Proceedings of
The Second National Congress on Fluids Engineering
August 22-24, 2002, Muju, Korea

원관내 밸브 디스크 회전각의 변화에 따른 유동특성

심요셉*·허형석**·변동근***·서용권****

Characteristics of flow for various rotating angle in cylindrical tube

Joseph Shim*, Hyeung-Suk Huh**, Dong Gun Byun*** and Yong-Kweon Suh****

Key Words : *Butterfly Valve(버터플라이 밸브), Vortex Flow(와류), Stagnation Point(정체점), Valve Disk(밸브 디스크), Cylindrical Tube(원관), Seperation Point(박리점)*

Abstract

In this paper, flow on the rear region of a butterfly valve was analysed by using numerical and experimental methods. The butterfly-valve disk angle is changed as 0-60 degree and the uniform flow velocity was fixed in this experiment. It was shown that the numerical results are similar to the experimental results. General discussions are given to the flow-pattern change upon the disk angle of the valve.

1. 서 론

오늘날 산업체에서 사용하는 각종 기기 등에서는 밸브를 쉽게 볼 수 있다. 밸브는 유량의 효과적인 분배나 제어를 위해서 사용한다. 그 중에서 버터플라이 밸브는 원관내의 유량을 밸브 디스크의 각도를 움직여서 제어한다. 디스크 각도에 따라 유체가 원관을 지나가는 단면적이 크게 달라짐으로 압력차이에 의해 유속의 변화가 심하게 되고 밸브 후류는 일정한 유동패턴이 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^o일 때 밸브 하류의 3차원 유동의 특성을 연구하였고 박상원 등은 버터플라이 밸브하류의 유동 안정성에 관해서 연구하였으며 Eom (1988) 은 유량조절에 의한 버터플라이 밸브의 성능을 연구하였다. Addy et al. (1985) 은 버터플라이 밸브에 대한 압축성 유체의 특성을 연구하였고 Morris and Dutton (1989) 은 압토크특성을 연구한 바 있다.

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

* 동아대학교 대학원 기계공학과, jo1030@hanmail.net
** 동아대학교 대학원 기계공학과, hshuh5946@hanmail.net
*** HY-lok corporation, freeman@hy-lok.com
**** 동아대학교 산업시스템공학부, yksuh@mail.donga.ac.kr

하지만 DNS (Direct Numerical Simulation)를 사용하여 난류를 수치해석하기 위해선 엄청난 계산시간이 요구되기 때문에 이를 해결하기 위한 수치해석기법들이 많이 발표되고 있다. 이중에서 LES (Large Eddy Simulation)는 작은 scale 유동구조는 modeling 하고 큰 scale 유동구조는 직접 계산하는 기법이다. LES는 비교적 정확한 해를 제공하기 때문에 현재 DNS 의 차선책으로서 많이 사용되고 있는 방법이다. 본 연구에서는 밸브 디스크의 각도가 0^o~ 60^o 일 때 밸브 후류의 유동패턴을 실험하였고 그 신뢰성을 검토해 보기 위해 상용코드 FLUENT 6.0 을 이용하여 수치해석결과를 실험결과와 비교함으로써 정확한 유동장을 검증해 보는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 수치해석 및 실험방법

2.1 수치해석 방법

Fig.1은 수치해석에 사용된 격자계이다. 격자계는 FLUENT의 부속프로그램인 Gambit 을 이용하여 구성하였으며 노드수

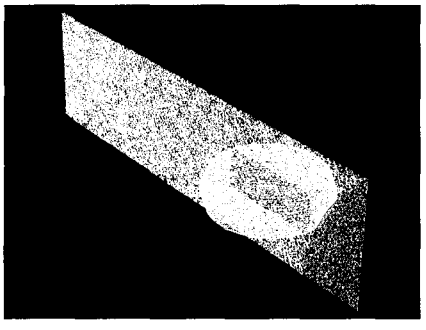


Fig. 1 grid system on the valve disk

는 50만개이고 비구조적 격자계를 사용하였다. 원관내의 밸브 디스크 표면과 입,출구에서의 격자구성을 나타낸다. 밸브는 실제 모양에 가깝게 tire 형태로 가정하였다.

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

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i u_i}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re}\frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

여기서 τ_{ij} 전단응력텐서로서

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i}\,\overline{u_j}$$

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

본 연구에서는 가장 흔히 사용되는 Smagorinsky의 와점성 모델(eddy viscosity model)을 사용하였다. 아격자 스케일(SGS; subgrid scale)의 응력텐서 τ_{ij}는 각 좌표계 방향의 기준 격자인 $\triangle_1$, $\triangle_2$, $\triangle_3$보다 작은 에디의 활동이 공간평균성분의 점성을 일으키는 효과이다. 이것과 해상변수 (resolved variable ; 공간평균변수 즉 $\overline{u_i}$, $\overline{p}$ 등을 가리킴) 와의 관계는 아래와 같이 가정한다.

$$\tau^a_{ij} = \tau_{ij} - \delta_{ij}\tau_{kk}/3 = -2\nu_t \overline{S_{ij}} \quad (2)$$

여기서 τ^a_{ij}는 응력텐서의 비등방성(anisotropic)부분이고 $\overline{S_{ij}}$는 변형률텐서(strain rate)이고 다음과 같이 정의된다.

$$\overline{S_{ij}} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right)$$

식 (2)가 의미하는 바는, 응력텐서의 비등방성(anisotropic)부분이 변형률 $\overline{S_{ij}}$에 비례하며 그 비례상수를 $-2\nu_t$로 두자는것이다. 여기서 응력텐서의 등방성항 $\tau_{kk}/3$은 압력에 흡수시킬 수 있으므로 고려에서 제외시킬 수 있다. 식 (2)의 관계를 고려하면 식 (1)은 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = \frac{\tau^a_{ij}}{\partial x_j} + \frac{1}{3}\frac{\tau_{kk}}{\partial x_j}\delta_{ij} = \frac{\tau^a_{ij}}{\partial x_j} + \frac{1}{3}\frac{\tau_{kk}}{\partial x_i} \quad (3)$$

새로운 압력 $\tilde{p}$는 다음과 같다.

$$\tilde{p} = \overline{p} + \frac{1}{3}\tau_{kk}$$

Smagorinsky는 ν_t를 에너지 생성과 소산이 균형을 이룬다는 가정에서 다음과 같이 정의하였다.

$$\nu_t = C\,\overline{\triangle}^2\,|\overline{S}|$$
$$|\overline{S}| = (2\overline{S_{ij}S_{ij}})^{1/2}$$
$$\overline{\triangle} = (\triangle x_1 \triangle x_2 \triangle x_3)^{1/3}$$

C는 모델상수이고 $|\overline{S}|$는 공간함수로서 스칼라이다. $\overline{\triangle}$는 필터링 폭이며 격자크기 $\triangle x_1$, $\triangle x_2$, $\triangle x_3$는 각 방향의 격자간격이다.

수치해석시 시간에 대해서는 음적 오일러법, 대류항에 대해서는 풍상차분법, 압력항에 대해서는 SIMPLE법으로 처리하였다. 입구난류강도는 10%, 모델상수C는 0.1로 두었으며 초기 입구에서의 유속은 실험조건과 동일하게 0.15m/s로 주었다.

2.2 실험장치 및 실험방법

실험에서는 밸브디스크 끝단에서부터 하류쪽으로 30cm의 지점까지 가시화하였다. 밸브디스크 두께는 32mm이고 직경은 100mm이며 밸브디스크 중앙 끝단은 얇은 고무로 실링 처리되어 있다. Fig. 2는 실험장치를 도시한 것이다.

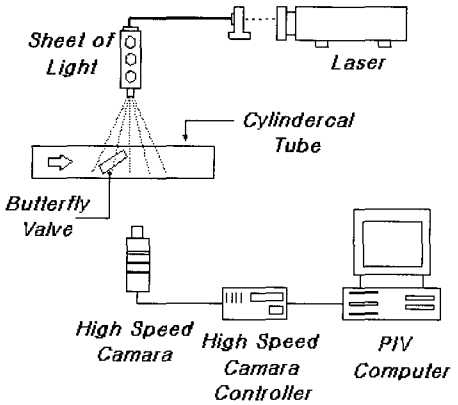


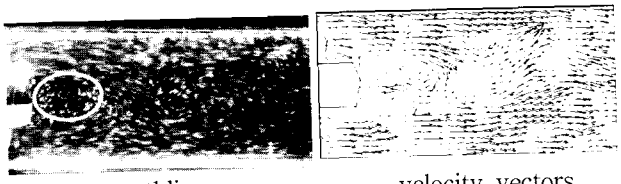
Fig.2 Experimental apparatus

아르곤-이온 레이저광을 원관의 중앙단면에 비추어 디지털 고속 카메라에 의해 촬영하고 이렇게 촬영된 영상은 DT-3155 보드에 의해 하드디스크에 저장된다. 속도장 계산을 위한 PIV 해석은 상용 프로그램인 Thinker's Eyes를 사용하였으며 계산시 나타나는 에러 벡터 역시 여기서 제거하고 내삽(interpolation)하였다. 유동 가시화를 위하여 물과 비중이 비슷한 아크릴 파우더를 사용하였다.

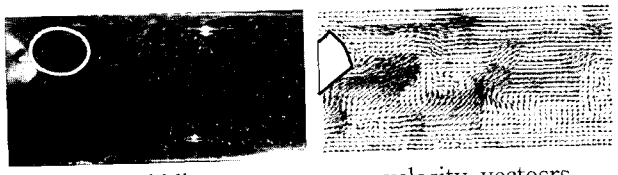
3. 결과 및 검토

Fig.3 은 원관내로 유입된 유체가 밸브 디스크 각도의 변화에 따라 어떠한 유동의 패턴으로 흘러가는지를 가시

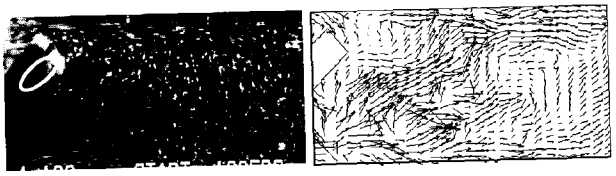
화한 사진이다. 원관의 지름(100mm)과 평균유속(0.15m/s)을 기준으로 하였을 때 레이놀즈수는 1.5×10^4 이다.



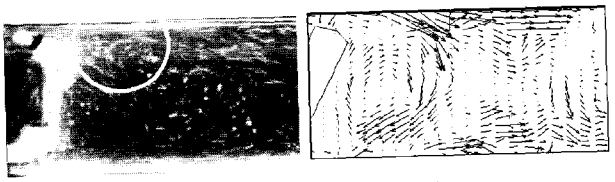
pathlines velocity vectors
(a) valve disk angle= 0^o



pathklines velocity vectosrs
(b) valve disk angle= 30^o



pathlines velocity vectors
(c) valve disk angle= 45^o



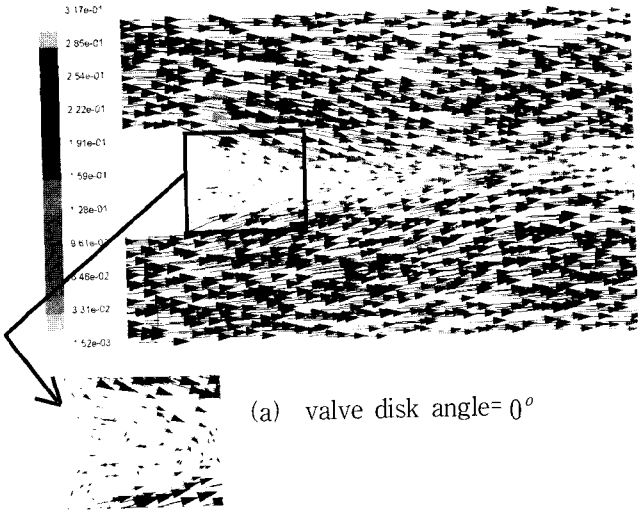
pathklines velocity vectors
(d) valve disk angle= 60^o

Fig. 3 Experimental results

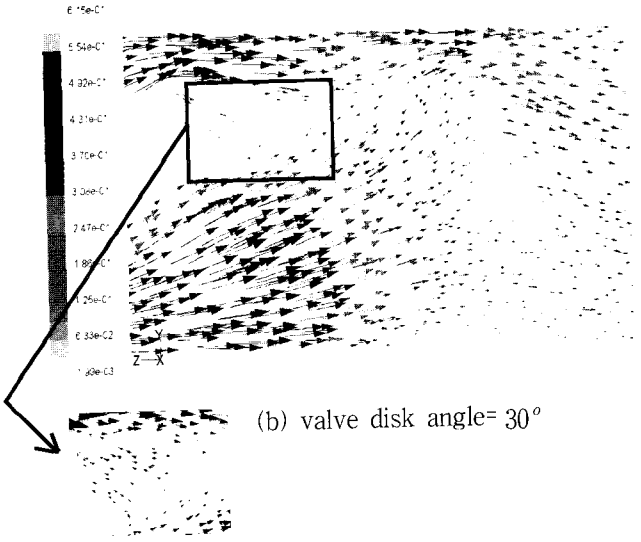
Fig .4는 Fig. 3의 전형적인 유동양상을 설명하기 위한 사진이다. 보이는 것처럼 P1과 P2점은 각각 전방정체점(stagnation point)과 후방정체점이 생기는 것을 알 수 있다. 원관 입구에서의 유체는 P1점을 경계로 P1보다

Fig .4 Pattern of flow with surrounding valve disk

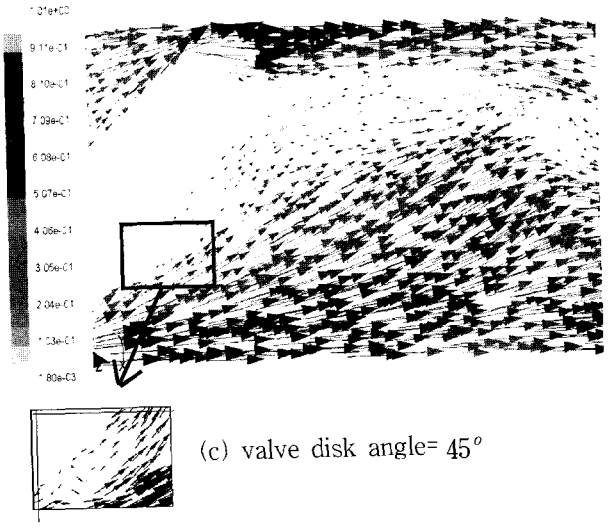
윗 부분은 원관의 상류부분으로 흘러가고 P1보다 아랫부분은 원관의 하류부분으로 흘러간다. P1을 지난 유체는 단면적의 급격한 감소로 초기조건보다 몇 배 빠른 속도로 밸브 디스크 상,하단과 원관 사이의 좁은 단면적으로 흘러가고 밸브 후방에는 재순환영역이 생기게 된다. Fig. 3에서 O 으로 재순환영역을 표시하였다. 디스크의 각도가 60^o일 때 실험한 다른 3가지의 경우보다 와류(Vortex)의 범위가 큰 것을 확인할 수 있고 0^o일 때에는 일반적으로 구조물 후류에서 발견되는 반전하는 와류쌍(Vortex pair)을 발견할 수 있었다.



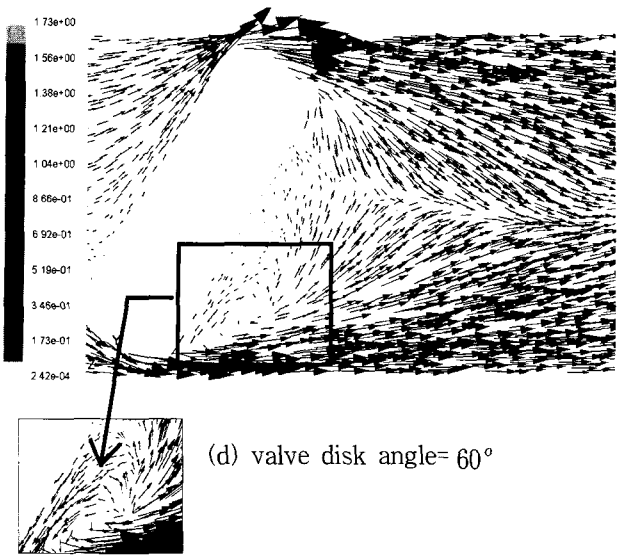
(a) valve disk angle= 0^o



(b) valve disk angle= 30^o



(c) valve disk angle= 45^o



(d) valve disk angle= 60°

Fig. 5 Numerical solutions for various valve disk angles at Re = 1.5×10^4

Fig. 5 는 수치해석결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 본 연구의 계산결과는 실험결과와 특히 disk angle이 작을 때 잘 맞는 경향을 보여준다. 밸브디스크의 각도가 60°일 때는 디스크 상부의 오른쪽 끝단에서 박리가 시작되어 와류가 생기면서 박리영역이 끝나는 지점을 중심으로 밸브 상,하단을 통과한 유체가 합쳐지는 경향이 실험과 동일하게 나타났다. 45°일 때는 밸브 디스크 하단부를 통과한 유체가 60°일 때와 비교해 볼 때 상대적으로 매우 적은 와류(vortex)가 생겨나는 것을 알 수 있다. 디스크각도가 60°의 경우는 실험치와 비교해 볼 때 다소 후류영역의 크기가 차이가 나지만 비교적 다른 각도에 비해는 큰 와류가 생기는 것을 알 수 있다. disk angle이 클 때 정확한 수치해를 얻기 위해서는 계속적인 연구가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 레이놀즈수가 1.5×10^4일 때 밸브 디스크의 각도변화에 따른 유동장의 변화를 실험과 수치해석을 통하여 연구하였다. 연구의 결과를 정리해 보면 다음과 같다.

(1) 수치해석 결과는 실험결과와 특히 디스크 각도가 작을 때 잘 맞는다.
(2) PIV해석으로 밸브 디스크변화에 따른 유동구조의 특징을 확인할 수 있었다.
(3) 버터플라이 밸브 디스크를 통과하면서 발생하는 유체의 정체점, 박리점, 재순환 영역등이 밸브각도에 따라 상당히 다르게 나타났다.
(4) 수치해석에 사용된 LES기법이 밸브후류를 해석함에 있어 타당한지는 좀 더 연구해 볼 필요가 있다.

후 기

본 연구는 (재)부산 테크노 파크 " 특화 산업기술 개발 사업 " 지원에 의해 수행된 연구 결과의 일부이며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

[1] 박상원, 이상우. "버터플라이 밸브 하류 유동의 안정화에 관한 연구", 대한기계학회논문집 B권, 제24권 제11호, pp 1417~1427. 2000
[2] Daichin and Lee, S, J., "Flow Structure of the Wake behind an Elliptic Cylinder Close to a Free Surface", KSME Int. J. Vol. 15, No. 12, pp. 1784~1793, 2001
[3] Eom, K., "Performance of Butterfly Valves as a Flow Conrtoller," *ASME J. Fluids Engineering*, Vol.10, pp. 16~19. 1988
[4] Morris, M. J. and Dutton, J. C., "Aerodynamic Torque Characteristics of Butterfly Valves in Compressible Flow, "*ASME J. Fluids Engineering*, Vol. 111, pp. 392~399. 1989
[5] Shim, E. B. and Chang, K, S., "Three-Dimensional Vortex Flow Past a Tilting Disc Valve Using a Segregated Finite Element Scheme," *Comput. Fluids*, Vol. 3, pp. 205~222. 1994
[6] Addy, A. L., Morris, M. J. and Dutton, J. C, "An Investigation of Compressible Flow Characteristics of Butterfly Valves," *ASME J. Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 512~517. 1985