

## 액체로켓엔진 배관 김발 신축 이음 모멘트 평가

유재한\*, 문일윤\*\*, 이수용\*\*\*, 최충현\*\*\*\*

### Moment Evaluations of Gimbal Expansion Joints for Liquid Rocket Engine Propellant Pipes

Jaehan Yoo\*, Ilyoon Moon\*\*, Soo Yong Lee\*\*\*, Chunghyeon Choi\*\*\*\*

#### Abstract

The gimbal expansion joint for the pipe line of a liquid rocket engine undergoes high pressure and cyclic rotational displacement loadings. In present study, the moment analyses and tests of the internal-type gimbal expansion joint for the engine were performed. The moment components due to spring stiffness, friction and lateral force were obtained using an analytic method and their sums at low and high pressures were compared with the test results. Also, applying a MoS<sub>2</sub> dry film lubricant to the pin of an external hinge expansion joint, it is tested that the galling of the pin was removed and the friction coefficient was decreased for low pressures.

#### 초 록

액체로켓엔진 고압 배관의 김발 신축이음은 고압에서 반복적인 회전 변위를 받게 된다. 본 연구에서는 고압에서 내부형 김발 신축이음의 모멘트 해석 및 시험을 수행하였다. 해석적으로 스프링 강성, 마찰과 측력에 의한 모멘트 값을 각각 구하고 시험으로 얻어진 전체 모멘트 값과 비교하였다. 또한 외부형 힌지 신축이음에 대하여 회전 편에 이황화몰리브덴 코팅을 적용하여 저압에서 갈링 현상이 없어지고 마찰 계수가 감소하는 것을 확인하였다.

키워드 : 액체 로켓 엔진 (Liquid Rocket Engine), 김발 신축 이음 (Gimbal Expansion Joints), 모멘트 (Moment), 해석 (Analysis), 시험 (Test), 이황화몰리브덴 코팅 (MoS<sub>2</sub> Coating)

#### 1. 서 론

액체로켓엔진의 고압 추진제 김발 신축이음은 압력에 의한 분리력을 지지하는 기계적 체결부와

유동의 기밀을 위한 주름관으로 구성된다. 대부분 기계적 체결부는 두 개의 이중 전단형 서포터와 이를 연결하는 링으로 구성되어 2축 회전이 가능한 김발 조인트이며, 주름관은 보강링이 있

접수일(2013년 2월 13일), 수정일(1차 : 2013년 6월 7일, 게재 확정일 : 2013년 7월 1일)

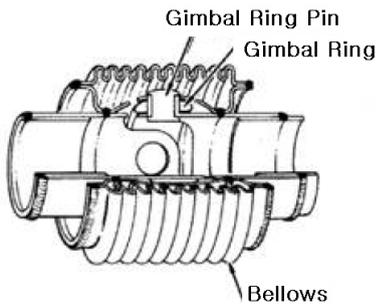
\* 미래로켓연구팀/tonup@kari.re.kr

\*\* 미래로켓연구팀/leejy@kari.re.kr

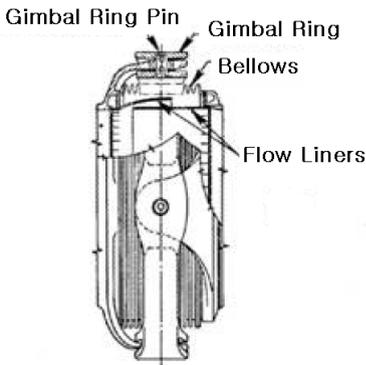
\*\*\* 미래로켓연구팀/sylee@kari.re.kr

\*\*\*\* 과학기술연합대학원대학교 발사체시스템공학/cch1004n@xmail.kari.re.kr

는 'U'자 형상으로 다점으로 구성되어 있다. 이 신축이음은 터보펌프 후단의 배관에 위치하여 고압의 환경에 있으며 연소기 김발을 하는 경우는 운용 조건에서 반복적인 회전 변위를 받게 된다.



(a) 내부형 김발 신축이음



(b) 외부형 김발 신축이음

그림 1 김발 신축이음의 종류 [1]

추진제의 흐름 저항이 작은 김발 신축이음은 그림 1과 같이 내부 (Internal) 및 외부 (External) 형이 있다. 내부형은 주름관 (Bellows) 내부에 김발 링 (Gimbal ring), 김발 링 핀 (Gimbal ring pin) 등으로 구성된 기계적 체결부가 있는 형상이며 외부형은 반대이다. 외부형은 내부형에 비해 기계적 체결부를 변경하여도 주름관의 설계 변경이 필요없으며, 제작 후에도 체결부만을 교체할 수 있고, 핀의 거동 관찰이 용이하며 주름관 직경이 작아 분리력이 상대적으로 작아지는 장점이 있으나 흐름 라이너 (Flow Liner) 추가 및 전체 직경 증가로 중량이 증가하는 단점이 있다. 고압 추진제 배관에 사용된 외부형 김발 신

축이음의 예로는 SSME[1], Vulcain, RD 170 및 180 등이 있다. 또한 저압에서 사용되는 상용 김발 신축이음도 대부분 외부형이다[2].

연소기 김발을 위해 연료 펌프 출구 압력을 사용하는 추력벡터제어 구동기를 사용하는 경우에는 김발 신축이음의 회전 모멘트가 커지면 구동기의 크기가 커져야 한다. 따라서, 김발 신축이음의 모멘트에 대한 평가와 요구 조건을 만족시키지 못하는 경우에 감소 방안에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 액체로켓엔진용 추진제 고압 배관에 사용을 위해 상대적으로 중량 및 크기의 장점이 있는 내부형 김발 신축이음의 모멘트 해석 및 시험을 수행하였다. 또한 외부형 힌지 신축이음으로 이황화몰리브덴 코팅의 마찰 성능을 평가하였다.

## 2. 이론적 배경

김발 신축이음의 회전 모멘트  $M_t$  는 식(1)과 같이 계산된다[3].

$$M_t = M_s + M_f + M_r + M_a \quad (1)$$

여기서,  $M_s$ 는 주름관의 스프링 강성에 의해 발생하는 모멘트로 회전각에 비례하며,  $M_f$ 는 핀 마찰에 의한 모멘트로 압력에 비례하며,  $M_r$ 은 측력 (lateral force)에 의한 모멘트이다. 이 효과는 주름관의 회전 변형으로 측방향 투영면적 변화에 의해 발생한다.

네 번째 항  $M_a$  는 힌지 암 사이의 마찰에 의한 모멘트로 해석적으로 구하기 쉽지 않다. 이외에도 중력, 슬리브의 마찰 등이 있을 수 있다. 여기서 고려된 모델들에서는 힌지 암 사이에 간극이 존재하여 마찰이 없는 것을 해석 및 시험 후의 마찰면 육안 관찰을 통해 확인하여, 본 해석에서는 고려하지 않았다.

스프링 강성에 의한 모멘트  $M_s$ 는 식(2)와 같다.

$$M_s = k_s \times \alpha \quad (2)$$

여기서,  $k_s$ 는 주름관 스프링 강성을,  $\alpha$ 는 회전각을 의미한다. 스프링 강성은 EJMA 표준[4]이나 유한요소해석 (Finite element analysis, FEM)으로 계산될 수 있다. 여기서는 EJMA 표준을 이용하였다.

마찰에 의한 모멘트  $M_f$ 는 식(3)과 같다.

$$M_f = \mu \times F_s \times r_p \quad (3)$$

여기서,  $\mu$ 는 마찰계수를,  $F_s$ 는 압력에 의한 분리력을,  $r_p$ 는 핀의 반경을 의미한다. 일반적으로 윤활이 없는 경우에 마찰계수는 재질, 온도, 표면조도 및 작동 유체에 따라서 0.25~0.9 까지 변할 수 있으므로, 운용 조건에서 모멘트 시험을 수행하는 것이 좋다. 이황화몰리브덴 (MoS<sub>2</sub>) 코팅이나 상용 PTFE 라이너와 같은 윤활을 사용할 경우에 마찰계수를 감소시킬 수 있으나[5], 여기서 고려된 내부형 김발에는 별도 윤활이 적용되지 않았다.

압력에 의한 분리력  $F_s$ 는 식(4)와 같이 구해진다.

$$F_s = \pi \times r_{bc}^2 \times P \quad (4)$$

여기서,  $r_{bc}$ 는 주름관의 흐름 최대 반경을,  $P$ 는 압력을 의미한다.

측력에 의한 모멘트  $M_r$ 은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$M_r = A_r \times l_b \times P/2 \quad (5)$$

여기서,  $l_b$ 는 주름관의 축방향 길이를 의미하며,  $A_r$ 은 주름관 회전으로 인한 측면의 투영 면적 변화로 식(6)과 같이 표현된다.

$$A_r = 2 \times \pi \times r_{bc}^2 \times \tan(\alpha/4) \quad (6)$$

내압이 있는 경우에 FE 해석으로 스프링 강성

과 측력에 의한 모멘트의 합을 구할 수 있다.

대부분의 상용 김발 신축이음 제작사는 모멘트 계산을 위해 식(7)과 같은 형태[2]로 나타내며 모델에 따른 각 계수값  $C_s$ ,  $C_f$ ,  $C_r$ 을 제공한다.

$$M = C_s \times \alpha + C_f \times P + C_r \times \alpha \times P \quad (7)$$

여기서, 각 계수는 각각 모멘트에 대한 회전각, 압력, 회전각 및 압력의 민감도를 나타낸다.

식(7)와 식(1)의 상관관계를 나타내는 기존 참고 문헌은 없으나 간단한 대입을 통해 식(7)의 계수들과 식(2)~(6)에 나타난 파라미터와의 상관관계를 구할 수 있다. 회전각이 작고 힌지 암 사이의 마찰과 같은 부가마찰이 없다고 가정하고, 식(4)를 식(3)에 대입하고, 식(6)을 식(5)에 대입한다. 그리고 식(2)와 이러한 식(3), (5)를 식(1)에 대입하고  $\tan(\alpha/4)$  항은  $\alpha/4$ 으로 근사화하면, 네 번째 항을 제외한 식(1)의 각 항은 순서대로 식(7)의 각 항이 되며 식(7)의 각 계수는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_s = k_s \quad (8-1)$$

$$C_f = \mu \times r_p \times \pi \times r_{bc}^2 \quad (8-2)$$

$$C_r = \pi \times r_{bc}^2 \times l_b/4 \quad (8-3)$$

### 3. 내부형 김발 신축이음

#### 3.1 상용 김발 신축이음 해석

액체로켓엔진 내부형 김발 신축이음의 모멘트 값의 적절성을 알기 위하여 직경이 유사하나 약 40 bar 까지만 사용가능한 상용품[2]에 대한 모멘트 해석을 수행하였다.

표 1 압력에 따른 상용품 모멘트 (상온, 회전각 : 7°)

Press. (bar)	Moment (kgf·m)			
	$M_s$	$M_f$	$M_r$	$M_t$
10	13.6	1.84	2.86	18.3
100	13.6	18.4	28.6	60.5

약 100 mm 배관 내경인 BOA사의 외부형 신축이음의 모멘트 계수  $C_s$ ,  $C_f$ ,  $C_r$ 은 각각 19 Nm/°, 1.8 Nm/bar, 0.4 Nm/bar° 이다. 이 계수를 이용하여 상온에서 7° 회전했을 경우에 압력에 따른 모멘트를 구하면 표 2와 같다. 10 bar에서는 스프링 강성에 의한 모멘트가 압력감소효과 및 마찰에 의한 것보다 매우 커 스프링 강성의 비중이 크나 100 bar에서는 반대이다. 상용품의 경우, 핀의 반경  $r_p$ 에 대한 정보를 제시하지 않아 식(8-2)을 이용하여 마찰계수를 역으로 추정하는 것은 어렵다.

상용품은 40 bar 까지 사용가능하나 100 bar에서 해석한 이유는 압력 변화에 따라 3.2의 엔진용 김발 신축이음의 모멘트값과 비교하여 경향 및 적절성을 확인하기 위해서이다. 상용품은 100 bar에서 기계적 체결부나 주름관이 파손되어 작동하지 않을 수 있으나, 모멘트값은 주어진 회전각과 압력에서 형상과 마찰계수의 함수이므로 모멘트 값 비교에는 사용될 수 있다.

### 3.2 엔진용 김발 신축이음 모델 해석

그림 2는 엔진용 배관 김발 신축이음의 기하학적 형상이다. 기계적 체결부는 모두 Inconel 718이며 주름관과 주름관 보호링은 SUS 316L이다. 핀은 서포터와 용접으로 부착되며, 핀과 구형 미끄럼 베어링 (spherical plain bearing) 은 상대적인 회전 운동을 한다. 핀의 중앙 홀은 180° 반대면과의 축 정렬을 위한 것이며, 구형 미끄럼 베어링은 하중에 의한 변형으로 핀과 링의 상대적인 회전이 발생하였을 때, 접촉 응력의 집중을 막기 위해서 장착된다.s

표 2는 상온에서 7° 회전 변위를 가했을 때, 내압에 따른 김발 신축이음의 회전 모멘트 해석 결과이다. 마찰계수 0.9는 전 압력에서 모멘트 해석값과 3.3에서 제시되는 시험값이 유사하도록, 마찰계수 0.2는 마찰계수 감소에 따른 효과를 보기 위하여 임의로 선정하였다.

압력이 변하여도 스프링 강성에 의한 모멘트 변화는 작으며, 100 bar에서 다른 모멘트 성분에 비해 상대적으로 크기가 작다. 마찰 및 축력에

의한 모멘트는 압력에 선형 비례하며, 100 bar에서 마찰계수 0.9인 경우는 전체 모멘트에서 마찰에 의한 모멘트의 비율이 76 %, 마찰계수가 0.2인 경우는 42 % 로 낮아진다.

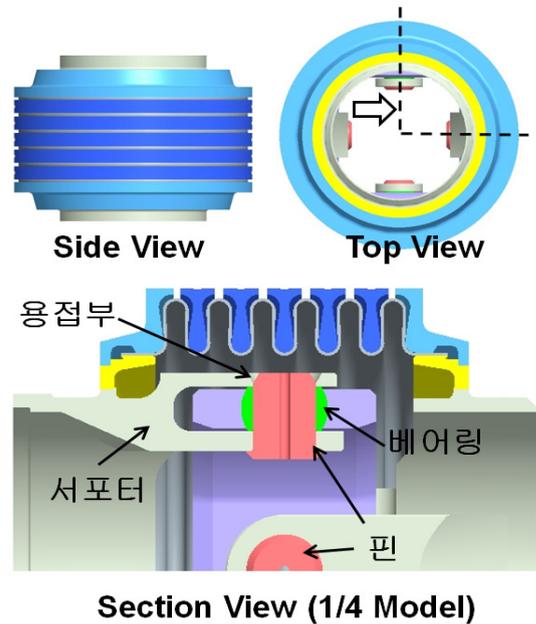


그림 2 엔진용 배관 내부형 김발 신축이음 형상

표 2 내부형 김발 신축이음 모멘트 해석 결과 (kgf·m)

Press. (bar)	0	10		100	
		$\mu$	0.9	0.2	0.9
$M_s$	2.84	4.12		4.19	
$M_f$	0	14.4	3.19	144	31.9
$M_r$	0	5.74		50.74	
$M_t$	2.84	23.6	12.4	199	86.9

마찰 계수 0.2인 엔진용 김발 신축이음 모멘트는 상용 김발 신축이음 해석 결과와 비교했을 때, 전반적으로 유사한 수준으로 주름관 회전 강성에 의한 모멘트는 작게, 마찰은 크게, 축력은 작게 나타났으며 마찰계수 0.9인 경우는 매우 크다. 여기서는 마찰계수가 0.2인 엔진용이 상용품과 유사한 수준의 모멘트가 발생하며, 3.3의 엔진

용 시험값과 비교하면 엔진용이 실제 작동 시에 갈링(galling)이 발생하여 마찰에 의한 모멘트가 큰 것을 확인하였다.

### 3.3 엔진용 김발 신축이음 모델 시험

그림 3과 같이 공압으로 작동하는 김발 신축이음 내구성 시험기가 구성이 되었다. 이 시험기에는 로드셀을 부착하여 회전 모멘트를 측정할 수 있다.

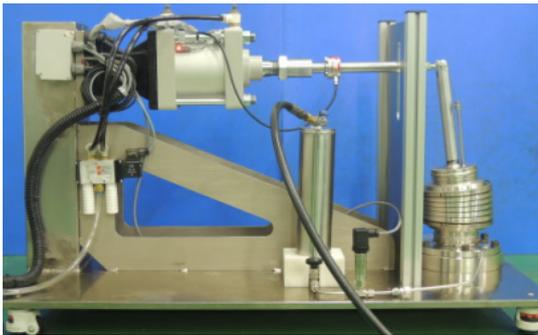


그림 3 내부형 김발 신축이음 내구성 시험기

약 300 회 시험 후에 단면을 살펴보면 그림 4와 같이 핀과 베어링 사이에 발생한 갈링에 의해 마찰계수가 매우 큰 것을 알 수 있다.



그림 4 회전 모멘트 시험 후의 내부형 김발 신축이음

그림 5는 김발 신축이음의 모멘트 해석-시험간 결과 비교이다. 시험 결과 압력이 증가하면 모멘트가 비교적 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 전반적으로 마찰계수를 0.9로 가정한 해석 결과와 시험 결과가 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

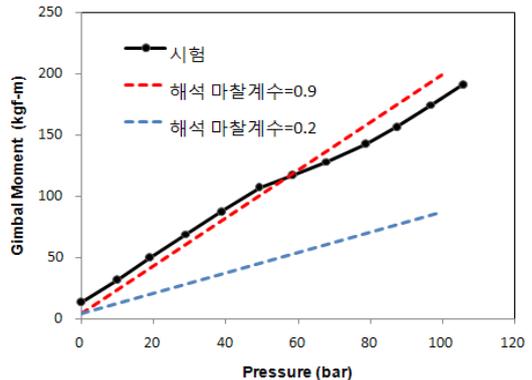


그림 5 내부형 김발 신축이음의 모멘트 해석-시험 비교

## 4. 외부형 김발 신축이음

그림 6은 이황화물리브덴 코팅의 마찰계수 평가를 위한 외부형 힌지 신축이음으로 제작 편의 및 비용 절감을 위하여 Inconel 718에 비해 강도가 약 1/5 수준인 SUS 321로 만들어져 시험은 20 bar 까지만 가능하다. 그림 5에서 알 수 있듯이, 상온 모멘트 시험 후에 코팅 미적용 모델의 핀은 갈링이 발생하였으며, 코팅 적용 모델은 발생하지 않았다.

표 3은 상온에서 7° 회전 변위를 가했을 때, 내압에 따른 힌지 신축이음의 회전 모멘트 해석 결과이다. 마찰계수 0.4와 0.01은 20 bar에서 외부형의 모멘트 시험값과 해석값이 유사하도록 임의로 정해졌다. 압력이 변하여도 스프링 강성에 의한 모멘트 변화는 작으며, 100 bar에서 축력 모멘트 성분에 비해 상대적으로 크기가 작다. 마찰 및 축력에 의한 모멘트는 압력에 선형 비례하며, 100 bar에서 마찰계수 0.4인 경우는 전체 모멘트에서 마찰 모멘트의 비율이 59%, 마찰계수가 0.01인 경우는 3.5%로 낮아진다.

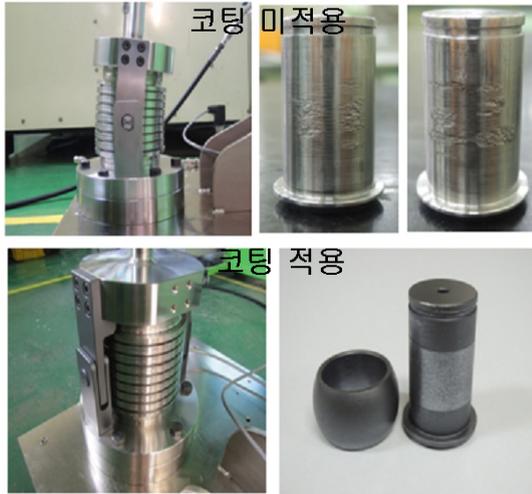


그림 6 외부형 힌지 신축이음 모멘트 시험

표 3 외부형 힌지 신축이음 모멘트 해석 결과 (kgf-m)

Press. (bar)	0	10		100	
$\mu$		0.4	0.01	0.4	0.01
$M_s$	2.12	1.89		1.9	
$M_f$	0	10.2	0.26	51.0	1.28
$M_r$	0	6.76		33.8	
$M_l$	2.12	18.9	8.90	86.7	37.0

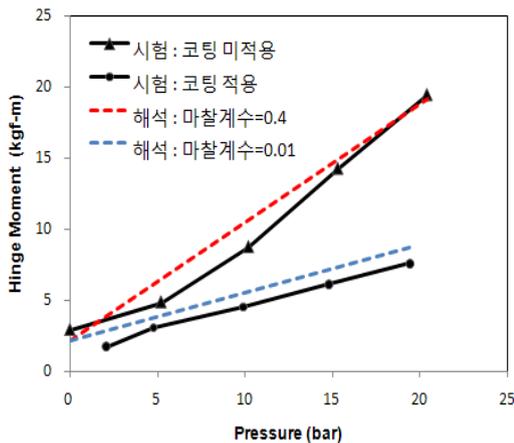


그림 7 외부형 힌지 신축이음의 모멘트 해석-시험 비교

그림 7은 모멘트 시험과 해석을 비교한 결과이다. 시험 결과에서 코팅을 적용하면 마찰계수가 0.4 이하에서 0.01 이하로 매우 작아진다. 코팅이 적용된 모델은 100 bar에서 마찰력 및 스프링 강성에 의한 모멘트가 축력에 의한 것에 비해 상대적으로 작아 정확한 마찰계수 추정은 어렵다. 앞선 내부형 김발 신축이음과 비교하면 외부형 힌지 신축이음이 갈림 발생 시에 마찰계수가 더 작으며, 이는 외부형 힌지 신축이음의 재질이 다르며 저압에서 시험을 수행했기 때문으로 추정된다.

## 5. 결 론

액체로켓엔진용 배관 김발 신축이음의 모멘트 해석 및 시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 내/외부형 김발 신축이음의 핀과 베어링 회전면에 갈림이 발생하는 것을 시험을 통해 확인하였다.

- 외부형 힌지 신축이음에 이황화몰리브덴 코팅을 적용하여 마찰에 의한 모멘트가 감소하여 축력에 의한 모멘트 보다 매우 작은 것을 확인하였다.

- 향후 고압에서 코팅 내구성 검증이 필요하다.

## 참 고 문 헌

1. Anon., "Liquid Rocket Engine Lines, Bellows, Flexible Hoses and Filters," NASA SP-8123, 1977.
2. www.boa-bkt.de.
3. Veiga, J. C., Kavanagh, N., Sousa, A. N. F., Medeiros, J. and Veiga, J. L., "Determination of Gimbal and Hinged Expansion Joints Reaction Moments," ASME PVP 2010-25223, 2010.
4. Expansion Joint Manufacturers Association, "Standards of The Expansion Joint Manufacturers Association," 9th Ed., White Plains, N.Y., 2009.
5. www.aurorabearing.com.