

## 주관적 평가방법을 적용한 냉장고 소음대책 수립

### A Strategy of Refrigerator Noise Control by Using Subjective Assessment

<sup>0</sup>정광일<sup>\*</sup> · 김석관<sup>\*\*</sup> · 이종구<sup>\*\*\*</sup> · 김양한<sup>\*\*\*\*</sup>

Kwang-Il Jung, Yang-Hann Kim, Suk-Gwan Kim and Jong-Goo Lee

#### ABSTRACT

The conventional methods for noise control attempts to simply reduce the level of product noise. This has been common practice in noise control industry. However, it is very straightforward common sense that we have consider human perception on noise. In this paper, we propose a noise control strategy which takes into account the subjective perception of product noise. We especially has concentrated on a refrigerator noise. The proposed method is composed of 3 steps. Firstly, the actual refrigerator noise signal is measured. Then, to make the sample noise set for subjective assessment the noise signal is edited in 1/3 octave bands. Finally, we establish a strategy of refrigerator noise control by using the results from subjective assessment of these noise signals

#### 1. 서론

소음이란 사람의 청각기관을 통해 느끼게 되는 소리 중에서 사람에게 불쾌하게 느껴지는 소리를 의미한다. 사람의 청각 기관을 주파수 영역에서 보면, 특별한 대역통과 특성을 가지며 소리의 크기와 주파수에 따라 복잡하고 비선형적인 반응을 나타낸다고 알려져 있다.[1]

사람의 청감을 고려하기 위하여 등청감곡선(equal-loudness-level contours)에 의해서 측정된 소리에 보정을 하거나 사람의 청감을 객관적인 물리량으로 표현하고자 많은 노력을 하고 있다.[1-4]

물리적 관점에서의 소음제어는 먼저 소음원 및 소음원 사이의 상대적인 중요성의 규명이 필요하다. 그리고 소음원, 전달경로, 수음자 사이에서 실제 소음제어 가능한 부분을 판별한 후 특별히 에너지가 집중되어 있는 주파수 혹은 주파수 밴드를 제어하는 방법이 이용되고 있다.[5-6] 그러나 이러한 방법은 사람의 청감 즉, 실제로 제품을 사용하는 사람

의 느낌에 대한 고려를 하지 않고 있기 때문에, 사용자가 소음개선의 여부를 느끼지 못하거나 더욱 불쾌하게 느끼는 경우 또한 있을 수 있다.

본 논문에서는 제품 사용자의 청감특성을 고려하여 소음제어 방향을 제시하고자 한다. 제안하는 방법은 Fig.1과 같이 나타낼 수 있다. 먼저 특정한 대상에 대해서 소음을 측정한다. 그리고 측정된 소음의 주파수 영역에서의 소음특성을 분석한다. 다음으로는 주파수 영역별로 소음특성 즉, 주파수별 음압크기 등을 바꾸어 수정된 소음특성의 평가음을 구성한다. 마지막으로 이러한 평가음을 제품 사용자가 평가하여 그 결과를 소음제어에 반영하고자 한다.

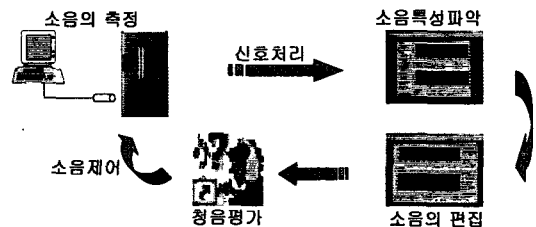


Fig.1 The flow chart of proposed method

이렇게 제안된 방법을 본 논문에서는 냉장고 소음에 적용하고자 한다. 냉장고는 생활습관이나 식생활의 변화에 따

\* 한국과학기술원 대학원 기계공학과

\*\* LG 생산기술원 주임연구원

\*\*\* LG 생산기술원 선임연구원

\*\*\*\* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

라 대형화(대용량화)되어 가고 있다. 따라서 압축기의 성능 향상이 요구되어, 압축기에 의한 소음이 냉장고의 주요 소음원으로 작용하고 있다. 또한 주거공간에서 간헐적으로 운전되면서 발생하는 냉장고 소음은 제품에 대한 불만족의 요소가 되고 있다. 본 논문에서는 냉장고 소음원들을 고려하여 평가음을 구성하고 실제 제품을 사용하는 사람들이 평가하여 냉장고 소음제어 방향을 제시하고자 한다.

## 2. 냉장고 소음특성

냉장고 소음은 크게 압축기, 냉기 순환용 냉동실 팬, 압축기 냉각용 기계실팬, 냉매 유동에 의한 소음 등으로 구분할 수 있다.[7-8]

### 2.1 기계실 팬 단독소음 특성

냉장고의 구성요소 중 기계실 팬이 단독으로 구동될 때 측정된 소음(무향실(100Hz cut-off frequency, 암소음레벨: 23 dB)에서 측정)의 특성을 살펴보면, Fig.2는 파워 스펙트럼으로 주요 특성은 180Hz, 360Hz, 380Hz 임을 알 수 있다.

따라서 A-가중치 1/3 옥타브 밴드 스펙트럼을 분석할 경우, 1/3 옥타브 밴드의 중심 주파수가 200Hz와 400Hz인 밴드가 주요 특성임을 알 수 있다.

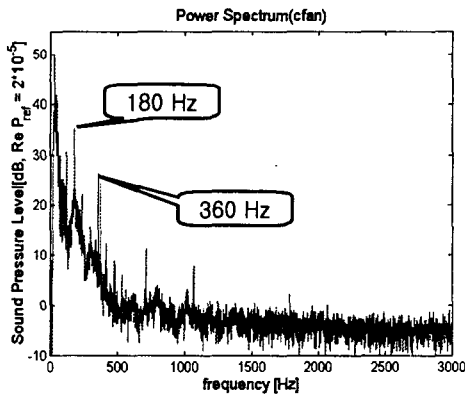


Fig.2 Power spectrum of the compressor cooling fan

### 2.2 냉동실 팬 단독소음 특성

냉장고의 구성요소 중 냉동실 팬 단독으로 구동될 때 측정된 소음의 특성을 살펴보면, Fig.3는 파워 스펙트럼으로 주요 특성은 400Hz 임을 알 수 있다.

또한 A-가중치 1/3 옥타브 밴드 스펙트럼을 분석할 경우, 1/3 옥타브 밴드의 중심 주파수가 400Hz인 밴드가 주요

특성임을 짐작할 수 있다.

### 2.3 압축기 단독소음 특성

냉장고의 구성요소 중 압축기가 단독으로 구동될 때 측정된 소음의 특성을 살펴보면, Fig.4는 파워 스펙트럼으로 주요 특성은 470Hz와 1500~3000Hz 사이의 많은 주파수 성분들이 기인하는 것으로 알 수 있다.

또한 A-가중치 1/3 옥타브 밴드 스펙트럼을 분석할 경우, 1/3 옥타브 밴드의 중심 주파수가 500Hz인 밴드가 주요 특성임을 알 수 있다.

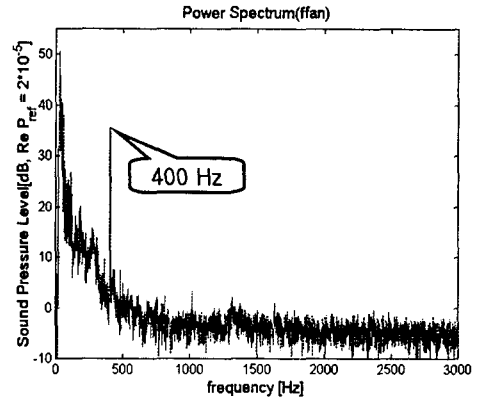


Fig.3 Power spectrum of freezing room fan

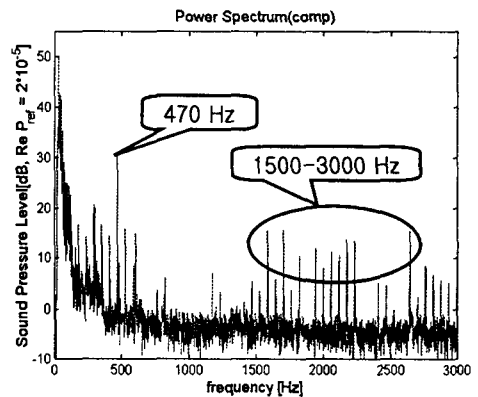


Fig.4 Power spectrum of compressor

### 2.4 전체 냉장고 소음특성

냉장고의 모든 구성요소를 작동시킬 때 측정된 소음의 특성을 살펴보면(Fig.5) 주요 특성은 기계실 팬, 냉동실 팬, 압축기 소음의 특성이 모두 포함되어 180Hz, 360Hz, 380Hz, 400Hz, 470Hz와 1500~3000Hz 임을 알 수 있다.

또한 A-가중치 1/3 옥타브 밴드 스펙트럼을 분석하여

보면, 1/3 옥타브 밴드의 중심 주파수가 400Hz, 500Hz, 1600Hz, 2500Hz 밴드가 주요 특성이다.

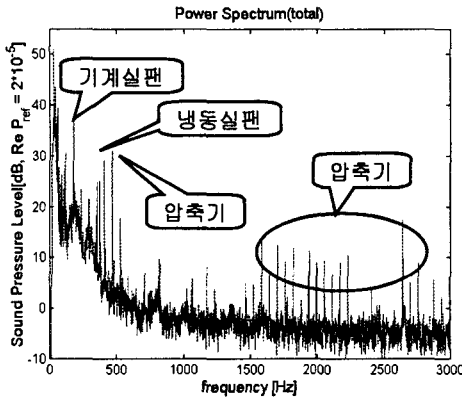


Fig.5 Power spectrum of refrigerator

### 3. 소음특성 편집방법

이제 측정된 소음의 어떠한 부분을 줄여주면 실 사용자의 소음감소에 대한 만족도가 증가하는지를 알기 위하여 Fig.5와 같은 소음 스펙트럼을 편집 할 수 있는 방법이 있어야 함을 알 수 있다.

측정된 소음에서 특정한 주파수 대역별로 소음원의 특성을 수정하여 평가음을 구성하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있다. 본 논문에서는 주파수 영역에서 편집하는 방법을 소개하고자 한다. 디지털로 저장된 소음 신호를  $x(t)$ 라고 하면 시간영역에서 유한한 함수의 푸리에 변환의 정의는

$$X(f, T) = \int_0^T x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.1)$$

으로 정의된다. 여기서, T는 주기, f는 주파수, t는 시간을 나타낸다. 식 3.1에서 일정한 시간간격  $\Delta t$ 에 의해서 N개의 샘플을 가지는 신호  $x(t)$ 가 존재한다고 가정하고,  $\Delta t$ 는 또한 관심 주파수 영역보다 충분히 크게 샘플링 되었다고 가정한다면, 식 3.1은 DFT(Discrete Fourier Transform)의 정의에 의해서

$$X(f, T) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp[-j2\pi fn \Delta t] \quad (3.2)$$

여기서,  $x_n = x(n \Delta t)$   $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$

으로 표현된다.

파워 스펙트럼은 음압레벨(Sound pressure level)의 정

의에 따라서

$$SPL = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_{ref}^2} [dB] \quad (3.3)$$

여기서,  $P_{ref} = 2 \times 10^{-5} Pa$

으로 구할 수 있으며,  $p$ 는 주파수에 해당하는 음압 실효치(Root mean square)를 의미한다.

파워 스펙트럼에서 옥타브 밴드 스펙트럼을 구하기 위해서는 dB 스케일의 합으로 식 3.4와 같이 옥타브 밴드내의 파워를 합하여 구할 수 있다.

$$L_{ob} = 10 \log_{10} \frac{p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + \dots}{p_{ref}^2} \quad (3.4)$$

여기서,

$L_{ob}$  : 옥타브 밴드의 음압레벨, dB Re  $2 \times 10^{-5} Pa$

$p_1, p_2, \dots$  : 옥타브 밴드내의 음압 실효치

위상에 관한 정보는 처음 DFT의 정보가 그대로 존재하는 상태에서 어떤 특정한 밴드내의 음압레벨을 줄여서 원 신호를 수정하게 된다. dB 스케일의 정의에서 만약 어떤 밴드내의 값을  $x$  dB 수정하였다면 수정된 밴드내의 크기를 균일한 이득(Gain)을 갖는 어떤 비율로 수정한 것이 된다.

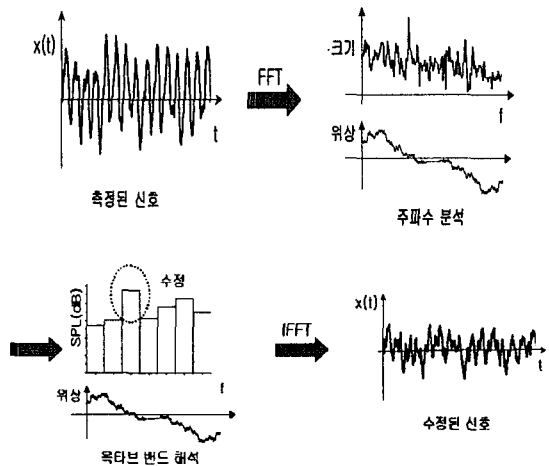


Fig.6 The flow chart of editing process

이득을 K라고 하면 구하는 방법은 음압레벨의 정의에 의해서

$$\begin{aligned} x \text{ dB} &= 20 \log_{10} \left( \frac{p}{p_{ref}} \right) - 20 \log_{10} \left( \frac{K \times p}{p_{ref}} \right) \\ &= -20 \log_{10}(K) \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$K = 10^{(-x/20)}$$

와 같이 구해진다.

Fig.6은 특정 주파수 대역별로 소음원의 특성을 수정하는 방법에 대해 설명하고 있다. 우선, 측정된 소음을 옥타브 밴드 해석을 하여, (3.5)식을 이용하여 구한 이득으로 소음의 밴드별 크기를 수정한다. 이때, 위상이 문제점으로 대두될 수 있는데, 본 논문에서는 측정된 소음의 위상을 그대로 사용하는 방법을 택하고 있다. 이것은 소음 발생 메카니즘의 변화가 실제로 소음제어를 하기전과 후에 큰 변화가 없을 가정하고 있다고 볼 수 있다. 이렇게 신호처리한 주파수 데이터를 역 푸리에 변환으로 우리가 원하는 수정된 시간 데이터를 얻을 수 있다.

주파수 영역에서의 소음특성 수정은 주파수 영역에서 이상적인 필터인 사각 필터를 사용한 것과 같다. 즉, 밴드내의 크기를 균일한 비율로 변화시키고 위상은 원신호의 위상을 그대로 사용하여 수정된 신호를 생성하는 것을 의미한다. 다른 의미에서 보면, 밴드별로 수정한다는 것은 밴드내의 주파수에 해당하는 조화함수의 초기위상은 보존하고, 크기를 수정한다는 것을 말한다.

#### 4. 냉장고 소음의 주관적 평가

주관적 평가의 목적은 어떤 제품의 특정한 성격에 대한 사용자의 반응을 조사하는 것으로 보통 제품의 물리적 특성과 사용자의 반응을 동시에 조사하는 것을 포함한다. 평가음에 대한 신뢰성 있고 재현성 있는 결과를 나타낼 수 있는 주관적 평가방법을 선정하고 통계적 분석방법에 의해서 소음제어에 사람의 청감특성을 고려하고자 한다.

##### 4.1 평가음의 구성

2절의 냉장고 소음의 특성과 3절의 소음특성을 수정하는 방법에 의해서 예비실험 결과 기계실 팬 소음과 냉동실 팬 소음보다는 압축기 소음을 더 불쾌하게 느낀다는 결과를 얻을 수 있었다. 압축기 소음의 경우 소음특성이 압축기의 종류에 따라 다르다. 또한, 같은 압축기라고 하더라도 실제 냉장고 부착되어서 측정할 경우 주파수 영역에서의 주요 소음특성이 1/3 옥타브 밴드 스펙트럼에서 중심 주파수가 400Hz, 500Hz, 1600Hz, 2500Hz 인 4개 밴드에서 주요 특성을 나타낸다는 것을 데이터 분석에서 알 수 있었다. Fig.7은 압축기 소음의 1/3 옥타브 밴드 스펙트럼을 나타낸다.

이러한 결과를 바탕으로 총 6개의 평가음을 다음과 같이 구성하였다. 6개의 평가음의 제한조건으로 A-가중치 전 체음압레벨은 33dBa로 같은 조건으로 하였다.

- (1) 소리 1 : 압축기 소음의 400Hz 밴드 성분을 강조 (500Hz 밴드 성분을 줄임)

- (2) 소리 2 : 측정된 압축기 소음(500Hz 밴드 성분)
- (3) 소리 3 : 소리 1에서 고주파 성분(1600Hz, 2500Hz 밴드)를 줄이고 400Hz 밴드 성분을 강조
- (4) 소리 4 : 소리 2에서 고주파 성분(1600Hz, 2500Hz 밴드)를 줄이고 500Hz 밴드 성분 강조
- (5) 소리 5 : 압축기 소음의 1600Hz 밴드 성분 강조 (500Hz 밴드 성분을 줄임)
- (6) 소리 6 : 압축기 소음의 2500Hz 밴드 성분 강조 (500Hz 밴드 성분을 줄임)

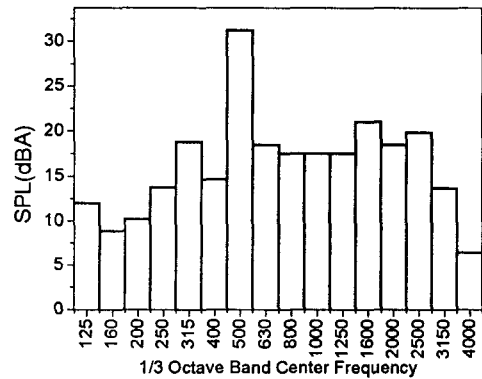


Fig.7 1/3 Octave band spectrum of compressor

##### 4.2 주관적 평가방법 및 과정

본 연구에서는 주관적 평가방법으로 대응비교법(Paired comparison method)[9]과 점수를 평가하는 방법[10]을 적용하였다. 대응비교법의 경우 구분이 어려운 여러 개의 비교 대상들 중에서 선택하거나 비교 대상간의 차이가 미세하여 평가가 어려운 경우 신뢰성과 재현이 높다. 점수를 평가하는 방법은 평가자가 평가음 전체를 미리 듣고 기준이 되는 소리를 정하고 들려주고 구성된 평가음에 대해서 평가자의 기준에 따라서 점수를 평가하는 방법을 사용하였다.

평가 방법은 크게 두 부분으로 구성하였다. 첫 번째 부분에서는 점수를 주는 방법으로 먼저 전체 6개의 평가음을 모두 듣고 그 소리들 중에서 기준을 정하도록 하였다. 그리고 불쾌하게 느끼는 정도를 연속적으로 주어지는 소리에 대해 1점에서 5점으로 평가하도록 구성하였다. 평가자가 보다 일관성 있는 판단을 할 수 있도록 점수를 매기는 방법을 먼저 수행하였다. 두 번째 부분에서는 연속적으로 들려주는 두 개의 소리를 듣고 자신의 기준에 따라 두 소음 중에서 더 불쾌하게 들리는 소리를 선택하는 대응비교법을 사용하였다. 6개의 평가음의 조합에 의해서 총 15개의 항목에 대해 평가를 수행하였다.

청취방법의 선택에 관한 사항으로, 재생매체를 스피커로 할 경우 평가하는 청음실의 크기 및 모양과 스피커의 위치 및 청음자의 위치 등이 평가결과에 영향을 미칠 수 있다. 본

연구에서는 이러한 스피커에 의한 청취방법의 문제점을 해결하기 위해서 헤드폰에 의해서 평가음을 재생하였으며, 동시에 6명이 평가에 참여할 수 있도록 헤드폰 전용 6채널 앰프를 사용하여 Fig.8과 같은 평가 시스템을 구성하였다.

평가자와 관련된 사항으로 평가자의 판단능력에 대해서는 성별, 나이, 청력손실의 경험, 청음평가에 대한 경험 및 소리에 대한 관심 등을 알 수 있는 평가 전 설문조사를 하였다. 평가인원의 경우 일반적으로 표본의 크기가 커질수록 통계적으로 모집단을 특징을 더 잘 나타낸다고 볼 수 있다

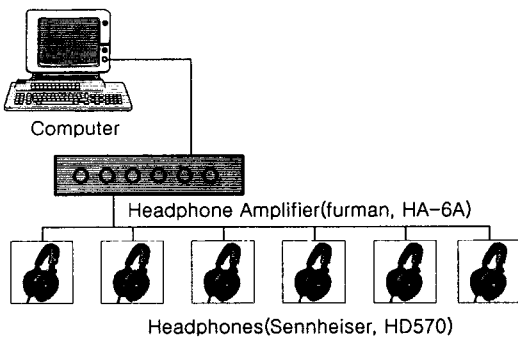


Fig.8 The subjective assessment system

## 5. 평가 결과 및 통계처리

평가단은 LG 생산기술원 연구원 35명을 대상으로 하였다. 성별은 남자는 29명, 여자는 6명이며, 나이는 20대에서 30대를 대상으로 평가하였다.

주파수 영역에서의 1/3 옥타브 밴드별로 음압레벨을 수정하여 구성한 평가음들 사이에 차이가 존재한다는 것을 분산분석(Analysis of Variance, ANOVA)[10]을 적용하여 검증하였다. 본 연구에서는 평가음의 변화를 요인으로 하여 처리수준은 6가지로 하였다. 만약 분산분석법을 적용하여 평가음의 종류에 따라 평가자들이 불쾌하게 느끼는 점수의 차이가 존재한다는 결론을 얻으면, 다음으로 다중 비교의 한 방법인 투크 검증법(Tukey's Method)[10]을 적용하여 어떤 처리 수준의 평가음이 유의수준 내에서 같은 정도로 불쾌한 지에 대한 등급을 판정하였다.

### 5.1 점수를 평가하는 방법

6개의 평가음에 대한 35명의 평가자에 대한 불쾌하게 느끼는 점수의 평균은 Fig.9와 같으며, 분산분석에 따른 결과는 Table 1과 같다. 평가음의 종류에 따른 유의수준 0.05에서 검증결과 평가음의 종류는 불쾌한 정도의 점수에 영향을 미친다는 결론을 얻을 수 있다.

이와 같이 분산분석법에 의한 가설 검증은 단순히 요인

이 평가 점수에 영향을 미치는가 그렇지 않은가에 대한 정보만 얻게 된다. 따라서 어떤 경우에 점수가 높은지 또는 어떤 경우에 요인에 의한 평가 점수차이가 존재하지 않은지는 투크 검증법을 적용한다. 투크 검증법을 적용한 결과는 Table 2와 같다. 여기서 Table 2의 평균 사이에 유효한 차이가 존재하는지 여부에 따른 등급은 주어진 평가음의 경우 평가음 5번과 6번의 경우는 다른 평가음보다 불쾌한 정도가 크다는 것을 나타내고, 평가음 1, 3, 4번의 경우는 다른 평가음보다는 불쾌한 정도가 작다는 것을 나타낸다.

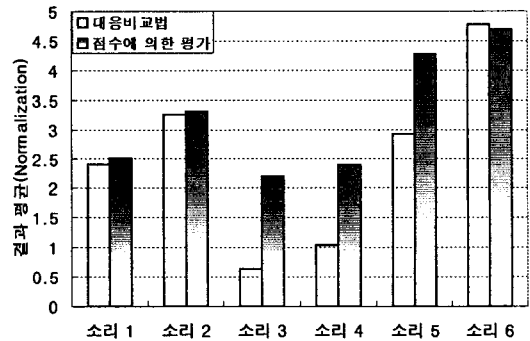


Fig.9 The result of subjective assessment

Table 1 Result of ANOVA

Source of variation	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Squares	F
Treatments	5	135.30	27.06	47.92
Error	204	115.20	0.56	
Total	209	250.50		

Table 2 Result of multiple comparison

소리번호	평균	정규화된 평균	그룹판정
6	4.9	4.69	A
5	4.6	4.28	A
2	3.8	3.32	B
1	3.1	2.51	C
4	3.0	2.40	C
3	2.8	2.20	C

### 5.2 대응비교법

각각의 평가자에 대해 평가의 일관성을 검증한 결과, 총 평가인원 35중 28명의 평가자가 주관적인 판단에 하에 불쾌한 소리와 덜 불쾌한 소리를 구별하였다. 그러므로 일관된 판단 기준을 적용하여 판단 능력이 있다고 결론을 내릴 수 있다. 판단 능력이 검증된 28명의 평가 결과는 Fig.9와

같고, 전체 선호도 점수 사이에 유효한 차이가 존재하는지 여부에 따른 등급은 Table 3에 나타내었다.[9]

검증 결과는 점수를 평가하는 방법과 유사한 결과로 주어진 평가음의 경우 평가음 6번은 다른 평가음보다 불쾌한 정도가 크다는 것을 나타내고, 평가음 3번과 4번은 다른 평가음보다는 불쾌한 정도가 작다는 결과를 나타내었다.

Table 3 Result of multiple comparison

소리번호	평균	정규화된 평균	그룹판정		
6	129	4.78	A		
2	88	3.26		B	
5	79	2.93		B	C
1	65	2.41			C
4	28	1.04			D
3	17	0.63			D

## 6. 결론 및 요약

본 논문에서는 사용자의 청감특성을 고려한 소음제어 대책 수립에 대해 살펴보았다. 실제 적용예로, 냉장고 소음의 주파수별 소음특성을 수정하여 평가음을 구성하고, 주관적 평가 방법을 적용하여 냉장고 소음대책에 대한 방향을 제시하였다.

압축기 단독소음의 평가 결과를 살펴보면, 1/3 옥타브 밴드의 중심 주파수가 2500Hz와 500Hz 밴드의 성분을 가장 불쾌하게 느낀다는 결과를 얻었다. 또한, 1/3 옥타브 밴드의 중심주파수가 400Hz와 500Hz 밴드 성분보다는 상대적으로 작지만 1600Hz와 2500Hz 밴드 성분을 더 불쾌하게 느낀다는 결과를 얻었다.

냉장고 단독소음들의 예비평가 결과를 볼 때, 기계실 팬 소음과 냉동실 팬 소음보다는 압축기 소음을 더 불쾌하게 느낀다는 결과를 얻었다.

이러한 현재 평가단의 결과를 참고할 때, 냉장고 소음 제어 전략으로 기계실 팬 소음과 냉동실 팬 소음보다는 압축기에 대한 소음제어에 많은 노력이 필요하고, 압축기 소음 제어시에는 1/3 옥타브 밴드의 중심주파수가 2500Hz, 500Hz 밴드의 소음제어에 많은 노력이 필요함을 본 연구를 통해 알 수 있었다.

본 논문에서 제안한 사람의 청감특성을 고려한 소음제어 방법은 냉장고 소음뿐만 아니라 다른 가전제품이나 기계의 소음제어 전략을 수립하는 과정에도 적용이 가능할 것이다.

## 후 기

실험에 도움을 주신 LG생산기술원 김석관 박사, 이종구 씨와 청음실험에 참여해 주신 LG생산기술원 연구원에게 감사 드립니다. 본 연구는 LG생산기술원, 과학기술부의 국가지정연구실(NRL) 사업과 교육부의 두뇌한국 21(BK21) 사업에 의해 지원되었으며 지원에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) E. Zwicker, H. Fastl, Psychoacoustics : Facts and Models, Springer-Verlag, pp.1~53, pp.181~234
- (2) Takeo Hashimoto, "Sound Quality Study and its Application to Car Interior and Exterior Noise," 한국소음진동공학회 2001년도 춘계학술대회논문집, pp.19~26, 2001
- (3) 임도형, "제품의 음질 특성에 관한 연구 : 진공 청소기에의 적용," 한국과학기술원 기계공학과, 석사학위논문, pp.11~21, 2000
- (4) 김소희, "5자유도 잔향 모델을 이용한 실내 잔향 필터의 설계," 한국과학기술원 기계공학과, 석사학위논문, 2000, pp.17~27
- (5) Lord Gately Evensen, Noise Control For Engineers, Krieger Publishin Company, pp.36~57, pp.103~291
- (6) David A. Bies and Colin H. Hansen, Engineering Noise Control : Thoery and Practice, E & FN SPON 2nd edition, pp.44~63
- (7) 오상경, "가전제품의 소음진동제어 기법에 관한 고찰" 한국소음진동공학회, 1991 v.1, n.2, pp.83-94 1226-0924
- (8) 주재만, 김중래, 이동현, "냉장고의 이상소음에 관한 사례연구", 한국소음진동공학회 2001년도 춘계학술대회논문집, pp.380~384
- (9) H. A. David, The Method of Paired Comparison, CHARLES GRIFFIN, pp.9~43
- (10) Jay L. Devore, Probability and Statistics for Engineering and the Sciences, Duxbury Press, 4th edition, pp.275~419