

# 원심력을 이용한 모멘텀휠 베어링의 오일공급장치(LDS) 설계

강정민<sup>1\*</sup>, 이상욱<sup>2</sup>, 최준영<sup>2</sup>, 송태성<sup>1</sup>, 송덕기<sup>1</sup>

LIG넥스원<sup>1</sup>, 대영엠텍<sup>2</sup>

## Design of Lubricant Delivery System(LDS) for Momentum Wheel Bearing using Centrifugal Force

JeongMin Kang<sup>1\*</sup>, Sangwook Lee<sup>2</sup>, Junyoung Choi<sup>2</sup>, Taeseong Song<sup>1</sup>, Deokki Song<sup>1</sup>

**Key Words** : Lubricant Delivery System(오일공급장치), Momentum Wheel(모멘텀휠), Control Moment Gyro(제어모멘트자이로), Centrifugal Force(원심력), Vapor pressure(증기압)

### 서론

해외위성에 탑재되어 실제 우주 환경에서 운용되는 CMG와 반작용 휠(Reaction Wheel), 구동부품의 고장 사례를 보면 주로 크게 슬립링의 아크 발생 혹은 베어링 윤활문제, 베어링 손상에 의한 문제가 주로 이루어져 있다. 특히, 고속으로 회전하는 모멘텀휠은 베어링 부의 온도가 올라가기 때문에 다른 회전하는 구동장치에 비해 베어링의 오일은 높은 증기압(Vapor pressure)을 가지게 된다. 이로 인해서 발생한 오일의 증발(Evaporation)은 모멘텀휠의 소모전력을 올리거나 베어링의 파손으로 이어져 CMG의 운용이 불가해질 우려가 있다.

이러한 회전하는 구동부품에서의 윤활문제를 해결하기 위한 해외의 연구는 다음과 같다. S.D.Lewis 등은 긴 수명을 가지는 Self-Lubricating bearing에 관한 연구를 통해 Polymeric cage material을 적용하여 긴 수명기간동안 오일을 공급하는 설계를 제시하였다.<sup>(1)</sup> M. Palladino 등은 유체 윤활유 사용으로 발생하는 증발(Evaporation)으로 인해 발생으로 인한 회전장치의 수명을 예상하고 시험하였다.<sup>(2)</sup> K.Sathyan 등은 다양한 연구를 통해 Active/Passive 방식의 Oil reservoir를 제안하였다.<sup>(3~4)</sup>

본 논문은 이러한 문제점과 연구를 참고하여 모멘텀휠에 적용 가능한 오일공급장치의 설계 및 성능분석에 관한 내용을 서술한다.

### 본론

모멘텀 휠은 CMG에 장착되어 각운동량을 만들어내는 장치이며, 우주환경에서 수천 rpm의 속도로 상시 회전한다. 따라서, 이 장치의 베어링에는 항상 원심력(Centrifugal force)이 작용하게 되고, 이를 이용하면 긴 수명 동안 베어링 오일을 연속적으로 공급가능하다. 따라서 다양한 방식의 오일공급장치 중 오리피스 가 적용된 Passive 방식의 Centrifugal LDS가 적합하다. 가장 이상적인 LDS 설계는 베어링의 오일의 손실량(Oil Loss)과 오일공급장치의 질량유량이 동일한 경우이다. 하지만 이는 시스템의 설계(Open/Closed design)에 따른 조건(온도, 압력, 체적)에 의해서 좌우

된다. 한편, ECSS-Q-TM-70-52A에 기술된 단위 면적당 증발량(Evaporation rate per surface unit)을 다음과 같이 정의하고 있다.

$$\frac{dm_{evap}}{dt} = -0.044 \sqrt{\frac{M}{T} P_s(T)} \quad (1)$$

여기서,  $dm_{evap}/dt$ 는 단위 면적당 증발량이고,  $M$ 은 물질량(g/mol),  $T$ 는 표면온도(K),  $P_s(t)$ 는 증기압(mbar)이다. 모멘텀휠에 고려하고 있는 베어링 오일은 우주 헤리티지(Heritage)가 확보된 합성오일(Synthetic oil)인 NYE-2001a이며, 주요 물성치는 Table 1과 같다. 이를 이용하여 베어링 2개로 구성된 모멘텀휠의 75℃의 온도조건에서 10년간 오일 증발량을 계산하면 약 385.2  $\mu g$  ( $\approx 0.0044 \mu g/h$ )으로 매우 작은 양이다. ECSS에서의 증발량 계산수식은 시스템의 조건(온도, 압력, 체적)을 고려하지 않은 증발량이기 때문에 별도 시험을 통해 실제 시간당 오일 손실량을 측정하는 것이 필요하다.

결론적으로 베어링의 오일의 손실량과 오일공급장치량을 동일하게 구성하는 것은 매우 어려우며 과도한 오일량을 공급하여 베어링을 마찰을 올리거나 오염(Contamination)이 발생하지 않는 대략 5  $\mu g/h$ 의 질량유량을 가지는 오일공급장치를 목표로 설계를 하였다.

오리피스를 통해 빠져나가는 오일의 질량유량(Mass flow rate)은 다음과 같이 계산된다.<sup>(3)</sup>

$$q = K \frac{\pi \rho^2 w^2 r^4}{8\eta} \left[ \frac{R_3^2 - R_1^2}{R_3 - R_2} \right] \quad (2)$$

여기서,  $K$ 는 유량 계수( $=0.326$ )이고,  $\rho$ 는 오일의 밀도( $kg/m^3$ ),  $\eta$ 는 오일의 동점도 계수(Dynamic viscosity,  $kg/m-s$ ),  $r$ 은 오리피스의 반경( $m$ ),  $w$ 는 각속도( $rad/s$ ),  $R_1$ 은 오일공급장치 내 오일 내경의 반경( $m$ ),  $R_2$ 는 오일공급장치 내 오일의 외경의 반경( $m$ ),  $R_3$ 는 제어 오리피스까지의 반경( $m$ )이다. 자세한 치수는 Fig.1과 같다. 목표한 질량유량 달성을 위해 제한된 크기와 회전속도, 오일을 고려하면 변수는  $R_3$

Table 1. Major Oil Properties

Properties	Value
Temp. Range	-45 ~ -125 °C
Molar mass	910 g/mol
Density	844 kg/m <sup>3</sup>
Kinematic viscosity	14.3 mm <sup>2</sup> /s @ 100°C
	106.7 mm <sup>2</sup> /s @ 40°C
	80,500 mm <sup>2</sup> /s @ -40°C
Evaporation	- @ 206h, 204°C
	0.04 % @ 24h, 100°C
Vapor Pressure	3.0e <sup>-13</sup> Torr @ 25°C
	4.9e <sup>-9</sup> Torr @ 75°C

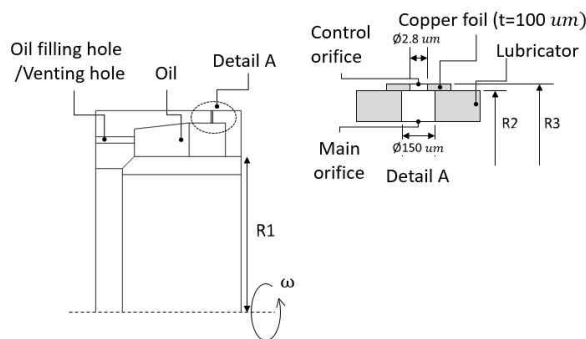


Fig. 1. Schematic of Centrifugal LDS

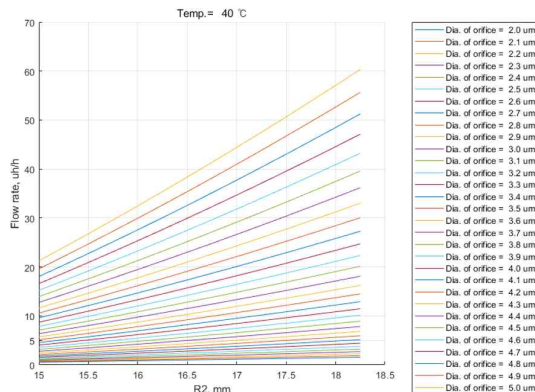
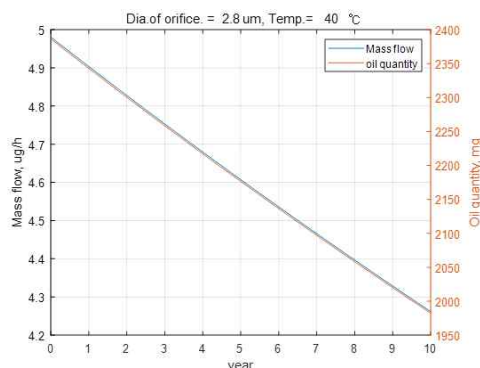
Fig. 2. Mass flow rate vs.  $R_2$ , orifice size( $r$ )

Fig. 3. Mass flow rate vs. Years

Table 2. Deign Parameter

Parameter	Value
$r$	2.8 $\mu\text{m}$
$R_1$	13.0 mm
$R_2$	17.0 mm
$R_3$	17.6 mm
Mass flow rate	4.98 $\mu\text{g/h}$ @ 40°C
Oil quantity	2.38 g
Oil delivery	0.40 g @ 10 year

와  $r$ 이 되며, 이에 따라 선택 가능한  $R_2$ 와  $r$ 은 Fig.2와 같다. 이를 통해 오일공급장치의 오일량 및 오일 질량유량을 예상할 수 있다. 실제 운용시에는 오일이 점차 빠져나감에 따라  $R_1$ 이 점차 커지게 되고 이는 질량유량이 Fig.3와 같이 점차 낮아지게 된다. 그럼에도 10년동안 충분한 오일의 질량유량을 가지며 총 0.4g의 윤활유 공급이 될 것으로 예상된다.

## 결론

본 논문에서는 고속으로 회전하는 모멘텀휠의 베어링에 오랜 수명기 동안 연속적으로 베어링 오일 공급을 위하여 윤활유 공급장치 설계 및 성능분석하였다. 이를 통해 목표 질량유량을 확보 가능한 설계변수를 확보하였다. 향후 실제 제작을 통해 예측한 성능과 유사하게 나오는지 시험을 진행할 예정이다.

## 후기

본 연구는 과학기술정보통신부의 거대과학연구개발사업인 ‘스페이스파이오니어사업’에 의해 수행되었습니다.(2021M1A3B9094394)

## 참고문헌

- 1) Lewis, S., Anderson, M., “Recent development in performance and life testing of self-lubricating bearing for long-life application”, ESMATS, 2007
- 2) Palladino, M., Murer, J., “Life prediction of fluid lubricated space bearings : a case study,” ESMATS, 2011, pp. 279~285.
- 3) Sathyan, K., Hsu, H. Y., “Development of a Centrifugal Oil Lubricator for Long-Term Lubrication of Spacecraft Attitude Control Systems—Design and Theory,” Tribology Transactions, Vol. 54, No. 5, 2011, pp. 770~778.
- 4) Sathyan, K., Hsu, H. Y., “Development of a Centrifugal Oil Lubricator for Long-Term Lubrication of Spacecraft Attitude Control Systems—Experimental Evaluation,” Tribology Transactions, Vol. 54, No. 6, 2011, pp. 832~839.