

전기저항법에 의한 크리프 손상의 비파괴적 검출

이 해 무 · 윤 기 봉 · 남 승 훈 · 소 철 호*

한국표준과학연구원 소재특성평가센터 *동신공과대학

Non-destructive Detection of Creep Damage Based on Electric Resistance Technique

H. M. Lee, K. B. Yoon, S. H. Nahm and C. H. Soh*

Materials Evaluation Center, Korea Research Institute of Standards and Science

*Dept. of Physics, DongShin Engineering College

ABSTRACT

As Cr-Mo-V steels have excellent mechanical and creep properties at elevated temperatures, they are extensively used in power plants. However, the steam turbine components are supposed to have suffered material degradation during long-term service at elevated temperatures. Many efforts have been made to assess the safety and residual life of these components by means of non-destructive methods such as plastic replication, hardness and electric resistance techniques. Recently, a parameter correlating hardness changes during long-term heating to those during creep was introduced and it was named 'G parameter'.

The electric resistivity as well as hardness are affected by damage accumulation, but there have been no efforts to correlate G parameter to resistivity changes. In this study, relationship between G parameter and changes in electric resistivity was investigated using artificially aged Cr-Mo-V steel. It is well understood that G parameter can be applied to electric resistance technique.

1. 서 론

재료가 고온에 장시간 노출되면 노출 시간이 경과됨에 따라 재료의 미세조직이 변화하여 강도나 연성이 저하되는데 특히 고온에서 부하가 걸려 있는 경우에는 조직 변화가 가속되어 더욱 그러하며 이러한 현상을 경년열화라고 부른다. 경년열화는 화력발전 설비나 화학 플랜트 설비에서 많이 나타나는데 경년열화에 의한 재료의 손상을 비파괴적으로 검출, 평가하는 방법의 개발은 설비의 안전성

평가나 경제적인 운용을 위해서도 매우 중요하다. 손상의 비파괴적 검출방법에는 금속조직법^{1, 2)}, 경도법^{3, 4)}, 전기저항법^{5, 6)} 등이 보고되고 있다. 이 중 일부는 현장에서 설비의 잔여 수명 평가에 많이 이용되고 있으며 현장 적용시에는 손상도의 추정 정확도를 높이기 위하여 여러 방법을 동시에 사용하여 종합 평가하게 된다.

이와 같은 비파괴적 손상 검출 방법 중에서 경도법은 다른 방법에 비하여 측정 방법이 간단하여 그동안 많은 관심과 연구가 집중되어 왔다. 일 예

로 Goto 등³⁾은 터빈의 로터 재료로 많이 사용되는 Cr-Mo-V강의 경우, 조직이 미세하기 때문에 장시간 가열에 의한 조직 변화와 크리프에 의한 조직 변화를, 조직 자체를 관찰함으로써 식별하는 것은 매우 힘들지만 경도 변화를 측정하면 식별이 가능하다고 보고하였다. 즉 LMP(Lason-Miller Parameter)를 사용하여 식 (1)과 같은 G라는 새로운 변수를 정의하고 G와 경도비(원재의 경도에 대한 사용재의 경도)의 상관 관계를 이용하여 손상에 미치는 온도(T) 및 시간(t)에 의한 영향과 응력(σ)에 의한 영향을 식 (2)와 같이 구분하였다.

$$G = \log T + \log(20 + \log t) \quad (1)$$

$$G' = G + 1.94 \times 10^{-4} (\sigma - 103) \quad (\sigma \geq 103 \text{ MPa의 경우}) \quad (2-1)$$

$$G' = G \quad (\sigma < 103 \text{ MPa의 경우}) \quad (2-2)$$

한편 재료의 전기저항은 탄화물의 석출 및 기지(matrix)내의 고용 원소의 감소, 전위 밀도의 변화, 기공(void) 생성에 의한 밀도의 감소 등에 의하여 변화하기 때문에 Cr-Mo-V강의 크리프 손상을 평가하는 방법의 하나로서 전기저항법이 유용하다고 보고⁴⁾되었다. 그러나 경도법에서와 같이 크리프 손상에 미치는 온도·시간에 의한 영향과 응력에 의한 영향을 구분하는 방법은 아직 제안된 바 없다.

따라서 본 연구에서는 Cr-Mo-V강을 일반 사용 온도보다는 높고 뜨임온도보다는 낮은 630°C의 온도에서 열처리 함으로써 고온 장기 사용재의 미세조직을 시뮬레이션⁵⁾하여, 열처리 효과가 경도와 전기비저항

에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 경도법과 마찬가지로 전기저항법에서도 크리프 손상에 미치는 온도·시간의 영향과 응력에 의한 영향을 구분할 수 있는지 조사하여 고온 사용 설비의 잔여 수명 예측 및 설비의 안전성 평가에의 사용 가능성에 대하여 검토하였다.

2. 실험방법

시험에 사용된 강재의 제조 공정은 다음과 같다.

먼저 고주파 진공 용해하여 강괴를 만들어 이를 1,200°C에서 15시간 동안 soaking 열처리를 한 뒤 단조비 5.4로 1,000~1,200°C에서 단조하였다. 이를 1,050°C에서 7시간 불림한 후 680°C에서 6시간 뜨임하여 70×300×300(mm), 2개와 70×300×180(mm), 1개로 절단하였다. 이를 다시 960°C에서 5시간 불림하여 강재 공냉시킨 후 685°C에서 18시간 뜨임하여 공냉시킨 것을 공시재로 사용하였다. 이 강재의 화학조성을 Table 1에, 인장시험 및 Vickers 경도시험(5 kgf의 하중 사용) 결과를 Table 2에 나타내었다.

이 강재를 25×50×10(mm) 크기의 사각 블록으로 절단한 다음 630°C에서 각각 227, 453, 682, 933, 1142, 1382, 1598 및 1820 시간 유지한 후 공냉하여 미세조직이 다른 시험편들을 준비하였으며, 표면 다듬기를 한 뒤 5kgf로 Vickers 경도를 측정하였다. 전기비저항값은 사각 블록으로부터 다시 길이 50mm, 직경 8mm의 원통형 시험편을 가공하여, 직류전류를 사용한 4단자 전위차법으로 항온조에서 온도를 변화(1.0, 33.7, 53.9, 73.9, 93.9°C)시키면서 측정하였다.

Table 1. Chemical composition of Cr-Mo-V steel. (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Sol Al
0.31	0.29	0.80	0.015	0.022	0.21	0.39	1.19	1.42	0.25	0.006

Table 2. Mechanical properties Cr-Mo-V steel. (Gage length : 20mm)

YS(MPa)	UTS(MPa)	Elongation(%)	RA(%)	Vickers Hardness(5kgf)
686	843	18	49	264

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 1에 열처리 시간에 따른 Vickers 경도값의 변화를 나타내었다. 열처리 시간이 증가함에 따라 경도값은 감소하였는데 열처리 시간이 682시간이 될 때까지는 경도값의 변화율이 크지만 그 이후의 변화율은 감소하였다. 일반적으로 Cr-Mo-V강을 450~550℃에서 열처리 하였을 경우에는 가열 시간에 따른 경도 변화가 거의 없으나 600℃ 이상에서는 경도가 크게 변화하는 것으로 알려져 있다.³⁾

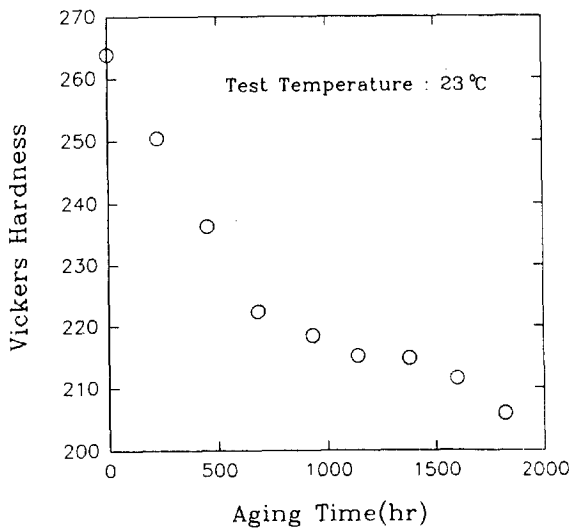


Fig. 1. Vickers hardness as a function of aging time (thermally aged at 630°C).

Fig. 2는 열처리된 시험편의 전기비저항값을 시험 온도에 대하여 도시한 것으로서 시험 온도에 따른 전기비저항의 증가량은 열처리 시간에 무관하게 일정하다. 이를 토대로 각 열처리 시험편에 대한 상온(23℃)에서의 비저항값을 계산하여 도시하면 Fig. 3과 같으며 열처리 시간에 따른 전기비저항의 변화 경향은 Fig. 1의 경도시험 결과와 유사하게 나타난다. 따라서 잔여 수명 예측을 위하여 경도비를 이용한 연화곡선 (softening curve)을 작성³⁾하였듯이 전기비저항을 이용하여서도 연화곡선을 작성할 수 있으리라고 추정된다. 따라서 X축은 G변수로, Y축은 원재에 대한 열처리 시험편의 전기비저항 비로 하여, 본 연구에서 얻은 결과와 문헌에 보고된 결과³⁾를 재도시하면 Fig. 4와

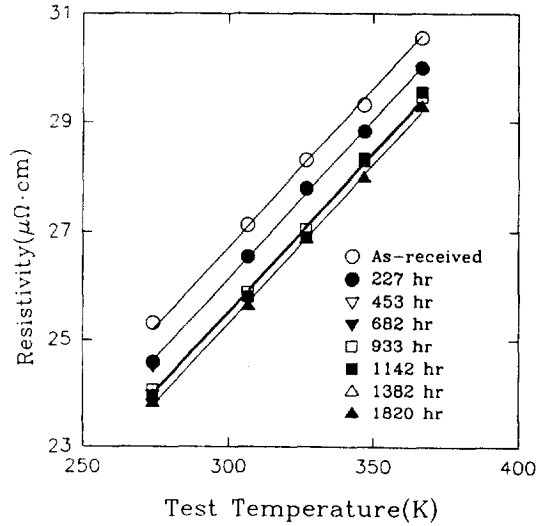


Fig. 2. Test temperature dependence of electric resistivity (thermally aged at 630°C).

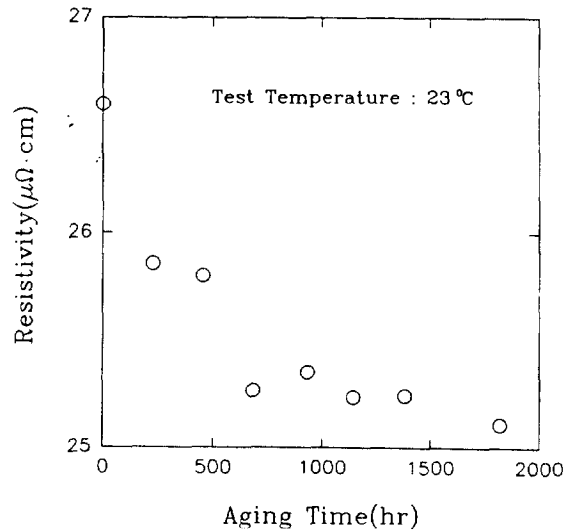


Fig. 3. Electric resistivity as a function of aging time (thermally aged at 630°C).

같이 나타난다. 즉 무부하 가열재의 경우 G변수와 전기비저항 비 사이에도 경도의 경우와 동일한 상관관계가 있음을 알 수 있다. Fig. 4에서 Y축을 원재의 전기비저항으로 표준화(normalizing)한 것은 뜨임 조건에 따라 원재의 전기비저항이 영향을 받게 되기 때문이다.

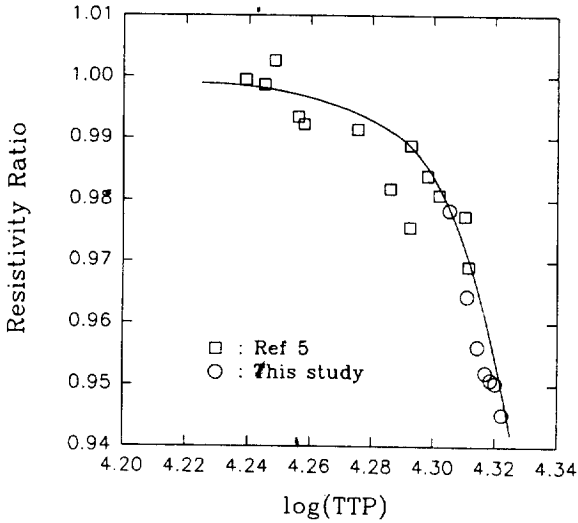


Fig. 4. Relationship between resistivity ratio and G'-pa parameter.

가열재가 부하를 받는 경우, 즉 크리프 상태에서의 재질 변화를 살펴보기 위하여 크리프 시험에 의해 파단된 재료 및 크리프 파단 전에 시험을 중단한 재료에 대한 결과⁵⁾를 무부하 가열재의 결과와 중첩시켜 Fig. 5에 나타내었다. 크리프 시험재에 대한 결과는 무부하 가열재의 결과와 일치하지 않고 있는데 온도가 낮더라

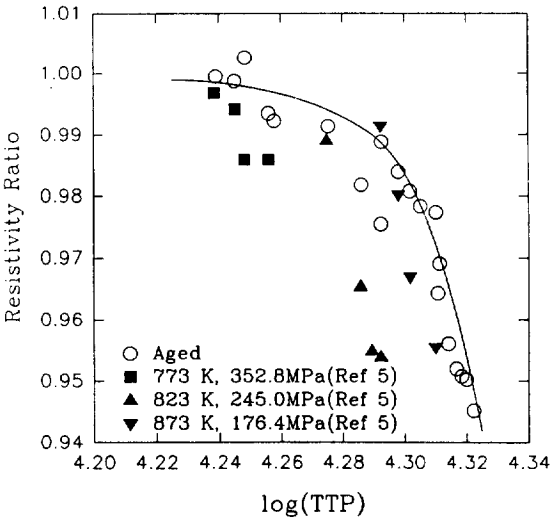


Fig. 5. Comparisons of resistivity ratio vs. G'-parameter relations between the aged and crept materials.

도 부하 응력이 높으면 열화가 빨리 진행됨을 알 수 있으며 경도값 측정에 있어서도 이와 유사한 현상이 관찰된다. 즉 동일한 크리프 시험 온도에서도 응력 의존성이 있기 때문에 응력이 높을 경우 경도 측정값이 좌측으로 이동하여 단순 가열측으로부터 멀어져 가는, 즉 응력에 의하여 연화가 촉진되는 경향이 있다³⁾. 이와 같이 크리프에 의한 재질 변화는 단순 가열에 의한 재질 변화에 응력에 의한 영향이 중첩된 것이다. 따라서 크리프 시험재와 무부하 가열재의 결과가 일치하지 않는 것은 응력에 의한 영향이므로, 경도법에서 응력 보정에 사용된 식(2)를 전기저항법에 사용함으로써 응력에 의한 영향을 보정하여 Fig. 6에 재도시하였다. 그 결과 크리프 시험재의 결과도 단순 가열재의 결과와 매우 잘 일치하였다. 따라서 X축을 G'으로 하면 크리프에 의한 전기비저항 비의 변화를 단순 가열재의 연화곡선으로 근사시킬 수 있다.

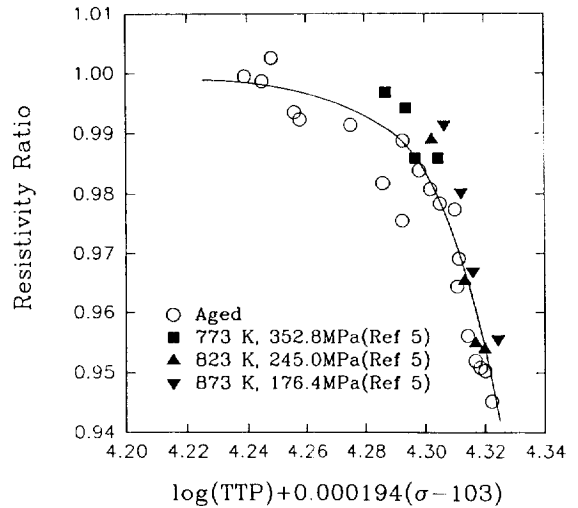


Fig. 6. Comparisons of resistivity ratio vs. G'-parameter relations between the aged and crept materials.

결국 손상 검출 위치(고온 고응력부)와, 이와 온도가 동일한 저응력부에서의 전기비저항을 측정하여 Fig. 6으로부터 ΔG를 구하면 식(2)에 의하여 손상 검출 위치에서의 사용 응력을 추정할 수 있다. 또한 응력과 T(C+logt.)의 관계를 나타내는 기존의 데이터로부터 파단 시간 t_r를 계산(사용 온도를 알고 있는

경우)할 수 있어 t/t_0 (t_0 는 설비의 사용 시간) 즉 수명 소비율, Φ 와 잔여수명, $t_0 \times (1 - \Phi)$ 를 추정할 수 있다. 다만, Fig. 6에서는 제한된 결과치만을 사용하였기 때문에 보다 정확한 근사 곡선을 얻기 위해서는 단순 가열재 및 크리프 시험재의 전기비저항 값에 대한 보다 확충된 D/B(데이터베이스)가 요망된다.

4. 결 론

Cr-Mo-V강을 630°C에서 227, 453, 682, 933, 1142, 1382, 1598 및 1820 시간 열처리하여 열화 정도가 각기 다른 9종의 조직을 만들어 열화도의 차이가 경도값 및 전기비저항값에 미치는 영향을 조사하였다. 이때 경도법에서 사용되는 G 변수를 전기저항법에 적용시켰으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 열처리 시간에 따른 경도값과 전기비저항값의 감소는 동일한 경향을 나타내었다.

2) 크리프에 의한 전기비저항 비의 변화는 다음의 관계식으로 정리할 수 있다.

$$G' = \log T + \log(20 + \log t) + 1.94 \times 10^{-4}(\sigma - 103)$$

후 기

본 연구는 과학기술처 후원으로 한국표준과학연구원 에서 수행된 '고온사용설비 파손방지 기술개발'의 연구 결과의 일부이며 Cr-Mo-V강의 제조 및 입수를 위해 도와 주신 한국항공우주연구소 이주진 박사님, 일본 東北大의 壓子哲雄 교수님 및 住友金屬의 관계자 여러분, 그리고 열처리 및 경도시험에 많은 도움을 주신 김시천씨와 박종서씨께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 増山不二光, 西村宣彦 : 金屬學會會報, 1988, Vol. 27, No.4, pp.287-289.
2. B. Neubauer and U. Wedel : ASME Int. Conf. on Advances in Life Prediction Methods, Albany, N. Y., April, 1983, pp.307-313.
3. 後藤徹 : 材料, 1983, Vol.32, No.356, pp.563-569.
4. B. J. Cane, P. F. Aplin and J. M. Brear : J. of Press. Vessel Tech., 1985, Vol.107, pp.295-300.
5. 祐川正之 : 壓力技術, 1988, Vol.26, No.6, pp.361-367.
6. M. Sukekawa, M. Shiga, Y. Tobita and S. Kirihara : Int. Conf. on Creep, Tokyo, Japan, April, 1986, pp.321-325.
7. A. M. Abdel-Latif, J. M. Corbett, D. Sidney and D. M. R. Taplin : Proc. of 5th Int. Conf. on Fracture(ICF5), Vol.4, Cannes, France, March, 1981, pp.1613-1620.
8. A. M. Abdel-Latif, J. M. Corbett and D. M. R. Taplin : Metal Science, 1982, Vol.16, pp.90-96.