

4. 부정류해석에서 밸브의 경계조건

박 한 영*

수충격 관련 기술을 연재물 (1회: 수충격 해석 이론, 2회: 압력파란?, 3회: 특성법에 의한 해석, 4회: 부정류해석에서 밸브의 경계조건, 5회: 수충격 분석 시 경계조건 설정, 6회: 수충격 완화설비)로 소개하고 있으며, 본 기사는 그 가운데 네 번째 기고이다.

부정류해석의 대부분은 정상유동상태를 변화시키는 즉, 밸브의 개도 조작 시 또는 펌프와 수차의 기동, 정지 시 유체 속도의 변화를 발생시키는 설비에서의 경계조건에 의해 해결이 가능하다. 관로 내부 절점에서의 부정류해석은 다음과 같은 한 쌍의 부정류 특성식을 연립하여 해결할 수 있다.

$$C^+ : (V - V_0) + \frac{g}{a}(H - H_0) + \frac{f\Delta t}{2D} V_0 |V_0| = 0 \quad (1)$$

$$C^- : (V - V_0) - \frac{g}{a}(H - H_0) + \frac{f\Delta t}{2D} V_0 |V_0| = 0 \quad (2)$$

상기 식에서 V_0 및 H_0 는 정상유동상태에서의 유속 및 수두, f 는 배관 마찰계수, Δt 는 미소시간, D 는 배관직경으로 모두 기지수 (known)이다. 따라서 미소시간 Δt 경과 후 유속 V 및 수두 H 만이 미지수이다. 미지수가 2개이고 식이 2개이므로 연립방정식을 풀어 유속 V 및 수두 H 를 구할 수 있다.

그러나 밸브, 펌프 및 수차설비가 설치된 경계지점에서는 경우에 따라 상기 C^+ 또는 C^- 특성식 중 하나만을 적용할 수 있으므로 또 하나의 특성식이 필요하다. 이번 기고에서는 상하수도사업장에서 가장 많이 사용되는 설비들 중 밸브에서의 경계조건식에 대해서 기술하기로 한다.

1. 유출계수 τ 의 표현

밸브에서의 유출계수 τ 는 밸브 개도에 따른 유량과 수두의 변화비를 나타내고, 유출계수 τ 는 다음과 같이 오리피스 및 손실계수 두 방법으로 표현할 수 있다.

1.1 오리피스

완전 개방된 밸브 전단과 후단의 수두 차이가 H_0 인 경우 토출 유속은

$$V_0 = (C_d A_g)_0 \sqrt{2gH_0} \quad (3)$$

이며, 유량은 상기 식에 단면적을 곱하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_0 = A V_0 = A (C_d A_g)_0 \sqrt{2gH_0} \quad (4)$$

여기서,

C_d : 유출계수

A_g : 밸브 유효단면적

A : 관로 단면적

H_0 : 밸브 완전개방 시 밸브에 작용하는 유효수두

밸브의 개도가 시간에 따라 변화하면 밸브 유효단면적 A_g , 유출계수 C_d 및 밸브에 작용하는 유효수두 H_0 가 변화하게 되며, 이 때의 유량은 다음과 같다.

* 한국수자원공사, 한국수자원연구원
E-mail : hanyung@kowaco.or.kr

$$Q = AV = A(C_d A_g) \sqrt{2gH} \quad (5)$$

밸브 개도 변화에 따른 유량 변화를 나타내기 위해 식 (5)를 식 (4)로 나누면

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{A (C_d A_g) \sqrt{2g} \sqrt{H}}{A (C_d A_g)_0 \sqrt{2g} \sqrt{H_0}} \quad (6)$$

$$\frac{(C_d A_g) \sqrt{H}}{(C_d A_g)_0 \sqrt{H_0}} = \tau \sqrt{\frac{H}{H_0}}$$

이 된다.

1.2 손실계수

밸브를 통과하면서 발생하는 수두손실은 다음 식으로 표현할 수 있으며, 여기서 V 는 밸브 상류측 배관 내 유속을 나타낸다.

$$H = K \frac{V^2}{2g} \quad (7)$$

밸브가 완전 개방되었을 때, 위치에 따른 손실계수를 K_0 로 표현하면

$$H_0 = K_0 \frac{V_0^2}{2g} \quad (8)$$

이 되며, 상기 식의 속도를 유량으로 대체하면 다음과 같다.

$$H_0 = K_0 \frac{1}{2g} \frac{Q_0^2}{A^2} \quad (9)$$

밸브가 폐쇄되면 손실계수 K 와 밸브 상류측에 작용하는 수두는 증가하는 반면, 유속은 감소하게 되며 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$H = K \frac{1}{2g} \frac{Q^2}{A^2} \quad (10)$$

식 (9)를 식 (10)으로 나누면

$$\frac{H_0}{H} = \frac{K_0}{K} \frac{Q_0^2}{Q^2} \quad (11)$$

이 되고, 이를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{Q}{Q_0} = \sqrt{\frac{K_0}{K}} \sqrt{\frac{H}{H_0}} = \tau \sqrt{\frac{H}{H_0}} \quad (12)$$

식 (6)과 식 (12)로부터 τ 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\tau = \frac{(C_d A_g)}{(C_d A_g)_0} = \sqrt{\frac{K_0}{K}} = \frac{Q}{Q_0} \sqrt{\frac{H_0}{H}} \quad (13)$$

상기 식에서 시간 경과에 따른 밸브개도를 알 수 있기 때문에 밸브의 각 개도에서의 손실계수 K 는 기지수가 되므로, 상기 식과 식 (1) 또는 식 (2)와 연립하여 밸브에서의 유속 V 또는 수두 H 를 결정할 수 있다.

2. 밸브의 유량특성

식 (13)에서 밸브의 각 개도에서 밸브를 통과하는 유량은 밸브 상·하류측에 작용하는 차압에 따라 결정된다. 이와 같이 차압에 따라 밸브를 통과하는 유량을 밸브유량특성이라 하며, 이 밸브유량특성 가운데 밸브 상·하류에서 일정한 차압을 형성하여 밸브의 개도에 따라 밸브를 통과하는 유량을 고유유량특성이라 하며, 밸브가 관로에 설치되어 차압이 변화할 때 밸브를 통과하는 유량을 유효유량특성이라 한다.

2.1 고유유량특성

고유유량특성은 밸브 상·하류에서 차압을 일정하게 유지하면서 밸브의 개도에 따라 통과하는 유량을 나타내는 것으로 사용하는 단위에 따라 C_v , K_v 및 A_v 로 표현한다. 우리나라에서 주로 사용하는 K_v 는 다음 식과 같이 밸브의 특정 개도에서 온도 5~40°C의 물이 압력 손실 1 bar 발생 시 통과하는 유량 m^3/hr 을 나타낸다.

$$K_v = Q \left(\frac{\Delta p_0}{\Delta p} \times \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1/2} \quad (14)$$

Q : 유량(m^3/hr)

Δp_0 : 기준차압 1 bar

Δp : 밸브에서 차압(bar)

ρ_0 : 기준액체밀도(1000 kg/ m^3)

ρ : 액체밀도(kg/ m^3)

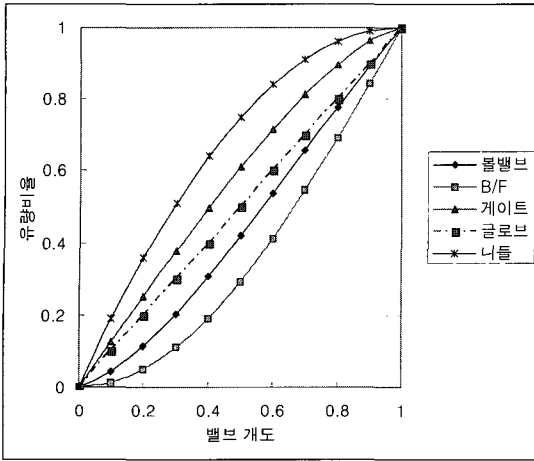


Fig. 1 밸브 고유유량특성

상기 식에서 ρ/ρ_0 는 비중이고 Δp_0 의 수치는 1이므로, 상기 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_v = Q \left(\frac{G}{\Delta p} \right)^{1/2} \quad (15)$$

여기서 G 는 비중이다.

고유유량특성에는 밸브 구조에 따라서 개도와 유량의 관계가 등간격눈금 도표상에서 직선이 되는 선형특성, 로그 도표상에서 직선이 되는 등비특성, 유량이 개도의 제곱근의 형태로 나타나는 제곱근특성 그리고 밸브 개도에 따른 유량이 제곱근특성보다 더욱 큰 급속 개방특성이 있다. 이러한 개도와 유량계수 K_v 의 관계를 Fig. 1에 나타내었다. 이 그림에서 B/F는 버터플라이밸브를 의미한다.

- 선형 특성: 개도와 유량이 비례하는 특성이며 이것에 가까운 특성을 갖는 밸브로는 글로브밸브가 있다.
- 등비 특성: 이 특성은 개도 동일 증가분에 대하여 유량증가비율 즉, 유량계수의 변화율이 같게 되어 적은 개도에서는 유량변화가 비교적 작고 큰 개도에서는 유량변화가 크다. 유량의 광범위한 제어에 적합하며 버터플라이밸브 및 볼밸브가 여기에 해당된다.
- 제곱근 특성: 이 특성은 전폐로부터 중간 개도부분까지는 개도의 변화량에 대하여 유량변화의 비율이 크지만, 그 이상의 개도부분에서는 유량변화비율이 작게 된다. 게이트밸브와 같은 차단용 밸브가 여기에 해당된다.

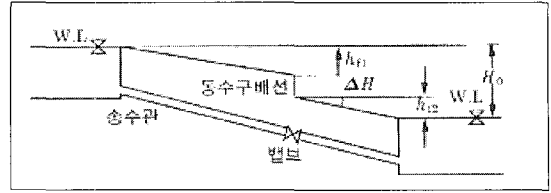


Fig. 2 송수관과 밸브의 관계

- 급속 개방 특성: 이 특성은 전폐로부터 중간 개도부분까지는 개도의 변화량에 대하여 유량변화의 비율이 제곱근 특성보다 크고, 그 이상의 개도부분에서는 유량 변화비율이 매우 작게 된다. 니들밸브가 여기에 해당된다.

2.2 유효유량특성

고유유량특성은 밸브의 각 개도에 있어서 전후의 압력차를 일정하게 유지하면서 얻는 것이다. 그러나 실제 관로에서는 관로손실수두가 존재하기 때문에 밸브의 개도가 같아도 그 밸브의 고유유량특성과 일치하지 않는다. 유효유량특성은 이러한 관로의 영향을 고려한 밸브의 유량특성이다. 특히 관로의 손실계수가 클수록 밸브 개폐에 의한 영향이 적어져 유량제어가 어렵게 되고, 반대로 관로 손실계수가 작을수록 밸브 개도의 영향이 커져 유량을 제어하기가 용이하게 된다.

Figure 2에서와 같이 2개의 배수지 간을 밸브를 매개로 하여 구경 D 의 단일관로로 연결할 때 관로 전체의 손실수두는 다음 식과 같다.

$$H_0 = h_{f1} + \Delta H + h_{f2} \quad (16)$$

$$h_{f1} = C_{P1} \frac{v^2}{2g}$$

$$h_{f2} = C_{P2} \frac{v^2}{2g}$$

- 여기서, ΔH : 밸브에서 손실수두
- h_{f1} : 밸브 상류측 관로에서 손실수두
- h_{f2} : 밸브 하류측 관로에서 손실수두
- C_{P1}, C_{P2} : 관로손실계수
- K : 밸브손실계수

Figure 2에서 밸브를 포함한 관로 전체의 손실수두는 수두차 H_0 와 같으므로

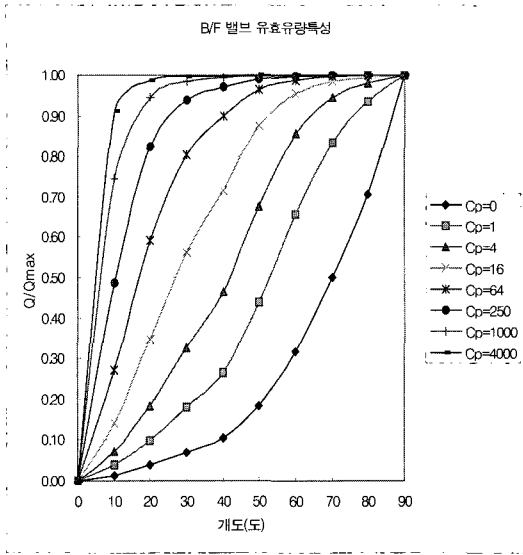


Fig. 3 버터플라이밸브의 유효유량특성

$$H_0 = (C_{p1} + K + C_{p2}) \frac{v^2}{2g} \quad (17)$$

가 되고, 따라서

$$v = \sqrt{\frac{2gH_0}{K + C_p}} \quad (18)$$

이 된다. 상기 식에서 $C_p = C_{p1} + C_{p2}$ 이고, 이 때의 유량 Q 는 다음과 같다.

$$Q = A \cdot v = A \cdot \sqrt{\frac{2gH_0}{K + C_p}} \quad (19)$$

만약 관로가 없고 밸브가 단독 설치되어 특정 개도에서 상류측 압력 γH_0 이 작용하고 하류측은 대기로 유출하는 경우 최대 유량이 되며, 이 때의 유량 Q_{max} 는

$$Q_{max} = A \cdot \sqrt{\frac{2gH_0}{K}} \quad (20)$$

이므로

$$\frac{Q}{Q_{max}} = \sqrt{\frac{K}{K + C_p}} \quad (21)$$

의 관계가 성립한다. 식 (19)에서 밸브를 통과하는 유량 Q 는 밸브에 작용하는 수두 H_0 , 밸브 손실계수 K 및 관로손실계수 C_p 에 의해 결정되는데, C_p 가 커질수록 K 의 영향이 감소되어 Fig. 3과 같이 버터플라이밸브의 등비특성이 급개방특성으로 변형된다.

Figure 3에서와 같이 $C_p = 0$ 일 때의 특성은 버터플라이밸브의 고유 특성인 등비특성이 되어 관로손실계수 C_p 가 작은 관로에서는 밸브 고유특성을 유지하는 것이 가능하지만, 관로가 길고 마찰손실이 크면 유량 제어특성이 나빠지므로 미리 관로의 C_p 값을 검토할 필요가 있다. Fig. 3에서 $C_p = 4,000$ 일 때 개도가 10° 가 되면 전개시의 95% 유량이 흐르게 되고, 그 이상 밸브를 열어도 유량증가는 5%를 넘지 못하게 된다. 바꾸어 말하면 완전개방상태에서 개도를 10%까지 교축하여도 유량은 5% 정도만 감소하고, 나머지 10%에서 유량 95%가 감소한다. 따라서 관로가 상당히 긴 경우에는 밸브의 최종 개도 5%에서 심각한 수충격 현상이 발생하여 관로사고의 원인이 된다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 수자원공사에서는 (주)삼진정밀과 공동으로 밸브 개도별 밸브 폐쇄속도를 조정할 수 있는 즉, 상기의 경우 밸브폐쇄 시 상승압력의 크기를 제한하면서 개도 100~10%까지는 신속히 폐쇄하고 유량변화가 큰 10~0%까지는 완만히 폐쇄시켜 수충격 현상으로 인한 관로사고를 예방할 수 있는 스마트(smart)밸브를 개발 완료하여 현장실험 중에 있다.