

< 논문 >

머신비전을 이용한 밸브어셈블리의 3 차원 마멸특성 분석

박 창 우* · 정 성 중†

(2005 년 4 월 11 일 접수, 2006 년 3 월 17 일 심사완료)

3D Wear Analysis of Valve Assemblies by Using the Machine Vision

Chang-Woo Park and Sung-Chong Chung

Key Words : Machine Vision(머신비전), 3-D Surface Topography(3 차원 표면지형학), Shape from Focus(초점결상), Valve and Seat Wear(밸브와 시트 마멸), Wear Measurement(마멸측정)

Abstract

Wear of engine valves and seat inserts is a major factor affecting engine performance. In order to improve quality and life of valve assemblies, wear mechanism and 3-D surface topography should be analyzed according to operating conditions of the engine. After developing an engine simulator that generates valve speed up to 90Hz and temperature up to 900°C as well as controls test load, wear experiments have been conducted for two different engine speeds as 10Hz and 25Hz. In order to observe the wear characteristics and monitor surface conditions of the valve assemblies, a cost-effective 3-D wear analysis system based on the shape from focus(SFF) and machine vision has been fabricated in this paper. 3-D surface topography of the valve assemblies has been analyzed to understand the wear behavior according to operating conditions of the engine. Consequently, wear volume of the valve assemblies is quantized by using the developed 3-D wear analysis system.

기호설명

$F(x_i, y_j)$: 초점결상지수(focus measure index), FMI
 H_L : 수정라플라시안 마스크(mask)
 $I(x, y)$: 입력영상
 $ML(x, y)$: 출력영상의 결과값
 N, M : 블록윈도우(block window) 크기
 P, Q : 반경 및 원주 방향 샘플수
 P_r : 화소분해능
 S_{dr} : 전개 계면면적비
 S_{ds} : 산의 밀도
 S_g : RMS 거칠기
 S_{rx} : 반경방향 샘플링 비
 S_{ry} : 원주방향 샘플링 비
 T_L : 문턱값
 $f(x_i, y_j)$: 기준표면

n : 카메라의 이동횟수
 $z(x_i, y_j)$: 실제표면
 ∇^2_M : 수정라플라시안 연산
 Δd : 이송간격
 Δx : 반경방향의 샘플링간격
 Δy : 원주방향의 샘플링간격
 $\eta(x_i, y_j)$: 잔차면

1. 서론

자동차 엔진의 성능은 엔진의 출력, 내구성 및 연비 등과 같은 몇 가지 기준에 의해 평가되며 엔진 밸브(valve)와 시트인서트(seat insert)로 구성되는 밸브어셈블리(valve assemblies)의 마멸은 엔진성능에 직접적인 영향을 주는 중요한 요소 중 하나이다. 따라서 밸브어셈블리의 마멸상태를 엔진의 구동조건에 따라 다양하게 관측하고 마멸특성을 분석하는 것은 엔진의 소음, 진동 그리고 배기가스를 줄이고 연비 및 출력을 향상시켜 고품질의 엔

* 한양대학교 대학원 기계설계학과

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : chung@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0444 FAX : (02)2298-4634

진을 제작하기 위해 필요하다.

밸브어셈블리의 접촉면은 높은 온도와 충격력 및 피로로 인해 미소한 산(peaks)과 골(valleys)이 발생하기 때문에 접촉식 장비를 사용하여 마멸자국을 측정하고 마멸기구를 분석하는 것은 매우 어렵다. 일반적으로 마멸특성 분석을 위해서 스캐닝 터널링현미경(STM), 원자력 현미경(AFM), 스캐닝 전자현미경(SEM) 및 공초점 간섭현미경(confocal microscope)⁽¹⁻³⁾ 등을 사용하고 있으나 고가의 장비이며 측정시간이 많이 소요될 뿐만 아니라 마멸량 정량화가 어렵고 일반적인 작업환경에서 사용하기 힘들다는 단점이 있다.

본 연구에서는 정밀 서보스테이지(precision servo stage) 상에서 초점결상(shape from focus, SFF)방법⁽⁴⁻⁶⁾과 영상처리기술을 이용한 머신비전 측정기술을 이용하여 밸브어셈블리의 마멸량 분석과 상태감시를 위해 경제적인 3 차원 마멸특성 분석시스템을 개발한다. 정밀 서보스테이지에 CCD 카메라와 줌렌즈(zoom lens)를 부착하고 할로겐광원과 LED 광원을 이용하여 노이즈와 반사를 줄여 깨끗한 영상을 획득하였으며, 영상처리를 통해 자동차엔진 밸브어셈블리 마멸면의 3 차원 깊이 정보를 측정한다. 그리고 이 형상정보를 이용하여 3 차원 표면지형학(3-D surface topography)^(7,8)의 두 항목인 시각적 특성규명(visual characterization)과 파라미터 특성규명(parameter characterization)을 통해 마멸특성을 분석하고 마멸량을 정량화 한다.

2. 밸브어셈블리의 마멸

2.1 마멸실험 조건

밸브어셈블리의 마멸실험은 실제 자동차엔진의 구동조건과 유사 환경을 구현할 수 있도록 개발된 엔진 시뮬레이터(engine simulator)⁽⁹⁾에서 수행한다. 엔진속도, 연소온도 및 밸브어셈블리의 개폐 수를 조절함으로써 다양한 마멸실험을 수행할 수 있다. 엔진 시뮬레이터는 크게 유압장치, 제어장치 그리고 기계장치로 구성된다. 유압장치는 밸브헤드에 힘을 전달하여 엔진과 같은 연소압력을 부여하고, 제어장치는 밸브헤드에 부여되는 힘, 시트인서트 온도, 밸브어셈블리의 접촉간극 등과 같은 실험 과정에서의 상태를 감시하고 제어한다. 그리고 챔버(chamber) 내의 온도 감시를 위해 열전대와 밸브어셈블리의 접촉간극을 일정하게 유지하기 위해 LVDT가 사용되었다.

마멸실험은 자동차 실제엔진의 저속운전 상태의 1200 rpm 에 해당하는 10Hz 와 고속운전 상태의 3000rpm 에 해당하는 25Hz 에서 수행되었다. 엔진의 온도조건은 시트인서트의 바깥표면에서는 350°C, 밸브 표면에서는 760°C이다. 그리고 가혹조건에서 실험을 위해 연료로 LPG 가 사용되었으며 1960N 의 부하로 밸브와 시트인서트를 2.1×10^6 번 개폐 시켜 마멸실험을 수행하였다. Table 1 은 마멸실험 조건이다.

2.2 밸브어셈블리

Fig. 1 은 밸브어셈블리의 기하형상 이다. 측정면 을 반경방향, 원주방향 그리고 Z 방향으로 정의하였다. 밸브어셈블리의 접촉면은 연소부하와 반복된 접촉으로 인해서 미끄럼운동, 충격력 및 전단력이 발생하고 이로 인해 연삭마멸(abrasive wear), 고착마멸(adhesive wear) 및 충격마멸(impact wear)^(12,9)이 나타난다. 따라서 접촉면의 마멸량과 표면지형의 분석을 통해 밸브와 시트인서트의 마멸특성 분석이 필요하다. 밸브의 재료는 STR35 이며 시트는 HVS1-2 로 높은 온도에서 산화와 부식이 일어나지 않고 강도 저하가 쉽게 일어나지 않는 내열강이다. 그리고 밸브와 시트인서트의 경도는 각각 419Hv(500g)과 397.7Hv(500g)이다.

Table 1 Wear test conditions

Hz (rpm)	10 (1200)	25 (3000)
Test temperature (°C)	350	
Valve displacement (mm)	1.0	
Cycles	2.1×10^6	
Test load (N)	1960	
Fuel used	LPG	

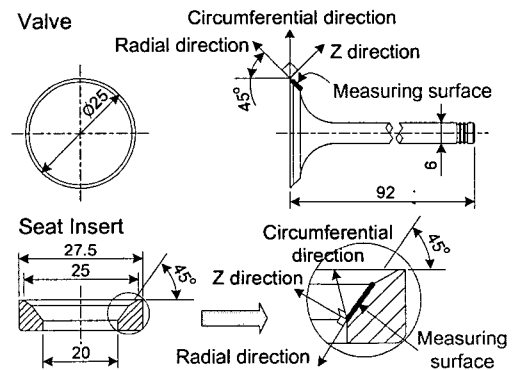


Fig. 1 Geometries of the valve assembly

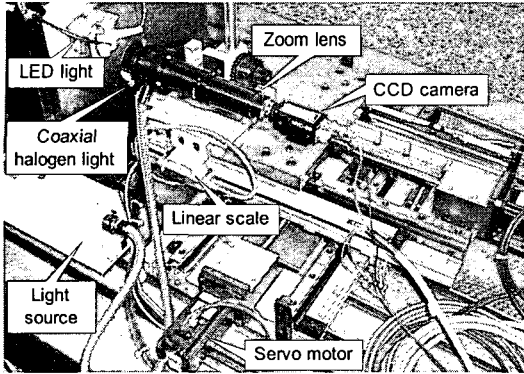


Fig. 2 Developed machine vision system

Table 2 Image acquisition and processing conditions

Moving interval(Δd)	5 μ m
Magnification	$\times 3.5$
Pixel resolution(P_x)	2.17 μ m
Image size	640 \times 480 pixels
Gray levels	256(8 bit)
Mask	modified Laplacian(step=2)
Block window size	$N = M = 7$

3. 머신비전 3 차원 마멸특성 분석시스템

3.1 마멸특성 분석시스템의 구성

머신비전을 이용하여 개발한 3 차원 마멸특성 분석시스템은 Fig. 2 에서와 같이 CCD 카메라와 줌렌즈를 장착한 AC 정밀 서보스테이지,⁽¹⁰⁾ CCD 카메라의 축과 수직인 앵글플레이트, 가감속 시 발생할 수 있는 충격과 형태의 진동을 효과적으로 없애기 위한 진동절연정반(고유진동수 5Hz), 조명 장치와 디지털 영상처리를 위한 컴퓨터로 구성된다. 3 차원 형상을 복원하여 벨브어셈블리의 마멸특성을 분석하기 위해 초점결상법⁽⁴⁻⁶⁾을 사용하며, 텍스처(texture)가 뚜렷하고 깨끗한 영상을 획득하기 위해서 전방조명으로 할로겐조명(halogen illumination) 장치를 이용한 확산조명을 사용한다. 벨브어셈블리의 접촉면은 미소한 산과 골을 가지고 있기 때문에 국부적인 부분에 조명이 미치지 못하여 텍스처가 좋지 못한 곳이 존재한다. 이는 형상을 왜곡시켜 높이 측정에 있어 정밀도를 떨어뜨린다. 따라서 국부조명으로 백색 LED 광원을 사용하여 영상의 질을 향상시켜 표면지형을 정확하게 분석한다.

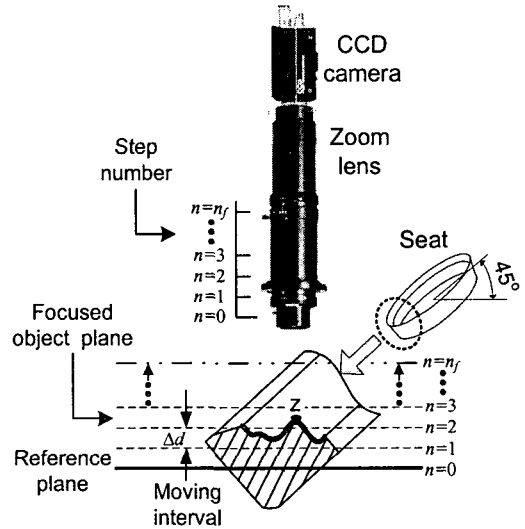


Fig. 3 Shape from focus system

3.2 초점결상 시스템

고역통과필터와 같은 역할을 하여 초점결상지수 (focus measure index: FMI)^(5,6) 변화의 민감성을 증대시키기 위해 수정라플라시안(modified Laplacian) 마스크(mask) 연산자를 사용한다. 입력영상 $I(x,y)$ 의 수정라플라시안을 아래 식과 같은 2 차 편미분으로 정의한다.

$$\nabla^2_M I(x,y) = \left| \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \right| + \left| \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \right| \quad (1)$$

식 (2)는 수정라플라시안의 디지털 근사식이다.

$$ML(x,y) = |2I(x,y) - I(x-step,y) - I(x+step,y)| + |2I(x,y) - I(x,y-step) - I(x,y+step)| \quad (2)$$

여기서, $step$ 은 도함수를 계산하기 위해 사용되는 화소들 사이의 가변공간이다. 획득된 영상의 고주파 성분의 포함정도를 정량적으로 나타내기 위하여 초점결상지수를 다음 식으로 정의한다.

$$F(i,j) = \sum_{x=i-M}^{i+M} \sum_{y=j-N}^{j+N} ML(x,y) \text{ for } ML(x,y) \geq T_L \quad (3)$$

초점결상지수는 영상내의 임의의 위치(i,j)를 중심으로 주변의 수정라플라시안 값들의 합으로 계산되며, N, M 값에 의해서 합을 위한 블록윈도우(block window)의 크기가 정해진다. T_L 은 문턱값으로 $ML(x,y)$ 이 문턱값 이상일 때만 더해진다.

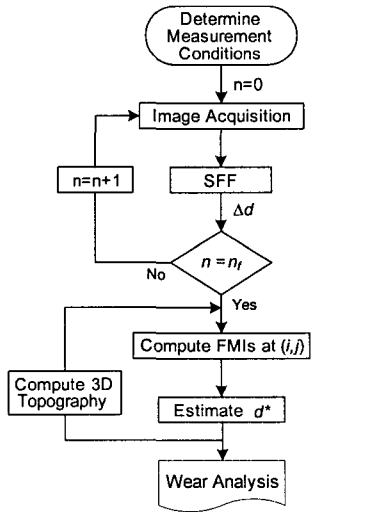


Fig. 4 Flow chart of the wear analysis system

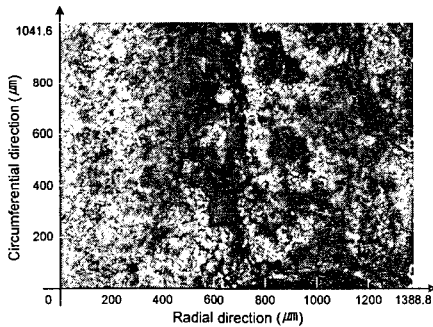


Fig. 5 Raw image of a valve (25Hz case)

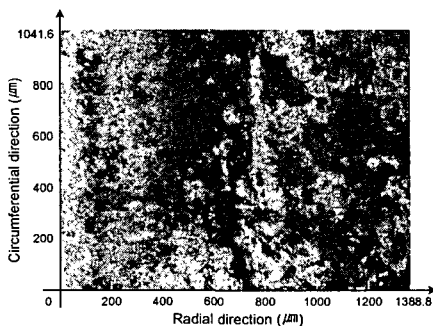


Fig. 6 Raw image of a seat insert (25Hz case)

Fig. 3 은 밸브어셈블리의 3 차원 좌표값을 얻기 위한 SFF 시스템이다. 기준표면으로부터 CCD 카메라를 연속적으로 이동시켜 화소 Z 점의 초점결상 지수를 최대 높이 d_{n_f} 까지 구한다.

$$d_{n_f} = n_f \times \Delta d \quad (4)$$

측정이송간격마다 획득한 초점결상지수를 가우시안 보간법(Gaussian interpolation)^(5,6)을 사용하여 최적의 초점결상지수 값을 추정함으로써 화소 Z 점의 정확한 높이 d^* 를 구한다. Fig. 4 는 영상 내의 임의의 위치 (i,j) 에서 마멸특성 분석을 위한 과정을 보인 것이다.

3.3 이미지 획득과 처리

깨끗한 영상을 빠른 시간에 획득하는 것은 표면 상태감시와 검사시간의 최소화를 위해 중요하다. 직선형 위치검출기(linear scale)에 의해서 되먹임 되어 1 μm의 위치결정 분해능과 12m/sec의 이송 속도를 갖는 Fig. 2의 서보스테이지에서 CCD 카메라의 측정이송간격을 빠르고 정확하게 제어하여⁽¹⁰⁾ 측정시간을 최소화 하였으며 보정된 CCD 카메라를 이용하여 정확한 2 차원 영상⁽⁶⁾을 획득하여 형상정보의 왜곡을 줄였다.

CCD 카메라를 Fig. 3과 같이 Z 방향으로 이송간격(moving interval) Δd 씩 연속적으로 이동하면서 영상을 획득하도록 자동화 하였으며, 획득한 영상은 256 밝기의 농도등급과 640×480 화소를 가진다. 밸브어셈블리를 0°, 90°, 180°, 270°로 4등분하고 각 부분으로부터 영상을 획득하여 표면거칠기를 정량화하고 마멸특성을 분석한다. 미소한 부분의 분석을 위해서 줌렌즈의 배율을 ×3.5로 하여 2.17 μm의 화소분해능(pixel resolution) P_r 을 얻었으며, 측정 이송간격은 5 μm, 수정라플라시안 마스크의 가변공간의 크기 step은 2 그리고 블록윈도우 크기를 결정짓는 변수 N, M 은 7을 사용한다 Table 2는 영상획득 및 처리를 위한 조건이다. 그리고 Fig. 5와 6은 각각 엔진 시뮬레이터를 이용하여 25Hz의 주파수로 마멸실험한 밸브와 시트 인서트 접촉면의 원영상(raw images)이다. 접촉면이 서로 동일한 부분에 대해서 획득한 영상이며 반경 방향과 원주방향의 크기는 각각 1388.8 μm과 1041.6 μm이고 텍스처가 거의 유사하다.

4. 3 차원 표면지형

거칠기 곡선(roughness profile)을 이용한 2 차원 표면특성 규명은 표면 전체의 마멸 자국과 방향 및 마멸특성에 관한 정보를 제공하지 못하기 때문에 표면마멸의 특성규명에 제약이 존재한다.⁽¹¹⁾ 따라서 밸브어셈블리의 표면거칠기와 마멸특성은 3 차원 표면정보를 이용한 3 차원 표면지형 규명의 두 항목인 시각적 특성규명과 파라미터 특성규명^(7,8)을 이용하여 분석한다. 표면 $f(x_i, y_j)$ 는 실제표면

(original surface) $z(x_i, y_j)$ 를 최소자승평균(least squares mean)법으로 구한 표면이며 3 차원 표면지형을 규명하기 위한 기준표면으로 사용된다. 식 (5)는 실제표면 $z(x_i, y_j)$ 와 기준표면 $f(x_i, y_j)$ 사이의 차인 잔차면(residual surface) $\eta(x_i, y_j)$ 를 나타내며 표면지형 파라미터(parameters)를 위한 함수로 사용된다. 그리고 x_i 와 y_j 는 각각 반경방향과 원주방향의 i 와 j 번째 픽셀좌표이며 식 (6)에 의해 표현된다. 여기서 Δx 와 Δy 는 각각 반경방향과 원주방향의 샘플링 간격(sampling interval)을 나타낸다. 획득한 각 단위 프레임의 디지털 영상데이터를 효율적으로 분석하기 위해 640×480 영상의 가로와 세로의 샘플링 비 ($S_r: S_\theta$)를 (8:6)과 (16:12)로 샘플링 하여 지형정보(topographic information)의 양을 줄인다. 여기서 P 와 Q 는 각각 반경방향과 원주방향의 샘플링 수이다.

$$\eta(x_i, y_j) = z(x_i, y_j) - f(x_i, y_j) \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_i = i\Delta x, & i = 1, 2, \dots, P \\ y_j = j\Delta y, & j = 1, 2, \dots, Q \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{여기서 } \begin{cases} \Delta x = P_r \times S_r, & \Delta y = P_\theta \times S_\theta \\ P = 640/S_r, & Q = 480/S_\theta \end{cases}$$

4.1 시각적 특성규명

2 차원 지형정보인 거칠기 곡선은 대략적인 마멸유형과 표본 된 부분의 마멸 깊이만을 관측할 수 있다. 따라서 접촉면의 마멸 자국, 깊이 및 마멸특성과 같은 표면 전체의 상태를 관측하기 위해서는 3 차원 시각적 특성규명이 필요하다. 3 차원 플롯을 이용한 시각적 특성규명은 표면상태감시와 마멸특성 분석을 위해 매우 유용하며 실험조건에 따른 표면마멸 유형을 효율적으로 관측할 수 있다.

본 논문에서는 실제 지형정보를 사실적으로 표현한 등각플롯(isometric plot), 실제표면을 인위적인 처리에 의해서 분석하는 절단플롯(truncated plot)을 사용하여 표면지형을 시각적으로 분석한다.^(7,8) 등각플롯은 접촉면을 3 차원 복원한 형상정보를 인위적인 처리 없이 사실적으로 표현한 플롯이며 마멸깊이와 마멸유형 및 방향을 효율적으로 관찰할 수 있다. 절단플롯은 절단을 위한 기준을 Z 방향으로 변화시키며 절단함으로써 실제표면의 물리적인 처리를 통해서 특징이 존재하는 부분이나 관심 부위를 보다 세밀하고 정확하게 분석할 수 있다.

4.2 파라미터의 정의

일반적으로 표면거칠기는 거칠기 곡선을 이용하

여 산술평균거칠기(arithmetical mean deviation) R_a , RMS 거칠기(root mean square deviation) R_q , 10 점평균 거칠기(ten point height) R_z ^(11,12)를 구하고 그 크기를 서로 비교함으로써 거친 정도를 정량화하고 분석한다. 표면거칠기 파라미터는 임의의 측정위치와 표본수를 정하고 거칠기 곡선의 산술평균값을 취함으로써 구할 수 있으며 이 같은 파라미터를 2 차원 파라미터라 정의한다.⁽¹¹⁾ 하지만 2 차원 파라미터는 표본 곡선의 특징에 따라 민감하게 변하며 접촉면 전체에 대한 거칠기를 표현하기에는 지형 정보가 부족하다. 따라서 실제표면 전체에 대한 표면거칠기로 확장하여 3 차원 파라미터를 정의한다.

벨브어셈블리의 표면거칠기와 마멸량을 정량화하기 위해서 파라미터의 특성에 따라 크기파라미터(amplitude parameter), 공간파라미터(spatial parameter), 복합파라미터(hybrid parameter)^(7,8)로 구분한다. 크기파라미터의 RMS 거칠기 S_q 는 잔차표면의 RMS 값이며 거칠기의 크고 작은 정도를 가장 효과적으로 표현할 수 있기 때문에 정량화하여 비교 분석하기 쉽다. 다음식은 RMS 거칠기 S_q 이다.

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{PQ} \sum_{j=1}^Q \sum_{i=1}^P \eta^2(x_i, y_j)} \quad (7)$$

공간파라미터는 표면지형의 공간특징을 나타내며 기준표면의 표면적에 대한 산(summit)의 수를 산의 밀도(density of summits) S_{ds} 라 정의한다. 여기서는 3×3 크기의 단위 샘플범위 내의 중앙값이 8 개의 이웃(eight nearest neighbors) 보다 클 경우를 산이라 정의한다. 산의 밀도 S_{ds} 는 다음 식으로 표현된다.

$$S_{ds} = \frac{\text{Number of summits}}{(P-1)(Q-1)\Delta x \Delta y} \quad (8)$$

표면지형의 크기특성과 공간특성을 함께 가지는 파라미터를 복합파라미터로 정의한다. 복합파라미터인 전개계면면적비(developed interfacial area ratio) S_{dr} 은 식 (9)와 같이 표현되며 기준표면의 면적에 대한 실제표면을 펼쳤을 때 표면적의 비로서 계면면적의 증가비를 나타낸다.

$$S_{dr} = \frac{\sum_{j=1}^{Q-1} \sum_{i=1}^{P-1} A_{ij} - (P-1)(Q-1)\Delta x \Delta y}{(P-1)(Q-1)\Delta x \Delta y} \times 100(\%) \quad (9)$$

여기서

$$A_y = \sqrt{1 + \left(\frac{\eta(x_i, y_j) - \eta(x_i, y_{j-1})}{\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{\eta(x_i, y_j) - \eta(x_{i-1}, y_j)}{\Delta y} \right)^2} \Delta x \Delta y$$

5. 마멸특성 분석과 정량화

5.1 25Hz (3000rpm)의 경우

시각적 특성규명을 위해 25Hz(3000rpm)로 실험을 수행한 밸브어셈블리의 원영상 Fig. 5와 6의 3차원 표면거칠기, 마멸량 및 마멸특성을 분석한다. Fig. 7과 8은 밸브어셈블리 표면지형의 등각플롯이다. 가혹한 조건에서 실험을 수행하기 위해 LPG를 이용하였으며, 연소과정에서 발생하는 부하를 모사하기 위해 1960N의 부하를 인가하면서 2.1×10^6 회 마멸실험을 수행하였다. 충격력에 따른 피로마멸의 영향으로 피팅(pitting)이 관찰되며,⁽¹³⁾ 시트인서트와 밸브가 접촉하는 반경에서 원주방향으로 충격에 의한 변형, 마멸 및 고착 등에 의해서 골과 산이 발생한다.^(1,2,13) 즉, 밸브의 산과 시트인서트 골의 마멸자국 위치가 서로 유사하고 그에 따른 마멸깊이와 유형은 상반되게 발생한 것을 시각적으로 관측할 수 있다.

기술표준원에서 제정된 밸브 및 시트인서트의 신뢰성평가 기준에 의거 최저와 최고 높이차로 정의되는 마멸깊이는 등각플롯의 명암과 높이 차를 이용하면 효율적으로 측정되며 밸브는 약 70 μm, 시트인서트는 약 80 μm으로 경도가 큰 밸브에 비해 경도가 작은 시트인서트의 마멸깊이가 더 크다.

Fig. 9와 10은 밸브의 절단플롯이며 Fig. 11과 12는 시트인서트의 경우이다. 기준표면을 절단기준으로 실제표면을 절단하였을 때 기준표면 이상을 산, 그 이하를 골이라 정의한다. 피로마멸에 의한 피팅이 뚜렷하게 관측되며, 밸브의 산과 시트인서트의 골은 상호 반복된 충격력과 미끄럼운동으로 인해서 접촉부위가 마멸되고 쌓여 반달모양의 마멸자국이 발생하고 그 위치는 거의 일치함을 확인할 수 있다. 반대의 경우인 밸브의 골과 시트인서트의 산도 유사한 마멸특성을 가지며 피팅은 물론 국부적인 산과 골을 관찰할 수 있다.

5.2 10Hz (1200rpm)의 경우

10Hz(1200rpm)로 마멸실험을 수행한 밸브어셈블리의 마멸을 시각적 특성규명을 이용하여 분석한다. Fig. 13과 14는 각각 밸브와 시트인서트의 등각플롯이다. 25Hz로 마멸실험을 수행한 경우에 비해서 마멸깊이가 작으며 반경방향 단면에서 반달모양의 확연한 마멸자국과 마멸의 방향성은 관측

되지 않으나 접촉면에서 충격 피로에 의한 피팅이 관찰되며 국부적인 부분에서 연삭과 고착에 의한 마멸깊이의 변화^(1,2)를 볼 수 있다. 밸브의 마멸깊이는 약 40 μm이며 시트인서트의 마멸깊이는 약 45 μm이다.

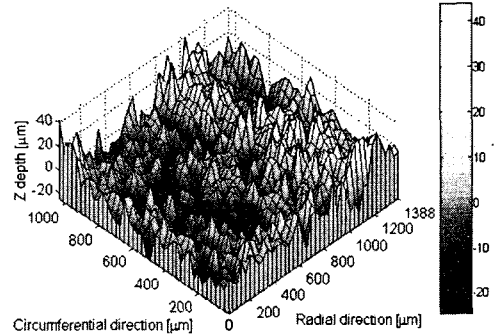


Fig. 7 Isometric plot of the worn valve

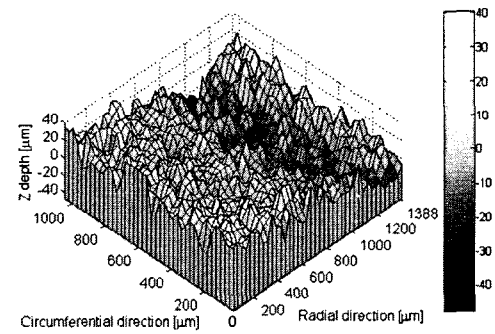


Fig. 8 Isometric plot of the worn seat insert

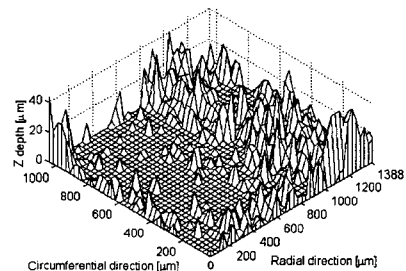


Fig. 9 Truncated plot of the worn valve: peaks

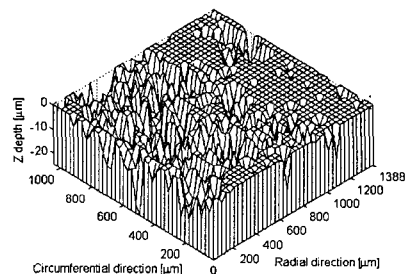


Fig. 10 Truncated plot of the worn valve: valleys

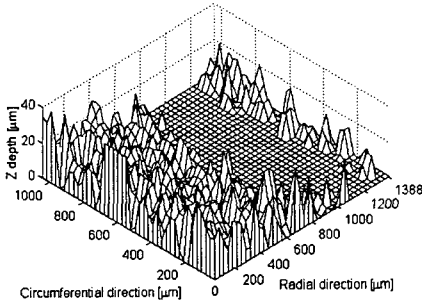


Fig. 11 Truncated plot of the worn seat insert: peaks

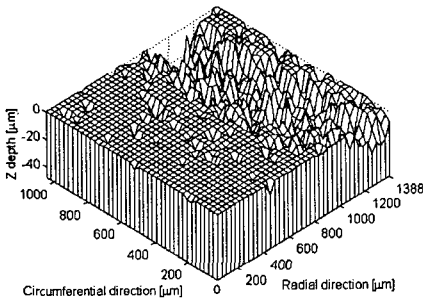


Fig. 12 Truncated plot of the worn seat insert: valleys

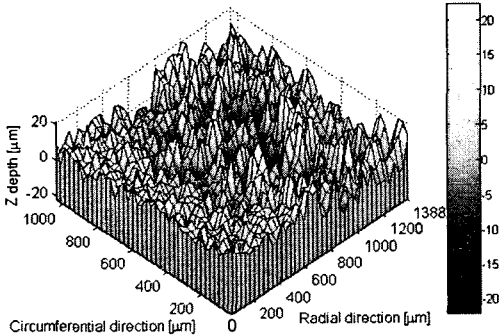


Fig. 13 Isometric plot of the worn valve

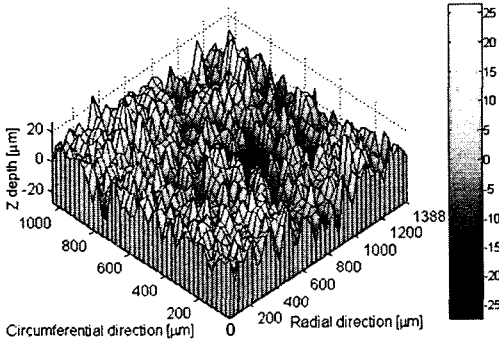


Fig. 14 Isometric plot of the worn seat insert

Table 3 3D parameters of the valve (10Hz case)

Parameters & Sampling Ratio		Valve				
		0°	90°	180°	270°	Mean
$S_q(\mu m)$	8:6	9.14	7.51	9.63	8.23	8.63
	16:12	9.01	7.51	9.92	8.23	8.67
$S_{ds}(mm^{-2})$	8:6	284.19	286.33	293.30	313.07	294.22
	16:12	79.07	95.93	90.95	87.04	88.23
$S_{dr}(\%)$	8:6	16.37	12.01	19.72	13.35	15.36
	16:12	8.97	6.27	11.12	7.35	8.42

Table 4 3D parameters of the seat insert (10Hz case)

Parameters & Sampling Ratio		Seat insert				
		0°	90°	180°	270°	Mean
$S_q(\mu m)$	8:6	9.68	8.58	9.49	8.90	9.16
	16:12	9.43	8.59	9.23	8.60	8.96
$S_{ds}(mm^{-2})$	8:6	282.85	293.43	293.48	297.74	291.88
	16:12	92.35	95.23	83.63	91.63	90.71
$S_{dr}(\%)$	8:6	16.94	13.34	15.21	14.74	15.06
	16:12	8.99	7.22	8.18	7.56	7.99

Table 5 3D parameters of the valve (25Hz case)

Parameters & Sampling Ratio		Valve				
		0°	90°	180°	270°	Mean
$S_q(\mu m)$	8:6	11.88	13.77	11.32	11.41	12.10
	16:12	12.20	13.88	11.48	11.62	12.30
$S_{ds}(mm^{-2})$	8:6	297.03	345.94	319.71	294.19	314.22
	16:12	87.26	98.90	88.72	89.44	91.08
$S_{dr}(\%)$	8:6	22.00	42.71	24.39	20.99	27.52
	16:12	12.15	18.48	12.14	10.78	13.39

Table 6 3D parameters of the seat insert (25Hz case)

Parameters & Sampling Ratio		Seat insert				
		0°	90°	180°	270°	Mean
$S_q(\mu m)$	8:6	15.70	15.33	16.36	14.46	15.46
	16:12	15.98	15.88	16.72	14.66	15.81
$S_{ds}(mm^{-2})$	8:6	309.79	350.20	348.07	309.79	329.46
	16:12	82.90	97.44	94.54	91.63	91.63
$S_{dr}(\%)$	8:6	23.36	29.23	35.19	26.54	28.58
	16:12	12.08	15.38	17.03	12.90	14.35

5.3 마멸의 정량화

엔진속도에 따른 마멸량과 표면거칠기를 3 차원 파라미터를 이용 정량화하고 분석하였다. Table 3 과 4 는 10Hz 로 마멸실험 한 밸브어셈블리의 3 차원 표면지형 파라미터이며 Table 5 와 6 은 25Hz 의 경우이다. 밸브어셈블리의 90 도 마다 4 부분에서 8:6 과 16:12 의 샘플링 비로 데이터를 획득하여 파라미터를 구하고 산술평균을 통해 정량화 한다.

Table 7 Mean values of 3D parameters

Parameters & Sampling Ratio		1 st pairs (10Hz)		2 nd pairs (10Hz)		3 rd pairs (10Hz)	
		Valve	Seat insert	Valve	Seat insert	Valve	Seat insert
$S_q (\mu m)$	8: 6	8.63	9.16	8.71	9.23	9.98	9.51
	16:12	8.67	8.96	8.72	9.25	10.09	9.52
$S_{ds} (mm^{-2})$	8: 6	294.22	291.88	297.71	302.93	282.64	300.67
	16:12	88.23	90.71	90.80	91.34	85.82	90.32
$S_{dr} (%)$	8: 6	15.36	15.06	13.33	16.75	16.70	18.55
	16:12	8.42	7.99	6.68	8.49	8.46	10.82
Parameters & Sampling Ratio		1 st pairs (25Hz)		2 nd pairs (25Hz)		3 rd pairs (25Hz)	
		Valve	Seat insert	Valve	Seat insert	Valve	Seat insert
$S_q (\mu m)$	8: 6	12.10	15.46	13.39	17.00	13.78	18.16
	16:12	12.30	15.81	13.33	17.38	13.70	18.03
$S_{ds} (mm^{-2})$	8: 6	314.22	329.46	372.35	375.01	374.12	393.26
	16:12	91.08	91.63	106.17	101.63	104.35	118.26
$S_{dr} (%)$	8: 6	27.52	28.58	42.04	47.97	34.70	53.32
	16:12	13.39	14.35	17.43	21.14	14.18	22.26

마멸깊이의 3 차원적인 크기 특성을 나타내는 RMS 거칠기 S_q 는 10Hz 의 밸브와 시트인서트의 경우 각각 8.63 과 9.16 μm 이며 25Hz 의 경우는 12.10 과 15.46 μm 이다. 경도가 큰 밸브가 시트인서트에 비해서 양 경우 모두 S_q 가 큰 값을 가지며, 저속의 10Hz 에 비해서 고속의 25Hz 에서 S_q 값이 확연히 크게 나타나는데 이는 고속의 작동조건에서 마멸량과 표면거칠기가 더 크게 발생한다는 것을 의미한다.

충격과 피로 마멸에 의해 발생하는 피팅을 정량화 할 수 있는 산의 밀도를 나타내는 파라미터 S_{ds} 또한 25Hz 의 경우가 더 크며, 이는 접촉면에서 피팅이 보다 심하게 일어나서 접촉면이 더 거칠다는 것을 의미한다. 전개된 계면면적비 S_{dr} 은 RMS 거칠기와 산의 밀도에 의해서 영향을 받으며 복합적인 특성을 나타낸다. 25Hz 경우가 10Hz 에 비해 크게 발생하며, 마멸량과 표면거칠기의 증가는 접촉면의 표면적을 증가시킴을 알 수 있다. 이상과 같이 엔진속도의 증가는 2.1×10^6 번의 동일한 개폐 실험에도 불구하고 마멸량과 표면거칠기를 급격하게 증가시키며 밸브에 비해서 시트인서트의 마멸이 상대적으로 크게 나타남을 파라미터를 비교함으로써 확인할 수 있다. Table 7 은 3 쌍의 밸브어셈블리에 대한 3 차원 파라미터의 평균값을 정리한 것으로 동일한 운전조건에서 마멸에 따라 비슷한 표면지형 조건이 밸브어셈블리에서 측정됨을 확인할 수 있다.

6. 결론

(1) 초점결상법을 이용하여 밸브어셈블리의 3 차원 측정 및 상태감시를 위한 3 차원 마멸특성 분석시스템을 개발하였다. 머신비전시스템은 정밀 서보스테이지 상에서 CCD 카메라, 줌렌즈, 광원장치 및 이미지처리 모듈을 사용하여 구현되었다.

(2) 개발한 시스템을 사용하여 밸브어셈블리 접촉면의 표면지형을 3 차원 형상으로 가시화하고 정량화 함으로써 효율적으로 마멸특성 분석을 수행하였다.

(3) 세 개의 밸브를 2.1×10^6 회 부하 1960N 에서 LPG 를 연소하면서 10Hz 로 마멸실험을 한 경우, 피로와 충격 마멸에 의한 피팅이 크게 관찰되었고, 밸브의 평균 RMS 거칠기는 9.13 μm 이며 시트인서트는 9.27 μm 이다. 25Hz 의 경우는 피팅은 물론 밸브어셈블리 접촉면에서 충격에 의한 변형, 마멸 및 고착 등에 의해 골과 산이 발생하였고, S_q 값은 밸브가 13.1 μm 이며 시트인서트는 16.97 μm 으로 속도가 2.5 배 증대됨으로써 밸브의 경우는 약 43%, 시트인서트는 약 29% 마멸에 따른 표면거칠기가 증대하였다.

(4) 25Hz (3000rpm)의 경우 밸브어셈블리의 접촉면 마멸자국은 마멸이 크게 진전되어 서로 반경방향으로 거의 일치하는 형상을 가지나, 10Hz (1200rpm)의 경우는 마멸이 작게 일어나 접촉면 전체에서 불규칙적으로 마멸이 발생한다.

(5) 엔진속도의 증가는 마멸량을 급격히 증가시키며 밸브에 비해 시트인서트의 마멸량이 더 크게 일어남을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Wang, Y. S., Narasimhan, S., Larson, J. M., Larson, J. E. and Barber, G. C., 1996, "The Effect of Operating Conditions on Heavy Duty Engine Valve Seat Wear," *Wear*, Vol. 201, pp.15~25.
- (2) Ootani, T., Yahata, N., Fujiki, A., and Ehira, A., 1995, "Impact Wear Characteristics of Engine Valve and Valve Seat Insert Materials at High Temperature (Impact Wear Tests of Austenitic Heat-Resistant Steel SUH36 Against Fe-Base Sintered Alloy Using Plane Specimens)," *Wear*, Vol. 188, pp.175~184.
- (3) Bhushan, B., 1999, *Handbook of Micro/nano-tribology, Second Edition*, CRC Press.
- (4) Nayar, S. K. and Nakagawa, Y., 1994, "Shape from Focus," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 16, No. 8, pp. 824~831.
- (5) Yoon, H. S. and Chung, S. C., 2004, "Vision Inspection of Micro-drilling Processes on the Machine Tool," *Transactions of the NAMRI/SME*, Vol. 32, pp.391~398.
- (6) Yoon, H.S. and Chung, S.C., 2004, "Machine Vision Inspection System of Micro-Drilling Processes on the Machine Tool," *Transactions of the KSME (A)*, Vol. 28, No. 6, pp.867~875
- (7) Dong, W. P., Sullivan, P. J. and Stout, K. J., 1994, "Comprehensive Study of Parameters for Characterizing Three Dimensional Surface Topography III: Parameters for Characterizing Amplitude and Some Functional Properties," *Wear*, Vol. 178, pp. 29~43.
- (8) Dong, W. P., Sullivan, P. J. and Stout, K. J., 1994, "Comprehensive Study of Parameters for Characterizing Three Dimensional Surface Topography IV: Parameters for Characterizing Spatial and Hybrid Properties," *Wear*, Vol. 178, pp. 45~60.
- (9) Park, C. W., Chun, K. J. and Chung S. C., 2004 "Wear Measurement of Valve Assemblies by using the Machine Vision," *2004 Annual Meeting, American Society for Precision Engineering, Vol. 34*, pp. 289~292.
- (10) Chung, S.C. and Kim, M.S., 2005, "Integrated Design of Servomechanisms Using a Disturbance Observer," *Transactions of the KSME (A)*, Vol. 29, No. 4, pp.591~599.
- (11) Chung, S.C. et al, 2001, *Modern Manufacturing Processes*, Moonwundang, Seoul.
- (12) Bhushan, B., 2002, *Introduction to Tribology*, John Wiley&Sons, New York.
- (13) Fricke, R. W. and Allen C., 1993, "Repetitive Impact Wear of Steels," *Wear*, Vol. 162-164, pp. 837~847.