

냉장고 냉매 소음의 저감에 관한 연구

A Study on Reduction of Refrigerant Noise in Household Refrigerator

최성원*·황원걸**·설승윤**·임형은**·김상수***

Seong-Won Choi, Won-Gul Hwang, Seung-Yun, Hyung-Eun Im and Sang-Soo Kim

Key Words : Refrigerant Noise(냉매소음), Sound Quality Index(음질지수), Transfer Matrix(전달행렬)

ABSTRACT

In this study, refrigerant noise at connection of capillary tube and evaporator is investigated. Mechanism of refrigerant noise generation is examined in side-by-side type home refrigerator with two evaporators. It is found that the refrigerant noise is generated during refrigeration room fan-off (R-fan off) for that type refrigerator. The reason is that mass flow rate gets down during R-fan off and flow pattern is changed at outlet of capillary tube. We suggest designs for reduction of refrigerant noise with horizontal double expansion device, muffler, and accumulator. To evaluate those improved designs, sound quality index is used.

2. 냉매소음

1. 서론

냉장고의 냉매소음은 압축기 운전 중 발생하는 소음과 압축기가 꺼진 후의 소음으로 대별할 수 있다. 압축기가 꺼진 후 발생소음은 주로 증발기의 어큐뮬레이터에서 발생한다. 본 연구는 가정용 냉장고에서 압축기 운전 중에 발생하는 소음의 저감 방법을 다룬다. 압축기 운전 중에는 모세관과 증발기 연결부에서 고속으로 급팽창하는 냉매의 유동에 의한 냉매 소음이 불규칙적으로 발생한다.

본 연구에서는 냉장실과 냉동실에 각각의 증발기를 갖는 냉장고(side-by-side형 냉장고)에서의 모세관과 증발기 연결부에서 발생하는 냉매소음의 발생 메커니즘을 규명하고 이를 저감하는 방법을 모색하고자 한다.

냉매 소음의 발생 조건을 찾고, 냉매소음 발생 시 소음과 온도, 압력을 측정하여 냉동시스템을 분석하여 냉매소음의 발생 메커니즘을 규명한다. 이를 토대로 소음 저감 방안을 모색한다. 또한, 냉매소음 저감 방안으로 머플러 장착과 드라이어 하단의 어큐뮬레이터 장착을 제안하여 소음 저감 효과를 확인하고, 음질지수를 소음저감의 평가기준으로 사용하여 각 개선안의 소음저감 효과를 평가하였다.

2.1 2상 유동

냉장고의 모세관은 냉매의 빠르고 현저한 압력 강하를 발생시키는 팽창기구의 하나이다. 모세관 내의 유동은 2상 유동이다. 모세관 입구를 통해 들어온 액상의 냉매는 관 벽면과의 마찰에 의해 압력강하가 발생한다. 압력이 포화압력 이하가 되면 벽면에서부터 기포가 생성되어 작은 기포와 액상이 같이 흐르는 버블 유동(bubbly flow) 양상을 보인다. 이후 유체의 압력이 계속 떨어져서 기포의 양이 점점 증가하고, 이 기포들이 결합하여 슬러 유동(slug flow)으로의 천이가 일어난다. 모세관 출구부의 2상유동 양상이 이와 같은 슬러 유동일 때 냉매소음이 발생한다.

이후 기체량의 증가함에 따라 기체 속도는 점점 빨라지고, 슬러 유동의 액체 플러그(plug)이 파괴되면서 유동의 중심에 기포가 존재하고 벽면에는 액상이 존재하는 환상 유동(annular flow)의 형태를 띠게 된다. 이후 액적 유동(drop flow)의 형태를 거쳐 결국 단상기체가 된다. 한편, 수평관인 경우 2상유동의 양상은 Fig. 1과 같은 유동맵(flow map)을 통해서 파악할 수 있다. 여기서 냉매의 유동 소음이 발생하는 슬러 유동 혹은 플러 유동 영역은 액상과 기상의 속도가 상대적으로 작은 영역임을 알 수 있다.

* 전남대학교 대학원

E-mail : magma1534@yahoo.co.kr

Tel : (062) 530-0211, Fax : (062) 530-1689

** 전남대학교 기계시스템공학부

*** 삼성광주전자㈜

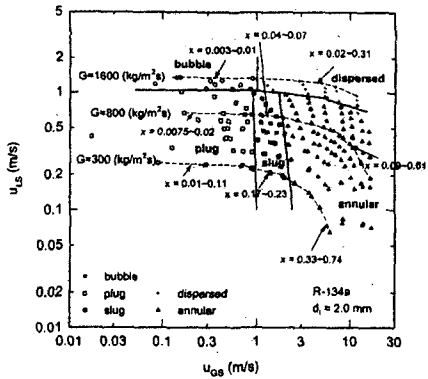


Fig. 1 Two phase R-134a patterns and transition lines($d=2\text{mm}$)⁽¹⁾

2.2 모세관 내의 냉매 유동 해석

냉매의 유동 소음은 모세관 출구의 2상 유동 양상에 지배를 받는다. 모세관 출구의 2상 유동 양상 변화는 모세관 출구의 액상과 기상의 속도의 변화를 통해서 유추할 수 있다. 연구대상 냉장고의 소음발생 시점을 찾기 위한 예비실험에서 압축기와 팬 작동(R/F-fan on) 후 냉장실 팬만 꺼졌을 때(R-fan off) 냉매소음이 발생하는 것을 알 수 있었다. 냉매소음 발생시 모세관 출구부의 유동상태를 예측하기 위해, 모세관 유동해석을 하였고 보다 정확한 해석을 위하여 석션라인(suction line)과의 열교환을 고려하였다.

모세관 출구부의 측정값과 해석값은, R/F-fan on 시 온도는 각각 -20.5°C , -18.6°C , 압력은 110kPa, 118kPa이고, R-fan off 시 온도는 각각 -25.1°C , -23.7°C , 압력은 102kPa, 112kPa이었다. 해석값이 실험값보다 대체적으로 높으나 이는 모세관과 석션라인의 열교환을 단위 길이 당 일정한 것으로 간주하였기 때문으로 사료되고, 실험값과 해석값이 거의 일치하여 해석을 통한 모세관내 유동의 예측이 가능하리라 사료된다.

해석 결과, R/F-fan on시 모세관 출구부의 질량 유량은 1.13g/s, 속도는 34.5m/s이었고, 냉매소음이 발생하는 R-fan off시 질량유량은 1.07g/s로 감소하였고, 속도는 8.9m/s로 급격히 감소하였다.

이 결과로부터 냉장실의 증발기 온도가 하강하여 냉장실 팬이 꺼지면 모세관 출구부의 온도가 하강하고, 냉매의 순환량이 감소하여 질량유량이 감소함을 알 수 있다. 또한 미량의 질량유량 감소는 모세관 출구의 냉매의 유동 속도를 급격히 감소시킴을 알 수 있다. 즉, 소음 측정 결과 냉장실 팬이 꺼진 구간에서 냉매소음이 발생하는 것은 냉매 순환량 감소가 원인을 알 수 있었다. 이것은

냉장실과 냉동실 팬이 모두 작동되는 경우에 버블 유동 등의 양상을 보이다가 냉장실 팬이 정지하면 슬러릭 혹은 플러그 유동으로 천이되어 유동소음이 발생하는 것으로 추정된다.⁽¹⁾

3. 측정 및 결과

3.1 측정 장치

냉매 소음의 측정과 냉동사이클 분석을 위하여 Fig. 2와 같이 냉장고의 소음, 온도 및 압력의 측정장치를 구성하였다.

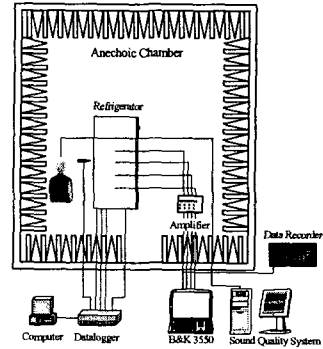


Fig. 2 Setup of experiment

온도 측정위치는 냉장고의 냉동사이클과 관련된 압축기 입·출구, 응축기, 모세관 출구 및 증발기 입구, 드라이어, 냉동실과 냉장실의 고내이다. 압력은 압축기의 고압측과 저압측 두 곳을 측정하였다. 소음측정에는 4개의 마이크로폰(B&K Type 4165)과 2개의 사운드 레벨미터 (Rion NL-05)를 사용하였고 signal analyzer(B&K Type 3550)을 이용하여 신호분석을 하였다. 냉동실과 냉장실 팬의 작동시기는 냉매소음 발생과 밀접한 관련 있는 것으로 보여 팬에 인가되는 전압을 측정하여 ON/OFF를 판단하였다.

또한, 음질지수를 소음개선의 지수로서 사용하기 위해 냉장고의 음질을 분석하였다. 냉장고 후면 증발기 조립부에서 발생하는 음압 변화를 토르소(torso)를 이용하여 측정하였다. 청감 특성을 나타내는 음질 요소로는 라우드니스(Loudness: N), 샤프니스(Sharpness : S), 러프니스(Roughness: R), 변동강도(Fluctuation strength: F) 등이 정의되어 쓰이고 있다. 이 음질요소를 토대로 본 연구에서 사용된 음질지수(SQI: Sound Quality Index) 식⁽²⁾은 다음과 같다.

$$SQI = -10 + 17 \times N_{mean} + 10 \times S_{mean} + 9 \times F_{mean} \quad (1)$$

3.2 냉매소음 발생 영역 실험 결과

Side-by-side 형 냉장고의 연속 운전시의 압력, 소음 및 냉장실과 냉동실 팬의 작동을 측정한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 편의상 한 사이클을 4개 구간으로 나누어 살펴보면 다음과 같다.

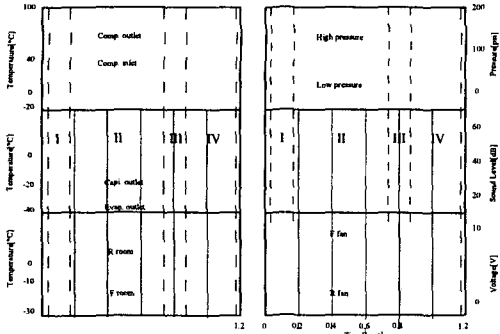
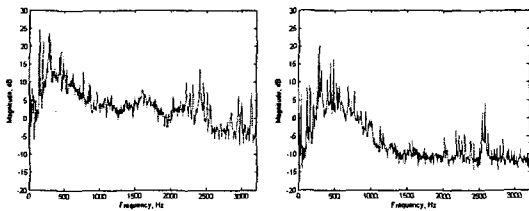


Fig 3 Results of experiment

I구간은 압축기와 냉장실 및 냉동실 팬이 작동을 시작하는 구간이며, II구간은 냉장실의 온도가 설정온도 이르러 냉장실 팬이 꺼지는 구간으로, 이 구간에서 냉매소음이 발생한다.

III구간에서는 냉동실이 설정온도에 이르러 냉동실 팬이 꺼지고 압축기도 같이 꺼지는 구간이다. 이 때 자연제상을 위하여 냉장실 팬이 다시 켜지는 구간이기도 하다. IV구간에서는 자연제상을 마치고 냉장실이 팬이 꺼짐에 따라 압축기와 냉장실 및 냉동실 팬이 모두 꺼지는 구간이다.



(a) Section I(R/F fan on) (b) Section II(R-fan off)
Fig. 4 Auto-spectrum of section I and II

냉장실 팬이 꺼진 후 발생된 냉매소음의 주파수 특성을 알아보기 위해 냉장고 전면 중앙에서 거리 1m, 높이 1m 위치에서 측정한 냉매소음의 주파수 스펙트럼을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 압축기, 기계실 팬, 냉장실과 냉동실 팬이 모두 작동하는 I구간의 소음양상을 보여주고 있다. 이는 전 주파수 구간에서 높은 소음수준을 보여주고 있다. Fig. 4(b)는 냉장실 팬이 꺼지고, 냉매소음이 발생하는 II구간의 소음양상을 보여주고 있다. 냉매소음이 2.6~3kHz 대역에서 관찰되었다.

4. 냉매 소음 개선

냉매소음을 개선하기 위해 기존 냉장고의 모세관 입구부와 출구부 형태를 변경하였다. L자형 이중확장관을 사용한 기존의 모세관을 수평화 한 이중확장관 후미에 머플러를 장착한 경우와, 이중확장관없이 모세관에 직접 머플러를 연결한 경우 그리고 모세관 입구쪽의 드라이어 밑에 어큐뮬레이터를 장착 경우에 대해 소음저감 효과를 살펴보았다.

4.1 머플러의 장착

길이 52mm 직경 22.7mm의 머플러를 Fig. 5와 같이 제작하였다. 그 내부에 메쉬의 크기가 조밀한 금속메쉬를 넣어 설계하였다. 이는 모세관 출구에서 유입되는 슬러지 유동의 냉매가 금속메쉬를 통과하면서 잘게 부서지는 효과와 소음저감 효과를 주기위한 것이다.

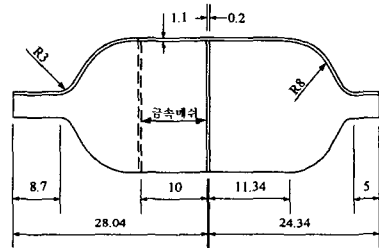


Fig. 5 Muffler

머플러에 금속메쉬를 장착했을 때의 머플러 성능을 살펴보기 위해서 머플러의 투과손실(TL: transmission loss)을 살펴보았다. Fig. 6과 같이 n 개의 다공판과 $n-1$ 개의 직관요소로 구성된 다중 다공판 흡음시스템의 총 전달행렬 $[T]$ 를 구하면 다음과 같다.

$$[T] = [P]_1 \cdot [S]_2 \cdot [P]_3 \cdots [S]_{n-1} \cdot [P]_n \quad (2)$$

이 전달행렬로부터 전달손실은 다음과 같이 계산된다.

$$TL = 20 \log_{10} \left[\frac{1}{2} T_{11} + \frac{T_{12}}{\rho_0 c} + T_{21} \times \rho_0 c + T_{22} \right] \quad (3)$$

직관이 없고, 다공판이 하나일 때 전달행렬 $[P]$ 는

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_0 c \zeta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 $\zeta = (R + jX)/\sigma$ 로 다공판의 특성임피던스이다. 그리고 음향임피던스 $R = \delta_r \times 7.337 \times 10^{-3}$, 리액턴스 $X = \delta_x \times 2.2245 \times 10^{-5} f(1 + 51t)(1 + 204d_h)$ 이다. σ 는 공극율, f 는 주파수(Hz), t 는 다공판의 두께(m), d_h 는 구멍지름(m)을 나타낸다. 본 연구에서 비선형 보정계수 δ_x 와 δ_r 은 각각 $\delta_x = 1$, $\delta_r = 1.3$ 으로 하였다.⁽³⁾

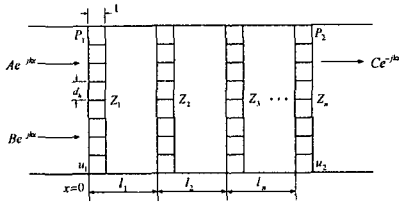


Fig. 6 Multiple perforated plates sound absorbing system

2상류에서 밀도와 유속은 보이드율에 따라 달라진다. 금속메쉬를 갖는 머플러는 보이드율이 0.8 일 때, 밀도는 $\rho = 275 \text{kg/m}^3$, 음속 $c = 145 \text{m/s}$ 로 하여 SYSNOISE로 해석하였다. 금속메쉬를 갖는 경우 금속메쉬의 앞부분과 뒷부분을 나누어 SYSNOISE로 해석한 후 식(2)을 이용하여 TL을 구한다.

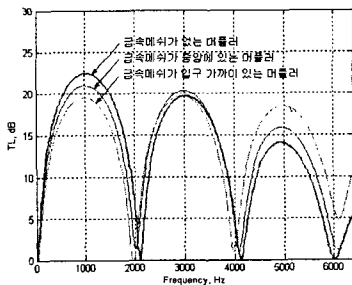


Fig. 7 TL of muffler

머플러에서 금속메쉬의 위치는 Fig. 5에 나타낸 것과 같고, 금속메쉬의 위치에 따른 TL 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 머플러는 보이드율이 커짐에 따라 포물선이 차지하는 주파수 영역이 커지고 포물선 수가 줄어들었다. 본 연구에서 소음저감안으로 사용된 금속메쉬가 중앙에 있는 머플러는 금속메쉬가 없는 경우보다 4kHz 이상의 고주파 대역에서 TL 값이 약 3dB 크게 나타났다. 또한, 금속메쉬의 위치에 따라 TL의 값이 달라지는 것을 알 수 있었는데, 이는 소음 발생 주파수에 따라 위치 선정을 고려해야 할 것으로 사료된다.

4.2 어큐플레이터의 장착

모세관 입구 조건을 개선하기 위하여, 드라이어 하단에 어큐플레이터를 장착하였다. 냉장실 팬이 꺼진 후 드라이어 내에 있는 액냉매가 모세관 끝단에서 2mm 정도의 액면변동을 보였다. 이로 인해 모세관 입구에 액상과 기상의 냉매가 들어가 모세관 출구의 2상 유동에 영향을 주어 냉매소음이 발생할 것으로 예상되었다. 그래서, 드라이어 밑에 어큐플레이터를 설치하여 액면변동을 완충시키도록 하였다. 액면의 변동 높이가 2mm 정도이므로, 어큐플레이터의 높이를 5mm로 선정하여 소음저감 효과를 검토하였다.

5. 실험 결과 및 고찰

개선안을 적용하기 위해 side-by-side형 냉장고 2대를 샘플로 선택하였다. 양산용 냉장고는 냉장실에 노출된 모세관의 길이가 짧아서 다양한 개선안을 적용하기에 부적합하므로, 전체적인 모세관 길이의 변경없이 냉장실에 모세관을 충분히 길게 나오도록 샘플을 제작하였다. 그리고 실험은 먼저 각각의 개선안을 적용하여 수행하고, 최종적으로 원형 시험을 수행하였다. 2개의 샘플을 편의상 A, B로 구분하여 명명한다.

시험 결과, Fig. 8의 샘플 A 냉장고는 1.2kHz와 2.3~3kHz에서 피크가 주로 발생하였고, 이를 개선한 Fig. 9의 이중확장관을 수평으로하고 머플러를 장착한 냉장고의 소음 주파수 특성을 살펴보면 1.3kHz의 피크는 없어졌고, 2.4kHz의 냉매소음이 줄어들었다.

샘플 B에는 두 가지 변경안을 적용하였다. 하나는 이중확장관 없이 모세관을 수평으로하여 직접 머플러에 연결한 것이고, 두 번째는 드라이어 밑에 어큐플레이터를 장착한 것이다. 소음 측정 결과, Fig. 10~12와 같이 모세관에 직접 머플러를 장착한 냉장고는 400Hz이하 저주파 대역의 피크가 크게 감소하였고, 드라이어 밑에 어큐플레이터를 장착한 냉장고에서는 3kHz 대역의 피크가 크게 감소하였다.

냉매소음 저감의 효과를 보인 개선안이 냉동성능의 저하를 가져온다면 그 개선안은 재고되어야 한다. 따라서 각 개선안에 대한 냉동성능의 검토를 위해 압축기가 기동하여 꺼질 때 까지의 한 사이클동안의 평균 온도를 측정하고 설정온도와 비교하였다. 냉장실과 냉동실의 설정 온도는 각각 2℃, -20℃ 이었다. 그 결과, 드라이어하단에 어큐플레이터를 장착한 개선안은 각각 1.17℃, -17.8℃로 냉동실의 성능이 약간 저하됐으나 모세관에 직

접 머플러를 장착한 안은 각각 1.02℃, -19.9℃이고 수평이중확장관-머플러의 개선안은 각각 0.93℃와 -20.1℃로 좋은 냉동 성능을 보였다.

각 개선안에 대해 식 (1)의 음질지수를 계산하였다. 표 1에 나타난 개선안 적용 냉장고의 음질지수의 결과를 살펴보면 각 개선된 냉장고는 원형 냉장고에 비해 음질면에서도 개선된 것을 알 수 있다. 샘플 A는 샘플 B보다 소음정도가 커서 음질면에서도 좋지 않았었다. 이를 고려해 보면 수평이중확장관-머플러, 어큐뮬레이터 그리고 머플러순으로 각각 18.4%, 7.4%, 1%의 음질이 개선되었음을 알 수 있다. 따라서 가장 좋은 개선안은 수평이중확장관-머플러로 사료된다.

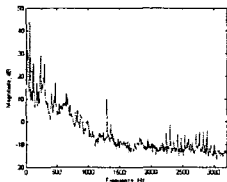


Fig. 8 Sample A

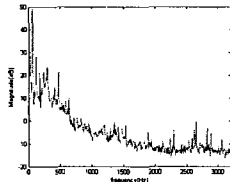


Fig. 9 Horizontal double expansion device-muffler

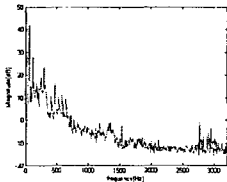


Fig. 10 Sample B

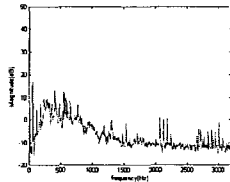


Fig. 11 Muffler

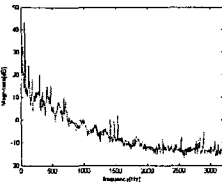


Fig. 12 Accumulator

Table 1 SQI of refrigerators

		N	S	F	SQI
		son	acum	vacil	
A	Original	1.23	0.69	0.11	18.74
	Horizontal double expansion device-muffler	0.98	0.76	0.13	15.29
B	Original	1.00	0.76	0.11	15.53
	muffler	0.98	0.77	0.12	15.37
	Accumulator	0.90	0.76	0.15	14.24

6. 결론

본 연구에서는 냉장실과 냉동실에 각각의 증발기를 갖는 냉장고(side-by-side형 냉장고)에서의 모세관과 증발기 연결부에서 발생하는 냉매소음의 발생 메커니즘 규명과 이에 대한 저감안을 제시하였다.

연구대상 냉장고는 압축기 기동후 냉장실 팬이 꺼진 구간에서 냉매소음이 발생하는 것을 알 수 있었다. 이는 side-by-side형 냉장고의 특징으로 냉장실의 온도가 설정온도까지 내려가면, 냉매 순환량 감소하여 모세관 출구부의 속도가 저하되어, 그 곳에서의 2상 유동 양상이 변화하여 소음이 발생하는 것으로 사료된다.

소음저감 방안으로서 이중확장관의 수평화, 금속메쉬가 들어 있는 머플러, 어큐뮬레이터를 적용한 개선안들을 제시하였다. 그리고 금속메쉬의 적용위치에 대한 머플러의 성능의 변화도 살펴보았다. 제시된 개선안은 모세관 다음에 수평이중확장관과 머플러를 장착한 것, 머플러만을 장착한 것 그리고 드라이어 하단에 어큐뮬레이터를 장착한 3가지이다.

이러한 개선안을 평가하기 위해 선정된 음질지수를 사용하여 음질의 개선을 검토하였다. 가장 좋은 소음저감 효과와 음질의 개선을 보인 것은 수평이중확장-머플러를 단 것이고, 다음으로 어큐뮬레이터를 단 것, 머플러만을 단 것 순이다. 각 개선에 따른 냉동성능의 영향도 검토하였으나 어큐뮬레이터를 장착한 안이 냉동성능이 약간 저하되었으나 이를 보완하여 적절히 활용하면 이 또한 효과적인 방안이 될 것으로 사료된다.

후기

본 연구는 2003년도 두뇌한국 21사업과 삼성전자주전자(주)에 의해 수행된 연구 결과이며 지원에 감사 드립니다.

참고 문헌

- (1) Chien-Yuh Yang, Cheng-Chou Shieh, 2001, Flow pattern of air-water and two-phase R-134a in small circular tubes, International Journal of Multiphase Flow, International Journal of Multiphase Flow, Vol.27.
- (2) 권경환, 2000, "냉장고 모세관 출구에서 발생하는 단속적 냉매 유동소음 저감에 관한 연구", 부산대학교 일반대학원.
- (3) 이동훈 등, 2002, "전달행렬법을 이용한 다중 공판 시스템의 흡음성능 예측", 한국소음진동공학회 논문집, 제 12권, 제 9호, pp.709~716.