[논 문] - 비파괴검사학회지
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing
Vol. 20, No. 5 (2000. 10)

가역 투자율 측정에 의한 1Cr-1Mo-0.25V 강의 열화도 평가

Degradation Evaluation of 1Cr-1Mo-0.25V Steel by Measuring Reversible Magnetic Permeability

유권상*, 김용일**, 남승훈***, 유광민*, 조육****, 손대락****
Kwon-Sang Ryu*, Yong-Il Kim**, Seung-Hoon Nahm***, Kwang-Min Yu*, Youk Cho****, and De-Rac Son****

초 록 고온에서 운용 중인 설비의 안전성을 평가하기 위해서는 사용기간동안 열화된 재료의 물성을 측정하여야 한다. 실제 사용되고 있는 화력발전소 터빈의 로터에서 열화도가 다른 여러 종류의 시편을 입수하기 어렵기 때문에, 터빈 로터재로 널리 사용되고 있는 1Cr-1Mo-0.25V 강을 인공열화시켜 시편으로 사용하였다. 열화도의 비파괴적 평가를 위하여 교류 섭동 자기장을 인가하여 가역 투자율을 측정하는 자기적 방법을 사용하였다. 열화도의 증가에 따라 경도와 가역 투자율 피크 사이의 간격은 감소하였는데, 경도와 가역 투자율 피크 간격과의 선형관계를 이용하여 비파괴적으로 터빈 로터강의 열화도를 평가할 수 있는 기초를 마련하였다.

주요용어: 교류 섭동 자기장, 가역 투자율, 가역 투자율 피크 사이의 간격, 보자력, 1Cr-1Mo-0.25V 강, 열화도

Abstract The integrity of the turbine rotors can be assessed by measuring reversible permeability and Vickers hardness of the aged rotors at service temperature. The measurement system of reversible permeability, which measured by applied alternating perturbing magnetic field, was constructed in order to evaluate material degradation, nondestructively. The test specimen was 1Cr-1Mo-0.25V steel used widely for turbine rotor material, and the specimens were prepared by the isothermal heat treatment at 630 ℃. The reversible permeability of the test materials were measured at room temperature. The peak interval of reversible permeability and Vickers hardness decreased with the increase of degradation. The degradation of test material may be determined nondestructively by the lineality of Vickers hardness and the peak interval of reversible permeability.

Keywords: Alternating perturbing magnetic field, reversible magnetic permeability, peak interval of reversible permeability, coercive field strength, 1Cr-1Mo-0.25V steel, degradation

1. 서 론

크리프에 의한 수명 소비는 대상부에서 시험편을 채취하여 실험실에서의 가속시험으로 추정할 수 있고, 사용중의 인성 저하는 충격시험이나 파괴인성시험에 의해 판단할 수 있다. 그러나, 이 경우의 문제점은 대상부를 연속적으로 감시할 수 없으며, 이용할 수 있는 재료의 양이 적고 한정되어 있기 때문에 종합적인 시험에 이용할 수 없다는 것이다. 더욱이 시험편이 작고 수량이 적기 때문에 결과는 부정확하다. 손상부가 규명되었다고 해도 시험편을 채취하는 위치의 안전성, 작업성 등으로 인해 목표가 되는 위치로부터 떨어진 장소로부터 손상부의 재료상태를 추정하는 경우도 있다. 시험편 채취부의 보수나 그 장기 안전성을 보증하는 충분한 실적과 신뢰성이 현시점에서 확립되어 있지 않기 때문에, 운영자 측에서는 일반적으로 사용중인 기기에서의 샘플의 채취를 허락하

(접수: 2000. 6. 14) * 한국표준과학연구원 전자기표준부(Div. of Electromagnetic Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-600), 한국표준과학연구원 산업측정표준부, 한국표준연구원 물질량표준부, 한남대학교 물리학과

고 싶어하지 않는다. 그러나, 이와 같은 상황에서도 시험편 채취를 일반화하고 있는 것은 재료특성을 추정하여 수명평가의 부정확성을 없애기 위해서이다.

비파괴적 방법은 실제 사용기기를 크게 훼손시키지 않고 손상상태를 직접적으로 파악할 수 있다는 장점 때문에 효용성이 크다. 이 방법을 사용할 경우에는 손상량의 정량화와 추정 손상량의 정확도 향상이 매우 중요하다. 비파괴적 평가는 대상 기기를 외부에서 진단하는 방법이기 때문에 기기 내부는 평가할 수 없으므로 평가부위가 한정된다는 단점이 있기는 하지만, 파괴적 평가에 비하면 효율적이고 경제적이며 정기적인 monitoring 방법으로 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. 고온에서 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[3-6], 경도법[7,8], 자기적 방법[9-11] 등이 연구 발표된 바 있고 이 중 일부는 실제 설비의 잔여수명평가에 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 열처리시간을 달리하여 열화정도가 다른 시험편을 준비하였으며, 열화시간에 따른 1Cr-1Mo-0.25V 강의 기계적 특성 저하를 경도값 변화와 가역 투자율의 피크 사이의 간격 변화인 보자력에 의해 살펴보았다.

2. 실 험

2.1. 실험재료

실험에 사용된 강재는 화력발전소 터빈로터 소재로 많이 사용되는 1Cr-1Mo-0.25V 강으로서 화학적 성분과 기계적 물성치는 이미 알려져 있다[9]. 그리고 실제로 열화된 재료의 미세조직과 유사한 미세조직을 갖는 시료를 얻기 위해서 인위적으로 실제 사용온도 538℃보다 높은 630℃에서 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 이론에 의하여 538 ℃에서 어느 일정시간에서의 Fe의 자기 확산량과 일치하는 630 ℃에서의 시간을 계산에 의해 결정하였으며[12], 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)	453	933	1,322	1,820	3,640	5,460
Time served at 538℃ (h)	25,000	50,000	75,000	100,000	200,000	300,000

2.2. 경도시험

경도측정용 시험편으로는 10 mm × 10 mm × 10 mm 크기의 정육면체 형상의 시료를 사용하였다. 경도측정을 용이하게 하기 위해 시험면을 100번부터 1200번까지 사포로 순차적으로 연마한 후 0.6 μm의 diamond paste를 사용하여 경면제작하였다. 경도시험은 마이크로 비커스 경도시험기를 사용하였으며 시험하중은 1kgf로 하였고 하중부하시간은 15 초로 하였다. 경도측정은 상온에서 각 시험편에 대해서 20회씩 실시하였으며 압입자국간의 상호간섭을 피하기 위하여 경도측정위치는 압입자국 대각선 길이의 4배 이상 떨어지도록 하였다.

2.3. 가역투자율

Fig. 1은 B-H 히스테리시스 곡선과 가역 투자율의 profile을 나타내고 있다. Fig. 1 (c)에서 보이는 바와 같이 어떤 값의 직류 자기장에서 교류 자기장을 인가하면 주자화곡선은 부자화곡선을 따라 변하게 된다. 이때 자속밀도와 인가자기장의 미소 변화비 ($\Delta B/\Delta H$)가 증분 투자율 (incremental permeability)이고, $\Delta H \to 0$일 때의 투자율이 가역 투자율 (reversible permeability)이다[13]. Fig. 1 (b)는 자기이력곡선에서 미분하여 구한 가역 투자율의 절대값을 나타내고 있다[14].

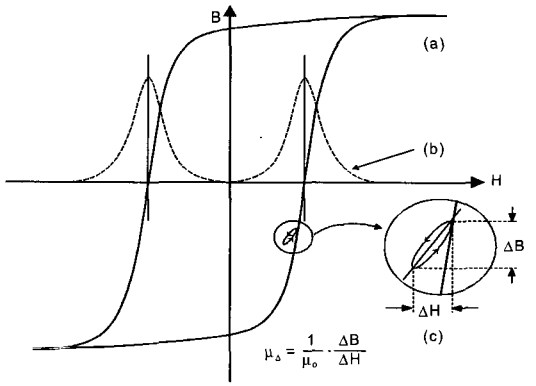

Fig. 1 Hysteresis loop and reversible permeability. (a) B-H loop hysteresis loop, (b) absolute value profiles of reversible permeability, and (c) incremental permeability

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 h가 서서히 변화하는 자기장 H_o와 진폭이 h_o이고 각주파수가 ω인 교류 자기장 $h_o\sin\omega t$의 중첩이면, 교류 섭동 자기장은 주자기이력곡선을 따라 부자기이력곡선 (minor hysteresis loop)을 유도한다. 주자기이력곡선이 부자기이력곡선 상의 자기과정과 같다는 것을 증명하기는 어렵다. 그러나 비직선 자화는 H_o를 중심점으로 섭동 자기장에 의해 반복될 것이고, 현상론적으로 자기장 h의 멱급수로 표현될 수 있다[15].

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

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

여기서 m은 유도된 자화이고, χ_1는 선형 자화율이며, χ_2, χ_3, · · · 는 비선형 고차 자화율 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[16].

$$\begin{aligned} E &\propto d\frac{m}{dt} \\ &= A\omega\left(\chi_1 h_o + \frac{3}{4}\chi_3 h_o^3 + \cdots\right)\cos\omega t \\ &+ A\omega(\chi_2 h_o^2 + \chi_4 h_o^4 + \cdots)\sin 2\omega t + \cdots \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 A는 탐지코일의 치수와 채우기 인자 (filling factor) 등의 기하학적 인자에 의해 결정되는 상수이다. 실험적으로 록-인 증폭기 (lock-in amplifier)의 참고신호의 각주파수를 ω, 2ω로 두고 측정하면 식 (3)의 첫 번째 항과 두 번째 항의 유도전압을 각각 구할 수 있다.

나) 가역 투자율 측정장치

가역 투자율 측정용 시험편으로는 폭 5mm, 두께 1mm, 길이 55mm인 박판형 시험편을 사용하였다. 가역 투자율을 측정하기 위한 장치의 개략도가 Fig. 2에 주어져 있다. 시편에 탐지코일, 직류 및 교류 자기장 인가용 코일을 권선하였다. 직류는 I/O aquisition board (Natonal Instrument PCI-MIO-16XE-10, 16-bit resolution)에서 발생한 파형을 전력증폭기 (Tecron 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. 전기강판을 이용하여 요크를 만든 후, 솔레노이드형 보빈에 탐지코일로 311회를 권선하고, 교류 자기장 인가용 코일로 211회를 권선한 후, 직류 자기장 인가용으로 166회를 권선하여 사용하였다. 시편은 최대 자기장이 8.0kA/m이고, 주파수가 0.05Hz인 삼각파형을 인가한 후, 40Hz, 80A/m의 정형파를 섭동 자기장으

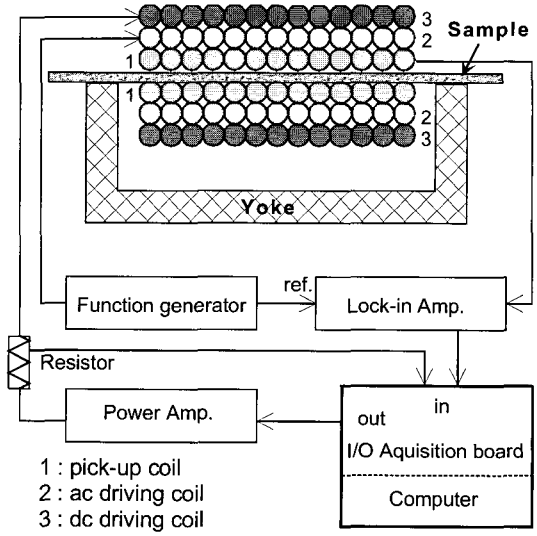

Fig. 2 Block diagram for the measurement of the reversible permeability profiles at 1Cr-1Mo-0.25V steel

로 인가하였다. 션트와 록-인 증폭기로 읽은 값은 I/O aquisition board의 입력측을 통하여 측정한 후, 컴퓨터에서 데이타를 처리하게 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 열화시간에 따른 보자력과 경도값의 변화

Fig. 3은 0시간, 933시간, 1,820시간 및 5,460시간에서 열처리한 4개의 시편에서 측정한 가역 투자율의 파형이다. 가역 투자율 피크 사이의 간격 (peak interval of reversible permeability)이 보자력의 두 배인데, 보자력은 열화시간이 길어짐에 따라 점점 좁아짐을 알 수 있다. 7개의 시편에서 측정한 보자력이 Fig. 4에 주어져 있다. 열화시간이 증가함에 따라 보자력이 점차 감소하므로, 이는 시편이 자기적으로 연화 (softening)됨을 알 수 있다.

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

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 이종 결합으로 인한 결정립과 결정립계와의 결합력을 감소시키는 원인이 되므로 사용시간이 증가함에 따라 Cr-Mo-V 강의 기계적 성질 및 물리적 성질이 저하된다[9]. 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[10].

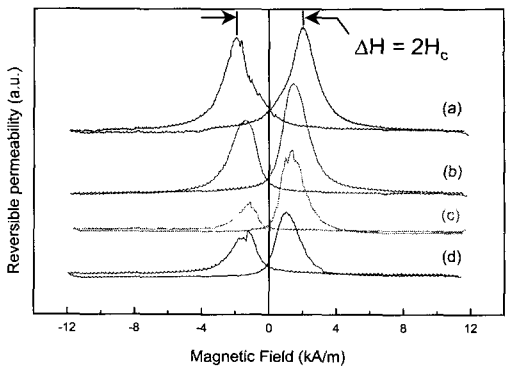

Fig. 3 Reversible permeability profiles for ageing times (a) 0h, (b) 1,322h, (c) 1,820h, and (d) 5,460h

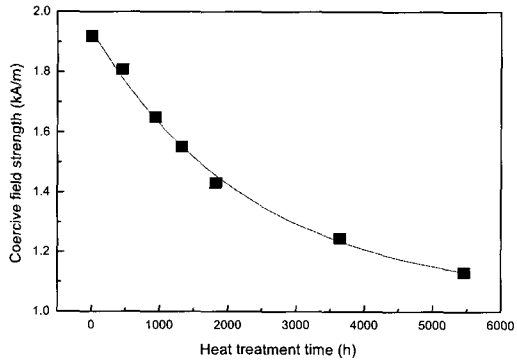

Fig. 4 Dependency of coercive field strength on heat treatment time

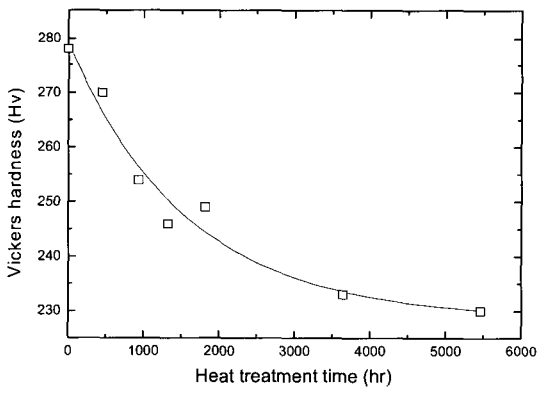

Fig. 5 Dependency of Vickers hardness on heat treatment time

3.2. 보자력과 경도값 변화의 상대비교

경도값과 보자력을 열처리 전의 시편에 대한 값으로 normalize한 값들을 Fig. 6에 나타내었다. 미열화재의 경도값에 비해 1,322시간 열화재의 경도값은 약 90 %에 상당했지만 5,460시간 열화재의 경도값은 83%에 상당하여 열화시간에 비해 경도값의 변화 폭이 초기에 비해 상당히 줄어들었음을 알 수 있다. 열화시간이 1,820시간을 넘어서면 경도값의 변화는 약 3% 정도에 불과하므로 경도값의 특성상 열화정도를 구분한다는 것은 쉬운 일이 아니다. 그리고 열화시간에 따른 경도값의 감소경향으로 미루어 보아 5,460시간 이상의 열화재의 경도값은 5,460시간의 열화재의 경도값과 비교하여 1% 이상의 차이는 없을 것으로 추정된다.

전반적으로 볼 때 보자력이 비커스 경도에 비해 감소의 폭이 약 2배에 이르고 있다. 보자력은1,820시간 이상에서도 그 변화의 폭이 10 %를 약간 상회하고 있으며 열화시간에 따른 보자력의 감소경향으로 미루어 보아 5,460시간 이상의 열화재의 보자력은 5,460시간의 열화재의 보자력과 비교하여 수 %의 차이가 있을 것으로 추정된다. 따라서 장기 사용된 설비의 열화도를 평가하는데는 보자력을 측정함이 아주 우수하다는 것을 알 수 있으므로, 보자력을 이용한 열화평가법이 장시간 열화된 소재의 손상정도를 판정하는데 현재까지 발표된 평가법 중에서 아주 우수한 방법이라고 사료된다.

Fig. 7은 경도값과 보자력의 상관관계를 나타내고 있으며, 두 인자간에는 좋은 선형관계가 있음을 알 수 있다. 비파괴적 검출방법 중에서 경도법은 다른 방법에 비하여

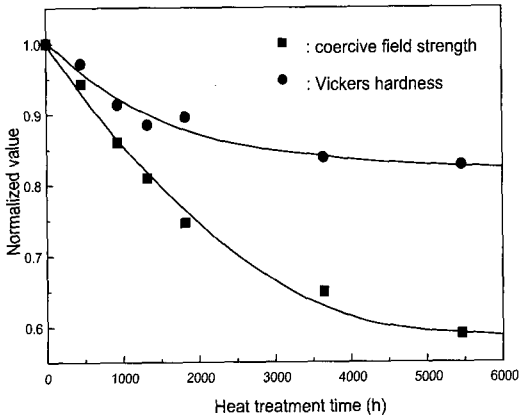

Fig. 6 Normalized coercive field strength and Vickers hardness on heat treatment time

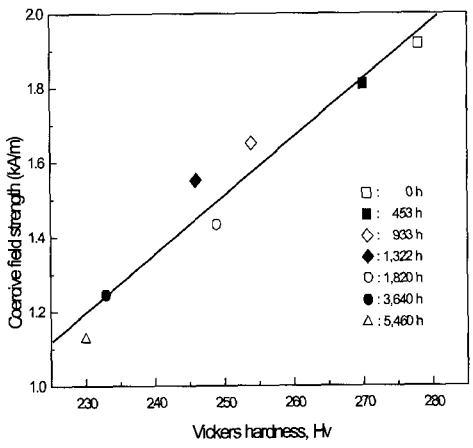

Fig. 7 Relationship between coercive field strength and Vickers hardness

측정방법이 간편하여 그 동안 많은 관심이 집중되어 왔다. Goto는 저응력 상태에서 Cr-Mo-V강의 고온 크리프 수명을 Larson-Miller parameter의 변형인 G 파라메터를 이용하여 예측하였다[7]. 따라서 Fig. 7의 상관관계를 이용하여 보자력의 측정으로부터 경도값을 추정한다면 G 파라메터를 이용하여 고온 크리프 수명을 계산할 수 있으므로 경년열화재의 잔여수명을 구할 수 있다.

4. 결 론

재료의 가역 투자율을 이용하여 터빈 로터강의 열화도를 비파괴적으로 평가하는 기법을 연구하였으며 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 가역 투자율 피크 사이의 간격에 의해 측정한 보자력은 경도특성에 비해 장시간 열화된 소재에서도 그 변화 폭이 크기 때문에 장시간 시효열화된 소재의 열화도를 평가하는데 유용한 방법이다.

(2) 가역 투자율 측정으로 사용 중인 터빈 로터의 크리프 잔여수명을 간접적으로 평가하는 것이 가능한 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국표준과학연구원 시설안전계측연구센터의 방재기술사업의 일환으로 수행된 것입니다.

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, 김엄기, 유광민, 대한기계학회논문집 A권, Vol. 22, No. 5, pp. 814~820, (1998)

[4] 남승훈, 유광민, 김엄기, 비파괴검사학회지, Vol. 18, No. 1, pp. 10~16, (1998)

[5] 이해무, 윤기봉, 남승훈, 소철호, 열처리공학회지, Vol. 7, No. 3, pp. 155~159, (1994)

[6] K. M. Yu., S. H. Nahm, and Y. I. Kim, J. Mater. Sci. Lett., Vol. 18, pp. 1175~1176, (1999)

[7] 後藤撤, 材料, Vol. 32, No. 32, pp. 563-569, (1983)

[8] B. J. Cane, P. F. Aplin, and J. M. Brear, J. Press. Vessel Tech., Vol. 107, No. 6, pp. 295-300, (1985)

[9] 유권상, 남승훈, 김용일, 유광민, 손대락, 비파괴검사학회지, Vol. 19, No. 4, pp. 288~293, (1999)

[10] K. S. Ryu, S. H. Hahm, Y. B. Kim, K. M. Yu and D. Son, INTERMAG 99, DP-26, Korea.

[11] K. S. Ryu, S. H. Hahm, Y. I. Kim, K. M. Yu and D. Son, JMSL, in press.

[12] 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)

[13] R. Boll, "Soft Magnetic Materials", Heyden & Son Ltd., London, pp. 36~37, (1979)

[14] "Standard Terminology of Symbols and Definitions Relating to Magnetic Testing", ASTM A340, (1996)

[15] H. Negishi, H. Takahashi and M. Inoue, J. Magn. Magn. Mat., 68, pp. 271~279, (1987)

[16] T. Sato and Y. Miyako, J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 51, pp. 1394~1400, (1981)