

# Control Valve Handbook 5.11

## 글로브밸브 액추에이터 사이징

### 1 개요

액추에이터 사이징은 밸브를 작동시키는 데 필요한 힘과 액추에이터가 실제로 공급할 수 있는 힘을 비교하는 과정이다.

글로브밸브는 축 방향의 **추력(Thrust)**을 기준으로 선정한다. 회전식 밸브는 축 토크를 기준으로 선정한다.

$$F_{\text{actuator,available}}(x) \geq F_{\text{valve,required}}(x)$$

위 조건을 개방, 폐쇄, 전 스트로크 및 Fail-Safe 조건에서 모두 만족해야 한다.

여기서 중요한 점은 다음과 같다.

- 밸브 측에는 공정압력, 시트, 패킹 및 특수 구조에 의한 힘이 있다.
- 액추에이터 측에는 공압력과 스프링력이 있다.
- 스프링력은 밸브 측의 A, B, C, D에 포함하지 않는다.
- 스프링력은 액추에이터의 순 가용 추력을 계산할 때 반영한다.

### 2 밸브 측 요구 힘

Control Valve Handbook 5.11은 글로브밸브의 요구 힘을 다음 네 항목으로 구분한다.

$$F_{\text{valve,required}} = F_{\text{unbalance}} + F_{\text{seat}} + F_{\text{packing}} + F_{\text{additional}}$$

| 구분 | 명칭                         | 의미                                    |
|----|----------------------------|---------------------------------------|
| A  | Unbalance Force            | 공정압력이 플러그에 가하는 순 불평형력                 |
| B  | Force to Provide Seat Load | 요구 누설등급을 확보하기 위해 최종적으로 형성해야 하는 시트 압착력 |
| C  | Packing Friction           | 밸브 스템의 이동을 방해하는 패킹의 정지 및 운동 마찰력       |
| D  | Additional Forces          | 벨로즈 강성, 특수 쉴 마찰 및 비표준 구조에서 발생하는 추가 힘  |

A, B, C, D는 힘의 발생 원인과 성격이 서로 다르다.

- A, C, D는 작동 방향에 따라 액추에이터를 방해하거나 도울 수 있다.
- B는 극복해야 하는 외부 저항력이 아니라 최종적으로 확보해야 하는 압착력이다.
- 네 힘이 전 스트로크에서 항상 동시에 같은 크기로 작용하는 것은 아니다.

### 3 A: 불평형력

불평형력은 플러그 양측의 순 압력차가 순 불평형 면적에 작용하여 발생한다.

$$F_{\text{unbalance}} = \Delta P_{\text{net}} A_{\text{unbalance}}$$

여기서,

- $\Delta P_{\text{net}}$ : 플러그 양측의 순 압력차
  - $A_{\text{unbalance}}$ : 밸브 구조에 따른 순 불평형 면적
- 미국 단위계에서는 다음과 같다.

$$F[\text{lbf}] = \Delta P[\text{psi}] A[\text{in}^2]$$

SI 단위계에서는 다음과 같다.

$$F[\text{N}] = \Delta P[\text{Pa}] A[\text{m}^2]$$

핸드북의 단순 사이징에서는 주로 차단 상태의 압력차를 사용한다. 다만 실제 이동 중 유체력은 개도, 유량, 트림 및 유동 방향에 따라 변할 수 있다.

불평형력이 폐쇄를 방해하면 폐쇄 요구 추력에 더하고, 폐쇄를 도우면 뺀다.

$$F_{\text{close}} = F_{\text{seat}} + F_{\text{packing}} + F_{\text{additional}} \pm F_{\text{unbalance}}$$

### 4 B: 시트 하중

시트 하중은 시트의 무게가 아니다.

시트 하중은 플러그를 시트에 압착하여 요구 누설등급을 확보하기 위해 최종적으로 남겨야 하는 접촉력이다.

원형 포트에서는 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$F_{\text{seat}} = L_{\text{seat}} C_{\text{port}} = L_{\text{seat}} \pi d_{\text{port}}$$

여기서,

- $L_{\text{seat}}$ : 포트 원주 단위 길이당 요구 시트 하중
- $C_{\text{port}}$ : 포트 원주
- $d_{\text{port}}$ : 포트 지름

플러그가 시트에서 떨어져 있는 동안에는 다음과 같다.

$$F_{\text{seat}} = 0$$

플러그가 시트에 접촉한 이후 액추에이터 힘이 계속 증가하면, 위치는 거의 변하지 않고 추가 힘이 시트 하중으로 전환된다.

### 5 C: 패킹 마찰력

패킹 마찰력은 다음 요소의 영향을 받는다.

- 스템 지름
- 패킹 재질
- 패킹 압축량
- 공정압력과 온도
- Live-loaded packing 여부

스스템이 정지해 있더라도 움직이려는 순간에는 정지마찰이 발생한다. 이동 중에는 운동마찰이 발생한다.

따라서 액추에이터는 다음 두 조건을 모두 고려해야 한다.

$$F_{\text{breakaway}} \geq F_{\text{static friction}}$$

$$F_{\text{travel}} \geq F_{\text{dynamic friction}}$$

패킹 마찰력은 이동 방향의 반대 방향으로 작용하므로 개방과 폐쇄 계산에서 각각 방향을 바꾸어 적용한다.

## 6 D: 추가 힘

추가 힘에는 다음 항목이 포함될 수 있다.

- Bellows seal의 축 방향 강성
- 특수 썰의 마찰
- 비표준 트림의 기계적 저항
- 스템 및 플러그 자중
- 기타 제조사 지정 하중

이 값은 일반식보다 제조사의 제품별 자료를 사용하는 것이 원칙이다.

## 7 액추에이터 축 힘: 공압력과 스프링력

A, B, C, D는 밸브 측에서 요구되는 힘이다. 액추에이터 스프링은 액추에이터 내부에서 힘을 생성하거나 공압력에 저항한다.

다이어프램에 의한 공압력은 다음과 같다.

$$F_{\text{air}}(x) = P_{\text{loading}}(x)A_{\text{effective}}(x)$$

스프링 힘은 초기 압축력과 스트로크에 따라 증가한다.

$$F_{\text{spring}}(x) = F_0 + kx$$

여기서,

- $F_0$ : 스프링 초기 압축력
- $k$ : 스프링 상수
- $x$ : 액추에이터 스트로크

다이어프램 액추에이터의 순 출력 추력은 공압력과 반대 방향 스프링력의 차이이다.

$$F_{\text{actuator,net}}(x) = F_{\text{air}}(x) - F_{\text{spring}}(x)$$

단, 위 식은 공압력이 작동 방향이고 스프링력이 반대 방향인 경우이다. 요구 작동 방향이 스프링 방향이라면 부호가 반대가 된다.

## 8 Air-to-Open, Spring-to-Close

이 구성에서는 공압력이 밸브를 열고, 스프링력이 밸브를 닫는다.

### 개방 가용 추력

$$F_{\text{available,open}} = F_{\text{air}} - F_{\text{spring}}$$

따라서 다음 조건을 만족해야 한다.

$$F_{\text{air}} - F_{\text{spring}} \geq F_{\text{required,open}}$$

### 폐쇄 가용 추력

공기압을 낮추면 스프링이 밸브를 닫는다.

$$F_{\text{available,close}} = F_{\text{spring}} - F_{\text{air}}$$

공기 상실 시에는  $F_{\text{air}} = 0$  이므로 다음과 같다.

$$F_{\text{available,fail-close}} = F_{\text{spring}}$$

따라서 Fail-Close 조건에서는 스프링력이 폐쇄 저항을 극복한 후에도 요구 시트 하중을 남겨야 한다.

$$F_{\text{spring}} \geq F_{\text{packing}} + F_{\text{additional}} + F_{\text{seat}} \pm F_{\text{unbalance}}$$

## 9 Air-to-Close, Spring-to-Open

이 구성에서는 공압력이 밸브를 닫고, 스프링력이 밸브를 연다.

### 폐쇄 가용 추력

$$F_{\text{available,close}} = F_{\text{air}} - F_{\text{spring}}$$

따라서 다음 조건을 만족해야 한다.

$$F_{\text{air}} - F_{\text{spring}} \geq F_{\text{required,close}}$$

### 개방 가용 추력

공기압을 낮추면 스프링이 밸브를 연다.

$$F_{\text{available,open}} = F_{\text{spring}} - F_{\text{air}}$$

공기 상실 시에는 다음과 같다.

$$F_{\text{available, fail-open}} = F_{\text{spring}}$$

## 10 Bench Set과 스프링 힘

Bench Set은 무부하 조건에서 설정한 액추에이터 스프링의 초기 압축과 정격 스트로크 압력 범위이다. 무부하 상태에서는 대략 다음 관계가 성립한다.

$$P_{\text{bench}}(x)A_{\text{effective}}(x) \approx F_{\text{spring}}(x)$$

Bench Set 하한은 일반적으로 최초 이동에 필요한 스프링 초기 압축력과 관련된다.

Bench Set 상한은 정격 스트로크에서 증가한 스프링 압축력과 관련된다.

Bench Set은 밸브 측 요구 힘이 아니다. Bench Set은 액추에이터 내부 스프링의 힘을 압력 범위로 표현한 액추에이터 특성이다.

최종 시트 하중은 단순히 인가 공기압 전체가 아니다.

$$F_{\text{seat}} = F_{\text{actuator, net at seat}} - F_{\text{other valve loads}}$$

즉, 최종 액추에이터 순 추력에서 불평형력, 패킹 저항 및 추가 하중을 제외한 나머지가 시트 하중이 된다.

## 11 개방 및 폐쇄 요구 추력

### 개방 요구 추력

개방 시에는 시트 하중을 새로 생성하지 않으므로 일반적인 계산식은 다음과 같다.

$$F_{\text{required, open}} = F_{\text{process, open}} + F_{\text{packing}} + F_{\text{additional}}$$

여기서 공정력이 개방을 돕는다면 해당 힘은 뺀다.

### 최종 폐쇄 요구 추력

불평형력이 폐쇄를 방해하는 경우에는 다음과 같다.

$$F_{\text{required, close}} = F_{\text{unbalance}} + F_{\text{packing}} + F_{\text{additional}} + F_{\text{seat}}$$

불평형력이 폐쇄를 돕는 경우에는 다음과 같다.

$$F_{\text{required, close}} = F_{\text{packing}} + F_{\text{additional}} + F_{\text{seat}} - F_{\text{unbalance}}$$

시트 하중은 외부 저항력이 아니라, 다른 하중과 평형을 이룬 뒤에도 남겨야 하는 힘이다.

## 12 개도에 따른 힘의 변화

밸브의 요구 힘은 스트로크 전체에서 일정하지 않다.

Valve Signature에서 시트 접촉 후 스트로크가 거의 변하지 않는데 액추에이터 압력 또는 계산 힘이 계속 증가하는 구간은 추가 힘이 시트 하중으로 변환되는 구간으로 해석할 수 있다.

| 운전 구간    | 주요 힘                              |
|----------|-----------------------------------|
| 시트 이탈 직전 | 정지 패킹 마찰, 공정력, 스프링 또는 공압력         |
| 이동 구간    | 개도별 공정 유체력, 운동 패킹 마찰, 스프링력        |
| 시트 접근    | 변화하는 유체력, 패킹 마찰, 스프링력             |
| 시트 최초 접촉 | 위치 변화가 감소하고 시트 하중이 발생하기 시작함       |
| 최종 폐쇄    | 차단 불평형력과 기타 하중을 상쇄한 후 요구 시트 하중 확보 |
| 공기 상실    | Fail-Safe 방향의 스프링력으로 요구 안전 위치 확보  |

### 13 최종 액추에이터 선정 조건

개방과 폐쇄 요구 추력을 각각 계산한다.

$$F_{\text{required,open}}$$

$$F_{\text{required,close}}$$

그리고 전 스트로크와 Fail-Safe 조건도 함께 검토한다.

$$F_{\text{required,max}} = \max [F_{\text{required,open}}, F_{\text{required,close}}, F_{\text{required,travel}}, F_{\text{required,fail-safe}}]$$

그러나 단순히 최대 요구값만 구해서는 충분하지 않다. 액추에이터의 가용 추력도 스트로크에 따라 변하기 때문이다.

따라서 최종 검증식은 다음과 같다.

$$F_{\text{actuator,available}}(x) \geq F_{\text{valve,required}}(x) \quad \forall x$$

선정 시 다음 항목을 확인한다.

1. 최대 차단 차압과 불평형 면적을 결정한다.
2. 개방 및 폐쇄 방향의 불평형력 부호를 결정한다.
3. 요구 누설등급에 따른 시트 하중을 계산한다.
4. 제조사 자료에서 패킹 마찰력을 확인한다.
5. 벨로즈와 특수 구조의 추가 힘을 반영한다.
6. 개방 및 폐쇄 요구 추력을 각각 계산한다.
7. 액추에이터의 공압력과 스프링력 곡선을 확인한다.
8. 최소 공급압력에서 정상 작동 가능 여부를 검증한다.
9. 공기 상실 시 Fail-Open 또는 Fail-Close를 검증한다.
10. 최대 공급압력에서 스템과 트림의 허용하중을 초과하지 않는지 확인한다.

## 14 결론

5.11의 A, B, C, D는 밸브 측의 요구 힘이다. 스프링력은 A, B, C, D에 추가하는 다섯 번째 밸브 하중이 아니다.

스프링력은 공압력과 함께 액추에이터 측의 순 가용 추력을 결정한다.

따라서 밸브 요구 힘과 액추에이터 가용 힘을 분리하여 계산하고, 개방, 폐쇄, 전 스트로크 및 Fail-Safe 조건에서 가용 추력이 요구 추력 이상인지 검증해야 한다.

$$\underbrace{F_{\text{unbalance}} + F_{\text{seat}} + F_{\text{packing}} + F_{\text{additional}}}_{\text{밸브 측 요구 힘}} \iff \underbrace{F_{\text{air}} \pm F_{\text{spring}}}_{\text{액추에이터 측 가용 힘}}$$

## 참고자료

- Emerson, *Control Valve Handbook*, Chapter 3, 5.11, 8.5.5.
- Philip L. Skousen, *Valve Handbook*, 3rd Edition, Chapter 8.