

가스발생기 산화제 개폐밸브용 벨로우즈 구조 평가

유재한* · 이종엽* · 이수용*

Structural Evaluations of Bellows for a Gasgenerator Lox Shut-off Valve

Jaehan Yoo* · Joongyoun Lee* · Soo Yong Lee*

ABSTRACT

The analysis and experimental results for the bellows of gasgenerator liquid oxygen shut-off valve are presented. The analyses are 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 results include the spring rate, the stress and the fatigue life of the bellows. The effects of the contact and material plasticity on the FE analysis results are also analyzed.

초 록

가스 발생기 산화제 개폐 밸브에 사용되는 벨로우즈의 구조 해석 및 시험이 수행되었다. 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.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Shut-off Valve(개폐 밸브), Bellows (주름관), Fatigue Life(피로 수명), EJMA

1. 서 론

가스 발생기 산화제 개폐 밸브는 높은 압력의 작동 기체에 의해 포켓이 움직여 개폐된다. 공압부에 압력이 높아지면 벨로우즈와 스프링이 압축되고 포켓이 움직여 유로가 개방되고 가스발생기로 산화제가 공급된다. 여기에 사용되는 벨

로우즈는 공압이 작용하는 영역과 스프링 및 포켓이 움직이는 영역을 구분하는 역할을 하며 작동 시에는 높은 외압과 축방향 변위가 작용한다. 이 벨로우즈는 보강되지 않은 (unreinforced) 다겹(multy ply), "U"자의 형상을 가지는 단일 벨로우즈(single bellows)이다.

벨로우즈는 배관이 사용되는 다양한 분야에서 널리 사용되며 구조 평가와 관련된 기술은 오래 전부터 개발되어 현재는 여러 표준들이 존재한다[1,2,3]. 벨로우즈 구조와 관련하여 Becht는 많

* 한국항공우주연구원 발사체미래기술팀

† 교신저자, E-mail: tonup@kari.re.kr

은 연구들을 수행하였으며 특히 2002년에 EJMA (Expansion Joint Manufacturing Association) 표준과 선형 정적 유한 요소 해석 결과를 비교하여 그 차이의 원인을 분석하였다[4]. 여기서 한 개의 겹을 가지는 벨로우즈의 다양한 형상에 대하여 해석이 수행되고 분석되었으나 소성이나 접촉이 고려되지는 않았다.

본 연구에서는 EJMA 표준[1]을 이용하여 스프링 강성, 응력 및 피로 수명을 계산하였다. 이 표준은 탄성 이론과 경험에 기초한 식들로 구성되어 해석 결과를 빠르게 도출하여 설계 단계에서 활용될 수 있다. 그리고 이러한 결과를 상용 유한 요소 (FE, finite element) 해석 프로그램인 Abaqus v6.9[5]로 해석한 결과와 비교하였다. 여기서, FE 해석 결과에서 고려된 비선형성인 접촉이나 재료의 소성에 의한 영향도 살펴보았다. 또한 가스발생기 산화제 개폐 밸브는 액체 산소에 의해 작동 온도가 극저온이 되므로 극저온에서 물성치 변화에 따른 영향도도 살펴보았다.

2. 해석 결과

Figure 1에 나타난 해석에 사용된 벨로우즈는 내경 약 34, 한 겹의 두께 0.2 mm이며 총 6 겹과 8 개의 산으로 구성되어 있다. 사용된 재료는 오스테나이트 스테인리스 강으로 상온 및 극저온 (-196 °C) 탄성 계수는 195 및 210 GPa를 사용하였으며 상온 및 극저온 항복 강도는 269 및 235 MPa로 가정하였다. 하중 조건으로 외압 7 MPa과 4 mm의 축방향 압축을 가정하였다. 극저온에서의 해석은 탄성계수와 소성 이후의 응력-변형을 관계의 변화만을 가정하였다.

벨로우즈는 시트(sheet) 혹은 관(pipe) 형태의 소재를 공압, 수압, 롤러(roller) 등에 의해 성형이 되는데 이 과정에서 겹의 두께가 얇아지게 된다. 표준에서는 이러한 효과를 고려하며 모든 계산 과정에서 성형전의 두께가 아닌 성형 후의 두께가 사용된다. 표준에 의한 식에서 본 모델은 성형 후의 두께가 0.183 mm로 얇아졌다. 유한요소 해석에서는 성형전의 두께가 사용되었다.

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



Fig. 1 Bellows for Gasgenerator Lox Shut-off Valve

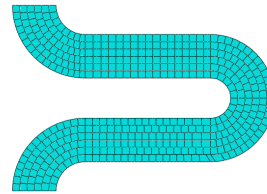


Fig. 2 FE Model for the Bellows

2.1 스프링 강성 해석

형상과 재료의 함수인 스프링 강성은 대개 벨로우즈가 국부적인 소성 변형이 발생하는 영역에서 작동하게 되어 일반적으로 탄성 해석은 스프링 강성을 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.

Table 1은 상온 및 극저온에서 EJMA 표준 및 FE 해석 결과와 시험 결과를 나타낸다. 여기서 f 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 한 겹의 두께를 나타낸다. 표준 해석 결과에서 성형 과정의 두께 감소로 인해 강성이 감소하는 것을 알 수 있다. 그리고 같은 해석 조건의 표준에 비해 FE 해석 결과가 높게 예측하며 접촉에 의해 강성이 증가하는 것을 알 수 있다. 재료 비선형성에 의해 강성이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 시험 결과는 2개의 다른 측정 기관에서 측정된 값을 제시하였다. 시험 기관 간에 측정 오차가 크며 표준에 의한 값보다는 크게, FE 해석에 비해서는 작거나 크게 측정되었다. 또한 극저온에서는 표준 해석은 상온에 비해 강성이 커져 스프링 강성이 증가하며 FE 해석은 강성이 커지나 항복 강도가 작아져 오히려 감소하였다.

Table 1 Bellows Spring Rate (N/mm)

$f_{RT,EJMA,t=0.2}$	217
$f_{RT,EJMA,t=0.18}$	201
$f_{RT,FE,t=0.2}$ w/o contact and plastics	290
$f_{RT,FE,t=0.2}$ w/o plastics	356
$f_{RT,FE,t=0.2}$	272
$f_{RT,Test}$	236, 286
$f_{CT,EJMA,t=0.2}$	218
$f_{CT,FE,t=0.2}$	259

2.2 응력 해석

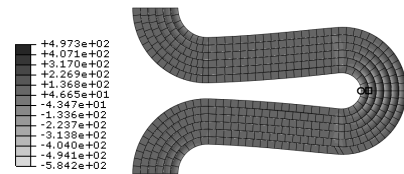
Table 2는 상온에서 압력 및 변위 하중이 작용하는 경우에 표준으로 계산된 응력을 나타낸다. 여기서 σ 는 응력을 아래 첨자 P, D, a, c, m 및 b는 각각은 압력 하중, 변위 하중, 자오 (meridional) 방향, 원주 (circumferential) 방향, 막 (membrane) 응력 및 굽힘 응력을 나타낸다. 굽힘 응력에 비해 막 응력은 매우 작으며 압력에 의한 응력은 압력에 정비례하여 커지는 것을 알 수 있다. 극저온에서의 응력은 변위에 의한 응력만이 탄성 계수의 변화인 약 10% 정도 절대값이 증가하였다.

Figure 3은 압력 및 변위 하중이 가해졌을 때, 상온에서 자오 방향 응력 및 등가 소성 변형을 분포를 나타낸 것이다. 여기서, 왼쪽이 벨로우즈 내부이고 검은색 원이 표준 해석 결과와 비교를

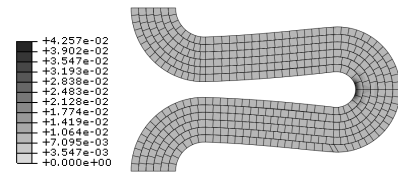
위한 FE 해석 결과의 측정점이다. 응력의 절대값은 굽힘에 의해 각 겹에서 산 끝의 안쪽과 바깥 쪽 면에서 큰 것을 알 수 있다. 그리고 이 경우에는 측정점보다 검은색 사각형의 절대값이 다소 높게 나왔으나 이외의 하중이 가해지는 경우에는 측정점의 절대값이 가장 크다. 등가 소성 변형율을 보면 산 끝에 소성 변형이 집중되어 있는 것을 알 수 있다.

Table 2 Stress Analysis Results at Room Temperature from EJMA standard (MPa)

$\sigma_{P,c,m}$	-85
$\sigma_{P,a,m}$	-19
$\sigma_{P,a,b}$	-410
$\sigma_{D,a,m}$	-5
$\sigma_{D,a,b}$	-475



(a) Meridional Stress Distribution
(circle : gauge point, rectangular : max. absolute value)



(b) Equivalent Plastic Strain Distribution

Fig. 3 FE Analysis Results
(deformed shape, left side : internal)

Table 3은 상온 및 극저온에서 표준에 의한 응력 해석 결과와 FE 해석 결과를 비교하였다. 압력 및 변위 하중이 각각 작용하는 경우에는 유한 요소 해석 결과가 표준에 의한 해석 결과에 비해 크게 예측되었으며 특히 원주 방향 해석 결과가 상대적으로 차이가 컸다. 그러나 압력과 변위 하중이 함께 작용하는 경우는 FE 해석 결과가 작게 예측하였다.

상온에서 압력과 변위 하중이 함께 작용하는 경우의 자오 방향 응력 FE 해석 결과에서 소성을 제외할 경우 및 소성 및 접착을 제외할 경우에는 각각 -2023 MPa와 -639 MPa로 나왔다. 즉, 접착에 의해 응력이 크게 증가하고 소성에 의해 다시 크게 감소하는 것을 알 수 있다.

극저온에서의 표준 해석 결과는 상온에 비해 강성이 커져 변위에 의한 응력이 증가하며 FE 해석은 강성이 커지나 항복 강도가 작아져 스프링 강성과 마찬가지로 오히려 감소하였다.

Table 3 Comparisons of Stress Analysis Results

Stress	RT		CT	
	EJMA	FE	EJMA	FE
$\sigma_{P,c,m}$	-85	-240	-85	-221
$\sigma_{P,a,m+b}$	-429	-561	-429	-487
$\sigma_{D,a,m+b}$	-480	-570	-523	-496
$\sigma_{P+D,a,m+b}$	-781	-549	-823	-473

Table 4 Comparisons of Fatigue Life Analyses ($\times 10^4$)

RT		CT	
EJMA	FE	EJMA	FE
12.3	212	8.8	1436

2.3 피로 수명 해석

Table 4는 상온 및 극저온에서 표준에 의한 수명 해석 결과와 FE 해석 결과를 비교하였다. 수명 해석은 각 경우의 응력 해석 결과를 표준의 수식에 대입하여 구하였다. 표준의 수식은 약 425 °C 이하에서 유효하며 $\sigma_{P+D,a,m+b}$ 과 재질의 특성만의 함수이며 극저온에 관한 특별한 언급은 없다. 그러나 대부분의 오스테나이트 스테인레스강은 동일한 응력에 대해 극저온에서 피로 수명이 증가하므로 극저온의 해석 결과는 다소 보수적으로 예측한 것으로 볼 수 있다. 그리고 응력과 피로수명은 지수 함수 관계이므로 작은 응력 변화에도 피로수명의 변화는 매우 크다.

상온에서 작은 응력으로 인해 FE 해석 결과가 수명이 더 높게 나왔으며 극저온에서 표준 해석 결과 수명은 감소하였으나 소성의 영향으로 인해 FE 해석 결과는 반대로 증가하였다.

극저온 83 bar에서 50회 작동 시험을 한 결과 누설이 발생되지 않았다.

3. 결 론

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

- 표준 해석 결과 굽힘에 의한 자오 방향 응력이 막 응력에 비해 크게 유발된다.
- 유한 요소 해석 결과에서 스프링 강성 및 자오 방향 응력은 접착에 의해 증가되고 소성에 의해 감소되는 것을 확인하였다.
- 유한 요소 응력 해석 결과가 소성에 의한 영향으로 EJMA 표준에 의한 해석 결과보다 작아 피로 수명이 높은 것을 확인하였다.
- 극저온에서 피로 수명은 상온 결과에 비해 표준 해석은 낮게 예측하였으나 유한 요소 해석은 높게 예측하였다.

참 고 문 헌

1. Standards of The Expansion Joint Manufacturers Association, Inc. 9th Ed. White Plains, N.Y., Expansion Joint Manufacturers Association.
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. Becht IV, C, "An Evaluation of EJMA stress Calculations for Unreinforced Bellows," Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 124, pp. 124~129.
5. Dassault Systems, Abaqus Analysis User's Manual, 2009.