

< 학술논문 >

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.11.1131>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

디젤엔진용 실린더 라이너 소재의 고온 마모특성[§]

김진열*, 김재훈**†, 오광근*, 이승학**, 장준용**

* 충남대학교 기계공학부, ** (주)삼영기계

Wear Characteristics of Cylinder-Liner Materials for Diesel Engine at Elevated Temperature

Jin-Yeol Kim*, Jae-Hoon Kim**†, Kwang-Keun Oh*, Seung-Hak Lee** and Joon-Yong Chang**

* Mechanical Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

** Samyoung Machinery Co., Ltd.

(Received March 31, 2015 ; Revised August 31, 2015 ; Accepted September 7, 2015)

Key Words: Cylinder Liner(실린더 라이너), Friction Coefficient(마찰계수), Specific Wear Rate(비마모율), Wear(마모),

초록: 선박 디젤엔진용 실린더 라이너는 피스톤 링과 지속적인 왕복운동을 통해 마모가 발생한다. 마모는 디젤엔진의 성능을 저하시키고, 사용 수명을 단축시킨다. 본 논문은 선박 디젤엔진용 실린더 라이너의 GT 금속 및 기존 금속에 대하여 마모특성을 평가하였다. 마모시험은 상온, 175 °C, 325 °C의 온도조건과 10 N, 30 N, 50 N의 하중조건에서 수행되었으며, 마모량, 비마모율 및 마찰계수를 평가하였다. 또한 각 조건에 대한 마모메커니즘을 분석하기 위해서 SEM 분석을 수행하였다. 두 금속 공히, 상온에서 연삭 및 응착마모가 진행되었고, 고온에서 부식마모가 발견되었다. GT 금속은 기존 금속 대비 모든 온도 범위에서 마모량 및 비마모율이 작고 마모특성이 더 우수하다.

Abstract: In a diesel engine, the wear of the cylinder liner occurs because of the continuous reciprocating motion of the piston ring. This wear reduces the performance of the diesel engine and shortens its service life. This study evaluated the wear characteristics of GT metal and a conventional metal used for cylinder liners using a ship's diesel engine. Wear tests were performed at temperatures of 25 °C, 175 °C, and 325 °C, and under loads of 10 N, 30 N, and 50 N. The amount of wear, specific wear rate, and friction coefficient were evaluated for each condition. To analyze the wear mechanism, observations were made on an SEM. In the case of both metals, abrasive and adhesion wear occurred on the wear surfaces at room temperature, and corrosion wear was observed at high temperatures. The amount of wear and the specific wear rate of the GT metal were lower than those of the conventional metal at all temperatures, and hence it can be concluded that the wear characteristics of the GT metal are much better.

- 기호설명 -

f_c : 마찰계수
 F_F : 마찰 하중(N)
 F_N : 수직 하중(N)
 w_e : 비마모율(mm³/Nm)

1. 서론

일반적으로 상대운동을 하는 모든 물체는 마찰이 존재하며, 각 경우에 상응하는 적절한 윤활을 하고 있지만 마모(wear)는 필연적으로 발생한다. 마찰 부위에 형성되는 마모로 인해 윤활유 속에는 다량의 마모 입자들이 존재하게 됨으로써 마모를 가속시키는 요인으로 작용하여 손상의 원인이 되기도 한다.^(1,2) 마모의 주된 원인은 스커핑(scuffing) 현상이며, 구동부의 실린더 라이너와 피스톤 링 부분에 많이 발생한다. 스커핑 현상은 엔진 내부

§ 이 논문은 2015년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2015. 4. 2-3., 서귀포KAL호텔) 발표논문임.

† Corresponding Author, kimjhoon@cnu.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

의 윤활유 공급이 원활하지 않을 경우 피스톤 링과 실린더 라이너에 무 윤활 마모가 발생하는 것으로 엔진고장에 치명적인 요인 중 하나이다. 이처럼 마모는 엔진효율이 저하되고, 배기가스가 많이 배출되는 등 환경에 직접적인 영향을 미치고 있다. 따라서 엔진의 원활한 작동유지를 위해서는 정확한 마모예측과 그 평가방법이 요구된다. 이를 토대로 엔진 손상을 미연에 방지할 수 있다.

최근에는 마찰 및 마모로 인한 장비들의 손상을 방지하고 엔진의 수명을 늘리고 정확한 마모예측을 하기 위한 많은 연구가 진행 중이다.⁽³⁻⁸⁾

본 연구에서 사용된 GT 금속은 디젤엔진용 실린더 라이너 재료이다. 이 재료는 피스톤 링과 지속적인 왕복동 운동으로 인한 마모발생을 방지하고 수명을 연장하기 위해 새로 개발된 합금이다. 따라서 국내 개발품인 GT 금속 및 기존 금속의 실린더 라이너를 무윤활의 스커핑 상태에서 마모 특성을 비교하였다. 작동조건을 고려해서 온도와 하중을 변수로 설정하여 영향을 분석하였다. GT 금속 및 기존 금속의 실린더 라이너에 대한 마모량을 평가하여 마모특성을 분석하였다. 또한, 소재 표면 전단력의 척도인 마찰계수를 비교하여 분석하였다. 마모시험 후 마모된 표면을 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)을 이용하여 마모메커니즘을 분석하였다.

2. 재료 및 시험 방법

2.1 재료 및 시편

Fig. 1은 마모시험에서 사용되는 실린더 라이너와 피스톤 링의 시편을 나타낸 것이다. 실제 작동조건을 묘사하기 위하여 고정부인 실린더 라이너는 하부시편으로 사용하였고, 실제로 운동을 하는 피스톤 링은 실제로 운동을 하는 피스톤 링은 상부시편으로 제작하였다. 실제 실린더 라이너와 피스톤 링의 접촉면은 호 형태를 이루지만 본 연구에서는 두 재료의 마모특성에 대한 비교이기 때문

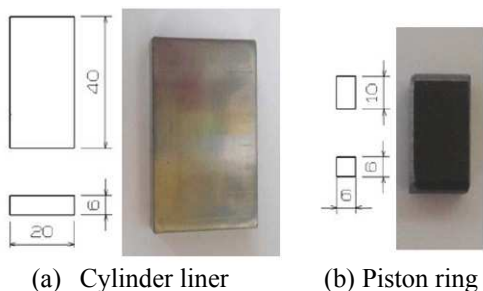


Fig. 1 Configuration of test specimens

에 평평한 접촉면을 가지도록 하였다. 또한 시편 모서리부는 샌드페이퍼(sandpaper)로 연마하여 응력집중을 최소화하여 실험하였다.

Fig. 2는 GT 금속 및 기존 금속의 미세조직에 대한 현미경사진이다. GT 금속이 기존 금속보다 그래파이트(graphite) 및 스테다이트(steadite)의 함량이 많은 것을 확인할 수 있다. 그래파이트는 고체 윤활제로 상대 운동하는 부분의 마모량을 감소시켜 윤활작용을 하며 스테다이트는 높은 경도를 지니고 있어 재료의 내마모성을 향상시키는 특징을 가지고 있다. Table 1은 GT 금속 및 기존 금속에 대한 화학조성을 나타낸 것이다.

2.2 왕복동 마모 시험(Reciprocating wear test)

Fig. 3은 마모시험에 사용된 왕복동 시험기이다. 본 장비는 디지털 제어방식으로 미끄럼 속도(1-30Hz), 미끄럼 거리(1-30 mm) 및 마모시간을 제어할 수 있다. 그리고 고온 마모시험은 가열장치를 이용하여 500℃까지 수행할 수 있다. 하중은 상부에서 하부로 가해지게 되며, 로드셀을 통하여 마찰력을 측정하고 마찰계수로 환산하게 된다.

Table 1 Chemical composition of test materials (wt%)

Material	C	Si	Mn	Cr	Cu
GT metal	2.9 ~3.3	1.6 ~2.3	0.6 ~0.9	0.2 ~0.5	0.2 ~0.5
Conventional metal	3.13	1.85	0.92	0.28	1.68

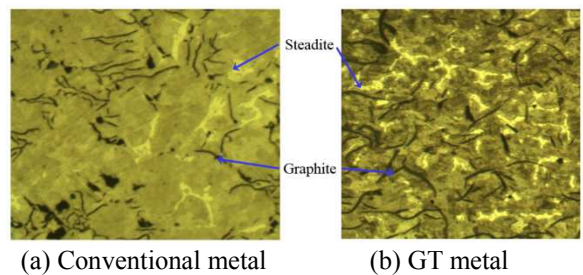


Fig. 2 Microstructures of GT and conventional metals(x100)

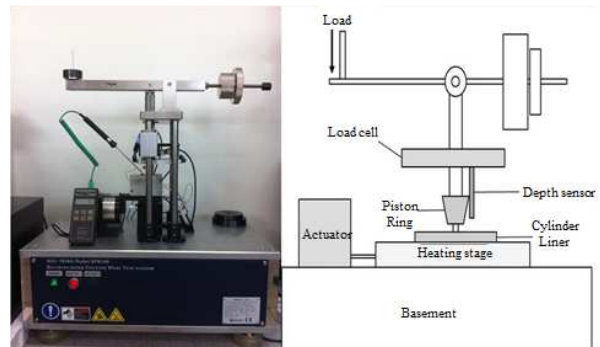


Fig. 3 Reciprocating wear test

Table 2 Test conditions of wear test

Time	21600s (6h)		
Line Speed	0.048m/s (3Hz)		
Temperature	R.T	175 °C	325 °C
Load	10N	30N	50N

마모시험의 전과 후에 실린더 라이너의 정확한 무게 측정을 위해서 시편의 먼지 입자 및 불순물을 초음파 세척한 다음에 분해능 0.0001g의 전자식 저울을 이용하여 무게를 측정하였다.

실린더 라이너의 마모특성을 비교하기 위한 조건은 크게 환경조건과 구동조건으로 나누어 실험하였다. 환경조건은 디젤엔진의 작동온도이며 상온(25°C)과 가동 중의 온도범위인 175 °C, 325 °C로 분류하여 온도에 따른 마찰특성의 변화를 관찰하였다. 구동조건은 하중 및 속도에 대한 것이며, 하중 조건에 따른 마모거동을 분석하기 위해 온도와 속도는 고정하여 일정하게 유지하고, 수직하중(10 N, 30 N, 50 N)을 변수로 실험하였다. 시험시간은 충분한 마모특성을 관측하기 위해 6 시간(21,600 sec)동안 실시하였다. Table 2는 마모시험 조건을 정리한 것이다.

일반적으로 마찰에 의한 마모특성을 정량적으로 평가할 때 마찰계수(friction coefficient)와 비마모율(specific wear rate)을 이용한다. 마찰계수 f_c 는 소재의 계면에 작용하는 마찰하중 F_F 에 대한 수직하중 F_N 의 비를 나타낸다. 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$f_c = \frac{F_F}{F_N} \quad (1)$$

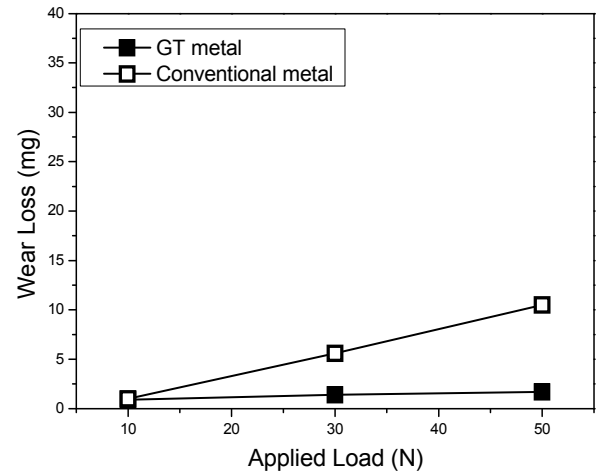
비마모율 \dot{w}_e 은 소재간의 마모 정도를 비교하기 위한 값이다. 마모량(Δm)에 대한 시간(Δt), 속도(v), 밀도(ρ) 및 수직하중(F_N)으로 다음 식과 같이 표현할 수 있다.⁽⁹⁾

$$\dot{w}_e = \frac{\Delta m}{\Delta t} \frac{1}{v\rho F_N} \quad (2)$$

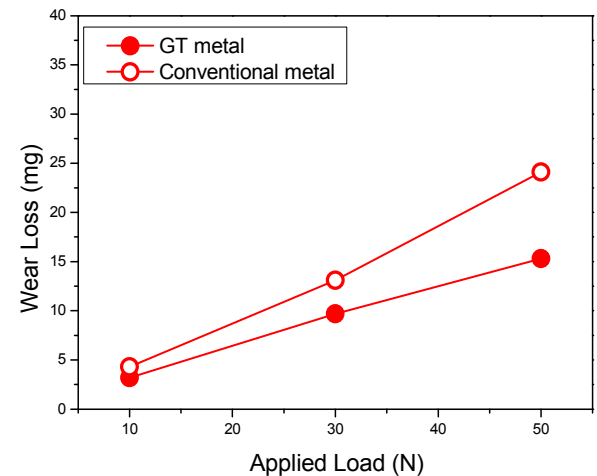
3. 결과 및 고찰

3.1 하중 및 온도에 따른 마모특성 비교

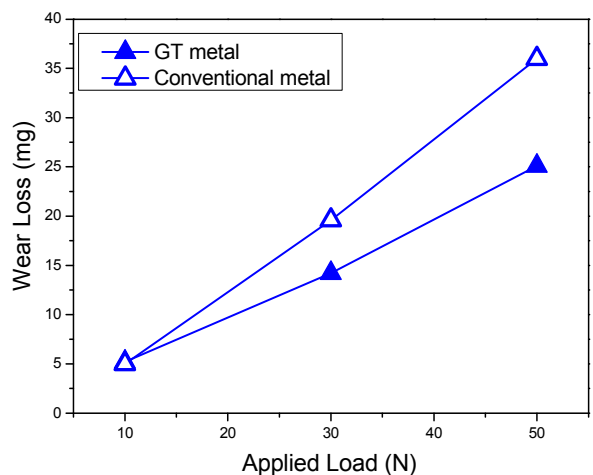
Fig. 4는 GT 및 기존 금속에 대하여 접촉하중과 온도에 따른 마모량의 변화를 비교하여 나타낸 것이다. 두 재료는 공히, 작용하중과 온도가 증가함에 따라 마모량은 점차 증가한다. GT 금속의 실린



(a) R.T.



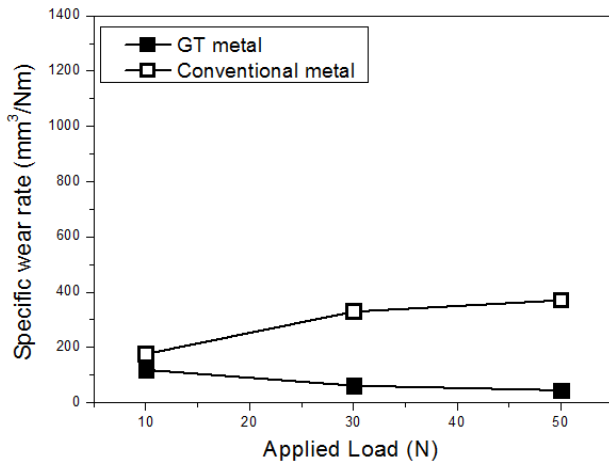
(b) 175°C



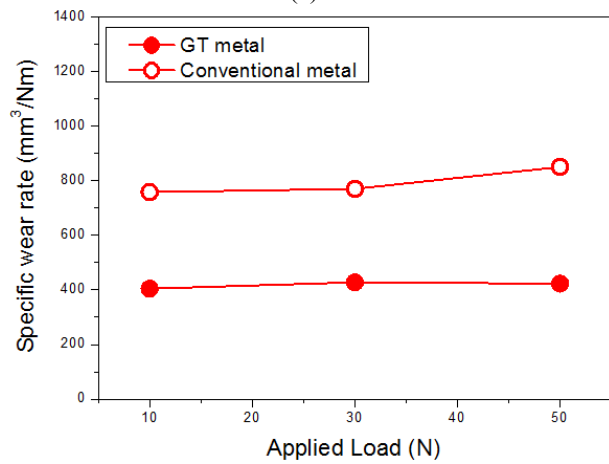
(c) 325°C

Fig. 4 Results of wear loss for cylinder liner at various loads

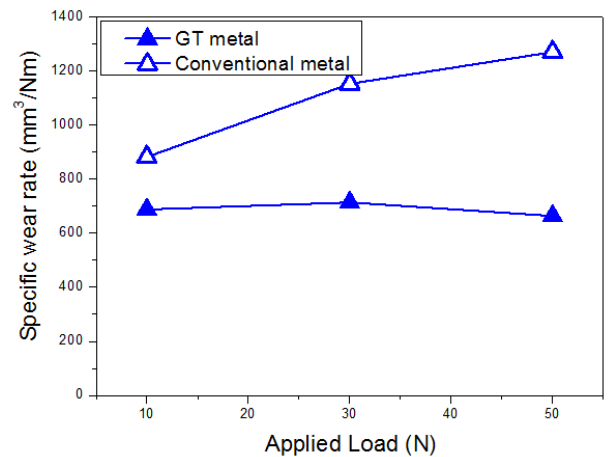
더 라이너는 기존 금속보다 마모량이 현저하게 감소되는 것을 확인할 수 있다. 낮은 하중일 경우,



(a) R.T.



(b) 175°C



(c) 325°C

Fig. 5 Results of specific wear rate for cylinder liner at various loads

두 소재의 마모량 차이는 비슷하였다. 하지만 상온에서 하중이 증가할수록 기존 금속의 마모량이 최대 6 배 증가하였고, 고온인 175°C, 325 °C에서는 1.3 배 증가한 것을 알 수 있다. 이는 GT 금속에

Table 3 Results of friction coefficient

Temp.	Load	GT metal	Conventional metal
R.T.	10 N	0.351	0.476
	30 N	0.443	0.568
	50 N	0.489	0.570
175 °C	10 N	0.548	0.541
	30 N	0.481	0.450
	50 N	0.431	0.388
325 °C	10 N	0.436	0.388
	30 N	0.409	0.378
	50 N	0.404	0.377

그라ไฟ이트의 윤활작용과 더 많은 스테다이트의 균일한 분포로 기존 금속보다 마모량을 감소시키는 것으로 판단된다.

Fig. 5 는 마모량에 대한 결과로부터 비마모율로 환산한 결과를 나타낸 것이다. 전체적으로 온도가 증가함에 따라 비마모율은 증가하고 있다. 이를 통해 GT 및 기존 금속은 온도의 증가에 따라 마모특성이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

일정온도에서 작용 하중이 증가할 때 기존 금속의 비마모율은 증가하고 있으나, GT 금속의 경우에는 거의 일정하거나 미소한 증가를 보이고 있어 작용하중의 영향은 거의 없는 것으로 나타나고 있다. 따라서 GT 금속의 마모특성이 기존 금속보다 더 우수하게 나타나고 있다.

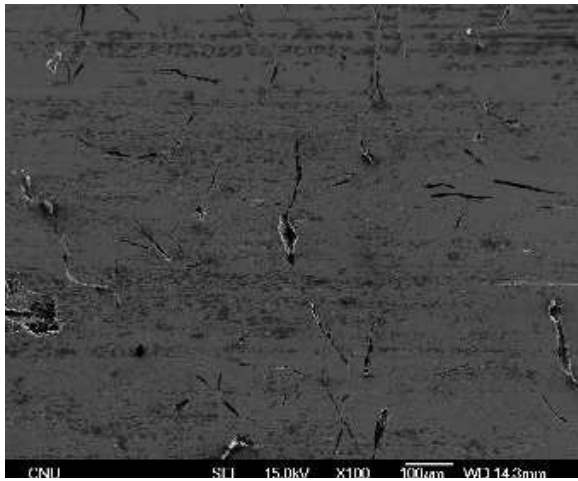
3.2 마찰계수 비교

소재의 표면에 발생하는 전단력의 척도인 마찰계수를 비교하여 마모특성을 분석할 수 있다. Table 3 은 GT 및 기존 금속에 대한 마찰계수를 안정화 구간에서 얻은 결과를 평균하여 나타낸 것이다.

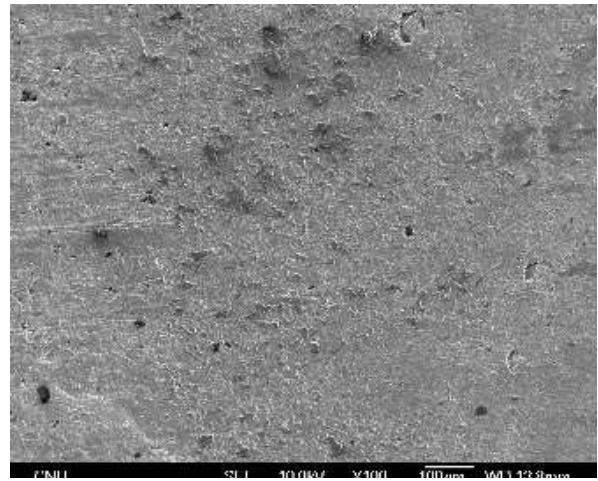
두 재료의 마찰계수는 상온에서 하중이 증가함에 따라 마찰계수가 증가한다. 반면, 고온인 175 °C, 325 °C인 경우의 마찰계수는 하중 증가에 따라 감소하고 있다. 이는 고온으로 올라 갈수록 그라ไฟ이트의 윤활작용에 의해 마찰계수가 감소하는 것으로 판단된다. 하지만 마찰계수의 감소율은 상대적으로 기존 금속에서 큰 것으로 나타났다. 이러한 이유는 마모표면의 SEM 관찰에서 상세히 논의될 것이다.

3.2 마모표면의 SEM 관찰

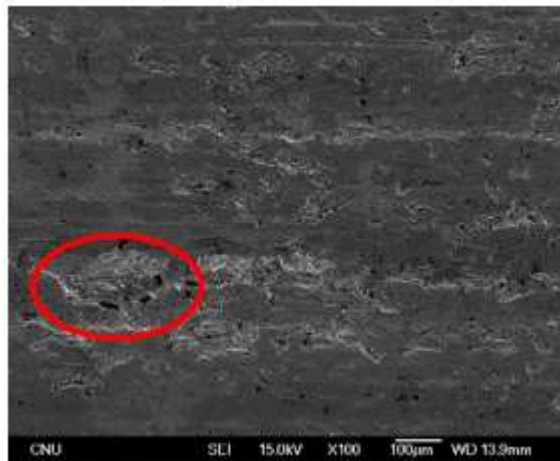
마모 시험을 종료한 후에 시편의 표면에 발생한 마모흔에 대하여 SEM 을 관찰하였다.



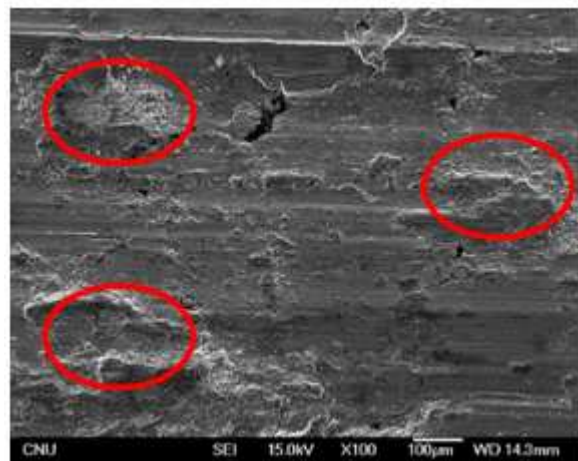
(a) GT metal
R.T., 30N



(c) Conventional metal
R.T., 30N



(b) GT metal
325 °C, 30N



(d) Conventional metal
325 °C, 30N

Fig. 6 SEM images of GT and Conventional metal at R.T. and 325

Fig. 6 는 GT 및 기존 금속에 대한 SEM 사진을 나타낸 것이다. 상온에서 연삭 및 응착마모가 진행되었고, 고온에서는 부식마모도 함께 진행되었음을 알 수 있다.

두 시편의 마모량은 온도가 증가할수록 증가하고, 마모 표면은 거칠어 진 것을 확인 할 수 있다. 상온일 때, Fig. 6(a) 및 (c)를 비교하면 GT 금속보다 기존 금속의 표면이 더 거칠어 진 것을 확인할 수 있다. 재료의 마모가 진행되면서 기존 금속은 GT 금속보다 연삭 및 응착마모가 많이 진행되어 표면이 거칠어지고 마모량이 증가하고 있다.

고온일 때, Fig. 6(b) 및 (d) 에 표시한 것과 같이, 두 소재는 고온으로 올라갈수록 표면이 거칠어지고 산화가 발생하였으며 그 산화된 정도는 기존 금속이 더 많이 나타나고 있다. 또한, 연삭 및 응착뿐만 아니라 표면산화에 의해 부식마모도 함께 진행되었다.

부식마모가 진행되면 상대적으로 약한 산화피막은 피스톤 링과 지속적인 마찰을 통해 반응층이 깨지고 새로운 표면이 발생하게 되며 이를 지속적으로 반복하여 마모량이 증가한다.⁽¹⁰⁾ 따라서 325 °C에서는 GT 금속에 비해 기존 금속에서 산화가 많이 진행되어 마모량이 증가하였다. 또한 앞장에서 논의한 것과 같이, 기존금속의 마찰계수 감소율이 GT 금속보다 크게 나타났다. 이는 기존금속이 상대적으로 많은 부식마모가 진행되어 산화막의 윤활작용으로 인해 감소한 것으로 판단된다.

따라서 SEM 분석에서도 금속이 기존 금속보다 마모특성이 우수하다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 실린더 라이너 소재인 GT 금속

및 기존 금속에 대해 마찰특성을 비교분석 하였다. 작동환경을 고려한 온도, 하중을 변수로 하여 왕복동 마모시험을 진행하고 마모특성을 평가하였다. 이러한 결과로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) GT 금속의 마모량은 그라파이트의 윤활작용과 더 많은 스테다이트의 균일한 분포에 의해 기존 금속보다 더 작다.

(2) GT 및 기존 금속의 비마모율은 온도의 증가에 따라 증가한다. 일정온도에서 작용 하중이 증가할 때, 기존 금속의 비마모율은 증가하고 있으나 GT 금속의 경우에는 거의 일정하거나 약간 증가한다.

(3) 두 재료의 마찰계수는 상온에서 작용하중의 증가에 따라 증가한다. 반면, 175 °C, 325 °C에서 마찰계수는 작용하중의 증가에 따라 감소한다.

(4) 두 재료 공히, 상온에서 연삭 및 응착마모가 진행되고, 고온에서는 부식마모도 함께 진행된다. 상온에서 GT 금속의 연삭 및 응착마모가 기존 금속보다 적게 발생하며 고온에서 산화의 정도가 더 작기 때문에 GT 금속의 마모특성이 더 우수하다.

후 기

본 연구는 (주)삼영기계의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌 (References)

- (1) Hong, H. and Chun, S. M., 1994, "Source and Countermeasure of Wear and Damage in Engine," *Journal of the KSTLE*, Vol. 10, No. 2, pp. 5~19.
- (2) Prchlik, L. and Sampath, S., 2007, "Effect of the Microstructure of Thermally Sprayed Coatings on Friction and Wear Response Under Lubricated and Dry Sliding Conditions," *Wear* 262, pp. 11~23.
- (3) Jang, J. H., Kim, J. H., Kim, C. H. and Moon, Y. H., 2008, "Effect of Coating Layer Hardness on the Wear Characteristics of Diesel Engine Cylinder Liner - Piston Ring," *Transaction of Materials Processing*, Vol. 17, No. 5, pp. 343~349.
- (4) Song, K., Kim, K. and Shim, D., 2004, "Evaluation of Tribological Properties on Piston Ring\Liner Using Accelerative Wear Test," 2004, *KSTLE*, pp. 75~78.
- (5) Na, E.-Y. and Baik, S.-Y., 2009, "A Study on Types and Reasons of Engine Troubles Related to Fuel Oil," *Journal of the MEE*, Vol. 12, No. 3, pp. 143~150.
- (6) Kim, C. K. and Kim, K. S., 2009, "Experimental Study on the Friction Characteristics of Pin-Bush Bearing Metals for Diesel Engine," *Journal of the KSTLE*, Vol. 25, No. 6, pp. 409~413.
- (7) Ha, Y.-S., 2011, "Development of LVDT-Based Measuring System of the Cylinder Liner Wear for Marine Diesel Engines and Its Performance Evaluation," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 6, pp. 829~834.
- (8) Kim, K. H., Jo, J., Lee, H., Lee, J., 2012, "Marine Engine Wear Diagnosis and Assessment Using the Wavelet Transform," *Journal of KIEE*, Vol. 61, No. 6, pp. 845~850.
- (9) Juri, P., Mart, V. and Sergei L., 2006, "Friction and Dry Sliding Wear Behavior of Cermets," *Wear*, Vol. 260, pp. 815~824.
- (10) Hang, J.-H., Kim, H.-H., Kim, C.-H., Y.-H., Moon, 2007, "Abrasive Wear Characteristics of Materials for Diesel Engine Cylinder Liner and Piston Ring," *KSHT*, Vol. 20, No. 2, pp. 72~77.