

버터플라이 밸브를 통과하는 압축성 유동에 대한 실험 및 수치해석적 연구

황 규 식,¹ 장 문 석,¹ 홍 진 표,¹ 허 형 석¹A STUDY ON EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS
ON THE COMPRESSIBLE FLOW INTO A BUTTERFLY VALVEK.S. Hwang,¹ M.S. Chang,¹ J.P. Hong¹ and H.S. Heo¹

Compressible flow characteristics in a butterfly valve is studied experimentally and numerically. The disk angle of the valve is changed as 0° ~ 30° . The SST model is used to represent the turbulent effect in the commercial code, CFX11. It was found that the numerical results are similar to the experimental ones, general discussions are given to the pressure distributions upon the disk angle of the valve.

Key Words : 버터플라이밸브(Butterfly Valve), 압축성유동(Compressible flow)

1. 서 론

유량 및 압력 조절 목적으로 사용되는 밸브 중 버터플라이 밸브(Butterfly valve)는 작고 가벼우며, 먼간거리가 짧고 간결하여 설치에 용이하다. 이러한 이유로 버터플라이 밸브는 화학플랜트, 상하수도설비, 제반 산업설비 외에도 조선설비, 소방설비, 반도체장비 등의 여러분야의 산업에 다양하게 이용되고 있다. 사용되어지는 유체는 액체와 일부 공기관련 장비에 사용되는 가스(Gas), 스팀(Steam), 슬러리(slurries) 등의 유체에 사용되어지고 있다.

최근에는 고속 비행체(유도무기, 항공기 등)에 유입되는 공기유량(압력)을 시스템에서 요구하는 조건에 따라 조절해 주는 장치에도 많이 사용되고 있는 추세이다. 이 장치는 기술적으로는 액체 추진기관의 산화제와 연료량을 조절해주는 장치나 고체 추진기관에서 고온의 가스유량 또는 압력을 조절해주는 공기량 조절장치 및 공기 압력 조절장치와 유사하다. 이렇게 광범위하게 사용되어지는 버터플라이 밸브의 연구는 주로 비압축성 유체를 중심으로 이루어지고 있으며 압축성 유체에 대한 연구는 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 버터플라이 밸브 내부를 흐르는 압축

성 유체에 대한 유동특성을 실험과 수치해석적인 기법을 통하여 분석하고, 실험결과와 수치해석결과를 비교 하고자 한다. 수행 목적은 고온, 고압의 액체, 고체 추진기관의 가스유량과 압력조절을 수행하는 능동형 버터플라이 밸브 개발의 사전연구로 진행되었다. 고온, 고압의 기체를 이용하여 버터플라이 밸브의 특성을 분석하는 실험은 매우 위험하거나, 많은 비용과 시간이 필요하여 현실적으로 어려운 면이 있다.

이번 연구는 버터플라이 밸브에 상온, 질소를 작동유체로 적용한 수치해석과 실험으로 진행하였다. 두 결과를 비교, 분석함으로써 수치해석의 신뢰성을 높이고, 향후 고온, 고압의 추진기관용 버터플라이 밸브 개발 시, 본 연구를 통해 얻어진 연구결과와 수치해석기법을 적용하고자 한다.

2. 버터플라이밸브 설계사양 및 모델링

2.1 설계사양

본 연구에 적용된 버터플라이밸브는 입구단의 압력변화가 발생하여도 디스크의 각도를 변화시켜 후단의 유량과 압력을 조절하기 위한 목적으로 설계되었다. 설계의 기본적인 사양은 Table 1과 같다.

2.2 3차원 형상 모델링

버터플라이밸브는 설계사양을 만족하는 형상으로 3차원 모

¹ 정희원, 동명모트롤(주) 기술연구소

* Corresponding author, E-mail: aerosp@nate.com

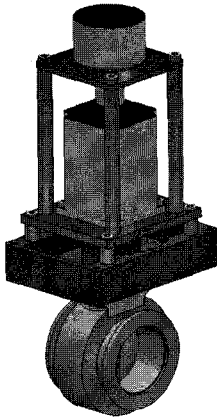


Fig. 1 3D Modeling of Butterfly Valve

델링이 되었으며, Fig. 1과 같다. 디스크의 상부에 모터와 엔코더를 연결하였다. 모터는 제어의 용이성 및 정지 시 잠김 토크 등을 고려하여 Stepping Motor로 선정하였고, 밸브 후단 압력제어를 위해 밸브 디스크의 위치를 검출하여 신호로 변환하는 위치검출 센서로 Absolute 형식의 엔코더(Encoder)를 사용하였는데, 이는 디스크가 계속적으로 조절되어도 초기 위치로부터 절대위치를 검출할 수 있도록 하기 위해서이다.

3. 유동해석

3.1 계산 조건

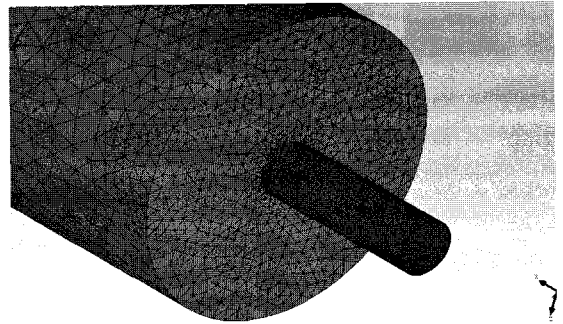
실험에 의해 측정된 버터플라이 밸브의 전, 후단 압력과 비교를 목적으로 동일한 조건에 대해 유동해석을 수행하였다. 유동해석을 위해 상용코드인 ANSYS CFX11을 사용하였으며, 버터플라이 밸브 입구, 버터플라이 밸브 Disk, 출구 오리피스를 고려한 3차원 정상상태의 해석을 수행하였다. 난류모델로는 압축성 유동에 비교적 정확한 결과를 보이는 SST, Heat Transfer Model은 Total Energy를 적용하였다.

3.2 계산 격자 및 경계 조건

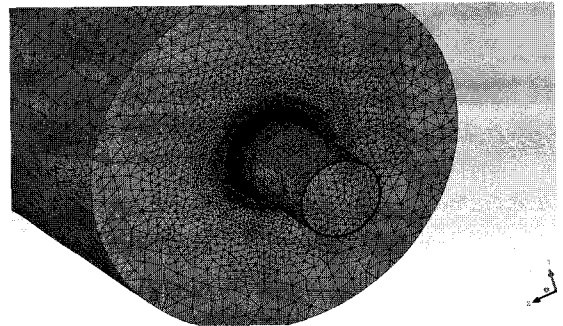
계산 격자의 생성 시 적용 난류모델의 특성에 따라 원활한 수렴성과 신뢰성을 확보하기 위해 y+, 경계층의 격자 밀집도,

Table 1 Design specification

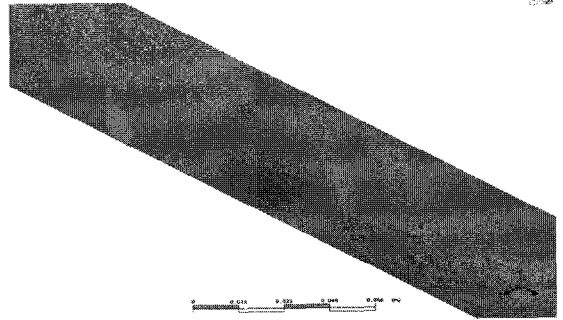
구분	입구단		출구단		비고
	압력	온도조건	압력	온도	
기본 조건	690kPa	20±10℃	172kPa	20±10℃	시험장치의 끝단 오리피스 크기: 15mm
일반 조건	172kPa	20±10℃	손실 없이 통과	20±10℃	



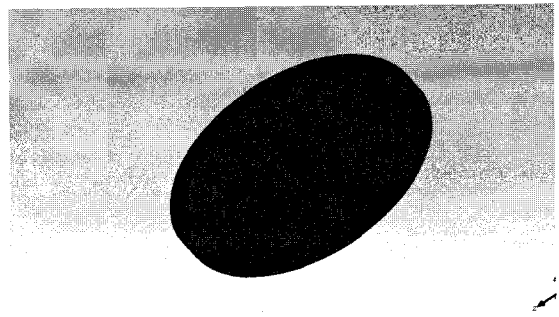
(a) Inlet



(b) Outlet



(c) Cylindrical Tube



(d) Disk

Fig. 2 Computational grid

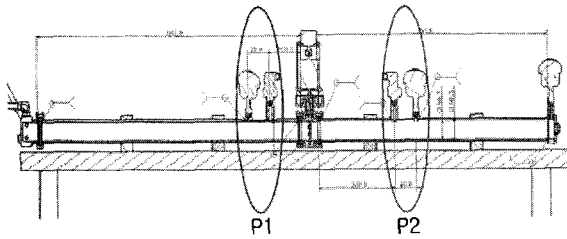


Fig. 3 Schematic of Butterfly Valve

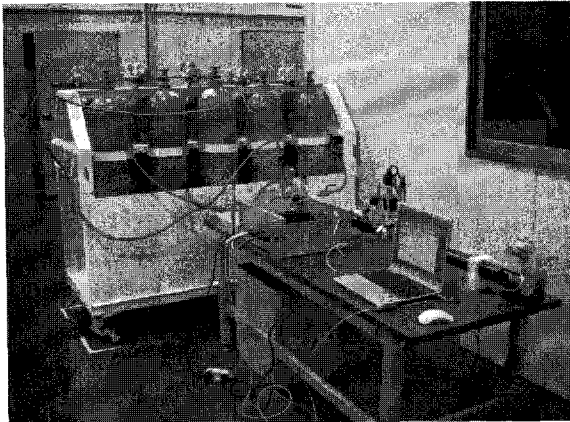


Fig. 4 Test Equipment of Butterfly Valve

격자형태 등을 신중히 고려하여야 한다. 따라서 우수한 품질의 계산 격자 확보가 정확한 유동해석의 필수적인 요소라고 할 수 있다.

본 연구에서는 Tetra-Prism 형태의 격자를 사용해 버터플라이 밸브 Disk, 오리피스 격자를 생성하였으며, 벽면경계로부터 첫 번째 격자까지 거리의 척도인 y^+ 는 적용난류 모델의 특성을 고려하여 10이하로 제한하였다. 계산 격자의 노드 수는 전체 약 1,000,000 노드이며, Disk 주변에 적정수준의 노드 수를 확보하기 위해 격자 크기는 0.1mm 이하로 제한하였다. 본 연구에 사용된 계산 격자계의 형태를 Fig. 2에 나타내었다. 유동해석을 위한 입구 조건으로 실험장치와 동일한 690kPa의 압력을 가하였고, 출구 오리피스는 대기압을 적용하였다. 버터플라이 밸브의 Disk 각도는 15°, 20°, 25°, 30° 로 각각 변경하며 유동해석을 수행하였다.

4. 실험장치 및 실험방법

본 연구의 실험 장치는 크게 버터플라이 밸브, 원관, 디지털 및 아날로그 압력계, 밸브의 각도 측정을 위한 absolute type encoder, 데이터를 획득하기 위한 DAS(Data Acquisition System)와 획득 데이터를 보여주는 컴퓨터로 구성되어있다.

설계가 완료된 실험장치의 주요 치수는 Fig. 2와 같다. 원관의 길이는 약 600mm 이고 밸브 디스크(Disk)의 두께는 4mm 이다. 중요 센서인 압력센서를 2 inch(50mm) 시험배관을 기준으로 밸브 전단에는 100mm 앞쪽에 설치하였고, 후단에는 밸브에서 250mm 떨어진 위치에 설치하였다.

시험은 5개의 bombe(Bomb)에서 동시에 질소 가스를 방출하며, 레귤레이터(Regulator)를 이용하여 압력을 690kPa로 맞추었다. 레귤레이터에서 플렉시블 호스(Flexible Hose)를 이용하여 실험용 원관과 연결하였으며 끝에 아날로그 압력센서를 설치하였다. 밸브 디스크 전(P1), 후단(P2)에는 아날로그와 디지털 압력센서를 같이 설치하였다. 원관의 마지막 출구 부분에는 오리피스($\phi 15$)를 달아 놓아 밸브 디스크 후단에 적절한 압력이 형성되도록 Fig. 3과 같이 실험 장치를 구성하였다. 밸브의 개도는 전폐되었을 때가 0°, 전개되었을 때 90°로 정의하였다.

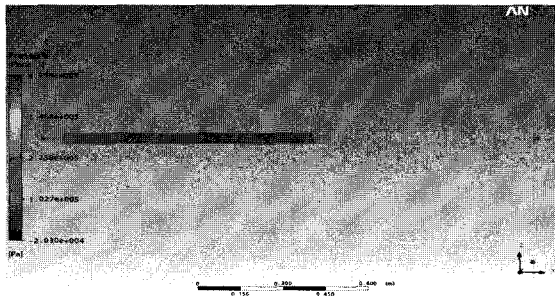
성능 시험은 bombe를 열고 레귤레이터를 이용하여 설정압력을 조절하였다. 최초 설정 압력은 690kPa이며 정확한 압력측정을 위해 플렉시블 호스에서 2inch(50mm) 원관으로 연결된 부분에 압력계를 설치하였고 전, 후단에 아날로그와 디지털 압력계를 같이 설치하였다. 완성된 실험 장치의 모습은 Fig. 4와 같다.

5. 결과 및 고찰

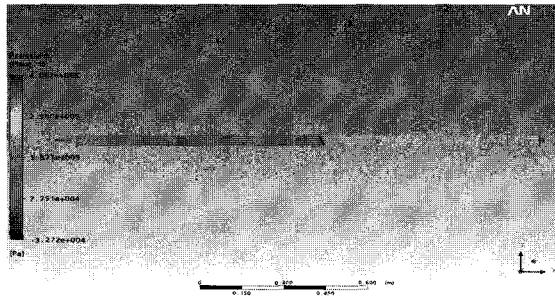
Fig. 5는 버터플라이 밸브 내부의 정압분포를 나타낸 그림이며 압력의 단위는 Pascal이다. Fig. 6은 덕트의 센터라인인 x 축을 따라 압력을 plot한 그림이다.

Disk의 각도가 15°인 경우, 밸브 전단의 압력은 471.8 kPa, 후단의 압력은 207 kPa로 Disk 전, 후의 압력차이가 크게 나타났다. 해석의 결과로 Disk의 개도가 15°인 경우, Disk 전, 후단의 압력손실이 높음을 알 수 있다. 또 버터플라이 밸브의 입구와 Disk의 전단부의 압력 차이는 거의 없는 것으로 나타나 밸브전단에서의 압력손실은 작은 것으로 나타났다.

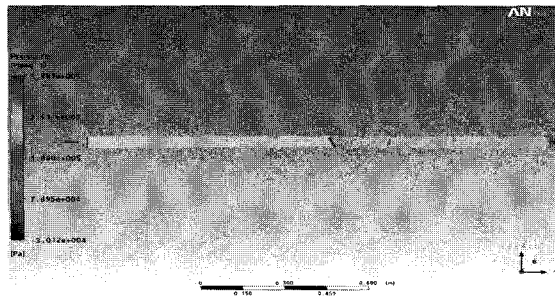
이와는 달리 25°이상의 Disk 각도에서는 밸브전단에서 약 100 kPa정도의 압력강하가 발생하는 것으로 나타났다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 3가지 경우 모두 입구에서 압력 변화가 나타나고 있다. 이처럼 15°와 달리 밸브 전단에서 압력 강하가 나타나는 것은 유입구와 밸브 전단 덕트(Duct) 사이에서 발생하는 압력 손실이 밸브에서의 압력 손실에 필적하거나 크기 때문이다. 25°의 경우 유입구에서 밸브 전단까지 89.6 kPa의 압력 강하가 발생하는 데 반해 밸브에서는 69.9 kPa의 압력강하가 발생하고 있다. 30°의 경우 유입구에서 밸브 전단까지 103 kPa의 압력 강하가 발생하는 데 반해 밸브에서는 39.3 kPa의 압력강하가 일어나고 있다. 2가지 경우 볼 때 각



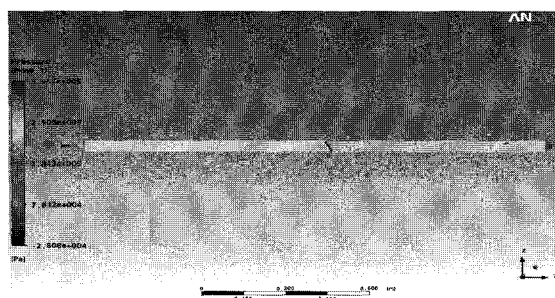
(a) Valve disk angle = 15°



(b) Valve disk angle = 20°



(c) Valve disk angle = 25°



(d) Valve disk angle = 30°

Fig. 5 Distribution Pressure of CFX

도가 증가 할수록 밸브 전단에서의 압력 강하는 증가하고 밸브에서의 압력강하는 감소하는 것을 알 수 있다. Table 2에 Disk 각도에 따른 전, 후단의 압력 데이터와 유량 데이터를

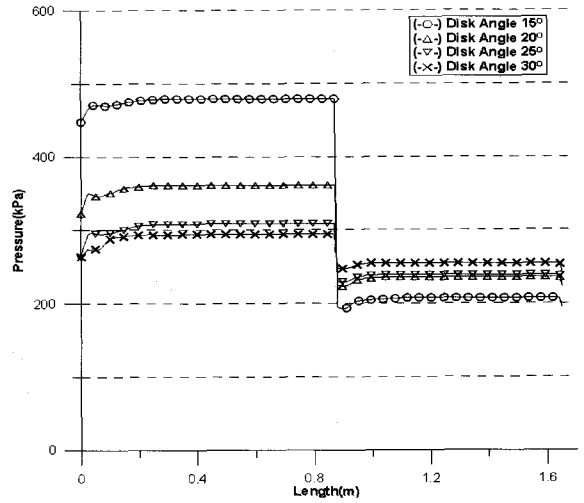


Fig. 6 Variation of Distribution Pressure along the pipe center

정리하였다.

유입 유량은 밸브 전단의 압력 강하와 비례한다고 볼 수 있다. 압력강하가 크다는 것은 질소분배와 밸브 전단의 압력 차이가 크다는 것을 의미하고, 이는 유량의 증대로 이어진다. 따라서 유량은 밸브 각도가 증가할수록 증가하고 있다. 그런데 25° 이상의 밸브 각도에서는 각도 변화에 대해서 덕트 내 유량의 변화가 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 25° 이상에서는 밸브에서의 손실이 유입구와 유출구에서의 손실에 비해 충분히 작아지기 때문이다. 결국 밸브의 역할이 감소하는 것을 의미한다.

실험 후 측정 그래프는 Fig. 7와 같으며 그 결과 값은 Table. 3에 나타내었다. 시험 시 밸브의 개도는 15°, 20°, 25°, 30°이다. Disk의 각도가 15°인 경우, 밸브 전단의 압력은 495.7kPa이고, 후단의 압력은 171kPa으로서 유동해석과 마찬가지로 전, 후단의 압력강하가 크게 나타남을 알 수 있다. 30°의 Disk 각도에서는 밸브 전단의 압력은 282.7kPa이고, 후단의 압력은 273kPa으로서 거의 손실 없이 통과되고 있다. 유동의 변화가 Disk의 각도에 따라 급격하게 변함을 알 수 있으며, 30°이후의 압력분포는 각도의 변화에 상관없이 전, 후단의 압력이 비슷해진다.

Table 2 Test Results of Analysis(단위:kPa)

Disk Angle	밸브전단 (P1)	밸브후단 (P2)	밸브에서 압력강하	유량 (Kg/sec)
15°	469.6	207.3	262.2	0.100
20°	360.7	238.6	122.1	0.111
25°	308.5	238.6	69.9	0.112
30°	293.7	254.4	39.3	0.113

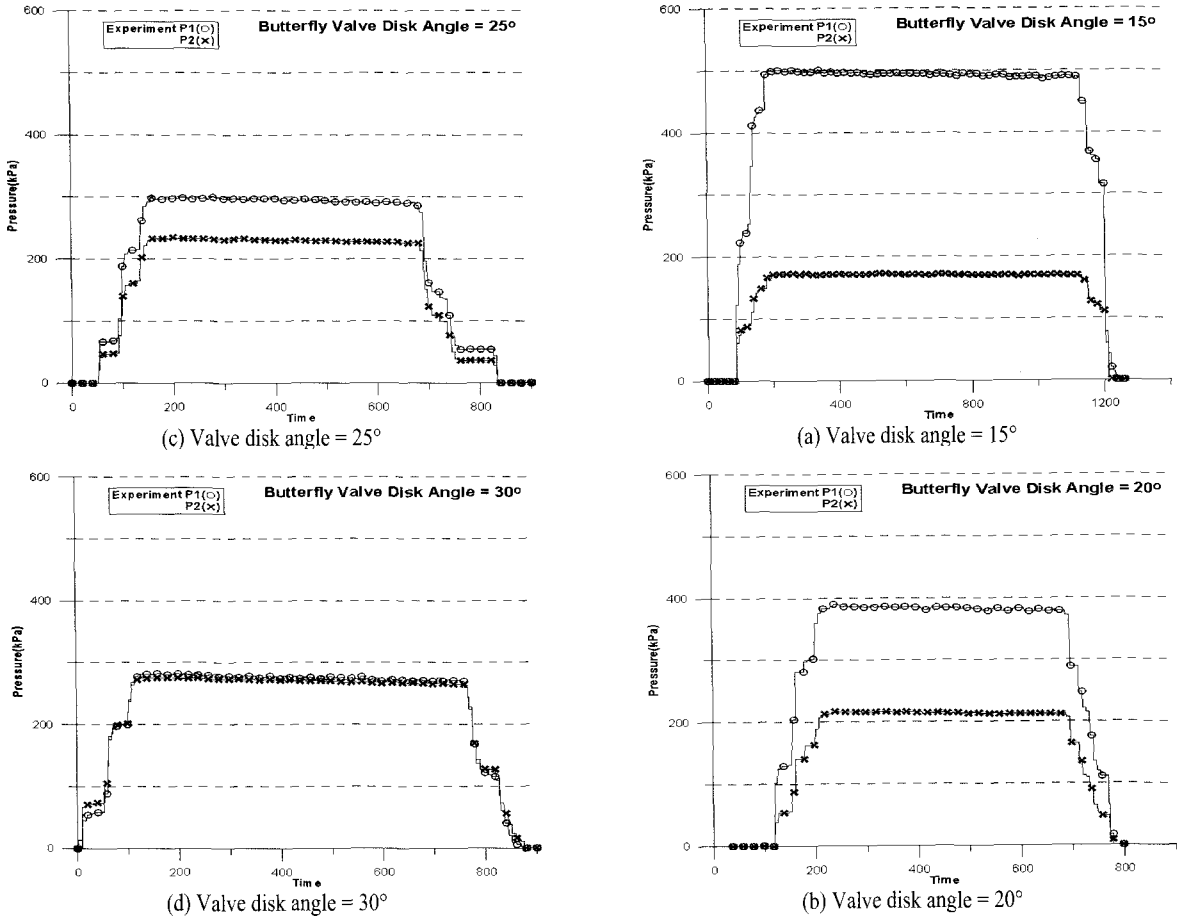


Fig. 7 Graph of Distribution Pressure

Table 4는 해석 data와 실험값과의 압력 데이터 비교이다. angle이 20°이하의 경우는 실험값과 비교해 볼 때 약간의 차이가 발생하고 있으나, Disk 각도가 커질수록 압력 데이터가 잘 맞는 경향을 보이고 있다.

6. 결 론

본 연구는 고온, 고압용 추진기관의 연료, 공기량 제어를

목적으로 하는 능동형 버터플라이 밸브 개발의 사전연구를 목적으로 진행되었으며, 효율적인 설계검증 기구로서 수치해석 기법의 신뢰성과 적용성을 검토해 보았다.

- 1) 버터플라이 밸브의 개도 (15°, 20°, 25°, 30°) 에 따라 디스크 전, 후단의 차압을 측정하였으며, 이 실험결과와 해석 결과의 비교를 통하여 해석결과의 신뢰성을 검토하였다.

Table 3 Test Results(단위:kPa)

Disk Angle	밸브전단 (P1)	밸브후단 (P2)	밸브에서 압력강하
15°	495.7	171.0	324.7
20°	386.1	215.8	170.3
25°	298.5	232.4	66.1
30°	282.7	273.0	9.7

Table 4 Pressure Data(단위:kPa)

Disk Angle	P1		P2	
	CFX11	Experiment	CFX11	Experiment
15°	469	495	207	171
20°	360	386	238	215
25°	308	298	238	232
30°	293	282	254	273

- 2) 실험에 의해 계측된 압력 데이터와 수치해석 데이터는 버터플라이 밸브의 열림각이 클수록 오차는 줄어드는 경향을 보였다.
- 3) 버터플라이 밸브의 전단(P1)의 압력분포는 실험과 수치해석의 결과가 유사한 경향을 보였으며, 밸브의 후단(P2)부에서 다소 큰 오차를 보였다.
- 4) 버터플라이 밸브의 개도가 15° 일 때 밸브 전, 후단의 압력손실은 약 260kPa로 나타났으며, 밸브의 개도가 클수록 압력손실은 줄어드는 경향을 보였다.
- 5) 향후, 수치해석부분의 신뢰성을 높이기 위한 추가 연구가 필요할 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지원에 의해 수행된 연구 결과의 일부이며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 1985, 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.512-17.
- [2] 1988, Eom, K., "Performance of Butterfly Valves as a Flow Controller," *ASME J. Fluids Engineering*, Vol.110, pp.16-19.
- [3] 1989, 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.
- [4] 1994, Shim, E.B. and Chang, K.S., "Three-Dimensional Vortex Flow Past a Tilting Disk Valve Using a Segregated Finite Element Scheme," *Comput. Fluids*, Vol.3, pp.205-222.
- [5] 2000, 박이, "버터플라이 밸브 하류 유동의 안정화에 관한 연구," *대한기계학회논문집 B권*, 제24권 제11호, pp.1417-1427.
- [6] 2000, 박이, "공기조화용 버터플라이 밸브 하류에서의 3차원 유동특성," *대한기계학회논문집 B권*, 제24권 제2호, pp.260-269.
- [7] 2001, 김양, "평판 사이 정방형실린더 주위의 난류유동에 관한 LES," *대한기계학회논문집 B권*, 제2권 제2호, pp.1417-1427.
- [8] 2001, Daichin and Sang Joon Lee., "Flow Structure of the Wake behind an Elliptic Cylinder Close to a Free Surface," *KSME Int. J.* Vol.110, pp.16-19.