

직렬 연결된 PZT구동 마이크로 압축기의 최적 설계

이 일 환, 윤 재 성, 김 민 수

서울대학교 기계항공공학부

Optimal Design of Serial Connected PZT driven Micro Compressor

Il Hwan Lee, Jae Sung Yoon, Min Soo Kim

Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

ABSTRACT: Optimal design of serial connected PZT driven micro compressor was investigated. Modeling equations were derived using energy equation and mass conservation equation. The results show that mass flow rate was increased as number of connected micro compresses is increased. As pressure difference between suction port and discharge port in compressor group is increased, connected compressors have much more mass flow rate than single compressor. Mass flow rate is also increased as driving frequency is increased. And optimal design scale is suggested for highest efficiency or highest mass flow rate.

Key Words: Micro compressor (마이크로 압축기), Piezoelectric actuator (압전 액츄에이터), Serial Connection (직렬연결)

기호설명

A_v : 밸브 유량통과 면적, m^3
 C_d : 밸브 오리피스 계수
 I : 관성모멘트, $kg \cdot m^2$
 I_0 : 단면모멘트, m^4
 L_v : 외팔보에서 유로까지 거리, m^3
 \dot{m} : 질량유속, kg/s
 n : 폴리트로픽 가스 상수
 P_c : 압축기 챔버압력, Pa
 V_c : 압축기 챔버부피, m^3
 L : 압축기 챔버의 길이, m

c : 챔버
 d : 토출
 i : 흡입
 m : 중간
 o : 토출
 s : 흡입

그리스문자

ρ : 밀도, kg/m^3
 θ : 밸브 각도, rad
 γ : 압축비
 δ : 길이변화량, m^2

하첨자

1. 서론

최근 들어 전자장치 냉각을 위한 마이크로 열 시스템에 대한 많은 연구들이 진행되고 있다. 전자장비들의 성능이 발전함에 따라 소형화와 집적

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-8362

E-mail address: minskim@snu.ac.kr

화가 이루어지고 있으며 이로 인해서 과거에는 크게 문제가 되지 않았던 전자장비에서의 열유속 해결이 큰 문제로 떠오르고 있다.

전자장비 자체에서 저전력, 저발열의 설계기술을 위해 노력을 기울이고 있지만, 발생하는 열유속을 자체만으로는 효과적으로 해결하기 어려운 상황이며 이에 MEMS(micro electronic mechanical system)을 이용한 마이크로 액추에이터(micro actuator), 마이크로 펌프(micro pump), 마이크로 밸브등에 관한 연구들이 활발히 진행 중이다.⁽¹⁾

현재 쓰이고 있는 일반적인 칩의 냉각기술인 핀-팬 쿨러(fin-fan cooler)는 그 크기와 성능에 있어서 여러가지 문제가 있다. 일단 용량에 비해 크기가 크고, 먼지 등의 오염원에 노출될 경우 냉각 성능이 많이 저하되게 된다. 노트북 컴퓨터에 많이 쓰이고 있는 히트파이프(heat pipe)는 크기는 작으나 냉각성능에 있어서 획기적인 발전이 없어 전자장비의 고발열을 해결하기는 어렵다. 때문에 기존의 핀-팬 쿨러나 히트파이프만을 이용해서는 냉각성능을 향상시키는 데에는 한계가 있다고 할 수 있다.

이러한 전자장비에 마이크로 냉동기(micro refrigerator)를 사용한다면 칩에서의 열관리를 더 효율적으로 할 수 있을 것으로 생각된다. 뿐만 아니라 냉동기의 소형화는 마이크로 전자장비, 생명공학, 재료과학, 박막제조의 열제어 등 가볍고 작은 열교환기가 요구되는 많은 영역에서 응용될 수 있을 것으로 예상된다.

현재 냉동시스템의 기본요소 중에서 열교환기에 대한 연구는 많이 진행되고 있지만 압축기에 대한 연구는 미진한 실정이다. 그래서 본 연구에서는 이러한 마이크로 압축기 제작을 위하여 압축기의 성능에 미치는 여러 가지 설계변수들에 대해서 그 성능을 예측하여 최적의 형상을 제시하려 한다.

본 연구에서 고려된 마이크로 압축기의 경우 일반 왕복동식 압축기와 다른 방식인 막막구동(membrane actuation)으로 압축을 하기 때문에 왕복동식 압축기에 비해 압축비가 낮다. 때문에 1개의 압축기만을 고려하지 않고 여러 개의 마이크로 압축기를 직렬로 연결한 압축기 군에서 최적의 성능을 가지는 각각의 압축기의 형태와 조건을 제시하려고 한다.

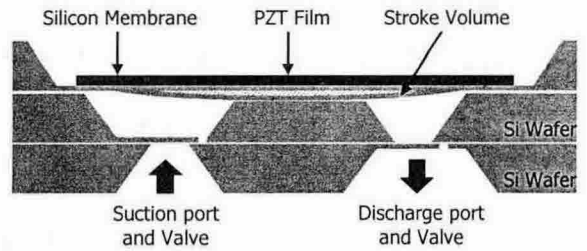


Figure 1. Schematic of a PZT driven micro compressor

2. 모델링 및 시뮬레이션

2.1. 마이크로 압축기의 기본형상

본 연구에서 모델링한 마이크로 압축기의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 본 마이크로 압축기는 MEMS 공정기술을 이용하여 실리콘 웨이퍼(silicon wafer)를 이용하여 제작된다. 압축기제작을 위해서 3장의 웨이퍼가 접합되어 제작되며 이 압축기는 압전소자(PZT)를 이용하여 구동된다. 압전소자는 챔버위의 얇은 실리콘 박막에 부착되어 박막이 압전소자에 의해 변형하여 변위를 가지게 된다. 입구 밸브와 출구밸브는 외팔보 밸브(cantilever valve)로 구성되어 있다.

일반적인 왕복동식 압축기와는 달리 마이크로 압축기의 경우 행정체적이 상대적으로 낮다. 따라서 냉동시스템에서 사용될 수 있는 적정한 압력을 가지게 하기 위해서 마이크로 압축기를 직렬로 연결하는 것을 고려하였다.

2.2. 마이크로 압축기 모델링

마이크로 압축기에서 에너지 보존법칙과 질량 보존법칙을 이용하여 압력변화와 질량보존에 대한 식⁽²⁾을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dP_c}{dt} = -\frac{nP_c}{V_c} \frac{dV_c}{dt} + \frac{nP_c}{\rho_c V_c} (\dot{m}_i - d\dot{m}_e) \quad (1)$$

이 식에서 흡입유량과 토출유량은 오리피스 식을 고려하여 챔버압력에 따라서 다음과 같이 3가

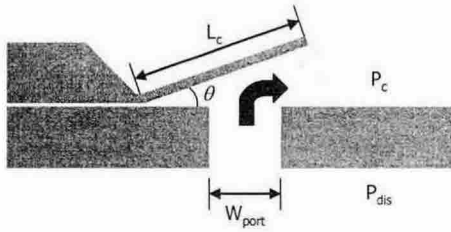


Figure 2. Simple modeling of a cantilever check valve

지 경우로 분류하여 나타낼 수 있다.

$$P_c > P_{dis} :$$

(2)

$$P_c < P_{suc} :$$

(3)

$$P_{dis} > P_c > P_{suc} :$$

(4)

위 식에서 흡입되는 유량과 토출되는 유량은 압력차와 흡입되는 면적에 의해서 결정되는데, 압력차는 식 (1)에 의해서 계산되며, 면적은 외팔보 밸브의 변위가 압력에 의해 생기는 변위를 고려하여 계산할 수 있다. 시뮬레이션에서 고려된 외팔보 밸브의 개형을 Fig. 2에 나타내었다. 외팔보 밸브의 탄성력과 밸브에 가해지는 압력에 의한 힘의 평형을 고려하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$I \frac{d^2 \theta_s}{dt^2} = C_s A_{valve} L_v (P_c - P_{suc}) - \frac{3EI_0}{L} \tan \theta_s \quad (5)$$

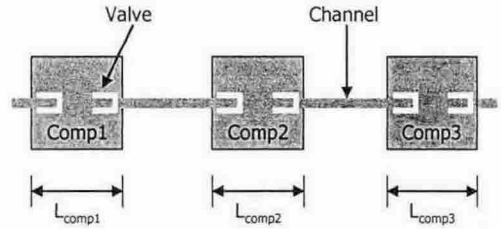


Figure 3. Schematic of serial connected micro compressor

$$I \frac{d^2 \theta_d}{dt^2} = C_d A_{valve} L_v (P_{dis} - P_c) - \frac{3EI_0}{L} \tan \theta_d \quad (6)$$

최종적으로 압축기에서 얻어지는 유량을 얻기 위해서는 위의 식 (1)-(6)를 동시에 계산되어야 하는데 본 연구에서는 4차의 Runge-Kutta 방법으로 위의 식을 계산하였다. 이를 이용하면 압축기의 기하학적인 형상, 흡입압력, 토출압력이 주어졌을 때에 압축기의 압력곡선과 유량을 계산할 수 있다.

하나의 압축기가 아니라 여러 개의 압축기가 직렬로 연결되는 경우에는 전체 압축기 군의 흡입압력과 토출압력이 정해진다면, 중간에 위치한 압축기들의 흡입압력과 토출압력을 질량보존을 이용하여 계산할 수 있다. 마이크로 압축기가 직렬로 연결되었을 때 각각의 흡입 압력과 토출압력은 다르지만 각각의 압축기가 통과시키는 토출 유량은 모두 같아야 한다. 이를 만족시키는 압력 조건을 Secant Method를 이용하여 압축기들에서 유량이 일정하게 하는 각각의 압축기의 흡입압력과 토출압력을 계산하였다.

시뮬레이션에서 압축기는 1번 압축기부터 마지막 압축기까지 순차적으로 구동한다고 가정하여 계산하였으며 본 연구에서는 3개까지 직렬 연결된 마이크로 압축기에 대해서 계산을 수행하였다. 마이크로 압축기의 크기는 중간 압축기의 크

Table 1. Geometry shape of micro compressor

Chamber Shape (mm)	12×12
Height of chamber (μm)	40
Valve Shape (μm)	4000×2000×20
Suction Pressure (kPa)	100
Discharge Pressure (kPa)	120, 125, 130, 135, 140

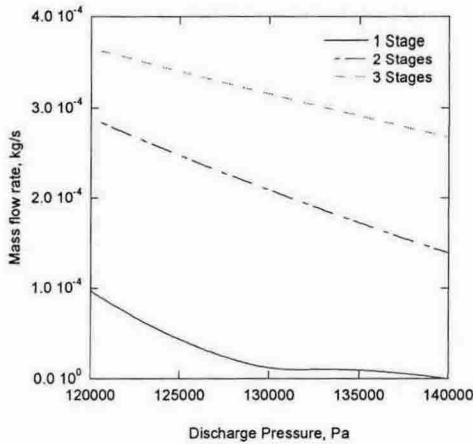


Figure 4. Mass flow rate with respect to number of connected compressors (60 Hz)

기를 기준으로 1번째와 3번째의 압축기의 크기를 각각 다음의 관계에 따라 변화시켰으며 직렬 연결된 마이크로 압축기의 개형을 Fig. 3에 나타내었다.

$$\begin{aligned} L_{comp1} &= L_{comp2} + \delta \\ L_{comp3} &= L_{comp2} - \delta \end{aligned} \quad (7)$$

그 외에 계산에 사용된 변수들을 Table 1에 정리하였다.

3. 시뮬레이션 결과

3.1 연결개수에 따른 유량변화

마이크로 압축기가 1단인 경우와 2~3단이 연결된 경우에 유량의 변화를 계산하여 Fig. 4에 나타내었다. 압축기가 1단인 경우 압력차가 낮은 경우에는 어느 정도의 유량을 가지지만, 압력차가 점점 커짐에 따라서 토출유량이 크게 줄어드는 것으로 나타났다. 반면에 2단과 3단 마이크로 압축기의 경우 압력차가 높아질 때에도 1단 압축기에 비해 상대적으로 큰 유량을 가지는 것으로 계산되었다.

흡입압력과 토출압력의 차이가 적은 경우에는

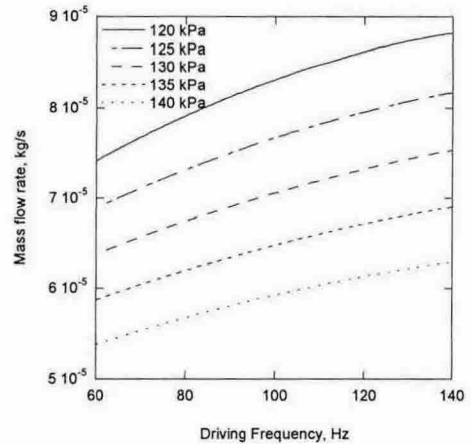


Figure 5. Mass flow rate with respect to driving frequency and discharge pressure

2단 압축기와 3단 압축기와의 유량차이가 그리 크지 않았지만 차이가 점점 커짐에 따라서 유량이 점점 더 크게 차이가 남을 알 수 있다.

3.2 압축기 가진 주파수변화에 따른 유량의 변화.

마이크로 압축기에서 왕복동식의 피스톤의 왕복운동은 박막을 통한 왕복운동과 대응된다. 마이크로 압축기에서 더 높은 속도로 박막을 구동하기 위해서는 압전소자에 인가되는 가진 주파수를 조절하여 원하는 속도로 박막을 구동할 수 있다. 3개의 마이크로 압축기가 직렬로 연결된 경우에 압전소자에 가해지는 주파수의 변화에 따른 유량의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 가진 주파수가 증가함에 따라 유량이 증가하는 양상을 보였지만 점점 그 증가폭이 둔화되는 경향을 보임을 알 수 있다.

3.3 압축기 체적변화에 따른 유량의 변화

마이크로 압축기가 3개가 연결되었을 경우에 각 압축기의 크기 변화에 따른 유량의 변화를 계산하였다. 단순히 유량을 흘려보내는 펌프와는 달리 유체가 압축되는 경우에는 각 압축기의 크기가 전체 압축기군의 성능에 중요한 영향을 미치는 변수라고 생각된다.

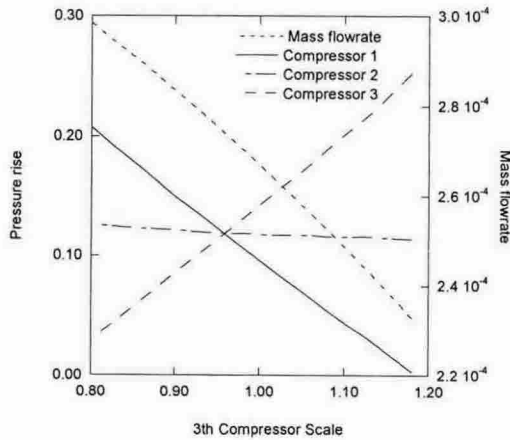


Figure 6. Pressure rise and mass flow rate with respect to compressor scale variation (60 Hz)

압축기의 크기는 두 번째 압축기의 크기기준으로, 첫 번째 압축기와 세 번째 압축기의 길이를 80%~120%의 범위에서 변화시키면서 각각의 압축기의 압축비와 유량을 계산하여 Fig. 6에 나타내었다.

압축기 크기가 3개 모두 동일할 시에는 3번째 압축기가 압축비가 가장 높고, 첫 번째 압축비가 가장 낮게 나타났다. 첫 번째 압축기의 크기가 크고 세 번째 압축기의 크기가 작아질수록 유량은 증가하는 경향을 보였으며, 이 경우에는 첫 번째 압축기가 가장 높은 압력비를 가지는 것으로 나타났다.

3.4 최대 효율을 위한 압축기의 크기선정

일반적인 다단압축 시스템에서 중간 압력은 식 (8)을 만족하는 압력일 때에 가장 효율이 높아진다.

$$\frac{P_m}{P_1} = \frac{P_2}{P_m} = \gamma_{b_m} \quad (8)$$

이는 3단 직렬 마이크로 압축기에 적용해보면 Fig. 5에서 다단 압축기의 길이비가 각각 104%, 100%, 96%인 경우에 해당한다. 압축기의 전기적 효율측면에서 설계한다면 위의 길이비를 기준으

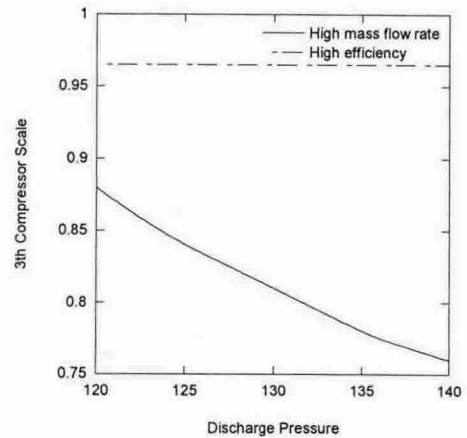


Figure 7. Optimal scale for high efficiency and high mass flow rate with respect to discharge pressure (60 Hz)

로 설계하는 것이 바람직하다. 하지만 최대한 많은 유량을 확보하기 위한 관점에서 압축기 군을 설계하게 된다면 첫 번째 압축기가 크고 세 번째 압축기가 작은 경우가 가장 효율적이라고 할 수 있다. 이는 Fig. 6에서 각 압축기의 길이비가 120%, 100%, 80%인 경우에 해당된다.

주어진 흡입압력과 토출압력조건에서 첫 번째 압축기의 길이비가 120%보다 높은 경우에는 두 번째와 세 번째 압축기에서 질량보존식을 만족시키지 못한다. 이는 압축기의 크기차이가 커짐에 따라 첫 번째 압축기의 유량을 나머지 압축기에서 만족시키지 못하기 때문으로 생각된다. 따라서 유량조건을 만족시키는 한에서 최대한 첫 번째 압축기의 크기가 크게 설계를 한다면 유량을 최대로 확보할 수 있는 압축기를 설계할 수 있다.

여러 가지의 흡입압력과 토출압력의 차이에 대해서 압축기의 효율이 최대인 크기와, 유량이 최대인 크기를 Fig. 7에 나타내었다. 토출압력이 증가함에 따라 최대 유량을 나타내는 압축기의 크기는 달라졌지만, 최대 효율을 나타내는 압축기의 크기는 일정하게 나타났다.

5. 결론

MEMS 가공기술로 제작될 직렬 연결된 마이크로 압축기의 최적설계에 관한 연구를 수행하였다. 에너지 방정식과 질량보존방정식을 이용하여 압축기를 모델링하였으며 외팔보 형태로 구성된 밸브를 함께 고려하여 압축기 시스템을 모델링하였다.

같은 압력차에서 압축기를 1단으로 연결할 때에 비하여 2단, 3단을 연결할 경우 얻을 수 있는 유량은 크게 증가하였다. 2단과 3단의 경우 압축기 균의 흡입압력과 토출압력의 차이가 증가할수록, 유량차이가 더 증가하는 경향을 보였다.

압전소자로 구동되는 3단으로 연결된 마이크로 압축기에 가진 주파수가 증가할 때에 유량이 증가하였으나 그 증가폭은 주파수가 상승할수록 감소하는 경향을 보였다.

3단으로 연결된 마이크로 압축기에서 첫 번째 압축기의 크기가 크고 세 번째 압축기의 크기가 작은 경우에 가장 큰 유량을 나타내었으며 그 반대의 경우에는 유량이 점점 작아지는 경향을 보였다. 각 압력차에서 열역학적 효율이 최대인 크기와 유량이 최대인 크기를 조사하였다.

후 기

본 연구는 마이크로 열시스템 연구센터의 지원으로 수행되었으며 이에 감사하는 바이다.

참고 문헌

1. Yoon, J. and Kim, M. S., 2005, Performance analysis of a silicon-based micropump for gases, The Sixth KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Jeju, Korea, Session C, CJ-02.
2. Srinivas, M. N. and Padmanabhan, C., 2002, Computationally efficient model for refrigeration compressor gas dynamics, International Journal of Refrigeration, Vol. 25, pp. 1083-1092.
3. Feng, G. H. and Kim, E. S., 2004, Micropump based on PZT unimorph and one-way parylene valves, Journal of micromechanics and Microengineering, Vol. 14, pp. 429-435.