

이온주입한 강의 미시적 마모 특성의 평가

문 봉 호*, 최 병 영**

Development of Methodology for Evaluating Tribological Properties of Ion-Implanted Steel

Bong-Ho MOON*, Byung-Young CHOI**

ABSTRACT

Ion implantation has been used successfully as a surface treatment technology to improve the wear, fatigue and corrosion resistances of materials. A modified surface layer by ion implantation is very thin (under 1 μm), but it has different mechanical properties from the substrate. It has also different wear characteristics. Since wear is a dynamic phenomenon on interacting surfaces with relative motion, an effective method for investigating the wear of a thin layer is the observation of wear process in microscopic detail using in-situ system. The change of wear properties produces the transition of wear mode. To know the microscopic wear mechanism of this thin layer, it is very important to clarify its microscopic wear mode.

In this paper, using the SEM and AFM Tribosystems as in-situ system, the microscopic wear of Ti ion-implanted 1C-3Cr steel, a material for roller in the cold working process, was investigated in repeated sliding. The depth of wear groove and the specific wear amount were changed with transition of microscopic wear mode. The depth of wear groove with friction cycles in AFM tribosystem and specific wear amount of Ti ion-implanted 1C-3Cr steel were less about 2-3 times than those of non-implanted 1C-3Cr steel. The microscopic wear mechanism of Ti ion-implanted 1C-3Cr steel was also clarified. The microscopic wear property was quantitatively evaluated in terms of microscopic wear mode and specific wear amount.

Key Words : Microscopic Wear Mechanism(미시적 마모 기구), Microscopic Wear Mode(미시적 마모 형태), Ti ion-Implantation(Ti이온 주입), 1C-3Cr Steel(1C-3Cr강), Specific Wear Amount(비마모량), SEM Tribosystem(SEM 트라이보시스템), AFM Tribosystem(AFM 트라이보시스템).

1. 서 론

초기에 반도체 재료에서 시작한 이온주입은 현재 기계

재료의 마모, 피로, 부식에 대한 저항력을 향상시키는데 성공적으로 사용되어지고 있다.

영국 Harwell 원자력 연구소에서 시작된 기계재료의

* 전북대학교 공과대학

** 전북대학교 공과대학 금속공학과 및 신소재개발연구소

이온주입은 내마모성 향상의 가능성을 보여준 이래, 최근 일부 산업화에 응용하여 기계재료의 트라이볼로지 특성을 개선하기 위한 새로운 표면 개질법⁽¹⁾으로 주목받고 있다. Singer⁽²⁾, Hulber⁽³⁾ 등은 강에 Ti 이온을 주입하여 경도는 변화하지 않지만 마찰계수는 1/2로 감소시키는 이온주입 효과를 보고했다.

Pope등⁽⁴⁾은 오스테나이트 스테인레스강에 Ti와 C 이온주입에 의해 마찰계수가 1/2로 감소하는 것을 보고하고 있고, Sasaki등⁽⁵⁾은 오스테나이트 스테인레스강에 여러 종류의 이온을 주입하여 각 원소들에 대한 이온 주입 효과를 관찰했다. 그 결과 Ti이온은 마찰계수가 1/3 저감, 내마모성이 8배로 향상되는 가장 안정된 결과를 나타냈다. 한편, 공구재료에 N 이온 주입한 결과⁽⁶⁾ 내마모성이 증대되어 공구수명이 향상되었다.

위와 같이 많은 연구 결과들은 이온 주입에 의한 트라이볼로지 특성 개선의 원인을 두께 수 μm 에 불과한 표면 개질층만의 기계적 성질 변화에 따른 내마모성 향상이라고 보고하고 있다. 그러나 마모가 발생하는 표면을 직접 볼 수가 없기 때문에 표면개질층의 마모가 어떻게 발생하는가를 나타내는 마모거동에 관한 연구는 거의 없다. 따라서 이온주입에 의한 표면개질층의 마모거동을 나타내는 마모형태 및 마모기구에 관한 연구는 보고되어 지지 않고 있다.

표면개질층의 마모특성을 알기 위해서는 표면개질층만의 마모거동을 알아야 하기 때문에 표면개질층에서 마모거동을 직접 관찰할 수 있는 미시적 관찰 시스템이 요구되어 진다.

Kato등⁽⁷⁻¹⁰⁾은 SEM내의 마모실험장치에서 물체가 미끄러짐 접촉시 발생하는 미시적 마모의 전과정을 직접 관찰할 수 있는 SEM(Scanning Electron Microscope) Tribosystem을 활용하여 금속, 세라믹, 세라믹코팅 등에서 발생하는 미시적 마모형태(Microscopic wear mode)를 정의하고 그에 대한 미시적 마모기구를 해석하였다. 그 결과 마모형태의 변화에 따라 마모특성이 변화하는 것을 밝혀냈다. 이온주입에 의한 표면개질층의 미시적 마모기구를 해석하기 위해서는 마모거동을 직접 관찰하여 미시적 마모형태가 정의되어야 하므로 SEM Tribosystem은 이온주입에 의한 표면개질층의 마모거동을 직접 관찰하는데 유용한 기구이다.

본 연구에서 사용된 시편은 냉간압연의 로울러 재료로 사용되는 1C-3Cr강이며 그 내마모성 향상을 위해 Ti 이온을 주입하였다. Ti 이온주입으로 표면개질된 층은 $1\mu\text{m}$

이내로 매우 얇으나 모재와 다른 기계적 성질을 가지고 있기 때문에 마모거동도 모재와는 다를 것으로 예상되어 진다. 이에 마모거동을 직접 관찰하기 위하여 SEM Tribosystem을 사용해 Ti 이온이 주입된 1C-3Cr강 및 미주입한 1C-3Cr강의 미시적 마모를 반복 미끄럼 마찰과정에서 관찰하였다.

또한 SEM에서 관찰 할 수 없는 표면의 미시적 마모특성을 평가하기 위해 AFM(Atomic Force Microscope) Tribosystem도 이용하였다. 위의 관찰을 기초로 미시적 마모형태를 정의하였고 마모 흔 길이 및 비마모량(Specific wear amount)을 구하여 1C-3Cr강의 이온주입 및 미주입시의 미시적 마모특성을 평가하였으며 아울러 Ti 이온주입 1C-3Cr강의 미시적 마모기구를 해석하였고 Ti 이온주입한 1C-3Cr강의 표면개질층의 미시적 마모거동에 따른 미시적 마모특성을 정량적으로 밝히고자 시도하였다.

2. 실험 방법

2.1 시편제작

본 연구에서 사용된 시편은 반경이 다른 3종류의 편과 디스크이다. 편 시편의 재료는 다이아몬드이며 각각의 반경은 25, 70, 110 μm 이다.

디스크 시편은 크기가 $24 \times 24 \times 1\text{mm}$ 이며, 그 재질은 0.95%의 C, 3.2%의 Cr과 Ni, Mo, V, Si, Mn등이 약간씩 첨가된 냉간 압연용 로울러 재료인 1C-3Cr강이며 표면경화 열처리되어져 있다. 디스크 시편은 이온주입 및 미주입의 2종류로 평균입경이 0.25 μm 인 다이아몬드 연삭재로 buffing한 후 MEVVA(Metal Vapor Vacuum Arc Source)로 이온을 주입하였다.

이온의 종류는 Ti 이온이며 이온주입 조건은 이온 가속 에너지 70keV, 이온주입량은 10^{17} ions/cm² 이다. 그리고 이온주입후 미주입 표면과 같은 표면거칠기를 유지하기 위해 다시 buffing을 실시하였다. 이온주입 및 미주입 시편의 표면 거칠기를 측정된 결과 공히 0.01 μm Ra이하로 나타났다.

2.2 Ti 이온주입 시편의 특성

Ti 이온주입 깊이를 알기 위해, 이온주입후 buffing한 시편을 AES(Auger Electron Spectroscopy)를 이용하여 표면 분석을 행하였다. Fig.1에 AES 분석에 의한 Ti 이온의 주입 깊이를 나타내었다. 표면에서부터

100nm까지는 Ti 농도가 Fe보다 높았으며 100nm에서 내부로 갈수록 점점 감소하면서 240nm를 넘어서 Ti가 존재하지 않았다. 또한, 표면에 매우 가까운 약 20nm 깊이까지 산소가 나타나고 있는데 이것은 표면산화에 의한 것으로 생각된다. Fig.2에 Vickers경도계의 하중 변화에 따른 이온주입 표면 및 미주입 표면의 미소경도를 Indentation time 30sec에서 나타내고 있다. 두 표면간의 미소 경도차이는 나타나지 않고 있으며 0.49N 이하에서 경도가 증가하고 있는데 이것은 표면경화 열처리 효과라고 생각되어 진다.

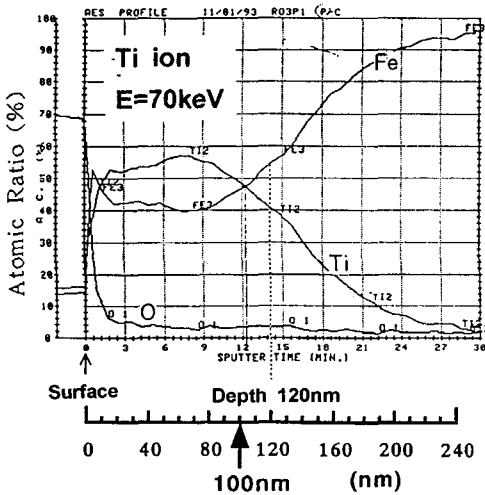


Fig. 1 The AES depth profile for Ti ion-implanted specimen

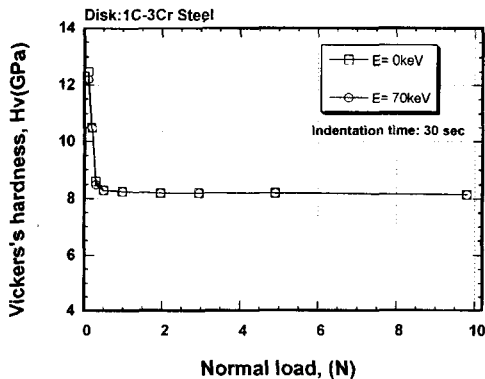


Fig. 2 Variation in Vickers's microhardness as a function of normal load in the Ti ion-implanted and non-implanted specimens

2.3 SEM Tribosystem 및 AFM Tribosystem을 사용한 마모시험

Fig.3에 SEM Tribosystem의 SEM내의 시료실에 설치된 pin-on-disk형의 마모시험장치를 나타내고 있다. 외부의 구동모터에 의해 구동되어지는 디스크는 핀과 미끄럼 마찰이 행해지며 미끄럼 속도는 200 μ m/s로 속도 콘트롤러에 의해 제어되어진다. 또한 수직하중은 핀이 장착된 레버의 반대쪽에 하중 부가용 압축 코일 스프링을 조절하여 0.05에서 0.5N까지 변화시켰다.

비마모량은 표면 거칠기 시험기로 측정된 마모 흔 곡선에서 구했다. 이온주입에 따른 표면 특성 변화를 더욱 자세히 알기 위해 Fig.4의 AFM Tribosystem을 사용하였

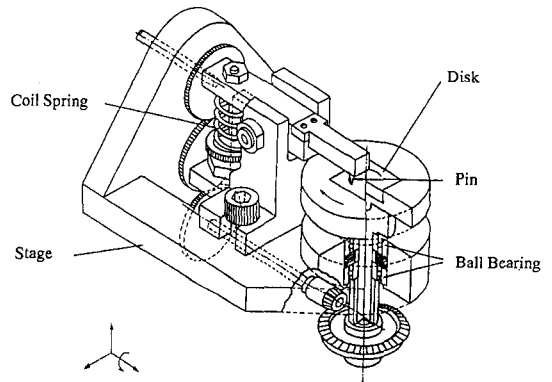


Fig. 3 A schematic diagram of the pin-on-disk type wear apparatus assembled in SEM Tribosystem

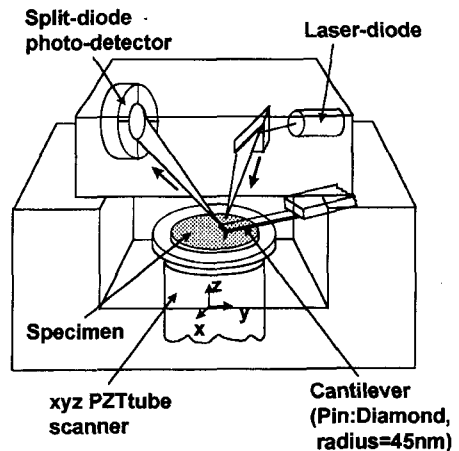


Fig. 4 A schematic diagram of the AFM Tribosystem

다. AFM Tribosystem은 AFM에서 미끄럼 마찰 실험을 하기위해 AFM 측정용 핀의 장착부분인 캔틸레버가 실험용 핀을 장착 할수 있게 개조되어진 실험장치이다. 실험용 핀의 끝의 재료는 다이아몬드이고 반경이 45nm이며 디스크 시험편은 Ti 이온주입 및 미주입의 1C-3Cr 강이다. 마모시험 조건으로 수직하중이 10μN 이며 굽기 반복 실험(reciprocating scratch test)의 횟수는 64, 128, 256회이고, 왕복 거리는 1μm이다. 일정 굽기 반복수에서 반경이 20nm인 측정용 핀을 사용하여 마모 흔을 관찰하였다.

3. 실험 결과

3.1 마모형태

반복 미끄럼 접촉을 하는 이온주입과 미주입 시편에서 관찰된 마모형태는 Fig.5에 나타난 바와 같이 Ploughing, Shear-tongue(Type I), Shear-tongue(Type II)와 같이 3 종류로 분석되었다. 각 마모형태별로 그 특성 및 생성과정은 다음과 같이 설명된다.

(1) Ploughing

Fig.5(a)는 Ploughing에 대한 SEM사진이다. Ploughing은 초기 마모일 경우와 하중이 낮을 때 발생하는 마모형태로 마모입자가 발생하지 않고 단지 소성유동에 의해서 마모 흔만이 형성된다.

(2) Shear-tongue(Type I)

Shear-tongue(Type I)은 Fig.5(b)에 나타내었다. Shear-tongue(Type I)은 이온주입한 시편에서만 관찰되며 화살표와 같이 핀 앞에 분말형태의 마모입자가 구름형태의 덩어리로 모이는 마모형태이다.

(3) Shear-tongue(Type II)

Fig.5(c)에 Shear-tongue(Type II)를 나타내었다. Shear-tongue(Type II)는 이온 주입과 미주입 시편에서 공통적으로 나타나며 핀 앞에 화살표와 같이 바늘형태의 마모입자가 모이는 마모형태이다.

3.2 마모형태에 대한 하중과 마찰 반복수의 효과

Fig.6(a)(b)에 이온주입과 미주입 시편에 대해 마모형태에 대한 하중 및 마찰 반복 수의 효과를 각각 나타내었다. 이온주입 시편은 3형태의 마모형태를 나타내는 반면, 미주입의 경우는 Shear-tongue(Type I)이 나타나지 않고 있다. 이 결과에서 Shear-tongue(Type I)은 이온주입에 의해 발생하는 마모형태인 것을 알 수 있다.

Fig.6(a)와 같이 이온주입의 경우는 0.05N(▼, ▽), 0.1N(▲, △), 0.3N(■, □, ◻), 0.5N(○, ○)의 하중 및 50회 까지의 마찰 반복수 증가에 따라 (▼, ▲, ■)의 표시된 Ploughing에서 (□, ○)의 표시의 Shear-tongue(Type I)을 통해서 (□, ○)로 표시된 Shear-tongue(Type II)로 마모형태가 천이 되고 있으며 그 천이구역을 천이경계선으로 나타내었다. 미주입의 경우는 Ploughing에서 하중 및 마찰 반복수 증가에 따라 Shear-tongue(Type II)로 천이하고 있는 것을 Fig.6(b)에 나타낸다. (▼, ▲, ■)의 표시된 Ploughing에서 (□, ○)의 표시의 Shear-tongue으로 천이는 이온주

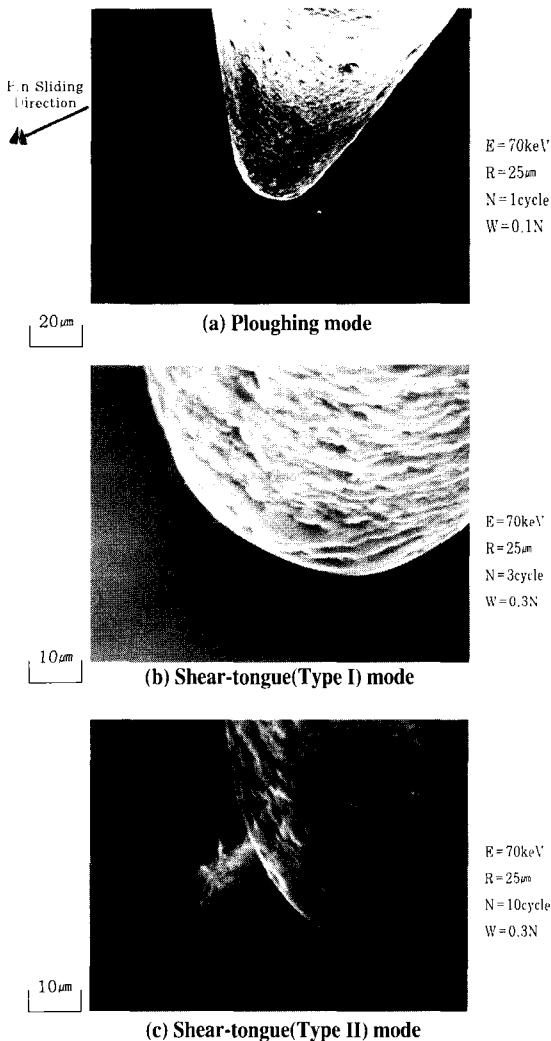
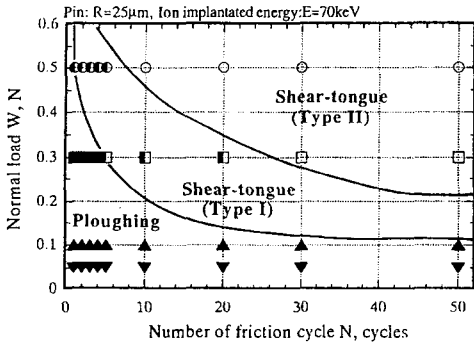
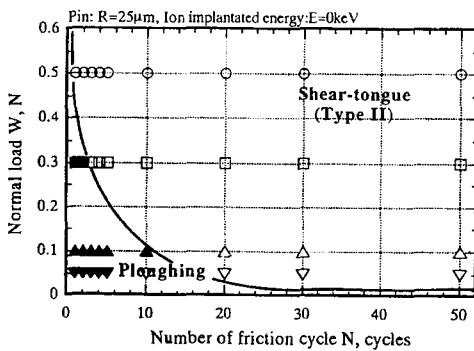


Fig. 5 SEM micrographs showing:
 (a) Ploughing mode (b) Shear-tongue(Type I)mode,
 (c) Shear-tongue(Type II)mode.



(a) Ti ion-implanted specimen



(b) Non-implanted specimen .

Fig.6 The transition of wear mode in
(a) Ti ion-implanted specimen and
(b) Non-implanted specimen with friction cycles and loads

입의 경우가 미주입보다 높은 하중에서 이루어지고 있다. 이온주입 및 미주입 공허 Ploughing에서 Shear-tongue (Type I), Shear-tongue (Type II)로 천이조건은 하중이 증가함에 따라 천이가 이루어지는 경우에 해당하는 마찰 반복수가 감소하는 것을 알 수 있다.

3. 3 마찰 반복에 따른 마모 흔 깊이의 변화

Fig.7에 핀의 반경 25 μm, 하중 0.1N, 0.3N, 0.5N에서 마찰 반복수에 따른 이온주입 시편의 마모 흔의 곡선을 나타내고 있다. 마찰 반복수와 하중 증가에 따라 마모 흔 깊이가 증가하고 있다.

Fig.8은 핀의 반경 25 μm에서 마찰 반복수에 따른 이온주입과 미주입시편의 마모 흔 깊이의 변화를 나타내고 있다. 마모 흔의 깊이는 마찰 반복수의 초기에는 핀과 디스크의 접촉 면적이 작기 때문에 핀의 접촉 압력이 크므로 급격히 증가하다가 약 10회 이후 접촉 면적이 커짐에 따

라 완만한 증가를 나타내고 있다. 이온 주입층의 마모 흔의 깊이는 동일 실험 조건에서 각각 이온 미주입 시편의 약 1/2이다.

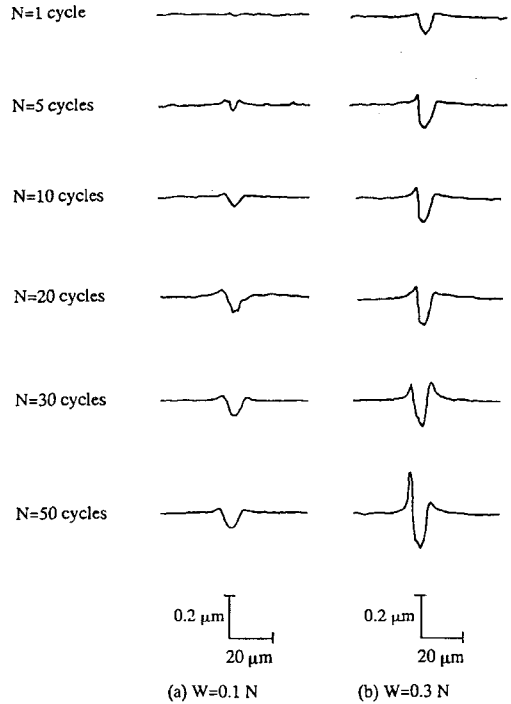


Fig. 7 Variation in cross-sectional profiles of the wear grooves of Ti ion-implanted specimen with friction cycles. (Pin radius: 25 μm)

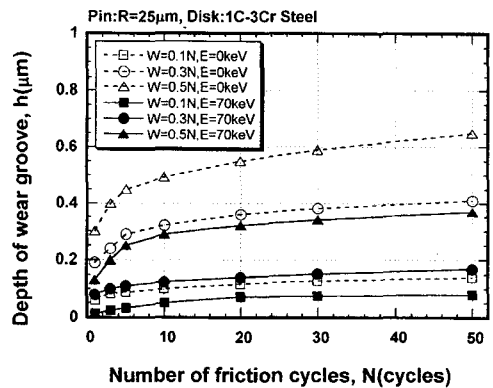


Fig. 8 Variation in depth of wear groove as a function of friction cycles in the Ti ion-implanted and non-implanted specimens

3. 4 마찰 반복수에 따른 비마모량(ws)의 변화

Fig. 7에서 얻은 마모 흔 곡선에서 마모량, 비마모량을 계산한다. 비마모량은 마모량을 하중과 미끄럼 거리로 나눈 값으로 정의한다. Fig. 9에 핀의 반경이 25 μm에서 이온주입 시편과 미주입 시편의 비마모량 변화를 나타내었다. 마찰 반복수 증가에 따라, 이온주입 및 미주입시편의 비마모량은 증가하고 있고 하중이 증가함에 따라 비마모량이 증가하고 0.5 N의 하중에서는 이온주입한 시편과 미주입 시편의 비마모량의 차이가 마찰반복수의 증가에 따라 감소하여 거의 같아짐을 알 수 있었으며 비마모량의 범위는 $9 \times 10^{-6} - 4 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 / \text{Nm}$ 이다. 이 결과에서 카모 흔 깊이가 증가함에 따라 내마모성에 대한 이온주입 효과는 감소하고 있음을 알게 되었다. Fig. 9의 비마모량 변화 및 Fig. 6의 마모형태 천이의 관계에서 마모형태에 따른 비마모량을 정량적으로 나타낼 수 있다. 이와 같이 마모형태에 따른 비마모량을 정량적으로 나타낼 수 있는 마모특성 평가방법은 마모거동을 직접 관찰해야만 가능하다. Ti 이온주입층에서 마모특성 평가의 결과는 다음과 같다.

- Ploughing $w_s < 1 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 / \text{Nm}$
- Shear-tongue(Type I) $1 \times 10^{-5} < w_s < 2 \times 10^{-5}$
- Shear-tongue(Type II) $2 \times 10^{-5} < w_s < 4 \times 10^{-5}$

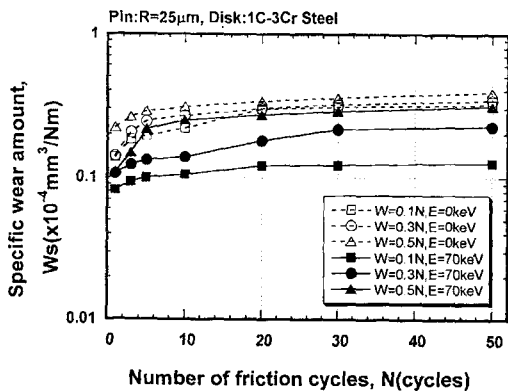
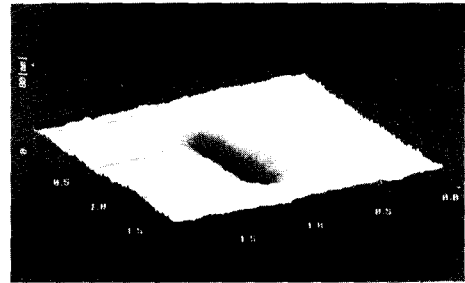


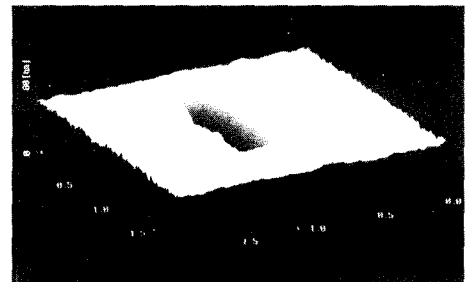
Fig. 9 Variation in specific wear amount as a function of friction cycles in the Ti ion-implanted and non-implanted specimens

3. 5 AFM Tribosystem의 상 및 마모 흔의 변화

AFM Tribosystem에서 256번 반복 굽기 실험 후 AFM의 마모 흔에 대한 상을 이온주입 및 미주입 시편에



(a) Ti ion-implanted specimen



(b) Non-implanted specimen

Fig.10 AFM images of wear grooves for (a)Ti ion-implanted specimen and (b) Non-implanted specimen.



(a) Ti ion-implanted specimen



(b) Non-implanted specimen

Fig.11 AFM reverse images of wear grooves for (a)Ti ion-implanted specimen and (b) Non-implanted specimen.

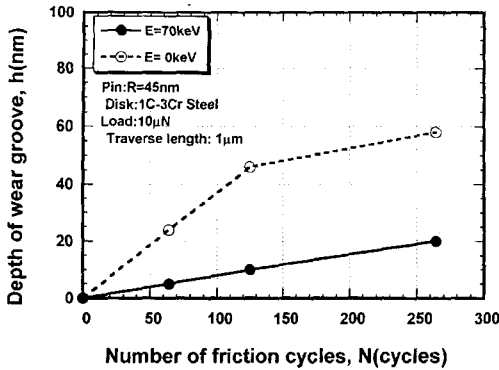


Fig. 12 Variation in the depth of wear groove with friction cycles

대해 각각 Fig.10(a)(b)에 나타내었다. 또한 굽기시험의 깊이를 알기 위해 Fig.11(a)(b)에 이온주입 및 미주입 시편의 AFM 역상을 각각 나타내었다. 이 결과 이온 주입 시편이 이온 미주입의 시편보다 마모 흔의 깊이가 작은 것을 나타내고 있다. Fig.12에 마찰 반복수에 따른 마모 흔의 깊이 변화를 보여 주고 있으며 이온주입 및 미주입 시편의 마모흔 깊이는 256회에서 각각 최대 20nm 및 58nm를 나타내고 있다. 이온 주입 시편에 대한 마모 흔 깊이가 각각의 굽기 반복수에서 이온 미주입 시편에 비해 1/2 - 1/3으로 감소하고 있다.

4. 고찰

Fig.6(a)에서 이온주입 시편의 마모형태는 어느 일정한 마찰 반복수에서 Shear-tongue (Type I)에서 Shear-tongue(Type II)으로 천이 되고 있다. 하중이 큰 경우에는 천이 되는 마찰 반복수가 작은 값으로 나타나고 있다. 또한 미주입 시편의 경우는 Shear-tongue(Type I)의 마모형태는 나타나지 않고 있다. 이런 결과를 기초로 마찰 반복수에 대한 마모형태 천이는 마모 흔 깊이에 따른 재료의 특성이 변화되기 때문이라고 할 수 있다. 따라서 마모 흔 깊이에 따라 마모형태가 달라진다고 말할 수 있다. Fig.13은 마모 흔 깊이를 종축, 마찰반복수를 횡축으로 하여 마모형태의 변화를 나타내었다. 이 그림에서 백점은 Shear-tongue(Type II)의 마모형태를 흑점은 Shear-tongue(Type I)이나 Ploughing을 나타내고 있다. 또한 Shear-tongue(Type I)에서 Shear-tongue(Type II)로 마모형태 천이는 120nm와 240nm의 범위의 마모 흔 깊이에서 발생하고 있다. Fig.1에 나타난 바와 같이 Ti 이온주입 깊이가 곡선에서 Ti 이온이 50% 이상의 깊게 들어간 깊이는 대략 100nm 이내에 집중되어 있다. 그리고 Ti 이온농도는 100nm 깊이를 넘게 되면 감소하고 있으며 240nm에서는 0을 나타내어 마모형태가 천이 하는 깊이는 Ti 이온의 존재여부에 따르는 것으로 판단된다. 따라서 Shear-tongue(Type I)에서

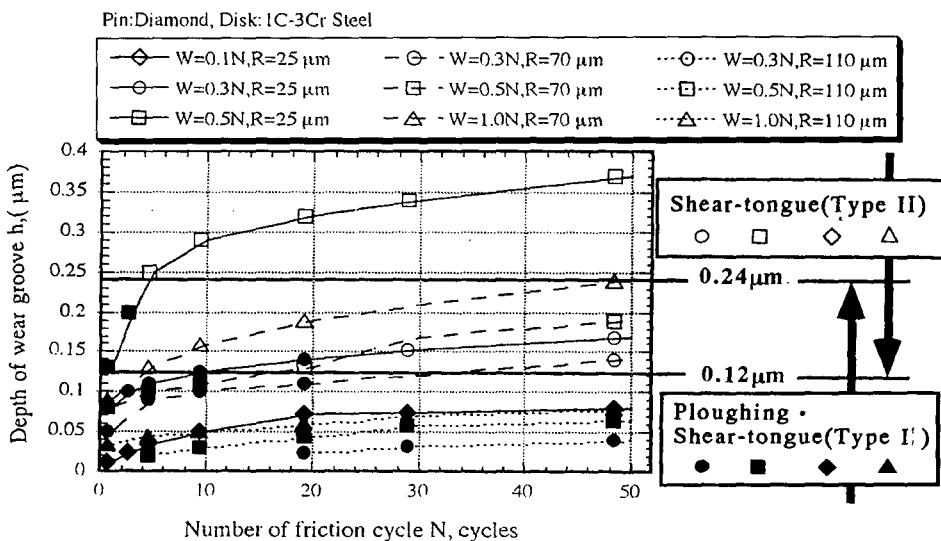


Fig.13 The effect of the depth of ion-implantation on wear mode

Shear-tongue(Type II)로 마모형태가 천이 되는 것은 마모 흔 깊이가 이온주입 깊이보다 큰 경우에 발생한다.

AFM Tribosystem을 사용하여 측정한 Fig.12에 나타난 이온주입 및 미주입 시편의 마모흔 깊이는 256회에서 각각 최대 20nm 및 58nm이며 Ti이온 농도가 50%이상인 100nm 이내에서는 Ti이온 주입의 경우 미주입에 비해 마모흔의 깊이가 1/2-1/3으로 감소함을 나타내고 있다. 즉, 이온주입층에 의해 내마모성이 발생하고 있는 것이 판단되어진다.

Shear-tongue의 마모형태는 Fig.5에 나타난 바와 같이 마모가 발생하지 않는 Ploughing이 일어난 뒤 발생하기 때문에 마모입자 발생 측면에서 매우 중요하다. Shear-tongue(or Slip-tongue)의 마모형태는 Kato등^(11, 12)에 의해 처음으로 정의되었다. 그들은 Shear-tongue의 마모입자가 핀의 진행 방향 쪽의 핀 앞부분과 모재와의 접촉부에서 마찰 반복수 증가에 따라 어느 길이로 모재가 늘어나 늘어난 부분이 모재와 분리되어 발생하는 것을 관찰하여 Shear-tongue의 발생기구를 제안하였다. 핀 앞부분에서 핀과 디스크 사이에서 국부적 마소응축으로 Shear-tongue이 발생한다고 가정하여 한 개의 Shear-tongue의 마모입자를 발생하는데 필요한 관계식을 나타내면 다음과 같다.

$$W \times N \propto (Hv^2 \times R) / f \quad (1)$$

여기서 W는 하중, N : 마찰반복수, R : 핀 반경, Hv : Vickers경도, f : 계면의 전단 강도이다.

(1)식에서 마찰 반복수와 하중은 반비례하고 있으며 Fig.6(a)(b)와 같이 실험결과와 잘 일치하고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 SEM 및 AFM Tribosystem을 사용하여 1C-3Cr강 및 Ti 이온주입 1C-3Cr강의 표면개질층의 마모거동을 직접 관찰하였으며, 그 결과를 이용하여 Ti 이온주입 1C-3Cr강의 표면개질층의 마모특성을 평가하였다.

Ti이온 주입층은 Ploughing, Shear-tongue(Type I), Shear-tongue(Type II)의 3종류의 마모형태가 나타났고, 이온 미주입층은 Ploughing, Shear-tongue(Type II)의 2종류의 마모형태가 나타났다. 또한 마모형태는 이온주입의 경우 Ploughing에서 Shear-

tongue(Type I)을 거쳐 Shear-tongue(Type II)로 천이하고, 미주입의 경우는 Ploughing에서 Shear-tongue(Type II)로 천이하였다. Shear-tongue(Type I)에서 Shear-tongue(Type II)로 마모형태 변화는 Ti 이온주입 깊이에 따라 변화하고 있다.

Ti 이온주입이 미주입에 비해 마모 흔 깊이는 1/2, 비마모량은 1/2 - 1/3 정도 작았다. 비마모량의 변화는 마모형태에 변화에 따른 것으로 정량적으로 비교하여 나타낼 수 있다.

AFM Tribosystem을 사용하여 실험한 결과로 부터 Ti이온 농도가 50%이상인 100nm 이내에서는 Ti이온 주입의 경우 미주입에 비해 마모흔의 깊이가 1/2-1/3으로 감소하여 더 낮게 나타났다.

6. 후 기

본 논문은 1996년도 전북대학교 국제 공동 지원 연구비에 의하여 연구되었으며, 국제공동연구에 협조해준 日本 東北大學의 K. Kato 교수와 N. Umehara 조교수에게 감사드린다.

참 고 문 헌

1. Straede, C. A., "Practical applications of ion implantation for tribological modification of surface," Wear, Vol. 130, pp. 113-122, 1989.
2. Singer, I. L., "Tribomechanical properties of ion implanted metals," Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 27, PP. 585-595, 1992.
3. Hulber, G. K. and Smidt, F. A., "Application of ion implantation to wear protection of materials," Nuclear Instruments and Physics Research, B 7/8, pp. 151-157, 1985.
4. Pope, L. E., Knapp, J. A., and Follstaedt, D. M., "In situ friction and wear measurement of ion-implanted 304 stainless steel in nitrogen and oxygen ambients," Surface and Coating Technology, Vol. 36, pp. 361-374, 1988.
5. Sasaki, J., Hayashi, K., Sugiyama, K.,

- Ichiko, O., and Hashiguchi, Y., "Implantation of Titanium, Chromium, Yttrium, Molybdenum, Silver, Hafnium, Tantalum, Tungsten and Platinum ions generated by a metal vapor vacuum ion source into 440C stainless steel," *Surface and Coating Technology*, Vol. 51, pp. 166-175, 1992.
6. Krishnamurthy, R., "Wear characteristics of ion implanted cutting tools," *IMEchE*, Vol. C174/87, pp. 665-669, 1987.
 7. Hokkirigawa, K. and Kato, K., "An experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting and wedge formation during abrasive wear," *Tribology International*, Vol. 21, pp.51-57, 1988.
 8. Kisunai, H., Kato, K., Hokkirigawa, K., and Inoue, H., "The transitions between microscopic wear modes during repeated sliding friction observed by a scanning electron microscope tribosystem," *Wear*, Vol. 135, pp. 237-249, 1990.
 9. Hokkirigawa, K., Kato, K., and Araya, S., "Wear mode transition of silicon carbide in repeated sliding friction," *Proc. Japan Inter. Tribology Conference (Nagoya)*, pp. 1425-1431, 1990.
 10. Kato, K., Hokkirigawa, K., Tsutsumi, M., and Diao, D. F., "Observation of wear modes of ceramic coating with SEM-VTR Tribosystem," *Proc. Annual Conf. of JSLE (Tokyo)*, pp. 565-568, 1991.
 11. Kayaba, T. and Kato, K., "The adhesive transfer of the slip-tongue and the wedge," *ASLE Trans.*, Vol. 24 No. 2, pp. 164-174, 1981.
 12. Mizumoto, M. and Kato, K., "The mechanism of the generation of wear particle in abrasive wear," *Proc. Annual Conf. of JSLE (Morioka)*, pp. 545-548, 1992.