

<논 문>

세라믹 코팅된 1Cr-1Mo-0.25 V강의 피로균열성장 특성

서 창 민* · 김 경 렬**

(1997년 3월 17일 접수)

Fatigue Crack Growth Properties of Ceramic Coated 1 Cr-1 Mo-0.25 V Steel

C. M. Suh and K. R. Kim

Key Words : TiN Ceramic Coating (TiN 세라믹 코팅), Fatigue Crack Growth Rate (피로균열성장률), Arc Ion Plating (AIP, 아크-이온-플레이팅), Fractography (파단면 해석), Stress Intensity Factor Range (응력확대계수 범위)

Abstract

Fatigue tests were performed to investigate the effect of ceramic coatings as in TiN and TiCN on fatigue crack growth properties of ceramic coated 1Cr-1Mo-0.25V steel with different coating thickness in laboratory air conditions. The experimental results are described with respect to a Paris equation, $da/dN=C(\Delta K)^m$, where the crack growth rate of coated specimens provided as similar growth rate as that of the uncoated specimen regardless of coating thickness. Furthermore, it was observed that the type of coating layer had virtually no effect on crack growth rate in the full region of stress intensity factor range. And it was also appeared that the final crack length of TiCN coated specimens was short compared to that of TiN coated, and the substrate specimens, in which it was inferred due to lowering the toughness of coated material from high hardness of TiCN coating layer itself.

1. 서 론

최근, 금속의 표면에 세라믹을 코팅함으로써 코팅재의 전자기적 특성, 광학특성뿐만 아니라 내마모성, 내식성, 내열성, 내피로성 및 미관의 개선과 같은 표면처리 기술이 주목을 받고 있다.^(1,14,15) 또한, 세라믹 코팅은 표면개선방법 중에서도 모재의 표면에 세라믹 박막을 코팅함으로써 모재의 특성을 손상시키지 않고, 세라믹이 가지고 있는 내열성, 내부식성 및 내마모성을 접목할 수 있는 기술로서 추후 기계부품 및 구조 부재로서의 큰 활용이 기대되고 있다.

금속 재료에 세라믹을 10 μm 이하의 두께로 코팅하는 방법으로 물리증기증착(PVD) 및 화학증기증착(CVD) 등이 주로 이용되고 있다. PVD 방법의 일종인 아크-이온-플레이팅(AIP, Arc Ion Plating)은 박막의 밀착성이 높고, 가스와의 반응성이 좋으며, 비교적 저온(약 500°C 이하)에서 코팅을 할 수 있는 특징을 가지고 있다. 특히, 모재에 증착되는 박막의 세라믹재로서, TiN, TiC, TiCN, TiAlN 및 Al_2O_3 등과 같은 코팅재가 널리 이용되고 있다.⁽¹⁾ 이러한 세라믹재 중에서 TiN 코팅 박막은 마찰계수가 적고, 내식성, 내열성 및 모재와의 접착력이 우수하다. 또한 TiC로 코팅된 금속 재료는 높은 표면경도를 가지고 있어서 내마모성이 요구되는 기계부품 등에 주로 응용되고 있다. 그러나, TiC는 TiN 보다도 고경도를 가지고 있으나

*회원, 경북대학교 기계공학부

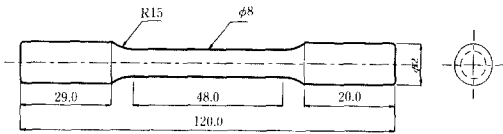
**회원, 포항공과대학교 가속기연구소

Table 1 Chemical compositions (wt, %)

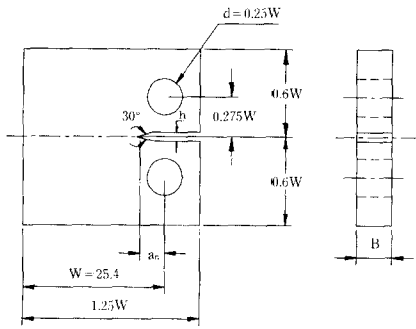
Element	C	Si	Mn	Cu	P	S	Ni	Al	Cr	Mo	V	As	Sn	Sb
Composition	0.29	0.24	0.76	0.03	0.0033	0.0006	0.46	0.0018	1.10	1.19	0.24	0.002	0.003	0.0006

Table 2 Arc ion plating conditions during TiN and TiCN coating process

Temp. (°C)	Bias voltage (V)	Pressure (Pa)		Time (min)		
		TiN	TiCN	2.5 (μm)	3.5 (μm)	5.0 (μm)
450	-200	N ₂ =1.0	N ₂ =1.0 CH ₄ =0.5	50	70	100



(a) Monotonic tensile specimen



(b) CT specimen ($a_n=0.2W$, $B=W/8$, $W/6$)

$$W/4, h = \frac{W}{16}$$

Fig. 1 Configuration of specimen (Unit : mm)

모재와의 부착력 및 윤활성이 떨어지는 것으로 알려지고 있다.^(1, 14) 따라서 이 두 가지 코팅재의 장점을 모두 활용한 TiCN 코팅 박막의 개발이 시도되고 있으며, 이는 절삭공구, 금형 등의 내마모성이 요구되는 기계부품 뿐만 아니라 침식 또는 캐비테이션(cavitation)에 의한 부식의 방지가 요구되는 증기터빈의 날개 등에 적용되어 큰 성과를 거두고 있음이 보고되고 있다.^(2,3)

세라믹 코팅재를 구조부재 등으로 사용하기 위해서는 코팅재의 피로특성 및 강도특성의 평가가 필요하며, 또한 금속의 피로균열이 주로 표면에서 발생된다는 점에 비추어 볼 때, 코팅처리를 통하여 금속표면이 경도가 높은 세라믹 박막으로 코팅됨으로써 코팅재의 피로균열의 발생 및 성장거동이 박

막의 영향을 받을 것으로 예상된다. 그러나, 세라믹 코팅재의 피로강도 문제에 대한 연구는 미흡한 실정이며, 특히, 강도설계에 반영하기 위한 목적의 피로강도, 균열의 발생 및 성장특성에 관한 연구는 충분치 않은 상태이다.^(4,9-13)

따라서 본 연구에서는 코팅 박막이 피로균열의 성장에 미치는 영향을 조사하기 위하여 터빈로터강으로 널리 사용되고 있는 1Cr-1Mo-0.25V강을 모재로 선택하여 PVD 방법중 아크-이온-플레이팅법(arc ion plating)으로 TiN 및 TiCN을 코팅하였다. 이때 CT 시험편의 두께는 W/8, W/6 와 W/4인 세가지 종류로 제작하였으며, 또한 세라믹 코팅 두께를 2.5 μm, 3.5 μm 및 5 μm인 세가지 종류로 코팅하여 실온 대기중에서 축인장하중제어 피로시험을 실시하고, 피로균열의 성장거동을 선형파괴역학적으로 해석하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편

본 실험에 사용된 시험편 재료는 터빈로터용 소재로 널리 사용되고 있는 1Cr-1Mo-0.25V 강으로서 재료의 화학적 조성은 Table 1 과 같다. 시험편은 시료의 조질을 균질화하기 위하여 955°C까지 가열하여, 22시간 동안 Air Blasting 처리를 한 다음, 다시 680°C에서 40 시간 유지시켜 노냉한 후, 단조 제작된 원관형 소재로부터 노치방향을 균열 성장이 가장 용이한 단조방향과 직각(C-R)으로 절단하여 채취하였다. 코팅재의 기계적 성질을 파악하기 위한 인장시험편은 ASTM E 8 규정에 따라 평행부 직경 8 mm의 표준시험편으로 가공하였다. 또한, ASTM E 647⁽⁷⁾에 의거하여 피로균열성장 시

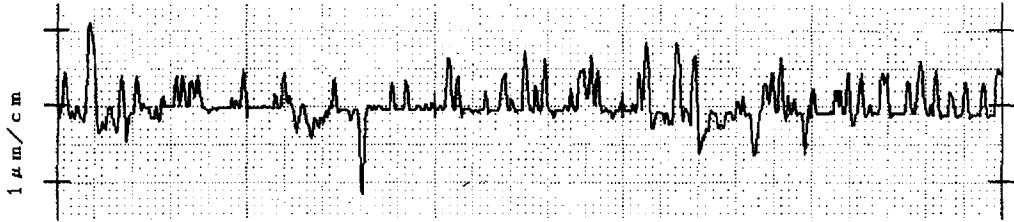


Fig. 2 Profile of surface roughness along the surface of 3.5 μm TiCN coated specimen

험을 위한 CT 시험편은 세종류(W/8, W/6, W/4)의 두께로 각각 가공하였다.⁽⁷⁾ 기계가공한 시험편 표면은 에머리지(emery paper)를 사용하여 1500번까지 연마하여 산화크롬으로 버핑한 후, 초음파 세척기를 사용하여 세척하였다.

시험편의 코팅은 PVD 방법중 아크방전식 이온-플레이팅을 사용하여 TiN 및 TiCN의 세라믹을 표면에 코팅하였다. 이때, 코팅시간을 변화시켜 코팅층의 두께를 각각 2.5 μm , 3.5 μm , 5.0 μm 로 제작하였다. Table 2는 본 실험에 사용된 아크-이온-플레이팅의 코팅조건을 나타내고 있으며, Fig. 1은 인장 시험편 및 CT 시험편의 형상을 도식하고 있다.

2.2 경도 및 표면조도 시험

세라믹 코팅층과 모재와의 경도차이를 정량적으로 파악하기 위한 경도시험은 마이크로 비커스 경도계(HMV-2000, Shimadzu)를 사용하여 실온 대기중에서 실시하였다. 이때, 코팅층에 대한 모재의 영향을 최소화하기 위하여 하중을 각각 15g 및 25g으로 부가하였고, 하중 부가시간은 30초로 하였다. 또한 코팅층의 표면특성이 피로균열생장에 미치는 영향을 조사하기 위한 일환으로 코팅처리후 코팅층의 표면조도를 기준길이 2.4mm에 대하여 표면거칠기 시험(Surf-test-500, Mitutoyo)을 실시하였다.

2.3 인장시험 및 피로시험

세라믹 코팅재의 정적 기계적 성질을 파악하기 위한 인장시험(Model 1127, Instron)은 ASTM E 8 규정에 따라 실온 대기중에서 하중속도 2 mm/min으로 일정하게 제어하여 실시하였다. 또한 세라믹 코팅층이 피로균열의 성장에 미치는 영향을 면밀하게 관찰하기 위하여 축인장하중제어 피로시험(Servopulser, Shimadzu)을 실온 대기중에서 실시

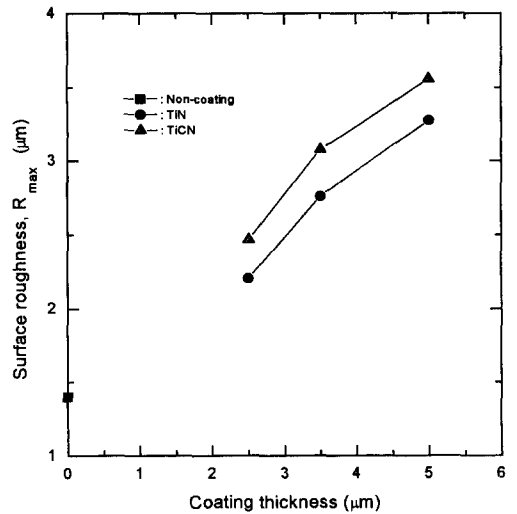


Fig. 3 Relationship between the surface roughness, R_{max} and coating thickness

하였다.

이때, 피로하중은 정현파로 주파수 10 Hz, 하중비($R = P_{\text{min}}/P_{\text{max}}$) 0.1에서 ASTM E 647-93 규정에 의거하여 하중비 일정의 ΔK -감소시험 및 일정 하중진폭의 피로시험을 각각의 시험편에 동시에 적용하여 실시하였다. 하중제어는 컴퓨터 제어 방식을 사용하였으며, 균열길이는 이동식 현미경($\times 50$)을 사용하여 예비 피로균열 생성후, 약 0.3mm의 일정한 간격으로 측정하였다.

2.4 코팅층 표면 및 파단면 관찰

주사식 전자현미경(SEM) 및 에너지 분산형 X선 분광법(EDS)을 이용하여 코팅층의 표면상태 및 그 화학적 조성을 정량적으로 분석하고, 피로시험 완료후 파단면을 관찰하여 코팅층의 두께 및 피로균열의 성장 양상을 조사하였다.

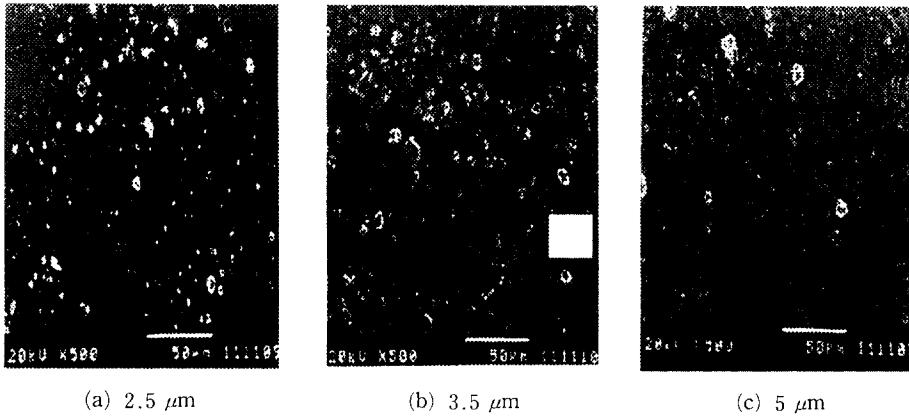


Fig. 4 SEM images of TiCN coating layers showing droplets

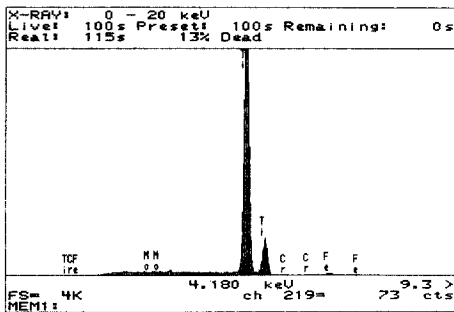


Fig. 5 EDS analysis on the surface of TiCN coating layer

3. 실험결과 및 고찰

3.1 코팅층의 특성

Fig. 2는 예로서 3.5 μm 두께의 코팅층을 가진 TiCN 코팅재의 표면조도의 형상을 나타내고 있다. Fig. 3은 코팅재의 종류 및 코팅두께에 따른 코팅 시험편의 표면조도의 측정결과를 최대높이 거칠기(R_{max})에 대하여 도시하고 있다. R_{max} 은 코팅층의 두께가 증가할수록 TiN 코팅재보다는 TiCN 코팅재에서 더 크게 나타나고 있으며, 이러한 코팅층의 표면조도의 증가는 주로 이온세척중 표면에 생성되는 요철, Ti^+ 이온의 표면과의 충돌에 따른 모재의 국부적인 용융으로 인한 매크로입자(droplet)의 증가^(5,6,14) 및 일정한 코팅시간의 유지에 따른 Ti 플럭스(Ti flux)의 증가에 기인하는 것으로 파악되고 있다.

Fig. 4는 TiCN 코팅층의 표면상태, 즉 매크로입자의 분포 및 크기를 SEM 관찰을 통해 파악한 사

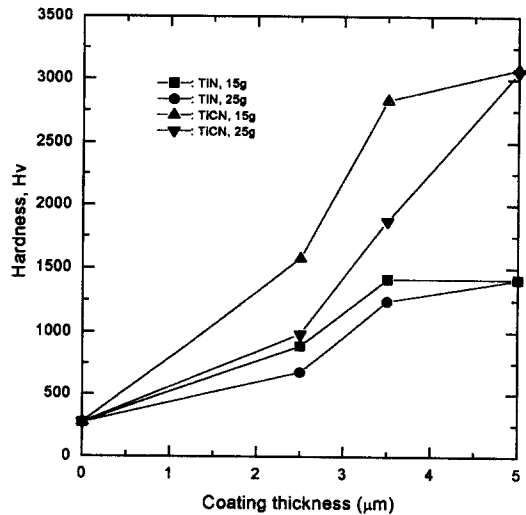


Fig. 6 Relationship between the Vickers hardness and coating layer thickness for TiN and TiCN coating layer at different indentation load

진의 일례를 도시하고 있다. 코팅층의 두께가 증가할수록 매크로입자의 크기가 증가하여 조밀하게 분포되는 것을 알 수 있으며, 또한 매크로입자의 경계에는 기공(void) 등이 생성되어 나타남을 알 수 있다.

Fig. 5는 코팅층의 일정 영역에서의 EDS 분석 결과를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 코팅층은 Ti 성분이 주류를 이루고 있으며, 이를 통하여 각 코팅재에 Ti이 균일하게 증착되어 있음을 파악하였다.

3.2 코팅재의 기계적 성질 및 경도

AIP의 진공챔버의 온도조건, 즉 450°C에서 2.5 μm 의 두께로 TiN 코팅된 인장시험편을 사용하여 단순 인장시험을 실시한 결과, 코팅재의 인장강도는 771.1 MPa로서, 모재의 인장강도 776.9 MPa와 거의 유사한 값을 나타내었다. 또한 코팅재의 항복강도, 연신율 및 단면수축률 등의 기계적 성질도 모재와 거의 동일한 값을 나타내었다. 이는 재료 표면에 코팅된 코팅층의 두께가 얇고, 취성이 커서 세라믹 코팅이 정적인 기계적 성질에는 거의 영향을 미치지 못하고 있음을 시사하고 있다.

Fig. 6은 코팅재의 종류와 코팅층의 두께에 따른 경도 측정값을 도시하고 있다. 이는 코팅층의 경도 측정시 압입하중(indentation load)의 과부하에 의한 모재의 영향을 최소화하기 위하여, 압입하중을 15 g과 25 g으로 하고, 각 코팅두께별로 각각의 시험편에 대하여 6회 이상 측정하여 그 평균값을 정리한 결과이다. 코팅층이 두꺼울수록 모재의 영향을 적게 받아 비커스경도값이 높게 나타나고 있으며, 또한 경도의 평균값에 대한 편차에 있어서도 다소 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 코팅층의 두께가 증가할수록 표면에 코팅입자의 증가 및 조밀화에 기인하여 표면이 거칠어짐으로써 표면의 특성에 민감한 평균 경도값의 분산폭이 증가하는 것으로 판단된다. 특히 압입하중이 15 g인 경우, 코팅층의 두께가 3.5 μm 이상에서는 코팅재의 종류에 관계없이 일정한 경도를 나타내고 있으며, 이때 TiCN 코팅재의 경도는 약 3000 Hv 정도임을 알 수 있었다.

더욱이 TiN 코팅재보다는 TiCN 코팅재의 경도가 크게 나타나고 있으며, 모재와 비교하여 TiN 코팅의 경우, 약 5배, TiCN 코팅의 경우 약 11배 정도로 크게 나타났다. 압입하중이 25 g에서 경도가 낮게 나타나는 것은 15 g의 하중에 비해 코팅층이 모재의 영향을 크게 받아 압입 자국의 소성변형이 보다 크게 나타나기 때문으로 판단된다.

3.3 코팅재의 피로균열성장 특성

Fig. 7은 축인장 하중제어 피로시험에서 이동식 현미경을 사용하여 직접 측정된 균열길이 a 와 반복수 N 과의 관계를 나타낸 선도이다. CT 시험편에서 예비균열을 생성시킨 후, 하중감소법에 따라 3%씩 하중을 감소시키면서 $\Delta K=10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 영역까지 피로균열을 성장시킨 후, 하중을 일정하게 유

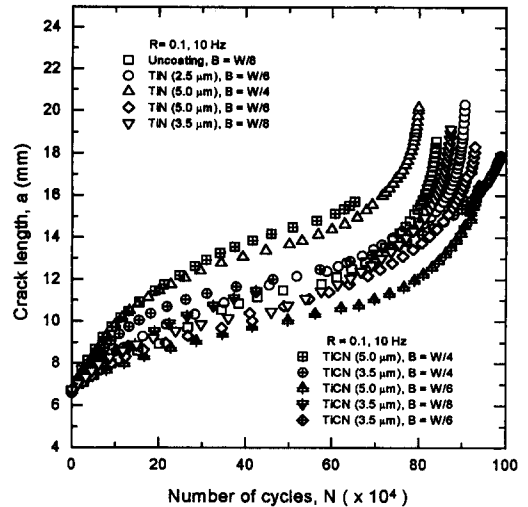


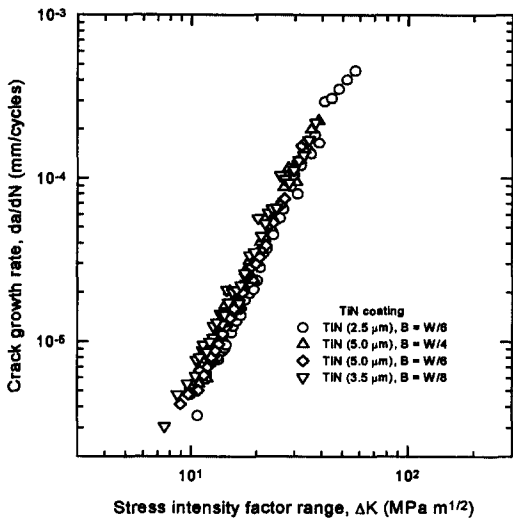
Fig. 7 Crack growth behavior in constant amplitude fatigue test for different load applied to uncoated CT-specimen, TiN and TiCN coated CT specimens

지시키면서 ΔK 증가법에 따라 피로시험을 실시하였다. 이때 균열길이는 0.3 mm 간격으로 일정하게 측정하여 $a-N$ 선도를 구하였다.

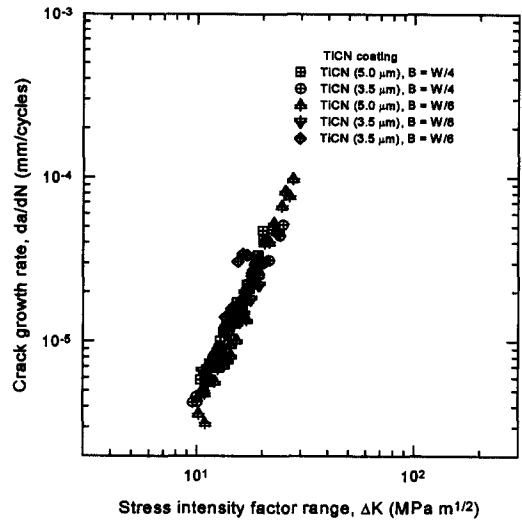
모재와 코팅재의 균열성장 관계를 고찰하면, 일정한 두께의 시험편에 대하여 ($B=W/8$), 모재(\square), TiN(∇) 및 TiCN(∇) 코팅재의 경우, 비슷한 균열성장 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나, TiCN(∇) 코팅재는 TiN(∇) 코팅재에 비하여 적은 반복수, 즉 균열길이가 작게 성장한 상태에서 파단이 발생하고 있다.

이는 TiCN(∇) 코팅재의 경우, TiN(∇) 코팅재보다도 표면이 고경도의 취성이 강한 상태로써 시험편이 얇을 경우 코팅층의 영향이 크게 나타남으로써 모재가 가지고 있는 고인성의 특성을 악화시킨 요인으로 추정된다. 더욱이, 동일 두께의 시험편의 경우($B=W/6$), TiN 및 TiCN 코팅재 각각에 대한 코팅두께의 영향을 살펴보면, 기호 \circ (2.5 μm), \diamond (3.5 μm)의 TiN 코팅재의 균열성장은 코팅두께의 차이에 관계없이 거의 일정한 균열성장 양상을 나타내고 있으며, 기호 \triangle (5 μm), \diamond (3.5 μm)의 TiCN 코팅재의 균열성장에 있어서도 코팅두께의 차이에 관계없이 일정하게 균열이 성장함을 알 수 있다.

또한, 동일 두께의 시험편($B=W/4$)에 대하여 기호 \triangle (5 μm), \boxplus (5 μm)으로 표기된 TiN,



(a) TiN coating specimen



(b) TiCN coating specimen

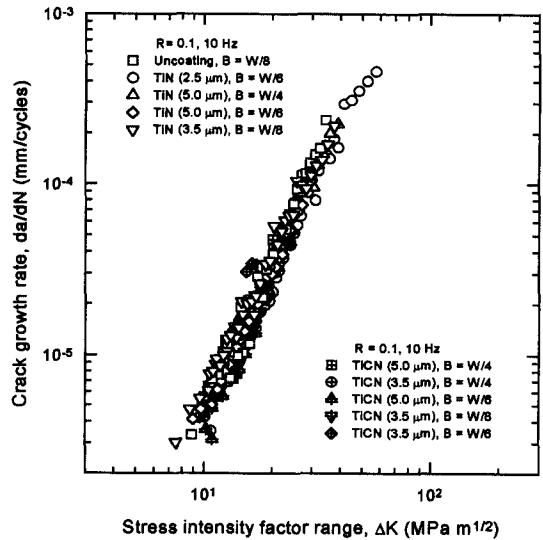
Fig. 8 Continued

TiCN 코팅재에 있어서도 거의 일정한 균열성장 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 더욱이 본 실험에서 사용한 CT 시험편의 두께가 W/4(약 6.35 mm) 이하인 점을 감안하면, 일정 두께 이상(본 실험의 경우, W/8)의 시험편에 대하여는 시험편의 두께에 관계없이, 동일 코팅재에 대하여 코팅두께의 차이에 영향을 받지 않고, 일정한 균열성장 양상을 나타낼 수 있음을 시사하고 있다.

Fig. 8은 모재와 TiN, TiCN 코팅재의 피로균열 성장속도, da/dN과 응력확대계수범위, ΔK의 관계를 도시하고 있다. 여기서 균열성장속도는 Fig. 7에 도시된 바와 같이, CT 시험편 표면에서 약 0.3 mm의 일정한 균열길이의 성장에 따른 피로 반복수를 측정하여 균열성장곡선을 구한 후, 이로부터 직접할선법(secant method)의 개념을 사용하여 균열성장속도를 구하였다. 또한 ASTM E 647에서 제시된 선형 파괴역학 파라미터인 ΔK를 사용하여 응력확대계수범위를 구하였다.

Fig. 8(a)는 TiN 코팅재의 피로균열성장 특성을 나타내고 있으며, Fig. 8(b)는 TiCN 코팅재의 균열성장 특성을 나타내었고, Fig. 8(c)는 모재 및 코팅재의 균열성장 특성을 동시에 비교하여 나타내고 있다.

Table 3은 Fig. 8의 균열성장속도와 응력확대계수 범위의 관계로부터 각각의 시험편 두께 및 코팅 두께에 따라 Paris 공식을 적용하여 구한 재료상수



(c) TiN, TiCN and uncoating specimen

Fig. 8 Relation between fatigue crack growth rate versus stress intensity factor range for constant amplitude fatigue test for different specimen thickness and different coating thickness

C 및 기울기 m을 나타내고 있다.

$$\text{Uncoated : } da/dN = 4.295 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.0444}$$

$$\text{TiN : } da/dN = 7.249 \times 10^{-9} (\Delta K)^{2.8476}$$

$$\text{TiCN : } da/dN = 1.314 \times 10^{-8} (\Delta K)^{3.1387} \quad (1)$$

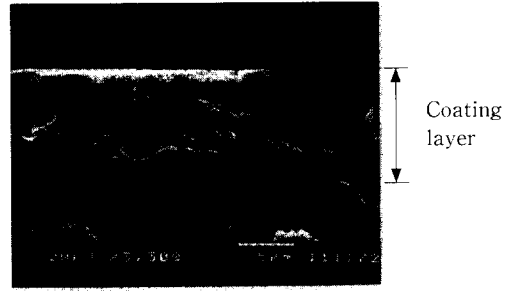
본 실험에 사용한 CT 시험편상의 피로균열의 성

Table 3 The gradient and constant of Paris equation

	Specimen thickness	Coating thickness	C	m
Uncoated	W/8		4.295×10^{-9}	3.0444
TiN	W/6	2.5 μm	4.027×10^{-9}	2.9463
	W/4	5.0 μm	6.577×10^{-9}	2.8613
	W/6	5.0 μm	5.712×10^{-9}	2.8968
	W/8	3.5 μm	1.268×10^{-8}	2.6861
Average			7.249×10^{-9}	2.8476
TiCN	W/4	5.0 μm	3.864×10^{-9}	3.0671
	W/4	3.5 μm	8.851×10^{-9}	2.7260
	W/6	5.0 μm	1.578×10^{-9}	3.3138
	W/8	3.5 μm	5.129×10^{-8}	2.0449
	W/6	3.5 μm	1.007×10^{-10}	4.5415
Average			1.314×10^{-8}	3.13 87

장특성은 식 (1)과 같이 Paris 공식으로 정리할 수 있으며, 선도상의 기울기 m은 모재의 경우에는 약 3.0이고, TiN, TiCN 코팅재의 경우에는 각각 그 평균값이 2.85와 3.14로 나타났다. Fig. 8(a)와 Fig. 8(b) 선도에서 코팅층의 경도가 큰 TiCN 코팅재의 경우에는 TiN보다 낮은 ΔK 영역에서 피로 시험이 종료됨으로써 $da/dN \cdot \Delta K$ 선도에서 얻을 수 있는 자료가 적은 것을 알 수 있으며, 또한 Table 3의 기울기 m에 나타난 바와 같이 TiCN 코팅재가 TiN 코팅재보다 코팅층의 두께에 따라 균열성장속도의 분산폭이 다소 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. TiCN 코팅층의 경도가 TiN 코팅층보다 크며, 또한 본 실험에 적용한 코팅처리와 같이 밀착성이 우수한 상태의 세라믹 코팅재에 있어서는 코팅층이 표면경도의 증가에 기인한 피로균열성장 지연효과보다는 오히려 모재가 가지고 있는 고인성의 실질을 떨어뜨린 결과에 의한 것으로 판단된다.

또한 식 (1)에 나타난 바와 같이 경도가 큰 TiCN 코팅재의 균열성장속도가 TiN 코팅재보다 다소 빠른 영역으로 나타나고 있지만, 전체 응력화대계수범위를 고려할 때, 세라믹 코팅층의 두께 및 시험편의 두께 차이가 균열성장속도의 증가 및 감

**Fig. 9** SEM images of fatigue fracture surface at ΔK -decreasing zone of TiN 5 μm specimen

소에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 이것은 피로균열이 성장할 때 코팅재가 코팅층의 영향보다는 모재의 파괴인성에 주로 기인하고 있음을 의미한다.

소형 CT 시험편에 의한 본 피로시험을 통해서 코팅재의 피로강도의 향상^(8~13)이라는 측면에서 고려하면 피로균열의 선단에 응력이 집중되어 피로균열이 성장하는 경우에는 코팅층의 영향은 거의 없는 것으로 판단된다. 그러나 피로균열의 발생 초기 단계에는 표면의 경한 세라믹 박막은 초기 피로균열의 발생을 억제함으로써 코팅재의 피로강도가 모재의 피로강도와 비교하여 크게 향상된다고 할 수 있다.⁽¹⁰⁾

3.4 피로파단면 관찰

Fig. 9는 피로시험 종료후 SEM을 사용하여 관찰한 피로파단면의 양상이다. 그림에 도시된 바와 같이 모재와 코팅층은 양호한 밀착성을 가지고 있으며, 피로과정 중의 코팅층 자신의 파괴 및 박리현상은 발생하지 않는 것으로 판단된다. 이는 축인장하중제어 피로시험의 경우, 거시적으로 큰 변형이 수반되지 않고, 탄성거동하에서 코팅층 및 모재와의 계면의 개재물 등에 미소변형(micro strain)이 축적되어 미소균열이 발생하고, 또한 이를 기점으로 응력이 집중됨으로써 균열이 성장하는 것으로 추정된다. 피로파단면의 특징을 살펴보면 코팅층의 경우에는 낮은 균열 성장속도 영역(10^{-5} mm/cycle 이하)에서 취성재료의 피로파단과 같은 양상을 나타내고 있으며, 모재는 결정입자에 의한 연성 줄무늬(ductile striation)가 Facet상으로 존재하는 입내파면(transgranular) 양상을 나타내고 있다.

4. 결 론

화력발전소의 터빈로터용 재료로서 널리 이용되고 있는 1Cr-1Mo-0.25V 강으로부터 채취하여 시험편 두께를 3가지(W/8, W/6, W/4)로 달리한 CT 시험편에 TiN 및 TiCN의 세라믹 코팅을 각각 2.5 μm , 3.5 μm 및 5 μm 의 두께로 제작한 후, ΔK 감소법과 ΔK 증가법에 따라 축인장하중제어 피로시험을 실시하여 그에 따른 제반특성을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 코팅재의 경도는 모재에 비하여 TiN의 경우는 약 5배, TiCN의 경우는 약 11배 정도 크게 나타났으며, 또한 코팅층의 두께의 증가에 따라 표면 조도가 증가하는 양상을 나타내었다. 코팅재의 기계적 성질은 모재와 유사한 특성을 나타냈으며, 이는 코팅층의 두께가 얇고, 취성이 커서 세라믹 코팅층이 정적 기계적 성질에 직접적인 영향을 미치지 못함을 시사하고 있다.

(2) $da/dN-\Delta K$ 의 관계로부터 Paris공식을 이용하여 정리한 선도상의 기울기(m)는 TiN, TiCN 코팅재의 경우, 각각 2.85와 3.14 모재의 경우는 3.0으로서, 전체 응력확대계수 범위를 고려할 때, 코팅재의 종류, 코팅층의 두께 및 시험편의 두께의 차이가 균열성장속도의 증가 및 감소에는 큰 영향을 미치고 있지 않음을 알 수 있었다. 그러나, TiCN 코팅재의 경우에는 낮은 ΔK 영역에서 파단을 일으켰으며, 이는 세라믹 코팅된 CT 시험편 상에서 피로균열이 성장할 때, 코팅층이 표면경도의 증가에 기인한 피로균열성장 지연효과보다는 오히려 모재가 가지고 있는 인성의 저하에 의한 결과로 추정된다.

(3) 코팅재의 피로파단면을 분석한 결과, 코팅층과 모재는 양호한 밀착성을 나타내고 있음을 확인하였으며, 코팅층은 취성재료가 가지고 있는 파면양상을 나타낸 반면, 모재의 경우에는 연성 줄무늬가 Facet상으로 존재하는 입내파면 양상을 나타내었다.

참고문헌

(1) 上田重明, et al., 1994, PVD·CVD 皮膜の基礎と應用, 表面技術協會.

- (2) Shiozawa, K., Nishino, S. and Handa, K., 1992, "The Influence of Applied Stress Ratio on Fatigue Strength of TiN-coated Carbon Steel," *JSME International Journal*, Series I, Vol. 35, No. 3, pp. 347~353.
- (3) Munster, S. and Kohlhof, K., 1995, "Cavitation Protection by Low Temperature TiCN coatings," *Surface and Coatings Technology*, 74-75, pp. 642~647.
- (4) Murakami, R., Morikawa, Y., Morimoto, Y., Yoneda, M. and Katsumura, M., 1994, "Fatigue Properties and Fatigue Crack Behavior of Steel with TiN_x Films Laminated by Dynamic Mixing Method," *J. Soc. Mat. Sci.*, Vol. 43, No. 490, pp. 847~852.
- (5) Ljungcrantz, H., Hultman, L. and Sundgren, J., 1994, "Microstructural Investigation of Droplets in Arc-evaporated TiN Films," *Surface and Coatings Technology*, 63, pp. 123~128.
- (6) Akari, K., Tamagaki, H., Kumakiri, T. and Tsuji, K., 1990, "Reduction in Macroparticles during the Deposition of TiN Films Prepared by Arc Ion Plating," *Surface and Coatings Technology*, 43/44, No. 1-3, pp. 312~323.
- (7) E 647-93, 1993, *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*, ASTM.
- (8) Suh, C. M., Ritchie, R. O. and Kang, Y. G., 1989, "Growth Behavior of Short Surface Cracks in 2.25Cr-1Mo Steel," *KSME Journal*, Vol. 3, No. 2, pp. 78~85.
- (9) Itoh, T., Kamach, K. and Yamamoto, T., 1986, "An X-ray Study on Residual Stress and Strength of TiN-coated WC-Co Alloy," *J. Soc. Mat. Sci.*, 35, No. 394, pp. 743~748.
- (10) Saruki, K., Hotta, S. and Arai, T., 1989, "Investigation of Surface Cracks near Fracture Point in VC Coated Steel under Rotating Bending Fatigue," *J. Soc. Mat. Sci.*, 38, No. 429, pp. 651~657.
- (11) Hwang, J. U., Ogawa, T. and Tokaji, K., 1995, "Fatigue Strength and Fracture Mechanisms of Ceramic-Sprayed Steel in Air and a Corrosive Environment," *Proceedings of ITSC '95*, Kobe,

- pp. 767~772.
- (12) Shiozawa K. and Ohshima S., 1990, "Effect of TiN Coating on Fatigue Strength of Carbon Steel," *J. of the Society of Materials Science*, 39-442, pp. 927~932.
- (13) Murakami, M., Takeuchi, T., Yano, T. and Katsumura M., 1991, "Fatigue Properties of TiN Films on Steel Coated by Dynamic Mixing," *Mechanical Behavior of Materials*, Vol. 6, pp. 487.
- (14) 김석삼, 서창민, 류춘무, 박준목, 1995, "TiN 코팅된 고속도강과 합금공구강의 마멸거동," *대한기계학회논문집*, 제19권, 제3호, pp. 705~712.
- (15) 김홍우, 김문일, 1992, "TiN 박막을 코팅한 드릴의 수명향상에 관한 연구," *대한기계학회논문집*, 제16권, 제12호, pp. 2340~2348.