

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

김정표* · 석창성**

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)

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°C. 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. Especially the nonlinear parameter of the signal is sensitive and will be a good parameter to evaluate the material degradation.

1. 서 론

대형에너지 변화설비의 지속적인 증설과 사용년수의 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 측정하는 방법에는 비파괴적인 방법이 적합하며, 비파괴적인 방법으

로는 압입법, 초음파법, 전기비저항법, 레프리카법 등이 있다. 이들 방법 중 초음파법은 재료 내부 결함의 검출뿐만 아니라 기계적성질 등의 재료의 물성평가에도 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⁽²⁻⁴⁾. 비선형초음파법은 매질에 입사된 음파가 매질내의 비선형 응답을 수반하는 인자인 동공, 균열, 전위 등과 상호작용으로 왜곡되는 원리를 이용하는 것이다⁽⁵⁻⁷⁾.

본 연구에서는 1Cr-1Mo-0.25V강을 630°C에서 등은 열화방법으로 제작된 3종류의 열화시편과 열화시키지 않은 시편을 준비하였으며^(8,9), 이를 대상으로 열화 단계에 따른 기계적인 재료물성치를 평가하였다. 또한 열화에 따른 초음파 파라미터를 측정하여 기계적 재료물성치의 변화와 비

* 성균관대학교 대학원 기계공학과

** 성균관대학교 기계공학부

교· 분석하였다.

2. 열화재의 강도 평가

2.1 기계적인 물성치 측정

2.1.1 인장시험

인장시험에 사용된 시험기는 Shimadzu사의 25ton 용량의 전기유압식 만능시험기(Autograph AG-25TG)이며, 상온에서 시험을 수행하였다. 이때 인장속도는 1mm/min였으며, 인장시험은 ASTM E 8-95a(KS B 0801)에 준하여 수행되었다⁽¹⁰⁾. Table 1과 Table 2는 1Cr-1Mo-0.25V강의 화학성분 조성비와 각 단계별 열화재에 대한 인장시험의 결과인 연신율(uniform elongation), 항복강도(yield strength), 인장강도를 나타내었으며, Fig. 1은 열화에 따른 진응력-진변형률 선도를 도시한 그림이다. 이들 결과로부터 열화가 진행됨에 따라 인장강도와 항복강도가 감소되고 연신율이 증가되는 것을 알 수 있다. 특히, 453시간 열화재의 인장강도와 항복강도는 신재와 비교하여 약 20% 감소되었으며, 933시간 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 μ m 크기의 알루미늄 분말을 이용하여 습식으로 경면 제작하여 표면 거칠기에 의한 경도치의 변화를 배제하였다. 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 25ton 용량 전기유압식 재료시험기이며 ASTM E 399-90의 K_{Ic} 시험방법에 따라 시험을 수행하였다⁽¹¹⁾. 상온에서 K_{Ic} 시험을 수행하였으며 이때 K_{Ic} 의 충족 조건을 만족하지 못하였으므로 K_Q 로 표시하였다. Fig. 3에서 열화가 진행될수록 파괴인성치 K_Q 가 선형적으로 감소되는 경향을 볼 수 있다. 전반적으로 파괴시험 결과는 열화가 진행됨에 따라 기계적인 성질이 감소하는 현상과 일치하고 있으며, 특히 선형적인 감소를 보이는 K_Q 는 다른 재료물성치와 비교 시 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. 센서의 중심 주파수는 11.1MHz이며, 주파수 밴드는 7.8MHz~14.4MHz이었다. 이때 이격 거리와 시편의 두께는 각각 123mm, 10.2mm이며, 센서의 직경은 6.35mm였다.

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 $\pm 0.001N/mm$ 였다.

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

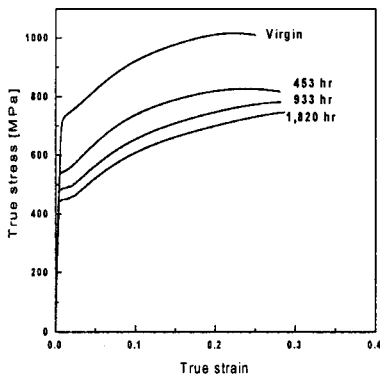


Fig. 1 Effect of degraded time on true stress-true strain curve

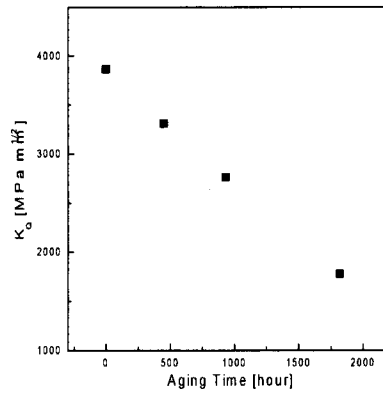


Fig. 3 Effect of degraded time on fracture toughness

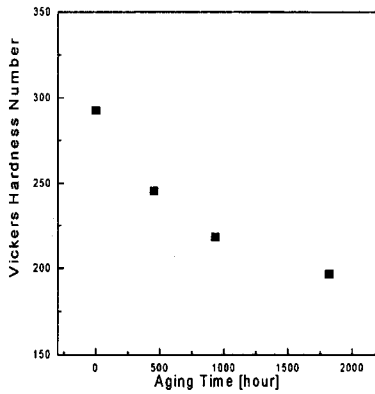


Fig. 2 Effect of degraded time on vicker hardness

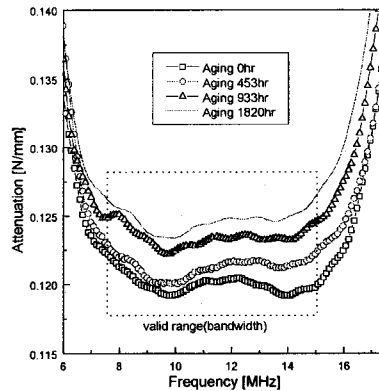


Fig. 4 Attenuation vs. frequency for 4 different 1Cr-1Mo-0.25V steel

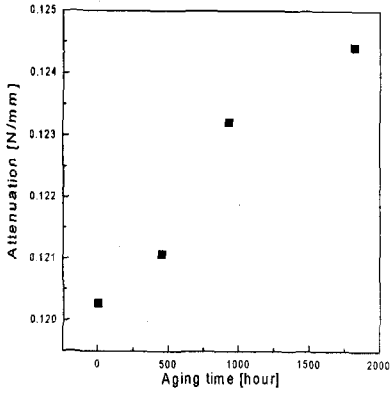


Fig. 5 Attenuation vs. center frequency for 4 different aging specimens

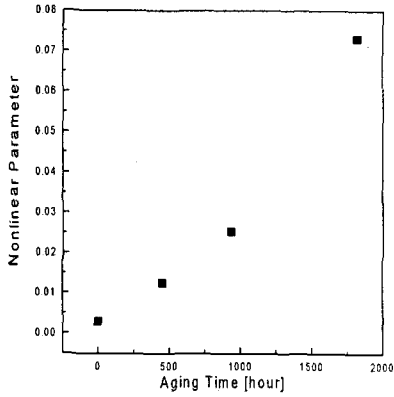


Fig. 6 Nonlinear parameter(β) for different aging specimens

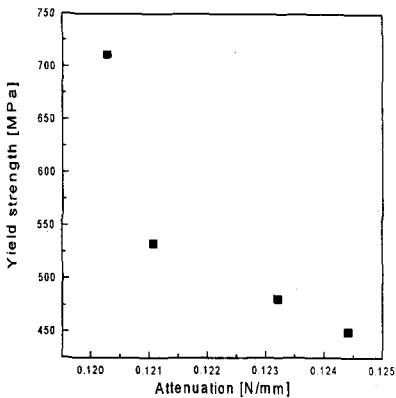


Fig. 7 Attenuation vs. yield strength for each aging specimens

3.2 비선형 응답

시편의 크기는 $20 \times 30 \times 50(\text{mm})$ 이며, 두 개의 독립적인 고주파수와 저주파수의 센서가 글루(glue)를 사용하여 양 끝단에 부착되었다. 공진주파수가 500kHz인 센서와 1MHz인 센서는 각각 발신용과 수신용 센서로 사용되었다. 파형발생기(SRS 560)를 이용하여 저주파수의 연속음파를 발생시켰으며, 이때 발생된 음파를 증폭기(HP 8347A)로 증폭하여 저주파수 센서를 통해 재료에 입사시켰다. 매질과의 상호 작용으로 산란된 신호는 고주파수 센서를 통하여 수신되었으며 수신된 신호를 오실로스코프(LeCroy 9310L)로 관찰하였다.

열화가 진행될수록 배진동의 진폭이 커졌으며, 원시시편과 비교시 1,820시간 열화된 시편에서는 배진동의 진폭이 20dB 이상 증가되었다. 이러한 비선형 현상을 실험적으로 평가하기 위해 비선형 파라미터(β)를 사용하였다⁽¹³⁾. Fig. 6에서는 열화에 따른 비선형파라미터(β)의 증가를 보여주고 있다.

3. 재료물성치와 초음파특성에 대한 고찰

Fig. 7은 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 산란 효과가 커짐에 기인한다. 또한 열화에 따른 항복강도의 감소는 재료의 취약해짐에 있다. 즉 결정립 경계면에서 특정원소 등의 석출과 그 화합물의 형성에 따른 입계취화가 그 원인이라 할 수 있다. 이러한 현상은 항복응력과 비선형 파라미터와의 상관 관계를 나타낸 Fig. 8에서도 관찰되고 있다.

Fig. 9, Fig. 10은 열화에 따른 연신율과 초음파 파라미터와의 상관관계를 보여 주는 그림이다. 열화진행에 따라 감쇠계수와 비선형 파라미터는 증가되고 있으며 또한 연신율도 증가되고 있다. 열화에 따른 파괴인성치와 초음파 파라미터와의 관계는 Fig. 11과 Fig. 12에서 보여주고 있다. 재료열화에 따른 입계취화 등의 원인으로 재료가 취약해져 파괴인성치가 감소되고 있다.

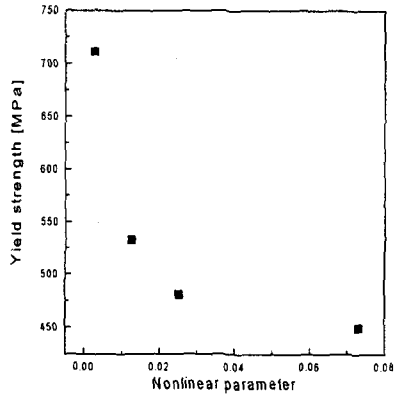


Fig. 8 Nonlinear parameter vs. yield strength for each aging specimens

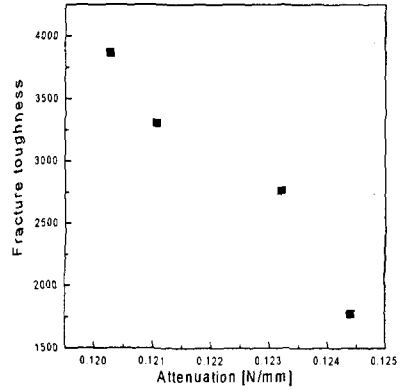


Fig. 11 Attenuation coefficient vs. fracture toughness for each aging specimens

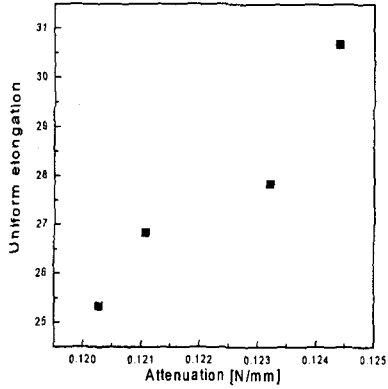


Fig. 9 Attenuation coefficient vs. uniform elongation for each aging specimens

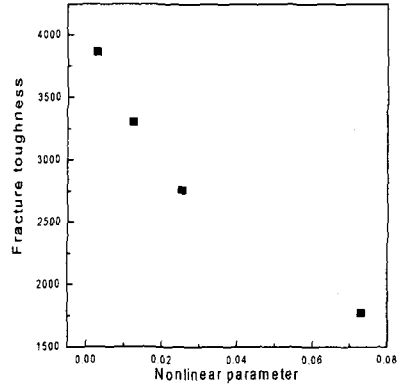


Fig. 12 Nonlinear parameter vs. fracture toughness for each aging specimens

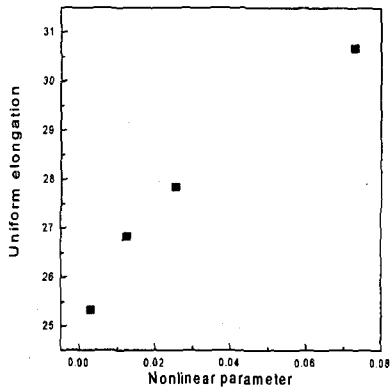


Fig. 10 Nonlinear parameter vs. uniform elongation for each aging specimens

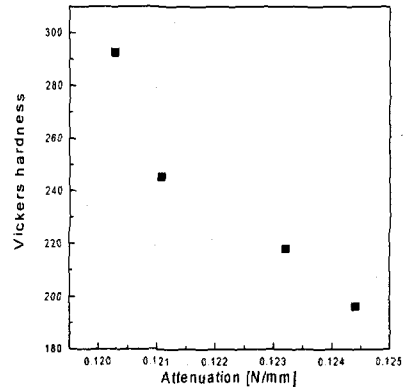


Fig. 13 Vickers hardness vs. attenuation coefficient for each aging specimens

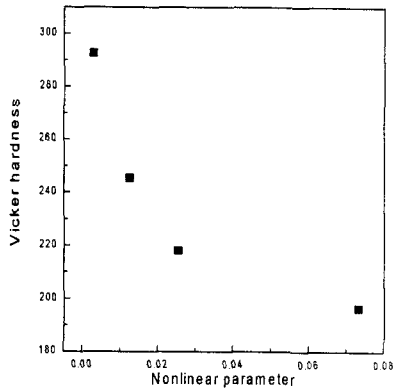


Fig. 14 Vickers hardness vs. nonlinear parameter for each aging specimens

Fig. 13와 Fig. 14는 열화 진행에 따른 초음파 파라미터와 비커스경도값과의 관계를 보여주고 있는 그림이다. 초음파 파라미터의 증가에 따라 경도가 감소되는 경향을 보여주고 있다. 열화에 따른 강도의 감소는 입계취하 등의 원인에서 기인되는 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 1Cr-1Mo-0.25V강을 등온열화시켜 열화단계에 따라 기계적인 물성치를 확보하여 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 감쇠계수가 증가하였으며, 비선형 현상인 배진동의 발생 효율이 커졌다. 특히, 1,820시간 열화재에서의 배진동 진폭은 원시시편과 비교시 20dB이상 증가되었다.

(3) 비선형 파라미터와 파괴인성치 또한 비선형 파라미터와 연신율과의 선형적인 관계는 설비의 열화정도를 예측하기에 유용하리라 판단된다.

참고문헌

(1) 권재도, 1992. "장기사용 Cr-Mo강 열화재의 파괴인성평가와 수명 예측," 대한기계학회논문

집, 제16권, pp. 1421~1428.

(2) Ruud, C. O., and Green, E., 1984, "Nondestructive Methods for Material Property Determination," Plenum. Press, pp. 151-160.

(3) 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.

(4) Pollard, H. F., 1977, "Sound Waves in Solids," Pion, London, pp. 23-77.

(5) 김정표, 김의준, 윤석왕, 1996, "고체내 결함의 위치추정을 위한 비선형 음향 탐지법," 한국음향학회 학술발표대회 논문집 제 15권 1(s)호, vol. 15, No.1(s), pp.365-368.

(6) 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.

(7) Breazeale, M. A., Ford, J., 1998, "Acoustic Source Book," McGraw-Hill, pp. 57-68.

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

(9) 서창민, 윤기봉, 윤석호, 김승태, 1992, "열화시킨 1Cr-1Mo-0.25V강의 고온에서의 JIC 및 Tmat 평가," 제 2회 경년열화 및 수명평가 심포지움 논문집, pp. 27-55.

(10) 1995, "Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials," ASTM E 8-95a, Annual Book of ASTM Standard, pp. 56-76.

(11) 1995, "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials," ASTM E 399-90, Annual Book of ASTM Standard, pp. 412-442.

(12) 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.

(13) 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.