

<論 文>

이온질화 처리강의 미끄럼 마멸 특성

유 봉 환* · 성 환 태** · 조 규 식***

(1983년 9월 5일 접수)

The Sliding Wear Characteristics of Ion-Nitrided Steel

Bong Hwan Ryu, Hwan Tae Sung and Kyu Sik Cho

Abstract

An attempt is made to predict the wear behavior of ion-nitrided metal, when wear arises from asperity interactions. The analysis demonstrates that wear mechanisms are not inconsistent with observed behavior, indicates and approaches to a better appreciation of the effects of such factors as nitrided layer formation and surface topographical features.

It was found on ion-nitriding that penetration rate and case development are faster and wear properties of the final product are more improved than conventional gas and salt-bath methods of nitriding.

기 호 설 명

- A* : 접촉면적
- B* : 응력/변형 비례상수
- C* : 마멸상수
- D* : 변형상수
- E* : 탄성계수
- E'* : 일반화된 탄성계수
- H* : 경도
- K* : 하중/면적비례상수
- L* : 마멸길이
- N* : 돌기의 수
- N_s* : 과단되기까지의 마멸 반복회수
- P* : 마멸하중
- T* : 접촉력의 수평방향 분력
- V* : 마멸체적
- Y* : 인장항복 응력
- a* : 접촉부분의 반경

- b* : 돌기 사이의 초기간격
- c* : 응력상수
- d* : 표면으로 부터의 이탈된 부분까지의 거리
- f* : 표면전단응력상수
- g* : 돌기의 분포한계
- h* : 표준화된 이탈된 부분까지의 거리($\frac{d}{\sigma}$)
- m* : 피로파괴상수
- n* : 가공경화지수
- s* : 표준화된 돌기의 높이
- t* : 마멸입자 크기의 지수
- v* : 마멸입자의 체적
- w* : 마멸표면의 폭
- z* : 돌기높이
- β : 돌기반경
- γ : 마멸입자크기상수
- δ : 돌기의 수직접촉거리
- ϵ : 유효변형율
- $\bar{\epsilon}_1$: 1회 미끄럼으로 인한 변형율
- η : 마멸 표면거리
- λ : 단순 접촉 상수

*정회원, 송전대학교 기계공학과

**정회원, 경희대학교 기계공학과

***정회원, 공군사관학교

- μ : 마찰계수
 ν : 프와송비
 $\bar{\sigma}$: 유효응력
 σ : 돌기분포의 평균거리
 $\phi(z)$: 돌기분포함수

1. 서 론

물체의 표면은 아무리 정밀하게 가공하여도 완전한 이상평면이 될 수 없고 표면에는 다수의 돌기(asperities)가 존재한다. 정밀 가공면에서는 $0.05 \sim 0.10 \mu\text{m}$ 그리고 일반적인 마무리면은 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 의 표면 거칠기를 갖는다. 이와같이 돌기가 존재하는 두 표면이 일정한 힘으로 접촉되면 그 돌기부에서는 Fig. 1과 같은 접촉상태가 된다.

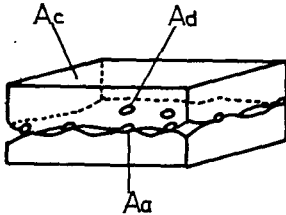


Fig. 1 The contact area of two surfaces

접촉면적 A_c 는 물체의 기하학적 형상에 의하여 결정되고 A_d 는 돌기가 하중에 의하여 탄성 및 소성변화에 의하여 생긴 것이다. A_a 는 진실접촉 면적을 표시하고, 이것은 A_d 면내에 존재하고 그 면적의 총합은 외부에서 가하여지는 하중에 비례한다. 접촉한 두 면이 서로 운동함으로써 돌기의 접촉이 계속 형성되고, 파괴되며 이와같은 접촉점에서 고열이 발생되고 산화 및 다른 화학적 변화가 일어나 접촉면 및 접촉 표면밀(subsurface)의 기계적 성질이 변화한다.

이와같은 마찰과정에 있어서의 변화는 마멸 메카니즘으로서의 이론적 규명이 매우 복잡하다. 마찰에 의한 표면 손상의 형태는 미시적인 절삭, 반복 부하에 의한 굽부이탈 및 응축에 의한 손상 등 3가지로 대별할 수 있다. 미시적인 절삭은 두 접촉면중 경도가 큰 표면의 돌기가 상대편 접촉면에 충분한 깊이로 침입하였을 때 일어난다. 반복부하에 의한 마멸은 상대면에 압인된 돌기의 운동에 의하여 Fig. 2와 같이 진행방향에 buldge를 생기게함으로써 금속표면이 탄성적으로 변형하고, 돌기가 이동한 후 원상태로 되는 과정이 되풀이 되어짐에 따라 표면층은 피로하여지고 결국 표면이 떨어져 나간다.

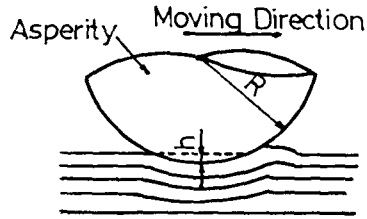


Fig. 2 Buldge deformation

응축에 의한 마멸은 마찰조건에서 진실 접촉면 A_c 부분에 발생하는 응축력에 수반되는 재료의 내부적 변화에 의하여 생긴다. 표면손상이 어떤 조건에서 일어나는가는 돌기형상에 따라 달라지며 응축의 강도, 모체금속의 강도 및 상대적침입 깊이 h/R (R : 돌기의 반경, h : 침입심도)에 의하여 결정된다. 금속의 내마멸성을 높이는 수단으로서 열표면 처리라는 여러가지 방법이 행하여져 왔으며 일반적으로 마찰접촉면 사이의 응축력을 약화시켜 마찰계수를 줄임과 동시에 모체금속 자체의 경도를 높이는 것이 내마멸 효과를 높이는 것이다

내마멸성을 증가시키기 위한 확산처리법 중의 하나인 강의 질화처리에 관한 역사는 오래 되었으며 최근에는 무공해 혹은 생산성 향상의 관점에서 몇몇 새로운 방법이 실용화 되고 있다. 이 외에 침투질화, 산질화, 산질화침탄 등 질화와 다른 표면 열처리를 조합하여 동시에 행하는 복합표면 처리법도 개발되어, 이미 그 일부는 실용화단계에 있다. 질화를 중심으로한 열처리가 널리 보급되어 온 원인은 처리온도가 $500 \sim 600^\circ\text{C}$ 의 화이트 영역에 있기 때문에 재료의 성질을 손상시키지 않으며 처리후의 변형이 적을 뿐 아니라 광범위한 종류의 강에 대하여 처리가 가능하고, 생성된 질화층에는 자기 특유의 성질을 갖고 있어 기계구조용 재료로서 요구되는 다양한 특성을 충족시킬 수 있는 표면층이 얻어지기 때문이다

Al, Cr, Mo, Ti 및 V 등의 합금원소를 함유하는 기계구조용강 혹은 다이스강이나 스테인레스강과 같은 크롬계 합금강은 질화처리를 함으로써 표면경도가 $Hv 1,000$ 또는 그 이상에 달하게 되며, 이것이 내마멸성 향상에 유효한 작용을 한다.

한편, 탄소강이나 저합금강과 같은 질화에 의하여 높은 경도가 얻어지지 못하는 경우라도 표면층에 생성된 질화물의 마찰 및 마멸단계에서 상대편 재료와의 사이에 생기는 응축 혹은 응축을 억제하는 역할로서 마멸을 경감시키는 원인이 되고 있다. 따라서 질화에 의한 경화층의 생성과 비금속적 물성을 지닌 $\epsilon\text{-Fe}_2\text{-}_3\text{N}$,

γ' -Fe₄N 등의 화합물층 생성이 내마멸성 개선의 작용을 한다. 전술된 질화법에는 가스질화법, 염욕질화법 및 타흐트라이드(Tufftride) 질화법이 있고 최근에는 이온질화법이 연구 개발되었다^(1,2,3).

본 논문에서는 이온질화 처리강의 미끄럼 마멸현상에 대하여 이론 및 실험적으로 규명하고 종래의 질화법과 비교하였다.

또한 미끄럼 마멸을 나타내는 일반식 $\frac{V}{L} = C \frac{P}{H}$ 를 이용하여 이온질화, 염욕질화 및 가스질화에서의 C 값을 구하였으며 여기에서 V 는 마멸체적, L 은 마멸길이, P 는 마멸하중, H 는 경도이며 C 는 마멸상수이다.

2. 이론 해석

변형 및 응력 관계로부터 다음과 같은 관계식을 쓸 수 있다⁽⁷⁾.

$$\bar{\sigma} = B\bar{\epsilon}^n \quad (1)$$

식 (1)로 표시되는 재료에 있어서 돌기가 구형이라고 할때 접촉압력과 응력사이에는 다음과 같은 식이 성립된다.

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{c} \frac{P}{\pi a^2} \quad (2)$$

여기서 a 는 접촉면의 반경이고 c 는 상수이다.

구형돌기의 반경을 β 라 하면 응력은 $\frac{a}{\beta}$ 의 함수로 표시할 수 있고 $\beta \gg a$ 라고 볼 수 있으므로 다음과 같은 식으로 쓸 수 있다.

$$\bar{\epsilon} = D \frac{a}{\beta} \quad (3)$$

여기서 D 는 상수이다.

식 (1), (2) 및 (3)으로부터 다음 식을 유도할 수 있다.

$$\bar{\epsilon} = \left(\frac{K}{\pi Bc} \right)^{1/n} \left(\frac{a}{\beta} \right) \quad (4)$$

단, $K = B\pi c D^n$ 이며 재료특성에 따라 정하여지는 상수이다. 구형돌기의 수직접촉 길이가 δ 일때 $a^2 = \lambda\beta\delta$ 와 같은 관계식이 성립한다. 따라서 $\bar{\epsilon}$ 는 다음과 같이 된다.

$$\bar{\epsilon} = \left(\frac{K}{\pi Bc} \right)^{1/n} \left(\frac{\lambda\delta}{\beta} \right)^{1/2} \quad (5)$$

Greenwood⁽⁸⁾에 의하면 접촉면적 $A_i = \pi a^2 = \lambda\beta\delta$ 로 표시되고 마멸하중 p 하에서 높이 z 를 갖는 돌기의 표면으로부터 이탈부분 거리를 d 라고 하면 돌기의 수직접촉거리는 $\delta = z - d$ 로 된다. 또한 돌기분포함수 $\phi(z)$ 라 할 때 높이가 z 인 돌기의 접촉확률은 $(z > d) = \int_a^\infty \phi(z) dz$ 로 되고 N 개의 돌기에 대하여는 $N \int_a^\infty \phi(z) dz$ 가 된다.

따라서 실제 접촉면적 A 및 마멸하중 P 는 다음과 같이 된다.

$$A = \lambda\pi N\beta \int_a^\infty (z-d)\phi(z) dz \quad (6)$$

$$P = NK\lambda^{1+n/2} \beta^{1+n/2} \int_a^\infty (z-d)^{1+n/2} \phi(z) dz \quad (7)$$

Fig. 3에 표시된 것과 같이 두돌기 표면이 접촉되어 있고, 수직하중을 P_1 , 수평하중을 T_1 으로 표시하면 돌기의 파괴는 수직하중 P_1 에 주로 관계되며 수평하중 T_1 에 의해서는 영향이 거의 없다고 가정할 수 있으며 수직하중 P_1 과 수평하중 T_1 과의 관계는 다음과 같이 된다⁽⁹⁾.

$$\frac{T_1}{P_1} = \mu = \frac{f}{\alpha(1-f^2)^{1/2}} \quad (8)$$

여기서 f 는 접촉전단응력에 의존되는 값으로서 0~1의 값을 갖는다.

Fig. 4에서 돌기의 최대수직 접촉거리 $\delta_{max} = 2\beta - b$ 가 되고 따라서 식 (5)는 다음과 같이 된다.

$$\bar{\epsilon}_{max} = \left(\frac{K}{\pi Bc} \right)^{1/n} \lambda^{1/2} \left(2 - \frac{b}{\beta} \right)^{1/2} \quad (9)$$

돌기 초기높이가 z 일 때 접촉면 상부가 견고하므로 $b = d + 2\beta - z$ 가 되고 따라서 식 (9)는 다음과 같이 된다.

$$\bar{\epsilon}_{max} = \left(\frac{K}{\pi Bc} \right)^{1/n} \left(\frac{\lambda}{\beta} \right)^{1/2} (z-d)^{1/2} \quad (10)$$

피로파괴 조건에서 변형비는 다음과 같은 형태로 된다⁽⁵⁾.

$$\left(\frac{\bar{\epsilon}_1}{\bar{\epsilon}_{max}} \right)^n = N_f \quad (11)$$

여기서 $\bar{\epsilon}_1$ 은 1회의 미끄럼 후의 최대 소성변형율이고 $\bar{\epsilon}_{max}$ 은 접촉되어 있는 돌기의 최대변형율이며 N_f 는 파단되기까지의 마멸반복회수를 나타내고 m 은 피로파괴 상수로서 일반적으로 금속에 있어서는 2이다.

Fig. 5에서 접촉부 윗면의 돌기수를 N_w , 길이 L 상

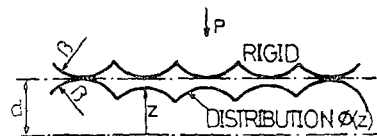
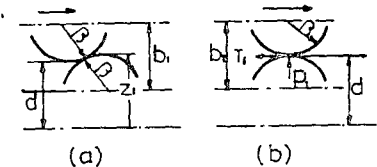


Fig. 3 Normal contact of rough surfaces



(a) Initial contact, (b) Max. deformation
Fig. 4 Asperity contact during sliding

에 있는 돌기수를 N_L 이라고 하고 높이 z_1 의 돌기가 $\phi(z_1)$ 의 접촉확률을 갖고 있다고 한다면, 최대응력에 의하여 손상되는 마멸량은 $v = \gamma \bar{\epsilon}_{max}^n$ 이 되고 거리 L 에 대한 마멸체적은 다음과 같다.

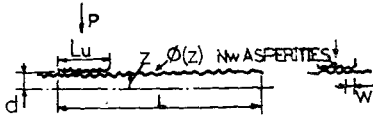


Fig. 5 Model used for a wear

$$V = N_w N_v N_L \gamma \int_0^{\infty} \frac{\bar{\epsilon}_{max}}{N_s} \phi(z) dz \quad (12)$$

여기서 N_w 는 접촉부 윗면에 존재하는 돌기열의 수효이다. 돌기의 선밀도를 η 로 표시하면, 식 (12)에서 $N_v = \eta L_v$ 그리고 $N_L = \eta L$ 로 표시된다. 여기서 L_v 는 접촉상면의 길이이다.

이 식을 식 (12)에 대입하고 식 (10)과 식 (11)을 고려하면 다음식이 얻어진다.

$$\frac{V}{L} = \frac{N_w \eta^2 L_v \gamma}{\bar{\epsilon}_1^n} \left(\frac{\lambda}{\beta} \right)^{\frac{n+t}{2}} \left(\frac{K}{\pi Bc} \right)^{\frac{n+t}{n}} \times \int_0^{\infty} (z-d)^{\frac{n+t}{2}} \phi(z) dz \quad (13)$$

식 (13)은 확률함수 $\phi(z)$ 에 의하여 특징 지어지는 돌

기 분포에서의 마멸량을 표시한다.

식 (13)에서 z 및 d 를 표준화된 변수 $s = \frac{z}{\sigma}$ 와 $h = \frac{d}{\sigma}$ 로 바꾸고 접촉확률 $\phi(z)$ 를 표준화된 확률 $\phi(s)$ 로 대신하고, 돌기분포함수 $\phi(s)$ 가 e^{-s} 로 분포 되었다고 가정한다면

$$\int_h^{\infty} (s-h)^n \phi(s) = n! e^{-h} \text{가 되고}$$

경도 H 가 B, c 에 비해함을 고려하여 다음과 같이 놓을 수 있다.

$$\frac{V}{L} = C \frac{P}{H} \quad (14)$$

여기서

$$C = K \frac{\eta \gamma}{\pi \bar{\epsilon}_1^n} \frac{(\sigma \lambda)^{(t-n+n-2)/2}}{\beta^{(2+m+n+1)/2}} \left(\frac{K}{\pi Bc} \right)^{(n+t)/(n-1)} \times \{(m+t)/2\}! / \{(1+n/2)\}!$$

이다.

4. 실험방법 및 고찰

4.1. 실험방법

이온질화 처리강의 미끄럼 마멸 특성을 규명하기 위한 시편은 SCM 3으로 준비하였으며 화학적 성분은 Table 1과 같다.

Table 1 The chemical composition of specimen

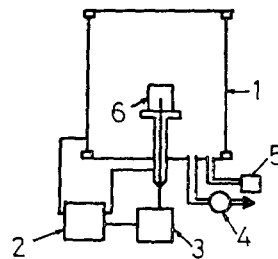
Composition	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Specimen	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
SCM 3	0.33~0.38	0.15~0.35	0.60~0.85	0.03	0.03	0.25	0.90~1.20	0.15~0.30

제작된 표준시편은 질화처리하기전 1,500 mesh로 표면을 최종 연마한 후 비누물로 깨끗이 닦고 알코올로 세척하여 건조시켰다.

이온질화장치는 Fig. 6으로 표시하였고(4) 그 주요 요소는 진공로, 가스공급장치 및 전기공급원으로 되어 있으며 가스질화 및 염욕질화를 현대유압에 설치되어 있는 장치를 사용하였다. 마멸시험은 Ogoshi high speed wear testing machine(Type OAT-U)을 사용하였으며 시편은 시험기의 표준시편이며 silder는 SCM 3을 사용하였다.

4.2. 결과 및 고찰

마멸에 의한 파괴는 마멸하중이 반복 작용하는 재료 표면에 균열이 생기고, 그 균열이 전파하여 생기는 것이다. 따라서 표면의 상태 곧 표면거칠기, 경도 및 잔



1. vacuum chamber 2. electric unit
3. regulating device 4. vacuum pump
5. gas distribution 6. workpiece

Fig. 6 The ion-nitriding equipment

류응력 등은 마멸특성을 검토하는데 중요한 인자가 된다. 특히 질화처리를 한 것은 내부와 표면의 조성이

다르게 되어 내마멸성에 미치는 영향이 현저하다. 염욕질화, 가스질화 및 이온질화처리 등에 의하여 얻어지는 표면층과 내마멸성 관계를 실험한 결과 마멸량에 차이가 있었다. KCN 또는 NaCN 을 주성분으로 하는 염욕층에서 철강재료를 처리하면 재질에 관계없이 초기 표면에는 질소를 과포화로 포함한 다공질의 화합물이 또 그 내면에는 질소의 확산층이 생성된다⁽¹⁰⁾. 가스질화처리에 있어서도 염욕처리의 경우와 같이 초기 표면에 Fe₃N으로 대표되는 화합물층이 생성된다.

일반적으로 질화에 의한 내마멸성의 향상은 질소화산층에 기인한다는 이론이 지배적이며, 사용 환경에 있어서 또 화합물층의 존재가 크게 영향을 주는 것으로 추측된다.

이온질화법은 종래의 가스질화 또는 염욕질화 방법에 비하여 질화속도가 빠른데다가 표면에 생성되는 질화층을 자유롭게 조절할 수 있다.

Fig. 7은 염욕질화처리, 가스질화처리 및 이온질화처리방법에 따라 질화처리한 SCM3의 질화시간에 따른 질화깊이를 보여 준다.

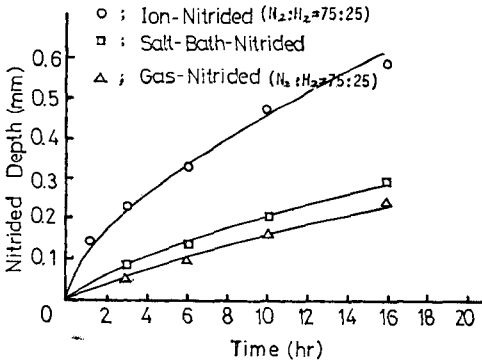


Fig. 7 Nitrided layer depth as a function of treatment time (500°C, SCM3)

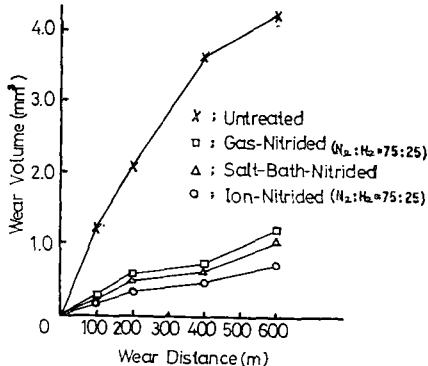
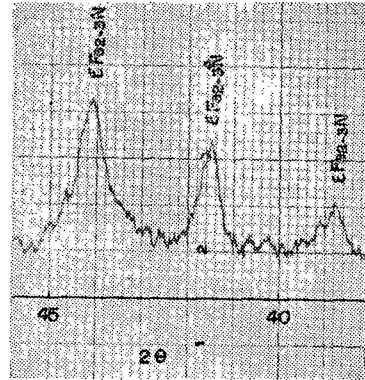
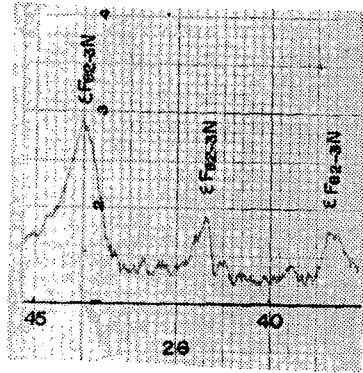


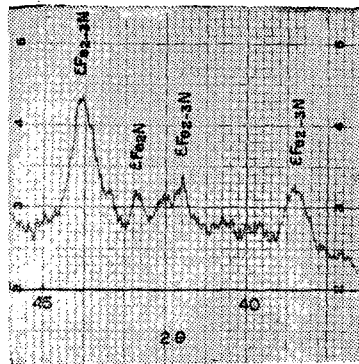
Fig. 8 Wear volume according to nitriding to methods(Load 3.2kg, Speed 2.38m/sec)



(a) Gas-Nitrided



(b) Salt-Bath-Nitrided



(c) Ion-Nitrided

Fig. 9 X-ray structural analysis according to nitriding methods

질화처리 방법에 따른 마멸특성을 검토하기 위하여 질화깊이를 같게 시편을 만들었으며 따라서 이온질화 시편은 3시간 그리고 염욕질화와 가스질화시편은 12

시간 처리하였다. 이때의 미끄럼 마멸 특성은 Fig. 8에 나타나 있고 Fig. 9는 X-ray 분석사진이다.

X-ray 분석 사진으로부터 이온질화 시편, 염욕질화 시편 및 가스질화 시편의 질화표면은 모두 $Fe_{2-3}N$ 의 균일 ϵ 상이 나타남을 알 수 있다.

이 결과에 의하면 이온질화 처리한 것이 내마멸성이 가장 우수하다. 이러한 현상은 이온질화 방법이 화합물층 생성을 쉽게 하게 하고 화합물층을 균질하게 하며 이것이 응착억제 효과를 나타내기 때문이라 생각된다.

가스질화나 염욕질화 처리한 강에 있어서도 질화층은 우수한 내마멸성을 갖지만 화합물층이 불균질하고 표면부근이 다공질이 되기 쉬워 이것이 초기 마멸을 크게 하는 원인이 된다.

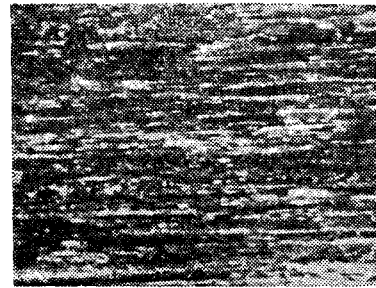
Gregory⁽¹¹⁾는 질화처리 방법에 따른 마찰 및 마멸 특성을 Table 2와 같이 주었다.

Table 2에서 알 수 있는 바와 같이 이온질화 처리강은 보다 가혹한 마멸조건에서도 가스질화나 염욕질화법에 비교하여 질화처리 표면의 화합물층이 균질하며 마찰계수가 작기 때문에 결과적으로 마멸량이 작게 나타난 것으로 판단된다. 이러한 사실은 Fig. 10에 표시한 마멸흔적 사진에서도 알 수 있듯이 가스질화나 염욕질화 처리강이 이온질화 처리강보다 질삭마멸이 심하게 나타나 있음을 알 수 있다.

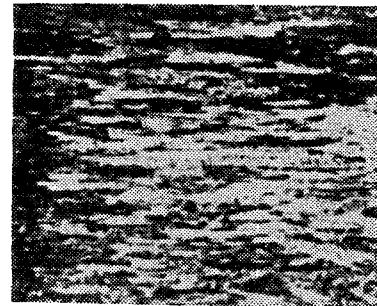
위에서의 설명은 마멸량을 나타내는 식 (14)에서 알 수 있으며 또한 이온질화 처리강은 표면이 균질하고 sputtering 현상에 의하여 질화처리가 되므로 보다 큰 잔류압축응력을 얻을 수 있어⁽¹²⁾ 응력/변형 비례상수 B 가 커져 결과적으로 질화처리된 표면의 경도를 크게할 뿐 아니라 응력/변형 비례상수 B 를 인자로 포함하는 마멸상수를 작게 하기 때문에 마멸량이 작은



(a) Gas-Nitrided



(b) Salt-Bath-Nitrided



(c) Ion-Nitrided

Fig. 10 Photographs of worn surface for SCM3 nitrided

Table 2 Friction and wear characteristics according to nitriding methods

Nitriding method	Lubrication friction			Dry friction		
	Max. load (lb)	Mean friction coefficient	Observed wear surface	Max. load (lb)	Mean friction coefficient	Observed wear surface
Ion-nitriding	2,500	0.032	Non-seizing	400	0.16	Surface damage due to seizing 1. Severe damage due to seizing
Gas-nitriding	1,200	0.038	Seizing	200	0.40	2. Severe seizing at the beginning of test
Salt-bath-nitriding	2,000	0.035	Partial seizing	470	0.28	1. Occurring of micro wear particles while testing 2. Increase of friction coefficient with seizing

것으로 판단된다.

마멸실험의 결과치는 5개의 시편을 실험한 평균값으로 이 값과 마멸시편과 동일한 시편에서 구한 평균 경도 값(이온질화 $H_v=785$, 염욕질화 $H_v=737$, 가스질화 $H_v=722$)을 가지고 실험한 각점에서 식 $\frac{V}{L}=C\frac{P}{H}$ 에 대입하여 마멸상수 값을 계산하여 평균치를 구하면 다음과 같이 된다.

이온질화 $C=0.306$

염욕질화 $C=0.423$

가스질화 $C=0.538$

이 결과로부터 미끄럼 마멸을 나타내는 $\frac{V}{L}=C\frac{P}{H}$ 의 공식에 있어서 동일한 마멸조건인 경우 마멸량에 영향을 주는 요소는 마멸상수 C 및 경도 H 이나, 경도 H 보다, 마멸상수 C 에 영향을 더 크게 받는다는 사실을 앞에서 설명한 다른 질화처리에 의한 경도값 H 와 마멸상수 C 값의 차이로부터 판단할 수 있다. 따라서 $\frac{V}{L}=C\frac{P}{H}$ 에서 마멸상수 C 값에 영향을 주는 인자들이 질화처리 방법에 따라 달라진다는 사실과 이들 인자가 질화처리강의 마멸특성에 영향을 크게 미치며 이온질화 방법이 종래의 질화법과 비교하여 더 좋은 바람직한 결과를 얻을 수 있다는 사실을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 질화깊이가 같을 경우 이온질화 처리강은 염욕 질화나 가스질화 방법에 비하여 내마멸성이 크다.

(2) 미끄럼 마멸을 나타내는 마멸공식 (14)에서 알 수 있는 바와 같이 여러 인자의 함수로 표시되는 마멸상수 C 값은 이온질화의 경우가 가장 작으며 종래의 질화법에 비하여 이온질화 처리강의 내마멸성을 좋게 하는데 있어 경도 H 보다 더 큰 영향을 준다.

(3) 염욕질화나 가스질화 방법에 비하여 이온질화 처리된 강 표면의 마찰계수가 작으나 동일한 ϵ 단일 상을 갖고 있다는 사실을 본 실험을 통하여 증명할 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) J.T. Burwell, Survey of Possible Wear Mechanisms, Information Report J965, SAE, 1966
- (2) M. Confente, M. Michel and M. Gantois, Ion-nitriding of Steels, Contribution to XVth International Colloquium on Heat Treatments, Caen, France, 1974
- (3) C.K. Jones and S.W. Martin, Ion-nitriding, the '73 Heat Treatment, London, the Metal Society, pp. 71~77, 1975
- (4) H.S. Kim, K.S. Cho & M.S. Kang, The Added Carbon Content Effect on the Hardness and Wear Characteristics in Ion-Nitriding, KSME, Vol. 7, No. 1, pp. 19~27, 1983
- (5) T. Sone and K. Yamanaka, On the Ion-nitriding steel, Journal of the Japan Institute of Metals, 40(1976), pp. 908~102.
- (6) K.S. Cho and C.O. Lee, The Effects of Carbon on Ion-Nitriding, Transactions of the ASME, JEMT, Vol. 102, April pp. 229~233, 1980
- (7) Halling, A Contribution to the Theory of Mechanical Wear, Wear, 34(1975), pp. 239~249.
- (8) J.A. Greenwood and J.B.P. Williamson, Contact of nominally flat surfaces, Proc. Roy. SOC (London), A295(1966), 300.
- (9) J.F. Tavernelli and L.F. Coffin, A Compilation and Interpretation of cyclic/strain fatigue tests, Trans. Am. SOC. Metals, 51(1959), 438.
- (10) T. Bell, Ferrite Nitrocarbouizing, Heat Treatment of Metals, pp. 39~49, 1975
- (11) J.C. Gregory, Heat Treatment of Metals, 2 (1975), 55.
- (12) K.S. Cho and C.O. Lee, Wear, 64(1980), pp. 303~310.