



디젤엔진의 연소소음 음질평가용 인덱스 개발

Evaluation of Sound Quality of a Diesel Engine with Considering Masking Effect

윤 동 운* · 이 상 권† · 이 동 철** · 정 인 수**
Dong-Un Yun*, Sang-Kwon Lee†, Dongchul Lee** and Insoo Jung**

(Received June 19, 2018 ; Revised October 23, 2018 ; Accepted October 23, 2018)

Key Words : Diesel(디젤), Combustion Noise(연소음), Masking Effectiveness(마스킹 효과), Sound Quality(음질)

ABSTRACT

The present study focused on knocking noises of internal combustion engines. It was shown that the quantification of knocking noise can be calculated by considering time-frequency masking. The knocking noises were synthesized from the characteristics of diesel engine sounds. The subjective rating of these sounds was performed by a jury test. For the objective evaluation, time-frequency masking is applied to the knocking sound signals, and the modulation degree of those signals was calculated. By a correlation test, the diesel sound quality index (DSQI) was developed. The DSQI was successfully applied to the quantification of knocking noise of diesel engines.

1. 서 론

디젤엔진은 고압분사를 통해 뛰어난 연비를 가지고 있지만, 고압으로 인하여 소음이 증가한다. 특히 2회 전 당 1회 폭발하는 다기통 엔진은 진폭변조(amplitude modulation)된 충격음을 발생시킨다. 이러한 충격음을 일반적으로 디젤 노킹소음이라 불린다. 엔진으로부터 발생하는 디젤 노킹소음은 구조진동 및 방사소음으로 차량의 실내 소음으로 전달된다⁽¹⁾.

디젤엔진의 노킹소음은 엔진구조물의 공진 주파수와 관련이 있으므로 특정 주파수 밴드에서 진폭변조소음의 합이다. 진폭변조의 소음은 “까르르” 하는 소음의 특징을 가지고 있으며, 이는 차량의 승차감을 방해하는 큰 요소가 된다. 따라서 디젤 노킹소음을 평가하

기 위한 연구가 많이 진행되었다. 기존의 연구에서는 디젤의 연소소음의 특징인 진폭변조를 계산하기 위하여 협대역 변조도 분석 NBMA(narrow band modulation analysis)를 적용하여 변조정도(degree of modulation)를 계산하여 디젤노킹 평가 인덱스 DKI(diesel knocking index)로 사용하는 연구가 있었다⁽²⁾.

DKI라는 평가지수는 인간의 청각계에서 이루어지는 마스킹 효과를 고려하지 않은 지수이다. 최근 연구에서는 연소노킹지수 CKI(combustion knocking index)라는 마스킹 효과를 고려한 지수를 제시하였다⁽³⁾. 이 방법은 시간영역의 신호에서 진폭 변조 정도를 계산하여 노킹신호를 정량화하는 기술이다. 연구결과에 따르면 DKI보다 CKI가 청음평가 결과와 상관성이 높다⁽³⁾. 마스킹효과라는 것은 주파수성분이 다른 주파수에 영향을 미치는 주파수 마스킹⁽⁴⁾, 한 시간대의 마스커가 다

† Corresponding Author ; Member, Department of Mechanical Engineering, Inha University

E-mail : sangkwon@inha.ac.kr

* Department of Mechanical Engineering, Inha University

** Member, Engine Research lab., Hyundai Motor Company

‡ Recommended by Editor Jae Hung Han

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

른 시간에 영향을 미치는 시간 마스킹이 존재하고 있으며 두 마스킹은 동시에 영향을 미친다⁽⁵⁾. 그러나 CKI 기술은 동시에 영향을 미치는 것을 고려한 것이 아니라 두 마스킹 효과 중에 가장 효과가 큰 것을 사용하였다. 특히 노킹소음은 진폭변조 및 주파수 변조가 동시에 발생함으로 두 마스킹 효과를 동시에 고려해야 한다.

이 연구에서는 엔진 폭발에 기인한 저주파의 하모닉 성분의 주파수 마스킹효과와 진폭변조특성으로 발생하는 최대 음압 점에 대한 시간 마스킹효과를 고려하여 연소소음 정량화에 적용하고자 한다. 연구방법은 엔진에서 발생하는 노킹소음을 신호처리 기술을 통하여 모델링 후 합성음을 제작한다. 여기에 마스킹효과를 고려하여 진폭변조 정도를 계산한다. 다음 단계로 합성음에 대한 청음평가 결과를 시행하여 변조도와 상관도 비교를 하여 알고리즘의 유효함을 검증한다. 이 결과를 실제 엔진에 적용하기 위하여 엔진실험을 시행하였으며, 엔진의 실험 조건은 디젤 연소 노킹음이 가장 많이 발생하는 정속 조건과, 가속조건에서 실시하였다. 측정된 엔진 소음에 이 연구에서 개발된 시간-주파수 마스킹 기술을 적용하고 청음평가와의 상관성을 통하여 마스킹 효과를 검증하였다. 검증된 알고리즘을 활용하여 디젤엔진음질인덱스를 개발하였다.

2. 엔진 연소음 제작

2.1 연소음의 수학적 표현

내연기관에서 발생하는 소음은 폭발음과 폭발음의 주기의 배수인 하모닉 성분 소음, 노킹소음, 기타 배경 잡음으로 구성된다⁽⁶⁾. 이러한 소음을 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

$$P_{harmonic} = \sum_{i=1}^{order} A_i \sin(2\pi i f_i t + \phi_i) \tag{1}$$

$$P_{knock} = \sum_{i=1}^{band, freq} \sum_{j=-(n-1)/2}^{(n-1)/2} B_{i,j} \sin(2\pi(f_{b,i} + 0.5j f_i)t + \phi_{i,j}) \tag{2}$$

$$P_{noise} = C * WN \tag{3}$$

여기서

$$C = \frac{P_{harmonic,RMS}}{\sqrt{SNR}} \tag{4}$$

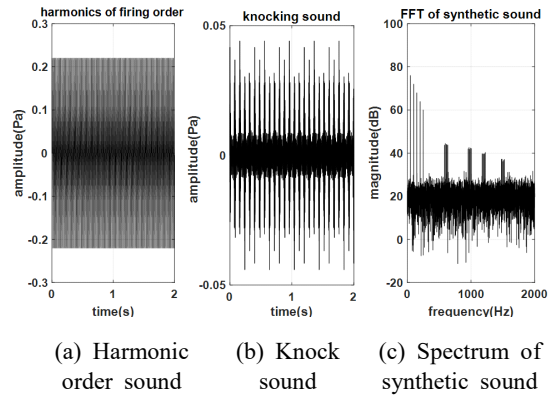


Fig. 1 Spectra for the synthetic combustion sound

$$P_{syn,knock} = P_{harmonic} + P_{knock} + P_{noise} \tag{5}$$

식 (1)에서 A_i 는 하모닉 성분진폭이며, B_{ij} 노킹성분의 진폭이다. ϕ_i 는 위상을 나타낸다. 하모닉성분은 폭발음에 대한 하모닉 개수(order)의 사인파의 합성으로 나타낼 수 있다. 폭발 주파수는 $f_i = r/min/60$ Hz로 결정된다. 노킹소음은 0.6 kHz ~ 4 kHz의 특정밴드 부분에서 엔진구조물의 공진으로 발생되며 진폭 및 주파수 변조신호이다. 이때 변조 주파수는 $f_i/2$ 이다. 노킹 소음은 이러한 변조 주파수의 N 개의 합으로 표현한다. N 이 많을수록 modulation depth가 커지므로 노킹이 큰 소음으로 들린다. 배경 소음은 랜덤 신호를 사용하며 크기는 SNR(signal to noise ratio)로 표현한다.

2.2 연소음의 시뮬레이션

측정 연소음을 직접 적용한 경우 노킹소음의 특성을 파악하기 어려움으로 합성음을 활용하여 노킹소음에 대한 하모닉 소음의 마스킹 효과를 파악할 수 있다. 따라서 연소음을 시뮬레이션하기 위해서 2.1에서 제시한 수식을 이용하여 하모닉 소음, 노킹소음 등을 제작하고 배경 소음을 추가하여 합성음을 만들어 주파수 분석을 시행하면 Fig. 1과 같다.

3. 시간-주파수 마스킹 이론

3.1 주파수 마스킹

주변소음이 많은 공간에서 대화하는 경우 상대방의 소리가 잘 들리지 않는다. 이것은 상대방의 소리가 주변소음에 의해서 묻혀 버리기 때문인데 이러한 현상을

마스킹 효과라 한다⁽⁷⁾. 주파수 마스킹에 대한 다양한 연구결과가 존재하지만 이 연구에서는 Terhardt⁽⁸⁾의 이론을 적용한다. Terhardt의 이론은 다음과 같다.

$$L_{E,n}(f) = L_n - s(z_n - z_f) \tag{6}$$

$$z = 13 \arctan [0.76(f/\text{kHz})] + 3.5 \arctan [(f/7.5\text{kHz})^2] \text{Bark} \tag{7}$$

$$s = 27 \text{dB/Bark}, f \leq f_n \tag{8}$$

$$s = [-24 - (0.23\text{kHz}/f_n) + (0.2L_n/\text{dB})] \times \text{dB/Bark}, f > f_n \tag{9}$$

여기서 L_n 은 n 번째 주파수에서의 마스크를 나타내며, $L_{E,n}$ 은 n 번째 마스크의 마스킹 곡선을 나타낸다. z 는 Bark를 나타낸다. 전체 마스킹 효과는 각 주파수에서의 마스크효과의 합으로 나타나며 다음과 같다.

$$P(f) = \int_{-\infty}^{\infty} p(t) \exp(-j2\pi ft) dt \tag{10}$$

$p(t)$ 는 엔진 연소음을 나타내며, $P(f)$ 는 연소음의 주파수 성분을 나타낸다. 연소소음에 대한 SPL(sound pressure level)은 다음과 같다.

$$L(f) = 20 \log_{10} \left(2 \frac{|P(f)|}{p_{ref}} \right), f = 0, \dots, fs/2 \tag{11}$$

최종적으로 마스킹된 음압은 다음과 같다.

$$LX(f) = L(f) - 10 \log_{10} \left[\sum_{\substack{n=1 \\ n \neq f}}^N 10^{L_{E,n}(f)/20\text{dB}} \right] + 10^{L_{TH}(f)/\text{dB}} + I \tag{12}$$

L_{th} 는 청각곡선이며, I 는 노이즈 레벨이다. LX 는 마스킹 된 SPL이다.

Fig. 2는 연소를 시뮬레이션 기법을 통하여 시뮬레이션된 연소음 4개에 대한 주파수 마스킹을 적용한 결과를 나타낸다. Fig. 2(a), (b), (c), (d)의 차이는 엔진의 속도가 1500 r/min, 2500 r/min, 3500 r/min, 4500 r/min으로 증가함에 따라서 변화하는 소음 신호이다. 저주파 하모닉 성분과 노킹소음이 변화함을 나타내며, 각각의 하모닉 성분이 노킹소음을 마스킹하는 문지방(threshold) 값의 변화를 볼 수 있다.

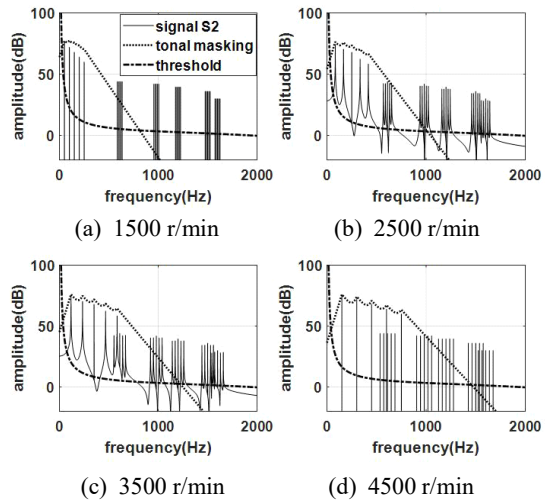


Fig. 2 Frequency masking for the synthetic combustion sounds

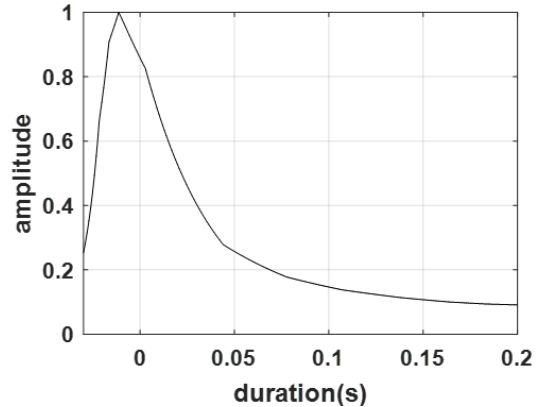


Fig. 3 Model of temporal masking curve

3.2 시간 마스킹

시간 마스킹 효과는 선(pre masking) 마스킹 후 마스킹(post masking) 기술이 있다. 이 연구에서는 일반적으로 Zwicker⁽⁹⁾의 선-후 마스킹 곡선을 사용하며 마스킹 곡선은 Fig. 3과 같다.

시간 마스킹 곡선을 사용하여 주파수 마스킹된 노킹 신호만을 적용한 결과 Fig. 4와 같다.

4. 청음평가

디젤 노킹소음에 대한 주관적 평가 방법으로 변조도 (degree of modulation)가 적용되어 왔다⁽¹⁰⁾. 그러나 마스킹 효과를 고려하지 않음으로 청음평가 결과와 상관

도가 낮았다. 따라서 추가적인 가중치가 필요하며 이 가중치는 엔진 운전 조건에 따라서 변함으로 실제 사용에 정확도가 낮다. 이 연구에서는 시간-주파수 마스킹 방법을 적용한 신호의 변조도를 구하여 객관적 지수로 사용하고자 한다. 따라서 합성음에 대한 청음평가 결과와 변조도의 상관성을 구하면 Fig. 5와 같다. 청음평가 방법은 rating 방법^(11,12)을 사용하였으면 참가 인원 남녀 합계 30명이다. 청음평가치의 상하 값은 편차를 나타낸다.

이 결과에 의하면 마스킹을 고려하지 않은 것파 주파수 마스킹만 고려한 방법보다 시간-주파수 마스킹을 동시에 고려한 방법이 청음평가와 상관도가 높

음을 알 수 있다.

5. 디젤엔진 노킹 소음 개관적 평가

5.1 엔진소음 측정 및 실험 조건

이 객관적 평가방법을 실제 디젤엔진에 적용하기 위해서 4기통 디젤엔진을 무향실에 설치하고 엔진엔진부터 1 m 거리에서 음압을 측정하고 측정된 음압에 대하여 시간-주파수 마스킹을 취한 후에 신호에 대한 변조도를 측정하였다. 청음평가는 4장에 참가한 동일한 인원 및 방법으로 주관 평가를 시행하였으며, 주관적 평가를 실행하여 변조와의 상관성을 구하였다. 엔진의 운전 조건은 1250 r/min, 1500 r/min, 1750 r/min에서의 정속 조건과 준 가속으로 엔진을 가속하는 경우를 선택한다. 준가속 조건의 경우 엔진에 걸리는 부하를 기준하여 LTI(light tip input), MTI(middle tip input) 두 조건으로 시행하였다. 이 두 조건에서 디젤엔진의 노킹소음이 발생한다. LTI의 경우는 완가속 조건으로서 1200 r/min, 1400 r/min, 1600 r/min, 1800 r/min, 2200 r/min, 2400 r/min에 대해서 청음평가를 실시하였다. 각 운전 조건에 사용된 청음평가용 데이터의 시간은 3초이다. Fig. 6은 청음평가 결과를 엔진 가속 조건에 따라서 표시하였다. 실선은 LTI 조건이고 점선은 MTI 조건이다.

엔진의 속도에 따른 음압증가 효과를 반영하기 위해서 마스킹된 변조도에 디젤 노킹소음이 발생하는 구간에 음압을 고려하여 실제 엔진에 적용하기 위한 DSQI (diesel sound quality index)를 개발하였다.

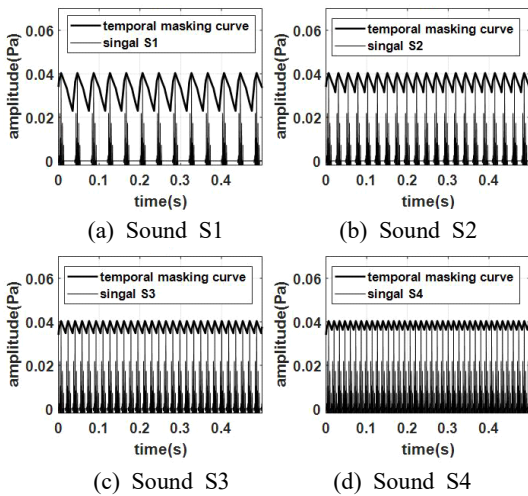


Fig. 4 Temporal masking for the synthetic knocking sound

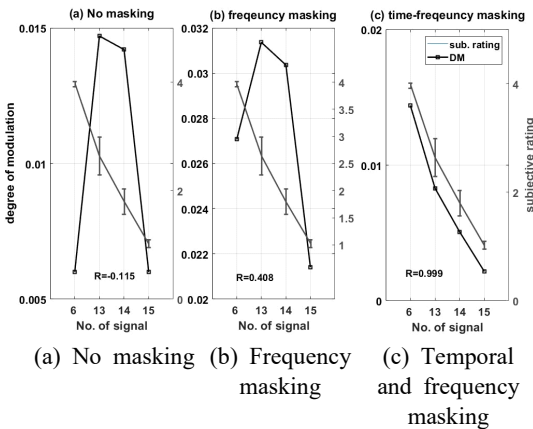


Fig. 5 Correlation between subjective rating and the degree of modulation

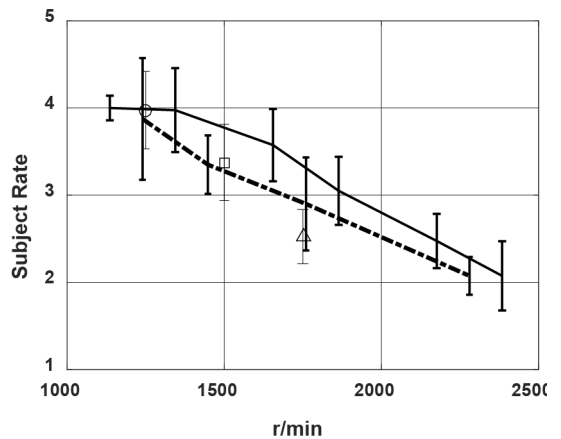


Fig. 6 Subjective rate versus engine speed (r/min)

6. 결 론

이 연구는 디젤엔진의 고압 연소압력으로 인하여 발생하는 디젤 노킹연소음에 대한 객관적 음질평가 방법을 연구하였다. 일반적으로 종래에 사용되는 객관적 평가법은 노킹 연소음에 대한 변조도를 이용하는 것이다. 그러나 기존 방법은 소음에 대한 마스킹 효과를 고려하지 않은 방법으로 실제 인간이 청감평가를 통해서 얻는 결과와 상관성이 부족하다. 따라서 새로운 가중치를 주어서 상관도를 높이는 방법을 취하지만 이 연구에서는 마스킹을 고려한 변조도를 구하여 객관적 평가 지수로 활용하였다. 이러한 연구를 진행하기 위해서 디젤엔진으로부터 발생하는 소음신호가 필요하며 신호처리 기술을 이용하여 연소음에 대한 합성 신호를 제작하였다.

합성 신호에 대한 노킹음질에 대한 주관적 청음평가를 시행하였으며 객관적 평가를 위한 마스킹 고려한 변조도를 구하기 위해서 시간-주파수 마스킹 알고리즘을 개발하였다. 합성음에 대한 마스킹 고려된 변조도는 청음평가 결과와 상관성이 높은 결과를 얻었다. 따라서 이 알고리즘을 실제 엔진에서 측정된 소음에 적용하여 디젤엔진 음질평가용 인덱스를 개발하고 청음평가를 통하여 높은 상관도를 검증하였다. 이 연구결과는 향후 디젤엔진의 음질 개발과 차량의 실내 음질 평가에 사용될 수 있다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 및 현대자동차의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2015R1A2A1A15052549, No. 2016R1A2B2006669).

References

- (1) Pruvost, L., Leclère, Q. and Parizet, E., 2009, Diesel engine Combustion and Mechanical Noise Separation Using an Improved Spectrofilter, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 23, No. 7, pp. 2072~2087.
- (2) Sauvage, O., Laurac, A., Bezat, M., Roussarie, V. and Guillemain, P., 2012, Diesel Knock Noise From

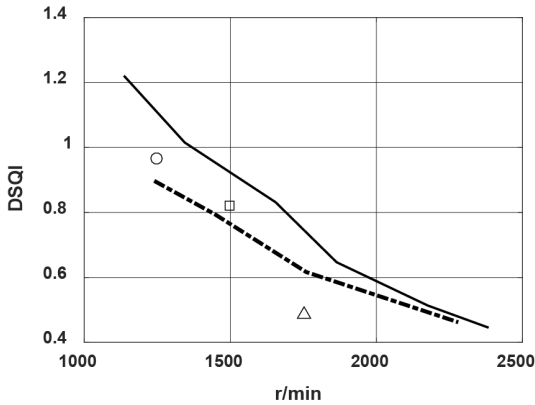


Fig. 7 Objective rate versus engine speed (r/min)

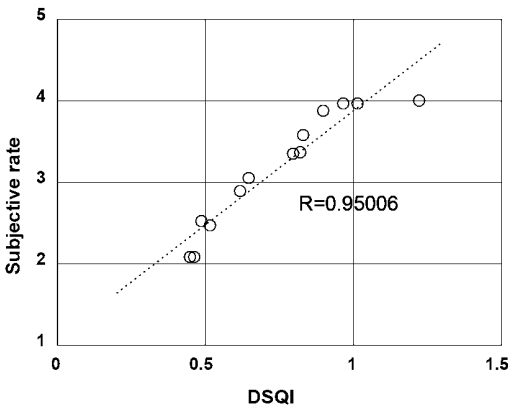


Fig. 8 Correlation between objective rate and subjective rate (DSQI)

$$DSQI = DM \cdot L \Big|_{f_i}^f \quad (13)$$

여기서 DM은 시간-주파수 마스킹이 고려된 변조도 (degree of modulation)이다. 그리고 L은 음압레벨이다. 개발된 DSQI를 이용하여 청음평가에 사용된 측정된 신호를 이용하여 DSQI를 구하여 엔진 속도 (r/min)와 비교하여 객관적 평가를 시행하면 Fig. 7과 같다.

주관적인 평가와 객관적인 평가에 대한 상관성을 구하면 Fig. 8과 같이 매우 높은 상관도를 가진다. 객관적인 평가법에 의하면 DSQI를 이용한 예측된 주관 값이 실제 청음평가를 통하여 얻은 결과와 유사하다.

이상의 95% 이상 높은 상관도는 이 연구방법을 이용한 디젤노킹 소음에 대한 객관적 평가법은 상당한 신뢰성이 있으면 향후 디젤엔진 노킹소음 평가에 유용하게 사용할 수가 있다.

Combustion Phenomenon to Perceived Signals, Proceedings of the Acoustics 2012 Nantes Conference, Nantes, France, pp. 1039~1044.

(3) Graf, B., Brandl, S., Sontacchi, A. and Girstmair, J., 2013, Objective Parameters for Engine Noise Quality Evaluation, *Auto Tech Review*, Vol. 2, No. 8, pp. 38~43.

(4) Sellerbeck, P., Nettelbeck, C., Heinrichs, R. and Abels, T., 2007, Improving Diesel Sound Quality on Engine Level and Vehicle Level – A Holistic Approach, *SAE Technical Paper*, Vol. 2007-01-2372. doi: 10.4271/2007-01-2372.

(5) Palmer, A. R., 1987, Physiology of the Cochlear Nerve and Cochlear Nucleus, in *Hearing*, edited by M.P. Haggard and E.F. Evans, Churchill Livingstone, Edinburgh.

(6) Lee, S. K., 2008, Objective Evaluation of Interior Sound Quality in Passenger Cars During Acceleration, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 310, No. 1-2, pp. 149~168.

(7) Moore, B. C. J., 1998, *Cochlear Hearing Loss*, Whurr Publishers, London.

(8) Terhardt, E. and Stoll, G., 1982, Algorithm for Extraction of Pitch and Pitch Saliency from Complex Tonal Signals, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 71, No. 3, 679~688.

(9) Fastl, H. and Zwicker, E., 2007, *Psychoacoustics: Facts and Models*, 3rd edition, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

(10) Necciari, T., Kronland-Martinet, R., Ystad, S., Laback, B., Savel, S. and Meunier, S., 2001, Auditory Time-frequency Masking: Psychoacoustical data and Application to Audio Representations, in *Speech, Sound and Music Processing: Embracing Research in India*, CMMR 2011, FRSM 2011. Lecture Notes in Computer Science, edited by Ystad S., Aramaki M., Kronland-Martinet R., Jensen K. and Mohanty S., pp. 146~171, Springer, Berlin, Heidelberg.

(11) Otto, N., Amman, S., Eaton, C. and Lake, S., Guidelines for jury evaluations of automotive sounds, *SAE Technical Paper*, Vol. 1999-01-1822, doi: 10.4271/1999-01-1822.

(12) Kim, E. Y., Jang, J. U. and Lee, S. K., 2012, Tonality Design for Sound Quality Evaluation for Gear Whine Sound, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 22, No. 12, pp. 1172~1183.



Dong-Un Yun is a graduate student in Department of Mechanical Engineering at Inha University. He has studied for active sound design and active sound quality for the passenger car.



Sang-Kwon Lee received a Ph.D. degree on Sound and vibration Signal Processing Group at the ISVR in University of Southampton UK. He is currently the professor in the Department of Mechanical Engineering Inha University, Incheon, Korea.



Dongchul Lee studied mechanical engineering at Hanyang University for Master of Science. Since 2004 he has been working for Hyundai Motor Company. He became a senior research engineer in 2011. He is working on sound quality, deep learning based on NVH big data and NVH control.



Insoo Jung studied mechanical engineering at Pusan University for Master of Science. Since 1993 he has been working for Hyundai Motor Company. He became a research fellow in 2015. He is working on sound quality, NVH control and engine condition diagnosis based on big data and deep learning.