

# Hertz 압력에 따른 TiAlCrN 코팅의 마찰·마멸특성 및 수명 평가

우상규<sup>†</sup> · 이영제<sup>\*‡</sup>

성균관대학교 대학원 기계공학부

\*성균관대학교 기계공학부

## Friction and Wear Characteristic of TiAlCrN Coating on Hertz Pressure

Sang-Kyu Woo<sup>†</sup> and Young-Ze Lee<sup>\*‡</sup>

Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

\*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

**Abstract** - In this paper, we investigated the wear life, wear rate, and its transition on the Hertz pressure. In the experiment, we used TiAlCrN coating deposited by the sputtering technique and ball diameter of 10mm, 7.94mm and 4.76mm for the various Hertz pressure. Ball-on-disk sliding tests were performed under the unlubricated condition. As the diameter of a ball decreased, the failure load of TiAlCrN coating decreased. However, a good correlation was observed between the wear life and Hertz pressure, and all ball specimens showed the infinite wear life at about 450MPa. In measurement of wear rate, as the diameter of the ball increased, the wear transition appeared in bigger load. However, a good correlation was observed between the wear rate and Hertz pressure. The transition appeared in the range from 550MPa to 600MPa at all ball specimens.

**Key words** - TiAlCrN coating, Hertz pressure, Wear life

### 1. 서론

일반 금속 재료로는 표면층이 최적의 윤활 특성을 갖기에 한계점이 있기 때문에 모재에 윤활특성이 우수한 표면층을 부여하는 기술이 개발되어 왔다. 그 중 세라믹 코팅이 최고의 관심사가 되고 있다. 세라믹 코팅은 마멸에 대한 저항성 및 고체윤활 효과가 매우 우수하다[1-4]. 그래서 최근 내마멸성 및 저마찰이 요구되는 공구, 금형, 사출성형기계부품 및 신소재 등 다양한 분야에 사용되고 있다. 그러나 이러한 세라믹 코팅이 우수한 고체윤활 및 기계적 물성을 가지고 있을지라도 기계요소들

의 반복적인 접촉을 하게 되면 코팅된 표면이 손상되어서 우수한 물성을 잃게 되며, 마찰계수 또한 불안정하게 변하게 되어 기계요소의 성능에 치명적인 불안정을 가져오게 된다. 그렇기 때문에 세라믹 코팅의 마찰과 마멸특성에 대한 연구가 필요하다.

현재까지의 연구에서 세라믹 코팅은 하중이 증가함에 따라서 mild wear에서 severe wear로 천이가 일어난다고 알려져 있다[5]. 그리고 세라믹 코팅의 마멸은 하중에 의해서 마멸이 결정된다는 인식에 의해 압력보다는 하중에 대한 함수로 지금까지 분석되었다. 그러나 Ravikiran 등은 세라믹의 마멸 분석에서 하중의 함수로 분석하는데에는 몇가지 결점이 있다고 지적했으며, Hertz 압력과 세라믹

<sup>†</sup> 주저자 : wsk98@skku.edu

<sup>‡</sup> 책임저자 : yzlee@yurim.skku.ac.kr

코팅의 마멸 사이에 더욱 밀접한 관계가 있다고 제안하였다[6].

따라서 본 연구에서는 재료의 물성치를 측정하고 이것을 바탕으로 Hertz 압력을 구하여 세라믹 코팅의 wear rate, wear transition, wear life와의 관계를 정립하고자 한다.

## 2. 실험

본 실험을 위해서 사용한 디스크 시편은 모재로 두께가 500 $\mu\text{m}$ 인 실리콘 웨이퍼(Si-wafer)를 사용하였고 표면에 두께가 3 $\mu\text{m}$ 인 TiAlCrN 코팅을 증착시켰다. 증착 방법으로는 물리 증기 증착 (PVD: Physical Vapour Deposition)방법 중 스퍼터링(sputtering)방법을 사용하였고 코팅을 증착시키기 전 모재의 표면에 불순물을 제거하기 위해서 스퍼터 세정을 10분동안 하였다. 상대재인 스틸볼은 직경 10mm, 7.94mm, 4.76mm 세가지 크기를 사용하였다.

실험 방법으로는 Fig. 1과 같은 ball-on-disk 형태의 미끄럼 실험을 수행하였다. 실험전 모든 시편은 아세톤으로 초음파 세척을 하여 불순물과 잔류 유기물을 제거하였다. 미끄럼 시험 시 선속도는 0.16m/s로 고정하였다. 접촉하중은 분동(dead weight)을 올려 압자와 디스크에 직접 작용시켰다.

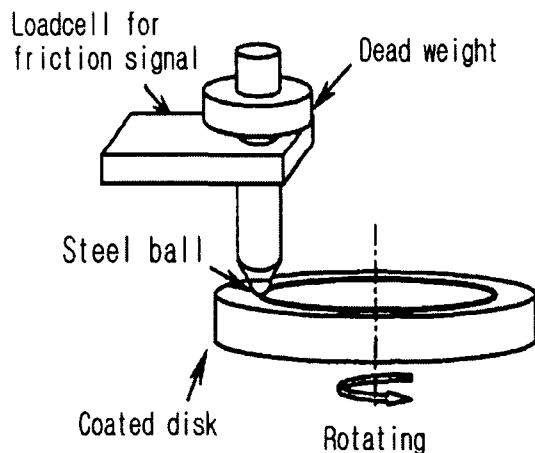


Fig. 1 Ball-on-disk type sliding test

마찰력은 로드셀을 사용하여 측정하였고 측정된 마찰력 신호는 인디케이터(indicator)를 통하여 아날로그/디지털 컨버터(A/D converter)로 변환된 후 컴퓨터에 저장된다. 저장된 마찰력 신호는 신호처리프로그램에 의해 하중으로 나뉘어 마찰계수로 계산된다.

마멸 수명 선도는 미끄럼시험 중 마찰계수가 급격한 증가를 일으키는 지점을 코팅이 파괴되는 시점이라고 결정을 하고 이때까지의 접촉 회전수를 미끄럼 접촉 실험에 대한 마멸 수명(wear-life)이라고 한다. 그리고 접촉회전수 8000번까지 코팅의 손상이 없을 경우 이때의 Hertz 압력을 파손이 발생하지 않는 압력이라고 정의한다.

마멸율의 측정은 먼저 표면 조도계를 이용하여 마멸 트랙의 수직인 방향으로 형상을 측정후 그 평균 면적과 원주의 길이를 곱하여 마멸량(wear volume)을 측정한다. 이렇게 계산된 마멸량을 실험시간동안 이동한 거리로 나누어 마멸율을 계산한다.

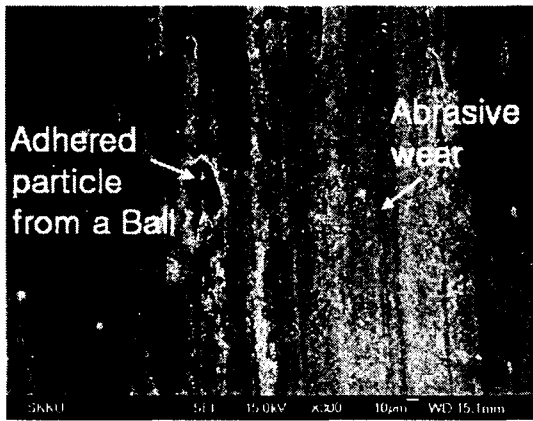
## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 미끄럼 실험결과

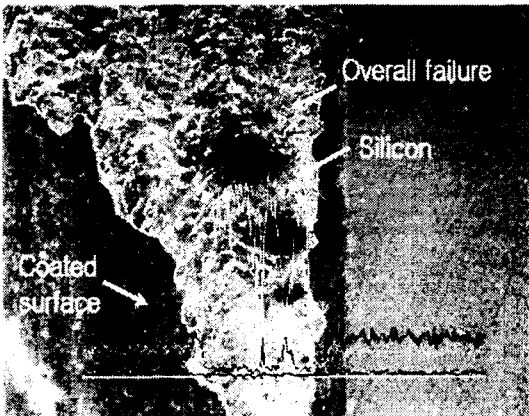
TiAlCrN 코팅과 스틸볼과의 마찰에서 주요 마멸 메카니즘은 SEM 사진과 EDS 분석을 통해서 알아보았다. Fig. 2(a)에서 보면 주위보다 검게 보이는 부분을 볼 수 있다. EDS분석으로 이부분의 성분을 확인한 결과 Fe성분이 검출되었다. 이것은 슬라이딩 동안 볼의 Fe성분이 코팅층으로 응착되었기 때문이다. 그리고 그 이외의 부분에서는 방향이 일정하게 연삭이 일어난 것을 SEM 사진을 통해서 알 수 있다. Fig. 2(b)는 최종적으로 코팅이 파괴될 때에는 코팅층과 모재의 경계면이 완전히 떨어져 나가는 스폐링(spalling) 현상이 일어나는 것을 보여준다. 이 부분을 EDS 분석한 결과 코팅층이 완전히 벗겨져 Si 성분이 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 3(a)에서 연삭이 일어난 부분을 EDS 분석한 결과 Fig. 3(b)에서 보는것과 같이 산소가 검출되었다. 이것은 슬라이딩 동안 코팅층의 표면에 산

화막이 형성되었음을 말해준다.

슬라이딩 실험을 할 때 연삭된 표면에 나타나는 산화막의 영향을 알아보기 위해서 질소 분위기에서 실험을 하였다. 이 실험의 실험조건은 상대재로 10mm 볼을 사용하였고 하중은 1.35N이고 선속도는 0.16m/s이다. Fig. 4는 공기중에서와 질소분위기에서의 마찰계수 변화를 보여주고 있다. 처음 공기중에서 실험할 때에는 마찰계수가 0.68정도로 일정하게 유지된다. 600번의 접촉뒤 질소를 투입시킨 결과 마찰계수가 급격히 떨어지는 것을 볼 수 있다. 마찰계수는 급격히 떨어지다가 약 0.13에서 일정해진다. 이 실험을 통해서 TiAlCrN 코팅 위의 산화막은 고마찰계수를 유도한다는 것을 알 수 있다.

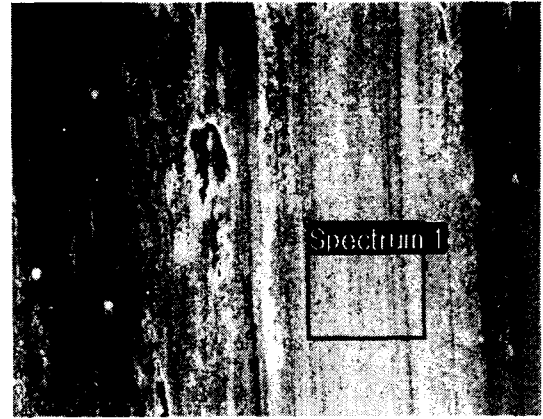


(a)

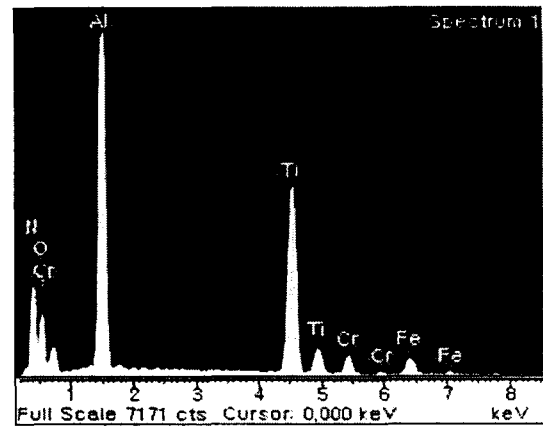


(b)

Fig. 2 SEM images of the wear track (a)before failure (b)after failure



(a)



(b)

Fig. 3 EDS analysis for the sliding track

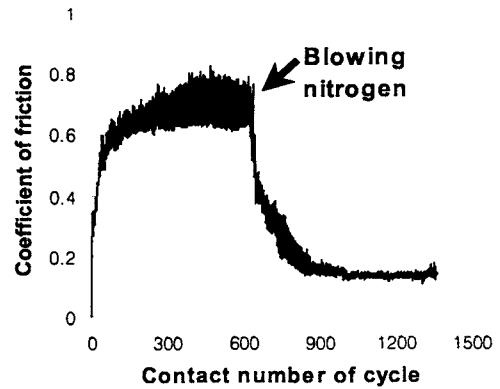


Fig. 4 COF signal in the ambient condition and nitrogen condition

### 3.2 Hertz 압력과 마멸 수명과의 상관관계

Fig. 5는 각각의 볼크기마다 슬라이딩 실험을 수

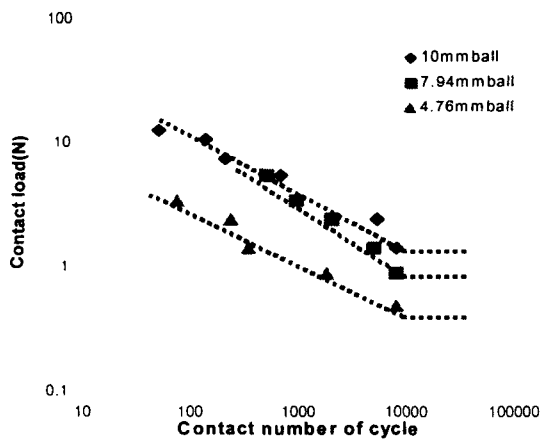


Fig. 5 Wear life versus applied load diagram on the various diameters of ball specimens

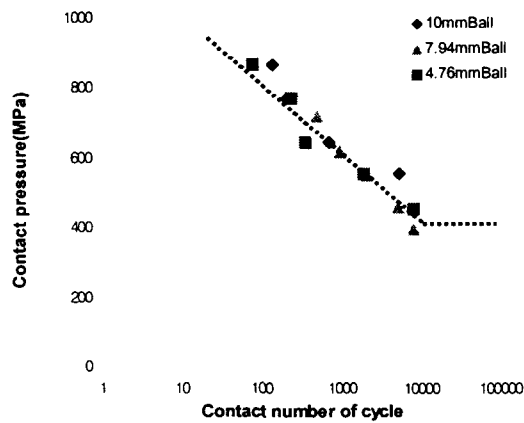


Fig.6 Wear life versus Hertz pressure diagram on the various diameters of ball specimens

행한 후 측정된 마멸 수명을 바탕으로 하중과 마멸 수명과의 그래프를 대수좌표로 나타낸 것이다. 볼크기가 증가할수록 같은 하중에서의 마멸 수명이 증가한다. 이는 볼의 크기가 증가할수록 디스크와 상대재 사이의 Hertz압력이 감소하기 때문이다. 표면의 거칠기가 일정하지 않거나 거친 표면에서는 Hertz 접촉면적과 실접촉면적이 많은 차이를 보일 수 있으나 본 실험에 사용된 시편은 조도가 매우 일정하고 매끄럽기 때문에 Hertz 접촉면적과 실접촉면적이 큰차이가 나지 않는다고 가정하였다. 이러한 가정에 Fig. 5의 하중을 Hertz 압력으로 바꾼 결과 Fig 6에서와 같이 하나의 마멸 수명선도가 작성되었다. 볼의 크기가 증가할수록 접촉회전수가 8,000번이 될 때까지 코팅의 파괴가 일어나

지 않는 하중은 증가한다. 그러나 Hertz 압력으로 보면 약 450MPa에서 코팅은 무한 수명을 가진다는 것을 알 수 있다.

### 3.3 Hertz 압력과 마멸율과의 상관관계

미끄럼 마멸에서 Archard의 마멸식은 가장 기본적으로 널리 사용되는 식이다. 그러나 Archard식은 총 마멸량이 Hertz 면적에 따른 압력의 분포와는 상관없이 하중에만 비례한다. 그렇기 때문에 볼의 크기에 따라서 다르게 나타나는 마멸율에 대한 설명을 하지 못한다. 마멸율을 측정하는 실험에서 실험조건은 각각의 볼 크기마다 선속도는 0.21m/s로 일정하게 유지 시켰으며 하중은 0.47N에서 6.26N 사이에서 실험하였다.

Fig. 7은 적용된 하중과 볼 크기에 따른 마멸율의 변화를 보여준다. 낮은 하중에서는 매우 낮은 마멸율이 나타나며 마멸율과 하중 사이의 그래프의 기울기가 작은 것을 볼 수 있다. 그러나 하중을 점점 증가시키면 어느 하중이상에서는 하중과 마멸율 사이의 그래프 기울기가 급격히 증가하는 구간이 존재한다. 이러한 현상은 마멸의 형태가 mild wear에서 setere wear로 바뀌기 때문이다.

Fig. 7에서 볼의 크기가 4.76mm에서 10mm로 증가하면서 마멸의 형태가 변화하는 하중이 각각 1N에서 4.5N으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 접촉면의 형태가 변화하면서 하중에 따른 Hertz 압력이 다르기 때문에 볼의 크기가 증가할수록 마멸의 형태가 변하는 하중이 증가하기 때문이다. Fig. 8은 Fig. 7의 하중을 Hertz 압력으로 바꾼 것이다. 그 결과 Hertz 압력이 550MPa에서 600MPa 사이에서 마멸율의 천이가 일어나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7에서 일반적으로 같은 하중일 때에는 볼의 크기가 증가할수록 마멸율은 감소한다. 그리고 Fig. 8에서 같은 Hertz 압력에서는 볼의 크기가 할수록 마멸율은 증가한다. 이러한 현상은 각각의 볼 크기에서 같은 하중일 때에는 볼의 크기가 작을수록 국부압력이 증가하게 되어 깊이 방향의 마모가 많이 일어나고 같은 Hertz 압력일 때에는 볼의 크

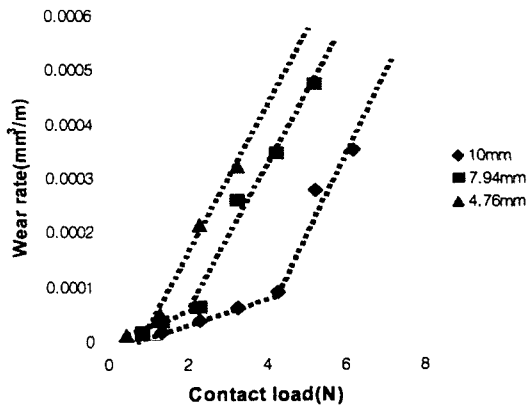


Fig. 7 Wear rate versus applied load diagram on the various diameters of ball specimens

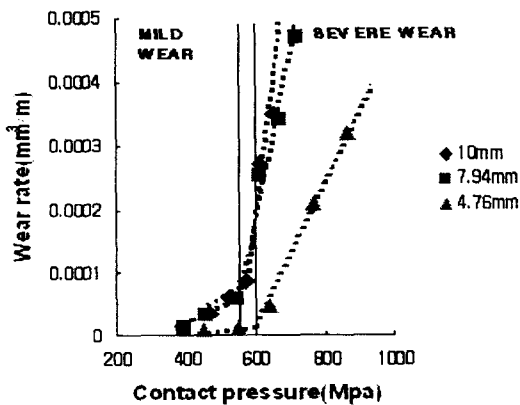


Fig. 8 Wear rate versus Hertz pressure diagram on the various diameters of ball specimens

기가 커질수록 접촉면의 지름이 증가하기 때문에 마멸폭이 증가하기 때문이다.

#### 4.결 론

Hertz 압력에 따른 TiAlCrN코팅의 마찰과 마멸 특성을 살펴보고 수명평가를 위해서 직경이 서로 다른 볼을 사용하여 슬라이딩 실험을 한 후 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 미끄럼시 TiAlCrN코팅과 스틸볼과의 주요 마

멸 메카니즘은 응착마멸과 연삭 마멸이고 연삭 마멸 표면에는 산화막이 생성된다. 이때 생성된 산화막은 스틸볼과의 마찰에서 고마찰을 유도한다.

2. 미끄럼 실험에서 동일 하중하에서는 볼 크기가 커질수록 마멸 수명이 증가하나 Hertz 압력으로 접근했을 때 모든 볼에서 동일한 압력에서는 비슷한 마멸 수명이 측정되었다. 그리고 Hertz 압력이 450MPa 이하에서는 접촉회전수 8000회 이상의 마모 수명을 갖는 무한수명이 존재한다.

3. 마멸율의 측정에서 볼의 크기가 증가할수록 마멸율의 천이가 일어나는 하중은 증가하나 Hertz 압력으로 접근했을 때 약 550MPa에서 600MPa 사이에서 마멸율의 천이가 일어나는 것을 알 수 있다.

#### 후 기

이 연구는 한국과학재단 지정 산업설비안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. M. Urgen and A. F. Cakir, Surface & Coatings Technology, 96 (1997) 236-244.
2. Y. L. Su, S. H. Yao, Z. L. Leu, C. S. Wei and C. T. Wu, Wear, 213 (1997) 165-174.
3. B. Navinsek, P. Panjan and J. Krusic, Surface & Coating Technology, 97 (1997) 182-191.
4. K. Holmberg and A. Matthews, Thin Solid Films, 253 (1994) 173-178
5. J. ZHANG and A. T. ALPAS, Acta Materialia, 45 (1997) 513-528
6. A. Ravikiran, S. Jahanmir, Wear, 251 (2001) 980-984