

# 내마모 전동체 제조를 위한 질화탄소코팅의 개발

최병영\*, 梅原德次\*\*

## Development of Carbon Nitride Coating for High Wear Resistant Rolling Element

Byung Young Choi\* and Noritsugu Umehara\*\*

### ABSTRACT

Carbon nitride coatings on the substrates of 0.55wt% C - 1.68wt% Mn induction-hardened rolling elements were prepared by ion beam assisted deposition. It was found through metallographic observation that the carbon nitride coatings appeared lamellar-type repeated layers parallel to the surface of substrate. Surface roughness of the coated specimens was improved in comparison with that of the substrates. Wear resistance of the coatings was evaluated using Polymet RCF-1 machine with a constant supply of lubricant followed by Weibull statistical analysis and scanning electron microscopy. The results indicated failure due to old-age wear-out of the coatings was mainly caused by numerous micropits formed on the wear track during repeated rolling contact.

**Key Words** : Carbon nitride(질화탄소), Ion beam assisted deposition(이온 빔 보조 증착), Weibull statistical analysis(와이블 통계 분석), Rolling contact(회전접촉), Rolling element(전동체)

### 1. 서론

베어링의 작동중에 윤활유가 주입된 상태에서 전동체(rolling element)가 내륜 및 외륜의 궤도면을 따라 회전하면서 반복적인 접촉응력 즉 Hertz응력이 가해져 표면에 박리가 발생하고 파손된다. 최근 수송기관과 압연기 등의 고속화에 따른 가혹한 조건에서 상대운동을 하는 베어링의 전동체 표면에서 국부적 파손이 회전접촉중에 빠르게 진행되어 기계의 성능을 저하시키고 때로는 기계 시스템의 파괴를 유발하여 신뢰성 및 생산성 저하가 문제점으로 대두되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 내마모 전동체를 만드는 것이 선결과제이다.

전동체에 표면경화층을 형성시키는 방법으로 고주파 유도경화하여 회전접촉 피로시험한 결과<sup>(1)(2)</sup> 반복적인 접촉응력으로 인해 일어나는 마르텐사이트의 퇴화를 지연시켜 수명개선을 꾀할 수 있었으나 이때에도 심하게 변형된 마르텐사이트로 인한 국부적 파손이 발생하였다. 내구성을 더욱 높이기 위해 회전접촉중에 저마찰특성을 지닌 코팅막을 전동체 표면에 만들어 준다면 국부적 파손이 억제되거나 지연될 것으로 예측된다.

질화탄소(carbon nitride)는 저마찰 특성을 가진<sup>(3)</sup> 신물질이며 이온빔 보조 증착(ion beam assisted deposition) 방법에 의해 이를 기판(substrate)에 증착

\* 전북대학교 신소재공학부 및 신소재개발연구소

\*\* 東北大學 工學部 機械電子工學科

시 밀착성이 우수한 코팅막이 형성될 것으로 생각된다. 이때 전동체 재료의 표면에 질화탄소 코팅막을 만들어준다면 내마모 전동체가 제조될 것으로 생각된다. 그러나 아직 이에 관한 연구가 거의 없으며 전동체 재료의 표면에 WC-Co코팅하여 회전접촉중에 나타나는 파손을 관찰한 연구보고가 최근 발표된 바 있다.<sup>(4)</sup> 따라서 본 연구에서는 전동체 재료의 표면에 이온빔 보조 증착 방법으로 질화탄소 코팅막을 형성시켜 시편을 제조한 후 각 시편의 회전접촉중에 나타나는 내구성을 평가하고 이를 토대로 내마모 전동체 제조 가능성을 검토하고자 시도하였다.

이때 내구성 시험결과를 와이블 분포의 통계적 방법으로<sup>(5)</sup> 신뢰도함수를 사용하여 와이블 선도에 나타내어 구체적으로 평가하고 질화탄소 코팅막을 X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)와 Scanning electron microscopy (SEM)로 분석하여 그 응용에 필요한 기초자료를 제시하고자 한다.

## 2. 실험방법

질화탄소 코팅의 기관으로 사용되는 재료는 진공유도용해후 단조에 의해 제조된 0.55 wt.% C-1.68 wt.% Mn강을 50kw, 200kHz 고주파 발전기를 사용하여 유도코일에 의해 가열 후 분사냉각하여 고주파 유도경화하고 템퍼링한 직경 9.55 mm  $\phi$ , 길이 50 mm의 시편이다. 코팅전에 시편크기를 정밀측정하고 자분탐상과 변형측정하여 선별한 다음 시편표면을 세척하기 위해 1.0keV의 가속전압의 아르곤 이온으로 5분동안 스퍼터 크리닝을 하였다.

이온빔 보조증착 방법에 의한 질화탄소코팅은 다음과 같이 실시하였다. 백그라운드 압력과 작동압력을 각각  $8.2 \times 10^{-7}$ Torr,  $1.4 \times 10^{-4}$ Torr의 상태로 유지된 진공챔버내에서 99.999% 순도의 탄소타겟에 가속전압 1.0keV의 아르곤 스퍼터링 이온을 조사(irradiation)하여 발생한 sputtered carbon을 시편에 증착시킴과 동시에 가속전압 0.5keV의 질소이온을 입사각 45° 로 시편에 충돌시켜 증착되도록 하였다.

코팅막은 XPS와 SEM으로 분석하고 Polymet RCF-1에서<sup>(2)</sup> 탄성유체 윤활조건으로 코팅한 시편의 반복적인 회전접촉중에 나타나는 내구성을 각 시편별로 평가하였다. 시험중에 시편표면에 박리가 발생하면 시편과 회전접촉하면서 상대운동을 하고

있는 디스크와 시편사이에 발생한 진동이 진동 감지장치에 전달되어 Polymet RCF-1의 작동이 정지된다. 이때 회전계에 나타난 회전수를 기록하여 그 시편의 내구수명 즉 회전 접촉 피로수명으로 하였다. 각 시편의 수명을 와이블 분포의 통계적 방법으로 다음식, 신뢰도 함수  $R(x)$ 를 사용하여 나타내었으며  $x$ 의 최소기대값인  $x_0 = 0$ 일 때 (1)식은 (2)식으로 되고 2매개변수분포 (two-parameter distribution)라 하며 (2)식을 이용하여 와이블 선도에 수명값을 나타내었다.

$$R(x) = \exp \left[ - \left( \frac{x - x_0}{\theta - x_0} \right)^b \right] \quad x \geq x_0 \quad (1)$$

$$R(x) = \exp \left[ - \left( \frac{x}{\theta} \right)^b \right] \quad x \geq 0 \quad (2)$$

b : 와이블 계수

$\theta$  : 특성치 또는 척도값

$x$  :  $x_0$ 의 최소기대값

Taylor Hobson 표면조도 측정기로 코팅막의 표면조도를 측정하고 또한 코팅한 시편의 반복적인 회전접촉중에 나타나는 코팅막의 마모면을 정밀분석하며 그 결과를 각각의 수명값과 관련지어 고찰하여 내마모 전동체 제조에 필요한 기초자료를 제시하였다.

## 3. 결과 및 고찰

코팅막을 MgK $\alpha$  X-ray source를 사용한 XPS로 분석하여 C1S 광전자와 N1S 광전자의 결합에너지 영역을 narrow scan하여 스펙트럼을 얻은 결과 Fig 1과 Fig 2와 같이 나타났다. Fig 1과 Fig 2 모두 비대칭성을 보여주고 있으며 이를 deconvolution하였고 C1S 피크는 C-C(284.6eV), CN $_x$ (286eV),  $\beta$ -C $_3$ N $_4$ (287.3eV), C-O(289eV) phase로 밝혀지고 N1S 피크는  $\beta$ -C $_3$ N $_4$ (398.5eV), CN $_x$ (400.2eV), N-N/N-O(402.9eV)로 밝혀졌다. 각 피크로부터 본 실험의 코팅중에 C와 N이 결합하여 주로 질화탄소가 형성된 것을 알 수 있고 일부 나타나는 O를 확인하기 위해 O1S 광전자의 결합에너지 영역인 526eV~536eV 범위를 narrow scan한 결과 530.7eV에서 주 피크가 나타나므로 코팅후 표면의 미소영역에서 산화가 일어났다고 생각된다.

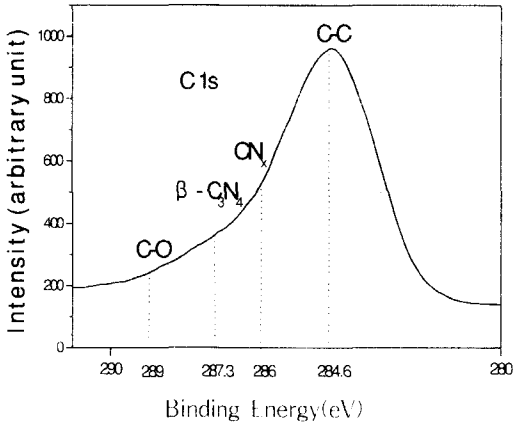


Fig. 1 XPS C1s spectrum for carbon nitride film

SEM으로 코팅막을 관찰한 결과 Fig 3과 같이 기공 또는 미세균열이 없고 치밀한 코팅층이 기판과 경계면에 밀착생성되고 경계면에 평행한 방향으로 겹겹이 형성되었다. 이러한 구조는 라멜라 고체

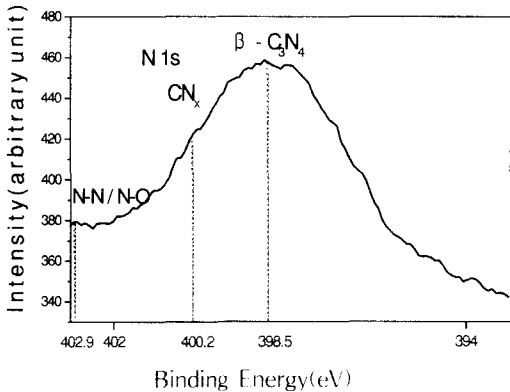


Fig. 2 XPS N1s spectrum for carbon nitride film

코팅의 MoS<sub>2</sub> 또는 graphite 구조와 흡사하며 경계면에 평행한 면내에서는 강한 결합을 나타내지만 상하 면간에는 반 데르 발스(Van der Waals)힘에 기인한 매우 약한 결합력을 나타낸다. Taylor

Hobson표면조도 측정기로 컷 오프 길이(cut-off length) 0.8mm에서 중심선 평균조도 Ra를 측정할 결과 Fig 4와 같은 표면조도 프로파일을 보이며 코팅한 각 시편의 표면조도의 측정치는 Ra 0.065~0.077 μm로 나타났다. 이 값은 코팅 전 각 시편의 표면조도 Ra 0.077~0.092 μm에 비해 미려하고 균질한 표면조도를 보이므로 이온빔 보조증착에 의한 질화탄소 코팅에 의해 표면조도가 개선될 수 있음을 보여주고 있다.

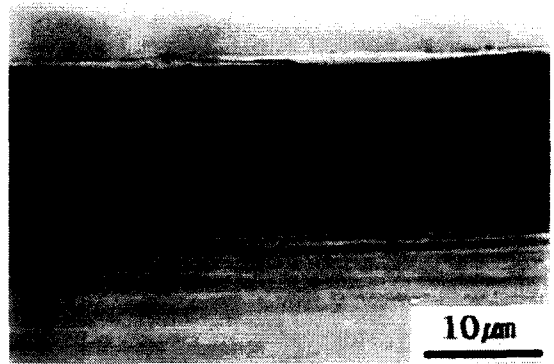
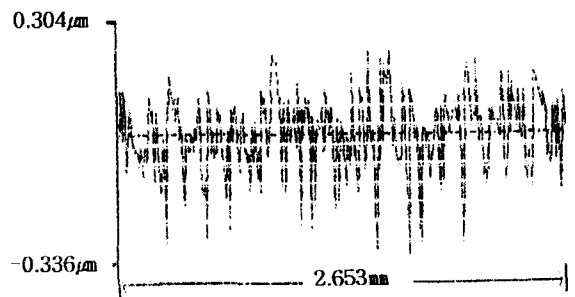


Fig. 3 Scanning electron micrograph showing cross-section of carbon nitride film formed by ion beam assisted deposition



Peak to Valley = 0.640 μm

Fig. 4 Surface roughness profile of carbon nitride film

탄성유체윤활 조건으로 Polymet RCF-1에서 질화탄소 코팅한 시편의 내구성을 각 시편별로 측정

하고 그 값을 와이블 분포의 통계적 방법으로 와이블 선도에 표시한 결과 Fig 5와 같이 나타났다. 측정시편의 90%가 표면에 박리가 일어나지 않고 견딜 수 있는 수명에 해당하는  $L_{10}$  수명은  $7.4 \times 10^6$  이고  $L_{50}$  수명 즉 미디안 수명(median life)은  $2.2 \times 10^7$ , 와이블 기울기는 1.73으로 밝혀졌다. Fig 5의 와이블 기울기가 1보다 큰 값인 1.73을 보인 것은<sup>(6)</sup> 국부적 파손의 억제 또는 지연에 의한 장수명 마모(old-age wear-out)에 의한 파손 메카니즘

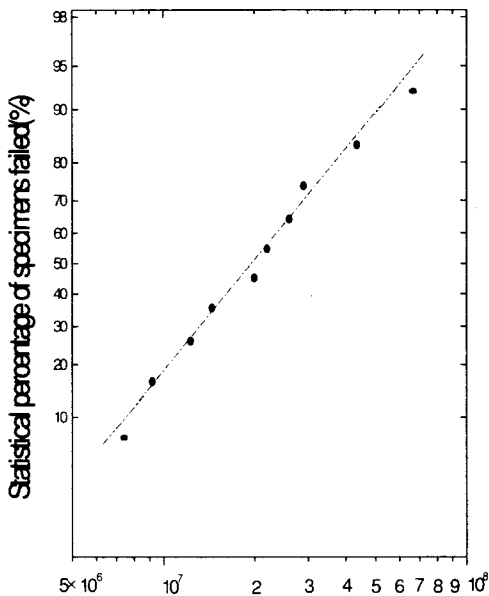


Fig. 5 Weibull analysis of rolling contact fatigue lives of carbon-nitride coated steels

(failure mechanism)을 나타낸다고 알려져 있어 질화탄소 코팅은 결과적으로 파괴까지 걸리는 시간을 예측 가능케하며 시스템의 신뢰성을 높이는 데 기여할 것으로 판단된다.

질화탄소 코팅한 시편에서 반복적인 회전접촉중 생성된 마모트랙을 SEM으로 관찰한 결과 Fig 6과 같이 매우 많은 흰색 반점들이 마모트랙 내부에 나타났다. Fig 6의 마모트랙 단면(cross-section)프

로파일을 Tayler Hobson 표면조도기로 정밀 측정된 결과 Fig 7과 같이 1.139 mm의 마모트랙 폭과 8.658 μm의 마모트랙 깊이에 매우 많은 micropits가 관찰되었다. 즉, Fig 6에 나타난 매우 많은 흰색 반점들은 micropits임이 밝혀졌다. 이 흰색 micropits 영역의 성분을 EPMA로 분석한 결과, Fe와 Mn이 주성분인 기관조성이 나타났고 코팅성분은 거의 관찰되지 않았다. 따라서 Fig 6에 나타난 micropits는 반복적인 회전접촉중에 질화탄소 코팅층이 벗겨져 마모트랙내 넓은 영역에서 다수 생성된 것임을 알 수 있게 된다. 일반적으로 코팅하지 않는 경우 한 군데에서 매우 큰 macropit가 생성되며<sup>(7)</sup> 그 영역에서 급격히 국부적 파손이 일어난다. 이와는 달리 본 연구에서는 질화탄소 코팅층의 마모트랙내 넓은 영역에서 회전접촉중에 반복적인 asperity contact에 기인한<sup>(8)</sup> asperities의 미소파단 또는 소성변형이 초기에 일어난 후<sup>(4)</sup> 결과적으로 매우 작은 micropits가 여러군데 분산되어 생성되는 특성을 보인다. 이 특성은 국부적 파손의 억제 또는 지연에 의한 내마모성을 나타내게 되며 Fig 5의 가파른 와이블 기울기를 보이게 되고 전동체의 수명과 신뢰도를 증가시키는 역할을 한다.

#### 4 결론

최근 자동차와 철도등 수송기관의 고속화와 제철소의 압연기등의 고속작동에 따른 가혹한 조건에서 상대운동을 하는 베어링의 전동체 표면에서 국부적 파손이 회전접촉중에 진행되고 기계 및 시스템의 파괴를 유발하여 신뢰성 및 생산성 저하가 문제점으로 대두되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안의 하나로 본 연구에서는 0.55 wt.% C - 1.68 wt.% Mn 유도경화강의 기관위에 질화탄소 코팅을 이온빔 보조증착방법에 의해 실시하고 탄성 유체윤활 조건으로 회전접촉 피로시험중에 나타나는 내구성을 평가한 다음 와이블 분포의 통계적 방법으로 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

코팅막을 관찰하고 분석 및 평가한 결과, 치밀한 질화탄소 코팅층이 기관과 경계면에 밀착생성되고 경계면에 평행한 방향으로 겹겹이 형성되었으며 표면조도는 코팅전에 비해 개선되어 미려하고 균질한 표면이 생성되었다. 질화탄소 코팅한 시편의 회전접촉중에 나타나는 내구성을 와이블 분포의

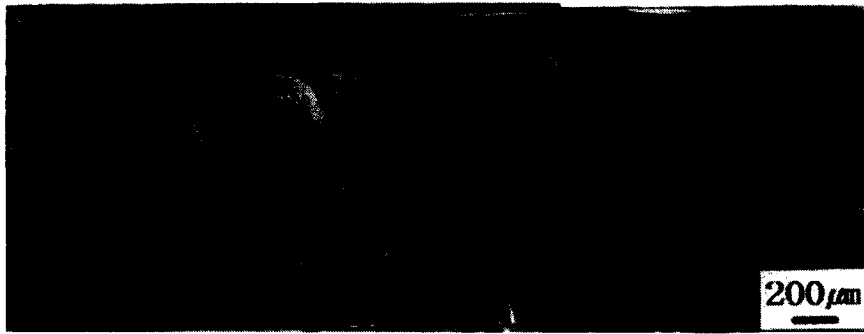


Fig. 6 Scanning electron micrographs showing numerous micropits appeared on the wear track of carbon-nitride coated rolling element

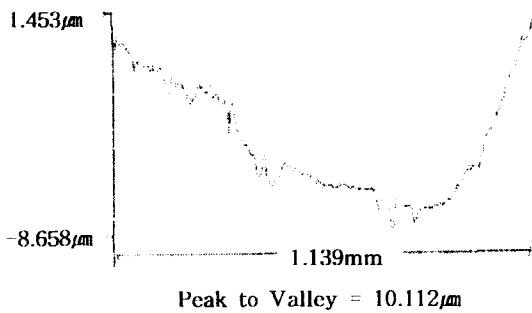


Fig. 7 Cross-section profile of wear track of carbon-nitride coated rolling element

통계적 방법으로 비교분석한 결과, 반복적인 회전 접촉중에 마모트랙내 넓은 영역에서 micropits가 다수 생성되어 국부적 파손의 억제 또는 지연에 기인한 장수명 마모에 의한 파손특성을 가진 전동체가 질화탄소 코팅에 의해 만들어 질 수 있음을 보여주었다.

### 후 기

이 논문은 1998년도 전북대학교의 지원 연구비에 의하여 연구되었으며, 본 연구에 협조해준 日本東北大學의 K.Kato 교수님과 전북대학교 서재명 교수님, 장정석, 차영주군에게 감사드립니다.

### 참고문헌

1. B.Y. Choi et al, "Metallographic Study on Rolling Contact Fatigue of 0.44% C-1.71% Mn Induction-Hardened Bearing steels," *Wear*, Vol. 192, pp.1~5, 1996.
2. B.Y.Choi and G.W.Bahng, "Characterisation of Microstructure and Its Effect on Rolling Contact Fatigue of Induction Hardened Medium Carbon Bearing Steels," *Materials Science and Technology*, Vol. 14, pp. 816~821, 1998.
3. C.J.Torng et al, "Structure and Bonding Studies of the C:N Thin Films Produced by RF Sputtering Method," *J. Mater. Res.*, Vol 5, pp. 2490~2496, 1990.
4. R.Ahmed and M.Hadfield : "Failure Modes of Plasma Sprayed WC-15%Co Coated Rolling Elements," *Wear*, Vol. 230, pp. 39~55, 1999.
5. J.E.Shigley and C.R.Mischke, "Mechanical Engineering Design," Mcgraw-Hill, pp. 165, 1989.
6. R.B.Abernethy et al, "Weibull Analysis Handbook," Wright-Patterson AFB, 1983.
7. B.Y.Choi and D.J.Yoon, "Role of Surface Hardened Layer in Lower Bainite-Martensite Matrix on Rolling Contact Fatigue of High-Carbon Chromium Bearing Steel," *PRICM-1, TMS*, pp. 459~464, 1992.
8. H. S. Cheng, T. P. Cheng and W. D. Sproul, "Mechanics of Coating," Elsevier, pp. 81~88, 1990.