실린더 헤드에서의 진동신호를 이용한 밸브간극 진단에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Valve Lash Diagnosis Using Cylinder Head Vibration Signal

석 정 호*, 김 원 진**, 박 윤 식***
J. H. Seok, W. J. Kim, Y. S. Park

ABSTRACT

In this work, the possibility to diagnose valve lashes of an automotive diesel engine via cylinder head vibration/noise analysis is studied. First of all the measurement signals and conditions are selected after considering which signals and conditions are most suitable to diagonse valve lashes. Both accelerometer and microphone are used to measure cylinder head accelerations and acoustic pressure due to valve impact on cylinder head. The signals are measured in both cranking and engine firing conditions. Finally, it was found that acceleration signal obtained in engine operating condition is the most reliable signal to diagnose the valve lash condition. The valve closing angle and the peak acceleration due to valve close are chosen to analyze the valve lash condition. The measured cylinder head acceleration signals are statistically tested to derive information which are useful to judge the valve lash. In conclusion, it was found that the developed technique can be one of feasible methods to diagnose the valve conditions while the engine is in operation.

1. 서 론

캠-밸브 시스템에 대한 연구는 계의 동적 모델링 방법, 캠 기구의 최적화를 위한 캠 형상 설계등 많은 연구가 있어 왔다. 최근에는 엔진의 소음 또는 진동신호로부터 엔진의 이상작동을 진단하는 자가진단 시스템 개발에 관심이 모아지고 있는데, 본 연구에서는 실린더 헤드 위에서의 진동신호를 측정하여 밸브간극의 이상 유무를 판단하는 신호처리기법 및 알고리듬 개발에 그 목적을 두었다.

선행 연구로는 입력신호 회복의 한 분야로 엔진의 진동신호로부터 밸브의 충격력 회복에 관한 연구가 있었다.[1] 여기서 사용한 방법은 전달함수를 이용한 역 필터링 방법(inverse filtering method)으로 엔진과 같은 복잡한 구조물에서는 시스템 특성을 나타낼 수 있는 정확한 전달함수를 구하기 어려우므로 이와같

* 대우중공업 산차사업부
** 한국과학기술원 기계공학과
*** 한국과학기술원 기계공학과, 정회원

은 방법의 적용은 매우 제한적이다. 한편 엔진의 진동을 일으키는 여러 힘들을 규명한 연구가 있었는데[2], 이 연구에서는 피스톤 스랩(piston slap)에 의한 진동은 그 해당 실린더의 가까운 블럭 표면만 가진하고, 엔진 진동의 대부분은 크랭크 축 베어링에 의하여 발생되는 것으로 확인되었다. 이와 같은 선행연구 결과에서 볼 때 엔진 전체 진동에서 캠-밸브 운동의 기여도는 그렇게 크지 않음을 추정할 수 있다. 그러나 밸브의 충격에 의한 음압 에너지에 대한 연구[3]에서 보면 밸브가 열릴 때는 약 1kHz, 닫힐 때는 약 2~4kHz 부근에서 같은 정도의 소음이 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 밸브의 충격력에 대한 응답은 특정 주파수 영역내에서 크게 나타나므로 밴드 패스 필터(band pass filter)를 이용하여 밸브 작동에 의한 응답을 분리할 수 있는 가능성이 있다.

본 연구에서는 밸브간극의 정도를 파악하는데 적합한 센서(sensor) 및 측정상태를 선정하고, 측정신호를 해석하는 유용한 방법을 구하고자 한다. 먼저 예비실험을 통하여 엔진 폭발에 의한 엔진 블럭 가진주파수를 파악하고, 밸브작동에 의한 측정된 신호의 주파수 범위를 예측하여 복잡한 엔진 진동신호로부터 밸브 충격에 의한 신호만을 분리하는 것이 가능한 지를 검토하였다. 그리고 진단에 적합한 센서(가속도계, 마이크로폰)의 선정, 즉 가속도와 소음신호 중에 어느 것이 더 타당한가를 평가하고, 이상진단시에 시동모터(starting motor)로 크랭킹 상태(cranking condition)에서 신호를 측정하는 방법과 엔진 폭발에 의한 폭발 상태(firing condition)에서 신호를 측정하는 방법을 비교하여 가장 효과적인 측정상태와 방법을 선택하였다. 그 결과 폭발상태에서 가속도계로 진동신호를 측정하는 것이 밸브간극의 이상진단에 적합한 조건으로 판명되었다. 밸브간극 진단방법은 시간영역에서의 신호처리로부터 얻어지는 두가지 정보에 의해 가능하게 되는데, 그것은 첫째 밸브 충격에 의한 신호발생 구간을 정량화한 것이고 두번째 정보는 밸브 충격에 의한 가속도 신호의 크기를 정량화한 것으로 위의 두가지 정보로부터 밸브간극의 적정성 여부를 판단하는 신호 해석 방법에 대하여 연구하였으며, 실험을 통하여 그 방법의 실제 엔진에의 적용가능성을 검토하였다.

2. 진동 및 소음신호에 의한 밸브간극 진단

이상진단 방법은 크게 경향분석법(trend analysis)과 고급진단법(high level diagnosis)으로 나누어진다. 경향분석법은 시스템에 관한 과거의 정보를 이용하는 정성적 방법으로 이 경우에는 입력자체를 알 필요가 없는 장점이 있지만 효과적 진단을 위해서는 다른 입력으로부터의 간섭이 없어야 하며, 또한 과거의 자료에 나타나지 않은 새로운 상황에 대해서는 효과적인 진단을 못하는 제한이 있다. 고급진단법은 시스템의 전달함수를 이용하기 때문에 정량적 진단이 가능하며, 새로운 입력상황도 시스템의 응답으로부터 예측 가능한 방법이지만 정확한 전달함수를 알아야 한다는 제한점을 가지고 있다. 선행 연구[1]에서는 밸브간극 진단시에 고급진단법의 적용을 검토하였는데, 다음과 같은 문제점들이 발생하였다.

- 동종의 엔진이라도 각개의 엔진에 따라 전달함수가 상당히 변화하는 문제점
- 밸브 충격이 일점 충격이 아니고 어떠한 면을 통한 충격이므로 이 경우 정확한 전달함수 정의에 따른 문제점
- 엔진의 비선형성으로 인한 문제점
- 8개 밸브 모두와 측정점에 대한 8개의 전달함수가 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 경향분석법을 사용하여 주어진 입력범위 내에서 가속도와 소음신호로부터 밸브간극을 진단할 수 있는 알고리듬을 제시하고자 한다. 신호 경향분석법을 이용하여 밸브간극을 진단하는데 사용된 방법의 순서는 그림 1에서와 같다. 즉 먼저 예비실험을 통하여 효과적 이상진단을 하기 위한

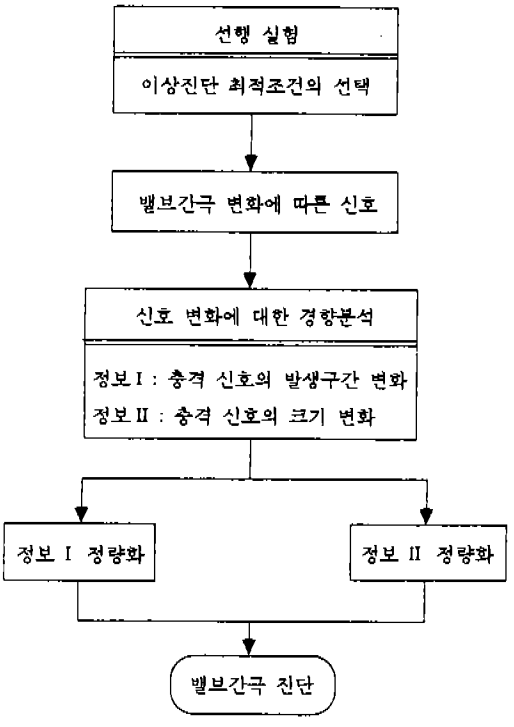


그림 1 신호 경향분석법에 의한 밸브간극 진단 과정

그림 2 실험 장치

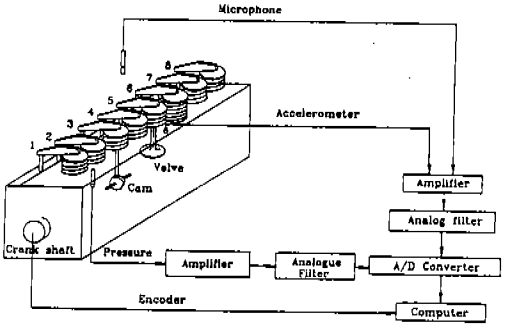


그림 3 실험장치에 대한 개략도

제반조건에 대하여 검토하였다. 즉 적합한 센서의 선정과 측정시에 엔진 작동상태 결정 등이 선행되어야 한다. 다음은 간극 변화에 따른 신호 변화 경향을 분석하여 특성을 파악하고, 진단에 유용한 변수(parameter)를 찾는 것인데, 여기서 고려된 변수는 충격에 의한 신호의 발생 구간 변화와 신호의 크기 변화이다. 그림 1에서의 정보 I, II와 같이 신호의 특성변수가 결정되면 각 특성을 정량화함으로써 이상진단 자료를 얻을 수 있다. 신호의 경향에 따라 정량화 정보에 가중치(weighting value)를 주면, 보다 효율적인 이상진단이 가능하다.

3. 신호 측정 및 진단 조건 선택

3.1 신호 측정

4기통 디이젤 엔진을 사용하여 실험을 하였으며, 실험장치는 그림 2의 사진과 그림 3에서 보여진 바와 같다. 4행정 4기통 엔진의 실린더 폭발 및 밸브의 작동순서는 표 1에 나타나 있으며, 밸브의 개폐현상은 실린더 폭발 전후에서 서로 겹쳐 있음을 알 수 있다. 그러나 개현상과 폐현상 중 하나만 고려하면 표 1에서와 같이 폭발현상을 전후로 각 밸브의 작동각이 구분될 수 있다. 진동 및 소음신호의 측정은 각각 가속도계와 마이크로폰을 이용했는데, 그림 3에서 보듯이 가속도계는 5번 밸브 앞에, 마이크로폰은 실린더 헤드커버(cylinder head cover)의 위 중앙에서 13 cm 위에 설치하였다. 그리고 크랭크축에 설치된 엔코더 신호(encoder signal)를 기준으로 하여 가속도 신호를 측정하거나 소음신호를 측정하였다. 또한 엔코더 신호의 초기위치와 실린더의 폭발에 의한 가진주파수(excitation frequency)를 알아내기 위해 1

표 1 실린더 폭발 및 밸브 작동각

종 류	디이젤 엔진											
캠 각도(deg)	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	
1 번 실린더	2c	1o			1c		폭			2o		
2 번 실린더		3c			폭			4o			4c	3o
3 번 실린더	6o			6c	5o			5c			폭	
4 번 실린더	폭			8o			8c	7o			7c	
1 사이클	2c폭3c			6c폭1c			8c폭5c			4c폭7c		
	보기). 2c : 2 번 밸브 닫음 폭 : 폭발											

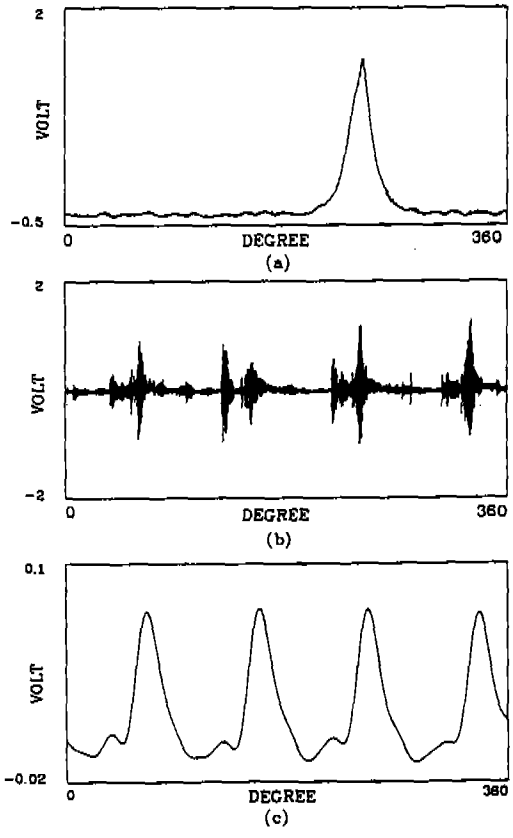


그림 4 압력신호와 가속도 신호 및 저주파수 성분
(a) 측정압력 (b) 가속도 신호
(c) 필터링된 신호 (0～100 Hz)

번 실린더에 압력센서(pressure sensor)를 붙여 실린더내의 압력을 측정하였다. 엔진 회전수는 캠축 기준으로 380 rpm, 샘플링 주파수(sampling frequency)는 20kHz, 로우 패스 필터(low pass filter)는 11.5 kHz 에 맞추었다. 그림 4 (a),(b)는 각각 압력센서로 측정한 실린더 압력과 실린더 헤드에서의 가속도 신호를 나타낸 것이다. 그림 4 (b)의 가속도 신호를 로우 패스 필터링(0～100Hz) 하면 그림 4 (c)와 같이 된다. 이는 실린더의 폭발로 인한 가속도 성분으로써 엔진 회전수가 크랭크축 기준으로 760 rpm 정도일 때 약 25 Hz의 성분을 가지며 매우 낮은 주파수 대역임을 알 수 있다.

3.2 이상진단 조건의 선택

본 연구에서는 밸브간극의 크기를 변화시켜 밸브의 이상작동 현상을 유발하고, 이 때 발생되는 진동/소음 신호로부터 밸브간극의 이상유무를 판별한다. 밸브의 이상진단에 적합한 조건을 알아보기 위해서 다음과 같은 네 가지 조건에서 선행실험을 하였다.

- 폭발상태 (firing condition)에서의 진단
  1) 가속도계 이용
  2) 마이크로폰 이용
- 크랭킹 상태 (cranking condition) 에서의 진단
  1) 가속도계 이용
  2) 마이크로폰 이용

엔코더 신호를 이용하여 정확한 캠축 회전각(camshaft angle)을 기준으로 하고 실린더 헤드에서의 진동신호를 가속도계로 측정하여 보면 밸브가 열릴 때의 신호는 닫힐 때의 신호에 비하여 매우 미약하므로 닫힐 때의 충격신호를 중심으로 하여 밸브간극을 예측한다. 그림 5, 6 는 폭발상태에서 밸브간극의 변화에 따른 진동신호의 변화를 표현한 것인데, 간극이 커질수록 밸브가 닫힐 때의 충격신호가 커지고 충격 발생각이 앞으로 이동되는 신호 변화특성을 볼 수 있다.

소음신호의 발생은 진동신호와는 다른 전

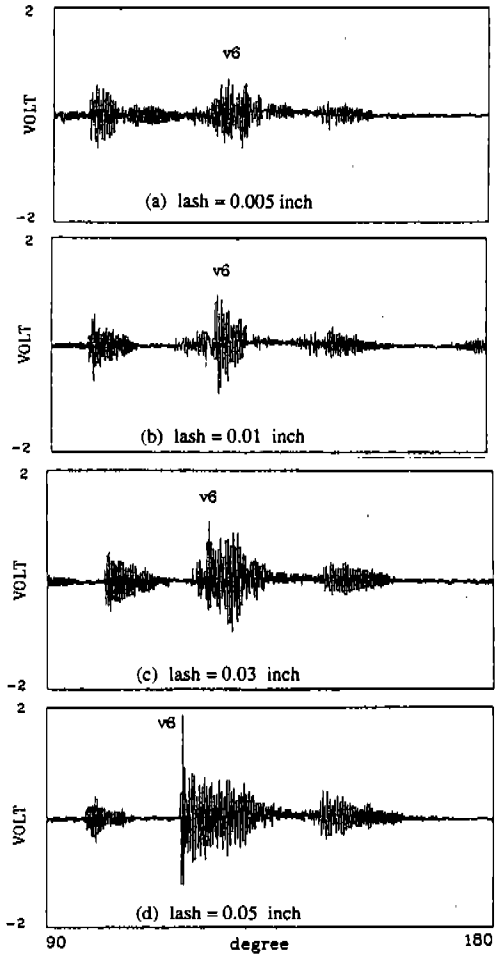


그림 5 밸브간극에 따른 진동신호의 변화 (6번 밸브)

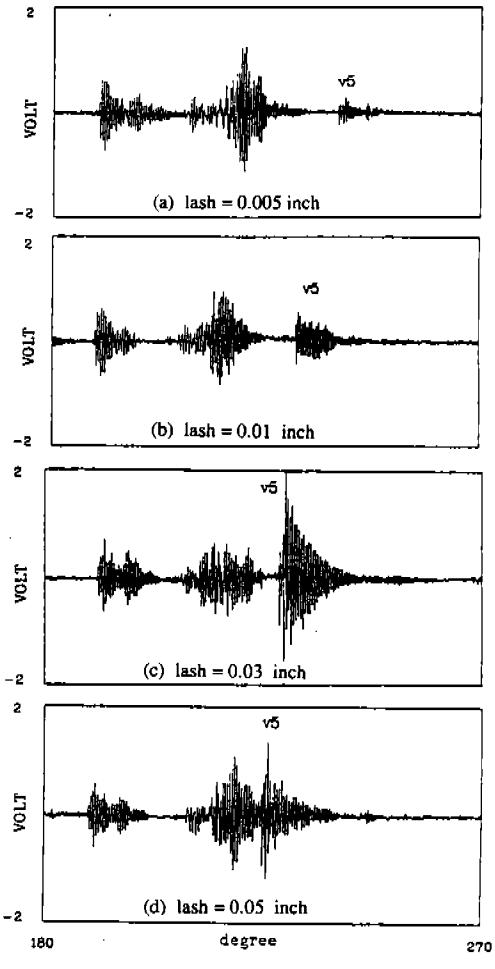
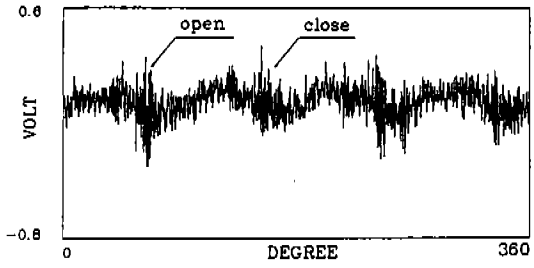


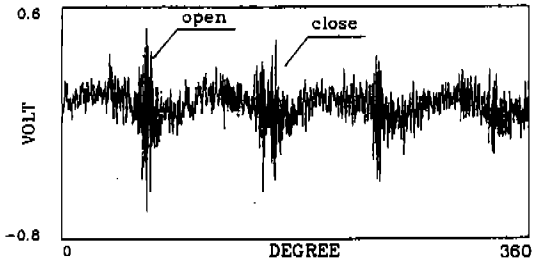
그림 6 밸브간극에 따른 진동신호의 변화 (5번 밸브)

달 경로를 가지므로 밸브가 열릴 때의 신호도 닫힐 때와 비교하여 어느 정도 크게 나타난다. 즉 밸브가 닫힐 때에는 실린더 헤드의 밸브 시트(valve seat)와 충돌하여 구조물을 통해 전달되는 것(structure borne noise)과 공간상의 압력변화에 의해 헤드 커버를 통해서 전달되는 것(air borne noise)으로 소음이 발생되고, 또한 밸브가 열릴 때에도 공간상의 압력변화에 의해 소음이 발생된다. 따라서 소음측정에 의한 방법은 밸브가 닫힐 때와 열릴 때의 두 상태를 진단정보로 이용할 수 있을 것이다. 그러나 그림 7은 엔진 커버의 위에서 소음신호를 측정한 것인데, 간극이 커짐에 따라 밸브가 개폐될 때 두 상태 모두 신호가 크게 나타나지만, 이 경우는 외부의 소음에 영향을 받기 쉽고, 밸브가 개폐시에 모두 같은 정도의 소음이 발생되므로 표 1에서 알 수 있듯이 서로 다른 밸브의 신호가 서로 겹쳐서 특정 밸브에 의한 소음을 구별하기 어렵게 된다.

크랭킹 상태에서의 이상진단은 엔진이 폭발에 의해서 작동되는 것이 아니라 시동모터에 의해 크랭크축이 구동될 때 발생되는 신호를 측정하는 방법으로, 이 때에는 폭발로

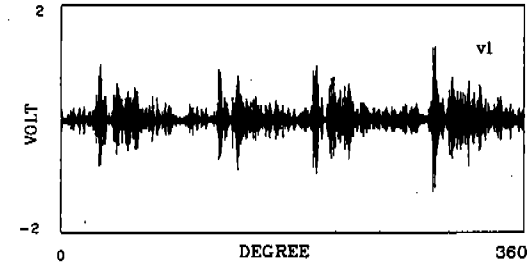


(a) all valve lash = 0.01 inch

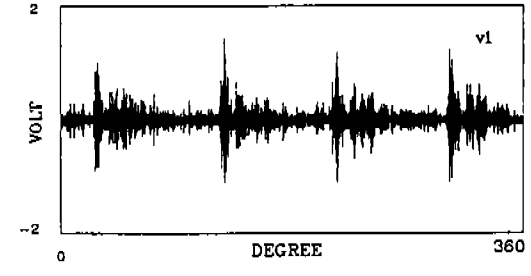


(b) valve 1 lash = 0.06 inch, others = 0.01 inch

그림 7 정상상태와 이상상태의 소음신호



(a) all valve lash = 0.01 inch



(b) valve 1 lash = 0.06 inch, others = 0.01 inch

그림 8 크랭킹 상태에서 측정한 정상, 이상 상태의 가속도 신호

인한 크랭크축 베어링력 등이 없어 가속도를 측정하기에 매우 좋을 것으로 생각된다. 또 폭발에 의한 소음이 없으므로 소음신호 측정도 좀 더 쉬울 것으로 보인다. 그러나 실제 진동신호를 측정해 보면 그림 8에서 보는 바와 같이 밸브간극 이상에 의한 신호가 거의 나타나지 않는데, 그 이유는 회전수가 너무 낮기 때문이다. 엔진을 시동할 때 캠축은 약 100~107rpm 정도의 낮은 회전수를 가지므로 간극이 큰 경우라도 밸브는 캠기구에 붙어서 움직이기 때문에 밸브의 개폐시에 실린더 헤드에 가해지는 충격력이 매우 작다. 이때 소음신호를 측정하는 경우에도 시동모터 소음이 매우 크므로 밸브작동에 의한 소음은 아주 작게 되어 밸브간극 진단에 부적당하게 된다.

이상의 예비실험에서 밸브간극을 진단하기에 가장 적합한 조건은 폭발상태에서 가속도 신호를 측정하는 것임을 알 수 있다.

또한 위의 네 가지 경우에 대하여 주파수 영역에서 밴드 패스 필터(band pass filter)를 사용하여 밸브신호를 분리하는 시도를 하였는데, 그 결과 밸브의 이상진단을 할 수 있을 정도의 밸브신호를 분리해 내는 것은 불가능한 것으로 판단되었는데, 그 이유는 다음과 같다. 우선 밸브 작동에 의해 발생되는 힘은 충격력으로 넓은 주파수 대역에 걸쳐 실린더 헤드 부분을 가진하게 된다. 따라서 밸브신호가 어느 정도 큰 특정 주파수 범위의 신호를 취할 경우 간극에 따른 신호가 왜곡(distortion)되어 이상진단에 이용될 수 없다.

따라서 본 연구에서는 폭발 상태에서 가속도계를 이용하여 얻어진 신호를 특정 밴드 필터를 사용하지 않고, 다만 폭발에 의한 저주파수 성분(0~100 Hz)만 제거한 후 시간영역에서 신호의 통계적 특성을 파악하여 밸브간극의 이상을 진단하는 방법을 사용하고자 한다. 즉, 밸브간극에 따른 시간영역에서의 진동신호 변화를 정량화함으로써 밸브간극의 이상진단이 가능하게 된다.

4. 시간 영역에서의 이상진단

앞 절의 예비실험에서 알 수 있듯이 밸브 기구에 의한 진동신호의 특성은 밸브가 닫힐 때의 시간과 그 신호의 크기가 간극이 커질수록 닫히는 시간은 빨라지고 신호의 크기는 커진다는 것이다. 밸브는 실린더 폭발을 기준으로 볼 때 폭발 직전에 닫히는 밸브와 폭발 이후에 닫히는 밸브가 있다. 배기밸브의 경우 폭발전, 흡기밸브의 경우 폭발 후에 닫힌다. 물론 여기서 실린더 헤드에 가해지는 충격력은 폭발행정을 수행하는 실린더의 밸브가 아닌 다른 두 실린더에 소속된 밸브의 운동으로부터 발생된다. 이러한 연속된 작용을 4번 일으키면서 한 사이클을 이룬다. 그러므로 흡기밸브와 배기밸브 각각 한 개를 대상으로 하여 진단 가능성을 조사하면 나머지는 같은 형태의 연속된 작용이므로 같은 방법으로 적용할 수 있을 것이다.

폭발 전에 닫히는 밸브는 그림 3에서의 짝수 번 밸브(배기밸브)이며, 폭발 후에 닫히는 밸브는 홀수번 밸브(흡기밸브)이므로 여기서는 6번과 5번 밸브를 진단대상으로 하고 나머지 밸브는 정상간극(0.01inch=0.254mm)으로 둔다. 먼저 배기밸브인 6번 밸브를 보면 그림 3은 밸브간극이 커짐에 따라 나타나는 밸브신호를 보이고 있다. 그림에서 보면 간극이 작으면 폭발시에 생기는 크랭크축의 진동신호와 겹쳐 밸브의 충격에 의한 신호는 보이지 않는다. 그러나 간극이 커질수록 충격신호는 앞으로 이동하며, 그 크기 또한 커짐을 알 수 있다. 흡기밸브인 5번 밸브의 경우는 그림 6에 나타나 있다. 흡기밸브의 경우는 폭발 신호와는 떨어져 있으며, 다른 입력의 간섭이 없는 깨끗한 상태임을 알 수 있다. 이 경우도 마찬가지로 간극이 커짐에 따라 충격신호가 앞으로 이동하고, 그 크기도 점점 커진다. 그러나 그림 6 (d) 처럼 간극이 너무 크면 밸브 충격에 의한 신호가 폭발신호와 겹쳐지는 현상을 볼 수 있다.

다음 절에서는 밸브 충격에 의한 진동신호에서 관찰된 위의 특성을 이용하여 밸브간극에 따른 진동신호의 변화량을 정량화하고자 한다. 이에 앞서 측정된 진동신호에는 엔진의 주기적 폭발에 의한 저주파 성분이 전체적으로 크게 포함되게 되는데, 이 주파수 성분은 하이 패스 필터(high pass filter : 0~100Hz 제거)를 이용해서 원래의 진동신호로부터 제거할 수 있다.

4.1 충격에 의한 신호 발생 구간의 정량화

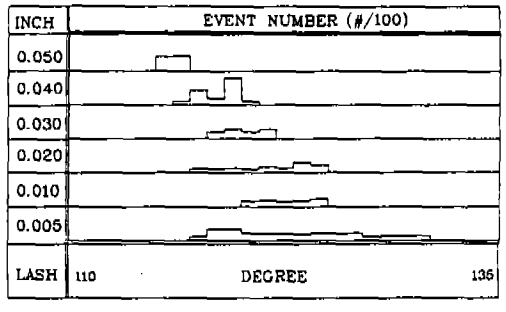
시간영역에서 밸브 충격에 의한 신호의 발생각 변화를 정량화하는 것은 주어진 여러 사이클의 데이터에 대한 충격발생횟수 즉 사건발생횟수(event number)를 구하므로 가능하다. 여기서 충격발생횟수를 구하기 위해서는 어떤 충격신호가 주어지면 사건(event)으로 수용할 것인지를 판단해야 하는데, 그것은 충격신호의 크기 및 그 신호의 유지시간 정도를 설정된 기준값과 비교하여 결정된다. 그런데 원래 진동신호는 변동이 심하므로 이것을 바로 정량화 과정에 이용하면 간극에 따른 신호의 변화 경향을 파악하기 어려우므로 다음과 같은 방법으로 신호의 형태를 변조한다. 즉 신호의 부호가 바뀌는 각 부분에 대하여 부호가 양일 경우 최대값, 음일 경우 최소값을 구한 후 절대값을 취하고, 보간법을 이용해서 사이값들을 구하여 충격신호를 쉽게 판별할 수 있는 신호로 만든다. 그리고 재구성된 신호에 대하여 설정된 기준값을 이용해서 사건수용 여부를 결정한다. 앞에서 설명한 바와 같이 밸브간극이 커질수록 충격에 의한 진동신호의 발생각이 빨라지는 것을 볼 수 있는데, 이 특성을 이용하여 정량화한 것이 표 2이다. 100사이클의 데이터를 이용해서 6번과 5번 밸브에 대하여 종축을 밸브간극으로 하고 횡축을 캠각도로 하여, 간극에 따른 각도별 충격신호의 발생횟수를 표시한 것이다. 예로서 6번 밸브의 경우 간극이 0.050inch (1.27mm)일 때는 100번의 사이클 중 115°에서 43번, 116°에서 45번

117°에서 7번의 충격이 발생되었음을 나타낸다. 이 충격신호 발생횟수의 합이 100이 안되는 것은 그 해당 사이클의 신호가 좋지 못한 상태일 경우 캠축각 상에서 정확한 충격신호의 위치를 찾지 못하기 때문이다. 또 예로서 6번 밸브의 간극이 0.020 inch (0.508 mm)일 때를 보면, 각각의 구간에서 탐지된 횟수의 합은 100이 넘는다. 이는 6번 밸브가 폭발 직전에 닫히는데, 간극이 커짐으로 인해 폭발로 인한 신호와 밸브 충격에 의한 신호가 분리되기 시작하는 시점이기 때문이다. 상대적으로 매우 강한 신호인 폭발신호와 그 속에 있는 밸브의 약한 신호로 구성된 한 신호가 밸브간극이 커짐에 따라 그 크기도 커지고 앞으로 이동하여 두 개의 신호로 나누어지면서 충격발생이 예상되는 지점에 2번의 값으로 기록되기 때문이다. 표 2를 그림으로 나타낸 것이 그림 9이다. 그림에서 볼 수 있듯이 간극이 커짐에 따라 밸브가 닫히는 각도가 앞으로 이동하며 간극이 0.005 inch(0.127 mm)에서 0.050 inch (1.27 mm)까지 변할 때 밸브가 닫히는 각도에는 20° 정도까지의 큰 변화가 있음을 알 수 있다. 여기서 간극이 작은 경우에는 충격신호가 작기 때문에 발생위치를 정확히 탐지하기 어렵다. 표 2에서 간극이 0.005 inch (0.127 mm) 일 때 괄호 안의 값은 사건수용여부 결정시에 기준값을 낮추어 구해진 값들이다. 즉 간극이 0.005 inch (0.127 mm)인 경우는 충격신호가 매우 작고, 유지시간이 짧아서 외란과 구별이 잘 안되므로 발생횟수가 아주 적게 감지된다. 따라서 발생횟수가 주어진 데이터의 사이클 횟수에 비하여 아주 작은 경우에는 밸브간극이 비정상적으로 작은 상태임을 인식할 수 있다. 표 3은 간극이 0.005 inch (0.127 mm) 일 때의 값을 제외하여 표 2를 백분율로 나타낸 것이다. 예로서 위의 표를 보면 6번 밸브가 115°에서 닫혔을 때 간극이 0.050 inch (1.27mm) 일 확률은 100 %이다. 이 표를 이용하면 주어진 밸브 충격에 의한 신호의 발생각으로부터 밸브간극을 추정할 수 있다.

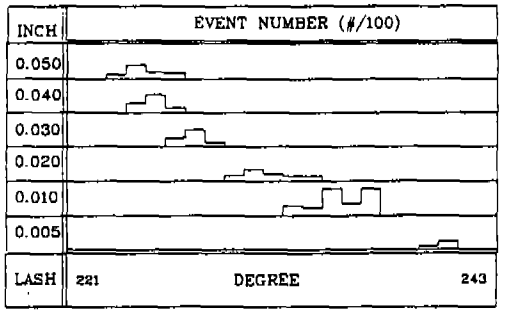
표 2 충격에 의한 신호 발생각의 정량화

[inch]	충격발생횟수(event number)														< 6 번 배기밸브 >	
0.050	43	45	7													
0.040		11	43	18	8	10										
0.030				21	29	22	29									
0.020			11	11	13	11	18	14	32	23	2	11	7			
0.010					6	17	18	16	18	23	4					
0.005		(3)	(11)	(34)	(33)	(21)	(21)	(18)	(18)	(22)	(20)	(22)	(11)	(13)	(13)	(14)
간극	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130
	캠축각 [°]															

[inch]	충격발생횟수(event number)														< 5 번 흡기밸브 >	
0.050	14	42	21	18												
0.040		28	53	14												
0.030				26	49	13										
0.020							16	34	20	15	14					
0.010										29	22	8	35	8		
0.005																(10) (24)
간극	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240
	캠축각 [°]															



< VALVE 6 >



< VALVE 5 >

그림 9 밸브간극에 따른 충격신호각의 이동

표 3 신호 발생각의 변화에 대한 백분율화

[inch]	백분율 [%] < 6 번 배기밸브 >															
0.050	100	80	12													
0.040		20	70	36	14	17										
0.030				42	52	36	44									
0.020			18	22	23	18	28	47	64	50	33	100	100			
0.010					11	29	28	53	36	50	67					
0.005																
간극	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130
	캠축각 [°]															

[inch]	백분율 [%] < 5 번 흡기밸브 >															
0.050	100	60	28	31												
0.040		40	72	24												
0.030				45	100	100										
0.020							100	100	100	34	40					
0.010										66	60	100	100	100		
0.005																
간극	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240
	캠축각 [°]															

4.2 충격에 의한 신호 크기의 정량화

앞 절에서는 밸브간극이 커지면 충격 타이밍이 앞으로 이동한다는 신호변화 특성을 정량화하였다. 이 절에서는 간극에 따른 충격신호의 크기에 대해 정량화를 한다. 시간영역에서 충격신호가 임펄스의 형태를 띄고 있으므로 충격신호의 크기를 4가지 즉 최대절대값, 최대진폭, 응답 파워, 포락선 파워로 정의한다. 응답 파워는 임펄스 신호를 절대값을 취한 후 모두 더한 값으로 한다. 표 4와 5는 각각 6, 5번 밸브에 의한 진동신호(100사이클)에 대해 위의 4가지 값을 계산해서 그 평균과 표준편차를 표시한 것이다. 실린더 폭발과 밸브의 닫히는 시간이 겹치는 6번 배기밸브는 각 영역에서 기준신호에 대하여 응답 파워 포락선 파워를 제외하고는 대체로 선형적인 경향을 가지고 있음을 보이고 있다. 여기서 응답 파워나 포락선 파워가 좋지 않은 결과를 가져온 것은 신호의 유지시간이 충격의 크기에 따른 어떤 경향을 가지고 있지 않기 때문이다. 5번 밸브의 경우에 선형적 경향을 가지다가 간극이 0.05 inch (1.27 mm) 일 때는 오히려 결과 값이 작아지는데, 이것

표 4 신호의 크기로 정의된 값들의 평균과 표준편차 (6번 밸브)

최대절대값							
간극	0.000	0.005	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050
평균		0.71	0.85	1.10	1.14	1.46	1.73
표준편차		0.17	0.22	0.32	0.22	0.24	0.31

최대진폭							
간극	0.000	0.005	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050
평균		1.31	1.56	1.98	2.06	2.68	3.13
표준편차		0.30	0.41	0.53	0.35	0.43	0.50

응답파워							
간극	0.000	0.005	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050
평균		20.84	18.00	24.42	20.30	24.48	42.26
표준편차		7.57	9.13	12.27	9.51	9.98	13.86

포락선파워							
간극	0.000	0.005	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050
평균		30.31	26.10	35.46	29.38	35.85	61.33
표준편차		10.97	13.06	12.75	13.36	14.27	20.22

표 5 신호의 크기로 정의된 값들의 평균과 표준편차 (5번 밸브)

최대절대값							
간극	0.000	0.005	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050
평균		0.54	0.69	1.23	2.24	2.54	1.82
표준편차		0.18	0.17	0.40	0.36	0.34	0.41

최대진폭							
간극	0.000	0.005	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050
평균		0.96	1.26	2.12	3.87	4.38	3.02
표준편차		0.34	0.29	0.59	0.59	0.48	0.66

응답파워							
간극	0.000	0.005	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050
평균		5.45	13.26	20.49	44.53	57.55	31.88
표준편차		1.34	5.20	8.60	5.58	5.58	11.79

포락선파워							
간극	0.000	0.005	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050
평균		8.12	19.61	30.16	65.83	83.53	45.96
표준편차		1.87	7.62	12.71	8.09	7.72	17.09

은 그림 6 (d)에서 보듯이 간극이 너무 커지면 닫히는 시간이 앞으로 이동하여 폭발신호와 겹치기 때문이다.

4가지의 값 중에서 대체적으로 밸브간극에 대한 선형성이 좋은 신호의 최대값을 선택하여 앞에서 캠 각도에 대한 충격발생횟수를 도표화한 것과 같이 각 밸브간극에 대하여 나타난 최대값들을 여러 범위로 나누어 발생횟수화하였다. 이를 앞에서와 같이 백분율로 나타낸 것이 표 6, 표 7인데, 이 표를 이용하면 밸브 충격에 의한 신호의 최대값으로부터 밸브간극을 추정할 수 있다.

표 6 신호 크기 변화에 대한 백분율화 (6번 밸브)

[volt]	%	%	%	%	%	%	[inch]
2.2 - 2.4						100	0.005
2.0 - 2.2			6		6	88	0.0476
1.8 - 2.0			5		23	72	0.0462
1.6 - 1.8			8	8	31	53	0.0429
1.4 - 1.6			18	15	43	24	0.0373
1.2 - 1.4	.	8	25	25	25	16	0.0313
1.0 - 1.2	.	21	27	46	5		0.0233
0.8 - 1.0	.	35	30	30	5	0	0.0205
0.6 - 0.8	.	72	22	6			0.0134
0.4 - 0.6	.	68	32				0.0132
0.2 - 0.4	.						.
0.0 - 0.2							.
신호크기	0.005	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050	기대값
	밸브 간극 [inch]						

표 7 신호 크기 변화에 대한 백분율화 (5번 밸브)

[volt]	%	%	%	%	%	%	[inch]
3.2 - 3.4					100		0.040
3.0 - 3.2				14	86		0.0386
2.8 - 3.0				28	72	.	0.0372
2.6 - 2.8				43	57	.	0.0357
2.4 - 2.6				34	66	.	0.0366
2.2 - 2.4				66	34	.	0.0334
2.0 - 2.2				57	43	.	0.0343
0.8 - 2.0			32	52	16	.	0.0284
0.6 - 0.8			50	50		.	0.025
1.4 - 1.6			90	10		.	0.021
1.2 - 1.4		10	90			.	0.019
1.0 - 1.2		39	61			.	0.016
0.8 - 1.0		44	56			.	0.0156
0.6 - 0.8	.	79	21			.	0.0121
0.4 - 0.6	.	85	15				0.0115
0.2 - 0.4	.						.
0.0 - 0.2							.
신호크기	0.005	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050	기대값
	밸브 간극 [inch]						

5. 결 론

이상에서 엔진의 외부에서 진동/소음 신호를 측정하여 밸브간극의 이상을 진단하는 방법은 폭발 상태에서 진동신호를 측정하는 것이 가장 적절한 방법임을 알 수 있었다. 또한 측정된 신호에서 밸브에 의한 신호만을 분리하는 것은 입력신호의 특성상 어려운 점이 많다. 따라서 본 연구에서는 밸브간극의 변화에 따른 시간영역에서 진동신호의 변화, 즉 밸브에 의한 충격에 의한 신호 발생각 변화와 신호크기 변화, 이 두 가지의 신호특성을 정량화함으로써 밸브간극을 진단하는 방법을 제시하였다. 결론적으로 밸브간극 진단방법으로써 택한 위 두 방법의 성능을 아래와 같이 정리한다.

1) 흡기밸브는 시간영역에서 다른 신호와 간섭이 없으므로 간극이 클 때나 작을 때 모두 진단이 가능하고, 정보 I (충격신호 발생각도의 정량화 정보)과 정보 II (충격신호 크기의 정량화 정보)에 가중치를 동등하게 주어도 된다.

2) 배기밸브는 시간영역에서 다른 신호와 간섭이 있으므로 간극이 클 때는 정보 I에, 작을 때는 정보 II에 각각 가중치를 더 주는 것이 좋다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적 기초 연구 지원에 의한 결과이며, 재단의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Y.S. Park and H. Lee, "Valve Lash Identification by Using Engine Block Acceleration Measurement," Asia-Pacific Vibration Conference, Melbourne, 1991
2. D. Anderton, M.R. Ghazy, "Dynamic Response of Heavy Duty Diesel Engine Structures," SAE. 871669, 1988.
3. M. Hanaoka and S. Fukumura, "A Study of Valve Train Noises and a Method of Cam Design to Reduce the Noises," Toyota Motor Co. Ltd., (Japan), 730247.
4. R. G. Dejong, R. E. Powell, J.E. Manning, "Engine Monitoring Using Vibration Signals", SAE. 861246, 1987.
5. Kishiro Akiba, Toshiaki Kakiuchi, "A Dynamic study of Engine Valving Mechanisms : Determination of the Impulse Force Acting on the Valve", SAE. 880389, 1989.
6. R. H. Lyon, Machinary Noise and Diagnostics, Massachusetts Institute of Technology.
7. Scheaffer/McClave, Probability and Statistics for Engineers, Third Edition. PWS-KENT