

V8 엔진을 탑재한 차량의 아이들링 시의 음질 개선 An Improvement in Idle Sound Quality of a V8 engine

서인수

In-Soo Suh

Key Words : NVH(소음, 진동, 하쉬니스), Idle(아이들링), Sound Quality(음질), Engine(엔진).

ABSTRACT

In order to keep the market competitiveness, it is desirable for automotive manufacturer to meet the customer's various aspects of requirements. The overall NVH (Noise, Vibration, and Harshness) performance has been an important measure when evaluating overall vehicle performance, product quality, and enhancing customers' loyalty to the product. The noise and vibration, while the engine is idling, has been brought particular attention to the drivers and passengers, because they encounter the operation conditions quite frequently without other masking noise sources: wind noise, road noise, and even powertrain radiated noise at higher speed driving. The specific noise, defined as 'CHIT' noise, has been identified as a potential customer issue, from the Pickup Truck with newly developed V8 powertrain. This paper describes the definition of the noise, identifying the potential sources, and noise radiation mechanisms, based on series of powertrain and vehicle test and verification processes. Then, based on the root-cause identified, the design change has been proposed and validated with several vehicles in order to have a complete satisfaction of the customer.

는 것을 목표로 하고 있다.

1. 서론

자동차에 대한 소음, 진동에 관한 연구 및 개발은 지난 20년 동안 많은 발전을 하였으며, 이에 대한 중요성은 더 설명이 필요가 없다. 더불어 소비자의 완성차에 대한 기대도 기술의 발전과 더불어 더욱 향상되고 있다.

소비자들이 요구하는 자동차에 대한 끊임없는 품질, 내구, 그리고 복합적 성능과 더불어 소음 및 진동은 소비자 정숙성에 대한 요구 뿐만 아니라 품질의 한 중요한 부분으로써 완성차 업계의 중요한 개발 특성 요구 중의 한가지로 자리잡고 있다.

특히 기본 엔진과 관련된 소음 및 진동의 경우, 한가지 엔진이 여러 차종에 탑재되므로, 각 차종의 소음에 대한 기대치, 운전 특성 및 소음, 진동에 대한 민감도가 상이 하므로, 각 차종의 개발 목표 및 개발 시점에 따라 그 대응 방법도 다르게 된다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 최근 신엔진으로 개발된 기본 엔진의 특정한 소음 문제가 개발된 차량에 대한 소비자의 예측되는 문제에 관해 그 소음을 정의하고, 그 소음의 원인규명에 대한 시험 절차 및 조건을 정립하고, 그 원인 규명을 다각도로 분석하여 각 차종의 개발 시점에 따라 적절하게 그 대응 방법을 결정할 수 있도록 여러가지 설계 안을 제시하

본 연구에서 이용된 엔진은 최근 개발된 5.7L V8 엔진이며, 이 엔진에 대한 간단한 제원은 Table 1에 기술되어 있으며, 여러차종, 특히, 픽업트럭, 세단, SUV 등에 탑재가 되고 있으며, 북미 시장에서 많은 관심을 끌고 있다. Figure 1에 본 엔진의 외관과 그 엔진 내부의 밸브트레인 및 트랭크트레인의 모습을 보여주고 있다.⁽¹⁾

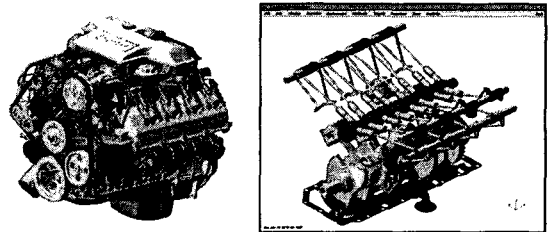


Fig. 1 The DaimlerChrysler 5.7L V8 engine and its inside view

Table 1 The basic specification of the 5.7L V8 engine

GEOMETRY	SPECIFICATION
Displacement (cm ³)	5654
Bore (mm) /Stroke (mm)	99.5 /90.9
Bore/Stroke Ratio	1.09
Compression Ratio	9.6:1
Rod Length/Crank radius	3.49
Weight (Kg)	242

차량개발 당시에 제기된 아이들링 시의 소음 문제는 이 엔진이 제공하는 경쟁사 엔진의 성능을 월등히 능가하는 장점과 살리기 위해 반드시 해결해

* DaimlerChrysler, Auburn Hills, MI, USA
E-mail : insoo@alum.mit.edu
Tel : (248)952-5964

야 하는 과제가 되었다. 물론 8 기동의 연소가 제 공하는 4 차 성분의 엔진 차수는 타의 추종을 불 허하는 안정성을 갖고 있다.

이 아이들링 시의 소음은 주로 이 신 엔진이 처 음으로 탑재된 트럭의 외측 소음으로, 소비자들이 운전 시에 차량 내부에서는 느끼지 못하지만, 밖 으로 둘러싸인 주차장이나, 담벼락이 있는 곳을 서행 또는 아이들링 시에 느낄 수 있다고 아주 제 한적인 특성을 지니고 있었다. 이 소음은 아이들 링시의 외부 소음으로 정의 할 수 있다. 따라서 이 소음을 그 소리가 나는대로 ‘칠칠소음’으로 명 명하였으며, 본 연구에서는 이 ‘칠칠소음’의 원인 구명을 위한 시험 방법 및 그 소음, 진동 데이터 분석 및 그 결과를 정리하고자 한다.

2. 칠칠 소음의 확인, 정의, 시험방법 및 데 이터 분석

1.1 칠칠 소음의 현상과 그 확인

이 칠칠소음은 트럭이 아이들링하고 있을 때 자동 차의 외측에서 들리며, 배기파이프 시스템이 차의 우측으로 장착되어 있으므로, 우측에서 더욱 그 소음이 새게 들리는 특성이 있었다. 또한 차의 전 륜 하우스에서도 이 소음이 분명하게 들리는 특성 이 있었다. 따라서 자동차의 배기파이프 시스템이 이 소음과 관련하여 특정한 역할을 한다는 것은 분명하였으며, 또한, 전륜 하우스에서 그 소음이 명확하다는 것은 기본 엔진의 운전과 깊은 관련이 있음을 의미한다. 이 소음이 기본 엔진과 관련이 있다는 또 하나의 증거는 이 V8 엔진이 장착되는 다른 차종, 즉 세단이나, SUV 에도 정도는 다르지 만 유사한 세기와 그 소음 특성을 지닌 소음이 관 찰되었다.

이 소음은 운전자 창이 닫혔을 때 운전자나 동승 자는 거의 느끼지 못하며, 단지 창이 열렸을때,특 히 차고 같은 밀폐 공간이나, 담벼락 주위, 특히 미국인들이 주로 이용하는 드라이브 인(drive-in) 가게 등을 이용할 때 주로 강조가 되는 특성도 있 었다.

따라서 이 소음을 그 소리가 나는대로 칠칠소음이라 이름을 붙였으며, 영어로는 CHIT Noise 로 명명 하였다. 한편으로, 이 V8 엔진이 장착되는 차량은 동급 차종 중 premium 급으로 소비자의 기대치가 아주 높은 시장 목표를 갖고 있으며, 이는 트럭, 세단 및 SUV 에 모두 적용된다고 할 수 있다.

이러한 현상 관찰을 통하여 그 소음의 원인 규명 을 위하여, 다음과 같은 가정을 설정하였다.

이 소음의 근본 원인은 기본 엔진의 운전 특성과 관련이 있으며, 배기 파이프는 전달계 및 방사면 역할을 한다.

또 이 소음은 소비자가 쉽게 불평하는 소음의 세 기 문기 문제가 아니라, 제한적으로 발생하는 조 건에서 소수의 소비자가 불평을 제기할 수도 있는 완성차의 품질 및 음질(Sound Quality)과 관련된 문 제이다.

1.2 시험 및 계측장비 구성

칠칠소음의 원인 규명을 위하여 주로 기본 엔 진에 초점을 맞추어, 크게 세 가지로 그 시험 절 차를 설정하였다. 이는 엔진연소가 있는 파워트레 인 다이내모미터(firing powertrain dynamometer)와 모우트링 엔진 다이내모미터(motoring engine dynamometer), 그리고 차량시험으로 구성된다.

1.2.1 연소 파워트레인 다이내모미터시험

엔진 연소와 관련한 파워트레인 전반의 소음 특성 및 원인 구명을 위하여 Figure 2 와 같이 엔 진, 트랜스미션 그리고 이 파워트레인이 장착되는 트럭의 완전한 배기파이프 시스템을 구성, 차량과 가장 근접한 상태의 엔진 아이들링 연소를 구현하 였다. 이때 아이들링 엔진 회전속도는 625rpm 으 로 차량과 같은 조건으로 설정하였다.

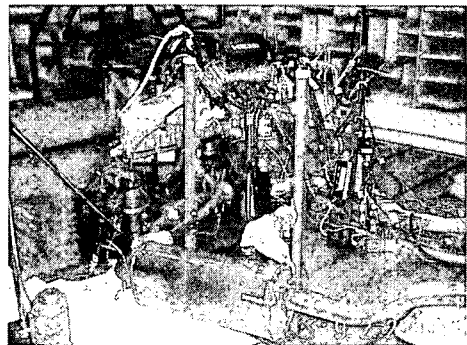


Fig. 2 The Powertrain test setup on the firing dynamometer inside semi-anechoic chamber, which shows the engine, transmission and a complete vehicle exhaust system

차량과 유사한 조건의 소음 측정을 위하여 실 차와 같은 배기파이프 시스템으로 부터 Y-접점(Y-junction)에서 근접소음을 측정하여, 실차 소음과 그 소음 주파수 특성을 비교하여, 칠칠 소음이 실 차 엔진 무항실 내에서 구성된 파워트레인에서도 존재하는 것을 확인하였다. 또한 엔진의 좌측 및 우측 30cm 거리에 두 마이크로폰을 설치하여 엔진 으로부터의 방사소음도 동시에 측정하였다. 이와 더불어 배기매니폴드의 각 런너에 절대압 측정 센

서(absolute pressure sensor)를 설치하여, 배기 압력에 의한 소음원도 분석에 사용하였다. 이 때 Figure 3 에서 보는바와 같이 각 좌, 우 뱅크에 있는 4 개의 런너에 압력센서를 설치하였다.

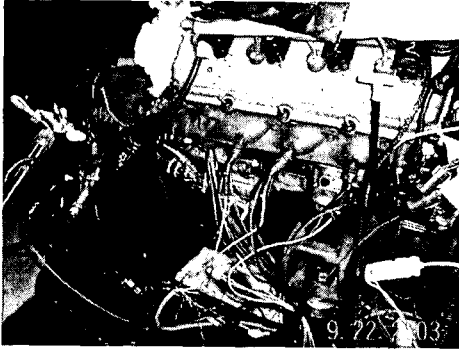


Fig. 3 Exhaust gas pressure probes installed in each runner of the exhaust manifold

또한 엔진으로부터의 구조적 진동을 측정하기 위하여 두 개의 가속도계를 엔진 실린더 헤드 좌, 우측에 설치하여, 그 주파수 특성 분석 및 칠칠 소음과의 연계성을 검토하는데 사용하였다.

이와는 별도로 엔진의 각 싸이클에 따른 시간 분석을 위하여 크랭크 각도 신호 발생기(crank angle encoder)를 엔진 트랭크 폴리에 장착하여, 상사점 신호(TDC signal) 및 엔진 회전 1 도 각마다 펄스를 발생시켜 엔진의 싸이클과 동기하여 신호 분석에 이용하였다. 또한, 각 신호에 대해 동일한 주파수 밴드를 유지하기 위해 크랭크 각도 샘플링 보다는 캠 센서를 이용하여, 크랭크 각도 동기표현(crank angle representation)을 사용하여 데이터 분석에 이용하였으며, 이는 다음 절에서 상세히 설명하겠다.

1.2.2 모우트링 엔진 다이아모미터 시험

엔진 연소와는 별도로 엔진의 기계적 소음과 관련된 여부를 파악하기 위해 엔진과 회전 속도가 조절되는 모우트링 다이노미터를 이용하여 벨브 트레인 등과 관련한 기계적 소음 원인 구명을 행하였으며, 이는 Figure 4 에 나타내었다.

이 장치는 엔진만을 지지대에 설치한 다음 다이노미터에 연결하여 모우터링시키도록 설치되었다. 따라서 연소가 없는 상태에서 기계적 소음만을 연구할 수 있는 방법이라 할 수 있다. 이 장치에서는 엔진의 좌, 우측에 30cm 거리에 마이크를 설치하여, 엔진으로부터의 기계적 방사 소음을 측정하였으며, 또한 가 속도계를 엔진 실린더 헤드 좌, 우측에 설치하여, 엔진의 진동도 측정하였다.

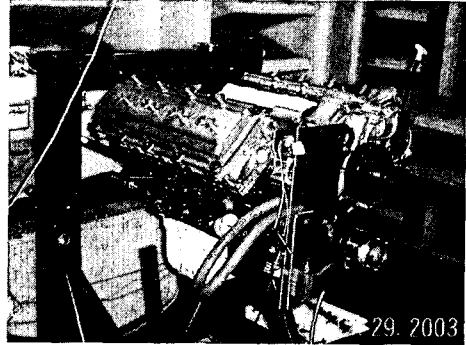


Fig. 4 Motoring dynamometer setup with the base engine only inside semi-anechoic chamber. Also shows the crank angle encoder setup with cam sensor tap-off

연소가 있는 파워드레인과 마찬가지로 크랭크 각도 신호 발생기를 장착하였으며, 또한 캠 센서를 이용하여 크랭크 각도 동기 표현 방식으로 데이터를 분석하였다.

1.2.3 차량 시험

차량 시험은 소음의 특성구명을 위하여 필수적인 시험이며, 동시에 실제 차량에서의 소음 형태 분석에 사용되었다. 그리고 원인 규명을 통하여 발견한 설계변경안을 실제 차량에 적용 그 효과를 검증하는데도 차량시험이 사용되었다.

본 시험에서는 단지 한 개의 마이크와 엔진 회전수 신호를 이용, 간단한 데이터 분석을 하였다. 차량은 상온에서 크랭킹하여 약 한 시간동안 5 분 또는 10 분, 15 분 간격으로 1 분간의 데이터를 취들하여 분석하였으며, 이는 엔진의 아이들링이 냉각수 온도 및 여러가지 조건들에 의해 엔진의 상태가 변화하며, 이에 따라 칠칠 소음과의 관계가 있는 지를 구명하는데 사용하였다.

또한 이 과정은 동종의 여러 대의 차량과 다른 차종들로 부터의 칠칠 소음의 공통적인 특성을 밝혀내는데 아주 중요한 절차였다고 사료된다. 특히 이 때 사용된 간단한 시험 방법은 실제 정비 등 어느 곳에서든지 쉽게 시험을 하여 그 소음의 정도를 파악하고 신속하게 대처 할 수 있게 하는 면에서 아주 중대한 의미를 지닌다고 할 수 있다.

그리고 이 차량 시험결과의 마이크로폰 데이터를 이용하여, 칠칠 소음의 주관적 평가에 이용하였으며, 실제 차량으로부터의 주관적 평가와 연계성을 밝혀내는데도 사용되었다. 더불어, 그 주관적 평가를 계량화하기 위해 음질 분석에 사용되는 여러 지수들을 적용, 분석하여, 주관적 평가와 가장 잘 관련되는 음질 지수를 선별, 이를 그 칠칠 소

음의 세기를 나타내는 지수로 이용하였다.

2. 시험결과 및 칠칠소음의 원인 분석

2.1 칠칠 소음의 특성 분석

칠칠 소음의 특성 분석을 위하여 우선 차량에서의 시험을 수행하였다. 차량을 방음 처리가 되지 않은 보통의 실험실에 위치한 다음, 마이크로폰을 차량의 하부바디에 위치하여, 배기파이프 시스템의 Y-접점에서 근접소음을 측정하여, 이를 칠칠 소음의 표준 시험상태로 정의하여 사용하였다. Y-접점은 양측 뱅크로 부터의 연소배기 압력이 만나는 곳으로서 한 곳에서의 측정 결과로써 두 뱅크의 연소와 관련된, 특히 배기 압력과 관련된 소음을 파악할 수 있었으며, 그 소음 결과가 차량 주위에서 들리는 소음의 특징과 가장 근접하게 평

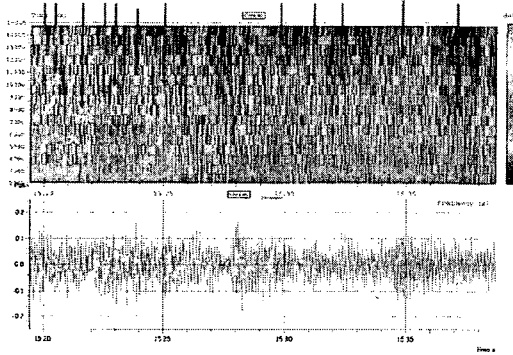


Fig. 5 Sound pressure time signal from the microphone located at Y-junction off the exhaust pipe system of the pick-up truck, and its time-frequency representation

가되었다. Figure 5의 하단에 Y-접점으로 부터의 소음 측정 결과를 시간 함수로 1kHz의 High Pass Filter 적용한 후의 엔진의 한 사이클 동안을 나타내었으며, 이의 시간-주파수 분석 결과를 상단에 표현하였다. 기록된 소음을 이용하여, 각 종의 필터를 이용, 그 주 주파수 성분을 분석한 결과 5-8kHz 성분이 칠칠 소음의 주된 성분임을 밝혀내었다. 그러나, 소음의 발생 빈도가 간헐적이고, non-stationary 성분이어서 통상의 주파수 분석을 이용하여서는 그 차이를 구분하기가 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 이러한 non-stationary 성질을 잘 분석할 수 있는 시간-주파수 분석(time-frequency representation)을 사용하였다.⁽²⁾ Figure 1의 상단에서 볼 수 있듯이, 엔진의 한 사이클 동안 약 8-10 번의 충격성 소음을 볼 수 있다. 엔진의 아이들 회전수가 650rpm 인 것을 감안하면, 약 20 msec 동안 상당수의 충격성 소음이 발생하는

것이며, 이는 보통의 사람 청각 응답이 200-500 msec 인 것을 감안하면,⁽³⁾ 이 소음의 발생 빈도는 사람의 귀에 1-2 번의 충격성 소음으로 들리게 된다. 따라서 기록된 소음을 재생하여 그 소음을 확인하고, 시간-주파수 분석을 통하여 분석, 칠칠 소음의 특징을 밝혀내었으며, 이 표준 시험을 여러 차량에 적용, 차량에 따른 차이 및 변화를 확인하는데 사용하였다.

이 소음의 주관적인 평가와 부합되는 객관적인 음질 지수를 찾기위해 여러가지 음질 지수들을 적용하였으며, 그 중 SHARPNESS⁽⁴⁾가 이 소음의 특징을 가장 잘 표현하는 것으로 나타났다.

2.2 칠칠 소음의 원인 분석

2.2.1 구조 진동에 의한 소음

차량 또는 엔진에서 간헐적, 그러나 주기적(intermittent, but periodic)으로 발생하는 소음 중에 밸브트레인에 의한 소음이 칠칠 소음과 유사하게 들릴 수 있다고 판단되었다. 따라서 연소가 있는 파워트레인에 소음 시험 중에 가속도계를 엔진의 실린더헤드에 장착하여 시간-주파수 분석을 저용한 결과를 Figure 6에 나타내었다. 하단에 그 시간 함수를, 그리고 상단에 시간-주파수 특성을 나타내었다. 밸브트레인에 의한 충격 소음은 상당한 광대역의 주파수 성분을 지니는 것을 볼 수 있다. 또한 한 뱅크에서의 가속도 결과이지만, 그 충격성 빈도가 엔진의 한 사이클동안 8 번 정도인 것을 볼 수 있다. 이 소음과 칠칠 소음과의 구체적인 관련성을 확인하기 위하여, 연소가 없는 상태에서 모우터링 시험을 행하였고, 다음 절에서 이를 논하기로 한다.

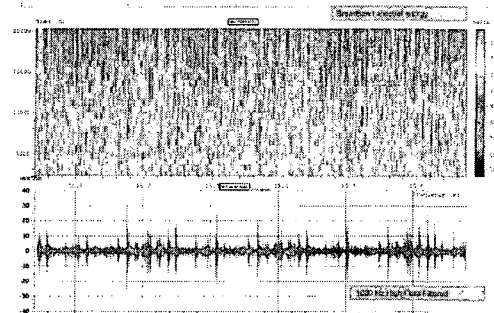


Fig. 6 Cylinder head vibration time signal and its time-frequency representation

2.2.2 배기 연소 압력에 의한 소음

칠칠 소음이 배기파이프에서 가장 명확하게 들리는 현상이므로, 배기 시스템과의 관련 원인을 찾는 것은 당연한 경로이다. 배기 압력과의 관련성을 차기 위하여 압력 센서를 각 배기 매니홀드

런너에 장착하여 그 압력을 측정, 시간-주파수 분석을 적용하였다. 좌측 매니홀드(실린더 2, 4, 6 8 번)에 대한 그 측정된 결과를 Figure 7에 나타내었다. 이 측정된 신호를 스피커를 통해 소리로 전환, 들어보면, 칩칩 소음과 아주 유사한 소리를 들을 수 있었다. 이와 관련성을 측정된 압력에서 찾기 위해 1kHz의 High-Pass Filter를 적용하여 그 신호를 다음 Figure 8에 나타내었다. 이를 보면, 한 엔진 사이클마다, 각 각의 배기 과정에 한 번의 압력파가 발생함을 볼 수 있으며, 이를 스피커를 통하여 소리로 전환할 때에도 이 필터를 적용하여 주관적 분석을 함하였다. 이 신호에 대해 시간 주파수 분석을 적용한 결과를 Figure 9에 나타내었으며, 6-8kHz의 집중된 에너지 성분을 쉽게 관찰할 수 있다. 따라서 이 압력과 또한 칩칩 소음의 원인 중의 하나인 것을 확인하였다.

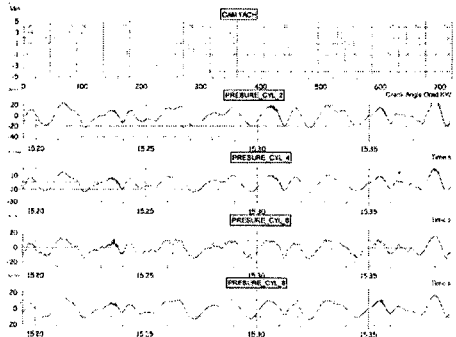


Fig. 7 Exhaust pressure time signal from the right-side bank manifold runners with synchronized with cam signal during an engine cycle

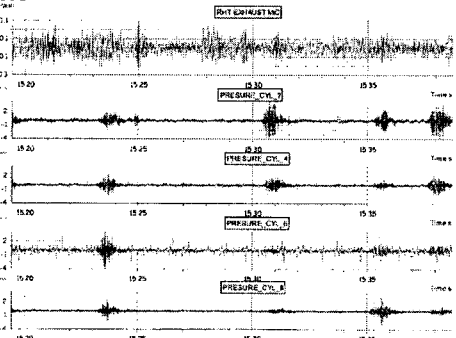


Fig. 8 Exhaust pressure time signals with 1 kHz high-pass FIR filter with the sound pressure signal

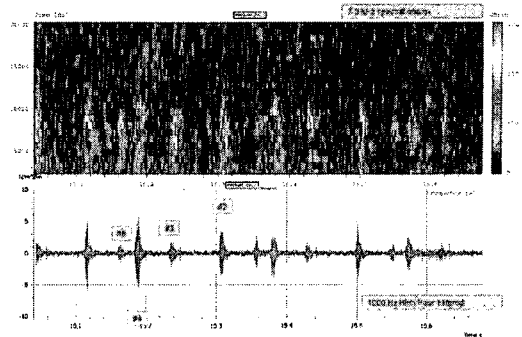


Fig. 9 Exhaust pressure signal from one runner with its time-frequency representation

2.2.3 밸브트레인에 의한 소음 확인

2.2.1 절에서 서술한 구조적 소음원에 대한 구체적인 원인 분석을 위하여 모우터링 다이노미터에서 시험을 수행하였다. 이 경우에도 마이크로폰과 가속도계를 동시에 측정하고, 엔진과 동기된 크랭크 엔코더 신호 및 캠 센서 신호를 이용하여 엔진 회전과 동기하여 신호를 분석하였다. 이 경우 특별하게 가속도계를 엔진 실린더 내부 밸브의 헤드 표면에 가속도계를 위치하여, 밸브들의 진동을 측정하였다. 이를 1kHz의 high-pass 필터를 적용하여, 그 결과를 엔진의 사이클과 동기하여, 실린더 헤드 우측에서의 가속도계 측정 결과와 함께 Figure 10에 나타내었다. 또한 밸브운동의 정확한 타이밍을 확인하기 위하여, 기구학상의 밸브움직임도 함께 표현하여, 그 정확한 밸브 운동시기를 확인하는데 도움이 되도록하였다. 이 그림에서 보듯이, 실린더 헤드에서의 충격성 진동이 발생하는 시기가 각각의 흡기 및 배기 밸브의 헤드면에서 측정된 시기와 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 칩칩 소음의 중요한 원인으로써 밸브트레인에 운동에 의한 충격성 소음임을 밝혀내었다.

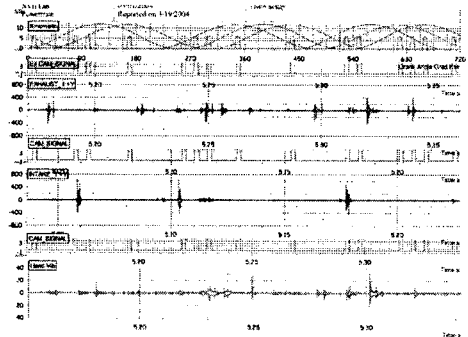


Fig. 10 Valve Head vibration and Cylinder Head vibration from the motoring engine setup synchronized with the cam signal and valve train kinematics

2.2.4 소음 원인과 소음의 전달 및 방사 특성

위에서 서술한 원인 분석을 토대로 차량에서 측정된 소음과의 관련을 찾아내는 일은 그리 어려운 작업이 아니라고 본다. 칠칠 소음의 주된 방사는 차량에서의 배기파이프 시스템, 특히 배기 촉배장치 전단에서 가장 선명하게 들리며, 이는 엔진에서 발생한 밸브 운동에 의한 충격 진동 및 엔진 연소후 배기과정 동안 발생한 압력파에 의해 발생한 음파가 배기 파이프를 통하여 전달되어, 그 음파가 반사되는 지점에서 소음으로 외부로 방사되는 것이다. 이를 확인하기 위해 다른 시험도 수행하였지만, 본 보고에서는 생략하기로 한다.

3. 결론

차량에서 발생한 소음을 규명하기 위해, 차량시험 및 엔진 다이내모미터에서 일련의 시험을 계획, 구성하였다. 소음과 진동을 동시에 측정하여, 소리 분석 및 주파수 분석을 통하여 그 소음의 특징을 규정하고, 그 원인을 밝혀내는 기본 자료로 사용하였다.

1. 칠칠 소음은 본 V8 엔진이 장착된 차량에서 발생하며, 기본 엔진에서 그 원인이 있으며, 차량의 배기파이프에서 가장 선명히 방사가 된다는 것을 밝혀내었다.
2. 이 소음은 엔진의 회전수와 동기하여 발생하며, 한 회전당 약 8 회의 충격성 원인에 기인하며, 소리의 특성은 한 회전당 1-2 회 정도로 들리게 되며, 그 중심 주파수는 5-8kHz 이다.

3. 칠칠소음의 주된 원인으로 밸브트레인의 운동으로 인한 구조 진동과 배기 과정에 의한 압력파에 의한 두가지를 밝혀내었다.
4. 이러한 원인 분석을 통하여 이 소음을 해결하기 위한 여러가지 방안들을 도출할 수 있었으며, 차량에 실제로 적용할 수 있는 토대를 마련하였다.

참 고 문 헌

- (1) Lee, Robert et. al. The new DaimlerChrysler 5.7L V8 Engine, SAE, 1999
- (2) Suh, I. Application of Time-Frequency Representation Techniques to the Impact-Induced Noise and Vibration from Engines, 2002 SAE Congress, Detroit, February 2002
- (3) Kryter, K., The Handbook of Hearing and the Effects of Noise, Academic Press, 1994
- (4) Mueller-BBM Pak Software Ver. 5.6