과냉도에 따른 모세관 입구단에서의 냉매 상태 변화가 냉장고 냉매 소음에 미치는 영향의 실험적 분석

Experimental Analysis of the Effect of Phase Change at the Entrance of a Capillary Tube by Sub-cooling Control on Refrigerant-induced Noise

오 영 후*. 김 민 성*. 한 형 석**. 김 태 훈***. 정 의 봉†

Young-Hoo Oh, Min-Seong Kim, Hyung-Suk Han,
Tae-Hoon Kim and Weui-Bong Jeong

(Received July 31, 2012 ; Revised October 5, 2012 ; Accepted October 5, 2012)

Key Words : Sub-cooling(과냉), Capillary Tube(모세관), Two-phase Flow(2상 유동), Phase Change(상 변화), Refrigerant-induced Noise(냉매소음)

ABSTRACT

This study is focused on the experimental analysis of the noise induced by phase change of refrigerant at the entrance of capillary tube. The refrigerant is usually two-phase condition when it flowed into the capillary tube. At the entrance of capillary tube, the phase condition of refrigerant is formed by sub-cool control. If it has sufficient sub-cool temperature, all of the vapor refrigerants turned to liquid, which means there is only liquid. Otherwise, the gas is coexisted. Based on this theory, we experiment on each case by changing sub-cool temperature using refrigerant-supplying equipment. The noise level is measured for each case and compared.

1. 서 론

일상생활에서 사용하고 있는 많은 가전제품들은 각각의 기능으로 작동함에 있어서 여러 가지 이유로 많은 소음들을 발생시킨다. 그 중 에어컨, 냉장고 등은 작동 중 냉매의 유동을 수반하는 대표적인 가전제품이다. 기계적 소음이 주 소음원인 다른 기기들과는 달리 냉매의 유동을 수반하게 되는 이 제품들은 냉매의 유동에 의한 소음이 발생하게 된다. 이

러한 냉매소음은 위 가전제품들에서 가장 문제시 되는 소음 중 하나이다. 최근 가전제품의 저소음화로 인해 가전제품의 소음 저감에 대한 관심이 높아지고 있으며, 그에 따른 기계적 소음에 대한 많은 대책이 강구되어 저소음화가 이루어지고 있다. 압축기를 비롯한 각 단품에 대한 기계적 소음의 저감으로 인해 에어컨, 냉장고 등에서 냉매 소음이 차지하는 비중이 상대적으로 커지고 있으며, 이에 따라 냉매 소음에 대한 근본적인 대책이 시급한 실정이다.

냉매가 배관을 따라 흐르게 되면 냉매는 배관 벽

† Corresponding Author ; Member, School of Mechanical Engineering,
Pusan National University
E-mail : wbjeong@pusan.ac.kr
Tel : +82-51-510-2337, Fax : +82-51-517-3805

* Graduate School of Mechanical Engineering, Pusan National University

** Naval Sea System Center, Defense Agency for Technology and Quality

*** Engineering Design Department, LG Electronics

† Recommended by Editor Jin Oh Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

면과의 마찰, 압력변화, 유동에 수반되는 맥동 및 기타 요인들에 의해 소음을 발생시킨다. 특히 온도 및 압력 조건에 의해 기상과 액상이 공존하는 2상 상태가 되어 흐르게 될 경우, 불안속적인 유동이 발생하게 되고 그에 따라 소음이 발생하게 된다. 따라서 이러한 냉매의 2상 유동에 따른 냉매소음에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. Kim⁽¹⁾은 냉장고 증발기 입구배관의 형상과 직경에 따른 냉매의 내부 유동양식을 유동양식 선도를 통해 예측하고, 예측한 유동양식을 토대로 관내 유동양식을 환상류로 천이 시킴으로써 냉매소음의 저감을 다루었다. Hirakuni⁽²⁾는 에어컨의 모세관 입구에서의 슬러그류에 의한 냉매소음을 다루었고, 이를 저감하기 위해서 드라이어(dryer)를 모세관 입구에 설치하여 슬러그류를 환상류로 변환시켜 소음을 저감하는 방법을 제시하였다.

냉동사이클에서 냉매는 수많은 요인들에 의해 그 상태가 변하지만 모세관 입구단에서의 냉매의 상태는 사이클의 과냉도에 의해 결정될 수 있다. 과냉도가 크면 고온 고압의 증기상태인 냉매가 단상 상태의 과냉액이 되고 과냉도가 작으면 액상과 기상이 공존하는 2상 상태가 된다. 냉장고에서 발생하는 냉매 소음을 줄이기 위해 많은 연구가 진행되어왔지만, 실제 냉동 사이클의 운전 조건하에서 과냉도가 소음 발생에 미치는 영향에 대한 연구는 많이 이루어지고 있지 않다. 이 논문에서는 모세관 입구단에서 과냉도에 따라 냉매의 상태를 변화시키고 이에 따른 냉매소음의 변화에 대해 실험적으로 분석해보고자 한다.

2. 냉장고 단품 실험을 통한 모세관 입구 냉매상태 관찰 및 소음 측정

실제 냉장고 단품의 모세관 입구단에 사이트 글라스를 설치하여 작동 중 냉매 상태를 관찰하고, 냉장고 후면 30 cm 떨어진 위치에서 마이크로폰으로 소음을 측정하였다. 냉장고 기동 후, 20분 뒤에 측정된 사이클 조건 및 모세관 입구 냉매 상태 그리고 소음을 Figs. 1~3에 각각 나타내었다.

Fig. 1은 냉장고 기동 후 20분이 되었을 때 형성된 냉장고 사이클을 몰리에르 선도(Mollier diagram)에 나타낸 그래프이다. 사이클을 나타내기 위해, 측정된 증발기 온도 $T_{eva} = -14.8^{\circ}\text{C}$ 와 응축기 온도

Fig. 1 Refrigerating cycle on Mollier diagram after 20 mins from operation

Fig. 2 Phase state of refrigerant at the entrance of capillary tube

$T_{cond.mid.} = 47.9^{\circ}\text{C}$ 데이터를 사용하였고 모세관에서는 등엔탈피 과정 그리고 압축기에서는 등엔트로피 과정을 가정하였다. 응축기 출구단(=모세관 입구단)에서의 온도($T_{cond.end.} = 38^{\circ}\text{C}$) 및 2상 상태 냉매 관찰을 통하여 충분한 과냉이 확보되지 않음을 알 수 있다. Fig. 2는 냉장고의 모세관 입구단(응축기 출구단)에 설치된 사이트 글라스를 통하여 냉매의 상태를 관찰한 결과이다. Fig. 2(a)에서 동심원 모양의 사이트 글라스 내부에 액체가 가득 차있는 것을 볼 수 있으며 Fig. 2(b)에서는 기포가 밑에서 위로 올라오면서 동심원 주위로 기포가 분포함을 알 수 있다. 그러므로 냉매는 기상과 액상이 공존하는 2상 상태로 모세관 입구단에 유입됨을 확인할 수 있다. 일반적으로 2상 유동은 단상유동에 비해 불안정한 유동 형태를 가지기 때문에 2상 상태로의 냉매의 유입은 불규칙한 진동 및 소음이 발생되고 그 크기도 클 것으로 예상된다.

Fig. 3 1/3 octave spectra of refrigerant-induced noise of operating refrigerator

Fig. 3은 냉장고가 작동하는 중에 캐비닛 후면에서 발생하는 소음을 2초 간격으로 1분 동안 측정하는 것이다. 전 주파수 대역에서 소음 레벨이 변화를 보이는데, 특히 변동 315~400 Hz, 1600 Hz 주파수 대역 부근에서 소음의 변동 폭이 매우 크며 불안정한 값을 나타냄을 확인 할 수 있다.

이는 모세관 입구단에서 냉매가 2상 유동을 하게 되면서 발생하는 불규칙한 맥동 및 기타 유동조건에 의해 특정 주파수 대역의 소음이 발생되기 때문으로 판단된다.

이상적으로는 응축기에서 충분한 과냉이 확보가 되어서 과냉액(액상)상태로 모세관입구로 유입되어야 한다. 하지만 실제 사이클 데이터 및 사이트 글라스 관찰 결과를 보면, 응축기와 응축기 출구단의 온도 차이가 나지만 이는 압력강하에 의한 것으로 보이며 충분한 과냉이 이루어지지 않아서 2상 상태로 모세관 입구로 유입됨을 알 수 있다.

3. 과냉도에 따른 냉매소음 분석

3.1 냉동 사이클 운전을 위한 냉매공급장치

실제 냉장고의 내부를 보면 냉매 배관은 냉장고의 후면부에 위치하고 배관과 후면 평판 사이 공간에는 발포재로 채워져 있다. 배관에 냉매가 흐르게 되면 배관에서는 유동에 의한 소음 및 진동이 발생하게 된다. 이는 발포재를 통해 캐비닛 후면의 평판으로 전달되고 평판의 진동에 의해 소음이 외부로 방사된다. 따라서 냉장고에서 발생하는 냉매소음은 유동조건에 의해 발생하는 소음과 배관에 발생한 진동에 의해 가진된 후면 평판의 방사소음으로 볼 수 있다. 배관은 발포재로 둘러싸여 있기 때문에 냉장고의 외부에서 측정되는 소음은 배관에서 발생하는

소음보다 후면 평판의 진동에 의해 발생하는 소음이 더 기인할 것으로 생각된다. 이 실험에서는 실제 냉장고 구조를 고려하여 발포재를 통한 평판의 진동에 의해 발생하는 소음을 측정할 수 있도록 Fig. 4와 같이 시스템을 구성하였다.

Fig. 5(a)와 같이 무향실 외부에 설치된 냉매공급장치를 이용하여 냉동 사이클 조건을 조절하고 Fig. 5(b)의 장비를 이용하여 유동하는 냉매의 유량과 각 사이클 구성 장치에서의 온도 데이터를 측정하였다. 냉매공급장치에는 압축기, 응축기, 증발기 및 팽창밸브 등으로 구성되어 있으며 고압, 저압 및 과냉도를 조절할 수 있다. 특히 과냉도의 경우 피드백 제어를 통하여 챔버내의 온도를 원하는 설정 온도로 조절할 수 있다. 측정하고자 하는 모세관 영역을 무향실 안에 구성하여, 다른 냉동사이클 요소를 무향실 외부에 구성하여 외부의 영향을 최소화하였다. 캐비닛의 후면 평판의 진동에 의해 소음이 방사되는 실제 냉장고와 비슷한 조건에서의 소음을 측정하기 위하여 방사판을 제작하였다. 방사판은 90 mm × 90 mm 크기의 정사각형 모양의 알루미늄 소재의 금속판으로 제작하였고 Fig. 5(c)와 같이 앵글로 구조를 만들어 방사판을 부착, 고정하였다. 방사판은 배관과 발포재를 사용하여 부착되고, 배관에서 발생하는 진동이 전달되어 소음을 외부로 방사하게 된다.

3.2 냉장고 구조를 고려한 소음 실험 구성

무향실 내부에는 모세관 영역을 구성하였고, 발생하는 소음을 측정하기 위해서 측정장비를 설치하였다. Fig. 6과 같이 방사판의 중앙에 가속도계를 설치하고, 중앙에서 30 cm 떨어진 위치에 마이크로폰을 설치하여 방사판에서 발생하는 소음을 측정하였다. 소음계는 PCB사의 378B02모델의 마이크로폰을 사용하였다.

Han⁽³⁾은 냉장고에 쓰이는 단일 발포재에 대하여 진동 전달 특성을 분석함으로써 2상 상태로 냉매가 흐르는 배관에서 발생한 냉매유발소음이 구조기인소음으로 전달되는 지를 실험적으로 분석하였다. 실험을 통하여 단일 발포재의 강성과 탄성률이 배관의 진동을 캐비닛에 전달할 만큼 크다는 것을 알아냈다. 그래서 이 실험에서도 냉장고 구조를 고려하여 배관, 단일발포재 및 평판으로 구성된 실험 장치를 구성하였다.

Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 6 Test setup - a part of capillary tube in the anechoic room

(a) Refrigerant-supplying equipment

(b) Temperature and mass flow rate measuring device

(c) Radiation plate

Fig. 5 Refrigerant-supplying equipment and measuring instrument

Table 1 Test condition

	High pressure (gauge)	Low pressure (gauge)	Subcool temperature (°C)	Radiational plate
Case1	3.5	0.80~0.84	0	×
Case1	3.5	0.80~0.84	0	○

Fig. 7 A comparison of 1/3 octave spectra of using radiation plate and not using

냉장고 후면부에서는 캐비닛 평판이 냉매 배관에
서 발생한 소음 및 진동을 전달받아 소음을 외부로
방사한다. 실험을 위해 제작한 방사판은 캐비닛 후면
평판의 역할을 하기 때문에 모세관에서 발생하는 진
동 및 소음을 전달받아 충분한 크기의 소음을 방사할
수 있어야 한다. 이 같은 방사판의 성능을 검증하기
위하여 방사판의 유무에 따른 소음의 크기를 실험을
통해 비교해 보았다. 냉동사이클의 조건은 Table 1과
같이 동일하게 설정하고 Fig. 6과 같이 두 경우에 대
해 모세관 영역을 구성하여 측정된 소음레벨을 비교
한 결과 Fig. 7과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

동일한 사이클 조건에서 방사판이 있을 경우의 소음 레벨이 방사판이 없을 경우보다 전 주파수 영역에 대해 크게 나타났고, 소음의 변동 또한 큰 것으로 나타났다. Fig. 3의 실제 냉장고의 소음 데이터를 보면 주파수에 따른 소음의 변화가 확실히 나타나는데 이는 방사판이 있는 경우의 데이터와 같은 모습을 보인다. 따라서 제작된 방사판이 냉장고에서 캐비티의 후면 평판과 같은 역할을 한다고 볼 수 있다.

3.3 실험 조건

실제 냉장고에 사이트 글라스를 설치하여 작동 중에 관찰한 결과 Fig. 2와 같이 모세관 입구단에서 냉매가 2상 상태임을 확인하였다. 작동하는 냉장고에서 측정된 소음은 특정 주파수 범위에서 변화가 심하게 나타난다. 모세관 입구단에서의 냉매 상태와 이러한 변동음의 관계를 알아보기 위해 모세관 입구의 냉매 상태가 단상일 때와 2상일 때의 소음을 냉매공급장치를 이용하여 실험하였다.

실험에 사용된 냉매공급장치는 저압, 고압, 과냉도를 조절함으로써 사이클의 조건을 조절할 수 있다. 모세관 입구단에서의 냉매의 상은 사이클의 과냉도에 의해 변화시킬 수 있다. 일반적으로 작동하는 냉장고의 P-h선도를 보면 Fig. 8과 같이 응축기에서 나온 냉매가 2상으로 모세관으로 유입되는 것을 알 수 있다. 여기서 일정 수준의 과냉도를 확보하게 되면 P-h선도 상에서 냉매 상태가 습포화증기에서 과냉각 액체 영역으로 이동하면서 모세관 입구단에서의 냉매 상태를 단상으로 만들 수 있다. 따라서

Fig. 8 P-h diagram of single phase flow and two phase flow according to the sub-cool

저압, 고압 조건을 일정하게 두고 과냉도를 조절하여 모세관 입구단에서 냉매의 상태를 단상과 2상으로 조절할 수 있도록 Table 2와 같은 실험조건을 설정하였다. 또한 구성된 냉동사이클의 모세관 입구단에서 냉매가 2상으로 유입될 경우와 실제 냉장고 실험의 결과를 비교하여 2상 모세관 입구단에서 냉매가 2상이 될 경우의 경향성을 파악하고, 단상유동일 경우와 비교하여 냉매의 상태에 따른 소음 변화를 확인해 보도록 한다.

3.4 실험 결과

냉매공급장치 및 방사판을 이용하여 모세관 입구

Table 2 Test condition

Phase of refrigerant	High pressure (gauge)	Low pressure (gauge)	Subcool temperature (°C)
Single phase	3.5	0.62~0.66	7
Two phase	3.5	0.62~0.66	0

Fig. 9 1/3 octave spectra of single phase flow and two phase flow

Fig. 10 Standard deviation of SPL about single phase flow and two phase flow

단의 냉매 상태가 각각 단상과 2상일 때 소음을 측정하였다. Fig. 9는 각각의 경우에서 측정된 1/3 옥타브 스펙트럼을 1초 간격으로 1분간의 데이터를 평균하여 나타낸 것이다. 일부 주파수 대역을 제외한 전 주파수 영역에 대해서 모세관 입구단에서 냉매가 2상으로 유입될 때가 단상으로 유입될 때보다 소음 레벨이 더 크게 나타난다. 특히 2 kHz 이하의 주파수 대역에서 소음 레벨의 차이가 크게 나타났지만 2 kHz 이상의 주파수 대역에 대해서는 일부 영역을 제외하고 그 차이가 저주파수 영역에 비해 크지 않았다. 이를 통해 2상유동에서 나타나는 불규칙한 유동은 저주파수 영역에 영향이 큼을 알 수 있다.

이론적으로 살펴보면, 모세관은 하나의 급확대관으로 볼 수 있으며, 2상유동이 흐르는 급확대관을 Fig. 11과 같이 표현할 수 있다. 단면 1과 단면 2를 통과하는 운동량 변화와 양 단면에 작용하는 압력을 고려하여 운동량 방정식을 세우고 이를 이용하면 압력 변동식은 아래 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다⁽⁴⁾.

$$\Delta p = \frac{G_1^2 \sigma}{\rho_f} \left[\left\{ \frac{(1-x_1)^2}{1-\alpha_1} + \frac{\rho_f x_1^2}{\rho_g \alpha_1} \right\} - \sigma \left\{ \frac{(1-x_2)^2}{1-\alpha_2} + \frac{\rho_f x_2^2}{\rho_g \alpha_2} \right\} \right] \quad (1)$$

여기서 G 는 질량유속, x 는 건도, α 는 기공률, ρ 는 밀도 그리고 σ 는 면적비 ($\sigma = A_1/A_2$)를 의미한다. 압력강하 식에서, 모세관 입구에서 2상으로 들어올 경우 유입되는 건도 x_1 값에 변동이 발생하게 되고 이는 압력 변동을 유발하게 된다.

각각의 실험에 대해 각 주파수 영역에서 소음의 변동을 알아보기 위하여 표준편차를 사용하여 비교해 보았다. 표준편차는 측정된 음압값을 이용하여

다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2)$$

$$= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - \bar{x}^2}, \quad (\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n})$$

여기서 $\bar{x}$ 는 각 주파수별 SPL의 평균값이고 x_i 는 1초 간격으로 측정된 SPL값을 의미한다. 각 1초 간격으로 1분 동안 측정된 소음의 표준편차를 위 식으로 구하여 Fig. 10에 나타내었다. 단상일 경우 표준편차가 1이하의 비슷한 수준의 값을 유지하는 반면 2상 유동일 경우에는 표준 편차가 매우 큼을 확인할 수 있다. 2상 유동 시 발생하는 맥동 및 불규칙한 유동에 의해 소음이 큰 폭으로 변함을 알 수 있다. 실제 작동하는 냉장고의 측정 결과인 Fig. 3에서도 2 kHz 이상의 주파수 영역에 비해 2 kHz 이하의 주파수 영역에서의 변화가 컸던 것과 마찬가지로 실험에서도 2 kHz 이하의 주파수 영역에서 그 변동이 크게 나타났다. 따라서 과냉도를 충분히 확보하여 모세관 입구단에서의 냉매의 상태를 단상으로 유도할 경우 소음레벨이 저감될 것임을 예상할 수 있다.

4. 결 론

모세관 입구단에서 냉매의 상태에 따라 발생하는 냉매소음의 변화를 알아보는 실험을 하였다. 모세관 입구단에서 냉매의 상태를 다르게 하여 소음을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 냉매공급장치를 이용하여 모세관 입구에서의 냉매 상태가 2상일 때와 단상일 때 실험한 결과 2상 상태일 때 변동음이 큰 것을 알 수 있었다. 실제 냉장고에서 모세관 입구단의 냉매의 상태는 2상 상태이다. 따라서 냉장고에서 발생하는 변동음은 모세관 입구단에서의 냉매의 상태와 관련이 있음을 알 수 있다.

(2) 모세관 입구단에서 냉매가 2상으로 유입될 때보다 단상 상태로 유입될 때에 소음의 크기가 작고 변동이 작다. 따라서 실제 냉장고를 제작할 때 과냉

Fig. 11 Two phase flow for sudden enlargement

도를 충분히 확보하여 모세관 입구에서 냉매의 상태를 단상으로 만들면 냉매 소음을 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0021800).

참 고 문 헌

- (1) Kim, M. S., Jeong, W. B., Han, H. S. and Kim, T. H., 2009, Reduction of Refrigerant-induced Noise of the Refrigerator by Modification of the Evaporator Inlet Pipe, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibrations Engineering, Vol. 19, No. 10, pp. 1012~1020.
- (2) Hirakuni, S., 2004, Noise Reduction Technology Caused by Refrigerant Two-phase Flow for Room Air-conditioner, Japanese J. Multiphase Flow, Vol. 18, No. 1, pp. 23~30.
- (3) Han, H. S., Kim, M. S., Jeong, W. B., Seo, M. Y. and Lee, S. Y., 2010, Analysis of Vibration Transmitting Characteristics of the Insulation-foam for Reducing Refrigerant-induced Noise of a Refrigerator, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 1, pp. 45~50.
- (4) Lee, S. Y., Kim, B. J. and Kim, M. H., 1993, Two-phase Flow Heat Transfer, Daeyoung-Sa, pp. 235~244.

Younghoo Oh received B.S. degree from Pusan National University in 2011 and he is currently a graduate student at school of mechanical engineering in Pusan National University in Busan Korea.

Minseong Kim received a B.S. degree in Mechanical Engineering from Pusan National University in 2007. He is currently graduate student at Mechanical Engineering at Pusan National University in Busan, Korea.

Hyungsuk Han received a B.S. degree in Production and Mechanical Engineering from Pusan National University in 1996. He then went on to receive his M.S. and Ph.D. degrees from Pusan National University in 1998 and 2007, respectively. Dr. Han is currently a Senior Researcher at Defense Agency of Technology and Quality, Pusan, Korea.

Korea.

Taehoon Kim received his B.S. and M.S. degrees from Changwon University in 2003 and M.S. degree from Pusan National University in 2005, respectively. He is currently a Senior Researcher at LG electronics Co., Changwon,

Weuibong Jeong 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 analysis of noise and vibration, fluid-structure interactions and acoustic-structure interactions.