

Barkhausen noise 를 이용한 1Cr-1Mo-0.25V 강의 열화도 평가

이종민* · 남영현† · 안봉영** · 남승훈** · 이승석** · 이억섭*

(2001년 7월 23일 접수, 2002년 3월 29일 심사완료)

Evaluation of 1Cr-1Mo-0.25V Steel Degradation Using Magnetic Barkhausen Noise

Jong Min Lee, Young Hyun Nam, Bongyoung Ahn, Seung Hoon Nahm, Seung Seok Lee and Ouk Sub Lee

Key Words : 1Cr-1Mo Steel(1Cr-1Mo 강), Domain Wall(자구벽), Magnetic Field(자장), Coercive Force(보자력), Flux Density(자속밀도), Barkhausen Noise(바크하우젠 노이즈)

Abstract

It is inevitable to evaluate the life of turbine rotor because the operating periods of power plants need to be extended. For the test, seven kinds of specimens with different degradation levels were prepared by the isothermal heat treatment at 630°C. Magnetic methods utilizing Barkhausen noise coercive force(BN_c) were applied to detect the degradation caused by thermal aging. Magnetic property of material is related with domain dynamics and that is affected by the microstructure of material. Therefore BN_c is very sensitive to the microstructure change of the material. With the increase of degradation, BN_c was decreased and this phenomenon is considered due to precipitations and grain size. The result was compared with Vickers hardness(H_v) and coercive force(H_c) to detect the relative variation, and was related with H_v and YS to estimate the change of the mechanical properties with the degradation.

1. 서론

1Cr-1Mo-0.25V 강은 국내 화력발전소의 터빈 로터에 많이 사용되고 있는 재료로서 설비의 사용온도 및 사용시간, 부식환경 및 불규칙적인 부하변동 등에 의해 열화(degradation)현상을 겪게 된다.

열화 현상의 지배인자로서는 응력이 원인이 되어 일어나는 기계적 열화와 열적 활성화에 의해 일어나는 재질열화로 구별될 수 있으며, 재질열화 손상은 연화(softening)와 취화(embrittlement)로 나눌 수 있다. 연화는 고온에서 장시간 사용에 의한 탄화물의 조대하나 진위 조직의 회복에 의해서 생기며, 크리프 강도나 피로강도 등의 기계적 특성을 저하시킨다. 취화는 내열재료로서 널리 사용되

는 Cr-Mo 계, Cr-Mo-V 계 저합금강을 330~350°C 부근의 온도에서 장시간 사용할 경우 발생하는 대표적인 열화현상으로 입계균열에 의한 파괴, 충격치의 저하 및 재료의 연취성전이온도(Fracture Appearance Transition Temperature: FATT)의 급격한 상승으로 인한 재료의 인성 저하를 일으키는 원인이 되고 있다.⁽¹⁾ 한편, 취화에 따른 재료의 기계적 물성 평가를 위하여 사용중인 설비에서 시료를 채취하기란 거의 불가능하므로 비파괴적인 평가방법이 많이 이용되고 있다.

현재 적용되고 있는 비파괴적평가방법 중 자기 측정법은 B-H 곡선을 측정하여 재료의 물성을 평가하는 방법으로, 한번의 측정으로 물성을 나타내는 자기에너지 손실(W : hysteresis loss), 잔류 자속 밀도(B : remanence),보자력(H : coercive force) 등을 얻을 수 있다는 장점이 있으며, 이들은 재료의 결정립도, 응력, 소성변형, 제 2 상과 같은 석출물 존재와 밀접한 관계가 있으므로 물성변화 평가를 가능하게 한다.

* 책임저자, 회원, 한국표준과학연구원

E-mail : namyh@kriss.re.kr

TEL : (042)868-5339 FAX : (042)868-5639

† 회원, 인하대학교 기계공학부

** 회원, 한국표준과학연구원

재료의 자기적 구조는 자구(domain) 및 이들간의 에너지 완충지역 역할을 하는 자구벽(domain wall)으로 구성되어 있으며, 교환에너지와 결정 이방성 에너지와의 상호작용을 통해 일정 두께의 자구벽을 형성하게 된다. 거시적으로 강자성체의 자구는 외자장과 평행한 자구가 성장하는 방향으로 연속적인 자구벽의 이동/회전을 하게 된다. 그러나 미시적 관점에서 볼 때, 강자성체 내부의 입계, 개체물, 탄화물, 각종결함(전위, 기공)등에 의한 국부적인 자기에너지의 불연속성은 자구벽 이동에 대한 방해 작용을 하여 불연속적인 자구벽의 이동/회전이 일어나게 한다. 이 때문에 시편 가까이에 유도코일을 놓으면 미시적인 자속변화에 따른 펄스상의 노이즈(noise) 변화가 검출되는데, 이를 Barkhausen noise 라고 한다.⁽²⁾

Barkhausen noise 는 미세조직의 변화 이외에도 응력분포와 탄소함량에 따라 그 변화가 나타나므로 이에 대한 연구도 진행되고 있다.^(3,4) 이러한 응력에 따른 Barkhausen noise 의 변화는 180° 자구벽의 수적인 증가 및 모양의 변화, 자구벽 이동시 나타날 수 있는 pinning 에너지의 변화에 의해 나타난다고 할 수 있다.

본 연구에서는 Barkhausen noise coercive force (BN_c)를 재료물성 인자로 두고 열화시간에 따른 ICr-1Mo-0.25V 강의 열화도를 측정하였다. 이러한 시편에 대한 열화도 평가법으로 Vickers 경도, 보자력(Coercive force), 전기비저항, 초음파 등을 이용한 연구가 이루어져 있으나, 열화도의 분해능 및 현장적용의 시간적/공간적 제약 등이 단점이 되고 있다. 따라서 BN_c 를 이용하여 보다 실용적인 방법으로 열화도를 평가하고자 하였으며, 미세조직의 변화를 통하여 물성변화의 원인을 살펴보고 있다.

2. 이론적 배경

2.1 결정립의 크기와 Barkhausen noise

Barkhausen noise 는 Faraday 의 법칙으로부터 다음 식과 같이 자구벽의 이동속도에 의해 결정되며, 자구벽의 이동속도는 외부의 인가 자기장에 의한 자구벽의 구동력(driving force)과 pinning 효과로부터 나오는 억제력(retarding force)과의 상호 상쇄되는 관계로서 표현된다.

$$V(t) = 2N CI_s \left(\frac{du}{dt} \right) \cos \theta$$

$$\begin{aligned} &= 2N CI_s Av(x) \cos \theta \\ [v(x) &= 2HI_s \cos \theta - F_r(x)] \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 V(t)는 Barkhausen noise 을 나타내며 N 은 단위 길이 당 코일의 감은 수, C 는 상수, 2I_s 는 180° 자구벽의 변화에 의한 자화량의 변화, u 는 자화된 자구벽의 부피, 그리고 θ는 자기선속과 탐촉 코일사이의 각도, A 는 이동하는 자구벽의 단면적, v(x)는 자구벽의 이동속도, H 는 인가 자기장, F_r(x)는 억제력을 나타낸다.

Barkhausen noise 에 영향을 주는 미세조직의 인자로서 우선 결정립계는 자구벽 이동에 pinning 효과를 줌으로써 자구벽의 이동을 방해하고, 이에 따라 자구벽의 이동속도가 작아지게 되므로 결과적으로 Barkhausen noise 를 감소시키는 영향을 나타내게 된다. 즉, 결정립 크기가 작아질수록 더욱 많은 pinning 효과에 의해서 Barkhausen noise 는 작아지게 된다. 그리고, 강자성체의 자기적 특성중 하나인 보자력(coercive force)은 외부 자장에 의한 자구벽의 180° 변화를 의미하므로 pinning 현상에 의해 영향을 받고 있음을 알 수 있고, Barkhausen noise 에 절대적인 영향을 주는 180° 자구벽의 이동에 의해 결정된다고 할 수 있다. 즉, 보자력이 클수록 더 많은 인가 자기장에 의해서 자화상태가 변화하게 되므로 자기적으로 경(hard)하다고 할 수 있으며, 보자력은 강자성체 내부의 자화의 용이도를 나타내는 척도라고 할 수 있다. 그러므로 자구벽 이동에 방해가 되는 억제력을 기존의 정량화 된 보자력으로 대체함으로써 정량적인 Barkhausen noise 를 얻을 수 있다.

이상과 같이 식 (1)에서 결정립 크기(D)를 고려한 보자력을 억제력(retarding force)으로 생각할 수 있으며, Mager 에 의한 결정립 크기와 보자력(H_c)과의 관계는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.^(5,6)

$$H_c = 3 \sqrt{\frac{kT_c K_1 / B}{M_s}} \cdot \frac{1}{D} \quad (2)$$

여기서 k 는 Boltzmann 상수, K₁ 은 자기결정 이방성, T_c 는 Curie 온도를 나타내고, B 은 적자상수, M_s 는 포화자화값이다. 그러므로, 외부 자화량을 H 라고 할 때, 결정립 크기에 의한 자구벽의 이동속도는 억제력으로서 보자력을 도입하게 되면 식 (3)과 같이 된다.

$$v(x) = 2I_s \cos\theta (H - H_c) \\ = 2I_s \cos\theta \left(H - 3 \sqrt{\frac{kT_c K_V / B}{M_s}} \cdot \frac{1}{D} \right) \quad (3)$$

이와 같이 재료 내부에 pinning 위치로서의 영향이 결정립계에 의해서만 결정된다면, 자구벽의 이동속도는 결정립 크기의 역수와 직선적인 비례관계가 성립될 것이다. 그리고, 결정립이 자구벽 이동의 pinning 위치로서의 역할을 하지만, 저탄소강인 철강 재료에 있어서 Barkhausen noise에 가장 큰 영향을 주는 것은 0.25~1%의 탄소라고 알려져 있다. 이는 비자성체인 탄소가 자구벽 이동에 절대적으로 방해할 일으켜 억제력의 증가를 유발하기 때문이다. 또한, 자구벽이 개재물을 지나는 과정에서 전위나 결정립계의 pinning 현상과 유사한 과정이 나타나게 되고, 개재물과 자구벽이 만나는 부분을 제외한 곳에서 자구벽의 면적 변화가 일어난다고 알려져 있다.

2.2 Barkhausen noise damping

교류자기장에서 재료내부의 진폭 감쇠효과는 일반적으로 식 (4)과 같은 거리의 함수로 나타낼 수 있다.⁽⁷⁾

$$\frac{H(x)}{H_0} = \exp \left[- \left(\frac{\pi f \mu}{\rho} \right)^{1/2} x \right] \quad (4)$$

여기서 H_0 와 H_x 는 $x=0$ 과 거리 x 에서 자장의 진폭, f 는 주파수, μ 는 투자율(permeability) 그리고 ρ 는 저항(resistivity)을 나타낸다.

식 (4)로부터 주파수 f_1 과 f_2 사이의 스펙트럼 분포를 포함하는 노이즈의 감쇠를 거리 $L(x)$ 의 함수로 나타내면 식 (5)와 같다.

$$L(x) = \frac{\int_{f_1}^{f_2} g(f) \exp(-Ax f^{1/2}) df}{\int_{f_1}^{f_2} g(f) df} \quad (5)$$

여기서, $A = \sqrt{\pi \mu / \rho}$, $g(f)$ 는 주파수 함수로서의 진폭 변화를 나타낸다. 주파수 f_1 과 f_2 사이의 모든 노이즈의 주파수 성분을 고려하면 $L(0)=1$, $L(\infty)=0$ 과 같은 normalized average damping의 형상을 $L(x)$ 의 함수로 얻게 된다. 위와 같은 원리를 이용하여 두께에 따른 normalized power spectrum의 형상을 얻을 수 있으며, 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(f) = \left[\frac{\int_0^d \exp(-Ax f_2^{1/2}) dx}{\int_0^d \exp(-Ax f_1^{1/2}) dx} \right]^2 \quad (6)$$

3. 실험 방법

3.1 시편 준비

시편은 길이 55mm, 폭 5mm, 두께 1mm의 박판을 사용하였고, 기계적 물성과 화학적 성분은 각각 Table 1과 2에 나타내었다. 실제로 열화된 재료의 조직과 유사한 미세조직을 갖는 시료를 얻기 위하여 인위적으로 실제 사용온도(538°C)보다 높고, 재결정 온도보다 낮은 온도(630°C)에서 가속열처리를 하였고, 이때 소요되는 시간은 식 (7, 8)의 Fe 자기확산(self diffusion)이론에 근거하였다.^(8,9)

530°C에서

$$S_1 = S_0 \exp \left[- \frac{Q}{RT_1} \right] = \frac{C}{t_1} \quad (7)$$

630°C에서

$$S_2 = S_0 \exp \left[- \frac{Q}{RT_2} \right] = \frac{C}{t_2} \quad (8)$$

이때 확산계수 $S_1=S_2$ 이므로 열화시간(t_2)은 식 (9)와 같이 표현된다.

$$t_2 = t_1 \exp \left[\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right] \quad (9)$$

여기서 R 은 기체상수, Q 는 Fe의 자기확산에 필요한 활성화에너지, T_1 과 T_2 는 열화온도, t_1 과 t_2 는 열화시간이다. Table 3은 실제 사용시간과 열처리 시간을 비교한 것이다.

3.2 경도 시험

경도 시험용 시편은 10×10×10mm의 정육면체를 사용하였으며, #100에서 #1200까지의 사포로 연마 후 0.6 μ m의 diamond paste를 사용하여 경면 제작하였다. 경도시험은 마이크로 비커스 경도시험기를 사용하였으며, 시험 하중은 1kgf, 하중 부하시간은 15sec, 측정 회수는 각 시험편에 대하여 20회로 하였다.

Table 1 Mechanical properties of 1Cr-1Mo-0.25V steel

Specimen (Virgin)	Temperature 24 °C	Temperature 538 °C
Yield Strength	665.2 MPa	533.5 MPa
Tensile Strength	823.1 MPa	580.6 MPa
Elongation	18.8 %	22.7 %
Reduction of area	59.4 %	55.5 %

Table 2 Chemical composition (Wt, %)

C	0.31	Cr	1.11
Si	0.23	Mo	1.32
Mn	0.76	V	0.27
P	0.006	As	0.006
S	0.001	Sn	0.005
Ni	0.36	Sb	0.001

Table 3 Determination of aging at 630 °C for equivalent microstructure serviced at 538 °C

Aging time at 630 °C, hr	Time served at 538 °C, hr
0	0
453	25,000
933	50,000
1,322	75,000
1,822	100,000
3,640	200,000
5,460	300,000

3.3 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 실험장치를 나타낸 것으로 BN_C 측정을 위하여 3MA 자화 장치를 사용하였고, 주파수 및 자화 진폭(H_{max})은 컴퓨터를 이용한 remote control에 의해 조절되었다. 실험에 사용된 주파수는 30, 40, 50 Hz로 하였으며, 각각의 주파수에 대하여 외부에서 가해주는 자화 진폭은 10 A/cm에서 시작하여 5 A/cm씩 증가시켜 60 A/cm까지 측정하였다. 이때, 자화 장비의 게인(gain)은 30 dB로 하였다. BN_C 는 교류 파형을 전원으로 증폭시킨 후, 자화 코일로 시험편을 자화시키는 과정에서 측정하였고, 자화과정에서 시험편의 자속 변화는 센서 내부의 검출코일을 통하여 유도 전압으로 검출하였다.

Fig. 2는 본 실험에서 검출된 유도 전압의 변화를 개략적으로 나타낸 것으로, X축은 외부에서 가해주는 자기장 H에 대한 tangential 값 H_t 를 표시

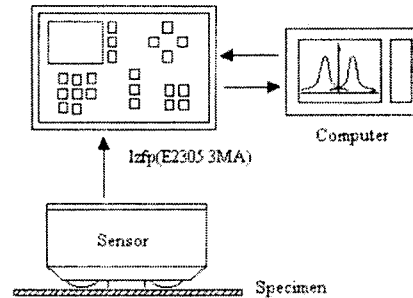


Fig. 1 Experimental set-up for measuring the Barkhausen noise

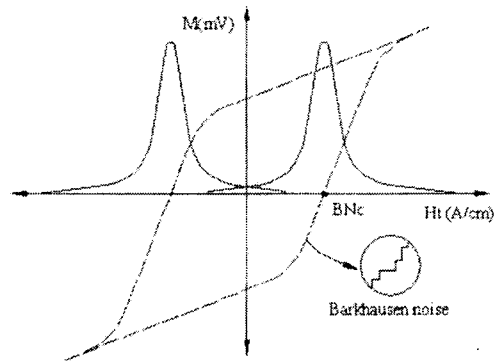


Fig. 2 Hysteresis loop of magnetic material and Barkhausen noise coercive force

하고 있으며, Y축은 Barkhausen noise 발생에 따른 전압 M(mV)를 나타내고 있다. 이때 Y축의 최대 값에 해당하는 X축 값을 Barkhausen noise coercive force(BN_C)로 정의하였으며, Barkhausen noise가 가장 크게 검출되는 지점이었다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 주파수 및 H_{max} 에 따른 BN_C 의 변화

Fig. 3은 시험주파수를 특정 주파수로 고정시킨 후, H_{max} (Magnetic amplitude)를 증가 시키면서 BN_C 를 측정하는 것이다. Fig. 3 (a), (b), (c)에 나타난 바와 같이 H_{max} 를 증가 시킬수록 BN_C 는 점차 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그러나 열화가 많이 진행될수록 BN_C 증가율은 감소하였으며, 특히 300,000 시간 시험의 경우 주파수 30 Hz에서는 신호가 나타나지 않았으나, 주파수가 40, 50 Hz로 높아 질수록 점차 뚜렷한 신호를 얻을 수 있었다.

4.2 열화도에 따른 BN_C 의 변화

Fig. 4는 H_{max} 가 50, 55, 60 A/cm 인 경우로 시편의 열화가 진행됨에 따라 BN_C 는 점차 감소하고 있다. Mager 에 의한 결정립 크기와 보자력(H_C)과의 관계식 (2)에 따르면 결정립 크기가 커질수록 BN_C 는 감소하게 된다. 실험에 사용된 시편들의 두께가 1mm 로 동일함에도 불구하고 BN_C 가 감소하는 현상이 나타나는 것은 열화가 진행될수록 각 시편에 있어서 결정립의 조대화가 이루어지기 때문이라 판단된다. 열화 초기에는 BN_C 신호가 크게 감소되고 있으나, 100,000 시간 경과한 후에는 큰 변화를 관찰할 수 없었다. 이것은 열화 초기에 결정립의 조대화가 급격히 발생하나, 어느 정도 열화가 진행된 이후에는 결정립의 조대화 현상이 둔화되는 것으로 판단된다. 한편, 주파수에 따른 BN_C 는 큰 차이를 보이고 있지 않았다.

Fig. 5는 Vickers 경도, 보자력(Coercive force),

BN_C (주파수: 40 Hz, H_{max} : 55 A/cm)를 이용하여 열화도를 측정할 값으로 신재에 대하여 normalize 한 것이다.

Vickers 경도의 경우, 신재의 경도값(■)에 대하여 100,000 시간 열화재의 경도값은 약 90%, 300,000 시간 열화재의 경도값은 약 85%에 상당하였다. 초기 시편의 경우 열처리 시간에 비해 경도값의 감소폭이 크게 나타나고 있었으나, 열화시간이 100,000 시간 이상인 경우에는 경도값의 변화는 크게 나타나지 않았으므로 열화도 구분에는 어려움이 따른다.

전반적으로 볼 때 자기적 특성을 이용한 방법은 기계적 특성을 이용한 방법에 비해 변화의 폭이 약 2 배에 이르고 있으며, 자기적 물성변화를 통한 평가가 재료의 열화도 평가에 더욱 적합한 방법인 것으로 나타나고 있다.

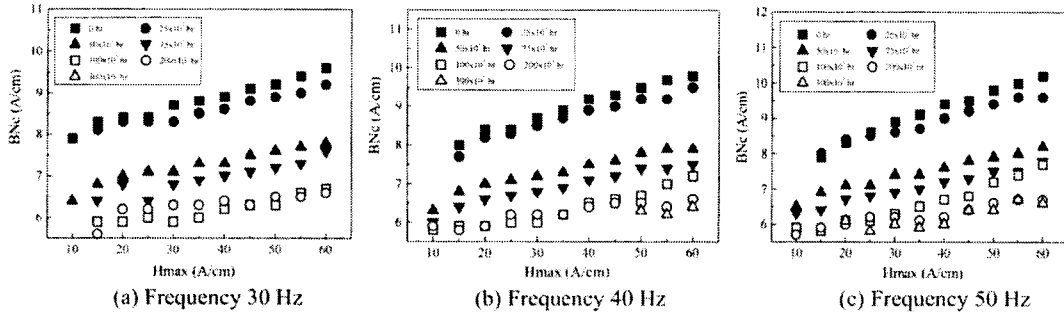


Fig. 3 Relationship between BN_C and H_{max} of ICr-1Mo steels

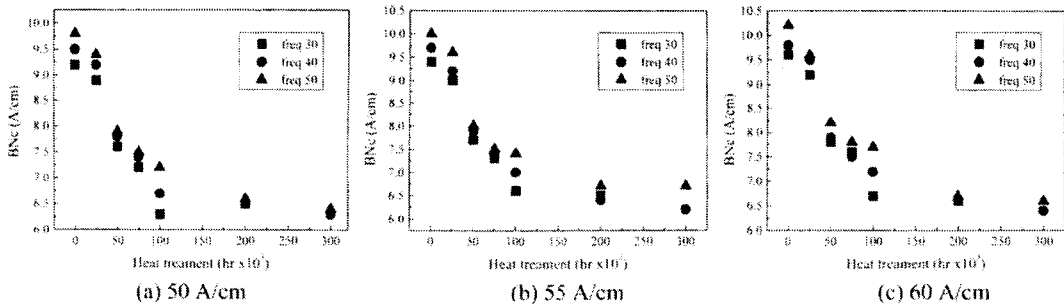


Fig. 4 Dependence of Barkhausen noise coercive force (BN_C) on heat treatment time

한편, 보자력(H_C) 측정법은 장시간 사용된 설비의 열화도를 측정하는데 있어 우수한 방법임에도 불구하고, 시간적/공간적 제약으로 인해 현장에 직접 적용하기에는 한계가 따른다는 단점을 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 재료의 자기적 특성을 이용하면서 또한 센서를 대상체에 직접 접촉하여 시편의 자속변화에 따른 유도전압을 측정하므로 현장 적용성이 우수한 Barkhausen noise 를 사용하여 재료의 열화도를 평가하였다. Fig. 5 에서 나타난 바와 같이 열화에 따른 H_C 와 BN_C 의 감쇠는 시편이 자기적으로 연화(softening)되어 가고 있음을 의미하는 것으로, BN_C 의 감쇠정도가 H_C 에 비하여 약간 크게 나타나고 있으나 두드러진 변화를 보이고 있지는 않다. 또한, 100,000 시간 이상의 경우 감쇠의 폭이 크게 나타나지 않고 있으며 이는 자기연화가 어느 정도 포화상태에 이르렀기 때문이라 판단된다.

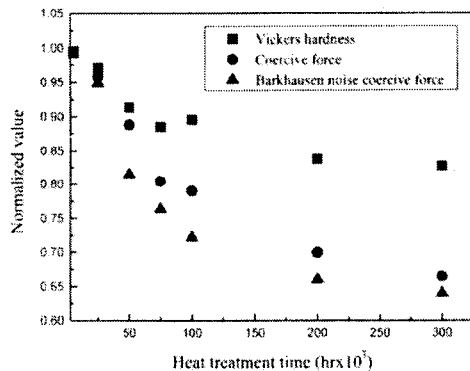


Fig. 5 Normalized Barkhausen noise coercive force, Coercive force and Vickers hardness on heat treatment time

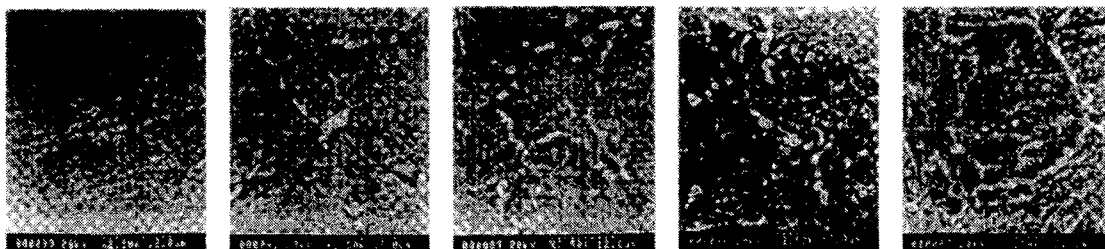
4.3 전자현미경(SEM)에 의한 조직 관찰

열화에 따른 물성변화의 원인을 알아보기 위하여 신재와 열화 된 재료의 조직차이를 전자현미경을 통하여 알아 보았으며 그 결과를 Fig. 6 에 나타내었다. 신재에서는 결정입계에서 석출물이 관찰되지 않았으며, 열화가 진행될수록 결정입계에 석출물이 증가하였다. 한편, 열화에 따라 결정립의 크기는 점차 커지는 것을 관찰할 수 있었고, 100,000 시간 이상 시편의 경우에는 석출물의 변화 및 결정립의 조대화에는 큰 변화가 없었다.

이와 같은 입계에서의 불순물의 편석량 또는 결정립의 조대화는 사용시간에 따라 증가하며 이로 인해 장시간 사용한 재료의 경우 기계적 성질 및 자기적 성질이 점차적으로 변화하게 된다. 즉, 사용 시간에 의존하는 입계 석출물이나 불순물의 크기 및 분포 등의 변화가 재질열화를 유발하는 미시기구로 작용하여 재료의 물성을 변화 시키고 있음을 알 수 있다.

4.4 BN_C 와 항복응력과의 상관관계

Fig. 7 은 BN_C 와 보자력과의 상관관계를 나타낸 것이다. 재료의 자기적 물성치인 H_C 은 솔레노이드 보빈에 자속밀도 측정용 코일을 권선하여 측정하게 되므로 대상체의 기하학적 형상 및 공간적 제약 등에 의해 현장적용에는 한계가 따르게 된다. 따라서 보다 실용적인 방법으로 보자력을 측정하기 위하여 Barkhausen noise 를 사용하여 H_C 에 상당하는 BN_C 를 구하였다. 이들간의 상관도는 선형적 관계를 나타내는 것으로 볼 수 있으며, 이를 통하여 볼 때 BN_C 가 보자력을 대신할 수 있는 우수한 재료인자로 판단되어질 수 있다.



(a) Virgin (b) 25,000 hr (c) 50,000 hr (d) 75,000 hr (e) 100,000 hr

Fig. 6 Microstructure of ICr-1Mo-0.25V steel for degraded specimens

가장 보편적으로 사용되고 있는 기계적 물성 평가 방법은 인장시험으로 재료의 탄성 및 소성 성질 진반에 관한 정보를 제공해 주고 있다. 따라서 시간에 따른 상대적 열화도 평가와 더불어 간접적인 기계적 물성 평가가 이루어 진다면 설비의 안정성 평가에 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 생각하며, 본 실험에서 얻은 결과를 바탕으로 식 (10)과 식 (12)을 구하였다.

Fig. 8 은 BN_c 와 Vickers 경도값과의 관계를 나타낸 것으로, 이를 수식으로 표시하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$BN_c = 0.07H_v - 11.05 \quad (10)$$

BN_c 로부터 Vickers 경도값을 얻고 이를 통하여 재료의 열화시간(t)을 추정하면 식 (10)과 같은 수평평가함수(G-parameter)로부터 G 파라미터를 얻는다.^(10,11) 따라서 열화온도(T)의 변화에 따른 열화재의 잔여수명을 구할 수 있게 된다.

$$G = \log(t) + \log[20 + \log(T)] \quad (11)$$

여기서 t는 열화시간, T는 열화온도이다.

Fig. 9 는 BN_c 와 항복강도와의 상관관계를 나타낸 것으로, 이를 2 차 함수로 표시하면 다음과 같이 나타난다.

$$BN_c = -\frac{2.11}{10000}YS^2 + 0.21YS - 43.11 \quad (12)$$

BN_c 가 감소할수록, 즉 열화가 진행 될수록 재료의 항복강도는 점차 감소하는 경향을 나타내고 있

다. 한편, 두께에 따른 Barkhausen noise 의 이론적 감쇠효과를 고려하여 준다면 기존의 열화도 평가 방법에 비해 현장 적용성과 실용화가 매우 큰 방법이 될 것이며, 재료의 기계적 성질을 예측하는데 있어서도 매우 유용한 방법이 될 것이라 판단 된다.

5. 결론

재료의 자기적 성질을 이용하여 ICr-1Mo-0.25V 강의 열화도를 평가하는 방법으로 Barkhausen noise 를 이용하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 열화시간이 증가함에 따라 Barkhausen noise coercive force(BN_c)는 지수함수적 감소를 보였으며 열화시간이 100,000 hr 을 넘으면서 감소율의 변화 폭이 점차 작아지는 경향을 보였다.

(2) BN_c 는 경도법에 비하여 열화에 따른 시편의 구분이 뚜렷하게 나타났으며, 보자력에 상당하는 열화도 평가 결과를 얻을 수 있었다.

(3) ICr-1Mo-0.25V 강은 열화에 따라 결정립의 조대화, 석출물의 입계편석 등이 나타나고 있었으며, 이러한 현상은 열화가 진행 될수록 점차 감소하였다. 이로 인하여 경도, 보자력, BN_c 는 열화 초기에는 변화율이 심하였으나, 열화가 진행 될수록 변화율은 점차 감소하였다.

(4) BN_c 의 측정으로 사용 중인 터빈 로터의 기계적 물성(Vickers 경도, 항복강도)을 간접적으로 평가하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

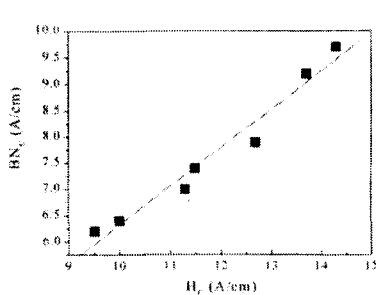


Fig. 7 Relationship between BN_c and H_c

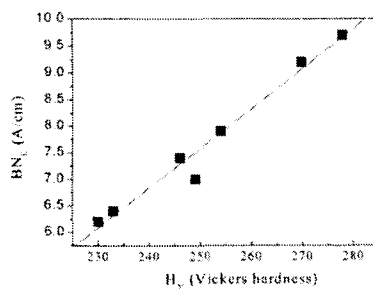


Fig. 8 Relationship between BN_c and H_v

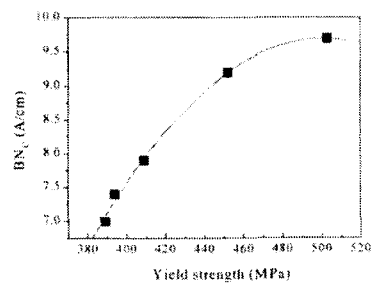


Fig. 9 Relationship between BN_c and YS

참고문헌

- (1) Nam, Y.H and Seong, U.H., 1999, "Prediction of Fracture Appearance Transition Temperature(FATT) to Steel by Ultrasonic and Barkhausen Noise Method," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 23, No. 7, pp.1215~1222.
- (2) Cullity., 1993, *Introduction to Magnetic Materials*, Addison-Wesley & Sons Inc, pp. 377~467.
- (3) Yi, J.K., Lee, B.W., and Kim, H.C., 1994, "Nondestructive evaluation of isothermally annealed 12% CrMoV steel by magnetic BN measurement," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 130, pp. 81~91.
- (4) Ranjan, R., Jiles, D.C., and Rastogi, P.K., 1987, "Magnetic Properties of Decarburized Steels: An Investigation of the Effects of Grain Size and Carbon Content," *IEEE Transactions of Magnetics*, Vol. 23, pp. 1869~1876.
- (5) Kim, D.W., Hong, J.H., Ahn, B and Kwon, D., 2001, "Quantification of Barkhausen Noise Method by Microstructural Analysis and Nondestructive Evaluation of Fracture Toughness," *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, Vol. 39, pp. 301~307.
- (6) Ryu, K.S., Nahm, S.H., Kim, Y.I., Yu, K.M and Son, D.R., 1999, "Degradation Evaluation of Aged 1Cr-1Mo-0.25V Steel Using Coercive Force," *Journal of the Korea Society for Nondestructive Testing*, Vol. 19, pp. 288~292.
- (7) Lammeraner, J. and Staffl, M., 1966, *Eddy Currents*, Iliffe Books LTD, London, p. 40.
- (8) Abdel-Latif, A. M., Corbett, J. M., Siedy, D. and Taplin, D. M. R., 1981, "Effect of Microstructural Degradation on Creep Life Prediction of 2.25 Cr-1Mo Steel," *Fifth Canadian Conference on Fracture*, pp. 1620~1631.
- (9) Yoo, k. B., Yoon, S. H., Kim, S. T., Suh, C. M. and Nahm, S. H., 1994, "Evaluation of J_{IC} and T_{mat} of Aged 1Cr-1Mo-0.25V Steel at Elevated Temperature," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 18, pp. 2860~2870.
- (10) Schwant, R. C., and Timo, D. P., 1985, "Life Assessment and Improvement of Turbo Generator Rotors for Fossil Plants," New York, Pergamon Press, pp. 325~334.
- (11) Viswanathan, R., and Gehl, S., 1991, "A Method for Estimation of the Fracture Toughness of Cr-Mo-V Rotor Steels Based on Composition," *Journal of Engineering Material and Technology*, Vol. 113, pp. 263~270.