≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society, Volume 21, Number 4, August 2011 http://dx.doi.org/10.4283/JKMS.2011.21.4.136

바크하우젠 노이즈에 의한 1Cr-0.5Mo 강의 열화도 평가

김민기[1,2] · 박종서[1] · 이윤희[1] · 김철기[2] · 유권상[1]*
[1]한국표준과학연구원 산업측정표준본부, 대전시 유성구 가정로 267, 305-340
[2]충남대학교 신소재공학부, 대전시 유성구 궁동 220, 305-764

(2011년 6월 22일 받음, 2011년 8월 1일 최종수정본 받음, 2011년 8월 3일 게재확정)

고온에서 운용 중인 설비의 안전성 평가를 위하여 사용기간 동안 열화된 재료의 물성을 측정하여야 하나, 운용 중인 설비에서 열화도가 다른 여러 종류의 시편을 획득하기가 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 열교환기의 튜브와 압력용기의 재료로 널리 사용되고 있는 1Cr-0.5Mo 강을 인공열화시켜 시편으로 사용하였다. 열화도 평가를 위하여 바크하우젠 노이즈의 포락선(envelope)에서 첨두값(peak value) 사이의 간격, 보자력 및 경도를 실온에서 측정하였다. 열화도의 증가에 따라 세 값은 모두 감소하였는데, 이는 기지의 탄화물 입자가 조대화 됨으로써 탄화물 석출에 의한 기지의 연화가 결정립계의 경화보다 우세하게 작용하여 나타나는 것으로 판단되었다. 포락선 첨두값 사이의 간격과 경도값의 선형관계를 이용하여 자기적 특성 측정에 의해 간접적으로 1Cr-0.5Mo 강의 열화도를 비파괴적으로 평가할 수 있는 근거를 제시하였다.

주제어 : 바크하우젠 노이즈, 1Cr-0.5Mo 강, 열화도, 비파괴적, 미세구조, 바크하우젠 노이즈 포락선 첨두값 사이의 간격(PIBNE)

I. 서 론

열교환기 튜브와 압력용기와 같이 운용 중인 설비에서 시험편을 채취한 후 실험실에서 열화조직 분석을 통하여 잔여수명을 추정할 수 있다. 그러나 시험할 수 있는 시료의 양이 적고 한정되기 때문에 대상부를 연속적으로 감시할 수 없고, 시험편을 채취하는 위치의 안전성, 작업성 등으로 인해 목표가 되는 위치로부터 떨어진 장소로부터 손상부의 재료상태를 추정하는 경우도 많다.

비파괴적 방법은 실제 사용설비를 크게 손상시키지 않고 열화를 파악할 수 있다는 장점 때문에 효용성이 크다. 비파괴적 방법은 대상 설비를 외부에서 평가하는 방법이기 때문에 평가부위가 한정된다는 단점이 있기는 하지만, 파괴적 평가에 비하면 효율적이고 경제적이며 정기적인 점검방법으로 이용할 수 있다는 장점을 가지고 있다[1].

구조물의 손상평가에 대한 비파괴적 방법으로는 금속조직학[2, 3], 전기저항법[4, 5], 경도법[6, 7], 자기적 방법[8-11] 등이 발표되었고, 이 중 일부는 실제 설비의 열화평가에 이용되고 있다. 다른 방법에 비하여 경도법은 측정방법이 간편하여 그 동안 많은 관심이 집중되어 왔으나, 정밀도가 떨어질 뿐만 아니라 장시간 열화된 소재의 손상정도를 판별하는데 한계가 있었다. 바크하우젠 노이즈 측정은 운용 중인 Cr-Mo 강의 용접 부위에 대한 평가, 캠샤프트의 grinding 스트레스 평가 및 12 % CrMoV 강의 열화평가에 비파괴적 방법으로 사용되었다[12-14].

*Tel: (042) 868-5164, E-mail: ryuks@kriss.re.kr

본 연구에서는 열처리시간을 달리하여 열화정도가 다른 시편을 준비하였으며, 열화시간에 따른 1Cr-0.5Mo 강의 특성변화를 바크하우젠 노이즈 포락선의 첨두값 사이 간격(Peak Interval of Barkhausen Noise Envelop: PIBNE), 자기이력곡선에서 구한 보자력 변화 및 경도변화 등을 살펴보았다. PIBNE는 surface type probe로 측정이 가능하기 때문에 비파괴적으로 1Cr-0.5Mo 강의 열화를 평가할 수 있다.

II. 실 험

1. 실험재료

실험에 사용된 강재는 열교환기 튜브와 압력용기의 재료로 널리 사용되고 있는 1Cr-0.5Mo 강으로 화학 성분은 Table I에 주어져 있다. 운용 중인 설비 재료의 미세조직과 유사한 미세조직을 갖는 시료를 얻기 위하여 실제 사용온도 593 °C보다 높은 700 °C에서 등온 열처리하였다. 이 때 열화시간은 아래 식의 Larson-Miller parameter(*LMP*)에 의하여 결정하였다.

$$LMP = T(C + \log t) \quad (1)$$

여기서 T는 열화 온도(K), C는 재료상수, 그리고 t는 열화시간(h)을 말한다. 실제 사용하는 온도와 비교한 열처리 시간은 Table II와 같다. 시험에 사용된 시편은 6종으로 열처리전

Table I. Chemical composition of test material (mass %).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.143	0.239	0.627	0.005	0.005	1.01	0.49

Table II. Decision of aging time at 700 °C for equivalent microstructure served at 593 °C.

Aging time at 700 °C (h)	1	30	300	1,070	3,000
Service time at 593 °C (h)	50	2,450	32,580	135,980	433,000
Larson-Miller parameter	13,622	15,059	16,032	16,569	17,005

시편 1종과 700 °C에서 열처리 시간이 각각 1시간, 30시간, 300시간, 1070시간 및 3000시간인 5종을 준비하였다.

2. 바크하우젠 노이즈 및 자기이력곡선 측정

바크하우젠 노이즈와 자기이력곡선을 측정하기 위하여 encircling probe를 사용하였으며, 폐자기회로를 구성하기 위하여 규소강판을 적층하여 가공한 요크를 사용하였다. 실험에 사용된 시편의 크기는 50 mm(l) × 27 mm(w) × 5 mm(t)이었다. 시편 크기에 맞는 코일포머를 제작하여 탐지코일, 자화력 코일을 각각 187회, 142회 권선하였으며 함수발생기(VXI Agilent E1441A)에서 발생한 파형을 전력증폭기로 전력 증폭하여 삼각 파형의 자기장을 발생시켰다. 시편에 인가한 최대 자기장은 14 kA/m이었으며, 자기장의 크기는 1 Ω 션트저항에 걸리는 전압을 측정하여 구하였다. 탐지코일에서 측정된 신호는 입출력 신호획득 보드(National Instrument PCI-MIO-16XE-10, 16-bit resolution)를 통하여 디지털화하였으며, 측정 개략도가 Fig. 1에 주어져 있다. 자기이력곡선은 탄동법(ballistic method)으로 측정하였다[15].

3. 로크웰 경도(HRB) 및 미세구조 측정

경도 및 미세조직 시험편으로는 50 mm(l) × 50 mm(w) × 5 mm(t) 크기의 직육면체 형상의 시료를 사용하였다. 경도는 로크웰 경도 측정기(대경테크, TH-300)로 측정 하였으며, 측정기는 KS B 5530에 따라 인증된 표준물질로 교정하여 사용하였다. 미세조직관찰을 위하여 2 % 농도의 Nital(Alcohol 98 % + Nitric acid 2 %)을 사용하였으며, 시편 표면에 손상이 가지 않도록 Nital에 잠기게 하여 부식시킨 후 잔류 부식액이 없도록 알코올로 깨끗이 세척하여 사용하였다. 미세조직은 주사전자현미경(Topcon Corp., SM-300)을 사용하여 관찰하였다.

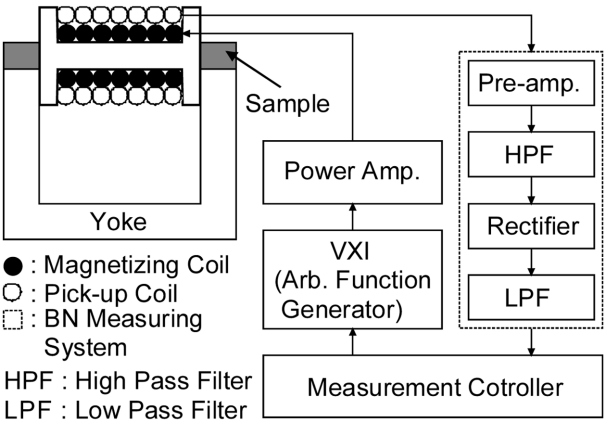

Fig. 1. Block diagram for measuring the Barkhausen noise signal.

III. 실험결과 및 고찰

Fig. 2와 3은 미열화재와 700°C에서 1시간, 30시간, 300시간, 1,070시간 및 3,000시간에서 열처리한 6종의 시편에서 측정한 바크하우젠 노이즈의 포락선과 자기이력곡선을 보이고 있다. Fig. 2와 3에서 볼 수 있는 바와 같이 열처리 시간이 증가함에 따라 PIBNE와 보자력은 감소함을 알 수 있다.

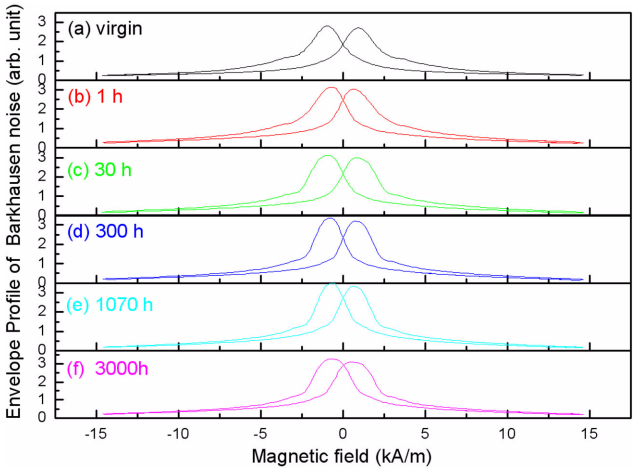

Fig. 2. Envelop profiles of Barkhausen noise for aging time. (a) virgin, (b) 1 h, (c) 30 h, (d) 300 h, (e) 1070 h, and (f) 3,000 h.

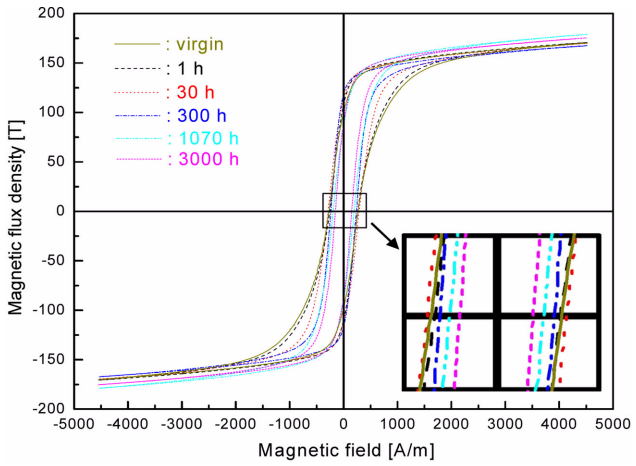

Fig. 3. Hysteresis loops for aging time 0 h, 1 h, 30 h, 300 h, 1070 h, and 3000 h.

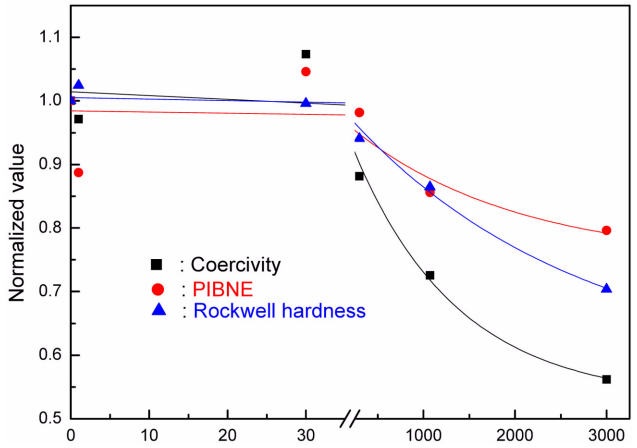

Fig. 4. Dependence of normalized PIBNE, coercivity and Rockwell hardness on aging time.

Fig. 4는 로크웰 경도, PIBNE 및 보자력 값을 열처리 전의 시험편에서 얻어진 값으로 정규화시킨 그래프로 1시간 열처리한 시편은 미열화재보다 보자력과 PIBNE은 감소하고 HRB는 증가한 후 30시간 열처리 시편에서는 모두 증가하였다. 이후 열처리 시간이 증가함에 따라 세 값은 모두 감소하였다. 이때 곡선은 first order exponential decay로 피팅하였다.

탄소강에서 탄소가 미량일 경우 탄소는 순철의 BCC 격자 안에 고용되며 고용한도를 넘어선 탄소는 세멘타이트라는 탄화물 형태로 존재한다. 세멘타이트는 과량의 탄소가 존재할 경우 독립적인 상으로 존재하며, 일반적인 탄소강에서는 순철 기지 내에 층상이나 침상으로 분포하는 펄라이트나 베이나이트 상이 된다. Biss 및 Wada는 1Cr-0.5Mo 강에서 초기열화의 경우 페라이트 기지(matrix)에서 Cr, Mo 함량의 감소없이

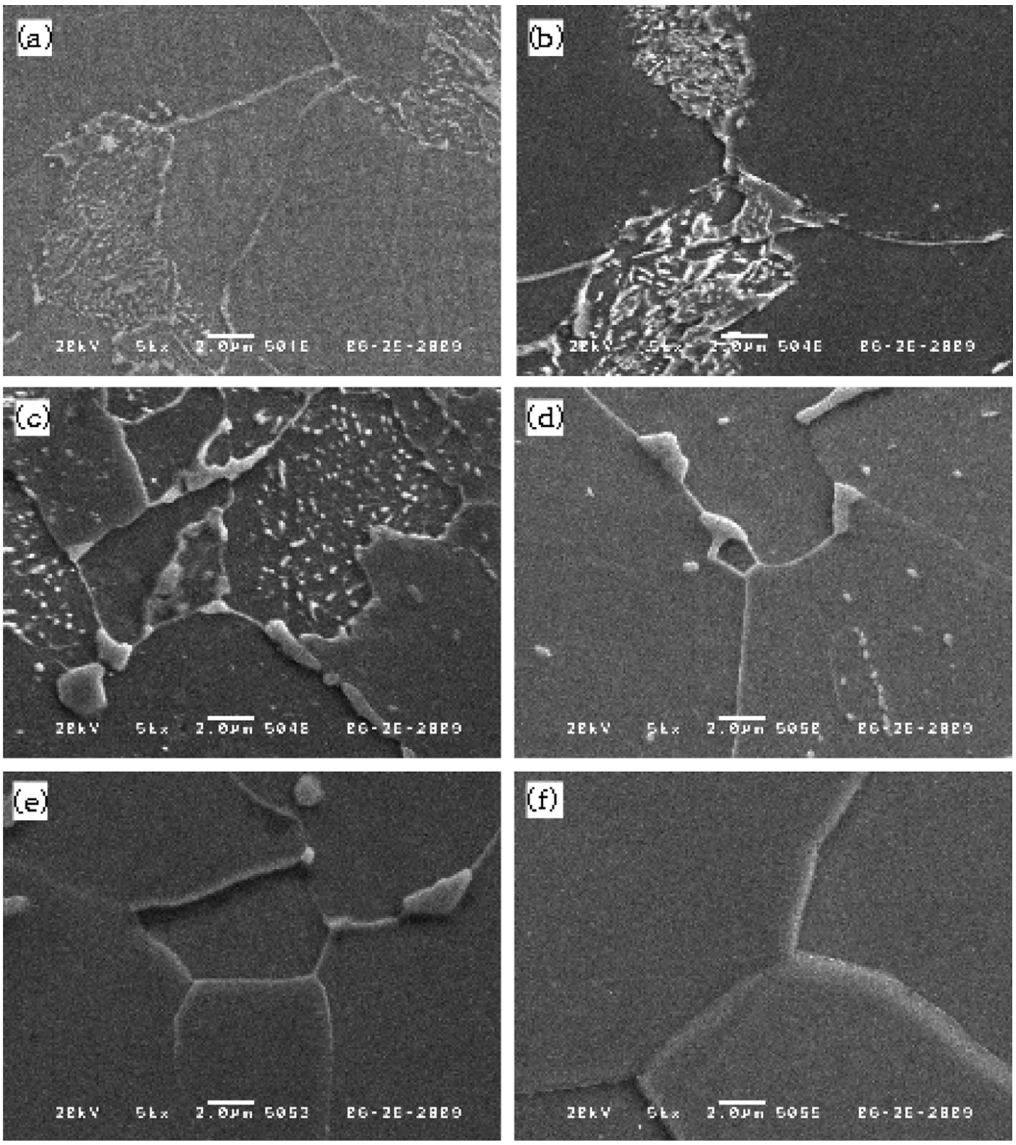

Fig. 5. SEM microstructure of 5,000 magnifications. Aging times are (a) 0 h, (b) 1 h, (c) 30 h, (d) 300 h, (e) 1,070 h, and (f) 3,000 h.

세멘타이트에 가까운 화학성분을 갖는 많은 경질 탄화물이 형성되는 것으로 보고하였다[16]. 이로 인해 1시간 열처리 시편의 경도는 증가하는데 이 시편의 미세구조(Fig. 5(b))는 열처리 전 시편의 미세구조(Fig. 5(a))와 큰 변화를 보이지 않는다. 페라이트 기지에 침상의 세멘타이트가 혼재하는 형태를 베이나이트(bainite)라고 하는데[17], 열처리 시간 증가에 따른 경도 감소는 베이나이트 분해(Fig. 5(c), (d))와 Cr, Mo 원자의 확산으로 설명되어진다[16]. 반면에 장시간 열화재의 경우 Cr, Mo 원자의 큰 확산이 M_2C와 M_7C 탄화물을 형성하여 기지의 경도를 저하시킨다. 게다가 열화시간이 증가함에 따라 준안정 베이나이트(metastable bainite) 상의 분해가 경도를 저하시킨다[16]. M_2C와 M_7C 탄화물이 결정(grain)에 부분적으로 석출되고(Fig. 5(e)), 결정립계로 확산되어 연한 페라이트기지(soft ferrite matrix)와 경한 결정립계(hard grain boundary)를 형성한다(Fig. 5(f)). 열처리 시간이 증가함에 따라 전반적으로 나타나는 자기적 특성 및 기계적 특성의 저하는 기지에 있는 탄화물 입자들이 조대화 됨으로써 탄화물 석출에 의한 기지의 연화가 결정립계의 경화보다 우세하게 작용하는 것으로 판단된다[18].

Fig. 6은 경도값과 PIBNE의 상관관계를 나타내고 있다. 실제 설비의 잔여수명평가는 초기열화보다 장시간 열화가 중요하고, 30시간까지의 초기열화에 대해서는 상관관계를 찾기 쉽지 않기 때문에, 30시간 이후의 열화재에 대해 두 인자 간에는 아래 식과 같은 선형관계를 보이고 있다.

$$PIBNE = A \cdot HRB + B \qquad (2)$$

여기서 A는 0.18, B는 1.26×10^{-2}이다. 비파괴 평가법 중에서 경도법은 다른 방법에 비하여 측정이 간단하기 때문에 그동안 많은 관심이 집중되었다. Goto는 저응력 상태에서 Cr-Mo-V 강의 고온 크리프 수명을 Larson-Miller parameter의 변형인 G 파라미터를 이용하여 예측하였다[6]. 따라서 Fig. 6의 상관관계를 이용하여 PIBNE의 측정으로 경도값을 추정하면 G 파라미터를 이용하여 열화 및 고온 크리프 수명을 계산하여 경년열화재의 잔여수명도 구할 수 있다. 따라서 surface type probe로 PIBNE을 측정하여 식 (2)에 의해 경도를 계산하면 비파괴적으로 1Cr-0.5Mo 강의 열화도를 구할 수 있을 것으로 판단된다.

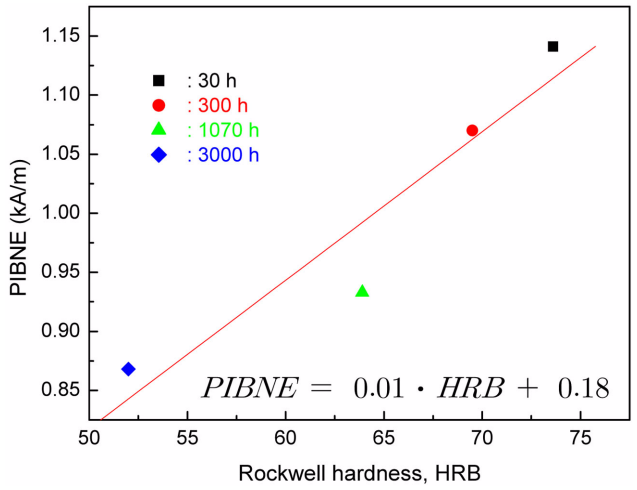

Fig. 6. Correlation between the PIBNE and Rockwell hardness.

IV. 결 론

등온열처리한 저합금 1Cr-0.5Mo 강의 자기적 성질과 경도값을 측정하고 SEM으로 미세 구조를 분석하였다. PIBNE, 보자력 및 경도는 열처리 시간이 증가함에 따라 감소하였다. 열처리 시간이 증가함에 따라 전반적으로 나타나는 자기적 특성 및 기계적 특성의 저하는 기지의 탄화물 입자가 조대화되면서 탄화물 석출에 의한 기지의 연성이 결정립계의 경성보다 우세하게 작용하여 나타나는 것으로 판단된다. 경도값과 PIBNE는 비례하였으며, 아직 데이터가 부족하지만 이 상관관계를 이용하여 surface type probe에 의해 비파괴적으로 PIBNE를 측정하여 경도값을 계산하면 1Cr-0.5Mo 강의 열화를 비파괴적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] 유권상, 김용일, 남승훈, 유광민, 조육, 손대락, 비파괴검사학회지 **20**, 445 (2000).
[2] R. Viswanathan and S. Gehl, Journal of Engineering Materials and Technology **113**, 263 (1991).
[3] B. W. Jones, C. R. Hills, and D. H. Polonis, Metallurgical Trans. A **22A**, 1049 (1991).
[4] K. M. Yu, S. H. Nahm, and Y. I. Kim, J. Mater. Sci. Lett. **18**, 1175 (1999).
[5] 남승훈, 유광민, 김엄기, 비파괴검사학회지 **18**, 10 (1998).
[6] 後藤撤, 材料 **32**, 563 (1983).
[7] B. J. Cane, P. F. Aplin, and J. M. Brear, J. Press. Vessel Tech. **107**, 295 (1985).
[8] K. S. Ryu, S. H. Nahm, J. S. Park, K. M. Yu, Y. B. Kim, and D. Son, J. Magn. Magn. Mater. **251**, 196 (2002).
[9] 김동원, 1999년도 한국비파괴검사학회 추계학술발표회 300, (1999).
[10] J. K. Yi, B. W. Lee, and H. C. Kim, J. Magn. Magn. Mater. **130**, 81 (1994).
[11] J. Kameda and R. Ranjan, Acta Metall. **35**, 1515 (1987).
[12] A. Mitra, Z. J. Chen, and D. C. Jile, NDT&E Int'l., **28**, 29 (1995).
[13] R. M. Fix, K. Tiitto, and S. Tiitto, Materials Evaluation **48**, 904 (1990).

[14] J. K. Lee, B. W. Lee, and H. C. Kim, J. Magn. Magn. Mater. **130**, 81 (1994).
[15] ASTM Special Technical Publication 371 S1, Direct-Current Magnetic Measurement for Soft Magnetic Materials, ASTM, Philadelphia (1970) pp. 28-38.
[16] V. A. Biss and T. Wada, Metallurgical Trans. A **16A**, 109 (1985).
[17] K. Yagi, G. Merckling, T.-U. Kern, H. Irie, and H. Warlimont, Advanced Materials and Technology, Springer, Berlin (2004) p. 48.
[18] K. S. Ryu, S. H. Nahm, Y. B. Kim, K. M. Yu, and D. Son, J. Magn. Magn. Mater. **222**, 128 (2000).

Degradation Evaluation of 1Cr-0.5Mo Steel using Barkhausen Noise

Min-Gi Kim[1,2], Jong-Seo Park[1], Yun-Hee Lee[1], CheolGi Kim[2], and Kwon-Sang Ryu[1]*
[1]*Division of industrial Metrology, Korea Reseach Institute of Standards and Sicence, Daejeon 305-340, Korea*
[2]*Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea*

(Received 22 June 2011, Received in final form 1 August 2011, Accepted 3 August 2011)

Mechanical properties of degraded materials must be measured for evaluating the integrity of the facilities operating at high temperature. In fact it is complicated to obtain the different degraded specimens from an operating facility. Specimens of 1Cr-0.5Mo steel prepared by the isothermal heat treatment at 700 °C were tested, which has been widely used as tubes for heat exchangers and as plates for pressure vessels. The magnetic properties and Rockwell hardness (HRB) were measured at room temperature. The peak interval of Barkhausen noise envelope (PIBNE), coercivity, and hardness decreased with the increase of degradation. The magnetic and mechanical softening of matrix is likely to govern the properties of the specimen more than the hardening of grain boundary by carbide precipitations. The degradation of test material may be determined by the linear correlation of PIBNE and HRB. Degradation of 1Cr-0.5Mo steel could well be nondestructively evaluated by PIBNE measured with surface type probe.

Keywords : Barkhausen noise, 1Cr-0.5Mo steel, degradation, nondestructive, microstructure, PIBNE (peak interval of Barkhausen noise envelope)