

전기비저항을 이용한 1Cr-1Mo-0.25V강의 인성열화도 평가

남승훈*, 유광민**, 김엄기***

* 한국표준과학연구원 방재기술연구센터 재료강도연구그룹

** 한국표준과학연구원 전자기연구부 전기그룹

*** 공주대학교 기계공학과

요약 사용중인 터빈 로터에서 균열이 발견된다면 그 안전성을 평가하기 위해서는 제조 당시의 재료물성 데이터가 아닌 열화된 재료의 물성 및 인성을 사용해야 한다. 본 연구에서는 시험재료로 터빈 로터재로 널리 사용되고 있는 1Cr-1Mo-0.25V강을 사용하였다. 로터강의 경우 발전소에서 실제 사용된 열화재를 종류별로 입수하는 것은 매우 어렵기 때문에 실제로 열화된 재료의 미세조직과 유사한 미세조직을 갖는 시료를 얻기 위해서 실제 사용온도보다 높은 630°C에서 등온 열화처리하여 열화도가 다른 7종류의 시료를 만들었다. 열화도와 재료의 인성을 비파괴적으로 평가하기 위하여 직류 전위차법을 이용하였으며, 상온에서 전기비저항을 측정하였다. 열화도의 증가에 따라 전기비저항과 재료인성은 일정시간까지는 감소하는 것으로 나타났으며, 전기비저항과 인성과의 상관관계를 만들었다. 따라서 이를 이용하여 비파괴적으로 재료인성을 평가할 수 있는 기초를 마련하였다.

1. 서론

고온에서 사용되는 플랜트 설비의 요소는 사용 시간이 경과함에 따라 크리프 손상의 일환으로 고온 노화(aging), 취화(temper embrittlement) 및 조사 취화(radiation embrittlement) 등의 손상을 받아 재료의 인성 및 강도가 장시간에 걸쳐 감소하게 된다. 이러한 플랜트의 안전성을 사용중에 평가하기 위해서는 재료의 강도 및 인성의 열화상태(strength and toughness degradation)를 비파괴적으로 모니터 하는 측정기술이 필요하다. 지금까지 국내에서도 재료의 노화에 의한 강도 및 인성 감소치를 정량적으로 평가하는 비파괴적 기법을 연구하고 있으나 아직 미진한 실정이다.

터빈 로터는 사용 시간이 증가함에 따라 뜨임취화가 일어나며 인성도 변화한다. 사용중인 터빈 로터의 수명을 평가하기 위해서는 제조당시의 재료물성 데이

터가 아닌 열화된 재료의 물성 및 인성을 사용해야 한다. 그러나 파괴인성 측정을 위하여 사용중인 로터에 손상을 주지 않고 로터로부터 시험편을 채취한다는 것은 기술적으로 어려울 뿐만 아니라 경비와 시간이 많이 소요되므로 파괴적 방법에 의한 터빈 로터의 인성평가는 사실상 적용 불가능하다. 따라서 비파괴적 재료물성평가 및 재료인성평가기술이 개발되어야 하며, 여러 가지 비파괴적 방법이 연구되고 있다^{1~4)}.

재료의 전기저항은 미시적 변화에서부터 거시적 결함양상에 이르기까지 많은 요인들에 의해서 변화하기 때문에 경년열화의 비파괴적 평가방법의 하나로 사용될 수 있다고 알려져 있으나⁵⁾, 아직까지 크리프 손상에 미치는 온도·시간에 의한 영향과 응력에 의한 영향을 구분하는 방법이 제안되지 않았다. 그리고 열화손상에 의한 미세조직 변화에 수반되는 전기저항의 변화는 손상받지 않은 모재에 비하여 수 % 이내의

(접수 : 1997. 8. 16)

값이라고 알려져 있으며, 더욱이 모재의 비저항값이 매우 작아서 열화에 따른 전기비저항 변화는 수 $\mu\Omega\text{cm}$ 이가 되므로 구조용 강재에서 이를 측정하는 것이 쉬운 것은 아니다⁶⁾. 그러나 일부 강종에서 초기 크리프 손상의 경우 조직사진 자체로는 미세조직 변화의 식별이 어렵기 때문에 이 경우 전기적 방법이 유용하다고 보고되어 있다⁷⁾.

본 연구에서는 고온 장기 사용재의 미세조직을 시물레이션하기 위하여 Cr-Mo-V강을 630°C에서 열처리하였으며, 열처리 시간에 따른 전기비저항의 변화를 조사하였다. 전기저항 측정에는 직류법을 사용하였으며, 여러 가지 방법으로 전기비저항을 측정하였다. 측정된 전기 비저항값과 충격시험에서 얻은 파면양상천이온도(fracture appearance transition temperature : FATT)와의 관계 등을 구하였으며, 또한 충격시험 결과로부터 파괴인성값을 추정하여 전기 비저항과 파괴인성과의 상관관계를 작성하였다.

2. 실험

시험에 사용된 강재는 화력발전소 터빈 로터에 많이 사용되는 1Cr-1Mo-0.25V 강으로서, 이 소재의 화학적 성분은 Table 1에, 기계적 물성은 Table 2에 나타내었다. 로터강의 경우 실제 발전소에서 사용된 열화재를 종류별로 입수하는 것은 매우 어렵기 때문에 실제로 열화된 재료의 미세조직과 유사한 미세조직을 갖는 시료를 얻기 위해서 인위적으로 실제 사용온도(538°C)보다 높은 온도(630°C)에서 등온 열화 처리하여 7종류의 시험편을 준비하였다. 이 때 소요되는 열처리시간은 Fe의 자기확산(self diffusion) 이론에 의하여 각 온도에서의 Fe 확산량이 같은 조건에서 결정하였으며⁸⁾, 열처리시간은 Table 3과 같다.

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 (°C)	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°C for equivalent microstructure serviced at 538°C

Time served at 538°C (h)	25,000	50,000	75,000	100,000	200,000	300,000
Aging time at 630°C (h)	453	933	1,322	1,820	3,640	5,460

직류전류를 이용한 4단자 전위차법으로 전기비저항을 측정하였다. Fig. 1은 전기비저항을 측정하기 위한 실험장치의 개략도이다. 정확도가 0.05%인 DC current source (Fluke 382A, 최대용량 5A)를 이용하여 시험편에 전류를 공급하였으며, 시험편에 공급되는 전류량과 전압은 0.01 Ω 의 standard resistor와 정확도가 0.1%인 nano-voltmeter (Keithley 181)를 이용하여 1nV까지 측정하였다.

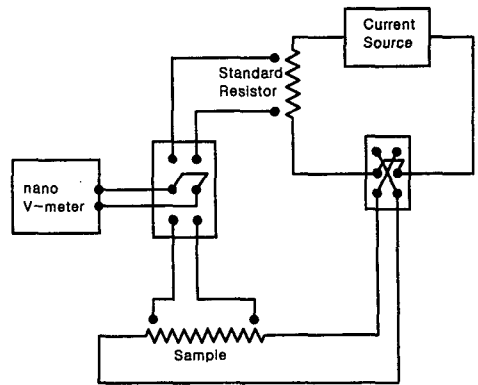


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup

전기비저항 측정용 시험편은 길이 55 mm, 폭 5 mm, 두께 1 mm인 박판형으로 제작하였다. 측정 전압의 probe 사이에서 균일한 전류밀도 혹은 균일한 전위차를 형성하기 위해서는 전류단자와 전압 probe 사이의 길이를 시험편 단면적 둘레보다 1.5배 이상 되는 것이 좋기 때문에 시험편의 양 끝단에서 전류를 공급하였고 시험편 중앙부의 19 mm 간격에서 전압을 측정하였다.

시험편의 온도변화는 전기비저항 변화의 한 요인이 된다⁹⁾. 점용접을 하여 전기비저항을 측정하는 경우는 항온조를 사용하였으며, 전류입력선과 전압측정선으로 직경 0.5 mm의 chromel 열전대선을 사용하였다. 접촉식으로 전기비저항을 측정하는 경우는 시험

상자와 시험치구를 사용하였으며, 전류입력선과 전압 측정선으로 직경 1.0 mm의 구리선을 사용하였다. 그리고 시험치구와 시험편은 나사못과 스프링을 이용하여 압착하였다.

전기비저항 측정시 영향을 미치는 여러 가지 오차 요인 중 시험편의 치수와 전압출력선의 위치 등의 측정은 상당히 큰 오차를 일으키므로 10회씩 측정하였다. 또한 전압측정시에 상당히 큰 오차를 야기하는 접점의 온도변화에 따른 열기전력의 영향을 줄이기 위하여 전류의 방향을 바꾸어 전압을 측정하여 정방향과 역방향에서 얻은 두 전압의 평균값을 사용하였으며, 동상신호에 의한 잡음신호의 영향을 최소화시키기 위하여 동일한 접지를 사용하였다.

3. 실험 결과

3.1. 열화시간에 따른 전기비저항의 변화

Fig. 2는 열화시간에 따른 전기비저항의 변화를 나타낸다. 전기비저항은 접촉식과 점용접식, 4단자법과 브릿지법 등으로 측정되었다. 각각의 열화재에서 측정된 전기비저항값은 측정방법에 따라 약 10% 이내의 차이가 있었다. 전기비저항의 평균값은 열화도에 따라 대략 23.8 $\mu\Omega$ cm에서 26.0 $\mu\Omega$ cm 사이에서 변하고 있다. 그리고 데이터의 분산폭이 대략 2.0 ~ 2.5 $\mu\Omega$ cm로 나타났지만 왜 이러한 분산이 나타나는지 그 원인은 아직 밝혀지지 않고 있다. 동일한 열화재에서 측정된 전기비저항의 차이는 시험온도의 영향이 일부 작용한 것으로 판단되며, 전압측정선 간격의 측정오차도 영향을 미친 것으로 사료된다. 전압측정선 간격의 0.05 mm의 측정오차는 전기비저항 0.13 $\mu\Omega$ cm의 오차를 낳으므로 길이측정에 특히 주의해야 한다. 그러나 같은 방법으로 반복측정을 해도 실험 데이터가 분산되므로 시험온도나 길이측정 오차가 전기비저항값에 전적으로 영향을 미치는 것은 아니라고 사료된다.

열화시간이 증가함에 따라 전기비저항값은 초기엔 큰 변화를 보이지만 열화시간이 길어질수록 그 변화폭은 점차로 작아졌다. 75,000시간 이상의 열화재에서 전기비저항의 감소는 더 이상 감지되지 않았다. 그러나 열화시간이 일단 50,000시간을 넘어서면 전기비저항의 변화폭이 약 10% 이내이기 때문에 측정오차의 범위를 고려한다면 그 변화를 사실상 구분하기 어렵다는 것을 알 수 있다.

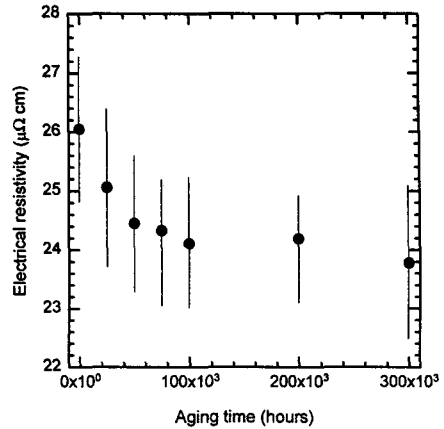


Fig. 2. Dependency of electrical resistivity on aging time

3.2. 열화에 의한 인성의 저하

Fig. 3은 열화시간에 따른 FATT의 변화를 나타내고 있다. FATT값은 열화시간에 따라 변하고 있으며, 50,000시간 사용재에 상당하는 가속 열화재에서 FATT의 값이 거의 최대에 수렴하였으므로 측정오차를 고려한다면 더 이상의 증가는 없다고 추정된다. 따라서 터빈 로터강의 경우 인성 열화도는 40,000시간 일 때가 최대이며, 그 이후부터는 사용시간이 증가해도 재료의 인성열화에 미치는 영향이 적다는 일부 연구자들의 연구결과¹⁾와 거의 일치하고 있다.

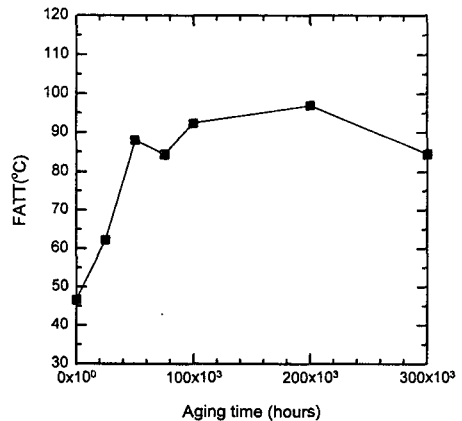


Fig. 3. Dependency of FATT on aging time

4. 고 찰

4.1. 전기비저항과 FATT와의 관계

Fig. 4에 전기비저항과 FATT의 관계를 나타내었

다. 열화시간이 증가함에 따라 초기엔 전기비저항은 크게 감소하고 FATT는 크게 증가하였다. 열화시간이 50,000시간을 넘으면 전기비저항과 FATT는 거의 변하지 않았다. 50,000시간 이상의 열화제에서 전기비저항의 변화가 거의 나타나지 않는 것에 대한 이유는 아직 밝혀지지 않고 있지만, 열화시간에 대한 전기비저항과 FATT의 의존성이 유사하기 때문에 둘 사이의 상관관계가 잘 나타나고 있다. 특히 열화가 시작되는 초기에 전기비저항과 FATT의 변화가 크므로 이 관계를 이용하여 전기비저항으로부터 FATT를 추정하는 것이 가능하다. 그리고 열화시간이 약 50,000시간 이상이 되면 FATT와 전기비저항의 변화가 적으므로 전기비저항과 FATT의 관계로부터 장시간 열화된 재료의 인성을 평가할 수 있다. 본 연구에서 얻은 전기비저항과 FATT와의 관계는 다음과 같다.

$$FATT = A_1(\rho) + B_1 \dots\dots\dots (1)$$

여기서 $A_1 = -21.23$, $B_1 = 6.00 \times 10^2$ 이다.

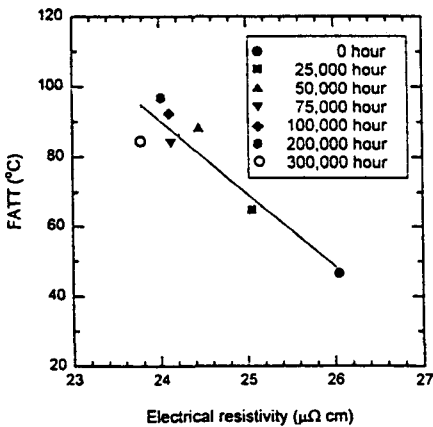


Fig. 4. Relationship between electrical resistivity and FATT

4.2. 전기비저항과 파괴인성과의 관계

전기비저항과 FATT가 좋은 상관관계를 가지고 있으므로 기존에 보고되어 있는 FATT와 파괴인성값 K_{IC} 와의 상관관계¹⁰⁻¹²⁾를 이용한다면 전기비저항 측정값으로부터 파괴인성값 K_{IC} 를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 파괴인성값을 추정하기 위해 Jones¹²⁾이 제

안한 식(2)를 이용하였다.

$$K_{IC} = 10800 / [108 - (T - FATT)] \dots\dots\dots (2)$$

여기서 K_{IC} 의 단위는 $\text{ksi}\sqrt{\text{in}}$, T 및 FATT의 단위는 °F 이다. Fig. 5는 초과온도(시험온도-FATT)에 대한 K_{IC} 의 변화를 나타낸 것으로서 참고문헌 10에서 인용한 데이터의 분산범위와 본 실험에서 얻은 데이터를 도시한 것이다. 본 실험에서 얻은 결과가 다른 연구자가 얻은 데이터의 분산폭내에 위치하고 있으므로, 본 실험결과가 인성평가에 사용될 수 있으리라고 사료된다. 따라서 비파괴적 방법으로 사용중인 로터의 인성을 평가하기 위해서는 먼저 로터의 전기비저항을 측정 후 전기비저항과 FATT와의 상관관계 (Fig. 4)를 통하여 FATT를 구할 수 있으며, 그 다음 K_{IC} 와 초과온도와의 상관관계를 이용하여 K_{IC} 를 추정할 수 있다.

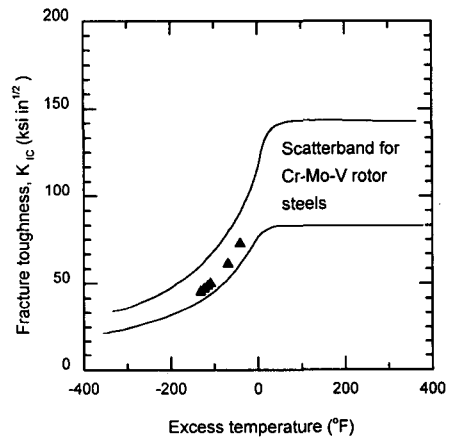


Fig. 5. Relationship*between excess temperature and fracture toughness, K_{IC}

Fig. 6은 전기비저항과 FATT를 이용하여 계산에 의해 얻은 K_{IC} 와의 상관관계를 나타낸다. 열화시간이 증가함에 따라 50,000시간까지는 파괴인성값과 전기비저항의 변화가 크게 나타난다. 그러나 열화시간이 50,000시간을 넘으면 FATT의 변화가 거의 나타나지 않기 때문에 FATT로부터 계산한 K_{IC} 의 값도 거의 차이가 나타나지 않으며 전기비저항의 변화도 거의 없다. 따라서 전기비저항은 재료인성과 좋은 상관관계를 나타내며 그 관계는 다음 식과 같다.

$$K_{IC} = A_2(\rho)^2 + B_2(\rho) + C_2 \dots\dots\dots (3)$$

여기서 $A_2 = -3.42$, $B_2 = 177.22$, $C_2 = -2.22 \times 10^3$ 이다.

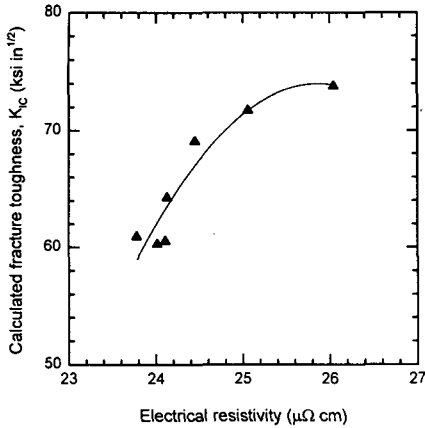


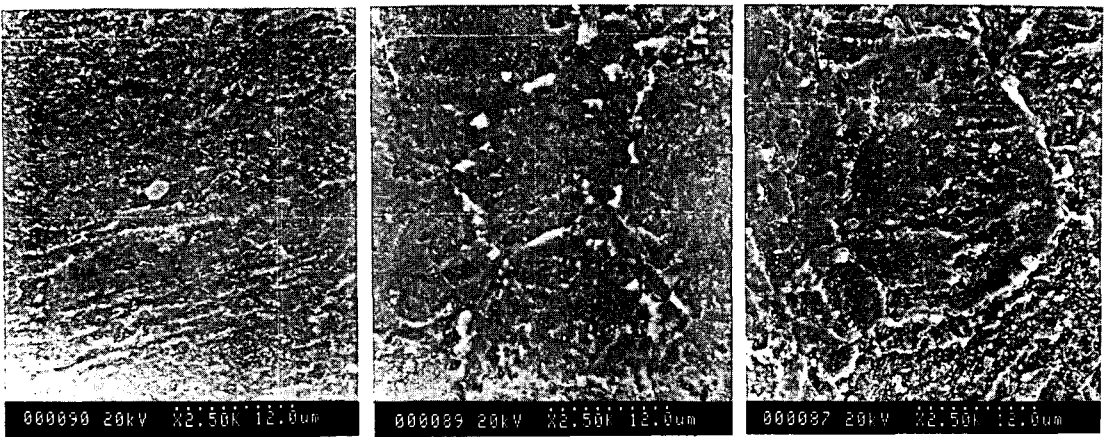
Fig. 6. Relationship between electrical resistivity and calculated fracture toughness

4.4 열화도에 따른 미세조직의 변화

열화도에 따른 기계적 성질 및 재료인성의 저하원인을 규명하기 위해 미사용재와 열화재의 미세조직을

주사형 전자현미경으로 관찰하였으며 Fig. 7에 나타내었다. 미세조직 관찰결과, 미사용재에서는 결정립 계상에 석출물이 거의 관찰되지 않았으나 열화도가 증가할수록 결정립계에서 석출물의 양이 증가하였다. 석출물의 성분을 주사형 전자현미경의 EDS(energy disperse spectrometer)로 분석한 결과를 Table 4에 나타내었다. 기지부의 경우 10만시간에 상당하는 열처리재의 화학성분은 미사용재의 화학성분과 유사하였으나, 결정립계에서는 열처리재와 미사용재의 화학성분이 다르게 나타났다. 즉, 열화된 재료의 결정립계에서는 다량의 Cr, Mo, Mn 등이 발견되었으며 이로 미루어 Cr, Mo, Mn계 석출물이 결정립계에 석출된 것으로 추정된다.

이와 같이 결정립계에서의 불순물의 편석량이 사용시간에 따라 점차 증가하며 이로 인해 고온에서 장시간 사용한 재료의 경우 전기비저항과 같은 물리적 성질과 인장강도 및 경도와 같은 기계적 성질 그리고 재료인성이 점차적으로 감소하게 된 것으로 판단된다. 즉, 사용시간에 종속적인 입계 석출물의 크기 및 분포가동이 재질열화를 유발하는 미시기구로 작용하여 재료의 물리적, 기계적 특성을 변화시키고 있음을 알 수 있다.



(a) unused material (b) 50,000 hours aging material (c) 100,000 hours aging material

Fig. 7. Microstructure of 1Cr-1Mo-0.25V steel

Table 4. Difference of chemical composition of virgin and 100,000 hrs degraded materials at grain boundary(Wt, %)

	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

5. 결론

재료의 전기비저항 성질을 이용하여 터빈 로터강의 파괴인성을 평가하는 비파괴법을 연구하였다. 아직 데이터가 부족하기는 하지만 비파괴적 방법으로 재료인성 및 물성을 평가할 수 있다는 가능성을 확인하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 열화시간이 증가함에 따라 전기비저항은 초기엔 감소하지만 약 75,000시간 이상의 모사 열화재에서 전기비저항의 감소 경향은 거의 나타나지 않았다.
- 2) 열화시간이 증가함에 따라 FATT는 초기엔 증가하였으나 약 50,000시간 이상의 모사 열화재에서 FATT는 더 이상 증가하지 않았다. 따라서 1Cr-1Mo-0.25V강의 재료특성상 전기비저항은 재료인성과 상관관계가 잘 나타났다.
- 3) 재료가 열화될수록 결정립계에서 다량의 석출물이 석출되었고 이들의 성분은 Cr, Mo, Mn 등으로 밝혀졌다.

후 기

본 연구는 과기처 국제공동연구과제인 “재료인성 열화도의 준비파괴적 평가기술 개발” 과제의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

1) R. Viswanathan and S. Gehl, Journal of Engineering Material and Technology, Vol. 113(1991), pp. 263-270

2) J. R. Foulds and C. W. Jewett, Report GS-7526, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California (1991)

3) S. H. Nahm, A. Kim, K. M. Yu, C. M. Suh and J. S. Park, Proceedings of the KSME 1996 Fall Annual Meeting A, Inha Univ., Incheon, (1996), pp. 292-297

4) T. Shoji and H. Takahashi, Life Extension and Assessment for Fossil Power Plants, EPRI CS-5208, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California (1987)

5) M. Sukekawa, M. Shiga, Y. Tobita and S. Kirihama, 1986, International Conference on Creep, Tokyo, Japan, April 14-18, (1986), pp. 321-325

6) S. H. Nahm, A. Kim and C. M. Suh, 1996, International Workshop on NDT & Safety '96, Yeungnam Univ., Kyongsan, September 5-6, (1996), pp. 289-298

7) S. H. Nahm, A. Kim, U. B. Baek and C. M. Suh, Proceedings of the 6th Symposium on Material Degradation and Life Prediction, (1996), pp. 57-69

8) 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, (1981), pp. 1613-1620

9) D. G. Fink and D. Christiansen, 'Electronics Engineers' Handbook, 2nd., McGraw Hill (1982)

10) R. C. Schwant and D. P. Timo, Life Assessment and Improvement of Turbogenerator Rotors for Fossil Plants, New York, Pergamon Press, (1985)

11) S. T. Rolfe and S. R. Novak, ASTM STP 463, (1970), pp. 124-159

12) G. T. Jones, Proc. of the Inst. of Mech. Eng., Vol. 186, (1972), pp. 32-32

Evaluation of Toughness Degradation of 1Cr-1Mo-0.25V Steel by Electrical Resistivity

S. H. Nahm*, K. M. Yu** and A. Kim***

* Material Strength Research Group, Failure Prevention Research Center,
Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-600

** Electricity Group, Division of Electromagnetic Metrology, Korea Research
Institute of Standards and Science, Taejon 305-600

*** Department of Mechanical Engineering, Kongju University, Kongju 314-701

Abstract Remaining life of turbine rotors with a crack can be assessed by the fracture toughness of the aged rotors at service temperature. DC potential drop measurement system was constructed in order to evaluate material toughness nondestructively. Test material was 1Cr-1Mo-0.25V steel used widely for turbine rotor material. Seven kinds of specimen with different degradation levels were prepared according to isothermal aging heat treatment at 630°C. Electrical resistivity of test material was measured at room temperature. It was observed that material toughness and electrical resistivity decreased with the increase of degradation. The relationship between fracture toughness and electrical resistivity was investigated. Fracture toughness of a test material may be determined nondestructively by electrical resistivity.