

Control Valve Handbook Chapter 8

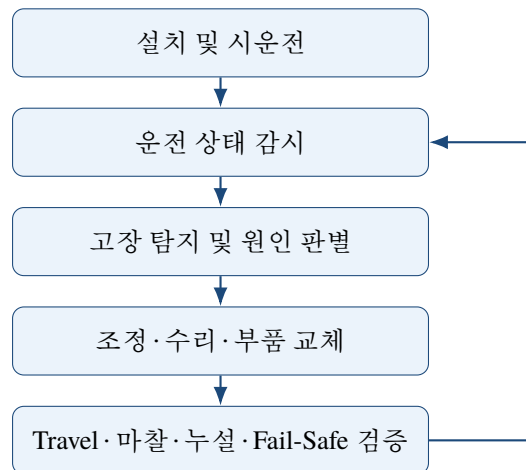
제어밸브 설치·진단·액추에이터 유지보수

1 기술사 대비 핵심 범위

Chapter 8의 핵심은 밸브를 고장 후 분해하는 것이 아니다.

올바른 설치로 초기 결함을 방지하고, 운전 중 상태를 진단하며, 실제 열화 상태에 따라 정비한 후 설계 성능과 Fail-Safe 기능이 회복되었는지를 검증하는 것이다.

올바른 설치 → 상태 감시 → 고장 진단 → 정비 → 성능 검증



시험 대비 핵심 절은 다음과 같다.

절	핵심 주제	기술사 답안 관점
8.2	올바른 설치	청결, 유동방향, 배관응력, 계장공기, 시운전
8.3	유지보수 방식	반응형·예방형·예측형 유지보수 비교
8.3.4	제어밸브 진단	공기 누설, 공급압력, Travel 편차, 마찰 추세
8.5.5	Bench Set	스프링 초기 압축, 순 추력, 시트 하중, Fail-Safe
8.5.6	Valve Travel	Undertravel, Overtravel, 유량 및 차단성능
정비 후	Validation	기준 상태와 비교하여 성능복원 확인

2 올바른 설치와 시운전

제어밸브 설치 불량은 단순한 기계적 문제가 아니다. 밸브의 마찰과 요구 추력을 증가시켜 제어성능과 Fail-Safe 신뢰성을 저하시킨다.

$$F_{\text{margin}} = F_{\text{actuator,available}} - F_{\text{valve,required}}$$

여기서,

- $F_{\text{actuator,available}}$: 해당 스트로크에서 액추에이터가 공급할 수 있는 추력
- $F_{\text{valve,required}}$: 공정력, 패킹 마찰 및 기타 저항을 극복하는 데 필요한 추력

배관 정렬 불량이나 본체 변형이 발생하면 추가 기계저항이 증가한다.

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

따라서,

$$F_{\text{mechanical}} \uparrow \Rightarrow F_{\text{margin}} \downarrow$$

가 되어 응답 지연, Stick-Slip, Travel 편차 및 Fail-Safe 실패가 발생할 수 있다.

2.1 설치 전 확인

1. 제조사 사용설명서와 안전 주의사항을 확인한다.
2. 명판의 압력등급, 온도, 재질 및 작동방향을 확인한다.
3. 운송 중 본체, 플랜지, 액추에이터 및 포지셔너 손상을 확인한다.
4. 배관의 스케일, 금속편 및 용접 슬래그를 제거한다.
5. 본체 화살표와 설계 유동방향을 일치시킨다.

배관 이물질은 시트면을 손상시키고, 플러그·볼·디스크의 운동을 방해하여 차단 누설과 고착을 일으킬 수 있다.

2.2 배관 및 계장공기

- 플랜지를 볼트로 강제로 끌어맞추지 않는다.
- 플랜지 볼트는 대각선 순서로 단계적으로 체결한다.
- 대형 액추에이터는 배관과 별도로 지지한다.
- 계장공기 튜브는 짧고 충분한 지름으로 구성한다.
- 필터·레귤레이터와 최소 공급압력을 확인한다.
- Flushing과 수압시험 시 정상 트림의 손상 가능성을 검토한다.

2.3 시운전 확인

- 입력신호와 실제 Travel의 Zero 및 Span
- 정격 전 스트로크
- 개방 및 폐쇄 응답
- 패킹 외부누설

- 시트 차단성능
- 공기 상실 시 Fail-Open 또는 Fail-Close

3 유지보수 방식의 발전

3.1 반응형 유지보수

고장 발생 → 수리 또는 교체

초기 비용은 낮지만 돌발정지와 긴급정비 위험이 크다.

3.2 예방정비

시간 또는 주기 도달 → 일괄 분해·점검

고장 전에 정비할 수 있지만, 정상 밸브를 불필요하게 분해하고 실제 열화 밸브는 정비주기까지 방치할 수 있다.

3.3 예측정비

상태 측정 → 열화 추세 분석 → 필요 설비만 계획정비

중요 제어밸브에는 스마트 포지셔너와 비침습 진단을 이용한 예측정비가 적합하다.

항목	반응형	예방형	예측형
정비시점	고장 후	일정 주기	상태 악화 시
주요 장점	초기비용이 낮음	고장 가능성 감소	불필요한 정비 감소
주요 문제	돌발정지	과잉정비	진단기술 필요
적용 대상	비중요 설비	일반 설비	중요 제어밸브

4 진단 기반 유지보수 페루프

전통적인 유지보수 프로세스는 다음 네 단계로 구성된다.

Fault Detection → Fault Discrimination → Process Recovery → Validation

1. **Fault Detection:** 운전 중 이상 발생 여부를 탐지한다.
2. **Fault Discrimination:** 마찰, 누설, 공급압력, 포지셔너 또는 트림 문제를 구분한다.
3. **Process Recovery:** 원인에 따라 조정, 세정, 수리 또는 부품 교체를 수행한다.
4. **Validation:** 수리 후 성능을 초기 기준 또는 직전 기준 상태와 비교한다.

검증이 완료되면 다시 운전 중 감시단계로 돌아간다.

5 스마트 제어밸브 진단

5.1 계장공기 누설

공기질량 유량 진단은 다음 누설을 검출하는 데 사용한다.

- 액추에이터 튜브와 피팅
- 다이어프램
- 피스톤 씰과 O-ring
- 디지털 밸브 컨트롤러 내부

공기 사용량이 기준값보다 증가하면 다음과 같이 판단한다.

$$\dot{m}_{\text{air,current}} > \dot{m}_{\text{air,baseline}} \Rightarrow \text{누설 또는 씰 열화 가능}$$

5.2 공급압력 진단

정지 상태의 공급압력과 밸브 작동 중 공급압력을 비교한다.

$$\Delta P_{\text{droop}} = P_{\text{supply,static}} - P_{\text{supply,dynamic}}$$

ΔP_{droop} 가 증가하면 다음을 점검한다.

- 공급 튜브의 지름과 길이
- 필터·레귤레이터 막힘
- 공기 공급용량 부족
- 액추에이터 또는 부스터의 과도한 공기소비

액추에이터 공압력은 다음과 같다.

$$F_{\text{air}} = P_{\text{actuator}} A_e$$

따라서 공급압력이 저하되면 액추에이터 가용 추력도 감소한다.

5.3 Travel Deviation

명령 위치와 실제 위치의 차이는 다음과 같다.

$$e_x(t) = x_{\text{command}}(t) - x_{\text{actual}}(t)$$

정상상태에서는:

$$|e_x(t)| \leq e_{\text{allow}}$$

이어야 한다.

Travel Deviation 증가는 다음 문제를 나타낼 수 있다.

- 패킹 마찰 또는 밸브 고착

- 공급압력 부족
- 액추에이터 공기 누설
- 포지셔너 교정 이탈
- 공정 불평형력 증가
- 트림 손상

5.4 마찰 및 마찰 추세

Handbook은 운전 중 진단으로 밸브 어셈블리의 마찰과 Deadband를 측정하고 그 변화를 추세 관리하도록 설명한다.

다음 수식은 이 진단 원리를 설명하기 위한 준정적 공학적 근사식이며, Handbook에 직접 제시된 계산식은 아니다.

동일 위치에서 마찰을 제외한 기준힘을 $F_0(x)$ 라 하고, 마찰력의 크기를 $F_{\text{friction}}(x)$ 라 하면:

$$F_{\text{open}}(x) = F_0(x) + F_{\text{friction}}(x)$$

$$F_{\text{close}}(x) = F_0(x) - F_{\text{friction}}(x)$$

따라서:

$$F_{\text{friction}}(x) \approx \frac{|F_{\text{open}}(x) - F_{\text{close}}(x)|}{2}$$

두 곡선의 평균은 마찰을 제외한 기준하중을 나타낸다.

$$F_0(x) \approx \frac{F_{\text{open}}(x) + F_{\text{close}}(x)}{2}$$

압력 Signature를 사용할 경우:

$$F_{\text{friction}}(x) \approx \frac{A_e(x)}{2} |P_{\text{open}}(x) - P_{\text{close}}(x)|$$

마찰 근사식은 동일 Travel, 동일 공정조건, 저속 준정적 시험, 시트 비접촉 조건에서 사용한다.
방향 전환점, Seat Contact 구간, 큰 차압 변화 및 고속 Stroke 구간에서는 공정력·관성·Deadband가 함께 포함될 수 있다.

단일 마찰값보다 변화 추세가 중요하다.

$$\frac{dF_{\text{friction}}}{dt} > 0$$

이면 패킹 과조임, 패킹 열화, 스템 손상, 가이드 마찰 또는 정렬 불량을 점검한다.

6 Bench Set과 액추에이터 순 추력

Bench Set은 스프링 조절기를 통해 액추에이터 스프링에 부여하는 초기 압축이다.

스프링 힘은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

다이어프램 또는 피스톤에 의한 공압력은:

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

공압력이 스프링에 반대하여 작동하는 경우 순 가용 추력은:

$$F_{\text{net}}(x) = P_{\text{loading}}(x)A_e(x) - (F_{\text{preload}} + kx)$$

Bench Set을 등가 압력으로 표현하면:

$$P_{\text{spring}}(x) = \frac{F_{\text{preload}} + kx}{A_e(x)}$$

따라서:

$$F_{\text{net}}(x) = A_e(x) [P_{\text{loading}}(x) - P_{\text{spring}}(x)]$$

6.1 시트 하중

최종 시트 하중은 액추에이터 순 추력 전체가 아니다.

다른 밸브 하중을 상쇄한 후 남는 힘이다.

$$F_{\text{seat,available}} = F_{\text{actuator,net}} - F_{\text{unbalance,resist}} - F_{\text{packing}} - F_{\text{additional}}$$

Bench Set 초기 압축이 지나치게 작으면:

- Fail-Safe 힘 부족
- 시트 하중 부족
- 차단 누설 증가

Bench Set 초기 압축이 지나치게 크면:

- 작동 시작압력 증가
- 공압 추력 여유 감소
- 정격 Travel 미달
- 응답성 저하

6.2 Fail-Close 검증

공기 상실 시 스프링만으로 밸브를 닫아야 한다면:

$$F_{\text{spring,fail}} \geq F_{\text{unbalance,resist}} + F_{\text{packing}} + F_{\text{additional}} + F_{\text{seat,min}}$$

불평형력이 폐쇄를 돕는 경우에는 그 힘을 보조력으로 반영해야 한다.

7 Valve Travel 설정

정확한 Travel은 유량과 차단성능을 동시에 결정한다.

7.1 Undertravel

$$x_{\max} < x_{\text{rated}}$$

이면:

$$C_v(x_{\max}) < C_{v,\text{rated}}$$

가 되어 설계 최대유량을 확보하지 못한다.

7.2 Overtravel

$$x_{\max} > x_{\text{rated}}$$

이면 다음 문제가 발생할 수 있다.

- 액추에이터의 시트 하중 감소
- 플러그와 보닛의 기계적 간섭
- 스템과 플러그 연결부 손상
- 트림 손상
- 포지셔너 교정범위 이탈

따라서 다음 조건을 확인한다.

$$x_{\text{actual,min}} = x_{\text{seat}}$$

$$x_{\text{actual,max}} = x_{\text{rated}}$$

8 정비 후 Validation

정비 완료는 재조립이 끝난 시점이 아니다.

다음 항목을 기준 상태와 비교하여 성능복원을 확인해야 한다.

- 명령 Travel과 실제 Travel
- Zero, Span 및 선형성
- 개방·폐쇄 응답시간
- 패킹 마찰과 Deadband
- 계장공기 누설
- 공급압력 Droop
- Seat Leakage

- Fail-Open 또는 Fail-Close

정비 성공 = 고장 제거 + 기준 성능 회복 + Fail-Safe 검증

정비 결과를 초기 또는 직전 기준 Signature와 비교하고, 정상 여부가 확인된 후 운전에 복귀시킨다.

9 기술사 답안용 결론

제어밸브 유지보수는 고장 후 분해수리에 한정되지 않는다.

설치 전 배관 청결, 유동방향, 배관응력 및 계장공기를 확인하여 초기 결함을 방지한다.

운전 중에는 스마트 포지셔너를 이용하여 공기 누설, 공급압력, Travel Deviation, 마찰 및 Deadband를 감시한다.

Bench Set과 Valve Travel을 정확히 조정하여 정상운전 추력, 시트 하중 및 Fail-Safe 성능을 확보한다.

마지막으로 정비 후 기준 Signature와 비교하여 밸브 성능이 회복되었는지를 검증한다.

참고자료

- Emerson, *Control Valve Handbook*, Sixth Edition, Chapter 8: Installation and Maintenance.