초음파법을 이용한 1Cr-1Mo-0.25V강의 열화도 평가에 관한 연구

김 정 표† · 석 창 성*

(2001년 5월 19일 접수, 2001년 9월 17일 심사완료)

A Study on the Evaluation of Material Degradation of 1Cr-1Mo-0.25V Steel using Ultrasonic Techniques

Jeong-Pyo Kim and Chang-Sung Seok

Key Words: Material Properties(재료물성치), Nonlinear Parameter(비선형파라미터), Degradation(열화), Ultrasonic Technique(초음파법), 1Cr-1Mo-0.25V steel(1Cr-1Mo-0.25V 강)

Abstract

It's required mechanical properties of in-service facilities to maintain safety operation in power plants as well as chemical plants. In this study the four classes of the thermally aged 1Cr-1Mo-0.25V specimens were prepared using an artificially accelerated aging method at 630℃. Ultrasonic tests, tensile tests, K_{IC} tests and hardness tests were performed in order to evaluate the degree of degradation of the material. The mechanical properties were decreased as degraded, but the attenuation coefficient and the harmonic generation level of a ultrasonic signal were increased. Expecially the nonlinear parameter derived from the harmonic generation level is sensitive and will be a good parameter to evaluate the material degradation.

1. 서 론

대형에너지 변화설비의 지속적인 증설과 사용년 수의 증가에 따라 설비의 안전성 확보 및 수명 예측 기술이 요구되고 있다. 이러한 설비의 수명 및 안전성을 평가하기 위해서는 설비의 재료물성치를 알아야 하며, 이러한 물성치는 가동년수의 증가에 따라 변화되는 것으로 알려져 있다. 특히 가혹한 환경하에서 운전되는 산업설비에는 기계적 성질이 저하되는 재료열화현상이 발생된다. 이러한 열화현상은 설비의 수명과 안전운전에 영향을 미치므로 이에 대해 정기적이고 지속적인 검사가 요구되고 있다.[1]

가동 중 설비의 열화도를 비파괴적인 방법으로 평가할 수 있으며, 압입법, 초음파법, 전기비저항법, 레프리카법 등이 연구되고 있다.[2,3] 이들 방법 중 초음파법은 재료 내부 결함의 검출뿐만 아니라 기계적 성질 등의 재료물성치 평가에도 이용되고 있는 방법이다. 초음파법은 선형초음파법과 비선형초음파법으로 나누어지며, 선형초음파법은 재료 내에 음파를 입사시켜 음파와 재료와의 상호작용 후 산란된 신호를 분석하여 음파의 감쇠, 속도 등을 측정하여 재료의 정보를 얻는 방법이다.

특히, 음파의 감쇠계수는 재료내 결정립의 크기와 음파의 주파수와 관련하여 민감하게 결정된다. 또한 매질이 분산매질의 경우 음파의 속도는 주파수에 의존하는 것으로 알려졌다.[4~6] 비선형 초음파법은 매질에 입사된 음파가 매질내의 비선형 응답을 수반하는 인자인 동공, 균열, 전위 등과 상호작용으로 왜곡되는 원리를 이용하는 방법이다. 특히 기본파의 배진동 발생은 비선형 응답의 대표적인 현상이다.[7~9]

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 대학원 기계공학과
E-mail : jpkim@nature.skku.ac.kr
TEL : (031)290-7477 FAX : (031)290-7482
* 회원, 성균관대학교 기계공학부

본 연구에서는 1Cr-1Mo-0.25V강을 630℃에서 등온 열화방법으로 453 시간, 933 시간, 1820 시간 열화시킨 3종류의 열화시편과 열화시키지 않은 시편을 준비하였으며,[10,11] 이를 대상으로 열화단계에 따른 기계적인 재료물성치를 평가하였다. 또한 열화에 따른 초음파 파라미터를 측정하여 기계적 재료물성치의 변화와 비교· 분석하였다.

2. 열화재의 강도 평가

2.1 기계적인 물성치 측정

2.1.1 인장시험

인장시험에 사용된 시험기는 Shimadzu사의 25,000kg 용량의 전기유압식 만능시험기(Autograph AG-25TG)이며, 상온에서 시험을 수행하였다. 이때 인장속도는 1 mm/min였으며, 인장시험은 ASTM E 8-00(KS B 0801)에 준하여 수행되었다.[12]

Table 1은 1Cr-1Mo-0.25V강의 화학성분 조성비를 보여주고 있다. Table 2에는 1Cr-1Mo-0.25V강의 열화전 재료와 각 단계별 열화재에 대한 인장시험의 결과인 항복강도(yield strength), 인장강도, 연신율(uniform elongation)를 나타내었다. Fig. 1은 열화에 따른 진응력-진변형률 선도를 도시한 그림이다. 이들 결과로부터 열화가 진행됨에 따라 인장강도와 항복강도가 감소되고 연신율이 증가된다는 것을 알 수 있다. 특히, 453 시간 열화재의 인장강도와 항복강도는 신재와 비교하여 약 20 % 감소되었으며, 933 시간 이후에는 감소율이 둔화되어짐을 알 수 있다

2.1.2 경도시험

경도시험에 사용된 시험장비는 Akashi사의 마이크로 비커스경도기(Micro Vickers hardness tester : MVK-H2)이다. 경도시험에서 측정면을 0.5 ㎛ 크기의 알루미나 분말을 이용하여 습식으로 경면제작하여 표면 거칠기에 의한 경도치의 변화를 배제하였다. 압입점간의 거리가 경도치에 미치는 영향을 배제하기 위해서 압흔의 5배 이상의 충분한 간격을 두고 현미경과 모니터로 관찰하면서 원하는 위치에서 경도를 측정하였다. 압입 횟수는 열화전 재료와 열화단계별로 4개의 시험편에 대해 시험편 당 10회로 하였으며, 시험하중은 10초 동안에 1 kg_f 까지의 하중이 작용하도록 하였다.

Fig. 2에는 단계별로 열화된 시편의 비커스 경도(Vickers hardness)를 나타내었다. 열화가 진행됨에 따라 경도값이 인장강도와 유사한 경향으로 감소되고 있음을 볼 수 있다.

2.1.3 파괴인성시험

파괴인성시험에 사용된 시험기는 인스트론사(Instron Model 1332)의 25000 kg 용량 전기유압식 재료시험기 이며 ASTM E 399-90의 K_{IC} 시험방법에 따라 시험을 수행하였다.[13] 각 열화 단계별로 2개의 CT 표준시험편을 사용하였다.

상온에서 K_{IC} 시험을 수행하였으며 ASTM E 399에 따라 P_Q를 결정한 후 이로부터 K_Q를 결정하였다. 이때 K_{IC}의 충족 조건을 만족하지 못하였으므로 K_Q로 표시하였다. Fig. 3은 열화시간에 따른 K_Q값의 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 3에서 열화가 진행될수록 파괴인성치 K_Q가 지속적으로 감소되는 경향을 볼 수 있다. 특히 열화진행에 따라 K_Q값의 변화는 비선형적으로 감소하는 인장강도, 경도 등의 경향과 비교시 선형적으로 감소되고 있음을 알 수 있다. 전반적으로 파괴시험 결과는 열화가 진행됨에 따라 기계적인 성질이

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

Table 2 Tensile and hardness test results

Aging Time (hour)	Yield Strength (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Uniform Elongation (%)	Vickers Hardness
0	711	844	25.3	292
453	533	676	26.8	245
933	481	615	27.8	218
1,820	450	582	30.7	196

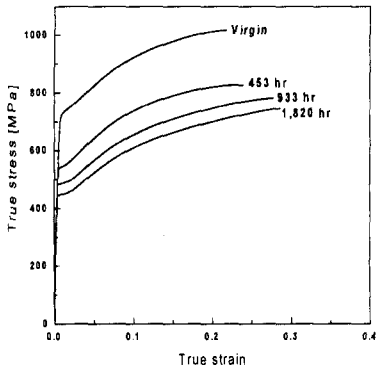

Fig. 1 Effect of degraded time on true stress-true strain curve

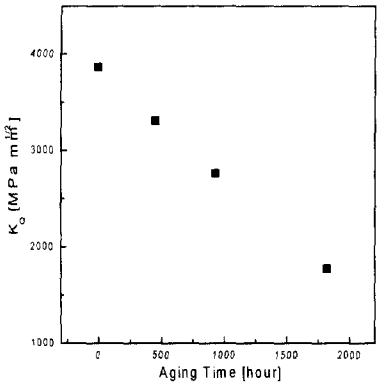

Fig. 3 Effect of degraded time on fracture toughness

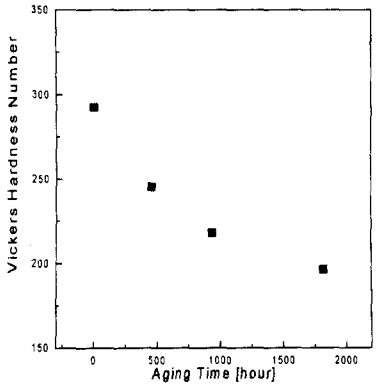

Fig. 2 Effect of degraded time on vicker hardness

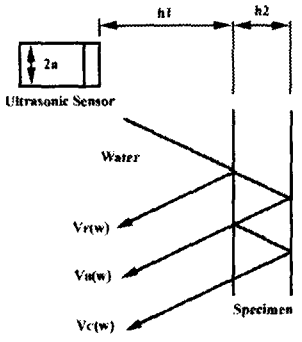

Fig. 4 Wave propagation diagram

감소하는 현상과 일치하고 있으며, 특히 선형적인 감소를 보이는 K_Q는 다른 재료물성치와 비교시 열화를 평가, 예측하기에 유용한 것으로 판단된다.

3. 초음파 특성 평가

3.1 감쇠 계수

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. 4는 수침법을 이용한 음파의 진행도를 나타낸 그림이다. 센서(Parametric, V356 30/.25)의 중심 주파수는 16.7 MHz이며, -3 dB 주파수 밴드는 12.8 MHz~21.7 MHz 이었다. 이때 센서와 시편 표면과의 거리(h1)와 시편의 두께(h2)는 각각 0.0197 m, 0.0102 m 이며, 센서의 반지름(a)은 0.0063 m 였다.

음파의 스펙트럼은 진폭 스펙트럼과 위상 스펙트럼으로 구분되며, 위상 스펙트럼은 시간 영역에서 신호를 포착하여 FFT(Fast Fourier Transform)를 수행하여 얻어 졌다. 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 안정될 때까지 평균을 수행한 후 분석하여 감쇠계수를 얻었다.[14] 이때 샘플링속도를 100 MS/s 로 하였다.

Fig. 5는 수침법을 이용하여 각 열화단계별로 10번을 측정하여 평균한 감쇠계수를 도시한 그림이다. 감쇠의 경우 열화가 진행될수록 감쇠계수가 대체적으로 커졌으며, Fig. 6은 중심주파수에서 열화진행에 따른 감쇠계수의 증가를 보여주고 있다. 감쇠계수의 측정 편차는 ± 0.001 N/mm였다.

3.2 비선형 응답

Fig. 7은 음파의 비선형현상을 관찰하기 위한 시험장치도이다. 시편의 크기는 0.02× 0.03× 0.05(m)이며, 두 개의 독립적인 고주파수와 저주파수의 센서가 글루(glue)를 사용하여 양 끝단에 부착되었다. 공진주파수가 500 kHz인 센서와 1 MHz인 센서를 각각 발신용과 수신용 센서로 사용하였다. 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/s이였다.

재료의 열화에 따라 발생되는 배진동의 진폭을 관측하기 위하여, 재료에 저주파 센서로 연속파를 발생시켰으며, 수신센서를 이용하여 배진동을

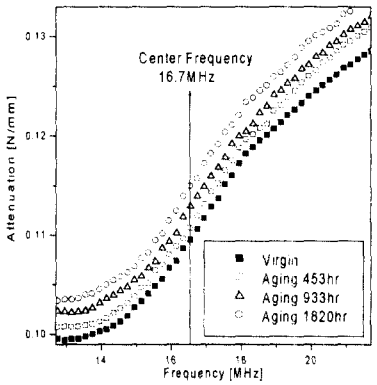

Fig. 5 Attenuation vs. frequency for 4 different 1Cr-1Mo-0.25V steel

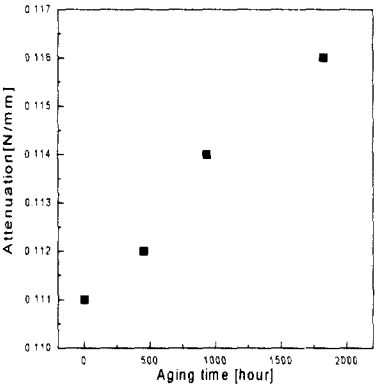

Fig. 6 Attenuation vs. center frequency for 4 different aging specimens

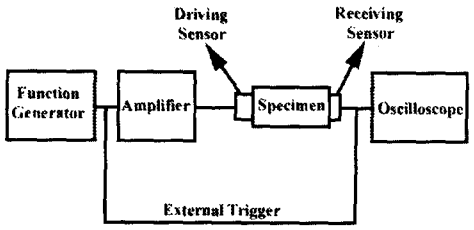

Fig. 7 Block diagram of apparatus for nonlinear acoustics

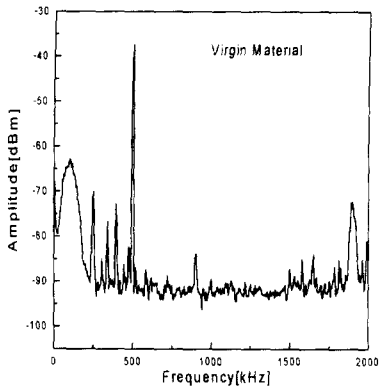

Fig. 8 Absent nonlinear response on virgin material for 1Cr-1Mo-0.25V

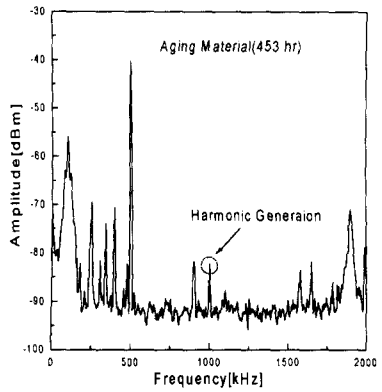

Fig. 9 Nonlinear response on aging material for 1Cr-1Mo-0.25V (453hour)

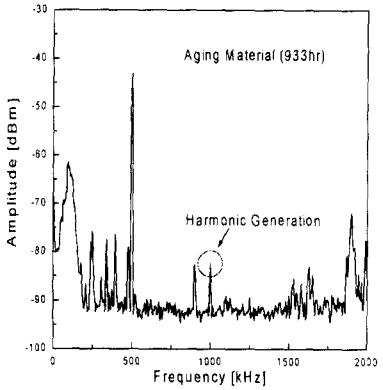

Fig. 10 Nonlinear response on aging material for 1Cr-1Mo-0.25V (933hour)

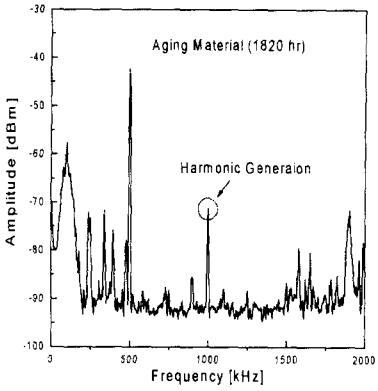

Fig. 11 Nonlinear response on aging material for 1Cr-1Mo-0.25V (1820hour)

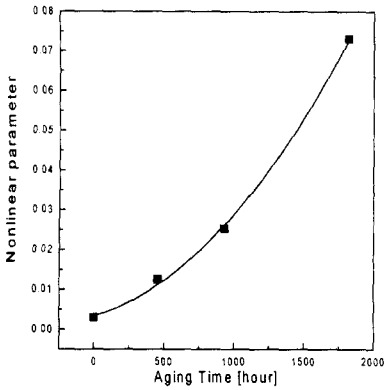

Fig. 12 Nonlinear parameter(β) for different aging specimens

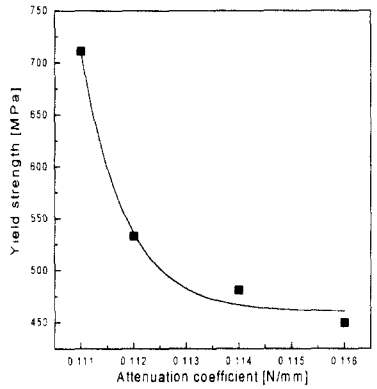

Fig. 13 Attenuation vs. yield strength for each aging specimens

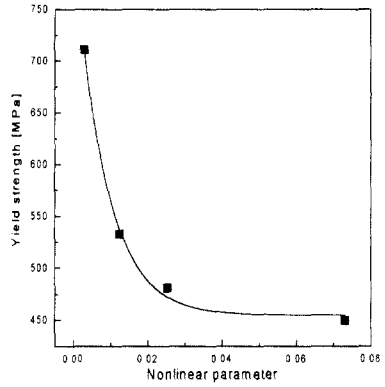

Fig. 14 Nonlinear parameter vs. yield strength for each aging specimens

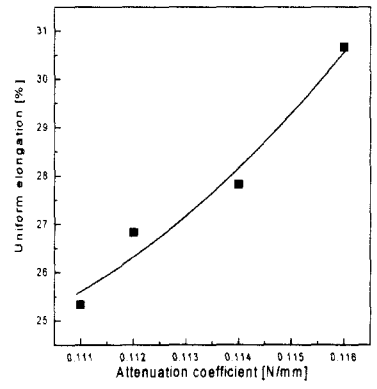

Fig. 15 Attenuation coefficient vs. uniform elongation for each aging specimens

관찰하였다. 먼저 센서와 시험장치에 의한 비선형성을 피하기 위해 원재료에서 증폭비를 변화시키며 신호를 관찰하여 배진동이 발생되지 않는 적정한 증폭비(40 dB)를 설정하였다. 이를 기준으로 열화시편에 따른 배진동의 발생효율을 관찰하였다. 주파수 스펙트럼에서 오실로스코프의 FFT 기능을 이용하여 30개 신호를 평균하여 주파수를 분석하였다.

Fig. 8~11은 열화진행에 따른 배진동 발생효율을 관찰하여 도시한 그림이다. 그림에서 보여지는 바와 같이 열화가 진행될수록 배진동의 진폭이 커졌으며, 원재료와 비교시 1,820 시간 열화된 시편에서는 배진동의 진폭이 20 dB이상 증가됨을 확인하였다.

이러한 비선형 현상을 실험적으로 평가하기 위한 변수에는 비선형파라미터(β)가 있으며, 식 (1)과 같이 정의된다.[15]

$$\beta = \frac{8 v^2 A_{2nd}}{\omega_o^2 z A_{1st}^2} \tag{1}$$

여기서 A_{1st}, A_{2nd}는 기본파의 진폭과 배진동파의 진폭이며, z, ω_o, v 는 각각 시편의 두께, 기본파의 각진동수(angular frequency), 위상속도이다. Fig. 12에서는 열화에 따른 비선형파라미터(β)의 증가를 보여주고 있다.

4. 재료물성치와 초음파특성에 대한 고찰

4.1 항복응력과 초음파 특성

Fig. 13은 열화에 따른 감쇠계수와 항복강도의 관계를 나타낸 그림이다. 감쇠계수가 증가됨에 따라 항복강도가 감소되고 있음을 알 수 있다. 열화에 따른 감쇠계수의 증가는 조직의 조대화에 따른 결정립의 크기 또는 결정립계에서의 석출물 등과 같은 산란체의 크기가 증가됨에 따라 산란효과가 커짐에 기인한다. 또한 열화에 따른 항복강도의 감소는 재료의 취약해짐에 있다. 이는 결정립 경계면에 Mn, Cr, S 등이 석출되어 항복강도가 저하되는 것으로 알려졌다. 즉 결정립 경계면에서 특정원소 등의 석출과 그 화합물의 형성에 따른 입계취화가 그 원인이라 할 수 있다.[11,16,17] 특히, 453 시간 열화된 시편의 항복강도

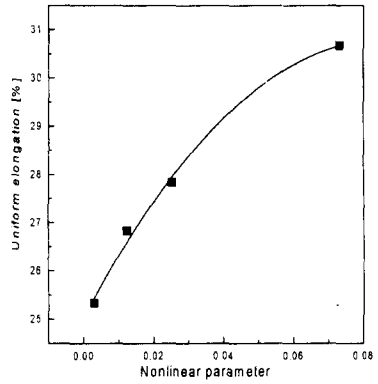

Fig. 16 Nonlinear parameter vs. uniform elongation for each aging specimens

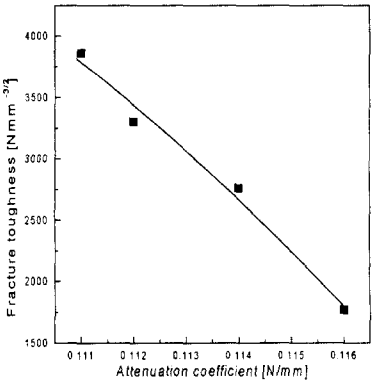

Fig. 17 Attenuation coefficient vs. fracture toughness for each aging specimens

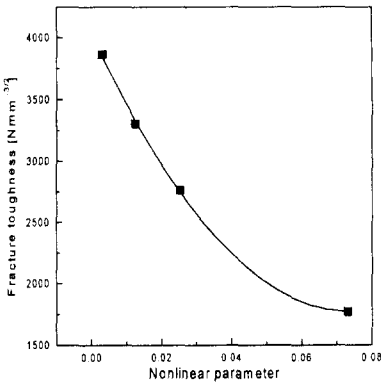

Fig. 18 Nonlinear parameter vs. fracture toughness for each aging specimens

가 급격하게 감소되고 있다. 이는 항복 응력과 결정립 크기와의 일반적인 관계에서 그 원인을 찾을수 있다. 즉 항복응력은 결정립 크기의 역근제곱으로 비례하며, 열화초기에 결정립의 크기가 결정됨에 기인한다.[18] 그 이후에는 재료가 열화될수록 결정립 경계면으로 특정 원소가 확산되므로 항복응력은 완만하게 감소하게 된다. 이러한 현상은 항복응력과 비선형 파라미터와의 상관 관계를 나타낸 Fig. 14에서도 관찰되고 있다. 열화가 진행될수록 비선형파라미터는 증가되며 항복응력이 감소되고 있음을 알 수 있다.

4.2 연신율과 초음파 특성

Fig. 15, Fig. 16은 열화에 따른 연신율과 초음파 파라미터와의 상관관계를 보여 주는 그림이다. 열화진행에 따라 감쇠계수와 비선형 파라미터는 증가되고 있으며 또한 연신율도 증가되고 있다. 열화에 따른 연신율의 증가는 재료의 조대화에 따라 결정립의 크기가 커지게 되므로 전위의 움직임이 용이하게 되며 이에 따라 재료의 연성이 증가하게 됨에 있다. 특히, Fig. 15와 Fig. 16에서 연신율과 감쇠계수의 관계와 비교하여 연신율과 비선형 파라미터의 관계가 비교적 선형적인 증가 형태를 보여주고 있다. 이는 연신율과 비선형 파라미터의 관계로부터 재료의 열화정도를 평가할 수 있음을 의미한다.

4.3 파괴인성치와 초음파 특성

Fig. 17과 Fig. 18은 재료 열화에 따른 파괴인성치와 초음파 파라미터와의 관계를 보여주고 있다. 열화진행에 따라 파괴인성치는 감소되고 있으며 초음파 파라미터는 증가되고 있다. 열화에 따른 파괴인성치의 감소는 입계취하 등의 원인으로 재료가 취약해지기 때문으로 사료된다. 이와 유사하게 J_{IC}, T_{mat} 등의 파괴인성치도 재료가 열화됨에 따라 감소되는 것으로 보고되고 있다.[11] Fig. 18에서는 비선형파라미터와 파괴인성치사이의 상관관계가 있음을 보여주고 있다.

4.4 경도와 초음파 특성

Fig. 19와 Fig. 20은 열화 진행에 따른 초음파 파라미터와 비커스경도값과의 관계를 보여주고 있는 그림이다. 초음파 파라미터의 증가에 따라 경도가 감소되는 경향을 보여주고 있다. 열화에

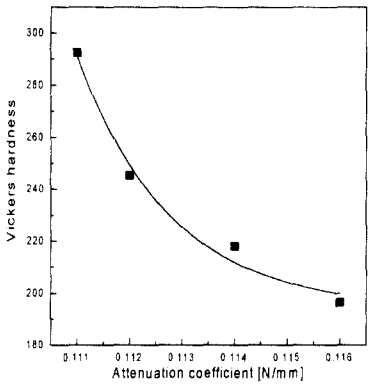

Fig. 19 Vickers hardness vs. attenuation coefficient for each aging specimens

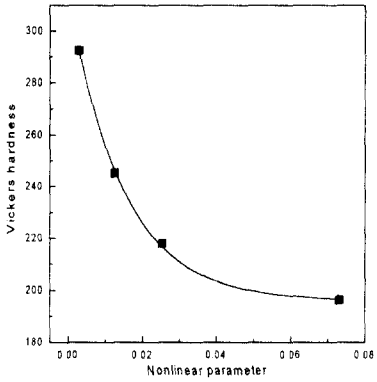

Fig. 20 Vickers hardness vs. nonlinear parameter for each aging specimens

따른 강도의 감소는 입계취화 등의 원인에서 기인되는 것으로 사료된다.[11,16,17]

5. 결 론

본 연구에서는 1Cr-1Mo-0.25V강을 등온열화시켜 열화단계에 따라 기계적인 물성치를 확보하였으며 이를 대상으로 초음파를 이용하여 열화에 따른 재료물성치의 변화를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 재료의 열화가 진행됨에 따라 강도는 감소되며 연성은 증가됨을 알 수 있었다.

(2) 각 열화시편에서 열화의 진행에 따라 초음파의 감쇠계수가 증가하였다. 이는 재료열화에 따른 조직의 조대화에 따라서 산란효과가 커짐에 기인하는 것으로 사료된다.

(3) 재료열화에 따라 배진동발생을 관찰한 결과, 열화가 진행될수록 배진동의 발생 효율이 커졌다. 그러므로 배진동과 같은 비선형파라미터는 열화평가하기에 적합한 파라미터임을 알 수 있다.

(4) 초음파 파라미터(비선형파라미터와 감쇠계수)와 파괴인성치 또는 초음파 파라미터와 연신율과의 관계로부터 다른 재료물성치와 비교시 선형적인 경향을 보여주고 있다. 이를 이용하여 설비의 열화정도를 예측하기에 유용하리라 판단된다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

(1) 권재도, 1992. "장기사용 Cr-Mo강 열화재의 파괴인성평가와 수명 예측," 대한기계학회논문집, 제16권, pp. 1421～1428.

(2) 남승훈, 김엄기, 유광민, 1998, "전기비저항을 이용한 1Cr-1Mo-0.25V강의 인성열화의 비파괴적 평가," 대한기계학회논문집A, pp. 814～820.

(3) 한상인, 윤기봉, 정세희, 1997, "입계부식법에 의한 사용중인 화력발전소 요소의 잔여수명 평가," 대한기계학회논문집A, pp. 22～31.

(4) Ruud, C. O., and Green, E., 1984, *Nondestructive Methods for Material Property Determination*, Plenum. Press, pp. 151～160.

(5) Sachse, W., 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) Pollard, H. F., 1977, "Sound Waves in Solids," Pion, London, pp. 23～77.

(7) 김정표, 김의준, 윤석왕, 1996, "고체내 결함의

위치추정을 위한 비선형 음향 탐지법," 한국음향학회 학술발표대회 논문집 제15권 1(s)호, Vol. 15, No. 1(s), pp. 365～368.

(8) Sutin, A. M., Zaitsev, V. Y. and Belyaeva, I. Y., 1992, "Nonlinear Interaction of Acoustical Wave due to Cracks and its Possible Usage for Cracks Detection," *J. Vibration and Control.*, pp. 786～793.

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

(10) 정희돈, 1991, "고온설비의 경년열화와 측정법," 대한기계학회지, 제31권, 제3호, pp. 251～260.

(11) 윤기봉, 윤석호, 김승태, 남승훈, 서창민, 1994, "시효열화시킨 1Cr-1Mo-0.25V 강의 고온에서의 J_{IC} 및 Tmat의 평가," 대한기계학회논문집, pp. 2860～2870.

(12) 1995, "Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials," ASTM E 8-00, Annual Book of ASTM Standard, pp. 56～76.

(13) 1995, "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials," ASTM E 399-90, Annual Book of ASTM Standard, pp. 412～442.

(14) Lester, W., Scherr, Jr., and Song Sung Jin, 1992, "Ultrasonic Scattering by a Flat-bottom in Immersion Testing: an Analytical Model," *J. Acoust. Soc. Am.*, 92(1), pp. 478～486.

(15) Hurley, D. C., Balzar, D., Purtscher, P. T., and K. W. Hollman, 1998, "Nonlinear Ultrasonic Parameter in Quenched Martensitic Steels," *Journal of Applied Physics*, Vol(83), pp. 4584～4588.

(16) 허정훈, 서창민, 남승훈, 1996, "시효열화시킨 1Cr-1Mo-0.25V강의 고온하의 회전굽힘 피로강도에 관한 연구," 대한기계학회논문집 A, pp. 2819～2832.

(17) 남승훈, 박종화, 김엄기, 1999, "소형 샤르피 충격시험편을 이용한 1Cr-1Mo-0.25V강의 인성 열화도 평가," 대한기계학회논문집 A, pp. 2303～2308.

(18) Dieter, G. E., 1986, *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, pp. 72～84.