

## 소비자 청감을 고려한 초 저소음 냉장고 개발

### Development of the Ultra-Silence Refrigerator with Considering Consumer's Hearing

주재만\*· 이재원\*· 이진우\*· 정정교\*· 김용태\*

Jaeman Joo, Jeawon Lee, Jinwoo Lee, Jeoungkyo Jeoung, Yongtae Kim

#### ABSTRACT

Until now, a home appliance mostly has revealed physical quantities created by the standpoint of engineers, by using the A-weighted sound pressure level and the sound power. It is, however, obviously impossible to characterize a complex sound with a single number. Many parameters must be considered. In addition to loudness, we must take into account frequency and amplitude variation over time, spectral balance, tonality, and many other attributes. Thus, in this research, the general tendency of consumer psychology was investigated for the refrigerator's sound. The noise from the refrigerator was evaluated by not only the simple sound pressure levels but also the consumer's sense of hearing. And also, in order to improve the quality of sound through the design change, the consumer's evaluation was analysed and related to the engineering quantities. With the several design changes, finally the most silence refrigerator in the world was developed with considering the consumer's hearing of sense.

#### 1. 서 론

오랫동안, 소음 분야에 종사하는 많은 연구자들은 단순히 A-weighted 음압만을 이용하여 소음 분석을 수행하여 왔다. 당시에는 단순히 소음량을 저감한다는 데에만 관심이 맞추어져 있었으므로 A-weighted 음압만을 이용하는 경우에도 연구 개발에 큰 무리가 없었다. 그러나 기술의 발달과 함께 갈수록 치열해지는 시장 경쟁으로 인하여 대부분 제품의 소음 수준이 전체적으로 내려가게 되었고, 이렇게 전체적인 음압 수준이 내려가면서 단순한 소리의 크기나 강도 만으로는 더 이상 제품의 소음, 특히 소비자들이 원하는 소음의 특성을 표현하거나 평가할 수가 없게 되었다.

물론 그렇다고 해서 소음의 전체적인 음압 수준이 중요하지 않게 된 것은 아니다. 오히려 제품 소음 수준이나 낮아지면서, 제품의 A-weighted 음압이나 Loudness가 그전보다 더욱 중요하게 인식되어야 할 것이다. 다만, 더욱 고급화되고 복잡해진 소비자의 욕구를 만족시키기 위해서는 단순히 Loudness의 저감 만으로는 한계가 있다는 것이다. 이에 따라 본 연구에서는 냉장고를 대상으로 소비자 Panel을 통한 소음만족도 평가를 수행하였으며, 그 결과를 개발자가 사용할 수 있는 물리적 수치로 나타내었다.

기존의 A-weighted 음압이나 Loudness 외에 소비자의 청감을 표현할 수 있는 인자를 도출하고, 이를 실제 제품의 구조 음향적 특성과 연계하여 분석하였다. 특히 정상 운전 상태에서의 소음에 대해, 주파수 영역에서의 특성을 보다 세분화하여 분석하였다. 이를 위해 냉장고 소음을 내부 음원 별로 분류하고, 각 음원별 소음특성을 분석함으로써 소비자 평가를 통해 제안된 물리량을 가장 효과적으로 개선하기 위한 최적의 제품 개선 방안을 수립하고 이를 신제품 개발에 적용하였다. 이렇게 함으로써 세계 최저 소음 냉장고를 개발을 실현할 수 있었다.

#### 2. 소비자 Panel 평가

평가는 실제 제품을 얇은 천으로 가려 제품 정보를 노출 시키지 않는 상태에서 Blind test로 진행하였으며, 냉장고의 기동음과 정상 운전음에 대해 5점 척도의 만족도 평가와 어의차이법에 의한 음질 평가를 수행하였다. 어의 차이법에 사용된 형용사는 기존의 연구 결과를 이용하여 선정하였다<sup>1,2)</sup>.

소비자 평가를 마친 후에는, 평가 결과에 대한 인자 분석을 수행하였다. 우선은 전통적인 소음 평가 방법을 이용하여, 냉장고의 음압 및 음향파위를 측정하였으며, Head Acoustic사의 artificial head를 이용하여 음질 인자(Zwicker parameter)<sup>3)</sup> 분석을 수행하였다.

모든 인자들을 대상으로 만족도 평가 결과와의 상관 관계를 분석한 결과, 냉장고의 Loudness가

\* 삼성전자 생활가전연구소 요소기술그룹  
E-mail : jman.joo@samsung.com  
Tel : (031) 218-5217, Fax : (031) 218-5196

어느 정도 낮아진 후에는 sharpness 가 소비자 청감에 가장 큰 영향을 미치는 인자로 나타났다. 또한 여의차이법에 의한 평가에서도 날카로움의 느낌이 평가 결과와 가장 밀접한 것으로 나타났다.

이에 따라, 주 인자로 나타난 Sharpness 에 대하여 좀 더 세밀한 분석을 진행하기 위해, 각 모델의 음원에 대하여 인위적인 수정을 가하여 동일한 Loudness 를 가지면서 Sharpness 는 다르도록 수정 작업을 진행하였다. 이렇게 수정된 음원들을 이용하여 30 명의 Jury 를 대상으로 주관 평가를 수행하였으며, 그 결과 만족도 3 점 수준을 얻기 위해서는 Sharpness 가 0.7acum 이하가 되도록 관리하여야 한다는 결론을 얻을 수 있었으며, 그 결과를 그림 1 에 보였다.

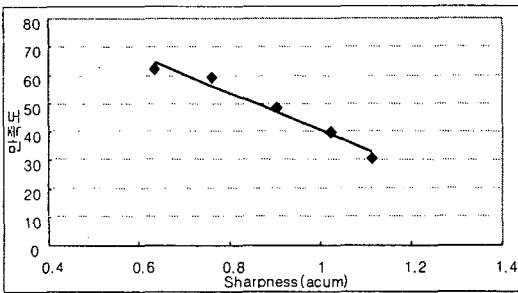


그림 1. Sharpness 에 대한 Jury 평가 분석

### 3. 냉장고 소음 개선

본 연구에서는 냉장고 소음에 대하여 각 음원별 기여도를 분석하고, 우선 가장 중요한 전체 음압 수준(또는 Loudness)을 낮추기 위한 개선 설계를 진행하였으며, 2 장에서 두 번째 주 인자로도 출된 Sharpness 를 개선하기 위해 특정 주파수에 대한 소음 저감 설계를 진행하였다.

냉장고 정상 운전 상태에서의 주요 소음원은 압축기와 Fan 으로 구분될 수 있다. 간혹 일부 저가 모델 등에서 내부 냉매 소음이나 열수축 팽창음이 간헐적으로 발생하는 경우가 있을 수 있으나, 본 연구에서는 고려되지 않았다.

#### 3.1 압축기 소음 개선

냉장고의 진동 전달은 압축기의 그로멧에 대한 특성 분석과 압축기와 그로멧으로 구성되는 강제 시스템의 모드 분석을 기초로 하고 냉장고 기계실 바닥면의 특성을 분석하여 냉장고 SET 로의 진동 전달을 최소화함으로써 개선시킬 수 있다.

그림 2 는 압축기 그로멧의 재질 변경을 통한 압축기와 그로멧으로 구성되는 강제시스템의 FRF 특성을 나타낸 것이다. 이처럼 6 개의 DOF 에 대한 강제 시스템의 Mode 분석을 통하여 압축기에

의한 냉장고 바닥면으로의 진동 전달력을 감소시킬 수 있다.

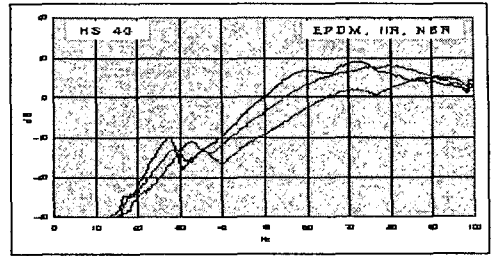


그림 2. 그로멧 재질 변경에 따른 FRF 특성

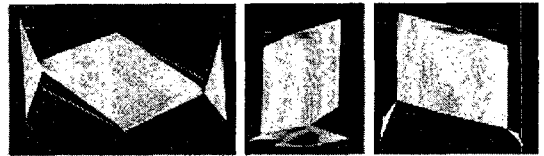


그림 3. 압축기 강제 시스템의 회전 모드 형상

그림 3 은 압축기 강제 시스템의 6 가지 모드 중 회전 모드의 형상을 간단히 도시화 한 것이다. 이 같은 압축기 회전 모드에 의한 진동이 냉장고 저주파 진동을 발생시킴으로써 소음을 야기하게 된다. 그러나 이 진동은 냉장고 운전 영역에서 그로멧의 최적화를 통하여 감소시킬 수 있다. 또한 여기서 중요한 것은 냉장고 기계실 바닥면의 강성은 압축기 강제 시스템의 고유진동수에 영향을 미친다는 것이다. 이는 1 자유도계 모델링으로 간단히 설명 가능하다.

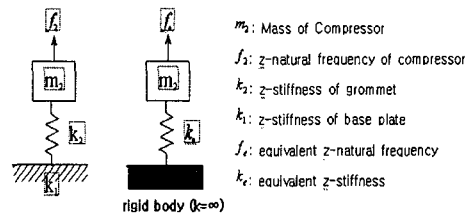


그림 4. 냉장고 바닥면의 1 자유도계 모델링

그림 4 는 냉장고 바닥면에 대한 강성이 압축기 강제 시스템에 영향을 미칠 수 있을 만큼 작다는 가정 하에 간단한 1 자유도계 모델을 설명한 것이다. 이 모델을 통하여 실제 Rigid Body 에서 계산된 압축기의 강제 모드는 냉장고 SET 에서 수정되어 분석되어야 한다. 기존에 주로 발생되었던 압축기 단품의 진동과 냉장고 SET 의 진동의 차이는 이 방법으로서 해결하였다.

### 3.2 Fan 소음 저감

냉장고 소음의 또 하나의 주요 원인인 팬 소음의 경우, 유로 구조 및 부하에 따라 회전 수 및 소음이 변하게 된다. 따라서 기존 사용하는 팬을 다른 냉장고에 적용하였을 경우, 소음 특성이 달라질 뿐만 아니라 팬의 작동 점이 설계점을 벗어난 영역에서 작동되는 경우가 발생하여 전체 시스템 성능저하 등 문제를 야기할 수 있다. 따라서 냉장고용 팬 소음을 예측하기 위해서는 작동 압력과 유량 및 소음을 동시에 측정하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 유량, 작동압력, 소음 그리고 효율을 동시에 측정할 수 있는 무향팬테스터를 제작하여 신규 팬 개발 시에 활용할 수 있도록 하였다.

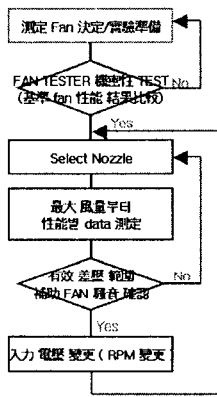


그림 5. 팬 테스트 프로시저

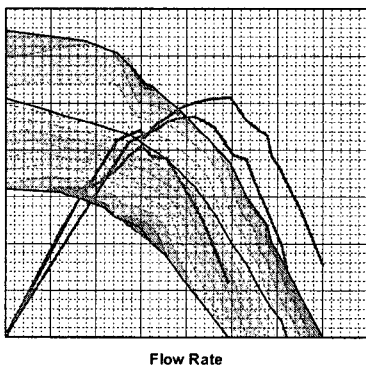


그림 6. 냉장고 내부 유동팬의 소음/성능

20 여종의 냉장고용 팬에 대하여 그림 5에서 나타난 프로시저에 따라 소음, 성능 시험결과를 개별적으로 구하였다. 그림 6은 팬소음/성능 그래프로 유량 및 압력에 따른 소음을 컨투어로 표현한 그래프이다. 각 팬에 대한 실험결과를 데이터 베이스화 하여 신 제품 설계 시, 팬 및 제어사양 선

정에 적용할 수 있는 데이터 베이스를 구축하였다. 구축된 데이터 베이스를 바탕으로 유량과 성능을 고려하여 소음을 최소화한 냉장고용 팬 작동 유량 및 압력을 선정할 수 있었다.

### 3.3 Spectral Balance 를 위한 고주파 소음 저감

냉장고 소음에 있어서 Sharpness 에 대한 기여도가 가장 높은 주파수 대역의 소음원은 바로 압축기이다. 특히 압축기 셀에 의한 방사 소음은 고주파 대역의 소음에 크게 기여 한다. 따라서 압축기 셀을 통한 방사 소음 저감을 위한 연구를 진행하였다. 실험 모달 해석을 통해서 압축기를 둘러싸는 셀의 고유주파수와 고유모드를 알 수 있지만, 실제 운전 중인 압축기의 셀 진동은 셀의 표면에 작용하는 외력과 셀의 고유 모드에 의해 결정된다. 따라서, 각 1/3 옥타브 밴드 별로, 운전 중인 압축기의 거동, 즉 ODS(Operating Deflection Shape)를 측정하여, 주요 주파수 대역의 압축기 셀의 거동을 살펴보았다. 그림 7 에서 보이는 바와 같이, 72 개 지점의 상호 상관 스펙트럼함수 (Crosspower spectrum)를 측정하였다.

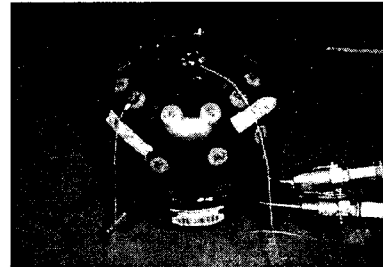


그림 7. 운전 중인 압축기 셀의 ODS 측정

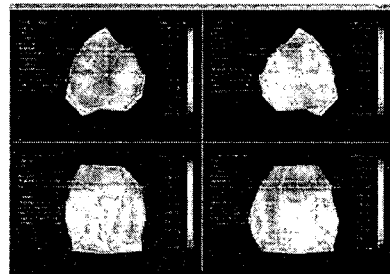


그림 8. 2500Hz 의 ODS

그림 8 은 중심 주파수 2500Hz(1/3 옥타브 밴드)의 ODS 를 나타낸 것이다. 여기에서 알 수 있듯이 몇 개의 특정 위치의 진폭이 상대적으로 크게 나타나고 있다. 즉, 이 부분의 진동을 저감 시키면, 2500Hz 대역의 진동에 의한 소음이 감소 될 수 있음을 예상할 수 있었으며, 실제로 해당 부분에

대한 설계 변경을 통해 압축기 고주파 소음이 상당부분 개선됨을 확인할 수 있었다.

#### 4. 개선 제품 평가

##### 4.1 소음 평가

제품 소음 평가는 우선 기존의 평가 규격에 따라, 냉장고 전, 후, 좌, 우 각 1m 위치에서의 음압 레벨과 EN28960 에 의거하여 냉장고 음향 파워 측정을 진행하였다. 이때, 개발 냉장고가 BLDC 모터를 적용한 능력 가변형 냉장고 이므로, 각 작동 RPM 별로 평가를 진행하였으며, 특히 작동 후 3 사이클이 지난 후의 안정 상태를 주 비교점으로 선정하였다.

또한 기존 제품과의 상대 비교를 위해 경쟁사 동급 모델에 대해서도 동일한 평가를 진행하였으며, 그 결과를 그림 9 에 보였다. 그림 9 에서 사각형으로 된 결과는 냉장고 정면 중앙에서 1m 위치에서 측정된 SPL 이며, 마름모로 표시된 것은 음향 파워이다. 여기에서 알 수 있듯이 기존 냉장고 중 가장 소음이 낮은 경우와 비교해서도 5dBa 이상 낮은 것을 확인할 수 있었다.

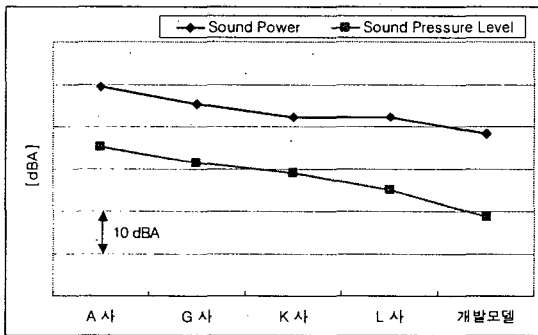


그림 9. 냉장고 소음 실험 결과

##### 4.2 소비자 청음 평가

본과제의 주요 목표에는 전통적인 소음 수준의 저감 외에도 소비자의 청감 개선이 포함되어 있다. 따라서 개발 모델에 대해 기존 제품 4 대와 함께 소비자 청감 평가를 진행함으로써 개선 효과를 검증하였다.

그림 10 에는 소비자 청음 평가결과를 나타내었다. 결국 소비자 평가를 통해, 본 연구를 통해 개발된 모델이 기존의 소음 레벨 뿐 아니라 소비자 청감 평가에서도 가장 높은 점수를 받았음을 확인하였다.

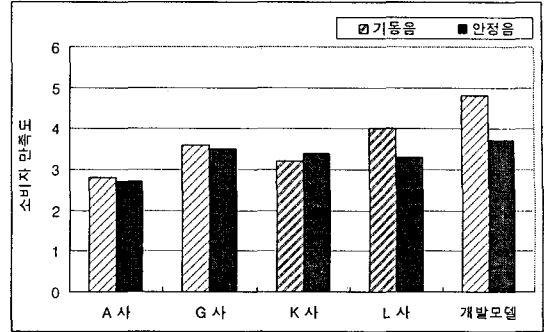


그림 10. 냉장고 소음 소비자 청음 평가

#### 5. 결론

본 연구에서는 기존의 연구/개발 관행이었던 특정 위치에서의 음압이나 음향 파워 외에도 소비자 청감을 고려한 소음 개선 설계를 수행하였다. 이를 위해 소비자 청음 평가 프로세스를 개발 활용하여 냉장고 소음에 대한 소비자 청감을 물리적으로 분석하였으며, 분석된 결과를 반영하여 냉장고 소음 개선 설계를 수행하였다.

우선 기본적인 소음 수준(Loudness)을 저감하기 위하여 냉장고 소음원 별 기여도 분석 및 목표치를 설정하고 이에 대한 개선 설계를 진행하였으며, 이와 함께 소비자 청음 평가를 통해 도출된 인자 개선을 함께 진행함으로써, 제품 검증 과정에서 기존의 동급 모델 대비 매우 우수한 소음 성능을 나타냄을 확인하였다. 또한 우수 선진 경쟁사 제품과의 비교를 통해 본 제품의 소음 성능이 감히 세계 최고 수준임을 확인하였다.

#### 참고문헌

1. J. Lee, J. Joo and S. Oh, Sound Quality Evaluation for the Refrigerator and the Air Conditioning System, *Proc. Internoise 2003*, Jeju, Korea, 2003
2. 이제원, 주재만, 오상경, 이나경, "가전 제품의 음질 향상을 위한 음설계 연구", 한국소음진동공학회 춘계 학술 대회, 목포, 2003
3. E. Zwicker, H. Fastl, *Psychoacoustics; Fact and Models*, 2<sup>nd</sup> edition, Springer, 1999
4. J. Lee, J. Kim, Sound transmission through cylindrical shell of hermetic compressors, *Purdue Conference Proceedings*, pp. 933-940, 2000