

액체로켓엔진용 유압식 레귤레이터 설계

김윤상* · 한풍규* · 김영수* · 하힌 B.N.**

Design on Hydraulic Regulator in Liquid Rocket Engine

Yunsang Kim* · Poonggyoo Han* · Youngsoo Kim* · Hahin B.N.**

ABSTRACT

In this work, we researched static and dynamic characteristics concern to hydraulic regulator control process and parameter setting, which is used on liquid rocket engine regulation. The hydraulic regulator of 8K14 "SCUD" 9D21 engine is analyzed and on the basis of the developed mathematical modeling the analysis of response time and certification on automatic control accuracy is carried out. In this process, we find out specific design configuration of needle valve flow section that effects on pressure regulation performance.

초 록

본 연구에서는 액체로켓엔진의 제어기구로서 많이 사용되는 유압식 레귤레이터에서의 제어 프로세스와 제어 변수의 조절에 관한 정적 및 동적 특성을 연구하였다. 본 연구의 대상으로는 8K14 "SCUD"의 9D21 엔진에 사용되는 유압식 레귤레이터를 선택하였으며, 본 유압식 레귤레이터의 수학적 모델링을 거쳐, 액체로켓엔진 내부에서의 유압식 레귤레이터의 응답속도와 자동제어시스템의 정밀도 분석을 수행함으로써, 유압식 레귤레이터의 유압조절기구인 니들밸브 유로면적의 설계값을 도출하였다.

Key Words: 유압식 레귤레이터, 액체로켓엔진, 니들(needle)

1. 서 론

액체로켓엔진에서 가장 중요한 제어변수인 추력을 조절하기 위해서는 연소실 압력 조절이 요구된다. 이를 위해 유압식이나 전자제어식 레귤레이터가 사용되는데, 안전하고 고정밀도의 레귤

레이터를 설계하기 위해 연소실과 가스발생기에서의 압력과 온도 등 여러 작동 조건들의 상호연관성을 고려하여야 한다^{[1][2]}.

본 연구의 대상인 Fig. 1의 8K14 "SCUD"의 9D21 엔진에 사용되는 유압식 레귤레이터에서는 터보펌프의 터빈을 작동시키는 가스발생기의 유량을 제어하여 엔진의 추력을 조절하게 된다. 로켓이 목표물에 정확히 도달하기 위해서는 설정된 속도를 유지시켜 주어야 하는데, 가스발생기

* (주)로템 기술연구소

** 모스크바항공기술대학교

내부 압력의 오차에 의해 발생하는 레귤레이터 내부 니들밸브의 진동을 빠르게 감쇠시킴으로서, 로켓의 속도가 기 입력된 설정값에 근접시키게 한다. 또한, 연료와 산화제의 성분비를 유지, 가스발생기의 온도를 일정하게 함으로써, 터보펌프가 안정적으로 작동하게 한다.

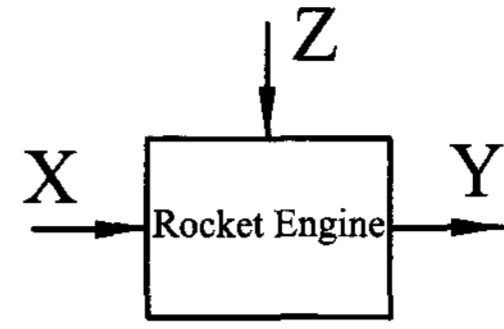


Fig. 2 레귤레이터의 작동원리

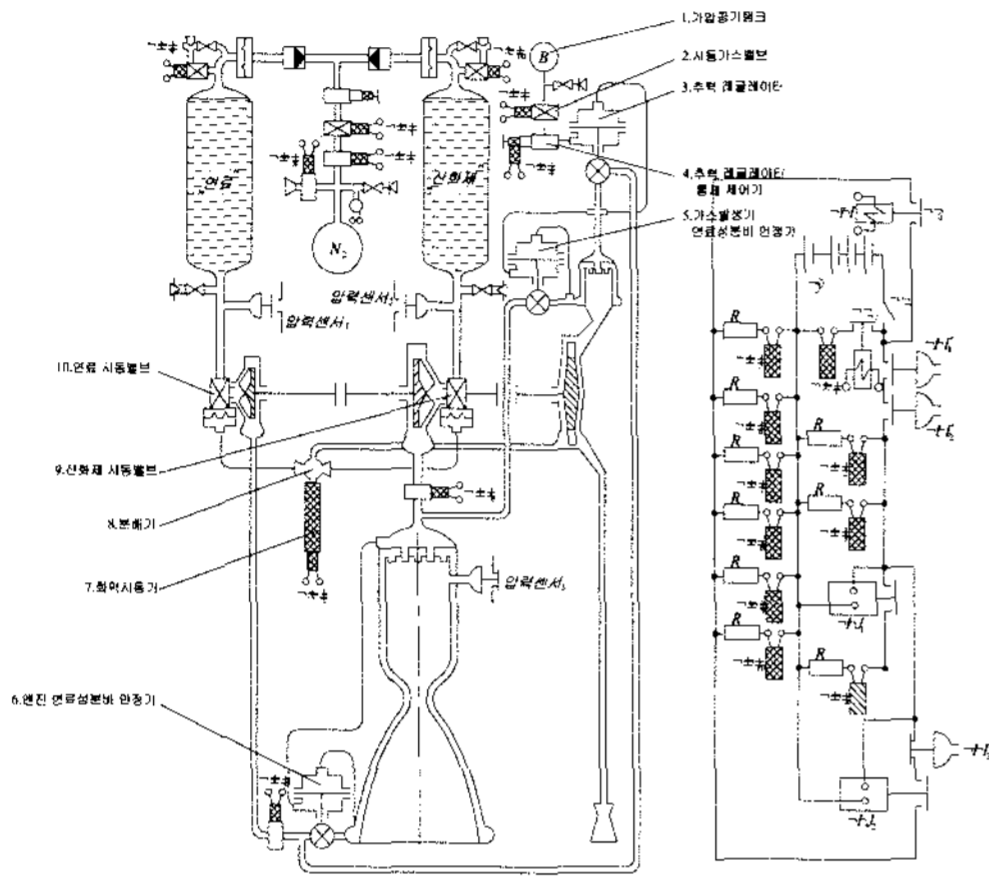


Fig. 1 8K14 "SCUD"의 9D21 엔진 스킴

본 논문에서는 유압식 레귤레이터를 안정적으로 작동하기 위해 레귤레이터내 다이어프램의 치수와 강도, 출구 노즐의 내경, 니들밸브 유로 단면의 최소와 최대 면적 및 니들밸브의 단면형상에 대한 수학적 모델링을 수행하여 액체로켓엔진 내부에서의 유압식 레귤레이터의 응답속도와 자동제어시스템의 정밀도 분석을 수행함으로써, 유압식 레귤레이터의 유압조절기구인 니들밸브 유로면적의 최적설계값을 도출하였다.

2. 유압식 레귤레이터의 작동원리

레귤레이터의 작동변수는 Fig. 2의 Output 변수, Input 변수, 제어변수로 구성되어 있으며, 로켓엔진의 작동조건은 Output 변수 벡터에 의해 정해진다.

$$Y = \{y_j, j = \overline{1, n}\} \quad (1)$$

주요 Output 상태변수로는 연소실 압력, 가스발생기 압력, 펌프 연료 유량, 연소실 온도 등이 있으며, Input 변수에는 대기압력, 연료성분 온도 및 유공압 요소의 유체저항 등이 있다. 조절작용 Z는 로켓제어시스템에서 오는 신호를 의미하며, 속도 조절 시스템과 추진제 탱크의 유량 조절 시스템으로 구성되어 있다.

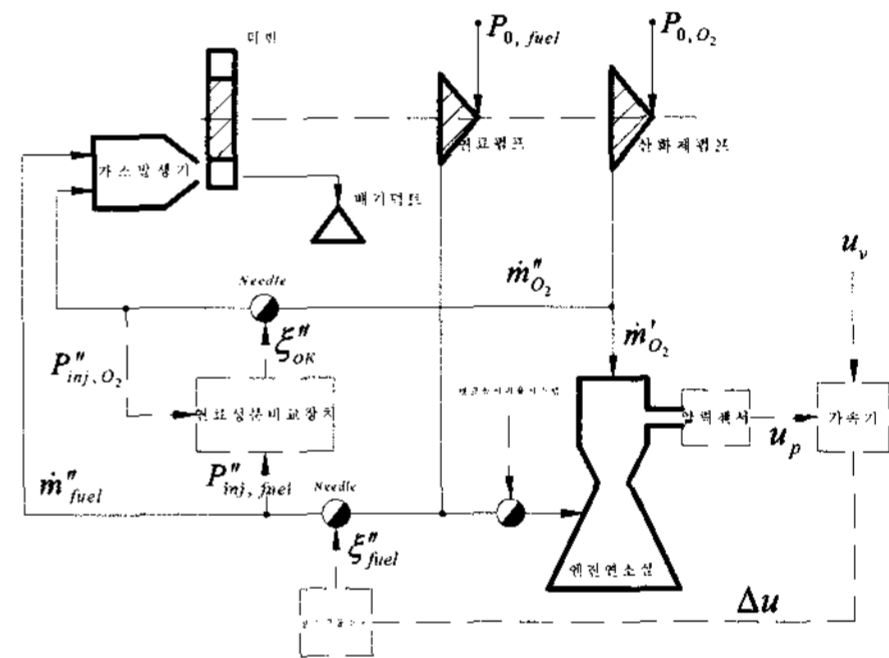
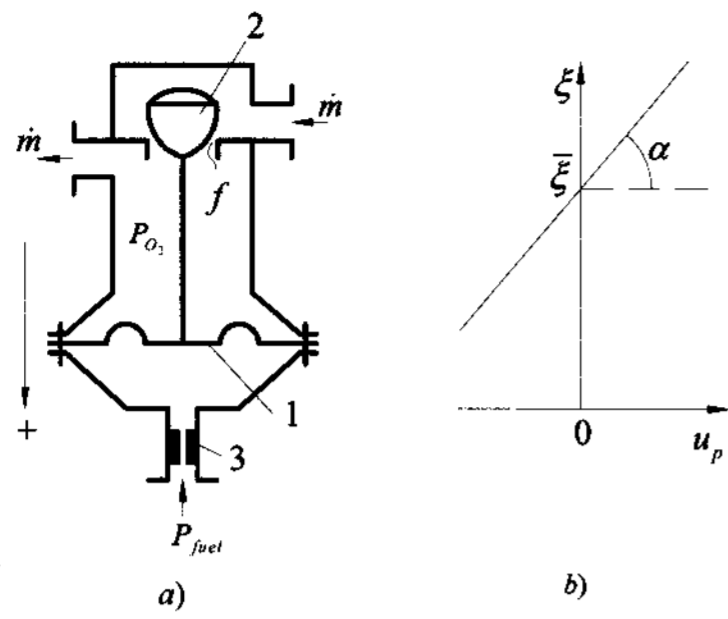


Fig. 3 로켓엔진 연소실 압력 조절장치 개략도

Fig. 3은 로켓엔진 연소실 압력 조절장치 개략도이다. 연소실에 장착된 압력센서에서 측정된 전기신호와 속도 조절 시스템의 신호와의 편차는 증폭장치를 거쳐 레귤레이터 구동모터를 구동시킴으로써 니들의 변위를 변화시킨다. 이와 같이 가스발생기 연료유량을 변화시킴으로써 터빈 추력이 변화되며, 이에 따라 산화제와 연료펌프의 도출량이 변화되고 연소실 압력 및 엔진 추력도 조정된다.

Fig. 4는 압력 레귤레이터의 구조도이다. 레귤레이터의 주요 기능은 조절압력(레귤레이터 출구에서의 산화제 압력)과 연료압력(프로그램 값)이 항상 같게 유지시켜 주는 것으로서, 레귤레이터의 다이어프램이 연료 유량에 따른 압력을 감지하여, 연료 및 연소실 압력을 비교하는 역할을 한다.



1. 다이어프램, 2. 니들, 3. 오리피스

Fig. 4 압력 레귤레이터

3. 레귤레이터의 수학적 모델링

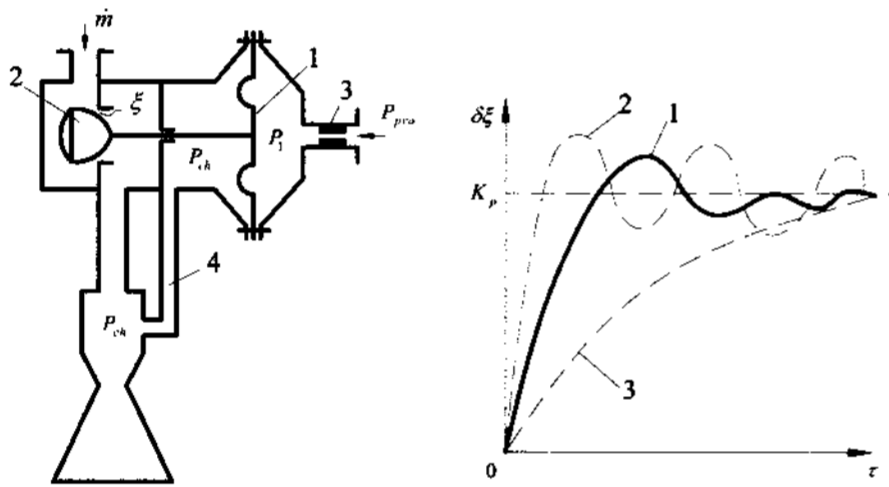


Fig. 5 연소실 압력 변화에 작용하는 압력 레귤레이터

수학적 모델 이론은 조절 정밀도를 의미하며, 통계오차의 크기는 레귤레이터 증폭율의 증가와 완충성의 감소에 의해 감소된다. 이를 위해서는 다이어프램의 강도를 줄이고 오리피스 내경을 증가시켜야 한다. 그러나 이런 경우에는 압력의 비 감쇠진동을 유발한다 (Fig.5의 곡선2). 다이어프램의 강도가 클 때나, 오리피스 내경이 작을 경우에는 압력조절값의 오차가 증가하고, 레귤레이터의 응답속도가 감소된다 (Fig.5의 곡선3). 레귤레이터의 최적 운용조건을 위해서는 다이어프램의 강도와 오리피스의 직경 조절에 따른 압력 섭동의 완충 역할이 이루어져야 한다. 이와같은 방법으로 다이어프램에 작용하는 힘의 평형조건에 의해 식(2)와 같은 지배방정식을 유도할 수 있다.

$$T_p^2 \cdot \frac{d^2}{d\tau^2} \delta\xi + 2 \cdot T_p \cdot \varepsilon \cdot \frac{d}{d\tau} \delta\xi + \delta\xi = K_p \cdot \delta P_k - K_p \cdot \delta P_{mp} \quad (2)$$

여기에서, 증폭율은

$$K_p = \frac{f_3 \cdot \bar{P}_k \cdot \tan \alpha}{c \cdot \bar{\xi}} = \frac{f_3 \cdot \bar{P}_{np} \cdot \tan \alpha}{c \cdot \bar{\xi}} \quad \text{이며, 시간상수는}$$

$$T_p = \sqrt{\frac{m}{c}} \quad , \quad \text{완충율은} \quad \varepsilon = \frac{\rho \cdot f_3^2 \cdot r_{oc}}{2 \cdot T_p \cdot c} \quad \text{이다.}$$

4. 레귤레이터 설계 프로세스와 설계치

레귤레이터의 설계에서 중요한 것은 니들과 다이어프램의 치수, 그리고 오리피스의 출구직경을 구하는 것이다. 이를 위해서는 초기값 선정이 중요하며, 단계별로 주요 치수를 결정하게 된다.

① 1단계 : 설계 초기값을 결정한다.

본 연구의 유압식 레귤레이터의 설계를 위한 초기치는 표 2에 나타내었다. 표 2에 주어진 설계 초기치들은 유압식 레귤레이터에서 사용되는 일반적인 값을 인용하였다^[3].

Table 2. 설계 초기값

시간상수	T_p	0.001
완충율	ε	1
증폭율	K_p	35
연소실압력차	δP_k	± 0.1
엔진증폭율	K_0	1/3

② 2단계 : 니들의 형상을 설계한다.

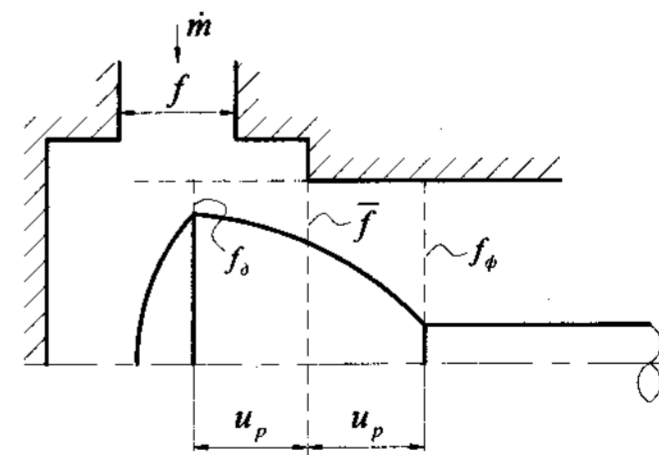


Fig. 6 니들 단면

③ 주관의 유체저항 최대와 최소 변화값 $\delta\xi$ 을 구한다.

$$\delta\xi_0 = -\frac{\delta P_k}{K_0} = 0.3 \quad ; \quad \delta\xi_\phi = -\frac{0.1}{1/3} = -0.3$$

② 주관의 유로단면적을 구한다.

$$f = \frac{\bar{m}}{\bar{\rho} \cdot w_{don}} = f_{\phi} = 10^{-4} \text{ m}^2$$

③ 조임과 플림 조절상태에서 관의 유체저항 크기를 구한다.

$$\xi_0 = \bar{\xi} \cdot (1 + \delta\xi_0) = 1.5 \cdot 10^8 \text{ 1/m}^4$$

④ 니들의 통과단면 면적을 구한다.

$$f_0 = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \mu^2 \cdot \xi_0}} = 0.72 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

⑤ 니들의 형상을 구한다. 이와 같은 계산 절차에 따라서, Fig. 6과 같은 니들의 형상을 구하는데, 이 때 니들 특성 경사각 $\tan\alpha$ 은 다음과 같이 결정한다.

$$\tan\alpha = \frac{\xi_0 - \xi_{\phi}}{2 \cdot u_p} = 0.35 \cdot 10^{11} \text{ 1/m}^2$$

③ 3단계 : 다이어프램의 질량과 강성, 압력을 이용하여, 다이어프램의 단면적을 구한다.

$$f_s = \frac{K_p \cdot c \cdot \bar{\xi}}{P_{\kappa} \cdot \tan\alpha} = 1.14 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

④ 4단계 : 출구 오리피스 직경을 구한다. 이 때, 오리피스 상수는 $1.5 \times 10^5 \text{ 1/m}$ 이므로, 출구 오리피스 직경은 1mm가 된다.

$$r_{oc} = \frac{2 \cdot T_p \cdot c \cdot \varepsilon}{\rho \cdot f_s^2} = 1.5 \cdot 10^5 \text{ 1/m} \cdot \text{sec}$$

$$d_{oc} = 3,4 \cdot \sqrt{\frac{l}{d_{oc}} \cdot \frac{v}{r_{oc}}} = 1 \text{ mm}$$

5. 결 론

유압식 레귤레이터의 기본 데이터를 활용하여, 8K14 "SCUD"의 9D21 엔진에 사용되는 유압식 레귤레이터의 수학적 모델링을 통해 니들 형상 및 단면적, 다이어프램 직경, 오리피스 직경을 최적 설계하였다. 레귤레이터 내부에서 다이어프램의 변위에 따라 발생할 수 있는 압력섭동을 줄이기 위해 다이어프램의 강도와 레귤레이터 오리피스의 직경을 고려하여 계산을 수행하였다.

이와 같은 유압식 레귤레이터의 설계 방법은 액체로켓엔진 설계에 적용 가능할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. 코즐롭 A.A., 노비콥 B.H., 살로비에프 E.B. 액체로켓엔진의 흐름과 제어 시스템. M.: 마시노스트로에니예, 1988, c. 352.
2. 압산니콥 B.B., 바롭스끼 B.И. 액체로켓엔진의 이론과 설계. M.: 마시노스트로에이니예, 1971, c. 540.