

# KSR-III TVC 구동장치 릴리프밸브 시뮬레이션 분석 연구

선병찬\*, 송은정\*\*

## A Simulation Study on Relief Valve for KSR-III TVC Actuator

Byung-Chan Sun\*, Eun-Jung Song\*\*

### Abstract

In this paper, in order to guarantee successful operation of KSR-III TVC actuator in the presence of excessive external disturbances, a relief valve is designed as a key component of the actuator. It is shown that the relief valve can resolve the stability problems which occur due to actuator failure in the presence of excessive disturbance torques on the actuator. Six degree-of-freedom simulation shows that relief valves with low operating pressure and low LOHM parameter may be better in stability and performance of the TVC actuator system.

### 초 록

본 논문에서는, KSR-III 김발엔진 구동장치 시스템의 원활한 작동을 보장하기 위한 방안으로 릴리프밸브의 적용을 고려하였다. 비행 중의 김발엔진 지지구조물에서의 진동 및 급격한 외란 등에 의해 구동기에 과도한 토크가 작용하는 경우, 구동기의 작동불능 및 로켓의 성능저하가 발생 가능함을 보였으며, 릴리프밸브의 적용을 통해 그러한 불안정성을 해소시킬 수 있음을 보였다. 6자유도 시뮬레이션 분석을 통해, 릴리프밸브의 작동압이 낮을수록, LOHM 파라미터가 작을수록 시스템의 성능 면에서 유리하다는 결과를 제시하였으며, 릴리프밸브를 채용함에 따라 로켓에 작용하는 TWD 등의 외란을 감소시키는 효과도 발생함을 보일 수 있었다.

키워드 : 로켓(rocket), 김발엔진(gimbal engine), 구동장치(actuator), 릴리프밸브(relief valve), 시뮬레이션(simulation), 안정성(stability)

### 1. 서 론

KSR-III 로켓의 1단부 자세제어는 추력벡터제

어 방식으로 이루어져 있다. 추력벡터제어를 위한 구동장치 시스템이 전기유압식으로 개발되어 적용되었다. 구동장치 시스템 개발과정에서, 비행

\* 유도제어그룹/bcsun@kari.re.kr

\*\* 유도제어그룹/ejsong@kari.re.kr

중에 구동기에 작용할 외란토크의 양을 예측해서 충분히 많은 여유를 가지도록 유압 시스템 및 관련 배관들을 설계한 바 있다. 하지만, 김발엔진 지지구조물 등에서의 유연특성으로부터 발생하는 고주파수 진동이라든지, 임의의 충격 거동 등에 의해 순간적으로 설계유압을 초과하는 현상이 발생할 수 있으며, 이 경우, 구동장치 구성품 중 일부가 파손되어 심하면 구동장치의 작동이 멈추게 됨으로써 더 이상 제어가 이루어지지 않을 수 있는 현상을 유의할 필요가 있었다. 제어가 수행되지 않으면 로켓이 원하는 궤적으로 비행하지 못하고 엉뚱한 곳으로 추락하게 되므로 위험한 상황이 발생할 수 있기 때문이다.

이에, KSR-III용 구동장치의 경우에는 어떠한 조건에서도 구동장치의 기본적인 동작 특성을 보장하기 위한 목적으로 구동기 내에 릴리프밸브(Relief Valve)를 부착하는 방식으로 설계를 진행하였다. 피스톤 양단에 걸리는 유압차가 설계치를 초과하게 될 경우 릴리프밸브가 작동하게 하여 순간적으로 피스톤 양단의 유압차를 제거함으로써 구동장치에 작용하는 부하를 없애주는 역할을 하도록 설계하였다. 릴리프밸브가 작동하는 순간에는 제어명령이 전달되지 않는 상황이 발생하기도 하지만, 시스템이 완전히 파괴되는 경우를 방지할 수 있으므로 사고에 대한 방지 측면에서도 유리할 것으로 판단되었다.

로켓의 전 비행영역에 대한 시스템 안정성 확보는 중요한 문제가 되는 바, 릴리프밸브의 동작과 관련하여 로켓 시스템의 성능이 어떤 식으로 변화할 지에 대한 분석은 필수적이며, 거꾸로 비행 성능 분석을 토대로 릴리프밸브의 사양을 결정하는 중요한 기준을 제공할 수도 있을 것이다. 본 논문에서는 릴리프밸브의 개략적인 작동 원리에 대해 설명을 하고, 릴리프밸브의 설계와 관련한 시뮬레이션 분석 결과에 대해 정리하였다.

## 2. 릴리프밸브

### 2.1 작동원리

릴리프밸브의 작동원리에 대해 간략히 도식화

하면 다음 그림과 같다.

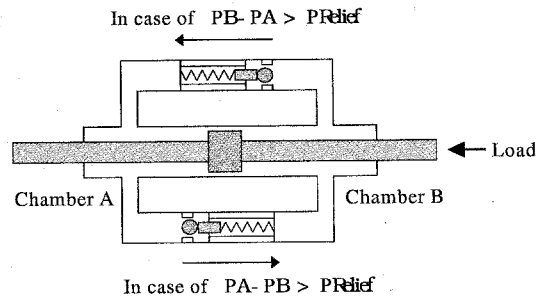


그림 1. 릴리프 밸브의 작동원리

피스톤의 왕복운동이 이루어지는 실린더의 바깥쪽에 피스톤 양단의 챔버 간에 유체가 흘러갈 수 있는 두 개의 새로운 통로가 형성되어 있으며 그 통로에 베어링이 설치되어 있다. 위의 통로는 챔버 B에서 챔버 A로 유체가 흘러가기 위한 것이고, 아래 통로는 챔버 A에서 챔버 B로의 흐름을 위한 것이다. 정상적인 경우, 각 통로에 설치된 스프링의 탄성력에 의해 통로가 막힌 상태가 되므로 두 챔버 간의 유체 흐름은 없으며, 두 챔버 간의 유압 차이에 따라 피스톤의 운동이 제어되는 상태가 된다. 하지만, 발사체에 작용하는 급격한 외란 등으로 인해, 피스톤 양단의 유압차이 ( $|P_A - P_B|$ )가 릴리프밸브 내의 스프링 반발력 ( $P_{Relief}$ )보다 커지게 되면 베어링이 밀리게 된다. 베어링이 뒤로 밀리면서 챔버 A, B 사이의 유로가 형성되게 되며 압력이 높은 쪽 챔버로부터 낮은 쪽 챔버로 유체가 흐르게 된다. 유체가 흘러 나간 쪽 챔버는 압력이 낮아지게 되고 유체가 흘러 들어온 쪽 챔버의 압력은 상승하게 됨으로써 피스톤 양단의 압력 차이가 감소하게 되고 구동기의 파괴를 미연에 방지할 수 있게 되는 것이다.

일반적으로, 릴리프밸브가 작동하는 조건을 살펴보면 외부에서 부하(Load)가 작용하는 도중에 반대 방향의 제어 명령이 주어질 때이다. 위 그림에 의하면 피스톤을 오른쪽으로 미는 방향으로 제어를 수행하고자 한다면, 유압 구동장치 시스템 내부에서는 챔버 A의 압력을 챔버 B의 압력

보다 크게 만들기 위해 유체를 챔버 A 쪽으로 가하게 된다. 이에 따라 유압차  $P_A - P_B$  가 점점 증가하게 되지만 반대방향으로 외부 부하가 작용하고 있으므로 유압차가 외부 부하보다 큰 값이 되기 전까지는 피스톤의 움직임은 없거나 오히려 외부 부하에 의해 반대방향으로 움직이게 된다. 따라서, 외부 부하를 견디면서 오른쪽으로 피스톤을 움직여 주기 위해 유압 시스템 내부에서는 챔버 A 쪽으로 유체를 더 많이 넣어 주게 되고 유압차  $P_A - P_B$ 는 점점 커지게 되는 것이다. 유압차가 릴리프밸브의 셋팅압 이상이 되는 순간 릴리프밸브의 작동이 이루어지게 된다.

## 2.2 설계 파라미터

릴리프밸브를 통한 유체의 속도는

$$Q_{\text{Relief}}(\text{gpm}) = 20 \frac{\sqrt{|P_A - P_B| \text{ psi}}}{\text{LOHM}} \quad (1)$$

의 공식으로 계산이 가능한데, 여기서 LOHM은 밸브의 직경과 관련한 유체의 저항값이 된다. LOHM이 작을수록 릴리프밸브를 통한 유체의 흐름은 빨라져서 보다 짧은 시간에 정상 상태에 도달하게 된다. 하지만, LOHM을 작게 하기 위해서는 밸브의 직경을 키워야 하므로 그만큼 제작과 관련한 오차가 커지는 문제점도 있다.

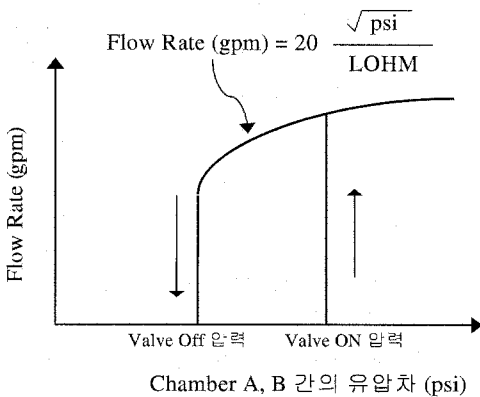


그림 2. 릴리프 밸브의 유속 공식

유압차에 따른 유속의 관계를 그림으로 나타내면 그림 2와 같다. 보통, 밸브가 열리는 압력과 닫히는 압력이 다른데 밸브가 닫히는 압력이 열리는 압력에 비해 500 psi 정도 낮은 값이 되며, 열리는 압력이 결정되면 그 구조에 의해 닫히는 압력이 함께 주어지는 경우가 많다. 따라서, 릴리프밸브의 사양을 결정하는 중요한 파라미터는 LOHM 값과 밸브가 ON 되는 압력 차 두 가지가 됨을 알 수 있다.

## 2.3 유압방정식

릴리프밸브가 작동되지 않는 정상 비행 상황에서 구동장치 유압방정식을 우선 정리해 보면 다음과 같다.

$$Q_{AC} = A\dot{x}_p + \frac{V_{cyl} + Ax_p}{\beta_e} P_A \quad (2)$$

$$Q_{BD} = -A\dot{x}_p + \frac{V_{cyl} - Ax_p}{\beta_e} P_B \quad (3)$$

여기서,  $Q_{AC}$ 는 챔버 A로 유입되는 유체의 유속을 의미하고,  $Q_{BD}$ 는 챔버 B로 유입되는 유체의 유속을 의미한다.  $A$ 는 피스톤 단면적,  $V_{cyl}$ 은 실린더의 초기 부피,  $\beta_e$ 는 상수,  $x_p$ 는 피스톤의 변위를 각각 나타내고 있다.

릴리프밸브가 작동하게 되면, 챔버 A, B 간의 유체의 흐름에 의해 각 챔버 내의 유체 흐름이 달라지는데, 그 식을 정리하면 다음과 같다.

$$Q_{AC} - Q_{\text{Relief}} \text{sign}(P_A - P_B) = A\dot{x}_p + \frac{V_{cyl} + Ax_p}{\beta_e} P_A \quad (4)$$

$$Q_{BD} - Q_{\text{Relief}} \text{sign}(P_A - P_B) = -A\dot{x}_p + \frac{V_{cyl} - Ax_p}{\beta_e} P_B \quad (5)$$

위 식에서  $\text{sign}(\cdot)$  은 다음과 같이 정의되는 함수이다.

$$\text{sign}(a) = \begin{cases} 1 & \text{if } a > 0 \\ -1 & \text{if } a < 0 \\ 0 & \text{if } a = 0 \end{cases} \quad (6)$$

챔버 A의 압력( $P_A$ )이 챔버 B의 압력( $P_B$ )보다 크면 유체가 챔버 A에서 챔버 B로 흘러가게 되어 챔버 A로의 유속은 감소하게 되고 챔버 B로의 유속은 증가하게 된다. 릴리프밸브가 이상적으로 작동한다면, 궁극적으로는 양 챔버압 사이에

$$P_A = P_B \quad (7)$$

의 관계가 성립하게 되지만, 시간에 따른 천이구간이 존재함으로 인해서 식(7)의 정상 상태에 도달하는 데는 다소 시간이 걸리고 보통은 식(7)의 상태에 도달하기 전에 밸브가 닫히게 된다. 실제로 그림 2에 의하면,

$$|P_A - P_B| \leq P_{\text{Relief OFF}} \quad (8)$$

유압차가 릴리프밸브의 셋팅압(닫히는 경우)보다 작아질 때 닫히게 된다.

### 3. 시뮬레이션 분석

#### 3.1 시뮬레이션 상황

김발엔진 구동장치에 릴리프밸브가 설치되어 있는 경우에 대해서 6자유도 시뮬레이션 분석을 수행하였다. 로켓의 강제모드 외에 슬로싱, 벤딩, TWD, 바람 등의 영향을 고려하였고, 0.3도의 추력비정렬 오차 또한 존재한다고 가정하였다. 구동장치 모델로는 서보밸브 다이내믹스, 피스톤 다이내믹스, 유압방정식 등의 유압시스템 고유의 비선형 운동방정식을 사용하였고, 피스톤 양단의 최대 유압차 사양은 4500 psi 정도로 설정되었다.

릴리프밸브의 동작은 외란 토크가 극대화되는 최악의 상황에서 발생할 것이므로 김발엔진 지지 구조물에서의 유연모드 주파수가 1차 벤딩주파수와 겹치도록 가상의 시나리오를 가정하였다. 김발엔진 구조물에서의 유연모드가 벤딩모드와 겹

치게 되면 진동이 커지고 엔진 관성력에 의한 외란토크가 극대화될 것이기 때문이다. 시뮬레이션에서 사용된 김발엔진 구조물의 유연모드는 고유주파수 15 Hz, 감쇠계수 0.0089 (이득증가 35 dB)이다.

#### 3.2 밸브 작동압에 따른 시뮬레이션 분석

릴리프밸브의 작동압에 따른 특성 차이를 살펴보기 위해 릴리프밸브 셋팅압으로

Case 1 :  $P_{\text{Relief ON}} = 4500 \text{ psi}$ ,

$P_{\text{Relief OFF}} = 4000 \text{ psi}$ ,

$LOHM = 1500$

인 경우와

Case 2 :  $P_{\text{Relief ON}} = 3200 \text{ psi}$ ,

$P_{\text{Relief OFF}} = 3000 \text{ psi}$ ,

$LOHM = 1500$

인 경우에 대해 시뮬레이션 분석을 수행하였다. 위의 사양들은 이미 개발되어 있는 표준 부품들에 대한 카탈로그에서 참조한 데이터이다. 그 결과는 그림 4 ~ 그림 9와 같이 얻어졌다.

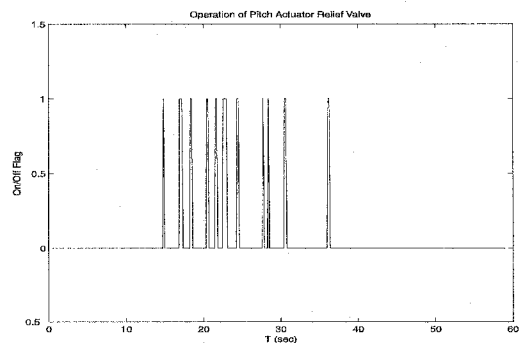


그림 4. 릴리프밸브 개폐특성

그림 4는 릴리프밸브의 전형적인 ON/OFF 개폐 특성을 보여주고 있다. 구동장치에 과부하가 걸리는 순간 작동을 시작했다가 순간적으로 유압

평형을 이룬 후 다시 닫히는 동작을 반복하면서 안정적인 운용을 보장하게 됨을 볼 수 있다.

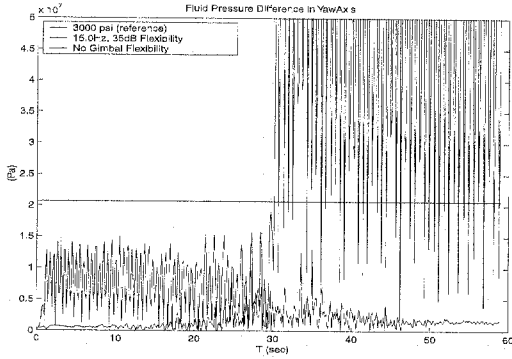


그림 5. 유압차 : 릴리프밸브가 없는 경우

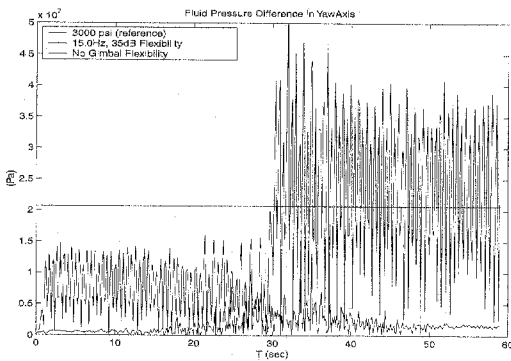


그림 6. 유압차 : 릴리프밸브 적용, Case 1

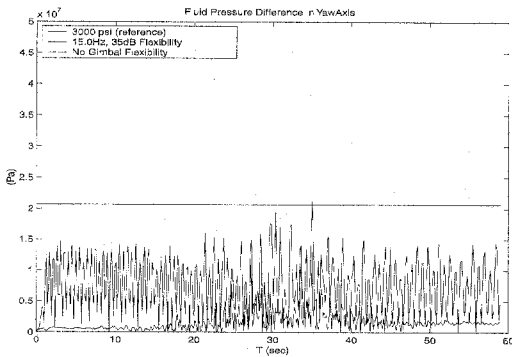


그림 7. 유압차 : 릴리프밸브 적용, Case 2

그림 5 ~ 그림 7은 릴리프밸브의 작동압에 따라 피스톤 양단에 걸리는 유압 차이를 그린 결과이다. 릴리프밸브가 없는 경우(그림 5)에는 김발 유연 모드 및 벤딩에 의해 김발각속도가 커지고, 그에 따라 구동기에 작용하는 외란토크도 커지면서 피스톤 양단의 유압차가 7000 psi 이상이 되어 비행 후 30 초부터는 구동기가 작동 불능 상태에 빠지게 됨을 확인할 수 있다. 반면에, 릴리프밸브가 있는 경우에는 밸브의 연속적인 개폐 동작을 통해 전 비행영역에 대해 4500 psi 이하의 설정치를 만족함을 확인할 수 있다. Case 1의 경우(그림 6) 순간적으로 유압차가 4500 psi를 넘기는 하지만 전체적으로 4500 psi 이하 수준으로 유지시키게 되며, Case 2의 경우(그림 7)에는 밸브 설정압에 따라 3200 psi 이하로 유지할 수 있음을 알 수 있다.

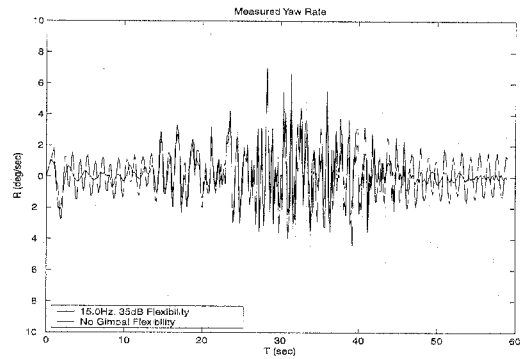


그림 8. 로켓의 자세각속도 : Case 1

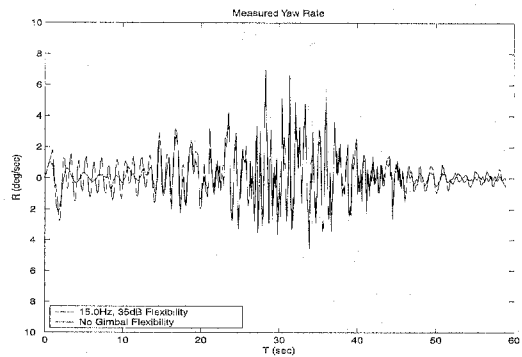


그림 9. 로켓의 자세각속도 : Case 2

그림 8 ~ 그림 9 는 릴리프밸브 채용에 따른 로켓의 자세각속도 특성을 보여주고 있다. Case 2의 경우, Case 1에 비해 각 상태변수에 대한 오차가 적게 나타나며, 상대적으로 좋은 성능을 가짐을 알 수 있다. 위 결과들에 의하면, 릴리프밸브의 셋팅압을 낮게 설정할수록 시스템 성능 및 안정성 면에서 유리하다고 판단할 수 있다. 하지만, 실제적으로는 밸브의 셋팅압을 무조건 낮추는 것이 좋은 것만은 아님에 유의할 필요가 있다. 셋팅압이 낮을수록 그만큼 릴리프밸브가 동작하는 구간이 길어질 것이고 그렇게 되면 그 구간동안에는 제어가 이루어지지 않게 되므로 심하면 로켓의 제어성능 저하를 야기할 수도 있기 때문이다. 그리고, 구동장치 내부적으로도, 외란이 그다지 크지 않음에도 불구하고 유압을 생성하기 위한 초기 충전영역에서 일시적으로 릴리프밸브가 동작하게 되면 제대로 명령을 추종하지 못하는 경우가 생길 수도 있기 때문이다. 따라서, 유압 시스템의 안정된 동작을 보장하는 범위 내에서 가능한 한 낮은 셋팅압을 가지도록 릴리프밸브의 사양을 결정하는 것이 중요할 것이다.

한편, 릴리프밸브를 채용하더라도 밸브 개폐가 짧은 시간 내에 발생하게 됨으로써 비행성능에 미치는 악영향은 거의 없다고 할 수 있는데, 릴리프밸브의 적용 가능성을 확인할 수 결과라 하겠다.

### 3.3 외란토크 감소 효과 분석

앞의 결과를 보면, 릴리프밸브가 없을 경우 과도한 외란토크가 가해질 때 시스템이 불안정해지는 반면, 릴리프밸브의 채용으로 그러한 현상을 해소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 즉, 릴리프밸브가 구동기에 작용하는 외란토크를 감소시키는 효과까지 가진다는 사실이다. 이에, 시뮬레이션 결과의 상세 분석을 통해 릴리프밸브에 의한 외란토크 감소 현상에 대해 살펴볼 필요가 있다.

릴리프밸브의 동작에 의해 구동기에 가해지는 외란토크 및 TWD 성분의 크기가 감소하는 현상은 릴리프밸브가 동작하는 구간에 대한 결과를 확대해서 살펴봄으로써 규명할 수가 있는데, 그

형태는 그림 10 ~ 그림 15와 같다.

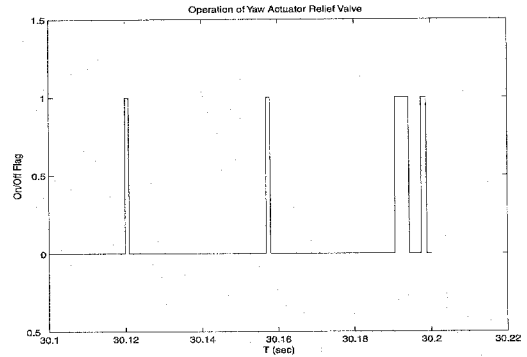


그림 10. 상세도 : 릴리프밸브 작동

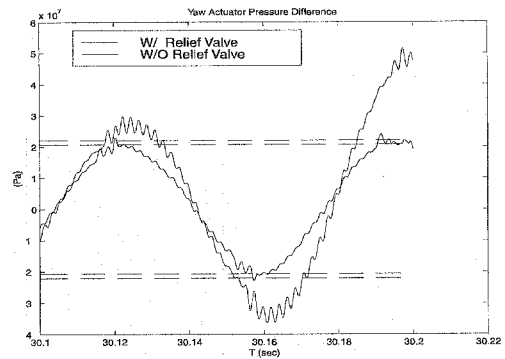


그림 11. 상세도 : 유압차

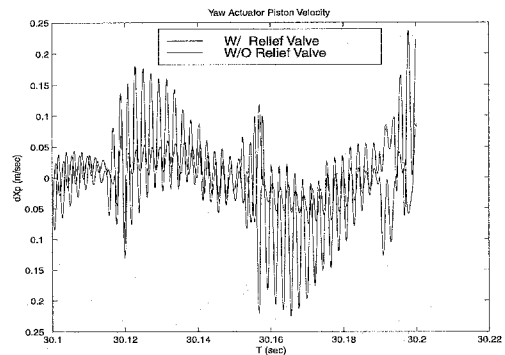


그림 12. 상세도 : 피스톤 속도

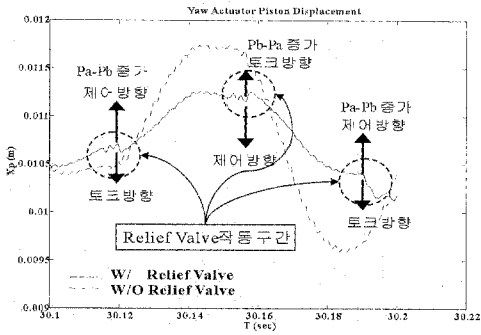


그림 13. 상세도 : 피스톤 변위

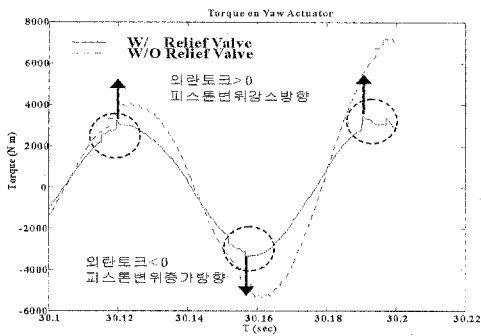


그림 14. 상세도 : 외란토크

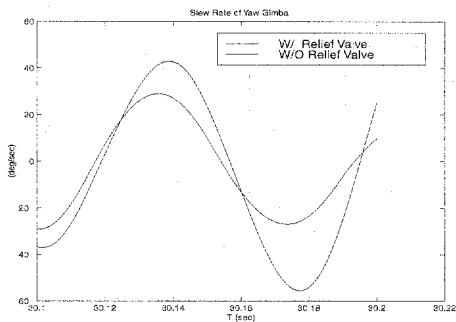


그림 15. 상세도 : 김발각속도

전반적인 경향을 보면, 릴리프밸브의 작동에 의해 유압차가 감소하는 현상 외에, 서보밸브 및 피스톤의 속도가 감소함으로써 그에 따라 엔진관 성력이 감소해서 TWD에 의한 외란토크의 크기가

감소하게 됨을 볼 수가 있다. 특히, 외란토크의 작용방향과 구동기 제어방향에 따른 유압차 변화 및 피스톤 속도 변화 부분에 대해서는 그림 13 ~ 그림 14 을 통해 자세히 살펴볼 수가 있다.

먼저, 릴리프밸브가 작동하기 이전 상황을 살펴보면, 제어명령에 따라 피스톤이 움직이려는 방향과 외란토크의 작용방향이 반대가 되면서 피스톤 전후방 챔버 간의 압력차이가 증가하게 된다. 피스톤 전후방 챔버 간의 유압차이가 증가하다가 릴리프밸브 작동압에 도달하는 순간 릴리프밸브가 열리면서 고압 챔버에서 저압 챔버 쪽으로 유체가 흘러가게 된다. 고압 챔버에서 저압 챔버로 유체가 흘러감에 따라 고압 챔버의 압력은 감소하고 저압 챔버의 압력은 증가하게 된다. 이상적인 경우라면, 고압 챔버에서 저압 챔버로 유속이 순간적으로 발생하게 되어 순식간에 챔버 A, B의 압력 ( $P_a = P_b$ )이 같아지게 되며 유량은  $Q_{ac} = -Q_{bd}$ 의 관계를 만족하게 될 것이다. 릴리프밸브를 통한 유체의 흐름에 의해, 제어하고자 하는 방향으로의 압력이 감소하게 되고 상대적으로 외란토크에 의한 압력만이 존재하게 되므로 피스톤은 외란토크가 작용하는 방향으로 밀리게 된다. 즉, 외란토크 작용방향으로 피스톤의 속도와 변위가 증가하게 되어 실제적으로는 제어방향으로의 피스톤 속도 및 변위가 감소하는 효과가 발생하는 것이다.

따라서, 김발각속도 및 가속도의 크기 감소에 의해 엔진관성에 의한 힘과 모멘트도 감소하게 되고, 이에 따라 외란토크(토크 성분 중 엔진관 성력에 의한 값이 지배적이므로)의 크기도 감소하게 됨을 알 수 있다. 릴리프밸브를 통한 유체의 흐름에 의해, 챔버 A, B 간의 유압차가 릴리프밸브 작동압 이하로 되면 곧이어 릴리프밸브는 닫히게 된다. 릴리프밸브가 닫힌 이후에 피스톤은 또 다시 제어하려는 방향으로 움직이려고 하는데, 이때 조금 감소하긴 했지만 여전히 큰 값의 외란토크 성분이 존재한다면 챔버 A, B 간의 압력차는 다시 증가하기 시작하고, 어느 순간 유압차가 릴리프밸브 작동압 이상이 되면 또다시 릴리프밸브가 동작해서 위의 과정을 반복하게 된

다. 릴리프밸브의 ON/OFF 동작이 여러 번 반복되면서 엔진관성에 의한 힘과 모멘트, 그리고 외란토크의 크기가 계속적으로 감소하게 될 것이고, 이후 외란토크의 크기가 충분히 작아지게 되면 정상적인 구동장치 운용이 이루어지게 된다. 릴리프밸브가 작동하는 동안, TWD 및 외란토크가 감소하게 되므로 결과적으로 로켓의 자세각 오차 성분도 감소하게 된 것으로 짐작할 수 있다.

### 3.4 LOHM 값에 따른 시뮬레이션 분석

밸브의 LOHM 값, 즉 릴리프밸브를 통한 유체의 유속을 변화시킨 경우에 대해 시뮬레이션 분석을 수행하였다. 다음의 Case 3에 대한 시뮬레이션 결과를 앞의 Case 1 결과와 비교해 보았다.

Case 3 :  $P_{Relief_{ON}} = 4400 \text{ psi}$ ,  
 $P_{Relief_{OFF}} = 4200 \text{ psi}$ ,  
 $LOHM = 400$

Case 3의 작동압을 Case 1과 같은 값으로 가정하지 않은 것은, LOHM 값에 따른 릴리프밸브의 사양을 기존 제품 카탈로그로부터 찾아보았을 때 같은 작동압을 가지면서 LOHM만 다른 것이 없었기 때문이다. 여기서 가정한 Case 3의 데이터가 실제로 존재하는 부품들 중에서 Case 1과 가장 유사한 작동압을 가지는 경우에 해당한다. 이때, 시뮬레이션 결과는 그림 16 ~ 그림 19와 같이 얻어졌다.

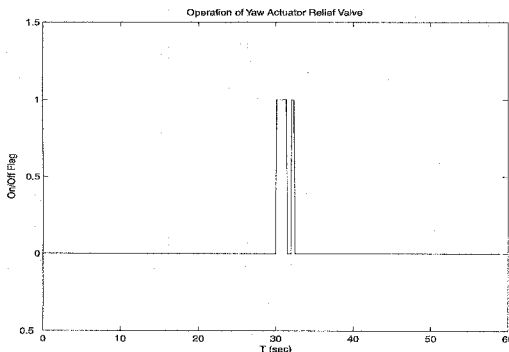


그림 16. 릴리프밸브 작동 : Case 3

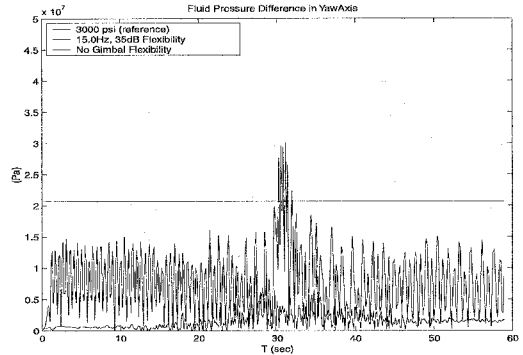


그림 17. 유압차 : Case 3

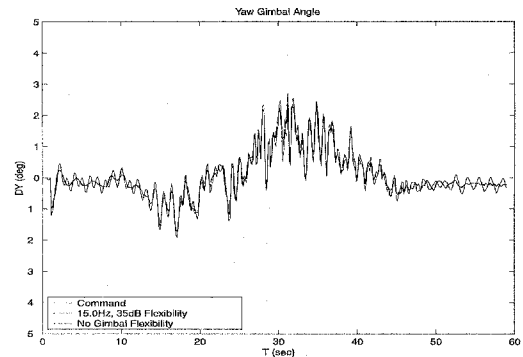


그림 18. 김발각 : Case 3

Case 1에 비해 LOHM 값이 작은 만큼 보다 짧은 시간 내에 릴리프밸브의 개폐가 이루어지고, 보다 빠른 시간에 유압 평형을 이루게 됨으로써 안정화 영역에 빨리 들어가게 됨을 볼 수 있다. 특히, 밸브의 작동압이 4400 psi 로 설정되어 있음에도 불구하고 외란토크 감소 효과가 크므로 피스톤 양단에 걸리는 유압차가 모든 구간에 걸쳐 3000 psi 이하로 설정가능함을 알 수 있으며, 결과적으로 안정적인 김발링(그림 18) 및 로켓 자세제어(그림 19)가 가능함을 확인할 수 있다. 따라서, LOHM 값이 작을수록 유압시스템의 안정성 측면이나 시스템의 성능 측면에서 좋다고 할 수 있겠다.



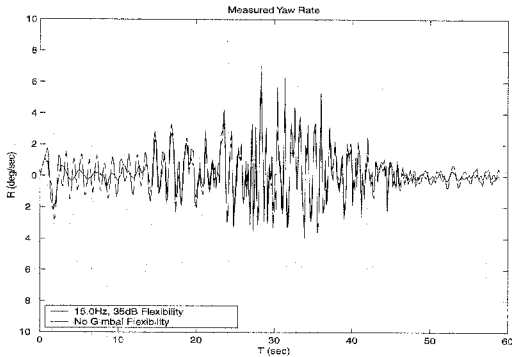


그림 19. 로켓 자세각속도 : Case 3

#### 4. 결 론

본 논문에서는 KSR-III용 유압식 김발엔진 구동장치 시스템의 기본적인 동작 특성을 보장하기 위해 릴리프밸브를 채용하는 방안을 고려하였다. 릴리프밸브의 채용에 따른 시스템 특성 변화를 분석하기 위해 6자유도 시뮬레이션 분석을 수행하였다.

바람, 벤딩, TWD 등에 의한 외란토크가 구동기에 과도하게 작용하는 경우, 유압 시스템의 원활한 작동이 불가능함을 보였으며, 릴리프밸브의 채용에 의해 이러한 불안정성을 해소할 수 있음을 보일 수 있었다. 시뮬레이션 분석을 통해, 릴리프밸브를 채용할 경우, 구동기에 작용하는 외란토크의 영향이 감소하는 효과가 발생함을 알 수 있었고, 로켓의 자세 안정성에 유리한 방향으로 작용함을 발견할 수 있었다.

릴리프밸브의 작동압 및 LOHM 값에 따른 결과 비교를 통해, 릴리프밸브의 작동압이 낮을수록, LOHM 값이 작을수록 시스템 성능 면에서 유리함을 알 수 있었다. 하지만, 릴리프밸브의 작동압이 너무 낮을 경우 구동장치의 작동 불능 구간이 길어지는 문제가 있으므로 기본적인 구동장치의 작동을 보장하기 위해서는 유압시스템의 안정성을 보장하는 압력을 기준으로 릴리프밸브의 작동압을 결정하는 것이 바람직할 것으로 보인다. 그리고, LOHM 값은 성능 면을 고려할 때

가능하면 작은 값이 좋겠지만, 너무 작은 값으로 설정하게 되면 유체의 통로를 크게 만들어야 하므로 제작이 곤란할 수도 있음에 유의할 필요가 있다. 제작의 편의성 및 유압 시스템에 대한 악영향 등을 충분히 고려하여 결정해야 할 것으로 판단된다. 따라서, 릴리프밸브의 적용을 통해, 벤딩 및 유연모드 등이 시스템에 끼치는 악영향을 감소시키는 데는 한계가 있을 것으로 보이며, 이 경우 구조물의 설계 변경이나 필터 설계 등을 병행해서 시스템의 안정성 및 성능을 개선하는 것이 바람직한 방향이 될 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

1. 선병찬, 정호락, "KSR-III 김발엔진 구동장치 서보필터 설계," 항공우주기술, 1권, 2호, 2002, pp.105-112.
2. 선병찬, 박용규, 최형돈, "KSR-III 김발엔진 구동장치 종합선형모델 연구," 한국항공우주학회 추계학술발표회, 2002, pp.1208-1211.
3. 선병찬, 박용규, 최형돈, "KSR-III 김발엔진 구동장치용 서보필터 형상 연구," 한국항공우주학회 추계학술발표회, 2002, pp.1204-1207.
4. *Effects of Structural Flexibility on Launch Vehicle Control Systems*, NASA - SP - 8036, 1970.
5. *Liquid Rocket Actuators and Operators*, NASA - SP - 8090, 1973.
6. H.E.Merritt, *Hydraulic Control System*, John Wesley & Sons, 1967.
7. A.L.Greensite, *Analysis and Design of Space Vehicle Flight Control Systems*, Spartan Books, 1970.