

## 네온을 작동유체로 하는 GM형 맥동관 냉동기의 실험적 연구

### Experimental study on GM-type pulse tube refrigerator with neon as working fluid

김효봉<sup>1</sup>, 박종호<sup>2,\*</sup>

Hyobong Kim<sup>1</sup>, Jong-Ho Park<sup>2,\*</sup>

**Abstract:** This paper describes experimental study on GM-type pulse tube refrigerator with neon as a working fluid instead of helium. Neon gas has similar compression characteristics with helium gas because it is a monoatomic gas. In experiments, a cooling performance test was performed with same compressor and pulse tube refrigerator for neon and helium as working gas. From experimental results, a PTR with neon show the improved cooling performance than a PTR with helium. Cooling performance and operating characteristics of a PTR were discussed and compared for two different working gas.

**Key Words:** pulse tube refrigerator, helium compressor, neon gas.

연구는 주로 설계 최적화, 재생기의 효율 향상, 열교환기의 효율 향상 등의 방법으로 이루어져왔다.

맥동관 냉동기의 냉각 성능 향상을 위한 또다른 방법으로는 작동 유체를 헬륨 대신에 혼합 기체로 사용하는 연구가 수행되었다[6-8]. Chen 등은 헬륨과 질소, 수소, 네온, 아르곤의 혼합 기체를 작동 유체로 하는 맥동관 냉동기의 사이클 해석과 실험적 연구를 통해 냉동기 성능 향상의 가능성을 보였다.

본 연구에서는 혼합 기체가 아닌 순수한 네온 기체를 작동 유체로 하는 맥동관 냉동기에 대한 실험적 연구를 수행하여 1단 맥동관 냉동기의 작동 유체로서의 네온의 적용 가능성을 검토하였다. 동일한 압축기와 맥동관 냉동기에 헬륨과 네온을 주입하여 각각의 성능 시험을 수행하였고, 작동 유체에 따른 성능시험 결과를 비교, 분석하였다.

## 1. 서 론

극저온 냉각시스템을 구성하기 위해서는 극저온 냉동기가 필수적이고, 소형 극저온 냉각시스템에는 주로 GM(Gifford-McMahon) 극저온 냉동기, 스테어링 극저온 냉동기, 맥동관 냉동기가 주로 사용되고 있다. 현재까지의 냉동기 개발 현황을 살펴보면 GM 극저온 냉동기는 80 K에서 10 W 이상의 냉각 능력을 갖도록, 스테어링 극저온 냉동기는 10 W 이하의 냉각 능력을 갖도록 개발되어 왔으며 맥동관 냉동기는 두 가지 형태의 냉동기를 대체하기 위한 목적으로 개발되어 왔다[1].

소형 극저온 냉동기 중에서 맥동관 냉동기는 작동 원리는 GM 극저온 냉동기와 스테어링 냉동기와 동일하지만 냉각을 위한 팽창기로서 교체 변위기 대신에 기체 변위기를 사용하는 점이 다르다. 기체 변위기를 사용함으로써 저온부에 움직이는 부분이 없어 구조가 간단하고 신뢰성이 높은 장점이 있다. 다만, 현재까지는 냉각 성능이나 열효율이 낮은 단점이 있다.

고신뢰성의 장점을 갖는 맥동관 냉동기의 적용 영역 확대를 위해서는 냉각 효율 향상이 무엇보다 중요하며, 여러 연구자들에 의해 효율 향상을 위한 연구가 진행되어 왔다[2-5]. 맥동관 냉동기의 냉각 효율 향상

## 2. 시험장치 제작 및 구성

성능시험에 사용된 맥동관 냉동기는 본 저자가 발표한 이전 연구에서 설계, 제작되었던 맥동관 냉동기를 그대로 사용하였으며, 그 사양은 Table 1과 같다 [9].

1단 U형 맥동관 냉동기 형태로 제작되었으며, #200 인칭동 금속망을 재생 물질로 사용하였다. 재생기와 맥동관의 직경은 각각 38.1과 31.8 mm이며, 길이는 100 mm로 동일하다. 위상조절기구로는 오리피스 밸브와 기체저장소를 사용하였는데, 오리피스 밸브로는 동일한 미터링 밸브(Swagelok, 4MG) 두 개를 병렬로 연결하여 사용하였다.

제작된 맥동관 냉동기의 온도 측정을 위하여 다이오드 온도센서(DT-670, Lakeshore Inc.)가 저온부에 설치되었으며, 열부하를 인가하기 위한 히터(HTR-25, Lakeshore Inc.)가 저온부 열교환기에

Table 1. Specifications of fabricated pulse tube refrigerator.

Regenerator	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 31.8(1.25), 100(L) [mm]</li> <li>• #200 phpbroustonz mesh</li> </ul>
Puls tub	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 31.8(1.25), 100(L) [mm]</li> </ul>
Gas resrvir	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 liter</li> </ul>
Ofce ale	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1/4 metering alws(Sagelok)</li> <li>• parallel connection</li> <li>• 1/4 1/8 alws(Sagelok)</li> <li>• 1/4 lowcoef =0.010</li> </ul>

<sup>1</sup>정 회 원 : 한국기계연구원 선임기술원

<sup>2</sup>비 회 원 : 충남대학교 기계공학과 교수

\*교신저자 : jhpark@cnu.ac.kr

원고접수 : 2011년 04월 04일

심사완료 : 2011년 06월 20일

게재확정 : 2011년 06월 20일

설치되었다. 압력은 압축기의 흡입부(PL)와 토출부(PH), 재생기 입구(Ps), 맥동관 고온부(Ppt)에 압력 센서를 설치하여 작동 중의 압력 파형을 측정하였다.

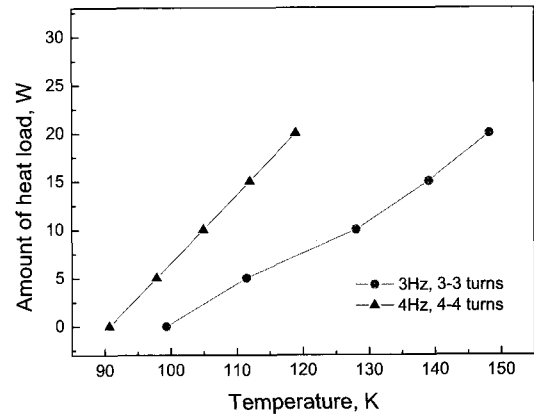
압축기는 기존에 크라이오 펌프(cryopump)에 사용되는 GM 극저온 냉동기 구동용으로 사용되는 헬륨 압축기(Genesis vacuum technology 2.1)가 사용되었으며, 압력 파형 생성을 위한 로터리 밸브는 스텝 모터(PK2913-02A, Oriental motor)로 구동된다.

### 3. 성능시험 및 결과

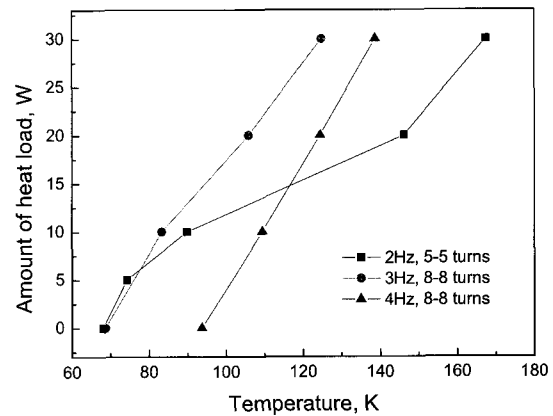
#### 3.1. 실험 조건

구성된 장치를 이용하여 헬륨과 네온을 주입하여 각각의 작동 기체에 대하여 작동 주파수와 오리피스 밸브 개방수(valve turns)를 변화시키며 무부하 온도를 측정하고, 각각의 경우에서 최적의 밸브 개방수에서 열부하 시험을 진행하였다. 네온과 헬륨의 충전압력은 1560 kPa로 동일하다.

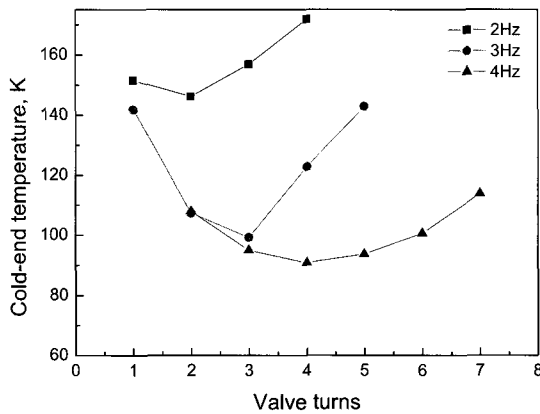
작동 주파수는 2, 3, 4 Hz에 대해서 실험을 수행하였고, 밸브 개방수는 작동 기체와 작동 주파수가 고정된 상태에서 무부하 온도가 최저인 조건이 나타나도록 조절하며 실험을 수행하였다. 본 논문에서는 두 개의 미터링 밸브를 병렬로 설치하였으며, 이후에 명시되는 밸브 개방수는 두 개의 미터링 밸브의 개방수를 의미한다. 즉, 밸브 개방수가 2인 경우에는 두 개의 밸브를 모두 2 회전씩 개방했음을 의미한다.



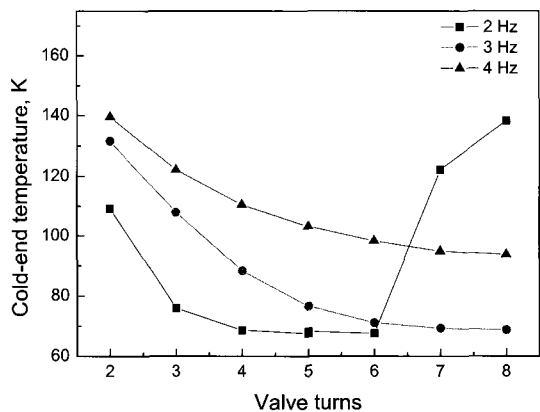
(a) with helium as a working gas



(b) with neon as a working gas



(a) with helium as a working gas



(b) with neon as a working gas

Fig. 1. Measurement of no-load temperature.

Fig. 2. Results of heat load test.

#### 3.2. 무부하 시험 결과

Fig. 1은 작동주파수와 오리피스 밸브 개방수에 따른 무부하 온도 측정 결과이다. Fig. 1 (a)에서 헬륨을 작동기체로 한 경우에는 작동 주파수가 증가할수록 저온부 온도가 감소하고 최적 밸브 개방수가 증가하는 경향이 나타난다. 반면에 Fig. 1 (b)에서 네온을 작동기체로 하는 경우에는 작동주파수가 감소할수록 더 낮은 저온부 온도를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 다만, 헬륨과 네온의 경우에 모두 작동 주파수가 증가할수록 더 작은 밸브 개방수에서 저온부 온도가 최저값을 갖는 현상이 나타난다. Fig. 1 (b)에서 작동 주파수가 3 Hz와 4 Hz인 경우에는 사용된 미터링 밸브의 최대 개방수에서도 최저점이 도달하지 않았지만, 더 큰 밸브 개도에서 최저점에 도달할 것으로 예측된다.

오리피스 맥동관 냉동기의 냉각 성능은 맥동관 저온부에서의 압력 진폭, 질량유량 진폭, 압력과 질량 유량 사이의 위상차에 의해 결정된다. 오리피스 밸브의 개도에 따라 세 가지 변수가 영향을 받게 되고, 그 결과에 따라 냉동기의 냉각 성능이 결정된다. 맥동관 냉동기의 냉각 성능은 압력과 질량 유량의 진폭이 클수록, 압력과 질량 유량 사이의 위상차가 작을수록 증가한다. 오리피스 밸브의 개도가 작은 경우에는 압력 진폭은 증가하고 질량 유량의 진폭은 감소하며, 압력과 질량 유량 사이의 위상차는 증가한다. 반대로, 오리피스 밸브 개도가 큰 경우에는 압력 진폭과 위상차는 감소하지만, 질량 유량의 진폭은 증가한다. 오리피스 밸브의 개도에 따른 상반되는 효과 때문에 냉각 성능이 최대가 되는 최적 밸브 개도가 존재한다. 오리피스 밸브

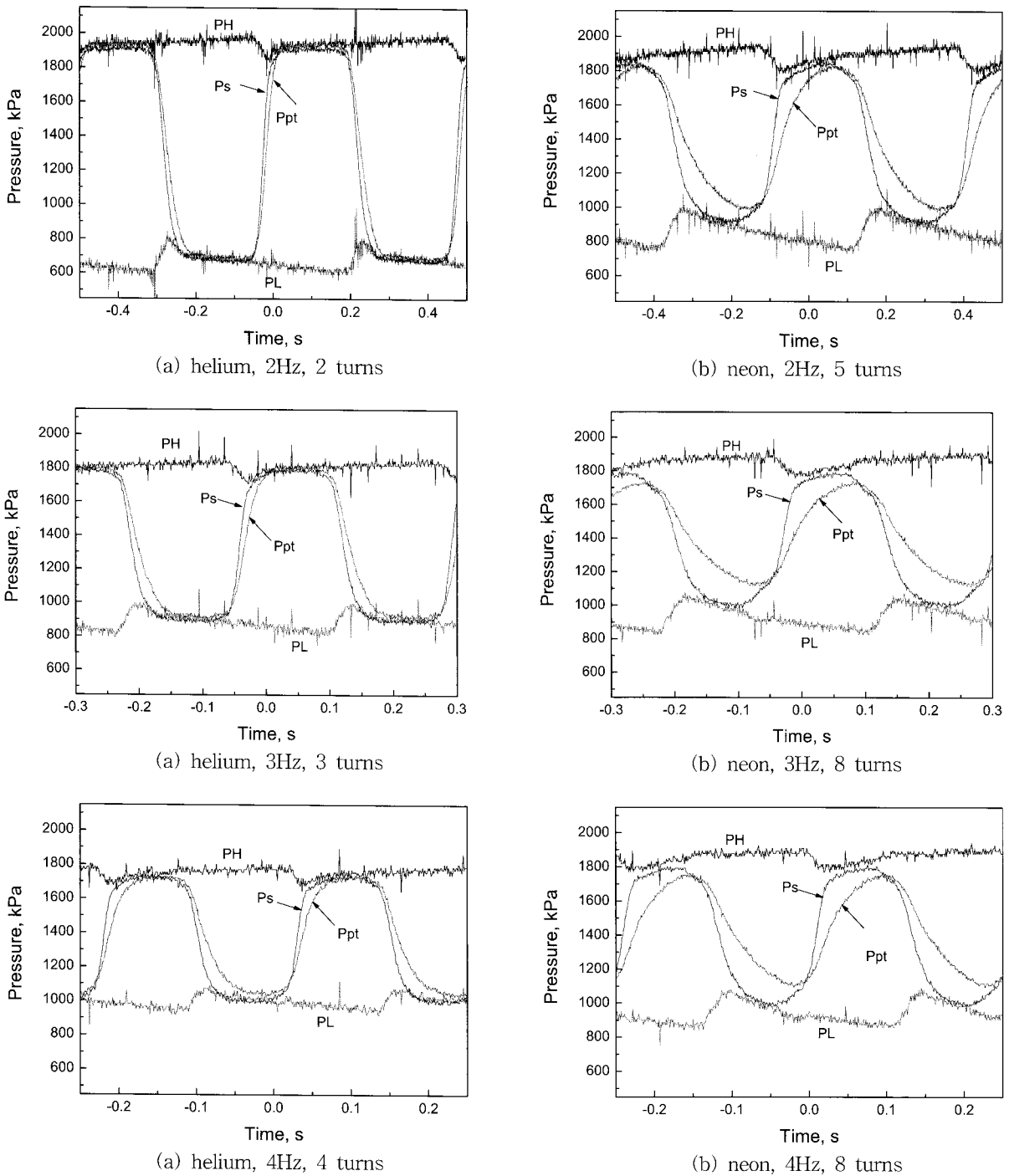


Fig. 3. Measurement of pressure waveform.

로 사용되는 미터링 밸브는 유동에 대한 저항으로써 작용하고, 최적 밸브 개도는 최적의 저항 값을 의미한다. 작동주파수가 증가할수록 맥동관의 컴플라이언스 효과의 증가와 사이클 주기(cycle period) 감소로 인한 질량 유량 증가 효과가 나타나고 이는 더 큰 밸브 개도에서 유동 저항 증가 효과로 나타난다. 때문에 Fig. 1에 나타난 바와 같이 작동 주파수가 증가할수록 최적 밸브 개방수가 증가하는 결과가 나타난다.

Fig. 1 (a)와 (b)의 결과를 비교해보면, 네온을 작동 유체로 하는 경우에 최적 밸브 개방수가 더 큰 것으로 나타났다. 이는 헬륨과 네온의 밀도 차이로부터 기인한다. 헬륨은 네온에 비해 밀도가 낮기 때문에 더 작

은 밸브 개도에서 최적의 유동 저항을 겪게 되는 것으로 사료된다. 추후 이론 연구를 통해 보다 명확한 원인 규명이 가능할 것으로 생각된다.

### 3.3. 열부하 시험 결과

Fig. 2는 각각의 작동주파수에서 최적 밸브 개방수에서의 열부하 시험 결과를 보여준다. 헬륨을 작동 기체로 하는 경우에는 3, 4 Hz의 작동 주파수에서 밸브 개방수는 각각 3, 4이다. 작동 주파수가 2 Hz인 경우에는 무부하 온도가 매우 높게 나타났기 때문에 열부하 시험을 수행하지 않았다. 네온을 작동 기체로 하는 경우에는 2, 3, 4 Hz의 작동 주파수에서 밸브 개방수

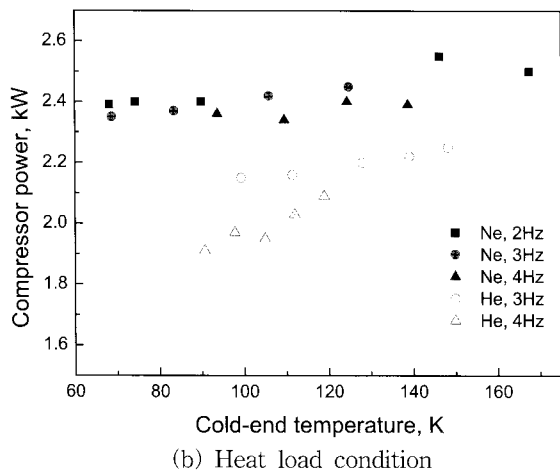
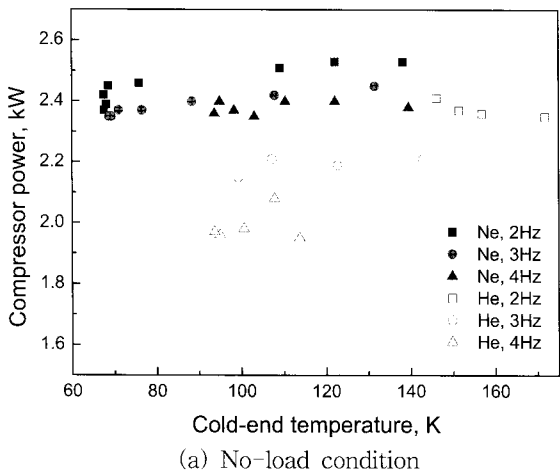


Fig. 4 Measurement of compressor power.

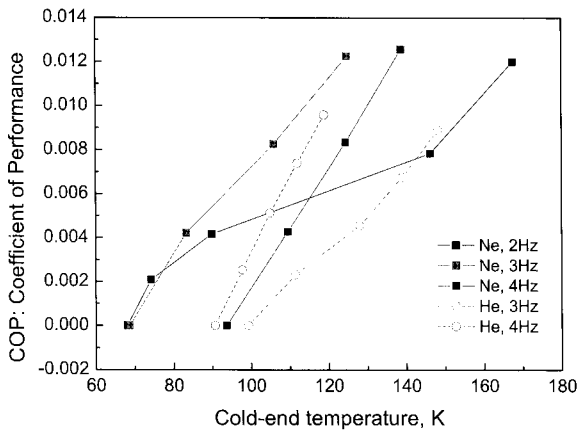


Fig. 5. Coefficient of Performance (COP).

는 각각 5, 8, 8이다. 작동 주파수가 2 Hz인 경우에는 밸브 개방수가 5와 6인 경우에 거의 유사한 무부하 온도가 측정되었으나, Fig. 1 (b)에 나타난 바와 같이 개방수가 6과 7인 경우에 온도 차이가 급격하게 나타나기 때문에 열부하에 따른 안정성을 고려하여 밸브 개방수를 5로 선정하여 실험을 진행하였다.

헬륨과 네온의 두 가지 경우에 모두 작동주파수가 증가할수록 열부하 증가 대비 온도 증가량이 감소하는 경향이 나타났다. 특히, Fig. 2 (b)의 네온의 결과에서 작동주파수가 2 Hz인 경우와 3 Hz인 경우를 비교해 보면, 무부하 온도는 거의 유사한 반면에 3 Hz인

경우에 열부하량이 증가하더라도 저온부 온도 증가 정도가 낮은 것으로 나타났다.

### 3.4. 압력 파형 측정

Fig. 3은 헬륨과 네온을 작동 유체로 하는 경우에 작동 주파수에 따른 압력파형 측정 결과를 보여준다. 압축기 고압부(PH), 저압부(PL), 재생기 입구(Ps), 맥동관 고온부(Ppt)에서의 압력을 측정하였다. 재생기 입구에서의 압력은 모든 경우에 압축기의 고압과 저압의 압력을 잘 따르고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 맥동 압력을 생성하기 위한 로터리 밸브에서의 압력 강하는 없음을 의미한다.

헬륨의 경우에는 재생기 입구에서의 압력(Ps)과 맥동관 고온부(Ppt)에서의 압력이 큰 차이를 보이지 않는 반면에, 네온의 경우에는 재생기 입구에서의 압력 파형은 삼각파 형태와 유사한 반면에 맥동관 고온부의 압력 파형은 삼각파 형태에 가까워지는 것으로 측정되었다. 이는 네온의 경우에 재생기와 맥동관에서의 컴플라이언스 효과가 더 크게 나타남을 의미한다. 이는 동일한 체적에서는 기체 상수가 작을수록 체적의 컴플라이언스가 더 크기 때문이다.

헬륨과 네온의 또 다른 차이점은 작동 주파수에 대한 압력파형 변화의 영향이다. 작동 주파수가 증가하더라도 네온은 고압과 저압의 압력 값이 크게 변하지 않아 고압과 저압의 압력차 변화가 크지 않은 반면에, 헬륨의 경우에는 작동 주파수가 증가할수록 고압과 저압의 압력차가 크게 감소하는 경향이 나타난다. 헬륨이 네온에 비해 밀도가 작기 때문에 작동 주파수에 따른 체적 유량 변화가 크기 때문인 것으로 사료된다.

### 3.5. 압축기 소비 전력 및 성적계수

Fig. 4는 사용된 압축기의 소비 전력 측정 결과를 보여준다. 측정 결과는 무부하 조건인 경우와 열부하 조건인 경우로 구분하여 각각 저온부 온도에 대하여 소비 전력 변화를 나타내었다. 일반적으로 저온부 온도가 증가할수록 압축기 소비전력은 증가한다(9). Fig. 4의 측정 결과에서, 네온은 작동주파수와 저온부 온도에 크게 영향을 받지 않고, 2.4 kW 내외의 소비 전력이 측정되었다. 헬륨은 전반적으로 네온에 비해 소비 전력량이 작고, 온도가 증가할수록 소비전력이 증가하는 현상이 네온에 비해 비교적 뚜렷하게 나타난다. 압력 파형 변화와 마찬가지로 네온은 헬륨에 비해 작동 환경에 대해 압축기 소비전력의 변화가 둔감한 것으로 나타났다.

측정된 냉동 능력과 압축기의 소비전력으로부터 성적계수(COP: Coefficient of Performance) 계산한 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 작동 주파수가 낮은 3 Hz의 경우에는 네온의 경우에 성적계수가 더 크게 나타났지만, 작동 주파수가 높은 4 Hz의 경우에는 헬륨을 사용하는 경우에 더 큰 COP를 얻을 수 있었다. 이는 Fig. 4에 나타난 것처럼 네온은 작동주파수에 따라 압축기 입력 전력 변화가 거의 없지만, 헬륨은 작동 주파수가 증가할수록 압축기의 입력전력이 감소하기 때문이다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 동일한 압축기와 저온부로 구성된 1 단 GM형 맥동관 냉동기에 작동기체를 헬륨과 네온으로 하여 냉각 성능 실험을 수행하였고, 연구 결과로부터 다음의 결론을 얻었다.

(1) 헬륨과 네온 모두 작동주파수가 증가할수록 최

적 밸브 개방수는 증가하는 경향이 나타났고, 네온의 경우에 헬륨보다 더 큰 밸브개도에서 최적 냉각 특성을 보여주었다.

(2) 열부하 시험 결과 작동주파수가 증가할수록 열부하 증가량에 대한 온도 증가량이 감소하는 것으로 나타났다.

(3) 압력 파형 측정 결과, 네온을 작동 유체로 하는 경우에 컴플라이언스 효과가 더 크게 나타나고 작동주파수가 증가하더라도 압축기의 고압과 저압의 압력차가 크게 영향을 받지 않는 것을 확인하였다.

(4) 압축기의 소비전력 측정결과, 네온이 헬륨보다는 전력 소비량이 크지만, 저온부 온도에 따른 영향이 크지 않은 것으로 나타났다.

(5) 압력 파형과 압축기 소비전력의 측정 결과로부터 네온은 헬륨에 비해 작동주파수 및 저온부 온도와 같은 작동 환경에 대한 영향이 크지 않음을 확인하였다.

(6) 작동 유체로 네온을 사용하는 경우에 맥동관 냉동기의 성능향상이 가능할 것으로 기대되며, 고온초전도체 영역인 80 K급 1단 맥동관 냉동기에서 작동 유체로써의 네온의 효율성이 클 것으로 기대된다. 보다 명확한 해석 및 설계를 위해서는 추후 이론 연구가 수반되어야 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 전략기술개발사업의 일환으로 수행 중인 초고진공 펌프 개발 과제에 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

[1] H.J.M. ter Brake and G.F.M. wiegerinck, "Low-power cryocooler survey", *Cryogenics*, vol. 42, pp. 705-718, 2002.

[2] L.M. Qiu, Y.L. He, Z.H. Gan, X.B. Zhang, G.B. Chen, "Regenerator performance improvement of a single-stage pulse tube cooler reached 11.1 K", *Cryogenics*, vol. 47, pp. 49-55, 2007.

[3] P.C.T. de Boer, "Maximum attainable performance of pulse tube refrigerators", *Cryogenics*, vol. 42, pp. 123-125, 2002.

[4] K. Wang, Y.L. Ju, X.S. Lu, A.Z. Gu, "On the performance of copper foaming metal in the heat exchangers of pulse tube refrigerator", *Cryogenics*, vol. 47, pp. 19-24, 2007.

[5] C. Wang, S.Q. Wang, J.H. Cai, Z. Yuan, "Experimental study of multi-bypass pulse tube refrigerator", *Cryogenics*, vol. 35, pp. 555-558, 1995.

[6] G.B. Chen, K. Tang, Y.H. Huang, Z.H. Gan, R. Bao, "Refrigeration performance enhancement of pulse tube refrigerators with He-H<sub>2</sub> mixtures and Er<sub>3</sub>NiH<sub>x</sub> regenerative material", *Cryogenics*, vol. 44, pp. 833-837, 2004.

[7] Z.H. Gan, G.B. Chen, G. Thummes, C. Heiden, "Thermodynamic performance prediction of pulse tube refrigeration with mixture fluids",

*Cryogenics*, vol. 40, pp. 261-267, 2000.

[8] Z.H. Gan, G.B. Chen, G. Thummes, C. Heiden, "Experimental study on pulse tube refrigeration with helium and nitrogen mixtures", *Cryogenics*, vol. 40, pp. 333-339, 2000.

[9] H. Kim, J.H. Park, "Research on fast cool-down of orifice pulse tube refrigerator by controlling orifice valve opening", *Superconductivity and Cryogenics*, vol. 12, 2010.

[10] Swagelok metering valve catalog, "http://www.swagelok.com"

### 저 자 소 개



김효봉(金孝峰)

1960년 4월 10일생, 2000년 대전산업대 공대 기계공학과 졸업, 2002년 충남대 공대 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 기계공학과 박사과정, 현재 한국기계연구원 선임기술원.



박종호(박종호)

1951년 03월 06일생, 1973년 전북대 공대 기계공학과 졸업, 1975년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 1985년 08월 30일 동 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 1978년 06월 ~ 현재 충남대학교 기계공학과 교수.