

CNx코팅된 강의 회전접촉피로에 미치는 코팅두께의 영향

최병영 · 梅原徳次*

전북대학교 신소재공학부 및 신소재개발연구소
*日本 東北大學 工學部 機械電子工學科

Effect of Coating Thickness on Rolling Contact Fatigue of CNx Coated Steel

Byung Young Choi and Noritsugu Umehara*

School of Advanced Materials Engineering and Research Institute of Advanced Materials Development,
Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea

*Department of Mechatronics and Precision Engineering, Graduate School of Engineering,
Tohoku University, Sendai 980-8579, Japan

Abstract Ion beam assisted deposition system was used to deposit CNx coatings with various thickness on the substrates of high-frequency induction hardened steels. Rolling contact fatigue tests were performed using Polymet RCF-1 machine with a constant supply of lubricant. Rolling contact fatigue life was substantially different in the steels with various thickness of CNx coatings. The optimum thickness of CNx coating was found to be 8.9 μm , showing the longest fatigue life, mainly caused by higher resistance to initiation of cracks and protective overcoat remaining to the surface failure during rolling contact fatigue. Cracks were initiated in the substrates under the surface of wear track and propagated to the surface, which eventually resulted in the failure. The reduction of fatigue life observed in the specimen with elimination of CNx coating during rolling contact fatigue was explained by the substrates deformation.

(Received September 6, 2000)

Key words: Ion beam assisted deposition, CNx coatings, Rolling contact fatigue, Lubricant, Cracks, Substrates, Steels with various thickness of CNx coatings

1. 서 론

최근 고속으로 회전하는 DC모터를 동력원으로 작동되는 전기부품이 내장된 기계에서 모터 베어링의 조기파손으로 인한 수리 및 교체에 소요되는 비용증대 등이 중요한 문제점으로 대두되고 있다. 모터 베어링은 작동 중에 회전접촉면에서 받는 반복하중이 자동차와 철도차량 및 압연기 등에 사용되는 베어링에 가해지는 하중에 비해 낮으며 그 수명은 반복하중을 받는 웨도면 영역에서 생기는 회전접촉피로에 의해 웨도면에 박리가 발생할 때까지 총회전수로 나타낸다. 이때 피로균열이 종종 강에 분포한 비금속 개재물 주위에 생긴 응력집중에 의해 발생하며 특히 산화물계 개재물에서 주로 피로균열이 시작됨에 따라[1] 진공정련에 의해 산화물계 개재물의 함량을 낮추어 청정도가 높은 강을 제조한 결과 이체는 비금속 개재물 주위에서 생기는 피로균열의 생성 가능성이 감소되고 있다[2]. 그러나 각종 기계가 고속화

됨에 따라 산화물계 비금속개재물 이외에 피로 과정 중에 일어나는 표면영역의 국부적인 소성변형 및 조직변화에 기인하여 피로파괴가 발생하고 있음이 밝혀지고 있다[3,4].

따라서 본 연구에서는 모터 베어링의 내구성을 더욱 높이기 위해 저마찰 특성을 가진[5] CNx를 코팅한 시편을 제작하여 회전접촉피로시험을 실시하고 코팅두께별로 그 수명을 조사하여 회전접촉피로수명이 가장 긴 CNx코팅막의 적정두께를 알아내려고 한다. 이때 코팅방법은 기판(substrate)과 접착력을 높이는데 효과적인 이온빔 보조증착(ion beam assisted deposition)에[6,7] 의한 코팅을 택하여 탄소의 아르곤 이온빔 스퍼터링과 질소이온을 기판에 동시에 조사되도록 시도하였다. CNx 코팅한 시편을 회전접촉피로시험하여 나타나는 피로거동을 구체적으로 밝힌 연구는 아직 거의 없는 것으로 판단되며 CNx의 SP² 결합구조에 기인하여 저마찰특성이 나타난다고 밝혀지는 등 결합구조에 관한 연구보고

가 있다[6]. 이에 본 연구에서는 CN_x 를 코팅한 시편을 회전접촉 피로시험 후 CN_x 코팅막의 두께별로 각각 나타나는 표면마모를 분석하고 또한 CN_x 코팅막의 마모트랙의 수직단면을 SEM으로 관찰하여 바리를 일으키는 회전접촉 피로균열의 생성 및 성장거동을 체계적으로 밝혀 회전접촉 피로저항이 가장 높게 나타나는 최적코팅두께를 제시하고 아울러 그 피로거동을 두께별로 비교 검토하고자 한다.

2. 실험방법

증착과 이온조사가 동시에 기판표면에서 진행되어 결과적으로 화합물박막이 형성되는 이온빔 보조증착방법에 의해 Fig. 1에 도식적으로 표시한 진공챔버내에서 탄소의 아르곤 이온빔 스퍼터링과 질소이온을 시편홀더에 장착한 기판에 동시에 조사 및 증착되도록 하였다. 기판으로 사용된 재료는 자동차에 주로 쓰이는 베어링 재료인 고주파유도경화한 0.55wt.%C-1.68wt.%Mn강을 템퍼링한 직경 9.5 mm ϕ , 길이 50 mm의 시편이다. 이온빔 보조증착 전에 시편표면을 세척하기 위해 1.0keV의 가속전압의 아르곤 이온으로 5분동안 스퍼터 크리닝을 하고 Taylor Hobson표면조도 측정기로 컷오프 길이(cut-off length) 0.8 mm에서 중심선 평균조도 R_a 를 측정된 결과 R_a 0.077~0.092 μm 로 나타났다. 이온빔 보조증착시 진공챔버내 백그라운드 압력과 작동압력은 각각 8.2×10^{-7} Torr, 1.4×10^{-4} Torr로 유지시키고 99.999%순도의 탄소타겟에 가속전압 1.0keV의 아르곤 스퍼터링 이온을 조사하여 발생한 sputtered carbon을 기판에 증착시키고 동시에 가속전압 0.5keV의 질소이온을 입사각 45°로 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 기판에 조사되도록 하였다.

코팅막을 XPS와 SEM으로 분석한 결과 코팅중에 C와 N이 결합하여 CN_x 가 기판과 경계면에 밀착생성되었음을 확인하였다[8]. Fig. 2에 도식적으로 표시한 Polymer RCF-1에서 윤활유를 상대운동하는 시편과 디스크의 회전접촉면에 분당 20방울씩 공급하면서 회전속도 8,000rpm 조건으로 실온에서 회전접촉피로시험을 실시하였다. 시험 중에 시편의 접촉면에 바리가 발생하면 시편과 디스크 사이에 발생한 진동이 일어나 진동감지장치에 전달되어 시험기의 작동이 멈춘다. 이때 회전계에 나타난 회전수를 그 시편의 회전접촉 피로수명으로 기록하였다.

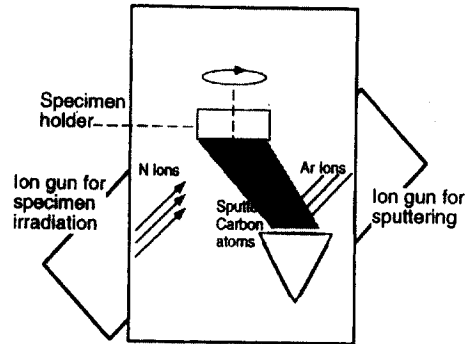


Fig. 1. Schematic diagram of ion beam assisted deposition apparatus.

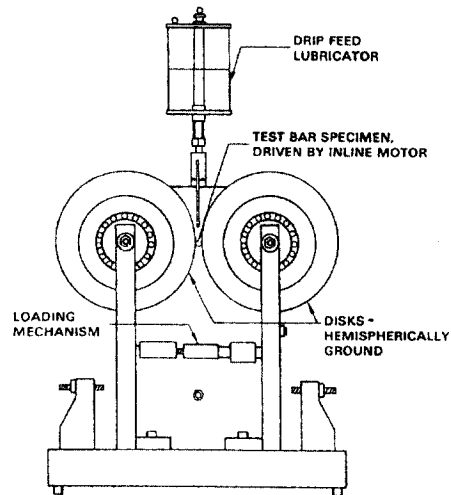


Fig. 2. Schematic diagram of front view of RCF tester.

코팅한 시편의 각각의 표면조도를 측정된 결과 R_a 0.065~0.077 μm 로 나타나 코팅 전에 비해 표면조도가 개선되었으며 거의 일정한 값을 보이고 있다. CN_x 코팅한 시편의 수직단면을 절단하여 SEM으로 관찰하고 부위별로 코팅막의 두께를 측정하여 평균치를 구하였고 회전접촉피로시험 후 시편에 나타난 마모트랙의 마모흔(wear scar)의 깊이와 폭을 Taylor Hobson표면조도 측정기로 정밀 측정하였다. 또한 마모트랙의 마모흔 직하영역의 수직단면을 절단하여 회전접촉 피로균열의 생성 및 성장거동을 SEM으로 관찰하여 그 결과를 CN_x 코팅막의 두께별로 나타나는 회전접촉 피로수명과 비교 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 CNx코팅막의 두께에 따른 CNx코팅한 시편의 회전접촉 피로수명의 변화를 보여주고 있으며 CNx 코팅막의 두께가 $8.9\ \mu\text{m}$ 일 때 회전접촉피로수명이 6.50×10^7 으로 나타나 가장 수명이 길게 나타났다. CNx코팅막의 두께가 증가함에 따라 수명이 증가하거나 감소하지 않고 뚜렷한 경향이 나타나지 않은 특징을 보이고 있다. Fig. 4는 CNx코팅막의 두께에 따른 CNx 코팅한 시편의 회전접촉피로시험 후 나타나는 마모트랙의 마모흔의 깊이변화를 보여주고 있다. 회전접촉 피로수명이 가장 높게 나타난 경우에 해당하는 CNx코팅막의 두께가 $8.9\ \mu\text{m}$ 인 시편에서 마모흔의 깊이는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 $6.9\ \mu\text{m}$ 를 보이고 있다. 즉, 회전

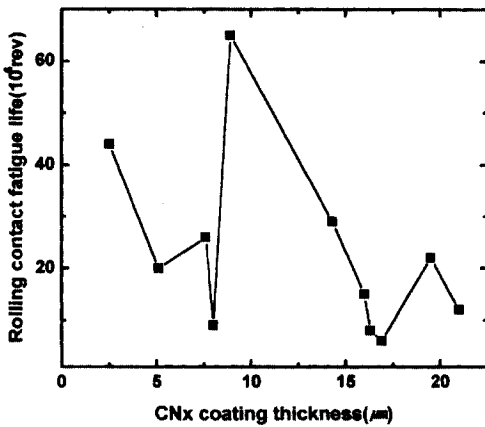


Fig. 3. Variation in rolling contact fatigue life of CNx coated steels with various thickness.

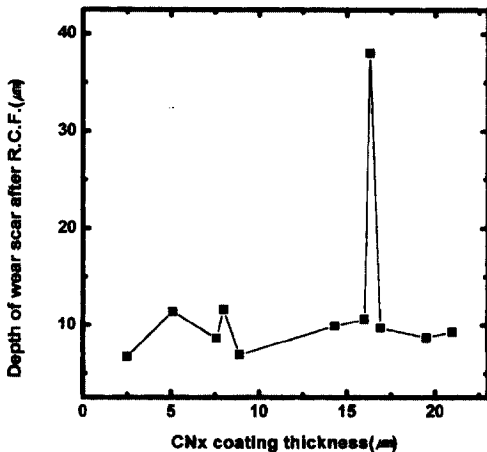


Fig. 4. Variation in depth of wear scar after rolling contact fatigue of CNx coated steels with various thickness.

접촉피로시험 중에 CNx코팅막이 완전히 벗겨지지 않고 시편의 보호막 역할을 하면서 CNx코팅막의 저마찰특성으로 인해 회전접촉 피로저항이 증가하게 됨에 따라 회전접촉 피로수명이 가장 높게 나타났다고 생각된다. Fig. 5는 CNx코팅막의 두께에 따른 CNx코팅한 시편의 회전접촉 피로시험 후 나타나는 마모트랙의 마모흔의 폭변화를 보여주고 있다. 회전접촉피로수명이 가장 높게 나타난 시편, 즉, CNx코팅막의 두께가 $8.9\ \mu\text{m}$ 인 경우 회전접촉 피로시험 후 마모흔의 폭이 모든 시편중 가장 작은, $1.14\ \text{mm}$ 로 나타났다. 이 결과는 반복적인 회전접촉중에 역회전 전단응력이 최대에 이르게 되는 영역이 CNx코팅막의 두께가 $8.9\ \mu\text{m}$ 인 시편에서 모든 시편중 가장 표면에 가까운 위치임을 말해주고 있다[9].

회전접촉 피로시험 후 마모트랙의 마모흔직하 영역의 수직단면을 절단하여 회전접촉 피로균열의 생성 및 성장거동을 SEM으로 관찰한 결과, CNx코팅막의 두께가 $8.9\ \mu\text{m}$ 인 시편에서 Fig. 6에 나타난 바와 같이 표면직하 기관에서 균열이 생성된 다음 표면쪽으로 성장하여 표면파괴, 즉, 박리가 일어났음을 알게 되었다. Fig. 7은 표면직하 기관에서 균열이 생성된 후 일정한 방향으로 표면쪽으로 성장하였지만 Fig. 6와 같이 표면파괴에는 이르지 않은 회전접촉 피로균열을 나타내주고 있다. Fig. 6과 Fig. 7에 나타난 바와 같이 회전접촉 피로균열의 생성위치에서 산화물계 개재물등 비금속 개재물이 보이지 않으므로 이 위치에서 생성된 피로균열은 반복적인 회전접촉 중에 전단변형의 방향이 회전한 결과 역회전 전단응력이 최대에 이르게 되어 국부적인 소성변

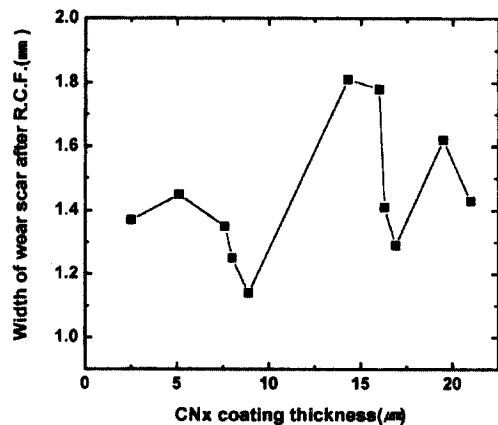


Fig. 5. Variation in width of wear scar after rolling contact fatigue of CNx coated steels with various thickness.

Fig. 6. Scanning electron micrograph showing surface failure during rolling contact fatigue.

Fig. 7. Scanning electron micrograph showing initiation and propagation of subsurface crack during rolling contact fatigue.

형에 기인한 것으로 생각된다[10]. CNx코팅막의 두께가 8.9 μm 인 시편에서 모든 시편중 Fig. 3과 같이 가장 수명이 길게 나타난 것은 Fig. 4~Fig. 7의 실험결과를 종합분석한 결과, 회전접촉 피로시험중에 CNx코팅막이 완전히 벗겨지지 않고 시편의 보호막 역할을 하면서 CNx코팅막의 저마찰 특성으로 인해 나타나는 회전접촉 피로균열의 생성에 대한 높은 저항성에 주로 기인한다고 생각된다.

회전접촉 피로시험중 CNx코팅막이 완전히 벗겨진 경우에 해당하는 예를 들어 분석해보면 CNx코팅막의 두께가 8.0 μm 인 시편에서 Fig. 4에 나타난 바와 같이 회전접촉 피로시험 후 마모트랙의 마모흔의 깊이가 11.6 μm 로 나타나므로 회전접촉 피로시험 중 CNx코팅막이 완전히 벗겨진 것을 알 수 있다. 이때에는 회전접촉 피로수명이 Fig. 3에 나타난 바와 같이 0.9×10^7 으

로 CNx코팅막의 두께가 8.9 μm 인 시편의 회전접촉 피로수명이 6.50×10^7 인데 비해 현저히 낮은 값을 보이고 있다. 즉, CNx코팅막이 회전접촉 피로시험중에 완전히 벗겨져 CNx코팅막의 저마찰 특성을 유지하지 못하고 회전접촉 피로수명이 현저히 감소하여 나타났다. 회전접촉 피로시험 후 마모트랙의 마모흔의 폭은 CNx코팅막의 두께가 8.0 μm 인 시편에서 Fig. 5에 나타난 바와 같이 1.25 mm를 보이고 이 값은 CNx코팅막의 두께가 8.9 μm 인 시편에서 1.14 mm로 나타난 데 비해 증가하였다. 이는 반복적인 회전접촉중에 역회전 전단응력이 최대에 이르는 영역이 CNx코팅막이 벗겨진 데 기인하여 기판이 압입변형(indentation deformation)되어 비교적 깊게 나타난 것으로 해석된다[11].

본 연구결과를 통해 회전접촉 피로저항이 가장 높게 나타나는 최적 CNx코팅막의 두께는 8.9 μm 이며 CNx코팅의 두께에 따라 회전접촉 피로수명이 현저하게 달라지므로 최적두께로 제어하여 코팅하는 것이 장수명 베어링을 제조하는데 필요한 중요인자임을 알게 되었다.

4. 결 론

이온빔 보조증착에 의해 CNx코팅한 강 of 코팅두께에 따라 나타나는 회전접촉 피로거동을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. CNx코팅막의 두께에 따라 회전접촉 피로수명이 현저하게 다른 값을 나타내며 CNx코팅막의 두께가 8.9 μm 일 때 회전접촉 피로수명이 가장 길게 나타났다.
2. 회전접촉 피로시험중에 CNx코팅막이 완전히 벗겨지지 않고 기판의 보호막 역할을 하면서 회전접촉 피로균열의 생성에 대한 높은 저항성에 주로 기인하여 회전접촉 피로수명이 가장 긴 값을 나타낸다고 생각된다.
3. 마모트랙영역의 표면적하 기판에서 회전접촉 피로균열이 생성되어 표면쪽으로 성장하여 표면파괴, 즉, 박리가 일어났으며 표면파괴를 일으키지 않은 피로균열도 관찰되었다.
4. 회전접촉 피로시험중에 CNx코팅막이 완전히 벗겨진 경우에는 CNx코팅막의 보호막 역할이 유지되지 않아 기판이 압입변형되어 회전접촉 피로수명이 비교적 낮은 값을 보여주었다.

후 기

이 논문은 1999년도 전북대학교의 지원 연구비에 의

하여 연구되었으며, 본 연구에 협조해준 日本 東北大學의 K. Kato교수님에게 감사드립니다.

참고문헌

1. 윤복용, 최병영: 대한금속학회지, 28권 7호 (1990) 634.
2. T. Uesugi: Trans. ISIJ, Vol. 28 (1988) 893.
3. B. Y. Choi et al: Wear, Vol. 192 (1996) 1.
4. B. Y. Choi and G.W.Bahng: Materials Science and Technology, Vol. 14 (1998) 816.
5. J. M. Sivertsen et al: IEEE Trans. Magn., Vol. 33 (1997) 926.
6. K. J. Boyd et al: J. Vac. Sci. Technol. A, Vol. 13 (1995) 2110.
7. X. W. Su et al: Surf. Coat. Technol., Vol. 84 (1996) 388.
8. 최병영, 梅原德次: 한국정밀공학회지, 16권 11호 (1999) 243.
9. J. Halling: Principles of tribology, MacMillan Press, London (1975) 401.
10. V. Bhargava, G. T. Hahn and C. A. Rubin: Metall. Trans. A, Vol. 21A (1990) 1921.
11. J. M. Leroy and B. Villechaise: Mechanics of coating, Elsevier, Amsterdam (1990) 195.