

내부 기체의 온도 변화에 따른 극저온 냉각기용 소형 금속 벨로우즈의 변형에 관한 연구

이 승 하* · 이 태 원**†

* LIG 넥스원 탐색기/광학연구센터, ** 금오공과대학교 기계설계공학과

Study on Deformation of Miniature Metal Bellows in Cryocooler Following Temperature Change of Internal Gas

Seung Ha Lee* and Tae Won Lee**†

* EO/IR R&D Lab, LIGNex1 Co., Ltd.,

** Dept. of Mechanical Design Engineering, Kumoh Nat'l Inst. of Technology

(Received October 23, 2014 ; Revised December 23, 2014 ; Accepted January 4, 2015)

Key Words: Joule-Thomson Cryocooler(줄-톰슨 극저온냉각기), MBWR State Equation(MBWR 상태방정식), Bellows(벨로우즈), Internal Volume(내부 체적), Axisymmetric Shell Element(축대칭 셸요소)

초록: 벨로우즈는 줄-톰슨 소형 극저온 냉각기에서 온도조절장치로 사용하는 중요한 부품이다. 벨로우즈는 매우 얇은 셸로 제작되었으며 내부는 질소기체로 충전되어 있다. 또한 재료는 니켈-코발트 합금이며 이 재료는 300℃에서 극저온까지 탄성계수와 강도가 변하지 않는 금속이다. 벨로우즈 내부의 기체는 온도가 바뀌면 기체의 압력과 부피가 변하고 결과적으로 벨로우즈가 길이 방향으로 수축 또는 팽창한다. 이 현상을 해석하기 위하여 주어진 온도에서 기체의 상태방정식이 만족될 때까지 수정된 압력하에서 벨로우즈의 변형과 변형된 내부 체적을 반복적으로 계산하였다. 현 연구에서 기체의 온도-부피-압력 상태를 정의하는 식으로 MBWR 상태 방정식이 채택되었다. 제안한 해석 방법론의 타당성을 증명하기 위하여 실험을 수행하였고 비교결과 수치 해는 실험값과 잘 일치하였다.

Abstract: A bellows is an important temperature control component in a Joule-Thomson micro-cryocooler. It is designed using a very thin shell, and the inside of the bellows is filled with nitrogen gas. The bellows is made of a nickel-cobalt alloy that maintains its strength and elastic properties in a wide range of temperatures from cryogenic to 300℃. The pressure of the gas and the volume within the bellows vary according to the temperature of the gas. As a result, the bellows contracts or expands in the axial direction like a spring. To explore this phenomenon, the deformation of the bellows and its internal volume must be calculated iteratively under a modified pressure until the state equation of the gas is satisfied at a given temperature. In this paper, the modified Benedict-Webb-Rubin state equation is adopted to describe the temperature-volume-pressure relations of the gas. Experiments were performed to validate the proposed method. The results of a numerical analysis and the experiments showed good agreement.

1. 서론

밀봉된 내부에 고압의 기체로 충전된 벨로우즈는 외부로부터 열전달에 의해 내부 기체의 온도가 변하고 이에 따른 기체의 체적 및 압력 변화로 벨로우즈가 수축 또는 팽창한다. 이 현상을 이용한 밸브 개폐로 냉매의 유량을 조절할 수 있는 벨로우즈는 냉장과와 냉동고, 에어컨, 보일러, 유량 계측기 및 줄-톰슨

마이크로 냉각기의 온도제어에 널리 사용된다. 대부분의 벨로우즈는 주름을 갖는 원통형 셸 구조물인 복잡한 형상이므로 변형해석은 주로 유한요소법에 의존한다.⁽¹⁻⁴⁾ 그러나 이들 연구들은 내부 압력으로 인한 변형 해석이고 내부 기체의 온도는 전혀 고려하지 않았다. 내부 기체의 온도변화에 따른 벨로우즈의 거동을 예측하기 위하여 Chien 등⁽⁵⁾은 벨로우즈를 단순히 선형 스프링으로 모델링하여 해석을 수행하였다. 내부 기체의 온도 변화에 따른 보다 정확한 벨로우즈의 변형 해석을 위하여 Lee 등^(6,7)은 기체의 온도-체적-압

† Corresponding Author, twlee@kumoh.ac.kr

력 상태 방정식과 유한요소법을 결합한 수치적 방법을 제안하였으나 실험적으로 검증하지 못하였다. 이에 본 연구에서는 기존의 연구보다 향상된 내부 체적 계산 기법을 적용하고 실험을 통해 채택된 방법의 타당성을 검증해 보기로 한다.

잘 알고 있듯이 내부에 충전된 기체는 온도변화에 따라 압력을 변화시켜 벨로우즈를 수축 또는 팽창시키는데 중요한 사실은 변형된 벨로우즈의 내부 체적 변화는 기체의 체적변화와 동일해야 한다는 것이다. 그러므로 정확한 변형해석을 위하여 먼저 벨로우즈 내부에 충전된 기체의 온도, 압력 및 체적 변화의 상관관계를 알아야 한다. 질소의 경우 일반적으로 MBWR(Modified Benedict Webb Rubin) 상태방정식^(8,9)이 정확하며 이는 32 개의 계수를 갖는 비선형 고차 방정식으로 기체의 온도, 압력과 체적의 상관관계를 기술하고 있다. 이 상태방정식은 너무 복잡하여 REFPROP⁽¹⁰⁾ (Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties) 로 NIST 에서 상용코드화 하였다. 참고로 MBWR 식은 기체뿐 아니라 액체 상태까지 포함하여 온도-체적-압력 상태를 정확히 표현한다.

본 연구 대상인 벨로우즈는 초박막으로 만들어진 곡선의 주름을 갖는 축 대칭 형상이다. 수치해석에 필요한 축대칭 셀 요소는 Ahmad 등⁽⁹⁾에 의하여 처음 개발되었으나, 많은 셀 요소 중 초박막 벨로우즈 해석에는 감차적분⁽¹²⁻¹⁵⁾을 이용한 3 절점 축대칭 셀 요소⁽¹⁶⁾가 적합하다. 이는 Lee 등⁽⁴⁾이 내압에서 정확한 예측을 실험적으로 증명하였다. 그러므로 상용 유한요소 코드인 ANSYS 에서 이 요소를 선정하고 변형 해석을 수행하였다. 그런데, 내부 기체의 온도가 변하면 기체의 체적과 압력이 MBWR 상태 방정식을 만족하면서 이 내부 압력으로 인한 변형된 벨로우즈의 내부 체적이 일치해야 하는 것이 일반적인 유한요소해석과 다른 점이다. 이 어려움을 해결하기 위하여 반복적인 방법을 사용하였다.

제안된 방법은 내부 기체 온도가 결정되면 초기 가정된 내압하에 벨로우즈의 변형을 구하고 이 변형된 벨로우즈의 내부 체적이 MBWR 상태 방정식을 만족할 때까지 내압을 수정하는 것이다. 이를 위해서 벨로우즈 내부 기체의 체적 계산이 필요하다. Lee 등^(6,7)은 두 절점을 선형으로 근사화한 후 원추형 체적의 구분구적법을 적용하였으나 보다 정확하고 효율적인 내부 체적 계산을 위해 모델링에서 선정된 유한요소의 형상함수에 맞는 적분 결과를 사용하는 것이 추천된다. 그러므로 본 연구에서 체적을 계산하기 위하여 벨로우즈를 모델링한 3 절점 축대칭 셀 요소의 형상함수로부터 직접 기체의 체적을 구하는

적분식을 유도하였다.

제안된 수치해석에 의해 내부 기체의 온도 변화에 따른 벨로우즈의 변형을 정확히 예측할 수 있음을 입증하기 위하여 실험을 수행하였다. 실험은 293 K 의 상온에서 벨로우즈에 고압의 질소 기체로 충전한 후 기체의 온도를 변화하면서 길이 방향 변형을 측정하였다. 실제 극저온 냉각기의 사용조건에 맞게 온도 조건을 설정하여야 하나 실험의 어려움으로 온도범위는 223K~323K 로 제한하였다. 이 범위에서 실험 측정값들과 수치해석 결과와 잘 일치함을 확인하였다. 비록 실험의 온도 구간이 극저온을 포함하지는 않으나 MBWR 상태 방정식이나 제안된 방법이 온도 범위에 대한 제약이 없기 때문에 벨로우즈 내부 기체 전체가 액화되지 않는 한 본 연구의 방법은 극저온 초소형 벨로우즈의 거동을 예측하는데 적용할 수 있다.

2. 벨로우즈의 변형해석

2.1 벨로우즈의 기계적 특성

연구 대상인 초소형 줄-톰슨 극저온 냉각기는 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 냉각을 위하여 오르피스를 통하여 극저온 질소 기체를 분출한다. 극저온 기체의 분출에 의한 열전달로 인하여 벨로우즈 내부 기체의 온도가 변하여 기체의 압력과 체적 변화로 일어나며 이는 결국 벨로우즈의 압축과 팽창을 통한 냉매의 유량을 조절하게 된다.

극저온에 사용되는 벨로우즈는 일반적으로 니켈 합금으로 제작되는데 일반적으로 초박형일 경우

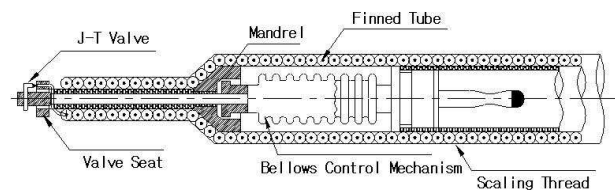


Fig. 1 Schematic drawing of bellows-controlled Joule-Thomson micro-cryocooler

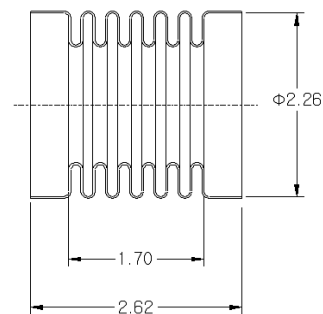


Fig. 2 Geometry of bellows in Joule-Thomson micro-cryocooler

요구되는 치수 및 기계적 성질을 확보하기 위하여 전착에 의해 제작된다. 참고로 본 연구에서 벨로우즈는 Fig. 2 에서 보는 바와 같이 내부가 질소로 충전된 원통형으로 길이 2.62mm, 외경 2.26mm 이고 두께 0.025mm 인 벨로우즈로 초소형이면서 초박형이다.

초소형 극저온 냉각기 유량조절용 벨로우즈는 내열성과 내식성이 우수하고 반복하중에 의한 균열이 가거나 파괴되지 않아야 하며 온도변화에 따른 기계적 성질이 변화가 없어야 한다. 이러한 조건을 만족하는 재질로는 니켈-코발트 합금으로 Nicoform 사에서 제조된 Nicoloy 15 가 적합하다. 이 재료는 95% 이상의 니켈과 5%이하의 코발트 균형재로 구성되어 있고 순수 니켈보다 더욱 큰 항복강도를 가지며 전착에 의하여 제조할 경우 최소 0.01mm 의 두께로 제조 가능하기 때문에 박형이면서 소형인 벨로우즈 제작에 용이하다. 뿐만 아니라 극저온에서 300℃에 이르는 넓은 온도범위에서 동일한 기계적 특성을 유지하므로 온도변화에 따른 탄성계수나 푸아송비의 변화는 거의 없고 열팽창 효과 역시 무시할 수 있다. Table 1 에 기계적 특성을 나타내었다.

2.2 기체의 상태방정식

밀폐된 벨로우즈 내부의 기체는 질량이 불변이므로 온도가 변화하면 이에 따라 압력과 체적이

Table 1 Mechanical properties of bellows

Ultimate Tensile Strength (psi)	150,000
Yield Strength (psi)	120,000
Modulus of Elasticity (psi)	22,000,000
Poisson's Ratio	0.31
Shear Modulus (psi)	8,400,000

변화한다. 기체의 온도, 압력 및 체적의 관계를 기술하는 상태 방정식은 몇 가지 식들이 제안되었으나 아래의 MBWR 상태방정식이 가장 정확한 것으로 알려져 있다.

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

위 식에서 P는 압력, T는 절대온도, R은 기체상수, ρ는 밀도이며 N₁~N₃₂, γ는 기체에 대한 상수로 질소의 경우 Table 2 에 설명되어 있다.

2.3 벨로우즈 변형해석

Fig. 1 과 같은 구조의 줄-톱슨 극저온 냉각기를 생각하자. 초기상태로 293 K 와 2MPa 의 고압 질소로 벨로우즈는 충전되었다. Fig. 1 의 오른쪽 관을 통해 상온에서 유입된 질소기체는 왼쪽에 있는 오르피스를 통과하며 온도가 73K 로 급격히 떨어진다. 유량 조절용 벨로우즈 내부 질소의 온도는 73K 에서 323K 의 사이로 추론할 수 있으나 현실적으로 내부 질소가 액화되지 않아야 유량 조절이 용이하므로 본 연구에서는 온도범위를 100K~323K 로 설정하였다.

벨로우즈 내부의 기체가 특정온도에 도달하였을 때 벨로우즈의 변형을 계산하기 위하여 온도-체적-

Table 2 Nitrogen coefficients for MBWR equation(γ = 0.0056, R = 0.0820562, liter-atm/mol·K coefficients are for temperature in Kelvin, pressure in atmospheres and density in mols/liter.)

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

압력의 상태방정식을 만족하는 압력과 변형 형상의 내부 체적을 반복적으로 계산하여야 한다. 이에 대한 알고리즘은 문헌^(6,7)과 동일하게 다음과 같다.

단계 1. 323K 에서 100 K 까지 온도 구간을 n 개의 구간으로 나누어 특정 온도 T_i 를 정의한다. 본 해석에서는 1K 간격으로 설정하였다.

단계 2. 기체의 온도가 변화하면 체적이 변한다. 벨로우즈 내부의 질소는 초기 조건으로 충전된 후 밀폐되어서 기체의 질량은 일정하다. 참고로 전 온도 T_{i-1} 에서 구한 내부 체적을 초기 내부체적으로 가정한다.

단계 3. 밀봉된 질소 기체의 질량을 벨로우즈 내부의 체적으로 나누어 계산된 밀도 ρ 와 온도 T_i 를 상태방정식 (1)에 대입하여 내부 질소의 압력 P_k 를 계산한다.

단계 4. 단계 3 에서 구한 기체의 압력 P_k 를 내부에 적용하여 벨로우즈의 변형 해석을 한다. 벨로우즈의 재질은 온도에 따라 물성이 변하지 않으므로 열팽창 효과는 무시한다.

단계 5. 변형된 벨로우즈의 형상 자료로부터 내부체적을 구한다. 계산된 벨로우즈의 내부체적을 이용하여 밀도 ρ 를 구한 후 식 (1)에 대입하여 새로운 벨로우즈의 내부압력 P_{k+1} 를 구한다.

단계 6. 단계 5 에서 구한 압력 P_{k+1} 과 단계 4 에서 주어진 내부 압력 P_k 가 일치하면 온도 T_i 에서 벨로우즈 내부 압력과 변형 결과가 최종적으로 구해졌다. 그러나 이 압력들이 차이가 있으면 압력 P_{k+1} 를 압력 P_k 대체한 후 단계 4-6 을 반복한다.

단계 4 에서 내압을 받는 벨로우즈의 변형은 본 연구에서 상용 유한요소 코드인 ANSYS 로 해석하였다. 박막 쉘을 해석하기 위해 선정된 감차 적분을 적용한 축대칭 3 절점 쉘요소는 Lee 등⁽⁷⁾과 동일하게 SHELL209 로 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 모델링 하였다. 그리고 단계 3 과 단계 5 에서 상태방정식 (1)로부터 계산되는 압력은 상용 코드 REFPROP 을 사용하였다. 또한, 가장 핵심인 변형된 벨로우즈 내부의 체적은 2-4 절의 방법에 따라 계산되었으며 이 모든 과정은 ANSYS 의 APDL 을 이용하여 프로그래밍하였다.

2.4 벨로우즈 내부체적 계산

내부 기체의 온도변화에 따른 벨로우즈의 변형을 계산하려면 반복적으로 벨로우즈의 내부압력과

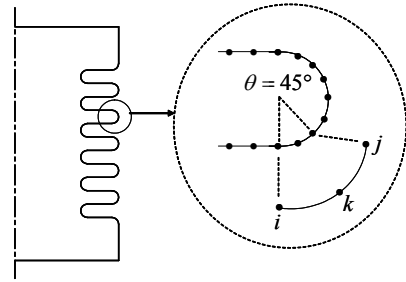


Fig. 3 Finite element modeling of bellows

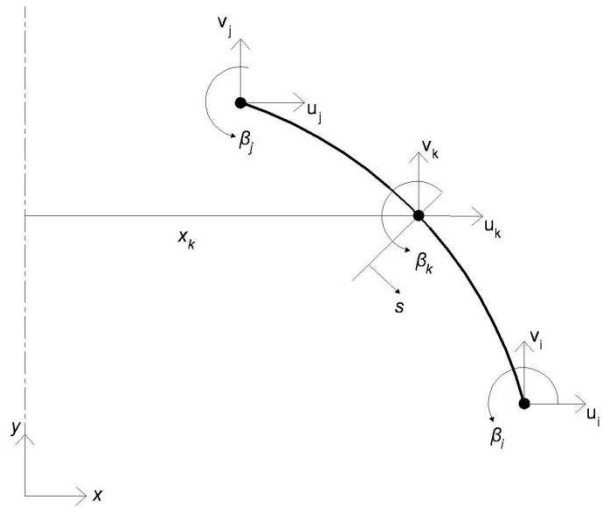


Fig. 4 3 nodes axisymmetric shell element

내부 체적을 구하여야 하기 때문에 효율적인 내부 체적 계산 방법이 필요하다. Lee 등^(6,7)은 간단한 원추식을 이용한 구분구적법에 의존하였으나 여기서는 수치해석을 위하여 선정된 유한요소와 연계하여 벨로우즈 내부체적을 구하고자 한다.

벨로우즈 구조 해석에 선정된 SHELL209 는 3 절점 축대칭 쉘 요소로 Fig. 4 에 도시하였다. 쉘의 두께는 0.025mm 로 체적 계산에 무시할 정도이므로 이 효과는 고려하지 않기로 한다. 이 요소의 변위는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 u(s) &= \frac{1}{2}[u_k(-s + s^2) + u_i(s + s^2) + u_j(1 - s^2)] \\
 v(s) &= \frac{1}{2}[v_k(-s + s^2) + v_i(s + s^2) + v_j(1 - s^2)] \\
 \beta(s) &= \frac{1}{2}[\beta_k(-s + s^2) + \beta_i(s + s^2) + \beta_j(1 - s^2)]
 \end{aligned} \quad (2)$$

위 식에서 u 및 v 는 변위이며 s 에 대한 매개 방정식으로 표현 되고 $-1 \leq s \leq 1$ 이다. 또한 체적 적분을 위하여 필요한 좌표 x, y 역시 식(2)와 동일한 형상함수를 적용하여 아래와 같이 표현된다

$$\begin{aligned}
 x(s) &= \frac{1}{2}[x_k(-s + s^2) + x_i(s + s^2) + x_j(1 - s^2)] \\
 y(s) &= \frac{1}{2}[y_k(-s + s^2) + y_i(s + s^2) + y_j(1 - s^2)]
 \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)의 곡선으로 정의된 회전체의 체적은 아래의 적분을 통하여 계산된다.

$$V = \pi \int_{-1}^1 x(s)^2 \frac{dy(s)}{ds} ds \quad (4)$$

위 적분은 GAUSS 수치적분을 이용하여 구할 수 있다. 이를 위하여 적분항을

$$f(s) = x(s)^2 \frac{dy(s)}{ds} \quad (5)$$

로 정의하면 식 (4)는 결국 아래의 함수값과 가중치의 합으로 기술된다.

$$V = \pi \sum_{i=0}^n w_i f(s_i) \quad (6)$$

여기서 $f(s)$ 는 s 의 5 차 다항식이므로 차수 n 은 5 이상이면 된다. 최종적으로 모든 축대칭 셀 요소 대하여 각각의 적분 결과식 (6)을 더하면 전체 벨로우즈의 내부 체적이 된다.

3. 실험 및 해석 결과

3.1 실험

2 장의 알고리즘에 의한 수치해의 정확성을 입증하기 위하여 실험을 계획하였다. 그러나 전작과정으로 제작된 벨로우즈는 초소형, 초박형일 뿐 아니라 소형 극저온 냉동기 내부에 장착되므로 벨로우즈 내부 온도를 측정하기가 불가능하다. 그러므로 항온 챔버에 벨로우즈만 단독으로 설치한 후 온도변화에 따른 길이방향 변형량을 측정하였다. 벨로우즈는 상하부에 STS316 스테인리스 봉을 이용하여 밀폐처리 하였다. 물론 가스 공급을 위하여 먼저 하부에 0.6 mm 스테인리스 관으로 입구를 만들고 이곳을 이용하여 293K 의 질소 기체를 2MPa 로 벨로우즈 내부에 충전하였으며 충전 후 입구는 밀봉 처리 하였다. Fig. 5 는 실험을 위해 설치된 장치들의 구성도이다. Fig. 5 에서 보면 실험 장치들은 크게 일정한 온도 조건을 유지하기 위한 항온 챔버와 변위 측정을 위한 LVDT, 온도 측정을 위한 열전대, 센서의 출력을 증폭하고 설정하기 위한 인디게이터, 데이터 획득을 위한 DAQ, 그리고 데이터 분석을 위한 PC 로 구성되어 있다.

벨로우즈 내부 기체의 온도 범위는 223K~323K 로 $\Delta T = 100K$ 로 설정하였으며, 5K 간격 총 21 구간에서 벨로우즈의 길이방향 변형을 측정하였다. 줄-톱슨 극저온 냉각기의 유량 조절용 벨로우즈의 사용조건과 동일하게 극저온이 포함된 온도 범위 까지 실험을 수행하여야 하나 100K 에 이르는 극저온 상태의 시험은 저온 유지의 어려움과 장비의

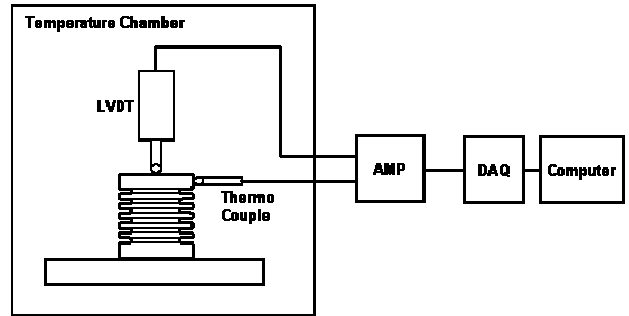


Fig. 5 Schematics of experiment

측정오차가 커질 우려가 있으므로 이 온도범위로 한정하였다. 더구나 본 실험의 주된 목적은 제안된 해석 방법의 타당성 입증이므로 223K~323K 범위의 실험결과와 비교만으로 충분하다.

내부 질소 기체의 온도를 원하는 값으로 설정하기 위하여 항온 챔버 내에서 벨로우즈를 설치하였다. 챔버 내부의 단위 시험온도를 1 시간 이상 일정하게 유지하여 벨로우즈 내부 기체의 온도 역시 목표 온도에 도달하였다고 보고 벨로우즈의 길이방향 변형량을 LVDT 로 측정하였다. 잘 알고 있듯이 접촉식 변위측정 센서인 LVDT 는 온도에 따라 측정값이 차이가 발생하기 때문에 온도 보정이 필요하다. 따라서 각 온도에 대한 LVDT 변위 보정값을 측정하여 벨로우즈의 길이방향 변형량을 수정하였다.

3.2 해석결과 및 실험 결과

해석적 방법에 의한 벨로우즈 내부 기체의 온도에 대한 내부압력과 체적, 길이 방향 변위의 수치 해석 결과를 Table 3 에 나타내었다. 반경방향 변위도 물론 존재하나 그 크기는 최대 0.001mm 이하로 길이방향 변위에 비하여 상대적으로 무시할 정도이므로 Table 3 에서 생략하였다. 각 벨로우즈 내부 기체 온도에 대하여 2-3 절의 알고리즘에 의한 유한요소해석은 최대 4 회 이내에 반복과정으로 해를 구할 수 있는 것으로 나타났다. 여기서 해의 수렴 여부를 판단하는 단계 6 에서 기술한 조건인 압력의 변화는 0.1%로 설정하였다.

Table 3 에서 설정 온도가 일부 규칙성이 없는 이유는 관심 온도범위가 100K-323K 이고 293K 는 기준점으로 이 온도에서 벨로우즈에 2MPa 의 질소가스가 주입되기 때문이다. 초기 기준 온도와 압력하에서 벨로우즈는 0.4739mm 길이 방향으로 팽창되어 있다. 한편 2-4 절의 수치적분에 의해 구한 벨로우즈 내부의 체적은 3 차원 CAD 프로그램인 CATIA 에서 구한 체적 값과 거의 오차 없이

Table 3 Pressure, volume, density and displacement of bellows at each temperature

Temp(K)	Pressure(kPa)	Vol(mm ³)	Disp(mm)	Density
323	2187.1	10.2132	0.5182	0.8140
310	2106.7	10.1591	0.4991	0.8184
293	2000.0	10.0872	0.4739	0.8242
290	1980.9	10.0745	0.4694	0.8252
270	1853.2	9.9884	0.4391	0.8323
250	1723.3	9.9008	0.4083	0.8397
230	1590.8	9.8117	0.3769	0.8473
210	1455.8	9.7206	0.3449	0.8553
190	1317.8	9.6277	0.3122	0.8635
170	1176.6	9.5327	0.2788	0.8721
150	1031.8	9.4350	0.2445	0.8812
130	882.4	9.3344	0.2091	0.8907
110	726.8	9.2296	0.1722	0.9008
100	645.6	9.1749	0.1530	0.9061

Table 4 Comparison between axial deformations by experiments and results by Analysis

Temperature (°C)	Analysis (mm)	Experiment (mm)	Error(%)
323	0.5182	0.528	1.9
313	0.5036	0.514	2.0
303	0.4887	0.498	1.9
298	0.4814	0.490	1.8
293	0.4739	0.482	1.7
288	0.4664	0.478	2.4
278	0.4513	0.465	2.9
268	0.4361	0.445	2.0
258	0.4207	0.426	1.2
248	0.4052	0.411	1.4
238	0.3896	0.396	1.6
228	0.3737	0.380	1.6
223	0.3658	0.372	1.7

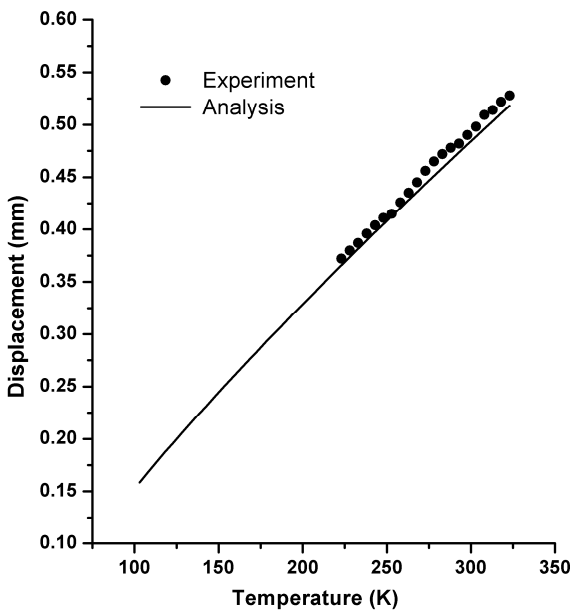


Fig. 6 Comparison between axial deformations by experiments and results by analysis

일치함을 확인하였다.

실험과 해석결과는 Fig. 6 에 도시하였다. 실험에서 벨로우즈의 길이방향 변위만 측정하였기 때문에 이 변형량만 비교하였다. 223K~323K 의 온도 범위 내에서 두 변형량은 거의 일치하나 실험값이 해석값보다 전체적으로 약간 크다.

두 결과의 오차 정도를 분석하기 위하여 Table 4

에 수치적으로 나타내었다. 실험을 행하였던 온도 범위에서 본 연구의 방법에 의해 수치적으로 계산한 벨로우즈 길이방향 변위량이 실험결과와 3% 미만의 오차로 잘 일치함을 알 수 있다. 그런데 벨로우즈에 충전하는 질소의 기준온도인 293K 에서도 실험과 해석 사이에 오차가 1.7% 존재한다. 293K, 2MPa 는 충전 질소 기체의 초기 조건으로 해석적 방법이 온도 변화에 따른 벨로우즈 거동을 정확히 예측하는지를 판단하려면 실험과 해석 결과가 일치하여야 하는데 두 값이 오차가 존재하는 것은 전착공정에 의하여 만들어진 초소형, 초박형 벨로우즈의 제작 공차, 재질, 질소 주입 온도 및 압력의 변동성 때문으로 판단된다.

이와 같은 이유로 초기의 벨로우즈 내부 기체온도 293K 를 기준으로 온도변화에 따른 상대변위를 관찰 할 필요가 있다. Table 4 에서 보면 벨로우즈 내부 기체온도가 323K 에서 실험은 길이 방향으로 0.046mm 의 팽창이 발생하고 해석은 0.0443mm 이다. 또한 낮은 온도인 223K 에서 실험 값은 -0.112mm 이고 해석 값은 -0.1081mm 이다. 각 온도에서 계산하여 보면 293K 에서 많이 벗어난 온도에 해당하는 길이방향 상대변위가 클수록 두 결과의 오차는 작다. 이는 실험에서 매우 작은 변위를 측정하고 그 측정변위의 변동성이 상대적으로 커서 벨로우즈의 거동이 불안정 하기 때문에 측정 오차가 커진 것으로 판단된다. 오차의 특성을 분석한 결과 제안된 수치해법은 실험 결과와 전체적

으로 잘 일치한다고 말할 수 있다.

4. 결 론

극저온 냉동기의 냉매인 질소의 유량제어용 초박형 벨로우즈의 거동을 수치적으로 해석하였다. 제안된 방법은 기체의 상태 방정식과 내부 기체의 압력에 따른 벨로우즈의 변형 해석을 반복적으로 수행하나 반복 횟수가 최대 4 회 정도로 많은 계산 시간을 요구하지는 않았다. 또한 벨로우즈의 체적 역시 선정된 유한요소의 형상함수를 이용하여 계산하였다. 비록 본 연구에서는 MBWR 상태 방정식과 유한요소해석을 위해 ANSYS 에서 감차적분을 적용한 축대칭 3 절점 쉘요소를 사용하였으나 보다 정확하고 효율적인 상태방정식과 벨로우즈의 변형해석 방법이 존재한다면 이들을 바로 적용할 수 있다.

해석 결과 연구 대상인 벨로우즈는 내부 기체의 온도가 변함에 따라 내부의 압력이 변하며 이에 따른 변형을 하게 된다. 그런데 반경방향 변형은 길이방향 변형에 비하여 상대적으로 적어 그 영향을 무시할 정도이고 길이방향 변형은 내부 기체인 질소가 액화되지 않는 한 본 연구의 방법으로 쉽게 구할 수 있다. 제안된 방법의 타당성을 입증하기 위하여 실험도 수행하였다. 벨로우즈 내부 온도가 223K~323K 범위에서 제작상의 공차와 기체 주입 온도, 압력 조건의 변동성과 측정 오차가 있음을 감안하면 실험 결과 역시 해석 결과와 잘 일치한다.

설계 관점에서는 벨로우즈의 변형량도 중요하지만 응력 상태의 계산되어야 한다. 초소형이고 초박형 벨로우즈의 경우 응력 측정이 불가능하므로 수치적 해석 방법에 의존하게 된다. 그러므로 본 연구의 해석 방법은 향후 다양한 초소형 초박형 벨로우즈 개발에 기여할 수 있다.

후 기

이 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 지원된 논문입니다.

참고문헌 (References)

- (1) Koh, B. K., Park, G. J. and L, W. I., 1995, "Development of a Bellows Finite Element for the Analysis of Piping System," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 19, No. 6, pp. 1439~1450.
- (2) Koh, B. K and Park, G. J., 1997, "Development of Bellows Finite Element Analysis Program and Simplified Formulas of Bellows and Shape Optimization," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 21, No. 8, pp. 1195~1208.
- (3) Kim, D. H. and Choi, M. J., 2001, "Vibration Analysis Model for Bellows Using Reduced Degree of Freedom in the Vehicle Exhaust System," *KSPE Autumn Conference*, pp. 659~663.
- (4) Lee, S. H and Lee, T. W., 2008, "A Study on the Structural Characteristic of Miniature Metal Bellows in Joule-Thomson Micro-Cryocooler," *Journal of the KSPE*, Vol. 25, No. 5, pp. 95~102.
- (5) Chien, S. B., Chen, L. T. and Chou, F. C., 1996, "A Study on the Transient Characteristics of a Self-Regulating Joule-Thomson Cryocooler," *Cryogenics*, Vol. 36, No. 12, pp. 979~984.
- (6) Lee, S. E and Lee, T. W., 2008, "Deformation Analysis of Self-Regulating Bellows in Joule-Thomson Cryocooler," *Journal of the KSPE*, Vol. 25, No. 4, pp. 100~107.
- (7) Lee, S. H. and Lee, T. W., 2009, "Deformation Analysis of Miniature Metal Bellows Charged Nitrogen for Temperature Change to Cryogenic Condition," *Journal of the KSPE*, Vol. 26, No. 10, pp. 81~88.
- (8) Younglove, B. A., 1982, "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. 1~9.
- (9) Jacobsen, R. T., Stewart, R. B., 1973, "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.
- (10) Lemmon, E. W., Huber, M. L. and McLinden, M. O., 2007, *NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties REFPROP Version 8.0*, NIST
- (11) Ahmad, S., Irons, B. M. and Zienkiewicz, O. C., 1970, "Analysis of Thick and Thin Shell Structures by Curved Element," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 2, No. 2, pp. 419~451.
- (12) Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L. and Too, J. M., 1971, "Reduced Integration Techniques in General Analysis of Plates and Shells," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 3, No. 2, pp. 275~290.
- (13) Hughes, T. J. R., Cohen, M. and Haron, M., 1978, "Reduced and Selective Integration Techniques in the Finite Element Analysis of Plates," *Nuclear Eng. Design.*, Vol. 46, No. 1, pp. 203~222.
- (14) Stolarski, H. and Belytschko, T., 1982, "Membrane Locking and Reduced Integration for Curved Elements," *J. Appl. Mech.*, Vol. 49, No. 1, pp. 172~176.
- (15) Stolarski, H. and Belytschko, T., 1983, "Shear and Membrane Locking in the Curved C0 Elements," *Comp. Method in Appl. Mech. and Eng.*, Vol. 41, No. 3, pp. 279~296.
- (16) ANSYS, 2007, *Online Documentation for ANSYS V11.0*, ANSYS Inc.