

## 플라즈마 침탄 공정을 이용한 SCM415강의 표면 경화 특성

김대욱 · 김동원\* · 임병수 · 김석범\*

성균관대학교 기계공학부

\*경기대학교 재료공학과

### Characteristics of Plasma Carburizing Process in Surface Hardening of SCM415 Steel

Dae-Wook Kim, Dong-Won Kim\*, Byeong-Soo Lim and Seuk-Buom Kim\*

School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746

\*Department of Materials Engineering, Kyonggi University, Suwon 440-760

(1998년 4월 21일 받음, 1998년 6월 9일 최종수정본 받음)

초 록 현재 자동차용 소재 및 기계부품에 폭넓게 이용되는 SCM415강의 플라즈마 침탄 특성을 연구하기 위해 가스조성, 압력, 전류밀도, 온도 및 시간을 변수로 사용하였다. 가스조성의 경우 저합금강에서는 수소 가스 효과 보다 메탄가스에 의해 주로 침탄 특성이 좌우되며, 메탄가스 100%일 때 시편 내의 모든 방향에서 경화층 분포가 일정하고, 최대의 유효경화깊이를 얻을 수 있었다. 가스압력이나 플라즈마 전압이 상승할 때 전류밀도가 상승하게 되는데, 이에 따라 최표면의 탄소농도가 증가하게 되어 강의 유효경화깊이는 증대되었다. 침탄 온도의 경우 적어도 850°C 이상되어야 유효경화깊이를 얻을 수 있었고, 온도가 상승할수록 유효경화깊이의 증가를 나타내어 침탄 효과가 우수하였다. 탄소의 확산 깊이는 침탄 시간의 제곱근에 비례하는 것으로 나타났다. 플라즈마 침탄한 강의 피로강도를 평가한 결과 열처리하지 않은 시편이나 재가열처리한 시편에 비해 높은 피로강도를 나타내었다.

**Abstract** The influence of plasma carburizing process on the surface hardness of SCM415 low-alloy steel (0.15% C) was investigated under the various process conditions of gas composition, gas pressure, plasma current density, temperature and time. The effective case depth was found to depend on the amount of methan gas containing carbon, thus the deepest case depth and the uniform hardness were obtained with the 100% methan gas. The case depth increased with the plasma current density. The effective plasma carburizing temperature of SCM415 steel was found to be higher than 850°C, and the case depth was proportional to the square root of carburizing time under the same current density. The bending fatigue strength of the plasma carburized specimen is higher than those of as-received specimen or reheat-quenched specimen.

## 1. 서 론

기술이 고도화됨에 따라 마모와 피로를 동시에 받는 기계 부품들이 늘어나고 있다. 특히 현재 많이 사용되는 기어, 크랭크 축, 클러치, 캠, 스피들 등의 기계부품들은 충격에 잘 견디기 위하여 인성이 크고, 내구성이 보장되어야 하며, 상대운동으로 인한 마찰, 마모에도 잘 견디어야 한다. 따라서 많은 경우, 기계부품의 표면만을 경하게 하여 내마모성은 뛰어나고, 재료 자체는 연하여 인성을 갖추게 할 수 있는 표면 열처리법이 요구된다. 이렇게 표면 열처리한 재료는 내마모성, 강도, 충격에 대한 저항성을 요구하는 기계 부품, 금형, 공구 등에 적용되고 있다.<sup>1,2)</sup>

현재 열처리법으로는 염욕침탄, 가스침탄 및 가스질화법이 주류를 이루고 있으나, 최근 환경친화적이고 작업성 및 경제성이 매우 우수한 플라즈마 침탄법의 보급이 확산되고 있다. 플라즈마 침탄법은 기존의 방법들과 비교할 때, 진공 중에서 행하여지므로 공해가 없고, 가스소비가 줄어들며, 입계산화나 탈탄과 같은 침탄 이상층의 발생이 적다. 또한

처리시간의 단축으로 경제적이며, 난침탄재의 침탄, 부분침탄 및 질화, 그리고 복잡한 모양의 기계부품도 표면 경화할 수 있다는 장점을 가지고 있다.<sup>1,3,4)</sup> 이처럼 우수한 특성을 가진 플라즈마 침탄 열처리법은 이미 여러 선진국에서 다양한 강종에 대한 효과적인 공정의 개발과 연구<sup>3~7)</sup>가 많이 진행되어왔으나 현재 국내에서는 플라즈마 침탄 열처리로의 개발이나 난침탄재의 플라즈마 침탄 등에만 한정되어 연구가 수행되어져 왔을 뿐, 실제 침탄강으로 널리 사용되는 저합금강의 플라즈마 침탄 특성 연구는 부족한 것이 현실이다. 그러므로 본 연구에서는 플라즈마 침탄로를 이용하여 현재 자동차용 소재로 널리 사용되고 있는 SCM415강의 플라즈마 침탄 최적 공정 개발을 위한 각종 침탄 변수들의 실험적 특성을 분석, 조사하고자 한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 시편 제작

본 실험에 사용한 재료는 저합금강인 SCM415강을 사용하였으며, 화학성분은 표 1과 같다. 지름 8.2mm이며 길이가

Table 1. Chemical composition of SCM 415 steel.

Element	C	S	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
wt. %	0.15	0.21	0.72	0.01	0.02	0.10	0.97	0.17	0.13

70mm인 봉 형상의 시편에 대해 플라즈마 침탄 특성을 조사하였다.

## 2.2. 열처리 및 플라즈마 침탄

플라즈마 침탄로는 반응로, 보조가열장치, 냉각장치, 전원공급장치, 진공배기계, 전기 제어장치로 이루어져 있다. 반응로는 후연 전열 방식이며, 플라즈마를 발생시키기 위해 시편 지지대를 음극으로 하고 노의 몸체를 양극으로 하여 양극간에 수백V의 DC 전압을 인가시킬 수 있도록 구성하였다. 본 연구에 사용된 침탄로는 1-챔버 방식으로 고온의 로를 냉매가스인 질소가스를 이용하여 강제 냉각시켰다.

효과적인 침탄을 위해 모든 시편은 아세톤 용액으로 약 30분간 초음파 세척한 후 플라즈마 침탄로에 장입하였다. 100mTorr의 진공 상태에서 900°C까지 승온하여 시편을 오스테나이트화하였다. 시편의 산화막이나 불순물의 제거를 위한 플라즈마 스퍼터링은 900°C에서 H<sub>2</sub>와 Ar 가스를 1:1의 비율로 넣은 후, 플라즈마 전압 400~450V, 전류밀도 2~3mA/cm<sup>2</sup>의 조건으로 30분간 실시하였다. 스퍼터링을 마친 후 시편에 플라즈마 침탄을 실시하였으며, 침탄 후에는 질소가스로 강제 냉각시켰다. 시편의 표면을 마르텐사이트 조직으로 만들기 위해서는 약 300°C/sec의 냉각속도가 필요한데, 본 연구에 사용된 플라즈마 침탄로의 냉각속도는 이보다 현저히 낮기 때문에 플라즈마 침탄 공정 후의 질소가스에 의한 직접 퀴칭법으로는 시편의 표면을 경화할 수 없었다. 따라서 침탄된 시편을 재가열 퀴칭하였는데, 이를 위해 900°C의 분위기로에서 30분간 오스테나이트화한 후 오일 퀴칭하였다. 재가열 퀴칭된 시편은 최종적으로 180°C의 오일 도가니에서 2시간 템퍼링 처리되었는데 이는 침탄강에 인성을 부여하기 위함이다. 그림 1은 시편의 준비, 침탄 및 그 후의 재가열 열처리 순서를 나타내고 있다.

## 2.3. 미세 경도 조사

플라즈마 침탄된 시편의 미세경도 측정은 시편을 측방향에 대하여 수직으로 잘라 미소경도시험기를 사용하여 측정하였다. 시편이 등근 봉 형상이므로 상, 하, 좌, 우, 4 방향이 골고루 표면 개질되어 경도가 상승하였는지 확인하였다. 플라즈마 침탄의 경우, 하중 200g, 가압시간 15초의 조건으로 표면에서부터 0.1mm간격으로 각각 3회씩 측정하여 평균값을 경도값으로 정하였다.

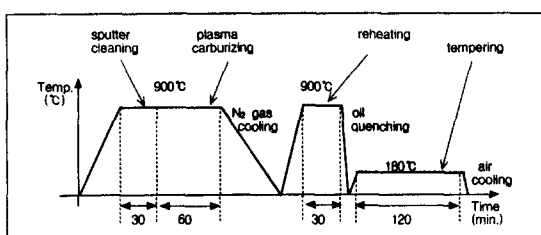


Fig. 1. Heat treatment of the specimens.

## 2.4. AES를 이용한 탄소농도 조사

침탄된 시편의 경도를 결정하는 인자는 탄소함량과 후속 열처리이다. 일반적인 침탄 두께는 0.1~1.2mm 인데, 이 범위에서 탄소 농도의 변화를 알아보기 위해서 Auger Electron Spectroscopy (AES, Perkin-Elmer SAM 4300)를 이용하였다. 침탄한 시편의 단면을 얇게 절단하고 표준방법에 따라 연마한 후, 아세톤 용액의 초음파 세척을 거쳐 N<sub>2</sub> 가스로 건조시켰다. 사용된 electron beam current와 voltage는 300nA, 5keV 이었다.

시편을 장입한 후 시편 표면의 산화층 등 불순물을 제거하기 위하여 1분간 스퍼터 크리닝을 하였다. AES 분석은 우선 line scan방법을 통해 대략적인 탄소분포를 조사하였으며, 관심이 있는 곳에서 7~8 포인트 AES 스펙트럼을 얻었다. 탄소 함량은 스펙트럼의 relative peak-to-peak height를 이용하여 비교하였다.<sup>9)</sup>

## 2.5. 미세조직 관찰

플라즈마 침탄 이후 변화된 표면층의 미세조직과 모재의 미세조직 등을 관찰하기 위하여 광학 현미경을 사용하여 사진 촬영을 하였다. 시편은 5% 나이탈액으로 에칭한 후 400배의 배율로 촬영하였으며 표면으로부터 중심부까지 연속적으로 조사하였다.

## 2.6. 기계적 성질 시험

플라즈마 침탄한 SCM415강의 기계적 성질을 평가하기 위하여 회전 굽힘 피로 시험을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 피로시험기는 3510rpm의 오노식 회전 굽힘 피로 시험기이다. JIS Z 2274에 준하여 회전 굽힘 피로 시험을 수행하여 S-N 선도를 구하였다.<sup>9)</sup> 모든 실험은 상온에서 수행하였으며, 시편에 응력을 가하는 방법은 시험기가 시험속도에 도달한 후 하중이 가능한 한 서서히 가해지도록 하였다. 철강재료와 같은 BCC 재료에서는 일반적으로 생각되는 10<sup>6</sup> 회전 이상에서 파단하지 않는 굽힘 응력을 피로한도로 보기 때문에,<sup>10,11)</sup> 시험편의 무한 수명을 5×10<sup>6</sup>회전으로 정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

플라즈마 침탄 특성을 조사하기 위하여 공정에 침탄 변수로 이용된 것은 가스 조성, 가스 압력, 플라즈마 전압, 플라즈마 전류밀도, 온도 및 시간이다. 이들 공정 변수들에 대한 각각의 침탄 특성 고찰은 다음과 같다.

### 3.1. 가스 조성비의 영향

가스조성의 경우 수소가스와 메탄가스의 양을 조절하여 침탄 특성을 살펴보았다. 일반적으로 수소 플라즈마는 환원 작용을 하기 때문에 표면에 있는 산화막이나 그을음을 제거해주는 역할을 하므로, 이전의 연구<sup>3)</sup>에서 수소가스를 탄소가 포함된 가스와 혼합하여 플라즈마 침탄하였으나, 수소가스 영향에 대해서는 조직적인 연구 결과가 보고되지 않았

Table 2. Case depth, heat treatment and process parameters of each specimen.

Process	Gas Condition (%)	Pressure (Torr)	Plasma Voltage (V)	Current Density (mA/cm <sup>2</sup> )	Temperature (°C)	Time(min.) carburizing + diffusion	Case Depth (mm)
sputter cleaning	Ar 50/H <sub>2</sub> 50	3	400-450	2-3	900	30	
plasma carburizing	CH <sub>4</sub> 25/H <sub>2</sub> 75	10	417-453	9.11-8.82	900	60 + 30	-
	CH <sub>4</sub> 50/H <sub>2</sub> 50	10	435-444	9.11	900	60 + 30	-
	CH <sub>4</sub> 75/H <sub>2</sub> 25	10	464-468	9.11-8.96	900	60 + 30	0.74
	CH <sub>4</sub> 100	10	500-474	9.11	900	60 + 30	0.83

다. 따라서 본 연구에서는 SCM415강에서의 플라즈마 침탄시 수소가스의 영향을 정량적으로 알아보기 위하여 표 2에 나타낸 바와 같이 수소가스와 메탄가스의 양의 비를 달리하여 실험을 수행하였다. 수소가스가 75%, 50% 일 때는 유효경화깊이가 나타나지 않아 침탄효과가 없는 것으로 조사되었다. 유효경화깊이는 ASM (American Society for Metals)의 정의에 따라 경도가 550 HV를 나타내는 깊이로 정하였다.<sup>12)</sup> 메탄가스의 양이 75% 이상되어야 유효경화깊이가 존재하고 메탄 가스 100%일 때 최대 유효경화깊이를 나타내었다. 이 같은 결과는 SCM415강의 플라즈마 침탄의 경우 유효경화깊이가 메탄가스의 양에 의존한다는 것을 의미한다. 따라서 모든 공정은 최고의 침탄효과를 나타내는 가스 조성인 메탄가스 100%를 사용하였다.

3.2. 가스 압력과 플라즈마 전압의 영향

플라즈마 침탄시 노내 가스 압력이 침탄에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 노내 압력 조절이 가능한 3Torr부터 10Torr까지 변화시켜가며 시편을 침탄하였다. 그림 2는 압력변화에 따른 플라즈마 침탄 직후 시편의 깊이에 따른 경도분포를 나타내고 있는데, 질소가스를 통하여 냉각했기 때문에 시편이 균일하게 담금질되지는 않았지만, 경도가 700HV 이상인 층에서는 마르텐사이트 조직이 관찰되었다. 그림 3은 침탄직후의 시편들을 900°C에서 30분간 재가열 담금질 처리하고 180°C에서 2시간 동안 템퍼링한 후의 경

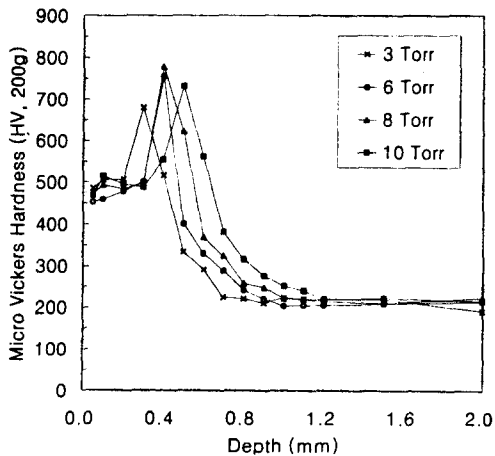


Fig. 2. Influence of gas pressure on the plasma carburizing characteristics (As-plasma carburized specimen; 900°C, carburizing 60min.)

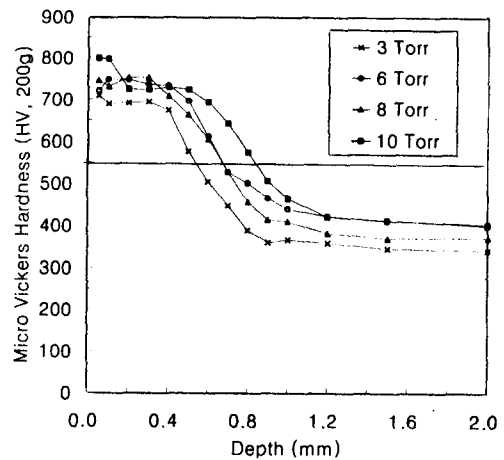
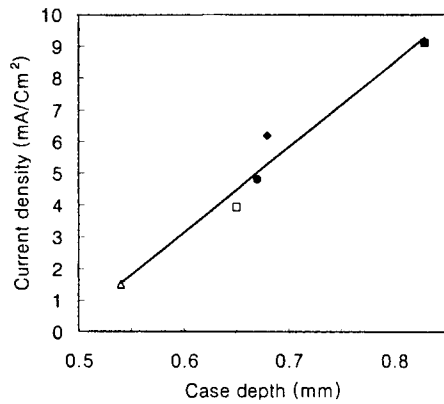


Fig. 3. Influence of various gas pressure conditions on the plasma carburizing characteristics. Dotted line for HV 550 represents the effective case depth. (Plasma carburized, reheat quenched, and tempered specimens; 900°C carburizing 60min., diffusion 30min., 180°C tempering 2 hours)

화층의 변화를 보여주고 있다. 그림 3에서와 같이 시편의 표면에서부터 고탄소 마르텐사이트 층이 형성되어 높은 경도를 보이고 있다. 시험 결과에 의하면 노내 가스 압력이 높을수록 침탄 효과가 우수하여 깊은 유효경화층을 얻을 수 있었다. 이는 같은 전압에서 노내의 가스 압력이 높아지면 전류밀도가 높아지고, 플라즈마 강도가 커져 많은 양의 탄소가 주입, 확산되어 보다 깊은 유효경화층을 얻는 것으로 사료된다. 또한 플라즈마 침탄시 노내 가스 압력이 동일한 경우에도 플라즈마 전압 변화에 의한 전류밀도의 변화는 침탄효과에 동일한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그림 4에 나타낸 바와 같이 노내의 가스압력이나 전압과는 상관없이 전류밀도의 증가가 유효경화깊이의 증가를 가져왔다. 플라즈마 침탄시 전류밀도의 증가는 표면의 탄소농도 증가를 야기함으로써 유효경화깊이가 증가한 것으로 생각되며, 이를 입증하기 위해 전류밀도의 변화에 의한 탄소농도의 변화 경향을 AES를 사용하여 조사한 결과, 그림 5에서와 같이 전류밀도가 높아질수록 같은 깊이에서 탄소농도가 상대적으로 높아지는 것을 알 수 있다.

플라즈마 침탄법을 다른 침탄법과 비교하면, 본 연구를 통하여 온도 900°C, 전류밀도 9.11mA/cm<sup>2</sup>로 1시간 플라즈마 침탄 후 30분 확산시킨 SCM415강에서 0.83mm의 유효경화깊이를 얻은 것에 반하여, AISI1020강을 927°C에서



	Gas Pressure (Torr)	Plasma Voltage (V)
□	10	488
■	8	510
●	6	447
○	8	428
△	3	517

Fig. 4. Relationship between current density and case depth (Plasma carburized, reheat quenched, and tempered specimens; 900°C carburizing 60min., diffusion 30min., 180°C tempering 2 hours)

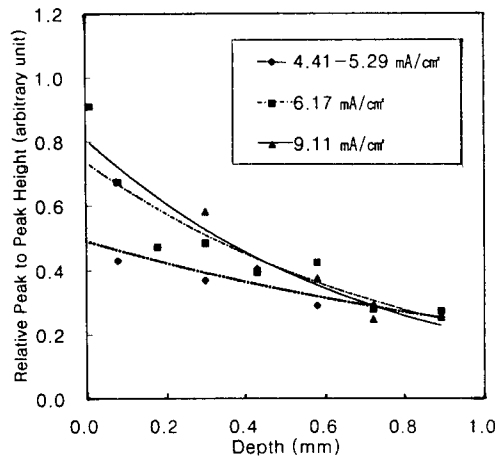


Fig. 5. Variation of relative carbon content with the current density.

1시간 동안 진공침탄한 후 같은 시간에서 확산한 결과, 0.6 mm의 유효경화깊이를 얻었다.<sup>1)</sup> 이와같은 플라즈마 전류밀도 상승에 의한 침탄 효과의 향상으로 짧은 시간에도 깊은 유효경화깊이를 얻었으며, 이 같은 결과는 진공침탄 등 다른 침탄법에 비해 플라즈마 침탄법이 매우 경제적인 표면처리 방법이 될 수 있음을 나타내고 있다.

### 3.3. 온도의 영향

그림 6에 플라즈마 침탄 공정시 온도가 침탄강의 경도에 미치는 영향을 나타내었다. 플라즈마 침탄 온도가 800°C 이하인 경우에는 노내 압력이나 전류밀도와는 관계없이 효과적인 유효경화깊이를 거의 얻을 수 없었다. 이것은 탄소 0.15%의 강인 경우, 800°C 이하의 온도에서는 탄소 용해도가 매우 낮은  $\alpha$ 철이  $\gamma$ 철과 혼재하여 전반적으로 강의 탄소용해도가 낮아기 때문으로 사료된다. 그러나 탄소함량

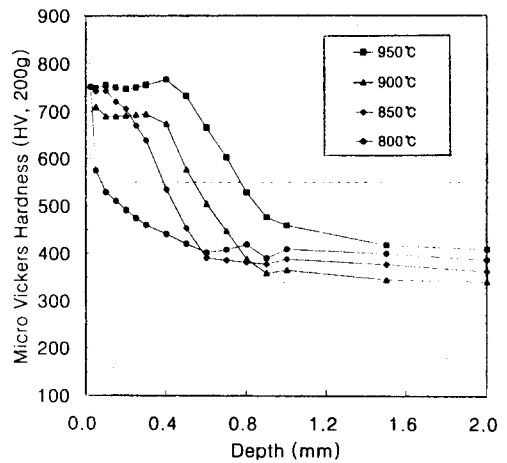


Fig. 6. Influence of various carburizing temperatures on the plasma carburizing characteristics. Dotted line at HV 550 represents the effective case depth. (Plasma carburized, reheat quenched, and tempered specimens; 3Torr, 1.47-2.06mA/cm², carburizing 60min., diffusion 30min., 180°C tempering 2 hours)

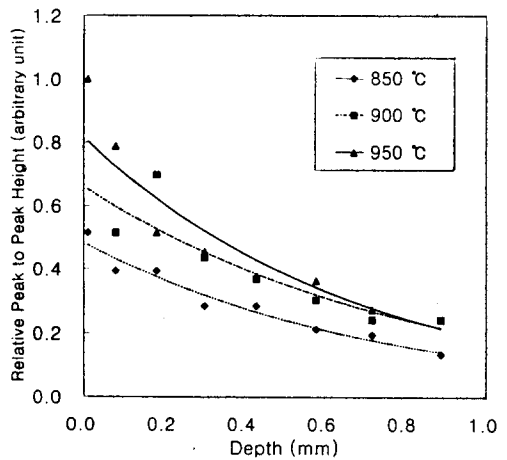


Fig. 7. Variation of relative carbon content with the carburizing temperature.

0.15%인 탄소강의 오스테나이트화 온도인 850°C 이상에서는 눈에 띄는 침탄효과를 얻을 수 있었으며, 온도가 상승할수록 탄소 농도가 증가하였다. 이 같은 사실을 입증하기 위해 탄소의 농도분포를 조사하였다. 그림 7은 침탄 온도에 따른 탄소농도의 변화를 나타낸 것으로, AES를 이용하여 그 상대적인 양을 도기한 것이다. 온도 950°C, 최표면에서의 탄소 peak to peak height를 1로 하고 나머지 량들과 비교한 결과, 온도가 낮을수록 같은 깊이에서 탄소농도가 감소하는 경향을 알 수 있다. 플라즈마 침탄 직후의 시편을 조사한 결과 침탄 온도 850, 900, 950°C일 때, 침탄되어 탄소가 확산된 깊이는 각각 0.5, 0.7, 0.9mm로 나타났다. 실제 침탄 깊이는 각 온도에서의 확산계수의 제곱근에 비례하므로, 900°C와 950°C에서 C의  $\gamma$ -Fe내 확산계수의 제곱근의 비는 Honeycomb의 자료<sup>13)</sup>를 이용하여 계산하면 약 1.32가 되므로, 위의 시험결과에서와 같이 900°C와 950°C에서 침탄된 깊이의 비와 비교적 잘 일치하고

있다.

3.4. 시간의 영향

플라즈마 침탄 시간이 미치는 영향을 조사하기 위하여 20분, 40분, 60분 동안 침탄하였으며, 시간에 따른 유효경화깊이 변화를 그림 8에 나타내었다. 그림 8에서 알 수 있듯이 침탄시간이 증가함에 따라 유효경화깊이는 증가하였다. 플라즈마 침탄 직후의 시편을 조사한 결과 침탄시간이 20분, 40분, 60분일 때, 침탄되어 탄소가 확산된 깊이는 각각 0.6mm, 0.8mm, 1.0mm로 나타났다. 이 같은 결과는 침탄 및 확산시에 탄소의 확산깊이가 시간의 제곱근에 비례하는 것을 잘 나타내 준다. 그림 9에 나타낸 것과 같이 침탄 온도 900℃, 8.96-9.11mA/cm<sup>2</sup>에서 침탄층의 성장률은 0.0167mm/sec<sup>1/2</sup>(1mm/hr<sup>1/2</sup>)로 밝혀졌다.

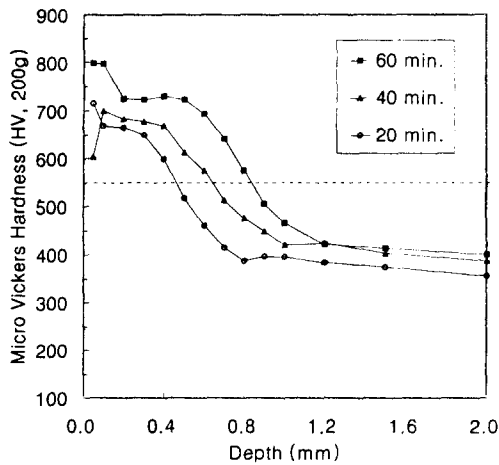


Fig. 8. Influence of various carburizing times on the plasma carburizing characteristics. Dotted line at HV 550 represents the effective case depth. (Plasma carburized, reheat quenched, and tempered specimens; 10Torr, 8.96-9.11mA/cm<sup>2</sup>, 900℃ diffusion 30min., 180℃ tempering 2 hours)

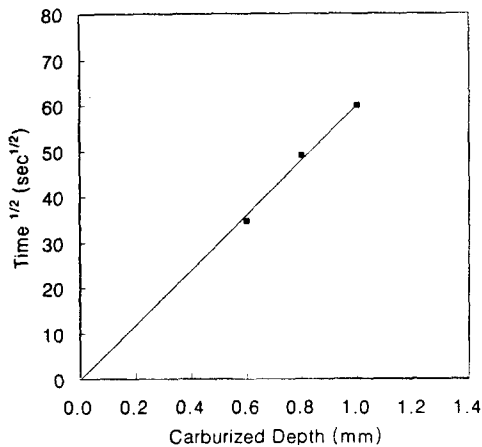


Fig. 9. Plasma carburized depth and the square root of carburizing time.

3.5. 플라즈마 침탄 강도의 미세조직 관찰

플라즈마 침탄하고 재가열한 후 템퍼링한 SCM415강의 미세조직을 광학현미경을 이용하여 관찰한 결과를 그림 10에 나타내었다. 그림 10 (a), (b)에 나타낸 것과 같이 플

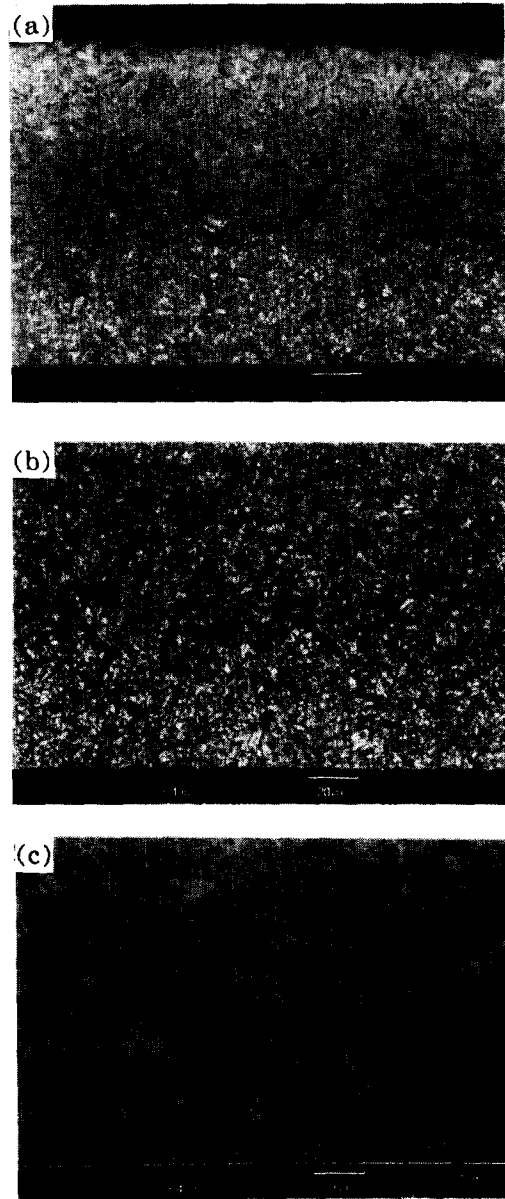


Fig. 10. Microstructures (a) from the surface to 150μm, (b) from the 300μm to 450μm, and (c) in core for the plasma carburized SCM415 steel (×400, 5% Nital etching)

라즈마 침탄한 강재의 표면 미세조직은 템퍼드 마르텐사이트 조직이었으며, 탄소량이 상대적으로 많은 표면으로 갈수록 조밀한 구조였다. 표면이 템퍼드 마르텐사이트 조직을 나타내는 것과는 다르게 내부는 그림 10 (c)와 같이 베이나이트 조직이었는데, 이는 마르텐사이트 조직보다 인성이 우수하므로 피로강도의 향상에 기여할 것으로 예상된다.<sup>14)</sup>

3.6. 기계적 성질 시험

플라즈마 침탄한 SCM415강을 열처리를 하지 않은 SCM415강과 재가열처리를 한 SCM415강과 비교하여 플라즈마 침탄에 의한 피로강도의 향상을 고찰하였다.

기계적 성질을 평가한 시험편들의 열처리 조건과 표면 경도를 표 3에 나타내었으며, 시험결과로 얻어진 S-N 선도를 그림 11에 나타내었다. 결과를 살펴볼 때, 열처리를 하

Table 3. Various heat treating conditions of specimens for evaluating the mechanical properties.

Specimens	Heat treating conditions						Surface Hardness* (HV 200g)
As-received specimen	Hot-Annealed						170-220
Reheat quenched specimen	900°C 120min. (100m Torr)	Nitrogen gas cooling to room temperature	900°C, 30min.	Oil quenching	180°C 120min	Air Cooling	350-400
Plasma carburized specimen	900°C 60min. Plasma carburizing (CH <sub>4</sub> 100%, 8Torr, 1.2mA/cm <sup>2</sup> )	Nitrogen gas cooling to room temperature	900°C, 30min.	Oil quenching	180°C 120min	Air Cooling	550-710

\*hardness from the surface to 500 $\mu$ m for each specimen.

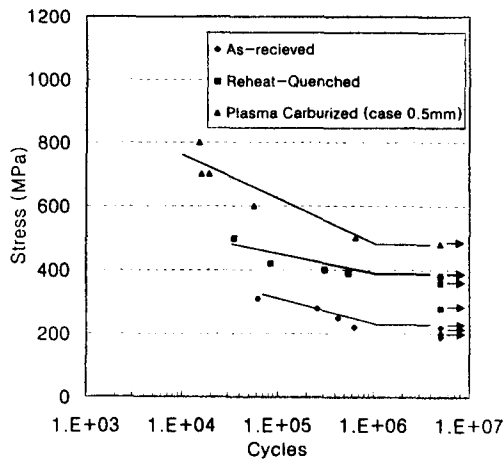


Fig. 11. S-N curves for the as-received, the reheated and tempered, and the plasma carburized specimens.

지 않은 시편의 피로강도는 210MPa로 나타났으며, 재가열처리를 한 시편의 피로강도는 390MPa, 900°C에서 1시간 침탄하고 30분 확산시켜 0.5mm의 유효경화깊이를 얻은 시편은 490MPa의 피로강도를 나타내었다. 그러므로 침탄 처리한 시편이 열처리를 하지 않은 시편에 비해서는 두 배 이상 피로강도가 향상되었으며, 재가열처리를 한 시편에 비해서도 피로강도가 향상된 결과를 가져왔다.

#### 4. 결 론

저합금강인 SCM415강에 대하여 플라즈마 침탄 공정을 변수로 하여 침탄 특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 플라즈마 침탄 효과는 수소가스의 영향보다는 탄소를 함유한 메탄가스의 량에 의존하여, 메탄가스가 100%일 때 가장 우수한 침탄 효과를 나타낸다.

2) 플라즈마 침탄시 가스 조성과 가스 압력, 그리고 온도 등은 플라즈마 전압과 전류의 크기에 영향을 미치며, 플라즈마 전류밀도가 높고 낮음에 따라 침탄 특성이 좌우된다. 전류밀도가 높을 때 강 표면에 많은 량의 탄소가 침투하여 높은 농도의 탄소가 확산하게 되고, 보다 깊은 유효경화깊

이를 가져오는 것으로 나타났다.

3) 플라즈마 침탄 온도는 850°C 이상에서 효과적이었으며, 온도가 높을수록 침탄 효과가 우수하였다.

4) 침탄 온도 900°C, 전류밀도 1.2mA/cm<sup>2</sup>, 1시간의 플라즈마 침탄과 900°C, 30분의 확산을 통하여 0.5mm의 유효경화깊이를 얻은 시편은 열처리를 하지 않은 시편이나 재가열 처리한 시편에 비해 우수한 굽힘피로강도를 나타내었다.

5) 침탄온도 900°C, 전류밀도 8.96-9.11mA/cm<sup>2</sup>에서 침탄층의 성장률은 0.0167mm/sec<sup>1/2</sup>이었다.

#### 감사의 글

이 논문은 성균관대학교의 1997년도 성균학술연구비와 산업설비 안정성 평가 연구 센터 (SAFE, ERC)의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. 최신 열처리 기술, 산업정보원 pp. 173-174, 189-191, 1990
2. G.P. Cavallaro, Bending Fatigue and Contact Fatigue Characteristics of Carburized Gears, Surface & Coating Technology 71, pp. 182-192, 1995
3. F. Schnatbaum and A. Melber, Plasma Carburising of Steel in Pulsed Direct-Current Glow Discharges, Heat Treatment of Metals, p. 45-51, 1994
4. K. Akutsu, et al., Practice and Experience with Plasma Carburizing Furnace, Ion Nitriding and Ion Carburizing, pp. 249-256, 1989
5. J.G. Conybear, et al., Plasma Carburize High Alloy Bearing, Gear Steels., Heat Treating, pp. 11-13, 1992
6. S. Dorn, et al., Parameters, Uniformity and Trends in Plasma Carburizing, 1995 Carburizing and Nitriding with Atmospheres, ASM Int'l, pp. 89-92, 1995
7. W. L. Grube and J. C. Gay, "High-Rate Carburizing in a Glow-Discharge Methane Plasma," Metal-

- lurgical Transactions A, Vol. 9A, Oct. pp. 1421-1429, 1978
8. L. Davis, et al., Handbook of Auger Electron Spectroscopy, Perkin Elmer Co., pp. 5-12, 1976
  9. JIS Z 2274, Method of Rotating Bending Fatigue Testing of Metals. pp. 176-181, 1978
  10. C. R. Juvinall, Fundamentals of Machine Component Design, 2nd Ed. John Wiley & Sons, pp. 81-96, 1991
  11. A. J. Bannantine, J. J. Comer, and L. J. Handrock, Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall, pp. 1-31, 1990
  12. Methods of Measuring Case Depth (SAE), Metals Handbook, 8th Ed., ASM, p. 164, 1964
  13. R. W. K. Honeycombe, Steels: Microstructure and Properties, Edward Arnold, p. 7, 1981
  14. H. J. Kim and Y. G. Kweon, High Cycle Fatigue Behavior of Gas-Carburized Medium Carbon Cr-Mo Steel, Metallurgical Transactions, Vol. 27A, pp. 2557-2564, 1996