



냉장고 기계실의 고주파 소음 특성 분석을 통한 음질 개선

Sound Quality Improvement of Refrigerator using the Analysis of High Frequency Noise Radiated from Compressor in the Machine Room

장 준 영* · 김 태 훈** · 탁 언 수* · 정 의 봉* · 안 세 진†
Jun-Young Jang*, Tae-Hoon Kim**, Un-Su Tark*, Weui-Bong Jeong* and Se-Jin Ahn†

(Received August 1, 2019 ; Revised September 10, 2019 ; Accepted September 10, 2019)

Key Words : Refrigerator Noise(냉장고 소음), Sound Quality(음질), Contribution Analysis(기여도 분석), Pressure Transmissibility(음압전달률), Absorbent(흡음재), Sound Insulation Material(차음재)

ABSTRACT

This paper provides an analysis of the characteristics of the noise of components that affect the sound quality of oil-less refrigerators and suggests ways to effectively improve the sound quality. As the sound quality of refrigerators is determined by the characteristics of the various components and the path through which the noise is transferred, it is necessary to first analyze the characteristics of the noise generated by the components. Therefore, after measuring the noise of each part, we conducted a contribution analysis of the sound quality of each noise source. As a result, the oil-less compressor was found to be the dominant part of the sound quality of the refrigerator, while the high-frequency noise of the compressor is the main cause of poor sound quality. Then, to improve the sound quality by reducing the high-frequency noise of the compressor, we changed the transfer path of the noise using sound-absorbing and -insulating material and predicted the effect of the sound quality through a pressure transmissibility test. As a result of verification from actual operation, the sound quality of the refrigerator was improved most by the reduction of the sharpness and criteria of declination when the absorbent was attached to the surrounding walls of the compressor. Finally, the overall SPL decreased by 2.95 dBA, and the sound quality score was improved by 1.83.

1. 서 론

최근 소비자들의 생활 소음에 대한 기대 수준이 높아지면서, 가전제품의 소음저감뿐만 아니라 심리음향 영역에 해당하는 음질에 대한 관심과 요구가 증가하고 있다. 가전제품의 소음은 작은 수준이라고 할지라도 실생활에서 긴 시간 동안 소비자에게 노출될 때

불쾌감을 준다. 이러한 이유로 인하여, 최근 가전제품의 음질을 측정해 소음을 평가하고 개선하는 연구가 활발히 이루어지고 있다. Jeong⁽¹⁾은 세탁기 각 소음원 부품의 기동음을 실제 세탁 음에 합성하여 신뢰할 수 있는 가상 세탁음을 제작하고, 행정소음에 대한 음질 평가를 수행하여 kurtosis와 SIL을 이용한 인덱스를 구축하였다. Lim⁽²⁾은 제품의 음질을 하나의 값으로 나타내기 위해 진공청소기의 짜증도 지수를 모

† Corresponding Author ; Member, Uiduk University,
Division of Energy & Electrical Engineering
E-mail : sjahn@uu.ac.kr
* School of Mechanical Engineering, Pusan National University
** LG Electronics

A part of this paper is presented at the KSNVE 2019 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Soo Il Lee
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

텔화하여 주파수 성분과 음질 사이의 상관관계를 파악하였고, Jeong⁽³⁾은 진공청소기 소음의 특성을 표현하는 형용사 어휘(무딘-날카로운, 부드러운-거친 등)를 정의하고, 이에 기여하는 음질 요소들을 시험적으로 밝혔다. 이러한 연구들은 가전제품의 소음성능 향상을 위하여 저소음화 뿐만 아니라 사용자의 감성을 고려한 음질 관점의 개선이 필요함을 시사한다⁽³⁾.

가전제품 중에서도 실내에서 상시로 작동하는 냉장고는 소비자의 소음에 대한 민감도가 매우 높은 것으로 보고되고 있다. 이러한 이유로, 선행된 여러 연구를 통해 주요 소음원이 되는 부품들의 소음 수준을 상당히 낮추었으나, 소비자의 요구는 저소음형 냉장고에 그치지 않고 불쾌하지 않은 소리, 즉 음질이 더 좋은 냉장고에까지 확대되고 있다⁽⁴⁾. 이러한 추세에 맞춰 You⁽⁴⁾는 냉장고 소음에 대한 소비자들의 주관적인 반응을 예측하기 위해 의미 미분법 실험(semantic differential test)을 수행하였다. 이 연구를 통해 저자는 음질을 표현하는 형용사 어휘를 선정하고, 음질 요소 간의 상관분석을 수행하여 주거환경에서의 냉장고 소음에 대한 음질 인덱스를 제안하였다. Gu⁽⁵⁾는 가정집에서의 잔향 효과를 고려한 냉장고 정상 기동음에 대해서 인공지능망을 이용해 라우드니스 및 샤프니스와 청음실험 결과의 높은 상관관계를 발견하였다. Kong⁽⁶⁾은 다양한 모델의 냉장고에 대하여 냉장고 소음의 패턴을 분류한 뒤, 음질에 영향을 주는 주요한 소음 패턴을 근거로 하여 냉장고 소음의 심리 음향 시험을 위한 음원들을 선정하였고, 이러한 연구 방법을 통하여 냉장고 소음의 특성을 반영한 음질 지표를 개발하였다. 이어서 Kim⁽⁷⁾은 음질 지표 개발에 있어서 다양한 모델의 냉장고에서 발생하는 다양한 패턴의 소음을 편집하여 음압레벨을 동일하게 맞춘 음원을 이용해 냉장고 소음의 음질지표를 개발하였다. 이 연구에서 저주파 소음에 의한 고주파 소음의 마스킹 효과는 냉장고 음질에 긍정적인 영향을 미치는 것을 발견하였고, 이러한 마스킹 효과를 냉장고 음질 지표 계산에 반영하는 방법을 제시했다.

이 연구에서는 오일리스 냉장고에 대해서 주요 소음원들이 냉장고 음질에 기여하는 정도를 분석한다. 냉장고의 사이클 상태에 따라 정교하게 제어되는 각 부품의 소음원은 냉장고의 상태나 환경에 따라 변화하기 때문에, 신뢰성 높은 기여도 분석을 위해서는 효과적인 실험 방법이 요구된다. 이 연구에서는 오일

리스 냉장고 각 부품의 비연성된 소음을 측정하고, 각 소음원에 대한 음질 기여도를 분석한다. 그리고 효과적인 음질 개선을 위하여 소음원에서 냉장고 전방에 위치한 수음점까지 소리가 전달되는 비율을 주파수에 따라 나타내는 음압전달률 시험을 제시하였다. 이후 흡차음재를 적용하여 전달경로 변경에 따른 음질 개선 효과를 예측하고, 최종적으로 냉장고가 실제로 기동하는 상태에서 냉장고 음질이 개선되는 정도를 확인하였다.

2. 시험 방법

2.1 냉장고의 음질 인덱스

심리 음향학에서는 소음에 대한 주관적 지각량을 구분하기 위하여 사용하는 지표로 라우드니스(loudness), 샤프니스(sharpness), 러프니스(roughness), 변동강도(fluctuation strength) 등을 제시한다⁽¹¹⁾. 이러한 지표들은 음원에 대한 소리의 크기, 날카로움, 거친 정도, 변동의 세기를 정량화한 것으로, 소리의 음질 특성을 보편적으로 구분할 때 사용하는 것들이다. 하지만 이러한 지표들은 특정한 제품에서 발생하는 소음의 음질을 효과적이고 실질적으로 표현하기에 부족하다. 때문에, 제품의 소음 특성, 사용 환경과 사용자의 기대수준 등이 반영된 상관성 높은 지표를 선정하거나 새로운 지표를 개발할 필요가 있다.

냉장고 소음의 경우, 20 Hz 미만의 변조 주파수에 의해 음의 크기가 변화하는 느낌을 표현하는 변동강도와 20 Hz ~ 300 Hz 변조 주파수에 의한 톤(tone)의 변화로 발생하는 거친 느낌을 표현하는 러프니스는 냉장고 음질 평가에 유의미한 연관성이 적은 것으로 보고되었다⁽⁶⁾. 반면에 라우드니스는 사람의 심리적인 반응에 의한 소음의 크기를 반영하므로, 음질의 주관 평가치와 높은 상관성을 갖는 지표이다. 그리고 동일한 소음레벨(SPL)을 가지는 냉장고 소음의 경우, 소음의 고주파 성분에 높은 가중치를 두는 샤프니스가 음질에 유의미한 영향을 미친다. 또한, 냉장고 소음에서 저주파 음이 상대적으로 클 경우, 고주파 음을 마스킹하는 효과가 냉장고 음질에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다⁽⁷⁾. 이 연구에서는 Kong⁽⁶⁾과 Kim⁽⁷⁾의 연구를 참고하여, 다음의 3가지 지표와 주관 평가 시험을 통해 개발된 냉장고 음질점수(sound quality score)를 음질 평가에 활용하였고, 최종적으로

오일리스 냉장고의 음질 기여도 분석과 전달경로 변경에 따른 음질 개선 효과를 확인하였다.

(1) 라우드니스

라우드니스는 음의 크기 및 대소에 대한 주관적 지각량을 나타내는 음질 지표이다. Zwicker는 정상음에 대한 1/3 옥타브밴드 분석을 기반으로 식 (1)을 이용해 임계 대역에 대한 비라우드니스(specific loudness) N' 를 계산하고, 이를 청각의 임계 대역(bark scale number, z)에 대해 적분하여 전체 라우드니스 N 을 계산했다. 이때, E_{TQ} 는 최소 가청한계에서의 자극이고, E_0 는 측정된 소음에서의 대응 자극이다⁽¹¹⁾.

$$N' = 0.08 \left(\frac{E_{TQ}}{E_0} \right)^{0.23} \left[\left(0.5 + 0.5 \frac{E}{E_{TQ}} \right)^{0.23} - 1 \right] \quad (1)$$

$$N = \int_0^{24Bark} N' dz \text{ [sone]} \quad (2)$$

(2) 샤프니스

식 (3)과 같이 계산되는 샤프니스 S 는 음의 날카로움에 대한 주관적 척도이다. 식 (1)에서 계산한 비라우드니스 N' 에 고주파 성분의 가중치 $g(z)$ 를 적용한 값으로, 동일한 라우드니스 값을 가질지라도 소음의 스펙트럼 분포에 따라 샤프니스 값은 달라질 수 있다.

샤프니스는 청각의 임계 대역 z 가 16(중심주파수 : 2900 Hz, 대역폭 : 450 Hz)을 초과하는 범위에서 높은 가중치 $g(z)$ 를 적용한다. 이것은 날카로움에 대한 청감특성이 약 3 kHz를 기점으로 매우 민감해지기 때문이다⁽¹¹⁾.

$$S = 0.11 \frac{\int_0^{24Bark} N' g(z) z dz}{\int_0^{24Bark} N' dz} \text{ [acum]} \quad (3)$$

$$g(z) = \begin{cases} 1 & z \leq 16 \\ 0.066e^{0.171z} & z > 16 \end{cases}$$

(3) 스펙트럼의 기울기

식 (4)의 스펙트럼 기울기(criteria of declination) D 는 냉장고 소음에서 마스킹 효과에 의한 청감 특성을 반영하는 지표이다. 냉장고 소음의 마스킹 효과는 주로 상대적으로 큰 저주파 대역의 소음에 의해 고주파 대역의 소음이 적게 감각되는 현상을 의미한다.

이 연구에서는 A 특성 청감보정을 적용한 1/3 옥타브 밴드 스펙트럼에서 1 kHz를 기준으로 저주파 영역과 고주파 영역을 나눈 뒤, 저주파 영역에서 가장 높은 SPL과 고주파 영역에서 가장 높은 SPL의 크기 차이를 계산하고, 이 차이와 옥타브밴드 축이 이루는 기울기를 마스킹 효과의 정량적인 값으로 정하여 음질 지표 값으로 활용하였다⁽⁷⁾.

식 (4)의 SPL_B 와 SPL_A 는 각각 1 kHz 이상 영역에서 가장 높은 SPL(dBA) 값, 1 kHz 이하 영역에서 가장 높은 SPL(dBA) 값을 의미하고, O_B 와 O_A 는 SPL_B 와 SPL_A 에 해당하는 1/3 옥타브밴드 인덱스(octave band number)를 의미한다. 저주파 대역의 소음이 고주파 대역의 소음보다 상대적으로 클 때, 마스킹 효과에 의한 청감특성이 음질에 긍정적인 영향을 미치므로 기울기 값은 감소하고, 부정적인 영향을 미칠 때 기울기 값은 증가한다.

$$D = \frac{SPL_B - SPL_A}{O_B - O_A} \text{ [dBA/Oct]} \quad (4)$$

(4) 냉장고 음질점수

냉장고 음질점수는 냉장고의 특성에 따라 선정된

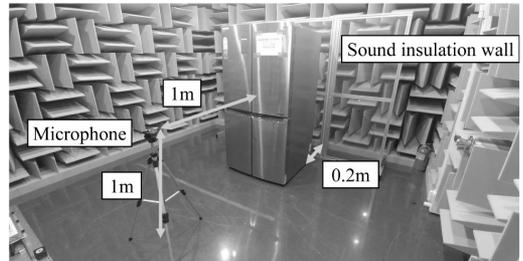


Fig. 1 Measurement setup for contribution test. refrigerator, wall and a microphone

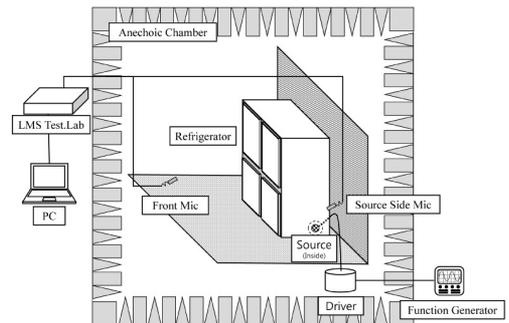


Fig. 2 Measurement setup for pressure transmissibility with monopole sound source

음질 지표들을 종합하여 냉장고 음질을 하나의 값으로 표현한 인덱스이다. 냉장고 음질에 대한 주관평가 시험을 통해 각 음질 지표가 음질에 기여하는 가중치 (c_1, c_2, c_3)를 추정하고, 이를 활용하여 식 (5)와 같이 냉장고 음질 점수를 계산한다. 음질점수는 낮을수록 더 소리의 음질이 좋다는 것을 의미한다.

$$SQ\ score = c_1N + c_2S + c_3D \quad (5)$$

2.2 냉장고 부품별 음질 기여도 분석

냉장고 부품은 물리적으로 서로 구별되어 기동하지만, 외부 환경의 변화나 냉장고 상태에 따라 연성되어 작동한다. 특히 압축기의 작동은 압축기 자체의 온도 및 냉장고 내부의 온도에 따라 작동하는 각종 쉘의 작동 여부와 연관되어 있다. 이로 인해 냉장고 부품별 기여도 분석을 정밀하게 수행하기 위해서는 사이클에 따른 냉장고 부품의 제어 로직을 먼저 이해하고, 각 부품이 비연성 되어 작동하는 정상 상태 작동 구간을 찾아 소음을 측정하여야 한다.

이 연구에서는 오일리스 냉장고의 가동구간마다 부품들의 작동 순서와 제어 로직을 파악한 뒤, 냉장고 시

스템 내/외적 변화에 비교적 둔감하면서도 측정 결과의 재현성과 대표성을 확보할 수 있는 소음 측정 구간을 선정하였다. 또, 냉장고의 제어 로직이나 사이클이 바뀌지 않는 범위에서 각 부품에 공급되는 전력을 차단하는 방법으로 단일 부품에 대한 소음을 측정하여 소음 기여도를 분석하는 시험절차를 설정하였다.

소음 측정은 Fig. 1과 같이 반무향실(차단주파수 : 125 Hz, 압소음 레벨 : 15 dBA)에 냉장고를 위치시킨 뒤, 냉장고가 설치되는 일반적인 상황을 고려하여 냉장고의 후면에 아크릴 재질의 벽(2770 × 1950 × 10 t, 평균 투과손실 33 dB)을 설치한 뒤 수행하였다⁽¹²⁾. 수음점은 냉장고 전면에서 1 m, 지면에서 1 m 지점에 위치시켰다. 측정에 사용한 장비는 LMS Test. Lab이며, 샘플링 주파수는 20 480 Hz, 주파수 분해능은 1 Hz로 설정하였다.

이 연구에서는 부품별 음질 기여도 분석과 함께 각 부품의 소음 특성을 주파수 영역에 따라 분석하였다. 효과적인 음질 개선을 위한 정보로 활용하기 위하여 크게 3가지 주파수 영역으로 나누었는데, 0 kHz ~ 1 kHz는 저주파 영역, 1 kHz ~ 4 kHz는 중주파 영역, 그리고 4 kHz ~ 10 kHz는 고주파 영역으로 설정하였다.

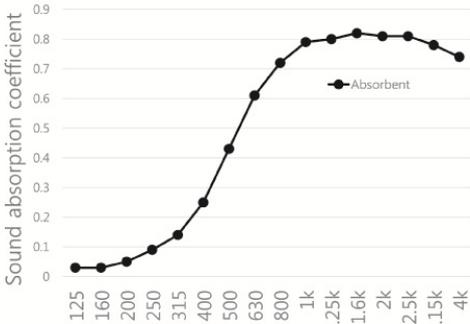


Fig. 3 Sound absorption coefficient of absorbent

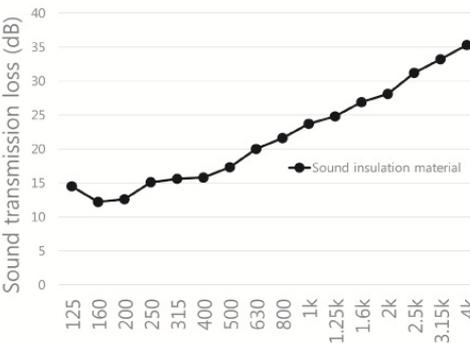


Fig. 4 Transmission loss of sound insulation material

2.3 음압전달률 시험

음질은 음원에서 발생한 소음이 수음점까지 전달되는 경로의 특성에 따라 달라진다. 따라서 효과적으로 음질을 개선시키기 위해서는 소음이나 음질 기여도가 큰 부품에 대하여 소음의 전달경로를 파악한 뒤, 그 경로를 변경해야 한다. 이 연구에서는 2.2장의 부품별 기여도 분석으로 추정된 기여도가 가장 큰 부품에 대하여, 방사되는 소음의 전달경로가 갖는 주파수 특성을 파악하기 위해 식 (6)으로 계산되는 음압전달률(pressure transmissibility)을 측정한다. 이때, P_{Front} 는 냉장고 전면에서 위치한 마이크에서 측정한 음압의 스펙트럼이고, P_{Source} 는 소음원의 음압 스펙트럼이다.

$$Pressure\ Transmissibility = 20 \log_{10} \left| \frac{P_{Front}}{P_{Source}} \right| \quad [dB] \quad (6)$$

또, 음압전달률을 이용하여 소음원 주변의 음장과 전달경로의 변경에 따른 주파수 영역별 소음의 특성 변화를 분석한다. 시험을 위해 Microflown Technologies사의 무지향성 mid-high range monopole source를 사용하였으며, 음원의 안정적인 출력 주파수 범위는 300 Hz

~7000 Hz이다. Fig. 2는 음압전달률 시험을 위한 소음원과 마이크로폰의 설치 방법을 보여준다.

2.4 전달경로 변경

소음의 전달경로(path) 변경을 위해 냉장고의 구조를 수정하는 데는 많은 시간과 비용이 소요된다. 하지만 흡음재나 차음재를 이용하면 현재 완성된 제품의 설계를 크게 수정하지 않으면서 전달경로를 변경할 수 있기 때문에, 이미 가전제품에 흡음재를 적용한 사례가 많다. Kim⁽¹⁰⁾은 진공청소기의 구조 및 소음 특성을 파악하여 흡음재를 부착할 위치를 선정하고, 여러 흡음재를 적용하여 다양한 흡음 성능을 조사하였다. 또, 흡음재가 진공청소기의 중고주파 대역의 소음저감에 효과적임을 밝혀, 음질 개선에 유용함을 시사했다. 냉장고의 경우, 압축기가 약 1 kHz 이상의 주파수 영역에서 소음을 방사하기 때문에 흡음재를 이용해 소음 저감과 음질 개선을 기대할 수 있다. 이 연구에서 사용된 흡음재는 극세사 형태의 제품으로 두께는 5 t, 면밀도는 600 g/m²이다⁽¹³⁾. 흡음재의 흡음률은 Fig. 3에 도시하였다. 또, 전달경로를 차단

하기 위해 냉장고에 사용되는 얇은 벽과 동등한 수준의 투과손실을 갖는 차음재를 이용하였다. 차음재는 두께 1 t, 면밀도 1500 g/m²이며, 차음재의 투과손실을 Fig. 4에 도시하였다⁽¹³⁾.

3. 시험 결과

3.1 부품별 음질 기여도 시험

오일리스 냉장고의 주요 소음원에는 압축기(compressor)와 기계실 팬(C-fan) 그리고 고내팬(냉장실 팬, 냉동실 팬) 등이 있다. 압축기는 냉매의 압력을 높여 시스템에 순환시키고 열교환을 가능하게 해 주는 장치로서, 압축기의 작동 주파수 성분과 압축기 셀의 공진이 소음의 주된 원인으로 알려져 있다⁽⁸⁾. 기계실 팬은 기계실 안에 있는 압축기와 응축기(condenser)에서 발생하는 열을 기계실 밖으로 순환하여 냉각시키고, 냉장실 팬(R-fan)과 냉동실 팬(F-fan)은 고내의 냉기를 공급 또는 순환시키는 역할을 수행한다. 팬 소음은 팬의 회전 주파수와 날개(blade)의 개수에 따른 BPF(blade passing frequency)

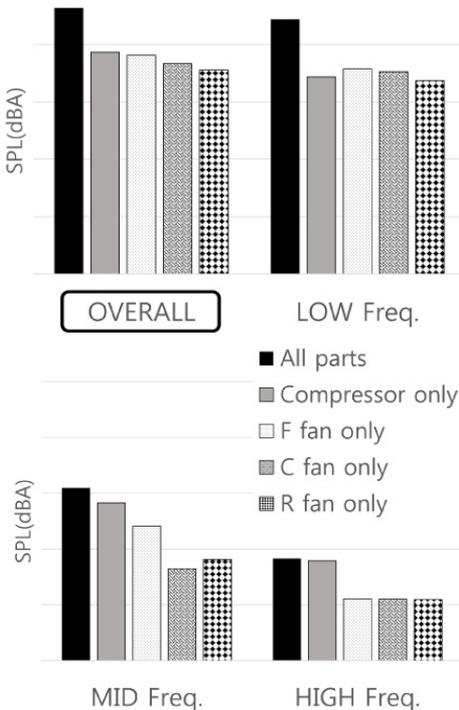


Fig. 5 Contribution of each part in terms of sound pressure

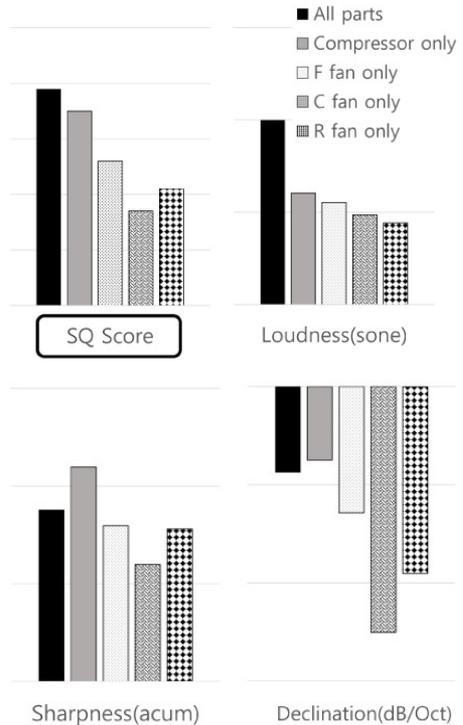


Fig. 6 Contribution of each part in terms of sound quality

가 소음 발생의 주된 원인으로 작용한다. 이 연구에서는 압축기와 기계실 쉘, 그리고 고내쉘이 냉장고 음질에 기여하는 정도를 분석하기 위한 시험을 수행하였다.

부품별 소음원의 소음 레벨(SPL)과 주파수 영역별 크기를 모든 부품이 작동할 때의 소음과 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 먼저 0 kHz ~ 1 kHz의 저주파 영역의 크기를 보면, 4가지 주요 부품들의 소음 수준이 1 dBA 내외의 차이로 모두 비슷하며, 이 저주파 대역의 소음이 중주파와 고주파 대역보다 전체 소음 레벨에 미치는 영향이 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. 1 kHz ~ 4 kHz의 중주파 대역에서 소음의 기여도가 큰 부품은 오일리스 압축기와 냉장실 쉘이다. 압축기의 경우 쉘의 구조진동에 의한 방사소음이 넓은 대역에 걸쳐서 발생하기 때문에 1 kHz 이상의 주파수 대역에서도 높은 소음 기여도를 갖는 것으로 알려져 있다^{(8),(9)}. 4 kHz 이상의 고주파 대역에서는 쉘의 기여도는 압축기보다 현저히 낮음을 알 수 있다.

Fig. 6는 부품별 소음에 대한 주요 음질 지표와 냉장고 음질점수를 도시한 그래프이다. 부품별 냉장고 음질점수는 Fig. 5에서 보인 각 부품의 소음 레벨의 경향과 큰 차이를 보이는데, 그 원인은 각 부품의 소음 특성에 있어서 샤프니스와 스펙트럼의 기울기가 다른 경향을 보이기 때문이다. 샤프니스와 스펙트럼의 기울기는 모두 소음의 중주파 및 고주파 대역 소음과 관련이 있으므로, 냉장고 부품의 음질 특성은 1 kHz 이상 주파수 대역에 의해 구분되는 것으로 추정할 수 있다.

냉장고의 주요 소음원 중에서도 압축기는 냉장고 음질 지표 모두에서 가장 높은 값을 갖는다. 특히 중고주파 대역에서 가중치를 둔 샤프니스와 저주파에 의한 고주파의 마스킹 효과를 반영한 스펙트럼의 기울기에서 다른 부품들과 차이가 두드러진다. 이것은 1 kHz 이상 대역에서 압축기의 방사소음이 지배적이기 때문이다. 따라서 압축기는 냉장고 음질에 가장 큰 기여도를 갖는 부품이며, 효과적인 냉장고 음질 개선을 위해서는 압축기의 1 kHz 이상 대역 소음의 저감이 필요하다.

3.2 음압전달률 시험

냉장고 기계실에 위치한 압축기에서 방사한 소음은 기계실 내부 벽면에서 반사되고, 열교환을 위해 뚫려 있는 통풍구를 통과하여 냉장고 전방에 위치한 수음점에 도달한다. 또는 기계실을 둘러싸고 있는 얇은 패널을 투과한 소음이 수음점까지 전달되기도 한다. 효과적인 소음 저감을 위해서는 기계실의 구조와 소음전달 경로를 고려하여 흡음재 또는 차음재를 적용할 효율적인 위치와 방법을 선정해야 한다.

이 연구에서는 음질 기여도가 가장 큰 부품으로 선정된 오일리스 압축기에 대해서, 소음 전달경로를 변경시켜 음질 개선을 기대할 수 있는 네 가지 변경안을 제시하였다. 먼저 방사되는 소음이 압축기를 둘러싼 철판 벽면에서 반사되거나 투과되는 것을 저감하기 위하여 압축기의 주위 벽에 흡음재를 적용하였다(이하 inner wall case). 흡음재는 압축기 주위의 위, 아래, 뒤, 옆쪽 벽에 위치시키되, 통풍구를 막지 않도록

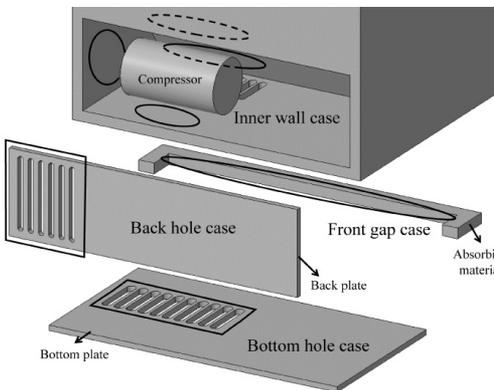


Fig. 7 Countermeasure cases for sound quality improvement with absorption material in the machine room

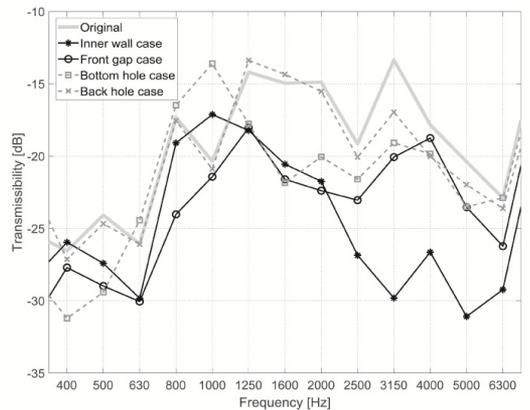


Fig. 8 Comparison of pressure transmissibility between original and 4 kinds of countermeasure case

록 부착하였다. 또, 기계실 바닥 판에 위치한 통풍구를 통하여 냉장고 전면으로 전달되는 소음을 저감하기 위해 냉장고 바닥과 지면의 틈에 흡음재를 띠 형태로 위치시켰다(이하 front gap case). 이외에도 통풍구를 통과하는 소음을 차단하기 위해 바닥 판과 기계실의 뒷판에 위치한 통풍 구멍을 차음재를 이용하여 막았다(이하 bottom hole case, back hole case). 압축기가 위치한 기계실 구조에 흡차음재를 적용한 개략도를 Fig. 7에 도시하였다.

기계실 내부의 음장특성과 전달경로의 특성 변화를 관찰하기 위해 주파수별 음압전달률 시험의 결과를 1/3 옥타브밴드로 Fig. 8에 나타내었다. 이때 monopole source는 압축기 위치에서 발생시켰으며, 수음점은 냉장고 전면에서 1 m, 지면에서 1 m에 위치시켰다.

먼저 inner wall case는 1 kHz 이상의 넓은 주파수에서 소음 저감 효과가 크게 나타나는 것으로 확인되었다. 이것은 기계실 내벽에 부착된 흡음재가 중고주파 대역의 소음 저감에 효과적이라는 사실을 의미한다. 특히 다른 개선안들에 비해 2.5 kHz 이상의 넓은 주파수 대역에서 효과가 두드러지는데, 샤프니스나 기울기를 개선하는데 연관성이 있을 것으로 예상된다.

Front gap case는 1 kHz 이하에서 소음 저감의 효과가 두드러진다. 적은 양의 흡음재를 사용하였음에도 불구하고, 저주파 영역에서 소음 저감 효과가 크

게 나타났다. 압축기의 저주파 영역 소음은 전체 소음 레벨에서 큰 몫을 차지하므로, 음질 지표 중 라우드니스를 낮추는 데 많은 효과가 있을 것으로 예상할 수 있다.

차음재를 이용하는 bottom hole case과 back hole case 모두 중고주파 대역에서 흡음재를 사용하는 개선안들 보다 효과가 떨어지는 것을 확인하였다. bottom hole case는 400 Hz ~ 500 Hz에서 소음 저감 효과를 보이지만, 1 kHz 주변에서 소음이 크게 증가하는 영역이 발생하기 때문에 전체적인 라우드니스 감소 효과가 미비할 것으로 예상된다. 또한, 중주파수에 해당하는 영역의 소음이 소폭 감소하므로 샤프니스나 스펙트럼 기울기의 개선이 미약하게 있을 것으로 예상된다. Back hole case는 소음 개선 효과가 거의 없으며, 오히려 차음벽에 의해 반사된 음(音)에너지로 인해 부분적으로 소음이 증가하는 구간이 발생하는 것을 확인하였다.

Fig. 9는 앞서 소개한 Fig. 8의 1/3 옥타브밴드 음압 전달률 결과를 세 가지 주파수 영역별로 나타낸 것이다. 이를 통해 음질개선여부를 효율적으로 예측해보고자 한다. Fig. 9에서 양(+)의 수치는 소음이 개선된 양을 나타내고, 음(-)의 수치는 소음이 개선되지 않고 오히려 증가한 것을 의미한다.

이 결과는 전체 주파수 대역(OA freq.)에서의 개선 정도가 각각의 주파수 대역에서 비례하여 나타나지 않은 것을 알 수 있으며, 음질에 주요한 영향을 미치면서도 상대적으로 크기가 작은 고주파 대역에서의 개선 정도에 주목할 필요성이 있음을 시사한다.

기계실 내벽에 흡음재를 부착했던 inner wall case는 1 kHz 이상의 중고주파 대역에서 소음 저감효과가 큰 것으로 확인되었다. 특히 고주파 영역에서 다른 개선안들보다 음압전달률 개선 효과가 현저히 큰 것으로 보아 샤프니스와 스펙트럼 기울기 감소로 저감으로 인한 음질 개선에도 효과가 클 것으로 예상된다. 이것은 앞서 Fig. 8을 통해 예상했던 내용과 일치한다. 냉장고의 바닥 틈을 흡음재로 막는 front gap case는 1 kHz 미만의 저주파에서 소음 개선 효과가 두드러지게 나타났다. 이 또한 1/3 옥타브 밴드 결과와 비슷한 결과를 예측할 수 있는데, 저주파 대역은 냉장고의 소음 레벨에 큰 영향을 미치기 때문에 overall SPL 저감과 음질의 라우드니스 감소에 큰 효과가 있을 것으로 예상된다. 하지만, 저주파 소음 저감으로 인해 마스크

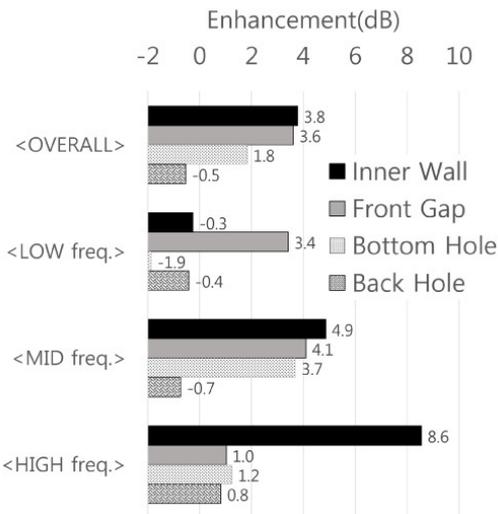


Fig. 9 Enhancement with the 4 kinds of countermeasure case on frequency range

효과가 떨어질 수 있기 때문에 스펙트럼 기울기의 개선이 inner wall case에 비해 작을 것이다.

기계실의 바닥 면 통풍구를 차음재로 막는 bottom hole case는 1 kHz~4 kHz의 중주파 대역에서 소음 저감 효과가 나타났지만, 고주파 영역의 소음 저감 효과가 미약하기 때문에 샤프니스의 개선이 적을 것으로 예상된다. 또한, 1 kHz 이하 구간에서 오히려 소음이 증가하기 때문에 라우드니스 증가로 인해 종합적인 음질 개선에는 큰 영향을 미치지 못할 것으로 예상된다. 마지막으로 기계실의 뒷면 통풍구를 막는 back hole case는 음압전달률에서 개선되는 정도가 미비하고, back hole을 막음으로써 오히려 음압전달률이 부분적으로 상승하는 구간이 나타난 것을 알 수 있다.

3.3 작동상태 시험

앞서 시험한 음압전달률 결과를 참고하여, 냉장고가 실제 작동조건에서 개선안들의 소음 저감 및 음질 개선 효과를 확인하는 시험을 실시하였다. 냉장고는 내외부의 다양한 조건들(온도, 습도, 부품들의 상태 등)에 따라 전환되는 기동 상태에 따라 소음의 특성

도 민감하게 변화한다. 그래서 이 연구에서는 흡차음재 적용에 따른 개선 효과 시험을 실효적으로 검토하기 위하여 냉장고 기동 사이클은 정상 상태의 일반기동 운전으로 고정하였다. 시험 중에 사이클이 변하는 경우는 재시험하였으며, 시험의 오차를 줄이기 위하여 각각 6번 반복 시험하여 얻은 평균값을 각 개선안의 대표값으로 하였다.

실제 기동 상태에서 개선안을 적용하여 측정된 주파수 영역별 음압 레벨(SPL)과 각 음질 지표 값을 각각 Figs. 10, 11에 도시하였다. 실제 작동 상태에서 각 개선안의 효과를 검증한 결과는 3.2절의 음압전달률 시험을 통해 예측한 결과와 유사함을 확인하였다. 이는 모든 소음원이 작동하는 상태에서 시험하였음에도 불구하고, 압축기의 중고주파 소음이 냉장고 전체 음질에 지배적인 영향을 미치고, 또 그 소음이 전달되는 경로를 변경시키는 것이 음질 개선에 큰 효과가 있기 때문이다.

흡음재를 압축기 주위 벽에 부착한 inner wall case는 음압전달률 시험 결과와 유사하게 중고주파 대역에서 소음 저감 효과가 상대적으로 큰 것으로 나타났

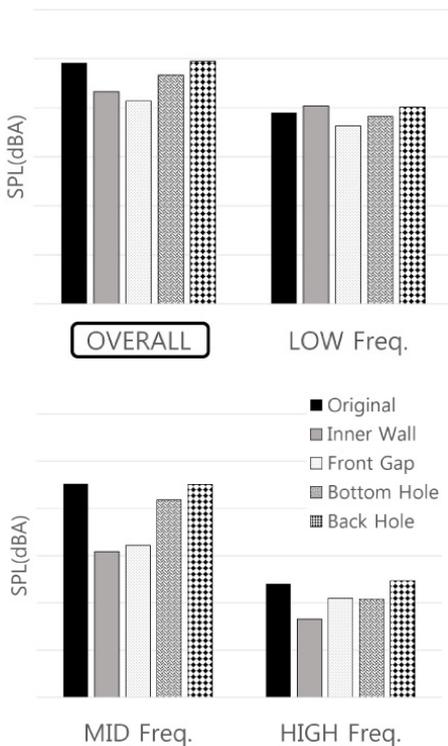


Fig. 10 SPL comparison of operating noise

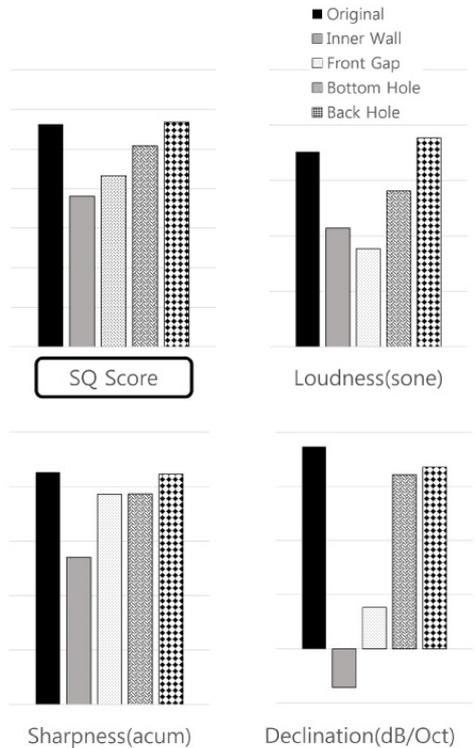


Fig. 11 SQ comparison of operating noise

다. 이로 말미암아 저주파 대역에서 소음 개선 효과가 없었음에도 불구하고, 다른 개선안들에 비해 냉장고 음질점수가 가장 많이 개선된 것으로 확인되었다. 이것은 중고주파 대역 소음 저감으로 인해 샤프니스가 감소하고, 마스킹 효과가 냉장고 음질에 긍정적으로 기여하면서 스펙트럼의 기울기가 개선 전에 비해 매우 낮아졌기 때문이다.

Front gap case는 overall SPL이 가장 크게 개선되었음에도 불구하고, inner wall case보다 냉장고 음질점수 개선 효과가 떨어졌다. 이것은 overall SPL 저감으로 인한 라우드니스 저감보다 중고주파 영역에 큰 영향을 받는 샤프니스의 개선이 미약했기 때문이다. 스펙트럼의 기울기에서도 개선 효과가 inner wall case보다 떨어졌는데, 3.2절에서 음압전달률 시험을 통해 확인한 대로, 소음의 전달경로 변경으로 인해 저주파 대역의 소음이 저감되면서 고주파 소음을 저감하는 소리의 마스킹 효과를 오히려 떨어뜨렸기 때문이다.

차음재로 통풍구를 막는 bottom hole case와 back hole case는 소음 저감 효과와 음질 개선 효과에서 흡음재를 사용한 개선안에 비하여 모두 작게 나타났다. 중고주파 대역에서 소음 개선 효과가 다소 있었던 bottom hole case는 냉장고 음질점수에서 약간의 개선 효과가 있었던 반면에, back hole case는 소음 개선 효과는 나타나지 않았으며 음질점수가 오히려 나빠지는 것을 확인할 수 있다. 이는 3.2절에서 추정하였듯이, 차음재에 반사된 음에너지가 다른 전달경로에 더해졌기 때문이다.

4. 결 론

냉장고의 음질은 라우드니스, 샤프니스, 스펙트럼의 기울기의 영향이 지배적이다. 이 연구는 이들 지표를 바탕으로 냉장고의 음질 개선을 위해 음질 기여도 분석을 수행하고, 압축기가 음질에 지배적인 영향을 미치는 부품을 밝혔다. 이후, 압축기 소음의 전달경로를 흡차음재를 이용해 변화시키고, 음압전달률 시험을 통해 전달경로 변경에 따른 음질 변화를 예측하였다. 실제 작동상태에서 음질 개선을 검증한 결과, 음압전달률 시험과 실제 작동상태에서 음질이 변화하는 경향은 매우 유사했으며, 압축기 주위 벽에 흡음재를 부착하는 경우가 가장 효과적이었다. 이는 압축기에서 방사되는 중고주파 대역 소음이 흡음재로 인

해 크게 저감되면서 샤프니스와 스펙트럼 기울기가 개선되었기 때문이다. 따라서, 냉장고 음질 개선을 위해서는 흡음재를 적정 위치에 적용하는 것이 효과적이며, 이 연구에서는 압축기 주위 벽에 흡음재를 부착한 결과 overall SPL이 2.95 dBA, 냉장고 음질점수가 1.83점 개선되었다.

References

- (1) Jeong, J. E., Yang, I. H., Fawazi, N., Jeong, U. C., Lee, J. Y. and Oh, J. E., 2012, Sound Quality Evaluation for Laundry Noise by a Virtual Laundry Noise Considering the Effect of Various Noise Sources in a Drum Washing Machine, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 6, pp. 564~573.
- (2) Lim, D. H. and Park, Y. J., 2000, A study on the Assessment of Product Sound Quality: Application to Vacuum Cleaners, Korea Advanced Institute of Science and Technology.
- (3) Jeong, J. E., Yang, I. H., Park, G. D. and Oh, J. E., 2010, Case Study for Sound Quality Index of Vacuum Cleaner' Operating Noise, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 12, pp. 1223~1228.
- (4) You, J., Chang, H. Y., Lee, C. H., Jeong, J. H. and Jeon, J. Y., 2006, Sound Quality Characteristics of Refrigerator Noise in Real Living Environments, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 8, pp. 797~805.
- (5) Gu, J. H., Lee, S. K., Kim, J. R. and Lee, E. Y., 2004, A Study on Development of Sound Quality Index of a Refrigerator Based on Human Sensibility Engineering, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 991~996.
- (6) Kong, K. S., Jeong, W. B., Kim, T. H., Shin, D. S. and Ahn, S. J., 2016, Pattern Analysis of Noise Radiated from Household Refrigerator, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 26, No. 2, pp. 121~129.
- (7) Kim, T. H., Kong, K. S., Jeong, W. B. and Ahn, S. J., 2017, Sound Quality Analysis of Refrigerators with the Same Sound Pressure Level, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering,

Vol. 27, No. 6, pp. 798-806.

(8) Lee, D. S., Hwang, W. G., Lee, Y. Y. and Im, H. E., 2002, Coherence Analysis of Noise and Vibration for Reciprocating Compressor, Proceedings of the KSNVE Symposium Conference, pp. 875-880.

(9) Chae, S. H., Hwang, W. G., Oh, I. K., Park, S. W. and Ryu, K. O., 2005, A Study on Noise Radiation of Compressor Shell, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 164-167.

(10) Kim, J. H., Cho, T. J., Jeong, J. W., Choi, M. J. and Lee S. G., 2007, A Study on Acoustic Absorption Efficiency of Vacuum Cleaner by Kind of Acoustic Absorbent, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 681-686.

(11) Zwicker, E. and Fastl, H., 2013, Psychoacoustics: Facts and Models, Springer Science & Business Media, Vol. 22.

(12) ISO 3744:1994, 2010, Acoustics — Determination of Sound Power Levels of Noise Sources Using Sound Pressure — Engineering Method in an Essentially Free Field over a Reflecting Plane.

(13) Namyang Novitech Co., Ltd., 2009, Namyang Novitech E-catalog Websuler Series & ZERONY Sheet BAL Series.



SeJin Ahn is received B.S., M.S. and Ph.D. degrees from Pusan National University in 1994, 1996, and 2003, respectively. Dr. Ahn is currently a professor at the department of energy & electricity in Uiduk University. His research interest is in human vibration.



WeuiBong jeong is received B.S. and M.S. degrees from Seoul National University in 1978 and from KAIST in 1980, respectively. He then received his Ph.D. degree from Tokyo Institute of Technology in 1990. Dr Jeong is currently a professor at the department of mechanical engineering at Pusan National University in Busan, Korea. His research interests are in the area of the measurement and signal processing finite/boundary element



JunYoung Jang received B.S. degrees from Pusan National University in 2018 and he is currently majoring in noise and vibration in Pusan National University. He especially is interested in improvement of sound quality.