

Hofler 타입 열음향 냉장시스템의 공진특성과 냉장성능

Acoustic resonance and refrigerating capability of a Hofler type thermoacoustic refrigerating system

하 재 규*
(Zae Gyoo Hah*)

※본 논문은 1995년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

요 약

Hofler 타입의 열음향 냉장시스템에 있어서 음향학적 공진특성을 해석하고, 공진특성이 냉장성능에 미치는 영향을 시스템의 제작 및 냉장 실험을 통하여 확인하였다. 열음향 냉장시스템의 공진특성을 결정하는 주요 인자는 공명구 (cavity) 와 가는 관, 그리고 굵은 관으로 구성되는 공명기의 특성과, 구동 스피커의 특성, 그리고 스피커 후면부의 음향학적 특성이며, 다시 스피커의 전기적 특성과 결합되어 전기적 공진특성이 정해진다. 또한 공명기에서 발생하는 벽-효과 (wall effect)를 통한 감쇠로 인하여 공진특성이 둔해진다. 제작된 열음향 냉장시스템에 대한 해석 및 실험결과 전체 공진특성은 공명기에 의하여 결정되지만 후면부의 강성과 감쇠로 인하여 공진특성이 상당히 둔화되고, 냉장실험 결과 정확한 공진특성의 유지가 냉장성능에 큰 영향을 미침을 확인하였다.

ABSTRACT

Acoustic resonance characteristics were analyzed and their effect on the refrigerating capability were experimentally verified on a fabricated Hofler-type thermoacoustic refrigerating system. Factors governing the overall resonance are the resonator composed of a cavity and two pipes, the loudspeaker driving the resonator, and rear side impedance characteristics of speaker housing. All these are coupled with electric constants of the speaker to exhibit electric resonance. Also the 'wall-effect' within the resonator causes attenuation to reduce the sharpness of the resonance. Analysis and experiments showed that the resonator has the most significant effect on the overall characteristics, while the rear-side impedance of the speaker housing and the wall-effect of the resonator reduce the sharpness of resonance. Maintaining the accuracy of the resonance is, therefore, very important for efficient refrigeration.

I. 서 론

매질내를 진행하는 음파는 압력과 변위의 진동과 함께 온도의 진동도 수반한다. 이러한 물리량의 변화와 함께 음파와 경계면 (boundary)의 상호작용을 통하여 폭넓은 열음향 현상이 발생하는데, 일상생활에서의 발생 정도는 너무나 미미하여 관측하기 힘들다. 하지만 밀폐된 공간에 고압의 가스를 밀봉한 환경에서는 열 현상이 상당히 중요해져 열기관 (heat engine)이나 열 펌프 (heat pump)로 사용할 수 있게 된다. 보통의 냉장 시스템에서는 피스톤이나 터빈 등의 부품이 필요하지만 열음향 냉장시스템

에서는 스피커로 매질을 구동하므로 마찰부위가 없고 윤활이 필요 없게 되어, 냉각성능보다는 장치의 단순성, 신뢰성, 경제성이 필요한 분야에 이용되고 있으며, 냉각성능에 대한 한계도 계속되는 연구를 통하여 확장되고 있다[1].

열음향 냉장시스템의 동작을 음향학적으로 보면, 밀봉된 구조 즉 공명기내에 정상파(standing wave)를 형성할 때 velocity antinode쪽에서 pressure antinode쪽으로 열이 흐르는 현상을 이용하는 것으로, 매질과 벽 (wall)사이에서 발생하는 소위 벽효과 (wall-effect)를 통하여 강화된다 [2]. 따라서 열음향 냉장 시스템의 효율적 동작을 위한 두 가지 주요 변수는 정확한 정상파를 형성시켜 공간적인 열의 흐름을 일정하게 하는 것과, 벽효과와 강화를 위해서 매질-벽의 접촉을 크게 하는 스택을 설계하는 것이다.

*공주대학교 전자공학과
접수일자: 1996년 10월 11일

공명기내에 정상파를 생성하는 간단한 방법은 막힌 관을 이용하여 $\lambda/4$ 공진을 형성하거나 열린 관을 이용하여 $\lambda/2$ 공진시키는 것인데, 막힌 관의 경우 냉각되는 쪽(cold end)이 스피커와 인접하여 스피커에서 발생하는 열로 냉각효과가 감소된다. 한편 열린 관의 경우 고압가스를 밀봉할 수 없고 공명기의 길이가 길어지는 단점이 있으므로, 열린 쪽(open end)을 큰 공명구(cavity)로 대체하고 antiresonance를 사용하여 $\lambda/4$ 공진하도록 한 것이 Hofler 타입의 열유향 냉장시스템이다[3, 4].

Hofler 타입의 공명기는 구동스피커가 antiresonance에서 구동하므로 큰 압력과 적은 변위 즉 아주 딱딱한 상태에서 구동되어야 한다. 따라서 공명기의 구조와 스피커의 해석을 통하여 공진특성을 정확히 해석하여 공진점을 유지하는 것이 냉장성능에 큰 영향을 미친다.

본 논문에서는 Hofler 열유향 냉장시스템을 설계, 제작하고 그 공진특성을 결정하는 여러 변수를 해석하며 공진특성이 냉장성능에 미치는 영향을 실험을 통하여 검증하고자 한다.

II. 열유향시스템의 제작

본 연구에서 제작된 열유향시스템은 기본적인 Hofler 공명기로서 스피커 하우징, 챔버, 고온 열교환기, 스택, 저온 열교환기, 가는 관(small diameter tube), 그리고 공명구(cavity)로 구성되어있다. Hofler 공명기의 제작에 관한 기본 사항은 이미 여러 연구에서 보고되어있으므로[4, 5], 제작시에 주의해야 할 몇 가지 사항만 기술하기로 한다.

우선 안전성을 고려해야 한다. 특히 10기압 이상의 고압이 걸리므로 재질선택에 있어서 깨지거나 파열할 가능성이 있는 재료는 피해야 하며 이음쇠 부분에도 안정성을 고려하여 실험시의 사고에 대비해야 한다. 둘째, 고압가스의 밀봉문제이다. 여러 개의 부품을 조립할 때 조립부위의 고정방법과, 오링, 밸브 등의 적절한 선정이 필요하며, 실험시의 편이를 위하여 고정/탈착이 용이하도록 제작하는 것이 좋다. 셋째, 충전시의 주의점으로서 일단 조립 후 공명기내의 공기를 진공으로 뽑은 후 충전하도록 하고, 이때 너무 급작스런 가압은 공명기의 팽창, 온도상승과 함께 바열이나 구동 스피커의 다이어프램의 파열을 유발하므로 적은 흐름도 제어할 수 있는 레귤레이터를 사용하는 것이 좋다. 넷째, 공명구의 제작시 제작의 용이함과 안전성을 고려하여 결정해야 한다. 실험을 통하여 동작이 확인된 후라고 하면 공명구의 형상을 증착이나 화학적인 성형으로 할 수도 있으나, 시중에서 흔히 구할 수 있는 부품으로 대응하는 것도 한가지 방법이다. 본 연구에서는 다세대 주탕용 불탱크의 뜨개를 구입하여 구멍을 뚫고 다시 가는 관과 용접하여 사용하였다. 다섯째, 열 교환 작업을 하게 되는 열교환기와 스택의 제작에 관한 것으로서, 먼저 스택의 경우 열교환기용 플레이트와 띄우개(spacer)를 교대로 적층하여 성형한 후 띄우개를

녹여내는 방법도 있으나[4], 선반작업을 통하여 열교환기 형상을 가공하고 와이어 커팅을 통하여 플레이트를 삽입하는 홈을 만드는 것이 손쉽다. 또한 스택의 경우는 열전도성이 낮은 필름을 나선형으로 감아 사용하는데 필름사이를 적당하게 띄워 유지해야 하므로 상당한 수작업이 필요하며 띄우개 구실을 하는 선과 필름을 접착하는 적당한 접착제의 선정이 상당히 중요하다. 즉, 띄우개와 필름을 녹이지 않아야 하며, 접착도 빠른 접착제를 선정해야 한다. 마지막으로 스택과 열교환기의 접촉에 관한 문제로 양자는 매질의 변위보다 작은 거리만큼 접촉을 유지해야 하므로, 스택면과 열교환기 면이 편평하도록 주의해야 하고 스택을 제작할 때와 열교환기에 플레이트를 꽂을 때 주의해야 한다. 본 연구에서 제작된 열유향시스템의 설계도는 아래의 그림 1과 같다.

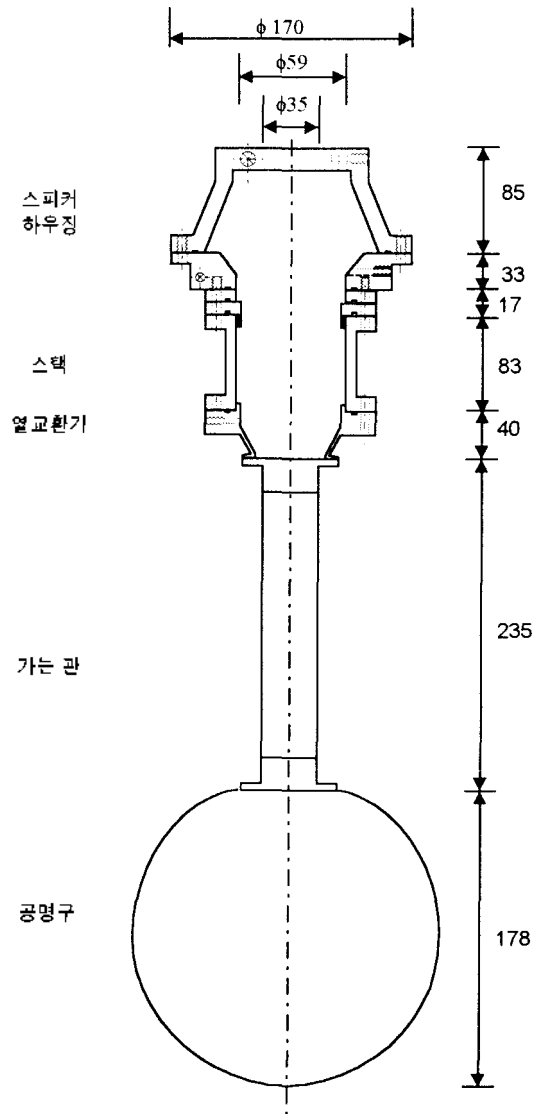


그림 1. 제작된 열유향 시스템의 전체 설계도

Ⅲ. Hoffer 공명기의 공진특성

제작된 Hoffer 공명기의 기계적 공진에 큰 영향을 미치는 변수는 구동스피커의 전면부 방사 임피던스, 후면부 방사 임피던스, 그리고 스피커의 기계적 특성이다. 우선 전면부 방사 임피던스와 후면부 임피던스를 해석하기 위하여 아래의 그림 2와 같이 공명기의 구조를 단순화하여 생각하기로 한다. 전면부 임피던스는 공명구와 가는 관, 굵은 관으로 구성되는 공명기의 구조로서 결정되는 바, 아래의 일련의 식으로 계산된다. 즉 공명구부터 보면, flanged end pipe의 방사 임피던스와 강성의 연결로서

$$Z_{MS} = \frac{\rho_0 c k^2 S_2^2}{2\pi} + j \frac{8\omega S_2 \rho_0 a_2}{3\pi} - j \frac{\gamma \rho_0 S_2^2}{\omega V_s} \quad (1)$$

이 된다. 여기서 ρ_0 는 밀도, p_0 는 정압, c 는 음속, ω 는 각주파수, k 는 전파상수, a_2 는 가는 관의 반경을 γ 는 등압등적 비열의 비를 의미하고 나머지 변수는 그림 2에 도시된 바와 같다. 식 (1)의 임피던스가 가는 관과 굵은 관을 통하여 변환되므로 최종적인 전면부 임피던스는 아래의 식 (2)와 같다.

$$Z_{MF} = \left(\frac{S_f}{S_1}\right)^2 S_1 \rho_0 c \frac{Z_2 + j \rho_0 c S_1 \tan(kx_1)}{\rho_0 c S_1 + j Z_2 \tan(kx_1)} \quad (2)$$

$$\text{단, } Z_2 = \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2 S_2 \rho_0 c \frac{Z_{MS} + j \rho_0 c S_2 \tan(kx_2)}{\rho_0 c S_2 + j Z_{MS} \tan(kx_2)} \quad (3)$$

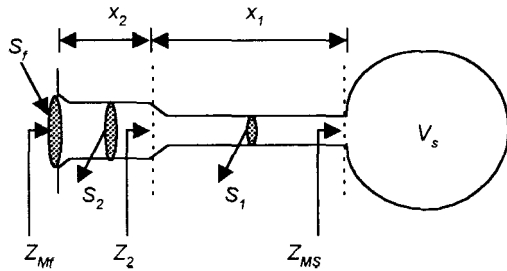


그림 2. 공진특성의 계산을 위해 간략화된 공명기의 구조

이 때, 식 (2)와 (3)의 전파상수 k 는, 공명기의 벽과 유체 사이의 접촉을 통한 점성손실 (viscous loss)과 열 손실 (thermal loss)이 발생하는 벽-효과 (wall effect)로 인하여 아래의 식 (4)와 같이 된다[2]. 즉,

$$k = \frac{\omega}{c} - j\alpha \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{1}{ac} \sqrt{\frac{\omega \nu_0}{2}} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{\sqrt{\text{Pr}}}\right) \quad (5)$$

여기서 α 는 감쇠상수이며, a 는 관의 반경, ν_0 는 kinematic viscosity, γ 는 등압등적 비열비열, Pr 은 Prandtl number를 각각 의미한다.

후면부 방사 임피던스는 스피커 하우징으로 결정되며

$$Z_{MB} = j \left(\frac{\omega B \rho_0}{\pi a_f} - \frac{\gamma \rho_0}{\omega V_b} \right) S_f^2 \quad (6)$$

로 되는데, 이때 a_f 는 스피커의 반경이고, V_b 는 스피커 하우징의 부피이며 B 는 end correction factor이다[6].

이상에서 구한 식 (2)와 (6)의 임피던스를 구동 스피커와 결합한 등가회로는 아래의 그림 3과 같다. 본 연구에서 사용한 스피커는 가정용 증음부 오디오 스피커로서 그 특성변수는 $L_e = 2.4 \times 10^{-4} H$, $R_e = 5.1 \Omega$, $M_M = 5.76g$, $C_M = 2.22 \times 10^{-5} m/N$, $R_M = 2.78 \Omega$, $BI = 5$ 이다. 그림 3의 등가회로에 대한 계산결과와 실제 실험 결과를 아래의 그림 4와 그림 5에 각각 보였다. 그림 4의 (a)는 공명기의 기계적 공진특성을 구성하는 각 성분을 보인 것으로서 전면부의 리액턴스와 후면부의 리액턴스를 보였다, 이때 본 실험에서 사용한 스피커의 리액턴스는 크기가 충분히 작아 전체 특성에 미치는 영향이 미비하므로 생략하였다. 그림 4의 (b)는 전체 기계적 공진특성을 그리고 (c)는 전기적 특성을 나타낸다. 그림 4에서 보듯이 전면부 임피던스는 감쇠로 인하여 둔화된 공진특성을 보이며, 후면부의 강성이 매우 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 따라서 스피커 입력 단자에서 볼 때에도 공진이 뚜렷이 드러나지 않음을 알 수 있다. 이는 그림 5의 실험결과와 일치한다. 따라서 효율적인 생각을 위하여 정확한 기계적 공진점을 유지해야 함을 고려할 때, 스피커의 선정과 스피커 하우징의 구조에 주의해야 함을 알 수 있다. 즉, 스피커를 선정에 있어서는 질량이 크고 강성도 큰 (stiff) 경우 리액턴스가 커져 전면부 방사 임피던스의 공진에 영향을 미치므로 가볍고 유연한 (flexible) 스피커를 선정해야 한다. 또한 공명기 전체 길이 (dimension)를 적게 하는데 집착하여 스피커 하우징의 부피를 너무 적게 하는 구조는 공진을 왜곡할 수 있으므로 적당한 부피를 주거나 흡음재를 채우는 등의 방법을 사용하는 것이 좋다. 이러한 이유로 스피커를 거꾸로 사용하여 후면부의 부피를 키우는 방법을 사용할 수도 있는데[4], 이 경우는 스피커에서 발생하는 열을 잘 냉각시키도록 냉각수 통로와 스피커의 몸체가 가능한 가깝고 밀착되도록 제작하는 것이 좋다.

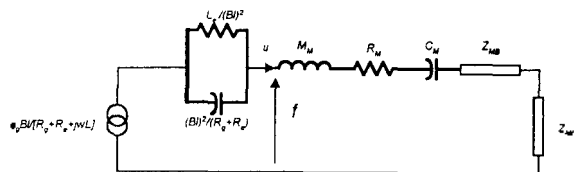


그림 3. 제작된 열음향 시스템의 등가회로

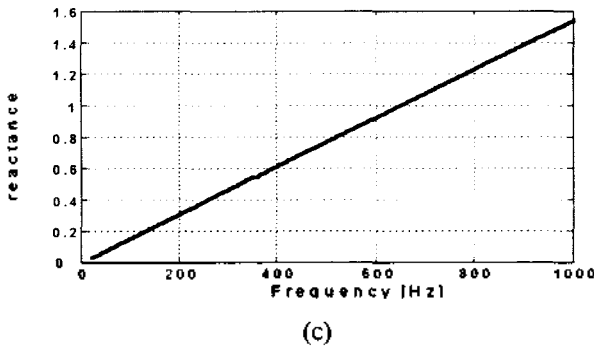
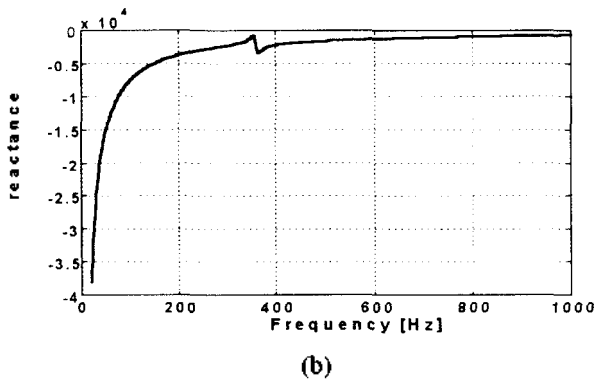
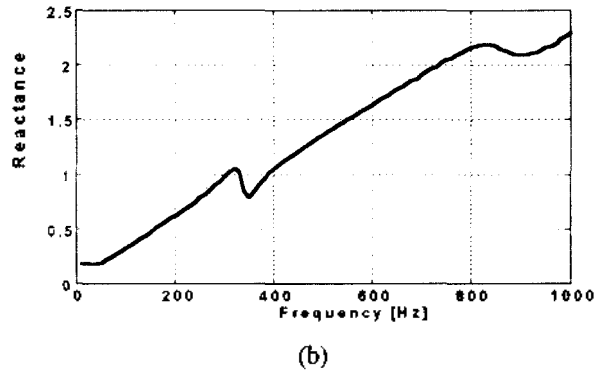
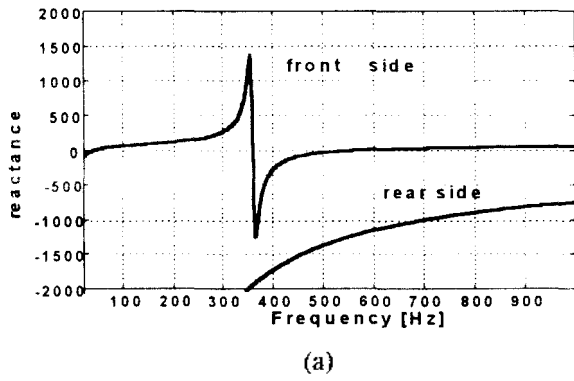


그림 4. 제작된 열음향 시스템의 공진특성의 계산결과
 (a) 전면부 리액턴스와 후면부 리액턴스
 (b) 전체 기계적 공진특성
 (c) 전기적 공진특성

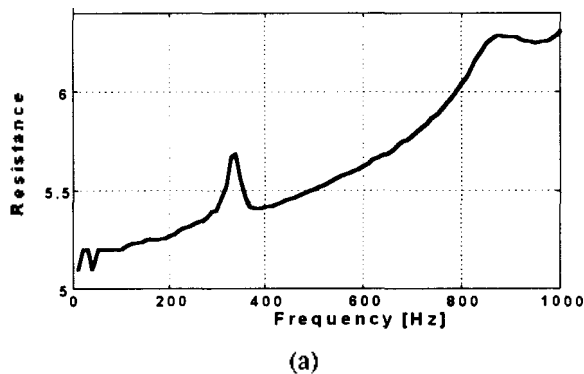


그림 5. 제작된 열음향시스템의 전기적 공진특성의 측정결과
 (a) 실수부 (b) 허수부

IV. 공진특성과 냉장성능

그림 1의 제작된 공명기에 냉각수를 공급하고, 온도계 측정 열전쌍을 고온/저온 열교환기의 플레이트에 밀착한 후 공명기 내부에 음압측정용 센서를 장착하여 전체 냉장시스템을 구성하였다. 그림 5의 제작된 시스템의 공진특성에 대한 실험결과에 근거하여 공진주파수 340Hz에서 앰프의 전압을 고정시킨 후 주파수를 변화시키면서 공진특성이 냉장성능에 미치는 영향을 실험하였다. 실험 결과 측정된 공명기내의 스피커 바로 앞부분의 음압은 아래의 그림 6과 같고, 냉장실험의 개시후 2시간 경과후의 냉장결과와 그림 7과 같다. 그림 6과 그림 7에서 보듯이 공진점에서 벗어날수록 음압의 최대치도 급격히 감소하고 냉장성능도 현저히 약화된다. 따라서 공진점을 정확히 유지하는 것이 냉장실험에서 제일 중요하다는 것은 당연하다. 본 실험에서 얻어진 최대온도차는 30℃의 실내환경에서 16℃로서 스택의 설계치와 차이가 있는데, 그 주요인은 외부로부터의 계속되는 열적 부하 때문으로서 열적 평형상태가 이루어지기 때문이다. 따라서 정확한 열 실험을 위해서는 외부의 열 부하를 완벽히 차단하도록 저온부를 진공용기로 단열시키는 것이 중요하다.

한편 실험과정에서 주위의 온도가 변화하거나 공명기의 각 부분의 온도가 변하면 밀봉가스의 음속이 변화하고 파장도 변화하므로 정확한 공진을 유지하기가 힘들다고 할 수 있다. 따라서 앞의 공진특성의 해석결과와 종합

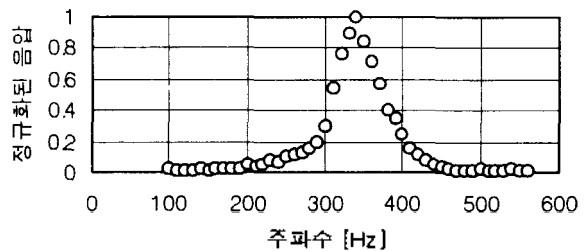


그림 6. 공명기 내부에서 측정된 음압

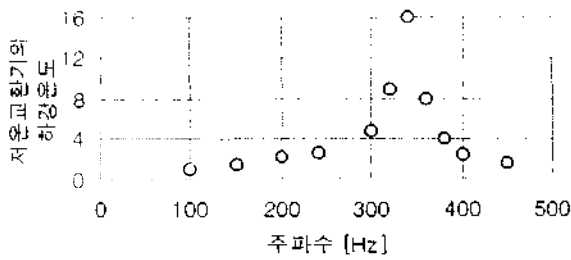


그림 7. 공명기의 구동 주파수에 따른 냉각성능

하여 보면, 우선 공명기의 설계시에 명확한 공진특성을 유지하도록 하는 것이 중요하며, 실제 시스템 구성에 있어서는 구동 스피커면에 가속도계를 장착하여 속도신호를 얻고 음압센서를 통하여 음압신호를 얻어 양자간에 동 위상이 되도록 케환시키는 회로를 구성하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 Hoffer 타입의 열음향 냉장시스템에 대하여 공명기의 공진특성을 결정하는 주요 변수를 해석하고, 실제 제작된 공명기를 이용하여 냉장실험을 수행함으로써 공진특성이 냉장성능에 미치는 영향을 확인하였다. 본 연구를 통하여 기존의 보고에서 간과하기 쉬운 주요 사항을 확인한 바, 공명기의 설계시에 스피커 하우징의 후면부 임피던스를 줄이도록 하는 구조를 채용해야 하며 스피커의 선정에 있어서도 공명기의 공진특성을 왜곡하지 않도록 선정해야 한다. 또한 다양한 냉장환경에 적용하기 위하여는 공명기 내부의 속도 신호와 음압신호를 검출하고 양자가 동 위상이 되도록 구동하는 구동회로의 제작이 바람직하다. 냉장실험 결과 공진점을 벗어나면서 급격히 냉장성능이 감소되므로 공진점을 유지하는 것은 냉장성능의 향상을 위하여 필수적이며, 외부 열 부하를 줄이기 위한 단열방법이 중요함을 확인하였다. 현재까지 진행되는 각국의 연구를 볼 때 보편적인 냉장기관으로 사용되기에는 미진하지만 간편하고 신뢰도 있는 장치로서 그 응용분야를 넓혀 가는 열음향 냉장기관에 대한 지속적인 연구가 요망되고 있으며, 특히 명확한 공진특성의 확보 및 유지방법, 열 손실의 감소 방법, 스택의 구조변경을 통한 제작의 간편화 방안 등이 추가로 연구되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. G. W. Swift, "Thermoacoustic engine and refrigerators," *Physics Today*, Vol. 48, No. 7, pp. 22-28, 1995.
2. S. Tempkin, *Elements of Acoustics*, John Wiley & Sons, New York, 1981, pp. 410-421.
3. G. W. Swift, "Thermoacoustic engines," *J. Acoust. Soc.*

Am., Vol. 84(4), pp. 1145-1180, 1988.

4. H. J. Hoffer, *Thermoacoustic refrigerator design and performance*, Ph. d. dissertation of University of California San Diego, pp. 63-71, 1986.
5. 하재규, 안철용, 성경모, "열음향 냉장시스템(II): 제작 및 시험," *한국음향학회지*, Vol. 14, No. 6, pp. 13-20, 1995.
6. L. L. Beranek, *Acoustics*, Mc-Graw-Hill, New York, 1954 pp. 217-218.

▲ 하 재 규(Zae Gyoo Hah) 1962년 11월 14일생

1985년 2월: 서울대학교 전자공학과 졸업

1987년 2월: 서울대학교 대학원 전자공학과 공학석사

1993년 2월: 서울대학교 대학원 전자공학과 공학박사

(음향공학)

1993년 3월~현재: 국립공주대학교 전자공학과 조교수