

액슬 와인 음질에 대한 연구

Sound Quality Analysis for Axle-Gear Whine Sound

김태규† · 이상권* · 조윤경** · 김종연***

Tae-Gyu Kim, Sang-Kwon Lee, Yun-Kyoung Jo and Jong-Youn Kim

Key Words : Axle(액슬), Sound Quality (음질), Sound Quality Metrics(음질요소), Artificial Neural Network(신경회로망), Psychoacoustics(심리음향), SUV(Sport Utility Vehicle)

ABSTRACT

A gear whine sound due to the axle system is one of the most important sound qualities in a sport utility vehicle (SUV). In the previous research about the gear whine sound, it was known that it is difficult to evaluate the gear whine sound objectively by using the only A-weighted sound pressure level because of the masking effect. In this paper, for the objective evaluation of the axle-gear whine sound, the characteristics of the axle-gear whine sound is at the first investigated based on the synthetic sound technology and the new objective evaluation method for the axle-gear whine sound is developed by using the sound metrics, which is the psychoacoustics parameters, and the artificial neural network (ANN) used for the modeling of the correlation between objective evaluation and subjective evaluation.

1. 서 론

자동차 실내소음의 연구는 실내소음의 음압을 저감하는 측면과 음질(Sound Quality)의 향상이라는 측면에서 연구되어 왔다. 단순한 음압 저감의 측면에서는 이미 상당부분 소비자가 만족할만한 수준에 다다랐다. 그러나 단순한 실내소음의 수준만을 줄이는 방법은 소비자들이 이전에 인식하지 못한 새로운 문제점을 야기하였고, 소비자 또한 실내소음의 저감에만 만족하지 않고 좀더 향상된 자동차 실내소음을 요구하고 있다. 그러므로 소비자의 욕구를 만족시키기 위한, 음질에 관한 많은 연구가 이루어지고 있으며 [1-5], 앞으로도 더욱 중점적으로 다루어야 할 부분이다. 자동차 실내소음은 크게 부우밍 소음(booming noise), 럼블링 소음(rumbling noise), 기어소음(gear noise), 엔진 소음(engine noise), 타이어 소음(tire noise), 풍절음(wind noise), 배기소음 등이 있다. 이 중에서 엔진소음과 배기소음 등의 음압

레벨 감소로 인해 상대적으로 작은 기어소음이 새로이 문제가 되고 있다. 액슬에서 발생하는 기어소음은 작은 소리임에도 불구하고 기어 작동 RPM 에 따라 순음에 가까운 소리가 주파수 변조되어 예상치 못한 순간에 발생되므로 심리적으로 불쾌감을 유발하게 된다. 차량에 대한 소비자의 만족도를 평가하기 위하여 매년 임상실험을 한다 면 시간적, 경제적으로 많은 부담이 된다. 그러므로 심리음향학에서 정의한 다양한 음질요소(sound metrics) [6-8]와 주관적 평가와의 관계를 파악하여 객관적인 등급화가 필요하다. 음질요소와 주관적 평가와의 관계는 비선형적이고 매우 복잡하므로 이런 특성을 해석하기 위해서 인공신경회로망(ANN) [9]이론이 필수적이다. 따라서 본 연구를 통하여, SUV 차량의 액슬에서 발생하는 기어소음에 대한 합성신호를 제작 [10]하였고 임상실험을 통하여 소비자 만족도를 예측할 수 있는 신경회로망 인덱스를 구현하였다.

2. 인공소음 제작

2.1 차량 실내 소음의 녹음

SUV 차량의 정상주행 시, 사람의 청감을 표현하기 위하여 Binaural 형태로 실내 소음을 녹음하

† 인하대학교 대학원 기계공학과

E-mail : mizdoyagi@gmail.com

Tel : (032) 860-8650, Fax : (032) 868-1716

* 정회원, 인하대학교 기계공학과 교수

** 다이모스 (주)

*** 다이모스 (주)

였다. Binaural recording 은 좌우 귀에서 감지되는 음압의 차이와 음원으로부터 좌우 두 귀에 이르기까지의 거리에 따른 소리 위상차도 녹음할 수 있다. 이는 임상실험에서 실제 소음과 같은 느낌으로 평가할 수 있도록 만들어준다. 소음 데이터 녹음장비로 Head-Acoustics 사의 Artificial Head HMS III 을 조수석에 위치시켜, 실내 소음을 녹음하였다. 또한 RPM 데이터를 얻기 위하여 프로펠러 축으로부터 Tacho-Meter Signal 을 실내소음과 동시에 측정하였다. 실험은 총 5 대의 SUV 차량 실내 소음을 녹음하였으며 주행은 서산 시내의 일반도로에서 실시되었다. 주행시험은 30 km/h 에서 130 km/h 까지 coast up 을 실시하였다, 수집된 소음데이터는 청음평가 및 합성신호 제작을 위하여 LMS 사의 CADA-X(version 3.5D)의 Test-Monitor 모듈을 이용하였다. 합성신호 제작은 신경회로망 학습에 필요한 액슬 소음의 제작을 위한 것이다.

2.2 액슬 소음 신호특성

액슬 와인(whine) 소음은 순음(pure tone)과 비슷하나 주파수 변조가 일어남으로 순음로 볼 수는 없다. 따라서, Order summation 의 방법으로 평가된다. 그러나 이 방법은 차량 자체의 암소음(Background noise)를 고려하지 않았기 때문에 정확한 기어 와인소음을 표현하지 못한다. 차량의 엔진소음, 배기소음, 로드 노이즈 등 다른 주요 소음의 크기가 크면 비교적 작은 기어소음은 이들에 의한 마스킹(Masking) 효과로 덜 들리게 된다. Becker, S.의 기어 소음에 연구 [11]에 의하면 다음의 세가지 마스킹 효과가 존재한다.

- (1) Broadband-band noise masking
- (2) Narrow-band noise masking
- (3) Low-pass noise masking

광대역 마스킹 (Broadband masking)에 대한 Zwicker 의 실험결과에 의하면 20Hz ~ 4KHz 범위의 순음은 17dB 이상 큰 백색잡음(white noise)에 의해 마스킹 된다는 것을 알 수 있다. 액슬 소음의 경우 주파수 변조가 일어남으로 10~20dB 이상일 경우 마스킹 된다. Fig.1 은 일반적인 SUV 차량의 실내소음과 액슬기어 오더 성분에 대한 측정결과 이다. 차량의 overall 소음레벨과 액슬기어 오더 성분의 차이가 20dB 이상이면 마스킹 현상 때문에 기어소음이 들리지 않게

된다. Fig.1 에서 굵은 실선은 overall 레벨이고, 중간에 가는 실선은 액슬기어의 오더 성분이다. 그리고 점선은 overall 레벨과 기어 오더 성분의 차이를 나타내며, @로 표시된 부분은 그 차이가 가장 작은 부분이다. 그러므로 이 구간이 가장 큰 기어소음 발생구간이라고 파악할 수 있다.

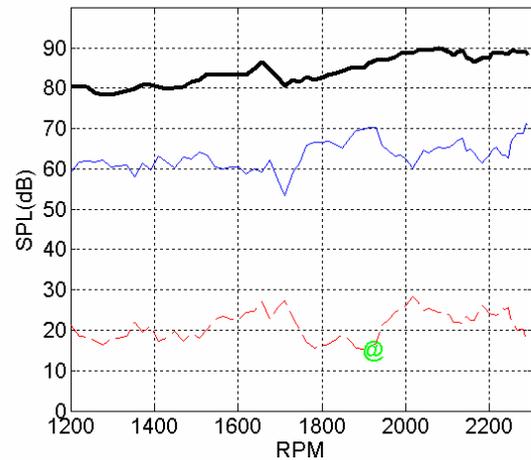


Fig. 1 Comparison of overall noise and gear noise

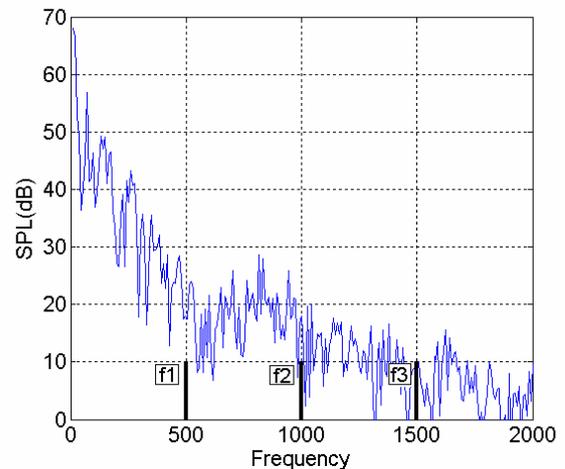


Fig. 2 Gear Whine noise vs. Frequency

협대역 마스킹 (Narrow-band noise masking)에 대한 설명으로 Fig. 2 에서, f1 과 f2 의 경우 배경소음과 overall level 의 차이는 같으므로 광대역 마스킹을 통한 분석으로는 f1 과 f2 는 같은 결과를 얻는다. 협대역 주파수 분석을 해보면 f1 의 경우 보다는 f2 의 경우 배경소음과의 차이가 작기 때문에 사람은 f2 를 더 잘 인지할 수 있다. 또한 마지막으로 f2 와 f3 의 경우 앞의 두 방법으로 판단하면 같은 결과로 판단되지만, 자동차소음의 경우 많은 부분을 차지하는 엔진소음과 배기소음은 저주파 대역에 위치한다. 그렇기 때문에 같은 크기의 소음일지라도 저주파보다는 고주파대역의 소음이 더 잘 들리게 된다. 따라서 f3 는 f2 보

다 고주파에 위치하므로 f_3 가 더 잘 들리게 된다. 본 연구에서는 액슬 인공신호를 제작할 시 광대역 마스킹을 고려하여 액슬 소음의 크기 (peak level)를 조정하였으며 협대역 마스킹과 주파수 효과를 고려하여 기어 소음의 발생위치를 변화하며 합성신호를 제작하였다.

2.3 액슬 합성신호 제작

신경망 회로를 이용하기 위해서는 학습에 필요한 많은 종류의 소음 신호가 필요하다. 하지만 실제 연구 개발과정의 기간, 비용의 측면에서는 직접적인 액슬 소음 녹음은 바람직하지 못하다. 이를 보완하기 위해 디지털 신호처리 기술을 이용하여 합성신호를 제작하였다. Fig.3 는 본 연구의 합성신호 제작과정을 보여준다. 각 그림의 상위 부분은 실내 소음의 Waterfall 과형을 보여주며, 하위 부분은 Colormap 을 보여준다. Fig.3 의 (a)는 합성신호 제작을 위해서 사용한 기준차량 소음이며, Fig.3 (b)는 칼만 적응 필터(kalman adaptive filter)를 이용하여 액슬의 기어 소음차수(order)를 제거한 배경소음이다. Fig.3(c)는 주파수 변조를 이용하여 액슬의 기어 소음과 유사하게 만든 신호를 Fig.3 (b)의 배경소음에 합성한 형태이다.

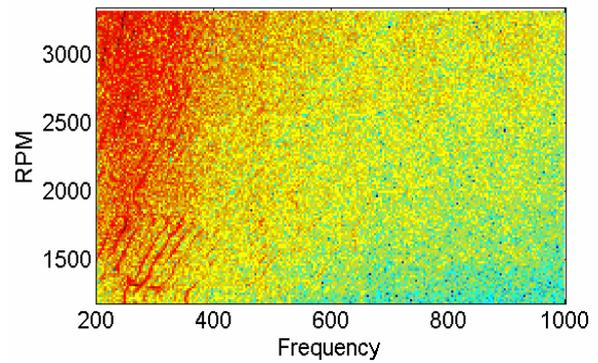
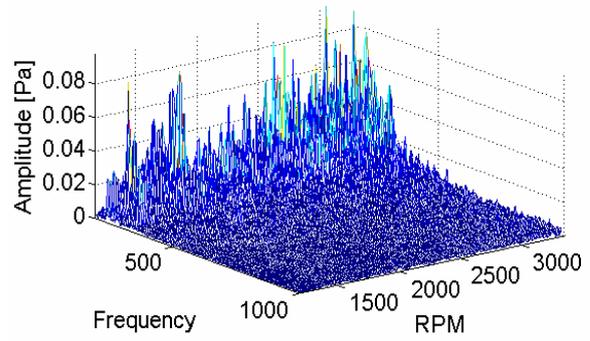


Fig. 3 (b) The background signal of the vehicle

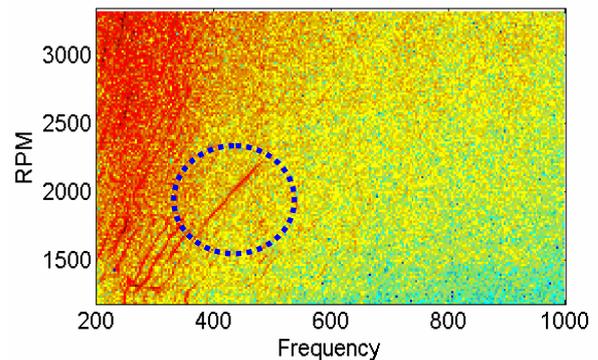
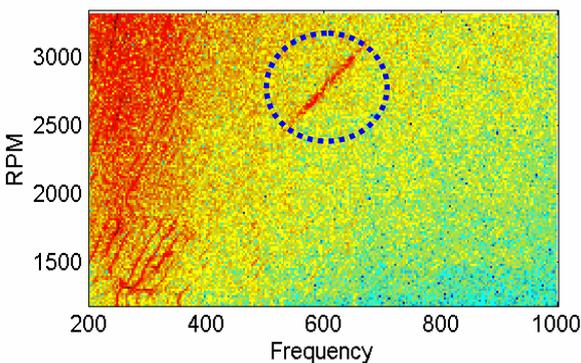
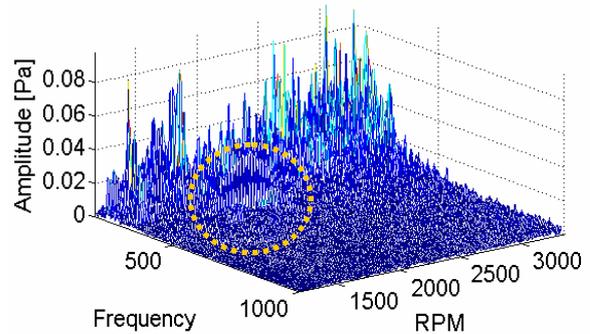
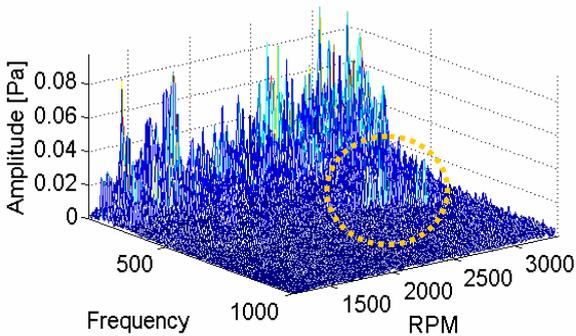


Fig. 3 (a) The original signal of the vehicle

Fig. 3 (c) The artificial axle signal of the vehicle

Fig.4 는 액슬 기어 성분을 만드는 과정을 나타내며 이 작업은 Matlab 소프트웨어를 이용하였다. Fig.4(a)는 주파수 변조되어 SUV 차량의 프로펠러 축의 속도 변화와 동일하게 변화하는 신호이며 Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)를 구간 확대한 것으로 식 (1)로 표현된다.

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

Fig.4(c)는 정현파(sinusoid)신호를 이용하여 만들었으며 액슬 와인(whine)소음의 크기, 위치, 폭을 결정한다. Fig.4(c)는 다음의 식(2)로 표현된다.

$$\begin{cases} S(t) = A_j \cos \omega_k (t - t_i) + A_j + 1, \\ S(t) = 1, \end{cases} \quad \text{otherwise} \quad (2)$$

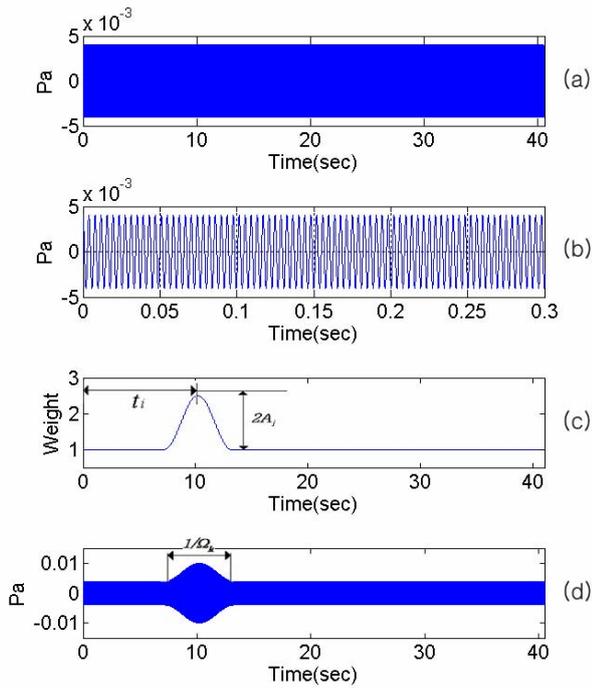


Fig. 4 The process of making the axle order sweep signal

식 (2)에서 A_j , t_i , ω_k 는 각각 액슬 와인소음의 크기, 발생위치, 발생 폭을 결정하는 변수이며 그 자세한 값은 Table 1 에 나타냈다. 위의 식(1)의 신호와 식 (2)의 신호를 곱하여 액슬 기어 order 와 유사한 신호인 Fig.4 의(d)를 만들며 식 (3)으로 표현된다.

$$x(t) = a(t)S(t) \quad (3)$$

Table 1 Variables used in making axle gear whine signal

Time shift t_i (center frequency)	Amplitude A_j	Duration $T_i = 1/\Omega_k$ Time interval
3.50s(200.35Hz)	0.75Pa(54dB)	6.05s(70Hz)
10.26s(373.75Hz)	1.2657Pa(57dB)	6.48s(75Hz)
17.12s(453.12Hz)	1.9941Pa(60dB)	6.91s(80Hz)
23.96s(532.38Hz)	3.0230Pa(63dB)	7.35s(85Hz)
10.26s and 23.96s (373.75HzAnd 532.38Hz)		

위와 같은 방법으로 제작된 인공신호는 80 개이며 Fig.3(b)의 배경 잡음 신호와 합성되어 청음평가에 사용하였다.

3. 청음평가

임상실험은 2.3 장의 방법으로 만든 80 개의 액슬 기어소음 합성신호와 5 개의 실차 신호로 총 85 개의 액슬 소음데이터를 이용하였다. 평가방법은 레이팅 방법(rating method)을 이용하였으며 SAE 학회에서 규정된 4~9 점 방식을 사용하였다. Table 2 와 같이 불쾌할수록 낮은 점수로 평가된다. 평가자는 총 21 명이다.

Table 2 The organization of the evaluation grades

Grade	Evaluation mark	Grade	Evaluation mark
4	Unacceptable	7	medium
5	Borderline	8	Good
6	Fair	9	Excellent

3.1 음질요소 분석

Fig. 5 는 청음평가한 신호의 음질인자와 주관적 평가 점수와의 상관관계를 나타낸 것이다. 심리음향학에서 정의한 주요 음질요소 중 dB(A), Loudness, AI 가 평가값과 85% 이상으로 높은 상관성을 갖는다. 신경망 회로 학습을 위해 평가값과 상관도가 높은 인자를 선정해야 한다. Loudness 와 dB(A)는 음의 크기를 나타내는 인자이므로 서로 높은 상관성을 갖는다. 그러므로 첫 번째 인자로 AI 를 선정하고 AI 와 역 비례관계가 더 큰 Loudness 를 두 번째 인자로 선정하였다. Table 3 에서 선정을 위한 인자간의 상관도를 표시하였다.

Table 3 The correlation of soundmetrics

	dB(A)	Loudness	AI
dB(A)	1.00		
Loudness	0.98	1.00	
AI	-0.93	-0.97	1.00

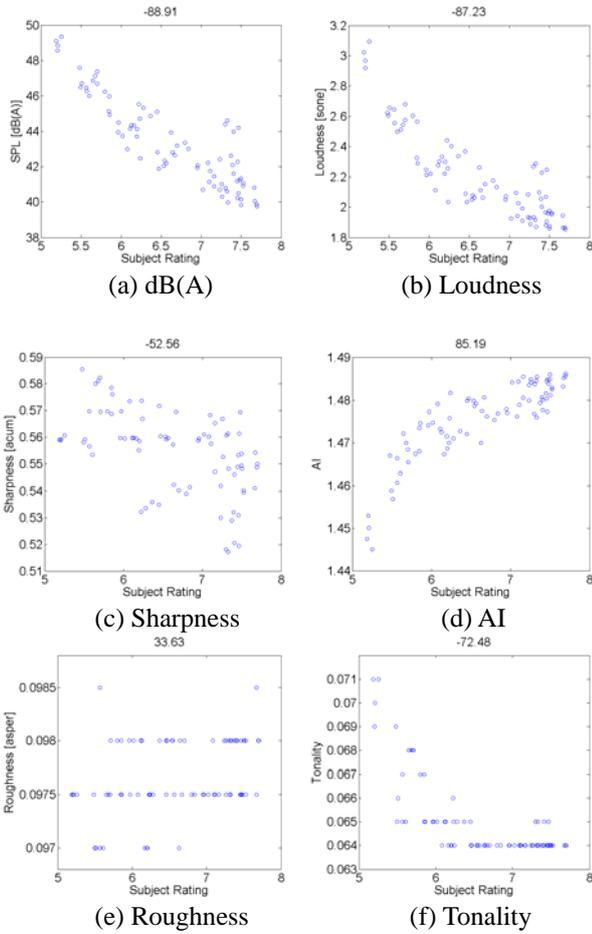


Fig. 5 Sound metric for axle noise sound

4. 음질 인덱스 구현

선형회귀분석이나 다항회귀분석을 이용하여 데이터의 상관관계를 통해서 음질인덱스를 제작하는 것이 일반적인 음질 인덱스 구성과정이다. 회귀분석을 통하여 두 데이터의 상관관계를 규명하기 위해서는 두 데이터가 선형적인 관계를 가져야 한다. 그러나, 액슬 기어소음 청음평가 점수는 여러 가지 음질요소의 조합에 의해 비선형적인 관계를 이루므로 본 연구에서는 Fig. 6 과 같은 다층 신경회로망을 이용하여 음질인덱스 구현을 하였다. 본 연구에서 쓰인 신경회로망은 비선형적인 모델을 해석하기 위하여 많이 사용되지만 개별적인 학습이 필수적이다. 그러므로 학습을 위한 데이터의 양이 충분히 확보되어야 한다. 이를 만족시키기 위하여 인공 합성신호를 제작하였다. Fig. 6 은, 역전파 (back propagation) 알고리즘을 사용하여 6 개의 뉴런 (neuron)을 갖는 은닉 층과 1 개의 뉴런을 갖는 출력 층으로 구성된 신경회로망을 표현한 그림이다. 식 (4)는 음질인덱스를 위해 사용된 신경회로망을 수식적으로 표현한 것이다. 식(4)에 사용된 함수는 tansig, purelin 함수이며 입력 값

으로 Loudness, AI 를 사용하여 학습시켰다.

$$\text{Output} = f^2(W^2 f^1(W^1 x + b^1) + b^2) \quad (4)$$

f^1 : tansig 함수 f^2 : purelin 함수
 W^1 : 은닉층 가중행렬 W^2 : 출력층 가중행렬
 b^1 : 은닉층 편향벡터 b^2 : 출력층 편향벡터

신경회로망 학습을 위하여 Matlab 을 사용하여 프로그래밍 하였으며 출력 값으로 액슬 음질점수를 얻을 수 있도록 제작하였다. 청음평가에 사용된 85 개 중 인공신호 60 개를 이용하여 학습 시키고, 나머지 인공신호 20 개를 이용하여 자체 검증을 실시하였다. 또한, 학습된 가중치 (W_i)의 검증을 위해 실차 신호 5 개에 대하여 입력 검증을 실시하였다. 학습 횟수는 학습도중의 검증(자체검증)에서 타겟 값(청음 평가 값)과 출력 값(신경회로망의 출력 값)의 상관도가 92%이상일 경우와 5 개의 입력 검증신호에 대해서 타겟 값과 출력 값의 상관도가 92% 이상일 경우에만 학습이 끝나도록 하였다.

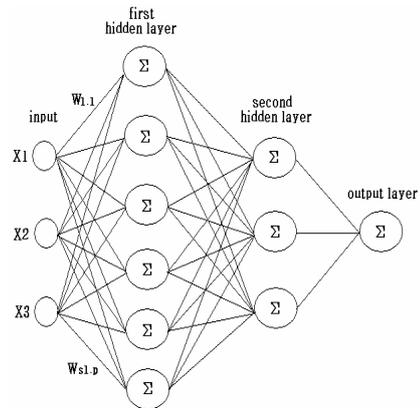


Fig. 6 Schematic of multilayer neural network

4.1 액슬 소음 청음평가 결과

신경 회로망의 학습 후 결과에 대한 검증은 학습에 사용하지 않은 데이터를 사용해야 한다. Fig. 7 은 60 개의 학습신호에 대해 입력 값과 출력 값의 상관도가 96.3%으로 높은 상관성을 가지는 출력 값을 얻고 있다. Fig. 8 은 학습신호를 제외한 새로운 신호 20 개의 상관도로서 95.5%의 상관성을 보여주고 있다. Fig. 9 는 실차 신호 5 개를 통한 상관성 검증을 보여주는 것으로 97.8%를 나타낸다. 따라서 본 연구에서 구현된 액슬 음질 인덱스를 통하여 차량의 실내소음 중 액슬 소음에 대해서는 우수한 결과를 얻을 수 있음이 확인되었다.

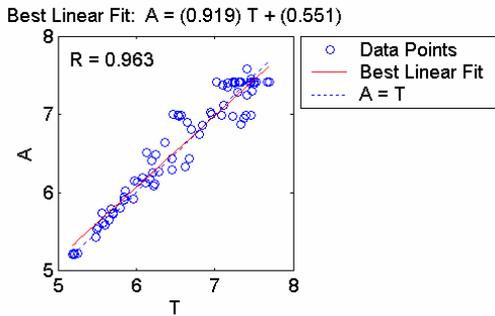


Fig. 7 Correlation between subjective evaluation and neural network output.

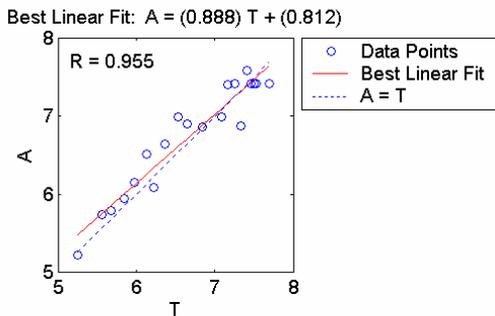


Fig. 8 Correlation between subjective evaluation and neural network output for testing data.

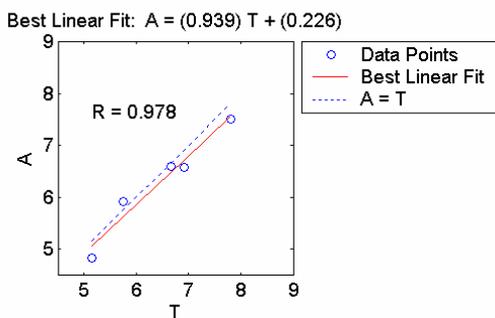


Fig. 9 Comparison subjective evaluation with neural network output for validation data.

5. 결론

음질 인덱스 개발을 위하여 주관적 요소인 청음 평가와 객관적 요소인 음질요소와의 연관성을 알아본 본 연구에서 임상실험 결과와 음질요소의 상

관성을 분석한 결과 dB(A), Loudness, AI 의 상관성이 높게 나타났다. 독립적인 음질요소를 구분하기 위하여 음질요소간의 상관도를 계산해본 결과 Loudness 와 AI 를 음질인덱스 개발을 위한 인자로 선정할 수 있었다. 액슬 소음의 음질인덱스를 개발하기 위해서, 음질요소 (Loudness, AI) 와 액슬 소음의 특성 (크기, 위치)등을 고려하여야 할 것이다. 액슬 음질 인덱스 제작 후 인공신경망(ANN)의 출력 값은 학습 값과 상관성이 있음이 확인되었으며 실제 차량 신호에 대해서는 97.8%의 상관성을 가짐으로써 실제 개발 차량 실내 소음의 액슬 음질 점수를 청음평가 없이 예상할 수 있음을 보여주었다.

후 기

본 연구는 다이모스(주)의 산학연구비와 미래형 자동차의 핵심기반기술(과제번호 10023237) 연구비로 수행 되었습니다.

참고문헌

- (1) Blommer M., et al., 1995, "Calculating the Loudness of Impulsive Sounds," SAE 951311.
- (2) Lee, S. K., et al., 1993, "Identification of the relation between crankshaft bending and interior noise of A/T vehicle in idle state," SAE930618.
- (3) Lee, S. K., et al., 1993, "Improvement for vibration of the power plant for noise reduction and enhancement of sound quality," KSAE, Vol. 1, No. 2, pp.77~88.
- (4) Lee, S. K., et al., 1994, "Weight reduction and noise refinement of HYUNDAI 1.5Liter Powerplant," SAE940995.
- (5) Heo, D. J., et al., 2000, "Sound quality analysis and modeling for interior noise of a vehicle," KSNVE, Vol. 10, No.2, pp. 254~260
- (6) H. Fastl., 1997, "The Psychoacoustics of Sound-Quality Evaluation," ACUSTICA 83 (1997) 754-764
- (7) Zwicker, E. and Fastl, H., 1999, "Psychoacoustics, Facts and Models," Springer-Verlag, Berlin.
- (8) Zwicker, E. Fastl, H. and Dallmayr, C., 1984, "Basic-Program for Calculating the Loudness of Sounds from Their 1/3-oct Band Spectra According to ISO 532B," Acustica, Vol. 55, No. 63.
- (9) Matr, H., 1996, "Neural Network Design," PWS Publishing Company.
- (10) Brigham, O., 1998, "The Fast Fourier Transform And Its Applications," Prentice-Hall.
- (11) Becker, S. and Yu, S. X., 1999, "Gear Noise Rating Prediction Based on Objective Measurement," SAE 1999-01-1720