

미소 비커스경도에 의한 Cr-Mo-V강의 경년열화 평가

김정기*, 남승훈**, 김업기***

* 공주대학교 대학원,

** 한국표준과학연구원

*** 공주대학교 공과대학 기계공학과

Evaluation on Degradation of Cr-Mo-V Steel
by Micro-Vickers Hardness Measurement

Jung-Ki Kim*, Seung Hoon Nahm**, Amkee Kim***

* Graduate College, Kongju National Univ., Kongju 314-701, Korea

** Korea Research Institute of Standards and Science

*** Dept. of Mechanical Engineering, Kongju National Univ., Kongju 314-701, Korea

ABSTRACT

Since Cr-Mo-V steel has excellent fracture and creep properties at elevated temperature, they are extensively used as steam turbine components such as the turbine rotor. However, the turbine rotor steel used to suffer material degradation during long term service. Therefore, the assessment of the safety and residual life of the turbine rotor is periodically required during service. One of the most convenient techniques for that is the hardness method mainly due to its simplicity and nondestructive characteristics. In this research, six specimens with different aging times of turbine rotor steel were artificially prepared by an isothermal heat treatment at 630°C. The micro Vickers hardnesses of specimens were measured at room temperature. The relationships between the fracture properties and the hardness ratio were investigated. And also an indirect method to evaluate the residual life of degraded turbine rotor was proposed based on the micro Vickers hardness measurement.

1. 서 론

60년대 이후 산업현대화에 따라 건설된 많은 중화학 플랜트설비를 보유하고 있는 우리의 실정에 비추어 볼 때 30여년이 지난 지금 경년열화에 의한 재료의 손상을 평가하는 기술개발은 중요한 당면과제 중의 하나가 되었다¹⁾. 고온에서 사용되는 플랜트설비는 사용시간이 경과함에 따라 고온에서의 장시간 노출에

의하여 노화(aging), 취화(temper embrittlement) 및 조사취화(radiation embrittlement) 등의 손상을 받게 되어 요소를 구성하고 있는 재료의 기계적 성질이 점차적으로 저하하게 된다. 이 같은 결과는 재료 내의 탄화물의 조대화, 불순물의 입계편석과 같은 미세조직의 변화와 밀접한 관계가 있다.

한편 플랜트의 안전성 또는 수명평가를 위하여 현재 운용 중인 설비재료의 강도, 인성 및 잔여수명에

대한 정확한 평가가 요구되는데, 현장 접근 및 적용에서의 용이성을 고려해 보면 보다 비파괴적이고 간편한 실험방법이 요구된다. 현재 구조물의 손상평가에 대한 비파괴적 검출방법으로는 금속조직학, 전기저항법, 경도법 등이 연구 발표된바 있고 이중 일부는 실제 설비의 잔여 수명평가에 이용되고 있는 실정이다¹⁻⁴⁾. 이와같은 비파괴적 검출방법 중에서 경도법은 다른 방법에 비하여 측정 방법이 간편하여 그동안 많은 관심과 연구가 집중되어 왔다. 일 예로 Cr-Mo-V강의 경우 비커스 경도값과 LMP(Larson-Miller Parameter)와 같은 시간-온도 파라미터(Time Temperature Parameter)와의 관계를 이용하여 실제 사용조건에서의 크리프 수명을 가속시험에서 얻은 결과로부터 예측하는 기술이 연구된 바 있다. 그러나 대부분의 연구에서 사용된 경도값은 시험하중이 1 kgf 이상에서 측정된 것으로 일정 크기의 시험편을 채취하여 실험실에서 측정된 것이다. 따라서 실제 환경에서 설비 요소에 직접 작은 하중으로 경도를 측정할 수 있는 휴대용 시험기의 운영을 고려해 볼 때 미소 경도기(보통 1 kgf 이하의 시험하중) 응용의 필요성이 제기되고 이에 따른 경도값에 대한 시험하중 효과의 검토가 필요하다.

본 연구에서는 발전소 터빈 로터 재료로 많이 사용되고 있는 1Cr-1Mo-0.25V강을 사용하여 각각 다른 시간동안 인위적으로 경년열화 처리시켰다. 이 재료에 대하여 미소 비커스(micro-Vickers) 경도기를 이용하여 시험하중 50gf, 200gf, 500gf, 1kgf에서 각각 40회씩 경도를 측정하여 경년열화시간 및 시험하중이 미치는 미소 비커스 경도분포의 변화를 조사하였다. 또한 측정된 경도값과 파괴인성 및 피로수명의 상관관계를 구하였고, 크리프 잔여수명 예측을 위한 미소 비커스 경도의 응용 가능성을 검토하였다.

2. 실험

2.1 실험재료

본 실험에 사용한 재료는 터빈 로터용 소재로 널리 사용되는 1Cr-1Mo-0.25V강으로 고주파 진공용해법으로 제조되었다. 제조공정은 먼저 고주파 진공용해하여 강괴를 만들고 이것을 1200℃에서 15시간 동안 유지시킨후 단조비 5.4로 1000℃~1500℃에서 단조하였다. 그 후 1050℃에서 7시간 노르말라이징한 후 680℃에서 6시간 템퍼링하였다. 그 다음 이 강괴를 65×60×10(mm) 크기의 사각블록으로 절단하여 960℃에서 5시간 노르말라이징한 후 공랭하고 685℃에서 18시간 템퍼링하여 사용하였다. 이 재료의 화학적 조성 및 이와 근사한 조성을 지닌 ASTM(A470) 재료의 조성을 Table 1에 나타내었다. 실험재료의 성분 중 재료의 열화와 밀접한 관계가 있는 요소인 P와 S의 양이 ASTM 재료가 규정하고 있는 양보다 높게 나타나고 있는데 이는 실험재료를 1960~1970년대에 생산되었던 로터재의 조성으로 모사(simulate)하기 위하여 의도적으로 증가시킨 결과이며 현재의 진공용해 기술로는 이 양을 매우 작게 조절할 수 있다. 참고로 Table 2에 실험재료의 기계적 성질을 나타내었다.

2.2 시험편의 가속열화처리

터빈 로터강의 경우 실제 발전소에서 사용된 열화재를 사용시간 및 열화된 상태가 균일하게 종류별로 입수하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 실제 상황에서 열화된 재료와 유사한 미세조직을 갖는 시료를 인위적으로 실제사용 온도(538℃)보다 높고 재결정 온도보다 낮은 온도인 630℃에서 가속열화처리하여 사용하였다. 이때 가속 열화처리에 필요한 시간은 실제 사용 온도에서 철이 자기확산(self diffusion) 되는 양과 동일한 양이 가속열처리 온도에서 발생하도록 선택해야 하는데 철의 자기확산 이론에 근거하면 서로 다른 두 온도에서 같은 확산량을 갖게 되는 열화시간 간의 관계는 다음식과 같이 계산된다.

$$t_2 = t_1 e^{-\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} \quad (1)$$

여기서 절대온도 $T_1[K]=811.5K(538^\circ C)$, $T_2[K]=903.5K(630^\circ C)$, 이며, 시간 $t_1[h]=$ 온도 T_1 에서의 열화시간, $t_2[h]=$ 온도 T_2 에서의 열화시간, $R=$ 기체상수($8.31432 J/kmol/K$), $Q=$ 철의 자기 확산 활성화 에너지 ($272kJ/mol$)를 나타낸다. Table 3에서는 $538^\circ C$ 에서 사용한 것과 동일한 열화

조직을 얻기 위해서 본 연구에서 시행한 $630^\circ C$ 가속 열화처리에 필요한 시간을 나타낸 것이다. 한 예로 $538^\circ C$ 에서 약 10만 시간동안 사용된 재료의 열화조직을 모사하기 위하여 $630^\circ C$ 에서 1832시간 동안 유지하는 가속열화처리가 필요하다.

Table 1. Chemical composition (wt. %)

Element	C	Si	Mn	P	S	Sb
Composition	0.31	0.29	0.80	0.015	0.022	0.015
ASTM A470	0.25~0.35	0.15~0.35	1.00max	0.015max	0.018max	-

N	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Sn	As
0.013	0.21	0.39	1.19	1.42	0.25	0.004	0.015
-	-	0.75max	0.90~1.50	1.00~1.50	0.20~0.30	-	-

Table 2. Mechanical properties

Temp. ($^\circ C$)	Yield Stress (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)
24	665.2	823.1	18.8	59.4
538	533.5	580.6	22.7	55.5

Table 3. Comparison between aging time at $630^\circ C$ and aging time at $538^\circ C$ for equivalent microstructure

Time served at $538^\circ C$ (hr)	0	36850	73700	100760	200200
Aging time at $630^\circ C$ (hr)	0	670	1340	1832	3640

2.3 미세조직 검사

열화재의 열화시간에 따른 조직의 특징을 조사하기 위하여 미사용재와 각기 다른 시간동안 가속열화시킨 열화재의 표면을 4% 나이탈(질산+알코올) 용액으로 부식시켜 그 미세조직의 변화를 주사형 전자현미경(SEM)으로 관찰하였다. 또한 열화 시간에 따른 입계 부분의 화학조성의 변화를 조사하기 위하여 전자현미경에 부착된 EDS(energy dispersion spectrometer)을 사용하였다.

2.4 경도시험

경도시험을 위한 시험편은 미사용재와 가속열화처리한 재료로부터 $10 \times 10 \times 10$ (mm)크기의 정육면체를 가공하여 사용하였다. 시험편의 한면을 #100에서 #1200까지의 사포로 순차적으로 연마하였고 최종적으로 $0.3\mu m$ 크기의 알루미나 분말을 이용하여 습식으로 경면 제작하여 경도측정에 사용하였다. 경도측정에 사용한 경도 시험기는 일본 Mitutoyo사의 MVK-HO 미소 비커스(micro Vickers) 경도기이며, 본 연구에서 사용한 시험하중은 50gf, 200gf,

500gf, 1kgf이고 하중부하 시간은 15초로 하였다. 경도 측정은 상온(24℃)에서 각 시험편에 대하여 40회씩 측정하였으며 측정 위치는 압입자국 간의 상호간섭을 피하기 위하여 경도 측정위치가 서로 압입자국의 대각선 길이의 최소 4배 이상 떨어지도록 하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 열화에 따른 미세조직의 변화

열화시간에 따른 터빈 로터강의 미세조직의 변화를 관찰하기 위하여 미사용재와 열화재의 표면을 4% 나이탈용액으로 부식시킨 후 그 표면을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였다. Fig. 1(a)~(d)는 열화시간에 따른 미세조직의 변화모습을 나타내고 있다. Fig. 1(a)는 미사용재의 조직을 나타내는데 결정립계 부근에서의 석출물의 양이 열화재(Fig. 1(b)~(d))에서 나타나는 양에 비하여 많지 않고 열화재의 경우에도 열화시간의 증가에 따라 결정 입계에서의 석출물의 양이 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히 Fig. 1(d)는 장시간에 걸친 열화의 효과를 보기 위하여 특별히 630℃에서 5460 시간 동안 열화처리시킨 시험편의 조직을 나타내는데 입계에서의 석출물의 양이 매우 큼을 알 수 있다. 이와 같이 입계에서의 석출물 증가는 확산작용에 의한 물질의 이동 상태를 나타내는 것으로 열화시간 증가에 따른 경도 감소의 직접적인 원인이 되는 것으로 판단된다. 이러한 입계 주위에 발견되는 석출물의 화학성분을 주사전자현미경에 부착되어 있는 EDS(energy dispersion spectrometer)로 분석한 결과를 정리하여 Table 4에 나타내었다. 분석결과의 특징은 열화재의 입계부근에 미소원소 양이 미사용재에 비하여 월등히 크다는 사실과 열화된 재료의 결정입계에 다량의 Mo, Cr, Mn등이 발견되는 점이다. Mo, Cr, Mn등의 미량 원소들이 입계로 이동하여 Mo, Cr, Mn계 탄화물을 석출시킨 결과로 추정된다.

이와 같이 결정입계에서의 편석량은 사용시간에 따

라 점차 증가하게 되므로 고온에서 장시간 사용한 재료의 경우에는 연화작용에 의하여 경도는 물론 인장강도, 피로강도 및 파괴인성값과 같은 기계적 성질의 변화가 예상된다.

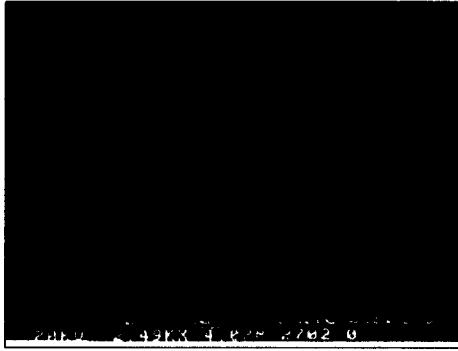
Table 4. Difference of chemical composition between virgin material and 1832 hours aged material at grain boundary(wt, %)

구 분	Virgin material	Degraded material
Si	0.53	0.57
P	0.22	0.50
Mo	0.84	3.16
V	0.42	1.10
Cr	0.99	9.90
Mn	0.88	5.25
Fe	95.15	78.78
Ni	0.96	0.75

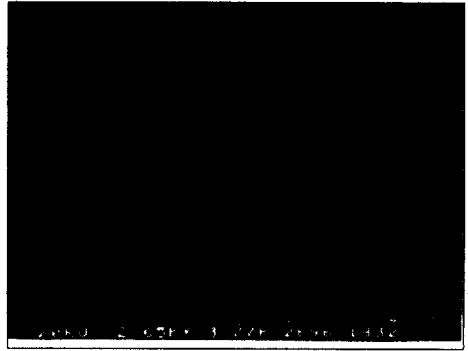
3.2 경년열화에 따른 경도값의 변화

Fig. 2는 시험하중 1kgf에서 가속열화시간이 각각 0, 1340, 3640 시간인 시험편에서 측정한 경도값의 확률밀도 분포를 나타낸 것이다. Histogram은 실험값을 구간별 확률밀도로 나타낸 것이며 실선으로 나타낸 곡선은 평균값과 표준편차로부터 계산된 정규분포(normal distribution) 곡선을 나타낸 것이다.

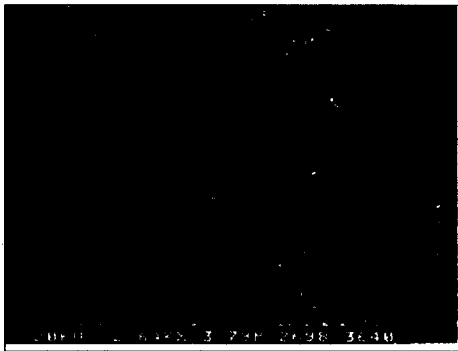
그림에서 알 수 있듯이 경도값들의 분포가 열화시간에 따른 확률분포의 변화에도 불구하고 정규분포곡선을 따르고 있음을 알 수 있다. 또한 이상의 결과는 그외의 시험하중의 경우에서도 같은 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 정규분포의 확률적 특성(characteristics)이 평균값과 표준편차에 의하여 결정되므로 이에 대한 고찰이 필요하다. Fig. 3은 가속열화시간에 따른 평균 경도값의 변화를 시험하중에 따라 나타낸 것이다. 열화시간이 증가함에 따라 경도값은 감소하는데 처음 1340 시간이 될 때까지는 경도값의 감소율이 크고 그 후의 감소율은 감소하여 일정한 값을 나타낸다. 또한 비록 같은 열화조



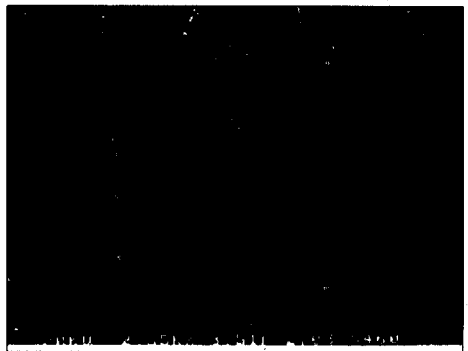
(a)



(b)

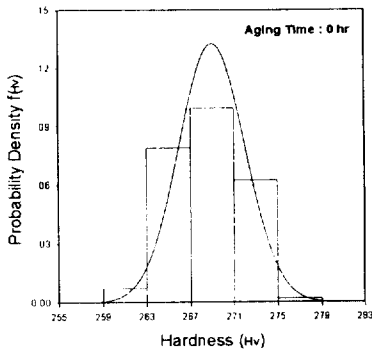


(c)

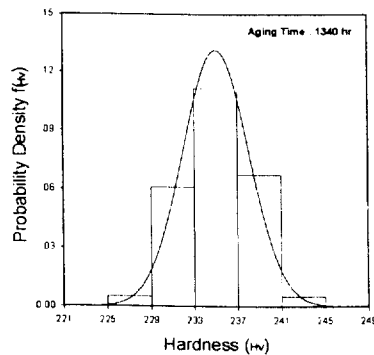


(d)

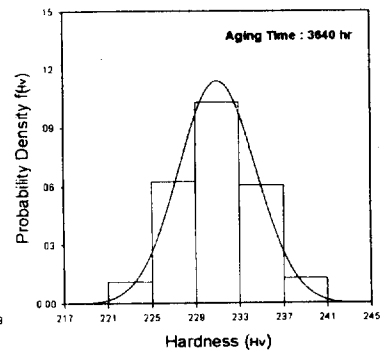
Fig. 1 Microstructure of 1Cr-1Mo-0.25V steel; (a) 0 hour aging, (b) 1832 hours aging, (c) 3640 hours aging, (d) 5460 hours aging



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. Probability density distribution of Vickers hardness ; (a) 0hr, (b) 1340hr, (c) 3640hr

건의 재료일지라도 시험하중에 따라 평균 경도값이 다르게 나타나고 있다. 작은 하중일수록 높은 경도값을 나타내고 있으며 시험하중이 크게 되면 그 영향은 작아지게 되어 500gf 이상에서는 하중의 차이에 의한 평균 경도값의 차이는 거의 사라지게 된다. 한편 Fig. 4는 가속열화시간에 따른 표준편차의 변화를 시험하중에 따라 나타낸 것이다. 가속열화시간에 따른 표준편차의 변화를 시험하중에 따라 나타낸 것이다. 가속열화시간에 따른 표준편차의 변화 폭은 50gf의 경우를 제외하면 평균값에 비하여 작게 나타나고 있다. 또한 50gf와 같이 매우 작은 시험하중에서는 비교적 큰 표준편차값을 나타내고 있다. 이는 시험하중이 작으면 시험편의 불균질에서 오는 오차가 커지고 압입자국이 작아지기 때문에 압입자국 측정시 발생하는 오차가 커지기 때문이다. 50gf와 같이 작은 시험하중에서 시험했을 때 가속열화 시간에 따라 발생할 것으로 예상되는 불균질화로 인한 경도값 분산(표준편차)의 변화를 살펴보면 열화시간에 따라 증가하다 감소하는 경향을 보이고 있다. 따라서 터빈 로터강의 경년열화 평가를 위하여 미소 경도법을 사용하는 경우에 시험하중의 크기에 따른 경도값의 변화와 함께 경도값의 분산 특성에 대한 주의가 요망된다.

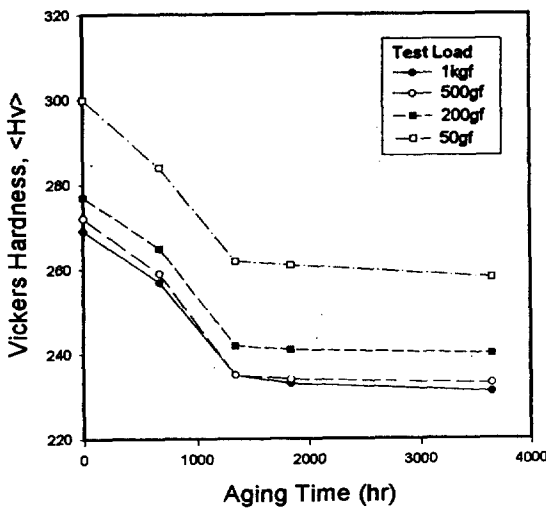


Fig. 3. Hardness variation with aging treatment time at 630°C

3.3 경도비와 파괴특성치의 관계

Fig. 5는 가속열화시간에 따른 평균 경도값의 변화를 미사용재의 평균 경도값, $\langle H_{V0} \rangle$, 으로 무차원화 (normalizing) 한 경도비, $\langle H_V \rangle / \langle H_{V0} \rangle$ 를 나타낸 것이다. 경도비로 나타낸 경우에는 Fig. 3에서와 같이 시험하중의 차이에 따른 경도값의 차이가 거의 사라지게 되어, 가속열화시간에 따라 경도비는 시험

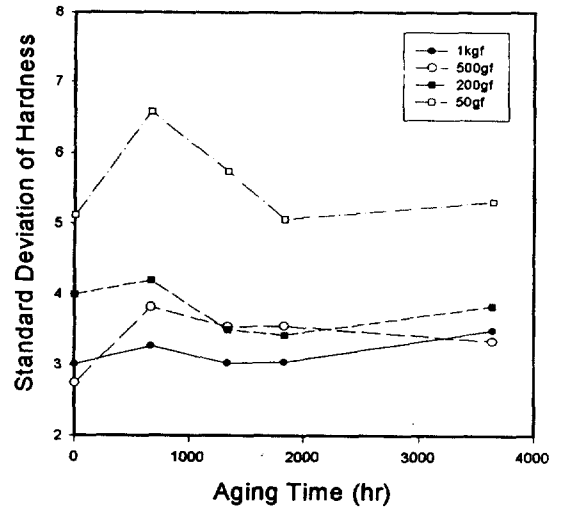


Fig. 4. Variation of hardness standard deviation with aging treatment time at 630°C

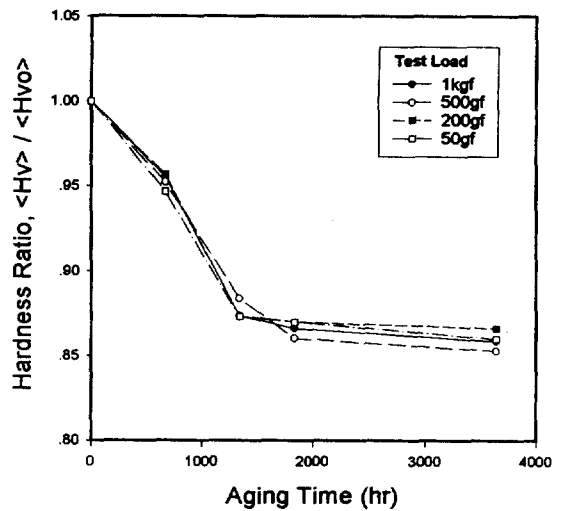


Fig. 5 Hardness ratio ($\langle H_V \rangle / \langle H_{V0} \rangle$) variation with aging treatment time at 630°C

하중에 관계 없이 단순 감소하는 한 곡선으로 나타나는 경향을 보이고 있다. 따라서 경도비에 대응한 재료의 기계적 성질 및 크리프 잔여 수명에 관한 데이터를 별도의 시험을 통하여 실험적으로 확보하면 경도측정을 통하여 간접적으로 이들에 대한 평가가 가능하게 된다. Fig. 6은 본 연구에서 사용한 터빈 로터강의 경도비와 실사용온도인 538℃에서의 파괴인성치와의 관계를 나타낸 것이고, Fig. 7은 경도비와

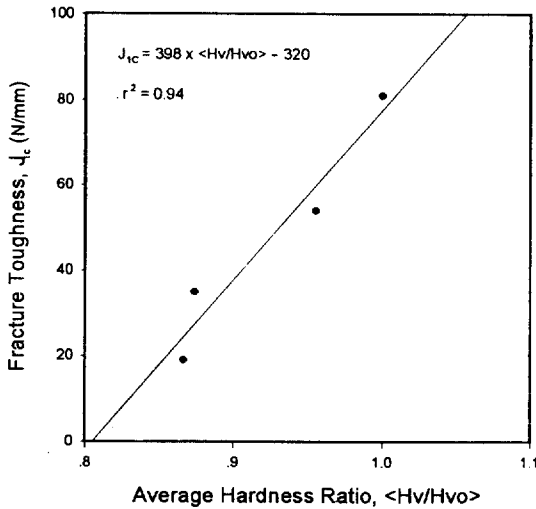


Fig. 6 Hardness ratio(<Hv>/<Hv0>) vs. fracture toughness

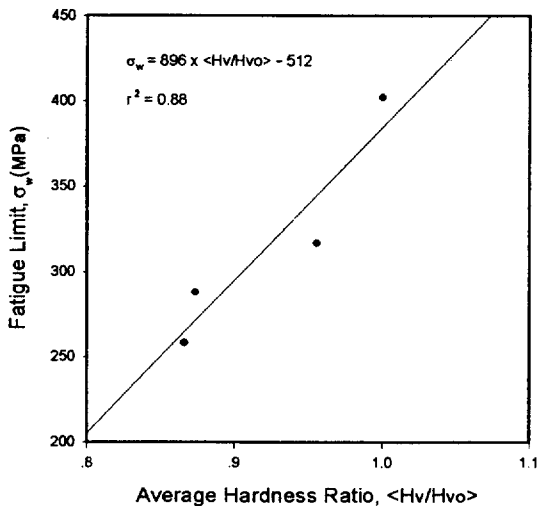


Fig. 7 Average hardness ratio(<Hv>/<Hv0>) vs. fatigue limit

상온에서의 피로한도⁵⁾와의 관계를 나타낸 것이다. 이 구간에서의 경도비 변화를 측정하면 비교적 정확한 파괴특성치의 예측이 가능한 것으로 판단된다.

3.4. 경도비에 의한 크리프 잔여 수명평가

Goto⁶⁾는 저응력 ($\sigma < 103$ MPa) 상태에서 Cr-Mo-V강의 고온 크리프(creep) 수명을 LMP (Larson-Miller Parameter)의 변형인 식 (2)와 같이 정의된 G 파라미터를 이용하여 예측 하였다.

$$G = \log T + \log(20 + \log t) \quad (2)$$

여기서 T는 재료가 사용되고 있는 환경의 절대 온도이고, t는 재료의 크리프 수명이다. 본 연구에서 사용한 다양한 기간 동안 가속열화시킨 재료에 대하여 실제 사용온도 보다 높은 고온에서 가속 크리프 시험을 행하여 잔여 수명을 구하면 식 (2)로부터 각 재료의 G 파라미터를 결정할 수 있다. 따라서 이 G 값과 본 연구에서 구한 경도비와의 관계를 작성하면 경도비 측정으로 열화재의 G 값의 추정이 가능하므로 식 (2)에 의하여 임의의 사용온도에서의 경년열화재의 잔여 수명을 계산하는 것이 가능하다.

4. 결 론

1Cr-1Mo-0.25V 강을 630℃에서 0, 670, 1340, 1832, 3640 시간 가속열화처리하여 열화도에 따른 미세조직의 변화와 경도값의 변화를 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 가속열화처리 시간이 증가함에 따라 평균 미소 비커스 경도값이 감소하는 연화곡선을 나타내었으며, 연화곡선은 시험하중이 작을수록 높게 나타났다.
2. 열화재의 평균 경도값을 미사용재의 평균 경도값으로 무차원화한 경도비를 가속열화시간에 따라 나타낸 연화곡선은 평균 경도값으로 표시했을 경우와는 다르게 시험하중의 차이에도 불구하고 거의 동일한 연화곡선을 따라 감소하여 일정한 값에 도달하였다.

3. 경도비 측정에 의하여 사용 중인 터빈 로터의 파괴특정치 및 크리프 잔여수명을 간접적으로 평가하는 것이 가능한 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국표준과학연구원 방재기술연구센터에서 주관하는 방재기술사업의 일환으로 수행된 것입니다.

참고문헌

- [1] 문한규, 이해무, 윤기봉, 남승훈, “고온사용설비의 비파괴 진단기술 개발”, 한국표준과학연구원, KRISS-92-063-IR, 1993.
[2] 이해무, 윤기봉, 남승훈, 소호철, “전기저항법에 의한 크리프 손상의 비파괴적 검출,” 열처리공학

회지, Vol. 7, No. 3, pp. 155-159, 1994.

- [3] Abdel-Latif, A.M., Corbett, J.M., and Taplin, D.M.R., “Analysis of carbides formed during accelerated aging of 2.25Cr-1Mo steel, Metal Science, Vol. 16, pp. 90-96, 1982.
[4] 한상인, 윤기봉, 정세희, “입계부식법에 의한 사용중인 화력발전소 요소의 잔여수명평가”, 대한기계학회 논문집(A), Vol. 21, No. 1, pp. 22-31, 1997.
[5] 서창민, 허정훈, 남승훈, “시효열화시킨 1Cr-1Mo-0.25V강의 고온하의 회전굽힘 피로강도에 관한 연구”, 대한기계학회 논문집(A), Vol. 20, No. 9, pp. 2819-2832, 1996.
[6] 後藤徹, 材料, Vol. 32, No. 356, pp.563-569, 1983.