<연구논문>

한국표면공학회지

J. Kor. Inst. Surf. Eng.

Vol. 44, No. 5, 2011.

<http://dx.doi.org/10.5695/JKISE.2011.44.5.207>

침탄질화 처리된 SCM415강의 깊이에 따른 확산 및 마모특성 변화

이수연^a, 윤국태^b, 허석환^{c*}, 이찬규^a^a창원대학교 금속·신소재공학부, ^b대구기계부품연구원, ^c삼성전기

The Change in Diffusion Coefficient and Wear Characteristic in Carbonitriding Layer of SCM415 Steel

Su Yeon Lee^a, Kuk Tea Youn^b, Seok Hwan Huh^{c*}, Chan Gyu Lee^a^aDepartment of Metallurgy & Advanced Materials Engineering, Changwon National University, Changwon 641-773, Korea^bDaegu Machinery Institute of component & Materials, Daegu, Korea^cSamsung electro-mechanics, Busan, Korea

(Received October 7, 2011 ; revised October 27, 2011 ; accepted October 28, 2011)

Abstract

In this study, the change in diffusion coefficient and wear characteristic with depth in the carbonitriding layer of SCM415 steel was discussed. To determine the diffusion coefficient, depth profile of carbon was measured from the surface using the Glow Discharge Spectrometer. In otherwise, measurements of carbide fraction, micro vickers hardness of surface and observation of microstructure have been implemented through the SEM image. $\text{Fe}_3(\text{C},\text{N})$ layer and effective depth were increased as the time for carbonitriding takes longer. According to wear experiment, the results showed that wear resistance was improved by $\text{Fe}_3(\text{C},\text{N})$ layer and effective depth.

Keywords: Carbonitriding, Hardness, Microstructure, Diffusion coefficient, Surface carbon content

1. 서 론

강의 표면경화 열처리의 대표적인 방법인 침탄 열처리하는 재료의 내마모 및 피로강도를 향상시키는 기술로서 스프링, 기어 등의 기계부품 및 금형 등에 널리 적용되고 있다. 이러한 침탄 열처리법은 다른 열처리법에 비해 비교적 깊은 곳까지 경도가 높은 표면을 얻을 수 있다는 우수한 특징을 가지고 있다^{1,2)}. 표면경화 열처리 중 침탄과 질화 열처리 방법은 표면층의 탄소나 질소 등의 성분을 증가시켜 탄화물이나 질화물을 만들거나 단순한 성분 함량의 증가로 표면층의 성질을 바꿀 수 있어 지금까지도 현장에서 주로 사용되고 있다³⁾.

침탄 방법에는 고체 침탄, 주입식 침탄, 진공 침탄, 플라스마 침탄 등이 있고 각종의 재질, 용도에 따라 사용되고 있다. 특히 근래에는 침탄 깊이를 얻기 위해 탄소의 확산속도가 빠르고, 산화를 발생을 억제시켜 기계적 성질을 향상시키는 진공 침탄과 침탄성 가스의 플라스마를 이용한 플라스마 침탄이 많이 연구 및 실용화되고 있다^{4,5)}. 플라스마 침탄 처리는 침탄가스의 소비가 적고 침탄가스나 캐리어 가스에 산소를 포함하지 않기 때문에 표면이상층이 형성되지 않는 이점이 있다⁶⁾. 진공 침탄처리하는 가스 침탄처리의 단점인 유해가스 CO_2 를 다량 발생시키는 환경문제를 개선하고 새로운 처리기술에 대한 연구가 활발히 진행중이다⁷⁾.

질화 처리는 가스 질화, 플라스마를 이용한 이온 질화 등이 있고 침탄처리의 처리온도인 850~950°C

*Corresponding author. E-mail : shhuh12@gmail.com

Table 1. Chemical composition of specimen (wt%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	Cu	P	S	Ni	Fe
0.15	0.21	0.72	0.97	0.17	0.13	0.01	0.02	0.10	Bal.

Fig. 1. Structure of air bearing spindle: (a) before assembly and (b) after assembly.

보다 낮은 온도에서 처리하므로 변형이 작은 장점이 있으나 처리시간이 길고 유효 경화깊이가 작아서 아직 광범위하게 사용되지는 않는다. 많은 연구자들은 질화깊이를 향상시키는 연구를 진행하고 있다⁸⁻¹¹⁾.

본 연구에서는 위의 두 가지 표면처리기술의 장점을 결합시킨 침탄질화 열처리를 사용하였으며, 질화처리 기술이라기보다는 변형된 침탄처리기술로 침탄된 표면층을 질화처리하기 위해 침탄 분위기에 NH_3 를 불어 넣어서 NH_3 가 가스 분위기에서 질소로 분해되어 탄소와 함께 강으로 확산되는 열처리 방법이다. 침탄질화 열처리는 본 연구적용 대상인 다양한 베어링 시스템을 장착한 공작기계용 고속 스핀들의 표면처리 분야 외 Auto Mission, Fork, Lever 류 등 자동차부품, 에어컨 등 전자부품, 유압부품, 산업기계부품, 특수볼트, 기어 및 Shaft류에 적용되는 등, 고수명, 저진동, 고정밀화 등의 특성을 요하는 다양한 기계부품 분야에 응용가능하다. 따라서 본 연구는 침탄질화 열처리법으로 $\text{Fe}_3(\text{C},\text{N})$ 상의 생성을 통하여 낮은 유효 경도깊이에서도 내마모성을 향상시키고자 하였다. 침탄질화 열처리의 시간에 따른 미세조직, 유효 경도깊이 변화, 탄소의 확산계수 및 내마모 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편 제작 및 침탄질화 열처리

그림 1과 같이 공작기계의 부품인 베어링 스핀들의 침탄질화 처리 및 적용할 목적으로 본 연구에 사용한 시험편은 저탄소 합금강인 SCM415강을 30 mm × 30 mm × 10 mm 크기 및 10 mm × 20 mm × 30 mm 크기로 절단하여 침탄질화 열처리를 실시하였고, 시험편의 화학 조성은 표 1에 나타내었다.

본 연구에서 사용된 침탄질화 열처리의 공정 흐름도를 그림 2에 나타내었다. 그림 2는 침탄질화 열

Fig. 2. Heat treatment for carbonitriding.

Table 2. Condition of carburizing and diffusion

Heat No.	Carburizing		Nitriding	
	Temp (°C)	Time (min)	Temp (°C)	Time (min)
A	850	20	850	20
B	850	30	850	20
C	850	30	850	30

처리 조건으로 승온 60분 후, 5분 동안 예열, 850°C에서 20~30분 침탄, 같은 온도에서 20~30분 동안 질화, 60°C까지 급냉시킨 후, 후열처리(템퍼링)를 실시하였다. 850°C 침탄질화 열처리시 사용된 가스는 LPG가스로 탄소 분압 1.0을 유지하였으며, 질화처리시에는 NH_3 가스 분위기에서 탄소 분압 0.8로 열처리하였다. 이때 실시한 침탄 및 질화처리 시간 및 온도조건을 표 2에 나타내었다. 조건 A는 850°C에서 침탄처리 20분, 질화처리 20분, 조건 B는 850°C에서 침탄처리 30분, 질화처리 20분, 조건 C는 850°C에서 침탄처리 30분, 질화처리 30분을 행하여 시험편을 준비하였다.

2.2 미세 조직 및 확산 계수

침탄질화 열처리 시간변화에 따른 유효 경화깊이 변화를 확인하기 위해 침탄질화된 시험편의 단면을 Sand paper #2000까지 연마하고, 1 μm까지 Polishing 한 후 표면에서 내부로의 미세경도 및 미세조직 변화를 관찰하였다. 미세조직 관찰은 광학현미경 및 주사전자현미경을 이용하여 관찰하였고, 특정 시험편에 대해서는 표면에서 내부로의 탄소농도변화를 분석하여 확산계수를 구했다. 탄소농도분석은 GDS (Glow Discharge Spectrometer, JY10000RF, KBSI-PA314)를 이용하여 A조건의 시험편을 표면에서 깊이 방향으로의 탄소의 변화를 0.02 mm단위로 분석하였다.

2.3 마찰·마모 시험

침탄질화 열처리된 시편의 마찰·마모 특성을 평가하기 위해 Ball on Disk 방식의 마모시험기 (RB114HTS)를 사용하였으며, 시험편은 30 mm × 30 mm × 10 mm 크기로 가공하였으며 상대재료로는 SUJ2 베어링 강을 사용하였다. 마찰·마모 시험조건은 상온에서 무윤활 상태로 회전속도 100 RPM, 시험시간 300 sec, 시험거리 47.1 m, 회전반경 12.5 mm, 시험부과하중 5 kgf으로 시험을 실시하였으며, 마찰·마모시험 후 마찰계수, 마모흔 관찰 및 분석을 행하였다. 마찰계수 측정은 Ball 시험편 홀더부에 strain gauge를 부착하여 발생하는 마찰력을 마찰계수 계산 알고리즘을 이용하여 마찰계수를 구하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 미세조직 및 탄화물 분율 측정

침탄질화 열처리에서 형성되는 화합물층의 조성 및 두께는 침탄질화 처리방법, 열처리 조건, 가스 조성 및 강의 화학조성 등에 의존한다고 보고되었다^{6,12}. 침탄질화 열처리 후 템퍼링한 시편의 광학현미경 사진을 그림 3에 나타내었으며, 그림 3(a)는 A조건의 시편 단면으로 관찰한 조직사진으로 최표면층에 형성하고 있는 화합물층을 관찰할 수 있었으며, 그림 3(b)는 (a)사진의 최표면층 확대사진이다. 최표면층은 백색층을 이루는 $Fe_3(C,N)$ 화합물층으로 깊이는 평균 0.045 mm, 그 하부에 탄소농도가 높은 템퍼드 마르텐사이트 조직이 나타난다. 그림 3(c)에서는 탄소 농도가 높은 영역의 하부를 확대한 광학현미경 사진으로 템퍼드 마르텐사이트 조직으로 관찰되었다. 침탄질화 처리에 의해 최표면층은 탄소 농도가 높은 $Fe_3(C,N)$ 화합물이 존재함이 보고되었고¹³, 이 화합물층은 고경도 및 내마모 특성을 갖고 있지만, 취성파괴를 일으키는 것으로도 알려져 있다. 그림 3(d), (e)는 B조건과 C조건에서의 단면 광학현미경 사진으로, 상의 조성 및 형상은 A조건 (a)와 동일하나, $Fe_3(C,N)$ 층과 고탄소 농도의 템퍼드 마르텐사이트층의 깊이가 침탄질화 처리시간에 따라 깊어짐을 확인할 수 있다. B와 C조건에서의 $Fe_3(C,N)$ 화합물층의 깊이는 평균 0.093 mm, 0.141 mm 정도였다.

그림 4는 A, B, C조건의 시편을 주사전자현미경을 이용하여 미세 조직사진을 관찰한 결과로, A, B, C조건에서 템퍼드 마르텐사이트와 다량의 탄화물이 관찰되었다. 그림 5는 A조건 탄화물의 EDS분석 결과로 Fe조성은 19.96 at%, Cr은 1.38 at%, C은 78.25 at%로 (Fe,Cr)계 탄화물로 분석되었다. 탄화물의 size는 약 0.5~1 μm 정도이다. 이는 구조용 탄소

Fig. 3. Optical microstructure of carbonitriding specimens: (a) condition A, (b,c) magnification of (a), (d) condition B, (e) condition C.

Fig. 4. SEM image of Carbonitriding specimens: (a) Condition A, (b) Condition B, (c) Condition C.

Fig. 5. Carbide analysis by SEM-EDS.

Fig. 6. Volume fraction of carbide (%).

Fig. 7. Hardness profile with depth from the surface of carbonitrided specimen.

강이나 합금강에서 침탄열처리에 의해서 탄화물이 형성되는 것으로 알려져 있다. 침탄질화 열처리에 의한 모재 내의 Cr이 표면으로 확산되어 이때 생성되는 모재 내의 Cr공핍층에 의해 내식성은 하락한다¹⁴⁾. 주사전자현미경 미세 조직사진을 바탕으로 이미지 프로그램을 이용하여 탄화물의 체적분율을 산출한 결과를 그림 6에 나타내었다. 침탄질화 열처리 후 침탄질화층의 (Fe,Cr)계 탄화물의 체적분율은 A조건 0.94%, B조건 1.69%, C조건 3.02%으로

탄화물의 체적분율이 열처리시간이 증가함에 따라 증가하였다.

3.2 유효 경화깊이

그림 7은 표면에서부터 내부 모재까지의 경도 변화를 나타냈으며, 유효경화 깊이는 KSD ISO 4507의 기준에 따라서 경도 Hv=550 이상까지를 유효경화 깊이로 계산하였다¹⁵⁾. 표면에서부터 내부 모재까지의 경도 분포는 표면의 최고경도 Hv=850에서 급격히 감소하여 SCM415강의 모재 경도는 Hv=400을 나타내었다. 최표면층인 Fe₃(C,N)의 경도는 모재인 템퍼드 마르텐사이트상 보다 2배 이상 높은 값을 나타내었다. 침탄질화 열처리 조건별 유효경화층(Hv>550) 깊이는 A조건 0.22 mm(침탄 20분, 질화 20분), B조건 0.34 mm(침탄 30분, 질화 20분), C조건 0.48 mm(침탄 30분, 질화 30분)으로 침탄질화 열처리 시간이 증가할수록 유효경화층 깊이는 증가하는 것으로 나타났다. 유효경화층 깊이는 Fe₃(C,N) 상과 탄소 농도에 의존한다. Harris *et al.*에 의하면 침탄공정의 유효경화 깊이는 다음의 실험식 (1)으로 표현된다.

$$D = k\sqrt{\tau} \quad (1)$$

여기서 D는 유효 경화깊이, τ 는 총 침탄시간, k는 상수로 표현된다. k값은 침탄공정의 열처리, 가스 조건 및 강의 종류에 따라 변한다.

Lee *et al.*은 가스 침탄처리 실험에서 SCM420강의 900°C와 930°C에서의 k값은 각각 0.35와 0.40으로 보고하였다⁷⁾. 본 연구에서 구한 k값은 0.411로 Lee *et al.* 연구의 930°C에서의 k값과 유사한 결과를 나타내었다. 이는 탄소 분압, 열처리 조건 및 가스 조성 등이 달라서 단순 비교는 어렵지만 다소 높은 값을 나타내었다.

3.3 확산계수 산출

850°C에서 침탄질화 열처리한(침탄 20분, 질화 20분) 시편의 표면으로부터 깊이 방향으로의 농도분석 결과를 그림 8에 나타내었다. 최표면층에서 1 μ m까지는 0.56~1.05 wt%의 탄소농도를 나타내었으며, 이는 침탄처리에 의한 최표면층에 탄소가 집적되어 있는 탄소이상층이다. 그 이후 탄소농도는 일정하게 감소하였으며 표면에서 약 200 μ m에서 모재의 탄소농도인 0.15 wt%를 나타내었다. Carbon Potential을 1.0과 0.8로 유지시키면서 SCM415강의 표면에서부터 내부로 탄소를 침투시키기 위해 850°C에서 침탄질화 열처리를 한 시편으로부터의 확산거리 X

Fig. 8. Carbon profile of carbonitrided specimen at condition A.

Table 3. Diffusion coefficient and carbon content of carbonitriding

X (μm)	C (wt%)	D (m ² /s)
100	0.2477	8.0×10^{-13}
140	0.2013	4.46×10^{-12}
180	0.1616	1.08×10^{-12}

와 농도 C와의 관계는 Fick의 제2법칙에서 표면농도가 일정하게 유지되는 반무한대 고체를 위치와 시간에 관한 미분방정식으로 다음과 같은 경계조건 ($t > 0, x = 0, C = C_s$; $t > 0, X = \infty, C = C_0$)을 넣어서 구한 해로서, 아래의 식 (2)와 같은 오차함수(Error function)의 형태로 표시된다¹⁶⁾.

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{X}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (2)$$

식 (2)에서

C_s : 표면의 탄소농도 (wt%)

C_x : 표면으로부터 (X) 거리 떨어진 지점의 탄소농도 (wt%)

C_0 : 모재의 탄소농도 (wt%)

X : 표면으로부터의 거리 (mm)

를 나타낸다.

그림 8에서 보듯이 표면에서 깊이 방향으로의 농도 분석을 GDS장비를 이용하여 도출한 탄소의 농도를 상기 식(2)에 대입하여 확산계수(D)를 고찰할 수 있다. 이때 확산 전 모재의 탄소농도는 CS분석의 실측치인 0.15 wt%를 이용하였고, 표면의 탄소농도는 GDS 분석결과인 1.05 wt%를 사용하여 확산계수를 계산하였다. GDS 분석을 통해 얻어진 탄소농도를 이용하여 그림 8에 표시된(*) 영역의 확산계수 계산결과를 표 3에 나타내었다.

SCM415강 내의 탄소 확산계수는 평균 $2.113 \times$

Fig. 9. Example of Arrhenius plot for the comparison with our result¹⁷⁾.

Table 4. Reference data of diffusion coefficient¹⁸⁾

Diffusing Species	Host metal	T (°C)	D (m ² /s)
C	α -Fe	500	2.4×10^{-12}
		900	1.7×10^{-10}
	γ -Fe	900	5.9×10^{-12}
		1100	5.3×10^{-11}

10^{-12} m²/s로 계산되었다. 그림 9에 본 연구에서 구한 탄소 확산계수를 외삽해본 결과를 표시하였으며, 900°C에서 γ -Fe에 탄소의 확산계수인 5.9×10^{-12} m²/s와 비슷한 결과를 얻었다^{17,18)}.

3.3 마찰 · 마모특성

침탄질화 처리를 하지 않은 SCM415강의 모재와 침탄질화 열처리된 시편의 각 조건을 동일한 조건으로 마모시험을 실시한 결과를 그림 10에 나타내었다. 침탄질화 처리를 하지 않은 시편에 비해 침탄질화 처리된 시편의 마찰계수 값은 낮아졌으며, 침탄처리 30분, 질화처리 30분인 C조건에서 마찰계수가 0.156으로 SCM415강의 마찰계수 대비 60% 향상되었다. 이는 C조건에서 침탄질화 화합물층(Fe₃(C,N))의 깊이가 평균 0.141 mm이고, 탄화물의 체적분율도 3%로, SCM415강 및 침탄질화 열처리강 중에서도 가장 낮은 마찰계수(0.156)를 가진다. 침탄질화층의 윤활성이 내마모 특성을 향상을 가져온 것으로 판단된다. 그림 11에서는 A, B, C조건에 대한 마모시험 후의 마모흔을 나타내었으며, 모든 조건에서 응착마모와 연삭마모가 혼재되어 있으나 주로 연삭마모 현상이 나타났다. 침탄질화 처리시

Fig. 10. Variation of friction Coefficient with base metal and condition.

Fig. 11. SEM image of wear traces: (a) Base metal, (b) Condition A, (c) Condition B, (d) Condition C.

간의 증가는 마모흔 폭의 감소로 나타났으며, 이는 마찰계수와 마찬가지로 침탄질화 처리가 내마모성을 증가시켰음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 SCM415강의 침탄질화 열처리를 각각 40분(A조건), 50분(B조건), 60분(C조건)을 실시하였을 때, 침탄질화 열처리에 의한 미세조직, 유효 경화깊이, 탄소 확산계수 및 마찰계수를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. SCM415강에서 침탄질화 열처리의 시간을 증가시키는 A, B, C조건에서 유효 경화깊이는 각각 0.22 mm, 0.34 mm, 0.48 mm로 증가하였다.

2. A, B, C조건에서 최표면층의 $Fe_3(C,N)$ 화합물

층의 두께는 평균 0.045 mm, 0.093 mm, 0.141 mm였다.

3. SCM415강의 탄소 확산계수 (850°C)는 $2.113 \times 10^{-12} m^2/s$ 정도로 앞서 보고된 연구자들의 $\gamma-Fe$ 내의 탄소 확산계수(900°C)와 유사한 값을 가졌다.

4. 침탄질화 열처리 C조건에 따라 유효 경화깊이 0.48 mm에서 모재 대비 60% 향상된 마찰계수 0.156을 얻었다.

참고문헌

1. G. P. Cavallaro, Surface & Coating Technology, 71 (1995), 182.
2. Krauss, G., Materials Park, Ohio, ASM International, (1990).
3. H. W. Lee, Yonsei University, (2003), 11.
4. K. Terakado, R. Urao, M. Ohmori, Metall. and Mater. Trans. A., 27A (1996) 40.
5. M. Okumiya, Y. Tsunekawa, I. Niimi, K. Sakakibara, Mater. Trans, JIM., 35 (1994) 351.
6. K. B. Park, D. M. Shin, K. S. Lee, J. Kor. Inst. Met. & Mater., 2 (2000) 338.
7. W. B. Lee, G. I. Moon, Y. K. Cho, K. M. Lim, S. G. Byun, J. Kor. Inst. Surf. Eng., 43 (2010) 211.
8. H. Mallener, M. Schuiz, HTM, 48 (1993) 166.
9. M. B. Karais, A. M. Staines, Heat treatment Metals, 16 (1989) 79.
10. J. Zysk, J. Tacikowski, E. Kaspizycka, HTM, 34 (1979) 263.
11. Y. K. Kim, J. Kor. Inst. Surf. Eng., 43 (2010) 91.
12. T. W. Kim, Y. S. Cho, Y. H. Kim, H. S. Park, The Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers Semiannual, 38 (2004) 214.
13. T. W. Kim, Y. S. Cho, Y. H. Kim, H. S. Park, The Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers Semiannual, 38 (2004) 218.
14. H. B. Bang, U. C. Jung, W. S. Jung, B. C. Cha, J. Kor. Inst. Surf. Eng., 44. (2011) 149.
15. Korean Industrial Standard, Sintered ferrous materials, carburized or carbonitrided - Determination and verification of case-hardening depth by a micro-hardness test, KS D ISO 4507, (2009).
16. C. G. Lee, J. Kor. Soc. for Heat Treatment, 19 (2006) 54.
17. William D. Callister, David G. Rethwisch, Mater. Sci. & Eng., Sigma Press, 8 (2011) 152.
18. E. A. Brandes, G. B. Brook Smithells Metals Reference Book, Butterworth-Heinemann, Oxford, 7 (1992).