

# Performance test of 100 W linear compressor

J. Ko\*, D. Y. Koh, S. J. Park, H. B. Kim, Y. J. Hong, and H. K. Yeom

Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon, Koear

(Received 21 August 2013; revised or reviewed 12 September 2013; accepted 13 September 2013)

## Abstract

In this paper, we present test results of developed 100 W class linear compressor for Stirling-type pulse tube refrigerator. The fabricated linear compressor has dual-opposed configuration, free piston and moving magnet type linear motor. Power transfer, efficiency and required pressure waveform are predicted with designed and measured specifications. In experiments, room temperature test with flow impedance is conducted to evaluate performance of developed linear compressor. Flow impedance is loaded to compressor with metering valve for flow resistance, inertance tube for flow inertance and buffer volumes for flow compliance. Several operating parameters such as input voltage, current, piston displacement and pressure wave are measured for various operating frequency and fixed input current level. Behaviors of dynamics and performance of linear compressor as varying flow impedance are discussed with measured experimental results. The developed linear compressor shows 124 W of input power, 86 % of motor efficiency and 60 % of compressor efficiency at its resonant operating condition.

**Keywords :** Linear compressor, Gas force, Flow impedance, Resonance

## 1. 서 론

선형 압축기는 소형 극저온 냉동기인 스티어링 냉동기 혹은 스티어링형 맥동관 냉동기에서 맥동 압력 및 왕복 유동을 생성하는 필수 구성품이다. 선형 압축기에서 피스톤은 선형 모터에 인가되는 교류 전원에 의해 실린더 내부에서 왕복 운동을 한다. 이 때, 실린더 내부의 압축 공간에 압력 변화가 일어나고 이로 인한 피스톤 양단의 압력차에 의한 가스힘(Gas force)은 피스톤 운동을 결정하는 주요 변수이다. 가스힘은 피스톤의 진동 시스템의 강성과 감쇠 효과에서 기계적인 효과에 더하여 부가적인 효과로 나타나며 선형압축기의 공진 운전 조건, 전달 일률, 효율을 결정하는 가장 큰 변수이다 [1, 2].

설계, 제작된 선형압축기의 성능 시험을 위해서는 몇 가지 방법이 있다. 첫 째, 저온 팽창기를 연결하여 극저온 냉동기로 운전하는 방법은 냉동기의 냉각 시험을 동시에 진행할 수 있는 장점이 있지만, 압축기와 팽창기의 성능이 독립적으로 분석하기 어렵기 때문에 압축기만의 성능을 확인하기에는 어려움이 있다. 둘째, 제작된 선형 압축기에 기계적인 운동을 인가하여 생산되는 전력으로부터 성능을 평가하는 발전 모드 시험이 있지만, 이 방법에서는 선형 모터의 성능 평가에 초점이 맞추어져 압축기 전체의 성능을 평가하기에는 제한적이다. 마지막으로, 상온 조건에서 선형 압축기에 유동 임피던스(flow impedance)를 인가하여 운전 시험을 수행하는 방법이 있다. 기존의 선형 압축기에 대한 해석 및 설계 연구를 통하여 선형압축기는 공진 운전 조건에서 전달 일률 및 효율이 최대로 나타남을 확인하였으며, 사양이 결정된 선형압축기의 공진 운전을 위해서는 압축 공간에서의 압력 진폭 및 위상이 일정한 조건을 충족시켜야 함이 확인되었다[3]. 즉, 선형압축기의 공진 운전을 만족하기 위한 압력 파형이 생성되도록 유동 임피던스를 인가하면 실제 운전 조건에서 압축기의 성능을 독립적으로 평가할 수 있음을 의미하며, 최근 선형 압축기

개발연구에서는 성능평가를 위해 많이 사용되고 있다 [4]. 다만, Zou *et al.*의 연구에서는 공조용 선형 압축기에 대하여 힘과 속도를 측정하는 방식을 적용한데 반해, 본 연구에는 극저온 냉동기용 선형압축기를 대상으로 하고, 복잡한 힘 측정을 배제하는 방식으로 실험이 진행되었다. 상온에서 진행되는 유동 임피던스 부하 조건에서의 선형 압축기 성능 시험은 두 가지 측면에서 의미가 있다. 첫 째는 개발된 선형압축기 자체의 성능 평가로부터 설계 사양을 만족하는 지 확인할 수 있다. 다음으로는 선형압축기를 공진 주파수에서 작동하도록 하는 상온의 유동 임피던스 조건은 냉동기의 저온부를 설계하는 데 있어 유용한 참고 자료로 활용된다. 저온부의 형상 및 운전 조건으로 결정되는 유동 임피던스를 상온 시험에서의 조건과 동일하도록 하면 선형압축기의 능력을 최대한 이용하여 냉동기를 운전할 수 있게 된다.

본 연구에서는 100 W급 선형 압축기의 제작 및 상온 성능시험을 수행하였다. 설계, 제작된 선형압축기의 사양으로부터 작동 주파수에 따른 압축기 성능을 예측하였다. 성능시험에서는 상온 임피던스 부하 조건에서 압축기에 인가되는 전압 및 전류, 피스톤 변위, 압축 공간에서의 압력 파형을 측정하여 유동 임피던스 부하 조건에 따른 선형 압축기의 거동 특성 및 성능 변화에 대하여 토의하였다.

## 2. 선형압축기 제작 및 성능예측

제작된 선형압축기는 두 개의 피스톤이 서로 반대 방향으로 선형 왕복 운동을 하며 선형 모터의 영구자석이 움직이는 복동 압축식 가동 자석형(double-acting moving magnet type) 구조를 갖는다. 조립이 완료된 압축기는 직경 100 mm, 길이 250 mm의 크기로 Fig. 1에 외형 사진이 있다. 설계 및 측정된 제작 사양은 Table 1에 나타내었다. 선형 모터 설계에서는 요크 재질로 순철을

\* Corresponding author: jsko@kimm.re.kr

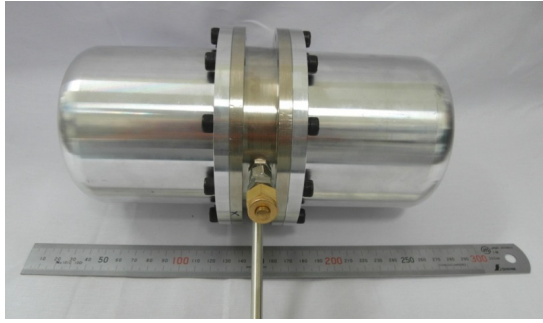


Fig. 1. Photo of fabricated linear compressor.

TABLE I  
SPECIFICATIONS OF FABRICATED LINEAR COMPRESSOR.

	Designed( Measured)
Effective resistance ( $\Omega$ )	0.46(0.53)
Effective inductance (mH)	4.68(5.20)
Thrust constant (N/A)	10.06
Rated current (Arms)	4
Operating frequency (Hz)	40 ~ 60
Moving mass (g)	250(185)
Flexure	Spring magnet
Piston diameter (mm)	16
Piston stroke (mm)	12

설계하였으나 제작에서 전기강관을 사용함으로써 유효 인덕턴스와 전기저항이 설계에 비해 증가하였고, 가동자는 설계에 비해 가볍게 제작되어 185 g의 질량을 갖는 것으로 측정되었다. 유효 인덕턴스와 전기저항은 LCR 미터(4235 LCR meter, WAYNE KERR)를 이용하여 측정되었다. 가동자는 질량이 작은 경우에는 부가 질량을 통해 공진주파수 조절이 가능하기 때문에 질량이 설계값보다 작도록 가공되었으며, 영구자석의 체적을 줄임으로써 가동자 전체 질량을 줄일 수 있었다. 선형압축기의 최대 입력 전력은 허용 피스톤 진폭으로 공진 조건을 만족하도록 운전할 때 얻을 수 있으며, 다음의 식으로부터 계산된다.

$$W_m = f \times \oint (v \cdot i) dt = f \times \left\{ \oint (K_E \cdot i) dt + \oint (R \cdot i^2) dt \right\} \quad (1)$$

여기에서,  $f$ 는 작동주파수,  $K_E$ 는 모터 추력 상수,  $R$ 은 전기저항을 의미한다. 제작에서 변경된 사양을 이용하여 계산한 결과 최대 입력 전력은 40, 50, 60 Hz의 작동주파수에 대하여 각각 102, 122, 143 W로 예측되었다.

### 3. 성능시험

성능시험에서는 제작된 선형 압축기에 유동 임피던스 부하 요소를 연결한 후에 전류를 인가하며 입력 전압 및 전류, 피스톤 변위, 압축 공간 내부 압력 변화를 측정하였다. 피스톤에 가속도 센서(PCB, 353B18)를 설치하여 가속도 측정 파형의 정현파 곡선 맞춤으로부터 진폭과 위상이 결정되고, 변위와 가속도 사이의 이중 미분 관계로부터 피스톤 변위의 진폭과 위상이 환산된다. 압축 공간 내부의

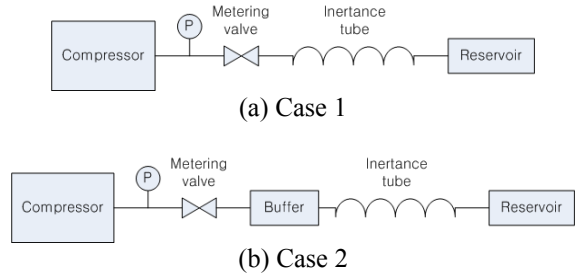


Fig. 2. Schematic diagram of test setup.

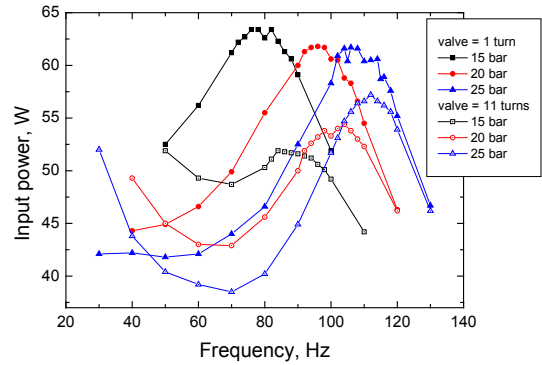


Fig. 3. Measurement of input power (case 1).

압력 파형은 압축기와 부하 요소 사이의 연결관 중간에 동압력 센서(PCB, 112A21)를 설치하여 측정하였다. 연결관으로는 1/4 인치 외경, 80 mm 길이의 관을 사용하였으며, 연결관에서의 유동 저항, 컴플라이언스 효과, 관성 효과에 의한 압력 파형의 오차는 매우 작다.

유동 임피던스는 기계적 진동시스템에서의 스프링, 감쇠기, 질량에 대응하여 버퍼 체적을 이용한 컴플라이언스, 미세 조절 밸브 혹은 오리피스를 이용한 유동 저항, 직경이 작고 길이가 긴 관을 이용한 관성 효과의 조합에 의해 결정된다. 성능시험에서는 컴플라이언스 효과를 위하여 일정 체적을 갖는 버퍼를, 유동 저항을 위하여 미세 조절 밸브(Swagelok, 4L series, Cv: 0 ~ 0.16)를, 관성 효과를 위하여 외경 1/8 inch, 길이 1.5 m의 구리관을 사용하였다. 이 때, 유동 저항은 제작사에서 제시하는 밸브의 유량 계수( $C_v$ )로부터 도출이 가능하며, 컴플라이언스 효과는 버퍼의 내부 체적과 운전 온도에 의해  $V/RT$ 로 계산되고, 관성 효과는 관성관의 내경과 길이로부터  $L/A$ 에 의해 계산된다. 실험에 사용된 구성 요소의 사양으로부터 계산되는 컴플라이언스와 관성 효과는 각각  $8.025 \times 10^{-11} m^{-1}s^{-2}$  과  $6.807 \times 10^5 m^{-1}$ 이다.

성능시험에서는 Fig. 2에 나타난 두 가지 경우의 부하 요소 조합에 대하여 시험을 수행하였다. Case 2의 경우에는 많은 유량으로 인하여 관성관에서 발생하는 과도한 유동 저항 효과를 완화하기 위하여 Case 1에 비해 0.05 리터의 체적을 갖는 버퍼가 미세 조절 밸브와 관성관 사이에 설치되어 있는 구조이다.

#### 3.1. 운전 특성 시험

Case 1에 대한 시험에서는 밸브 개도 및 충전 압력에 의한 운전 특성 변화를 측정하였다. 15, 20, 25 bar의 충전 압력 범위와 30 ~ 130 Hz의 작동 주파수 범위에서 운전 시험을 진행하였고, 인가 전류의 크기는 모든 실험 조건에서 4 A<sub>rms</sub>로 고정하였다.

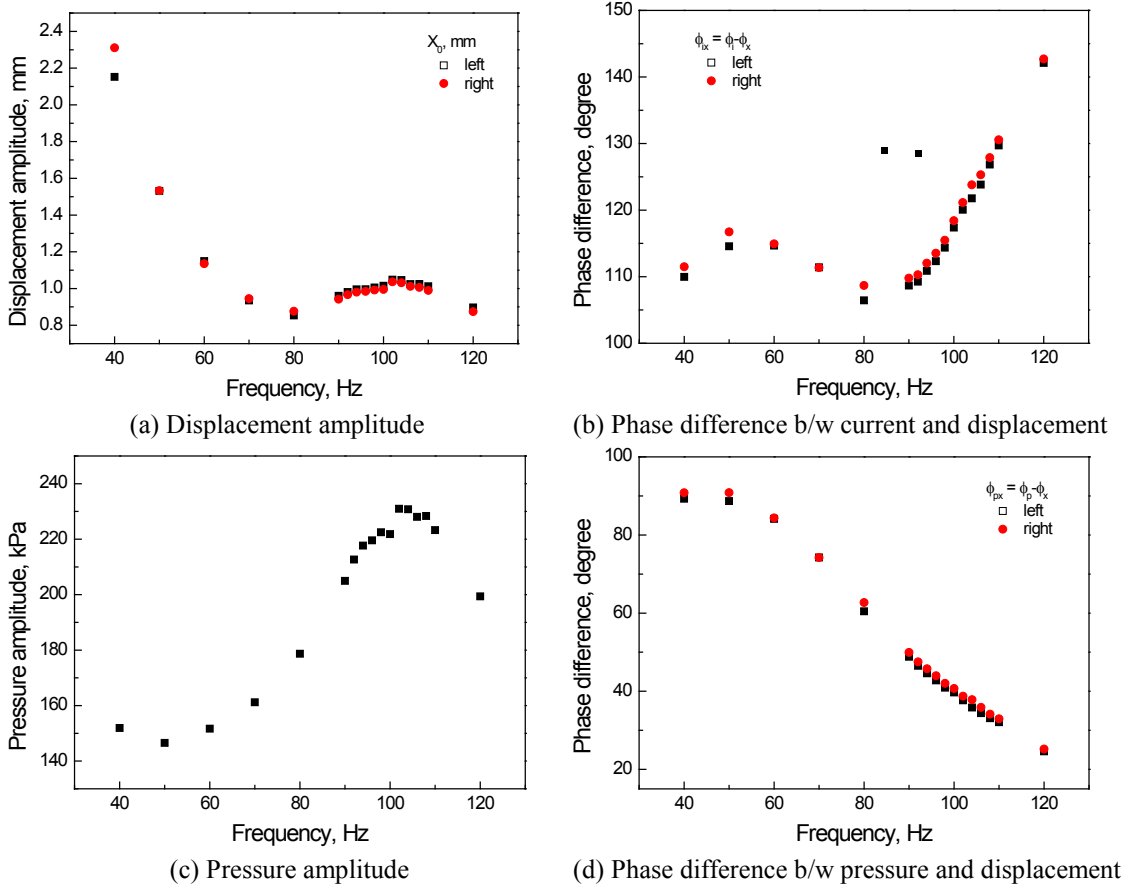


Fig. 4. Measurement of piston displacement and pulsating pressure (Case 1).

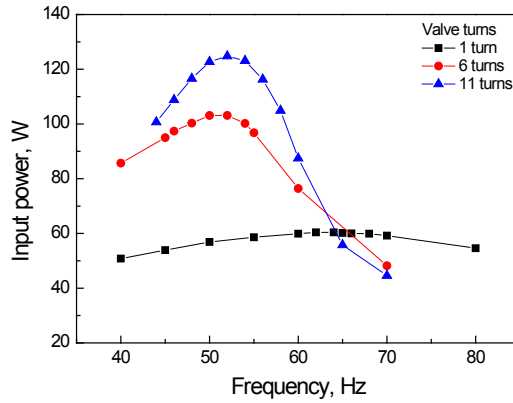


Fig. 5. Measurement of input power (Case 2).

Fig. 3은 측정된 입력 전력을 보여준다. 입력 전력은 압축기의 전류 도입선에서 측정된 전압과 전류의 진폭 및 위상차이로부터 다음의 식을 이용하여 계산된다.

$$W_{in} = f \times \int (v \cdot i) dt = \frac{1}{2} V_0 I_0 \cos \phi_v \quad (2)$$

여기에서,  $V_0$ 와  $I_0$ 는 각각 전압과 전류 진폭이며,  $\phi_v$ 은 전압, 전류 사이의 위상차를 의미한다. 입력 전력 변화 측정 결과, 기존의 여러 연구에서 밝혀진 것처럼 충전 압력이 증가할수록 입력전력이 최대가 되는 최적 주파수가 증가하는 경향이 확연히 나타난다 [5]. 이는 동일한 피스톤 변위 혹은 압력비에 대하여 충전 압력이 높을수록 압력

진폭의 크기가 증가하여 가스 스프링 효과가 크게 나타나기 때문이다. 가스 스프링 효과는 피스톤 운동에 의해 압축 공간의 체적이 감소하면 압력이 상승하고 이로 인하여 기계적인 스프링에서 운동 방향과 반대되는 방향으로 스프링 힘이 작용하는 것과 같이 피스톤 운동과 반대되는 방향으로 가스힘이 작용하는 현상을 의미한다.

밸브 개방수의 영향에서는 밸브 개방수가 1인 경우에 비해 11인 경우에 오히려 최적 주파수가 증가하는 경향이 나타난다. 미세 조절 밸브의 개방수가 작은 경우에 유동 저항이 크기 때문에 가스 스프링 효과가 더 크게 나타나서 최적 주파수가 증가해야 할 것으로 예측할 수 있지만, 실험에서 사용된 관성관은 유동 관성 효과뿐만 아니라 유동

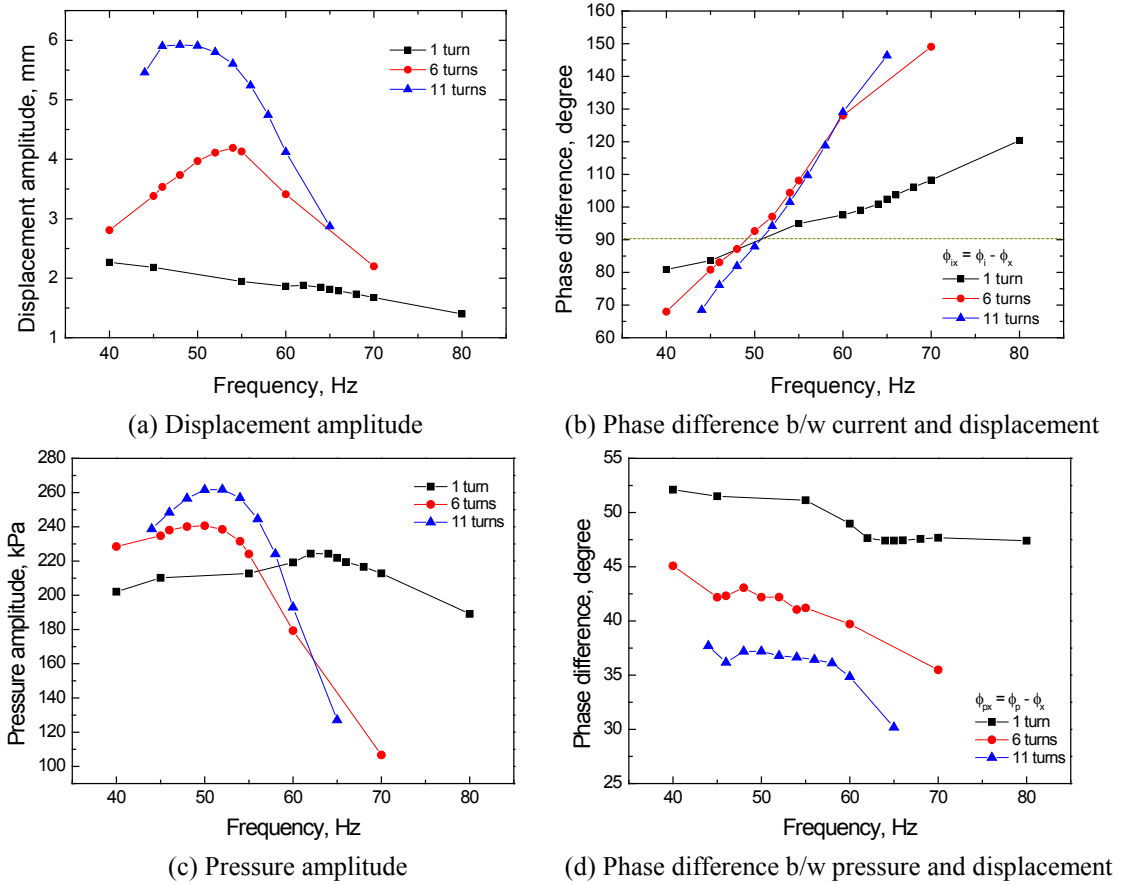


Fig. 6. Measurement of piston displacement and pulsating pressure (Case 2).

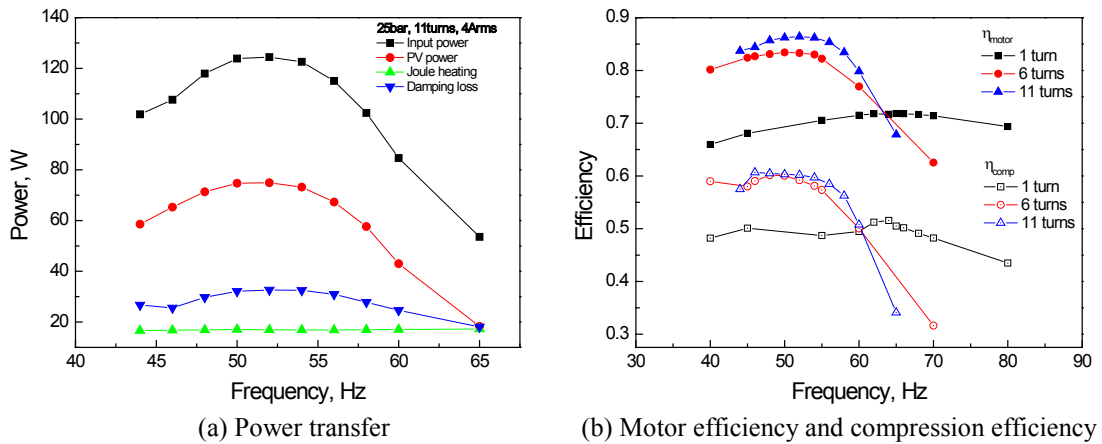


Fig. 7. Results of power transfer and efficiencies (Case 2).

저항 효과도 동시에 나타내기 때문이다. 밸브 개방수가 1인 경우에는 밸브에서의 압력강하가 크기 때문에 관성관에서의 유량이 작아 관성관에 의한 유동 저항이 작게 나타날 수 있고, 밸브 개방수가 11인 경우에는 밸브에서의 압력강하가 작기 때문에 상대적으로 관성관에 많은 유량의 기체가 흐를 수 있고 이는 유동 저항이 증가하는 것으로 나타날 수 있다. 선형 압축기 입장에서 전체 유동 저항은 밸브와 관성관에서의 유동 저항이 더해져 나타나기 때문에 밸브 개방수가 큰 경우에 오히려 전체 유동 저항이 증가하여 최적 주파수가 증가하는 것으로 생각된다.

Fig. 4는 case 1의 시험 중 20 bar 충전 압력, 밸브

개방수 11 조건에서 측정된 피스톤 변위와 압력 파형의 진폭 및 위상차 측정 결과를 보여준다. 최적 주파수인 105 Hz 부근에서 피스톤 진폭이 1 mm 내외로 작은 값임에도 불구하고 압력 진폭은 약 230 kPa로 높게 측정되었다. 입력 전류와 피스톤 변위 사이의 위상차는 모든 작동주파수에서 90° 이상의 값을 보이고 있어 항상 공진주파수보다 높은 주파수에서 운전되고 있음이 확인되었다.

Fig. 3과 4의 결과로부터 case 1의 부하 조건은 선형 압축기에 과도한 유동 임피던스가 추가되어 있는 것으로 판단되었다. 전체 유동 임피던스를 줄이기 위하여, 특히,

관성관에서의 유동 저항 효과를 줄이기 위하여 case 2 시험에서는 Fig. 2 (b)에 나타난 바와 같이 미세 조절 밸브와 관성관 사이에 0.05 L의 내부 체적을 갖는 버퍼를 설치하였다. 버퍼를 사용함으로써 밸브를 통과한 후 관성관으로 유입되는 가스 유량을 완충하는 컴플라이언스 효과로 나타나 case 1에 비해 관성관에서의 유량을 감소시키고 이는 관성관에서의 유동 저항 감소 효과로 나타난다. Fig. 5는 case 2의 구성, 25 bar의 충전 압력, 4 A<sub>rms</sub>의 입력 전류 조건에서 밸브 개방수에 따른 입력 전력 측정 결과를 나타내었다. 밸브 개방수가 6, 11인 조건에서 특정 주파수에서 입력 전력이 최대가 되며, 목표 성능인 100 W 이상의 입력 전력을 소모함을 확인하였다. 반면에 밸브 개방수가 1인 조건에서는 주파수 변화에 대한 입력 전력 변화가 크지 않고, 그 값도 50 ~ 60 W 범위로 목표 성능에 도달하지 못하였다.

Fig. 6은 Fig. 5와 같이 입력 전력이 측정될 때의 피스톤 변위와 압력 파형의 진폭과 위상차 측정 결과이다. 밸브 개방수가 커질수록 피스톤 진폭은 큰 폭으로 증가하는 반면, 상대적으로 압력 진폭의 변화는 크지 않은 것으로 나타난다. 또한, 밸브 개방수가 클수록 압력과 피스톤 변위 사이의 위상차가 작아진다. 전류와 피스톤 변위 사이의 위상차는 모든 밸브 개방수에 대하여 50 ~ 52 Hz에서 90°의 값을 보여 공진주파수는 밸브 개방수의 영향을 크게 받지 않는 것으로 확인되었다. 밸브 개방수가 11인 조건에서 51 Hz의 공진주파수, 5.9 mm의 피스톤 진폭, 124 W의 입력전력이 측정되어 100 W 입력 전력, 40 ~ 60 Hz의 공진 주파수, 피스톤 변위 6 mm인 목표 및 설계 성능을 만족하는 것을 확인하였다.

### 3.2. 효율 계산

선형 압축기의 전압, 전류, 피스톤 변위, 압력 측정 결과로부터 일률 전달량 및 효율 계산이 가능하다. 입력 전력 ( $\dot{W}_{in}$ )은 식 (2)를 이용하여 계산되고, 작동 기체로 전달되는 PV 일 ( $\dot{W}_{PV}$ ), 전기 저항에 의한 손실 ( $\dot{W}_R$ ), 피스톤 마찰 및 간극을 통한 누설로 인한 감쇠 손실 ( $\dot{W}_{damp}$ )은 각 측정 변수의 진폭 및 위상으로부터 계산되고, 모터 효율 ( $\eta_{motor}$ ) 압축 효율 ( $\eta_{comp}$ )은 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{W}_{PV} = f \times \oint \left( p \cdot A \cdot \frac{dx}{dt} \right) dt = \frac{1}{2} \omega X_0 P_0 A_p \sin \phi_{px} \quad (3)$$

$$\dot{W}_R = f \times \oint (R \cdot i^2) dt = RI_{rms}^2 \quad (4)$$

$$\dot{W}_{damp} = \dot{W}_{in} - \dot{W}_{PV} - \dot{W}_R \quad (5)$$

$$\eta_{motor} = (\dot{W}_{in} - \dot{W}_R) / \dot{W}_{in} \quad (6)$$

$$\eta_{comp} = \dot{W}_{PV} / \dot{W}_{in} \quad (7)$$

여기에서,  $X_0$ 는 피스톤 변위 진폭,  $P_0$ 는 압력진폭,  $A_p$ 는 피스톤 단면적,  $\phi_{px}$ 는 압력과 변위 사이의 위상차를 의미한다. 식 (2) ~ (7)을 이용하여 계산된 일률 및 효율 결과는 Fig. 7에 보이는 바와 같다. 전기 저항에 의한 열손실은 주파수에 관계없고, 특히 PV 일의 크기가 공진 주파수 범위를 벗어나면 급속히 감소하는 것으로 나타난다. 이러한 영향으로 모터 효율 및 압축효율 또한 공진주파수에서 최대가 되는 것으로 나타난다. 본 연구에서 개발된 선형 압축기는 모터 효율은 86 % 만족스러운 결과를 얻었지만, 압축 효율은 60 %로 일반적으로 잘

만들어진 선형 압축기의 효율인 70 ~ 75 % 수준에는 미치지 못하였다. 이는 감쇠 손실이 크기 때문이며, 피스톤의 마찰 손실을 줄이는 개선을 통해 압축 효율 향상이 기대된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 소형 극저온 냉동기에서 맥동 압력 및 왕복유동 생성을 위해 필수 구성품인 선형 압축기의 제작 및 성능시험 결과를 포함하고 있다. 입력전력 기준으로 100 W급 선형 압축기를 제작하였으며, 복잡한 형상의 저온 팽창부 없이 상온에서도 압축기의 성능을 독립적으로 측정할 수 있는 유동 임피던스 부하 시험을 수행하였다. 성능 시험 결과 유동 임피던스 조건에 따라 선형 압축기의 성능이 민감하게 영향을 받는 것이 실험적으로 확인되었으며, 특정 부하 조건에서 압축기의 성능이 설계 및 목표 사양을 만족하는 것을 확인하였다. 역으로, 압축기의 성능이 만족하는 유동 임피던스 조건은 저온 팽창부의 설계 및 운전 조건 설정에 기초 자료로 활용되어 선형 압축기의 성능을 최대로 활용하는 극저온 냉동기 개발이 가능할 것으로 기대된다. 본 연구에서 개발된 선형 압축기의 효율은 86 %의 모터효율과 60 %의 압축 효율을 보였으며, 가스 베어링 구조 개선 및 플렉서 (flexure) 베어링 적용을 통한 마찰 손실을 저감하는 방향으로 개선이 되면 압축 효율 향상이 기대된다. 고효율 극저온 냉동기의 개발을 위해서는 저온 팽창부의 최적 설계뿐만 아니라 일종의 에너지원인 선형 압축기의 능력을 최대한 효율적으로 활용하는 것이 요구되며, 본 연구는 선형압축기의 효율 극대화화 및 저온 팽창부와와의 부하 정합 (load matching)의 기초 연구로서의 의의가 있다.

## ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM) and the Ministry of Science, ICT & Future Planning (MSIP).

## REFERENCES

- [1] M. K. Heun, S. A. Collins, D. L. Johnson, R. G. Ross, Jr., "Investigation of gas effects on cryocooler resonance characteristics", *Cryocooler 9*, pp. 421-430, 1997.
- [2] G. S. Choi and K. J. Kim, "Analysis of nonlinear dynamics in a linear compressor", *JSME Int. J. C-Mech. Sy.*, vol. 43, pp. 545-552, 2000.
- [3] J. Ko, H. Kim, S. J. Park, Y. J. Hong, H. Yeom, D. Y. Koh, "Analysis of electric circuit using capacitor for driving linear compressor", *Progress in Superconductivity and Cryogenics*, vol. 14, pp. 43-47, 2012.
- [4] H. Zou, L. Zhang, G. Peng, "Efficiency measurement of linear oscillation motor with gas load", *Int. J. Appl. Electrom.*, vol. 34, pp. 109-118, 2010.
- [5] Y. J. Hong, S. J. Park, H. B. Kim, H. K. Yeom, "The numerical analysis of performance of the Stirling cryocooler", *Superconducting and cryogenics*, vol. 4, pp. 58-62, 2002