

럼블링 음질 인덱스와 음질요소 관계 규명 Development of Rumbling Index and its Identification

이상권* · 김병수** · 박동철**

Sang-Kwon Lee, Byung-Soo Kim and Dong-Chul Park

Key Words : car, rumbling index, neural, roughness, loudness

ABSTRACT

Rumbling sound is one of the most important interior sound of a passenger car. The conventional rumbling noise research was focused on the reduction of the A-weighted sound pressure level. However A-weighted sound pressure level can not give the whole story about the rumbling sound of a passenger car. In this paper, we employed sound metric which is the subjective parameter used in psychoacoustics. According to recent research results, the relation between sound metrics and subjective evaluation is very complex and has nonlinear characteristics. In order to estimate this nonlinear relationship, artificial neural network theory has been applied to derivation of sound quality index for rumbling sound of a passenger car.

1. 서 론

자동차 실내에서 발생하는 소음에는 부우밍 소음(booming noise), 럼블링 소음(rumbling noise), 기어 소음(gear noise), 엔진 소음(engine noise), 타이어 소음(tire noise), 풍절음(wind noise)등이 있다.⁽¹⁾ 그 중 럼블링 소음은 일반적으로 200~500Hz 의 주파수 대역에서 발생된다. 주로 간격이 엔진 회전수의 1/2 오더(half order)인 연속된 3 개의 오더 성분에 의해 발생되며 15~35Hz 의 변조 주파수를 갖는 진폭 변조를 일으킬 때 심한 럼블링 소음을 발생시킨다.^(2,3) 최근까지 럼블링 소음에 대한 연구는 실내 dBA(A-weighted sound pressure level)를 줄이는데 주안점을 두었다. 그러나 dBA 만으로 운전자의 소음에 대한 느낌을 나타내는데 불충분하기 때문에 음질(sound quality)에 대한 연구가 이루어 지고 있다.^(4,5) 음질 평가는 보통 청음 실험을 통한 주관적 평가를 하는데 이는 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 그런데 소리에 대한 사람의 느낌이 주관적이라 할지라도 어떤 공통된 특성을 나타내는데, 이를 정량적으로

측정하는 분야가 심리음향학(psychoacoustics)이다.⁽⁶⁾ 심리음향학에서 표현하고 있는 음질 요소에는 소리에 대한 주관적 크기를 나타내는 라우드니스(loudness), 소리의 날카로움을 나타내는 샤프니스(sharpness), 거칠기를 의미하는 러프니스(roughness), 소리의 크기변화에 따른 느낌을 표현하는 변동강도(fluctuation strength)등이 있으며 이를 음질 매트릭스(sound metrics)라고 한다. 음질 매트릭스와 주관적 평가와의 관계는 비선형적이며, 이러한 특성을 해석하기 위해 신경회로망(artificial neural network) 이론이 음질분석에 사용되고 있다.^(7,8) 본 연구에서는 럼블링 소음에 대한 인덱스(index)를 개발하기 위해 신경회로망 이론을 사용하였다. 신경회로망의 입력 값으로 음질 매트릭스를 사용하고, 목표값(target)으로 청음평가 실험을 통해 계산된 평균치를 적용하였다. 학습과정(training)을 통하여 최적화된 신경회로망은 자동차 럼블링 소음에 대한 주관적 평가를 객관화하여 사용 될 수 있다.

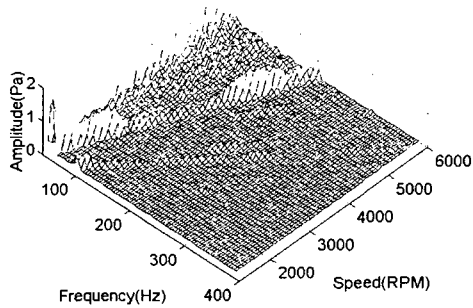
2. 럼블링 소음 신호 제작

신경회로망의 학습과정은 많은 데이터를 필요로 한다. 그러나 학습과정에 필요한 자동차 소음 데이터를 얻기에는 많은 시간이 걸리며 다양한

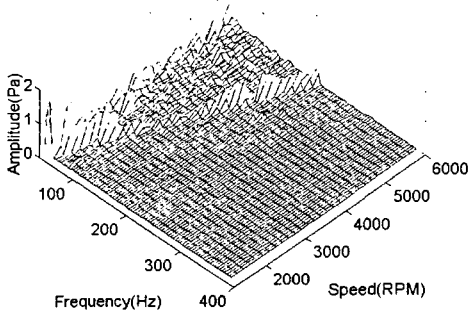
* 책임저자, 정회원, 인하대학교 기계공학과 교수
E-mail: sangkwon@inha.ac.kr

Tel:(032)860-7305, Fax:(032)868-1716

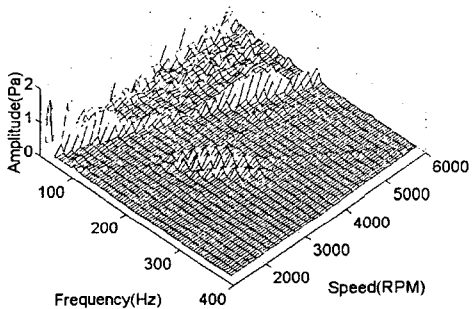
** 현대자동차 연구소 기능시험 2팀



(a) Original sample car



(b) Sample car without the 3.5, 4, 4.5 order



(c) Synthesized rumbling signal

Fig. 1 The process of making rumbling sound

크기와 속도에서 발생하는 럼블링 소음을 획득하기는 어렵다. 따라서 본 논문에서는 인공적으로 럼블링 소음을 제작하였다. Fig. 1은 럼블링 신호 제작 과정을 보여준다. Fig. 1의 (a)는 본 논문에서 럼블링 신호를 만드는데 사용한 샘플차량이며 직렬 4기통 엔진을 장착하고 있다. Fig. 2

의 (b)는 칼만적응필터(kalman adaptive filter)를 이용하여 엔진 회전수의 3.5, 4, 4.5 차 오더 성분을 제거한 형태이다. 이 신호를 럼블링 신호를 만드는데 배경소음(background noise)으로 사용하였다. Fig. 1의 (c)는 4기통 엔진 회전수의 3.5, 4, 4.5 차 성분을 럼블링 소음이 발생하도록 만들어서 Fig. 1의 (b)에 해당하는 배경신호에 더한 합성신호다. 이러한 합성신호를 만드는데 고려된 인자는 럼블링 발생 4차 오더 성분의 크기, 4차 성분과 3.5·4.5차 성분과의 크기차, 발생 RPM 위치, 발생 RPM 구간의 폭 등 4가지다. Fig. 2는 4차 성분을 만드는 과정을 나타낸다. Fig. 2의 (a)는 주파수가 4차 성분과 같이 증가하는 신호이고 (b)는 첫번째 그림을 확대한 것으로 식(1.a)로 표현된다. 3.5, 4.5차 성분도 Fig. 2와 같은 방법으로 만들며 식(1.b)와 (1.c)로 표현된다.

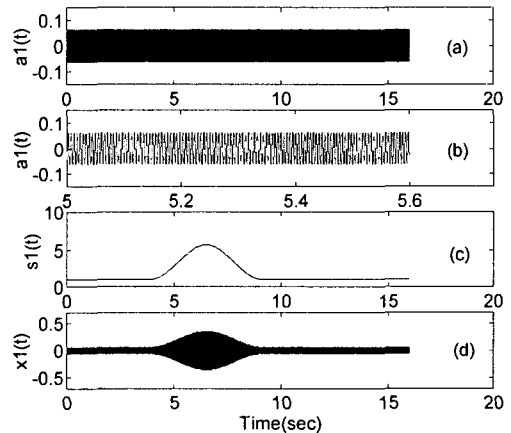


Fig. 2 The process of making the fourth order

$$a_1(t) = |a_1(t)| e^{j\theta_1(t)}, \quad 0 \leq t \leq 16 \quad (1.a)$$

$$a_2(t) = |a_2(t)| e^{j\theta_2(t)}, \quad 0 \leq t \leq 16 \quad (1.b)$$

$$a_3(t) = |a_3(t)| e^{j\theta_3(t)}, \quad 0 \leq t \leq 16 \quad (1.c)$$

샘플신호의 크기를 고려하여 $|a_1(t)|$ 은 0.0632로 하였다. 그리고 $|a_2(t)|$ 과 $|a_3(t)|$ 의 크기는 0.02로 동일하게 하였다. 샘플신호 4, 3.5, 4.5차 성분의 순간 주파수는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$f_1(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi_1(t)}{dt} \quad (2.a)$$

$$f_2(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi_2(t)}{dt} \quad (2.b)$$

$$f_3(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi_3(t)}{dt} \quad (2.c)$$

다양한 종류의 럼블링 소음을 만들기 위해서 Fig. 2 의 (c)와 같은 $S_1(t)$, $S_2(t)$ 를 정현파(sinusoid) 신호

를 이용하여 식(3)과 같이 만든다.

$$S_1(t) = A_j \cos[\omega_k(t-t_i) - \pi] + A_j + 1, \quad t_i \leq t \leq t_i + \frac{2\pi}{\omega_k}$$

$$S_2(t) = B_{j,m} \cos[\omega_k(t-t_i) - \pi] + B_{j,m} + 1, \quad t_i \leq t \leq t_i + \frac{2\pi}{\omega_k}$$

$$S_1(t) = S_2(t) = 1, \quad \text{otherwise}$$

식(3)에서 $A_j, B_{j,m}$ 은 4 단계로써 4 차 성분의 크기를 결정하고, t_i 는 3 단계로써 럼블링 소음의 발생 위치, ω_k 는 3 단계로써 발생 구간의 폭, Q_m 은 4 차 성분과 3.5, 4.5 차 성분과의 크기차를 결정하는 변수 값이다. 마지막으로 식(1)의 신호들과 식(3)의 $S_1(t)$, $S_2(t)$ 를 곱하여 식(5)와 같이 직렬 4 기통 엔진의 4, 3.5, 4.5 차 성분을 만든다. 여기서 r 은 다음과 같이 정의된다

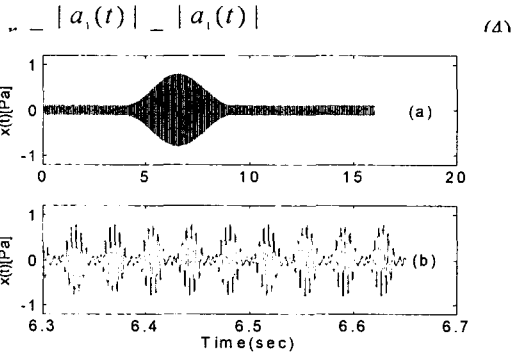


Fig. 3 Characteristic of synthesized rumbling signal

Fig. 3 의 (a)는 4, 3.5, 4.5 차 성분을 더한 신호이며 식(6)과 같이 표현된다. Fig.3 의 (b)는 (a)의 그림을 확대한 것으로 신호가 진폭 변조됨을 보여준다.

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) + x_3(t) \quad (6)$$

Fig. 2와 Fig. 3과 같은 방법으로 만들어진 $x(t)$ 를 Fig. 1 의(b)에 더함으로써 최종적인 럼블링 신호가 만들어 진다. 이러한 방법을 5, 4.5, 5.5 차 성분에도 적용하였다. 만들어진 모든 신호 중 150 개의 신호를 선택하여 청음 평가 실험에 사용하였다. 변수 값은 Table 1에 나타내었다.

Table. 1 Parameters used in making rumbling signal

A_i (SPL)	t_i (RPM)	$\omega_k/2\pi$ (Δ RPM)	$Q_m(\Delta$ dB)
1.08 (80dB)	3.94sec (2500RPM)	0.29Hz (1000RPM)	1 (0dB)
2.31 (85dB)	7.39sec (3500RPM)	0.19Hz (1500RPM)	1.58 (4dB)
4.5 (90dB)	10.83sec (4500RPM)	0.14Hz (2000RPM)	2.24 (7dB)
8.39 (95dB)		M)	3.16 (10dB)

3. 청음 평가 실험

3.1 실험방법

청음 평가에 사용된 총 신호의 개수는 Fig. 1과 같은 방법으로 만든 합성신호 150 개와 가공되지 않은 16 개의 자동차 신호를 합하여 총 166 개가 사용되었다. 실험 인원은 20 대 남녀로써 남성이 17 명, 여성 4 명으로 총 21 명이 실험에 참가하였다. 신호는 RME 사운드카드(sound card)를 거쳐 파워앰프(power amplifier)와 이퀄라이저(equalizer)로 이루어진 Head acoustics사의 재생 시스템(playback system)을 통하여 헤드폰(headphone)으로 전달된다. 점수 평가는 자동차 회사에서 일반적으로 사용하는 4-9 점 방식을 사용하였다. 점수가 높을수록 음질이 우수함을 의미하므로 럼블링이 심한 차일수록 낮은 점수를 받게 된다. 신호의 재생 및 평가는 실험자가 직접 제어할 수 있도록 하여 원하는 만큼 반복 재생이 가능하도록 하였다.

3.2 청음 실험결과

Fig. 4는 166 개의 신호에 대한 21 명의 주관적 평가 값인 3486 개의 데이터를 나타낸다. 1 번에서 150 번까지는 청음실험 평균값을 기준으로 재배열된 합성신호이며, 151 번부터 166 번까지는 가공되지 않은 실차 신호이다. Fig. 5는 각각의 신호에 대한 청음실험 평균값과 95% 신뢰 구간을 나타낸다. 전체 신호에 대한 평균 신뢰구간은 ± 0.18 이다. 그리고 합성신호에 대한 평균 신뢰구

간은 ± 0.17 이며 실차에 대해서는 ± 0.19 이다.

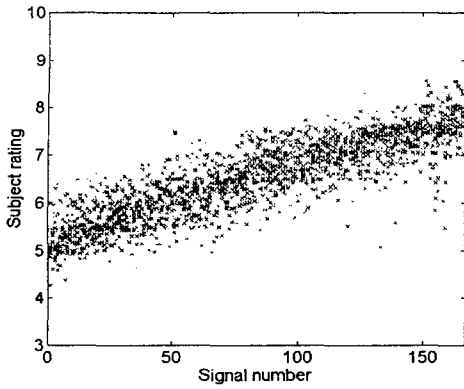
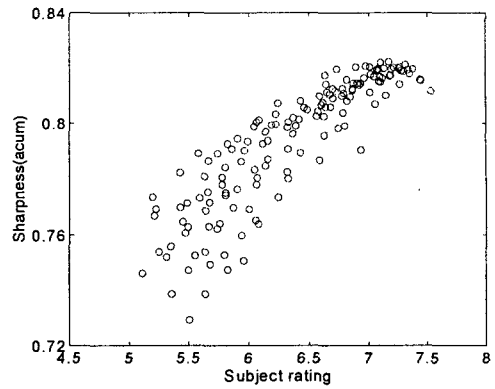


Fig. 4 All subjective ratings for 166 signal



(b) Relation between sharpness and subject rating

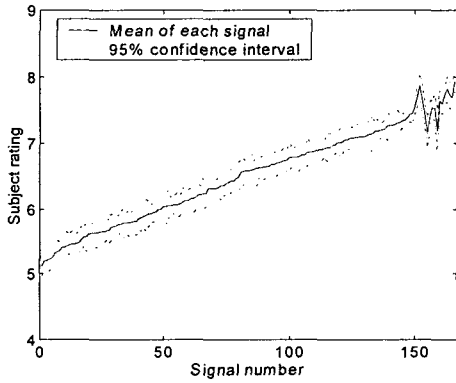
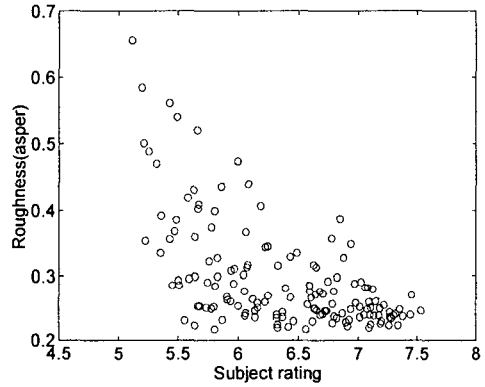
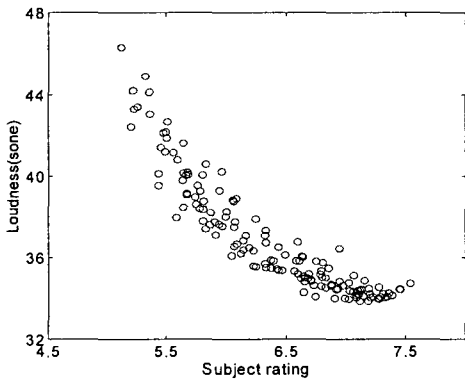


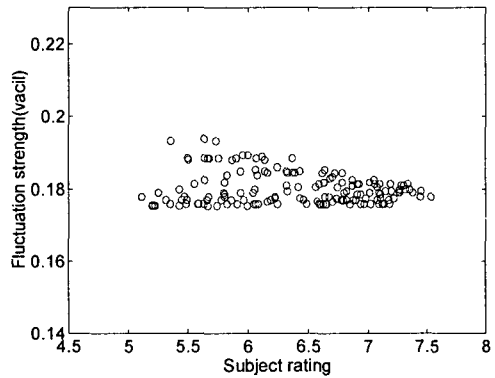
Fig. 5 Mean value and 95% confidence interval



(c) Relation between roughness and subject rating



(a) Relation between loudness and subject rating



(d) Relation between fluctuation and subject rating

Fig. 6 Relation between sound metrics and subjective evaluation

Fig. 6 는 청음 평가 평균값과 음질 메트릭스의 관계를 나타낸다. Fig.5 (a), (b), (c)에서 알 수 있듯이 청음 평가에 대해 라우드니스는 비선형적으로 반비례 하고 샤프니스는 비례하며 러프니스는 반비례하는 경향이 있음을 알 수 있다. Fig.5 의 (d)를 보면 변동강도는 큰 관계가 없음을 알 수 있다. 이에 따라 라우드니스, 샤프니스, 러프니스를 신경회로망의 입력 값으로 사용하였다.

4. 신경회로망을 이용한 인덱스 개발

입출력 관계가 복잡한 문제를 해석하기 위해서는 일반적으로 Fig. 7 과 같은 다층 신경회로망을 사용하며 다음과 같이 표현된다.

$$Y = f^3(W^3 f^2(W^2 f^1(W^1 X + b^1) + b^2) + b^3) \quad (7)$$

식(7)에서 $X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_p]^T$ 는 입력벡터, $Y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n]^T$ 는 출력 벡터, f 는 전달함수(transfer function), W 는 가중치(weight) 행렬을 나타낸다.^(9,10)

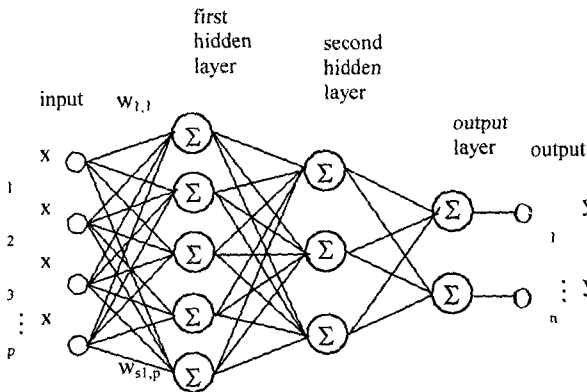


Fig. 7 Schematic of multilayer neural network

신경회로 망을 이용한 음질 인덱스는 각 음질 요소들의 비선형관계에 대한 식 (7)의 W 를 구하는 과정이다. 본 연구에서는 12 개의 뉴런(neuron)을 갖는 은닉층(hidden layer)과 1 개의 뉴런을 갖는 출력층(output layer)으로 구성된 2 층(two layer) 신경회로망을 구현하였으며 역전파(backpropagation) 알고리즘을 사용하였다. 신경회로망의 입력 값으로 라우드니스, 샤프니스, 러프니스가 사용되었고 목표 값으로 청음실험 평균치가 적용되었다. 166 개의 신호 중에 합성신호의 반인 75 개는 신경회로망의 학습과정

(Training)에 사용하였고, 나머지 75 개는 결과의 증명(validation)에 사용하였다. 그리고 실차 신호 16 개는 실제 실험(Test)에 적용하였다. 이것에 대한 결과들을 보면 Fig. 8 의 (a)는 청음실험 평균값이고 (b)는 최적화된 신경회로망을 이용하여 계산된 출력 값이며 (c)는 두 값의 비교를 나타낸다. 이 결과를 선형 관계식(Linear regress)을 이용하여 상관도를 구하면, 청음실험 평균치와 신경회로망의 출력 값은 Fig. 9 에서와 같이 95.6%의 상관관계를 나타내었다.

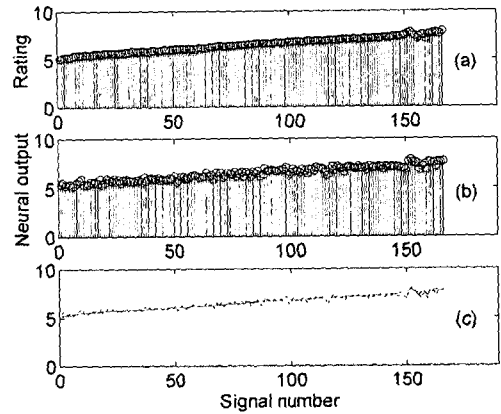


Fig. 8 Comparison between neural output and subjective Evaluation for 166 signals

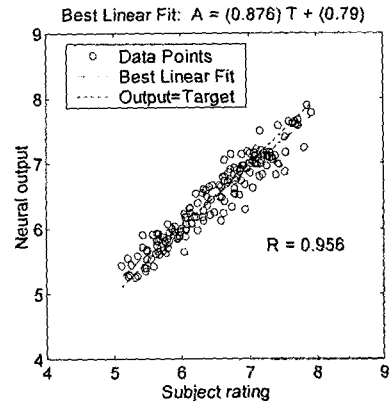


Fig. 9 Correlation between neural output and subjective evaluation for 166 signals

앞에서 구현된 신경회로망을 이용한 범블링 인덱스의 유용성을 검증하기 위해 16 개의 양산 차량에 적용하였다. 직렬 4 기통 엔진, V6 엔진, V8 엔진을 장착한 차량을 각각 다른 모양으로 나타내었다. 16 개의 양산 차량에 대한 주관적 평가 값과 신경

회로망의 출력 값과의 상관관계는 Fig. 10 과 같이 82.3%를 나타내었다. 또한 음질 인덱스에 대한 음질요소와의 관계는 Fig.11 과 같이 나타낼수 있다.

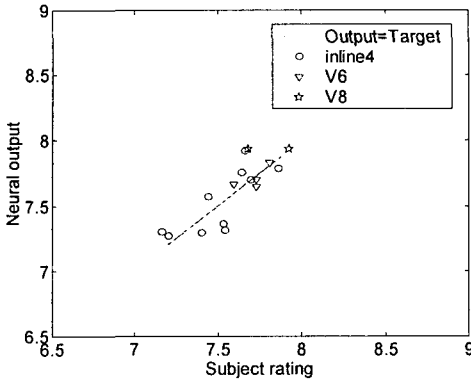


Fig.10 Comparison between neural output and subjective evaluation for 16 real cars

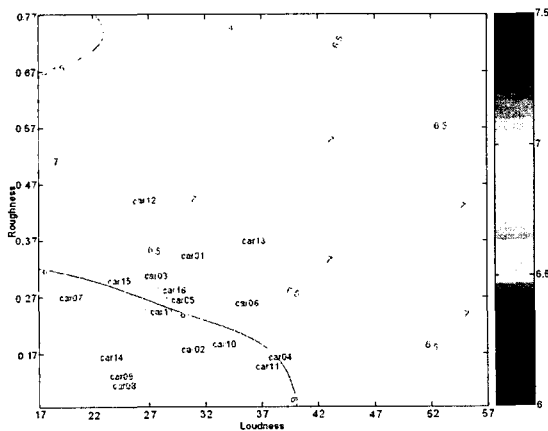


Fig.11 relation between sound index and sound metrics for 16 real cars

참 고 문 헌

- (1) 정승균, 1998, "승용차의 진동소음 평가 및 개선 방법" 한국소음진동공학회지, 제 8 권 1 호, pp.3-8 .
- (2) 이상권, 최병욱, 여승동, 1993, "차량의 실내소음 저감 및 음질 향상을 위한 Power Plant 진동 개선에 관한 연구", 한국 자동차 공학회 논문집, 제 1 권 제 2 호, pp. 77~88.
- (3) Wakita, T., et.al, 1989, "Objective Rating of Rumble in Passenger Compartment During Acceleration", SAE891155.
- (4) Witer, S. J. and Lim, T. C., 1999, "Crankshaft Rumble Noise Phenomenon: Experimental Characterization of Source Strength and Path Response", SAE1999-01-1770
- (5) Murata, H., Tanaka, H., Takada. H. and Ohsasa, Y., 1993, Sound Quality Evaluation of Passenger Vehicle Interior Noise. *Society of Automotive Engineering*, SAE931347.
- (6) Zwicker, E. and Fastl, H., 1999, *Psychoacoustics: Facts and Models*. Springer-Verlag, Berlin, 2nd Edition.
- (7) Davies, P. and Laux, P. D., 2000, "Artificial Neural Network Modeling of Human Response to Synthesized Machinery-Like Sound", Proc. *The 7th International Congress on Sound and Vibration*, Garmisch-Partenkirchen, Germany, pp.2461-2468.
- (8) Lee, S. K., Chae, H. C, Park, D. C. and Jung, S. G., 2002, "Sound Quality Index Development for the Booming Noise of Automotive Sound Using Artificial Neural Network Information Theory", *Sound Quality Symposium 2002*.
- (9) Hagan, M.T. and Demuth, H. B. and Beale, M., 1996, *Neural Network Design*, PWS Publishing Company, Boston.
- (10) Bishop, C. M., 1995, *Neural Networks for Patten Recognition*. Oxford University Press.
- (11) Park, D. C, Back, H. G and Jung, S. G. 2003, "An Analysis of Rumble Noise in Passenger Vehicle Compartment", *Internoise2003*, Jeju, Korea