

표면SH파를 이용한 2.25CrMo 강의 열화도 평가

Nondestructive Evaluation for Degraded 2.25CrMo Steel using Surface SH-wave

김 현목*, 박 익근*, 박 은수*, 김 정석*, 권 숙인**
*서울산업대학교 비파괴평가기술연구소
**고려대학교 금속재료공학부

1. 서론

화력발전설비나 석유화학설비와 같은 에너지 변환설비에는 CrMo 강, CrMoV 강, 스테인레스 강과 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].

재질 열화도를 평가하는 방법은 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법으로 나눌 수 있다. 이러한 방법 중 고온 설비부재의 열화도는 현장에서 재료를 채취하여 충격시험, 인장시험, 파괴인성시험 등과 같은 파괴적인 방법을 이용하여 평가하는 것이 가장 정확하다. 하지만, 가동 중인 현장에서 시험편을 채취한다는 것은 사실상 불가능하고, 시간적 제약과 경제적으로 많은 문제점을 내포하고 있다. 따라서 이러한 단점들을 극복할 수 있는 비파괴적인 평가기술의 개발이 요구되고 있다[2].

UNDE(ultrasonic nondestructive evaluation)에 의한 열화도 평가에는 초음파 파형이 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 2.25CrMo 강에 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 않으면서 종파(longitudinal wave)

에 비해 민감한 감쇠효과를 얻을 수 있고, 표면 및 표면근방의 결함검출과 재료특성 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 탐상면과 평행한 방향으로 진동하는 횡파이며, 탐촉자의 아크릴 웨지와 강(steel)의 횡파속도가 각각 1360m/s, 3230m/s일 때 입사각을 24.9°로 하면 스넬의 법칙에 따라 굴절각이 90°에 가까운 표면SH파가 발생된다. 그러나 횡파는 유체 중에서는 존재하지 않기 때문에 시험체에 전달시키기 위해서는 일정한 높은 점성의 접착매질이 요구된다[3].

SH파탐상의 특징으로는 기본적으로 모드변환에 주의할 필요가 없고, 표면SH파 사각탐상법으로 표층부의 결함검출에 유리하며 면상결함에 초음파를 수직으로 입사할 수 있는 장점이 있다. 그러나 진동자로부터 횡파가 썩기를 전파하므로 S/N비가 나쁘며, 높은 점성의 접착매질 사용으로 인해 탐촉자의 주사에 문제가 있고 재현성이 높은 데이터를 얻기 힘든 단점이 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 모의 열화 시험편 제작

실험에 사용된 시험편 재료는 터빈로터용 소재로 널리 사용되는 2.25CrMo 강으로 900℃에서 1시간 노멀라이징(normalizing)처리 후 720℃

Table 1 Chemical composition of 2.25CrMo steel

Element	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Fe
Comp. (wt. %)	0.138	0.142	0.46	0.004	0.014	2.27	0.97	Bal.

Table 2 Accelerated aging time at 630°C for equivalent microstructure served at 538°C

Time served at 538°C(hr)	As-received	80,000	170,000	260,000
Aging time at 630°C(hr)	0	1,500	3,100	4,800

에서 1시간 템퍼링(tempering)처리한 포항제철(주)의 합금을 사용하였으며, 화학적 성분을 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 실제 발전소 터빈에서 오랜 기간 사용된 재료와 유사한 미세조직을 갖도록 열화를 수행하기 위해 시료를 인위적으로 일반 사용온도(약 538°C)보다 높고 재결정온도보다 낮은 630°C의 온도에서 15단계로 고온 열처리를 통한 가속열처리를 수행함으로써 고온 장기 사용재의 미세조직 변화를 시뮬레이션하였다. Table 2는 철의 자기확산식에 의한 열화시간의 예이다.

3.2 실험방법

3.2.1 미세조직 관찰

열화 단계에 따른 탄화물의 형태 및 탄화물의 변화 등을 조사하기 위해 2.25CrMo 강의 소재와 각 단계별 열화재에 대해 가속 열화시간에 따른 미세조직의 변화 과정을 광학현미경 및 주사전자현미경을 통해서 관찰하였다. 현미경 조직검사는 표준절차에 준하여 수행하였고, 열화의 진행에 따른 미세조직의 변화를 관찰하였다. 투과 전자현미경 관찰을 위한 시험편은 asetic acid 100ml + methanol 900ml의 전해액으로 -20°C, 3V, Flow rate 3의 조건에서 전해 연마하였다.

3.2.2 경도시험

열화에 따른 경도변화를 측정하기 위해 시험편을 #800에서 #1500까지의 수지연마제로 연마한 후, 0.5 μm크기의 알루미나 분말을 이용하여 최종연마하고 표면거칠기를 일정하게 하여 표

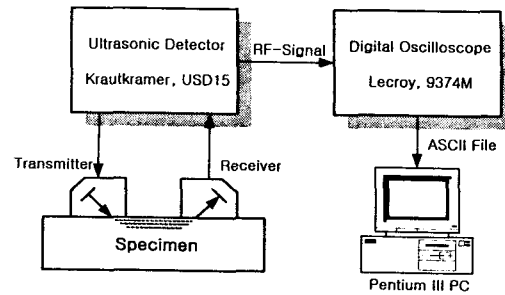


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

면거칠기에 의한 경도값 의존성을 최소화하였다. 일본 Shimadzu사의 마이크로비커스 경도시험기(micro Vickers hardness tester, HMV-2000)를 사용하여 압입점간의 거리가 경도값에 미치는 영향을 배제하기 위해서 압흔의 5배 이상의 충분한 간격을 두고 경도를 측정하였다.

3.2.3 초음파시험

본 연구에서 사용한 실험장치의 구성도는 Fig. 1과 같이 초음파탐상기(KrautKramer, USD15), 디지털오실로스코프(Lecroy, 9374M)를 사용하였으며, 2탐촉자를 이용한 pitch-catch법으로 전파 거리를 달리하여 각 시험편의 감쇠계수를 측정하였다. 실험에 사용한 탐촉자는 Japan Probe(사)의 표면SH와 탐촉자(5C10×10A90-SH)를 사용하였다. 접촉매질로는 Nichigou Acetylene Co., Ltd제의 소니코트 SHN-30의 고 점성 황과 전용 접촉매질을 사용하고, 5kg의 하중을 15분간 부가하여 에코가 안정화된 후에 3회 반복 측정하였다. 탐촉자로부터 수신된 초음파 에코 파형은 초음파탐상기와 오실로스코프의 CRT상에 나타나고, 오실로스코프에서 1000회 평균화처리된 파형을 PC에 구축된 신호처리시스템을 이용하여 초음파 신호의 감쇠 측정 및 FFT를 이용한 주파수 분석을 수행하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 열화도에 따른 미세조직 및 경도 변화

2.25CrMo 강은 적절한 기계적 성질을 부여하기 위해 노멀라이징 후 템퍼링 열처리를 하여 사용한다. 본 연구에서 사용된 재료도 동일한 열처리를 한 것이다. Fig. 2는 열화시간에 따른

미세조직의 변화모습을 광학현미경을 통해 관찰한 것이다. 각각의 시험편은 광학현미경 사진으로 페라이트 기지에 베이나이트가 혼재하는 조직을 가지고 있다. Fig. 3은 초기 시험편과 열화 시험편을 주사 전자현미경으로 관찰한 사진이다. 열화가 진행됨에 따라 입계와 입내 탄화물이 조대화 되었음을 정성적으로 알 수 있다. 또한 이 사진으로부터 결정립의 크기를 측정한 결과 약 $20\mu\text{m}$ 였으며, 열화시간이 증가함에 따라 결정립의 성장은 일어나지 않고 있음을 확인하였다. Fig. 4는 열화시간에 따른 탄화물의 변화 양상을 보여주는 투과 전자현미경 사진이다. 열화시간이 증가함에 따라 탄화물이 조대화되며 점차 구상화가 진행되고 있다. 미세한 침상의 탄화물은 점차 수가 줄어들어 1500시간 이후에는 거의 관찰할 수 없었다. 또한 입계 탄화물도 조대화가 되며 점차 합체가 되어가고 있다.

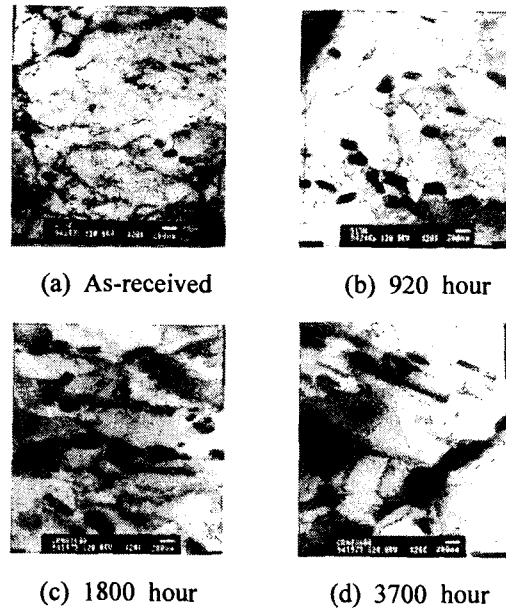


Fig. 4 TEM micrographs showing morphology of carbide

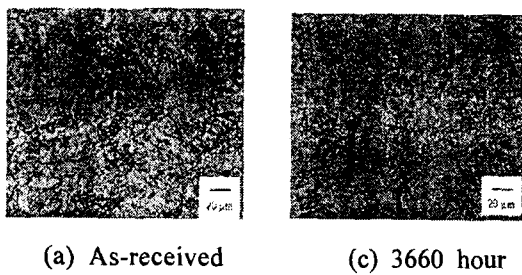


Fig. 2 Optical micrographs of the specimens

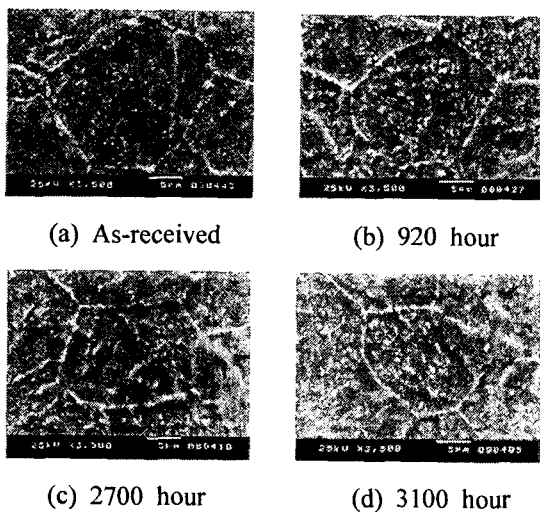


Fig. 3 SEM micrographs showing coarsening of carbide

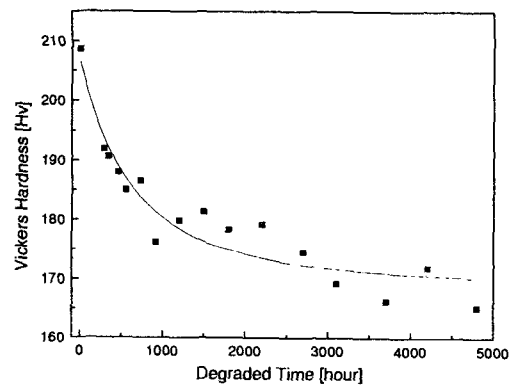


Fig. 5 Change of Vickers hardness with degraded time

Fig. 5는 열화시간에 대한 경도값의 변화를 나타낸다. 열화시간이 진행될수록 경도값의 저하가 둔화되는 경향을 알 수 있다. 이와 같은 경도값의 변화는 재질 열화 정도와 밀접한 관계가 있으므로, 간접적으로 파괴시험치의 예측은 물론 재질 열화도 평가의 가능성을 확인할 수 있다.

4.2 열화도에 따른 표면SH와의 감쇠특성

FFT에 의한 주파수분석을 적용하면 초음파펄스의 주파수특성을 분석하여 초음파 감쇠계수의 주파수의존성을 평가할 수 있다. Fig. 6은 탐

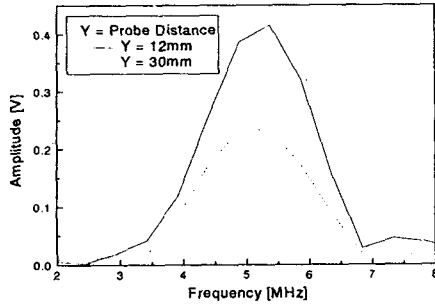


Fig. 6 Amplitude spectra of Surface SH-wave at each probe distance

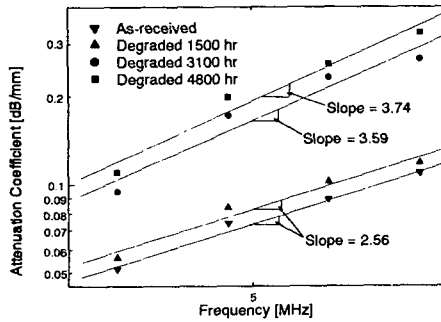


Fig. 7 Log-log plot attenuation coefficient with Frequency

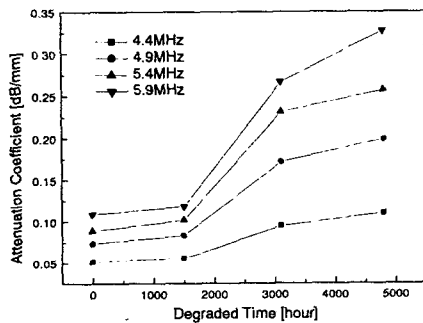


Fig. 8 Effect of degradation time on attenuation

축자거리, 12mm, 30mm에서 수신된 에코를 FFT 하여 중첩한 진폭 스펙트럼이다. 수신된 에코의 진폭의 차를 이용하여 초음파 감쇠계수의 주파수의존성을 Band-width 범위에서 평가할 수 있다. Fig. 7의 직선의 기울기는 열화손상에 따른 주파수의존성에 대한 감도를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 열화시간에 따른 주파수 의존감도(dependency sensitivity)는 2.56에서 3.74로 증가하였다. Fig. 8은 열화시간에 따른 각 주파수 별 감쇠계수의 변화이다. 열화에 의한 탄화물의 석출 및 형상변화로 인해 열화시간이 증가할수록 감쇠가 증가하는 것으로 나타났다.

5. 결론

2.25CrMo 강의 모의 경년열화에 따른 미세조직의 변화와 표면SH파의 감쇠특성의 변화를 이용한 재료의 열화도 평가 가능성을 실험적으로 검증하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 경년열화에 의한 조직의 결정립계 부근에서 탄화석출물 증가와 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] 정희돈, "고온설비의 경년열화와 측정법", 대한기계학회지, 제31권, 제3호, pp.251~260, (1991)
- [3] 박 익근, 이 철구, "초음파에 의한 필렛 용접힐부의 표면결함 검출능에 관한 실험적 검증", 대한용접학회지, Vol. 18, No. 1, (2000)