

개폐 시 최소 간섭을 갖는 버터플라이 밸브 디스크의 설계

최영#, 부광석*, 여흥태**, 허관도**, 김호관***

Design of Butterfly Valve Disk to Minimize Interference at Opening and Closing

Young Choi#, Kwangsuk Boo*, Hongtae Yeo**, Kwando Hur** and Hokwan Kim***

ABSTRACT

In this study, the design and analysis of a butterfly valve disk was performed to minimize the rubbing between the disk and the seat at opening and closing. The butterfly valve has double eccentric structure and the contact surface between the disk and the seat is a conical surface. At the instant of opening and closing the valve by the rotation of disk, the positions of zero contact point are changed. Also, if the cone surface is cut in the perpendicular direction to the rotation axis of the valve, the contour of cutting section is hyperbolic. Therefore minimum distance between the origin of the eccentric axis and the hyperbolic curve goes to the position of zero contact point. In order to consider the interferences between the disk and the seat, the thermal-structure coupled field analysis was performed by ANSYS.

Key Words : Conical surface (원추곡면), Zero contact point (Zero 접촉), Thermal-structure coupled field analysis (열-구조 연성해석)

1. 서론

버터플라이 밸브(butterfly valve)는 제조공장, 발전설비 혹은 선박용으로 많이 사용되며 고온, 고압의 증기의 이송을 위한 배관에 설치되어 증기의 유량을 제어한다. 또한 게이트밸브, 볼밸브, 글로우밸브 보다 중량이 가볍고 공간을 작게 차지하며 완전 개폐 작동이 매우 빠른 것이 장점이다.

버터플라이 밸브에 대한 지금까지의 연구들은 주로 밸브의 압력손실계수, 토크특성, 유량제어 특

성에 대해서 이루어졌다. Addy¹ 등은 압축성 유동의 제어에 사용되는 버터플라이 밸브의 성능에 대하여 연구하였고, Eom² 는 구멍이 뚫린 회전판을 갖는 버터플라이 밸브의 성능과 밸브 디스크의 직경이 밸브의 유량제어 특성에 미치는 영향을 연구하였다. Park^{3,4} 등은 디스크 회전각에 따른 공기조화용 버터플라이 밸브의 유동제어 특성과 밸브 하류에서의 3차원 유동의 가시화 연구를 수행하였고 하류 유동을 안정화하기 위한 유동 안정장치를 제작하여 하류 난류 유동의 변화에 대해 연구하였다.

접수일: 2004 년 6 월 10 일; 게재승인일: 2004 년 9 월 9 일
교신저자: 인제대학교 기계자동차공학부 수송기계부품기술혁신센터(TIC)
E-mail ychoi@inje.ac.kr Tel. (055) 320-3755
* 인제대학교 기계자동차공학부 수송기계부품기술혁신센터(TIC)
** 동의대학교 기계공학부
*** 경남중소기업청

Kimura와 Ogawa^{5,6} 등에 의해 밸브 디스크의 형상에 따른 버터플라이 밸브의 유체 동역학적 특성 중에 압력손실 특성 및 토크 특성의 예측을 위한 연구가 수행되었다.

현재 버터플라이 밸브의 실링(sealing) 향상을 위해 여러 가지 형태의 디스크 구조들이 개발되어 있다. 그러나 이러한 구조들은 디스크 또는 시트에 부가적인 장치를 장착한 형태이므로 가공상의 문제와 밸브 디스크의 개폐과정에서 시트와 마찰에 의해 마모가 심하다.

그러므로 본 연구에서는 버터플라이 밸브의 개폐에 따른 디스크와 시트의 기하학적인 운동 궤적을 분석하여 개폐과정에서 디스크와 시트가 간섭을 일으키지 않고 최종적으로 밸브가 닫히는 순간 디스크와 시트가 접촉하는 형태의 구조를 개발하여 마모를 감소시키고자 하였다. 또한, 고온/고압의 환경에서 작동성의 향상을 위해 유한요소해석을 이용하여 변형량 및 간섭량을 알아 보았다.

2. 버터플라이 밸브의 구조

2.1 디스크 및 시트의 기하학적 구조

일반적인 버터플라이 밸브의 구조는 Fig. 1과 같다. 즉, 바디(body)에 시트(seat)가 부착되고 디스크(disk)는 회전축(stem)에 연결되어 회전축의 회전에 의해 밸브가 개폐된다. 닫힌 상태에서는 디스크와 시트의 접촉에 의해 실링(sealing)이 된다.

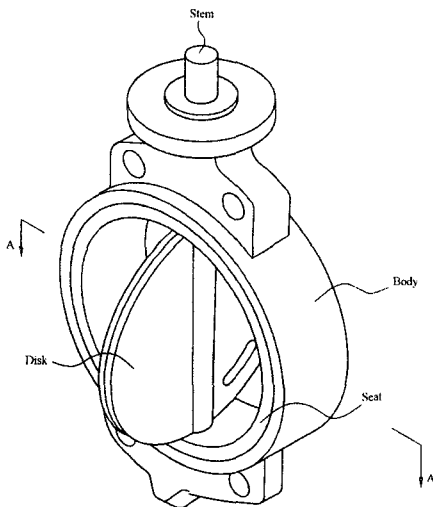


Fig. 1 Schematic drawing of a butterfly valve

Fig. 2와 같이 밸브 단면을 보면 디스크와 시트는 회전축에 대해 e_1 만큼 편심되어 있고 디스크의 회전 중심은 시트의 중심축에 대해 e_2 만큼 편심되어 있는 이중편심(double eccentric)구조이다.

일반적으로 버터플라이 밸브의 디스크와 시트는 원추(cone) 형상으로 되어 있다. Fig. 3은 원추 곡면에 대해 z 값이 일정한 단면으로 자르면 C와 같은 쌍곡선(hyperbola)의 형태가 된다.

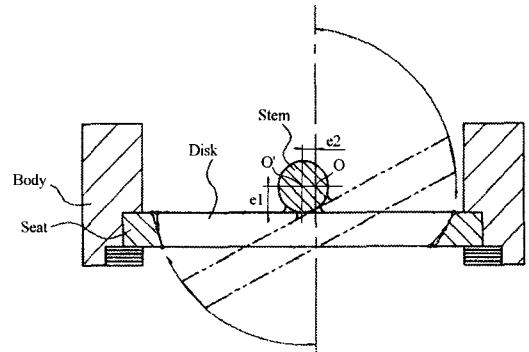


Fig. 2 Sectional view of a disk and a seat

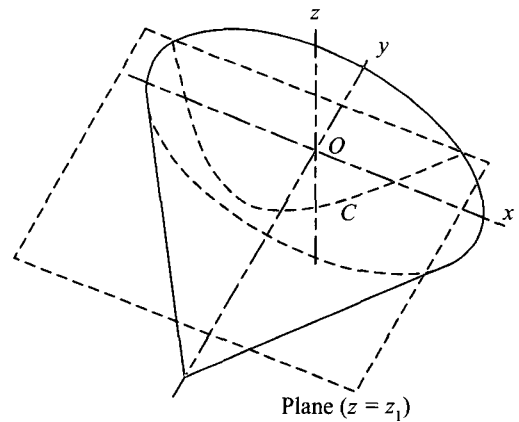


Fig. 3 A shape of cone and a section of the cone

2.2 밸브 디스크의 회전에 따른 접촉위치

밸브 디스크를 형성하는 원추곡면은 식(1)과 같이 수식화 된다. 또한 설계변수는 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

$$x^2 + z^2 - \{(y+l) \tan \alpha\}^2 = 0 \quad (1)$$

여기서

$$\tan \alpha = \frac{r_1 - r_2}{l_1}$$

$$r_1 = \sqrt{r^2 - l_0^2}$$

$$r_2 = \sqrt{r^2 - (l_0 + l_1)^2}$$

$$l_2 = \frac{r_2}{\tan \alpha}$$

이고, 원점으로부터 원추곡면(conical surface)의 꼭지점 P 까지 거리를 l 로 둘 수 있다.

$$l = l_0 + l_1 + l_2 \quad (2)$$

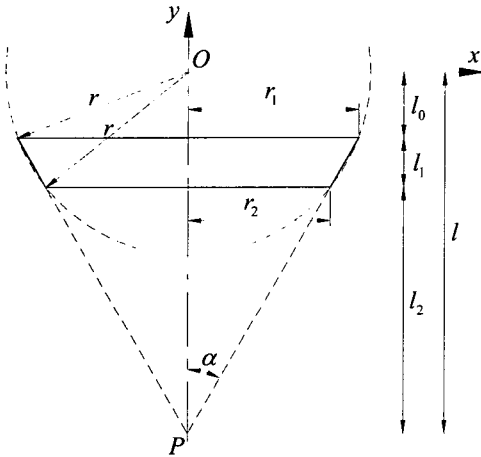


Fig. 4 Design parameter of the cone surface

식(1)에서 $z = 0$ 인 경우는 식(3)과 같은 꼭지점 P 를 통과하는 두 직선의 방정식을 나타낸다.

$$y = \pm \frac{x}{\tan \alpha} - l \quad (3)$$

$z \neq 0$ 이고 $|z| < r_1$ 에서는 원추곡면을 x-y 평면에 평행하게 자른 형상으로 쌍곡선을 이루게 되므로 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$x^2 - \{(y + l) \tan \alpha\}^2 + z_1^2 = 0 \quad (4)$$

여기서, z_1 은 구간 $-r_1 < z_1 \neq 0 < r_1$ 에서 임의의 값을 나타낸다.

본 연구에서 제안한 버티플라이 밸브의 디스크는 이중 편심형 구조를 기본으로 하여 디스크의 회전에 의한 개폐동작에서 디스크와 시트의 간섭 위치를 파악하여 제거한 제품이다.

밸브를 여는 과정에서 디스크와 시트 간의 간섭이 일어나기 시작하는 위치는 편심된 중심 $O'(-e, 2, 0)$ 에서 식(3) 및 식(4)에 각각의 수선을 내려 만나는 점들이 단혔을 때 디스크와 시트가 위치하는 구간 l_1 안에 있는 경우 교점으로 나타낼 수 있다. 이와 같은 방법으로 교점에서 곡선의 접선과 수선의 직교 관계를 이용하여 방정식을 유도하거나 CAD 시스템을 이용하여 교점들을 찾을 수 있다.

편심된 회전중심에서 교점까지의 거리를 반경으로 원을 작도하면 디스크가 반시계 방향으로 열리는 경우 각 수선의 좌측방향에 존재하는 반경보다 큰 부분의 길이만큼 간섭을 발생하게 된다.

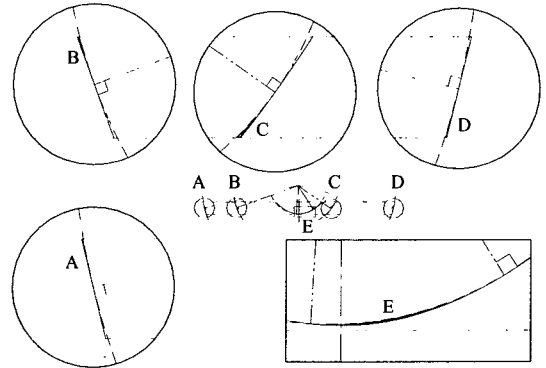


Fig. 5 Interference region of disk at the arbitrary z value

임의의 z 위치에서 단면을 자를 때 간섭발생부분은 Fig. 5와 같다. 결국 A, B, C, D와 같은 각 단면에서 간섭영역이 나타난다. 계속하여 z 값의 변화에 따른 수선을 작도한 경우 Fig. 6과 같다.

z_5 에서 원을 작도하였을 경우 원과 쌍곡선이 수선의 교점 이외에 다른 부분에서 교차하게 된다. 결국 수선의 교점에서부터 다른 교점까지의 간섭 발생부분을 제거 영역으로 봐야만 한다. 이 부분은 Fig. 5의 E에 해당한다.

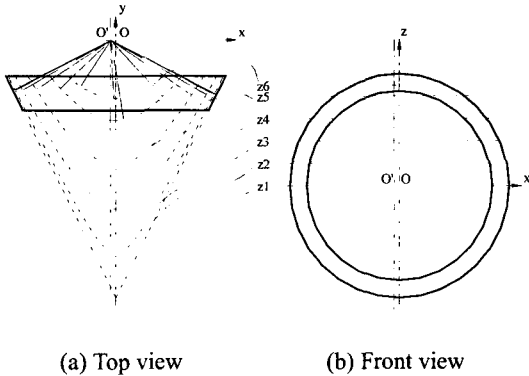


Fig. 6 Drawing of zero contact point according to z value

이와 같이 수선을 작도하면 접촉의 시작점 즉, 간섭량이 없이 접촉하는 zero 접점에 해당한다. 이 점들을 연결하면 Fig. 7과 같은 디스크 개폐시 디스크와 시트의 zero 접점의 위치와 궤적을 작도할 수 있다. 결국 반시계 방향으로 회전할 때 곡선 A의 위쪽 부분과 곡선 B의 아래 부분은 시트를 침투하게 된다. 그러므로 시트를 침투하는 부분을 가공하여 디스크를 제작하면 개폐시 디스크와 시트 간의 접촉없이 최종적으로 닫히는 경우만 접촉되는 디스크 구조를 설계할 수 있다.



Fig. 7 Drawing of paths of zero contact points

3. 버터플라이 밸브의 유한요소해석

3.1 열-구조연성해석

본 연구에서는 유체로부터 버터플라이 밸브에 가해지는 열 및 압력에 따른 열-구조 연성해석을 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS⁷를 이용하여 수행하였다.

해석 적용 모델의 디스크 치수는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Dimension of the butterfly valve disk

Base radius of disk (r)	100 [mm]
Eccentric value of x-axis (e)	1 [mm]
Eccentric value of y-axis (l_0)	17 [mm]
Thickness of disk (l_1)	13 [mm]

버터플라이 밸브의 유한요소모델과 압력 경계 조건은 Fig. 8과 같다. 밸브 디스크가 닫혔을 때 디스크의 뒷면에 600℃의 고온 유체가 압력 20 kgf/cm²으로 작용하며 디스크의 앞면에 200℃의 상대적으로 저온인 유체가 압력 0 kgf/cm²으로 작용하는 상태를 가정한다. 밸브 내의 이송유체는 오일류로 대류열전달 계수를 60W/m²℃로 가정하고 밸브 외면은 대기와 접촉하여 자연대류가 발생하므로 대류 열전달 계수를 10W/m²℃로 가정하여 유한요소해석을 수행한다.

해석모델의 제품은 바다, 디스크 및 시트의 재료로 AISI 316 Stainless Steel⁸을 사용하고 일반적으로 디스크와 시트의 접촉면은 Stellite No. 6⁹을 코팅하여 내마모성을 향상시켜 사용한다.

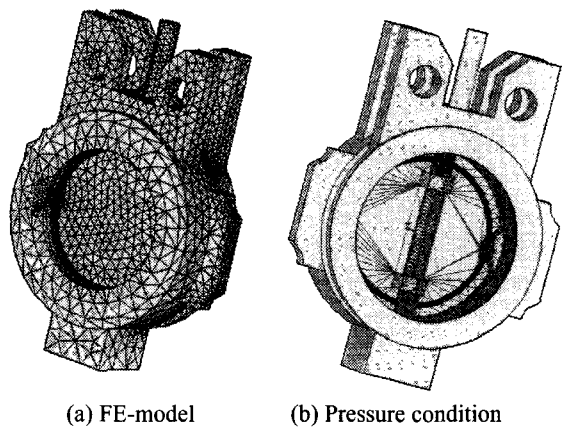
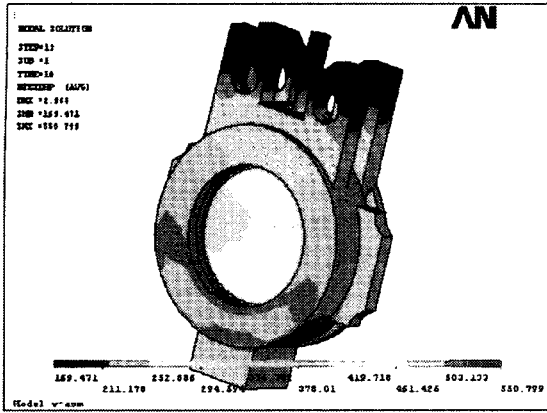
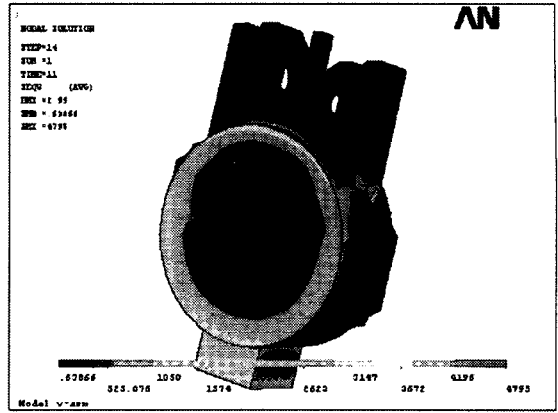


Fig. 8 FE-model and pressure condition of the butterfly valve

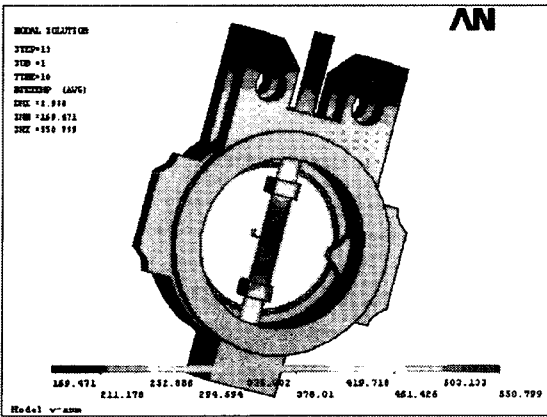
경계조건으로 주어진 온도에 대한 해석 결과는 Fig. 9와 같다. 디스크 뒷면의 입구부에서 고온의 유체와 만나는 회전축(stem)에서 가장 높은 온도를 나타내며 대기와 접촉하는 부분에서는 낮은 온도 분포를 보이고 있다.



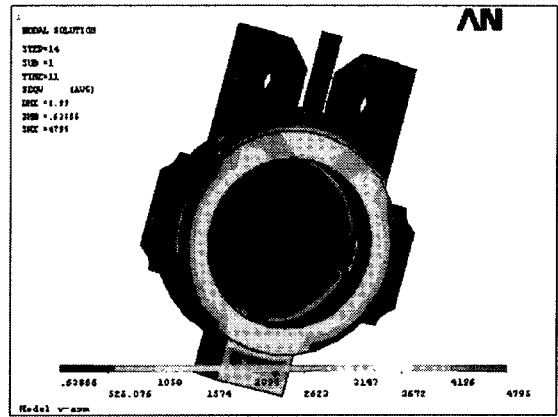
(a) The front side, outlet



(a) The front side, outlet



(b) The reverse side, inlet



(b) The reverse side, inlet

Fig. 9 Distribution of temperature

Fig. 10 Distribution of effective stress

온도조건과 압력조건에 따른 버터플라이 밸브의 유효응력 분포는 Fig. 10과 같다. 디스크와 시트 접촉부와 회전축의 연결부에서 조금 높은 응력 분포를 나타내고 있으나 전반적으로 안전한 응력 상태를 나타낸다.

3.2 열변형에 의한 디스크와 시트의 간섭

고온의 유체에 의해 디스크와 시트는 열팽창하게 된다. 그 결과 서로 다른 열팽창에 의해 디스크와 시트가 간섭을 일으킬 수 있다. 또한 디스크가 시트에 끼어 밸브 디스크가 열리지 않을 수 있다. 그러므로 디스크 제작시 열변형량을 고려하기 위해 유한요소해석에 의해 계산된 디스크의 팽창량을 기준으로 시트의 팽창량을 뺀 간섭량을 계산한 결과 및 위치는 Table 2 및 Fig. 11과 같다.

Table 2 Interference between the disk and the seat

Angle[deg.]	-45	0	45	90
Value [mm]	0.24107	0.29503	0.23747	0.3651

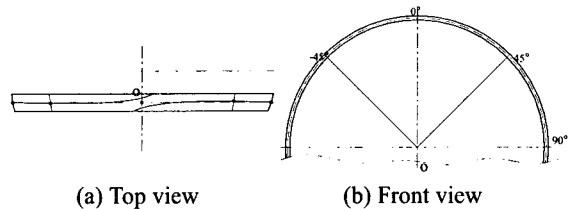


Fig. 11 Measure points at the disk and the seat

z축 방향을 0°로 두고 ±45° 및 90° 위치에 대해 간섭량을 계산한 결과 90°에서 0.3651mm,

45° 에서 0.23747mm, 0° 에서 0.29503mm, -45° 에서 0.24107mm로 나타났다. 즉, 각도가 0와 90° 에서 간섭량이 많고 90° 의 경우 가장 많은 간섭량이 나타났다. 결국 디스크는 회전축과 고정되는 부분에서는 팽창이 억제되므로 각도 90° 의 방향으로 많은 변형이 일어나는 것을 알 수 있다.

이와 같은 결과로부터 디스크와 시트의 접촉을 유지하는 상태에서 반경에 대해 가장 작은 간섭량을 가지도록 하기 위하여 반경에 대해 약 0.23mm 정도의 가공 여유를 고려하도록 하였다.

4. 결론

본 연구에서는 버터플라이 밸브의 개폐과정에 디스크와 시트의 간섭 부분을 고려하여 zero 접점의 위치를 파악하고 이를 기준으로 간섭부분을 제거한 디스크의 형상을 개발하여 개폐 시 마찰발생을 감소시키고자 하였다. 또한 닫힌 상태에서 디스크와 시트의 접촉면적이 넓으므로 높은 압력에도 견딜 수 있을 것이다.

유한요소법을 이용한 버터플라이 밸브의 열-구조 연성해석에 의해 디스크와 시트의 열팽창에 의한 간섭량을 계산한 결과로부터 디스크와 시트 사이의 실링은 양호한 것을 알 수 있었다. 또한 디스크 및 시트의 제작 시 필요한 열팽창에 따른 가공 공차를 고려할 수 있었다.

후기

본 연구는 케이.비.(주)를 참여기업으로 하여, 경남중소기업기술이전촉진센터(GPCTT)에서 지원하는 상품화개발과제 의하여 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Addy, A. L., Morris, M. J. and Dutton, J. C., "An Investigation of Compressible Flow Characteristics of Butterfly Valves," ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 107, pp. 512-517, 1985.
2. Eom, K., "Performance of Butterfly Valves as a Flow Controller," ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 110, pp. 16-19, 1988.

3. Park, S. W. and Lee, S. W., "Three-Dimensional Flow Characteristics in the Downstream Region of a Butterfly-Type Valve Used in Air-Conditioning Systems," J. of Korean Society of Mechanical Engineers B, Vol. 24, No. 2, pp. 260-269, 2000.
4. Park, S. W. and Lee, S. W., "An Experimental Study on the Flow Stabilization in the Downstream Region of a Butterfly-Type Valve," J. of Korean Society of Mechanical Engineers B, Vol. 24, No. 11, pp. 1417-1427, 2000.
5. Kimura, T., Tanaka, T., Fujimoto, K. and Ogawa, K., "Hydrodynamic characteristics of a butterfly valve - Prediction of pressure loss characteristics," ISA Transactions, Vol. 34, pp. 319-326, 1995.
6. Ogawa, K. and Kimura, T., "Hydrodynamic characteristics of a butterfly valve - Prediction of torque characteristics," ISA Transactions, Vol. 34, pp. 327-333, 1995.
7. ANSYS Analysis Guide, Vol. IV, ANSYS Release 5.7, 2000.
8. The Online Materials Information Resource, <http://www.matweb.com>.
9. Wu, A. P., Ren, J. L., Peng, Z. S., Murakawa, H. and Ueda, Y., "Numerical simulation for the residual stresses of Stellite hard-facing on carbon steel," J. of Materials Processing Technology, Vol. 101, pp. 70-75, 2000.