

직교배열표를 이용한 진공 청소기의 음질과 주파수 특성의 상관 관계에 관한 연구

임도형*, 정혁**, 이정권**

*현대중공업, **한국과학기술원 기계공학과

A Study on the Correlation between Frequency Components and Sound Quality of a Vacuum Cleaner using the Orthogonal Array

Do-Hyeong Lim*, Hyuk Jeong**, Jeong-Guon Ih**

*Hyundai Heavy Industry, **Dept. of Mechanical Engineering, KAIST

pinknoiz@hanmail.net

요약

제품의 음질 특성과 관련된 주요 주파수 대역을 파악하기 위해 본 연구에서는 청소기 소리의 주파수 대역을 음성인식에 중요한 주파수 대역인 4개의 대역으로 나누고, 각 대역 성분을 직교배열표에 따라 가감한 16개의 소리를 만들었다. 만들어진 소리에 대해 10명을 대상으로 4가지의 표현어로 Semantic Differential Method(SDM)로 주관적 평가를 하여, 청소기음의 주파수 특성과의 상관관계를 살펴보았다. 불쾌한 느낌과 관련이 깊은 주파수 대역은 고주파수 대역이었으며, 성능이 좋은 느낌을 주기 위해서는 저주파수 대역을 증가시키는 것이 효과적이었다.

1. 서론

지금까지 제품의 소음제어에 있어서, 제품의 소리를 평가하는 기준이 되어온 것은 음압레벨이었다. 반면에 실제 제품의 사용자가 그것의 소리를 평가하는 것은 음압레벨 측면에서가 아니라, '얼마나 더 시끄러운지', '얼마나 날카로운지' 등의 음질 측면에서이다. 그래서 최근 들어서는 음질 측면에서의 소음제어에 대한

필요성이 제기되고 이에 대한 연구가 이루어지고 있으며, 제품의 음질 평가에 대한 수요도 많아지고 있지만 아직까지 이들에 관한 체계적인 연구는 확립되지 못했다. 본 연구에서는 제품의 음질 특성에 관한 연구의 일환으로서, 대표적인 가전제품의 하나인 진공 청소기를 대상으로 음질특성과 주파수성분의 상관관계를 규명해 보고자 하였다.

제품의 음질평가와 관련하여 일반적으로 이용하는 방법은 해당되는 제품의 소리를 들려주고 평가자가 다양한 측면에서 그 소리를 평가하게 하여 평가치를 분석해 보거나, 그 값을 주성분 분석하여 제품의 음질값을 입체적으로 보는 방법 등이다[1]. 본 연구에서는 하나의 청소기 소리를 대상으로 주파수 대역을 4개로 나누고, 각 대역 성분을 가감하여 그 대역 성분이 전체 음질에 미치는 영향을 살펴 보았다. 4개의 주파수대역을 4개의 수준으로 동시에 변화 시킬 경우, 총 256개의 소리에 대해 살펴보아야 하므로 실제 사람들을 대상으로 음질평가를 하기는 어려우므로, 본 연구에서는 실험회수를 줄이기 위해 실험계획법을 이용하였다.

II. 본론

청소기 음질특성을 살펴보기 위해 본 연구에서는 종류가 다른 청소기 소리를 서로 비교한 것이 아니라, 동일한 청소기 소리를 주파수 대역별로 변화 시켜서 그 소리들을 비교하여, 각 주파수대역이 전체 음질에 어떠한 영향을 미치는지를 살펴보고자 하였다.

1. 대상 소리의 녹음과 직교배열표를 이용한 평가 대상음의 생성

하나의 청소기를 선정하여 일반 가정의 거실에서, 민속 장판 위에 청소기를 놓고 그 소리를 녹음하였다. 청소기는 최강모드에서 15초 동안 작동한 후에 15초 동안을 녹음하였다. 측정에 사용된 마이크로폰은 휴대용 마이크셋 (B&K 2810, 2642, 4130)이며, 녹음 시 마이크로폰은 사용자 귀의 위치라고 생각되는 지점에 배치하였다. 마이크로폰에서 입력된 신호를 녹음하기 위해 DAT 레코더 (Sony PC 216)를 이용하였고, A/D converter (Digidesign AM3)를 이용하여 데이터를 취득하였다.

본 연구에서는 인간의 언어 인지와 관련하여 중요한 대역을 중심으로 주파수 대역을 4개로 구분하였다. 각 대역은 12 kHz의 임계대역을 (critical band rate)에 해당되는 23 bark을 4개로 나눈 것으로 각 대역은 표 1과 같다. 각 대역이 전체 청소기 음질에 미치는 기여도를 파악하기 위해 각 대역을 청각에 의해 구별이 가능하도록 3 dB씩 가감한 소리, 6 dB 감소 시킨 소리, 그리고 그대로 둔 소리에 대해 평가를 하고자 하였다. 이 경우 4개의 대역이 하나씩 변할 경우, 총 13개의 소리에 대해 음질 평가를 하면 된다. 이 경우, 실제 상황에서 결과 예측에 대한 신뢰성과 재현성이 떨어지기 때문에 4개 대역의 값이 동시에 변할 경우에 대해 실험을 해 보아야 한다. 본 연구에서는 실험계획법을 도입하여 적은 횟수의 실험으로도 각 대역의 수준변화에 따른 음질의 차이를 살펴보고자 하였다.

표 2와 같이 실험 인자는 앞에서 나눈 청소기 주파수 대역 4개이며, 각 인자는 4수준으로 설정하였다. 이 경우 필요한 자유도가 12이므로 $L_{16}(2^{15})$ 의 직교배열표를 이용하였다[2]. 직교배열표에서 경우 한

줄의 자유도가 1이므로 4수준으로 변하는 인자의 경우는 표에서 세 줄이 할당되어야 한다. 조건에 맞게 $L_{16}(2^{15})$ 의 직교배열표를 표 3과 같이 변형하였다. 앞서 실시된 원시실험의 경우 256가지의 소리에 대해 실험을 해보아야 했었지만, 여기서 직교 배열표를 이용할 경우 단지 16개의 소리로도 인자의 주효과를 살펴볼 수 있게 된다. 직교배열표에서 전체 자유도 15중 주효과에 할당된 자유도는 12이며 나머지 자유도 3을 오차에 할당하였다. 표 3의 직교표에서 각 숫자는 주효과인 각 대역별 주파수 성분의 증감을 의미한다. 소리 14는 원음에서 첫번째 대역을 6 dB 감소, 두 번째 대역은 그대로 두고, 세 번째 대역을 3 dB 감소, 네 번째 대역을 3 dB 증가 시킨 소리를 의미한다. 각 대역의 교호작용은 없는 것으로 가정하였다.

2. 주관적 평가

음질의 다양한 측면을 살펴 보기위해 본 연구에서는 주관적 평가 방법으로서 SDM을 이용하였다. SDM은 음질 평가에 자주 이용되는 평가 방법으로, 서로 대치되는 말을 양 극단에 배치하여 평가자가 점수를 주도록 하는 방법이다. SDM의 용어 선정은 음질 평가를 하는데 있어서 중요한 문제로, 평가하고자 하는 제품의 음질특성에 따라 적절하게 선정해야 한다. 본 연구에서는 참고문헌[1][4] 등을 통해 기계소음과 관련된 어휘를 파악하고, 그 중 청소기 소리를 잘 묘사한다고 생각되는 표현을 골랐다. 예비실험 등을 통해 그림 1과 같이 최종 선택하였다.

SDM 실험에서 순서에 의한 바이어스를 제거하기위해 본 연구에서는 무작위 순서로 반복 실험을 하였다. 판단하는데 필요한 최소한의 시간으로 소리를 4초간 들려 주는 것을 기본으로 하였다. 소리와 소리 사이에는 2초간의 공백을 두어 평가자가 판단을 내릴 시간을 주었다. 전체시간은 평가자가 피로해지지 않도록 10분을 넘기지 않았고, 평가자는 7척도 평가를 이용하였다.

본 연구에서 평가를 위한 청소기 소리의 재생은 헤드 폰을 이용하였다. 라우드 스피커의 경우 재생되는 실험실

의 소음레벨, 잔향시간, 평가자의 위치 등의 조건을 맞추는 것이 헤드폰을 이용하는 것보다 훨씬 까다로운 단점이 있기 때문이었다. 재생을 위해 청소기 소리들은 모두 하나의 CD로 제작하여, 평가에 이용하였다. 재생에 이용한 CD player는 Marantz CD-67 이며, 헤드폰은 Sennheiser HD580 이다. 청음실험이 진행되는 동안 청음실 내의 음압은 40 dBA 이내로 유지하였다.

3. 실험결과

목적함수는 평가값의 평균으로 하여 실험을 하였다. 짜증나는 정도에 대한 분산분석표가 표 4 이고, 10 명의 평가결과값을 이용하여 각각의 주효과를 살펴본 결과가 그림 2 이다. 그림에서 전체적으로 각 대역별로 독립적인 경향을 보이며 대역별 주효과를 관찰할 수 있다.

소리가 '시끄러운 정도' 나 '짜증나는 정도' 는 어떤 대역이든지 증가하면 그 정도가 커지는 것을 볼 수 있지만, 고주파 대역으로 갈수록 기여도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. '시끄러운 정도'와 '짜증나는 정도'를 감소시키기 위해서는 고주파수 대역을 감소시키는 것이 훨씬 효과적이라는 것을 예측할 수 있다.

한편 '날카로운 정도'는 '시끄러운 정도'나 '짜증나는 정도'와는 달리 다른 대역 성분의 가감에는 큰 영향을 받지않고, 단지 고주파수 대역(그림 2(c)에서 네 번째 대역)에 많은 영향을 받는다. '시끄러운 정도'나 '짜증나는 정도'와는 달리 저주파 대역을 증가 시켰을 경우에는 오히려 '날카로운 느낌'이 감소하는 것을 볼 수 있다. 실제로 음의 '날카로움'만이 문제가 된다면, 고주파 대역을 감소시키는 것이 가장 효과적이지만, 이것이 여의치 않을 경우에는 저주파 대역을 증가 시키는 것도 어느 정도 효과가 있을 것으로 예상된다.

다른 가전제품과는 달리 청소기소리는 체적으로 조용한 느낌도 중요하지만, 청소가 잘되는 느낌 또한 중요하다. '먼지가 잘 빨리는 느낌'의 청소기를 만들기 위해서는 그림의 결과에서, 가장 낮은 주파수 대역과 가장 높은 대역의 성분을 증가 시키는 것이 보다 효과적이라고 볼 수 있다. 그러나 앞서 살펴본 바와

같이 고주파수 대역은 '날카로운 느낌', '불쾌한 느낌', '짜증나는 느낌'등의 부정적인 느낌과 직접적으로 상관이 있다. 따라서 '먼지가 잘 빨리는 느낌'의 청소기를 만들기 위해서는 저주파수 대역 성분을 증가 시키는 것이 가장 효과적이라고 판단된다.

4. 교호작용(interaction)

본 실험에서, 네 가지 표현어의 경우 모두 -6 dB 한 값과 -3 dB 한 값이 (즉 그림 2 에서 각 밴드의 1 수준과 2 수준의 값이) 큰 차이가 없거나 오히려 순서가 뒤바뀐 경우도 있다. 특히 '먼지가 잘 빨리는 정도'의 두 번째, 세 번째 대역, '시끄러운 정도'의 세 번째 대역, '불쾌한 정도'와 '날카로운 정도'의 네 번째 대역에서 이러한 경향을 뚜렷하게 관찰할 수 있다. 이는 교호작용(interaction)이라고 볼 수 있는, 스펙트럴 마스킹의 영향 때문이다..

우리 청감의 독특한 특성인 스펙트럴 마스킹 곡선은 저주파수쪽보다 고주파수 대역쪽의 기울기가 더 완만하므로[3] 고주파수 대역쪽으로 더 많은 영향을 주게 된다. 스펙트럴 마스킹을 보여주는 것이 그림 3 의 실선으로, 이것이 실제 우리가 듣는 소리이다[3].

실제 실험에 이용한 청소기 소리는 그림 4 와 비슷한 라우드니스 분포를 이룬다. 여기서 그림과 같이 어떤 대역을 3 dB 감소시킬 경우, 실제로 우리가 듣는 소리는 원음에 비해 ㉠ 만큼 줄어든 소리이다. 만약 6 dB 줄이게 된다면 스펙트럴 마스킹의 영향은 더 커지게 되어 우리가 듣는 소리는 원음에 비해 ㉡+㉢ 만큼 줄어든 소리가 된다. 즉 3 dB 를 줄이고 6 dB 를 줄였지만, 실제 듣는 소리는 ㉢의 면적만큼만 차이가 나게 된다. 따라서 그림 4 에서 보듯이 각 밴드의 1 수준과 2 수준의 차이가 다른 수준들의 차이에 비해 적게 나타나게 되는 것이다.

이와는 반대로 특정한 대역의 성분을 증가 시킬경우는 스펙트럴 마스킹에 의해 증가하는 정도는 더 커지게 된다. 그림 4 에서 3 dB 증가 시킬 경우를 보면, 실제로 듣게 되는 소리는 증가 시킨 3 dB 외에도 ㉣ 만큼 더 증가한 소리가 된다.

III. 결론

청소기의 주파수 대역별 증감이 전체 청소기의 음질에 미치는 영향을 살펴 보기위해 실험계획법을 이용해서 소리를 작성하고, SDM 을 이용하여 이들에 대해 주관적 평가를 실시하였다. '불쾌한 느낌'이나 '시끄러운 느낌', 그리고 '날카로운 느낌' 은 주로 고주파 대역 성분에 많은 영향을 받았으며, '먼지가 잘 빨리는 느낌'을 강조하기 위해서는 저주파수 대역을 증가시키는 것이 효과가 컸다. 한편 특정한 대역의 성분이 증감할 경우 스펙트럴 마스킹에 의해 다른 대역에도 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 적용한 방법은 다른 제품의 음질관점에서의 소음제어 시 우선 제어해야 할 주파수 대역을 파악하는 데에도 이용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] R. Bisping, " Emotional Effect of Car Interior Sounds: Pleasantness and Power and Their Relation to Acoustic Key Features," 951284, SAE Noise and Vibration Conference, 1995.
- [2] M.S. Phadke, *Quality Engineering Using Robust Design* (Prentice Hall, N.Y., 1989), Chap. 4-5, pp. 67-148.
- [3] E. Zwicker and H. Fastl, *Psychoacoustics, Facts and Models* (Springer-Verlag, Berlin, 1990).
- [4] K. Takanami, M. Iwahara, H. Saito, and M. Sakata, "Improving Interior Noise Produced During Acceleration," 911078, SAE Noise and Vibration Conference, 1991.
- [5] G.S. Peace, *Taguchi Methods: A Hands-On Approach* (Addison Wesley, N.Y., 1993), Chap. 17-18, pp. 273-311.
- [6] A. Bendell, J. Disney and W. A. Pridmore, *Taguchi Methods : Applications in World Industry* (IFS Publications , UK, 1989)

| 대역 | 주파수 (kHz) | 임계대역폭(Bark) | 해당음 |
|----|-----------|-------------|------|
| 1 | 0-0.6 | 0-5.75 | 유성자음 |
| 2 | 0.6-1.5 | 5.75-11.5 | 모음 |
| 3 | 1.5-3.9 | 11.5-17.25 | 무성자음 |
| 4 | 3.9-12.0 | 17.25-23 | 파찰음 |

Table 1. Range of the bands.



Fig.1. Adjectives used in the experiment.

| Factor | Level | | | | Degree of freedom |
|------------------------|-------|-----|-------|-------|-------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| Band1 | + 3dB | 0dB | - 3dB | - 6dB | 3 |
| Band2 | + 3dB | 0dB | - 3dB | - 6dB | 3 |
| Band3 | + 3dB | 0dB | - 3dB | - 6dB | 3 |
| Band4 | + 3dB | 0dB | - 3dB | - 6dB | 3 |
| D.O.F for main effects | | | | | 12 |
| D.O.F for total | | | | | 15 |
| D.O.F for errors | | | | | 3 |

Table 2. Control factors and their levels.

| Sound s | Band 1 (A) | Band 2 (B) | Band 3 (C) | Band 4 (D) | E1 | E2 | E3 |
|---------|------------|------------|------------|------------|----|----|----|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 |
| 4 | 1 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1 |
| 5 | 2 | 1 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 |
| 6 | 2 | 2 | 1 | 4 | 2 | 1 | 2 |
| 7 | 2 | 3 | 4 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 8 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 9 | 3 | 1 | 3 | 4 | 1 | 2 | 2 |
| 10 | 3 | 2 | 4 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| 11 | 3 | 3 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| 12 | 3 | 4 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 13 | 4 | 1 | 4 | 2 | 2 | 1 | 2 |
| 14 | 4 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| 15 | 4 | 3 | 2 | 4 | 1 | 1 | 1 |
| 16 | 4 | 4 | 1 | 3 | 1 | 2 | 2 |

Table 3. $L_{16}(2^{15})$ orthogonal array and factor assignment.

| Factors | Sum of Squares | Degree of Freedom | Mean of Squares | F |
|----------|----------------|-------------------|-----------------|--------|
| Band1 | 0.212 | 3 | 0.071 | 0.933 |
| Band2 | 2.995 | 3 | 0.998 | 13.191 |
| Band3 | 3.681 | 3 | 1.227 | 16.213 |
| Band4 | 12.253 | 3 | 4.084 | 53.966 |
| *E1 | 0.216 | 1 | | |
| *E2 | 0.000 | 1 | | |
| *E3 | 0.011 | 1 | | |
| Residual | 0.227 | 3 | 0.076 | |

Table 4. ANOVA table for 'annoyance' of the vacuum cleaners.

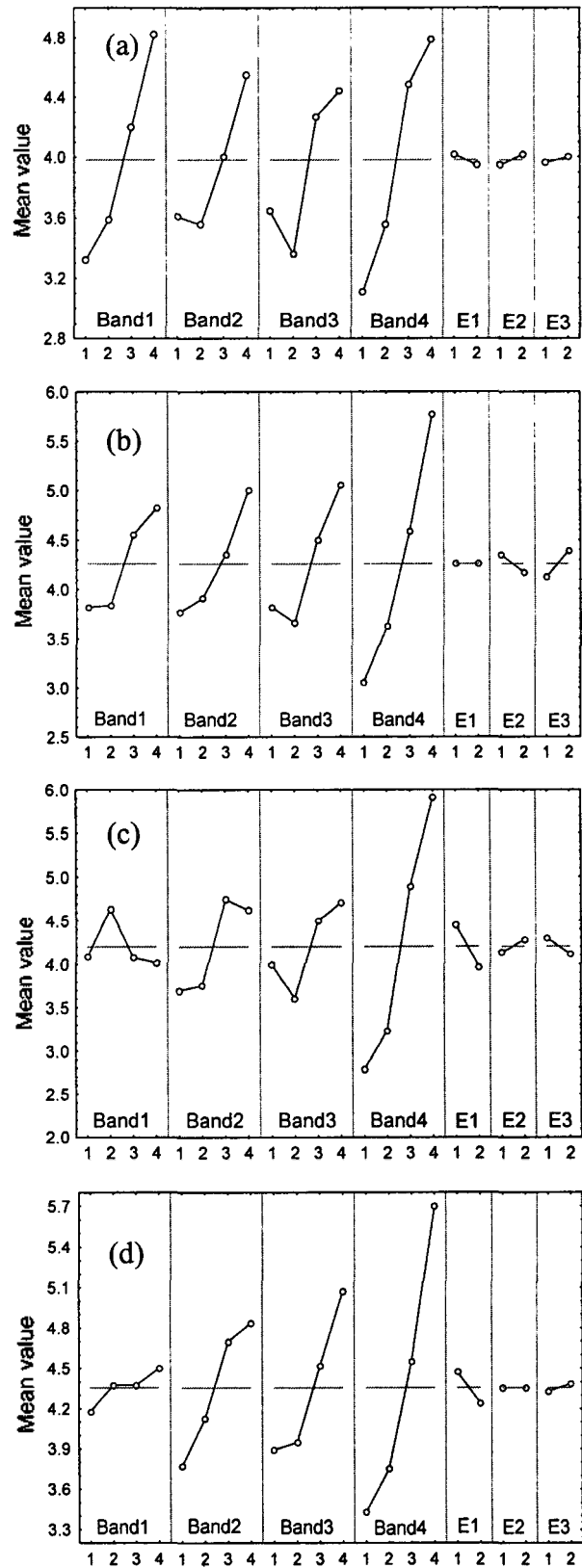


Fig.2. Factor effects for each adjective. (a) Sucking well, (b) noisy, (c) sharp, (d) annoy

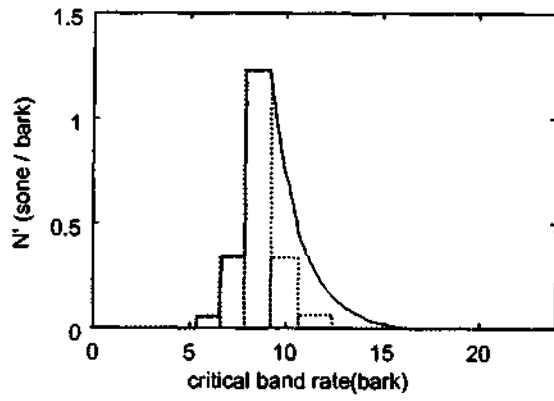


Fig.3. Spectral masking (Dash: main loudness, solid: specific loudness).

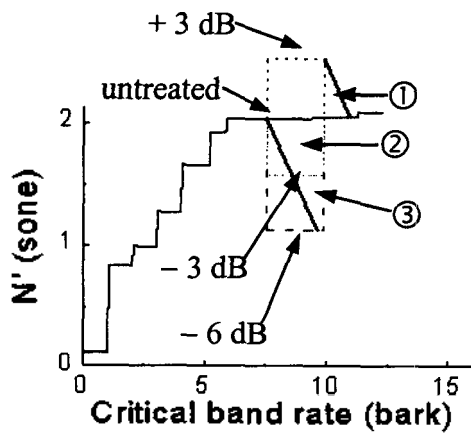


Fig.4. Interaction by spectral masking.