

마찰 및 음향방출 신호를 이용한 CrN 코팅의 마모수명 평가

조정우 · 이영제*

성균관대학교 기계공학부 대학원

*성균관대학교 기계공학부

Life Evaluation of CrN Coatings due to Wear Using Friction and Acoustic Emission Sensor

Chung-Woo Cho and Young-Ze Lee*

Graduate School of Mechanical Engineering, SungKyunKwan University

*School of Mechanical Engineering, SungKyunKwan University

Abstract—Acoustic emission (AE) sensor was used to evaluate the wear-life of CrN-coated steel disks with 1 μm and 4 μm coating thickness. The relationship between AE and friction signal from scratch test and sliding test was investigated. The first spalling of CrN film was detected by AE signals in the early stage of coating failures, and overall failures by friction signals. Therefore, the conservative design for coating-life should be done using the results of AE signals. Using the percent contact load, the ratio of sliding normal load to the critical scratch load and the number of cycles to failure was measured to predict the wear-life of CrN film. On the wear-life diagram the percent contact loads and the number of cycles to failure showed a good linear relationship on the log coordinate. As the load percentage was decreased, the diagram showed that the wear-limits, at which the coated steels survived more than 35,000 cycles, were about 4~5% of the critical scratch loads.

Key words—CrN film; Acoustic emission; Wear-life diagram; Critical scratch load; Wear-limit.

1. 서 론

세라믹코팅(ceramic coating)은 기계요소와 장치가 소형화, 경량화 그리고 고속화됨에 따라 높은 품질과 긴 수명이 요구된다는 필요성에 맞추어 많은 발전이 이루어져 왔다. 세라믹코팅은 높은 하중을 지지할 정도로 표면이 강하지는 않으나 상대적으로 작은 하중에 대해 마찰에 의한 모재의 손상과 마모를 줄이는 중요한 역할을 한다. 많은 세라믹 코팅 중 CrN코팅은 뛰어난 마모(부식저항성과 인성, 저마찰 효과, 코팅조직의 안정성과 기계요소의 적용성 등에서 크게 주목 받고 있다[1-3].

최근 세라믹코팅의 특성평가를 위해 마찰신호보다 현장 적용성이 좋고, 코팅막 파손에 대하여 민감성이 좋은 음향방출(acoustic emission: AE) 신호를 이용한

많은 연구들이 진행되고 있다[4-6]. 그러나 이러한 연구들은 세라믹코팅이 적용된 기계공구의 상시계측기술(online monitoring technique)과 시험조건이 매우 이상적이라 할 수 있는 자기저장매체에 국한된 경향이 있다. 따라서 세라믹코팅의 AE 기술을 이용한 마모수명평가를 위해서는 세라믹코팅의 특성평가에 가장 일반적으로 사용되고 있는 스크래치시험과 실제 세라믹 코팅이 적용되는 메커니즘이 같은 미끄럼시험에 이를 적용하고 그 가능성을 평가하는 것이 시급한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 세라믹코팅의 마모수명평가를 위해 일반적으로 사용되고 있는 스크래치시험과 미끄럼시험에 AE를 적용시키고, 기존의 마찰신호에 의한 평가법과 비교·분석하고자 한다. 또 두께가 다른 CrN 코팅막의 마모수명평가 및 마모수명선도를 작성하고 그 특성을 알아보하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험조건

2-1. 스크래치시험장치

현재 코팅막과 모재와의 밀착력을 측정하기 위해 가장 일반적으로 사용되고 있는 스크래치시험을 수행하였다. 일반적으로 코팅막의 첫 번째 파손이 일어나는 최소 하중을 임계스크래치하중(critical scratch load)이라 정의한다[9]. 이러한 임계스크래치하중은 AE와 마찰 신호로 결정하며, 광학현미경을 통하여 이를 검증한다.

본 연구에서는 CSEM INSTRUMENTS(Switzerland)사의 MICRO-SCRATCH TESTER를 사용하였다. 스크래치 압자로는 끝반경이 0.2 mm인 다이아몬드콘을 사용하였다. 시험조건은 수직하중을 1분당 30 N까지 일정하게 증가시키고, 코팅시편을 10 mm/min의 속도로 수평 이동시켜 1분간 실험하였다. 시험결과의 편차를 고려하여 5회 이상 반복 실험하였고, 임계스크래치하중은 AE와 마찰 신호로 결정하였다. 본 연구에 사용된 스크래치시험기의 개략도는 Fig. 1과 같다.

2-2. 미끄럼시험장치

본 실험을 위해 제작된 cone-on-disk형 미끄럼 코팅마모시험기의 개략도는 Fig. 2와 같다.

2-2-1. 마찰신호 측정부

접촉하중은 분동(deadweight)을 올려 압자와 디스크에 직접 가하여 결정하였다. 마찰력은 로드셀을 사용하여 측정하였는데, 측정된 마찰력신호는 인디케이터를 통하여 아날로그/디지털 컨버터로 변환된 후 컴퓨터로 5 Hz로 샘플링하여 저장되었다. 저장된 마찰력신호는 신호처리프로그램에 의해 마찰계수로 계산되었다.

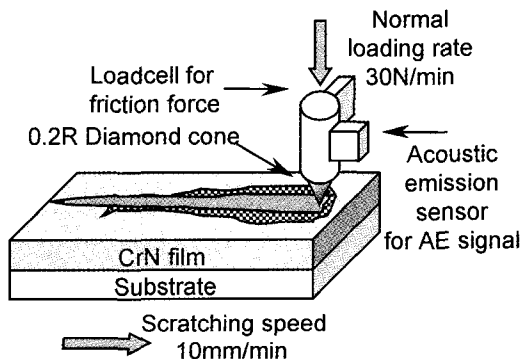


Fig. 1. Schematic diagram of scratch tester.

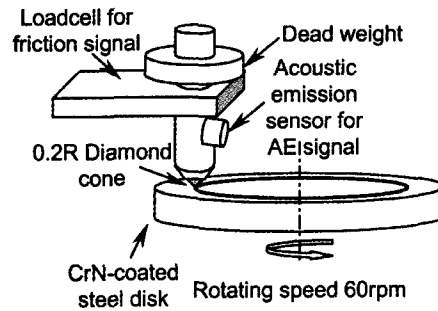


Fig. 2. Schematic diagram of sliding tester.

2-2-2. AE신호 측정부

AE 센서는 압자가 고정된 지그를 센서의 크기에 맞게 가공하여 고정시켰다. 모든 이음부는 커플링트를 사용하여 발생된 신호가 AE 센서에 잘 전달될 수 있게 하였다. 이렇게 획득한 AE 신호는 40 dB 게인의 앰프를 통하여 증폭한 후, 50 kHz~500 kHz의 주파수 대역의 밴드패스필터로 필터링하였다. 이러한 주파수영역 설정은 재료의 소성변형과 코팅막의 파손에 의한 AE 신호가 50 kHz~200 kHz 영역에서 발생한다는 선행 연구[4]와 예비실험에 의해 AE 신호의 민감도가 500 kHz 이하에서 가장 좋았기 때문이다. 필터링한 신호는 100 kHz로 샘플링하여 오실로스코프를 통하여 디스플레이하고, 컴퓨터로 저장하였다.

2-3. 시편 및 실험 조건

본 실험에 사용한 시편은 지름이 45 mm, 두께가 5 mm인 S20C 일반탄소강을 표면경도와 표면조도를 각각 250 HV, Ra 0.05 μm로 가공하여 사용하였다. 코팅막의 증착은 CADP(Cathodic Arc Deposition Process)에 의해 두께를 1 μm와 4 μm로 CrN 코팅시편을 제작하였다. 상대재는 반경이 0.2 mm인 일반경도계용 다이아몬드콘을 사용하였는데, 이는 상대재의 응착마모의 영향을 최소화하고 연삭마모에 의한 코팅막의 마모수명평가를 하기 위한 것이다[7]. 미끄럼시험시 속도는 60 rpm(0.047 m/s)으로 고정하여 실험하였다. 이는 회전속도에 의한 마찰열의 발생을 방지하고, 압자의 리프트현상이 일어나지 않도록 하기 위해서 이다.

미끄럼시험의 최소 접촉하중을 임계스크래치하중의 2%인 0.35 N으로 결정하고, 0.1 N씩 증가시켜 실험하여 AE와 마찰 신호를 측정하였다. 각각의 하중 조건에서 3번 반복하여 실험하였으며, 실험후 디스크는 아세톤으로 닦고 다이아몬드압자는 아세톤을 이

용한 초음파세척을 하여 사용하였다. 다이아몬드압자는 미끄럼시험에 의한 마모를 고려하여 각각의 접촉하중에 대한 실험 후 교체하여 사용하였다.

2.4. 마모수명선도

스크래치시험에서 얻은 임계스크래치하중에 대한 미끄럼시험시 접촉하중의 백분율을 백분율접촉하중(percent contact load)[8]이라 결정하고, 임계스크래치하중의 2~10%내의 백분율하중에서 미끄럼시험을 수행하였다. 이때 코팅막 파손에 의한 AE의 돌발형신호(burst signal)[4]가 발생할 때, 그리고 마찰력의 급격한 증가가 일어날때까지의 회전수를 미끄럼접촉하중에 대한 마모수명(wear-life)이라 하였다. 그리고 35,000회전수까지 코팅막의 손상이 없을 경우의 접촉하중을 마모한도(wear-limit)라 정의하였다. 이렇게 실험된 각각의 백분율접촉하중에 대한 코팅막의 마모수명을 대수좌표계에 표시하여 마모수명선도(wear-life diagram)[8]를 작성하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3-1. 스크래치시험과 EDX 분석 결과

Fig. 3은 스크래치시험 결과로서 접촉하중 증가에 따른 AE와 마찰 신호를 나타내고 있다. Fig. 3(a)는 AE와 마찰 신호 모두 천이가 나타나지 않은 부분의 스크래치 트랙이다. 이를 EDX(Energy Dispersive X-ray) 분석을 수행하여 아래와 같이 나타내었는데, 코팅막의 손상이 나타나지 않아 모재의 성분인 Fe가 검출되지 않고 코팅재인 Cr만 검출되는 것을 볼 수 있다. Fig. 3(b)는 AE 신호의 첫번째 천이가 나타난 부분의 스크래치 트랙을 보인 것인데, 사진에서와 같이 첫번째 스폴링(spalling)이 발생한 것을 볼 수 있다. 이를 EDX분석을 수행하여 아래와 같이 나타내었는데, 스폴링 발생에 의한 모재의 성분인 Fe가 나타나기 시작하였다. 이러한 코팅막의 파괴가 시작되는 스폴링이 나타난 부분에서의 마찰신호를 살펴보면 어떠한 천이도 나타나지 않은 것을 볼 수 있다. 이렇게 볼 때 스크래치시험에 있어 AE 신호는 코팅막의 파괴가 시작됨을 의미하는 스폴링을 감지한다는 것을 알 수 있다. Fig. 3(c)는 마찰력 신호의 천이가 나타나기 시작한 부분의 스크래치 트랙을 나타낸 것이다. 이미 코팅막의 파손에 의해 모재가 완전히 드러나 있는 것을 볼 수 있으며, 이는 EDX 분석

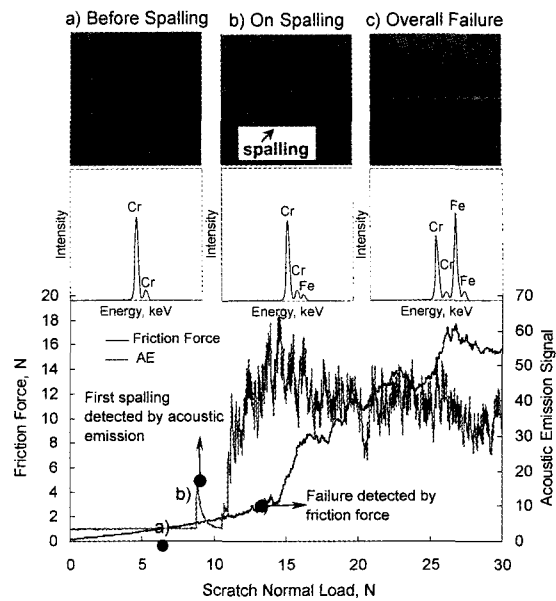


Fig. 3. Scratch test data for CrN coated steel disk with 1 μm coating thickness, photographs of scratch track and EDX analysis result of scratch track (—: 200 μm).

을 통해서 검증되고 있다. Table 1은 CrN 코팅의 AE와 마찰 신호에 따른 임계스크래치하중을 나타낸 것이다.

이상의 스크래치시험과 그 트랙의 EDX 분석을 통하여 코팅막의 스폴링 발생은 코팅막 파손의 시작이라 정의할 수 있으며, 이러한 스폴링 감지에 있어 AE 신호가 마찰신호보다 더 민감하다는 결과를 얻을 수 있다.

3-2. 미끄럼시험결과

Table 1. Critical scratch load of CrN coated steel disk with 1 μm and 4 μm coating thickness by acoustic emission and friction signal

Coating Thickness	Scratch Critical Load (N)			
	1 μm		4 μm	
Test Number	By AE Signal	By Friction Signal	By AE Signal	By Friction Signal
1	7.47	13.72	10.11	18.96
2	7.49	14.37	8.80	19.29
3	7.17	13.06	9.82	19.29
4	7.80	13.40	10.44	21.58
5	7.17	13.06	11.10	21.25
Average	7.42	13.52	10.05	20.07

Fig. 4는 접촉하중 0.75 N에서 모재인 S20C 일반 탄소강에 대한 미끄럼마모시험을 수행한 결과이다. 마찰계수는 접촉회전수 2000까지 측정하여 표시하였다. AE 신호는 접촉회전수 40, 100, 200, 800, 1500, 2000에서 0.1초 동안의 신호를 표시하였다. 접촉회전수 증가에 따라 마찰계수는 0.25로 대체로 일정하다. AE 신호는 미끄럼시험 초기부터 모재의 표면에 의한 돌발형신호가 나타나는 것을 볼 수 있다. AE 신호의 진폭의 차이는 모재의 파손정도를 나타낸다[4]. 즉 미끄럼 접촉회전수가 증가할수록 모재의 파손은 심해진다는 것을 AE 신호를 통해 알 수 있다.

Fig. 5는 CrN 코팅막두께 1 μm인 시편에 각 접촉하중에 따라 미끄럼마모시험을 수행한 결과이다. Fig. 5(a)는 접촉하중 0.35 N일 때의 실험결과인데, 마찰계수는 접촉회전수 35,000까지 0.06으로 일정한 것을 볼 수 있다. AE 신호는 코팅막의 소성변형에 의한 연속형신호(continuous signal)[4]가 나타나는데, 재료의 파손시 나타나는 돌발형신호는 나타나지 않았다. 따라서 접촉하중 0.35 N에서는 코팅막이 파손되지 않는 마모한도가 나타난다고 할 수 있다. 이것은 AE 신호와 마찰신호 모두 일치된 결과를 보이고 있기 때문이다. Fig. 5(b)는 접촉하중 0.45 N일 때의 실험결과인데, 마찰계수는 접촉회전수 540까지 0.06으로 변화가 없었으나, 그 이후 코팅막 파손에 의한 마찰계수의 급격한 증가가 나타나는 것을 볼 수 있다. AE 신호를 보면 접촉회전수 500전까지 코팅막의 소성변형에 의한 연속형신호가 나타났다. 접촉회전수 500부터 코팅막 파손에 의한 돌발형신호가 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 5(c)는 접촉하중 0.55 N일 때의 실험결과이다. 마찰계수는 접촉회전수 170까지 0.06으로 일정하다가 그 이후에 코팅막 파손에 의한 급격한 마찰계수의 증가를 볼 수 있다. AE 신호는 접촉회전수 160전까지 코팅막의 소성변형에 의한 연

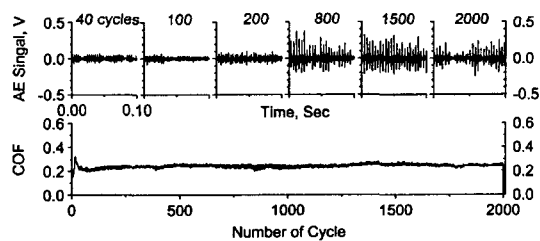
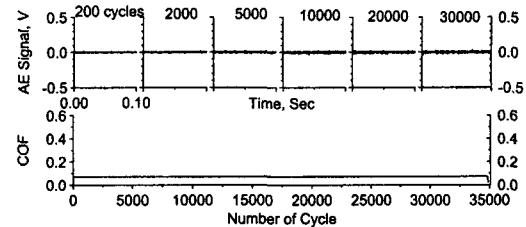
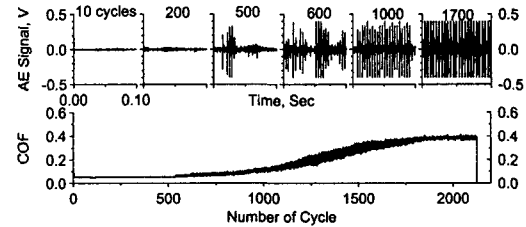


Fig. 4. AE and coefficient of friction (COF) signals for uncoated steel disk sliding at a normal load of 0.75 N.

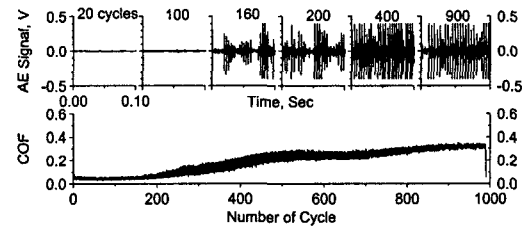
속형신호를 보이고 있으며, 그 이후에 코팅막 파손에 의한 돌발형신호가 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 5(d), (e)의 접촉하중 0.65 N, 0.75 N일 때도 같



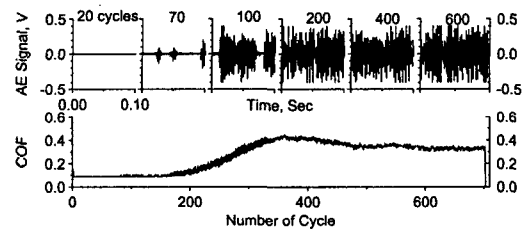
(a) 0.35N normal load



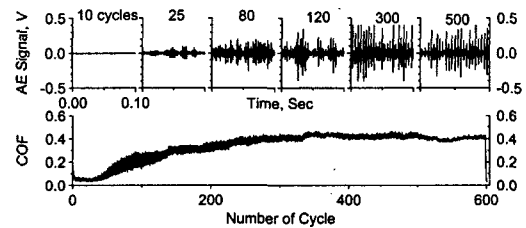
(b) 0.45N normal load



(c) 0.55N normal load



(d) 0.65N normal load



(e) 0.75N normal load

Fig. 5. AE and coefficient of friction (COF) signals for CrN-coated steel disk with 1 μm coating thickness, sliding at each normal load.

은 경향을 보이고 있다. 즉 각 접촉하중 조건에서 마찰계수는 접촉회전수 80, 40까지 0.06으로 일정한 반면 그 이후의 접촉에서 코팅막파손에 의한 마찰계수의 심한 증가가 나타난다. Fig. 5(d), (e)의 AE 신호는 접촉회전수 70, 25일때 코팅막 파손에 의한 돌발형신호를 보이고 있다. 실험결과 코팅막 파손에 의해 나타나는 마찰신호와 AE 신호는 거의 일치하나, AE 신호가 마찰신호보다 미끄럼회전수 증가에 따른 코팅막 파손에 항상 빠르게 반응한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 CrN 코팅막두께 $4\mu\text{m}$ 인 시편에 각 접촉하중에 따른 미끄럼마모시험을 수행한 결과이다. Fig. 6(a)는 접촉하중 0.45 N일 때의 실험결과인데, 마찰계수는 접촉회전수 35,000까지 0.04로 일정한 것을 볼 수 있다. AE 신호는 코팅막의 소성변형에 의한 연속형신호가 나타나는데, 재료의 파손시 나타나는 돌발형신호는 나타나지 않았다. 따라서 접촉하중 0.45 N에서는 코팅막이 파손되지 않는 마모한도가 나타난다. 이것을 CrN 코팅막두께 $1\mu\text{m}$ 와 비교하면, 코팅막두께가 $4\mu\text{m}$ 일 때 마모한도가 나타나는 접촉하중이 증가된 것으로 코팅막두께의 증가로 인한 저마찰효과 및 모재와의 밀착력이 증가[10]하기 때문이라 볼 수 있다. Fig. 6(b)는 접촉하중 0.55 N일 때의 실험결과인데, 마찰계수는 접촉회전수 640까지 0.04로 변화가 없었으나, 그 이후 코팅막파손에 의한 마찰계수의 급격한 증가가 나타나는 것을 볼 수 있다. AE 신호를 보면 접촉회전수 580전까지 코팅막의 소성변형에 의한 연속형신호가 나타났다. 접촉회전수 580부터 코팅막 파손에 의한 돌발형신호가 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 6(c)은 접촉하중 0.65 N일 때의 실험결과이다. 마찰계수는 접촉회전수 400까지 0.04으로 일정하다가 그 이후에 코팅막 파손에 의한 급격한 마찰계수의 증가를 볼 수 있다. AE 신호는 접촉회전수 320전까지 코팅막의 소성변형에 의한 연속형신호를 보이고 있으며, 그 이후에 코팅막 파손에 의한 돌발형신호가 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 6(d), (e)의 접촉하중 0.75 N, 0.85 N일 때도 같은 경향을 보이고 있다. 즉 각 하중조건에서 마찰계수는 접촉회전수 250, 110까지 0.04으로 일정한 반면 그 이후의 접촉에서 코팅막파손에 의한 마찰계수의 심한 증가가 나타난다. 각각의 AE 신호는 접촉회전수 240, 100일 때 코팅막 파손에 의한 돌발형신호를 보이고 있다.

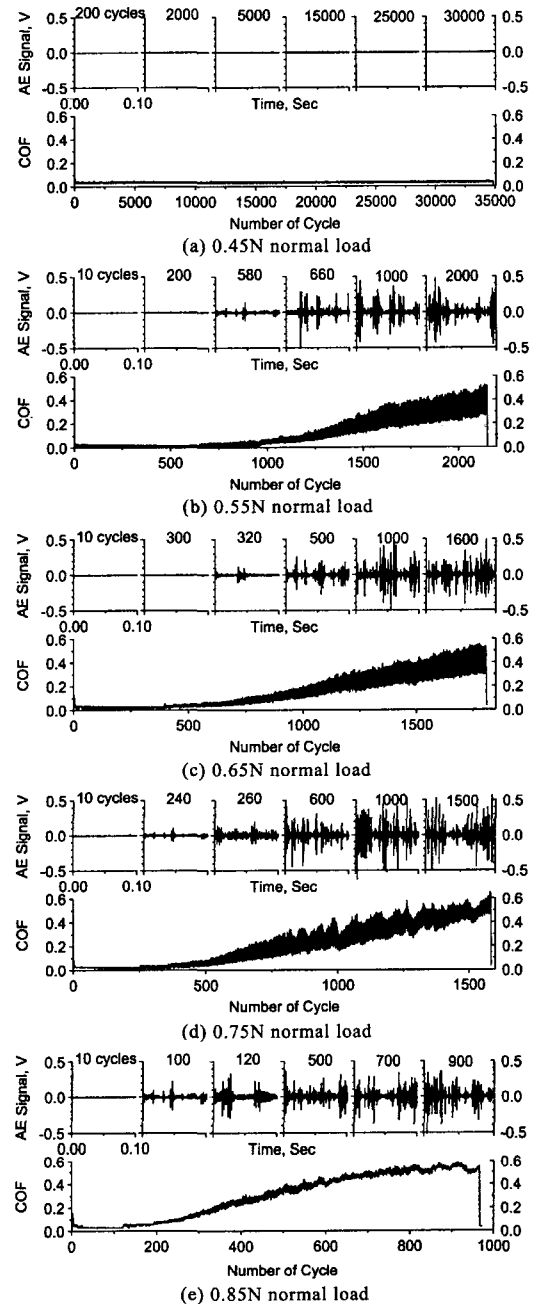


Fig. 6. AE and coefficient of friction (COF) signals for CrN-coated steel disk with $4\mu\text{m}$ coating thickness, sliding at each normal load.

이러한 미끄럼시험결과를 바탕으로 각 접촉하중별 마모수명을 Table 2과 같이 정리할 수 있다.

Fig. 7는 코팅막두께 $1\mu\text{m}$ 일 때, 접촉하중 0.45 N

Table 2. Wear-Life of CrN coated steel disk with 1 μ m and 4 μ m coating thickness by acoustic emission and friction signal (Minimum values among three tests)

Coating Thickness	Wear-Life (Number of Cycles)			
	1 μ m		4 μ m	
Normal Load	By AE Signal	By Friction Signal	By AE Signal	By Friction Signal
0.35 N	35,000	35,000	-	-
0.45 N	500	540	35,000	35,000
0.55 N	160	170	580	640
0.65 N	70	80	320	400
0.75 N	25	40	240	250
0.85 N	-	-	100	110

조건에서 미끄럼마모시험을 수행한 후의 마모트랙이다. Fig. 7(a)는 저마찰신호와 연속형 AE 신호가 나타날때(Fig. 5(b)의 접촉회전수 200에 해당함)까지 실험한 트랙인데, 코팅막의 소성변형만 나타나 있을 뿐 코팅막이 모재에서 떨어져 나가는 스폐링현상은 나타나지 않았다. Fig. 7(b)는 저마찰신호와 돌발형 AE 신호가 나타나기 시작할때(Fig. 5(b)의 접촉회전수 500에 해당함)까지 실험한 트랙인데, 코팅막의 부분적인 스폐링현상이 나타난 것을 볼 수 있다. 이러한 코팅막의 스폐링현상은 코팅막파손이 시작되는 것을 의미하는 것으로 마찰신호보다 AE 신호가 코팅막파손을 예측하는데 더 민감하다는 것을 보이고 있다. Fig. 7(c)는 마찰계수의 급격한 증가와 돌발형 AE 신호가 나타날때(Fig. 5(b)의 접촉회전수 1000에 해당함)까지 실험한 트랙인데, 코팅막이 심하게 파손되어 모재가 완전히 드러나 있는 것을 볼 수 있다.

이상의 미끄럼시험결과 AE 신호는 코팅막 파손의 시작인 스폐링 현상을 감지하고, 마찰신호는 코팅막의 전체적인 파괴(overall failure)를 감지한다는 것을 알 수 있다. 따라서 세라믹코팅의 마모수명평가에 있어 AE 신호는 마찰신호보다 정확한 예측을 제공한다고 할 수 있다.

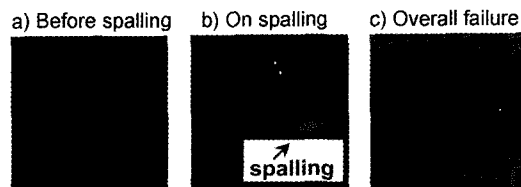
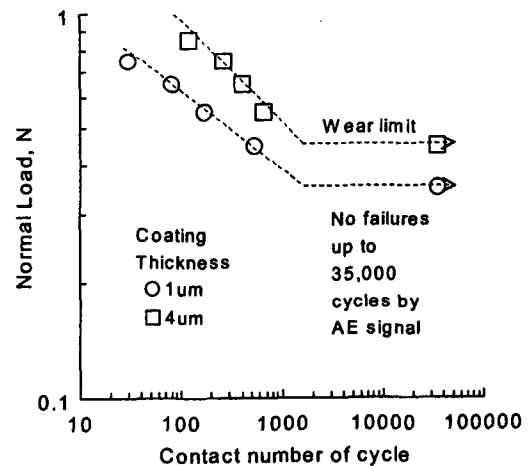


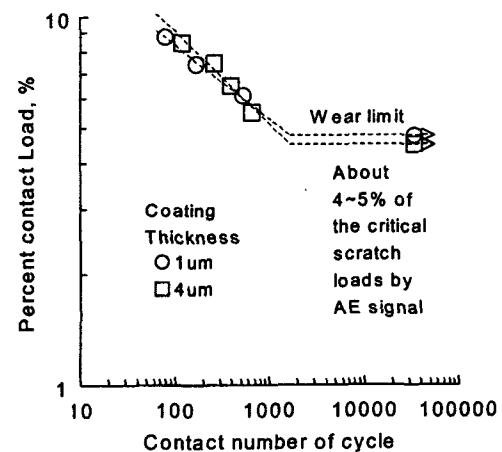
Fig. 7. Wear tracks of CrN-coated disk with 1 μ m coating thickness, sliding at 0.45 N normal load (-: 200 μ m).

3.3. 마모수명선도

미끄럼시험과 스크래치시험의 결과를 바탕으로 Fig. 8과 같이 마모수명선도를 작성할 수 있다. Fig. 8(a)는 Table 2에 정리된 미끄럼접촉하중과 AE 신호에 의한 마모수명을 대수좌표에 나타낸 것이다. 대수좌표에서 미끄럼접촉하중과 마모수명은 매우 좋은 선형성을 나타내었다. 미끄럼접촉하중이 작아짐에 따라 피로실험의 S-N 곡선에서 보이는 내구한도와 유사한 마모한도가 존재함을 알 수 있다. 마모한도에서는 35,000회의 미끄럼접촉에서도 코팅막의 파손이 나타나지 않았



a) Wear-Life diagram using sliding contact load



b) Wear-Life diagram using the percent contact load

Fig. 8. Wear-Life diagram of CrN coated steel disk with 1 μ m and 4 μ m coating.

다. Fig. 8(b)는 Table 1에 정리된 AE 신호에 의한 임계스크래치하중을 100%로 보고, 미끄럼시험에서의 각 접촉하중에 따른 마모수명을 임계스크래치하중에 대한 백분율접촉하중이라 하여 대수좌표계에 표시하였다. 백분율접촉하중이 낮아짐에 따라 마모한도가 나타났고, 그 마모한도는 AE 신호에 의해 임계스크래치하중의 4~5%, 마찰신호에 의해 임계스크래치하중의 2~3% 범위에 존재함을 알 수 있다. 이러한 백분율접촉하중에 의한 코팅막의 마모수명평가 기술은 시험 방법이 간단한 스크래치시험을 수행하여 미끄럼시험시 코팅막의 마모수명을 예측할 수 있다.

4. 결 론

CrN으로 코팅된 일반탄소강의 마모수명평가를 위해 스크래치시험과 미끄럼시험에 AE를 적용시켜보고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 스크래치시험과 미끄럼시험에서 AE 신호에 의하여 코팅막의 마모수명을 평가할 수 있으며, 코팅막 파손에 대하여 AE 신호가 마찰신호보다 더 민감하게 반응한다.

2) 스크래치시험과 미끄럼시험에 의해 CrN 코팅막의 마모수명선도 작성이 가능하며, 백분율접촉하중을 이용한 마모수명선도에서 접촉하중에 따른 마모수명은 좋은 선형성을 나타낸다. 또 백분율접촉하중이 작아짐에 따라 35,000회 이상의 접촉에서도 코팅막이 파손되지 않은 마모한도가 나타난다.

3) 백분율접촉하중에 의한 마모수명선도에서 CrN 코팅막의 마모한도는 AE 신호에 의해 스크래치임계하중의 4~5%, 마찰신호에 의해 임계스크래치하중의 2~3%에 존재한다.

4) CrN 코팅막은 코팅막두께 1 μm 보다 4 μm 일 때 마모수명이 길게 나타난다.

후 기

본 연구는 98년 한국과학재단 연구비지원(과제번호 981-1011-069-2)으로 SAFE 연구센터에서 수행되었습니다.

참고문헌

1. Urgen, M. and Cakir, A. F., "The effect of heating on corrosion behavior of TiN-and CrN-coated steels," *Surface & Coating Tech.*, Vol.96, pp.236-244, 1997.
2. Su, Y. L., Yao, S. H., Leu, Z. L., Wei, C. S., and Wu, C. T., "Comparison of tribological behavior of three films-TiN, TiCN and CrN-grown by physical vapor deposition," *WEAR*, Vol.213, pp.165-174, 1997.
3. Navinsek, B., Panjan, P. and Krusic, J., "Industrial applications of CrN(PVD) coatings deposited at high and low temperatures," *Surface & Coating Tech.*, Vol.97, pp.182-191, 1997.
4. Cho, S. S. and Komvopoulos, K., "Correlation between acoustic emission and wear of multi-layer ceramic coated carbide tools," *Transactions of the ASME*, Vol.119, pp.238-246, 1997.
5. Bhushan, B. and Forehand, S. M., "In situ instrumentation for localized wear studies of magnetic thin-film disks," *Proc. Instrn. Mech. Engrs.*, Vol.211, Part J, pp.249-262, 1997.
6. O'Brien, K. and Harris, D., "Head/disk interface contact detection using a refined acoustic emission technique," *Journal of Tribology*, Vol.118, pp.539-542, 1996.
7. 정기훈, 이영제, "마모수명평가를 위한 TiN경질박막의 마찰 및 마모특성에 관한 연구," *한국윤활학회지*, 제13권, 제3호, pp. 28-32, 1997.
8. Lee, Y. Z. and Jeong, K. H., "Wear-life diagram of TiN-coated steels", *WEAR*, Vol.217, pp.175-181, 1998.
9. Perry, A. J., "Scratch adhesion testing:a critique," *Surface Engineering*, Vol.2, pp. 183-190, 1986.
10. Jensen, H., Jensen, U. M. and Sorensen, G., "Reactively sputtered Cr nitride coatings studied using the acoustic emission scratch test technique," *Surface & Coating Tech.*, Vol.74-75, pp.297-305, 1995.