

## 고온 피로균열 성장거동 관찰을 위한 코팅기술의 응용

남승훈\* · 김용일\*\* · 서창민\*\*\* · 김동식\*\*\*\*

\*한국표준과학연구원 산업측정표준부

\*\*한국표준과학연구원 물질량표준부

\*\*\*경북대학교 기계공학부

\*\*\*\*삼익정공(주) 기술연구소

## Application of Coating Technique for Measurement of Elevated Temperature Fatigue Crack Growth Behavior

SEUNG-HOON NAHM\*, YONG-IL KIM\*\*, CHANG-MIN SUH\*\*\* AND DONG-SUK KIM\*\*\*\*

\*Division of Industrial Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea

\*\*Division of Chemical and Material Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea

\*\*\*Department of Mechanical Engineering, Kyungbuk National University, Daegu, Korea

\*\*\*\*Research Institute of Technology, Samick LMS, Daegu, Korea

**KEY WORDS:** Coating Technology 코팅기술, Elevated Temperature Fatigue 고온피로, Crack Growth 균열성장, Remote Measurement System 원거리측정시스템

**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. The test material was 1Cr-1Mo-0.25V steel which is widely used as a turbine rotor material. 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. 서 론

피로균열 성장거동에 대한 데이터를 얻기 위한 레프리카법(replica method)은 주기적으로 레프리카를 균열면에서 채취해야 하므로 많은 시간과 노력이 요구되며 사용온도에 있어서 제약이 있다(Suh et al., 1992; Swain, 1992). 또한 균열길이의 간접 측정법인 전위차(potential drop)법(Gangloff et al., 1992), 컴플라이언스(compliance)법(Vecchio et al., 1985)은 고온 환경 하에서나 부식 환경 하에서는 측정 센서의 내열성과 내식성에 대한 문제와 균열 크기와의 사전 교정 관계의 필요성 때문에 그 적용이 제한되고 있다.

위와 같은 이유로 레프리카법이나 간접 측정법 등을 대신하여 비교적 간편하게 균열의 발생 및 성장을 관찰하고 실시간에 연속적으로 그 크기를 측정할 수 있는 새로운 시험기법의 개발이 요구되고 있다. 이를 위하여 균열 화상 데이터를 컴퓨터에 입력시켜 그 크기를 측정하고 영구 보존할 수 있는 원거리 측정 시스템(remote measurement system, RMS)에 관한 연구

가 최근에 활발하게 진행되고 있다(Ueno et al., 1995; Nahm et al., 1996; Nahm and Suh, 1997). 이와 같은 특징에도 불구하고 고온 환경 하에서 피로 시험을 수행하면 시험편 표면의 산화막의 생성으로 인하여 원거리 측정시스템으로 균열 성장 거동의 관측 및 측정이 어렵기 때문에 그 사용이 제한되고 있다.

본 연구에서는 원거리 측정 시스템으로 고온 환경하의 피로 균열 관측 및 균열 길이의 측정을 가능하게 하기 위해서 터빈 로터용 소재로 널리 사용되는 재료인 1Cr-1Mo-0.25V강에 표면 개질 기술의 일환인 내마모성, 내산화성이 우수한 TiAlN(서창민과 김경렬, 1997)과 경질 Cr 코팅(Karpov, 1997) 처리를 실시하여 고온 피로시험을 통하여 코팅층의 효과를 평가하고자 한다. 즉 코팅층이 모재의 기계적 성질과 피로 균열 성장률에 미치는 영향을 검토하여 고온에서 원거리 측정 시스템으로 균열 관측 및 측정에 코팅 처리의 유용성을 검토하는데 본 연구의 목적을 두었다.

### 2. 실험 방법

#### 2.1 시험편의 제작

본 연구에서 사용된 시험용 재료는 국내 화력 발전소의 증기 터빈 로터용 소재로서 많이 사용되고 있는 1Cr-1Mo-0.25V

제1저자 남승훈 연락처: 대전광역시 유성구 도룡동 1

042-868-5383 shnahm@kriss.re.kr

**Table 1** Chemical compositions of 1Cr-1Mo-0.25V steel (Wt, %)

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mn	V	As
Composition	0.31	0.23	0.76	0.006	0.001	0.36	1.11	1.32	0.27	0.006

**Table 2** TiAlN coating conditions of AIP

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

강재로서, 그 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같다.

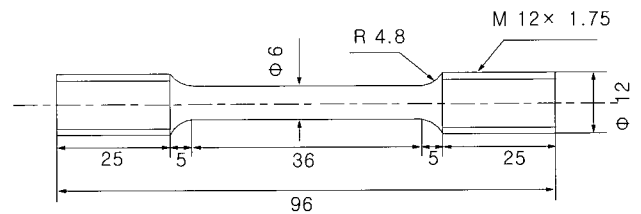
본 연구의 시험용 모재는 Fig. 1에 도시한 바와 같이 단조 제작된 원판형의 터빈 로터 강이다. 코팅재의 기계적 특성을 파악하기 위해서 인장시험편을 Fig. 1과 같이 시험편의 길이방향이 단조한 원통형 재료의 원주방향과 일치하도록 채취하였다. 인장시험편의 형상은 ASTM E8 규격(ASTM, 2000)에 의거하여 Fig. 2(a)와 같이 평행부 직경 6 mm, 평행부 길이 36 mm의 표준시험편으로 제작하였다. 피로 시험편은 피로균열 성장이 용이하게 발생될 수 있도록 Fig. 1과 같이 균열 성장 방향이 모재의 원주 방향과 일치하도록 채취하였으며, 시험편의 형상은 ASTM E647 규격(ASTM, 1999)에 준하여 Fig. 2(b)와 같이 compact tension(CT) 시험편으로 가공하였다.

CT시험편의 노치부에서 발생, 성장하는 피로균열의 관측이 용이하도록 기계 가공한 시험편 표면은 에머리 페이퍼를 이용하여 #1200까지 연마한 후, 다이아몬드 페이스트(6 μm, 1 μm)를 이용하여 시험편 표면을 버핑하여 표면조도를 향상시켰다.

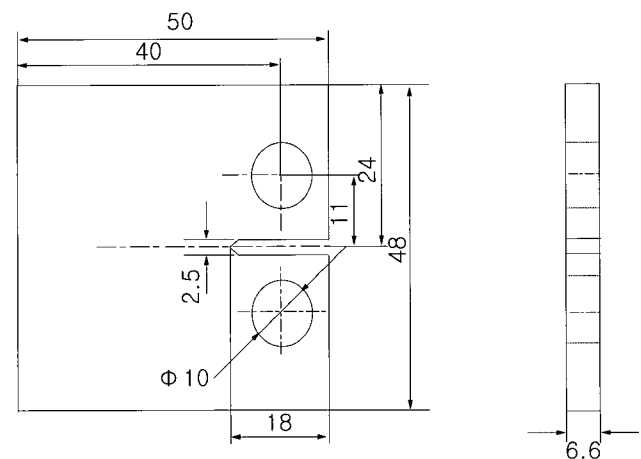
**2.2 시험편의 코팅**

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

아크이온 플레이팅 장비는 본체, 전원 공급 장치, 진공 용기, 반응가스 공급장치, 진공펌프, 보조 가열원 및 시험편 회전장치로 구성되어 있다. 시험편 코팅은 진공용기에 장착하고 Mo 히터로 450 °C까지 균일한 가열 및 코팅을 하기 위해서 시험편이 장착된 치구를 회전시켰다. 진공분위기 속에서 음(-)으로 전하된 타겟 표면에 양(+)으로 전하된 폴리브텐션을 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 400 V 이하의 음전압을 가하면 타겟에서 방출된 Ti+이온들이 시험편 표면에 증착(deposition)

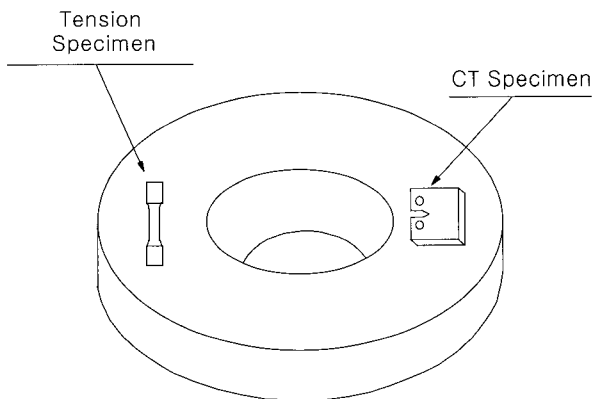


(a)



(b)

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



**Fig. 1** Specimen orientation taken from a turbine rotor steel

하게 된다. Ti 중간층(interlayer)의 두께가 0.1~0.3  $\mu\text{m}$  정도가 되도록 Ti 중간층 코팅을 5분간 실시하고, 반응가스인 질소( $\text{N}_2$ )를 공급 한 후, 질소압력 1.5 Pa, 바이어스 전압 200 V, 타겟전류 70 A하에서 TiN 중간층 코팅을 20분간 실시하였다. 이와 같은 공정을 통해서 모재와의 밀착력(bond strength)을 강화시켰다(Shieu et al., 1997).

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(Karpov, 1997; Gang et al., 1994). 이런 코팅 층의 두께는 코팅 시간에 비례하여 결정되며, 본 실험에서는 시험편 표면에 5  $\mu\text{m}$ 로 일정하게 코팅하였으며, TiAlN 코팅 층은 짙은 검색(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 세척한 후 아세톤으로 초음파 세척하였다. 치수 정밀도를 요하는 부품에 사용되는 적합양극 과정을 거쳐 부품과 양극을 확실하게 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  $^{\circ}\text{C}$ , 전류 밀도는 20~70  $\text{A}/\text{dm}^2$ 로 하였다.

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  $^{\circ}\text{C}$ 의 노에서 2 시간 처리하여 수소를 제거한 후 #1000정도의 에머리 페이퍼로 연마하였다. 본 실험에서는 시험편에 5  $\mu\text{m}$ 로 일정하게 코팅하였으며 Cr 코팅층은 은백색을 나타낸다. Table 3은 실험에 사용된 코팅 욕의 조성과 전착 조건을 나타내었다.

### 2.3 측정시스템의 구성

본 연구에서 적용된 원거리 측정 시스템은 Fig. 3과 같이 망원렌즈(Questar Ltd.)와 집중광원(light source), 3축 제어기, digital indicator, CCD 카메라, 화상처리장치를 내장한 컴퓨터 등으로 구성되어 있다. 본 연구에서 사용한 렌즈의 초점거리는 약 840 mm이며, 렌즈에서 잡은 영상은 CCD 카메라를 통하여 모니터에 나타내었다. 영상은 렌즈의 조합에 따라 약 80~480 배 정도 확대된다.

본 측정 시스템의 장점은 실험 중에 실시간 연속적으로 정밀한 데이터를 얻을 수 있으며 직접적인 균열 길이의 관측 및 측정이 가능하다는 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(image)을 컴퓨터에 저장시켜 실험이 끝난 뒤라도 컴퓨터에 저장된 균열을 담은 화상을 불러내어 균열의 길이를 측정하는 것이 가능하도록 하였다.

본 연구에서 구성한 측정시스템의 정밀도를 평가하기 위하여 교정을 실시하였다. RMS와 교정 받은 200mm 자(scale)를

Table 3 Bath composition and electrodeposition conditions

Bath composition	CrO <sub>3</sub>	50~110 g/l
	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3~7 g/l
	HCOOH	15 ml/l
Electrodeposition condition	Bath temperature	20~50 $^{\circ}\text{C}$
	Current density	20~70 $\text{A}/\text{dm}^2$
	Anode	Pb alloy

정렬한 후 모니터에 나타난 자 눈금의 상으로부터 측정된 값을 자의 눈금과 비교하여 본 시스템의 정밀도를 확인하였다. 40 mm 눈금을 20회 측정된 결과 평균측정값은 39.68 mm로서 실제 길이와의 오차는 -0.8 % 였다.

본 시스템은 표면 균열의 측정시 높은 정밀도를 갖고 있으며 피로균열의 발생 및 성장거동을 컴퓨터에 영구히 보관할 수 있다. 또한 본 시스템은 고온이나 불활성 가스 분위기 등의 특수 환경 하의 피로균열의 성장거동을 관찰하는데도 적용 가능하므로 다른 시험방법에 비해 여러 가지 측면에서 유용하다. 그러나 측정 분해능의 한계 때문에 균열의 개구변위나 균열단 힘 등을 측정하기는 어렵다.

CCD 카메라는 균열의 진전이 CCD 카메라로 얻어진 전체 영상의 3/4 지점에 도달했을 때 이동하게 하였다. 또한 본 연구에 사용한 CCD 카메라의 픽셀은 768(H)  $\times$  494(V) 이며, 1cell size 는 8.4 $\mu\text{m}$   $\times$  9.8 $\mu\text{m}$  이다. 본 시스템에서 이용할 수 있는 최대 배율인 6배의 렌즈를 이용할 경우 17인치 모니터에 나타나는 상은 실제 크기의 약 480배 정도이다. 그리고 이 경우 입력영상의 1픽셀(340 $\mu\text{m}$ )은 실제 약 0.7 $\mu\text{m}$ 에 해당한다. 따라서 본 시스템에서 균열로의 식별이 가능한 최소한치균열크기는 30 $\mu\text{m}$ 이다.

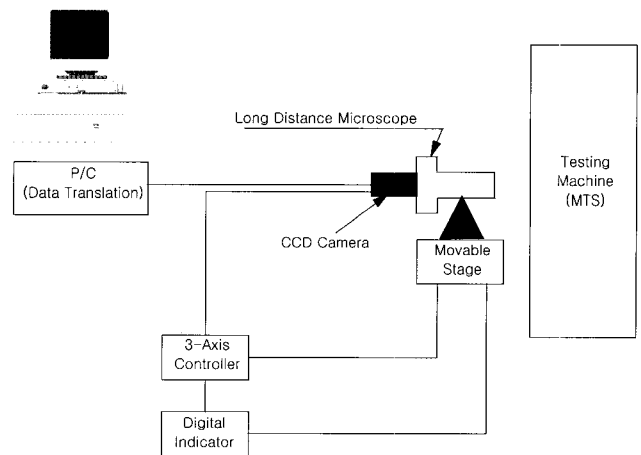


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup with remote measurement system

2.4 실험방법

본 실험에서는 1Cr-1Mo-0.25V강의 시험편 표면에 TiAlN과 Cr 코팅처리를 하여 코팅층이 모재의 기계적 특성 및 피로균열성장거동에 미치는 영향을 파악하기 위해서 인장시험, 경도 시험 및 피로시험을 수행하였다. 인장시험을 비롯한 피로시험은 최대용량이 100 kN인 유압식 만능재료시험기를 사용하였다.

고온에서 피로시험을 수행하기 위해서 온도가열장치로 최대 1100 °C까지 사용할 수 있는 개폐식 사각형 전기로를 제작하여 사용하였다. 제작된 전기로는 PID 컨트롤러를 사용하여 시험온도에서 ±1 °C 이내로 유지할 수 있다. 그리고 원거리측정 시스템을 사용하여 균열의 관찰 및 측정을 용이하게 하기 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.

고온에서 시험할 때 광원의 밝기에 특히 유의하였는데 fiber type의 광원은 피사체와의 거리가 50mm 이상 떨어지면 조도가 현격히 저하되어 균열 상이 모니터에 나타나지 않았다. 이러한 문제점을 해결하고자 fiber type 광원 앞에 알루미늄 경통과 집광렌즈를 부착시켜 300mm 정도의 거리에서 빛을 비추어도 전기로 내부의 균열이 관찰되도록 하였다.

인장시험은 ASTM E8 규격(ASTM, 2000)에 따라서 Fig. 2와 같이 직경 6mm, 표점거리 25.4mm인 시험편을 제작하여 하중속도 1mm/min로 일정하게 제어하면서 상온과 고온에서 각각 수행하였다.

1Cr-1Mo-0.25V강의 균열성장거동을 파악하기 위해서 상온·대기 분위기, 고온·대기 분위기, 고온·아르곤 가스 분위기에서 하중반복속도 10 Hz, 응력비 R = 0.1 조건에서 정형파형으로 ASTM E647 규격(ASTM, 1999)에 준하여 K 증가법으로 각각 피로시험을 수행하였다. 또한 고온에서의 시험온도는 538 °C로 정하였는데 그 이유는 본 연구에서 선택한 1Cr-1Mo-0.25V강이 사용되는 화력발전소 터빈로터의 입구부에서의 증기온도가 538 °C이기 때문이다.

균열길이의 측정을 위해 먼저 망원렌즈의 초점을 CT 시험편의 노치 선단부에 맞춘 후 피로시험을 시작하였다. 원거리측정 시스템을 사용하여 하중반복수에 따른 균열성장거동을 관찰하였으며, 균열길이는 주기적으로 시험을 멈춘 후 최대 피로하중의 80 %를 가한 상태에서 측정된 후 image processing 소프트웨어로 균열화상을 컴퓨터에 저장하였다.

또한 코팅층의 경도값을 정량적으로 파악하기 위해서 마이크로 비커스 경도기 (HMV-2000, Shimadzu)를 이용하여 상온에서 압입하중 15 g에서 측정하였다. 시험횟수는 코팅제의 종류에 따라 시험편당 10 회 측정하여 평균값을 취하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 시험재의 기계적 성질

Table 4는 코팅제의 상온 및 538 °C에서 단순 인장 시험한

결과를 비코팅제와 비교하여 나타낸 것이다. Table 4에서 알 수 있듯이 동일한 온도에서는 코팅제와 비코팅제의 인장 강도는 거의 유사한 값을 나타내고 있다. 이것은 모재 표면의 코팅층이 얇고 취성이 크기 때문에 코팅층이 재료의 기계적 성질에는 거의 영향을 미치지 않는다는 사실에 기인한다(Suh et al., 1999; 오맹종 외, 1998). 또한 비코팅제와 코팅제 모두 상온에 대하여 538 °C에서 인장강도가 약 29 % 감소함을 확인할 수 있다. 이와 같은 연구 결과는 다른 연구 결과와도 유사하다.(Suh et al., 1999; Suh et al., 1997)

Table 5에 코팅층의 종류에 따른 경도값의 변화를 마이크로 비커스 경도기를 이용하여 측정된 결과를 나타내었다. 압입하중 25 g를 기준으로 해서 TiAlN 코팅제의 경도값이 모재의 경도값보다 약 9배, Cr 코팅제는 약 3배 향상되었다. 위의 결과로부터 코팅층이 모재에 비해 상당히 경하다는 것을 알 수 있다. 그러나 코팅 두께, 코팅조건 등과 같은 여러 가지 조건에 의해 경도값은 영향을 받을 수 있으므로 본 실험 조건에서 얻은 경도값을 코팅 소재의 경도특성으로 간주하기보다는 상대 비교값으로 활용하는 것이 바람직하다고 사료된다.

Table 4 Mechanical properties of test materials

Material	Temperature (°C)	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

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

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

3.2 고온에서의 균열화상

Fig. 4는 TiAlN 코팅제와 Cr 코팅제의 538 °C에서 피로 시험 수행과정에 원거리 측정 시스템을 이용하여 CT시험편에서 관찰한 균열 화상의 예를 나타내었다. 고온에서 관찰한 균열화상은 상온에서 만큼 선명하진 않았지만, 시험편의 표면을 코팅

처리함으로써 산화막의 형성이 억제되어 원거리 측정 시스템으로 균열의 관찰 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.

3.3 상온에서의 피로균열성장거동

Fig. 5는 비코팅재와 코팅재의 피로균열 성장거동을 균열 성장 속도 (da/dN)와 응력확대계수범위 (ΔK)로 정리하여 양대수 좌표계로 나타낸 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 상온 대기 분위기에서 전체적으로 코팅재의 피로균열 성장속도가 비코팅재의 성장속도와 유사하므로 코팅층이 모재의 피로균열 성장에 미치는 영향이 상온 하에서는 거의 없다는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 다른 연구결과에서도 보고되고 있다(서창민과 김경렬, 1997; Suh et al., 1997). 또한 서 등의 연구에 의하면 코팅층의 두께를 2.5 μm, 3.5 μm, 5.0 μm로 변화시켜도 코팅층의 두께가 균열성장속도에는 영향을 미치지 않았다고 보고하고 있다(서창민과 김경렬, 1997). 이는 시험편의 표면 코팅층이 시험편의 두께와 비교해서 상당히 얇기 때문에 균열 전파에 필요한 구동력에는 영향을 주지 못하기 때

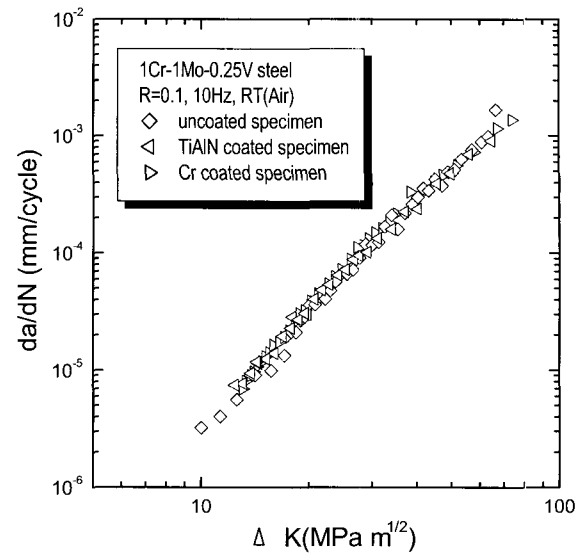


Fig. 5 Crack growth rates of TiAlN coated, Cr coated specimen and uncoated specimen at room temperature

문으로 사료된다.

비코팅재와 코팅재의 da/dN과 ΔK의 관계식을 Paris-Erdogan 식으로 나타내면 다음 식과 같다. 식(1)은 상온에서 비코팅재, TiAlN, Cr코팅재의 피로균열성장거동을 나타낸다.

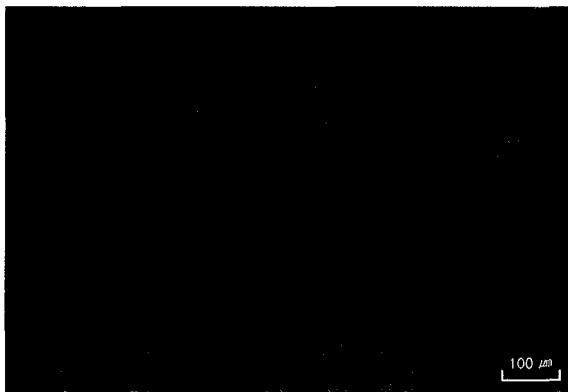
$$\frac{da}{dN} = C_1 (\Delta K)^{m_1} \tag{1}$$

여기서 피로균열진전속도의 단위를 mm/cycle로 나타내고 응력확대계수범위의 단위를 MPa m<sup>1/2</sup>로 나타낼 때, C<sub>1</sub> = 2.69×10<sup>-9</sup>, m<sub>1</sub> = 3.13 이다.

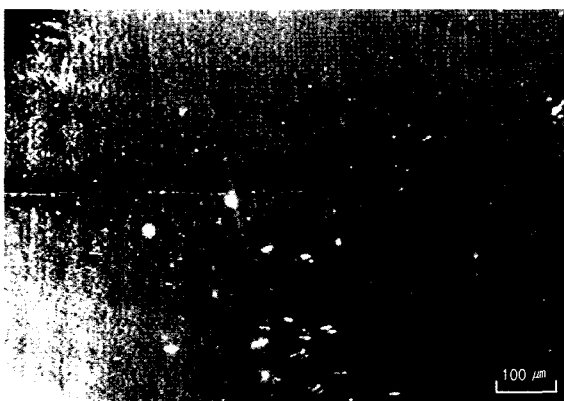
3.4 고온에서의 피로균열성장거동

Fig. 6에 538 °C 고온 아르곤 가스와 대기 분위기 상태에서 비코팅재의 피로균열 성장속도를 나타내었다. 538 °C에서 피로시험을 수행하면 시험편 표면에 산화막이 형성되어 원거리 측정 시스템으로 균열의 관측이 어려워서 직류 전위차법으로 고온 대기 분위기의 균열 성장속도를 얻었다. 직류전위차법의 측정 신뢰성은 이미 이전의 연구에서 원거리측정시스템과의 비교에 의해 확인된 바 있다(남승훈 등, 1996). 산화가 억제되는 아르곤 가스 분위기에서도 시험편 표면에서 산화를 완전히 억제시킬 수 없어서 4시간 피로시험을 한 후 피로시험을 일시 중단하여 시험편 표면에 생긴 산화막을 제거한 후 피로시험을 다시 실시하여 균열 성장을 관측하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 538 °C 고온 아르곤 가스 분위기 상태의 균열 성장속도가 538 °C 대기 분위기의 균열 성장속도 보다 약간 느리게 나타났다.

Fig. 7은 538 °C 고온 대기 분위기에서의 1Cr-1Mo-0.25V강의 코팅재와, 비코팅재의 균열 성장률을 비교해서 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 코팅재와 비코팅재의 균열 성장거동이 유사하게 성장하고 있음을 알 수 있다. 즉 코팅층이 모재의 균열 성장 속도에는 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

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

본 논문에 적용된 TiAlN 및 Cr 코팅 처리가 시험편 표면에 생기는 산화막의 형성을 억제하여 원거리 측정 시스템으로 균열 관찰 및 균열 길이의 측정을 가능하게 하였다. 특히 538 °C 에서도 TiAlN 및 Cr 코팅처리가 모재의 피로 균열 진전속도에는 영향을 미치지 않으므로 고온피로 및 크리프-피로와 같은 장시간의 유지시간이 요구되는 환경 하에서 대단히 유용할 것으로 사료된다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이 고온에서는 코팅재와 비코팅재의 균열성장속도가 비슷하기 때문에 원거리 측정 시스템으로 측정된 고온하의 코팅재의 실험 데이터로 비코팅재의 고온 실험 데이터를 대체하여 사용하는 것이 가능하다. 식 (2)와 (3)은 각각 538 °C 아르곤 분위기, 538 °C 대기분위기 중에서의 균열성장속도를 나타낸다.

$$\frac{da}{dN} = C_2 (\Delta K)^{m_2} \tag{2}$$

$$\frac{da}{dN} = C_3 (\Delta K)^{m_3} \tag{3}$$

여기서 피로균열진전속도의 단위를 mm/cycle로 나타내고 응력확대계수범위의 단위를 MPa m<sup>1/2</sup>로 나타낼 때, C<sub>2</sub> = 3.52 × 10<sup>-9</sup>, C<sub>3</sub> = 4.13 × 10<sup>-9</sup>, m<sub>2</sub> = m<sub>3</sub> = 3.18 이다.

따라서 고온·아르곤가스분위기에서의 균열성장속도와 고온·대기중에서의 균열성장속도를 비교한다면 기울기를 나타내는 m값은 같고 절편을 나타내는 C값에서 약간의 차이가 발생하므로 두 조건에서의 속도 차이는 C값의 차이에서 오며, 그 차이가 크지 않다는 것을 알 수 있다.

### 3.5 피로파면의 관찰

Fig. 8은 고온에서 각 코팅재의 피로시험 종료 후 주사형 전자현미경을 이용하여 피로 파단면의 피로균열 성장양상을 관찰한 사진의 일례를 나타내고 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 모재와 코팅층은 양호한 밀착상태를 유지하고 있으며, 피로 파괴 과정중의 코팅층 자신의 파괴 또는 박리현상은 발생되지 않은 것으로 관찰되고 있다. 또한 코팅층의 표면에 산화막이 형성되어 있지 않았다. 이는 축방향 하중제어 피로시험의 경우 거시적으로 큰 변형이 수반되지 않고 탄성거동 하에서 코팅층 및 모재와의 계면에서 개재물 등에 미소 변형이 축적되어 미소 균열이 발생되고 또한 이를 기점으로 응력이 집중되어 균열이 성장하기 때문이라고 추정된다.

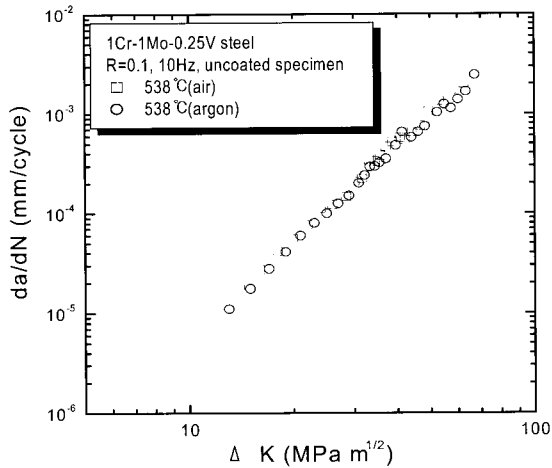


Fig. 6 Crack growth rates in air and argon environment at 538°C

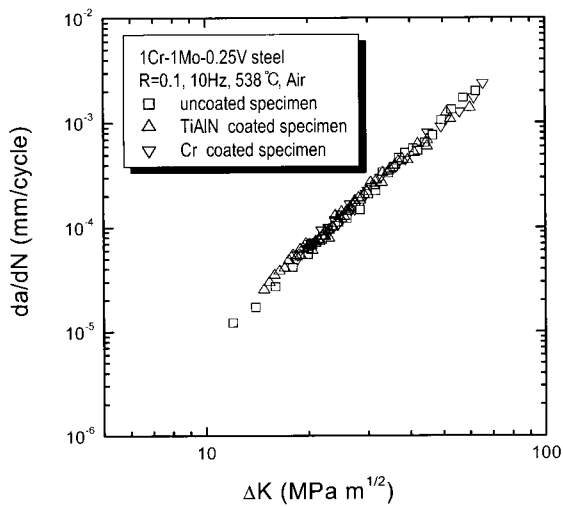
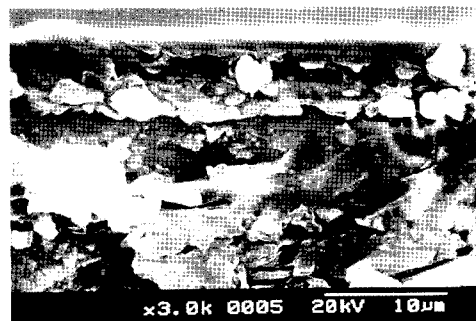
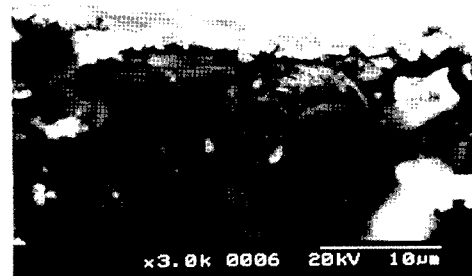


Fig. 7 Crack growth rates of TiAlN coated, Cr coated specimen and uncoated specimen at 538°C



(a) TiAlN coating layer



(b) Cr coating layer

Fig. 8 Fractography of the fatigue fractured surface

#### 4. 결 론

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 측정 시스템(RMS)의 균열 관측에의 코팅 처리의 유용성에 대해서 연구하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) TiAlN 및 Cr 코팅처리를 통하여 538 °C에서 시험편 표면의 산화막 형성을 억제시켜 원거리 측정 시스템으로 균열 관찰 및 균열 길이의 연속적인 측정이 가능하였다.

(2) 538 °C 아르곤 가스 분위기 상태의 균열 성장속도가 538 °C 고온 대기 분위기의 균열 성장속도 보다 다소 느리게 나타났다. 코팅재의 538 °C 대기중에서의 균열성장속도는 비코팅재의 538 °C 대기중에서의 균열성장속도와 유사하게 나타났다. 따라서 TiAlN 및 Cr 코팅처리가 시험편 표면에서 형성되는 산화막을 억제시켜 538 °C에서의 균열관찰을 용이하게 해 주었지만 균열 성장 속도에 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다.

(3) 상온 및 538 °C에서 피로시험을 수행한 결과, 각 시험온도에서 TiAlN 및 Cr 코팅 처리가 피로 균열 성장 속도에 미치는 영향이 거의 없으므로 비코팅재의 실험 데이터를 필요로 하는 곳에 코팅재의 실험 데이터로 대체하여 사용하는 것이 가능하다.

#### 참 고 문 헌

- 남승훈, 장상엽, 서창민, 김시천 (1996). "원거리측정시스템과 직류 전위차법을 이용한 고온피로균열 측정," 대한기계학회 춘계학술대회논문집(A), pp 37-42.
- 서창민, 김경렬 (1997). "TiN 코팅 공정 개선에 의한 1Cr-1Mo-0.25V 강재의 피로강도 특성," 한국해양공학회지, 제11권 제4호, pp 49-60.
- 서창민, 김경렬 (1997). "세라믹 코팅된 1Cr-1Mo-0.25V강의 피로균열성장 특성," 대한기계학회논문집 A권, 제21권 제10호, pp 1674-1682.
- 오맹중, 오창배, 김귀식 (1998). "세라믹 용사된 S45C강재의 기계적 특성 및 피로특성," 한국해양공학회지, 제12권 제1호, pp 32-38.
- Gang, G.H., Uchida, H. and Koh, E.S. (1994). "Macroparticle-Free TiN Films Prepared by Arc Ion-plating Process," Surface and Coatings Technology, 68/69, pp 141-145.
- 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, Vol 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. and Suh, C.M. (1997). "Observation on the Growth Behavior of Small Surface Cracks Using Remote Measurement System," ASTM STP 1318, pp 71-84.
- 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., 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.
- Suh, C.M., Kim, K.R. and 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., Kim, K.R. and Lee, D.W. (1999). "Fatigue Strength of Ti AlN Ceramic Coated 1Cr-1Mo-0.25V Steel at Elevated Temperatures," International Journal of Korean Ocean Engineering and Technology, Vol 1, No 1, pp 70-77.
- 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 Connolly G. (1985). "Development of an Automated Fatigue Crack Propagation Test System," ASIM STP 877, pp 44-66.
- ASTM (2000). "Standard Test Methods of Tension Testing of Metallic Materials," Annual Book of ASTM Standards, Part 10, E8, pp 130-149.
- ASTM (1999). "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," Annual Book of ASTM Standards, Part 10, E647, pp 674-701.

2001년 8월 27일 원고 접수

2002년 3월 12일 최종 수정본 채택