

## 고압가스감압시스템 최적화 설계기법

정용갑\* · 조남경\*

### Optimum Design Method for Pressure-reducing System using High-pressure Gas

Yonggahp Chung\* · Namkyung Cho\*

#### ABSTRACT

To launch rocket on launch pad, propellants and gases are charged into the rocket by remote control system. Using pneumatic pressure-reducing regulators, kinds of gases with various pressure levels are supplied into launch pad. As most of operations for launching the vehicle are remotely controlled in the launch control room, pressure pulsations due to rapidly gas supply at the upstream of regulators can make the required operating pressure range missed and cause damage to the regulators. In this paper, the optimum design methods of pressure regulators of pressure-reducing system on launch pad using high-pressure gases were investigated to solve the aforementioned problems and for stable gas supply to launch pad.

#### 초 록

로켓을 발사하기 위해서는 발사대에 로켓을 세워놓고 추진제와 고압가스 등을 충전한 다음 원격제어로 로켓을 발사하게 된다. 로켓 발사대로는 지상저장탱크에 고압으로 저장되어 있는 고압가스가 여러 종류의 압력조정기를 통과하여 운용압력으로 감압되어 공급된다. 로켓 발사시에는 발사통제실에서 원격으로 모든 운용이 이루어지기 때문에 압력조정기 전단에는 급격한 가스 공급이나 압력변동 등으로 인하여 운용압력을 벗어나거나 압력조정기가 파손되는 경우가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 고압가스가 안정적으로 감압되어 발사대로 공급되기 위한 고압가스감압시스템 최적화 설계기법을 고찰하였다.

Key Words: Pressure Regulator(압력조정기), High-pressure Gas(고압가스), Launch Complex(발사대), Pressure-reducing System(감압시스템), Liquid Rocket(액체로켓)

#### 1. 서 론

\* 한국항공우주연구원 추진제어팀  
연락처, E-mail: ygchung@kari.re.kr

액체 로켓을 발사하기 위해서는 고체 로켓에 서와는 달리 발사대 및 지원설비에서는 많은 작업들이 수행된다. 발사체와 발사대의 연결장치(Coupling Device)를 통하여 발사체로 충전되는

것은 추진제인 산화제와 연료, 추진제 탱크를 가압하기 위한 가압제 그리고 발사체 밸브 구동을 위한 고압가스 등이다. 이와 같이 발사체로 충전되는 추진제와 고압가스는 발사통제실에서 원격으로 모든 운용이 이루어지며 안전을 위하여 추진제가 발사체로 충전이 시작되기 이전에 모든 인원은 발사대에서 철수하게 된다. 발사가 취소되거나 발사 종료 작업이 완료되어 발사대 접근이 허용되어야만 작업 인원은 발사대에 접근할 수 있다. 발사를 위하여 사용되는 고압가스 종류로는 발사대 연결장치 운용을 위한 가스와 발사체 공압밸브 구동용 고압가스, 추진제 탱크 가압용 고압가스, 제어용 고압가스, 지상설비시스템 구동용 고압가스 등이 있다. 이러한 고압가스를 운용 압력으로 감압하는 감압시스템 설계에 있어서 가장 중요한 역할을 하는 구성품은 압력조정기라고 볼 수 있다. 고압가스 감압시스템 설계시 경제성과 성능, 복잡성 등을 고려하지 않고 무조건 고가의 압력조정기만을 사용하여 시스템을 설계할 수도 있으나 이와 같은 방법으로 설계하는 것은 효율적이지 않다.

본 논문에서는 압력조정기를 포함한 감압시스템 설계에 있어서 성능과 복잡성, 경제성 등 여러 측면을 고려하여 로켓 발사대와 지상지원설비 설계를 위한 고압가스 감압시스템 최적화 설계 기법에 대하여 고찰하였다. 로켓 발사대 전체에는 여러 종류의 시스템이 복합적으로 운용되고 있으므로 본 논문에서 언급되는 내용은 고압가스 공급시스템에 대하여 국한된다.

## 2. 압력조정기 및 감압시스템 운용압력

### 2.1 압력조정기

압력조정기(Regulator)는 고압으로 공급되는 가스를 운용 압력으로 감압하여 사용자에게 안정적으로 공급하는 것으로 압력조정기에서 압력을 제어하는 기준에 따라 직동식(Direct-acting)과 돔부하식(Dome-loaded), 파이롯식(Piloted)으로 구분된다[1]. Figure 1은 압력조정기에 대한 제어특성과 제어오차를 나타낸 것이다. 일반적으로

로 직동식 압력조정기는 파이롯식에 비하여 유량과 압력 변동성이 작은 경우 사용되며 제어오차가 다소 큰 것이 단점이지만 구조가 덜 복잡하고 가격이 저렴하여 여러 분야에서 널리 사용되고 있다. 반면 파이롯식 압력조정기는 직동식에 비하여 구조가 복잡하고 고가이지만 제어오차가 작은 것이 특징이다. 또한 Figure 2는 압력조정기에서 유량 증가에 따른 감압 제어 특성을 나타낸 것으로 통과 유량이 증가함에 따라 제어오차가 증가하여 감압제어 압력이 점점 강하하는 것을 보여주는 선도이다.

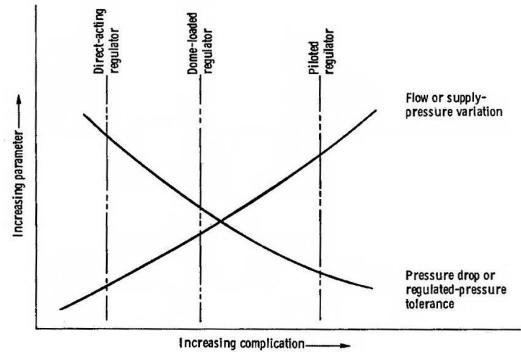


Fig. 1 Control Factors in Regulator

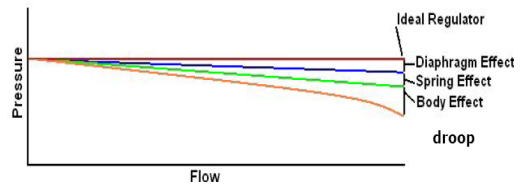


Fig. 2 Regulator Flow Characteristics

### 2.2 감압시스템 운용 압력

지상저장용기에 380~400 bar로 저장된 고압가스는 사용자인 발사대와 지상지원설비의 운용압력으로 고압가스 감압시스템에서 감압되어 공급된다. 이와 같이 각 시스템에서 요구되는 사용압력 종류가 다양하기 때문에 고압가스 감압시스템에서는 0.83 bar의 저압에서부터 220 bar의 고압에 이르기까지 넓은 압력 범위로 감압되어 공급되어야 한다. Table 1은 발사대에서 사용되는 압력 중에서 일부 조건을 나타낸 것이다.

Table 1. Operating Pressures in Launch Complex

No.	Operating Pressure (bar)	No.	Operating Pressure (bar)
1	0.83	5	30
2	5	6	47
3	8	7	100
4	10	8	220

또한 고압가스 공급은 압력조정기 전후단의 공압구동 자동밸브를 설정된 알고리즘 절차에 따라 원격으로 제어되어야 할 경우에는 가스가 공급되기 전에 수동으로 압력조정기를 운용압력으로 설정해 두어야 한다.

### 2.3 최적화 설계를 위한 주요 변수

고압가스 감압시스템을 최적화 설계하기 위해서는 성능과 복잡성, 경제성, 원격제어 및 운용성 등 여러 가지 변수가 있을 수 있다. 본 논문에서는 이러한 변수들 중에서 고압가스 감압시스템 구축시 시행착오를 겪었던 문제점들을 고려할 때, 고압가스 감압시스템 설계시 다음의 주요 변수들을 고려하여 설계해야 한다.

- (1) 압력조정기 자체 성능 (유량, 압력, 제어오차 등)
- (2) 원격제어로 인한 유입부의 급격한 압력 상승
- (3) 고압가스 공급원으로부터의 공급압력 변동
- (4) 운용압력이 공급원 대비 현저히 낮을 경우
- (5) 압력조정기의 허용 누설 안정화 방안

## 3. 최적화 설계 기법 및 방안

### 3.1 압력조정기 선정

가스 공급원을 고압에서 저압으로 감압하는 경우에 사용되는 압력조정기를 선정하기 위해서는 유량 및 감압 압력 등의 사용 조건을 고려해야 한다. 고유량이 필요한 시스템에 저유량 압력조정기를 설치할 경우 설정 압력보다 제어 압력이 더 낮아져 제어오차가 증가하게 되므로 필요

유량보다 큰 유량계수의 압력조정기를 선정해야 한다. 또한 감압되는 제어 압력의 범위를 고려하여 압력조정기를 선정할 경우 제어오차를 감소시킬 수 있다. 그리고 압력조정기의 밸브/시트부에서는 작은 파티클에 의해서도 손상이되어 누설이 발생할 수 있으므로 필터가 장착된 압력조정기를 선정하거나 압력조정기 전단에 필터를 설치하는 것이 바람직하다.

### 3.2 원격제어로 인한 수격방지시스템

가스 공급원이 고압인 유공압시스템에 압력조정기가 설치된 경우 압력조정기 전단의 공압밸브를 원격제어로 개방시(Fig. 3(a)) 수격현상으로 인하여 압력조정기에 고온/고압의 가스가 유입되게 되어 밸브의 시트부가 파손된다. 이와 같은 현상을 방지하기 위해서는 가스 공급시 공압밸브와 압력조정기 사이 최대 압력 도달시간이 약 1~3초가 되도록 압력 상승 시간을 지연시키는 바이패스 라인을 설치하게 되면 압력조정기 파손을 방지할 수 있게 된다(Fig. 3(b)).

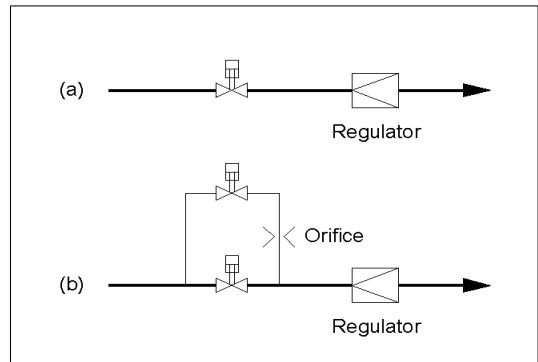


Fig. 3 Bypass Line Method

### 3.3 가스공급원 압력 변동시 제어오차 감소기법

고압가스를 일정 저장용기에 저장한 후 이를 감압하여 사용하는 유공압시스템에서는 가스를 사용함에 따라 저장용기의 가스 압력은 점점 감소하게 된다. 이와 같은 경우 압력조정기를 한 개 설치할 경우 가스공급원의 압력감소로 인한 제어오차가 최종 제어오차가 되어 시스템 요구 조건을 만족시키지 못하게 되는 경우가 있다.

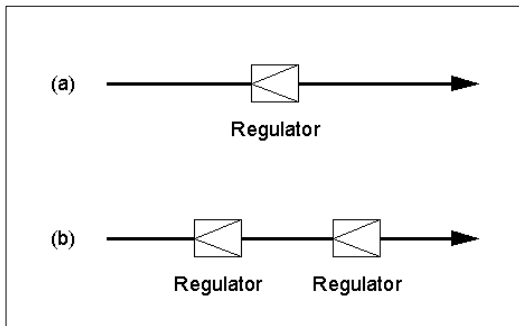


Fig. 4 2nd Stage Pressure Reducing

이와 같이 가스 공급원 압력 감소로 인하여 발생하는 제어오차를 감소시키기 위해서는 Fig. 4의 (a) 유공압시스템에 Fig. 4의 (b)에서와 같이 압력조정기를 하나 더 설치하게 되면 두번째 압력조정기 전단의 압력 변화가 작아져서 최종 제어오차는 거의 발생하지 않게 되어 시스템 요구 조건을 만족시킬 수 있게 된다.

### 3.4 가스공급원 대비 미압의 제어압력 공급

Table 1에서와 같이 운용압력이 0.83 bar 정도로 가스 공급원에 비하여 현저히 낮을 경우, 정적인 상태에서는 성능을 만족시키는 압력조정기가 있을 수 있으나 실제 원격제어시스템에 적용할 경우에는 제어압력이 가스공급원 대비 미압이므로 가스공급이 원활하지 않아 성능을 만족시키지 못하였다. 이는 3.3항에서와 같은 방법으로 2단 감압시스템을 도입하여 해결할 수 있다.

### 3.5 압력조정기 고유누설 및 미세누설 안정화

일반적으로 밸브에서는 고유 누설이 존재하게 되며 이를 허용 누설이라고도 한다. 압력조정기에서도 이러한 고유 누설이 존재하며 보통의 경우 유공압시스템 자체의 고유누설과 상쇄가 되어 문제가 되지는 않지만 고유누설이 시스템 자체의 고유누설을 초과할 경우 또는 고유누설을 초과하여 누설이 발생될 경우 시스템에 문제가 될 수 있다. 특히 고유량 압력조정기에서는 밸브

시트부가 크기 때문에 배관시스템 자체의 영향이거나 압력조정기 밸브시트부의 미세한 손상으로도 고유 누설을 초과할 수 있다. 이와 같은 경우 압력조정기의 시트를 교체하거나 압력조정기 전체를 교체하여도 이러한 문제가 해결되지 않을 경우가 발생하였지만 그 누설량이 시스템의 성능상 허용되는 양일 때에는 Fig. 5의 (b)에서와 같이 압력조정기 후단에 고유누설량을 벤트하는 오리피스스를 설치하여 허용 누설을 안정화시킬 수 있다.

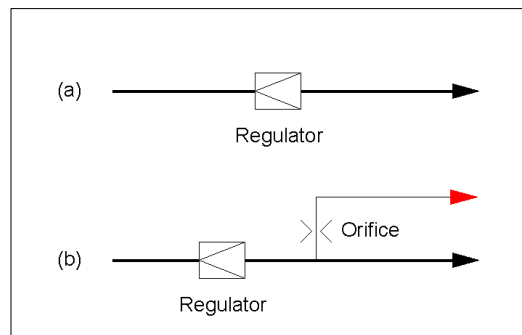


Fig. 6 Orifice Venting Method

## 4. 결 론

본 연구에서는 발사대의 고압가스공급시스템 개발시 경험을 바탕으로 고압가스 감압시스템 설계시 발생할 수 있는 주요 변수들에 대한 설계 방안 및 최적화 기법에 대하여 고찰하였다.

## 참 고 문 헌

1. Anon., "Liquid Rocket Pressure Regulators, Relief Valves, Check Valves, Burst Disks, and Explosive Valves," NASA SP-8080, 1973