

C-N코팅 스퍼기어의 摩擦 · 磨耗 特性에 관한 研究

盧 龍[†] · 柳晟基^{*}

中國 重慶大學 機械傳動國家重點實驗室 訪問學者, 中國 延邊大學 理工學院
*慶尙大學校 機械航空工學部, 航空機部品技術研究所

A Study on the Friction and Wear Characteristics of C-N Coated Spur Gear

Long Lu[†] and Sung-Ki Lyu^{*}

The State Key Laboratory on Mechanical Transmission, Chongqing Univ.,
Chongqing, China, Yanbian University, Yanji, China

*School of Mechanical & Aerospace Eng., ReCAPT, Gyeongsang Nati. Univ., Jinju, Korea

Abstract – This study deals with the friction and wear characteristics of C-N coated spur gear. The PSII apparatus was built and a SCM415 test piece and test gear 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 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. We was investigated the effect of C-N coating on hardness, friction and wear. The TiN coated gear showed a more serious friction phenomena than that of C-N coated gear. It was considered that coating of TiN, which was conducted at a vacuum chamber at about 500°C, results in a tempering of base material that causes microstructural change, which in turn resulted in decreasing of hardness. The C-N coated gear and pinion had higher wear resistance than that of TiN coated gear and pinion. C-N coating significantly improved the friction and wear resistance of the gear.

Key words – plasma source ion implantation, none-line-of-sight process, gear, 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 치 파손과 치면의 마모이다. 치 파손은 과대하중에 의하여 단시간에 이뿌리부근에서 일어나는 파손이다. 치면의 마모는 열처리 등에 의하여 표면경화된 치에서 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 처리방법에는 전통적인 열처리 방법 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 중의 양이온들이 200°C에 불과한 낮은 온도에서 소재의 표면에 충돌/주입되어 소재주위에 플라즈마 피복(Plasma sheath)이 형성되며, 이온들은 소재의 모든 표면에 입사/충돌을 일으키게 되므로[1], 2차원적인 공정의 한계

[†]주저자 · 책임저자 : lulong1122@hanmail.net

를 극복할 수 있는 3차원적인 공정으로 처리해야 하는 표면적이 넓고 표면형상이 복잡한 경우에도 쉽게 적용이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 볼 베어링, 구멍의 내부표면 등 형상이 복잡하고 크기가 다양한 경우 증착할 수 있는 우수한 방법이다[2].

M. Murakawa[3] 등은 PVD법으로 SCM415강인 스퍼기어 표면에 경도값 1100 Hv, 두께 1.5~2 μm인 WC/C박막을 증착시켜 무 윤활상태에서 기어의 사용수명을 3배 연장시켰고 WC/C박막을 증착시키기 전에 MSP(micro shot peening)공정을 실시하여 기어의 사용수명을 더욱 효과적으로 향상시켰으며 헬리콥터 기어 등 윤활유를 주유시킨 후 무 윤활상태의 특수한 조건에서 사용수명 연장에 관한 연구를 하였다. J. C. Jiang[4] 등은 스퍼기어 표면에 W-DLC박막을 증착시켜 “four-square” 기어 시험기와 TEM을 사용하여 코팅기어의 파손기구에 대하여 결합형태를 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 하기 위하여 기어재료인 SCM415 합금강을 시험편재료로 선택하여 플라즈마 이온주입법 PSII으로 시험편 및 기어표면에 C-N박막을 증착시켜 PSII 코팅층의 특성을 고찰하고, C-N코팅과 TiN코팅의 마찰계수와 임계하중을 구하였다. 그리고 C-N코팅 시험편의 마모기구를 규명하여, C-N코팅기어와 TiN코팅기어의 마찰·마모 특성을 고찰하고자 한다. 또한 내마모성을 향상시키기 위한 기어코팅기술 등을 연구하고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

2-1. 시험편

본 연구에서 사용한 시험편과 시험기어 재료는 기어재료에 널리 사용하고 있는 KSD규격인 SCM 415강을 사용하였다. SCM415의 화학적 성분을 Table 1에 나

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

Table 2. Dimension of the test gear

	Pinion	Gear
Material	SCM415	
Tooth shape	Involute	
Number of teeth (Z)	17	32
Module (m)	1.75	
Pressure angle (α)	200	
Modification coefficients (x)	0.6	0.8
Face width (b)	12 mm	9 mm
Span gage (5 teeth)	-0.042 -0.085	-0.042 -0.085
Finish	Coating	

타냈다. 시험편은 지름이 φ30이고 두께가 10 mm인 디스크타입으로 가공하고 시험기어는 스퍼기어로서 시험기어의 형상과 재원을 Table 2에 나타냈다. 그리고 플라즈마 이온주입시험기와 물리증착시험기를 사용하여 시험편과 시험기어의 표면에 C-N박막과 TiN박막을 증착하였다.

2-2. 실험장치

시험편을 기어표면에 고경도 박막층을 증착시키기 위하여 Fig. 1의 플라즈마 이온주입시험기(PSII-EX)를 사용하였다. 실험장치는 진공로, 진공펌프, 타겟 테이블(target table), 자기여과도관(magnetic filtering duct), 음극, 바이어스 전압과 기체입구 등으로 구성되어 있다.

본 실험에서는 볼 온 디스크타입으로 상대시험편인 세라믹 볼을 회전하는 박막증착된 시험편을 디스크위에 올려놓고 일정한 하중으로 가압하면서 상온, 상압, 무 윤활유 상태에서 마찰·마모시험을 수행하였다. 실험

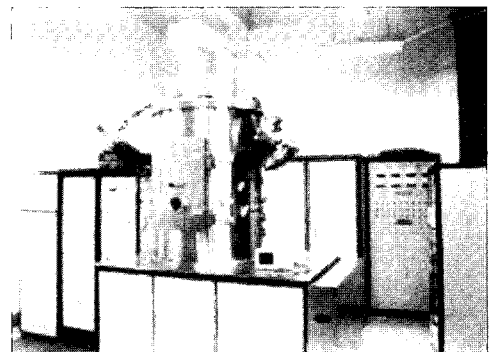


Fig. 1. Device of plasma source ion implantation.

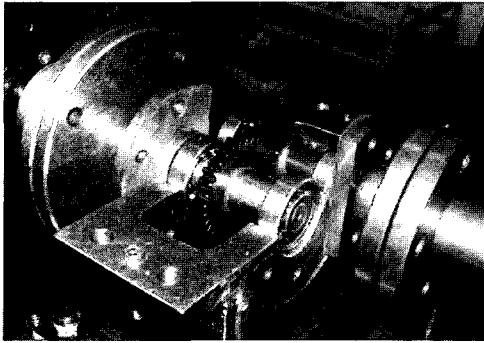


Fig. 2. Gear box of friction and wear testing machine.

순서는 초음파세척, 건조, 마찰·마모시험, 초음파세척, 건조, 현미경관찰, 표면조도측정의 순으로 수행하였다.

마찰·마모의 실험조건은 미끄럼속도를 100 mm/sec로 항상 일정하게 하고 하중은 50, 100, 150 N으로 변화시키면서 200 μm의 곡률을 가진 다이아몬드 입자로 실험을 하였으며, 시험편마다 5회씩 측정하여 그 평균값을 구하였다.

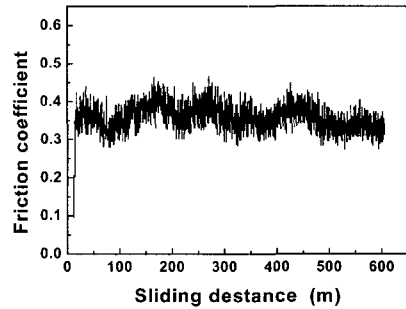
시험기어 표면에 C-N과 TiN 박막을 증착한 시험기어의 마찰·마모실험은 Fig. 2에 나타낸 기어 마찰·마모시험기를 사용하였다. 기어 마찰·마모시험기는 크게 모터, 회전속도와 토크센서, 기어박스, 브레이크 등으로 구성되어 있다. 박막을 증착한 시험기어를 기어박스에 장착시키고, 적절한 윤활유를 기어박스에 투입하여 기어를 윤활 시키면서 모터 파워 4 Kw, 회전속도 1800 rpm에서 실험하였다. 브레이크는 0~50 N·m의 하중을 무단변속 시킬 수 있으며 입력부와 출력부의 토크와 축 회전속도를 제어할 수 있다. 그리고 윤활유의 온도를 실시간으로 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

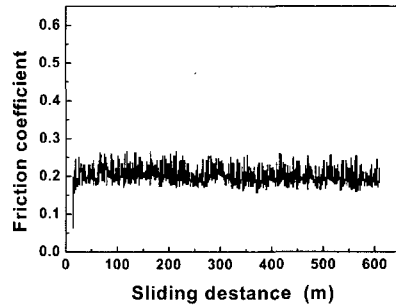
3-1. 하중에 따른 마찰계수의 변화

Fig. 3(a)와 (b)는 50 N의 수직하중과 100 mm/sec의 미끄럼속도에서 두께가 3.1 μm인 TiN박막과 C-N박막층에 대한 마찰계수의 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 3(a)에서 TiN박막층의 평균마찰계수는 0.364로서 Fig. 3(b)의 C-N박막층의 평균마찰계수 0.192보다 높게 나타났으며, C-N박막층의 마찰계수의 변화는 TiN박막층의 마찰계수의 변화보다 더 안정적으로 나타났다.

Fig. 4는 각 시험편에 대한 수직하중의 변화에 따른 마찰계수의 평균값을 나타낸 그림이다. 수직하중을 50,



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



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

Fig. 3. Friction coefficient of specimens as a function of sliding distance.

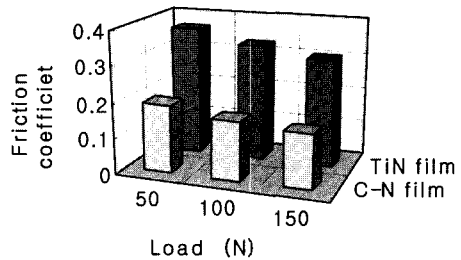


Fig. 4. Comparison of friction coefficient for specimens of TiN and C-N at different load.

100, 150 N으로 주었을 때 C-N박막층의 평균마찰계수는 0.192, 0.166, 0.153으로 나타났으며, TiN박막층의 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. 4에서 알 수 있듯이 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 마찰 표면의 항복강도이다.

질소를 SCM415강 표면에 주입한 후 표면을 강화시킴으로써 마찰표면의 항복강도를 향상시키는 한편 가는 입자형질화물을 생성함에 따라 연한 페라이트의 연속성을 파괴하므로 마찰하는 두 표면의 접착력을 감소시킨다. 즉, τ 를 감소시켜 마찰계수를 현저하게 감소시키면서 내마모성이 향상된 것으로 생각된다.

3-2. C-N증착 전후의 경도와 마찰계수 비교

경도시험과 미끄럼 마찰실험결과를 Figs. 5와 6에 나타냈다. PSII를 처리한 경우 경도는 Fig. 5에서 알 수 있듯이 61~70% 높게 나타났고, 마찰계수는 Fig. 6

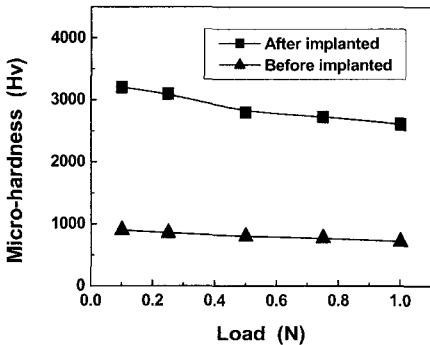


Fig. 5. The relationship between the micro-hardness and loads.

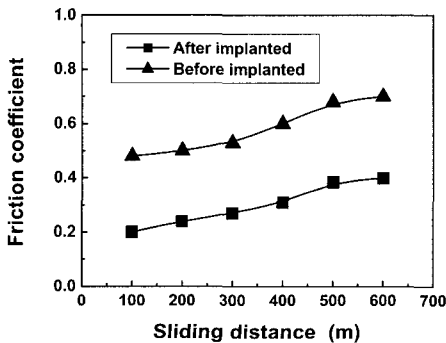


Fig. 6. The relationship between the friction coefficient and sliding distance.

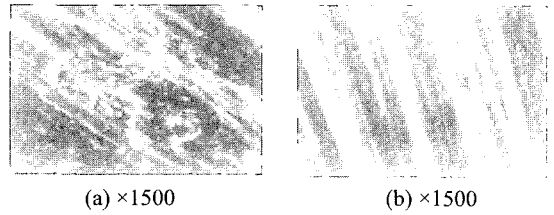


Fig. 7. The wearing surface of specimen of SCM415 (a) before implanted and (b) after implanted.

에서 알 수 있듯이 14~50% 낮게 나타났다. 비커스 경도가 3200 Hv까지 도달하는 것을 보면 탄화물이 높은 경도에 중요한 역할을 한 것으로 사료된다. Fig. 7의 마찰실험 후 시편의 마모흔적을 관찰하면 PSII 처리한 SCM415강의 마찰흔적이 미세한 형태로 뚜렷한 응착마모 특징이 보이고 마모된 표면에 구멍이 일부 나타났다. 그러나 PSII처리한 SCM415강의 시험편은 마찰면이 아주 평활하고 서로 평행한 적은 마모흔적과 가벼운 산화흔적이 나타났다. PSII기술을 이용하였기 때문에 마모기구는 응착마모로부터 가벼운 산화마모로 변화하면서 마모를 훨씬 감소시켰다.

4. 시험기어의 마찰 · 마모

물리증착 시험기(TX6 MS)를 사용하여 기어와 피니언에 TiN박막을 입힌 사진을 Fig. 8에 나타냈다. 시험

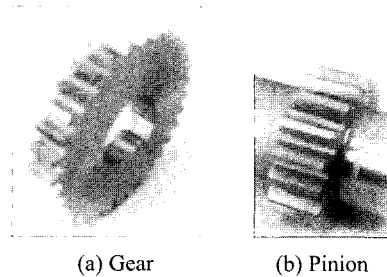


Fig. 8. The gear and pinion coated with TiN film.

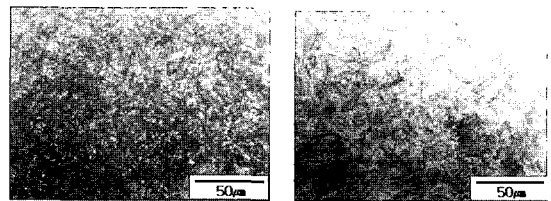


Fig. 9. Microstructure of specimen coated with TiN film (×500).

기어 이를 절단하여 금속조직을 관찰하고 모재의 경도를 측정하였다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 마르텐사이트 조직과 잔류 오스테나이트 조직에서 뜨임 트루스타이트 조직으로 변화하는 경향을 관찰할 수 있었다. 표면 경도는 857 Hv에서 628649 Hv로 떨어졌다. 이것은 TiN 코팅공정에서 진공로 온도가 약 500°C이므로 SCM415 강이 템퍼링처리 되면서 금속조직을 변화시키고, 표면 경도를 떨어뜨린 것으로 사료된다.

회전속도 1800 rpm, 하중 420 N·m에서 마찰·마모시험한 TiN코팅 기어와 피니언의 표면 사진을 Fig. 10에 나타냈다. Fig. 10에서 알 수 있듯이 기어 표면이 피치원 부분에서 심한 마모현상을 관찰할 수 있었다. 시험편 마찰·마모시험과 동일하게 모재의 경도가 떨어지면서 코팅층에 대한 지지력이 약화되어 마모현상이 쉽게 발생한 것으로 예측된다.

시험기어와 피니언에 C-N코팅한 사진을 Fig. 11에 나타냈다.

C-N코팅한 기어와 피니언을 마찰·마모시험 후 기어와 피니언의 사진을 Fig. 12에 나타냈다. TiN코팅한 기어가 피니언의 파손보다 적지만 피치원부분에서 파손된 흔적을 관찰할 수 있었다. 기어와 피니언표면은 모두 경한 C-N박막을 입혔지만 반드시 초기 마모과정이 경과되어야 하므로 기어와 피니언 표면에 부득불

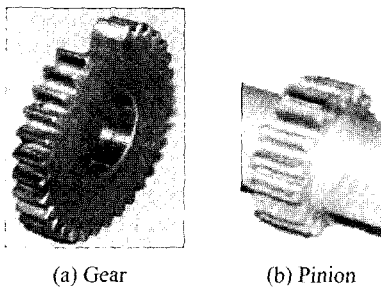


Fig. 10. The surface of gear and pinion coated with TiN film after test.

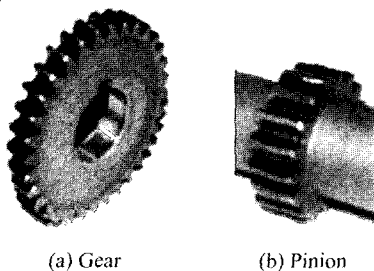


Fig. 11. The gear and pinion coated with C-N film.

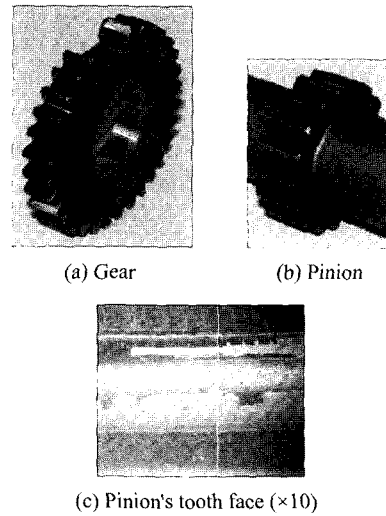


Fig. 12. The surface of gear and pinion coated with C-N film after test.

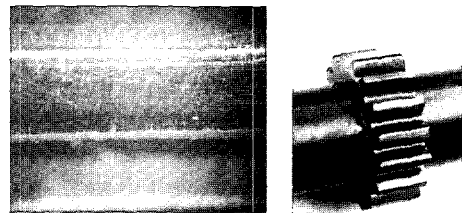


Fig. 13. The surface of pinion coated with C-N film after test.

마모현상이 발생한 것으로 생각된다.

따라서 C-N코팅한 피니언과 코팅하지 않은 기어의 마찰·마모시험을 해보았다. 마찰·마모시험 결과는 Fig. 13에 나타난 바와 같이 매우 향상되었다. 치면에는 미세한 균한 흔적이 발견되었고 이뿌리 부분에 조그마한 마모현상이 나타났는데 이것은 코팅전에 치형 수정법으로 억제할 수 있을 것으로 생각한다.

5. 결 론

본 연구에서는 SCM415합금강 시험편과 시험기어에 침탄열처리와 C-N, TiN박막 코팅을 시켜 상온, 상압 및 무윤활상태에서 볼 온 디스크타입 마찰·마모시험기로 시험편의 마찰·마모시험을 하였고, 시험기어의 마찰·마모시험을 하여 기어의 내마모성을 향상시키기 위한 기어코팅기술을 연구하였다. 본 연구에서 얻은 결과들을 요약하면 다음과 같다.

1. C-N박막과 TiN박막의 마찰계수는 하중의 증가에 따라 다소 감소하는 경향으로 나타났고, 동일한 하중일 때 C-N박막층의 마찰계수는 TiN박막층의 마찰계수보다 작게 나타났다.

2. 플라즈마 이온주입법으로 C-N코팅을 한 경우 경도는 모재보다 61~70% 증가하였으며, 마찰계수는 14~50% 감소되었다. 또한 C-N박막층의 마찰기구는 응착마모로부터 산화마모로 변화되는 것이 관찰되었다.

3. TiN코팅기어는 C-N코팅기어보다 마모형상이 크게 나타났다. TiN코팅시 500°C에 달하는 진공로내의 온도로 인하여 기어 모재가 템퍼링 처리되면서 금속이 변화되고 모재의 경도가 저하되므로 코팅층에 대한 지지력이 떨어져 코팅층이 파손된 것으로 추정된다.

4. C-N코팅한 기어와 피니언은 TiN코팅보다 마모 현상이 적게 나타났고 C-N코팅한 피니언과 코팅을 하지 않은 기어의 마찰·마모 시험결과 마찰·마모 특성이 현저하게 제고됨을 알 수 있었다.

후 기

이 論文은 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, BK21, 航空機部品技術研究센터의 支援에 依해 研究되었으며 이에 感謝드립니다.

참고 문헌

1. J.R. Conrad, A. Dodd, F.J. Worzala and X. 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 and 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. M. Murakawa, T. Komori and S. Takeuchi *et al.*, "Performance of a Rotating Gear Pair Coated with an Amorphous Carbon Film under a Loss-of-Lubrication Condition," *Surf. & Coat. Tech.*, Vol. 120-121, pp. 646-652, 1999.
4. J.C. Jiang, W.J. Meng and A.G. Evans *et al.*, "Structure and Mechanics of W-DLC Coated Spur Gears," *Surf. & Coat. Tech.*, Vol. 176, pp. 50-56, 2003.