

공리적 방법을 이용한 버터플라이밸브 설계

박영철*, 배인환**, 이동희***

*동아대학교 기계공학과

**한국 키스톤 발부(주)

***동아대학교 대학원 기계공학과

The Design of the Butterfly Valve Using Axiomatic Design

YOUNG-CHUL PARK*, IN-HWAN BAE** AND DONG-HWA LEE***

*Dong-A University, Dept. of Mechanical Engineering Graduate School, Busan, Korea

**Keystone Valve (Korea) Co. Ltd., Ansung, Korea

***Dong-A Graduate School, Dept. of Mechanical Engineering, Busan, Korea

KEY WORDS: Axiomatic Design 공리적설계, Independence Axiom 독립공리, Decoupled Design 비연성화 설계, Computer Fluid Dynamics 전산유동해석, Butterfly Valve 버터플라이밸브

ABSTRACT: Functional requirements and design parameters were not clarified in the early design process. Design axiom shows some difficulty for larger system designs, such as the butterfly valve, which is basically carried out by an incremental and iterative process. A numerical analysis was carried out on fluid flows in a butterfly valve, by using ANSYS-FLOTRAN. Characteristics of the butterfly flows at different valve disk opening angles, with a uniform incoming velocity, were investigated. The entire analysis is decomposed to satisfy the independence axiom. This paper resolves the problems associated with the establishment of a systematic design process.

1. 서 론

산업체에서 유량을 효과적으로 제어하기 위해서 여러 종류의 밸브들이 사용되고 있다. 그 중에서 버터플라이 밸브(butterfly valve)는 원판형의 디스크가 시트(seat)와 접촉함으로써 유체의 흐름을 조절 및 차단하는 소형이고, 컴팩트한 구조의 밸브이다. 버터플라이 밸브의 유동특성에 대한 수치해석적 접근과 Particle Image Velocimetry (PIV) 기법에 의한 실험적 연구 및 구조해석에 대한 연구는 많이 수행되고 있다.(Lacor and Hirsch, 1988; Kim and Wu, 1992; Kim and Huang, 1993; Kitamura et al., 1993; Mcpherson et al., 1951) 하지만 밸브의 전반적인 설계에 대한 연구는 많지 않은 실정이다.

지금까지의 버터플라이 밸브 설계에서는 대부분 도면화 과정 이후 시제품을 완성하여 몇 가지 성능 테스트만을 거친 후 제품을 출시하였다. 그러나 사용 중 문제가 발생하는 경우 원인을 규명할 수 있는 적절한 대처 방안의 부재로 인한 시간적, 경제적 손실을 발생하는 경우가 많다. 따라서 밸브의 초기설계에서부터 과학적이고 합리적인 접근이 필요하다고 할 수 있다. 이러한 과학적인 접근을 위해서 공리적 설계방법을 적용하였다.

공리적 설계방법은 기존의 경험에 의존하거나 임기응변적

으로 수행되던 설계 과정에 과학적인 접근방법을 도입하는 방식으로 여러 분야의 공학문제에 적용되고 있다(Suh, 1990). 공리적 설계의 개념은 소프트웨어 개발분야에 성공적으로 도입되기 시작하였으며, 부품설계, 시스템설계, 발명 등과 같은 분야에서 이미 많은 성과를 거두고 있고, 일관된 방법으로 다양한 설계문제에 접근하기 때문에 공학자들이 이해하기 쉬운 설계방법이라 할 수 있다.(Kim et al., 1991; Albano and Suh, 1992; Suh, 1995; Song et al., 2002; Shin et al., 2002; Do and Park, 1996)

따라서 본 연구에서는 버터플라이 밸브의 설계과정에서 경험에 의존하는 지금까지의 설계 관행에 비해 보다 체계적이고 합리적인 설계를 위해서 공리적 설계기법을 도입하였다. 즉, 공리적 설계기법 중에서 독립공리를 이용하여 버터플라이 밸브의 기능적 요구들을 정의하고 각각의 기능적 요구들을 만족하는 설계 파라미터를 구조해석과 유동해석을 이용하여 결정하였다. 구조해석은 범용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하였고, 유동해석은 ANSYS/FLOTRAN을 사용하였다.

2. 이론적 배경

공리적 설계 방법은 설계분야에서 일반적인 원리로 소개되어왔다. 공리적 방법에서 정의하는 설계는 기능영역에서 정의되는 기능요구사항(Functional Requirements: FRs)과 물리적 영역에서 정의되는 설계파라미터(Design Parameters: DPs) 사

이의 사상과정을 통해 제시된 요구사항을 만족하는 일체화된 해결책을 생성하는 것이다. 또한 제품이나 공정설계를 수행하는 경우에 두 가지 공리인 '독립의 공리'와 '정보의 공리'를 이용하여 설계하는 방법이다. 특히, 설계방정식을 통하여 나타나는 설계행렬을 통해 각각의 설계 및 제품을 평가하여 보다 올바른 설계를 할 수 있도록 도와준다.

공리적 설계에 있어서 가장 중요한 것은 설계자에 의한 기능적 영역의 기능요구사항과 물리적 영역의 설계파라미터의 선정이다. 공리적 설계는 이런 두 영역 사이의 일대일 사상에 의해서 이루어지기 때문이다. 또한 분석과정에서 기능요구사항과 설계파라미터 사이의 관계를 설계행렬을 통해 표면에 드러나게 함으로써 설계자의 판단오류를 줄이고 창의적인 설계를 돕는 원리이다. 공리설계에서 설계방정식은 다음과 같이 세가지 형태로 나타낼 수 있다.

연성설계(Coupled design)

$$\begin{pmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & X \\ X & X & X \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

비연성화설계(Decoupled design)

$$\begin{pmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & O \\ X & X & O \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{pmatrix} \quad (2)$$

비연성설계(Uncoupled design)

$$\begin{pmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & O \\ O & X & O \\ O & O & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서 X는 해당 기능요구사항과 설계파라미터가 관련이 있음을 의미하고 O는 관련이 없음을 의미한다. 식(1)의 연성설계는 FR1을 만족시키기 위해 DP1, DP2, DP3를 모두 결정해야 하는 경우를 보여준다. 그러나 FR1을 만족시키기 위해 DP1, DP2, DP3를 결정하더라도, 이 전체 설계파라미터가 FR2 및 FR3를 모두 동시에 만족시킨다는 보장은 없다. 따라서 주어진 기능요구사항을 모두 만족시키기 위해서는 시행착오를 반복하여 설계파라미터를 결정해야 한다.

식(2)의 비연성화 설계는 만족시켜야 할 기능요구사항의 순서를 잘 정리하면, 식(1)의 연성 설계에서와 같은 반복적인 시행착오는 피할 수 있음을 보여준다. 이 경우, FR1을 만족하기 위해서는 DP1만을 결정하고, FR2를 만족하기 위해서는 이미 결정된 DP1에 추가적으로 DP2만을 결정하면 된다. 마찬가지로 FR3를 만족하기 위해서는 DP1, DP2가 이미 결정되었으므로 DP3만을 결정하면 전체 기능요구사항을 일관되게 만족시킬 수 있다.

식(3)은 각각의 기능요구사항을 만족시키기 위해 해당하는 하나의 설계파라미터를 결정하여 설계를 완성하는 비연성 설계를 보여준다. 이 때에는 각각의 기능요구사항을 독립적으로 다룰 수 있다. 따라서 차후 어떤 기능요구사항에 변화가 생기

더라도 관계되는 설계파라미터 만을 다시 결정하면 되므로, 설계결과와 유지 보수가 매우 용이하다.

공리적 설계에서의 독립공리는 기능요구사항과 설계파라미터가 1:1로 대응되는 식(3)과 같은 비연성 설계를 추천하고 있다. 하지만 이것이 어렵다면 차선책으로 식(2)의 비연성화 설계를 추천하고 있다. 만약 설계결과가 식(1)과 같은 연성 설계라면, 이것은 공리적 설계의 관점에서 좋은 설계라 할 수 없다. 이 경우 설계자는 기능요구사항이나 설계파라미터를 다시 결정하여 비연성 설계 혹은 비연성화 설계가 되도록 해야 한다.(Suh, 1990)

3. 공리적 방법을 이용한 버터플라이 밸브의 설계

버터플라이 밸브는 디스크(Disc), 스템(Stem), 바디(Body), 시트(Seat)의 4가지 주요부품으로 구성되어 있다. 버터플라이 밸브의 시트는 우수한 신뢰성과 안전성이 보장되어야 한다. 특히 주어진 온도 및 압력 등의 운전 환경 하에서도 완벽한 구조적 안정성 확보 및 기밀 특성을 유지할 수 있어야 하므로 최적의 실링을 위한 시트의 형상이 필요하다. 또한, 디스크의 형상이 두께가 얇은 판의 형상을 하고 있어 허용압력 이상의 압력상태에서는 디스크가 제일 먼저 손상을 입게 된다.

일반적인 밸브의 설계를 계층구조화하면, 기능적 요구는 다음과 같다.

FR11 : 적용압력에 대해 충분한 강성을 가져야 한다.

FR12 : 밸브가 열렸을 때 압력손실이 적어야 한다.

FR13 : 작동 토크가 적어야 한다.

FR14 : 밸브가 닫혔을 때 누수가 없어야 한다.

기능적 요구를 충족시키기 위한 여러 가지의 설계파라미터가 존재한다. 다음 절의 최적화 설계기법을 이용하여 기능적 요구를 만족시키기 위하여 다음과 같은 설계파라미터들을 각각 결정하였다.

먼저 FR11의 기능적 요구는 디스크의 두께를 설계 파라미터로 설정하였고, FR12의 기능적 요구는 밸브의 디스크 형상과 관계가 많으므로 디스크의 외곽곡률을 설계파라미터로 설정하였다. FR13의 기능적 요구에 대한 설계파라미터는 시트의 접촉마찰과 관계되므로 디스크와 시트의 접촉깊이로 설정하였으며, FR14의 기능적 요구는 밸브의 실링(Sealing) 능력과 관계된 요구사항이므로 시트두께를 설계파라미터로 설정하였다. 이상의 설계파라미터들을 정리하면 다음과 같다.

DP11 : 디스크의 두께

DP12 : 디스크의 외곽곡률

DP13 : 디스크와 시트의 접촉깊이

DP14 : 시트 두께

이상의 설계파라미터들을 이용하여 설계행렬을 전개하면, 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} FR_{11} \\ FR_{12} \\ FR_{13} \\ FR_{14} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X & X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} DP_{11} \\ DP_{12} \\ DP_{13} \\ DP_{14} \end{pmatrix} \quad (4)$$

이 경우 설계파라미터들을 특정한 순서로 맞추어 가면 기능적요구의 독립성은 보장될 수 있으므로 공리1을 만족한다. 설계행렬이 비연성화 설계행렬이 됨을 알 수 있다. 따라서, DP11과 DP12를 결정하게 되면, FR11과 FR12를 만족하게 되고, DP13를 먼저 변경하면 FR13가 만족되어지며, FR14의 설계파라미터는 DP13와 DP14를 동시에 변화시켜야 하지만, 이미 DP13가 결정되었기 때문에 DP14만 결정하면 FR14를 만족하게 된다.

4. FRs에 대한 DP의 설계 방안

Fig. 1은 버터플라이 밸브의 공리적 설계기법의 흐름을 나타내고 있다. 우선 초기설계에서 설계파라미터를 선정하고, CFD 해석을 수행하여 유동의 흐름에 의한 밸브의 디스크에 작용하는 압력을 구하고, 구해진 압력을 디스크에 적용하여 구조해석을 통한 최적화를 수행한다. 또한, 디스크와 시트의 접촉해석을 통한 실링 최적화를 실시하게 된다.

Fig. 2 (a)는 버터플라이 밸브의 선정된 설계파라미터와 일반적인 버터플라이 밸브의 세 가지 주요 부품인 바디(Body), 스템(Stem), 디스크(Disc)를 나타내고 있다. 설계파라미터는 디스크의 단면에서 중심부분의 두께와 하부두께(Lower Thickness) 및 디스크의 상부의 기울어진 각도이다. Fig. 2 (b)는 Seat의 설계파라미터를 나타내고 있다. 즉, 시트와 디스크의 접촉깊이(Depth)와 시트의 접촉폭(Width)이다.

4.1 DP11의 결정

FR11의 기능적요구는 적용압력에 대해 충분한 강성을 가져야 한다는 것이다. 이러한 기능적 요구사항을 만족시키기 위한 설계파라미터는 DP11이다. DP11은 디스크의 두께이다.

버터플라이 밸브의 주요 부품에 작용하는 압력은 디스크의 개폐각도에 따라 디스크에 작용하는 압력이 변화하기 때문에 디스크 표면과 접하는 동일한 위치에 대하여 유체의 속도와 압력이 달라진다. 따라서 정확한 부품 설계를 위해서는 밸브가 닫혀있을 때만의 압력을 고려하여서는 안되며, 밸브가 열려 있는 상태에서의 압력까지 구하여 밸브의 설계에 반영하여야 한다. 밸브가 받는 압력을 실험적으로 구하면 되지만, 유체가 흐르고 있는 상황에서 실험적으로 압력을 구한다는 것은 쉬운 일이 아니다.

따라서 밸브가 닫혔을 때와 15°, 30°, 45°, 90°열렸을 때 유동해석을 통하여 얻은 압력값을 이용한다. 각각의 각도에 따른 구조해석 결과 개폐각도 15°일 때가 가장 큰 응력을 나타내었다. 따라서, 이 중에서 가장 큰 압력이 발생하는 개폐각도 15°일 경우에 대해서 적용하였다. 또한 개폐각도 15°일 경우에 대한 강성만 만족된다면 나머지 각도의 경우도 만족함을 알 수 있다. Fig. 3은 유동해석을 통한 밸브 유동장의 압력분포를

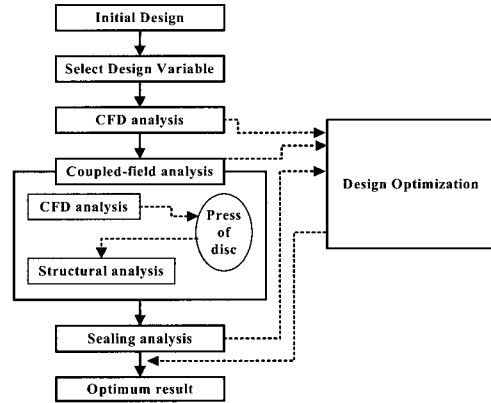
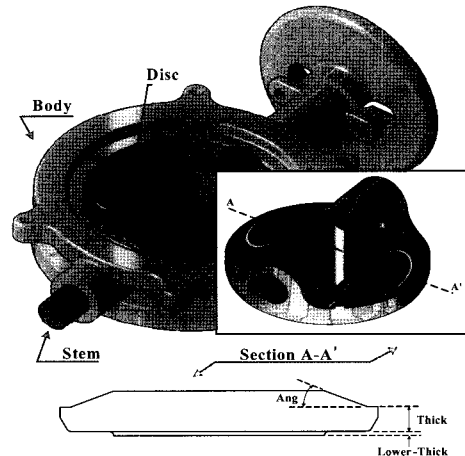
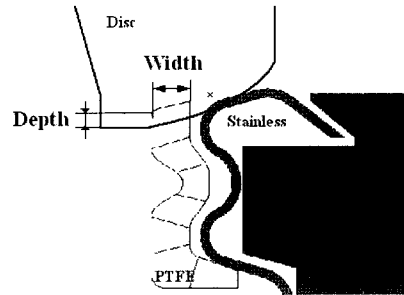


Fig. 1 Procedure of optimization



(a) Disc



(b) Seat

Fig. 2 Design variable of butterfly valve

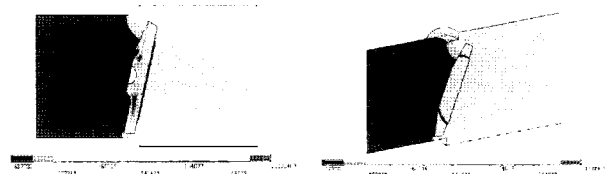


Fig. 3 Pressure distribution at the disc opening angle 15°

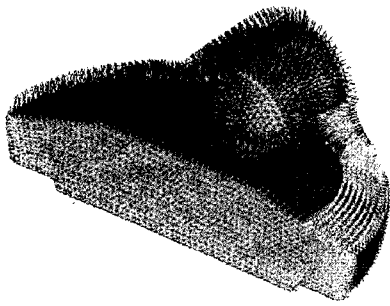


Fig. 4 Boundary condition of disc

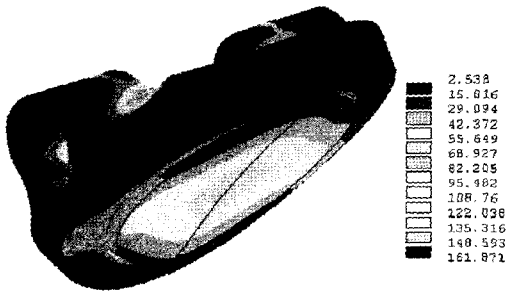


Fig. 5 Result of structural analysis of initial design (open angle 15°)

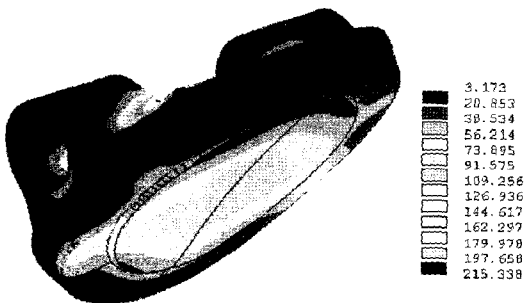


Fig. 6 Result of structural analysis of optimum design (open angle 15°)

나타내고 있다. 그림에서와 같이 디스크의 접촉부분의 압력분포가 불균일함을 알 수 있다.

Fig. 4는 디스크의 구조해석을 위한 경계조건을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 유동해석을 통한 디스크의 표면에 작용하는 압력을 하중으로 부여하였으며, 스템이 연결되는 부분의 모든 자유도를 구속하였다.

Fig. 5는 초기설계에서의 디스크의 응력분포를 나타내고 있으며, Fig. 6은 최적설계된 디스크의 응력분포를 나타내고 있다. 초기설계의 디스크 두께는 14 mm이고, 최적설계된 디스크의 두께는 12.5 mm이다.

구조해석 결과를 바탕으로 과대 설계된 부분은 치수를 줄이고, 약하게 설계된 부분은 치수를 늘려 설계를 수정하였다. 수정설계된 밸브에 대하여도 앞에서와 마찬가지로 유동해석과 구조해석을 연속적으로 수행하였다. 물론 전통적인 방법으로 설계자가 직관력을 발휘하여 치수를 조정할 수도 있으나 일반

적으로 널리 알려진 최적화 수법을 이용하면 보다 효율적으로 최적의 치수 및 형상을 찾을 수 있다.

4.1 DP12의 결정

FR12의 기능적요구는 밸브가 열렸을 때 압력손실이 적어야 한다는 것이다. 이러한 기능적요구사항을 만족시키기 위한 설계파라미터는 DP12, 즉 디스크의 외곽곡률(Ang)이다.

밸브는 액체, 기체, 분립체가 흐르는 배관 계에서 유체의 흐름을 조절 차단하는 유량제어장치이므로 밸브에 가해지는 하중의 대부분은 유체에 의한 것이다.

압력손실계수는 다음식을 이용하였다(Kim and Huang, 1993).

$$k_1 = \left(\frac{V_1^2}{2} + \frac{P_1 - P_2}{\rho} \right) \frac{2}{V_2^2} - \left(1 + \frac{L}{D} \right) \quad (5)$$

여기서 P1, P2는 각각 상부와 하부에서의 정적 압력을 나타내고, V1, V2는 상부와 하부의 속도를 나타내며, L은 P1과 P2사이의 거리, D는 튜브의 수력반경을, f는 난류유동에서 원형 파이프의 마찰계수를 나타낸다. 그리고, f는 유동해석에서 벽면이 매끈한 관이라고 가정을 하였기 때문에 난류유동일 때 마찰계수에 대한 Moody선도를 참고하여 f는 0.013으로 대입하여 계산하였다. 압력손실계수를 해석적으로 구하기 위하여 유동해석을 수행하여 디스크가 완전히 열려있는 상태에서 압력분포 및 속도분포를 구하였다. 유동해석을 수행하기 위하여 상용구조해석용 프로그램인 ANSYS(version5.7)의 유동해석 모듈인 FLOTTRAN 을 이용하였으며, 내부 유체는 상온의 물을 사용하였다.

Fig. 7은 유동해석을 위한 경계조건을 보이고 있다. (a)는 입구속도를 (b)는 출구 압력을, (c)는 벽면에서 유체의 속도를 구속한 것을 나타내고 있다. Fig 8은 유동해석의 결과로 디스크가 완전히 열렸을 때의 속도분포를 나타내고 있으며, Fig. 9는 압력분포를 나타내고 있다.

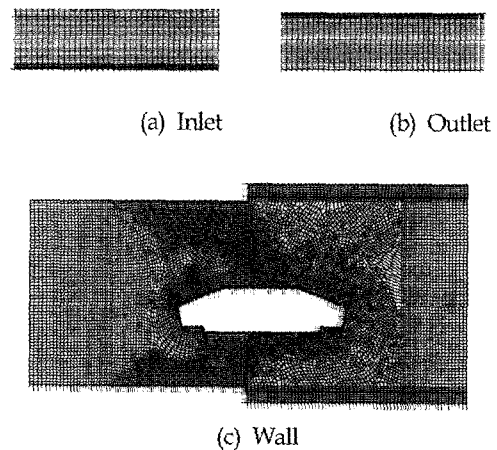


Fig. 7 Boundary condition for CFD analysis

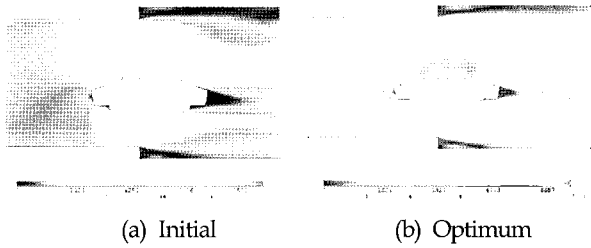


Fig. 8 Velocity distribution at the disc opening angle 90°

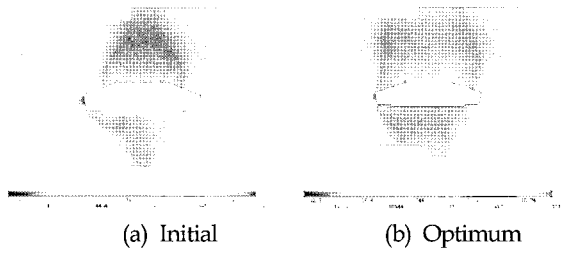


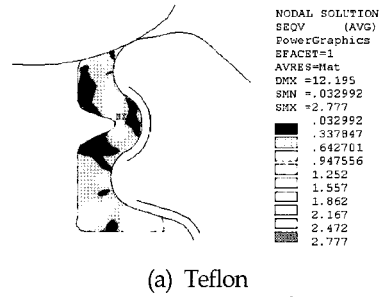
Fig. 9 Pressure distribution at the disc opening angle 90°

유동해석결과 초기모델의 각도는 18.2°이고, 이때의 압력손실 계수는 0.45이다. 최적설계된 디스크 단면의 각도는 15.5°이고, 압력손실계수는 0.38이다.

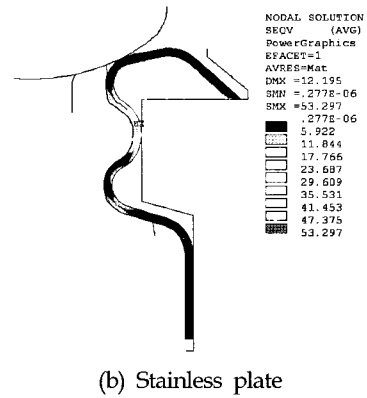
4.3 DP13 및 DP14의 결정

밸브의 용도에 관계없이 확실한 실링의 유지는 반드시 필요하다. 확실한 실링이 유지되지 않으면, 사용유체의 누설에 따른 안전사고의 발생 위험성이 높고, 경제적 손실을 발생시킨다. 또한 진동흡수 및 기밀유지의 역할을 하는 밸브 내의 시트는 밸브가 완전히 닫혔을 때 디스크의 바깥 면과 적절한 접촉 면적을 가지고 실링을 유지하여야 하며, 디스크의 개폐 시에는 디스크와 부드러운 접촉을 이루어야 한다. 또한 시트는 디스크가 열리게 되면, 원래의 위치로 되돌아가는 뛰어난 탄성 복원력이 요구된다. 연구 대상의 밸브는 테프론(PTFE)과 스테인레스 스틸(Stainless steel)의 2중 안전구조의 시트로 구성되어 있다. 버터플라이 밸브에 적용되는 실링은 1차적으로 테프론에서 이루어지며, 2차적으로 스테인레스 스틸에서 이루어진다. 실링은 주로 테프론에서 이루어지며, 테프론이 마모되거나 노후화 되어 기밀의 유지가 잘 되지 않을 경우에는 스테인레스 스틸 부분에 의해 실링이 이루어지는 구조이기 때문에 테프론의 수명을 늘릴 수 있는 장점이 있다.

시트부의 테프론은 스테인레스 스틸부와 리테이너(Retainer)에 의해 바다에 강제 끼움을 받게 되고, 이 상태에서 디스크가 닫힐 때 디스크의 바깥 표면과 시트인 테프론이 1차접촉이 이루어지고, 2차적으로 스테인레스 스틸 부와 강제 접촉을 하게 된다. 이러한 메카니즘을 해석상에서 구현하여 실링능력과 실링상태 및 실링 시에 테프론과 스테인레스 스틸이 받는 응력 상태를 평가하였다. 해석결과와 평가에서 테프론과 디스크가 접할 때의 접촉 면압과 정수압과의 관계에서 정수압이 크고 접촉면적이 넓은 경우를 최적 조건으로 결정하였다.

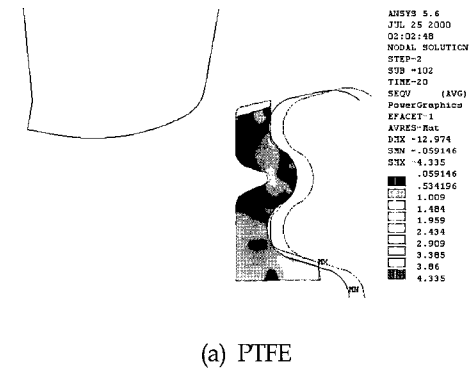


(a) Teflon

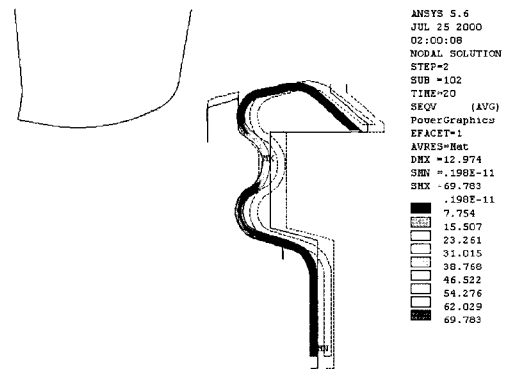


(b) Stainless plate

Fig. 10 Stress distribution of initial design seat



(a) PTFE



(b) Stainless plate

Fig. 11 Stress distribution of optimal design seat

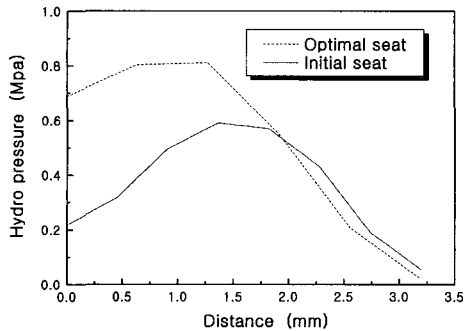


Fig. 12 Comparison of hydrostatic pressure between initial and optimal design seat

Fig. 10은 초기 설계된 시트의 응력분포를 나타내고 있으며, Fig. 11은 최적설계된 시트의 응력분포를 나타내고 있다. 초기 설계의 접촉깊이는 0.3 mm이며, 최적설계된 접촉깊이는 0.4 mm이다. 또한 시트의 초기설계 두께는 6 mm이며, 최적설계된 시트의 두께는 8 mm이다.

Fig. 12는 기존 시트와 최적 설계된 시트에 대한 정수압을 비교하여 나타내었다. 같은 접촉면적에서 정수압이 크게 작용하는 최적화된 시트의 경우가 올바른 설계방향이다. 그러나 정수압을 지나치게 높게 설계하면, 디스크의 개폐가 어려워지거나 테프론이 찢어지는 현상이 발생할 수 있다. 따라서 디스크의 개폐가 자유로운 범위 내에서 정수압을 높게 설계해야 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 공리적 설계 방법을 이용하여 버터플라이 밸브설계에 대한 분석을 통해 현재까지 수행되고 있는 과정보다 효율적이고 체계적인 설계결과를 만들어 낼 수 있는 방법에 대하여 모색하였다. 이는 밸브의 설계과정에 있어서 지금까지의 설계 기술의 과정이 너무 추상적이기 때문에 체계적인 설계 기법 확립의 어려움으로 인한 개발시간의 장기화나 개발업무의 무질서함에서 기인하는 문제로부터 탈피하여 버터플라이 밸브의 통합적인 설계체계를 정립하기 위함이다.

결론적으로 본 연구에서는 버터플라이 밸브를 설계함에 있어서 설계의 기본적인 방법과 이 과정을 통해 물리적 구체화가 이루어진 구체적인 실제 사례를 보여주고, 제품의 기본 구상에서 제품 설계를 통해 제품을 제조하는 일련의 과정을 체계적으로 접근하는 설계 방법을 제시하고 이의 유용성을 보였다.

Table 1은 밸브의 초기 설계 파라미터와 최적화된 설계 파라미터를 정리하여 나타내었다.

Table 1 Results of initial and optimum design variable

Step	D.V.	Thickness (mm)	Lower Thickness (mm)	Angle (°)	Depth (mm)	Width (mm)
Initial		14.0	4.0	18.2	0.3	6.0
Optimum		12.5	2.0	15.5	0.4	8.0

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구 결과임.

참 고 문 헌

- Albano, L.D. and Suh, N.P. (1992). "Axiomatic Approach to Structural Design, Research in Engineering Design", Vol 4, pp 171-183.
- Do, S.H. and Park, G.J. (1996). "Software Development for Glass-Bulb Automatic Design Integrated System Using Design Axiom", Transaction of KSME (A), Vol 20, No 4, pp 1333-1346.
- Lacor, C. and Hirsch, C. (1988). "Numerical Simulation of the Three-Dimensional Flow around a Butterfly Valves", ASME Fluids Eng. Div. Publ. FED, Flows in Non-Rotating Turbo Machinery Components, Vol 69, pp 157-163.
- Kim, R.H. and Wu, N.Y. (1992). "Numerical Simulation Butterfly Valve Fluid Flow", Proceedings of the FLUENT User's Group Meeting, pp 296-313.
- Kim, R.H. and Huang, C. (1993). "3-D Analysis Butterfly Valve Fluid Flow", Proceeding of the FLUENT User's Group Meeting, pp 43-57.
- Kim, S.J. Suh, N.P. and Kim, S.G. (1991). "Design of Software Systems Based on Axiomatic Design", Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, Vol 8, No 4, pp 243-255.
- Kitamura, M. Yamazaki, K. Okada, U. and Hashimoto, K. (1993). "Visualizing Flows in Butterfly Valves," Flow visualization III, Proc. 3rd Inter. Sym. on Flow Visualization, pp 178-186.
- Mcfherson, M.D. Strausser, H.S. and Williams, J.C. (1951). "Butterfly Valve Flow Characteristics," J. Hydraulic Division ASCE, Vol 83, pp 1167.1-1167.27.
- Shin, G.S. Yi, J.W. Park, G.J. (2002). "Axiomatic Design of a Beam Adjuster for Laser Marker", Transaction of KSME (A), Vol 26, No 9, pp 1727-1735.
- Song, K.N. Kang, B.S. Choi, S.K. Yoon, K.H. and Park, G.J. (2002). "Design of a Nuclear Fuel Rod Support Grid Using Axiomatic Design", Transaction of KSME (A), Vol 26, No 8, pp 1623-1630.
- Suh, N.P. (1990). The Principles of Design, Oxford University Press, New York.
- Suh, N.P. (1995). "Axiomatic Design of Mechanical Systems", Transactions of the ASME-Design Engineering Division, Vol 117(B), pp 2-10.

2004년 2월 12일 원고 접수

2004년 6월 28일 최종 수정본 채택