

2.25Cr-1Mo 강 인공 열화제의 고주파수 초음파 감쇠특성에 관한 연구

A Study on the High Frequency Ultrasonic Attenuation Characterization in Artificially Aging Degraded 2.25Cr-1Mo Steel

박익근*, 박은수*, 김정석*, 김현목*, 권숙인**, 변재원***

Ik-Keun Park*, Un-Su Park*, Chung-Seok Kim*, Hyun-Mook Kim*, Sook-In Kwun**
 and Jai-Won Byeon***

초 록 재료나 설비의 고온 장시간 사용으로 인하여 발생하는 재질열화 평가에는 파괴적인 방법이 널리 사용되고 있으며, 신뢰도가 높다. 그러나, 시험편의 채취가 어렵고 많은 경비와 시간이 소요된다. 전기저항법, 레프리카법, 바크하우젠 노이즈법, 전기화학적방법, 초음파법 등과 같은 비파괴적인 열화손상 평가 방법이 주목을 받고 있다. 본 연구에서는 2.25Cr-1Mo 강을 630 °C에서 장시간 등온열처리로 모의 열화시험편을 제작하고, 고온설비부재에서 발생하는 미세조직의 변화와 고주파 초음파의 전파특성(감쇠계수)과의 일대일 상관관계를 규명하여 초음파 비파괴평가에 의한 열화도 평가의 유용성 유무를 실험적으로 검증하였다. 그 결과 2.25Cr-1Mo 인공열화제의 경우 열화가 진행됨에 따라 탄화물의 석출 및 조대화가 일어나며 초음파 감쇠계수는 증가하는 경향을 나타내었으며, 그 정도는 침상의 탄화물이 거의 소멸되는 1,000 시간 이후에 초음파 감쇠계수가 급격히 증가하는 매우 좋은 상관성을 나타내었다.

주요용어: 재료열화, 초음파 비파괴평가, 감쇠계수, 푸리에변환, 웨이블릿변환, 연성·취성 전이온도

Abstract: The destructive method is reliable and widely used for the estimation of material degradation but, it have time-consuming and a great difficulty in preparing specimens from in-service industrial facilities. Therefore, the estimation of degraded structural materials used at high temperature by nondestructive evaluation such as electric resistance method, replica method, Barkhausen noise method, electro-chemical method and ultrasonic method are strongly desired. Ultrasonic nondestructive evaluation technique has been reported good to attain efficiency of measurement, high sensitivity of measurement, and rapidity and reliability of result interpretation. In this study, it was verified experimentally the feasibility of the evaluation of degraded 2.25Cr-1Mo steel specimens which were prepared by the isothermal aging heat treatment at 630 °C by high frequency longitudinal wave method investigating the change of attenuation coefficient by FFT analysis and wavelet transform. Because of carbide precipitation increase and spheroidization near grain boundary of microstructure to aging degradation, attenuation coefficient had a tendency to increase as degradation proceeded. It was identified possibly to evaluate degradation using the characteristics of high-frequency ultrasonics. Frequency dependence of ultrasonic attenuation coefficient to aging degradation appeared large, which made sure that attenuation coefficient is an important parameter for evaluation of aging degradation.

Keywords: material degradation, ultrasonic nondestructive evaluation, attenuation coefficient, FFT analysis, wavelet transform, ductile brittle transition temperature (DBTT)

1. 서 론

화력발전설비나 석유화학설비와 같은 에너지변환설비에는 CrMo강, CrMoV강, 스테인레스강과 같이 고온에서 우수한 기계적 성질을 갖는 내열강이 널리 사용되고 있다. 그러나 이들 고온재료는 약 300 ~ 540 °C의 고온에서 장시간 사용되는 동안에 탄화물이나 금속간 화합물의 입내 및 입계로의 석출 등으로 인하여 미세조직의 변화를 일으켜 초기의 우수한 기계적 특성이 저하되는 재질열화가 발생하는 것으로 알려져 있다[1-3]. 이러한 경년열화는 설비의 수명을 단축시키고 대형사고의 가능성을 내포하고 있으므로, 정기적으로 사용점검사(ISD)를 실시하여 안전성을 진단하고, 현재의 설비를 계속 사용할 것인가? 또는 교체하여야 할 것인가? 그대도 사용한다면 취약부위는 어디이며 언제 보수하여야 하는가? 등에 대한 예측이 필요하다. 즉, 구조물의 안전성 및 건전성 확보 측면에서 재질열화의 평가기법에 대한 연구의 필요성이 매우 중요하게 인식되고 있다[4-6].

재질 열화도의 평가는 현장 실기로부터 재료를 채취하여 충격시험, 크리프시험, 인장시험, 파괴인성시험 등과 같은 파괴적인 방법으로 평가하는 것이 가장 정확하다. 하지만, 가동중인 현장 실기에서 구조물에 손상을 입히지 않고 시험편을 채취한다는 것은 사실상 불가능하고, 시간적 제약과 경제적으로 많은 문제점을 내포하고 있다. 즉 재료의 전체적 시험이 불가능하고 결과 도출에 많은 공정이 필요 할 뿐 아니라 측정변수의 해석이 어렵고 신뢰도가 낮아 현장 적용의 어려움이 수반된다. 따라서 구조물을 파손시키지 않고 손상 정도를 정량적으로 현장모니터링 할 수 있는 고정밀도의 정량적 비파괴평가(quantitative nondestructive evaluation; QNDE) 기법의 확립이 현안과제가 되고 있다[7,8]. 현재 국내에서는 경도측정법, 전기저항법[9], 레프리카법, 바크하우젠노이즈법[10], 전기화학적방법[11], 초음파법[12], 압입법[13], 소형편치법[14] 등 비교적 다양한 비파괴적인 열화도 평가에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

이 중 초음파 비파괴평가에 의한 열화도 측정방법은 측정의 간편성, 높은 측정감도, 측정결과 해석의 신속성 확보에 우수한 것으로 보고되고 있다[15,16]. 초음파 계측에 의한 열화도 평가에는 초음파 파형이 가지고 있는 각종 특징량의 파라미터(음속, 감쇠계수 등)를 추출하여 이들이 갖는 강한 특징량 파라미터와 재료의 열화·손상 등 물성 변화와의 상관성을 도출하고 수치화하여 열화도를 평가한다[17].

본 연구에서는 2.25Cr-1Mo 인공열화재를 장시간 등은 열처리로 모의 열화시험편을 제작하고, 고온설비재료에서 발생하는 미세조직의 변화와 고주파 초음파의 전파특성과의 상관관계를 규명하여 초음파 비파괴평가에 의한 열화도 평가의 유용성 유무를 실험적으로 검증하고자 한다.

2. 실 험

2.1. 인공 모의 열화재 제작

본 실험에 사용된 시험편 재료로 현장에서 장시간 사용되어 열화된 실제 사용재료를 입수하는 것은 매우 어려우므로 본 실험에 사용된 시험편재료는 열화된 재료의 미세조직과 유사한 인공 열화시험편을 제작하여 모의실험을 하였다.

2.25Cr-1Mo 강은 900 °C에서 1 시간 노말라이징처리 후 720 °C에서 1 시간 템퍼링처리하였으며 화학적 성분은 Table 1과 같다. 석출탄화물과 관련한 열화 시험편을 제작하기 위하여 시료를 630 °C의 온도에서 고온 가속 열처리를 수행함으로써 고온 장기 사용재와 유사한 미세조직을 갖는 시험편을 제작하였다. 가속열처리에 필요한 시간은 Table 2와 같으며, Table 3은 실험에 사용한 2.25Cr-1Mo 강의 기계적 성질을 나타내고 있다.

Table 1 Chemical composition of 2.25Cr-1Mo steel

Comp.	C	Si	Mn	S	P	Al	Cr	Mo	Ni
wt.%	0.138	0.142	0.46	0.004	0.014	0.07	2.27	0.97	0.97

Table 2 Determination of accelerated aging time at 630°C for equivalent microstructure(×1000 h)

Time Served at 538 °C	as-received	65	100	170	260
Aging Time at 630 °C	0	1.2	1.8	3.1	4.8

Table 3 Mechanical properties of 2.25Cr-1Mo steel

Mechanical Property	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
Value	480.2	630.14	24	203.8

2.2. 미세조직관찰

열화에 따른 석출탄화물의 형태 및 입내와 입계에서 탄화물의 변화 등을 조사하기 위해 2.25Cr-1Mo 강의 모재와 열화제에 대해 열화시간에 따른 미세조직의 변화를 FESEM(field emission scanning electron microscope)과 투과전자현미경을 통해서 관찰하였다. 2.25Cr-1Mo 강에서 존재하는 주요 탄화물로 Baker와 Nutting 등[18-20]은 M_3C 와 Mo가 풍부한 M_7C_3 , $M_{23}C_6$ 그리고, Cr이 풍부한 M_2C , M_6C 탄화물의 변태과정을 일으킨다고 연구 보고하고 있으며, 특히 2.25Cr-1Mo 강에 미세하게 분산된 침상의 탄화물(Mo가 풍부한 M_2C 탄화물)은 전위의 이동을 억제하는데 효과적이고 계속되는 탄화물 반응을 통하여 고용체내에 존재하는 Mo의 함량과 M_2C 형태의 탄화물은 감소하고 평형조건에 도달하기 위해 Mo가 풍부한 M_6C 탄화물을 형성하며 조대화되는 것으로 알려져 있다[21].

2.3. 경도시험 및 충격시험

경도 시험편은 표면 거칠기를 일정하게 하여 표면 거칠기에 의한 경도값의 변화를 배제하였고, 일본 Shimadzu사의 미소 비커스 경도시험기(HMV-2000)를 사용하였다.

연성-취성 전이온도의 변화를 관찰하기 위해서 각 열처리 단계별로 $-140^{\circ}C \sim 20^{\circ}C$ 범위에서 V-노치 샤르피 충격 시험을 하였다.

2.4. 초음파시험

본 연구에 사용한 초음파계측 시스템의 모식도는 Fig. 1과 같으며, 초음파의 에너지 전달효율이 양호한 수침법을 이용한 비접촉 펄스에코법으로 측정하였다. 초음파 비파괴평가 계측시스템으로는 Hitachi사의 초음파영상장치(mi-scope; 100 MHz)를 사용하였으며, 오실로스코프(LeCroy 9374M) 디지털 스토리지 장치로부터 1000회의 RF-signal 데이터를 수집하고 평균화하였다. 탐촉자는 초음파 감쇠계수의 주파수의존성을 고정밀도로 평가하기 위해 광대역 주파수 특성을 갖는 Ultran(50MHz, 진동자의 지름 0.25in.), Panametrics M312(10MHz, 진동자의 지름 0.25in.), Ultran WS50-5(5MHz, 진동자의 지름 0.25in.)의 수침탐촉자를 사용하였다.

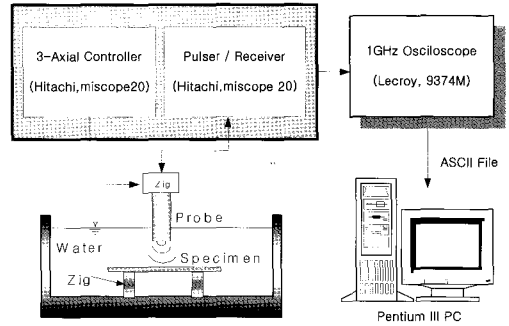


Fig 1. Schematic diagram of experimental setup

초음파 파형이 가지고 있는 특징량의 파라미터 중 감쇠계수는 50MHz의 고주파수 탐상 시의 감쇠를 고려해 두께 2.3mm인 시험편을 사용하였으며, 감쇠계수의 측정 은 시간영역에서 시험편을 왕복한 신호에 대해 일정한 시간영역을 설정 후 감쇠계수 측정을 위해 스펙트럼해석을 이용하였다. 또한, 초음파 감쇠의 주파수 의존성의 고정밀도 평가를 위해 MathWorks사 MATLAB ver. 5.2 Toolbox Wavelet을 사용하여 웨이블렛 해석이 가능한 M-file을 구축하고 사용자 편의를 위한 GUI 환경의 해석 알고리즘을 개발하여 활용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 열화도에 따른 미세조직의 변화

Fig. 2는 열화된 시험편을 FESEM으로 관찰한 사진으로 구형, 막대, 침상의 세 가지 탄화물을 볼 수 있고 Mo가 풍부한 침상의 M_2C 탄화물이 1,000 시간이 지나면서 거의 나타나지 않고 있음을 알 수 있었다. Fig. 3은 열화시간에 따른 탄화물의 변화 양상을 보여주는 투과전자 현미경사진이다. 열화시간이 증가함에 따라 탄화물이 조대화되며 점차 구상화가 진행되고 있다. 구상의 탄화물은 920 시간 까지는 빠른 속도로 조대화가 일어났으며 이후에도 완만하지만 지속적인 조대화가 진행되고 있다.

3.2. 기계적 성질

Fig. 4는 열화된 시험편을 사용하여 상온 하에서 측정한 비커스 경도값의 변화 경향을 나타내었다. 920 시간까지는 비교적 급격하게 감소하며 그 이후에는 완만하게 감소하

는 경향을 보이고 있다. Gope 등[19]은 2.25Cr-1Mo 강에서 템퍼링에 따라 침상의 탄화물(M₆C)의 변태과정에서 기지내 고용된 Mo의 고갈이 일어나며 연화가 된다고 보고하고 있으며, 이를 참고로 하여 920 시간까지의 급격한 경도 저하는 M₆C 탄화물의 소멸, 기지에 고용된 Mo의 감소 그리고 이로 인한 M₆C 탄화물의 조대화에 의한 것으로 생각된다.

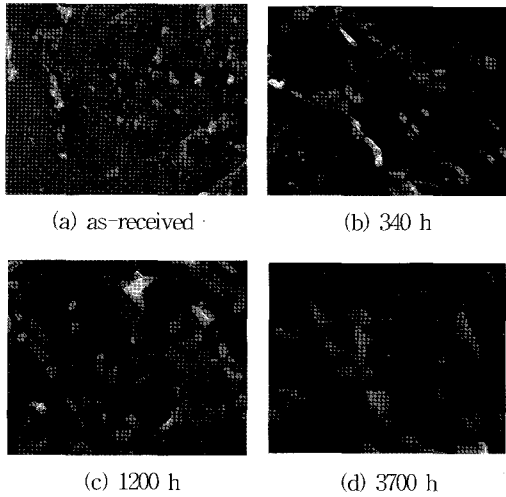


Fig. 2 FESEM image showing morphology of carbides ($\times 20,000$)

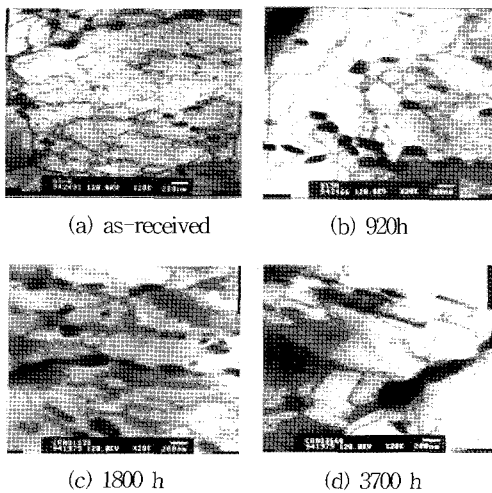


Fig. 3 TEM micrographs showing morphology of carbides ($\times 20,000$)

Fig. 5는 입계에서의 단위 길이당 탄화물의 면적을 나타낸 것이다. 입계 탄화물은 열화시간이 증가함에 따라서 조대화가 되며, 합체되기 때문에 입계 탄화물은 입계의 길이당 탄화물의 면적으로 정량화 하였다. 920 시간까지는 열화시간이 증가함에 따라서 탄화물이 차지하는 면적이 증가하며 이후에는 그 속도가 점차 감소하고 일정해지는 경향을 보이고 있다. Fig. 6은 열화 시간에 따른 연성-취성 천이온도(DBTT)의 변화를 나타내고 있다. as-received 시편의 DBTT값은 $-47\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이었으며 920 시간까지는 급격히 천이온도가 증가하다 이후에는 더 이상 증가하지 않는 경향을 나타내었다. 천이온도가 920 시간 이후에는 변화가 없는 것으로 보아 이는 M₆C의 조대화보다는 M₆C 탄화물의 소멸과 직접적인 관련이 있는 것으로 생각된다.

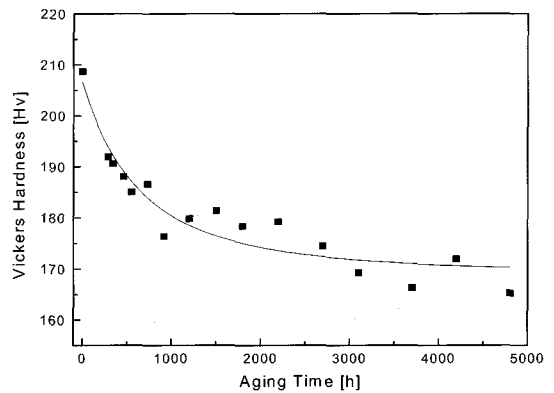


Fig. 4 Change of Vickers hardness with aging time

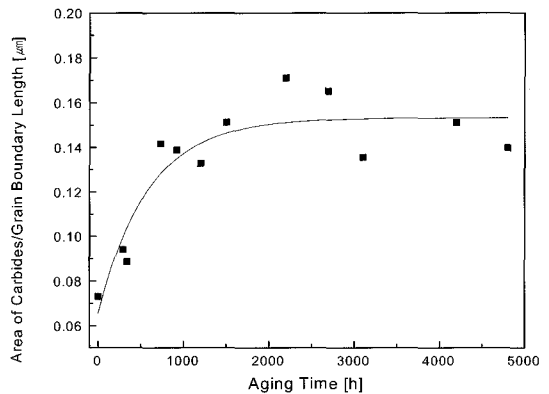


Fig. 5 Change of area on grain boundary carbides per unit grain boundary length

3.3. 열화도에 따른 초음파 특성 변화

초음파는 강의 내부를 지나는 동안 확산이외에 결정입계 및 조직 특성에 의해 산란되어 에너지를 손실하게 된다. 이러한 초음파의 감쇠는 저면 에코 진폭높이의 저하 및 다중 반사횟수의 감소로도 관찰되며, 초음파 감쇠계수는 강한 주파수 의존성이 있고 주파수에 대해 지수함수적으로 증가하는 경향을 갖고 있다.

Fig. 7은 5, 10, 50 MHz의 고주파수 특성을 갖는 탐촉자를 이용하여 펄스 에코 방식에 의해 감쇠계수를 측정 한 결과를 나타내고 있다. 열화시간에 대한 초음파 감쇠계수의 변화를 나타낸 것으로 열화시간이 증가함에 따라서 감쇠계수는 1,000 시간 정도까지는 서서히 증가하다가 그 이후에는 급격한 증가를 보이고 있음을 알 수 있다.

5 MHz와 10 MHz의 저주파수 영역에서는 열화시간에 따른 초음파 감쇠계수의 변화를 구분할 수가 없고, 35 MHz 이상의 고주파수 영역에서 열화시간에 따라 감쇠계수가 증가하는 좋은 상관성을 나타내고 있다.

홍 등[22]은 구오스테나이트 결정립의 크기를 고정시키고 열처리 조건에 따른 탄소강에서의 초음파 감쇠에 대한 연구에서 구 오스테나이트 결정립보다 더 미세한 하부조직의 단위가 산란체로 작용한다고 보고하였으며, 이는 본 실험에서 사용한 인공열화 시험편들의 평균 결정립의 크기는 20 μm 로 결정립의 크기 변화는 없고, 이로부터 초음파의 산란체로서 결정립의 영향은 동일한 것으로 생각되고 열화에 따른 탄화물의 형태학적 변화 즉, 920 시간까지는 침상의 Mo_2C 가 없어지면서 탄화물의 조대화와 합체로 되어 가는 단계에서 결정립계 석출탄화물의 증가가 입계 산란에 기여한 것으로 사료되어진다.

Fig. 8은 웨이블렛 분석에 의한 초음파의 감쇠계수의 주파수 의존성을 나타내고 있다. 감쇠계수는 주파수에 대해 지수함수의 경향으로 증가한다. 하지만, 주파수 스펙트럼에서 볼 수 있었던 지속적인 감쇠계수의 증가보다는 50 MHz에 근접할수록 그 주파수에 대한 감쇠계수의 증가량이 둔화되는 것을 알 수 있었다. 실험에 사용한 탐촉자의 중심주파수가 35 MHz인 경우 파장이 약 170 μm 로 결정입의 평균 크기가 약 20 μm 를 고려하면, 산란영역은 Rayleigh 산란영역($\lambda \gg 2\pi D$)에 해당되므로 초음파의 감쇠계수 주파수 의존성은 매우 커 이론적으로 주파수의 4승에 비례한다. 하지만 50 MHz의 고주파수인 경우에 파장은 약 120 μm 정도이므로 그 산란영역은 Rayleigh 산란

영역에서 Stochastic영역으로 넘어가는 단계라고 할 수 있다.

Rayleigh 산란영역에서는 주파수의 4승에 비례하지만 초음파 감쇠계수는 Stochastic 영역에서는 주파수의 2승에 비례하는 것으로 알려져 있다[21]. 결과에서와 같이 감쇠계수는 40 MHz가 넘어가면서 그 증가가 둔화되는 경향을 보이고 있다. 2.25Cr-1Mo 강에 존재하는 탄화물의 평균크기는 0.2 μm 이하의 매우 미세한 입자의 변화 과정으로 이러한 변화를 검출하기 위해서는 산란 양을 증폭시켜야 하며 이를 위해서는 고주파수의 광대역 특성을 갖는 탐촉자가 유리함을 알 수 있다.

Fig. 9는 감쇠 계수의 주파수 의존성을 고찰하기 위한 것으로 이미 살펴본 바와 같이 사용한 탐촉자의 중심주파수와 결정입의 평균크기를 고려하면 Rayleigh 산란영역에 해당한다. Rayleigh 산란 영역에서의 이론적 감쇠계수는 $\alpha = C \cdot D^n \cdot f^m$ 으로 표현된다[23].

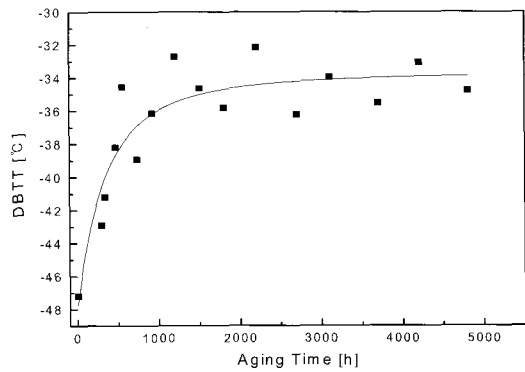


Fig. 6 Change of DBTT with aging time

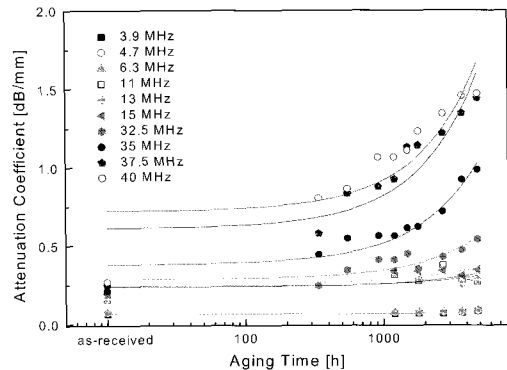


Fig. 7 Attenuation coefficient as a function of aging time at each frequency

여기에서, $n=3$, $m=4$ 이다. 따라서, 직선의 기울기는 주파수 지수 m 을 의미하며 단일 상을 갖는 강에서의 이론적인 값은 $m=4$ 인데 비해 실험적으로 구한 값은 열화 시간에 관계없이 기울기는 약 1.8~2.4이었다. 기존의 실험적 연구에 의하면 2상, 3상 등의 복합조직을 갖는 강에서는 이론값과는 다르게 감쇠계수는 주파수의 제곱에 근사한 값으로 비례한다고 보고하고 있다[24]. 본 연구결과에서 이론값과 차이가 있는 것은 초기의 인공열화재의 경우 페라이트 기지에 배이나이트가 혼재하는 조직으로 열화가 진행됨에 따라서 석출탄화물과 같은 제 2상의 생성에 기인하는 것으로 사료된다.

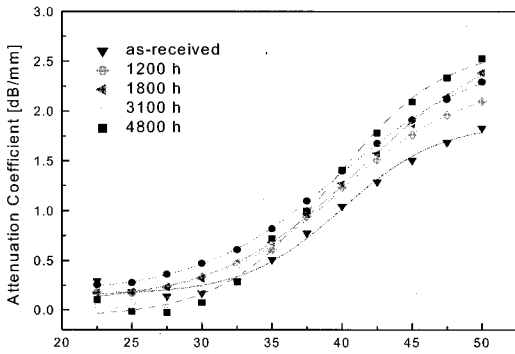


Fig. 8 Relationship between attenuation coefficient and frequency at each degraded material analysed by wavelet transform

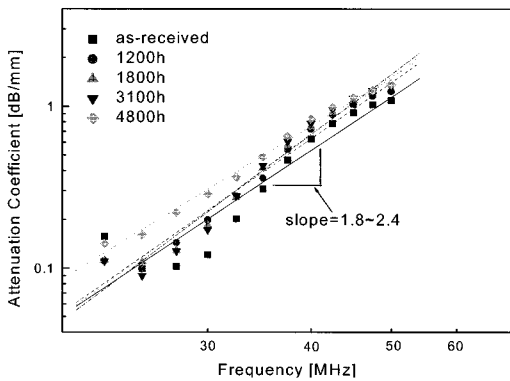


Fig. 9 Frequency dependence of attenuation coefficient

4. 결 론

2.25Cr-1Mo 강을 모의열화 시켜 열화에 따른 미세조직의 변화와 초음파 스펙트럼 특성을 이용한 감쇠계수와 의 상관 관계에 대한 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 열화시간이 증가함에 따라서 침상의 M₂₃C₆ 탄화물은 급격히 감소를 하다 1,000 시간 이후에는 거의 소멸되고 석출탄화물은 점차 조대화되면서 입계에서의 단위길이당 탄화물의 면적이 증가함을 알 수 있었다.
2. 열화에 의한 입계 탄화물의 석출 및 조대화로 인해 초음파 감쇠계수는 열화가 진행됨에 따라서 증가하는 경향을 나타내었으며, 그 정도는 침상의 탄화물이 거의 소멸되는 1,000 시간 이후에는 초음파 감쇠계수가 급격히 증가하였다. 결과로부터 초음파 감쇠계수를 이용한 열화도 평가의 가능성을 확인하였다.
3. 미소한 탄화물입자에 의한 산란성을 효과적으로 평가하기 위하여 고주파 탐촉자 (35MHz이상)를 이용한 비파괴평가 기법의 적용이 효과적임을 알 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

- [1] 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)
- [2] 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 Turbin Steel", *ISIJ International*, Vol. 37, No. 11, pp. 1133-1138, (1997)
- [3] 정희돈, "고온설비의 경년열화와 측정법", 대한기계학회지, 제 31권, 제 3호, pp. 251-260, (1991)

- [4] Abdel-Latif, A. M., Cobett, J. M., Sidey, D. and Taplin, D.M.R.M, "Effects of Microstructural Degradation on Creep Life Prediction of 2.25Cr-1Mo Steel", Proc. of 5th Int. Conf. on Fracture (ICF5), Cannes, France, Vol. 4, pp. 1613-1620, (1981)
- [5] 박익근, 정민화, 이상국, "초음파비파괴평가 기법에 의한 재료의 열화·손상 식별", KSNT UT/AE9614, pp. 149-162, (1996)
- [6] 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)
- [7] 정현조, 남승훈, 장경영, 남영현, "비선형 음향효과에 의한 고온 재료의 파괴인성 열화도 평가", 한국비파괴검사학회지, Vol. 20, No. 5, pp. 373-380, (2000)
- [8] 박익근, 박은수, 김현목, 권숙인, "표면SH파에 의한 고온 구조재 열화·손상의 비파괴평가", 2000 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 280-285, (2000)
- [9] 석창성, 김동중, 배봉국, "전기비저항법을 이용한 재료열화 평가", 대한기계학회논문집 A권, 제 24권, 제 12호, pp. 2995-3002, (2000)
- [10] R. Ranjan and P. B. Thompson, "A study on the effect of dislocation on the magnetic NDE methods", *Journal of Applied physics*, 61(8), pp. 3196-3198, (1987)
- [11] 齋藤 喜久, 壓子 哲雄, 波邊 農, "電氣化學的手法によるステンレスステツシス鋼の材料劣化現位置 評價技術の開發", 日本機械學會論文集(A編), Vol. 57, No. 538, pp. 1442-1448, (1991)
- [12] 남영현, "초음파에 의한 압력용기의 연취성천이온도 평가", 한국비파괴검사학회지, Vol. 20, No. 5, pp. 373-380, (2000)
- [13] 석창성, 김정표, 안하늘, "압입법을 이용한 재료 열화의 평가에 관한 연구", 대한기계학회 추계학술대회 논문집 A권, Vol. 24, No. 2, pp. 171-176, (2000)
- [14] 정세희, "소형편치시험법에 의한 발전용증기관의 경년 재질열화 평가에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제 15권, 제 5호, pp. 1665-1673, (1991)
- [15] S. Hirsekorn, "The scattering of ultrasonic waves by polycrystals", *J. Acoust. Soc. Am.*, 72(3), (1992)
- [16] 유효선, 정세희, "고온부재의 열화도 평가를 위한 초음파 특성에 관한 연구", 제 6회 경년열화 및 수명평가 심포지움 논문집, pp. 27-43, (1996)
- [17] 박익근, 박은수, 안형근, 권숙인, 변재원, "초음파 에코파형의 Wavelet 해석과 비파괴평가에의 응용", 한국비파괴검사학회지, Vol. 20, No. 6, pp. 501-510, (2000)
- [18] R. G. Baker J. Nutting, "The Tempering of 2.25Cr-1Mo steel after quenching and normalizing", *J.I.S.I.*, July, (1959)
- [19] N. Gope, T. Mukferjee, D. S. Sarma, "Influence of long-term aging at 520°C and 560°C and the superimposed creep stress on the microstructure of 1.25Cr-0.5Mo steel", *Metall. Trans.*, 23A, (1989)
- [20] W. B. Jones and J. A. Van Den Avyle, "Substructure and Strengthening Mechanism in 2.25Cr-1Mo steel at Elevated Temperatures" *Metall. Trans.*, Vol. 11A, Aug., (1980)
- [21] J. Nutting, AIME Proc. Topical Conference of Ferrite Alloy for use in the Nuclear Energy Technologic, (1983)
- [22] 홍순택, 권숙인, 조용용, "초음파 감쇠측정에 의한 탄소강 미세조직의 비파괴적 평가", 대한금속학회지, Vol. 37, No. 7, (1999)
- [23] D. Nicoletti and A. Anderson, "Determination of grain size distribution from ultrasonic attenuation: Transformation and inversion", *J. Acoust. Soc. Am.*, 101(2), pp. 668-689, (1997)
- [24] B. Y. Ahn, S. S. Lee, S. T. Hong, H. C. Kim and S. L. Kang, *NDT & International*, 32, 58, (1999)