

거친 청감을 유발하는 엔진소음 개선 방향 고찰

Improvement of engine noise causing rough sound quality

정인수,[†] 김석준,¹ 조덕형^{††}

(Insoo Jung,^{1†} Sukzoon Kim,¹ and Teockhyeong Cho¹)

¹현대자동차

(Received May 25, 2018; accepted July 19, 2018)

초 록: 지속적으로 강화되는 배기가스 및 연비 규제에 대응하기 위해 자동차 업계에서는 다양한 노력을 하고 있다. 하지만 이로 인해 NVH(Noise, Vibration, and Harshness) 성능이 악화되는 경우들이 많이 발생하고 있다. 사례로 가솔린 엔진의 고압 펌프 소음 및 MPI(Multi-Point Injection)와 GDI(Gasoline Direct Injection)의 듀얼 분사로 인한 가속 천이 소음, 가솔린 터보차저 소음, 디젤 엔진에서의 분사변수 캘리브레이션으로 인해 악화되는 연소음에 대한 원인 및 개선방향을 제시하였다. 이러한 소음들은 고주파 소음으로 운전자에게 거친 청감을 유발하기 때문에 적절한 NVH 대책으로 저감시키는 노력이 반드시 필요하다.

핵심용어: 고주파 소음, 거친 청감, 고압 펌프 소음, 터보차저 소음, 디젤 연소음

ABSTRACT: The automotive industry is making various efforts to cope with ever-increasing exhaust emissions and fuel economy regulations. However, this often results in degraded NVH (Noise, Vibration, and Harshness) performance. For example, we proposed the causes and improvements for the noise generated by the high-pressure pump noise of a gasoline engine, the change of acceleration noise due to dual injection of MPI (Multi-Point Injection) and GDI (Gasoline Direct Injection), the noise of a gasoline turbocharger, and the combustion noise deteriorated due to the injection parameters calibration in a diesel engine. Since these noises are caused by the high frequency noise, and the driver feels the rough sound quality, efforts to reduce them with proper NVH measures are indispensable.

Keywords: High frequency noise, Sound roughness, High-pressure pump noise, Turbocharger noise, Diesel combustion noise

PACS numbers: 43.50.Ed, 43.50.Gf

1. 서 론

환경문제에 대한 인식이 증대되면서 자동차 배기가스 및 연비에 대한 규제가 지속적으로 강화되고 있다. 이러한 규제를 만족하기 위해 자동차 업계에서는 다양한 노력을 하고 있다. 하지만 이로 인해 NVH(Noise, Vibration, and Harshness) 성능이 악화되는 경우들이 많이 발생하고 있다. 본 논문에서는 가솔린 엔진과 디젤 엔진의 몇 가지 사례를 통해 이 주

제를 다루고자 한다. 첫째, 배기가스 저감을 위해 가솔린 엔진의 연료계 시스템이 변경되면서 기존에 경험하지 못했던 소음문제가 발생하고 있다. 둘째, 다운사이징을 통한 성능 및 연비 개선을 위하여 가솔린 엔진에서 터보차저(turbocharger) 적용이 계속 증가하고 있다. 그런데 터보차저는 고속 회전하면서 공기를 압축하므로 회전체 기인 소음, 기름음 및 서지(surge) 소음 등이 발생한다.^[1-3] 특히 차량 가속 후 감속 조건에서 가속 페달 Tip-out 시 발생하는 서지 소음은 문제가 되고 있다. 셋째는 디젤 엔진의 경우이다. 배기가스와 연비 규제를 만족하기 위해 엔진의 연소 기술, LNT(Lean NOx Trap)와 SCR(Selective

[†]Corresponding author: Insoo Jung (isjung@hyundai.com)
Hyundai Motor Company, Yeonguso-ro, Namyang-eup, Hwaseong,
Gyeonggi-do 18280, Republic of Korea
(Tel: 82-31-8036-3025)

Catalytical Reduction) 같은 배기가스 저감장치 및 분사변수(injection parameter) 캘리브레이션(calibration) 등으로 대응하고 있다. 여기서 캘리브레이션으로 배기가스 및 연비를 저감할 때 trade-off 관계^[4] 인연소음(combustion noise)이 악화된다. 지금까지 언급한 가솔린 엔진의 연료계 시스템 변경에 따른 소음, 터보차저의 서지 소음 및 디젤 연소음^[5]은 고주파특성이 매우 강해 운전자에게 거친 청감을 유발하기 때문에 차량 NVH 상품성을 크게 저하시킨다. 이에 본 논문은 각 소음의 원인과 개선 방안을 제시하고자 한다.

II. 엔진소음 개선

2.1 가솔린 연료계 시스템 관련 소음

가솔린 엔진의 경우 배기가스 규제 대응을 위해 연료 분사압을 지속적으로 상향하는 추세이다. 최근에 연료 미립화를 통한 배기가스 PN 저감을 위해서 분사압을 150 bar ~ 200 bar에서 250 bar ~ 350 bar로 상향하고 있다. 이로 인해 고압 펌프의 단품 소음이 Fig. 1처럼 7 dBA 악화된다.

또한 기존 MPI(Multi-Point Injection) 또는 GDI(Gasoline Direct Injection) 단일 분사 방식에서 MPI+GDI 듀얼 분사가 적용되고 있다. 이로 인해 MPI 분사 ↔ MPI+GDI 분사 ↔ GDI 분사로 전환될 때 소음 레벨 변화가 발생하여 운전자가 청감적으로 이질감을 느끼게 된다.

특히 배경 소음이 낮은 아이들 영역에서 분사압 차이가 큰 촉매 예열 전후 영역 및 저속 운전 시 이질감이 매우 크다. Fig. 2는 MPI 분사에서 GDI 분사로 변할 때 1 kHz 이상의 주파수 대역에서 소음이 악화되면서 소음 레벨이 6 dBA 정도 증가하는 것으로 보여주고 있다. 이러한 고주파 소음을 개선할 수 있는 방안은 아래 3가지로 생각해 볼 수 있다.

- 1) 고압 펌프 단품의 작동 소음 개선
 - 2) 엔진 주요 방사부 흡차음 성능 강화
 - 3) 고압 펌프에서 엔진 본체로의 진동 절연 구조 적용
- 고압 펌프 내부의 작동부 경량화와 제어 전류 하향을 통한 가진력 저감 등을 통한 고압 펌프의 단품 소음 개선은 효과가 있지만 제한적이기 때문에 흡차음 성능 강화가 반드시 필요하다. 그래서 최근에는 엔진 커버 구조가 플라스틱 스킨과 흡음재 일체형

방식에서 엔진 상부 구조에 완전히 밀착하는 흡음재와 플라스틱 스킨의 분리형으로 방식이 변하고 있다. 또한 Fig. 3과 같이 고압 펌프 하부에 고무 절연 구조를 적용하여 엔진 본체로의 진동 전달을 저감하는 노력을 하고 있다.

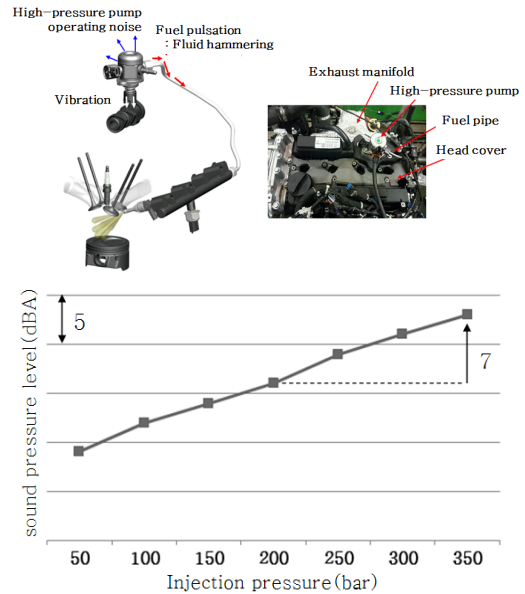


Fig. 1. Noise level change according to the injection pressure.

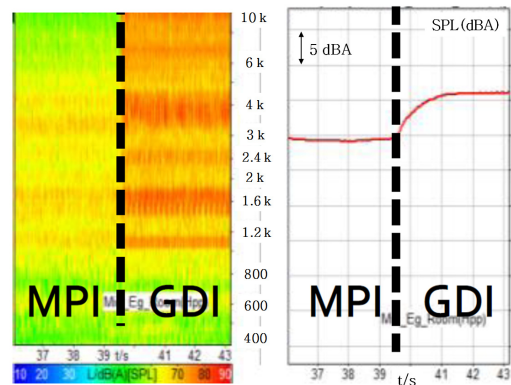


Fig. 2. Noise change when injection mode is changed from MPI to GDI.

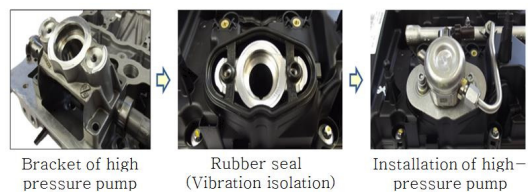


Fig. 3. Vibration isolation of high pressure pump.

2.2 가솔린 터보차저의 서지 소음

터보차저는 배기가스를 이용해 고속으로 회전하면서 컴프레서 휠로 공기를 압축하여 엔진에 공급하는 부품이다. 그러나 압축하는 과정에서 공기 유동의 불안정한 상태가 생겨서 소음이 발생한다. 주 원인은 Fig. 4에 표시된 컴프레서 휠의 유량과 압축비 성능 곡선을 보면 알 수 있다. 그림의 서지 라인(surge line)에서 컴프레서 휠의 유동 불안정으로 생기는 압력 변화로 인해 유동 박리가 발생하여 그 영향으로 소음이 발생한다.

서지 소음으로 알려져 있는 이 소음은 차량에서 1500 r/min~2500 r/min 구간 가속 후 가속페달 Tip-out 조건에서 주로 발생한다. Fig. 5는 이 조건에서 터보차저 근접 소음을 측정된 것이다. 서지 라인을 벗어나면서 3 kHz~6 kHz 대역의 소음이 발생하는 것을 알 수 있다.

이러한 서지 소음을 저감하기 위해서는 Tip-out 조건에서 가장 빠른 시간에 터보차저의 부스트 압력을 컴프레서 흡입구에 공급하여 서지 라인에 근접하지

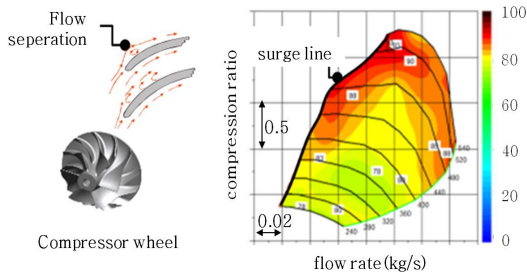


Fig. 4. Surge line of a compressor wheel.

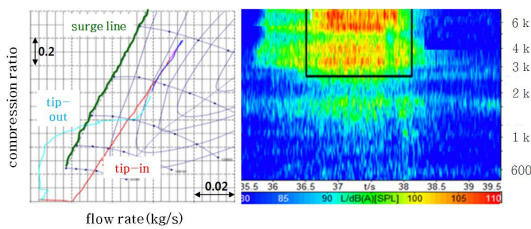


Fig. 5. Surge noise.

Table 1. Design variation relative to the base.

RCV		Improvement
flow area	inlet	+178 mm ²
	valve	+18 mm ²
	outlet	+36 mm ²

않도록 해야 한다. 이를 위해 컴프레서 출구와 엔진 인터쿨러 사이에 RCV(Recirculation Valve)를 설치하여 Tip-out 조건 시 부스트 압력을 에어클리너와 컴프레서 흡입구 사이로 보내는 방법을 사용한다. 본 논문에서는 기존 RCV를 설계적으로 변경하여 서지 소음을 개선하였다.

개선 RCV는 Table 1에 나타난 것처럼 입구, 밸브 및 출구의 유로 면적을 기존 RCV보다 확대하여 컴프레서와 인터쿨러 사이의 부스트 압력을 빨리 저감하고자 하였다. 추가적으로 부스트 압력이 보다 더 원활하게 RCV를 빠져나갈 수 있도록 유동 방향을 Fig. 6과 같이 변경하였다.

또한 다운사이징 터보 엔진의 경우 자연 흡기방식의 엔진 대비 2배 정도의 공기 부스트를 통해 엔진의

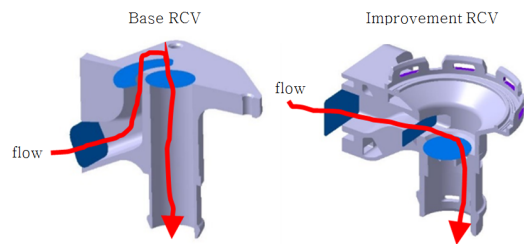


Fig. 6. Flow improvement of boost pressure.

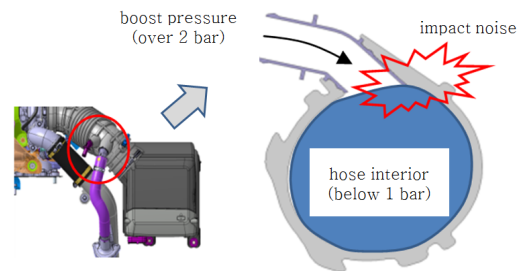


Fig. 7. Impact noise by the flow of boost pressure.

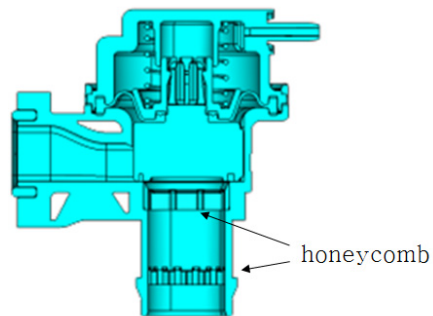


Fig. 8. RCV with 2-layer honeycomb.

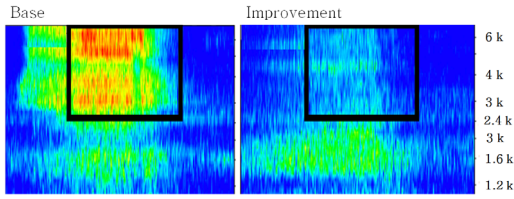


Fig. 9. Result with the improvement RCV.

성능을 구현한다. 이때 RCV는 2 bar 이상의 압력을 가진 공기를 1 bar 미만의 흡기 호스에 보내는 기능을 하는데 압력 차이로 인한 유동 속도의 불균일에 의해 Fig. 7과 같이 흡기 호스 측에 충격음이 발생한다. 이런 충격음을 해소하기 위해, Fig. 8에 표시된 것처럼 부스트 압력의 속도를 균일하게 하는 하니컴(honeycomb) 구조를 상부와 하부에 설치하였다.

Fig. 9는 최종 시험 결과를 나타낸 것이다. RCV의 개선 사양 적용 외 추가적으로 EMS(Engine Management System) 제어 변수 변경을 통해서 저소음을 8 dBA 저감할 수 있었다.

2.3 디젤 연소음

앞에서 언급한 것처럼, 배기가스와 연비 규제 대응을 위해 적용하는 다양한 기술 중 엔진 분사변수 캘리브레이션은 trade-off 관계로 1250 r/min ~ 2250 r/min 구간의 연소음을 악화시킨다. 그 이유는 배기가스 및 CO₂를 측정하는 Fig. 10의 NEDC(New European Driving Cycle)의 연료량 10 mg~25 mg 영역과 대부분 일치하기 때문이다.

따라서 이 영역의 분사변수 변화에 따른 연소음과 배기가스의 특성을 함께 고려하는 게 개발 초기에 중요하다. 다음은 1.6 L 디젤 엔진의 BMEP(Brake Mean Effective Pressure) 6 bar, 정속 1500 r/min 조건에서 분사압 변화에 따른 소음 레벨 변화를 나타낸 것이다. 분사압은 고압화를 통해 배기가스 PM을 저감하고자 한다. Table 2에 나타나 있는 것처럼, 베이스 분사압 대비 200 bar 증가 시 엔진소음이 1.0 dBA 악화되고, 200 bar 감소 시 2.1 dBA 개선된다.

Fig. 11의 주파수 변화를 보면 500 Hz ~ 4000 Hz 대역, 특히 1.2 kHz ~ 2.5 kHz 고주파 소음이 악화되는 것을 알 수 있다.

이 엔진의 경우 이 구간에서 2번의 파일럿 분사와

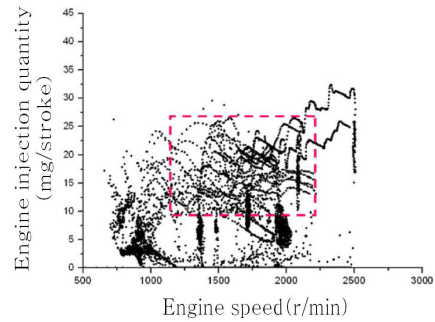


Fig. 10. NEDC trace of a 1.6L diesel engine.

Table 2. Noise level change according to the change of injection pressure.

Injection pressure (bar)	Engine noise (dBA)
+200	+1.0
+100	+0.9
Base	
-100	-1.0
-200	-2.1

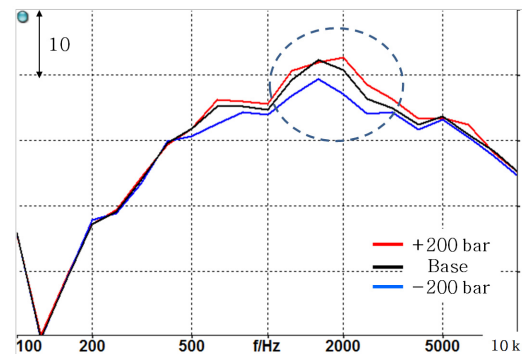


Fig. 11. Frequency characteristics according to the change of injection pressure.

1번의 메인 분사로 연료를 연소실에 분사하고 있다. Table 3은 주분사시기(main injection timing)를 변경했을 때의 소음 변화를 나타낸 것이다. 분사시기를 베이스 대비 1~4도 진각(advance)하면 엔진소음이 최대 0.4 dBA 증가하는 반면, 지각(retard)하면 0.6 dBA ~ 3.0 dBA 저감된다.

Fig. 12는 그때의 소음 변화를 보여주고 있다. 일반적으로 TDC(Top Dead Center) 기준 진각하면 PM과 CO₂가 저감되고, 소음이 나빠진다. 그리고 지각하면 NO_x가 저감되고 소음이 개선된다. 하지만 이러한 경향은 엔진의 연소계 구성 내용과 베이스의 분사시

Table 3. Noise level change according to the change of main injection timing.

Main injection timing (crank angle degree)	Engine noise (dBA)
+4	0.0
+3	+0.1
+2	+0.1
+1	+0.4
Base	
-1	-0.6
-2	-1.6
-3	-2.5
-4	-3.0

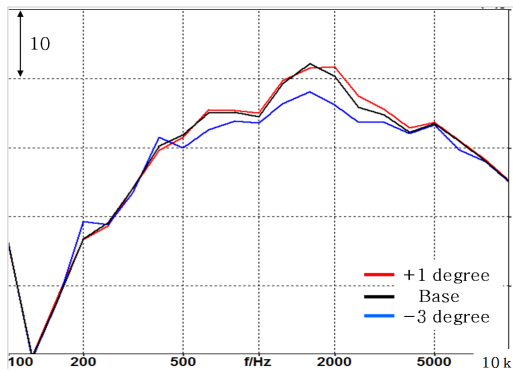


Fig. 12. Frequency characteristics according to the change of main injection timing.

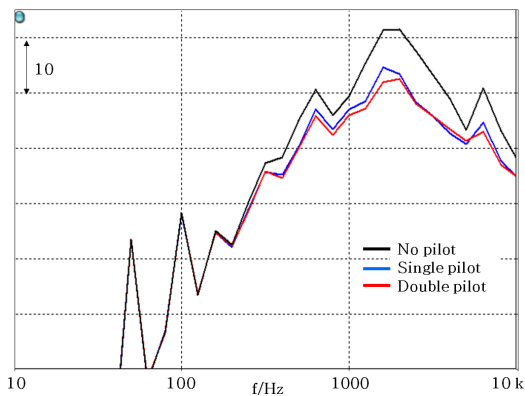


Fig. 13. Noise effect of pilot injection.

기 위치에 따라 달라진다.

Fig. 13은 파일럿 분사가 없을 때와 있을 경우의 소음 변화를 나타낸 것이다. 파일럿 미적용 대비 2번의 파일럿 분사를 할 때 소음 레벨이 8.2 dBA 차이가 난다. 파일럿 분사는 메인 분사 전에 연소실에 소량의

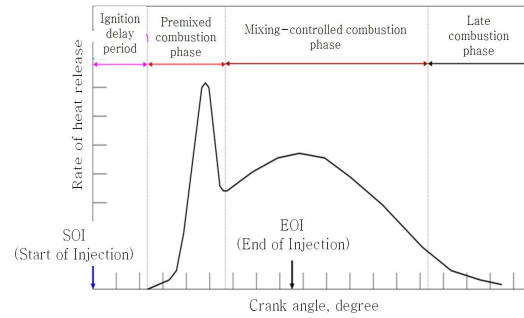


Fig. 14. Rate of heat release.

Table 4. Change of injection parameters and combustion noise.

Category	Changes compared to the base
Injection pressure	198 bar increase
Main injection timing	2.6 degree advance
Boost pressure	85.8 hPa decrease
Fuel consumption	7.7 % improvement
Smoke	40.1 % decrease
NOx	50.7 % increase
Combustion noise	2.4 dBA increase

연료를 분사하는 것을 말한다. 이것의 효과는 연소실의 온도를 높여 메인 분사의 착화지연 기간을 단축하여 Fig. 14의 예혼합 연소 구간(premixed combustion phase)의 최대압력상승기울기를 완만하게 하여 연소음을 저감하는 것이다. 하지만 사용되는 소량의 연료량이 엔진 연소 효율을 위해 사용되는 것이 아니기 때문에 연비 측면에서 단점으로 작용한다. 그래서 연비와 소음 측면에서 최적화가 필요하다.

지금까지 주요 분사변수별 특성을 확인해 본 것처럼 배기가스, 연비 및 연소음이 상호 연관성을 가지고 있다. 따라서 점점 강화되는 배기가스 및 연비 규제에 대응하기 위해서는 분사변수 캘리브레이션의 방향을 배기가스, 연비 및 연소음의 최적화에 맞추기 보다는 배기가스와 연비 개선에 치중하는 것이 효과적이라고 생각한다. Table 4는 1850 r/min, 연료량 16 mg 정속 조건에서의 사례이다. 이 경우에 Smoke와 NOx의 trade-off 특성은 EGR(Exhaust Gas Recirculation)량을 조정하여 대응했다.

이로 인해 악화되는 연소음은 차량의 전달경로와 흡차음 개선 대책으로 저감하면 된다.

III. 결 론

배기가스 및 연비에 대한 규제가 지속적으로 강화되면서 고주파 엔진소음이 나빠져 거친 음질을 유발하고 있다. 본 논문에서는 연료계 시스템 관련 소음, 터보차저 서지 소음 및 연소음의 사례를 통해 고주파 소음을 어떻게 개선할 것인지에 대해 살펴보았다. 이번 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 가솔린의 고압화로 인한 고압 펌프의 작동 소음 및 MPI+GDI 듀얼 분사로 발생하는 고주파의 거친 소음은 단품 개선, 진동 절연 및 엔진 주요 방사부 흡차음 성능 강화 등의 다양한 방법을 통해 개선하고 있다.
- 2) 가솔린 터보차저 서지 소음은 상용 운전 구간에서 3 kHz ~ 6 kHz 대역의 소음으로 발생하여 운전자에게 거친 청감을 유발할 수 있는 소음이다. 이것은 RCV의 유로 면적 확대, 2-layer 하니컴 및 EMS 제어변수 적용을 통해 개선 가능하다.
- 3) 디젤 엔진의 분사변수 변화에 대한 배기가스, 연비 및 연소음 특성을 살펴보았다. 분사변수 캘리브레이션으로 trade-off 관계를 가지고 있는 이들을 최적화하는데 한계가 있기 때문에 점점 강화되는 규제 대응을 위해서는 캘리브레이션을 배기가스 및 연비 측면으로 사용하고 그로 인해 악화되는 연소음은 차량 NVH 대책으로 저감하는 새로운 접근법이 필요하다.

References

1. H. Kuma, T. Inoue, T. Isogai, K. Shimizu, and T. Iida, "Development of reduction method for whirl noise on turbocharger," SAE Technical Paper 2007-01-4018 (2007).
2. X. Kuang, J. Pang, H. Zhang, L. Yang, and J.-h. FU, "Surge noise identification and control of automotive turbochargers," SAE Technical Paper 2014-01-2053 (2014).
3. J. Veit, P. Langjahr, S. Brandl, and B. Graf, "Turbocharger noise quality parameters for efficient TC noise assessment and refinement," SAE Technical Paper 2016-01-1817 (2016).
4. S. Mendez and B. Thirouard, "Using multiple injection

strategies in diesel combustion: potential to improve emissions, noise and fuel economy trade-off in low CR engines," SAE Technical Paper 2008-01-1329 (2008).

5. I. Jung, J. Jin, H. So, C. Nam, and K. Won, "An advanced method for developing combustion noise through the analysis of diesel combustion," SAE Technical Paper 2013-01-1901 (2013).

저자 약력

▶ 정 인 수 (Insoo Jung)



1988년 2월: 부산대학교 기계공학과 학사
 1993년 2월: 부산대학교 기계공학과 석사
 1993년 5월: 현대자동차 입사
 2015년 1월 ~ 현재: 현대자동차 연구위원

▶ 김 석 준 (Sukzoon Kim)



1994년 2월: 서울대학교 조선공학과 학사
 1996년 2월: 서울대학교 조선공학과 석사
 2001년 4월: 현대자동차 입사
 2003년 1월 ~ 현재: 현대자동차 책임연구원

▶ 조 덕 형 (Teockhyeong Cho)



1997년 2월: 송실대학교 기계공학과 학사
 2001년 8월: 연세대학교 기계공학과 석사
 2002년 7월: 현대자동차 입사
 2006년 1월 ~ 현재: 현대자동차 책임연구원