

보자력을 이용한 1Cr-1Mo-0.25V강 인공시효재의 열화도 평가 Degradation Evaluation of Aged 1Cr-1Mo-0.25V Steel Using Coercive Force

유권상*, 남승훈**, 김용일***, 유광민*, 손대락****
 K. S. Ryu*, S. H. Nahm**, Y. I. Kim***, K. M. Yu* and D. R. Son****

초 록 고온에서 사용중인 터빈 로터의 안전성을 평가하기 위해서는 열화된 재료의 물성이 필요하다. 실제로 발전소에서 사용되고 있는 열화도가 다른 로터강을 종류별로 입수하기가 어렵기 때문에, 터빈 로터재로 널리 사용되고 있는 1Cr-1Mo-0.25V 강으로 인공열화 시료를 제작하였다. 실제로 사용된 재료의 미세조직과 유사한 미세조직을 갖는 시료를 얻기 위하여 실제 사용온도보다 높은 630℃의 등온에서 열처리시간을 다르게 하여 열화도가 다른 7종류의 시료를 얻었다. 열화도를 비파괴적으로 평가하기 위하여 상온에서 측정된보자력을 이용하였다. 열화도의 증가에 따라 경도와보자력은 감소하였는데, 이 원인을 미세조직 및 EPMA 분석에 의해 구명하였고, 경도와보자력과의 상관관계를 만들어 비파괴적으로 열화도를 평가할 수 있는 기초를 마련하였다.

주요용어 :보자력, 1Cr-1Mo-0.25V강, Vickers경도, 히스테리시스 루프, SEM, EPMA

Abstract The integrity of the turbine rotors can be assessed by the coercive force and Vickers hardness of the aged rotors at service temperature. The coercive force measurement system 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 then the seven kinds of specimens with different degradation levels were prepared by the isothermal heat treatment at 630℃. The coercive force of the test materials was measured at room temperature. Vickers hardness and coercive force decreased with the increase of degradation. The relationship between Vickers hardness and coercive force was investigated. The degradation of test material may be determined nondestructively by the relationship between Vickers hardness and coercive force.

Keywords: coercive force, 1Cr-1Mo-0.25V steel, Vickers hardness, hysteresis loop, SEM, EPMA

1. 서 론

고온에서 설비를 장시간 사용하면 재질에 열화(material degradation) 현상이 일어나 재료의 본래 성질이 점차 나빠진다. 재질열화 현상의 지배인자로서는 설비의 사용온도 및 사용시간, 부식환경 및 불규칙적인 부하변동 등이 있다. 열화는 크게 응력이 원인이 되어 일어나는 기계적인 열화와 열적 활성화에 의해 일어나는 재질열화로 대별되고, 재질열화손상은 연화

(softening)와 취화(embrittlement)로 나누어진 다. 연화는 고온에서의 장시간 사용에 의한 고용강화 원소의 감소나 탄화물의 생성 및 조대화, 전위조직의 회복에 의해서 생기며, 크리프강도나 피로강도 등의 기계적 특성을 열화시킨다.

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] 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 초기의 열화손상정도를 판별하는 데는 유용하지만 장시간 열화된 소재의 손상정도를 판별하는 데는 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 강 of 기계적 특성 저하를 경도값 변화, 보자력 변화 및 미세조직의 변화에 의해 살펴보았다.

2. 실험

2.1. 실험재료

실험에 사용된 강재는 화력발전소 터빈로터 소재로 많이 사용되는 1Cr-1Mo-0.25V 강으로서 화학적 성분과 기계적 물성치는 각각 Table 1 및 2와 같다. 그리고 실제로 열화된 재료의 미세조직과 유사한 미세조직을 갖는 시료를 얻기 위해서 인위적으로 실제 사용온도

(538℃)보다 높은 온도(630℃)에서 등은 열화 처리하여 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 [7], 실제 사용온도와 비교한 열처리 시간은 Table 3과 같다.

2.2. 경도시험

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

2.3. 보자력 측정

보자력 측정용 시험편으로는 폭 5mm, 두께 1mm, 길이 55mm인 박판형 시험편을 사용하였다. 보자력을

Table 1 Chemical composition (wt, %)

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

Table 2 Mechanical properties

Temperature (℃)	Yield strength (MPa)	Tensile strength(MPa)	Elongation (%)	Reduction of area(%)	Hardness (Hv)
24	665.2	823.1	18.8	59.4	266
538	533.5	580.6	22.7	55.5	-

Table 3 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

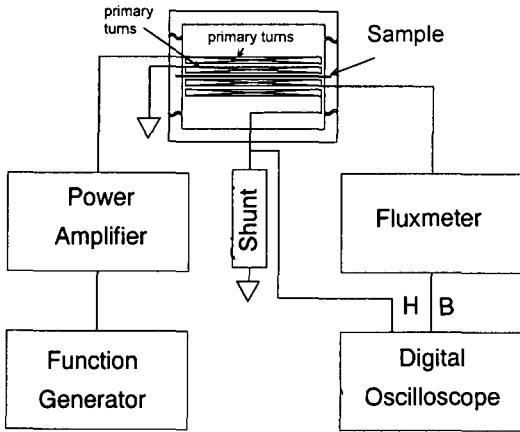


Fig. 1 Block diagram for coercive force measurement

측정하기 위한 장치의 개략도가 Fig. 1에 주어졌다. 보자력 측정장치는 시편에 자화력을 인가하기 위한 파형발생기 (hp 3325B)와 전력증폭기 (Tecron 7562), 자계 측정을 위한 션트(1Ω), 그리고 자속밀도 측정을 위한 자속계 (RFL 916)로 구성된다. 전기강판을 이용하여 요크를 만든 후, 슬레노이드형 보빈에 자속밀도 측정용 코일로 340회를 권선한 후, 자기장 인가용 코일로 100회를 권선하여 사용하였다. 시편은 최대 자기장이 8.0kA/m이고, 주파수가 0.05Hz인 삼각파형에 의해 자화되었다. 션트와 자속계에서 읽혀진 값은 디지털 오실로스코프(Lecroy 9403AM)에서 디지털화된 후 컴퓨터에서 처리되었다.

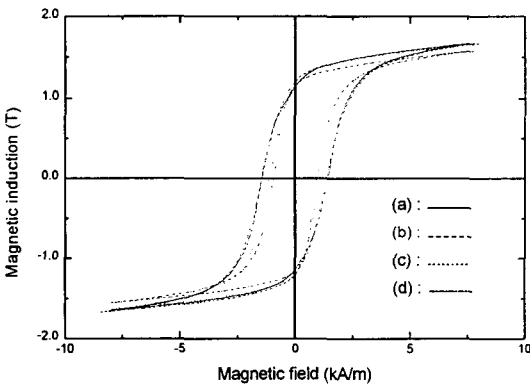


Fig. 2 Hysteresis loops with aging times (a) 0 hr, (b) 933 hrs, (c) 1,820 hrs and (d) 5,460 hrs

3. 실험 결과 및 고찰

3. 1. 열화시간에 따른 보자력과 경도값의 변화

Fig. 2는 0, 933, 1,820 및 5,460시간에서 열처리한 4개의 시편에서 측정한 자기이력곡선이다. 자기이력곡선상에서 자기유도값이 0이 될 때 음의 자기장값에서 원점까지의 간격이 보자력인데, 열화시간이 길어짐에 따라 보자력이 점점 감소함을 알 수 있다. 7개의 시편에서 측정한 자기이력곡선에서 구한 보자력이 Fig. 3에 주어졌다. 열화시간이 증가함에 따라 보자력이 점차 감소한다. 따라서 시편이 자기적으로 연화(softening)됨을 알 수 있다.

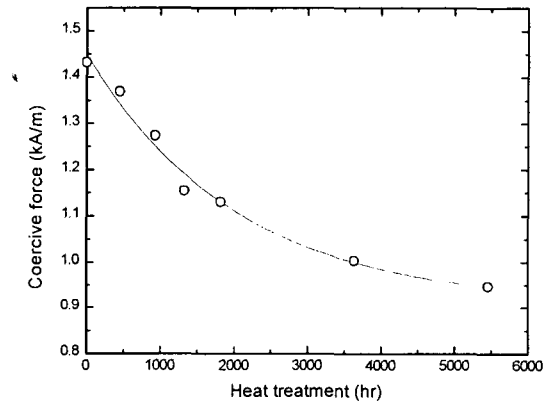


Fig. 3 Dependence of coercive force on heat treatment time

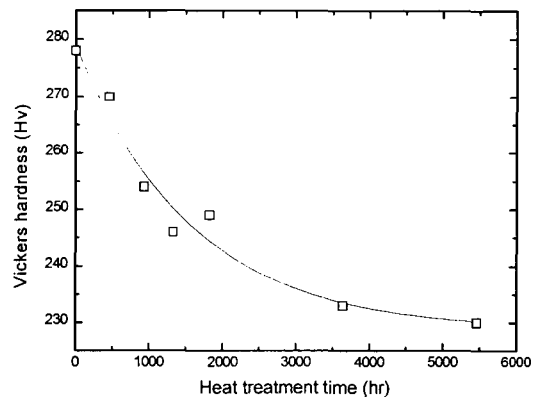


Fig. 4 Dependence of Vickers hardness on heat treatment time

Fig. 4는 열화시간에 따른 비커스 경도값의 변화를 나타내고 있다. 보자력의 경우와 같이 열화시간이 증가함에 따라 경도값도 점차 감소한다. 시효 열화시간이 증가함에 따라 경도값은 초기엔 큰 감소율을 보이지만 열화시간이 약 1,322시간을 넘으면 감소율의 변화폭이 점차로 작아지는 경향을 보였다.

3.2. 열화시간에 따른 무차원화한 보자력과 경도값의 변화

경도값과 보자력값을 열처리전의 시편에 대한 값으로 normalize한 값들을 Fig. 5에 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. 보자력의 경우는 1,820시간 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 것

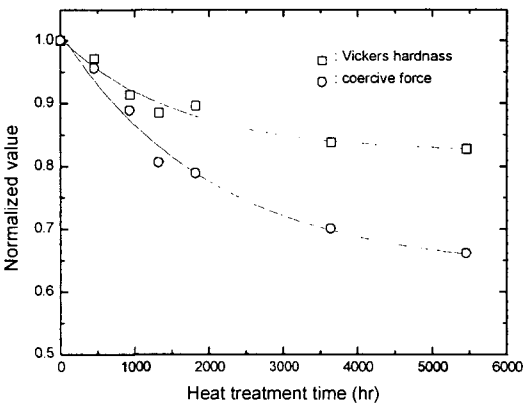


Fig. 5 Normalized coercive force and Vickers hardness on heat treatment time

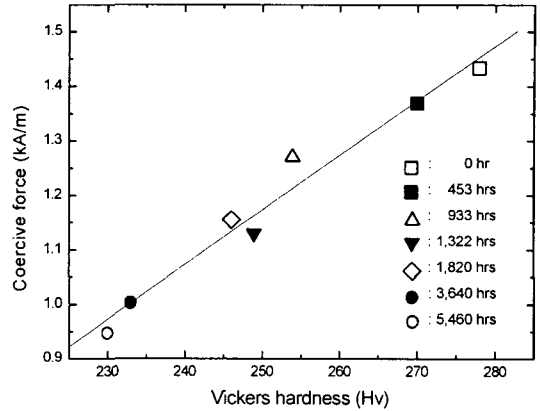


Fig. 6 Relationship between coercive force and Vickers hardness

으로 추정된다. 따라서 장기 사용된 설비의 열화도를 평가하는데는 보자력이 아주 우수하다는 것을 알 수 있으므로, 보자력을 이용한 열화평가법이 장시간 열화된 소재의 손상정도를 판정하는데 지금 현재까지 발표된 평가법 중에서는 가장 우수한 방법이라고 사료된다.

Fig. 6은 경도값과 보자력과의 상관관계를 나타내고 있으며, 두 인자간에 좋은 선형관계를 갖는다. 이는 Jae-Kyung Yi 등이 측정한 결과와 거의 일치한다 [10]. 비파괴적 검출방법중에서 경도법은 다른 방법에 비하여 측정방법이 간편하여 그 동안 많은 관심이 집중되어 왔다. Goto는 저응력 상태에서 Cr-Mo-V강의 고온 크리프 수명을 Larson-Miller parameter의 변형인 G 파라미터를 이용하여 예측하였다[5]. 따라서 Fig. 6의 상관관계를 이용하여 보자력의 측정으로부터 경도값을 추정한다면 G 파라미터를 이용하여 고온 크리프 수명을 계산할 수 있으므로 경년열화재의 잔여수명을 구할 수 있다.

3.4. 열화시간에 따른 미세조직의 변화

열화시간에 따른 미세조직의 변화를 살펴보기 위하여 미열화재와 각기 다른 시간동안 가속 열화시킨 열화재의 표면을 4% 나이탈 용액으로 부식시켜 그 미세조직의 변화를 주사형 전자현미경으로 관찰하였다. 또한 열화시간에 따른 결정립계의 화학성분의 변화를 조사하기 위하여 electron probe micro analysis(EPMA)를 사용하였다.

Fig. 7은 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. 7(a)) 열화재의 경우에는 열화시간이 길어짐에 따라 결정립계 주위에 석출물의 양이 증가하는 것을 볼 수 있다(Fig. 7(b)). EPMA의 분석에 의하면 기지내의 탄소(Fig. 7(c))가 빠져나가 결정립계 상에서 탄화물을 형성한다(Fig. 7(d)). 결정립계에서 형성된 탄화물은 Fig. 8의 X-선 회절 상에서 볼 수 있는 것과 같이 $Mn_{23}C_6$ 와 $(Cr_{2.5}Fe_{4.3}Mo_{0.1})C_3$ 이다. 특히 열화시간이 가장 긴 5,460시간 열화재에서는 결정립계에 석출된 탄화물이 대략 $2.0\mu m$ 정도의 크기이며 그 양도 상당함을 알 수 있다.

열화 시간이 증가함에 따라 기지 원소중 탄화물을 형성하기 쉬운 원소들이 결정립계에서 석출되어 안정한 탄화물 뿐만 아니라 준안정한 탄화물을 형성하게 된다. 이렇게 형성된 탄화물 가운데 준안정한 탄화물은 사용 시간이 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 따

라 Cr-Mo-V 강의 기계적 성질 및 물리적 성질이 저하된다고 사료된다. 또한 열화시간이 증가함에 따라 결정립의 조대화가 발생하면 석출 초기에 기지와 결정립 사이에 존재하는 잔류응력이 소멸되고 기지와 결정립 각자의 고유한 계면성질을 지니게 됨에 따라 결정립 사

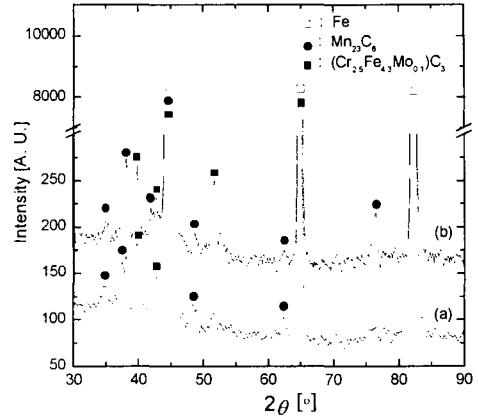


Fig. 8 X-ray diffraction patterns of 1Cr-1Mo-0.25V steel (a) before and (b) after heat treatment at 630°C for 3,640 hours

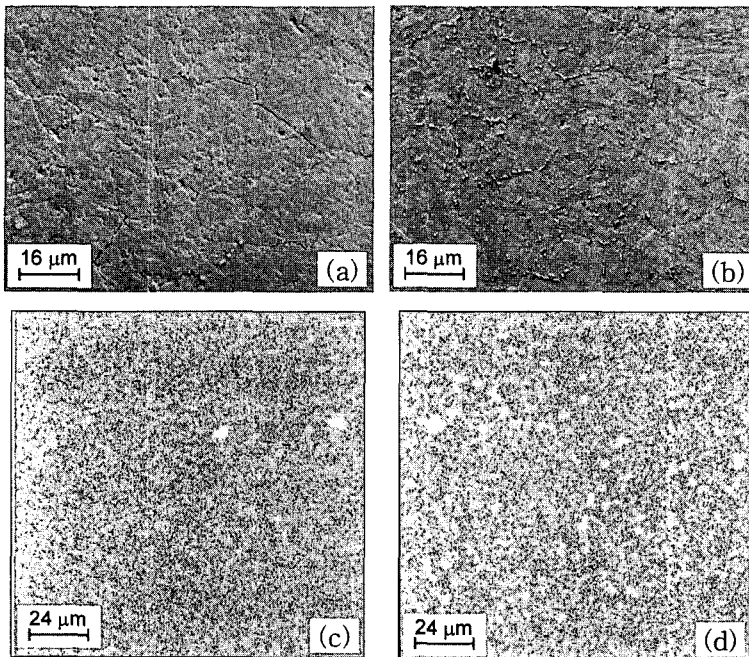


Fig. 7 SEM and EPMA photographs of 1Cr-1Mo-0.25V steel before (a, c) and after (b, d) heat treatment at 630°C for 3,640 hours

이의 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 기인하는 것으로 생각된다.

4. 결 론

재료의 자기적 성질을 이용하여 터빈 로터강의 열화도를 비파괴적으로 평가하는 기법을 연구하였으며 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) 보자력은 경도특성에 비해 장시간 열화된 소재에서도 그 변화폭이 크기 때문에 장시간 시효열화된 소재의 열화도를 평가하는데 유용한 방법이다.
- 2) 보자력의 측정으로 사용중인 터빈로터의 크리프 잔여수명을 간접적으로 평가하는 것이 가능한 것으로 판단된다.
- 3) 1Cr-1Mo-0.25V 강에 있어서 열화시간이 증가함에 따라 결정립의 조대화, 기지에서 결정립계로 Cr, Mo, Mn, C 원소의 이동으로 결정립계에서 생성된 탄화물의 증가로 경도 및 보자력이 감소하였다.

후 기

본 연구는 한국표준과학연구원 방재기술연구센터의 방재기술사업의 일환으로 수행된 것입니다.

참 고 문 헌

- [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, 김업기, 유광민, *대한기계학회논문집 A* 권, 제 22권, 제 5호, pp. 814-820, (1998)
- [4] 남승훈, 유광민, 김업기, *비파괴검사학회지*, 제 18권, 제 1호, pp. 10-16, (1998)
- [5] 이해무, 윤기봉, 남승훈, 소철호, *열처리공학회지*,

제 7권, 제 3호, pp. 155-159, (1994)

- [6] K. M. Yu, S. H. Nahm and Y. I. Kim *J. Mater. Sci. Lett.*, To be published, (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] 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)
- [10] Yi Jae-Kyung, Lee Byong-Whi and Kim, H. C., *J. Magn. Magn. Mater*, Vol. 33, No. 371, pp. 137-142, (1984)