

# 초음파 비선형성을 이용한 2.25Cr-1Mo 강의 열화도 평가

최윤호\* · 김현묵\* · 장경영\*\* · 박익근\*\*\*

## Evaluation of Degradation of 2.25Cr-1Mo Materials using the Nonlinear Acoustic Effect

Yun-Ho Choi, Hyun-Mook Kim, Kyung-Young Jhang and Ik-Keun Park

**Key Words :** Nonlinear Acoustic Effect(비선형 음향효과), Material Degradation(재료 열화), Nonlinear Parameter(비선형 파라미터), Ultrasonic Wave(초음파)

### 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 degradation of 2.25Cr-1Mo steel is investigated. Firstly, a number of 2.25Cr-1Mo steel samples were heat-treated, and their damage mechanism was examined. Secondly, Ultrasonic nonlinear parameter was measured. Nonlinear acoustic parameter was found to be clearly sensitive to the material degradation.

### 1. 서론

지금까지 국내에 건설되어 가동되고 있는 발전 설비, 화학플랜트 등 고온 고압의 가혹한 환경에서 사용되는 구조물은 사용 년 수가 증가함에 따라 점차 노후화 되고 있으며, 재질의 기계적 성질이 약화되는 경년 열화(aging degradation)가 발생한다. 따라서 이러한 경년 열화를 in-line 으로 검사하기 위한 비파괴적 평가기법에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다.<sup>(1-4)</sup>

고온에서 사용되는 플랜트 설비는 Cr-Mo 강, Cr-Mo-V 강, Stainless 강과 같은 고온에서 우수한 기계적 성질을 갖는 내열강이 널리 사용되고 있다.

그러나 이들 재료는 고온에서 장시간 사용되는 동안에 탄화물이나 금속간 화합물의 입내 및 입계 석출, 수소석화 등으로 인하여 사용시간이 경과함에 따라 금속학적 미세조직의 변화를 일으키고 초기의 우수한 특성이 저하되는 재료 열화를 일으킨다.<sup>(1)</sup>

재질 열화도를 평가하는 방법은 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법으로 나눌 수 있다. 이러한 방

법 중 고온 설비부재의 열화도 평가는 현장에서 재료를 채취하여 충격시험, 크리프시험, 인장시험, 파괴인성시험 등과 같은 파괴적인 방법<sup>(5-6)</sup>을 이용하여 평가하는 것이 신뢰성이 높다. 하지만 가동 중인 현장에서 구조물에 손상을 가하지 않고 시험편을 채취한다는 것은 사실상 불가능하고 시간적 제약과 경제적으로 많은 문제점을 내포한다. 즉 재료의 전체적 시험이 불가능하고 결과도출에 많은 공정이 필요할 뿐만 아니라 측정변수의 해석이 어렵고 신뢰도가 낮아 현장 적용의 어려움이 수반된다. 따라서 구조물을 파괴시키지 않고 손상 정도를 정량적으로 온라인 모니터링 할 수 있는 고감도, 고정밀도의 정량적인 비파괴 평가 기법의 확립이 필요하게 되었다. 특히 초음파에 의한 비파괴 평가가 유용한 것으로 인식되고 있다.

초음파 비파괴평가(UNDE) 기법은 측정의 간편성, 높은 측정감도, 측정결과 해석의 신속성 및 신뢰성 확보에 우수한 것으로 보고되고 있다.<sup>(5)</sup> 초음파 비파괴평가에 의한 열화도 평가에는 초음파 파형이 가지고 있는 각종 특징량의 파라미터를 추출하여 이들이 갖는 강한 특징량(strong feature) 파라미터와 재료의 열화·손상 등 물성변화와의 상관성을 도출하고 수치화하여 열화도를 평가한다.

일반적인 초음파 비파괴 방법, 예를 들어 속도, 감쇠 또는 산란을 측정하는 방법들은 일단 조직의 변화가 발생한 다음에 이를 검출할 수 있는 방법으로, 조직의 변화가 크게 발생할 수 있는 상태,

\* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

\* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\* 한양대학교 기계공학부

\*\*\* 서울산업대학교 기계공학과

즉 조직의 변화의 발생 직전의 탄화물의 변화를 예견적으로 검출하기는 곤란하다. 실제로 결함이라고 생각되는 조직의 변화는 찾아낼 수 있지만 결함이 아닌 조직의 변화는 즉, 탄화물이 혼재되어 있는 경우는 찾아내기 매우 어렵다. 이에 반해 최근 비선형 음향효과(nonlinear acoustic effect)가 재료의 열화에 민감하다는 사실이 보고되고 있다.

장<sup>(7)</sup> 등은 초음파 비선형성이 인장하중과 피로하중을 받은 재료의 조기 열화손상 검출에 유용함을 발표한 바 있으며, 이로써 고온부재의 경년열화와 초음파 비선형 파라미터의 상관성이 높을 것으로 예견된다.

초음파 비선형 음향효과는 음파가 전파함에 따라 기본 주파수성분에 대해서 2 차나 그 이상의 고조파성분이 발생하는 것으로 설명될 수 있다.<sup>(8)</sup>

하지만 비선형 음향효과에 의해 발생하는 고조파 성분의 크기가 기본 주파수에 비하여 매우 미소하기 때문에 원래 신호에 혼입된 잡음의 영향을 크게 받을 수 있다. 이러한 주파수 변화를 해석하기 위해 예전에는 파워 스펙트럼 기법을 이용하였으나 이 기법은 정규성 잡음이 그대로 잔류하게 때문에 주파수 성분의 미소한 변화를 정확하게 알아낼 수 없다는 본질적인 한계가 있었다. 이러한 파워 스펙트럼의 단점을 보완할 수 있는 신호처리 기법으로 바이 스펙트럼 기법이 제안된 바 있다. 이 기법은 정규성 잡음을 소거할 수 있을 뿐만 아니라 특정한 위상관계를 유지하는 두 주파수 성분을 검출할 수 있다는 특징으로부터 기본 주파수 성분과 일정한 위상을 유지하는 순수 고조파 성분만을 추출해야 하는 비선형 음향효과의 측정에 매우 효과적인 방법으로 여겨진다.<sup>(9)</sup>

본 연구에서는 2.25Cr-1Mo 강에 대하여 장시간 등온열처리로 모의 열화시험편을 제작하여 고온설

비부재에서 발생하는 경년 열화와 비선형 음향효과와의 상관관계를 규명함으로써 초음파 비파괴평가에 의한 고온부재의 열화도 평가의 가능성을 실험적으로 검증하였다.

## 2. 실험

### 2.1 모의 열화시편 제작

실험에 사용된 시편은 터빈로터용 소재로 사용되는 2.25Cr-1Mo 강으로 900°C에서 1 시간 노말라이징(normalizing)처리 후 720°C에서 1 시간 템퍼링(tempering)처리한 포항제철에서 제조된 합금을 사용하였으며 화학적 성분을 Table 1에 나타내었다.

본 연구에서는 실제 발전소 터빈에서 오랜 기간 사용된 재료와 유사한 미세조직을 갖도록 모의 열화 시편을 제작하기 위하여 시편을 인위적으로 일 반 사용온도(538°C)보다 높고 재결정온도보다 낮은 630°C의 온도에서 고온 열처리를 통한 가속 열처리를 수행함으로써 고온 장기 사용재와 유사한 미세조직을 시뮬레이션하였다. 본 연구에서 실시한 가속열처리시간은 Table 2과 같다. 그리고 Table 3은 2.25Cr-1Mo 강의 기계적 성질을 나타내 고 있다.<sup>(10)</sup>

### 2.2 초음파 시편 제작

Fig. 1은 시편의 형상과 치수를 나타낸다. 시편의 표면을 #800 ~ #1500 연마지를 사용하여 연마처리 하였다.

Table 1 Chemical composition of 2.25Cr-1Mo steel(wt. %)

Element	C	Si	Mn	S	P	Al	Cr	Mo	Ni	Fe
Comp.	0.138	0.142	0.46	0.004	0.014	0.07	2.27	0.97	0.97	Bal.

Table 2 Determination of accelerated aging time at 630°C for equivalent microstructure

Time Serviced at 538°C [hr]	As-received	65,000	100,000	170,000	260,000
Aging Time at 630°C [hr]	0	1,500	1,800	3,100	4,800

Table 3 Mechanical properties of 2.25Cr-1Mo steel

Mechanical property	Yield strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
Value	49	64.3	24	203.8

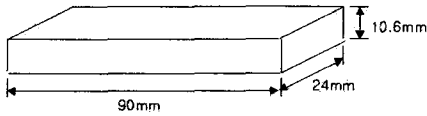


Fig. 1 Shape and Dimensions of specimen

### 3. 초음파 비선형 음향효과

#### 3.1 이론

먼저, 설명을 위하여 식(1)에 나타낸 비선형 버전의 후크 법칙을 생각하자.<sup>(11)</sup>

$$\sigma = E\varepsilon(1 + \beta\varepsilon + \dots) \quad (1)$$

여기서, E는 Young's modulus 이고,  $\beta$  는 2 차 비선형 탄성계수다. 본 논문에서는 식(1)의 2 번째 항, 즉 2 차항까지만 고려하기로 한다.

이와 같은 비선형 탄성효과에 의해서 음파(탄성파)가 매질을 전파함에 따라서 고조파 성분이 발생하게 되는데, 그 과정에 대한 설명을 위하여, Fig. 2 에 보인 바와 같이 정현파의 초음파 종파가 열화된 금속재료를 통과하는 경우를 생각한다.

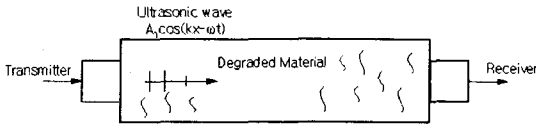


Fig. 2 One dimensional wave propagation in a degraded material

그림에서,  $A_1$  은 단일 주파수를 갖는 초기 파형의 진폭이고,  $\omega$  는 각주파수,  $k$  는 파수이다. 감쇠가 무시되는 경우의 1 차원적 거동에 대해서, 운동방정식은 다음과 같이 된다.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} \quad (2)$$

여기서,  $\rho$  는 밀도이고  $u$  는 변위이다.

식(2)에 식(1)의 관계를 대입하고, 변위  $u$  와 변형율과의 관계  $\varepsilon(x,t) = \frac{\partial u(x,t)}{\partial x}$  를 이용하면, 다음과 같은 비선형 파동 방정식을 얻을 수 있다.

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

식(3)의 해를 구하기 위해서, 섭동 이론을 적용한다. 우선, 변위  $u$  를 식(4)처럼 가정한다

$$u = u_0 + u' \quad (4)$$

여기서,  $u_0$  는 초기 변위로, Fig. 1 에 나타낸 파형과 같고,  $u'$  는 1 차 섭동해이다. 섭동해를 구하여 식(4)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$u = u_0 + u' \\ = A_1 \cos(kx - \omega t) - A_2 \sin 2(kx - \omega t) \quad (5)$$

여기서,

$$A_2 = \frac{\beta}{8} A_1^2 k^2 x \quad (6)$$

즉, 식(5)의 두 번째 항이 2 차 조화성분을 나타냄을 알 수 있고, 이로써 2 차 조화성분이 전파 과정을 통하여 발생한다는 것을 설명할 수 있다. 또한, 식(6)에서 2 차 조화성분의 크기  $A_2$  가  $\beta$  에 의존한다는 것을 알 수 있는데,  $\beta$  는 재료의 특성을 나타내는 물질상수이므로, 만약 우리가  $\beta$  의 변화를 알아낼 수 있다면, 그 재료의 특성 변화 즉, 변질의 정도를 정성적으로 측정할 수 있게 된다. 그러나,  $A_2$  는  $\beta$  외에도 초기파형의 진폭  $A_1$ , 파수  $k$ , 전파거리  $x$  에 관계되므로 재료의 변질과 관련된 성분만을 추출하기 위해서는  $A_1, k, x$  등 실험 조건을 일관성 있게 유지해야 할 필요가 있다.

이것이 곤란한 경우에는  $A_2$  를 측정하기 보다는  $\beta$  를 측정해야 하며 식(6)으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\beta = \frac{8A_2}{A_1^2 k^2 x} \quad (7)$$

또, 전파거리  $x$  와 파수  $k$  가 일정하다고 가정하면 정규화된 비선형 음향파라미터  $\beta'$  를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\beta' = \frac{\beta k^2 x}{8} = \frac{A_2}{A_1^2} \quad (8)$$

본 연구에서는  $\beta'$  를 후술하는 바이스펙트럼 해석법을 이용하여 구하였다.

### 3.2 측정장치

Fig. 3 은 수신 초음파 신호에 포함된 2 차 조화 성분의 크기를 정확하게 계측하기 위한 실험장치의 구성도를 나타낸다. 이 시스템은 저잡음으로 데이터의 획득이 가능한 초음파 신호분석 장치인 RAM5000(미국 RITEC 사)을 포함하고 있다.

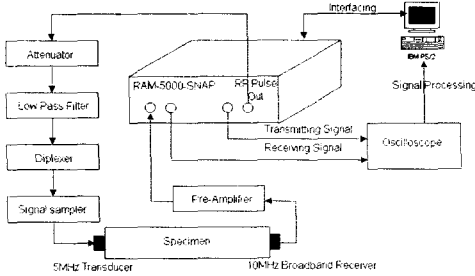


Fig. 3 Measurement system for higher harmonic components

송신을 위해서 사용된 탐촉자는 직경 0.5in 인 5MHz 협대역 압전 트랜스듀서이며, 송신신호의 파형은 톤 버스트(tone burst)를 이용하였다. 수신에는 2 차 고조파 성분을 민감하게 검출하기 위해서 10MHz 가 중심 주파수인 광대역 압전트랜스듀서를 사용하였다. 여기서, 광대역 센서는 수신 초음파 신호에 발생하는 주파수 성분을 포괄적으로 관찰하기 위한 것이다. 기타 감쇠기, 필터, 앰프는 송수신 신호의 특성을 조절하기 위한 것이다. 수신 신호는 A/D 변환되고, PC 에서 처리된다. Fig. 4 은 2.25Cr-1Mo 시편에 대한 송수신 신호의 예를 보여준다.

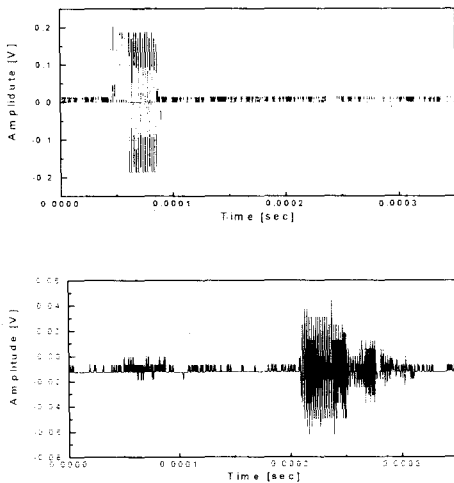


Fig. 4 Example of Transmitted and Received Signal

### 3.3 바이 스펙트럼 해석을 이용한 비선형 파라미터의 측정

이전의 연구에서는 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. 특히 비선형 음향효과에 의해 발생하는 고조파 성분의 크기는 기본 주파수 성분에 비하여 매우 작기 때문에 원래 신호에 혼입된 잡음의 영향을 크게 받을 수 있다. 파워 스펙트럼은 다음과 같이 2 차 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 2 차의 자기상관함수이고,  $X(\omega)$  는  $x(t)$  의 푸리에 변환이다.

일반적으로 고체 재료에서의 비선형 파동시스템에서 단일 주파수  $\omega_1$  의 조화성분의 시계열신호

$x(t) = A_1 \sin(\omega_1 t)$  를 입력함수로 하였을 때 출력함수는 2 차 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 2 차 조화 성분의 진폭을 나타낸다. 이러한 신호에서  $\omega = \omega_2(2\omega_2)$  인 경우의 각각의 파워스펙트럼 값  $P(\omega_1)$ ,  $P(\omega_2)$  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  $\beta'$  은 다음과 같이 구할 수 있다.

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

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

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

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

과워 스펙트럼의 계산에서와 마찬가지로 비선형 전파 시스템에서 출력이 식(10)과 같은 경우에  $\omega_m = \omega_1$ ,  $\omega_n = \omega_2$ 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  $\beta'$ 는 다음과 같이 구해질 수 있다.

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

#### 4. 실험결과 및 고찰

비선형 음향 효과를 측정함으로써 경년 열화 평가의 가능성을 실증적으로 검증하기 위해 경년 열화를 인공적으로 0에서 4800 시간사이에 가열시킨 열화시편에 대해 초음파 비선형 파라미터를 측정하였다.

Fig. 5는 파워스펙트럼에 의한  $\omega_2$ 의 열화시간에 따른 상대적인 크기를 나타낸다. 열화시간이 증가할수록  $\omega_2$ 는 증가되었으며, 송신 트랜듀서의 입력 전압을 증가할수록 감도가 증가하였다. 그러나 300V의 낮은 입력전압에서는 열화시간에 따른  $\omega_2$ 의 일정한 경향을 얻을 수 없었다. 반면, 바이스펙트럼을 이용한 Fig. 6의 비선형 파라미터는 열화시간에 따라 증가되었으며, 모든 입력전압에서 일정한 경향이 나타났으며, 비교적 높은 입력전압에서 열화에 따른 비선형 파라미터의 민감도가 높은 결과가 나왔다. 이러한 결과는 파워스펙트럼을 이

용할 경우 정규성 잡음이 그대로 잔류하기 때문에 주파수 성분의 미소한 변화를 정확하게 측정되지 않는 반면 바이스펙트럼을 이용한 경우는 정규성 잡음을 소거할 수 있어 시편의 미세조직변화에 순수 고조파 성분만을 추출하는 것이 가능하기 때문이라 판단된다.

그러나, 입력전압이 증가할수록 민감도가 증가되는 것은 아니며, 일정 이상의 입력전압에서는 경향을 얻을 수 없었다. 따라서 열화에 따른 비선형 음향효과와 실험에서는 입력전압의 적절한 선정이 필요하다.

열화시간이 증가할수록 시편의 미세조직은 결정입의 크기는 변화하지 않으나, 결정입계 또는 입내의 탄화물 석출로 인해 기계적 성질이 변화되는 것으로 알려져 있다.<sup>(10)</sup> 이러한 탄화물 석출은 초음파가 진행할 때 산란기구로 작용하게 되어 비선형 음향효과를 일으키는 원인이 되는 것을 사료된다.

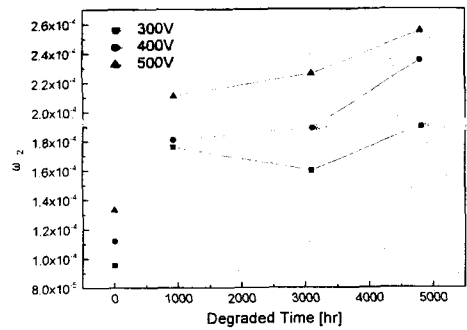


Fig. 5 Relative Magnitude of  $\omega_2$  Component for Power spectrum for aging degraded specimen

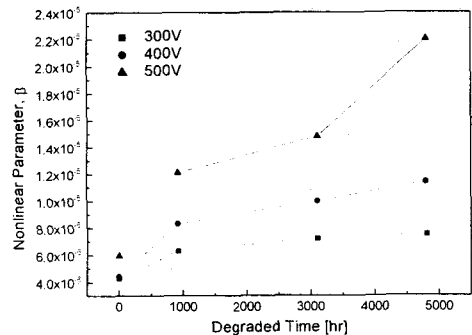


Fig. 6 Relative Magnitude of Nonlinear Parameter for aging degraded specimen

## 5. 결론

열화된 2.25Cr-1Mo 강 시편에 대하여 초음파 비선형 음향효과에 관한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

초음파 비선형 음향 파라미터는 재료가 열화될 수록 증가하였으며, 특정한 입력전압에서 높은 민감도를 나타내는 것으로 확인되었다.

시편 내부의 결정입계 또는 입내의 탄화물 석출이 산란기구로 작용하여 비선형 파라미터가 증가되는 원인으로 판단된다.

초음파 비선형 음향효과를 이용하여 비파괴적으로 2.25Cr-1Mo 강의 열화 평가의 가능성이 확인되었다.

향후, 열화재의 탄화물 석출에 대한 초음파 산란과 비선형 음향효과와의 상관관계를 규명하고자 한다.

## 참고문헌

- (1) Mitsuo Yamashita, U.K.Viswanathan, Isamu Yamamoto and Toshiro 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.Bruegger, "In-Service Degradation of Toughness of Steam Turbine Rotors", Transactions of the ASME, Vol.107, pp.316~324, (1985)
- (3) 정희돈, "고온설비의 경년열화와 측정법", 대한 기계학회지, 제 31 권, 제 3 호, 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 2<sup>nd</sup> Conference on Mechanical Behaviors of Materials, Seoul, Korea, pp.17~24,(1998)
- (5) 남승훈, 김시천, 박종서, 김엄기, "소형 Charpy 충격시험을 이용한 1Cr-1Mo-0.25V 강의 인성 열화도 평가", 대한 기계학회, 추계학술대회논문집 A, pp.196~201,(1998)
- (6) 서창민, 윤기봉, 윤석호, 김승태, "열화시킨 1Cr-1Mo-0.25V 강의 고온에서의 JIC 및 Tmat 평가", 제 2 회 경년열화 및 수명평가 심포지엄 논문집, pp 27~55,(1995)
- (7) 장경영, 김경조, "비선형 음향효과를 이용한 미세결함(열화)의 조기 검출", 비파괴검사학회지, Vol. 18, No. 5, pp. 365~371. (1998)
- (8) 김경조, 장경영, "음향비선형파라미터의 추정을 위한 바이스펙트럼 해석법의 적용", 비파괴검사학회지, vol. 19, No. 2, pp. 85~92, (1999)
- (9) I.Y.Demin, et,al, Nonlinear Characteristics of Propagation of Low frequency Vibration on Soft Tissues and its Measurement using Bispectral Analysis, Proceeding of 13<sup>th</sup> ISNA,pp.344~349,(1993)
- (10) 김정석, 박은수, 박익근, 권숙인, 김현목, "표면 SH 파를 이용한 2.25CrMo 강의 열화-손상평가", 대한 기계학회, 추계학술대회논문집 A, pp 280~285,(2000)
- (11) J. A. TenCate, et, al, "Laboratory Study of Linear and Nonlinear Elastic Pulse Propagation in Sandstone", JASA 100, pp 1383~1389,(1996)