

고온에서 원거리 측정 시스템을 활용하기 위한 코팅기술의 응용에 관한 연구

서 창민(경북대 공대), 남 승훈(표준연구원), 이 해무(표준연구원)
김 용일(표준연구원), 김 동석*(경북대 대학원)

Coating technique for use with remote measurement system at elevated temperatures

Chang-Min Suh, Seung-Hun Nahm, Hae-Mu Lee
Yong-Il Kim, Dong-Suk Kim*

KEY WORDS : RMS 원거리 측정 시스템, Crack Measurement Method 균열 측정 방법, Coating Process 코팅공정, Tensile Strength 인장강도, Fatigue Crack Growth Rate 피로 균열 성장률.

ABSTRACT: The remote measurement system(RMS) as a new experimental method is limited in its application to crack measurements at elevated temperatures because of the oxide layer on the specimen surface. Since TiAlN and Cr coating layers have a high resistance to oxidation and wear, this paper proposed a TiAlN and Cr coating technique for specimens to facilitate the measurement of crack growth behavior using RMS.

To investigate the effects of the coating layer, tension and fatigue tests were carried out at room temperature and at 538°C, using specimens of 1Cr-1Mo-0.25V steel. From the experimental results, it was found that the mechanical properties of the TiAlN and Cr coated specimens were similar to those of the substrate. Accordingly, the TiAlN and Cr coated layer had hardly any influence on the fatigue crack propagation.

1. 서론

피로균열 성장거동에 대한 데이터를 얻기 위한 직접적인 측정방법인 레프리카법(replica method)은 주기적으로 레프리카를 균열면에서 채취해야하므로 많은 시간과 노력이 요구되며 사용온도에 제약이 있다(Suh, C. M., 1992; Swain, M. H., 1992). 또한 균열길이의 간접적인 측정방법인 전위차(potential drop)법(Gangloff, R. P., 1992)과 컴플라이언스(compliance)법(Vecchio, R. S., 1985)은 고온환경하에서나 부식환경하에서는 측정센서의 내열성과 내식성의 문제와 균열 크기와 사전 교정 관계의 필요성 때문에 그 적용이 제한되고 있다.

따라서, 레프리카법이나 간접 측정법 등을 대신하여 비교적 간편하게 균열의 발생 및 성장을 관찰하고 실시간에 연속적으로 관측한 균열 화상데이터를 컴퓨터에 입력시켜 그 크기를 영구 보존할 수 있는 원거리 측정시스템(remote measurement system, RMS)에 관한 연구가 최근에 활발하게 진행되고 있다(Ueno, A., 1995, Nahm, S. H., 1996, Nahm, S. H., 1996). 이와 같은 특징에도 불구하고

고온 환경 하에서 피로시험을 수행하면 시험편 표면의 산화막의 생성으로 인하여 원거리 측정시스템으로 균열 성장 거동의 관측 및 측정이 어렵기 때문에 그 사용이 제한되고 있다.

따라서 본 연구에서는 원거리 측정시스템으로 고온 환경하의 피로균열 관측 및 균열길이의 측정을 가능하게 하기 위해서 터빈 로터용 소재로 널리 사용되는 재료인 1Cr-1Mo-0.25V강에 표면 개질 기술의 일환인 내마모성, 내산화성이 우수한 TiAlN(서창민, 1995; 滝澤貴久男, 1993)와 경질 Cr(Karpov, D. A., 1997) 코팅 처리를 실시하여 고온 피로시험을 통하여 코팅층의 효과를 평가하고자 한다. 즉 코팅층이 모재의 기계적 성질과 피로 균열성장률에 미치는 영향을 검토하여 고온에서 원거리 측정시스템으로 균열 관측 및 측정에 코팅 처리의 유용성을 검토하는데 본 연구의 목적을 두었다.

2. 실험방법

2.1 시험편의 제작

본 연구에서 사용된 시험용 재료는 국내 화력

발전소의 증기 터빈 로터용 소재로서 많이 사용되고 있는 1Cr-1Mo-0.25V 강재로서, 그 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같다.

본 연구의 시험용 모재는 Fig. 1에 도시한 바와 같이 단조 제작된 원판형의 터빈 로터 강이다. 코팅재의 기계적 특성을 파악하기 위해서 인장시험편을 Fig. 1과 같이 시험편의 길이방향이 단조한 원통형 재료의 원주방향과 일치하도록 채취하였으며, 시험편의 형상은 ASTM E8 규정에 의거하여 Fig. 2(a)와 같이 평행부 직경 6mm, 길이 36mm의 표준시험편으로 제작하였다. 피로 시험편은 피로균열 성장이 용이하게 발생할 수 있도록 Fig. 1과 같이 균열 성장 방향이 모재의 원주 방향과 일치하도록 채취하였으며, 시험편의 형상은 ASTM E647 규격에 준하여 Fig. 2(b)와 같이 CT(compact tension) 시험편으로 가공하였다.

CT시험편의 노치부에서 발생, 성장하는 피로균열의 관측이 용이하도록 기계 가공한 시험편 표면은 에머리 페이퍼를 이용하여 #2000까지 연마한 후, 알루미늄(Al_2O_3)분말을 이용하여 시험편 표면을 버핑하여 표면조도를 향상시켰다.

2.2 시험편의 코팅

높은 이온화율과 이온 에너지로 밀착력이 우수하고 치밀한 피막조직을 얻을 수 있는 장점을 갖는 아크이온 플레이팅(arc ion plating, AIP)법을 채택하여 시험편에 TiAlN 코팅을 실시하였다.

아크이온 플레이팅 장비는 본체, 전원공급장치, 진공용기, 반응가스 공급장치, 진공펌프, 보조 가열원 및 시험편 회전장치로 구성되어 있다. 시험편 코팅은 진공용기에 장착하고 Mo히터로 진공을 유지하고 450℃까지 균일한 가열 및 코팅을 하기 위해서 시험편이 장착된 치구를 회전시킨다.

진공분위기 속에서 음(-)으로 전하된 타겟 표면에 양(+)으로 전하된 물리브덴선을 순간적으로 접촉시키면 타겟 표면에 아크 스팟(arc spot)이 발생되고 이로 인해 타겟 표면에 미세 용융 풀(pool)이 형성되어 Ti⁺이온이 방출된다.

이 때 시험편에 400V 이하의 음전압을 가하면 타겟에서 방출된 Ti⁺이온들이 시험편 표면에 증착(deposition)하게 된다. Ti 중간층(interlayer)의 두께가 0.1~0.3μm 정도가 되도록 Ti 중간층 코팅을 5분간 실시하고, 반응가스인 질소(N_2)를 공급한 후, 질소압력 1.5Pa, 바이어스 전압 200V, 타겟전류 70A하에서 TiN 중간층 코팅을 20분간 실시하였다. 이와 같은 공정을 통해서 모재와의 밀착력(bond strength)이 강화된다[11].

마지막으로 본 실험에서 사용된 TiAlN 코팅을 실시하기 위해서, Al 타겟을 점화시키게 된다. 그리고 아크이온 플레이팅 공정의 단점인 드롭렛(droplet)을 억제하기 위해 이온 필터(ion filter)를 사용하였다. 이런 코팅 층의 두께는 코팅 시간에 비례하여 결정되며, 본 실험에서는 시험편 표면에 5μm로 일정하게 코팅하였으며, TiAlN 코팅층은 짙은 감색(dark blue)을 띤다. Table 2에서는 본 실험에 사용된 아크이온 플레이팅의 코팅조건을 나타내고 있다.

Cr 코팅처리 공정은 코팅할 표면을 잘 연마하여 10% 알칼리 용액에서 예비 세척 한 후 아세톤으로 초음파 세척하였다. 치수 정밀도를 요하는 부품에 사용되는 적합양극 과정을 거쳐 부품과 양극을 확실히 유지하고 코팅에 필요한 전류를 통전하는 도체 등의 지그를 부품과 일체 시킨 후 코팅의 밀착성을 향상시키기 위해 양극처리 공정을 수행하였다. 처리액으로 크롬산 용액이 사용되었고, 처리액의 온도는 20~50℃, 전류 밀도는 20~70A/dm²로 하였다.

Table 1 Chemical compositions(%)

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mn	V	P
0.31	0.23	0.76	0.36	1.11	1.32	0.27	0.006

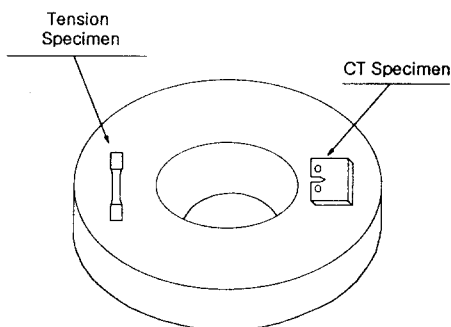
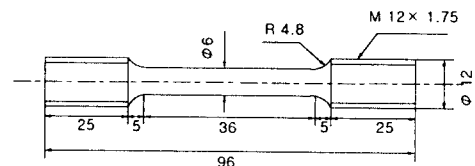
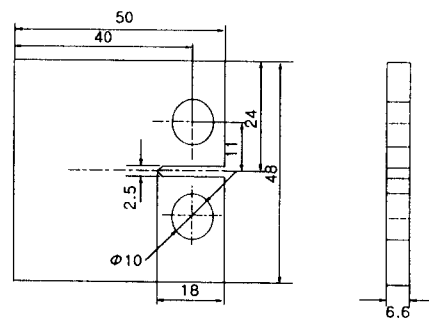


Fig. 1 Specimen orientation taken from a turbine rotor steel



(a)



(b)

Fig. 2 Geometry of specimen (a) tensile specimen (b) CT specimen (unit : mm)

시험편을 코팅조에 넣고 적당한 시간을 유지하여 전류를 통하게 한 후 전착을 개시하고 연속 작업을 수행하여 시험편 표면에 경질 Cr층이 형성되기 시작한다. Cr 코팅에는 다량의 수소가 흡장(吸藏)되어 모재에 영향을 주어 부품의 강도가 저하되는 수소 취성이 발생하므로 150~250℃의 노에서 2시간 처리하여 수소를 제거한 후 #1000정도의 에머리지로 연마하였다. 본 실험에서는 시험편에 5μm로 일정하게 코팅하였으며 Cr 코팅층은 은백색을 나타낸다. Table 3은 실험에 사용된 코팅 욕의 조성과 전착 조건을 나타내었다.

2.3 측정시스템의 구성

본 연구에서 적용된 원거리 측정시스템(RMS)은 Fig. 3과 같이 망원렌즈(Questar Ltd.)와 집중광원(light source), 3축 제어기, Digital indicator, CCD 카메라, 화상처리장치를 내장한 컴퓨터 등으로 구성되어 있다. 본 측정시스템의 장점은 실험 중에 실시간 연속적으로 정밀한 데이터를 얻을 수 있으며 직접적인 균열길이의 관측 및 측정이 가능한 것이다. 또한, 실험이 끝난 후에도 균열의 길이를 측정할 수 있도록 하기 위하여 CCD 카메라와 범용 시판되고 있는 화상처리장치(Optimas 6.0)를 이용하여 균열을 포함하는 시험편 표면의 화상

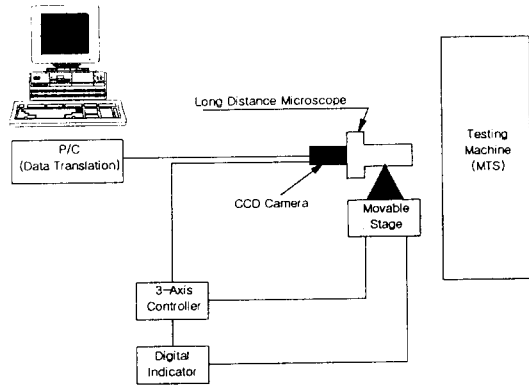


Fig. 3 Schematic diagram of remote measurement system

Table 2 TiAlN coating conditions of AIP

Temperature (°C)	Bias Voltage (V)	Current (A)	Vacuum (Torr)	Pressure of N ₂ (Pa)	Time (minute)
450	-200	50~100	10 ⁻⁴ ~10 ⁻⁶	1.0	70

Table 3 Bath composition and electrodeposition conditions

Bath composition	CrO ₃	50~110g/l
	(NH ₄) ₂ SO ₄	3~7g/l
	HCOOH	15 ml/l
Electrodeposition condition	Bath temperature	20~50℃
	Current density	20~70A/dm ²
	Anode	Pb alloy

(image)을 컴퓨터에 저장시켜 실험이 끝난 뒤라도 컴퓨터에 저장된 균열을 담은 화상을 불러내어 균열의 길이를 측정하는 것이 가능하다.

2.4 실험 방법

본 실험에서는 1Cr-1Mo-0.25V강의 시험편 표면에 TiAlN와 Cr 코팅 처리를 하여 코팅층이 모재의 기계적 특성 및 피로균열성장거동에 미치는 영향을 파악하기 위해서 인장시험, 경도시험 및 피로시험을 수행하였다. 인장시험을 비롯한 피로시험은 최대 용량이 100kN인 유압식 만능재료 시험기(MTS Ltd.)를 사용하였다. 고온에서 피로 시험을 수행하기 위해서 온도 가열 장치로 최대 900℃까지 사용할 수 있는 개폐식 사각형 전기로를 제작하여 사용하였다. 그리고 원거리 측정 시스템을 사용하여 전기로 내부의 시험편 표면을 균열의 관찰 및 측정을 용이하기 위해서 전기로 한쪽 벽면에 100×100mm 크기의 석영 투시창을 만들었다. 고온 피로시험을 수행할 때는 이 투시창을 통하여 고휘도의 빛을 시험편 표면에 조사시켜 전기로 내부의 시험편 표면 관찰이 가능하도록 하였다.

인장시험은 ASTM E8 규정에 따라서 Fig. 2와 같이 직경 6mm, 표점거리 25.4mm인 시험편을 제작하여, 하중속도 1 mm/min로 일정하게 제어하면서 상온과 고온에서 각각 수행하였다.

1Cr-1Mo-0.25V강의 균열의 성장거동을 파악하기 위해서 상온·대기 분위기, 고온·대기 분위기, 고온 아르곤 가스 분위기에서 하중 반복 속도 10 Hz, 응력비 R=0.1 조건에서 정현파형으로 ASTM E647 규격에 준하여 각각 피로시험을 수행하였다.

균열길이의 측정을 위해 먼저 망원렌즈의 초점을 CT 시험편의 노치 선단부에 맞춘 후 피로시험을 시작하였다. 원거리 측정 시스템(RMS)으로 하중 반복수에 따른 균열성장거동을 관찰하였으며, 균열 길이는 시험을 멈춘 후 최대 피로 하중의 80%를 가한 상태에서 측정된 후 Image Processing 소프트웨어로 균열 화상을 컴퓨터에 저장하였다. 또한 코팅층의 경도값을 정량적으로 파악하기 위해서 상온에서 압입 하중 15g, 25g로 마이크로 비커스경도기(HMV-2000, Shimadzu)를 이용하여 측정하였다.

시험회수는 코팅재의 종류에 따라 시험편 당 10회 측정하여 평균값을 취하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시험편의 기계적 성질

Table 4는 코팅재의 상온 및 538℃에서 단순 인장시험한 결과를 비코팅재와 비교하여 나타낸 것이다. Table 4에서 알 수 있듯이 동일한 온도에서는 코팅재와 비코팅재의 인장강도는 거의 유사한 값을 나타내고 있다. 이것은 모재 표면의 코팅층이 얇고 취성이 크기 때문에 코팅층이 재료의 기계적 성질에는 거의 영향을 미치지 않는다는 사실에서 기인한다. 또한 비코팅재와 코팅재 모두 상온에 대하여 538℃에서 인장강도가 약 29% 크게 감소함을 확인 할 수 있다. 이와 같은 연구 결과는 다른 연구 결과와도 유사하다.

Table 5에 코팅층의 종류에 따른 모재의 경도값의 변화를 마이크로 비커스 경도기를 이용하여 측정된 결과를 나타내었다. 압입하중 15g를 기준으로 해서 TiAlN 코팅재의 경도값이 모재의 경도값보다 약 7.9배, Cr 코팅재는 약 2.3배 향상되었다. 또한 압입하중의 크기에 따라서 경도값의 차이가 나타나고 있다. 이는 코팅 두께가 얇기 때문에 압입하중이 높은 25g에서 15g보다 모재의 영향을 더 많이 받아 압흔 자국이 크게 나타났기 때문이며 이와 비슷한 연구결과가 보고되고 있다(서창민, 1995). 또한 TiAlN 코팅층이 Cr 코팅층보다 경도값이 높게 나타남을 알 수 있다. 일반적으로 TiAlN과 같은 세라믹 코팅이 Cr과 같은 금속 도금보다 경도값이 높게 나타났다.

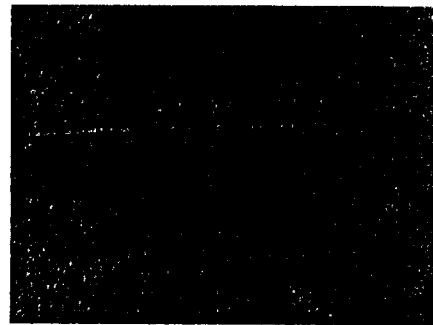
3.2 고온에서의 균열 화상

Fig. 4는 TiAlN 코팅재와 Cr 코팅재의 고온 피로 시험 수행과정에 원거리 측정 시스템을 이용하여 CT시험편에서 관찰한 균열 화상의 예를 나타내었다. 고온에서 관찰한 균열 화상은 상온만큼 선명한 화상은 얻을 수 없었지만, 시험편의 표면을 코팅 처리하므로 산화막의 형성이 억제되어 원거리 측정 시스템으로 균열의 관측 및 측정이 가능하였다.

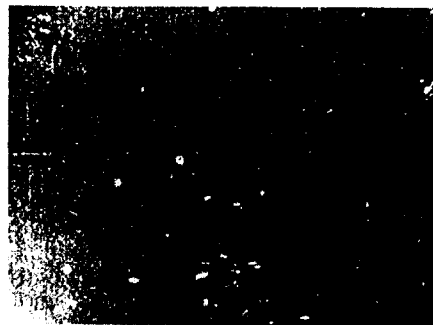
특히 Fig. 4(a)의 TiAlN 코팅재의 경우 피로균열의 화상이 다소 검게 나타났지만, Fig. 4(b) Cr 코팅재 보다 균열의 관측이 용이하였다.

Table 5 Micro-Vickers hardness of TiAlN, Cr coated specimens and uncoated specimen.

Specimen	Hv(15g)	Hv(25g)
Uncoated	295	258
TiAlN coated	2,320	2,295
Cr coated	682	745



(a)



(b)

Fig. 4 Examples of crack observation by the remote measurement system at 538℃ (a) TiAlN coated specimen(×100) (b) Cr coated specimen (×100)

Table 4 Mechanical properties of test materials.

Material	Temperature (℃)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)
Uncoated specimen	24	823.1	18.8	56.7
	538	580.6	22.7	55.5
TiAlN coated specimen	24	820.4	18.5	52.3
	538	584.2	22.8	55.4
Cr coated specimen	24	822.3	18	51.9
	538	581.3	22.5	53.3

3.3 상온에서의 피로균열성장거동

Fig. 5는 상온에서 비코팅재와 코팅재의 피로균열 성장거동을 피로균열 성장 속도(da/dN)와 응력 확대계수범위(ΔK)로 정리하여 양대수 좌표계로 나타낸 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 상온 대기 분위기에서 저 ΔK 영역에서는 코팅재의 균열 성장속도가 비코팅재의 균열 성장속도 보다 빠르게 성장하다가 ΔK 가 증가할수록 비코팅재와 거의 유사하게 성장하고 있음을 알 수 있다. 즉 전체적으로 코팅재의 피로균열 성장특성이 비코팅재와 거의 유사하므로 코팅층이 모재의 피로균열 성장에 미치는 영향이 상온 하에서는 그다지 크지 않음을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 다른 연구결과에서도 보고되어 있다(서창민, 1995; Suh, C.M., 1997). 이는 시험편의 표면 코팅층이 시험편의 두께와 비교해서 상당히 얇기 때문에 균열 전파에 필요한 구동력에는 영향을 주지 못하기 때문으로 해석된다. 따라서 상온에서 코팅층이 모재의 균열 전진속도에 큰 영향을 주지 않으므로 비코팅재의 실험 데이터를 코팅재의 실험 데이터로 대체해서 사용을 가능함을 알 수 있다.

비코팅재와 코팅재의 da/dN 과 ΔK 의 관계식을 Paris-Erdogan식으로 나타내면 다음 식과 같다. 식(1, 2, 3)은 각각 상온에서 비코팅재, TiAlN, Cr 코팅재의 피로균열성장거동을 나타내었다.

$$\frac{da}{dN} = 1.89 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.22} \quad (1)$$

$$\frac{da}{dN} = 3.39 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.05} \quad (2)$$

$$\frac{da}{dN} = 3.01 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.11} \quad (3)$$

3.4 고온에서의 피로균열성장거동

Fig. 6에 538°C 아르곤 가스와 대기 분위기 상태에서의 비코팅재의 피로균열 성장률을 나타내었다.

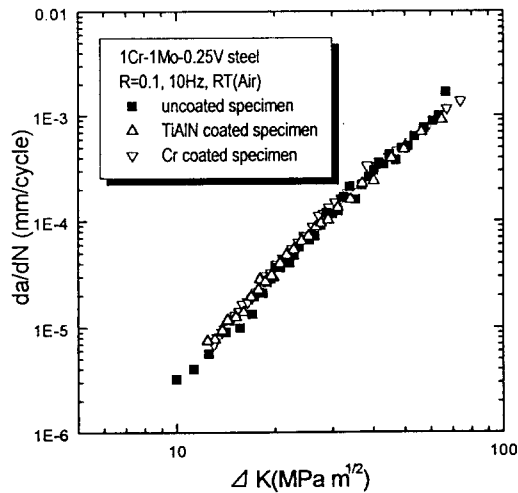


Fig. 5 Crack growth rates of TiAlN coated, Cr coated specimen and uncoated specimen at room temperature

538°C에서 피로시험을 수행하면 시험편 표면에 산화막이 형성되어 원거리 측정시스템으로 균열의 관측이 어려워져 직류 전위차법으로 고온 대기 분위기의 균열성장률을 얻었으며, 산화가 억제되는 아르곤 가스 분위기에서도 완전히 시험편 표면에 산화가 억제되지 않아서 4시간 피로시험을 한 후 피로시험을 일시 중단하여 시험편 표면에 생긴 산화막을 제거한 후 피로시험을 다시 실시하여 원거리 측정시스템으로 균열성장을 관측하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 538°C 아르곤 가스 분위기 상태의 균열 성장속도가 대기 분위기의 균열 성장속도 보다 약간 느리게 나타났지만, 시험편 표면의 산화가 모재의 피로 균열 성장률에 미치는 영향은 크지 않음을 알 수 있다.

Fig. 7은 538°C 대기분위기에서의 1Cr-1Mo-0.25V강의 코팅재와 비코팅재의 균열성장률을 비교해서 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 코팅재와 비코팅재의 균열성장거동이 유사하게 성장하고 있음을 알 수 있다. 즉 코팅층이 모재의 균열 성장 속도에는 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다.

따라서 본 논문에서 적용된 TiAlN 및 Cr 코팅 처리가 시험편 표면에 생기는 산화막의 형성을 억제하여 원거리 측정시스템으로 균열관측 및 균열 길이의 측정을 가능하게 하였다. 특히 538°C에서도 TiAlN 및 Cr 코팅처리가 모재의 피로균열 전진 속도에는 영향을 미치지 않으므로 고온피로 및 크리프-피로와 같은 장시간의 유지시간이 요구되는 환경하에서 대단히 유용할 것으로 판명된다. 따라서 원거리 측정시스템으로 측정된 고온하의 코팅재의 실험 데이터로 비코팅재의 고온실험 데이터를 대체하여 사용하는 것이 가능하다. 식(4, 5, 6, 7)은 각각 538°C 비코팅재 아르곤 분위기, 비코팅재 대기 분위기, TiAlN 코팅재 대기 분위기, Cr 코팅재 대기 분위기중에서의 균열성장률을 나타내었다.

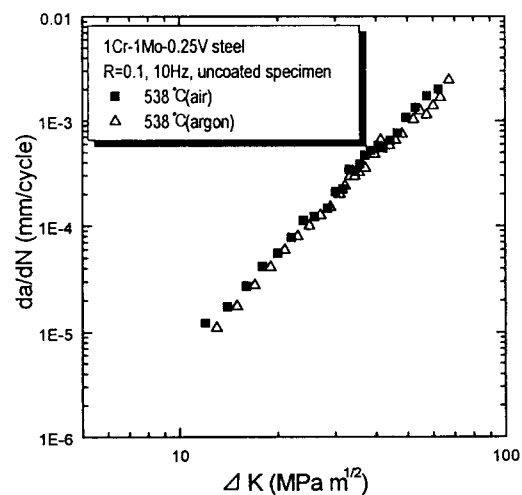


Fig. 6 Crack growth rates in air and argon environment at 538°C

참고문헌

$$\frac{da}{dN} = 3.52 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.18} \quad (4)$$

$$\frac{da}{dN} = 4.13 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.18} \quad (5)$$

$$\frac{da}{dN} = 9.52 \times 10^{-9} (\Delta K)^{2.95} \quad (6)$$

$$\frac{da}{dN} = 7.85 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.00} \quad (7)$$

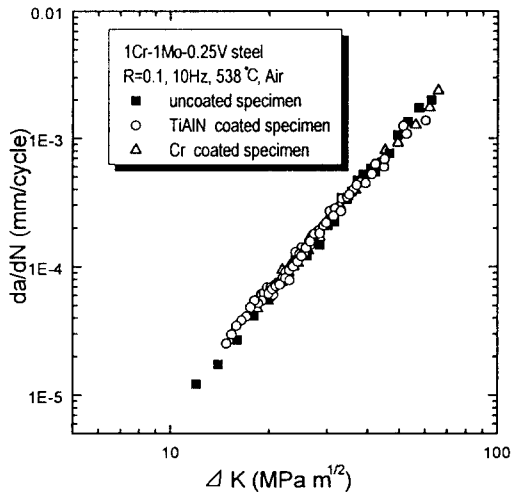


Fig. 7 Crack growth rates of TiAlN coated, Cr coated specimen and uncoated specimen at 538°C

4. 결론

화력 발전소의 터빈 로터 강재로 널리 사용되는 1Cr-1Mo-0.25V 강재에 TiAlN 및 경질 Cr 코팅 처리를 통하여 상온 및 538°C에서 피로시험을 실시하였다. 코팅층이 모재의 기계적 특성과 피로 균열 성장거동에 미치는 영향을 조사하여 538°C에서의 원거리 측정시스템(RMS)의 균열 관측에의 코팅처리의 유용성에 대해서 연구하였다.

- 538°C에서 TiAlN 및 Cr 코팅처리를 통하여 시험편 표면의 산화막 형성을 억제시켜, 원거리 측정 시스템으로 균열관찰 및 균열길이의 연속적인 측정이 가능하였다.
- 538°C 아르곤 가스 분위기 상태의 균열성장속도가 538°C 대기 분위기의 균열성장속도 보다 다소 느리게 나타났지만 시험편 표면의 TiAlN 및 Cr 코팅에 의한 산화가 균열성장속도에 미치는 영향은 크지 않았다.
- 상온 및 538°C에서 피로시험을 수행한 결과 TiAlN 및 Cr 코팅 처리가 피로균열 성장속도에 미치는 영향이 거의 없으므로 코팅재의 실험 데이터로 비코팅재의 실험 데이터를 대체하는 것이 가능하다.

서창민, 김경렬, 권현욱(1995). "세라믹 코팅된 1Cr-1Mo-0.25V강재의 피로균열의 발생, 성장 거동," 대한기계학회 춘계논문집(1), pp. 185~190.

Gangloff, R. P., Slavik, D. C., Piascik, R. S. and Van Stone R. H., 1992, "Direct Current Electrical Potential Measurement of the Growth of Small Cracks," ASTM STP 1149, pp. 116~168.

Karpov, D. A., 1997, "Cathodic Arc Sources and Macroparticle Filtering," Surface and Coatings Technology 96, pp. 22~33.

Nahm, S. H., Lee, H. M., Suh, C. M. and Kee, S. S., 1996, "Measurement of Small Surface Fatigue Cracks by Remote Measurement System," Journal of Materials Science Letters, Vol. 15, pp. 422~424.

Nahm, S. H., Lee, H. M., Suh, C. M., 1996, "A Study on Observation and Growth Behavior of Small Surface Cracks by Remote Measurement System," J. KSME Journal, Vol. 10, No. 4, pp. 396~404.

Shieu, F. S., Cheng, L. H., Shiao, M. H. and Lin, S. H., 1997, "Effects of Ti Interlayer on the Microstructure of Ion-plating TiN Coatings on AISI 304 Stainless Steel," Thin Solid Films, 311, pp. 138~145.

Suh, C.M., Kim, K.R., Do, S.G., 1997, "Crack Growth Behavior of Ceramic Coated 1Cr-1Mo-0.25V Steel," Proc. of an International Conference on Advanced Materials Development and Performance, Auckland, New Zealand, pp. 256~261.

Suh, C. M., Hwang, N. S. and Park M. K., 1994, "Fatigue Crack Growth, Coalescence Behavior and Its Simulation on Multi-Surface Cracks," Trans. KSME, Vol. 18, No.2, pp. 716~728.

Swain, M. H., 1992, "Monitoring Small-Crack Growth by the Replication Method," ASTM STP 1149, pp. 34~56.

Ueno, A., Kishimoto, H., Kondo, T. and Uchida, M., 1995, "Automated Fatigue Crack Growth Tracking System With Image Processor," Trans. JSME(A), Vol. 61, No. 585, pp. 53~58.

Vecchio, R. S., Jablonski, D. A., Lee, B. H., Hertzberg, R. W., Newton, C. N., Roberts, R., Chen, G. and Connelly G., 1985, "Development of an Automated Fatigue Crack Propagation Test System," ASTM STP 877, pp. 44~66.

瀧澤貴久男., 1993, "PVD, CVD薄膜による耐蝕性の改善," 材料科學, Vol. 30, No. 2 pp. 70~78.