

전기비저항법을 이용한 재료열화 평가

석창성* · 김동중** · 배봉국***
(2000년 3월 9일 접수)

Evaluation of Material Degradation Using Electrical Resistivity Method

Chang-Sung Seok, Dong-Joong Kim and Bong-Kook Bae

Key Words: Electrical Resistivity(전기비저항), Electrical Resistance(전기저항), Degradation(열화), Four-Point Probe(4탐침 탐촉자)

Abstract

The remaining life estimation for the aged components in power plants as well as chemical plants are very important because mechanical properties of the components are degraded with time of service exposure in high temperature. Since it is difficult to take specimens from the operating components to evaluate mechanical properties of components, nondestructive techniques are needed to estimate the degradation. In this study, test materials with 4 different degradation levels were prepared by isothermal aging heat treatment at 630°C. And the DC potential drop method and destructive methods such as tensile, K_{IC} and hardness tests were used in order to evaluate the degradation of 1Cr-1Mo-0.25V steels. The objective of this study is to investigate the possibility of the application of DCPD method to estimate the material degradation, and to analyse the relationship between the electrical resistivity and the degree of material degradation.

1. 서 론

고온, 고압 환경 하에서 사용되는 산업설비 재료들은 역학적, 화학적, 열적 효과에 의해 초기의 조직상태 등이 변화되어 기계적 성질이 저하되는 재료열화(material degradation) 현상^(1,2)을 수반하게 된다. 이러한 열화에 의해 저하된 설비의 잔존수명을 평가하기 위해서 제조당시의 재료 물성 데이터와 더불어 수명평가 시점에서 열화가 진행된 재료의 물성치를 알아야 한다. 하지만 사용 중인 설비에 손상을 주지 않고 직접 시험편을 채취하여 재료 물성 데이터를 얻는 것이 사실상 불

가능하며 경비와 시간이 많이 소요되므로, 비파괴적인 방법을 이용하여 재료열화가 진행된 부분의 재료 물성치를 측정하여 상태를 진단하고 잔존수명을 예측하는 일이 필요하다.

재료열화를 비파괴적으로 측정하는 데는 여러 가지 방법이 적용될 수 있는데, 이러한 방법 중 측정이 간편하고 현장에 적용가능성이 높은 방법으로 직류전위차법(Direct Current Potential Drop; DCPD)이 있다. DCPD법으로는 재료의 전기비저항을 얻을 수 있는데, 전기비저항은 탄화물의 응집, 조대화, 입계석출, 기지(matrix)내의 고용원소의 감소, 전위밀도의 변화 등과 같은 미세적 변화에서부터 기공(void) 및 균열 전파 등의 거시적 결합양상에 이르기까지 많은 요인들에 의해 변화하므로 전기비저항을 측정함으로써 재료의 미세조직의 변화, 즉 열화도의 평가가 가능하다.^(3,4) 특히, 일부 강종의 경우 크리프 손상에서 중요한 열화기구인 초기 미세조직 변화와 같이 조직사전

* 회원, 성균관대학교 기계공학부
E-mail : csseok@yurim.skku.ac.kr
TEL : (031)290-7477 FAX : (031)290-7482

** LG전자(주)

*** 성균관대학교 대학원 기계설계학과

자체로는 식별이 어려울 정도의 미소한 열화현상에도 DCPD법을 이용한 전기비저항(electrical resistivity) 측정 방법이 매우 유용하다고 보고된 바 있다.⁽⁵⁾

본 논문에서는 발전설비의 터빈 로터 강으로 많이 사용되고 있는 1Cr-1Mo-0.25V 강을 등은 열화 열처리(isothermal aging heat treatment)시켜 열화 정도가 다른 시험편을 제작하였다. 그리고 인장시험, 경도시험, 파괴인성시험, 미세조직 관찰 시험들을 수행하여 얻은 결과와 DCPD법을 사용하여 얻은 전기비저항을 비교하여 재료열화에 따른 파괴시험결과와 전기비저항과의 관계에 대해 연구하였다.

이를 바탕으로 재료의 열화도를 전기비저항법으로 평가할 수 있는 지를 검토하고 현장에서 간편하게 적용할 수 있는 열화도 측정 시스템을 제작하기 위한 기반을 마련하고자 한다.

2. 전기비저항법

재료가 열화되면 시그마상의 석출, 탄화물의 조대화 와 같은 재료내부의 미세조직의 변화로 인하여 전기비저항이 변화하게 된다. 따라서 열화된 재료와 열화되지 않은 신재의 전기비저항을 각각 측정하여 비교하면 재료의 열화 정도를 감지할 수 있다.

본 연구에서는 ASTM B193-87과 F84-93을 참조하여 4탐침법(four point probe method)^(6,7)으로 전기비저항을 측정하였다. 4탐침법은 전류와 전압 단자가 등간격으로 배열되어있는 4개의 탐침을 동시에 시험편에 압착하여 전류와 전압을 측정함으로써 전기비저항을 측정하는 방법이다.

2.1 전기비저항

이웃한 탐침 사이의 간격이 s 인 탐촉자를 이용하여 전기비저항이 ρ 인 재료에 4탐침법을 적용할 때 탐촉자의 전류 단자에서 I 의 전류가 흐르면 전류 단자로부터 거리 r 만큼 떨어진 지점에서의 전위 V 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (1)$$

위의 식 (1)로부터 특정한 시편형상에 대한 전기비저항의 식을 구할 수 있다.⁽⁸⁾

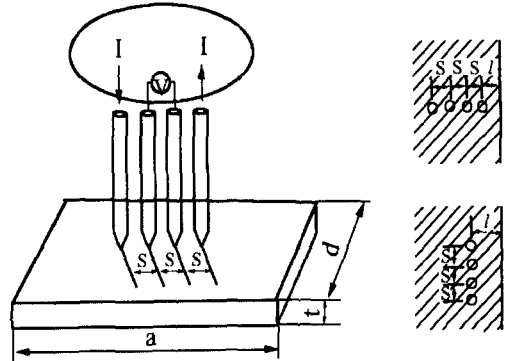


Fig. 1 Configuration of specimen boundary and 4 point probe

후판(bulk sample), 즉 시편의 두께 t 가 탐촉자 간격 s 에 비해 매우 두꺼운 경우($t \gg s$)의 전기비저항은 다음과 같다.

$$\rho = 2\pi s \left(\frac{V}{I} \right) \quad (2)$$

박판(thin sheet), 즉 시편의 두께 t 가 탐촉자 간격 s 에 비해 매우 얇은 경우($t \ll s$)의 전기비저항은 다음과 같다.

$$\rho = \frac{\pi t}{\ln 2} \left(\frac{V}{I} \right) \quad (3)$$

2.2 오차와 보정계수

식 (2)와 (3)은 무한 평면으로 가정한 시편의 두께가 매우 두껍거나 매우 얇은 특정한 경우의 식으로서 실제의 적용에 있어서는 Fig. 1과 같이 시편의 크기가 유한하므로 오차를 수반하게 된다. 탐촉자와 시편 가장자리 사이의 거리 l , 그리고 시편의 두께 t 가 모두 $4s$ 이상인 경우에는 시편을 반무한체(semi-infinite solid)로 보아 식 (2)를 적용할 수 있으며, 이때 2% 이내의 오차를 수반하게 된다.⁽⁹⁾ 같은 조건에서 두께가 $0.7s$ 이하인 경우에는 식 (3)을 적용할 수 있으며, 이때 마찬가지로 2% 이내의 오차를 수반하게 된다.⁽¹⁰⁾ 시편의 두께가 $0.7s \sim 4s$ 사이의 값인 경우, 혹은 오차를 좀더 줄여서 정확한 값을 얻고자 하는 경우 시편의 형상에 대한 보정계수(correction factor)⁽¹¹⁾를 고려해 주어야 한다.

Table 1 Chemical composition of 1Cr-1Mo-0.25V steel (wt%)

C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	V	Sn
0.29	0.01	0.74	0.004	0.007	0.060	1.29	1.24	0.25	0.0047

$$\rho_s = k\left(\frac{V}{I}\right) \quad (4)$$

식 (4)는 일반적인 면저항(sheet resistance) ρ_s 을 나타내며, 여기서 k 는 형상보정계수이다. k 는 주어진 시험편 및 탐촉자의 형상에 대하여 시험편 두께(t/s)에 대응하는 보정계수 F 와 폭과 너비(d/s , a/d)에 대응하는 보정계수 C 로 구성되어있으며, F 와 C 는 각각 Smits의 보정표를 참조하여 구할 수 있다.⁽¹⁰⁾

본 연구에서는 탐촉자의 중심이 사각형 시편의 정중앙에 위치할 때 시편의 가장자리로부터 탐촉자의 임의 탐침 까지의 거리가 네 방향 모두 $4s$ 이상이 되도록 시편을 제작하였으며, 이와 함께 시편형상에 대한 보정계수를 고려하여 측정오차를 줄이고자 하였다.^(12,13)

3. 실험

시험에 사용된 강재는 화력발전소 터빈로터에 많이 사용되는 1Cr-1Mo-0.25V 강으로, 화학적 성분을 Table 1에 나타내었다.

3.1 가속열화

본 연구에서는 실제 발전소 터빈에서 오랜 기간 사용된 재료와 유사한 미세조직을 갖도록 열처리를 수행하였다. 재료를 일반 사용온도(538℃)보다 높고 재결정온도(뜨임 온도)보다 낮은 630℃의 고온에서 인위적으로 모의 열처리를 수행하여 고온에서 장시간에 걸쳐 사용한 재료와 같은 미세조직을 갖도록 하였다. 가속 열처리에 소요되는 시간은 실제 사용온도에서 철이 자기확산(self diffusion)되는 양과 동일한 양이 가속열처리 온도에서 발생하도록 다음 식으로부터 구하였다.^(14,15)

$$t_2 = t_1 \exp\left[\frac{Q}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right] \quad (5)$$

Table 2 Aging time at 630℃ for equivalent microstructures serviced at 538℃

Service Time at 538℃ (hour)	0	15,000	25,000	35,000	50,000	100,000
Aging Time at 630℃ (hour)	0	273	453	634	933	1,820

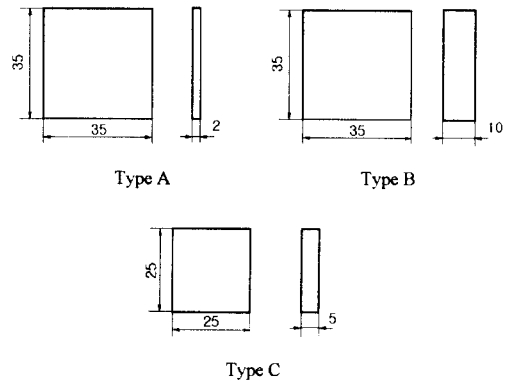


Fig. 2 Shape and dimensions of specimens for electrical resistivity test (unit: mm)

여기서 T_1 은 811K(538℃), T_2 는 903K(630℃), t_1 은 T_1 에서의 열화시간(hour), t_2 는 T_2 에서의 열화시간(hour), R 은 기체상수(8.3143 J/mol/K), Q 는 철의 자기 확산활성화 에너지(272 kJ/mol)를 나타낸다.

Table 2에는 실제 사용온도에서 장시간 사용된 것과 동일한 미세조직을 얻기 위해 630℃에서 가속열처리를 수행한 시간을 나타내었다.

3.2 시험편

전기비저항법으로 측정된 재료의 열화를 파괴 시험 결과와 비교하기 위해 열처리 시간에 따라 4단계(0, 25000, 50000, 100000 시간)로 모의 열화시켜 파괴시험 재료를 준비하였다. 그리고 파괴 시험과는 별도로, 열화시간이 50,000시간을 넘는 경우 전기비저항의 감소가 적어진다는 연구⁽³⁾를 바탕으로 50,000시간 이전의 전기비저항 변화를 살펴보기 위해 15,000, 35,000의 2단계를 추가하여 총 6단계의 시험편을 제작하였다.

또한 가속 열화시킨 재료를 가공하여 두께와 형상이 전기비저항에 미치는 영향을 평가하기 위해 박판 시험편(type A)과 후판 시험편(type B)을 6개의 열화 단계별로 가공하고, 또한 다른 형상의 시험편(type C)을 4 단계로 가공하였다. Fig. 2는 전기비저항을 측정하기 위한 이들 시험편의 형상을 나타낸다.

3.3 장치구성 및 시험방법

전기비저항 측정장치는 탐촉핀 간격이 1.59mm인 시그나톤(signatone)사의 4탐침 탐촉자(four-point probe; Model S-301)와 최대범위 10A인 HP사의 정밀 전류원(Model 6642A), 1mA까지 측정이 가능한 GDM사의 전류계(Model 8055), 1nV까지 측정이 가능한 케스레이(Keithley)사의 전압계(Model 181), 그리고 전류의 방향을 바꿀 수 있는 스위치 전환회로로 구성되어있다.

전위차를 측정할 때 공급전류를 크게하면 분해능을 향상시킬 수 있으나 접촉점이 가열되어 측정값이 변동될 수 있으므로 적절한 전류를 공급해 주어야 한다. 본 연구에서는 재질변화를 평가하기 위해 필요한 최소한의 전류인 1A를 공급하였다. 또한 외부온도 변화에 의한 영향을 제거하기 위하여 온도가 일정한 항온실에서 13.5℃의 온도를 유지하며 실험을 수행하였다. 이때 실험한 온도가 일반적인 실험실 온도보다 낮으므로 전기비저항값이 실제보다 낮게 평가되었을 가능성이 있다.

전기비저항 측정시험은 다음과 같이 진행하였다. 시험편에 탐촉자를 접촉시키고 안정화될 때까지 기다린 후 전압계의 기준전압과 전류계의 기준전류를 각각 0으로 설정하고 전류를 가하여 일정시간 경과 후 전위차와 전류를 측정하였다. 접촉점에서의 온도변화에 의한 열기전력을 보정하기 위하여 전원의 양극을 바꾸어 가며 같은 재료에 대해 3~5회 측정하여 절사한 평균 저항값을 구한 후 이로부터 전기비저항을 환산하였다.

4. 결과

4.1 전기비저항의 보정

Fig. 3은 열화시간에 따른 전기비저항의 변화를 시험편의 형상별로 나타난 그림이다. 여기에서 type A, type B, type C는 Fig. 1에 나타난 시험편들의 시

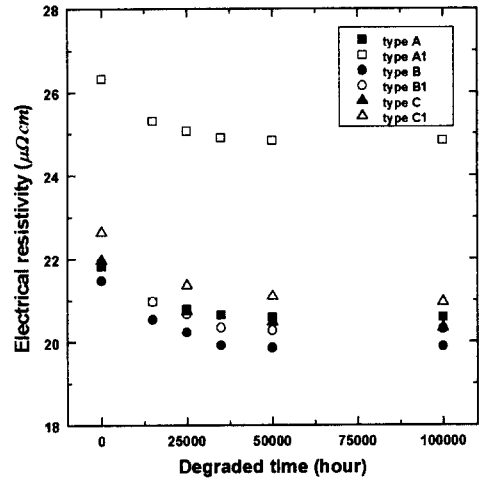


Fig. 3 Effect of degraded time on electrical resistivity

Table 3 Uncertainty of resistivity

Specimen	Degraded time [hr]	Average resistivity [$\mu\Omega$ cm]	Uncertainty [%]
Type A	0	21.80	0.113
	15000	20.96	0.159
	25000	20.76	0.186
	35000	20.63	0.066
	50000	20.57	0.121
	100000	20.57	0.089
Type B	0	21.46	0.061
	15000	20.52	0.052
	25000	20.22	0.100
	35000	19.91	0.042
	50000	19.85	0.126
	100000	19.89	0.211
Type C	0	21.95	0.084
	25000	20.72	0.019
	50000	20.45	0.109
	100000	20.32	0.136

험결과로 식 (4)를 이용하여 구한 결과를 나타낸 것이며 type A₁, type B₁, type C₁은 Fig. 1의 type A, type B, type C의 시험결과인데 보정계수를 사용하지 않고 식 (2)또는 (3)을 이용하여 구한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 열화가 진행될수록 각각의 형상에 대하여 측정된 저항값이 각 단계별로 감소하는 것을 볼 수 있다.

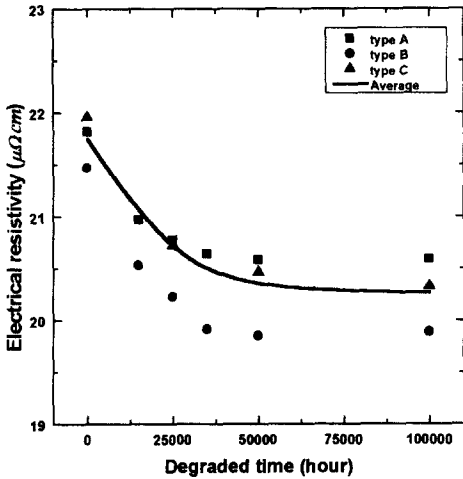


Fig. 4 Effect of degraded time on electrical resistivity measured in different specimen type

Fig. 3에서 형상계수가 고려되지 않은 경우(type A₁, type B₁, type C₁)에는 전기비저항이 각각의 형상에 대해서 서로 다른 값을 보이는데 반해 형상계수가 고려된 경우(type A, type B, type C)에는 각각의 형상에 대해서 거의 일정한 전기비저항값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 그러므로 전기비저항값을 산출하기 위해서는 반드시 측정 대상의 형상에 대한 영향을 배제하기 위해서 보정인자를 고려해야 한다.

Table 3에 보정계수가 고려된 경우(type A, type B, type C)에 대한 전기비저항의 열화시간과 시편종류별 측정불확도를 나타내었다.

4.2 재료열화에 따른 전기비저항

Fig. 4는 앞 절에서 구한 보정계수를 고려한 전기비저항에 대하여 형상과 열화 단계별로 평균을 취하여 나타낸 그래프로써, 계산된 평균값은 열화가 진행될수록 감소하는 경향을 보인다.

4.3 재료열화에 따른 파괴시험치

Fig. 5~7은 열화단계별 파괴시험 결과를 나타낸 그림이다. Fig. 5와 Fig. 6에서 인장강도와 항복강도, 그리고 경도치는 열화 초기인 50,000시간까지는 급격히 감소되며, 50,000시간 이후에는 감소가 둔화되는 것을 볼 수 있다. 그리고 Fig. 4의 전기비저항도 이와 유사한 경향을 보인다.

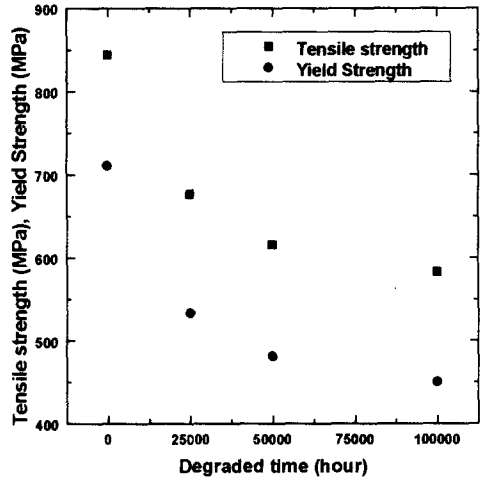


Fig. 5 Effect of degraded time on tensile strength and yield strength

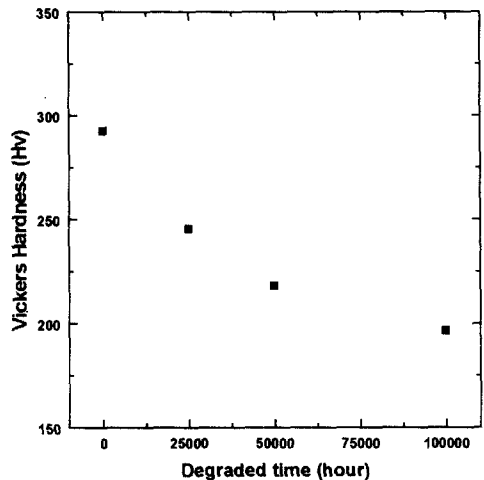


Fig. 6 Effect of degraded time on Vickers hardness

그러나 Fig. 7에서 파괴인성치는 인장시험결과나 경도시험 결과와는 달리 열화가 진행됨에 따라 선형적으로 감소되었으며 50,000시간 이후에도 감소가 지속되었다. 이러한 경향은 파괴인성치에 영향을 미치는 입계의 석출물들이 열화가 지속됨에 따라 증가하여, 경계면이 취약해지기 때문인 것으로 생각된다.

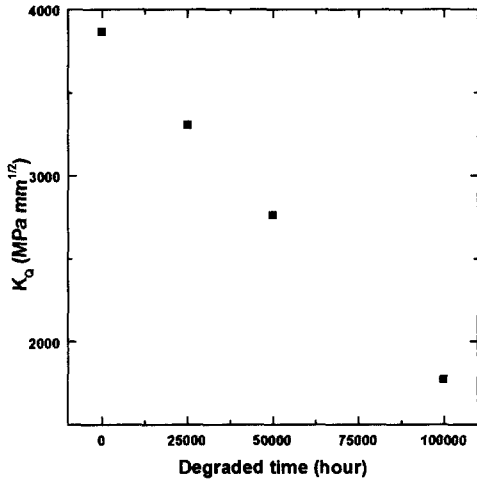


Fig. 7 Effect of degraded time on fracture toughness

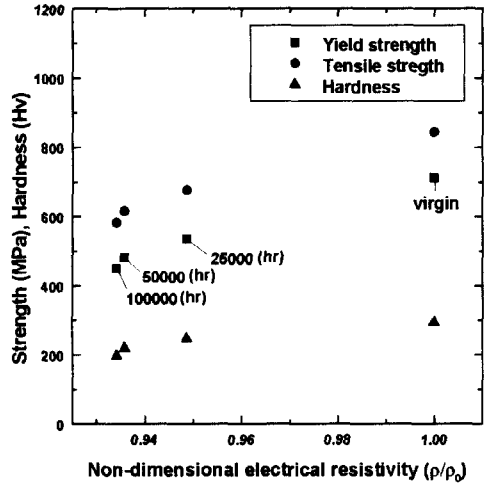


Fig. 9 Relation between material properties and electrical resistivity

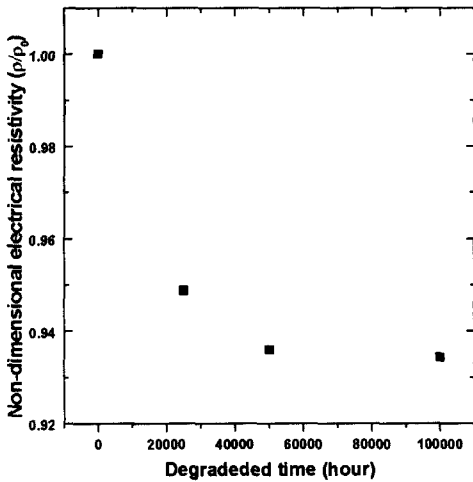


Fig. 8 Effect of degraded time on non-dimensional electrical resistivity

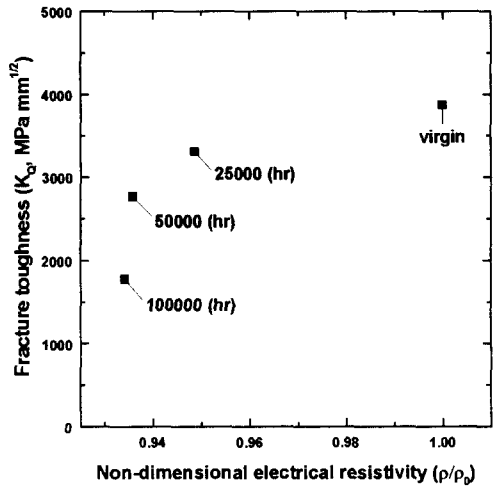


Fig. 10 Relation between fracture toughness and electrical resistivity

4.4 무차원 전기비저항과 파괴시험치

Fig. 8은 각 열화 단계별로 형상이 다른 시험편의 전기비저항(ρ)을 열화되지 않은 재료의 전기비저항(ρ_0)으로 나눈 무차원 전기비저항(ρ/ρ_0)의 평균을 나타낸 것이다. 이 그림에서 무차원 전기비저항은 열화가 진행됨에 따라 일정한 값인 0.93에 근접하는 것을 볼 수 있었다. 여기서 구한 무차원 전기비저항의 평균값은 파괴시험치와의

상관관계를 분석하는데 사용되었다.

Fig. 9와 Fig. 10은 무차원 전기비저항의 평균값을 이용하여 인장강도, 항복강도, 경도치 그리고 파괴인성치(K_{Ic})와의 상관관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 파괴시험으로 구한 인장강도, 항복강도, 경도치 그리고 파괴인성치와 무차원 전기비저항 사이에 상관관계가 있음을 알 수 있다.

4.5 전기비저항법을 이용한 재료열화평가

전기비저항법을 이용한 열화도 평가는 직접 전기비저항을 사용하거나, 무차원 전기비저항을 사용함으로써 가능하다. 이들 두가지를 비교해 보면, 전기비저항은 측정대상의 형상과 시험 환경에 영향을 받는 값으로, 정밀한 측정과 보정계수를 필요로 하며, 형상이 조금만 복잡해도 보정계수를 구하는 것이 쉽지 않지만, 주어진 형상에 대하여 정량적인 값을 제공하므로 측정대상에 대한 자료가 확보되어있는 상태에서 한번의 측정으로 정확히 대상의 열화 상태에 대한 정량적인 평가가 가능하다는 특징이 있다.

한편 무차원화된 전기비저항은 열화재의 전기비저항을 비열화재의 전기비저항으로 나눈 값으로, 분모와 분자의 형상보정계수가 서로 상쇄되므로 전기저항만을 측정하여 무차원화시켜도 동일한 결과를 얻을 수 있으며, 주어진 측정대상에 대하여 정량적인 평가를 내릴수는 없지만 형상이 동일한 측정대상에 대해서는 자료가 없는 상태에서도 정성적인 비교 평가가 가능하다는 특징이 있다.

두 가지 모두 재료열화 평가를 위해서는 신재일 때의 자료가 있어야 하며, 지속적으로 일정 조건 하에서 전기저항을 측정해야한다. 하지만 전기비저항법을 이용하면 비교적 간단하게 초기 열화기구를 연구할 수 있으며, 또한 실제 현장에서 재료의 열화와 재료의 인성을 추정할 수 있다는 장점이 있다. 단, 구조물로부터 시편을 채취하지 않고도 열화도측정이 가능하려면 형상에 관계없이 일정한 전기비저항의 파라미터가 필요하며, 이에 대한 연구가 더 필요할 것으로 생각된다.

5. 결 론

본 연구는 재료의 열화도를 평가할 수 있는 비파괴적인 파라미터를 제시하기 위한 기초연구로 가속열화 시킨 1Cr-1Mo-0.25V강에 대하여 파괴시험법인 인장시험, 경도시험, 파괴인성시험과 비파괴시험법인 전기비저항 측정시험을 각각 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 열화시간이 증가할수록 파괴인성치는 선형적으로 감소되었으나 인장강도, 항복강도, 경도 등은 50,000시간까지는 감소 현상이 두드러졌으며 그 이후에는 감소가 둔화되었다.

(2) 전기비저항은 열화시간이 증가할수록 감소되었고 50,000시간까지는 감소 현상이 두드러졌으며 그 이후에는 감소가 둔화되었다. 이것은 인장 및 경도시험 결과와 비슷한 경향을 나타낸 것으로 전기비저항으로 초기 열화의 정도를 예측할 수 있음을 의미한다.

(3) 전기비저항과 파괴시험을 통해 얻어진 인장강도, 항복강도 및 경도치들의 상관관계로부터 전기비저항만으로 재료의 파괴시험결과를 예측할 수 있다.

(4) 전기비저항법에 의한 열화도 평가를 수행하기 위해서는 시험편의 형상, 시험온도 등의 영향이 고려되어야 한다. 그러나 보정계수를 계산하는 것이 어려운 경우, 무차원 전기저항을 이용하면 동일한 형상의 재료에 대한 정성적인 열화평가가 가능하다.

후 기

이 논문은 1998년 학술진흥재단의 공모 과제 연구비에 의하여 연구 되었음.

참고문헌

- (1) Viswanathan, R. and Gehl, S., 1991, "A Method for Estimation of the Fracture Toughness of Cr-Mo-V Rotor Steels Based on Composition," *Journal of Engineering Materials and Technology*, (Transactions of the ASME), Vol. 113, pp. 263-270.
- (2) Viswanathan, R. and Bruemmer, S. M., 1985, "In-service Degradation of Toughness of Steam Turbine Rotors," *Journal of Engineering Materials and Technology*, (Transactions of the ASME), Vol. 107, pp. 316-324.
- (3) 남승훈, 김엄기, 유광민, 1998, "Nondestructive Evaluation of Toughness Degradation of 1Cr-1Mo-0.25V Steel Using Electrical Resistivity," 대한기계학회논문집 A, Vol. 22, No. 5, pp. 814-820.
- (4) 석명진, 최질현, 이동철, 문인훈, 1994, "Sb-InSb 및 Sn-Bi 공정합금의 미세조직과 전기비저항," 한국재료학회지, Vol. 4, No. 1, pp. 97-106.

- (5) Park, Y. K. and Ahn, B. Y. 1989, "Nondestructive Evaluation of Tempering Process of S45C Steel using DC Potential Drop Measurement," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 9, No. 1, pp. 77~78.
- (6) ASTM B193-87, 1992, "Standard Test Method for Resistivity of Electrical Conductor Materials," *Annual Book of ASTM Standard*, pp. 308~311.
- (7) ASTM F84-93, 1993, "Standard Test Method for Measuring Resistivity of Silicon Wafers with an In-Line Four-Point Probe," *Annual Book of ASTM Standard*, pp. 135~147.
- (8) Valdes, A. B., 1954, "Resistivity Measurements on Germanium for Transistors," *Proceedings of the IRE*, pp. 420~427.
- (9) ASTM F43-93, 1993, "Standard Test Methods for Resistivity of Semiconductor Materials," *Annual Book of ASTM Standard*, pp. 50~56.
- (10) Smits, F. M., 1958, "Measurement of Sheet Resistivities with the Four Point Probe," *The Bell System Tech. Journal*, Vol. 37, pp. 711~718.
- (11) Logan, M. A., 1967, "Sheet Resistivity Measurements on Rectangular Surfaces-General Solution for Four Point Probe Conversion Factors," *The Bell System Tech. Journal*, pp. 2277~2322.
- (12) Shi, J. and Sun, Y., 1997, "New Method of Calculating the Correction Factors for the Measurement of Sheet Resistivity of a Square with a Square Four-Point Probe," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 68, No. 4, pp. 1814~1817.
- (13) Yamashita, M., Nishii, T. and Kurihara, H., 1996, "Resistivity Correction Factor for the Four-Point Probe Method on Cylindrical Materials," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 35, pp. 1948~1953.
- (14) Abdel-Latif, A. M., Corbett, S. M. and Taplin, D. M. R., 1982, "Analysis of Carbides Formed During Accelerated Aging of 2.25Cr-1Mo Steel," *Metal Science*, Vol. 16, pp. 90~96.
- (15) Abdel-Latif, A. M., Corbett, J. M., Sidey, D. and Taplin, D. M. R., 1981, "Effects of Microstructural Degradation on Creep Life Prediction of 2-1/4Cr-1Mo Steel," *Advanced in Fracture Research*, (Proc. Of 5th Int. Conf. On Fracture(ICF5)), Vol. 4, pp. 1613~1620.