

압입법을 이용한 재료 열화의 평가에 관한 연구

김정표* · 석창성** · 안하늘***

A Study on the Evaluation of Material Degradation using Ball Indentation Method

Jeong Pyo Kim, Chang Sung Seok, Ha Neul Ahn

Key Words: Ball Indentation Method(압입법), Degradation(열화), Yield Strength(항복강도), Tensile Strength(인장강도), Fracture Toughness(파괴인성), IDE(압입변형에너지)

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. BI(Ball Indentation) test has a potential to replace conventional fracture tests like a uniaxial tensile test, fracture toughness test, hardness test and so on. In this paper, we would like to present the aging evaluation technique by the BI method. The four classes of the thermally aged 1Cr-1Mo-0.25V specimens were prepared using an artificially accelerated aging method. Tensile tests, fracture toughness tests, hardness tests and BI tests were performed. The results of the BI tests were in good agreement with fracture characteristics by a standard fracture test method. The IDE(Indentation Deformation Energy) of a BI technique as a new parameter for evaluating a degradation was suggested and the new IDE parameter clearly depicts the degradation degree.

1. 서론

고온, 고압 환경하에서 사용되는 산업설비 재료들은 역학적, 화학적, 열적 효과에 의해 초기의 조직상태 등이 변화되어 기계적 성질이 저하되는 재료열화(material degradation) 현상[1,2]을 수반하게 된다. 재료열화는 설비노후의 가장 큰 원인 중 하나이며, 고온환경, 부하조건, 부식환경 등의 복합적 원인에 의하여 재료의 특성이 변화되어

발생된다. 이러한 환경적 열화와 손상에 의한 재료의 단축된 수명을 정확히 예측하기 위해서는 정기적인 조사를 수행하여 재료의 상태를 정확히 평가하는 것이 필요하다[3].

비파괴적인 재료평가법에는 초음파법, 전기저항법, 레프리카법, 입계부식법 및 압입(Ball Indentation)시험법[4,5] 등이 사용되고 있다. 이중 압입법은 운전중인 시설물의 가동을 중단하지 않고 간단한 시험만으로 재료의 항복강도 및 진용력-진변형률 곡선을 얻을 수 있는 방법으로, 이를 이용하면 재료의 열화상태를 예측하는 것이 가능하다.

본 연구에서는 1Cr-1Mo-0.25V 강을 이용하여 고온에서 장시간 사용함으로써 발생하는 열화현상이 재료의 강도와 인성에 미치는 영향을 알아보기 위해 등은 열처리(isothermal aging heat

* 성균관대학교 대학원 기계공학과
** 성균관대학교 기계공학부
*** (주)기아자동차 선형 생기팀

treatment) 방법으로 모의 열화(simulated degradation)시켜 열화 정도가 다른 시험편을 제작하였다. 이 시험편을 이용하여 압입시험, 인장시험, 경도시험, 파괴인성시험 등을 수행하였으며, 그 결과를 고찰하였다.

2. 열화재의 강도 평가

2.1 열화재 제작

본 연구에 사용된 재료는 화력발전소 터빈로터용 소재로 많이 쓰이는 1Cr-1Mo-0.25V강으로서 화학성분조성비는 Table 1과 같다.

재료의 열화현상을 평가하기 위해 실제 기계구조물에서 장기간 사용하는 도중에 적당한 간격을 두고 시료를 채취하여 실험하는 것이 가장 이상적이나 터빈로터강의 경우 실제 발전소에서 사용된 열화재를 시간단계별로 입수하는 것이 매우 어렵기 때문에 이와 유사한 미세조직을 갖는 재질을 얻기 위해서 사용온도(538℃)보다 높은 온도(630℃)에서 등온열화열처리(isothermal aging heat treatment)방법을 실시하였다[8,9].

2.2 인장 시험

신재와 각 열화단계별로 제작된 열화재의 인장 특성의 변화를 관찰하기 위해서 ASTM E 8-95a [9] (KS B 0801)에 따라 각 열화단계별로 2개씩의 시험편을 제작하여 인장시험을 수행하였다. 인장시험에 사용된 시험기로는 Shimadzu사의 25ton 용량의 전기유압식 만능시험기(Autograph AG - 25TG)를 사용하였으며, 상온에서 1mm/min의 속도로 시험을 수행하여 하중-변위 선도, 연신율(elongation), 항복강도(0.2% offset) 및 인장강도 등을 구하였다.

2.3 경도 시험

재료의 열화도를 평가하기 위해 경도시험을 수행하였다. 경도측정에는 일본 Agsshi사의 Micro Vickers hardness tester(모델명 : MVK-H2)를 사용하였다. 압입 횟수는 신재와 열화단계별로 4개의 시험편에 대해 시험편 당 10회로 하였으며, 시험하중은 10초 동안에 1kg까지의 하중이 작용하도록 하였다.

2.4 파괴인성시험

각 열화 단계별로 2개의 CT 표준시험편을 사용하였다. 파괴인성시험에 사용된 시험기는 인스트론사의 25ton 용량 전기유압식 재료시험기(Instron Model 1332)이며 ASTM E 399-90[10]의 K_{Ic} 시험방법에 따라 시험을 수행하였다. 모든 시험의 제어, 데이터 처리 및 결과해석에는 A/D 변환기와 PC를 사용하였다.

3. 압입법

3.1 압입법

압입자를 이용하여 재료표면에 하중을 가하면 표면에 탄소성 변형이 발생되며 이 탄소성 변형 영역의 크기와 변형량은 압입하중의 크기에 비례한다. 압입법을 이용하여 열화시험에 따라 재료의 항복강도(σ_y), 진응력-진변형률선도, 브리넬 경도 등을 구하였다[4,5,6].

Fig. 1과 Fig. 2는 압입에 따른 시험편의 압입흔적과 압입하중-압입깊이 선도를 보여주고 있다.

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

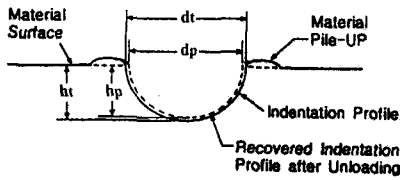


Fig. 1 Schematic diagram of indentation profile

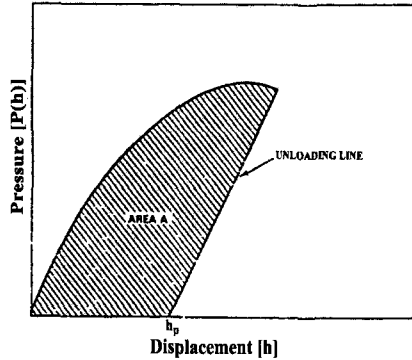


Fig. 3 Definition of the area for IDE

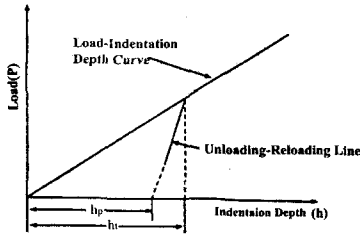


Fig. 2 Indentation load-depth curve

3.2 압입변형에너지

Haggag에 의해 제안된 압입파괴에너지 (Indentation Energy to Fracture : IEF)는 다음 식과 같으며, 압입시험시 파괴까지의 압입에너지로 정의되며 다음과 같이 표현된다.

$$IEF = \int_0^{h_f} P_m(h) dh \quad (14)$$

$$P_m = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (15)$$

여기서, P_m 은 평균압입접촉압력, P 는 압입하중, h 는 압입깊이, h_f 는 벽개파괴응력까지의 압입깊이, d 는 압입시 압입자가 접촉하는 면의 반경이다. 그러나 IEF는 벽개파괴응력 설정의 문제점으로 인해 구하는 방법이 쉽지가 않다. 따라서 본 논문에서는 압입시험기로 재료의 열화도를 보다 쉽게 평가할 수 있는 파라미터로서 압입변형에너지 (Indentation Deformation Energy : IDE)를 제안하였다.

$$IDE = \int_0^{h_p} P_m(h) dh \quad (16)$$

여기서 h_p 는 인장강도까지의 압입깊이로, P_m 은 평균압입 접촉압력이다. IDE는 압입시험시 최대소성까지 재료가 변형하는데 필요한 에너지로 정의되며 Fig. 3의 압입압력-압입깊이선도에서 압입압력에 대한 최대소성 압입깊이까지의 면적으로 나타낼 수 있다. 이 IDE는 압입시 재료가 변형되는데 필요한 에너지인 동시에 재료에 흡수되는 에너지라고 할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

시험에 사용된 압입시험기(ATC사)[15]에는 직경 0.508mm (0.02in)인 텅스텐 카바이드강(WC)으로 된 구형 압입자를 장착하여 시험편의 표면을 압입하여 시험결과를 얻었으며, 압입속도 0.005mm/s, 하중인가 및 제하(loading- unloading) 횟수 7회로 상온에서 실험을 수행하였다.

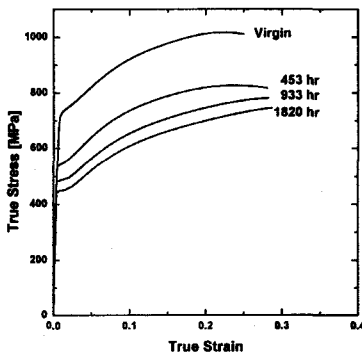
모재와 각 단계별로 제작된 열화재를 압입장비를 이용하여 압입시험한 결과 압입하중과 압입깊이곡선에서 얻을 수 있는 항복강도(yield strength), 인장강도(tensile strength), Brinell hardness 값, 변형율-경화지수(strain-hardening exponent : n), 강도계수(strength coefficient : K) 등을 구하였다.

Fig. 4는 인장시험과 압입시험으로부터 얻은 각 시험편의 진응력-진변형률 곡선을 나타낸 것이다. 여기에서 인장시험으로 구한 진응력-진변형률 선도와 BI시험으로부터 구한 결과가 유사한 경향으로 나타남을 알 수 있다. Fig. 5와 Fig. 6은 압입

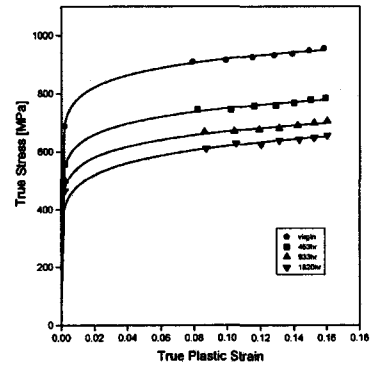
시험에 의해서 얻은 항복강도와 인장강도를 인장 시험 결과와 비교한 것으로서, 인장시험과 압입 시험의 결과는 잘 일치하였다. Fig. 7은 압입시험에서 얻은 브리넬 경도(Brinell hardness) 값과 비이커스 경도시험에서 얻은 비이커스 경도값을 ASTM-E140 환산표에 의해서 환산한 브리넬 경도 값과 비교한 것이다. 이 그림에서도 두 경도 값의 오차는 거의 없는 것으로 나타났다.

Table 2에는 압입법을 이용하여 각 시편으로부터 구한 IEF와 IDE값, 파괴인성 시험으로부터 구한 파괴인성치를 나타내었다. ASTM 399에 따라 K_{IC} 시험을 수행[10]하였으며 ASTM의 두께조건을 만족하지 못하였으므로 K_Q 라 하였다. Fig. 8에는 Haggag이 제안한 IEF와 인장시험결과와의 관계를 나타내었으며 Fig. 9에는 본 연구에서 제안된 IDE값과 인장시험결과와의 상관관계를 나타내었다. Fig. 10에는 IEF와 파괴인성치(K_Q)와의 관계를 Fig. 11에는 IDE와 파괴인성치(K_Q)와의 관계를 나타내었다.

그러나 IEF는 압입시험만으로 벽개파괴응력까지의 깊이를 구할 수 없으며, 인장시험을 수행하여 가상 압입파괴깊이를 구해야 한다. 그러므로 열화상태가 다른 재질에 대하여 IDE값을 계산함으로써 재료물성치와 이에 따른 열화도를 예측할 수 있으리라 사료된다.



(a)



(b)

Fig. 4 True stress-true strain curves by (a) the tensile test and (b) the BI test

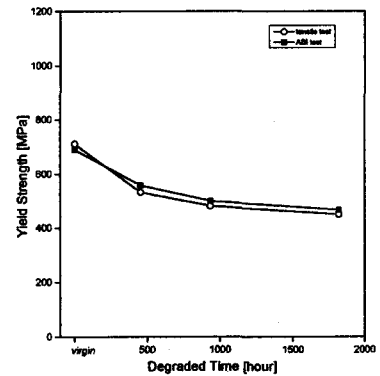


Fig. 5 Comparison of yield strength by tensile tests and BI tests

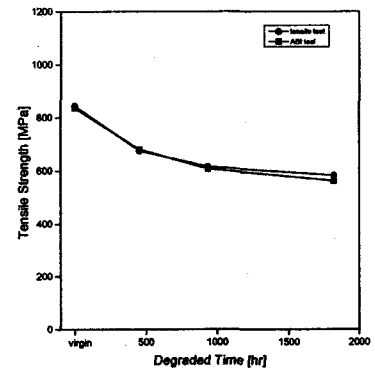


Fig. 6 Comparison of tensile strength by tensile tests and BI tests

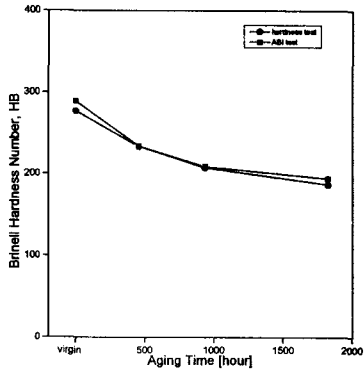


Fig. 7 Comparison of hardness by hardness tests and BI tests

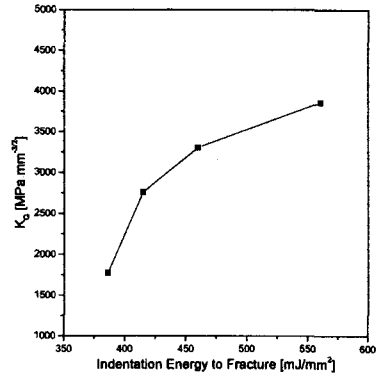


Fig. 10 Relationship between fracture toughness and IEF

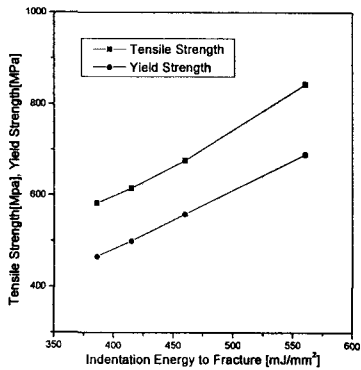


Fig. 8 Relationship between tensile test results and IEF

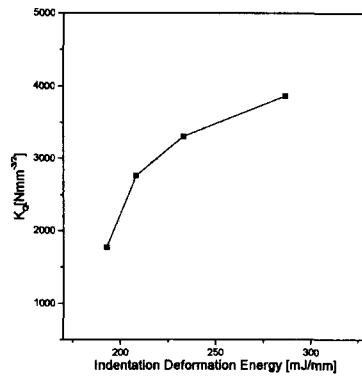


Fig. 11 Relationship between fracture toughness and IDE

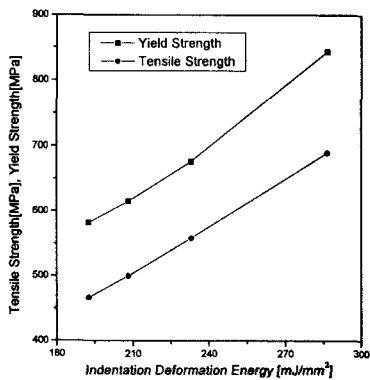


Fig. 9 Relationship between tensile test results and IDE

Table 2 Results of Fracture toughness tests and BI tests

Degraded Time [hour]	Fracture Toughness [Nmm ^{-3/2}]	IEF [mJ/mm ²]	IDE [mJ/mm ²]
0	3863	560.3	286.6
453	3304	459.7	232.9
933	2761	414.8	208.2
1,820	1771	386.0	192.7

5. 결론

경년열화 현상의 일종인 열취화현상이 자주 나타나는 화력발전소의 터빈로터용 소재인 1Cr-1Mo-0.25V 강을 가속열화시켜 재료의 열화가 재료특성에 미치는 영향에 대하여 알아보기 위하여 파괴시험과 압입시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 재료의 열화가 진행됨에 따라 재료의 연성은 증가하였으나 인장강도와 항복강도는 감소하였다. 이러한 경향은 열화의 진행에 따라 933시간까지는 그 영향이 크게 나타났으나 그 이후에는 그 영향이 감소되었다.

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

(3) 열화도를 평가하기 위한 새로운 파라미터로 압입시험시 재료가 변형하는데 필요한 에너지인 압입변형에너지(Indentation Deformation Energy : IDE)를 제안하였다. 이 IDE는 열화에 따라 변화되는 기계적특성을 예측할 수 있으리라 사료된다.

참고문헌

- (1) R. Viswanathan, S. Gehl, "A Method for Estimation of the Fracture Toughness of Cr-Mo-V Rotor Steels Based on Composition", *Journal of Engineering Materials and Technology*, (Transactions of the ASME), Vol. 113, pp. 263-270, 1991.
- (2) R. Viswanathan, S. M. Bruemmer, "In-service Degradation of Toughness of Steam Turbine Rotors", *Journal of Engineering Materials and Technology*, (Transactions of the ASME), Vol. 107, pp. 316-324, 1985.
- (3) 권재도, "장기사용 Cr-Mo강 열화재의 파괴인성평가와 수명 예측", *대한기계학회논문집*, 제16권, pp. 1421-1428, 1992.
- (4) Haggag, F. M., and 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.
- (5) Haggag, F. 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.
- (6) 변택상, 김주학, 지세환, 홍준화, "준비파괴적 기계적특성 평가를 위한 자동화압입시험법 응용", 제 6 회 경년열화 및 수명평가 심포지엄 논문집 pp. 167-171, 1996.
- (7) Haggag, F. M., Byun, T. S., Hong, J. H., Miraglia, P. Q., and Murty, K. L., "Indentation- Energy-To-Fracture(IEF) Parameter for Characterization of DBTT in Carbon Steels Using Nondestructive Automated Ball Indentation (ABI) Technique", *Scripta Materialia*, Vol. 38, No. 4, pp. 645-651, 1998.
- (8) 권재도, 박중철, 이우호, 박윤원, "원전기기용 CF8M의 430°C 열화 특성에 관한 연구", *원전기기 워크샵*, pp. 129-142, 1998.
- (9) 서창민, 윤기봉, 윤석호, 김승태, "열화시킨 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, 1992.
- (10) "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials", ASTM E399-90, *Manual book of ASTM Standards*, pp. 412-442, 1995.