항복점과 재료가 파단 되어 분리되는 지점인 파단점이 가까운 경우를 의미한다. 따라서 연신율은 다양한 설계, 응용 분야에서 재료를 선택할 때 중요한 고려 요소가 된다. 예를 들어, 구조물이나 기계 부품 들은 충격이나 변형에 대한 저항 능력이 필요하다. 그러므로 상대적으로 높은 연신율을 갖는 재료의 선택이 필요하고, 이와 같은 이유로 연신율은 구조물이나 기계 부품들의 설계를 최적화하고 안전성을 평가하기 위한 중요한 요소가 된다. 또한 연신율은 반복적인 변형에도 잘 견딜 수 있는 능력의 척도가 될 수 있다. 즉 연신율이 높은 재료의 경우 반복적인 변형에 따른 피로에 의하여 파괴되기 쉬운 환경에서 제품의 수명을 높이는 중요한 역할을 하게 된다.

#### IV. 결 론

계장화압입시험은 마이크로 및 나노 스케일 재료의 기계적 물성을 측정 할 수 있는 측정 기술로 특히 얇은 코팅 막의 경도, 탄성 계수 및 기타 기계적 물성을 정밀하게 분석하는 데 유효한 기술로 알려져 있다. 일반적으로 계장화압입시험으로 부터 측정 할 수 있는 기계적 물성으로는 복합경도, 소성경도, 탄성계수, 탄성율, 크립율 등이고, 소성경도의 경우에는 일반적인 비커스 경도계로 측정된 경도와 경향이 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 전통적인 인장시험기를 통하여 얻을 수 있는 인장 강도 또는 연신율에 대한 평가는 불가능한 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 계장화압입시험의 측정 데이터를 기반으로 경도와 강도 또는 연신율과의 상관성을 분석하고, 분석 결과를 통하여 계장화압입시험으로 획득한 기계적 물성 값으로 부터 연신율을 산출하는 방법을 제시하였다. 실제 사례로 웨이퍼 위에 코팅된 고분자 필름에 대한 기계적 물성을 측정하고, 측정된 데이터로 부터 연신율을 산출 해 보았다, 본 연구 결과를 통하여 얻

어진 재료의 연신율은 제품 설계 및 공정/품질 관리에 필요한 의미 있는 정보를 제공하는 중요한 기계적 물성이라고 할 수 있다. 이를 통하여 재료의 강도, 연성, 탄성 등을 종합적으로 평가할 수 있고, 이 평가 결과를 통하여 다양한 산업 및 응용 분야에 적절한 재료의 선택과 공정 설계에 활용될 수 있을 것으로 예상되어 진다.

#### References

- [1] D.R. Fewings, "A credit limit decision model for inventory floor planning and other extended trade credit arrangement," *Decision Science*, Vol.23, pp.200-220, 1992.
- [1] J. C. Kim, Y. I. Park, S. H. Lee and S. M. Noh, "A review of recent research on nanoindentation of functional polymers," *Polymer Science and Technology*, Vol. 29, No. 2, pp. 152-157, 2018.
- [2] J.H. Hahn, K.R. Lee, K.S. Kim and S.Y. Lee, "Principal and Applications of Nanoindentation Test," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 19, No. 3, pp. 19-26, 2002.
- [3] B.B. Jung, H.K. Lee and H.C. Park, "Measurement of Mechanical Properties of Thin Films Using a Combination of The Bulge Test and Nanoindentation," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 36, No. 2, pp. 117-123, 2012.
- [4] B.H. Jung and H.S. Kim, "Evaluation of Mechanical Properties of Barrier Ribs for Plasma Display Panel Using Nano Indenter Technology," *Fabrication and Characterization of Advanced Materials*, Vol. 13, No. 1, pp. 53-58, 2003.
- [5] Y.J. Kang, J.H. Baeg, H. Park and Y.R. Cho, "Measurement of Intrinsic Hardness of Deposited Chromium Thin Films by Nanoindentation Method and Influencing Factors," *Korean Journal of Metals and Materials*, Vol. 58, No. 3, pp. 207-215, 2020. <https://doi.org/10.3365/KJMM.2020.58.3.207>
- [6] J.H. Hahn, "Nanoindentation Experiments on Some Thin Films on Silicon," *Journal of the Korean Ceramic Society*, Vol. 37, No. 6, pp. 596-603, 2000.
- [7] J.H. Hahn, J.H. Park, G. S. Kim and S. Y. Lee, "Nanoindentation Experiments on MEMS Device," *Journal of the Korean Ceramic Society*, Vol. 40, No. 7, pp. 657-661, 2003.