

## 열음향 냉장시스템 (Ⅱ) : 제작 및 실험

### Thermoacoustic Refrigerating System, Part Ⅱ : Implementation and Experiment

하 재 규\*, 안 철 용\*\*, 성 평 모\*\*  
(Zae Gyoo Hah\*, Chul Yong Ahn\*\*, Keong Mo Sung\*\*)

※본 논문은 삼성전자의 위탁과제 결과입니다.

#### 요 약

본 논문에서는 열음향 냉장시스템을 실제로 설계, 제작하고 그 동작을 확인하였다. 제작된 시스템은 4인치 중음부 스피커로 구동되며 스피커 하우징, 챔버, 스택하우징, 스택, 열교환기, 가는관, 그리고 공명구로 구성되었으며 내부에 10기압의 He를 채워 실험하였다. 실험 중 온도하강측정을 위하여 T 타입의 열전쌍을 열교환기에 부착하였고, 내부용압측정을 콘덴서 마이크로폰을 장착하였다. 스피커의 열손상을 막고 고온 열교환기를 냉각시키기 위하여 냉각수를 공급하였다.

실제 실험을 위하여 제작된 열음향기관의 전기적인 임피던스를 측정하여 공진특성을 파악하였는데, 실험 결과 설계치와는 약간 다르게 340Hz로 구동하는 것이 효율적이었다. 이러한 해석을 기초로 실제 냉장실험을 수행한 결과 30℃의 조건하에서 340Hz, 50W로 구동하였을 때 16℃의 냉장효과를 관찰하였다. 관찰된 냉각효과와 설계치의 차이를 규명하기 위하여 제작된 열음향기관의 미비점을 고찰하였는 바, 냉각부의 단열이 제일 중요한 문제임을 파악하였으며 그외의 보완이 필요한 사항은 이후의 진행될 연구의 과제로서 제시하였다.

#### ABSTRACT

In this paper, the thermoacoustic refrigerating system was implemented and its operation was experimentally verified. The system is composed of several parts : 4 inch midrange speaker, speaker housing, chamber, stack housing, stack of plates, heat exchangers, thin pipe and cavity. The system is filled with He gas at 10 bar and contains T-type thermocouples and condensor microphone for measuring the temperature and pressure inside, respectively. In addition, cooling water is used for protecting speaker from thermal destruction and cooling down the hot heat exchanger. For the experimental verification of the implemented refrigerating system, electrical impedance and resonance characteristics were measured. The results showed that it was most efficient to drive the system at 340 Hz. When operated at 340 Hz, 30℃ environments and 50 electrical watts, the temperature of the cold region decreased by 16℃. The dissatisfaction mainly comes from the incomplete thermal insulation of the cold region. We also pointed out some guidelines to improve the performance for later study.

#### I. 序 論

열음향 냉장시스템의 동작을 실험적으로 확인하기 위해서는 열음향기관, 온도측정부, 단열부, 구동부 등의 제작과 전체 시스템의 집적이 필요하다. 열음향기관의 설계절차는 이미 제시되어 있는 바, 실제 제작에 있어서는

각 부분의 재질 및 가공방법의 선택이 매우 중요해진다. 본 논문에서는 우선 제작된 열음향기관의 각 부분의 제작방법 및 제작시 고려할 사항을 설명할 것이다. 특히 열음향기관의 핵심이라 할 수 있는 스택과 열교환기의 제작에 대하여 자세히 알아보기로 한다. 또한, 제작된 열음향기관을 구동 스피커와 결합하였을 때의 전체 임피던스 특성을 해석하고 이를 기초로 실제 냉장실험을 수행하여 그 동작을 확인하기로 한다.

\*공주대학교 전자공학과  
\*\*서울대학교 전자공학과

접수일자 : 1995년 7월 3일

II. 열음향 기관의 제작

열음향기관을 제작하기 위하여 제 I부에서 설명한 설계원칙에 따라 열음향기관을 설계하고 제작하였다. 제작된 열음향기관은 기본적인 Hofler 공명기로서 그 설계도는 그림 1과 같고 설계 사양은 표 1과 같다.

전체적인 구조는 스피커의 하우징, 챔버(chamber), 고온 열교환기, 스택부, 저온 열교환기, 가는 관(small diameter tube)과 공명구(cavity)로 구성하였다. 스피커 하우징은 스피커를 지지하고 내부의 고압의 헬륨 가스를 지지하며 과도한 구동에 따른 스피커의 열손상을 막기위한 냉각수를 확보하는 구실을 한다. 챔버는 스피커 하우징 안의 스피커의 전면으로부터 고온 열교환기의 위치, 즉 스택의 시작위치까지를 띄우는 구실을 하고 스피커의 방사면적과 스택의 면적사이의 완충작용을 하는 용도로서 고온 열교환기의 온도가 상승하는 것을 막기 위하여 추가적인 냉각수를 흘리도록 하였다. 고온 열교환기와 저온 열교환기는 열이 잘 통하도록 음향학적으로 해당부위의 유체의 변위를 고려하여 설계하였는데 뒤에서 자세히 설명할 것이다. 가는 관과 공명구는 우선 전체적인 길이를 조정하여  $\lambda/4$  공명을 하도록 하고 유체의 높은 압력을 유지하며 점성손실(viscous loss)을 최소화하는 구실을 한다.

설계에 있어서 특히 유의한 것은 실험에 편리하도록 가능하면 조립이 용이하고 문제가 있는 부품은 갈아질 수 있도록 접합부위를 오링(O-ring)으로 처리하여 플렌지나 클램프로 조일 수 있도록 하였고 열전쌍이나 스피커 선 등의 불가피한 연결부위에 대하여도 피팅(fitting)을 사용하여 교환이 되도록 한 것이다. 따라서 예폭시의 사용과 용접을 최대한 억제하였다. 또한 냉각수 파이프도 튜브피팅(tube fitting)을 이용하여 부착/격리가 용이하도록 하였다. 스택부의 하우징 제작에서는 MC재질의 플라스틱을 사용하였는데 고온 열교환기로부터 저온 열

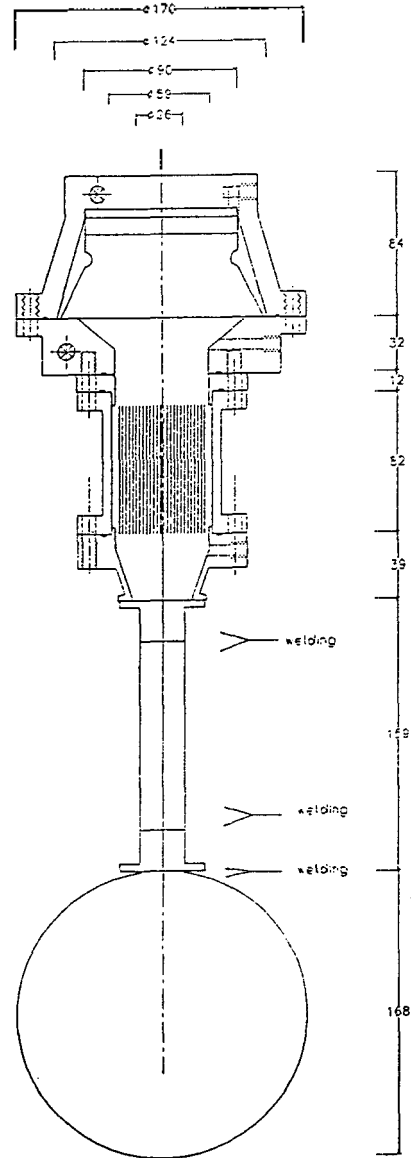


그림 1. 열음향기관의 전체 설계도

표 1. 열음향기관의 설계 사양

유체의 밀도	1.9[kg/cm <sup>3</sup> ]
유체 속 음파의 속도	940[m/s]
작동 주파수	460[Hz]
ratio of specific heats	1.67
Isobaric heat capacity per unit mass	5.2[J/gK]
실내온도가 되는 기준위치	3[cm]
실내온도	300[K]
원하는 온도차이	90[K]
스피커와 스택 사이의 거리	5[cm]
굵은관(스택)의 직경	5[cm]
가는관의 직경	2.85[cm]
굵은관(스택)의 길이	6.34[cm]
가는관의 공명기 길이	26.8[cm]
헬륨홀츠 공명기의 부피	2400[cm <sup>3</sup> ]

교환기로서의 열의 흐름을 최소화하려면 가능한한 스택 하우징의 두께를 작게 해야하는 반면에 헬륨의 투과를 줄이기 위하여는 두께가 커야하므로 타협이 필요하였다. 또한 가는관과 공명구 그 자체의 열용량이 크지 않고 열을 잘 전달할 수 있어야 하므로 얇아야 하는데 너무 얇은 경우 스피커의 구동에 따른 공진모드가 생겨 소음이 커지게 되고 내부의 헬륨의 압력을 건디는데 문제가 생기므로 바람직하지 않다. 따라서 이 경우에도 타협이 필요하다.

본 연구에서 실제 제작된 열음향기관의 실물 그림을 그림 2에 보였다. 제작된 열음향기관의 전체길이는 66cm이다. 사용한 재질은 스피커하우징과 챔버는 황동으로 하였고, 열교환기는 황동과 듀랄루민, 가는 관과 공명구는 스테인레스 스틸을 사용하였다. 또한 스택하우징은

MC로, 스택부는 PET 필름을 사용하였다.

각 주요부분에 대하여 간략히 설명하면 아래와 같다.

II-1. 스피커 하우징과 챔버

스피커하우징을 설계하기 위하여 우선 적절한 스피커를 선정하였다. 현재 국내에 시판되는 일반 가정용 스피커 중에서 큰 파워를 감당할 수 있고 열적 손상에 강하며 소형인 스피커가 필요하였다. 이러한 조건을 만족시키는 스피커로 북두사에서 제작된 4인치 중음부 스피커를 사용하였다.

선정된 스피커의 하우징은 스피커가 음파를 방사하는 매질(헬륨 10기압)을 유지하고 스피커의 열을 냉각시키기 위한 냉각수의 확보라는 두가지 기능을 수행한다. 그리고 가스주입구를 만들어 가스주입밸브가 장착될 수 있도록 하였고 스피커 입력단자를 확보하였다.

스피커 하우징과 스택 사이에 들어가는 챔버는 내부가 39°의 경사로 테이퍼가 지면서 단면이 좁어드는 구조로 되어 있다. 스피커의 단면적과 공명기의 단면적이 다르기 때문에 테이퍼를 만들어 점진적으로 임피던스 매칭을

시켜 주기 위함이다. 그리고, 열전쌍과 내부음압측정용 마이크로폰이 들어갈 수 있는 구멍을 만들어 고온 열교환기 부분의 온도와 내부 음압을 측정할 수 있게 하였다. 열전쌍은 구리(Cu)와 콘스탄탄(Ni45Cu55)의 합금인 T 타입을 사용하였다[1].

II-2. 열교환기

고온 열교환기는 뜨거운 스택의 열을 냉각수를 통해 식히는 역할을 하고, 저온 열교환기는 스택의 저온부분 온도를 바깥으로 뿜어 내는 역할을 한다. 열음향기관에서 필요한 열교환기의 구조는 그림 3과 같이 열전도성이 양호한 금속재를 적당한 폭과 두께로 유체의 변위에 평행하도록 배치하는 것이다. 이때 금속재의 폭은 해당위치의 유체단위의 변위보다 크게 해야하고 금속재의 간격은 열침투깊이의 2배 이상 되도록 한다[2]. 이러한 구조의 열교환기는 금속판과 띄움재(spacer)를 교대로 쌓아 성형하고 선반으로 모양을 깎은 후 띄움재를 예칭하여 만드는 방법이 가능하지만[3], 본 연구에서는 제작의 편의를 위하여 와이어 커팅을 사용하였다. 즉 와이어 커팅에 의해 두랄루민을 세로로 촘촘하게 홈을 내고 이곳에 열전도도가 좋은 구리판을 평행하게 삽입한 구조이다. 이때 홈과 홈 사이의 간격은 0.8mm, 홈의 폭은 0.2mm, 깊이는 4mm로 하고 여기에 두께 0.3mm, 폭 7mm인 동

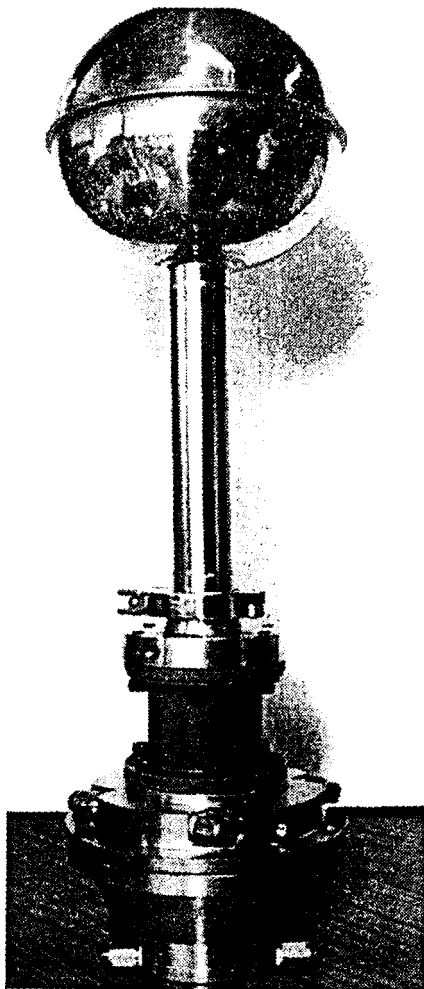


그림 2. 열음향기관의 전체 외형

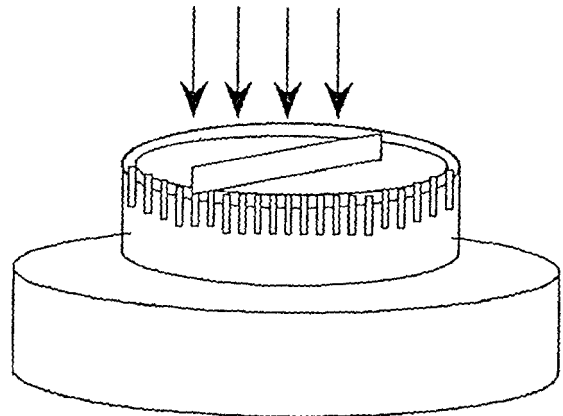


그림 3. 열교환기의 제작

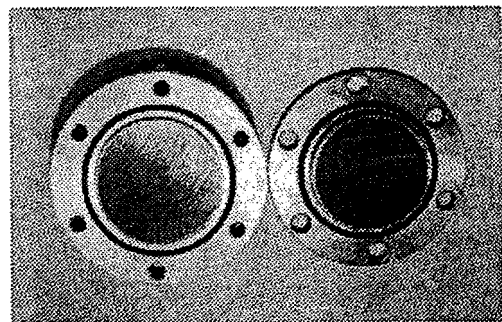


그림 4. 열교환기의 실물모양  
(a) 저온 열교환기 (b) 고온 열교환기

판을 집어넣어 별도의 고정장치 없이 꼭 끼도록 하였다. 또한 열전쌍이 들어갈 수 있는 홈을 파 두었고, 저온 열교환기의 경우에는 가는 관과 연결될 수 있게 단면적이 점점 줄어드는 형태로 만들었다. 가는 관과 결합하는 부분은 클램프로 조일 수 있게 만들어 조립을 용이하게 하였다. 제작된 열교환기의 실물모양을 그림 4에 보였다.

II-3. 스택

열음향기관의 핵심이라고 할 수 있는 스택은 PET 필름을 가는 나일론 봉에 나선형으로 말아서 제작하였다. 스택은 유체와 벽의 상호작용(fluid-wall interaction)을 극대화시키기 위한 부품으로서 가능한 한 넓은 면적의 벽이 점성침투깊이의 2배이상 유지되는 형태로 구성된다. 본 연구에서는 PET 필름으로 벽을 만들고 낚시줄로 간격을 유지시키는 구조를 사용하였다. 낚시줄을 필름에 붙이기 위해서는 적당한 접착제를 찾아야 하는데 실제 본 연구에서 여러가지 접착제를 사용하였으나 신속히 굳고 강인한 접착제를 찾지못하여 차선택으로 얇은 접착테이프를 사용하였다. 그림 5와 같이 나무로 틀을 제작하여 일정한 간격으로 못을 박은 후 낚시줄을 팽팽하게 고정시켜 필름에 대고 얇은 접착 테이프로 위와 아래를 단단하게 붙이는 방법을 사용하였다. 이 때, 접착테이프가 유체의 흐름에 방해가 되지 않도록 PET 필름에 단단히 붙이는 것이 중요하다. 낚시줄을 필름에 붙인 후 니퍼로 필름에 바짝 붙여 잘라내었다. 제작에 사용된 PET 필름의 두께는 0.1mm, 접착테이프의 두께는 0.05mm, 나일론

봉의 직경은 10mm, 낚시줄의 두께는 0.5mm와 0.75mm의 두가지이다. 직경 59mm의 스택을 만들기 위해 PET 필름이 334cm가 들어갔는데 낚시줄의 간격을 처음에는 촘촘하게 하고 나중에는 비교적 듬성듬성하게 유지시켰다. 처음 33cm까지는 0.5mm 두께의 낚시줄을 0.25cm 간격으로 고정시키고 나머지 부분은 0.75mm 두께의 낚시줄을 0.5cm 간격으로 고정시켰다. 이렇게 하여 만든 스택의 유효 간격은 0.58mm, 유효 단면적은 0.24mm<sup>2</sup>가 됨을 계산으로 구할 수 있었다. 스택 하우징은 열전도가 낮고 단단한 재질의 플라스틱인 MC를 사용하여 만들었다. 제작된 스택의 실물모양을 그림 6에 보였다.

II-4. 가는 관과 헬름홀쯔 공명기

가는 관과 헬름홀쯔 공명기는 스테인레스 파이프를 스테인레스 구에 용접시킴으로써 구현하였다. 스테인레스 구의 제작을 위해서는 구형 성형재에 도금한 후 성형재를 녹여내거나, 반구를 프레스 성형하여 용접하는 방법이 가능한데, 본 연구에서는 후자의 방법으로 제작되어 시판되는 다세대주택의 물탱크용 뜨개를 구입하여 사용하였다. 즉 직경 90cm의 물탱크용 스테인레스 구(球)를 가는 관의 직경에 맞게 구멍을 낸 후 클램프용 연결관을 용접하고 스테인레스 파이프를 다시 용접하였다. 클램프로 물리기 위해 클램프용 연결관을 여기에 다시 용접하여 가는 관과 헬름홀쯔 공명기 전체를 일체형으로 만들

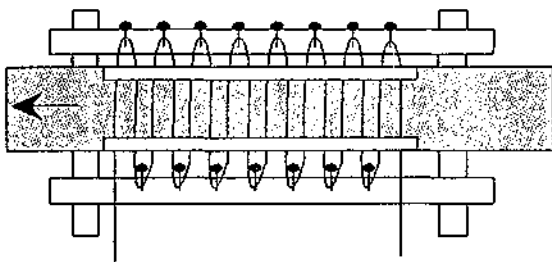


그림 5. 스택의 제작

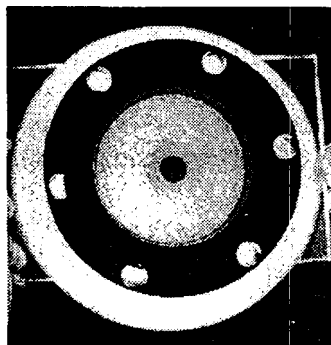


그림 6. 제작된 스택의 모양

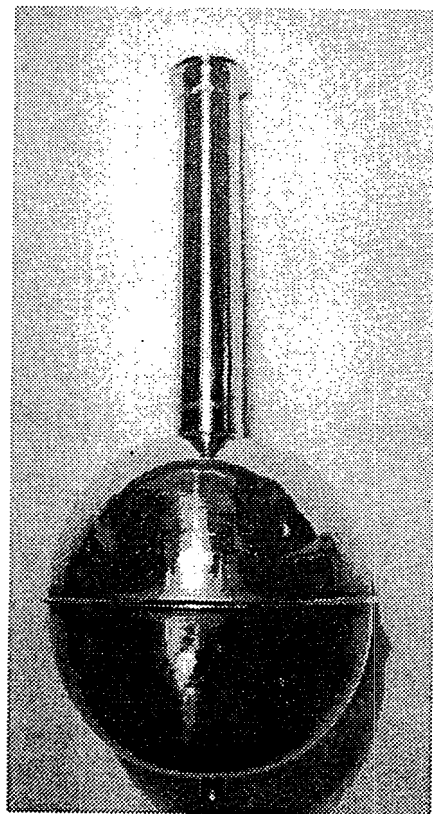


그림 7. 가는관과 공명기의 실물모양

었다. 이때 가는 관의 내경은 손실을 최소화하기 위하여 35mm로 하여 굵은 관의 0.6배가 되도록 하였다[4]. 제작된 공명구의 체적은 2797cm<sup>3</sup>이다. 제작된 가는관과 헬름홀츠 공명기의 실물모양을 그림 7에 보였다.

### Ⅲ. 제작된 열음향기관의 임피던스 특성

공명기의 음향학적 특성은 제 I 부에서 살펴본 것과 같이 그림 8로 주어진다. 그러나, 실제로 제작된 공명기는 가는 관과 굵은 관의 두가지로만 이루어져 있지 않고 단면적이 점차로 변하는 테이퍼가 있으며, 설계에서 고려하지 않았던 챔버 등이 있어 설계치와의 차이가 있게 된다. 따라서 모의실험을 수행함에 있어 챔버의 단면적의 변화를 고려하여 테이퍼는 여러 부분으로 잘라 단면적의 변화에 따라 임피던스를 변환시키도록 하였다. 그리고 스택에 의하여 줄어든 단면적도 보정을 할 필요가 있다. 이를 고려하여 실제 제작된 열음향기관의 임피던스 특성을 모의실험하였다. 그 결과를 그림 9에 보였다.

이상의 분석을 기초로 스피커와 공명기가 결합된 전체 시스템의 등가회로는 그림 10과 같다[5]. 그림 10에서 보듯이 스피커 자체의 임피던스로 인하여 공명기의 입력 임피던스  $Z_{Mo}$ 는 부하로 작용하므로 바람직한 동작을 위해서는, 첫째 스피커와 공명기를 결합한 시스템의 공진 특성이 원래의 공명기의 실제특성과 일치해야 하고, 둘째 공진주파수 근처에서 공명기의 방사저항이 스피커의 기계적 저항보다 커서 음향에너지의 전달이 쉽게 되어야 한다.

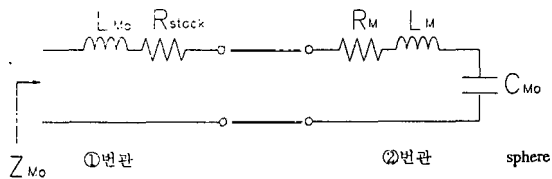


그림 8. 전체 공명기의 등가회로

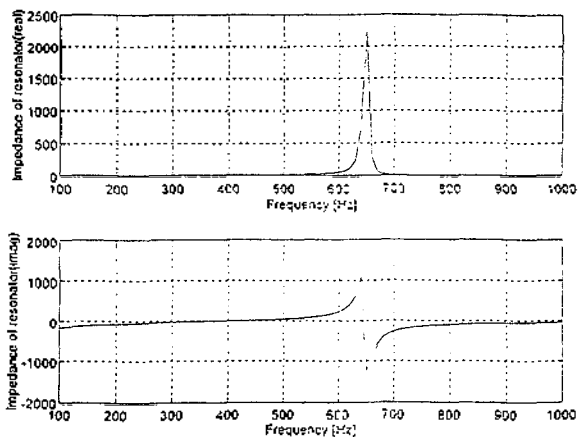


그림 9. 공명기의 임피던스  $Z_{Mo}$

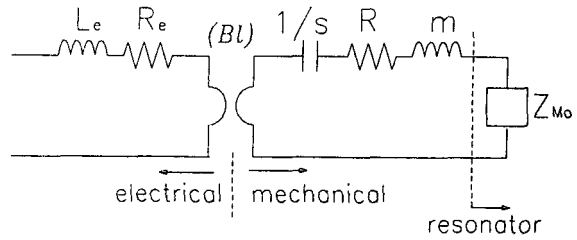


그림 10. 공명기에 스피커를 연결한 경우의 등가회로

- $R_e$  = 보이스 코일의 직류저항 [ $\Omega$ ]
- $L_e$  = 보이스 코일의 인덕턴스 [H]
- $m$  = 진동부의 질량 [kg]
- $s$  = 지지부의 강성 [N/m]
- $R$  = 가동부의 기계적저항 [mechanical ohm]
- $Z_{Mo}$  = 공명기의 기계적 임피던스 [mechanical ohm]

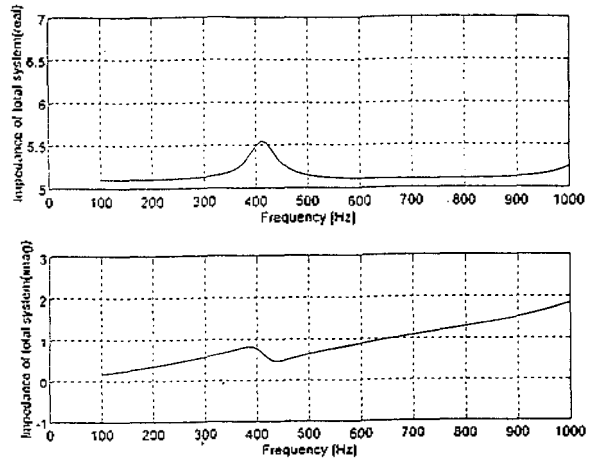


그림 11. 스피커를 결합한 전체 시스템의 임피던스 모의실험 결과

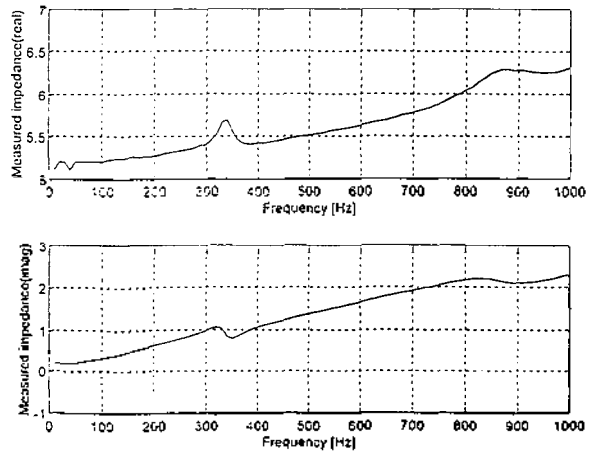


그림 12. 스피커를 결합한 전체 시스템의 임피던스 측정결과

그림 11은 그림 9의 기계적인 임피던스를 가지는 공명기를 스피커에 연결하였을 때 스피커의 전기적인 단자에서 바라본 전기적 임피던스이다. 그림 11에서 알 수 있는 바와 같이 기계적인 공진과 전기적인 공진이 일치하지 않게 된다. 이는 스피커의 특성상 기계적인 부분이 전기적인 부분과 자이레이터에 의해 연결되어 있는 형태로 모델링이 되기 때문이다. 기계적인 저항의 허수부분이 작아진다고 하더라도 자이레이터에 의해 전기적인 부분에서 보면 아주 큰 값을 가지게 되므로 전기적으로 공진을 하지 않게 되는 것이다.

그림 12는 실제로 제작된 열음향기관에서 스피커를 통하여 측정된 전체 시스템의 임피던스 그림이다. 실제의 측정치와 모의실험의 결과가 비슷하게 나타남을 알 수 있다. 실제 측정치의 경우 전기적인 공진점은 340Hz에서 부근에서 나타나 모의실험 결과와 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 이러한 차이가 나타나는 가장 큰 이유로는 스피커의 등가회로 모델링에서 사용된 각 인자들이 모두 1기압의 공기 중에서 측정된 것이기 때문에 10기압의 He 속에서는 스피커의 계수들의 값이 달라지기 때문이다. 특히 스피커 뒷면의 공기 스프링이 아주 단단해지기 때문에 스프링 상수가 증가하게 되고 이의 변화가 스피커와 전체 시스템의 공진에 영향을 미침을 짐작할 수가 있다. 그리고, 측정치에 있어서 850Hz 부근에서의 변이점은 스피커의 등가회로가 저주파 영역에서 잘 근사가 되고 고주파 영역에서는 분할진동에 의하여 잘 맞지 않게 되는 것을 시사하여 주고 있어 분할진동주파수 이상에서는 새로운 형태의 모델링이 필요함을 나타내어 주고 있다.

#### IV. 냉장 실험

##### IV-1. 실험 구성

열음향냉장시스템의 동작을 위해서는 원하는 주파수로 구동시키기 위한 구동회로와 스피커의 열손상을 방지하고, 고온 열교환기를 식힐 수 있는 냉각수(cooling

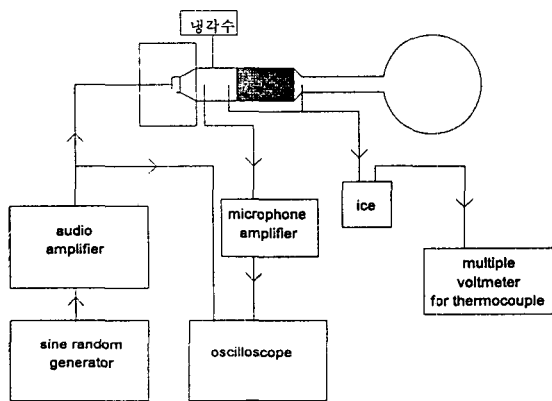


그림 13. 열음향냉장시스템의 실험 블록 다이어그램

water)의 공급, 그리고 열음향냉장시스템의 성능을 측정할 수 있는 온도 계측장치(thermocouple)와 공명기 내부의 음압을 측정할 수 있는 마이크로폰(pressure transducer)이 필요하다.

이러한 구성요소를 갖춘 열음향냉장시스템의 실험 블록 다이어그램을 그림 13에 나타내었다. 구동신호는 정밀한 오실레이터로 정현파를 발생하고 이를 증폭하여 사용하였다. 실험에서 사용한 스피커의 최대 입력 허용 파워는 80W이었고 이러한 영역에서 작동할 수 있는 고출력 오디오 앰프를 사용하였다. 오실로스코프로는 입력신호의 크기와 파형을 알아 보고, 마이크로폰에 인가되는 신호를 읽는데 사용하였다. 작동주파수에서 스피커의 임피던스가 6Ω 이므로 예로서 50W의 입력 신호를 얻기 위해서는 17.3 V의 RMS 전압이 필요하다.

공명기 내부 열교환기의 온도를 측정하기 위해서 T 타입의 열전쌍(thermocouple)을 사용하였고 고온 열교환기 부분과 저온 열교환기 부분 두 곳의 온도를 측정할 수 있게 하였다. 열전쌍의 기준온도를 0℃로 잡기 위하여 열전쌍과 전선의 연결 부위를 실리콘 액이 들어있는 시험관에 넣은 후 보온병의 얼음 속에 집어 넣었다. 보온병에 얼음을 가득 넣은 경우 얼음이 다 녹기까지 5시간 이상이 걸려 기준온도를 일정시간 계속 유지할 수 있었다. 열전쌍에서의 전압은 기준점과 1℃의 온도차에 대해 약 0.04mV의 전압 차이가 발생하는데[1], 10nV까지 측정할 수 있는 디지털 멀티미터를 이용하여 열전쌍에서의 전압차를 측정하였다. 냉각수 파이프는 착탈을 용이하게 하기 위하여 one touch tube fitting을 사용하였고 일반 냉각수용 수지 호스를 사용하여 냉각수를 공급하였다.

이상의 실험조건에서는 열음향기관에 실내의 대기가 계속 열적부하를 가하므로 저온열교환기 부분과 가난관, 공명구를 열적으로 단열시킬 필요가 있다. 특히 실험결과와 설계치의 비교에 있어서 이러한 단열이 매우 중요한데 본 연구에서는 진공용기를 제작하여 열부하를 제거하고자 하였다.

##### IV-2. 실험 과정 및 결과

열음향 냉장시스템의 실험을 하기 위해서는 여러가지 주의할 사항이 있다. 먼저 공명기 내부를 10기압의 헬륨 가스로 채우기 이전에 진공 펌프를 사용하여 헬륨 이외의 기체를 뽑아 내어야 한다. 로타리 펌프를 5분 이상 가동시켜 공기를 뽑아 내고 헬륨은 아주 천천히 채우도록 한다. 헬륨을 급하게 채울 경우 스피커의 진동판이 파손되므로 헬륨 가스통에 압력 조절기(pressure regulator)를 부착하고 니들 밸브를 달아 미세하게 충전을 시키도록 한다. 10기압을 다 채우고 나면 헬륨홀츠 공명기가 따뜻해짐을 느낄 수 있었다. 따뜻해진 공명기가 식은 후 압력이 약간 줄어들므로 정확하게 10기압을 채우기 위해 미리 조금 더 압력을 높게 충전을 하는 것이 좋다. 방전시에도 마찬가지로 조금씩 방전시켜 스피커의 파손을 막

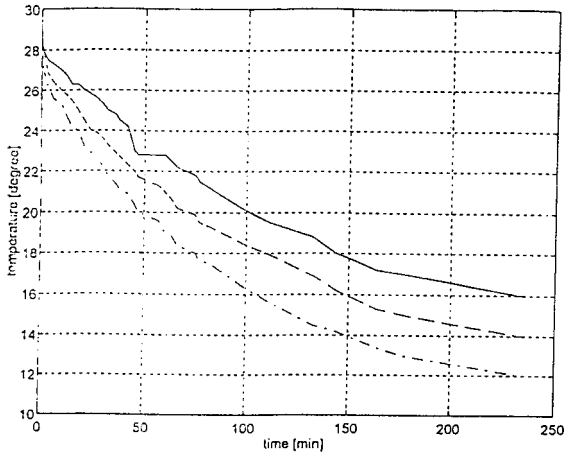


그림 14. 저온 열교환기의 스피커 구동 전력에 따른 온도 변화의 측정결과  
(— 30W, --- 40W, -.- 50W)

도록 한다.

공명기를 진공용기에 넣고 난 후 여러가지 in-let 단자들을 덮개와 연결시킨다. 덮개를 꼭 닫은 후 로타리 펌프를 사용하여 충분히 낮은 기압이 될 때까지 기다린 후 얼음을 보온병에 넣고 열전쌍의 온도 기준점(reference junction)이 들어있는 시험관을 담겨 온도 기준점이 얼음과 같은 온도가 되면 냉각수를 흘리고 실험을 시작한다.

임피던스의 허수부분이 작아지는 340Hz로 함수발생기를 작동시킨 후 오실로스코프를 관찰하여 원하는 RMS 전압값이 될 때까지 앰프의 볼륨을 작동한다. 이렇게 하여 30W, 40W, 50W의 입력이 가해졌을 때의 실험결과를 그림 14에 보였다. 그림 13은 실온 30°C에서의 실험 결과인데 냉각수의 영향으로 실온보다 2°C 낮은 상태에서 시작되었다. 고온 열교환기 부분은 3분 동안 1.5°C의 온도 상승이 있었고 그 이후에는 계속 같은 온도를 유지하였다. 전원 연결 3분 후 고온 열교환기 부분의 온도가 1.5°C 높아진 것은 스피커에서 발생하는 열 때문인 것으로 생각되어진다. 이후에는 스피커에서 발생하는 열과 냉각수가 뺀 열이 평형을 이루어 더 이상 온도가 올라가지는 않는다. 저온 열교환기 쪽의 온도 하강은 시간이 갈수록 기류가 완만해져 어느 수준 이하로는 온도가 내려가지

표 2. 실험이 끝난 후 가판과 헬륨홀츠 공명기의 위치에 따른 온도 분포

저온열교환기로부터의 거리	온도 차이(°C)
7 cm	1.5 °C
13 cm	2.5 °C
17 cm	3 °C
23 cm	4 °C
28 cm	4.5 °C
32 cm	4.5 °C
35 cm	4.5 °C
38 cm	4.5 °C

않음을 볼 수 있다. 또한 입력 신호가 클수록 냉각속도가 빠름을 알 수 있는데 스피커의 파손 방지를 위해 50W까지만 측정하였다. 50W의 입력에 대해서 약 16°C의 온도 하강이 이루어졌다. 실험이 끝난 후 진공 용기를 꺼내어 저온 열교환기와 직접 접촉하고 있는 가판과 헬륨홀츠 공명기의 온도 분포를 표 2에 나타내었다. 저온 열교환기와 멀어질수록 온도 차이가 많이 나는 것을 볼 수 있는데 이는 주변으로부터 열이 표면적이 큰 헬륨홀츠 공명기로 들어오고 있다는 것을 나타내어 준다. 따라서, 단열이 좀 더 잘 이루어진다면 직접 접촉하고 있는 헬륨홀츠 공명기와 저온 열교환기 부분이 같은 온도로 열적 평형을 이루고 더 많은 온도 하강이 일어날 것을 예상할 수 있다.

#### IV-3. 실험 결과 고찰

이제까지 서술한 실험결과를 고찰해보면 기대하였던 성능과는 큰 차이를 보이고 있다는 것을 알 수 있다. 그 원인을 생각해 보면

첫째, 실험장치 전체를 단열시키고 실험을 수행하지 못했다는 것이다.

둘째, 제작된 열음향기관의 열용량문제이다. 앞에서 언급하였듯이, 본 연구에서는 열음향시스템의 안정성, 기밀성, 보수성을 위해서 시스템 전체의 중량이 무거워지고 열용량이 커졌는 바, 가능한한 각 부품을 얇고 부피가 적게 하여 열용량을 줄이는 것이 중요하다.

셋째, 열음향기관의 공진특성의 문제이다. 앞에서 논의했듯이 전체 열음향기관의 공진특성은 설계치와 차이를 보이고 있으며 따라서 설계된 구동주파수로 열음향기관을 구동시키는 것은 비효율적이다. 문제는 전체 시스템의 공진특성을 설계치와 일치시킬 수 있어야 하는데 앞에서 보듯이 새로운 스피커의 제작이 필요하며 그 특성은 공기중에서 측정된 값과는 상당히 다르다는 것이다.

넷째, 스택의 구조문제이다. 유효단면적을 극대화시키기 위해서는 본 연구에서도 사용된 호플러의 스택이 좋겠지만 음향학적인 관점에서 볼 때 너무 촘촘한 스택은 많은 저항 성분을 가지게 되고 공명기의 Q를 감소시켜 공진특성을 흐린다. 따라서 스택 부분의 개량을 통하여 성능을 더욱 향상시킬 수 있다고 생각된다.

#### V. 결 론

본 연구에서는 실제 열음향기관을 제작하고 전체 시스템을 구성하여 실험한 결과 30°C의 실내에서 별다른 단열을 하지 않은 상태에서 16°C의 온도강하를 얻었다. 열음향기관의 실제 제작에 있어서 전체 열음향기관의 냉매 유지성, 스택의 제작방법, 열교환기의 제작 등이 주요사항으로서 여러 가지 변화가 가능한데, 기본적으로는 시스템의 경량화와 부품 교환의 용이성 사이의 선택이 핵심 사항이라고 할 수 있다. 특히 스택과 열교환기의 제작은 까다롭고 자동화하기가 힘들며 오랜 시간에 걸친 수

작업이 필요하는 등 상당한 주의가 요망된다. 또한 제작된 열음향기관과 구동스피커를 결합했을 때의 음향학적 해석을 통하여 공진특성을 확인하여야 하고, 이를 통하여 설계치와 이론치 사이의 차이를 규명하는 것이 중요한 과제로 된다. 즉 이러한 해석을 기초로 세부 설계를 다시 조정하는 과정이 필요한데, 매우 시간이 많이 걸리며, 간단한 모델로 모의실험하는 것도 쉽지 않다. 본 연구에서의 냉장실험 결과로 얻어진 16℃의 냉장성능은 실제의 설계치와는 차이가 있지만, 단열이 되지 않아 외부로부터 계속적인 열적부하가 걸려있는 상태(30℃의 실내)에서의 값이므로 단열상태에서는 이보다 훨씬 큰 온도하강을 예상할 수 있다. 결론적으로, 열음향 냉장시스템에 대한 연구는 이론도 중요하지만 다양한 실험을 통해 해결되고, 개선되어야 하며, 따라서 지속적인 연구가 요망된다.

### 참 고 문 헌

1. R. D. Benedict, *Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements*, John Wiley & Sons, New York, 1977, pp. 73-135.
2. N. Rott, "Thermoacoustic heating of the closed end of an oscillating gas column," *J. Fluid Mech.*, vol. 145, 1984, pp. 1-9.
3. T. J. Hofler, *Thermoacoustic Refrigerator Design and Performance*, Ph. D. dissertation at University of California, San Diego, Dept. of Physics, 1986, pp. 8-14.
4. Reference [3], ch.2.
5. M. Rossi, *Acoustics and Electroacoustics*, Artech House, Norwood, 1986.
6. Reference [3], pp. 71-75.