

## 산업용 표준의 압력시험 방법에 의한 버터플라이 밸브 구성품의 구조해석에 관한 연구

신명섭\* · 윤준용\*\*\* · 박인원\* · 이성환\*\* · 박한영\*\*\* · 정승화\*\*\*

### A Study on Structural Analysis of Butterfly Valve Components by Pressure Testing of the Industrial Standard

Myung Seob Shin\*, Joon Yong Yoon\*\*\*, In Won Park\*, Seoung Hwan Lee\*\*,  
Han Yung Park\*\*\*, Seung Hwa Jung\*\*\*

Key Words : butterfly valve(버터플라이밸브), structure analysis(구조해석), pressure testing(압력시험), pipeline(관로)

#### ABSTRACT

Butterfly valves are widely used in current industry to control the fluid flow. They are used for both on-off and throttling applications involving large flows at relatively low pressure-drop especially in large size pipelines. In this study, we carried out the structure analysis of the butterfly valve components according to pressure testing of the industrial standard. the numerical simulation was performed by using ANSYS Workbench. The reliability of valve is evaluated under the investigation of the strain rate, the leak test and the durability of the valve.

#### 1. 서 론

산업체에서 사용되는 밸브는 배관 내를 흐르는 유체의 유량, 방향, 압력 등을 제어하는 유체기기이며, 기본적으로 개폐, 과압방지(over-pressure protection), 역지(non-return), 교축(throttling)의 네 가지 기능을 수행한다. 제어밸브(control valves)로는 볼 밸브(ball valve), 글로브 밸브(globe valve), 버터플라이 밸브(butterfly valve) 등이 있으며, 그 중 버터플라이 밸브는 원관 내부에 설치된 디스크를 회전시킴으로써 낮은 차압(pressure drop)에서 유체의 흐름을 포함하는 개폐와 유량을 조절한다.<sup>(1)</sup> 버터플라이 밸브는 석유(petroleum), 가스(gas), 상하수(water and sewage)를 수송하는 큰 지름의 관로에 주로 사용되고 있으며, 밸브 디스크의 형상에 따라 단일형(single-disc)과 이중형(double-disc)으로 구분하며, 밸브 디스크 위치에 따라 동심(concentric)과 편심(eccentric)으로 구분한다.<sup>(2)</sup>

기존의 버터플라이 밸브에 대한 연구는 구조적 특성보다는 밸브를 관로에 설치함으로써 발생하는 밸브의 수력학적 특성(hydrodynamic characteristic),<sup>(3)</sup> 유량제어 특성,<sup>(4)</sup> 공동현상(cavitations)<sup>(5)</sup>과 밸브 디스크의 토크(torque)<sup>(6)</sup> 등의 유동특성(flow characteristics)에 대한 연구가 주를 이루고 있다. 최근에는 최적설계 기법을 도입하여 버터플라이 밸브의 편심축 위치 결정에 관한 연구<sup>(7)</sup>와 버터플라이 밸브의 유동 안정성을 확보하면서 동시에 밸브의 구조적 안정성을 고려하고자 하는 연구로 확대 진행되고 있다.<sup>(8)(9)</sup>

현재 산업용으로 사용하는 버터플라이 밸브에 대한 국내·외 표준으로는 ISO 10631,<sup>(10)</sup> ANSI/ASME B16.34,<sup>(11)</sup> ANSI/AWWA C504,<sup>(12)</sup> KS B 2333<sup>(13)</sup> 등이 있다. 이러한 표준에서는 밸브 사용에 대한 압력등급(pressure class)을 규정하고 있으며, ISO 5208,<sup>(14)</sup> IEC 60534-4,<sup>(15)</sup> KS B 2304<sup>(16)</sup>에서는 밸브의 검사 방법과 압력시험에 대하여 규정하고 있다. 이러한 버터플라이 밸브의 국내·외 표준들을 적용한 일반적인 밸브설계에 대한 연구들은 현재 진행되고 있지 않다.

본 연구에서는 밸브 국제 및 국내 표준에서 규정하고 있는 밸브 압력시험 조건으로 단일형과 이중형의 버터플라이 밸브에 대하여 밸브 몸통(valve body)과 디스크(disc) 부분의

\* 한양대학교 대학원 기계공학과

\*\* 한양대학교 공학대학 기계공학과

\*\*\* 한국수자원공사

† 교신저자, E-mail : joyoon@hanyang.ac.kr

구조해석을 수행하였다. 구조해석을 위하여 범용소프트웨어인 ANSYS Workbench<sup>(17)</sup>를 사용하였으며, 구조해석의 결과를 이용하여 버터플라이 밸브의 디스크 형상에 따른 설계 안전도(safety factor), 구조 안정성(structural safety)과 구조해석을 통한 누설 여부를 예측하였다.

## 2. 버터플라이 밸브의 압력시험 방법

국내·외 표준인 ISO 5208,<sup>(13)</sup> IEC 60534-4<sup>(14)</sup>와 KS B 2304<sup>(15)</sup>에서는 밸브의 검사 및 시험방법에 대하여 규정하고 있으며 모든 밸브는 기본적으로 정수압(hydrostatic pressure)을 이용하여, 밸브몸통의 내압시험(shell test)과 시트 누설 시험(seat leakage tests)을 수행해야 한다. 내압시험은 일시적인 시험으로서 밸브 몸통의 양쪽 면에 플랜지(flange)를 볼트로 체결하여 밸브 내부에 정수압을 가압하여 밸브몸통의 파손을 판단하는 시험이며, 시험압력은 관 최대허용압력의 1.5배 압력으로 시험을 수행하여야 한다. 시트 누설시험은 밸브 디스크를 차단한 후 밸브 입구부에 정수압을 유지하여 밸브 시트(seat)와 디스크 사이에서 누설(leakage)이 발생하는지를 판단하는 시험이며, 시험압력은 밸브 사용압력의 1.1배보다 작은 압력으로 시험을 수행하여야 한다. KS B 2333<sup>(12)</sup>에서 규정한 버터플라이 밸브의 시험 압력 조건은 Table 1에 나타내었다.

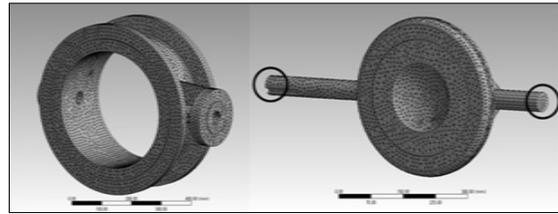
## 3. 수치해석 방법

본 연구에서는 밸브의 구조 안정성을 평가하기 위하여, 밸브 몸통과 디스크에 대하여 모델링을 수행하였다. 격자(mesh)는 1요소(element)에 4개의 질점(node)을 가지는 사면체요소(Tetrahedron element)와 격자의 밀도(relevance)를 조절하여 생성하였다. Fig. 1에 단일형과 이중형 버터플라이 밸브의 유한요소 모델을 나타내었다.

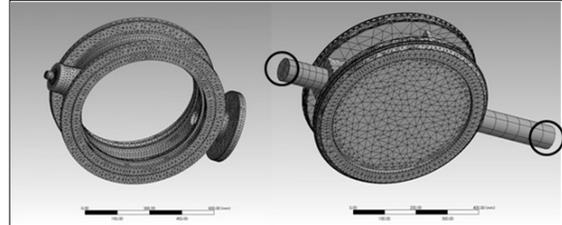
버터플라이 밸브는 유체와 접촉하는 부분이 많은 관계로 사용 유체에 대한 내식성(corrosion-resistance)과 압력에

Table 1 Pressure testing of butterfly valves (KS B 2333)

Valve type	Single/Double disc
Nominal valve size (DN) [mm]	400
Nominal pressure (PN) [kg/cm <sup>2</sup> ]	10K
The working pressure [MPa]	0.98
The maximum allowable operating pressure [MPa]	1.37
Pressure of shell testing [MPa]	2.26
Pressure of leakage testing [MPa]	0.98



(a) Single-disc butterfly valve-body and disc



(b) Double-disc butterfly valve-body and disc

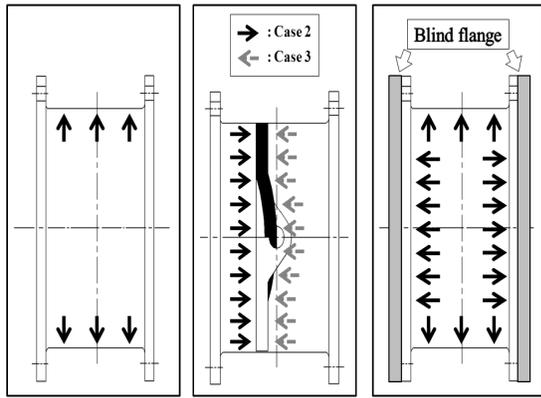
Fig. 1 Mesh generation of butterfly valves

Table 2 Material properties of butterfly valves

Valve type	Single disc		Double disc	
	Body Disc	Shaft	Body Disc	Shaft
Material Name	GCD450	STS304	GCD450	STS316
Young's modulus [GPa]	172	200	172	193
Poisson's ratio	0.275	0.290	0.275	0.290
Yielding stress [MPa]	280	215	280	290
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	7200	8000	7200	8000

견딜 수 있는 충분한 강도를 가져야 한다. 본 연구에서는 밸브 몸통과 디스크의 재료로는 일반적으로 산업용으로 널리 사용되는 GCD450의 덕타일 강(ductile cast iron) 사용하였으며, 밸브 축은 내열성(thermal-resistance), 내마모성(wear-resistance) 등이 우수한 STS304과 STS316의 스테인리스 강(stainless steel)을 사용하였다. 구조해석에 사용된 각 재료에 대한 물성치는 Table 2와 같다.

본 연구에서는 밸브의 구조해석을 위해 ANSYS Workbench를 사용하였다. Fig. 1의 오른쪽 그림에서 원으로 표시된 축 끝단부 각 질점들에 대해 모든 자유도를 구속하였으며, 또한 밸브 디스크면의 가장자리는 밸브 몸통과 맞닿은 부분의 각 질점들에 대해서도 모든 자유도를 구속하였다. 밸브의 구조 안정성을 평가하기 위하여, 국내·외 표준인 ISO 5208,<sup>(13)</sup> IEC 60534-4<sup>(14)</sup>와 KS B 2304<sup>(15)</sup>에서 규정된 밸브의 압력조건으로 수치계산을 수행하였다. 구조해석을 위한 압력 조건은 Fig. 2와 같이 밸브 몸통과 디스크에 작용하는 압력의 방향에 따라서 다음과 같다.



(a) Case 1 (b) Case 2, 3 (c) Case 4

Fig. 2 Loads case of butterfly valves

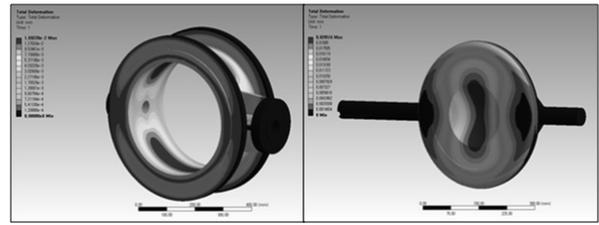
- ① Case 1 ; the working condition of valve body (P=0.98 MPa)
- ② Case 2 ; the working condition of valve disc (P=0.98 MPa)-positive direction
- ③ Case 3 ; the working condition of valve disc (P=0.98 MPa)-negative direction
- ④ Case 4 ; the shell testing condition of valve body (P=2.26 MPa)

#### 4. 수치해석 결과 및 고찰

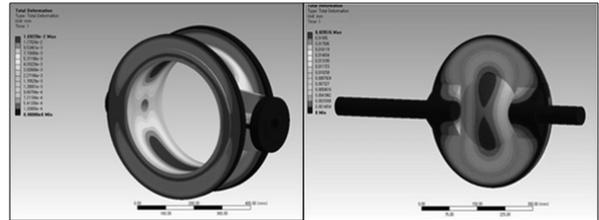
##### 4.1 사용 압력에서의 밸브몸통과 디스크의 수치결과

밸브 몸통과 디스크의 사용압력 조건(case 1)에 대하여 유한요소법에 근거하여 수치해석을 수행하였다. Fig. 3은 단일형과 이중형 버터플라이 밸브에 대한 변형(deformation)의 분포를 보여준다. Fig. 3(a)의 왼쪽에서 볼 수 있듯이 밸브 몸통의 내부에 사용압력이 작용하는 경우의 최대 변형량은 몸통의 상부 중앙에서 발생하고 있는 0.02 mm이다. 좌우 방향의 변형량보다 상하 방향의 변형량이 상대적으로 더 크다는 것을 알 수 있다. 이는 밸브 몸통 좌우로 축을 지지하는 부분이 형성되어 있어서 변형량을 억제하는 역할을 하기 때문이라고 예상할 수 있다. 또한 Fig. 3(c)의 이중형인 경우에도 변형량 분포는 단일형과 비슷한 부분에서 발생하며, 최대 변형량은 0.062 mm이다. 또한, 밸브 몸통에 작용하는 등가응력(equivalent stress)의 최대값은 단일형인 경우, 16.75 MPa이며, 이중형은 42.39 MPa로 국부적으로 발생한다. 각 밸브 몸통의 항복응력(yielding stress)은 280 MPa이므로 단일형과 이중형의 안전계수는 16.72와 6.61이다. 따라서 밸브 몸통은 내부에 사용압력이 작용하는 경우에는 충분히 안전함을 예상할 수 있다.

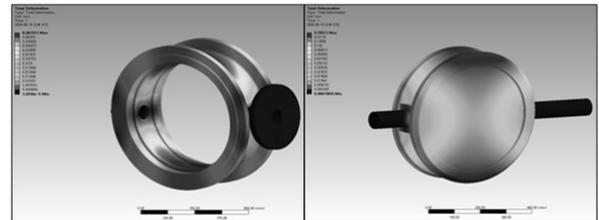
Fig. 3에서의 오른쪽은 각 밸브 디스크에 대한 변형량 분포를 보여주고 있다. 단일형인 경우, 하중 방향에 따라 정방



(a) single-disc valve body and disc (positive direction)



(b) single-disc valve body and disc (negative direction)



(c) double-disc valve body and disc

Fig. 3 Distribution of the deformation in the working condition of butterfly valves

향과 역방향으로 구분하며, 이중형인 경우에는 정방향의 결과만 나타내었다. 왜냐하면 이중형인 경우, 양방향의 유동을 제어하기 위하여 정방향과 역방향의 디스크 형상이 같기 때문이다. 정방향일 때의 단일형은 최대 변형량이 0.020 mm이며 축과 디스크의 연결부위에서 발생한다. 디스크의 변형량 분포는 축을 중심으로 상·하 대칭이며, 안전계수는 축과 디스크에 대하여 모두 2.22로서 충분히 안전함을 알 수 있다. 또한, 역방향일 때는 최대 변형량은 0.021 mm이고 안전계수는 1.83이다. 정방향의 최대 변형량이 역방향보다 작으며, 안전계수도 정방향이 더 안전함을 알 수 있다. 이것은 두 방향의 사용압력은 0.98 MPa로 동일하지만, 이중형과는 다르게 단일형인 경우에는 디스크의 앞면과 뒷면의 형상이 다르기 때문이다. 이중형인 경우, 변형량의 분포는 단일형과 유사하며, 최대 변형량은 0.265 mm이고 안전계수는 축(shaft)에 대하여 5.94이며, 디스크(disc)에 대하여 2.02로서 충분히 안전함을 알 수 있다.

##### 4.2 내압시험에서의 밸브 몸통의 수치결과

Fig. 4는 내압시험(shell testing)일 때의 각 밸브 몸통에 대한 변형량과 등가응력의 분포를 나타낸다. Fig. 4(a)의 단일형인 경우, 최대 변형량은 플랜지 상하부에서 발생하며, 사용압력 조건의 최대 변형량보다 큰 0.55 mm을 보여주고 있

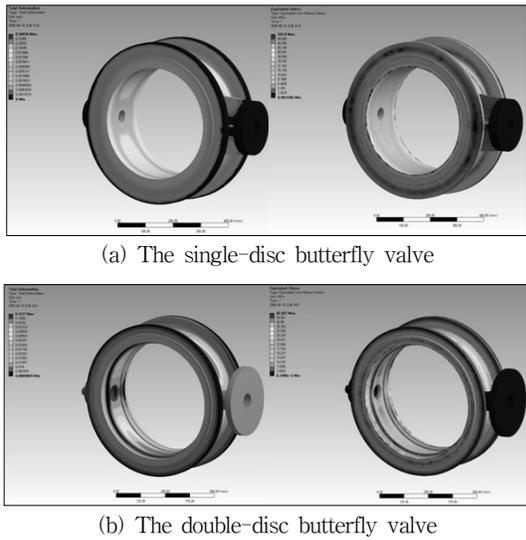


Fig. 4 Distribution of deformation and equivalent stress in the Shell testing of butterfly valves

다. 발생하는 위치도 사용압력 조건하고는 다르게 밸브 몸통 상·하부 blind 플랜지 부분에서 발생한다. 이는 플랜지 부분을 고정하기 위한 볼트에 작용하는 축 방향의 압력이 밸브 몸통의 내부압력보다 상대적으로 크게 작용하기 때문이다. 최대 등가응력은 143.9 MPa이며, 안전계수는 1.95이다. 따라서 밸브 몸통에 지속적인 압력이 유지되는 경우에는 사용압력 조건보다는 위험하며 보강설계(reinforcement design)가 필요하다는 것을 예상할 수 있다. 그러나 최대 응력의 발생지점이 국부적이며 내압시험은 일시적인 시험이므로 파손(failure)되지는 않을 것으로 예상된다. Fig. 4(b)의 이중형인 경우에도 단일형과 유사하며, 안전계수는 3.41로서 충분히 안전하다고 할 수 있다.

### 4.3 밸브 몸통과 디스크 사이의 누설 판단

버터플라이 밸브의 누설 시험은 KS B 2333<sup>(12)</sup>에서 누설 시험압력과 시험시간을 규정하고 있다. 밸브의 누설은 밸브 몸통, 디스크, 시트와 그 밖의 다른 부품들이 복합적으로 작용하는 현상이다. 밸브의 누설을 판단하는 것은 밸브의 차단 성능에 대한 중요한 지표이다. 그러나 실질적으로 시트누설 시험을 통해 밸브의 누설여부를 판단하는 것은 많은 비용과 시간이 요구된다. 따라서 누설 시험에 따른 비용과 시간을 절감하기 위해 구조해석을 적용하여 밸브의 누설여부를 대략적으로 평가할 필요가 있다.

구조해석으로 밸브의 누설을 판단하는 방법은 두 가지가 있다. 첫 번째 방법은 유한요소법의 접촉해석(contact analysis)을 이용하는 것이고, 다른 방법은 선형 정적(linear static) 구조해석을 이용하는 것이다. 접촉해석은 밸브의 몸통, 디스크와 시트를 모두 고려하여 누설여부를 판단하는 것이다. 그러나 이 방법은 수치해석의 특성상 비선형적(non-linear)이

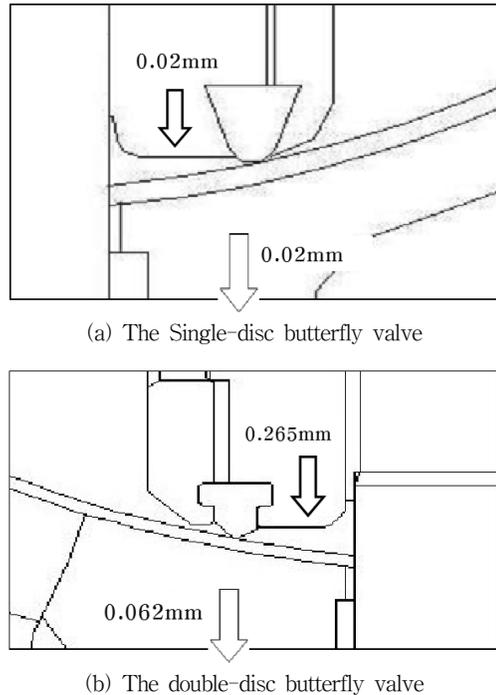


Fig. 5 Leakage judgments of butterfly valves

라서 정확도와 수렴이 선형해석에 비해서 안 좋은 단점이 있다. 이에 반하여 선형 정적 구조해석은 밸브 몸통과 디스크를 각각 구조해석하여 그 결과를 조합하여 밸브의 누설여부를 판단하는 것이다. 이 방법은 접촉해석에 비해 간단하나 밸브 몸통과 디스크를 각각 수치해석을 해야 하는 단점이 존재한다.

본 연구에서는 두 번째 방법인 밸브 몸통과 디스크에 대하여 각각 선형 정적 구조해석을 수행하고 그 결과를 조합하여 누설 여부를 예측하였다. 밸브 몸통과 디스크의 최대 변형량을 토대로 밸브 몸통과 디스크를 이동시키면 누설 여부를 판단할 수 있다. Fig. 5는 단일형과 이중형의 버터플라이 밸브에 대한 누설 여부를 대략적으로 판단한 것이다. 밸브 디스크의 최대 변형량이 밸브 몸통의 변형량보다 크면, 밸브는 누설이 일어나지 않는다고 할 수 있다. 본 연구에서 구조해석을 수행한 단일형과 이중형 버터플라이 밸브 모두 누설이 발생하지 않는다고 사료되며, 이는 실제 각 밸브에 대하여 누설 시험을 수행한 결과와 동일하다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 버터플라이 밸브 국·내외 표준에서 규정한 압력시험 조건으로 밸브 몸통과 디스크에 대하여 선형 정적 구조해석을 수행하였다. 4가지 압력조건에 대하여 밸브 몸통과 디스크의 유한요소법(FEM)을 수행하여 변형량, 등가응력, 안전계수를 도출하여 밸브의 구조 안정성을 판단하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

- (1) 사용압력 조건과 내압시험에서의 밸브 몸통과 디스크는 충분히 안전하게 설계되었음을 알 수 있었다.
- (2) 단일형 디스크인 경우, 정방향과 역방향에 상관없이 안전하게 설계되었음을 알 수 있었다. 단, 정방향의 안전계수가 역방향보다 높은 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 밸브 바디와 디스크에 대하여 각각 선형 정적 구조해석을 수행하고, 그 결과를 조합하여 밸브의 누설을 판단하였다.

## 후 기

본 연구는 2009년도 2단계 두뇌한국21(BK21) 사업과 한국수자원공사의 연구지원에 의하여 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Hutchison, J. W., 1976, "ISA Handbook of Control Valves," Instrument Society of America, USA.
- (2) Skousen, P. L., 2004, "Valve Handbook," McGraw-Hill, USA.
- (3) Kimura, T., Tanaka, T., Fujimoto, K. and Ogawa, K., 1995, "Hydrodynamic Characteristics of a Butterfly Valve-Prediction of Pressure Loss Characteristics," ISA Transactions, Vol. 34, pp. 319~326.
- (4) Eom, K., 1998, "Performance of Butterfly Valves as a Flow Controller," ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 110, pp. 16~19.
- (5) 윤준용, 이승준, 김승식, 2004, "공동현상 방지를 위한 버터플라이 밸브의 유동장 해석," 유체기계저널, Vol. 7, No. 1, pp. 9~16.
- (6) Park, J.Y. and Chung, M.K., 2006, "Study on Hydrodynamic Torque of a Butterfly Valve," ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 128, pp. 190~195.
- (7) 신명섭, 이상일, 박경진, 윤준용, 2008, "특성함수를 이용한 펌프 제어 밸브의 편심축 결정," 유체기계저널, Vol. 11, No. 3, pp. 43~49.
- (8) Yi, S.I., Shin, M.K., Shin, M.S., Yoon, J.Y. and Park, G.J., 2008, "Optimization of the eccentric check butterfly valve considering the flow characteristics and structural safety," Proc. IMechE, Part E : Journal of Process Mechanical Engineering, Vol. 222, No. 1, pp. 63~73.
- (9) Song, X.G., Wang, L., and Park, Y.C., 2009, "Analysis and optimization of a butterfly valve disc," Proc. IMechE, Part E : Journal of Process Mechanical Engineering, Vol. 223, No. 2, pp. 81~89.
- (10) ISO 10631, 1994, "Metallic butterfly valves for general purposes," International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- (11) ANSI/ASME B16.34., 2004, "Valves-Flanged, Threaded, and Welding End," The American Society of Mechanical Engineers, New York, USA.
- (12) ANSI/AWWA C504, 2006, "Rubber-seated butterfly valves," American Water Works Association, Colorado, USA.
- (13) KS B2333, 2008, "수도용 버터플라이 밸브," 한국표준협회.
- (14) ISO 5028, 2008, "Industrial valves-Pressure testing of metallic valves," International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- (15) IEC 60534-4, 2006, "Industrial-process control valves, Part 4 : Inspection and routine testing," International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland.
- (16) KS B2304, 2001, "밸브의 검사 통칙," 한국표준협회.
- (17) ANSYS User's Manual version 11.0, ANSYS Inc., USA.