

금형공구강의 표면성질 향상에 미치는 질소이온주입의 효과에 관한 연구

김화정*, 김용조#

A Study on Effect of Nitrogen Ion Implantation on Improvement of Surface Properties of Tool Steel

Hwa-Jeong Kim*, Yohng-Jo Kim#

ABSTRACT

The ion implantation technology is generally used in order to improve surface mechanical properties, especially tribological properties, of engineering metals. In this study, experimental works were carried out to investigate the surface properties, such as hardness, wear quantity, wear rate and friction force, of a nitrogen ion implanted tool steel STD11 under dry condition. Specimens for the wear test were made to investigate the influences of the initial ion implantation temperature and the total ion radiation. Wear properties, such as the wear quantity and the wear rate, of the nitrogen ion implanted tool steel were considerably improved, especially under the low sliding speed and the low applied load.

Key Words : Ion implantation technology(이온주입기술), Nitrogen ion implanted steel (질소이온주입 강), Wear resistance (마멸 저항), Knoop hardness(누프 경도), Tool steel(금형공구강)

1. 서 론

오고에너지로 가속화 된 이온 원소를 공업용 소재에 조사(irradiation)하여 표면에 화학적 조성이나 결정 구조 및 조직 등에 변화를 일으켜 소재 표면의 기계적 성질을 개선하는 표면 개질(surface modification) 기술로 잘 알려진 이온주입기술(ion implantation technology)은 소재 내 이온의 침투깊이가 일반적으로

1 μ m정도 이내가 되어 고체의 얇은 층의 성질만을 변화시키는 특성을 가지고 있다. 이온주입기술의 산업적 응용에 있어서는 반도체 제조분야에서 가장 먼저 사용되었고^[1], 특히 내마멸성 및 내피로성과 같은 기계적 특성과 내부식성의 화학적 특성 등의 개선에 의해 정밀 부품의 내구성 및 수명 향상을 위한 기술로 많이 활용되고 있다.^{[2]-[6]}

이온주입기술은 소재의 변형이나 치수공차가 전혀 발생하지 않고, 또한 표면층의 박리 현상이 일어나지 않으며, 표면 산화나 손상이 발생하지 않을 뿐만 아니라, 1 μ m 이하의 표면 조도까지 조절이 가능한 장점들로 인하여 초정밀 부품의 내구성 향상을 위한 제품

* 경남대학교 대학원 기계설계학과

교신저자 : 경남대학교 기계자동화공학부

E-mail : yohngio@kyungnam.ac.kr

의 최종표면처리 공정으로서 각광을 받고 있다. 이러한 산업적 응용과 더불어 특히 질소이온(nitrogen ion) 주입기술에서는 이온 주입조건에 따른 각종 정밀부품 소재의 표면조직 및 내마멸 특성변화에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 복합 이온주입의 경우 TiC, TiN등의 화합물 형성을 유도함으로써 효과적인 경화를 얻을 수 있었다.^{[7]-[8]} Fujihana등^[9]에 의하면 이온 조사량이 증가함에 따라 경도는 다소 감소하지만 모재의 주입온도가 증가함에 따라 경도는 오히려 증가한다. 이러한 이온주입의 효과에 의해 여러 가지 공구재나 금형재료가 마찰이나 내마멸성에 대해 효과적인 향상을 기대할 수 있다.^{[7]-[13]} Diniel등^[13]에 의하면 공구강에 질소이온을 주입하는 경우 내마멸성이 약 25%~63%정도 증가하고, Dimigen^[10]은 질소이온 주입에 의해 4140강 및 초경합금의 내마멸성이 각각 70% 및 50% 정도 향상된다고 하였다. 그러나 현재까지 이온 주입에 의한 조직, 경도 및 내마멸성등 표면특성 변화에 대한 많은 연구에도 불구하고 이온 주입조건이나 소재의 종류에 따라 많은 차이를 보이고 있다. 특히 국내의 경우 산업고도화에 따라 정밀 부품 제조에 사용되는 각종 정밀 금형, 플라스틱 사출용 스크루, 펀치, 내마멸 정밀 공구의 내구성 향상을 위한 정밀 표면처리 기술개발 응용이 절실히 요구됨에 따라 이온주입기술 개발이나 특성평가 기술에 대한 연구가 매우 중요 시 되고 있다.

따라서 본 연구에서는 금형공구강 STD11의 내마멸성 향상을 위한 정밀 표면 처리 공정의 일환으로 질소이온 주입법을 이용하여 이온 조사량과 공정온도를 변수로 하여 질소이온주입 공정의 산업적 응용 기술개발을 위한 공정 자료기반을 구축하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험소재 및 금형

본 연구에 사용한 실험소재는 각종 금형 및 펀치 등의 주요 소재로 사용되고 있는 금형공구강 STD11이며, 화학적 조성은 Table 1과 같다. 실험용 콤파운드 금형(compound die)의 펀치와 다이의 소재도 동일한 공구강을 사용하였고, 지름 50~75mm의 봉재에서

두께 약 5mm로 절단 후 경화처리와 템퍼링 처리하여 Fig. 1과 같은 형상으로 제작하였다.

또한 내마멸시험용 콤파운드 금형을 Fig. 2와 같이 제작하여 블랭킹(blanking)과 피어싱(piercing)을 복합시켜서 한 공정에서 제품형상과 구멍형상을 동시에 가공하는 방법으로 실험하였다.

Table 1 Chemical compositions of STD11 (%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Fe
1.40~1.60	≤0.40	≤0.60	11.00~13.00	0.80~1.20	0.20~0.50	Balance



Fig. 1 Compound dies (blanking & piercing)

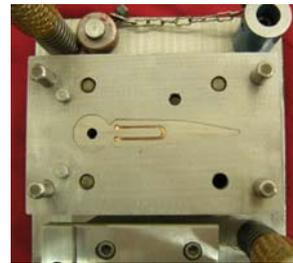


Fig. 2 Assembled compound die set and setup

2.2 이온 주입

본 실험에서는 질소이온을 사용하였으며, 연마한 시편을 초음파 세척(ultrasonic cleaning)하여 이온 주입기의 주입실(chamber)에 장착하여 주입하였다. 이온 주입장치는 Duo-PIGatron 이온원을 이용한 고전류 이온주입기이며, 이온주입 초기 진공도는 5×10^{-6} Torr로 하였으며, 이때 가속 에너지는 85keV, 이온빔의 전류 밀도는 $50 \mu A/cm^2$ 으로 하였다. 그리고 질소이온의 주입 조건은 Table 2 및 3과 같다.

질소 이온을 주입하여 이온 조사량에 따른 경도, 마멸량 및 마멸율, 마찰력 등의 변화를 관찰하기 위

해 이온 조사(irradiation)는 $3 \times 10^{16} \sim 1 \times 10^{18}$ ions/cm²의 범위로 하였다. 이온 주입 시 온도의 영향에 대해 고찰하기 위해서는 5×10^{17} 과 1×10^{18} ions/cm²의 두 가지 조사량에 대해 이온주입 초기온도를 상온에서 400℃까지 변화시켜 이온 주입하였으며, 이때 이온주입 시간에 대한 온도의 변화는 Fig. 3과 같다.

Table 2 Conditions for nitrogen ion implantation

Dose(ions/cm ²)	3×10^{16}	7×10^{16}	2×10^{17}	5×10^{17}	1×10^{18}
Energy(keV)	85	85	85	85	85

Table 3 Conditions of implantation temperature in nitrogen ion implantation

Temp.(℃)	R.T.	100	200	400
Dose(ions/cm ²)	5×10^{17} , 1×10^{18}			
Energy(keV)	85	85	85	85

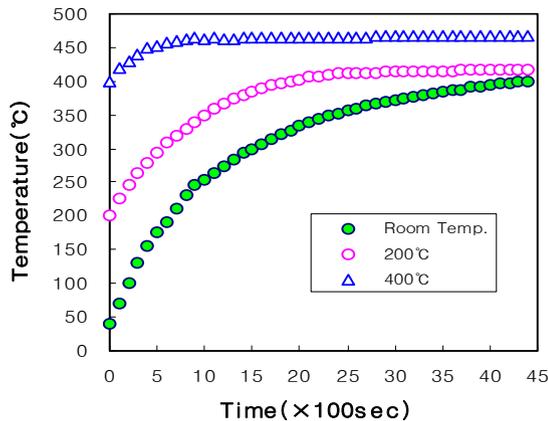


Fig. 3 Changes in temperature in ion implanting

2.3 내마멸시험

이온주입 금형공구강의 내마멸시험에는 Pin-on-disc 형식의 마멸시험기를 사용하였다. 마멸장치는 Fig. 4에 도시한 바와 같이 AC감속모터를 이용하여 속도제어를 하였으며, 마멸 시 마찰력 변화를 측정하기 위해 Pin지지대에 350Ω 변형계이저를 이용한 변형센서

를 부착하였고, 마멸 횟수에 따른 마찰력 변화를 AD 변환기를 사용하여 컴퓨터에서 데이터를 수집 분석하였다. 또한 Flow chart 기록계를 이용하여 마찰력 변화를 측정하였다. 내마멸시험에는 직경 5mm의 강구를 Pin에 고정하여 10g, 50g, 100g와 같이 3종류의 작용하중으로 하중변화에 대한 내마멸 특성을 분석하였다.

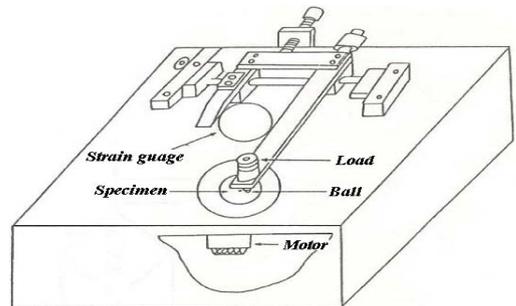


Fig. 4 A schematic of a tribotester (pin-on-disc type)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 경도(Hardness)

이온주입 금형공구강의 경도 측정에는 누프 경도 측정기(Knoop hardness tester)를 이용하였으며, 작용하중과 이온 조사량의 변화에 따른 경도의 측정 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 일반적으로 이온 조사량이 많아질수록 경도가 다소 증가하는 경향을 보이지만 1×10^{18} ions/cm²의 조사량에서는 오히려 경도가 다소 하락하는 현상을 나타내는데, 이는 이온주입 시 시편의 온도상승에 따른 모재의 열화에 기인하는 것으로 판단되어진다.

한편, 이온 주입 시의 온도를 변화시켰을 때 경도의 변화는 Fig. 6에 나타내었는데, 이온주입 시의 초기 온도가 높아짐에 따라 질소의 확산현상에 의해 더 깊이 질소이온이 존재함에 따라 경도가 대체로 약간 증가하는 것을 볼 수 있다. 거의 모든 이온주입 조건에서 경도가 증가하는 요인은 Fe-Nitride와 Cr-Nitride 등의 형성에 의한 강화효과와 이온의 침투 및 조사손상(irradiation damage)^[15]에 의한 강화 등에서 기인하는 것으로 판단된다.

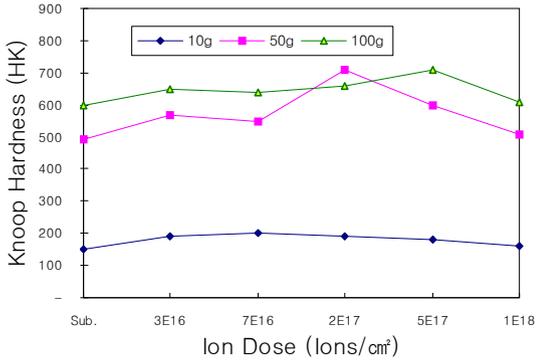
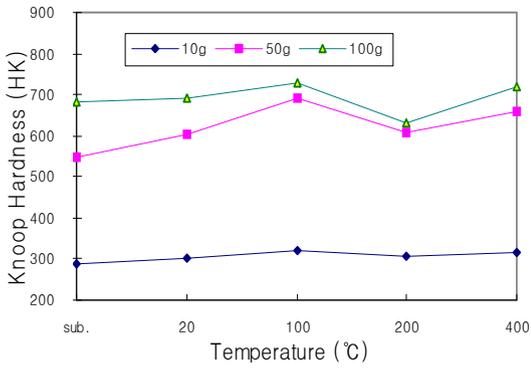
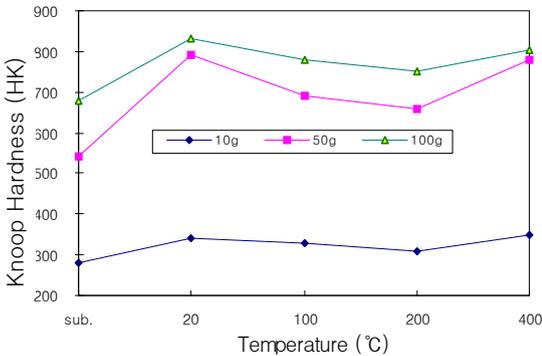


Fig. 5 Knoop hardness according to total doses



(a) 5×10^{17} ions/cm²



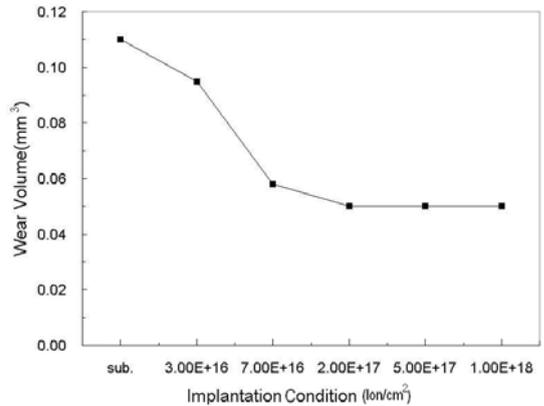
(b) 1×10^{18} ions/cm²

Fig. 6 Knoop hardness according to implantation temperatures

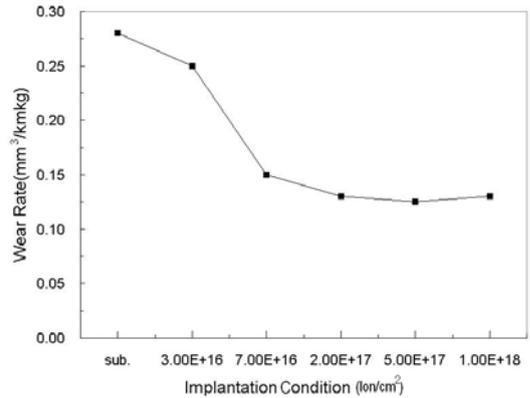
3.2 마멸저항(Wear resistance)

이온 조사량의 변화에 따른 마멸량과 마멸율을

Fig. 7에 나타내었다. 내마멸성은 질소이온을 주입하지 않은 모재에 비하여 이온주입을 하였을 경우가 우수한 것으로 나타났으며, 특히 7×10^{16} ions/cm² 조사량 이상에서 내마멸성이 매우 우수하였다. 그러나 조사량 1×10^{18} ions/cm²에서는 오히려 내마멸성이 약간 감소하는 경향을 보이는데 이는 이온주입 시 온도상승에 따른 모재의 열화에서 기인하는 정도의 저하 때문이라 판단된다.



(a) Wear volume



(b) Wear rate

Fig. 7 Wear effects according to total doses for the nitrogen ion implanted tool steel

Fig. 8은 마멸시험을 7×10^{16} ion/cm²의 이온 조사량에 대해서 작용하중을 변화시키면서 실험한 경우 마멸량을 나타낸 것이다. 50~100g의 하중에서는 이온주입을 하지 않았을 경우보다 내마멸성의 향상 폭이 컸으

며, 200~300g의 하중에서는 내마멸성의 향상 폭이 앞의 경우에 비해 상대적으로 적었다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 이온주입 강은 낮은 하중에서 더욱 우수한 내마멸성을 나타내는 것으로 볼 수 있다.

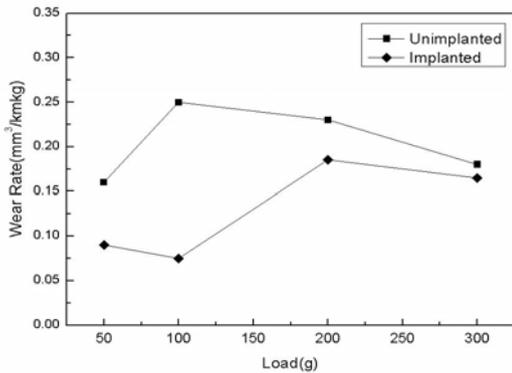
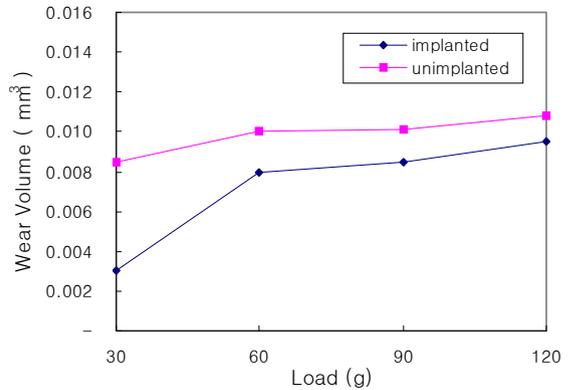


Fig. 8 Wear rate according to applied loads for the nitrogen ion implanted tool steel (7×10^{16} ions/cm²)

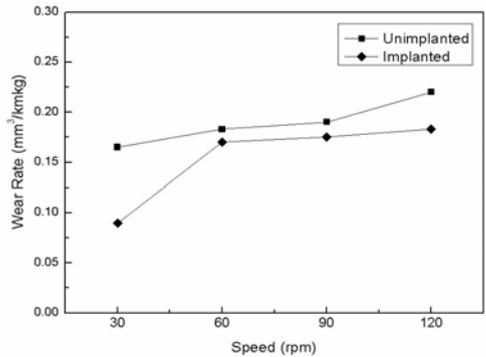
Fig. 9는 7×10^{16} ion/cm²의 이온 조사량에 대해서 접촉 미끄럼 속도 회전수를 30~120rpm까지 변화시키면서 실험한 경우 마멸량 및 마멸율을 나타낸 것인데, 30rpm에서 가장 좋은 내마멸성을 보이고 있다. 이로 미루어 볼 때 저속에서 이온주입에 의한 내마멸성의 향상이 두드러질 것으로 보인다. 이러한 현상의 원인은 접촉 미끄럼 속도가 증가함에 따라 마멸부의 온도가 상승하여 마멸저항의 특성이 약화되기 때문이라 판단된다.

5×10^{17} ion/cm²의 이온 조사량으로 주입할 때 초기온도를 상온~400℃의 범위로 변화시키면서 이온 주입한 경우 마멸량과 마멸율은 Fig. 10에 나타내었다. 100℃의 초기온도로 이온 주입하였을 경우가 가장 우수한 내마멸성을 보이고 있는데, 0.9km의 거리로 마멸실험을 행한 경우에는 초기온도가 400℃일 때 내마멸성이 가장 우수하지만, 1.6km의 거리로 마멸실험을 행한 경우에는 초기온도 100℃의 경우가 가장 우수한 것으로 나타났다. 마멸율을 비교해보면 실험 거리가 0.9km에서 1.6km로 변함에 따라 초기온도 100℃의 경우에는 마멸율의 증가가 크지 않으나 200℃와 400℃의 초기온도로 이온주입을 행한 경우에는 마멸율의 증가가 상대적으로 크게 나타나는 것은 마

멸량의 변화 경향과 거의 동일하다.



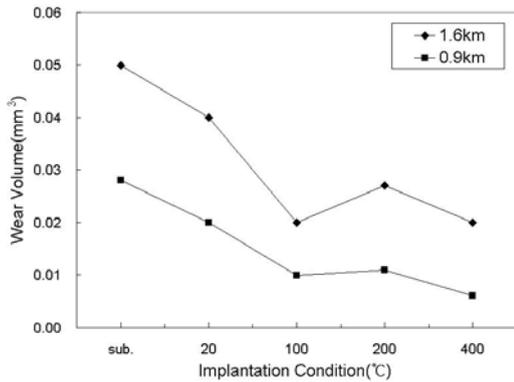
(a) Wear volume



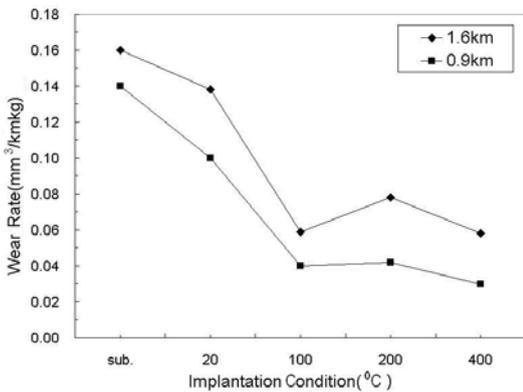
(b) Wear rate

Fig. 9 Wear effects according to linear velocity for the nitrogen-ion implanted tool steel (7×10^{16} ions/cm²)

Fig. 11은 1×10^{18} ions/cm²의 조사량에 대해 초기온도를 변화시키면서 이온 주입한 경우의 마멸량과 마멸율을 나타낸 것인데, 초기 이온주입온도를 100℃로 하였을 때 가장 적은 마멸량을 보였다. 마멸율에 대해서도 동일한 경향을 보이고, 즉 마멸거리가 0.9km에서 1.6km로 증가하여도 가장 적은 마멸율의 변화를 보이는 온도는 역시 100℃임을 확인할 수 있다. 이처럼 이온주입 시 초기온도의 변화를 주었을 경우에 다른 조건에 비해 우수한 내마멸성을 보이는 것은 Fe-rich phase를 통한 질소의 확산에 의한 강화^[13] 때문이라 판단된다.



(a) Wear volume



(b) Wear rate

Fig. 10 Wear resistance according to implantation temperatures (5×10^{17} ions/cm²)

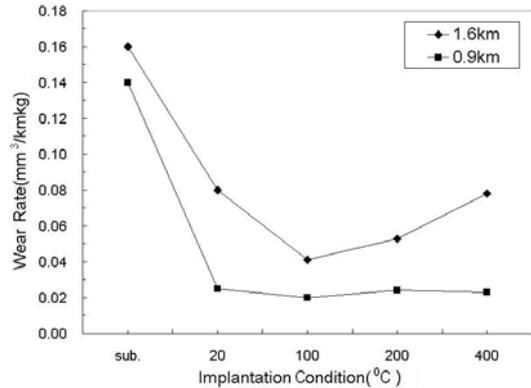


Fig. 11 Wear rates according to ion implantation temperatures (1×10^{18} ions/cm²)

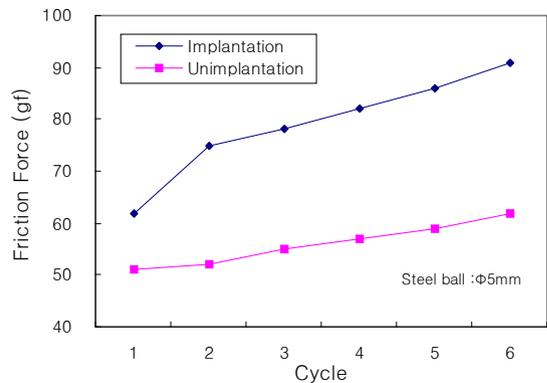


Fig. 12 Friction forces by the pin-on-disc wear test

3.3 마찰력(Friction force)

Fig. 12는 이온주입 후 금형공구강 표면과 강구와의 마찰력 변화를 나타낸 것인데, 질소이온 주입 후 마찰력은 증가되었고 초기 마멸이 진행함에 따라 점진적으로 마찰력이 증대됨을 보이고 있다. 이러한 마찰력의 증가는 2×10^{17} ions/cm²의 조사량으로 주입한 경우 시편의 표면경도는 93HK인데 비하여 강구의 경도는 80HK이기 때문에 강구의 연삭마멸^[16]에 기인하는 것으로 판단된다. 즉 이온 주입 금형공구강은 이온 주입하지 않은 모재보다 경도가 높기 때문에 표면부의 미세 돌출부에 의해 강구의 연삭마멸이 발생하기 때문이다.

4. 결 론

금형재료로 많이 사용되고 있는 공구강 STD11에 질소이온 조사량과 초기온도를 기본 변수로 하여 이온을 주입하고, 경도 및 내마멸성 등의 표면 성질의 변화에 대해 실험 연구하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 질소이온 주입한 금형공구강의 표면경도는 일반적으로 증가하는 경향을 보이고, 이온 조사량의 변화에 따라 경도의 향상이 각각 다르게 나타났다. 특히 이온 조사량이 3×10^{16} ion/cm²에서 경도향상의 효과가 가장 우수하였다.

2. 이온 조사량이 $2 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{18}$ ion/cm²의 범위에서 가장 우수한 내마멸성을 나타내었으며, 또한 이온 주입온도가 100~400°C의 범위에서 내마멸성이 매우 우수하게 나타났다.

3. 이온주입 금형공구강과 강구의 접촉 마찰력에 대해서는 이온주입 강이 이온주입을 하지 않은 모재에 비해 연삭마멸의 효과 때문에 마찰력이 높게 나타났다.

후 기

본 연구는 2008학년도 경남대학교 학술연구장려금 지원으로 이루어졌음

참고문헌

- Williams, J. S., "Ion Implantation of Semiconductors", Mat. Sci. Eng., pp.8-15, 1998.
- Sioshansi, P., "Ion Beam Modification of Materials for Industry", Thin Solid Films, Vol. 118, pp.61-72, 1984.
- Sioshansi, P., "Medical applications of ion beam processes", Nucl. Instr. & Meth. in Phys. Res., Vol. 19-20, pp. 204-208 (1987)
- Sioshansi, P., "Surface Modification of Industrial Components by Ion Implantation", Nucl. Instr. & Meth. in Phys. Res., Vol. 37-38, pp. 667-671, 1989.
- G. Dearnaley, "Ion Implantation Part II: Ion Implantation in Nonelectronic Materials", Nucl. Instr. & Meth. in Phys. Res., Vol. 24-25, pp. 506-511, 1987.
- Williams, J. M., Buchanan, R. A. & Lee, I. S., "Ion Beam Processing of Surgical Materials", Nucl. Instr. & Meth. in Phys. Res., Vol. 37-38, pp. 676-681, 1989.
- Sioshansi, P. & Au, J. J., "Improvements in Sliding Wear for Bearing-Grade Steel Implanted with Titanium and Carbon", Mat. Sci. Eng., Vol. 69, pp. 161-166, 1985.
- Hutchings, R., "The Subsurface Microstructure of Nitrogen-Implanted Metals", Mat. Sci. Eng., Vol. 69, pp. 129-138, 1985.
- Fujihana, T. ; Okabe, Y. ; Iwaki, M., "Effects of Implantation Temperature on the Hardness of Iron Nitrides Formed with High Nitrogen Dose", Nucl. Instr. Meth., Phys. Res., Vol. 39, pp. 548-551, 1989.
- Dimigen, H. Kobs, K., Leutenecker, R. Ryssel, H. & Eichinger, P., "Wear Resistance of Nitrogen-Implanted Steels", Mat. Sci. Eng., Vol. 69, pp. 181-190, 1985.
- Sioshansi, P., "Surface Modification of Industrial Components by Ion Implantation", Mat. Sci. Eng., Vol. 90, pp. 373-383, 1987.
- Feller, H. G., Klinger, R. & Benecke, W., "Tribo-Enhanced Diffusion of Nitrogen Implanted into Steel", Mat. Sci. Eng., Vol. 69, pp. 173-180, 1985.
- Daniels, L. O. & Wilbur, P. J., "Effects of Nitrogen Ion Implantation on Load-Bearing Capacity and Adhesive Wear Behavior in Steels", Nucl. Instr. & Meth. in Phys. Res., Vol. 19-20, pp.221-226 (1987)
- Wei, R., Wilbur, P. J., Ozturk, O. & Williamson, D. L., "Tribological Studies of Ultrahigh Dose Nitrogen-Implanted Iron and Stainless Steel", Nucl. Instr. & Meth. in Phys. Res., Vol. 59-60, pp.731-736, 1991.
- Kaufmann, E. N. & Buene, L., "Non-Equilibrium Structures in Ion-Implanted Metals", Nucl. Instr. Meth., Vol. 182/183, pp. 327-336, 1981.
- Habig, K. H, "Wear Behaviour of Surface Coatings on Steels", Tribol. Int., Vol. 22, pp. 65-73, 1989.