

2.25Cr-1Mo강의 열화도 평가를 위한 비선형 음향효과 응용법

Application of Non-linear Acoustic Effect for Evaluation of Degradation of 2.25Cr-1Mo Steel

최윤호*, 김현묵*†, 장경영**, 박익근***

Y. H. Choi*, H. M. Kim*†, K. Y. Jhang** and I. K. Park***

초 록 재료 내부를 초음파가 전파하면서 발생하는 비선형 음향효과는 재료의 열화도를 비파괴적으로 평가하는데 우수한 것으로 보고되고 있다. 비선형 음향효과는 재질의 특성에 따라 나타나는 정도가 다르며, 이러한 정도는 비선형 파라미터를 이용하여 정량적으로 평가하는 것이 가능하다. 본 연구에서는 2.25Cr-1Mo 강이 540°C에서 장시간노출되었을 때 일어나는 미세조직의 변화를 얻기위해 인공 열처리를 수행하고, 2.25Cr-1Mo 강의 열화도와 비선형 음향효과와의 관계를 실험적으로 검증하여 경년 열화도와 비선형 파라미터의 상관관계를 규명하고자 하였다. 비선형 파라미터는 바이스펙트럼법과 파워스펙트럼법을 이용하여 측정되었으며, 실험결과 바이스펙트럼법에 의한 비선형 파라미터는 열화 시간에 매우 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

주요용어 : 초음파, 비선형 음향효과, 파워스펙트럼, 바이스펙트럼, 재료 열화

Abstract Nonlinear acoustic effect has been considered as an effective tool for the evaluation of material degradation. In this paper, the applicability of nonlinear acoustic effect to the evaluation of degraded 2.25Cr-1Mo steel is investigated. Firstly, artificial aging was performed to simulate the microstructural degradation in 2.25Cr-1Mo steel arising from long time exposure at 540°C. Secondly, ultrasonic nonlinear parameter was quantitatively measured by bi-spectrum and power spectrum. Nonlinear acoustic parameter from bi-spectrum was found to be clearly sensitive to the aging time.

Keywords: ultrasonic, nonlinear acoustic effect, power spectrum, bi-spectrum, material degradation

1. 서 론

국내에 건설되어 가동되고 있는 발전설비, 화학플랜트는 열효율을 향상시키기 위해 가동온도를 높이려는 많은 연구가 진행되고 있다. 이를 위해서는 설비의 안정성 및 열효율이 우수한 내열강을 사용하게 된다. 이러한 내열강 중 Cr-Mo강, Cr-Mo-V강, Stainless강은 고온에서 우수한 기계적 성질을 갖고 있어 널리 사용되고 있다. 그러나 사

용 년 수가 증가함에 따라 점차 노후화 되고 있으며, 재료의 기계적 성질이 약화되는 열화손상이 발생한다. 따라서 재료의 열화도를 in-line으로 검사하기 위한 비파괴적 평가기법에 대한 연구의 필요성이 인식되어 다양한 열화도 평가기법이 연구되고 있다[1-4].

비파괴적으로 열화도를 평가하는 기법중에서 초음파 비파괴평가(ultrasonic nondestructive evaluation;UNDE) 기법은 측정의 간편성, 높은 측정감도, 측정결과 해석의 신속성 및 신뢰성 확보에 우수한 것으로 알려져 있으며[5], 특

히 비선형 초음파 특성은 재료의 열화정도에 민감하게 반응되는 평가기법으로 보고되고 있다[6,7].

초음파가 재료 내부를 전파하면서 나타내는 다양한 특성중에서 비선형 음향효과는 음파가 매질을 따라 전파할 때 기본 주파수 성분 이외에 고조파 성분이 발생하는 현상으로 설명될 수 있다. 기존의 비선형 음향효과를 해석하기 위한 방법으로 파워스펙트럼법을 적용하였으나, 이 해석법은 정규성 잡음이 그대로 잔류하게 때문에 주파수 성분에서 발생하는 미소한 변화를 정확하게 알 수 없다는 본질적인 한계를 갖고 있다. 이러한 파워스펙트럼법의 단점을 보완하기 위한 신호처리 기법으로 바이스펙트럼법이 있다. 바이스펙트럼법은 정규성 잡음을 소거할 뿐만 아니라 특정한 위상관계를 유지하는 두 주파수 성분을 검출할 수 있어 기본 주파수 성분과 일정한 위상을 유지하는 순수 고조파 성분만을 추출하여 비선형 음향효과의 측정에 매우 효과적인 방법이다.

장[8] 등은 바이스펙트럼 해석법을 이용하여 초음파 비선형 파라미터를 정량적으로 평가하고 유용성을 증명하였다. 또한 바이스펙트럼 해석법에 의한 비선형 파라미터를 이용하여 인장하중과 피로하중을 받은 재료의 조기 열화 손상을 검출하는데 유용함을 보고하였다[7]. 그러나 내부 미세조직의 변화와의 상관관계등 열화기구와 초음파 비선형 음향효과의 관계에 대한 검토는 이루어진 바 없다. 따라서 본 연구에서는 인공 열화 시킨 2.25Cr-1Mo강의 미세조직의 변화와 초음파 인자와의 상관관계에 대한 선행 연구[5]에 덧붙여 비선형 음향효과의 변화와의 상관관계를 알아보고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1. 초음파 비선형 음향효과

일반적으로 초음파의 비선형 음향효과란 음파가 매질을 따라 전파할 때 기본 주파수 성분 이외의 고조파 성분이 발생하는 현상으로 설명할 수 있다[9]. 이 때 2차 고조파 성분의 크기는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_2 = \frac{\beta}{8} A_1^2 k^2 x \tag{1}$$

여기서, β 는 비선형 파라미터, A_1 은 단일 주파수를 갖는 초기 파형의 진폭, ω 는 각주파수, k 는 파수이다.

Fig. 1은 비선형 파라미터 β 가 일정할 경우, 즉 재료에 아무런 변형이 없을 때부터 가지고 있는 비선형성을 나타내는 것으로 A_1 가 A_2 에 비례하는 것을 보여준다 [11]. 그러나 실제로 재료는 일정한 감쇠를 갖고 있으며 일반적으로 열화도가 증가할수록 감쇠는 증가된다[5]. 따라서 수신신호에서 기본주파수 성분의 크기는 열화의 증가에 따라 감소하게 된다. Fig. 2는 열화시간의 증가에 따른 기본 주파수 성분의 크기와 2차 조화성분의 크기의 변화를 나타낸다. 만약 비선형 파라미터 β 가 열화와 무관하게 일정할 경우 2차 조화성분은 식(1)에 보인 바와 같이 기본주파수 성분의 제곱의 크기로 감소한다. 하지만 비선형 파라미터 β 가 열화시간의 증가에 따라 증가할 경우에는 2차 조화성분의 감소율은 앞의 경우에서 보다는 작아질 것이며 경우에 따라서는 A_1 의 변화를 보다도 커질 수도 있을 것이다.

본 연구에서는 이와 같이 β 가 열화도에 따라 증가하는 것을 A_2 로부터 측정하고자 하였으며, 다음과 같이 구할 수 있다.

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

단, 전파거리 x 와 파수 k 가 일정하다고 가정하면 정규화된 비선형 파라미터를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\beta' = \frac{\beta k^2 x}{8} = \frac{A_2}{A_1^2} \tag{3}$$

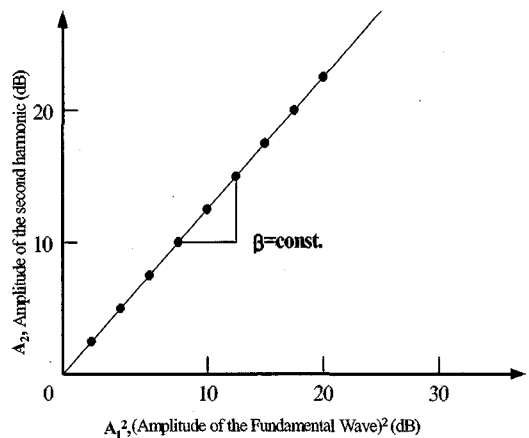


Fig. 1 The nonlinearity of constant β

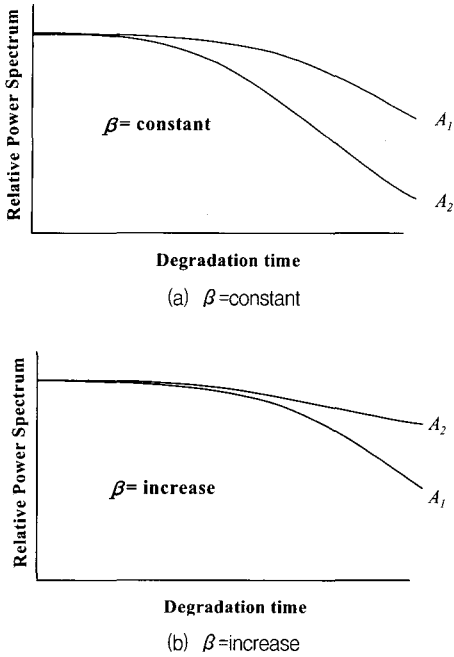


Fig. 2 The relationship between A_1 and A_2 under β condition as degradation time

2.2. 비선형 파라미터의 추정

비선형파라미터를 구하기 위하여 대부분의 경우에 파워스펙트럼 해석을 이용하였으나 파워스펙트럼에는 정규성 잡음이 그대로 잔류하기 때문에 주파수 성분의 미소한 변화를 정확하게 알아낼 수 없는 본질적인 한계가 있다[6]. 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.

$$P(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{j\omega\tau} d\tau \quad (4)$$

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

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

일반적으로 고체 재료의 비선형 파동시스템에서 단일 주파수 ω_1 의 조화성분의 시계열신호 $x(t) = A_1 \sin(\omega_1 t)$

를 입력함수로 하였을 때 출력함수는 2차 고조파 성분까지 고려할 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x(t) = A_1 \sin(\omega_1 t) + A_2 \sin(2\omega_1 t) \quad (5)$$

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

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

$$P(\omega_2) = |X(\omega_2)|^2 = A_2^2 \quad (6)$$

따라서 파워스펙트럼에 의한 비선형 파라미터 β' 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\beta'_{ps} = \frac{A_2}{A_1} = \frac{\sqrt{P(\omega_2)}}{P(\omega_1)} \quad (7)$$

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

$$B_{xxx}(\omega_m, \omega_n) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R_{xxx}(\tau_1, \tau_2) e^{j(\omega_m \tau_1 + \omega_n \tau_2)} d\tau_1 d\tau_2 \quad (8)$$

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

파워스펙트럼의 계산에서와 마찬가지로 비선형 전파 시스템에서 출력이 식 (5)와 같은 경우에 $\omega_m = \omega_1, \omega_n = \omega_1$ 인 경우의 바이스펙트럼 $B(\omega_1, \omega_1)$ 의 크기를 구하면 다음과 같다.

$$|B(\omega_1, \omega_1)| = |X(\omega_1)X(\omega_1)X^*(\omega_1 + \omega_1)| = A_1^2 A_2 \quad (9)$$

따라서 식 (9)를 이용하면 바이스펙트럼에 의한 비선형 파라미터 β_{bs} 는 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$\beta_{bs} = \frac{A_2}{A_1^2} = \frac{|B(\omega_1, \omega_1)|}{P(\omega_1)^2} \quad (10)$$

3. 실험장치 및 방법

3.1. 열화 시험편 제작

실험에 사용된 시험편의 재료는 터빈로터용 소재로 널리 사용되는 2.25Cr-1Mo강으로 900°C에서 1시간 노멀라이징(normalizing)처리 후 720°C에서 1시간 템퍼링(tempering)처리한 포항제철(주)의 합금을 사용하였으며, 화학적 성분을 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 실제 발전소 터빈에서 오랜 기간 사용된 재료와 유사한 미세조직을 갖도록 열화를 수행하기 위해 시료를 인위적으로 일반 사용온도(약 540°C)보다 높고 재결정온도보다 낮은 630°C의 온도에서 15단계로 고온 열처리를 통한 가속 열처리를 수행함으로써 고온 장기 사용재의 미세조직 변화를 시뮬레이션하였다. Table 2는 철의 자기확산식에 의한 열화시간의 추정 예이다[12]. 시험편의 형상은 90×24×10mm의 직사각형으로 가공하였다.

Table 1 Chemical composition of 2.25Cr-1Mo steel

Element	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Fe
Comp. (wt. %)	0.138	0.142	0.46	0.004	0.014	2.27	0.97	Bal.

Table 2 Accelerated aging time at 630°C for equivalent microstructure served at 538°C

Time served at 538°C(hr)	As-received	80,000	170,000	260,000
Aging time at 630°C(hr)	0	1,500	3,100	4,800

3.2 초음파 시험

Fig. 3은 수신 초음파 신호에 포함된 고조파성분의 크기를 정확하게 계측하기 위한 실험장치의 구성도를 나타낸다. 이 시스템은 저잡음으로 데이터의 획득이 가능한 초음파 신호분석 장치인 RAME000(미국 RITEC사)을 포함하고 있다.

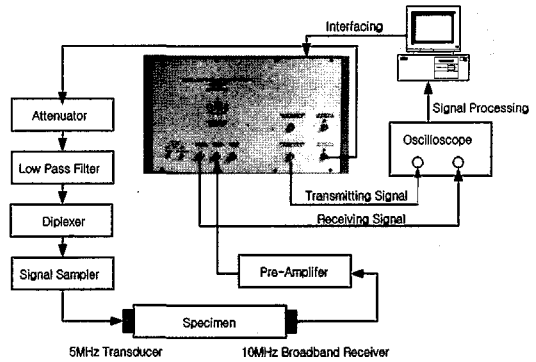


Fig. 3 Measurement system for the effect of nonlinear acoustic

송신을 위해서 사용된 탐촉자는 5MHz 협대역 압전트랜스듀서이며, 송신신호의 파형은 톤 벌스트(tone burst)를 이용하였다. 수신에는 고조파 성분을 민감하게 검출하기 위해서 10MHz가 중심 주파수인 광대역 압전트랜스듀서를 사용하였다. 여기서, 광대역 센서는 수신 초음파 신호에 발생하는 주파수 성분을 포괄적으로 관찰하기 위한 것이다. 기타 감쇠기, 필터, 복수기, 시그널 샘플러, 프리앰프는 송수신 신호의 특성을 조절하기 위한 것이다. 수신 신호는 A/D 변환되고, 수신된 파형의 데이터는 PC에서 FFT를 이용한 주파수 분석, 바이스펙트럼 해석을 통하여 비선형 파라미터의 값을 얻게된다.

4. 결과 및 고찰

4.1 비선형 파라미터의 변화

비선형 음향효과를 적용함으로써 경년열화 평가의 가능성을 실증적으로 검증하기 위하여 각각의 열화시간 단계의 시험편에 대해 초음파 비선형 파라미터를 측정하였다. Fig. 4는 파워스펙트럼에 의한 비선형 파라미터 β_{ps} 의 크기 변화를 나타낸 것이다. Fig. 5는 바이스펙트럼에 의한 비선형파라미터 β_{bs} 의 크기 변화를 나타낸 것이다. Fig. 4와 Fig. 5를 보면 파워스펙트럼과 바이스펙트럼에 의한 비선형 파라미터 모두 열화시간에 따라 증가하는 경향을 볼 수 있다. 또한 입력전압의 변화에 따라서 비선형 파라미터의 변화정도가 달리 나타났으나 입력전압이 증가할수록 민감도가 증가되는 것은 아니며, 일정전압의 입력전압에서는 유사한 경향을 얻을 수 있었다. 따라서

열화에 따른 비선형 음향효과 측정의 실험에서는 입력 전압의 적절한 선정이 필요하며, 본 실험의 경우 300V 정도이면 충분한 것으로 분석되었다.

열화시간이 증가할수록 재료의 미세조직은 탄화물 크기의 증대, 입계로의 석출이 일어나 초음파의 진행을 방해하는 산란기구로 작용하는 원인이 되어 기본 주파수 성분의 크기가 감소하게 되며[5], 비선형 파라미터는 미세조직의 변화에 민감하게 반응하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 열화시간에 따른 파워스펙트럼과 바이스펙트럼에 의한 비선형 파라미터의 크기를 비교한 결과이다. 파워스펙트럼에 의한 비선형 파라미터의 크기보다 바이스펙트럼에 의한 비선형 파라미터의 크기가 열화에 보다 민감한 경향을 볼 수 있으며 열화시간에 따라 크기차는 매우 높게 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 파워스펙트럼을 이용하는 경우 정규성 잡음이 그대로 잔류하기 때문에 주파수 성분의 미소한 변화가 정확하게 측정되지 않아 열화시간에 따른 비선형 파라미터의 민감도가 떨어지는 반면, 바이스펙트럼을 이용한 경우에는 정규성 잡음을 소거하고 순수 고조파성분만을 추출함으로써 열화시간에 따른 비선형 파라미터의 민감도가 높게 나타났기 때문으로 사료된다.

4.2. 비선형 파라미터의 상대 변화율

반복적인 실험에 따른 비선형 파라미터의 민감도를 확인하기 위해 비선형 파라미터의 상대 변화율을 조사하였다. 또한 열화시간에 따른 기본 주파수 성분 크기의 상대 변화율도 조사하여 비교하였다. 기본 주파수 성분의 상대 변화율은 초기 기본 주파수성분의 크기와 각각

열화시간에 따른 기본주파수성분의 크기의 차를 이용하여 다음과 같이 구한 것이다.

$$\left| \frac{A_i - A_0}{A_0} \right| \times 100 \quad (\%) \tag{11}$$

여기서 A_0 은 초기 기본 주파수성분의 크기를 나타내고, A_1 는 각각 열화시간에 따른 기본 주파수성분의 크기를 나타낸다.

또한 비선형 파라미터의 상대 변화율은 초기 비선형 파라미터의 크기와 각각 열화시간에 따른 비선형 파라미터의 크기를 차를 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$\left| \frac{\beta_i - \beta_0}{\beta_0} \right| \times 100 \quad (\%) \tag{12}$$

여기서 β_0 는 초기 비선형 파라미터의 크기를 나타내고, β_1 는 각각 열화시간에 따른 비선형 파라미터의 크기를 나타낸다.

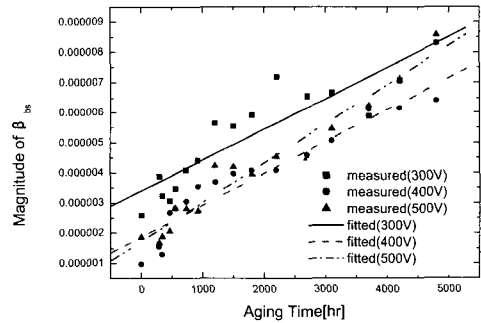


Fig. 5 Magnitude of β_{bs} for aging time

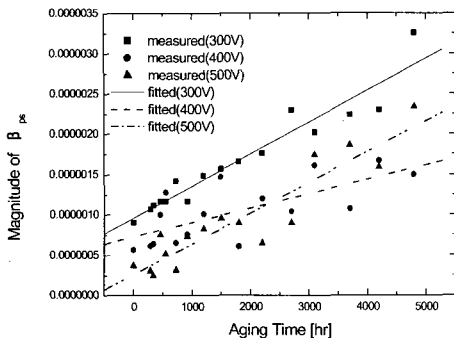


Fig. 4 Magnitude of β_{bs} for aging time

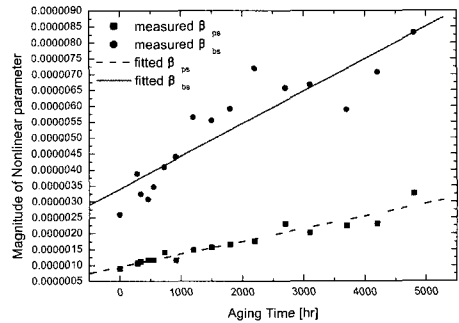


Fig. 6 Sensitivity of nonlinear parameter between β_{ps} and β_{bs}

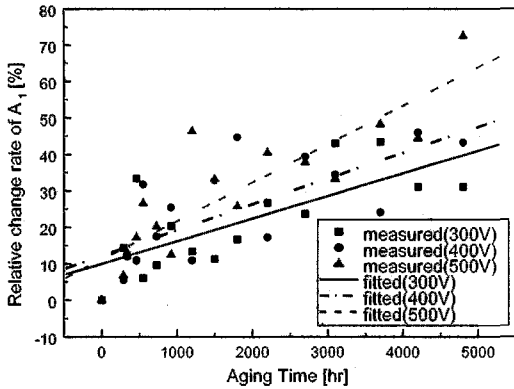


Fig. 7 Relative rate of change of A1 for aging time

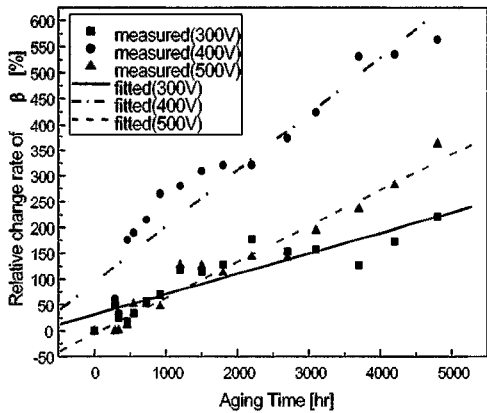


Fig. 9 Relative rate of change of β for aging time

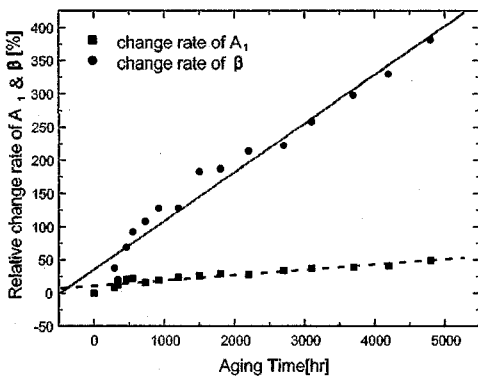


Fig. 10 Differences of relative change rate of A1 and β for aging time

Fig. 7은 기본 주파수 성분의 상대 변화율을 나타낸 것이다. 열화시간에 따라 증가하는 경향을 볼 수 있으며 송신 전압이 높을수록 민감도가 증가하고 있음을 알 수 있다. Fig. 8은 비선형 파라미터의 상대 변화율을 나타낸 것이다. A_1 의 상대 변화율과 마찬가지로 열화시간에 따라 증가하는 경향을 볼 수 있다. A_1 의 상대 변화율과 β 의 상대 변화율의 민감도 차이를 알아보기 위해 비교해본 결과 Fig. 9와 같이 나타났다. 결과에서 알 수 있듯이 A_1 의 민감도는 최대 20% 정도이지만, β 의 민감도는 최대 400%정도 나타났다. A_1 에 비해 β 의 열화에 대한 민감도가 매우 높음을 입증할 수 있다.

5. 결 론

인공 열화된 2.25Cr-1Mo강의 열화도 평가를 위해 초음파 비선형 음향효과를 적용하여 실험적으로 검증한 결론은 다음과 같다.

- (1) 열화 시간이 증가함에 따라 기본 주파수성분의 크기는 감소하였으며, 비선형 파라미터는 증가하였다.
- (2) 열화도 평가에 적용되는 비선형 파라미터는 파워스펙트럼에 비해 바이스펙트럼 해석을 적용한 경우에 민감도가 좋게 나타나 열화도를 평가하는 유용한 파라미터라고 사료된다.
- (3) 송신전압은 300V 정도 이상이면 열화에 충분히 민감한 비선형 파라미터를 구할 수 있었다.

참고문헌

- [1] M. Yamashita, U. K. Viswanathan, I. Yamamoto and T. Kobayashi, "Service-induced Changes in the Microstructure and Mechanical Properties of a Cr-Mo-Ni-V Turbine Steel," *ISIJ International*, Vol. 37, No. 11, pp. 1133-1138, (1997)
- [2] R. Viswanathan and S. M. Bruemmer, "In-Service Degradation of Toughness of Steam Turbine Rotors," *Transactions of the ASME*, Vol. 107, pp. 316-324, (1985)
- [3] 정희돈, "고온설비의 경년열화와 측정법", *대한기계학회지*, 제 31권, 제 3호, pp. 251-260, (1991)
- [4] S. K. Hur, K. T. Hong and J. M. Do, "The measurement of Degradation in Creep-Ruptured

- Cr-Mo-V steels by NDE Methods," Proc. of the 2nd Conference on Mechanical Behaviors of Materials, Seoul, Korea, pp. 17-24, (1998)
- [5] 박은수, 박익근, 김정석, 김현목, 변재원, 권숙인, "2.25Cr-1Mo 강 인공 열화재의 고주파수 초음파 감쇠특성에 관한 연구", 비파괴검사학회지, 제 21권, 제 4호, pp. 439-445, (2001)
- [6] 장경영, 김경조, "비선형 음향효과를 이용한 미세결합(열화)의 조기 검출", 비파괴검사학회지, 제 18권, 제 5호, pp. 365-371, (1998)
- [7] 정현조, 남승훈, 장경영, 남영현, "비선형 음향효과에 의한 고온 재료의 파괴인성 열화도 평가", 비파괴검사학회지, 제 20권, 제 5호, pp. 424-430, (2000)
- [8] 김경조, 장경영, "음향 비선형파라미터의 추정을 위한 바이스펙트럼 해석법의 적용", 비파괴검사학회지, 제 19권, 제 2호, pp. 85-92, (1999)
- [9] I. Y. Demin, "Nonlinear Characteristics of Propagation of Low frequency Vibration on Soft Tissues and its Measurement using Bispectral Analysis," Proceeding of 13th ISNA, pp. 344-349, (1993)
- [10] R. Truell, "Ultrasonic Methods in Solid State Physics", Academic Press, New York, (1969)
- [11] W. T. Yost, "Ultrasonic Nonlinearity Parameters and Third-order Elastic Constants of Copper between 300 and 3° K," JAP, Vol. 52, No. 1, pp. 126-128, (1981)
- [12] A. M. Adbel-Latif, J. M. Corbett and D. M. R. Talpin, "Analysis of 2.25Cr-1Mo Steel," Met. Sci., Vol. 16, pp. 90-96, (1982)