

공압 레귤레이터의 공급시 압력강하 특성 및 제어방법

조남경* · 정용갑* · 남중원* · 조인현*

Pressure Drop Characteristics and Control Method of Pneumatic Regulator for Gas Supply

Nam-kyung Cho* · Yong-Gahp Chung* · Jung-Won Nam** · In-Hyun Cho*

ABSTRACT

Pneumatic system is widely applied to ground facility and launcher on-board system. The main requirements of pneumatic system is to meet pressure and flow requirements of gas consumers. For launcher related applications, different from other applications, very high flow is required which can leads to supply pressure drop against required setting pressure. The supply pressure decrease is closely related to regulator characteristics. In this paper, the characteristics of pneumatic regulator related to supply pressure decrease and the control methods for reducing the pressure offset are reviewed.

초 록

공압시스템은 지상설비 및 발사체 공급시스템에 광범위하게 활용되고 있다. 공압시스템의 목적은 수요처에서 요구되는 유량 및 압력을 요구조건에 맞게 공급하는 것이다. 발사체 관련 가스공급은 타 분야 가스공급과는 달리 대유량의 가스공급이 일반적으로 요구되며, 이때 공급압력이 감소되어 유량을 공급하는 동안 요구되는 압력을 만족시키지 못하는 현상이 흔히 발생한다. 공급시 압력감소는 레귤레이터의 특성과 직접적으로 연관되어 있다. 본 논문은 대유량 가스공급시 공급압력 감소와 관련된 레귤레이터의 특성을 제어이론의 측면에서 검토하였고 이를 개선시킬 수 있는 방법을 이론적으로 제시하였다.

Key Words: Pressure offset(압력오차), Gas supply(가스공급), Regulator(레귤레이터), Force balance(힘 균형), Pneumatic system(공압 시스템)

1. 서 론

발사장 지상설비 및 발사체 운용에 있어 압축 가스를 이용한 공압시스템은 매우 광범위하게 활용된다. 압축가스의 사용처는 크게 발사체 내부 및 외부 환경제어, 발사체 내부 탱크충전, 압력에 의한 일생성 등이 있으며, 이젝터 효과에

* 한국항공우주연구원 추진제어팀

** 한국항공우주연구원 발사대개발팀
연락처, E-mail: cho@kari.re.kr

의한 진공생성, 극저온 추진제 온도제어 등 특수한 목적을 위해 사용되기도 한다. 모든 공압시스템의 운용 항목에는 공압 수요처의(gas consumer)의 요구조건이 존재한다. 수요처의 요구조건은 발사체 개발과정에서 도출되며, 이는 지상 공압시스템이 만족시켜야 할 공급규격에 해당한다. 특수한 경우를 제외하고 대부분의 공압시스템의 공급요건은 얼마의 압력(힘)으로서 얼마나 빠르게(유량) 가스를 수요처에 공급할 수 있는가 하는 능력으로 제시된다.

일반적으로 지상 공압설비는 레귤레이터를 이용하여 요구압력으로 감압하여 공급한다. Fig. 1에 제시한 일반적인 레귤레이터 공급곡선을 보면 유량이 커질 경우(q_1 에서 q_2 로 증가) 공급압력이 감소함을 보여준다[1]. 유량이 증가할수록 압력감소폭은 더 커지는 것을 볼 수 있다. 이 경우 유량 요구조건은 만족하는 반면 요구 압력조건은 만족시키지 못 할 수 있다.

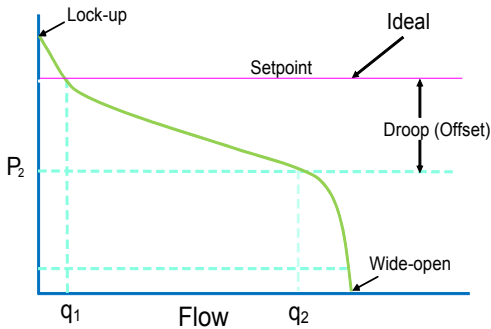


Fig. 1. Performance curve of regulator

이러한 압력오차는 레귤레이터 자체의 특성과 밀접하게 관련되어 있다. Fig. 2에 제시한 일반적인 직동식 레귤레이터의 구조를 보면 후단압력을 일정하게 유지하기 위하여 아래와 같이 3요소로 구성된다[2].

- ① 제한부(restricting device) (밸브, 오리피스)
- ② 감지부 (sensing device) (다이아프램)
- ③ 부하부 (loading device) (스프링, 기준압력)

레귤레이터는 위의 3요소의 힘의 균형을 통하여 동작하게 된다. 마찰을 무시한 이상적인 경우

를 생각하면 레귤레이터는 설정압력을 유지하면서 필요한 유량을 공급할 수 있어야 한다. 그러나 실제로는 스프링이나 다이어프램 등 부품의 고유특성 때문에 필요유량 공급시 요구압력을 만족시키지 못하게 된다.

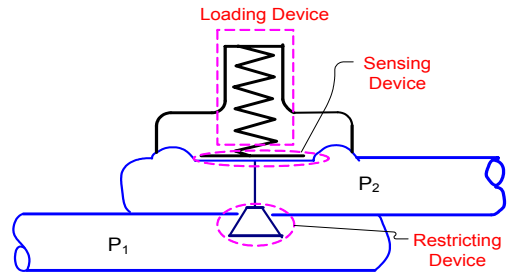


Fig. 2. Major sections of regulator

본 연구에서는 기본적인 직동식(스프링 식) 레귤레이터의 고유량 공급시 제어압력 강하특성에 대하여 비례제어방식 제어 민감도 측면에서 분석하였다. 이를 통해 레귤레이터의 압력강하에 영향을 미치는 요인과 개선방안을 제시하였다.

또한 돔압력 구동방식(dome-loaded) 및 피아롯 구동방식(pilot operated) 레귤레이터 적용시 직동식 레귤레이터보다 압력강하 특성이 개선되는 원인을 이론적으로 제시하였다.

2. 레귤레이터 후단압력 강하 고찰

2.1 가스공급시 레귤레이터 후단 압력제어 기구

Figure 3[2]에 제시한 일반적인 공압시스템을 보면 가스하중(load)부 밸브를 닫아서 유량이 공급되지 않을 경우에는, 레귤레이터의 다이어프램에 작용하는 후단압력(P_2)에 의한 힘과 스프링의 압축힘이 평형을 이루기 때문에 레귤레이터 밸브는 정지한 상태를 유지한다. 가스 하중부 밸브를 열었을 경우에는 레귤레이터 후단 쪽 가스가 수요처로 빠져나가기 때문에 후단압력 P_2 가 낮아지게 된다. P_2 를 유지하기 위해서는 레귤레이터 전단에서 충분한 가스가 공급되어야 하며 이를 위해서는 레귤레이터 밸브가 최대한 개방되어야 한다. 그러나 레귤레이터 밸브의 개방 정도

는 P_2 에 의존하는 힘 균형에 따라 정해진다.

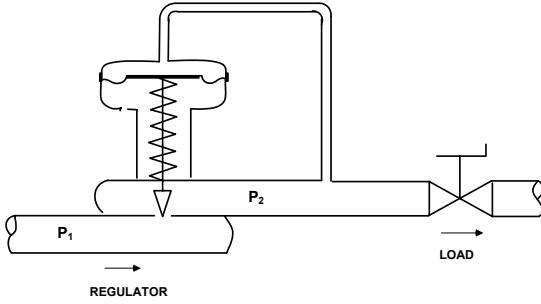


Fig. 3. Pneumatic Control System

2.2 힘 균형 변화에 따른 레귤레이터 후단 압력

수요처에 유량을 공급하기 전의 힘 균형이 Fig. 4에 제시하였다[3]. 밸브를 열리게 하는 힘으로 밸브 포핏(면적 A_s)에 가해지는 힘($F_p = (p_1 - p_2)A_s$)과 스프링에 의한 힘($F_k = k \cdot x$)이 있고, 밸브를 닫히게 하는 힘으로 다이어그램(면적 A_M)에 후단압력(P_2)에 의해 가해지는 힘($F_M = p_2 \cdot A_M$)이 있으며, 밸브를 열리게 하는 힘과 밸브를 닫히게 하는 힘은 서로 균형을 이루고 있다.

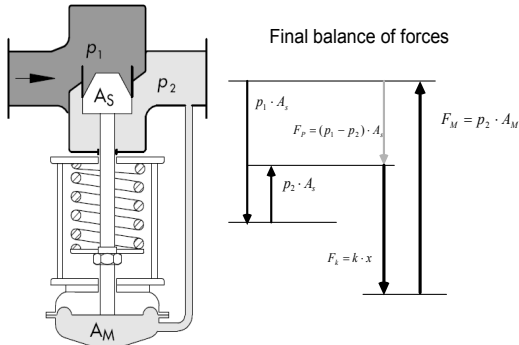


Fig. 4 Force balance without flow

만일 수요처 가스공급에 의해 P_2 가 감소한다면 다이어프램에 가해지는 힘 F_M 이 줄어들게 되며, 이로인해 힘의 균형이 깨져서 밸브가 열리게 된다. 밸브가 열릴 경우 스프링의 압축힘을 감소하며, 감소한 스프링에 의한 힘과 후단압력(P_2)에 의해 다이어프램에 작용하는 힘(F_M)이 재평형을

이루게 된다.

가스가 공급되기 전과 비교하면 설정압력보다 낮은 후단압력으로 평형에 도달하게 된다(Fig. 5). 즉 직동식 레귤레이터는 가스가 수요처로 공급이 될 경우 밸브가 열리게 되고, 이것은 설정압력보다 낮은 후단압력으로 평형에 도달하게 하는 원인이 된다. 가스가 공급되는 동안 낮아진 후단압력은 계속 유지된다.

Equilibrium with changed valve position

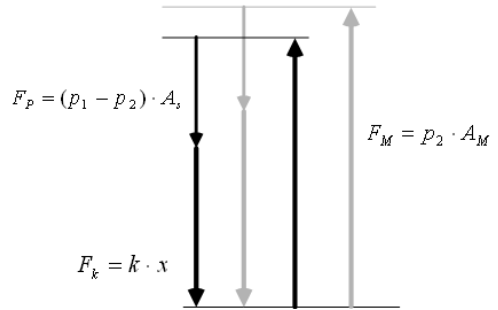


Fig. 5. Force balance variation when gas flow is initiated

2.3 밸브개도에 따른 압력 감소량 예측

Figure 6에서 레귤레이터 밸브가 닫힌 위치에서 X 만큼 이동했을 경우, 밸브를 개방시키는 힘으로서 다이어프램에 작용하는 대기압에 의한 힘($P_A A_A$), 초기 설정된 값(S_o)에 대하여 이동에 따른 감소분을 반영한 부하스프링에 의한 힘($S = S_o - k_{ref} X$), 제어(후단)압력에 의해 밸브 포핏에 작용하는 힘($P_R A_i$)등이 있으며, 밸브를 닫히게 하는 힘으로서 바이어스 스프링(bias spring)에 의한 힘($L_o + k_{lock} X$), 제어압력에 의해 다이어프램에 작용하는 힘($P_R A_A$), 유입압력에 의해 밸브 포핏에 작용하는 힘($P_s A_i$)등의 존재한다 [4]. 힘의 균형식은 (1)식과 같으며,

$$P_R = \frac{P_A A_A - P_s A_i}{A_A - A_i} + \frac{S_o - L_o}{A_A - A_i} - \frac{k_{ref} + k_{lock}}{A_A - A_i} \cdot X$$

$$-P_s A_i \quad (1)$$

차분형태로 쓰면 (2) 식과 같다.

$$\Delta P_R = -\frac{(k_{ref} + k_{lock})}{A_A - A_i} \cdot \Delta X \quad (2)$$

레귤레이터를 통한 수요처로의 공급 유량(G)은,

$$G = \frac{(\pi A_o X) P_s}{\sqrt{T_s}} \cdot \left(\frac{2\gamma}{(\gamma-1)R} \cdot \left(\left(\frac{P_R}{P_s} \right)^{2/\gamma} - \left(\frac{P_R}{P_s} \right)^{(\gamma+1)/\gamma} \right) \right)^{1/2} \quad (3)$$

로 표현되며, 따라서 ΔG 는 ΔX 에 비례한다. 여기서 A_o 는 레귤레이터 오리피스 면적이다. (2)식에서 보는바와 같이 밸브 이동거리 X 의 증가(즉 유량 G 의 증가)는 제어압력의 강하를 유발한다.

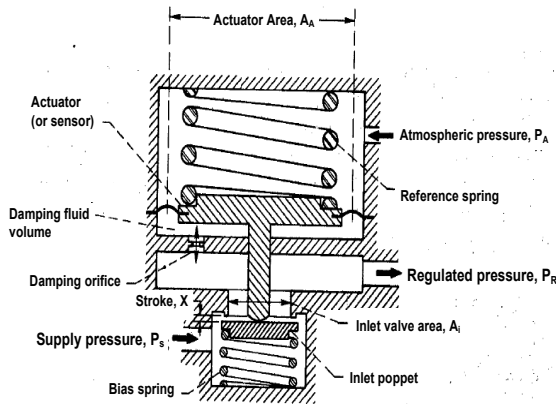


Fig. 6. Self acting regulator

3. 레귤레이터 제어 민감도 분석

압력제어 대상시스템에 있어서 수요처의 유량 하중에 따른 압력오차가 클 경우 낮은 민감도를 가지며 제어이득(gain)이 적다고 할 수 있다 [5]. 압력오차는 기본적으로 유량하중을 감당하기 위해서 밸브가 개방되어야 하고 이를 위해서는 제어압력(P_R)이 감소해야 하기 때문에 발생한 것이다. 압력오차 관계식이 의미하듯이 압력오차

(ΔP_R)는 밸브의 개방에 필요하며(ΔX) 이는 유량하중 변화량(ΔG)에 비례한다. 또한 압력오차는 유량 하중을 감당하기 위한 것이기 때문에 유량이 공급되는 한 이러한 압력오차가 계속적으로 유지되어야 한다[2].

레귤레이터를 일종의 밸브로 본다면 다른 종류의 밸브와 마찬가지로 제어압력 감소시 밸브의 개도를 늘려서 보다 많은 유량이 공급되게 하여야 한다. 자체 구동원이 있는 일반 밸브와는 달리 레귤레이터는 제어압력의 감소를 밸브의 구동원으로 활용한다. 따라서 적은량의 밸브의 구동원(제어압력 감소)으로 밸브 개도를 크게 할 수 있다면 레귤레이터의 민감도와 제어이득을 높일 수 있다.

레귤레이터의 제어 민감도(S)는 (2)식을 변형한 (4)식으로 표현할 수 있다[5]. 민감도(S) 값이 클수록 적은 압력강하량(ΔP_R)으로 큰 밸브 개방량(ΔX)을 유발할 수 있다. (4)식에서 k_d 는 다이어프램의 스프링 계수를 의미한다.

$$S = \frac{\Delta X}{\Delta P_R} = -\frac{(A_A - A_i)}{(k_s + k_d + k_{lock})} \quad (4)$$

4. 압력오차 저감방법

앞에서 언급한 바와 같이 레귤레이터의 압력 오차를 저감하기 위해서는 (4)식의 제어 민감도(S)가 커야한다. (4)식에 제시된 변수들을 살펴보면, 첫 번째로 다이어프램 면적 A_A 가 커야한다. 이것은 적은 제어압력 변화에 대해서도 다이어프램에 작용하는 압력힘과 부하부 스프링 힘의 차이를 크게 함으로서 밸브개도를 증가시킬 수 있음을 의미한다.

두 번째로 밸브 포핏 면적 A_i 가 적어야 한다. 특히 레귤레이터 입구 압력과 출구 제어압력 차이가 클 경우에는 포핏 면적에 의한 민감도 효과가 커지게 된다. 입구압력과 출구압력의 차이가 클 경우에는 포핏에 구멍을 뚫어 벨루우즈

하부에 작용하는 압력으로 포핏 힘을 상쇄한 균형화(balance) 방식 포핏이(Fig. 7) 적용되어야 한다[1]. 이 경우 (4)식에서 A_i 는 무시할 수 있다.

셋째로 부하 스프링 계수(k_s)가 적어야 한다. 스프링 계수가 적다는 것은 제어압력 변화로 인해 밸브 개도가 보다 클 수 있다는 것으로서 직접적으로 민감도를 증가시킨다. 예를 들면 스프링계수가 반으로 줄어든다면 동일한 제어압력 감소에 대하여 2배의 밸브 이동거리가 발생하게 된다. 밸브 이동거리가 크면 압력 저감량을 보충할 수 있는 유량이 즉시 공급되어 압력오차가 저감되게 된다. 제어 범위가 넓은 레귤레이터와 좁은 제어범위의 레귤레이터를 비교하면, 압력 제어범위가 넓은 경우 부하 스프링 계수가 커지므로 제어 범위가 좁은 것이 유리하다. Fig. 8에 제시한 돔 압력 구동(dome pressure loaded) 방식 레귤레이터는 다이어프램에 부하하중을 인가하는 스프링 대신에, 부하압력을 생성하여 돔에 공급하는 방식으로서, 식 (4)의 부하 스프링 계수 k_s 를 없애는 효과로 인해 민감도를 크게 향상시킬 수 있다.

이제까지 유량하중이 없는 평형상태($X=0$)에서 유량하중이 주어지 밸브의 이동이 발생한 경우 다이어프램 면적을 일정하다고 간주하였다. 그러나 실제로 다이어프램은 Fig. 9와 같이 압력이 감소할 경우(P_{Ro} 에서 P_R 로 감소) 유효면적이 늘어나는 특성이 있다(초기면적 A_A 에서 A'_A 에서 증가). 다이어프램 면적을 일정하다고 가정할 경우 제어압력에 의해 다이어프램에 가해지는 힘의 변화량은 $|(P_{Ro} - P_R) \cdot A_A|$ 가 되고 다이어프램의 면적이 늘어나는 것을 고려할 경우는 $|P_{Ro}A_A - P_R A'_A|$ 가 된다. 일반적인 레귤레이터에서 다이어프램 면적 증가를 고려할 경우 다이어프램에 가해지는 힘의 변화량은 감소하게 된다 [1]. 제어압력 감소에 의한 다이어프램에 가해지는 힘의 변화량이 클수록 밸브의 개도(ΔX)가 커지는 특성을 볼때 다이어프램의 면적 변화가 적은 것이 유리함을 알 수 있다.

앞에서 주어진 압력강하량(ΔP_R)에 대한 밸브

개방량(ΔX)으로 정의되는 민감도(S) 차원에 국한하여 고찰하였다. 레귤레이터 밸브가 개방되었을 경우 유량의 공급은 일반 제어밸브가 개방되었을 경우와 같은 특성을 보인다. 식 (3)에서 공급유량은(G)에 밸브 개도(X) 뿐 아니라 오리피스 면적 A_o 와 유입압력 P_s 에 비례한다. 따라서 오리피스 면적이 클 경우 적은 압력오차로 요구 유량을 보낼 수 있다. 그러나 레귤레이터의 경우 차단밸브와는 달리 밸브가 자체적으로 개폐를 반복하므로 오리피스 면적이 크면 진동이 일어나 시스템이 불안정해질 수 있다는 점을 고려해야 한다[2].

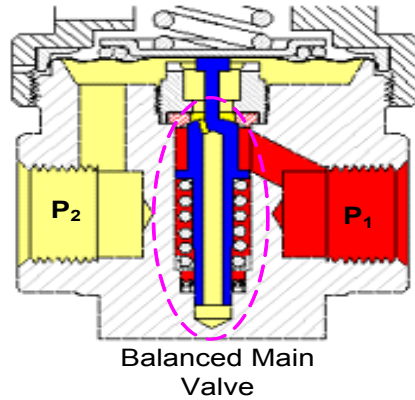


Fig. 7. Schematics of balanced main valve

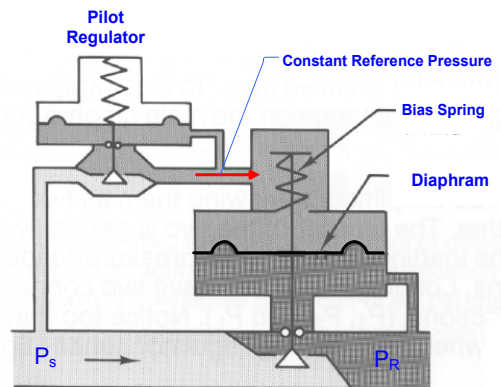


Fig. 8. Dome pressure loaded regulator

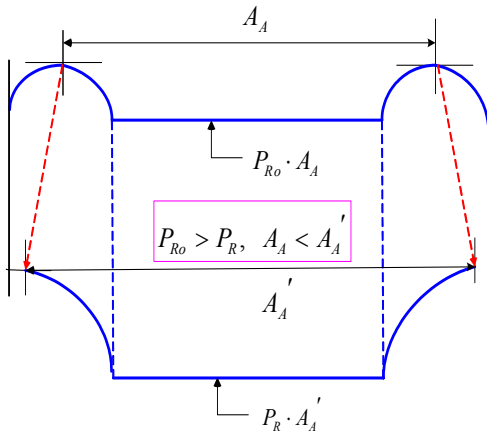


Fig. 9. Diaphragm area variation

5. 파이롯 레귤레이터

3장에서 제시한 제어 민감도를 극대화하여 압력오차를 최소화하기 위해서는 Fig. 10과 같은 파이롯(pilot) 레귤레이터가 적용되어야 한다. 파이롯 레귤레이터는 적은 제어압력(P_R)의 변화를 증폭한 부하압력(P_L)을 레귤레이터(main regulator) 다이어프램에 인가하여 레귤레이터 밸브를 개방시킴으로서 제어 민감도(S)를 크게 향상시키는 방법을 적용한다[2].

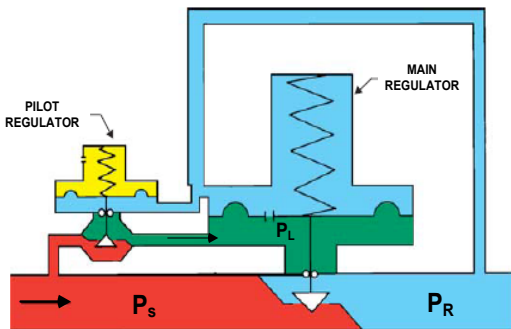


Fig. 10. Pilot operated regulator

6. 결 론

본 연구에서는 기본적인 직동식(스프링식) 레귤레이터의 특성에 따른 고유량 공급시의 제어압력 강하특성에 대하여 고찰하였다. 레귤레이터의 압력강하 특성은 제어압력 변화에 따른 레귤레이터 주밸브의 응답특성으로 설명될 수 있었다. 이를 통해 압력강하에 영향을 미치는 요인과 개선방안을 제시하였다. 또한 돔압력 구동방식(dome-loaded) 및 파이롯 구동방식(pilot operated) 레귤레이터 적용시 압력강하가 개선되는 원인을 이론적으로 제시하였다.

감 사 의 글

본 연구는 과학기술부 특정연구개발사업인 소형위성발사체(KSLV-I) 개발사업의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Iain Johnston, "Pressure Regulator Explained" Tescom Technical Training, Emerson Process Management
2. Floyd D. Jury, "Fundamentals of Gas Pressure Regulation", Technical monograph 27, Fisher Control, 1972
3. "Introduction to Self-operated Regulators", Technical Information L202 EN; SAMSON AG, 2000
4. "LIQUID LOCKET ENGINE PRESSURE REGULATORS, RELIEF VALVES, CHECK VALVES, BURST DISKS, AND EXPLOSIVE VALVES", NASA SP8080, 1973
5. Controllers and Controlled Systems Technical Information L102 EN; SAMSON AG