등온열처리법에 의해 모의 열화된 1Cr-1Mo-0.25V 터빈케이싱 강의 재질열화 평가

마영화 · 김도형 · 윤기봉†
중앙대학교 기계공학부
(2009. 11. 24. 접수 / 2010. 2. 3. 채택)

Evaluation of Material Degradation of 1Cr-1Mo-0.25V Turbine Casing Steel Aged Artificially by Isothermal Heat Treatment

Young-Wha Ma · Do-Hyung Kim · Kee-Bong Yoon†
Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University
(Received November 24, 2009 / Accepted February 3, 2010)

Abstract : Material degradation should be considered to assess integrity and residual life of high temperature equipments. However, the property data reflecting degradation are not sufficient for practical use. In this study, mechanical properties of 1Cr-1Mo-0.25V casting steel generally used for turbine casing were measured and variation of microstructure was observed. Degradation was simulated by isothermal heat treatment.
Key Words : material degradation, isothermal heat treatment, ageing, casting steel, turbine casing

1. 서 론

고온에서 사용되는 설비요소 재료는 금속학적 변화가 발생한다. 금속학적 변화들은 재료를 연화 또는 취화시킴으로써 제작 당시에 재료가 갖고 있던 강도 및 인성 값 등의 기계적 물성 값을 감소시킨다[1-3]. 이러한 현상을 고온 재질열화(material degradation)라 한다. 재질열화에 따른 기계적 물성 값들의 감소는 설비요소의 잔여수명 단축, 안전성 및 구조건전성(structural integrity) 문제를 야기 시킨다.

고온 설비요소에 사용되는 CrMo계 강은 제조과정에서는 템퍼 취화에 대한 감수성이 비교적 적으나 장시간 사용할 경우 취화가 문제시 된다[1,2]. 취화는 가동 중인 설비요소에서의 갑작스런 취성파괴를 발생시킨다[2]. 고온 설비요소의 갑작스런 파괴를 방지하기 위해서는 제조 당시의 재료물성 값이 아닌 열화된 재료의 물성값을 사용하여 수명을 평가하여야 한다. 하지만, 사용 중인 설비요소에서 표준형 시험편 제작에 필요한 재료를 채취하여 열화된 재료물성을 측정하는 것은 현실적으로 어려움이 있다. 이러한 이유로 사용 중인 실기 부재의 재질열화 물성을 간접적으로 평가할 수 있는 비파괴평가 기법들이 개발 · 연구 되고 있다[4,5]. 하지만 비파괴평가를 통해 얻어진 결과들은 상당히 보수적인 수명평가 결과를 제시하는 경향이 있다. 따라서 고온 설비요소의 정확한 수명평가 및 건전성 확보를 위해서는 직접적인 재질열화 물성 측정을 통한 데이터 확보가 필요하다.

사용 중인 고온 설비요소의 운전시간에 따른 재질열화 정도를 인위적으로 모사하기 위해 등온열처리법(isothermal heat treatment)이 사용되고 있다[1,3,6-8]. 이 열처리법은 재료를 사용온도 보다 높은 일정한 온도에 노출시킴으로써 합금성분의 확산속도를 빠르게 하여 석출물 형성을 가속화시킬 수 있다. 등온열처리법을 사용하면 고온에서 장시간 운전한 설비요소 재료의 열화정도를 짧은 시간 안에 근사하게 모사할 수 있다.

본 논문에서는 고온 설비요소의 잔여수명 및 건전성 평가를 위해 필요한 재질열화 물성을 제공하고자 한다. 연구 대상 재료는 터빈케이싱용 재료로 많이 사용되고 있는 1Cr-1Mo-0.25V 주조강이다. 이 재료에 대해 등온열처리법을 사용하여 열화 정도

† To whom correspondence should be addressed.
kbyoon@cau.ac.kr

가 다른 여러 단계의 모의 열화재를 제작한다. 제작된 열화재에 대해 금속학적 미세구조 변화 관찰, 경도측정, 인장시험, 충격시험을 수행한다.

2. 시험재 및 실험방법

2.1. 시험재 제작

본 연구에 사용된 터빈 케이싱용 1Cr-1Mo-0.25V 주조강의 화학성분 및 화학조성을 Table 1에 나타내었다. 연구대상 재료에 대해 고온에서 연화에 의한 강도열화와 템퍼취화에 의한 인성열화를 모사하기 위해 등온열처리법을 사용하였다. 이 열처리법을 사용하여 증기터빈의 사용온도 538℃ 보다 높은 온도인 630℃에서 원재를 포함하여 7단계의 열화 정도가 다른 열화재들을 준비하였다. 모의 열화재 제작을 위한 가속열화 조건을 Table 2에 정리하였다. 가속열화 조건은 식(1)을 사용하여 결정하였다[8].

$$t_2 = t_1 \exp\left[\frac{Q}{R}\left(\frac{1}{T_2}-\frac{1}{T_1}\right)\right] \quad (1)$$

여기서, t_1은 실제 사용시간, t_2는 가속열화 열처리 시간, T_1은 사용온도, T_2는 가속열화 열처리 온도, Q는 활성화 에너지로 122853J, R은 기체상수이며 8.314J/mol · K이다.

2.2. 실험 방법

재질열화 정도가 다른 모의 열화재들에 대해 광학 현미경을 사용하여 금속조직을 관찰하였다. 시험편은 표면을 #1200까지 습식 연마한 후, #6μm, #1μm 순서로 다이아몬드 연마제를 사용하여 연마하였다. 연마된 시험편들에 대해 3% 나이탈(알콜 97% + 질산 3%)을 사용하여 5~10초 정도 부식시킨 후 미세조직의 변화를 관찰하였다.

Table 1. Chemical composition of 1Cr-1Mo-0.25V casting steel (ASTM A356 Grade 9) (wt %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
0.168	0.37	0.65	0.02	0.011	1.11	1.91	0.23

Table 2. Conditions of isothermal ageing heat treatment

Actual Ageing Time (t_1)	Year	0.17	0.5	1	3.15	5	10
	Hour	1440	4320	8760	27594	43800	87600
Accelerated Ageing Time (t_2)	Hour	26	78	159	500	794	1587

모의 열화재들에 대한 재질열화 물성을 측정하기 위해 로크웰 경도시험, 인장시험, 충격시험을 수행하였다. 경도는 측정오차를 최소화하기 위해 금속표면을 1μm 알루미나 분말을 사용하여 경면 연마한 후, 150kgf의 하중을 4초 동안 유지하여 측정하였다. 측정점은 10개소로 하였다. 측정된 경도값들은 최대 및 최소 값을 제외한 8개소의 값을 평균하여 사용하였다. 인장시험은 ASTM E8M에 준하여 변위제어 방식으로 수행하였다. 시험 횟수는 각각의 열화조건 마다 2회씩 반복 수행하였다. 충격시험은 ASTM E23에 준하여 샤르피 충격시험법으로 수행하였다. 열화 조건별 실험 횟수는 12~13회 이었고, 실험온도 범위는 -197~220℃이었다. 상온을 기준으로 저온 충격시험은 메탄올과 액체질소(-197℃), 고온은 실리콘 오일(220℃)을 용매로 사용하였다.

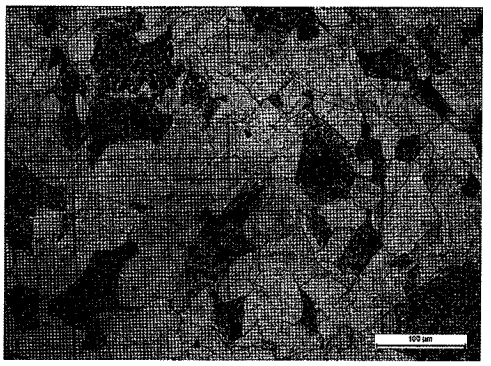
3. 실험결과 및 고찰

3.1. 미세조직 관찰

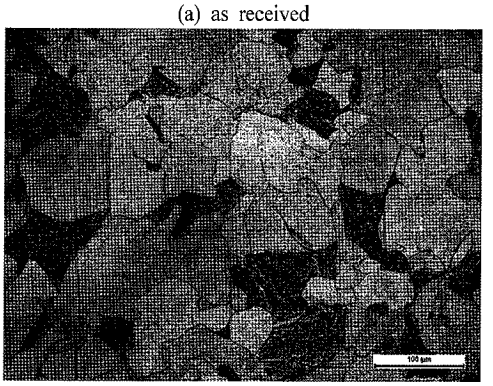
1Cr-1Mo-0.25V 주조강에 대해 열화시간에 따른 금속조직의 변화를 관찰하였다. 관찰 결과를 Fig. 1에 보였다. 원재에 대한 조직 관찰결과인 Fig. 1(a)에서 페라이트(ferrite)와 펄라이트(pearlite) 조직이 명확히 관찰되었다. 다만, 주조시 발생한 미세조직의 불균일과 페라이트 조직 내에 분포하고 있는 석출물들이 관찰된다. 실제 운전시간 0.17년(2개월)에 상응하는 모의 열화재 조직관찰 결과인 Fig. 1(b)에서는 이러한 불안정한 미세조직 현상이 관찰되지 않는다. 이 현상을 제외하고는 원재와 차이가 없다. 하지만, 운전시간 1년을 모사한 Fig. 1(b)부터는 금속조직의 변화가 뚜렷이 관찰되었다. 즉, 펄라이트 조직 내에 시멘타이트(Fe_3C) 상의 탄소가 확산되면서 페라이트화 되어가는 것이 관찰되었다. 이로부터 고온에서 재질열화가 발생하면, 펄라이트 조직이 페라이트화 된다는 것을 확인할 수 있다. 이 금속학적 변화는 정성적으로 재질열화가 진행되고 있다는 것을 설명할 수 있는 근거이다. 왜냐하면, 위에서 설명한 금속학적 변화는 재료의 강도 저하를 야기하는 주요 요인 중 하나이기 때문이다.

3.2. 경도측정 결과

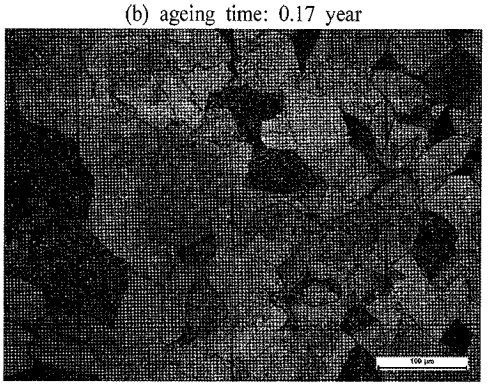
열화시간에 따른 경도측정 결과를 Table 3에 정리하였고, Fig. 2에 나타내었다. 경도값은 열화 초기(0.17년)에 감소하였다가 다시 증가하는 경향을 보



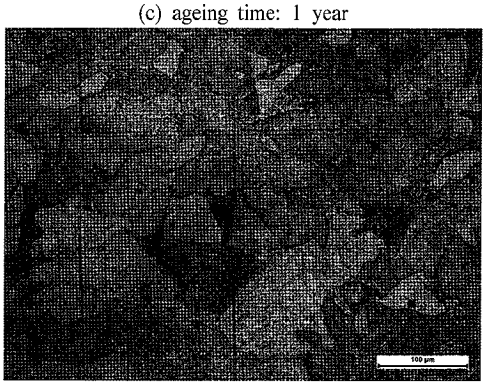
(a) as received



(b) ageing time: 0.17 year



(c) ageing time: 1 year



(d) ageing time: 10 year

Fig. 1. Microstructures of 1Cr–1Mo–0.25V casting steel with ageing time.

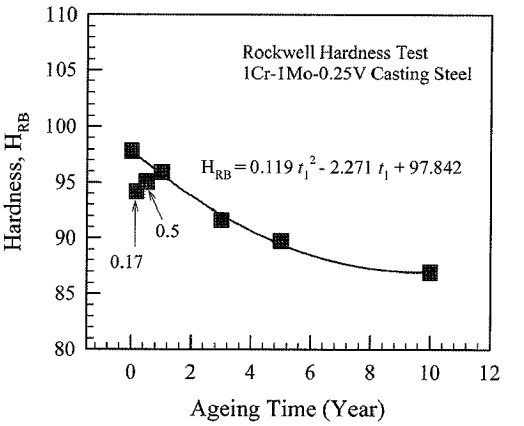


Fig. 2. Variation of hardness of 1Cr–1Mo–0.25V casting steel with ageing time.

였다. 이는 앞 절에서 설명하였듯이, 주조시 발생한 잔류응력이나 불안정한 조직이 열화 초기에 안정화 되면서 나타나는 현상으로 볼 수 있다. 하지만 1년 이후부터에는 더 이상 경도값이 증가하지 않고 계속해서 감소하였다. 10년 재질열화 후 경도값은 약 10% 정도 감소하였다. 열화시간에 따른 경도값의 변화를 회귀 분석하여 다음의 관계식을 얻었다. 이때 열화 초기(0.17년, 0.5년) 경도값은 회귀 분석 시 제외하였다. 이는 재질열화가 아닌 주조조직의 안정화 단계에서 발생한 결과이기 때문이다.

$$H_{RB} = 0.119t_1^2 - 2.271t_1 + 97.842 \quad (2)$$

여기서 t_1은 식 (1)에 주어진 실제 사용시간이다.

3.3. 인장시험 결과

인장실험 결과로부터 측정된 1Cr-1Mo-0.25V 주조강의 열화시간에 따른 항복강도 및 인장강도 값을 Table 3에 정리하였다. 그리고 강도값들의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 강도값들은 전체적으로 열화시간이 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 보였다. 하지만 열화초기에는 경도값과 마찬가지로 급격히 감소하였다가 다시 상승하였다. 이 결과를 통해 주조로 제작된 고온 설비요소는 운전 초기에 손상 또는 파손 위험에 노출되어 있다는 것을 알 수 있다. 최대 인장강도는 10년 후 약 25%의 강도 저하를 보였고, 항복강도는 약 40%의 강도 저하 경향을 보였다. Fig. 2에 보인 경도측정 결과와 마찬가지로 열화 초기(0.17년, 0.5년) 데이터를 제외한 나머지 데이터를 회귀분석 하였다. 그리고 다음과 같은 열화시간에 따른 최대 인장강도(σ_{UTS})와 항복강

Table 3. Material degradation properties of 1Cr-1Mo-0.25V casting steel

Ageing Time (Year)	0	0.17	0.5	1	3	5	10
HRB	97.8	94.2	95.1	95.9	91.6	89.8	87.0
σ_{ys} (MPa)	580	430	495	480	435	400	345
σ_{UTS} (MPa)	788	680	725	704	644	620	587
DBTT (℃)	135	126	140	122	109	110	105

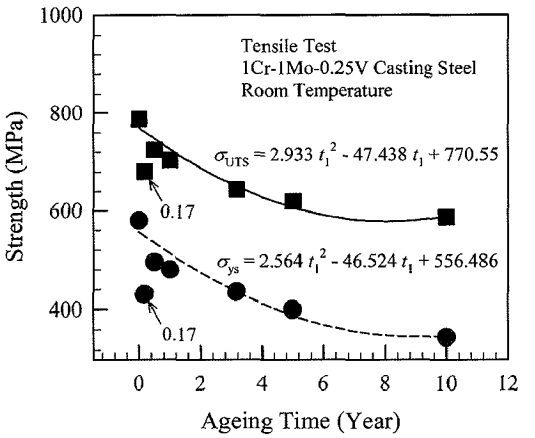


Fig. 3. Variation of strength values of 1Cr-1Mo-0.25V casting steel with ageing time.

도(σ_{ys}) 변화 예측식들을 얻었다.

$$\sigma_{UTS} = 2.933t_1^2 - 47.438t_1 + 770.55 \quad (3)$$

$$\sigma_{ys} = 2.564t_1^2 - 46.524t_1 + 556.486 \quad (3)$$

국내 화력발전 플랜트 고온설비들은 70% 이상이 10년 이상의 운전연수를 가지고 있다. 열화시간에 따른 강도평가 결과를 통해 볼 때, 1Cr-1Mo- 0.25V 주조강으로 제작된 이들 고온 설비요소들(특히, 터빈 케이싱)의 경우, 40% 정도의 항복강도 저하가 발생하였을 것으로 추정할 수 있다. 따라서 고온 설비요소들의 잔여수명을 평가할 때 안전계수를 고려하고는 있으나, 보다 신뢰할 만한 잔여수명 및 건전성 평가 결과를 얻기 위해서는 반드시 설비요소 재료의 재질열화 물성값을 사용해야 할 것으로 사료된다.

3.4. 충격시험 결과

충격실험 결과 얻은 충격흡수 에너지값 결과들을 식 (5)에 주어진 4-parameter model로 가정한 쌍곡선 정접 함수(hyperbolic tangent function)를 사용하여 회귀분석 하였다[9].

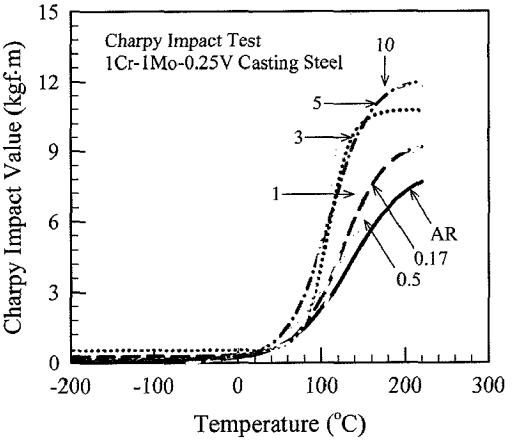


Fig. 4. Results of Charpy impact test of 1Cr-1Mo-0.25V casting steel with ageing time.

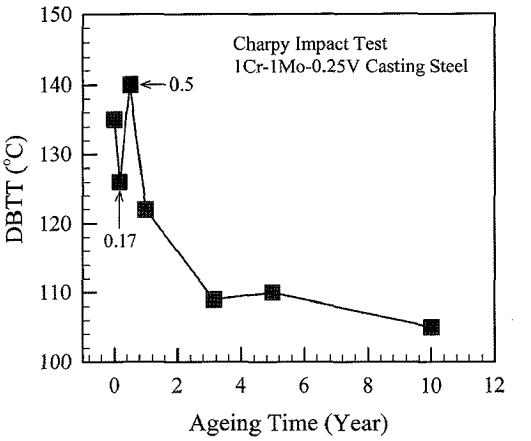


Fig. 5. Variation of DBTT of 1Cr-1Mo-0.25V casting steel with ageing time.

$$CVN = A + B\tanh\left(\frac{T - T_0}{C}\right) \quad (5)$$

여기서, A, B, T_0, C는 회귀 상수(fitting constants)이며, DBTT는 T_0에 의해 정의된다. 회귀분석 결과 얻은 열화시간에 따른 CVN(Charpy V-notch) 에너지 곡선 결과를 Fig. 4에 보였다. 일반적으로 재질열화가 발생하면 연취성천이온도(ductile-brittle transition temperature, DBTT)는 상승한다. 또한, 충격시험에 의한 CVN 에너지 곡선은 열화된 재질의 경우 신재에 비해 온도측 상에서 우측으로 이동하게 된다. 하지만 Fig. 4에 보인 1Cr-1Mo-0.25V 주조강은 CVN 에너지 곡선이 왼쪽으로 이동하였으며, DBTT도 오히려 감소하였다. DBTT의 감소는 Fig. 5를 통해 명확히 확인할 수 있다. Fig. 5에서 DBTT 변화 경향은 경도 및 강도 값의 경향과 유

사하였다. 얻어진 DBTT를 Table 3에 정리하였다. 충격시험 결과로부터 1Cr-1Mo-0.25V 주조강은 열화가 진행됨에 따라 인성이 오히려 증가한다는 것을 알 수 있다. 이는 이 재료로 제작된 고온 설비요소의 경우 균열이 존재하더라도 설비를 운전하는 중에도 수명평가를 위한 시간적 여유가 있다는 것을 의미한다. 또한, 수명이 거의 소진 되었다 하더라도 보수 또는 교체 시기를 결정할 때 시간적 여유가 충분하다는 것을 보여준다.

4. 결 론

본 논문에서는 등온열처리법을 통해 모의 열화된 1Cr-1Mo-0.25V 터빈케이싱 주조강에 대해 고온 재질열화 물성측정 연구를 수행하였다. 이는 고온 설비요소의 잔여수명 및 건전성 평가 시 재질열화를 반영할 수 있는 열화물성 데이터를 제공하기 위함이다. 결과로부터 다음과 같은 결론들을 얻었다.

1) 1Cr-1Mo-0.25V 주조강은 열화 초기에 강도 및 인성의 불안정한 상태가 관찰되었다. 이는 주조시 발생한 잔류응력이나 불안정한 조직 및 석출물이 안정화되면서 나타나는 현상으로 사료된다.

2) 열화시간이 증가함에 따라 경도, 강도, 연취성 천이온도가 모두 감소하는 경향을 보였다. 연취성 천이온도의 감소는 인성의 증가를 의미한다. 강도 감소와 인성 증가의 원인은 펄라이트의 페라이트화에 기인한 것으로 판단된다.

3) 1Cr-1Mo-0.25V 주조강은 고온 재질열화가 발생함에 따라 인성이 증가하는 경향을 보이므로 이 재료로 제작된 고온 설비요소는 균열이 존재하거나 설계수명이 거의 소진되었다 하더라도 수명평가, 보수 및 교체의 시간적 여유가 충분할 것으로 사료된다.

감사의 글 : 본 논문은 전력기반기금 지원에 의한 전력산업연구개발사업과제의 위탁과제 (R-2004-0-014, "터빈 잔여수명 평가에 고온 재질 열화도를 반영하는 방법에 대한 연구") 연구비 및 2007년도 중앙대학교 박사후연수과정 지원사업 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1) 윤기봉, "터빈 잔여수명 평가에 고온 재질 열화도를 반영하는 방법에 대한 연구", 한전 전력연구원 보고서, R-2004-0-014, 2006.
2) 윤기봉, "국내 화력발전설비 수명해석 연구", CAU-RIPE-YKB-9601, 1996.
3) 남승훈, 박종화, 김엄기, "소형 샤르피 충격시험편을 이용한 1Cr-1Mo-0.25V강의 인성 열화도 평가", 대한기계학회논문집 A권, 제23권, 제12호, pp. 2303～2308, 1999.
4) R. Viswanathan and S. Gehl, "A Method for Estimation of the Fracture Toughness of Cr-Mo-V Rotor Steel Based on composition", Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 113, No. 2, pp. 263～270. 1991.
5) 남승훈, 유광민, 김엄기, "전기비저항을 이용한 1Cr-1Mo-0.25V강의 인성열화도 평가", 비파괴검사학회지, 제18권, 제1호, pp. 10～16, 1998.
6) 마영화, 이진상, 윤기봉, "고온 재질 열화도를 반영한 CrMoV 터빈로터의 재료 위험도 및 잔여수명평가", 한국안전학회지, 제21권, 제4호, pp. 33～41, 2006.
7) 윤기봉, 윤석호, 김승태, 서창민, 남승훈, "시효열화시킨 1Cr-1Mo-0.25V 강의 고온에서의 JIC 및 Tmat의 평가", 대한기계학회논문집, 제18권, 제11호, pp. 2860～2870, 1994.
8) A.M. Abdel-Latif, J.M. Corbett, D. Sidey and D.M.R. Taplin, "Effects of Microstructural Degradation on Creep Life Prediction of 2.25Cr-1Mo Steel", Advances in Fracture Research (Fracture 81), Vol. 4, pp. 1613～1620, 1982.
9) William Oldfield, "Fitting Curves to Toughness Data", Journal of Testing and Evaluation, Vol. 7, No. 6, pp. 326～333, 1979.