

## 디젤엔진 배기밸브와 시트 인서트의 밸브 재질에 따른 마모 및 매칭성 연구

김양수\*, 전경진#, 홍재수\*, 정동택\*\*

### A Study of Wear and Matching of Diesel Engine Exhaust Valve and Seat Insert Depending on Valve Materials

Yang Soo Kim\*, Keyoung Jin Chun#, Jae Soo Hong\* and Dong Teak Chung\*\*

#### ABSTRACT

The wear on engine valve and seat insert is one of the most important factors affecting engine performance. The engine valve and seat insert must be able to withstand the severe environment that is created by: high temperature exhaust gases generated while the engine is running, rapid movement of the valve spring, high pressure generated in the explosive process. In order to study such problems, a simulator has been developed to generate and control high temperatures and various speeds during motion. The wear simulator is considered to be a valid simulation of the engine valve and seat insert wear process with various speeds during engine activity.

This work focused on the test of various degrees of wear on four different exhaust valve materials such as HRV40, HRV40-FNV (face nitrided valve), STL #32, STL #6. Throughout all tests performed in this study, the outer surface temperature of the seat insert was controlled at 350°C, the cycle number was  $4.0 \times 10^6$ , the test load was 6860 N, the fuel was LPG, the test speed was 20 Hz (2400 RPM) and the seat insert material was HVS1-2.

The mean (standard deviation) maximum roughness of the exhaust valve and seat insert was 25.44 (3.16)  $\mu\text{m}$  and 27.53 (3.60)  $\mu\text{m}$  at the HRV40, 21.88 (2.38)  $\mu\text{m}$  and 25.94 (3.07)  $\mu\text{m}$  at the HRV40-FNV, 36.73 (8.98)  $\mu\text{m}$  and 61.38 (7.84)  $\mu\text{m}$  at the STL #32, 73.64 (23.80)  $\mu\text{m}$  and 60.80 (13.49)  $\mu\text{m}$  at the STL #6, respectively.

It was discovered that the maximum roughness of exhaust valve was lower as the high temperature hardness of the valve material was higher under the same test conditions such as temperature, test speed, cycle number, test load and seat insert material. The set of the HRV40-FNV exhaust valve and the HVS1-2 seat insert showed the best wear resistance.

**Key Words** : Exhaust Valve (배기 밸브), Wear (마모), High Temperature Hardness (고온경도), Valve Material (밸브 재질), Maximum Roughness (최대거칠기), Wear Resistance (마모 저항성)

☞ 접수일: 2008년 10월 1일; 게재승인일: 2008년 3월 21일

\* 한국생산기술연구원 실버기술개발단

# 교신저자: 한국생산기술연구원 실버기술개발단

E-mail: chun@kitech.re.kr Tel. (041) 589-8430

\*\* 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

### 1. 서론

자동차 엔진 성능에 요구되는 인자의 첫째는 출력성능이다. 넓은 회전수역에서 평탄하고 높은 토크값을 나타낼 것이 요구된다. 둘째는 경제성이다. 일반적으로 주행거리에 대한 연료소비량이 적어야 경제성이 좋다고 할 수 있다. 셋째는 신뢰성이다. 어떠한 조건하에서도 확실하게 작동하고 장기간 고장없이 성능을 발휘하는 신뢰성도 필요하다. 출력, 경제성, 신뢰성이 자동차용 엔진의 기본적인 요구성능이다.<sup>1</sup>

4 행정 싸이클 내 연소기관과 디젤기관 등은 동력을 얻기 위해서 흡입, 압축, 폭발, 배기의 과정을 거치게 된다. 자동차 엔진의 경우 동력을 위한 폭발행정에 필요한 혼합공기를 연소실 안으로 흡입한다. 연소된 연소가스를 외부로 배출시키기 위해서 1 개의 실린더에 1 개 이상의 흡기 밸브와 배기 밸브가 각각 설치되어 있다. 흡기 밸브와 배기 밸브는 피스톤이 1 사이클을 작동하는 극히 짧은 시간 동안에 흡기 및 배기를 효율적으로 할 수 있고, 두 밸브가 동시에 닫혀있는 압축 및 폭발행정에서는 충분히 기밀을 유지할 수 있어야 한다.<sup>2,6</sup>

또한 고온의 연소 가스에 노출되어도 산화되지 않고 장시간의 사용에도 충분히 견딜 수 있어야 한다. 특히 배기 밸브의 밸브헤드 부분은 엔진이 작동할 때에 항상 고온에 노출되므로 그 재료나 모양은 특별히 설계되어 있다.<sup>7,8</sup>

본 연구에서는 디젤엔진 배기밸브의 고온경도와 마모량과의 상관관계를 분석하고, 디젤엔진 배기밸브 종류별로 같은 재질의 시트 인서트와의 마찰성을 알아보려고 한다.

### 2. 실험방법 및 실험조건

#### 2.1 시편

실험에 사용된 디젤엔진 배기밸브와 시트 인서트의 화학조성을 살펴보면 Table 1 과 같으며, 이러한 성분들의 배기밸브와 시트 인서트의 마모에 있어 중요한 영향을 미친다. 배기밸브와 시트 인서트의 재질이 무엇인지에 따라 마모의 깊이차가 발생할 수 있으며 마모 시에 배기밸브와 시트 인서트의 맞닿는 면으로 옮겨가는 응착마모를 확인할 수 있고, 이는 공초점 레이저 스캐너(Comfocal lazer microscope)와 전자주사현미경 (Scanning Electron

Microscope)을 통하여 측정할 수 있다.

Table 1 Chemical compositions of valves and the seat insert

Materials	(wt. %)			
	Valve (HRV40)	Valve (STL #32)	Valve (STL #6)	Seat Insert (HVS1-2)
C	0.03	1.5	0.9	1.1
Si	-	0.9	0.4	-
Mn	-	0.4	1.0	-
Cr	15.0	24.0	26.0	7.5
Mo	0.7	0.6	1.0	2.0
Ni	41.0	24.0	3.0	2.0
N	-	-	-	0.5
Cu	-	-	-	15
W	-	11.5	3.0	2.0
Co	-	Bal	Bal	6.5
Fe	Bal	2.0	3.0	Bal

#### 2.2 마모 실험장치

본 연구에서 사용한 마모 실험장치는 고온·고압의 엔진 내부환경에서 구동되는 배기밸브와 시트 인서트를 실험할 수 있도록 제작된 것이다. Fig. 1은 “밸브 및 시트인서트 마모시험기” 시스템 그림이다.

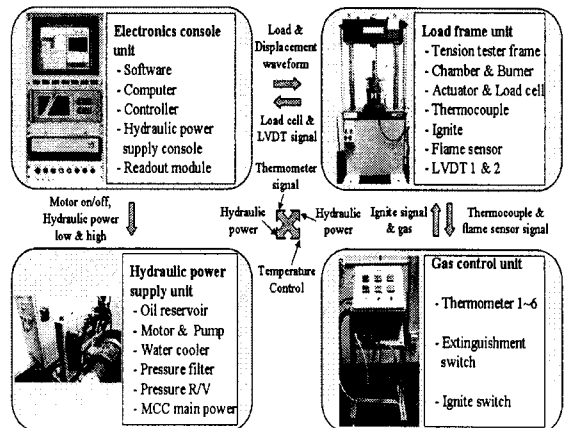


Fig. 1 Wear tester system

마모 시험기는 전자부(Electronics console unit), 기계부(Load frame unit), 유압부(Hydraulic power supply unit), 가스제어부(Gas controller unit)로 구성되어 있다. 각 유닛들은 여러 기능을 가진 장치 또는 부품의 조립체이며, 상호간에 신호(Signal)를 주고 받는다. 전자부는 실험조건에 맞는 신호를 생성하고 감시하는 역할을 하며, 기계부는 시편을 설치하고 엔진내부의 가혹조건을 만들어내는 역할을 수행한다. 유압부는 액추에이터(Actuator)를 구동시킬 유압을 만들어 내는 역할을 하며, 가스제어부는 설정된 온도에 따라 가스의 유입을 제어하는 역할을 한다.<sup>3, 6, 9, 10</sup>

마모 시험기에서 제어 가능한 실험 변수로는 사이클 수, 하중, 엔진 스피드, 온도가 있다. 사이클 수는 엔진에서 밸브와 시트 인서트의 개폐 횟수를 의미하며, 제어가능범위는 0 ~ ∞이다. 하중은 엔진의 폭발과정에서 생성되는 연소압력을 의미하며, 0 ~ 39,260 N의 힘을 엔진밸브에 가할 수 있다. 엔진 스피드는 엔진회전수(RPM)를 의미하며, 0.01 Hz ~ 50 Hz (1.2 RPM ~ 6,000 RPM) 사이의 엔진 스피드를 구현 할 수 있다. 온도는 밸브 착좌면의 온도를 의미한다. 실험에서는 측정상의 어려움으로 인하여 시트 인서트 바깥쪽 원주 부분온도를 측정하였으며, 이 부분의 온도를 900℃까지 가열 할 수 있다. 마모 실험기의 성능을 살펴보면 Table 2 과 같다.

Table 2 Performances of the wear tester

Variables	Range
Cycle number (cycle)	0 ~ ∞
Load (N)	0 ~ 39,260
Engine speed (Hz)	0.01 ~ 50
Temperature (℃)	Room Temp. ~ 900

### 2.3 실험조건

실험 횟수는 4 종류의 시편별로 6 회씩이며, 총 24 회의 실험을 실시하였다.

사이클 수는 실차의 밸브와 시트 인서트 개폐 횟수를 의미하며, 사이클 수는  $4 \times 10^6$  사이클이다.

엔진스피드는 20 Hz 를 사용하였고 이를 엔진회전수로 환산하면 2,400 RPM 이 된다.<sup>11</sup>

하중은 6,860 N (700 kg)을 사용하여 실험하였으며 이 값에 밸브헤드의 면적을 곱하여 연소압력으로 환산하면 약 140 bar 정도가 된다.

온도는 실차의 밸브 착좌면 온도를 의미한다. 실험 중 밸브 착좌면의 온도를 측정하는 것은 구현이 힘들다. 따라서 본 연구에서는 시트 인서트 외경부의 온도와 밸브 착좌면과의 온도 관계를 측정하였다. 이때 밸브 착좌면의 온도가 760℃일 때 시트 인서트 외경부의 온도는 350℃를 나타내었고 이를 기준하여 실험 온도로 설정하였다.<sup>3, 5</sup>

연료는 LPG 를 사용하였다. LPG 를 사용한 이유는 실험상 쉽게 Gas 의 양을 조절하여 온도를 제어할 수 있는 장점이 있고, 연소 후 윤활물질발생이 다른 연료에 비해 상대적으로 적어 마모 비율이 증가하기 때문에 가속실험으로서의 의미도 가질 수 있기 때문이다.<sup>12-14</sup> 본 연구에서 사용한 실험 조건을 정리하면 Table 3 과 같다.

Table 3 Wear test conditions

Engine speed (Hz)	20 (2,400 RPM)
Test temperature at the outer surface of the seat insert (℃)	350
Valve displacement (mm)	1.0
Times of valve opening and closing	$4.0 \times 10^6$
Test load (N)	6,860
Fuel used	LPG

## 3. 측정장비 및 방법

### 3.1 측정장비

일반적으로 밸브 착좌면과 시트 인서트 착좌면의 마모 깊이는 두 가지 방법을 이용해 측정해 왔다.

첫째, 마모가 발생한 밸브 착좌면과 시트 인서트 착좌면을 2 차원 형상측정기(Profiler)를 사용해 단면형상을 그리는 것이다. 둘째, 마모가 발생한 밸브 착좌면과 시트 인서트 착좌면의 특정 부분을 3 차원 스캐너로 스캔하고 3 차원 형상을 분석하는 것이다.

본 연구에서는 공촉점 레이저 스캐너(OLS 1100,

Olympus, Japan, Resolution - 0.01  $\mu\text{m}$ )를 이용하여 밸브 착좌면과 시트 인서트 착좌면의 마모를 측정하였다. 이 방법은 측정된 3 차원 범위 내에서 여러 개의 2 차원 단면을 발취해 낼 수 있고, 스타일러스의 크기에 영향을 받지 않고 측정이 가능한 장점이 있다.

### 3.2 측정방법

최대거칠기란 측정거리내에서 최대값과 최소값의 차이를 말한다. Fig. 2 는 최대거칠기의 개념을 도식화한 그림으로, Measurement Length 는 밸브 착좌면과 시트 인서트의 착좌면이 맞닿는 Scanning area 중 원중심방향쪽 측정기준을 의미한다.

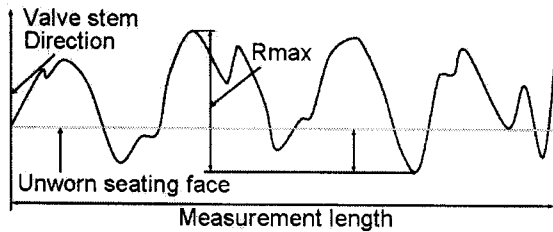


Fig. 2 Definition of Rmax

Fig. 3 는 3 차원 레이저 스캐너를 이용하여 측정한 밸브 착좌면과 시트 인서트 착좌면의 측정 위치를 나타낸 그림이다.

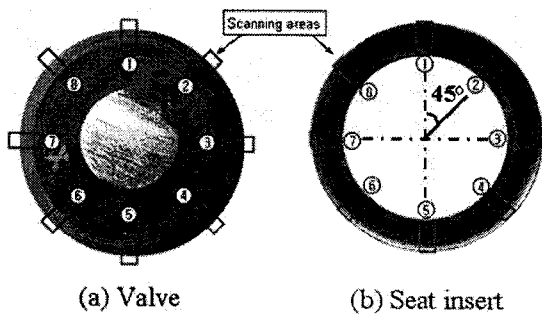


Fig. 3 Scanning areas of valve and seat insert

각 시편별로 8 개의 스캐닝영역(Scanning area)이 있음을 알 수 있으며, 각각의 스캐닝영역 위치는 밸브 착좌면과 시트 인서트 착좌면을 45° 단위로 나눴을 때 생기는 8 개 포인트를 기준으로 설정되었다.

Fig. 4 은 스캐닝으로 얻어진 Scanning area 데이

터 위에 단면형상을 얻기 위해 측정한 10 개의 스캐닝선 위치를 표시한 그림이다. 이 10 개의 스캐닝영역 중 최대값과 최소값은 제외한 8 개의 데이터에서 최대거칠기값을 구하였다.

위와 같은 방법을 통해 한 실험군당 6 개의 시편들을 평균하여 평균 최대거칠기값을 구하였다.

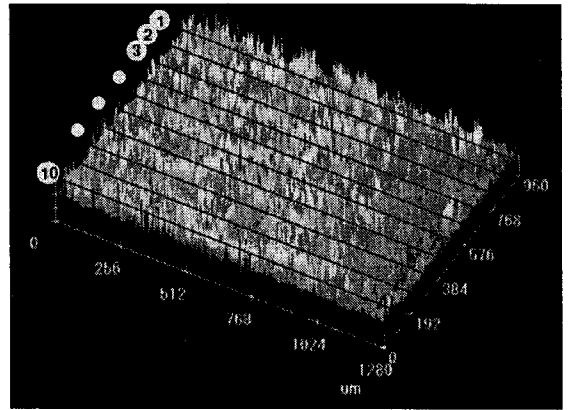


Fig. 4 Scanning lines on a scanning area for measuring the Rmax of a valve

## 4. 측정결과

### 4.1 평균 최대거칠기 분석

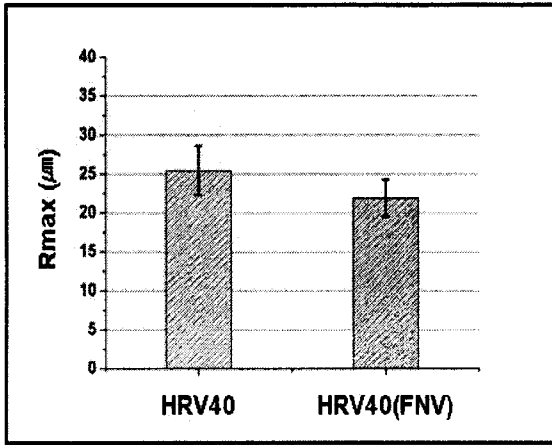
본 연구에서는 밸브 착좌면과 시트 인서트 착좌면의 평균 최대거칠기를 관찰하였다. Tabel 4 는 실험 결과값을 나타낸 것이다.

Table 4 Rmax of worn valve and seat insert

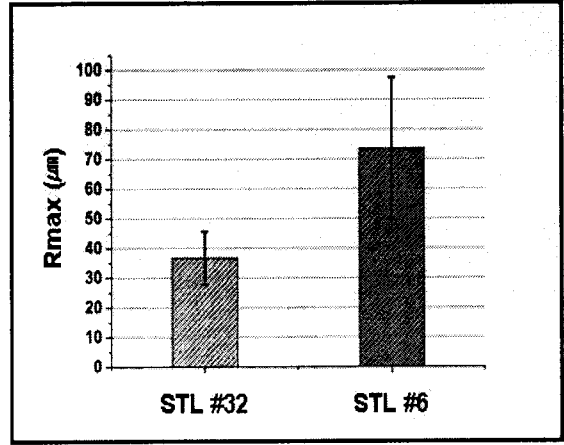
(Unit:  $\mu\text{m}$ )

Description		1	2	3	4	5	6	Mean (SD)
HRV 40	Valve	26.01	28.31	27.11	25.43	27.09	18.68	25.44 (3.16)
	Seat	27.72	32.77	23.35	29.71	29.10	22.50	27.53 (3.60)
HRV 40 FNV	Valve	22.64	26.50	20.74	20.80	21.82	18.80	21.88 (2.38)
	Seat	25.15	28.86	26.89	30.30	22.33	22.13	25.94 (2.77)
STL #32	Valve	22.36	35.15	40.24	52.52	33.15	36.99	36.73 (8.98)
	Seat	51.16	54.64	63.09	74.86	66.30	58.23	61.38 (7.84)
STL #6	Valve	50.50	93.22	74.77	88.65	100.32	34.37	73.64 (23.80)
	Seat	83.53	58.34	48.56	74.41	50.48	49.47	60.80 (13.49)

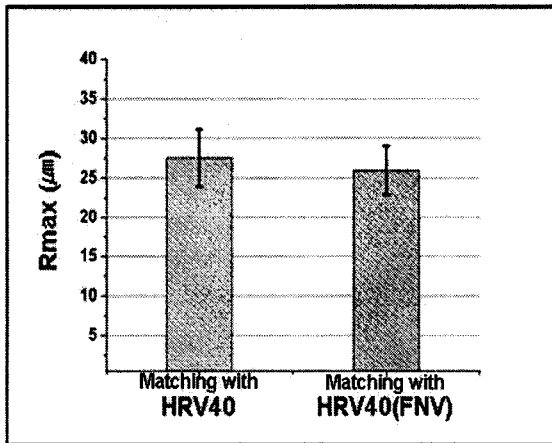
\*SD: Standard Deviation



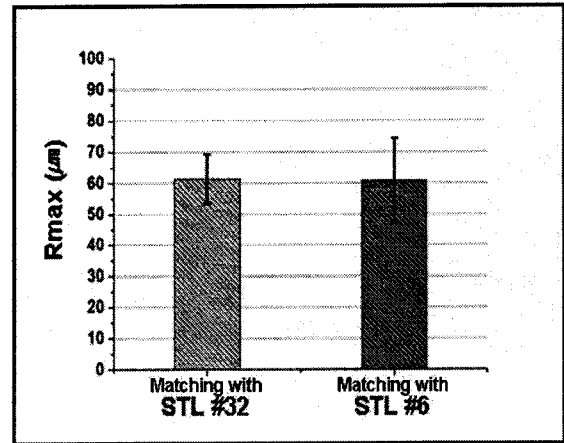
(a) Rmax of valve



(a) Rmax of valve



(b) Rmax of seat insert



(b) Rmax of seat insert

Fig. 5 Comparison of Rmax of HRV40 series valves and the seat insert (HVS1-2)

Fig. 6 Comparison of Rmax of STL series valves and the seat insert (HVS1-2)

Fig. 5 의 (a)는 배기밸브 HRV40 계열의 6 개 실험시편의 평균 최대거칠기를 표면질화처리 유·무에 따라 각각 구분하여 평균값을 비교한 그림이다. Fig. 5 의 (b)는 배기밸브 HRV40 계열의 배기밸브와 매칭시켜 실험한 6 개의 시트 인서트 평균 최대거칠기값을 비교한 그림이다.

Fig. 6 의 (a)는 STL 계열의 배기밸브 6 개의 실험시편의 평균 최대거칠기값을 비교한 그림이며 (b)는 배기밸브 STL 계열과 매칭시켜 실험한 시트 인서트의 6 개의 평균 최대거칠기값을 비교한 그림이다.

#### 4.2 매칭성 고찰

Fig. 7 는 배기밸브와 시트 인서트의 침하량 (Recession)을 나타낸 것이다. 배기밸브 HRV40 과 시트 인서트 HVS1-2 의 침하량은 52.96 μm이고, 배기밸브 HRV40-FNV 과 시트 인서트 HVS1-2 의 침하량은 47.83 μm이다. 배기밸브 STL #32 과 시트 인서트 HVS1-2 의 침하량은 98.11 μm, 배기밸브 STL #6 과 시트 인서트 HVS1-2 의 침하량은 134.43 μm이다.

분석한 결과 HRV40-FNV 밸브의 경우 가장 낮은 침하량을 나타내었다. 따라서 매칭성 관점에서

볼 때 HRV40-FNV 밸브와 HVS1-2 시트 인서트의 매칭이 가장 우수하다고 판단된다.

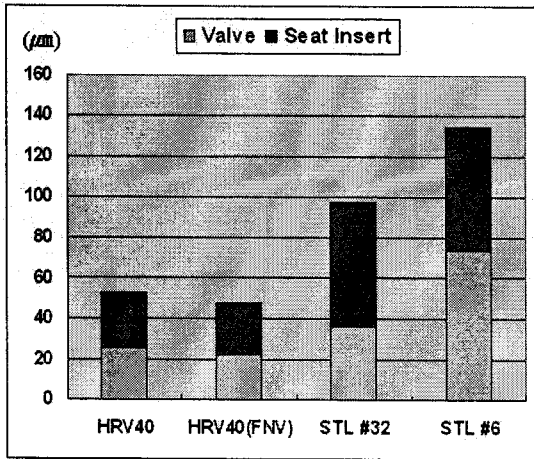


Fig. 7 Total average recession of valves and the seat insert for matching

## 5. 고온경도와 마모 상관관계 분석

### 5.1 고온경도 분석

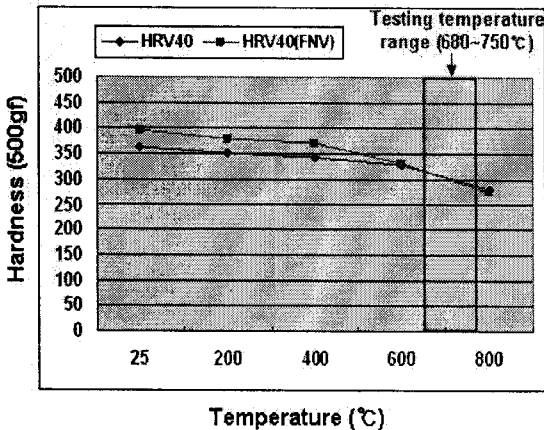


Fig. 8 High temperature hardness measurement of HRV40 series valves

배기밸브의 고온경도 측정은 기계적 연마 후 고온 미세 경도 시험기(DUH-201S, SHIMADZU, Japan)를 이용하였고, 고온경도 시험은 시편별로 각각 5회씩 측정하여 최대, 최소값을 제외한 값들의 평균

치를 구하였다. 이러한 절차로 측정된 Valve의 고온경도값은 배기밸브 HRV40 계열의 경우는 Fig. 8에 나타나있고, 배기밸브 STL 계열의 경우는 Fig. 9에 나타나있다. 온도별 경도값의 변화를 보면 고온으로 갈수록 급격하게 경도값이 떨어짐을 알 수 있다.

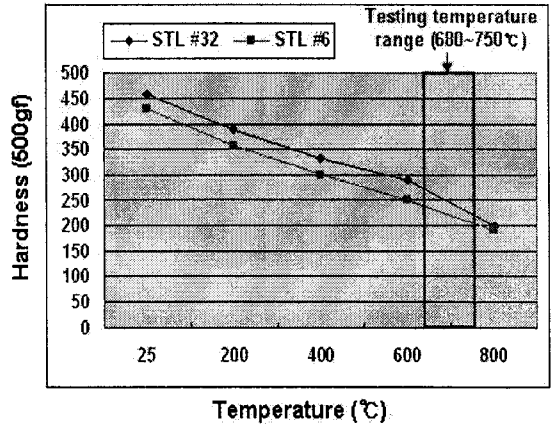


Fig. 9 High temperature hardness measurement of STL series valves

### 5.2 상관관계 분석

본 연구에서는 배기밸브의 고온경도값과 평균 최대거칠기값의 상관관계에 대해서 분석하였다. Table 5은 각 배기밸브 재질의 종류에 따라 고온경도값과 평균 최대거칠기값을 정리해 나타낸 것이다.

Table 5 High temperature hardness and total average Rmax depending on valve materials

(Unit: μm)

Material type	High temperature hardness (500gf - 700 °C)	Total average Rmax (SD)
HRV40	303.2	25.44 (3.16)
HRV40(FNV)	300.9	21.88 (2.38)
STL #32	244.5	36.73 (8.98)
STL #6	220.7	73.64 (23.80)

먼저 고온경도와 평균최대거칠기를 변량 x, y로 정하여 상관관계를 알고자 상관계수를 다음과 같은 수식 (1)로 계산하였다.

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} \cdot S_{yy}}} \dots \dots \dots (1)$$

여기서,

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i)^2}{n}$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i)^2}{n}$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)}{n}$$

이다.

그 결과 아래와 같은 상관계수를 구하였다.

$$r = \frac{5109.167}{\sqrt{(1681.336) \cdot (-2624.546)}} = -0.895$$

일반적으로  $-0.5 < r < 0.5$  이면 변량 x 와 y 는 상관관계가 없다고 말하는데 현재 r 의 절대값이 0.895 이므로 상관관계가 있다고 보여진다. 따라서 고온경도와 평균최대거칠기 사이에는 r 값이 ‘-’ 이므로 음의 상관관계가 있다고 판단된다.

위의 결과를 토대로 배기밸브의 고온경도와 평균 최대거칠기값의 상관관계를 분석하기 위하여 Fig. 10 과 같이 그래프로 나타내었다.

그림을 보면 1 번(STL #32)에서 2 번(STL #6)의 고온경도값 차이에 대한 평균최대거칠기값이 급격하게 작아지나, 2 번에서 3 번(HRV40)의 고온경도값 차이에 대한 평균최대거칠기값의 작아지는 정도가 1 번에서 2 번의 경우와 비교하여 매우 적음을 알 수 있다. 따라서 선형적 관계보다는 곡선적 지수관계이다. 결론적으로 고온경도와 평균최대거칠기값 사이에 음의 상관관계가 있으며 이는 고온경도가 커질수록 평균최대거칠기값이 작아지는 결과를 나타낸다.

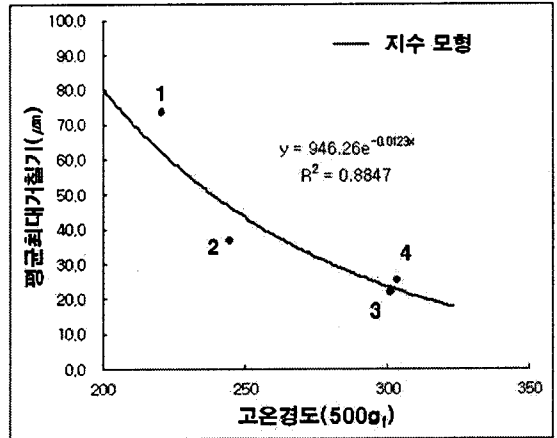


Fig. 10 Analysis of correlation between high temperature hardness and average Rmax

### 6. 결론

본 연구에서는 밸브 및 시트 인서트 전용 마모 시험기를 사용하여 실차의 경우와 유사한 조건으로 밸브와 시트 인서트의 소재특성, 평균 최대거칠기와 고온경도에 대해서 시험을 수행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 배기밸브인 HRV40 의 평균 최대거칠기 (SD)는 25.44 (3.16)  $\mu\text{m}$ 이고, 시트 인서트의 평균 최대거칠기 (SD)는 27.53 (3.60)  $\mu\text{m}$ 이다. HRV40-FNV 의 평균 최대거칠기 (SD)는 21.88 (2.38)  $\mu\text{m}$  이고, 시트 인서트의 평균 최대거칠기 (SD)는 25.94 (3.07)  $\mu\text{m}$  이다. STL #32 에서의 평균 최대거칠기 (SD)는 36.73 (8.98)  $\mu\text{m}$ 이고, 시트 인서트의 평균 최대거칠기 (SD)는 61.38 (7.84)  $\mu\text{m}$ 이다. STL #6 에서의 평균 최대거칠기 (SD)는 73.64 (23.80)  $\mu\text{m}$ 이고, 시트 인서트의 평균 최대거칠기 (SD)는 60.80 (13.49)  $\mu\text{m}$ 이다.

2) 배기밸브와 시트 인서트의 마모결과를 분석한 결과 HRV40-FNV 밸브와 HVS1-2 시트 인서트 세트가 가장 낮은 침하량의 합을 나타내었다. 따라서 매칭성 관점에서 볼 때 HRV40-FNV 밸브와 HVS1-2 시트 인서트가 가장 우수하다고 판단된다.

3) 배기밸브의 고온경도값과 평균 최대거칠기값의 상관관계에 대해서 분석하였다. 그 결과로 고온경도값이 높아질수록 평균 최대거칠기값이 대체적으로 작아지는 경향성을 나타내었고, 이는 고온경도값과 마모량의 관계를 추정할 주요한 근거

가 된다고 판단된다.

### 후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 부품·소재 종합기술지원사업으로 수행하였습니다.

### 참고문헌

1. Kim, E. S., Cho, J. H., Park, K. S., Jung, T. Y. and Im, B. S., "Automobile Technology Handbook," The Korean Society of Automobile Engineers, No. 1, pp. 4-25, 1996.
2. Son, S. M. and Park, K. S., "The Effects an Abnomal Adjusting Intake and Exhaust Valves on the Combustion Characteristics of SI Engine," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 22, No. 3, pp. 123-129, 2005.
3. Chun, K. J., Hong, J. S., Kim, J. H., Hyung, S. J. and Shin, C. S., "Comparison of Wears in the Engine Valve and Seat Insert Depending on Valve Materials," The 13th International Pacific Conference on Automotive Engineering, Vol. 26, pp. 206-211, 2005.
4. Lewis, R., Dwyer-Joyce, R. S. and Josey, G., "Investigation of Wear Mechanisms Occurring in Passenger Car Diesel Engine Inlet Valves and Sear Inserts," SAE Paper No. 1999-01-1216, 1999.
5. Chun, K. J., Hong, J. S. and Lee, H. J., "A Study on Engine Valve and Seat Insert Wearing Depending on Speed Change," SAE Technical Paper No. 2004-01-1655, 2004.
6. Malatesta, M. J., Barber, G. C., Larson, J. M. and Narasimhan, S. L., "Development of a Laboratory Bench Test to Simulate Seat Wear of Engine Poppet Valves," Tribology Transactions, Vol. 36, No. 44, pp. 627-632, 1993.
7. Pyle, W. R. and Smrcka, N. R., "The Effect of Lubricating Oil Additives on Valve Recession in Stationary Gaseous-Fueled Four-Cycle Engine," SAE Technical Paper Series No. 932780, 1993.
8. Yang, L. C., Hamada, A. and Ohtsubo, K., "Engine Valve Temperature Simulation System," SAE Technical Paper No. 2000-01-0564, 2000.
9. Zhao, R., Barber, G. C., Wang, Y. S. and Larson, J. E., "Wear Mechanism Analysis of Engine Exhaust Valve Seats with a Laboratory Simulator," Tribology Transactions, Vol. 40, No. 22, pp. 209-218, 1997.
10. Lewis, R., Dwyer-Joyce, R. S. and Josey, G., "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, Institution of Engineers, pp. 365-370, 1998.
11. Chun, K. J. and Hong, J. S., "A Study on Wear of Engine Valve and Seat Insert Depending on Speed Change," The Korean Society of Automobile Engineers, Vol. 11, No. 6, pp. 14-20, 2003.
12. Giles, W., "Valve Problems with Lead Free Gasoline," SAE Technical Paper No. 710368, 1971.
13. Kimihiko, A., Akira, M. and Akio, Y., "Hardfaced Valve and P/M Valve Seat System for CNG and LPG Fuel Engines," SAE Technical Paper No. 2005-01-0718, 2005.
14. Godfrey, D. and Courtney, R. L., "Investigation of the Mechanism of Exhaust Valve Seat Wear in Engines Run on Unleaded Gasoline," SAE Technical Paper No. 710356, 1971.