

깊이 측정이 가능한 마이크로 압입 시험기 개발 및 성능평가

정진성[†] · 김호경[‡]

서울산업대학교 자동차공학과

Development and its Performance Evaluation of a Depth-Sensing Micro-Indentation Testing Device

Chung, Chin-Sung[†] and Kim, Ho-Kyung[‡]

Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea
(Received February 15, 2009; Revised April 18, 2009; Accepted April 27, 2009)

Abstract – We developed a compact micro indentation testing device (designated SNUT) which is capable to measure Young's modulus of a sample using depth and applied load data during indentation. Performance of this device was evaluated using pure Ti, pure Ni, and die steel (SKD11). As a result of analysing the indentation test data, the frame compliance C_f was found to influence mainly the modulus by 80% among several factors affecting accuracy of Young's modulus. Project area, which was determined by indirect indentation method, was modified using direct SEM observation. Finally, Young's modulus error was reduced to 5% after taking into consideration the frame compliance and modified projected area from 80% error without any these two correction factors. The performance of SNUT and MTS instruments was compared using same specimen (pure Ti).

Keywords – micro-indentation testing machine(마이크로-인덴테이션 시험기), young's modulus(탄성계수), frame compliance(프레임 컴플라이언스), projected area(투영면적), Berkovich type diamond indenter(베르코 비치형 다이아몬드 압입자)

1. 서 론

현재 수 마이크로미터 혹은 그 이하 두께 박막의 탄성계수, 인장 및 항복강도와 같은 기계적 특성을 측정하기 위한 방법으로 나노 인덴테이션(nanoindentation) 방법이 가장 유효하다. 이 방법은 뾰족한 압입자를 이용하여 수 mN 단위의 극미세 하중으로 박막 및 나노 시편의 표면을 압입하여 수 nm 깊이의 압흔을 형성시키고, 측정된 하중-변위 곡선으로부터 경도 및 탄성계수 등을 기본적으로 얻을 수 있다. 최근에는 상용 나노 인덴터를 이용하여 잔류응력[1,2], 진응력-진변형률[3], 항복강도[4], 가공경화지수[5] 등을 평가하는 연구가 국내외적으로 활발히 이뤄지고 있다. 예로, Kwon 등의

연구[2]에서는 두 박막 시편을 동일한 하중으로 압입시험을 실시하여, 잔류응력에 따라 다른 기울기를 보이는 압입하중-변위곡선의 최대 압입하중에서의 접촉면적을 나눔으로써 정량적인 잔류응력을 측정하였다. Huber와 Tsakmakis[3]는 신경망 이론과 연속압입(cyclic indentation)시험법을 적용하여 재료의 진응력-변형률을 측정하는 방법을 제시하였다. 한편 Lu[5]는 시편의 탄성계수, 구형 압입자의 반경, 압입시험으로 얻은 두 개의 압입하중과 각 하중에서의 압입깊이로 대표 응력을 계산하고, 각각의 값으로 항복강도와 가공경화지수를 결정하였다.

지금까지 국내외적으로 압입방법을 적용하여 재료의 물성치 내지는 거동을 발표한 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 이들 논문의 대부분은 상용화된 압입 시험기를 사용하여 재료의 물성치 내지는 거동을 평가한 것이 대부분이다. 실제 재료의 물성치를 평가하는 정밀한

[†]주저자 : gcschung@hanmail.net

[‡]책임저자 : kimhk@snut.ac.kr

시험기를 설계하고 각종 주요 부품들을 조립하고 혹은 제작하는데 중요한 요소가 무엇이며 이들 요소들이 시험기의 성능에 얼마나 영향을 미치는가를 다루는 연구는 국내외적으로 매우 드물다[6-8]. 그러나 이와 같이 주요 부품을 구성하고 조립하며 고정하여 물성치를 평가하는 연구는 산업적 혹은 기술적 측면에서 중요한 연구로 판단된다. 특히 마이크로급 이상의 정밀한 측정기의 각종 부품의 설치 및 조립 과정은 실험결과에 매우 예민한 요소로 기존의 설치 및 조립 방식을 적용 시에는 매우 큰 오차를 유발한다고 판단된다.

본 연구에서는 구조가 간단하며 사용이 용이하며 깊이 측정이 가능한 기능을 추가하여 탄성계수와 경도 등을 측정하는 시스템을 설계 제작하여 그 성능을 입증하고자 한다. 이를 위하여 베르코비치(Berkovich) 형태의 다이아몬드 압입자를 이용한 콤팩트한 크기의 마이크로 인덴터를 제작하였다. 이미 기계적 물성치가 알려진 시험편을 사용하여 실험 결과에 영향을 미치는 주요 인자를 파악하여 이들의 영향을 정량적으로 분석하였다. 최종적으로 동일한 재료에 대하여 상용 나노 인덴터를 사용하여 도출된 실험결과와 결과 값을 비교 분석하였다.

2. 시스템 설계 및 제작

2-1. 시스템 구성

마이크로 해상도의 압입시험기는 베르코비치형 압입자를 사용하여 시험편의 탄성계수와 경도 평가에 필요한 하중과 변위를 측정하도록 설계하였다. 이를 위하여 Fig. 1과 같이 X축 스테이지에 시험편 마운트를 장착하여 한 번 마운트로 여러 차례 측정이 가능하도록 하였다. 압입이 이루어지는 미세변위 조정은 입력신호에 정확하게 비례적인 반응을 보이므로 정밀제어가 가

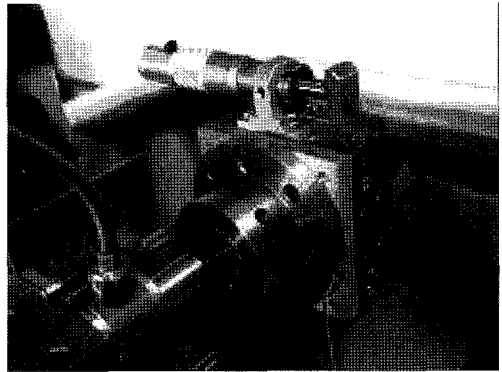


Fig. 1. Specimen holder on the X positioning stage.

능하며, 열 변형이 적은 특성을 갖는 최대 30 μm 까지 확장이 가능한 사각기둥 형태의 피에조 액츄에이터를 사용하였다.

변위 측정은 노이즈를 고려할 경우 변위해상도가 약 6 nm, 최대 50 μm 의 측정 범위를 가진 독일 PI사의 비접촉식 정전용량 변위계를 사용하였다. 하중 측정은 해상도가 0.01 mN, 최대하중용량이 0.5 N인 소형 압축 로드셀을 장착하였다. 압입자, 로드셀, 피에조 액츄에이터의 중심선을 일치시켜 순수한 압축하중이 가해지도록 LM(linear motor) 가이드 테이블 위에 설치하는 하중전달 시스템 (load train system)을 Fig. 2와 같이 구성하였다.

2-2. 각종 부품의 제작 및 조립

시험기의 구성품은 일반 구조용강인 SM45C의 베이스 위에 조립하였으며 수평 형태로 설치하여 안정성을 높이고 바닥면의 기울어짐에 대한 영향을 줄이고자 하였다. 시험편을 고정하기 위한 마운트 모듈은 3 μm 의 진직도를 가지는 X 스테이지에 고정하고, 시험이 실시되는 동안 좌우로 이동하여 여러 차례 측정이 가능하도록

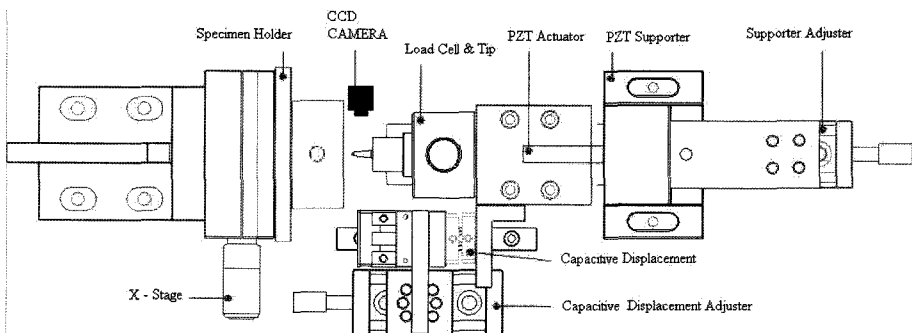


Fig. 2. Schematics of load transfer system of the micro-indentation testing machine.

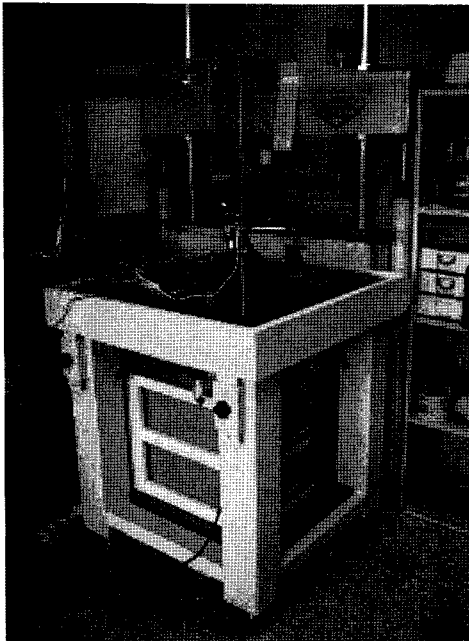


Fig. 3. The assembled indentation system with thermal isolation case on the anti-vibration table.

록 하였다. 시험편에 하중을 가하는 방식은 전압이 인가시 피에조 액츄에이터가 확장하는 원리를 적용하였다.

마이크로 압입 시스템의 경우 비록 모든 부품의 가공이 정밀하더라도 이를 조립하는 단계에서 볼트 체결 시 약간의 체결력 차이로 인하여 중요 부품의 뒤틀림이 예상되며 이로 인하여 측정결과에 지대한 영향을 준다. 따라서 나노급 해상도의 정전용량 변위계의 설치를 위하여 화상 카메라를 이용하여 타겟(target)과 프로브(probe)가 동일한 간격을 유지하는지를 관찰하며 초소형 정밀 볼트로 고정하였다. 또한 온도 편차로 인한 열 변형을 줄이고, 온도 안정화시간을 단축시키기 위한 단열 케이스는 아랫면이 없는 상자 형태로 제작하였다. 압입시험 후 케이스의 측면 포트에 연결막대기를 이용하여 마이크로 미터를 회전시켜 스테이지를 이동시키는 방법을 사용하였다. 외부로부터 고주파 및 저주파의 미세한 진동을 차단하기 위하여 시험기는 격막 공기 스프링을 내장한 제진대위에 최종적으로 Fig. 3과 같이 설치하였다.

2-3. 소프트웨어 개발

제작된 시험기의 측정 및 제어를 위하여 National Instrument사의 LabVIEW version 8.2를 사용하여 프로그램을 개발하였다. 압입시험 프로그램과, 결과 값을

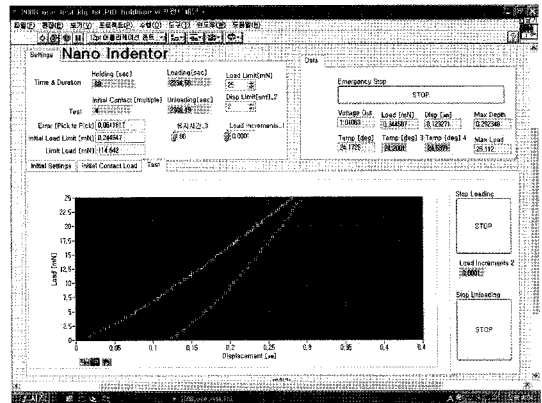


Fig. 4. Front panel of the program for controlling test procedure and acquiring depth and applied loads and control.

이용하여 컴플라이언스를 계산하는 프로그램, 컴플라이언스를 적용하여 탄성계수를 산출하는 프로그램을 개발하였다. 탄성계수를 결정하는 방식은 지금까지 여러 연구에서 제안되었으나 본 연구에서는 Oliver와 Pharr의 식을 적용하였다. 압입시험 프로그램은 크게 4 단계로 구분되어 있다. 제 1단계는 실험 조건을 설정하며, 제 2단계는 시험기기의 안정화 상태를 확인한다. 제 3단계에서 피에조 액츄에이터를 확장시켜 압입자가 시험편에 압입을 시작하고, 프로그램 내부에 설정된 초기 접촉하중을 감지하면 부하-유지-제하의 단계로 압입자의 위치를 제어하게 된다. 마지막 제4 단계는 데이터의 저장 단계로 데이터 저장 후 시험이 완료되도록 구성하였다. Fig. 4는 압입시험 프로그램으로 최대하중, 최대변위, 유지시간, 이송속도 등의 시험조건을 설정하도록 되어 있으며 하중과 변위에 대한 수치를 실시간으로 확인이 가능하도록 하였다.

본 연구에서 개발한 시편의 고정구의 경우 시편 설치시 시험기 성능에 어느 정도 영향을 끼칠만한 컴플라이언스의 차이가 발생하였다. 따라서 컴플라이언스를 측정하는 프로그램은 다양한 하중(또는 압입깊이)으로 측정된 압입깊이(h_p)와 제하시의 초기부분 기울기의 역수를 이용하여 선형으로 회귀하여 절편 값(컴플라이언스)을 구할 수 있도록 구성하였다. 컴플라이언스를 결정하기 위하여 본 연구에서는 하중범위 25 mN 200 mN로 각 시편에 따라 7~10회 정도의 실험 데이터를 사용하였다. 탄성계수는 Fig. 5와 같이 압입시험으로 저장한 파일을 이용하여, 앞서 결정한 컴플라이언스를 적용하여 계산하게 된다.

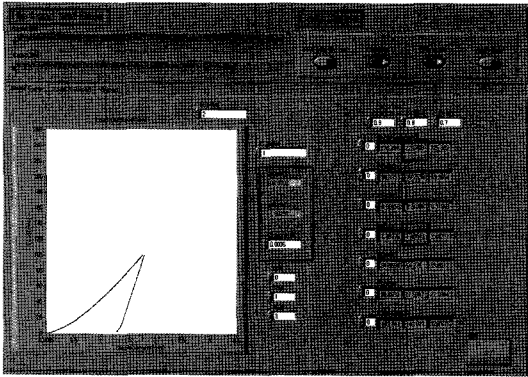


Fig. 5. Front panel of the program for determining an elastic constant.

3. 개발된 마이크로 압입 시험기 평가

3-1. 압입시험기 예비실험

압입 시험에 사용된 시험편은 순수 Ni과 순수 Ti, 공기강인 SKD11 시편을 사용하였다. 두 개의 박막 시편을 제외한 벌크 시험편은 시험편 홀더에 부착이 가능한 크기로 절단 한 뒤 최종적으로 0.05 μm 의 산화 알루미늄나 파우더로 경면 연마 가공하였다. 제작된 압입시험기 평가를 위하여 준비된 순수 Ni, 순수 Ti, SKD 11종의 세 가지 시편을 25, 50, 100, 200 mN의 하중범위를 적용하였으며, 최대하중에서의 유지시간은 15초와 60초로 구분하여 7~10회 이상 압입하고, 압입 속도는 0.6 $\mu\text{m}/\text{min}$ 으로 모든 시험구간에서 동일하게 적용하였다. 개발된 시험기가 보정되지 않은 상태에서의 압입 시험결과 탄성계수 측면에서 3가지 재료에 대하여 77~88% 범위에서 오차가 발생하였다. 압입시험 결과에 지대한 영향을 주는 요소를 분석하기 위하여 경도가 높거나 낮은 재료, 하중 범위, 유지시간, 하중 속도의 변화에 따라 어떻게 변화하는 가를 실험 결과를 분석하였다. 분석 결과 이들 요소들의 변화에 의한 값은 일관성이 거의 없으므로 거의 영향이 없는 것으로 판단되었다. 따라서 본 시험기가 약간의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 나노 압입시험에 영향을 미치는 인자로는 온도 변화, 초기압입 깊이, 시험기 컴플라이언스, 압입자 형상, 압입시의 pile-up과 sinking-in, 표면 거칠기, 압입자 팁 무뎠정도, 압입자 크기 효과, 잔류응력 등으로 구분된다[10]. 본 연구에서는 재료의 경우 풀림 처리를 하여 잔류응력의 영향은 배제하였으며 압입자의 팁을 SEM으로 관찰 한 결과 무뎠 정도가 매우 양호하여 배제하였다. 또한 압입자 크기 효과의

경우 본 연구의 경우 마이크로급이므로 무시하였다. 따라서 시험기 성능에 크게 영향을 미치는 인자로는 시스템 컴플라이언스와 투명면적 보정 계수로 분석하였다. 우선 시스템 컴플라이언스를 고려한 탄성계수를 결정하고 추가로 투명면적 보정계수를 고려한 탄성계수를 고려하여 두 인자의 영향을 정량적으로 분석하였다.

3-2. 프레임 컴플라이언스 측정

압입시험에서 프레임 컴플라이언스의 영향은 스프링의 경우와 유사하며 인가된 하중에 따라 변형되는 프레임으로 인하여 측정된 압입깊이는 실제 압입깊이보다 큰 수치로 검출되게 한다. 이러한 프레임 컴플라이언스는 압입깊이의 역수와 프레임 강성을 이용하여 계산할 수 있다. 또한 전체 컴플라이언스 $\left(\frac{dh}{dP}\right)_t$ 는 식 (1)과 같이 시험에서의 접촉에 의한 컴플라이언스 $\left(\frac{dh}{dP}\right)_c$ 에 시험기 프레임의 컴플라이언스가 추가된다.

$$\left(\frac{dh}{dP}\right)_t = \left(\frac{dh}{dP}\right)_c + C_f \quad (1)$$

프레임 컴플라이언스의 영향으로 탄성계수와 경도는 낮은 수치로 계산되며 식 (2)와 같이 압입깊이를 보정할 수 있다.

$$h'_t = h_t - C_f P_t \quad (2)$$

여기서 h'_t 은 컴플라이언스가 고려된 최대 압입깊이이며 h_t 는 최대압입하중이다.

프레임 컴플라이언스(C_f)는 하중에 대한 시험기 고유의 값이다. 그러나 동일한 재료에 대한 시험편의 교체시마다 약간 상이한 값이 나타났다. 이와 같은 결과는 시험편 고정구를 포함한 컴플라이언스가 고정구가 시험편을 안정적으로 고정하지 못한 결과로 판단되었다. 따라서 본 연구에서는 시험편을 교체시 우선 컴플라이언스를 측정하여 이를 이용하여 압입깊이를 결정하도록 프로그램을 하였다. 컴플라이언스 측정을 위하여 ISO 14577[9]에서 명시되어 있는 제하데이터의 사용범위는 최대하중의 80%의 데이터를 본 연구에서 개발한 시험기의 결과를 분석에 사용하였다. Fig. 6은 순수 Ni의 15초와 60초 유지시간에 대한 시스템의 컴플라이언스 C_f 를 결정한 그래프이다. 순수 Ni의 경우는 15초의 유지시간의 경우가 60초보다 C_f 가 1.6% 가량 낮게 측정되었다. Table 1은 최대하중에서의 유지시간에 따른 순수 Ni, Ti, SKD11 시편의 C_f 를 나타내고

Table 1. The variations of C_f for pure Ni, Ti and SKD11 samples with respect to holding time of 15 sec and 60 sec

Specimens	C_f at 15 s hold	C_f at 60 s hold
pure Ni	0.003451 $\mu\text{m}/\text{mN}$	0.003504 $\mu\text{m}/\text{mN}$
pure Ti	0.003660 $\mu\text{m}/\text{mN}$	0.003544 $\mu\text{m}/\text{mN}$
SKD11	0.003651 $\mu\text{m}/\text{mN}$	0.003503 $\mu\text{m}/\text{mN}$

Table 2. Experimental elastic modulus for pure Ni, Ti, and SKD11 before consideration of factors (E_{c1}), after consideration of compliance (E_{c2}), and after consideration of compliance and modified indenter projected area ratio (E_{c3})

Level	Load[mN]	Specimen	E (GPa)	Error [%]
E_{c1}	100	Ti	27.9	77.1
		Ni	35.8	83.0
		SKD11	40.1	80.9
	200	Ti	19.3	84.1
		Ni	24.6	88.3
		SKD11	28.3	86.5
E_{c2}	100	Ti	132.7	8.8
		Ni	277.6	26.1
		SKD11	224.1	6.7
	200	Ti	125.8	3.1
		NI	234.6	6.6
		SKD11	208.7	0.6
E_{c3}	100	Ti	132.0	8.2
		Ni	223.2	1.4
		SKD11	201.0	4.3
	200	Ti	130.8	2.9
		Ni	214.1	2.6
		SKD11	203.8	2.9

있다. 순수 Ti와 SKD11 시편에서는 15초의 유지시간의 경우가 60초보다 약 3.5% 크게 C_f 가 결정되었다. 매 시편마다 다른 C_f 가 결정되기는 하였으나, 60초의 동일한 유지시간에서 오차범위가 2% 이내를 보이고 있다는 것은 유지시간의 오차 약 6%의 편차를 가지고 있는 15초보다 안정적으로 나타났다.

세 가지 시편(순수 Ni, 순수 Ti, SKD11)을 사용하여 하중조건 100 mN과 200 mN의 평균적인 탄성계수를 결정하였다. 순수 Ni, 순수 Ti, SKD11의 탄성계수는 각각 122 GPa, 220 GPa, 210 GPa로 가정하였다.

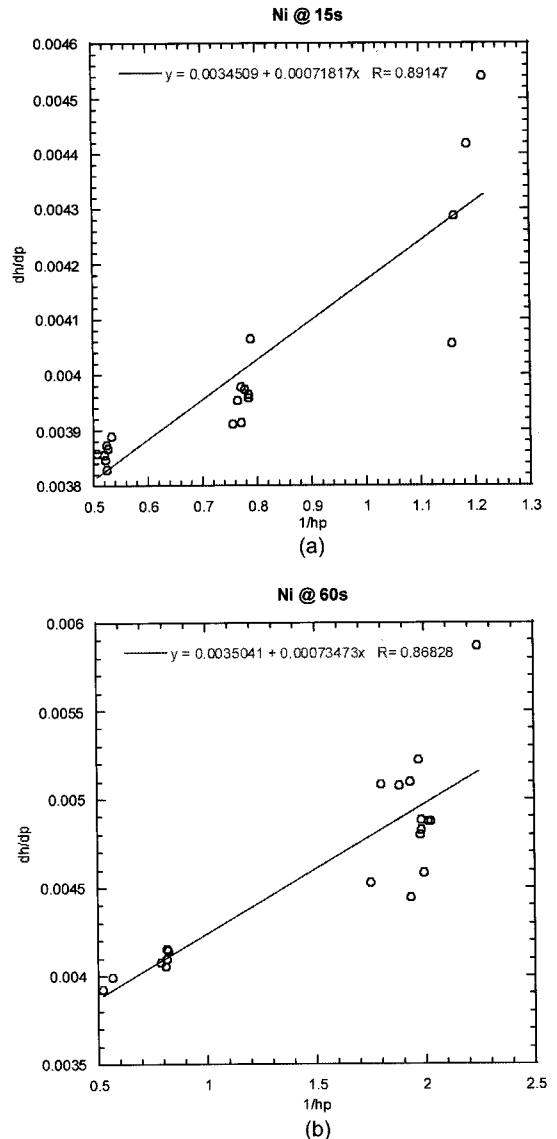


Fig. 6. Determination of system compliance C_f for pure Ni with a holding time of (a) 15 sec and (b) 60 sec, respectively.

Table 2는 실험결과로 C_f 만을 교정 적용하는 경우는 7499% 수준으로 약 70% 이상 개선되었으며 탄성계수 결정에 대한 C_f 의 영향이 약 80%로 매우 크게 나타났다. 그러나 좀 더 향상된 탄성계수 값을 결정하기 위하여 C_f 이외에 다른 영향인자로 압자형상을 고려하여 압입깊이로부터 간접적으로 결정된 압입 투영단면적(A_i)과 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 직접적으로 결정된 투영단면적(A)을 비교하여 보정하는 것이



Fig. 7. SEM image of a indent for pure Ni at P=200 mN.

요구된다.

3-3. SEM을 이용한 투영면적 보정

압입자가 수직으로 시험편 표면을 압입할 경우 압입 투영단면적(A_i)은 이상적인 베르코비치 압입자의 경우 $24.5 h_p^2$ 로 계산된다. 본 연구에서는 순수 Ni, SKD11 시험편을 사용하여 압입시험을 실시하였다. 압자형상과 압입깊이로부터 간접적으로 결정된 압입 투영단면적(A_i)과 SEM을 이용하여 직접적으로 결정한 투영단면적(A)을 비교하였다. Fig. 7은 SEM을 이용하여 투영단면적을 측정된 순수 Ni의 예이다. 압입 흔적의 대칭성으로 본 연구에서 개발한 시험기의 압입 직진도의 정확성이 확보된 것으로 확인되었다. 압입시험을 이용하여 측정된 단면적과 SEM을 이용하여 측정된 단면적의 비율(A_i/A)을 식 (3)을 적용하여 탄성계수를 결정하였다.

$$E^* = \frac{dP}{dh} \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta\sqrt{A}} \sqrt{\frac{A_i}{A}} \quad (3)$$

Fig. 8은 순수 Ni 시험편을 이용하여 시험기의 압입 깊이를 통하여 간접적으로 결정한 단면적(A_i)과 SEM 이미지를 관찰하여 직접적으로 측정된 단면적(A)을 비교한 그래프로, 간접적으로 결정한 압입 단면적이 크게 결정되고 있음을 알 수 있다. 압입 깊이를 통하여 간접적으로 결정한 단면적(A_i)을 SEM 이미지를 관찰하여 직접적으로 측정된 단면적을 고려하여 수정한 단면적(A_{modif})은 식 (4)와 같다.

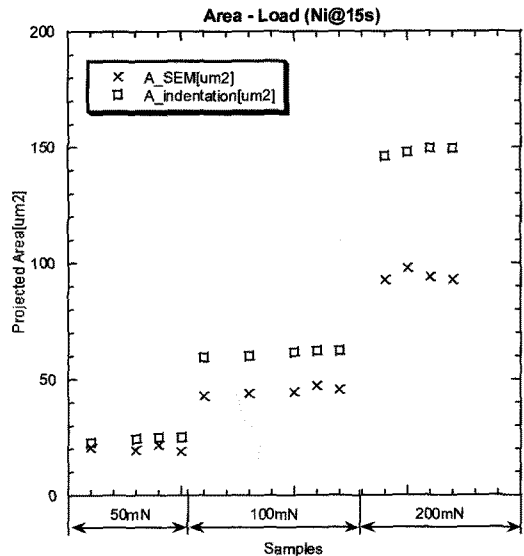


Fig. 8. The comparison of projected areas determined using the indentation and SEM observation methods.

$$A_{modif} = 0.4 \times A_i + 5.3 \quad (4)$$

한편 압입시험의 C 는 약 $0.0035 \mu\text{m}/\text{mN}$ 로 초기 결정 하였으나, SEM으로 결정한 투영면적을 고려하여 결정 한 C 는 하중(P)에 따라 증가하여 식 (5)를 결정하였다.

$$C_f = 0.0031891 + 5.8806 \times 10^{-7} \times P, \quad (5)$$

Table 2는 세 가지 시험편(순수 Ni, 순수 Ti, SKD11)을 사용하여 하중조건 100 mN과 200 mN에서 콤프라 이언스 C_f 및 투영 면적보정 계수를 적용한 시험편의 탄성계수를 E_{c3} 를 추가하였다. 분석결과 본 연구에서 고려한 탄성계수 결정에 영향을 주는 인자 중에서는 C_f 의 영향이 약 80%로 가장 크게 나타났으며, 투영 면적보정 계수는 반대로 약 5~10% 정도 탄성계수를 감소시켰다. 최종적으로 구하고자하는 시험편의 탄성계수에서는 C_f 와 투영 면적보정 계수를 적용하는 경우에는 9097% 수준으로 결정되어 좀 더 정확한 결과를 나타냈다. 결론적으로 이들 C_f 와 투영 면적보정 계수 인자를 고려하지 않은 경우보다 인자를 고려한 경우가 오차를 80%에서 5% 이내로 감소시키는 것을 확인할 수 있었다.

4. 상용 나노 시험기와의 성능 비교평가

최종적으로 본 연구에서 제작된 마이크로 압입 시험

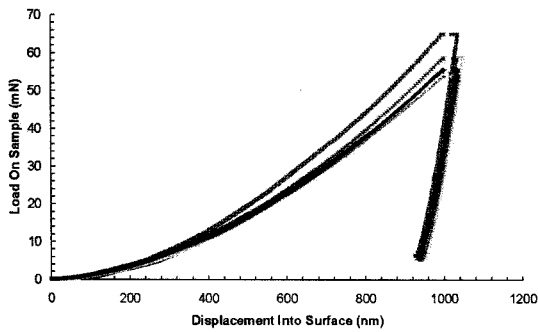


Fig. 9. Load-displacement curves for pure Ti at indentation depth of 1000 nm.

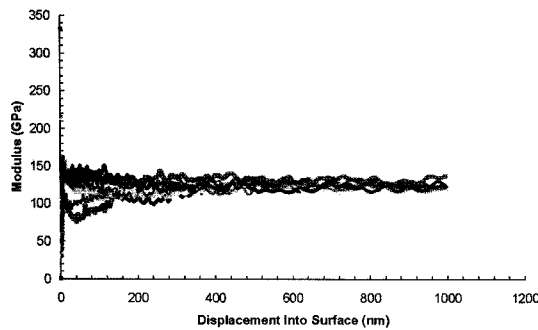


Fig. 10. Elastic modulus variations with indentation depth for pure Ti.

기의 성능 평가를 위하여 순수 Ti 시편을 이용하여 상용화된 나노 압입 장비에서 측정된 결과와 비교 검증하였다. 이를 위하여 MTS Nano Indenter XP를 이용하여 8회 압입시험을 실시하였다. 실험 결과를 통하여 상용화된 장비의 경우 순수 Ti에 대하여 동일 압입 조건에서 압입하중-깊이 선도의 경우 Fig. 9와 같이 최대 하중에 대하여 5.7%의 편차가 존재하는 것으로 나타났다. Fig. 10과 같이 깊이에 대하여 탄성계수를 측정 한 결과 약 깊이가 400 nm 정도까지 탄성계수의 측정에 비교적 많은 편차가 발생하며 그 이후에는 평균 122 GPa 정도의 탄성계수를 나타내었다. 측정된 평균 탄성계수 122 GPa는 일반적으로 인장실험에 의한 순수 Ti의 탄성계수 103 GPa보다 18.4% 높은 값으로 나타났다. 통상적으로 압입 방법에 의한 탄성계수가 인장 시험으로 결정한 탄성계수보다 큰 것으로 알려져 있다. 예로, Ni의 경우 압입 방법에 의한 탄성계수가 인장탄성계수보다 약 15% 높은 것으로 알려져 있다 [11]. Table 3은 동일 순수 Ti 시험편에 대하여 상용 MTS 장비와 본 연구에서 개발한 시험기의 성능을 비교 평가한 것이다. 탄성계수의 경우 본 시험기의 경우

Table 3. Comparisons of elastic modulus results for pure Ti using MTS Nanoindenter and the indentation device developed in this work (SNUT)

Testing Machine	MTS Nanoindenter	SNUT
Material	Pure Ti	Pure Ti
Possions ratio	0.25	0.25
Max Disp. (nm)	1000	2950
Max Load (gr)	6	20
E. Modulus (GPa)	122.0	131.4
E. Modulus std	6.9 (5.7%)	9.92 (8.2%)

최대 데이터 오차가 8.2%로 기존 상용 장비의 경우 데이터 편차가 5.7%에 비하여 약간 크나 비교적 성능이 우수한 것으로 나타났다. 추가로 나노 영역에 대한 DLC 시편의 350 nm 압입시험 결과에서는 탄성계수가 225 GPa로 8.9% 정도 낮게 평가되었고, 160 nm에서는 390.7 GPa로 MTS 장비의 실험 결과인 247 GPa와 비교하여 60% 크게 평가되었다. 낮은 압입깊이에 대한 실험데이터가 확보된다면 투영 면적보정 계수와 컴플라이언스를 고려하여 오차를 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

ISO 14577[9]의 압입 시험기 분류는 매크로 범위 ($2\text{ N} \leq F \leq 30\text{ kN}$), 마이크로 범위 ($2\text{ N} > F, h > 0.2\ \mu\text{m}$), 나노 범위 ($h=0.2\ \mu\text{m}$)의 3가지로 구분된다. 본 연구에서 제작한 인덴터의 경우 시험 가능한 하중범위 25 mN ~100 mN에서 정밀도가 100 μN 이내로 나노급 시험 하중 공차 범위에 $\pm 1\%$ 만족하나, 최대 50 μm 측정범위의 서브나노급 변위계는 해상도 6 nm로 변위 측정 정밀도 측면에서 최대허용오차 2 nm를 초과하여, 나노급이 아닌 마이크로급의 인덴테이션 시스템으로 평가된다. 추후 나노급 해상도의 변위계를 사용하여 압입 시험 데이터를 확보한다면, 나노영역의 압입시험이 가능할 것으로 예상된다. 또한 시험편의 장착시마다 많은 프레임 컴플라이언스의 차이가 발생하는 이유는 시험편 고정구의 문제로 판단되어 이에 대한 추후 개선된 고정구 개발이 필요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 정밀 초소형 부품의 탄성계수 및 경도를 측정하기 위한 마이크로 압입시험 장치를 설계하여 제작하였다. 다양한 시편에 대하여 본 연구에서 개발한 시스템을 사용하여 평가하였으며 다음과 같은 결

론을 얻었다.

1. 제작된 시험기를 이용한 데이터 분석결과 탄성계수 결정에 영향을 주는 인자 중에서는 프레임 컴플라이언스 C_f 의 영향이 약 80%로 가장 크게 나타났다. 본 시험기의 경우 시험편 고정구의 문제로 인하여 시험편에 따라 많은 차이를 발생한 것으로 판단되며 안정적인 고정이 가능한 시험편 고정장치의 설계가 요구된다.

2. 프레임 컴플라이언스 C_f 는 투영면적을 고려할 경우 C_f 는 하중(P)에 따라 다음과 같이 증가하였다. $C_f = 0.0031891 + 5.8806 \times 10^{-7} \times P$

3. 프레임 컴플라이언스 C_f 와 투영 면적보정 계수를 적용하는 경우는 이들 인자를 고려하지 않은 경우보다 탄성계수 측정시 오차를 80%에서 5% 이내로 감소시키는 것을 확인되었다.

4. 동일 순수 Ti 시험편에 대하여 상용 장비와 본 연구에서 개발한 시험기의 성능을 비교 평가한 결과 탄성계수의 경우 본 시험기의 경우 최대 데이터 오차가 8.2%로 기존 상용 장비의 경우 데이터 편차가 5.7%에 비하여 약간 크나 비교적 성능이 우수한 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Oliver, W.C and Pharr, G.M., *J. Master. Res.*, Vol. 7, pp. 1564-1583, 1992.
2. Lee, Y. H., Jeong, J. H., Park, J. S., and Kwon, D., "Analysis of Non-equi-biaxial Surface Residual Stress through the Modeling of Shape Shifting in Instrumented Indentation Curve", *J. Kor. Inst. Met & Mater.*, Vol. 41, No. 11, pp. 737-742, 2003.
3. Huber, N. and Tsakmakis, C., "Determination of Constitutive Properties from Spherical Indentation Data using Neural Networks Part I: the Case of Pure Kinematic Hardening in Plasticity Laws", *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 47, pp. 1569-1588, 1999.
4. Jayaraman, S., Hahn, G.T., Oliver, W.C., Rubin, C.A., and Bastias, P.C., "Determination of Monotonic Stress-strain Curve of Hard Materials from Ultra-low-load-indentation Tests", *Int. J. Solid Struct.*, Vol. 35, pp. 365-381, 1998.
5. Cao Y.P. and Lu J., "A New Method to Extract the Plastic Properties of Metal Materials from an Instrumented Spherical Indentation Loading Curve", *J. Acta Materialia*, Vol. 52, pp. 4023-4032, 2004.
6. Augulis L., Tamulevicius S., Augulis R., Bonneville J., Goudeau P., and Templier C., "Electronic Speckle Pattern Interferometry Formechanical Testing of thin Films", *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 42 (2004) pp. 1-8, 2004.
7. Bamberg E., Grippo C.P., Wanakamol P., Slocum A.H., Boyce M.C., and Thomas E.L., "A Tensile Test Device for in Situ Atomic Force Microscope Mechanical Testing", *Precision Eng.*, Vol. 30, pp. 71-84, 2006.
8. 양경탁, 김현준, 김호경, "마이크로 압입 크리프 시험기 개발 및 성능평가", *한국윤활학회지*, Vol. 24, No. 1, pp. 27-33, 2008.
9. ISO 14577 - 1 Metallic materials - Instrumented indentation test for hardness and materials parameters - Part 1 : Test method.
10. Fischer-Cripps A.C. "Nanoindentation", *Springer*, pp. 69-93, 2004.
11. Stauss S., Schwaller P., Bucaille J.L., Rabe R., Rohr L., Michler J., and Blank E., "Determining the Stress-strain Behaviour of Small Devices by Nanoindentation in Combination with Inverse Methods", *Microelectronic Engineering*, Vol. 67-68, pp. 818-825, 2003.