

Control Valve Handbook 5.14

Cavitation과 Flashing

1 개요

액체가 제어밸브의 제한부를 통과하면 유로가 수축하고 유속이 증가한다. 실제 유체의 최소 단면적은 물리적 제한부 바로 하류의 **Vena Contracta**에서 형성된다. 이 지점에서는 유속이 최대이고 정압이 최소가 된다.

유로 수축 → 유속 증가 → P_{vc} 감소 → 증기 기포 발생 가능

밸브 하류에서 유로가 확대되면 유속은 감소하고 압력은 일부 회복된다. 그러나 에너지가 밸브에서 소산되므로 하류압력은 입구압력까지 완전히 회복되지 않는다.

$$P_1 \rightarrow P_{vc} \rightarrow P_2, \quad P_1 > P_2$$

여기서,

- P_1 : 밸브 입구압력
- P_{vc} : Vena Contracta 압력
- P_2 : 밸브 출구압력
- P_v : 운전온도에서 액체의 증기압

2 Choked Flow와 기포 발생

IEC 액체 사이징에서는 액체 유동이 초크되는 한계 압력강하를 ΔP_{choked} 로 계산한다.

$$\Delta P_{\text{actual}} = P_1 - P_2$$

$\Delta P_{\text{actual}} > \Delta P_{\text{choked}} \Rightarrow$ Cavitation 또는 Flashing 가능

이 조건에서는 밸브뿐 아니라 인접 하류 배관에도 손상이 발생할 수 있다.

기포가 생성되는 직접 조건은 Vena Contracta 압력이 증기압보다 낮아지는 것이다.

$$P_{vc} < P_v$$

이 단계까지는 Cavitation과 Flashing이 동일하다. 두 현상은 압력회복 후 출구압력 P_2 가 증기압 P_v 보다 높은지 낮은지에 따라 구분한다.

3 압력 프로파일과 판별

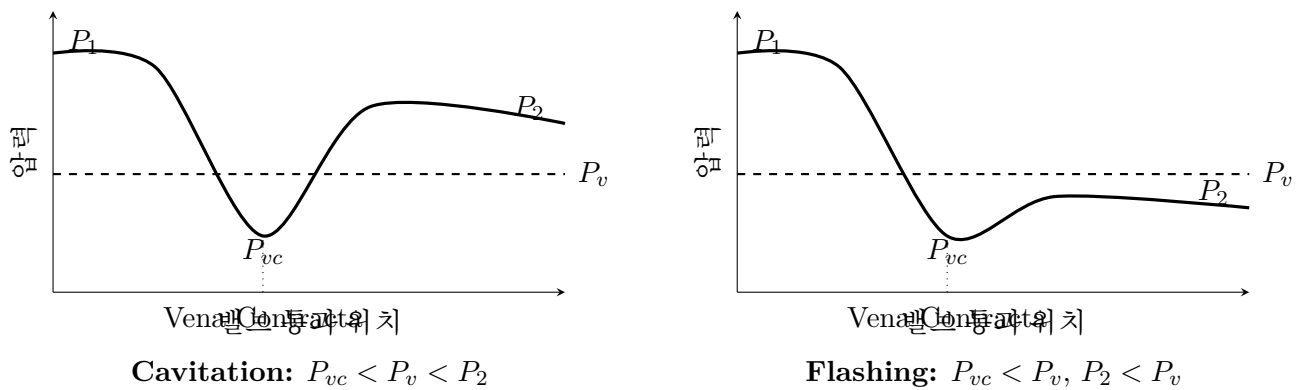


Figure 1: Cavitation과 Flashing의 개념적 압력 프로파일

3.1 Cavitation

$$P_{vc} < P_v < P_2$$

Vena Contracta에서 생성된 증기 기포는 하류의 압력회복 구간에서 붕괴한다.

기포 붕괴 에너지가 밸브 표면 가까이에서 방출되면 재료가 국부적으로 탈락한다.

3.2 Flashing

$$P_{vc} < P_v, \quad P_2 < P_v$$

출구압력이 증기압보다 낮으므로 생성된 기포가 붕괴하지 않는다.

하류 유동은 액체와 증기가 혼재된 고속 2상 유동이 된다.

4 Cavitation과 Flashing 비교

항목	Cavitation	Flashing
기포 발생	$P_{vc} < P_v$	$P_{vc} < P_v$
출구압력	$P_2 > P_v$	$P_2 < P_v$
기포 거동	압력회복 후 붕괴	하류까지 지속
유동상태	기포 생성 후 재응축	액체-증기 2상 유동
주요 손상원리	기포 붕괴 에너지	고속 액적 및 2상 유동의 침식
손상 표면	거칠고 다공질인 cinder-like 형상	매끄럽고 광택이 있는 polished 형상
대표 소음	자갈이 흐르는 것과 유사한 소음	5.14에서는 고유한 소음 형태를 별도로 제시하지 않음
손상 위치	트림, 바디 및 압력회복이 일어나는 하류 배관	최고 유속부, 주로 플러그와 시트링의 seat line 부근
밸브에 의한 근본 예방	가능: 압력강하 분할 등	불가능: P_2 와 P_v 가 공정조건으로 결정됨

5 Pressure Recovery와 밸브 형식

밸브 형상에 따라 Vena Contracta 이후의 압력회복 정도가 달라진다.

- **High-recovery valve:** P_{vc} 가 더 낮아질 수 있어 Cavitation에 더 취약하다.
- **Low-recovery valve:** 내부 난류와 에너지 소산이 커 압력회복량이 상대적으로 작다.

High recovery라는 표현은 단순히 압력 손실이 작다는 의미만은 아니다.
Vena Contracta 압력이 더 낮아질 수 있으므로 액체의 증기압 이하로 내려갈 가능성이 커진다.

6 Flashing Service의 밸브 선정

Flashing은 $P_2 < P_v$ 인 공정조건에서 발생한다.

P_2 는 하류 공정과 배관이 결정하고, P_v 는 유체와 운전온도가 결정한다.

따라서 제어밸브 자체로 Flashing을 제거할 수 없다.

Flashing은 밸브로 방지하는 문제가 아니라 침식 손상을 최소화하는 문제이다.

침식 저감의 기본 원칙은 다음과 같다.

1. 액적이 밸브 표면에 충돌하는 횟수를 줄인다.
2. 충돌하는 표면에 가능한 한 단단한 재료를 적용한다.
3. 스토틀링 하류의 유로 면적을 확대하여 2상 유동 속도를 낮춘다.
4. 유동 방향 변화가 적은 밸브 형상을 선정한다.

권장되는 형상은 다음과 같다.

- Sliding-stem angle valve
- Eccentric rotary plug valve
- Segmented ball valve
- Expanded outlet 또는 확대된 하류 유로를 가진 밸브

Flashing과 부식이 동시에 존재하면 손상이 상승작용을 일으킨다.

예를 들어 물과 탄소강의 조합에서는 부식으로 형성된 연한 산화층을 Flashing 유동이 반복적으로 제거할 수 있다.

이 경우 부식 억제제를 고려한 재질 선정이 필요하다.

7 Cavitation Service의 대책

Cavitation은 다음 세 가지 방법으로 대응한다.

7.1 방법 1: Cavitation 제거

전체 압력강하를 다단 트림으로 여러 단계에 분배한다.

$$\Delta P_{\text{total}} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \cdots + \Delta P_n$$

각 단계의 국부 최저압력이 증기압보다 높도록 유지한다.

$$P_{vc,i} > P_v \quad \text{for all stages } i$$

그러면 증기 기포가 생성되지 않으므로 붕괴도 발생하지 않는다.

7.2 방법 2: 손상 격리 및 최소화

Cavitation 자체를 완전히 제거하지 못하면 다음 방법을 적용한다.

- 기포 붕괴 영역을 밸브의 주요 표면에서 격리한다.
- Cavitation의 영향을 받는 표면을 경화한다.
- 밸브 표면에 전달되는 붕괴 충격을 최소화한다.

7.3 방법 3: 시스템 조건 변경

하류압력 P_2 를 높여 Vena Contracta 압력이 증기압 이하로 내려가지 않도록 한다.

- 밸브를 하류 정압수두가 더 큰 위치로 이동한다.
- 오리피스 플레이트 또는 Backpressure Device를 적용한다.
- 배관과 공정조건을 변경하여 밸브 압력강하를 줄인다.

Backpressure Device를 적용하면 밸브의 Cavitation은 줄어들 수 있다.

그러나 Cavitation 위치가 오리피스와 같은 하류 제한장치로 이동할 수 있으므로 시스템 전체를 검토해야 한다.

8 선정 및 검토 절차

1. 입구압력 P_1 , 출구압력 P_2 , 운전온도 및 증기압 P_v 를 확인한다.
2. 실제 압력강하를 계산한다.

$$\Delta P_{\text{actual}} = P_1 - P_2$$

3. IEC 액체 사이징으로 ΔP_{choked} 를 확인한다.
4. $\Delta P_{\text{actual}} > \Delta P_{\text{choked}}$ 이면 초크 유동과 상변화 가능성을 검토한다.
5. $P_{vc} < P_v$ 인지 확인하여 기포 발생 가능성을 판단한다.
6. $P_2 > P_v$ 이면 Cavitation, $P_2 < P_v$ 이면 Flashing으로 구분한다.
7. Cavitation이면 다단 감압, 손상 격리 또는 P_2 상승 방안을 검토한다.
8. Flashing이면 직선 유로, 확대 출구, 속도 저감 및 경질재료를 적용한다.
9. 트림뿐 아니라 밸브 바디와 인접 하류 배관의 손상 가능성을 확인한다.
10. 부식과 침식의 복합작용을 고려하여 바디와 트림 재질을 선정한다.

9 기술사 답안용 핵심 정리

액체가 제어밸브의 제한부를 통과하면 Vena Contracta에서 유속이 최대가 되고 압력이 최소가 된다. $P_{vc} < P_v$ 가 되면 증기 기포가 발생한다.

이후 출구압력이 증기압보다 높아 기포가 붕괴하면 Cavitation 이고, 출구압력이 증기압보다 낮아 기포가 하류까지 유지되면 Flashing이다.

$$P_{vc} < P_v < P_2 \Rightarrow \text{Cavitation}$$

$$P_{vc} < P_v, \quad P_2 < P_v \Rightarrow \text{Flashing}$$

Cavitation은 전체 압력강하를 다단 트림으로 분할하여 각 단계의 최저압력을 증기압 이상으로 유지하면 방지할 수 있다.

반면 Flashing은 하류압력과 증기압이 결정하는 공정현상이므로 밸브 자체로 제거할 수 없다.

따라서 직선 유로, 확대된 하류 유로, 속도 저감 및 경질재료를 적용하여 침식 손상을 최소화해야 한다.

참고자료

- Emerson, *Control Valve Handbook*, Sixth Edition, Section 5.14.