

소화용 버터플라이 밸브 디스크의 토크특성에 관한 연구 A Study on the Torque Characteristics of Butterfly Valve Disc in Fire Protection

이동명[†] · 박승옥*

Dong-Myung Lee[†] · Sung-Ok Park*

경민대학 소방학과

*주식회사 육송

(2002. 04. 27. 접수/2002. 06. 10. 채택)

요 약

본 연구에서는 소화용수 제어에 사용되고 있는 버터플라이 밸브의 디스크에 대한 유체역학 토크특성을 연구하였다. 자유-유선 이론이 유체역학 토크특성을 예측하는데 응용되었다. 디스크의 토크특성은 토크 이론식에 밸브 디스크의 개도각과 주변속도가 보정되었고, 보정식이 추가되었다. 디스크의 토크특성은 허브의 두께와 직경 비에 대해 조사하였다. 예측결과는 버터플라이 밸브의 전형적인 특성을 보여줌으로서 성공적인 것으로 보여진다. 디스크 주변의 속도분포를 가시적으로 확인함으로써, 자유-유선이론이 디스크의 토크특성을 예측하는데 사용될 수 있음을 확인하였다.

ABSTRACT

This study has investigated hydrodynamic of torque characteristics for disc of butterfly valve that is used in control for fire-protection water. The free-streamline theory is applied to predict hydrodynamic of torque characteristics. The torque characteristics of disc are corrected for the angles of attack of valve disc and surrounding velocity of flow by theoretical torque equation, and correction equation is added. The torque characteristics of disc are investigated for the ratio of hub thickness to the valve diameter. The result of prediction are shown to be successful as that show typical torque characteristics of butterfly valve. Since the velocity distribution around the disc is confirmed in a visualization, it is confirmed that the free-streamline theory can be used to predict the torque characteristics of disc.

Keywords : Butterfly valve, Disc, Torque characteristics, Free-streamline theory, Torque coefficient

1. 서 론

버터플라이 밸브는 파이프라인에 설치되어 유체의 유량이나 압력제어에 사용되는 밸브 중 압력손실이 다른 밸브들보다 작고 간결하며 구조상 여러 가지 독특한 장점을 가지고 있기 때문에 제어밸브로서 중요성이 증가되고 있다. 이러한 이유로 버터플라이 밸브는 플랜트, 소방설비와 같은 산업설비 외에도 식품 의약품 등과 같은 곳에서도 날로 사용이 증가되고 있다. 최근 선진국에서는 건물이나 시설물의 방재성능향상과 방재

시스템의 자동화 측면에서 소화용수 제어용으로 전동식 버터플라이 밸브를 사용하고 있다. 건물이나 시설물의 방재성능은 소방시스템의 제어능력에 있음에도 불구하고, 국내 소방업계에서 제작하고 있는 버터플라이 밸브는 독자적인 노하우나 기술력이 전무한 상태로 거의 대부분이 외국사의 제품을 모방하고 있거나 비싼 로열티를 지불하고 수동식만을 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 저 개도 운전시 유체와류현상에 의한 밸브운전의 불안

[†]E-mail: dm2526@hanmail.net

정성을 들 수 있다. 이러한 운전특성이 버터플라이 밸브의 성능과 프로세스의 운전 건전성을 좌우하게 된다. 버터플라이 밸브의 성능해석에 대한 기존의 연구^{1,2)}는 대부분이 실험에 의한 것으로 이론적인 정립이 부족하고, 최근 Obata 등³⁾이 수치해석방법을 제안하였지만 이들은 결과만을 제공하였다.

따라서 본 연구에서는 전동식 버터플라이 밸브를 개발하기 앞서 버터플라이 밸브의 성능과 운전특성을 좌우하는 디스크의 토크특성에 대해 연구하였다. 디스크는 자유-유선(free-streamline)의 유체역학적 이론으로부터 평판날개로 정립하고, 디스크의 토크특성은 Ogawa⁴⁾가 실험으로부터 얻은 토크 보정식에서 개도각과 속도에 의한 식을 수정 보완하였다. 디스크의 토크특성은 밸브의 토크이론에 디스크의 개도각과 주변속도를 보정하였고, 보정식이 추가되었다. 디스크의 두께와 직경 비(t/D)에 대해 토크특성을 고찰하였다. 본 연구에 앞서 참고문헌 9에서 토크특성을 예측하였고, 예측특성은 버터플라이 밸브에서 나타나는 토크의 전형적인 형태⁴⁾를 보여줌으로서 결과는 성공적이라고 할 수 있다. 참고문헌 9의 예측결과와 본 연구의 결과 데이터로부터 새로운 디스크를 개발할 수 있는 엔지니어링 데이터를 구축하였다.

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.

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

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

식 (1)과 (2)로부터 베어링 마찰토크와 시팅토크, 정수력 불평형 토크는 서로 상쇄될 수 있고, 두 식으로부터 수력토크는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

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

2.2 토크계수

식 (3)의 수력토크를 토크특성예측을 위해 무차원 수로 나타내면 식 (4)와 (5)로 나타낼 수 있다.^{5,9)}

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

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

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

무차원 수 C_s 는 정적 의미의 토크계수이고, C_d 는 동적 의미의 토크계수이다. 식 (4)와 (5)에서 ρ 는 밀도 [kg/m^3], U 는 유속 [m/s], D 는 디스크의 직경 [m], ζ 는 압력손실계수, ΔP 는 밸브 전후의 압력차 [Pa]를 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 형성되는 개도각에 따라서 평판날개로 간주될 수 있다. 평판날개 뒤를 사수역(dead water region)으로 가정한 자유-유선 이론⁶⁾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. 따라서 디스크에 작용하는 유체역학 토크는 밸브 개도각의 변화와 밸브주변의 속도변화에 따른 보정이 이루어져야 한다.

3.1 토크예측계수

자유-유선 이론에서 유동은 디스크의 모서리로부터 완전히 분리되고 사수역은 날개 뒷부분에서 발생한다. 이 조건에서 자유-유선은 평판날개의 앞쪽과 뒤쪽 모서리로부터 발생하고, 자유-유선은 하류에서 확장된다. Imai⁷⁾가 complex velocity potential method을 이용하여 평판날개의 표면압력을 적분으로 얻은 토크로부터 토크예측계수는 개도각 α 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.⁸⁾

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

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

식 (8)과 (9)에서 θ 는 밸브의 열림 각도이고, α' 는 평판날개의 개도각에 상당한다. C_1 은 유속에 대한 토크 보정계수로서 다음절에서 결정하게 된다.

3.2 개도각과 두께에 의한 보정

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

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

$$\Delta\alpha \propto C_1 + kC_d \quad (11)$$

식 (11)에서 \propto 는 양력계수이고, \propto 는 상수로 평판날개의 C_1 경우 4이다. k 는 식 (5)와 같고, C_d 는 Reyleigh 식으로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

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

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

$$\Delta\alpha = F_1(C_1 + 4C_d) \quad (13)$$

$$F_1 = \frac{0.28}{1 + \left(\frac{t}{d}\right)^{2.2}} \quad (14)$$

3.3 속도에 의한 보정

디스크 모서리로부터 분리된 유동은 개도각이 커지게 되면 더 수축되고, 유동은 밸브두께에 의해 줄어들어 속도는 밸브근처에서 증가하므로 유동유체의 속도 U 역시 개도각에 의해 보정이 이루어져야 한다. 개도각을 보정한 속도 U_c 는 식 (15)와 같고, 식 (8)의 C_1 은 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.⁹⁾

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

$$C_1 = \left[F_2 \frac{1}{\sin \alpha} \right]^2 \quad (16)$$

식 (16)에서 F_2 는 유동수축에 대한 밸브두께의 영향을 보정하기 위한 값으로 두께와 직경의 비(t/D)를 나타낸다. 식 (15)에 나타낸 바와 같이 두께와 직경의 비가 커지면 밸브 개도각에 대한 보정 유동속도 또한 커짐을 알 수 있다.

4. 수치해석 및 결과고찰

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 원형허브와 평판허브의 디스크에 대해 토크특성을 비교 검토하였다. 토크 특성은 Table 1의 해석조건으로 예측하였다. 그리고 실제 버터플라이 밸브의 디스크 두께는 통상 밸브직경에

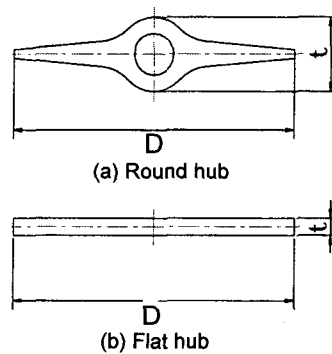


Fig. 1. Shape of disc.

Table 1. 해석조건

사용유체	물
유속	V = 4 m/s
압력	P=1,205 kPa
디스크 직경	0.1m
두께 비(t/D)	0.1~0.3

약 15~30% 정도이고, 이보다 커지면 밸브열림이 작게 되기 때문에 두께 비 $t/D \approx 0.1 \sim 0.3$ 범위로 제한하였다. 또한 계산의 단순화를 위해 유체유동은 2차원으로 가정하였고, 유동속도는 초기 설정치와 같게 고정시켰다. 두께 비에 대한 토크특성 예측계수 C_{dp} 는 프

로그램을 작성하여 수치해석인 방법으로 결과를 얻었다.

4.1 토크예측계수

Fig. 2~4는 밸브 개폐시 개도각의 변화에 따른 토크계수 C_{dp} 의 예측결과를 나타낸 것이다. 평판허브의 경우 t/D 의 비가 0.1인 경우만을 고찰하였고, 토크특성은 t/D 의 비가 0.1인 원형허브와 같게 나타났다.

Fig. 2~4의 결과는 밸브 개폐시 이론적인 형태로 나타낸 ISA 핸드북⁴⁾의 전형적인 토크특성과 같은 양상을 보여 주고 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 70° 보다 작을 때 급속하게 증가한다.

두께 비율 t/D 가 커지면서 토크계수가 커지는데, 이는 허브두께가 커짐에 따라 유동 비는 감소하고 압력손실이 커지기 때문인 것은 당연하다. 반면에 두께 비율은 밸브열림이 커지는 동안 토크에 큰 영향을 주지 않지만, 밸브 열림이 작을 경우 큰 속도로 와류지역이 허브주변에서 발생하고 밸브몸체와 교차하는 방향의 압력차이는 커지게 된다. 예측곡선에서 나타냈듯이 버터플라이 밸브는 40° 이하에서 사용할 경우 불합리하다. 이것은 디스크의 모서리 형상에 영향이 있는 것으로 보인다. 모서리 형상은 축류(vena contracta)에 영향을 주고 밸브주변의 압력분포가 변하게 된다.

4.2 디스크 주변의 속도분포

Fig. 5~7은 원형허브 디스크의 뒷부분에서 발생하는 속도분포와 유동분리를 가지적으로 나타낸 것이다. 유동은 거의 완벽하게 디스크로부터 분리된 후 평판날개 뒤 사수역이 발생하고 있다. 본 연구에서 평판날개의 자유-유선 이론으로 디스크의 토크를 예측하는데 사용될 수 있음을 보여준다. 디스크를 60° 열 경우 디

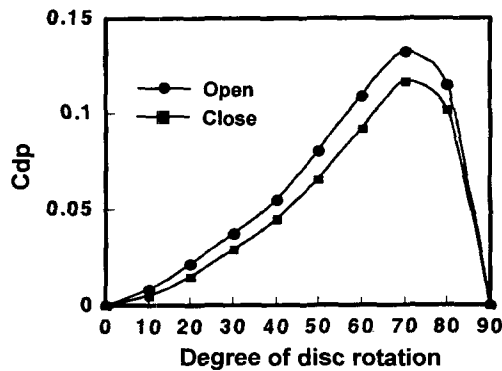


Fig. 2. Torque coefficient of $t/D = 0.1$.

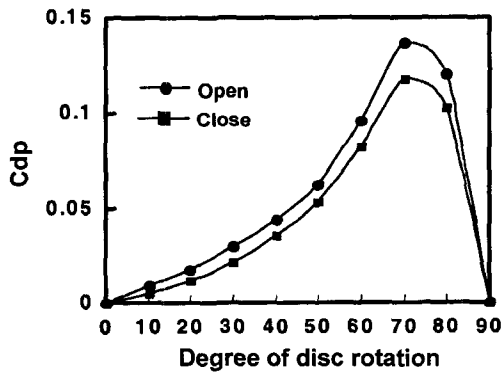


Fig. 3. Torque coefficient of $t/D = 0.2$.

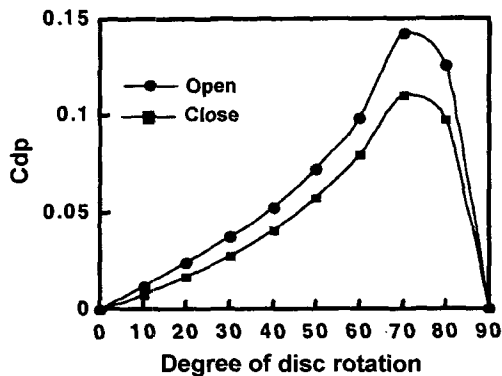


Fig. 4. Torque coefficient of $t/D = 0.3$.



Fig. 5. Velocity distribution at angle of attack 30° .

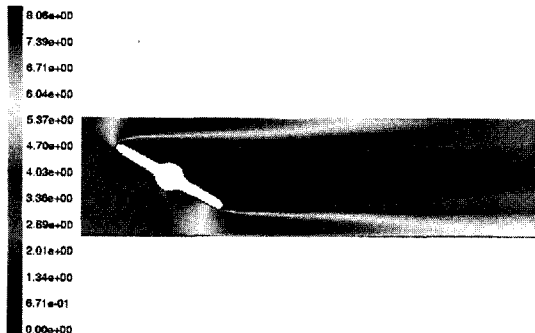


Fig. 6. Velocity distribution at angle of attack 60°.

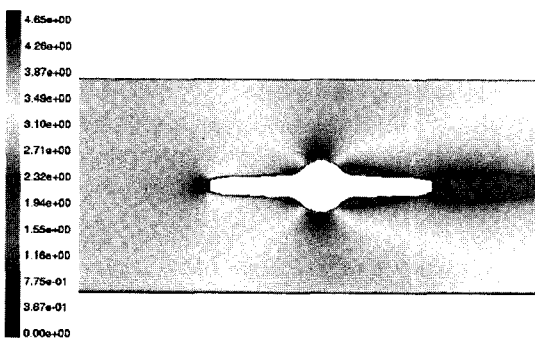


Fig. 7. Velocity distribution at angle of attack 90°.

스크 뒤로 박리현상이 일어나고, 디스크 모서리에서 유입부의 속도가 정체되는 현상을 보이고 있다.

5. 결 론

디스크의 형상과 두께 비에 따라 토크특성을 예측하였고, 예측된 토크특성은 참고문헌 4와 9와 같이 버터플라이 밸브의 전형적인 양상을 보여주었다. 평판날개의 사수역을 이용한 자유-유선이론이 디스크에도 사용될 수 있음을 확인하였다.

본 연구의 결과로부터 디스크의 토크특성에 대한 엔지니어링 데이터를 구축함으로써 새로운 유형의 디스크를 예측·설계하는데 필요한 자료로 활용할 수 있을 것으로 보며, 또한 본 연구결과에 디스크 모서리 부분에서 발생하는 정체현상을 소거시킨다면 훌륭한 디스크를 개발할 수 있을 것으로 본다.

감사의 글

본 연구는 2001년 “경기지방 중기청 산·학·연 컨소시엄 공동기술 개발사업”으로 이루어진 것입니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. S.D. Cohn, “Performance analysis of butterfly valves”, Instruments, 24, pp.800-884(1951).
2. T. Sarpkaya, “Torque and cavitation characteristics of butterfly valves”, ASME J. of Applied Mechanics, Dec. pp.511-518(1961).
3. M. Obata, N. Satofuka, T. Tanaka, “Numerical solution of 2-dimensional flows through butterfly valve using overset grid technique”, Transactions of the JSME, Japan Society of Mechanical Engineering, 59(B), pp.220-226(1993)
4. J.W. Hutchison, ISA Handbook of Control Valves, Instrument Society of America, 2nd Edition, pp.123-130(1976).
5. K-Valve Co. Ltd., Control Valves(1982).
6. L.M. Milne-Thomson, Theoretical Hydrodynamics, Mac-millan, New York, 5th Edition, pp.325-328 (1968).
7. I. Imai, Hydrodynamics, Syokabo Tokyo, First Part, pp.245-254(1973).
8. Kazuhiko Ogawa, Takeyoshi Kimura, “Hydrodynamic of butterfly valve - Prediction of torque characteristics”, ISA Transactions, 34, pp.327-333 (1995).
9. 이동명, 김엽래, 박승욱, 안민홍, “버터플라이 밸브 디스크의 유체역학 특성 토크특성 예측”, 한국화재 소방학회, 2002년도 춘계학술대회 논문집, pp.174-179(2002).
10. H. Glauert, Wind tunnel interference on wings, bodies and airscrews, Aeronautical Research Committee, Reports and Memoranda, No. 1566 (1933).
11. John K. Vennard, Robert L. Street, Elementary Fluid Mechanics, John Wiley & Sons Inc., pp.789-807(1982).