

C-N코팅 SCM415鋼의 摩擦·磨耗 特性에 關한 研究

柳晟基[†] · 盧龍^{*} · 金泰玉^{*} · 廉哲滿^{*} · 曹興進^{**} · 曹成敗^{***}

中國 重慶大學 機械傳動國家重點實驗室訪問學者, 慶尙大學校 機械航空工學部 航空機部品研究所

^{*}中國 延邊大學 理工學院 · ^{**}中國 重慶大學 機械傳動國家重點實驗室 · ^{***}慶尙大學校 大學院 機械設計學科

(2004. 9. 22. 접수 / 2005. 3. 10. 채택)

A Study on the Friction and Wear Characteristics of C-N Coated SCM415 Steel

Sung-ki Lyu[†] · Long Lu^{*} · Tai-yu Jin^{*} · Zhe-Man Lian^{*} · Xing-Jin Cao^{**} · Sung-Min Cho^{***}

The State Key Laboratory on Mechanical Transmission, Chongqing Univ., Chongqing, China, Mechanical & Aerospace Eng.,

^{*}Yanbian University, Yanji, China

^{**}SLMT, Chongqing Univ., Chongqing, China

^{***}Graduate School, GSNU, Jinju, Korea

(Received September 22, 2004 / Accepted March 10, 2005)

Abstract : This study deals with the friction and wear characteristics of C-N coated SCM415 steel. The PSII(plasma source ion implantation) apparatus was built and a SCM415 test piece with steel substrate was treated with carbon nitrogen by this apparatus. The composition and structure of the surface layer were analyzed and compared with that of PVD(physical vapor decomposition) coated TiN layer. It was found that both of friction coefficient of C-N coating and TiN coating decreased with increasing load, however, C-N coating showed relatively lower friction coefficient than that of TiN coating.

The micro-vickers hardness of C-N film is 3200 Hv, which is 32~43% higher than that of TiN film. The critical load of C-N film is 52N, which is 25% higher than that of TiN film. The hardness of C-N film fabricated by Plasma ion implantation is 61~70% higher than that of base material, and friction coefficient is 14~50% lower than that of base material. It is also interesting to note that the friction was changed from adhesive wear mode to light oxidizing wear mode.

Key Words : plasma source ion implantation, none-line-of-sight process, critical load, friction and wear

1. 서 론

기어는 동력전달장치에 가장 많이 사용하고 있는 핵심부품이며, 산업발달과 함께 출력향상과 동력전달의 효율을 증가시키기 위하여 소형화, 경량화, 저진동, 저소음화, 저비용, 고강도 및 내마모성이 높은 기어를 요구하고 있다.

동력전달용 기어에서 발생하고 있는 파손형태를 크게 나누면 기어의 치 파손과 치면의 마모이다. 치 파손은 과대하중에 의하여 단시간에 이뿌리부근에

서 일어나는 파손이다. 치면의 마모는 열처리 등에 의하여 표면경화된 값에서 피로에 의하여 일어나는 경우이며 피치점 부근에서 발생하는 피팅현상이다. 그러므로 기어는 고강도, 기어 중심부의 내 충격인성, 기어표면의 고경도와 고내마모성을 갖추어야 한다. 이 요구를 만족시키기 위한 기어 표면경화 처리 방법에는 전통적인 침탄열처리방법 외에 날로 발전하고 있는 여러 가지 표면개질기술이 폭넓게 응용되고 있다.

플라즈마 이온주입 PSII(plasma source ion implantation)법은 주입하고자 하는 물질을 기체상태로 플라즈마를 형성시킨 후, 처리하고자 하는 소재에 고전압의 바이어스(bias)를 인가함으로써 플라즈마

[†]To whom correspondence should be addressed.
sklyu@gsnu.ac.kr

중의 양이온들이 200°C에 불과 한 낮은 온도에서 소재의 표면 층돌/주입되며 소재주위에 플라즈마피복이 형성되며 이온들은 소재의 모든 표면에 입사/층돌을 일으키게 되므로¹⁾ 2차원적인 공정의 한계를 극복할 수 있는 3차원적인 공정으로 처리해야 하는 표면적이 넓고 표면형상이 복잡한 경우에도 쉽게 적용이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 불 베어링, 구멍의 내부표면 등 형상이 복잡하고 크기가 다양한 경우 증착할 수 있는 우수한 방법이다²⁾.

J. C. Jiang³⁾ 등은 재료 표면에 W-DLC 박막을 증착시켜 코팅이 내마모성에 미치는 영향을 고찰하였다.

앞으로 박막증착기술의 발전은 기술의 복합화를 위해 병행으로 이루어질 것으로 예측된다. 즉, 폭넓은 산업현장에서 요구하는 구체적인 용도에 맞도록 다양한 박막재료를 혼합하여 다층, 다성분의 박막을 제조하는 기술이 요구된다.

본 연구에서는 항공기, 자동차, 오토바이, 일반산업 기계 등에 널리 사용되고 있는 기어의 내마모성에 관한 연구를 하기위하여 기어재료인 SCM415 합금강을 시험편재료로 선택하여 플라즈마 이온주입법 PSII으로 시험편표면에 C-N박막을 증착시켜 PSII 코팅층의 특성과 모재경도, 박막층 두께, 표면거칠기 등이 임계하중에 미치는 영향을 고찰하고, C-N코팅과 TiN코팅의 마찰계수와 임계하중을 구하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1. 시험편

본 연구에서 사용한 시험편은 기어재료에 널리 사용하고 있는 KSD규격인 SCM415강을 사용하였다. SCM415의 화학적 성분을 Table 1에 나타냈다.

시험편의 크기는 지름이 $\phi 30$ 이고 두께가 10mm인 디스크형으로 가공하고 플라즈마 이온주입시험기와 물리증착시험기를 사용하여 C-N박막과 TiN박막을 증착하였다.

2.2. 실험장치

시험편표면에 플라즈마 이온주입시험기(PSII-EX)를 사용하여 고경도 박막층을 증착시켰으며, 마찰·마모시험은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 볼 온 디스크형으로 상대시험인 세라믹 볼을 회전하는 박막증착된 시험편을 디스크위에 올려놓고 일정한 하중으로 가압하면서 상온, 상압, 무윤활유 상태에서 마찰·마모시험을 수행하였다.

Table 1. The chemical composition of SCM415(wt,%)

SCM415	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Measured	0.14	0.30	0.62	0.03	0.02	1.10	0.16

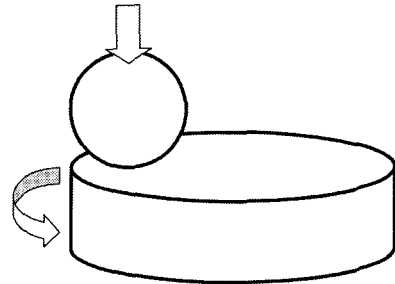


Fig. 1. Schematic illustration of ball on disc type wear tester

실험순서는 초음파세척, 건조, 마찰·마모시험, 초음파세척, 건조, 현미경관찰, 표면거칠기측정 순으로 수행하였다.

마찰·마모의 실험조건은 미끄럼속도를 100mm/sec로 항상 일정하게 하고 하중은 50, 100, 150N으로 변화시키면서 실험을 하였다.

굽기실험은 현재 널리 사용하고 있는 박막층과 모재의 결합성능을 평가하는 일종의 방법으로 정밀도가 좋아 현재 많이 사용하고 있는 실험방법이다.

본 실험에서는 굽기 시험기를 사용하였으며 200 μm 의 곡률을 가진 다이아몬드압자로 실험하였다. 시험편마다 5회씩 측정하여 그 평균값을 구하였다.

모재의 경도, 표면거칠기, 및 박막두께에 따르는 박막층과 모재표면의 접착강도를 평가하기 위하여 아래와 같은 실험분석을 수행하였다. 시험편 표면을 연마지 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000Cw를 사용하여 모재의 표면거칠기를 $Ra = 0.2 \sim 1 \mu\text{m}$ 로 필요한 만큼 연마하였다.

모재경도에 따른 임계하중변화는 박막두께 $t = 3.1 \mu\text{m}$, 표면거칠기 $Ra = 0.21 \mu\text{m}$, 담금질온도를 조절하면서 모재경도를 42~65HRC로 맞추었다. 모재표면 거칠기에 따른 임계하중변화는 박막두께 $t = 3.1 \mu\text{m}$, 모재경도 65HRC, 입도가 다른 연마지를 이용하여 표면거칠기를 $Ra = 0.21 \sim 0.96 \mu\text{m}$ 로 맞추었다. 박막 두께에 따른 임계하중변화는 표면거칠기 $Ra = 0.21 \mu\text{m}$, 모재경도 65HRC, 증착시간을 조절하여 박막두께를 0.6~3.1 μm 로 맞추었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. SCM415의 경도에 따른 접착강도의 변화

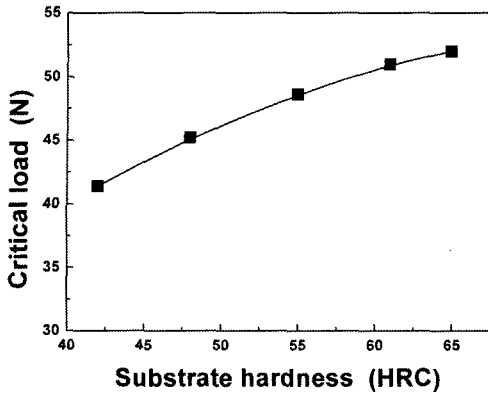


Fig. 2. The relationship between the critical load and substrate hardness

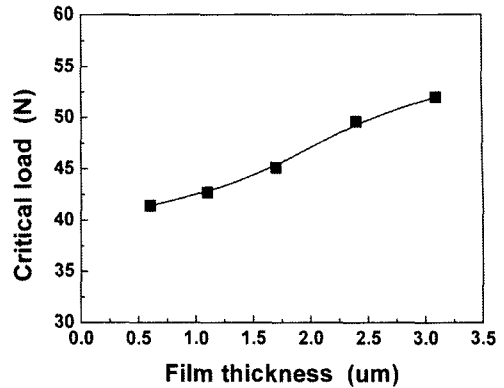


Fig. 3. The relationship between the critical load and film thickness

열처리공정을 변화시켜 SCM415 시험편의 표면 경도를 42, 48, 55, 61, 65HRC되는 시험편을 제작하였고, Fig. 2은 SCM415모재의 경도에 따른 임계하중 변화를 나타냈다.

Fig. 2에서 알 수 있듯이 모재경도가 증가함에 따라 임계하중이 증가하는 경향으로 나타났다.

이것은 박막이 연한 모재위에 증착되면 얇은 얼음이 연한 땅에 덮인 듯이 힘을 받으면 모재국부에 소성변형이 발생 할 수 있으므로 파열현상이 일어나 박막층이 이탈함으로써 임계하중이 감소하는 반면 박막이 경한모재에 증착되면 얇은 얼음이 시멘트바닥위에 덮인 듯이 파열되기 어렵고 임계하중이 형성되기 마련이다. 실험결과는 Hedebqvist⁴⁾의 실험결과와 일치하였다.

이것은 모재경도의 증가에 따라 소성변형의 저항력이 증가하여 박막층의 굽힘정도가 감소하면서 박막층이 더욱 높은 하중하에서 파열, 이탈현상이 일어나기 때문이다.

3.2. C-N박막두께에 따른 접착강도의 변화

C-N박막층의 두께가 임계하중에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 본 실험에서는 플라즈마 이온주입시간을 조절하여 C-N박막두께를 0.6, 1.1, 1.7, 2.4, 3.1 μm 가 되는 시편을 제작하였다. 박막층의 두께측정은 광학현미경을 사용하여 측정하였다.

Fig. 3에서 알 수 있듯이 C-N박막층의 두께가 증가함에 따라 임계하중도 증가하는 경향으로 나타났다. 이것은 두께의 증가에 따라 변형저항력이 증가한 것으로 생각된다^{5,6)}.

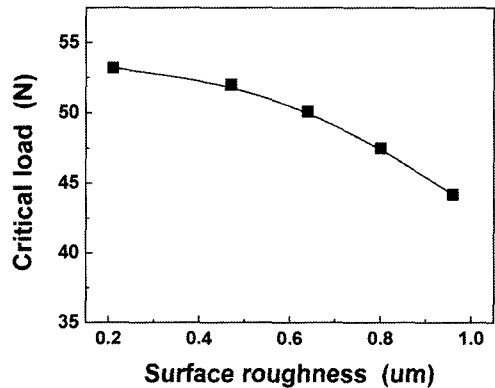


Fig. 4. The relationship between the critical load and roughness

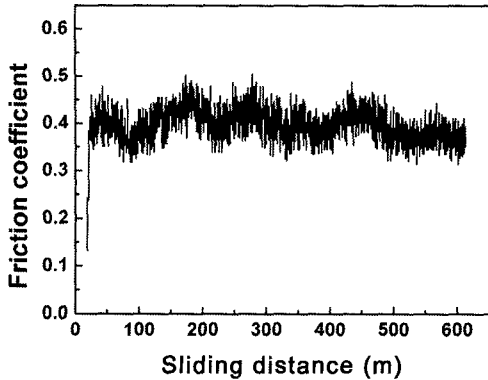
3.3. 모재표면거칠기에 따른 임계하중의 변화

본 실험에서는 그라인딩과 폴리싱을 하여 표면거칠기가 0.2~1.0 μm 되는 실험디스크를 제작하여 같은 조건하에서 디스크 표면위에 두께 3 μm 되는 C-N박막을 입혀 임계하중을 측정하였다.

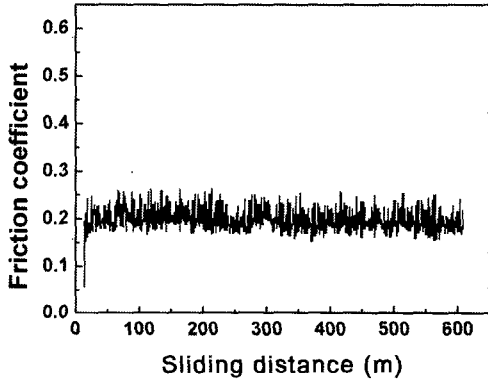
Fig. 4에 나타난 바와 같이 시편모재의 표면거칠기가 좋을수록 임계하중이 증가하였으며, 표면이 거칠수록 임계하중이 다소 감소하였다. 이것은 표면이 거칠수록 응력집중이 발생하기 쉽고 보다 작은 하중하에서도 박막층과 모재표면 사이에 큰 전단력을 받으면서 박막층이 파괴되고, 모재표면이 거칠수록 파괴현상이 더욱 쉽게 발생하기 때문이라고 생각된다.

3.4. 하중에 따른 마찰계수의 변화

Fig. 5의 (a)와 (b)는 50N의 수직하중과 100mm/sec의 미끄럼속도에서 두께가 3.1 μm 인 TiN박막과 C-N박막층에 대한 마찰계수의 변화를 나타낸 그림이다.



(a) Thickness of TiN film = 3.1 μm, Load = 50N



(b) Thickness of C-N film = 3.1 μm, Load = 50N

Fig. 5. Friction coefficient of specimens as a function of sliding distance

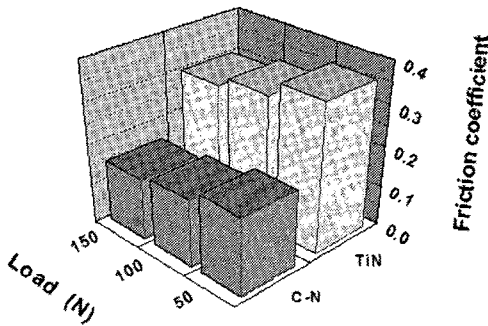


Fig. 6. Comparison of friction coefficient for specimens of TiN and C-N at different load

Fig. 5(a)에서 TiN박막층의 평균마찰계수는 0.364로서 Fig. 5(b)의 C-N박막층의 평균마찰계수 0.192보다 높게 나타났으며, C-N박막층의 마찰계수의 변화는 TiN박막층의 마찰계수의 변화보다 더 안정적으로 나타났다.

Fig. 6은 각 시험편에 대한 수직하중의 변화에 따른 마찰계수의 평균값을 나타낸 그림이다. 수직하중

을 50, 100, 150N으로 주었을 때 C-N박막층의 평균 마찰계수는 0.192, 0.166, 0.153으로 나타났으며, TiN 박막층의 평균마찰계수는 0.364, 0.327, 0.302로 나타났다. 여기서 마찰계수는 하중의 증가에 따라 다소 감소하는 경향으로 나타났다. 동일하중일 때 C-N박막층의 마찰계수는 TiN박막층의 마찰계수보다 작게 나타났다.

Fig. 6에 나타난 바와 같이 여기서 마찰계수는 하중의 증가에 따라 다소 감소하는 경향으로 나타났으며, 동일하중일 때 C-N박막층의 마찰계수는 TiN박막층의 마찰계수보다 작게 나타났다.

응착이론에 의하면 응착마모과정에서 마찰계수는 아래식과 같이 표시한다.

$$\mu = \frac{\tau}{\sigma_s} \quad (1)$$

여기서 τ 는 두 접촉표면의 응착전단강도, σ_s 는 마찰표면의 항복강도이다.

질소를 SCM415강 표면에 주입한 후 표면을 강화 시킴으로써 마찰표면의 항복강도를 향상시키는 한편 가는 입자형질화물을 생성함에 따라 연한 페라이트(ferrite)의 연속성을 파괴하므로 마찰하는 두 표면의 접촉력을 감소시킨다. 즉 τ 를 감소시켜 마찰계수를 현저하게 감소시키면서 내마모성이 향상된 것으로 생각된다.

3.5. 코팅층의 경도

본 연구에서는 시험편의 박막층경도를 측정하기 위하여 마이크로 비커스 경도 시험기를 사용하여 측정하였다. 코팅층의 경도측정에서 모재의 경도가 낮은 영향을 배제하기 위하여 마이크로 비커스 경도의 작용하중을 가능한 작게 하여 0.1~1.0N의 범위에서 측정하였다. 경도측정의 정확성을 위하여 시험편 종류에 따라하중을 같게 하였으며, 시험편마다 5회씩 측정하여 그 평균값을 구하였다. C-N 박막과 TiN박막의 마이크로 경도를 Fig. 7에 나타냈다.

Fig. 7에 나타난 바와 같이 0.1N 하중에서 C-N박막의 비커스 경도값은 3200Hv로 나타났으며 TiN박막의 마이크로 비커스 경도값은 2090Hv로 나타났다. 동일하중에서 C-N박막의 마이크로 비커스 경도가 TiN박막의 마이크로 비커스 경도보다 32~43% 높게 나타났다.

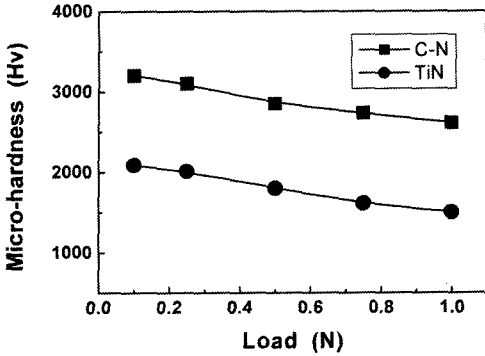


Fig. 7. The relationship between the micro-hardness of specimen surfaces and loads

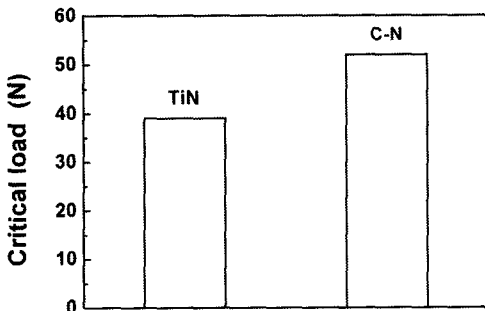


Fig. 8. Comparison of critical load for specimens of TiN and C-N film

3.6. C-N박막과 TiN박막의 임계하중

굽기시험법을 이용하여 C-N박막과 TiN박막의 임계하중을 비교하였다.

Fig. 8에 나타난 바와 같이 C-N박막의 임계하중이 TiN박막보다 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 C-N박막의 비커스경도가 높을 뿐만 아니라 모재의 경도가 높기 때문이라고 생각된다. 모재의 경도가 높을수록 박막에 대하여 지지력이 강화되면서 높은 접촉강도를 가질 수 있다. 그리고 접촉강도가 높아짐에 따라 내마모성도 높아진다는 것을 관찰할 수 있다⁷⁾.

3.7. SCM415시편과 C-N증착전후의 마찰특성비교

경도시험과 미끄럼 마찰실험결과를 Fig. 9, 10에 나타냈다. PSII를 처리한 경우 경도는 Fig. 9에서 알 수 있듯이 61~70% 높게 나타났고, 마찰계수는 Fig. 10에서 알 수 있듯이 14~50% 낮게 나타났다. 비커스경도가 3200Hv까지 도달하는 것을 보면 탄화물이 높은 경도에 중요한 역할을 한 것으로 사료된다.

Fig. 11의 마찰실험 후 시편의 마모흔적을 관찰하면 PSII 처리된 SCM415강의 마찰흔적이 미세한 형태로 뚜렷한 응착마모 특징이 보이고 마모된 표면에 구멍이 일부 나타났다. 그러나 PSII 처리한 SCM415강의 시험편은 마찰면이 아주 평활하고 서로 평행한 적은 마모흔적과 가벼운 산화흔적이 나타났다. PSII기술을 이용하였기 때문에 마모기구는 응착마모로부터 가벼운 산화마모로 변화하면서 마모를 훨씬 감소시켰다.

시험편의 마찰·마모측정을 위하여 일정한 미끄럼 거리에서 실험을 정지시켜 초음파세척을 한 후 마찰상태를 관찰하고, 불의 마모영향을 최소화한 줄이기

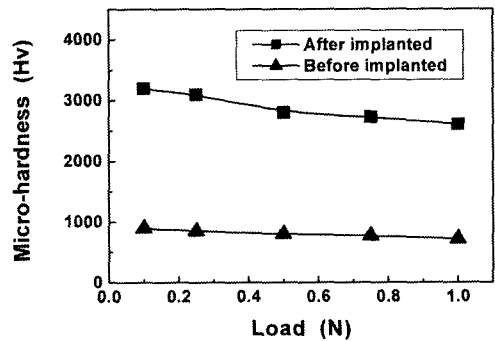


Fig. 9. The relationship between the microhardness and loads

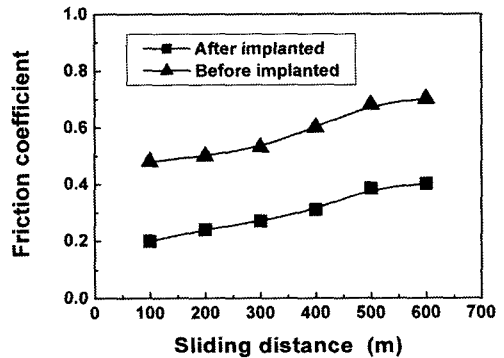


Fig. 10. The relationship between the friction coefficient and sliding distance

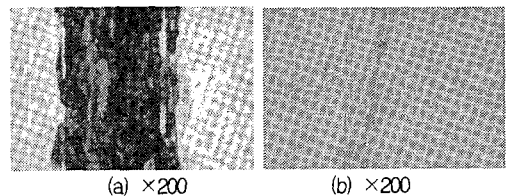


Fig. 11. The wearing surface of specimen of SCM415 (a) before implanted and (b) after implanted

위해 각 단계마다 볼의 접촉부를 바꾸면서 실험을 계속하였다. 이로 인하여 각 단계의 초기에는 마찰계수가 급격히 떨어졌다가 길들이기 상태가 반복적으로 나타나면서 다시 정상마모상태를 유지하는 현상이 나타났다. 이것은 마모입자들의 제거에 따른 영향⁸⁾을 실험적으로 보고된 바 있으며, 마찰·마모과정에서 마모입자들이 마찰저항력을 상승시키는 주요원인임을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 SCM415합금강 시험편에 침탄열처리와 C-N, TiN박막 코팅을 시켜 상온, 상압 및 무윤활상태에서 볼 온 디스크형 마찰·마모시험기와 굵기시험기로 시편의 마찰·마모실험을 하여 모재의 경도, 표면거칠기, 박막층의 두께 등이 임계하중에 미치는 영향과 코팅층과 모재와의 접착강도를 구하였다. 본 연구에서 얻은 결과들을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 모재경도와 C-N박막층의 두께가 증가할수록 임계하중이 증가하였다. 그리고 표면거칠기가 거칠수록 임계하중이 감소하였다.
- 2) C-N 박막과 TiN 박막의 마찰계수는 하중의 증가에 따라 다소 감소하는 경향으로 나타났고, 동일한 하중일 때 C-N 박막층의 마찰계수는 TiN 박막층의 마찰계수보다 작게 나타났다.
- 3) C-N 박막의 최대 마이크로비커스 경도값은 3200Hv로 나타났으며, TiN박막의 경도 보다 32~43% 높게 나타났다. C-N박막의 임계하중은 TiN박막의 임계하중보다 약 25% 높게 나타났다.
- 4) 플라즈마 이온주입법으로 C-N코팅을 한 경우 경도는 모재보다 61~70% 증가되었으며, 마찰계수는 14~50% 감소되었다. 또한 C-N박막층의 마찰기구는 응착마모로부터 산화마모로 변화되는 것이 관찰되었다.

감사의 글 : 이 논문은 中國 重慶大學 機械傳動

國家重點實驗室 訪問學者經費支援, 2004年度 地方大學革新力量強化事業, 知識基盤機械 部品·素材 研究開發 Cluster事業團의 支援에 依해 研究되었으 며 이에 感謝드립니다.

참고문헌

- 1) J. R. Conrad, A. Dodd and F. J. WorzalaX. Qiu, "Plasma Source Ion Implantation: A New, Cost-Effective, Non-Line-of-Sight Technique for Ion Implantation of Materials", Surf. & Coat. Tech., Vol. 36, pp. 927~937, 1998.
- 2) Z. M. Zeng, T. K. Kwok, X. B. Tian et al., "Plasma Immersion Ion Implantation into Inner and Outer Races of Industrial Bearings", Surf. & Coat. Tech., Vol. 120-121, pp. 663~667, 1999.
- 3) J. C. Jiang, W. J. Meng, A. G. Evans et al., "Structure and Mechanics of W-DLC Coated Spur Gears", Surf. & Coat. Tech., Vol. 176, pp. 50~56, 2003.
- 4) P. Hdenqvist, M. Olsson and S. Jacobson, "Failure Mode Analysis of TiN-Coated High Speed Steel: In Situ Scratch Adhesion Testing in the Scanning Electron Microscope", Surf. & Coat. Tech., Vol. 41, pp. 31~49, 1990.
- 5) D. S. Richerby, "A Review of the Methods for the Measurement of Coating-Substrate Adhesion," Surf. & Coat. Tech., Vol. 36, pp. 541~557, 1988.
- 6) S. H. Bull, D. S. Rickerby, "The Use of Scratch Adhesion Testing for the Determination of Interfacial Adhesion: The Importance of Frictional Drag", Surf. & Coat. Tech., Vol. 36, pp. 503~517, 1988.
- 7) B. J. Kim, Y. C. Kim, D. K. Lee et al., "The Effect of NH₃ Plasma Pre-Treatment on the Properties of TiN Coatings Produced by Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition", Surf. & Coat. Tech., Vol. 111, pp. 56~61, 1999.
- 8) S. Jahanmir, E. P. Abrahamson, and N. P. Suh, "Sliding Wear Resistance of Metallic Coated Surfaces", Wear, Vol. 40, pp. 75~84, 1976.