Journal of the KSTLE Vol. 23, No. 1, February 2007, pp. 14~18
The Korean Society of Tribologists & Lubrication Engineers

질소이온 코팅 SCM415강의 마찰 · 마모특성에 관한 연구

하위파* · 손유선* · 류성기†

경상대학교 기계항공공학부, 항공기부품기술연구소(지식기반기계부품소재연구개발 클러스터사업단)
*경상대학교 대학원 기계설계학과

A Study on the Friction and Wear Characteristics of Nitrogen Ions Coated SCM415 Steel

Heibo He*, Yusun Son* and Sungki Lyu†

School of Mechanical & Aerospace Eng., ReCAPT(CK-MEM R&D Cluster), Gyeongsang Nati. Univ.
**Graduate School Gyeongsang National Univ., Korea*

Abstract – SCM415 alloy was implanted with nitrogen ions using plasma source ion implantation (PSII), at a dose range of 1×10^{17} to $6\times10^{17}N^{+}cm^{-2}$. Auger electron spectrometry (AES) was used to investigate the depth profile of the implanted layer. Friction and wear tests were carried out on a block-on-ring wear tester. Scanning electron microscopy (SEM) was used to observe the micro-morphology of the worn surface. The results revealed that after being implanted with nitrogen ions, the frictional coefficient of the surface layer decreased, and the wear resistance increased with the nitrogen dose. The tribological mechanism was mainly adhesive, and the adhesive wear tended to become weaker oxidative wear with the increase in the nitrogen dose. The effects were mainly attributed to the formation of a hard nitride precipitate and a supersaturated solid solution of nitrogen in the surface layer.

Key words – plasma source ion implantation (PSII), friction and wear tests, micro-morphology, tribological mechanism.

1. 서 론

SCM415합금은 기계적 성질이 우수하며 다른 기계구조용강과 비교해 상대적으로 가격이 저렴하기 때문에 많은 기계요소에 사용되고 있다. 특히 정밀기어, 축, 피스톤과 같은 기계요소에 널리 사용된다. 그러나 SCM415강의 단점인 마모특성으로 인하여 쉽게 표면이 마모되며, 마모로 인한 표면손상이 쉽게 발생한다. 이런 단점을 보완하기 위한 방법으로는 소재특성을 변화시키지 않고 재료표면개질방법 을 이용하여 표면특성만을 개선시키는 방법이 있다.

최근에 질소이온주입법(PSII)이 재료표면경도향상과 마찰계수를 저하시키기 때문에 PSII는 표면개질방법 중에서 매우 혁신적인 기술이다[1]. PSII는 금속, 폴리머(polymer), 세라믹, 반도체 등의 표면 특성 을 향상시키고 있다[2-3].

이온주입법은 고온표면열처리가 불가능한 금속에 있어 매우 유용한 표면처리 방법이다. 그러나 이전의 이온주입법은 다음과 같은 한계가 있다. 낮은 빔전류로 인한 주입시간 증가와 평평하지 않은 표면을 가진 재료에서 균일한 주입형상을 얻기 위해서는 빔 스캐닝과 주입위치 변경이 필요하다. 이에 반해 PSII는 이전의 기술의 한계를 뛰어 넘어 소재표면에 동일한 표면개질이 가능하게 하였다[4-6]. 이전의 이온주입법과 비교했을 때 PSII의 장점은 비용절감과 함께 한 번에 넓은 영역에 걸쳐 이온주입처리가 가능하며 재료를 따로 조작하지 않고도 3차원 형상을 가진 모재에 이온을 주입할 수 있다는 것이다. PSII는 조준선(line of sight)의 제약이나 주입물질의 잔류 문제가 없다. 따라서 PSII는 무궁한 상업적 잠재력을 지니고 있다[7-9].

†주저자 · 책임저자 : sklyu@gsnu.ac.kr

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

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	Ni
0.16	0.23	0.69	0.22	0.016	1.02	0.19	0.01	0.03

본 연구는 PSII를 이용하여 SCM415합금강에 질소 주입을 시켜 질소이온이 주입된 SCM415합금강의 마찰특성을 분석하였다. 질소분포형상은 Auger Electron Spectroscopy(AES)를 이용하여 각 질소 주입량에 따라 측정하였고 마모면의 미세구조는 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다. 그리고 각 시험편의 시편무게손실과 마찰계수, 마이크로 비커스 경도를 측정하여 마모마찰 효용성 측면에서 고찰하였다.

2. 시험편 및 실험방법

본 연구에서는 정밀기어, 축, 피스톤과 같은 기계요소에 널리 사용되고 있는 SCM415합금강을 시험편의 모재로 선택하였다.

상부 시험편인 사각시험편의 크기는 가로 12.7 mm 세로 12.7 mm 높이 12.7 mm이고, 표면 거칠기는 0.05 μm이며, 화학성분은 Table 1과 같다.

하부시험편은 로울러의 직경이 60 mm이고 두께가 16 mm인 SCM415합금강을 가공한 다음 연마하여 사용하였다.

시편의 모든 면은 연삭가공을 거친 후 표면 거칠기를 약 0.05 μm의 조도를 가지도록 연마하였다. 모든 재료는 질소이온주입전에 초음파세척기에서 아세톤과 알코올로 세척하였다. 플라즈마이온실험은 KIST에 있는 Plasma Source Ion Implanter를 사용하였다. 이온주입기의 진공챔버는 직경 100 cm 높이 150 cm의 스테인레스강 실린더로 제작되었다. 13.56 MHz, 2 kW RF플라즈마 발생장치는 고밀도, 고순도 RF 플라즈마를 발생시키기 위하여 진공챔버 위쪽에 위치해있다. Fig. 1은 PSII 시스템 사진이며, 진공챔버, 진공펌프, 모재고정틀, 자기필터링덕트, 전자관막대, 가스흡입구, 바이어스볼테이지(Bias Voltage)로 구성되어 있다.

이온주입에너지는 60 kV이며, 주입량은 각각 1×10^{17}, 3×10^{17}, 6×10^{17} $N^{+}cm^{-2}$이다. 플라즈마이온주입조건을 Table 2에 나타냈다.

질소주입 전에 시편을 깨끗이 세척하기 위하여 아르곤 가스를 챔버에 가압시켰다. 가스의 단위부피당 속도와 챔버내부압력은 각각 5.0 cm^3/s, 약 2.0×10^{-3} Torr로

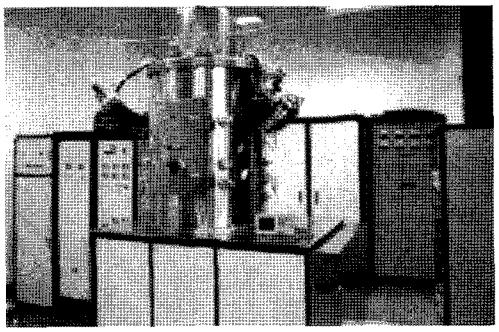

Fig. 1. The plasma source ion implantation device.

Table 2. PSII implantation conditions

Implantation Parameters	Data
N_2 Pressure (×Torr)	1
Arc Current (A)	0.5
Implantation Voltage (kV)	60
Pulse Frequency (Hz)	150
Pulse Width (μs)	10
Implantation Time (h)	1.5
Implantation Dose ($\times10^{17}$)	1.0, 3.0, 6.0

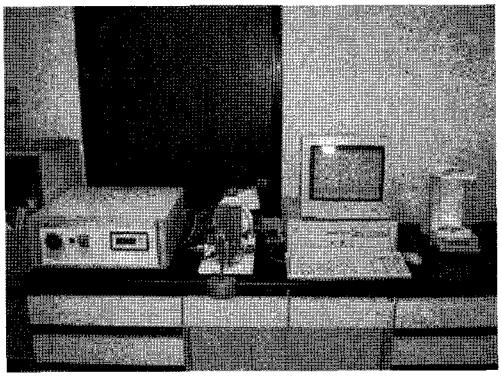

Fig. 2. Multi-purpose friction and wear tester.

제어되었다. 일정 시간 후 챔버 압력을 1×10^{-4} Pa이하로 낮춘 후 질소가스를 챔버로 압송하여 질소이온주입을 실시하였다.

시편의 마찰마모시험은 미끄럼 방식의 마찰 · 마모시험기(Plint Ltd 제작, Model : TE 53)를 사용하였으며, TE 53 다목적 마찰·마모시험기를 Fig. 2에 나타냈다. 시험 시스템의 주요구성은 컴퓨터, Compend 2000 프로그램(Plint & Partners Ltd 제작), 마찰 · 마모시험장치, 자동센서 컨트롤박스, 전자 저울 등이다.

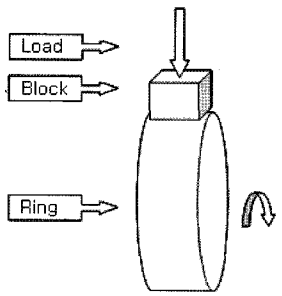

Fig. 3. Schematic illustration of the wear test.

TE 53 다목적 마모·마찰시험장치는 다용도 시험테스터기로서 링 형상 부분의 단방향 미끄럼 검사와 로울러 형상의 조합형 구름/미끄럼 테스트를 할 수 있다. 이 장비는 영국 국제마찰공학센터에서 인증된 제품이며, 마찰을 일으키기 쉬운 매개체 검사 그리고 건조와 윤활 검사에도 적합하다.

본 연구에서는 블록·링 마모시험을 수행하였다. 실험방법에 관한 개략도를 Fig. 3에 나타냈다. 마모 시험편은 시험 전후에 아세톤으로 세척하였다. 실험조건은 상온, 대기압상태, 건식마찰, 링 회전속도 50 rpm, 하중 67 N에서 각 실험은 2000초 동안 진행하였으며 실험 후 전자저울을 이용하여 시편의 무게손실을 측정하였다.

마모형상은 Auger Electron Spectroscopy(AES)를 이용하여 측정하였다. 단위깊이 당 이온분포를 알아보기 위하여 아르곤이온빔을 4 kV까지 가속시켜서 시편을 점차적으로 스퍼터 시켰다. 각 실험을 종료한 후 표면검사를 위해 SEM을 이용하였다

3. 결과 및 고찰

3-1. 질소이온주입층 분석

Fig. 4는 AES에서 측정된 깊이에 따른 이온분포를 나타내고 있다. 60 kV에서 각 1×10^{17}, 3×10^{17}, 6×10^{17} $N^{+}cm^{-2}$만큼의 질소를 샘플에 주입시켰다. 샘플의 질소 함량은 각각 최고 32, 25, 22%인 정규분포를 보인다. 일반적으로 저 합금강은 상온에서 약 0.005%의 아주 적은 질소를 포함하고 있다.

이온주입 후 Fe_3N와 Fe_4N화합물이 일정하게 샘플 표면에 분포되어있을 뿐만 아니라 과포화, 무질서한 고용층이 형성되었다. 이것은 소재표면경도를 높이는데 효과가 있다[10-11]. 질소고용체는 표면층을 강하게 만드는 또 다른 메커니즘이다.

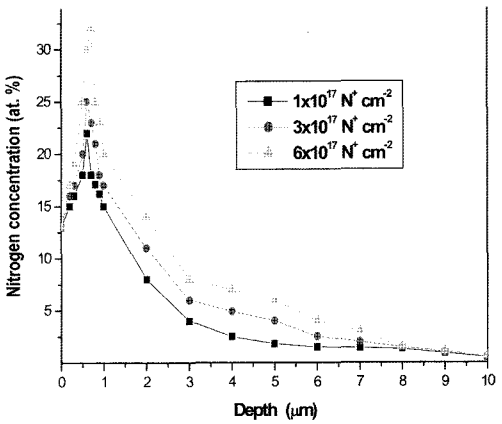

Fig. 4. The depth profiles of nitrogen in the ion implantation layer at various doses.

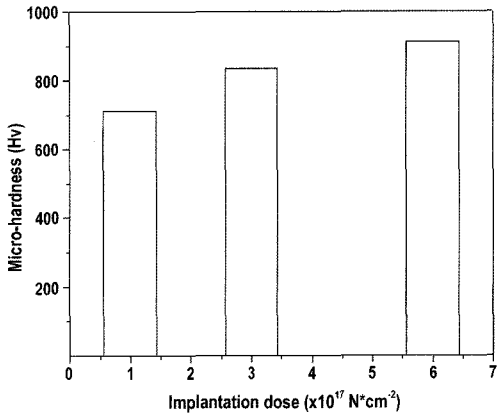

Fig. 5. The relationship between micro-hardness and various implantation doses.

3-2. 비커스경도시험

각기 다른 질소주입양에 대한 샘플의 마이크로 비커스경도 데이터를 Fig. 5에 나타냈다. 각 경도값은 샘플 한개 마다 5회 측정 후 그 평균값을 이용하였다. 마이크로 비커스 경도값이 질소의 주입량에 따라 증가함을 알 수 있다. 질소주입량이 6×10^{17} $N^{+}cm^{-2}$에 달하면 1×10^{17} $N^{+}cm^{-2}$일 때 보다 경도가 30%정도 향상되었다.

3-3. 무게손실 측정

건식마찰조건에서 질소주입량에 대한 무게감소량의 관계를 Fig. 6에 나타냈다. Fig. 6에 기록되어 있는 데이터는 67 N 하중 조건에서 얻은 데이터이다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 질소주입량이 늘어남에 따라 시편의 무게손실양은 감소하였다. 이온주입량이 3×10^{17} $N^{+}cm^{-2}$인 경우의 무게손실양은 1×10^{17} $N^{+}cm^{-2}$일 때보다

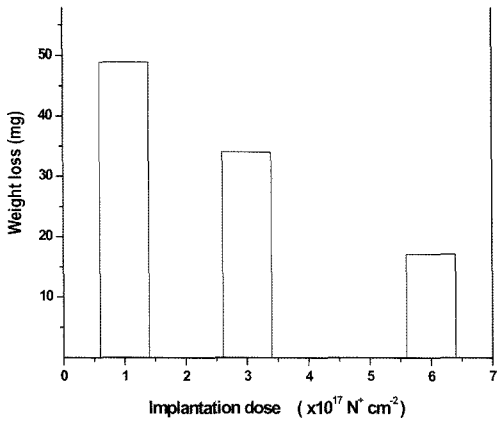

Fig. 6. The relationship between weight loss and various implantation doses.

약 30%낮게 나타났고, 이온주입량이 6×10^{17} N^+cm^{-2}인 경우 시편의 무게손실양은 1×10^{17} N^+cm^{-2}일 때 보다 약 60%정도 적게 나타났다. 이 결과는 PSII가 표면층의 마모저항을 크게 개선시켜 준다는 것을 증명한다. Fe_3N와 Fe_4N 화합물과 질소과포화고용체의 영향이 크다고 볼 수 있다. 실험결과 비커스경도가 높을수록 무게손실양이 적게 나타나는 것을 알았다.

3-4. 마찰계수

질소이온주입량, 마찰거리, 마찰계수에 관한 관계를 Fig. 7에 나타냈다. 각 주입량에 대한 평균마찰계수는 0.412, 0.383, 0.276이다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 질소 주입량 증가에 따라 마찰 계수는 감소하였다.

응착이론에 의하면 응착모모과정에서 마찰 계수는 다음식과 같이 표시한다[12].

$$\mu = \tau/\sigma_s$$

여기서 μ는 마찰계수, τ 전단 강도, σ_s 접촉표면의 항복강도이다. 질소주입 후 표면층의 항복강도가 증가하고 미세입자-질화물로 구성된 두 번째 상이 생성되었는데 그 층은 페라이트(ferrite) 조직의 연속성에 손상을 입힌다. 이로 인하여 SCM415표면층의 응착력 감소로 인한 τ와 마찰계수의 감소가 이루어지며 반면에 마모저항이 향상된다.

3-5. 마모시험

SEM(JEOL5600)을 이용하여 관찰된 SCM415합금강

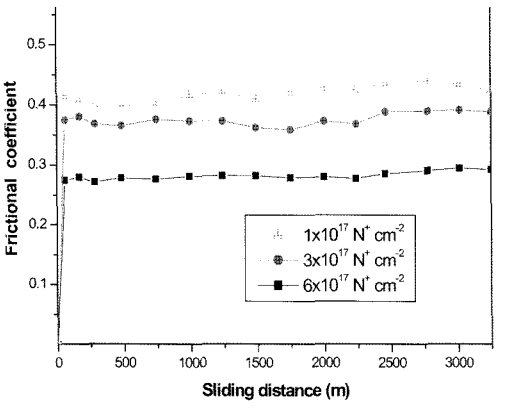

Fig. 7. The relationship between the surface frictional coefficient and sliding distance for various implantation doses.

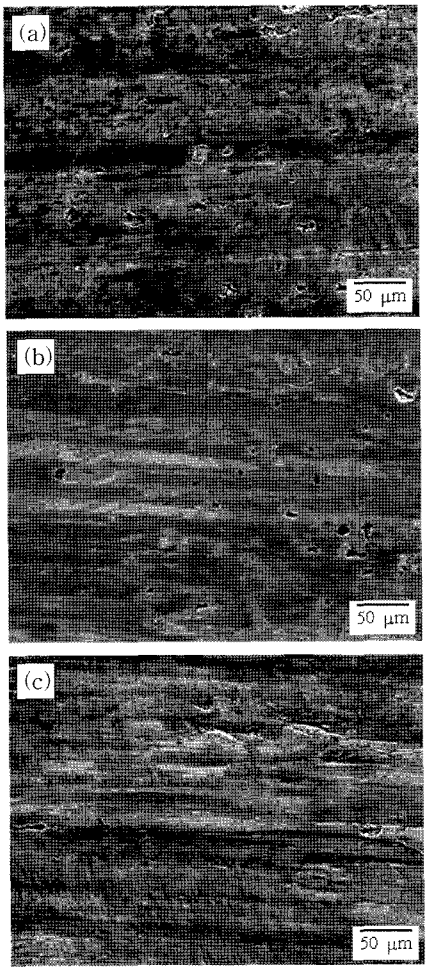

Fig. 8. Micro-morphology of the worn surface observed using SEM: (a) 1×10^{17}, (b) 3×10^{17}, and (c) 6×10^{17} N^+cm^{-2}.

의 마모면의 미세구조를 Fig. 8에 나타냈다.

Fig. 8(a)는 질소 주입량이 1×10^{17} $N^{+}cm^{-2}$인 시편을 마모 시험한 후의 마모면을 나타내고 있다. 사진에는 흠집부에 미끄럼방향으로 약간의 균열과 함께 마모흔적과 전단 변형된 미세구멍이 보인다. 마모면의 소성변형은 금속이 마찰면으로부터 제거되었음을 보여준다.

이온주입량을 3×10^{17} $N^{+}cm^{-2}$까지 증가시켰을 경우 Fig. 8(b)에 나타난 바와 같이 찢겨진 흔적이나 미세구멍은 보이지만, 마모표면에 균열은 발생하지 않았다.

즉, 이온주입량이 증가함에 따라 고착마멸이 점차적으로 줄어드는 경향을 알 수 있다.

주입량이 6×10^{17} $N^{+}cm^{-2}$인 경우 Fig. 8(c)에 나타난 바와 같이 마모흔적은 상대적으로 부드럽게 나타났다. 마모면에 평행한 긁힘 자국과 경미한 흠집이 보일 뿐이다. 즉, 산화에 의한 마모가 가장 큰 마모 매커니즘으로 보여진다.

이러한 결과는 질소이온을 주입한 후에는 마모마찰 매커니즘이 주로 응착마멸이라는 것을 보여준다.

질소주입량이 증가함에 따라 응착마멸도 줄어드는 경향을 보였다.

주입량이 6×10^{17} $N^{+}cm^{-2}$인 경우 산화로 인한 마모가 나타났다. 이것은 무게감소량과 마찰계수가 줄어들게 된 이유이다.

이러한 영향은 표면에 단단한 Fe_3N와 Fe_4N화합물 표면과 과포화질소고용체 형성에 영향을 미치며, 이로 인하여 마찰특성이 현저히 향상되었다고 볼 수 있다.

4. 결 론

1. PSII방법을 이용하여 질소이온을 주입한 후의 질소이온주입 분포는 정규분포 특성을 가진다. 질소이온 주입양이 증가할수록 SCM415합금강의 표면층 마찰계수는 작게 나타났다.

2. 비커스경도는 질소이온양에 따라 증가하는 반면 무게손실양은 줄어들었다. 또한 이온주입표면층의 마모특성은 눈에 띄게 향상되었다. 이런 영향은 Fe_3N와 Fe_4N화합물과 표면층의 과포화질소고용체의 형성 때문이다.

3. 질소이온을 주입한 후 마멸 메커니즘은 응착마멸로 변화되었으며, 질소주입량이 증가할수록 응착마멸의 영향이 줄어드는 반면에 산화로 인한 마멸의 영향이 나타나는 경향을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03)과 한국산업기술재단 지역혁신인력양성사업 지원에 의해 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. A. V. Byelia, "High current density ion implantation and its application to improve the wear resistance of ferrous materials," *Wear*, 203-204, pp.596-607, 1997.
2. L. Lu and S.-K. Lyu, "A study on the friction and wear characteristics of c-n coated spur gear," *The Korean Society of Tribologist & Lubrication Engineering*, Vol. 20, No. 5, pp. 272-277, 2004.
3. S.-K. Lyu and L. Lu, "A study on the friction and wear characteristics of C-N coated SCM415 steel," *Journal of the KOSOS*, Vol. 20, No. 1, pp. 18-23, 2005.
4. J. R. Conrad, J. L. Radtke, R. A. Dodd, F. J. Worzala and N. C. Tran., *J. Appl. Phys.*, Vol. 62, pp. 45-91, 1987.
5. G. A. Collins, R. Hutchings and J. Tendys, "Advanced surface treatments by plasma ion implantation," *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 68/69, pp. 285, 1994.
6. S. Mändl, J. Brutscher and R. Günzel, "Nuclear instruments and methods in physics," *Research Section B*, Vol. 112 pp. 252-254, 1996.
7. A. Liu, X. Wang and B. Tang, "Improve retained dose and impact energy of inner surface plasma immersion ion implantation using long pulse duration with deflecting electric field," *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 149, pp.114-118, 2002.
8. J. R. Conrad and R. A. Dodd, "Plasma source ion implantation: A new, cost-effective, non-line-of-sight technique for ion implantation of materials," *Surf. Coat. Technol.*, pp. 927-937, 1988.
9. A. Chen, J. T. Scheure, C. Ritter, R. B. Alexander and J. R. Conrad, "Comparison between conventional and plasma source ion-implanted femoral knee components," *Appl. Phys.*, Vol. 70, pp. 57-67, 1991.
10. A. Mitsuo and S. Uchida, "Effect of pulse bias voltage and nitrogen pressure on nitrogen distribution in steel substrate by plasma immersion ion implantation of nitrogen," *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 186, pp. 196-199, 2004.
11. H. H. Wang and M. B. Tian, "Ions Beam Surface Strength," in Chinese, pp. 131-132, 1988.
12. C. Q. Gao, "Metal Tribology," pp. 131-132, in Chinese, 1988.