좌굴과 상변화를 이용한 micro actuator의 개발 및 해석

송귀은* · 김정식* · 김광호* · 이윤표*

Thermo-pneumatic Micro Actuator with Bi-stable Membrane

Song Gwi Eun, Kim Jeong Sik, Kim Kwang Ho, Lee Yoon Pyo

Key Words : Micro actuator(구동기), Thermo-pneumatic, Buckling(좌굴), Phase change(상변화)

Abstract

A brand-new micro actuator is introduced in this paper. This device is one of thermo-pneumatic actuators, and based on two distinct principles of snap-through buckling and phase change. These coupled phenomena affect each other positively and will outrun the performance of an ordinary thermo-pneumatic actuator. Our efforts are focused on comprehensive analysis on the driving force of the actuator. For the analysis, we explain each principle and offer approximated models for the buckling and phase change. The calculation results from each model are compared to experimental data. The comparison between prediction from models and data from experiments is within the satisfaction in spite of a lot of approximations.

기호설명

$X=\frac{x}{l}$	(무차원 길이)
$Z=\frac{\bar{d}}{t}$	(박막의 두께와 최대 처짐량의 비)
$\Delta=\frac{\delta}{\bar{d}}$	(무차원 최대 처짐량)
$W(X)=\frac{w(x)}{\bar{d}}$	(무차원 처짐 곡선)
$N^2=\frac{R}{(EI/l^2)}$	(보의 압축에 의한 무차원 압축력)
$F_1=\frac{f_1}{EI\bar{d}/l^3}$	(중앙에서의 무차원 집중하중)
$F_2=\frac{f_2}{EI\bar{d}/l^4}$	(무차원 균일 분포하중)
$\frac{F_1}{F_2}\equiv\alpha=\frac{L_m^2}{L_0^2-L_m^2}$	(집중하중과 균일하중의 비)

1. 서 론

매년 MEMS 분야에 있어서 가공 및 제작기술의 발전과 새로운 아이디어의 적용을 통해서 다양한 종류의 micro actuator(1,2)가 개발 및 소개되어 왔다. 그 중에서도 상변화(phase change)를 동반한 thermo -pneumatic actuator 는 다른 actuator 에 비하여 여러 다른 특징들을 가지고 있다. 보통 상변화 thermo-pneumatic actuator 는 액체와 기체 사이의 상변화를 통해서 상대적으로 적은 전압과 적은 체적에서 큰 변위와 힘을 제공해 줄 수 있다고 알려져 있다. 본 연구에서는 이러한 thermo-pneumatic actuator 의 장점을 극대화하기 위해서 박막의 인위적인 좌굴(buckling) 현상(3)을 thermo-pneumatic actuator 에 추가하여 actuator 가 할 수 있는 일과 변위 모두를 크게 향상시킬 수 있는 장치를 고안하였다.

기존의 연구에서는 좌굴 현상과 상변화에 관한 많은 연구가 독립적으로 있어왔다. 특히나 마이크로 크기의 밀폐된 공간에서 상변화를 통한 열전달에 대하여 Kanviany (4,5)등은 그의 논문과 저서를 통해서 좌굴이 일어나지 않는 일반적인 박막으로 밀봉된 thermo-pneumatic micro actuator 에 대한 열전달 문제를 다루면서, 가열과 냉각을 통해서 작동유체의 상변화를 통한 열전달 해석 문제를 간단하면서도 유용한 모델들을 통해서 해석하였다.

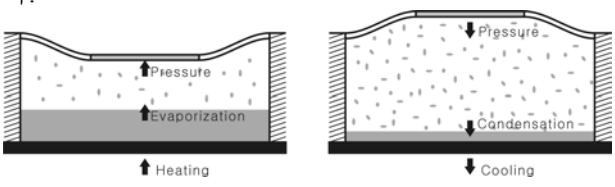
본 연구에서는 이러한 박막의 bi-stable buckling 특성과 밀폐된 공간에서의 작동 유체의 상변화를 통한 압력 변화가 함께 일어나는 경우에 서로 상승 작용을 하여 흥미로운 결과를 보일 것이라 생

* 한국과학기술연구원 열유동 제어센터
E-mail : kwsong@kist.re.kr
TEL : (02)958-5685 FAX : (02)958-5689

각하여, 이 2 가지 요소들을 모두 포함시킨 새로운 방식의 micro actuator 를 제시하였다. 이 장치에 대한 특성을 이해하기 위하여 좌굴과 열전달에 대하여 각각의 근사해석 모델들을 유도하였으며, 실험 결과의 비교를 통해서 제시된 micro actuator 의 특성을 살펴보았다.

2. Actuator 의 작동 원리

본 장치의 구동 원리는 아주 단순하게 보이는 액체의 증발/응축과 좌굴이라는 현상으로부터 출발한다. 열전 모듈에 전기를 흘려주면 하단의 구리로 만들어진 전열판을 통해 작동 유체가 가열된다. 가열된 액체는 증발에 의해 액체 상태에서 기체 상태로 상변화를 하게 되고 증발된 기체를 통해 가압실 내부의 압력이 상승하게 된다. 상승된 압력이 일정한 압력 이상으로 상승하게 되면 snapping 박막이 이 압력을 견디지 못하고 좌굴 현상(snap-through buckling)에 의해 순간적으로 팽창하게 되여, 박막은 Fig. 1 의 (b)의 위치로 움직이게 된다. 역으로 전기의 극을 반대로 바꾸어 열전 모듈에 전기를 흘려 보내주면, 열전 모듈을 구리판을 냉각시키게 되고 다시 작동 유체를 냉각시키게 된다. 작동 액체와 기체가 모두 온도가 내려가면서 기체에서 액체로의 응축이 활발하게 일어나게 되고, 가압실 내의 압력도 급격히 떨어지게 된다. 낮아진 압력이 어느 일정 압력 이하로 떨어지게 되면, 박막이 이를 견디지 못하고 순간적으로 수축하여 Fig. 1 의 (a)의 위치로 다시 돌아오게 된다. 본 연구에서는 인위적으로 열전 모듈을 통한 온도 제어방법으로 가압실 내의 작동 유체를 가열 및 냉각을 하여 Bi-stable 박막의 반복적인 순간적 움직임을 인위적으로 제어할 수 있었다.

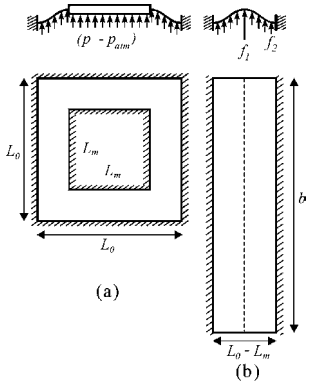


(a)Heating-induced snap-up (b)Cooling-induced snap-down

Fig. 1 Principle of the actuator

3. Bi-stable 박막의 구조 역학적 특성

Fig. 2 (a)에서 볼 수 있듯이 내부와 외부의 경계조건이 모두 정사각형의 형태를 이루고 있는 박막의 좌굴 현상은 3 차원 비정상(unsteady)의 복잡한 현상으로 FEM 등의 방법이 좀더 정확할 것이나, 본 연구에서는 되도록 대상을 1 차원적인 문제로 단순화시켜 본 연구에 적합한 근사모델을 찾고 그에 따른 각 설계 변수의 영향을 살펴보고자 노력하였다. 따라서 Fig. 1 의 가압실 내의 압력이 어느 정도에 이르렀을 때에 박막이 좌굴(snap-through buckling)을 일으켜 순간적으로 팽창 또는 수축할 것인지를 이 단순화된 모델로부터 알아내려고 하였다. Fig. 2 (a)에서처럼 $L_o \times L_o$ 의 정사각형 틀 속에 $L_m \times L_m$ 의 정사각형의 휘지 않는 판이 가운데에 위치하고 있고 내외 정사각형의 동서남북 방향의 모든 경계조건이 모두 clamped 경계조건을 가지고 있다.



$$b = L_0 + L_m \,,\; f_1 = \frac{(p - p_{atm}) \cdot L_m^2}{b} \,,\; f_2 = (p - p_{atm})$$

Fig. 2 Simplification of 3D membrane to 1D beam

(a)의 해석 대상을 마치 Fig. 2 (b)의 길고 좌우에서만 clamped 경계조건을 가지는 펼쳐진 형상으로 단순화하여 3 차원적 좌굴 현상을 1 차원적인 해석 방법으로 접근하였다.

이후로의 해석은 위의 Fig. 2 (b)에서처럼 3 차원 박막이 아닌 1 차원 보(beam)를 해석할 것이며, 이를 해석하기 위하여 여러 기하학적인 영향 인자에 대한 정의들을 Fig. 3 에 정리하여 놓았다.

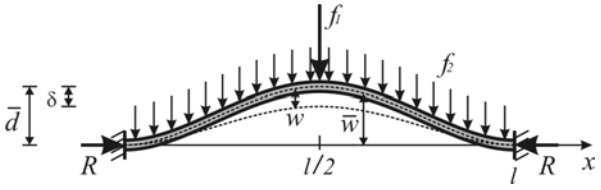


Fig. 3 Free body diagram for buckling membrane

보가 f_1 와 f_2 없이 압축력 R 만 받는 경우에, 보의 모양은 $\overline{w} = \frac{\bar{d}}{2} \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{l}\right)\right]$ 으로 표현되며 경계조건은 $w(0) = w(l) = 0$, $w'(0) = w'(l) = 0$, $w'(l/2) = 0$ 으로 표현할 수 있다. 위에서 도시한 f_1, f_2, R 의 다양한 하중 조건과 경계 조건들을 만족하는 보의 처짐 곡선(deflection curve)을 일반적인 계산방법으로 유도해내는 것은 쉬운 일이 아닐 것이다. 그래서 유도해내고자 하는 처짐 곡선을 정현(sinusoidal)함수의 무한 중첩(superposition)으로 전

개할 수 있다고 가정한 Rayleigh-Ritz 방법(6)을 사용하였다.

$$W(X)=\sum_{i=0}^{\infty} A_i W_i(X) \qquad \text{(식 1)}$$

W(X)는 membrane deflection shape 을, Ai 는 mode amplitude 를, Wi(X)는 mode shape 을 각각 의미한다. 위의 식에서 Wi 는 선형화된 Euler 보의 지배방정식에 대한 특성함수이며 buckling mode 를 형성한다. 보의 모양은 x=l/2 를 중심으로 대칭을 이루어야 하는데, 비대칭적인 항들을 모두 0 으로 처리하여 다시 정리하면 특성치와 특성함수를 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$\left.\begin{aligned} W_i(X) &= 1-\cos(N_i X) \\ N_i &= 2\pi(i+1) \end{aligned}\right\} \quad i=0,1,2,3,4,\cdots \text{(식 2)}$$

A_i 를 계산하기 위한 Rayleigh-Ritz 방법(minimum total potential energy method)은 다양한 하중 조건에서 보가 경험하게 되는 총 potential energy 가 최소가 되는 조건에서 보의 처짐 곡선이 형성된다는 이론으로, 총 potential energy 을 이루고 있는 굽힘에 의한 변형 에너지(U_b), 압축에 의한 변형 에너지(U_s), 하중에 따른 일(U_f) 등을 (식 1,2)를 이용하여 유도해서, 이를 모두 더한 총 potential energy 의 최소치가 되는 A_i 를 찾도록 하는 방법이다. A_i 을 결정하기 위해서 total potential energy 가 최소가 되도록 결정되어야 하므로 $\frac{\partial U_t}{\partial A_i}=0$ 의 식이 만족하도록 A_i 을 계산하면 아래의 식으로 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned} A_0 &= -\frac{\overline{A}_0 N_0^2}{N^2-N_0^2}+\frac{(4\alpha+2)F_2}{N_0^2\left(N^2-N_0^2\right)} \\ A_{4j} &= \frac{(4\alpha+2)F_2}{N_{4j}^2\left(N^2-N_{4j}^2\right)}, \qquad j=1,2,3,\cdots \\ A_k &= \frac{2F_2}{N_k^2\left(N^2-N_k^2\right)}, \qquad k\neq 0,4,8,12,\cdots \end{aligned} \qquad \text{(식 3)}$$

F_2에 대해서 2 차 함수를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} &\left[\left(1+\sum_{j=1}^{\infty}\frac{N_0^2\left(N^2-N_0^2\right)^2}{N_{4j}^2\left(N^2-N_{4j}^2\right)^2}\right)\cdot(4\alpha+2)^2 + \sum_{k\neq 0,4,8\cdots}^{\infty}\frac{4N_0^2\left(N^2-N_0^2\right)^2}{N_k^2\left(N^2-N_k^2\right)^2}\right]\cdot F_2^2 \\ &-4(2\alpha+1)\overline{A}_0 N_0^4\cdot F_2 \\ &+\overline{A}_0^2 N_0^4 N^2\left(2N_0^2-N^2\right)+\frac{N^2N_0^2\left(N^2-N_0^2\right)^2}{3Z^2}=0 \end{aligned} \qquad \text{(식 4)}$$

중앙 지점에서의 무차원화된 처짐량은

$$\begin{aligned} \Delta &= \overline{W}(1/2)-W(1/2)=\overline{A}_0 W_0(1/2)-\sum_{i=0}^{\infty}A_i W_i(1/2) \\ &= 2\overline{A}_0-2\sum_{j=0}^{\infty}A_{4j} \end{aligned} \qquad \text{(식 5)}$$

이로서 처짐 곡선과 처짐량 등을 이론적으로 계산할 수 있는 식들을 유도하였고, 압력과 최대 처짐량 사이의 관계를 계산할 수 있게 되었다. 전체적으로 계산 과정을 다시 정리하면, 우선 보에 작용하는 압축력(R)을 가정하여 (식 4)를 통해 F_2를 계산하고, R 과 F_2를 통해서 각각의 A_i는 (식 3)를 통해서 계산할 수 있다. 최종적으로 (식 5)를 통해서 무차원 처짐량(Δ)을 계산할 수 있다.

Geometric Dimensions

L_0	Length of square cavity	= 19.5	[mm]
L_m	Length of central rigid square	= 10	[mm]
H_c	Depth of Cavity	= 4.5	[mm]
t	Thickness of membrane	= 0.1	[mm]
$\overline{d}$	Initial deflection of membrane	= 1.0	[mm]
h	Initial depth of working fluid pool	= 2.0	[mm]
T_H	Temperature of heating block	= 16, 32	[℃]
T_∞	Temperature of ambient air	= 20	[℃]

Thermal properties

n-pentane (n-C_5H_{12})

M	Relative molecular mass	= 72.151	[$kg/kmol$]
T_{sat}	Boiling temperature	= 36.06	[℃]
ρ_l	Density at liquid state	= 609.78	[kg/m^3]
ρ_g	Density at vapor state	= 2.9693	[kg/m^3]
$C_{p,l}$	Specific heat of liquid	= 2367.3	[$J/kg\cdot$K]
$C_{p,g}$	Specific heat of gas	= 1764.0	[$J/kg\cdot$K]
k_l	Thermal conductivity of liquid	= 0.10724	[$W/m\cdot$K]
k_g	Thermal conductivity of gas	= 0.015283	[$W/m\cdot$K]
Δh_{lg}	Enthalpy	= 3.576×10^5	[J/kg]

Dry Air (at 20 ℃)

h_∞	Free convection heat transfer coeff.	= 2	[W/$m^2\cdot$K]

Membrane

ρ_m	Density of membrane	= 1380	[kg/m^3]
$C_{p,m}$	Specific heat of membrane	= 960	[$J/kg\cdot$K]
k_m	Thermal conductivity	= 0.15	[$W/m\cdot$K]
E	Modulus of elasticity	= 3.4	[GPa]

Table 1 data required for the analysis of actuator

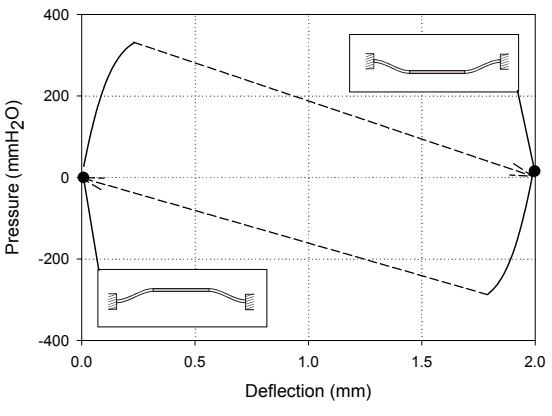


Fig. 4 Pressure-Deflection Curve

이러한 방법을 사용하여 Table.1 의 계산 조건에 대하여 계산한 결과를 Fig.4 에 정리하였다. 위의 이론적 모델을 통해서 331 와 -287 mmH_2O 에서 박막의 좌굴 현상이 일어날 수 있음을 예측할 수 있다. 중간의 점선들은 좌굴에 의해 순간적으로 박막이 움직이는 부분이다.

4. 열전달 해석

상변화가 일어나는 시험부내의 온도와 압력의 변화를 근사적으로 해석하기 위해 몇가지 가정이 필요하다. 우선 가열판의 온도 T_H 와 대기온도 T_∞ 는 고정된 값이다. 박막의 온도 T_m 도 박막의 두께가 얇으므로 일정하게 유지된다고 가정하였다. 시험부 가열면의 가로세로 길이(19.5x19.5mm^2)는 높이(2mm)에 비해 상대적으로 크므로 열전달은 전도와 상변화에 의해 지배된다고 할 수 있다.

시험부에서의 열의 흐름을 보면 열전모듈에 의해 가열된 열이 구리판과 작동유체를 거쳐 대기중으로 방출된다. 시험부 내부의 2 상 상태의 열전달은 전도에 의해 이루어진다고 가정하였다. 이는 밀도차에 의한 부력 등으로 생기는 자연대류의 발생 여부는 Rayleigh 수가 1708 이하일 경우, 자연대류보다 전도에 의한 열전달이 지배적이며 단순한 온도 분포를 이룬다고 알려져 있다. (7)

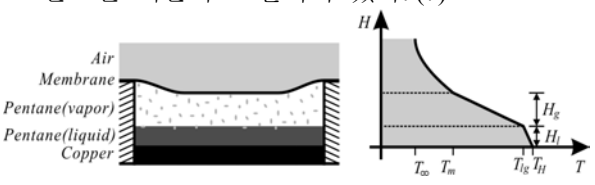


Fig. 5 Phase change heat transfer model

지금까지 언급한 여러 가정들을 토대로 작동유체에 대해서 에너지 보존식과 밀폐된 공간에 대한 질량 보존식을 유도할 수 있으며, 박막에 대해서도 하나의 에너지 보존식을 적용하여 T_{lg}, T_m, H_l 의 총 3 개의 변수에 대한 총 3 개의 미분 방정식을 유도할 수 있다.

지금까지 언급한 여러 가정들을 토대로 작동유체에 대해서 에너지 보존식과 밀폐된 공간에 대한 질량 보존식을 유도할 수 있으며, 박막에 대해서도 하나의 에너지 보존식을 적용하여 액체와 기체의 경계면의 온도 T_{lg} 박막의 온도 T_m, 작동유체 액면의 수위 H_l 의 총 3 개의 변수에 대한 총 3 개의 미분 방정식을 유도할 수 있다.

Fig. 5 는 시험부의 열전달 특성을 나타낸 그림이다. 가열판의 열은 액체상태의 작동유체에 전달(Q_l)되어, 일부가 기체로의 상변화($\dot{S}_{lg}$)와 벽면을 통해 손실되고, 나머지는 기체로 전달(Q_g)된다. 이와 같은 작동유체와 박막에 대한 열수지 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$-Q_g + Q_l = -\dot{S}_{lg} + \left(\rho c_p V\right)_g \frac{dT_{lg}}{dt}$$

$$Q_g - Q_{air} = \left(\rho c_p V\right)_m \frac{dT_m}{dt}$$

이때 각각의 열전달을 나타내는 식들은

$$Q_g = A_{cav} \cdot k_g \frac{T_{lg} - T_m}{H_g}$$

$$Q_l = A_{cav} \cdot k_l \frac{T_H - T_{lg}}{H_l}$$

$$Q_{air} = A_{cav} \cdot \bar{h}_\infty \left(T_m - T_\infty\right)$$

$$\dot{S}_{lg} = \dot{m}_l \Delta h_{lg} = \Delta h_{lg} \rho_l \left(A_{cav} \frac{dH_l}{dt} \right) = A_{cav} \rho_l \Delta h_{lg} \frac{dH_l}{dt}$$

이때 기밀이 유지된 가압실 내의 질량은 다음의 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} M_{cav} &= V_l \rho_l + V_g \rho_g \\ &= A_{cav} \cdot \left[\rho_l H_l(t) + \rho_g H_g(t)\right] \\ &= A_{cav} \cdot \left\{\rho_l H_l(t) + \rho_g \left[H_c - H_l(t)\right]\right\} \end{aligned}$$

액체 상태의 경우, 밀도가 일정하다고 볼 수 있으나, 기체의 경우는 압력과 밀도에 따라 밀도의 변화가 크므로 이상 기체 방정식 $\rho_g = \frac{M}{R_g T_{lg}} p_g$ 으로 근사화하여 온도와 압력관계에서 밀도를 알 수 있고, 비체적과 엔탈피와 함께 상이 변할 때, 포화압력과 온도의 관계를 나타내는 Clausius-Clapeyron 식을 적용할 수 있다.

$$p_g = p_{g,o} \cdot \exp\left[-\frac{M \Delta h_{lg}}{R_g} \left(\frac{1}{T_{lg}} - \frac{1}{T_{g,o}} \right) \right]$$

이들을 작동 유체에 대하여 정리하면 (식 6)

$$\frac{M p_{g,o} c_{p,g} \left(H_c - H_l\right)}{R_g T_{lg}} \cdot \exp\left[-\frac{M \Delta h_{lg}}{R_g} \left(\frac{1}{T_{lg}} - \frac{1}{T_{g,o}} \right) \right] \frac{dT_{lg}}{dt}$$

$$= \rho_l \Delta h_{lg} \cdot \frac{dH_l}{dt} - k_g \cdot \frac{T_{lg} - T_m}{H_c - H_l} + k_l \cdot \frac{T_H - T_{lg}}{H_l}$$

마찬가지로 박막에 대하여 정리하면 (식 7)

$$\left(\rho c_p\right)_m \frac{dT_m}{dt} = k_g \cdot \frac{T_{lg} - T_m}{H_c - H_l} - \bar{h}_\infty \left(T_m - T_\infty\right)$$

질량 보존 법칙을 밀폐된 가압실에 적용하면, 액체에서 감소된 작동 유체의 질량은 기체에서 증발된 질량과 같으므로 $m_{cav} = m_l + m_g = const.$ 이며, 시간 변화량에 대해서는 $\dot{m}_l + \dot{m}_g = 0$ 으로 표현될 수 있다. 이 식을 정리한 것이 아래의 식이며 밀도와 액체 층의 높이로 표현되고 있다.

$$\frac{d}{dt}\left(A_{cav}\rho_l H_l\right) + \frac{d}{dt}\left(A_{cav}\rho_g H_g\right) = 0$$

위의 식을 H_l 과 T_{lg} 만의 식으로 정리한 것이 아래의 (식 8)이다.

$$\frac{H_c\rho_l - \frac{M_{cav}}{A_{cav}}}{\left(H_c - H_l\right)^2}\cdot\frac{dH_l}{dt} = -\frac{Mp_{g,o}}{R_g}\left[\frac{\left(M\Delta h_{lg}/R_g\right)}{T_{lg}^3} - \frac{1}{T_{lg}^2}\right]\cdot\exp\left[-\frac{M\Delta h_{lg}}{R_g}\left(\frac{1}{T_{lg}} - \frac{1}{T_{g,o}}\right)\right]\cdot\frac{dT_{lg}}{dt}$$

최종적으로 3 개의 변수 T_{lg}, T_m, H_l에 대한 (식 6), (식 7), (식 8)의 3 개의 비선형 연립 미분방정식을 얻을 수 있었다.

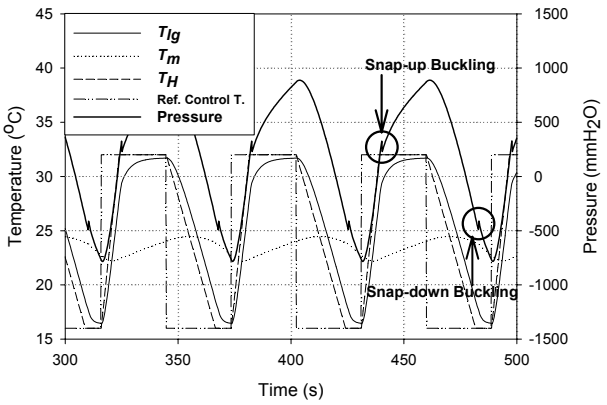


Fig. 6 Heat transfer simulation results

이 미분방정식들을 5 차 Runge-Kutta Method 를 사용하여 앞서 제시한 Table.1 의 조건에 대하여 계산을 하였고, 그 결과를 Fig. 6 에 예시하였다.

위의 계산은 실험과의 비교를 위해서 여러 조건들을 실험의 경우에 해당하는 값들을 사용하였다. 우선 T_H 등은 계산에 있어서는 경계 조건에 해당하므로 Fig. 9 의 구리 가열판의 온도 변화를 근사식으로 적용하였다. 또한 H_c 는 좌굴에 의해 $\bar{d} = \pm 1\ mm$ 만큼 순간적으로 움직이는 것으로 계산하였고, 가압실 내의 압력이 미리 설정된 좌굴 팽창 압력보다 커질 경우에 H_c가 $\bar{d}$만큼 증가하여 체적이 순간적으로 증가되도록 하였고, 역으로 좌굴 수축 압력 이하로 떨어지면 H_c 가 $\bar{d}$ 만큼 감소하여 체적도 순간적으로 감소되도록 하였다. 좌굴 팽창-수축 압력은 Fig. 9 의 실험에서 얻어진 값을 사용하였으며, 좌굴에 의해 체적이 변하게 될 때에 이러한 변화는 짧은 순간에 일어나므로 단열 압축 및 단열 팽창으로 보고, 압력의 계산에 반영하였다.

5. 실험 장치

이 thermo-pneumatic micro-actuator 를 실험적으로 구현하기 위해서 간단한 시험용 모듈을 설계 제작하였고, 이 장치를 측정 및 제어하기 위한 시스템도 꾸며 보았다. 우선 측정용 모듈은 Fig. 7 에 자세히 정리되어 있듯이, 맨 위에는 bi-stable 박막과 이를 고정 및 기밀성(sealing)을 유지시켜 줄 수 있는 틀을 한 덩어리로 제작하여 박막 부분만 쉽게 교체할 수 있도록 하였다. 모듈의 몸체는 poly-carbonate 로 이루어져 있으며, 바닥은 구리로 접착되어 있다. 구리의 아랫면에는 열전 모듈을 부착하였고 그 아래에는 열을 배출할 수 있는 방열 핀과 팬을 부착하였다.

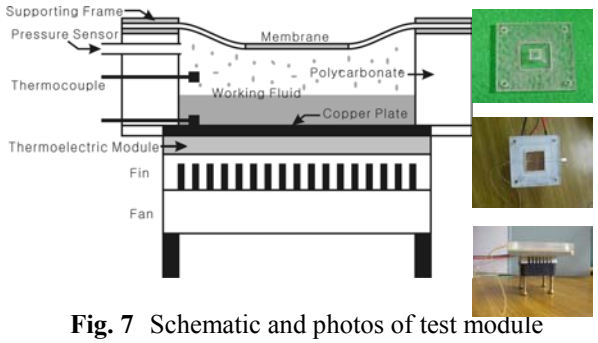


Fig. 7 Schematic and photos of test module

측정을 하기 위해 압력 센서를 작은 튜브에 연결해서 시험 모듈에 부착하였고, 온도 측정을 위해서 열전대를 구리판과 몸체 중간 정도에 부착하였다. 온도제어는 이 열전대에서 측정된 온도를 입력 받아서 VEE 계측 소프트웨어를 이용한 제어 신호를 만들고, programmable power supply 를 통해서 열전 모듈에 인가되는 전압을 조절함으로 해서 온도를 일정한 제어온도로 설정 및 유지할 수 있었다. 또한 추가적인 제어 신호를 programmable power supply 를 통해 relay 를 구동하여 열전 모듈에 흐르는 전압의 극성을 바꿀 수 있도록 하였다. 전체적인 제어와 측정 신호의 흐름을 Fig. 8 에 정리하여 놓았다.

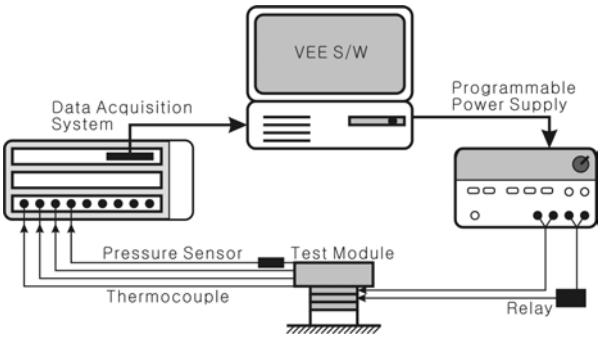


Fig. 8 Measurement and Control

위의 실험 설비를 통해서 실험한 결과가 Fig. 9 이다. 그림들을 통해서 알 수 있듯이 상변화가 없는 경우에 비하여 상변화가 있는 경우에 더욱 큰 압력 변화를 보이고 있다. 그림에서는 확인 할 수 있듯이 좌굴에 의한 압력과 온도의 순간적 변화를 살펴볼 수 있다. 따라서 좌굴을 일으킬 수 있을 정도의 압력 변화를 유도하기 위해서는 본 연구에서와 같은 상변화가 있는 actuator 가 유리할 것이다. 본 실험에서는 이러한 좌굴은 팽창의 경우 298 mmH_2O 에서 일어났으며, 수축의 경우 약 -487 mmH_2O 에서 일어난 것을 알 수 있다. Fig. 4 의 이론 식에 의한 계산결과와는 차이를 보이고 있으며, 여러 요인에서 기인하는 것으로 보인다. 좌굴 하중의 계산은 -331 와 287 mmH_2O 에서 박막의 좌굴을 예측하였으나, 실험에서는 이와는 다소 차이를 보이고 있다. 이것은 주로 3 차원 처짐을 1 차원 보의 처짐으로 단순화하면서 생겨난 오차일 수도 있으며, 실험에서는 정확한 의미에서 clamped 경계조건 아니므로, 정확하게 이론적인 값과 일치하는 결과를 얻기에는 어려울 것이다. 그러나 그러한 차이가 단순화된 모델의 계산 결과와의 비교라는 측면에서 좌굴 압력을 추정하는 데에는 충분할 것이다.

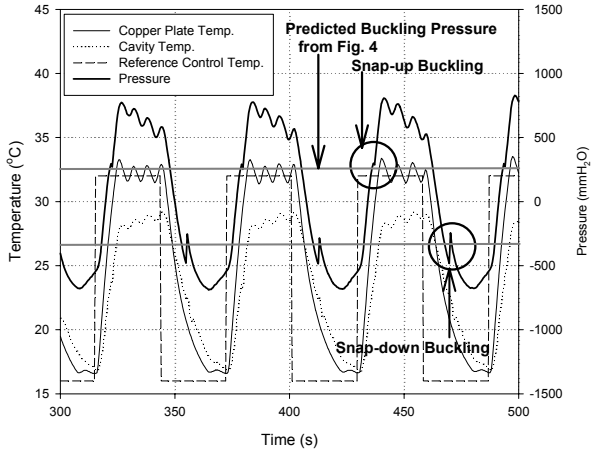


Fig. 9 Results from Experiments

Fig. 6 의 계산 결과와 Fig. 9 의 실험 결과와의 비교에 있어서도 만족스러운 유사성을 보이고 있다. 이 두 그래프의 압력을 비교해 보면 열전달 모델이 실제의 장치를 적절히 모사하고 있음을 확인할 수 있다. 물론 열전달의 계산에 있어서도 압력의 변화에 차이를 보이고 있는데, 이는 주로 벽면을 통한 열손실의 무시와 가압실 내부의 온도분포에 대한 가정에서 오는 오차로 보인다.

추가적인 오차의 원인으로는 불응축 가스의 존재이다. 계산에서는 가압실 내부의 작동유체는 오직 순수한 pentane 의 액체와 기체만으로 이루어진 것으로 가정하여 계산하였으나, 실험에서는 이를 엄밀하게 구현하기에는 불가능하여 어느 정도는 대기중의 산소나 수증기 등의 불응축 가스의 영향이 분명히 존재하며 이에 따른 계산 상의 압력도 실제로는 부분압을 의미할 것이다. 그러나 복잡한 CFD 계산을 거치지 않고도 상변화와 좌굴이 함께 일어나는 조건에서도 근사적으로나마 만족스러운 근사치를 보여주었다.

6. 결 론

본 연구에서는 이미 잘 알려진 좌굴 현상을 상변화를 동반한 thermo-pneumatic actuator 에 적용한 새로운 actuator 에 대하여 설명하였다. 작동 원리를 좀더 구체적으로 이해하고 해석하기 위해서 좌굴에 관한 구조 역학적인 근사 모델과 열전달에 관한 상변화 열전달 모델을 제시하였으며, 이들을 검증하고 실제 작동여부를 알기 위해서 작은 시험 모듈을 기계가공을 통해서 제작하였고, 이를 시현해 보였다. 본 연구를 통해서 새로이 제시된 thermo-pneumatic micro actuator 의 구동 특성과 구동원리에 대한 이해를 높일 수 있었다.

참고문헌

(1) N.T. Nguyen, S.T. Wereley, 2002, Fundamentals and Applications of Microfluidics, pp. 257-260
(2) Microfluidic Technology and Application, M. Koch, A. Evans, A. Brunnschweiler, 2000
(3) B. Wagner, H.J. Quenzer, S. Hoerschelmann, T. Lisec, M. Juerss, 1996, Bistable Microvalve with Pneumatically Coupled Membranes, IEEE, pp. 384-388
(4) M. Kaviany, 2002, Principles of Heat Transfer, pp. 828-834
(5) P. L. Bergstrom, J. Ji, Y. Liu, M. Kaviany, K. D. Wise, 1995, Thermally Driven Phase-Change Microactuation, J. of Microelectromechanical Systems, Vol.4, No.1, pp.10-17
(6) Jin Qiu, J. H. Lang, A. H. Slocum, A Centrally-Clamped Parallel-Beam Bistable MEMS Mechanism
(7) Bejan, 1993, Convective Heat Transfer 2/e, p. 416