

## 오리피스를 이용한 고차압 제어 버터플라이 밸브의 캐비테이션 저감에 관한 연구

### A Study on Reduction of Cavitation with Orifice on High Differential Pressure Control Butterfly Valve

이상범<sup>1\*</sup>

Sang-Beom Lee<sup>1\*</sup>

#### 〈Abstract〉

The exchange of goods over the sea is a situation in which the amount of trade between countries is gradually increasing. In order to maintain the optimal operating condition, the ship maintains stability and optimal operating conditions by inserting or withdrawing ballast water from the ballast tank according to the loading condition of cargo capacity is also increasing. Control valves play an important role in controlling fluid flow in these pipes. When the flow rate is controlled using a control valve, problems such as cavitation, flashing, and suffocating flow may occur due to high differential pressure, and in particular, damage to valves and pipes due to cavitation is a major problem. Therefore, in this study, the cavitation phenomenon is reduced by installing orifices at the front and rear ends of the high differential pressure control butterfly valve to reduce the sudden pressure drop at the limiting part of the butterfly valve step by step. The flow coefficient according to the shape of the orifice, the degree of cavitation occurrence, and the correlation were analyzed using a CFD(Computational Fluid Dynamics), and an optimal orifice design for reducing cavitation is derived.

*Keywords : Orifice, Cavitation, High Differential Pressure, Butterfly Valve, Control Valve*

---

<sup>1\*</sup> 정회원, 교신저자, 대우조선해양(주) 선박해양연구소, 책임연구원 <sup>1\*</sup> Corresponding Author, Ship and Ocean R&D Institute, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co. Ltd.  
E-mail: lsb7766@gmail.com

## 1. 서론

세계화 시대에 따라 지역과 국가를 넘나드는 국제적인 교류는 점점 증가하고 있으며, 해상을 통한 물자교류는 국가 간 무역량이 점차 증가하고 있다. 선박은 최적의 운항 상태를 유지하기 위해 화물의 적하 상태에 따라 밸러스트 탱크의 평형수를 넣거나 빼내어 선박의 안정성 유지와 최적 운항 조건을 유지하게 되는데, 이러한 선박의 대형화로 인해 평형수 처리를 위한 배관의 용량 역시 커지고 있다.

이러한 배관에서 유체 흐름의 제어에 중요한 임무를 수행하는 것이 제어 밸브이다. 이러한 제어 밸브는 공정 유체의 유동, 압력, 온도, 유량 등의 제어를 위해 설계된 기계설비로 다양한 산업에서 사용되고 있다. 밸브는 목적과 용도에 따라서 형식, 규격, 압력 등급에 맞게 설계가 된다. 앞서 언급한 바와 같이 선박의 대형화, 기능의 통합화 등으로 인해서 밸브의 기능적 요구사항 및 성능에 대한 요구 수준이 높아지고 있다. 제어 밸브를 이용하여 유량을 제어할 경우, 높은 차압으로 인해 캐비테이션, 플래싱, 질식유동 등과 같은 문제점이 발생할 수 있으며, 특히 캐비테이션 현상으로 인한 밸브와 배관의 파손이 큰 문제가 되고 있다.

캐비테이션은 밸브의 제한부에 의해서 밸브 전단과 후단의 압력 차이가 클 때 쉽게 발생할 수 있다. 밸브 국소 부위에서의 압력이 유체의 포화 증기압보다 낮아지게 되면서 기포가 발생하게 되며, 이렇게 발생한 기포는 밸브 후단으로 이동하면서 점차 압력이 회복된다. 압력이 포화 증기압 이상으로 회복되고, 이로 인해 발생하였던 기포가 붕괴하면서 주변에 큰 충격압, 소음, 진동을 발생시킨다. 이러한 캐비테이션 현상이 장기간 유지될 경우, 밸브 및 배관 시스템에 심각한 손상을 일으키는 원인이 된다.

버터플라이 밸브에 관한 연구는 주로 유량 제어에 따른 유동 특성 및 손실 계수 등에 대한 수치 해석적 연구가 수행되어왔다. Park[1]은 실험 계획법을 적용하여 구조해석과 유동해석을 수행하여 버터플라이 밸브의 압력손실계수와 응력을 고려한 특성치에 대해 평가하였고, Song[2]은 수치해석 기법을 이용해 밸브의 구조 분석 및 유동해석을 수행하여 버터플라이 밸브의 최적 설계를 수행하였으며, 실험을 통해 최적 설계의 정확성을 검증하였다. Rahmeyer[3]는 버터플라이 밸브에서 발생하는 소음을 실험적 데이터를 기반으로 캐비테이션의 감지 및 캐비테이션 단계에 따른 소음 한도에 관한 연구를 수행하였다. Hwang[4]은 버터플라이 밸브에서 발생하는 캐비테이션의 상태감시를 위해 Support Vector Machine 알고리즘을 이용하여 밸브의 캐비테이션 발생 여부를 판별하는 감시시스템을 제안하기 위한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 캐비테이션 발생의 억제를 위하여 버터플라이 밸브의 형상 설계개선을 통해 근본적인 캐비테이션의 저감이 이루어지면 좋으나, 실제 배관 시스템에 적용되는 경우 관로의 길이 및 형태, 난류 유동 등 다양한 요인에 의해서 유동 특성이 변할 수 있으며, 예상치 못한 캐비테이션이 발생하는 경우가 많다. 이러면 밸브의 설계 수정 또는 교체를 위해서는 큰 비용과 시간 등의 손실이 발생하게 된다. 이러한 문제 해결 방법의 하나로 배관 시스템에 오리피스를 설치하는 방법이 있다. 오리피스 설치를 통해서 밸브에서 발생하는 캐비테이션을 저감시킬 수 있으며, 오리피스를 사용할 경우 설치 및 교체 시간이 단축되고, 쉽게 오리피스의 설계 수정이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 고차압 제어 버터플라이 밸브의 전단 및 후단에 오리피스를 설치하여 버터플라이 밸브 제한부에서의 급격한 압력 강하를 단계적으로 감압시킴으로 인해 캐비테이션의 현상을 저감 하고자 한다.

오리피스의 형상에 따른 유량 계수, 캐비테이션 발생 정도 및 상관관계를 수치해석 프로그램을 활용하여 분석하고, 캐비테이션 저감에 우수한 조건의 오리피스 설계안을 도출하고자 한다.

## 2. 밸브의 유량 계수와 캐비테이션 지수

유량 계수는 밸브의 성능을 나타내는 대표적인 지표로 특정 조건에서 밸브 개도별 밸브를 통과하는 시간당 유량을 나타내며, 배관 시스템에 적절한 밸브를 선정할 때 유량 계수를 사용한다. 밸브 선정 시 배관 시스템에서 요구되는 유량보다 작은 유량 계수의 밸브를 선정하면 밸브 상류측에 압력이 집중되어 높은 압력이 발생하고 장비에 손상을 줄 수 있으며, 높은 압력 상태의 유동이 밸브를 통과하면서 캐비테이션 또는 플래싱 효과가 쉽게 발생할 수 있다. 반대로 배관 시스템에서 요구되는 유량보다 큰 유량 계수의 밸브를 선정하면 원하는 유량의 제어를 위해서 밸브를 저개도에서 운행하게 되므로 밸브의 구동부에 무리가 가해지며, 밸브의 크기 및 비용의 증가로 인해서 설치 및 유지적인 측면에서 문제점이 발생하게 된다. 때문에, 요구 유량 조건에 맞는 유량 계수를 갖는 밸브를 선정하는 것은 매우 중요하다.

유량계수는 15.6°C의 물이 1psi의 차압 조건으로 1분 동안 밸브를 통과한 물의 양을 1gallon 단위로 나타낸 것으로 정의하고 있으며, 기호로는  $C_v$ 로 나타낸다. IEC-60534-2-1의 정의에 따른 유량 계수  $C_v$ 의 계산 방법은 식 1과 같다[5].

$$C_v = \frac{Q}{8.65 \times 10^{-1}} \times \sqrt{\frac{\rho/\rho_0}{\Delta P}} \quad (1)$$

여기서,  $C_v$ 는 유량 계수,  $Q(m^3/h)$ 는 유량,  $\rho(kg/m^3)$

는 현재 기온에서의 물의 밀도,  $\rho_0(kg/m^3)$ 는 15도 상태에서의 물의 밀도,  $\Delta P(bar)$ 는 입력차를 각각 나타낸다.

유동 특성은 밸브의 개방 정도에 따른 유량 변화의 상관관계를 나타내며, 가장 일반적으로 많이 사용되는 3가지 유동 특성은 등비 유동(Equal Percentage), 선형 유동(Linear Percentage), 급개방 유동(Quick-Open Percentage)이다. 배관의 영향을 고려하지 않고 밸브의 형상 및 밸브에서 발생하는 압력 저하가 일정할 때의 유동 특성을 고유유동특성이라 한다. 하지만, 실제 유동 특성은 밸브의 몸체 형상, 배관은 물론 시스템 내 압력 저하 또는 압력 손실에 따라서도 크게 영향을 받으며, 이러한 영향들이 모두 고려된 유동 특성을 유효유동특성이라 한다.

또한, 밸브에서 캐비테이션은 일반적으로 유체가 밸브의 베나 축소부(Vena contracta)를 통과하면서 유동의 속도가 증가하고 압력은 저하된다. 압력이 저하됨에 따라서 액체는 팽창하기 시작하고, 증기압 이하로 압력이 낮아지면서 증기 기포가 발생하게 된다. 유체 내부에서 형성된 증기 기포는 밸브의 후단 하류측으로 이동하다가 압력이 증기압 이상으로 회복하면서 내파되기 시작한다. 이러한 과정을 캐비테이션이라고 하며, 캐비테이션 과정에서 발생하는 내파로 인해 소음 및 진동이 발생하고, 지속적인 내파 현상은 밸브 및 배관 시스템의 심각한 내부 손상을 일으킨다. 내파로 인한 충격파는 최대 6,900bar에 이른다고 보고된 바 있으며, 이러한 충격파로 인한 파손 부위의 표면은 마치 샌드블라스트를 한 것과 유사한 표면 형태를 가지게 된다. 그 때문에 재료 코팅막을 파손시키고, 모재를 화학 또는 부식조건에 쉽게 노출되도록 하기도 한다. 또한, 밸브의 기능적인 측면에서도 밸브를 통과하는 유량을 감소시키고 당초 설계된 유량 계수를 감소시키기도 한다.

밸브를 포함한 공정 장치에서의 캐비테이션 발생을 예측하기 위해서 캐비테이션의 발생 가능성을 나타내는 다양한 지표들이 제시되었다. 밸브 설계에 있어서 캐비테이션의 발생 가능성은 매우 중요한 설계 요건으로 캐비테이션의 발생이 예상되는 경우 밸브의 형상, 디스크, 플러그, 주변 배관 시스템 등의 변경을 통하여 캐비테이션의 발생을 낮추어야 한다.

밸브 산업에서는 오래전부터 유량과 압력저하 제공근 사이의 선형 상관관계에서 캐비테이션의 영향을 보여주는 캐비테이션 계수( $K_C$ )를 사용했으며, 식 2와 같이 계산한다. 오늘날에도  $K_C$ 는 캐비테이션의 발생 가능성을 나타내는 지표로 많이 사용되고 있으나,  $K_C$ 는 밸브를 손상 발생시킬 수 있는 사전질식(Pre choked)를 고려하지 않았다는 문제점이 있다[6]. 밸브에는 캐비테이션 계수( $K_C$ )보다 캐비테이션 지수( $\sigma$ )가 더욱 유용하게 사용되고 있다.  $\sigma$ 는 1995년 미국계측협회 ISA(Instrument Society of America)에 의해서 증명이 되었다.  $\sigma$ 는 일반적으로 캐비테이션을 발생시키려는 힘과 캐비테이션에 대항하는 힘의 비로서 나타내며 식 3과 같이 계산된다.  $\sigma$ 의 값이 클수록 밸브 내부의 캐비테이션 현상을 억제하려는 힘이 크고, 반대로  $\sigma$ 가 작을수록 캐비테이션의 발생 확률이 크다고 할 수 있다.  $\sigma$ 가 0 또는 음의 수가 되면 플래싱이 발생하는 것으로 간주한다.

$$K_C = \frac{P_1 - P_2}{P_1 - P_v} = \frac{\Delta P}{P_1 - P_v} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{P_2 - P_v}{P_1 - P_2} \quad (3)$$

여기서,  $K_C$ 는 캐비테이션 계수,  $P_1$  밸브 전단부 압력,  $P_2$ 는 밸브 후단부 압력,  $P_v$ 는 액체의 증기압,  $\sigma$ 는 캐비테이션 지수를 각각 나타낸다.

### 3. 수치해석 및 오리피스 조합 설정

#### 3.1 해석 모델

Fig. 1은 본 연구에 사용된 고차압 제어용 버터플라이 밸브의 형상으로 Class 300 100A의 편심형 버터플라이 밸브와 디스크 형상을 나타내고 있다. Fig. 2는 버터플라이 밸브에서 발생하는 캐비

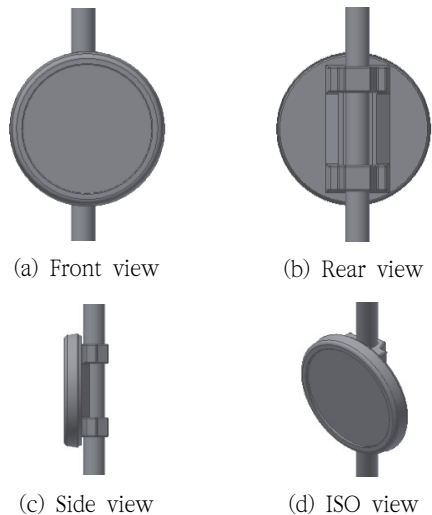


Fig. 1 3D modeling of the butterfly valve disc

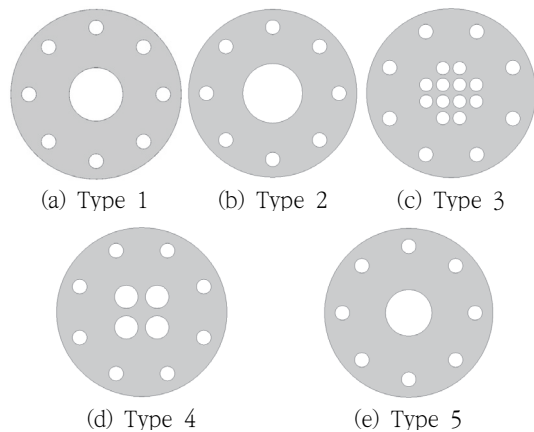


Fig. 2 Type of orifices by shape

Table 1. Dimensions of orifice shape

Type	1	2	3	4	5
No. of Bore	1	1	12	4	1
Bore Dia. (mm)	80	90	20	35	70
Bore total cross-section area (mm <sup>2</sup> )	5027	6362	3770	3848	3848
Area ratio	0.65	0.8	0.5	0.5	0.5
Orifice-thickness (mm)	10				

테이션을 저감 시키기 위한 오리피스의 형상을 나타낸다. 오리피스 홀 개수, 홀 직경, 홀 전체면적이 다른 5가지의 오리피스를 사용하여 연구를 수행하였으며, 오리피스의 기본적인 제원은 Table 1과 같다. Area ratio는 본 연구에서 사용된 100A 크기의 배관 내부의 유동이 흐르는 단면적과 오리피스의 홀의 전체 단면적의 비를 상대적으로 나타낸 비율로 정의한다.

### 3.2 경계 조건

본 연구에서는 Standard k-ε 난류 모델을 사용하였으며, 배관 및 밸브의 벽면은 Non-Slip 점성 유동으로 설정하였다. 적용 유체는 25°C의 물을 사용하였으며, 해석영역은 발달 유동이 충분히 생성될 수 있도록, 밸브를 기준으로 전단 11D, 후단 21D의 파이프 길이를 생성하였으며, 파이프의 직경은 밸브의 직경과 동일하게 100A의 파이프를 적용하였다. 밸브의 주요 성능 지표인 유량 계수 측정 및 밸브 사용 조건에서의 캐비테이션 지수 분석을 위해서 2가지 조건으로 경계 조건을 부여하고 수치해석을 각각 진행하였다. 첫째, 유량 계수 측정을 위해서는 밸브의 호칭 직경을 기준으로 전단 2D의 지점에서 3bar의 압력, 후단 6D의 지점에서 2.5 bar의 압력이 발생 되도록 압력을 설정하여 유동 조건을 설정하였다. 둘째, 캐비테이션 지수 및 캐비테이션 발생 정도를 측정하기 위

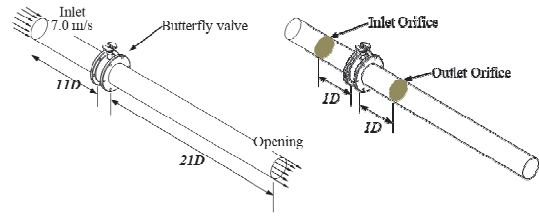


Fig. 3 Boundary condition of simulation

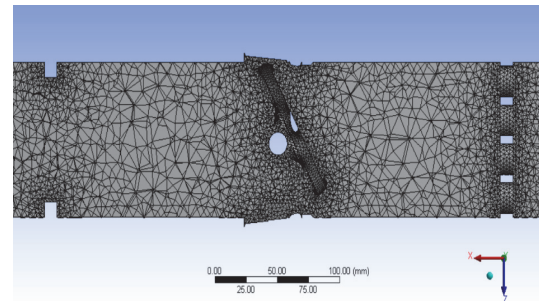


Fig. 4 3D mesh model including pipe system, orifice and butterfly valve

해서 밸브의 사용 조건인 유동의 유입 속도 7m/s, 출구 측은 대기압 조건으로 설정하였다. 본 연구에 사용된 경계 조건을 Fig. 3에 도시하였다.

Fig. 4는 본 연구에 적용된 격자계를 나타낸 그림으로 다면체 격자(polyhedral elements)를 이용하여 배관과 밸브, 오리피스의 격자를 구성하였다. 밸브와 오리피스의 격자 크기는 3 mm, 주변부의 크기는 10 mm를 적용하였으며, 생성된 노드는 약 12 만개, 생성된 요소 수는 약 65 만개이다.

### 3.3 수치 해석 모델의 적합성 검증

본 연구에 사용된 해석프로그램 및 수치해석 조건의 검증을 위하여 버터플라이 밸브의 유량 계수와 캐비테이션 지수를 실험을 통해 측정하였으며, 유동해석 프로그램을 이용한 수치해석 결과와 실험값 비교를 통해 수치해석 접근방법의 정확성

**Table 2. Comparisons of valve flow coefficient and cavitation index between CFD and Experimental results**

Disc angle	30 deg.		70 deg.	
	$C_v$	$\sigma$	$C_v$	$\sigma$
CFD	80.9	0.044	262.2	0.637
Exp.	77.5	0.042	251.5	0.612
Error (%)	4.39	4.76	4.25	4.08

을 검증하였다. 밸브의 유량 계수를 구하기 위하여 KS 규격인 KS B 2101 : 밸브의 용량계수 시험 방법을 참조하여, 규격에서 제시하는 시험 장비 구성 및 시험 절차를 준수하여 시험을 진행하였다. 캐비테이션 지수는 밸브의 호칭 직경을 기준으로 전단 1D 위치와 후단 5D 위치에서 압력을 측정된 후, 위의 식 3의 계산 방법을 이용하여 캐비테이션 지수  $\sigma$ 를 구하였다. 이를 통해 측정된 실험값과 수치해석의 결과는 Table 2와 같다.

밸브 개도 30 deg와 70 deg에서 유량 계수와 캐비테이션 지수를 구하여 비교해본 결과 오차가 5% 이내인 것을 확인하였다. 이는 수치해석 조건의 설정 및 해석의 타당성이 충분하다고 판단되며, 이후의 연구는 위의 수치해석 조건을 적용하여 오리피스와 형상 및 위치에 따른 캐비테이션의 저감 효과와 유동 특성 분석을 수치해석 프로그램을 활용하여 진행하였다.

### 3.4 오리피스와 밸브의 조합

고차압 제어 버터플라이 밸브의 캐비테이션 저감을 위하여 오리피스를 배관 시스템에 설치하고 이로 인한 캐비테이션의 저감 효과와 밸브의 유동 특성의 변화를 확인하기 위해서 CFD 유동해석 프로그램을 사용하여 결과를 분석하였다. Fig. 2의 5가지 형상의 오리피스를 밸브의 전단과 후단에 1개씩 조합하여 사용하였다. Type 1~Type 2는

**Table 3. Combination of orifice for CFD**

Cases	Inlet orifice	Outlet orifice
No orifice	-	-
Case 1	Type 1	-
Case 2	Type 2	-
Case 3	-	Type 3
Case 4	-	Type 4
Case 5	-	Type 5
Case 6	Type 1	Type 3
Case 7	Type 1	Type 4
Case 8	Type 1	Type 5
Case 9	Type 2	Type 3
Case 10	Type 2	Type 4
Case 11	Type 2	Type 5

밸브의 전단부에 공칭 직경 1D만큼의 거리에 설치하였으며, Type 3~Type 5는 밸브의 후단부에 공칭 직경 1D만큼의 거리에 설치하였다. 전단 및 후단에 오리피스가 없는 경우를 포함하여 전단 3가지 경우, 후단 4가지 경우를 조합하여 총 12 Case를 Table 3과 같이 설정하였다.

## 4. 결과 분석

### 4.1 유동해석 결과

고차압 제어 버터플라이 밸브의 개도가 저개도 열림 상태인 30 deg와 고개도 열림 상태인 70 deg에서의 유동해석 결과의 일부를 Fig. 5에 도시하였다. 유동 내부의 절대 압력이 액체의 포화증기압보다 낮아지는 압력 구간에서 기포가 발생하는 것을 고려하여 적용 유체의 포화증기압인 2.33 kPa 이하의 압력 분포 구간을 캐비테이션 발생 구간으로 가정하고 ISO-Surface를 이용하여 volume 을 측정하였다.

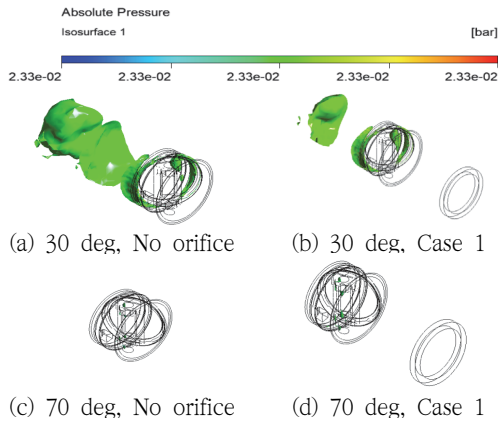


Fig. 5 Cavitation volume distribution

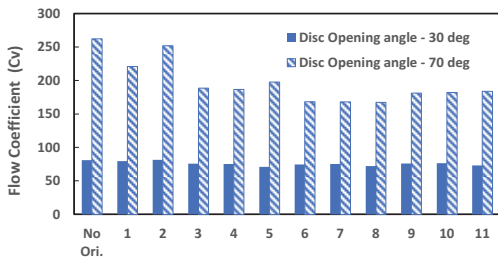


Fig. 6 Flow coefficient at 30 deg and 70 deg

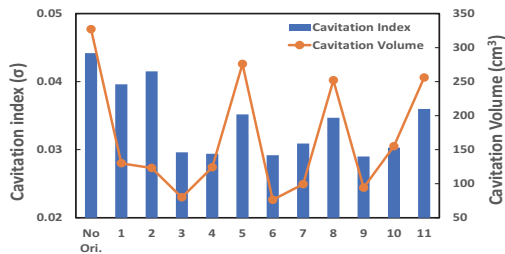


Fig. 7 Cavitation characteristic at 30 deg

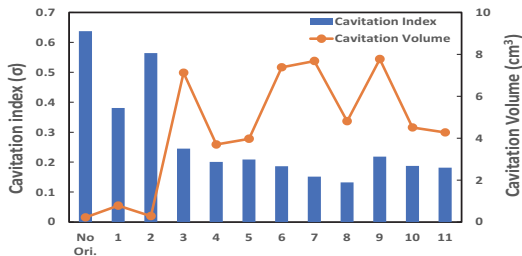


Fig. 8 Cavitation characteristic at 70 deg

각각의 유동해석의 결과로부터 오리피스를 조합한 12가지 Case에서의 열림 각도 30 deg와 70 deg에서의 유량 계수를 Fig. 6에 도시하였고, 각각의 열림 각도에 대한 캐비테이션 지수와 캐비테이션 volume을 Fig. 7과 Fig. 8에 도시하였다.

밸브의 디스크가 30 deg 개방된 경우, 각 Case 별 유량 계수는 오리피스가 없는 경우 대비 약 10% 내외의 감소를 하고 있으며, 대체로 균일한 값을 나타내고 있다. 이러한 결과는 밸브의 디스크 개방으로 인한 유로 확보가 매우 작으므로, 오리피스의 유무 및 형상에 대한 영향을 크게 받지 않는 것으로 판단된다. 반면 밸브의 디스크가 70 deg만큼 개방된 경우, Case 8의 유량 계수는 밸브만 있을 때의 약 65% 수준으로 오리피스가 유량의 흐름에 방해요인으로 작용하는 것을 확인할 수 있다. 저개도와 고개도 모두 같이 Case 3~Case 5의 결과가 유사하며, Case 6~Case 8, Case 9~Case 11의 값이 각각 유사함을 확인할 수 있다. 이를 통해 오리피스의 전체 홀 면적이 같으면 홀의 크기와 개수가 유량 계수에 주는 영향은 매우 미미한 것으로 판단된다.

밸브의 디스크가 30 deg 개방된 경우, Case 6에서 가장 적은 캐비테이션 volume이 발생하였으며, 이는 No orifice에서의 캐비테이션 volume의 약 26% 수준으로 오리피스의 설치로 인하여 캐비테이션의 발생을 억제하는 효과가 나타남을 확인할 수 있다. 또한, 캐비테이션 volume 분포 및 속도 분포를 보면 No orifice의 경우 밸브의 후단에서 소용돌이가 크게 발생하는 것을 볼 수 있으며, 캐비테이션이 밸브 후단에서 크게 형성되는 것을 보았을 때, 캐비테이션으로 인해 내파가 발생하고, 내파의 영향으로 소용돌이가 함께 발생하는 것으로 추측이 된다. 오리피스가 설치된 경우, 밸브와 후단 오리피스의 사이에서 소용돌이의 발생이 적게 형성되며 오리피스의 후단에서 소용돌이와 캐비테이션이 발생함을 확인할 수 있다.

Case 6과 Case 9의 속도 분포를 확인하면, 오리피스 후단에서 소용돌이가 발생하지 않고 유동이 안정적으로 형성되는 것을 확인할 수 있다. 오리피스의 홀의 개수가 많을수록 캐비테이션의 발생을 저감 시키고, 후단 배관의 유동 흐름을 안정화하는 것으로 판단된다.

밸브의 디스크가 70 deg 개방된 경우, 오리피스 설치된 Case에서 전부 캐비테이션이 No orifice보다 높게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 버터플라이 밸브의 특성상 높은 개도에서는 디스크로 인한 유동 흐름의 방해가 작고, 30 deg 수준의 저개도에서 캐비테이션이 많이 발생하므로, 캐비테이션의 저감 효과를 위한 오리피스의 설치는 저개도에서의 효과가 극대화되도록 설계하는 것이 바람직하다고 판단된다.

버터플라이 밸브의 캐비테이션 저감을 위한 오리피스를 설계하기 위해서 오리피스 홀 전체 단면적과 홀 개수가 주요 파라미터라고 판단된다. 홀 전체 단면적을 통해서 유량 계수를 조절하고, 홀 개수를 통해 캐비테이션 현상을 저감 시킴으로 인해서 밸브의 교체 없이 캐비테이션 저감 및 유동 특성 개선을 위한 오리피스의 최적 설계가 가능할 것으로 기대된다.

### 4.2 상관관계 분석

피어슨 상관계수(Pearson Correlation Coefficient)

를 적용하여 오리피스의 형상과 캐비테이션 저감 효과에 대한 상관관계를 분석하였다. 통계학에서 피어슨 상관계수란 두 변수 간의 선형 상관관계를 계량화한 수치를 말한다. 피어슨 상관계수는 코시-슈바르츠 부등식에 의해 +1과 -1 사이의 값을 가지며, +1은 완벽한 양의 선형 상관관계를 나타내며, 0은 선형 상관관계가 없음을 나타내고, -1은 완벽한 음의 선형 상관관계를 나타낸다. 피어슨 상관계수는 동간척도나 비례 척도의 데이터에서 두 변수의 공분산을 표준 편차의 곱으로 나눈 값으로 식 4와 같이 계산한다. 여기서,  $x$ 와  $y$ 는 변수를 말하며,  $\bar{x}$ 와  $\bar{y}$ 는 평균값을 의미한다.

$$r = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}} \quad (4)$$

밸브의 후단에 장착되는 오리피스 Type 3~Type 5는 오리피스의 전체 홀 단면적을 같게 설계하였으며, 오리피스의 홀 직경과 개수를 조정하였다. 오리피스 홀의 직경이 작은 경우는 홀의 개수를 늘려서 전체 홀 단면적이 같도록 설정하였으며, 오리피스 전체 단면적이 같다는 전제 조건에서 오리피스의 홀 직경과 오리피스로 인한 캐비테이션 저감 효과의 상관관계를 분석하기 위하여 오리피스 홀 직경과 Cavitation volume을 두 변수  $x$ 와  $y$ 로 설정하고 피어슨 상관계수를 구하였다. 밸브의 개도가 저개도인 경우와 고개도인 경우의

Table 4. Pearson correlation coefficient at 30 deg and 70 deg

Deg.	Inlet orifice	None			Type 1			Type 2		
	Outlet orifice	Type 3	Type 4	Type 5	Type 3	Type 4	Type 5	Type 3	Type 4	Type 5
30 Deg.	x variable (Bore diameter)	0.2	0.35	0.7	0.2	0.35	0.7	0.2	0.35	0.7
	x variable (Cavitation volume)	79.9	12.4	276	76.3	99.4	252	94.1	155	256
	Pearson Correlation Coefficient	0.98			0.98			0.99		
70 Deg.	x variable (Bore diameter)	0.2	0.35	0.7	0.2	0.35	0.7	0.2	0.35	0.7
	x variable (Cavitation volume)	7.12	3.7	3.97	7.38	7.68	4.81	7.77	4.51	4.27
	Pearson Correlation Coefficient	-0.68			-0.92			-0.77		



상관계수는 반대의 성향을 나타냈으며, 저 개도에서는 양의 상관관계, 고 개도에서는 음의 상관관계를 나타냄을 확인할 수 있었다. 즉, 오리피스 직경이 증가하면 저 개도에서는 캐비테이션이 증가하고, 고 개도에서는 감소함을 확인할 수 있었다. Table 4는 오리피스 홀 직경과 Cavitation volume의 상관계수 결과이다.

## 5. 결론

본 연구를 통하여 고차압 제어 버터플라이 밸브의 전·후단에 오리피스를 설치하고 오리피스의 형상 변화에 따른 밸브의 유량 계수와 캐비테이션 volume을 측정하고 분석하였다.

1. 실험 결과와 CFD 유동해석 결과를 비교한 결과 5% 이내의 오차 수준을 보였으며, CFD 유동해석을 위한 경계 조건 설정 및 해석 결과값의 신뢰성을 확보하였다.
2. 유량 계수의 경우 저개도에서는 오리피스의 유무 및 형상에 따른 변화가 10% 수준으로 오리피스로 인한 변화가 미미함을 확인하였으며, 고개도에서는 오리피스의 면적 비가 적을수록 오리피스가 유동의 진행에 방해 요소로 작용하여 유량 계수가 감소함을 확인할 수 있었다.
3. 버터플라이 밸브의 전단과 후단에 오리피스 설치를 통하여 캐비테이션 발생량을 75% 저감 시킬 수 있었다.
4. 오리피스의 전체 면적비가 같은 경우, 저개도는 다공 오리피스, 고개도는 단공 오리피스가 캐비테이션 저감 효과가 뛰어난을 피어슨 상관계수를 통해 확인할 수 있었다.

본 연구는 고차압 용 버터플라이 밸브에서 빈

번히 발생하는 캐비테이션 현상이 저감될 수 있도록 오리피스의 형상에 따른 유동 특성과 캐비테이션 발생 정도를 분석하였다. 오리피스 설계를 위한 주요 파라미터가 오리피스 홀 전체 단면적과 홀의 개수임을 확인하였다. 이를 통해 버터플라이 밸브에 요구되는 유동 특성 개선 및 캐비테이션 저감에 효과적인 오리피스의 최적 설계를 위한 기초 연구 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- [1] Y. C. Park, J. S. Choi, and J. Kang, "A Optimization of Butterfly Valve using the Characteristic Function", Journal of the Korea Society of Ocean Engineers. vol. 19, no. 3, pp. 59-65, (2005).
- [2] X. G. Song, L. Wang, S. H. Baek, and Y. C. Park, "Multidisciplinary optimization of a butterfly valve". ISA Transactions, vol. 48, no. 3, pp. 370-377, (2009).
- [3] W. J. Rahmeyer, "Cavitation noise from butterfly valves", Nuclear Engineering and Design, vol. 72, no. 3, pp. 297-301, (1982).
- [4] W. W. Hwang, M. H. Goh, and B. S. Yang, "Cavitation Condition Monitoring of Butterfly Valve Using Support Vector Machine", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, vol. 14, no. 2, pp. 119-127, (2004).
- [5] International Electrotechnical Commission, "Industrial-process control valves - Part 2-1: Flow capacity - Sizing equations for fluid flow under installed conditions", IEC 60534-2-1, (2011).
- [6] H. Y. Park, T. H. Jeong, and J. G. Choi, "Valve-Actuator A to Z", Hongneung Publishing Company, vol. 1, pp. 293-296, (2013).