

차량 부밍소음의 청감 변화 인지를 위한 주파수 역치 Difference Limen for Just Noticeable Change of Booming Sensation in Frequency

신성환*·이정권**

Sung-Hwan Shin and Jeong-Guon Ih

Key Words: Sound Quality (음질), Booming Noise (부밍소음), Booming Sensation (부밍소음의 청감), DL (Difference Limen, 차이식역), Listening Test (청음실험),

ABSTRACT

Among many auditory feelings for the vehicle interior noise, booming is considered as the most important nuisance to the passenger and developer. Because the main source of booming noise is a power train system including engine, in general, it consists of tonal components related to fundamental engine rotation and its harmonics including the firing frequency. Therefore, it is demanded to extract the effective tonal components only by using pitch extraction algorithm based on the place theory enable to find aurally relevant tonal components. However, there is a difference between booming sensation and pitch perception according to frequency change of tonal component. In this study, subjective listening test using a tracking method was performed to find the difference limen for just noticeable change of booming sensation in frequency. 20 Koreans and 10 Japanese were participated in this test and the results obtained from Koreans and Japanese were compared with each other. Finally, 5Hz was determined as the difference limen for just noticeable change of booming sensation in frequency, and by applying this value to booming analysis using pitch concept, it was confirmed that the degree of prediction of booming sensation was improved.

1. 서론

최근 자동차 분야의 소음 제어는 차실 내부 소음의 음질을 최적화하는 데 그 목적을 두고 있다. 음질을 최적화 한다는 것은 소음에 의한 짜증도 (annoyance)을 최소화 하면서, 제품의 특성과 부합되는 소리가 발생할 수 있도록 제어하는 것을 의미한다. 자동차 실내 소음의 경우, 전체적인 음질 (overall sound quality)에 영향을 주는 여러 가지 청감 (perceptual feeling) 중 가장 주요한 역할을 하는 것이 부밍소음 (booming noise)와 관련된 것이다. 이러한 부밍소음은 여러 가지 소음원에 의해서 발생하지만 그 중에서도 특히 엔진을 포함한 동력전달계 (power train system)에서 발생하는 소음과 관련성이 크다. 때문에 엔진 회전수에 따른 점화주파수 (firing frequency)와 이것의 조화주파수 (harmonic frequencies)에 관련된 순음 또는 협대역 소음으로 이루어진 토널 성분들이 부밍소음을 구성하는 주성분을 이룬다.

기존 부밍소음의 분석에는 차수해석 (order analysis)가 사용되었지만, 이 방법은 음압레벨에 기본을 두고 있기 때문에, 음질과의 직접적인 연관성을 찾기가 어렵다^[1]. 이런 문제점을 극복하기 위해서 실제 인간에게 인지되는 토널 성분 (tonal

component)을 추출하고, 추출된 각 성분들이 인간에게 미치는 정도를 예측할 수 있는 피치 개념 (pitch concept)이 적용된 방법이 제안되었다^[2,3]. 여기서 피치란 실제 인간이 느끼는 음의 높이를 의미한다.

그러나 인간이 피치의 변화를 인지할 수 있는 차이식역 (DL: difference limen)과 부밍의 변화를 인지할 수 있는 DL 이 다를 수 있다는 문제점이 제기된다. 따라서 본 연구에서는 추적방법 (tracking method)을 이용한 청음실험 (listening test)를 수행하여 부밍의 변화를 인지하기 위한 DL 을 구하고, 얻어진 결과를 피치 개념을 이용한 부밍소음 분석^[3]에 적용하여 음질 예측 정도를 파악하는 것을 목적으로 한다. 이 과정에서 청음자로 참여한 일본인과 한국인 사이의 데이터를 분석, DL의 차이를 비교 하였다.

2. 부밍 변화 인지를 위한 DL

2.1 청음실험 (listening test)

본 청음실험의 목적은 부밍소음의 청감 변화를 인지하기 위해 필요한 DL 을 구하는 것이다. 이를 위하여 소리의 여러 가지 역치 (threshold)를 찾기 위해 적용되는 추적방법을 사용하였다.

추적방법을 위한 기준음으로는 80 Hz 에서 200 Hz 까지 20 Hz 간격으로 총 7 개의 순음을 선택하였고, 기준음의 부밍 정도와 그 차이를 인

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

** 한국과학기술원 기계공학과 소음진동제어센터

지하기 위한 비교음은 60 Hz 에서 220 Hz 까지 2 Hz 간격으로 제작된 순음들이다. 기준음 상한을 200 Hz 로 잡은 이유는 부밍의 정도가 가장 주요하게 인지되는 주파수 영역이 200 Hz 이하이기 때문이다. 이는 그림 1 과 같이 Hashimoto^[4]의 임상실험 결과로부터 제안된 부밍을 위한 가중치와 샤프니스 계산을 위해 사용되는 가중치^[5]의 비교로부터 확인할 수 있다.

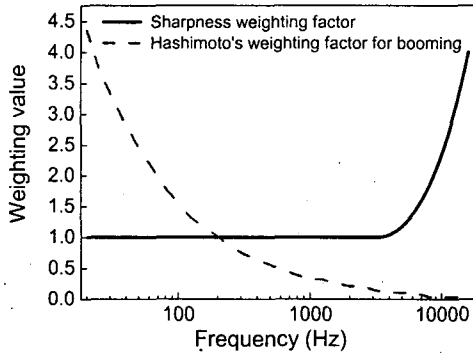


그림 1. 부밍과 관련된 가중 함수와 샤프니스를 위한 가중함수의 비교

그리고 실험 대상음들의 크기는 모두 23 sone 의 라우드니스를 갖도록 하였다. 이 값은 2200 rpm 에서 3800 rpm 까지 가속 중 녹음된 서로 다른 6 종류의 차량에 대한 내부 소음 라우드니스 값의 평균값이다.

실험에 참여한 청음자 (subject)는 정상적인 청력을 갖고, 부밍소음에 대한 평가 경험이 있는 일본인 10 명과 한국인 20 명을 선택하였다. 음의 재생을 위해서는 Head acoustics 사의 HPS III.1 모델을 사용한 헤드폰 재생 방법을 이용하였고, 청음실험에서 청음자의 추적방법 수행을 쉽게 하기 위해서 그림 2 와 같은 실험 프로그램을 제작, 제공하였다. 재생음의 레벨 보정을 위해서 Head acoustics 사의 HMS III.1 더미헤드를 이용하였다.

그림 2 에서 'Given' 버튼을 누르면 기준음이 들리고, 'Upward / Downward' 방향의 버튼을 누르면 기준소음에 비해 높거나 낮은 주파수를 갖는 비교음을 들을 수 있다. 비교음의 선택은 이러한 두 버튼 아래에 있는 슬라이드 바를 이용, 순차적으로 선택할 수 있다. 즉 청음자가 슬라이드 바를 이용하여 기준소음과 비교음의 부밍 정도가 서로 다른 지점에 양 방향의 슬라이드 바를 고정하게 된다. 이러한 방법으로 7 개의 기준음에 대한 실험을 반복하게 되고, 이 프로그램에서 기준음은

무작위 순으로 각 청음자에게 재생된다.

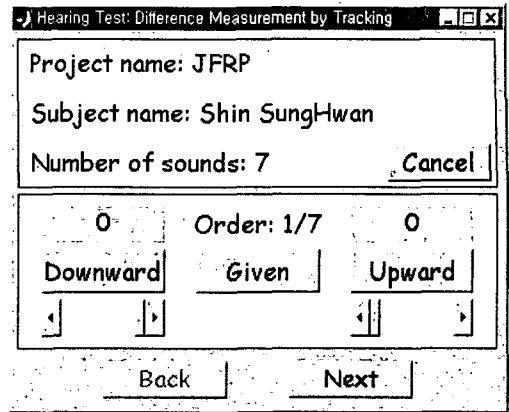


그림 2. 추적방법을 이용한 청음실험용 프로그램

2.2 DL 비교 및 결과

2.1 에서 설명했던 방법에 의하면 본 실험에서는 기준음으로 주어지는 순음의 주파수와 비교하여 높은 주파수영역 (upper frequency part)로의 DL 과 낮은 주파수영역 (lower frequency part)로의 DL 이 주어진다. 그림 3 은 기준음에 비해 높은 주파수 영역의 DL 을 나타낸다. 100 Hz 이상의 기준음에서 한국인과 일본인의 결과를 비교하면 비교적 비슷한 값들을 갖고 있음을 볼 수 있다. 그러나 80 Hz 에서는 각 그룹의 데이터에서 얻어진 95% 신뢰구간조차 전혀 겹치지 않을 만큼 일본인이 더 작은 DL 을 갖고 있음을 확인할 수 있다. 이는 일본인이 저주파수의 인지에 더 민감하다는 것을 의미하는 것이기도 하다. 전체적으로 판단하면 기준음과 비교하여 높은 주파수 영역에서의 DL 은 약 5.5 Hz 임을 알 수 있다.

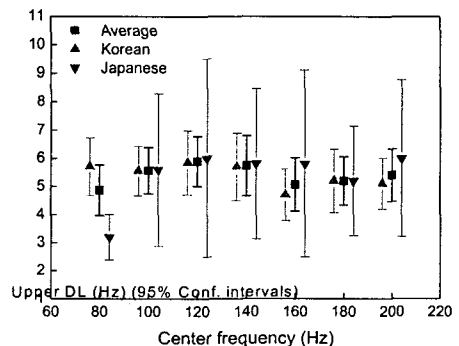


그림 3. 기준음에 비해 높은 주파수영역에서의 DL 결과

그림 4 는 기준음에 비해 낮은 주파수 영역의

DL 을 나타낸다. 높은 주파수 영역의 결과와 마찬가지로 기준음의 주파수가 80 Hz 일 때 일본인의 부밍에 대한 DL 이 한국인의 DL 보다 낮음을 확인할 수 있다. 전체적으로 판단하면 기준음과 비교하여 낮은 주파수 영역에서의 DL 은 약 4 ~ 5 Hz 의 값을 가짐을 알 수 있다. 이렇게 기준음에 대하여 높은 주파수 영역과 낮은 주파수 영역에서 나타나는 DL 차이는 주어진 순음에 대해서 저주파 영역으로의 마스킹 곡선^[6] 기울기가 고주파 영역에 비해 상대적으로 크다는 것에서 그 원인을 찾을 수 있다.

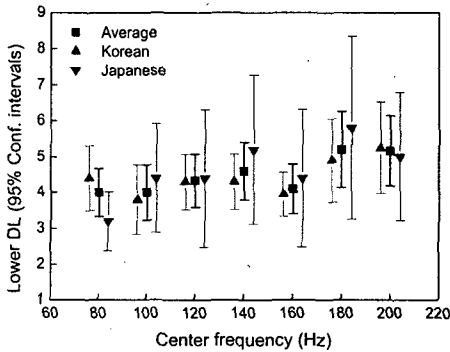


그림 4. 기준음에 비해 낮은 주파수영역에서의 DL 결과

본 연구에서는 부밍의 변화를 인지할 수 있는 DL 을 기준음과 비교하여 높고 낮은 주파수 영역에 관계없이 약 5 Hz 로 결정하였다. 이 값은 부밍에 대한 두 영역 DL 값의 평균을 취한 것이다.

3. DL 과 부밍청감의 예측

위치 이론 (place theory)에 기본을 둔 피치 분석 방법^[2]에서는 주파수 분석을 수행하여 토널 성분을 선택하고, 추출된 토널 성분에 마스킹 효과를 고려하여 실제 인간에게 인지되는 토널 성분 (aurally relevant tonal component) 만을 추출한다. 추출된 토널 성분에 대해서는 임상실험에 근거한 가중함수^[6]를 적용하여 실제 인간에게 느껴지는 각 토널 성분들의 세기 (spectral pitch strength)을 구할 수 있다.

이러한 피치 분석과 라우드니스 분석을 이용하여 부밍 정도의 예측을 위해 사용될 수 있는 음질 지수, 즉 부밍세기 (booming strength)^[3]가 그림 5 와 같이 제안되었다. 이러한 부밍세기를 얻기 위하여 본 연구에서 얻은 부밍 변화 인지를 위한 DL 이 주파수 분석을 위한 주파수 해상도

(frequency resolution)으로 사용되었다.

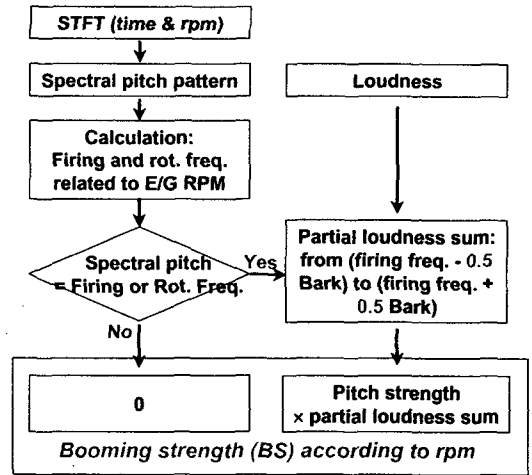


그림 5. 피치 및 라우드니스 해석 방법을 이용한 부밍 예측 음질 지수: 부밍세기.

계산된 부밍세기가 실제 인간이 느끼는 부밍청감 (booming sensation)과 어떤 관계가 있는가를 알아보기 위해서, 12 개의 자동차 가속 주행 중 차실 내부 소음에 대한 청음실험을 수행하였다. 청음실험을 위해 크기평가법 (magnitude estimation method)를 사용하였고, 총 41 명의 청음자가 참여하였다. 그리고 신뢰성 및 재현성 있는 결과를 얻기 위해 크기평가법을 위한 통계처리 방법^[7]이 적용되었다. 녹음된 차실 내부 소음의 재생을 위해서 2.1 장에서 언급된 동일한 장비가 사용되었다. 그 결과는 그림 6 과 같다.

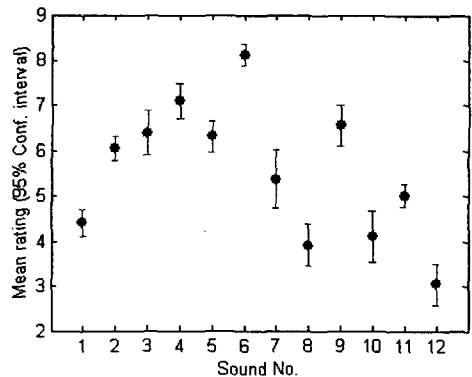


그림 6. 청음실험을 통해 얻어진 12 개 차실 내부 소음의 부밍청감 결과

그림 7 은 부밍세기와 주관적으로 얻은 부밍청감을 비교한 것이다. 이 그림에서 그림 7(a)의 부

밍세기는 앞에서 언급된 바와 같이 본 연구에서 얻어진 DL, 5 Hz 를 주파수 해상도로 사용한 결과이고, 그림 7(b)는 기존 피치 분석에서 사용되는 주파수 해상도, 12.5 Hz 를 적용한 결과이다. 각 그림에 대한 결정계수 (coefficient of determination)을 비교해 보면 그림 7(a)의 경우가 0.857, 그림 7(b)의 경우가 0.762 로 그 예측 정도가 향상되었음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 추적방법에 의한 청음실험을 이용하여 자동차 실내 소음의 청감에 가장 주요한 역할을 하는 부밍소음의 변화를 인지할 수 있는 DL, 즉 차이식역 (difference limen)이 5 Hz 라는 것을 얻었다. 또한 이 결과를 부밍 예측을 위해 제안된 부밍세기에 적용하였고, 청음실험을 통해서 얻어진 주관적인 부밍청감과 비교하였다. 결과적으로 부밍세기를 구하기 위하여 본 연구에서 얻어진 DL 을 적용한 것이 기존 피치 해석을 위해 사용된 주파수 해상도를 적용한 것보다 결정계수를 기본으로 0.762 에서 0.857 로 향상되었음을 확인하였고, 이는 부밍의 예측 정도가 정확해졌음을 의미한다.

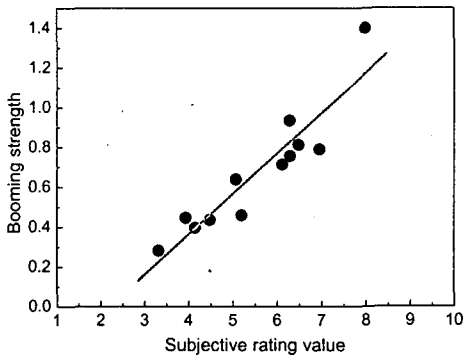
후 기

본 연구는 BK21 사업에서 일부 지원을 받아 진행되었습니다.

참고문헌

- [1] R. Helman and E. Zwicker, "Why can a decrease in dB(A) produce an increase in loudness?," J. Acoust. Soc. Am. **82**, 1700~1705 (1987).
- [2] 신성환, 이정권, "피치 알고리즘의 수정 및 소음에의 적용," 추계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, pp. 511~516, 서울, 2002.
- [3] S.-H. Shin and J.-G. Ih, "Sound quality evaluation of booming noise in passenger cars," InterNoise 2003, CD-ROM No. 609 (2003).
- [4] 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).
- [5] W. Aures, "A Model for Calculating the Sensory Euphony of Various Sounds," Acustica **59**, 130~141 (1985).
- [6] E. Zwicker and H. Fastl, *Psychoacoustics, Facts and Models*, 2nd updated ed. (Springer, New York, 1999).
- [7] 신성환, 이정권, "음질 분석을 위한 주관적 평가의 통계적 처리 방법," 하계학술발표회 논문집, 한국음향학회, pp. 335 ~ 358, 목포, 2003.

(a)



(b)

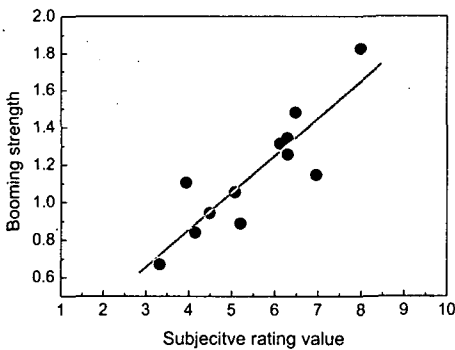


그림 7. 청음실험을 통해 얻어진 부밍청감과 주파수 해상도 (a) 5 Hz, (b) 12.5 Hz 를 적용하여 얻은 부밍세기 사이의 비교