



## 미소 표면변형 관찰을 통한 가스배관 부재의 항복특성 평가

†이윤희 · 백운봉 · 정인현 · 남승훈 · 이상혁\*

한국표준과학연구원 삶의질표준본부, \*(주) 케이테크노콘  
(2008년 5월 19일 접수, 2008년 6월 16일 수정, 2008년 6월 16일 채택)

### Assessment of Yield Characteristics of Gas Pipeline Materials by Observing Surface-Local Deformation

†Yun-Hee Lee · Un-Bong Baek · In-Hyeon Cheong · Seung-Hoon Nahm · Sang-houck Lee\*

Division of Quality of Life, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-340, Korea  
\*K-Technocon Co., Ltd., Seoul 150-826, Korea

(Received May 19, 2008, Revised June 16, 2008, Accepted June 16, 2008)

#### 요 약

가스배관 열화부재의 실시간 역학물성 측정기술로 계장화 압입과 압입흔적 입체측정의 융합이 시도되었다. 압입하중-변위곡선을 계장화 압입시험으로 획득한 후 반사식 레이저 스캐너를 이용하여 압입흔적을 3차원으로 관찰하였다. 압흔 단면프로파일로부터 소성역 크기와 실제 접촉경계를 분석할 수 있었고, 두 값을 이용하여 소재의 항복강도와 경도를 계산하였다. 항복강도는 단축 인장시험에서 얻어진 값과 유사한 경향을 나타내었고, 경도는 재료쌓임 영향으로 압입곡선에서 계산된 값에 비해 20~30% 낮은 값을 나타내었으나 최대 인장강도와 정량적인 관련성이 있음을 확인할 수 있었다. 덧붙여 압입하중 인가부의 형태를 수정하여 압입시험과 동시에 압흔주변 형상변화를 측정하기 위한 시스템도 고안되었다.

**Abstract** – A combination of the instrumented indentation and 3D morphology measurement has been tried in order to perform a real-time property measurement of degraded materials in gas pipelines; three-dimensional indent morphologies were recorded using a reflective laser scanner after a series of instrumented indentations on three metallic specimens. Dimensions of the permanent deformation zone and contact boundary were analyzed from the cross-sectional profile over an remnant indent and used for estimating yield strength and hardness, respectively. Estimated yield strength was comparable with that from uniaxial tensile test and actual hardness implying material pile-up effects was lower than the calculated value from indentation curve by 20~30%. It means that this 3D image analysis can explain the material pile-up effects on the contact properties. Additionally, a combined system of indentation and laser sensor was newly designed by modifying a shape of the indentation loading fixture.

**Key words** : pipeline steel, indentation test, 3D profiler, yield strength, hardness

#### I. 서 론

고온 고압에서 운용되는 압력용기 소재는 미세조직적인 열화를 겪게되며 장기사용 시에는 강도와 인성 등의 역학적 정보에 기반한 신뢰성 측정과 함께 압력용기의 운전조건을 복합적으로 고려한 사용적합성 평가가 필요하다[1]. 더 나아가 설비부재의 후속 운용에서 나타날 손상을 예측하고 잔류수명을 정량적으로 평가하는 것이 중요하다. 특히 우리나라의 경우 1970년대

구축된 기간설비들의 설계수명이 2000년대 들어 도래하기 시작함에 따라 설비부품과 부재의 손상정도를 파악하고, 정밀한 수명진단을 통해 경제적인 운전연장을 진행하기도 한다[2].

이처럼 운용 중인 열화부재의 물성을 정밀 측정할 수 있는 기법의 필요성이 대두되었고, 설비부재에서 채취할 수 있는 시험편 크기가 한계를 가지기 때문에 다양한 소형시험편 이용기술이 개발되었다. 즉 소형시험편 충격시험[3], 박판 미소인장기술[4] 등은 물론 박판에 수직적인 부하를 가하여 파열시키는 소형편치기술[5]도 소개되었다. 소형편치 시험을 제외한 이들 시험법들이

†주저자: uni44@kriss.re.kr

갖는 기본개념이자 장점은 이미 표준화된 기존 시험원리와 분석방법을 그대로 적용하고 시험편 크기만 축소한다는 점이다. 동시에 이들 시험법들이 갖는 문제점으로는 소형시험편의 변형 혹은 파괴에 인가되는 외부부하가 기존 시험기의 측정범위나 검출분해능을 벗어나기 때문에 개별 연구자가 시험 목적에 맞추어 시험기를 개발해야하는 점이나 표면효과가 극심해지는 미소시험편에서 크기효과와 같은 예기치 않은 현상 등이 발현될 수 있다는 점이다.

이상과 같은 열화부재의 미소시험편 시험기술의 한계점과 함께 설비안전관리 기술에서도 예측정비 기술(predictive management)은 물론 위험도(risk)가 높은 부분의 집중적인 관리를 통해 예기치 않은 운전중단 등에서 오는 경제적 손실을 최소화시키고자하는 신뢰성정비기술을 뛰어넘어 상태기반 설비관리(condition based facility maintenance)로 이행되고 있다[6]. 이 기술은 개방검사를 제외한 어떠한 경우라도 정상적인 설비운전을 목표로 다양한 온라인 모니터링 기술을 실시간 설비 운전점검 및 설비부재의 상태평가에 접목하게 된다. 온라인 모니터링 기술로 인해 실시간 고장분석과 긴급정비가 가능할 뿐만 아니라 기존 시험편 채취시험에서 대상설비가 무부하 상태인 것을 가정하는 것과 달리 실제 설비의 부하상태, 운용환경 하에서 시험하기 때문에 물성측정이 보다 현실적이라고 할 수 있다. 따라서 설비 안전관리 환경과 새로운 물성측정 수요에 대응하여 실시간으로 설비부재의 열화를 측정할 수 있는 부착형 부재물성 측정시스템의 개발이 시급하였다.

계장화 압입시험(instrumented indentation test)은 경질 압입자로 대상부재의 표면을 눌러 발생하는 변형을 측정하는 기술로 기본 개념은 경도시험법과 유사하다. 경도시험과의 차이점은 모터나 액추에이터를 이용해 연속적으로 압입하중을 증가시키고, 대응하는 압입자 침투 변위를 연속적으로 기록하여 압입하중-변위곡선(indentation load-displacement curve)을 얻는다는 점이다. 간단한 시험원리와 함께 구동부 및 하중/변위 측정 센서의 소규모 모듈화가 용이하여 설비 부착형 계장화 압입시스템 상용품이 개발되어 있으며, 다양한 설비들에 확대 적용되고 있다[7].

계장화 압입시험의 원시데이터인 압입하중-변위곡선은 하중인가에 따른 압입자 하부의 탄/소성 변형기록은 물론 하중제거에서 소재의 탄성회복 정보도 포함한다. 이 곡선 분석을 통해 표면경도는 물론 탄성계수의 평가가 가능하며[8], 설비부재의 표면 잔류응력에 대응한 압입하중-변위곡선의 형상변화에 대한 해석모델[9]이 개발되었으며, 최근에는 경질 금속소재의 파괴인성을

예측하는 데도 적용되고 있다[10]. 특히 구형 압입자를 이용하여 다양한 압입자 침투깊이에서의 변형정보를 축적할 경우에는 소성유동특성(plastic flow properties)을 해석하는 것이 가능하다[7,11]. 구형압입시험을 통한 항복강도 및 유동특성의 측정은 많은 금속소재에서 타당성이 검증되었으나 유동곡선 외삽(extrapolation)을 통해 항복강도를 측정하는 기존 분석기법[7,11]이 불균일 항복현상(inhomogeneous yielding phenomena)과 같은 불연속 거동을 갖는 철계 금속소재에 완벽히 적용될 수 있느냐에 대한 논란의 여지가 있다. 또한 계장화 압입 시험 결과의 첫 분석단계는 압입자와 대상부재 표면 간의 접촉깊이, 접촉면적과 같은 정확한 접촉부 해석이다. 구형압입시험을 포함하는 계장화 압입시험기술에서는 유한요소해석 모델이나 다중회귀법(iteration method) 등을 적용하여 이 접촉물성을 간접적으로 예측하고 있다[11,12]. 그러나 연성금속의 경우에는 압흔주변에 재료쌓임(material pile-up)과 같은 복잡한 형상들이 발생하기 때문에 이론적인 예측기술이 한계를 갖는다[13,14].

따라서 본 연구에서는 계장화 압입시험법의 현장 대상부재에 직접 적용하는 특징은 살리고, 압입자 침투변형을 단순한 압입곡선만으로 얻는 기존의 수준을 능가하여 비접촉 입체 형상 관찰기술을 복합하기 위한 선행연구를 진행코자 하였다. 나노압입시험 후 얻어진 잔류 압입흔적을 입체적으로 분석하여 궁극적으로 표면 항복강도를 측정하는 선행연구[15]를 매크로 영역으로 확장하고자 하였다. 또한 재료쌓임 효과가 감안되었을 때의 실제 경도도 측정하고, 이들 형상분석 물성측정결과들과 단축 인장시험에서 측정된 물성을 직접 비교함으로써 본 시험법의 타당성을 검토하였다.

## II. 이론적 배경

압입시험으로 유기된 소성역(indentation-induced plastic zone)의 크기와 항복강도를 관련짓는 연구는 Kramer 등[16]에 의해 시도되었다. Fig. 1과 같이 압흔부 하부에 반경  $C$ 의 반구형태의 소성역을 가정하였고, 이 영역의 구체적인 크기는 압흔 주위의 소성변형에 의한 재료쌓임 영역의 크기로 근사하였다. 압흔중심을 통과하는 선형 프로파일의 전형적인 형상은 압입자와 시험편의 접촉영역 외각에서 최고점이 나타난 이후에 완만히 감소하여 압입 전의 기준 표면(reference plane)으로 수렴하게 된다. 즉  $z$ 축 방향으로의 높이상승이 사라지는 최외각 경계에서 소성역 크기를 결정할 수 있다. 소재가 강소성(rigid plasticity) 및 등방적인 변형을 한다

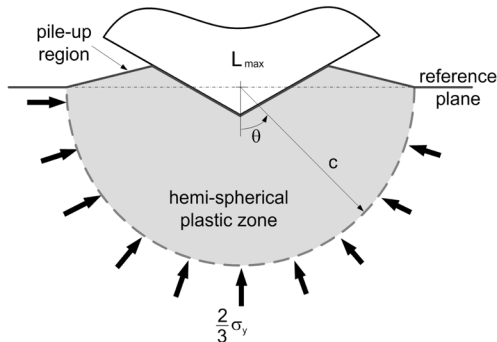


Fig. 1. Force equilibrium around the hemispherical plastic zone [15,16].

면 압입자를 통해 인가된 하중은 반구형 탄/소성역 경계면적과 이 경계면에 수직으로 존재하는 방사상 응력의 곱에 의해 지탱된다. 즉 Fig. 1과 같이 소성역 상부의 압입하중과 하부의 방사상 지탱하중 사이의 힘 평형(force equilibrium)을 고려하면 항복강도  $\sigma_{ys}$ 는 Eq. (1)로 정의된다[15,16]. Eq. (1)의  $L_{max}$ 는 최대 압입하중을 나타내고, 탄/소성역 경계의 방사상 응력  $\sigma_r$ 은 Hill의 구형공동모델(spherical cavity model)에 의해  $2\sigma_{ys}/3$ 로 주어진다[17]. 특히 Eq. (1)은 소성변형이 크게 확장할 경우에는 압입자 형상에 무관하게 적용할 수 있다.

$$\sigma_{ys} = \frac{3L_{max}}{2\pi C^2} \quad (1)$$

### III. 실험방법

압입강도 측정시험을 위한 소재로는 천연가스 배관재로 사용되는 API X70강, 일반강인 S45C강 및 연결 금속 특성을 파악하기 위한 AI 2011 합금의 3종을 사용하였다. 계장압입 영상분석 시험결과와 비교를 위해 선행연구에서 일축인장시험으로 얻어진 이들 소재의 항복강도 및 가공경화 특성은 Table 1에 정리하였다.

시험을 위한 표면연마는 사포를 통해 진행하고, 이후

Table 1. Mechanical properties measured from uniaxial tensile tests.

Specimen	API X70	S45C	AI 2011
Yield strength (MPa)	597	374	270
Work-hardening index	0.128	0.338	0.186
Tensile strength (MPa)	789	920	474

1.0  $\mu\text{m}$  입도를 갖는 알루미늄으로 광택연마하였다. 연마된 표면에 직경 1.0 mm의 텅스텐카바이드 볼을 사용하여 압입시험을 수행하였고, 적용된 계장화 압입시스템은 0.1  $\mu\text{m}$ 와 14.7 mN의 깊이 및 하중 분해능을 갖는 프론틱스사의 AIS 3000이었다. 1.0 mm/min의 압입하중 인가 및 제거 속도를 채용하였고, 최대압입깊이 제어 방식을 적용하여 270  $\mu\text{m}$ 의 압입깊이를 갖는 압입하중-변위곡선을 획득하였다. 3회 이상 계장화 압입시험을 반복하여 압입데이터를 축적하였다.

계장화 압입시험 후 얻어진 압입흔적은 Keyence사의 LJ-G015 레이저 센서모듈을 이용하여 비접촉식으로 입체형상을 측정하였다. 본 센서모듈의 경우 7 mm의 슬릿 형태의 레이저 빔을 대상부재 표면에 입사 및 반사시켜 빔을 한번 조사함으로써 2차원 프로파일을 얻어낼 수 있는 강점을 갖고 있으며, 수평 및 수직분해능은 각각 2.5  $\mu\text{m}$ 와 0.2  $\mu\text{m}$ 이다. 구형 잔류압흔 정보는 최대 직경(혹은 원형 압흔의 지름부위)에 대응하는 프로파일을 얻어야만 정확한 표면 항복강도 정보의 파악이 가능하며, 기존 탐침식 형상측정기(stylus profiler)는 다회 반복측정을 통한 시행오차 없이 직경부 잔류압흔 형상 정보를 획득하는 것이 곤란하다. 최대 직경부의 정확한 판단을 위해 본 연구에서는 잔류 압흔시편 테이블을 1.0 mm/min의 속도로 이동시키면서 슬릿형 레이저빔을 조사함으로써 3차원적인 형상정보를 획득하고, 이 중 압흔 직경이 가장 크게 나타나는 슬릿 프로파일을 압입특성 분석에 사용하였다. 평균적인 프로파일 정보의 획득을 위해 레이저 스캔은 압흔을 45°씩 돌려가면서 4회 반복하였고, 소성역 크기나 접촉경계 결정은 반복 시험 분석데이터를 평균하여 사용하였다.

### IV. 결과 및 고찰

#### 4.1. 계장화 압입시험 결과

계장화 압입시험결과 얻어진 압입하중-변위곡선은 Fig. 2에 중첩되어 있다. 다회의 계장화 압입시험에서 중첩적인 압입곡선이 획득되었으며, 최대 압입깊이에 대응하는 압입하중은 API X70강이 가장 높고 알루미늄 합금이 가장 낮은 값을 가졌다. 이는 API X70 천연가스 배관재가 가장 높은 상대강도 (혹은 경도)를 나타냄을 의미한다.

Fig. 2의 최대하중이 인가된 이후 하중을 제거하는 과정 중에 얻어진 탄성회복곡선은 Oliver와 Pharr가 제시한 기법[8]을 이용하여 분석할 수 있다. Eq. (2)와 같이 하중제거곡선으로부터 접촉깊이  $h_c$ 의 계산이 가능하며, 1.0 mm 직경을 갖는 구형압입자의 기하학적 형

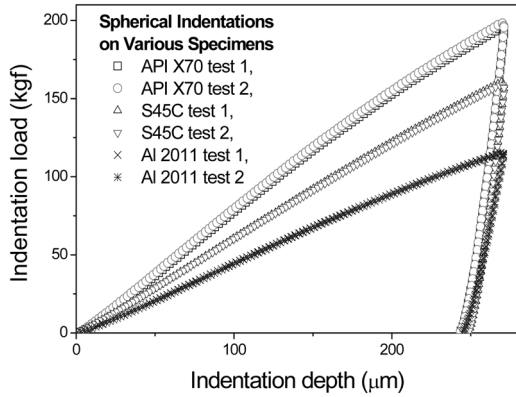


Fig. 2. Spherical indentation curves from three specimens.

Table 2. Hardness estimated using the Oliver and Pharr's analysis [8].

Specimen	API X70	S45C	Al 2011
Contact depth (μm)	256.1±0.10	258.1±0.10	256.5±0.39
Contact area (μm <sup>2</sup> )	598476±42	601545±9	599200±590
Hardness (GPa)	2.97±0.03	2.37±0.02	1.79±0.01

상을 고려하면 접촉면적은 Table 2와 같이 정리될 수 있었다.

$$h_c = h_{max} - 0.75(h_{max} - h_i) \quad (2)$$

Eq. (2)에서  $h_{max}$ 는 최대 압입깊이이고,  $h_i$ 는 절편깊이로 하중제거곡선의 초기기울기선을 연장하여 하중이 0인 x축과 만나는 압입깊이를 나타낸다. 최대 압입하중을 Table 2의 접촉면적으로 나눔으로써 세 가지 소재의 압입경도가 계산되었다.

동일한 최대 압입깊이에 대응하는 압입하중의 변화로 인해 나타난 Table 2의 경도 고저순서는 Fig. 1의 압입하중 크기와 동일한 순서를 가졌다.

#### 4.2. 레이저 프로파일 영상획득 결과

Al 2011 합금 표면에 형성된 압흔을 슬릿형 레이저 빔으로 스캔한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 7 mm 슬릿폭을 1 mm/min의 속도로 이동시켜서 얻어진 영상에서는 기대했던 바와 마찬가지로 중심부에 원형 압흔이 형성되었고, 그 주변에 재료쌓임을 나타내는 원형 고리무늬가 여러 형성됨을 확인할 수 있었다. 덧붙여 영상 전면에 걸쳐 스캔방향에 평행하게 물결무늬가 발생함

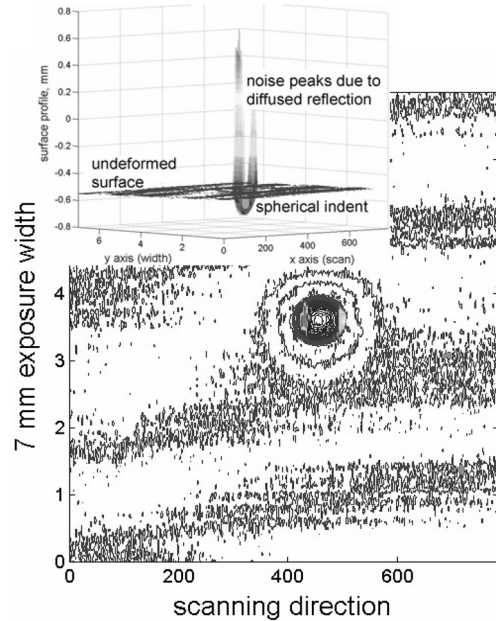


Fig. 3. 2D and 3D morphology of a remnant indent on the Al 2011.

을 확인할 수 있었는데, 이는 시편 표면이 스캔방향에 수직으로 전반적으로 기울어져 있음을 의미한다.

2D 영상의 좌측상단에 중첩된 입체영상에서는 시편 표면(undeformed surface)을 기준으로 중심부에 구형 압입흔적(spherical indent)과 위로 치솟는 피크(noise peaks)가 공존함을 나타낸다. 실제 압입흔적에서 기준면에 비해 상승하는 것은 재료쌓임 이외에는 없으며, Fig. 3을 자세히 살펴보면 두 개의 피크가 구형 압흔 내부에 존재함을 확인할 수 있다. 이것은 레이저 입사빔이 압흔의 사면에서 난반사(diffused reflection)를 일으켜서 나타난 결과로 판단된다. 따라서 압흔 및 주변의 정확한 형상정보를 역학물성 분석에 사용하기 위해서 이러한 잡음신호가 없는 지역에서 레이저 프로파일을 추출하는 것이 필요하였다.

#### 4.3. 형상분석 기반 경도 및 항복강도 측정

시험편 표면에 형성된 잔류압흔 중심을 가로지르는 프로파일은 Fig. 4에 중첩하였다. 동일한 최대압입깊이로 압입시험을 진행하더라도 각 시험체의 소성유동 특성이 다르므로 인해 압입자 주변 재료쌓임 형상이 변함을 확인할 수 있었다. 변형 이전의 기준면과 중첩함으로써 압흔 주변의 영구변형 영역(plastic deformation zone)을 확인할 수 있으며, 스캔거리로 미분하여 미분

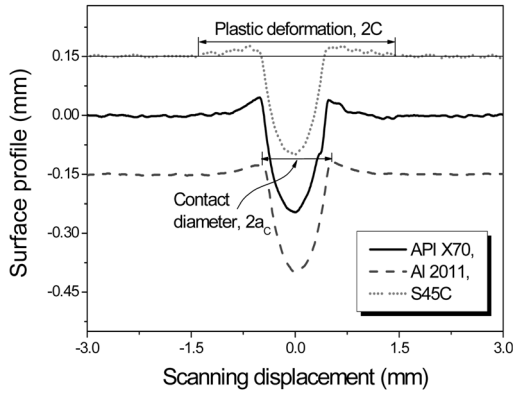


Fig. 4. Cross-sectional profiles of remnant indents on three samples.

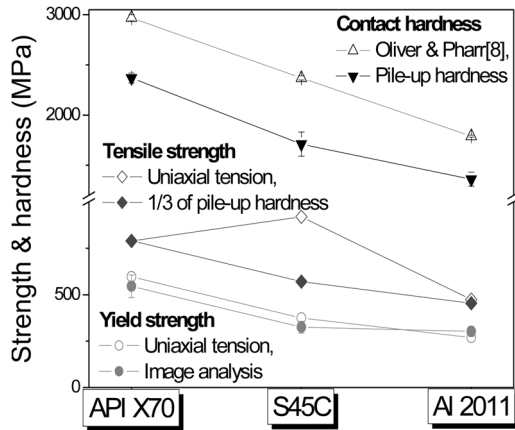


Fig. 5. Property comparisons from conventional and developed methods.

값이 0이 되는 지점으로부터 접촉직경(contact diameter)의 측정도 가능하다.

영구변형영역의 크기를 반구형 소성역 직경에 해당하는 2C로 두고, Fig. 2의 최대 압입하중을 Eq. (1)에 대입함으로써 세 가지 시험편의 항복강도가 평가되었다. Table 1의 단축인장시험에서 얻어진 항복강도와 비교해보면, API X70 및 S45C 강은 경우 좀 낮게 평가되었고, 반면에 Al 2011 합금의 경우 과대평가되는 양상을 나타내었다. 그러나 최대 15% 오차범위 내에서 압입시험을 통해 단축 인장시험의 항복강도를 예측할 수 있었다(Fig. 5 참고).

이상과 같은 항복강도 측정에서의 오차요인으로는 기계연마에서 오는 표면조도 등이 영구변형 영역 측정에 영향을 미칠 수 있다는 점과 강소성에 관한 이론적

Table 3. Yield strength and hardness estimated from the profile analysis.

Specimen	API X70	S45C	Al 2011
Yield strength (MPa)	545±61	325±32	302±27
Contact radius (μm)	509.0±6.6	540.9±19.7	514.7±13.6
Hardness (GPa)	2.37±0.05	1.71±0.12	1.36±0.07

모델의 한계에서 찾을 수 있을 것으로 판단된다. 덧붙여 구형압입 시험의 경우 압입깊이에 따라서 변형률이 달라지며, 또한 표면적하 소성역의 형상 역시 단편적으로 반구형으로 가정하는 데서 문제가 발생할 수도 있다.

Fig. 4의 프로파일 미분을 통해 압흔 외각의 최대점들을 결정함으로써 접촉직경의 결정이 가능했다. 압입하중을 접촉직경에 대응하는 접촉면적으로 나눔으로써 새롭게 경도값을 측정하고 Table 3에 정리하였다.

Oliver-Pharr 분석식[8]을 통한 Table 2의 경도치와 비교해 본 결과 본 연구의 영상분석을 통해 계산된 Table 3의 경도값이 압흔 주변부 재료쌓임의 하중분산에 의해서 약 30% 정도 낮게 평가됨을 확인할 수 있었다. 그러나 경도를 소성구속인자(plastic constraint factor, 대개 3.0 정도의 상수)로 나누어 최대인장강도를 구하는 실험적인 기법[18]을 적용했을 때 Fig. 5에서 확인할 수 있는 것처럼 본 연구의 프로파일 분석을 통한 경도는 심각한 가공경화거동을 나타내는 S45C 강을 제외한 두 금속시험편에서 Table 1의 최대인장강도와 일치하는 결과를 나타내었다.

#### 4.4. 온라인 측정용 복합장비 개발

슬릿형 레이저 프로파일러를 통해 일부 잠음신호의 혼입 가능성이 있으나 3D 압흔 형상정보 및 주변 재료쌓임 정보를 획득할 수 있음을 확인하였다. 특히 레이저 프로파일러가 갖는 비접촉식이라는 강점을 이용하여 본 연구에서는 압입시험 시스템과의 융합을 시도하였다. Fig. 6과 같이 압입시험은 MTS사의 Insight 2 만능재료시험기를 압축방향으로 구동시켜서 진행하고, 압입시험 도중 시편표면의 변형은 레이저 프로파일러를 통해 관찰할 수 있도록 설계, 제작하였다.

그러나 실시간 압입변형 신호의 획득을 위해서는 압입프로브가 시편에 맞닿아 있는 동시에 레이저 센서가 시편 위에 위치하여 시편표면을 지속적으로 관찰할 수 있어야 한다. 즉 레이저 센서와 압입축의 위치가 중복

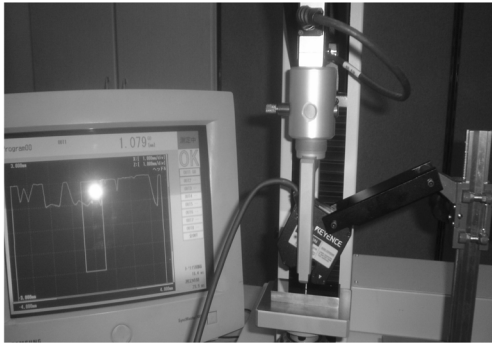


Fig. 6. Indentation system combined with a laser profiler.

될 수밖에 없고, 이 문제를 해결하기 위하여 Fig. 6과 같이 사각 링 형태로 하중인가부를 개조하고 그 내부에 레이저 센서를 설치하였다. 압입시험 진행 중 변형정보의 획득은 압입자가 레이저 빔을 일부 가리는 문제로 인해 재료쌓임 영역의 확인에 국한되어 초기적인 시험이 진행되고 있다. 추가적인 연구를 통해 경도, 항복강도 및 가공경화지수 등과 같은 역학물성 측정을 위한 레이저 획득 프로파일 신호의 확장된 분석기술이 개발될 것으로 기대된다.

## V. 결 론

본 연구에서는 압입시 변형곡선 만을 데이터로 측정함으로써 역학물성 평가에 있어서 한계를 보이는 기존 계장화 압입기법의 개선책으로써 비접촉식 표면형상 측정센서를 부가적으로 이용하는 초기 연구를 수행하였다. 우선 계장화 압입시스템을 이용하여 천연가스 배관재인 API X70강, S45C강 및 Al 2011 합금 표면에 구형 압흔을 형성하였고, 압흔 표면을 슬릿형 레이저 센서로 스캔함으로써 입체적인 압흔 형상정보를 획득하였다. 획득된 형상정보를 통해 경도와 항복강도를 분석하였고, 단축 인장시험 및 기존 곡선분석 경도와 비교하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 레이저 센서로 측정된 압흔 단면 프로파일을 분석하여 소성변형이 발생한 재료쌓임 영역(소성변형 크기)을 결정하였고, 스캔 거리에 따라 프로파일 형상을 미분함으로써 압흔 주변의 최대값(접촉 경계)을 결정하였다.

(2) 소성변형 영역의 크기를 이용하여 항복강도를 계산하였고, 압흔 주변 최대값 폭을 이용하여 실제 경도를 계산하였다. 계산된 항복강도는 15% 이내에서 단축 인장시험에서 획득된 값과 일치하였고, 프로파일에서

측정된 경도 역시 경도와 최대인장강도 사이에 선형 비례한다는 경험식에 적용했을 때 S45C를 제외한 두 가지 소재에서 신뢰성 있는 결과를 나타내었다.

(3) 압입하중이 인가되는 축을 반사식 레이저 센서를 감싸는 링 형태로 수정하고, 링의 하부 중앙에 경질 압입자를 결속함으로써 압입시험 도중에 압흔 주변부의 연속적인 변형을 관찰할 수 있으며, 본 기술을 이용한 향후 연구를 통해 재료쌓임과 가공경화와의 상관관계 규명은 물론 정량적인 소성유동의 해석이 가능할 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 지식경제부의 에너지기술혁신 프로그램으로 지원되었으며, 이 논문은 “차세대에너지안전연구단”의 연구결과입니다(세부과제번호: 2007-M-CC23-P-09-1-000).

## 참고문헌

- [1] American Petroleum Institute, Fitness- for-Service; API Recommended Practice 579, 1st ed., API Publishing Services, (2000)
- [2] 진태은, 최형집, 홍승열, 정일석. “원자력 발전소 수명관리에 관한 연구동향”, 한국원자력학회 96년도 춘계학술발표논문집, 195-200, (1996).
- [3] Nahm, S.H., A. Kim and J. Park, “Evaluation on Toughness Degradation of Cr-Mo-V Steel Using Miniaturized Impact Specimen Technology”, *Int. J. Impact Eng.*, **25**, 805-816, (2001)
- [4] Kohno, Y., A. Kohyama, M.L. Hamilton, T. Hirose, Y. Katoh and F.A. Garner, “Specimen Size Effects on the Tensile Properties of JPCA and JFMS”, *J. Nuclear Mater.*, **283-287**, 1014-1017, (2000)
- [5] Linse, T., M. Kuna, J. Schuhknecht and H.-W. Viehrig. “Usage of the Small Punch Test for the Characterisation of Reactor Vessel Steels in the Brittle-ductile Transition Region”, *Eng. Frac. Mech.*, **75**, 3520-3533, (2008)
- [6] Bengtsson, M. “Condition Based Maintenance System Technology - Where is Development Heading?”, Proc. of the 17th European Maintenance Congress, (2004)
- [7] 권동일, 이경우, 김광호, “계장화 압입시험을 이용한 원자력재료의 기계적 특성 평가기술”, 기계와 재료, 68-78, (2007)
- [8] Oliver, W.C. and G.M. Pharr, “An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation

- Experiments”, *J. Mater. Res.*, **7**, 1564-1583, (1992).
- [9] Lee, Y.-H. and D. Kwon, “Estimation of Biaxial Surface Stress by Instrumented Indentation with Sharp Indenters”, *Acta Mater.*, **52**, 1555-1563, (2004)
- [10] Lee, J.-S., J.-i. Jang, B.-W. Lee, Y. Choi, S.G. Lee and D. Kwon, “An Instrumented Indentation Technique for Estimating Fracture Toughness of Ductile Materials: A Critical Indentation Energy Model Based on Continuum Damage Mechanics”, *Acta Mater.*, **54**, 1101-1109, (2006)
- [11] Ahn, J.-H. and D. Kwon, “Derivation of Plastic Stress-strain Relationship from Ball Indentations: Examination of Strain Definition and Pileup Effect”, *J. Mater. Res.*, **16**, 3170-3178, (2001)
- [12] Kim, S.H., B.W. Lee, Y. Choi and D. Kwon, “Quantitative Determination of Contact Depth during Spherical Indentation of Metallic Materials - A FEM Study”, *Mater. Sci. Eng. A*, **415**, 59-65, (2006)
- [13] Bolshakov, A. and G.M. Pharr, “Influences of Pile-up on the Measurement of Mechanical Properties by Load and Depth Sensing Indentation Techniques”, *J. Mater. Res.*, **13**, 1049-1058, (1998)
- [14] Beegan, D., S. Chowdhury and M.T. Laugier, “A Nanoindentation Study of Copper films on Oxidised Silicon Substrates”, *Surf. Coat. Technol.*, **176**, 124-130, (2003)
- [15] 이윤희, 김주영, 허용학, 남승훈, 권동일, “나노압입 유기된 소성변형역 크기측정에 기반한 박막소재의 항복강도 평가”, *대한금속재료학회지*, **44**, 678-683, (2006)
- [16] Kramer, D., H. Huang, M. Kriese, J. Robach, J. Nelson, A. Wright, D. Bahr and W.W. Gerberich, “Yield Strength Predictions from the Plastic Zone around Nanocontacts”, *Acta Mater.*, **47**, 333-343, (1998)
- [17] Hill, R. *The Mathematical Theory of Plasticity*, 5th ed., Oxford Univ. Press, (1971)
- [18] Tabor, D. “The hardness of Solids”, *Rev. Phys. Technol.*, **1**, 145-179, (1970)