

# 계장화 압입시험법을 이용한 금속소재의 인장물성 평가기술 (ISO TR29381) : 대표응력-대표변형률 방법

권동일 · 강승균 · 김국환 · 최민재

서울대학교 재료공학부

## Introduction to Instrumented Indentation Technique for Evaluating Tensile Properties of ISO TR29381 : Representative Stress-Representative Strain Method

Dongil Kwon, Seung-Kyun Kang, Kug-Hwan Kim, Min-Jae Choi

Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University

### 1. 서 론

계장화 압입시험법은 기존의 경도시험법을 한 차원 발전시킨 형태로 압입시험 중 하중과 변위를 연속적으로 측정하여 하중-변위 곡선(그림 1)을 제시한다는 장점이 있다. 하중-변위 곡선을 분석함으로써 경도, 탄성계수뿐만<sup>1-16)</sup> 아니라 소재의 강도<sup>17-30)</sup>, 잔류응력<sup>31-33)</sup> 및 파괴인성<sup>34-37)</sup>을 측정하기 기술이 개발되어 그 활용이 기대되고 있다. 특히 국내 대학 연구실의 기술로 개발된 대표응력과 대표변형률을 이용한 금속 소재의 인장물성 평가 알고리즘은 2008년에 ISO TR29381<sup>38)</sup>로 등재되어 표준화 단계에 도달하였고 알고리즘의 우수성과 정확성을 공인 받았다고 평가되고 있다. ISO에 등재된 계장화 압입시험법을 이용한 인장물성 평가기술은 계장화 압입시험의 장점인 비파괴 평가 및 미소단위 평가의 특성을 바탕으로 각종 구조물 및 시설의 사용 중 건전성 평가 및 멀티스케일의 역학특성 평가에 적극적으로 활용되고 있다. 이와 더불어 나노/마이크로

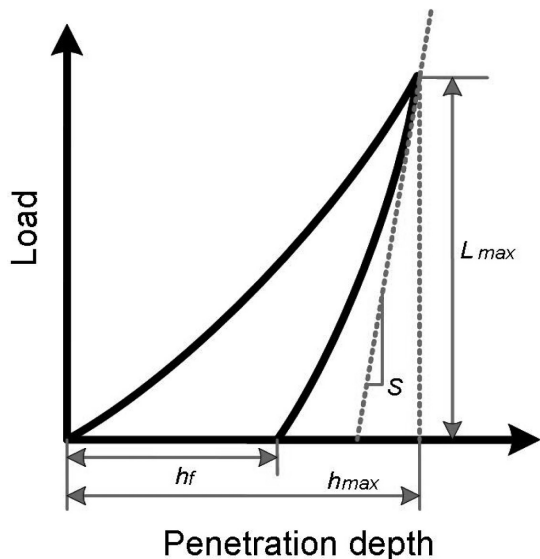


그림 1. 계장화 압입시험의 하중-변위 곡선의 개형.

단위로의 평가영역 확장과 고저온 환경 제어기술의 결합을

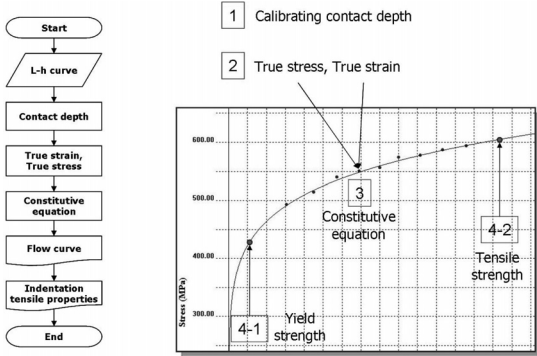


그림 2. 대표응력-대표변형률을 이용한 인장물성 평가 알고리즘과 요약도.

통해 기술의 파급효과가 더 커질 것으로 예상된다. 나아가 해외시장으로의 기술수출을 통한 신시장 개척도 가능할 것으로 보이며 국가 산업의 새로운 분야를 개척할 것으로 기대하고 있다.

이 글을 통해 국내 기술로 개발되어 ISO TR29381에 등재된 계장화 압입시험법을 이용한 인장물성 평가기술 대표응력과 대표변형률의 관점에서 소개하고자 한다. 계장화 압입시험법에서 정의되는 대표응력과 대표변형률을 이용한 소재의 인장물성 평가는 크게 4가지 단계로 구성된다(그림 2). 1단계는 압입시험의 접촉깊이를 평가하는 것이고, 2단계는 대표응력과 대표변형률을 정의하는 단계, 3단계는 구성방정식을 결정하는 단계, 마지막 4단계는 인장물성을 결정하는 단계이다.<sup>19, 38)</sup> 다음 장에서 4단계의 알고리즘에 대해서 세부적으로 소개하도록 하겠다.

## 2. 대표응력과 대표변형률을 이용한 인장물성 평가기술

### 2.1 구형압입자를 이용한 계장화 압입시험의 접촉면적 결정

계장화 압입시험에 의해 발생한 변형을 해석하기 위해서 압입시험 과정 중에 압입자와 소재가 맞닿는 접촉면적을

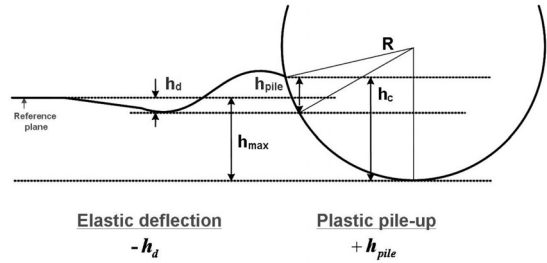


그림 3. 구형압입자의 탄성 힘과 소성 파일업의 모식도.<sup>18)</sup>

정확히 평가하는 것이 중요하다. 접촉면적은 압입자의 기하학적 형상을 바탕으로 접촉깊이( $h_c$ )로부터 유도된다. 계장화 압입시험에서는 연속적으로 하중과 변위를 측정하기 때문에 압입하는 순간의 접촉깊이를 바로 측정할 수 있다고 판단하기 쉽다. 하지만 소재가 압입되는 순간 소재 주변에서 발생하는 탄성변형과 소성변형에 의한 탄성 힘( $h_d$ )과 소성 파일업( $h_{pile}$ ) 현상이 발생하기 때문에 기준점으로 부터의 압입깊이를 측정한 최대압입깊이( $h_{max}$ )만으로는 직접적인 접촉면적을 측정할 수 없다(그림 3). 이러한 접촉깊이 결정의 문제는 인장물성 뿐만 아니라 경도 및 탄성계수 등의 물성을 측정하는 과정에서도 동일하게 나타나므로 이를 해결하기위한 많은 연구가 진행되어 왔다.<sup>2,3,12,13,17,18)</sup> 탄성 변형에 의한 탄성 힘 현상은 Sneddon의 탄성접촉해석에 기반을 둔 Oliver-Pharr의 연구가 가장 보편적으로 받아들여지고 있으며 식(1)과 같이 표현된다.<sup>3,12)</sup>

$$h_d = \chi \frac{L_{max}}{S}, \quad (1)$$

여기서  $L_{max}$ 는 최대압입하중, S는 하중제거곡선의 초기 기울기,  $\chi$ 는 압입자 형상에 따른 상수이며 구형압입자에 대해서 0.75의 값을 갖는다. 보편적인 해석이 존재하는 탄성 힘 현상과는 달리 소성에 의한 파일업은 그 해석이 복잡하기 때문에 해석적인 방법의 보편식이 존재하지 않는다. 파일업을 보정하기 위한 대부분의 연구는 파일업에 영향을 미치는 영향인자 사이의 관계를 규명하고 그 관계를 수식화하는 연구였다.<sup>12,13,17,18)</sup> 소성변형을 대표하는 재료물성인

가공경화지수(n)와 최대탄성변형률에 해당하는 항복강도와 탄성계수의 비가 파일업에 영향을 주는 핵심 인자로 받아들여져 왔다. 이와 같은 연구에 기반하여 접촉깊이의 소재, 압입깊이 및 압입자 반지름(R)에 따른 변화를 유한요소해석을 통해 다음의 식(2)을 구하였다.<sup>18)</sup>

$$h_c = (h_{max} - h_d) \left( 1 + 0.131(1 - 3.423n + 0.079n^2) \left( 1 + 6.258 \frac{h_{max}}{R} - 8.072 \left( \frac{h_{max}}{R} \right)^2 \right) \right) \quad (2)$$

파일업의 높이가 소재의 물성에 종속하는 함수와 압입깊이에 종속하는 함수의 곱으로 나타나 있으며 탄성 힘에 의한 값을 반영하여 최종적인 접촉깊이 식을 제시하고 있다. 압입자의 기하학적 형상을 바탕으로 압입깊이와 압입자 반지름을 통해 소재와의 접촉반경( $a_c$ ) 및 접촉면적( $A_c$ )을 환산할 수 있다.

$$A_c = \pi a_c^2 = \pi (2Rh_c - h_c^2) \quad (3)$$

인장물성인 가공경화지수가 소재의 파일업에 영향을 주기 때문에 계장화 압입시험을 수행하기 전에 가공경화지수를 미리 알고 있어야 한다는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위하여 임의의 가공경화지수를 대입하여 계장화 압입시험 알고리즘에서 측정되는 가공경화지수와 비교하여 반복 계산하는 과정이 포함된다는 점이 접촉깊이를 정확히 반영하는 대표응력-대표변형률 기법의 큰 특징이다.<sup>17)</sup>

## 2.2 대표응력과 대표변형률

계장화 압입시험을 통한 인장물성 평가는 구형압입자를 사용한다. 비커스 혹은 윈블형의 각진 압입자는 기하학적 자기 동일성(geometrical-self-similarity)을 갖고 있기 때문에 압입깊이가 증가함에 따라 소성영역의 크기가 커지지만 그 형태는 동일하다.<sup>13)</sup> 이에 반해 기하학적 자기 동일성을 갖지 않는 구형압입자는 압입깊이에 따라 소재와 접촉하는 접촉각이 연속적으로 변화하고 압입자 하부에서 발생하는 응력장의 형태가 연속적으로 변화한다. 따라서 연속적으로 변화하는 응력장을 해석함으로써 각기 다른 대표응

력과 대표변형률을 정의할 수 있다.

### 2.2.1 대표응력의 결정

소재와 압입자의 접촉이 발생하여 하중이 인가될 때, 초기에는 완전 회복이 가능한 탄성변형이 발생하고 탄소성 변형으로 진행되다가 최종적으로 완전 소성변형의 단계에 도달한다. 구형압입자를 이용하는 경우, 초기의 탄성 혹은 탄소성 변형이 발생하는 구간이 굉장히 짧기 때문에 압입이 진행되는 전구간을 완전 소성변형 구간으로 가정한다. 압입시 발생하는 평균응력을 소재의 유동응력과 연계시키려는 연구가 진행되었으며 슬립라인 이론에 기반을 둔 해석을 바탕으로 소성구속계수( $\psi$ )를 통한 다음 식(4)가 소개되었다.<sup>9, 19)</sup>

$$\sigma_r = \frac{1}{\psi} \cdot \frac{L_{max}}{A_c} \quad (4)$$

소성구속계수가 약 3의 값을 갖는 것으로 알려져 있지만 소재의 가공경화지수에 영향을 받는다는 연구결과도 있다. 하지만 24개의 실제소재와 12개의 이상소재에 대한 유한요소해석의 결과를 바탕으로 대부분에 금속소재에 대해서 그 의존도가 크지 않음이 밝혀졌다.<sup>19)</sup>

### 2.2.2 대표변형률

대표변형률에 대한 정의는 Tabor 가 제안한 식과, Ahn 과 Kwon이 제안한 방식이 있다. Tabor는 실험을 바탕으로 sine 함수를 이용한 대표변형률을 제시했다.<sup>9)</sup>

$$\epsilon_r = K_1 \left( \frac{a_c}{R} \right) = K_1 \sin \theta \quad (5)$$

$K_1$ 은 실험적으로 결정된 상수로 보통 0.2의 값이 사용되며  $\theta$ 는 압입자와 소재 사이의 접촉반각이다. Sine 함수의 특성상 압입깊이에 따라 가공경화되는 양상이 직선적으로 증가하는 경향이 반영된다. 따라서 오스테나이트 계열의 철강 소재와 같이 소재의 가공경화양상이 직선형으로 나타나는 경우에 적합한 정의로 판단되고 있으며 2008년에

Lee와 Kwon이 인장물성평가와 접목하여 오스테나이트 계열의 스테인리스강의 강도를 평가한 결과를 소개한 바 있다.<sup>39)</sup>

대부분의 금속소재는 앞서 소개한 직선적인 가공경화보다는 변형률이 증가함에 따라 가공경화정도가 낮아지는 양상을 보인다. Ahn과 Kwon은 구형압입자 하부에서 발생하는 변형률장의 형태를 해석함으로써 tangent 함수에 기반한 변형률을 식(6)과 같이 제시하였다.<sup>17)</sup> 압입축의 방향으로의 변위를 정의하여 미분함으로써 전단변형률을 유도하였으며 최대전단변형률에 비례하는 대표 변형률을 제시하였다.

$$\epsilon_r = \left( \frac{\alpha}{\sqrt{1 - (a_c/R)^2}} \right) \left( \frac{a_c}{R} \right) = \alpha \tan \theta \quad (6)$$

비례상수  $\alpha$ 는 유한요소해석을 도입하여 결정되었으며 0.14의 값을 취하는 것으로 알려져 있다.<sup>18)</sup> 소재의 가공경화형태를 반영한 적절한 대표변형률의 선택을 통해 다양한 소재에 대한 대표응력-대표변형률의 적용 가능범위를 넓히고 있다.

### 2.3 구성방정식의 결정

하중의 인가와 제거를 병행하는 다중압입기술을 이용하여 다중압입 시점마다 하나의 대표응력과 대표변형률을 구할 수 있다. 따라서 압입시험을 통해 얻어지는 대표응력-대표변형률은 인장곡선의 개형만을 제시하므로 대표응력-대표변형률을 바탕으로 인장곡선의 구성방정식을 제시하여 인장곡선을 모사할 수 있다. 인장곡선의 소성구간 묘사에 가장 일반적으로 사용되는 방법은 Hollomon 식을 이용한 방식이다.

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (7)$$

하지만 Hollomon 식의 경우 앞서 소개한 tangent 함수를 사용하는 소재에 적합하다. 가공경화지수는 1보다 작은 값을 취하므로 변형률이 증가함에 따라 소재의 가공경

화정도가 작아지는 양상을 보인다. 하지만 오스테나이트 계열의 철강 소재의 경우는 직선적인 가공경화양상을 보이므로 Hollomon 식이 적합하지 않다. 따라서 직선적인 가공경화를 쉽게 표현하기 위하여 다음의 식이 제안되었다.<sup>39)</sup>

$$\sigma = A + E_T \epsilon \quad (8)$$

A와  $E_T$ 는 재료상수이며 A의 값은 항복강도로 근사할 수 있다.

### 2.4 인장물성의 결정

완전소성에서의 응력장을 해석한 대표응력-변형률은 유도곡선 중 소성영역에 해당하는 값을 제시한다. 초기의 선형적인 탄성부분은 계장화 압입시험의 하중 제거 곡선을 통해서 얻어지는 탄성계수를 이용하여 구한다. 두 소재의 접촉시 발생하는 환원 탄성계수( $E_r$ )는 식(9)와 같이 하중제거 곡선의 초기 기울기(S)와 접촉면적으로 표현된다.<sup>1-13)</sup>

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{\sqrt{A_c}} \quad (9)$$

환원 탄성계수로부터 소재의 탄성계수(E)는 식(10)을 통해 유도된다.

$$E = (1 - \nu^2) \left( \frac{1}{E_r} - \frac{(1 - \nu_{tip}^2)}{E_{tip}} \right) \quad (10)$$

여기서  $\nu$ 는 시편의 포아송비,  $E_{tip}$ 과  $\nu_{tip}$ 은 각각 압입자의 탄성계수와 포아송비를 나타낸다.

금속소재의 탄성 영역은 소재의 탄성계수와 변형률로 표현되므로 다음과 같이 나타낸다.

$$\sigma = E\epsilon \quad (11)$$

소재의 탄성영역이 정의되면 0.2% 오프셋을 이용하여 소재의 항복 강도를 구할 수 있다. 식(7)과 (11)을 이용하여 항복 변형률을 식(12)와 같이 구하고 식(7) 또는 (11)에 대

입하여 항복강도를 결정할 수 있다.<sup>19)</sup>

$$K\epsilon_y^n = E(\epsilon_y - 0.002) \quad (12)$$

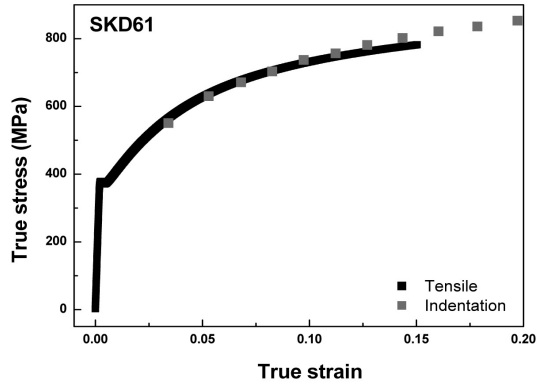
인장강도는 인장에서의 instability를 이용한 식(13)을 통해 구해진 인장 변형률( $\epsilon_{tensile}$ )로부터 측정된다.

$$\epsilon_{tensile} = n \quad (13)$$

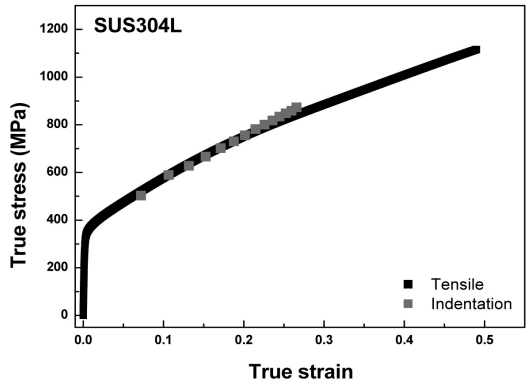
대표응력과 대표변형률을 이용한 위의 4단계를 통해 최종적으로 소재의 인장특성인 항복강도와 인장강도, 탄성계수를 측정할 수 있다.

### 3. 실험적 검증

금속 소재 SKD61, S45C, SK3, SUS420J2, SUS304L, SUS316L의 소재가 사용되었으며 소재의 표면은 1um 알루미나 파우더로 폴리싱을 하였다. 계장화 압입시험은 AIS 3000(프론틱스, 대한민국)을 사용하였으며 사용장비의 하중 분해능은 5.6 gf 이고 변위 분해능은 0.1 um이다. 계장화 압입시험은 15회 다중압입방식, 150um의 변위제어로 진행되었으며 압입속도는 0.1mm/min으로 설정되었다. 구형압입자는 텅스텐카바이드로 제작되었다. 비교실험으로 수행된 인장시험은 25mm 길이의 지름 6mm의 봉상 시편을 사용하였으며 cross-head 속도는



(a) SKD61



(b) SUS304L

그림 4. 인장곡선과 대표응력-대표변형률의 비교 (a) SKD61, (b) SUS304L.

표 1. 인장시험과 압입시험을 이용한 항복강도 및 인장강도의 비교

재 료	항복강도(MPa)			인장강도(MPa)		
	인장시험	압입시험	오 차	인장시험	압입시험	오 차
SKD61	371.45	357.21	-3.83	781.33	846.70	8.37
S45C	362.72	344.12	-5.13	774.19	786.11	1.54
SK3	315.08	329.18	4.48	706.53	720.38	1.96
SUS420J2	398.47	428.63	7.57	797.69	790.68	-0.88
SUS304L	338.68	340.35	0.49	1117.73	1207.06	7.99
SUS316L	304.67	323.87	6.30	950.70	884.90	-6.92

1 mm/min이었다. 대표응력-대표변형률을 이용하여 측정된 인장물성 및 인장시험의 결과를 표 1에 나타내었다. 인장물성인 항복강도, 인장강도가 5% 내외의 오차에서 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 대표응력, 대표변형률과 인장곡선과의 중첩성을 확인하기 위해서 그림 4에 인장곡선과 대표응력-대표변형률을 나타내었다. Hollomon 식을 따르는 페라이트 계열의 소재인 SKD61과 직선적인 가공경화 양상을 보이는 오스테나이트 소재 SUS304L에 대표응력과 대표변형률이 인장곡선을 잘 모사하고 있음을 알 수 있다. 계장화 압입시험을 이용하여 인장곡선을 모사하고 이로부터 인장물성을 유도할 수 있음을 확인하였다.

#### 4. 잔류응력의 측정

소재에 잔류응력이 존재하게 되면 잔류응력이 존재하지 않는 무응력 상태의 거동과 다른 변형 및 파손이 발생하기 때문에 잔류응력의 유무 및 수치를 측정하는 것이 중요하다. 앞서 제시한 강도평가 알고리즘도 무응력 상태를 기준으로 완성된 알고리즘으로서 잔류응력이 존재하는지의 여부를 실험 전에 판단해야 한다. ISO TR29381에 부록에서 이와 관련된 내용을 다루고 있어 내용을 소개하고자 한다.

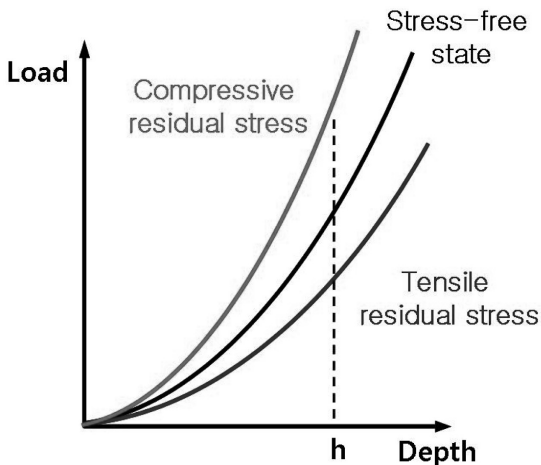


그림 5. 잔류응력에 따른 하중-변위 곡선의 변화.

잔류응력이 존재하는 상황에서 압입시험을 수행하게 되면 잔류응력이 존재하지 않는 상태와 비교하여 다른 하중-변위 곡선이 나타난다(그림 5).<sup>32-33)</sup> 일반적으로 압축잔류응력이 인가되어 있으면 같은 압입깊이를 압입하는데 있어 더 많은 하중이 요구된다. 반면에 인장잔류응력이 존재할 때는 같은 압입깊이를 압입할 때 낮은 하중이 필요하다. 이처럼 잔류응력이 존재하지 않는 상태에서 유도된 기준곡선으로부터의 하중차이를 통해 잔류응력을 평가할 수 있다.

기존의 연구에 따르면 expanding cavity 모델<sup>40)</sup>을 이용하여 잔류응력이 존재하는 곳에 압입하중이 가해질 때 잔류응력의 편차응력만이 압입하중에 영향을 준다는 결론을 얻을 수 있다. Lee와 Kwon은 실험적인 검증을 통해 잔류응력을 정수압응력과 편차응력으로 분해하여 편차응력의 압입축 방향의 하중이 직접적으로 압입시험의 하중에 영향을 준다는 연구결과를 보여주었다.<sup>32-33)</sup> 앞서 인장물성 평가 알고리즘에서도 소개된 바와 같이 압입시험에서의 하중을 유동곡선의 응력으로 환산한 것이 대표응력이다. 동일한 정의를 이용하여 하중차를 응력으로 환산하게 되면 잔류응력을 평가할 수 있다. 현재까지의 알고리즘에서는 두 방향의 잔류응력의 비를 알고 있어야 평가가 가능하다. 잔류응력의 수치를 요구하는 많은 상황에서 일반적으로 잔류응력의 비를 알고 있는 경우와 달리 비를 정확히 알지 못하는 경우에는 장축과 단축의 길이가 다른 누프(Knoop) 압입자를 이용하는 연구가 진행되고 있다.

#### 5. 맺음말

지금까지 ISO TR29381에 등재된 대표응력-대표변형률을 이용한 인장물성평가 알고리즘과 잔류응력 평가에 대해서 소개하였다. 국제 표준으로 인정 받은 만큼 결과의 재현성과 정확성이 우수함을 확인할 수 있었다. 계장화 압입시험이 국부적인 변형만을 가하는 비파괴적인 시험법인 만큼 국내외 산업에서 비파괴 강도평가에 적극적인 활용이 기대된다. 특히 이 기술은 국내 대학에서 알고리즘이 완성되고 국내 기업에서 상용화한 성공적인 사례로 해외수출을



통한 신시장 개척이 가능할 것으로 보인다. 하지만 영국, 독일, 미국 등의 선진국에서도 기술개발을 위한 활발한 투자가 진행되고 있는 만큼 계장화 압입시험 분야에 있어서의 지속적인 혁신이 요구될 것으로 생각된다.

이번엔 표준화된 계장화 압입시험을 이용한 인장물성평가 알고리즘을 기반으로 계장화 압입시험 기술이 크게 3가지 분야로 확장될 것으로 기대된다. 가장 우선적으로 요구되는 부분은 평가 스케일의 확장이다. 현재 개발된 기술은 수십에서 수백 마이크로미터 단위의 변형을 가하여 소재의 물성을 평가하기 때문에 박막 및 나노소재 등에 적용하는데 어려움이 있다. 신성장 분야인 나노/마이크로 분야의 역학적 특성 평가가 요구되고 있으며 현재의 기술을 이와 접목시킨다면 큰 파급효과를 얻을 것으로 기대된다. 다음 단계는 소재의 범위를 확장하는 것이다. 현재의 알고리즘의 시작은 금속소재에 기반을 두고 진행되었으나 복합소재 및 고분자 소재 등과 같은 소재에 대해서는 검증이 이루어지지 않았다. 마지막 단계로 온도/습도 등의 환경요인을 제어하여 물성을 평가하는 기술로의 확장이 요구된다. 반도체 소자를 비롯한 전자소재에서부터 고온 설비에 이르는 많은 소재들이 고저온의 극한환경에서 사용되므로 환경요소가 반영된 물성측정이 요구되고 있다. 끝으로 국내에서 개발된 기술의 표준화를 바탕으로 지속적인 기술선진국으로서의 입지를 다지기 위한 노력이 요구되고 있고 관련 연구가 적극적으로 진행되고 있는 만큼 이를 통한 국가산업의 확장과 발전이 이루어지기를 기대해 본다.

### 참고 문헌

1. S.I. Bulychev, V.P. Alekhin, M.K. Shorshorov, A.P. Ternovskii, G.D. Shnyrev, *Zavod. Lab.* **41**, 1137 (1975).
2. M.F. Doerner, W.D. Nix, *J. Mater. Res.* **1**, 601 (1986).
3. W.C. Oliver, G.M. Pharr, *J. Mater. Res.* **7**, 1564 (1992).
4. A. Gouldstone, N. Chollacoop, M. Dao, J. Li, A.M. Minor, Y.L. Shen, *Acta Mater.* **55**, 4015 (2007).
5. A.C. Fischer-Cripps, *Vacuum* **58**, 569 (2000).
6. N.K. Mukhopadhyay, P. Paufler, *Int. Mater. Rev.* **51**, 209 (2006).
7. J.S. Field, M.V. Swain, *J. Mater. Res.* **10**, 101 (1995).
8. C.A. Schuh, *Mater. Today* **9**, 32 (2006).
9. D. Tabor: *Hardness of metals* (Clarendon Press, New York, 1951).
10. A. Bolshakov, G.M. Pharr, *J. Mater. Res.* **13**, 1049 (1998).
11. A.C. Fischer-Cripps: *Nanoindentation* (Springer, New York, 2002).
12. W.C. Oliver, G.M. Pharr, *J. Mater. Res.* **19**, 3 (2004).
13. Y.T. Cheng, C.M. Cheng, *Mater. Sci. Eng. R.* **44**, 91 (2004).
14. J.Y. Kim, B.W. Lee, D.T. Read, D. Kwon, *Scripta Mater.* **52**, 353 (2005).
15. J.Y. Kim, S.K. Kang, J.R. Greer, D. Kwon, *Acta Mater.* **56**, 3338 (2008).
16. J.Y. Kim, S.K. Kang, J.J. Lee, J.I. Jang, Y.H. Lee, D. Kwon, *Acta Mater.* **55**, 3555 (2007).
17. J.H. Ahn, D. Kwon, *J. Mater. Res.* **16**, 3170 (2001).
18. S.H. Kim, B.W. Lee, Y. Choi, D. Kwon, *Mater. Sci. Eng. A- Struct.* **415**, 59 (2006).
19. J.Y. Kim, K.W. Lee, J.S. Lee, D. Kwon, *Surf. Coat. Tech.* **201**, 4278 (2006).
20. E.C. Jeon, J.Y. Kim, M.K. Baik, S.H. Kim, J.S. Park, D. Kwon, *Mater. Sci. Eng. A- Struct.* **419**, 196 (2006).
21. B. Taljat, T. Zacharia, F. Kosel, *Int. J. Solids Struct.* **35**, 4411 (1998).
22. M. Dao, N. Chollacoop, K.J. Van Vliet, T.A. Venkatesh, S. Suresh, *Acta Mater.* **49**, 3899 (2001).
23. N. Chollacoop, M. Dao, S. Suresh, *Acta Mater.* **51**, 3713 (2003).
24. E.G. Herbert, G.M. Pharr, W.C. Oliver, B.N. Lucas, J.L. Hay, *Thin Solid Films* **398-399**, 331 (2001).
25. S. Jayaraman, G.T. Hahn, W.C. Oliver, C.A. Rubin, P.C. Bastias, *Int. J. Solids Struct.* **35**, 365 (1998).
26. Y.T. Cheng, C.M. Cheng, *Int. J. Solids Struct.* **36**, 1231 (1999).
27. A.E. Giannakopoulos, S. Suresh, *Scripta Mater.* **40**, 1191 (1999).
28. T.A. Venkatesh, K.J. Van Vliet, A.E. Giannakopoulos, S. Suresh, *Scripta Mater.* **42**, 833 (2000).

29. J.L. Bucaille, S. Stauss, E. Felder, J. Michler, *Acta Mater.* **51**, 1663 (2003).
30. K.D. Bouzakis, N. Michailidis, *Thin Solid Films* **469-470**, 227 (2004).
31. S. Suresh, A.E. Giannakopoulos, *Acta Mater.* **465**, 755 (1998).
32. Y.H. Lee, D. Kwon, *Acta Mater.* **52**, 1555 (2004).
33. Y.H. Lee, J.Y. Kim, J.S. Lee, K.H. Kim, J.Y. Koo, D. Kwon, *Philos. Mag.* **86**, 5497 (2006).
34. J.S. Lee, J.I. Jang, B.W. Lee, Y. Choi, S.G. Lee, D. Kwon, *Acta Mater.* **54**, 1101 (2006).
35. B.R. Lawn, E.R. Fuller, *J. Mater. Sci.* **10**, 2016 (1975).
36. B.R. Lawn, A.G. Evans, D.B. Marshall, *J. Am. Ceram. Soc.* **63**, 574 (1980).
37. T.S. Byun, J.W. Kim, J.H. Hong, *J. Nucl. Mater.* **252**, 187 (1998).
38. ISO TR29381: Metallic Materials - Instrumented Indentation Test for Measurement of Indentation Tensile Properties (2008)
39. K.W. Lee, K.H. Kim, J.Y. Kim, D. Kwon, *J. Phys. D Appl. Phys.* **41**, 074014 (2008).
40. K.L. Johnson: *Contact Mechanics* (Cambridge University Press, Cambridge, 1985).