

이온질화 처리강의 마모현상 분석에 관한 연구

조 규 식

공군사관학교 기계공학과

Study On the Analysis of Wear Phenomena of Ion-Nitrided Steel

Kyu-Sik Cho

Korea Air Force Academy

Abstract – This paper deals with wear characteristics of ion-nitrided metal theoretically and experimentally in order to analysis of wear phenomena. Wear tests show that compound layer of ion-nitrided metal reduces wear rate when the applied wear load is small. However, as the load becomes large, the existence of compound layer tends to increase wear rate. The residual stress at the surface of ion-nitrided metal is measured, and the internal stress distribution is calculated when the normal and tangential forces are applied to the surface of metal. Compressive residual stress is largest at the compound layer, and decreases as the depth from the surface increases. Calculation shows that the maximum stress exists at a certain depth from the surface when normal and tangential force are applied, and that the larger the wear load is the deeper the location of maximum stress becomes. In the analysis, it is found that under small applied wear load the critical depth, where voids and cracks may be created and propagated, is located at the compound layer, as the adhesive wear, where hardness is an important factor, is created the existence of compound layer reduces the amount of wear. When the load becomes large the critical depth is located below the compound layer, and delamination, which may be explained by surface deformation, crack nucleation and propagation, is created, and the existence of compound layer increases wear rate.

Key words – compound layer, diffusion layer, subsurface abrasive wear, delamination wear.

1. 서 론

본 연구에서는 플라즈마 이온질화에 있어서 여러 마모 변수를 변화시켜, 금속기지 및 이온질화 가스중의 첨가 탄소량에 따른 이온질화 처리된 금속의 마모 현상을 이론 및 실험적으로 규명하였다.

연구 결과에 의하면 이온질화 처리된 금속의 마모율은 마모하중이 비교적 작은 경우에는 합성층의 존재가 마모율을 감소시킨다. 그러나 마모하중이 큰 경우에는 오히려 합성층의 존재가 마모율을 증가시키는 것으로 나타난다.

이러한 마모 실험결과를 분석하기 위하여 질화처리된 금속에 생성된 잔류 응력을 측정하고, 금속표면에

수직력 및 수평력이 작용할 때 내부에 생성되는 응력 상태를 계산하였다.

이온질화처리된 금속에 생성된 잔류 응력은 압축응력으로서 금속표면인 합성층에서 가장크고 금속내부로 갈수록 작아진다.

수직력 및 수평력이 작용할 때 금속내부의 최대 응력은 표면으로부터 어느 깊이에 존재하였다. 잔류 압축응력 및 최대응력 특성으로부터 이온질화금속의 마모는 합성층 깊이와 마모하중에 따라 달라진다고 생각되어진다. 마모하중이 비교적 작은 경우에는 어브레시브 마모 이론으로 계산한 값과 실험치가 잘 일치하였으며 마모하중이 비교적 큰 경우에는 delamination이론에 의한 마모해석이 실험결과와 경향과 일치한다.

2. 이온질화 원리

질화처리할 시편을 진공로속에 올려놓고 10^{-3} torr 정도로 진공시킨 후 질소가스 또는 질소+수소 혼합가스를 넣고 1~10 torr의 진공이 되게한다. 1500 Volt의 용량을 갖고있는 D·C power supply로부터 피처리물에 음극을 진공로에 양극을 연결하여 전압을 상승시키면 방전 특성 곡선이 얻어진다.

이온질화에 사용되는 방전영역은 글로우 방전영역이며 이 영역에 도달하지 못한 상태에서는 온도상승이 되지않고 이 영역을 넘어서면 아크가 발생한다. 글로우 방전영역에서 진공로속에 있는 가스가 이온화되고 활성화된 프라즈마, 상태가 되어 이온들은 피처리물의 표면을 향하여 가속된다. 이온이 피처리물의 표면에 충돌함으로써 온도를 상승시킨다. 적외선 온도 측정기로 측정하여 질화처리 온도에 달하면 전류를 제어함으로써 온도를 제어하며 온도 제어장치를 작동시켜 온도를 일정하게 유지시킨다.

실험에서 이온질화 온도를 430°C - 560°C 로 하였고 처리시간은 1-16시간의 범위이다. 질소이온이 금속표면을 때리면 금속은 분리되기 때문에 금속표면은 탄소나 산소들이 없는 상태로 된다. 질소이온이 가지고 있는 이온에너지(Eion)는 이들 원자를 금속표면으로부터 분리시키는데 필요한 일(W)과 운동에너지(E_{kin}) 그리고 금속을 가열하는 열(Q)로 분리된다($E_{ion}=W+E_{kin}+Q$) [1]. 활성화된 질소이온은 시료표면에 FeN을 생성시키고, 생성된 FeN은 불안정하기 때문에 Fe_2N , Fe_3N 및 Fe_4N 으로 바뀌어지면서 질소를 발생시킨다. 발생한 질소의 일부는 금속내부로 확산되고 일부는 표면으로 되돌아간다. 또 $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$ $\text{Fe}_4\text{N} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$ $\text{Fe}_3\text{N} \rightarrow \text{Fe}_{2,3}\text{N}$ 의 반응식에 의하여 합성층 형성에 기여한다 [2]. 이때 가스 압력이 높으면 이온의 수가 많게되어 주어진 에너지 중 각 이온이 갖는 에너지가 적게되어 금속내부로 침투하지 못하고 진공중으로 튀어나오는 이온이 많아지게 된다. 따라서 전류가 많이 흐르고 시편의 온도가 높아진다. 가스압력이 낮으면 이온의 수가 적게 되어 주어진 에너지중 각 이온이 갖는 에너지가 많게 되며 따라서 이온이 금속내부로 침투하는 확률이 크고 진공중으로 튀어나오는 이온수가 적기 때문에 시편의 온도가 떨어지게 된다. 이와같은 현상때문에 처리온도를 동일하게 유지하기 위하여는 가스압력이 낮을 때가 가스압력이 높을 때보다 더 높은 전압

을 공급하여야하며, 결과적으로 같은 처리 조건에서는 합성층의 두께가 증가되는 경향을 가지나, 가스압력이 너무 낮으면 이온수가 적어 오히려 합성층의 두께가 감소한다. 이온질화에 있어 영향을 주는 요소는 처리온도, 처리시간, 처리압력, 가스 조성으로서 이들 변수를 변화시킴으로써 합성층 및 확산층 깊이를 조절하여 요구하는 기계적 성질을 얻을 수 있다.

이온질화한 금속표면은 다른 질화법에 의하여 질화처리된 금속표면과 같으며 최외곽 표면인 합성층은 Alcoholic nitric acid etch에 의하여 영향을 받지않고 희게 나타나므로 White layer라고 불리운다. 합성층 아래의 확산층은 혼합조직으로 되어있다. 이온질화법은 다른 질화법보다 합성층 및 확산층을 쉽게 조절할 수 있어 요구되는 기계적 성질을 얻도록 질화처리를 조절할 수 있다. 연성, 마모 및 피로등은 합성층의 homogeneity와 합성층 깊이에 관계되고 생성된 질화층이 단일상의 합성층이되면 기계적 성질이 많이 개선되고 Heterogeneous조직은 취성을 갖게되며 전승은 합성층의 두께가 증가하면 감소하는 경향을 갖는다. 따라서 필요로하는 기계적 성질에 부합되도록 합성층을 조절하여야 한다. 합성층의 조직은 혼합가스속에 있는 탄소량에 따라서 달라지며 탄소량이 많아지면 $\gamma+\text{Fe}_3\text{C}$ 조직이 되어 합성층 두께가 감소하여 기계적 성질을 저하시킨다. 질화처리한 금속의 경도는 피처리물의 성분, 합성층 깊이 및 입자(grain)의 크기에 영향을 받는다. 동일한 피처리물에 있어서 충분한 합성층 깊이가 생성되었을 때 입자(grain)의 크기를 작게 하는 저온에서 경도가 크게된다. 한편, 이온질화는 비교적 저온에서 처리가 가능하므로 질화후의 재료의 변형이 적은 장점이 있다.

3. 시편준비 및 장치

온도, 시간 및 압력의 영향과 탄소량의 효과를 규명하기 위한 시편은 SCM 22, SCM 3 및 SCM 5 이고 마모실험을 위한 시편은 SCM 3로 준비하였다. 제작된 표준 시편은 질화처리하기전 1500 mesh로 표면을 최종 연마 한 후 비누물로 깨끗이 닦고 알콜로 세척하여 건조시켰다.

실험 시편의 조성은 Table 1과 같으며, 사용한 이온질화 실험 장치는 공사에 있는 Nippon Denshi Kogyo Co.의 JIN-ISS Type이다.

Table 1. The chemical composition of specimens

composition specimens	C(%)	Si(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)	Ni(%)	Cr(%)	Mo(%)
SCM 22	0.18-0.23	0.15-0.35	0.60-0.85	0.03	0.03	0.25	0.90-1.20	0.15-0.30
SCM 3	0.33-0.38	0.15-0.35	0.60-0.85	0.03	0.03	0.25	0.90-1.20	0.15-0.30
SCM 5	0.43-0.48	0.15-0.35	0.60-0.85	0.30	0.03	0.25	0.90-1.20	0.15-0.30

4. 마모특성

4-1. 마모 실험결과

마모거리 200 m, 마모속도 1.37 m/sec로 하여 마모하중을 2.1 kg에서 18.9 kg까지 5단계로 변화시켰을 때 마모량과 마모하중 곡선을 Fig. 1에 나타내었고, 마모량과 합성층 깊이의 관계를 Fig. 2에 도시하였다.

마모하중을 변화시켜 마모량과 합성층 깊이의 관계를 도시한 Fig. 2에서 마모하중 6.3 kg이하의 조건에서는 마모량이 합성층 깊이의 증가에 따라 감소하여 일정한 값에 접근하는 것을 알 수 있으며 마모하중이 12.6 kg 이상에서는 합성층 깊이의 어느 범위까지는 마모량이 감소하나 그 이상에서는 마모량이 증가한다. 이와같이 마모하중에 따라서 마모특성이 달라지는 것은 질화처리 금속의 합성층 깊이와 마모하중에 의하여 결정되는 Void생성 및 최대응력이 발생하는 임계 깊이에 관계된다고 생각된다.

4-2. 마모실험 결과 분석

마찰에 대한 mechanism은 마찰면이 마모하중이 작용한 상태에서 미끄럼 운동을 계속하면 표면은 매끈하게 되며, subsurface는 dislocation의 생성 및 운동에 의하여 소성 변형을 일으키게 되고, 따라서 금속 내부에 Void생성을 촉진하고 압축응력은 Void생성을 억제시킨다.

따라서 마찰표면의 파괴는 Void의 생성 및 성장을 촉진시키는 전단응력과 Void의 생성 및 성장을 억제하는 압축응력의 영향을 받게 된다. 이때 전단응력은 마찰계수와 마모하중에 따라 달라지며 압축응력은 마모하중으로 인한 압축응력 및 질화로 인하여 생성되는 금속 내부의 잔유응력에 의하여 영향을 받게 된다.

본 연구에서는 마모실험 결과를 분석하기 위하여 이온질화 금속의 잔유응력을 측정하였고 마찰계수가 일정할때 마모하중으로 인한 금속 내부의 전단응력 상태를 계산했다.

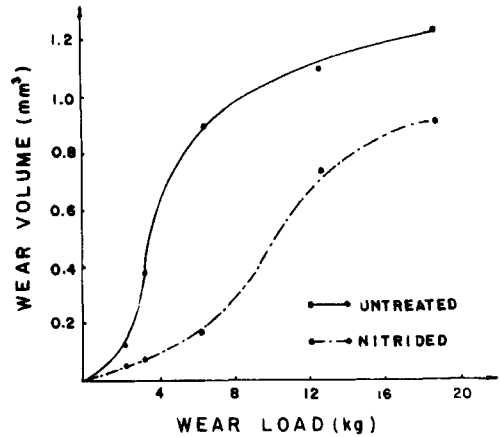


Fig. 1. Relation between wear volume and wear load for SCM 3 ion-nitrided under condition of 500°C, 5torr and 3 hrs (wear velocity of 1.37 m/sec, wear distance of 200 m).

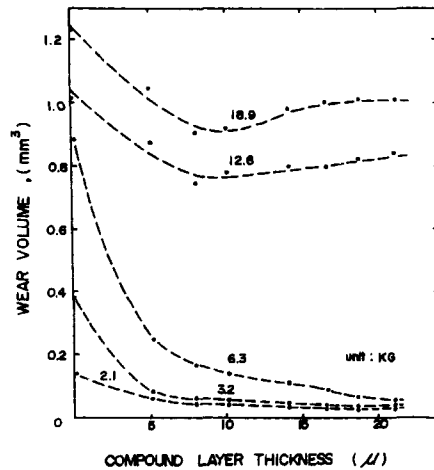


Fig. 2. Relation between wear volume and compound layer thickness for SCM3 ion-nitrided under condition of 500°C and 5 torr (wear velocity of 1.37 m/sec, wear distance of 200 m).

4-2-1. 이온질화 금속의 잔유응력

질화처리함으로써 금속 내부에 생성되는 잔류 압축

응력은 Almen [5]에 의하면 합성층에서 160,000 psi로서 최대가 되고 금속내부로 감에 따라 감소하며, Mailander [6]는 질화처리 금속의 최외표면에서 71,000 psi로서 가장 크다고 하였으며 Genter [7]는 최외표면에서 27,000 psi가 된다고 보고하였다.

본 연구에서는 질화처리 금속의 잔류응력을 측정하기 위하여 100×10×2 mm의 SCM 3의 시편으로 이온질화한 결과 약 75,000 psi정도의 잔류압축응력이 합성층에서 생성되었고, 이온질화 시간에 따른 금속 표면의 잔류 압축응력의 크기를 Fig. 3에 표시하였다.

Fig. 4는 잔류응력 측정을 위한 실험 시편을 처리시간을 달리하여 질화처리한 후 찍은 사진이다. Fig. 5는 실험결과 얻은 최대 잔류 압축응력 75,000 psi를 기준으로 하여 경도 측정방법[5]에 의하여 구한 잔류응력 분포를 질화처리 금속의 표면으로부터의 깊이에 따라 도시한 곡선이다. 이곡선은 Almen [5] 및 Jones

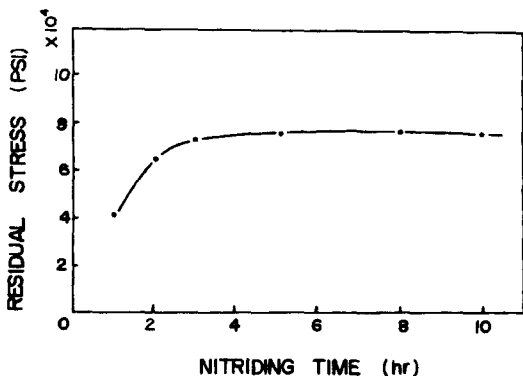


Fig. 3. Relation between compressive residual stress and Ion-nitriding time for SCM3 ion-nitrided under condition of 500°C and 5 torr.

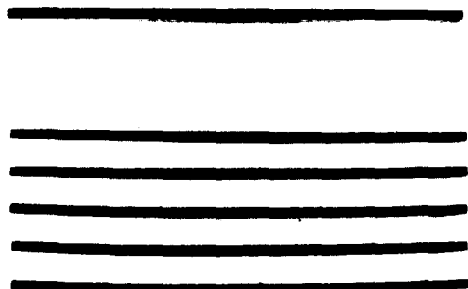


Fig. 4. Photographs of the SCM3 specimens ion-nitrided under condition of 500°C and 5 torr for measuring the compressive residual stress (from the above nitrided one side for 10,8,5,3,1 hrs and nitrided both sides for 3 hrs).

& Martin [8]의 표면에서부터의 깊이에 따른 잔류 압축응력 곡선과 잘 일치하고 있다

Fig. 5는 질화깊이에 따른 경도를 표시한 Fig. 6과 비슷한 경향을 갖고 있음을 알 수 있다.

Void생성을 억제시키는 잔류 압축응력은 표면에서 가장 크고 금속 내부로 갈수록 감소한다. 다음절에서 이와같은 잔류 압축응력 분포를 가지고 있는 이온질화 처리강에 마모하중이 작용하고 있을 때 최대응력이 일어나는 위치를 계산한다.

4-2-2. 마모하중으로 인한 금속 내부의 응력

Jahanmir & N. P. Suh [9]가 계산한 방법과 같이 수직력 및 수평력 때문에 생성되는 응력상태를 해석한

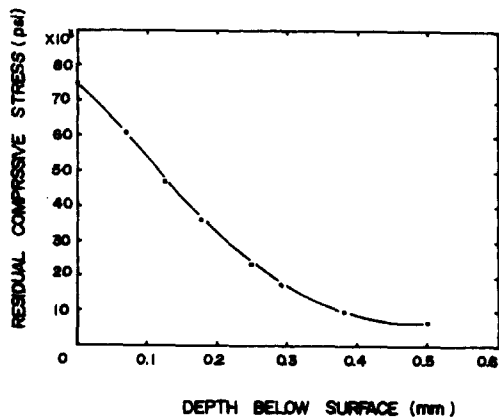


Fig. 5. Compressive residual stress distribution curve as a function of depth below surface for SCM3 ion-nitrided under condition of 500°C, 5 torr and 3 hrs.

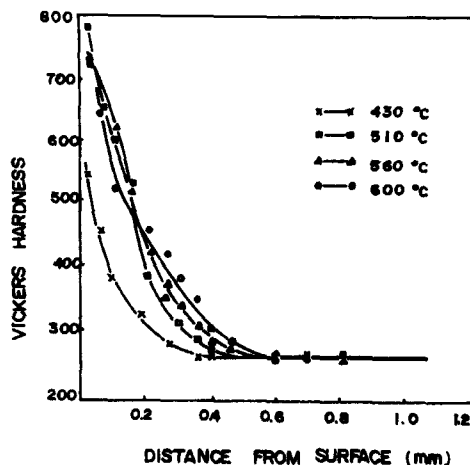


Fig. 6. Hardness distribution curve as a function of depth below surface for SCM3 ion-nitrided under condition of 5 torr and 3 hrs.

Smith & Liu [10] 이론은 Gill [11]의 컴퓨터 계산방법에 의해서 계산하였고, 계산결과로부터 얻은 깊이에 따른 소성 전단응력을 Fig.7에 도시하였다.

이온질화 최외곽 표면에 생성되는 잔류 압축응력 (σ_c)을 실험에서 측정된 75,000 psi로 하였으며 이값은 질화처리 하지않은 시험편의 전단항복강도 $K=\sigma_y/\sqrt{3}=66,000$ psi와 같다고 가정하여, 편의상 $K=\sigma_c=1$ 로 놓고 계산하였다. 계산에 사용한 깊이에 따른 잔류 압축응력 곡선은 Fig. 5로부터 최대 잔류압축응력을 $\sigma_c=1$ 로 놓았을 때 응력(Y)는 깊이(x)의 함수인 $Y=-2.460x^3+6.5887x^2-4.7779x+1.1359$ 로 표시된다. 표면으로부터 깊이에 따른 소성전단 응력을 나타낸 Fig. 7에서 볼 수 있는 바와같이 소성전단 응력이 최대치가 되는 영역은 표면에 존재하지 않고 표면으로부터 어느 깊이에

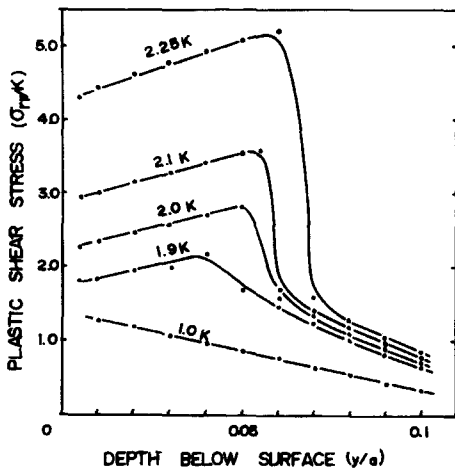


Fig. 7. Plastic shear stress distribution curve as a function of depth below surface.

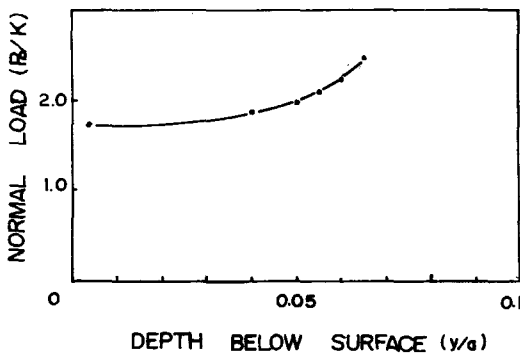


Fig. 8. Relation between depth at which maximum stress exist and wear load.

존재한다는 사실을 알 수 있으며 이러한 결과는 표면 경화되지 않은 금속에 대하여 연구한 Savitskii [12] 및 Jahanmir & N.P.Suh [9]의 결과와 같은 경향을 갖는다.

Fig. 8은 마모하중에 따른 최대응력이 발생하는 표면으로부터의 깊이를 Fig. 7에서 구하여 표시한 것으로서 마모하중의 증가에 따라 최대응력이 발생하는 깊이가 증가함을 보여주고 있다. 이와같은 사실은 소성이 발생하는 위치가 마모하중의 증가에 따라 깊어진다는 Jahanmir & N.P.Suh [9]의 주장과 일치한다.

컴퓨터 계산에 사용한 flow chart는 Table 2와 같고 계산에 있어 정상상태에 도달하는 반복 수는 Jahanmir & N.P.Suh [9]의 논문을 참고로 하여 15로 하였다.

4-2-3. 이온질화 금속의 마모현상에 대한 결론

앞에서 말한바와 같이 이온질화처리 금속의 잔류 압축응력은 금속의 최외곽 표면에 생성되는 합성층에

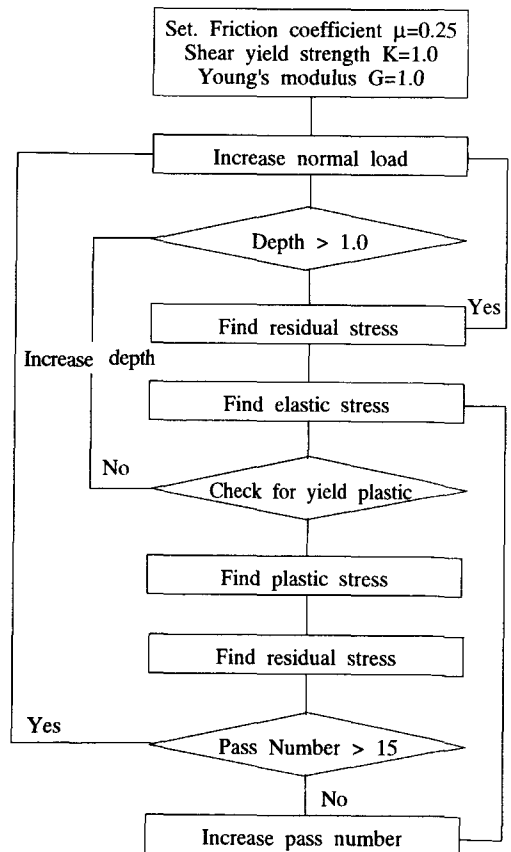


Table 2. A flow chart for calculation of stress and strain under a sliding contact

서 가장 크고, 또 최대전단 응력이 생성되는 영역은 금속표면에 존재하지 않고 금속 내부에 존재한다. 그러므로 합성층에서는 Void의 생성이나 성장이 되기 어렵고 가해진 전단응력이 금속의 결합력과 잔류 압축응력과의 합보다 크게되는 합성층과 확산층의 경계층 또는 확산층에서 생성되기 쉽고 마찰 표면으로부터 먼 깊이에서는 가해진 응력이 빨리 소멸되므로 (Fig. 7 참조) Void가 생성되지 않는다. 따라서 질화처리된 금속의 마모는 합성층 깊이와 마모하중에 따라 달라진다. 마모하중이 작을 경우에는 임계 깊이가 합성층 내부에 존재하게 되어 경도가 중요한 인자인 어브레시브 마모가 일어나며, 따라서 합성층의 존재가 마모량을 감소시킨다. 마모하중이 커서 임계깊이가 합성층 두께보다 크게 되면 합성층과 확산층의 경계층 또는 확산층내에서 Void생성 및 합성→Crack전파→과괴 과정에 의해서 설명되는 delamination [4]에 의해서 마모가 일어나는 것으로 기대할 수 있다.

Delamination에 의하여 합성층이 일단 떨어져 나가면 이온질화 처리한 금속은 금속내부로 갈수록 질소의 침투량이 적고 혼합조작이기 때문에 machining에 의한 어브레시브 마모가 일어난다.

마모하중이 클 경우에 있어서의 합성층 깊이에 따른 마모량 증가는 합성층 두께로 인한 것이며 합성층이 일단 떨어져 나간 후에는 마모량의 변화가 없다. 왜냐하면 마모가 일어나는 작은 영역에서는 확산층이 같기 때문이다. Fig. 9는 합성층 깊이와 마모하중에 따른 마모표면을 찍은 사진이고, 사진으로부터 앞에서 설명한 이온질화 금속의 마모현상을 알 수 있다.

마모하중이 작을 경우 어브레시브 마모가 일어난다는 이론적 설명을 위하여 다음과 같은 모델(Fig. 10)를 만들어 식을 유도하였다.

마모하중P는 마모표면의 경도R와 실제접촉 면적S의 곱으로 표시할 수 있다.

$$P=R \times S \quad (1)$$

실제접촉 면적S는 접촉점의 면적과 접촉점의 수n을 곱한 것이므로

$$S=n \times 2r \sin^{-1}(b/2r)$$

앞 식으로부터 어느 순간의 전체 접촉점의 수 n은 다음과 같이 된다.

$$n=P/2r \sin^{-1}(b/2r)R$$

단위 길이당 접촉점의 수 N은 전체 접촉점의 수 n를 유효 미끄럼 길이 d로 나눈 것이므로

$$N=n/d=P/2rd \sin^{-1}(b/2r)R=P/d^2 \sin^{-1}(b/2r)R \quad (2)$$

접촉면에서 마모가 일어난 확률을 K'라고 하였을 때, 직경 d인 반구에 있어서 미소 거리에 대한 마모량은 다음과 같이 표시된다.

$$dv/dx = K' \cdot N \cdot d^3/12 = K'/12 \cdot P \times d/\sin^{-1}(b/2r)R$$

마모 거리를 L이라고 하여 윗 식을 마모거리에 대하여 적분하면 마모량 V는 다음과 같다.

$$V=K' \cdot d \cdot L/12\sin^{-1}(b/d) \cdot P/R \quad (3)$$

식 3)으로부터 마모량은 경도의 함으로서 $V=C \cdot P/R$ 로 놓을 수 있다.

실험값으로부터 상수 C를 구하며 표시하면 주어진 하중에 대해서 다음과 같은 식을 얻는다.

$$2.1 \text{ kg; } V=3.15 \times 10^{-1} \times 1/R,$$

$$3.2 \text{ kg; } V=4.180 \times 10^{-2} \times 1/R,$$

$$6.3 \text{ kg; } V=9.470 \times 10^{-2} \times 1/R.$$

위 식으로부터 계산한 값과 실험에서 얻은 값을 Fig. 11에 비교하여 나타내었다. 그림으로부터 실험치와 계산값이 잘 일치하고 있으며 마모하중이 작을 때 어브레시브 마모가 일어난다는 앞에서의 설명을 뒷받침하여 준다. 저하중 마모특성에 대한 해석을 부가적으로 입증하기 위하여 탄소를 첨가하지 않을 때와 탄소를 0.5 atom%첨가 했을 때 질화처리한 마모시편을 가지고 마모속도와 마모거리를 변화시켜 마모실험을 하였다[3].

마모거리 200 m 마모하중 3.2 kg으로하여 마모속도를 0.304 m/sec에서 3.53 m/sec까지 6단계 변화시켰을 때 마모량과 마모속도 관계를 Fig. 12에 표시했다. 마모속도 2.38 m/sec 마모하중 3.2 kg으로하여 마찰거리를 66.6 m에 600 m까지 5단계 변화하였을 경우 마모량과 마모거리를 Fig. 13에 나타냈다.

마모량과 마모속도를 나타낸 Fig. 12와 마모량과 마모거리 관계를 표시한 Fig. 13에서 탄소를 0.5 atom% 첨가하였을 경우가 탄소를 첨가하지 않을 때보다 마모량이 적게 나타난다. 탄소를 첨가하면 마모량이 적은 것은 참고문헌에 나타난 바와같이 탄소를 0.5

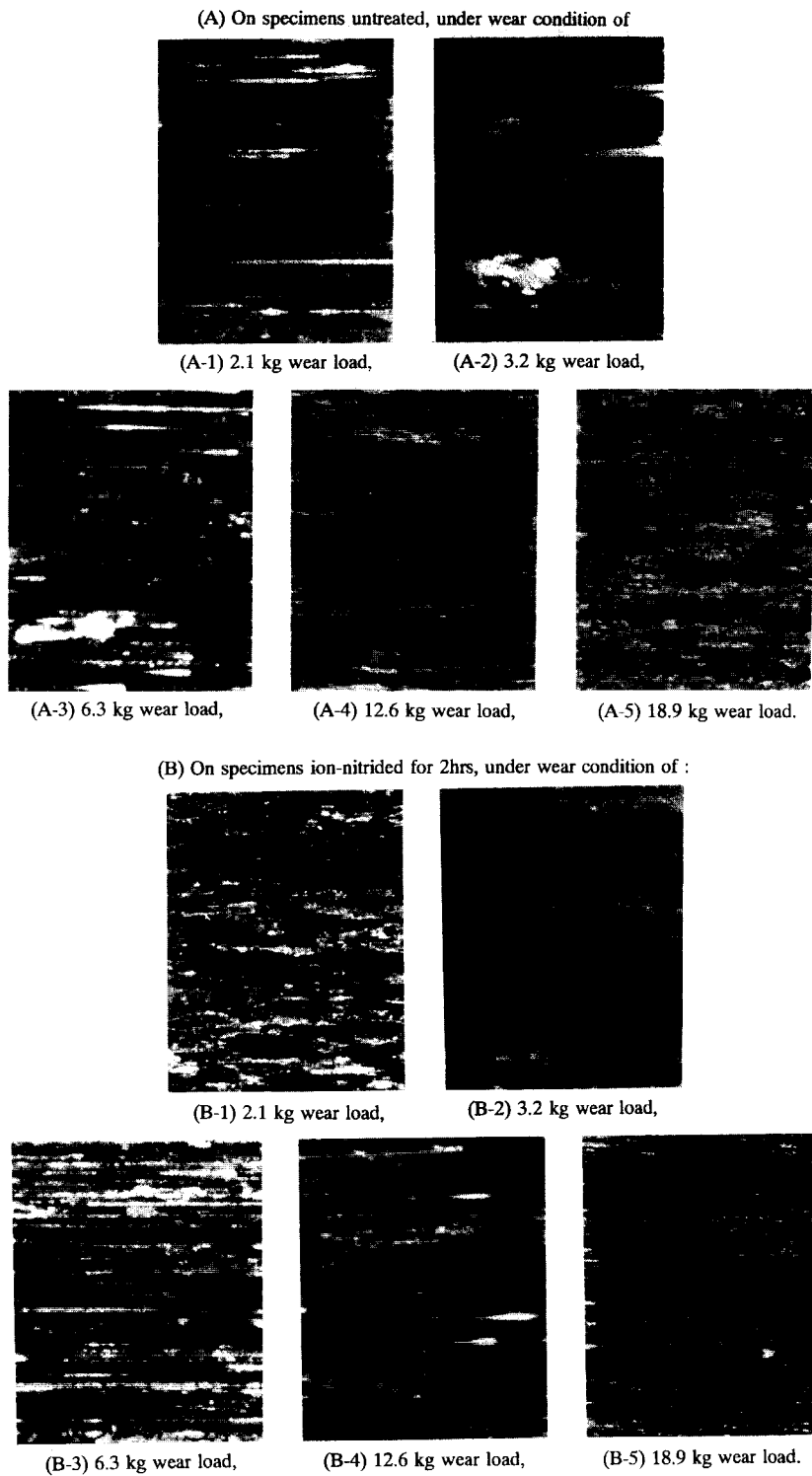


Fig. 9. Photographs of worn surface for SCM3 ion-nitrided at 5 torr and 500°C (wear velocity of 1.37 m/sec, wear distance of 200 m).

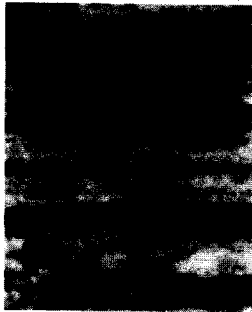
(C) On specimens ion-nitrided for 5hrs, under wear condition of :



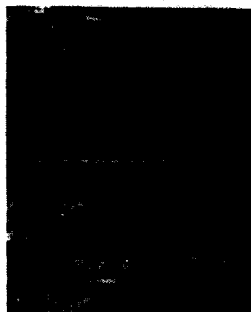
(C-1) 2.1 kg wear load,



(C-2) 3.2 kg wear load,



(C-3) 6.3 kg wear load,

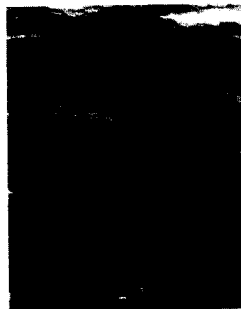


(C-4) 12.6 kg wear load,

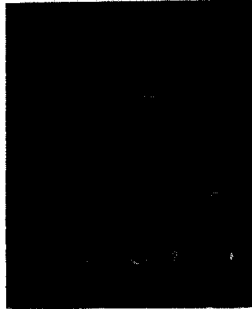


(C-5) 18.9 kg wear load.

(D) On specimens ion-nitrided for 9hrs, under wear condition of :



(D-1) 2.1 kg wear load



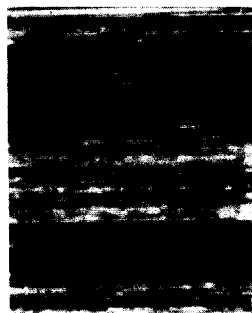
(D-2) 3.2 kg wear load,



(D-3) 6.3 kg wear load,



(D-4) 12.6 kg wear load,



(D-5) 18.9 kg wear load.

Fig. 9. Continued

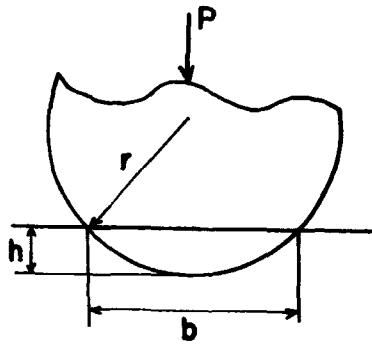


Fig. 10. A model of contact Particle.

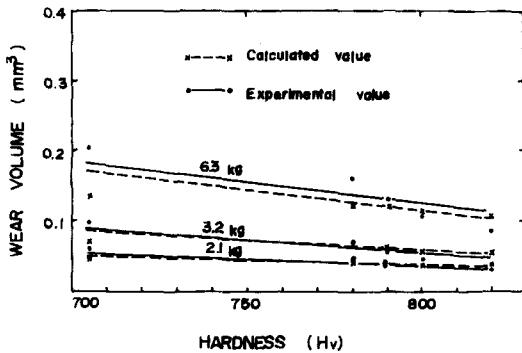


Fig. 11. Relation between wear volume and hardness for calculated value and experimental value.

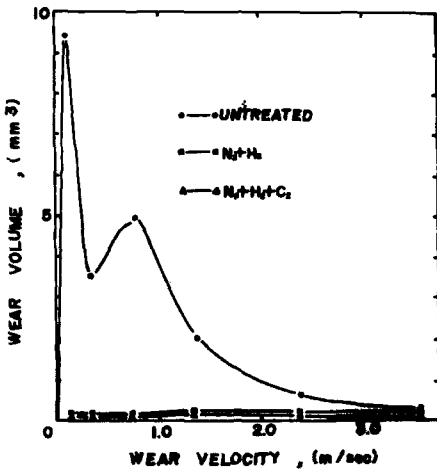


Fig. 12. Variation of wear volume with wear velocity for untreated and ion-nitrided with and without added carbon 0.5atom% under condition of wear distance 200 m and wear load 3.2 kg (500°C, 5 torr, 3 hrs, SCM3).

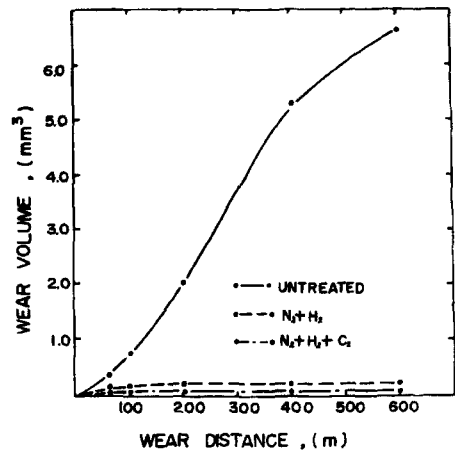


Fig. 13. Variation of wear volume with wear distance for untreated and ion-nitrided with and without added carbon 0.5 atom% under condition of wear velocity 2.38 m/sec and wear load 3.2 kg (500°C, 5 torr, 3 hrs, SCM3).

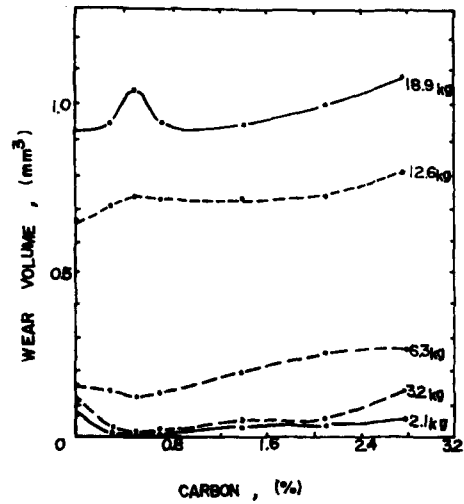


Fig. 14. Variation of wear volume with added carbon atom% for wear load under condition of wear velocity 1.65 m/sec and wear distance 200 m (500°C, 5 torr, 3hrs, SCM3).

atom% 첨가하였을 때가 경도가 더 크기 때문이다[2].

Fig. 14는 마모량을 첨가 탄소량 atom%에 따라 표시

한 것으로서 마모하중에 따라 질화처리 금속의 마모 특성이 달라진다는 앞서의 설명을 뒷받침하여 준다.

마모하중의 증가에 따라 최대응력이 생성되는 금속 표면으로부터의 위치를 표시한 Fig. 8을 Fig. 15와 같이 나타낼 수 있다.

마모하중이 클 경우의 마모가 delamination에 의하여 일어난다고 할때 마모량은 질화처리된 금속내부에

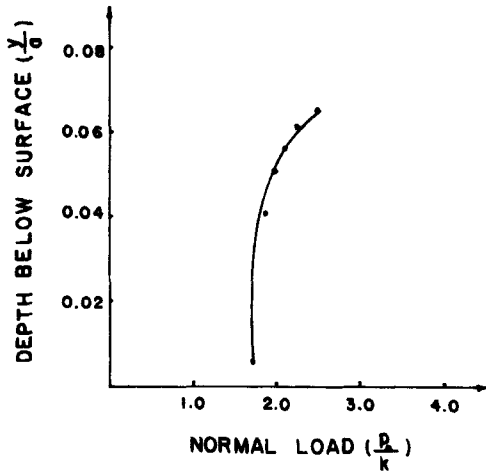


Fig. 15. Relation between wear load and depth at which maximum stress exist.

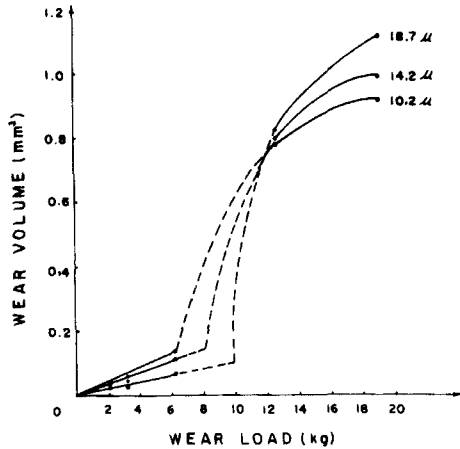


Fig. 16. Relation between wear volume and wear load for compound Layer thickness Variation.

생성되는 최대응력의 위치에 따라 결정되므로 마모량과 마모하중 관계는 Fig. 15와 비슷한 경향을 갖는 것을 기대할 수 있다.

앞에서 설명한 바와같이 질화처리한 금속의 마모는 마모하중이 작을때는 어브레시브 마모가 일어나 마모량과 마모하중은 직선관계로 표시되고 마모하중이 클 경우에는 delamination에 의하여 마모가 일어나며, 합성층의 깊이와 최대응력이 생성되는 위치에 따라 마모량이 결정된다.

따라서 이온질화 처리한 금속의 마모는 Fig. 16과 같이 표시될 수 있다.

5. 결 론

이온질화처리 금속의 잔유 압축응력은 금속의 최외곽 표면에 생성되는 합성층에서 가장크고, 또 최대 전단응력이 생성되는 영역은 금속표면에 존재하지 않고 금속 내부에 존재한다. 따라서 질화처리된 금속의 마모는 합성층 깊이와 마모하중에 따라 달라진다. 마모하중이 작을 경우에는 최대응력이 생성되는 임계 깊이가 합성층 내부에 존재하게 되어 경도가 중요한 인자인 어브레시브마모가 일어나며 합성층 존재가 마모량을 감소시킨다. 반면에 마모하중이 커서 임계 깊이가 합성층 두께보다 크면 합성층과 확산층의 경계층 또는 확산층내에서 Void생성 및 합성→Crack전파→파괴 과정에 의하여 설명되는 Delamination에 의해서 마모가 일어나 합성층 존재가 마모량을 증가시킨다. 따라서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 질화처리된 금속의 마모량은 질화처리되지 않은 금속보다는 작으며, 마모 하중과 합성층 두께에 따라 달라진다.
2. 마모하중이 작을 경우 임계 깊이가 합성층 내부에 존재하게 되어 경도가 중요한 인자인 어브레시브 마모가 일어나며 합성층 존재가 마모량을 감소시킨다.
3. 마모하중이 클 경우 임계 깊이가 합성층 두께보다 크게되어 delamination에 의한 마모가 일어나며 합성층 존재가 마모량을 증가시킨다.

참 고 문 헌

1. B. H. Yu, K. S. Cho, "The Formation Rate and Activation Energy of Diffusion Layer and Compound Layer in Ion-Nitriding," KSME, Vol.8, No.5, pp.476-480, 1984.
2. K. S. Cho & C. O. Lee, "The Effects of Carbon on Ion-Nitriding," Transactions of the ASME, JEMT, Vol.102, 1980, pp.229-233, 1980.
3. H. S. Kim, K. S. Cho, "The Added Carbon Content Effect on the Hardness and Wear Characteristics in Ion-Nitriding," KSME, Vol.7, No.5, pp.19-27, 1983.
4. N. P. Suh, "The Delamination Theory of Wear," Wear, 22, pp.111-124, 1973.
5. J. O. Almen, "Peened Surfaces Improve Endurance of Machined," Metal Process, 43, pp.209-215, 1943.
6. R. Mailander, "Residual Stresses and the Alternating

- Bending Strength of Nitrided Steel Specimens," Archiv fur das Eisenhüttenwesen, 6, pp.257-261, 1956.
7. F. Genter, "Favorable Residual Stresses in Nitrided Layers," Technische Mitteilungen Krupp, 1, pp.19-21, 1957.
 8. B. K. Jones & J. W. Martin, "Residual Stress Distribution in Nitrided En41B Steel as Function of Case Depth," Metals Technology, pp.520-523, 1977.
 9. S. Jahanmir & N. P. Suh, "Mechanics of Subsurface Void Nucleation in Delamination Wear," Wear, 44, pp.17-38, 1977.
 10. J. O. Smith and C. K. Liu, "Stresses due to Tangential and Normal Loads on an Elastic Solid with Application to some Contact Problems," J. Appl. Mech., 20, pp.157-166, 1953.
 11. S. Gill, "A Process for the Step-by-step Integration of Differential Equations in an Automatic Digital Computing Machine," Proc. Comb. Phil. Soc., 47, pp.90-108, 1951.
 12. K. B. Savitskii, "Cited in the Delamination Theory of Wear," the Advanced Research Project Agency, DoD Contract No. 0014-67-A-0204-0080 NR 229-011.