

# 압입법을 이용한 재료의 열화도 평가

김석민 · 석창성<sup>†</sup> · 이승석\* · 권재도\*\*

성균관대학교 기계공학부 · \*한국표준과학연구원 · \*\*영남대학교 기계공학부  
(1999. 10. 7. 접수 / 1999. 12. 30. 채택)

## Evaluation of Degraded Materials by Automated Ball Indentation(ABI) Technique

Seok-Min Kim · Chang-Seong Seok<sup>†</sup> · Seung-Seok Lee\* · Jae-Do Kwon\*\*

Department Mechanical Engineering, Sung Kyun Kwan University

<sup>†</sup>Korea Research Institute of Standards and Science · \*\*Department of Mechanical Engineering, Yeungnam University

(Received October 7, 1999 / Accepted December 30, 1999)

**Abstract** : As huge energy transfer systems like a nuclear power plant, steam power plant and petrochemical plant are operated for a long time, mechanical properties are changed by degradation. The life time of the systems can be affected by the mechanical properties. So determination of the integrity of the metallic structure is required either to ensure that failure will not occur during the service life of the components or to evaluate the lifetime extension of the structure. An automated ball indentation(ABI) method was developed as a non-destructive technique for evaluating the integrity of such metallic components. In this paper, we would like to present the aging evaluation technique by the ABI method. The five classes of the thermally aged CF8M specimens were prepared using an artificially accelerated aging method. After holding 100, 300, 900, 1800 and 3600 hours at 430 °C, the specimens were cooled down using water to room temperature respectively. The tensile test, hardness test, Charpy impact test, ABI test were performed. The results of the fracture test were compared with those of ABI test and the new evaluation technique of the integrity of metallic structures was developed.

**Key Words** : Automated Ball Indentation Test(자동 압입시험), Degradation(열화), Aging(시효), Fracture test(파괴 시험)

### 1. 서론

화력발전설비 및 원자력발전 플랜트와 같은 대형에너지 변환설비들은 고온의 특수환경에서 장시간 사용될 경우 금속조직의 변화가 생기고 재료의 기계적 특성도 변화하는 열화현상이 발생하게된다. 이는 대형에너지 변환설비의 운전, 수명 및 안전에 큰 영향을 주므로 환경적 열화와 손상에 의한 재료의 수명단축을 정확히 예측하기 위해서는 정기적인 조사를 수행하여 재료의 상태를 정확히 예측하는 것이 필요하다. 열화된 재료의 상태를 예측하는 방법은 파괴적인 방

법과 비파괴적인 방법이 사용되고 있다. 파괴적인 방법은 실제 재료의 물성치를 정확하게 측정하는 것이 가능하나 산업현장에서 운전 중인 시설물의 가동을 중단하여야 하며 구조물의 일부분을 채취하여야 하므로 시편 확보와 가동중단으로 인한 경제적, 기술적 측면의 어려움이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 비파괴적인 방법이 널리 사용되며 초음파법, 전기저항법, 레프리카법, 전기 화학적, 입계부식법 및 압입법<sup>1,2)</sup>을 이용한 방법 등이 주로 사용되고 있다.

이 중 압입법을 이용하면 운전중인 시설물의 가동을 중단하지 않고 재료의 항복강도 및 진응력-변형률 선도를 얻을 수 있으므로, 간단한 시험만으로도 재료의 상태를 예측하는 것이 가능하다. 특히 압입법은 다른 비파괴시험법으로 측

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
csseok@yurim.skku.ac.kr

정하기 어려운 배관이나 원자로 등의 용접부나 용접 열영향부와 같은 미소부위의 재료 물성치를 측정할 수 있는 장점이 있으며 이것은 열화된 구조물의 잔존수명예측 및 안전성평가에 많은 도움을 줄 수 있다.

압입법을 이용하여 재료의 기계적인 물성치를 평가하는 연구는 여러 연구자들에 의하여 행하여 졌다. Haggag 등<sup>2,3)</sup>은 압입법을 이용하여 원자력발전소 압력용기강인 A533B Class1의 온도에 따른 진응력-변형률선도를 구하였으며 온도에 따라 다른 특성을 보이는 진응력-변형률선도를 바탕으로 취성의 정도를 평가하기 위한 파라미터로 압입과파괴에너지(IEF; Indentation Energy to Fracture)를 제안하였다. 그러나 압입과파괴에너지는 임의로 임계과파괴응력을 설정하여 상대적으로 비교하는 방법이므로 일반적인 정량적값을 얻기 어려우며 또한 경년열화와 같이 재료가 취화현상을 통해 다른 파괴특성을 나타내는 경우에는 적용이 힘든 단점이 있다. Haggag 등<sup>4,5)</sup>은 압입시험을 통하여 파괴인성치를 결정하는데 문제가 되는 파단임계하중을 새로운 모델로 측정하였다. 그러나 파단임계하중을 결정하기 위해서는 온도에 따른 KIC값을 필요로 하므로 경년열화로 취화된 재료에 적용하기는 힘들다.

따라서 본 연구에서는 경년열화현상의 일종인 열취화 현상이 자주 나타나는 원자로 냉각재 펌프몸체, 냉각재 파이프 및 피팅, 서지라인, 가압기 스프레이 헤드 등의 재료인 오스테나이트-페라이트(austenite-ferrite) 2상 주조 스테인리스강(CF8M)을 가속열화시켜 단계별로 5가지의 열화재를 제작하고 이들 열화재를 압입시험, 충격시험, 인장시험 및 경도시험을 수행하여 비교함으로써 압입법만으로 열취화 현상을 평가할 수 있는 새로운 평가기준을 제시하고자 한다.

## 2. 시험용 모의열화재의 제작

본 연구에 사용된 재료는 원자력 발전소의 1차 계통에 사용되는 ASTM A351 grade CF8M 주조 스테인리스강을 사용하였으며, 화학성분은 표1과 같다.

열화현상을 평가하기 위해서는 실기에 장기 사용된 열화재를 이용하여 평가하는 것이 보다 이상적이지만, 현 상황에서 원전설비에 실제 사

용된 열화재를 입수하기는 거의 불가능한 상태이다. 따라서 실험실에서 모의적으로 가속해서 열화재를 제작하는 방법을 선택하였다. 이러한 가속열화방법의 이론적인 배경<sup>6)</sup>을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1은 원전배관용으로 사용되는 재료(Fe-29Cr-4Mo-2Ni)의 일종에 대하여 동일한 샐피 충격 에너지, 즉 68J 및 20J을 갖는 시효온도와 시효시간사이의 관계를 나타낸 것이다. 일반적으로  $\sigma$  상 취화구간인 700~810°C와 475°C 취화구간인 400~550°C에서는 짧은 시간에 충격에너지의 감소가 일어남을 알 수 있다. 본 연구에 사용된 재료의 운전온도 및 환경을 고려하면 원전 배관에서의 취화 기구는 475°C 취화와 관계가 있을 것으로 사료된다. 따라서 모의 열화온도는 단시간에 열화를 시킬 수 있고 가능한 한 낮은 온도인 430°C를 채택하였다<sup>7,8)</sup>.

따라서 430°C에서 100, 300, 900, 1800 및 3600 시간 유지 후 수냉(quenching)하여 각 단계별 열화재를 제작하였다. 본 연구에서는 모의 열화전의 재료를 건진재라 정의하고, 또한 430°C에서 100, 300, 900, 1800 및 3600시간 유지 후 수냉한 재료를 각각 100시간 열화재, 300시간 열화재, 900시간 열화재, 1800시간 열화재 및 3600시간 열화재라 정의하였다.

Table 1. Chemical composition of CF8M (wt. %)

Composition								
C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu
0.074	1.21	0.0318	0.0126	1.14	9.59	18.67	2.73	-

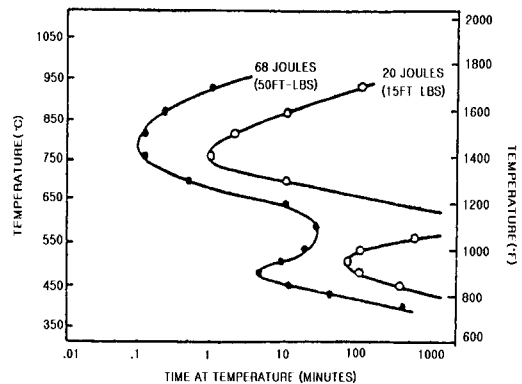


Fig. 1. Room-temperature Charpy v-notch toughness as a functional isothermal exposures of water-quenched Fe-29Cr-4Mo-2Ni alloy

### 3. 파괴적인 시험법에 의한 열화재의 재료물성치 평가

#### 3.1. 충격시험에 의한 열화평가

재료의 열화에 따른 기계적 성질의 현저한 차이를 평가할 수 있는 시험법으로 충격시험법이 널리 이용되고 있다. 여기에서 사용된 샤피(Charpy) 충격시험편은 KS B 0809에 따라 제작하였으며, V노치 형상을 일정하게 가공하기 위하여 노치 선단을 방전가공하였다. 건전재 및 각 단계별 열화재에 대해 샤피 충격 시험을 수행한 후 열화 시간과 충격 흡수에너지 사이의 관계를 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 2는 상온에서 건전재 및 5가지 열화재에 대한 충격에너지와 모의열화시간 사이의 관계를 나타낸 것이다. 그 결과 열화초기에는 상부단 값이 급속히 저하되며, 1800시간경과 이후에는 그다지 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다. 충격흡수 에너지가 감소하는 것은 재료의 인성이 감소하는 것으로 추정할 수 있으며 BSI방법에는 샤피 충격시험 결과인 vE(J)로부터 KIC를 간편하게 추정하는 다음과 같은 식이 제시되어 있다.

$$K_{IC} = 56.92 + 0.5270(vE) \quad (1)$$

(  $K_{IC}$  ;  $MPa\sqrt{m}$ ,  $vE$  ; J )

식 (1)을 이용하면 충격 시험후 얻은 vE값에 의해 KIC를 추정할 수 있다. Fig. 3은 파괴인성치와 열화시간과의 관계를 그래프로 나타낸 것이다. 이로부터 열화시간이 지날수록 파괴인성치가 감소하는 것을 알 수 있다.

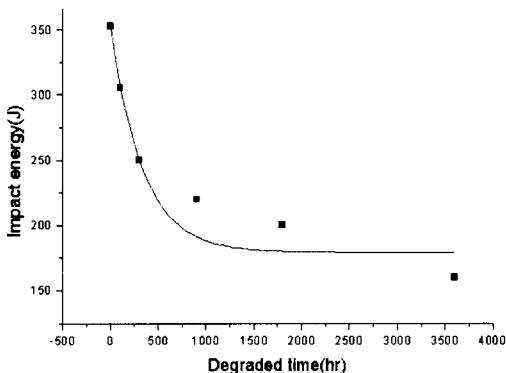


Fig. 2. Degraded time vs impact energy

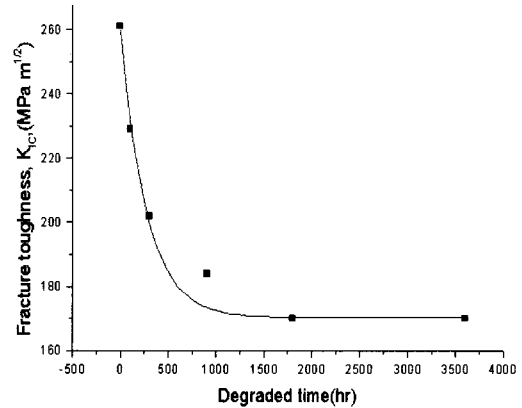


Fig. 3. Degraded time vs fracture toughness

#### 3.2. 인장시험에 의한 열화평가

건전재 및 각 단계별 열화재의 인장특성의 변화를 관찰하기 위하여 KS B 0801의 인장시험편 규격에 준거하여, 표점거리 10mm, 폭 5mm, 평행부거리 30mm, 모서리 반경 15mm, 두께 3mm인 축소 시험편을 제작하여 인장시험을 수행하였다. 인장시험에 사용된 시험기는 시마스(Shimadzu)사의 Autograph AG-25TG이고, 1mm/min의 속도로 시험을 수행하였다. 인장시험으로부터 얻은 하중-변위선도를 Fig. 4에 나타내었으며 연신율, 단면 수축률 및 인장강도를 Table 2에 나타내었다. Fig. 4의 하중-변위선도로부터 열화가 진행된 재료일수록 강도가 강해지며 재료의 파단점이 점차 짧아지는 특성을 보인다. 이 결과로부터 CF8M은 건전재와 3600시간 열화재를 비교해보면 건전재는 인장강도가 낮고 연신율이 높은 특성을 보이는 반면 3600시간 열화재는 인장강도가 높고 연신율이 낮은 특성을 보인다. 이 결과는 CF8M은 열화될수록 강도가 높고 연성이 낮아진다는 것을 알 수 있다.

Table 2. Mechanical properties of materials

	Virgin	100hr	300hr	900hr	1800hr	3600hr
Tensile St.	531 MPa	539 MPa	620 MPa	620 MPa	624 MPa	580 MPa
El.	68.6%	63.5%	67.9%	67.3%	59.8%	41.6%
R.of A.	46.5%	36.0%	43.4%	37.2%	34.1%	30.3%

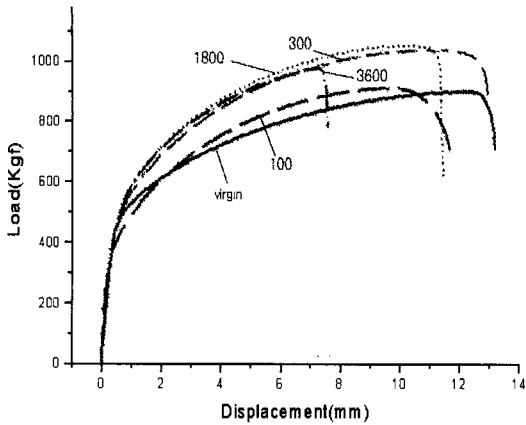
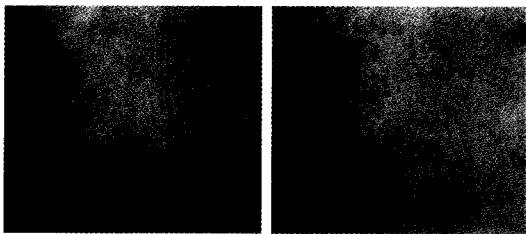
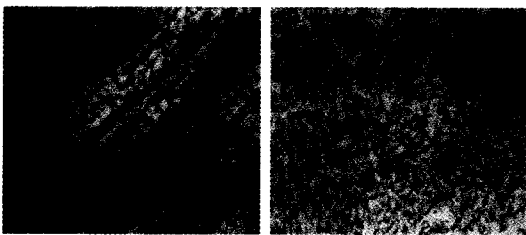


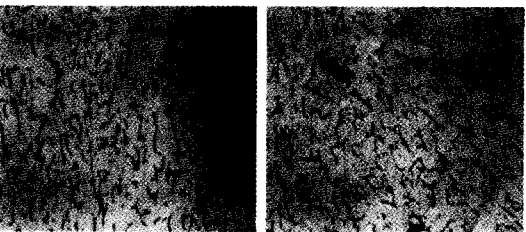
Fig. 4. The result of tensile test for virgin and degraded materials



(a) Virgin (b) 100hrs degraded



(c) 300hrs degraded (d) 900hrs degraded



(e) 1800hrs degraded (f) 3600hrs degraded

Photo. 1. Microstructure of virgin and degraded materials[×100]

### 3.3. 열화재의 조직관찰

재료의 장시간 사용에 따른 열화현상은 금속 조직의 변화로도 확인할 수 있다. 따라서 A351 grade CF8M의 건전재와 430℃에서 가속 모의열

화시킨 각 단계별 모의 열화재의 가속 열화시간에 따른 미세 조직의 변화과정을 관찰해 보았다. 시편의 표면을 연마한 후 광학현미경에서 100배로 관찰한 조직사진을 Photo. 1에 나타내었다. 모의 열화시간이 길어짐에 따라 조직의 변화가 생기며 열화시간이 길어질수록 크롬탄화물의 양이 많아지는 것을 알 수 있다.

## 4. 압입시험법에 의한 재료의 열화도평가

### 4.1. 압입시험법

압입 시험기는 구형 압입자를 시험편에 단계적으로 압입하여 재료의 물성치를 얻는 방법이다. 자동압입시험기(ATC사)에서 직경 1.5748mm (0.062in)인 텅스텐 카바이드 강 압입자를 이용하여, 압입속도 0.00076mm/s, loading-unloading 횟수는 8회로 상온에서 실험을 수행하였다. Fig. 5은 압입하중-깊이 선도를 나타낸 것이다. 시험편은 샤프(Charpy)시험후에 절단된 시험편을 사용하였다. 압입시험기는 조작부와 시험기 본체로 구성되어있다.

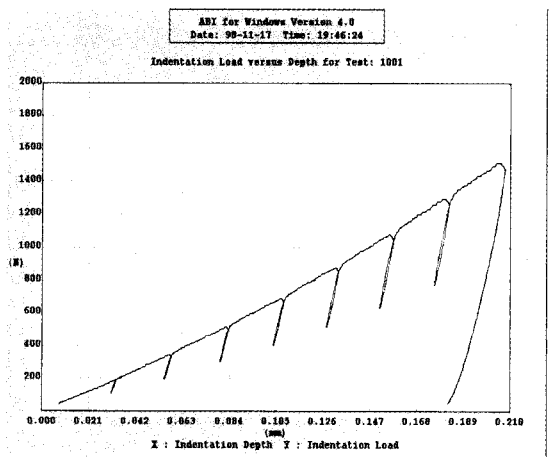


Fig. 5. Indentation load vs depth of ABI test

### 4.2. 압입시험결과

#### 4.2.1 진응력-변형률선도

Fig. 6은 압입시험으로부터 구해진 열화재의 진응력-변형률 선도이다. 진응력-변형률 선도는 다음의 수식에 의하여 결정된다.

$$\sigma = K \cdot \epsilon_p^n \quad (2)$$

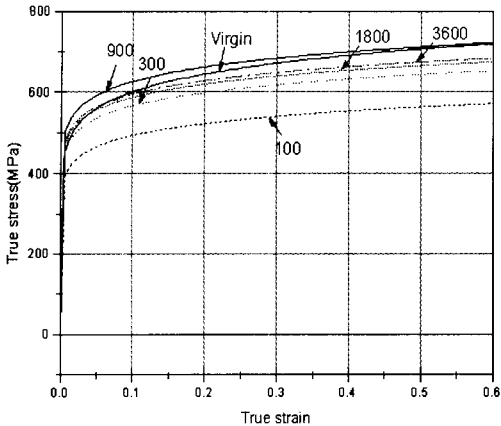


Fig. 6. True-stress vs true plastic strain curve by ABI test

여기서,  $K$ 는 강도계수(strength coefficient),  $n$ 은 연신률-경화 지수(strain-hardening exponent),  $\epsilon_p$ 는 소성-진변형률(true-plastic strain),  $\sigma$ 는 소성-진응력(true-plastic stress)이다.

식(2)에서  $K$ 값과  $n$ 값은 압입시험을 통하여 얻어진다. 본 연구에 사용된 CF8M의 경우에 압입 시험으로 예측된 진응력-변형률 선도는 인장시험의 결과와 잘 일치하지 않았다. 이는 인장시험시 표준시편의 조건을 만족하지 못하였으므로 오차가 발생된 것으로 사료된다.

#### 4.2.2. 항복강도 및 경도

Fig. 7은 압입 시험법으로부터 얻은 재료의 항복강도이다. 모의열화시간에 따른 항복강도는 다소 편차가 있으나 열화가 진행될수록 높아지는 경향을 보이고 있다. Fig. 8는 압입 시험법으

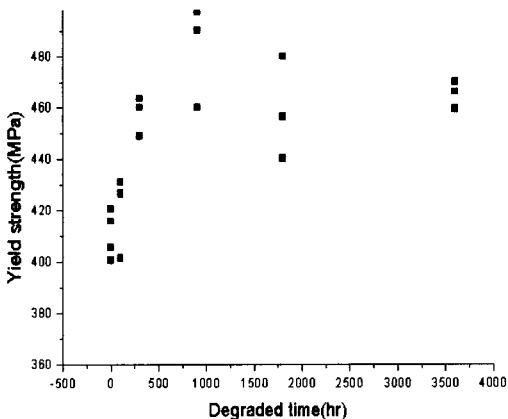


Fig. 7. Yield strength vs degraded time by ABI test

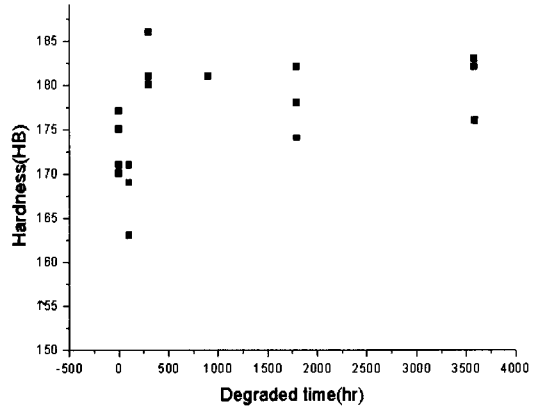


Fig. 8. Brinell hardness vs degraded time by ABI test

로부터 측정된 브리넬(Brinell) 경도값이다. 이 결과는 항복강도와 비슷한 경향을 나타내고 있으나 100시간 열화재의 경우 경도값이 낮게 나오는 경향을 나타낸다.

#### 4.2.3 연신율-경화지수

변형률-경화지수는 균일 연신율(Uniform Elongation)과 수학적으로 동일하다는 것이 증명된바 있으므로 변형률-경화지수의 변화는 균일 연신율의 변화로 생각할 수 있다. 균일 연신율은 네킹(necking)까지의 연신을 나타내는 것이므로 재료의 취성과 밀접한 관계가 있을 것으로 생각된다.

Fig. 9은 모의열화시간에 따른 연신율-경화지수의 변화를 나타낸 것이다. 상부단에서의 변화가 급격히 일어나며 1800시간 이상으로 갈수록 일정한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 모의 열화시간에 따른 충격흡수에너지 및 파괴인성치의 변화와 일치한다

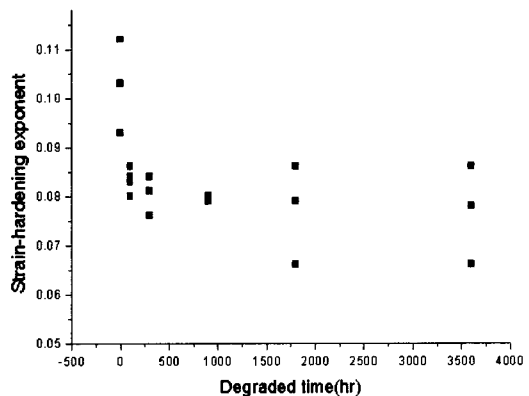


Fig. 9. Strain-hardening exponent vs degraded time by ABI test

**4.2.4. 압입 파괴 에너지 (Indentation Energy to Fracture; IEF)**

Haggag 등<sup>4)</sup>은 압입시험기로 재료의 성질변화를 평가할 수 있는 파라미터로 IEF를 제안하였다. IEF는 파괴까지의 압입 에너지로 정의되며 다음과 같이 표현된다.

$$IEF = \int_0^{h_f} P_m(h) dh \quad (3)$$

여기서,  $P_m$ 은 압입접촉압력,  $P$ 는 압입하중,  $h$ 는 압입깊이,  $h_f$ 는 벽개파괴응력까지의 압입깊이,  $d$ 는 압입시 압입자가 접촉하는 면의 반경이다. 압입시험시 압입-하중곡선은 일정한 기울기를 가지므로 이것은 IEF의 계산에 이용할 수 있다. 따라서 IEF는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$IEF = \frac{S}{\pi} \ln\left(\frac{D}{D-h_f}\right) \quad (4)$$

여기서,  $S$ 는 압입-하중곡선의 기울기이고  $D$ 는 압입자의 직경이다.  $h_f$ 를 결정하기 위해서는 벽개파괴응력을 알아야한다. 그러나 압입시험만을 이용하여서는 벽개파괴응력을 알 수 없으므로 대표 응력값을 설정하여 그에 해당하는 압입깊이를  $h_f$ 로 결정한다.

Fig. 10은 모의열화시간에 따른 압입파괴에너지의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 이 결과에

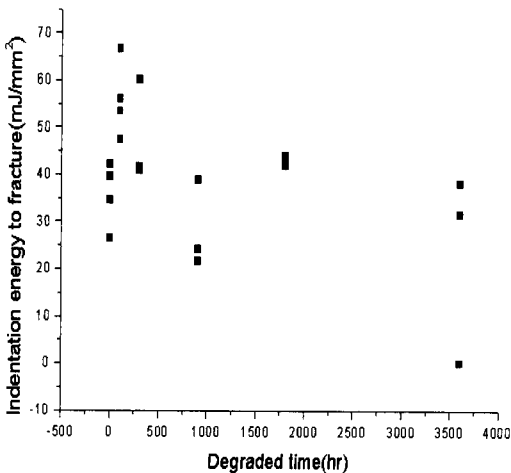


Fig. 10. Indentation energy to fracture vs degraded time by ABI test

서는 열화시간이 오래된 열화재 일수록 압입 파괴 에너지가 감소하는 경향을 보이고는 있으나 경향이 일관되지 못하고 100시간 열화재 및 300시간 열화재의 경우 건전재보다 오히려 높은 IEF를 나타냄을 알 수 있다. 이것은 IEF계산시 임의로 임계파괴응력을 설정하여 모든 재료가 동일한 응력에서 파괴된다는 가정에 의한 오차로 생각된다.

**4.2.5. IEU(Indentation Energy to Uniform elongation)**

Haggag 등<sup>4)</sup>에 의해 제안된 IEF에너지가 벽개파괴응력 설정시의 문제점 때문에 일관된 경향을 나타내지 않으므로 본 논문에서는 균일 연신율까지의 에너지인 IEU를 제안하였다. 이것은 진응력-압입깊이 선도에서 진응력을 압입깊이에 대하여 균일 연신율에 해당하는 압입깊이까지 적분한 것으로 다음과 같이 정의된다.

$$IEU = \int_0^{h_n} \sigma_t dh \quad (5)$$

여기서  $h_n$ 은 균일 연신율에 해당하는 압입깊이이다. Fig. 11는 모의 열화시간에 따른 IEU를 나타낸 것이다. 열화가 진행될수록 상부단에서 급격한 IEU의 감소가 일어나며 일정한 시간이 흐른 뒤에는 더 이상 감소하지 않는 경향을 보인다. 이것은 충격흡수에너지 및 파괴 인성치의 경향과 잘 일치함을 알 수 있다.

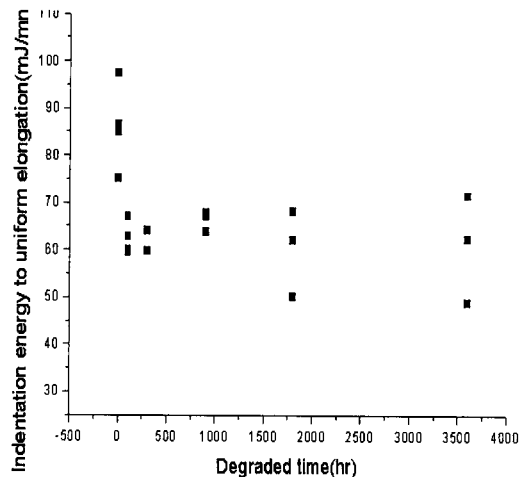


Fig. 11. Indentation energy to uniform elongation vs degraded time by ABI test

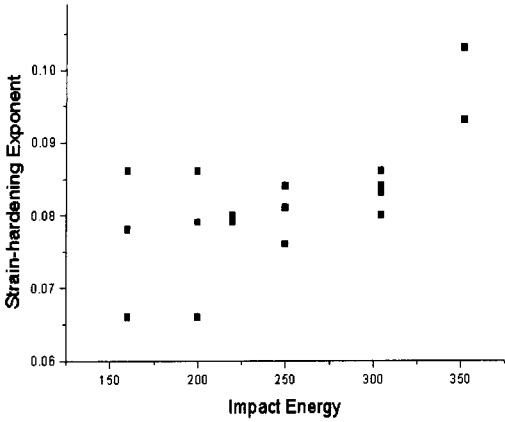


Fig. 12. Strain-hardening exponent vs impact energy

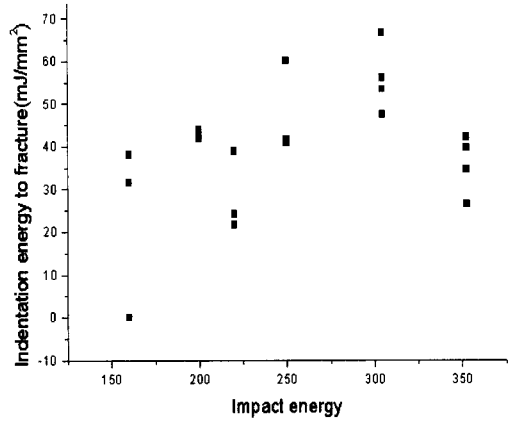


Fig. 13. Indentation energy to fracture vs Impact energy

### 4.3. 압입시험 결과의 비교분석에 의한 열화도 평가기준 설정

#### 4.3.1. 연신율-경화지수에 의한 열화도 평가

연신율-경화지수는 충격흡수에너지 및 파괴인성치와 비슷한 경향을 보이므로 430℃에서 열화된 CF8M의 열화도를 평가하는 파라미터로 사용할 수 있다. 연신율-경화지수는 균일 연신율을 나타내므로 이 값이 열화가 진행될수록 작아진다는 것은 재료가 열화됨에 따라 연신율이 작아진다는 것을 의미한다. Fig. 12은 연신율-경화지수와 충격흡수에너지와의 상관관계를 나타낸 그래프이다. 다소 편차가 있으나 좋은 상관관계를 나타냄을 알 수 있다.

#### 4.3.2. IEF(Indentation Energy to Fracture)에 의한 열화도 평가

IEF는 이론적인 근거에 의한 값이므로 의미를 가지나 실제 열화된 CF8M의 경우에는 적용이 힘들다. Fig. 13는 IEF와 충격흡수에너지와의 상관관계를 나타낸 것이다. 데이터가 다소 흩어져 있는 것을 알 수 있으며 IEF는 CF8M의 열화를 평가하는 파라미터로는 사용하기에는 무리가 있다.

#### 4.3.3. IEU에 의한 열화도 평가

IEU는 균일연신율까지의 압입에너지를 나타낸 것으로 단위는 IEF와 동일하다. Fig. 14는 IEU와 충격흡수에너지와의 상관관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 IEU를 이용한 경우가 IEF를 이용한 경우보다 좋은 경향을 보임을 알 수 있다. IEU는 압입 흡수 에너지를 나타내는 것이므로

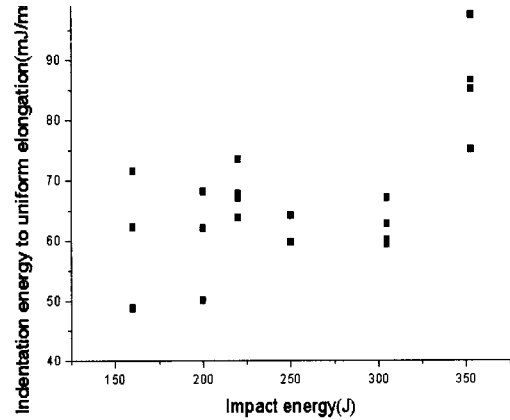


Fig. 14. Indentation energy to uniform elongation vs Impact energy

430℃에서 열화된 CF8M의 열화도를 평가하는 파라미터로 사용될 수 있다고 생각된다.

## 5. 결론

1) 열화온도가 430℃인 CF8M의 열화도를 평가하는 압입시험 파라미터로 연신율-경화지수와 IEU를 제안하였다.

2) IEF는 이론적으로 좋은 파라미터라고 생각되나 벽개파괴응력시의 압입깊이설정의 어려움 때문에 430℃에서 열화된 CF8M의 열화도를 평가하는 데는 어려움이 있었다.

3) 압입 시험으로부터 얻은 항복강도는 모의 열화시간이 진행됨에 따라 재료가 취화되는 것을 잘 나타내주고 있다.

4) 압입 시험으로부터 예측된 진응력-변형률 선도는 재료의 물성치변화를 잘 나타내주지 못했다. 그러나 항복강도값이 재료의 물성치변화를 잘 나타내주고 있는 까닭은 진-응력 변형률 선도 예측에 사용되는 메카니즘과 항복강도를 결정하는 메카니즘이 서로 다르기 때문인 것으로 생각된다.

**감사의 글 :** 본 논문은 한국표준과학연구원 산하 방재기술연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

- 1) Haggag, Fahmy M., 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. 1993.
- 2) Haggag, Fahmy M., Byun, Thak-Sang, Hong, J. H., Miraglia, P. Q., and Murty, K. Linga, Indentation-Energy-To-Fracture(IEF) Parameter for Characterization of DBTT in Carvon Steels Using Nondestructive Automated Ball Indentation (ABI) Technique.
- 3) Byun, Thak Sang, Kim, Jin Weon, Hong, Jun Hwa, A theoretical model for determination of fracture toughness of reactor pressure vessel steels in the transition region from automated ball indentation test, Journal of Nuclear Materials 252, pp. 187~194. 1998.
- 4) United States Patent 4,852,397.
- 5) Haggag, Fahmy M., Nanstad, R. K., 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. 1989.
- 6) 권재도, 박중철, 이우호, 박윤원, 원전기기용 CF8M의 430℃ 열화 특성에 관한 연구, 원전기기 워크샵, pp. 129~142. 1998.
- 7) 서창민, 허정훈, 이해무, 남승훈, 서덕영, 시효열화시킨 1Cr-1Mo-0.25V강의 고온하의 피로강도에 관한 연구, 제 5회 경년열화 및 수명평가 심포지엄 논문집, pp. 46~63. 1995
- 8) 정희돈, 권영각, 2.25Cr-1Mo 강역의 열화와 기계적 성질변화에 관한 연구, 제 3회 경년열화 및 수명평가 심포지엄 논문집, pp 185~197. 1994.