

# 줄-톰슨 마이크로 냉각기용 소형 금속 벨로우즈의 구조적 특성에 관한 연구

이승하\*, 이태원#

## A Study on the Structural Characteristics of Miniature Metal Bellows in Joule-Thomson Micro-Cryocooler

Seung Ha Lee\* and Tae Won Lee#

### ABSTRACT

A miniature metal bellows is used to minimize the excessive flow of the cryogenic gas in Joule-Thomson micro cryocooler. It is made of metal alloy and its geometry is axisymmetric. The bellows is filled with high pressure gas. It contracts or expands in the axial direction for a wide change of temperature, because the pressure and volume inside the bellows must be satisfied with state equation of the gas. Therefore, in order to design the bellows in Joule-Thomson micro-cryocooler, it is important to evaluate deformation of the bellows under internal pressure exactly. Considering geometric nonlinearity, deformations analysis of the bellows were obtained by a commercial finite element code ANSYS. The bellows was modeled by 3-node axisymmetric shell elements with reduced integration. Experiments were also performed to prove the validity of proposed numerical analysis. The results by numerical analysis and experiments were shown in good agreements.

**Key Words** : Miniature metal bellows (소형 금속 벨로우즈), Electro-deposition (전착), Reduced integration (감차적분), Finite Element Method (유한요소법), Geometric nonlinearity (기하비선형), Axisymmetric shell element (축대칭 셸요소)

### 1. 서론

벨로우즈는 주름을 갖는 원통형 셸 구조물로서 자동차 배기시스템의 진동흡수장치, 각종 배관의 신축이음, 진동저감을 위한 방진재 및 냉각기의 유량 조절용 부품 등으로 널리 사용되는 기계요소 부품이다. 이와 같이 다양한 용도로 활용되는 벨로우

즈는 사용 목적에 따라 많은 제조공법이 개발되어 왔는데 복잡한 형상 때문에 변형과 응력을 예측하기에 어려움이 있어 다양한 수치적 방법들이 제안되어 왔다. 먼저 축 대칭 셸의 지배 방정식을 급수 전개법<sup>1</sup>이나 점근법(asymptotic solution)<sup>2</sup>으로 근사하여 해를 구하거나 에너지이론<sup>3</sup>을 적용하여 변형 해석을 수행하였다. 이 방법들은 비교적 정확한 해

접수일: 2008년 2월 27일; 게재승인일: 2008년 6월 11일

\* LIG넥스원(주) 전자광학연구센터

# 교신저자: 금오공과대학교 기계공학부

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

를 구할 수는 있으나, 벨로우즈 형상의 근사에 따라 해의 안정성에 영향을 미치는 단점이 있다. 그러므로 Koh 등<sup>4,5</sup>와 Kim 등<sup>6</sup>의 연구에서 보듯이 복잡한 형상을 비교적 잘 정의하고 해 역시 정확한 유한요소해석이 일반적으로 사용되어진다.

기존의 연구들은 벨로우즈의 형상이 크고 일정 두께를 갖는 쉘 구조물로 동작 특성상 축 방향 또는 반경방향으로 외력이 작용하고 이에 대한 변형 해석이 주이다 그러나 본 연구 대상인 벨로우즈는 일반적인 기계부품에 사용되는 크기나 두께가 아닌 Fig. 1에 도시한 바와 같이 길이 2.62mm, 외경 2.26mm의 소형이면서 두께는 22 $\mu$ m로 성형되어 있는 초박형이다. 더구나 이 소형 벨로우즈는 일반적인 벨로우즈와 같이 외력에 따라 변형하는 것이 아니라 완전히 밀폐된 내부압력에 의하여 수축 팽창을 한다. 연구 대상인 소형 벨로우즈의 작동원리를 자세히 기술하면 다음과 같다. Fig. 2의 줄-튐슨 마이크로 냉각기에서 오른쪽에서 고압의 상온의 가스가 교환기를 지나 왼쪽에 있는 니들부위의 오리피스에서 분출되며, 이때 냉매의 단열팽창에 의해 주변의 열을 흡수하여 극저온에 도달한다. 냉각이 진행되면서 벨로우즈는 극저온에서 상온까지의 온도분포를 갖게 되는데 이에 따라 고압의 질소 혹은 아르곤 가스로 충전된 벨로우즈가 온도변화에 따른 체적 및 압력 변화로 수축 또는 팽창하여 벨브를 개폐함으로써 니들에서 분출되는 극저온 냉매의 유량을 조절하게 된다. 따라서 줄-튐슨 마이크로 냉각기의 개발을 위해서는 내부의 압력 변화에 따른 벨로우즈의 거동을 정확히 예측할 필요성이 있다.

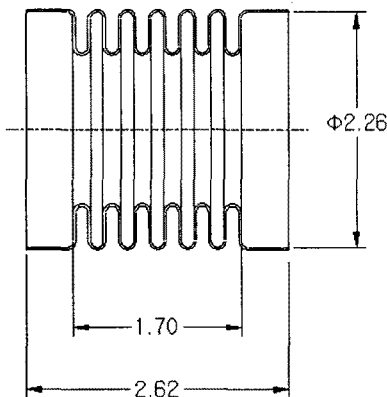


Fig. 1 Geometry of bellows

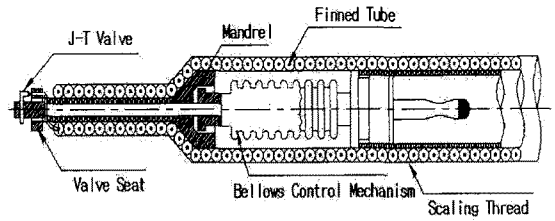


Fig. 2 Schematic drawing of bellows-controlled Joule-Thomson micro-cryocooler

극저온 줄-튐슨 냉각기에 사용되는 초박형이면서 소형인 벨로우즈에 대한 연구는 아직까지 거의 없는 실정이다. Chien 등<sup>7</sup>이 냉각기 전체의 열전달 해석 및 실험을 연구하였으나, 벨로우즈 부분을 단순히 선형 스프링으로 모델링하여 전체 냉각기의 온도 분포를 구하였다. 또한 Lee 등<sup>8</sup>은 벨로우즈의 온도변화에 대한 이론적 해석을 수행하였으나 일반적인 쉘요소로 해석하였고 그 결과의 타당성을 실험적으로 입증하지 못하였다. 그러므로 보다 향상된 설계를 위해서는 냉각기의 온도분포 외에 내부 가스의 온도 변화로 인한 내부 압력변화와 이에 따른 벨로우즈의 거동을 정확히 예측하는 것이 필수적이고 해석 결과를 실험을 통하여 검증할 필요가 있다. 그러나 실제 냉각기는 초소형이면서 밀폐된 공간에 벨로우즈가 설치되어 있으므로 벨로우즈 안의 온도변화와 이에 따른 압력 변화를 실험적으로 측정하기에 무리가 있다. 따라서 본 연구는 내압을 받고 있는 소형 벨로우즈의 변형을 수치적으로 계산하고 이를 실험을 통해 검증함으로써, 극저온 냉각기에 사용되는 벨로우즈의 변형 해석방법을 제시하고 이의 결과를 줄-튐슨 마이크로 냉각기 개발에 활용하고자 한다.

현재까지 구조물의 변형해석에 제안된 수치적 방법 중 유한요소법이 가장 많이 사용되고 있다. 그런데, 축 대칭 쉘요소에 의하여 벨로우즈의 변형 해석을 하는 경우 적합한 쉘요소의 선택이 수치해의 정확성을 높이는데 필수 불가결하다. 축대칭 쉘요소의 개발은 Ahmad<sup>9</sup> 등에 의하여 처음 시도되었으나, 개발된 등매개 쉘요소는 Mindlin이론을 바탕으로 하여 전단구속(Shear Locking) 현상과 멤브레인 구속(membrane locking) 현상으로 강성이 과도하게 계산되는 단점이 있었다. 전단구속현상은 두께가 얇은 쉘요소의 전단변형률이 '0'의 값으로 수렴하지 않음에 따라, 요소의 강성이 과도하게 계산

되는 현상이다. 한편, 멤브레인 구속 현상은 멤브레인 강성이 셸 두께가 얇아짐에 따라 더 이상 의미가 없음에도 불구하고 일반적인 유한요소법을 적용하면 요소의 강성을 지배하는 현상을 말한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 감차적분<sup>10,11</sup>이 개발되었다. 감차적분법은 셸요소의 전단구속 및 멤브레인 구속 현상이 감차적분의 가우스 적분점에서 제거된다는 수학적 이론에 바탕을 두고 있다. 감차적분법은 구속현상들이 제거되는 적분점에서 셸요소의 강성을 구함으로써 두께가 비교적 얇은 셸구조물의 변형해석을 하는 방법이다. 그러나 이 역시 제로에너지 모드의 발생으로 종종 잘못된 해를 구하는 경우가 있어 Stolarski 와 Belytschko<sup>12,13</sup> 등은 감차적분법의 장점을 살리면서 제로에너지 모드의 발생을 억제하는 방법을 제시하였다.

본 연구에서는 초박형이면서 소형인 벨로우즈의 유한요소해석을 위해 많은 셸요소 중에서 Fig. 3에서 보는 바와 같이 ANSYS에서 제안하는 감차적분을 이용한 3절점 축대칭 셸요소<sup>14</sup>를 선정하였다.

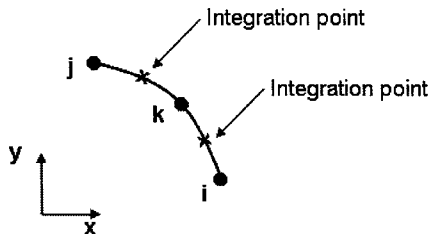


Fig. 3 Axisymmetric shell element with reduced integration (ANSYS SHELL209)

이 요소는 두께가 얇은 셸의 경우까지 해석 가능하고 대변형 및 대변형율을 포함하는 비선형 해석에 적합하다. SHELL209 요소를 사용하여 유한요소해석 코드 ANSYS로 변형해석을 하였고 벨로우즈의 골과 산부위의 변형을 정확히 예측하기 위하여 기하비선형 해석까지 고려하였다. 그리고 실험을 통하여 제안된 유한요소해석 방법의 타당성을 입증하였다.

## 2. 실험 장치 및 실험 방법

실험을 위해 제작된 벨로우즈는 니켈합금으로 제조업체의 성적서를 참조하여 재료의 화학 조성은

Table 1, 기계적 성질은 Table 2에 기술하였다. 실제 냉각기용 벨로우즈는 약77K의 극저온에서 상온까지의 동작범위를 가지고 있어 Lee등<sup>8</sup>의 연구에서 보듯이 저온에 따른 기계적 특성 변화가 있으나 본 연구에서는 상온 상태에서 압력에 따른 거동을 수행하므로 상온상태의 기계적 특성만 고려하였다.

Table 1 Chemical composition of bellows

Nickel plus cobalt	99.8%
Oxygen and carbon	0.05%

Table 2 Mechanical properties of bellows

Poisson's ratio	0.28
Yielding stress	758.4 MPa
Tensile strength	861.8 MPa
Young's modulus	160.992 GPa

소형 벨로우즈의 제작은 하이드로 포밍(hydro-forming)이나 전착을 이용하여 제작할 수 있으나 본 연구에 사용되는 벨로우즈와 같이 얇은 두께일 경우 요구되는 치수 및 기계적 성질을 확보하기 위하여 전착공정에 의해 제작되는 것이 일반적이다. 전착은 일반적으로 도금공정과 유사하고 Fig. 4에 전착공정에 의한 벨로우즈의 제작공정을 도시하였다.

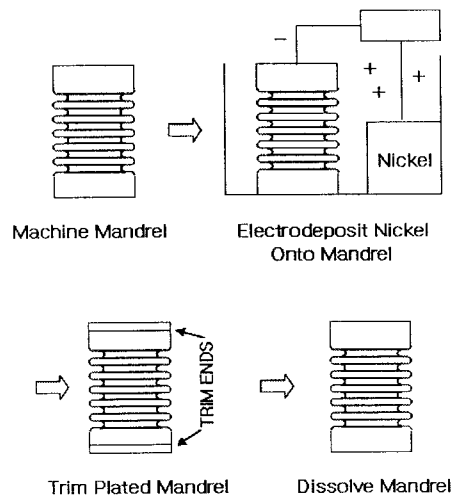


Fig. 4 Process of electrodeposition

이 과정을 상술하면 다음과 같다. 먼저 기계가공으로 벨로우즈의 내부 형상과 같은 멘드릴(mandrel)을 제작한 후 황산구리(CuSO<sub>4</sub>)와 같은 전해용액이 들어있는 도금조에 넣어 멘드릴에 음극을 니켈합금에 양극을 연결하여 전류를 공급하면 니켈이 석출된다. 석출된 니켈원자는 음극인 멘드릴로 전달되어 니켈을 전착시킨다. 최종적으로 불필요한 부위를 제거한 후 내부의 멘드릴을 용해시켜 제작한다. 이러한 전착공정을 통해 제작된 벨로우즈는 재료의 조성이 균일하고, 치수정밀도가 매우 높으며, 제조공정상 불순물의 유입이 없어 항상 동일한 기계적 특성을 가진다. 내부 멘드릴 용해는 화학 처리과정으로 벨로우즈의 특성에 영향을 미치지 않고 일종의 열처리 과정에 해당하므로 전착공정에 의해 제작된 벨로우즈는 제조사에서 발표한 원재료의 기계적 특성을 거의 유지하게 된다. 즉 원재료의 항복응력값 자체를 설계 허용응력으로 사용할 수 있다.

전착과정으로 제작된 벨로우즈의 내압에 따른 변형량 측정 실험을 위해 상하부에 STS316 스테인레스 봉을 가공하여 고정한 후 브레이징으로 밀폐 처리 하였으며, 하부 역시 동일재질의 0.6mm 스테인레스관을 브레이징하여 고압의 가스공급을 위한 입구를 만들었다. 고압의 질소가스로 벨로우즈 내부를 충전하였으며 0~10MPa의 압력을 조절할 수 있도록 압력조절기를 설치하였다. Fig. 5는 실험을 위

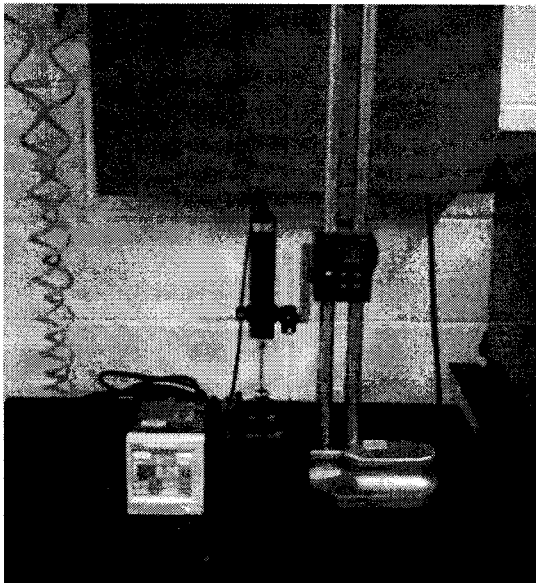


Fig. 5 Apparatus for experiment

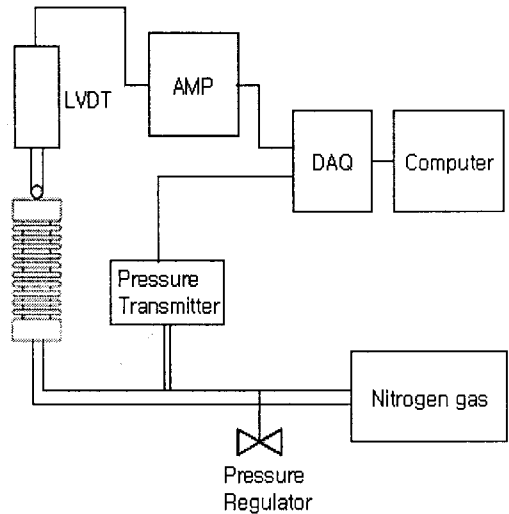


Fig. 6 Schematic diagram of experiment

해 설치된 장치들을 보여주고 있으며, 측정을 위하여 구성된 실험장치의 구성도는 Fig. 6에 자세히 도시하였다. Fig. 6에서 보듯이 실험 장치들은 크게 압력 공급을 위한 질소 공급장치 및 변위측정을 위한 LVDT, 압력측정을 위한 압력센서, 센서의 출력을 증폭하고 설정하기 위한 인디게이터, 데이터 획득을 위한 DAQ, 그리고 데이터 분석을 위한 PC로 구성되어 있다. 이중 변위 측정의 핵심 센서인 LVDT는 일본 Tokyo sokki kenkyujo 제품으로 2000x10-6strain/mm의 감도와 ±0.1%의 오차를 가지는 고정밀 센서이다. LVDT의 센서 신호 증폭을 위한 앰프는 디지털 인디게이트 기능을 가지고 있는 일본 Unipulse사의 F370을 사용하였다. 압력 센서는 Wise Sensor의 P115로써 압전세라믹 형식으로 0.5%의 정밀도를 가진다. 데이터 획득을 위한 DAQ는 National Instruments의 USB-6251를 사용하였다.

내부 압력은 0.2MPa 간격으로 0.2~2.0 MPa까지 단계적으로 질소를 충전하였다. 정확한 실험을 위하여 압력조절기(Pressure Regulator)를 사용하여 항상 일정한 압력이 유지되도록 하였다. 또한 내부에 질소를 공급한 즉시 벨로우즈의 변위를 측정할 경우 가스가 공급되는 부위의 유동흐름으로 인하여 벨로우즈의 내부와 압력계 관로상의 압력이 일치하지 않을 우려가 있으므로 압력 공급 후 압력이 변화되지 않는 시점까지 유지한 후 실험값을 획득하였다. 내부에 충전된 질소 가스는 주변 온도변화에 따라 팽창 및 수축할 수 있으며 이로 인한 변위 오

Table 3 Axial deformation results of the bellows by experiments

Pressure (MPa)	Axial deformation (mm)										Mean	Standard Deviation
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10		
0.2	0.067	0.066	0.055	0.054	0.059	0.059	0.060	0.062	0.065	0.065	0.061	0.00433
0.4	0.129	0.124	0.120	0.125	0.125	0.120	0.124	0.128	0.127	0.132	0.126	0.00359
0.6	0.190	0.196	0.188	0.192	0.193	0.192	0.190	0.189	0.197	0.191	0.192	0.00275
0.8	0.238	0.233	0.239	0.245	0.249	0.245	0.247	0.240	0.247	0.248	0.243	0.00501
1.0	0.278	0.271	0.285	0.290	0.299	0.287	0.284	0.291	0.293	0.291	0.287	0.00756
1.2	0.339	0.348	0.338	0.348	0.352	0.338	0.340	0.344	0.338	0.333	0.339	0.00572
1.4	0.388	0.383	0.371	0.386	0.382	0.381	0.384	0.380	0.383	0.385	0.382	0.00438
1.6	0.409	0.411	0.412	0.420	0.424	0.407	0.408	0.431	0.429	0.432	0.421	0.00959
1.8	0.469	0.465	0.464	0.466	0.464	0.460	0.466	0.453	0.470	0.473	0.465	0.00527
2.0	0.505	0.495	0.491	0.502	0.507	0.498	0.496	0.499	0.511	0.512	0.502	0.00667

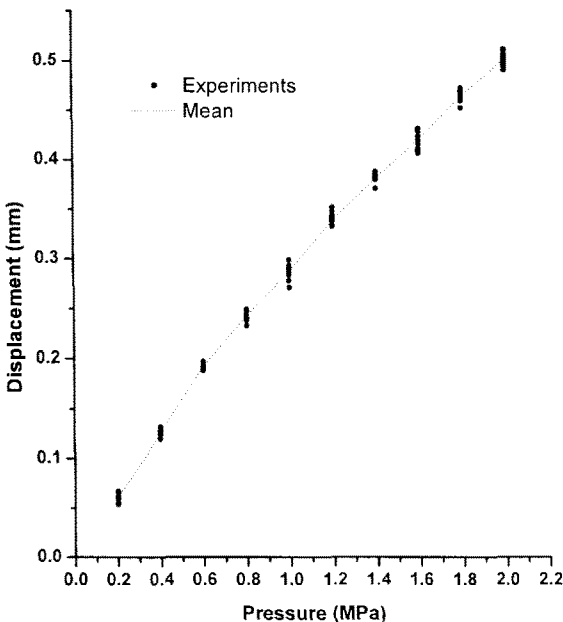


Fig. 7 Experimental results for axial deformation of bellows

차가 발생하므로 실험의 신뢰성을 확보하기 위하여 일정한 온도와 습도를 유지할 수 있는 항온항습조

에서 실험을 수행하였다. 이때 실험조건은 온도  $21.0 \pm 2.0^\circ\text{C}$ 와 습도  $50 \pm 10\%$ 를 유지하였다. 또한 재료의 탄성한계 영역을 초과할 경우 벨로우즈가 영구 변형이 일어날 수 있으므로 각 압력별 실험시 측정 압력을 가한 후 변위측정을 하고, 다시 압력을 제거하여 원상복구 시킨 후 변위를 측정하였다. 즉 초기 상태의 변위 변동 유무를 매 번 점검한 후 다음 실험을 실시하였다. 이러한 실험 방법으로부터 주어진 내압 하에서 벨로우즈가 탄성영역인지 소성영역인지 판단할 수 있으며 간접적으로 벨로우즈의 응력상태를 관찰할 수 있는 근거가 된다. 실험은 10개의 벨로우즈를 제작하여 탄성영역으로 판단되는 범위 내에서 앞에서 언급한 실험조건을 충족하는 각 압력별 10회, 총 100회의 축방향 변위를 측정하였다. 실험결과와 각 압력별 벨로우즈의 축방향 변위는 Fig. 7에 도시되었으며 10개의 벨로우즈에 대한 각 압력별 변위의 정확한 수치값과 평균값 및 표준편차는 Table 3에 기술하였다.

### 3. 변형 해석 및 결과 비교

Fig. 8에서 정의된 축대칭 쉘요소는 일반적으로 쉘의 길이 방향  $s$ 와 축의 중심으로 부터의 거리  $r$ 을 사용하여 응력 $\{\sigma\}$ 과 변형률 $\{\epsilon\}$ 이 정의된다. 응

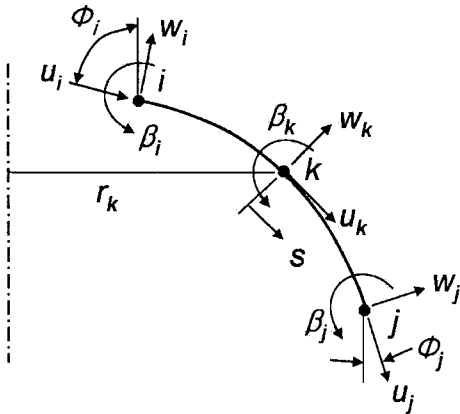


Fig. 8 The definition of 3 nodes axisymmetric shell element

력과 변형률의 상관관계는 다음과 같다.

$$\{\sigma\} = [C]\{\epsilon\} \quad (1)$$

위 식에서  $[C]$ 는 재료의 특성을 나타내는 행렬이며 축대칭 셸구조의 경우 셸두께  $t$ 와 영률  $E$ , 전단 계수  $G$ , 포아송비  $\nu$ 로부터 아래와 같이 표현된다.

$$[C] = \frac{Et}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{t^2}{12} & \frac{t^2\nu}{12} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{t^2\nu}{12} & \frac{t^2}{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{5G(1-\nu^2)}{6E} \end{bmatrix} \quad (2)$$

그리고 식 (1)에 정의된 변형률은 Fig. 8에서 도시된 축대칭 셸요소의 수직방향변위  $w$ 와  $s$ 방향 변위  $u$  및 축대칭 셸요소의 회전 변위  $\beta$ 로 다시 기술하면 다음과 같다.

$$\{\epsilon\} = \begin{bmatrix} d/ds & 0 & 0 \\ (\sin\phi)/r & (\cos\phi)/r & 0 \\ 0 & 0 & -d/ds \\ 0 & 0 & -(\sin\phi)/r \\ 0 & d/ds & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ w \\ \beta \end{Bmatrix} \quad (3)$$

식 (1)-(3)이 축대칭 셸의 응력과 변형 관계식이며 이 식들을 이용하여 유한요소 해석이 이루어지는데 박형 셸까지 적용하기 위하여 앞서 설명한 감차적분을 적용하게 된다.

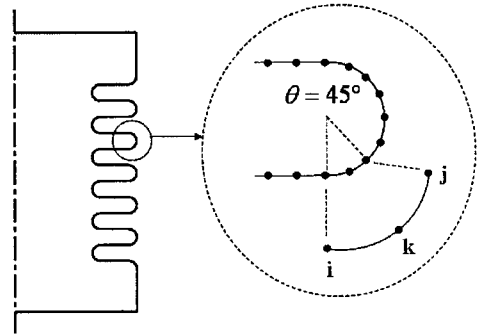


Fig. 9 Finite element modeling of bellows

축대칭 셸 구조물이고 초박막인 벨로우즈는 감차적분을 적용하는 셸요소로 모델링하였으며 해당 유한요소는 ANSYS에서 SHELL209이며 이는 각 절점당 3자유도를 갖는다. 이 요소를 사용하여 벨로우즈의 골과 산 부위는 Fig. 9와 같이 3절점 요소를 45도 간격으로 등분하였으며, 총 78개의 3절점 축대칭 셸요소로 분할한 결과 벨로우즈 전체는 157개의 절점으로 정의되었다. 변위 경계조건으로 벨로우즈 하부의  $y$ 변위를 모두 0으로 하였으며, 상부에 조립된 스테인레스 봉이 벨로우즈의 박막 부위에 비해 매우 큰 강성을 가지므로 상부의 모든 절점은 축방향으로 동일하게 변형된다고 가정하였다. 하중은 실험과 동일하게 벨로우즈 내부에 0.2MPa 간격으로 압력이 작용하는 조건하에 유한요소 해석을 수행하였다. 해석시 벨로우즈의 골과 산부분의 유한요소는 대변형이 일어나므로 기하 비선형성을 고려하여야 한다. 변형은 축방향과 반경방향으로 변형이 발생하나 벨로우즈의 구조적 특성상 대부분의 변형은 축방향 변형이 주가되며, 0.2MPa 부터 2MPa 까지의 압력 조건하에서 반경방향 변위는 축방향 변위의 1%이내임을 수치적으로 관찰하였다. 이는 벨로우즈의 산과 골의 변형이 상쇄되어 반경방향 변위는 거의 무시할 수 있는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 축방향 변형에 대해서만 논의 하였다. 실험 결과의 평균값과 유한요소 해석 결과를 도시한 Fig. 10 보듯이 내압에 대한 벨로우

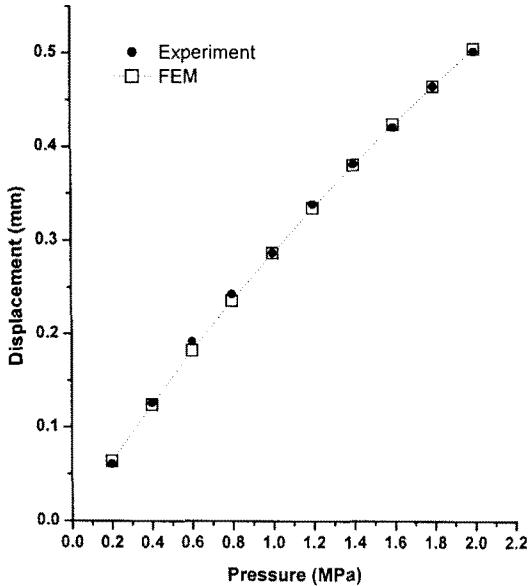


Fig. 10 Axial deformation results of bellows for changes of internal pressure

Table 4 Comparison between means of axial deformations by experiments and results by FEM

Pressure (MPa)	Experiment (mm)	FEM (mm)	Error (%)
0.2	0.061	0.064	4.22
0.4	0.126	0.124	1.53
0.6	0.192	0.182	5.61
0.8	0.243	0.236	3.12
1.0	0.287	0.287	0.00
1.2	0.339	0.335	1.00
1.4	0.382	0.381	0.36
1.6	0.421	0.424	0.76
1.8	0.465	0.465	0.07
2.0	0.502	0.505	0.58

즈의 축방향 변형은 약간의 비선형성을 나타내고 있으나 그 정도가 미미하다. 따라서 설계관점에서 선형으로 근사화 할 수 있다. 그리고 Fig. 10의 결과를 보다 자세하게 분석하기 위하여 수치적으로 나타낸 Table 4에서 보면 0.2 ~ 2.0MPa의 내압 하에

서 전 구간에 걸쳐서 두 결과는 최대 약 5.61%이하로 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 더구나 1.0MPa 이상에서는 실험결과와의 오차가 1.0%미만이다. 저압에서 오차가 큰 이유는 1.0MPa 이하의 내압에서는 매우 작은 변위가 측정되고 압력조절기를 사용했음에도 불구하고 비교적 작은 압력에서는 그 측정 변위의 변동성이 상대적으로 커서 벨로우즈의 거동이 불안정하기 때문에 측정오차가 커진 것으로 판단된다. 이러한 문제점 외에도 실제 벨로우즈의 제작공차와 실험 장치들의 측정 오차가 있을 수 있기 때문에 5.61%미만의 오차를 갖는 수치해는 실험 결과와 전체적으로 잘 일치한다고 말할 수 있다.

한편 벨로우즈의 크기나 형상 때문에 실험적으로 정확한 응력 측정은 불가능하다. 단지 같은 시편의 반복 실험을 통하여 내압 2.0MPa까지 탄성 영역임을 간접적으로 입증할 수 있었다. 그러므로 변형해석의 결과로부터 제안된 수치해법이 타당하다는 근거 하에 유한해석 결과만 검토하였다. 수치해석 결과 0.2 ~ 2.0MPa의 내압하에서 최대 Von Mises 상당응력은 벨로우즈의 가운데인 골 부위 2개소에서 집중된다. 최대하중인 내압 2.0MPa에서 이 부분의 상당응력은 708.54MPa로써 Table 1에 기술된 재료의 항복응력보다 작으므로 벨로우즈는 내압 2.0MPa 까지 해석적으로나 실험적으로도 탄성 영역에 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

줄-톱슨 마이크로 냉각기에 사용되어지는 벨로우즈는 내부 압력에 의한 축방향 변형을 이용하여 냉매의 유량을 조절하는 핵심 부품이다. 제품 개발 및 설계를 위하여 벨로우즈의 거동을 정확히 예측하여야 하므로 유한요소해석을 이용한 소형 벨로우즈의 변형 해석 기법을 제시하였고 실험을 통하여 제안된 방법의 타당성을 입증하였다. 해석 및 실험 결과 현재의 연구대상인 소형 벨로우즈는 내부의 압력이 증가함에 따라 축방향 변위가 비선형이나 비선형 정도가 미미하여 설계관점에서 선형으로 근사화할 수 있다. 그리고 유한요소해석 결과 최대응력은 벨로우즈의 중간에 위치한 골 부위에 발생하고 내압이 2MPa까지는 탄성영역에 있다. 이는 실험을 간접적으로 입증하였다. 그리고 벨로우즈의 반경방향 변형은 축방향 변형의 1.0% 이하로 무시할 수준이고 축방향 변형 역시 0.2~2.0MPa의 내압

하에서 계측기의 오차와 박형 벨로우즈의 제작공차를 고려하면 수치해가 실험 결과와 거의 일치한다.

결론적으로 감차 적분을 적용한 축대칭 3절점 쉘 요소와 기하 비선형을 고려한 유한요소해석은 현 연구 대상인 줄-튐슨 마이크로 냉각기용 소형 벨로우즈의 거동을 잘 예측한다. 제안된 수치해석 방법은 향후 다양한 초소형 박형 벨로우즈 개발에 기여할 수 있다.

그러나 극저온용 줄-튐슨 냉각기는 분출되는 가스의 온도가 극저온이고 열전달로 인하여 벨로우즈 내부 기체의 온도 역시 상온에서 극저온에 가까운 온도로 변화한다. 이와 같이 냉각기는 작동 중에 벨로우즈 내부 가스의 온도 변화로 인하여 내부 기체의 압력이 변하므로 보다 향상된 벨로우즈의 설계를 위하여 향후 이를 포함한 벨로우즈의 정확한 거동 현상의 연구가 필요하다.

## 후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다.

## 참고문헌

- Ota, T. and Hamada, M., "On the Strength of Toroidal Shell (1st Report, The Proposition of the Solution)," *Bul. JSME*, Vol. 29, No. 197, pp. 142-158, 1963.
- Clark, R. A., "Symptotic solutions of Elastic Shell Problem, Asymptotic solutions of Differential Equation and Their Applications," John Wiley and Sons, Inc., pp. 185-210, 1964.
- Laupa, A. and Weil, N. A., "Analysis of U-Shaped Expansion Joint," *J. Apple. Mech.*, Vol. 29, No. 3, pp. 15-123, 1962.
- 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.
- 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(A)*, Vol. 21, No. 8, pp. 1195-1208, 1997.
- Kim, D. H. and Choi, M. J., "Vibration Analysis Model for Bellows Using Reduced Degree of Freedom in the Vehicle Exhaust System," *KSPE Autumn Conference*, pp. 659-663, 2001.
- 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.
- 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.
- Ahmad, S., Irons, B. M. and Zienkiewicz, O. C., "Analsis of Thick and Thin Shell Structures by Curved Element," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 2, No. 2, pp. 419-451, 1970.
- 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.
- 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.
- Stolarski, H. and Belytschko, T., "Membrane Locking and Reduced Integration for Curved Elements," *J. Apple. Mech.*, Vol. 49, No. 1, pp. 172-176, 1982.
- Stolarski, H. and Belytschko, T., "Shear and Membrane locking in the Curved C0 Elements," *Comp. Method in Appl. Mech. and Engrg.*, Vol. 41, No. 3, pp. 279-296, 1983.
- ANSYS, "Online Documentation for ANSYS V11.0," ANSYS Inc., 2007.
- Bathe, K. J., "Finte Element Procedures," Prentice-Hall, p. 419, 1996.
- Cook, R. D., Malkus, D. S. and Plesha, M. E., "Concepts and Applications of Finite Element Analysis," John Wiley and Sons, pp. 352-357, 1989.