

승용차 브랜드 사운드를 위한 이차원 음질 인덱스 개발 New Development of Two-Dimensional Sound Quality Index for Brand sound in Passenger Cars

조 병 옥†, 이 상 권*, 박 동 철 **, 이 민 섭**, 정 승 균**
Byoung-Ok Jo, Sang-Kwon Lee, Dong-Chul Park and Min-Sub Lee, Seung-Gyoon Jung

Key Words : Booming Index(부우밍 인덱스) Rumbling Index(럼블링 인덱스), Brand Sound(브랜드 사운드)
Sound Quality(음질), Artificial Neural Network(신경회로망), Sound Metrics(음질요소)

ABSTRACT

In automotive engineering, the brand sound is one of the important advantage strategy in a car company. For the design of brand sound, the selection of descriptive word for a car sound is one of major works in automotive sound quality research. In paper, booming sound and rumbling sound, which are professional words used by NVH engineers are used for the design of brand sound. We employed sound metrics which are the subjective parameter used in psychoacoustics. According to most research results, the relationship between subjective evaluations and sound metrics has nonlinear characteristics and is very complex. In order to link these subjective evaluations to sound metrics, the artificial neural network technology has been applied to two-dimensional sound quality index for a passenger car. These indexes is used for 46 passenger cars, which are samples of famous cars in the world. Also the preference in car sounds is evaluated by the trained NVH engineers. We coupled this preference with booming and rumbling sounds by using artificial neural network. In future, the two -dimensional sound index and preference index are very useful for the development of brand sound in passenger cars.

1. 서 론

자동차 실내소음의 연구는 실내소음의 음압을 저감하는 측면과 음질(sound quality)의 향상이라는 측면에서 연구되어 왔다. 단순히 실내소음의 dBA 만을 줄이는 방법은 소비자들이 인식하지 못한 새로운 문제점이 발생하게 되었고, 소비자 또한 실내소음의 저감에만 만족하지 않고 좀더 좋은 자동차 실내소음을 요구하고 있다. 그러므로 자동차 디자인과정에서 실내소음의 음질은 중요한 요소가 되었으며, 자동차 실내소음 음질에 관한 많은 연구가 이루어 지고 있다. 자동차 실내소음은 크게 부우밍 소음(booming noise),럼블링소음(rumbling noise),기어 소음(gear noise), 엔진 소음(engine noise), 타이어 소음(tire noise), 풍절음(wind noise)등이 있다. 이 중에서 부우밍 소음과 럼블링 소음은 승용차 실내소음중 가장 중요한 소음이며, 두 소음의 음질에 관한 연구는 따로 이미 연구되었다.[3,8,9] 하지만 일반적으로 자동

차 소음에서 두 소음은 혼합되어 발생하며 자동차 브랜드 사운드에 영향을 주게 된다. 이러한 음질을 평가하기 위해서는 두 소음을 동시에 고려하는 2 차원 음질 인덱스 개발이 필요하다. 2 차원 음질 인덱스는 하나의 소음에 대해 두 개의 출력값이 나오는 것으로, 이런 인덱스를 구현하기 위해서 자동차 소음의 각각에 대해 부우밍과 럼블링 평가가 이루어져야 한다. 소음의 객관적 특성에 주관적 평가를 결부시키기 위해서 심리음향학(psychoacoustics)이 사용되었다. 심리음향학에서 음질요소(sound metrics)는 라우드니스(loudness), 샤프니스(sharpness), 러프니스(roughness) 그리고 변동강도(fluctuation strength)등이 있다. [6] 음질 요소와 주관적 평가와의 관계는 비선형적이고 매우 복잡하다. 이런 특성을 해석하기 위해서 신경회로망(ANN)이론이 사용되었다.[7] 신경회로망의 입력값으로 여러 개의 음질요소를 사용하였고 목표값으로는 부우밍과 럼블링의 청음평가 평균값을 동시에 이용하여 인덱스를 구현 하였다. 추가적으로 동일한 자동차의 실내소음을 대상으로 선호도에 대한 평가를 수행 하였다. 평가된 선호도는 이전에 평가된 부우밍 평가값과 럼블링 평가값과의 관계를 알아보기 위해 부우밍과 럼블링 평가값을 입력값으로 사용하고 선호도 점수를 목표값으로 하는 신경회로망 인덱스를 구현하였다.

† 인하대학교 대학원 기계공학과
E-mail : kingohkeec@naver.com
Tel : (032) 860-8650, Fax : (032) 868-1716

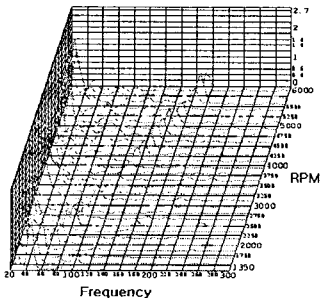
* 인하대학교 기계공학과 교수

** 현대자동차 남양연구소

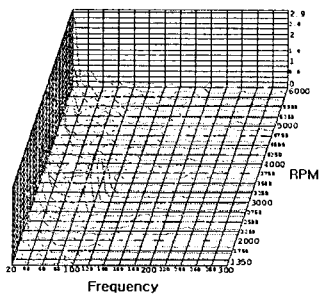
2. 인공신호 제작

2.1 부우밍 인공신호 제작

음질 분석에 사용되어지는 신경회로망은 가중치 (optmal weight) W_i 를 구해야 하고 이를 위해서는 많은 학습데이터가 필요하다. 따라서 다양한 크기와 속도에서 발생하는 부우밍 소음을 얻기 위해서 인공적인 신호를 제작하였으며, 부우밍 소음을 위한 인공신호는 칼만 적응필터 (kalman adaptive filter)와 신호처리 기법을 이용하여 만들었다. 부우밍 소음의 많은 연구에 의하면 인공신호의 중요한 인자는 부우밍 발생크기, 발생 주파수, 주파수 폭 등 3 가지이다.[3,4,8] 부우밍 인공신호를 제작과정은 Fig. 1 에서 보여주고 있으며, 인공신호는 최종적으로 50 개를 만들었고 학습에 사용된 신호는 총 35 개이다. Fig. 1 는 직렬 4 기통을 차량의 샘플소음으로, 엔진의 2nd 오더에 부우밍 소음이 인공적으로 만들어져 있음을 보여준다. 인공신호는 일차적으로 부우밍을 발생하고자 하는 오더를 제거하고 정현파 신호를 이용하여 부우밍 신호를 만든 후 오더가 제거된 신호에 합성하였다. 이와 같은 인공신호는 LMS 시스템을 이용해 제작하였다.



(a)Original sample car



(b)Synthesized booming signal in 2nd order

Fig. 1 Waterfall analysis of booming sound

2.2 럼블링 인공신호 제작

다양한 럼블링 소음을 얻기 위해 실차 신호를 배경소음으로 하여 인공적으로 럼블링이 발생하는 신호를 제작하였다. 많은 연구 논문에 의하면 럼블링 소음은 연속된 3 개의 1/2 오더에서 발생한다.[9,10] I4 엔진을 탑재한 차량의 경우 200Hz 에서 공진이 발생하면 3000rpm 에서는 4th 오더가 전승 주파수가 된다. 여기서 3.5 오더와 4.5 오더가 변조 주파수에 해당하며 진폭변조 주파수는 15Hz~35Hz 의 범위에 해당한다.

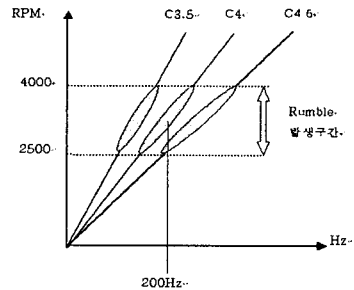


Fig. 2 Illustration of the rumbling signal

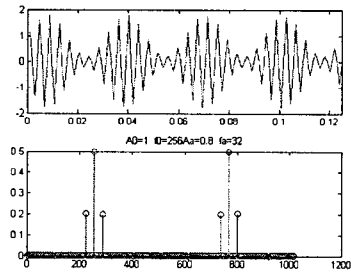


Fig. 3 Frequency analysis of the rumbling

실제 차량에서 공진이 발생시 구조물의 공진을 고려하면 200Hz 주변에서 일정한 밴드를 가지고 발생하므로 럼블링도 일정 rpm 구간에서 발생한다. 따라서 럼블링 합성신호에서는 럼블링 발생 시점, 럼블링 발생구간, 진폭변조율, 그리고 전승주파수 (공진주파수)의 진폭크기의 4 요소가 고려 되었다. 럼블링은 주로 가속시에 발생하므로 배경신호는 가속신호를 이용하였다. 인공적으로 럼블이 발생할 해당오더의 가속신호를 만들기 위해 sweep 신호를 이용해 인공가속 신호를 만들고 신호의 진폭변조를 위해 sine 함수를 이용해 포락 신호를 만들었다. 가속신호와 포락 신호를 곱하여 최종적으로 진폭 변조된 가속된 신호를 얻는다. 이를 배

경소음에 합성하여 인공적으로 럼블링 신호를 제작하였다. 인공적으로 만들어진 럼블링 소음은 50 개이며, 35 개만이 학습에 사용되었다. Fig. 4는 4th order 에 럼블링을 인공적으로 발생하게 한 소음을 보여준다.

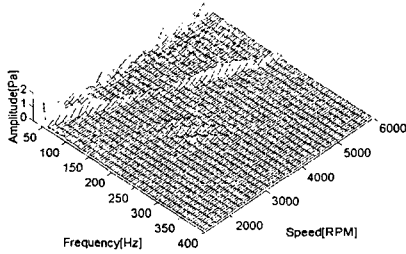


Fig. 4 Waterfall analysis of rumbling sound

3. 청음 평가

청음평가에 사용된 신호는 106 개이며, 부우밍 인공신호는 35 개, 럼블링 인공신호 35 개, 실차 신호 36 개로 구성 되었다. 추후 부우밍 인공신호 5 개, 럼블링 인공신호 5 개, 실차 신호 20 개의 소음이 인덱스를 검증하는데 사용 되었다. 실험인원은 NVH 전문가 12 명이 참가하였다. 소음의 재생은 Head acoustics 사의 playback system 을 통하여 헤드폰으로 전달되며, 재생 순서는 랜덤으로 구성하였다. 평가 점수는 4~9 점 방식을 사용하였으며, 부우밍과 럼블링이 심한 차일수록 낮은 점수를 받게 된다.

3.1 부우밍 청음평가 결과

106 개 신호에 대한 음질 요소의 계산 결과를 Fig. 5 에서 보여준다. 음질요소의 계산은 LMS 사의 Tmon 을 이용하였다. 또한 부우밍과 럼블링의 발생주파수 구간이 다르므로 각각 해당 구간의 loudness 의 영향을 알아보기 위해 필터를 이용했다. 라우드니스에 대해서만 200Hz lowpass filter 와 200~500Hz bandpass filter 로 필터링 후 그 값을 계산 하였다. Fig. 5 (b), (c)에서 알 수 있듯이 부우밍의 청음평가에 대해 200Hz lowpass filter 를 사용하여 계산된 라우드니스는 비선형적으로 반비례하는 경향이 있고, 샤프니스는 비선형적으로 비례하는 경향이 있다. 나머지 음질 요소인 라우드니스와 러프니스, 변동강도와는 큰 관계가 없음을 알 수 있다.

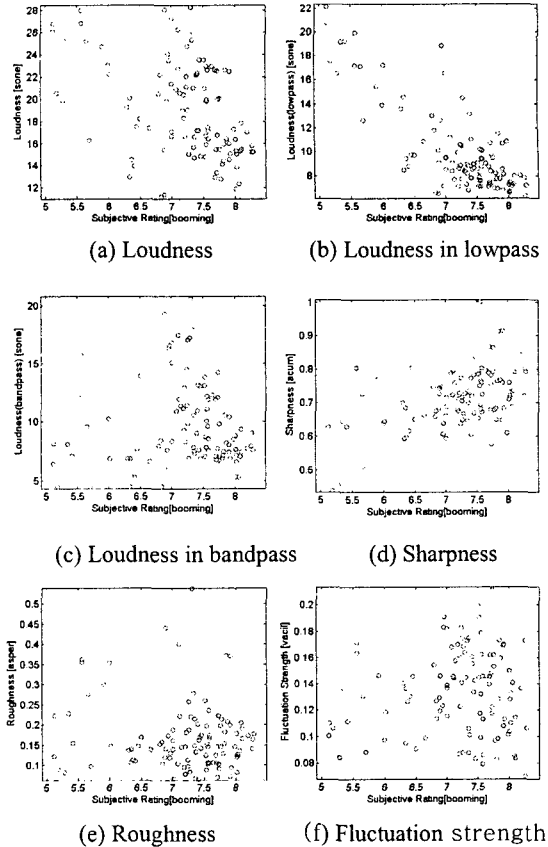
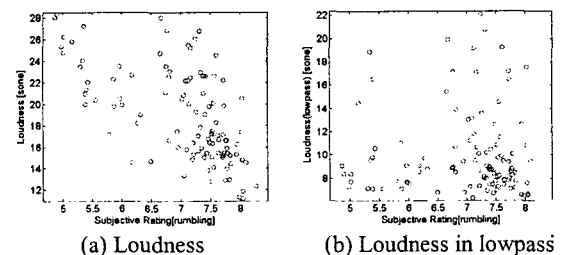
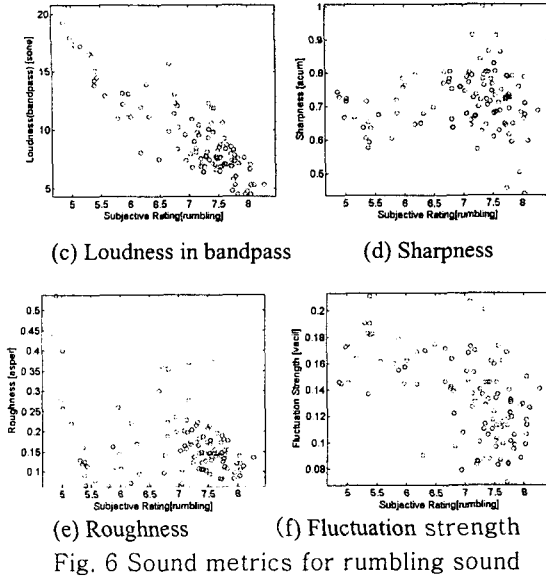


Fig. 5 Sound metrics for booming sound

3.2 럼블링 청음평가 결과

신경회로망의 입력데이터로 사용하기 위해서 계산된 음질요소와 럼블링 청음평가 값과의 관계를 Fig.6 이 보여준다. 럼블링 평가 결과는 200Hz~500Hz bandpass 를 한 라우드니스와 비선형적으로 비례하는 경향이 있고 변동강도와 비선형적으로 반비례함을 Fig. 6 의 (c),(f)를 통해서 확인된다. 다른 주요 음질 요소는 럼블링 청음평가 값과 큰 관계가 없음을 알 수 있다.





(c) Loudness in bandpass

(d) Sharpness

(e) Roughness

(f) Fluctuation strength

Fig. 6 Sound metrics for rumbling sound

4. 2 차원 음질 인덱스 구현

음질 요소와 평가결과의 비선형적인 관계를 해석하기 위해서 Fig. 7 과 같은 다층 신경회로망을 이용하였다. 본 연구에서 신경회로망은 역전파 알고리즘을 사용하여 6 개의 뉴런(neuron)을 갖는 은닉층과 2 개의 뉴런을 갖는 출력층으로 구성된다. 입력값으로 라우드니스(필터적용), 샤프니스, 러프니스, 변동강도를 사용하여 학습을 시킨후 가중치 값인 W_i 를 구하여 출력값으로 부우밍과 럼블링 값을 얻는다.

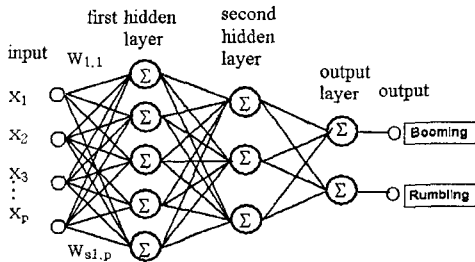
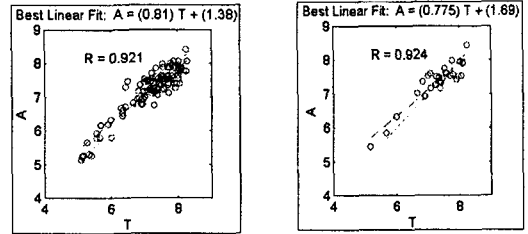


Fig. 7 Schematic of multilayer neural network

4.1 부우밍 청음평가 결과

총 106 개의 신호를 학습에 사용하여 가중치 행렬을 구한 결과 부우밍은 다갯값과 출력값이 92.1%의 상관관계를 보였다. 또한 인덱스 검증에 위해 30 대(실차신호 20 개, 인공신호 10 개)를 이용하여 확인한 결과 92.4%의 상관관계가 있었다.

따라서 구현된 인덱스를 이용하여 추후 부우밍의 값을 계산 가능하고 그 유용성을 확인 할 수 있다.



(a) All signals

(b) Verification signals

Fig. 8 Correlations between the output of ANN and the subjective rates in booming

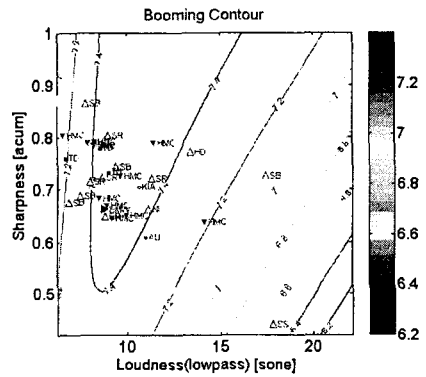
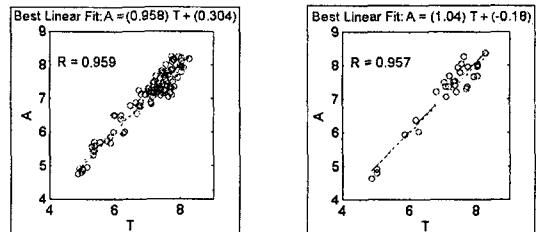


Fig. 9 Booming Contour between L and S

4.2 럼블링 청음평가 결과

럼블링 인덱스의 경우 학습상관도가 95.9%, 30 대 신호와의 유용성 검증을 위한 확인 결과는 95.7%의 높은 상관관계가 보였다. 따라서 추후 구현된 인덱스를 이용하여 럼블링의 경우에도 그 유용성을 확인 할 수 있다.



(a) All signals

(b) Verification signals

Fig. 10 Correlations between the output of ANN and the subjective rates in rumbling

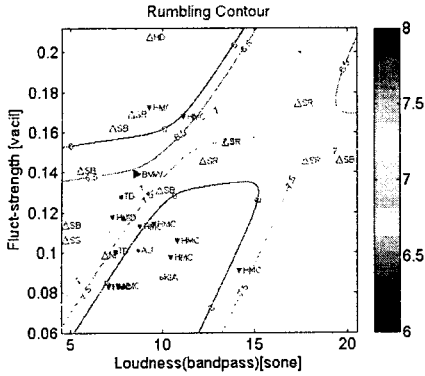


Fig. 11 Rumbling Contour between L and F

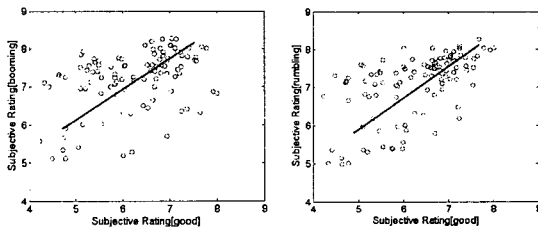
(AU=AUDI 사, BMW=BMW 사, KIA=KIA 사, NI=NISSAN 사, HMC=HYUNDAI 사, TD=TOYODA 사, SB=부우밍인공신호, SR=럼블링인공신호)

5. 선호도 음질의 구현

보통의 소비자는 승용차의 실내소음에 대해, 단지 소음이 좋다/나쁘다. (preference) 또는 힘이 좋다/힘이 없다. (powerfulness) 등으로 평가를 한다. 따라서 차량의 선호도에 부우밍과 럼블링이 어떤 영향을 미치는지 알아 볼 필요가 있다. 이를 위해 앞의 내용과 같이 106 개의 차량에 대해 선호도 청음평가를 실행하고 그 값을 이용하여 관계를 구현했다. 선호도에 대한 인덱스를 구하기 위해서 1 차원 신경회로망을 이용하였으며, 그 과정은 앞의 내용과 같다.

5.1 선호도와 부우밍, 럼블링과의 관계

Fig. 11 의 (a)는 실내소음의 선호도와 부우밍 점수와의 관계를 보여주는데, 두 평가의 관계는 비례관계가 있음이 확인된다. 그리고 (b)는 선호도와 럼블링 점수와의 관계를 나타내는 그림으로 역시 비례성이 있는 것으로 보여진다.



(a) Booming rates (b) Rumbling rates

Fig. 12 The relations between preference rates and booming, rumbling rates

차량의 대표적인 소음인 부우밍과 럼블링이 선호도와 양의 상관성을 가지지만(점수가 작을수록 부우밍과 럼블링 많음) 차량의 실내소음을 구성하는 두 요소이므로 단순히 이 두 인자만을 통해 완벽한 선호도를 예측하기는 불가능할 것이다. 하지만 100km/h 이하의 주행에서는 풍절음(wind noise) 영향이 적고 그 외 기어소음과 브레이크 소음, 배기 소음 등을 무시한다면 두 인자만으로도 선호도를 평가 할 수 있다.

5.2 선호도의 음질 등고선

2 차원 음질 인덱스와 같이 신경회로망을 이용하여 선호도 음질 인덱스를 구현했다. 선호도 인덱스는 부우밍과 럼블링의 두 지수를 입력값으로 하며, 6 개의 뉴런(neuron)을 갖는 은닉층과 1 개의 뉴런을 갖는 출력층으로 구성된다. 2 차원 인덱스와 동일하게 학습에는 106 개의 신호가 사용되었으며, 학습결과는 Fig. 13 의 (a)에서 86%의 상관성을 보여준다. 2 차원 인덱스에 비해 학습결과가 다소 떨어지며, 이는 자동차 실내소음의 선호도 평가에서 부우밍과 럼블링이 아닌 다른 요소가 영향을 줄을 간접적으로 확인 가능하다. (b)는 32 개의 신호에 대해 구현된 인덱스를 검증한 것이다. 30 개의 차종은 2 차원 인덱스와 동일하며, 2 개의 완성된 차종이 포함되었다. 검증을 위한 상관관계는 약 90%를 나타낸다. 선호도 음질 인덱스를 이용해 그린 음질 등고선은 결론 부분

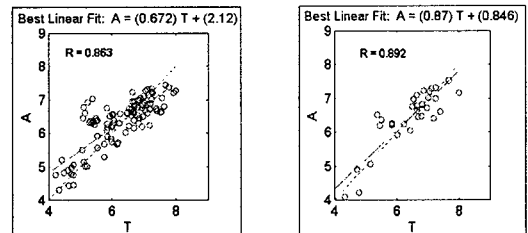


Fig. 14에 나타냈다.

(a) All signals (b) Verification signals
Fig. 13 Correlations between the output of ANN and the preference rates

6. 결론

부우밍과 럼블링을 동시에 출력값으로 갖는 2

후 기

본 연구는 현대자동차의 산학 연구비와 미래형 자동차의 핵심 기반기술(과제번호 10023237) 연구비로 수행 되었습니다. 지원에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 박동철 등, 2002, “승용차의 음질 개발에 관한 연구”, 소음진동공학회지, 12(5), pp342~350
- (2) 이상권, 2002, “인간의 감성과 인공 신경회로망을 이용한 음질 인덱스 개발에 관한 연구”, 소음진동공학회지, 12(5), pp351~357
- (3) 채희창 등, 2003, “신경망회로를 이용한 부우밍 음질의 인덱스 개발에 관한 연구”, 소음진동공학회논문집, 13(6), pp.445~451
- (4) Hatano, S. and Hashimoto, T., 2000 “Booming Index as a Measure for Evaluating Booming Sensation” Proc. Inter-Noise 2000, Nice, France.
- (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
- (9) Park D. C., Lee S. K., Kim B. S. and Jung S. G., 2004 “Developments of sound index for refinement of rumbling noise of a passenger car using artificial neural network based on human”, Barcelona, Spain
- (10) Wakita, T., Kozawa, Y., Samada, K., Sugimoto, G., 1998, “Objective Rating of Rumbling in Vehicle Passenger Compartment During Acceleration” proceeding of the 1998 SAE Noise and Vibration Conference, SAE891155

차원 음질 인덱스는 라우드니스, 필터링된 라우드니스, 샤프니스, 러프니스 그리고 변동강도를 신경회로망의 입력값으로 사용 하였다. 부우밍 지수는 200Hz lowpass 된 라우드니스, 샤프니스와 관계가 있으며, 럼블링 지수는 bandpass 된 라우드니스, 변동강도와 상관성이 있었다. 학습을 통해 얻은 뉴럴의 출력값은 부우밍의 경우 92%, 럼블은 96%의 상관성이 있으므로, 실제 개발 차량 실내소음의 부우밍과 럼블링 지수를 청음평가 없이 2D 인덱스를 적용하여 예상 할 수 있음을 보여준다. 또한 자동차의 선호도를 알아보는 방법으로 부우밍과 럼블링의 관계를 이용 하였다. Fig. 14는 부우밍과 럼블링을 이용하여 실내소음의 선호도를 예측한 등고선이다. 등고선을 통해 HMC사의 개발 차량과 양산차량의 변화를 알 수 있다. 두 차량 모두 부우밍 지수와 럼블링 지수가 증가하였고 그 결과 선호도 점수도 0.5~1 점 가량 증가했다. Fig. 9와 Fig. 11를 통해 현 상태의 차량에서 부우밍 지수와 럼블링 지수를 향상 시키기 위해 어떤 음질 요소를 변경해야 하는지 알 수 있다. 또한 Fig. 14를 이용하여 차량의 선호도 지수를 향상 시킬 수 있는 적절한 방법을 모색 할 수 있다. 결론적으로 차량의 실내소음을 개선하기 위해서는 부우밍과 럼블링이 없는 소음을 만드는 것이 중요하지만 정량적으로 어느 정도 수준이어야 하는지에 관한 정확한 해답은 없다. 또한 차량의 용도에 따라 그 정도도 달라질 것이다.

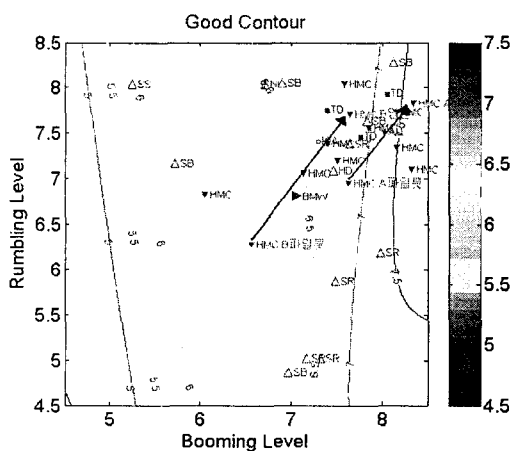


Fig. 14 Development of sound quality for passenger cars using sound index, which is booming and rumbling rates