

# 원관내 버터플라이 밸브 후류에 대한 수치해석 및 실험적 연구

심요셉\* · 허형석\* · 서용권\*\*

\*동아대학교 대학원기계공학과

\*\*동아대학교 기계산업시스템공학부

## Numerical and Experimental Study on the Wake Flow of a Butterfly-Type Valve

JOSEPH SHIM\*, HYEUNG-SUK HUH\*, YOUNG-KWEON SUH\*\*

\*School of Mechanical and Industrial System Engineering Dong-A University, Pusan 604-714, Korea

\*\*Department of Mechanical Engineering, Dong-a University, Pusan 604-714, Korea

**KEY WORDS:** Butterfly Valve (버터플라이 밸브), Vortex Flow (와류), Stagnation Point (정체점), Valve Disk (밸브디스크) Cylindrical Tube (원관), Separation Point (박리점)

**ABSTRACT:** In this paper, flow in the wake region of a butterfly valve is studied numerically and experimentally. The disk angle of the valve is fixed as 30° and the free stream velocity as 0.13 m/s in the experiment. Numerical analysis is performed in similitude of the experiment. The standard LES model is used to represent the turbulence effect in the commercial code Fluent 5.5. It is shown that the numerical result is similar to the experimental result for the wake flow of a butterfly-type valve.

### 1. 서 론

오늘날 산업체에서 사용하는 각종 기기 등에서는 밸브를 쉽게 볼 수 있다. 밸브는 유량의 효과적 분배나 제어를 위해서 사용한다. 그 중에서 버터플라이 밸브는 원관 내의 유량을 밸브 디스크의 각도를 움직여서 제어한다. 디스크 각도에 따라 유체가 원관을 지나가는 단면적이 크게 달라짐으로 압력차이에 의해 유속의 변화가 심하게 되고 밸브 후류는 일정한 유동 패턴이 없는 복잡한 난류형태를 띄게 된다.

밸브 디스크의 후류에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되어져왔다. 박상원과 이상우 (2000) 는 공기조화용 버터플라이 밸브 하류의 3차원 유동특성을 연구하였고 Shim and Chang (1994) 은 유한요소 방법을 적용하여 밸브 디스크 각도가 45° 일 때 밸브 하류의 3차원 유동의 특성을 연구하였고 박상원 등은 버터플라이 밸브하류의 유동 안정성에 관해서 연구하였으며 Eom (1988) 은 유량조절에 의한 버터플라이 밸브

의 성능을 연구하였다. Addy et al. (1985) 은 버터플라이 밸브에 대한 압축성 유체의 특성을 연구하였고 Morris and Dutton (1989) 은 압축성 유체에 대한 버터플라이 밸브의 공기역학적 토크특성을 연구한 바 있다.

물리적인 현상을 해석하기엔 실험적인 연구가 제일 정확하지만 실험에 드는 비용이 막대하기 때문에 수치해석적인 연구가 절실히 요구되고 있다. 또한 최근 들어 컴퓨터의 급격한 발달로 인하여 수치해석적 연구가 활발하게 진행되고 있다.

하지만 DNS (Direct Numerical Simulation)를 사용하여 난류를 수치해석하기 위해선 엄청난 계산시간이 요구되기 때문에 이를 해결하기 위한 수치해석기법들이 많이 발표되고 있다. 이 중에서 LES (Large Eddy Simulation)는 작은 scale 유동구조는 modeling 하고 큰 scale 유동구조는 직접 계산하는 기법이다. LES는 비교적 정확한 해를 제공하기 때문에 현재 DNS의 차선책으로서 많이 사용되고 있는 방법이다.

본 연구에서도 밸브 디스크의 각도가 30°일 때 밸브 후류의 유동패턴을 실험하였고 그 신뢰성을 검토해 보기 위해 상용코드 FLUENT5.5를 이용하여 수치해석을 수행하였다.

제1저자 심요셉 연락처: 부산광역시 사하구 하단2동 840번지 동아대학교 기계공학부 전산유체역학 실험실

051-200-6845 jo1030@hanmail.net

### 2. 모델링 및 수치해석

## 2.1 모델링

Fig. 1은 수치해석에 사용된 격자계이다. 격자계는 FLUENT의 부속인 Gambit을 이용하여 구성하였으며 노드수는 51만개이고 비구조적 격자계를 사용하였다. Fig. 2는 원관내의 밸브 디스크 표면과 출구에서의 격자 구성을 나타낸다. 밸브는 실제 모양에 가깝게 타이어 (tire) 형태로 가정하였다.

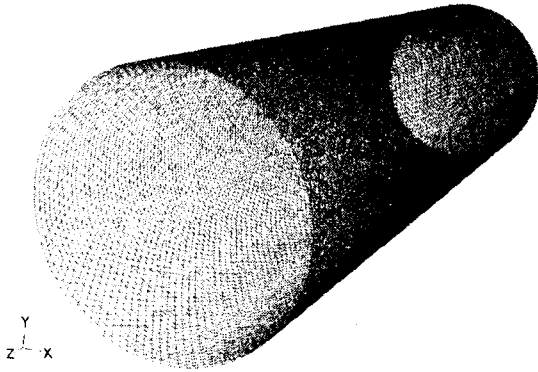


Fig. 1 Grid system within the cylindrical tube.

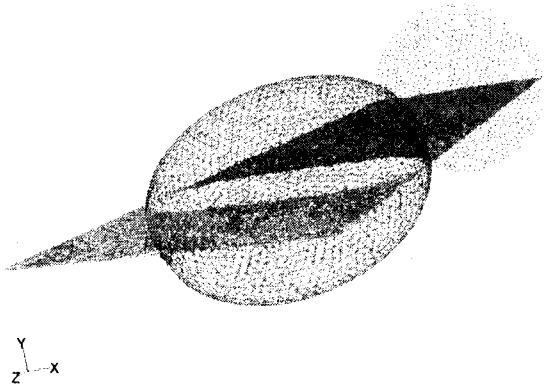


Fig. 2. Surface grid system on the valve disk and the at exit of the tube.

## 2.1 지배방정식과 LES model

비압축성 난류 흐름에 대하여 필터링 처리된 지배방정식을 텐서형으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} &= 0 \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $\tau_{ij}$ 는 전단응력텐서로서

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$$

이며,  $u_i$ 와  $u_j$ 의 곱의 필터링에서  $u_i$ 의 필터링과  $u_j$ 의 필터링의 곱을 뺀 것이다. 또한  $\bar{u}_i$ ,  $\bar{u}_j$ 는 각각 속도성분의 필터링 결과이며 방정식(1)을 통해 구하고자 하는 변수이다. 그러나  $\overline{u_i u_j}$ 는  $\bar{u}_i$ ,  $\bar{u}_j$ 와는 또 다른 항으로서 별도의 모델링을 통해서  $\bar{u}_i$ 와  $\bar{u}_j$ 를 사용하여 나타내지 않으면 안된다.

## 2.2 Smagorinsky 와 점성모델

본 연구에서는 가장 흔히 사용되는 Smagorinsky와 점성모델을 사용하였다. 아격자 스케일 (SGS; Subgrid Scale)의 응력텐서  $\tau_{ij}$ 는 각 좌표계 방향의 기준격자계인  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$ ,  $\Delta_3$ 보다 작은 에디의 활동이 공간평균성분의 점성을 일으키는 효과이다. 이것과 해상변수 (resolved variable ; 공간평균변수 즉  $\bar{u}_i$ ,  $\bar{p}$  등을 가리킴) 와의 관계는 아래와 같이 가정한다. 해상변수를 GS (GridScale) 변수라고도 한다.

$$\tau^a_{ij} = \tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\nu_t \bar{S}_{ij} \quad (2)$$

여기서  $\tau^a_{ij}$ 는 응력텐서의 비등방성(anisotropic)부분이고,  $\bar{S}_{ij}$ 는 변형률(Strain rate)텐서이고 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

식(2)가 의미하는 바는, 응력텐서의 비등방성(anisotropic)부분이 변형률  $\bar{S}_{ij}$ 에 비례하며 그 비례상수를  $-2\nu_t$ 로 두자는 것이다. 여기서 응력텐서의 등방성 항  $\frac{1}{3} \tau_{kk} (= \frac{1}{3} (\tau_{11} + \tau_{22} + \tau_{33}))$ 는 압력에 흡수시킬 수 있으므로 고려에서 제외시킬 수 있다. 식(2)의 관계를 고려하면 식(1)은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= \tau^a_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau^a_{ij}}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (3)$$

새로운 압력  $\bar{p}$ 는 아래와 같다.

$$\bar{p} = \bar{p} + \frac{1}{3} \tau_{kk} \quad (4)$$

Smagorinsky는  $\nu_t$ 를 에너지 생성과 소산이 균형을 이룬다는 가정에서 다음과 같이 정의하였다.

$$\nu_i = C \overline{\Delta^2} |\overline{S}|$$

$$\overline{\Delta} = (\Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3)^{\frac{1}{3}}$$

$$|\overline{S}| = (2 \overline{S_{ij}} \overline{S_{ij}})^{\frac{1}{2}}$$

C는 모델상수이고  $|\overline{S}|$ 는 공간함수로서 스칼라이다.  $\overline{\Delta}$ 는 필터링 폭이며  $\Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3$ 는 각방향의 각자계이다. 수치해석시 시간에 대해서는 IMPLICIT, 대류항에 대해서는 풍상차분법, 압력항에 대해서는 SIMPLE 법, 이산화는 유한체적법으로 하였다. 난류강도는 0.1%, 모델상수 C는 0.1로 두었으며 초기 입구에서의 유속은 실험조건과 동일하게 0.13 m/s로 주었다.

## 2.2 실험장치 및 실험방법

본 연구의 실험장치는 크게 버터플라이 밸브, 원관, 디지털 고속 카메라 (FASTCAM-Rab-bitmini 2), 화상처리를 위한 image board (DT-3155)가 내장된 PC, Ar-Ion Laser로 구성되어 있다. Fig. 3은 실험장치를 도시한 것이다.

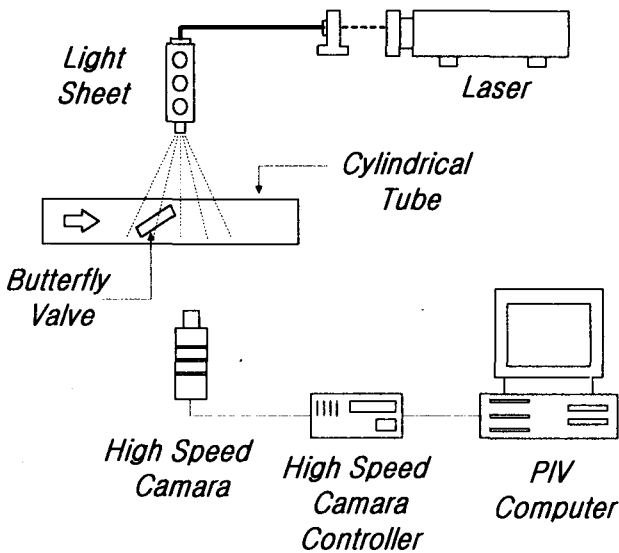


Fig. 3 Experimental apparatus.

가시화 가능한 원관의 길이는 1m이며 실험에서는 밸브 디스크 끝단을 기준으로 30cm를 가시화 하였다. 밸브 디스크 두께는 34mm이고 직경은 100mm이며 밸브 디스크 끝단은 얇은 고무로 실링 처리 되어 있다. Ar-Ion-Laser의 sheet light를 원관의 중앙단면에 비추고 디지털 고속 카메라에 의해 유동을 촬영하였다. 실험에서 셔트속도는 1/60 초이다. 이렇게 촬영된 영상은 DT-3155보드에 의해 하드디스크에 저장된다. 속도장 계산을 위한 PIV 해석은 상용 프로그램인 Thinker's Eyes를 사용하였으며 계산시 나타나는 에러벡터 역시 여기서 제거하고 내삽(Interpolation)하였다. 유동 가시화를 위하여 물과 비중이 비슷한 아크릴 파우더를 사용하였고 원관내 유동속도는 하류 쪽에

설치된 조절밸브를 이용하여 조절하였다.

## 3. 결과 및 검토

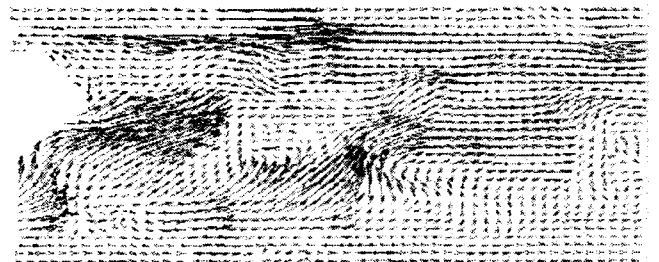
Fig. 4는 밸브 디스크의 각도가 30도로 고정되어 있을 때 원관내 유입된 유체가 밸브 디스크 주위에 이르러 어떠한 유동의 패턴으로 흘러가는지를 가시화한 사진이다. 원관의 지름 (D=100mm)과 평균유속 (0.13 m/s)를 기준으로 하였을 때 레이놀즈수는  $1.3 \times 10^4$ 이다. 원관내 유체는 초기 속도에 의해 흘러가다가 밸브 디스크 주위에서 급격하게 유동의 패턴이 변한다.



Fig. 4 Flow pattern around valve disk.



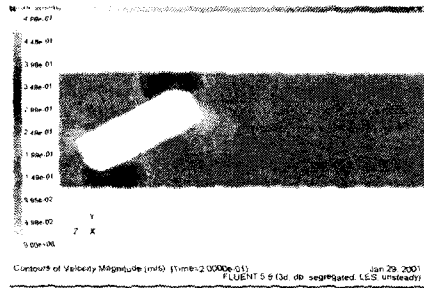
(a) Pathlines.



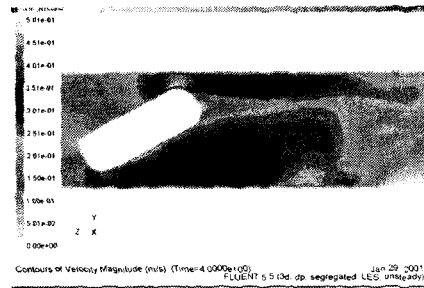
(b) Velocity vectors for PIV analysis

Fig. 5 Experimental results of the flow visualization in the wake of the valve.

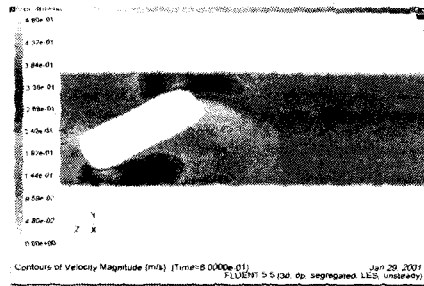
Fig. 4는 이 그림에서 보이는 처럼 P1과 P2점에서 각각 정체점 (Stagnation Point)과 박리점 (Separation Point)이 생기게 된다. 원관 입구에서의 유체는 P1점을 경계로 P1점보다 윗 부분의



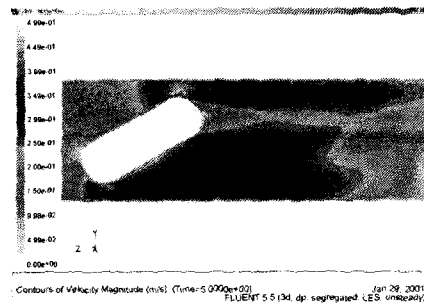
(a)  $t = 0.2$



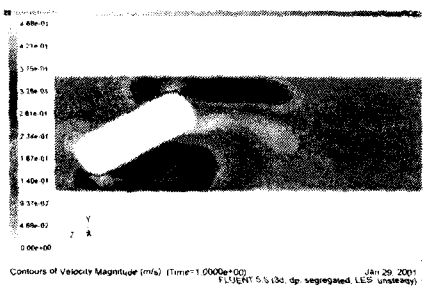
(f)  $t = 4$



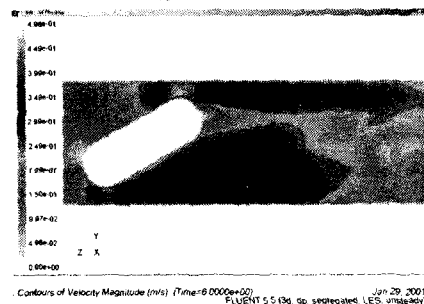
(a)  $t = 0.6$



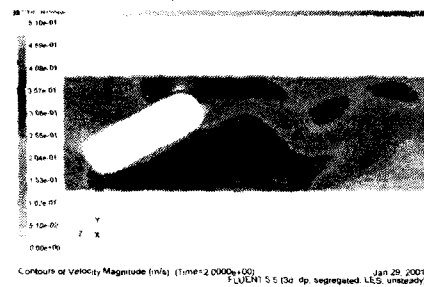
(g)  $t = 5$



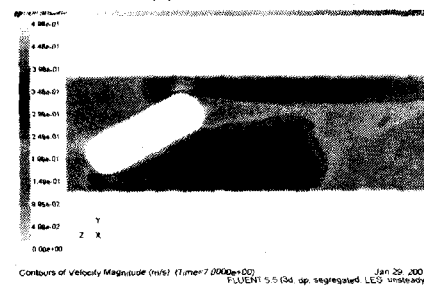
(c)  $t = 1$



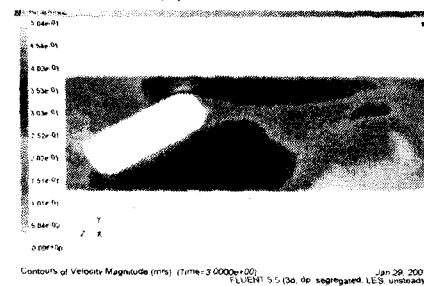
(h)  $t = 6$



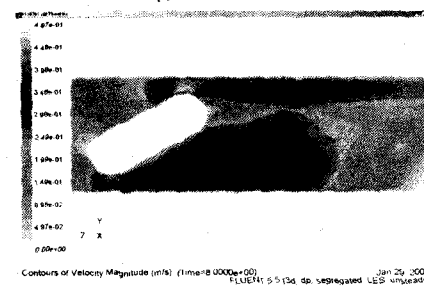
(d)  $t = 2$



(i)  $t = 7$



(e)  $t = 3$



(j)  $t = 8$

Fig. 6 Streamline of time step.

## 참 고 문 헌

유체는 원관 상류로 흘러가게 되고 P1점보다 아랫부분은 원관의 하류로 나뉘어져 흘러가게 된다. 이때 원관의 상류와 하류로 나뉘어진 유체는 지나가는 급격한 단면적의 감소로 인하여 압력차이가 발생하게 되고 유체는 초기조건보다 몇 배 빠른 유속으로 좁은 원관을 흘러가게 된다. 원관 상류를 지나가는 빠른 유속으로 인하여 P2점과 P3점 사이에서 재순환영역이 생기게 되는데 실험시 상류에서의 시계방향 Vortex를 관찰할 수 있었다. 고속카메라에 의해서 촬영된 유동장이 Fig. 5에 나타나 있다. (a)는 셔트속도 1/60 프레임으로 촬영된 사진이고 (b)는 Frame grabber에 의해 계산된 velocity vector이다.

Butterfly Valve disk의 윗부분을 통과하는 원관 상류의 빠른 유속이 아랫부분을 통과하는 원관 하류의 유속보다 운동에너지를 오래가지고 있음을 확인할 수 있다. P3점을 기준으로 Valve disk 하단을 통과하는 유속과 상류의 유속이 합쳐지는 것을 알 수가 있으며 이때 하류에서 상류로 올라오는 유속은 원관의 단면적이 급격하게 커짐에 따라 운동에너지를 잃어버린다. P3점을 기준으로 합쳐진 유속은 원관의 중심부로 서서히 이동한다. 원관의 길이방향을  $x$ 축이라고 가정하고 밸브 디스크의 지름을  $D$ 라 한다면 밸브 디스크 중앙을 기준으로  $x/D = 1.4$ 인 점의 원관 중심부에서는 무질서한 천이형태의 유동 패턴을 띄게 되는 것을 실험을 통해 알 수 있었다. Fig. 6은 시간스텝에 따른 유선을 나타낸 것이다. 밸브 디스크의 끝단부에서 초기유속보다 3.8배가량의 빠른 속도분포를 나타냈고 Valve disk상단의 속도벡터방향은 원관의 벽면과 거의 평행하다. 이는 유체의 운동량이 Valve 상단부에서 가장 많음을 나타낸다.  $t=0.6$ 일 때 박리점이 나타나기 시작하고  $t=2$ 일 때 재순환영역이 생긴다. 그림을 통하여 밸브 디스크 하단부의 속도분포가 상단부보다 넓게 분포되어있음을 확인할 수 있다.  $t=4$ 일 때 Valve 상단유속과 하단유속이 합쳐지는 즉 박리점이 끝나는 점이 생성되고 이 점을 중심으로 Valve 하단의 유속은 운동량을 급격하게 잃어 유속이 감소하는 것을 알 수 있고 이와 같은 유동은  $t=5$ 이후의 시간스텝에서도 계속됨을 알 수 있고 이와 같은 결과는 앞에서 논의한 유동의 가시화 결과와도 잘 일치하는 것이다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 밸브 후류에 대한 수치해석과 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 수치해석과 실험을 비교해본 결과 정성적으로 비슷한 결과를 나타내었다.

(2) 수치해석에 사용된 LES 기법은 난류를 해석함에 있어 믿음직한 결과를 제공한다.

(3) Butterfly Valve disk를 통과하는 유체의 정체점과 박리점을 실험과 수치해석을 통하여 모두 발견할 수 있었다.

(4) 원관내 밸브 상류의 유동은 하류의 유동보다 운동에너지를 오랫동안 가지고 흘러가며 박리영역이 끝나는 점을 기준으로 하류유동과 상류유동이 합쳐지는 현상을 수치해석을 통하여 알 수 있었다.

박상원, 이상우 (2000) "버터플라이 밸브 하류 유동의 안정화에 관한 연구", 대한기계학회논문집 B권, 제24권 제11호, pp 1417~1427.

박상원, 이상우 (2000) "공기조화용 버터플라이 밸브 하류에서의 3차원 유동특성", 대한기계학회논문집 B권, 제24권 제2호, pp 260~269.

김도형, 양경수 (2001) "평판 사이 정방향실린더 주위의 난류 유동에 대한 LES", 대한기계학회논문집 B권, 제2권 제2호, pp 1417~1427.

Daichin and Sang Joon Lee., 2001, "Flow Structure of the Wake behind an Elliptic Cylinder Close to a Free Surface," *KSME Int. J.* Vol. 15, No. 12, pp. 1784~1793,

Eom, K., 1988, "Performance of Butterfly Valves as a Flow Controller," *ASME J. Fluids Engineering*, Vol. 110, pp. 16~19.

Morris, M. J. and Dutton, J. C., 1989, "Aerodynamic Torque Characteristics of Butterfly Valves in Compressible Flow," *ASME J. Fluids Engineering*, Vol. 111, pp. 392~399.

Shim, E. B. and Chang, K. S., 1994, "Three-Dimensional Vortex Flow Past a Tilting Disc Valve Using a Segregated Finite Element Scheme," *Comput. Fluids*, Vol. 3, pp. 205~222.

Addy, A. L., Morris, M. J. and Dutton, J. C., 1985, "An Investigation of Compressible Flow Characteristics of Butterfly Valves," *ASME J. Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 512~517.