

# 줄-튐슨 극저온 냉각기용 벨로우즈의 변형해석

이상은\*, 이태원#

## Deformation Analysis of Self-regulating Bellows in Joule-Thomson Cryocooler

Sang Eun Lee\* and Tae Won Lee#

### ABSTRACT

Bellows is an important component in Joule-Thomson cryocooler, which minimize the excessive flow of the cryogenic gas. The bellows is made of Monel 400 and its geometry is an axial symmetric shell. During cool-down process, the pressure and volume within bellows must be satisfied with Benedict-Webb-Rubin state equation. Moreover, Poisson's ratio of Monel 400 is nearly constants, but its Young's modulus varies for a drop in temperature. Under these conditions, bellows contracts in the axial direction like a spring. To evaluate deformation of bellows at cryogenic temperature, the numerical calculation of the volume within bellows and finite element analysis are iteratively used in this research. the numerical results show that deformation of the bellows is approximately linear for change of temperature.

**Key Words** : Cryogenic Temperature (극저온), Self-regulating Bellows (자기조절 벨로우즈), State Equation of Gas (기체의 상태방정식), Cool-down (온도강하), Finite Element Analysis (유한요소해석)

### 기호설명

$E$  = young's modulus  
 $m$  = mass of gas within bellows  
 $P$  = pressure within bellows  
 $R$  = gas constant  
 $T$  = temperature  
 $V$  = volume within bellows  
 $\nu$  = specific volume of gas within bellows

$\bar{\nu}$  = specific volume per *kmol* of gas within bellows

### 1. 서론

극저온 기술은 과학적 연구 영역에서 뿐만 아니라 의료, 진공, 에너지 및 수송 등 여러 관련분야에서 실용화되어 사용되고 있다. 극저온에 도달하기 위해서는 반드시 냉각기가 필요하며 각 산업적 수요에 따라 다양한 냉각기가 개발되어 왔다. 예를

접수일: 2007년 10월 1일; 게재승인일: 2008년 1월 31일

\* LIG 넥스원 구미연구소 기술 5팀

# 교신저자: 금오공과대학교 기계공학부

E-mail: twlee@kumoh.ac.kr Tel. (054) 478-7375

들면, 극저온 냉각기는 전자부품의 극부냉각을 위한 초소형 기기로부터 핵융합로의 초대형 냉각기에 이르기까지 그 종류가 대단히 많다. 이와 같이 다양한 극저온 냉각기의 냉각 성능을 최대화시키고 극저온 가스의 유량을 적절히 제어하기 위해서 강력한 유량 조절 제어기를 필요로 한다. 이러한 용도에 적합한 다양한 유량 제어용 장치들이<sup>1,2</sup> 개발되었으나 소형 극저온 냉각기의 경우 구조가 간단하고, 단시간 내에 극저온에 도달하기 위해 벨로우즈 컨트롤러 메카니즘을 채택한 줄-톰슨 냉각기가 주로 사용하고 있다. 줄-톰슨 냉각기는 고압의 가스가 매우 좁은 통로의 오리피스를 통과한 다음 가스체적의 급격한 팽창으로 압력이 떨어지면서 온도강하가 이루어진다는 원리를 이용한다. 이 때, 극저온 가스의 소모를 줄이기 위하여 밸브를 닫아 유량을 조절할 필요가 있으며, 유량 조절용으로 Fig. 1에 도시된 벨로우즈를 사용하고 있다.

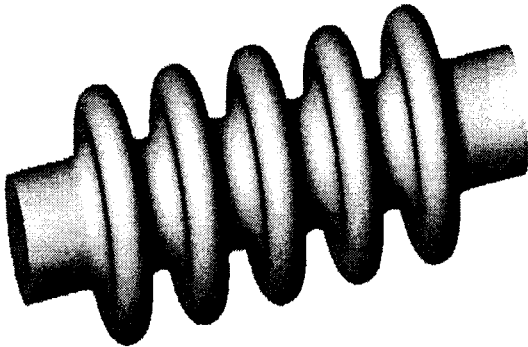


Fig. 1 Bellows Model

벨로우즈는 얇은 박판의 원통 셀로 구성되어 있으며 내부에는 극저온 용도에 사용되는 가스와 동질의 가스로 가득차 있다. 극저온 냉각에 사용되는 극저온 가스로는 헬륨, 수소, 질소, 아르곤, 산소 등이 사용되고 있으나 최근에는 임계온도가 77K인 질소가 상업용으로 많이 사용되고 있는 추세이다. Fig. 2는 벨로우즈로 조절되는 자기조절 줄-톰슨 극저온 냉각기의 개략도이다. 극저온 가스는 Fig. 2의 왼쪽에 있는 오리피스를 통과해서 나오고 이로 인하여 벨로우즈와 내부 가스의 온도가 강하하게 된다. 벨로우즈 내부 가스의 온도강하는 가스의 압력과 체적을 변화시키므로 결국 벨로우즈가 수축하여 극저온 가스의 유량을 조절하게 된다.

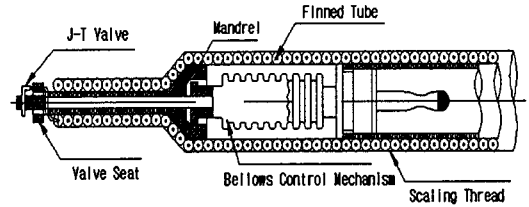


Fig. 2 Schematic Drawing of Bellows Control Self-Regulating Joule-Thomson Cooler

이와 같이 벨로우즈는 극저온 환경에서 냉각된 가스의 유량을 조절하는 핵심 부품이다. 그러나 극저온 냉각기에서 온도변화에 따른 벨로우즈의 거동에 관한 연구는 국내외적으로 거의 이루어지고 있지 않은 실정이다. 현재까지 벨로우즈에 관한 연구는<sup>3-7</sup> 구조물의 변형 및 파손을 방지하는 완충기용으로 진동 및 소음이나 고온 열변형에 관한 것이 대부분이다. 더구나 이러한 연구결과들은 대상 벨로우즈의 크기가 대형이며, 온도 변화에 따른 벨로우즈 내부 가스의 압력 및 체적 변화를 전혀 고려하고 있지 않다.

한편, 벨로우즈를 사용한 극저온 냉각기의 열전달에 관한 연구는 Chien등<sup>8,9</sup>에 의하여 이루어졌으나 벨로우즈 부분은 원통형 실린더로 단순화하여 냉각기의 열전달 해석을 수행하였다. 그들은 벨로우즈를 간단히 스프링으로 보고 정의된 강성계수를 이용하여 벨로우즈의 변형을 설명하였다. 그러므로 보다 정확한 초소형 냉각기의 열전달 해석을 위하여 실제 형상을 대상으로 벨로우즈 내부 가스의 온도 변화까지 고려한 벨로우즈의 변형해석이 요구된다.

초소형 극저온 냉각기용 벨로우즈의 상온에서 극저온까지 온도변화에 따른 거동을 정확히 예측하는 것이 보다 효율적인 극저온 가스의 유량제어를 위하여 필요하다. 그러나 초소형 벨로우즈의 거동이 눈에 보이지 않을 정도로 미세하고 극저온 환경을 만들기란 그리 수월하지 않으므로 벨로우즈의 거동에 관한 실험 및 측정에 많은 어려움이 따른다. 따라서 수치해석에 의한 초소형 벨로우즈의 거동에 관한 연구가 필요하다.

벨로우즈 내부에 충전된 가스는 온도변화에 따라 벨로우즈 내부압력을 변화시켜 벨로우즈의 형상을 변형시키는데 이 변형량은 벨로우즈의 내부체적 변화와 동일해야한다. 그러므로 벨로우즈의 변형해

석을 위하여 먼저 벨로우즈 내부의 온도, 압력 및 체적 변화의 상관관계를 알아야한다. 이 관계를 설명하기 위하여 간단한 이상기체 상태방정식을 사용할 수 있으나, 그 적용 범위는 제한된다. 따라서 넓은 온도 범위에서 온도와 압력 및 체적의 상태를 설명하는 다양한 상태방정식이 제안되었다. 이 중에서 Benedict-Webb-Rubin의 상태방정식이 가장 정확한 것으로 알려져 있으므로<sup>10,11</sup> 본 연구에서는 이상 상태 방정식을 사용하였다. 그리고 주어진 온도 하의 극저온 상태에서 Benedict-Webb-Rubin 상태방정식을 만족하는 벨로우즈의 내부체적 및 압력을 찾기 위하여 상태방정식을 만족할 때까지 반복적인 유한요소해석을 하여 벨로우즈의 정확한 최종 변형 형상을 계산하였다. 이 때 변형해석은 상용코드 ANSYS<sup>12</sup>를 사용하였으며 상태방정식의 만족여부를 검증하기 위한 벨로우즈 내부체적 계산은 자체 개발된 프로그램을 사용하였다.

## 2. 이론적 배경 및 해석모델

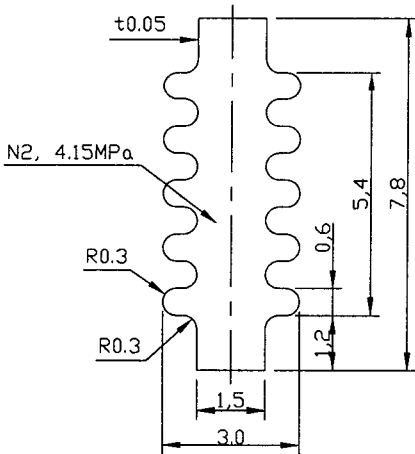


Fig. 3 The Cross-Section of Bellows

벨로우즈 컨트롤러 메카니즘은 내부가 질소로 충전된 Fig. 3과 같은 원통형 벨로우즈를 기반으로 Fig. 2에서 보는바와 같이 한쪽 끝이 니들밸브와 연결되어 있다. 극저온 가스가 분출되면 열전달로 인하여 벨로우즈와 내부에 충전되어 있는 질소의 온도도 함께 변화하여 압력과 체적이 변하므로 벨로우즈가 압축과 팽창을 한다. 즉, 벨로우즈는 온도 변화에 따라 스프링의 거동과 유사하게 변형되고

연결되어 있는 니들밸브의 변위를 조절하여 오리피스스의 개폐를 제어하게 된다.

벨로우즈는 내열성과 내식성이 우수하고 취성에 강하여 온도가 극저온으로 떨어져도 균열이 생기거나 파괴되지 않아야 하며 온도변화에 따른 프아송 비의 변화가 없어야 된다. 이러한 조건 때문에 니켈합금인 Monel 400으로 두께 0.05mm인 얇은 박판으로 제조되었다. 참고로 Monel 400의 프아송 비는 온도변화와 관계없이 0.32로 일정한 값을 가진다. 그러나 탄성계수는 온도에 따라 값이 변하며 제조사인 Special Metals Corporation<sup>13</sup>에서 발표한 온도-탄성계수에 관한 실험 자료는 Fig. 4와 같다.

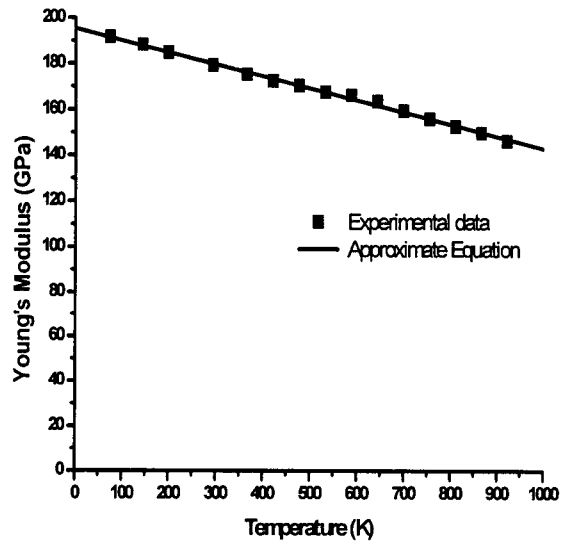


Fig. 4 Young's Modulus of Monel 400 for Change of Temperature

Fig. 4에서 보듯이 온도변화에 따른 탄성계수 값은 비선형이지만 어느 정도의 오차를 고려하여 선형으로 근사화 할 수 있다. 그러므로 이산 최소자승 근사를 적용하여 아래의 1차식으로 단순화하였다.

$$E = aT + b \quad (1)$$

여기서  $E$ 는 탄성계수이며  $T$ 는 온도이다.  $a, b$ 는 이산 최소자승으로 얻은 결과로써  $a = -0.05239$ ,  $b = 195.39051$ 이고 백분율 오차는

0.18%이다.

벨로우즈의 내부에 충전된 질소는 온도변화에 따라 압력과 체적이 변화하는데 내부 질소의 이러한 변화들은 상태방정식을 만족하여야 한다. 가스의 온도, 압력 및 체적을 기술하는 상태방정식 중 1940년에 제안된 Benedict-Webb-Rubin 상태방정식이 가장 정확한 것으로 알려져 있다. 상태방정식은 아래와 같으며 이 식은 본 연구의 관심대상인 벨로우즈 내부의 압력범위와 온도 범위에서 잘 적용된다.

$$P = \frac{RT}{\bar{v}} + \frac{B_0RT - A_0 - C_0T^{-2}}{\bar{v}^2} + \frac{b_0RT - a_0}{\bar{v}^3} + \frac{a_0\alpha}{\bar{v}^6} + \frac{c_0}{\bar{v}^3T^2} \left(1 + \frac{\gamma}{\bar{v}^2}\right) \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{v}^2}\right) \quad (2)$$

위 식에서,  $A_0, B_0, C_0, a_0, b_0, c_0, \alpha, \gamma$ 는 질소의 상수로 Table 1에 설명되어 있다.

Table 1 Constants in Benedict-Webb-Rubin state equation for Nitrogen

Constant	Value
$a_0$	2.54
$A_0$	106.73
$b_0$	0.002328
$B_0$	0.04074
$c_0$	$7.379 \times 10^4$
$C_0$	$8.164 \times 10^5$
$\alpha$	$1.272 \times 10^{-4}$
$\gamma$	0.0053

또한 식(2)에서  $P$ 는 질소의 압력,  $T$ 는 온도,  $R$ 은 기체상수,  $\bar{v}$ 는  $kmol$ 당 질소의 비체적으로 단위  $kg$ 당 비체적  $\nu$ 과 다음과 같은 상관관계를 갖는다.

$$\bar{v} = M\nu \quad (\text{For Nitrogen, } M = 28.013 kg/kmol) \quad (3)$$

식 (3)에서 질소의 비체적  $\nu$ 는 벨로우즈 내부의 질소 체적  $V$ 와 질소의 질량  $m$ 으로부터 아래와 같이 계산된다.

$$\nu = \frac{V}{m} \quad (4)$$

벨로우즈 내부압력은 식 (2)에서 보듯이 내부 가스의 온도와 비체적의 함수이다. 밀봉된 벨로우즈 내부에서는 질량의 변화가 없으므로 비체적이 변화하면 결국 식 (2)를 만족하도록 벨로우즈의 내부압력이 결정되어야 한다. 그런데, 식 (2)는 비선형식이므로 벨로우즈의 내부 온도가 변경되면 간단하게 내부체적과 내부압력 변화를 구하기가 불가능하다. 그러므로 초기 가정된 내부압력 하에 벨로우즈의 변형을 구하고 이에 따른 체적변화를 계산한 다음 식 (2)를 만족하도록 내부압력을 수정하는 반복적인 방법이 필요하다. 이 때 변형된 벨로우즈의 내부체적은 선정된 유한요소와 연계하여 변형 후 유한요소 절점의 좌표값의 직선 방정식을 이용하여 적분식으로부터 구할 수 있다.

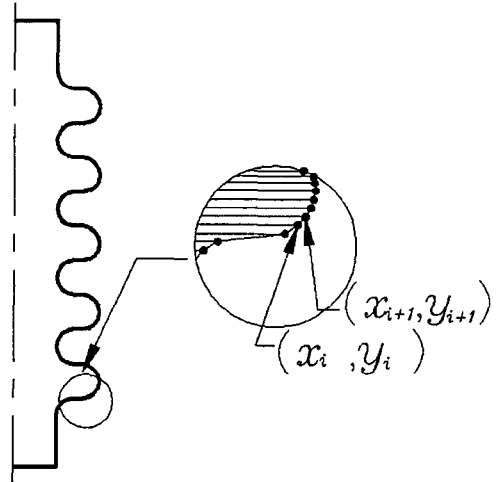


Fig. 5 Definition of Region for Numerical Calculation of Volume Inside Bellows

$n$ 개의 선형 축대칭 쉘 요소<sup>14</sup>로 벨로우즈를 모델링 한 후 Fig. 5에서 보듯이  $i$ 번째 요소의 절점 좌표값을  $(x_i, y_i)$ 와  $(x_{i+1}, y_{i+1})$ 로 정의하면 이 요소와 관계된 벨로우즈의 내부체적은 다음과 같다.

$$V_i = \int_{y_i}^{y_{i+1}} \pi x^2 dy \quad (5)$$

$$x = x_i + \left( \frac{x_{i+1} - x_i}{y_{i+1} - y_i} \right) (y - y_i)$$

$n$ 개의 유한 요소들에 대한 식 (5)의 결과들을 합하면 벨로우즈 전체 내부체적이 된다. 비록 벨로우즈의 형상이 복잡한 곡선으로 표현되지만 요소수가 많으면 제안된 방법에 의한 체적 계산은 큰 오차를 발생하지 않는다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위하여 질소를 충전시키기 전의 벨로우즈의 내부체적을 3차원 CAD 프로그램인 Pro-Engineer로 계산한 값과 현재의 방법에 의한 결과를 비교하였다. 비교 결과 제안된 방법은 체적이  $28.9401\text{mm}^3$  이고, Pro-Engineer로 얻은 체적은  $28.9405\text{mm}^3$ 로 두 값의 오차는 0.0014%로 무시할 정도이다.

### 3. 유한요소해석 및 결과

벨로우즈 내부의 초기 질소 충전압력은  $P_0 = 4.15\text{MPa}$ 이며, 온도는  $T_0 = 293\text{K}$ 이다. 참고로 식 (2)에 적용하면 초기상태의 비체적  $\nu_0 = 0.02418\text{m}^3/\text{kg}$ 를 얻을 수 있다. 벨로우즈는 박판의 축대칭 쉘 구조이므로 상용코드 ANSYS에서 선형 축대칭 쉘 요소를 사용하였다. 그리고 벨로우즈 양단은 길이 방향 변위가 같으므로 한쪽 단은 길이 방향 변위가 0이고 밸브와 연결된 부분의 모든 부위에서 변위가 동일하다는 구속조건을 부여하였다.

벨로우즈의 형상은 곡선으로 이루어져 있으므로 선형 축대칭 쉘 요소로 근사화하기 위하여 수많은 유한요소로 세분화하여야 한다. 그러므로 정확한 형상을 묘사하기 위하여 본 연구에서는 절점은 1221개이고 요소는 1220개로 벨로우즈를 모델링하였다. 그런데 벨로우즈의 변형은 기하학적 대변형을 고려하여야 하므로 비선형 해석을 수행하였다. 뿐만 아니라 온도 293K에서 Monel 400의 탄성계수는 이산 최소 자승 근사로 얻은 식 (1)을 이용하였다. 이와 같은 자료를 이용하여 얻은 해석결과 초기 질소충전 압력  $P_0 = 4.15\text{MPa}$ 에서 벨로우즈의 길이 방향 변위는  $\delta = 0.174686\text{mm}$ 다. 이 때 내부체적은  $V_0 = 29.66012\text{mm}^3$  이고 벨로우즈 내부의 질소 질량은  $m = 1.3794 \times 10^{-6}\text{kg}$ 이다.

벨로우즈 내부 온도는 극저온 질소가 방출되는 동안 열전달에 의해 293K에서 77K사이를 연속적으로 변할 수 있다. 그런데, 대기압에서 질소는

77K이하에서는 액화되고 압력이 높을수록 액화되는 온도가 올라간다. 현재 초기압력 4.15MPa는 고압이고 냉각 과정 중 압력이 저하되더라도 만약 벨로우즈 내부온도가 77K까지 떨어진다면 내부의 질소는 액화될 가능성이 있다. 그러나 벨로우즈를 단순 원통으로 가정하여 냉각기의 시간에 따른 온도 분포를 계산한 Chien<sup>8</sup>등의 연구 결과를 보면 벨로우즈 내부의 온도는 110K이상임을 알 수 있다. 더구나 벨로우즈 내부의 질소가 액화되면 유량 조절을 위한 벨로우즈의 역할이 의미가 없으며 상태 방정식 (2)의 적용 역시 불가능하게 된다. 그러므로 벨로우즈의 설계관점에서 77K까지 내부 질소는 기체 상태라는 가정하에 본 연구를 수행하였다. 이 목적을 위해서 293K에서 93K사이의 온도는 20K 간격으로 나누었고 극저온에서는 좀 더 세밀한 결과를 얻기 위해 93K에서 77K사이에는 4K의 간격으로 나누어 각 온도에서 벨로우즈의 길이 방향 변형을 계산하였다. 그 결과, 전체해석은 15개의 온도에 대하여 수행하였다.

벨로우즈의 변형해석을 하기 위해서는 각 온도에서의 내부압력을 알아야 된다. 그러나 내부압력은 식 (2)에서 보듯이 각 온도에서 벨로우즈 내부에 충전되어 있는 질소의 비체적으로부터 계산된다. 즉, 각 온도에서 내부압력은 최종 벨로우즈 변형형상과 상관관계가 있고 반드시 식 (2)를 만족해야 하므로 변형해석에 필요한 압력의 설정은 상당히 어려운 문제이다. 이를 해결하기 위하여 가정된 내부압력과 이에 따른 벨로우즈의 변형 후 내부체적이 식 (2)를 만족하도록 반복적으로 계산하였다. 각 온도  $T_i$  ( $i=0, 1, \dots, 14$ )에서 벨로우즈의 변형해석을 위한 과정은 Fig. 6에 표현되어 있고 이를 자세히 기술한 알고리즘은 다음과 같다.

- 단계 1. 온도가 변화하면 벨로우즈의 내부압력과 내부체적이 변한다. 내부체적이 바뀐다는 것은 질소의 비체적이 변화됨을 의미한다. 이 원리를 이용하여  $T_{i-1}$ 에서의 체적을  $T_i$ 의 초기체적으로 가정한다.
- 단계 2. 질량이 일정하므로 주어진 체적을 식(4)에 대입하여 벨로우즈의 내부 질소의 비체적을 구한 다음 이 결과를 식 (2)에 대입하여  $T_i$ 에서의 압력을 계산한다.
- 단계 3. 단계 2에서 계산된 압력을 벨로우즈 내부

- 에 적용하여 유한요소해석을 한다.
- 단계 4. 해석결과 변형된 형상 자료로부터 식(5)의 적분식을 이용하여 벨로우즈의 내부체적을 구한다.
  - 단계 5. 단계 4에서 구한 체적과 불변인 질량으로부터 식(4)에 적용하여 비체적을 구한 다음 식(2)에 대입하여 새로운 벨로우즈 내부압력을 구한다.
  - 단계 6. 만약 새로운 내부압력과 단계 2에서 주어진 압력이 동일하면 변형해석은 완성되거나 그렇지 않으면 기존의 압력을 새로운 내부압력으로 변경한 후 단계 3으로 가서 단계 3~6을 반복한다.

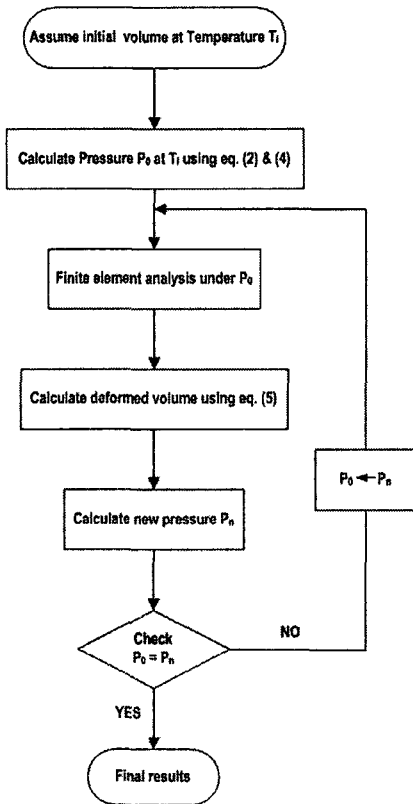


Fig. 6 Flow Chart for Deformation Analysis of Bellows at Temperature  $T_i$

위의 알고리즘을 이용하여 구한 벨로우즈의 각 온도에 따른 길이방향 변위를 Fig. 7에 도시하였다.

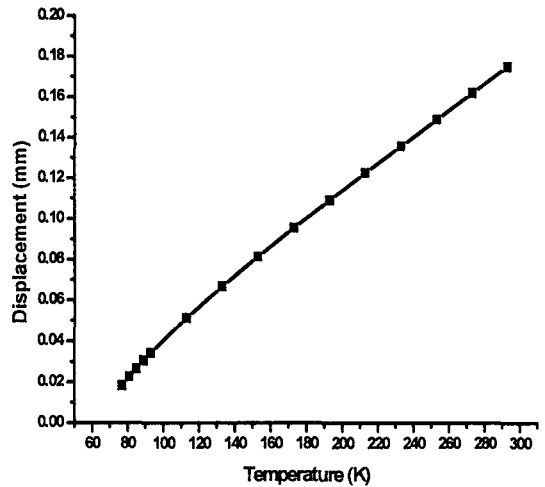


Fig. 7 Displacement of Bellows for Change of Temperature

또한, 각 온도에 대한 내부압력 및 체적과 길이 방향 변위의 수치 결과는 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Pressure, Volume and Displacement of Bellows at Each Temperature

Temperature (K)	Pressure (MPa)	Volume ( $mm^3$ )	Displacement (mm)
293	4.15	29.66012	0.174686
273	3.8465	29.60358	0.161568
253	3.5404	29.55038	0.148669
233	3.2319	29.49659	0.135624
213	2.9206	29.44211	0.122409
193	2.6057	29.38672	0.108974
173	2.2858	29.33015	0.095252
153	1.9589	29.27213	0.081175
133	1.6214	29.21214	0.063623
113	1.2657	29.14862	0.051203
93	0.8755	29.07830	0.0341385
89	0.7905	29.06289	0.030398
85	0.7022	29.04683	0.026499
81	0.6098	29.02997	0.022409
77	0.5126	29.00455	0.018095

각 온도에 대해서 제시된 알고리즘에 의한 벨로우즈의 유한요소해석은 1~3회 만에 수렴하는 것으로 나타났다. 최저온도인 77K일 때 반복횟수가 가장 크며, 이 경우 3회이다. Fig. 7에서 보듯이 벨로우즈의 온도범위 293K에서 77K사이에서 벨로우즈의 길이 방향 변화는 거의 선형에 근접하나 엄밀하게 비선형임을 확인할 수 있었다.

현재의 방법은 해에 도달할 때까지 벨로우즈 내부체적과 벨로우즈의 변형해석을 반복적으로 수행하므로 많은 계산 시간을 요구한다. 이는 설계관점에서 효율성이 부족하므로 반복횟수 1회의 계산 결과와 정확한 벨로우즈 거동과의 오차를 분석하였다. 이 비교 결과가 가장 많은 반복횟수인 온도 77K에서 Table 3에 기술되어있다. Table 3을 보면 질소의 경우 77K까지는 한번 만에 계산된 벨로우즈의 변형과의 오차는 내부체적과 내부압력은 0.0001%와 0.036%, 그리고 변위는 0.38%로 상대적으로 작다. 참고로 실제 냉각과정 중 벨로우즈 내부의 온도는 77K까지 떨어지지 않기 때문에 현재의 연구는 역화를 고려하지 않았다.

Table 3 Pressure, Volume and Displacement during Iteration for Exact Solution at 77K

Iteration Number	Pressure (MPa)	Volume (mm <sup>3</sup> )	displacement (mm <sup>2</sup> )
1	0.512409	29.00451	0.018025
2	0.512644	29.00456	0.018096
3	0.512643	29.00455	0.018095

#### 4. 결론

줄-톱슨 극저온 냉각기에서 유량 조절용 벨로우즈의 내부 질소는 항상 기체 상태라는 가정 하에 293K에서 77K까지 온도 변화에 대하여 벨로우즈의 변형을 해석하였다. 일정 온도 조건에서 변형해석에 필요한 벨로우즈의 내부 압력은 변형 결과인 체적과 밀접한 관계가 있다. 이러한 관계를 고려하여 각 온도에서 벨로우즈 내부 압력으로부터 계산된 변형 후 내부체적이 상태방정식 (2)를 만족하도록 반복적인 방법을 사용하였다. 또한, 현 연구 대상인 초소형 벨로우즈의 재질인 Monel 400은 온도

에 따라 탄성계수가 변하므로 온도에 따른 탄성계수 값은 근사식 (1)를 이용하여 구하였다.

식 (1)로부터 구한 탄성계수를 적용하고 3장의 알고리즘에 근거하여 초소형 벨로우즈의 온도 변화에 따른 변형 해석을 수행하였다. 해석결과 벨로우즈의 길이방향 변형에 비해 반경방향 변형은 거의 무시할 정도이다. 한편 벨로우즈의 길이 방향 변형은 293K에서 77K의 온도영역에서 온도 변화에 대하여 비선형으로 나타났다. 그러나 비선형 정도가 작아 설계관점에서 보면 선형으로 근사화할 수 있다.

제안된 알고리즘이 각 온도에서 벨로우즈의 거동을 정확히 예측할지라도 상태 방정식 (2)를 만족할 때까지 반복적인 벨로우즈 내부체적 계산 및 내부압력의 수정은 수많은 유한요소해석을 요구한다. 이 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서 반복적인 벨로우즈의 내부 압력과 체적 계산을 하지 않고 단지 1회만 계산하는 단순화 방법을 검토하였다. 비교 결과 단순화 방법에 의한 변형 해석값과 정확한 해석값은 상대적으로 작은 오차를 보였다. 그러므로 현 연구 대상인 벨로우즈 설계의 경우 1번만 내부 압력과 체적을 계산하는 단순화 방법을 사용할 수 있다.

본 연구의 결과는 초소형 줄-톱슨 극저온 냉각기의 유량 조절 용도인 벨로우즈의 설계에 적용될 수 있다. 그러나 보다 정확한 벨로우즈의 설계를 위하여 비록 어렵더라도 향후 실험 및 측정을 통한 비교분석이 요구된다. 또한, 77K의 극저온 질소가 분출되는 오리피스로부터 벨로우즈까지 열전달을 고려하여 이를 포함한 벨로우즈의 거동에 대한 연구도 추후 필요하다.

#### 후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다.

#### 참고문헌

1. Kim, S. J. and Jang, S. P., "Experimental and Numerical Analysis of Heat Transfer Phenomena in A Sensor Tube of a Mass Flow Controller," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 44, No. 9, pp. 1711-1724, 2000.

2. Bonney, G. E., "Bi-Material Controlled Demand Flow Joule-Thomson coolers," International Cryocooler Conference, pp. 1003-1011, 1993.
3. Lee, W. I., Oh, J. E. and Kim, T. W., "A Study on the Dynamic Characteristics of Bellows," Trans. of the KSME, Vol. 12, No. 6, pp. 1273-1281, 1988.
4. Lee, S. H., Sim, D. S. and Oh, S. G., "A Numerical Analysis Study on Evaluation of the Reliability for Bellows in the Vehicle Exhaust System," J. of KSPSE, Vol. 9, No. 4, pp. 77-82, 2005.
5. Koh, B. K. and Park, K. J., "Development of Element Analysis Program and Simplified Formulas of Bellows and Shape Optimization," Trans. of the KSME A, Vol. 21, No. 8, pp. 1195-1208, 1996.
6. Kim, D. H. and Choi, M. J., "A Vibration Analysis Model for Bellows Using Reduced Degree of Freedom in the Vehicle Exhaust System," Proceeding of KSPE Autumn Conference, pp. 659-663, 1997.
7. Rhee, E. J., Park, M. K. and Joo, D. W., "A Development of Brake System for Inline Skate using Bellows," J. of KSPE, Vol. 16, No. 3, pp. 30-37, 1999.
8. 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. 359-365, 1996.
9. Chien, S. B. and Chen, L. T., "Two-Phase Coexistence Analysis of the Bellows Control Mechanism for a J-T Cryocooler," Cryogenics, Vol. 39, No. 4, pp. 979-984, 1999.
10. Asami, T. "New Method to Determine the BWR Coefficients in Saturated Region," Cryogenics, Vol. 28, No. 8, pp. 521-526, 1988.
11. Cengel, Y. A. and Boles, M. A., "Thermodynamics - An Engineering Approach," 4-th Ed., McGraw-Hill, pp. 88-98, 2002.
12. ANSYS, "Online Documentation for ANSYS 10.0," ANSYS Inc., 2005.
13. Special Metals Online Technical Bulletin, "Monel Alloy 400," Special Metals Corporation, <http://www.specialmetals.com/documents/Monel20alloy20400.pdf>, 2005.
14. Lopez Cela, J. J., Huerta, C. and Alarcon, E., "Numerical Analysis of Axisymmetric Shell by One-Dimensional Continuum Elements Suitable for High Frequency Excitations," Computers and Structures, Vol. 78, No. 5, pp. 711-724, 2000.