한국소음진동공학회 2004년도 춘계학술대회논문집, pp. 1009~1012.

과도 음향 신호의 음질 평가 방법

A method for Sound Quality Evaluation of Non-stationary Acoustic Signal

신성환*·이정권*

Sung-Hwan Shin and Jeong-Guon Ih

Key Words : Sound Quality (음질), Sound Quality Metrics (음질인자), Listening Test (청음실험), Non-stationary Sound (과도음), Booming (부밍), Booming Strength (부밍세기)

ABSTRACT

Recently, the concern on sound quality (SQ) is on the steep increase in the fields of vehicle and home appliance and over the fast few decades, a considerable number of studies have been conducted on SQ evaluation. As a result, basic procedure for SQ evaluation has been already suggested. Although most interesting sounds have time-varying features, however, little is known about their SQ evaluation. The purpose of this study is to systematize a method for SQ evaluation of non-stationary sound. For this, various listening tests procedure for non-stationary sound is introduced and it is attempted to find out correlation between various SQ metrics and subjective data obtain from listening test. Booming of car interior noise in acceleration is used as an example and finally, representative value is obtained for the interesting sensation of non-stationary sound.

1. 서 론

일반적인 소음제어의 목표는 제품에서 발생되는 소음의 음압 레벨을 줄여, 최소화 하는 것에 있었으나, 최근 자동차나 가전제품 관련 분야에서 음질 (sound quality)에 대한 관심이 높아지면서 관련 제품의 음질을 최적화 하는 것이 추가되고 있다. 음질의 최적화를 위해서는 제품 소음에 대한 음질 평가가 필요하고, 많은 연구자[1,2]들에 의해서 음질 평가에 대한 기본적인 방법은 제시되었다. 그러나 이러한 연구들에서는 정상음 (steady sound)을 대상으로 하거나 상대적으로 짧은 음을 다루었기 때문에, 시간에 따라 특성이 변하는 일반 과도음 (non-stationary sound)에 대한 음질 평가에 기존 방법을 적용하는 것은 바람직하지 않다.

따라서 본 연구에서는 과도음에 대한 음질 평가 방법을 제안하고자 한다. 이를 위하여 먼저 일반적인 음질 평가 방법을 언급한 후, 과도음의 음질 평가에서 추가적으로 요구되는 문제를 해결할 수 있는 청음실험 (listening test)를 이용한 주관적인 방법 및 음질인자 (SQ metrics)를 이용한 객관적인 방법 등을 정리한다. 이러한 방법들은 가속주행 중 측정된 자동차 실내 소음의 부밍 (booming) 현상을 예측하는 예제에 적용되어, 제안된 방법에 의해서 상대적으로 긴 과도음의 음질을 예측할 수 있음을 보인다.

* 한국과학기술원 기계공학과 소음진동제어센터
E-mail: soulshin@kaist.ac.kr
Tel: (042) 869-5035, Fax: (042) 869-8220

2. 음질 평가 방법

제품 소음의 음질 평가는 소음에 대한 객관적/주관적 분석 부분과 분석 결과를 이용한 예측부분으로 나뉘어지고, 이를 위한 기본적인 방법은 Fig. 1 과 같이 정리할 수 있다. 첫번째 단계는 대상이 되는 제품의 다양한 모델을 대상으로 작동 중 발생 소음을 녹음하는 것이다. 모델의 선택은 보다 정확한 음질 평가를 위하여 특정 그룹으로 나누는 것이 필요한데, 예를 들면 자동차에서 가솔린/디젤 차량이나 승용차 (passenger car), 스포츠카 (sport car), 레저용차 (SUV) 등으로 나누는 것과 관련된다.

두번째 단계는 측정된 소음을 대상으로 객관적 분석을 위해 라우드니스 (loudness), 샤프니스 (sharpness), 러프니스 (roughness), 변동강도 (fluctuation strength) 등의 대표적인 음질인자 (SQ metrics)를 위해 수치평가법 (MEM: magnitude estimation method)나 쌍비교법 (PCM: paired comparison method)을 이용한 청음실험을 수행하는 것이다. 청음실험을 위해서 관심 지각인자 (perceptual dimension)를 선택한 후, 선택된 지각 인자에 주요한 영향을 줄 수 있는 소음원 또는 소음 특성을 파악하는 것이 필요하다.

세번째 단계는 위에서 얻은 주관적 결과와 객관적 결과 사이의 상관관계를 파악하는 것이다. 이러한 상관관계를 바탕으로 대상이 되는 지각인자와 관련된 음질 인자를 선택하고, 마지막은 음질 예측을 위한 단계로, 선택된 음질 인자를 입력

변수로 회귀분석 (regression analysis)을 수행하여 관련 음질 지수 (sound quality index)를 얻는 것이다.

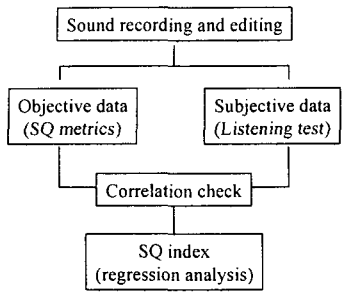

Fig. 1. 일반적인 음질 평가 방법

3. 과도음의 음질 평가

과도음에 대한 음질 평가 역시 전체적으로는 2장에서 언급된 일반적인 음질 평가 방법의 절차에 따라 이루어진다. 그러나 과도음의 경우에는 음질을 대표하는 대표값도 중요하지만 시간에 따른 음질의 정도를 파악하여 문제가 되는 시간 대역의 소음 제어를 할 수 있도록 정보를 제공하는 것도 필요하다. 본 장에서는 과도음의 음질 평가를 위해 각 단계에서 추가되는 부분을 설명한다.

3.1 객관적 음질 분석

음질 평가에 가장 일반적으로 사용되는 객관적 분석 방법은 음질인자의 계산이다. 대표적인 음질인자로는 라우드니스 (N), 샤프니스 (S), 러프니스 (R), 변동강도 (FL)가 있다. 이 중 라우드니스는 다른 음질인자의 발생 원인을 설명할 수 있기 때문에 가장 중요한 인자이고, 라우드니스의 정상음에 계산 방법만이 규격화되어 있다. 과도음에 대한 이러한 음질인자의 계산 방법은 아직 규격화 되어 있지는 않지만 많은 상용프로그램에서 제시되고 있다. 과도음의 음질인자 대표값으로는 라우드니스의 경우 N_{mean}, N_5, N_{10} 이 사용되고, 다른 음질인자도 비슷하다[5].

실제 음질 분석에서는 위 네가지 음질인자로 정확히 설명될 수 없는 음의 특성을 파악하기 위해서 토널리티 (tonality), 커토시스 (kurtosis), 피치 및 피치 강도 (pitch and pitch strength)[6] 등을 고려하기도 한다. 이와 함께 과도음의 시간-주파수 분석 방법인 STFT, VFR-FFT, VFR-STFT 등도 계산한다.

3.2 주관적 음질 분석

음질의 주관적 평가를 위해서는 청음실험이 수행되어야 한다. 그러나 과도음의 평가에 기존 청음실험에서 이용되었던 수치평가법이나 쌍비교법을 바로 적용하는 것은 적당하지 않다. 그 이유는 과도음의 경우, 그 특성이 시간에 따라 변하기 때문에 상대적으로 긴 시간 동안 재생되는 소리를 듣고 평가해야 하지만, 인간의 청각은 훈련 및 경험 정도에 따라 특정 소리에 대한 기억력에 차이가 커서 정확한 평가 결과를 얻는 것이 쉽지 않기 때문이다. 또한 음질 인자와 같은 객관적인 방법을 통하여 얻은 결과와의 상관관계를 찾는 것도 매우 어렵다.

따라서 과도음에 대한 청음실험은 크게 두 부분으로 나누어 수행해야만 한다. 첫째는 녹음된 과도음에서 2 초 또는 3 초 정도의 특정 부분만을 추출하여 편집한 후, 기존의 수치평가법이나 쌍비교법을 적용하여 음질인자 등의 객관적인 측정 결과와 상관관계 파악에 필요한 주관적 결과를 얻는 것이다. 이때 특정 부분 추출에는 Fig. 2 와 같은 평가 프로그램을 이용한 예비 실험 결과를 기준으로 한다. 예비 실험의 목적은 평가되는 지각인자가 뚜렷하게 나타나는 부분과 그렇지 않은 부분을 파악하여 청음실험을 위한 대상음의 개수는 최소화하면서 최대한 다양한 특성을 갖도록 하는 것이다. 평가 방법을 간단히 설명하면 다음과 같다. 먼저 'play sound' 버튼을 청음자가 누르면 음이 재생되면서 재생 시간에 따라 가운데 부분의 막대가 움직인다. 이때 청음자는 주어진 지각인자가 뚜렷하게 들리는 부분을 모두 표시한다. 음의 청취 회수에 대한 제한은 없다.

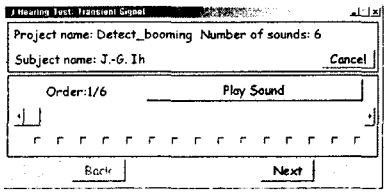

Fig. 2. 대상음 선택을 위한 예비 실험에 사용되는 프로그램.

둘째는 과도음의 시간에 따른 음질의 정도와 그 음의 음질을 대표할 대표값 사이의 관계를 파악하기 위한 청음실험이다. 이미 언급한 것처럼 과도음에서는 대상음의 음질을 대표하는 대표값을 기존 청음실험 방법으로 얻는 것이 힘들기 때문에 시간별 음질의 정도로부터 대표값을 예측하는 것이 필요하다. 이를 위해서 Fig. 3 과 같은 평가 프로그램을 사용한다. 프로그램은 소리가 재생되는

동안 청음자는 움직이는 막대의 위치에 따라 음질의 정도를 각 평가 슬라이드에 표시한 후, 마지막으로 전체 음질의 정도를 표시하는 것을 요구한다. 역시 음의 청취 회수에 대한 제한은 없다.

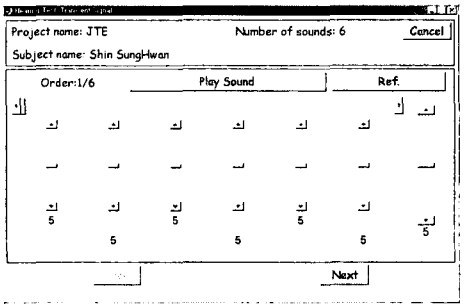

Fig. 3. 시간에 따른 과도음의 주관적 음질 평가를 위한 프로그램.

청음실험에서 얻은 평가 결과는 적절한 통계적 처리 과정[3,4]을 통하여 신뢰성이 보장된다.

3.3 상관관계 파악 및 음질 지수

주관적 평가 결과와 객관적 계산 결과 사이의 관계를 파악하기 위해 가장 일반적으로 사용되는 것은 상관계수 (coefficient of correlation)이다. 그러나 단순히 상관계수만을 가지고 음질에 영향을 주는 인자를 선택하는 것은 매우 위험하다. 과도음의 경우 시간에 따라 계산된 음질인자 값들이 그 음질인자와 관련된 인간의 인지 역치를 벗어나지 못해서 실제 대상 소음의 음질에는 아무런 영향을 주지 못하는 경우가 존재하기 때문이다.

따라서 일반적인 음질 지수 이외에 관련 소음의 특징을 고려하여 해당 소음에만 적용할 수 있는 인자를 제안하고, 그것을 음질 지수를 위한 입력 변수로 사용하는 것이 필요하다. 또한 주관적 음질 분석에서 나누어 수행했던 청음실험, 즉 특정 부분의 음질 정도 파악을 위한 실험 및 전체적인 음질 정도를 평가하는 실험 결과를 통하여 해당 소음의 음질 대표값을 얻을 수 있도록 해야 한다.

4. 차량 실내 소음에의 적용

2 장 및 3 장에서 언급된 음질 평가 방법을 적용하기 위한 예제로 자동차 실내 소음을 선택하였다. 대상 소음은 6 개 차종의 2000rpm 에서 6000rpm 까지 가속 주행 중 실내 소음이고, 음질 평가를 위한 지각인자는 부밍 (booming)이다. 객관적 음질 분석을 위한 방법으로는, 기존 부밍 분석을 위해 사용되었던 order analysis, 과도음을 위한 4 가지의 대표적인 음질인자, 시간-주파수 분석 (STFT), 토널리티, 피치 및 피치세기가 사용되었다. 그리고 부밍 현상의 주관적 평가를 위하여, 3.2 절에서 언급된 예비 실험 결과를 기준으로 녹음된 6 개의 과도음에서 12 개의 대상음을 추출하여 여러가지 목적을 갖는 청음실험을 수행하였고, 시간에 따른 부밍의 정도 및 대표값을 얻기 위한 청음실험이 수행되었다.

기존의 부밍에 대한 연구를 통해서 라우드니스가 부밍에 주요한 영향을 준다는 사실이 알려져 있지만[7,8], 실제 라우드니스를 일정하게 유지하도록 대상음의 일부를 편집하여 PCM 을 이용한 청음실험을 수행한 결과 Fig. 4 와 같이 부밍의 정도에서 차이를 나타냈다. 이는 라우드니스 이외의 어떤 인자가 부밍 현상에 영향을 주고 있음을 의미한다. 다른 음질 인자들과 청음실험 결과 사이의 상관계수를 계산한 결과 샤프니스와 관련된 상관계수만이 -0.92 로 유효한 값을 가졌지만 일부 샤프니스 값들이 인간이 느끼는 샤프니스 역치인 5% 범위안에 있을 뿐만 아니라 부밍이 샤프니스 차이보다는 라우드니스 차이에 더 민감하게 반응하기 때문에 음질 지수를 위한 입력변수로 사용하는 것은 적절하지 않다.

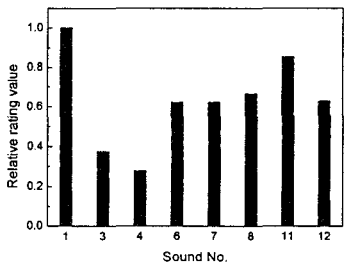

Fig. 4. 일정한 라우드니스를 갖도록 편집된 대상음에 대한 쌍비교법을 적용한 청음실험 결과.

이러한 문제를 해결하기 위해서 본 연구에서는 피치 세기 및 비라우드니스를 이용한 *BS* (부밍 세기: booming strength)를 제안하였다[9]. *BS* 와 주관적 평가 결과사이의 관계를 조사한 결과, Fig. 4 와 관련된 청음실험 결과와는 0.8 의 상관계수를 얻었고, 12 개 대상음에 수치평가법을 적용한 청음실험 결과와는 0.93 의 상관계수를 얻었다

음질 지수를 구하기 위하여 입력 변수로 시간에 따른 평균 라우드니스 (N_{mean})과 *BS* 를 사용하여 회귀분석을 한 결과, Fig. 5 과 같은 결과를 얻었다. 회귀 분석을 위해 사용된 데이터는 총

55 개이고, 타당성 검증을 위한 데이터는 9 개이다. 각 경우에 따른 결정계수는 0.93 과 0.90 이다.

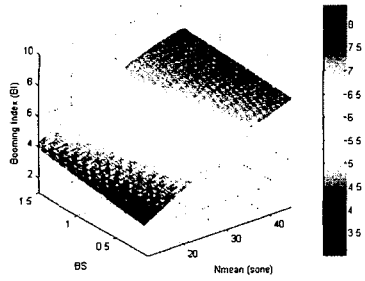

Fig. 5. 입력 변수 BS 와 N_{mean} 의 변화에 따른 부밍 지수의 변화

위 부밍 지수로부터 예측된 부밍 정도와 시간에 따른 부밍 정도를 평가한 청음실험 결과를 비교한 Fig. 6 을 보면 제시된 부밍 지수가 시간에 따른 부밍의 정도를 잘 예측하고 있음을 확인할 수 이다.

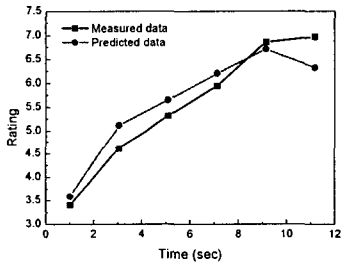

Fig. 6. 부밍 지수와 청음실험으로부터 얻은 시간에 따른 부밍 비교.

또한 6 개 차종, 자동차 실내소음의 주관적인 부밍 정도는 부밍 지수의 시간에 따른 값들의 평균과 일치하고 있음을 Fig. 7 에서 확인할 수 있다.

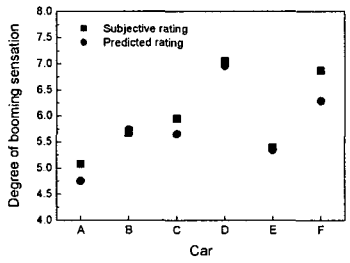

Fig. 7. 청음실험에 의한 각 자동차 실내 소음의 부밍 평가값과 부밍 지수로부터 예측된 대표값의 비교.

5. 결 론

본 연구에서는 과도음의 음질 평가를 위한 방법을 제시하였다. 과도음의 음질 평가가 기존의 음질 평가와 다른 점은 전체적인 음질의 정도를 대표하는 대표값뿐만 아니라 시간에 따른 음질의 정도를 측정하는 것이 고려되어야 하는 것이다. 이를 위하여 기존 음질 평가 방법에 과도음의 음질 평가를 위해 필요한 부분을 언급하고, 음질 평가를 위한 주관적 방법 및 객관적 방법을 소개하였다. 이러한 방법들을 가속 주행 중 실내 소음의 부밍 정도를 평가하는 예에 적용한 결과, 각 시간 또는 엔진 회전수에서의 부밍 정도를 예측할 수 있었고, 이 값들의 평균을 구함으로써 전체적인 부밍의 세기를 구할 수 있었다.

후 기

본 연구는 BK21 과 NRL 에서 일부 지원을 받아 진행되었습니다.

참고문헌

[1] P. May, P. Davies, and J. S. Bolton, "Correlation between Subjective and Objective Evaluation of Refrigerator Noise," Proc. Iner-Noise '96, 2257~2260 (1996).

[2] H. Schiffbanker, F. K. Brandl, and G. E. Thien, "Development and Application of an Evaluation Technique to Assess the Subjective Character of Engine Noise," SAE 911081, Noise and Vibration Conference, 369~379 (1991).

[3] S.-H. Shin, J.-G. Ih and H. Jeong, "Statistical processing of the subjective listening test data in PSQ", *Noise Control Eng. Journal*, 51(4), pp. 232 ~ 238, 2003.

[4] H. A. David, *The method of paired comparisons*, 2nd edition, (Oxford University press, New York, 1988).

[5] E. Zwicker and H. Fastl, *Psychoacoustics, Facts and Models*, 2nd updated ed. (Springer, New York, 1999).

[6] 신성환, 이정권, "피치 알고리즘의 수정 및 소음에의 적용," 추계학술대회논문집, 한국소음진동공학회, pp. 511~516, 2002.

[7] T. Hashimoto, S. Hatano, and M. Takada, "Evaluation of booming sensation during acceleration for car interior noise and its quantification," Proc. WESTPRAC VII, 699-702 (2000).

[8] S. K. Lee, H. C. Chae, D. C. Park, and S. G. Jung, "Sound Quality Index Development for the Booming Noise of Automotive Sound Using Artificial Neural Network Information Theory," Sound Quality Symposium 2002, SQS02_05 (2002).

[9] S.-H. Shin, J.-G. Ih and T. Hashimoto, "Prediction of booming sensation and its difference limen for just noticeable change in frequency", 146th meeting of ASA, p. 2351, 2003, Austin, Texas, USA.