

# 목적 연소압 형상을 이용한 음질 개선에 관한 연구

## The Study of the improvement of the sound quality using the target profile of combustion pressure

°김인수†, 황철균\*, 민병두\*\*

IS Kim\*, CK Hwang, BD Min

**Key Words** : Mechanical Noise, Combustion Noise, Target Combustion Pressure Profile(TCPP), Peak Firing Pressure(PFP), Multiple Injection, Roughness, Fluctuation Strength

### ABSTRACT

Engine Noise is composed of the mechanical and combustion noise. The contribution of combustion noise is generally bigger than the contribution of the mechanical noise at idle condition in DI diesel engine. That noise usually makes a roughness problem at the fundamental engine order. It is difficult to remove the modulation frequency so we have to directly reduce the combustion noise. The key effect of combustion noise reducing solution is the modification of the combustion pressure profile. It is accomplished by the multiple injection method and we solved the 400Hz combustion noise and improved the sound quality at idle condition in DI diesel engine.

### 1. 서론

상용차 위주의 디젤엔진에서 승용 개념의 디젤 엔진으로 사용 영역의 확대와 더불어 디젤엔진의 NVH 개선은 더 이상 선택의 요소가 아닌 필수 불가결한 요소가 되어 가고 있으며, 저소음 저진 개념에서 음질 측면에서 보다 듣기 좋고 차량별 특성을 나타내는 브랜드 사운드가 강조되고 있다. 브랜드사운드는 엔진음색으로 차량의 브랜드를 대

표하는 성격을 가지는 것으로 여러 가지 음질 지수를 조합하여 각 차량 별 독특한 음색을 구현하는 것이다.

일반적으로 Sound quality 를 수치화하여 구현하는 요소인 4 가지(Loudness, Sharpness, Roughness, Fluctuation strength)중 특히 Fluctuation strength 와 Roughness 가 운전자나 승객으로 하여금 소리의 거칠기 특성을 느끼게 함으로 실내 음질환경에서 안락함을 저해하는 주요 요소가 되고 있다.

본 연구에서는 차량 주행조건이 아닌 정지조건에서 기타 외부 소음보다는 엔진 자체의 소음이 문제가 되는 Idle Quality 개선 측면에 중점을 두고 있고, 특히, Mechanical Noise 측면보다는 Combustion Noise 에 기인하는 엔진의 거친 소리

† 책임저자; 쌍용자동차(주) 엔진구동시작시험팀

E-mail : kiminsoo@smotor.com

Tel : (031) 610-3370, Fax : (031) 610-3372

\* 쌍용자동차(주) 엔진구동시작시험팀

\*\* 쌍용자동차(주) 엔진구동시작시험팀

개선을 위해 목적 연소압력 형상을 설정하고 Multiple Injection 을 이용하여 설정한 연소압력 프로파일을 형성하여 엔진음색을 부드럽고 듣기 편안한 음색으로 전환하는데 그 목적이 있다.

## 2. 연소압 형상 설정

엔진으로부터 방사되는 소음을 측정하고 개선이 필요한 부분을 선정하여 이와 상관된 연소특성을 개선하는 방법으로 TCPP (Target Combustion Pressure Profile)를 설정한다.

### 2.1 Airborne Noise 분석 기법

Airborne Noise 분석은 Spectrum 분석과 Time 분석으로 크게 나누어 볼 수 있다. 특히, 이상 소음 분석은 이 두 가지를 병행하여야 한다. 최근에는 Angle base analysis 가 보편적으로 이루어 지고 있으나 이와 같은 Software 적용이 불가능하면 Time Frequency Analysis 를 독립적으로 이용하거나 wavelet 기법을 적용하여 주파수 대역별 타임윈도우를 달리할 수 있는 기법을 적용하여야 이상 소음의 정확한 타이밍을 파악할 수 있다.

본 연구에서 사용한 계측 시스템은 B&K 의 Pulse system 을 사용하였으며, 소음 측정엔 Engine Front 로부터 1m 떨어진 지점에서 B&K 마이크로폰(Type 4189-A021)을 사용하여 측정하였고 연소압력 측정은 1 번 Cylinder 에 Glow Plug 에 적용할 수 있는 AVL 의 연소압력센서 (GU12P / AG03)를 사용하였다.

Combustion Noise 와 Airborne Noise 의 연관성을 파악하기 위해 연소압력신호와 소음신호를 Time domain 에서 동기화 하여 두 신호간 상관관계를 분석하였다. 그리고 Sound Quality 분석을 위해서는 01dB 사의 dBSONIC V4.13 을 적용하였다.

Sound Quality 의 주요 지수로 Loudness, Sharpness, Roughness, Fluctuation strength 가

있으며, 맥동소음으로 인식할 수 있는 지수는 변조주파수의 영역에 따라서 10Hz 이하에서는 Fluctuation Strength 로 분류하고 그 이상에서는 Roughness 로 분리한다.

Fig.1 은 Sound Quality 분석 프로그램을 이용하여 엔진표면에서 1m 떨어진 지점에서 측정한 Airborne Noise 의 Modulation analysis 한 그래프이다.

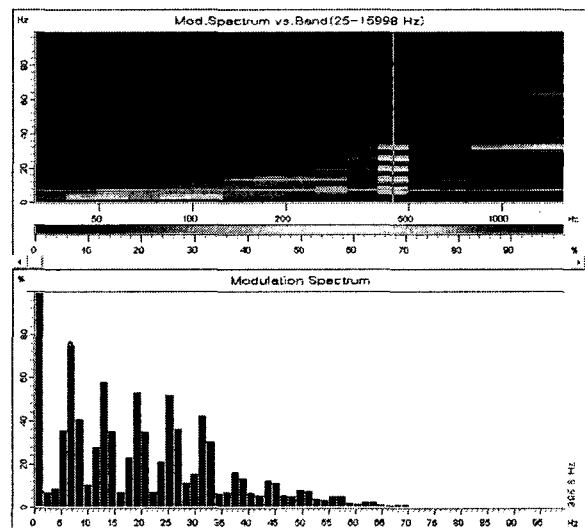


Fig.1 Modulation Analysis at Engine Front

문제가 되는 소음은 약 400Hz 의 Noise 로 저주파 6Hz 에 변조특성을 나타내고 있으며, 6Hz 는 Engine 2 회전의 1 번 발생하는 기초 성분으로 Fluctuation Strength 가 강하게 생성된다. 이를 저감하기 위해서는 Engine main order 성분인 6Hz 는 저감이 곤란하므로 약 400Hz 성분의 Combustion Noise 를 저감하여야 한다. 이 소음은 Engine Noise 의 주요 구성요소인 Mechanical Noise 와 Combustion Noise 측면에서 볼 때 Combustion Noise 에 유관하다.

연소압력 형상 중 저감 대상이 되는 주파수 대역의 소음을 파악하기 위해 대역필터를 적용한다. 대역필터 적용 결과는 다음 Fig.2 와 같고 이와 같은 대역 필터를 적용한 연소압력 프로파일은

Fig.3 과 같다.

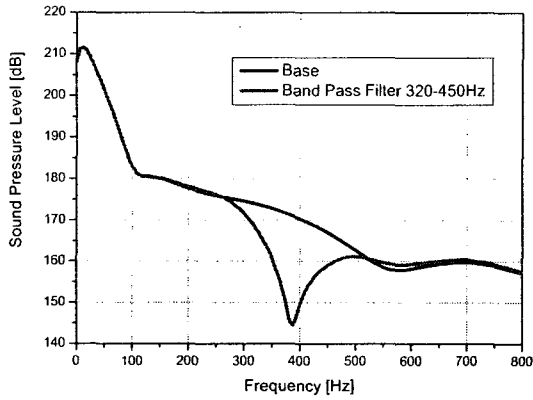


Fig.2 FFT analysis of combustion pressure  
[Base & Filtered Signal]

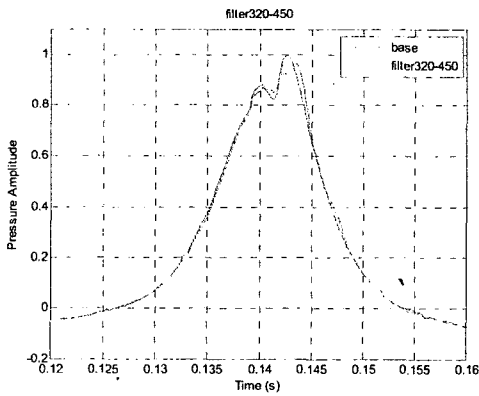


Fig.3 Combustion profile comparison of base  
signal with filtered signal

Fig.3 에서 Base 는 Pilot injection 에 의한 연소압력 Peak 와 Main Injection 에 의한 Peak 를 명확히 구별할 수 있으며 압력 구배 또한 명확하다. 그러나, Filtered signal 에서는 Pilot Injection 에 의한 Peak 는 큰 차이를 보이지 않으나 압력 변곡점이 상당량 상승하여 구배는 감소하였고 Main Injection 에 의한 연소압력 Peak 의 감소가 명확하게 나타난다. 따라서, 현재 Sound Quality 측면에서 문제시 되는 400Hz 대역 소음을 저감하기 위해서는 Main Injection 과 연관된 연소압력 Peak 를 저감시켜야 한다.

### 3. 연소압력 형상 구현

실린더 내부 연소압력의 급격한 상승 변동에 의해 생성되는 Combustion Noise 의 개선을 위해서 압축행정 에 적용한 Pilot Injection 은 연소 지연에 의한 급격한 압력상승은 일정량 제어하였지만 전 영역의 소음을 저감할 수 없었다. Fig.3 과 같은 TCPP 를 구현하기 위해서는 기존에 사용되는 2 회 분사 방법으로는 불가능 하므로 본 연구에서는 현재 사용중인 solenoid type injector 가 허용하는 범위에서 Pilot, Pre, Main, After, Post 로 5 번 분사를 사용하였다.

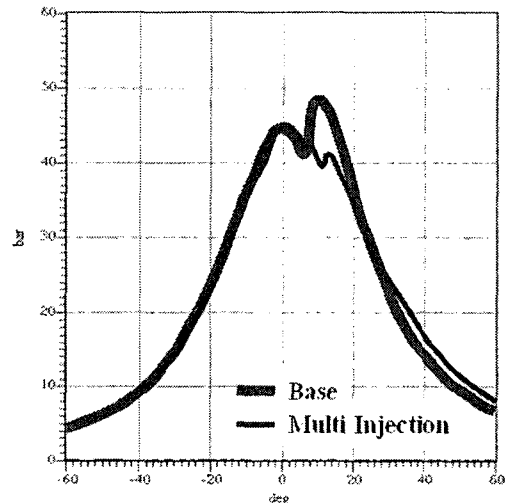


Fig.4 Combustion profile comparison of base  
signal with multiple injection signal

Fig.4 는 Base 와 Multiple Injection 을 하였을 때 Combustion Pressure Profile 를 비교한 것이다. 주파수 밴드 필터를 적용하여 400Hz 대역을 저감하여 생성한 CPP 와 같이 Main Injection 에 의해 형성되는 2 번째 Peak 가 사라졌음을 볼 수 있으며, PFP 저감에 따른 Torque 보상을 위해 사용한 After 와 Post Injection 에 의해 압축행정 후반에 압력저하가 지연되는 것을 볼 수 있다

Fig.5 는 1 번 Cylinder 에서 측정된 연소압력 데이터로 Pilot 과 Main injection 을 적용한 것과

Multiple injection 을 적용한 연소압력 데이터의 Spectrum 을 나타낸 그래프이다.

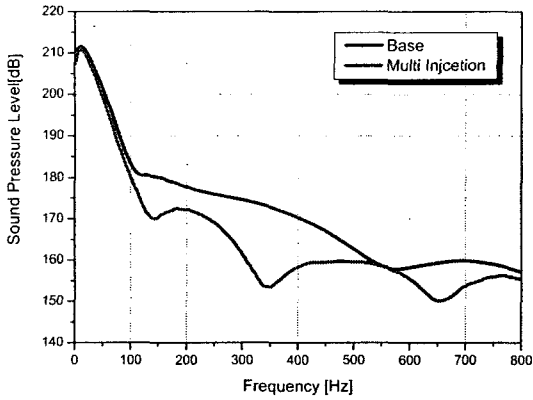


Fig.5 FFT analysis of combustion pressure [Base & Multiple Injection]

Fig.5 에서 300 ~ 400Hz 대역의 SPL 은 Fig.2 의 결과와 유사하게 Base signal 대비 Multiple injection 한 Signal 에서 10~15dB 낮아 졌음을 알 수 있다.

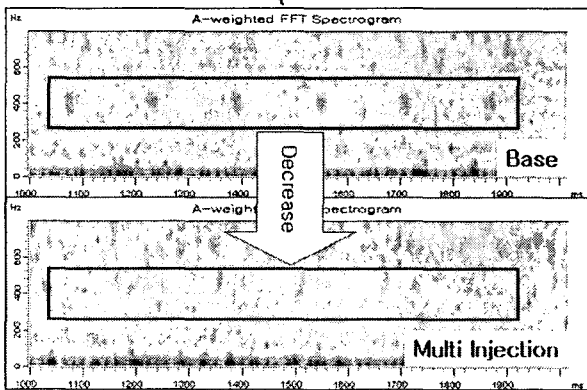


Fig.6 Engine Noise Spectrum comparison of base injection with Multiple injection

Fig.6 은 Engine Front 로부터 1m 떨어진 지점에서 측정한 Airborne Noise 를 Spectrum 분석한 그래프이다. 상부의 Pilot 과 Main Injection 이 적용된 Base 상태는 400Hz 대역에서 엔진 폭발과 동기화되어 주기적으로 Noise 가 증가한 패턴을

볼 수 있고, 아래의 Multiple Injection 이 적용되었을 때는 400Hz 대역 Noise 가 사라진 것을 볼 수 있다.

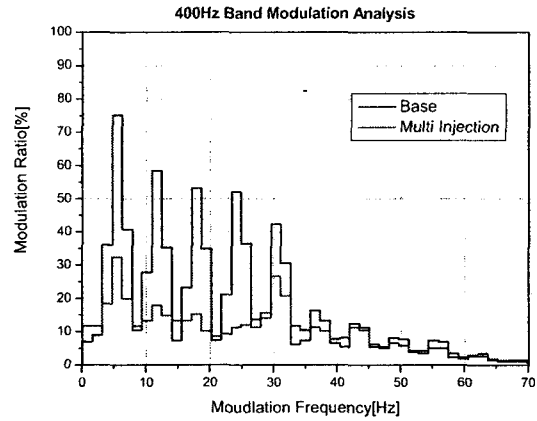


Fig.7 Modulation analysis at 400Hz

Fig.7 은 Base 와 Multiple Injection 적용에 따른 1m Airborne Noise 의 Modulation Ratio 를 비교한 그래프이다. Base 의 1/3 Octave band 중심 주파수 400Hz 대역소음에 대해 6Hz 의 Modulation Ratio 는 약 75%에서 33%로 약 56%의 개선효과가 있었다.

#### 4. 결론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론은 얻을 수 있었다.

1. Idle 과 같이 Mechanical Noise 가 상대적으로 작은 저속 영역에서의 음질지수에 악영향을 미치는 Roughness 악화는 주로 폭발행정에서 발생하는 급격한 압력 상승에 의한 Combustion Noise 에 기인한다.

2. Combustion Noise 개선을 위해 기존에 적용되고 있는 Pilot Injection 은 소음저감에 긍정적 영향을 미치나 Pilot 과 Main Injection 의 separation 간격을 제한하는 여러 요소들 때문에

최적화에 제한이 있으므로 두 Injection 사이에 발생하는 Combustion Pressure Profile 의 불연속에 따른 소음은 계속 발생되고 있다.

3. Idle 에서의 엔진 폭발주파수는 변조주파수로 약 6Hz 이고, 청각에 있어 문제가 되는 소음은 약 400Hz 대역의 소음이며, 이 소음은 Main Injection 에 의한 2 번째 Peak 에서 발생된다.

4. Combustion Noise 개선을 위해 주파수 대역 필터를 이용하여 생성한 Target Combustion Pressure Profile 은 엔진에서 1m 떨어진 지점에서 측정된 Airborne Noise 와 밀접한 연관성을 가진다.

5. Multiple Injection 의 적용은 PFP 의 저하와 실린더 내부 온도가 저감되기 때문에 Torque 낮아짐에 따라 이를 보상하기 위해 After 와 Post Injection 을 사용하므로 Emission 에 변화를 가져온다. 따라서, Torque 가 낮아지지 않고 Emission 의 악화가 없는 Multiple Injection Strategy 의 수립이 필요하다.

### 후 기

본 연구는 에너지관리공단의 지원하에 에너지절약 기술개발사업의 일환으로 수행된 결과의 일부이며 관계자 여러분께 감사 드립니다.

### 참 고 문 헌

- 1) Christian V. Beidl, Denis W. Gill, Wolfgang Cartellieri and Alfred Rust, "The Impact of Emissions and Fuel Economy Requirements on Fuel Injection System and Noise of HD Diesel Engines", SAE 980176, 1998.
- 2) Long Jhang, "A Study of Pilot Injection in a DI Diesel Engine" SAE 1999-01-3493, 1999.
- 3) Injection on Exhaust Odor and Engine Noise in DI Diesel Engines" SAE 2002-01-2874, 2002.
- 4) M. Badami, F. Mallamo, F. Millo and E. E. Rossi, "Influence of Multiple Injection Strategies on Emissions, Combustion Noise and BSFC of a DI Common Rail Diesel Engine" SAE 2002-01-0503, 2002.
- 5) F. Mallamo, M. Badami and F. Millo, "Analysis of Multiple Injection Strategies for the Reduction of Emissions, Noise and BSFC of a DI CR Small Displacement Non-Road Diesel Engine", SAE 2002-01-2672.
- 6) F Payri, A Broatch, B Tormos and V Marant, New methodology for in-cylinder pressure analysis in direct injection diesel engines - application to combustion noise. Measurement Science and Technology V16, 2005.