

비선형 음향효과에 의한 고온 재료의 파괴인성 열화도 평가

Estimation of Fracture Toughness Degradation of High Temperature Materials by Nonlinear Acoustic Effects

정현조*, 남승훈**, 장경영***, 남영현****

Hyunjo Jeong*, Seung-Hoon Nahm**, Kyung-Young Jhang*** and Young-Hyun Nam****

초 록 고온 장시간 사용재의 열화로 인한 파괴인성의 저하를 초음파 방법으로 평가하기 위하여 Cr-Mo-V 강을 실험실에서 인공 열화처리하여 열화로 인한 손상 기구를 규명하고, 열화도에 따른 초음파 파라미터의 변화를 체계적으로 관찰하였다. 초음파 파라미터로서 속도, 감쇠와 보다 최근에 개발된 비선형 음향 파라미터를 사용하였는데, 비선형 음향 파라미터가 가장 민감한 변화를 보였다. 또한 전기비저항 측정 결과와 비교할 때 두 방법 모두 전체적으로 유사한 거동을 보였다. Charpy V-notch 충격시험으로부터 구한 파면양상 천이온도(FATT)와 비선형 파라미터 사이에는 비교적 좋은 상관관계가 성립하였으며, FATT와 파괴인성(K_{IC}) 사이의 관계식에 근거하여 열화된 발전설비 재료의 파괴인성을 초음파 비선형 파라미터의 측정을 통하여 간접적으로 구할 수 있음을 보였다.

주요 용어: 열화, 비선형 음향효과, 파면양상천이온도, 파괴인성, 전기비저항

Abstract In order to develop an ultrasonic evaluation method for properties degradation of high temperature materials, a number of Cr-Mo-V steel samples were heat-treated, and their damage mechanism was examined. Ultrasonic parameters such as velocity, attenuation, and more recently developed nonlinear acoustic parameter were measured. The nonlinear acoustic parameter was found to be most sensitive to material degradation mainly attributed to the precipitation of impurities in grain boundaries. When compared to the electrical resistivity results, the nonlinear parameters showed similar behavior. There existed a relatively good correlation between the nonlinear parameter and the fracture appearance transition temperature (FATT) obtained by Charpy V-notch impact test. Based on the relationship between the FATT and the fracture toughness (K_{IC}), correlation between the nonlinear parameter and K_{IC} was established.

Keywords: degradation, nonlinear acoustic effect, fracture appearance transition temperature, fracture toughness, electrical resistivity

1. 서 론

화력발전 설비와 같이 고온에서 장시간 하중을 받으며 가동되는 설비 부품은 오랜 시간 동안 사용으로 인하여 노후화되며, 그 수명은 재료 열화에 의해 제한된다. 설비 노후의 가장 큰 원인은 재질 열화이며 그 발생원인은 고온 환경, 부하 조건, 부식 환경 등이며 대개는 이들이 복합적으로 작용하여 열화가 진행된다. 사용중인 설비의 건

전성 (또는 수명)을 신뢰성 있게 평가하기 위해서는 열화된 재료의 기계적 성질을 알아야 한다. 그러나 파괴인성과 같은 성질을 측정하기 위하여 사용중인 설비에 손상을 주지 않고 시험편을 채취한다는 것은 기술적으로 어렵울 뿐만 아니라 많은 경비와 시간이 소요되므로 파괴적 방법에 의한 인성평가는 사실상 불가능하다. 따라서 재료가 열화됨에 따라 물리적 성질 및 미시조직이 변화되는 것에 착안하여 미시구조 변화량과 손상도 또는 열

화도와의 관계를 정량적으로 파악함으로써 잔여 수명을 진단하는 비파괴검사법이 요구되고 있다.

Govindaraju 등[1]은 발전소의 주증기관 재료인 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 강과 재열기관용 재료인 $\frac{1}{2}\text{Cr}-\frac{1}{2}\text{Mo}-\frac{1}{4}\text{V}$ 강의 크리프 손상을 평가하기 위한 파라미터로서 자기 히스테리시스를 사용하였다. 이보다 앞서 Gomez Alvarez-Arenas 등[2]은 인공적으로 크리프 손상을 받은 $\frac{1}{2}\text{Cr}-\frac{1}{2}\text{Mo}-\frac{1}{4}\text{V}$ 강에 대하여 초음파 속도와 감쇠를 측정하고 이론모델을 도입하여 크리프 손상의 주요 기구인 기공의 크기와 부피분율을 결정하였다. 국내에서는 보다 최근에 크리프 손상을 받은 구리에 대하여 초음파의 감쇠를 이용하거나[3] 기공의 모양에 대한 점진적 손상 모델링과 신경회로망을 이용하여[4] 크리프 기공량을 정확하게 결정할 수 있는 방법이 제시된 바 있다. 고온에서의 장시간 노출로 인한 재료의 열화와 이로 인한 파괴인성의 저하를 비파괴적으로 평가하기 위하여 남 등[5]은 인공열화시킨 터빈 로터용 소재인 $1\text{Cr}-1\text{Mo}-0.25\text{V}$ 강에 대하여 전기비저항을 측정하였다. 남 등[6]은 다양한 결정립의 크기를 갖는 석유화학설비의 압력용기 소재인 $3\text{Cr}-1\text{Mo}-\frac{1}{4}\text{V}$ 강에 대하여 초음파의 감쇠계수, 결정립의 크기, 파면양상천이온도(FATT) 사이에 좋은 상관관계가 있음을 보였다. 장 등[7]은 초음파 비선형 음향효과(nonlinear acoustic effect)가 인장하중과 피로하중을 받은 재료의 조기 열화손상 검출에 유용함을 발표하였다.

본 연구에서는 고온 장시간 사용재의 열화로 인한 재료 강도의 저하를 초음파 방법으로 평가하기 위하여 Cr-Mo-V 강을 실험실에서 인공 열화처리하여, 열화로 인한 손상 기구를 규명하고, 열화도에 따른 초음파 파라미터의 특성 변화를 체계적으로 연구하고자 한다. 초음파 측정을 위하여 이미 개발된 정밀 측정법[8]을 이용하여 속도와 감쇠는 물론 최근에 개발된 비선형 음향효과[7]를 이용하여 열화도에 대한 민감도를 파악하며, 최적의 파라미터를 선정한다. 또한 열화도가 재료 강도에 미치는 영향을 구하기 위하여 Charpy V-notch 충격시험을 실시하여 파면양상 천이온도(FATT)의 변화를 실험적으로 구한다. 열화도에 따른 파괴인성의 저하는 기존의 문헌을 참고하여 FATT-파괴인성 사이의 관계식을 이용하며, 궁극적으로 열화도-초음파 파라미터-FATT-파괴인성 사이의 상관관계를 확립하고 초음파 파라미터 측정으로부터 발전설비재료의 파괴인성 값을 간접적으로 평가할 수 있는 초음파 비파괴 평가 기술을 개발하고자 한다.

2. 시 편

시험에 사용된 강재는 화력발전소 터빈 로터에 많이 사용되는 $1\text{Cr}-1\text{Mo}-0.25\text{Cr}$ 강으로서, 이 소재의 화학적 성분은 Table 1에, 기계적 물성은 Table 2에 나타내었다. 로터강의 경우 실제 발전소에서 사용된 열화재를 종류별로 입수하는 것은 매우 어렵기 때문에 실제로 열화된 재료의 미시조직과 유사한 미시조직을 갖는 시료를 얻기 위하여 인위적으로 실제 사용온도 538°C 보다 높은 온도 630°C 에서 등은 열처리하여 7 종류의 시편을 준비하였다 (Table 3 참조).

Table 1 Chemical composition (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	As	Sn	Sb
0.31	0.23	0.76	0.006	0.001	0.36	1.11	1.32	0.27	0.006	0.005	0.001

Table 2 Mechanical properties

Temperature (°C)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Hardness (Hv)
24	665.2	823.1	18.8	59.4	266
538	533.5	580.6	22.7	55.5	-

Table 3 Aging time at 630°C and equivalent service time at 538°C

Time served at 538°C (h)	25,000	50,000	75,000	100,000	200,000	300,000
Aging time at 630°C (h)	453	933	1,322	1,820	3,640	5,460

3. 초음파 비선형 음향효과

3.1. 이 론

먼저 설명을 위하여 식 (1)에 나타낸 비선형 응력-변형률 관계를 고려하자[7].

$$\sigma = E\epsilon (1 + \beta\epsilon + \dots) \tag{1}$$

여기서 E는 Young 상수, β 는 2차 비선형 탄성계수를 나타내는데 여기서는 비선형 음향 파라미터로 명명한다. 이 관계는 금속에서 전위 변위의 비선형적 거동에 주목한 이론적 고찰로 그 일반성이 입증되어 있다. 이와 같은

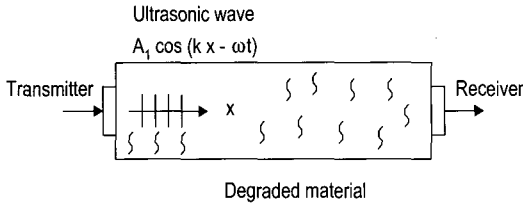


Fig. 1 One dimensional wave propagation in a degraded material

비선형적 탄성효과는 탄성파가 매질을 전파할 때 고조파 성분을 발생시키게 되는데 그 과정을 설명하기 위하여 Fig. 1과 같이 정현파의 초음파가 손상을 받은 재료를 전파하는 경우를 고려한다. Fig. 1에서 A_1 은 단일주파수를 갖는 초기 파형의 진폭이고 x 는 전파거리, ω 는 각주파수, k 는 파수이다.

1차원 파동방정식은 다음과 같이 된다.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} \tag{2}$$

여기서 ρ 는 밀도이고 u 는 변위이다. 식 (2)에 (1)의 관계를 대입하고 변형률-변위 사이의 관계식 $\epsilon(x, t) = \frac{\partial u(x, t)}{\partial x}$ 을 이용하면 변위 $u(x, t)$ 에 대한 비선형 파동방정식을 얻게 된다.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2E\beta \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \tag{3}$$

식 (3)의 해를 구하기 위하여 섭동이론을 적용하며, 이를 위하여 변위 u 를 다음과 같이 가정한다.

$$u = u_0 + u' \tag{4}$$

여기서 u_0 는 초기 변위로서 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$u_0 = A_1 \cos(kx - \omega t) \tag{5}$$

식 (4)에서 u' 는 1차 섭동해이다. 섭동해를 구하여 식 (4)를 다시 쓰면

$$u = u_0 + u' = A_1 \cos(kx - \omega t) - \frac{\beta}{8} A_1^2 k^2 x \cos 2(kx - \omega t) \tag{6}$$

이 식의 두 번째 항은 2차 조화성분을 나타내며, 결과적으로 전파과정을 통하여 2차 조화성분이 발생함을 설명할 수 있다. 또한 2차 조화성분의 진폭은 β 에 의존함을 알 수 있다. β 는 재료의 특성으로서 재료의 상태와 관계가 있으므로 β 를 측정하면 재료의 손상정도를 파악할 수 있다. 2차 조화성분의 진폭은 β 외에도 초기파형의 진폭 A_1 , 파수 k , 전파거리 x 에 의존하므로 재료의 변질로 인한 성분만을 추출하기 위해서는 A_1, k, x 등 실험 조건을 일정하게 유지해야 할 필요가 있다. 2차 조화성분의 진폭을 A_2 라고 하면, 비선형 음향 파라미터 β 를 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$\beta = \frac{8A_2}{A_1^2 k^2 x} \tag{7}$$

전파거리 x 와 파수 k 가 일정하다고 가정하면 정규화된 비선형 음향 파라미터 β' 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\beta' = \frac{\beta k^2 x}{8} = \frac{A_2}{A_1^2} \tag{8}$$

본 연구에서는 β' 를 바이스펙트럼 해석법으로 구하였다 (3.3절 참조).

3.2. 측정장치

Fig. 2는 수신 초음파 신호에 포함된 2차 조화성분의 크기를 정확하게 측정하기 위한 실험장치의 구성도를 나타낸다. 이 시스템은 저잡음으로 데이터의 획득이 가능한 초음파 신호분석 장치인 RAM10000 (미국 RITEC사)을 포함하고 있다.

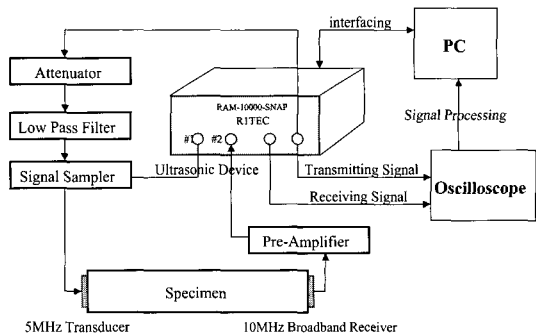


Fig. 2 Measurement system for higher harmonic components

송신을 위해서 사용된 탐촉자는 5 MHz 압전 트랜스듀서이며, 송신신호의 파형은 톤버스트(tone burst)를 사용하였다. 수신용으로는 2차 고조파 성분을 민감하게 검출하기 위해서 중심주파수가 10 MHz인 광대역 압전 트랜스듀서를 사용하였다.

기타 감쇠기, 필터, 앰프는 송수신 신호의 특성을 조절하기 위한 것이다. 수신 신호는 A/D 변환되고, 스펙트럼 영역에서 2차 조화성분의 크기를 구하였다.

3.3. 비선형 파라미터와 파워스펙트럼[9]

이전의 연구에서는 비선형 파라미터를 구하기 위하여 대부분의 경우에 파워스펙트럼 해석을 이용하였으나, 파워스펙트럼에는 정규성 잡음이 그대로 잔류하기 때문에 주파수 성분의 미소한 변화를 정확하게 알아낼 수 없다는 본질적인 한계가 있다. 특히 비선형 음향효과에 의해 발생하는 고조파 성분의 크기는 기본 주파수 성분에 비하여 매우 작기 때문에 원래 신호에 혼입된 잡음의 영향을 크게 받을 수 있다. 파워스펙트럼은 다음과 같이 2차 자기 상관함수의 푸리에 변환으로 정의된다.

$$P(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{j(\omega \tau)} d\tau$$

$$= X(\omega)X^*(\omega) = |X(\omega)|^2 \quad (9)$$

여기서 $R_{xx}(\tau)$ 는 2차의 자기상관함수이고 $X(\omega)$ 는 $x(t)$ 의 푸리에 변환이다.

일반적으로 고체 재료에서의 비선형 파동 전파 시스템에서 단일 주파수 ω_1 의 조화함수 시계열 신호 $x(t) = A_1 \sin(\omega_1 t)$ 를 입력함수로 하였을 때 출력함수는 2차 고조파 성분까지 고려할 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x(t) = A_1 \sin(\omega_1 t) + A_2 \sin(2\omega_1 t) \quad (10)$$

여기서 A_1 과 A_2 는 각각 기본 주파수 성분과 2차 조화성분의 진폭을 나타낸다. 이러한 신호에서 $\omega = \omega_1$ 인 경우와 $\omega = \omega_2 (= 2\omega_1)$ 인 경우의 각각의 파워스펙트럼값 $P(\omega_1)$, $P(\omega_2)$ 를 구하면

$$P(\omega_1) = |X(\omega_1)|^2 = A_1^2$$

$$P(\omega_2) = |X(\omega_2)|^2 = A_2^2 \quad (11)$$

따라서 비선형 파라미터 β' 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\beta' = \frac{A_2}{A_1^2} = \frac{\sqrt{P(\omega_2)}}{P(\omega_1)} \quad (12)$$

파워스펙트럼의 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 바이스펙트럼 해석을 수행하였다. 바이스펙트럼은 다음 식과 같이 3차의 자기 상관함수에 대한 2차원 Fourier 변환으로 정의된다.

$$B_{XXX}(\omega_m, \omega_n)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R_{XXX}(\tau_1, \tau_2) e^{j(\omega_m \tau_1 + \omega_n \tau_2)} d\tau_1 d\tau_2 \quad (13)$$

여기서 $R_{XXX}(\tau_1, \tau_2)$ 는 3차의 자기상관함수이다. 이와 같은 바이스펙트럼은 ω_m , ω_n , $\omega_k (= \omega_m + \omega_n)$ 의 세 주파수 성분 사이의 관계를 나타내는 3차의 통계량이며 정규성 잡음을 완전 배제할 수 있다는 특징을 갖는다. 또한 이러한 바이스펙트럼은 ω_m , ω_n , ω_k 가 모두 특정한 위상 관계를 유지하는 경우에만 유효하다. 따라서 비선형 음향효과에서와 같이 전파하는 기본 주파수 성분에 동시에 발생하는 미소한 고조파 성분을 찾아내는데 특히 유리하다고 할 수 있다.

파워스펙트럼의 계산에서와 마찬가지로 비선형 파동 전파 시스템에서 출력이 식 (10)과 같은 경우에 $\omega_m = \omega_1$, $\omega_n = \omega_1$ 인 경우의 바이스펙트럼 $B(\omega_1, \omega_1)$ 의 크기를 구하면 다음과 같다.

$$|B(\omega_1, \omega_1)| = |X(\omega_1)X(\omega_1)X^*(\omega_1 + \omega_1)| = A_1^2 A_2 \quad (14)$$

따라서 식 (14)를 이용하면 비선형 파라미터 β' 는 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$\beta' = \frac{A_2}{A_1^2} = \frac{|B(\omega_1, \omega_1)|}{P(\omega_1)^2} \quad (15)$$

4. 결 과

4.1. 열화시간에 따른 비선형 파라미터의 변화

Fig. 3은 열화시간에 따른 초음파 비선형 파라미터의 변화를 나타낸다. 각각의 열화제에서 측정된 초음파 비선형 파라미터는 약 5% 이내의 정확도를 갖는다. 비선형

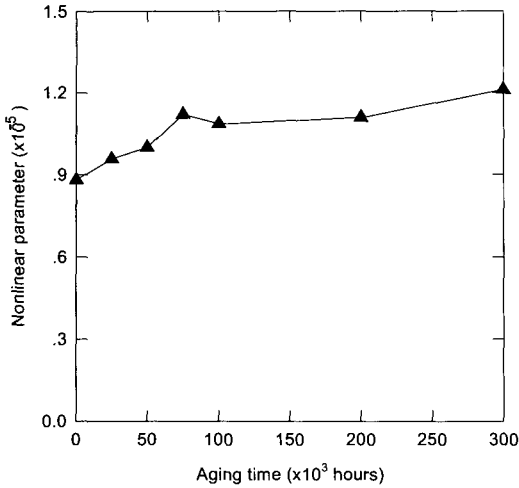


Fig. 3 Dependence of ultrasonic nonlinear parameter on aging time

파라미터 값은 열화도에 따라 대략 0.88×10^{-5} 에서 1.2×10^{-5} 사이에서 변하고 있다.

열화시간이 증가함에 따라 비선형 파라미터 값은 약 75,000 시간까지는 큰 변화를 보이지만 열화시간이 길어질수록 그 변화폭은 점점 작아진다.

4.2. 열화에 의한 인성의 저하

Fig. 4는 1Cr-1Mo-0.25V강 열화재의 열화시간에 따른 FATT의 변화를 나타내고 있다. FATT 값은 열화시간에 따라 변하고 있으며, 50,000 시간 사용재에 상당하는 가속 열화재에서 FATT 값이 거의 최대에 수렴하였으므로 측정오차를 고려한다면 더 이상의 증가는 없다고 추정된다. 따라서 터빈 로터 강의 경우 인성 열화도는 40,000 시간일 때가 최대이며, 그 이후부터는 사용 시간이 증가해도 재질의 인성열화에 미치는 영향이 작다는 일부 연구자들의 결과와 거의 일치하고 있다.

5. 고찰

5.1. 전기비저항 결과와 비교

Fig. 5는 열화시간에 따른 전기 비저항의 변화를 나타낸다[5]. 각각의 열화재에서 측정된 전기 비저항 값은 측정방법에 따라 약 10% 이내의 차이를 보였다. 전기 비저항의 값은 열화도에 따라 대략 $23.8 \mu\Omega \text{ cm} - 26.0 \mu\Omega \text{ cm}$

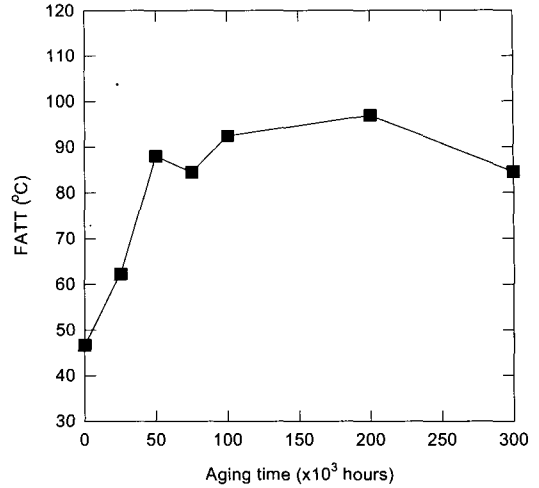


Fig. 4 Dependence of FATT on aging time

사이에서 변하고 있다.

열화시간이 증가함에 따라 전기 비저항 값은 초기에는 큰 변화를 보이지만 열화시간이 길어질수록 그 변화폭은 점점 작아진다. 약 75,000 시간 이상의 열화재에서 전기 비저항의 감소는 더 이상 감지되지 않았다. 그러나 열화시간이 일단 50,000 시간을 넘어서면 전기 비저항의 변화폭이 약 10 % 이내이기 때문에 측정 오차의 범위를 고려한다면 그 변화를 사실상 구분하기 어렵다는 것을 알 수 있다. 전기 비저항의 거동과 비교할 때 Fig. 3에 보인 초음파 비선형 파라미터도 대체로 유사한 경향을 보인다.

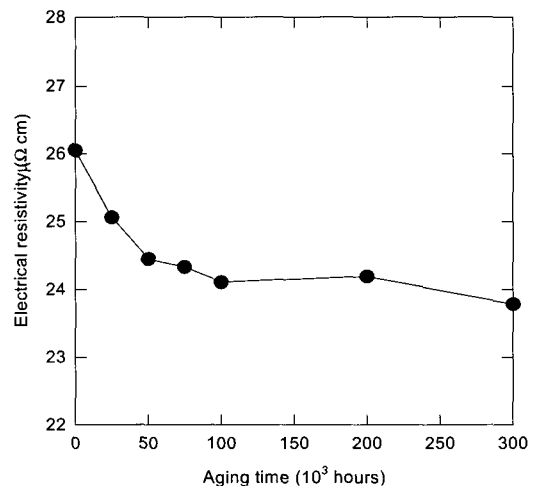


Fig. 5 Dependence of electrical resistivity on aging time

5.2. 비선형 파라미터와 FATT와의 관계

Fig. 6에 초음파 비선형 파라미터와 충격시험에서 얻은 파면양상 천이온도 (fracture appearance transition temperature: FATT)와의 관계를 나타내었다. 열화시간이 증가함에 따라 초기에 비선형 파라미터는 크게 증가하고 FATT도 크게 증가한다. 열화시간이 약 50,000 시간을 넘으면 비선형 파라미터와 FATT는 거의 변하지 않는다. 50,000시간 이상의 열화제에서 비선형 파라미터가 거의 변하지 않는데 그 이유는 아직 밝혀지지 않고 있다. 열화시간에 대한 비선형 파라미터와 FATT의 의존성이 유사하기 때문에 둘 사이에 좋은 상관관계가 있을 것이라고 예상할 수 있다. 특히 열화가 시작되는 초기에 비선형 파라미터와 FATT의 변화가 크므로 이 관계를 이용하면 비선형 파라미터로부터 FATT를 추정하는 것이 가능하다. 또 열화시간이 약 50,000 시간 이상이 되면 FATT와 비선형 파라미터의 변화가 작으므로 비선형 파라미터와 FATT의 관계로부터 장시간 열화된 재료의 인성을 평가할 수 있다.

5.3. 비선형 파라미터와 파괴인성과의 관계

비선형 파라미터와 FATT 사이에 좋은 상관관계가 있으므로 기존에 보고되고 있는 FATT와 파괴인성 값 K_{IC}

와의 관계를 이용한다면 비선형 파라미터 측정으로부터 파괴인성 값 K_{IC} 를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 파괴인성값을 추정하기 위해 Jones[10]가 제안한 다음 식을 이용하였다.

$$K_{IC} = 10800/[108 - (T - FATT)] \quad (15)$$

여기서 K_{IC} 의 단위는 $\text{ksi}\sqrt{\text{in}}$, T 및 FATT의 단위는 $^{\circ}\text{F}$ 이다. 여기서 초과온도는 (시험온도 - FATT)로부터 계산할 수 있다.

Fig. 7은 비선형 파라미터와 FATT 사이의 상관관계에 기초하여 (Fig. 6) 식 (15)로부터 계산한 비선형 파라미터와 K_{IC} 와의 상관관계를 나타낸다. 열화시간이 증가함에 따라 50,000~75,000 시간 까지는 파괴인성 값과 비선형 파라미터의 변화가 크게 나타난다. 그러나 열화시간이 약 75,000 시간을 넘으면 FATT의 변화가 거의 나타나지 않기 때문에 FATT로부터 계산한 K_{IC} 의 값도 거의 차이가 나타나지 않으며, 비선형 파라미터의 변화도 거의 없다. 따라서 초음파 비선형 파라미터와 열화된 재료의 인성 사이에는 좋은 상관관계가 있음을 알 수 있다.

초음파 비파괴 방법으로 사용중인 로터의 인성을 평가하기 위해서는 먼저 비선형 음향 파라미터 값을 측정 한 후 이전에 확립해 놓은 FATT와의 상관관계를 통하여 FATT의 값을 구할 수 있으며, 그 다음 K_{IC} 와 초과온도와의 상관관계를 이용하여 K_{IC} 를 추정할 수 있다.

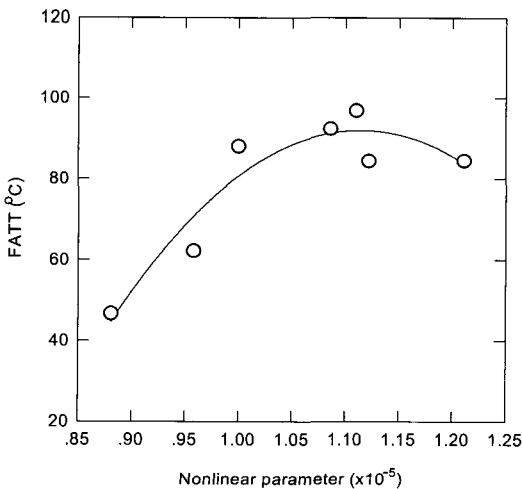


Fig. 6 Correlation between nonlinear parameter and FATT.

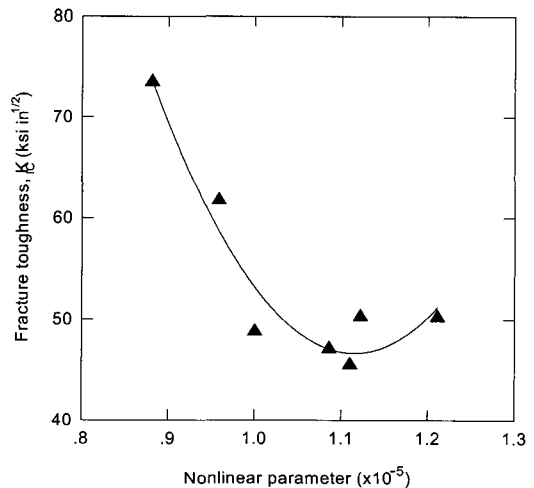


Fig. 7 Correlation between nonlinear parameter and fracture toughness.

6. 결 론

본 연구에서 1Cr-1Mo-0.25V강 열화재에 대하여 초음파 비파괴 시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 초음파 비선형 음향 파라미터는 열화시간의 증가와 함께 전반적으로 증가하였고, 열화시간이 약 75,000 시간까지는 큰 변화를 보이지만 열화시간이 길어질수록 그 변화 폭은 점점 작아졌다.
2. 초음파 비선형 파라미터 측정 결과를 전기 비저항 측정 결과와 비교할 때, 열화시간에 따라 전체적으로 비슷한 거동을 보였다. 즉, 열화 초기에 해당하는 약 50,000 - 75,000 시간까지는 비교적 큰 변화를 보이나, 이후로 열화시간이 증가해도 거의 변화를 보이지 않았다.
3. 충격시험을 통하여 얻은 FATT와 비선형 파라미터 사이에는 비교적 좋은 상관관계가 성립하였으며, FATT와 파괴인성 K_{Ic} 사이의 관계식에 근거하여 열화된 재료의 파괴인성을 비선형 파라미터의 측정으로부터 간접적으로 평가할 수 있음을 보였다.

참고문헌

- [1] Govindaraju, M. R., Kaminski, D. A., Devine, M. K., Biner, S. B. and Jiles, D. C., "Nondestructive Evaluation of Creep Damage in Power-Plant Steam Generators and Piping by Magnetic Measurements," NDT&E International, Vol. 30, No. 1, pp. 11-17, (1997)
- [2] Gomez Alvarez-Arenas, T., Riera-Franco de Sarabia, E. and Gallego-Juarez, J. A., "Ultrasonic Evaluation of Creep Damage in Steel," Ultrasonics, Vol. 31, No. 3, pp. 155-159, (1993)
- [3] 장영수, 정현조, "크리프 기공의 초음파 비파괴평가에 관한 연구", 비파괴검사학회지, Vol. 19, No. 2, pp. 110-117, (1999)
- [4] 조석제, 정현조, "신경회로망과 점진적 손상 모델링을 이용한 크리프 기공의 평가", 대한기계학회논문집 A 권, Vol. 24, No. 2, pp. 455-463, (2000)
- [5] 남승훈, 유광민, 김엄기, "전기비저항을 이용한 1Cr-1Mo-0.25V강의 인성열화도 평가", 비파괴검사학회지, Vol. 18, No. 1, pp. 10-15, (1998)
- [6] 남영현, 성운학, "초음파와 Barkhausen Noise에 의한 강의 연·취성 천이온도 예측", 대한기계학회논문집 A, Vol. 23, No. 7, pp. 1215-1222, (1999)
- [7] 장경영, 김경조, "비선형 음향효과를 이용한 미세 결함(열화)의 조기 검출", 비파괴검사학회지, Vol. 18, No. 5, pp. 365-371, (1998).
- [8] 장영수, 김진호, 정현조, 남영현, "시간 및 주파수 영역에서의 신호처리 기술에 의한 초음파 속도와 감쇠의 측정", 비파괴검사학회지, Vol. 19, No. 2, pp. 118-125, (1999)
- [9] 김경조, 장경영, "음향 비선형 파라미터의 추정을 위한 바이스펙트럼 해석법의 적용", 비파괴검사학회지, Vol. 19, No. 2, pp. 85-92, (1999)
- [10] Jones, G. T., Proc. of the Inst. of Mech. Eng., Vol. 186, pp. 32-32, (1972)