

## 압입법을 이용한 재료 물성치 평가 기법에 관한 연구

석창성\* · 김정표\* · 송성진\*\* · 김훈모\*\* · 김재원\*\*\* · 김수용\*\*\*\*  
(2000년 6월 20일 접수, 2001년 8월 29일 심사완료)

### A Study on the Evaluation Method of Mechanical Properties by Ball Indentation Method

Chang-Sung Seok, Jeong-Pyo Kim, Sung-Jin Song, Hun-Mo Kim,  
Jea-Won Kim and Soo-Young Kim

**Key Words:** Ball Indentation Method(압입법), Degradation(열화), Tensile Properties(인장특성), Hardness(경도), Fracture Toughness(파괴인성치)

#### Abstract

The BI(Ball Indentation) method has a potential to assess the mechanical properties and to replace conventional fracture tests. In this study, the BI test system has been developed to evaluate material properties. Tensile tests, fracture toughness tests, hardness tests and BI tests were performed by the system using four classes of thermally aged specimens. The results of the BI tests were in good agreement with fracture characteristics from a standard fracture test method.

#### 1. 서 론

최근 들어 국내에는 화력발전뿐만 아니라 원자력발전소와 같은 대형에너지 변환설비의 수가 급격히 증가되고 있으며, 이들 설비 중 보일러 및 터빈 등과 같이 고온, 고압 하에서 장시간 운용되는 기기의 수가 증가하는 추세에 있다. 고온 혹은 방사능환경 하에서 사용되는 기기의 재료는 열화에 의하여 강도 및 경도가 증가되고 연성 및 인성이 감소되어 취성파괴에 이르게 된다. 이러한 열화는 대형에너지 변환설비의 운전, 수명, 안전에 큰 영향을 미치므로, 정기적인 조사를 수행

하여 재료의 상태를 정확히 평가하는 것이 필요하다.<sup>(1)</sup> 재료의 상태를 평가하는 방법으로 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법이 사용되고 있다. 파괴적인 방법을 사용하는 경우 재료의 물성치를 비교적 정확하게 측정하는 것이 가능하나 산업현장에서 운전 중인 시설물의 가동을 중단하여야 하며 구조물의 일부분에서 시험편을 채취하여야 하므로 경제적, 기술적 측면의 어려움이 따르게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 비파괴적인 방법인 초음파법, 전기저항법, 레프리카법, 진기화학적방법, 입계부식법 및 압입(Ball Indentation : BI)시험법<sup>(2,3)</sup> 등이 사용될 수 있다.

이 중 압입시험법은 운전중인 시설물의 가동을 중단하지 않고 간단한 시험만으로 재료의 항복강도 및 진응력-진변형률 곡선을 얻을 수 있는 방법으로, 이를 이용하면 재료의 열화상태를 예측하는 것이 가능하다. 특히 압입시험법은 다른 비파괴시험법으로 측정하기 어려운 배관이나 원자로 등의 용접부나 열영향부(HAZ, Heat-Affected-Zones) 영역과 같은 미소부위의 재료 물성치를

\* 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : csseok@yurim.skku.ac.kr

TEL : (031)290-7446 FAX : (031)290-7482

\* 회원, 성균관대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 성균관대학교 기계공학부

\*\*\* 수원과학대학 금형설계

\*\*\*\* 회원, 수원과학대학 금형설계

측정할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 현재 자동압입(ABI, Automated Ball Indentation) 시험장비로는 미국 ATC사에서 개발된 소형압입시험기(Portable in-situ ball indentation microscope)가 있으며 미소부위의 재질평가에 주로 사용되고 있다.<sup>(3,4)</sup> 그러나 ATC사의 자동압입시험기(ABI)는 고가이며 실제 산업현장에 적용하기에는 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 탁상(desk-top)형태의 압입시험기를 개발하고 이를 바탕으로 하여 배관 탐제형 소형 압입시험기를 개발하였다. 또한 이 시험기들을 이용하여 비파괴적으로 재료물성치를 평가하고 이를 파괴시험결과와 비교 고찰하였으며, 비파괴적으로 재료 물성치를 평가할 수 있는 기법을 제시하고자 하였다.

## 2. 압입 시험기

### 2.1 압입시험기의 개발

본 연구에서는 비파괴적인 방법으로 재료 물성치를 측정하기 위한 압입 시스템(ball indentation system)을 개발하였다. 압입 시스템은 Fig. 1과 같이 모터, 로드셀(load cell), 변위센서(LVDT), 압입기구부 등으로 구성된 하드웨어부와 A/D 변환기를 통해 전달된 전기 신호를 처리하여 재료 물성치를 계산하는 소프트웨어부로 구성되어 있으며, 하중제어와 변위제어로 작동된다. 인덴터 볼(indentor ball)의 반경으로부터 최대 압입깊이를 계산하고 하중부과 및 제하(loading-unloading)의 횟수를 정하여 변위제어로 하중을 가하며, 하중-변위선도의 최대하중에서 30~40% 정도 제하(unloading) 되었을 때 다시 하중을 가하도록 하였다. 이때 시험초기에 선형적인 압입하중-변위 신호를 얻기 위하여 초기하중(40N)을 시편에 가하도록 하였다.

하중은 모터의 구동에 의해 인덴터를 통해 시편에 전달되며, 로드셀과 변위센서에 의해 하중과 압입깊이의 변화가 측정된다. 변위 센서의 분해능은 0.001 mm이며 스텝모터는 1회전을 50,000 간격으로 분할하여 한 간격(step)당 압입자가 120 μm 수직으로 움직이도록 제어된다.

Fig. 2는 본 연구에서 개발한 압입(BI) 시스템의 사진이다. 이 그림에서 (a)는 채취된 시편을 시험하기 위한 탁상용 압입기이고 (b)는 배관 위

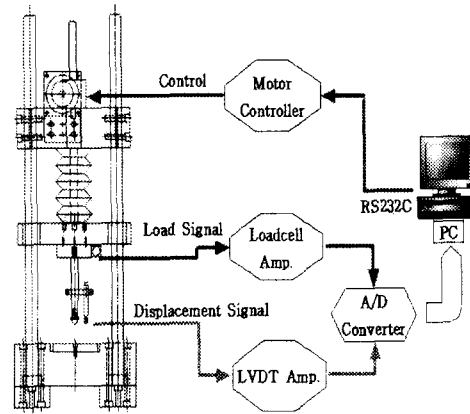
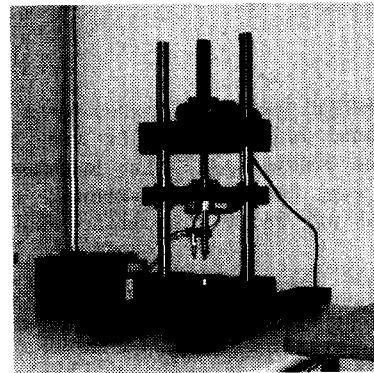
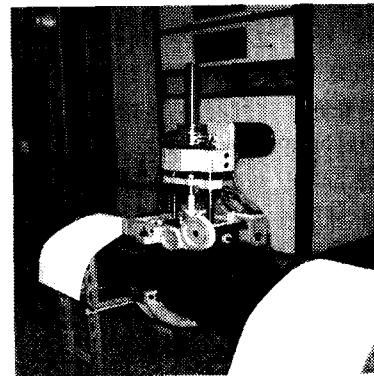


Fig. 1 Schematic diagram of the BI system



(a)



(b)

Fig. 2 BI systems for (a) specimen tests and (b) pipe tests

에서 움직이며 재료물성치를 측정할 수 있는 배관용 소형압입시험기이다. 배관용 소형압입시험기와 탁상용 압입 시험기의 기능은 동일하며, 이 시험기들의 시험결과도 오차없이 거의 동일하게 나타났다. 따라서 이 시험기들을 이용하여 재료 물성치를 측정할 수 있을 것이며, 특히 배관용 압입시험기를 이용하면 사용중인 배관의 열화도 예측도 가능할 것으로 생각된다.

로드셀과 변위센서에 의해 측정되어진 신호는 A/D 변환기를 통해 통합운영 시스템(PC)에 전달되어 재료 물성치를 계산하게 된다. 이때 A/D 변환기에서 처리된 하중과 변위 신호를 이용하여 PC상에서 압입깊이와 압입하중을 측정하게 된다. 하중증가에 따른 압입볼의 접촉 지름은 압입하중 부과시 최대 압입깊이로부터 구하여진다. 또한 Haggag<sup>(2,3,5)</sup>가 구현한 이론을 근거하여 압입볼의 접촉 지름과 압입하중-압입깊이 선도 및 각종 재료상수들로부터 항복강도, 응력-변형률선도, 경도 등을 구하도록 하였다.

2.2 항복강도의 계산

압입자를 이용하여 재료표면에 하중을 가하면 표면에 탄소성 변형이 발생되며 이 탄소성 변형 영역의 크기와 변형량은 압입하중의 크기에 비례한다. 재료의 항복강도( $\sigma_y$ )는 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(2,3,5)</sup>

$$\sigma_y = \beta_m A \tag{1}$$

$\beta_m$ 은 재료의 항복강도와 A의 비례관계로부터 결정되는 재료상수값으로 여러 재료에 대한  $\beta_m$ 이 여러 연구자들에 의하여 구해져 있으며, 탄소강의 경우 0.225인 값을 가진다.<sup>(6)</sup> A는 압입시험시 압입하중-압입깊이선도로부터 다음 식을 이용한 회귀분석에 의해 얻어진다.

$$P/d_i^2 = A(d_i/D)^{m-2} \tag{2}$$

여기서 D, m, P는 압입볼의 직경, 마이어상수(Meyer's coefficient), 압입하중이다.  $d_i$ 는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 압입하중부과 시 압입볼에

의하여 시편표면에 만들어진 압입흔적의 직경이며 다음 식에 의해 계산될 수 있다.

$$d_i = 2(h_i D - h_i^2)^{1/2} \tag{3}$$

여기서  $h_i$ 는 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 압입하중에 의한 탄소성 압입깊이로 Fig. 4와 같은 압입하중-압입깊이 선도에서 구해진다.

2.3 진응력-진변형률 선도의 계산

압입시험에 의한 진응력-진변형률 선도는 다음 식 (4)와 같은 형태로 얻을 수 있다.<sup>(2,3,5)</sup>

$$\sigma_i = K \epsilon_i^n \tag{4}$$

여기서 K와 n은 강도계수(strength coefficient)와 변형률-경화지수(strain-hardening exponent)로 Fig. 4와 같은 압입하중-압입깊이 선도로부터 회귀분석에 의하여 얻어진다. 이때 압입하중-압입

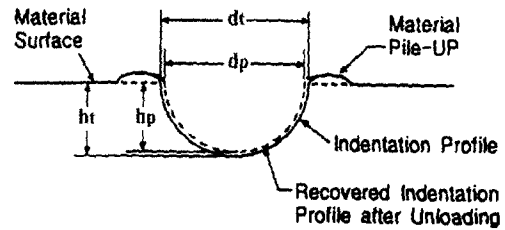


Fig. 3 Schematic diagram of indentation profile

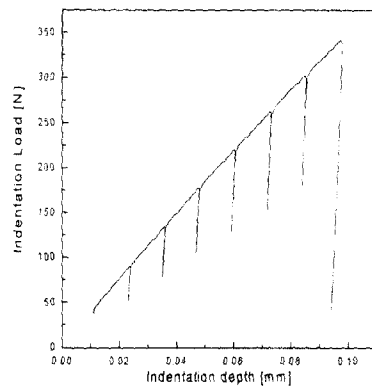


Fig. 4 Indentation load-depth curve

깊이 선도의 각 제하 시에 해당하는 소성 진변형률( $\epsilon_p$ ), 소성 진응력( $\sigma_t$ )을 결정하기 위하여 다음 식들이 사용되었다.

$$\epsilon_p = 0.2 d_p/D \quad (5)$$

$$\sigma_t = 4P/\pi d_p^2 \delta \quad (6)$$

여기에서  $d_p$ 는 압입하중에 의한 압입흔적의 소성직경이며 다음 식에 의하여 구해질 수 있다.

$$d_p = \sqrt[3]{\frac{0.5CD[h_p^2 + (d_p/2)^2]}{[h_p^2 + (d_p/2)^2 - h_p D]}} \quad (7)$$

상수  $C$ ,  $\delta$ 는 다음 식 (8), (9)와 같다.

$$C = 5.47P(1/E_1 + 1/E_2) \quad (8)$$

이때 식 (9)는 Haggag 등에 의하여 변형률감도 및 변형경화에 따라 구속인자의 크기가 다르게 나타난다는 점을 고려하여 Francis의 실험식을 수정하여 제안된 수식이다.

$$\delta = \begin{cases} 1.12 & \varphi \leq 1 \\ 1.12 + r \ln \varphi & 1 < \varphi \leq 27 \\ \delta_{\max} & \varphi > 27 \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{여기서 } \varphi = \epsilon_p E_2 / 0.43 \sigma_t \quad (10)$$

$$\delta_{\max} = 2.87 \alpha_m \quad (11)$$

$$\tau = (\delta_{\max} - 1.12) / \ln(27) \quad (12)$$

$E_1$  : 압입볼의 탄성계수

(Young's modulus)

$E_2$  : 하중제하시 얻어진 시편의 탄성계수 (Young's modulus)

여기서  $\alpha_m$ 은 변형률감도(strain rate sensitivity)를 나타내는 재료상수이며, 압입시험으로부터 응력-변형률선도를 얻기 위하여 실험으로 구해야 한다. 본 연구에서는 1Cr-1Mo-0.25V강의  $\alpha_m$  자료가 없었으므로 인장시험으로부터 진응력-진변형률선도를 얻은 다음, 압입으로 얻은 진응력-진

변형률선도와 같도록  $\alpha_m$ 값을 결정하였다.

## 2.4 경도의 계산

브리넬경도(Brinell hardness)는 다음 식 (13)과 같이 압입시 최대하중( $P_{\max}$ ), 압입볼의 직경( $D$ ), 최종압입흔적의 직경( $D_f$ )으로부터 구할 수 있다.<sup>(4)</sup>

$$HB = \frac{2P_{\max}}{[\pi D(D - \sqrt{D^2 - D_f^2})]} \quad (13)$$

## 2.5 파괴인성치의 계산

압입시험기에 의한 재료의 파괴인성치를 평가하기 위하여 Haggag 등<sup>(2,3,5)</sup>은 압입파괴에너지(Indentation Energy to Fracture : IEF)를 도입하였는데, 이 압입파괴에너지는 압입시험시 벽계파괴까지의 압입에너지로 정의되며 다음과 같이 표현된다.

$$IEF = \frac{S}{\pi} \ln\left(\frac{D}{D - h_f}\right) \quad (14)$$

여기서  $S$ 는 압입하중-압입깊이 선도의 기울기이며  $D$ 는 압입볼의 직경,  $h_f$ 는 압입시험에서 형성되는 최대수직압력이 임계벽개파괴응력을 넘어서는 가상파괴깊이이다. 여기에 사용되는 가상파괴깊이를 구하기 위하여 인장시험을 수행하여 파괴응력을 구하였다. 압입시험에서 이 파괴응력과 상응되는 가상압입파괴응력을 구하여 이를 대표 파괴응력으로 설정하였다. 이때 대표파괴응력과 상응되는 압입파괴깊이가 가상파괴깊이이며 이를 이용하여 압입하중-압입깊이 선도에서 압입파괴에너지(IEF)를 구하였다.

## 3. 시험 결과 및 고찰

### 3.1 시험편

본 연구에서 개발한 압입시험기를 이용하여 재료 물성치를 평가하기 위하여, 동일 재료를 가속 열화시켜<sup>(7,8)</sup> 서로 다른 물성치를 갖는 시험편을

**Table 1** Chemical composition (wt. %)

C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	V	Sn
0.29	0.01	0.74	0.004	0.007	0.060	1.29	1.24	0.25	0.0047

준비하였다. 여기에 사용된 재료는 화력발전소 터빈로터용 소재로 많이 쓰이는 1Cr-1Mo-0.25V강으로서 화학성분조성비는 Table 1과 같다. 이 재료를 630℃의 전기로에서 등온열화 열처리(isothermal aging heat treatment)방법<sup>(7,8)</sup>으로 453시간, 933시간, 1,820시간 열화시켜 열화시키지 않은 재료와 함께 4개의 시험편을 준비하였다.

**3.2 압입시험 및 결과**

본 연구에서 개발한 압입시험기에 직경 0.508mm (0.02in)인 텅스텐 카바이드강(WC)으로 된 구형 압입자를 장착하여 시험편의 표면을 압입하여 시험결과를 얻었다. 시험 시 압입하고자 하는 면을 연마(polishing)하여 표면 거칠기에 따른 데이터 값의 변화를 배제한 후 압입속도 0.005mm/s, 하중인가-제하(loading-unloading) 횟수 7회로 상온에서 실험을 수행하였다.

모재와 각 단계별로 제작된 열화재를 압입시험기를 이용하여 압입시험한 결과 압입하중과 압입깊이 곡선에서 얻을 수 있는 항복강도(yield strength), 인장강도(tensile strength), 브리넬 경도(Brinell hardness)값, 변형률-경화지수(strain-hardening exponent : n), 강도 계수(strength coefficient : K) 등을 구하여 Table 2에 나타내었다.

**3.3 인장시험결과와 압입시험결과 비교**

열화재의 인장특성의 변화를 관찰하기 위해 ASTM E 8-95a에 따라 열화전 재료와 각 열화재를 이용한 인장시험편을 제작하여 인장시험을 수행하였으며 이 결과를 압입시험결과와 비교하였다. 네킹 시점에서 하중변화율이 영(zero)이므로 균일 변형률(uniform strain)은 가공경화지수(n)와 같으며 식 (15)를 이용하여 인장강도를 구할 수 있다.<sup>(9)</sup>

$$\sigma_{TS} = K(n)^n \tag{15}$$

**Table 2** Results of BI tests

Degraded Time [hour]	Brinell Hardness [HB]	Yield Strength [MPa]	Tensile Strength [MPa]	Strain Hardening Exponent	Strength Coefficient [MPa]
0	289	690	837	0.070	1,019
453	234	558	681	0.080	903
933	209	500	607	0.089	823
1,820	194	466	562	0.109	798

**Table 3** Tensile strength and yield strength

Degraded Time [hour]	0	453	933	1,820
Yield Strength [MPa]	711	533	481	449
Tensile Strength [MPa]	844	676	615	582

Fig. 5는 인장시험과 압입시험으로부터 얻은 열화전 시험편의 진응력-진변형률 선도를 비교한 것이다. 여기서 압입시험으로 응력-변형률선도를 구하기 위하여 변형률감도( $a_m$ )를 구하였으며 1.25로 계산되었다. 각 열화시험편의 진응력-진변형률선도를 구하는데도 열화전 재료에서 계산된 변형률감도값을 이용하였다. Fig. 6, Fig 7, Fig 8은 열화시험편별 인장시험결과와 압입시험에 의해 구해진 진응력-진변형률선도를 비교한 그림이다. 인장시험으로 구한 진응력-진변형률 선도와 압입시험으로부터 구한 결과가 유사한 경향으로 나타남을 알 수 있다. 따라서 그 재료의 변형률감도값만 알면 압입시험만으로도 인장 특성을 구할 수 있음을 알 수 있다.

Table 3은 인장시험으로부터 구한 항복강도와 인장강도를 나타낸 것이며, Fig. 9와 Fig. 10은 이 결과와 압입법을 이용하여 구한 결과를 비교하여 그래프로 나타낸 것이다. 이들 결과로부터 열화진행에 따라 인장강도와 항복강도가 감소되고 있으며 두 시험결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

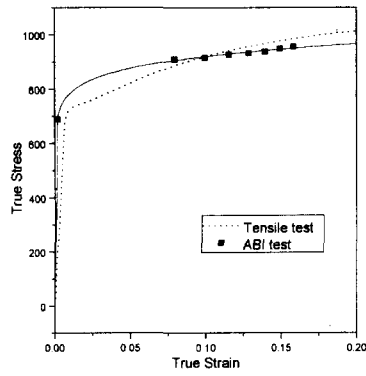


Fig. 5 True stress-true strain curves by the tensile test and the BI test for virgin specimen

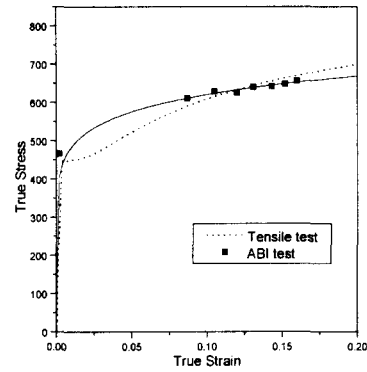


Fig. 8 True stress-true strain curves by the tensile test and the BI test (1,820hr degradation)

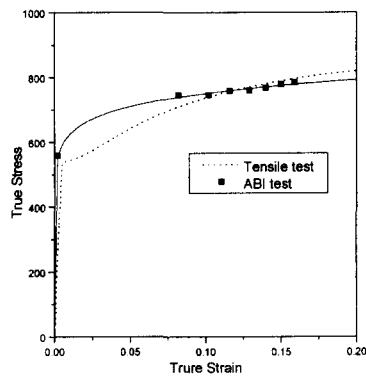


Fig. 6 True stress-true strain curves by the tensile test and the BI test (453hr degradation)

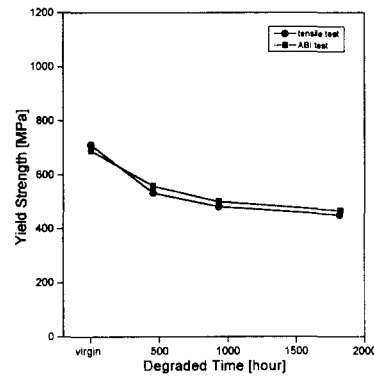


Fig. 9 Comparison of a yield strength by tensile tests and BI tests

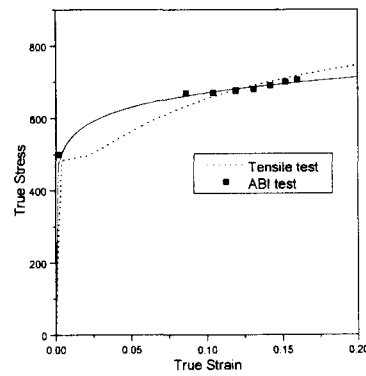


Fig. 7 True stress-true strain curves by the tensile test and the BI test (933hr degradation)

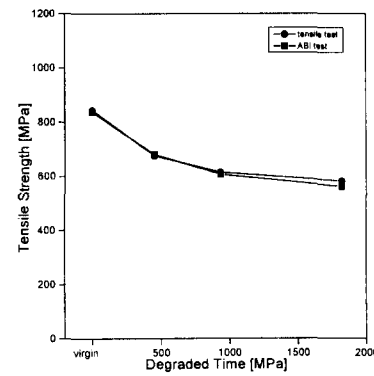


Fig. 10 Comparison of a tensile strength by tensile tests and BI tests

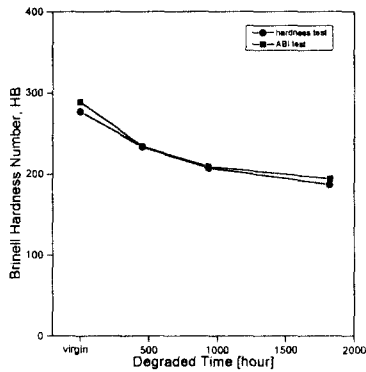


Fig. 11 Comparison of hardness by hardness tests and BI tests

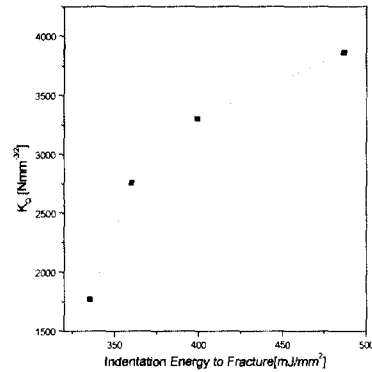


Fig. 12 Relationship between fracture toughness and IEF

Table 4 Results of fracture toughness tests and BI tests

Degraded Time [hour]	Fracture Toughness, $K_Q$ [ $Nmm^{-3/2}$ ]	IEF [ $mJ/mm^2$ ]
0	3,863	486.5
453	3,304	399.2
933	2,761	360.2
1,820	1,771	335.2

3.4 경도시험결과와 압입시험결과의 비교

경도시험은 비이커스 경도계(Vickers hardness tester)를 사용하여 수행하였다. 시험하중은 1 kg으로 하였으며, 표면연마를 수행하여 표면 거칠기에 따른 경도값의 변화를 배제하였다.

Fig. 11은 압입시험에서 얻은 브리넬경도(Brinell hardness)값과 비이커스 경도(Vickers hardness)시험에서 얻은 결과를 ASTM-E140 환산표에 의하여 브리넬 경도(Brinell hardness)로 환산하여 비교한 것이다. 이 그림에서도 열화가 진행됨에 따라 인장강도와 유사한 경향으로 감소되고 있으며 두 경도값의 오차는 거의 없는 것으로 나타났다.

3.5 파괴인성치시험결과와 압입시험결과의 비교

파괴인성시험에는 25.4mm 두께의 CT시편을 사용하였으며, 25ton용량의 전기유압식 재료시험기를 사용하여 ASTM E399에 따라  $K_{IC}$  시험을 수행하였다. 이때 ASTM의 두께조건을 만족하지 못하였으므로  $K_Q$ 라 하였다. Table 4에는 압입법을 이용하여 각 시편으로부터 구한 IEF값과 파괴인성 시험으로부터 구한 파괴인성치를 나타내었으며, Fig. 12에는 이를 그래프로 나타내었다. 열화에 따른 입계취화 등의 원인으로 열화가 진행됨에 따라 재료가 취약해지고 있다. 이에 따라 파괴인성치  $K_Q$ 가 감소되고 있으며, 이와 유사하게 압입파괴 에너지(IEF)도 열화에 따라 감소되는 상관관계를 보여주고 있다. 이는 압입시험으로 파괴인성치를 예측할 수 있음을 의미한다. 압입 파괴인성치라 할 수 있는 압입파괴에너지(IEF)는 벽개파괴까지의 압입에너지이며, 이는 가상압입 파괴깊이가 주어진 경우 얻을 수 있다. 그러나 압입시험만으로는 벽개 파괴응력까지의 압입깊이를 구할 수 없으므로 인장시험을 수행하여 압입 파괴에너지를 구할 수 있었다. 본 시험에서 압입 가상깊이가 0.135mm로 계산되었다.

3.6 압입시험법에 대한 고찰

압입시험은 재료를 파괴하지 않고 재료물성치를 얻을 수 있는 준비파괴적인 방법으로 가동 중 산업설비에 적용이 가능하며, 다른 비파괴시험과 비교시 시험자와 무관하게 일관된 데이터를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 또한 압입시험을 이용하면 원시시편의 변형률감도(strain rate sensitivity)를

나타내는 재료상수(material-type constant;  $\beta_m$ ,  $\alpha_m$ )가 확보된 경우, 인장시험결과나 경도 특성은 물론 파괴인성치까지도 예측할 수 있을 것으로 예상된다.

또한 압입시험은 인장시편이나 파괴인성시편이 없어도 되므로 시험부위가 작은 시편에 적용될 수 있다. 따라서 용접부와 같은 미세조직이 급격히 변하는 부위에 대한 기계적 특성분포를 구하는데 효과적으로 응용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 개발한 배관위에서 움직이며 재료물성치를 측정할 수 있는 배관용 압입시험기를 이용한다면 가동중인 배관 구조물의 안전성평가에도 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 압입법을 이용하여 재료물성치를 평가하기 위한 시험기를 개발하였으며 이 시험기의 성능을 검증하기 위해 물성치가 서로 다른 열화 시험편을 제작하여 파괴시험과 압입시험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 열화가 진행됨에 따라 입계취하 등의 원인으로 재료가 취약해져 재료의 강도가 감소되고 있다.

(2) 압입시험 결과 열화재의 항복강도와 인장강도 및 경도값 등의 기계적 특성이 파괴시험 결과와 잘 일치하였다.

(3) 원시시편의 재료상수(material-type constant;  $\beta_m$ ,  $\alpha_m$ )가 확보된 경우 인장시험을 수행하지 않고도 압입시험만으로도 열화재의 재료물성치 및 파괴인성치의 예측이 가능할 것으로 판단된다.

(4) 압입시험은 준비파괴적으로 재료물성치를 얻을 수 있는 방법으로 가동 중인 산업설비의 물성치 측정에 적용될 수 있을 것이다.

#### 후 기

이 논문은 1998년 학술진흥재단의 공모 과제 연구비(1998-018-E00085)에 의하여 연구되었음.

#### 참고문헌

- (1) 권재도, 1992. "장기사용 Cr-Mo강 열화재의 파괴인성평가와 수명 예측," 대한기계학회논문집, 제16권, pp. 1421~1428.
- (2) Haggag, F. M. and Nanstad, R. K., 1989, "Estimating Fracture Toughness using Tension or Ball Indentation Tests and a Modified Critical Strain Model," *The American Society of Mechanical Engineers PVP*, Vol. 170, pp. 41~46.
- (3) Haggag, F. M., 1993, "In-Situ Measurements of Mechanical Properties Using Novel Automated Ball Indentation System," *Small Specimen Test Techniques Applied to Nuclear Reactor Vessel Thermal Annealing and Plant Life Extension*, ASTM STP 1204, pp. 27~44.
- (4) ASTM E 10-93, 1993, "Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials," *Annual Book of ASTM Standard*, pp. 106~114.
- (5) Murty, K. L., Mathew, M. D., Wang, Y., Shah, V. N., Haggag, F. M., 1998, "Nondestructive Determination of Tensile Properties and Fracture Toughness of Cold Worked A36 Steel," *International Journal of Pressure and Piping*, Vol 75, pp. 831~840.
- (6) Haggag, F. M., Murty, K. L., Liaw, P. K., 1997, *Non-destructive Evaluation and Materials Properties III*. TMS, Warrendale, PA, USA, pp. 101~106.
- (7) 권재도, 박중철, 이우호, 박윤원, 1998, "원전 기기용 CF8M의 430℃ 열화 특성에 관한 연구," 원전기기 워크샵, pp. 129~142.
- (8) 서창민, 윤기봉, 윤석호, 김승태, 1992, "열화 시킨 1Cr-1Mo-0.25V강의 고온에서의 JIC 및 Tmat 평가," *Proceeding of the 2nd Symposium on Material Degradation and Life Prediction*, 경년열화 및 수명평가연구회, pp. 27~55.
- (9) Mathew, M. D., Murty, K. L., 1999, "Non-destructive Studies and Fracture Properties of Molybdenum at Low Temperature(148 to 423K)," *Journal of Materials Science*, Vol. 34, pp. 1497~1503.