

## 산화제 배관 김발 주름관 응력 해석

유재한\* · 문일윤\* · 이수용\*

### Stress Analyses of the Gimbal Bellows for a Lox Pipe

Jaehan Yoo\* · Ilyoon Moon\* · Soo Yong Lee\*

#### ABSTRACT

The stress analyses of the 'U'-shaped multi-ply reinforced gimbal bellows under high pressure and rotational displacement loadings are performed at the room and cryogenic temperatures. The bellows are used for the Lox pipe line which connects the combustion chamber with the turbopump of a liquid rocket engine. The distributions of the stress, the strains and the contact pressures are obtained from the finite element analysis considering the geometric non-linearities of the contacts between the plies and the material one of the isotropic plasticity. Those are compared with the stress results from EJMA (Expansion Joint Manufacturing Association) standard. Also, the effects of the operating temperature and the reinforcing ring on the stresses are investigated.

#### 초 록

상온 및 극저온에서 높은 압력과 회전 변위 하중을 받는 'U' 형상을 가진 다겹의 보강된 김발 주름관에 대하여 응력 해석이 수행되었다. 이 주름관은 액체로켓엔진에서 연소기와 터보펌프를 연결하는 산화제 배관에 사용된다. 기하학적 비선형성인 겹 간의 접촉 및 재질 비선형성인 등방성 소성이 고려된 유한요소 해석을 통하여 응력, 변형을 및 접촉 압력이 얻어졌으며 EJMA 표준 해석 결과와 비교하였다. 또한 응력에 대한 보강링 및 온도의 효과도 살펴보았다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Gimbal (김발), Bellows (주름관), Multi-ply (다겹), Reinforced (보강된), Stress Analysis (구조 해석), Finite Element (유한요소)

#### 1. 서 론

액체 로켓 엔진에서 터보펌프와 연소기를 연결하는 산화제 배관은 운용시에 높은 압력과 극

저온의 환경에 있으며 엔진 구성에 따라 김발 (gimbal) 성능이 요구된다. 이를 위해 사용되는 김발 주름관 (bellows) 은 압력에 의한 분리력을 지지하는 기계적 체결부와 고압 유체의 기밀을 유지하며 회전이 가능한 주름관으로 구성된다.

주름관은 배관이 사용되는 다양한 분야에서

\* 한국항공우주연구원 미래로켓추진팀

† 교신저자, E-mail: tonup@kari.re.kr

널리 사용되며 구조 평가와 관련된 연구는 오래 전부터 개발되어 현재는 여러 표준들이 존재한다[1-3]. 그럼에도 불구하고 다겹 (multi-ply) 주름관에 대한 구조 해석은 해석의 난이도와 한계성으로 인해 엄밀하게 수행된 예가 많지 않으며 대부분 하나의 겹을 가진 주름관 해석에 국한되었다[4-7].

본 연구에서는 'U' 형상, 다겹, 보강된 (reinforced), 내부형 김벌 주름관에 대하여 기계적 체결부를 제외하고 내부 유체 압력과 회전 변위가 있을 경우에 상온 및 극저온에서 유한요소 방법 (FEM, finite element method) 및 EJMA (Expansion Joint Manufacturing Association) 표준 [1]을 이용하여 응력 해석을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 유한요소 응력 해석은 소성 (plasticity)과 접촉 (contact)이 고려된 정적 비선형 해석으로 상용 유한요소 해석 프로그램인 Abaqus v6.9 [8]을 이용하여 수행되었다. EJMA 표준 해석은 설계 단계에서 해석 결과를 빠르게 도출할 수 있으나 탄성 이론에 기초하여 소성 효과를 고려할 수 없는 단점이 있다.

## 2. 응력 해석

### 2.1 해석 조건

해석에 고려된 주름관은 두께 0.3 mm인 3 겹과 높이 16.5 mm의 7 개의 산 (convolution)으로 구성되어 있다. 주름관의 최소 직경은 126 mm이며, 각 산 사이에는 보강링이 있어 내압에 의한 응력을 감소시킨다. 사용된 재료는 SUS 316 스테인레스 강으로 상온/극저온 탄성계수, 포아송비, 항복 강도와 인장 강도는 각각 167/219 GPa, 0.25/0.25, 355/586 MPa, 605/1488 MPa 으로 온도가 감소하면 탄성계수, 항복 및 인장 강도가 증가한다. 하중 조건으로 내압은 10 MPa, 회전 변위 7°를 가하였다.

유한요소해석을 위하여 Fig. 1과 같이 주름관 해석 모델은 대칭 경계 조건을 적용하여 실제 모델의 1/4 만이 고려되었다. 그리고 약 0.5 mm

크기의 1차의 연속체 셸 (continuum shell) 요소를 주름관에 밀집시켰으며 재료의 등방성 경화 (isotropic hardening)를 가정한 소성과 접촉 비선형성이 고려되었다. 주름관 이외의 보강링과 배관과의 연결 부분은 1차의 연속체 육면체 요소가 사용되었다.

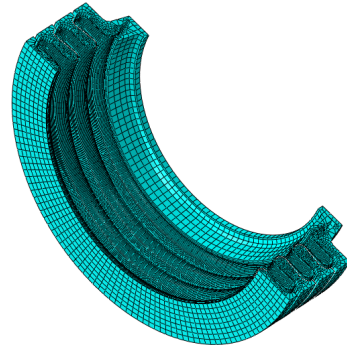


Fig. 1 Finite Element Model for the Bellows

### 2.2 EJMA 표준 해석 결과

Table 1은 상온 및 극저온에서 보강링의 유무에 따라 EJMA 표준을 이용한 응력 해석 결과를 나타낸다. 여기서  $P$ ,  $D$ ,  $m$ ,  $c$ ,  $e$  및  $b$ 는 각각은 압력 하중, 변위 하중, 자오 (meridional) 방향, 원주 (circumferential) 방향, 막 (membrane) 응력 및 굽힘 (bending) 응력을 나타낸다.

Table 1. Stress Analysis Results using EJMA Standards (MPa)

Temperature	20 °C		-196 °C
Reinforcing ring	W/O	With	With
$\sigma_{P,c,e}$	378	43	41
$\sigma_{P,m,e}$	98	63	63
$\sigma_{P,m,b}$	3600	1636	1636
$\sigma_{D,m,e}$	2	4	5
$\sigma_{D,m,b}$	249	427	560

기존의 주름관 해석 결과[9]에서의 경향과 같이 굽힘 응력에 비해 막 응력은 매우 작으며, 상

온에 비해 극저온에서는 주로 변위에 의한 응력이 탄성 계수에 증가로 인해 증가하였다. 보강링에 의해 압력에 의한 응력은 크게 감소하나 변위에 의한 응력은 증가하는 것으로 나타났다. 표준에서 수명 해석에 사용되는 전체 응력값  $\sigma_t$ 는  $0.7 \times (\sigma_{P,m,e} + \sigma_{P,m,b}) + (\sigma_{D,m,e} + \sigma_{D,m,b})$ 로 표현되며 이 값은 보강링에 의해 감소하게 되어 피로 수명은 증가하게 된다.

### 2.3 유한 요소 해석 결과

Figure 2는 상온에서 압력 및 회전 변위 하중을 받을 경우에 유한 요소 해석으로 얻어진 등가 소성 변형률과 Von Mises 등가 응력을 나타낸다. 여기서부터 편의상 보강링을 중간부터 1, 2, 3, 4 번으로 하며 압축되는 면을 A로, 인장되는 면을 B로 한다.

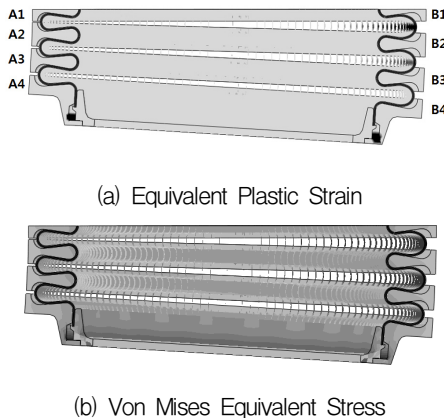


Fig. 2 Stress and Strain Results for the Bellows

변형 형상을 보면 A1에서 A4로 갈수록 보강링 끝단 사이의 거리가 늘어나며, B1에서 B4로 갈수록 줄어드는 것을 알 수 있다. 그리고 소성은 배관 연결 부위와 B1과 B2 보강링 사이의 주름관, B2와 B3 보강링 사이의 주름관에서 발생한다. 등가 소성 변형률 및 응력은 배관부를 제외하면 B1과 B2 보강링 사이 주름관의 최외곽 접산 부분에서 가장 크나 접산의 응력 차이는 크지 않고 원주 방향 변화가 크다.

Figure 3은 상온 하중 하에서 보강링과 각 접

의 접촉 압력을 나타낸다. 보강링 1 및 4번은 상대적으로 2번 및 3번 링에 비해 접촉 압력이 적어 상대적으로 적은 하중을 지지한다. 또한 주름관은 외측 겹으로 갈수록 접촉 압력 분포가 집중되는 것을 알 수 있다.

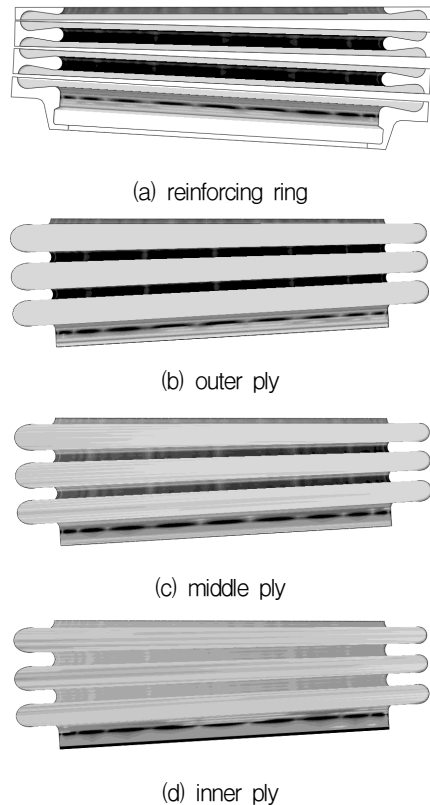


Fig. 3 Contact Pressure Distributions for the Bellows

여기에서 나타내지는 않았지만 극저온에서 변형 형상, 등가 응력 및 접촉 압력이 유사한 분포를 나타내었고 최대 등가 응력은 369 MPa에서 529 MPa로 상온 대비하여 43 % 증가하였다. 그러나 극저온에서 항복 강도의 증가로 인하여 소성은 발생하지 않았다. 최대 등가 응력이 증가한 이유는 극저온에서 항복 강도 및 탄성의 증가가 원인으로 추정된다[9].

상온/극저온 유한 요소 해석 결과, 최대 등가 응력이 발생한 지점에서 자오 방향 응력은 407/574 MPa이며 원주 방향 응력은 341/477

MPa이다. 표준 해석 결과와 비교하여 자오 방향 응력은 매우 작게, 원주 방향 응력은 매우 크게 예측하였다. 이러한 차이는 소성 및 접촉 비선형에 의해 발생된다.

### 3. 결 론

내압 및 회전 변위 하중을 받는 김발 주름관 응력 해석을 통하여 본 연구 모델 한하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 보강링은 변위에 의한 응력은 증가시키나 압력에 의한 응력을 감소시켜 결과적으로 피로 수명을 증가시키게 된다.
- 변형 후의 보강링 사이의 간격은 일정하지 않으며 가운데 주름관 외곽 접의 인장되는 면에서 가장 큰 등가 응력 및 변형율이 발생하여 구조적으로 가장 취약한 부분이다.
- 접촉 압력은 외곽 접으로 갈수록 일부 보강링 부위로 집중된다.
- 상온에 비해 극저온에서 탄성계수 및 항복 강도의 증가로 인해 변위에 의한 응력 및 등가 응력은 증가하게 된다.
- 유한 요소 해석은 EJMA 표준 해석 결과와 비교하여 자오 방향 응력은 작게 원주 방향 응력은 크게 예측하였다. 유한 요소 해석으로 얻어진 등가 응력은 표준 해석 결과로 얻어진 전체 응력값에 비해 작다.

### 참 고 문 헌

1. Standards of The Expansion Joint

Manufacturers Association, Inc. 9th Ed. (Expansion Joint Manufacturers Association, White Plains, N.Y.).

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. C. Becht IV, "Behavior of Bellows," Ph.D. thesis, Memorial University of Newfoundland, St. John's Newfoundland, Canada, 2000.
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. Abaqus Analysis User's Manual (Dassault Systems, 2009).
9. 유재한, 이중엽, 이수용, "가스발생기 산화제 개폐밸브용 벨로우즈 구조 평가", 한국추진 공학회 춘계학술대회, 2011.