

비파괴적인 재료물성치 평가에 관한 연구

김형익*, 석창성#, 김정표**

A Study on the Nondestructive Evaluation of Material Properties

Hyung Ick Kim*, Chang Sung Seok# and Jeong Pyo Kim**

ABSTRACT

The nondestructive evaluation system consisted of a ball indentation tester and a ultrasonic tester was developed to evaluate material properties. The relations between the parameters from test results using the system and the results of tensile and fracture toughness tests were investigated. The fracture toughness and tensile properties could be determined using the system. Some metallic materials were experimented to predict the fracture toughness and tensile properties and verify the relations between them. The predicted fracture toughness and tensile properties show a good agreement with the results obtained by conventional tests. It is found that the material properties and the material degradation can be evaluated using the nondestructive evaluation system.

Key Words : Ultrasonic Parameter(초음파 파라미터), Fracture Toughness(파괴인성치), Yield Strength(항복강도), Nondestructive Evaluation System(비파괴 평가 시스템)

1. 서론

고도 성장기에 건설되기 시작한 대형에너지 변환설비들의 사용 년 수가 증가함에 따라, 이들 설비의 안전성 확보를 위한 안전진단과 수명 예측 기술이 요구되고 있다. 특히, 화력발전 및 원자력발전 설비 등과 같이 가혹한 환경에서 운전되는 설비에서는 고온에서 장기간 사용되기 때문에 재료의 강도가 저하되어 건설당시보다 기계적 성질이 나빠지게 되는 경년열화 현상이 나타나게 되어 설비의 수명이 단축된다.

설비의 수명 예측은 측정한 재료물성치로부터 열화도를 평가함으로써 가능하다. 이러한 산업 설비의 재료 물성치를 평가하는 방법에는 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법이 있을 수 있다. 이중 파괴적인 방법은 인장시험, 충격시험, 피로시험, 파괴인성시험 등과 같이 시편을 이용하여 재료의 물성치를 평가하는 방법으로 비교적 정확하게 재료물성치를 측정하는 것이 가능하다. 그러나 가동중인 설비에 대하여는 산업현장에서 운전 중인 설비의 가동을 중단한 후 시험편을 채취하여야 하므로 경제적, 기술적인 어려움이 있다.¹⁻³

이러한 어려움을 극복하기 위하여 많은 연구자

접수일: 2004년 5월 31일; 게재승인일: 2005년 1월 21일
* 성균관대학교 기계설계학과 대학원
교신저자: 성균관대학교 기계공학과
E-mail seok@skku.edu Tel. (031) 290-7446
** (주) 삼성전기

에 의해 비파괴적인 방법인 압입(ball indentation)법, 초음파(ultrasonic)법, 전기비저항(electric resistivity)법, 레프리카(replica)법, 입계부식(grain boundary etch)법 등을 적용하여 열화를 예측하는 방법이 연구되고 있다.

그러나 이상의 연구결과들은 열화에 따른 비파괴 평가 파라미터 사이의 경험적 상관관계를 밝히고 있을 뿐, 상호유기적인 분석이 부족한 편이다. 특히 설비의 열화에 따른 파괴인성치와 비파괴적인 방법에 의해 얻은 파라미터와의 정량적인 상관관계에 대한 연구가 미미하며, 열화에 따른 파괴인성치 예측과 열화 정도를 평가할 수 있는 모델을 제시하지는 못하였다.⁴⁻⁶

따라서 본 연구에서는 이러한 점에 착안하여 압입법과 초음파법을 상호보완한 비파괴적인 재료물성치 평가 장비를 이용하여 열화단계에 따른 설비의 재료물성치를 측정하여 재료열화도를 평가하고자 한다. 또한 초음파 파라미터와 파괴인성치의 상관관계로부터 재료 열화에 따른 파괴인성치를 예측하고자 한다.

2. 비파괴 평가

2.1 비파괴 평가 장비

본 연구에서는 압입법과 초음파법을 이용하여 재료물성치를 측정하고, 이를 상호보완하여 재료의 열화정도를 평가하고 파괴인성치를 예측하였다. 시험장비는 비파괴적으로 재료물성치를 측정하는 압입시험기와 초음파시험기로 구성된 하드웨어, 그리

고 이를 구동하여 재료물성치를 계산 및 평가하는 프로그램으로 구성되어 있다.

이러한 장비를 이용하면 열화에 따른 재료 강도와 브리넬경도 등의 재료물성치의 변화를 측정하며, 초음파 파라미터인 감쇠계수 및 비선형 파라미터를 측정할 수 있다. 또한 압입법과 초음파법을 이용하여 얻은 항복강도와 초음파 파라미터로부터 파괴인성치를 예측할 수 있으며, 이 두 시험결과로부터 재료의 열화도를 종합적으로 평가할 수 있다. 특히 인장시험결과가 미확보된 경우에도 파괴인성치를 예측할 수 있다. Fig. 1은 본 연구에서 개발한 시험장비를 이용하여 시험을 수행한 결과를 화면에 나타낸 그림이다.

2.2 항복강도

압입자를 이용하여 재료표면에 하중을 가하면 표면에 탄소성 변형이 발생되며 이 탄소성 변형영역의 크기와 변형량은 압입하중의 크기에 비례한다. 이를 이용하여 재료의 항복강도(σ_{ys})를 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.^{7,8}

$$\sigma_{ys} = \beta_m A \quad (1)$$

여기서, β_m 은 재료의 항복강도와 A의 비례관계로부터 결정되는 재료상수값이다. 여러 재료에 대한 β_m 은 여러 연구자들에 의하여 구체적으로 구해졌으며, 탄소강의 경우 0.225인 값을 가진다. A는 압입시험으로부터 얻어지는 상수값이다.

2.3 초음파파라미터

재료의 열화에 따라 발생하는 배진동 발생효율을 나타내는 비선형파라미터(β)와 감쇠계수(α)를 관찰하였다.

감쇠계수는 탄성파가 고체매질에서 전파되어 갈 때 전파거리가 증가함에 따라 에너지가 감소되는 정도를 나타내며 다음 식(2)와 같다.⁹

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{P_0}{P}\right) \quad (2)$$

여기서 d 는 시편의 두께이며, P_0, P 는 각각 초기 탄성파의 진폭과 시편을 통과한 후의 탄성파

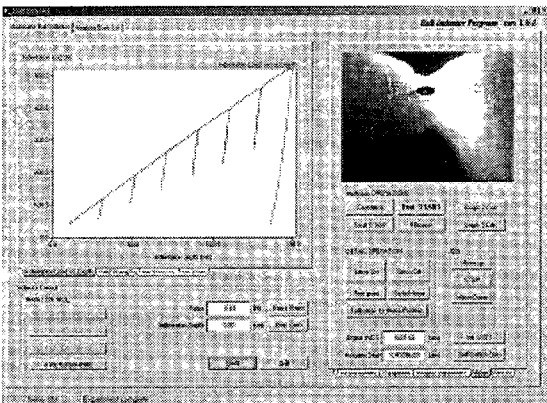


Fig. 1 Captured picture of experimental results of the nondestructive evaluation system

의 진폭이다.

또한 열화에 따라 나타나는 배진동 발생을 나타내는 비선형 파라미터는 다음 식 (3)과 같다.¹⁰

$$\beta = \frac{8v^2 A_2}{\omega_0^2 z A_1^2} \quad (3)$$

여기서, A_1 , A_2 는 기본파의 진폭과 배진동파의 진폭이며, z , ω_0 , v 는 각각 시편의 두께, 기본파의 각진동수(angular frequency), 위상속도이다.

2.4 초음파파라미터와 파괴인성치의 상관관계

파괴인성치와 초음파 파라미터의 상관관계를 설명하기 위해 Vary⁴에 의해 제안된 모델을 적용하였다. 본 모델은 외부응력이 재료에 작용할 때 파괴가 주로 공동의 합체에 의해 일어나는 재료에 적용되며, 외력에 의해 불안정 균열이 성장할 때 균열 선단에서 발생된 응력파가 미소균열의 생성을 진행시킨다는 가정에 의한 것이다. 즉, 응력파는 균열 선단 부근의 응력장을 변화시켜 균열을 생성시킨다. 이때 응력파의 크기는 감쇠계수에 의해 결정되므로 응력파의 감쇠계수는 파괴인성치와 밀접한 관계가 있다.

이러한 모델은 비선형 현상을 고려하지 않은 선형 초음파의 관점에서 응력과 문제를 해석한 것이다. 그러나 김정표 등^{11,12}의 연구에서와 같이 응력파가 열화된 재료에서 전파될 때 비선형 현상을 수반하므로 비선형 초음파를 도입하여 해석할 경우보다 정확하게 파괴인성치를 예측할 수 있다. 열화재의 비선형 응답을 고려하게 되면 선형적인 기본응력파와 열화에 의해 발생하는 배진동 응력파의 합으로 나타낼 수 있으므로, 초음파 파라미터와 파괴인성치의 관계를 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.¹³

$$\frac{J_{IC}}{\sigma_{ys}} = \psi \frac{(1-\nu^2)}{E} (A_1 + \beta \frac{A_1^2 k^2 l'}{8}) e^{-al'} (v\gamma/m)^{0.5} \quad (4)$$

여기서 J_{IC} , E 는 파괴인성치와 탄성계수이며, v , k , γ 는 음파의 속도, 파수, 감쇠계수의 기울기

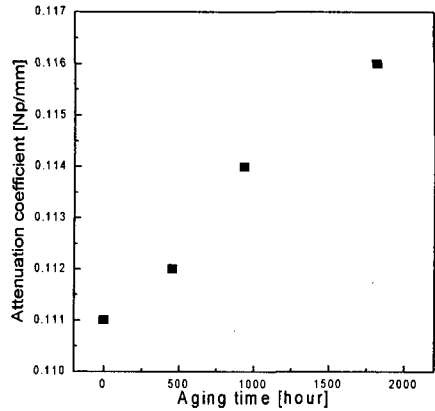


Fig. 2 Attenuation coefficient vs. aging time at center frequency for 4 different aging specimens

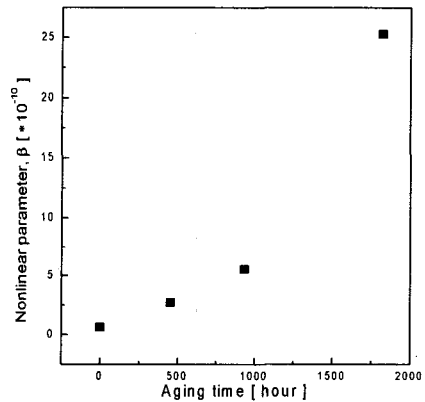


Fig. 3 Nonlinear parameter for different aging specimens

이며, m 은 감쇠계수측정에 따라 얻어진 지수승을 나타내는 상수이다.

3. 시험결과

3.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 화력발전소 터빈로터 용 소재로 많이 쓰이는 1Cr-1Mo-0.25V강이다. 온도 630°C에서 등온열화열처리(isothermal aging heat treatment)방법을 실시하여 3종류의 열화재와 열화되지 않은 시편을 준비하였다.¹⁴⁻¹⁶

3.2 감쇠계수와 비선형 파라미터

Fig. 2는 중심 주파수에서 열화시간의 변화에 따른 감쇠계수의 변화를 나타낸 것으로 열화진행에 따라 감쇠계수가 증가함을 알 수 있다. 감쇠계수의 측정 편차는 ± 0.001 Np/mm였다. 실험결과에서 보여지듯이 유효 주파수 밴드에서 주파수와 열화시간이 증가할수록 감쇠계수가 증가하고 있다.

Fig. 3은 열화진행에 따른 배진동 발생효율을 측정하여 도시한 그림이다. 그림에서와 같이 열화가 진행될수록 배진동의 진폭이 커졌으며, 건전재와 비교하여 1,820시간 열화된 시편에서 배진동의 진폭이 현저히 증가됨을 확인하였다.

3.3 항복강도와 초음파 특성

Fig. 4와 Fig. 5는 본 연구에서 개발한 비파괴 시험장비를 이용하여 열화에 따라 측정된 항복강도와 초음파 파라미터의 관계를 도시한 것이다. Fig. 4에서와 같이 열화에 따라 감쇠계수는 증가하며 이에 따라 항복강도가 감소되고 있다. 특히, 항복강도는 열화초기에 급격히 저하된 후 그 감소폭이 둔화되고 있으며, 열화가 진행될수록 특정 값에 수렴하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 경향은 항복강도와 비선형 파라미터와의 상관 관계를 나타낸 Fig. 5에서도 관찰되고 있다.

3.4 경도와 초음파 특성

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 열화 진행에 따른 초음파 파라미터와 비커스 경도값과의 관계를 나타낸 그림이다. 그림에서 초음파 파라미터의 증가에 따라 경도가 감소되는 경향을 보여주고 있다.

3.5 파괴인성치

파괴적인 인장시험을 수행하지 않고 압입법으로 파괴인성치를 구하기 위해서는 압입구속요소별도의 인장데이터가 필요하다. 이에 본 연구에서는 본 연구의 비파괴적인 재료물성치 평가 장비를 이용하여 파괴인성치를 예측하고자 한다. 이를 이용하여 압입법으로 항복강도를 구하고, 초음파법으로 구한 초음파 파라미터와 파괴인성치와의 상관관계식으로부터 파괴인성치를 구할 수 있다. 이때 초음파 파라미터와 파괴인성치와의 관계를 도시하면 Fig. 8과 같으며, 이로부터 회귀분석을 수행하여 다음과 같은 상관관계식 (5)를 구할 수 있다.

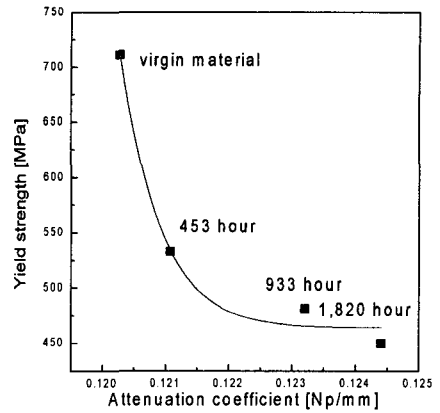


Fig. 4 Attenuation vs. yield strength for each aging specimens

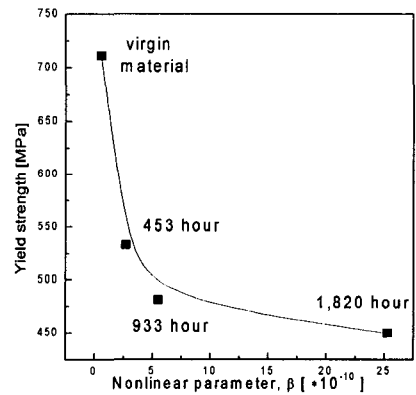


Fig. 5 Nonlinear parameter vs. yield strength for each aging specimens

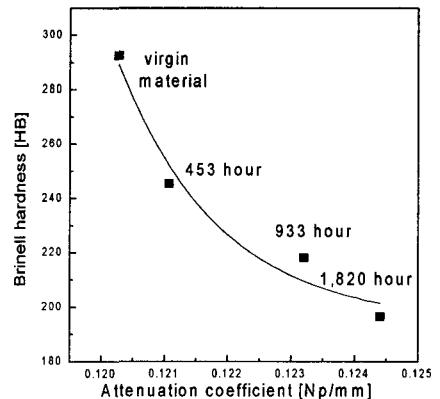


Fig. 6 Brinell hardness vs. attenuation coefficient for each aging specimens

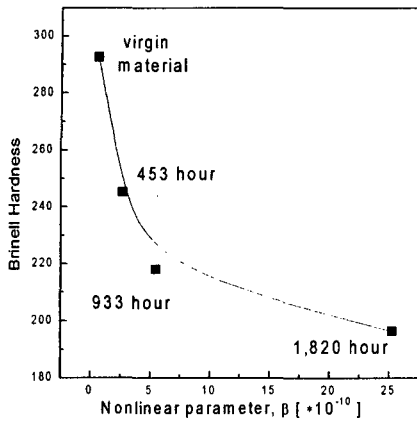


Fig. 7 Brinell hardness vs. nonlinear parameter for each aging specimens

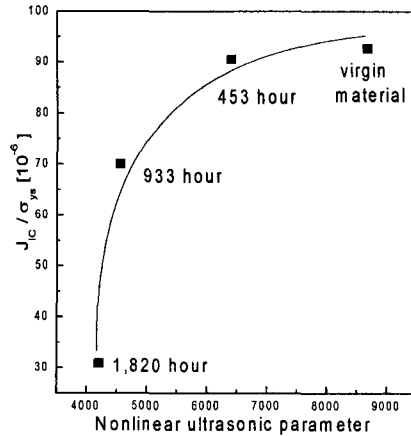


Fig. 8 Prediction of a fracture toughness for aging specimens using the nondestructive system

$$\frac{J_{IC}}{\sigma_{ys}} = -130.8 + 0.059 \left[A_1 + \beta \frac{A_1^2 k^2 l'}{8} e^{-\alpha l} (v\gamma/m)^{0.5} \right] - 3.817 \times 10^{-6} \times \left[A_1 + \beta \frac{A_1^2 k^2 l'}{8} e^{-\alpha l} (v\gamma/m)^{0.5} \right]^2 \quad (5)$$

여기서 항복강도와 초음파 파라미터는 압입법과 초음파법을 이용하여 측정할 수 있으므로 식 (5)를 이용하면, 파괴인성치를 예측할 수 있다.

4. 파괴인성치 예측

본 연구에서 개발한 방법의 유용성을 확인하기 위하여 기존 933시간 열화재와 더불어 CF8M과 SA508을 대상으로 파괴인성치를 예측하였다. Fig. 9는 초음파를 이용하여 CF8M과 SA508의 감쇠계수

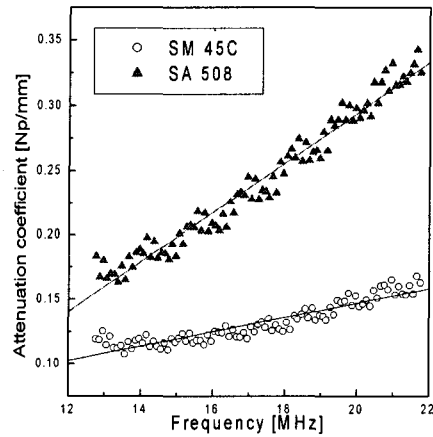


Fig. 9 Attenuation coefficient for CF8M and SA 508 steel

Table 1 Prediction of a fracture toughness using the nondestructive evaluation system

Specimen	BI test	Ultrasonic parameters				Fracture toughness J_{IC} , (J/m^2)		Error (%)
	Yield strength σ_{ys} (MPa)	Att. coefficient (α)	Velocity v (m/s)	Slope of Att. γ ($\times 10^{-9}$)	m	Predict	Experiment	
SM45C	505	0.121	5,599	5.552	1	21,037	22,443	-6.23
SA508	300	0.232	5,862	0.193	1	51,395	44,167	+16.3
1Cr-1Mo	711	0.111	6,035	5.310	2	65,382	65,921	-1.3

를 측정된 결과이며, Table 1은 각각의 시편에 대하여 비파괴 평가 장비를 이용하여 파괴인성치를 예측한 결과이다.

시험결과에서와 같이 본 연구방법을 적용하여 파괴인성치를 예측한 결과 SA508의 경우 파괴인성치의 오차는 약 16%까지 예측되었으며, Cr-Mo과 CF8M 강은 비교적 유효범위 안에서 파괴인성치를 예측하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서 제안한 방법을 이용할 경우 기존 파괴시험과 달리 비파괴적으로 재료물성치를 측정할 수 있으며, 또한 열화 평가와 파괴인성치 예측에 적용할 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 압입법과 초음파법을 상호보완한 비파괴적인 재료물성치 평가 방법을 제안하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 압입법과 초음파법을 이용하여 열화 단계별로 재료물성치를 측정하였으며, 이를 상호보완하여 열화도를 평가할 수 있었다.
- (2) 압입법과 초음파법을 이용하여 비파괴적으로 파괴인성치를 예측할 수 있는 관계식을 제안하였다.
- (3) 본 연구에서 제안한 방법의 유용성을 확인하기 위하여 다른 재료에 대하여 파괴인성치를 예측한 결과, 유효범위 안에서 잘 일치하였다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 연구센터의 연구비 지원과 두뇌한국21 사업에 의하여 지원으로 이루어진 것으로서 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. Seok, C. S., Kim, J. P., Ahn, H. N., "A Study on the Evaluation of Material Degradation of 1Cr-1Mo-0.25V Steel using Ball Indentation Method," Journal of KSPE, Vol. 18, No. 4, pp. 151-159, 2001.
2. Kim, H. I., Seok, C. S., Kim, S. P., "Evaluation of the Ductile-Brittle Transition Behavior of Fracture Toughness by Material Degradation," Journal of KSPE, Vol. 20, No. 5, pp. 140-147, 2003.
3. Suh, C. M., Huh, J. H., Namh, S. H., "Rotated Bending Fatigue Strength in Aged 1Cr-1Mo-0.25V Steel at Elevated Temperature," Journal of KSME A, Vol. 20, No. 9, pp. 2819-2832, 1996.
4. Vary, A., "Correlations among Ultrasonic Propagation Factors and Fracture Toughness Properties of Metallic Materials," Materials Evaluation, Vol. 36, pp. 55-64, 1978.
5. Kolsky, H. and Rader, D., Fracture, Liebowitz, H., Ed., Vol. 1, Academic Press, New York, pp. 533-569, 1971.
6. Kinmann, R. and Stephenson, E. T., "Ultrasonic prediction of grain size and mechanical properties in plain carbon steel," Materials Evaluation, Vol. 39, pp. 1116-1120, 1981.
7. 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.
8. 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, 1983.
9. Pollard, H. F., Sound Waves in Solids, Pion, London, pp. 23-77, 1977.
10. Morris, W. L., Buck, O. and Inman, R. V., "Acoustic Harmonic Generation due to Fatigue damage in High-strength Aluminum," Journal of Applied Physics, 50(11), pp. 6737-6741, 1979.
11. Kim, J. P., Seok, C. S., "A Study on the Evaluation of Material Degradation of 1Cr-1Mo-0.25V Steel using Ultrasonic Techniques," Journal of KSME A, Vol. 25, No. 12, pp. 2116-2124, 2001.
12. Kim, K. C., Jhang, K. Y., Hisashi, Yamawaki, "The Evaluation of Partially Degraded Material Using Nonlinear Propagation Characteristics of Ultrasonic Wave," Journal of KSME A, Vol. 25, No. 2, pp. 2116-2124, 2001.

13. Kim, J. P., Seok, C. S., "A Study on the Correlations between Ultrasonic Parameters and Fracture Toughness," Proceedings of the KSME 2002 Spring Annual Meeting, pp. 269-274., 2002.
14. Kwon, J. D., Woo, S. H., Park, J. C., Lee, Y. S., Park, Y. W., "A study on the 4300C Degradation Behavior of Cast Stainless Steel(CF8M) (II)-Evaluation of Low Cycle Fatigue Characteristics," Journal of KSME A, Vol. 24, No. 9, pp. 2183-2190, 2000.
15. Yoon, K. B., Yoon, S. H., Kim, S. T., Namh, S. H., Suh, C. M., "Evaluation of JIC and Tmat of Aged 1Cr-1Mo-0.25V Steel at Elevated Temperature," Journal of KSME A, Vol. 18, No. 11, pp. 2860-2870, 1994.
16. Abdel-Latif, A. M., Corbett, S. M. and Taplin, D. M. R., "Analysis of Carbides Formed During Accelerated Aging of 2.25Cr-1Mo Steel," Metal Science, Vol. 16, pp. 90-96, 1982.