

## 선형 및 비선형 초음파를 이용한 1Cr-1Mo-0.25V의 열화평가에 관한 연구

### A Study on the Evaluation of Material Degradation for 1Cr-1Mo-0.25V Steel using Linear and Nonlinear Ultrasonics

김정표\*, 석창성\*\*, 송성진\*\*, 김영환\*\*

Jeong Pyo Kim\*, Chang-Sung Seok\*\*, Sung-Jin Song\*\* and Young Hwan Kim\*\*

**초 록** 초음파법은 산업설비의 열화 정도나 결함을 평가하기 용이한 비파괴적 방법이다. 본 연구에서는 1Cr-1Mo-0.25V을 630 °C에서 등온열화처리하여 4개의 시편을 준비하였다. 이를 사용하여 초음파의 속도, 감쇠계수를 측정하여 재료의 열화를 평가하였으며, 배진동의 발생효율을 나타내는 비선형파라미터를 이용하여 재료의 열화정도를 평가하였다. 감쇠계수와 비선형파라미터는 열화가 진행될 수록 증가하였으며, 특히 1,820 시간 열화시편의 배진동 진폭은 원시시편의 배진동 진폭과 비교 시 20dB이상 증가하였다. 그러나 열화정도에 따른 속도의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 본 연구결과에서 감쇠계수와 비선형파라미터는 재질 열화에 민감하게 반응하는 파라미터였으며, 재질 열화도를 평가하기에 적절한 파라미터인 것으로 사료된다.

**주요어어**: 배진동생성, 열화, 비선형음향, 비선형파라미터, 감쇠

**Abstract**: Ultrasonic is a powerful nondestructive technique for getting the information of flaws and material properties of in-services facilities. We prepared 4 different 1Cr-1Mo-0.25V specimens by isothermal aging at 630 °C. We evaluated material degradation using ultrasonic parameters, velocity, attenuation and harmonic generation. Attenuation and nonlinear parameter derived from harmonic generation efficiency increased as degradation. Especially the second harmonic of the fundamental wave in the 1,820 h aging material was observed to exceed 20 dB more than that in the un-aged material. But velocity remained virtually the same for all specimens. We concluded that nonlinear parameter and attenuation are sensitive to material degradation, but velocity was not. It'll be a good parameter for evaluating the material degradation.

**Keywords**: harmonic generation, degradation, nonlinear acoustics, nonlinear parameter, attenuation

## 1. 서 론

산업설비 재료의 열화는 설비의 안전성확보 측면에서 매우 중요한 영향을 미친다. 이러한 열화 정도를 평가하기 위한 비파괴 적인 방법에는 초음파법, 압입법, 직류전

위차법, 레프리카법 등이 있다.

이들 방법중 초음파법은 재료 내부 결함의 검출뿐만아 니라 기계적 성질 등의 재료 물성평가에도 이용되고 있는 방법이다. 일반적으로 초음파법은 연속파(continuous wave)나 파열파(burst) 등을 재료 내에 입사시켜 음파의

감쇠, 속도 등을 측정하여 재료의 정보를 얻는 방법이다. 감쇠의 요인은 결합과 결정립에 의한 산란, 재료 내의 흡수, 파의 확산(beam spreading), 회절 등인 것으로 알려졌다. 특히, 음파의 감쇠계수는 재료 내 결정립의 크기와 음파의 주파수와 관련하여 민감하게 결정된다. 음파의 속도에 영향을 주는 요인은 석출물(precipitate), 결합, 위상 전이(alternate phase) 등이며, 이러한 요인은 복합적으로 작용되어 나타난다. 또한 매질이 분산매질인 경우 음파의 속도는 주파수에 의존하는 함수가 되므로 주파수에 따른 속도의 변화를 고려해야 한다[1-3].

또한, 비선형음향법은 매질에 입사된 음파가 매질내의 비선형 응답을 수반하는 인자인 동공(porosity), 균열(crack), 전위(dislocation) 등과 상호작용으로 왜곡(distortion)되는 원리를 이용하는 것이다. 비선형 현상으로는 기본파의 배진동 발생(harmonic generation), 고주파수와 저주파수 음파의 상호작용에 의한 결합 주파수 발생인 주파수 변조(frequency modulation), 반주파수 발생(sub-harmonic generation) 등이 있다[4,5].

비선형음향법에 대한 연구는 약 100여년 전 유체 내에서 Stokes와 Riemann에 의해 시작되었으며, 그 후로 비약적으로 발전되어 왔으나, 고체에서 비선형 현상에 대한 연구는 유체에 비하여 미약하였다. 최근에 와서 Morris, Sutin, Hirose 등의 여러 학자에 의해 비선형음향 특성을 이용한 음향 진단법이 연구되고 있으며, 국내의 경우 윤석왕, 김경조 등이 균열과 재료의 열화에 따른 음파의 비선형응답에 관한 연구를 수행하고 있다[4-8].

본 연구에서는 1Cr-1Mo-0.25V를 630°C에서 시효 열화시켰으며, 이를 이용하여 주파수에 따라 음파의 속도와 감쇠를 측정하였다. 또한 시효열화정도에 따라 음파의 비선형 현상인 배진동 발생효율을 관찰하였다.

2. 이 론

2.1. 선형음향법

2.1.1. 감쇠

이상적인 고체매질에서 음파의 발생은 음압의 변화에 기인한다. 이때 음파의 전파거리가 증가될수록 음압의 세기가 감소하며 그 원인은 산란, 흡수, 빔의 확산 등으로 알려졌다. 실제 초음파센서에서 발생된 음파는 이상적인 평면파(plane wave)보다는 구면파(spherical wave)에 가깝다. 또한 음파

와 매질의 상호작용과 센서요소(piezo-electric element)에 의한 회절(diffraction)효과는 수신된 음파의 진폭과 위상을 변화시키며, 이에 따라 음파의 속도와 감쇠의 변화를 수반한다. 그러므로 정확한 측정을 위해서 회절효과를 보정해야 한다[1,9].

Fig. 1에서와 같이 수침법을 이용하여 음파를 시편에 수직입사시켰을 때 회절효과와 비너 필터링(Wiener filtering)을 고려한 감쇠계수는 다음과 같다[10].

$$\alpha = -\frac{1}{2h_2} \ln \left[ \frac{|F(w)|^2}{|F(w)|^2 + n^2} \frac{|B(w)|}{|F(w)|} \right] \dots\dots\dots (1)$$

$$|B(w)| = |V_B \cdot R_{w/s} \cdot C_1(h_1, w)| \dots\dots\dots (2)$$

$$|F(w)| = |V_F \cdot T_{w/s} \cdot R_{s/w} \cdot T_{s/w} \cdot C_2(h_1, h_2, w)| \dots\dots\dots (3)$$

$$n^2 = 0.01|F(w)|_{\max}^2 \dots\dots\dots (4)$$

여기서  $V_F$ 는 시편의 표면에서 첫 반사된 음파(front surface reflection wave)이며,  $V_B$ 는 시편에 입사하여 시편과 상호 작용한 뒤 수신된 두 번째 음파(back surface reflection wave)이다. 그리고  $T_{w/s}$ ,  $T_{s/w}$ 과  $R_{w/s}$ ,  $R_{s/w}$ 는 각 경계면에서의 투과 계수(transmission coefficient)와 반사 계수(reflection coefficient)이다. 또한 회절효과를 고려한  $V_F$ 에서의 보정항  $C_1$ 과  $V_B$ 에서의 보정항  $C_2$ 는 다음 식과 같다.

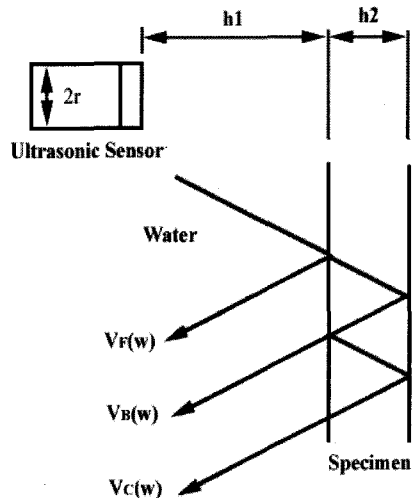


Fig. 1 Wave propagation diagram

$$C_1 = [1 - \exp^{ik_1 r^2/h_1} [J_0(\frac{k_1 r^2}{h_1}) - iJ_1(\frac{k_1 r^2}{h_1})]] \cdot (5)$$

$$C_2 = [1 - \exp^{i\frac{2\pi}{s}} [J_0(\frac{2\pi}{s}) - iJ_1(\frac{2\pi}{s})]] \dots\dots\dots (6)$$

$$s = 2(\frac{h_1 \lambda_1}{r^2} + \frac{h_2 \lambda_2}{r^2}) \dots\dots\dots (7)$$

여기서  $h_1, h_2$ 는 Fig. 1에서와 같이 시편과 센서와의 이격 거리와 시편의 두께이며,  $r$ 은 센서의 반경이다.

2.1.2. 속도

탄성파의 전파속도에는 일정 거리진행에 따른 위상변화를 시간의 함수로 표현한 위상속도와, 에너지가 전파되는 군속도가 있다. 음파가 매질에 전파되어 갈 때 거리 L 인 위치에서의 음파의 스펙트럼을 관찰하여 위상속도와 군 속도를 구할 수 있다. 다음 식 (8)과 (9)는 위상속도 ( $v_p$ )와 군 속도( $v_g$ )를 나타낸 식이다[2].

$$v_p = \frac{2\pi f L}{\Delta \phi + 2\pi f \tau_s} \dots\dots\dots (8)$$

$$v_g = \frac{2\pi L}{\frac{\partial \phi}{\partial f} + 2\pi \tau_s} \dots\dots\dots (9)$$

여기서  $\tau_s$ 는 전이 시간(shift time)이며,  $f, \phi$ 는 주파수와 위상을 나타낸다.

2.2. 비선형음향법

매질의 비선형 인자가 존재하는 경우 음파가 매질에 입사될 때 여러 비선형 현상들을 유발한다. 입방 결정내 탄성파가 입사 시 비선형 현상에 대한 Breazcale의 비선형 음파방정식은 다음과 같다[11].

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = K_2 (\frac{\partial^2 \xi}{\partial a^2} + 3 \frac{\partial \xi}{\partial a} \frac{\partial^2 \xi}{\partial a^2}) + K_3 \frac{\partial \xi}{\partial a} \frac{\partial^2 \xi}{\partial a^2} \dots\dots\dots (10)$$

여기서  $\xi$  는 입자의 변위이며,  $K_2$ 와  $K_3$ 는 2차 탄성계수의 조합항과 3차 탄성계수의 조합항이다. 음원이 싸인파 형태로 구동될 때, 이 해를 멱급수로 이용하여 나타내면, 입자변위는 다음 식 (11) 과 같다.

$$\xi = A_1 \sin(ka - wt) + A_2 \cos 2(ka - wt) + \dots\dots\dots (11)$$

$$A_2 = [-3 + \frac{K_3}{K_2}] \frac{A_1^2 k^2 a}{8} \dots\dots\dots (12)$$

$$= \beta \frac{A_1^2 k^2 a}{8} \dots\dots\dots (13)$$

여기서  $A_1$ 과  $A_2$ 는 각각 기본파의 진폭과 배진동주파수를 갖는 배진동파의 진폭,  $k$ 와  $\beta$ 는 파수(wave number)와 비선형파라미터이다. 위 해에서 음파가 전파됨에 따라 배진동이 증가되는 양상을 보여주고 있음을 알 수 있다. 이때 입자속도와 관련되는 위상속도(Phase velocity)는 다음 식 (13)과 같다.

$$c = c_0 [1 - \frac{3(3 + K_3/K_2)}{2} \frac{u}{c_0}]^{1/3} \dots\dots\dots (14)$$

여기서  $u, c$ 는 입자의 속도와 위상 속도이다. 이러한 음파의 배진동 발생은 물리적으로 매질과 상호작용한 음파의 형태와 관련이 있다. 즉 Fig. 2에서와 같이 비선형 인자를 갖는 매질에 입사된 음파가 매질의 비선형성인자와 상호작용하면서 전파됨에 따라 왜곡(distortion)된다. 이때 왜곡된 음파의 주파수 성분은 기본파의 배진동을 포함하게 된다. Fig. 2에서 정 방향으로 진행하는 음파를 고려 시 식 (13)으로부터 입자의 속도가 최대인 부분에서는  $c_0$ 보다 빠르게 운동하며 그 반대 경우 입자의 속도가 최소인 부분에서는 느리게 전파됨을 알 수 있다. 따라서 음파

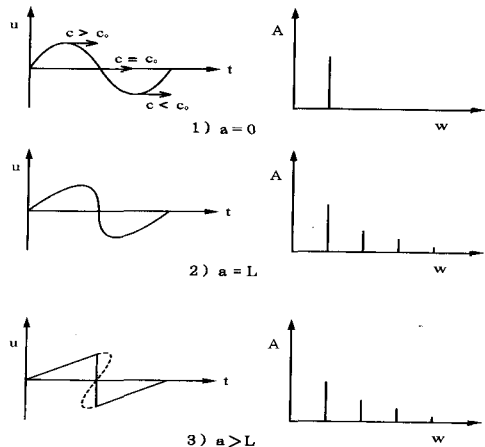


Fig. 2 Progressive distortion of an initially sinusoidal finite- amplitude wave

의 전파와 함께 파형이 찌그러지게 된다. 불연속거리  $a=L$ 에서 파형은 직각 삼각형형태를 가지며 그 이후의 형태는 이론적으로 다중함수로 존재하지만 물리적인 의미는 없다.

### 3. 시험 결과 및 고찰

#### 3.1. 시편

본 연구에 사용된 재료는 화력발전소 터빈로터용 소재로 사용되는 1Cr-1Mo-0.25V강으로, 화학성분조성비는 Table 1과 같다.

이 재료를 630°C의 전기로에서 등온열화 열처리(isothermal aging heat treatment)방법으로 453시간, 933시간, 1,820시간 열화시켜 원시시편과 함께 4개의 시험편을 준비하여 시험을 수행하였다[12,13,14].

Table 1 Chemical composition of 1Cr-1Mo-0.25V

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	

#### 3.2. 선형음향법

##### 3.2.1. 시험장치

초음파센서와 시편과의 접촉상태를 일정하게 유지시키기 위하여 수침법을 사용하였으며, 초음파센서의 특성을 관찰하기 위하여 파열음(pulse)을 시편에 수직 입사시킨 후 시편의 표면에서 반사되어온 신호를 주파수 분석하여 관찰하였다. Fig. 3은 수침법을 이용한 음파의 진행도를 나타낸 그림이다. 센서(Parametric, V356 30/25)의 중심

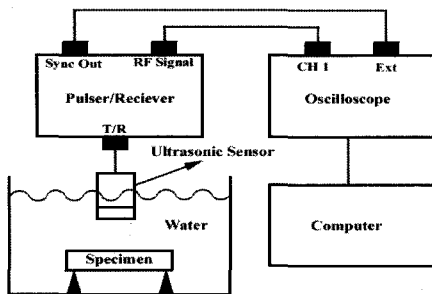


Fig. 3 Block diagram of apparatus for linear acoustics

주파수는 16.7MHz이며, -3dB 주파수 밴드는 12.8MHz~21.7MHz 이었다. 이때 센서와 시편 표면과의 거리( $h_1$ )와 시편의 두께( $h_2$ )는 각각 19.7mm, 10.2mm 이며, 센서의 반지름( $r$ )은 6.3mm 였다.

##### 3.2.2. 감쇠 측정

음파의 스펙트럼은 진폭 스펙트럼과 위상 스펙트럼으로 구분되며, 위상 스펙트럼은 시간 영역에서 신호를 포착하여 FFT(Fast Fourier Transform)를 수행하여 얻어진다. 이때 위상은  $-\pi \sim \pi$  사이의 값만을 갖고 있으므로 위상을 보정하였다.

감쇠를 측정하기 위해 시편의 표면에서 첫 반사된 음파( $V_F$ : front surface reflection wave)와 시편에 입사하여 시편과 상호 작용한 뒤 수신된 두 번째 음파( $V_B$ : back surface reflection wave)를 시간영역에서 신호가 안정 될 때까지 평균을 수행한 후 분석하였으며, 감쇠계수는 식(1)을 이용하여 계산하였다. 이때 샘플링속도를 100 MS/s 로 하였다.

Fig. 4는 수침법을 이용하여 각 열화단계별로 10번을 측정하여 평균한 감쇠계수를 도시한 그림이다. 감쇠의 경우 열화가 진행될수록 감쇠계수가 대체적으로 커졌으며, Fig. 5는 중심주파수에서 열화진행에 따른 감쇠계수의 증가를 보여주고 있다. 감쇠계수의 측정 편차는  $\pm 0.001 N_p/mm$ 였다.

##### 3.2.3. 속도 측정

음파의 속도를 결정하는 중요한 변수는 위상의 측정이다. 속도 측정에 사용된 신호는 두 번째 파열음과 세 번째 파열음을 관측하여 FFT를 수행한 후 위상을 보정하였다. 이때 위상속도와 군속도는 식 (8)과 (9)를 이용하여 구하였다. 이때 전이시간(shift time)은  $3.38 \mu s$  이며, 시편의 두께는 10.2 mm이었다.

##### 3.2.4. 감쇠 및 속도 측정결과 및 고찰

열화시편을 제작하여 열화단계에 따른 감쇠계수와 속도를 측정하였다. Fig 4에서와 같이 열화가 진행될수록 감쇠계수가 대체적으로 커졌으며, 중심주파수부근에서의 감쇠계수는 일정한 증가형태를 보여주었다. 이러한 감쇠계수의 증가는 시편이 열화가 진행됨에 따라 조직의 조

대화에 따른 결정립의 크기 또는 결정립계에서의 석출물 등과 같은 산란체의 크기가 증가됨에 따라 산란효과가 커짐에 기인한다. 본 연구에서 사용된 1Cr-1Mo-0.25V강은 열화가 진행됨에 따라 결정립 경계면에 Mn, Cr, S 등이 석출되는 것으로 알려졌다[15].

또한 열화정도에 따른 속도는 식 (8)과 (9)를 이용하여 측정되었다. 속도측정결과 열화시편에 따른 속도의 변화는 관찰되지 않았으며, 6,035 m/s로 일정하게 측정되었다. 본 시험조건에서 1Cr-1Mo-0.25V 강 의 경우 열에 의한 열화가 속도변화와 무관하게 나타났다.

### 3.3. 비선형음향법

#### 3.3.1. 시험장치

Fig. 6은 음파의 비선형현상을 관찰하기 위한 시험장치도이며, 사용된 시편의 크기는 20×30×50(mm)이었다. 사용된 센서의 공진주파수는 각각 500 kHz와 1 MHz였으며, 이때 글루(glue)를 사용하여 각 센서를 시편의 양 끝단에 부착시켰다.

파형발생기(SRS 560)를 이용하여 저주파수의 음파를 발생시켰으며, 이때 발생된 음파를 증폭기(HP 8347A)로 증폭하여 저주파수 센서를 통해 재료에 입사시켰다. 매질과의 상호 작용으로 산란된 신호를 고주파수 센서를 통하여 수신하였으며 수신된 신호를 오실로스코프(LeCroy 9310L)로 관찰하였다. 이때 샘플링 속도(sampling rate)는 50 MS/s이었다.

#### 3.3.2. 비선형파라미터 측정 및 고찰

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

Fig. 7, 8, 9, 10은 열화진행에 따른 배진동 발생효율을 측정하여 도식한 그림이다. 그림에서 보여지는 바와 같이 열화가 진행될수록 배진동의 진폭이 커졌으며, 열화되지

않은 시편과 비교 시 1,820시간 열화된 시편에서는 배진동의 진폭이 20dB이상 증가됨을 확인하였다.

이러한 비선형 현상을 실험적으로 평가하기 위한 변수에는 비선형파라미터( $\beta$ )가 있으며, 식 (13)에서와 같이 비선형파라미터는 다음 식 (15)와 같이 정의된다[11,16].

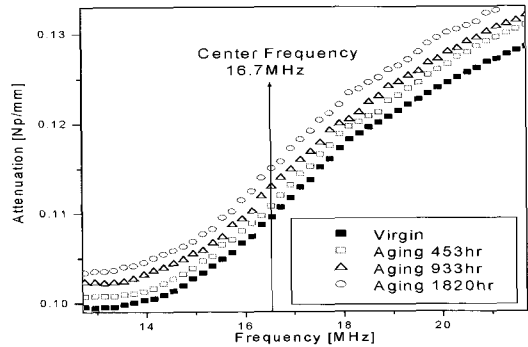


Fig. 4 Attenuation vs. frequency for 4 different 1Cr-1Mo-0.25V specimens

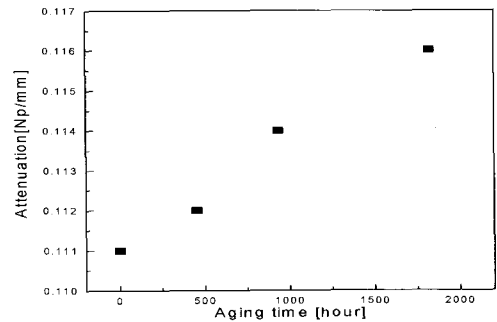


Fig. 5 Attenuation coefficient for aging materials at center frequency

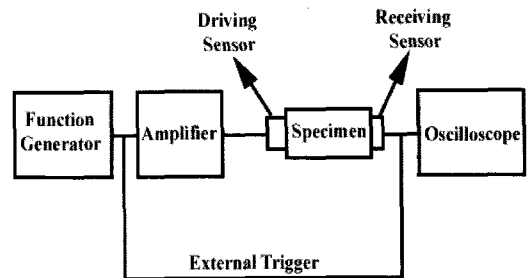


Fig. 6 Block diagram of apparatus for nonlinear acoustics

$$\beta = \frac{8 v^2 A_2}{\omega_o^2 z A_1^2} \dots\dots\dots (18)$$

여기서  $A_1, A_2$ 는 기본파의 진폭과 배진동파의 진폭이며,  $z, \omega_o, v$ 는 각각 시편의 두께, 기본파의 각진동수 (angular frequency), 위상속도이다. Fig. 11은 식(15)를 이용하여 열화가 진행됨에 따른 비선형파라미터를 측정하여 도시한 그림이다.

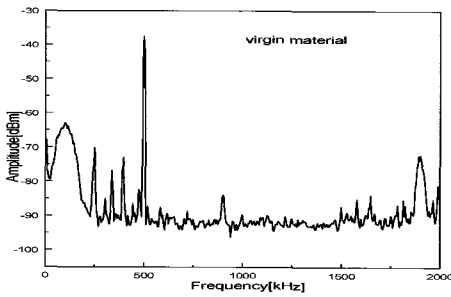


Fig. 7 Absent nonlinear response on virgin material for 1Cr-1Mo-0.25V

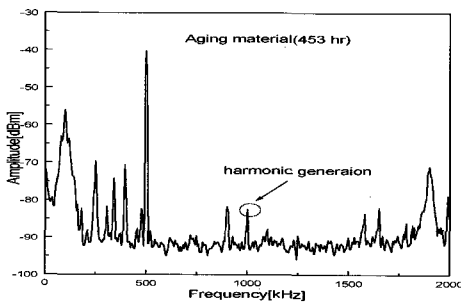


Fig. 8 Nonlinear response on aging material (453hour) for 1Cr-1Mo-0.25V

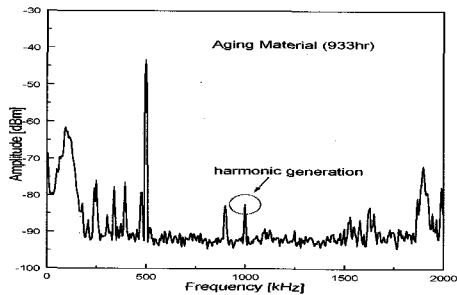


Fig. 9 Nonlinear response on aging material (933hour) for 1Cr-1Mo-0.25V

4. 결 론

본 연구에서는 1Cr-1Mo-0.25V를 등온열화시켰으며, 이를 사용하여 열화단계별 초음파변수를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 수직법을 이용하여 열화단계별 감쇠계수를 측정된 결과, 열화가 진행될수록 감쇠계수가 증가하였다. 이는 열화가 진행됨에 따라 조직의 조대화에 따른 결정립의 크기 또는 결정립계에서의 석출물 등과 같은 산란체의 크기가 증가됨에 따라 산란효과가 커짐에 기인한다.
- 2) 본 실험조건에서 1Cr-1Mo-0.25V의 경우 등온열화에 의한 속도의 변화는 미미하였다.
- 3) 재료의 열화에 따라 배진동의 발생을 관찰한 결과, 열화가 진행될수록 배진동의 진폭이 커졌으며, 1,820 시간 열화재의 배진동의 진폭은 원시시편과 비교 시 20 dB 증가하였다. 비선형파라미터는 재료의 열화정도를 예측하기에 유용하리라 판단된다.

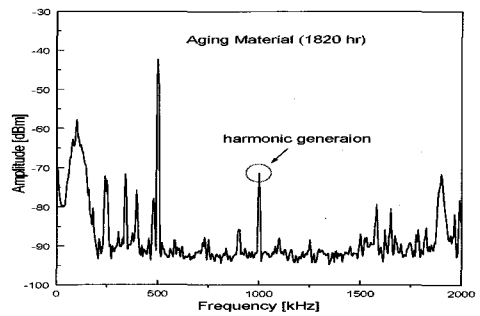


Fig. 10 Nonlinear response on aging material (1820hour) for 1Cr-1Mo-0.25V

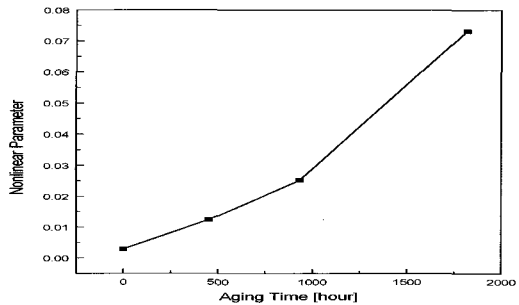


Fig. 11 Nonlinear parameter( $\beta$ ) for different aging specimens

## 후 기

이 논문은 1998년 학술진흥재단의 공모 과제 연구비 (1998-018-E00085)에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- [1] C. O. Ruud and E. Green, "Nondestructive Methods for Material Property Determination", Plenum Press, pp. 151-160, (1984)
- [2] Wolfgang Sachse and Yih-Hsing Pao, "On the determination of phase and group velocities of dispersive waves in solids", J. Appl. Phys., Vol. 49, pp. 4320-4327, (1978)
- [3] H. F. Pollard, "Sound Waves in Solids", Pion, London, pp. 23-77, (1977)
- [4] 김정표, 김의준, 윤석왕, "고체내 결함의 위치추정을 위한 비선형 음향 탐지법", 96년도 한국음향학회 학술 발표대회 논문집 제 15권 1(s)호, Vol. 15, No.1(s), pp. 365-368, (1996)
- [5] A. M. Sutin, V. Y. Zaitsev and I. Y. Belyaeva, "Nonlinear Interaction of Acoustical Wave due to Cracks and its Possible Usage for Cracks detection," J. vibration and control., pp. 786-793, (1992)
- [6] W. L. Morris, O. Buck, and R. V. Inman, "Acoustic Harmonic Generation due to Fatigue damage in High-strength Aluminum", J. Appl. Phys., 50(11), pp. 6737-6741, (1979)
- [7] S. Hirose, J. D. Achenbach, "Higher Harmonics in the Far Field due to Dynamic Crack-face Contacting", J. Acoust. Soc. Am., 93(1), pp. 142-147, (1993)
- [8] 김경조, 장경영, "음향비선형파라미터의 추정을 위한 바이스펙트럼 해석법의 적용", 비파괴검사학회지, Vol. 19, No. 2, pp. 85-92, (1999)
- [9] Ronald A. Kline, "Measurement of Attenuation and Dispersion using an Ultrasonic Spectroscopy Technique", J. Acoust. Soc. Am., 76(2), pp. 489-504, (1984)
- [10] W. Lester, Jr. Scherr and Song Sung Jin, "Ultrasonic Scattering by a Flat-bottom in Immersion Testing: an Analytical Model", J. Acoust. Soc. Am., 92(1), pp. 478-486, (1992)
- [11] M. A. Breazeale, J. Ford, "Acoustic Source Book", McGraw-Hill, pp. 57-68, (1998)
- [12] 유효선, "Cr-Mo강 시효계의 취화손상 평가를 위한 전기화학적 분석시험에 관한 연구", 비파괴검사학회지, Vol. 19, No. 6, pp. 411-419, (1999)
- [13] 정현조, 남승훈, 장경영, 남영현, "비선형 음향효과에 의한 고온 재료의 파괴인성 열화도 평가", 비파괴검사학회지, Vol. 20, No. 5, pp. 424-430, (2000)
- [14] 유권상, 김용일, 남승훈, 유광민, 조육, 손대락, "가역 투자율 측정에 의한 1Cr-1Mo-0.25V강의 열화도 평가", 비파괴검사학회지, Vol. 20, No. 5, pp. 445-450, (2000)
- [15] 허정훈, 서창민, 남승훈, "시효열화시킨 1Cr-1Mo-0.25V강의 고온하의 회전굽힘 파괴강도에 관한 연구," 대한기계학회논문집 A, pp. 2819-2832, (1996)
- [16] D. C. Hurley, W. T. Yost, E. S. Boltz, and C. M. Fortunko, "A Comparison of Three Techniques to Determine the Nonlinear Ultrasonic Parameter  $\beta$ ", Quantitative Nondestructive Evaluation, vol. 16, pp. 1383-1390, (1997)