

# 승용차 과도음에 대한 럼블링 음질 인덱스 개발 Transient Rumbling Index Development of Sound Quality on a Passenger Car

김 병 수\*·이 상 권\*\*·박 동 철\*\*\*·정 승 균\*\*\*  
Byung-Soo Kim, Sang-kwon Lee, Dong-Chul Park and Seung-Gyoon Jung

**Key Words** : Rumbling Index(럼블링 인덱스), Sound Quality(음질), Artificial Neural Network(신경회로망), Sound Metrics(음질요소), Principal Rumble Component(PRC)

## ABSTRACT

In our previous study, we have developed sound quality index for steady rumbling sound of passenger car. In this paper, we will study sound quality index for transient rumbling noise. The subjective evaluation of rumbling sound can be indicated to objective parameters by sound metrics of psychoacoustics and principal rumble component. And artificial neural network can be estimated complexity and nonlinear characteristics of relation between subjective evaluation and sound metrics. We applied to sound metrics and artificial neural network to development of sound quality index for transient rumbling sound of passenger car.

## 1. 서론

자동차 실내 소음 중 럼블링 소음(rumbling noise)은 일반적으로 200~500Hz 사이의 주파수 대역에서 연속된 3 개의 엔진회전수의 1/2 오더(half order) 성분에 의해 발생되고 15~35Hz의 변조주파수를 갖는 진폭변조의 정도에 따라 럼블링에 대한 청감은 달라진다. <sup>(1,2)</sup> 이러한 청감은 주관적인 것이므로 이를 측정하기 위해서는 항상 전문가의 실험에 의해서만 가능하다. 이런 단점을 해결하기 위해 주관적인 청감을 객관적인 인자로 나타낼 수 있는 인덱스 개발이 수행되었다. 선행된 연구에서 가속구간 전체에 대한 정상음 럼블링 인덱스는 개발되었다. <sup>(3)</sup> 하지만 각 RPM 구간에 따른 럼블링 청감은 또한 다를 것이다. 따라서 본 연구에서는 RPM에 따른 과도음 럼블링 인덱스에 관한 연구를 수행하였다. 구간은 2200RPM, 2900RPM, 3600RPM을 중심으로  $\pm 1.5$ sec씩 세 구간으로 나누어 수행하였다. 객관적 인자로 사용한 것은 주관적 느낌을 정량적으로 나타낸 심리음향학(Psychoacoustics)의 음질요소(sound metrics)이다. 음질요소(sound metrics)에는 라우드니스(loudness), 샤프니스(sharpness), 러프니스(roughness), 변동강도(fluctuation strength) 등이 있다. <sup>(4)</sup> 그리고 위의 음질요소 외에 엔진 두 회전 당 한 번의 주기를 나타내는 진폭변조된 선

호의 포락선(envelope)의 크기를 말하는 PRC(principal rumble component)를 사용하였다. <sup>(2)</sup> 그리고 비선형적인 특성을 나타내는 음질요소와 청음평가 결과와의 관계를 해석하기 위해 학습(training)과정을 통하여 최적화된 결과를 얻을 수 있는 인공 신경회로망(artificial neural network) 이론을 사용되었다. <sup>(5,6)</sup>

## 2. 과도음 럼블링 소음 신호 제작

다양한 럼블링 신호를 얻기 위해 본 연구에서는 실차신호를 배경신호(background signal)로 하여 인공적으로 신호를 제작하였다. Fig. 1 과 같은 배경신호를 택하여 2200RPM $\pm 1.5$ sec, 2900RPM  $\pm 1.5$ sec, 3600RPM $\pm 1.5$ sec 과 같이 세 구간을 만든다.

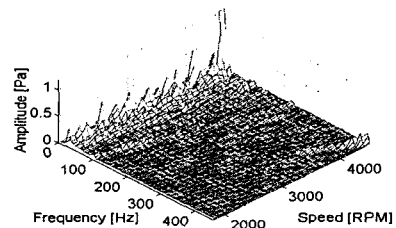


Fig. 1 Original sample car

럼블링의 발생은 연속된 1/2 오더에 의해 발생하므로 그에 해당하는 오더를 칼만적응필터(kalman adaptive filter)를 이용하여 제거한다. 제거된 오더 대신에 사용될 오더는 식 (1)의 과정으로 만든다. 식 (1,a)는 Fig.2 의 (a)와 같은 형태를 갖는 신호를 의미하며 식 (1,b)는 순간주파수를 의미한다.  $|x_i(t)|$ 는 해당하는 오더의 크기를 나타낸다. Fig. 2

\* 인하대학교 기계공학과 대학원  
E-mail : energetic@hanmail.net  
Tel : (032) 860-8842, Fax : (032) 868-1716

\*\* 인하대학교 기계공학과 교수

\*\*\* 현대자동차 남양연구소 시험 3 팀

의 (b)는 (a)의 일부구간을 확대한 것이다. 식 (1,c)를 이용하여 Fig.2 의 (c)와 같은 신호를 만들어 식 (1,a)의 신호에 곱하면 (d)와 같은 신호가 된다. 여기서  $f_c$  는 0.11Hz 이다. 연속된 세 개의 1/2 오더를 위와 같은 방법으로 제작한다.

$$\left( \begin{array}{l} \chi_i(t) = \chi_i(t) | e^{j\phi_i(t)} \quad (1. a) \\ f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi_i(t)}{dt} \quad (1. b) \\ S(t) = \cos(2\pi f_c t - \frac{\pi}{3}) \quad (1. c) \\ 0 \leq t \leq 3, \quad i = 1, 2, 3 \end{array} \right)$$

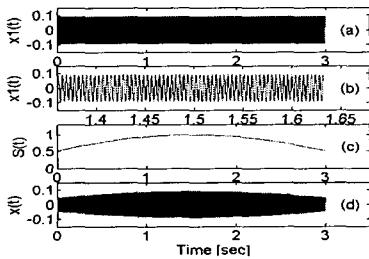


Fig. 2 Process of synthesized rumbling signal

위와 같은 방법으로 만들어진 세 개의 오더를 식 (2)와 같이 합하면 Fig. 3 의 (a)와 같이 진폭변조(amplitude modulation)된 변조신호가 된다. 이것이 럼블링 소음을 발생시키게 된다. Fig. 2 의 (b)는 (a)의 일부구간을 확대한 것이다.

$$\chi(t) = \sum_i \chi_i(t) S(t) \quad (2)$$

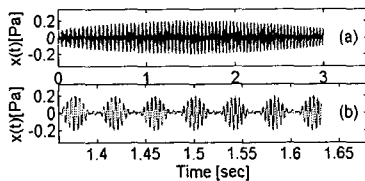


Fig. 3 Characteristics of synthesized rumbling signal

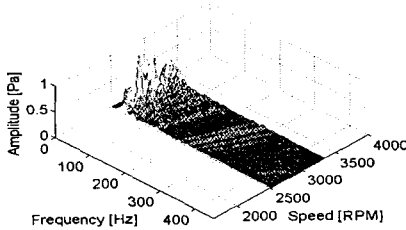


Fig. 4 Synthesized rumbling signal

위와 같은 방법으로 만든 신호  $x(t)$ 를 실차신호에서 연속된 세 개의 1/2 오더를 제거한 신호에 더하면 Fig. 4 와 같은 최종적인 럼블링 신호가 되는 것이다. 럼블링 소음은 발생위치와 발생구간 그리고 연속된 세 개의 오더들간의 크기 차에 따라 달라진다. (2) 발생구간은 발생 주파수 대역 안에서 세 구간으로 나누었고 나머지 요인들은 Table.1 에 나와 있는 것처럼 고려하여 신호를 제작하였다. 두 종류(I4, V6)의 엔진에 대해 제작하였고 오더들의 크기는 중심오더의 크기 변화와 중심오더와 나머지 오더와의 차이의 변화를 주었다. 실험에 사용된 인공신호와 실차 신호의 개수는 Table.2 에 있다.

Table.1 Parameters used in making rumbling signal

Engine type	Order	Center order amplitude	Amplitude difference
I4 V6	3.5C,4C,4.5C	65 dB	0 dB
	4.5C,5C,5.5C	70 dB	4 dB
	5.5C,6C,6.5C	80 dB	8 dB

Table. 2 Number of rumbling signals

	Synthesized signal	Real signal	All
2200RPM±1.5sec	42	21	63
2900RPM±1.5sec	42	24	66
3600RPM±1.5sec	49	24	73

### 3. 청음 평가 실험

#### 3.1 실험방법

실험 인원은 총 20 명이고 인공으로 제작된 신호와 실차 신호를 임의대로 배열하여 실험하였다. 실험은 Head acoustics 사의 재생시스템(play back system)을 사용하여 헤드폰(headphone)으로 듣고 평가하는 방식을 사용하였다. 평가방식은 레이팅(rating) 방식을 사용하였고 점수는 자동차 회사에서 사용하는 4~9 점 방식을 이용하였다. 점수가 높을수록 럼블링의 음질은 좋게 평가되는 방식이다. 실험자가 원하는 만큼 모든 신호가 반복재생 되도록 하였다.

#### 3.2 청음 실험 결과

##### (1) 2200RPM±1.5sec

Fig.5 는 63 개의 신호를 20 명이 평가한 데이터를 청음실험 평균값으로 재배열하여 나타낸 것이다. 전체신호에 대한 95% 신뢰구간은 평균 ±0.198 이다. Fig.6 은 음질요소와 청음 평가 결과와의 관계를 나타낸다. (a)와 (e)를 보면 라우드

니스와 PRC 는 청음평가 평균값에 대해 비선형적으로 반비례함을 알 수 있다. 그러나 (b),(c),(d)에 나타난 것처럼 러프니스, 샤프니스, 변동강도는 청음평가 평균과의 관계가 적음을 알 수 있다. 즉 라우드니스와 PRC 가 클수록 림블링에 대한 평가는 나빠진다는 것을 의미한다.

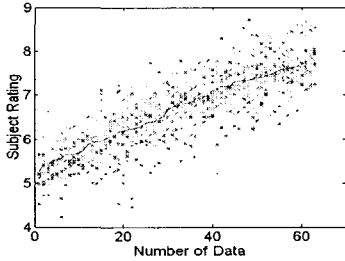
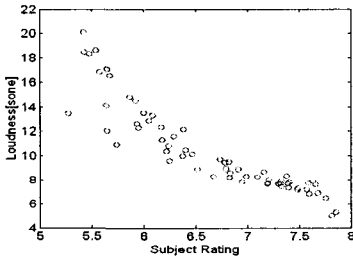
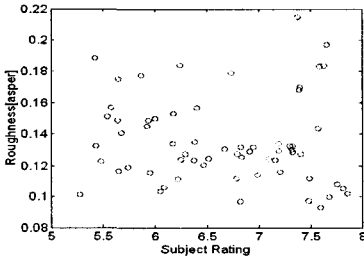


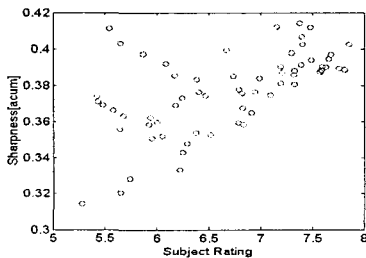
Fig. 5 All subjective ratings for 63 signal



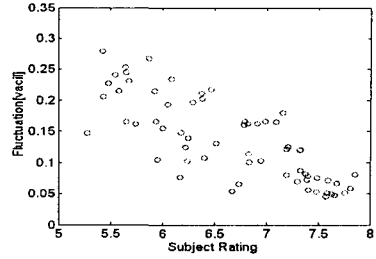
(a) Relation between loudness and subject rating



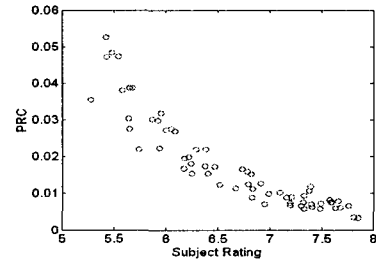
(b) Relation between roughness and subject rating



(c) Relation between sharpness and subject rating



(d) Relation between fluctuation and subject rating



(e) Relation between PRC and subject rating

Fig. 6 Relation between sound metrics and subjective evaluation

**(2) 2900RPM±1.5sec**

2900RPM 을 중심으로 한 구간에서의 림블링 음질에 대한 실험은 20 명의 인원이 66 개의 인공 및 실차 신호에 대해 수행되었다. 전체 신호에 대한 95% 신뢰구간은 평균  $\pm 0.196$  이다.

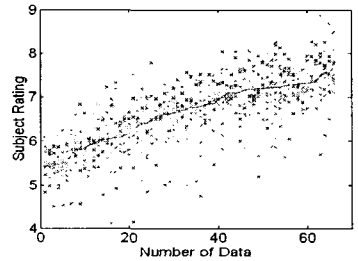
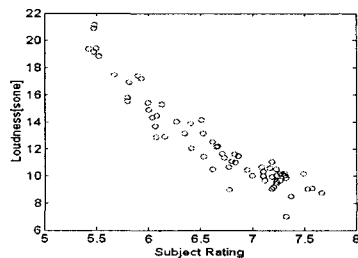
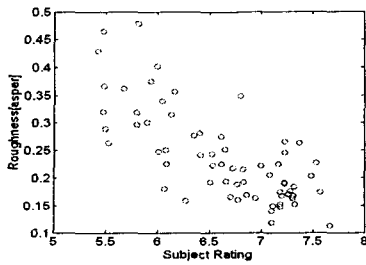


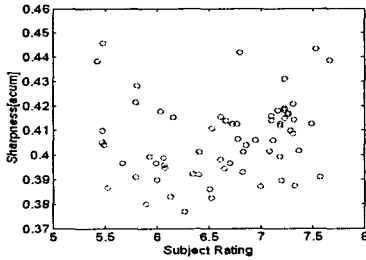
Fig. 7 All subjective ratings for 66 signal



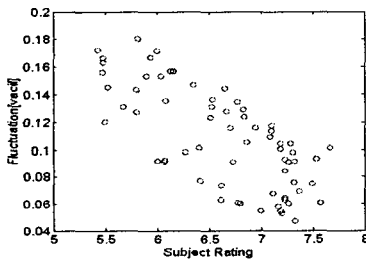
(a) Relation between loudness and subject rating



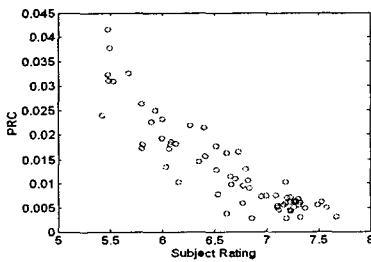
(b) Relation between roughness and subject rating



(c) Relation between sharpness and subject rating



(d) Relation between fluctuation and subject rating



(e) Relation between PRC and subject rating

Fig. 8 Relation between sound metrics and subjective evaluation

Fig.8 의 (a)와 (e)를 보면 라우드니스와 PRC 는 청음 평가 평균값에 대해 비선형적으로 반비례함을 알 수 있다. 그러나 (b),(c),(d)에 나타나듯이 러프니스, 샤프니스, 변동강도는 청음평가와 관계가 적음을 알 수 있다.

### (3) 3600RPM±1.5sec

3600RPM 을 중심으로 하는 구간에서의 럼블링 음질의 청음 평가 실험은 총 20 명이 73 개의 인공 및 실차 신호에 대해 수행되었다. 실험결과 전체신호에 대한 95% 신뢰구간은 평균  $\pm 0.20$  이다.

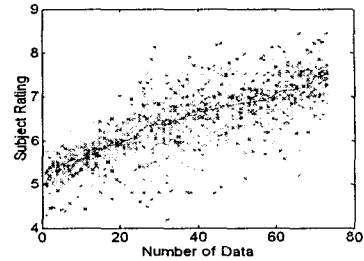
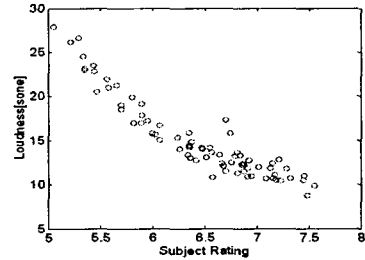
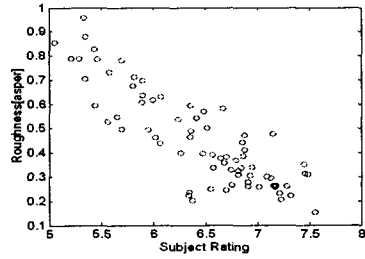


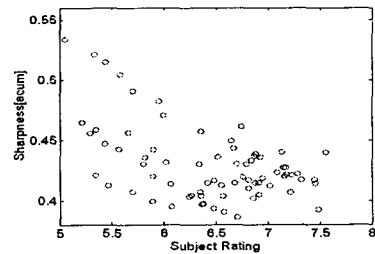
Fig. 9 All subjective ratings for 73 signal



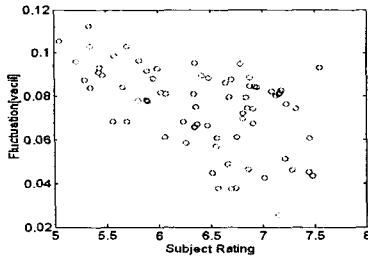
(a) Relation between loudness and subject rating



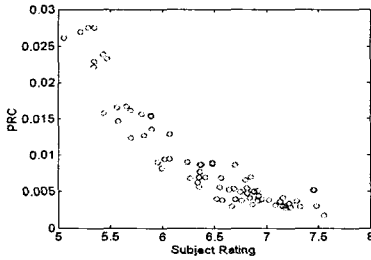
(b) Relation between roughness and subject rating



(c) Relation between sharpness and subject rating



(d) Relation between fluctuation and subject rating



(e) Relation between PRC and subject rating

Fig. 10 Relation between sound metrics and subjective Evaluation

Fig.10 의 (a)와 (e)를 보면 앞의 두 구간과 마찬가지로 라우드니스와 PRC 가 청음 평가 평균값에 비선형적으로 반비례함을 보인다. 그러나 샤프니스와 변동강도는 관계가 거의 없음을 보인다. 러프니스의 경우 청음 평가 대비 어느 정도의 경향은 보이지만 폭 넓은 분포를 보인다. 럼블링 음질에 주도적인 영향을 보인다 할 수 없다.

#### 4. 신경회로망을 이용한 인덱스 개발

앞의 실험 결과에 나와 있듯이 럼블링 음질과 높은 관계를 보이는 라우드니스와 PRC 를 보면 비선형적인 특성을 보인다. 이와 같이 복잡하고 비선형적인 관계를 해석하는 데에는 Fig.11 과 같은 다층 신경회로망을 사용하여 학습과정을 통한 최적화된 가중치(weight) 행렬을 얻음으로써 해결할 수 있다. 식 (3)과 같이 표현하는데 여기에서  $X$  는 입력벡터이고  $Y$  는 출력벡터이다. 그리고  $f$  는 전달함수(transfer function),  $W$  는 가중치행렬을 의미한다. (7,8)

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

본 연구에서는 역전파(backpropagation) 알고리즘을 사용하는 은닉층(hidden layer)이 1 개의 층

으로 구성되고 출력층(output layer)이 1 개의 뉴런(neuron)을 갖는 신경회로망을 사용하였다.

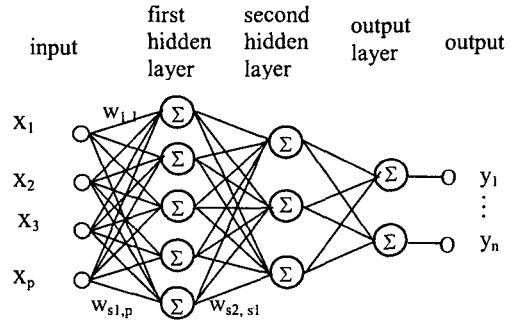
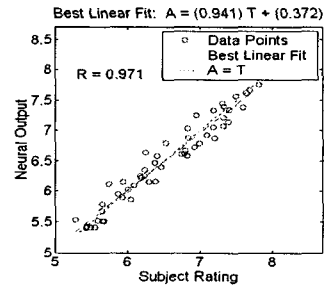


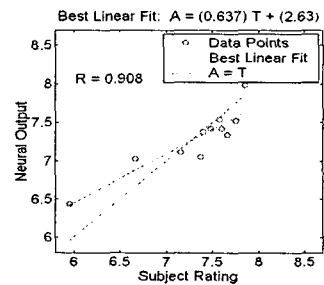
Fig. 11 Architecture of a multi-layer neural network

#### (1) 2200RPM±1.5sec

신경회로망 입력값으로 라우드니스와 PRC 를 사용하였고 총 63 개의 신호 중 32 개를 학습과정에 사용하여 가중치행렬을 구하였다. 그 결과 신호 전체에 대해서는 Fig.12 의 (a)에 나와있듯이 97.1%의 상관관계를 보였다. 또한 인덱스의 검증을 위해 양산차량 11 대를 이용하여 확인하였다. (b)에 나와있듯이 90.8%의 상관관계를 보였다.



(a) all signals

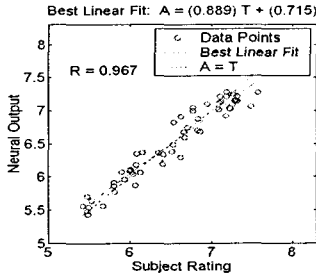


(b) real cars

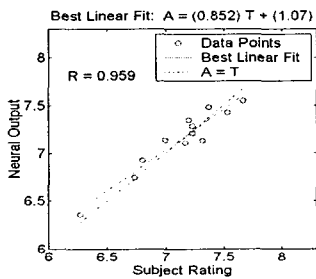
Fig. 12 Correlation between neural output and subjective evaluation for 2200RPM±1.5sec

**(2) 2900RPM±1.5sec**

라우드니스와 PRC 를 입력값으로 사용하고 66 개 중 33 개를 학습과정에 사용하였다. Fig.13 의 (a)를 보면 전체신호에 대해서 96.7%를 보였고 12 대의 양산차량과의 유용성 검증은 (b)와 같이 95.9%의 상관관계를 보였다.



(a) all signals

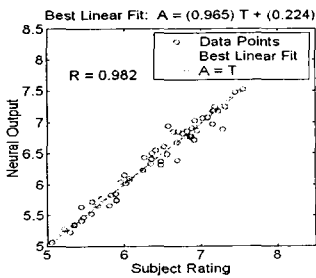


(b) real cars

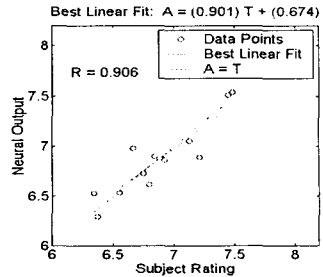
Fig. 13 Correlation between neural output and subjective evaluation for signals of 2900RPM±1.5sec

**(3) 3600RPM±1.5sec**

이 구간 역시 라우드니스와 PRC 를 입력값으로 하고 73 개중 42 개를 학습과정에 사용하였다. Fig.14 에 나와있듯이 전체에 대해 98.2%, 12 대의 양산차량과는 90.6%의 상관관계를 보였다.



(a) all signals



(b) real cars

Fig. 14 Correlation between neural output and subjective evaluation for signals of 3600RPM±1.5sec

**5. 결론**

본 연구에서는 라우드니스와 PRC 를 입력값으로 하고 청음실험 평균값을 목표값(target)으로 하는 1 개의 은닉층을 갖는 다층 신경회로망을 이용하여 과도음 럼블링 인덱스를 제작하였다. 학습과정을 통해 얻은 최적화된 신경회로망 출력값은 인공신호 및 검증을 위한 양산차량의 청음평가 결과와 세 구간 모두 90%이상의 높은 상관관계를 보임으로써 럼블링 인덱스로의 사용 가능 확인과 유용성 검증이 되었다.

**후기**

본 연구는 현대자동차 연구비로 수행되었습니다. 지원에 감사 드립니다.

**참고문헌**

- (1) 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,
- (2) Wakita, T., et.al, 1989, “Objective Rating of Rumble in Passenger Compartment During Acceleration”, SAE891155.
- (3) Lee, S. K., et.al., 2003, “Rumbling Noise Index for Sound Quality Analysis of a Passenger Car Using Artificial Neural Network”, *Internoise 2003*.
- (4) Zwicker, E. and Fastl, H., 1999, *Psychoacoustics: Facts and Models*. Springer-Verlag, Berlin, 2<sup>nd</sup> Edition
- (5) 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*
- (6) Lee, S. K., et.al, “Sound Quality Index Development for the Booming Noise of Automotive Sound Using Artificial Neural Network Information Theory”, *Sound Quality Symposium 2002*.
- (7) Hagan, M.T. and Demuth, H. B. and Beale, M., 1996, *Neural Network Design*, PWS Publishing Company