

승용차 부우밍 인덱스 개발에 관한 연구

Booming Index Development in a Passenger Car

채 희 창* · 이 상 권** · 박 동 철*** · 정 승 균***

Hee-Chang Chae*, Sang-Kwon Lee**, Dong-Chul Park***, Seung-Gyoon Jung***

Key Words : Artificial Neural Network(신경회로망), Booming Index(부우밍 인덱스), Sound Quality(음질), Sound Metrics(음질 매트릭스)

ABSTRACT

Booming sound is one of the most important interior sound of a passenger car. The conventional booming 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 booming 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 booming sound of a passenger car.

1. 서 론

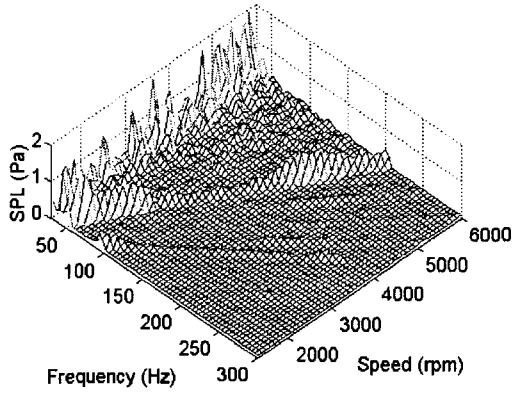
자동차 실내에서 발생하는 소음에는 부우밍 소음(booming noise), 럼블링 소음(rumbling noise), 기어 소음(gear noise), 엔진 소음(engine noise), 타이어 소음(tire noise), 풍절음(wind noise) 등이 있다. 그 중 부우밍 소음은 발생 주파수 대역이 20~200Hz 부근으로써 주로 자동차의 실내 공명에 의해 발생하며, 사람의 귀를 압박하는 듯한 느낌을 준다[1,2]. 최근까지 이러한 부우밍 소음에 대한 연구는 실내 dBA(A-weighted sound pressure level)를 줄이는데 주안점을 두었다. 그러나 dBA 만으로 운전자의 소음에 대한 느낌을 나타내는데 불충분하기 때문에 음질(sound quality)에 대한 연구가 이루어 지고 있다[3,4]. 음질 평가는 보통 청음 실험을 통한 주관적 평가를 하는데 이는 많은 시간과 노력을 필요

로 한다. 그런데 소리에 대한 사람의 느낌이 주관적이라 할지라도 어떤 공통된 특성을 나타내는데, 이를 정량적으로 측정하는 분야가 심리음향학(psychoacoustics)이다[5]. 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[6,7,8]. 본 연구에서는 부우밍 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 부우밍 소음에 대한 주관적 평가를 객관화하여 사용될 수 있다.

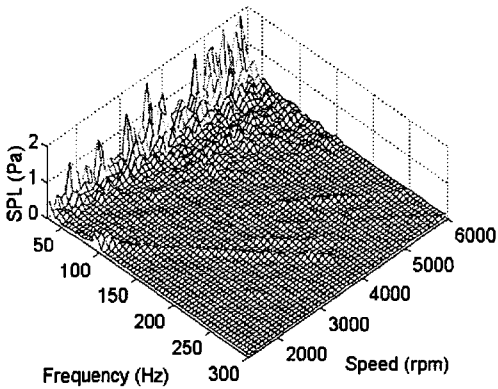
* 인하대학교 대학원 기계공학과
** 정회원, 인하대학교 기계공학과 교수
E-mail: sangkwon@inha.ac.kr
Tel:(032)860-7305, Fax:(032)868-1716
*** 현대자동차 연구소

2. 부우밍 소음 신호 제작

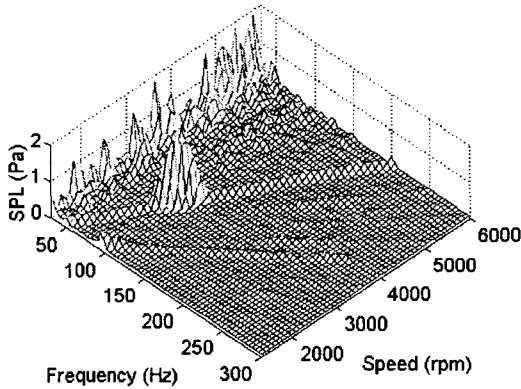
신경회로망의 학습과정은 많은 데이터를 필요로 한다. 그러나 학습과정에 필요한 자동차 소음 데이터를 얻기에는 많은 시간이 걸리며 다양한 크기와 속도에서 발생하는 부우밍 소음을 획득하기



(a) Original sample car



(b) Sample car without the second order



(c) Synthesized booming signal

Fig.1 The process of making booming sound

는 어렵다. 따라서 본 논문에서는 인공적으로 부우밍 소음을 제작하였다.

Fig.1 은 부우밍 신호 제작 과정을 보여준다. Fig.1 의 (a)는 본 논문에서 부우밍 신호를 만드는데 사용한 샘플차량신호이며 직렬 4 기통 엔진을 장착하고 있다. Fig.2 의 (b)는 칼만적응필터(kalman adaptive filter)를 이용하여 샘플신호의 엔진 폭발차수(firing order)를 제거한 형태이다. 이 신호를 부우밍 신호를 만드는데 배경소음(background noise)으로 사용하였다. Fig.1 의 (c)는 4 기통 엔진의 폭발차수에 해당하는 2 차 성분(second order)을 (b)에 더한 합성신호이다. 이러한 합성신호를 만드는데 고려된 인자는 부우밍 발생 크기, 발생 주파수 위치, 발생 주파수폭 등 3 가지다. Fig.2 는 2 차 성분을 만드는 과정을 나타낸다

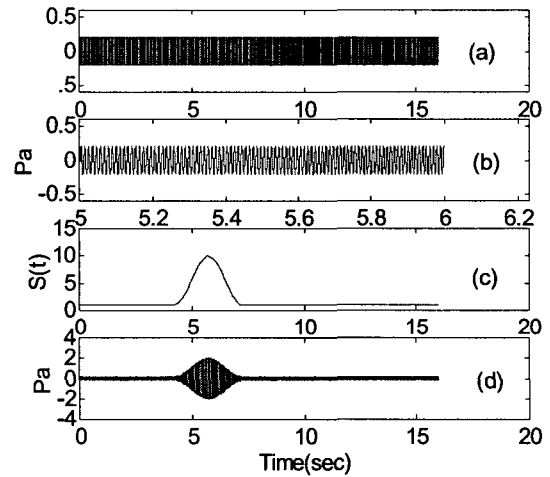


Fig.2 The process of making the second order

Fig.2 의 (a)는 주파수가 2 차 성분과 같이 증가하는 신호이고 (b)는 첫번째 그림을 확대한 것으로 식(1)로 표현된다.

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

샘플신호의 크기를 고려하여 $|a(t)| = 0.2$ 로 하였다. 샘플신호 2 차 성분의 순간 주파수는 다음과 같이 표현된다.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (2)$$

Fig.2 의 (c) 와 같이 다음 부우밍 크기, 위치, 폭을 결정하기 위한 S(t)를 정현파(sinusoid) 신호를 이용하여 다음과 같이 만든다.

$$\begin{cases} S(t) = A_j \cos \omega_k (t - t_i) + A_j + 1, & t_i - 0.5 \frac{2\pi}{\omega_k} \leq t \leq t_i + 0.5 \frac{2\pi}{\omega_k} \\ S(t) = 1 & , \text{ otherwise} \end{cases}$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, 10 \quad j = 1, 2, 3, 4, 5 \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

식(3)에서 A_j 는 5 단계로써 부우밍 소음의 크기를 결정하고, t_i 는 10 단계로써 발생하는 위치, ω_k 는 4 단계로써 발생 폭을 결정하는 변수다.

마지막으로 식(1)의 신호와 (3)의 신호를 곱하여 직렬 4기통 엔진의 2차 성분을 만든다.

$$x(t) = a(t)S(t) \quad (4)$$

Fig.2와 같은 방법으로 만들어진 부우밍 소음 신호는 총 200개이다. 이중 부우밍이 발생되지 않거나 소음이 유사한 신호들을 제외하여 150개의 신호를 청음 평가 실험에 사용하였다.

자세한 변수 값은 Table.1에 나타내었다.

Table.1 Variables used in making booming signal

Time shift t_i (Center frequency)	Amplitude A_j (Sound pressure level)	Time interval $2\pi / \omega_k$ (Frequency bandwidth)
1(55Hz)	1.08(90dB)	1.54 (15Hz)
2.6(70Hz)	2.31(95dB)	2.06 (20Hz)
4.1(85Hz)	4.5(100dB)	3.09 (30Hz)
7.2(115Hz)	8.39(105dB)	4.12 (40Hz)
8.8(130Hz)	15.31(110dB)	
10.3(145Hz)		
11.9(160Hz)		
13.4(175Hz)		
15(190Hz)		

3. 청음 평가 실험

3.1 실험방법

청음 평가에 사용된 총 신호의 개수는 Fig. 1과 같은 방법으로 만든 합성신호 150개와 가공되지 않은 16개의 자동차 신호를 합하여 총 166개가 사용되었다. 실험 인원은 20대 남녀로써 남성이 17명, 여성 4명으로 총 21명이 실험에 참가하였다. 신호는 RME 사운드카드(sound card)를 거쳐 파워앰프(power amplifier)와 이퀄라이저(equalizer)로 이루어진 Head acoustics 사의 재생시스템(playback system)을 통하여 헤드폰(headphone)으로 전달되며,

신호의 재생순서는 랜덤(random)하다. 점수 평가는 자동차 회사에서 일반적으로 사용하는 4~9 점 방식을 사용하였다. 점수가 높을수록 음질이 우수함을 의미하므로 부우밍이 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. 3은 166개의 신호에 대한 21명의 주관적 평가 값인 3486개의 데이터를 나타낸다. 1번에서 150번까지는 청음실험 평균값을 기준으로 재배열된 합성신호이며, 151번부터 166번까지는 가공되지 않은 실차 신호이다. Fig. 4는 각각의 신호에 대한 임상실험 평균값과 95% 신뢰 구간을 나타낸다. 전체 신호에 대한 평균 신뢰구간은 ± 0.21 이다. 그리고 합성신호에 대한 평균 신뢰구간은 ± 0.20 이며 실차에 대해서는 ± 0.28 이다.

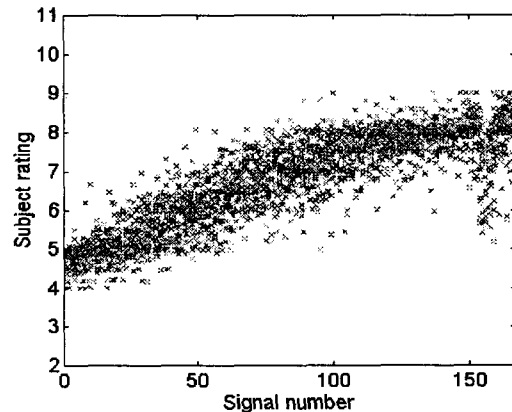


Fig. 3 All subjective ratings for 166 signal

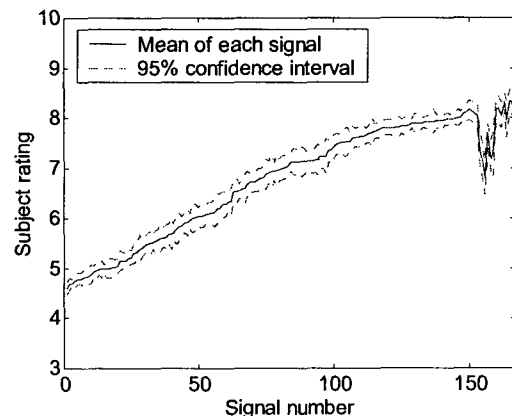
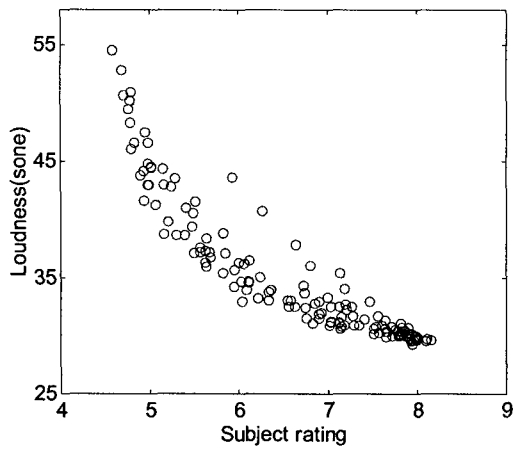
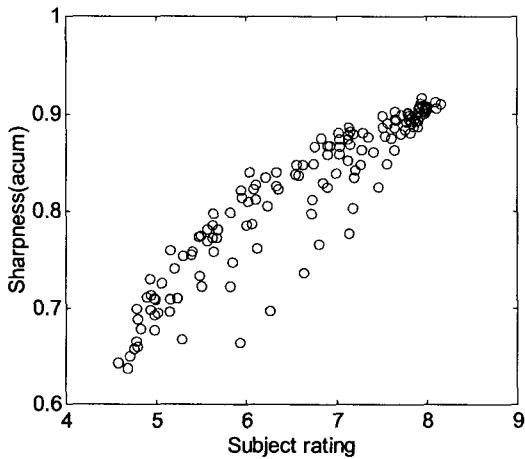


Fig. 4 Mean value and 95% confidence interval

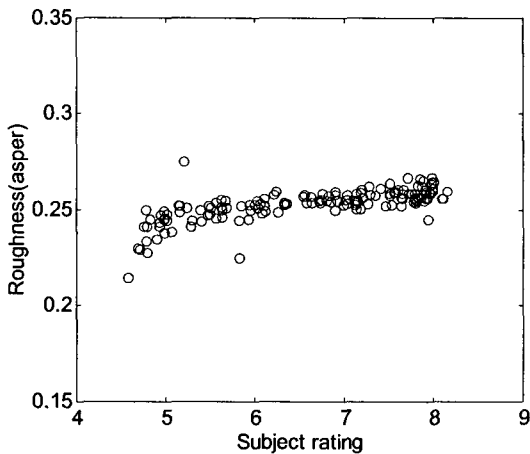
Fig.5는 청음 평가 평균값과 음질 매트릭스의 관계를 나타낸다.



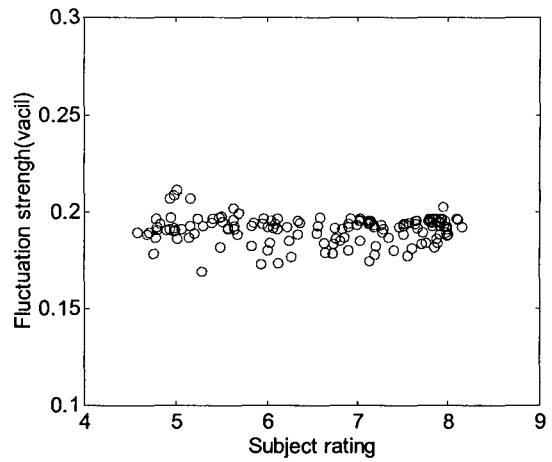
(a) Relation between loudness and subject rating



(b) Relation between sharpness and subject rating



(c) Relation between roughness and subject rating



(d) Relation between fluctuation and subject rating

Fig.5 Relation between sound metrics and subjective Evaluation

없음을 알 수 있다. 이에 따라 라우드니스와 샤프니스를 신경회로망의 입력 값으로 사용하였다.

4. 신경회로망을 이용한 인덱스 개발

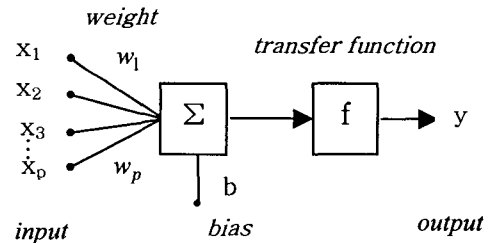


Fig. 6 Schematic of neural network in one neuron

Fig.6 은 한 개의 뉴런(neuron)에서 입력 x 와 출력 y 의 관계를 나타낸다. 한 개의 층(one layer)을 갖는 신경회로망은 다음과 같이 표현된다.

$$Y = f(WX + b) \quad (5)$$

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

$$Y = f^3(W^3 f^2(W^2 f^1(W^1 X + b^1) + b^2) + b^3) \quad (6)$$

Fig.5 (a),(b)에서 알 수 있듯이 청음 평가에 대해 라우드니스는 비선형적으로 반비례 하고 샤프니스는 비선형적으로 비례하는 경향이 있다. Fig.5 의 (c),(d)를 보면 러프니스와 변동강도는 큰 관계가

식(5),(6)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.

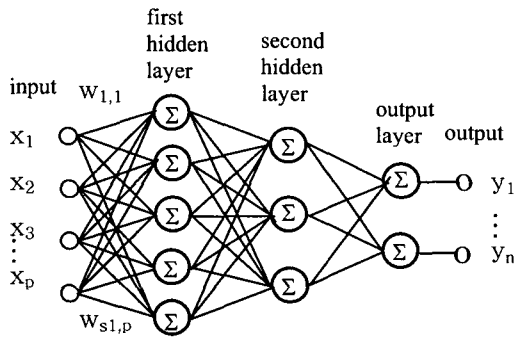


Fig. 7 Schematic of multilayer neural network

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)[9] 알고리즘을 사용하였다. 신경 회로망의 입력 값으로 라우드니스와 샤프니스가 사용되었고 목표 값으로

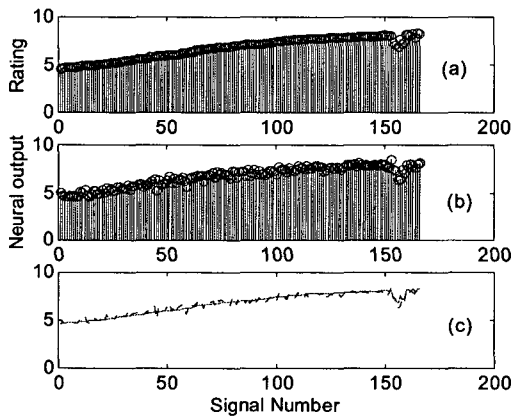


Fig.8 Comparison between neural output and subjective Evaluation for 166 signals

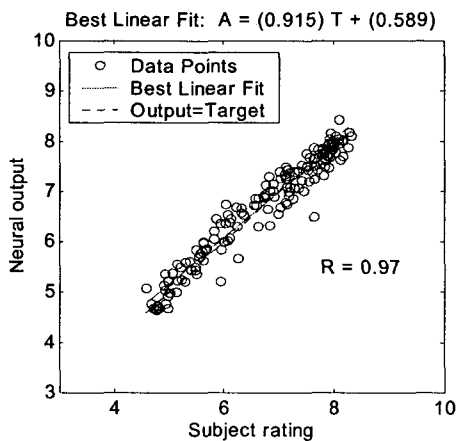


Fig.9 Correlation between neural output and subjective evaluation for 166 signals

청음실험 평균치가 적용되었다. 166 개의 1/2 인 83 개의 신호를 신경회로망 학습과정에 사용하여 최적화된 가중치 행렬 W 를 구하였다. Fig. 8 의 (a)는 청음실험 평균값이고(b)는 최적화된 신경회로망을 이용하여 계산된 출력 값이며 (c)는 두 값의 비교를 나타낸다. 청음실험 평균치와 신경회로망의 출력 값은 Fig. 9 에서와 같이 97%의 상관관계를 나타내었다

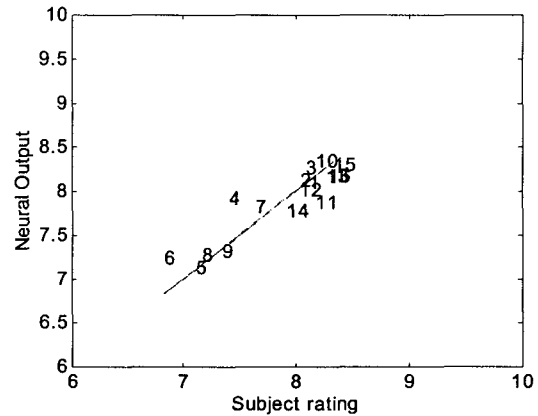


Fig.10 Comparison between neural output and subjective evaluation for 16 real cars

앞에서 구현된 신경회로망을 이용한 부우밍 인덱스의 유용성을 검증하기위해 Fig.10 같이 실제 차량에 대해 적용하였다. 1~10 번은 직렬 4 기통 엔진, 11~14 번은 V6 엔진, 15~16 번은 V8 엔진을 장착한 차량이다. 16 개의 차량에 대한 주관적 평가 값과 신경회로망의 출력 값과의 상관관계는 Fig. 11 에서와 같이 91.2%를 나타내었다. 그리고 본 연구에서 부우밍 신호 제작 시에 배경소음으로 사용된 직렬 4 기통 신호에 대한 상관관계는 Fig. 12 에서와 같이 93.5%를 나타내었다.

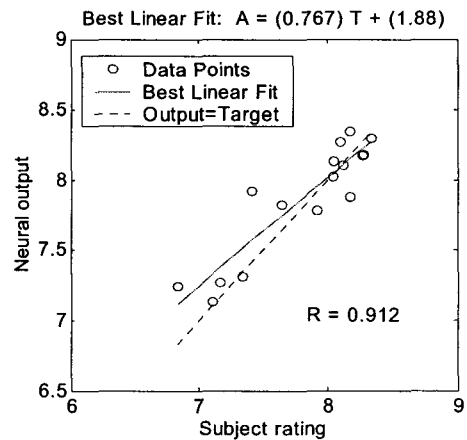


Fig. 11 Correlation between neural output and subjective evaluation for 16 real cars

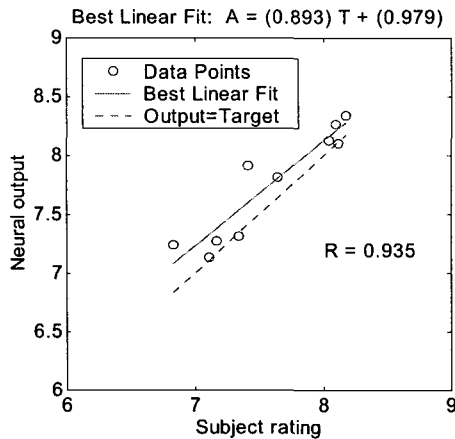


Fig. 12 Correlation between neural output and subjective evaluation for 10 In-line4 engine

5. 결론

본 연구에서는 신경회로망을 이용하여 부우밍 인덱스를 개발하였다. 신경회로망의 입력 값으로 음질 매트릭스중 라우드니스와 샤프니스를 사용하였고 목표 값으로 21 명의 청음평가 실험 평균치를 사용하였다. 학습과정을 통해서 최적화된 신경회로망의 출력 값은 청음 실험에 사용된 166 개 신호의 주관적 평가 값과 97%의 상관관계를 나타냄으로써 부우밍 인덱스로써 사용될 수 있음을 확인 하였다. 그리고 현재 양산되고 있는 차량에 대해서 적용함으로써 그 유용성을 검증하였다.

참고문헌

- (1) 이상권, 황우석, 김중희, 우재학, 이상희, 이학준, 2000, "소음 전달 경로 해석 및 주행 모드 해석을 이용한 차량의 실내소음 저감을 통한 음색 향상", 한국소음진동공학회지, 제 10 권 제 5 호, pp. 806~810
- (2) 정승균, 1998, "승용차의 진동소음 평가 및 개선 방법" 한국소음진동공학회지, 제 8 권 1 호, pp.3~8
- (3) Hatano, S. and Hashimoto, T., 2000 " Booming Index as a Measure for Evaluating Booming Sensation " Proc. *Inter-Noise 2000*, Nice, France
- (4) Hatano, S. and Hashimoto, T., 1998, "Modification of Booming Level for Higher Correlation with Booming Sensation, *Trans.JSAE*, Vol. 29(3), pp. 107~110
- (5) Zwicker, E. and Fastl, H., 1999, *Psychoacoustics: Facts and Models*. Springer-Verlag, Berlin, 2nd Edition,
- (6) 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

- (7) 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*
- (8) Dai, Y. and Lim, T. C. and Karr, C. L., 2002, "Neural Network Simulation of Subjective Response to Brake Squeal Noise", *Sound Quality Symposium 2002*
- (9) Hagan, M.T. and Demuth, H. B. and Beale, M., 1996, *Neural Network Design*, PWS Publishing Company, Boston