버터플라이 밸브의 최적설계를 위한 성능해석에 관한 연구

A research on performance analysis for optimum design of the butterfly valve

*홍남수 [1], #안 훈 [1], 강범성 [1], 김재열 [2]
*K. D. Hong[1], #K. D. Kim(ID@email.com)[1] , K. D. Lee[1] ,J. Y. Kim[2]
[1](주)삼우기계 기술연구소, [2]조선대학교 메카트로닉스공학과

Key words : Butterfly valve, Flow Coefficient, FEM Analysis, Computational Fluid Dynamics, Optimum Design

1. 서론

밸브는 대부분의 산업공정에 유체의 흐름과 유량을 제어하는데 사용되고 있다. 또한 밸브의 용도와 목적, 제어방식 등에 따라 밸브의 형태는 다양하다. 그 중 버터플라이 밸브(Butterfly Valve) 는 산업공정에 가장 광범위하게 적용되어 사용되고 있다. 최근에는 밸브의 재질이 발달함에 따라 초저온 천연가스의 유량조절과 핵처리장치 퍼지밸브 등의 특수용도에 이르기까지 폭넓게 사용되고 있다. 버터플라이 밸브의 구성은 바디(Body), 디스크(Disc), 스템(Steam)으로 구성되며, 스템이 회전하여 디스크와 바디가 접촉하면서 유체의 흐름과 유량을 제어하게 된다.이러한 버터플라이 밸브의 구동메카니즘에 따라 밸브의 유량계수, 토크(Torque)계수, 압력손실계수, 구조적 안정성 확보, 유동특성만을 고려한 수치해석 등의 밸브의 성능과 크기를 결정하는 설계변수들에 대해서 많은 연구가 이루어 지고 있다.

본 논문에서는 JWWA 규격에 근거한 버터플라이 밸브의 유량계수(Cv)식을 도출하고 버터플라이 밸브의 구조적 안정성을 확보하기 위하여 사용압력 조건에 따른 구조해석(structure analysis) 을 수행하였다. 또한 밸브 열림각도와 사용조건에 따른 유량계수 및 압력손실, 공동현상(Cavitation) 분석을 위하여 유동해석(flow analysis) 을 수행하여, 버터플라이 밸브의 최적설계에 적용하고자 한다.

2. 유량계수의 계산

2.1 JWWA 규격

JWWA 규격은 일본 수도협의 규격으로 JWWA 규격에 근거한 유량계수 계산식은 식(1)과 같다.

$$Cv = 46{,}200 \times \emptyset d^2 \div \sqrt{\varepsilon V} \tag{1}$$

여기서, $\emptyset d$ 는 밸브의 직경으로 [mm] 단위이며, εV 는 밸브손실계수로 Table 1 에 나타낸 것과 같이 밸브의 열림각도에 따라 일정하게 적용되고 있다. JWWA 규격은 밸브의 형태, 크기, 사용조건, 유동특성 등의 설계변수들을 전혀 고려하고 있지 않다.

Table 1 Loss coefficient of Butterfly Valve

Item	Value								
Degree	5˚	10˚	20˚	30˚	40˚	50˚	60˚	70˚	80˚
εV	1599	399	99	43.4	17.9	6.72	2.56	0.984	0.417

2.2 유량계수

유량계수는 밸브를 개폐할 때 밸브에 작용하는 압력손실과 관련이 있다. 유량계수는 밸브 크기와 배관 구성에 대한 예측에 이용되며, 계산식은 식(2)와 같다.

$$Cv_{ISA} = \frac{Q_{gpm}}{\sqrt{\Delta P_{ISA} / S_g}} \tag{2}$$

여기서, 마찰계수를 고려할 경우 압력 차에 대한 식은 식(3)과 같이 유도될 수 있다.

$$\Delta P_{net} = \Delta P_{ISA} - 0.008986 \times S_g \times f \times \frac{Q^2}{d^4} \tag{3}$$

여기서 f 는 마찰계수이고, d 는 밸브의 직경이다. 식(3)을 수정한 것이 식(4)이다.

$$Cv_{net} = \frac{Q}{\sqrt{\Delta P_{ISA} / S_g - 0.008986 \times f \times \left(\frac{Q}{d^2}\right)^2}} \tag{4}$$

3. 버터플라이 밸브의 구조 및 유동해석

3.1 구조해석 및 경계조건

버터플라이 밸브를 최적설계하기 위한 초기모델을 Fig. 1 에 나타내었다. 밸브바디의 안정성 확보를 위한 구조 해석을 수행하였다.

구조해석은 밸브의 사용압력인 0.98[MPa], 1.47[MPa] 값을 적용하여 하중조건을 부여하였다.

Fig. 1 Model of butterfly valve body for Structure analysis(SUS304)

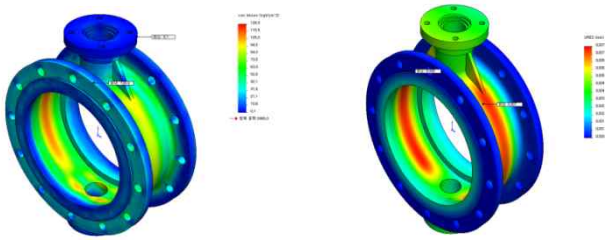
3.2 유동해석 및 경계조건

버터플라이 밸브에 작용하는 압력차를 구하기 위하여 유동해석 프로그램 CFdeign v9.0 을 이용하여 Cam 축 구동방식의 밸브에 대해 유동해석을 수행하였다. 밸브의 열림각도 10˚, 20˚, 30˚, 40˚, 50˚, 60˚ 의 6 단계에 대하여 유동해석을 수행하였다. 내부 유체는 비점성·비압축성 유체인 상온 20[℃] 의 H_2O 조건을 부여하였다. 밸브의 사용유속은 5[m/s] 로 입구조건으로 하였으며, 출구는 대기압으로 설정하였다. 유동장은 Yada et al.(1984) 와 Antoky and Sakurai(1984) 의 수치해석과 Kimmura(1995) 의 실험에서 알 수 있듯이 레이놀드수가 4,000 을 넘는 난류거동을 하므로, 난류유동 모델인 벽함수(wall funtion) 를 사용하는 k-ε 모델을 이용하 계산하였다.

3.3 구조해석 결과

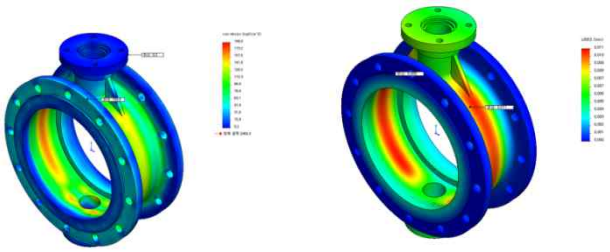
버터플라이 밸브의 사용압력에 따른 밸브 바디의 안정성 확보를 위하여 구조해석을 수행하였으며, 사용요소는 Ten-node tetrahedron 요소를 사용하여 해석결과값의 신뢰도

를 향상시켰다. 각 사용압력에 대한 구조해석 결과는 Fig. 2 와 Fig. 3 에 나타내고 있으며, 구조해석 결과값을 Table 2 에 정리하였다.



(a) Von mises stress (b) URES-Total Displacement

Fig. 2 Results of structure analysis(operating pressure : 0.98MPa)



(a) Von mises stress (b) URES-Total Displacement

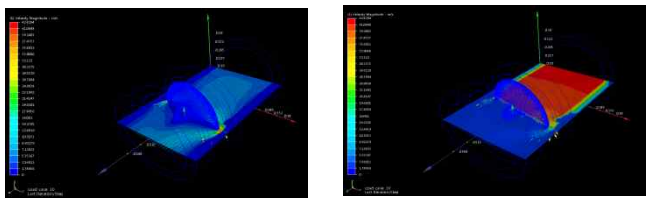
Fig. 3 Results of structure analysis(operating pressure : 1.47MPa)

Table 2 Results of structure analysis

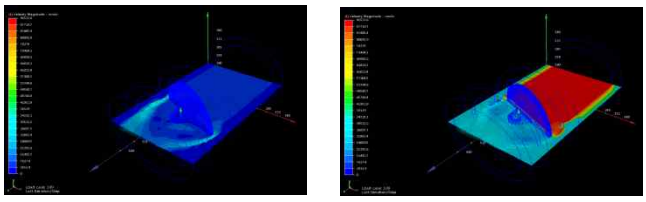
Item	Value(0.98MPa)	Value(1.47MPa)
Yield Stress [MPa]	241.27	241.27
Von Mises [MPa]	66.67	100.00
URES [mm]	0.064	0.097
Safety Factor	3.5	2.3

3.4 유동해석 결과

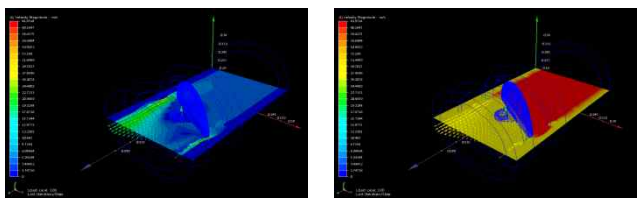
버터플라이 밸브의 300A 에 대한 유동해석을 수행하여 밸브열림 각도에 따른 압력장, 속도장을 분석하여 Fig. 4 에 나타내었고, 유동해석 결과값을 Table 3 에 정리하였다.



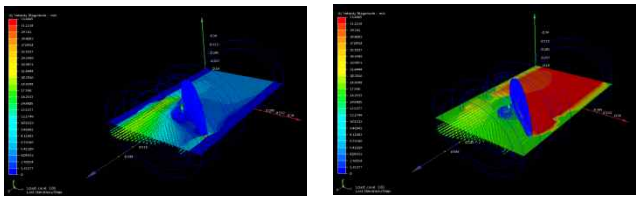
(a) Velocity vector and Pressure distribution (open degree : 10˚)



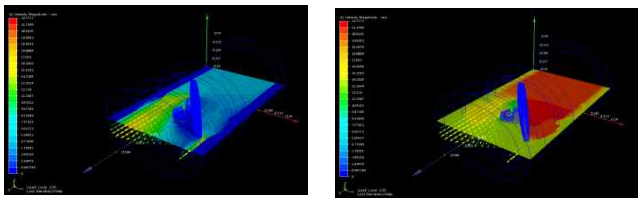
(b) Velocity vector and Pressure distribution (open degree : 20˚)



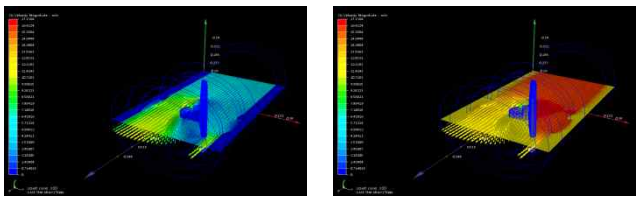
(c) Velocity vector and Pressure distribution (open degree : 30˚)



(d) Velocity vector and Pressure distribution (open degree : 40˚)



(e) Velocity vector and Pressure distribution (open degree : 50˚)



(f) Velocity vector and Pressure distribution (open degree : 60˚)

Fig. 4 Results of flow analysis

Table 3 Results of flow analysis

Item	Value					
Degree	10˚	20˚	30˚	40˚	50˚	60˚
Velocity[m/s]	42.82	91.53	41.93	32.46	27.73	17.13
Static Pressure [MPa]	3.52	0.60	0.39	0.28	0.20	0.16

4. 결론

본 논문에서는 버터플라이 밸브의 최적설계를 위하여 구조해석과 유동해석을 수행함으로써 최대응력과 밸브의 성능을 나타내는 압력손실계수를 목적함수와 설계변수 사이의 상관관계를 특성함수를 이용함으로써 2 개 이상의 목적함수에 대해 설계변수의 변화에 따른 설계 변경의 효과를 평가할 수 있었다. 또한 최적설계를 실시한 결과 구조적 안전성을 유지하면서, 기준 압력손실계수를 만족하는 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

후기

본 연구는 교육과학기술부.지식경제부.노동부의 출연금으로 수행한 산학협력중심대학육성사업의 연구결과로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kazuhiko Ogawa, "Hydrodynamic of butterfly valve-prediction of torque characteristics", ISA Transaction 34, 327-333, 1995.
2. T.Sprpkara "Torque and cavitation characteristics of butterfly valve", ASME Journal of Applied Mechanics, 511-518, 1961.
3. C.D Hung and R.H Kim, "Three-dimensional analysis of partially open butterfly valve flows", Transactions of the ASME, 118, 562-568, 1996.