<학술논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.10.873 ISSN 1226-4873(Print) 2288-5226(Online)

컨트롤 밸브용 침탄 SCM415강의 마멸 특성

이정원* · 나성현* · 윤동현* · 한순형** · 김형곤** · 김재훈*†
* 충남대학교 기계공학과, ** 대모엔지니어링

Wear Characteristics of Carburized SCM415 Steel for Control Valve

Jeong Won Lee*, Seong Hyeon Na*, Dong Hyun Yoon*, Sun Hyoung Han**, Hyung Gong Kim** and Jae Hoon Kim*†
* School of Mechanical and Aerospace Engineering, Chungnam Nat'l Univ.,
** DAEMO industry Corporation.

(Received May 13, 2016 ; Revised July 25, 2016 ; Accepted July 25, 2016)

Key Words: Wear(마멸), Specific Wear Rate(비마멸률), Carburizing(침탄), Coefficient of Friction(마찰계수)

초록: 컨트롤 밸브용 SCM415강은 밸브케이스와 밸브의 지속적인 운동을 통해 마멸이 발생한다. 마멸은 밸브의 성능을 저하시키고, 사용 수명을 단축시킨다. 본 논문은 컨트롤 밸브용 모재 및 침탄 처리된 SCM415강에 대하여 마멸 특성을 평가하였다. 마멸 시험은 다양한 온도 및 하중에서 왕복동 마모시험기를 이용하여 수행되었으며, 마멸량, 비마멸율 및 마찰계수를 분석하였다. 마멸 메커니즘은 SEM을 통하여 분석하였다. 마멸량에 대한 하중과 온도의 교호작용은 MINITAB을 이용한 분산분석을 수행하였다.

Abstract: SCM415 steel for the control valve undergoes wear because of continuous movement between the valve and valve case. The wear of the valve interrupts the performance of the valve, and decreases the service life. In this study, wear characteristics of the as-received and carburized SCM415 steels are evaluated. The wear tests are conducted for various temperatures and loads using a reciprocating wear tester. From these results, wear loss, specific wear rate, and coefficient of friction are analyzed. The wear mechanism was analyzed by SEM. The interaction effects between loads and temperatures on wear loss are determined for analysis of variance using MINITAB.

- 기호설명 -

W_e : 비마멸률
$\triangle m$: 마멸량
$\triangle t$: 시험 시간
v : 왕복 속도
ρ : 재료의 밀도
F_N : 수직 하중

1. 서 론

밸브는 배관 또는 압력용기에 장치되어 배관의 통로를 개폐할 수 있는 기계적 장치로서 유체의 흐름, 유량, 압력을 제어하는 중요한 기기이다. 밸브를 선정함에 있어서 밸브의 재질에 대한 선정은 매우 중요한 요소이다. 이러한 밸브에 대한 마멸은 각 부품의 상대운동으로 인해 필연적으로 발생하게 된다. 밸브의 마멸은 결과적으로 밸브 작동 시 유체의 흐름을 완벽하게 제어가 되지 않는 문제를 가지고 있다.[1,2]

일반적으로 밸브의 표면은 경하고 내마멸성이 뛰어난 재료로 구성되어 있으며, 표면처리를 하여 내마멸성, 강도 및 충격에 대한 저항성을 향상시켜 작동 시 밸브 성능을 향상시킬 수 있도록 많은 연구자들은 노력해 왔다.[3] 이러한 표면처리는 재료의 내부와 성질이 다른 표면층을 재료에 형성하여 향상된 기계적 성질을 얻는 방법이다.

표면 처리를 통해 형성된 표면층은 마멸, 피로, 부식 그리고 산화 저항성을 가지게 되어 매우 우

† Corresponding Author, jhoonkim@cnu.ac.kr
© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

Table 1 Chemical compositions of SCM415 steel

	C	Si	Mn	P	S
SCM415 (wt%)	0.13~0.18	0.15~0.35	0.6~0.85	0.03	0.03
	Cu	Ni	Cr	Mo	
	0.3	0.24	0.9~1.2	0.15~0.3	

Table 2 Mechanical properties of SCM415 steel

Mechanical perperty	As-received	Carburized
σ_{uts} [MPa]	612.44	1160.33
σ_y [MPa]	342.03	1037.16
E [GPa]	195.16	184.81
ε [%]	24.07	2.66
H_v	177	664

수한 기계적 성질을 가지게 된다. 표면 처리방법은 대표적으로 침탄법과 질화법 등이 있다. 침탄법은 여러 가지 면에서 다른 열 처리법에 비해 표면 개질층의 깊이를 비교적 깊게 할 수 있는 우수한 특징을 가지고 있다.[3,4]

침탄 처리를 이용한 강의 마멸 특성에 관한 연구는 주로 미세 조직적 특징과 관련하여 연구되어져 왔다. 즉 유효경화 깊이의 미세 조직적 특성 그리고 탄화물, 잔류 오스테나이트의 양과 마멸과의 관계에 대한 연구가 주류를 이루어 왔는데, 유효경화 깊이가 깊고, 경화층의 경도가 클수록 압입저항과 case crushing에 대한 저항성, 그리고 표면 전단력에 대한 저항력이 역시 커진다고 알려져 있다. 마멸의 측면에서 볼 때 조대한 탄화물이 절삭마멸 저항에 우수한 특성을 나타내는데 이는 미세한 탄화물이 동일한 경도에서 잔류 오스테나이트를 많이 함유하기 때문이다.[5]

본 논문은 왕복동 마멸 시험을 통해 컨트롤 밸브용 SCM415강 모재와 침탄처리 소재의 마멸 특성을 비교하였다. 시험조건은 실제 작동환경을 고려하여 상온과 고온 환경에서 마멸 특성에 대하여 비교하고, 하중에 따라 변화하는 마멸 특성에 대하여 고찰하였다.

2. 재료 및 시험방법

2.1 시험재료

본 논문에서 사용되는 재료는 컨트롤 밸브로 사용되는 SCM415강이다. Table 1은 SCM415강의 화학조성을 나타낸 것이다. SCM415강의 화학조성은 다소 높은 니켈, 망간, 크롬 양을 보인다. Fig. 1은 마멸 시험의 상부 및 하부 시편의 형상과 치수를 나타낸 것이다.

Table 2는 모재와 침탄 처리된 시편의 기계적 특성을 나타낸 것이다. 모재에 비하여 침탄 처리된 시편은 인장강도(σ_{uts}), 항복강도(σ_y), 비커스 경도값(H_v)은 각각 1.9배, 3.0배, 3.8배의 높은 값

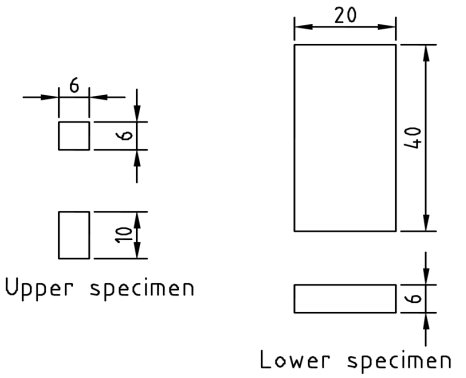


Fig. 1 Configuration of wear test specimens

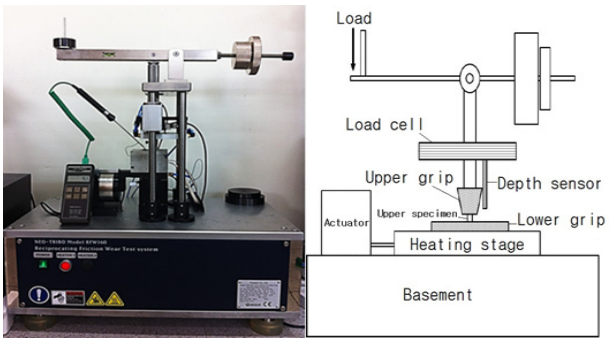


Fig. 2 Reciprocating wear tester RFW-160

을 보였다. 탄성계수(E)는 큰 차이를 보이지 않지만 모재가 약간 큰 값을 나타냈고 연신율을 보았을 때 침탄 처리된 시편은 취성의 성질을 나타내는 것으로 알 수 있다. 침탄 처리된 시편의 경우 표면으로부터 0.9 mm 이하에서의 경도는 Hv 600 이상이고 표면의 경도는 Hv 650 정도로 확인되었다.

2.2 시험장비 및 시험방법

2.2.1 시험장비

Fig. 2는 마멸 시험을 위한 고온용 마멸 시험기(RFW 160, reciprocating friction wear tester)를 나

Table 3 Wear test conditions

Condition	Time	1800 s (30 min)			
	Velocity	0.03 m/s (3 Hz)			
	Temperature	R.T.		90℃	
	Load	10 N	30 N	50 N	70 N

타낸 것이다. 마멸 시험기는 디지털 제어 방식으로 속도, 거리 및 시간을 제어할 수 있다. 시험재료는 컨트롤 밸브용 SCM415강의 모재와 침탄 소재를 이용하였다.

Table 3은 마멸 시험 조건을 나타낸 것이다. 시험온도의 경우 실제 유압브레이커의 컨트롤밸브 가동 시에 최대온도인 90℃와 상온을 시험조건으로 선정하였다. 최대온도와 상온에서 다양한 하중에서의 마멸특성을 분석하기 위하여 하중조건을 4가지 하중(10 N, 30 N, 50 N, 70 N)으로 시험속도 0.03 m/s와 1800초(30분)간 시험을 진행하였다. 또한, 무윤활로 시험을 진행하여 컨트롤 밸브 가동조건보다 가혹한 조건에서 마멸특성을 분석하였다.

2.2.2 비마멸률(specific wear rate)

마멸량(wear loss)은 다양한 조건에서 시험을 수행한 후 시험 전 후 시편의 질량을 0.0001 g의 정밀도를 가지는 전자식 저울로 측정하였다. 비마멸률은 측정된 마멸량으로부터 산출하였다. 이때 비마멸률은 일반적으로 마멸특성을 비교하는 척도로 사용되고 있으며, 식 (1)은 비마멸률을 나타낸 것이다.

$$W_e = \frac{\Delta m}{\Delta t}\frac{1}{v\rho F_N} \quad (1)$$

여기서, W_e는 비마멸률을 나타낸 것으로 소재간의 마멸 정도를 비교하기 위한 값이다. Δm은 시험 후 마멸량, Δt는 시험 시간, v는 시험 속도, ρ는 재료의 밀도, F_N은 수직하중을 나타낸 것이다.[6]

3. 결과 및 고찰

3.1 다양한 하중 및 온도에 따른 마멸 특성

SCM415강에 대한 마멸 특성은 10 N, 30 N, 50 N, 70 N의 시험하중과 상온 및 90℃의 시험온도 조건에 따라 분석하였다. Table 4는 상온 및 90℃ 온도 조건에서 모재 및 침탄 처리된 SCM강의 마멸량을 나타낸 것이다.

Table 4 Results of wear loss (unit: mg)

Condition		10 N	30 N	50 N	70 N
As-received	R.T.	14.1	54.0	78.6	85.3
	90℃	0.7	7.3	7.7	15.5
Carurized	R.T.	0.2	0.2	0.4	1.3
	90℃	0.8	1.7	2.3	2.1

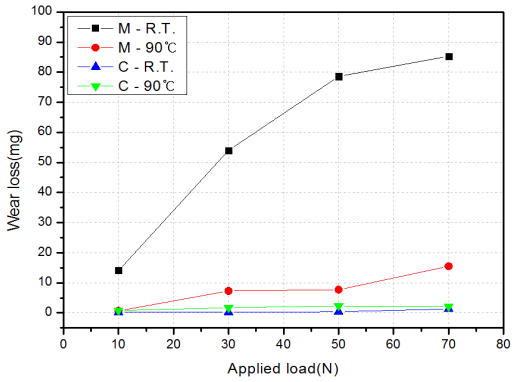


Fig. 3 Results of wear loss for applied loads

Fig. 3은 다양한 하중에 따른 마멸량을 정리한 것이다. Fig. 3에서 M은 SCM415강의 모재를 나타낸 것이고, C는 침탄 소재를 나타낸 것이다. 동일한 온도 조건에서 가해지는 하중이 증가함에 따라 소재의 마멸량은 증가하는 경향을 나타낸다. 모재의 마멸량은 침탄시편과 비교 시 큰 차이를 나타내고 있다. 침탄 소재는 모재에 비해 약 3.7배 높은 경도를 가지는데 높은 경도로 인하여 시편사이에 슬립현상이 발생하여 마멸량이 작게 나온 것으로 판단된다.

90℃의 온도조건에서 모재의 경우 상온보다 마멸량이 감소하고 침탄 소재는 반대되는 현상을 나타냈다. 모재의 경우 시편온도가 90℃인 경우 상부시편과 하부시편의 접촉부 온도의 현저한 상승으로 마찰면에 생성된 마멸분이 산화되어 산화막으로 윤활역할을 하여 마멸량이 감소한 것으로 사료된다.[7] 침탄소재의 경우 마멸량이 많지 않기 때문에 마멸분의 산화에 대한 영향보다 시편의 온도상승으로 인한 표면경도 감소로 인하여 마멸량이 증가하고 있다.[8]

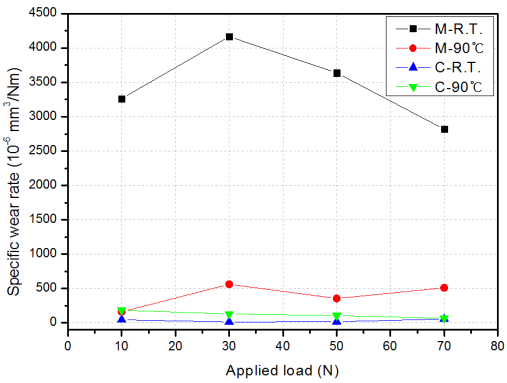


Fig. 4 Results of specific wear rate

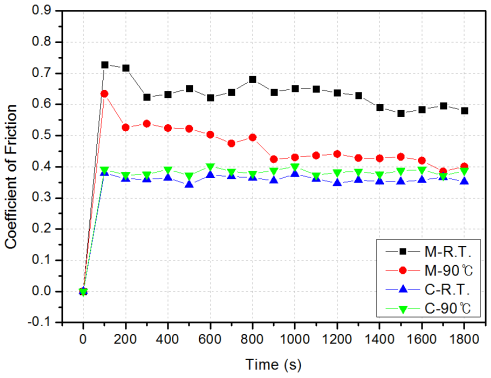
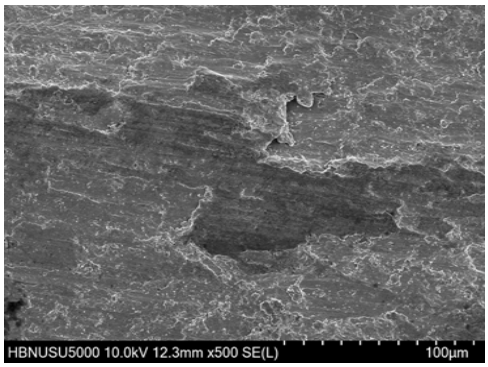


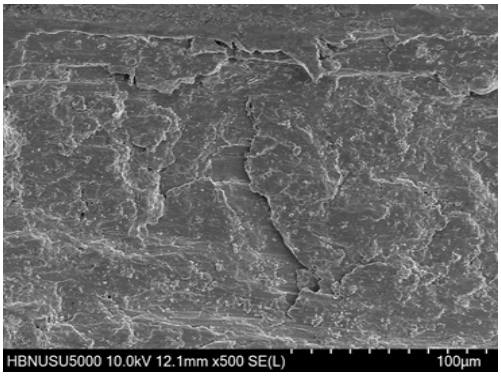
Fig. 5 Time histories of friction coefficient at 70 N

Fig. 4는 다양한 하중 조건에 따른 비마멸률을 나타낸 것이다. 하중이 증가함에 따라 마멸량은 증가하는 경향을 보였지만, 비마멸률의 경우는 마멸량과 다른 경향을 보이고 있다. 이는 하중이 증가할수록 마멸되는 양의 차이가 감소하여 나타나는 현상이다. 이를 통하여 마멸 정도가 가장 심하게 나타나는 하중은 30 N, 모재의 경우 상온, 침탄소재의 경우에는 90℃ 임을 확인할 수 있다.

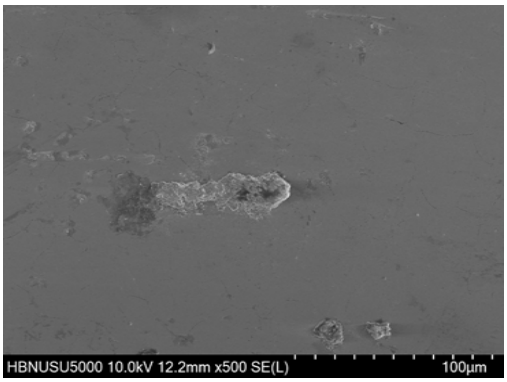
Fig. 5은 70 N에서 시간에 따른 마찰계수 값을 나타낸 것이다. 마멸시험기에서는 로드셀을 통하여 마찰력을 측정한다. 시편에 가해준 수직하중을 측정된 마찰력으로 나누어 마찰계수를 구하였다. 상온에서 모재의 마찰계수는 약 1400초 이후 안정화되고, 90℃에서 모재의 마찰계수는 900초 이후 안정화된다. 상온에서 모재의 마찰계수는 0.60, 침탄 소재의 마찰계수는 0.35이다. 90℃에서 모재의 마찰계수는 0.44, 침탄 소재의 마찰계수는 0.38이다. 따라서 모재의 마찰계수는 상온 및 고온에서 차이를 보이며, 침탄 소재의 마찰계수는 상온 및 고온에서 차이가 거의 없고 90℃에서 약간 높았다.



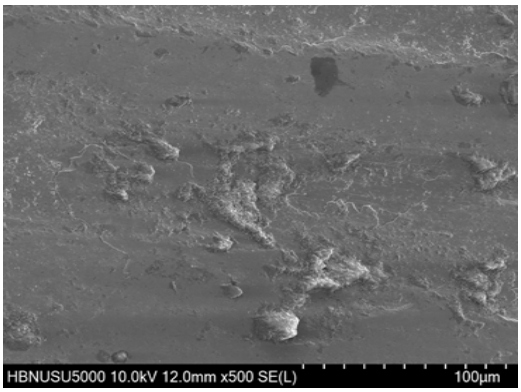
(a) As-received 30N



(b) As-received 70N



(c) Carburized 30N



(d) Carburized 70N

Fig. 6 SEM images for various loads at R.T.

3.3 SEM을 통한 마멸 표면 관찰

마멸 표면은 마멸 시험 후 시편의 표면에 발생한 마멸흔을 분석하기 위하여 SEM(scanning electron microscope) 촬영을 통해 관찰하였다. 마멸의 주 마모 메커니즘은 응착 마멸과 연삭 마멸로 나타나고 있다. 응착마멸은 접촉하여 상대운동을 하는 두 재료에서 가장 빈번하게 발생하는 파괴 메커니즘이고, 연삭 마멸은 두 물체가 상대 접촉 마찰 운동을 할 때 경한 소재의 표면이 상대적으로 연한 소재의 표면을 긁어서 작용하는 마모 메커니즘이다.

Fig. 6(a) 및 (b)는 상온에서 모재의 마멸시험을 각각 30 N 및 70 N의 하중조건으로 수행하여 SEM 촬영하여 나타낸 것이다. Fig. 6(a) 및 (b)의 마모 메커니즘은 연삭 마멸과 응착 마멸을 동시에 발생하였다. 모재의 경우 연성이 풍부하여 시편사이의 표면 돌출부에서 부분적으로 응착이 발생하고 고압력이 되면서 금속간에 응착이 발생한다. 이후 응착부근에 변형이 발생하게 되고 표면에 균열이 시작하며 연삭에 의한 마멸이 발생하게 되는 것이다.[9]

Fig. 6(c) 및 (d)는 상온에서 침탄 소재의 마멸시험을 각각 30 N 및 70 N의 하중조건으로 수행하여 SEM 촬영하여 나타낸 것이다. 모재와 비교하였을 때 Fig. 6(c)의 파단면은 마모 진행이 적은 것을 확인할 수 있고, Fig. 6(d)의 경우 Fig. 6(c)보다 하중이 증가함에 따라 마멸 진행이 상대적으로 많아진 것을 관찰할 수 있다.

모재와 침탄 소재의 마멸 메커니즘 비교 시, 모재의 경우 마멸량이 많았다. 이는 마멸입자의 생성이 침탄 소재의 시편보다 많다는 것을 알 수 있다. 이에 따라 모재에서는 많은 마멸입자들이 Third body abrasion 작용을 한 것으로 판단된다.[10] Figs. 6(a), (b)에서 보이는 것처럼 이러한 마멸 작용에 의해 표면에 스크레치가 관찰되는 것이다. 침탄 소재의 경우 마멸량이 작아 이러한 현상은 Figs. 6(c), (d)에서 관찰되지 않는다. 반면 하중이 증가함에 따라 침탄층의 마멸이 많이 진행되었기 때문에 응착 마멸 및 연삭마멸이 30 N 하중 조건에 비해 70 N에서 많이 발생한 것을 확인할 수 있다.

3.4 하중과 온도의 교호작용 분석

하중과 온도의 교호작용에 대한 분산분석은 시험에서 입력변수로 작용하는 인자인 하중, 온도, 침탄여부와 출력변수인 반응치의 마멸량에 대하여 영향 인자를 도출하기 위해 사용되었다. 본 연구에서는 유의 수준 0.05에 대하여 분산분석을 수행하였다.

Table 5 Factor informations for analysis of variance

Factor	Type	Level	Value
Load	Fixed	4	10, 30, 50, 70
Temp.	Fixed	2	23, 90
Specimen type	Random	2	As-received Carburized

Table 6 Parameters for analysis of variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
load	3	1132.1	337.4	0.63	0.621
Temp.	1	2391.2	2391.2	3.97	0.087
Specimen type	1	4025.9	4025.9	6.68	0.036
Load ×temp.	3	527.2	175.7	0.29	0.830
Error	7	4218.3	602.6		
Total	15	12294.8			

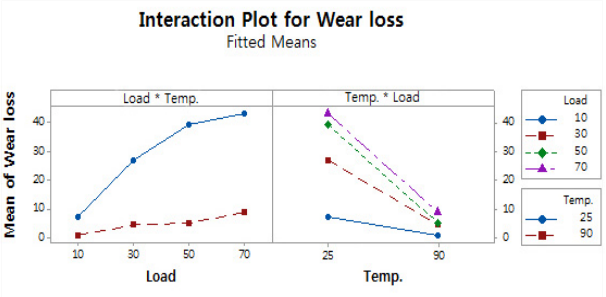


Fig. 7 Interaction plots for wear loss

Table 5는 분산해석에서 요인에 대한 정보를 나타낸 것이다. 이 때 하중과 온도는 기술적 의미를 가지는 모수인자이고, 시편의 종류는 기술적 의미를 갖지 못하는 변량인자이기 때문에 시편의 종류만 랜덤타입이다. Table 6은 하중과 온도의 교호작용에 대하여 유의수준 0.05로 분산분석한 결과를 나타낸 것이다.

DF는 자유도, Adj SS는 총제곱합이고, Adj MS는 제곱합을 자유도로 나눈 분산의 추정량이다. F-value와 P-value는 F검정, P검정을 나타내고 있다. 하중과 온도의 교호작용에 대한 P-value값은

유의수준 0.05보다 크다. 이는 하중과 온도의 교호작용은 마멸량에 영향을 끼치지 않는다.

Fig. 7은 교호작용 그래프를 실험계획법 소프트웨어인 MINITAB 17을 이용하여 나타낸 것이다. 이 때 그래프의 교차되는 부분은 교호작용이 유효한 것을 의미하지만, 본 연구에서 분석한 마멸량에 대한 하중과 온도의 교호작용은 유효하지 않는다.

4. 결 론

본 연구에서는 컨트롤 밸브에 사용하는 SCM415 강의 모재와 침탄 소재를 다양한 조건에서 실험하고, SEM분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 모재의 경우 하중이 10 N에서 70 N으로 증가할수록 상온과 90℃에서 마멸량이 증가지만, 90℃의 경우 마찰면에 생성된 마멸분이 산화되어 산화막의 윤활 역할에 의해 상온보다 마멸량이 감소한다.

(2) 침탄소재의 경우 하중이 증가할수록 마멸량이 증가한다. 하지만 모재처럼 마멸분이 많이 생성되지 않아 산화막으로 인한 마멸량의 감소보다 온도 상승으로 인한 경도의 감소로 90℃에서 마멸량이 증가한다.

(3) 비마멸률이 가장 큰 하중은 30 N이고, 상온에서 모재의 비마모율은 가장 크고, 침탄처리 소재에서는 90℃이다.

(4) SCM415강의 마멸 매커니즘은 연삭마멸과 응착마멸로 발생되며, 주로 발생되는 매커니즘은 응착마멸이다.

(5) SEM분석을 통하여 모재의 경우 많은 마멸입자들이 Third body abrasion 작용에 의해 스크레치가 관찰되고, 침탄소재의 경우 마멸량이 작아 이러한 현상은 관찰되지 않는다.

(6) 마멸량에 대한 하중과 온도의 교호작용은 유효하지 않다.

후 기

본 연구에서는 ㈜대모엔지니어링의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌
(References)

(1) Jang, J. H., Kim, J. H., Kim, C. H. and Moon, Y. H., 2008, "Effect of Coating Laver Hardness on the Wear Characteristics of Diesel Engine Cylinder Liner-piston Ring," *Transaction of Materials Processing*, Vol. 17, No.5, pp. 343~349.

(2) Jang, J. H., Kim, J. H., Kim, C. H. and Moon, Y. H., 2007, "Abrasive Wear Characteristics of Materials for Diesel Engine Cylinder Liner and Piston Ring," *Journal of the Korean Society for Heat Treatment*, Vol. 20, No. 2, pp. 72~77.

(3) Cavallaro, G. P., 1995, "Bending Fatigue and Contact Fatigue Characteristics of Carburized Gears," *Surface and Coating Technology*, Vol. 71, No. 2, pp. 182~192.

(4) Krauss, G., 1990, "Steels: Heat Treatment and Processing Principles," ASM International, Materials Park, Ohio.

(5) Stickels, C. A., 1992, "Carburizing, ASM Handbook," *Friction Lubrication and Wear Technology*, Vol. 18, pp. 873~877.

(6) Juri, P., Mart, V. and Sergei L., 2006, "Friction and Dry Sliding Wear Behavior of Cermets," *Wear*, Vol. 260, pp. 815~825.

(7) Cho, Y. S. and Park, H. S., 2011, "Wear Characteristics of AlBC for Piston Head of Power Servo Cylinder," *Journal of the KSTLE*, Vol. 27, No. 2, pp. 65~70.

(8) Venkatesan, K., Subramanian, C. and Summervile, E., 1997, "Tree-body Abrasion of Surface Engineered Die Steel at Elecated Temperature," *Wear*, Vol. 203, pp. 129~138.

(9) Kim, N. S., Kim, H. S., Seong, K. Y., Ahn, S. H. and Nam, K. W., 2009, "A Study on Wear Property of Oil Hydraulic Piston Pump Material," *JOET*, Vol. 23, pp. 30~34.

(10) Descartes, S., Desrayaud, C., Niccolini, E. and Berthier, Y., 2005, "Presence and Role of the Third Body in a Wheel-Rail Contact," *Wear*, Vol. 258, No. 7, pp. 1081~1090.