

<학술논문>

밸브 디스크 차단비 변화가 버터플라이밸브의 손실계수에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

노병준* · 이지근* · 최희주**

(2007년 8월 28일 접수, 2007년 10월 22일 심사완료)

Effects of the Blockage Ratio of a Valve Disk on Loss Coefficient in a Butterfly Valve

Byungjoon Rho, Jeekeun Lee and Heejoo Choi

Key Words: Butterfly Valve(버터플라이밸브), Blockage Ratio(차단비), Loss Coefficient(손실계수)

Abstract

The loss coefficient of the butterfly valve which allows partial opening of the valve at closed position and is applicable to the small-sized pipe system with the diameter of 1 inch was measured for the variation of the valve disk blockage ratio. Two different types of the valve disk configuration to adjust the blockage ratio were considered. One was the solid type valve disk of which the diameter was changed into the smaller size rather than the pipe diameter, and the other was the perforate type valve disk on which some holes were perforated. The results from two types of valve disk were compared to identify their characteristics in the loss coefficient distributions. The loss coefficient and the controllable angle of the valve disk were decreased exponentially with the decrease of the blockage ratio. In addition, the perforate valve disk had the effect on the higher loss coefficient rather than the solid type valve disk.

1. 서 론

버터플라이밸브(butterfly valve)는 관로 시스템에 사용되는 다른 밸브와 비교하여 상대적으로 낮은 압력손실이 발생하여 결과적으로 낮은 손실계수(loss coefficient)를 갖는다. 따라서 압력손실을 최소화하면서 많은 유량을 제어할 수 있어 유동학적 측면에서 매우 유리한 밸브라고 할 수 있다. 버터플라이밸브는 밸브의 구조가 간단하여 부식성 및 미립자 등이 포함된 유체가 작용하는 곳에 적용할 수 있다. 또한 버터플라이밸브의 작동은 완전 폐쇄부터 완전 개방까지 밸브 디스크

의 축을 90° 회전하면 되므로 공기압 및 전기적인 방법을 이용하여 제어가 가능한 다양한 분야에 폭넓게 사용되어져 오고 있다. 그러나 이러한 많은 장점에도 불구하고, 유량제어를 위한 버터플라이밸브는 밸브 디스크각 20°~60° 사이에서 탁월한 유량제어 성능을 보이지만 낮은 밸브 디스크각과 60° 이상의 큰 디스크각에서는 유량제어가 어렵고 특히 세밀한 유량제어에 적합하지 않은 단점을 가지고 있다. 또한 밸브 디스크 자체가 유로의 장애물이므로 아주 작은 밸브에는 적합하지 않은 측면이 있어 이에 대한 많은 연구가 수행되어져 오고 있다.

관련된 연구로 Park⁽¹⁾ 등은 버터플라이밸브 하류 유동 안정화를 위해 허니컴과 메쉬스크린이 조합된 유동안정화 장치를 설치하고 난류 유동의 감쇄 특성을 조사한 바가 있다. Park⁽²⁾ 등은 버터플라이밸브의 최적 설계를 위하여 유동해석과 구조해석을 통하여 밸브의 구조적 안정성을 평가하

† 책임저자, 회원, 전북대학교 기계항공시스템공학부
E-mail : leejk@chonbuk.ac.kr
TEL : (063)270-2369 FAX : (063)270-2369
* 전북대학교 기계항공시스템공학부, RCIT
** 퍼스텍(주)

였으며, 직교 배열표와 특성함수를 이용하여 밸브 디스크의 최적설계를 수행한 바가 있다. Morris⁽³⁾ 등은 버터플라이밸브 상류방향에 연결된 곡관의 영향을 조사하고, 관 직경의 8배 이상 되는 지점에 밸브가 설치 될 경우 곡관의 영향은 무시할 수 있음을 실험적으로 밝힌바 있다. 또한 Morris⁽⁴⁾ 등은 두 개의 버터플라이밸브가 연속적으로 설치되었을 경우 밸브 사이의 간격 및 두 밸브의 디스크각 변화에 따라 유동특성이 큰 영향을 받음을 보였다. Cohn⁽⁵⁾ 등은 버터플라이밸브 성능에 관한 밸브 디스크 형상의 영향을 다양한 밸브 하류 압력변화에 대해 조사하였으며, 밸브 디스크 형상이 밸브 전체 성능에 가장 큰 영향을 끼치는 변수임을 제시한 바가 있다. Addy⁽⁶⁾ 등은 압축성 유동에 사용되는 버터플라이밸브의 유동특성을 1차원 급확대 유동모델 시험장치를 이용하여 조사하였다. 또한 McPherson⁽⁷⁾ 등은 버터플라이 밸브를 갖는 관로에서 밸브 하단의 다양한 조건에 따른 유동특성을 조사한 바가 있다.

한편, 버터플라이밸브의 가장 큰 장점 중 하나는 밸브를 통과하는 유동의 압력손실이 적다는 것이다. 그러나 밸브가 거의 닫힌 상태인 디스크 각 85° 이내의 경우 매우 큰 압력손실을 초래하여 조절기능을 상실하게 된다. 따라서 유체 유동 시스템 내에서 버터플라이밸브가 단속밸브(on-off valve)로 사용되지 않고 최소유량을 확보해야 하는 경우, 밸브 디스크의 형상을 관 내경보다 작게 또는 관 내경과 동일하게 하되 디스크 표면에 구멍을 뚫어 밸브가 닫혀도 일정한 유량이 통과하도록 하는 방법이 이용되고 있다. 이와 같이 관로의 단면적 보다 밸브 디스크의 단면적이 작은 경우 차단비(blockage ratio)를 이용하여 나타내고 있다. 밸브 디스크의 차단비와 관련된 연구로서 Eom⁽⁸⁾ 등은 구멍이 뚫린 밸브 디스크와 직경 변화에 의한 디스크의 차단비 변화에 따른 밸브의 손실계수를 측정하였다. 또한 최대 손실계수 및 밸브의 조절가능 디스크각 등에 관한 결과를 제시하였다. Cho⁽⁹⁾ 등은 가솔린 엔진의 스톱 밸브를 다공 디스크 형상으로 제작 하여 분사된 연료의 미립화 및 혼합기 형성에 따른 엔진 성능 조사를 통하여 다공 디스크 형상이 무공 디스크 형상보다 우수한 성능을 나타냄을 보인바 있다.

본 연구에서는 밸브가 완전히 닫힌 상태에서 최소한의 유량확보가 필요한 직경 1 인치 정도의

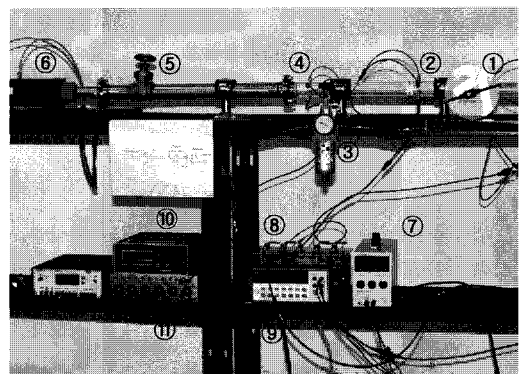
소형 관로시스템에 적용 가능한 버터플라이밸브를 설계·제작하고자 밸브 디스크의 차단비 변화에 따른 밸브의 손실계수를 밸브 디스크각 변화에 대하여 측정하였다. 또한 차단비 변화방법이 밸브의 손실계수 변화에 끼치는 영향을 고찰하기 위하여 관로직경보다 작은 밸브 디스크 및 밸브 디스크에 구멍이 뚫린 두 경우에 대하여 손실계수를 측정하여 비교 분석하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

버터플라이밸브의 손실계수 측정을 위하여 Fig. 1에 도식적으로 나타낸 바와 같은 실험장치를 구성하였다. 실험장치는 밸브에 압력 에너지를 공급하는 왕복식 공기 압축기와 밸브를 통과하는 유량을 측정하는 총류유량계 그리고 시험밸브 및 밸브 양단의 압력을 측정하는 압력측정 장치로 구성되어 있다. 밸브의 상류에 공급되는 압력은 압력조절밸브를 이용하여 조절하였다.

또한 총류유량계와 밸브 양단의 압력 측정은 1999 mmH₂O까지 측정이 가능한 디지털 마이크로 마노미터를 이용하여 측정하였다. 측정된 수두값은 밸브 디스크 각변화에 따른 압력변동을 고려하여 1회에 10,000개의 데이터를 10회 반복 측정한 후 컴퓨터에서 통계 처리한 후 손실계



① test valve ② downstream pressure tap ③ pressure regulator
④ back pressure tap ⑤ back pressure control valve ⑥ laminar flow meter
⑦ power supply ⑧ pressure transducer ⑨ voltage meter
⑩ micro-manometer ⑪ amplifier

Fig. 1 Experimental setup

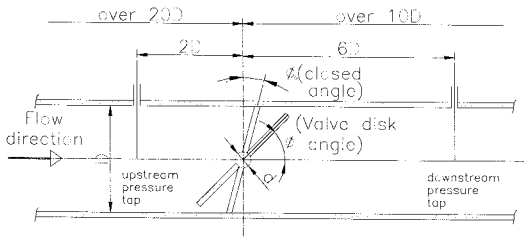


Fig. 2 Definitions of closed angle and valve disk angle

수 등을 계산하는데 이용하였다.

버티플라이밸브의 손실계수를 측정하기 위해서는 밸브를 가로지르는 압력차를 측정해야 한다. 본 연구에서는 밸브의 상류방향(upstream)과 하류방향(downstream)의 압력측정 위치, 압력 측정지점, 압력 탭의 크기 및 설치 방법 등을 관로 직경 D 의 무차원 수 형태로 나타낸 한국공업규격(KS B 2101-1989, 밸브의 용량계수 시험방법)에 명시된 기준을 근거로 선정하였으며, Fig. 2에 압력 측정위치와 측정 시스템의 개략도를 나타내었다.

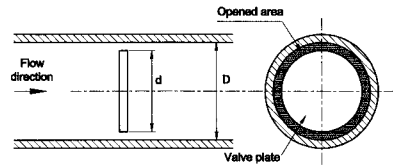
실험에 이용된 버티플라이밸브의 디스크 직경은 밸브의 내경과 동일한 25.4mm이며, 두께는 1 mm이다. 밸브 디스크는 밸브 축에 탈착이 가능하도록 나사못으로 고정하였으며, 이 때 나사못의 머리는 밸브 디스크의 두께를 초과하지 않도록 가공하여 사용하였다. 또한 실험 전에 밸브의 기밀 여부를 확인한 후 실험을 수행하였다.

2.2 실험방법

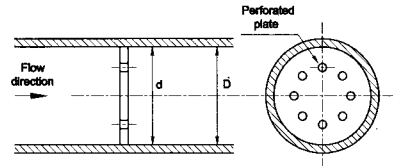
밸브가 설치된 시스템에서 밸브의 작동과 관계없이 일정 유량의 흐름을 확보해야 하는 경우가 있다. 이러한 조건을 만족시키기 위해 밸브가 완전히 닫혔을 때에 일정한 유동면적이 형성되도록 밸브 단면적과 밸브 디스크의 단면적 비로 정의되는 차단비를 1보다 작게 한다. 여기서 차단비는 식 (1)과 같이 정의 된다.

$$Blockage\ ratio = \frac{area\ of\ valve\ disk}{area\ of\ pipe} \quad (1)$$

차단비를 설정하는 방법으로는 Fig. 3(a)에 나타난 밸브 디스크의 직경을 변화시키는 방법(solid type valve disk)과 Fig. 3(b)의 밸브 디스크

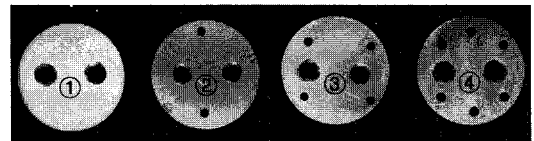


(a) Solid type valve disk



(b) Perforate type valve disk

Fig. 3 Two types of valve disk configuration



① 1.000 ② 0.990 ③ 0.975 ④ 0.950

Fig. 4 Perforated valve disk for various blockage ratios (valve closed angle of 0°)

에 구멍을 내어 밸브가 닫혔을 때 부분적인 유동면적을 확보하는 방법(perforate type valve disk)이 있다. 본 연구에서는 밸브 디스크의 직경을 변화시키는 방법으로 차단비가 1인 25.4mm의 직경을 24.87, 24.69 그리고 24.37mm로 변화시켜 차단비가 각각 0.990, 0.975, 0.950이 되도록 디스크를 제작하였다. 또한 밸브 디스크에 구멍을 내어 차단비를 0.990, 0.975, 0.950으로 조절하기 위하여 Fig. 4에 나타난 것과 같이 디스크 반경 0.75위치에 직경-구멍수를 각각 1.8mm-two holes, 2.0 mm-four holes, 2.2 mm-6 holes로 가공하여 실험에 사용하였다.

버티플라이밸브 전후의 유동은 밸브 디스크와 같은 유동저항체를 따라갈 수 없으므로 계순환유동을 포함하는 복잡한 유동장을 형성한다. 이러한 손실은 관로 시스템 전체에서 보면 밸브와 같은 교축부분 근처에서 주로 국부적으로 발생하는 부차적인 손실이며, 관로 시스템 전체의 손실은

마찰손실과 부차적 손실의 합으로 구성되어 있다. 버터플라이 밸브의 부차적 손실은 밸브 전후에서 전체 에너지 손실에 대한 운동에너지의 비로써 아래와 같이 정의된다.

$$K_v = \frac{\Delta p}{\rho v^2 / 2} \quad (2)$$

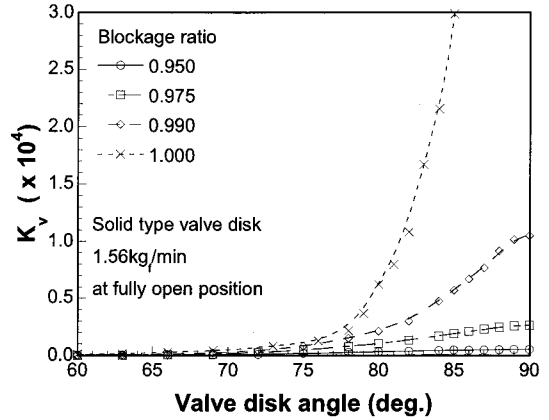
여기서 Δp 는 전체 압력손실 그리고 v 는 관내 평균속도이다. 본 연구에서는 버터플라이밸브의 차단비 변화에 대하여 부차적 손실계수를 밸브 손실계수(K_v)로 정의하고 식 (2)를 이용하여 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

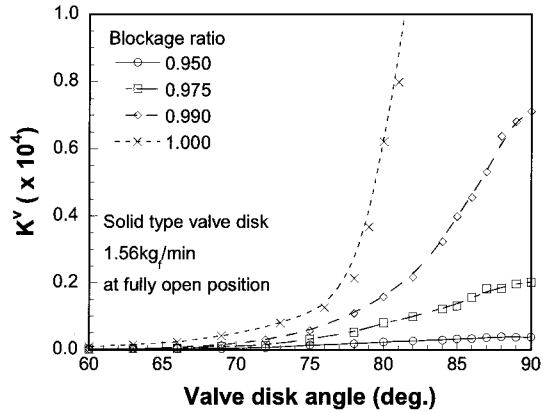
3.1 밸브 디스크 직경변화에 의한 차단비 변화

Fig. 5는 밸브 디스크의 직경을 변화시켜 차단비를 변화시킨 솔리드타입 디스크에 대해 밸브 닫힘각이 0°, 밸브를 완전히 개방한 상태에서 통과유량이 1.56kg/min, 상류방향 작용압력이 2.5 및 3.5bar 일 때 손실계수를 나타낸 것이다. 밸브 상류에 작용하는 압력에 관계없이 밸브 디스크의 차단비가 감소할수록 손실계수가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 차단비가 1 및 0.990의 경우 대략 75°근처에서부터 손실계수 변화가 시작되며 밸브 디스크각이 증가함에 따라 매우 급격하게 증가하는 경향을 나타내고 있다. 차단비 0.975 및 0.950의 경우 밸브 디스크각이 증가함에 따라 손실계수가 차단비 1 및 0.990의 경우와 달리 매우 완만하게 증가하고 있다. 밸브 상류에 작용하는 압력 변화에 대한 손실계수는 유사한 분포 경향을 나타내고 있으나, 2.5bar의 경우가 더 높은 손실계수 분포를 나타내고 있다.

Fig. 6은 밸브가 완전히 개방된 상태에서 유량이 1.56kg/min이고, 밸브 상류방향 작용압력이 2.5 및 3.5bar 일 때 차단비에 따른 손실계수의 최대값 변화를 나타낸 것이다. 차단비가 1이고 닫힘각이 0°인 밸브의 경우 밸브 디스크각이 최대가 되어 완전히 닫히게 되면 유량이 0이 되어 손실계수가 무한대의 값을 나타내므로 손실계수의 최대값을 구하는 것은 불가능하다. 따라서 밸브가 닫히기 직전의 임의의 디스크각의 손실계수를 최대값으로 선택하는 것이 바람직하다.



(a) 2.5 bar



(b) 3.5 bar

Fig. 5 Loss coefficient of butterfly valve with valve disk angle for four blockage ratios of 0.95, 0.975, 0.99 and 1 (solid type valve disk)

본 연구에서는 밸브가 닫히기 직전 5°에서의 손실계수를 최대손실계수(K_{vmax})로 정하였으며, 식 (3)으로 나낼 수 있다.

$$K_{vmax} = K_v \text{ at } (\phi_{max} - 5 \text{ deg.}) \quad (3)$$

여기서 ϕ_{max} 는 최대 밸브 디스크 각이다. 또한 차단비가 감소하면 관로 직경보다 밸브 직경이 작아지게 되어 최대 디스크각에서 손실계수 측정이 가능하지만, 차단비 1인 밸브 디스크에 대한 결과와 비교를 위해 차단비가 1 이하인 경우에도 식 (3)을 이용하여 최대 손실계수를 평가 하였다.

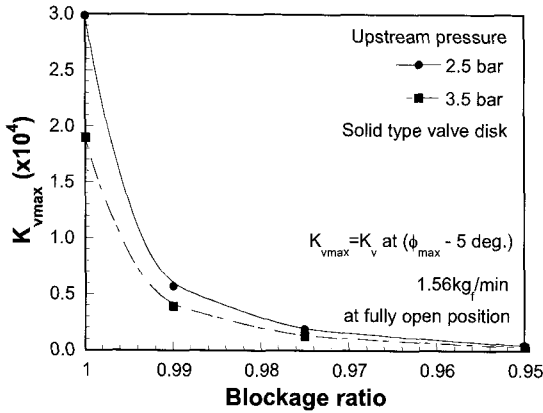


Fig. 6 Maximum loss coefficient of butterfly valve with blockage ratio at two upstream pressures of 2.5 and 3.5 bar (solid type valve disk)

그림에서 볼 수 있듯이 차단비가 1에서 0.99로 변화하면 최대손실계수가 급격히 감소하여 5,000 이하의 수준을 나타내고 있다. 차단비가 0.99부터는 더욱 감소하면 손실계수는 거의 선형적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 밸브 상류에 작용하는 압력에 따른 최대손실계수 변화를 살펴보면 밸브 상류방향 압력이 2.5bar인 경우가 더 큰 값을 나타내고 있으며 차단비가 감소할수록 차이는 감소함을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 5에 나타난 밸브 디스크각 변화에 따른 손실계수 분포에서 유량조절 기능을 수행할 수 있다고 판단되는 밸브 디스크각을 조절가능 디스크각 (controllable disk angle, $\Delta\phi$)으로 정의하고 밸브 디스크 차단비 변화에 대하여 나타낸 것이다. 밸브의 조절가능 디스크각은 밸브 양단에 압력차를 발생시켜 유량 및 압력 조절이 가능한 구간을 의미하며, $K_v=50$ 이 되는 지점의 디스크각을 조절가능 디스크각의 최소값으로 정하였고 식 (4)를 이용하여 계산하였다.

$$\Delta\phi = \phi \text{ at } K_{vmax} - \phi \text{ at } K_{v50} \quad (4)$$

결과를 살펴보면 차단비 1에서 두 작용압력의 평균값이 28.5° ($\phi \text{ at } K_{v50}=56.5^\circ$)를 나타내고 있으며, 차단비 0.99에서 21° ($\phi \text{ at } K_{v50}=64^\circ$), 차단비 0.975에서 18° ($\phi \text{ at } K_{v50}=67^\circ$)를 그리고 차단비 0.950에서 15° ($\phi \text{ at } K_{v50}=70^\circ$)를 나타내 차단비가

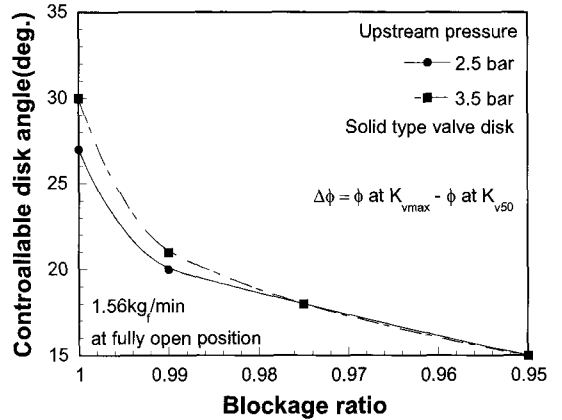


Fig. 7 Controllable valve disk angle with blockage ration for solid type disk at two upstream pressures of 2.5 and 3.5 bar (solid type valve disk)

감소함에 따라 조절가능 범위가 감소함을 알 수 있다. 또한 밸브 상류방향에 작용하는 압력이 2.5 bar 인 경우가 더 큰 값을 나타내고 있다. 이것을 Fig. 6에 나타낸 최대 손실계수 결과와 함께 고려해 보면 차단비가 감소할 수록 최대 손실계수 및 조절가능 밸브 디스크각이 거의 지수적으로 감소하는 경향을 나타낼 수 있다.

3.2 밸브 디스크 천공에 의한 차단비 변화

밸브의 차단비를 변화시키는 방법으로 밸브의 직경을 변화시키지 않고 밸브 디스크에 구멍을 내 차단비를 변화시키는 방법이 있다.

Fig. 8은 밸브 디스크에 직경 0.8mm 구멍 2개를 천공하여 차단비를 0.99로, 그리고 2.2 mm 구멍 6개를 천공하여 차단비를 0.950으로 조절하고 밸브가 완전히 개방되었을 경우의 유량이 1.56 kg/min 일 때, 밸브 디스크각 변화에 따른 손실계수변화를 밸브 상류방향 압력이 2.5bar일 때의 손실계수 분포를 나타낸 것이다.

손실계수 변화를 살펴보면 밸브 디스크각 $70^\circ\sim 75^\circ$ 근처에서 손실계수의 변화가 시작되며, 차단비가 증가 할수록 비교적 완만하게 증가하고 있음을 알 수 있다. 결과를 Fig. 5의 디스크 직경 변화에 의한 손실계수 분포와 비교해 보면 손실계수가 증가하는 디스크각 및 증가 기울기는 거의 유사한 경향을 나타내지만 디스크에 구멍을 뚫어 차단비를 변화시킨 경우가 다소 높은 분포 양상을 보여주고 있다.

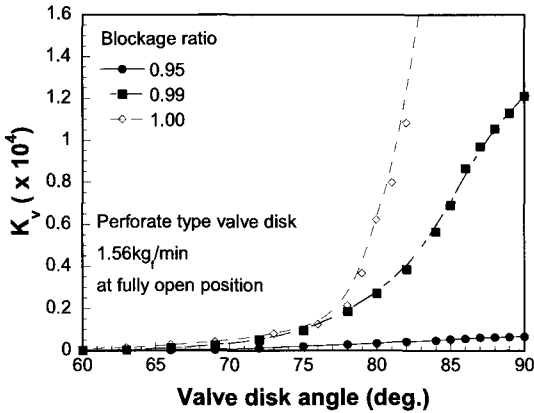


Fig. 8 Loss coefficient of butterfly valve with valve disk angle for three blockage ratios at upstream pressure of 2.5bar (perforate type valve disk)

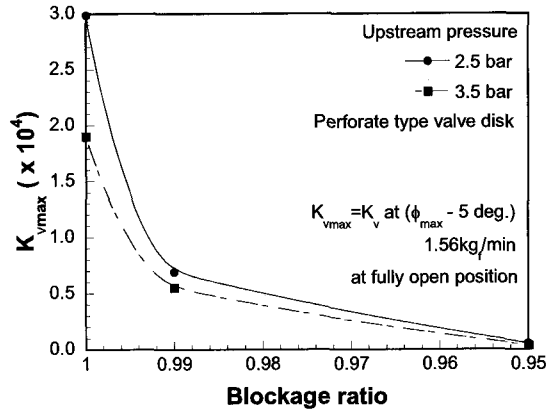


Fig. 9 Maximum loss coefficient of butterfly valve with valve disk angle for three blockage ratios at upstream pressure of 2.5bar (perforate type valve disk)

Fig. 9는 차단비 변화에 따른 손실계수의 최대값 변화를 식 (2)를 이용하여 밸브 상류방향 작용 압력에 대하여 나타낸 것이다. 차단비가 감소할수록 손실계수의 최대값은 감소하며, 차단비가 1에서 0.99로 변화 할 때 급격하게 감소함을 알 수 있다. 이것을 밸브 직경변화에 의한 차단비 변화 결과인 Fig. 6과 비교해 보면 디스크에 구멍을 뚫어 차단비를 변화시킨 경우가 약간 높은 최대 손실계수 분포를 나타내고 있으나 그 정도는 크지 않다.

Fig. 10은 다공 밸브 디스크의 차단비 변화에 따른 유량 조절가능 디스크각 ($\Delta\phi$) 변화를 알아보기 위하여 식 (3)을 이용하여 밸브 상류 방향 압력에 따른 조절가능 디스크각을 나타낸 것이다. 결과를 살펴보면 차단비가 감소함에 따라 조절가능 디스크 각은 감소하는 경향을 보이며, 0.99에서 두 작용압력의 평균값이 20.7° ($\phi \text{ at } K_{v50} = 64.3^\circ$)를 그리고 0.95에서 14° ($\phi \text{ at } K_{v50} = 71^\circ$)를 나타내고 있어 직경변화에 의한 21° 및 14° 와 매우 유사한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 밸브 상류방향 작용 압력이 작은 경우가 더 큰 조절가능 디스크각을 나타내고 있다.

3.3 밸브 차단비 변화방법 비교

차단비 변화 방법으로 전술한 바와 같이 밸브의 직경을 변화시키는 방법과 밸브 디스크에 구멍을 내어 변화시키는 방법이 있다.

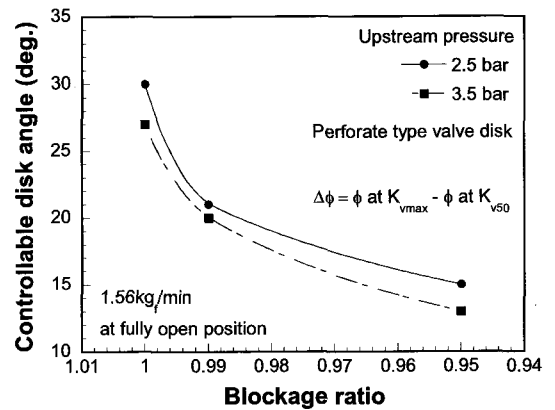
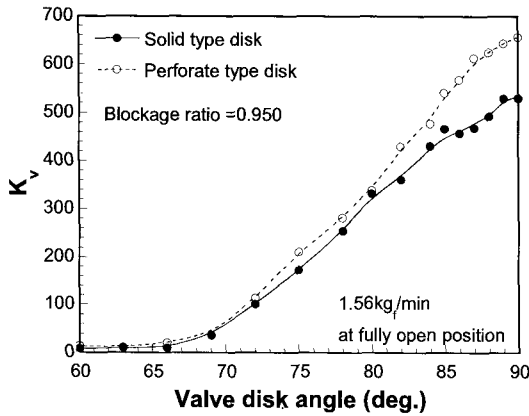
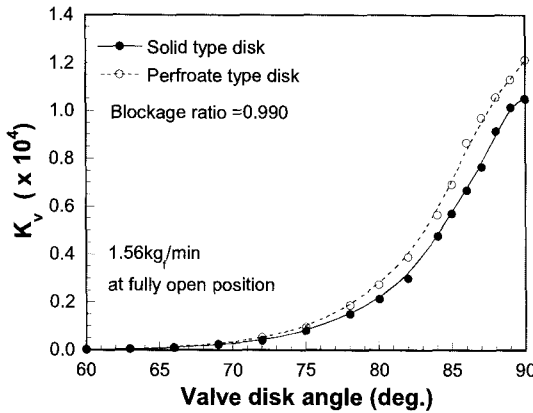


Fig. 10 Controllable valve disk angle with blockage ration for perforate type disk at two upstream pressures of 2.5 and 3.5bar

두 방법 사이의 차이를 알아보기 위하여 밸브 상류방향에 작용하는 압력이 2.5bar인 경우에 대하여 밸브 디스크각 변화에 따른 손실계수를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11(a)는 차단비 0.95 그리고 Fig. 11(b)는 차단비 0.99인 경우에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 차단비에 관계없이 밸브에 구멍을 내어 차단비를 변화시킨 경우가 $70^\circ \sim 75^\circ$ 근처부터 더 큰 손실계수 값을 나타내며 디스크 각이 증가 할수록 두 방법 사이의 차이는 점점 증가함을 알 수 있다.



(a) Blockage ratio of 0.95



(b) Blockage ratio of 0.99

Fig. 11 Loss coefficient of butterfly valve with valve disk angle (deg.) for valve disk types

이러한 결과는 밸브 디스크에 구멍을 뚫어 차단비를 변화시킬 경우 밸브를 통과하는 유체와 직접 접촉하는 밸브 디스크 면적이 증가하여 결과적으로 에너지 손실이 증가하기 때문으로 판단된다. 그러나 두 방법의 손실계수 차이는 최대 디스크 각인 90°에서 150 정도로 예상과 달리 크지 않음을 알 수 있다.

4. 결론

관로직경 1 인치 정도의 소형 관로시스템에 적용 가능한 버터플라이밸브의 차단비 변화 및 차

단비 변화방법에 대한 손실계수 영향을 실험적으로 고찰하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 밸브 디스크의 차단비가 감소할수록 최대 손실계수는 지수적으로 감소하며, 직경변화에 의한 차단비를 변화시킨 경우 조절가능 디스크각은 차단비 1에서 0.95로 변화 할 경우 14°가 감소함을 알 수 있었다.

(2) 구멍을 뚫은 밸브 디스크의 차단비 변화에 따른 조절가능 디스크각은 차단비 1에서 0.95로 변화 할 경우 15°로 13.5°가 감소하여 직경변화에 의한 차단비 변화와 유사한 감소경향을 나타냄을 알 수 있었다.

(3) 직경변화에 의한 차단비 변화보다 밸브 디스크에 구멍을 뚫어 차단비를 변화시킨 경우가 70°~75° 근처부터 큰 손실계수를 나타냄을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Park, S. W. and Lee, S. W., 2000, "An Experimental Study on the Flow Stabilization in the Downstream Region of a Butterfly-Type Valve," *Transactions of KSME*, Vol. 24, No. 11, pp. 1417~1427.
- (2) Park, Y. C., Choi, J. S. and Kang, J., 2005, "A Optimization of Butterfly Valve using the Characteristic Function," *The Korean Society of Ocean Engineers*, Vol. 19, No. 3, pp. 59~65.
- (3) Morris, M. J. and Dutton, J. C., 1991, "An Experimental Investigation of Butterfly Valve Performance Downstream of an Elbow," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 113, pp. 81~85.
- (4) Morris, M. J., and Dutton, J. C., 1991, "The Performance of Two Butterfly Valves Mounted in Series," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 113, pp. 419~423.
- (5) Cohn, S. D., 1951, "Performance Analysis of Butterfly Valves," *Instruments*, Vol. 24, pp. 880~884.
- (6) Addy, A. L., Morris, M. J., and Dutton, J. C., 1985, "An Investigation of Compressible Flow Characteristics of Butterfly Valves," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 512~517.
- (7) McPherson, M. D., Strausser, H. S. and Williams, J. C., 1951, "Butterfly Valve Flow Characteristics," *J. Hydraulic Division, ASCE*, Vol. 83, pp. 1167.1-1167.27.

- (8) Eom, K., 1988, "Performance of Butterfly Valves as a Flow Controller," *Journal of Fluids Engineering*, March, *Transaction of the ASME*, Vol. 110, pp. 16~19.
- (9) Cho, B. O. and Lee, C. S., 1996, "A Study on the Characteristics of Gasoline Engine Performance Equipped with Perforated Throttle Valve," *Journal of ILASS-Korea*, Vol. 1, No. 2, pp. 50~56.