

## 버터플라이 밸브 디스크의 유체역학 특성 - 토크특성의 예측

이동명, 김엽래, 박승옥\*, 안민홍\*\*  
경민대학 소방과학과 \* (주)육송 \*\* (주)해인

## Hydrodynamic characteristics of butterfly valve disc - Prediction of torque characteristics

Lee D. M., Kim Y. R., Park S. O.\*, and Ahn M. H.\*\*  
*Kyungmin College, \*Yooksong Co. Ltd., \*\*Shinsung College*

### 1. 서론

파이프라인 사이에 설치되어 유체의 유량이나 압력제어에 사용되는 밸브 중 버터플라이 밸브는 압력손실이 다른 밸브들보다 작고 간결하여 설치에 매우 적절하기 때문에 제어밸브로서 중요성이 증가되고 있다. 이러한 이유로 버터플라이 밸브는 소방설비, 화학플랜트, 상하수도설비, 제반 산업설비 외에도 식품·의약품 등과 같은 곳에서도 날로 사용이 증가되고 있다. 특히, 소방분야에선 최근 건물이나 시설물 화재에 대한 방재시스템의 중요성이 강조되면서 버터플라이 밸브의 사용이 급증하고 있는 실정이다. 하지만 국내 소방업계에서 제작하고 있는 버터플라이 밸브는 독자적인 노하우나 기술력이 전무한 상태로 거의 대부분이 외국사의 제품을 모방하고 있거나 비싼 로열티를 지불하고 제작하고 있는 실정이다.

버터플라이 밸브는 디스크 형상의 특성상 독특한 운전특성을 갖고 있다. 첫째, 밸브개도의 정도에 따라 밸브의 운전토크가 크게 변화되고, 둘째, 밸브 시팅에 비교적 큰 토크를 필요로 하며, 셋째, 유량조절을 할 때 저개도 운전시 유체와류현상에 의한 밸브운전의 불안정성을 들 수 있다. 이러한 운전특성이 버터플라이 밸브의 성능과 프로세스의 운전 건전성을 좌우하게 된다.

따라서 본 연구에서는 버터플라이 밸브의 성능과 운전특성을 좌우하는 디스크의 유체역학 특성을 자유-유선(free-streamline)이론으로 해석하고, 해석 데이터는 디스크를 개발하는데 필요한 엔지니어링 데이터로 이용하고자 한다. 또 이들 데이터는 밸브의 원천기술을 확보하는데 중요한 역할을 하고, 밸브의 에너지 손실감소와 효율증대로 밸브성능을 향상시킬 수 있다. 더불어 연구결과는 국내 소방산업의 선진화와 방재성능을 한 차원 높일 수 있고, 또 본 연구의 예측방법은 버터플라이 밸브 이외의 밸브에도 응용할 수 있다.

## 2. 디스크의 유체역학 특성

### 2.1 토크특성의 이론

디스크의 유체역학 특성은 밸브조작에 필요한 토크로 표현된다. 즉, 밸브설계에 영향을 미치는 토크는 수력토크( $T_h$ ), 시팅토크( $T_s$ ), 베어링 마찰토크( $T_b$ ), 정수력의 불평형 토크( $T_d$ )로 구성되고, 이들 4개의 기본 범주가 밸브조작에 필요한 토크를 결정하는데 사용된다. 밸브 구동장치의 회전력은 이들 토크의 합성으로부터 얻어지는 값 중에서 높은 값을 취하여 결정하게 된다. 베어링 마찰토크와 시팅토크, 정수력의 불평형 토크는 버터플라이 밸브의 회전 반대방향의 축에 항상 작용하고, 수력토크는 밸브를 닫는 방향으로 언제나 작용한다. 그러므로 밸브의 닫힘토크  $T_c$ 와 밸브의 열림토크  $T_o$ 는 다음 식으로 표시된다<sup>1)</sup>.

$$T_c = T_b + T_s + T_d - T_h \quad (1)$$

$$T_o = T_b + T_s + T_d + T_h \quad (2)$$

수력토크는 식(1)과 (2)로부터 식(3)과 같이 얻을 수 있다.

$$T_h = \frac{T_o - T_c}{2} \quad (3)$$

### 2.2 토크계수

식(3)의 수력토크에 의한 토크계수는 다음 두 식으로 나타낼 수 있다<sup>1,2)</sup>.

$$C_s = \frac{T_h}{(1/2)\rho U^2 D^3} \quad (4)$$

$$C_d = \frac{T_h}{\Delta P D^3} = \frac{T_h}{\zeta(1/2)\rho U^2 D^3} = \frac{C_s}{\zeta} \quad (5)$$

$$\zeta = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (6)$$

$C_s$ 는 정적 의미의 토크계수이고,  $C_d$ 는 동적 의미의 토크계수이다. 식(4)와 (5)에서  $\rho$ 는 밀도,  $U$ 는 유속,  $D$ 는 디스크의 직경,  $\zeta$ 는 압력손실계수,  $\Delta P$ 는 밸브 전후의 압력차를 나타낸다. 일반적으로 밸브설계에선 압력차를 이용하여 설계하기 때문에  $C_d$ 가 밸브선택에 실용적으로 사용된다.

## 3. 토크특성의 예측

버터플라이 밸브의 디스크는 유동에 대해서 저항하는 물체로 파이프의 벽으로부터 형성

되는 개도각에 따라서 평판날개로 간주될 수 있다. 평판날개 뒤를 시수역(dead water region)으로 가정한 자유-유선이론<sup>3)</sup>은 평판날개의 토크를 예측하는데 사용될 수 있다. 실제적으로 파이프 벽은 밸브특성에 영향을 미치고 밸브는 밸브 축 주위에 큰 두께를 가지고 있다. 이들 영향은 실제 버터플라이 밸브에서 무시될 수 없다. 그러므로 이들 영향은 밸브 개도각의 변화와 밸브에 주변의 속도변화로 고찰할 수 있다.

### 3.1 토크예측계수

자유-유선이론에서 유동은 모서리에서 완전히 분리되고 시수역은 날개 뒷부분에서 발생한다. 이 조건에서 자유-유선은 평판날개의 앞쪽의 모서리와 뒤쪽 모서리로부터 발생하고, 자유-유선은 하류에서 확장한다. Imai<sup>4)</sup>가 complex velocity potential method을 이용하여 평판날개의 표면압력을 적분으로 얻은 토크로부터 토크예측계수는 개도각  $\alpha$ 의 함수로 다시 표시할 수 있다.

$$C_{dp} = C_d \frac{3\pi \sin 2\alpha}{4(4 + \pi \sin \alpha)} \quad (7)$$

하지만, 실제 버터플라이 밸브의 토크특성을 예측하기 위해선 평판날개의 토크 식으로부터 파이프 벽과 앞서 언급된 이론의 영향이 함께 설명되어야 한다. 따라서 식(7)은 밸브의 열림각과 유동에 대한 보정이 함께 고려되어야 한다<sup>5)</sup>.

$$C_{dp} = C_1 C_d \frac{3\pi \sin(\pi - 2\theta)}{4(4 + \pi \sin(\pi - 2\theta))^2} \quad (8)$$

$$\theta = \pi/2 - \alpha' \quad (9)$$

식(8)와 (9)에서  $\theta$ 는 밸브의 열림 각도이고,  $\alpha'$ 는 평판날개의 개도각에 상당한다.  $C_1$ 은 유속에 대한 토크 보정계수이고, 다음절에서 결정하게 된다.

### 3.2 밸브 디스크의 개도각과 두께에 의한 보정

만일 밸브의 디스크가 임의 각도로 고정될 때, 모서리로부터 유동분리는 벽에 의해 수축되고, 이것은 개도각의 감소를 가져온다. 따라서 디스크가 벽에 영향을 받을 때 토크는 더 커지므로 식(7)은 개도각에 의해 보정되어야 한다. 개도각에 대한 벽의 영향은 개도각의 보정함수로 나타낼 수 있다는 것을 풍동터널 간섭실험으로 지적한 바 있다<sup>6)</sup>. 보정함수를 식(10)과 같이 가정하면,  $\Delta\alpha$ 는 식(11)과 같이 나타낼 수 있다<sup>7)</sup>.

$$\alpha' = \alpha + \Delta\alpha \quad (10)$$

$$\Delta\alpha \propto C_l + kC_{dp} \quad (11)$$

식(11)에서  $C_l$ 은 양력계수이고,  $k$ 는 상수로 평판날개의 경우 4이다.  $C_{dp}$ 는 식(7)과 같고,

$C_l$ 은 Reyleigh 식으로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$C_l = \frac{2\pi \sin \alpha \cos \alpha}{4 + \sin \alpha} \quad (12)$$

식(11)은 평판날개에 대한 것으로 실제 버터플라이 밸브의 디스크는 두께를 가지고 있다. 그럼으로 식(11)에는 디스크의 두께에 대한 보정 값이 추가되어야 한다. 여기서 보정인자는 밸브직경  $D$ 에 대한 허브두께  $t$ 의 비율로 나타낼 수 있고 식(13)과 같다<sup>9)</sup>. 따라서  $\Delta \alpha$ 는 식(14)와 같이 쓸 수 있다.

$$F_1 = \frac{0.28}{1 + \left(\frac{t}{d}\right)^{2.2}} \quad (13)$$

$$\Delta \alpha = F_1(C_l + 4C_{dp}) \quad (14)$$

### 3.3 속도에 의한 보정

디스크 모서리로부터 분리된 유동은 개도각이 더 크게 될 때 더 수축되고, 또 벽이 없는 곳에서 자유-유선 이론에 의한 토크를 얻기 위해선 유동은 밸브두께에 의해 줄어들고 속도는 밸브근처에서 증가하므로 속도  $U$  역시 개도각에 의해 보정되어야 한다. 개도각을 보정한 속도  $U_c$ 는 식(15)과 같고, 식(8)의  $C_l$ 은 식(16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_c = F_2 \frac{1}{1 - \sin \alpha} U \quad (15)$$

$$C_l = \left[ F_2 \frac{1}{\sin \alpha} \right]^2 \quad (16)$$

식(16)에서  $F_2$ 는 유동수축에 대한 밸브두께의 영향을 보정하기 위한 함수로 두께와 직경의 비를 나타내고, 두께와 직경의 비가 커지면 유동속도는 커진다.

## 4. 해석 및 결과

본 연구에서는 그림 1과 같이 round와 flat hub의 디스크에 대해 토크특성을 비교·검토하였다. 토크특성은 표 1의 해석조건으로 예측하고, 그리고 실제 버터플라이 밸브의 디스크 두께는 통상 밸브직경에 약 15~30% 정도이고 이보다 커지면 밸브열림이 작게 된다. 따라서 토크예측계수  $C_{dp}$ 는 두께비율  $t/D \approx 0.1 \sim 0.3$  범위로 정하였다.

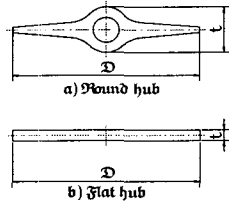


Fig. 1. Shape of disc.

Table 1. 해석조건

유 체	
사용유체	물
유 속	$V = 4\text{m/s}$
압 력	$P=1,205\text{kPa}$
디스크 직경	0.1m

#### 4.1 토크예측계수

그림 2~4는 밸브 개폐시 각도변화에 따른 토크계수  $C_{dp}$ 의 예측결과를 나타낸 것이다. 평판허브의 경우  $t/D$ 의 비율이 0.1인 경우만 고찰하였고, 토크특성은 원형허브와 같게 나타났다. 그림 2~4의 결과는 밸브 개폐시 이론적인 값으로 나타낸 ISA 핸드북<sup>1)</sup>의 특성과 같은 형상을 보여주고 있다. 토크계수의 최고치는  $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$  근처의 밸브열림과 닫힘에서 발생하고, 토크는 디스크의 개도각이 커지고 밸브열림이  $50^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 일 때 압력분포가 대칭이 된 후에 감소가 시작된다. 또 압력손실은 밸브열림이 70도보다 작을 때 급속하게 증가한다.

두께비율  $t/D$ 가 커지면서 토크계수가 커지는데, 이는 허브두께가 커짐에 따라 유동 비는 감소하고 압력손실이 커지기 때문인 것은 당연하다.

반면에 두께비율은 밸브열림이 커지는 동안 토크에 영향을 주지 않는다. 밸브 열림이 작을 경우 큰 속도로 와류지역이 허브주변에서 발생하고 밸브몸체와 교차하는 방향의 압력차이는 커지게 된다. 예측곡선에서 나타냈듯이 버터플라이 밸브는  $40^{\circ}$  이하에서 사용할 경우 불합리하다. 이것은 디스크의 모서리 형상에 영향이 있는 것으로 보인다. 모서리 형상은 축류(vena contracta)에 영향을 주고 밸브주변의 압력분포를 변하게 된다.

#### 4.4 디스크 주변의 속도분포

그림 5~7은 원형허브 디스크의 뒷부분에서 발생하는 속도분포와 유동분리를 가시적으로 나타낸 것이다. 유동은 거의 완벽하게 디스크로부터 분리된 후 평판 날개 뒤 사수역이 발생하고 있다. 본 연구에서 평판날개의 자유-유선이론으로 디스크의 토크를 예측하는데 사용될 수 있음을 보여준다.

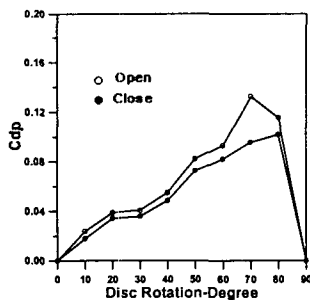


Fig. 2.  $t/D=0.1$  인 경우.

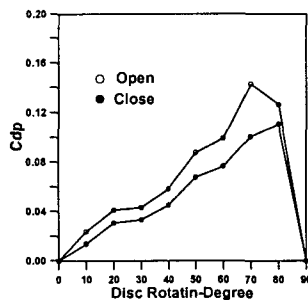


Fig. 3.  $t/D=0.3$ 인 경우.

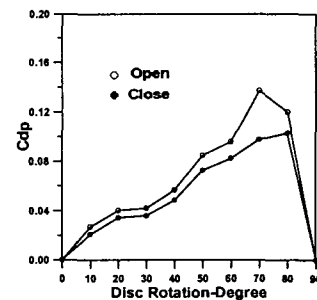


Fig. 4.  $t/D=0.2$ 인 경우.

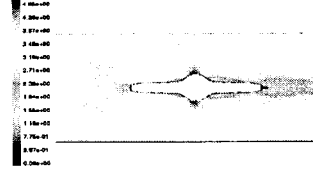
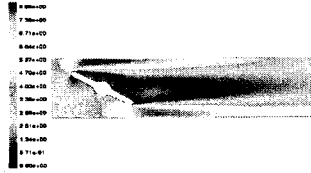
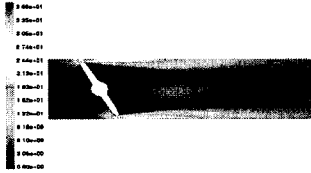


Fig. 5. 디스크를 30° 열 경우. Fig. 6. 디스크를 60° 열 경우. Fig. 7. 디스크를 90° 열 경우.

디스크를 60° 열 경우 디스크 뒤로 박리현상이 일어나고, 디스크의 끝면의 모서리에 의해 유입부의 속도가 정체하는 현상을 보이고 있다.

## 5. 결론

자유-유선이론을 이용하여 디스크의 형상에 따라 토크특성을 예측하였고, 예측된 토크특성은 버터플라이 밸브의 전형적인 형태를 보여줌으로서 예측결과는 성공적이라 할 수 있다. 본 연구결과와 디스크 모서리 부분에서 발생하는 정체현상만 소거시키면 훌륭한 디스크를 개발 할 수 있을 것으로 본다. 특히, 본 연구의 결과가 국내 소방산업을 선진화하는데 밑거름이 되었으면 한다.

## 참고문헌

1. J. W. Hutchison, ISA Handbook of Control Valves, Instrument Society of America, 2nd Edition, pp. 123~130, (1976).
2. K-Valve Co. Ltd., Control Valves Data Book.
3. L. M. Milne-Thomson, Theoretical Hydrodynamics, Mac-millan, New York, 5th Edition, pp. 325~328, (1968)
4. I. Imai, Hydrodynamics, Syokabo Tokyo, First Part, pp. 245~254, (1973).
5. Kazuhiko Ogawa, Takeyoshi Kimura, "Hydrodynamic of butterfly valve- Prediction of torque characteristics," ISA Transactions, 34, pp. 327~333, (1995).
6. H. Glauert, Wind tunnel interference on wings, bodies and airscrews, Aeronautical Research Committee, Reports and Memoranda, No. 1566, (1933).
7. John K. Vennard, Robert L. Street, Elementary Fluid Mechanics, John Wiley & Sons Inc., pp. 789~807, (1982).
8. H. Bleuler, "Escher Wyss News," No. 1-2. p. 33, (1939).