

디스크 회전각에 따른 버터플라이 밸브 하류에서의 유동특성

조대환*

* 목포해양대학교 기관시스템공학부

Flow Characteristics in the Downstream Region of a Butterfly Valve with Various Disk Opening Angle

Dae-Hwan Cho*

* Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

요 약 : 버터플라이 밸브는 선박에서 냉각수와 유류 계통 등에 범용으로 널리 사용되고 있다. 이 연구에서는 유량조정에 따른 배관계통의 버터플라이밸브 하류 유동특성을 규명하기 위하여 입자영상 유속측정장치를 이용하여 밸브개도에 따른 유선과 속도벡터 분포에 관한 정량적인 데이터를 확보하였다. 또한 밸브 주위 유동장의 압력성분을 고찰하기 위하여 개폐각도를 6가지 경우로 변화시켜 정압을 측정하였다. 그 결과 실험관 벽면에서 측정된 압력의 분포는 디스크가 전개 상태인 0°에서 45°까지는 입구 압력은 일정한 상태로 거의 변화하지 않았으나 약 60° 이상에서부터 압력 상승과 점차 급격한 변동현상이 나타났다. 특히, 75° 부근에서는 상류에서 급격한 압력 상승 경향을 보인 반면 하류 측은 압력변동이 적게 나타났다.

핵심용어 : 버터플라이밸브, 입자영상 유속측정장치, 배관, 압력강하, 정압, 비정상상태

ABSTRACT : Butterfly valves have been used for shut-off and throttling-control application in many industrial fields. Recently, they are frequently used for cooling water, oil system and ballast piping system of many larger vessels. They are especially suited for flow throttling control of heat exchangers in engine room. Measurement by the PIV(Particle Image Velocimetry) was conducted to investigate the flow characteristics of butterfly valve inserted within circular pipe. Flow behaviors such as instantaneous and time-mean velocity vectors are investigated. Furthermore, to reveal systematic performance of the butterfly valve, wall pressure was measured at 6 points along the pipe by digital manometer. As the valve position moves to the closed side, flow separation increases and persists its tendency downstream until smoothly uniform flow developed. The pressure loss is found to be about zero for the disk open angles less than 45 degrees, but is substantially increased for those larger than 60 degrees.

KEY WORDS : Butterfly valve, Particle image velocimetry, Piping, Pressure drop, Static pressure, Unsteady state

1. 서 론

선박에 있어서 각 기기의 상호간 운전을 위해서 밸브의 역할은 매우 중요하며 최근에 경비 절감과 밸브의 내구성 등을 고려하여 글로브 밸브 등이 보다 가격이 저렴한 버터플라이 밸브로 교체되어 가는 추세에 있다. 실제로 냉각수와 유류 계통 등에 범용으로 널리 사용되고 있으며 밸브 재질이 발달함에 따라 LNG선의 가스 유지 온도인 영하 163도에서 초저온 천연가스의 유량 조절과 핵처리 장치의 피지밸브 등의 특수 용도에 이르기까지 다양하게 사용되고 있다. 그러나 밸브 주위의 흐름에 대해서는 아직까지 잘 알려져 있지 않은 실정이다. 또한 밸브 주위의 부식에 따른 파공 등의 문제점이 발견되고 있으며, 그 원인은 공동현상, 침식과 전지부식 등으로 추정되고 있다.

Schweitzer(1972)는 버터플라이밸브가 개폐와 조절 조

정 용도로 적합하며 상대적으로 낮은 압력에서 대량의 액체나 가스의 유동을 제어하는 경우에 대용량의 액체에 대하여 조작성이 신속한 장점이 있음을 언급하였다. Eom(1988)은 유량조절용 버터플라이밸브의 성능을 조사하기 위하여 밸브를 전후하여 통과하는 전 압력손실을 측정하였으며 다공 디스크와 닫힌 위치에서 밸브에 흐름을 일부분 허용하는 맹판 디스크(blind disk)에 대하여 여러 직경에 대한 개폐율(디스크면적/파이프 또는 덕트 면적)에 따른 성능 비교의 결과를 보고하였다. 또한 다공 디스크와 닫힌 위치에서 밸브의 부분 열림을 허용하는 맹판 디스크의 두 가지 다른 형상의 경우에 대하여 관련된 성능을 연구한 결과를 보고하였다.

Lacor and Hirsch(1988)는 밸브 디스크 근처에서 Euler 수치해석 코드에 의한 버터플라이밸브의 유동을 연구하였다. Kim and Wu(1992)는 버터플라이밸브의 비압축성유동의 유동 형태, 속도 분포와 배출 계수의 평가를 위한 2차원 수치해석을 수행하였다. Lee et al.(2002)는

*대표저자 : dhcho@mmu.ac.kr, 061)240-7104

비압축성 및 압축성유동장의 특성에 대하여 수치해석을 하고 디스크 각도와 압력비의 변화에 따른 유량과 손실계수를 계산하였다. 그리고 입구유량은 디스크 각도와 압력비의 증가에 따라 감소하며, 손실계수와는 반비례함을 보였다. 또한 75°의 개도에서 압력비 0.2의 손실계수는 압력비 0.94에 비하여 약 80%가 증가함을 보고하였다.

Huang and Kim(1996)은 FLUENT를 사용하여 난류 유동에 대한 $k-\epsilon$ 모델을 적용하여 비압축성유동의 3차원 유동장의 속도와 압력분포를 구하기 위하여 수치 해석을 행하였다. 또한 밸브 디스크의 최적 설계를 위하여 안정된 유량 조절, 완만한 개폐 성능과 낮은 공동 특성에 대하여 보고하였다.

Kim(1998)은 버터플라이밸브주위 유동장에 대하여 입자영상 유속측정장치를 사용하여 속도장을 측정하고 내부 유동 특성을 고찰하였으며 정압공에서 벽면압력을 측정하고 손실계수에 의한 버터플라이밸브 주위의 유동에 대해 고찰하였다. 두 가지 경우의 레이놀즈수에 대하여 밸브의 개도 증가에 따른 속도장을 순간속도, 시간평균속도, 운동에너지와 난류운동에너지로 구분하여 밸브 주위의 복잡한 유동장을 분석하였다. 그 결과 밸브를 통과한 유동은 후부에서 박리가 발생하며, 밸브 개도 증가에 따라 박리가 현저히 증가함을 보였다.

Park and Lee(2000a; 2000b)는 버터플라이 밸브 하류에서의 3차원유동을 유막법을 이용하여 가시화하고 오공 프로브에 의해 계측 분석하였다. 또한 유동을 안정화하기 위해 허니컴과 메쉬스크린이 조합된 유동안정화 장치를 밸브 하류 측에 설치하고 난류운동의 감쇄에 대해 연구하였다. 그 결과 평균속도의 구배, 2차유동, 난류성분이 효과적으로 감소된 결과와 유동안정화장치를 이용하여 짧은 거리 내에서 난류유동을 효과적으로 감쇄시킬 수 있음을 보였다.

이 연구에서는 유량조정에 따른 밸브 하류의 유동특성을 규명하기 위하여 입자영상 유속측정장치와 정압공을 이용하여 디스크의 회전각에 따른 속도분포와 손실계수를 실험적으로 고찰하고 실질적인 유량조정의 범위를 평가하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 이 연구에서 채택한 실험 장치의 구성도를 보이고 있다. 좌측 상부의 수조에 입자를 주입하여 작동 유체 속에 고루 분포될 수 있도록 하였다. 수조의 물은 약 $0.6 \text{ m}^3/\text{min}$ 용량을 갖는 순환 펌프를 거쳐 디지털 유량계로 유입된다. 디지털 유량계는 대상 유동장보다 낮게 설치하였고 직경 80mm의 플렉시블 호스를 이용하여 실험용 아크릴 관과 연결하였다. 입구 구간의 영향을 최소화하기 위하여 $x/D = -3.0$ 의 위치에 정류기를 자체 제작하여 유입부 측에 부착하였다. 원관의 내경 D 는 모두 80 mm이며 이 연구에 사용된 밸브는 선박의 기관실에서 발전기 윤활 유냉각기에 사용되고 있는 것으로 구조는 Kim(1998)과 동일하다.

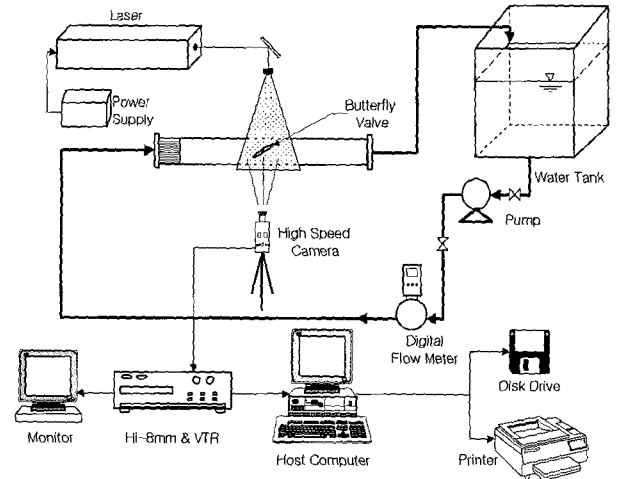


Fig. 1. Schematic arrangement of PIV system.

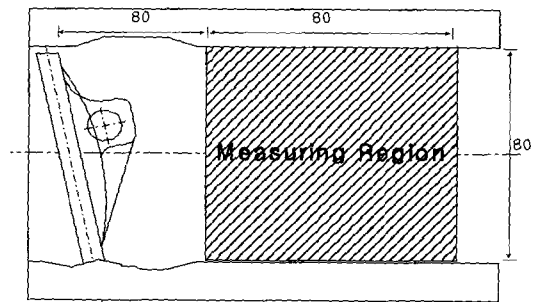


Fig. 2. Definition of measuring region.

가시화를 위하여 최대 출력 5W의 수냉식 아르곤이온 레이저를 사용하였다. 그리고 광파이버의 출구 측에 원통형 렌즈를 부착하여 퍼짐각 60° 전후의 시트라이트를 만들어 계측 단면에 조사하였으며 이때의 레이저 광원의 출력은 4.8W 전후였다. 가시화된 유동장은 고속카메라(Photron Fastcam, 240pps, 640×240 픽셀)를 이용하여 촬영하고 Hi-8mm 캠코더에 기록하였다.

Fig. 2는 실험에 사용된 밸브를 제작하기 위한 아크릴의 가공용 상세 규격과 계측영역을 나타내고 있다. 원관 내부 흐름은 좌측에서 우측으로 흐르며 밸브의 개도는 전개되었을 때 0°, 전폐되었을 때에는 90°로 정의하였다. 레이놀즈수는 $Re=2.4 \times 10^4$ 이며 밸브의 개도는 0°, 15°, 30°, 45°, 60° 그리고 75°의 여섯 경우이다. 유동장의 가시화를 위하여 원관 및 밸브 모형을 투명 아크릴로 제작하였으며, 정압 계측을 위하여 6개의 정압공을 설치하고 디지털 마노미터로 계측하였다. 계측 영역은 밸브의 후류 부분으로 $x/D = 0.5 \sim 1.5$ 의 위치이며 계측 단면의 크기는 80mm × 80mm의 정방형이다.

실험에 있어서 정압공에 의해 벽면 압력을 계측하고 밸브 전후의 손실계수를 구하여 버터플라이밸브 주위 유동 특성을 고찰하고자 하였다. 실제 관로에서의 손실은 단면적 변화와 관의 굴곡 및 밸브 전후 등에서 발생하고 기타 마찰 손실과 같은 여러 가지 요인에 의해 손실이 증가한

다. 따라서 유량 조절용 버터플라이밸브의 개도가 변화하면 손실 계수는 일정한 지수함수형으로 변화됨을 알 수 있다. 손실 계수를 구하기 위하여 버터플라이밸브의 상류와 하류에서 각각 4D부근의 흐름이 비교적 안정된 것으로 판단하고 이 위치에서 정압공에 의해 양단 사이의 압력차 (ΔP)에 의해 손실계수를 구하여 분석하였다.

본 연구에서 사용되는 기호는 다음과 같다.

- C_Q : flow coefficient
- D : diameter of pipe
- ΔH : total head loss
- ΔP : total pressure loss
- K_v : loss coefficient

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3과 Fig. 4는 밸브개도에 따른 유선과 속도벡터이다. Fig. 3과 Fig. 4(a)에서 보면 개도가 0° 일 때 밸브를 통과하면서 상하부의 속도 분포는 균일하게 나타났으며 밸브의 후부에서 일반적으로 익형에서 발생하는 박리 흐름을 보였다. 이와 같은 박리 흐름을 최소화하기 위해서는 그림에는 나타나 있지 않으나 밸브 상류 측에서의 속도는 대체로 균일하였으며 순간속도벡터를 보면 디스크 후미에서 연속된 와류의 발생이 나타났다.

Fig. 4(b)는 밸브의 개도가 30° 일 때의 밸브 디스크를 통과한 흐름의 속도벡터 분포이다. 교축현상에 의해 급확산류의 경향을 보이며 이러한 경향은 밸브의 닫힘이 커질수록 증가한다. 디스크를 통과하여 하류로 진행하면서 속도구배가 밸브의 개도 0° 와는 다르게 밸브 디스크를 중심으로 유동장 전체에 대하여 비대칭적인 속도분포로 나타내며 $x/D=1.0$ 이상의 하류영역에서 상부 측의 유속이 하부보다 빠르게 유지되고 있다.

Fig. 4(c)는 개도가 45° 의 경우로 상부 벽면근처에서 난류성분이 증가하는 경향이 나타났다. Fig. 4(d)는 밸브의 개도가 60° 일 때의 결과이며, 개도 45° 와 유사한 급확산류의 흐름과 속도구배를 나타내고 있다. 그러나 우측 상부는 비교적 균일한 흐름을 유지하고 있는 반면 좌측 하부에서는 크게 변화하고 있다. 이것은 축방향으로 디스크 후방에 근접해서는 3차원성의 흐름이 증가하기 때문이다. 특히 밸브 디스크 끝단부에서는 속도성분이 증가되며 하류 측에 속도의 변동이 크게 나타나고 있다.

Fig. 5과 Fig. 6은 밸브 개도 45° 와 60° 에서 u 성분과 v 성분의 속도분포를 도시한 것이다. 개도가 45° 보다 60° 에서 u/U_0 및 v/U_0 의 절대값이 감소되어 나타난 것은 유량이 줄어들었기 때문이다. 그리고 디스크 후부에서 급확산류의 속도구배는 개도가 증가할수록 급격히 평활화 되고, 최대 속도를 보이는 위치도 개도 60° 의 경우가 벽면에 근접해 있다.

Fig. 7에서 Fig. 9까지는 밸브의 개도에 따른 수평속도 성분, 수직속도 성분, $x/D=1.0$ 의 운동에너지를 추출하여 비

교하여 나타낸 것이다. 개도 $\Theta=0^\circ$ 의 경우 $y/D=0$ 의 부분이 낮게 나타나고 있다.

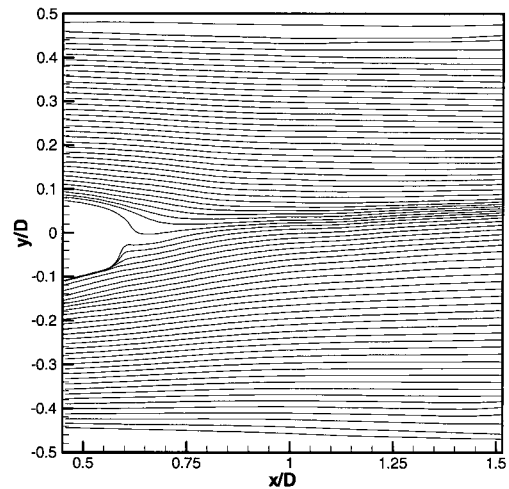
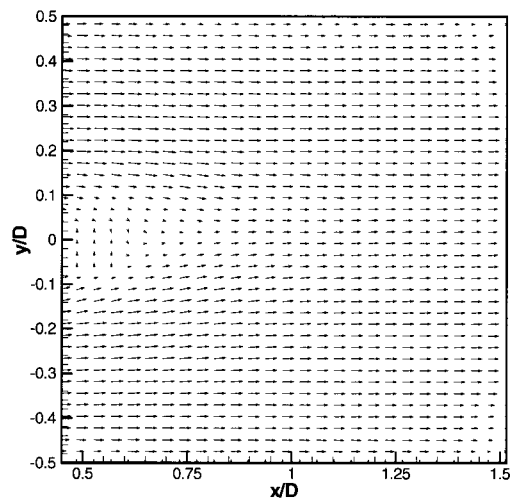
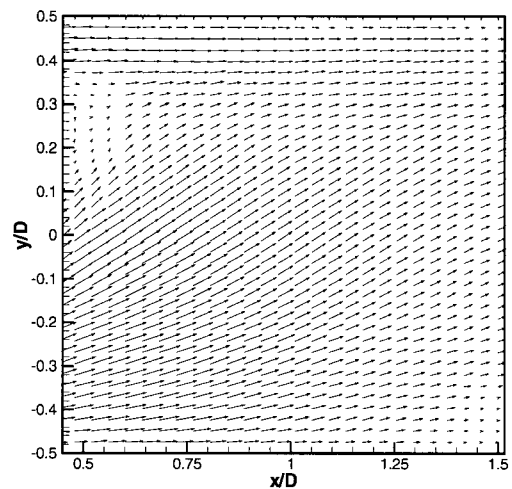


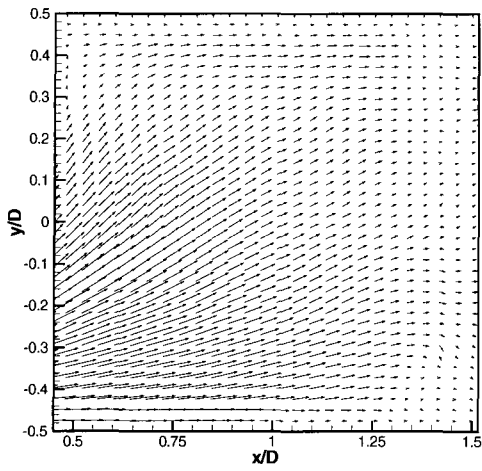
Fig. 3. Streamlines at $\Theta = 0^\circ$



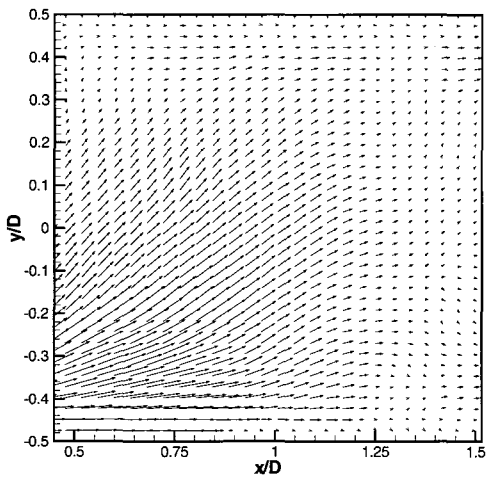
(a) $\Theta = 0^\circ$



(b) $\Theta = 30^\circ$

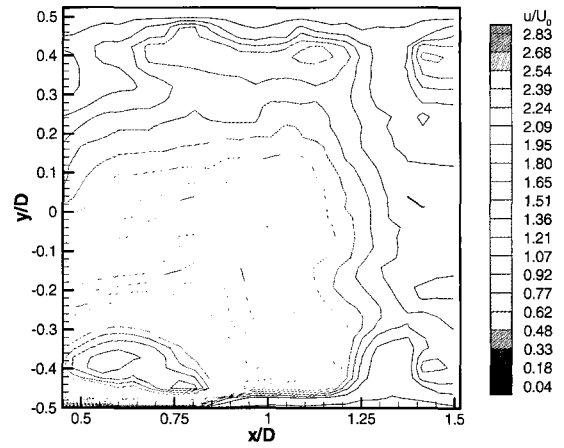


(c) $\Theta = 45^\circ$

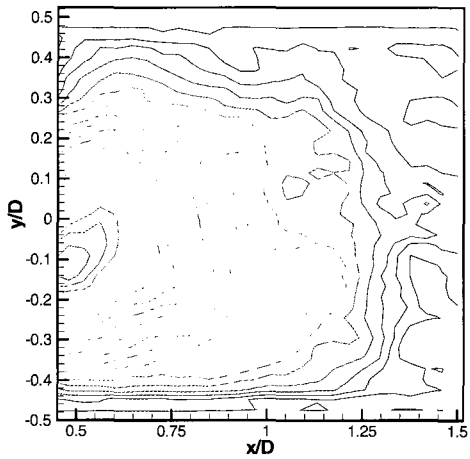


(d) $\Theta = 60^\circ$

Fig. 4. Time-mean velocity vectors.

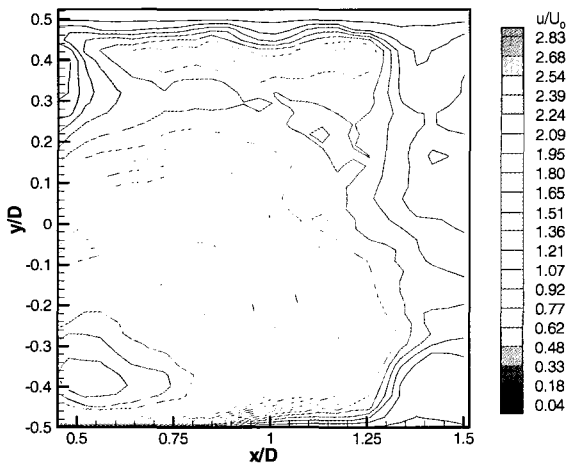


(b) $\Theta = 60^\circ$

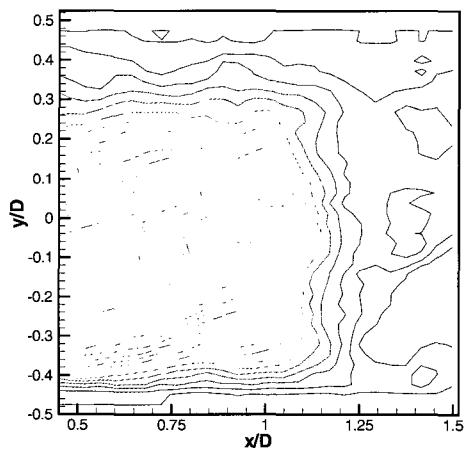


(a) $\Theta = 45^\circ$

Fig. 5. Contours of x-directional velocity.



(a) $\Theta = 45^\circ$



(b) $\Theta = 60^\circ$

Fig. 6. Contours of y-directional velocity.

이것은 $x/D=1.0$ 에서는 디스크의 영향을 받기 때문이다. 개도 $\theta=0^\circ$ 와 30° 의 경우는 그 경향이 유사하며 개도 $\theta=45^\circ$ 와 개도 $\theta=60^\circ$ 의 경우 비슷한 형태를 유지하고 있다. 이것은 손실계수와 유량조정 특성이 개도 $\theta=45^\circ$ 이하에서는 작기 때문이다. Fig. 9에서 개도 $\theta=0^\circ$ 를 제외하고는 $y/D=0.3$ 주위의 운동에너지가 낮게 나타나고 있다 이것은 밸브의 개도가 커지면서 밸브 디스크 후부에서 급확산류가 증가하기 때문이며 디스크의 배면에 형성된 박리 영역의 영향이다. Park and Lee(2000)는 이 부분의 연장선상에서 수직속도성분이 변화가 최소가 되는 점을 정체점(S_3)으로 정의하고 밸브디스크에 의해 발생한 유동의 역류가 끝나는 곳으로 설명하고 있다. 그리고 이 부분에서 디스크에 의해 상하로 분리되었던 유동이 서로 만나게 된다. 정체점(S_3)의 위치는 가시화 실험의 결과 $x/D=0.9$ 전 후였다. 개도 45° 의 경우가 $y/D=-0.35$ 부근에서 운동에너지가 가장 크게 나타나는 것은 실질적으로 유량이 조절되기 때문이며, 개도 60° 의 경우에 $y/D=-0.25$ 부근이 낮게 나타나는 것은 급확산류의 영향으로 형성된 난류 및 3차원성 흐름의 영향으로 추정된다.

Fig. 10은 밸브 주위 유동장의 압력성분을 고찰하기 위하여 개폐각도만을 0, 15, 30, 45, 60 및 75° 의 6가지 경우로 변화시켜 정압을 측정하여 도시한 것이다. 실험관 벽면에서 측정된 압력의 분포는 디스크가 전개 상태인 0° 에서 45° 까지는 입구 압력은 일정한 상태로 거의 변화하지 않았으나 약 60° 이상에서부터 압력 상승과 점차 급격한 변동 현상이 나타났다. 특히, 75° 부근에서는 상류에서 급격한 압력 상승 경향을 보인 반면 하류 측은 압력변동이 적게 나타났다. Fig. 11는 개도별 무차원손실계수($K_v=2(P_1-P_2)/\rho u^2$)이다. K_v 는 유량에 의해 환산된 단면 평균유입속도와 정압공에서 계측된 압력성분을 이용하여 계산하였으며 Lee et al.(2002)의 결과와 비교하여 나타내었다. 75° 에서 수치해석결과가 실험값에 비해 낮게 나타나는 것은 빠른 속도구배의 3차원성의 흐름을 평가하지 못하였기 때문으로 판단된다.

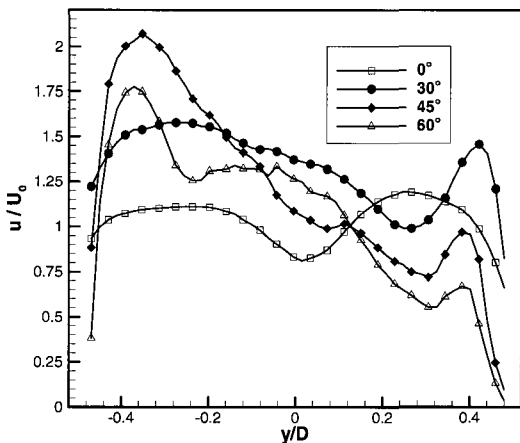


Fig. 7. Comparison of u-velocity distribution.

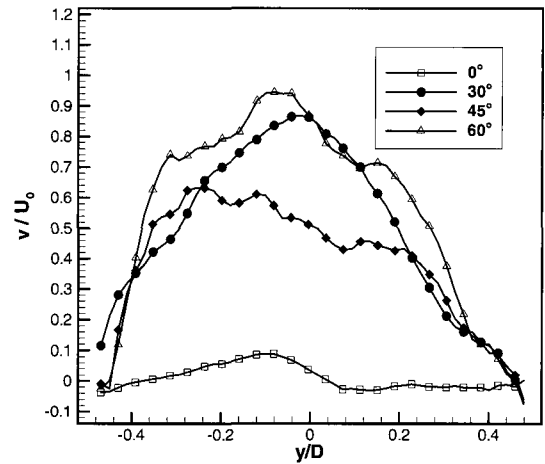


Fig. 8. Comparison of v-velocity distribution.

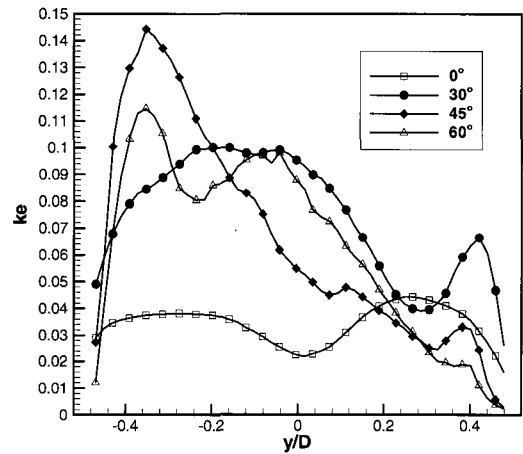


Fig. 9. Comparison of kinetic energy distribution.

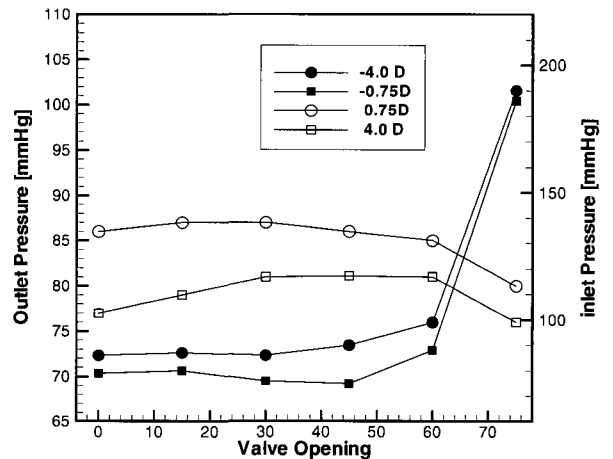


Fig. 10. Pressure distribution.

참고 문헌

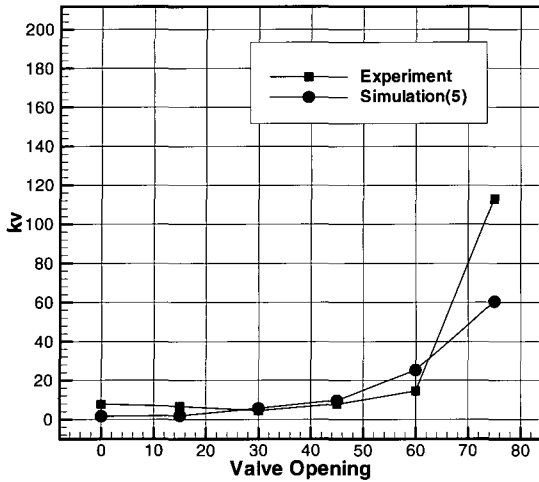


Fig. 11. Kv versus valve opening.

4. 결론

배관계통의 버터플라이밸브 후류 유동특성을 규명하기 위하여 입자영상 유속측정장치와 정압공을 이용하여 실험한 결과를 고찰하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) PIV 측정방법에 의해 버터플라이밸브 후류의 밸브 개도(0° , 15° , 30° , 45° , 60° 및 75°)에 따른 전유동장에 대한 데이터를 정량적으로 확보하였다.

(2) 밸브 전후의 정압을 측정하여 손실계수를 구한 결과 벽면의 압력분포는 $\theta = 0^\circ$ 에서 $\theta = 45^\circ$ 까지 압력차, 손실계수와 통과 유량의 변화가 미소하였으며 그 이상의 경우 실질적인 유량조정이 가능하였다.

(3) $x/D = 1.0$ 에서 운동에너지는 개도 $\theta=0^\circ$ 를 제외하고는 $y/D=0.3$ 주위의 속도 및 운동에너지가 낮게 나타났다. 이것은 밸브의 개도가 커지면서 밸브 디스크 후부에서 급확산류가 증가하기 때문이며 디스크의 배면에 형성된 박리영역의 영향으로 판단된다.

- [1] Schweitzer, P. A.(1972), Handbook of Valves, Industrial Press Inc., pp. 93-103.
- [2] Eom, K.(1988), Performance of Butterfly Valves as Flow Controller, ASME, J.F.E., Vol. 110, pp. 16-19.
- [3] Lacor, C., and Hirsch, C.(1988), Numerical Simulation of the Three-Dimensional Flow around a Butterfly Valves, ASME Fluids Eng. Div. Publ. FED. Vol. 69, Flows in Non-Rotating Turbo machinery Components.
- [4] Kim, R. H., and Wu, N. Y.(1992), Numerical Simulation Butterfly Valve Fluid Flow, Proc. FLUENT User's Group Meeting, pp.296-313.
- [5] Lee, D. H., Lee, J. U. and Choi, Y. H.(2002), Numerical Analysis of Incompressible and Compressible Flow Around a Butterfly Valve, Energy Engg., Vol. 11, No. 1, pp. 26-33
- [6] Huang, C., and Kim, R. H.(1996), Three-Dimensional Analysis of Partially Open Butterfly Valve Flows, ASME, J.F.E., Vol. 118, pp. 562-568.
- [7] Kim, S.W.(1998), A study on flow characteristics of butterfly valve by PIV, Master's thesis, Korea maritime university, Korea
- [8] Park, S. W. and Lee, S. W.(2000), Three-Dimensional Flow Characteristics in the Downstream Region of a Butterfly-Type Valve Used in Air-Conditioning Systems, KSME, Vol. 24, No. 2, pp. 260-269
- [9] Park, S. W. and Lee, S. W., (2000), An Experimental Study on the Flow Stabilization in Downstream Region of a Butterfly-Type Valve, KSME, Vol. 24, No. 11, pp. 1417-1427

원고접수일 : 2006 년 11월 03일

원고채택일 : 2006 년 12월 21일