

자기적 방법에 의한 터빈 로터강의 열화도 평가

유권상*, 박진습**, 남송훈³, 김용일³, 유광민*, 류제천*

*한국표준과학원 전자기부, **삼성전자 생산기술팀, ³한국표준과학원 산업측정부, ⁵한국표준과학원 물질량부

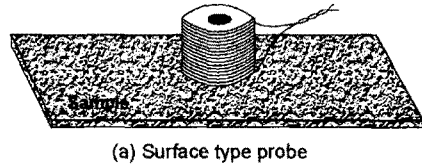
Degradation Evaluation of Turbine Rotor Using Magnetic Method

K. S. Ryu*, J. S. Park**, S. H. Nahm³, Y. I. Kim³, K. M. Yu*, J. C. Ryu*

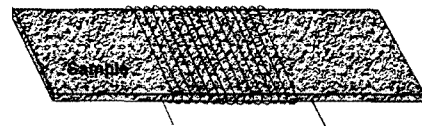
*Div. of Electromagnetic Metrology, KRISS, **Manufacturing Team, Samsung Electronics,

³Div. of Industrial Metrology, KRISS, ⁵Div. of Chemical Metrology and Material Evaluation, KRISS

Abstract - We present a new procedure to evaluate the degradation in a 1Cr-1Mo-0.25V steel. The method is based on the existence of the peak of reversible permeability in the differential magnetization around the coercive field strength. The apparatus is based on the detection of the voltage induced in a surface type coil using a lock-in amplifier tuned to a frequency to the exciting one. Results obtained the reversible permeability and Vickers hardness on the annealed samples show the peak interval of reversible permeability and Vickers hardness decreased as ageing time increased. The correlation between Vickers hardness and the peak interval of reversible permeability could well be evaluated nondestructively.



(a) Surface type probe



(b) Encircling type probe

Fig.1 Two type coils for measuring magnetic properties.

1. 서 론

강자성 물질에 천천히 변하는 직류 자기장과 교류 섭동 자기장을 중첩하여 인가하면 주자기이력곡선을 따라 부자기이력곡선이 유도된다. 이 부자기이력곡선에 의해 유도되는 전압, 즉 1차 고조파를 측정하면 주자기이력곡선을 미분한 가역 투자율 (reversible permeability)이 된다[1]. 가역 투자율 피크 사이의 간격은 보자력의 두 배가 되는 데, 이를 이용하여 터빈 로터강의 열화도를 비파괴적으로 평가할 수 있다.

고온이나 방사선이 조사되는 환경에서 오랫동안 사용된 설비의 열화도 및 잔여수명을 비파괴적으로 평가하기 위하여 금속조직법[2], 경도법[3], 자기적 방법[4] 등이 연구된 바 있고 이 중 일부는 실제 설비의 잔여수명 평가에 이용되고 있는 실정이다. 이와 같은 비파괴적 검출방법 중에서 경도법은 다른 방법에 비하여 측정방법이 간편하여 그 동안 많은 관심이 집중되어 왔다. 그러나 경도법은 정밀도가 떨어질 뿐만 아니라 장시간 열화된 소재의 손상정도를 판별하는데는 한계가 있다. 따라서 장시간 사용된 소재의 열화정도를 정량적으로 판별할 수 있는 새로운 비파괴평가기법의 개발이 요구되고 있다.

본 연구에서는 현장 평가가 가능한 surface type probe를 사용하여 열처리 시간을 달리하여 열화정도가 다른 시험편을 준비하였으며, 열화시간에 따른 1Cr-1Mo-0.25V 강 of 기계적 특성 저하를 경도값 변화와 보자력 변화에 의해 살펴본다.

2. 본 론

2.1 자성 측정용 프로브

일반적으로 자성을 측정하는 경우에 사용되는 코일은 그림 1 (a)와 같이 측정하려는 시편의 표면에 수직하게 코일을 놓아 시편에서 발생하는 자기선속 변화를 측정하는 surface type과 (b)와 같이 환봉이나 박편형태의

시편 주위에 코일을 감는 encircling type이 있다. 전자는 Barkhausen noise나 고조파 측정에 이용할 수 있고, 후자는 Barkhausen noise, 고조파 및 자기이력 곡선 측정할 수 있으나[5], 운용 중인 설비에 손상을 입히지 않고 수명평가 및 안전도 측정에는 surface type이 유용하다.

2.2 가역 투자율

어떤 값의 직류 자기장에서 교류 섭동 자기장을 인가하면 주자화곡선은 부자화 곡선 (minor magnetization curve) 상을 따라 변하게 된다. 이때 자속밀도와 인가자기장의 미소 변화비 ($\Delta B/\Delta H$)가 증분 투자율 (incremental permeability)이고, $\Delta H \rightarrow 0$ 일 때의 증분 투자율이 가역 투자율 (reversible permeability)이다[1].

인가 자기장 h 가 서서히 변하는 자기장 H_0 와 진폭이 h_0 이고 각주파수가 ω 인 교류 자기장 $h_0 \sin \omega t$ 의 중첩이면, 교류 섭동 자기장은 주자기이력곡선을 따라 부자기이력곡선을 유도한다.

비직선 자화는 H_0 를 중심점으로 섭동 자기장에 의해 반복될 것이고, 현상론적으로 자기자 h 의 멱급수로 표현될 수 있다[6].

$$h = H_0 + h_0 \sin(\omega t) \tag{1}$$

$$m = \chi_1 h + \chi_1 h^2 + \chi_3 h^3 \tag{2}$$

여기서 m 은 유도된 자화이고, χ_1 은 선형 자화율이며, χ_2, χ_3, \dots 은 비선형 고차 자화를 성분이다.

2.3 실험재료

실험에 사용된 강재는 화력발전소 터빈로터 소재로 많이 사용되는 1Cr-1Mo-0.25V 강으로서 화학적 성분과 기계적 물성치는 이미 알려져 있다[7]. 그리고 실제로

Table 1 Determination of ageing time at 630 °C for equivalent microstructure served at 538 °C.

Ageing time at 630 °C (h)	453	933	1,322	1,820	3,640	5,460
Time served at 538 °C ($\times 10^3$ h)	25	50	75	100	200	300

열화된 재료의 미세조직과 유사한 미세조직을 갖는 시료를 얻기 위해서 인위적으로 실제 사용온도 538°C보다 높은 630°C에서 등온 열화 처리하여 사용하였다. 시험에 사용된 시료는 7 가지로 열처리 전의 시편 1개와 630 °C에서 열처리 시간이 각각 453 시간, 933 시간, 1,322 시간, 1,820 시간, 3,640 시간 및 5,460 시간 인 6 개의 시편을 준비하였다. 이 때 소요되는 열화시간은 Fe의 자기 확산 이론에 의하여 538 °C에서 어느 일정 시간에서의 Fe의 자기 확산량과 일치하는 630 °C에서의 시간을 계산에 의해 결정하였으며 [8], 실제 사용온도와 비교한 열처리 시간은 Table 1과 같다.

2.4 경도측정

경도 측정용 시험편은 10 mm × 10 mm × 10 mm 크기의 정육면체 형상을 사용하였다. 경도측정은 시험면을 100번부터 1200번까지의 사포로 순차적으로 연마한 후 0.6 μm의 다이아몬드 페이스트로 경면제막하였다. 경도는 1 kgf의 시험하중과 15 s의 하중부하 시간에서 마이크로 비커스 경도시험기로 측정하였다.

2.5 가역 투자율 측정장치 구성

가역 투자율 측정용 시험편의 크기는 길이가 55 mm, 폭이 5 mm이고, 두께가 1 mm인 박판형을 사용하였다. 가역 투자율을 측정하기 위해 구성된 측정장치의 개략도가 그림 2에 주어져 있다. 페라이트 코어에 탐지코일, 직류 및 교류 자기장 인가용 코일을 권선하였다. 직류는 I/O acquisition board (National Instrument PCI-MIO-16XE-10, 16-bit resolution)에서 발생한 파형을 전력증폭기 (Tecron 7562)로 전력 증폭하여 인가하였고, 교류 자기장은 파형발생기 (hp 3325B)에서 발생한 파형을 인가하였다. 탐지코일에 유도되는 1차 고조파는 섭동 자기장을 참조신호 (reference signal)로 하여 lock-in 증폭기를 이용하여 측정하였다. 시편은 최대 자기장이 12.0 kA/m이고, 주파수가 0.05 Hz인 삼각파형에 의해 자화되었다. 선트와 lock-in 증폭기로 읽은 값은 I/O acquisition board의 입력측을 통하여 측정 한 후, 컴퓨터에서 데이터를 처리하게 하였다.

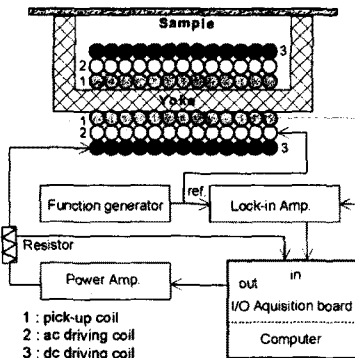


Fig. 2 Block diagram for measuring of the reversible permeability profiles at 1Cr-1Mo-0.25V steel.

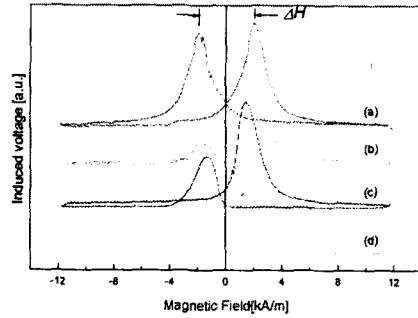


Fig. 3. Reversible permeability profiles for heat treatment times (a) 0 h, (b) 933 h, (c) 1,829 h, and (d) 5,460 h.

2.6 측정결과

2.6.1 열화시간에 따른 보자력과 경도값의 변화

그림 3은 0 시간, 933 시간, 1,820 시간 및 5,460 시간에서 열처리한 4 개의 시편에서 측정한 가역 투자율의 파형이다. 가역 투자율의 피크 사이의 간격은 보자력의 두 배인데, 이 피크 사이의 간격은 열화시간이 길어짐에 따라 점점 좁아짐을 알 수 있다. 7 개의 시편에서 측정한 보자력이 그림 4에 주어져 있다. 열화시간이 길어짐에 따라 보자력이 점차 감소하므로 이는 자기적으로 연화됨을 나타낸다.

그림 5는 열화시간에 따른 비커스 경도값의 변화를 나타내고 있다. 보자력과 같이 열화시간이 증가함에 따라 경도값도 점차 감소한다. 시료 열화시간이 증가함에 따라 경도값은 초기엔 큰 감소율을 보이지만 열화시간이 약 1,322 시간을 넘으면 감소율의 변화 폭이 점차로 작아지는 경향을 보였다.

열화 시간이 증가함에 따라 기지 원소 중 탄화물을 형성하기 쉬운 원소들이 결정립계에서 석출되어 안정한 탄화물 뿐만 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 이종결합으로 인한 결정립과 결정립계와의 결합력을 감소시키는 원인이 되므로 사용시간이 증가함에 따라 Cr-Mo-V 강의 기계적 성질 및 물리적 성질이 저하된다 [7]. 또한 열화시간이 증가함에 따라 결정립의 조대화가 발생하면 석출 초기에 기지와 결정립 사이에 존재하는 잔류용

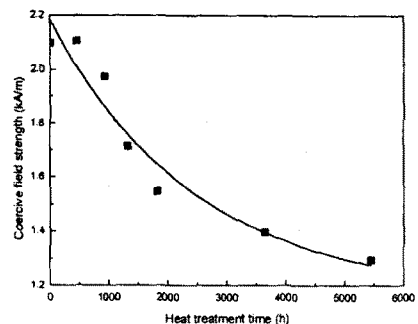


Fig. 4. Dependency of coercive field strength on heat treatment time.

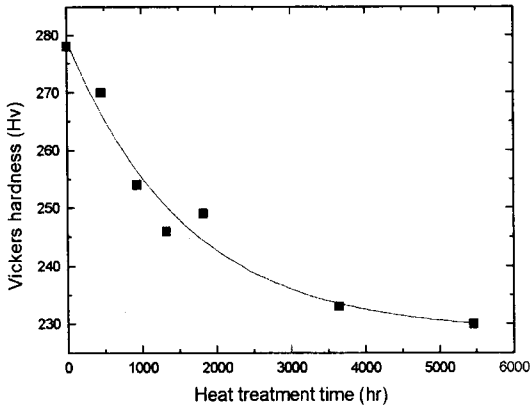


Fig. 5. Dependency of Vickers hardness on heat treatment time.

력이 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[4].

그림 6은 경도값과 보자력의 상관관계를 나타내고 있으며, 두 인자간에는 좋은 선형관계가 있음을 알 수 있다. 비파괴적 검출방법 중에서 경도법은 다른 방법에 비하여 측정방법이 간편하여 그 동안 많은 관심이 집중되어 왔다. Goto는 저응력 상태에서 Cr-Mo-V강의 고온 크리프 수명을 Larson-Miller 파라미터의 변형인 G 파라미터를 이용하여 예측하였다[3]. 따라서 그림 7의 상관관계를 이용하여 보자력의 측정으로부터 경도값을 추정한다면 G 파라미터를 이용하여 고온 크리프 수명을 계산할 수 있으므로 경년열화재의 잔여수명을 구할 수 있다.

2.6.2 Encircling type probe에 의한 측정값과 비교

그림 7은 두 가지 형태의 probe를 사용하여 열화 시간에 따른 보자력 변화를 나타내고 있다. (a)는 surface type probe로 1차 고조파를 측정하여 계산한 보자력의 변화이고, (b)는 encircling type probe로

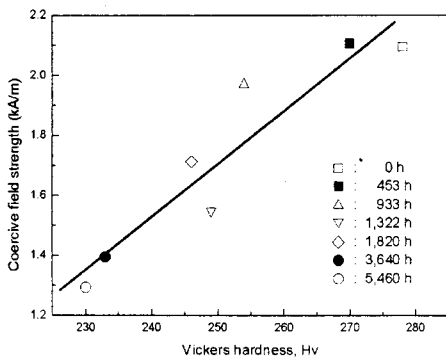


Fig. 6. Relationship between coercive field strength and Vickers hardness.

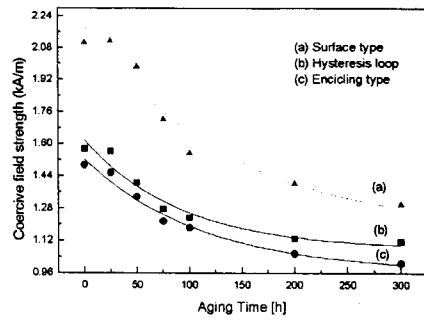


Fig. 7. Change of coercive field strength by measuring by (a) surface type probe, (b) and (c) encircling type probe.

탄동법 (ballistic method)으로 측정된 자기이력곡선에서 계산한 보자력 변화이며, (c)는 1차 고조파를 측정하여 계산한 보자력 변화이다. 자기이력곡선과 encircling type probe로 측정된 결과는 잘 일치하나, surface type probe로 측정된 결과는 다소 크게 계산되었다.

3. 결 론

Surface type probe로 가역 투자를 피크 사이의 간격으로 보자력을 측정하여 터빈 로터강의 열화도를 평가할 수 있는 방법을 연구하였다. Encircling type probe에 의한 자기이력곡선과 가역 투자율에 의해 계산한 보자력은 잘 일치하였고, surface type probe로 측정된 보자력에서도 같은 경향의 감소현상을 가짐을 알 수 있었다.

보자력 및 경도값은 열화시간이 증가함에 따라 감소하는 경향을 가짐을 알 수 있었다. 보자력과 경도값 사이에는 직선성이 있음을 알 수 있었고, 이 직선성을 이용하여 보자력 측정으로부터 경도값을 추정할 수 있으며, Goto의 G 파라미터에 의해 고온 크리프 수명을 계산할 수 있으므로 경년열화재의 잔여수명을 구할 수 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] R. Boll, "Soft Magnetic Materials", Heyden & Son Ltd., London, pp. 36~37, (1979).
- [2] Viswanathan, R. and Gehl, S., J. of Engin. Mater. and Technol., Vol. 113, No. 2(1991), pp. 263~270.
- [3] 後藤徹, 材料, Vol. 32, No. 32(1983), pp. 563-569.
- [4] K. S. Ryu, S. H. Hahm, Y. B. Kim, K. M. Yu and D. Son, INTERMAG 99, DP-26, Korea.
- [5] 황도근, 김호철, Korea Appl. Phys., vol. 5, pp. 280-285(1992).
- [6] H. Negishi, H. Takahashi and M. Inoue, J. Magn. Mat., 68, pp. 271~279 (1987).
- [7] 유권상, 남승훈, 김용일, 유광민, 손대락, 비파괴검사학회지, 제19권, 제4호(1999), pp. 288~293.
- [8] Abdel-Latif, A. M., Corbett, J. M., Sidey and D. M. R. Taplin, Proc. of 5th Int. Conf. on Fracture (ICF5), Vol. 4, Cannes, France, (1981), pp. 1613~1620.