



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

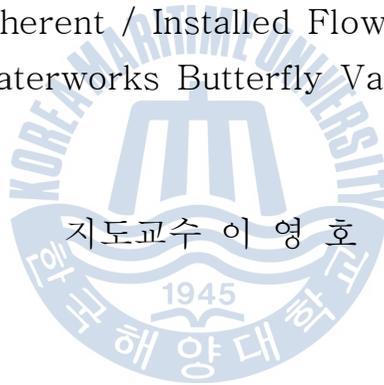
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

상수도용 버터플라이 밸브의 고유 및 유효 유량특성에 관한 연구

A Study on the Inherent / Installed Flow Characteristics of
Waterworks Butterfly Valve



지도교수 이 영 호

2012년 2월

한국해양대학교 대학원

기계공학과

정 승 화

本 論文을 鄭承和의 工學碩士 學位論文으로 認准함

위원장: 공학박사 왕 지 석



위 원: 공학박사 정 재 현



위 원: 공학박사 이 영 호



2011년 12월 23일

한국해양대학교 대학원

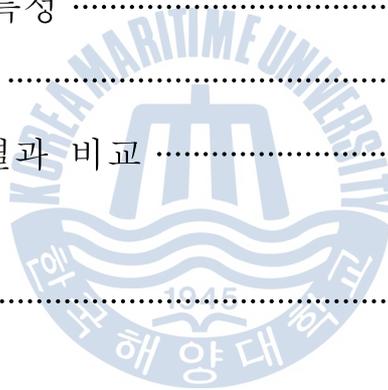
기 계 공 학 과

정 승 화

목 차

Abstract	iii
기호설명	v
제 1 장 서론	1
1.1 연구개요	1
1.1.1 밸브 일반	1
1.1.2 밸브의 손실계수	2
1.1.3 밸브의 용량계수	4
1.1.4 밸브의 유량특성	7
1.1.5 밸브의 캐비테이션 계수	10
1.1.6 버터플라이 밸브의 특성	13
1.2 연구배경 및 필요성	15
1.3 연구목적	17
제 2 장 실험 및 수치해석 방법	18
2.1 실험장치 및 밸브 제원	18
2.1.1 실험 장치 구성	19
2.1.2 밸브 제원	26
2.2 수치해석법	27
2.2.1 지배방정식	28
2.2.2 난류 모델링	29
2.2.3 이산화 방법	33

2.2.4 모델링	37
2.2.5 그리드 생성	39
2.3 실험 및 수치해석 결과 비교	41
2.3.1 실험 방법	41
제 3 장 밸브 성능특성	44
3.1 각 밸브별 고유 유량특성	44
3.2 각 밸브별 유효 유량특성	52
제 4 장 밸브 내부 유동특성	58
4.1 각 밸브별 유동해석	58
4.2 실험 및 유동해석 결과 비교	76
제 5 장 결 론	83
참고문헌	84
부록	85
감사의 글	



A Study on the Inherent / Installed Flow Characteristics of Waterworks Butterfly Valve

Seung Hwa, Jung

*Department of Mechanical Engineering
Graduate School of Korea Maritime University*

Abstract

For standardization of water supply facilities and operation control, we should find out the valve's inherent and installed flow characteristics. It is true that it has been hard to provide a study of typical valve's characteristic exactly because there are not enough experimental conditions on large or middle size valve and from small-scale companies. Thus, the primary objective of this paper is to suggest efficient valve control. To achieve this aim the study includes the laboratory test and analytical CFD in order to get results from designing valves and controlling factors with deliberations in the present domestic circumstance. Furthermore, it is effectively willing to give a help to practical-onsite works by clarifying the distinction among the each forms, opening ratio and others with mutual verification of CFD; also, this study derives valve's characteristic of volume flow from the forms, Inherent Flow Characteristic(C_v) of butterfly valves widely used.

According to the result of comparison between CFD analyses and valve-test values, it shows approximate values each other, and the error rate of Inherent Flow Characteristic (C_v) and lose factor (K) has within maximum values of 6%. Inherent Flow Characteristic (C_v) in the valve-test result shows a similar tendency as generally well-known fact. Also, this shows several characteristics; a symmetric disc design valve is Linear characteristic, and Single or double offset design valve which valve seat is fixed with disk is Linear characteristic or fixed with body is Equal Percentage. Moreover, when eccentric type is set to enhance butterfly valve's throttle, it is getting to be more triple offset design valve so that it has the characteristic like Linear. Those cause the volume flow is easy to adjust. An effective characteristic of volume flow can supply 40%~90% of maximum volume within opening ratio 20% of more than pipe loss $C_p=64$. Under the less than opening ratio 20% adjusted minutely, each manufacturer shows 10%~90% of maximum volume flow; thus, there is a big difference in supply ability according to trim and disk shape. In addition, the similar result to $\Delta=1\text{psi}$ condition from 400A is attained in the case of pipe's maximum volume flow (Q_{\max}) more than $1500\text{m}^3/\text{hr}$ during valve opening.

Nomenclature

A	:	cross sectional area of flow	m^2
C	:	flow coefficient	–
C_p	:	friction coefficient of pipe	–
C_v	:	inherent flow characteristics	–
g	:	gravitational acceleration	m/sec^2
H_1, H_2	:	gauge pressure	mAq
ΔH	:	total head loss	mAq
K	:	valve loss coefficient	–
P	:	static pressure	mAq
ΔP	:	total pressure loss	kg/cm^2
P_v	:	saturated vapor pressure	kg/cm^2
Q	:	volume flow rate	m^3/hr
v	:	fluid velocity	m/sec
T	:	temperature	
γ	:	specific weight	kg/m^3
ρ	:	density of working fluid	kg/m^3

제 1 장 서론

1.1 연구개요

1.1.1 밸브 일반

밸브의 정의는 「유체를 통과시키거나 막거나 또는 유체의 유동을 제어하기 위하여 통로를 개폐할 수 있는 가동기구를 가지는 기기의 총칭」으로 KS B 0100에서 정의하고 있으며, 이런 밸브는 오래 전부터 유체의 흐름을 제어하는데 사용되어 왔다^[1].

여기서 제어란 유체에서 물리적으로 표현되는 압력, 온도 및 유체의 속도 즉, 유량을 조정한다는 것을 뜻한다. 이러한 밸브는 각각의 프로세스계(Process System)에서 요구하는 유체의 물리적 조건과 양에 맞도록 각 제어단위의 마지막 단계에서 유체흐름을 제어하는 가장 일반적이고 중요한 제어요소(Control Component)이다.

프로세스 단위로 보면, 관로가 수송해야 할 유체에너지는 프로세스계의 제어요소인 밸브나 오리피스에서 주로 유체속도 또는 유체압력의 형태로 조정된다. 이러한 두 기능은 항상 유체에너지를 수송하는 프로세스 배관 계통의 형평과 안전을 위하여 상호 보완적인 관계로 제어기능을 수행한다. 이러한 제어기능에 중점을 두어 설계된 밸브가 제어 밸브인 것이다. 모든 밸브는 수송하는 유체의 압력, 온도 및 유량에 합당한 크기와 구조를 가지고, 유체에너지가 손실되지 않도록 외부와 불필요한 에너지 교류를 피하여야 한다^{[4][6][7]}.

1.1.2 밸브의 손실계수

밸브를 통과하는 물은 밸브에 의해 저항을 받아 압력저하를 초래한다. 이 압력손실은 밸브의 형상, 개도, 유속에 따라 변화하며 다음의 식으로 표현된다.

$$\Delta H = H1 - H2 \quad (1-1)$$

여기서 ΔH : 밸브의 손실수두 (m)

$H1$: 밸브 입구 측 정수두 (m)

$H2$: 밸브 출구 측 정수두 (m)

또한 밸브의 손실수두 ΔH 는 유속의 함수로써 다음 식으로 계산된다.

$$\Delta H = K \frac{v^2}{2g} \quad (1-2)$$

여기서 K : 밸브의 손실계수, v : 관내 평균유속 (m/s), g : 중력가속도 (m/s^2)

밸브의 손실계수는 밸브 형식, 구경 및 개도에 따른 수리특성을 나타내는 기본적인 계수로 실험에 의해 구해진다. Fig 1.1에서 Fig 1.3은 밸브에 대한 실험결과의 예를 나타낸 것이다. 이를 이용하면 밸브에 의한 압력손실은 상기 식에 의하여 간단히 구해진다^{[4][5]}.

이외에 압력과 유량의 관계 및 캐비테이션 발생의 유무를 검토하는 데에도 이용된다.

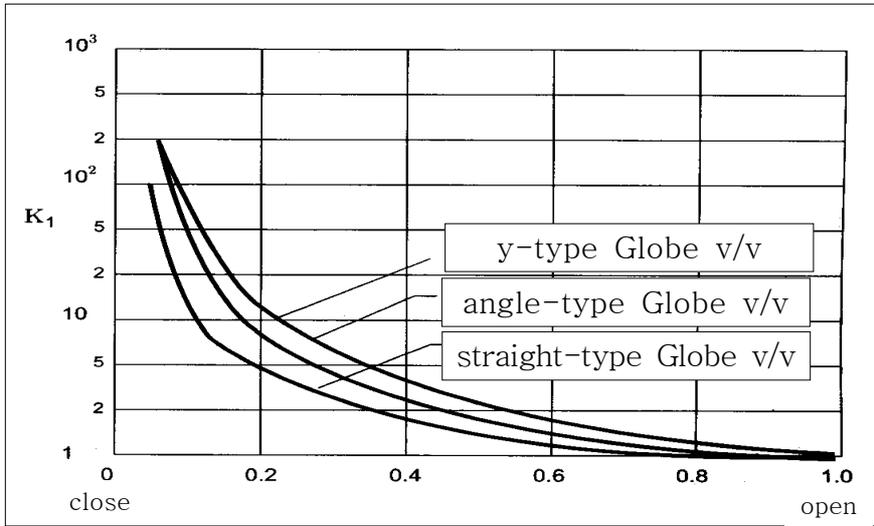


Fig. 1.1 Globe valve loss coefficient

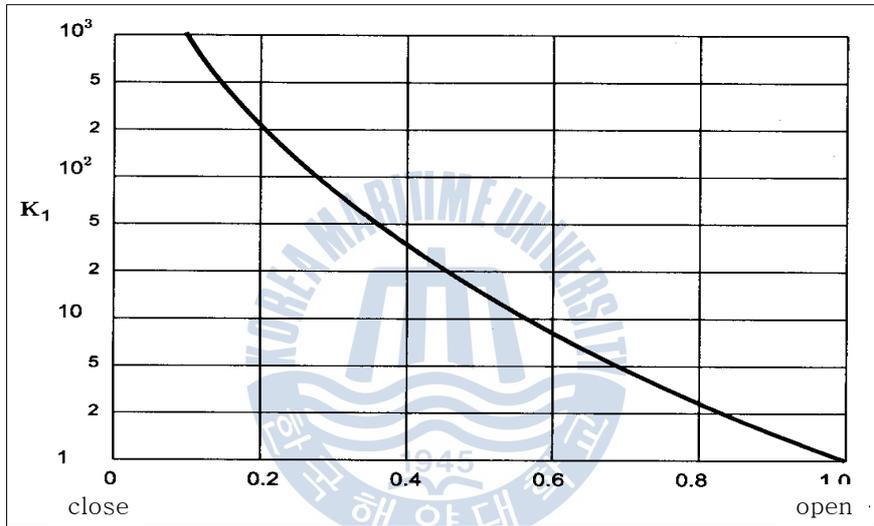


Fig. 1.2 Gate valve loss coefficient

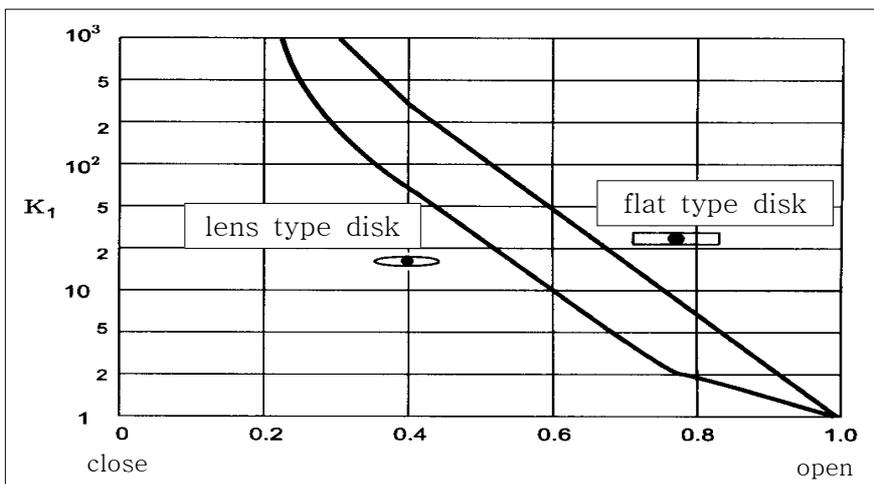


Fig. 1.3 Butterfly valve loss coefficient

1.1.3 밸브의 용량계수

1) 용량계수의 정의

밸브 내를 통과하는 유량을 오리피스 등을 통과하는 유량을 표현하는 경우와 같도록, 밸브전후의 차압을 사용하여 다음 식으로 표현한다.

$$Q = C \cdot A \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta p} \quad (1-3)$$

여기서 Q : 밸브통과유량, C : 밸브용량계수, A : 유수단면적, Δp : 밸브전후 차압

이 경우에 유수단면적 A 는 오리피스의 경우와 같이 특정한 경우가 되어야 하며 용량계수 C 도 일정하게 되지 않는다. 따라서 이 식은 실제의 계산에서는 적합하지 않다. 한편, 밸브접속관로의 단면적을 A , 관내평균유속 v 를 사용하면

$$Q = A \cdot v \quad (1-4)$$

밸브의 압력손실은

$$\frac{\Delta p}{\gamma} = K \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \Rightarrow \Delta p = K \cdot \frac{\gamma \cdot v^2}{2 \cdot g} \quad (1-5)$$

여기서 Δp : 밸브 전후의 차압, K : 밸브의 손실계수, γ : 물의 비중량

위 두개의 식으로부터 식(1-6)이 얻어진다.

$$Q = A \cdot \sqrt{\frac{2g \cdot \Delta p}{K \cdot \gamma}} = A \cdot \sqrt{\frac{2g}{K}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\gamma}} \quad (1-6)$$

이 식에서 우변의 A , K 및 γ 는 모두 특정한 값으로 할 수 있으므로 Δp 를 알 수 있으면, 이 식에서 유량을 계산할 수 있다.

여기서 $C = A \cdot \sqrt{2g/K}$ 로 놓으면 $Q = C \cdot \sqrt{\Delta p/\gamma}$ 로 나타 낼 수 있으며,

C를 유량계수로 간주하여 용량계수로 일반적으로 불리고 있다. 용량 계수가 정해지면 밸브전후의 차압만으로 밸브를 통과하는 유량이 결정 되기 때문에 제어용 밸브의 구경선정, 조절범위결정 등 제어용 밸브의 특성검토에 편리하다^{[4][5]}.

2) 용량계수의 종류

용량계수는 포괄적 표현을 하고 있기 때문에 밸브의 종류, 구경, 개도, 통과유체의 성질 등의 관계로 되어, 차원을 갖는 계수가 된다. 따라서 단위계 등 다른 방법에 따라 종류별 계수가 있지만 현재는 Cv값, Av값 및 Kv값이 정의되어 있다.^{[4][5][8][9]}

- Cv값

$Q = C \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\gamma}}$ 식에서 비중량(γ) 대신 비중 G(물인 경우 1)를 사용하여 정리하면,

$$C_v = Q \sqrt{\frac{1}{\Delta p}}, \quad C_v = 1.167Q \sqrt{\frac{1}{\Delta p}} \quad (1-7)$$

(US gal/min), $\Delta p(\text{lbf/in}^2)$ ($\text{m}^3/\text{시간}$), $\Delta p(\text{kgf/cm}^2)$

Cv값은 1958년에 미국의 주요밸브 제작사 등에서 결성한 FCI (Fluid Control Institute)에 의해 측정법, 정의 등이 결정되었다. 그 후 1981년 미국의 ISA(Institute Society of America)에 의해 개정되고 국가규격 (ANSI)로서 승인되어 현재는 국제적으로 넓게 보급되어 있다.

- A_v 값

$Q = C \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\gamma}}$ 식에서 Q 에 m^3/sec , Δp 에 Pa , 비중량 γ 대신 밀도 $\rho(kg/m^3)$

을 사용하면 용량계수를 A_v 값이라고 하며 다음 식으로 나타낸다.

$$A_v = Q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}} \quad (1-8)$$

A_v 값은 1976년 IEC(International Electrotechnical Commission)에서 정의되어 일본, 미국, 영국, 독일 등 19개 국가의 찬성을 얻어 공포되어 국제규격(ISO)에서도 채용되고 있다.

- K_v 값

$C_v = 1.167Q \sqrt{\frac{1}{\Delta p}}$ 식에서 Q 에 m^3/h , Δp 에 bar 의 단위를 사용하면

용량계수를 K_v 값이라고 말하며 다음 식으로 나타낸다.

$$K_v = Q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}} \quad (1-9)$$

K_v 값은 1962년 서독의 VDI/VDE에서 「지정된 개도에서, $1kgf/cm^2$ 의 압력손실로 조절밸브를 통과하는 $5\sim 30^\circ C$ 물의 1시간당의 유량」으로 하였으나, 그 후 IEC에서 압력손실을 1 bar로 정의하였다. K_v 값은 현재 독일어권에서 사용된다.

3) 용량계수와 손실계수의 관계

밸브의 용량계수도 일종의 유량계수로 손실계수와 호환될 수 있다.

Table 1.1 Valve inherent flow characteristics(Cv) and loss coefficient(K)

Pipe(D) unit	Cv - K relation	
	Cv → K	K → Cv
m	$K=2.138 \times 10^9 \frac{D^4}{Cv^2}$	$Cv = 46,240 \frac{D^2}{\sqrt{K}}$
mm	$K=2.138 \times 10^{-3} \frac{D^4}{Cv^2}$	$Cv = 46,240 \times 10^{-6} \frac{D^2}{\sqrt{K}}$

1.1.4 밸브의 유량특성

밸브개도와 유량과의 관계를 표시한 것을 밸브의 유량특성이라 하며 고유 유량특성과 유효 용량특성으로 나타낸다. 고유 유량특성은 밸브 상, 하류의 압력차를 일정하게 유지한 상태에서 개도와 유량과의 관계를 나타내는 것이며 유효유량 특성은 관로손실의 영향을 고려하여 나타내는 것이다.

1) 밸브의 고유 유량특성

밸브형식에 따라 선형(linear), 등비율형(equal percentage), 차단형(on-off)이 있으며, 용량계수 Cv와 관계를 Fig. 1.4에 나타내었다.

- 선형 특성(Linear) : 개도와 유량이 비례하는 특성으로 작은 개도 구역에서 유량변화비율이 크고 큰 개도구역에서는 변화비율이 작은 특성이다. 예를 들어 밸브의 개도가 50%이면 전체 유량의 50%가 밸브를 통과하게 된다. 글로브 밸브가 대표적인 예이다.

선형특성을 가진 밸브는 넓은 범위의 유량측정이 필요하고 계통의 압력강하량을 밸브를 통해 알 수 있을 때 쓰인다.

- 등비율 특성(Equal Percentage) : 개도의 증가분과 유량증가분이 같은 특성으로 개도구역이 적을 때는 유량변화가 작고 큰 개도구역에서는 유량변화가 크다. 버터플라이 밸브 및 볼밸브가 해당된다. 주로 계통압력강하를 미세하게 조절하기 위한 목적으로 사용된다.

- 차단 특성(On-Off) : 전폐부터 중간개도까지는 개도의 변화량에 대하여 유량변화의 비율이 커지만 그 이상의 개도에서는 유량변화의 비율이 작은 특성으로 제수밸브와 같은 차단용 밸브가 해당된다. 밸브를 약30% 개방시켰을 경우 총 통과유량은 전체유량의 90%에 달한다.

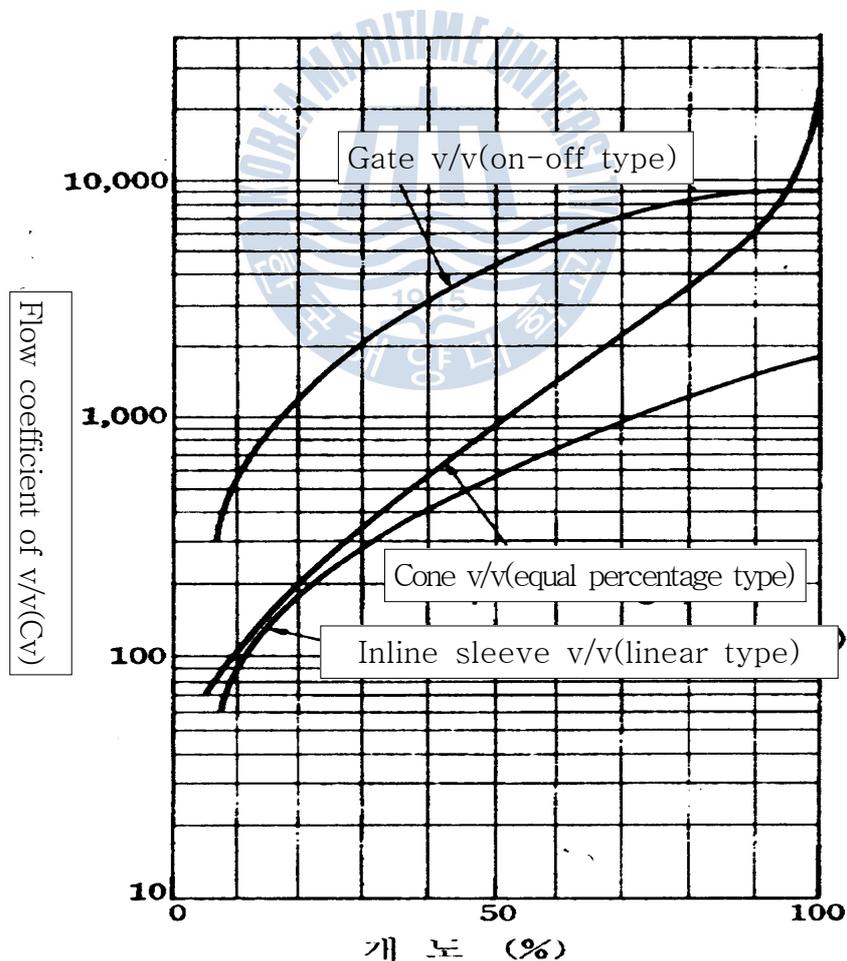


Fig. 1.4 Flow characteristics of V/V

2) 밸브의 유효 유량특성

밸브 고유 유량특성은 밸브 각 개도에 있어서 전후의 압력차가 일정하다고 가정한 것이다. 그러나 실제로는 관로 손실수두가 존재하기 때문에 밸브 개도가 같아도 그 밸브의 고유 유량특성과 일치하지 않아 실제 통과유량을 알기 어렵게 된다. 밸브 전단에서 손실이 크면 밸브개폐에 의한 영향이 적어져 유량제어가 어렵게 되기 때문이다.

이때 송수량은 다음 식으로 표현된다.

$$\frac{Q}{Q_{max}} = \sqrt{\zeta_{min} + Cp/\zeta + Cp} \quad (1-10)$$

여기서 Cp :관로손실계수, ζ :밸브의 손실계수, Q :실제 밸브 통과유량

Fig. 1.6에서 $Cp=0$ 일 때 밸브 고유의 특성이다.

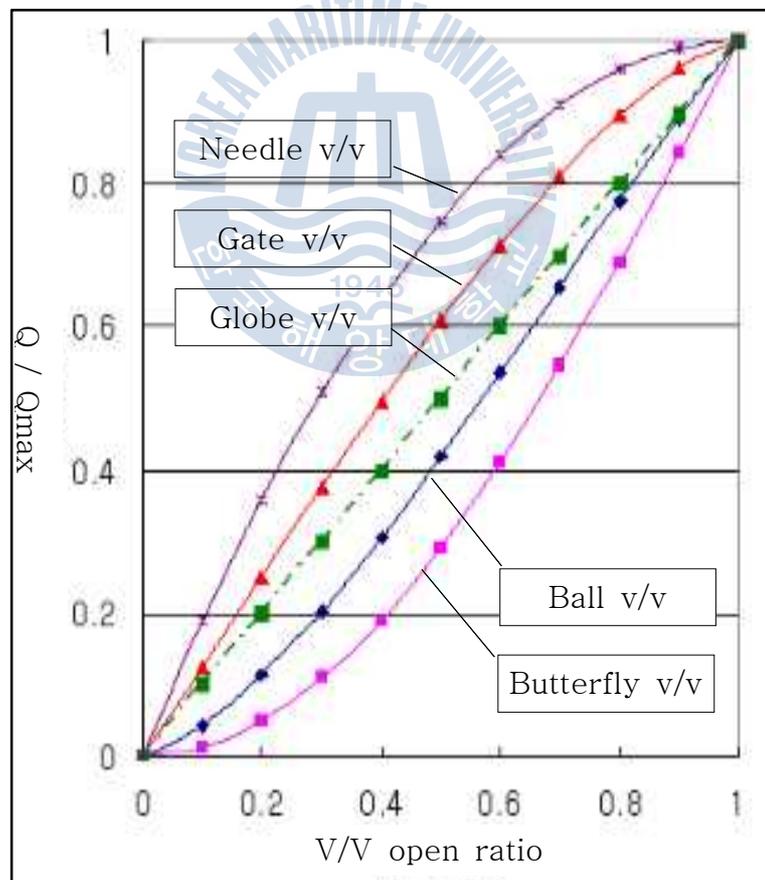


Fig. 1.5 Inherent flow characteristics

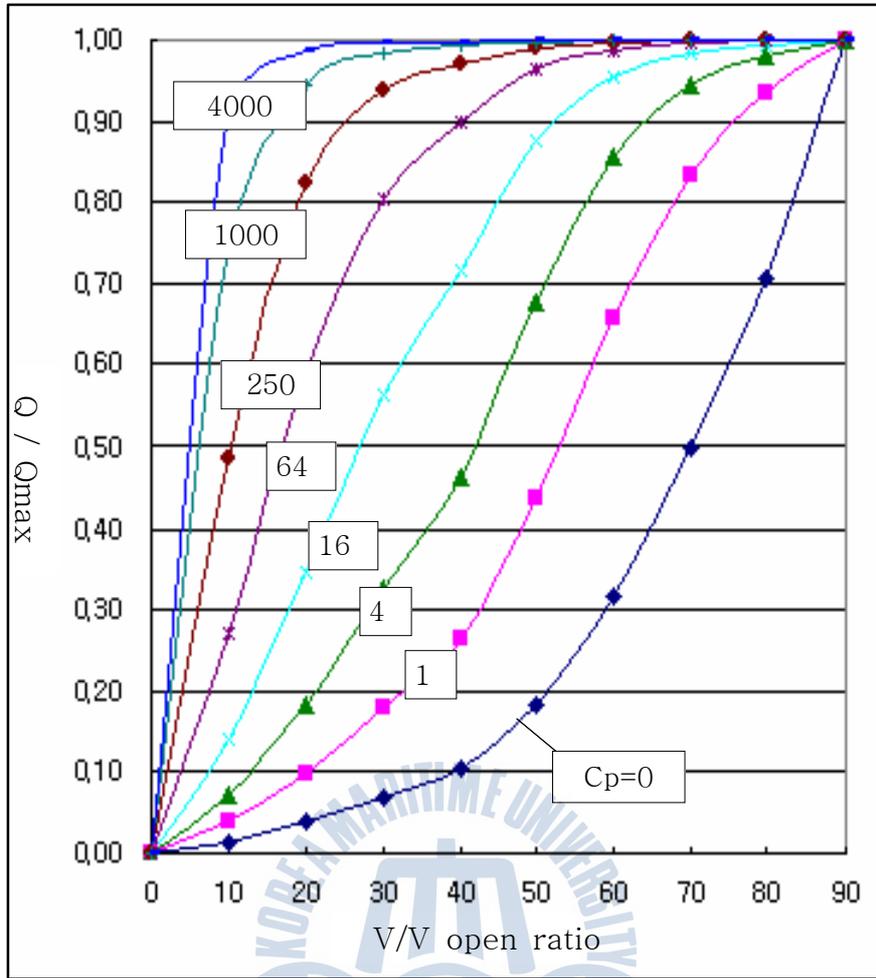


Fig. 1.6 Installed flow characteristics

1.1.5 밸브의 캐비테이션 계수

1) 캐비테이션 계수의 정의

물의 유속을 v , 흐르는 물의 정압을 p (절대압력), 어떤 수온에 있어서 포화증기압을 P_v (절대압력)라고 한다면, 캐비테이션의 발생조건은 $P \leq P_v$ 가 된다. 흐르는 물에서 압력이 국부적으로 저하하여 주위의 압력보다 $K \frac{v^2}{2g}$ 만큼 낮아지면 그 부분은 $P - K \frac{v^2}{2g} \leq P_v$ 로 되어, 캐비테이션이 발생한다. 캐비테이션이 발생하기 시작할 때의 K 값을

Kc로 하면

$$K_c = \frac{p - p_v}{\gamma \cdot \frac{v^2}{2g}} = \frac{H - H_v}{\frac{v^2}{2g}} \quad (1-11)$$

여기서, γ : 물의 비중량(kgf/m³), H: 흐르는 물의 절대압력 수두(mAq)
 H_v : 어떤 수온의 포화증기수두(mAq) 이 Kc를 캐비테이션 계수라고 한다.
 일반적인 밸브의 경우는

$$v = C\sqrt{2g\Delta H} \quad (1-12)$$

C : 밸브의 형식 및 개도에 의해 결정되는 정수

ΔH : 밸브전후의 압력차(mAq)로 두면,

$$K_c = \frac{H - H_v}{C^2 \cdot \Delta H} \Rightarrow K_c \cdot C^2 = \frac{H - H_v}{\Delta H} \text{ 이 식에서 } K_c \cdot C^2 \text{를 } \sigma \text{로 두면}$$

$\sigma = \frac{H - H_v}{\Delta H}$ 로 된다. 이 σ 를 밸브의 캐비테이션 계수라고 한다.

2) 캐비테이션 계수의 활용

- 설치조건에 따른 캐비테이션계수

일반적으로 캐비테이션 발생의 유무를 나타내는 지표로 캐비테이션 계수 σ 가 사용된다.

$$\sigma = \frac{H_1 + 10}{H_1 - H_2} \quad (1-13)$$

$$\sigma = \frac{H_2 + 10}{H_1 - H_2 + (v^2/2g)} \quad (1-14)$$

H_1 : 밸브 상류측의 계기압력(mAq), H_2 : 밸브 상류측의 계기압력(mAq)

보통은 식(1-13)을 사용하지만 평균유속이 크거나 밸브 설치장소의 표고가 높은 경우에는 식(1-14)를 사용하는 것이 안전하다. 상기 식으로부터 밸브전후의 압력차가 크고 하류측의 압력이 작을수록 캐비테이션계수는 작게 되어 조건이 나쁘게 됨을 알 수 있다.

3) 밸브고유의 캐비테이션계수

밸브는 구조, 형상 등 형식에 따라 고유의 캐비테이션 특성을 갖으며 σ_c 로 표시한다. σ_c 는 밸브 및 개도에 따라 Fig. 1.7과 같다.

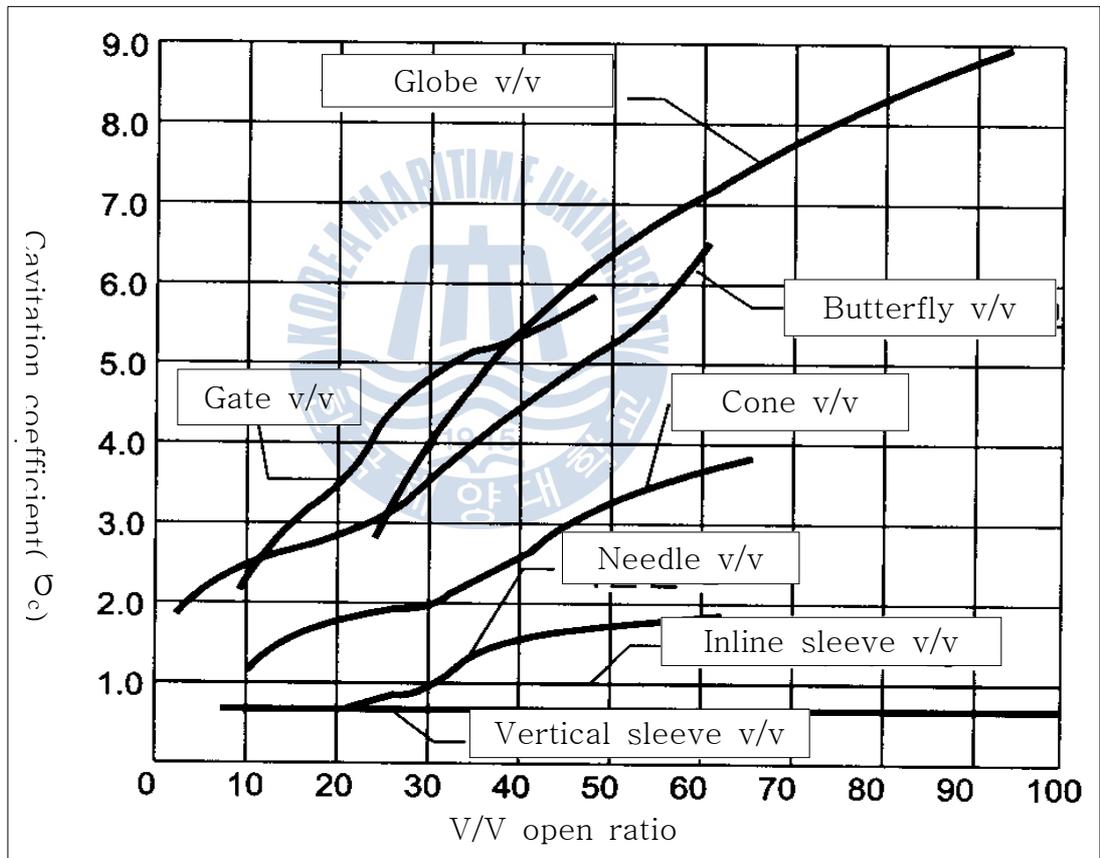


Fig. 1.7 V/V cavitation coefficient

1.1.6 버터플라이 밸브의 특성

버터플라이 밸브는 제어용밸브 중에서 상대적으로 경량이고 저렴하며 제어하기 용이한 유량특성(등비특성)을 가지고 있어 관로에서 널리 사용되고 있으며, 1930년부터 존재해 왔지만 20년 전까지는 주로 단순 개폐 차수 밸브로 사용되었고, 1970년 후반부터 교축용도에 적합하게 설계가 개선되면서 교축용으로 많이 사용되고 있다.

버터플라이 밸브는 동심과 편심의 두개의 그룹으로 분류되는데, 동심 버터플라이 밸브는 밸브 중앙에 디스크가 설치된 단순 개폐 용도로 사용되는 것이고, 편심 버터플라이 밸브는 디스크가 몸체 중앙에서 편심이 되게 설치되어 교축용으로 사용되는 것이다. 편심 버터플라이 밸브는 동심 버터플라이 밸브를 수정 설계하여 전체 행정에 걸쳐 개선된 유량조절이 가능한 한편, 동심 버터플라이 밸브를 교축제어용으로 사용하더라도 이는 특별하게 설계된 편심 버터플라이 밸브처럼 범위성이 좋지 못하고 시트 근방에서는 제어가 충분치 못하다.

버터플라이 밸브의 외관을 살펴보면 같은 구경의 볼밸브, 글로브 밸브 등과 비교할 때 매우 짧은 면간거리를 갖는다. 중량 또한 글로브 밸브의 동일 규격대비 40~80% 정도로 매우 가벼우므로 이 밸브는 공간과 중량이 제한되는 곳에서 많이 적용된다. 디스크 또한 가볍기 때문에 이를 작동하기 위한 힘이 적어서 버터플라이 밸브에는 작은 작동기를 사용할 수 있으며, 또한 내경이 배관 내경과 거의 동일하여 직선유동은 물론 높은 유량을 허용한다. 버터플라이 밸브의 크기는 회전 조정요소의 때문에 최소 50mm 이상이 되어야 하며, 디스크에 작용하는 측면부하 때문에 고성능 버터플라이 밸브는 최대 900mm로 제한된다.

버터플라이 밸브는 관로 안에 위치한 밸브의 복잡한 형상으로 인해서 박리와 재순환 영역(Recirculation zone)이 발생하고 이로 인해 와류가 생성된다. 유체와 밸브사이의 점성마찰에 따른 에너지 감소, 밸브 내를 지나는 유체의 관성력으로 인한 유속에너지의 압력에너지 변환 과정이 비가역 반응으로 나타나면서 소리나 진동 등으로의 에너지 변환이 발생하기 때문에 밸브를 지나는 유체는 회복할 수 없는 압력손실이 발생하게 된다 [3][4][5][6][10]



1.2 연구배경 및 필요성

상수도에 적용되고 있는 밸브들은 형식과 규격이 중소구경부터 대구경까지 다양하고, 원자력발전이나 석유화학 플랜트에 비하여 상대적으로 사용 압력, 온도 등 운전조건이 안정적이어서 설계 기술 및 밸브특성에 관한 연구가 활발하지 못한 실정이다.

또한, 상수도용 밸브는 산업용에 비해 낮은 거래가격이 형성되어 있으며, 설계 감리하는 경우에도 용수공급의 안정성에 중점을 두는 경우가 많아 밸브 제어특성의 연구는 외면되어 왔으며, 국내업체들은 밸브 형식과 규격에 따른 특성을 실험적으로 규명하지 않고, 표준적인 특성이나 외국 제조사의 기술 자료를 제공하다보니 상수도용 밸브에 대한 기술발전은 물론이고 정밀제어에 활용 수가 빈약하다.

밸브성능은 여러 조건하에서 안전하게 운전될 수 있도록 하는 구조기능(내구성, 마모성, 수밀성 등)의 성능과 제어기능(유량, 압력, 온도의 제어 등)의 성능 두 가지로 나누어 볼 수 있는데, 제어기능은 대표적으로 밸브의 용량계수 등을 말한다. 밸브 용량계수는 이미 1940년대에 정의되어 용량계수를 산출하기 위한 시험은 시험방법 기준들이 나오면서 1900년대 후반부터 시험이 수행되어 현재에는 많은 공학자와 밸브 산업계에는 단순한 유체역학적 지식으로써 여겨지고 있을 정도로 더 이상의 연구가 필요한 것인가에 대한 의문이 생길 수 있는 것이 사실이다.

그럼에도 불구하고 우리나라의 기술수준을 살펴보면 성능시험을 통해 용량계수를 카탈로그 상에 제시하고 있는 선진국의 경우와 다르게 국내 밸브 제작사(특히, 수도용 밸브업체)의 경우 용량계수 시험설비 조차 갖추지 못한 경우가 대부분일 뿐 아니라, 시험설비를 갖춘 일부업체의 경우에도

시험을 직접 수행해 본 기술자를 찾는 것은 매우 어려운 상황이다. 국내 밸브 업체에서는 용량계수가 필요할 경우 타사의 용량계수 자료나 상수도 시설기준의 자료 등을 그대로 제시하고 있으나, 이 용량계수 값이 자사의 밸브에 대하여 여전히 유효할 것인가에 대하여는 막연하게 “형식이 동일하니 그러할 것이다”라는 뚜렷한 근거 없는 추측만이 있을 뿐이다.

실무적인 측면에서 보면, 운영조건과 부적절한 밸브가 적용되어 밸브가 적정개도에서 유량이 원활히 제어되지 못하게 설계가 되면 캐비테이션 등의 이상 현상이 발생하고 이로 인한 소음과 진동으로 안정성에 영향을 미치기도 하기도 한다. 제조 납품된 밸브가 원하는 유량을 송수하지 못할 경우에 밸브 교체 등의 문제가 발생 될 수 있다^{[4][5][6][11][12]}.

더구나, 최근에는 고유가로 인하여 생산원가 부담이 지속적으로 발생함에 따라 전력비 절감과 온실가스 감축을 위하여 상수도관로시스템에 유량 및 압력 최적제어기술이 도입되는 상황임에 따라서, 우선 관망을 구성하고 제어하는 펌프 및 밸브에 대한 제어특성을 규명할 필요가 있다.

본 연구에서는 상수도분야의 유량제어 목적으로 일반적으로 적용되고 있는 버터플라이 밸브의 성능시험을 통하여 밸브 내부 형상, 디스크 및 시트구조의 설계 및 제조기술의 차이에 따른 각 밸브의 고유 유량특성(Cv)을 도출하여 관로손실(Cp)을 고려한 유효유량 특성을 분석하고, 그 시험 값을 조건으로 전산유체해석(CFD)을 수행하여 밸브 내부의 유동특성을 살펴보고자하며, 시험설비의 한계로 인해서 표준 차압($\Delta p=1\text{psi}$)의 형성이 곤란한 중·대구경 이상 버터플라이 밸브의 용량계수 분석 방법을 제시코자 한다.

1.3 연구목적

수도사업자는 관로에 적용되는 밸브들의 규격 선정과 효과적인 제어를 위하여 밸브의 고유 및 유효 유량특성을 파악해야 하는데, 제조업체의 영세성과 중·대구경 밸브에 대한 실물 시험 여건이 최근까지 미흡하여 실질적인 밸브특성 연구가 수행되지 못하였다. 특히, 수도용 밸브 제조업체는 대부분 시험설비를 갖추지 못하고 있으며, 산업용 고온고압밸브를 취급하는 10개 내외의 대형 밸브업체들도 시험구경이 대부분 300mm 이하이며, 그 이상의 구경은 소구경에서 시험한 용량계수 값에 상사법칙에 따른 외삽법을 이용하여 예측한 값을 사용하고 있다.

국외 제조사들은 시험을 통하여 용량계수(Cv) 등의 인자를 제시하고 있는데 반해서 국내 제조사는 밸브 제어설계에 필요한 데이터를 제시하지 않는 실정이다. 그 결과 해외 수출 등에 있어 용량계수를 요구하는 경우에는 자사 제품이 아닌 공개된 국외 타 밸브 카탈로그 및 상수도 시설기준 등의 용량계수 값을 그대로 제출하는 경우가 있었다.

본 연구는 이러한 국내현실을 감안하여 효과적인 밸브 설계 및 제어 인자를 도출하기 위하여 실물시험과 CFD 해석을 수행코자 하며, 관로에 널리 적용되고 있는 버터플라이 밸브의 형상별, 개도별 고유유량특성(Cv)을 파악하여 밸브의 유량특성을 도출하고, CFD를 통하여 상호검증함으로써 형상별, 각 개도별 제어특성의 차이를 밝혀내고, 관로 현장에서 관로손실 등을 감안한 효과적인 밸브 운전 제어에 도움을 주고자 한다. 또한, 시험설비가 과대하여 실물실험이 곤란한 중대구경의 버터플라이 밸브에서 제어특성 연구를 위한 대안을 제시하는데 그 목적이 있다.

제 2 장 실험 및 수치해석 방법

2.1 실험장치 및 밸브 제원

본 연구에서 밸브 실험장치는 K-water 연구원 유량계동에 위치하고 있으며 국내 최대의 유량계 교정설비로서 최대구경 800mm 이며, 건물 폭 35 m × 길이 75 m 로 국내에서는 최대의 교정설비 규모이다.

교정시스템을 살펴보면 우선 회수조에 연결된 지하 펌프장 펌프를 통해 정압탱크를 채운 물량은 설정된 정압탱크 높이가 되면, 일정수두로 시험 배관을 통해 안정적인 물량을 공급하게 된다.

시험배관에는 기준기로 사용되는 전자식 유량계가 설치되어 있으며, 중량측정식과 Master-meter식의 2가지로 교정이 수행된다. 전자식 유량계의 유량을 직접 비교하여 교정 하는 것이 Master-meter 방식이며, 시험 배관을 통과한 물을 주어진 시간동안 수집탱크로 수집된 물량을 시간으로 나누어 계산한 유량을 비교하여 교정하는 방식이 중량식 측정방식이다.

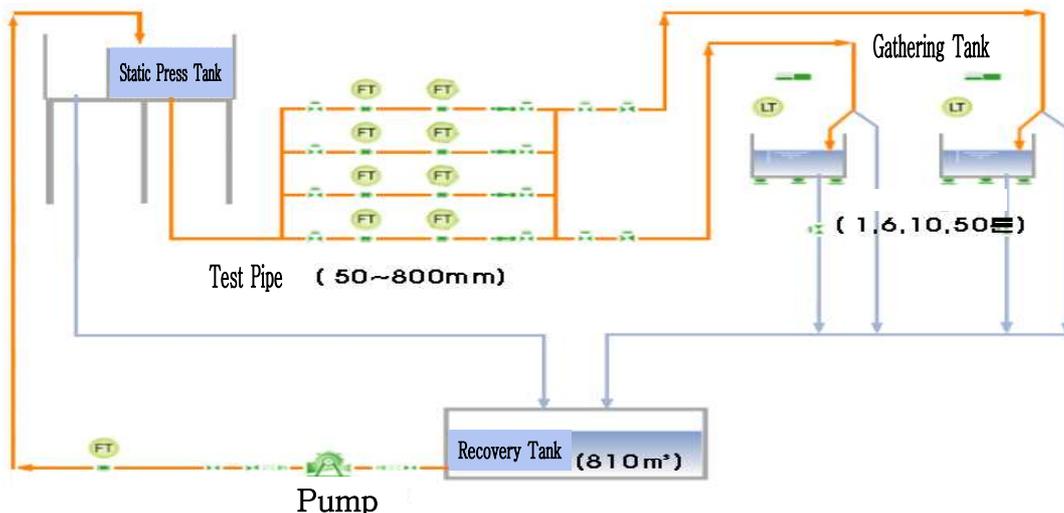


Fig. 2.1 Schematic diagram of flowmeter calibration system

- Testing diameter : (small)50,80,100,150 (large)300,400,600,800(mm)
- Straight pipe length : maximum diameter 50D
- Static pressure tank : height 27.5m, volume 68 m^3
- Pump : 17 $m^3/min \times 35m \times 3$ 대, 8.5 $m^3/min \times 35m$, 8.5 $m^3/min \times 70m$
- Gathering tank : volume 1, 6, 10, 50 m^3
- Uncertainty of measurement : (small pipe) 0.2%, (large pipe) 0.3%
- Testing flow range : 3 ~ 2700 m^3/h

2.1.1 실험 장치 구성

밸브 용량계수 실험 장치는 상, 하류 스로틀 밸브를 조작하여 밸브의 상, 하류 압력 및 유량 값을 제어하고, 이 때 시험구간 전후에 설치된 압력계로 상, 하류 압력과 차압 값을 구하고, 유량계와 온도계를 통하여 밸브를 통과하는 유량과 압력 값을 취득하여 용량계수 값을 산출할 수 있게 되어 있다. 크게 구분하면 측정계기 등의 하드웨어 장치와 데이터 처리 자동화 소프트웨어로 구성된다.

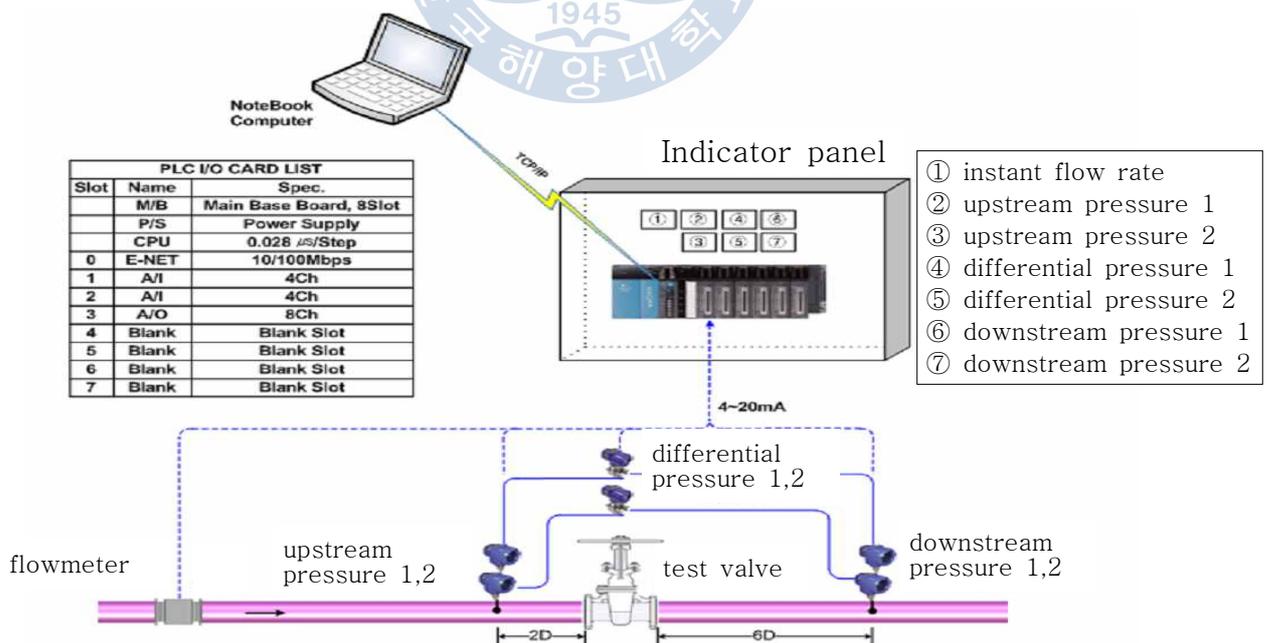


Fig. 2.2 Valve flow coefficient experiment device assembly

1) 하드웨어 설치

밸브 용량계수 실험 장치는 기존 교정 설비의 변형을 최소화 하고, 변형하는 경우에는 교정 정확도에 영향을 미치지 않는 범위에서 수행하였다. 각 센서에서 취득하는 출력 값은 현장 여건상 모두 4~20mA의 전류 값으로 하되 데이터 변환 과정을 최소화하여 보다 정확한 밸브 용량계수 값을 산출할 수 있도록 하였다.



Fig. 2.3 Valve flow coefficient experiment device assembly

① 압력계 설치

압력계는 국내외 관련 규격에 따라 설치하였다. 설치 수량은 KS B 2101과 JIS B 2005에는 밸브 상, 하류측에 각각 배관 단면상 수평 좌우 대칭으로 2대씩 설치하도록 규정하고 있다. 반면, ANSI/ISA 75.02와 IEC 60534-2-3에서는 상류 및 하류 측에 수평으로 각각 1대씩을 설치하도록 하되 평균압력을 측정하기 위하여 두수의 압력 탭을 내는 것을 추천하고 있으나 정확한 수량은 따로 명시하지 않고 있다. 여기서는 교정배관에 영향을 최소화하면서 압력계의 설치위치에 따른 압력값 차이를 비교할 수 있는 최소수량이라고 판

단되는 KS 및 JIS 규격에 따라 상, 하류측 좌우에 대칭으로 각각 2대씩 총 4개의 압력계를 설치하였다.

압력계 설치 시 상류 및 하류측에 확보하여야 할 직관거리는 모든 규격에서 공통으로 제시하는 상류측 2D, 하류측 6D, 상류 압력계의 상류측으로 다시 18D 이상, 하류압력계의 하류측으로 1D 이상의 직관거리를 확보하도록 하고 있어 그대로 시행했다.

압력탭의 구멍지름은 KS B 2101과 JIS B 2005에서는 최소 1mm, ANSI/ISA 75.02와 IEC 60534-2-3에서는 최소 3mm부터 시작하므로 여기서는 Fig. 2.4과 같이 3mm의 압력탭을 내었고 길이는 모든 규격의 권장 값인 5d, 즉 15mm로 하였다.

각 규격에서 모두 압력탭 내 공기 유입과 이물질의 축적의 가능성을 줄이기 위하여 배관의 중심을 향하여 배관 양쪽에서 수평으로 하도록 하고 있으며, 교정설비에 미치는 영향과 밸브 외의 압력손실 발생을 최소화하기 위해 압력탭 구멍 가장자리 마무리 작업을 하였다.

압력계는 정확도가 최고 측정범위(여기서는 5 kg/cm^2)의 $\pm 0.25\%$ 인 고정밀급으로 4자리 디지털 표시가 가능하고 전류 값이 출력되어 여기서는 4~20mA 신호를 이용하여 데이터를 실시간 취득하였다.

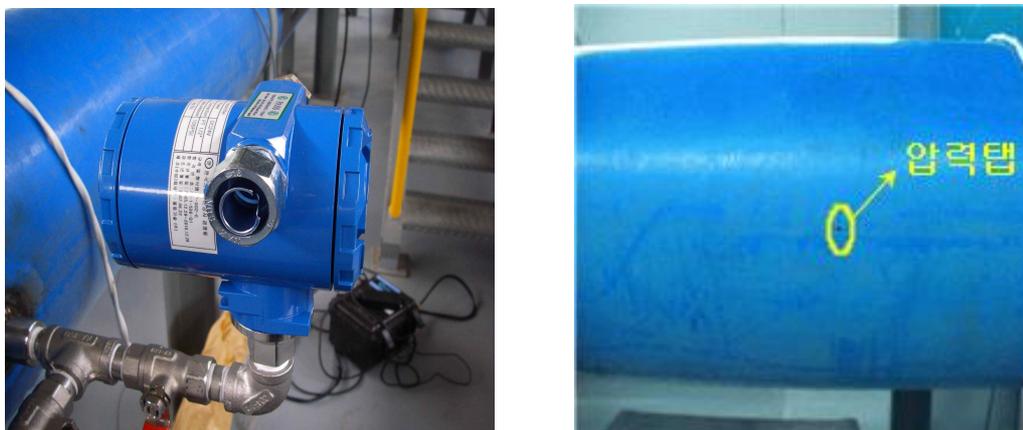


Fig. 2.4 Pressure measurement and pressure tap

② 차압계 설치

KS B 2101과 JIS B 2005에는 차압계 설치에 대한 언급이 없으나, ANSI/ISA 75.02와 IEC 60534-2-3에서는 상하류 압력계의 각 압력 값을 이용하여 차압을 측정시 발생할 수 있는 추가적인 부정확성을 줄이기 위해 직접 차압계를 설치할 것을 권장하고 있다. 차압계 설치를 위한 배관탭은 압력계 탭에서 T관을 이용하여 연결함으로써 두 계기의 압력이 동일한 점에서 측정되고 서로 값을 비교할 수 있도록 하였다. Fig. 2.5의 차압계는 최고 측정범위(여기서는 $5 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$)의 $\pm 0.075\%$ 의 정확도를 가진 초정밀급 디지털형으로 역시 4~20mA의 아날로그 출력을 신호로 사용하였다. 차압계 역시 좌측 상하류 압력탭에 연결한 좌측 차압계, 우측 상하류 압력탭에 연결한 우측 차압계 각 1대로 총 2대를 설치하였다.

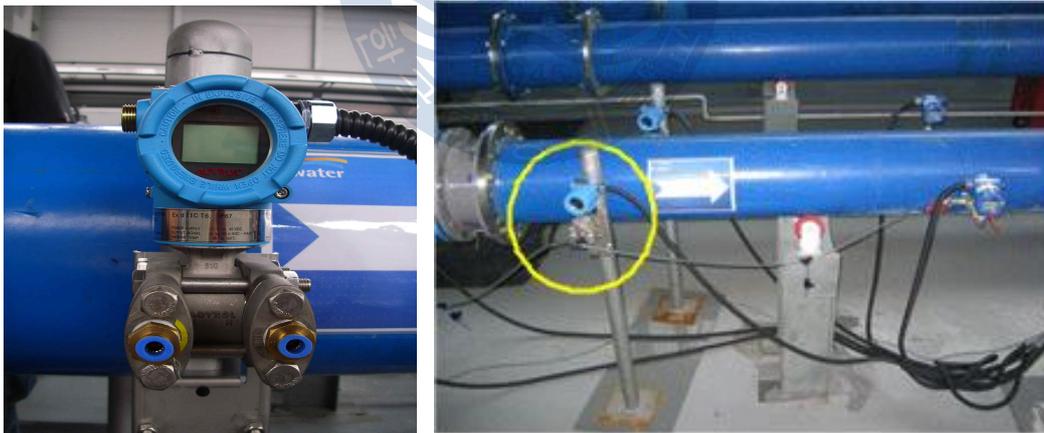


Fig. 2.5 Differential pressure

③ 유량 값, 온도 값 취득

밸브 용량계수 산정에 필요한 유량 값은 현재 설치되어 있는 Master-meter(기준기 전자유량계)의 값을 활용하되, 유량계 교정 신호와 별개로 독립적으로 신호를 취득하였다. 또한 온도 값은 시험

중 변화가 크지 않으므로 설치된 온도계의 값을 시험자가 육안으로 읽어 입력하면 자동으로 비중(specific gravity)값을 계산할 수 있도록 프로그래밍 하였다.



Fig. 2.6 Flowmeter and thermometer

④ PLC 및 판넬 설치

PLC는 Table 2.1과 같이 1개의 메인보드에 전원과 CPU를 제외하고 통신 모듈 1개와 3개의 IO 모듈을 설치하고 향후 확장을 고려하여 4개의 slot을 여유분으로 남겨두었다.

Table 2.1 PLC component and specification

Slot No	component	specification
	M/B	Main Base Board, 8 slot
	P/S	Power Supply, AC 220V
	CPU	0.028 μ s/Step, program memory 32k Steps
0	E-NET	10/100Mbps ethernet, RJ-45
1	A/I	4~20 mA, 0~16000 resolution, 4CH
2	A/I	4~20 mA, 0~16000 resolution, 4CH
3	A/O	4~20 mA, 0~16000 resolution, 8CH
4~7	Blank	Blank Slot

모듈은 아날로그에서 디지털 신호변환 시간이 2.5ms(채널당) 이하의 우수한 것을 사용하여 1초간 20회 이상의 데이터를 변형 없이 취득할 수 있는 것을 사용한다.

관넬의 설치위치는 각 센서(유량계, 압력계)에서 취득되는 신호의 변형이 최소화 될 수 있도록 압력계 설치위치 가까이에 설치하고 시험 밸브 및 유량계 설치에 장애가 되지 않도록 하였다. 관넬의 외부에는 압력값(4개), 차압값(2개), 유량값(1개)가 디지털 값으로 실시간으로 표시될 수 있도록 7개의 indicator를 설치하였다.

2) 소프트웨어 프로그램

취득한 데이터를 화면으로 구성하고 시험 데이터 저장 및 그래프 작성, 성적서 발급 등을 위한 밸브 용량계수 시험용 자동화 소프트웨어로 아래와 같이 크게 2가지로 구성된다.

① 데이터 취득용 PLC 프로그램

1초간 20회(50ms 주기)의 데이터를 PLC내부 메모리에 저장하고, TCP/IP 통신으로 노트북 컴퓨터에 데이터를 전송한다.

② 데이터 수집 및 처리용 프로그램

PLC 메모리에 저장된 데이터를 TCP/IP 통신으로 수신하여 PC에 디스플레이 하고 데이터를 이용한 각종 그래프와 성적서를 만드는 등 사용자가 지정하는 여러 가지 기능을 수행 한다.

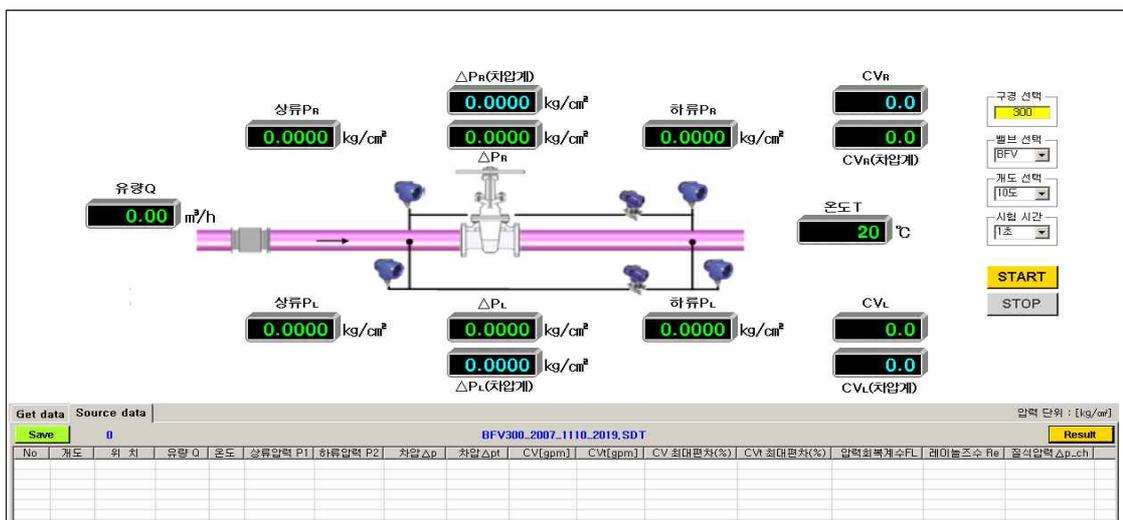


Fig. 2.7 Valve flow coefficient experiment device assembly program screen

■ 네트워크 연결 및 파일의 관리

- TCP/IP 통신 연결버튼 : PLC의 데이터가 실시간으로 화면에 뜬다.
- New file : 화면에 보이는 기존의 데이터를 지우고 새 파일을 연다.
- Load file : 이전에 저장했던 데이터 파일을 불러온다.
- 종료버튼 : 프로그램을 종료한다.

■ 실시간 데이터 표시 영역

화면의 시스템 그림과 함께 보이는 indicator 창으로, 통신을 연결하는 순간 현장 계기의 유량 값, 압력 값, 차압 값을 실시간으로 나타내고 이 값들을 계산한 차압 값과 용량계수 값을 나타낸다.

■ 사용자 설정 및 입력

- 구경선택 : 구경을 선택하면 밸브 내부 면적이 자동 계산된다.
- 개도선택 : 회전형 밸브는 10도 단위, 스템형 밸브는 10% 선택한다.
- 온도선택 : 온도 값은 직접입력하는데, Cv값 계산에 사용된다.
- 시험시간 : 1~10초간 연속 데이터를 저장하여 취득할 수 있다.
- Start 버튼 : 설정 시간만큼 PLC에서 데이터를 취득하여 저장하고 있다가 취득이 끝나면 그 값을 PC로 넘겨준다.
- Stop 버튼 : 데이터 수집 중간에 이를 취소하는 버튼이다.

■ 데이터 관리 및 그래프 화면

- Get Data

시험시간 동안 20회/초 측정되어 저장된 데이터가 PC에 라인별로 순차적으로 기록되어 이를 파일로 저장하고 불러올 수 있다. 데이터는 유량, 온도, 압력(4개), 차압(4개), Cv(4개)이다.

- Source Data

"Get Data"에서 "Paste"버튼을 누르면 데이터가 자동으로 넘어와 "Source Data"에서 최대, 최소 등 처리 후 그래프 작성한다.

2.1.2 밸브 제원

시험밸브는 유량제어용으로 널리 사용되는 버터플라이 밸브(400mm, 5대)이며, 버터플라이 밸브(일반형, 경사형)의 대표적인 제작 도면과 형상은 Fig. 2.8, 2.9과 같다.

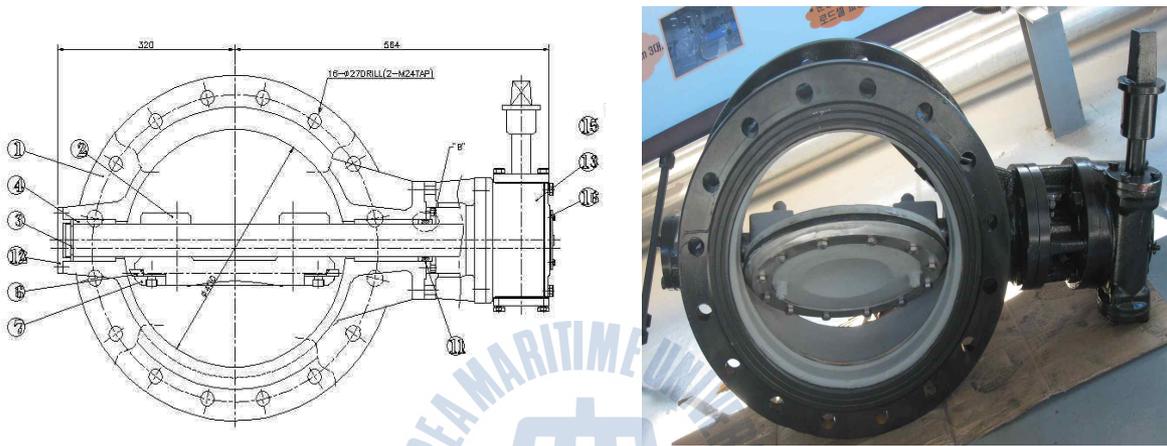


Fig. 2.8 Butterfly valve(general type)

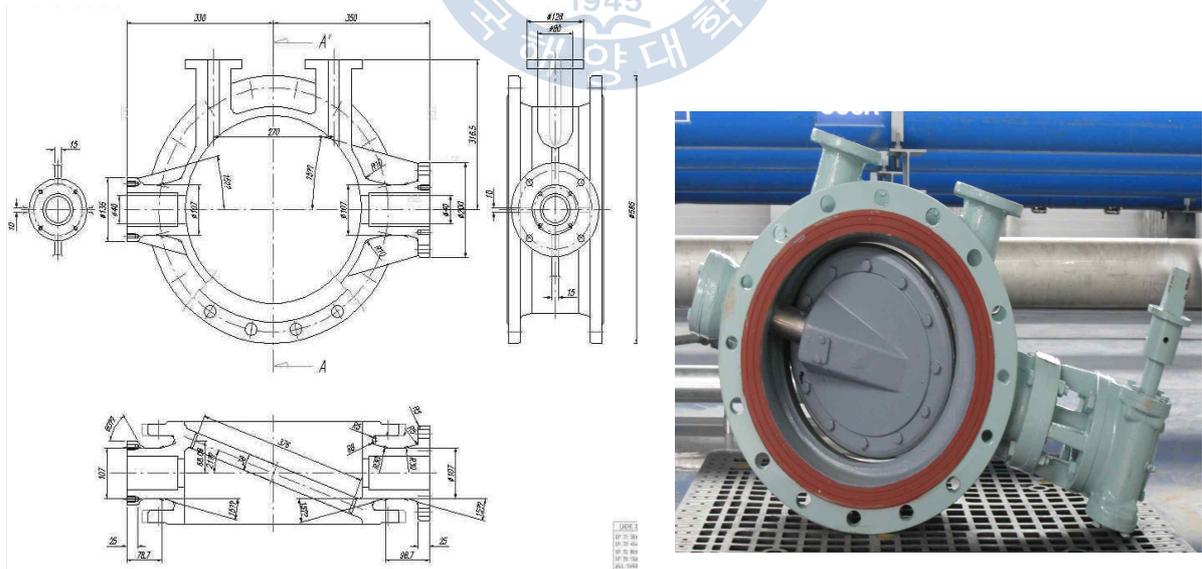


Fig. 2.9 Butterfly valve(slanting type)

2.2 수치해석법

본 연구에서는 상용 CFD코드 CFX-12를 사용하였다. 일반적으로 범용의 상용코드들은 SIMPLE 또는 SIMPLEC, Rhie and Chow 방법과 같은 압력에 기초한 방정식으로부터 만들어져 있다. 이들 압력에 기초한 코드들은 일반적으로 다양한 물리적 모델들과 경계조건을 제공하고 다른 CAE 도구들과 연동을 포함하는 복잡한 Multi-physics 문제 등에 적용될 수 있다.

유동장의 정확한 해석을 위해서는 점성저층에 대한 해석이 요구되고, 이를 만족시키기 위해서는 벽면 근처에 종횡비(aspect-ratio)가 매우 큰, 높은 격자 밀집도의 확보가 요구된다. 이러한 요구조건을 만족하는 CFX-12의 수치기법의 핵심은 질량과 운동량 방정식의 연동화(coupled formation)이다.

CFX-12는 압력기반 유한체적법(finite volume method)을 fully implicit 이산화하여 얻어지는 방정식을 algebraic multigrid coupled solver를 이용하여 해석한다. SIMPLE 등 고전적인 segregated 접근방법에 비해 implicit coupling 방법은 수렴을 가속시키고, 압축성 유동에 있어서 수렴성의 난점을 피할 수 있고, 높은 종횡비의 격자를 다룰 수 있는 장점을 갖는다.

2.2.1 지배방정식

지배방정식은 유체의 흐름을 예측 할 수 있는 수학적이고 물리적인 방정식으로 구성되어 있다. 또한 상황에 맞는 수학적 방정식고 물리적인 알고리즘이 중요하기 때문에 다양한 방정식을 적절하게 사용해야 한다. 일반적인 유동에서 다루는 방정식은 질량, 운동량, 에너지 방정식이고, 각각은 식(2-1), 식(2-2), 식(2-3)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + S_{u_i} \quad (2-2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H - P) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j H) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \tau_{ij}) + S_T \quad (2-3)$$

ρ : 밀도

u_j : 속도

P : 압력

μ : 점성계수

여기서,

H : 전엔탈피

h : 정적엔탈피

T : 온도

τ_{ij} : 응력텐서

상태방정식 $\rho = \rho(P, T)$, 점성계수와 변형률의 함수로서 응력텐서의 응력변형률 관계, 그리고, $h = h(P, T)$ 가 이들 방정식에 추가된다. 난류 유동은 와 점성(eddy viscosity)이 추가되고 방정식은 레이놀즈 평균 물리량에 대해 쓴다. 방정식의 일반적인 형태는 동일하다.

2.2.2 난류 모델링

난류 모델은 평균성분과 변동성분을 도입하여 수정된 수송 방정식 (transport equation)의 해를 구하기 위한 수단이다. 예를 들어, 속도 U 는 평균성분 \bar{U} 와 시간에 따른 변동성분 u 로 나눌 수 있다.

$$U = \bar{U} + u, \text{ 여기서 } \bar{U} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} U dt \quad (2-4)$$

Δt 는 난류의 변동 scale보다 상대적으로 큰 시간 scale이지만, 방정식을 푸는 전체 시간보다는 작은 시간 scale이다. 원래의 수송방정식에 시간 평균된 물리량을 대입하면 아래와 같은 Reynolds Averaged Navier-Stokes 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (2-5)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = \nabla \cdot (\tau - \overline{\rho u \otimes u}) + S_M \quad (2-6)$$

여기서 τ 는 분자 응력 텐서 (molecular stress tensor)이다.

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi - \overline{\rho u \phi}) + S_E \quad (2-7)$$

연속방정식은 변화가 없으나, 운동량과 스칼라 수송방정식은 레이놀즈 응력항인 $\overline{\rho u \otimes u}$, 그리고 레이놀즈 유속, $\overline{\rho u \phi}$ 등, 분자 확산 유속에 난류 유속항을 더한 항을 포함하고 있다. 이들 항은 비 평균화 방정식의 비선형 대류항으로 부터 나타난다. 이 항들은 turbulent velocity fluctuation에 의한 대류는 molecular level에서의 thermal fluctuation에 의해 야기되는 혼합보다 더 크다는 사실을 나타낸다. 고 레이놀즈수에서, turbulent velocity fluctuation은 thermal fluctuation의 평균자유경로 (mean free path)보다 훨씬 큰 길이 스케일을 갖는다. 따라서, 난류 유속은 분자 유속보다 훨씬 크게 된다.

Reynolds Averaged Energy 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot} + \overline{\rho u h} - \lambda \nabla T) = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2-8)$$

여기서 평균된 전체 엔탈피는 다음과 같이 주어진다.

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} U^2 + k \quad (2-9)$$

Total enthalpy는 평균운동에너지 (mean kinetic energy)와 난류운동에너지 (turbulent kinetic energy)를 포함한다. 여기서 난류운동에너지는 다음과 같이 정의된다.

$$k = \frac{1}{2} \overline{u^2} \quad (2-10)$$

k는 난류 운동 에너지이고 속도 변동의 분산으로 정의되고, 차원은 (L^2T^{-2}) 즉, m^2/s^2 이다. ε 은 turbulence eddy dissipation이고 단위시간당 k의 차원을 갖는다. 즉, (L^2T^{-3}), m^2/s^3 이다. k- ε 모델은 기본 방정식에 2개의 변수가 추가된다.

연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (2-11)$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) = \nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U)^f + B \quad (2-12)$$

여기서 B는 body force의 합이고, μ_{eff} 는 난류를 고려한 유효 점성이다. 그리고, p' 은 다음과 같이 표현되는 수정된 압력항이다.

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k \quad (2-13)$$

0-방정식 모델과 같이, k- ε 모델은 와점성 개념에 기초한다. 따라서,

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (2-14)$$

여기서 μ_t 는 난류 점성이다. k- ε 모델은 난류 점성을 난류 운동에너지와 소산율을 이용하여 다음과 같이 가정한다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2-15)$$

여기서 C_μ 는 상수이다.

k와 ε 은 난류 운동에너지와 난류 소산율에 대한 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (2-16)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (2-17)$$

여기서 $C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, \sigma_k$ 는 모델상수이다. P_k 는 점성과 부력에 따른 난류생성 항이며 다음 식으로 표현된다.

$$P_k = \mu_t \nabla U \cdot (\nabla U + \Delta U^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot U (3\mu_t \nabla \cdot U + \rho k) + P_{kb} \quad (2-18)$$

비압축성 유동에 대해, $\nabla \cdot U$ 는 작고 오른쪽 두 번째 항은 생성에 크게 기여하지 않는다. 압축성 유동의 경우 $\nabla \cdot U$ 는 shock이 발생하는 구역에서만 큰 값을 갖는다. $3\mu_t$ 항은 "frozen stress"가정에 기초한다. 이 값은 k와 ε 값이 shock을 지나면서 매우 크게 변하는 현상을 막아준다.

2.2.3 이산화 방법

CFX-12은 implicit pressure based 방법을 사용하며, 여기서 사용되는 주요 독립변수들은 (P, u_j, H) 이다. 일반적으로, 범용 상용코드는 위의 변수에 대해 해석을 수행하며, 이는 현장에서 일반적으로 부딪히는 비압축성 유동의 해석이 용이하기 때문이다.

Fig. 2.10 에서 실선으로 나타난 것은 일반적으로 알려져 있는 격자 즉, cell 이다. 실선으로 나타낸 cell, 즉 element를 다시 나누어 점선으로 표현된 sub element를 구성하며 제어체적은 음영으로 나타낸 부분과 같이 node를 둘러싼 sub element 들로 구성되며 hex, tetra, wedge, pyramid 등 모든 element 형태에 대해 동일하게 적용된다. 모든 변수 값과 유체의 물성치는 이 노드에 저장된다.

수치해석의 정확도는 노드 값으로 표현되는 적분점(IP)들에서의 표면 적분(fluxes) 값들의 정확도에 의해 결정된다. 계산을 통해 얻어진 해는 격자 노드에 저장되지만, 방정식의 대류항, 확산항, 압력구배항 등의 다양한 항들은 적분점에서의 해나 해의 구배 값을 필요로 하며 따라서, element 내부에서의 해의 변화를 계산하기 위해 finite element shape function이 사용된다. 이러한 방식을 FEM based FVM 혹은 element based FVM이라 한다. Fig. 22와 같이 제어 체적면에서 적분점의 개수가 2차원인 경우 일반적인 FVM의 4개에 비해 8개로 2배가 많은 것을 알 수 있다. 3D 육면체 격자의 경우 6개에서 24개로, 사면체의 경우 4개에서 평균 60개로 적분 점이 많아지므로 비교적 성긴 격자에 대해서도 해의 정확도가 뛰어난 장점이 있다.

식(2-1), (2-2), (2-3) 방정식들을 제어체적에 걸쳐 적분함으로써 질량, 운동량, 그리고 에너지 방정식에 대한 이산화 적분식은 각각 식(2-19), 식(2-20), 식(2-21)과 같다.

$$\rho V \left(\frac{\rho - \rho^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} (\rho u_j \Delta n_j)_{ip} = 0 \quad (2-19)$$

$$\rho V \left(\frac{U_i - U_i^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} m_{ip} (u_i)_{ip} = \sum_{ip} (P \Delta n_i)_{ip} + \sum_{ip} \left(\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \Delta n_j \right)_{ip} + \overline{s_{ui}} V \quad (2-20)$$

$$\rho V \left(\frac{(H - P/\rho) - (H^0 - P^0/\rho)}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} m_{ip} H_{ip} = \sum_{ip} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} \Delta n_j \right)_{ip} + \overline{s_{\emptyset}} V \quad (2-21)$$

여기서, $(\Delta n_j)_{ip}$ 는 적분점 위치에서 국부 표면 벡터이다. 그리고 제한 체적의 적분점 표면을 통과하는 m_{ip} 는 질량유동이다. 모든 방정식들은 시간간격의 제한을 피하기 위하여 implicit하게 다루어지며, 비정상 항에는 1차와 2차 backward Euler 방정식이 사용된다. 확산항은 element shape function의 미분형태로 각 적분점의 위치에서 구배계수를 계산함으로써 결정된다. 대류항은 Upwind, Quick 등 몇몇 기법에 의해 평가될 수 있으나, 기본 설정된 기법인 high resolution 기법을 사용한다. High resolution 기법은 대류항에 대한 2차 정확도의 upwind biased approach에 기초한 기법이며 Barth와 Jespersen에 의해 기술된 방법과 유사하고, 식(2-22)과 같다.

$$\phi_{ip} = \phi_P + \underline{\beta(\nabla \phi)}_{ip} \overline{\Delta r_{ip}} \quad (2-22)$$

식(4-23)과 같이 divergence 형태에서 모든 항들에 대해 질량 divergence 항은 표면적분의 형태로 변환된다.

$$m_{ip} = \rho_{ip} u_{j,ip} \Delta n_{j,ip} \quad (2-23)$$

밀도는 다른 대류 항처럼 표준 high resolution 스킴을 적용하여 계산되고, 식(2-24)와 같다.

$$\rho_{ip} = \rho_P + \beta(\nabla \rho)_{ip} \Delta r_{ip} \quad (2-24)$$

이 upwind biased 평가는 운동량과 에너지 방정식의 다른 대류량과 마찬가지로 유동이 상당히 압축성이어도 안정적이며, 2차의 정확도를 가진다. Implicit 방법에서 중요한 것은 ρu 의 선형화이다. 먼저 ρu 는 Newton Raphson 선형화에 의해 확정되어 식(2-25)과 같다.

$$(\rho u) \approx \rho^n u^0 + \rho^0 u^n - \rho^0 u^0 \quad (2-25)$$

여기서 위첨자 n은 새로운 값 (implicit)을 의미하고 0은 예전 (지연된 값) 시간레벨이다. 이러한 선형화는 전 영역에 걸친 마하수의 신뢰성 있는 수렴을 보장한다.

마지막으로, 식(2-26)과 같이 밀도에 대한 상태방정식은 압력의 향으로 구성된 ρ^n 의 implicit 표현을 얻기 위하여 차분되며 앞서 제공된 상태

방정식에서 미분항 $\frac{\partial \rho}{\partial P}$ 를 계산한다.

$$\rho^n = \rho^0 + \frac{\partial \rho}{\partial P}(P^n - P^0) \quad (2-26)$$

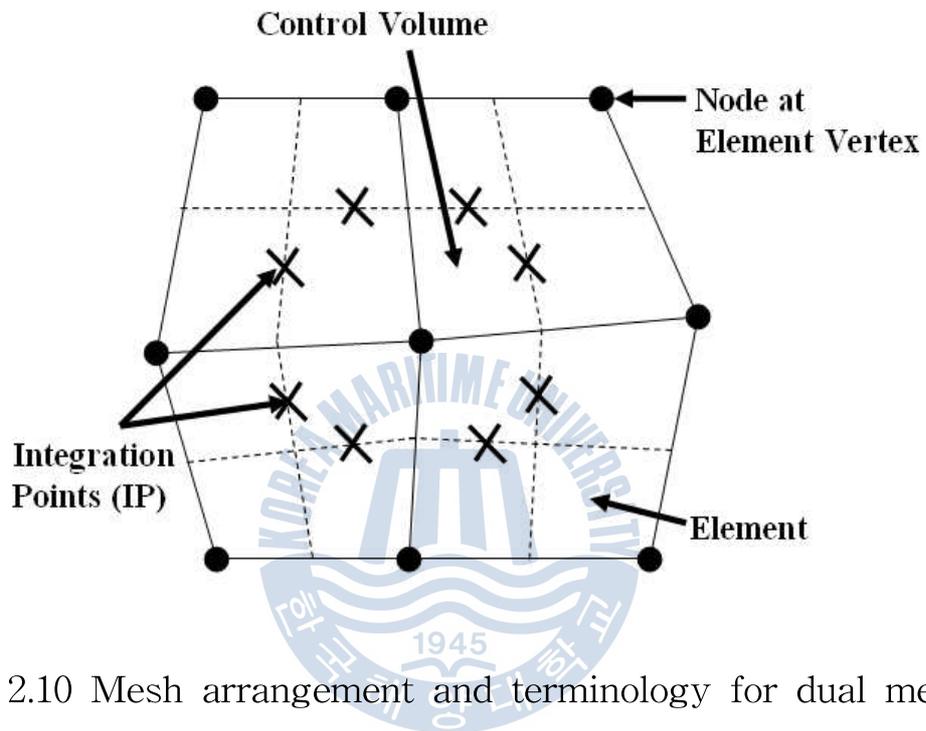


Fig. 2.10 Mesh arrangement and terminology for dual mesh

2.2.4 모델링

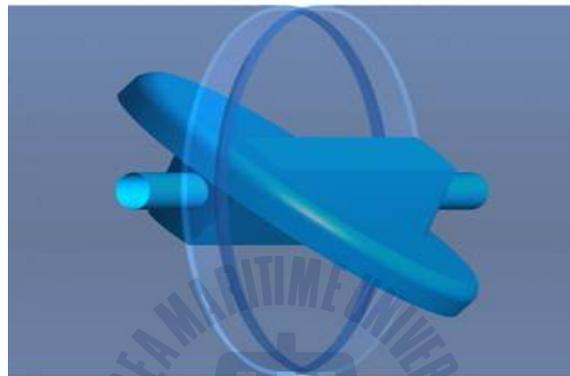
관로에서 제어목적으로 널리 사용되는 버터플라이 밸브 유동해석을 위하여 업체로부터 제공된 2D CAD 모델을 바탕으로 3D 밸브 모델링을 구성하였으며 Fig. 2.11은 유동영역을 추출하는데 중요한 바디와 디스크 부분을 3D 모델링한 것을 나타낸다.

유동해석에는 실험조건을 연장하여 흐름을 관찰코자 Fig. 2.12와 같이 구성하였다. 즉, 밸브 시험부로부터 전, 후단으로 관 내경(D)의 5배되는 지점을 포함하도록 유동해석 계산영역을 구성하였다. 모델링은 ANSYS-Design Modeler를 사용하여 작업을 수행하였다.

밸브 시트를 포함한 밸브 디스크 part와 밸브 전, 후단 관 내경(D)의 5배를 포함한 밸브 바디 part로 구성하여 밸브개도가 9~90° 범위에서 밸브별로 10가지의 모델링을 구성하였으며, 주요 부분(밸브 디스크 및 바디 등)의 결과를 각각 확인할 수 있게 모델링하였다.



(a) Butterfly valve(general type)



(b) Butterfly valve(slanting type)

Fig. 2.11 Modeling of Butterfly valve

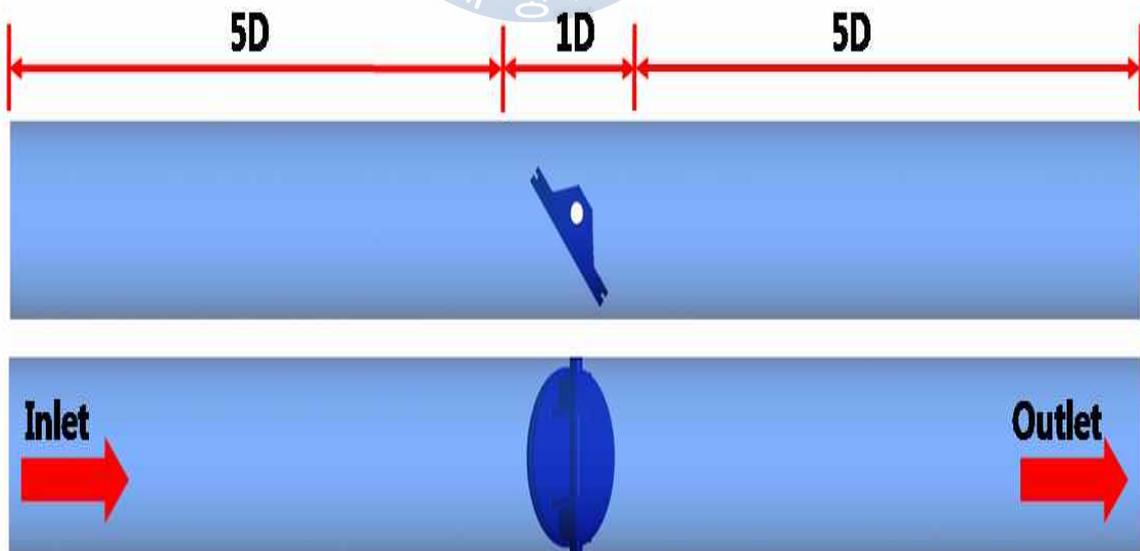


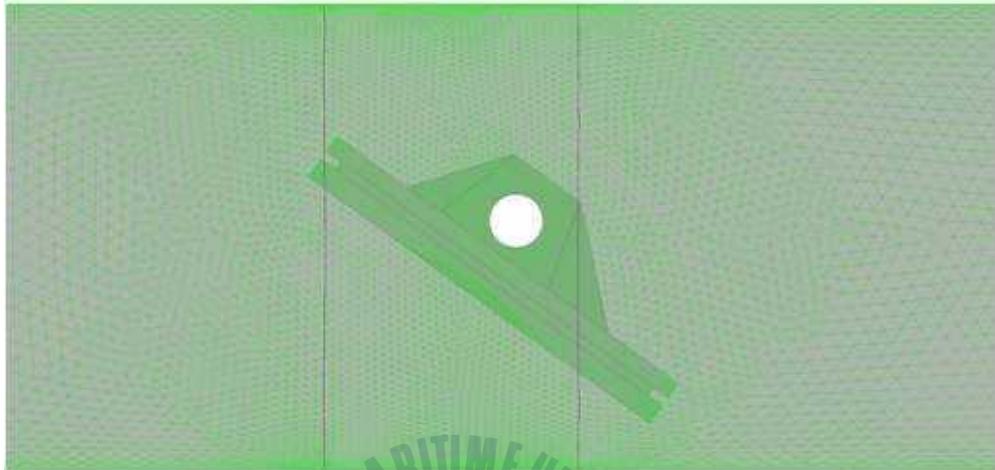
Fig. 2.12 Computational domain of Butterfly valve

2.2.5 그리드 생성

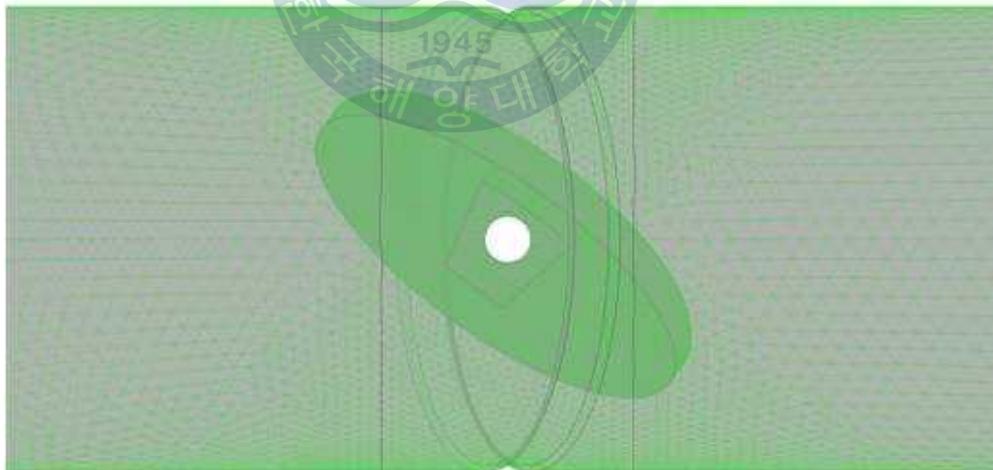
격자의 생성은 적용 난류모델의 특성에 따라 원활한 수렴 및 신뢰성 있는 결과를 확보하기 위해 Y^+ , 경계층 격자 밀집도, 격자 형태, Aspect ratio 등을 신중히 고려해야만 한다. 격자의 적절한 배치가 유동해석에서는 첫 번째 필수적인 요소라 할 수 있다.

유동특성에 영향을 주는 정도에 따라, 밸브 디스크, 몸체, 입·출구부 순서로 유동영역을 분할하여 유동 형태가 극도의 난류를 보이는 밸브 디스크부와 몸체부에 격자를 집중시키고, 버터플라이 밸브는 시트부의 형상이 복잡하여 형상의 제한없이 비교적 쉽게 우수한 격자를 생성 할 수 있는 tetra 격자를 구성하였다.

또한, sub-layer 영역의 정확한 해석을 위해 벽면 경계조건이 적용되는 경계면에 다수의 prism 격자를 분포시켰으며, 입출구부는 상대적으로 적은 격자를 생성하여 계산의 효율성을 높였다. 격자생성은 ANSYS-ICEM CFD 12을 사용하였으며, 격자는 비정렬 격자를 사용하였으며, 각 case의 격자 크기가 같아지도록 조정하여 격자를 생성하였고, 각 밸브의 동일한 계산 정확도를 유지하기 위해 개도별로 Node수는 $750,000 \pm 5,000$ 으로 조절하여 격자를 생성하였다. 작성 격자(Grid)는 Fig. 2.13과 같다.



(a) Butterfly valve(general type)



(b) Butterfly valve(slanting type)

Fig. 2.13 Unstructured tetra-prism(hybrid) for the valve domain

2.3 실험 및 수치해석 결과 비교

2.3.1 실험 방법

시험구간 내 용량계수를 측정할 밸브를 설치하고 상, 하류 스로틀 밸브를 조절하여 유량과 상, 하류의 압력을 조정하면서 이때의 온도값(온도계로부터), 밸브 전후단 압력값(상, 하류 압력계로부터), 그리고 유량값(유량계로부터)을 읽어 들여 용량계수 관계식에 대입하여 산출하는 것이다. 각 변수와 관련된 계측기기의 측정 불확도로 부터 밸브 용량계수의 측정오차에 기여하는 정도 및 오차범위를 정량화하여 확률적 분포를 고찰하고 합성함으로서 수행되었다. 측정 불확도는 $\pm 1\%$ (95% 신뢰수준)의 범위를 확보하면서 밸브 시험에 대한 신뢰성을 확보하여 각 업체별 밸브 유동특성을 나타내기 위하여 측정된 시험값을 통해 용량계수와 손실계수를 산출하였다. 밸브 시험 방법은 ANSI/ISA-75.02와 IEC 60534-2-3에 제시된 방법으로 시험설비를 Fig. 2.2와 Fig. 2.14와 같이 구성하였다^{[8][9]}.

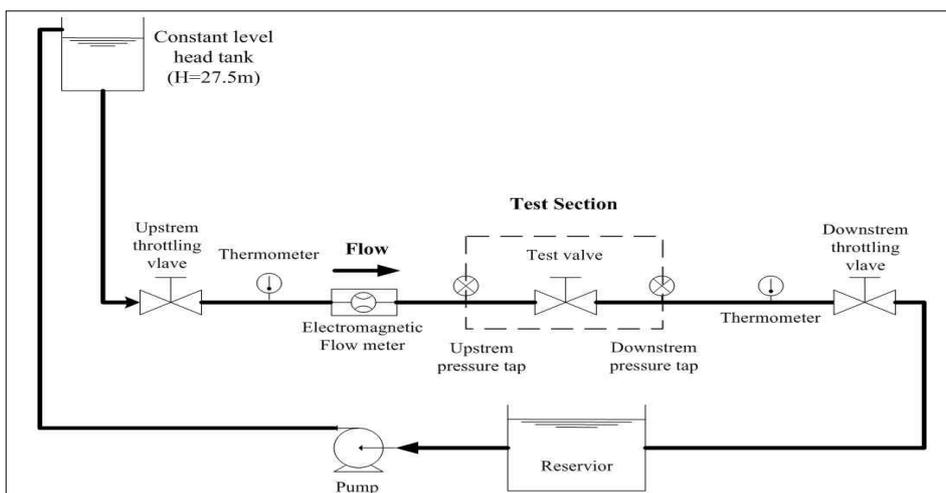


Fig. 2.14 Valve flow coefficient experiment device assembly

① 용량계수 C_v 에 대한 시험 절차

밸브 용량계수 C_v 를 결정하기 위해서는 Fig. 2.15의 배관 요구사항에 따라 피팅이 부착되어 있지 않은 시험표본을 설치한다. 압력은 밸브의 선택된 개도에서 시험부 압력 탭 양단에서 측정되어야 한다. 매우 작은 밸브 용량에 있어서는 비난류가 권고한 차압에서 발생할 수 있다. 이 경우에는 난류를 확보하기 위해서 보다 큰 차압을 사용해야 한다. 밸브 개도는 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%의 개도를 선택적으로 사용하여 고유유량특성을 산출한다.

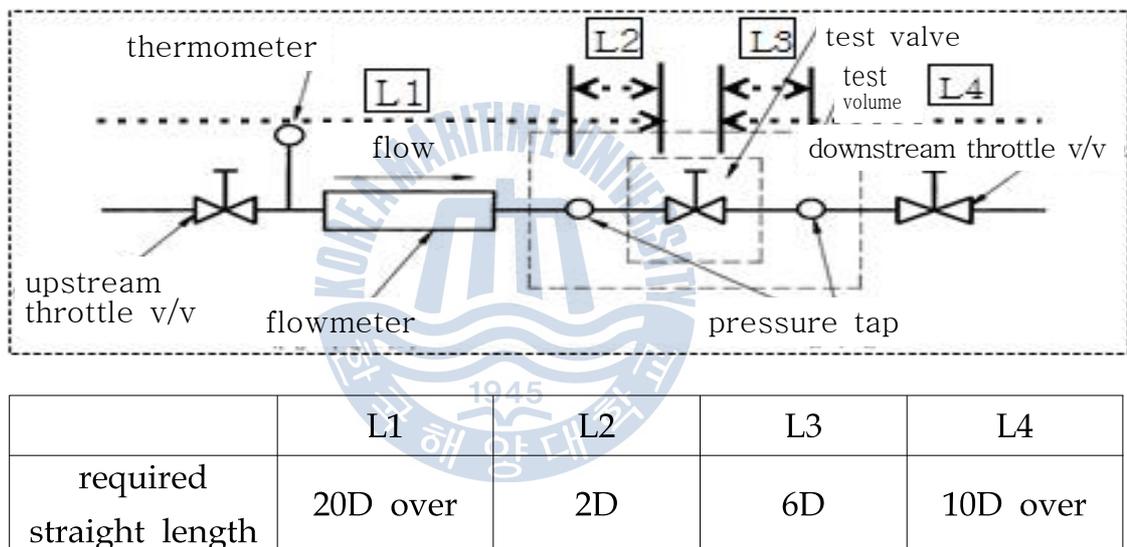


Fig. 2.15 Required straight pipe length and device assembly

시험구간은 밸브는 물론 밸브 전후단의 직관을 포함하는 것으로서 밸브전후에 확보하여야 할 직관거리를 모든 규격에서 Fig. 27과 같이 동일하게 제시하고 있다. 이 때 배관의 내경과 공시밸브의 입, 출구 내경은 2% 이내의 편차로 서로 일치하여야 하며, 배관 내부 표면은 스케일이나 녹 등의 과도하게 난류를 유발할 수 있는 물질이 없이 매끈한 것을 추천하고 있고, 측정 할 시험 값은 다음과 같다.

- 밸브 개도
- 입구 압력 P1
- 압력 탭 양단의 차압 (P1-P2)
- 유체 입구 온도 T1 (상온 20°C)
- 체적 유량 Q (m³/hr)
- 기압 (대기압)
- 시험밸브의 물리적 설명(즉, 밸브type, 호칭지름, 압력정격, 유동방향)

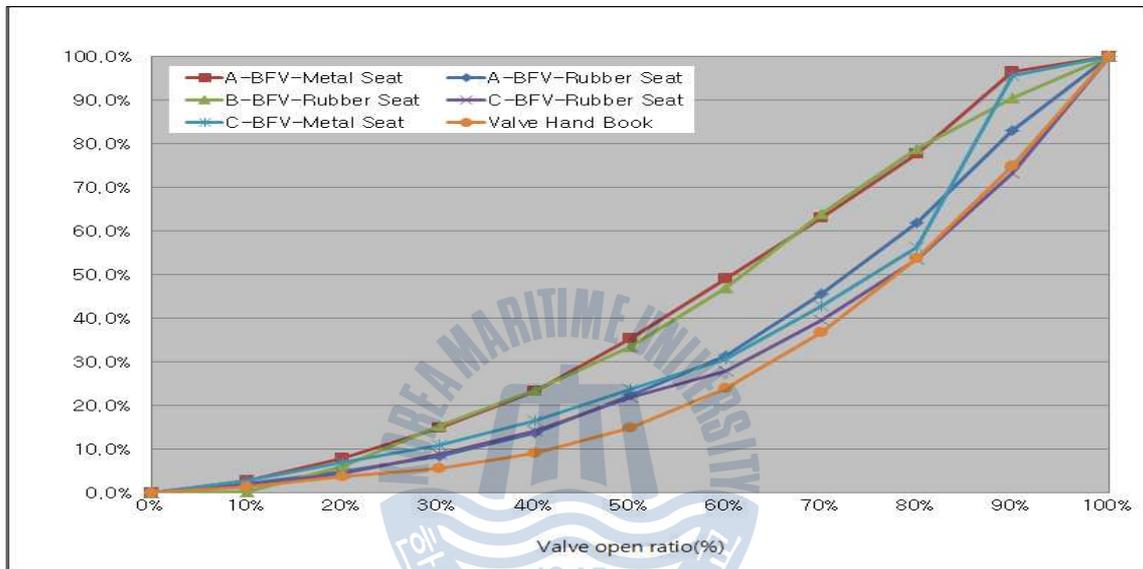
시험 조건과 방법은 관련 규격을 참고하였으며, 각 각의 버터플라이 밸브는 9~90도 범위를 매 9도 간격으로 10case로 나누어 각 개도에서 용량계수를 산출하였다. 각 개도별 3회(10초간) data 취득(회당 200개) 하였다. 1회 측정시간은 메모리 용량 상 최대 10초이므로, 본 시험에서는 1회의 데이터 측정시간을 10초로 통일하였다.

- 밸브 전후단 기준 차압 1 psi
- 각 밸브의 개도별 3회(10초간) data 취득
(9~90도, 9도 간격, 10Case, 회당 200개) 개도별 총 600개 data 취득
- 밸브 유량 (m³/hr) 변화 : Q=500, 1000, 1500, 2000, 2500
- 각 밸브의 개도별 3회(10초간) data 취득
(9~90도, 9도 간격, 10Case, 회당 200개) 개도별 총 600개 data 취득

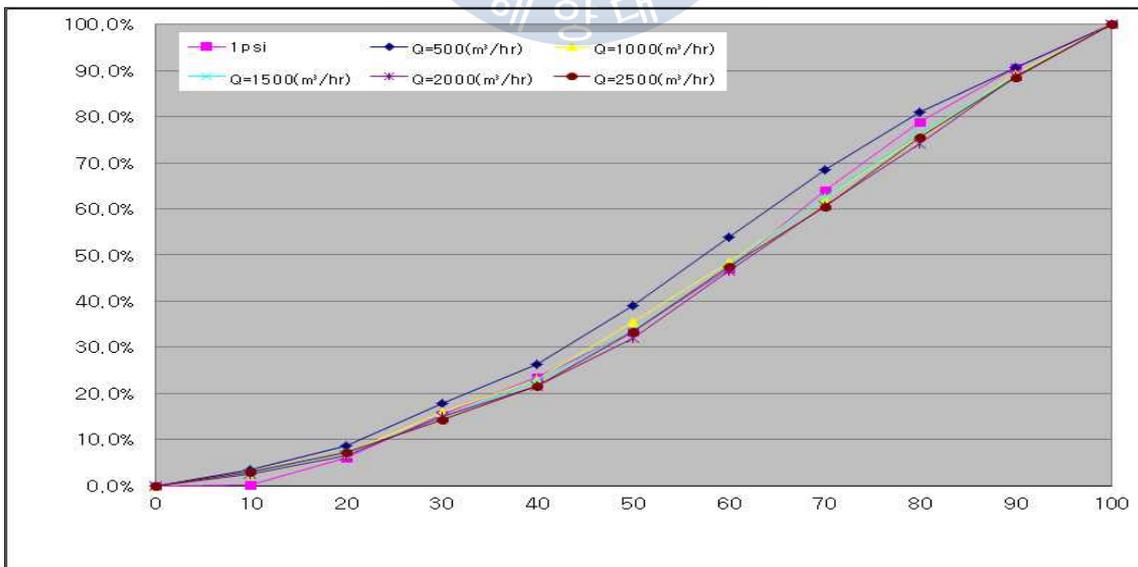
제 3 장 밸브 성능특성

3.1 각 밸브별 고유 유량특성

실험으로 취득한 값을 바탕으로 Fig. 3.1과 같이 각 밸브의 유동특성을 나타내는 용량계수를 산정하고 문헌의 시험 값과 비교하였다. 상세한 실험결과 값은 부록에서 참고 바랍니다.



(a) Cv value by products at $\Delta p=1\text{psi}$



(b) Cv value B-BFV-metal seat(slanting type) at $Q=500\sim 2500(\text{m}^3/\text{hr})$

Fig. 3.1 Cv value at $\Delta p=1\text{psi}$ and $Q=500\sim 2500(\text{m}^3/\text{hr})$

Fig. 3.1에서 가로축은 밸브 개도율을 나타내며, 세로축은 밸브 개도율이 100%일 때의 용량계수를 100%로 하여 개도율 변화에 따른 용량계수를 %로 나타낸 값이다. 대체적으로 시험 값은 일반적인 문헌과 유사한 경향을 보이며, 시험 값의 차이는 각 업체별 생산밸브의 구조적인 특징 때문에 발생하였다고 사료된다.

상기 Fig. 3.1(a) 은 차압을 고정($\Delta P=1\text{psi}$) 경우이며 밸브 구조에 따라서 다른 성능특성을 나타내고 있다. 동심형("B"사, H/B)의 경우는 선형 특성(Linear)을 나타내며, 편심형("A"사, "C"사) 경우 시트부 고정 위치가 디스크와 몸통으로 있는데, 밸브몸통부에 고정이면 등비율특성(Equal Percentage)이 나타나고, 디스크부에 고정이면 상대적으로 선형특성(Linear)이 나타나고 있다.

각 업체별 생산제품의 구조적인 특징에 따른 성능차이로 인해 전 개도 구간에서 용량계수의 편차를 보이고 있으므로, 정밀한 유량제어가 필요할 경우에는 밸브 선정기준으로 고려되어야 할 것이다.

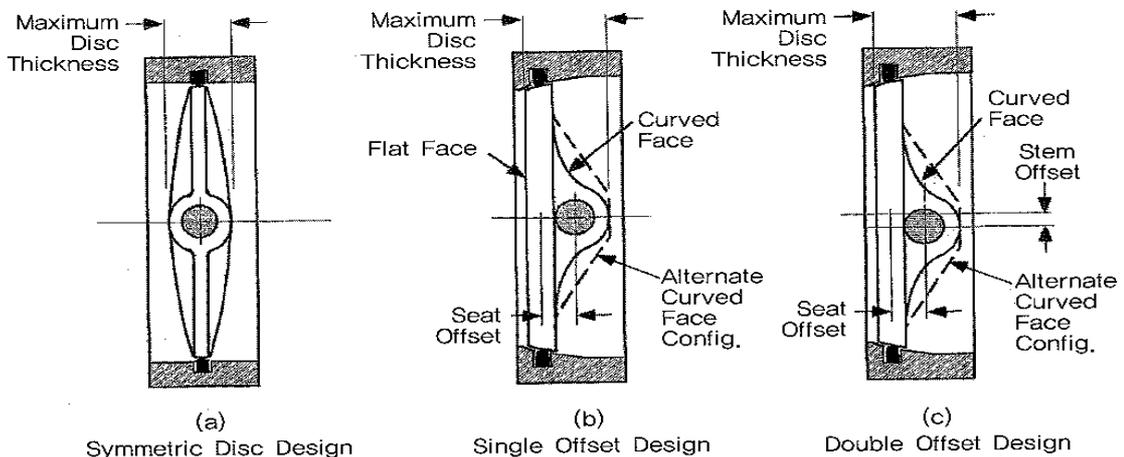
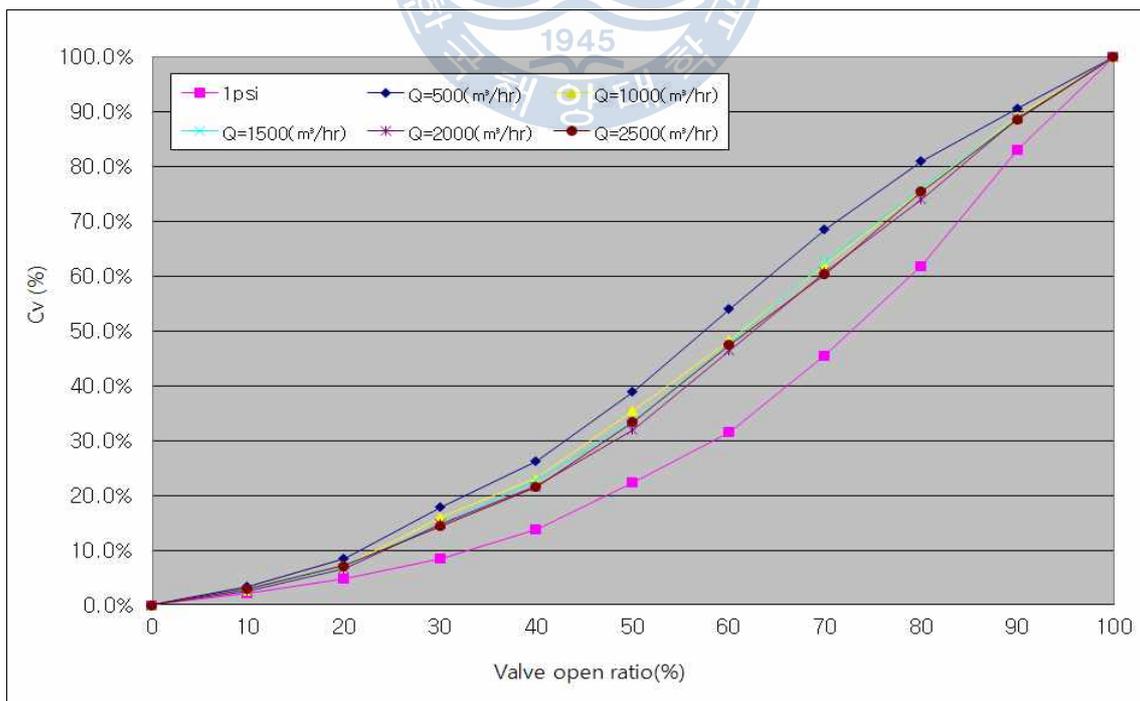


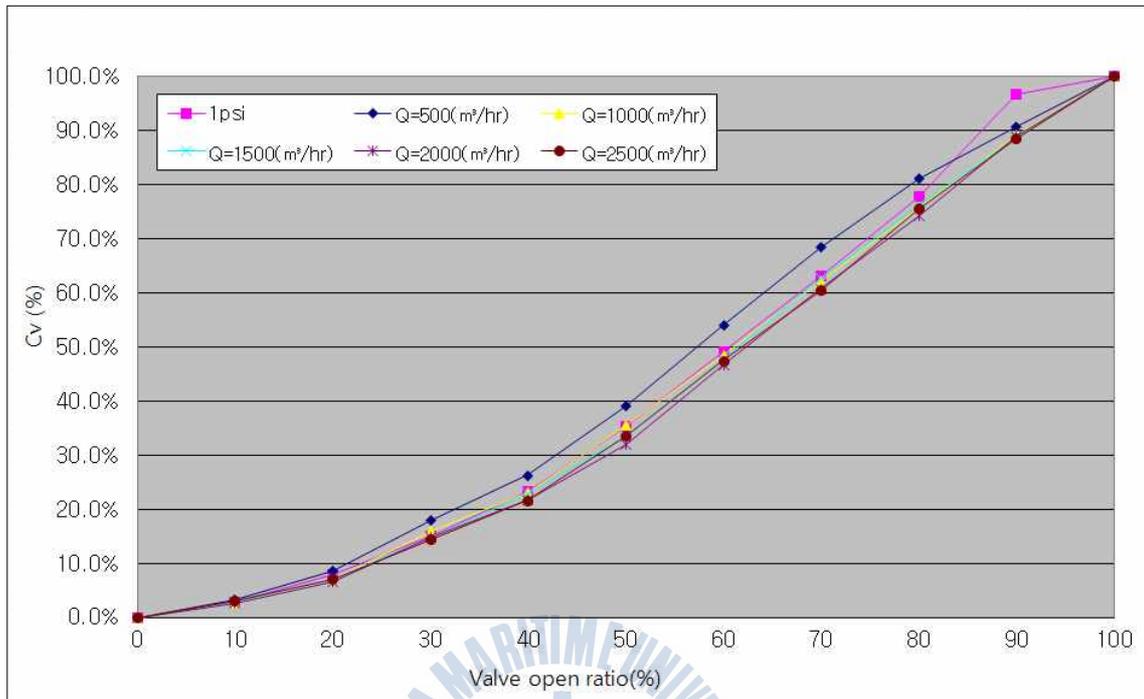
Fig. 3.2 Eccentric Butterfly valve 3 types

한편, 버터플라이 밸브는 교축기능의 향상을 위하여 Fig. 3.2와 같이 편심을 부여하고 있는데, 실험 결과에 의하면 2중 편심 구조가 될수록 선형(Linear) 특성으로 나타나 밸브제어를 통한 유량조절이 용이함을 알 수 있다. 한편으로 시트 재질(금속, 고무)에 따라 용량계수에 미치는 영향은 적어 보이며, 경사형의 디스크를 적용한 “B”사 제품은 글로브 밸브와 유사하게 선형(Linear) 특성을 나타내는 것으로 나타났다.

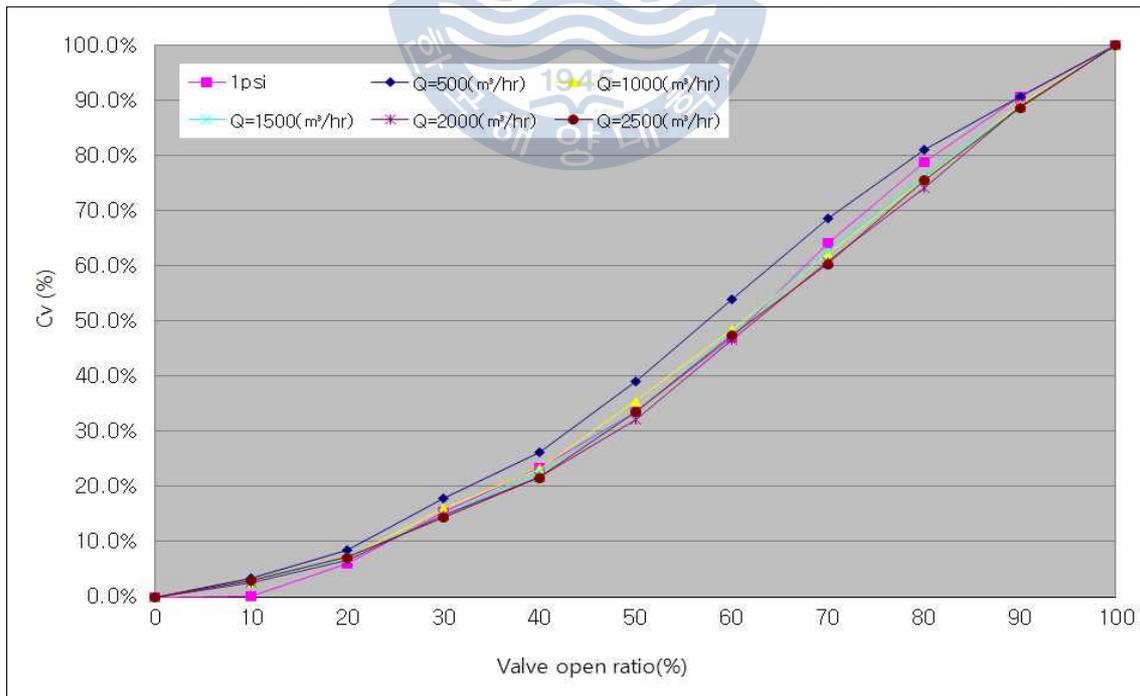
Fig. 3.1(a), (b)는 차압을 $\Delta p=1\text{psi}$ 로 고정된 경우와 밸브통과 유량을 통해 차압을 변화한 경우에 대하여 시험 값을 각 업체별 생산밸브를 비교한 그림이며, 최대유량이 고정된 경우에 Q_{\max} 가 $1500\text{m}^3/\text{hr}$ 이상인 경우에는 ANSI/ISA-75.02에 명시된 차압을 1psi로 고정된 시험 방법과 유사한 결과를 볼 수 있다. 이런 결과는 중대구경 밸브에 있어서 시험 설비의 한계로 인해 차압($\Delta P=1\text{psi}$) 형성이 곤란한 경우에 유량을 기준으로 용량계수를 측정 할 수 있음을 시사하고 있다.



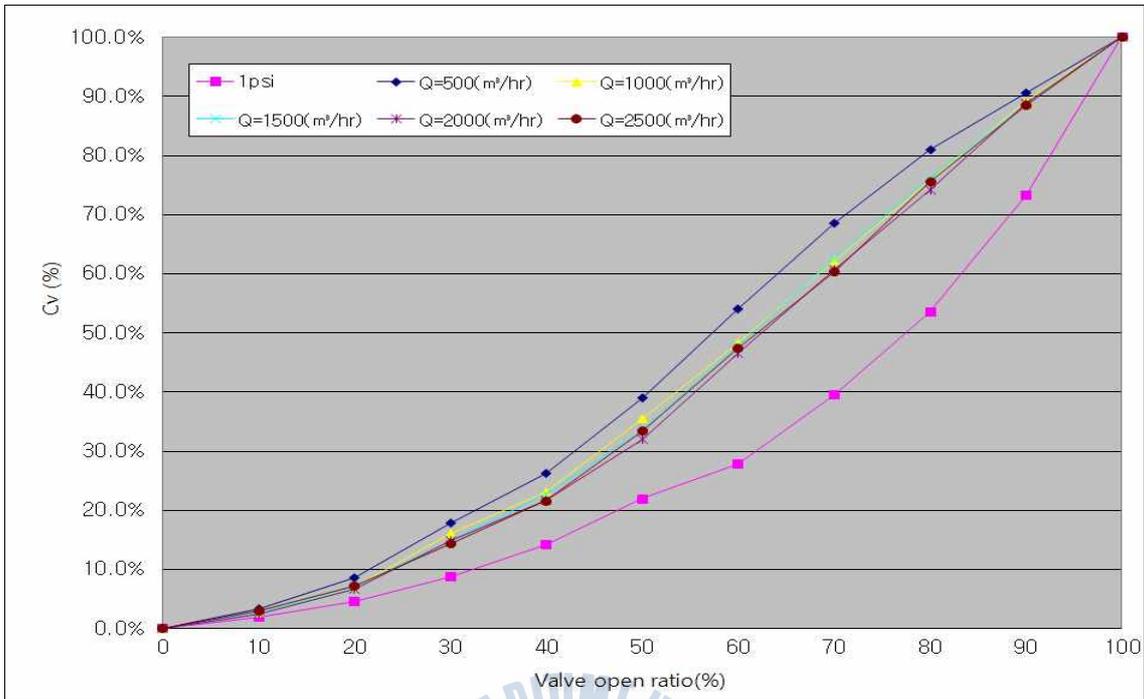
(a) A-BFV-Rubber seat



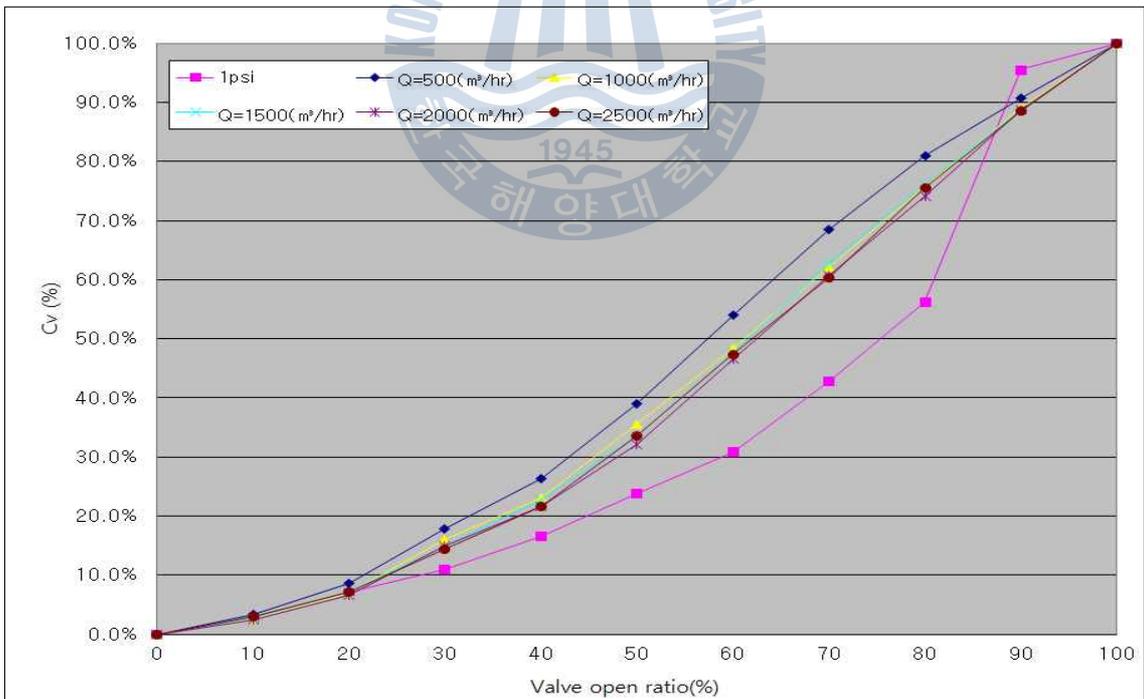
(b) A-BFV-Metal seat



(c) B-BFV-Rubber seat (slanting type)

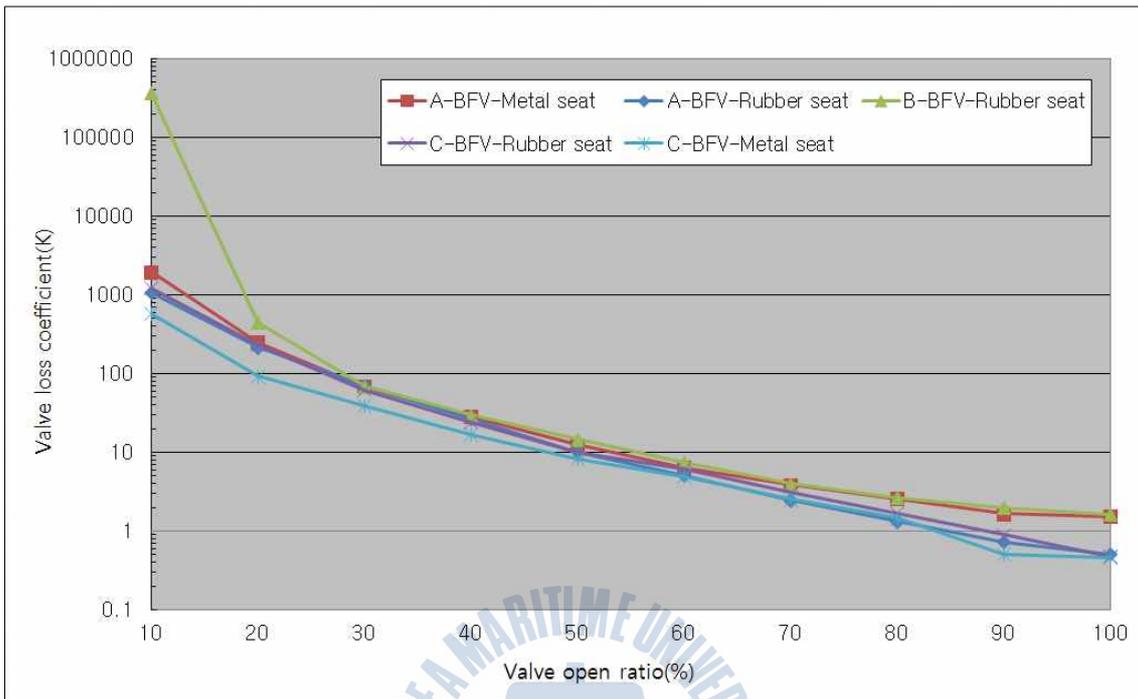


(d) C-BFV-Rubber seat

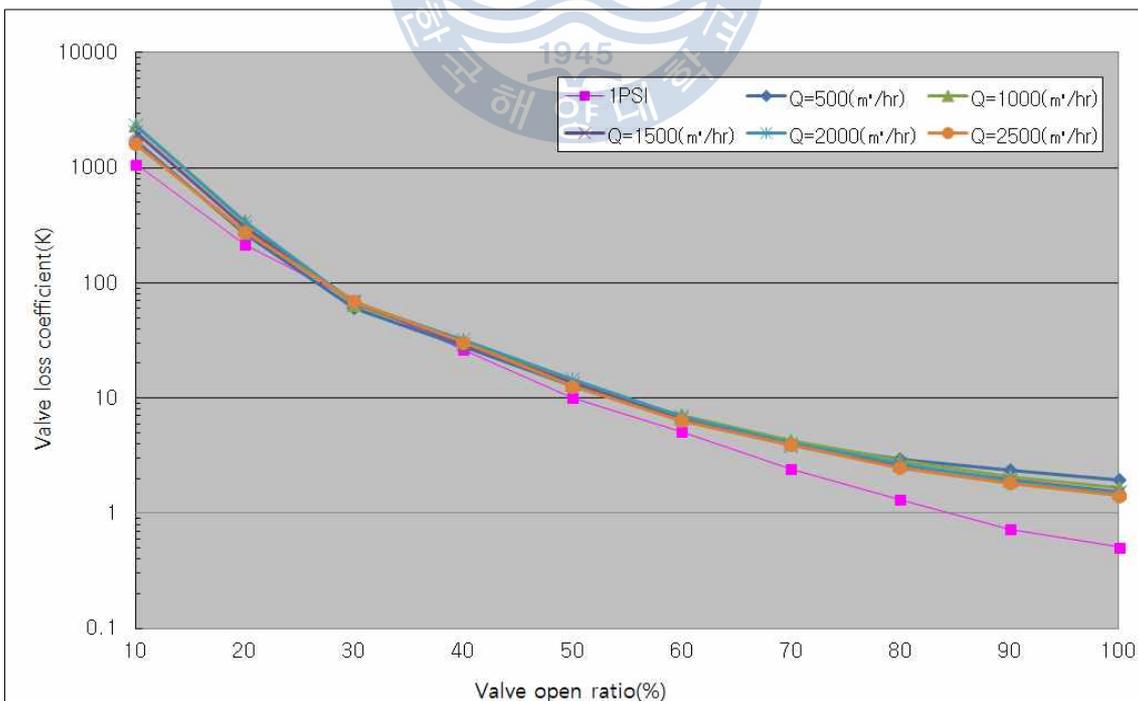


(e) C-BFV-Metal seat

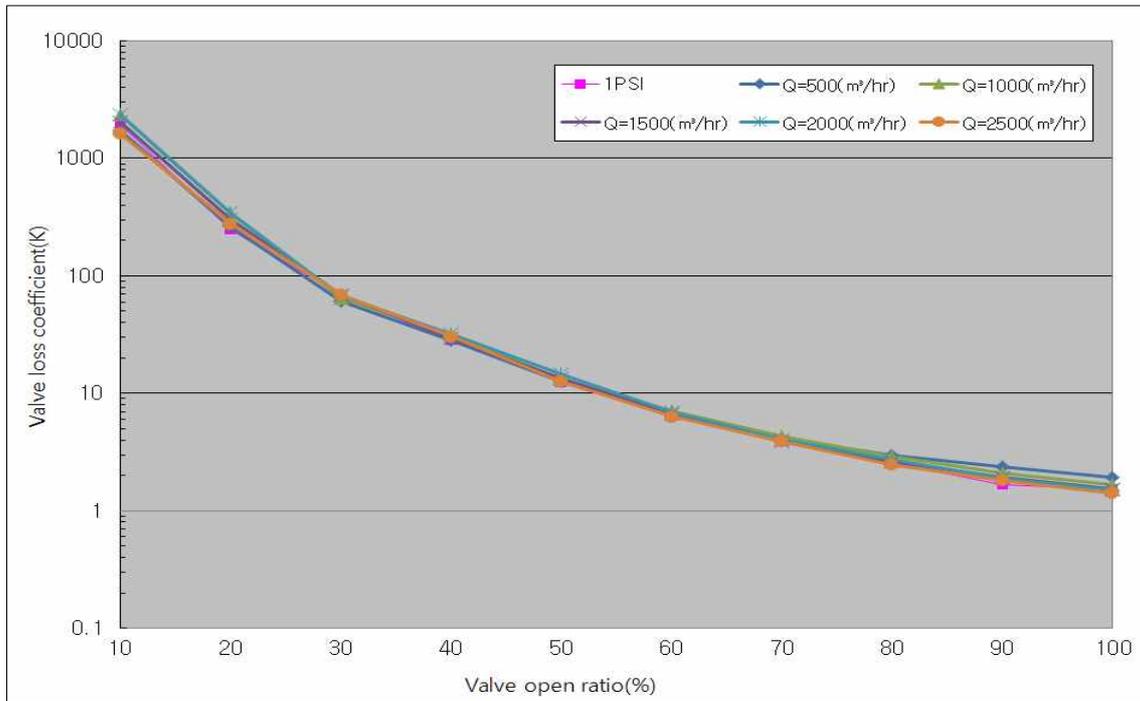
Fig. 3-3 Inherent flow characteristics by Butterfly valve products



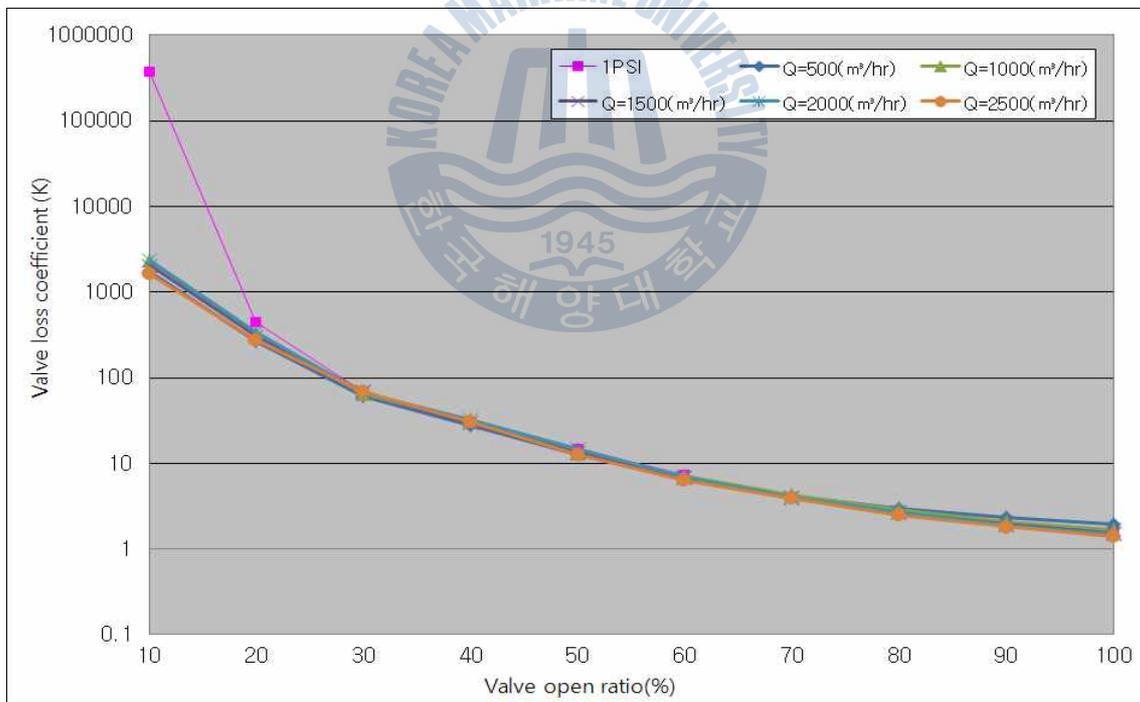
(a) Valve loss coefficient by Butterfly valve products ($\Delta P=1\text{psi}$)



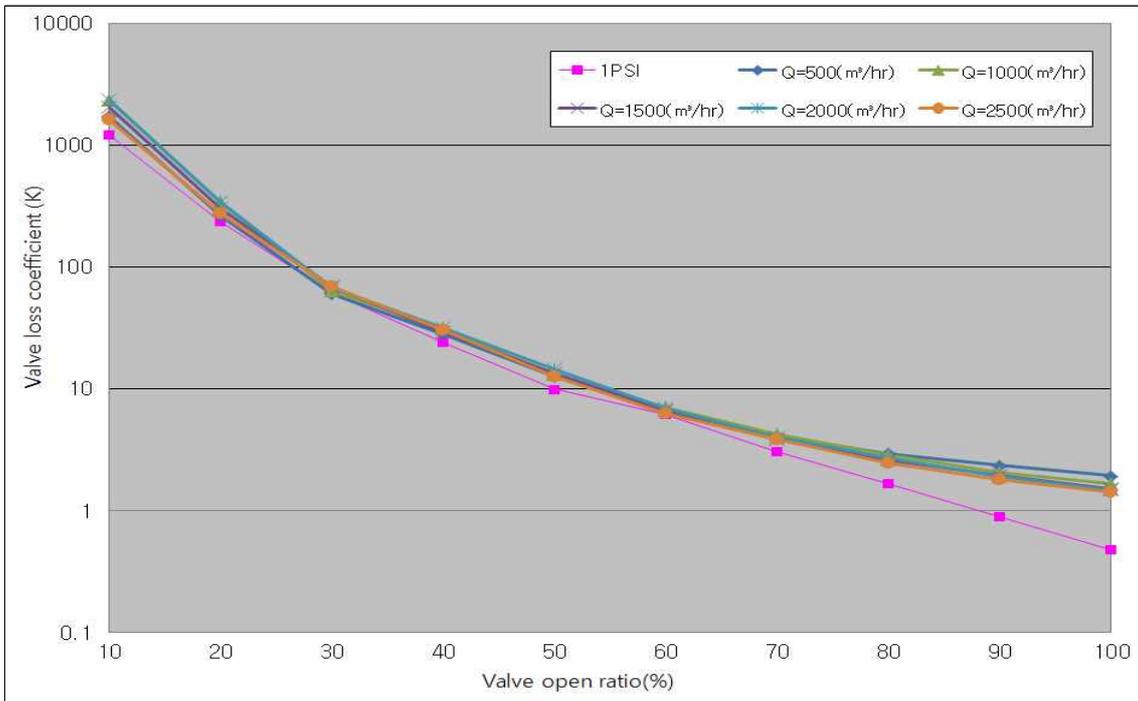
(b) A-BFV-Rubber seat



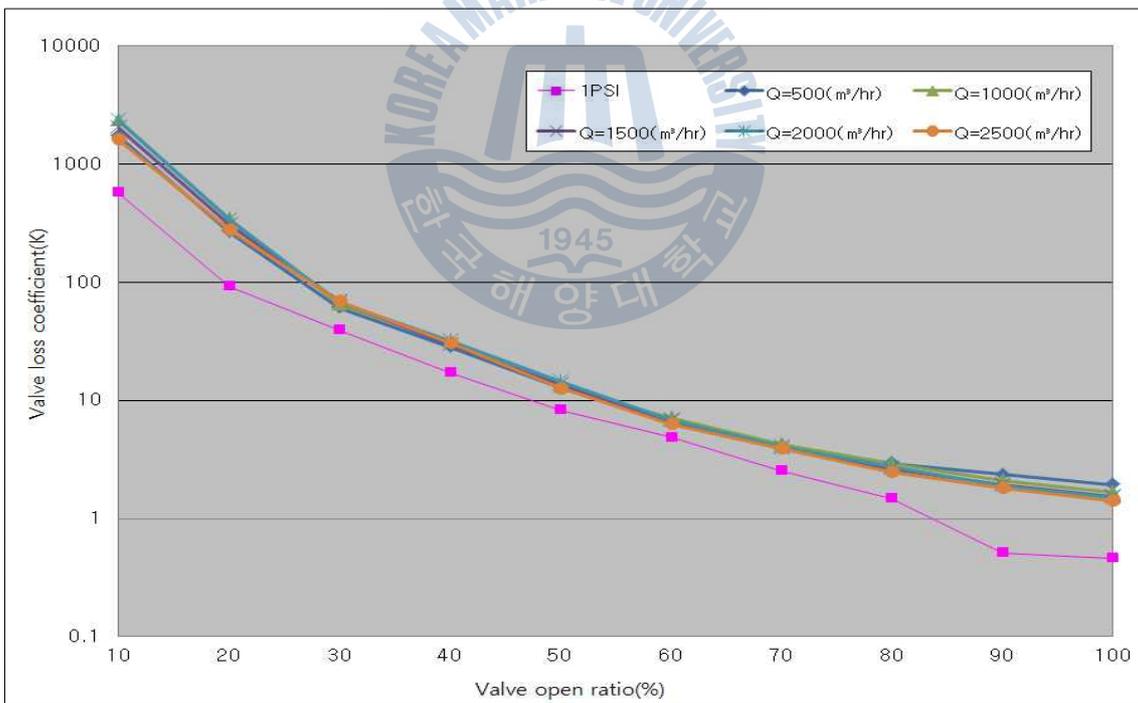
(c) A-BFV-Metal seat



(d) B-BFV-Rubber seat (slanting type)



(e) C-BFV-Rubber seat



(f) C-BFV-Metal seat

Fig. 3-4 Valve loss coefficient by Butterfly valve products (K)

3.2 각 밸브별 유효 유량특성

유량계수 C_v 는 밸브 상, 하류의 압력차를 일정하게 유지한 상태에서 개도와 유량과의 관계를 나타내는 밸브의 고유유량 특성으로서 무차원 상수값이며, 각 제조사별로 밸브의 유량성능을 나타내는 값이다. 유량계수는 실험으로 산정하는 것이며, 유효 유량특성은 관로 손실의 영향을 고려하여 나타내는 것이다.

실제 관로에서 밸브는 유체의 속도, 마찰, 유로의 확대, 축소에 따른 압력 손실 등으로 에너지가 감소하게 된다. 이러한 손실로 인해 밸브개도가 같아도 그 밸브의 고유유량특성과 일치하지 않아 실제 통과유량을 알기 어렵게 된다. 이러한 현상은 밸브 전단에서 손실이 크게 되면 밸브개폐에 의한 영향이 적어져서 유량제어가 어렵게 되고 반대로 관로손실이 작으면 밸브개도의 영향이 커져 유량을 제어하기가 용이하게 된다. 밸브 통과 유량은 다음 식으로 표현된다. Fig. 3.5에서 $C_p=0$ 일 때가 밸브 고유의 특성이다.

$$\frac{Q}{Q_{max}} = \sqrt{\zeta_{min} + C_p/\zeta + C_p} \quad (2-26)$$

C_p : 관로 손실계수, ζ : 밸브 손실계수, Q : 실제 밸브 통과유량

밸브에 의한 손실수두 발생과 마찬가지로 관로의 형상이나 거리, 내부마찰에 의해서 손실수두가 발생하게 되는데 이를 관로손실계수로 나타낼 수 있으며 이러한 관로 손실을 고려한 유효 유량특성 분석을 위해 다음 식이 필요하다

$$H_0 = h_{f1} + \Delta H + h_{f2} \quad (2-27)$$

$$\left[h_{f1} = C_{p1} \times \frac{v^2}{2g}, \quad \Delta H = K \times \frac{v^2}{2g}, \quad h_{f2} = C_{p2} \times \frac{v^2}{2g} \right]$$

hf1, hf2 : 밸브 상하류측 관로에서 손실수두, ΔH : 밸브 손실수두

C_{p1} , C_{p2} : 관로손실계수,

K : 밸브손실계수

$$H_0 = (C_{p1} + K + C_{p2}) \times \frac{v^2}{2g}, \quad C_p = C_{p1} + C_{p2} \quad (2-28)$$

$$v = \sqrt{\frac{2gH_0}{(K + C_p)}} \quad (2-29)$$

$$Q = A \cdot v = A \cdot \sqrt{\frac{2gH_0}{(K + C_p)}}, \quad C_p = 0 \text{ 일 경우 } Q_{max} \quad (2-30)$$

$$\frac{Q}{Q_{max}} = \sqrt{\frac{K}{K + C_p}} \quad (2-31)$$

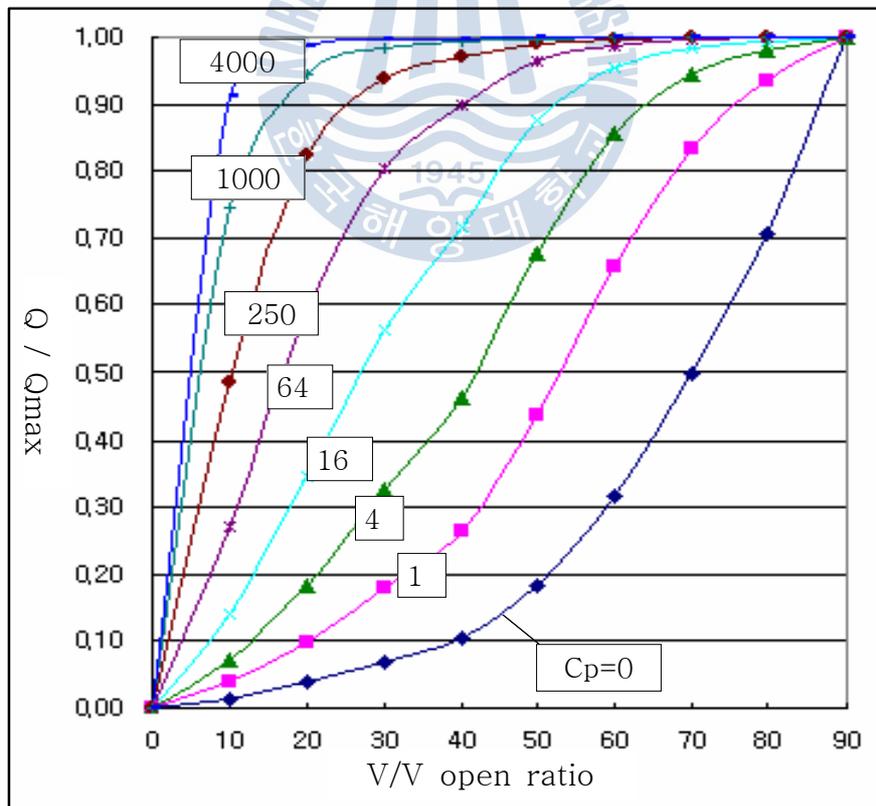
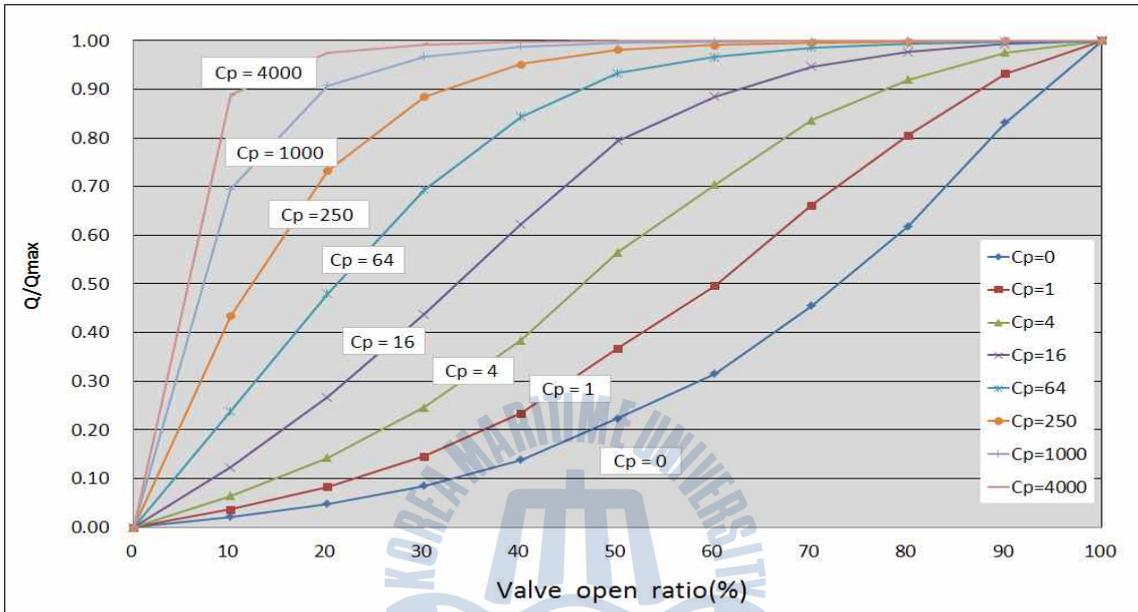
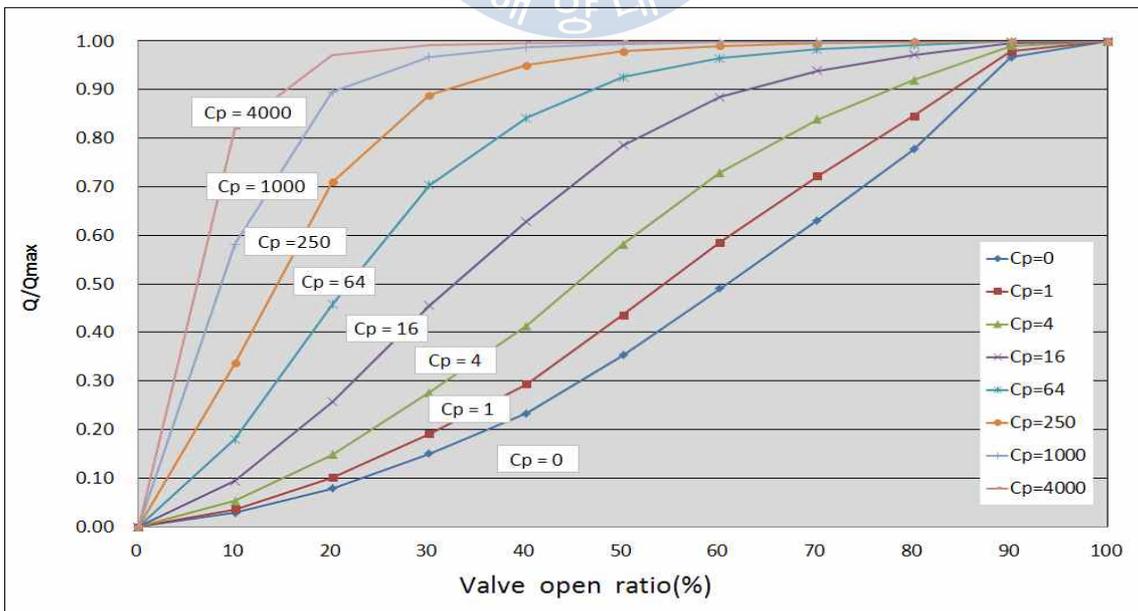


Fig. 3.5 Installed Flow Characteristics

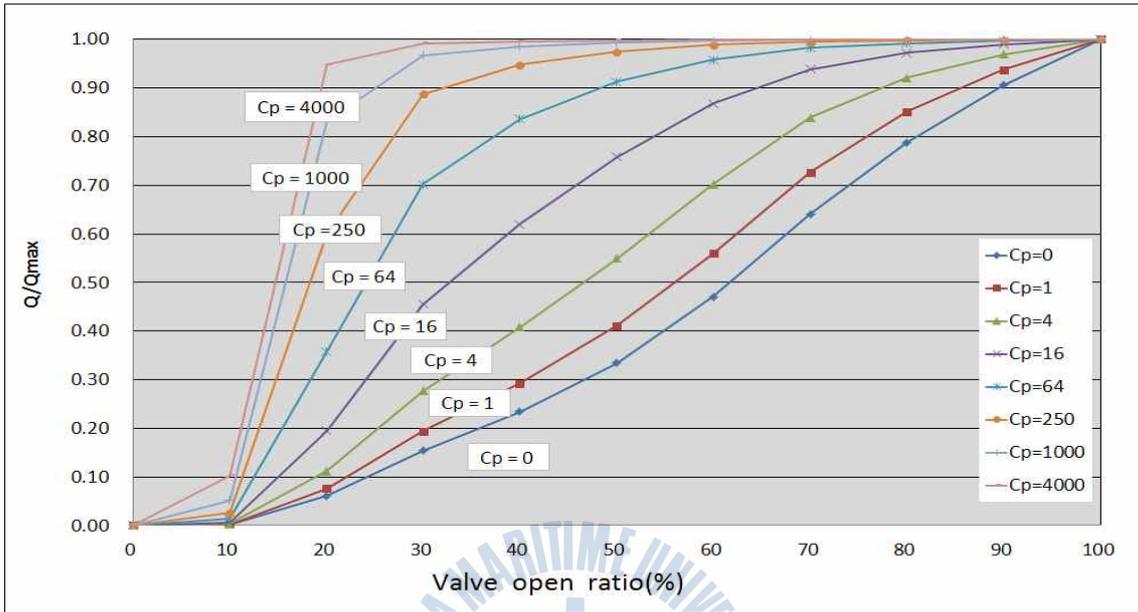
이 용량계수 시험을 통하여 제조사별, 밸브의 설계 및 제조기술의 차이에 따른 고유 유량특성을 고찰하였으며, 유체의 속도, 마찰 및 이형관 등에 따른 관로손실을 고려하여 각 제조사별 유효 유량특성을 Fig. 3.6 과 같이 도출하였다.



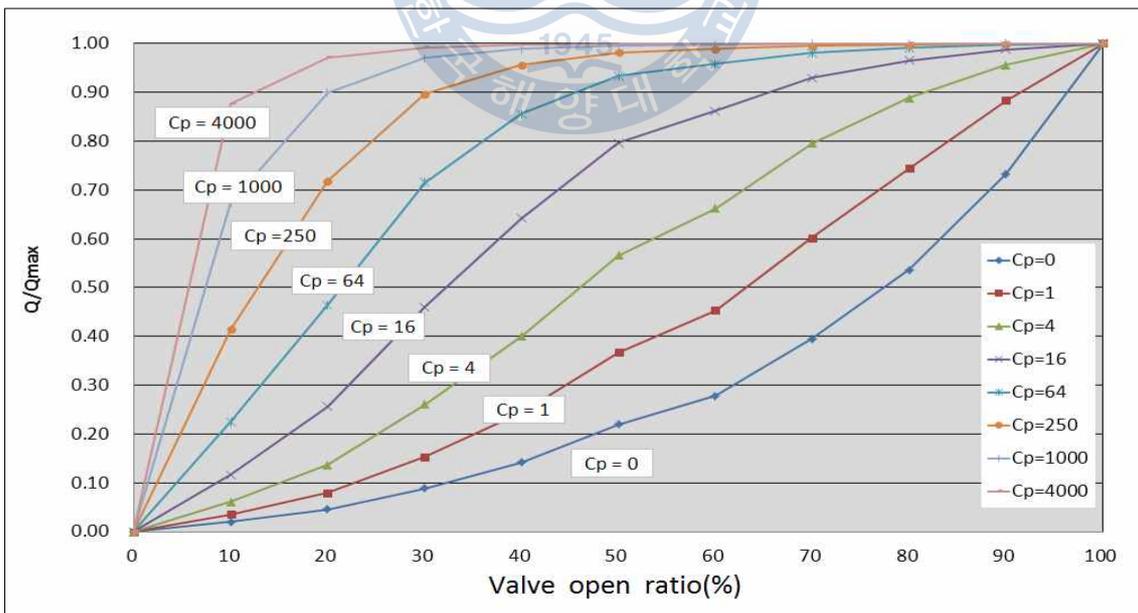
(a) A-BFV-Rubber seat



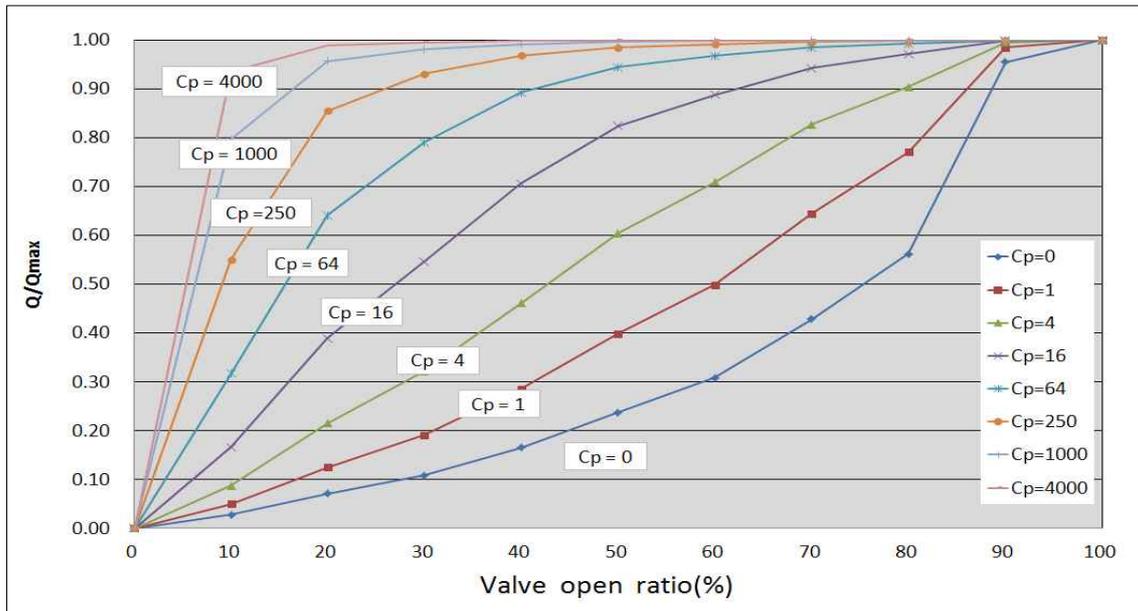
(b) A-BFV-Metal seat



(c) B-BFV-Rubber seat (slanting type)



(d) C-BFV-Rubber seat



(e) C-BFV-Metal seat

Fig. 3.6 Installed flow characteristics by products Butterfly valves

밸브개도에 따른 Q/Q_{max} 를 기준으로 버터플라이 밸브에 의한 미세 조절이 가능한 경계선으로 $C_p=64$ 를 설정 할 수 있으며, Fig. 3.4에서 나타난 바와 같이 관로손실이 $C_p=64$ 보다 더 클 경우는 개도 20% 에서 최대 유량의 40~90%를 공급할 수 있으며, 개도 20% 이하에서 $C_p=64$ 보다 클 경우 제조사별 밸브 내부구조나 특성에 따라 최대유량의

- 50~95%, 45~95%, 35~95%, 45~95%, 65~98% -> 20% 개도시
- 25~90%, 20~80%, 5~10%, 22~88%, 30~93% -> 10% 개도시

로 나타나 밸브 내부 트림과 시트 부위, 디스크 형상에 따라 유량제어 능력의 차이가 있는 것을 알 수 있다.

관로손실 $C_p=16$ 이하의 경우에는 개도 30~90% 범위에서 선형특성 (Linear)과 등비율특성(Equal Percentage)이 동시에 나타나며, 관로손실이 적을수록 버터플라이 밸브의 고유유량 특성인 등비율특성(Equal

Percentage)이 나타난다. “C”사의 경우에는 $C_p=16$ 경우에는 개도 80% 이상에서 급격한 공급 유량의 증가를 보이기도 한다.

문헌에서 제시 한 바와 같이 관로손실이 작을 경우 밸브 고유의 자체 특성을 유지하는 것이 가능하지만, 관로가 길고 마찰손실이 크면 유량제어 특성이 나빠지므로 미리 관로 C_p 값을 미리 검토할 필요가 있다. 버터플라이 밸브의 경우 $C_p=64$ 이하에서 유량제어 특성이 좋고 제어에 적합하다^{[4][5][6]}. 이 연구를 통하여 제조사별 설계기술의 차이가 유량제어 특성이 좌우 한다는 것을 알 수 있으며, 관로사고시 효과적인 통수계획을 수립하는 데 도움을 줄 것이다.



제 4 장 밸브 내부유동 특성

4.1 각 밸브별 유동해석

Fig. 4.1은 밸브 열림 각도에 따른 밸브 주위의 유적선(Stream line)을 나타낸 것이다. 유적선은 관로 내에서 물의 입자를 따라 추적한 운동궤적을 나타내는 방법으로 밸브의 개도변화에 따른 와류(Vortex)의 형상, 박리(Separation), 재순환영역 등 밸브에 의하여 발생하는 에너지 손실의 원인을 대략적으로 파악할 수 있다.

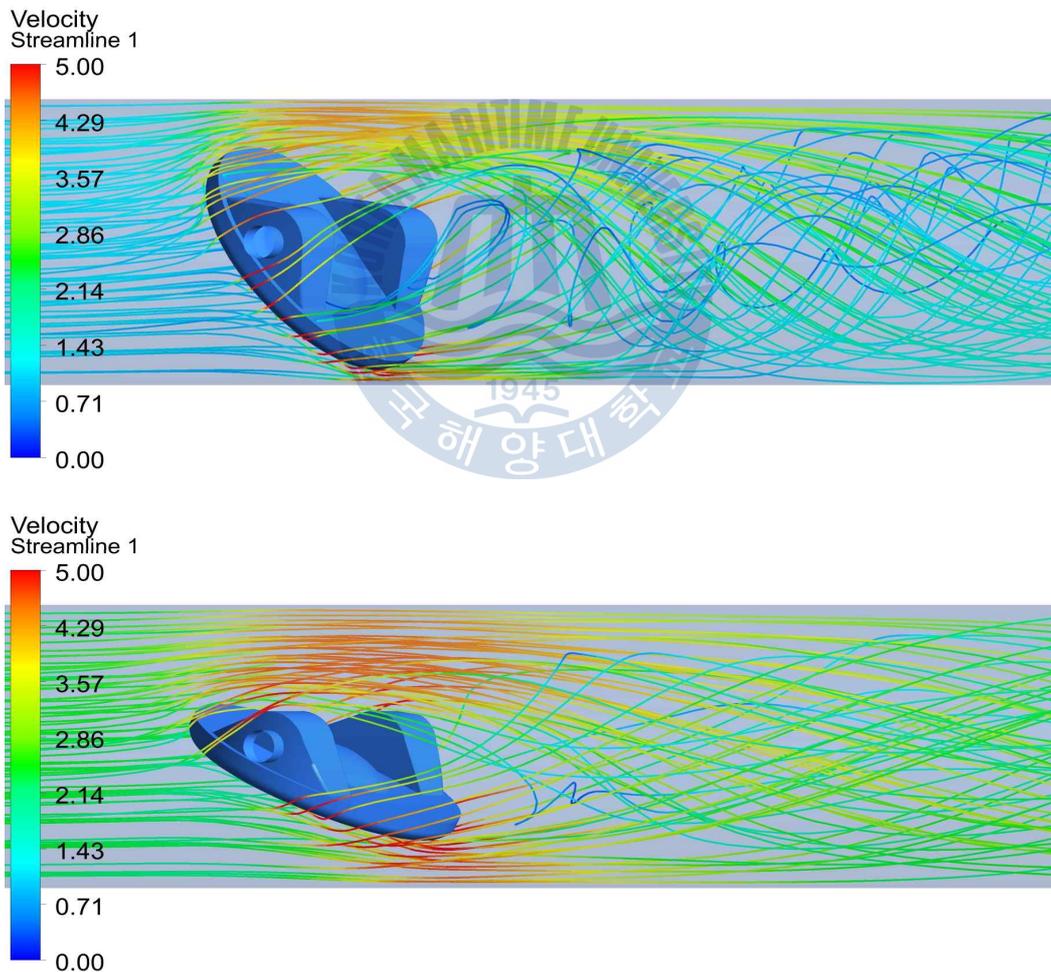


Fig. 4.1 Velocity streamline around Butterfly valve disk at an angle of 36, 63 degrees

싱글형 버터플라이 밸브인 경우에는 밸브 개도율이 100%에서 30%로 감소하면 밸브 디스크 후단부에 발생하는 와류의 크기가 점점 커지며, 밸브 디스크 후방의 흐름이 다시 밸브 후면으로 재 부착되어 국소적으로 재순환영역을 발생시키고 있다. 이는 개도변화에 따른 유로 단면적의 감소로 인하여 발생하는 현상이다. 버터플라이 밸브는 유량 및 압력 조절을 위해 개도를 조정하는데, 관내의 급격한 교축 발생으로 와류에 의한 손실과 속도 천이로 인한 속도에너지의 손실 등 많은 손실이 발생한다. 또한 버터플라이 밸브의 구조상 밸브 디스크가 관로내에 삽입된 구조를 갖고 있으므로 밸브 개도율이 높을수록 볼밸브와 같은 형식에 비해 디스크 부분에 유체입자가 정체하는 것을 볼 수 있다.

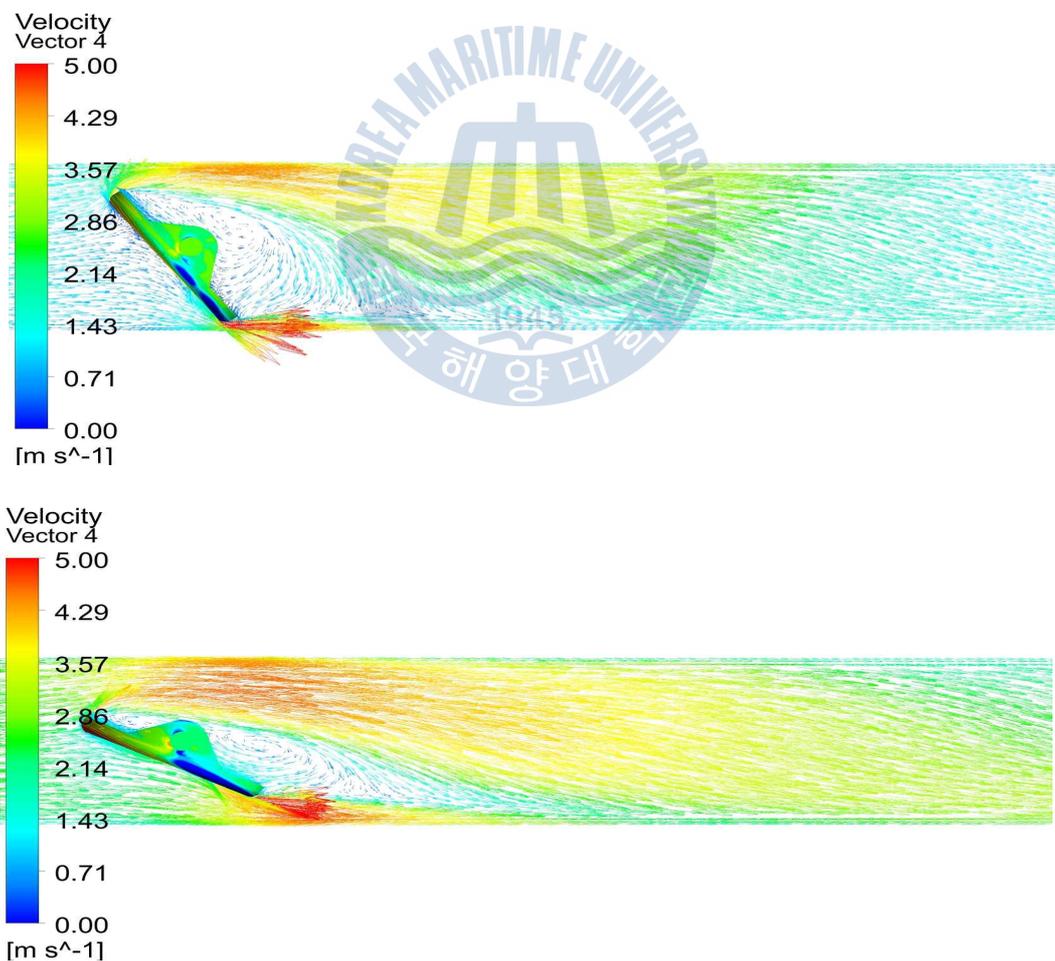


Fig. 4.2 Velocity vector around Butterfly valve disk at an angle of 36, 63 degrees

Fig. 4.2은 밸브 디스크 주위의 속도벡터를 관찰한 그림이다. 밸브 개도율이 작은 경우 와류형성은 비대칭적으로 발생하는 반면, 개도율이 100%에 가까울수록 와류형성이 좌우 대칭적으로 변화함을 알 수 있다. 또한 와류의 중심이 밸브 디스크 하단부로 이동하다가 다시 밸브 디스크 중심부로 이동하는 것을 알 수 있는데, 이는 디스크를 통과한 흐름이 출구 측으로 이동하면서 점차 압력이 회복되어 안정화되기 때문이다. 밸브로 유입되는 흐름은 밸브 디스크의 개폐각도에 따라 압력면에 높은 정압을 발생시키며 통과하고, 좁은 유로부를 통과하면서 흐름은 가속되어 밸브 압력면과 흡입면 사이의 압력차가 발생한다. 이와 같은 압력변화는 밸브 입구로부터 유입되는 동압이 밸브 디스크면에서는 정압으로, 다시 디스크를 통과해서는 동압으로 변화되는 일련의 에너지 변환과정을 거치게 된다.

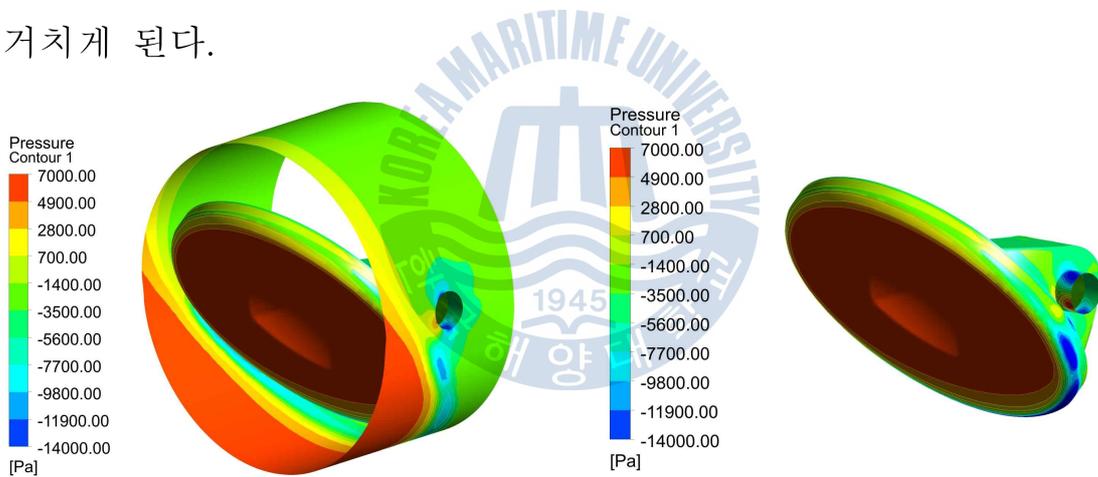
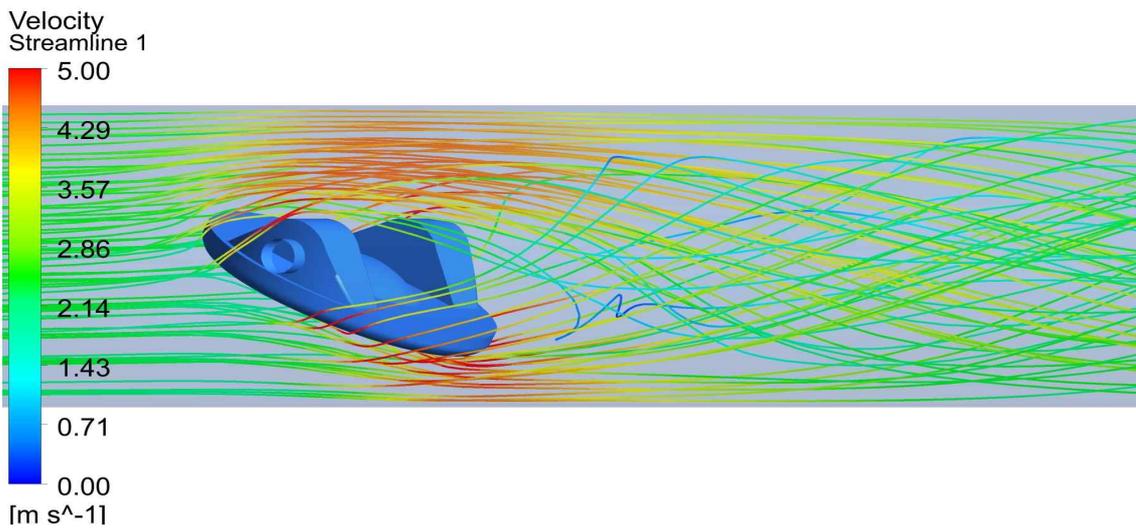
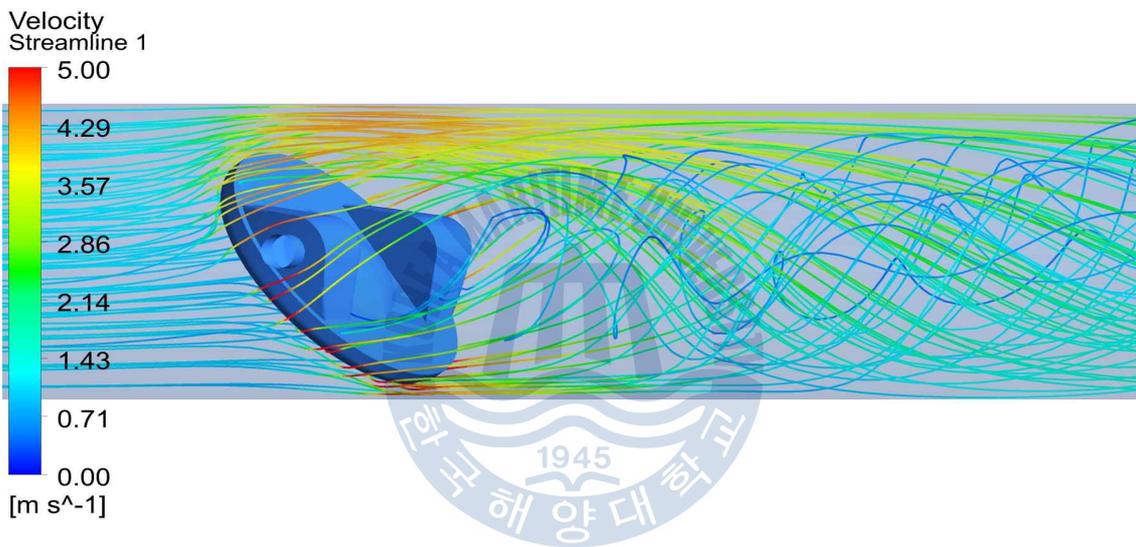
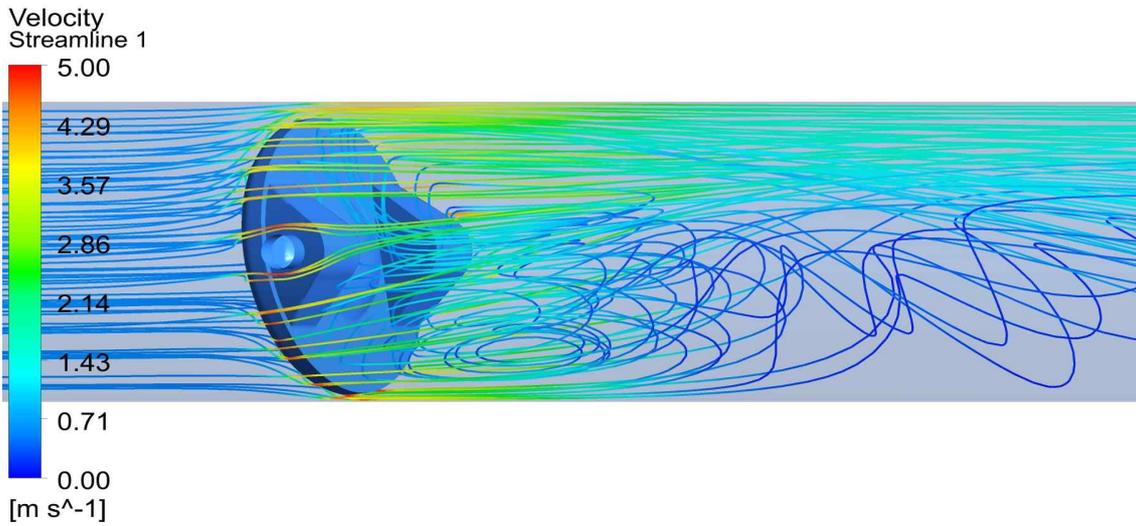
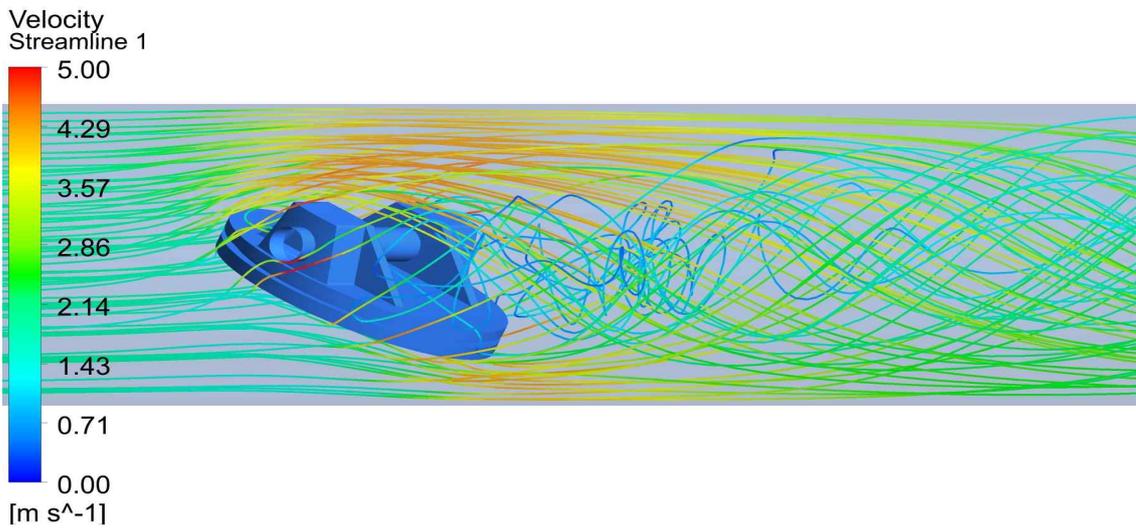
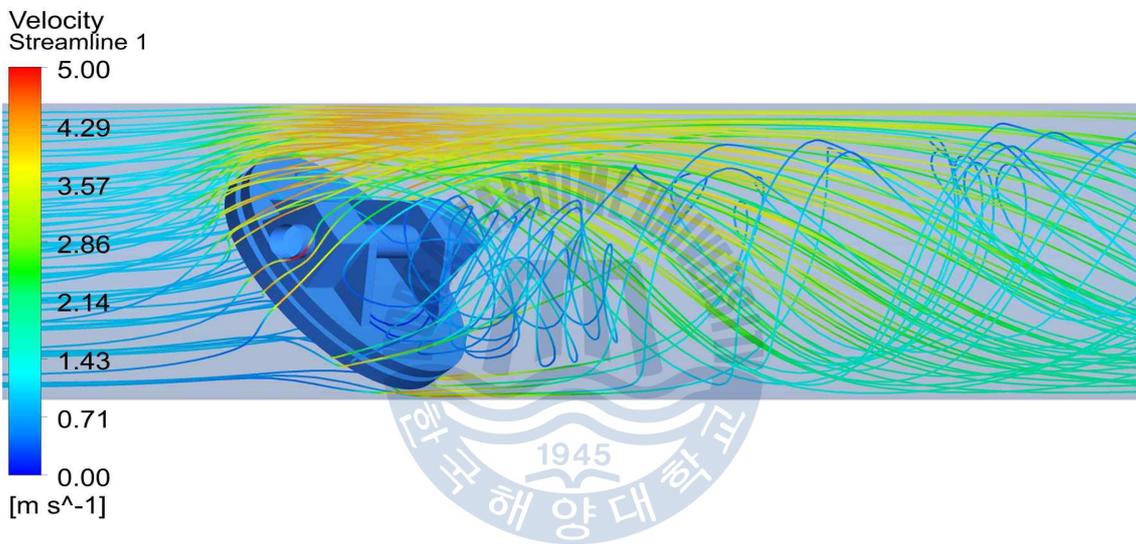
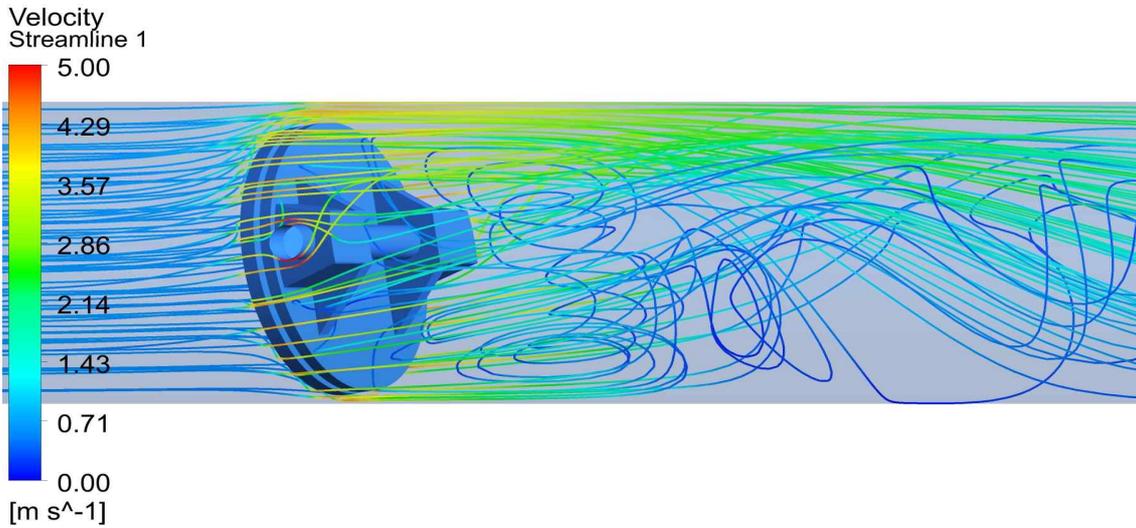


Fig. 4.3 Pressure contour around Butterfly valve disk at an angle of 36, 63 degrees

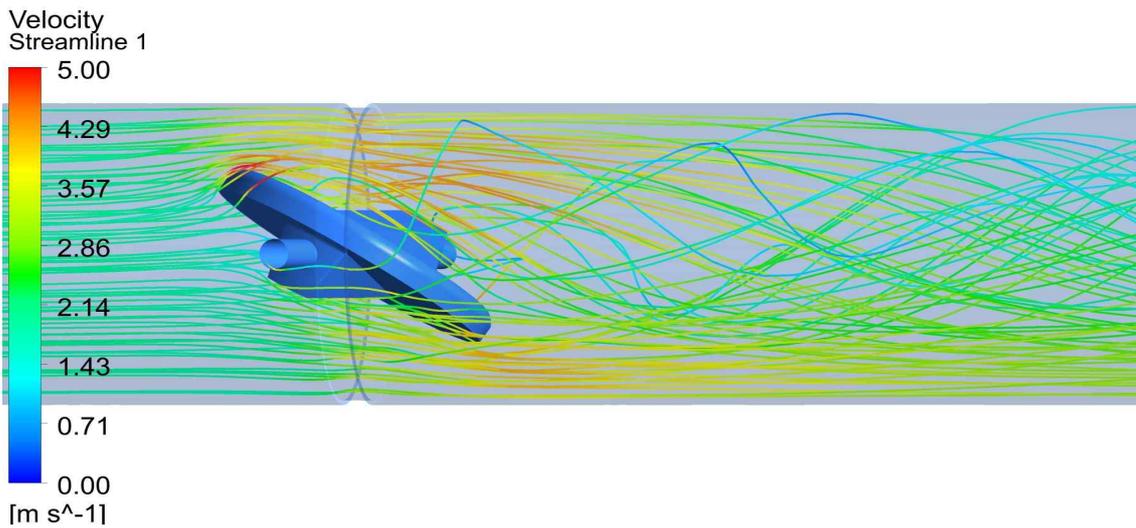
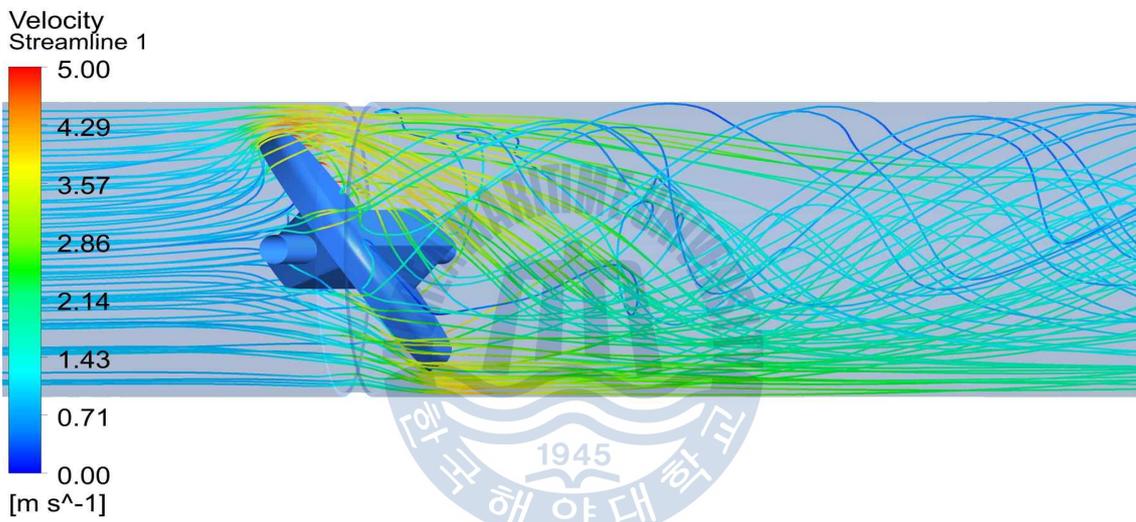
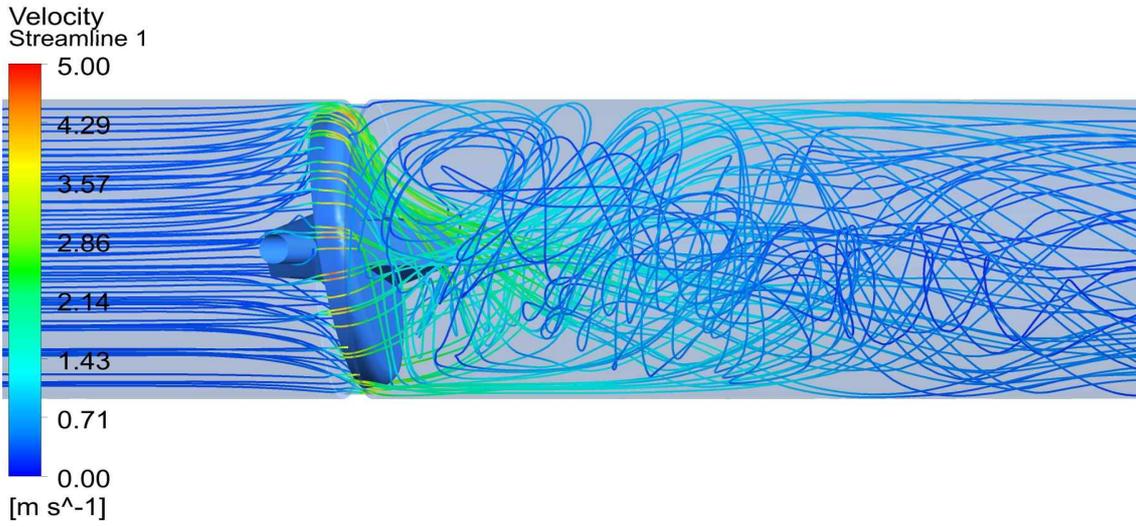
Fig. 4.3은 밸브 개도율에 따른 밸브 디스크 주위의 압력분포를 나타내었다. 개도율이 낮은 경우에는 밸브 디스크 면에 작용하는 압력 분포가 상대적으로 높게 나타나며, 이에 따라 밸브 손실계수가 크게 발생함을 알 수 있다. 밸브 개도율이 증가함에 따라 밸브 디스크 주위의 압력이 점차 감소하며, 밸브 몸체 부분보다 유동 진행에 저항하는 밸브 디스크면에 압력이 증가함을 알 수 있다.



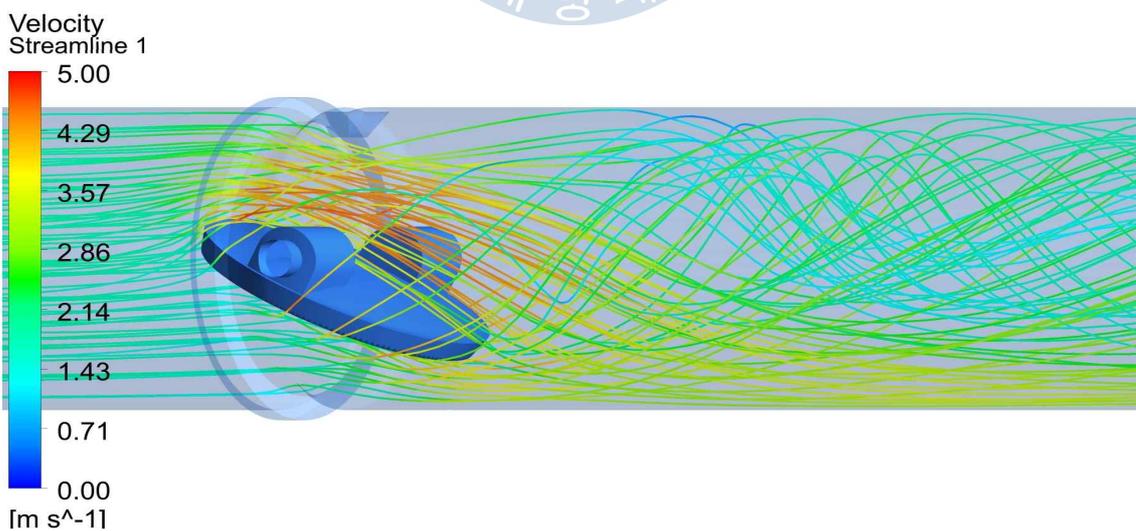
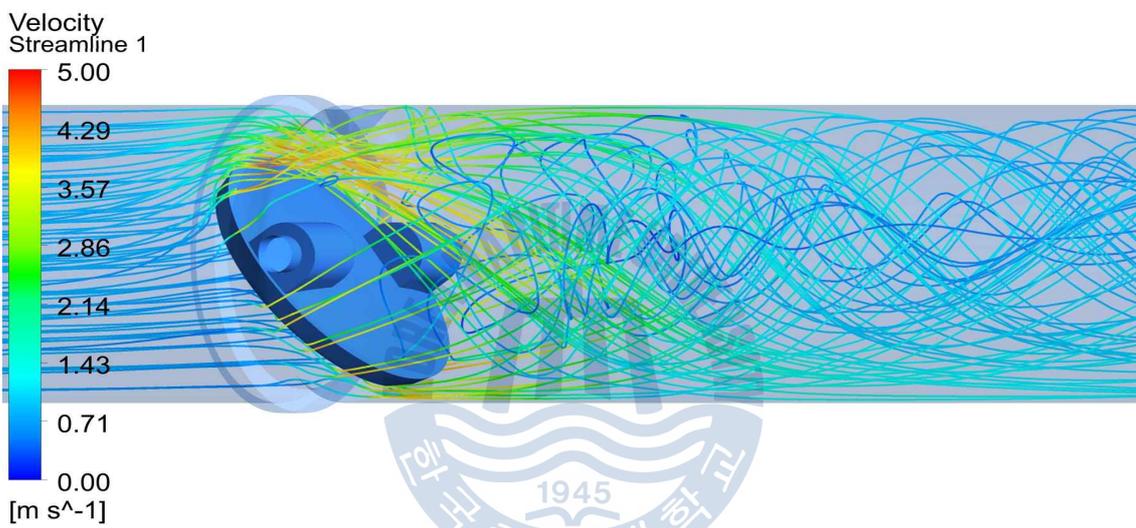
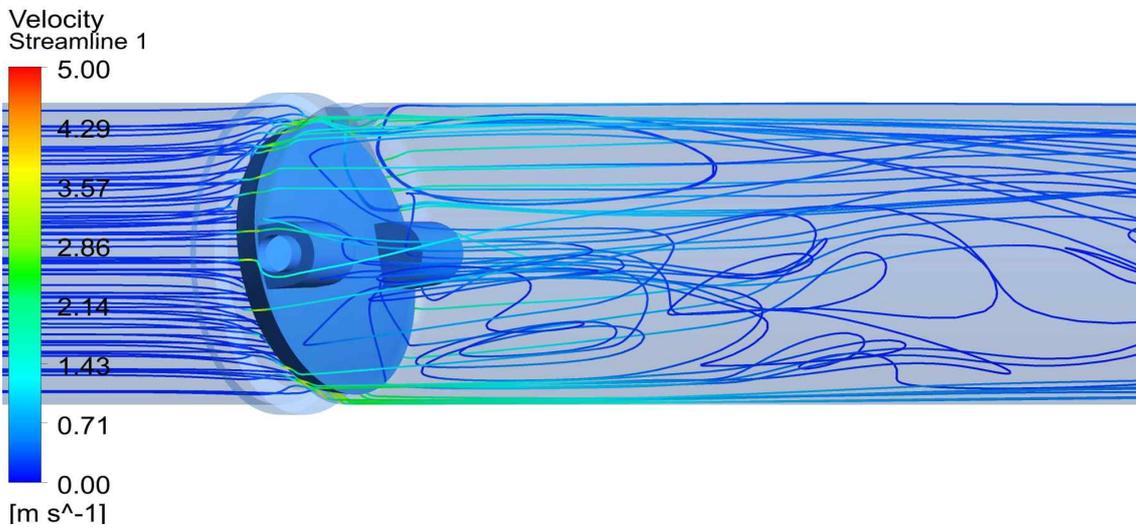
(a) A-BFV-Rubber seat



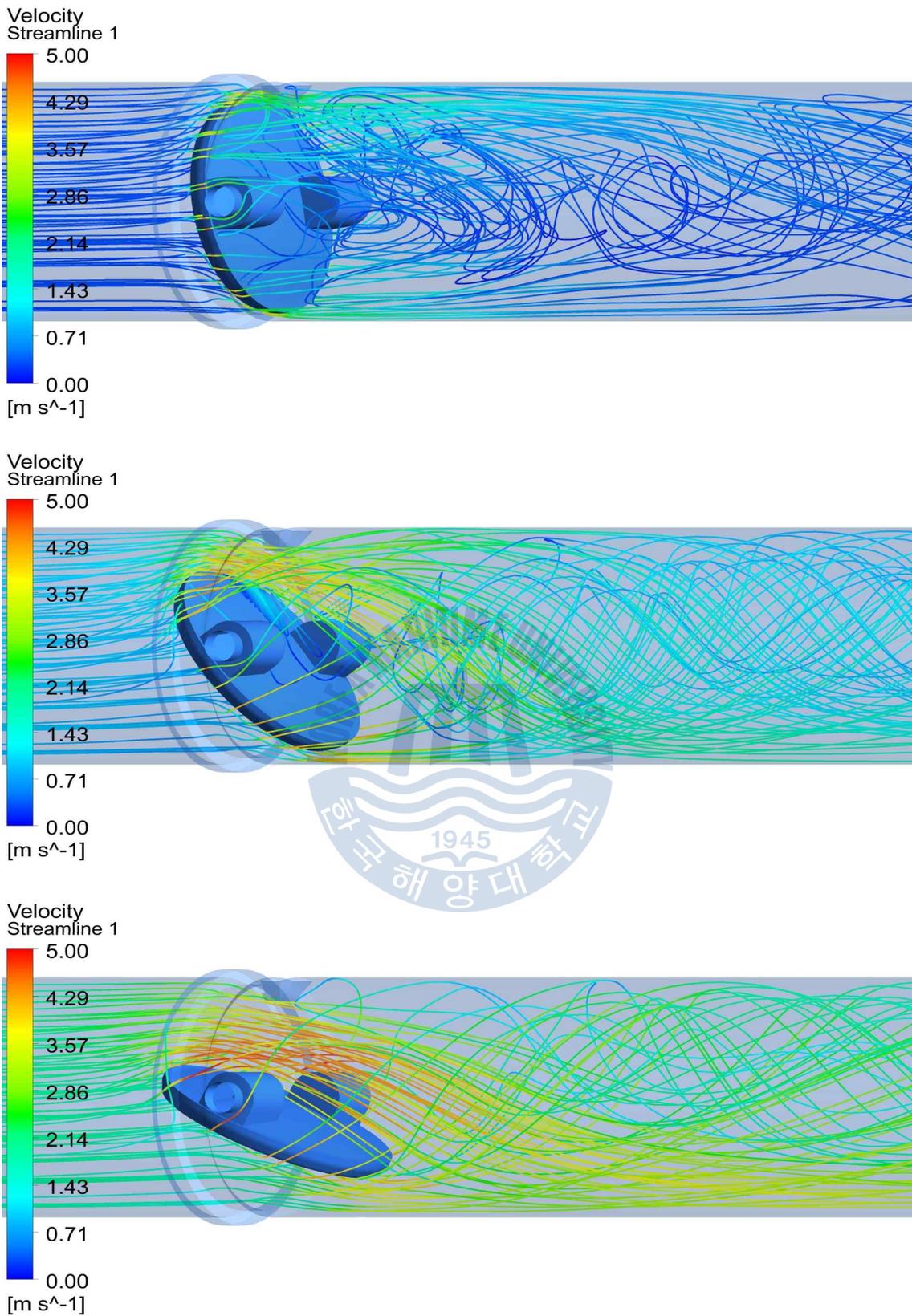
(b) A-BFV-Metal seat



(c) B-BFV-Rubber seat(slanting type)

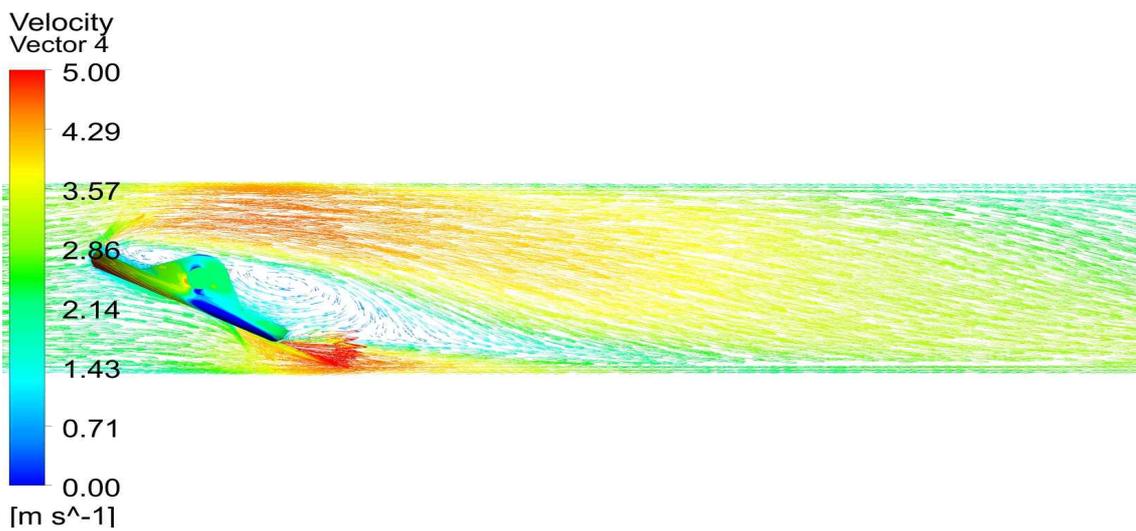
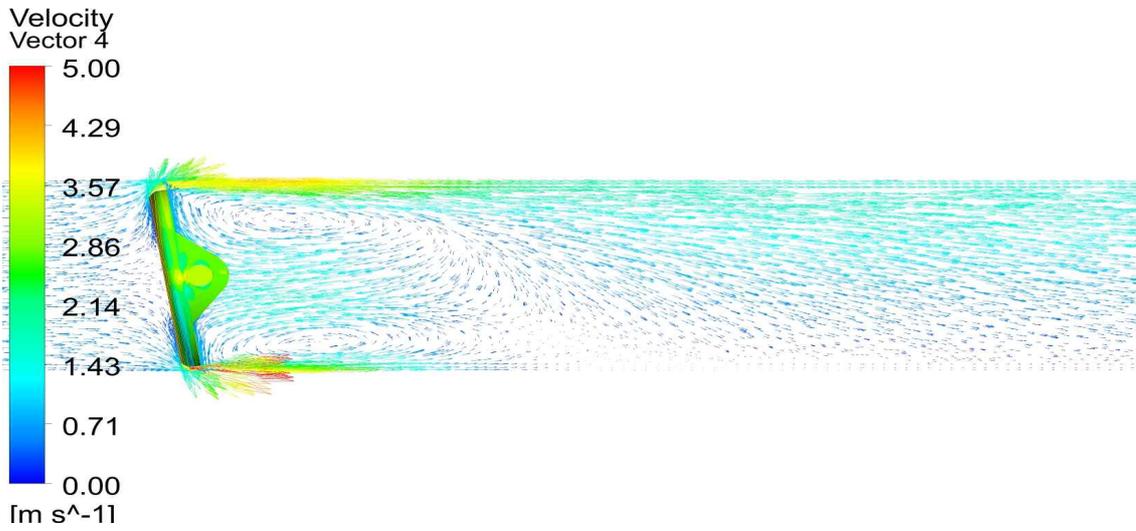


(d) C-BFV-Rubber seat

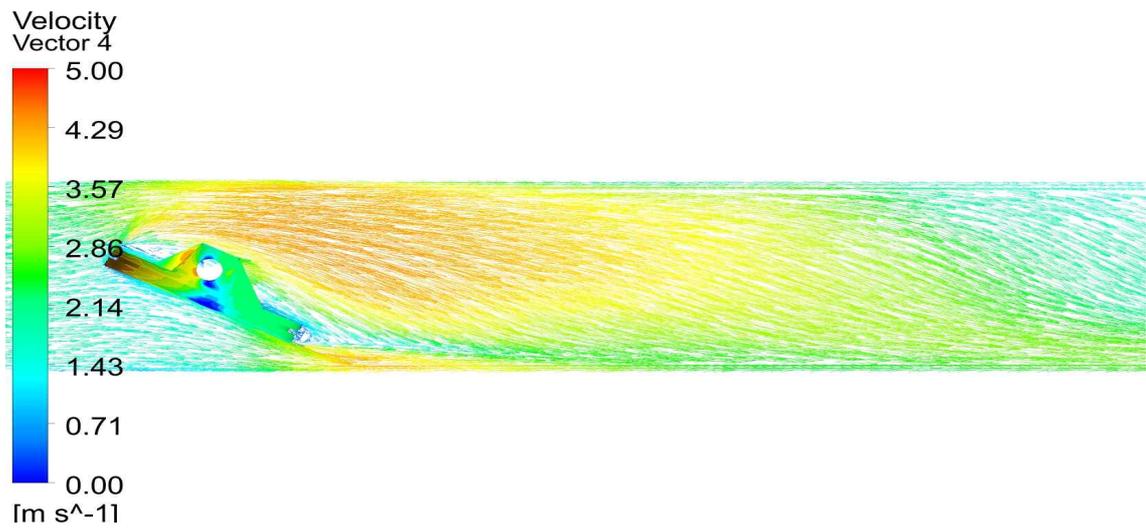
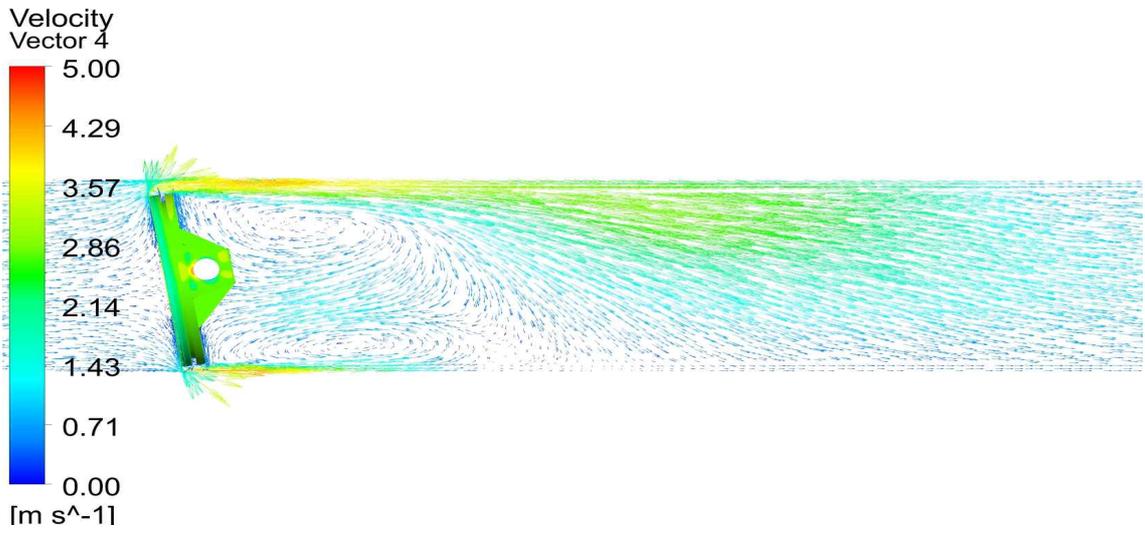


(e) C-BFV-Metal seat

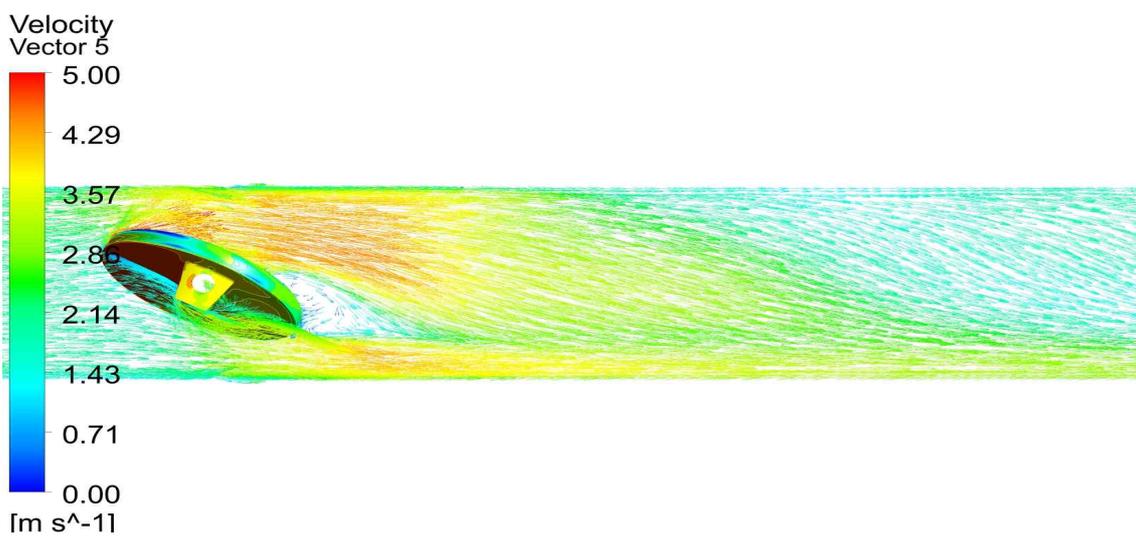
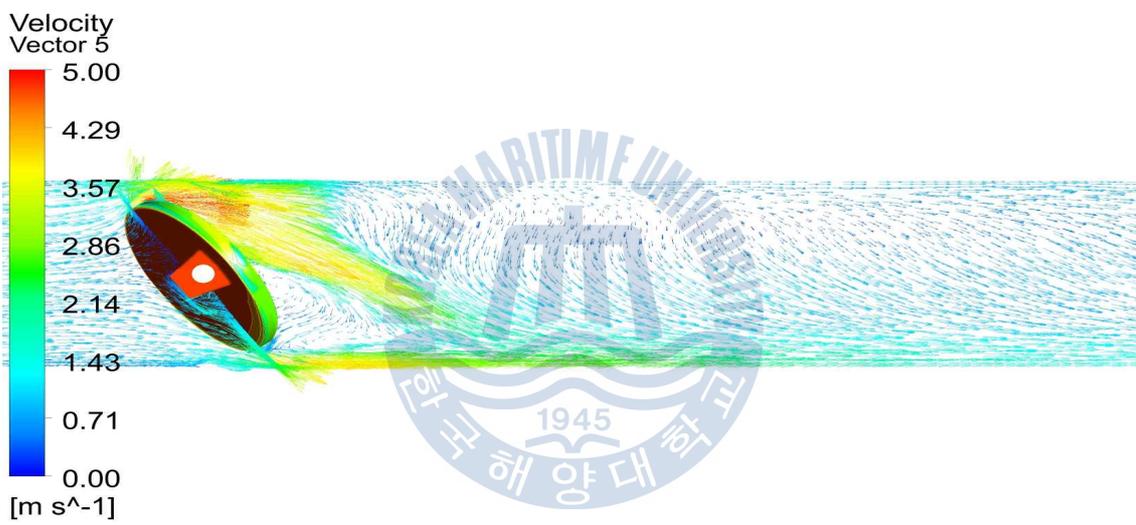
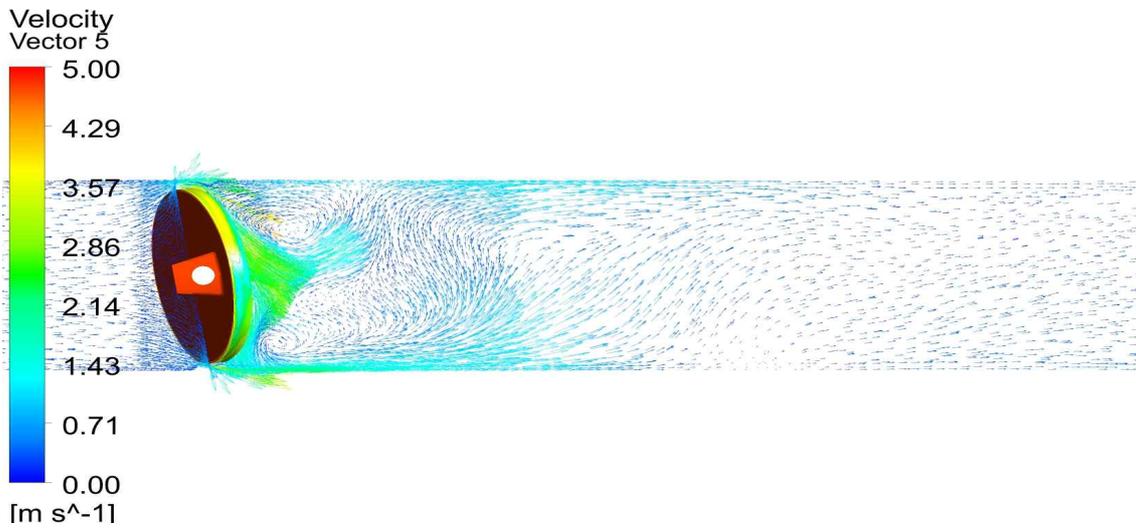
Fig. 4.4 Velocity streamline around Butterfly valve disk at an angle of 9, 36, 63 degrees



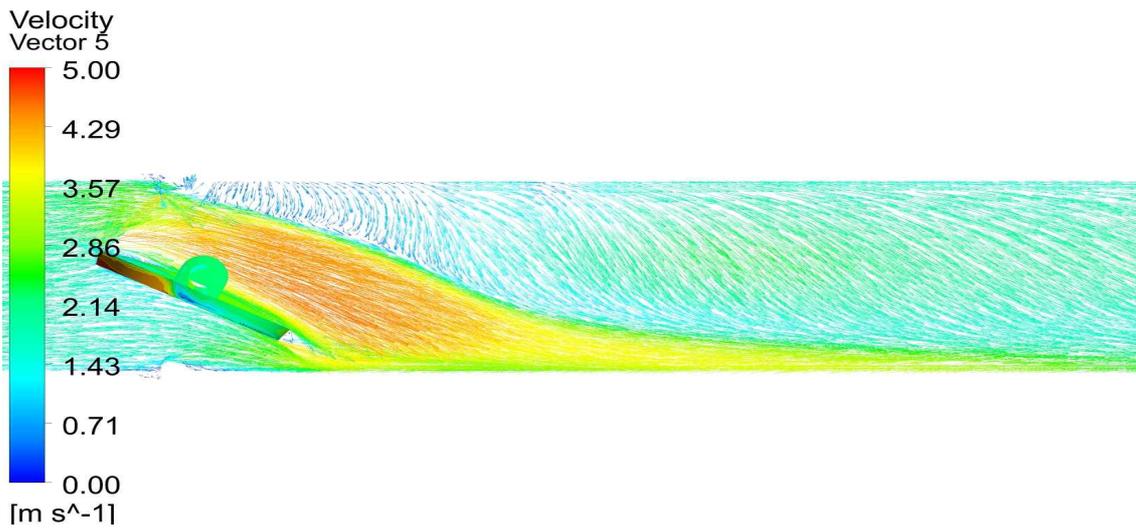
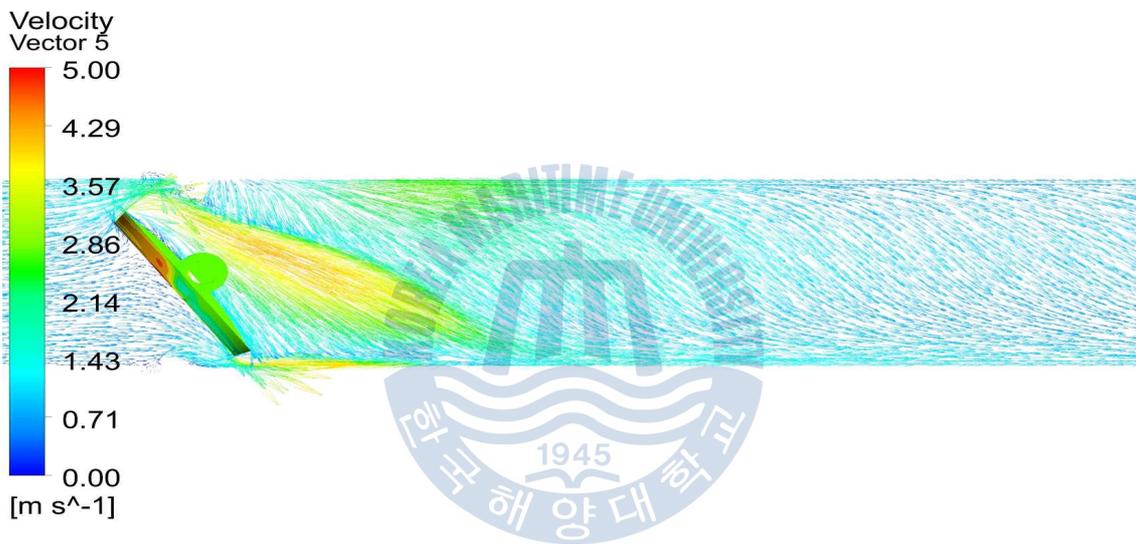
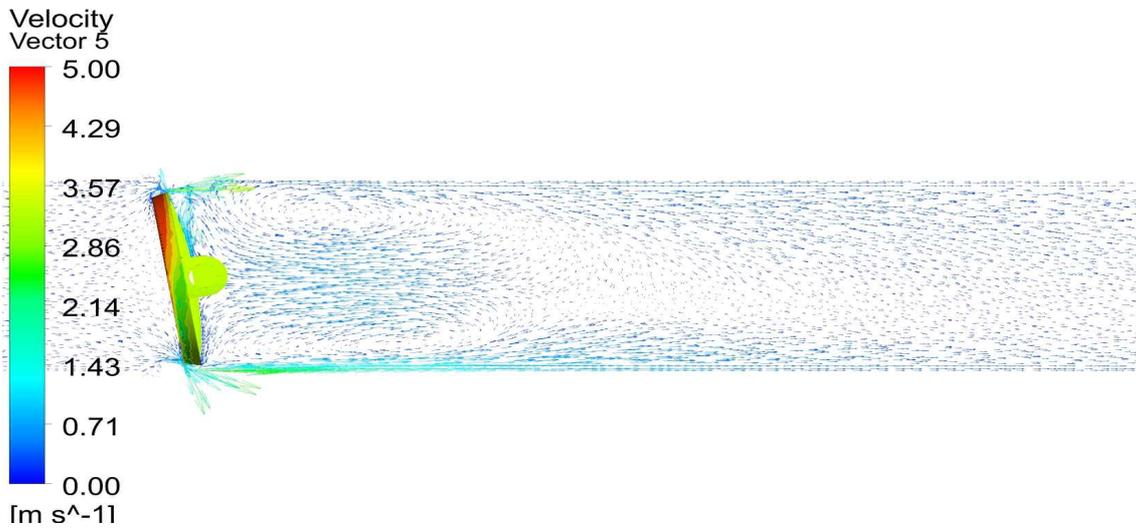
(a) A-BFV-Rubber seat



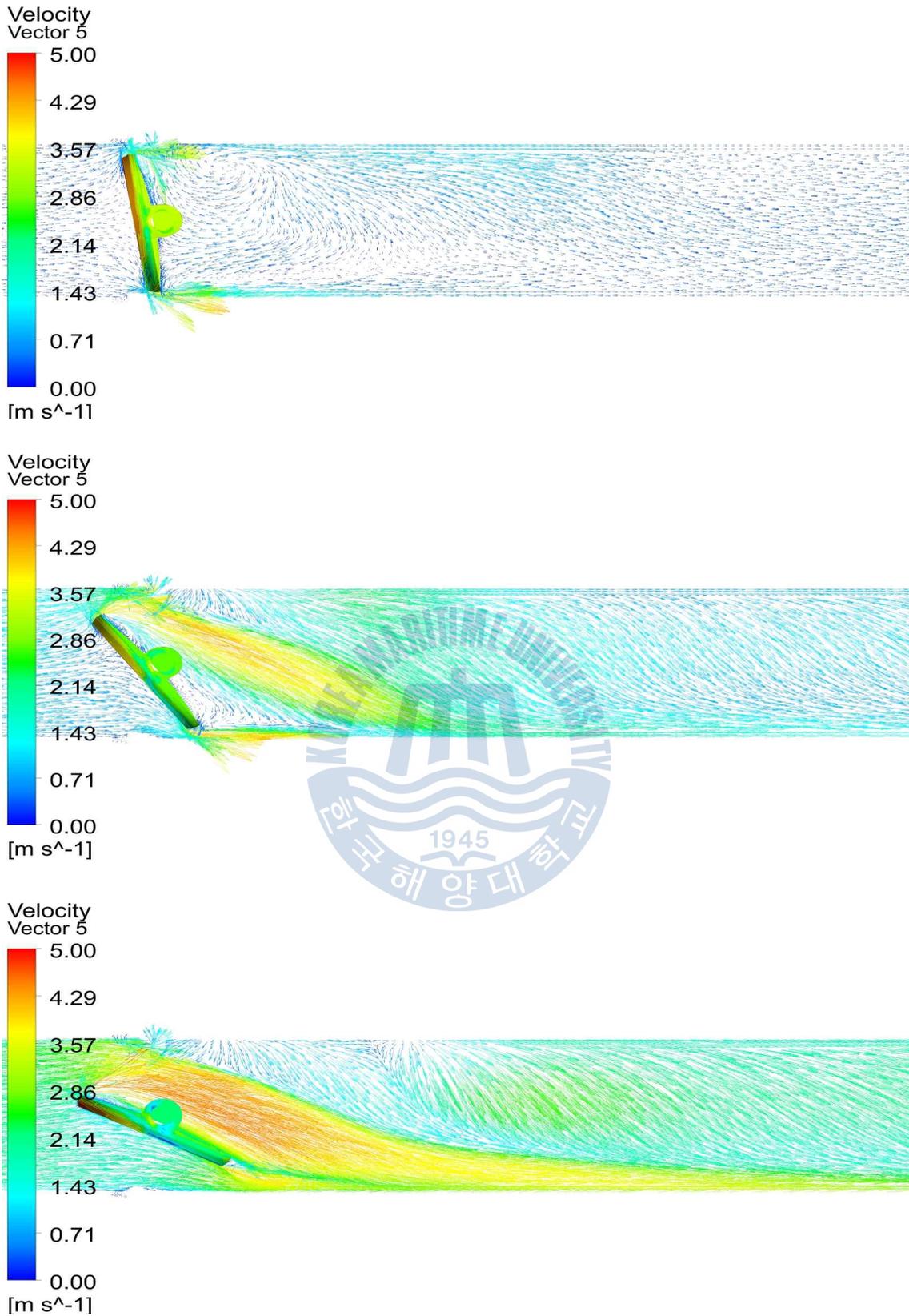
(b) A-BFV-Metal seat



(c) B-BFV-Rubber seat(slanting type)

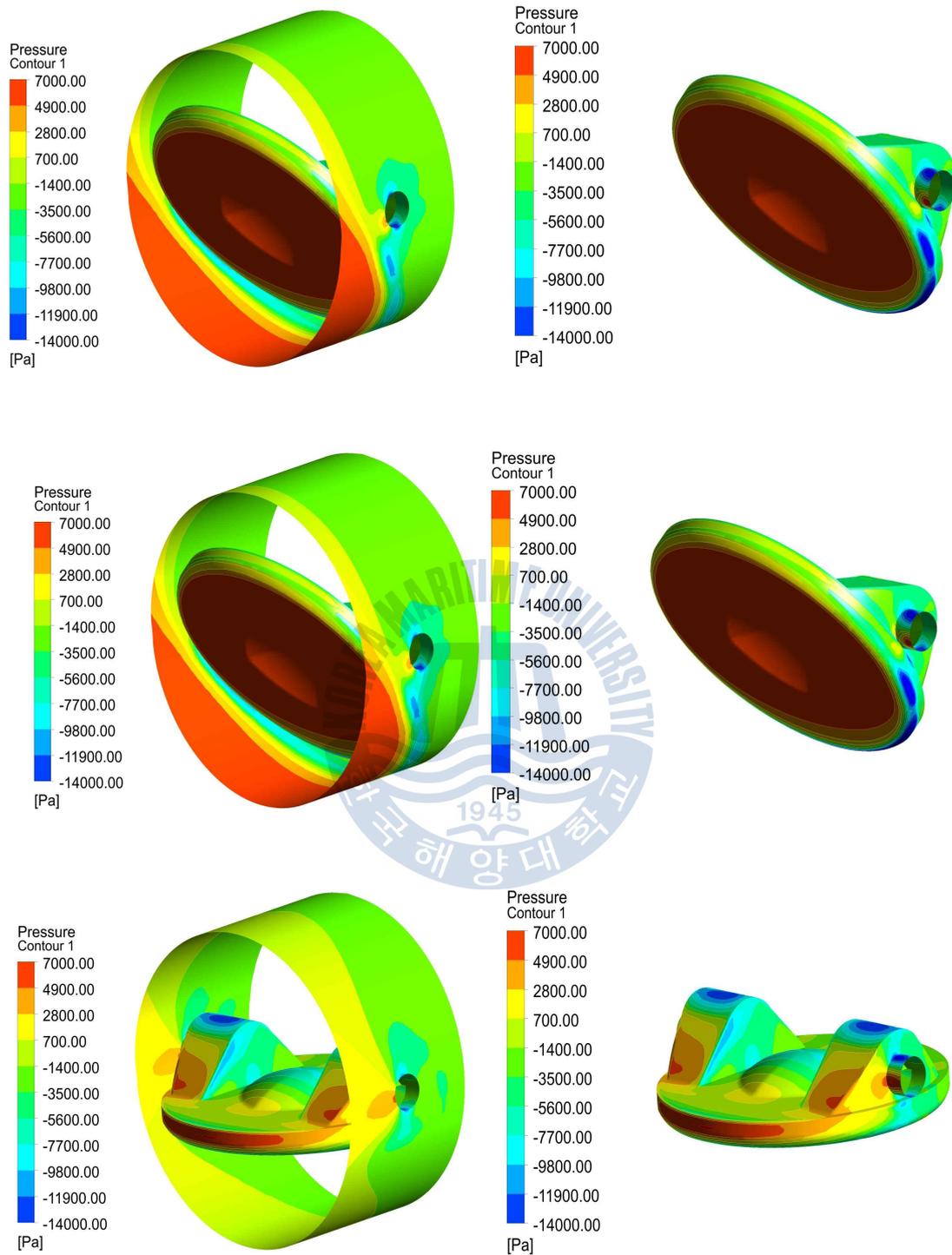


(d) C-BFV-Rubber seat

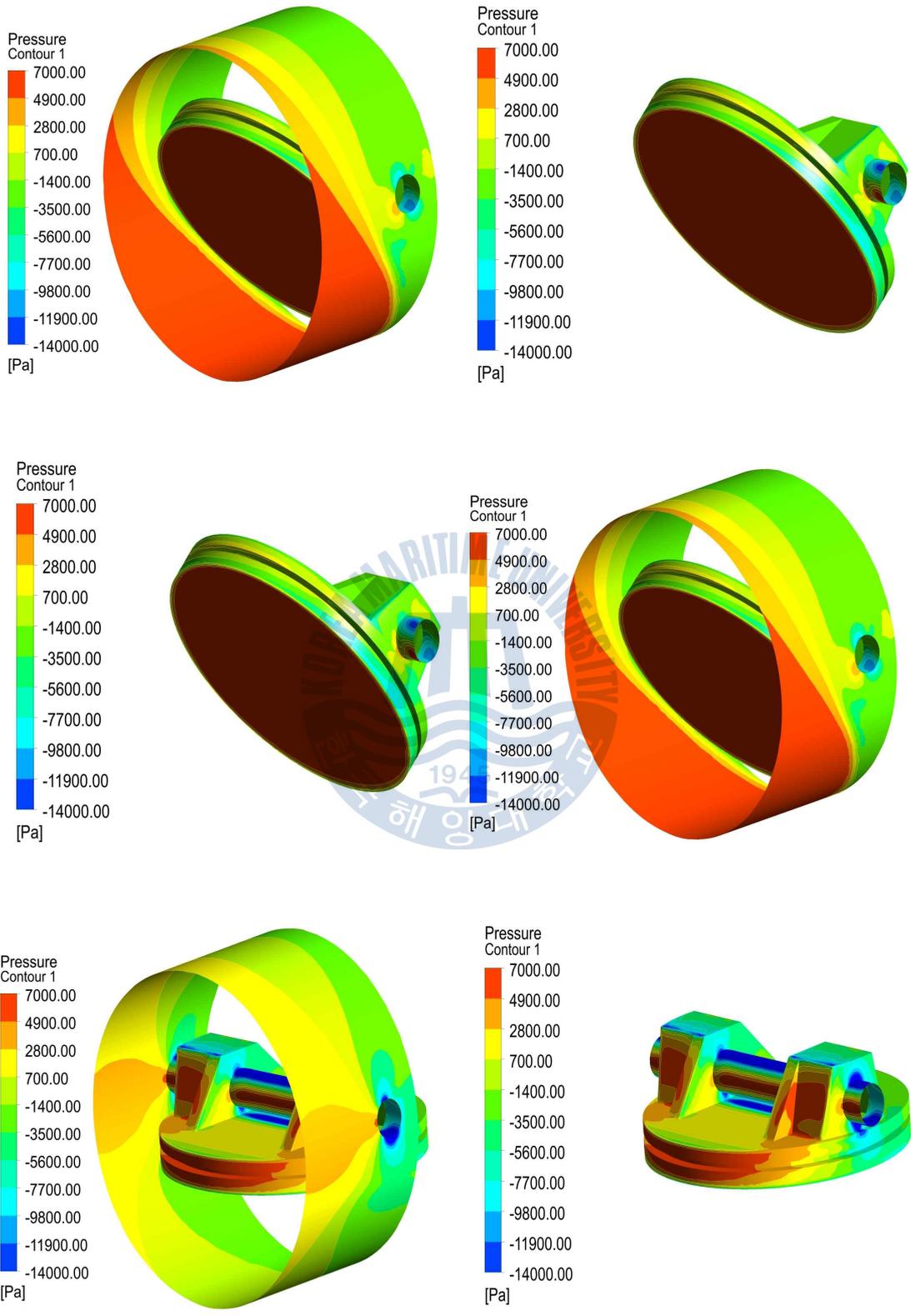


(e) C-BFV-Metal seat

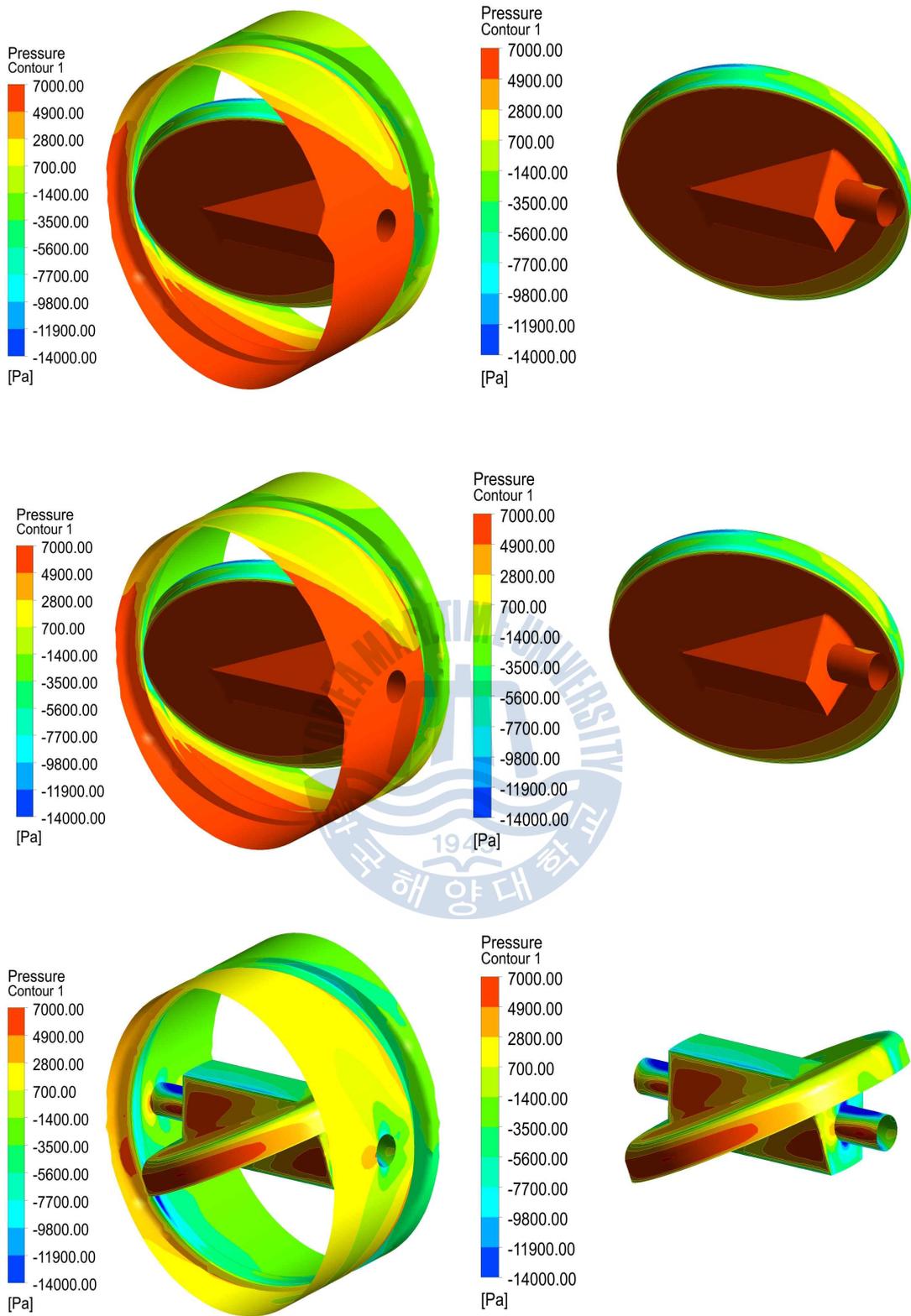
Fig. 4.5 Velocity vector around Butterfly valve disk at an angle of 9, 36, 63 degrees



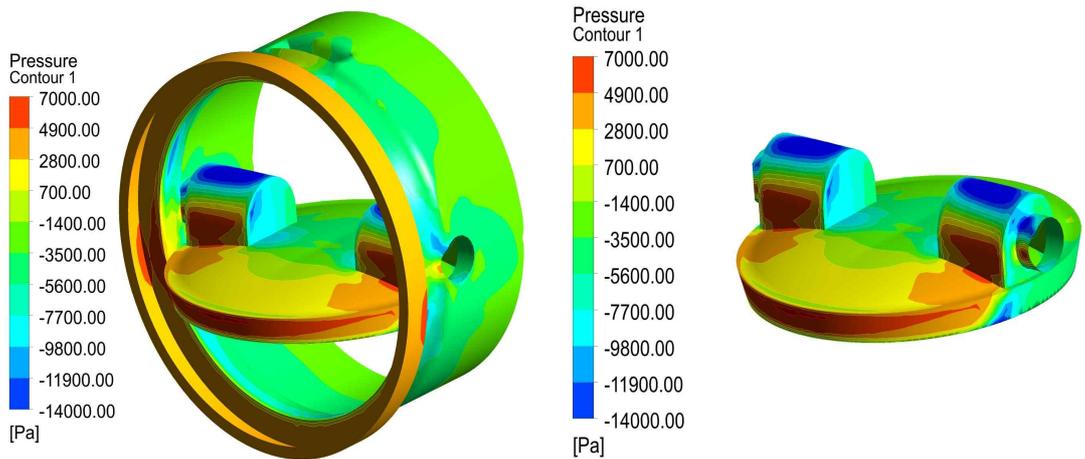
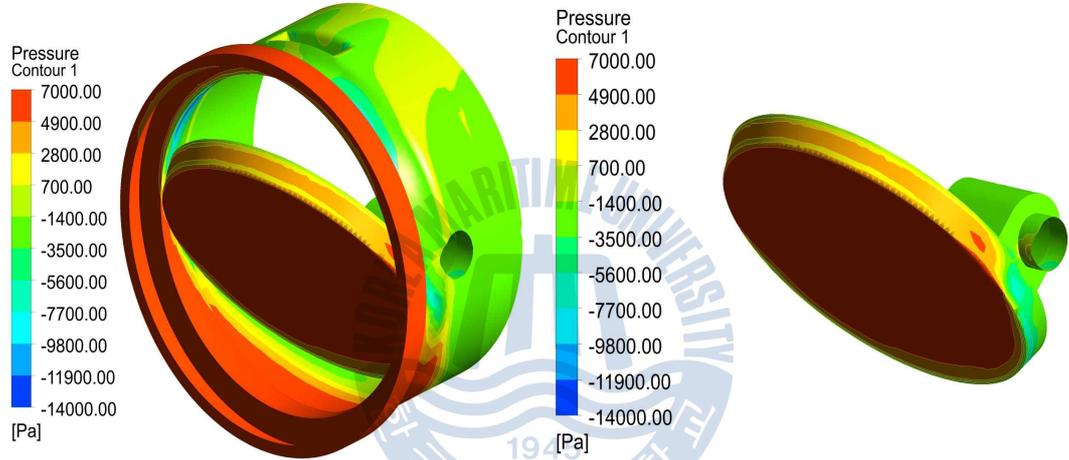
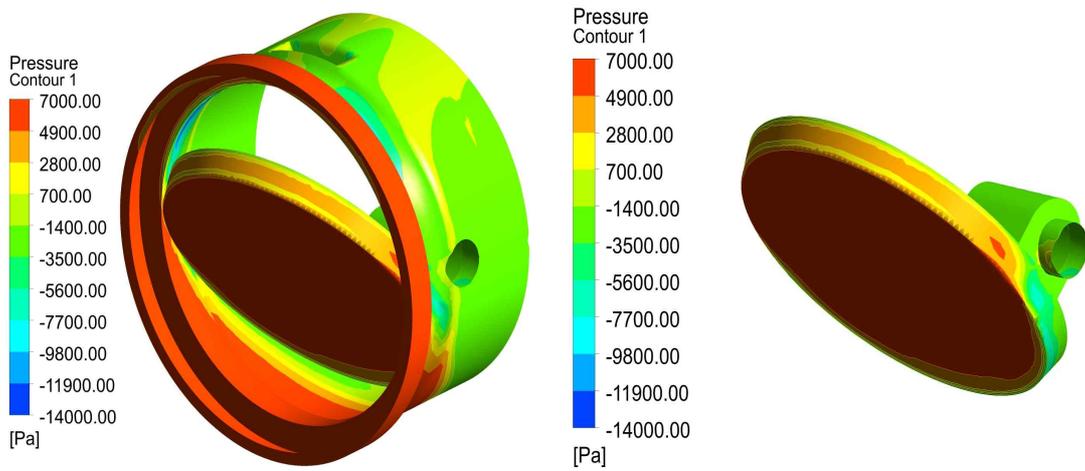
(a) A-BFV-Rubber seat



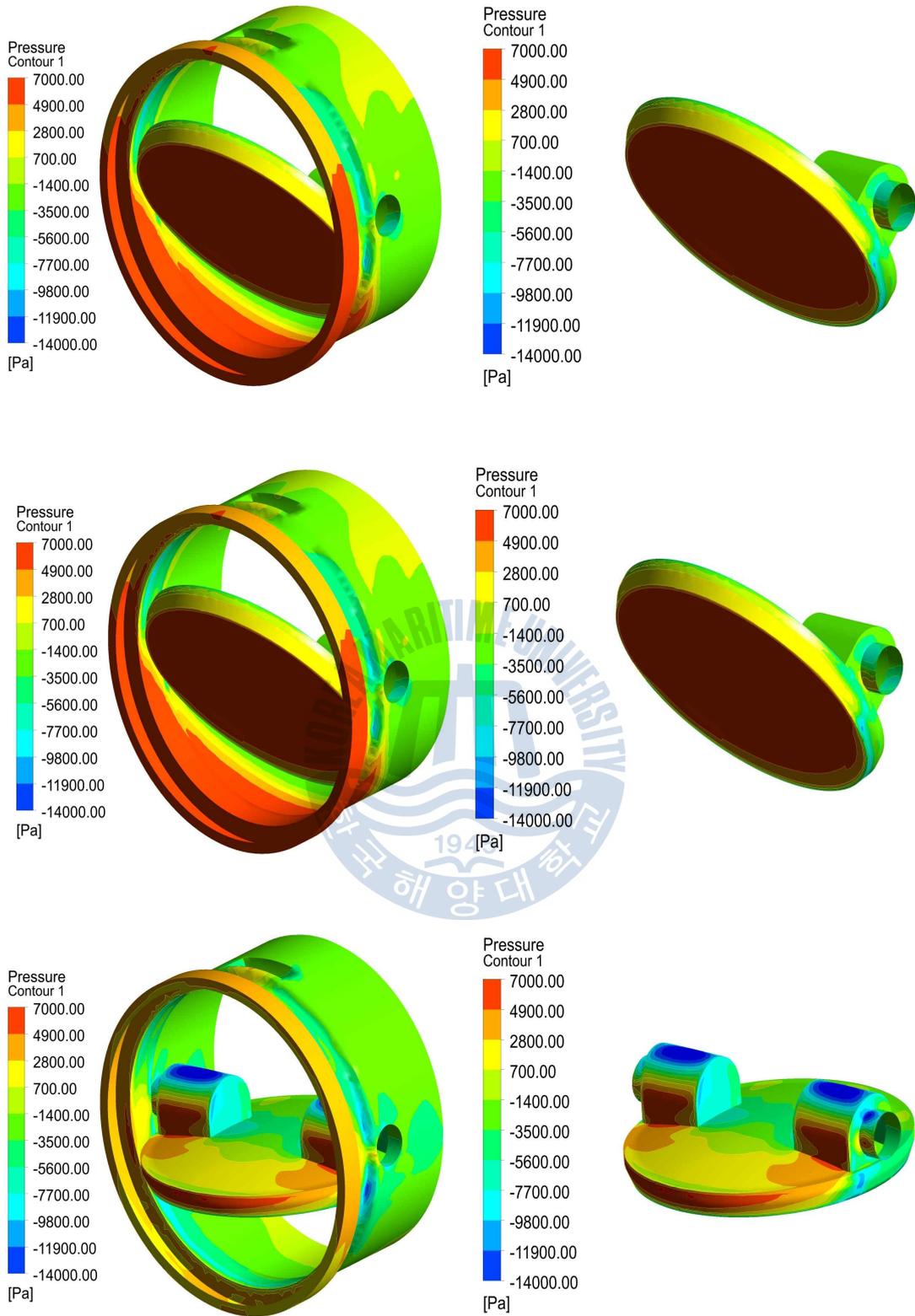
(b) A-BFV-Metal seat



(c) B-BFV-Rubber seat(slanting type)



(d) C-BFV-Rubber seat



(e) C-BFV-Metal seat

Fig. 4.6 Pressure contour around Butterfly valve disk at an angle of 9, 36, 63 degrees

4.2 실험 및 유동해석 결과 비교

밸브에서 유량에 대한 것은 용량계수로 나타낼 수 있으며, 밸브에 의한 압력손실은 손실계수로 표현할 수 있다. 이러한 밸브의 용량계수와 손실계수는 각 밸브의 디스크 형상에 따라 다른 값을 가질 수 있다. 즉, 각 밸브의 형태에 따라 밸브 전·후단의 에너지 손실이 다르다고 할 수 있다. 각 밸브의 용량계수와 손실계수에 주요한 영향을 주는 인자를 분석하기 위하여 수치해석의 결과를 토대로 각 밸브의 디스크 후단부에 발생하는 와류(Vortex) 형상, 재순환영역, 압력분포, 속도분포 등의 유동장을 파악하였다.

Fig. 4.7은 버터플라이의 밸브 시험결과와 유동해석 결과를 비교한 그림이다. 등비율(equal percentage) 유량특성을 나타내며, 대체적으로 시험 값과 근사한 값을 보인다. 밸브 용량계수(Cv)의 오차율은 최대 6%이며, 유동해석이 실제유동을 유사하게 예측한다는 것을 알 수 있다. 전체적으로 CFD 해석결과와 일치하며 발생오차는 밸브시험시 정확한 개도각도를 맞추지 못하거나, 유동해석시 제작도면을 이용한 모델링과 실물과의 차이 등으로 발생된 것으로 판단된다.

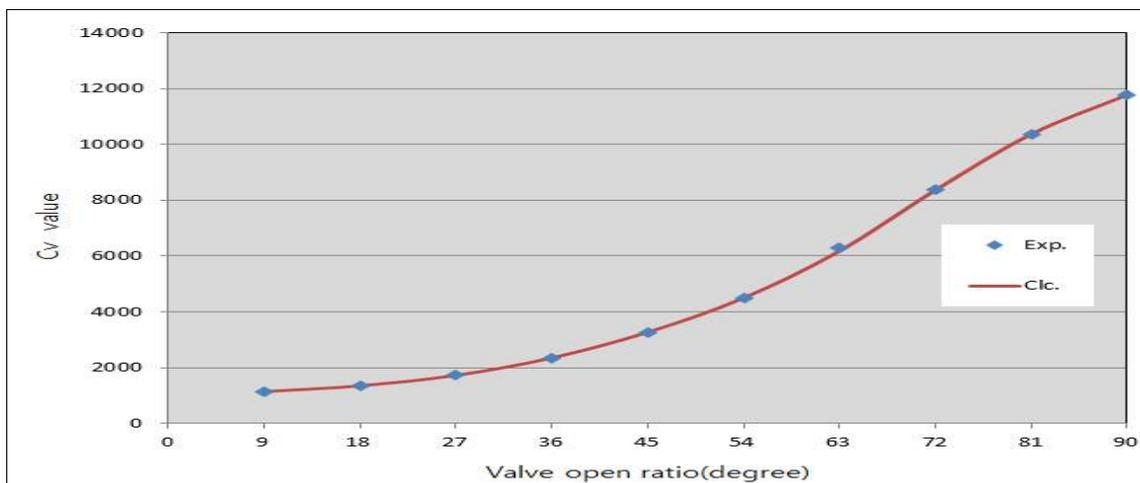


Fig. 4.7 Comparison experiment with calculation of valve flow characteristics

또한 버터플라이 밸브의 손실계수는 Fig. 4.8에 나타나 있으며, 손실 계수 역시 용량계수와 비슷한 오차율로 일반적으로 수치해석이 실제적인 현상을 모사하는데 적합하다고 판단되는 오차율 20% 기준 범위 내에 있다.

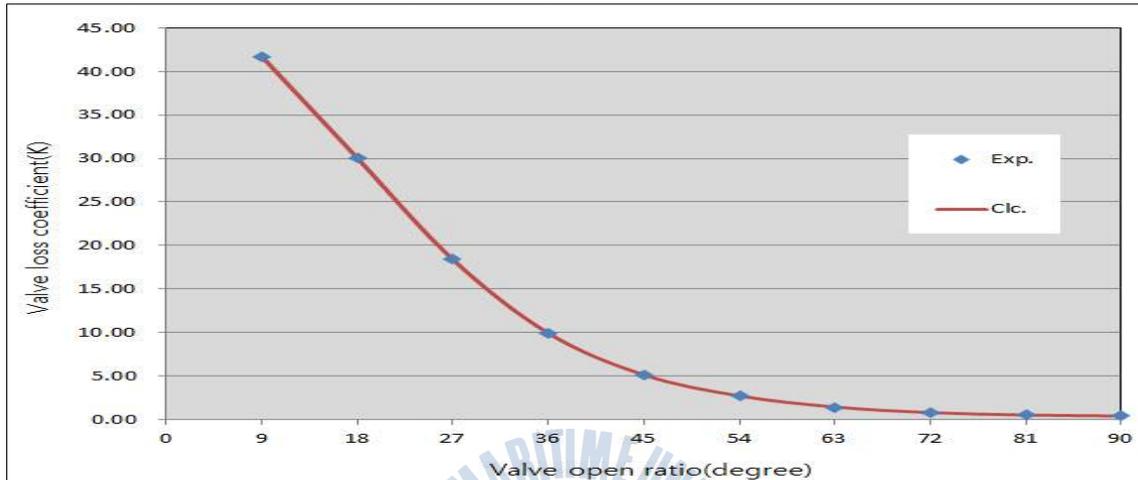


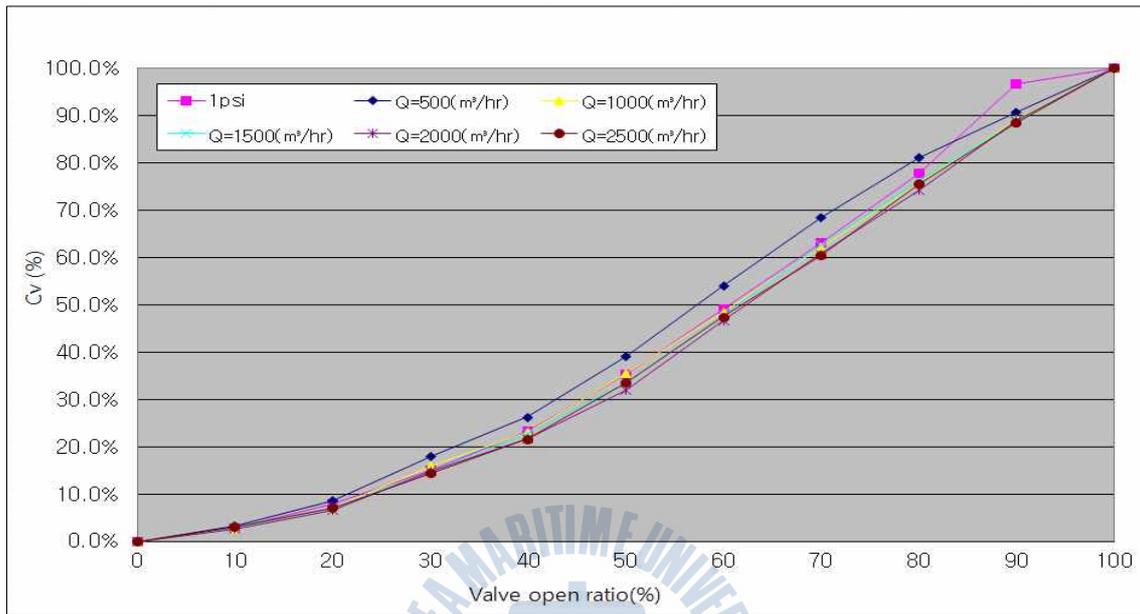
Fig. 4.8 Comparison experiment with calculation of valve loss coefficient

밸브 용량계수 시험은 ANSI/ISA-75.02 규격에 명시된 규정에 따라 밸브의 전·후단 차압을 $\Delta P=1\text{psi}$ 로 고정하여 수행하였다. 밸브 시험을 통해 얻은 결과는 400A의 경우, 일반적으로 알려진 용량계수의 값과 유사한 경향을 보이며 밸브별로 약간의 오차가 존재하는 것을 확인할 수 있었는데 이는 시험밸브의 디스크와 몸체부의 형상이 각 업체별 생산밸브의 내부구조가 다르기 때문에 발생한 결과라 사료된다.

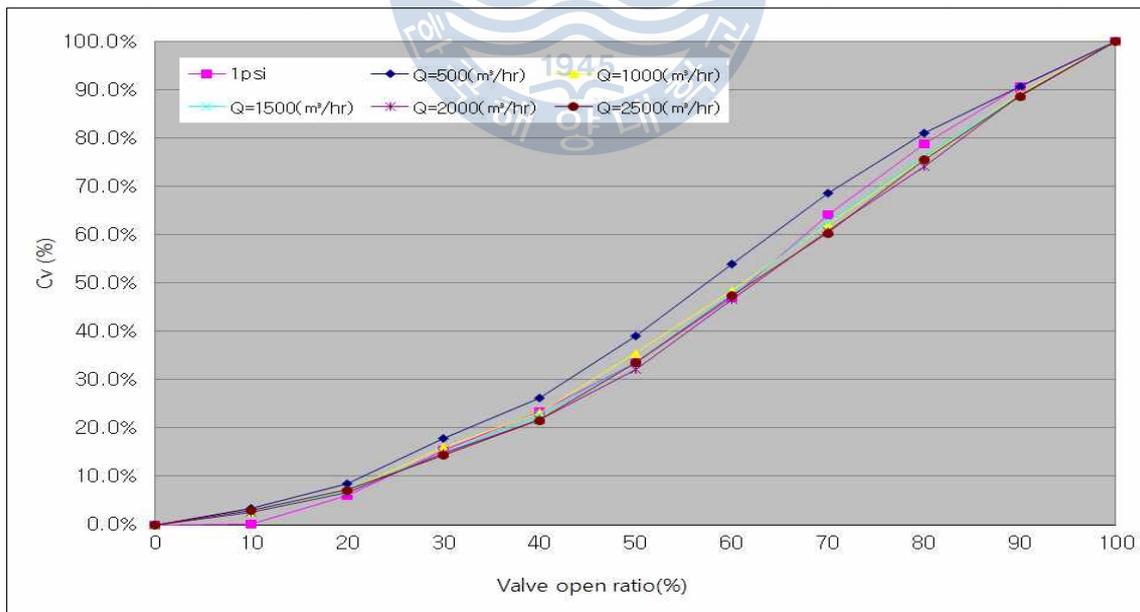
중·대구경 밸브의 경우 K-water 연구원에서도 유동을 부족으로 규격에 따른 시험이 불가능하였다. 이에 추가적으로 규격과 유사한 결과를 얻을 수 있을 것이라 생각되는 밸브 전개시의 관내 최대유량을 기준으로 차압 변화를 측정하는 방법으로 시험을 수행하였다.

Fig. 4.9와 같이 최대 유량(Q_{\max})이 $1500\text{m}^3/\text{hr}$ 이상인 경우에 400A에서 $\Delta P=1\text{psi}$ 조건과 유사한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

따라서 밸브성능을 평가함에 있어서 규격에 명시된 조건을 설비상의 이유로 만족시킬 수 없을 때, 최대 유량을 기준으로 차압의 변화를 측정하여 평가를 수행할 수 있다고 판단된다.

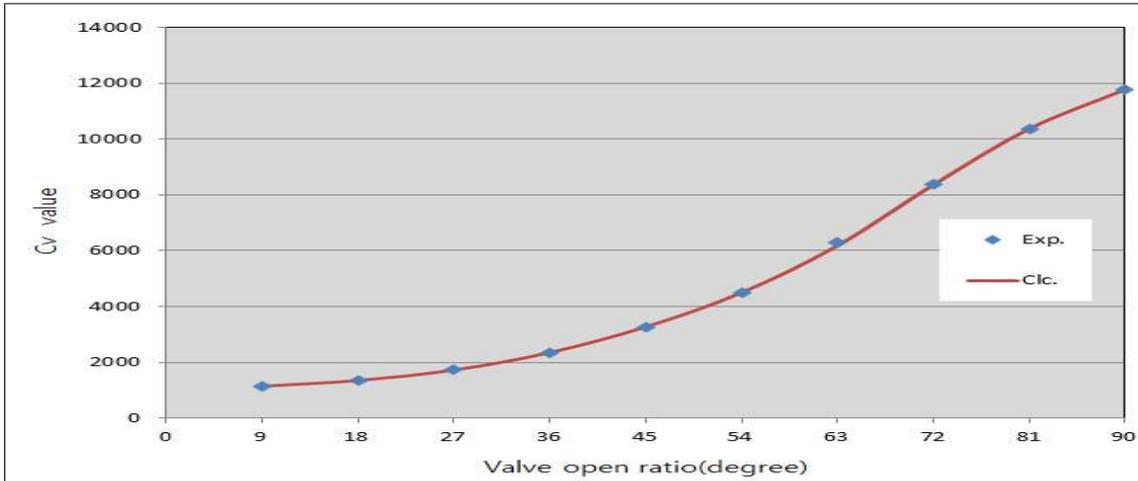


(a) A-BFV-Metal seat

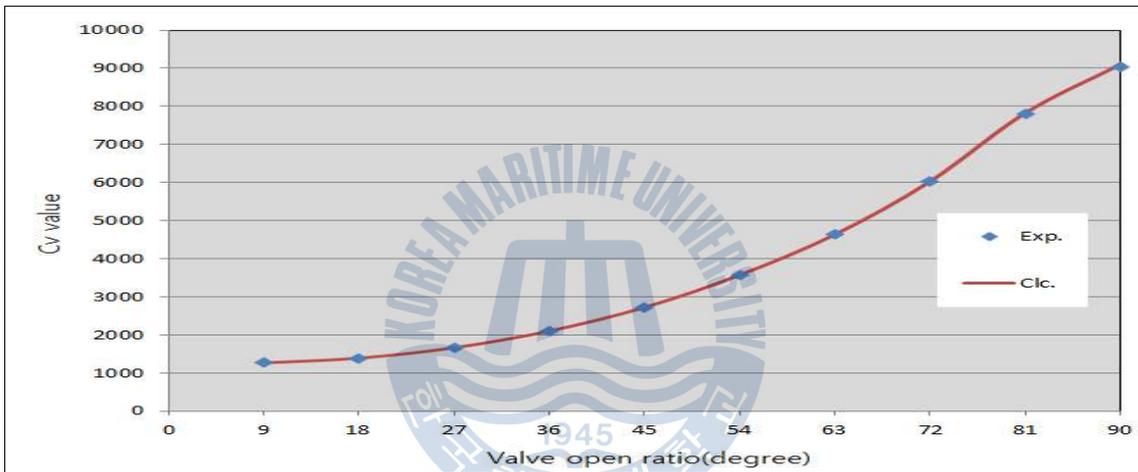


(b) B-BFV-Rubber seat (slanting type)

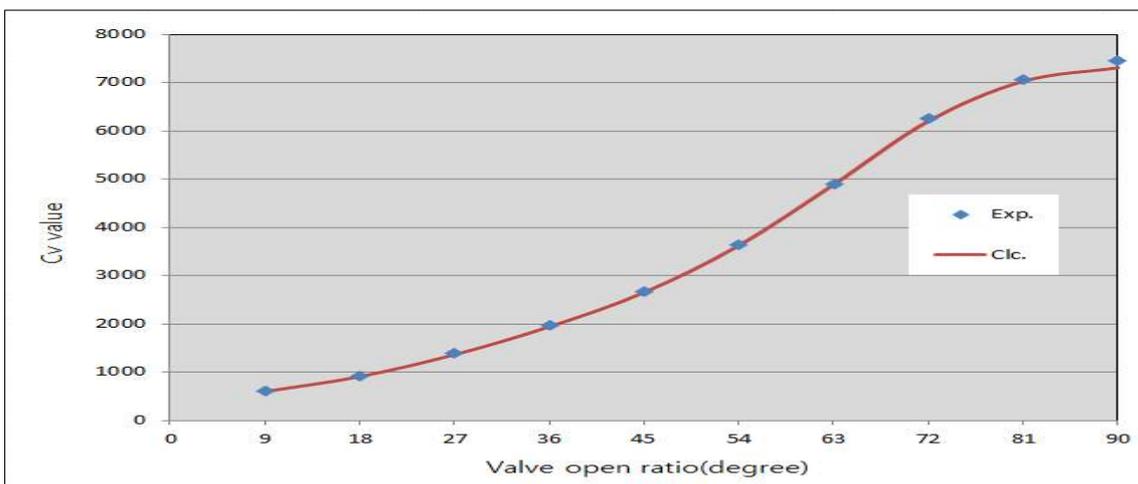
Fig. 4.9 Inherent flow characteristics by Butterfly valve products



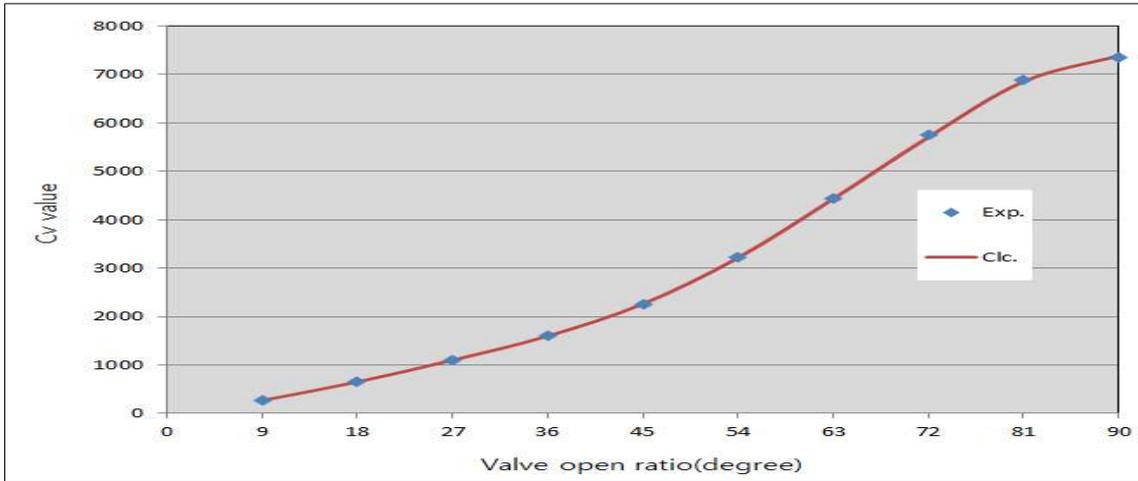
(a) A-BFV-Rubber seat



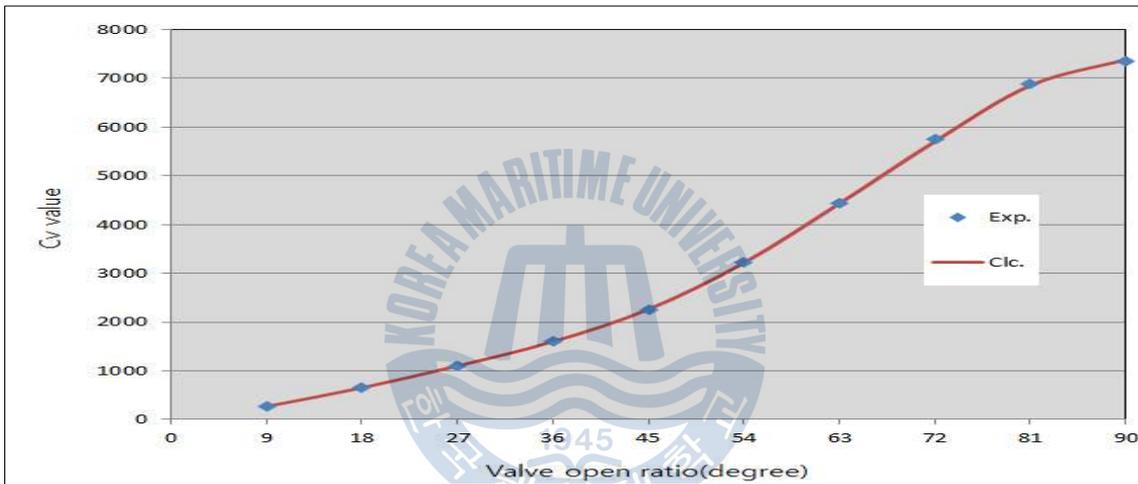
(b) A-BFV-Metal seat



(c) B-BFV-Rubber seat (slanting type)

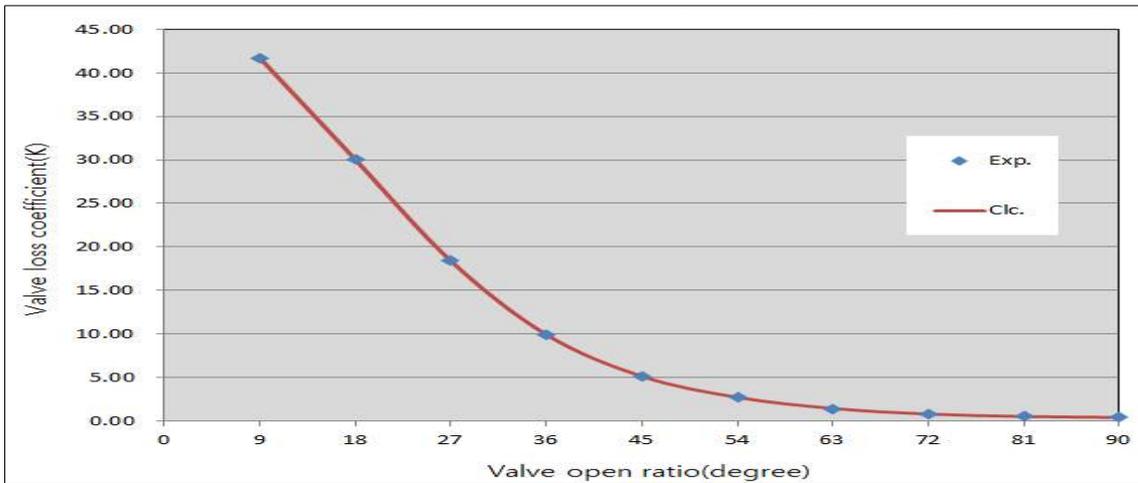


(d) C-BFV-Rubber seat

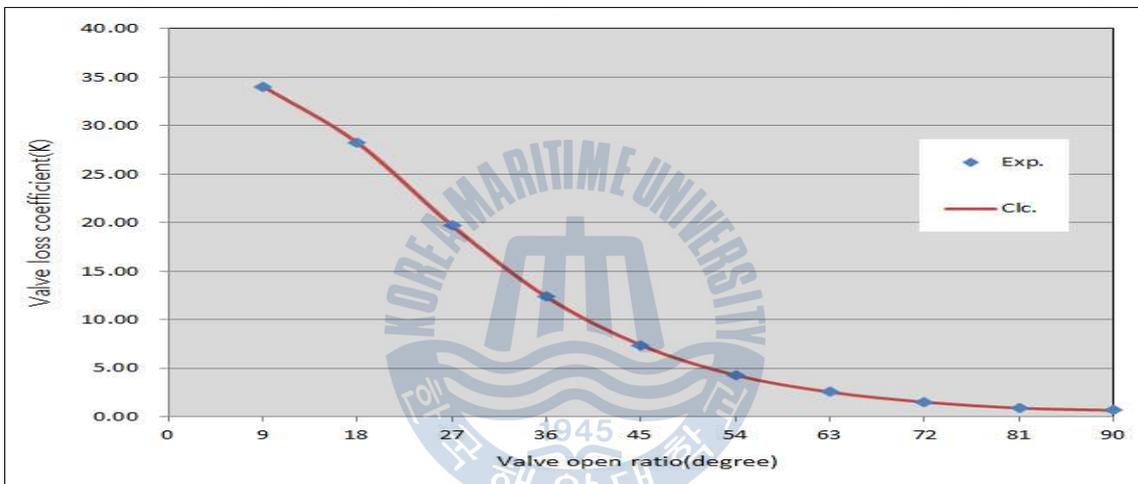


(e) C-BFV-Metal seat

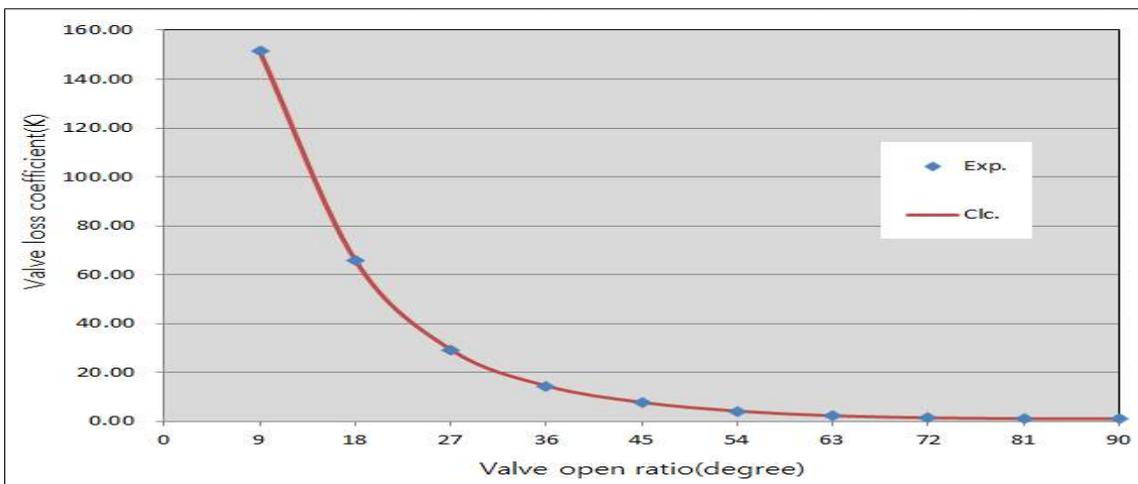
Fig. 4.10 Comparison experiment with calculation of valve flow characteristics



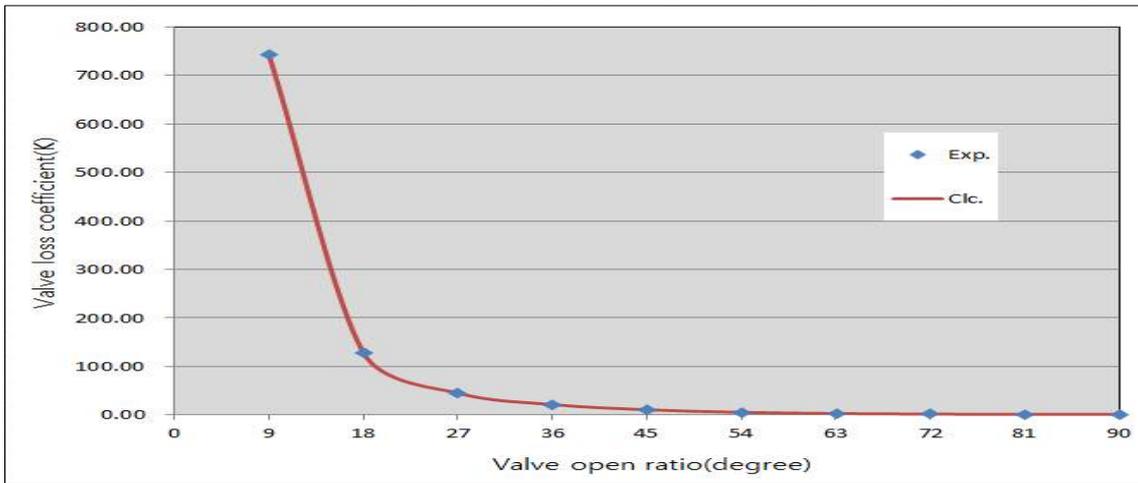
(a) A-BFV-Rubber seat



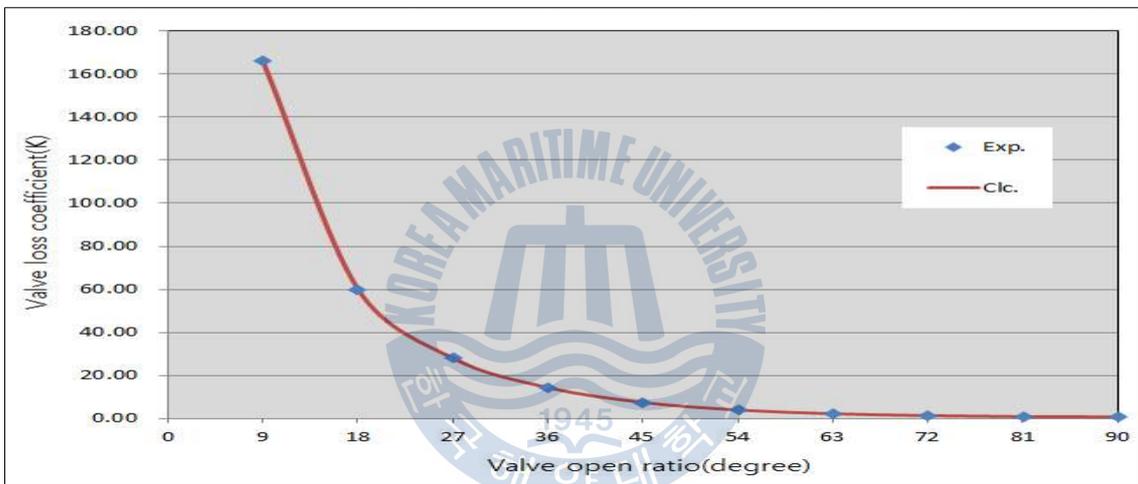
(b) A-BFV-Metal seat



(c) B-BFV-Rubber seat (slanting type)



(d) C-BFV-Rubber seat



(e) C-BFV-Metal seat

Fig. 4.11 Comparison experiment with calculation of valve loss coefficient

제 5 장 결론

본 연구에서는 버터플라이 밸브의 고유 및 유효유량특성 연구를 위하여 K-water 연구원에서 밸브시험을 수행하고 제작도면 및 기초자료를 획득하여, CFD 3차원 유동 특성 해석 및 성능평가를 목적으로 수행되었으며 다음과 같이 결론을 요약정리 할 수 있다

- (1) CFD 유동해석에 의한 값을 검증하기 위하여 밸브 시험 값과 비교한 결과 대체로 근사한 값을 보였으며, 밸브 용량계수(C_v)와 손실계수(K)의 오차율은 최대 6% 이내의 값을 가짐을 확인 하였다.
- (2) 밸브시험 결과 고유 유량특성(C_v)은 일반적인 문헌과 유사한 경향을 보이며, 동심형("B"사)의 경우는 선형특성(Linear), 편심형("A", "C"사) 경우 밸브시트가 디스크 고정이면 선형특성(Linear), 몸통 고정이면 등비율특성(Equal Percentage)이 나타남을 알 수 있었다.
- (3) 버터플라이 밸브는 교축기능을 위하여 편심을 부여하고 있는데 3중 편심 구조가 될수록 선형(Linear) 특성으로 나타나 밸브 제어를 통한 유량조절이 용이함을 알 수 있었다.
- (4) 버터플라이 밸브의 제어한계를 $C_p=64$ 를 설정 할 수 있는데, 유효 유량 특성이 $C_p=64$ 보다 클 경우에는 개도 20% 에서 최대 유량의 40~90%를 공급할 수 있으며, 미세하게 조절하는 개도 20% 이하에서는 밸브 내부 구조나 특성에 따라서 최대 유량의 10~90% 나타나 트림과 디스크 형상 등에 따라 제어능력의 큰 차이가 있는 것을 알 수 있었다.
- (5) 시험설비의 한계로 관련 규격에 따른 시험이 불가능하였으나, 밸브 전개시의 관내 최대유량(Q_{max}) 1500m³/hr 이상인 경우에 400A에서 $\Delta P=1\text{psi}$ 조건과 유사한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] KS B 0100, 밸브 용어
- [2] KS B 2101, 밸브의 용량 계수 시험 방법
- [3] KS B 2333, 수도용 버터플라이 밸브
- [4] 박한영, 정태희 역, 2005, “밸브 핸드북-2판”, 홍릉과학출판사.
- [5] 최병권 역, 2010, “밸브 입문서-2판”, 청문각 출판사.
- [6] Philip L. Skousen, 2004, "Valve Handbook, 2nd ed.," McGraw-Hill Inc.
- [7] G. Borden and P.G. Friedmann, 1998, "ISA Standards Control Valves," ISA.
- [8] IEC 60534-2-3, Industrial-process control valves - Part 2-3: Flow capacity - Test procedures
- [9] ANSI/ISA-75.02, Control Valve Capacity Test Procedures
- [10] P. Smith and R.W. Zappe, 2004, "Valve Selection Handbook, 5th ed.," Elsevier Inc.
- [11] T. C. Dickenson, 1999, "Valves, Piping and pipelines Handbook," Elsevier Science Ltd.
- [12] IEC 60534-2-1, Industrial-process control valves - Part 2-1: Flow capacity - Sizing equations for fluid flow under installed conditions

부록

1-1. "A" - BFV - Rubber seat - P=1psi

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	49.73035	0.109928	0.065986	6471.016	225.93	1072.2955	1072.9182
18	114.31250	0.252686	0.070205	6884.759	503.48	215.9158	216.0421
27	199.50910	0.441012	0.069367	6802.579	884.01	70.0381	70.0786
36	324.87510	0.718132	0.069563	6821.800	1437.47	26.4880	26.5035
45	529.40090	1.170233	0.070567	6920.259	2325.71	10.1190	10.1249
54	739.48140	1.634613	0.069425	6808.267	3275.22	5.1023	5.1053
63	1072.69200	2.371170	0.069916	6856.417	4734.32	2.4419	2.4433
72	1461.53500	3.230702	0.070290	6893.094	6433.27	1.3225	1.3232
81	1973.41500	4.362205	0.071037	6966.350	8640.66	0.7331	0.7335
90	2346.24500	5.186340	0.069406	6806.403	10393.12	0.5067	0.5070

1-2. "A" - BFV - Rubber seat - Q=500

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	283.02910	0.625632	1.674322	164194.898	255.26	840.0068	840.4940
18	411.08210	0.908691	0.862679	84599.910	516.51	205.1625	205.2816
27	466.24770	1.030634	0.383240	37583.005	878.93	70.8506	70.8917
36	489.03370	1.081002	0.154465	15147.842	1452.09	25.9573	25.9723
45	496.96930	1.098543	0.066794	6550.254	2244.05	10.8688	10.8752
54	499.08070	1.103211	0.037862	3712.994	2993.22	6.1090	6.1125
63	500.50020	1.106348	0.022750	2231.013	3872.44	3.6499	3.6520
72	501.40690	1.108353	0.015702	1539.840	4669.62	2.5101	2.5115
81	501.13020	1.107741	0.012320	1208.179	5268.83	1.9716	1.9727
90	501.76830	1.109151	0.010210	1001.259	5795.23	1.6297	1.6307

1-3. "A" - BFV - Rubber seat - Q=1000

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	291.15580	0.643596	1.818300	178314.317	251.98	862.0260	862.5266
18	509.91820	1.127167	1.452024	142394.912	493.84	224.4289	224.5591
27	736.87590	1.628853	0.893682	87640.266	909.65	66.1455	66.1839
36	859.41620	1.899727	0.512241	50233.682	1401.32	27.8723	27.8885
45	940.00990	2.077878	0.234531	22999.634	2265.19	10.6670	10.6732
54	968.49580	2.140846	0.133400	13082.071	3094.50	5.7157	5.7190
63	987.24070	2.182281	0.063331	6210.650	4578.11	2.6114	2.6129
72	993.41110	2.195921	0.039733	3896.476	5815.96	1.6181	1.6190
81	1000.21900	2.210969	0.025297	2480.788	7338.91	1.0162	1.0168
90	1002.66100	2.216367	0.018147	1779.613	8686.08	0.7254	0.7259

1-4. "A" - BFV - Rubber seat - Q=1500

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	266.42760	0.588934	1.942444	190488.685	223.09	1099.7552	1100.3932
18	563.22090	1.244992	1.738299	170468.899	498.53	220.2282	220.3560
27	860.15990	1.901371	1.383977	135721.780	853.27	75.1755	75.2191
36	1139.63500	2.519146	0.897633	88027.727	1403.74	27.7762	27.7923
45	1329.49000	2.938818	0.476438	46722.607	2247.77	10.8328	10.8391
54	1418.99700	3.136672	0.248436	24363.249	3322.35	4.9586	4.9615
63	1462.28300	3.232355	0.127228	12476.805	4784.22	2.3912	2.3926
72	1479.48400	3.270378	0.078904	7737.839	6146.54	1.4487	1.4496
81	1491.82700	3.297662	0.045021	4415.052	8205.02	0.8130	0.8135
90	1497.12400	3.309371	0.030029	2944.839	10082.29	0.5384	0.5387

1-5. "A" - BFV - Rubber seat - Q=2000

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	264.21510	0.584044	1.972305	193417.048	219.55	1135.4420	1136.1002
18	545.55820	1.205948	1.863190	182716.522	466.43	251.5827	251.7287
27	933.70050	2.063931	1.591278	156051.064	863.78	73.3562	73.3988
36	1289.59100	2.850622	1.205406	118209.947	1370.74	29.1296	29.1466
45	1614.57100	3.568985	0.727457	71339.162	2209.15	11.2150	11.2215
54	1779.86200	3.934359	0.443285	43471.408	3119.72	5.6236	5.6269
63	1888.18800	4.173812	0.229314	22488.021	4601.51	2.5849	2.5864
72	1939.97900	4.288295	0.130653	12812.682	6263.38	1.3952	1.3960
81	1967.38000	4.348865	0.071387	7000.673	8593.10	0.7412	0.7417
90	1985.95200	4.389918	0.050217	4924.605	10342.23	0.5117	0.5120

1-6. "A" - BFV - Rubber seat - Q=2500

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	290.71380	0.642619	1.980113	194182.752	241.10	941.5964	942.1423
18	610.37200	1.349218	1.891991	185540.935	517.85	204.0966	204.2150
27	979.67050	2.165547	1.713722	168058.719	873.33	71.7606	71.8023
36	1405.65200	3.107173	1.459178	143096.479	1357.98	29.6797	29.6969
45	1883.72300	4.163942	0.955678	93719.997	2248.70	10.8239	10.8302
54	2123.95200	4.694965	0.636333	62402.950	3107.23	5.6689	5.6722
63	2313.86700	5.114769	0.321873	31564.959	4759.56	2.4161	2.4175
72	2405.06900	5.316370	0.198231	19439.820	6303.95	1.3773	1.3781
81	2458.58400	5.434664	0.107535	10545.581	8749.47	0.7150	0.7154
90	2496.38900	5.518231	0.075650	7418.731	10592.01	0.4879	0.4881

2-1. "A" - BFV - Meal seat - P=1psi

open degree	flow rate (m3/hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	38.400594	0.084884	0.072008	7061.573	167.001	1962.5111	1963.6437
18	106.456188	0.235320	0.070323	6896.330	468.484	249.3785	249.5246
27	203.230693	0.449238	0.070500	6913.688	893.235	68.5988	68.6386
36	315.388515	0.697162	0.070336	6897.605	1387.805	28.4178	28.4344
45	474.542376	1.048969	0.069535	6819.054	2100.125	12.4096	12.4168
54	660.855743	1.460812	0.069844	6849.357	2918.185	6.4272	6.4309
63	851.135347	1.881422	0.069880	6852.887	3757.439	3.8767	3.8789
72	1045.449802	2.310951	0.069603	6825.723	4624.445	2.5593	2.5608
81	1297.767921	2.868697	0.069318	6797.774	5752.324	1.6541	1.6550
90	1343.342228	2.969438	0.069356	6801.500	5952.702	1.5446	1.5455

2-2. "A" - BFV - Metal seat - Q=500

open degree	flow rate (m3/hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	214.903100	0.475040	1.983700	194534.516	178.063	1726.2307	1727.2232
18	392.387100	0.867366	1.013000	99341.365	454.960	264.4245	264.5683
27	472.444800	1.044332	0.337900	33136.670	948.542	60.8324	60.8757
36	488.801600	1.080489	0.166800	16357.492	1396.734	28.0556	28.0730
45	497.919200	1.100643	0.078600	7708.027	2072.181	12.7465	12.7486
54	501.289800	1.108094	0.041600	4079.566	2868.002	6.6541	6.6569
63	502.178600	1.110058	0.025900	2539.922	3640.204	4.1304	4.1299
72	503.643600	1.113297	0.018600	1824.037	4306.285	2.9515	2.9487
81	502.771600	1.111369	0.014800	1451.384	4816.836	2.3590	2.3544
90	503.222500	1.112366	0.012200	1196.411	5313.288	1.9387	1.9373

2-3. "A" - BFV - Metal seat - Q=1000

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	181.571000	0.401360	1.928724	189143.212	152.575	2351.1654	2352.5288
18	436.162700	0.964131	1.621908	159054.841	399.674	342.6378	342.8365
27	752.601400	1.663614	0.908823	89125.091	921.290	64.4845	64.5219
36	861.515200	1.904367	0.575238	56411.577	1325.593	31.1478	31.1659
45	944.350400	2.087473	0.292649	28699.063	2037.184	13.1882	13.1959
54	977.501600	2.160753	0.168793	16552.939	2776.587	7.0995	7.1036
63	994.658200	2.198677	0.105545	10350.429	3572.935	4.2874	4.2899
72	1002.291000	2.215550	0.072406	7100.603	4346.878	2.8966	2.8983
81	1008.133000	2.228463	0.052861	5183.893	5117.088	2.0903	2.0915
90	1001.624000	2.214075	0.041452	4065.053	5741.193	1.6605	1.6615

2-4. "A" - BFV - Metal seat - Q=1500

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	196.675400	0.434748	1.969425	193134.617	163.550	2046.1879	2047.3741
18	486.578300	1.075574	1.802693	176783.793	422.924	306.0005	306.1781
27	884.776200	1.955785	1.343483	131750.676	890.817	68.9717	69.0118
36	1126.095000	2.489216	0.931400	91339.138	1361.689	29.5183	29.5355
45	1300.103000	2.873859	0.569319	55831.122	2010.809	13.5365	13.5443
54	1401.626000	3.098274	0.327553	32121.976	2858.000	6.7007	6.7046
63	1449.349000	3.203765	0.203137	19920.935	3752.748	3.8864	3.8887
72	1473.455000	3.257051	0.142190	13944.076	4560.090	2.6321	2.6336
81	1487.541000	3.288188	0.106888	10482.132	5309.772	1.9413	1.9424
90	1496.659000	3.308343	0.085116	8347.028	5986.724	1.5271	1.5280

2-5. "A" - BFV - Metal seat - Q=2000

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	184.566400	0.407981	1.989724	195125.269	152.696	2347.4345	2348.7965
18	471.945300	1.043228	1.899124	186240.444	399.656	342.6698	342.8687
27	966.049800	2.135439	1.567591	153728.163	900.438	67.5056	67.5447
36	1278.936000	2.827069	1.297983	127288.650	1310.041	31.8917	31.9102
45	1567.947000	3.465924	0.890950	87372.348	1938.543	14.5645	14.5730
54	1773.050000	3.919301	0.540053	52961.108	2815.618	6.9040	6.9080
63	1873.113000	4.140489	0.353786	34694.555	3675.058	4.0525	4.0548
72	1918.985000	4.241888	0.249326	24450.528	4484.961	2.7210	2.7226
81	1959.071000	4.330498	0.181206	17770.238	5370.744	1.8975	1.8986
90	1975.480000	4.366770	0.145222	14241.413	6049.611	1.4955	1.4964

2-6. "A" - BFV - Metal seat - Q=2500

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	221.897700	0.490502	1.989837	195136.350	183.576	1624.1204	1625.0613
18	527.488700	1.166006	1.920175	188304.842	444.236	277.3451	277.5060
27	998.145000	2.206385	1.718733	168550.130	888.506	69.3309	69.3712
36	1405.612000	3.107085	1.493666	146478.597	1342.176	30.3829	30.4005
45	1835.465000	4.057268	1.061448	104092.490	2079.063	12.6623	12.6696
54	2125.886000	4.699240	0.710528	69678.994	2943.202	6.3184	6.3221
63	2274.743000	5.028286	0.502102	49239.386	3746.340	3.8997	3.9020
72	2389.317000	5.281550	0.353256	34642.580	4691.373	2.4868	2.4883
81	2449.910000	5.415490	0.270884	26564.646	5493.244	1.8138	1.8149
90	2500.801000	5.527984	0.221020	21674.658	6207.753	1.4203	1.4211

3-1. "B" - BFV - Rubber seat - P=1psi

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	3.15446	0.006973	0.091802	9002.701	12.15	370774.1161	370989.2321
18	78.55485	0.173644	0.068965	6763.156	349.08	449.1493	449.4078
27	199.31660	0.440586	0.068459	6713.535	889.00	69.2545	69.2949
36	306.05930	0.676540	0.069712	6836.412	1352.77	29.9091	29.9264
45	437.46680	0.967014	0.069781	6843.178	1932.63	14.6538	14.6624
54	614.88530	1.359195	0.069842	6849.160	2715.22	7.4240	7.4282
63	839.22680	1.855099	0.070086	6873.089	3699.43	3.9992	4.0016
72	1028.37600	2.273210	0.069465	6812.189	4553.46	2.6398	2.6413
81	1177.85900	2.603640	0.069068	6773.257	5230.27	2.0008	2.0019
90	1301.87400	2.877773	0.069213	6787.477	5774.93	1.6412	1.6421

3-2. "B" - BFV - Rubber seat - Q=500

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	47.65545	0.105342	2.339064	229383.820	36.36	41392.6279	41416.6330
18	337.60740	0.746276	1.374278	134770.633	336.08	484.5701	484.8512
27	473.27080	1.046158	0.331205	32480.115	959.69	59.4269	59.4614
36	490.27770	1.083752	0.153663	15069.193	1459.58	25.6915	25.7065
45	497.20010	1.099054	0.084264	8263.476	1998.85	13.6989	13.7068
54	500.36350	1.106046	0.051677	5067.783	2568.66	8.2954	8.3001
63	502.32340	1.110379	0.031727	3111.356	3291.10	5.0532	5.0562
72	502.12560	1.109941	0.023008	2256.314	3863.15	3.6675	3.6695
81	502.86030	1.111565	0.019243	1887.094	4230.45	3.0583	3.0601
90	502.30690	1.110342	0.017157	1682.527	4475.30	2.7328	2.7344

3-3. "B" - BFV - Rubber seat - Q=1000

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	56.75257	0.125451	1.993781	195523.124	46.90	24877.8216	24892.2539
18	493.94540	1.091859	1.547281	151736.432	463.41	254.8692	255.0170
27	792.46690	1.751736	0.824248	80831.116	1018.65	52.7475	52.7781
36	896.05560	1.980718	0.484062	47470.266	1502.99	24.2291	24.2431
45	958.36540	2.118453	0.269754	26453.831	2153.37	11.8035	11.8104
54	984.15180	2.175453	0.162410	15926.980	2849.88	6.7390	6.7429
63	1003.61900	2.218485	0.100493	9854.997	3694.63	4.0096	4.0120
72	1009.73700	2.232009	0.062832	6161.714	4700.99	2.4767	2.4781
81	1011.97100	2.236947	0.050842	4985.897	5237.57	1.9952	1.9964
90	1015.71400	2.245221	0.044886	4401.813	5594.82	1.7485	1.7495

3-4. "B" - BFV - Rubber seat - Q=1500

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	47.52668	0.105057	2.005367	196659.323	39.17	35679.9956	35700.7010
18	415.07870	0.917525	1.861476	182548.436	355.04	434.2128	434.4646
27	923.33990	2.041029	1.288260	126335.149	949.36	60.7276	60.7629
36	1188.44100	2.627031	0.805004	78943.925	1545.79	22.9060	22.9193
45	1330.72100	2.941539	0.508460	49862.893	2177.86	11.5395	11.5462
54	1409.79500	3.116331	0.309033	30305.785	2959.54	6.2488	6.2525
63	1453.11700	3.212094	0.190300	18662.055	3887.34	3.6219	3.6241
72	1475.17900	3.260862	0.127274	12481.316	4825.54	2.3505	2.3518
81	1487.82800	3.288822	0.098501	9659.648	5532.27	1.7883	1.7893
90	1494.95700	3.304581	0.086031	8436.759	5948.03	1.5470	1.5479

3-5. "B" - BFV - Rubber seat - Q=2000

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	64.71045	0.143041	2.004191	196543.997	53.34	19235.1853	19246.3377
18	443.01880	0.979287	1.908983	187207.281	374.19	390.8983	391.1250
27	1023.09800	2.261543	1.508729	147955.772	972.04	57.9272	57.9608
36	1328.49900	2.936628	1.184166	116127.015	1424.71	26.9647	26.9804
45	1620.55800	3.582220	0.816639	80084.928	2092.77	12.4970	12.5043
54	1794.62300	3.966988	0.536290	52592.083	2859.86	6.6920	6.6959
63	1902.56500	4.205592	0.325255	31896.619	3893.13	3.6112	3.6133
72	1953.56400	4.318325	0.217074	21287.687	4893.22	2.2859	2.2872
81	1968.59400	4.351548	0.169592	16631.294	5578.58	1.7587	1.7597
90	1997.51000	4.415467	0.149478	14658.784	6029.37	1.5056	1.5065

3-6. "B" - BFV - Rubber seat - Q=2500

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	44.90866	0.099270	2.009432	197057.963	36.97	40042.2919	40065.5358
18	399.11390	0.882235	1.956667	191883.484	332.97	493.6613	493.9478
27	1054.97600	2.332009	1.683337	165078.968	948.92	60.7844	60.8196
36	1430.90400	3.162992	1.463532	143523.461	1380.32	28.7268	28.7435
45	1860.73500	4.113127	1.053370	103300.309	2115.75	12.2269	12.2340
54	2118.29900	4.682469	0.758583	74391.580	2838.29	6.7941	6.7981
63	2315.09900	5.117492	0.493177	48364.142	3847.15	3.6980	3.7002
72	2420.76600	5.351068	0.336956	33044.096	4866.73	2.3109	2.3122
81	2458.88700	5.435334	0.267623	26244.851	5546.87	1.7789	1.7799
90	2496.93400	5.519436	0.228953	22452.619	6089.82	1.4758	1.4767

4-1. "C" - BFV - Rubber seat - P=1psi

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	48.12327	0.106376	0.069574	6822.879	212.91	1207.3810	1208.0770
18	109.36337	0.241746	0.069920	6856.810	482.66	234.9435	235.0799
27	212.90079	0.470614	0.069674	6832.685	941.27	61.7764	61.8122
36	343.37540	0.759026	0.070403	6904.176	1510.23	23.9973	24.0110
45	531.23926	1.174297	0.069964	6861.125	2343.82	9.9632	9.9690
54	672.91262	1.487463	0.069875	6852.397	2970.76	6.2017	6.2053
63	958.71431	2.119224	0.070530	6916.630	4212.83	3.0839	3.0857
72	1292.30198	2.856615	0.069629	6828.272	5715.32	1.6756	1.6766
81	1782.16485	3.939449	0.070837	6946.737	7814.25	0.8963	0.8969
90	2427.21267	5.365318	0.070567	6920.259	10662.97	0.4814	0.4817

4-2. "C" - BFV - Rubber seat - Q=500

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	202.89921	0.448506	2.021300	198221.816	166.55	1973.2219	1974.3671
18	419.79163	0.927943	0.788472	77322.689	551.71	179.8145	179.9188
27	476.50366	1.053304	0.279556	27415.078	1051.73	49.4815	49.5101
36	490.90277	1.085133	0.126467	12402.176	1610.93	21.0908	21.1030
45	497.51287	1.099745	0.061356	6016.968	2343.93	9.9622	9.9680
54	498.79025	1.102569	0.035927	3523.235	3070.97	5.8036	5.8069
63	500.20485	1.105695	0.022106	2167.858	3926.08	3.5508	3.5528
72	500.87451	1.107176	0.014063	1379.109	4929.07	2.2528	2.2541
81	500.96762	1.107382	0.011223	1100.600	5518.62	1.7972	1.7982
90	501.66223	1.108917	0.009677	948.990	5951.18	1.5454	1.5462

4-3. "C" - BFV - Rubber seat - Q=1000

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	208.73941	0.461415	1.914400	187738.508	176.06	1765.7523	1766.7766
18	550.50149	1.216875	1.411946	138464.602	540.66	187.2437	187.3523
27	783.65495	1.732258	0.801998	78649.137	1021.20	52.4843	52.5148
36	879.85960	1.944917	0.485318	47593.438	1473.91	25.1945	25.2091
45	948.95688	2.097655	0.225707	22134.296	2331.01	10.0730	10.0788
54	975.27297	2.155827	0.119890	11757.193	3287.04	5.0657	5.0686
63	987.60787	2.183093	0.073866	7243.780	4240.67	3.0435	3.0453
72	995.54837	2.200645	0.042084	4127.031	5663.36	1.7065	1.7075
81	998.93139	2.208123	0.024517	2404.296	7445.09	0.9874	0.9880
90	1001.84213	2.214557	0.017482	1714.399	8842.53	0.7000	0.7004

4-4. "C" - BFV - Rubber seat - Q=1500

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	215.51124	0.476384	1.967331	192929.266	179.31	1702.3291	1703.3168
18	571.43451	1.263148	1.733385	169987.000	506.51	213.3380	213.4617
27	896.56485	1.981843	1.329216	130351.561	907.52	66.4566	66.4952
36	1144.75055	2.530454	0.869964	85314.325	1432.29	26.6800	26.6955
45	1319.11842	2.915892	0.497065	48745.425	2183.47	11.4803	11.4869
54	1410.90550	3.118786	0.270639	26540.619	3165.00	5.4639	5.4670
63	1450.41193	3.206114	0.163683	16051.819	4183.70	3.1270	3.1288
72	1473.59094	3.257351	0.091883	9010.644	5673.23	1.7005	1.7015
81	1491.41540	3.296752	0.049619	4865.962	7813.51	0.8965	0.8970
90	1497.40708	3.309996	0.030640	3004.758	9983.08	0.5492	0.5495

4-5. "C" - BFV - Rubber seat - Q=2000

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	250.23386	0.553138	1.977612	193937.487	207.66	1269.2727	1270.0089
18	654.44926	1.446650	1.811738	177670.805	567.41	170.0002	170.0988
27	970.31762	2.144873	1.587568	155687.237	898.71	67.7658	67.8051
36	1271.98203	2.811698	1.273238	124861.994	1315.52	31.6267	31.6450
45	1639.03055	3.623053	0.773738	75877.778	2174.51	11.5751	11.5818
54	1841.22579	4.070003	0.438918	43043.152	3243.29	5.2033	5.2063
63	1920.36698	4.244943	0.294743	28904.414	4127.94	3.2120	3.2139
72	1986.99193	4.392217	0.159879	15678.774	5799.25	1.6274	1.6284
81	2024.81109	4.475815	0.091193	8942.978	7824.82	0.8939	0.8944
90	1999.90960	4.420771	0.048760	4781.723	10569.39	0.4899	0.4902

4-6. "C" - BFV - Rubber seat - Q=2500

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	245.60109	0.542898	1.987546	194911.680	203.30	1324.2275	1324.9956
18	632.44916	1.398020	1.879899	184355.115	538.31	188.8815	188.9910
27	1096.33545	2.423433	1.634501	160289.792	1000.74	54.6518	54.6835
36	1487.22104	3.287480	1.375836	134923.421	1479.66	24.9989	25.0134
45	1882.92965	4.162188	0.941306	92310.585	2264.85	10.6701	10.6763
54	2123.47604	4.693913	0.615856	60394.842	3157.76	5.4890	5.4921
63	2293.18619	5.069054	0.373592	36636.860	4378.36	2.8551	2.8568
72	2400.92376	5.307207	0.216788	21259.640	6017.72	1.5114	1.5123
81	2447.84718	5.410930	0.126191	12375.110	8041.56	0.8464	0.8469
90	2502.77569	5.532349	0.071351	6997.143	10934.31	0.4578	0.4581

5-1. "C" - BFV - Metal seat - P=1psi

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	69.32005	0.153231	0.069060	6772.472	307.83	577.5854	577.9186
18	174.56660	0.385877	0.070292	6893.290	768.38	92.7022	92.7559
27	267.67380	0.591689	0.069584	6823.859	1184.19	39.0306	39.0531
36	407.74770	0.901320	0.070313	6895.350	1794.51	16.9964	17.0063
45	589.47590	1.303028	0.070934	6956.249	2582.91	8.2040	8.2088
54	761.64330	1.683601	0.070401	6903.980	3349.91	4.8773	4.8802
63	1053.54800	2.328852	0.069646	6829.939	4658.83	2.5217	2.5232
72	1399.97000	3.094613	0.071455	7007.342	6111.84	1.4652	1.4661
81	2345.80000	5.185356	0.069466	6812.287	10386.64	0.5073	0.5076
90	2421.80900	5.353373	0.067570	6626.353	10872.60	0.4630	0.4633

5-2. "C" - BFV - Metal seat - Q=500

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	294.06920	0.650036	1.291863	126688.483	301.93	600.3760	600.7243
18	439.63040	0.971797	0.457301	44845.909	758.68	95.0896	95.1447
27	476.94250	1.054274	0.205086	20112.066	1229.05	36.2334	36.2545
36	490.65770	1.084592	0.099571	9764.579	1814.61	16.6219	16.6316
45	497.31010	1.099297	0.055217	5414.938	2469.80	8.9727	8.9779
54	498.68150	1.102328	0.029069	2850.695	3413.32	4.6978	4.7005
63	500.51180	1.106374	0.018850	1848.554	4254.33	3.0240	3.0258
72	501.24030	1.107984	0.013281	1302.421	5075.85	2.1244	2.1257
81	501.53260	1.108630	0.008198	803.949	6464.21	1.3098	1.3106
90	502.41480	1.110581	0.006692	656.261	7167.16	1.0655	1.0661

5-3. "C" - BFV - Metal seat - Q=1000

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	359.26660	0.794154	1.748023	171422.498	317.11	544.2761	544.5920
18	689.21870	1.523508	1.080672	105977.721	773.71	91.4294	91.4824
27	836.25930	1.848539	0.635104	62282.426	1224.59	36.4979	36.5192
36	916.34170	2.025560	0.354975	34811.156	1794.86	16.9898	16.9997
45	956.47630	2.114277	0.201893	19798.940	2484.19	8.8691	8.8742
54	977.44010	2.160617	0.107261	10518.711	3482.90	4.5120	4.5146
63	987.61500	2.183108	0.058554	5742.186	4762.98	2.4126	2.4140
72	993.57370	2.196280	0.035847	3515.390	6124.10	1.4594	1.4602
81	1001.77900	2.214418	0.020434	2003.891	8178.36	0.8183	0.8188
90	1002.33100	2.215638	0.016106	1579.459	9216.84	0.6443	0.6446

5-4. "C" - BFV - Metal seat - Q=1500

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	345.06220	0.762755	1.899816	186308.306	292.15	641.2428	641.6151
18	789.81460	1.745874	1.470568	144213.457	760.07	94.7416	94.7966
27	1061.17400	2.345710	1.046758	102651.893	1210.41	37.3577	37.3793
36	1264.03200	2.794124	0.638381	62603.790	1846.24	16.0572	16.0665
45	1367.08300	3.021917	0.397403	38971.921	2530.76	8.5457	8.5507
54	1436.59800	3.175579	0.218278	21405.759	3588.41	4.2505	4.2530
63	1470.69800	3.250956	0.124636	12222.616	4861.53	2.3158	2.3172
72	1490.01500	3.293656	0.073081	7166.798	6432.20	1.3229	1.3237
81	1502.26200	3.320728	0.041553	4074.957	8600.35	0.7400	0.7404
90	1509.76700	3.337318	0.029959	2937.974	10179.32	0.5282	0.5285

5-5. "C" - BFV - Metal seat - Q=2000

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	370.22880	0.818385	1.936140	189870.473	310.51	567.6784	568.0077
18	792.79260	1.752456	1.709601	167654.586	707.59	109.3154	109.3789
27	1169.77300	2.585766	1.352387	132623.860	1173.88	39.7195	39.7425
36	1491.40700	3.296733	0.929383	91141.338	1805.38	16.7922	16.8020
45	1693.70400	3.743908	0.620120	60812.998	2509.98	8.6877	8.6928
54	1832.22700	4.050111	0.367610	36050.226	3526.60	4.4008	4.4034
63	1916.48500	4.236362	0.208187	20416.170	4901.73	2.2780	2.2793
72	1949.91100	4.310250	0.131740	12919.281	6269.41	1.3925	1.3933
81	1990.77900	4.400588	0.056852	5575.277	9743.61	0.5765	0.5768
90	1991.44200	4.402053	0.047828	4690.325	10626.73	0.4847	0.4850

5-6. "C" - BFV - Metal seat - Q=2500

open degree	flow rate (m ³ /hr)	velocity (m/sec)	Δp (kg/cm ²)	Δp (Pa)	Cv	Cv -> K	Cal K
9	371.36760	0.820903	1.960518	192261.138	309.52	571.3061	571.6374
18	843.10980	1.863682	1.795787	176106.546	734.22	101.5296	101.5885
27	1312.56400	2.901403	1.547675	151775.070	1231.26	36.1032	36.1241
36	1700.96100	3.759949	1.172400	114973.165	1833.27	16.2852	16.2946
45	1982.63800	4.382592	0.833557	81744.018	2534.23	8.5222	8.5272
54	2211.65100	4.888822	0.509497	49964.588	3615.90	4.1861	4.1886
63	2355.25600	5.206259	0.297045	29130.163	5043.11	2.1520	2.1533
72	2425.53100	5.361601	0.184974	18139.753	6581.45	1.2636	1.2643
81	2490.52600	5.505271	0.078961	7743.429	10343.20	0.5116	0.5119
90	2499.41600	5.524922	0.070374	6901.332	10995.22	0.4527	0.4530

감사의 글

대학교를 졸업한지 18년 만에 시작한 대학원 석사과정은 저에게 큰 도전이었고 처음엔 불가능해 보였습니다. 그러나 본 과정을 무사히 마무리하게 된 것은 함께 해준 선, 후배들이 있었기에 가능했습니다. 진심으로 감사드립니다. 그리고 본 논문이 완성되기까지 세심한 지도와 조언을 아끼지 않으시고 저에게 학문의 길을 열어 주신 이영호 지도교수님께 진심으로 깊은 감사를 드립니다. 아울러 부족한 논문을 바쁘신 와중에도 세심히 다듬어주신 오랜 은사님이시고 심사를 맡아 빛내주신 왕지석 교수님, 정재현 교수님께도 감사드립니다. 아울러 석사과정 2년 동안 전산유체해석(CFD)에 대한 많은 조언과 도움을 주셨던 최영도 교수님, 김범석 박사와 실험실에서 늘 반갑게 맞아준 최종웅, 최현준, 이낙중, 김지훈 후배님들에게 항상 고맙고 앞으로 하는 모든 일에 좋은 일만 있기를 기원합니다. 그리고 K-water 연구원의 김영준 박사, 박태진 과장, 인하대학교 신명섭 박사에게도 깊은 감사를 드리며 앞으로도 무궁한 영광과 건승이 함께하길 바랍니다. 그리고 저의 만학을 이끌어주신 김영도 본부장님, 배상식 처장님, 신경식 부장님, 박한영 부장님과 동료들에게 감사한 마음을 드립니다. 마지막으로 언제나 나를 믿고 묵묵히 힘이 되어준 사랑스런 아내 변선희, 자랑스러운 딸 정연주, 든든한 아들인 정영제 에게 멋진 아빠가 되고 싶었다는 말을 하고 싶고, 아직도 많이 부족하지만 그동안 느꼈던 고마움들을 많은 분들에게 베풀면서 살아갈 것이며 더 큰 발전을 위해 한 걸음 한 걸음 나아가는 도전적인 삶을 살도록 노력 하겠습니다.

2011년 12월 정승화 올림