

가스발생기 산화제 개폐밸브 주름관 구조 평가

유재한*, 이중엽**, 이수용***, 임형태****

Structural Evaluations of the Bellows for a Gas-generator Lox Shut-off Valve

Jaehan Yoo*, Joongyoun Lee**, Soo Yong Lee***, Hyeongtae Lim****

Abstract

The structural analyses and experimental results for the bellows of a gas-generator liquid oxygen shut-off valve were presented. The bellows experiences axial compression and external high pressure loadings at cryogenic temperatures. The analyses were performed using EJMA (Expansion Joint Manufacturing Association) standard and the commercial FE (finite element) analysis program, Abaqus v6.9, at room and cryogenic temperatures. The spring modulus, the induced stress and the expected fatigue life of the bellows were compared respectively. The effects by the contact and the material plasticity on the FE analysis results were also analyzed. Also, FE analyses related to a burst test were presented.

초 록

가스발생기 산화제 개폐 밸브에 사용되는 주름관의 구조 해석 및 시험이 수행되었다. 이 주름관은 극저온에서 압축 변위와 높은 외압 하중을 받는다. 구조 해석은 상온 및 극저온에서 EJMA (Expansion Joint Manufacturing Association) 표준 및 상용 유한 요소 해석 프로그램인 Abaqus v6.9를 이용하여 수행되었다. 스프링 강성, 응력 및 피로 수명 해석 결과들이 비교되었고 유한 요소 해석 결과에서 접촉 및 재료의 소성에 의한 영향을 살펴보았다. 또한 파열 시험과 관련된 유한 요소 해석 결과도 제시되었다.

키워드 : 액체로켓엔진 (liquid rocket engine), 개폐 밸브 (shut-off valve), 주름관 (bellows), 피로 수명 (fatigue life), EJMA, 유한 요소 (finite element)

1. 서 론

가스발생기 산화제 개폐 밸브는 높은 압력의 작동 기체에 의해 포켓이 움직여 개폐된다. 그림

1과 같이 공압부에 압력이 높아지면 주름관과 스프링이 압축되고 포켓이 움직여 유로가 개방되고 가스발생기로 산화제가 공급된다. 여기에 사용되는 주름관은 공압이 작용하는 영역과 스프링 및

접수일(2012년 1월 19일), 수정일(1차 : 2012년 6월 13일, 2차 : 2012년 6월 18일, 게재 확정일 : 2012년 7월 1일)

* 미래로켓연구팀/tonup@kari.re.kr ** 미래로켓연구팀/leejy@kari.re.kr ***미래로켓연구팀/sylee@kari.re.kr

**** 과학기술연합대학원 대학교 발사체시스템공학/dlagudxo@ust.ac.kr

포켓이 움직이는 영역을 구분하는 역할을 하며 작동 시에는 높은 외압과 축방향 변위가 작용한다. 이 주름관은 보강되지 않은(unreinforced), 다층(multi-ply), "U"자의 형상을 가지는 단일 주름관(single bellows)이다.

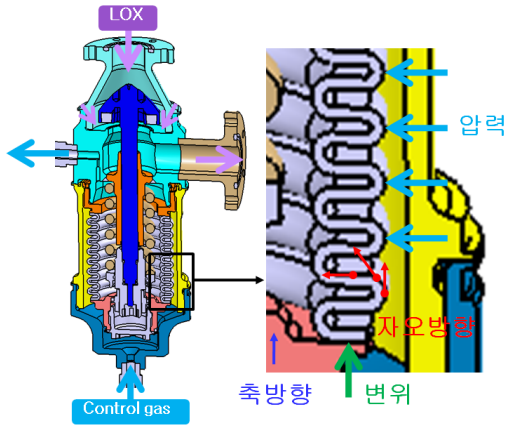


그림 1 밸브 개념도 (열린 상태, 다층을 단층으로 표현)

주름관은 배관이 사용되는 다양한 분야에서 널리 사용되며 구조 평가와 관련된 기술은 오래 전부터 개발되어 현재는 여러 표준들[1,2,3]과 규격[4]이 존재한다. 주름관 구조와 관련하여 많은 연구들이 수행되었으며, 특히 Becht는 2002년에 EJMA (Expansion Joint Manufacturing Association) 표준과 선형 정적 유한 요소 (FE, finite element) 해석 결과를 비교하여 그 차이의 원인을 분석하였다[5]. 여기서 보강되지 않은 한 개의 층을 가지는 주름관의 다양한 형상에 대하여 해석이 수행되고 분석되었으나 비선형성이 고려되지는 않았다. 총 300 개의 2개의 노드를 가지는 축대칭 선형 쉘(shell) 요소를 이용하여 구조 해석을 수행하였다.

이외에 최근 단층 주름관에 관한 연구로 2007년에 Williams[6]는 내압 및 축방향 변위가 있는 단층의 주름관에 대하여 소성이 고려된 비선형 정적 구조 해석을 수행하여 시험 결과 및 EJMA 표준 해석 결과와 비교하였다. 구조 해석을 위해 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용

하였고 4개의 노드가 있는 3차원 쉘 요소가 사용되었다. 소성이 고려된 유한요소 등가 응력 결과가 표준 해석과 많은 차이가 나는 것을 보였다.

또한 Steinbrink 등[7]은 내압 및 온도 하중을 받는 배기 배관의 단층 주름관에 관한 구조 해석이 수행되었다. 특히 FE 해석 결과에 대한 기하 비선형 및 소성에 의한 재료 비선형성의 영향을 살펴보았다. 응력 해석 결과에 기하 비선형성의 영향은 작았으며 재료 비선형성의 영향도는 큰 것을 확인하였다. 구조 해석을 위해 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하였고 20개의 노드를 가지는 육면체 및 10개의 노드를 가지는 4면체 요소가 사용되었다.

단층 주름관과 동일한 층 두께를 가지는 다층 주름관은 압력에 의한 자오 (meridional) 방향 응력은 증가하여 최대 운용압은 감소하나 변위에 의한 자오방향 응력이 감소하여 대개 피로 수명이 감소하는 장점이 있다. 그리고 스프링 강성은 감소한다[1].

다층 주름관에 관한 해석은 최근 FE 해석 기술의 발달에 더불어 가능해졌으나 최근 극히 일부만이 수행되었고 엄격한 조건에서 수행된 경우는 매우 제한적이다. 또한 이상적인 조건에서의 해석 결과도 제작상의 잔류 응력(residual stress)과 간극에 의해 큰 영향을 받게 되어 충분하지 못한 점이 있다. 따라서 층 간의 상호작용이 고려된 현재의 해석은 정성적인 영향도만을 파악할 수 있으며 정량적인 평가는 향후 추가적인 시험과 해석간의 비교들을 통해 가능하다.

과거 이러한 다층 주름관에 관한 구조 시험이 수행된 연구가 있으나 매우 복잡한 시험 결과로 인해 간단한 해석 모델로의 검증은 어려운 것으로 나타났다[8].

본 연구에서는 EJMA 표준[1]과 FE 해석을 이용하여 스프링 강성, 응력 및 피로 수명을 계산하고 비교하였다. 이 표준은 탄성 이론과 경험에 기초한 식들로 구성되어 해석 결과를 빠르게 도출하여 설계 단계에서 활용될 수 있다. 그러나 이 방법은 재료 비선형성인 소성 효과를 고려할 수 없으며 다층에 의한 효과가 지나치게 간략화한다. 반면에 FE 해석 결과는 소성이나 접촉을

상대적으로 정확하게 고려할 수 있으나 모델링, 계산 및 후처리 시간이 길게 소요된다. 여기서 FE 해석은 상용 프로그램인 Abaqus v6.9[9]로 수행되었다. 그리고 FE 해석 결과에서 고려된 비선형성에 의한 영향도 살펴보았다. 또한 가스발생기 산화제 개폐 밸브는 액체 산소에 의해 극저온에서 작동되므로 극저온에서 물성치 변화에 따른 영향도 살펴보았다.

2. 본 론

해석에 사용된 주름관은 내경 약 34, 단층의 두께 0.2 mm이며 총 6 층과 8 개의 산(convolution)으로 구성되어 있다. 사용된 재료는 오스테나이트 스테인리스강 321 시트(sheet)로 상온 및 극저온(-196 °C) 탄성 계수는 188 및 201 GPa를, 상온 및 극저온 항복 강도는 214 및 326 MPa로 가정하였다. 항복 이후의 응력-변형률 선도는 그림 2의 네킹(necking) 발생 이전에 데이터가 사용되었다[10]. 하중 조건으로 외압 7 MPa과 4 mm의 축방향 압축을 가정하였다.

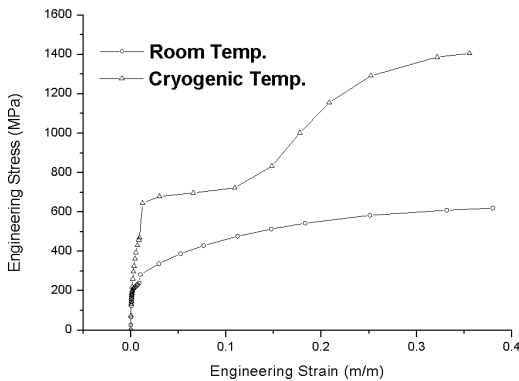


그림 2 SS 321 응력-변형률 선도

주름관은 시트 혹은 관(pipe) 형태의 소재를 공압, 수압, 롤러(roller) 등에 의해 성형이 되는데 이 과정에서 층의 두께가 일정하지 않게 얇아지게 된다. 표준에서는 이러한 효과를 고려하며 모든 계산 과정에서 성형 후의 얇아진 두께 0.183 mm가 사용되었다.

유한요소 해석에서는 설계 도면을 이용하여 성형전의 두께가 사용되었으며, 성형후의 형상을 비교적 정확하게 적용하기 위해서는 별도의 성형 FE 해석이 필요하다. 보수적인 접근을 하려면 FE 해석에서도 얇아진 두께를 사용해야 하나, 표준 해석과 달리 간극을 제거하기 위하여 도면에 대한 임의 수정이 필요하여 여기서는 설계 도면상의 두께 0.2 mm를 사용하였다. 주름관은 성형 과정에서 부분적인 두께 감소 이외에도 가공 경화 및 재질의 이방성이 발생되나 여기서는 고려하지 않았다.

수행된 모든 FE 구조 해석은 축대칭 정적 선형 혹은 비선형 해석이며 고려된 비선형성은 여러 층의 상호 접촉 및 재료의 등방성 소성이 있다. 그림 3과같이 2차의 축대칭 쉘 요소가 사용되었으며 크기는 약 0.2 mm이다. 여기서는 마찰에 의한 영향은 고려하지 않았다. 해석 모델은 가장 내측 층 안쪽 면의 자체 접촉을 고려하여 1 개의 산으로만 구성되었으나 여기서 고려된 하중 조건에서는 이러한 접촉이 발생하지는 않았다.

접촉 현상은 FE 해석 프로그램에 따라 다양한 구현 방법이 존재하며, 해석 결과에서 관통(penetration)과 같은 비물리적인 현상이 발생하지 않는 방법을 사용하는 것이 중요하다. 여기서는 유한 미끄럼(finite sliding) 방법과 관통을 허용하지 않는 직접 접촉(direct contact) 방법을 사용하였으며, 내측 층의 외측 면을 주면(master surface)으로, 외측 층의 내측 면을 종면(slave surface)으로 설정하였다. 또한 격자 수렴성 테스트를 통하여 약 1%이내에서 응력이 수렴되는 것을 확인하였다.

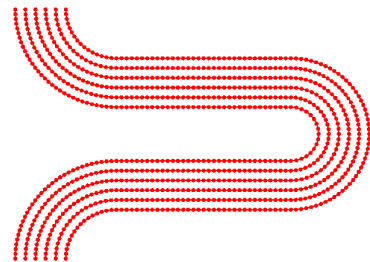


그림 3 주름관 유한요소 모델

2.1 스프링 강성 평가

형상과 재질의 함수인 스프링 강성은 대개 주름관이 극부적인 소성 변형이 발생하는 영역에서 작동하게 되어 일반적으로 단층 주름관의 탄성 해석은 실제보다 과도하게 예측하게 된다.

스프링 강성을 구하는 FE 해석에서는 비선형성으로 인해 하중 조건에 따라 스프링 강성이 변하므로 작동 영역의 축방향 압축 변위 4 mm를 하중으로 적용하여 얻어지는 반력을 이용하여 강성을 계산하였다.

표 1 주름관 강성 비교 (N/mm)

$f_{RT,EJMA,t=0.2}$	212
$f_{RT,EJMA,t=0.18}$	195
$f_{RT,FE,t=0.2}$ w/o contact and plastics	285
$f_{RT,FE,t=0.2}$ w/o plastics	347
$f_{RT,FE,t=0.2}$	219
$f_{RT,Test}$	236
$f_{CT,EJMA,t=0.2}$	209
$f_{CT,FE,t=0.2}$	299

표 1은 상온 및 극저온에서 EJMA 표준 및 FE 해석 결과와 시험 결과를 나타낸다. 여기서 f_N 는 스프링 강성을, 아래 첨자 EJMA, FE, Test, RT, CT 및 t 는 각각 EJMA 표준 해석 결과, FE 해석 결과, 시험 결과, 상온, 극저온 및 단층의 두께를 나타낸다. 표 1에 나타난 FE 해석 결과 중에서 $f_{RT,FE,t=0.2}$ w/o contact and plastics 만이 선형 해석 결과이다.

표준 해석 결과에서 본 모델의 경우는 성형 과정의 두께 감소로 인해 강성이 감소하는 것을 알 수 있다. 그리고 표준 해석 결과($f_{RT,EJMA,t=0.2}$)에 비해 같은 해석 조건의 FE 해석 결과($f_{RT,FE,t=0.2}$ w/o plastics)가 높게 예측된다. 이는 FE 해석이 표준 해석에 비해 접촉 효과를 크게 예측하고 있는 것을 나타낸다. 그리고 FE 해석 결과는 경계 비선형성인 접촉에 의해 강성이 증가하며 재료 비선형성인 소성에 의해 강성이 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

시험 결과는 표준 및 FE 해석에 비해서는 크게 측정되었다. 스프링 강성 측정값은 동일한 주름관이라도 소성으로 인해 변위에 따라 변하여 시험 시에 균일하고 정밀한 변위 제어가 요구되며, 사용 횟수나 시험 이력에 따라서도 측정값이 바뀐다. 또한 FE 해석에서는 성형 과정에서 발생된 두께 감소, 가공 경화, 층 간에 발생된 간극, 초기하중 (preload) 및 재료의 이방성 등에 대한 효과가 고려되지 않았으며, 해석은 1 개의 산으로 모델링되어 실제 주름관 양 끝단의 효과가 정확히 구현되지 않았다. 이러한 원인들이 시험과 FE 해석 결과 차이의 원인으로 추정된다. 또한 극저온에서는 상온에 비해 탄성계수와 항복 강도가 커져 스프링 강성이 증가하였다. 설계 요구 조건은 주름관 강성이 상온에서 125~375 N/mm 범위 안에 있는 것이다.

2.2 응력 해석

표 2는 상온에서 압력 및 변위 하중이 작용하는 경우에 표준으로 계산된 응력을 나타낸다. 여기서 σ 는 응력을, 아래 첨자 P, D, a, m 및 b는 각각 압력 하중, 변위 하중, 자오 방향, 막(membrane) 응력 및 굽힘 응력을 나타낸다. 굽힘 응력에 비해 막 응력은 매우 작다.

여기에 나타내지 않았지만 표준의 수식에 의하면, 극저온에서는 탄성계수의 증가로 같은 변위에 대해 응력이 증가하게 된다.

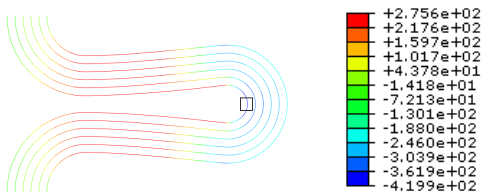
표 2 EJMA 표준 상온 응력 해석 결과 (MPa)

$\sigma_{P,a,m}$	-19
$\sigma_{P,a,b}$	-410
$\sigma_{D,a,m}$	-5
$\sigma_{D,a,b}$	-463

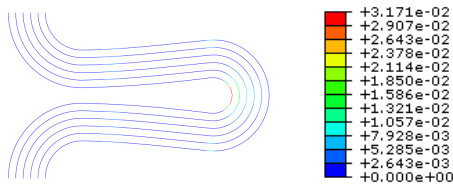
그림 4(a),(b)는 상온에서 압력 및 변위 하중이 가해졌을 때, 자오 방향 진응력 (true stress) 및 등가 소성 변형률 (equivalent plastic strain) 분포를 나타낸 것이다. 여기서, 좌측이 주름관 내부이고 해석 결과는 주름관 반경 방향 안쪽 면의 결과이며 검은색 사각형이 표 3을 위한 측정점이다.

다. 응력의 절대값은 측정점에서 가장 큰 것을 알 수 있으며 굽힘에 의해 압축이 발생하게 된다. 등가 소성 변형률을 보면 응력과 마찬가지로 측정점 부근에서 소성 변형이 집중되어 있는 것을 알 수 있다.

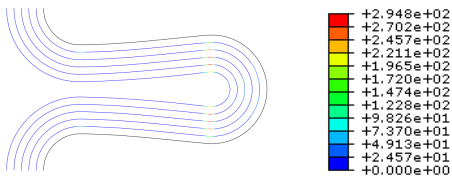
그림 4(c)는 상온에서 압력 및 변위 하중이 가해졌을 때, 각 층의 반경 방향 바깥 표면에서 접촉 압력을 보여준다. 접촉 압력에서 알 수 있듯이 접촉은 주로 주름관 직선 구간과 곡선 구간이 만나는 부분에서 크게 발생하며 반경 방향 바깥쪽 층에서 안쪽 층으로 갈수록 외곽 부분의 접촉 압력이 증가하는 것을 알 수 있다.



(a) 자오 방향 진응력 분포 (사각형 : 측정점)



(b) 등가 소성 변형률 분포



(c) 접촉 압력 분포

그림 4 유한 요소 해석 결과 (상온, 압력 및 변위 하중)

표 3 응력 해석 결과 비교

Stress (MPa)	RT		CT	
	EJMA	FE	EJMA	FE
$\sigma_{P,a,m+b}$	-429	-301	-429	-472
$\sigma_{D,a,m+b}$	-468	-351	-501	-657
$\sigma_{P+D,a,m+b}$	-769	-420	-801	-776

표 3은 상온 및 극저온에서 표준에 의한 응력 해석 결과와 FE 해석 결과를 비교하였다. 극저온에서 소성 변형이 작은 $\sigma_{P,a,m+b}$ 과 $\sigma_{D,a,m+b}$ 의 경우를 제외하고는 FE 해석 결과가 표준에 의한 해석 결과에 비해 크게 예측되었다. 그리고 FE 해석 결과 중에서 $\sigma_{P+D,a,m+b}$ 은 소성을 제외할 경우 및 소성 및 접촉을 제외할 경우에 각각 -2154 MPa와 -666 MPa로 나왔다. 즉, 접촉에 의해 응력이 크게 증가하고 소성에 의해 다시 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 스프링 강성 해석과 마찬가지로 표준에 비해 접촉 효과를 크게 예측하는 것을 알 수 있다.

극저온에서의 표준 해석 결과는 상온에 비해 탄성계수가 커져 변위에 의한 응력만이 증가하나 FE 해석은 탄성계수와 항복 강도가 커져 모든 응력은 증가하였다.

2.3 피로 수명 평가

표 4는 상온 및 극저온에서 표준 및 FE에 의한 고주기 피로 (high cycle fatigue) 해석 결과를 비교하였다. 표준에 의한 수명은 식(1)과 같이 $\sigma_{P+D,a,m+b}$ 과 재료의 특성만의 함수로, 약 425 °C 이하에서 유효하며 극저온에 관한 언급은 없다 [1]. 그러나 본 연구에서 적용된 재료는 동일한 응력에 대해 극저온에서 피로 수명이 증가하므로 [11], 극저온의 해석 결과는 다소 보수적으로 예측한 것으로 볼 수 있다.

$$N = \left(\frac{c}{\sigma_{P+D,a,m+b} - b} \right)^a \quad (1)$$

여기서, N 은 피로 수명 사이클 수를, a , b , c 는 재료 상수를 나타낸다. 이 식은 참고문헌[12]의 피로 수명 식에서 EJMA의 경험으로 재료 상수를 수정한 식으로, 열처리 되지 않은 오스테나이트 스테인리스강의 평균적인 피로 수명을 평가하기 위한 의도로 만들어졌다[1].

유한 요소 피로 수명 해석은 등가 응력과 응-수명 선도를 이용하여 구하였으며[13], 극저온

해석에서는 극저온 피로 물성치가 사용되었다 [11]. 표 3에 나타난 등가 응력 $\sigma_{P+D,a,m+b}$ 을 Goodman 선도를 이용하여 평균 응력이 고려된 등가 응력으로 변환하고, 이 값을 응력-수명 선도에서 적용하여 수명을 구하였다.

피로 수명 해석결과, 상온에서는 표준 해석에 비해 FE 해석 결과가 수명이 더 낮게 나왔다. 극저온에서 보수적으로 예측된 표준 해석 결과는 응력 $\sigma_{P+D,a,m+b}$ 이 증가하고 동일한 피로 수명식을 사용하여 결과적인 수명은 감소하였다. 그러나 유한 요소 해석 결과는 극저온에서 응력이 증가하여도 동일한 응력에 대해 피로 수명 증가가 크게 되어 피로 수명이 증가하였다.

표 4 피로 수명 해석 결과 비교 (x104 cycles)

RT		CT	
EJMA	FE	EJMA	FE
13.6	1.1	10.4	8.1

그림 5와 같이 상온에서 83 bar 의 주기 외압을 가하는 작동 시험을 한 결과, 약 6,000회에서 주름관 이외의 다른 부품에서 파손이 발생하여 시험이 중지되었으나, 주름관에서는 누설 및 외관상 영구 변형이 발생되지 않았다. 설계 요구 조건은 상온 및 극저온에서 각각 100 회의 작동에 문제가 없어야 하는 것이다.



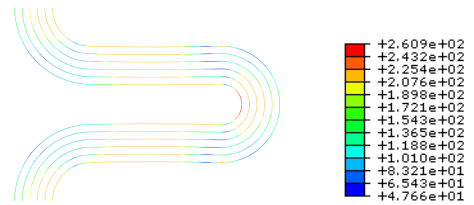
그림 5 상온 고주기 피로 수명 시험

여기서는 고주기 피로만이 비교적 간단히 고려되었으나, 피로 수명 목표 조건을 검증하기 위하여는 고주기 피로 수명의 분산 (scatter)과 극저온

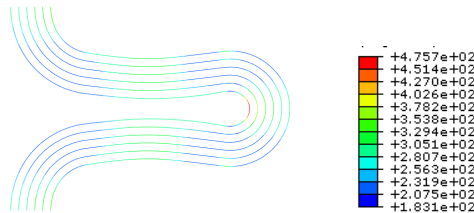
운용 조건이 고려된 저주기 피로 (low cycle fatigue) 해석 및 이와 관련된 시험도 고려해야 한다.

2.4 파열 성능 평가

주름관의 개발 과정에서는 상온, 운용압의 일정 배수에서 파단 발생 여부를 판단하는 파열 시험 (burst test)이 수행된다. 보통 2 배수의 압력에서 파열이 발생하지 않는 것이 설계 조건이며 시험으로 검증된다. 표준에서는 이러한 파열압을 예측하는 방법은 없으며 FE 해석을 통해서 정성적으로 예측하여 설계 조건을 만족하지 못할 경우에 설계 개선에 활용할 수 있다.



(a) 7 MPa



(b) 14 MPa

그림 6 Von-Mises 등가 응력 (상온, 압력 하중)



그림 7 상온 파열 시험

그림 6은 상온에서 외압 7 및 14 MPa의 압력 하중이 가해졌을 때, 각 층의 반경 방향 안쪽 표면에서 Von-Mises 등가 응력 분포를 나타내고 있다. 외압 7 MPa에서 곡선 부분의 안쪽 층과 직선 부분에서 등가 응력이 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 외압이 14 MPa로 증가하면 전반적으로 분포는 유사하고 응력의 크기가 증가한다. 특히 그림 3(a)의 측정점 부근에서 최대 응력이 476 MPa로 발생하여, 네킹 발생 이전의 최대 진 응력보다 작아 파열이 발생하지 않을 것으로 예측되었다. 참고로 그림 7과 같은 파열 시험에서는 외압 60 MPa에서도 파열이 발생하지 않았다.

3. 결 론

가스발생기 산화제 개폐 밸브에 사용되는 주름관의 해석 및 시험이 수행되었다. 본 모델의 압력과 변위가 함께 작용하는 하중 조건에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- FE 해석 결과에서 스프링 강성 및 자오 방향 응력은 접촉에 의해 증가되고 소성에 의해 감소되는 것을 확인하였다.
- 층간의 접촉은 EJMA 표준에 비해 FE 해석 결과가 크게 예측한다.
- 최대 응력은 FE가 EJMA 표준보다 작게 예측하였으나 스프링 해석 결과는 유사하였다.
- 최대 응력은 최내측 층의 안쪽면 정점에서 발생한다.
- 고주기 피로 수명은 상온에서 FE가 EJMA 표준보다 낮게 예측하며, 상온에 비해 극저온에서는 EJMA는 낮게, FE는 높게 예측한다.
- 개발된 모델은 스프링 강성, 상온 피로 수명 및 파열 요구 조건을 만족하였다.

참 고 문 헌

1. Standards of The Expansion Joint Manufacturers Association, Inc., 9th Ed., Expansion Joint Manufacturers Association,

- White Plains, N.Y., 2009.
2. ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1, Rules for Construction of Pressure Vessels, The American Society of Mechanical Engineers.
3. ASME B 31.3 Process Piping, The American Society of Mechanical Engineers.
4. MIL-DTG-17813G, Detail Specification Expansion Joints, Pipe, Metallic Bellows, 2004.
5. C. Becht IV, "An Evaluation of EJMA stress Calculations for Unreinforced Bellows," Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 124, pp. 124~129.
6. D. K. Williams, "Catastrophic Failure of Flex Hose Bellows due to Lateral Offset & Internal Pressure", Proceedings of PVP 2007, PVP 2007-26013.
7. S. E. Steinbrink, M. C. Aggarwal, K. I. M. Shepherd, "Linear and Nonlinear Finite Element Analysis of an Exhaust Manifold with included Bellows", Proceedings of PVP 2007, PVP 2007-26013.
8. C. Becht IV, "Behavior of Bellows," Ph.D. thesis, Memorial University of Newfoundland, St. John's Newfoundland, Canada, 2000.
9. Abaqus Analysis User's Manual, Dassault Systems, 2009.
10. Atlas of Stress-Strain Curves, 2nd Ed., ASM International, 2002.
11. Air force materials laboratory, Cryogenic Material Data Handbook, Vol.1, Section A, B, C, AFML-TDR-64-280, 1970.
12. B. F. Langer, Design of Pressure Vessels for Low Fatigue, ASME Paper 61-WA-18.
13. 이용복, 김호경, 정진성, 피로해석의 기초, 청문각, 1999.