

# 유동-구조 연성해석 기법을 이용한 초대형 버터플라이 밸브의 구조 안전성 평가

## The Structural Safety Evaluation for Butterfly Valve of Extra-large Type using Fluid-Structure Interaction Techniques

\*이성민<sup>1</sup>, 박영철<sup>2</sup>, 조영직<sup>1</sup>

\*S. M. Lee<sup>1</sup>, #Y. C. Park (parkyc67@dau.ac.kr)<sup>2</sup>, Y. J. Jo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>동아대학교 대학원 기계공학과, <sup>2</sup>동아대학교 기계공학과

Key words : Butterfly Valve of Extra-large Type, Fluid-Structure Interaction Techniques, Eccentric Type, Finite Element Analysis

### 1. 서론

버터플라이 밸브(butterfly valve)는 대형 건물이나 산업체에서 유량의 분배 및 제어에 사용될 뿐만 아니라, 각종 엔진의 흡입 공기유량의 제어에도 널리 쓰이고 있다. 버터플라이밸브는 구조가 단순하고 가벼우며 가격이 저렴하고 제어특성도 우수하여 산업용과 선박용으로 많이 사용되고 있다. 특히 Butterfly Valve는 타 밸브에 비하여 공간을 작게 차지하며, 전개에서 전폐의 위치로 전환이 매우 빠르다는 장점이 있다. 또한 최근에는 밸브의 재질이 발달함에 따라 초저온 천연가스의 유량조절과 핵처리장치, 폐지 밸브 등의 특수용도에 이르기까지 폭넓게 사용되고 있다.

이러한 고온, 고압의 환경조건에서 사용하는 밸브는 기능성과 안전성이 보장되어야 한다. 그러기 위해서는 Butterfly Valve의 구조적 안전성을 확보하면서 밸브의 유동특성을 고려하여야 한다.

Butterfly Valve는 여러 가지 산업공정에서 기체 또는 유량의 흐름을 제어하는 유량 제어 장치로 사용된다. Butterfly Valve는 배관 내 유체흐름 방향에 수직방향을 중심축으로 금속 재질의 Disc로 이루어지며, Shaft가 회전하여 Disc와 밸브 Body내의 Seat가 접촉하여 유체의 흐름을 밀폐 시킨다.

Butterfly Valve의 구조적인 측면에서는 중심형(concentric type) 버터플라이 밸브에서 작동성을 고려한 구조를 가지는 2중 편심형(double eccentric type)으로 변경되었으며 현재는 보다 한걸음 발전시킨 중심축 이동이 3차원인 3중 편심형(triple eccentric type) 구조로 발전 되었다. 수요적인 측면을 살펴볼 때 1000 mm 이하의 소형 Butterfly Valve 시장은 중심형, 편심형이 혼용되어 사용하고 있어 전 세계에서 치열한 경쟁 상태를 유지하고 있으나 1200 mm 이상의 초대형 Butterfly Valve 시장에서 편심형 Butterfly Valve는 여러 가지 기술적인 문제점으로 인해 몇몇 외국 2~3개 업체만이 제작하고 있는 상황이다.

본 논문에서는 이러한 기술적인 문제점을 해결하기 위해서 Computer Simulation을 이용하여 유동 특성을 알고, 유동해석에 의한 동적인 결과 값을 구조 해석에 적용하여 FSI 기법을 이용한 초대형 Butterfly Valve의 구조 안전성 평가를 실시하였다.

### 2. 이론적 배경

#### 2.1 연성해석의 개요

일반적으로 수행되는 단일 장(field)의 해석은 다른 장에 의한 영향을 무시하고 수행하는 해석이다. 반면에 다른 장의 상태가 명확히 목적의 결과에 영향을 주고 있으며, 또한 결과에 지배적인 영향을 미치고 있는 해석문제를 연성해석문제라 한다.

이러한 연성문제는 열-구조(heat-structural) 연성해석문제, 유체-구조(fluid-structural) 연성해석 문제 등을 예로 들 수가 있다. 전자는 열해석에 의한 온도분포를 구조해석의 온도하중으로 적용하는 것이고, 후자는 유체해석에 의한 정수압을 구조해석의 압력하중으로 적용하는 것이다. Butterfly Valve의 해석의 경우는 유동-구조 연성해석을 사용하는 것이 적합하다.

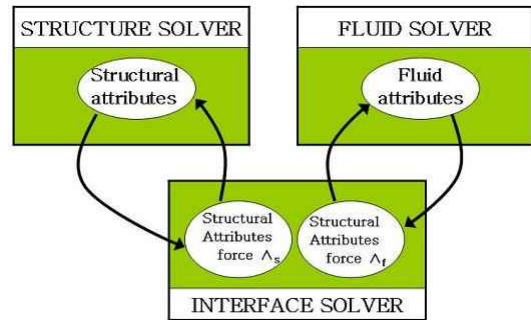


Fig. 1 Interaction Analysis by Three Modular Analyzers

#### 2.2 유동-구조 연성해석

연성해석에서의 상호 경계면에 대한 식은 일반적으로 유동모델의 결과 값이 구조물에 압력으로 작용하는 것을 식으로 표현하는 것을 뜻한다. 최근에는 2개 이상의 영역에서의 상호작용을 해석하는 연성해석 분야가 다중해석에서 새로운 시도가 되고 있으며 각각의 영역에서의 모델의 능력을 모듈화 시킬 뿐만 아니라 가능한 유동-구조 상호 영역에서 나뉜 모듈들을 상호 연계시키기 위해서 매우 중요하다.

따라서 유동-구조 연성해석 방정식은 이러한 나누어진 해석방정식을 같이 합쳐서 만들어진 것이라고 할 수 있다.

FSI(Fluid-Structure Interaction) 국부 해석 방정식은 라그랑지 상수(Lagrange multiplier)를 이용해서 연성해석 방정식을 만드는 방법은 라그랑지 상수의 기본 개념을 설명하면서 표현하였다. 따라서 유동-구조 연성해석 방정식에 대한 수식 (1)은 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\begin{cases} \begin{Bmatrix} u_{fb} \\ u_{sb} \end{Bmatrix} - L_a u_b = 0 \Rightarrow B_l^T u - L_b u_b = 0, u = \begin{Bmatrix} u_s \\ u_f \end{Bmatrix}, \quad (1) \\ L_b = B_l^T L = \begin{bmatrix} L_{bs} \\ L_{bf} \end{bmatrix}, B_l = \begin{bmatrix} B_s & 0 \\ 0 & B_f \end{bmatrix} \end{cases}$$

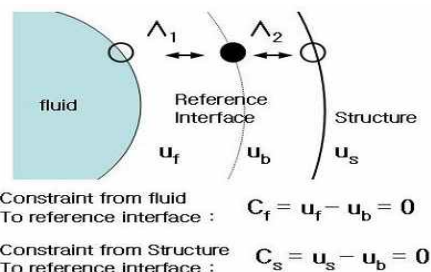


Fig. 2 Fluid-Structure Interface descriptions

만약 유체의 영역이 구조 영역과 Fig. 2처럼 나누어져 있을 경우 이때 부합하는 에너지 방정식 (2)은 다음과 같다. 여기서  $\mathcal{F}$ 은 강제 규칙 연산자이다.

$$\begin{aligned} \Pi(u, \lambda_b, u_b, \mu) &= u^T \left( \frac{1}{2} K u + M \ddot{u} - F \right) + \mu^T \varphi_f^T u_f \quad (2) \\ &+ \lambda_l^T \mathcal{F}^T (B^T u - L_b u_b), \quad \mathcal{F} = \begin{bmatrix} \mathcal{F}_s & 0 \\ 0 & \mathcal{F}_f \end{bmatrix} \end{aligned}$$

### 3. FSI 기법을 이용한 구조 안전성 검토

#### 3.1 유동해석

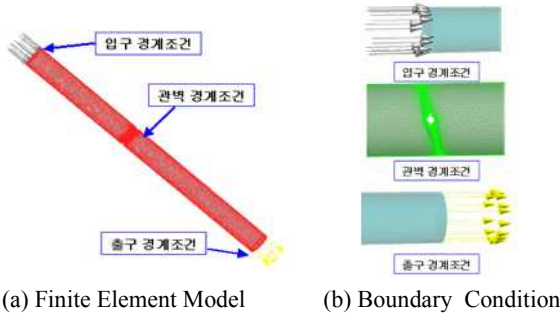


Fig. 3 FE Model & Boundary Condition of Fluid-Analysis

초대형 Butterfly Valve의 유동해석을 수행하기 위해 범용 CFD 프로그램인 CFX 11.0을 이용하였으며, 사용요소는 사면체요소와 프리즘(prism)요소를 사용하였다.

Fig. 3은 밸브가 15° 열렸을 때 유한요소모델을 생성하여 하중조건과 구속조건을 부여한 모습을 나타내고 있다. 내부 유체는 비압축성 유체인 25°C 상온의 물을 사용하였으며, 유동장은 레이놀드수가 4000을 넘는 난류거동을 하므로 난류유동 모델인  $k-\epsilon$  모델을 이용하여 계산하였다. 유동장 입구에 밸브의 사용되는 최고속도인 3m/s를 적용하였고, 출구는 대기압으로 설정하였다.

#### 3.2 유동해석의 결과

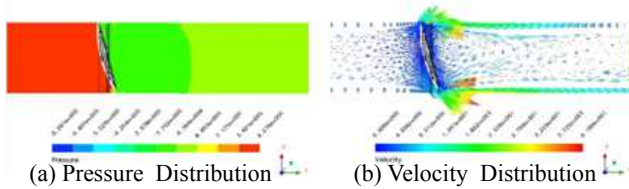


Fig. 4 Result of Fluid Analysis

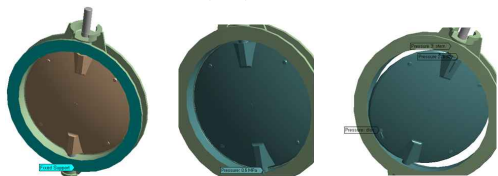
Fig. 4는 밸브의 CFD 해석을 통해 내부에 흐르는 유체의 유동특성 중에서 압력분포와 속도분포를 나타낸 것이다.

Table 1에서는 유동해석을 통한 압력과 속도의 최고값을 나타내었다. 최고압력은 4.676e+005Pa이고, 최고 속도는 41.9m/s이다. 위의 유동해석 결과를 바탕으로 초대형 Butterfly Valve가 15° 열렸을 때의 유동특성을 알 수 있다.

Table 1 Distribution of Pressure & Velocity

	Max Pressure(Pa)	Max Velocity(m/s)
Open Valve (15°)	4.676e+005	4.19e+001

#### 3.3 유동-구조 연성해석(FSI)



(a) Fix Support (b) Static Pressure (c) Dynamic Pressure

Fig. 5 Boundary Condition of Structure-Analysis

CFD 해석을 통한 유동해석 결과 값을 이용하여 초대형 Butterfly Valve의 구조 안전성 평가를 실시하였다.

Fig. 5는 구조해석에 필요한 하중조건 및 경계조건을 나타내었다. (a)는 Body의 Flange 양면에 완전구속을 주었고, (b)는 밸브가 닫혔을 경우의 사용압력인 정적압력 6Bar를 유체가 닿는 Body 내부와 Disc 한쪽 면에 적용하였다. (c)는 밸브가 열렸을 경우 이때 CFD 해석을 통한 동적압력을 적용하였다.

#### 3.4 연성해석의 결과

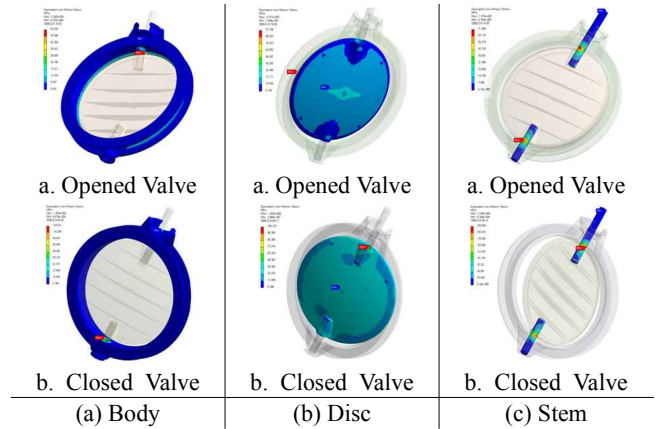


Fig. 6 Result of Fluid-Structure Analysis

Fig. 6에서 연성해석에 의한 밸브의 각 부품의 응력분포를 나타낸 것이다.

밸브가 닫혔을 때 최대응력의 경우, Body는 53.43MPa, Disc는 97.21MPa이고 Stem은 71.07MPa이다. 밸브가 열렸을 때에는 Body는 124.03MPa, Disc는 108.27MPa이고 Stem은 228.96MPa이다.

Table 2는 각 부품에 작용하는 최대응력을 나타낸 것이다. Table 2에서 보듯이 각 부품의 최대응력은 밸브가 열렸을 경우에 발생하는 것을 알 수 있다.

Table 2 Max Stress of Analysis Result

	Yield Stress(MPa)	Max Stress(MPa)	Safety Factor(-)
Body	240	124.03	1.94
Disc	240	108.27	2.22
Stem	800	228.96	3.49

### 4. 결론

본 논문에서는 유동-구조 연성해석(FSI)에 대해 수치해석적 기법을 이용하여 초대형 Butterfly Valve의 구조 안전성 평가를 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유동-구조 연성해석(FSI) 메커니즘에 대하여 라그랑지 상수(Lagrange Multipliers)를 이용하여 수식적인 방정식을 제시하였다.
- (2) 범용 FE 프로그램을 이용하여 FSI 기법이 사용된 해석을 수행하여 초대형 Butterfly Valve에 대한 구조 안정성 평가를 실시하였다.
- (3) 연성해석 결과 안전성 확보에 필요한 밸브에 각 부품의 안전율이 2.0에 상응하므로, 초대형 Butterfly Valve의 구조 안전성이 확보되었다.

### 후기

본 연구는 산업자원부 지정 지역혁신센터사업 신소형제강공정정공정개발연구센터 지원으로 수행되었음.

### 참고문헌

1. F. Lin and G. A. Schohl, "CFD prediction and validation of butterfly valve hydrodynamic force", World Water Congress (2004), pp.
2. E. Walhorn, A. Köllke, B. Hübner, D. Dinkler, "Fluid-structure coupling within a monolithic model involving free surface flows", Computer and Structures 81, pp2100-2111, 2005.
3. ANSYS CFX 11.0 User's Manual, ANSYS, Inc.
4. 공형걸, 박영철, "보강재를 이용한 중심형 버터플라이 밸브 디스크에 대한 안전성 평가", 한국정밀공학회지, 483-484, 2007.