

사이클 수 증가에 따른 엔진밸브 및 시트인서트 착좌면 마모

김 재 학¹⁾ · 전 경 진^{*1)} · 홍 재 수¹⁾ · 윤 영 한²⁾

한국생산기술연구원¹⁾ · 한국기술교육대학교²⁾

A Wear of Engine Valve and Seat Insert Seating Face Depending on Cycle Numbers

Jae Hak Kim¹⁾ · Keyoung Jin Chun^{*1)} · Jae Soo Hong¹⁾ · Young Han Youn²⁾

¹⁾Korea Institute of Industrial Technology, 35-3 Hongcheon-ri, Ipjang-myeon, Cheonan-si, Chungnam 330-825, Korea

²⁾School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education, Chungnam 330-825, Korea

(Received 31 October 2006 / Accepted 18 January 2007)

Abstract : This study investigated the wear of the valve and seat insert seating faces. A tester, an exhaust valve and a seat insert were used. Test variables were cycle numbers (2×10^6 , 4×10^6 , 6×10^6 and 8×10^6) and Hz (10Hz and 25Hz). The other test conditions such as temperature (350°C), fuel (LPG) and load (1960N) were fixed. The 10Hz tests indicated that the average Rmax of the valve increased at the rate of $7.76\mu\text{m}/10^6$ cycles starting from $29.42\mu\text{m}$ at the 2×10^6 cycles and that of the seat insert increased at the rate of $8.57\mu\text{m}/10^6$ cycles starting from $34.19\mu\text{m}$ at the 2×10^6 cycles. The 25Hz tests indicated that the average Rmax of the valve increased at the rate of $1.58\mu\text{m}/10^6$ cycles starting from $74.2\mu\text{m}$ at the 2×10^6 cycles and that of the seat insert increased at the rate of $1.25\mu\text{m}/10^6$ cycles starting from $83.95\mu\text{m}$ at the 2×10^6 cycles. The tribochemical reaction product covered the two seating faces, preventing the wear of the seating faces. As cycle numbers became greater, the average Rmax of the seating faces became greater, but the increase rate varied significantly depending on the Hz. The wear mechanism of the two faces was investigated through the tribochemical reaction.

Key words : Valve(밸브), Seat insert(시트 인서트), Seating face(착좌면), Cycle number(사이클 수), Average rmax(평균 최대 거칠기), Tribochemical reaction(트라이보케미컬 반응)

1. 서 론

엔진에 사용되는 밸브와 시트인서트는 두 가지 역할을 수행한다. 첫 번째 역할은 흡입과 배기행정 시 작동유체를 원활하게 교환하는 것이고, 두 번째 역할은 압축과 폭발행정 시 실린더 내부의 기밀을 유지하는 것이다. 밸브와 시트인서트가 이러한 역할들을 올바르게 수행하기 위해서는 밸브와 시트인서트가 접촉하는 부위인 밸브 및 시트인서트 착좌면의 마모를 체계적으로 연구할 필요가 있다.

밸브 및 시트인서트 착좌면의 마모에 관한 선행 연구들을 살펴보면 다음과 같다. 실험방법에는 전용마모 실험기 실험,^{1,2)} 엔진다이나모 실험,³⁾ 실차 실험이 있었다. 밸브 착좌면과 시트인서트 착좌면에 마모를 유발한다고 알려진 마모원인에는 연소압

*Corresponding author, E-mail: chun@kitech.re.kr

력,^{1,4,5)} 엔진회전수,³⁾ 사이클,^{1,2,10)} 온도,^{3,5,12)} 연료,^{6,7)} 윤활,⁸⁾ 밸브 중심조정불량,^{1,5)} 밸브 각도조정불량,¹⁾ 밸브닫힘속력⁵⁾ 등이 있었다. 실험변수는 3개 이상, 동일한 실험조건에서의 실험횟수는 4회 이하의 연구들이 대부분이었다. 실험결과는 2차원 형상측정기^{1,2)}와 3차원 스캐너⁹⁾를 이용하여 밸브 착좌면과 시트인서트 착좌면의 마모 깊이^{1,2)} 측정했으며, 마모기구분석은 FESEM(Field emission scanning electron microscope),⁹⁾ SEM(Scanning electron microscope),^{1,11)} EDS(Energy dispersive X-ray spectrometer),¹²⁾ XRD(X-ray Diffractometry)¹²⁾를 사용하여 실시하고 있었다.

선행연구들은 실험 사이클 수가 4×10^6 이하가 대부분이었고, 동일한 실험조건들에 대한 실험반복회수가 3회이하이거나 또는 불규칙했으며, 외국에서 양산된 밸브와 시트인서트를 이용하여 연구하였다. 이에 근거하여 본 연구에서는 실험 변수를 2가지(사이클 수, Hz)로 하였고, 실험 사이클 수를 2×10^6 , 4×10^6 , 6×10^6 , 8×10^6 로 설정하였다. 동일한 실험조건에 대해 6회씩 실험하였으며, 밸브와 시트인서트는 국내에서 양산되어 설차에 적용되고 있는 제품을 사용하였다.

본 연구에서는 사이클 수에 증가에 따른 배기밸브와 시트인서트 착좌면의 평균최대거칠기와 마모기구의 경향성의 변화를 파악하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

ENVIRONMENT	VALVE AND SEAT INSERT DESIGN AND TERM	CHARACTERISTIC
Area	Characteristic	
<u>Engine Condition</u>		
- Combustion Pressure	Tip	<u>A</u> Wear Resistance
- Engine Speed	Stem End	<u>B</u> Tensile Strength
- Temperature	Spring Retainer Groove	Low Density
- Cycle	Stem	<u>C</u> Wear Resistance
- Fuel	Seat Insert	<u>D</u> Wear Resistance
- Lubrication	Seat Insert Face	<u>E</u> Hot Fatigue Strength
- Hot Exhaust gas	Stem Blend Fillet Area	<u>F</u> Hot Fatigue Strength
<u>Mechanical Condition</u>	Valve Head	Thermal Conductivity
- Valve and Seat Insert Face Angle	Valve Face	Corrosion Resistance
- Valve Rotation	Combustion Face	Microstructure Stability
- Valve Literal Misalignment		
- Valve Angular Misalignment		
- Valve Spring Force		
- Valve Guide		
<u>Material Condition</u>		
- Valve Material		<u>G</u> Hot Fatigue Strength
- Seat Insert Material		<u>H</u> Wear Resistance
- Coating		

Fig. 1 Design, terminology, environment and characteristic of engine valve and seat insert

2.1 실험 장치

실험은 Photo. 1에서 나와 있는 “밸브 및 시트인서트 전용 마모 실험기”¹⁰⁾를 이용하여 실시하였다. 이 실험기는 제어장치(Electronics console), 기계장치(Load frame), 유압장치(Hydraulic power supply), 가스 제어기(Gas controller)로 구성되어 있으며, 실험기에서 제어 가능한 변수로는 사이클 수(마일리지), 하중(연소압력), Hz(엔진회전수), 밸브닫힘속력, 온도(시트인서트 외경부 온도)가 있다.

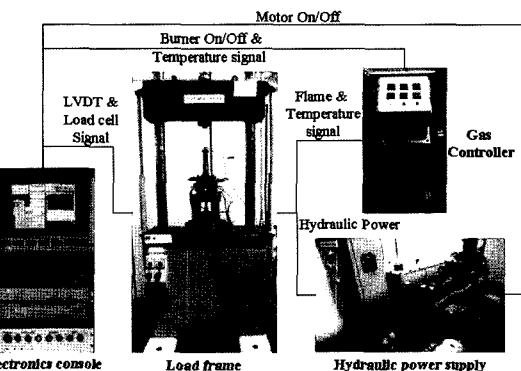


Photo. 1 Wear tester

2.2 실험 시편

시편으로는 가솔린기관에 사용되고 있는 배기밸브와 배기용 시트인서트를 사용되었다. 시편은 Fig. 1과 같은 형상을 가지고 있으며, 본 연구에서 관심을 가지는 밸브 착좌면(H)과 시트인서트 착좌면(D)

Table 1 Chemistry of valve and seat insert (wt. %)

Materials	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	Co	W	Fe
Valve	0.53	0.31	9.0	21.0	-	3.87	-	-	-	Bal
Seat insert	1.1	-	-	7.5	2.0	2.0	15	6.5	2.0	Bal

에는 내마모성이 필요하다.

시편은 Table 1과 같은 화학조성을 가지고 있다.

밸브와 시트 인서트의 화학조성은 두 착좌면의 마모량, 마모기구,¹³⁾ 마모 보호층 역할을 하는 산화물의 생성^{2,6)}에 영향을 미친다. Si와 Mn은 밸브에만 포함되어 있고, Cu, Co, W, Mo은 시트 인서트에만 포함되어 있다.

2.3 실험 조건

본 연구에서 실험한 실험조건은 Table 2와 같다.

Table 2 Test conditions

		Frequency (Hz)	
		10 (1200RPM)	25 (3000RPM)
Cycle number	2×10 ⁶	Load = 1960 (N)	
	4×10 ⁶	Temperature = 350 (°C)	
	6×10 ⁶	Fuel = LPG	
	8×10 ⁶		

사이클 수는 선행연구들의 실험 사이클 수가 대부분 4×10⁶사이클 이하인 것을 고려하여 결정하였다. 동일한 사이클 단위로 증가시키며 실험한 이유는 사이클 수와 마모와의 관계를 쉽게 분석하기 위해서이다.

Hz는 10Hz와 25Hz를 사용하였으며, 이 값을 엔진 회전수로 환산하면 1200RPM과 3000RPM이 된다. 10Hz는 엔진 공회전 시 RPM을 고려한 값이며, 25Hz는 고속도로 주행 시 RPM을 고려한 값이다.

하중은 1960N을 사용하였으며, 이 값을 연소압력으로 환산하면 40bar가 된다. 이 값을 가솔린 기관의 연소압력과 하중이 너무 클 경우 사이클 수가 마모에 미치는 영향을 쉽게 판단하기 위해 마모에 미치는 영향을 고려한 값이다.

온도는 350°C로 유지하며 실험하였으며, 이 값을 시트 인서트 외경부의 온도를 측정한 것이다. 본 연구에서 중요하게 생각하는 부위의 온도는 밸브 착좌면의 온도이지만, 실험 중 이 부분의 온도를 정확

하게 측정하는 것은 현실적인 제약사항이 있기 때문에 시트인서트 외경부 온도를 측정하고 유지하며 실험하였다. 시트인서트 외경부의 온도의 크기는 시트인서트 외경부 온도와 밸브 착좌면의 온도와의 상관관계를 조사를 통해 결정되었다.

연료는 실험상의 편의성과 가솔린을 사용한 실험보다 마모비율이 증가^{6,14)}한다고 알려져 있기 때문에 LPG^{2,4,6)}를 사용하였다.

2.4 측정방법

2.4.1 최대 거칠기

최대 거칠기란 측정거리(Length of Measurement) 내에서 최대값과 최소값의 차이를 말한다. Fig. 2는 밸브 착좌 면과 시트 인서트 착좌 면의 마모를 도식화한 것으로, 실험 후 두 착좌 면을 45°회전시킨 후 확대한 그림이다. 밸브 착좌 면 위에 반응 생성물이 쌓여 있는 것과 시트 인서트 착좌 면에 마모가 발생한 것을 알 수 있다.

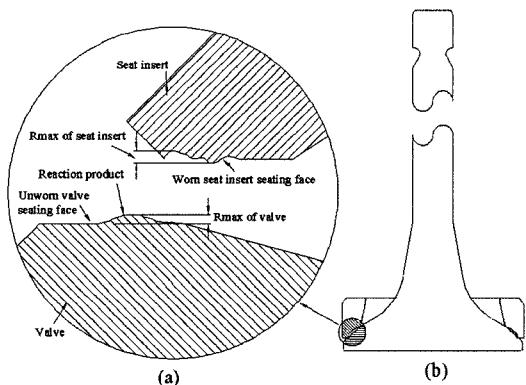


Fig. 2 Definition of Rmax of valve and seat insert seating face

밸브 착좌면과 시트 인서트 착좌면의 최대 거칠기는 공총점 레이저 스캐너(Confocal Laser Scanning Microscope)를 사용하여 측정하였다. 이 측정방법은 레이저로 측정을 하기 때문에 측정값이 스타일러스의 크기에 영향을 받지 않는다는 장점이 있다. Photo. 2는 공총점 레이저 스캐너가 측정할 두 착좌면의 측정부위를 표시한 사진이다. 밸브 착좌면과 시트인서트 착좌면을 45°단위로 나누었을 때 만들어지는 8개의 포인트를 측정하였다.

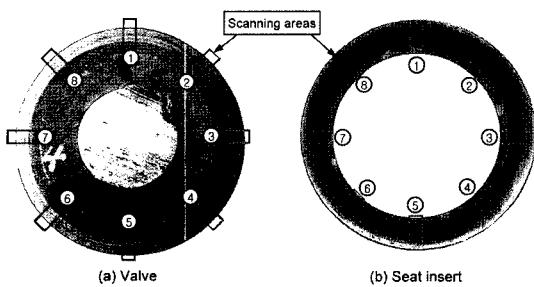


Photo. 2 Scanning areas of valve and seat insert

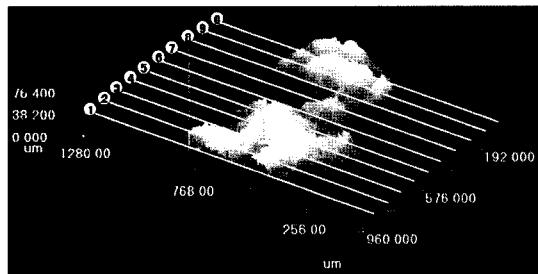


Fig. 3 Scanning result of scanning area

Fig. 3은 공축점 레이저 스캐너로 측정한 측정결과로 하나의 측정영역에서 10개씩의 최대 거칠기를 측정하였다.

2.4.2 마모기구

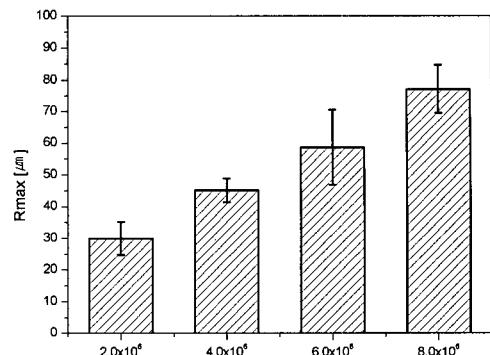
마모기구는 FE-SEM, SEM, EDS를 사용하여 조사하였다. 밸브 착좌면과 시트인서트 착좌면의 표면은 FE-SEM과 EDS를 사용하여 관찰 및 분석하였고, 두 착좌면의 단면은 SEM과 EDS를 사용하여 관찰 및 분석하였다.

3. 실험 결과

3.1 평균 최대 거칠기

Fig. 4는 Hz가 10Hz일 때 사이클 수에 따른 밸브 착좌면과 시트인서트 착좌면의 평균 최대 거칠기를 그려놓은 그래프이다. (a)는 밸브 착좌면의 평균 최대 거칠기 그래프이고, (b)는 시트 인서트 착좌면의 평균 최대 거칠기 그래프이다.

Fig. 5는 Hz가 25Hz일 때 사이클 수에 따른 밸브 착좌면과 시트 인서트 착좌면의 평균 최대 거칠기를 그려놓은 그래프이다. (a)는 밸브 착좌면의 평균 최대 거칠기 그래프이고, (b)는 시트 인서트 착좌면의 평균 최대 거칠기 그래프이다.



(a) Average Rmax of valve at 10Hz

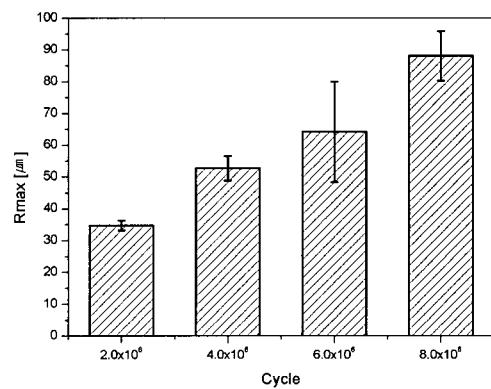


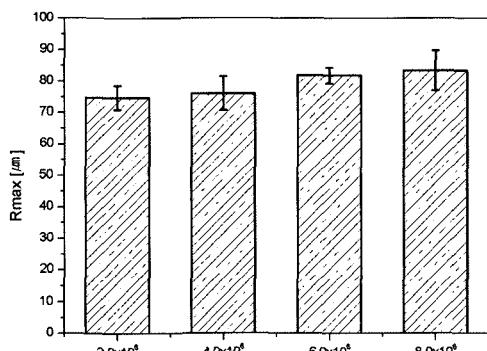
Fig. 4 Average Rmax of valve and seat insert at 10Hz

3.2 마모기구

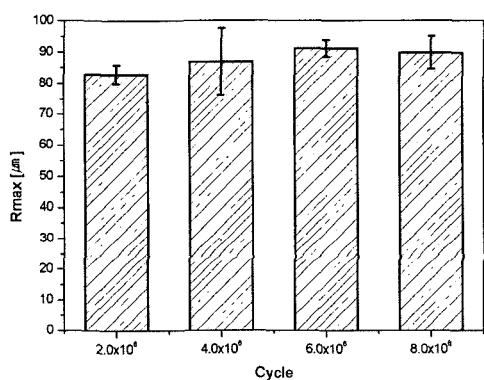
밸브 착좌면과 시트 인서트 착좌면에서 트라이보케미컬 반응(Tribocochemical reaction)에 의해 생성된 반응 생성물(Reaction product)이 관찰되었다. Fig. 3은 밸브 착좌면에 생성된 반응 생성물을 촬영한 사진이다.

Photo. 4는 밸브 착좌면의 단면사진과 밸브 착좌면 위에 생성된 반응 생성물의 성분분석 그래프이다. (a)는 밸브 단면을 확대한 사진이다. 밸브 착좌면을 덮고 있는 반응 생성물을 확인 할 수 있다. (b)는 반응 생성물의 성분분석(A)를 나타낸 그래프이다. 반응 생성물에서 시트인서트의 성분인 Cu와 O가 검출되었다.

Photo. 5는 시트 인서트 착좌면의 단면사진과 시트 인서트 착좌면 위에 생성된 반응 생성물의 성분분석 그래프이다. (a)는 시트 인서트의 단면을 촬영한 사진이다. 시트인서트 착좌면을 덮고 있는 반응



(a) Average Rmax of valve at 25Hz



(b) Average Rmax of seat insert at 25Hz

Fig. 5 Average Rmax of valve and seat insert at 25Hz

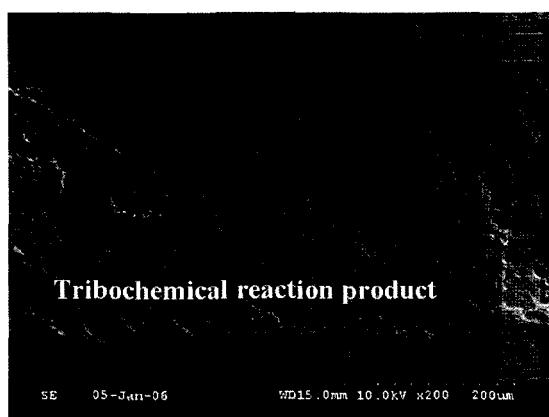
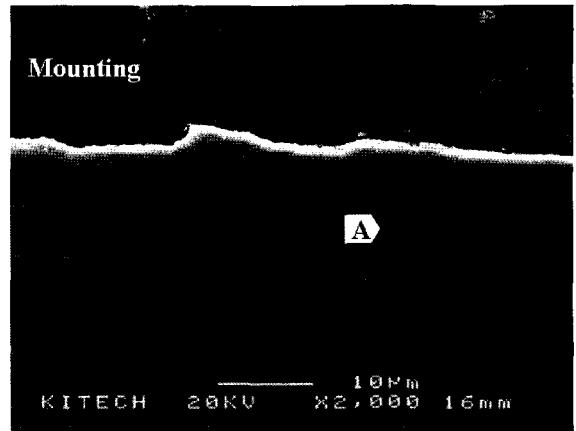
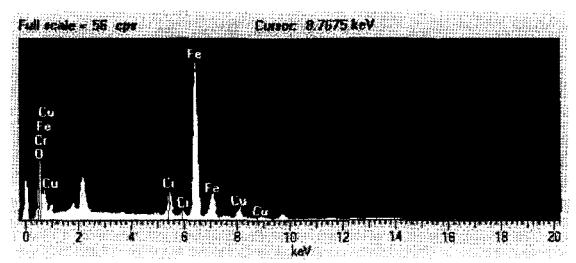


Photo. 3 FE-SEM photograph of tribochemical reaction product

성물을 확인할 수 있다. (b)는 시트 인서트 착좌면을 덮고 있는 반응 생성물의 성분분석결과(A)를 나타낸 그래프이다. 밸브의 성분이 Mn과 O가 검출되었다.



(a) Valve section (2000X)



(b) EDS result of point A

Photo. 4 SEM photograph of valve section and EDS result (10Hz, 6×10^6 cycle)

4. 고찰

Hz(엔진스피드)가 Cycle number(마일리지)보다 밸브 착좌면과 시트인서트 착좌면의 평균 최대 거칠기에 미치는 영향이 커졌다. t-test($\alpha=0.05$)분석 결과 25Hz 2×10^6 사이클의 두 착좌면의 평균 최대 거칠기는 10Hz 8×10^6 사이클의 두 착좌면의 평균 최대 거칠기와 통계학적인 차이가 없는 것으로 나타났다.

Hz가 10Hz일 경우 사이클 수가 증가해 밸브 착좌면과 시트인서트 착좌면의 평균 최대 거칠기에 미치는 영향이 비례적이었으며, 사이클 수가 두 착좌면의 평균 최대 거칠기에 미치는 영향이 Hz보다 커졌다. 밸브 착좌면의 평균 최대 거칠기는 $29.9\mu\text{m}$ (2×10^6 사이클)를 시작으로 $7.76\mu\text{m}$ / 10^6 cycles의 비율로 증가하였다. 시트인서트 착좌면의 평균 최대 거칠기는 $34.7\mu\text{m}$ (2×10^6 사이클)를 시작으로 $8.57\mu\text{m}$ / 10^6 cycles의 비율로 증가하였다.

Hz가 25Hz일 경우 사이클 수가 증가하면서 밸브

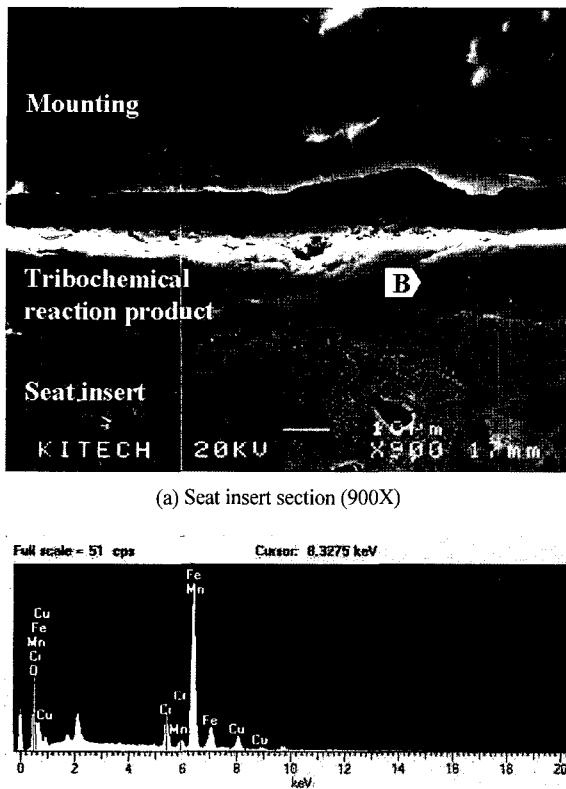


Photo. 5 SEM photograph of seat insert section and EDS result

착좌면과 시트인서트 착좌면의 평균 최대 거칠기가 미량씩 증가하는 것으로 나타났으며, 사이클 수가 두 착좌면의 평균 최대 거칠기에 미치는 영향이 Hz 보다 작았다. 벨브 착좌면의 평균 최대 거칠기는 $74.7\mu\text{m}$ (2×10^6 사이클)를 시작으로 $1.58\mu\text{m}/10^6\text{cycles}$ 의 비율로 증가하였으며, 시트인서트 착좌면의 평균 최대 거칠기는 $82.7\mu\text{m}$ (2×10^6 사이클)를 시작으로 $1.25\mu\text{m}/10^6\text{cycles}$ 의 비율로 증가하였다.

반응 생성물은 두 착좌면의 입자들이 고온상태에서 대기와 LPG 연소물질과 반응하여 생성된 물질이었다. 반응 생성물 아래의 두 착좌면이 손상되어 있고, 반응 생성물은 성분분석결과 두 시편의 화학조성성분과 다량의 O와 C, 그리고 기타 S, V, Al을 포함하고 있는 것을 나타났다.

반응 생성물은 두 착좌면의 마모 보호층 역할을 하고 있었다. 관찰결과 반응 생성물은 두 착좌면의 원면 위를 덮고 있어 두 착좌면의 모재가 직접 접촉하는 것을 막고 있었다. 그러나 너무 두껍게 형성된

반응 생성물은 벨브헤드부의 열전달을 악화시켜 벨브의 온도를 상승시키고, 평균 최대 거칠기를 증가시켜 실린더 내부의 가스기밀을 악화시킨다.

5. 결 론

밸브 착좌면과 시트인서트 착좌면의 평균 최대 거칠기는 사이클 수(마일리지)가 증가하면서 선형적으로 증가하였다. 사이클 수에 따른 두 착좌면의 평균 최대 거칠기 증가율은 Hz(엔진회전수, 10Hz와 25Hz)에 따라 큰 차이를 보였으며, Hz가 동일할 때 벨브와 시트인서트 착좌면의 평균 최대 거칠기는 증가 경향성이 거의 같았다.

밸브 착좌면과 시트인서트 착좌면의 마모기구는 사이클 수의 증가와 무관했으며, 두 착좌면 간의 차이도 없었다. 주된 마모기구는 트라이보케미컬 반응으로 밝혀졌으며, 트라이보케미컬 반응 생성물은 벨브 착좌면과 시트인서트 착좌면의 마모 보호층 역할을 하고 있었다.

References

- 1) M. J. Malatesta, G. C. Barber, J. M. Larson and S. L. Narasimhan, "Development of a Laboratory Bench Test to Simulate Seat Wear of Engine Poppet Valves," STLE, Vol.36, pp.627-632, 1993.
- 2) R. Zhao, G. C. Barber, Y. S. Wang and J. E. Larson, "Wear Mechanism Analysis of Engine Exhaust Valve Seats with a Laboratory Simulator," STLE, Vol.40, pp.209-218, 1997.
- 3) W. Giles, "Valve Problems with Lead Free Gasoline," SAE 710368, 1971.
- 4) Y. S. Wang, S. Narasimhan, J. M. Larson, J. E. Larson and G. C. Barber, "The Effect of Operating Conditions on Heavy Duty Engine Valve and Seat Wear," Wear 201, pp.15-25, 1996.
- 5) R. Lewis, R. S. Dwyer-Joyce and G. Josey, "Investigation of Wear Mechanisms Occurring in Passenger Car Diesel Engine Inlet Valves and Seat Inserts," SAE 1999-01-1216, 1999.
- 6) K. J. Chun, J. S. Hong and H. J. Lee, "A Study on Engine Valve and Seat Insert Wearing

- Depending on Speed Change," SAE 2004-01-1655, 2004.
- 7) A. Kimihiko, M. Akira and Y. Akio, "Hard-faced Valve and P/M Valve Seat System for CNG and LPG Fuel Engines," SAE 2005-01-0718, 2005.
 - 8) D. Godfrey and R. L. Courtney, "Investigation of the Mechanism of Exhaust Valve Seat Wear in Engines Run on Unleaded Gasoline," SAE 710356, 1971.
 - 9) W. R. Pyle and N. R. Smrcka, "The Effect of Lubricating Oil Additives on Valve Recession in Stationary Gaseous-Fueled Four-Cycle Engine," SAE 932780, 1993.
 - 10) K. J. Chun, J. S. Hong, J. H. Kim, S. J. Hyung and C. S. Shin, "Comparison of Wears in the Engine Valve and Seat Insert Depending on Valve Materials," IPC-13, Vol.26, 2005.
 - 11) R. Lewis, R. S. Dwyer-Joyce and G. Josey, "Design and Development of a Bench Test-Rig for Investigation Diesel Engine Inlet Valve and Seat Inset Wear," Proceedings of the 5th International Tribology Conference in Australia, Institution of Engineers, Australia, pp.365-370. 1998.
 - 12) R. Van Dissel, G. C. Barber, J. M. Larson and S. L. Narasimhan, "Engine Valve Seat and Insert Wear," SAE 892146, 1998.
 - 13) C. G. Scott, A. T. Riga and H. Hong, "The Erosion-corrosion of Nickel-base Diesel Engine Exhaust Valves," Wear 181-183, pp.485-494. 1995.
 - 14) M. Adegawa, H. Kobayashi, A. Mohri and K. Ohtubo, "Engine Valve Operating Temperature and Engine Operation Parameters," SAE, Palmphlet for Science Lecture Meeting 953, 1995.