

LNG선용 버터플라이밸브의 유동특성에 관한 연구 (제1부 : CFD해석과 실험결과의 비교)

김상완* · 최영도** · 김정환*** · 이영호****

Flow Characteristics of Cryogenic Butterfly Valve for LNG Carrier

(Part 1 : CFD Analysis and its Comparison with Experimentation)

Sang-Wan Kim*, Young-Do Choi**, Jung-Hwan Kim***, Young-Ho Lee****

Key Words : Butterfly valve(버터플라이밸브), Pressure loss coefficient(압력손실계수), Flow coefficient(유량계수), CFD(전산유체역학), PIV(입자영상유속계)

ABSTRACT

Butterfly valves are widely used as control valves for industrial process. For the definition of optimum configuration of the valve, wide range of related studies has been actively conducted in the case of working fluids of water or air under the normal temperature. Recently, internal flow and performance characteristics of cryogenic butterfly valve for LNG carrier take a growing interest in the field of research and development. Therefore, present study is aimed to investigate the internal flow and performance characteristics of the cryogenic butterfly valve because the study result for the valve can be hardly found at present. Part 1 of this paper describes the study result of a butterfly valve model under the condition of the normal temperature. Succeeding Part 2 of this paper will describe the internal flow characteristics of a cryogenic butterfly valve for LNG carrier. The results of Part 1 show that pressure loss coefficients and flow rate coefficients obtained by the present experiment and CFD analysis agree well each other. Moreover, internal flow visualization for the valve by CFD analysis and PIV measurement have revealed complicated flow patterns of the internal flow field in detail.

1. 서론

선박 및 산업설비 등의 배관계통에서는 유량을 효과적으로 제어하기 위해서 여러 종류의 유량제어 밸브

들이 사용되고 있으며, 그 중에서 버터플라이밸브는 원관 내부에 설치된 원형 디스크를 회전시킴으로써 유량을 조절한다. 버터플라이밸브⁽¹⁾는 유량제어가 가능하고 배관설계 및 유지관리가 용이하며, 특히 다른 밸브와 비교하여 밸브 효율이 높고 가격이 저렴한 장점을 가지고 있기 때문에 그 적용범위가 점차 확대되고 있는 추세이다.

그러나 버터플라이밸브의 개폐시 작은 개도에서 압

* 하이에어코리아(주)
** 한국해양대학교 산학협력단
*** 한국조선기자재연구원
**** 한국해양대학교 기계·정보공학부 (교신저자)
E-mail : sangwkim@hiairkorea.co.kr

력차이가 매우 크게 발생하여 밸브 디스크 가장자리 부근, 즉 유속이 가장 빠르게 나타나는 부근에서 유체의 압력이 액체의 포화증기압보다 낮아져서 캐비테이션이 발생하게 되며, 밸브의 소음과 진동을 수반하여 밸브디스크에 손상을 가져오는 사례^(2~4)도 확인되고 있다. 버터플라이밸브의 유동특성에 대한 연구는 주로 밸브의 압력손실계수⁽⁵⁾, 캐비테이션^(2~4), 토크특성^(6~7) 등에 대해서 이루어져 왔으며, 일반적으로 물과 기체를 사용한 유동장의 밸브 손실계수를 구하고, 캐비테이션 방지를 위한 밸브 형상의 고찰과 적정 액튜에이터 선정에 필요한 밸브 토크특성에 대한 연구가 진행되어 왔다.

최근에는 LNG용 버터플라이밸브에 대한 연구^(8~9)도 진행되고 있으나, 밸브 안정성을 고려한 기밀에 대한 연구와 밸브의 제작을 위한 최소한의 유동장 가시화 실험이 이루어졌을 뿐 유체공학적인 측면에서의 연구 실적은 아직 미약하며, 체계적인 검토가 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 제1부에서 버터플라이밸브의 기본적인 성능에 대해서 실험 및 CFD 해석결과를 통하여 확인하고, 성능과 밀접한 관계를 가지고 있는 내부유동에 대하여 CFD 해석결과와 PIV 계측결과를 이용하여 상세하게 검토하였다. 후속하는 제2부에서는 LNG선용 극저온 버터플라이밸브의 유동특성에 대하여 실험과 같은 크기의 모형에 대하여 CFD 해석을 수행하였으며, 극저온 상태에서의 버터플라이밸브의 유동특성에 대해서 검토하였다.

2. 실험장치 및 수치해석법

2.1. 성능 시험장치 및 PIV 실험장치

2.1.1. 성능 시험장치

본 연구에 채용된 버터플라이밸브 모델 및 성능시험장치의 개략도를 Fig. 1에 보이고 있다. 밸브 모델로서는 시판중인 버터플라이밸브 도면(KSB 2333)을 기준으로 하여 3중 편심 버터플라이밸브 모델을 제작하였으며, 밸브를 포함한 시험장치의 관로는 내부유동의 가시화가 가능하도록 투명한 아크릴수지로 제작하였다. 밸브 디스크의 직경(D) 및 밸브 상하류의 접속 원관 직경은 동일하게 80 mm로 설정하였으며, 밸브 전단 직관부의 길이는 17D로 설정하였다.

밸브의 개폐에 의한 유로 상류 및 하류에서의 압력변화를 검토하기 위하여 밸브로부터 상류와 하류의 각

각 1D의 지점인 Point 0과 1의 위치에 압력공을 설치하였으며, 밸브의 하류에는 Point 1로부터 총 6개의 압력공(Point 1~6)을 50 mm의 간격으로 설치하였다. 압력의 측정은 각 압력공에 부착된 액주압력계를 이용하여 벽면정압을 계측하였다. 유량계측에는 Magnetic 유량계를 사용하였으며, 밸브의 상류에 설치하였다. 작동 유체로서는 25°C의 상수도용 수도수를 사용하였다. 실험은 밸브 디스크를 완전히 닫았을 때의 각도를 0로 설정하여, 10°에서 90°까지 10° 간격으로 밸브 개도를 고정하여 실시하였다.

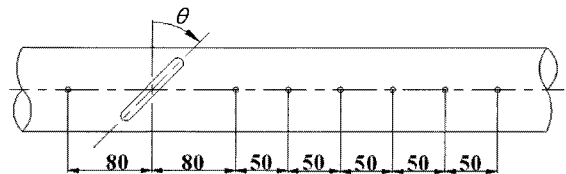


Fig. 1 Schematic view of butterfly valve and locations of pressure hole

2.1.2. PIV 실험장치

밸브를 포함한 유체기계의 내부유동은 성능과 밀접한 관련을 가지고 있으며, 성능개선을 위해서는 내부유동의 상세한 검토 및 유동특성의 파악이 필요하다. 그러나 유체기계의 내부유동은 복잡한 내부유동과 그에 따른 박리와 와류의 발생, 그리고 2차유동 등을 포함하는 매우 복잡한 내부유동으로 인하여 계측상의 어려움이 존재한다. 이러한 복잡한 내부유동장의 속도 계측에는 열선유속계(Hot-wire anemometer) 또는 LDV(Laser Doppler Velocimetry)가 주로 사용되어 왔으며, 점계측(pointwise) 속도측정기법에 의한 신뢰성과 정도면에서 우수한 성능이 입증되었으나, 시간평균값만을 제공하며 트레이싱에 필요한 과도한 계측시간 등이 문제점으로 지적되어 왔다.

따라서 본 연구에서는 내부유동장의 정량적인 동시 다점계측 및 가시화가 가능한 PIV 계측기법⁽¹⁰⁾을 적용하였으며, Fig. 2에 PIV 실험장치의 개략도를 보이고 있다.

버터플라이밸브 모델의 유동관로는 투명한 아크릴수지의 원관으로 제작되었으나, 아크릴 원관의 외부에서 내부유동장을 카메라로 직접 촬영시 아크릴 원관의 굴절에 의한 유동장의 영상왜곡이 발생하므로, 이것을 방지하기 위하여 버터플라이밸브 모델을 포함한 아크릴수지 원관 상류와 하류의 주변에 직육면체의 수조를

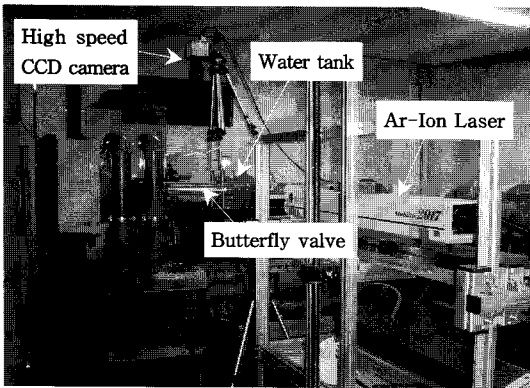


Fig. 2 Arrangement of PIV experiment

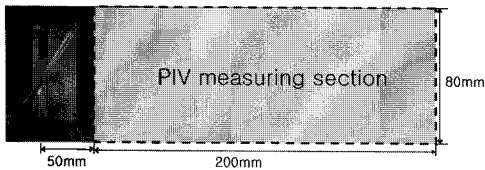


Fig. 3 Definition of measuring section for PIV

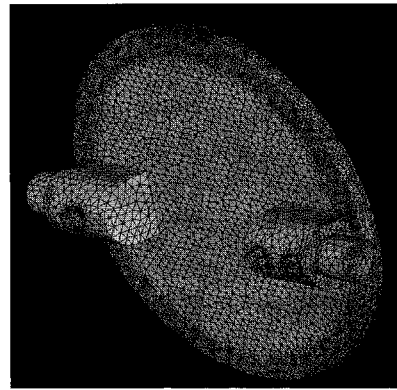
설치하여 물을 채워 넣었다. PIV 계측실험을 위한 광원으로는 최대출력 5W의 수냉식 아르곤 이온(Argon-Ion) 레이저를 사용하였으며, 레이저에서 발생되는 2mm의 원형 직진광을 실린드릭 렌즈로 통과시켜서 만들어진 두께 2mm의 2차원 시트라이트를 계측평면에 비추었다.

영상입력장치로서는 1280×1024 Pixel의 고해상도를 가지는 디지털 고속도카메라 (Photron FASTCAM, 1,000 fps at full frame)를 사용하였으며, 추적입자로서는 물과 비중이 비슷하고(평균비중 1.02) 실험에 사용된 디지털고속도카메라의 해상도를 고려하여 평균직경이 110 μm인 구형의 PVC(Poly Vinyl Chloride) 입자를 사용하였다. 유동해석을 위한 동일입자 추적 알고리즘은 FFT 계조치상호상관법을 이용하였다.

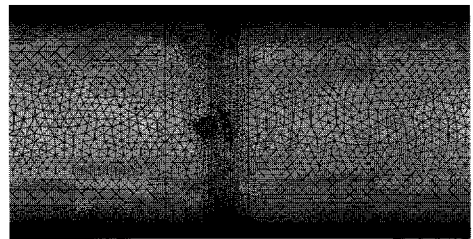
PIV 계측영역은 Fig. 3에 보이는 바와 같이 밸브 하류 50mm의 위치에서부터 하류로 80mm×200mm의 2차원 중앙계측단면으로 하였다.

2.2. 수치해석법

버터플라이밸브의 개도각 θ 에 따른 내부유동장의 속도 및 압력에 대한 정량적인 해석을 위하여 실험과



(a)



(b)

Fig. 4 Calculation grids of (a) valve disc and (b) circular pipe

병행하여 수치해석을 수행하였으며, 유체기계의 내부 유동과 성능의 해석에서 비교적 양호한 해석결과를 보이는 것으로 알려진 상용코드 ANSYS CFX⁽¹¹⁾를 본 연구에 적용하였다.

난류모델로서는 $k-\omega$ SST모델을 사용하였으며, 계산영역의 경계조건으로서 입구에서는 실험에서 얻어진 값인 0.5m/s~3.6m/s의 입구유속을 밸브의 개도에 대응하는 유량의 유입조건을 설정하였고, 출구에서는 정압일정의 경계조건을 설정하여 정상계산을 수행하였다.

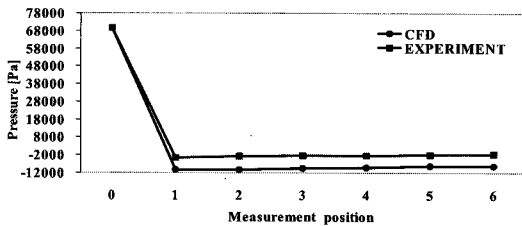
계산격자는 Fig. 4에서 보이는 바와 같이 밸브 디스크를 포함한 유입 및 유출관에 대하여 Tetra-Prism 타입의 계산격자를 작성하였으며, 전체 격자수는 계산기의 계산능력과 경제성에서의 격자 밀집도(무차원 벽면거리 $y^+ \leq 10$)를 고려하여 약 40만 노드로 하였다. 밸브 유입구에서 충분히 발달된 유입유동을 적용하기 위하여 밸브의 상류 유입관 길이를 10D로 설정하였고, 밸브 하류에서는 내부유동 계측지점에 대한 유출경계면으로부터의 영향이 미치지 않도록 10D의 충분한 유출관 길이를 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

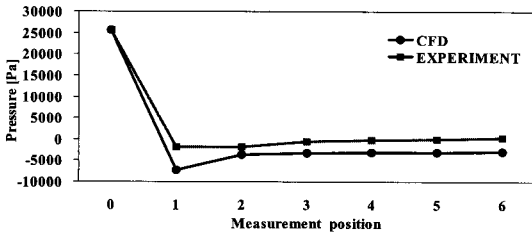
3.1. 압력손실계수

밸브의 압력손실계수 Kv 는 밸브의 압력손실 계산 이외에도 압력과 유량의 관계 및 캐비테이션의 발생유무를 검토하기 위해서도 사용되기 때문에 밸브의 성능 및 수력특성을 나타내는 가장 기본적인 계수이다. 압력손실계수는 밸브의 형식, 구경 및 개도에 의해서 달라지기 때문에 실험에 의해서 유량 및 밸브 상하류의 압력차를 측정해서 구해지며, 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

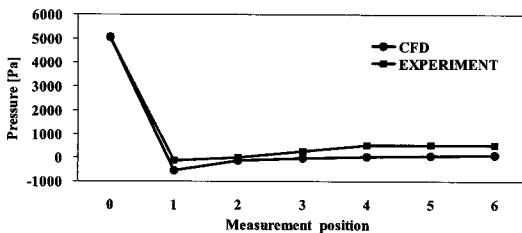
$$Kv = \frac{\Delta P}{\frac{\rho V^2}{2}} \quad (1)$$



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Pressure distributions by opening angle of (a) $\theta=10^\circ$, (b) $\theta=50^\circ$ and (c) $\theta=90^\circ$

여기서, ΔP 는 밸브의 상류 $1D$ 와 하류 $4.13D$ 사이의 압력강하이며, V 는 평균유입속도, ρ 는 물의 밀도이다.

Fig. 5는 밸브의 개도가 10° , 50° 그리고 90° 일 때의 밸브 상류로부터 하류의 각 위치에 설치된 압력공을 통하여 측정된 압력과 CFD 해석을 통해서 구한 값을 비교하고 있다. 실험과 계산의 결과가 양호하게 일치하는 것을 알 수 있으며, 밸브의 각 개도에서 밸브 전후에서 압력차가 상대적으로 매우 크게 존재하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 그래프의 종축에서 보이고 있는 압력값의 크기가 밸브의 각 개도에 따라서 크게 차이를 보임을 알 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5에서 구해진 압력값을 식(1)에 대입하여 구한 압력손실계수를 보이고 있으며, 본 연구에서 얻어진 결과는 Eom⁽⁵⁾이 실시한 버터플라이밸브 실험장치의 개도에 따른 압력손실계수의 분포와 거의 유사한 경향을 보이고 있다. Fig. 6에서 확인할 수 있는 바와 같이 밸브의 개도에 따른 압력손실계수는 개도각 $\theta=10^\circ \sim 20^\circ$ 사이에서 크게 저하하고, $\theta=40^\circ$ 이상에서는 거의 0에 가까운 값을 보이고 있다.

한편, 실험과 CFD 해석에 의한 압력손실계수의 값이 정량적으로 잘 일치하는 것으로부터 본 연구에서 적용한 수치해석법의 높은 신뢰성을 확보할 수 있었기 때문에, 후속의 제2부에서 다루게 될 LNG선용 극저온 버터플라이밸브의 유동특성에 대한 검토에서도 본 수치해석법을 적용하였다.

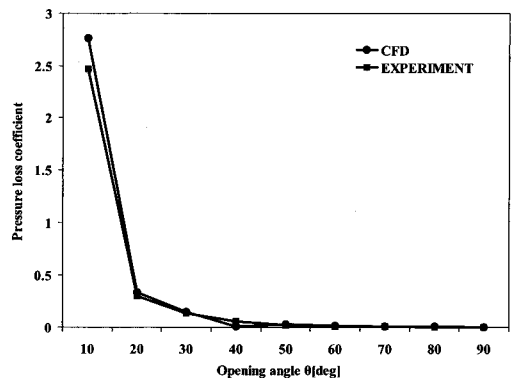


Fig. 6 Pressure loss coefficient by various opening angles

3.2. 유량계수

압력손실계수와 더불어 밸브의 성능을 나타내는 중

요한 요소로서 유량계수 C_v 가 많이 사용되고 있으며, 유량계수가 정해지면 밸브 전후의 차압만으로도 밸브를 통과하는 유량을 구할 수 있기 때문에 버터플라이밸브와 같은 제어용 밸브의 유동특성을 검토하는데 편리하게 사용되고 있다. 본 연구에서는 버터플라이밸브 모델의 유량계수에 대하여 밸브 제조사⁽¹²⁾에서 실제로 사용되고 있는 식(2)를 적용하여 밸브의 개도각 θ 의 변화에 따른 유량계수를 Fig. 7에서 백분율로 나타내었다.

$$C_v = 0.366 \frac{Q}{\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}} \quad (2)$$

여기서, Q 는 평균유량이다.

Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 유량계수가 밸브 개도의 2승에 비례하는 Parabolic 특성⁽¹⁾을 보이고 있으며, 이러한 결과는 버터플라이밸브의 전형적인 유량 특성에 속한다. 실험과 CFD 해석결과는 개도가 비교적 큰 영역에서 다소 차이를 보이고 있지만, 전체적으로 양호하게 일치하는 결과를 나타내고 있다.

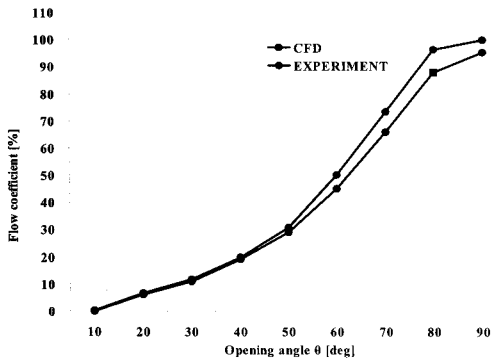
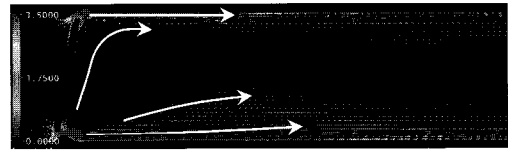


Fig. 7 Flow coefficient by various opening angles

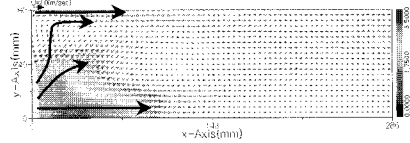
3.3. 내부유동장의 가시화

밸브의 성능은 내부유동장의 형상에 따라 결정되어지는 유동특성과 밀접한 관련이 있다. 따라서 본 연구에서는 밸브 내부유로의 형상에 따른 내부유동장의 변화를 CFD 해석결과 및 PIV 측정에 의한 실험결과를 이용하여 성능에 미치는 영향을 검토하였다.

Figs. 8~10은 본 연구에 적용한 버터플라이밸브 모델에 대하여 밸브 디스크의 개도를 $\theta=10^\circ$, 50° 그리고 90° 로 각각 변화시켰을 경우에 정상상태의 CFD

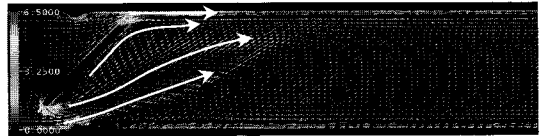


(a)

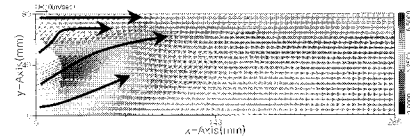


(b)

Fig. 8 Internal flow visualization by velocity vectors at valve opening angle of $\theta=10^\circ$: (a) by CFD (steady state) and (b) by PIV (time-averaged)

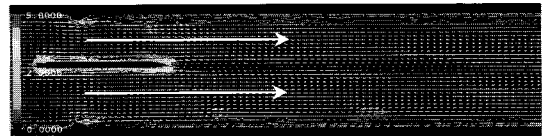


(a)

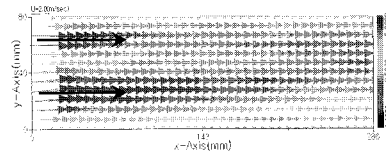


(b)

Fig. 9 Internal flow visualization by velocity vectors at valve opening angle of $\theta=50^\circ$: (a) by CFD (steady state) and (b) by PIV (time-averaged)



(a)



(b)

Fig. 10 Internal flow visualization by velocity vectors at valve opening angle of $\theta=90^\circ$: (a) by CFD (steady state) and (b) by PIV (time-averaged)

해석 및 시간평균 PIV 계측을 통하여 구해진 내부유동장의 속도벡터와 전체적인 유동패턴을 보여주고 있다. CFD 해석영역은 밸브 및 관로의 상하류를 포함하는 관로 전체의 중간단면이며, PIV 계측영역은 Fig. 3에서 도시한 밸브하류의 흐름방향 중간단면으로 하였다.

내부유동장은 전체적으로 밸브의 개도에 따라서 밸브 하류의 흐름이 크게 변화하는 것을 알 수 있으며, 밸브의 개도가 $\theta=10^\circ$ (Fig. 8)에서는 유로가 매우 좁기 때문에 유량이 상대적으로 적고, 밸브의 축을 기준으로 상부와 하부의 유로를 통해서 관로 벽면을 따라서 급격히 하류로 흘러가는 흐름을 형성하고 있다.

밸브의 개도가 $\theta=50^\circ$ (Fig. 9)에서는 밸브 디스크의 상부는 노즐형상의 유로, 하부는 오리피스 형상의 유로와 유사하며, 상부 유로에서는 밸브 하류로 제트와 같은 흐름을 형성하고, 하부 유로에서는 급확대 유로에서와 같이 흐름이 분산되며, 밸브 디스크 후방에서 관로의 하부에서 상부로 가로지르는 2차 흐름이 강하게 형성되는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 흐름이 발생하는 것은 밸브 디스크 후방에서 박리와 재부착을 포함하는 매우 복잡한 3차원흐름이 존재하기 때문이며, Fig. 5(b)에서 밸브 개도각이 $\theta=50^\circ$ 일 때 CFD해석결과와 실험 결과에 의한 밸브전후의 압력강하의 차이 값 비율이 다른 개도각일 경우에 비하여 좀 더 크게 예측되는 원인으로 판단된다.

밸브의 개도가 $\theta=90^\circ$ (Fig. 10)에서는 흐름이 상대적으로 안정화되어 비교적 균일한 흐름을 보이고 있다.

버터플라이밸브의 내부유동장에 대한 CFD 해석 및 PIV 계측 결과로부터 밸브 개도에 따른 내부유동장의 흐름 패턴을 정확하게 파악할 수 있었으며, 밸브의 하류에서는 매우 복잡한 유동장이 형성됨을 확인할 수 있었다. 따라서 이상과 같은 결과로부터 본 연구에서 적용한 CFD 및 PIV에 의한 가시화 기법이 밸브의 성능개선을 위한 내부유동장의 최적 설계인자 도출을 위해서 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

산업용 버터플라이밸브 모델에 대한 성능과 내부유동특성을 파악하기 위하여 CFD 해석 및 PIV 계측을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 버터플라이 밸브의 성능에 대한 실험 및 CFD 해

석을 통하여 정량적으로 일치하는 결과를 획득할 수 있었으며, 실험결과에 대한 CFD 해석결과와 신뢰성을 확보할 수 있었다.

2) 압력손실계수 및 유량계수를 구하여 버터플라이 밸브 모형에 대한 성능특성을 확인할 수 있었고, 압력손실계수는 밸브의 개도각 $\theta=10^\circ\sim 20^\circ$ 사이에서 급격하게 저하하였고, 그 이상의 개도에서는 거의 0에 가까운 값을 보였다.

3) 밸브 내부유동장의 가시화를 위하여 CFD 해석과 PIV 계측을 수행하였으며, 밸브 개도에 따른 내부유동특성을 명확하게 파악할 수 있었으며, 밸브가 부분 열림에서는 밸브 디스크 후방에서 강한 2차 흐름이 형성되어 매우 복잡한 유동 패턴을 나타내었다.

참고문헌

- (1) 日本水道協會, 1987, “水道用バルブハンドブック,” pp. 9~28 & pp. 149~168.
- (2) 윤준용, 이승준, 김은석, 2004, “공동현상방지를 위한 버터플라이 밸브의 유동장 해석,” 유체기계저널, 제7권, 제1호, pp. 9~16.
- (3) 谷 清人, 平田 泰茂, 大場 利三郎, 1994, “バタフライ弁まわりの壊食性渦キャビテーションによる振動およびノイズの擧動,” ターボ機械, 第22卷, 第8号, pp. 479~484.
- (4) 大場 利三郎, 祖山 均, 谷 清人, 武田 涉, 樋口 二郎, 平田 泰茂, 1996, “偏心形バタフライ弁まわりのキャビテーション振動の擧動,” ターボ機械, 第24卷, 第4号, pp. 193~199.
- (5) K. Eom, 1988, “Performance of Butterfly Valves as a Flow Controller,” ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 110, pp. 16~19.
- (6) Kazuhiko Ogawa, Takeoshi Kimura, 1995, “Hydrodynamic characteristics of a butterfly valve-Prediction of torque characteristics,” ISA Transaction, Vol. 34, pp. 327~333.
- (7) C. Sollic, F. Danbon, 1999, “Aerodynamic Torque Acting on a Butterfly Valve. Comparison and Choice of a Torque Coefficient,” ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 121, pp. 914~917.

- (8) M. M. Gerceker, 2003, "Tight at Cryogenic Temperatures : High Performance Butterfly Valve for Pipelines with Cryogenic Liquids," Linde Technology, Vol. 1, No. 2, pp. 40~42.
- (9) 설창호, 2006, "Cryogenic Butterfly Valve 개발 및 실험," 한국유체공학학술대회 논문집, pp. 75~78.
- (10) 이영호, 최장운, 1996, "PIV의 분류 및 원리," 대기기계학회지, 제36권, 제12호, pp. 1146~1162.
- (11) ANSYS Inc., 2004, "ANSYS CFX Documentation," Ver. 5.7.1, Waterloo, Ontario, Canada.
- (12) Toyo Valve Co., Ltd., <http://www.toyovalve.co.jp>