

초음파를 이용한 재질열화의 비파괴적 평가

김 정석*, 박 은수*, 박 익근**, 김 현묵**

* 서울산업대학교 재료공학과, ** 서울산업대학교 기계공학과

Nondestructive Evaluation for Material Degradation of 2.25Cr-1Mo steel by Ultrasonic Wave

Chung Seok Kim*, Un Su Park*, Ik Keun Park**, Hyun Mook Kim**

* Dep. of Material Science & Engineering, Seoul National Univ. of Technology

** Dep. of Mechanical Engineering, Seoul National Univ. of Technology

Abstract

This study has been achieved on the characteristics of ultrasonic wave in 2.25Cr-1Mo steel to evaluate the feasibility of ultrasonic nondestructive technique on the assessment of aging degradation.

The measured values were used find a relationship between the ultrasonic propagation properties and degradation such as coarsening of carbides and precipitates. The ultrasonic attenuation coefficient was mainly affected by the grain size of prior austenitic phase as well as degradation.

In this results, degradation and grain size in 2.25Cr-1Mo steel was able to cope with the changes in ultrasonic wave properties by applying the nondestructive evaluation method

Words : ultrasonic wave(초음파), ultrasonic velocity(음속), attenuation(감쇠) degradation(열화)

1. 서론

고온에서 사용되는 플랜트 설비로는 Cr-Mo강, Cr-Mo-V강, 스테인레스강과 같이 고온에서 우수한 기계적 성질을 갖는 내열강이 널리 사용되고 있다.

그러나 이들 재료는 고온에서 장시간 사용되는 동안에 탄화물이나 금속간 화합물의 입내 및 입계석출, 수소취화 등으로 인하여 사용시간이 경과함에 따라 금속학적 미세조직의 변화를 일으키고 초기의 우수한 특성이 저하되는 재질열화(material degradation)를 일으키는 것으로 알려져 있으며, 이에 따른 구조물의 안전성 및 신뢰성 평가방법이 중요하게 인식되고 있다.^[1]

일반적인 재질열화도의 평가방법으로 주로 충격시험, 크리프시험, 경도법 등을 이용하고 있으나 이들 방법들은 시편의 채취에서 관찰에 이르기까지 많은 시간과 인력이 소요되며 재료의 전체적 시험이 불가능하고 결과 도출에 많은 공정이 필요할뿐 아니라 측정변수의 해석이 어렵고 신뢰도가 낮아 현장 적용의 어려움이 수반된다. 따라서 이러한 방법보다 사용 중 구조물에 손상을 주지 않고, 고온설비부재의 안전성 및 신뢰성 확보를 위한 고감도, 고정도의 정량적 비파괴 평가기법의 확립이 현안과제가 되고 있다.^[2,3,4]

초음파비파괴평가(ultrasonic nondestructive evaluation; 이하 UNDE라 한다)기법은 측정의 간편성, 높은 측정감도, 측정결과 해석의 신속성 및 신뢰성 확보에 우수한 것으로 보고되고 있다.^[5] UNDE에 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 수

치화하여 열화도를 평가한다.

본 연구에서는 2.25Cr-1Mo강에 대하여 장시간 등온열처리로 모의 열화시험편을 제작하여 금속학적 미세조직을 관찰하고, 미세조직의 변화와 초음파의 전파특성과의 상관관계를 규명함으로써 재료의 열화도를 고찰하고자 한다.

2. 이론적 배경

다결정체내에서 결정입계에는 서로 다른 결정방위에 따른 탄성이방성이 나타나며, 초음파의 전파속도는 탄성계수, 밀도, 포아송비(Poisson's ratio), 온도 등에 의존한다. 다음과 같이 초음파의 대표적인 종파 v_L 과 횡파 v_T 의 전파속도는 다음 식으로 주어지고, 주로 탄성계수에 의존하는 파라미터(parameter)임을 알 수 있다.^[6]

$$v_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

$$v_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (2)$$

여기서, E 는 영률(Young's modulus), ρ 는 밀도, ν 는 포아송비이다.

재료특성에 관계하는 초음파 파라미터로 초음파 에너지의 감쇠는 열탄성 효과, 전위에 의한 뎀핑, 자성재료 자기탄성 등의 이력손실에 의한 흡수와 미세조직 및 결정입계 등에 의한 산란에 기인한다.^[7,8]

초음파의 에너지 손실은 음파가 재료 내부를 전파할 때 입자들을 진동시키고, 이 탄성진동을 열에너지로 변환시키는 흡수손실과 결정의 무질서한 배향, 결정입계의 비등방적 특성, 결정입의 크기 등 다양한 산란 메카니즘에 동반된 산란손실로 구분할 수 있으며 다음 식으로 표현된다.

$$\alpha(f) = \alpha_a(f) + \alpha_s(f) \quad (3)$$

여기서 $\alpha_a(f)$ 는 흡수감쇠계수이며, $\alpha_s(f)$ 는 산란감쇠계수이다. 초음파의 산란은 결정입의 평균 직경(\bar{D})과 초음파 파장(λ)의 비에 따라 뚜렷하게 다음 3가지의 산란영역으로 구분된다.

초음파의 파장이 결정입의 평균직경보다 매우 큰 Rayleigh영역, 파장이 결정입의 평균직경과 비슷한 Stochastic영역, 파장이 결정입의 평균직경보다 작은 Diffusion 영역이 그것이다.^[9]

3. 실험장치 및 방법

3.1 모의 열화제 제작

본 실험에 사용된 재료는 고온·고압용 발전설비의 터빈로터용 소재로 널리 사용되는 삼미특수강 제품의 2.25Cr-1Mo강으로 분광분석기를 사용하여 분석한 화학조성은 Table 1과 같다.

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

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

실제 고온부재로 오랜 기간 사용된 재료와 유사한 미세조직을 시뮬레이션하기 위해 다음 식 4의 철의 자기확산식(self diffusion function)을 이용하여 일반 사용온도(538℃)보다 높은 630℃의 온도에서 고온 가속 열처리를 수행하였다.^[10]

$$t_2 = t_1 \exp\left[\frac{Q}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right] \quad (4)$$

여기서, R 은 일반기체상수로 8.314J/kmol/K이고, Q 는 철의 자기확산화 에너지로서 272kJ/mol이며, D_0 는 상수, T_1 , T_2 는 열화온도, t_1 , t_2 는 열화시간

을 나타낸다. Table 2에 538℃에서 장시간 사용한 것과 같은 동일한 열화조직을 얻기 위하여 630℃에서 필요한 열화시간을 나타내었다.

Table 2. Equivalent service time at 538℃ and Aging time at 630℃

Time Served at 538℃(hr)	Virgin	3,000	12,000	60,000
Aging Time at 630℃(hr)	0	50	200	1,000

Fig. 1에서 열처리과정을 도식적으로 표시한 것처럼 시험편을 950℃에서 1시간동안 균질화처리한 시험편을 virgin으로 하였으며, 미세조직의 변화를 위해서 A₃변태점 이상 각각의 온도에서 열처리를 행하였다.

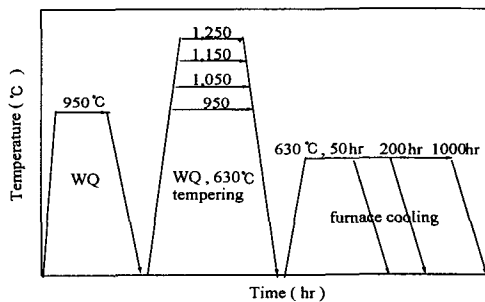


Fig. 1 Schematic diagram of heat treatment

3.2 실험방법

(1) 미세조직의 관찰

열화도에 따른 석출 탄화물과 금속학적 미세조직의 변화를 관찰하기 위해 2.25Cr-1Mo강의 모재와 각 단계별 모의열화재를 #80-#4000 수지연마지로 연마 후, 6μm, 1μm diamond 연마제로 경면제작하였으며, 시험편을 3%나이트랄 부식액을 사용하여 상온에서 약 30~40초 정도 부식하고, 광학현미경(Optical Microscope)의 배율을 200배, 1,000배로 열화의 진행에 따른 미세조직의 변화를 관찰하였다.

(2) 경도시험

열화도에 따른 경도변화를 측정하기 위해 균질화

처리한후 모의열화한 각각의 열화재의 경도를 측정하였다. 시험편의 경도측정은 일본 Future-Tech사의 마이크로비커스 경도계를 사용하였으며, 하중을 50g으로 하여 각각 5회 측정하였고 최고, 최저값을 제외한 평균값을 취하였다.

(3) 초음파시험

본 연구에 사용한 실험장치의 구성도는 Fig. 2와 같이 수침법을 이용한 pulse-echo법으로 측정하였다. 초음파 탐촉자는 Panametrics사 제품의 광대역 수침형 탐촉자로 주파수는 5MHz, 10MHz, 15MHz, 20MHz, 25MHz를 사용하였다. 탐상의 시험편과 수침형 탐촉자의 거리는 25mm를 유지하여 초음파의 원거리음장역이 적용될 수 있도록 하였다.

초음파의 감쇠계수는 시험편으로부터 반사에 의한 반복되는 초음파 펄스의 제 N번째 에코의 진폭강도가 최대가 되는 피크의 수신진폭강도 I_N ($N=1, 2, 3, \dots$)로서 다음 식 5에 의해 감쇠계수를 계산하였고, 실험장비로는 초음파탐상기 USD-15(KrautKramer; 35MHz), 디지털오실로스코프(Lecroy 9374M)를사용하였다.

$$\alpha = \frac{1}{M} \cdot \sum_{N=1}^M \frac{\log(I_{N+1}/I_N)}{T_{N+1} - T_N} \quad (5)$$

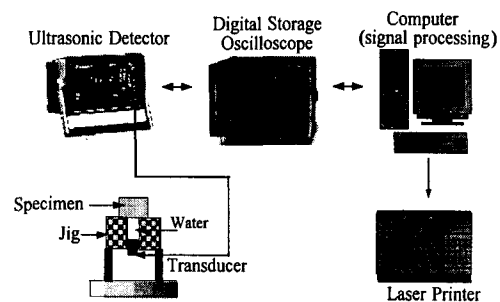


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

4. 시험결과 및 고찰

4.1 열화도에 따른 미세조직 및 경도변화

Fig. 3은 열화시간에 따른 미세조직을 광학현미경($\times 1000$)을 통해 관찰한 것이다. 초기시험편의 미세조직은 템퍼드 마르텐사이트조직으로 평행한

래스(lath)상으로 이루어져 있다.

모의열화처리 시간이 증가함에 따라 초기 세멘타이트(cementite)의 구상화를 관찰할 수 있으며 석출상이 입내, 입계, 템퍼드 마르텐사이트의 패킷(packet)계면에 석출되었음을 관찰할 수 있다. 이와 같은 입계석출은 입계강도를 저하시킴으로써 재료의 기계적 성질을 저하시키는 원인으로 사료된다.

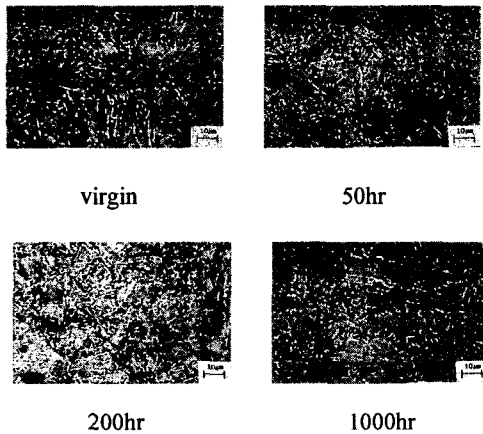


Fig 3. Effect of degradation on the microstructure

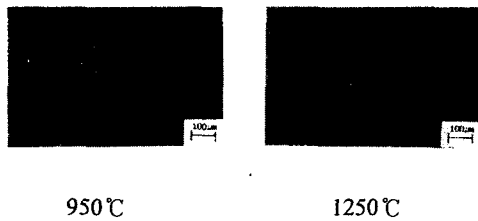


Fig. 4 Effect of austenizing temperature on grain size

Fig. 4는 균질화처리한 시험편을 각각 950°C, 1,250°C로 열처리한 결정립의 미세구조 변화를 보여주고 있다. 오스테나이트 온도 증가함에 따라 결정립의 크기가 증가하였다.

Fig. 5는 등온열화 시간에 따른 경도변화를 나타내었으며 열화시간이 증가함에 따라서 경도값은 감소되었다. 이는 고용강화된 합금원소가 결정립계로의 확산에 따른 석출과정에 의해 결정립내의 합금원소의 감소로 인한 격자변형에너지의 감소와 전위밀도의 감소에 의한 것으로 판단되어진다.

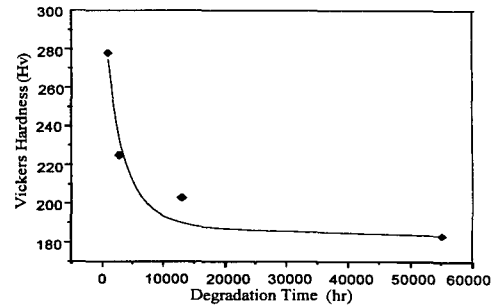


Fig. 5 Effect of degradation on Vickers Hardness

4.2 열화도에 따른 초음파특성의 변화

입내 및 입계에 석출되는 탄화물과 수반되는 조대화로 인해 2.25Cr-1Mo강에 있어서 템퍼취성(temper embrittlement)의 원인이 되며, 이러한 석출상이 초음파의 특성 파라미터인 감쇠계수와 음속에 영향을 주는 인자로 작용하는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 초기시험편과 1,000시간 등온열처리에 의한 모의열화시킨 시험편에서 초음파의 후면 반사에코의 오실로스코프상에 나타난 RF-signal 변화를 나타내었다. 후면반사에코 B₁, B₂, B₃로 감에 따라 peak의 높이가 감소되었으며, 또한 peak의 높이는 초기 시험편보다 낮아졌다.

탄성이방성이 큰 다결정체 내에서 초음파의 결정 입계에 의한 산란감쇠와 내부마찰에 의한 미세조직의 흡수감쇠로 대별되며 본 실험에서는 모두 단일상의 템퍼드 마르텐사이트조직으로 흡수감쇠에 미치는 영향은 극히 작은 것으로 판단된다. 또한 마르텐사이트는 전단변태, 무확산 변태임으로 조성의 변화는 없고 내부 조직의 방위차만 발생함으로 이들 방위가 감쇠에 미치는 영향은 극히 적으므로 거의 무시할 수 있다.

Fig. 7, 8은 초기 시험편과 열화된 시험편과의 감쇠량의 차를 도시하였다. 열화에 따른 석출상 등의 미세조직변화가 초음파의 산란체로 작용하여 건전재보다 열화재가 큰 감쇠를 나타내었다.

Fig. 9에서와 같이 초기 시험편보다 열화된 시험편의 초음파 전파속도가 증가하였다. 초기 시험편의

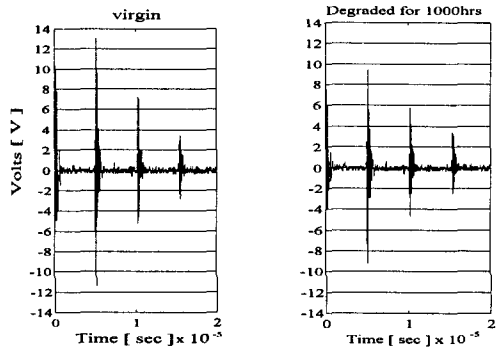


Fig. 6 Ultrasonic pulse echo waveform of virgin and 1000hrs degraded specimen at 630°C

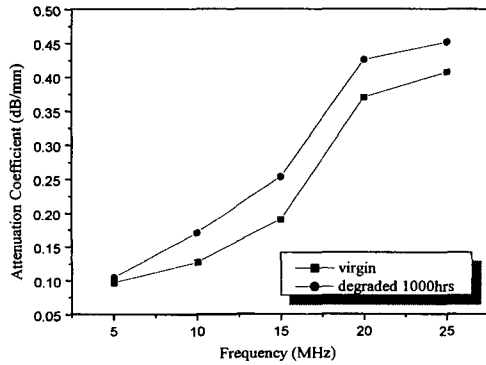


Fig. 7 Effect of degradation time on attenuation

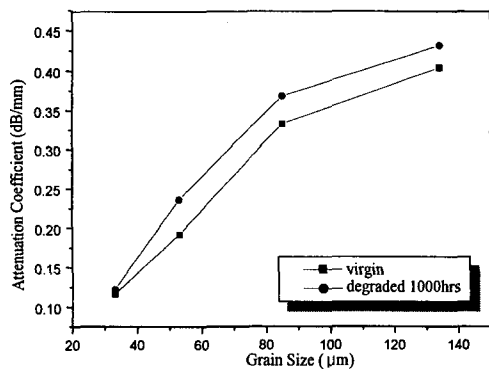


Fig. 8 Variation of ultrasonic attenuation coefficient

경우 마르텐사이트변태는 불규칙한 habit plane을 가지며 매우 미세한 쌍정(twin)의 집합체를 형성하

고 있으며 매우 높은 전위밀도를 지니고 있다. 따라서 초음파의 전파 경로가 불규칙해지고 전파시간의 지연을 초래하게 되어 전파시간은 느려졌다. 또한 열화된 시험편에 있어서 장시간 모의 열화처리에 의한 전위밀도의 감소와 석출상의 형성이 구형을 형성하기 때문에 초음파의 전파속도는 초기 시험편보다 빠르게 전파된다.

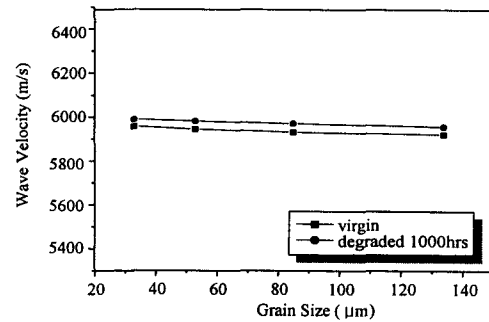


Fig. 9 Variation of longitudinal ultrasonic wave velocity of 2.25Cr-1Mo steel

5. 결론

2.25Cr-1Mo강의 재질열화에 따른 미세조직의 변화와 초음파의 전파특성에 대한 실험으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 630°C에서 장시간 등온 열처리하였을 때, 탄화물의 입내 및 입계석출과 구상화, 합금원소들의 입계편석 등 재질열화도를 경도법과 초음파적 비파괴적방법을 이용하여 열화도 평가의 가능성을 확인할 수 있었다.
- (2) 열화된 재료의 초음파 감쇠계수는 주파수가 증가함에 따라 감쇠계수가 커지는 주파수의존성이 있음을 확인할 수 있었다. 또한 열화된 재료에서 초음파의 종파속도는 증가한 것처럼 보이나 그 정도가 너무 미소하여 초음파 음속

에 대해 재질열화를 평가하는데는 추후 열화 조건을 달리한 시험재를 확보하여 지속적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

이상의 결과로 보아 2.25Cr-1Mo강의 재질열화의 평가에 대한 초음파의 전파특성(감쇠)은 유효한 파라미터라고 사료되어진다.

참고문헌

- [1] 福原照明, “材料の 損傷・劣化診断の 現狀” 非破壊検査, 46(3), 1997
- [2] 김건영, “국내화력발전소 보일러 및 압력용기의 현안과제 및 향후대책”, 大韓機械學會誌, 33(8), 1993.
- [3] 권재도, “압력용기강의 경년열화 평가와 그 대책”, 大韓機械學會誌, 32(4), 1992.
- [4] 정세희, 김정기, “고온재료의 재료특성 변화”, 大韓機械學會誌, 32(4), 1992.
- [5] S.K.Hur, K.T.Hong and J.M.Do, “The measurement of Degradation in Creep-Ruptured CrMoV steels by NDE Methods”, Proc.of the 2nd Conference on Mechanical Behaviors of Materials, Seoul, Korea, pp.17~24, 1988
- [6] J.Kraurkramer and H.Krautkramer, “Ultrasoni Testing of Materials”, 4th ed, Springer-Verl (1990) 11.
- [7] R.L. Smith, W.N. Reynolds, H.N.G. Wadley, “Ultrasonic attenuation and microstructure i low-carbon steels”, Met. Sci., 15, 1981.
- [8] H. Willems, K. Hoebbels, “Characterization microstructure by back scattered ultrasonic waves”, Met. Sci., 15, 1981.
- [9] S. Hirsekorn, “The scattering of ultrasonic by polycrystals”, J. Acoust. Soc. Am., 72(3) 1992.
- [10] Abdel-Latif, A. M., Cobett, J. M., Sidey, D Taplin, D.M.R.M 1981, “Effects of Microstruc 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.