

가역투자율 측정에 의한 터빈로터강의 비파괴적 잔여수명 평가

Nondestructive Evaluation of Remanent Life of Turbine Rotor Steel by Measuring Reversible Magnetic Permeability

유권상*[†], 남승훈*, 김용일*

Kwon Sang Ryu*[†], Seung Hoon Nahm* and Yong Il Kim*

초 록 고온, 고압에서 운용되고 있는 설비의 안전성을 평가하기 위해서는 사용시간 동안 열화된 물성을 정기적으로 점검하여 설비의 잔여수명을 평가해야 한다. 본 연구에서는 교류 섭동 자기장을 인가하여 구한 가역투자율 값을 이용하여 1Cr-1Mo-0.25V 강 of 잔여수명을 평가하기 위한 자기적 방법을 제시하고자 한다. 이 방법은 자기이력곡선의 미분값인 가역투자율이 보자력에서 침투값을 갖는 특성을 이용하였으며, 측정원리는 교류 섭동 자기장의 주파수에 동조된 록-인 증폭기를 사용하여 탐지코일에 유도된 제 1 고조파의 전압을 측정하는 것이다. 가역투자율의 침투값 간격 (peak interval of reversible magnetic permeability: PIRMP)과 비커스 경도는 열화가 진행됨에 따라 감소하였다. 따라서 비커스 경도와 PIRMP의 상관관계에 의해 연화곡선을 구할 수 있고, 이 연화곡선에 의해 터빈로터 강 of 잔여수명을 평가할 수 있다.

주요용어 : 교류 섭동 자기장, 가역투자율, 가역투자율 침투값 사이의 간격, 터빈로터강, 열화도

Abstract The integrity of the turbine rotors can be assessed by measuring the material properties at service temperature. In order to evaluate the remanent life of turbine rotor steel nondestructively, a measurement system of reversible magnetic permeability using an alternating perturbing magnetic field was constructed. We present a new non-destructive method to evaluate the remanent life of 1Cr-1Mo-0.25V steel using the value of reversible magnetic permeability. This method is based on the existence of reversible magnetic permeability in the differential magnetization around the coercive field strength. We measured the first harmonics voltage induced in a coil using a lock-in amplifier tuned to an exciting frequency. The Results of reversible magnetic permeability and Vickers hardness on the aged samples show that the peak interval of reversible magnetic permeability (PIRMP) and Vickers hardness decreases as aging time increases. A softening curve is obtained from the correlation between Vickers hardness and the PIRMP. This curve can be used as a non-destructive method to evaluate the remanent life of turbine rotor steel.

Keywords: alternating perturbing magnetic field, reversible magnetic permeability, PIRMP, turbine rotor steel, remanent life

1. 서 론

화력이나 원자력 발전소 등에 사용되는 터빈과

터빈 로터는 고온, 고압에서 사용되므로 장시간 사용하면 재질에 열화가 일어나 재료의 본래 특성이 나빠진다. 재료의 물성이나 인성의 저하를 평가하는

비파괴적 방법은 실제 사용기기를 크게 훼손시키지 않고 손상상태를 직접적으로 파악할 수 있다는 장점 때문에 효용성이 크다. 비파괴적 평가는 대상 기기를 외부에서 진단하는 방법이기 때문에 기기 내부는 평가할 수 없으므로 평가부위가 한정된다는 단점이 있기는 하지만, 파괴적 평가에 비하면 효율적이고 경제적이며 정기적인 점검방법으로 이용할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

재료의 물성이나 인성의 저하를 평가하는 여러 가지 비파괴적 방법들이 있지만 장시간 사용에 따른 열화정도를 판별할 수 있는 정량적인 비파괴평가법은 아직까지 큰 성과를 얻지 못하고 있다. 고온, 고압에서 사용되는 설비들은 그 특성상 재료의 미시적인 변화에서부터 거시적 결함에 이르기까지 많은 요인들에 의하여 열화정도를 판별할 수 있기 때문에 사용조건이나 환경에 따라 각기 별도의 평가방법이 응용되고 있다. 현재 구조물의 손상평가에 대한 비파괴적 검출방법으로는 금속조직학[1,2], 전기저항법[3,4], 경도법[5,6], 자기적 방법[7-9] 등이 연구 발표된 바 있고 이 중 일부는 실제 설비의 잔여수명평가에 이용되고 있는 실정이다. 이와 같은 비파괴적 검출 방법 중에서 경도법은 다른 방법에 비하여 측정방법이 간편하여 그 동안 많은 관심이 집중되어 왔다. 그러나 경도법은 정밀도가 떨어질 뿐만 아니라 장시간 열화된 소재의 손상정도를 판별하는 데는 한계가 있다. 따라서 장시간 사용된 소재의 열화 및 잔여수명을 정량적으로 판별할 수 있는 새로운 비파괴평가방법의 개발이 요구되고 있다.

강구조의 잔여수명을 평가하기 위해 G-parameter로 알려진 Larson-Miller 파라미터가 사용되었으나 [10], 감도가 떨어졌다. 최근에 Goto는 경도비를 이용하여 잔여수명을 평가할 수 있는 방법을 시도하였다. 응력의 작용이 연화과정을 가속시키기 때문에 열적 연화에 응력 작용을 포함시켜 Larson-Miller 파라미터를 개선한 G' 파라미터를 도입하였다[5].

본 연구에서는 열처리시간을 달리하여 열화정도가 다른 시험편을 준비하였으며, 열화시간에 따른 1Cr-1Mo-0.25V 강의 기계적 특성 저하를 경도값과 가역 투자율의 침투값 간격(PIRMP)에 의해 살펴보았다. 그리고 자기적 특성변화의 원인을 조사하기 위하여 SEM, EPMA 및 X-선 회절상을 통해 미세 조직을 관찰하고, 연화곡선에 의해 잔여수명을 평가하는 방법을 제시하였다.

2. 가역투자율 측정원리

Fig. 1은 $B-H$ 히스테리시스 곡선과 가역투자율의 profile을 나타내고 있다. Fig. 1(c)에서 보이는 바와 같이 어떤 값의 직류 자기장에서 교류 자기장을 인가하면 주자화곡선은 부자화곡선을 따라 변하게 된다[8]. 이때 자속밀도와 인가자기장의 미소변화비 ($\Delta B/\Delta H$)가 증분투자율 (incremental permeability)이고, $\Delta H \rightarrow 0$ 일 때의 투자율이 가역투자율 (reversible permeability)이다[11]. Fig. 1(b)는 자기이력곡선에서 미분하여 구한 가역 투자율의 절대값을 나타내고 있다[12].

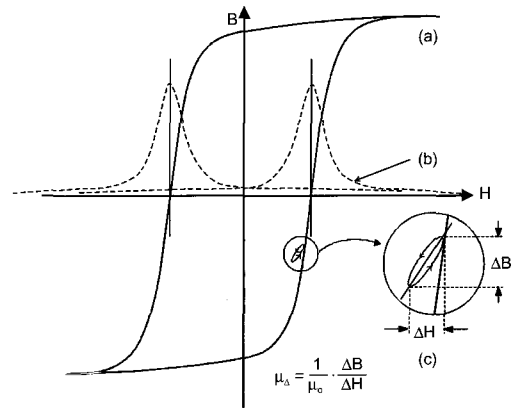


Fig. 1 Hysteresis loop and reversible magnetic permeability. (a) $B-H$ hysteresis loop, (b) absolute value profile of reversible magnetic permeability, and (c) incremental permeability (μ_{Δ}). Reversible magnetic permeability is the limiting value of the incremental permeability μ_{Δ} for $\Delta H \rightarrow 0$

주자기이력곡선 (major hysteresis loop)을 따라 연속적인 자구변화로부터 미시적인 자화를 관측하기 위하여 한 자기장에서 자기과정 (magnetic process)을 반복하게 하는 것이 좋다. 따라서 인가 자기장 h 가 서서히 변화하는 자기장 H_0 와 진폭이 h_0 이고 각주파수가 ω 인 교류 자기장 $h_0 \sin \omega t$ 와 중첩되면, 교류 섭동 자기장은 주자기이력곡선을 따라 부자기이력곡선 (minor hysteresis loop)을 유도한다. 주자기이력곡선이 부자기이력곡선 상의 자기과정과 같다는 것을 증명하기는 어렵다. 그러나 비직선 자화는 H_0 를 중심으로 섭동 자기장에 의해 반복될 것이고, 현상론적으로 자기장 h 의 맥급수로 표현될 수 있다[13,14].

$$h = H_o + h_o \sin(\omega t) \tag{1}$$

$$m = \alpha_1 h + \alpha_2 h^2 + \alpha_3 h^3 \tag{2}$$

여기서 m 은 유도된 자화이고, α_1 는 선형 자화율이며, $\alpha_2, \alpha_3, \dots$ 는 비선형 고차 자화를 성분이다.

시편에서 유도된 자화는 탐지코일에 전압 $E(H_o, h_o)$ 로 나타나며, 식 (2)의 자화에 비례하는 자속의 도함수로 주어진다. 간단한 계산에 의해 $E(H_o, h_o)$ 는 다음 식과 같이 표현할 수 있다[15].

$$E \propto d \frac{m}{dt} \\ = A\omega \left(\alpha_1 h_o + \frac{3}{4} \alpha_3 h_o^3 + \dots \right) \cos \omega t \\ + A\omega (\alpha_2 h_o^2 + \alpha_4 h_o^4 + \dots) \sin 2\omega t + \dots \tag{3}$$

여기서 A 는 탐지코일의 치수와 채우기 인자 (filling factor) 등의 기하학적 인자에 의해 결정되는 상수이다. 실험적으로 록-인 증폭기 (lock-in amplifier)의 참조신호의 각주파수를 $\omega, 2\omega$ 로 두고 측정하면 식 (3)의 첫 번째 항과 두 번째 항의 유도전압을 각각 구할 수 있다.

3. 실험

3.1. 실험재료

실험에 사용된 강재는 화력발전소 터빈로터 소재로 많이 사용되는 1Cr-1Mo-0.25V 강으로서 화학적 성분과 기계적 물성치는 이미 알려져 있다[7]. 그리고 실제로 열화된 재료의 미세조직과 유사한 미세조직을 갖는 시료를 얻기 위해서 실제 사용온도 538℃보다 높은 630℃에서 인위적으로 등온 열화처리하여 사용하였다. 시험에 사용된 시료는 7가지로 열처리 전의 시편 1개와 630℃에서 열처리 시간이 각각 453시간, 933시간, 1,322시간, 1,820시간, 3,640시간 및 5,460시간인 6개의 시편을 준비하였다. 이 때 소요되는 열화시간은 Fe의 자기확산 (self diffusion) 이론에 의하여 538℃에서 어느 일정시간에서의 Fe의 자기 확산량과 일치하는 630℃에서의 시간을 계산에 의해 결정하였으며[16], 실제 사용온도와 비교한 열처리 시간은 Table 1과 같다.

Table 1 Determination of aging time at 630℃ for equivalent microstructure serviced at 538℃

Aging time at 630℃ (h)	Time served at 538℃ (h)
453	25,000
933	50,000
1,322	75,000
1,820	100,000
3,640	200,000
5,460	300,000

3.2. 경도시험

경도측정용 시험편으로는 10 mm × 10 mm × 10 mm 크기의 정육면체 형상의 시료를 사용하였다. 경도측정을 용이하게 하기 위해 시험면을 100번부터 1,200번까지 사포로 순차적으로 연마한 후 0.6 μm의 diamond paste를 사용하여 경면제각하였다. 경도시험은 마이크로 비커스 경도시험기 (Future-tech corp. FN-7)를 사용하였으며 시험하중은 1 kgf로 하였고 하중부하시간은 15 초로 하였다. 경도측정은 상온에서 각 시험편에 대해서 20회씩 실시하였으며 압입자국간의 상호간섭을 피하기 위하여 경도측정위치는 압입자국 대각선 길이의 4배 이상 떨어지도록 하였다.

3.3. 가역투자율 측정장치

가역투자율 측정용 시험편으로는 폭 5 mm, 두께 1 mm, 길이 55 mm인 박판형 시험편을 사용하였다. 가역투자율을 측정하기 위한 장치의 개략도가 Fig. 2에 주어져 있다. 페라이트 요크에 탐지코일, 직류 및 교류 자기장 인가용 코일을 권선하였다. 직류는 I/O aquisition board (National Instrument PCI-MIO-16XE-10, 16-bit resolution)에서 발생한 파형을 전력증폭기 (Tecnron 7562)로 전력 증폭하여 인가하였고, 교류 자기장은 파형발생기 (hp 3325B)로 인가하였다. 탐지코일에 유도되는 교류 자화율은 섭동 자기장을 참조신호 (reference signal)로 하여 록-인 증폭기를 이용하여 측정하였다. 시편에 인가한 자기장은 주파수가 0.05 Hz이고 최대값이 12.0 kA/m인 삼각파형으로, 그 크기는 1 Ω 선트에 걸리는 전압에 의해 계산되었다. 선트와 록-인 증폭기로 읽은 값은 I/O aquisition

board의 입력측을 통하여 측정 한 후, 컴퓨터에서 데이터를 처리하게 하였다.

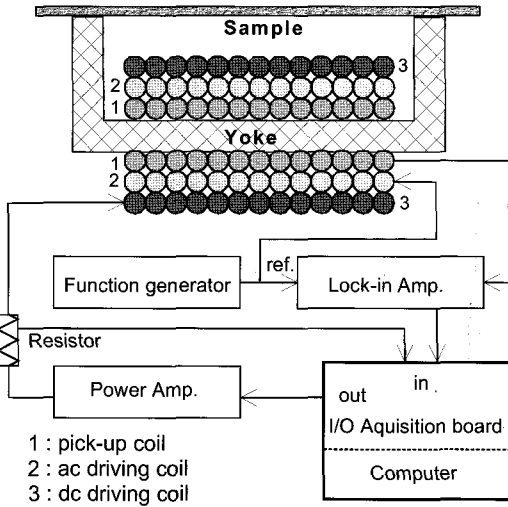


Fig. 2 Block diagram for the measurement of the reversible magnetic permeability profiles at 1Cr-1Mo-0.25V steel

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 미열화재와 933시간, 1,820시간, 5,460시간에서 열처리한 4개의 시편에서 측정 한 가역투자율의 파형이다. PIRMP는 보자력의 두 배인데, PIRMP는 열화시간이 길어짐에 따라 점점 좁아짐을 알 수 있다. 경도값과 PIRMP를 미열화재에 대해 normalize한 값들을 Fig. 4에 나타내었으며, 열화시간이 증가함에 따라 경도값은 초기엔 큰 감소율을 보이지만 열화시간이 약 1,322시간을 넘으면 감소율의 변화 폭이 점차로 작아지는 경향을 보인다. 전반적으로 PIRMP가 경도에 비해 감소의 폭이 약 2배에 이르고 있다. 따라서 장시간 사용된 설비의 경우 PIRMP를 측정하면 감도높게 열화를 평가할 수 있다.

Fig. 5는 열처리 전, 후의 미세조직 변화와 탄화물 분석을 위한 SEM 및 EPMA 사진을 보여주고 있다. 열화 처리를 하지 않은 시편의 경우에는 결정립계에 석출물이 거의 없으나 (Fig. 5(a)) 열화재의 경우에는 열화시간이 길어짐에 따라 결정립 주위에 석출물의 양이 증가하는 것을 볼 수 있다. (Fig. 5(b)). EPMA의 분석에 의하면 기지 내의 탄소

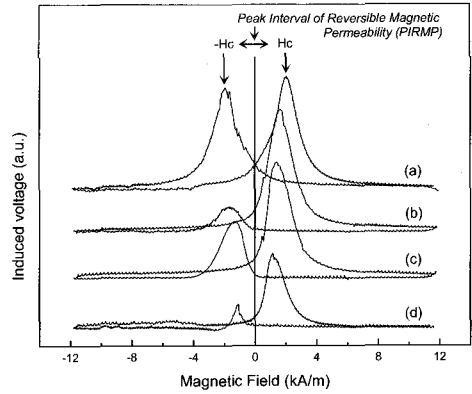


Fig. 3 Reversible magnetic permeability profiles for aging times (a) 0 h, (b) 1,922 h, (c) 1,820 h, and (d) 5,460 h

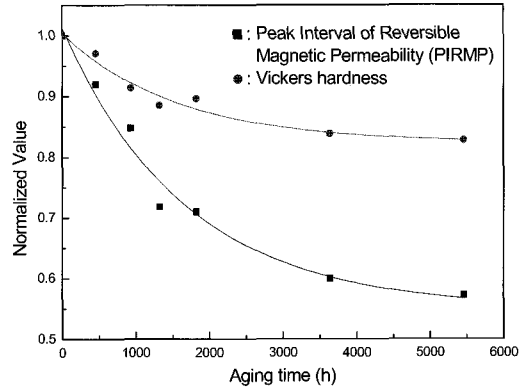


Fig. 4 Normalized coercive field strength and Vickers hardness on heat treatment time

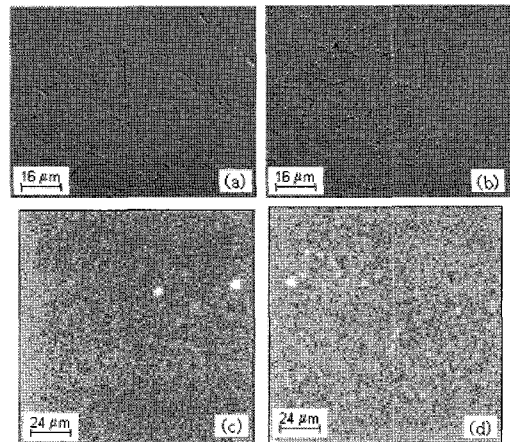


Fig. 5 SEM and EPMA photographs of 1Cr-1Mo-0.25V steel before (a, c) and after (b, d) ageing at 603 °C for 3,640 h

(Fig. 5(c))가 빠져나가 결정립계 상에서 탄화물을 형성한다 (Fig. 5(d)). 결정립계에서 형성된 탄화물은 Fig. 6의 X-선 회절상에서 볼 수 있는 것과 같이 $Mn_{23}C_6$ 와 $(Cr_{2.5}Fe_{4.3}Mo_{0.1})C_3$ 이다. 특히 열화시간이 긴 5,460 시간 열화재는 결정립계에 석출된 탄화물이 대략 $2.0 \mu m$ 정도의 크기이며 그 양도 상당함을 알 수 있다.

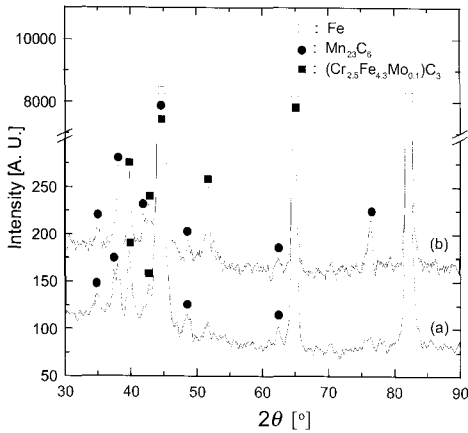


Fig. 6 X-ray diffraction patterns of 1Cr-1Mo-0.25V steel (a) before and (b) after ageing at 603 °C for 3,640 h

열화시간이 증가함에 따라 기지 원소 중 탄화물을 형성하기 쉬운 원소들이 결정립계에서 석출되어 안정한 탄화물뿐만 아니라 준안정한 탄화물을 형성하게 된다. 이렇게 형성된 탄화물 가운데 준안정한 탄화물은 사용시간이 길어짐에 따라 안정한 탄화물로 변태한다. 그리고 입계 주위에서의 탄화물의 증가는 공유결합의 탄화물로 이루어진 입계와 금속결합으로 이루어진 결정립과의 이중 결합으로 인한 결정립과 결정립계와의 결합력을 감소시키는 원인이 되므로 사용시간이 증가함에 따라 Cr-Mo-V 강의 기계적 성질 및 물리적 성질이 저하된다. 또한 열화시간이 증가함에 따라 결정립의 조대화가 발생하면 석출 초기에 기지와 결정립 사이에 존재하는 잔류응력이 소멸되고 기지와 결정립 각자의 고유한 계면성질을 지니게 됨에 따라 결정립 사이의 결합력을 약화시키는 원인이 된다. 따라서 열화시간의 증가에 따라 전반적으로 나타나는 기계적 성질 및 물리적 성질의 저하는 열화시간의 증가에 따른 입계에서의 탄화물의 석출과 조직의 조대화와 불순물 원소의 입계편석에 의한 미세조직의 변화에 기인한다[7].

Fig. 7은 경도값과 PIRMP의 상관관계를 나타내고 있으며, PIRMP는 경도값이 감소함에 따라 선형적으로 감소하고, 이 관계를 이용하여 터빈로터 강의 잔여수명을 예측할 수 있다. Goto는 저응력 상태에서 Cr-Mo-V강의 고온 크리프 수명을 Larson-Miller parameter의 변형인 G' 파라미터를 이용하여 예측하였다[5].

Fig. 7의 기울기에 의해 PIRMP는 비커스 경도의 함수로 다음과 같이 주어진다.

$$PIRMP = A \times H_v - B \quad (4)$$

여기서 $A = 3.10 \times 10^{-2}$, $B = -4.84$ 이다. PIRMP의 값은 Table 2에 주어져 있다.

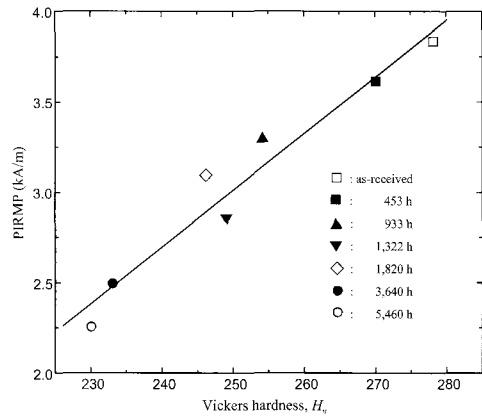


Fig. 7 Relationship between coercive field strength and Vickers hardness

Table 2 The PRIMP with aging time

Aging time (h)	As-received	453	933	1,322	1,820	3,640	5,460
PIRMP (kA/m)	3.84	3.62	3.30	3.10	2.86	2.50	2.26

Fig. 8은 시간, 온도 및 응력의 함수인 G' 파라미터가 경도비에 종속함을 보이고 있다.

G' 파라미터는 다음 식과 같이 정의한다.

$$G' = G + \Delta G \quad (5)$$

여기서 $G = \log [T(20 + \log t)]$ 이고, $\Delta G = 0.000217 (\sigma - 108)$ 이다. 그리고 σ 는 108 MPa 이상의 값을 가지며, 108 MPa 미만이면 0이다[5]. 연화곡선은

PIRMP의 측정에 의해 계산된 비커스 경도에 의해 구해질 수 있다. 이 연화곡선에 의해 터빈로터강의 잔여수명 평가 순서는 다음과 같다 (Fig. 9).

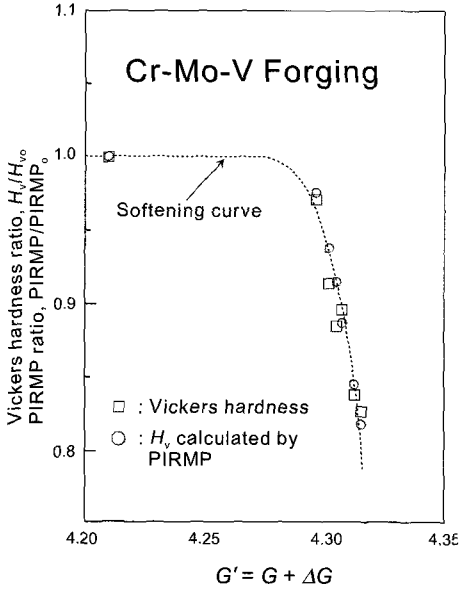


Fig. 8 Comparison of G' parameter calculated by Vickers hardness and reversible magnetic permeability. H_{v0} is the Vickers hardness of the as-received sample

- (1) 운용시간과 온도를 아는 고온, 저응력 영역에서 측정된 경도 (H_v)와 연화곡선을 이용하여 초기 경도 (H_{v0})를 구한다.
- (2) 잔여수명을 평가하고자 하는 고온, 고응력 영역 (critical area)의 경도 (H_v')를 측정한다. H_{v0} , H_v , H_v' 및 연화곡선을 이용하여 ΔG 를 계산할 수 있다.
- (3) ΔG 와 파단응력 (creep stress)의 도표를 이용하여 고온, 고응력 영역의 응력 (σ)를 평가한다 [5,17].
- (4) 잔여수명은 계산된 응력과 크립파단곡선 (creep rupture curve)에 의해 평가된다[18].

따라서 PIRMP에 의해 구한 연화곡선은 터빈로터강의 잔여수명을 평가하는 주요 방법이 될 수 있다.

5. 결론

비파괴적으로 가역투자율과 비커스 경도가 측정되었으며, PIRMP는 열화시간이 길어짐에 따라 감소하고, 경도에 비례하였다. 이는 열화시간이 증가함에 따라 결정립의 조대화, 기지에서 결정립계로 Cr, Mo, Mn, C 원소의 이동으로 결정립계에서 생성된 탄화물의 증가에 비해 기지의 탄화물 감소가

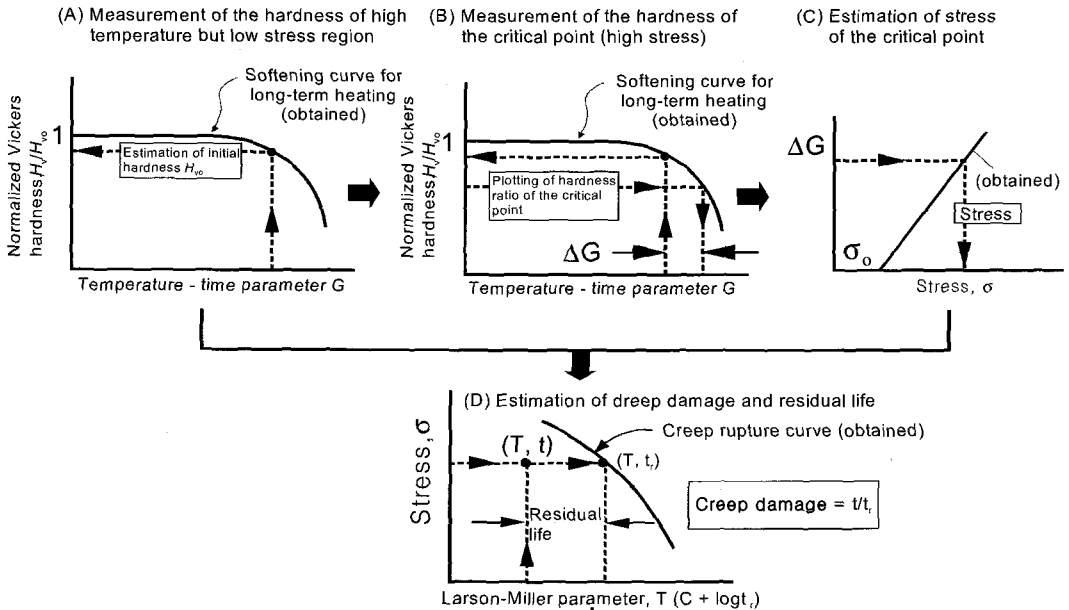


Fig. 9 Illustration of the method to detect creep damage and estimation remanent life in the case where service temperature and time are known [5]. C is material constant.

보다 크기 때문이다. PIRMP와 경도의 비례관계에 의해 PIRMP로부터 경도를 계산할 수 있었다. 열화재에 대한 비열화재의 PIRMP 비와 G' 의 관계에 의해 연화곡선을 구할 수 있었고, 이 연화곡선에 의해 터빈로터 강의 잔여수명을 가역 투자율 측정에 의해 비파괴적으로 평가할 수 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] R. Viswanathan and S. Gehl, *Journal of Engineering Material and Technology*, Vol. 113, No. 2, pp. 263-270, (1991)
- [2] B. W. Jones, C. R. Hills, and D. H. Polonis, *Metallurgical Trans. A*, Vol. 22A, pp. 1049-1058, (1991)
- [3] 남승훈, 유광민, 김엄기, *비파괴검사학회지*, Vol. 18, No. 1, pp. 10-16, (1998)
- [4] K. M. Yu., S. H. Nahm, and Y. I. Kim, *J. Mater. Sci. Lett.*, Vol. 18, pp. 1175-1176, (1999)
- [5] 後藤徹, *材料*, Vol. 32, No. 32, pp. 563-569, (1983)
- [6] B. J. Cane, P. F. Aplin, and J. M. Brear, *J. Press. Vessel Tech.*, Vol. 107, No. 6, pp. 295-300, (1985)
- [7] K. S. Ryu, S. H. Hahm, Y. B. Kim, K. M. Yu, and D. Son, *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 222, pp. 128-132 (2000)
- [8] K. S. Ryu, S. H. Hahm, Y. I. Kim, K. M. Yu, Y. B. Kim, Y. Cho, and D. Son, *Journal of Magnetism*, Vol. 6, No. 1, pp. 27-30 (2001)
- [9] K. S. Ryu, S. H. Hahm, J. S. Park, K. M. Yu, Y. B. Kim, and D. Son, *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 251, pp. 196-201 (2002)
- [10] R. K. Penny, D. L. Marriott, "Design for Creep," 2nd ed., Chapman & Hall, London, pp. 206-211, (1971)
- [11] R. Boll, "Soft Magnetic Materials," Heyden & Son Ltd., London, pp. 36-37, (1979)
- [12] "Standard Terminology of Symbols and Definitions Relating to Magnetic Testing," ASTM A340, (1996)
- [13] C. G. Kim, D. Y. Kim, K. S. Ryu, J. S. Yang, and J. -G. Lee, *Journal of Magnetism*, Vol. 1, No. 2, pp. 60-63 (1996)
- [14] H. Negishi, H. Takahashi and M. Inoue, *J. Magn. Magn. Mat.*, 68, pp. 271-279, (1987)
- [15] T. Sato and Y. Miyako, *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol. 51, pp. 1394-1400, (1981)
- [16] A. M. Abdel-Latif, J. M. Corbett, D. Sidey and D. M. R. Taplin, *Proc. of 5th Int. Conf. on Fracture (ICF5)*, Vol. 4, Cannes, France, pp. 1613-1620, (1981)
- [17] R. Viswanathan, "Damage mechanism and Life Assessment of High-Temperature Components," ASM International, pp. 289-292, (1972)
- [18] NRIM Creep data sheet No. B, "Data sheets on the elevated-temperature properties of 1Cr-1Mo-0.25V steel forging for turbine rotors and shaft (ASTM A470-8)," National Research Institute for Metals Director-General, (1990)