

표면SH파를 이용한 2.25Cr-1Mo강의 열화·손상 평가

김 현묵* · 박 익근* · 박 은수* · 안 형근* · 김 정석*

Nondestructive Evaluation for Degraded 2.25Cr-1Mo Steel though Surface SH-wave

Hyun Mook Kim, Ik Keun Park, Un Su Park,
Hyung Keun Ahn, Chung Soek Kim,

Key Words : Surface SH-wave, degradation, microstructure, ultrasonic nondestructive Evaluation, attenuation, wavelet transform

Abstract

It is very important to evaluate the surface or subsurface microstructure because of their influences on mechanical properties of materials. Surface SH-wave which is horizontally polarized shear wave traveling along near surface and subsurface layer is an attractive technique for material evaluation. The destructive method is widely used for the estimation of material degradation but it has a great difficulty in preparing specimens from in-service industrial facilities. In this study, nondestructive evaluation for degraded structural materials used at high temperature though surface SH-wave method is discussed. 2.25Cr-1Mo steel specimens which were prepared by the isothermal aging heat treatment at 650° were evaluated though ultrasonic nondestructive evaluation techniques investigating the change of sound velocity, attenuation coefficient and amplitude spectra. In addition, it has verified experimentally the frequency-dependence of attenuation coefficient though wavelet analysis method.

1. 서론

화력발전설비나 석유화학설비와 같은 에너지변환설비에는 Cr-Mo강, Cr-Mo-V강, 스테인레스강과 같이 고온에서 우수한 기계적 성질을 갖는 내열강이 널리 사용되고 있다. 그러나 이들 고온재료는 고온에서 장시간 사용되는 동안에 탄화물이나 금속간 화합물의 입내 및 입계로의 석출 등으로 인하여 미세조직의 변화를 일으켜 당초의 우수한 재질특성이 저하되는 것으로 알려져 있다.^[1,2]

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

방법 중 고온 설비부재의 열화도는 현장에서 재료를 채취하여 충격시험, 인장시험, 파괴인성 시험 등과 같은 파괴적인 방법을 이용하여 평가하는 것이 가장 정확하다. 하지만, 가동중인 현장에서 시험편을 채취한다는 것은 사실상 불가능하고, 시간적 제약과 경제적으로 많은 문제점을 내포하고 있다. 따라서 이러한 단점들을 극복할 수 있는 비파괴적인 평가기술의 개발이 요구되고 있다.^[3,4]

초음파비파괴평가(ultrasonic nondestructive evaluation; 이하 UNDE라 한다) 기법은 측정의 효율성, 높은 측정감도, 측정결과 해석의 신속성 및 신뢰성 확보에 우수한 것으로 보고되고 있다.^[4] UNDE에 의한 열화도 평가에는 초음파 파형이

*서울산업대학교 비파괴평가기술연구소

가지고 있는 각종 특성의 변수를 추출하여 이들이 갖는 강한 특징(strong feature) 변수와 재료의 열화·손상과의 물성변화에 대한 상관성을 추출하고 수치화하여 열화도를 평가한다.

본 연구에서는 2.25Cr-1Mo강에 대하여 장시간 등온열처리로 모의열화 시험편을 제작하여 금속학적 미세조직을 관찰하고, 미세조직의 변화와 초음파의 전파특성과의 상관관계를 규명함으로써 재료의 경년열화도를 고찰하고자 한다. 초음파의 모드로는 표면상황의 영향이 적고 모드 변환이 되지 않아 표면 및 표면근방의 결함검출과 재료 특성 평가에 유효한 표면SH파(horizontally polarized shear wave)를 적용하여 고온 부재의 열화·손상에 대한 비파괴평가의 유용성 유무를 실험적으로 검증하고자 한다.

2. SH파 탐상의 특징

SH파는 Fig. 1과 같이 탐상면과 평행한 방향으로 진동하는 횡파이며, 탐촉자의 아크릴 웨지와의 강(steel)의 횡파속도가 각각 1360m/s, 3230m/s일 때 입사각을 24.9°로 하면 스넬의 법칙에 따라 굴절각이 90°에 가까운 표면SH파가 발생된다.^[6] 그러나 횡파는 유체 중에서는 존재하지 않기 때문에 시험체에 전달시키기 위해서는 일정한 높은 점성의 접촉매질이 요구된다.^[6,7]

SH파탐상의 특징으로는 기본적으로 모드변환에 주의할 필요가 없고 표면SH파 사각탐상법으로 표층부의 결함검출에 유리하며 면상결함에 초음파를 수직으로 입사할 수 있는 장점이 있다. 그러나 진동자로부터 횡파가 쉐기를 전파하므로 S/N비가 나빠지며, 높은 점성의 접촉매질 사용으로 인해 탐촉자의 주사에 문제가 있고 결함크기(높이)를 추정할 수 있는 경우가 있으나, 결함위치(깊이)는 추정이 곤란하고 접촉매질의 문제로 재현성이 높은 데이터를 얻기 힘든 단점이 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 모의 열화 시험편 제작

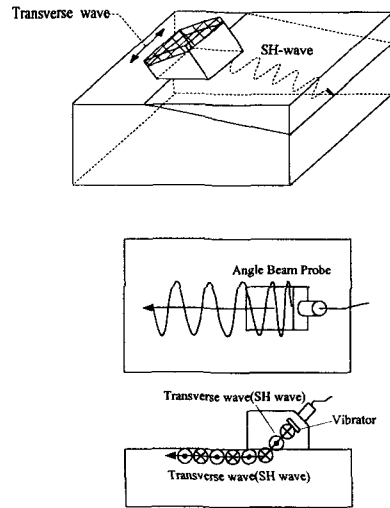


Fig. 1 Incidence of SH-wave and principle of surface SH-wave

실험에 사용된 시험편 재료는 고온·고압용 발전설비의 터빈로터용 소재로 널리 사용되는 삼미특수강(주) 제품의 2.25Cr-1Mo강으로 화학적 성분은 Table 1과 같다. 실제 발전설비 터빈에서 오랜 기간 사용된 재료와 유사한 미세조직을 갖도록 모의열화를 수행하기 위해 시료를 인위적으로 950℃에서 1시간동안 균질화 처리하였다. 모의열화에 필요한 시간은 철의 자기확산식으로부터 실제 사용온도(538℃)에서 철의 자기확산량과 동일한 양이 발생하도록 Table 2와 같이 각 시험편을 650℃에서 50, 200, 1,000시간 동안 등온열처리를 한 후 냉각하였으며, 고온 열처리를 통한 가속 열처리를 수행하여 고온 장기 사용재와 미세조직이 유사한 모의 시험편을 제작하였다.

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

Element	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Fe
Comp.	0.12	0.24	0.45	0.008	0.024	2.15	0.97	Bal.

Table 2. Accelerated aging time at 650℃ for equivalent microstructure served at 538℃

Time served at 538℃(hr)	Virgin	3,000	12,000	60,000
Aging time at 650℃(hr)	0	50	200	1,000

3.2 실험방법

3.2.1 미세조직 관찰

열화 정도에 따른 탄화물의 형태 및 탄화물내의 변화 등을 조사하기 위해 2.25Cr-1Mo강의 모재와 각 단계별 열화재에 대해 미세조직의 변화 과정을 광학현미경(Optical Microscope)을 통해 관찰하였다. 시험편을 #200, #500, #1200 수지연마지(emery paper)로 연마 후, 9 μ m, 6 μ m, 1 μ m 알루미늄(Al₂O₃)분말을 이용하여 습식으로 경면을 제작하였다. 현미경 미세조직 검사는 표준절차에 준하여 수행하였고, 금속 미세조직 관찰을 위하여 시험편을 3%나이탈(질산+알코올) 부식액을 사용하여 상온에서 약 30~40초 부식하였으며, 광학현미경의 배율을 1,000 배로 열화의 진행에 따른 미세조직의 변화를 관찰하였다.

3.2.2 경도시험

열화에 따른 경도변화를 측정하기 위해 시험편을 #800에서 #1500까지의 수지연마제로 연마한 후, 0.5 μ m크기의 알루미늄 분말을 이용하여 최종연마하고 표면거칠기를 일정하게 하여 표면거칠기에 의한 경도값 의존성을 최소화하였다. 경도측정은 일본 Future-Tech사의 마이크로비커스 경도계를 사용하였으며, 하중을 50g으로 하여 각각 5회 측정하였고, 압입자에 의한 압입형상이 뚜렷한 사각형상(◇)이 되도록 시험하였다.

3.2.3 초음파시험

본 연구에서 사용한 실험장치의 구성도는 Fig. 3과 같이 초음파탐상기(KrautKramer USD15), 디지털오실로스코프(Lecroy 9374M)를 사용하여, 2탐촉자를 이용한 pitch-catch법으로 각 시험편의 전파시간을 측정하고, 1탐촉자를 이용한 펄스반복법으로 초음파 속도와 감쇠계수를 측정하였다. Fig. 4는 일정한 하중을 부가하기 위해 제작한 치구의 형상이다. 실험에 사용한 표면SH파탐촉자는 Japan Probe(사)의 5C10 \times 10A90-SH를 사용하였다. 접촉매질로는 Nichigou Acetylene Co., Ltd제의 소니코트 SHN-40의 고 점성 핑파 전용 접촉매질을 사용하고, 3kg의 하중을 15분간 부가하여 에코가 안정화된 후에 10회 반복 측정하였다. Fig. 3과 같이 탐촉자에 수신된 초음파 에코 파형은 초음

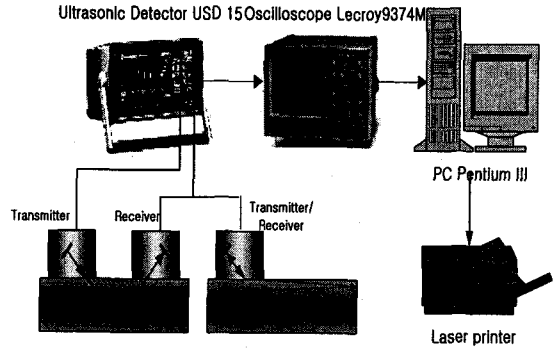


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

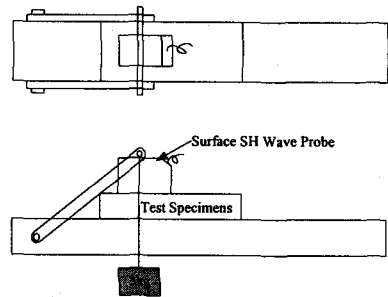


Fig. 4 Tool to test weight on surface SH-wave probe

파탐상기와 오실로스코프의 CRT상에 나타나고, PC를 이용한 데이터 획득 시스템을 구축하여 감쇠의 주파수 의존성을 고정밀도로 평가하기 위한 웨이트 변환 알고리즘을 프로그래밍 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 열화도에 따른 미세조직 및 경도 변화

Fig. 5는 열화시간에 따른 미세조직을 광학현미경을 통해 1000 배율로 관찰한 것이다. 초기 시험편은 템퍼드 마르텐사이트 조직으로 평행한 래스(lath)상으로 이루어져 있다. 열화가 진행됨에 따라 조직의 결정립계 부근에서 탄화석출물이 증가되고 구상화되었다. 이와 같은 미세조직 변화들은 기계적 성질을 변화하게 하고, 표면SH파 신호에 영향을 미치는 주요한 변수로 작용할 것으로 사료된다. Fig. 6은 열화시간에 대한 경도값의 변화를 나타낸다. 열화시간이 진행될수록 경도값

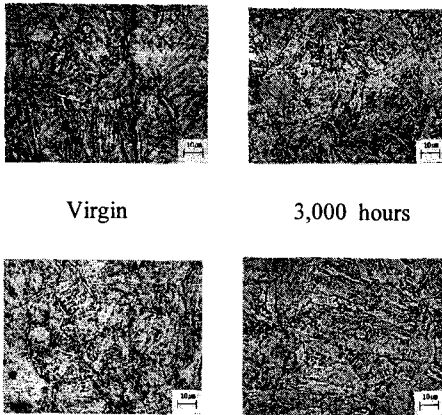


Fig. 5 Effect of degradation time on the microstructure

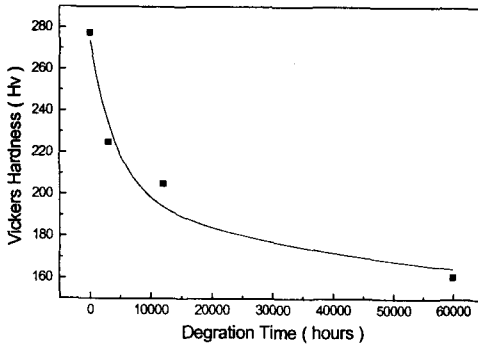
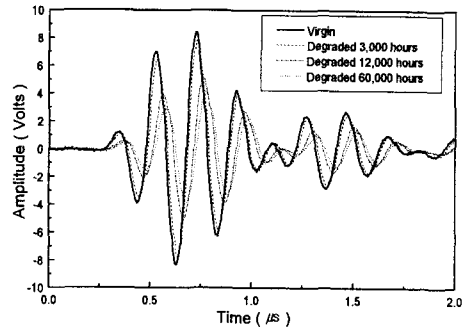


Fig. 6 Effect of degradation time on Vickers of 2.25Cr-1Mo steel hardness

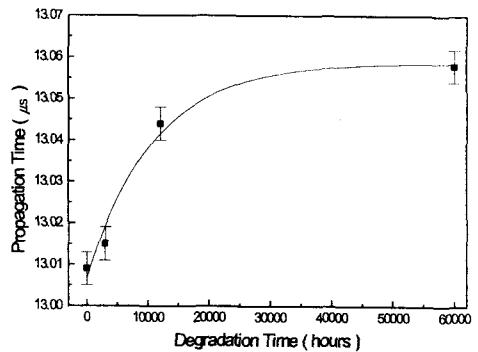
의 저하가 둔화되는 경향을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 일정시간 재료가 열화되면 탄화물의 석출량이 둔화되는 것으로 사료된다. 열화 정도에 따라 결정립계에서 발생하는 탄화물은 입계 파괴의 원인으로 나타나 경도값은 재질 열화 정도와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

4.2 열화도에 따른 SH파의 전파특성

Fig. 7(a)는 pitch-catch법을 이용하여 얻은 RF-Signal을 나타내고 있다. Fig. 7(b)와 같이 열화 시간이 증가된 시험편이 건전재에 비해 전파시간이 증가하여 SH파의 음속은 미소하게 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 펄스반복법을 이용하



(a) RF-signal waveform



(b) Difference of propagation time

Fig. 7 Effect of degradation time on ultrasonic time domain information

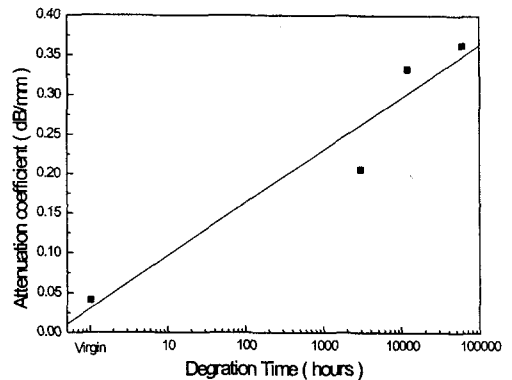


Fig. 8 Effect of degradation time on attenuation

여 시험편의 열화시간에 따른 감쇠계수의 변화를 오실로스코프에서 측정한 결과를 나타내고 있다. 본 실험결과에서는 열화시간이 증가함에 따라 감쇠계수는 증가하였다. 이는 Fig. 5와 같이 열화시

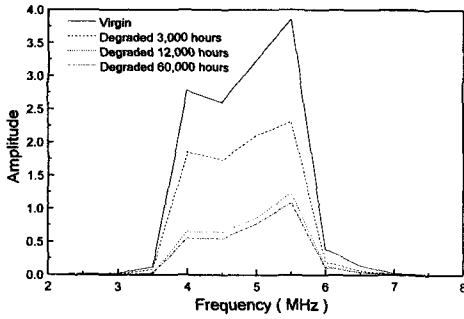
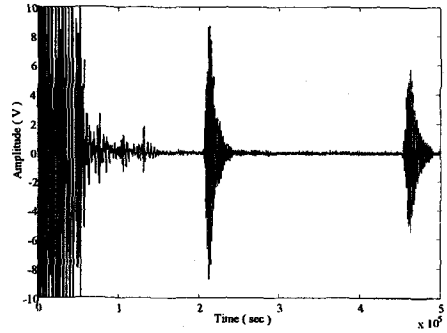


Fig. 9 Effect of degradation time on amplitude spectra

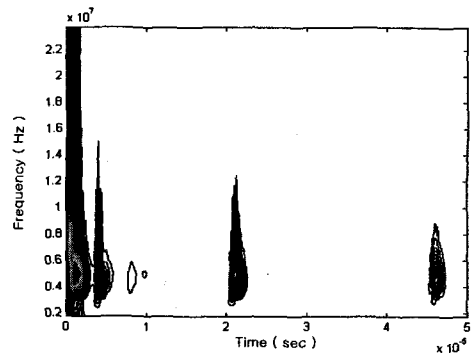
간이 증가함에 따라 결정입계에서의 탄화물 석출이 초음파 산란감쇠에 강한 영향을 미치는 것으로 판단된다. Fig. 9는 각 시험편의 진폭 스펙트럼을 나타내고 있다. 열화시간이 증가함에 따라 진폭의 값은 감소하였다.

4.3 감쇠계수의 주파수의존성 평가

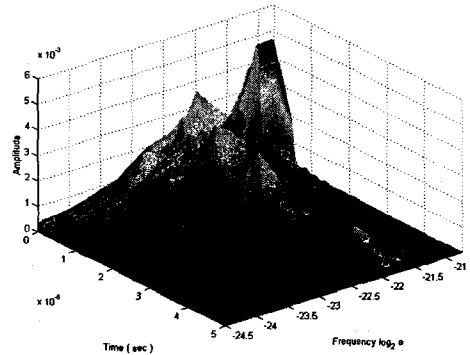
웨이브렛 변환에 의한 시간-주파수해석을 적용하면 초음파펄스의 발생시간에 따른 진폭을 주파수마다 구하여 초음파 감쇠계수의 주파수의존성을 평가할 수 있다^[8]. Fig. 10(a)는 중심주파수 5.5MHz의 표면SH파탐촉자를 펄스반복법으로 적용하여 시험편의 단면부 방향으로 전파시켰을 때의 에코파형이다. Fig. 10(b)는 웨이브렛 변환에 의한 시간축과 주파수축에 대한 등고선(contour)이고, Fig. 10(c)는 웨이브렛 변환 결과를 시간-주파수-진폭의 축으로 나타낸 3차원 그래프이다. 이와 같은 과정을 통하여 검출된 제 1에코와 제 2에코의 진폭의 차에 근거하여 초음파 감쇠계수의 주파수의존성을 평가할 수 있다. Fig. 11은 감쇠계수의 주파수의존성을 나타내고 있다. 열화에 의한 미세조직의 변화는 결정입계의 크기는 변화하지 않고, 탄화물의 변화가 가장 중요하다. 탄화물의 크기는 결정입계의 약 1/500~1/100정도이다. 따라서 초음파의 산란을 Rayleigh 영역, Stochastic 영역, Diffusion 영역으로 구분할 때, 1~25MHz의 주파수 범위에서 결정입계에 의한 산란과 탄화물에 의한 산란이 동시에 존재하게 된다. 결정입계 산란은 결정입계의 크기(66 μm)



(a)



(b)



(c)

Fig. 10 (a) Ultrasonic echo waveform, (b) contour plot and (c) wavelet transform

와 파장의 관계를 고려할 때 6MHz 이하의 영역은 Rayleigh 산란영역이며, 그 이상의 주파수 영역에서는 Stochastic 산란영역에 해당된다. 또한 탄화물에 의한 산란은 탄화물의 크기가 미소하여 1~25MHz의 모든 범위에서 Rayleigh 산란영역에

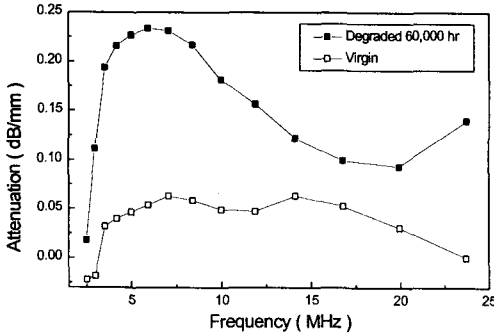


Fig. 11 Attenuation coefficient identified by the wavelet analysis

해당된다. 따라서 열화제는 탄화물 양이 증가하고 구상화되면서 결정입계 산란과 더불어 탄화물의 산란이 감쇠계수에 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다.

5. 결론

2.25Cr-1Mo강의 모의 경년열화에 따른 미세조직의 변화와 표면SH파의 특성의 변화를 이용한 재료의 열화도 평가 가능성을 실험적으로 검증하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 경년열화에 의한 조직의 결정립계 부근에서 탄화석출물 증가와 탄화물의 구상화로 인하여 초음파 감쇠계수는 열화가 진행됨에 따라 증가하는 경향을 나타내었으며, 표면SH파 특성을 이용한 열화도 평가의 가능성을 확인하였다.
- (2) 경년열화도에 따라 초음파 감쇠계수의 주파수의존성이 크게 나타나 경년열화도 평가에 중요한 변수임을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구비(과제번호 1999-2-301-009-3) 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

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 Turbin 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, 제31권, 제3호, 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, 1988
- (5) Y. Yokono, M. Katoh, K. Nisho, "Characteristics of Surface SH Wave Probe and its Application for Detecting Surface and Subsurface Flaws", Proc. of the 8th APCNDT, Dec. 11-14, 1995
- (6) 山田 尚雄, "粘性流體層についてのSH波通過率", NDI資料 21569, JSNDI, pp 34-38, 1997
- (7) 김현목, 박익근, 양봉근, 이철구, 이의중, "표면SH파법에 의한 표면결합의 검출능과 정량적평가에 관한 실험적 검증(제 2보) - 최적 시험조건과 박탐 탐상-", '99년도 한국비파괴검사학회 추계학술대회 논문집, pp 183-188, 1998
- (8) 박익근, 이정순, 이해무, "초음파 에코파형의 Wavelet 해석과 비파괴평가에의 응용", 대한기계학회 재료 및 파괴부문학술대회 논문집 pp 98-105, 1998