

극저온까지 온도변화에 따른 질소 충전 소형 금속 벨로우즈의 변형 해석

Deformation Analysis of Miniature Metal Bellows Charged Nitrogen for Temperature Change to Cryogenic Condition

이승하¹, 이태원^{2,✉}
Seung Ha Lee¹ and Tae Won Lee^{2,✉}

¹ LIG 넥스원(주) 전자광학연구센터 (EO/IR R&D Center, LIG Nex1 Co.)

² 금오공과대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

✉ Corresponding author: twlee@kumoh.ac.kr, Tel: 054-478-7375

Manuscript received: 2009.5.6 / Accepted: 2009.6.29

Bellows is used to control temperature of a Joule-Thomson micro cryocooler. It is made of Nickel-cobalt alloy that retains mechanical properties from cryogenic temperature to temperature of 570K. The geometry of bellows is an axisymmetric shell and Nitrogen with high pressure was charged at temperature of 293K. During cool-down process, the pressure and volume of Nitrogen are changed and must be satisfied with state equation. At cryogenic temperature, Nitrogen can exist as a part liquid and part vapor. Pressure-density-temperature behavior under this vapor-liquid phase equilibrium is closely given by the Modified-Benedict-Webb-Rubin(MBWR) state equation. To evaluate deformation of bellows for temperature change, the numerical calculation of the volume within bellows and finite element analysis of bellows under internal pressure were iteratively performed until MBWR state equation is satisfied. The numerical results show that deformation of the bellows can be analyzed by the present method in a wide range of temperature including cryogenic temperature.

Key Words: Miniature Metal Bellows (소형 금속 벨로우즈), Cryogenic Temperature (극저온), MBWR State Equation (MBWR 상태방정식), Finite Element Anysis (유한요소해석), Axisymmetric Shell (축대칭 셸)

1. 서론

전자부품의 극부 냉각에 많이 사용되는 줄-톰슨 극저온 소형 냉각기는 냉매인 고압의 질소 기체가 매우 좁은 통로인 오르피스를 통과한 다음 급격한 체적 팽창으로 압력이 떨어지면서 온도강하가 일어나는 원리를 이용한다. 이 때 냉매의 소모를 줄이기 위하여 밸브를 닫아 유량을 조절할 필요가 있으며 유량 조절용으로 내부가 고압의 질소로 충전되어 있는 소형 금속 벨로우즈를 사용하

고 있다. 실제로 냉각기가 작동 중 외부로부터 열 전달로 벨로우즈의 온도가 변하면 충전된 내부 질소 기체의 체적 및 압력 변화가 일어나 벨로우즈의 수축 또는 팽창으로 냉매의 유량을 조절하게 된다. 그러므로 극저온 소형 냉각기의 개발을 위하여 열전달로 인한 소형 금속 벨로우즈의 거동을 정확히 예측할 필요가 있다.

일반적으로 벨로우즈는 주름을 갖는 원통형 셀 구조물로서 복잡한 형상 때문에 이론적으로 변형과 응력을 예측하기 어려움이 있고 Koh 등^{1,2} 과

Kim 등³의 연구에서 보듯이 유한요소해석이 주로 사용된다. 특히 본 연구 대상인 벨로우즈는 Fig. 1에 도시한 것과 같이 길이 2.62mm, 외경 2.26mm의 소형이면서 두께는 25 μm 로 초박형이다. 이와 같은 초박형이면서 소형인 벨로우즈의 극저온까지 내부 질소 기체의 온도 변화에 따른 변형해석에 관한 연구는 이론적이나 수치적으로 아직까지 거의 없는 실정이다.

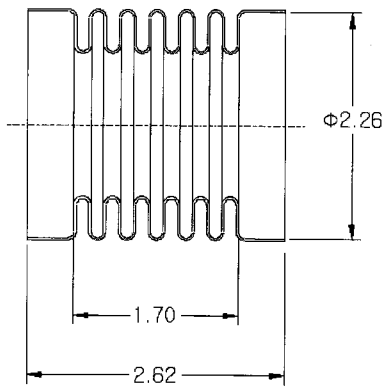


Fig. 1 Geometry of bellows

소형 초박막 벨로우즈의 변형에 대한 연구로 Lee 등⁴은 단지 내압 조건에서 유한요소해석을 하였고 실험 결과와의 비교를 통하여 수치해의 타당성을 입증하였으나 온도변화는 고려하지 않았다. 또한 벨로우즈 내부 질소 기체의 온도변화에 따른 벨로우즈의 거동에 관한 연구로 Lee 등⁵이 기체 상태 방정식을 이용하여 유한요소해석을 반복적으로 적용하는 수치적 방법을 제안하였으나 극저온에서 발생할 수 있는 내부 질소의 포화상태를 포함하지 않았다. 한편 Chien 등⁶은 극저온용 줄-튐슨 냉각기에 대하여 열전달 해석 및 실험을 수행하였으나 냉각기 전체에 중점을 두고 벨로우즈는 간단히 탄성변형을 갖는 단순 선형 스프링으로 모델링하였다. 이상의 연구들에서 보았듯이 극저온까지 온도 변화에 따른 벨로우즈의 거동을 정확히 예측하는 보다 향상된 해석 방법이 필요하다.

밀폐된 벨로우즈 내부의 기체는 온도가 변하면 압력과 체적이 변한다. 벨로우즈는 내부 압력에 의해 변형되는데 변형후 최종 내부체적은 질소 기체의 체적이 된다. 이러한 이유로 온도 변화를 고려한 벨로우즈의 변형해석을 위하여 먼저 벨로우즈 내부 기체의 온도와 압력 및 체적 변화의 상관

관계를 알아야 한다. 이 관계를 설명하기 위하여 본 연구에서는 MBWR(Modified-Benedict-Webb-Rubin)방정식^{7,8}을 사용하였다. MBWR 방정식은 32개의 계수를 갖는 고차 방정식이며 상변화 상태까지 포함하여 기체의 온도와 압력 및 체적의 상관 관계를 정확히 설명한다. 이 방정식은 다양한 기체에 대하여 제시되어 있고 매우 복잡한 형태이나 NIST에서 편리한 사용을 위하여 REFPROP⁹(Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties)이라는 상용 코드를 개발하였다.

연구 대상인 벨로우즈는 축대칭 셸 구조물이다. 그런데, 온도 변화로 발생하는 벨로우즈의 변형후 내부의 체적을 계산하기 위해서는 정확한 유한요소의 선정과 이 요소의 형상함수를 이용하여야 한다. 축대칭 셸 유한요소는 Ahmad¹⁰ 등이 제안하였으나 초박형 셸요소까지 적용하기 위하여 감차적분¹¹⁻¹³이 필요하다. 그러므로 보다 정확한 변형해석을 위하여 Fig. 2에서 보는 바와 같이 감차적분을 이용한 3 절점 축대칭 셸 유한요소를 선정하였다. 유한요소해석은 ANSYS¹⁴를 사용하였고 이 조건에 맞는 축대칭 셸 요소는 SHELL209이다. 참고로 이 유한 요소는 두께가 얇은 셸의 경우까지 해석 가능하고 대변형 및 대변형율을 포함하는 비선형 해석에도 적합하다.

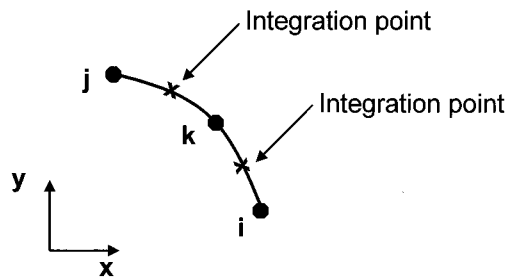


Fig. 2 Axisymmetric shell element with reduced integration (ANSYS SHELL209)

본 연구에서 제안된 기법은 Lee 등⁵과 동일하게 벨로우즈 내부 질소 기체의 온도변화에 따른 압력과 벨로우즈의 변형후 내부체적이 최종적으로 MBWR 상태방정식을 만족할 때까지 압력을 반복 수정하는 것이다. 그러나, 기존의 방법과 달리 Lee 등⁴이 실험으로 수치해의 정확성을 입증한 3 절점 감차적분을 적용한 축대칭 셸요소를 사용하였고 극저온 상태에서 발생할 가능성이 있는 벨로우즈 내부 질소의 포화상태까지 고려하였다.

2. MBWR 상태방정식

냉각기가 작동 중 벨로우즈의 내부에 충전된 질소는 상온에서 극저온까지 온도변화에 따라 압력과 체적이 변하는데 내부 질소의 이러한 변화들은 어떤 상관관계가 있다. 기체의 온도와 압력 및 체적의 관계를 설명하는 상태 방정식은 Redlich-Kwong 방정식, Peng-Robinson 방정식, BWR (Benedict-Webb-Rubin) 방정식등 다양한 종류가 제안되어 있으나 MBWR 상태방정식이 가장 정확한 것으로 알려져 있다. 더구나 MBWR 상태방정식은 포화상태에서 액체의 밀도까지 정확히 구할 수 있어 상변화 문제에 대한 접근이 용이하므로 극저온에 관한 기체의 상태를 묘사하는데 가장 적합하다.

질소와 같은 순수 물질은 포화 상태에서 기체와 액체, 또는 액체와 고체가 평형상태를 이루며 혼합물로 존재한다. 이때 기체와 액체가 포화 상태를 이루는 압력을 포화증기압(Saturated Vapor Pressure)이라 한다. 그런데, 연구 대상인 극저온 냉각기는 냉각부위의 최종 목표 온도가 77K 이므로 열전달로 인한 벨로우즈 내부 질소 역시 극저온까지 떨어질 가능성이 있다. 이는 벨로우즈 내부 질소가 포화상태에 도달할 수 있음을 의미하므로 본 연구에서는 다음과 같은 MBWR 상태방정식을 사용하였다.

$$\begin{aligned}
 P = & \rho RT + \rho^2(N_1T + N_2T^{1/2} + N_3 + N_4/T + N_5/T^2) \\
 & + \rho^3(N_6T + N_7 + N_8/T + N_9/T^2) \\
 & + \rho^4(N_{10}/T + N_{11} + N_{12}/T) + \rho^5(N_{13}) \\
 & + \rho^6(N_{14}/T + N_{15}/T^2) + \rho^7(N_{16}/T) \\
 & + \rho^8(N_{17}/T + N_{18}/T^2) + \rho^9(N_{19}/T^2) \\
 & + \rho^3(N_{20}/T^2 + N_{21}/T^3) \exp(-\gamma\rho^2) \\
 & + \rho^5(N_{22}/T^2 + N_{23}/T^4) \exp(-\gamma\rho^2) \\
 & + \rho^7(N_{24}/T^2 + N_{25}/T^3) \exp(-\gamma\rho^2) \\
 & + \rho^9(N_{26}/T^2 + N_{27}/T^4) \exp(-\gamma\rho^2) \\
 & + \rho^{11}(N_{28}/T^2 + N_{29}/T^4) \exp(-\gamma\rho^2) \\
 & + \rho^{13}(N_{30}/T^2 + N_{31}/T^3 + N_{32}/T^4) \exp(-\gamma\rho^2)
 \end{aligned} \tag{1}$$

위 식 (1)에서 P 는 질소의 압력으로 절대압력이며, T 는 온도, R 은 기체상수, ρ 는 밀도이다. 그리고 $N_1 \sim N_{32}$ 와 γ 는 질소의 상수로 Table 1 에 설명되어 있다. Table 1 의 상수 값들은 SI 단위계가

아닌데 이는 문헌의 내용을 충실히 전달하고자 그대로 표현하였으며 실제 수치 계산시 단위 환산한 값을 사용하였다.

식 (1)에서 표현된 질소의 밀도는 질소 체적 V 와 질소의 질량 m 으로 부터 아래와 같이 계산된다.

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{2}$$

한편 밀폐된 벨로우즈 내부에 있는 질소 질량은 일정하므로 식 (2)를 식 (1)에 대입하면 MBWR 상태방정식은 $P = f(T, V)$ 형태로 온도가 변하면 결국 압력과 함께 체적도 변한다.

살펴본 바와 같이 본 연구 대상인 고압의 질소로 충전한 후 밀봉된 벨로우즈의 경우 내부 질소의 온도가 결정되어도 압력과 체적은 쉽게 계산되지 않는다. 그러나, 내부 질소의 압력으로 변형된 벨로우즈의 내부 체적이 결국 상태방정식의 질소의 체적이다. 이 두가지 조건을 적용하면 특정 온도에서 상태방정식 (1)과 벨로우즈의 변형을 동시에 만족하는 하나의 압력과 체적을 계산할 수 있다.

기체와 액체가 혼재된 포화 상태시 증기압에 대한 연구로 대표적인 것은 Armstrong¹⁵ 과 Weber¹⁶ 가 실험 데이터부터 제안한 방정식이 가장 널리 사용된다. 이 방정식은 삼중점(triple point)부터 특이점(critical point)에 이르는 범위를 포함하고 65K 부터 140K 에 이르는 온도범위에서 질소의 포화 증기압을 정확히 예측한다. 증기압 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \ln(P) = & A_1/T + A_2 + A_3T + A_4(T_c - T)^{1.95} + A_5T^3 \\
 & + A_6T^4 + A_7T^5 + A_8T^6 + A_9 \ln(T)
 \end{aligned} \tag{3}$$

식(3)에서 T_c 는 질소의 특이점 온도로 126K 이며 T 는 포화 온도, P 는 증기압이다. 또한 $A_1 \sim A_9$ 는 증기압방정식의 상수로 Table 2 에 설명하였다.

3. 해석 및 결과

극저온용 소형 냉각기에 사용되는 초박형 벨로우즈는 일반적으로 니켈 합금으로 제작되는데 요

Table 1 Nitrogen coefficients for MBWR equation (Coefficients are for temperature in Kelvin, pressure in atmospheres and density in mols/liter)

N ₁	0.136097243686983 e-2	N ₁₇	-0.110400310752087 e-5
N ₂	0.107028500555504 e+0	N ₁₈	0.341309483327025 e-3
N ₃	-0.243926251659031 e+1	N ₁₉	-0.166216790652177 e-5
N ₄	0.341240789637052 e+2	N ₂₀	-0.164616585853003 e+5
N ₅	-0.422956791527436 e+4	N ₂₁	-0.119724198386865 e+6
N ₆	0.105277159433708 e-3	N ₂₂	-0.948085610750225 e+2
N ₇	-0.111355267180312 e-1	N ₂₃	0.554879602331972 e+5
N ₈	0.142748464727047 e-3	N ₂₄	-0.174677685666810 e+0
N ₉	0.179621096187021 e+5	N ₂₅	-0.256709963280944 e+1
N ₁₀	0.751267113751007 e-7	N ₂₆	-0.404528219006087 e-3
N ₁₁	0.231737284741220 e-2	N ₂₇	-0.257279422571519 e+0
N ₁₂	-0.509008258448481 e+0	N ₂₈	-0.121204517440575 e-6
N ₁₃	0.488523311385766 e-4	N ₂₉	0.104690038752288 e-4
N ₁₄	-0.112001704676209 e-2	N ₃₀	-0.529499586313775 e-9
N ₁₅	-0.678366343173806 e+0	N ₃₁	-0.774723053052639 e-8
N ₁₆	0.742796115735318 e-4	N ₃₂	0.610368224362452 e-7

$\gamma = 0.0056; R = 0.0820562 \text{ liter}\cdot\text{atm}\cdot\text{mol}\cdot\text{K}$

Table 2 Nitrogen coefficients for vapor pressure equation (Coefficients are for temperature in Kelvin and pressure in atmospheres)

A ₁	0.83944094440 e+4
A ₂	-0.18900452590 e+4
A ₃	-0.72822291650 e+1
A ₄	0.10228509660 e-1
A ₅	0.55560638250 e-3
A ₆	-0.59445446620 e-5
A ₇	0.27154339320 e-7
A ₈	-0.48795359040 e-10
A ₉	0.50953608240 e+3

Table 3 Mechanical properties of bellows

Ultimate Tensile Strength (psi)	1034.2 MPa
Yield Strength (pai)	827.4 MPa
Modulus of Elasticity (psi)	151.7 GPa
Poisson's Ratio	0.31
Shear Modulus (psi)	57.9 GPa
Composition	Nickel-95%(Min) Cobalt-balance

구되는 치수 및 기계적 성질을 확보하기 위하여 전착(electrodeposition)에 의해 제작된다. 연구 대상인 벨로우즈의 재료는 Nicoform 사에서 제조된 Nicoloy¹⁷ 로써 니켈-코발트 합금이며 95% 이상의 니켈과 5%이하의 코발트 균형재료 조성되어 있다. 제조사에서 제공하는 기계적 특성과 조성비는 Table 3 에 나타내었다.

일반적인 금속 재료는 온도변화에 따라 재료의 물성치가 변한다. 즉 상온에서의 탄성계수와 포와슨비가 극저온 상태에서 동일한 값을 갖지 않고 온도 변화가 심한 경우 열팽창도 고려하여야 한다. 그러나, 니켈-코발트 합금 Nicoloy 는 니켈보다 더욱 큰 항복강도를 가지며 극저온에서 570K 에 이르는 넓은 온도범위에서 동일한 기계적 특성을 유지하고 열팽창 효과 역시 미미하다.

위와 같은 물성치를 갖는 벨로우즈의 변형 해석을 위한 유한요소는 감차적분을 갖는 3 절점 쉘 요소인 ANSYS 의 SHELL209 요소를 선정하였다. 이 요소를 사용하여 벨로우즈의 골과 산 부위는

Fig. 3 과 같이 3 절점 요소를 45 도 간격으로 등분 하였으며 총 78 개의 축 대칭 쉘요소로 분할한 결과 벨로우즈 전체는 157 개의 절점으로 정의되었다. 변위 경계조건으로 벨로우즈 하부의 축방향 변위를 모두 0 으로 하였으며 상부는 벨브 시스템에 연결되어 벨로우즈의 박막 부위에 비해 매우 큰 강성을 가지므로 상부의 모든 절점은 축방향으로 동일하게 변형된다고 가정하였다.

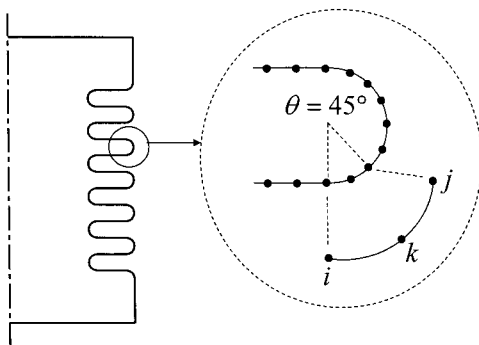


Fig. 3 Finite element modeling of bellows

밀폐된 공간에서도 온도분포는 다를 수 있으나 벨로우즈가 소형이고 초박막이므로 해석의 편의를 위하여 벨로우즈 표면과 내부 질소의 온도는 동일한 것으로 보았다. 이 가정하에 냉각기가 작동하는 동안 벨로우즈의 거동을 예측하기 위하여 77~293K 범위에서 벨로우즈 내부 온도가 일정하다는 조건하에서 유한요소 해석을 수행하였다. 해석시 벨로우즈의 골과 산부분의 유한요소는 대변형이 일어날수 있으므로 기하 비선형성을 고려하였다. 그리고 벨로우즈 내외부가 대기압일 때 벨로우즈 축방향 변위는 0 으로 기준 상태를 설정하였고 벨로우즈의 초기 상태로서 내부에 질소를 상온 293K 에서 절대압력 2101.325 kPa 로 고압 충전하였다. 그런데 벨로우즈 외부에 대기압 101.325 kPa 이 작용하므로 결국 변형해석에 필요한 상대압력은 2MPa 이다. 이 초기 상태하에서 ANSYS 의 해석결과 벨로우즈의 축방향 변위는 0.4739mm 이다.

내부 질소의 온도가 변할 때 각 온도에서의 벨로우즈의 변형해석을 하기 위해서는 먼저 내부 압력을 알아야 한다. 그러나, 각 온도에서 내부압력은 최종 벨로우즈의 변형 형상과 상관관계가 있고 반드시 식 (1)을 만족해야 하기 때문에 변형해석에 필요한 압력의 설정은 상당히 어려운 문제이다.

이를 해결하기 위하여 Fig. 4 와 같이 가정된 내부 압력과 이에 따른 벨로우즈의 변형 후 내부 체적이 식 (1)을 만족하도록 내부 압력을 수정하는 반복적인 알고리즘을 사용하였다.

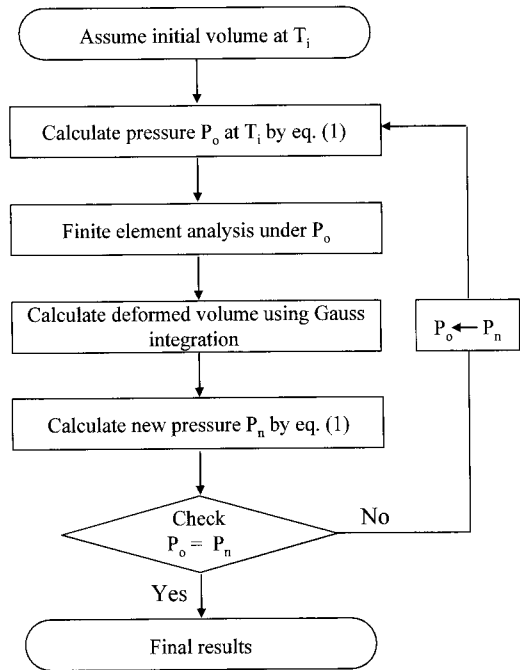


Fig. 4 Flow chart for deformation analysis of bellows at Temperature T_i

벨로우즈 내부의 각 온도 T_i 에서 제안된 알고리즘을 자세히 설명하면 다음과 같다.

- 단계 1 : 온도 T_i 에서 내부 체적을 가정한다.
 - 단계 2 : 가정된 내부체적을 식 (1)에 대입하여 내부 질소의 압력 P_o 을 계산한다.
 - 단계 3 : 내압 P_o 조건하에 벨로우즈의 유한요소해석을 한다.
 - 단계 4 : 해석결과로부터 벨로우즈의 변형 후 내부 체적을 구한다.
 - 단계 5 : 단계 4의 내부체적을 적용하여 식 (1)로부터 새로운 압력 P_n 을 구한다.
 - 단계 6 : 만약 압력 P_n 이 압력 P_o 과 동일하면 온도 T_i 에서 최종해이나 그렇지 않으면 P_n 을 새로운 P_o 로 변경한 후 단계 3부터 단계 6를 반복한다.
- 위의 알고리즘에서 단계 3의 벨로우즈의 유한요소해석은 ANSYS 를 사용하나 단계 2와 단계 5

에서 MBWR 상태방정식 (1)에 의한 압력 계산과 단계 4의 벨로우즈 내부 체적 계산이 추가로 요구되므로 이 모든 과정을 자동적으로 수행하기 위하여 ANSYS의 APDL로 프로그래밍하였다.

초기 상대압력 2MPa로 상온에서 질소를 충전한 벨로우즈가 내부 질소의 온도변화에 따른 벨로우즈 변형 특성을 관찰하기 위하여 상온인 293K로부터 극저온인 77K까지 1K 간격으로 내부 질소의 온도를 변화시켰을 때 제안된 방법에 의하여 수치해를 구하였다. 이 조건하에 제안된 방법의 해석결과들은 Fig. 5와 Table 4에 기술하였다.

그러나, Fig. 5와 달리 1K의 온도차에 대하여 벨로우즈의 변형해석 결과를 수치적으로 상세히 기술하기에는 무리가 있어 Table 4에서 20K 간격으로 내부 질소의 온도변화에 따른 최종적으로 계산된 벨로우즈의 내부압력과 내부체적 및 길이방향 변위 결과를 나타내었다. 참고로 Table 4에서 벨로우즈의 압력은 절대압력이다. 절대압력으로 표현된 Table 4로부터 내부 질소의 온도가 77K에서 질소 압력은 97.2 kPa로 벨로우즈 외부의 대기압 101.325 kPa보다 약간 작은 압력에 도달하였고 무시할 정도이긴 하지만 질소가 충전되기 전인 초기 기준 상태보다 벨로우즈가 길이 방향으로 수축된 현상을 관찰할 수 있다.

Fig. 5에서 내부 질소의 온도가 상온 293K에서 극저온 77K로 변할 때 1K 간격으로 벨로우즈의

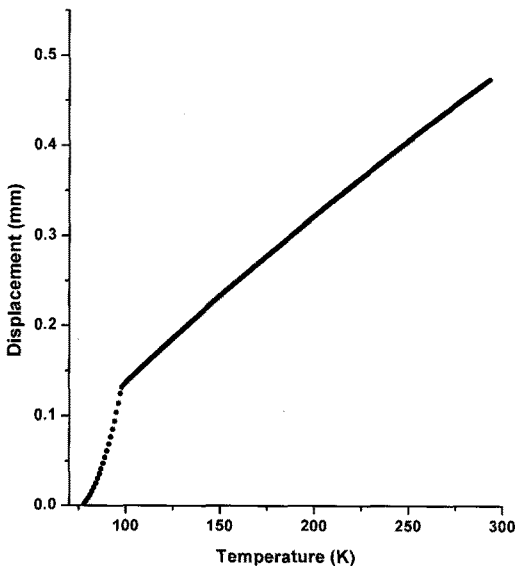


Fig. 5 Analysis results for axial deformation of bellows

Table 4 Pressure, volume and displacement of bellows at each temperature

Temperature (K)	Pressure (kPa)	Displacement (mm)	Volume (mm ³)
77	97.2	-0.0010	8.7373
93	462.1	0.0855	8.9831
113	787.1	0.1625	9.2020
133	950.5	0.2012	9.3121
153	1107.5	0.2384	9.4178
173	1259.5	0.2744	9.5202
193	1407.6	0.3095	9.6418
213	1552.1	0.3437	9.7173
233	1693.4	0.3773	9.8126
253	1832.1	0.4101	9.9059
273	1968.0	0.4423	9.9974
293	2101.3	0.4739	10.0872

변형량을 도시하였다. 해석 결과에서 보듯이 벨로우즈의 길이 방향 변형은 상온부터 약 100K 이상의 범위에서는 변형이 거의 선형에 가까움을 알 수 있다. 물론 약간의 비선형성을 보이나 그 정도가 미미하고 설계관점에서는 선형으로 근사화할 수 있다. 이는 Lee 등⁵의 결과와 유사하다. 그러나 내부 질소의 온도가 77K 이상이고 약 100K 이하의 범위에서는 100K 이상에서의 결과와 달리 1K의 온도변화에도 벨로우즈가 급격히 수축하는 현상을 나타낸다. 따라서 약 100K의 온도근처에서 벨로우즈 내부 질소가 기체와 액체가 공존하는 포화 상태에 도달하였고 이에 따라 급격한 밀도변화에 의한 큰 변형을 수반함을 추측할 수 있다. 이는 식 (3)의 증기압 방정식을 통하여 간접적으로 검증하기로 한다.

극저온 부근에서 포화상태에 도달하였음을 살펴보기 위하여 포화상태로 예상되는 100K에서 77K의 범위까지 증기압 방정식 (3)을 이용하여 증기압을 계산하였으며 본 연구의 해석결과와 비교하였다. 두 결과들의 비교는 Fig. 6에 도시하였으며, 정확한 수치는 Table 5에 나타내었다.

Table 5에서 보듯이 본 연구의 해석결과와 증기압 방정식 (3)의 해와의 오차는 77K~96K 범위에서는 0.1%의 오차 이내로 거의 일치한다. 다만

96K 이상의 온도에서는 오차가 커지는데 이는 벨로우즈 내부 질소가 포화 영역을 벗어나 순수 기체의 영역에 있기 때문이다. 그러므로 벨로우즈의 내부 질소가 포화가 시작되는 온도는 96K 임을 추론할 수 있으며 이때 질소의 절대압력은 583.2kPa이다.

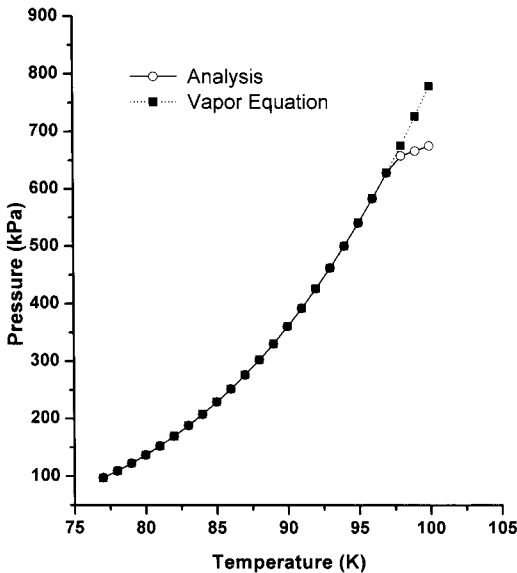


Fig. 6 Comparisons between results by the proposed method and pressure by vapor pressure equation (3)

Table 5 Numerical results by the proposed method and the vapor pressure equation (3)

Temperature (K)	Analysis Result Pressure (kPa)	Vapor Equation Pressure (kPa)	Error(%)
96.0	583.2	583.8	0.1014
94.0	500.2	500.7	0.1008
92.0	426.2	426.6	0.0963
90.0	360.5	360.8	0.0920
88.0	302.5	302.8	0.0864
86.0	251.7	252.0	0.0850
84.0	207.6	207.8	0.0846
82.0	169.5	169.6	0.0839
80.0	136.9	1376.0	0.0863
78.0	109.3	109.4	0.0958
77.0	97.2	97.3	0.1005

이상의 결과에서 보듯이 본 연구에서 제안한 해석 기법은 상온에서 포화상태까지 포함하여 극저온에 이르는 영역까지 온도 변화에 따른 극저온 냉각기용 벨로우즈의 거동을 정확히 계산함을 알 수 있다.

4. 결론

줄-튐슨 마이크로 극저온 냉각기에서 벨로우즈는 온도제어장치로 사용되는 핵심부품이고 제품 개발 및 설계를 위하여 벨로우즈의 거동을 정확히 예측하여야 한다. 이를 목적으로 본 연구에서 벨로우즈 내부 질소의 포화상태까지 포함하는 변형 해석 기법을 제시하였다.

해석 결과 연구 대상인 소형 초박막 금속 벨로우즈는 내부 충전 질소의 온도가 변함에 따라 내부의 압력이 변하고 이에 따른 축방향 변형이 일어나는데 질소가 포화상태에 도달하기 전에는 선형으로 근사화할 수 있다. 그러나 포화상태에 도달한 후인 극저온 상태에서는 급격한 변형을 수반한다. 본 연구에서 설정한 초기상태인 상온에서 상대압력 2MPa 으로 질소를 벨로우즈에 충전한 경우 냉각 과정 중 열전달로 벨로우즈의 온도가 변하여 내부 질소가 액체와 기체로 공존하는 포화상태에 도달하며 포화 시작 온도는 96K 이고 이때 내부압력은 538.16kPa 이다. 그러므로, 설계 관점에서 정확한 온도 제어를 위한 벨로우즈는 내부 질소의 온도가 선형성을 나타내는 약 100K 이상이 되어야 한다. 이상의 결과들은 77K 까지 냉각이 가능한 냉각기를 설계할 때 유량 조절용 벨로우즈의 크기나 위치 및 질소 충전 압력이 중요한 인자임을 설명한다.

결론적으로 본 연구에서 제안한 MBWR 상태 방정식과 유한요소해석을 반복적으로 수행하는 알고리즘은 현 연구 대상인 소형 초박막 금속 벨로우즈 거동을 상온에서 극저온에 이르는 영역까지 잘 예측하고 유량 조절을 위한 소형 벨로우즈의 설계에 활용할 수 있다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다.

참고문헌

1. Koh, B. K., Park, G. J. and Lee, W. I., "Development of a Bellows Finite Element for the Analysis of Piping System," Transactions of the KSME, Vol. 19, No. 6, pp. 1439-1450, 1995.
2. Koh, B. K. and Park, G. J., "Development of Bellows Finite Element Analysis Program and Simplified Formulas of Bellows and Shape Optimization," Transactions of the KSME, Vol. 21, No. 8, pp. 1195-1208, 1997.
3. Kim, D. H. and Choi, M. J., "Vibration Analysis Model for Bellows Using Reduced Degree of Freedom in the Vehicle Exhaust System," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 659-663, 2001.
4. Lee, S. H. and Lee, T. W., "A Study on the Structural Characteristics of Miniature Metal Bellows m Joule-Thomson Micro-Cryocooler," Journal of the KSPE, Vol. 25, No. 9, pp. 95-102, 2008.
5. Lee, S. E. and Lee, T. W., "Deformation Analysis of Self-regulating Bellows in Joule-Thomson Cryocooler," Journal of the KSPE, Vol. 25, No. 4, pp. 100-107, 2008.
6. Chien, S. B., Chen, L. T. and Chou, F. C., "A Study on the Transient Characteristics of a Self-regulating Joule-Thomson Cryocooler," Cryogenics, Vol. 36, No. 12, pp. 979-984, 1996.
7. Younglove, B. A., "Thermophysical properties of fluids. I. Argon, ethylene, parahydrogen, nitrogen, nitrogen trifluoride, and oxygen," Journal of Physical and Chemical Reference Data, Vol. 11, No. 1, pp. 4-9, 1982.
8. Jacobsen, R. T. and Stewart, R. B., "Thermodynamic Properties of Nitrogen Including Liquid and Vapor Phases from 63K to 2000K with Pressures to 10,000 Bar," Journal of Physical and Chemical Reference Data, Vol. 2, No. 4, pp. 757-922, 1973.
9. Lemmon, E. W., Haber, M. L. and McLinden, M. O., "NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP) Version 8.0," National Institute of Standards and Technology, 2007.
10. Ahmad, S., Irons, B. M. and Zienkiewicz, O. C., "Analysis of Thick and Thin Shell Structures by Curved Element," Int. J. Numer. Methods Eng., Vol. 2, No. 2, pp. 419-451, 1970.
11. Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L. and Too, J. M., "Reduced Integration Techniques in General Analysis of Plates and Shells," Int. J. Numer. Methods Eng., Vol. 3, No. 2, pp. 275-290, 1971.
12. Hughes, T. J. R., Cohen, M. and Haron, M., "Reduced and Selective Integration Techniques in the Finite Element Analysis of Plates," Nuclear Eng. Desgn., Vol. 46, No. 1, pp. 203-222, 1978.
13. Stolarski, H. and Belytschko, T., "Membrane Locking and Reduced Integration for Curved Elements," J. Appl. Mech., Vol. 49, No. 1, pp. 172-176, 1982.
14. ANSYS, "Online Documentation for ANSYS V11.0," ANSYS Inc., 2007.
15. Armstrong, G. T., "Vapor Pressure of nitrogen," Journal of Reserch of the National Bureau of Standards., Vol. 53, No. 4, pp. 263-266, 1954.
16. Weber, L. A., "Some Vapor pressure and P-V-T data on nitrogen in the range 65 to 140K," J. Chem. Thermodyn., Vol. 2, pp. 839-846, 1970.
17. Stein, B., Jaeger, P. and Przybyla, C., "Mechanical Properties of Electroformed Nickel Cobalt Alloy," Proceeding of the 22nd Heat Treating Society Conference and the 2nd International Surface Engineering Congress, pp. 308-310, 2003.