

## 이온질화에 있어서 가스중 첨가탄소량에 대한 마모현상 분석

조 규 식

공군사관학교

### The Analysis of Wear Phenomena on Added Carbon Content Gas Atmosphere in Ion-Nitriding

Kyu-Sik Cho

Korea Air Force Academy

**Abstract**—This paper was focused on the wear characteristics of ion-nitrided metal and with ion-nitride processing, which is basically concerned with the effects of carbon content in workpiece and added carbon content gas atmosphere on the best wear performance. Increased carbon content in workpiece increases compound layer thickness, but decreases diffusion layer thickness. On the other hand, a small optimal amount of carbon content in gas atmosphere increase compound layer thickness as well as diffusion layer thickness and hardness. Wear tests show that the 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. Compressive residual stress at the compound layer is the largest at the compound layer, and decreases as the depth from the surface increases. It is found in the analysis that under small applied load, the critical depth where voids and cracks may be created and propagated is located at the compound layer, so that the adhesive wear is created and 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 explained by surface deformation, crack nucleation and propagation, is created and the existence of compound layer increases wear rate. For the compound layer, at added carbon contents of 0 percent and 0.5 at. percent, the  $\epsilon$  monophase is predominant. But at 0.7 at. percent added carbon, the  $\epsilon$  monophase formation tends to be severely inhibited and  $\epsilon'$  and  $\text{Fe}_3\text{C}$  polyphase formation becomes dominant. This increased hard  $\epsilon$  phase layer was observed to be more beneficial in reducing friction and wear.

**Key words**—added carbon content,  $\epsilon$  monophase, polyphase, delamination.

#### 1. 서 론

이온질화법은 질화층의 조직을 조절할 수 있고 무공해처리이며 경제적이란 큰 장점을 가지고 있어 최근 독일, 미국, 일본 등에서 활발히 연구되고 있다.

이러한 이온질화의 효과에 미치는 요소로는 시편 성분, 가스조성, 가스압력, 질화온도 및 질화시간 등이 있으며, 위의 조건을 변화시킴에 따라 원하는 피처리물의 표면경도와 질화층의 두께 및 화합물층의 조직을 얻을 수 있다. 이온질화는 질소의 활성화온도인

400°C 부터 600°C 사이에서 행해지며, 이 온도사이에서는 450°C에서 질화시킬 때 최고의 경도가 얻어진다고 보고하였다. 이와같은 낮은 온도에서의 질화는 변형이 적고 중심부의 기계적 성질이 많이 떨어지지 않는 장점이 있으나 같은 두께의 질화층을 얻는데 많은 시간을 요하게 된다. 질화처리 온도가 높으면 질화물의 조대화가 일어나 경도가 감소하므로 질화에 많이 사용하는 온도영역은 500°C~550°C이다[1].

이온질화는 음극과 양극사이의 전압에 의하여 가속된 이온이 약 240 eV정도의 운동에너지를 가지며 이

가속된 이온에 의하여 분리된 철원자와 프라즈마내의 질소이온이 결합하여 시편표면에 흡착된다. 이 FeN은 불안정하므로 분해되어  $\epsilon$ -Nitride인  $Fe_{2,3}N$ 이나  $r'$ -Nitride인  $Fe_4N$ 이 형성되어 이  $Fe_{2,3}N$ 과  $Fe_4N$ 이 표면에서 화합물층을 형성하고 분해된 질소가 내부로 확산되어 확산층을 형성하게 된다.

스위스의 Berna Ionics사의 자료에 의하면 탄소강(DIN, K15C)을 이온질화 시킬 경우 보통 Hv 250~350이 얻어지고 Cr 및 Mo를 함유한 구조용강 SCM 4의 경우에는 Hv 550~750경도가 얻어지지만 재료비가 많이 드는 결점이 있으므로 경제적인 탄소강을 이온질화시켜서 더 높은 경도를 얻는 것이 생산성의 면에서 중요하다. Fe-N phase diagram에서 나타난 바와 같이 온도가 높을수록 질소의 고용도가 높아진다. 따라서 피처리물을 수냉하면 질소가  $\alpha$ -Fe가 과포화 고용되어 있는 상태가 되고 유냉하면 미세한 입상의 석출물이 질화층의 결정내에 또 작은 침상의 석출물,  $r'$ - $Fe_4N$ 이 입자내에 보인다. 이와같은 조직의 변화도 질화층 깊이와 함께 재료의 기계적 성질에 영향을 줄 것으로 보인다. 이온질화된 금속표면은 다른 질화법에 의하여 질화처리된 금속표면과 같으며 최외곽표면의 화합물층인 합성층은 alcoholic nitric acid etching에 의하여 영향을 받지 않고 희게 나타나므로 백색층(White Layer)이라고 불리우며 합성층 아래의 확산층과 혼합조직으로 되어 있다.

본 연구에서는 이온질화 가스중의 첨가 탄소량 변화에 따른 이온질화 효과 및 이온질화 처리된 금속의 마모특성을 이론 및 실험적으로 규명하였다.

금속기재내 탄소의 존재는  $Fe_3C \rightarrow Fe_3C$ ,  $Fe_4N \rightarrow Fe_3C$ ,  $Fe_3N \rightarrow Fe_{2,3}N(\epsilon)$ 의 반응에 의하여 형성되는 합성층 두께를 증가시키고, 확산작용에 의한 확산층은 기지층의 탄소가 질소의 확산을 방해하여 두께를 감소시키는 경향을 나타낸다[1].

이온질화가스중에 탄소를 첨가하면 합성층이 생성되는 금속표면은 탄소량이 많게되어 전술한 합성층 형성과정에 의하여 합성층 두께가 증가된다는 것이 발견되었다. 가스중에 탄소첨가로 합성층( $Fe_{2,3}N$ )이 생성된 금속표면은 확산층이 생성되는 금속 내부에 비하여 질소량이 많아져 결과적으로 금속내부로의 질소확산에 의하여 확산층이 증가하게 된다.

이온질화가스중에 탄소를 첨가하면 탄소를 첨가하지 않았을 때 보다 낮은 온도에서 경도의 최대치를 얻

을 수 있다.

마모 실험 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.

이온질화처리된 금속에 생성된 잔류 응력은 압축 응력으로서 금속표면인 합성층에서 가장 크고 금속내부로 갈수록 작아진다. 잔류 압축응력 및 최대응력 특성으로 부터 이온질화 금속의 마모는 합성층 깊이와 마모하중에 따라 달라진다고 생각되어 진다[2]. 일반적으로  $\epsilon$ 상은 HCP 구조의  $Fe_{2,3}N$  화합물로  $r'$ 층보다 경도는 높으나 취약한 반면  $r'$ 상은 FCC 구조의  $Fe_4N$  화합물로 경도는  $\epsilon$ 층보다 낮으나 연성이 좋은 것으로 알려져 있다[3]. 따라서 경도를 요구하는 재료에는 단상의  $\epsilon$ 상을, 연성을 요구하는 재료에는 단상의  $r'$ 상을 형성시키는 것이 바람직하다. 한편 화합물층에  $\epsilon$ 과  $r'$ 의 혼합상이 존재하면 내부의 자체응력으로 인해 균열이 발생할 가능성이 있다[4].

$r'$ 상은 상대적으로 연성이 좋고 실접촉 면적이 증가하여 마찰계수가 높은 반면  $\epsilon$ 상은 경도가 높고 실접촉 면적이 상대적으로 적어 마찰계수가 낮다. 탄소를 첨가하였을 경우  $\epsilon$ 의 단상을 얻을 수 있어 마모하중이 작은 경우 마모량을 감소시킬 수 있다.

## 2. 이온질화 원리 및 특성

Glow discharge는 수 torr의 진공중의 질화로에 전장을 걸어주면 전위차에 의해 기체가 여기(Excitation)되고 이온화(Ionization)되어 전기도체의 성격을 띠게 되며 전류를 흘려주면 빛을내는 지속방전(Self-Maintained Discharge)의 일종이 된다. 정규 글로우 방전(Normal Glow Discharge)은 전류밀도가 낮아서 이온질화에 이용되지 않고 큰 전류밀도를 갖는 이상 글로우 방전(Abnormal Glow Discharge)이 이온질화에 이용된다. 이온질화에서 일반적으로 전류밀도(Current Densities)는  $0.5 \times 10^{-3} A/cm^2$ 에서  $3.0 \times 10^{-3} A/cm^2$ 이다. 진공 반응기에 시편을 넣고 반응기 내 공기를 뽑아내고 질소와 수소 또는 아르곤가스의 혼합가스를 1~10 torr 정도로 채운 뒤 피처리물에는 음극, 반응기벽에는 양극을 연결하여 고압전류를 걸어주면 글로우방전(Glow Discharge)이 일어나며 전류가 흐르게 된다. 전압을

서서히 올리면 최초 음극에서 발생한 전자에 의해서 기체원자가 여기되기 시작하고, 이온화에너지 이상이 되면 질소가 이온화되어 질소의 양이온(N<sup>+</sup>)이 음극으로 흐르고 전자가 양극으로 흐르기 시작하여 전류가 흐르기 시작한다. 이온질화는 음극강하 전위차에 의해서 가속된 질소의 양이온이 시편표면에 충돌하여 일어난다. 사용전압에 의해 질소 이온(N<sup>+</sup>)의 운동에너지는 수 eV에서 수백 eV가 된다. 온도로 환산하면 수만 °C의 플라즈마 온도와 같다. 이 때 질소이온이 직접 철격자에 흡착되어 질화철을 형성하거나, 피처리물 표면에서 분리된 철격자가 플라즈마 중의 고도로 활성화된 질소이온과 결합하여 질화철을 형성하고 이것이 피처리물 표면에 흡착되는 두가지 방법에 의해서 질화철을 얻는다. 흡착된 질화철은 질화온도(400°C~600°C)에서는 불안정하므로 ε상인 Fe<sub>2</sub>N과 Fe<sub>3</sub>N, γ상인 Fe<sub>4</sub>N으로 분해된다. 이때 질화철에서 분리된 질소 중 일부는 다시 플라즈마 중으로 되돌아 간다. 이것을 역확산(Back Diffusion)이라 한다. 한편 질소의 양이온의 운동 에너지에 의해서 극히 작은 일부 면적의 온도는 수만도에서 수십만도에 이르기 때문에 피처리물 표면에 포함되어 있는 합금원소인 Al, Cr, Mo, Ti, V과 Fe의 금속원자는 표면으로부터 분리된다. 이 과정을 스퍼터링(sputtering)이라고 한다. 시편표면의 산화물을 환원시켜 주고 탄화물에서 탈탄현상을 일으키게 한다. 시편 중의 탄화물은 질소의 확산을 방해하기 때문에 스퍼터링 과정은 시편표면의 크리닝(cleaning)은 물론 질소의 확산을 돕는다.

수만도에서 수십만도에 이르는 고온은 극히 미소면적에 국한되어 있으므로 표면에는 해를 끼치지 않으며 표면의 평균온도가 질화처리 온도가 된다. 피처리물 표면에 충돌하는 질소이온의 운동에너지 중 일부는 원자와 전자의 분리에너지와 분리된 입자의 운동에너지로 바뀌어 지고 나머지는 열로 전화되어 피처리물을 가열하는데 쓰인다. 전력의 60%정도가 피처리물을 가열시키는 열로 전환된다고 알려져 있다[5].

### 3. 금속 기지내 탄소량의 영향

#### 3-1. 합성층 및 확산층

Fig. 1과 Fig. 2는 금속 기지내의 탄소량 변화에 따른 합성층 및 확산층 두께를 나타낸 것이며 온도에 비례하여 두께가 증가함을 알 수 있다. 합성층은 금속내

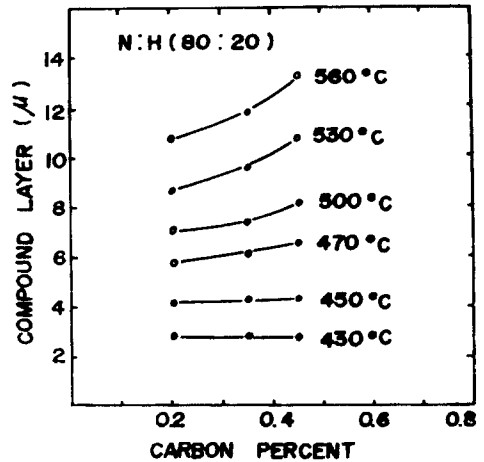


Fig. 1. Relation between compound layer thickness and carbon % in metal (5 torr, 5 hrs).

부의 탄소량 증가에 따라서 증가하며 이러한 경향은 저온에서는 뚜렷하지 않고 온도가 올라감에 따라 현저하다.

합성층은 주로 Fe<sub>3</sub>C → Fe<sub>3</sub>C, Fe<sub>4</sub>N → Fe<sub>3</sub>C, Fe<sub>3</sub>N → Fe<sub>2,3</sub>N (ε) 반응[6, 7]에 의하여 형성되기 때문에 탄소가 합성층 두께를 증가시킨다는 것을 기대할 수 있다.

확산층 두께는 금속내부의 탄소량 증가에 따라서 감소하며 이러한 사실은 금속내 탄소의 존재가 질소의 확산을 방해하여 확산층 두께가 감소하는 것으로 생각된다. 합성층 두께는 합성층 생성이 용이한 금속 기지내 탄소량이 많을 때 온도에 따른 차이가 크고 한편 확

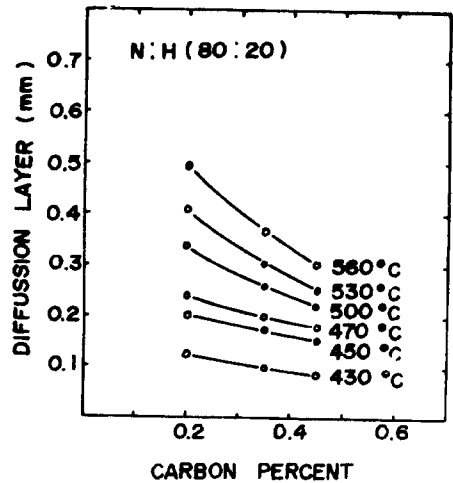


Fig. 2. Relation between diffusion layer thickness and carbon % in metal (5 torr, 3 hrs).

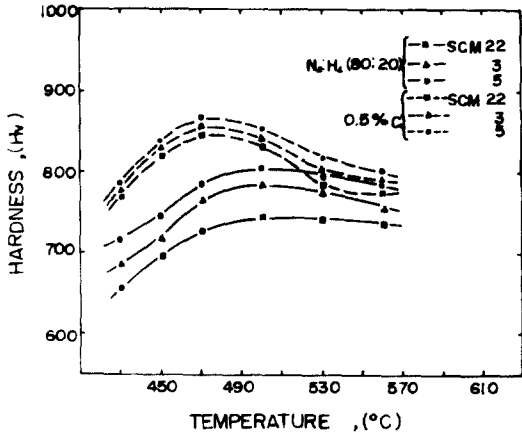


Fig. 3. Relation between hardness and temperature for SCM 22, SCM 3 and SCM 5 (Load 200 g, 5 Torr).

산층 두께는 확산층 생성이 용이한 금속 기지내 탄소량이 적을 때 온도에 따라 차이가 커진다. 또한 합성층 및 확산층은 생성이 비교적 어려운 저온도에서는 금속 기지내 탄소량 변화에 따른 영향이 현저하지 않다.

Fig. 4는 SCM 22, SCM 3 및 SCM 5를 이온질화 처리한 후 Alcoholic nitric acid etch로 부식시켜 금속현미경 조직사진을 찍은 것이며, 합산층은 부식되지 않고 희게 나타나고 있다.

### 3-2. 경도

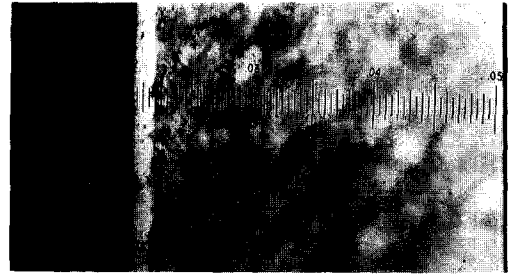
Fig. 3은 금속 기지내의 탄소량 변화에 따른 경도 특성을 나타낸 것으로서 금속 기지내 탄소량 증가에 따라 경도가 증가함을 보인다.

일반적으로 내부응력  $\sigma_i$ 는 근사적으로  $\sigma_i = a G \sigma^{1/3} c^n$ 으로 주어진다. 여기서  $a$ 는 상수,  $G$ 는 강성율,  $c$ 는 고용한 용질 원자의 농도  $n$ 은 1에 가까운 상수다.  $\epsilon$ 을 모체 금속 원자 반경을  $a_0$ 라고 하면 용질 금속의 원자 반경  $a$ 는  $a = a_0(1 + \epsilon)$ 으로 표시된다. 이식으로부터 알 수 있듯이  $\epsilon$ 의 값이 클수록, 즉 원자의 크기가 다를수록, 강성율이 클수록 또 고용량이 많을수록 격자의 뒤틀림이 크게 된다. 그 결과 내부응력이 커지고, 따라서 경도가 증가한다.

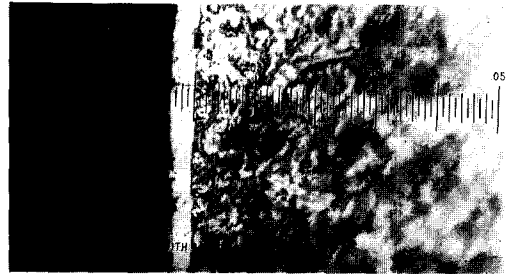
## 4. 이온질화 가스중 첨가 탄소량의 효과

### 4-1. 합성층 및 확산층

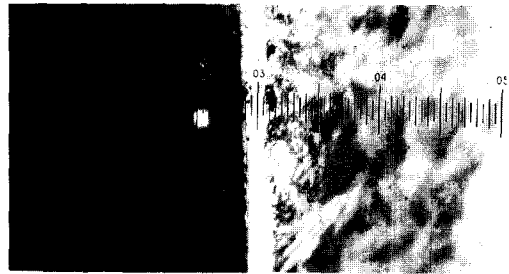
Fig. 1에서 금속기지 내 탄소량이 증가함에 따라 합



(A) SCM 22



(B) SCM 3



(C) SCM 5

Fig. 4. The Microstructure of Ion-nitrided metal ( $\times 400$ , 530°C, 5 Torr, 3 hrs).

성층이 증가하고 Fig. 2는 금속 기지 내 탄소량이 감소함에 따라 확산층이 증가함을 나타낸다. 따라서 이온질화 가스중에 탄소를 첨가함으로써 금속표면의 탄소량을 증가시켜 결과적으로 합성층을 증가시킬 수 있다.

합성층( $Fe_{2.3}N$ )의 생성으로 금속표면은 내부에 비하여 상대적으로 질소의 농도가 커지고 따라서 금속 내부로의 질소의 확산작용에 의하여 확산층도 증가된다. 혼합 가스중에 존재하는 탄소량에 따른 합성층 및 확산층 두께를 Fig. 5에 도시했다. 합성층 두께는 가스중의 탄소량이 0.5 atom %까지는 증가하며, 한편 확산층은 0.7 atom% 때 가장 깊게 나타났고 1.4 atom% 까지 증가한다. 가스중 탄소량 변화에 따른 금속 현미

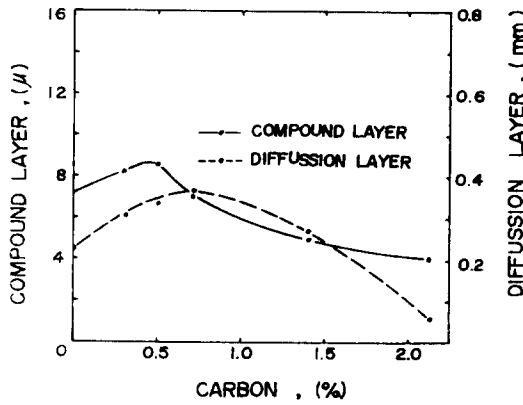


Fig. 5. Compound layer and diffusion layer thickness as a function of added carbon atom% in mixture gas (500°C, 5 Torr, 3 hrs, SCM3).

경 사진은 Fig. 6에 보였고, Fig. 7은 가스중 탄소량 변화에 따른 X-선회절 사진이다. 합성층은  $Fe_3C \rightarrow Fe_3C$ ,  $Fe_4N \rightarrow Fe_3C$ ,  $Fe_3N \rightarrow Fe_{2,3}N$ 의 반응[3, 4]에 의하여 형성되기 때문에 가스중의 탄소량 증가가 합성층 두께를 증가시키고 탄소량이 너무 많으면 질소가 들어갈 공간을 주지않아 Fig. 7의 X-선 회절 사진에서 볼 수 있는 바와같이  $\gamma'$ - $Fe_3C$ 의 혼합조직이 되어 합성층이 감소한다. 금속 내부에 비하여 금속표면의 질소량이 많을 경우 질소 입자의 확산으로 확산층이 증가된다. 탄소 첨가량이 너무 많으면 탄소 및 질소 입자가 상호 간섭을 일으킬 뿐 아니라 질소가 들어갈 공간을 주지 않아 확산층 두께가 오히려 감소된다.

Fig. 8은 탄소 0.5 atom%를 첨가 하였을 때와 첨가

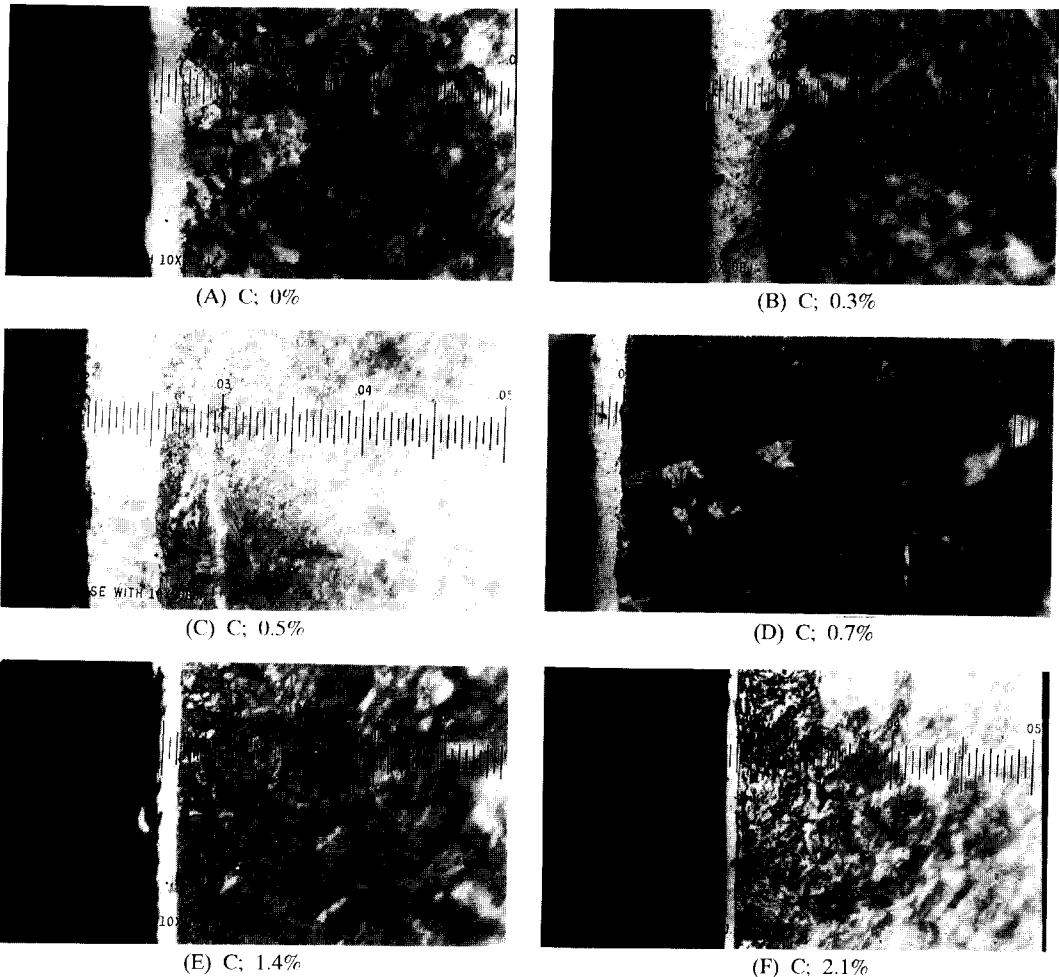
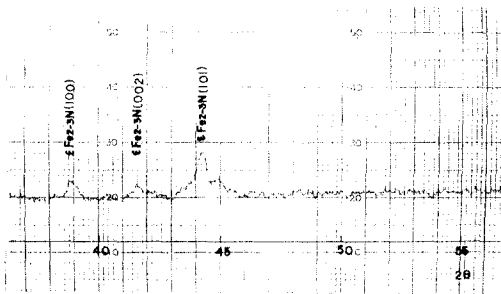
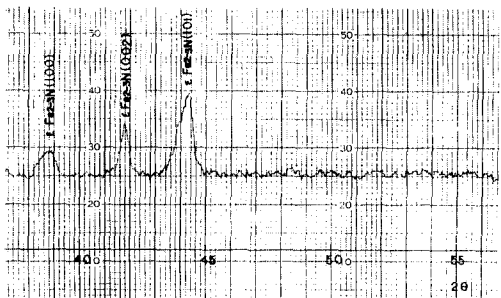


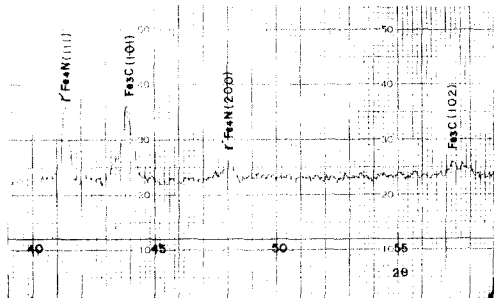
Fig. 6. Microstructure according to added carbon content



(A) C; 0%



(B) C; 0.5%



(C) C; 0.7%

Fig. 7. X-Ray structural analysis according to added carbon content (500°C, 5 Torr, 3 hrs, SCM 3).

하지 않았을 때의 합성층 깊이를 비교 도기한 곡선으로서 탄소를 0.5 atom% 첨가할 때, 탄소를 첨가하지 않은 이온질화 처리시의 합성층 깊이의 경향과 같이 시간의 1/2승에 비례한다.

#### 4.2. 경도

금속원소의 원자의 크기는 다르고 모체가 되는 원소에 크기가 다른 원소를 고용시키면 용질 원자는 그 주위의 결정 격자를 뒤틀리게 한다. 이와같은 격자 뒤틀림을 가진 격자면은 같은 크기의 원자가 배열한 평

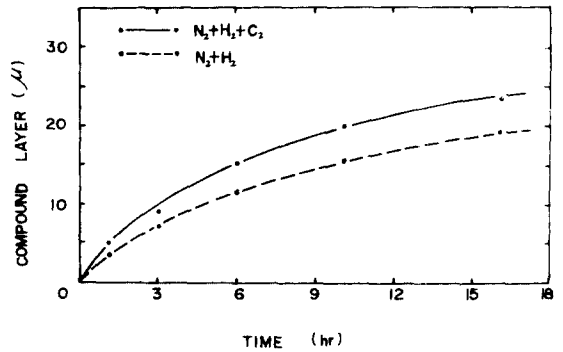


Fig. 8. Compound layer thickness with and without added carbon 0.5 atom% as a function of time (500°C, 5 Torr, SCM3).

탄한 격자면보다도, 움직이는데 더 많은 에너지를 요하고 그만큼 여분의 에너지가 필요하고 강하게 된다. 재료를 변형시키는데 필요한 응력  $\sigma$ 는 난위밀도  $N$ 이 클 수록 크고 일반적으로  $\sigma = abGN$ 으로 표시되고 여기서  $a$ 는 금속에 따라 상이한 상수로서 0.2~0.5가량의 크기,  $G$ 는 강성을  $b$ 는 버거스 벡터(Burgers Vector)를 나타낸다. 이 식으로부터 난위 밀도를 높게 만들면 강한 금속을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 가스중 첨가 탄소량에 따른 경도를 나타낸 것으로서 탄소량 첨가가 0.5 atom%까지는 경도가 증가되나 그 이상에서는 감소하고 있음을 보여준다. 이러한 경향은 가스중 첨가 탄소량에 따른 합성층 두께를 표시한 Fig. 5와 비슷한 경향을 갖는다.

Fig. 10은 SCM 22, SCM 3 및 SCM 5의 첨가 탄소량 0.5 atom% 때와 첨가하지 않았을 때의 경도-온도

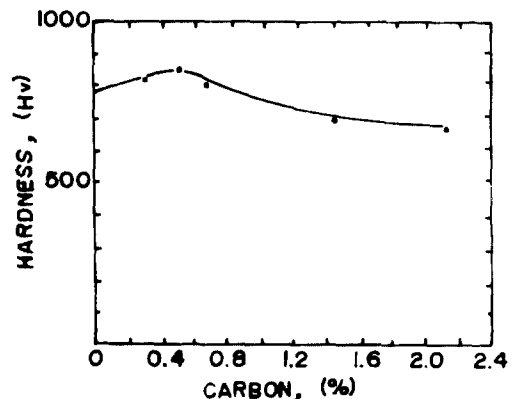
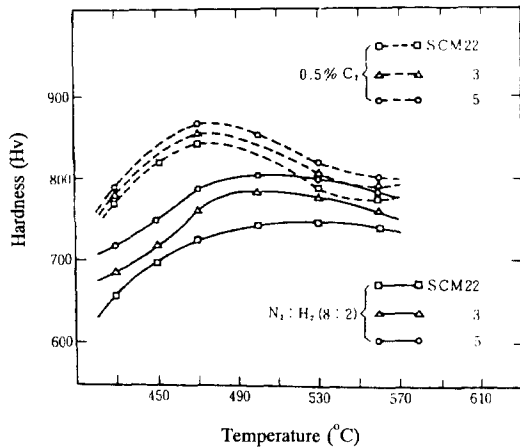


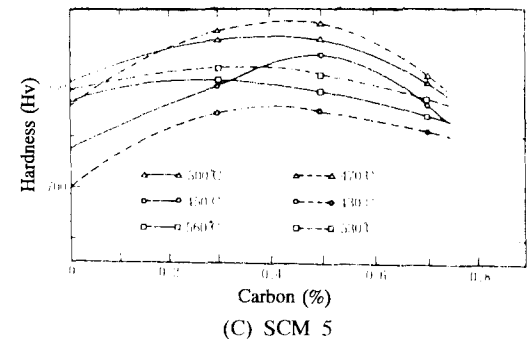
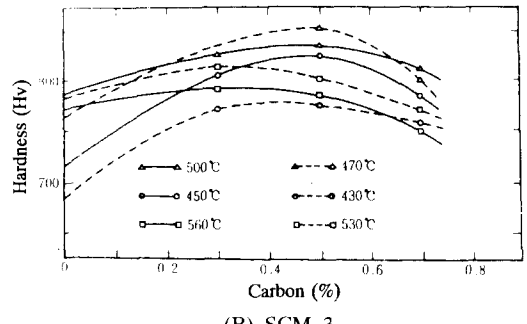
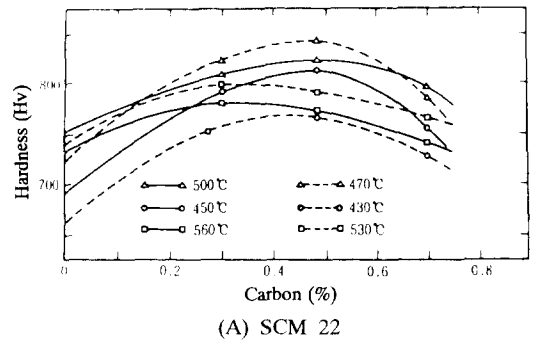
Fig. 9. Relation between hardness and added carbon atom% (Load 200 g, 500°C, 5 Torr, SCM3).



**Fig. 10.** Relation between hardness and temperature for with and with out added carbon 0.5 atom% (Load 200 g, 5 Torr, 3 hrs).

곡선을 나타낸 것이다. 가스중에 탄소를 첨가 하였을 때는 합성층 생성이 용이하게 되어 낮은 질화 처리 온도에서 주어진 정도 하중에 견딜 수 있는 합성층 두께를 얻을 수 있고, 또 질화 처리 온도가 낮으므로 생성 입자의 크기가 작게 되어 정도의 최대치가 탄소를 첨가하지 않았을 때에 비하여 낮은 온도에서 나타난다.

Fig. 11은 이온질화 혼합가스중 첨가 탄소량에 따른 정도 특성을 나타낸 것이며 합성층 생성이 어려운 저온에서는 정도가 첨가 탄소량에 따라 영향을 많이 받으나 충분한 합성층이 생성되는 고온에서는 첨가 탄소량에 따른 정도 변화가 적다. Fig. 12는 SCM 22, SCM 3, 및 SCM5에 있어서 혼합 가스중 첨가 탄소량에 따른 정도 특성은 금속 기지내 탄소량이 적은 SCM 22의 경우는 SCM 5보다 합성층 생성이 용이하지 않으므로 합성층 생성을 촉진시키는 첨가 탄소량에 따른 영향이 많으나, 탄소량이 많은 SCM5의 경우는 합성층 생성이 비교적 쉬워 첨가 탄소량에 의한 영향이 적다. 가스중 탄소 첨가량이 0.5 atom% 때가 온도에 따른 영향이 크고 0.3 atom%, 0.7 atom% 첨가 순으로 온도에 따른 영향이 적다. 이와같은 사실은 합성층 두께가 0.5 atom%, 0.3 atom% 그리고 0.7 atom% 탄소량 첨가에 따라 증가된다는 4-1절에서의 실험 결과로부터, 온도에 따른 정도 변화는 합성층 두께에 영향을 주는 첨가 탄소량 순위에 따라 달라짐을 알 수 있다.



**Fig. 11.** Hardness profile according to added carbon content for treatment temperature (Load 200 g, 5 Torr, 3 hrs).

## 5. 이온질화 가스중 첨가 탄소량이 마모특성에 주는 영향

마모거리를 5단계 변화하였을 경우 마모량과 마모거리 관계를 Fig. 12에 나타냈다. 마모량과 마모속도를 나타낸 Fig. 13과 마모량과 마모거리 관계를 표시한 Fig. 12에서 탄소를 0.5 atom% 첨가하였을 경우가 탄소를 첨가하지 않을 때보다 마모량이 적게 나타난다. 탄소를 첨가하면 마모량이 적은 것은 4-2절에서

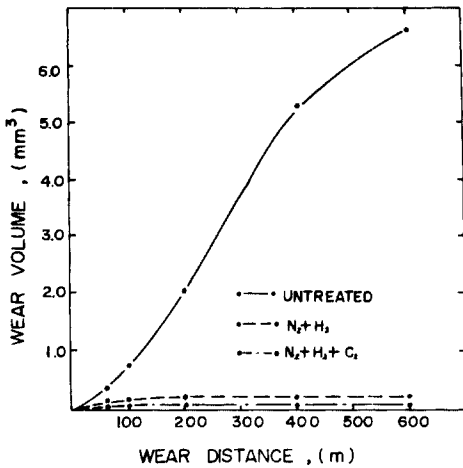


Fig. 12. Variation of wear volume with wear distance for untreated and ion-nitrided with and without added carbon 0.5 atom% under condition of wear velocity 2.38 m/sec and wear load 3.2kg (500°C, 5 Torr, 3 hrs, SCM3).

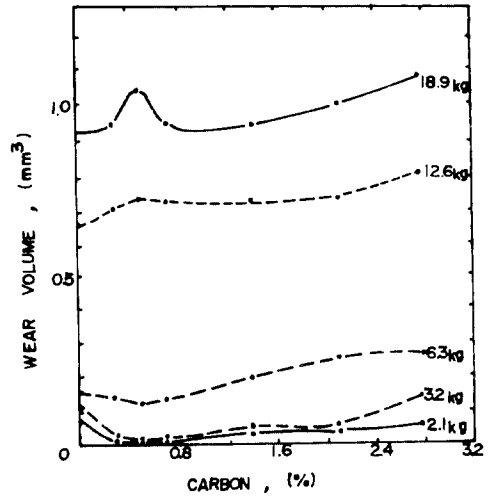


Fig. 14. Variation of wear volume with wear added carbon atom% for wear load under condition of wear velocity 1.65 m/sec and wear distance 200 m (500°C, 5 Torr, 3 hrs, SCM3).

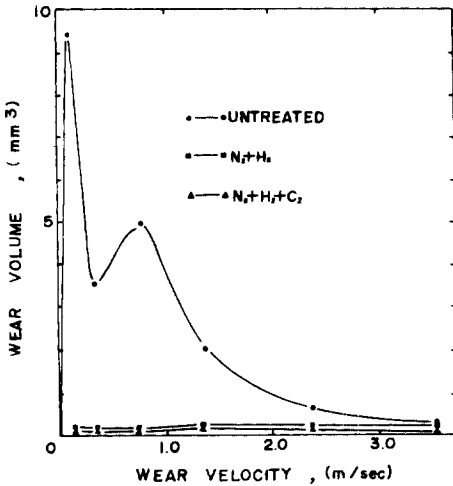


Fig. 13. Variation of wear volume with wear velocity for untreated and ion-nitrided with and without added carbon 0.5 atom% under condition of wear distance 200 m and wear load 3.2 kg (500°C, 5 Torr, 3 hrs, SCM3).

설명된 바와같이 탄소를 0.5 atom% 첨가하였을 때가 경도가 더 크기 때문이다.

Fig. 14는 마모량을 첨가 탄소량 atom%에 따라 표시한 것이다. 마모하중이 6.3 kg이하에서는 경도와 첨가 탄소량 관계를 표시한 4-2절의 Fig. 9와 같은 경향으로써 최대경도가 나타나는 0.5 atom% 첨가탄소량에서 마모량이 가장 적어짐을 볼 수 있다.

또한 Fig. 14에서 마모하중에 따라 질화처리 금속의 마모특성이 달라진다는 이론과 일치한다[8].

마모하중이 클 경우의 마모가 delamination에 의하여 일어나므로 마모량은 질화 처리된 금속 내부에 생성되는 최대 응력의 위치에 따라 결정된다는 이론과 일치한다[9].

앞에서 설명한 바와같이 질화처리한 금속의 마모는 마모하중이 작을 때는 abrasive마모가 일어나고, 마모하중이 클 경우에는 delamination에 의하여 마모가 일어나며, 합성층의 깊이와 최대응력이 생성되는 위치에 따라 마모량이 결정되며, ε상은 HCP 구조의 Fe<sub>2.3</sub>N 화합물로 r' 층 보다 경도는 높으나 취약한 반면 r'상은 FCC 구조의 Fe<sub>4</sub>N 화합물로 경도는 ε층보다 낮으나 연성이 좋은 것으로 알려져 있다. 따라서 경도를 요구하는 재료에는 단상의 ε상을, 연성을 요구하는 재료에는 단상의 r'상을 형성시키는 것이 바람직하다. 한편 화합물층에 ε과 r'의 혼합상이 존재하면 내부의 자체응력으로 인해 균열이 발생할 가능성이 있다.

r'상은 상대적으로 연성이 좋고 실접촉 면적이 증가하여 마찰계수가 높은 반면 ε상은 경도가 높고 실접촉 면적이 상대적으로 적어 마찰계수가 낮다. 탄소를 첨가하였을 경우 ε의 단상을 얻을 수 있어 마모하중이 작은 경우 마모량을 감소시킬 수 있다.



## 6. 요 약

최근 주목을 받고 있는 이온질화법은 종래의 질화법과 비교하여 공해가 없고, 질화가 신속하며, 처리과정의 간단, 질화처리 원가의 감소, 합성층 및 확산층 조절의 용이, 부분 질화처리의 가능 그리고 질화 처리 후 기계적 성질이 향상된다는 점에서 많은 연구가 되어 있으나, 질화 가스내의 탄소량 및 금속 기지내의 탄소량 영향과 질화처리물의 기계적 성질에 대하여는 연구가 되어있지 않다. 본 연구에서는 금속 기지내 탄소량 및 가스중 첨가 탄소량에 따른 이온 질화처리된 금속의 마모특성을 이론 및 실험적으로 규명했다. 금속내부의 탄소의 증가는  $Fe_3C \rightarrow Fe_3C$ ,  $Fe_4N \rightarrow Fe_3C$ ,  $Fe_3N \rightarrow Fe_{2,3}N$  ( $\epsilon$ ) 반응에 의하여 형성되는 합성층 두께를 증가시키거나 탄소의 존재가 질소의 확산을 방해하므로 합성층 두께는 감소한다. 이온 질화가스 중에 탄소를 첨가하면 합성층이 생성되는 금속표면은 탄소량이 많게되어 전술한 합성층 생성과정에 의하여 합성층이 증가한다.

합성층( $Fe_{2,3}N$ ) 생성으로 질소의 함유량이 많게된 금속표면에 비하여 확산층이 생성되는 금속내부는 질소량이 적으므로 질소의 확산 작용에 의하여 확산층을 증가시킬 수 있다. 합성층 두께는 가스중의 탄소량이 0.5 atom%까지 증가한다. 가스중에 탄소를 첨가하였을 때 합성층 생성이 용이하게 되어 낮은 질화처리 온도에서 주어진 경도 하중에 견딜 수 있는 합성층 두께를 얻을 수 있고, 또 질화 처리 온도가 낮으므로 생성 입자의 크기가 작게 되어 탄소를 첨가하지 않았을 때에 비하여 큰 경도를 얻을 수 있다.

이온질화처리 금속의 잔류 압축 응력은 금속의 최외각 표면에 생성되는 합성층에서 가장 크고, 또 최대 전단응력이 생성되는 영역은 금속표면에 존재하지 않고 금속내부에 존재한다. 따라서 질화 처리된 금속의 마모는 합성층 깊이와 마모하중에 따라 달라진다. 마모하중이 작을 경우에는 최대응력이 생성되는 임계 깊이가 합성층 내부에 존재하게 되어 경도가 중요한 인자인 abrasive 마모가 일어나며 합성층 존재가 마모량을 감소시킨다. 반면에 마모하중이 커서 임계 깊이가 합성층 두께보다 크면 합성층과 확산층의 경계층 또는 확산층내에서 Void 생성 및 합성-Crack 전파-파괴과정에 의해서 설명되는 delamination에 의해서 마모가 일어나 합성층 존재가 마모량을 증가시킨다[9].

가스중에 탄소를 첨가하면 합성층 두께 및 경도를 증가시키고 또한  $\epsilon$ 단상을 만들어 질접촉 면적이 상대적으로 적어 마찰계수를 낮게 할 수 있으므로 마모하중이 작을 경우 마모량을 감소시킬 수 있다.

## 7. 결 론

1. 이온질화에 있어 금속 기지내 탄소량 증가는 합성층 두께를 증가시키거나 확산층 두께를 감소시킨다.
2. 이온질화에 있어 가스중에 탄소를 0.5 atom% 첨가하면 합성층 및 확산층 두께를 증가시키고 경도를 크게 할 수 있어 저 마모하중에서 마모량을 감소시킬 수 있다.
3. 가스중에 탄소를 첨가하였을 경우  $\epsilon$ 의 단상을 얻을 수 있어 마찰계수 감소와 함께 마모량을 줄일 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. K. S. Cho & C. O. Lee, "The Effects of Carbon on Ion-Nitriding," Transactions of the ASME, JEMT, Vol. 102, pp. 229-233, 1980.
2. K. S. Cho & C. O. Lee, "The Wear Characteristics of Ion-Nitrided Steel," Wear, Vol. 64, pp. 303-310, 1980.
3. Spalvins, T., "Tribological and Microstructural Characteristics of Ion-Nitrided Steels," Thin Solid Films, Vol. 108, p. 157-163, 1983.
4. Hutchings, I. M., Tribology, CRC Press, pp. 223-224, 1972.
5. 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.
6. B. Prenosil, "Gefuge der bodnitrierten and in Ammoniatmosphäre mit Kohlenwasserstoffzusatz Hergestellten Schichten," Harterei-Techn., Mitt., Vol. 20, pp.41-49, 1965.
7. Imai *et al.*, "The effects of Alloy on Solution of Carbon and Nitrogen in Ferrite Iron," Journal of the Japan Institute of Metals, Vol. 7, pp. 137-152m 1968.
8. K. S. Cho, "Study on the Analysis of Wear Phenomena of Ion-Nitrided Steel, KSTLE, Vol. 13, No.1, pp. 1997.
9. N. P. Suh, The Delamination Theory of Wear, Wear, Vol. 22, pp. 111-124, 1973.