〈 논문 〉

초음파 파라미터와 파괴인성치의 상관관계에 관한 연구

김정표* · 박재실** · 배봉국*** · 석창성†

(2004년 7월 1일 접수, 2004년 11월 8일 심사완료)

A Study on the Correlations Between Ultrasonic Parameters and Fracture Toughness

Jeong-Pyo Kim, Jae-Sil Park, Bong-Kook Bae and Chang-Sung Seok

Key Words: Ultrasonic Parameter(초음파파라미터), Fracture Toughness(파괴인성치), Non-linear Parameter(비선형파라미터), Attenuation Coefficient(감쇠계수)

Abstract

In this study the four classes of the thermally aged 1Cr-1Mo-0.25V specimens were prepared using an artificially accelerated aging method. Ultrasonic tests were performed to get the correlation with fracture toughness. The modified theoretical Vary's equation, considering nonlinear response due to material degradation, was proposed for the correlations between ultrasonic parameters and fracture toughness. Experimental results indicate that ultrasonic attenuation coefficient, velocity and nonlinear parameters produce the correlations with fracture toughness and yield strength.

1. 서 론

초음파법은 재료에 손상을 주지 않고 재료물성치의 변화를 예측할 수 있는 대표적인 비파괴적인 방법이다. 이러한 초음파법은 파괴적인 방법을 보완할 수 있으며, 사용 중인 설비에 적용하여 재료물성치의 변화를 상시 감시할 수 있는 장점이 있다.

Vary 등은 초음파 파라미터인 감쇠계수와 속도를 측정하여, 이를 재료물성치 및 파괴인성치와의 실험적 상관관계를 얻는데 사용하였다.[1,2] 최근에 와서는 고온, 고압의 가혹한 환경에서 장기간 사용되는 부재에서 나타나는 크리프 손상과 경년 열화를 평가하기 위해 초음파법이 도입되고 있다. 이 중 열화진행에 따른 재료의 기계적 성질의 변화를 비파괴적으로 평가하기 위해 감쇠계수, 속도 등을 이용하는 연구가 진행되고 있다.[3~5] 또한 최근에 비선형음향학의 관점에서 재료열화가 진행됨에 따라 기본파의 배진동이 발생되는 배진동발생효율을 측정하여 얻은 비선형 파라미터를 이용하여 재료열화를 평가하고 있다.[6] 그러나 정 등[7]의 연구와 같이 열화에 따라 발생된 비선형파라미터와 재료 열화에 따라 변화되는 재료물성치 및 파괴인성치와의 상관관계를 종합적으로 분석한 연구는 부족한 편이다.[8,9]

본 연구에서는 발전설비의 터빈 로터에 사용되는 1Cr-1Mo-0.25V강을 등온 가속 열화시켜 각 열화단계에 따른 재료의 파괴인성특성과 초음파 파라미터의 상관관계를 고찰하였다. 특히 재료열화에 의한 비선형 응답을 고려하여 파괴인성치와 초음파 파라미터의 상관관계식을 제시하였다. 이들 결과를 이용하여 초음파 파라미터로부터 파괴인성치를 측정하여 재료 열화를 평가할 수 있도록 하였다.

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부
E-mail : seok@skku.edu
TEL : (031)290-7446 FAX : (031)290-7482
* 회원, 삼성전기 DM사업부
** 회원, 성균관대학교 산업설비안전성평가연구센터
*** 회원, 성균관대학교 기계공학부

2. 이론적 고찰

파괴인성치와 초음파 파라미터의 상관관계를 설명하기 위해 Vary에 의해 제안된 모델을 적용하였다. 본 모델은 불안정 균열 성장시 균열 선단에서 외력에 의해 발생된 응력파가 미소균열의 생성을 진행시킨다는 가정에 의한 것이다.

응력파는 균열 선단 부근의 응력장을 변화시켜 균열을 생성시킨다. 불안정균열 성장시 응력파는 매질을 통해 전파되어 가면서 세기가 감쇠되며, 이러한 응력파의 감쇠특성을 나타내는 감쇠계수는 균열성장에 영향을 주므로 파괴인성치를 결정하는 인자가 된다.[1,10]

파괴인성치인 임계응력확대계수(critical stress intensity factor) K_c는 다음 식 (1)과 같이 나타내어진다.[1,10]

$$K_c^2 = E G_e \tag{1}$$

상기 식에서 E, G_e는 각각 탄성계수와 변형에너지해방률을 나타낸다. 여기서 변형에너지 해방률은 임계 균열개구변위(critical crack opening displacement : δ_c)로 다음 식 (2)와 같이 나타내어질 수 있다.[1,10]

$$G_e = n \delta_c \sigma_{ys} \tag{2}$$

여기서 n은 상수(numerical coefficient)이고 σ_{ys}는 항복강도이다.

Fig. 1에서와 같이 평균 결정립의 직경이 δ인 두 개의 결정립 S와 R이 있으며, 이 두 결정립 사이의 거리는 l이다. 외력에 의해 결정립 S가 파단되면 이때 발생된 응력파가 결정립 R에 도달하게 된다. 결정립 R에 도착된 응력파 σ_w는 결정립주위에 존재하는 응력장을 변화시키며 이때 응력파는 다음 식 (3)과 같이 감쇠계수 α에 의해서 결정된다.

$$\sigma_w = \sigma_0 e^{-\alpha l} \tag{3}$$

여기서 σ_0는 초기 응력파의 진폭이다. 또한 감쇠계수 α는 주파수의 함수로써 식 (4)와 같이 나타내어진다.

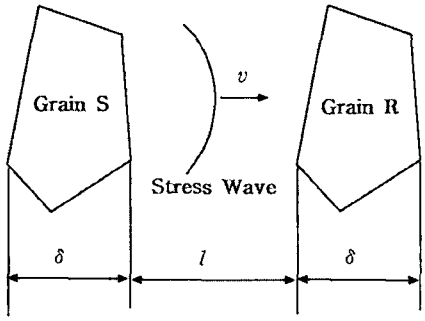

Fig. 1 Diagram of fracture model(Grain S and R are imbedded in a matrix subjected to a local static stress field).

$$\alpha = c f^m \tag{4}$$

여기서 c와 m은 상수이다.

그러나 Kim[6,9] 등의 연구에서와 같이 응력파가 열화된 재료에서 전파될 때 비선형 현상을 수반하고 있으므로 비선형초음파의 관점에서 이러한 현상을 해석하여야 한다. 비선형초음파의 관점에서 열화재의 비선형 응답을 고려하게 되면 초기 응력파의 진폭 σ_0는 선형적인 기본 응력파와 열화에 의해 발생되는 배진동 응력파의 합으로 나타낼 수 있으므로 식 (3)은 다음과 같이 변환되어진다.

$$\sigma_w = (\sigma_1 + \sigma_2) e^{-\alpha l} \tag{5}$$

여기서 σ_1과 σ_2는 각각 기본 응력파와 배진동 응력파의 진폭을 나타낸다. 이때 결정립 R에서 직경 δ인 미소균열을 생성하는데 필요한 응력파 에너지 ζ는 다음 식 (6)과 같다.[2]

$$\begin{aligned} \zeta &= \pi \delta \sigma_w^2 / E \\ &= \pi \delta (\sigma_1 + \sigma_2)^2 e^{-2\alpha l} / E \end{aligned} \tag{6}$$

결정립 S가 파단되면서 발생된 응력파는 계에 상응되는 주파수 밴드폭을 가지므로 결정립 R에 도착된 응력파의 에너지는 파장 λ에 따른 에너

지분포를 나타내고 있다. Vary 등[1]의 연구에 의하면 재료의 파괴인성치는 주파수 변화에 따른 감쇠계수의 변화율 $\gamma(=d\alpha/df)$와 상관관계가 있는 것으로 알려져 있다. γ와 $df/d\lambda(=-v/\lambda^2)$의 상관관계를 이용하여 식 (6)을 λ에 대해 미분하면 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned}\frac{d\zeta}{d\lambda} &= \frac{d}{d\lambda}(\pi\delta\sigma_w^2/E)\\ &= 2\pi(\sigma_1+\sigma_2)^2 e^{-2\alpha l}\delta v\gamma l/E\lambda^2\end{aligned} \tag{7}$$

여기서 v는 입자의 속도이다. 이때 Rayleigh 구역에서 결정립 R과 상호작용 후 산란되는 에너지 손실은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\zeta_\delta &= 2\pi\delta(\sigma_1+\sigma_2)^2 e^{-2\alpha l} l v/E\int_\delta^\infty(\gamma/\lambda^2)d\lambda\\ &= \{2\pi(\sigma_1+\sigma_2)^2 e^{-2\alpha l} l/E\}(v\gamma\delta/m)\end{aligned} \tag{8}$$

여기서 δ는 미소균열의 직경, l은 두 결정립 사이의 거리, m은 상수이다. 불안정균열성장 시점에서 결정립 S, R주위에는 변형에너지(strain energy) K_c^2/σ_{ys} 가 발생되며, 이 변형에너지가 결정립 부근에서 하중 방향으로 임계 균열 개구변위 δ_c를 생성시킨다. 이와 더불어 음향방출 즉 응력파를 발생시키며, 이 응력파 에너지의 일부분은 내부에 흡수되고 나머지는 Rayleigh 구역에서 산란된다. 여기서 응력파의 에너지 손실 ξ_{δ_c}는 인가된 변형에너지와 다음과 같은 관계가 있다.

$$N\xi_{\delta_c} = K_c^2/\sigma_{ys} \tag{9}$$

여기서 N은 상수이다. 식 (1)과 (2)의 관계식으로부터 E는 다음 식과 같다.

$$E = K_c^2/n\delta_c\sigma_{ys} \tag{10}$$

여기서 n은 수치계수이다. 상기 식 (10)을 식 (8)에 대입하여 E를 소거하면 다음 식과 같다.

$$\xi_{\delta_c} = \{2\pi(\sigma_1+\sigma_2)^2 e^{-2\alpha l} ln\delta_c\sigma_{ys}/K_c^2\}(v\gamma\delta_c/m) \tag{11}$$

이때 식 (11)을 식 (9)에 대입하여 K_c^2/σ_{ys}의 함수로 정리하면 다음 식 (12)와 같이 된다.

$$\begin{aligned}K_c^2/\sigma_{ys} &= \sqrt{2N\pi n\delta_c l}(\sigma_1+\sigma_2)e^{-\alpha l}(v\gamma/m)^{0.5}\\ &= \phi(\sigma_1-\sigma_2)e^{-\alpha l}(v\gamma/m)^{0.5}\end{aligned} \tag{12}$$

여기서 ϕ는 $\sqrt{2N\pi n\delta_c l}$이다. 이때 열화에 따른 비선형응답을 수반하는 응력파의 경우에는 비선형 파라미터 β로 나타내어 질 수 있으므로[10] 식 (12)는 다음과 같이 된다.

$$K_c^2/\sigma_{ys} = \phi(A_1+\beta\frac{A_1^2k^2l}{8})e^{-\alpha l}(v\gamma/m)^{0.5} \tag{13}$$

여기서 A_1은 기본응력파의 진폭, β는 비선형 파라미터이다. 윗 식으로부터 파괴인성치와 초음파 파라미터는 균열 진전 시 상관관계가 있음을 알 수 있다. 파괴 모드 I인 상태에서 파괴인성치 K_C는 K_{IC}가 된다. 균열 선단 부근에서 균열이 진전될 때 탄소성 파괴 거동을 하는 경우에는 J_{IC}를 도입하여 설명할 수 있다. 만일, 탄성거동이라면, 이때 J_{IC}는 K_{IC}와 다음과 같은 관계가 있다.

$$J_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{E}(1-\nu^2) \tag{14}$$

여기서 ν는 푸아송비이며, 식 (14)를 식 (13)에 대입하여 정리하면 다음식과 같다.

$$\frac{J_{IC}}{\sigma_{ys}} = \phi\frac{(1-\nu^2)}{E}(A_1+\beta\frac{A_1^2k^2l}{8})e^{-\alpha l}(v\gamma/m)^{0.5} \tag{15}$$

Table 1 Chemical composition for 1Cr-1Mo-0.25V steel (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

Table 2 Fracture test and attenuation coefficients for different aging specimens

Aging time [hour]	0	453	933	1,820
Fracture toughness [MPa $m^{1/2}$]	122	104	87	56
Yield strength [MPa]	844	676	615	582

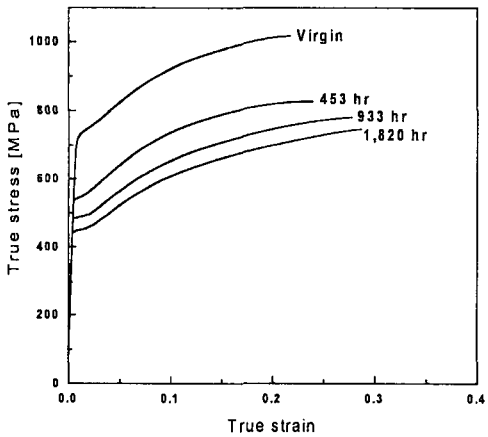

Fig. 2 True stress-true strain curve for different aging specimens

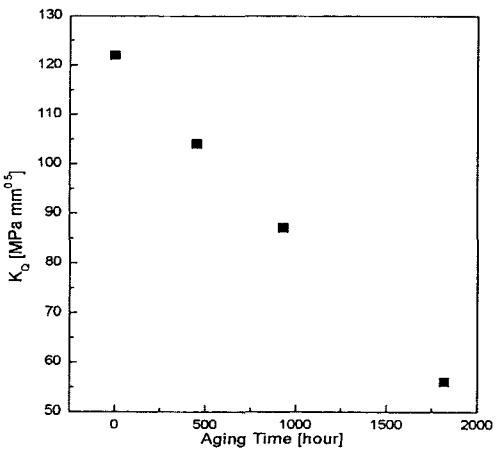

Fig. 3 Fracture toughness vs. aging time for different specimens

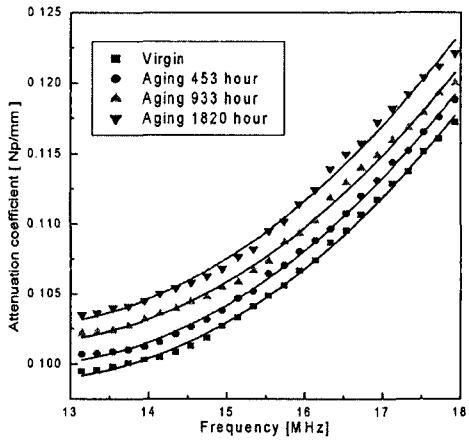

Fig. 4 Attenuation vs. frequency for different aging specimens

3. 실 험

본 연구에 사용된 재료는 화력발전소 터빈로터용 소재로 많이 쓰이는 1Cr-1Mo-0.25V강으로서 화학성분조성비는 Table 1과 같다. 가속 열화된 열화재를 얻기 위하여 사용 온도보다 높은 630℃에서 등온 열화 열처리(isothermal aging heat treatment)방법을 사용하였다. 이를 통해 3종류의 열화재와 열화되지 않은 시편을 준비하였다.[11]

ASTM E399-90의 K_{IC} 시험방법과 ASTM E8-95a(KS B 0801)에 따라 파괴인성 시험과 인장시험을 수행하였으며 시험 결과를 열화 단계에 따라 파괴인성치와 항복강도로 정리하여 Table 2에 나타내었다. Fig. 2와 Fig. 3은 각각 인장시험과 파괴인성시험 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 열화가 진행됨에 따라 파괴인성치와 항복강도 및 인장 강도가 감소함을 알 수 있다.

본 연구에서는 감쇠계수를 얻기 위하여 수침법을 이용하였으며 재료의 열화 진행에 따른 감쇠계수를 측정하였다.[9]

감쇠계수를 측정하기 위해 시편의 표면에서 처음 반사된 음파 시편에 입사하여 시편과 상호 작용한 뒤 수신된 두 번째 음파를 수신하였으며 이 두 신호를 분석하여 감쇠계수를 얻었다. 계산에 사용된 위상 스펙트럼은 시간 영역에서 신호를 포착하여 FFT를 수행하여 얻었다. 이때 위상은

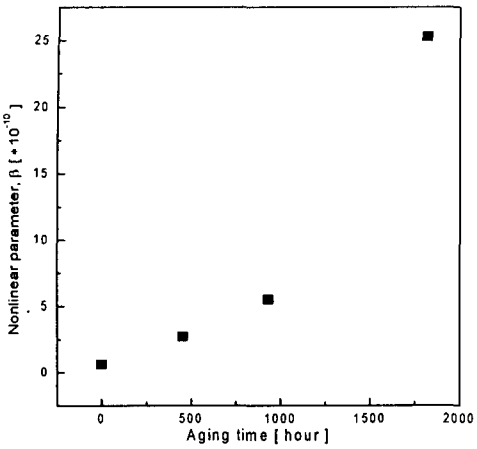

Fig. 5 Nonlinear parameter for different aging specimens

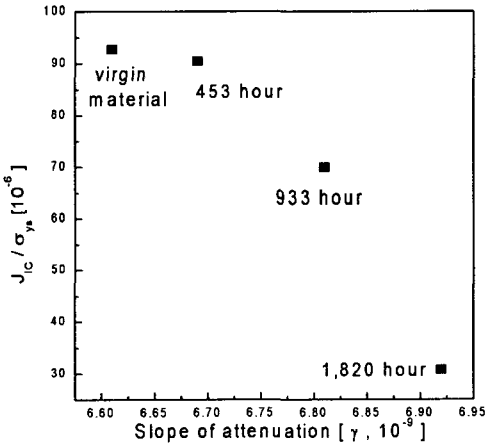

Fig. 6 Fracture toughness term vs. attenuation coefficient parameter for different aging specimens

$-\pi \sim \pi$ 사이의 값만을 갖고 있으므로 위상을 보정하였다. Fig. 4는 재료의 열화 시간에 따른 주파수별 감쇠계수를 측정하여 나타낸 그림이다. 이때 감쇠계수의 편차는 ±0.001 Np/mm였으며, 샘플링속도는 100 MS/s 로 하였다.

재료의 열화에 따라 발생되는 배진동의 진폭을 관측하기 위하여, 재료에 저주파 센서로 연속파를 발생시켰으며, 수신센서를 이용하여 배진동을 관찰하였다. 먼저 센서와 시험장치에 의한 비선형성을 피하기 위해 건전재에서 증폭비를 변화시키면서 신호를 관찰하여 배진동이 발생되지 않는 적정한 증폭비(40 dB)를 설정하였다. 이를 기준으로 열화시편에 따른 배진동의 발생효율을 관찰하였다. 주파수 스펙트럼에서 오실로스코프의 FFT 기능을 이용 30개 신호를 평균하여 주파수를 분석하였다.

Table 3 Ultrasonic parameters for different aging specimens at fundamental frequency

Aging time (hour)	0	453	933	1,820
α, Attenuation coefficient	0.1203	0.1211	0.1232	0.1244
β, Nonlinear parameter($\times 10^{-10}$)	0.632	2.71	5.50	25.3
γ, Attenuation parameter($\times 10^{-9}$)	6.61	6.69	6.81	6.92

재료 열화에 따른 비선형 파라미터는 식 (16)을 사용하여 구하였으며,[9] 이를 Fig. 5에 나타내었다.

$$\beta = \frac{8v^2 A_2}{w_0^2 z A_1^2} \tag{16}$$

여기서 A_1, A_2는 기본파의 진폭과 배진동파의 진폭이며 z는 시편의 두께, w_0는 기본파의 각 진동수, v는 위상 속도이다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 재료 열화가 진행될수록 비선형 파라미터가 증가되고 있다. 열화에 따른 감쇠계수와 비선형 파라미터를 Table 3에 나타내었다.

4. 초음파 파라미터와 파괴인성치

4.1 감쇠 파라미터

Fig. 4에서 구한 주파수 변화에 따른 감쇠계수의 관계로부터 감쇠기울기(감쇠 파라미터)를 구하여 열화재를 평가하였다. 이때 감쇠기울기 γ는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\gamma = d\alpha / df \tag{17}$$

주파수 변화에 따른 감쇠계수의 변화량을 나타내는 감쇠기울기를 기본 주파수에서 구하여 Table 3에 나타내었다. 중심주파수에서 감쇠기울

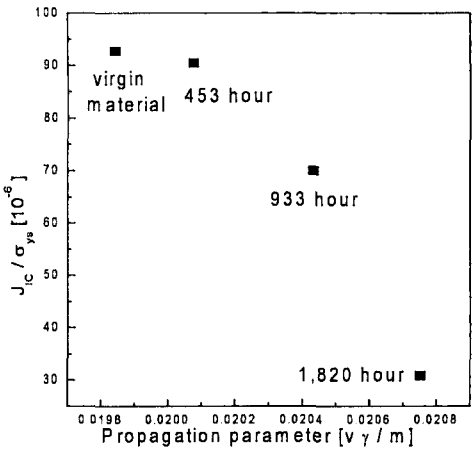

Fig. 7 Fracture toughness term vs. propagation parameter for different aging specimens

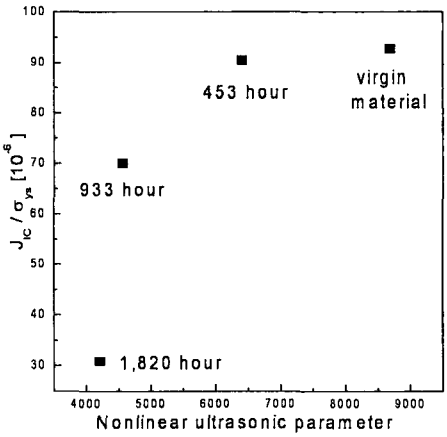

Fig. 8 Fracture toughness term vs. nonlinear ultrasonic parameter for different aging specimens

기는 열화가 진행될수록 증가되는 형태를 보여주고 있다. Fig. 6은 열화단계에 따른 감쇠기울기와 파괴인성치의 상관관계를 보여주고 있다. 열화 진행에 따라 감쇠기울기는 증가되고 있으며 이에 따라 파괴인성치는 감소되고 있다.

4.2 전파 파라미터

응력파의 전파 특성을 나타내는 속도와 감쇠계수의 함수인 전파 파라미터 $(v\gamma/m)$를 이용하여 Fig. 7에서와 같이 열화진행에 따른 전파 파라미터와 파괴인성치 항과의 관계를 살펴보았다. 열화가 진행됨에 따라 전파 파라미터는 감쇠기울기의 변화와 유사하게 증가하고 파괴인성치는 감소되고 있음을 알 수 있다.

4.3 비선형 초음파 파라미터(β')

식 (15)에서 선형(α, γ) 및 비선형(β) 파라미터를 포함한 항 $(A_1+\beta A_1^2 k^2 l/8)e^{-\alpha l}(v\gamma/m)^{0.5}$ 를 비선형 초음파 파라미터(β')라 하여 이를 이용하여 열화에 따른 파괴인성치 항과의 상관관계를 고찰하였다.

Fig. 8은 비선형 초음파 파라미터와 J_{IC}/σ_{ys}의 상관관계를 나타내고 있다. 열화가 진행될수록 비선형 초음파 파라미터와 파괴인성치가 동시에 감소되고 있음을 알 수 있다.

4.4 고 찰

본 연구에서 제안된 초음파 파라미터와 파괴인성치의 상관관계식은 Vary의 모델을 기반으로 균열 진전에 따라 발생되는 응력파의 감쇠계수와 비선형 파라미터로 주어지는 함수이다.

실제로 균열진전 시 초음파 파라미터를 동시에 측정하기 어려우므로, 초음파 파라미터는 파괴시험과 개별적으로 정적상태에서 측정하였다. 이때 동일 열화재에서 초음파의 거동과 균열진전 시의 초음파의 거동이 상호 동일하다는 가정을 하였다.

기존 개념의 비선형 파라미터는 열화에 따른 초음파의 거동만을 설명하였으나, 본 연구에서 제안된 비선형 초음파 파라미터는 열화에 따른 초음파 파라미터와 기계적인 물성치의 상관관계를 정량적으로 제시하였다.

열화가 진행될수록 결정립의 크기가 성장되고 결정립 경계면에 석출물이 증가되었으며, 이에 따라 초음파의 산란효과가 증가되어 초음파 파라미터(감쇠계수, 비선형 파라미터)가 커지는 것으로 측정 되었다.

본 연구에서는 1820시간까지 열화된 시편을 인공 제작하여 시험을 수행하였다. 관련연구[7]에 의하면, 1820시간 이상 가속 열화시 비선형 파라미터의 점진적인 증가가 관찰된 바 있으므로, 본 연구에서도 이와 유사하게 비선형 파라미터가 거동되리라 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 발전설비의 터빈 로터 강에 사용되고 있는 1Cr-1Mo-0.25V 강을 대상으로 등온열처리된 열화재를 준비하여 열화 단계에 따라 재료의 파괴인성 특성과 초음파 파라미터의 상관관계를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기존의 파괴인성치와 초음파 파라미터의 상관관계를 고찰하고 열화에 따른 응력파의 배진동 발생 효율을 나타낼 수 있는 비선형 파라미터를 적용하여 수정된 관계식을 제시하였으며, 이로부터 파괴인성치와의 상관관계를 설명하였다.

(2) 열화가 진행될수록 결정립의 크기가 성장되고 결정립 경계면에 석출물이 증가되었으며, 이에 따라 초음파의 산란효과가 증가되어 초음파 파라미터(감쇠계수, 비선형 파라미터)가 커졌다.

(3) 열화에 따른 파괴인성치와 초음파 파라미터를 도입하여 상관관계를 설명하였으며, 이들 관계를 이용하면 파괴인성치 및 수명예측에 적용될 수 있으리라 사료된다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터 및 두뇌한국 21 사업의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌.

(1) Vary, A., 1978, "Correlations among Ultrasonic Propagation Factors and Fracture Toughness Properties of Metallic Materials," *Material Evaluation*, Vol. 36, pp. 55~64.

(2) Kolsky, H. and Rader, D., 1971, "Facture," Liebowitz. H., Ed., Vol. 1, *Academic Press*, New York, pp. 533~569.

(3) Yamano, M., Ichikawa, M., Okuno, M., Suzuku, N. and Iizuka, Y., 1996, "Nondestructive Measurement of Grain Size in Steel Plate by Ultrasonic Attenuation," *Materials Science Forum* Vols. 210-213, pp. 759~766.

(4) Kline, Ronald A., 1984, "Measurement of Attenuation and Dispersion using an Ultrasonic Spectroscopy Technique," *J. Acoust. Soc. Am.*, 76(2), pp. 489~504.

(5) Sachse Wolfgang and Pao Yih-Hsing, 1978, "On the determination of phase and group velocities of dispersive waves in solids," *J. Appl. Phys.*, Vol. 49, pp. 4320~4327.

(6) Kim Kyung-Cho, Jhang Kyung-Young and Hisashi Yamawaki, 2001, "The Evaluation of Partially degraded Material Using Nonlinear Propagation Characteristics of Ultrasonic Wave," *Trans. of KSME. A*, Vol. 26, No. 2, pp. 214~219.

(7) Jeong, H., Nahm, Jhang, K.Y. and Nam, Y.H., 2002, "Evaluation of Fracture Toughness Degradaton of CrMoV Rotor Steels Based on Ultrasonic Nonlinearity Measurements," *J. of KSME Int.*, Vol. 16, No. 2, pp. 147~154.

(8) Breazeale, M. A. and Ford, J., 1998, "Acoustic Source Book," *McGraw-Hill*, pp. 57~68.

(9) Kim, J.P. and Seok, C.S., 2001, "A study on the Evaluation of Material Degradation of 1Cr-1Mo-0.25V Steel using Ultrasonic Techniques," *Trans. of KSME A*, Vol. 25, No. 12, pp. 2116~2124.

(10) Anderson. T. L., 1995, "Fracture Mechanics," *CRC Press*. pp. 13~127.

(11) Yoon Kee-Bong, Yoon, S.H., Kim, S.T., Nahm, Seung-Hoon and Suh, Chang-Min, 1994, "Evaluation of J_{IC} and T_{mat} of Aged 1Cr-1Mo-0.25V Steel at Elevated Temperature," *Trans. of KSME*, Vol. 18, No. 011, pp.2860~2870.