

압축착화 디젤엔진의 모사 EGR 시스템에 의한 소음 특성 변화 분석

박 범* · 윤성준* · 박성욱* · 박준홍*[†]

Study on Noise Generation Characteristics of Simulated EGR System for Compression Ignition Diesel Engine

B. Park, S. Yoon, S. Park and J. Park

Key Words: Compression ignition engine(압축착화엔진), Single cylinder engine(단기통엔진), Engine noise(엔진소음), Exhaust gas recirculation(배기가스 재순환), Sound quality metrics(음질인자)

Abstract

Experimental study was conducted to investigate the effect of EGR(exhaust gas recirculation) on engine noise using single cylinder combustion ignition engine. Under constant engine rotary speed of 1200 RPM, 8 mg fuel quantity was injected with 15, 18 and 21% of oxygen ratio and 1400 bar of injection pressure. Using the in-cylinder pressure data acquired by a piezo-electric transducer, the engine performance parameters were calculated. Radiated engine noise measured for 10 seconds was analyzed using spectral characteristics and sound quality metrics such as loudness, sharpness, roughness. From the obtained engine performance parameters and sound quality metrics, effect of oxygen ratio of the premixed air, start of injection timing on frequency characteristic and sound quality metrics were analyzed. Correlation analysis was conducted between MPRR(maximum pressure rise rate), RI(ringing intensity) and sound quality metrics. RI was identified as the most important factor having influence on the sound quality metrics.

기호설명

CI : 압축착화
DI : 직접분사
P.M. : 입자상 물질
NO_x : 질소 산화물
SOI : 분사시점
TDC : 상사점
EGR : 배기가스 재순환
CRDI : 커먼레일 직접분사

ECU : 엔진제어유닛
PRR : 압력상승률 [MPa/deg]
MPRR : 최대 압력상승률 [MPa/deg]
ROHR : 열발생률 [J/deg]
RI : Ringing intensity [kW/m²]
SPL : 음압레벨 [dB]
 L_{PA} : A가중 음압레벨 [dBA]
 N : 라우드니스 [sone]
 S : 샤프니스 [acum]
 R : 러프니스 [asper]
 F : 변동강도 [vacil]

Received: 03 Nov 2014, Received in revised form: 16 Dec 2014, Accepted: 17 Dec 2014)

*기계공학과, 한양대학교

[†]책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : parkj@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0424 FAX : (02)2298-4634

1. 서 론

디젤엔진은 높은 연비, 열효율 면에서 크게 각광받으

며 많은 차량에 사용되고 있다. 이러한 장점에도 불구하고 가솔린엔진에 비하여 많은 배출물질을 발생시키는 점과 높은 진동, 소음 레벨은 해결해야 할 문제점이다. 또한 최근 배기규제가 점점 더 강화됨에 따라 디젤엔진에서 발생하는 배출가스의 입자상 물질(P.M.)과 질소 산화물(NO_x)의 저감 또한 매우 중요한 과제가 되었다. 이에 따라 입자상 물질과 질소 산화물의 저감을 위하여 다양한 연구들이 진행되고 있으며 대표적으로 고압분사에 의한 연료의 미립화 방법, 저온 연소(low temperature combustion, LTC), 파이럿 분사(pilot injection), 배기가스 재순환 (exhaust gas recirculation, EGR) 등의 방법들이 개발 되었다.

이러한 방법들 중 EGR은 배기가스를 다시 연소 실린더 내부로 주입시켜 산소 농도를 낮추고 실린더내부의 비열을 높여 결과적으로 낮은 온도에서 연소가 일어나도록 하는 방법이다. 또한 EGR은 배출물의 저감 뿐 아니라 소음 발생에 있어서도 유리하다고 알려져 있다⁽¹⁾. 이러한 소음 저감 효과는 최근 강화되고 있는 다양한 소음규제의 요구에도 부합되기 때문에 배출가스저감과 더불어 많은 연구가 진행되고 있다. 엔진음은 크게 엔진음의 기계적 동작에 의해 발생하는 기계음과 실린더내부의 연소에 의해 방사되는 연소음으로 나눌 수 있는데⁽²⁾ 특히 연소음 쪽에서 많은 저감효과가 있다고 알려져 있다⁽³⁾. 또한 압력상승률은 주된 연소음의 원인이 되고 있다⁽⁴⁾. 이러한 기존의 연구들은 음압레벨에 기반한 소음 저감효과들을 다루었다.

따라서 본 연구에서는 모사 EGR이 적용된 단 기통 DI(direct injection) 디젤엔진을 사용한 소음, 내부압력 측정 실험을 수행하고 음압레벨의 효과 뿐 아니라 음질 인자들을 사용한 엔진소음의 특성 분석을 통하여 실제 사람들이 느끼는 성가심 특성 변화에 대해서 알아본다. 또한 음질인자들과 엔진성능인자들의 관계를 통해 모사 EGR의 산소비, 분사시점 등에 의한 소음저감 효과를 알아본다.

2. 실험장치 구성

실험장치의 구성은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 실험용 단기통 DI엔진과 엔진제어장치, 흡배기 제어장치, 동력계(dynamometer), 실린더 내부압력 및 소음 측정장치로 구성되었다.

엔진으로 CRDI(common rail direct injection) 시스템

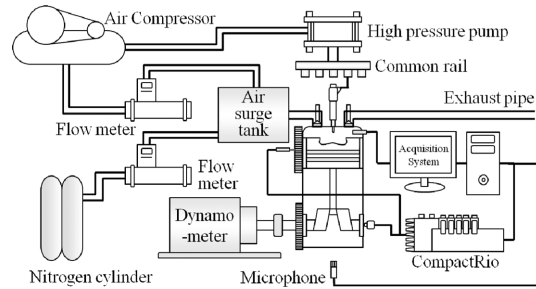


Fig. 1 Engine and exhaust gas recirculation system used in the experiment

Table 1 Engine specification used in the experiments

Type		Single Cylinder DI Engine
Bore×Stroke		75×84.5 mm
Displacement Volume		373.3 cc
Compression Ratio		17.8
Valve Type		DOHC 4
Intake Air		Natural aspiration
Intake Valve	Open	BTDC 8
	Close	ATDC 52
Exhaust Valve	Open	BBDC 8
	Close	ATDC 38

Table 2 Injector specification used in the experiments

Number of injection holes	6
Direct Injection System	Bosch Common-Rail
Nozzle Hole Diameter	0.128
Spray Included Angle	156

이 적용되었으며 배기량은 373.33 cc, 압축비는 17.8 이었고 자세한 사양은 Table 1에 나타내었다. 인젝터의 사양은 Table 2에 나타내었다.

엔진의 회전속도를 일정하게 유지시키기 위하여 55 kW의 DC 동력계를 사용하였고 이 때 엔진의 회전속도는 1200 rpm으로 유지하였다. 연료의 분사시점과 분사량은 NI-compactRIO를 사용하여 만든 ECU(engine control unit)를 통해 제어해주었다. 이렇게 만든 ECU는 제어장치, 샤프와 여러 모듈로 구성되었고 이를 제어하기 위해 FPGA/RT labview를 사용하여 코드를 구성하였다.

분사시점은 2, 0, -3, -6, -9, -12, -15, -20° 였으며 분사량은 8 mg 이었고 분사압은 1400 bar 였다.

실린더 내부압력을 측정하기 위하여 예열플러그의 위치에 피에조 트랜스듀서(6057A80, Kistler)를 부착하였다. 측정된 내부압력은 상사점 신호를 사용하여 변환되며 압력상승률, 열방출률과 같은 엔진성능지표를 계산하는데 사용되었다.

실린더로 들어가는 흡기량을 제어하기 위하여 유량제어기(GFC-67, Aalborg)를 사용하였고 EGR 시스템 구현을 위해 예혼합실을 장착하여 흡기와 질소를 효과적으로 배합하였다. 배기 매니폴드에는 램다미터(LA4, ETAS)를 장착하여 당량비(equivalence ratio)를 측정하였다. 실험에서 사용된 산소비는 15, 18, 21% 였다.

소음측정은 높이 1 m, 엔진 정면과의 거리 1m에서 약 10초 동안 마이크로폰(4189, Brüel & Kjaer)을 사용하여 이루어졌다. 측정된 소음은 상용프로그램(Artemis 12.0, HEAD acoustics)을 사용하여 분석하였다.

3. 실험결과 및 토의

예혼합기의 산소비, 분사시점 등을 변화시키며 측정된 소음을 기준에 널리 쓰이던 주파수 특성분석과 음질인자를 사용하여 분석하고 측정된 실린더내부 압력의 변화로부터 구해진 엔진성능인자와 비교하여 엔진운행조건이 소음저감에 미치는 영향을 알아보았다. 이 때 예혼합기의 산소비가 21%인 경우는 EGR이 적용이 안된 경우이며 18, 15%는 EGR을 모사한 경우이다.

3.1 엔진성능지표

Figure 2에 연료분사압 1400 bar, 분사량 8 mg 일 때 예혼합기의 산소비와 분사시점에 따라 변화하는 실린더 내부 압력선도와 열발생률(ROHR)을 나타내었다. 실린더 내부압력은 모든 산소비 조건에서 SOI = -10° 부근에서 최대를 보이며 그 크기도 큰 차이는 없었다. 하지만 열발생률은 반드시 SOI = -12°에서 최대는 아니었다. 실린더 내부압력과 열발생률은 산소비가 낮아질 때 SOI = -9°에서 SOI = -20, 2°로 갈수록 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 산소비가 낮아질수록 착화지연이 더 커지는 것을 확인할 수 있었는데 이는 EGR에 따라 흡기의 산소비가 낮아지고 CO₂ 비율이 증가하여 비열도 증가하기 때문에 연소온도와 내부압력을 낮추기 때문인 것으로 판단되었다.

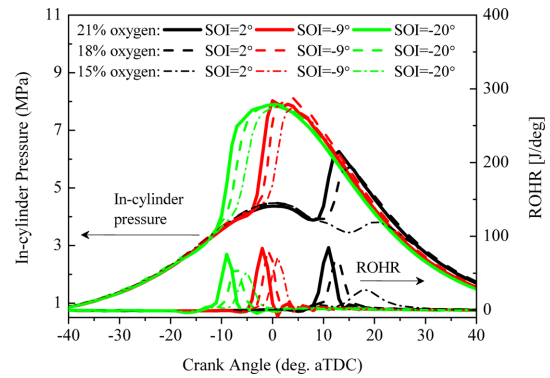


Fig. 2 Comparison of differences on combustion characteristics due to oxygen ratio

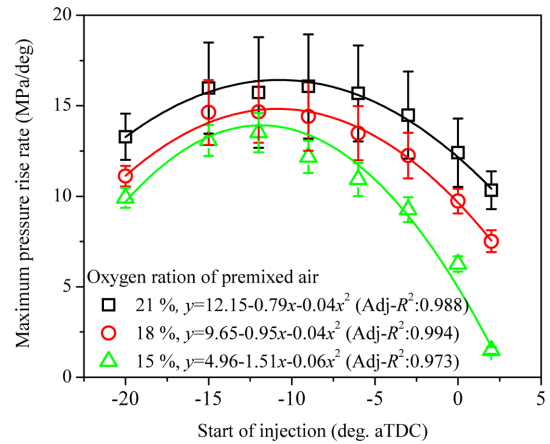


Fig. 3 Effect of start of injection timing on maximum pressure rise rate

Figure 3에 최대압력상승률(MPRR)을 나타낸 바와 같이 산소비가 낮아질수록 최대압력상승률이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 EGR 시 감소된 산소비율에 따라서 연소가 악화되기 때문이며 열발생률의 경향과 일치하였다.

Ringng intensity(RI)는 연소에 의해 발생하는 소음을 예측하기 위하여 Eng에 의해 제안된 인자로서 다음과 같이 정의된다⁽⁶⁾.

$$RI = \frac{1}{2\gamma} \frac{[\beta(dP/dt_{max})]^2}{P_{max}} \sqrt{\gamma RT_{max}} [kW/m^2] \quad (1)$$

여기서 γ 는 비열율, β 는 스케일인자로 실험적으로 구해진 값인 0.05를 사용하였다. γRT_{max} 는 음속에 관련된 인자이다. T 는 온도로서 본 연구에서는 측정이 불가하였

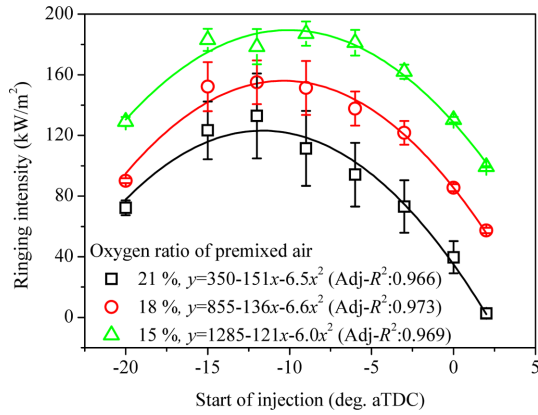


Fig. 4 Effect of start of injection timing on ringing intensity

으므로 RT를 이상기체식 $PV = nRT$ 로 부터 계산하였다.

Figure 4에는 예혼합기의 산소비와 분사시점에 따른 RI변화를 나타내었다. RI의 경향은 앞서 Fig. 3에 나타낸 최대압력상승률선도와 매우 비슷한 경향을 보이며 식 (1)에서 최대압력상승률의 제곱의 형태로 나타나기 때문이다. 이는 곧 최대압력상승률이 소음에 가장 큰 영향을 미치는 인자라는 것을 의미하며 반대로 P_{max} 와 RT_{max} 는 상대적으로 영향이 적다고 할 수 있다.

3.2 소음 특성변화

모사EGR에 따른 연소음 특성을 알아보기 위하여 주파수분석을 실시하였다. 엔진의 정상속도를 유지하기 위하여 동력계를 사용하였기 때문에 연소가 발생되지 않을 때 동력계의 소음을 측정하여 주파수 특성을 파악

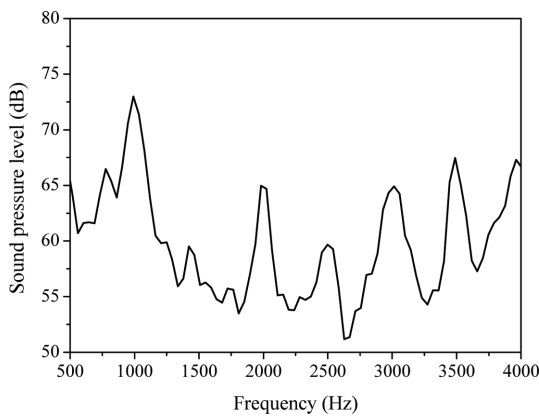


Fig. 5 Frequency characteristic of motoring sound

하였다.

측정된 동력계의 구동소음은 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 1, 2, 3 kHz의 하모닉 성분이 주된 영향을 미치며 따라서 측정된 연소소음은 이 성분들을 대역통과필터를 사용하여 제거해주었다. 다만 여기서 2.5, 3.5 kHz의 성분은 연소소음과의 레벨차이가 크기 때문에 크게 영향을 미치지 못한다고 판단되어 필터처리를 해주지 않았다.

이렇게 필터처리된 소음을 Fig. 6에 나타내었다.

분사시점이 $SOI = 2^\circ$ 일 때 모사EGR에 따라 산소비가 낮아질수록 특 히 500~3000 Hz 대역에서 소음이 크게 줄어드는 것을 확인할 수 있었고 그 차이는 5~10 dB였다. 분사시점이 상사점 이전으로 갈수록 차이가 줄어들어 산소비에 따른 소음차이가 거의 없었다. 하지만 2~3 kHz 대역에서는 산소비 21%일 때보다 15%일 때 소음 차이가 여전히 5 dB 이상 낮은 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 연소에 의해 발생하는 소음대역으로 알려진 1~3 kHz 대역에서 EGR이 분사시점이 상사점 근방에서 매우 효과적으로 소음을 저감시킬 수 있는 방법임을 나타낸다.

상용프로그램(Artemis 12.0, HEAD acoustics)을 통해 분석된 음질인자는 소리의 크기뿐 아니라 날카로움, 거칠기, 변동강도 등을 표현한다. 이 중 가장 대표적인 라우드니스는 음압레벨과는 달리 마스킹효과까지 고려할 수 있는 소리의 크기를 나타내는 인자로 Zwicker에 의해 제안된 모델이 대표적이며(6) 다음과 같이 표현된다.

$$N = \int_0^{24Bark} N'(z) dz \text{ [sone]} \quad (2)$$

여기서 $z(z=0, 1, 2, \dots, 24 \text{ Bark})$ 는 임계대역, N' 은 임계대역에서 비라우드니스이다. 샤프니스는 음의 날카로움을 나타내는 인자이며 Aures에 의해 제안된 모델은 다음과 같다(7).

$$S = 0.11 \frac{\int_0^{24Bark} N'(z)g'(z) dz}{\ln(0.05N+1)} \text{ [acum]} \quad (3)$$

여기서 $g'(z)$ 는 임계대역별 가중치이고

$$g'(z) = 0.0165 \exp\left(\frac{0.171z}{Bark}\right) \quad (4)$$

으로 표현된다. 즉 샤프니스는 전체음의 크기에서 주파수별 분포가 어떻게 되는지를 나타내는 인자이기 때문에 고주파수영역의 소음변화를 잘 나타낼 수 있고 샤프니스가 커질수록 음이 더 날카롭게 들린다. 러프니스와

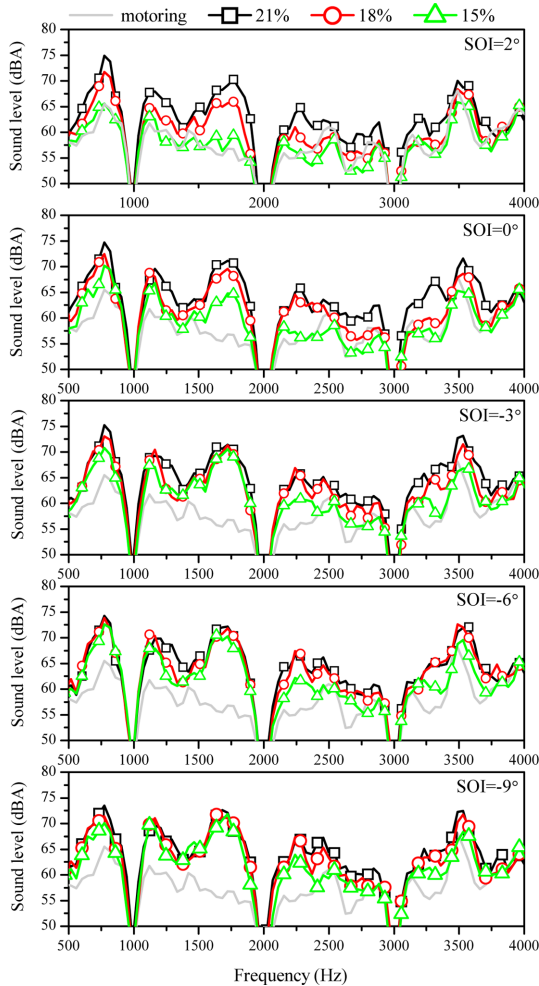


Fig. 6 Effect of oxygen ratio and start of injection timing on frequency characteristic of combustion noise

변동강도는 음의 변조주파수에 따른 인자들이며 높은 변조주파수를 사람의 귀는 거칠기로 인지하며 낮은 변조주파수에서는 변동강도로 인지하게 된다. 리프니스는 60 dB, 1 kHz 소리가 70 Hz의 변조주파와 100% 진폭 변조를 가질 때 1 asper 로 정의된다. 마찬가지로 변동 강도는 60 dB, 1 kHz 소리가 4 Hz의 변조주파와 100% 진폭변조를 가질 때 1 vacil 로 정의된다.

앞서 언급한 동력계의 영향을 제거한 소음으로부터 구해진 음질인자들이 산소비와 분사시점에 어떤 영향을 받는지 Fig. 7에 나타내었다. 라우드니스를 살펴보면 SOI = -9° 근방에서 가장 큰 소음을 발생시키는 것을 알 수 있으며 분사시점이 그 이전과 이후로 갈수록 소음이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 특히 산소비가 15%로

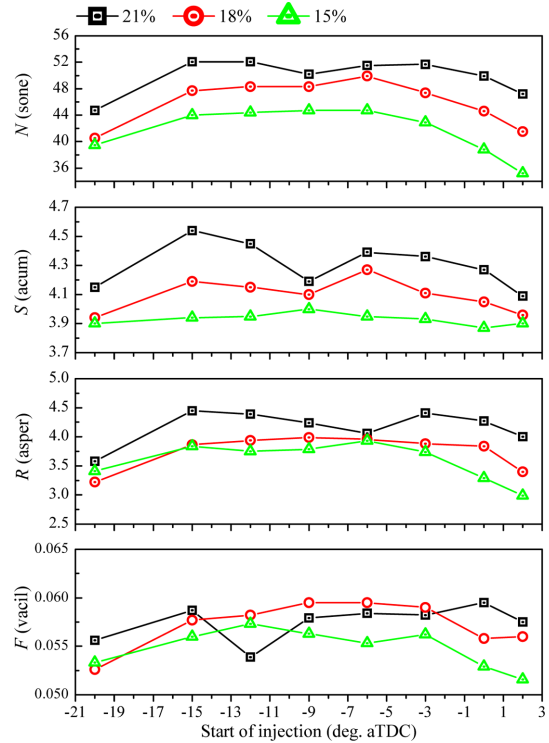


Fig. 7 Effect of oxygen ratio and start of injection timing on sound quality metrics

낮아질수록 경향이 뚜렷해졌다. 샤프니스도 라우드니스와 경향이 매우 비슷하지만 산소비 15%의 경우에는 분사시점이 크게 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. SOI = -6°에서 2로 갈수록 날카로움이 작아지는 것은 앞서 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 1~2 kHz 대역 소음은 낮아지는 반면 3 kHz 이상 대역 소음이 높아지기 때문인 것을 알 수 있다. 리프니스도 비슷한 경향을 보이기 때문에 산소비와 분사시점이 음의 거칠기에도 영향을 미치

Table 3 Correlation analysis for oxygen ratio of 21%

	MPRR		RI	
	Correlation coefficient	p-value	Correlation coefficient	p-value
N	.667	.071	.758*	.029
S	.704	.051	.722*	.043
R	.447	.267	.549	.159
F	-.110	.795	-.028	.947

** . p < 0.01, * . p < 0.05

는 것을 알 수 있지만 변동강도는 분사시점에는 크게 영향을 받지 않는 것을 알 수 있었다.

3.3 음질인자와 최대압력상승률의 상관관계

앞서 구한 최대음압상승률, RI와 음질인자와의 관계성을 알아보기 위하여 상관관계 분석을 수행하였다.

분석은 상용프로그램(IBM, SPSS 12)을 사용하였고 여기서 사용된 pearson 상관계수는 두 변수 간의 공변하는 선형적 관계를 나타내며 -1과 +1 사이에서 결정된다. 또한 p-value는 관찰된 데이터의 검정통계량이 귀무가설을 지지하는 정도를 확률로 표현한 것으로서 그 값이 작을수록 결과의 신뢰성이 높다고 할 수 있다. 결과를 Table 3부터 Table 5에 나타내었으며 모든 경우에서 최대압력상승률보다 RI가 음질인자와의 상관관계가 높았고 특히 산소비가 낮을수록 상관계수와 유의성이 모두 증가하였다. 특별히 라우드니스와 상관계수가 가장 높았으며 이는 RI가 인텐시티를 표현하는 인자이기 때문에 소리의 크기와 관련이 깊은 것으로 판단되었다. 다음으로는 샤프니스, 러프니스, 변동강도 등의 순으로 상관관계가 높았으며 산소비가 낮아질수록 상관관계는 더욱 커져 MPRR 뿐 아니라 RI가 EGR의 소음과 상관성이

매우 높은 것으로 판단되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 단기통 DI디젤엔진을 사용하여 모사 EGR 시스템을 구성한 후 산소비와 분사시점을 변경하며 실린더내부압력과 소음을 측정하였다. 측정된 실린더내부압력 데이터를 통하여 압력상승률과 열발생률을 구할 수 있었고 최대압력상승률을 사용한 ringing intensity를 구하였다. 측정된 소음은 동력계의 영향을 배제시킨 후 주파수 분석 및 음질인자를 통한 특성 분석을 실시하였다. 분석결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 흡기의 산소비가 낮아질수록 실린더내부압력의 감소와 이에 따른 소음의 저감을 확인하였고 특별히 연소에 큰 영향을 받는 1~3 kHz의 소음이 저감되는 것을 확인하였고 음질인자분석을 통해 소음크기의 저감 뿐 아니라 날카로움, 거칠기 등도 저감됨을 알 수 있었다.

2) 통계분석을 통하여 최대압력상승률보다 ringing intensity가 음질인자에 가장 밀접한 인자임을 확인하였다.

이러한 결과는 향후 엔진의 배출가스 저감 뿐 아니라 소음 저감의 기초적인 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 국토교통부 “철도 소음/진동 저감기술 개발” 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) G. Shibata, Y. Shibaie, H. Ushijima, and H. Ogawa, “Identification of Factors Influencing Premixed Diesel Engine Noise and Mechanism of Noise Reduction by EGR and Supercharging”, SAE International, No 2013010313, 2013.
- (2) H. Kanda, M. Okubo, and T. Yonezawa, “Analysis of noise sources and their transfer paths in diesel engines”, Proceedings of the 1990 Noise and Vibration Conference, No 900014, The Society of Automotive Engineers, Traverse City, Michigan, USA, 1990, pp.

Table 4 Correlation analysis for oxygen ratio of 18%

	MPRR		RI	
	Correlation coefficient	p-value	Correlation coefficient	p-value
N	.801*	.017	.870**	.005
S	.743*	.035	.796*	.018
R	.673	.067	.760*	.028
F	.595	.120	.698	.054

** . p < 0.01, * . p < 0.05

Table 5 Correlation analysis for oxygen ratio of 15%

	MPRR		RI	
	Correlation coefficient	p-value	Correlation coefficient	p-value
N	.922**	.001	.924**	.001
S	.671*	.069	.724*	.042
R	.894**	.003	.885**	.003
F	.883**	.004	.912**	.002

** . p < 0.01, * . p < 0.05

- 95~116.
- (3) W. Li, F. Gu, A. D. Ball, A. Y. T. Leung, and C. E. Phipps, "A study of the noise from diesel engines using the independent component analysis", *Mech. Syst. Signal Proc.*, Vol 15, 2001, pp. 1165~1184.
- (4) M. Selim, "Effect of exhaust gas recirculation on some combustion characteristics of dual fuel engine", *Energy Conv. Manag.*, Vol 44, 2003, pp. 707~721.
- (5) J. A. Eng, "Characterization of Pressure Waves in HCCI Combustion", SAE International, No 20020128559, 2002.
- (6) E. Zwicker and H. Fastl, "Psychoacoustics-Facts and models", 2nd ed. Berlin, Springer, 1999.
- (7) W. Aures, "Berechnungsverfahren für den sensorischen Wohlklang beliebiger Schallsignale", *Acustica*, Vol. 59, 1985, pp. 130~141.