

각운동 하중하에서 얇은 두께 피스톤 벨로우즈의 피로 특성 해석

Analysis of Fatigue Properties of Thin-walled Piston Bellows under Angular Motion Loading

현성열* · 박기태** · 김선진*†

Seong-Yeol Hyun*, Gi-Tae Park** and Seon-Jin Kim*†

(Received 16 July 2025, Revision received 13 August 2025, Accepted 19 August 2025)

초록 : 압력발생기에서 압력을 생성시키는 얇은 두께의 스테인리스강 피스톤 벨로우즈의 피로 특성을 평가하기 위하여, 본 연구에서는 벨로우즈의 실제 거동(각운동 하중하의 인장 및 압축)을 모사한 피로 시험기를 자체 설계 및 제작하여 피로시험을 수행하였다. 피로시험기는 모터와 크랭크를 사용하여 모터의 회전운동을 각운동으로 변환되도록 하고, 변위별 반복수를 측정할 수 있도록 각운동 변위-제어 방식으로 구성하였다. 피로시험은 5가지의 변위 레벨에서 각각 2개의 샘플에 대하여 수행하였다. 본 시험을 통하여 피스톤 벨로우즈의 피로 수명과 파괴 양상을 평가하였으며, 균열의 발생은 벽면에 부착된 쪽의 첫 번째 골에서 발생하는 것을 알 수 있었다.

키워드 : 압력 발생기, 벨로우즈, 각운동 하중, 피로시험기, 피로수명

Abstract : In order to evaluate the fatigue properties of the thin-walled stainless-steel piston bellows, that generates pressure in pressure generator, in this study, the fatigue test machine that simulates the actual behavior (extension and compression under angular motion loading) of the bellows was designed and manufactured, and fatigue tests were performed. The fatigue test machine uses a motor and a crank to convert the rotational motion of the motor into the angular motion of the bellows, and is configured in an angular motion stroke-control manner so that the number of cycles can be measured for each stroke. The fatigue test was performed on two samples each at five stroke levels. Through this experiment, the fatigue life of the piston bellows and the fracture morphology were evaluated, and it was found that cracks occurred in the first root on the side attached to the fixed part.

Key Words : Pressure Generator, Bellows, Angular Motion Loading, Fatigue Test Machine, Fatigue Life

*† 김선진(<https://orcid.org/0000-0001-7755-2581>) : 교수, 국립부경대학교 기계공학부

E-mail : sjkim@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6163

*현성열(<https://orcid.org/0009-0000-5722-8557>) : 대학원생, 국립부경대학교 대학원 기계설계공학과, 모전 쿨링시스템연구소

**박기태(<https://orcid.org/0009-0005-7140-8737>) : 책임연구원, 모전 쿨링시스템연구소

*† Seon-Jin Kim(<https://orcid.org/0000-0001-7755-2581>) : Professor, School of Mechanical Engineering, Pukyong National University.

E-mail : sjkim@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6163

*Seong-Yeol Hyun(<https://orcid.org/0009-0000-5722-8557>) : Graduate student, Dept. of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University, CSRI, Mojeon Co., Ltd.

**Gi-Tae Park(<https://orcid.org/0009-0005-7140-8737>) : Engineer, Cooling System Research Institute, Mojeon Co., Ltd.

1. 서 론

극저온(Cryogenic Temperature)은 통상 천연가스의 액화온도인 120K(-153℃) 이하의 온도영역을 의미하며, 극저온 냉동기(Cryocooler)는 극저온 온도까지 냉각되도록 설계된 기계식 냉동기를 의미한다. 일반적인 극저온 냉동기에는 다섯 가지가 있지만,¹⁾ 그중 스티어링(Stirling) 냉동기는 G-M(Gifford-McMahon) 냉동기와 더불어 다양한 상업적 분야에서 활용도가 매우 높은 극저온 냉동기 중의 하나이다.²⁾ 스티어링 타입 냉동기는 가스의 압축과 팽창을 수행하는 실린더와 피스톤 및 이를 구동시키는 구동기구로 구성된 압축기, 재생기, 변위기 및 팽창기 등으로 구성되어 있으며, 또한 압축기는 회전모터에 크랭크 기구를 부착하여 피스톤을 구동하는 회전 압축기(회전운동→직선운동)와 선형 모터에 의해 구동되는 선형 압축기로 구분한다.^{3,4)} 그러나 회전 압축기는 실린더와 피스톤을 수 마이크로의 원통도, 진원도 및 조도 등을 고려했을 때 제작에 많은 시간과 비용이 소요되고, 윤활을 해야 하는 단점이 존재한다. 또한 선형 압축기는 낮은 신뢰성, 증가된 소비전력, 비용/부피/외부진동의 증가가 발생하는 단점이 있다.⁵⁾ 이러한 관점에서 저자 등은 회전 압축기와 선형 압축기의 단점을 보완하고 신뢰성을 확보하기 위한 스티어링 타입의 극저온 냉동기 개발을 위한 압력발생기를 설계하고 개발 중에 있다. 극저온 냉동기의 설계³⁾ 및 적용과 관련된 주요 관심사는 성능과 효율성, 신뢰성 및 비용이며, 적용에 관한 우선 순위는 실제적인 용도에 따라 다르다.⁶⁾

이에 저자가 개발하고자 하는 압력발생기는 앞에서 언급한 회전 압축기와 선형 압축기의 단점을 보완하고 단순한 구조로 구성하기 위하여 각운동을 하는 피스톤 벨로우즈를 대향형으로 구성하여 수직 방향의 진동을 최소화하였으나, 축방향의 진동이 존재하여 이를 개선하고자 커넥팅 벨로우즈를 사용하는 구조로 구성하였다.⁷⁾

일반적으로 금속 벨로우즈는 내부와 외부 직경이 균일하고 피치 또는 간격이 일정하며, 각 컨볼루션의 평면이 평행한 개별 컨볼루션으로 구성된다. 컨볼루션의 유연성 덕분에 벨로우즈는 축 방

향, 각운동 및 측면 변위를 개별적으로 또는 조합하여 흡수할 수 있다. 금속 벨로우즈는 많은 산업 분야에서 사용되며,⁸⁻¹⁰⁾ 기본 동작 유형에는 일반적으로 축 운동(Axial Motion), 각 운동(Angular Motion), 측면 운동(Lateral Motion) 및 비틀림(Torsion)으로 구분할 수 있다.¹¹⁾

본 연구에서 개발 중인 극저온 냉동기용 압력발생기의 성능과 신뢰성을 향상시키기 위해서는 먼저 핵심부품인 벨로우즈의 피로수명을 평가하고 예측하는 것이 매우 중요하다. 압력발생기의 커넥팅 벨로우즈는 구조적으로 축 방향의 인장-압축 운동을 한다. 이와 같은 관점에서 저자 등은 이미 커넥팅 벨로우즈에 대한 축 방향 피로시험을 수행하여 그 피로수명을 평가하였다.⁷⁾

본 연구에서는 압력발생기에서 압력을 생성시키는 얇은 벽두께의 Q-형상의 스테인리스강 피스톤 벨로우즈의 주요 손상 기구인 피로 특성을 평가하기 위하여, 피스톤 벨로우즈의 실제 거동(각운동 하중하의 인장 및 압축)을 모사한 피로시험기를 자체 설계 및 제작하여 각운동 하중하의 피로시험을 수행한 결과를 보고하고자 한다.

2. 피로시험장치의 제작 및 실험

2.1 압력발생기

본 연구에서 개발하고자 하는 스티어링 극저온 냉동기용 압력발생기의 개념도를 Fig. 1에 나타낸다.⁷⁾ 그림 중의 커넥팅 벨로우즈는 피스톤 벨로우즈에서 압력을 생성할 때 발생하는 축 방향의 진동을 감소시켜 주며, 피스톤 벨로우즈가 압축할

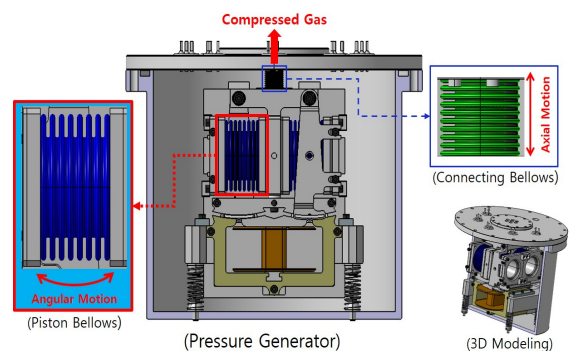


Fig. 1 Schematic drawing of the pressure generator

때 발생된 압축가스를 스틸링 극저온 냉동기로 보내주는 유로 역할을 한다. 커넥팅 벨로우즈의 축 방향 피로 특성에 대해서는 앞서 언급하였듯이 실험과 해석을 통하여 평가하였다.⁷⁾

Fig. 1의 피스톤 벨로우즈는 대향형으로 설치하여 각운동 방향의 진동을 흡수하는 구조이며, 각운동 하중하의 인장 및 압축을 반복하여 압력을 생성시키는 압력발생기의 핵심부품이다. 따라서 본 연구에서는 피스톤 벨로우즈의 각운동 하중하의 피로 특성을 평가하는 것이 주목적이다.

2.2 피스톤 벨로우즈의 제작

피스톤 벨로우즈의 제작에 사용된 재료는 전보⁷⁾의 커넥팅 벨로우즈와 동일한 SUS 304(UNS S30400) 오스테나이트계 스테인리스강이며, 그 화학적 성분과 기계적 성질은 전보⁷⁾와 동일하다.

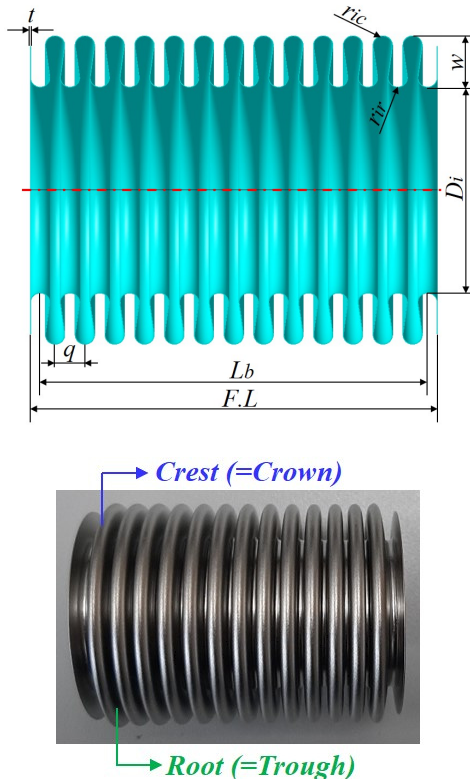


Fig. 2 Geometry and shape of the piston bellows used in this work

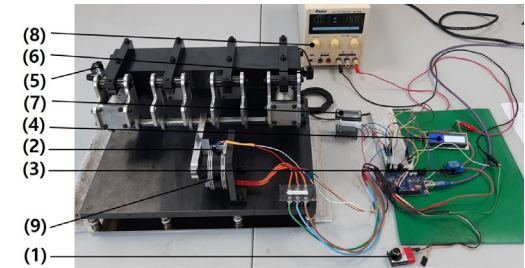
Table 1 Specifications of the piston bellows used in this work

Parameter	Value	Unit
Inner diameter (D_i)	24.2	mm
Height of convolution (w)	6.15	mm
Bellows nominal thickness of one ply (t)	0.1	mm
Pitch of convolution (q)	3.4	mm
Length of convolution (L_b)	44.2	mm
Free length ($F.L$)	46.5	mm
Number of convolution (N)	13	EA
Inside radius of crest convolution (r_{ic})	1.05	mm
Inside radius of root convolution (r_{ir})	1.05	mm

본 시험에 사용된 피스톤 벨로우즈는 Ω -형상으로 두께 0.1 mm 시트를 용접 및 조판하여 Hydraulic Forming 방식으로 전문 제작 업체에 의뢰하여 정밀 제작하였다. 본 연구에 사용된 피스톤 벨로우즈의 형상은 Fig. 2와 같이 Flange-Type Collar 구조이며, Table 1에 그 구체적인 사양을 나타내었다.

2.3 피로시험장치 제작 및 실험방법

압력발생기의 핵심부품인 피스톤 벨로우즈의 피로수명을 평가하기 위하여 자체 설계 및 제작한 피로시험기(Fatigue Test Machine)의 시험장치와 그 회로도를 Fig. 3 및 Fig. 4에 각각 나타내었다. 또한 Fig. 5는 본 연구에 적용된 압력발생기 구동용 리니어 모터의 위상별 특징과 각 위상별 각운동을 하는 압력발생기 및 자체 제작한 피로시험기에서의 피스톤 벨로우즈의 거동을 도식적으로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 위상이 π 와 2π 일 때는 전류가 0이 되어 벨로우즈는 중립위치가 되며, $\pi/2$ 와 $3\pi/2$ 일 때는 각각 상사점과 하사점이 되어 벨로우즈는 압축 및 인장이 되는 것을 알 수 있다. Fig. 3의 시험장치는 모터와 크랭크를 사용하여 모터의 회전운동을 벨로우즈의 각운동으로 변화되도록 설계하고, 변위-제어(Stroke-Controlled) 방식으로 구성하였다.



No.	Name	Function
(1)	RPM Regulator	Motor RPM Control
(2)	Hall Sensor	Motor RPM Detection
(3)	Relay	Motor power shuts off when press. drops by 10%
(4)	Pressure Display	Display pressure to voltage
(5)	Pressure Supply Line	N ₂ gas supply inside bellows
(6)	Pressure Sensor	Bellows internal pressure measurement
(7)	Counter	Motor rotation count display
(8)	D.C Power Supply	Pressure sensor & motor power supply
(9)	Motor	Operating test machine

Fig. 3 Experimental set-up

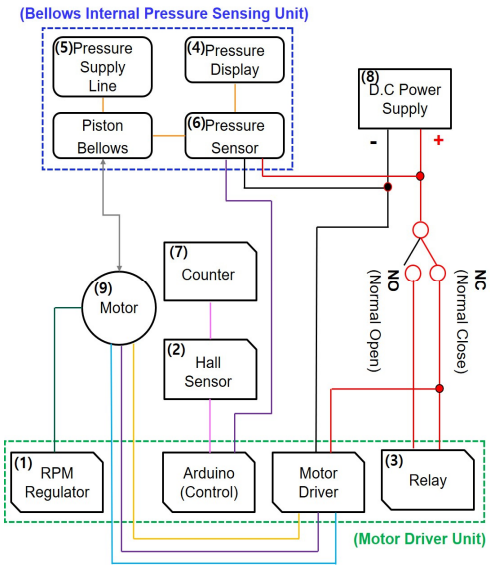


Fig. 4 Experimental circuit diagram

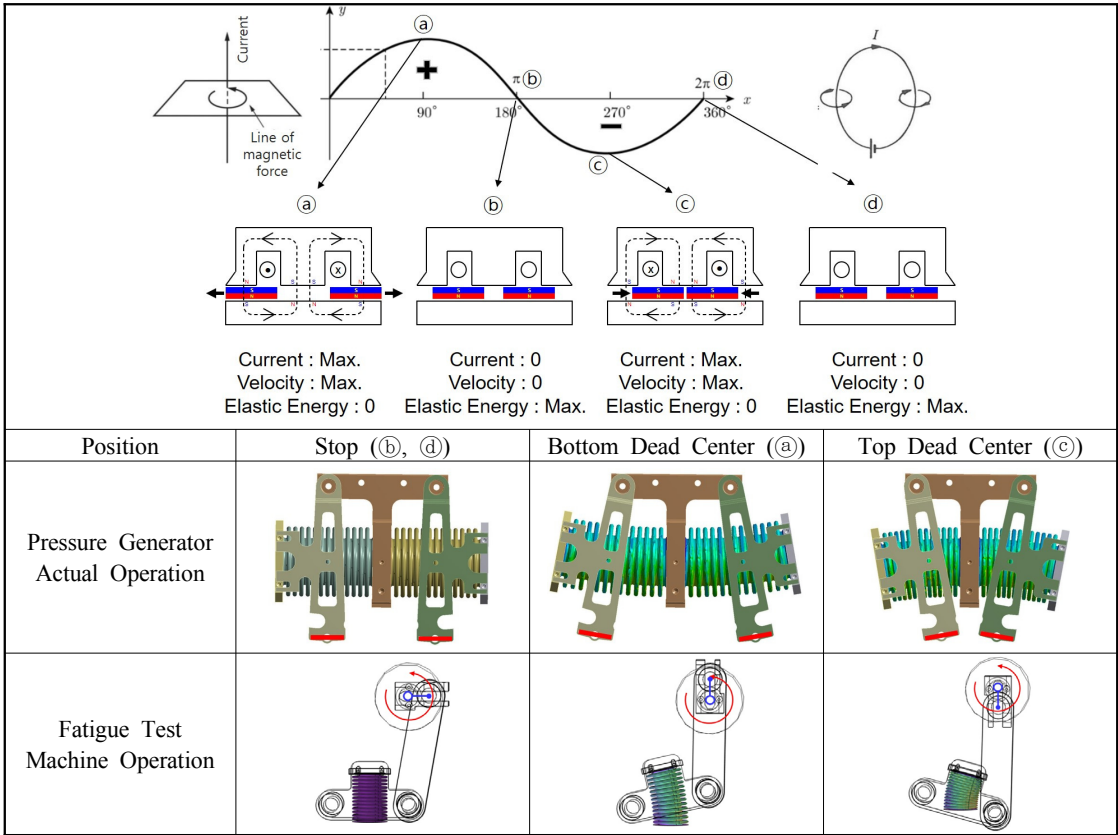


Fig. 5 Phase voltage of driven motor, and piston bellows behaviors for pressure generator and fatigue test machine according to angular motion

Fig. 6과 같이 변위는 모터 중심과 편심되어 조립되는 크랭크 핀에 의해 기구학적으로 조절하고, 반복수는 모터에 자석을 부착하여 홀 센서(Hall Sensor)로 측정하였다. 또한 벨로우즈의 균열(Crack) 발생 여부를 판별하기 위하여 벨로우즈 내부에 질소 가스를 1 bar의 압력으로 충전하고, 균열 발생 시 누설압력을 압력센서(PSS-1V-R1/8, 전압출력방식)로 0.9 bar 이하가 되면 모터가 정지하도록 아두이노를 사용하여 시험기를 구성하였다.

Fig. 7은 본 연구에서 수행한 벨로우즈 피로시험의 시간에 따른 각운동하의 하중 이력, 즉 변위(인장과 압축 변위 진폭의 합)의 변화 과정을 나타낸 것이다.

또한 본 연구에서의 피스톤 벨로우즈의 피로수명(Nf)은 압력에 의하여 모터가 정지하였을 때의

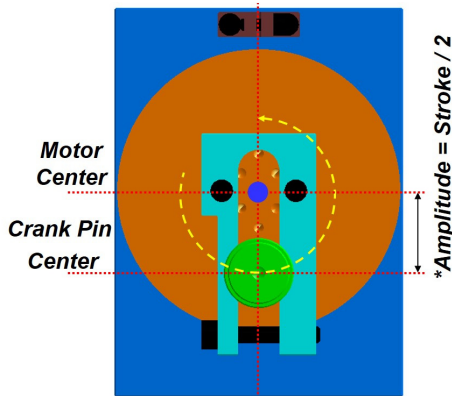


Fig. 6 Stroke adjusting method in this experiment

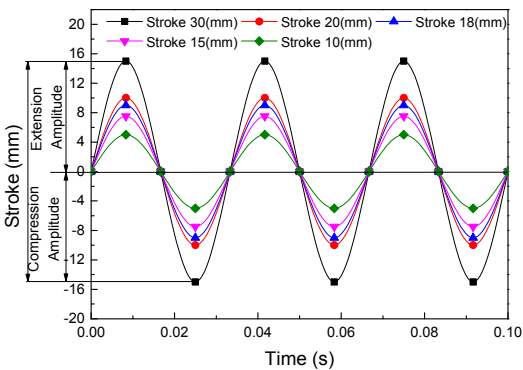


Fig. 7 The loading histories under angular motion in this work

총 반복수로 정의하였다. 본 연구에서는 시험시간과 경제성을 고려하여 30 mm에서 10 mm까지의 5가지 변위 레벨에서 피로 실험을 수행하였으며, 모터가 회전함에 따라 피스톤 벨로우즈는 0.1초 동안에 인장/압축을 3-사이클(반복수)이 수행되도록 회전수를 설정하였다. 즉, 30 Hz의 주파수로 각운동 방향의 변위 하중이 작용하도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 피로시험 결과, S-N 선도

Table 2는 본 연구에서 수행한 5가지의 변위 레벨에서 각각 2개의 벨로우즈 시작품에 대한 피로시험을 수행하여 얻은 정량적 피로수명 데이터를 나타낸다. Table 2에서 알 수 있듯이 변위가 증가하면 피로수명은 감소하고, 동일 변위에서도 벨로우즈의 피로수명에는 산포가 존재함을 알 수 있다.

또한 Table 2에서 피로수명을 이태릭체로 표현한 것은 그 하중 반복수까지 벨로우즈의 파손은 발생하지 않았으나 시험을 중단한 것을 의미한다(Run-out).

피로수명을 평가하고 예측하기 위한 고주기 피로(High-Cycle Fatigue, HCF) 모델에는 여러 가지가 있지만, 본 연구에서는 전통적인 S-N 모델에 의하여 평가하고자 한다.¹²⁾ Fig. 8은 피스톤 벨로우즈의 S-N 선도를 나타낸다. 본 그림으로부터 크게 3부분으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 첫째, 유한수명($N_f < 10^7$) 영역에서 변위가 감소함에 따라 수명이 증가하는 경사진 직선, 둘째 X-축과 평행한 10^7 반복수 수평선과 경사진 직선이 만나는

Table 2 Quantitative fatigue life for each stroke

Stroke [mm]	Fatigue Life (N_f)		
	Sample #1	Sample #2	Average
30	95,358	95,358	136,266
20	1,928,714	3,826,436	2,877,575
18	21,794,177	21,794,177	21,794,177
15	21,815,903	21,815,903	21,815,903
10	65,033,747	65,033,747	65,033,747

Knee 점, 그리고 수평선 이하, 즉 피로한도 이하에서 피로가 발생하지 않는 영역으로 구분할 수 있다. 본 연구에서 수평선이 Y-축과 만나는 변위를 설계피로한도(S_{df})라 정의한다. S - N 선도로부터 구한 본 연구의 피스톤 벨로우즈의 설계피로한도는 18.89 mm로 결정되었다. 또한 유한수명 영역에서의 피스톤 벨로우즈의 S - N 선도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S = 58.09 - 5.61 (\log N_f) \quad (1)$$

여기서, S 는 변위, N_f 는 피로수명을 나타낸다. 참고로, 식 (1)은 파단된 시험편의 평균수명과 중간 변위 레벨에서의 중단된 수명에 기초하였다.

Fig. 8에서 알 수 있듯이 변위가 증가할수록 피로수명은 감소하고 있으며, 18 mm 이하의 변위에서는 모든 벨로우즈 시작품에서 파괴가 발생하지 않았다(Run out).

실용적 관점에서 벨로우즈의 안전 설계를 위해서는 벨로우즈의 운용 조건에 대한 정확한 설계 피로한도를 결정하는 것이 매우 중요하다. S - N 선도로부터 구한 설계피로한도를 평가하기 위하여, 비교적 적은 시험편으로 설계피로한도를 평가할 수 있는 $S - (1/N_f)$ 곡선법¹³⁾과 비교하였다. Fig. 9는 $S - (1/N_f)$ 곡선을 나타낸 것이다. $S - (1/N_f)$ 관계식은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$S = 18.68 + 1.55E06 (1/N_f) \quad (2)$$

따라서 설계피로한도는 N_f 가 ∞ 일 때, 즉 수명의 역수가 0이므로 18.68 mm을 얻는다.

이상과 같이 S - N 곡선법과 $S - (1/N_f)$ 곡선법으로 구한 설계피로한도가 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

또한 실제 피스톤 벨로우즈의 운용 변위인 15 mm를 감안하여 안전율(Safety Factor, SF)을 계산한 결과, 1.2가 되는 것을 알 수 있다. 즉,

$$SF = \frac{18 \text{ mm (Design Fatigue Endurance)}}{15 \text{ mm (Actual Operation)}} = 1.2 \quad (3)$$

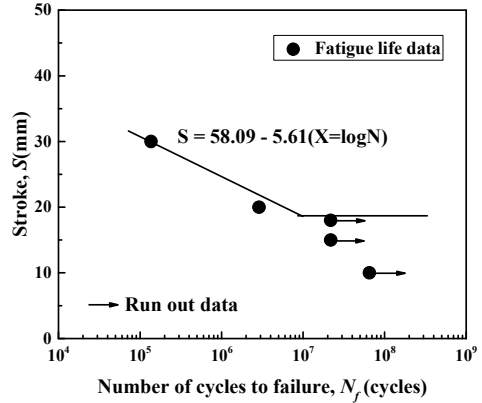


Fig. 8 Stroke(S)-Life(N) curve of bellows products

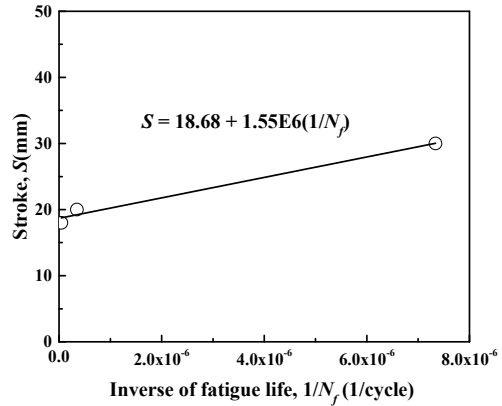


Fig. 9 Estimation of design fatigue strength using the S - $1/N_f$ curve method

3.2 거시적 파괴 양상

Fig. 10은 피로시험 후 파손된 벨로우즈의 일례로 피로 균열의 발생 위치와 균열의 형상을 나타낸 것이다. 변위 30 mm 및 20 mm에서 파손된 4개 벨로우즈에 대한 균열의 발생 위치를 조사한 결과, 4개의 벨로우즈 모두 첫 번째 산과 두 번째 산 사이의 첫 번째 골에서 발생한 것을 확인할 수 있었으며, Table 3에 그 결과를 요약 정리하였다.

Fig. 10에서 알 수 있듯이 본 연구의 각운동 반복 하중하의 벨로우즈의 피로 균열은 첫 번째 골 영역에서 발생하여 원주 방향을 따라 전파하여 길고 넓어지면서 결국 파괴에 이르는 것으로 나타났다. 이는 Yan 등¹⁴⁾의 반복 굽힘 변형을 받은

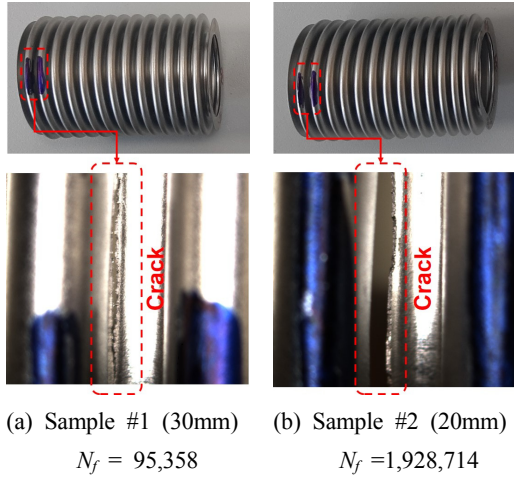


Fig. 10 Examples of fatigue crack initiation location and shape of the cracking

Table 3 Summary of crack initiation location

Crack Initiation Site	Quantities [EA]	Percentage [%]
1 st -Root	4 of 4	100
Total	4 of 4	100

얇은 벽두께를 갖는 스테인리스강 벨로우즈의 피로 균열의 발생 위치와 동일한 결과를 얻었다. 또한 Hao 등¹⁰⁾의 실험 결과와도 잘 일치한다. 이는 골의 응력 변화, 역방향 변형 및 두께 변화가 산보다 골에서 높기 때문인 것으로 사료된다.

3.3 수치해석 및 실험과의 비교

Table 1 및 Fig. 2에 제시된 벨로우즈 사양을 토대로 3D 모델링을 하고, ANSYS SpaceClaim에서 midsurface¹⁵⁾로 형상을 추출한 후 ANSYS에서 두께 정보를 부여하였으며, 재료는 전보⁷⁾에서 제시한 물성치를 적용하여 선형 해석을 수행하였다.¹⁶⁾

해석모델은 단순한 형태의 피로시험기의 형상으로 모델을 구성하였으며, 모터와 크랭크 등의 구조물은 강체(rigid)로 설정하고, 벨로우즈만 유연체(flexible)로 설정하였다. 또한 회전부는 revolute 조건을 주었으며, 부품들 간의 접촉면에는 fixed 조건을 주었다. 최종적으로 각운동 변위를 구현하기 위하여 모터에 각도를 주어 회전하면 크랭크

와 로드 등의 회전에 의하여 벨로우즈가 각운동을 하도록 설정하였다.

Fig. 11은 각 운동 변위 진폭이 ± 15 mm의 인장 및 압축 진폭이 작용할 때 벨로우즈에 발생하는 응력분포를 도시한 것이다. 인장의 경우 최대응력은 고정측의 두 번째 주름의 골에서 나타났으며, 그 값은 441.8 MPa로 나타났다. 또한 압축의 경우 최대응력은 첫 번째 주름의 골에서 나타났으며, 그 값은 723.0 MPa로 나타났다. Fig. 11에서 알 수 있듯이 압축(downward bending, Fig. 11(c))의 경우의 응력이 인장(upward bending, Fig. 11(a))의 응력보다 높게 나타났다. 이러한 양상은 다른 4가지의 각 운동 변위 진폭의 조건에서도 응력의 크기에만 차이가 있을 뿐 그 응력분포 형태는 유사한 결

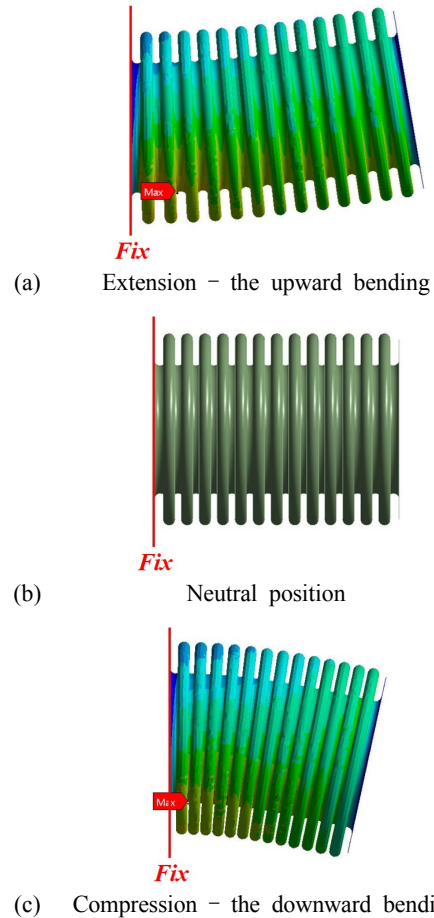


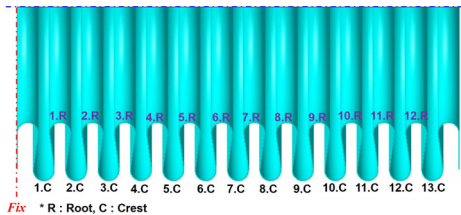
Fig. 11 Stress distribution of the piston bellows [Amplitude = ± 15 mm]

과를 보였다.

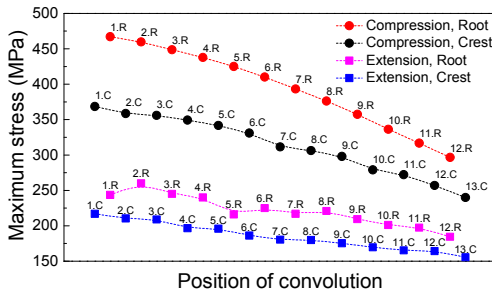
Table 4에 각각의 각운동 변위 진폭에서 인장 및 압축 시에 발생하는 최대응력 값을 나타내었다. 변위 진폭이 증가할수록 최대응력도 상응하여 증가하였으며, 모든 변위 진폭에서 인장에서보다 압축에서의 최대응력이 더 큰 값을 나타냄을 확

Table 4 Maximum stress value [MPa]

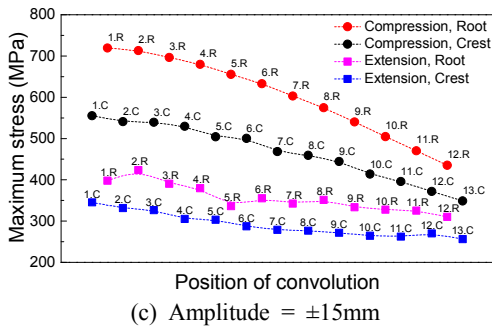
Amplitude [mm]	Extension	Compression
	Max. Stress	Max. Stress
±15	441.8	723.0
±10	269.4	464.8
±9	235.7	420.2
±7.5	184.8	351.4
±5	97.5	240.8



(a) Position of convolution



(b) Amplitude = ±10 mm



(c) Amplitude = ±15 mm

Fig. 12 Maximum stress according to convolution position at amplitude ±10 mm & ±15 mm

인할 수 있었다.

Fig. 12는 벨로우즈 주름의 위치에서 구한 응력을 나타낸 것이다. Fig. 12의 (a)는 벨로우즈 주름의 위치를 나타낸 것이며, Fig. 12의 (b) 및 (c)는 각각 진폭 ±10 mm 및 ±15 mm일 때의 인장과 압축 시에 벨로우즈의 주름별 산과 골에서의 최대응력을 나타낸 것이다. 본 그림에서 알 수 있듯이 고정벽 벽면으로부터 멀어질수록 벨로우즈의 운동이 유연해짐에 따라 응력값은 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 진폭에 따른 응력값에만 차이가 있을 뿐 주름의 위치에 따른 응력값의 변화는 거의 유사한 경향을 보였다. Fig. 10의 실험 결과에서 알 수 있듯이 본 연구의 각운동 반복 하중하의 벨로우즈의 피로 균열은 첫 번째 골 영역에서 발생하였으며, 응력해석에서도 첫 번째 주름의 골에서 최대응력이 발생하여 동일한 결과가 나타났다. 이는 Yan 등¹⁴⁾의 얇은 벽두께를 갖는 스테인리스강 벨로우즈의 굽힘 변형 특성과 균열 파손 기구 해석에 의한 피로 균열의 발생 위치와 동일한 결과를 얻었다. 또한 최대응력은 인장보다는 압축에서 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

결론적으로 피로시험에서 발생한 균열의 위치와 응력해석에서 최대응력이 발생한 위치가 동일하였으며, 시험 및 해석 결과에 대한 신뢰성을 확보할 수 있었다. 그리고 본 피스톤 벨로우즈가 구조적으로 가장 취약한 위치를 파악할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 스틸링 극저온 냉동기의 압력발생기에서 압력을 발생시키는 피스톤 벨로우즈의 피로수명을 평가하기 위하여, 피로시험기를 자체 설계 및 제작한 후 벨로우즈 시작품에 대한 피로시험을 수행하였으며, 또한 범용프로그램(ANSYS)을 사용하여 벨로우즈에 발생하는 응력을 수치해석 하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 피로시험을 통해 얇은 두께를 가진 각운동형 피스톤 벨로우즈 시작품에 대한 피로수명 선도(S-N)를 확보하였으며, 설계피로한도를 결정할 수

있었다.

2) 피로시험에서 균열은 변위 30 mm와 20 mm의 조건에서 발생하였으며, 모든 균열은 첫 번째 골에서 발생하였다.

3) 응력해석에서 진폭이 증가함에 따라 인장 및 압축응력 모두 증가하는 경향을 보였으며, 압축시 첫 번째 골에서 최대응력이 발생하였다.

4) 피로시험에서 발생한 균열의 위치와 응력해석에서 최대응력이 발생한 위치가 동일하였다.

Author contributions

S. Y. Hyun; Conceptualization, Fatigue test machine design & test, Data curation, Writing-original draft, G. T. Park; Investigation, Stress analysis. S. J. Kim; Supervision, Writing-review & editing.

References

1. R. Radebaugh, 2009, "Cryocoolers: The State of the Art and Recent Developments", *Journal of Physics: Condensed Matter*, 21(16), 164219. (DOI:10.1088/0953-8984/21/16/164219)
2. D. Sun, X. Qiao, D. Yang and Q. Shen, 2022, "Experimental Study on a Two-Stage Large Cooling Capacity Stirling Cryocooler Working Below 30K", *Cryogenics*, 129, 103619. (<https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2022.103619>)
3. S. J. Park, Y. J. Hong, H. B. Kim, D. Y. Koh, Y. H. Kim, B. K. Yu and K. B. Lee, 2001, "The Effect of the Charging Pressure and Operating Frequency in the Stirling Cryocooler", *The Korean Society of Superconductivity and Cryogenics*, 3(2), 62-68.
4. Y. J. Hong, S. J. Park and H. B. Kim, 2006, "Effects of the Dead Volume of the Compression and Expansion Spaces on the Performance of the Stirling Cryocooler", *KSME Autumn Conference Proceedings*, 158-162.
5. A. Veprík, I. Nachman and N. Pundak, 2009, "Dynamic Counterbalancing the Single-Piston Linear Compressor of a Stirling Cryogenic Cooler", *Cryogenics*, 49(5), 165-170. (<https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2008.12.003>)
6. Y. Xu, D. Sun, X. Qiao, Y. S. W. Yu, N. Zhang, J. Zhang and Y. Cai, 2017, "Operating Characteristics of a Single-Stage Stirling Cryocooler Capable of Providing 700 W Cooling Power at 77 K", *Cryogenics*, 83, 78-84. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.cryogenics.2017.03.003>)
7. S. J. Kim, S. Y. Hyun and G. T. Park, 2025, "Evaluation of Fatigue Life of Ω -Shaped Connecting bellows for Pressure Generators", *Journal of Power System Engineering*, 29(2), 54-62. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2025.29.2.054>)
8. Z. Yuan, S. Huo and J. Ren, 2019, "Mathematical Description and mechanical Characteristics of Reinforced S-Shape Bellows", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 175, 103931. (<https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.103931>)
9. S. D. Wankhede and S. H. Gawande, 2023, "Design and Analysis Aspect of Metal Expansion Bellows: A Review", *Forces in Mechanics*, 13, 100244. (<https://doi.org/10.1016/j.finmec.2023.100244>)
10. Z. Hao, J. Luo, L. Chen, Y. Cai, Y. Chen and M. Cheng, 2021, "Failure Mechanism of Unequal Parameters Metal Bellows under Repeated Bending Process", *Engineering Failure Analysis*, 129, 105671. (<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105671>)
11. www.hyspan.com/technical-assistance/.
12. Y. Murakami, T. Takagi, K. Wada and H. Matsunaga, 2021, "Essential Structure of S-N Curve: Prediction of Fatigue Life and Fatigue Limit of Defective Materials and Nature of Scatter", *International Journal of Fatigue*, 146, 106138. (<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106138>)

13. D. Kujawski, A. K. Vasudevan, S. Plano and D. Gabellone, 2024, “A Method to Estimate Fatigue Limit Using $(1/N_f)$ -S Curve”, International Journal of Fatigue, 182, 108205.
(<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108205>)
14. M. Yan, M. Y. Wang, Z. F. Xu, Y. Liu, L. Chen and H. G. Huang, 2023, “Analysis on the Bending Deformation Characteristic and Crack Failure Mechanism of Thin-Walled Stainless - Steel Bellows”, Engineering Failure Analysis, 143, part A, 106900.
(<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106900>)
15. E. Pavithra and V. S. S. Kumar, 2018, “Experimental Investigation and Numerical Analysis on Fatigue Life of Bellows”, Materials Today : Proceedings, 5(9), Part 3, 18848-18856.
(<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.232>)
16. D. H. Jeong, D. H. Chin and B. T. Kim, 2020, “A Study on the Behavioral Characteristics of Bellows for Expansion Joints”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 19(10), 52-58.
(<https://doi.org/10.14775/ksmpe.2020.19.10.052>)