

# 전산 시뮬레이션 기반의 위상최적설계에 의한 경량 밸브디스크의 구조적 안전성

김태형<sup>†</sup>

청주대학교 항공학부 항공기계공학전공

(2020년 8월 21일 접수, 2020년 9월 14일 수정, 2020년 9월 16일 채택)

## Structural Safety of Lightweight Valve Disc by Topology Optimization Design based on Computational Simulation

Taehyung Kim<sup>†</sup>

Major of Aeronautical & Mechanical Engineering, Division of Aeronautics, Cheongju University

(Received 21 August 2020, Revised 14 September 2020, Accepted 16 September 2020)

### 요 약

본 연구에서는 유동해석 및 구조해석을 수행하여 위상최적화에 의해 설계된 버터플라이 밸브 디스크의 구조적 안전성을 살펴보았다. 유동해석을 수행하여 유량계수의 변화와 공동현상을 예측하였으며, 구조해석 후 강도 및 강성의 유효성을 확인하였다. 유동해석 후 열림각이 커질수록 유량계수가 비선형적으로 증가하다가 완만한 경사를 보였고, 열림각이 12° 일 때 공동화 현상을 예측할 수 있었다. 구조해석 후 경량 디스크의 유효응력이 재료의 항복강도보다 작았으며, 최대변형량도 선행연구의 보수적 변형량보다 작았다. 궁극적으로 전산해석에 기초한 경량 밸브 디스크의 구조적 안전성이 유효함을 확인하였다.

**주요어** : 위상최적화, 버터플라이 밸브, 경량 디스크, 전산시뮬레이션, 구조적 안전성

**Abstract** - In this study, flow and structural computational analysis were performed to investigate the structural safety of the lightweight butterfly valve disc designed by topology optimization. After flow analysis, as the opening angle increased, the flow coefficient increased non-linearly and showed a gentle slope. When the opening angle was 12 degree, the cavitation could be predicted. After FE analysis, all FE von-Mises stresses of the lightweight disc were smaller than the yield strength of the material, and all FE maximum deformations were also smaller than the conservative deformation of the previous study. Ultimately, it was confirmed that the structural safety of the lightweight valve disc based on computational analysis is effective.

**Key words** : Topology Optimization, Butterfly Valve, Lightweight Disc, Computational Simulation, Structural Safety

## 1. 서 론

원자력 및 수화력 발전소, 상하수도 설비, 폐수처리 설비, 정유시설, 소화 및 방화시스템 연결배관

등은 다양한 유체 배관들이 서로 유기적으로 연결되어 있으며 배관과 배관을 연결하는 플랜지 부분에 유체의 흐름을 제어하기 위한 다양한 밸브들이 장착된다.<sup>(1-3)</sup> 이와 같은 밸브들은 설비의 운전 중 유체의 온도를 높이거나 낮추는 등의 역할에 기여하고 유체 유량과 유속을 기준에 맞게 제어함으로써 항상 설비가 안정된 상태로 기동 되도록 한다.

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.  
Tel : +82-43-229-8449 E-mail : ktmax@cju.ac.kr

특히 버터플라이 밸브는 원판형 디스크를 회전시켜 유체 흐름을 제어한다.<sup>(3-8)</sup> 이와 같은 버터플라이 밸브를 많이 채용하는 이유는 무엇보다 동급 밸브류와 비교할 때 중량이 가볍다는 큰 특징이 있고 설치 공간이 협소해도 큰 공간을 차지하지 않아도 된다는 장점 때문이다.<sup>(3)</sup> 이들 배관라인에 사용되는 밸브들은 대부분 주조 또는 단조법으로 생산되고 있으며 특히 발전소에 사용되는 이들 밸브류들은 그 치수가 상대적으로 크고 무겁다. 따라서 대형 밸브 부속품들을 제작함에 있어 소요되는 소재의 양 또한 방대하다. 이와 같은 이유로 본 연구자는 선행연구에서 위상최적화에 기초한 버터플라이 밸브 디스크의 경량 설계를 수행하였다.<sup>(9)</sup> 이렇게 설계된 밸브디스크는 3차원 금속프린팅으로 제작 가능하기 때문에 궁극적으로 경량의 밸브 부품을 제작할 수 있다. 그러나 경량 설계 후 실제 설계된 밸브와 디스크 부품을 장착하여 밸브의 개폐에 따른 유체의 흐름과 양, 수압 등에 대한 운전 환경을 고려한 구조적 안전성 연구가 병행되지 못했다. 즉, 배관 내 유체가 흐르는 과정에서 경량 설계된 밸브 디스크의 열고 닫음에 따른 유체의 공동현상과 그의 영향, 경량 설계에 따른 무게 경감으로 강성의 변화에 의한 분당 유체 누설량의 안전성에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 기존 상용 버터플라이 밸브디스크의 설계 기준을 만족하는 위상최적화로 설계된 경량 밸브디스크의 건전성 확보를 위한 해석 연구가 수행된다. 이와 같은 안전성 연구는 지금까지 진행되어 온 압력과 유동해석에 기반한 선행연구들<sup>(6,7,10,11)</sup>의 방법과 표준규격 및 구조해석 선행연구들<sup>(2,4)</sup>을 바탕으로 3차원 프린팅 제조가 가능한 밸브 디스크에 대한 안전성 연구를 진행한다. 이를 위해 3차원 버터플라이 밸브 디스크 기본 모델과 위상최적화로 경량 설계된 해석모델을 이용하여 유동 및 구조해석을 수행하고 실제 사용 환경에 대한 안전성을 확인한다.

## 2. 밸브디스크 형상 및 재료물성

Fig. 1의 (a)는 일반 상용화된 버터플라이 밸브의 형상을 보여주며, (b)는 밸브 디스크를 보여준다. 밸브 디스크의 표준 규격은 200A이며 호칭지름이 200mm임을 의미한다. 실제 디스크의 직경은 188mm이고 두께는 16mm이며, 3차원 곡면 형상을 이룬다. 두께는 16mm, 그리고 디스크 원판 상단 면에 디스크 원판을 개폐할 때 회전 지지해 주는 두 개의 브라켓이 부착되어 있다. Fig. 2는 디스크 기본 모델(좌측) 및 위상최적화 경량 모델(우측)을 보여준다.

본 해석연구에 사용된 버터플라이 밸브 디스크는 ASTM A351<sup>(12)</sup>에 규정된 CF8M 재질을 이용하여

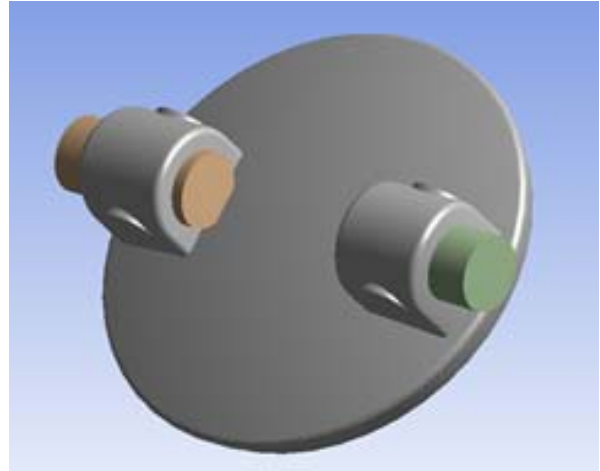


Fig. 1. Butterfly valve disc

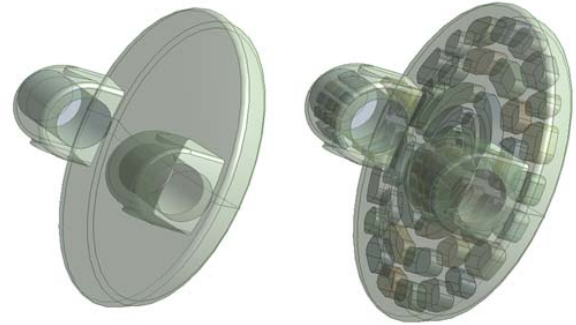


Fig. 2. Basic model(left) and lightweight model(right)

주강품으로 제작된다. 본 해석연구에 사용된 기계적 물성들로서 항복강도는 205GPa, 인장강도는 485MPa, 연신율은 30%이다. 해석에 반영한 재료의 탄성계수는 200GPa이며 푸아송의 비는 0.3을 적용하였다.

## 3. 밸브디스크 유동해석

### 3-1. 관내 유동해석 모델 및 유동해석 조건

본 연구에서는 선행된 연구들<sup>(6,7,10,11)</sup>과 같이 관내에서 밸브를 통과하는 유량 및 디스크에 작용하는 압력 특성을 분석하고자 유동해석을 수행하였다. 디스크 열림각에 따른 유량 변화에 대한 해석을 위해 ANSYS 18.0 Fluent 소프트웨어를 사용하였으며, 공동화 현상<sup>(11)</sup> 발생 가능성에 대한 해석을 위해 STAR-CCM+ 9.06 소프트웨어를 사용하였다. 유동해석을 위해 직경 188mm, 관로 총 길이는 5000mm로 모델링 하였으며, 관로 전방(Shaft side)에서 2000mm 떨어진 곳에 밸브 디스크를 위치시켰다. 해석모델 수립 시 축이 삽입되는 브라켓의 축 중심을 기준으로 직경이 198mm가 되는 구를 추가하여

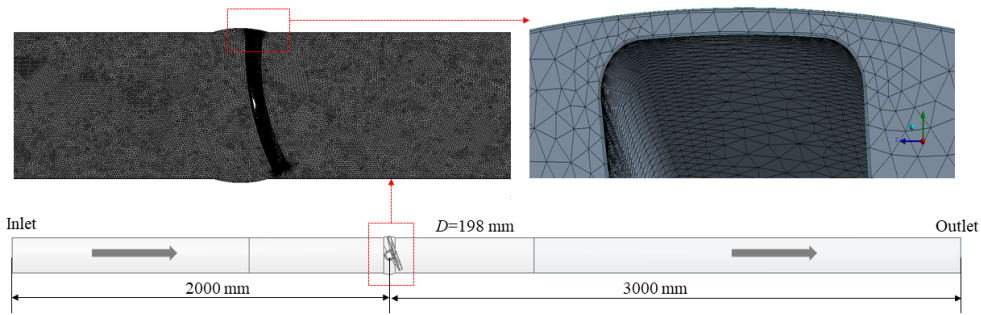


Fig. 3. Computational simulation model for fluid analysis

열림각에 따라 밸브 디스크가 관로를 침범하지 못하도록 설정하였다. Fig. 3은 본 연구에 사용된 유동해석 모델의 전체 형상을 보여준다. 유동해석 조건으로 밸브 디스크의 열림각이 달라지는 순간 유동의 영향은 적다고 가정하여 동적인 영향을 배제하고 비압축성 정상상태로 가정하여 해석을 수행하였다. 난류모델로는 CFD에서 사면체 유체 유동격자 생성시 높은 정확성을 보이는 *K-e*의 Realizable 모델을 채택하였다. 유동해석의 작동유체는 물 ( $H_2O$ )이며, 상온 밀도는  $1.0 \text{ g/cm}^3$ , 점도는  $1.003 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 를 적용하였다. 경계조건으로는 Shaft side 에서 기본 설계압력 0.4 MPa을 적용하였고, 출구에는 0MPa을 적용하였다. 또한 대기압은 101,325 Pa을 적용하였고 중력의 영향은 고려하지 않았다. 요소 생성은 삼각형 형상의 사면체 요소를 사용하였고, 디스크 형상이 유동에 미치는 영향이 크기 때문에 밸브 디스크의 Shaft side 및 Sheet side 방향으로 각각 500mm 위치까지 조밀하게 요소망을 구성하였다. 이때 생성된 전체 요소의 개수는 약 850 만개이다.

### 3-2. 밸브디스크 열림각에 따른 유량 변화

Fig. 4는 입력 압력이 0.4 MPa 일 때 밸브 디스크가 완전히 닫힌  $0^\circ$  를 제외하고  $10^\circ$ 부터  $90^\circ$  까지 밸브 디스크 열림각( $\alpha$ )에 따라 계산된 유량계수  $C_v$  를 보여준다. 밸브의 열림각에 따른 유량계수가 선정되면 밸브의 입출구측 차압으로 밸브를 지나는 유체 유량을 선정할 수 있어 밸브의 설계 뿐만 아니라 운영에 있어서도 매우 유용하다. 열림각이 증가할수록 유량이 비선형적으로 증가하는데 특히  $60^\circ$  이상부터 완만하게 증가함을 알 수 있는데 이 결과는 선행 연구결과들<sup>(6,7,10)</sup>과도 경향이 잘 일치된다. 본 연구에서 얻은 이 유량계수 결과는 밸브 업체나 수요자들이 적절한 밸브 유량을 선정하고 밸브의 제원을 선택함에 유용한 자료로 활용될 것이다. Fig. 5는 밸브 디스크 열림각에 따른 관내 유동의 흐름을 보여준다.

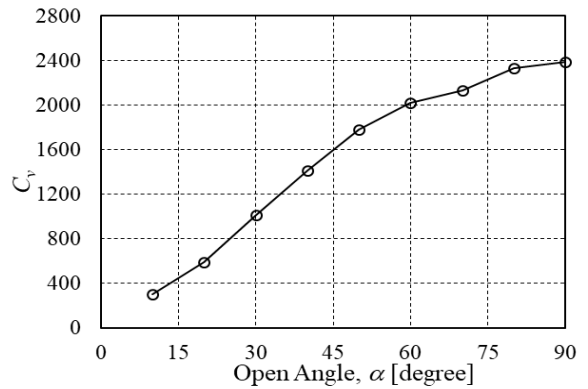


Fig. 4. Flow coefficient with various disc open angle

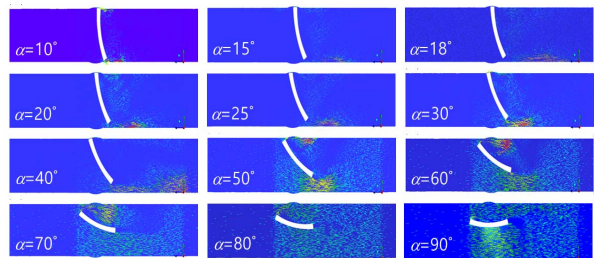


Fig. 5. Fluid flow with various disc open angle

### 3-3. 밸브디스크 열림각에 따른 공동현상

액체를 작동유체로 사용하는 유로 기기의 경우 급격한 압력 강하로 증기 기포가 발생하는 공동화 현상을 초래할 수 있다. 밸브의 경우 유동을 차단하고 압력을 제어하기 위한 디스크나 플러그의 개폐 정도에 따라 단면적에 변화를 준다. 단면적이 작아진 영역에서 베나 축소부의 협소한 지점을 통과하기 위해 유속이 증가하는데 이는 압력의 감소를 초래한다. 이때, 밸브 디스크나 플러그 주변 베나 축소부를 통과하는 액체의 압력이 증기압 이하로 저하되면 공동화 현상이 발생한다. 이와 같은 공동화 현상을 예측 분석하기 위해 밸브 통과 유량

과 압력강하 제곱근 사이의 선형관계로부터 공동화 영향을 보여주는 식(1)의 유량 곡선 공동화 지표 (Flow curve cavitation index,  $K_C$ )가 사용된다.

$$K_C = \frac{p_1 - p_2}{p_1 - p_V} = \frac{\Delta p}{p_1 - p_V} \quad (1)$$

여기서,  $p_1$ 은 밸브 유입 압력,  $p_2$ 는 밸브 출구 압력,  $p_V$ 는 밸브 유입구 및 베나 축소부에서 액체의 증기압을 나타낸다. 이때, 본 연구의 버터플라이 밸브에서 공동화가 발생할 수 있는 공동화 지표 경계로 압력회복 지수( $K_m$ )의 0.5배에 해당하는 값이 사용된다. 밸브에서 발생하는 공동화 현상을 예측하기 위한 또 다른 방법으로써 식(2)와 같은 공동화 지표(Cavitation index,  $\sigma$ )도 사용된다.

$$\sigma = \frac{p_2 - p_V}{p_1 - p_2} \quad (2)$$

여기서,  $p_1$ 은 밸브 유입 압력,  $p_2$ 는 밸브 출구 압력,  $p_V$ 는 작동 온도에서의 액체 증기압을 나타낸다. 이때, 공동화 지표가 클수록 밸브 내 공동화 손상 발생률이 작고, 공동화 지표가 작을수록 밸브 내 공동화 손상 발생률이 크다. 공동화 지표가 0 또는 음의 수가 되면 플래싱이 발생하며, 공동화 지표 경계로는 공동화 현상 발생이 시작되는 초기 공동화 지표와 질식 유동 또는 완전 공동화가 발생하는 질식 공동화 지표가 사용된다. 일반적으로 밸브의 설계 및 제작에 있어 상기와 같은 공동화 지표가 사용되지만 특정 밸브 설계 요건에 따라 달라진다. 이에 본 연구에서는 유동해석 후 얻은 밸브 디스크 및 플러그 주변 베나 축소부 영역에서의 최대 압력강하 값을 이용하여 밸브 내 공동화 현상 발생 여부를 예측하였다. 이때 경험적으로 공동화 현상이 많이 발생하는 경우의 디스크 열림각을 적용하였다. Fig. 5는 디스크 열림각이 12°, 15°, 18°일 때 밸브 내부의 압력 특성을 얻기 위한 유동해석 모델 및 격자 유형을 보여주며, Fig. 6는 버터플라이 밸브 입출구 차압 0.4MPa를 적용하여 유동해석 후 디스크 주변 압력 분포를 보여준다. 밸브 디스크가 열리면 편심된 디스크와 몸체 사이 간격으로 유동이 발생되며, 디스크와 몸체 사이 좁은 영역을 통과하는 유체의 속도가 증가함에 따라 압력 강하가 발생 된다. 특히 디스크 모서리 끝단에서 유동 박리로 인해 급격한 압력 강하가 발생한다. 이때, 낮은 압력을 갖는 디스크 모서리 끝단에서 압력 값이 증기압보다 낮아지면 공동화 현상이 발생한다.

Fig. 8부터 Fig. 10은 비압축성 유체인 물을 작동

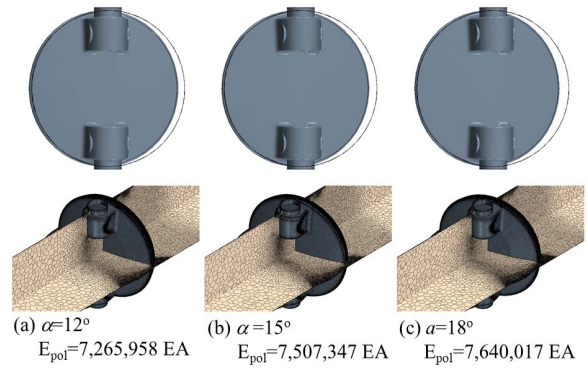


Fig. 6. Simulation grid with disc opening angle

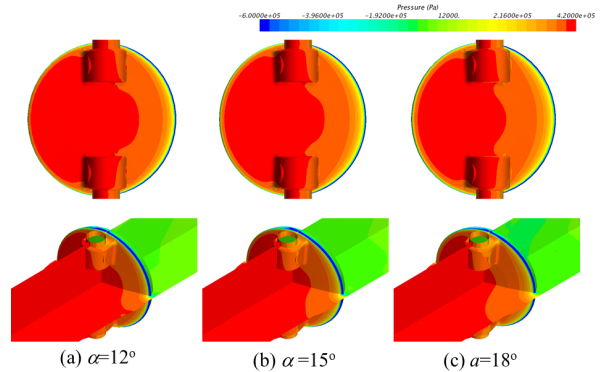


Fig. 7. Pressure around the disc with opening angle

유체로 사용하는 본 버터플라이 밸브에서 특정 열림각에 대해 디스크 주변에서의 출구 압력에 따른 공동화 현상 발생 예측 영역을 보여준다. 출구 압력이 약 2.0MPa 이하가 되면 디스크와 시트가 열리기 시작하는 부위를 시작으로 증기압보다 낮아지는 영역이 발생된다. 이때, 출구 압력이 낮아지면 증기압보다 낮은 압력을 갖는 영역이 점차 증가한다. 따라서 출구 압력 약 1.0MPa 이하에서, 시트에서 분리된 열린 디스크 모서리 끝단 전체가 증기압보다 낮은 압력이 되고, 출구 압력 약 0.1MPa 이하에서, 디스크와 시트 사이 단면이 모두 증기압보다 낮은 압력으로 분포된다. 본 연구에서 검토한 열림각 12°, 15°, 18°에서의 디스크 주변 압력을 살펴보면 열림각이 작은 12°일 때, 더 낮은 출구 압력 조건에서 공동화 현상이 발생할 수 있는 증기압 이하의 압력이 더 넓게 분포하였다. 본 해석 결과는 실제 버터플라이 밸브에서 공동화 현상을 검증하기 위한 선행 결과로써 의미가 크다. 이는 추후 다양한 디스크 열림각 및 입출구 차압 조건에서 공동화 현상에 따른 기포의 생성, 소멸 등에 대한 상변화를 포함한 다상유동 해석을 위한 자료로 활용될 것이다.

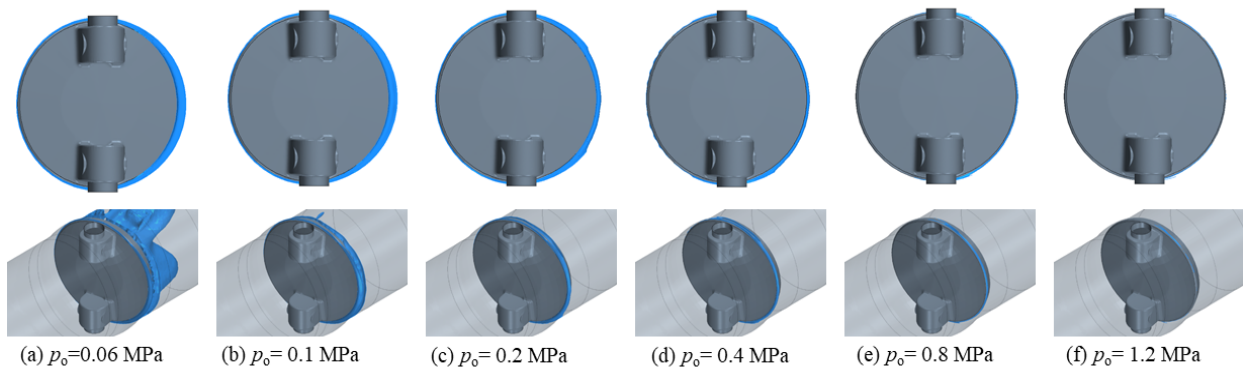


Fig. 8. Occurrence of cavitation around the valve disc at the opening angle  $\alpha=12^\circ$

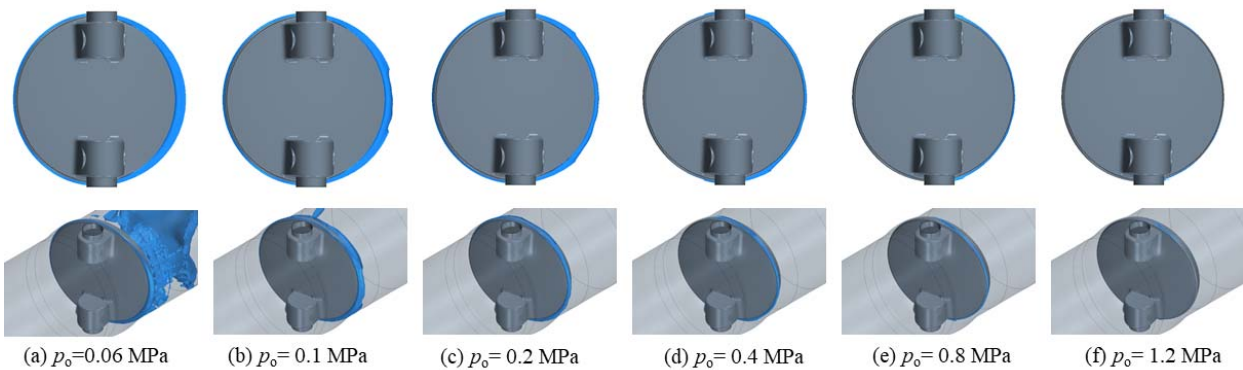


Fig. 9. Occurrence of cavitation around the valve disc at the opening angle  $\alpha=15^\circ$

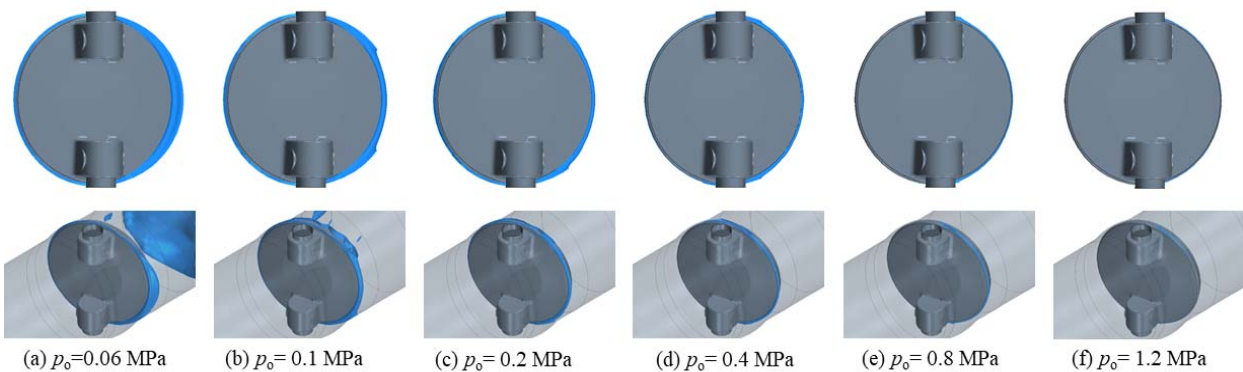


Fig. 10. Occurrence of cavitation around the valve disc at the opening angle  $\alpha=18^\circ$

## 4. 관내 밸브디스크 구조해석

### 4-1 밸브디스크 유한요소해석 모델

구조해석은 상용 유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS 18.0을 사용하였고 Static Structural 옵션을 선택하였다. Fig. 11의 (a)는 밸브 디스크 해석모델의

유한요소망 구성을 보여주며, (b)는 축이 삽입되는 브라켓 안쪽 면을 완전구속처리( $U_x=U_y=U_z=0$ )한 경계조건을 보여준다. 그리고 (c)는 디스크의 볼록한 면(Shaft side)과 오목한 면(Sheet side)에 상기 유체유동 해석으로부터 얻은 적용압력을 반영한 하중 조건을 보여준다. 이때 밸브 디스크는 열림각이  $0^\circ$ , 즉 완전닫힘 조건에서 해석이 수행되었다.

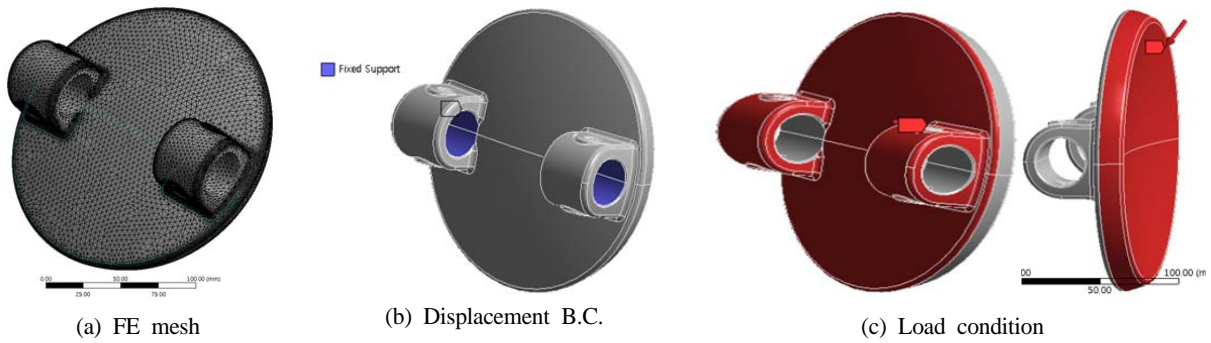


Fig. 11. FE mesh and boundary conditions

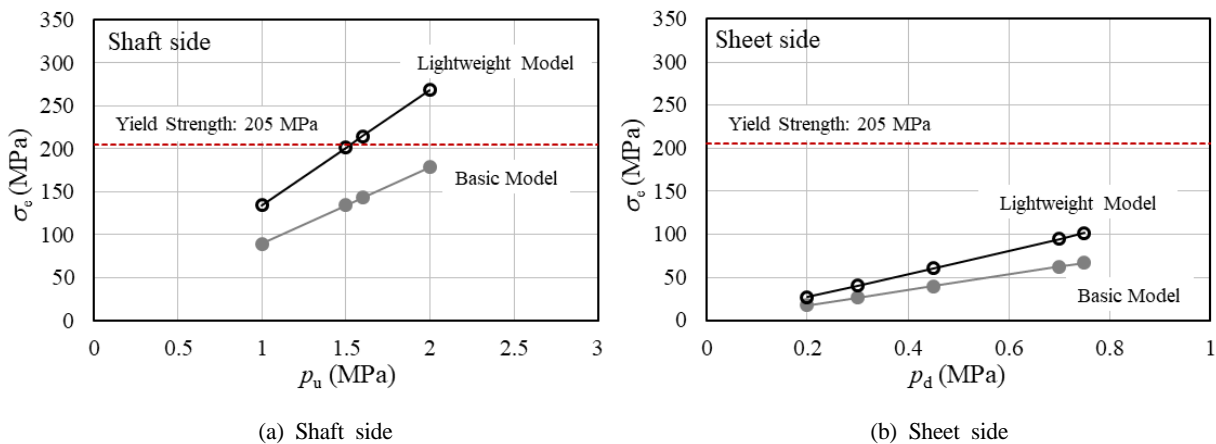


Fig. 12. Distribution of von-Mises stress with various applied pressure

#### 4-2. 밸브 디스크 구조해석

Fig. 12는 밸브 디스크 입구 측 표면(Shaft side) 및 출구 측 표면(Sheet side)에 작용하는 압력 조건에 대해 유한요소해석에 기초한 강도해석 수행 후의 유효응력을 보여준다. 디스크 Shaft side 및 Sheet side에 작용하는 압력에 따른 최대 유효응력이 모두 선형으로 증가함을 알 수 있다. 본 연구의 버터플라이 밸브 디스크에 대한 구조적 안전 기준은 KS B 2333<sup>(13)</sup>의 최대허용압력(1.37MPa)에 대한 유효응력을 재료의 항복강도와 비교하여 판단하였다. 해석 후 Sheet side의 경우 기본 디스크 모델은 1MPa부터 2MPa까지 모든 영역에서 유효응력이 재료의 항복강도 205MPa보다 낮은 값을 보여 충분히 안전함을 알 수 있다. 위상최적화 모델도 최대허용 압력 1.35MPa일 때 유효응력이 약 181MPa로서 역시 항복강도보다 낮은 값을 주어 안전함을 알 수 있다. 이로부터 위상최적설계에 의한 디스크의 강도가 유효함을 확인하였다. Fig. 13의 (a)와 (b)는 각각 표준 및 위상최적화된 밸브 디스크의 원판과 브라켓이 연결된 코너 부위에서 발생된 최대 유효응력 분포를 보여준다.

#### 4-3. 밸브 디스크의 강성해석

버터플라이 밸브의 누설에 대한 규격은 KS B 2333<sup>(13)</sup>에 규정되어 있으며 누설시험 압력과 시험 시간을 규정하고 있다. 이와 같은 밸브 시트의 누설시험은 많은 비용과 시간이 요구되기 때문에 본 연구에서는 디스크의 강성해석을 통해 누설여부를 예측해 보았다. 변형량의 유효성을 판단하기 위해 선행연구<sup>(2)</sup> 결과를 참고하였다. 선행연구<sup>(2)</sup>에서는 본 연구의 버터플라이 밸브 디스크와 동일한 재료 및 형상에 대해 600°C 환경에서 구조해석을 수행하여 1.157mm의 변형량을 주었고 기밀유지에 큰 영향을 미치지 않는다고 하였다. 이를 근거로 본 연구에서는 1.157mm보다 작은 변형량을 주면 안전하다고 판단하였다. Fig. 14는 밸브 디스크에 작용하는 압력 조건에 대해 강성해석 후 최대변형량 결과를 보여준다. 작용하는 압력의 증가에 따라 최대변형량이 선형적으로 증가한다. (a)와 (b)는 각각 Shaft side 및 Sheet side에 대한 최대변형량 결과로써, KS B 2333<sup>(13)</sup>의 최대허용압력 1.35MPa일 때의 모든 해석 변형량이 0.1mm 이내가 된다. 이 값은 선행연구<sup>(2)</sup>의 1.157mm보다 충분히 낮은 값을 주어 기밀에

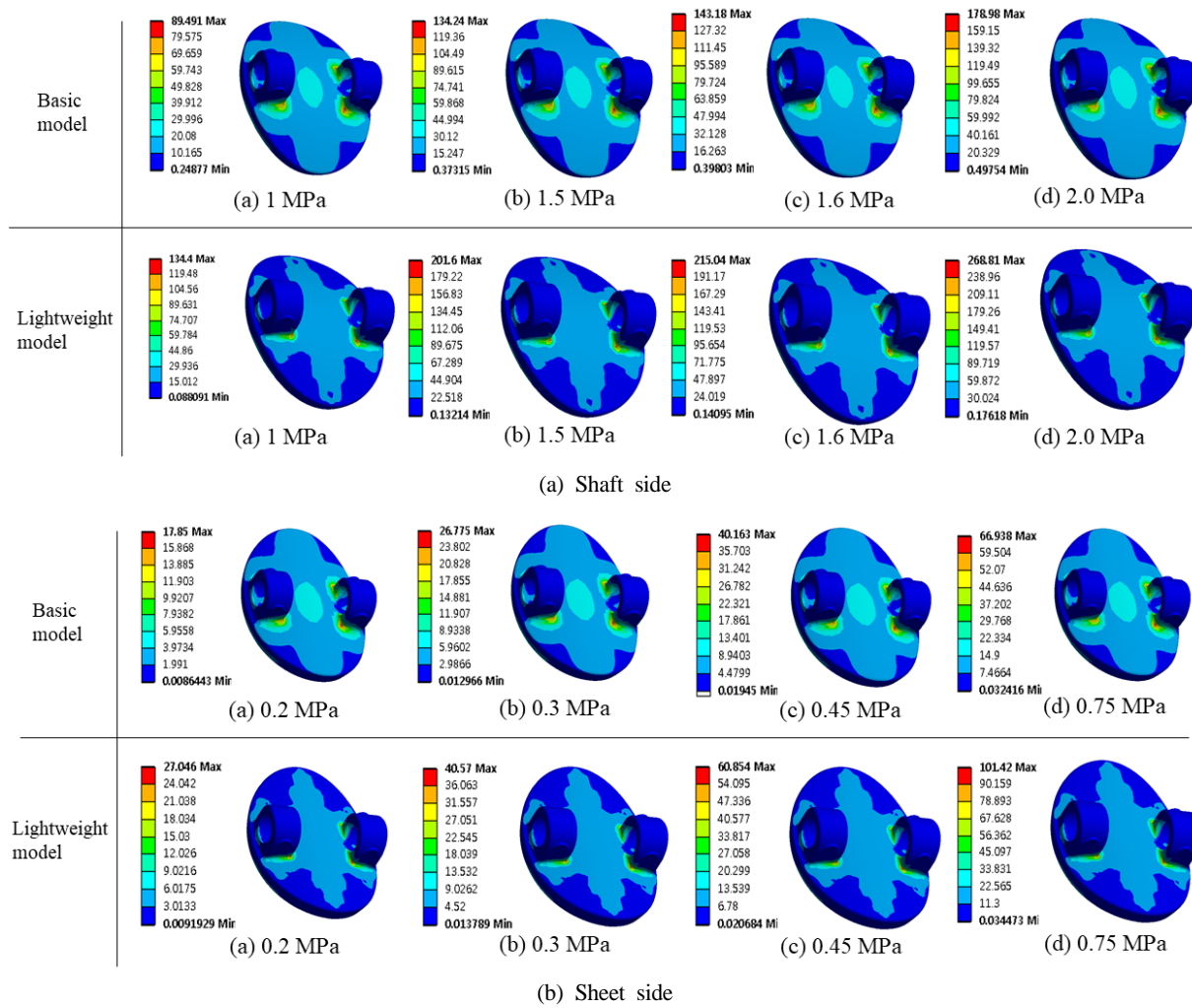


Fig. 13. Contours of von-Mises stress with various applied pressure

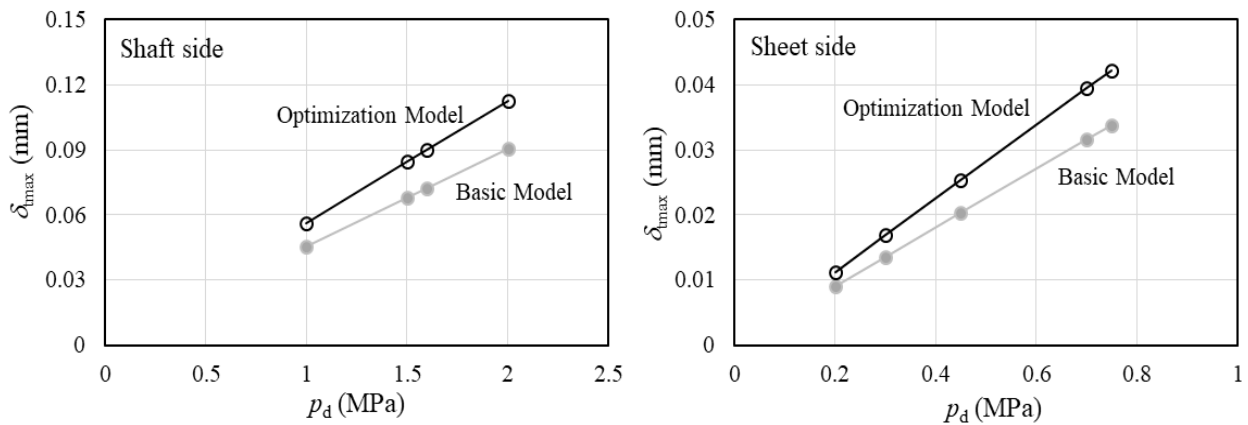


Fig. 14. Distribution of von-Mises stress with various applied pressure

효과적이라 판단된다. 따라서 강도해석에 이어 강성해석에서도 위상최적설계에 의한 경량 밸브 디스크

크가 구조적으로 안전하다고 판단된다. Fig. 15는 강성해석 후 디스크의 최대변형량을 보여준다.

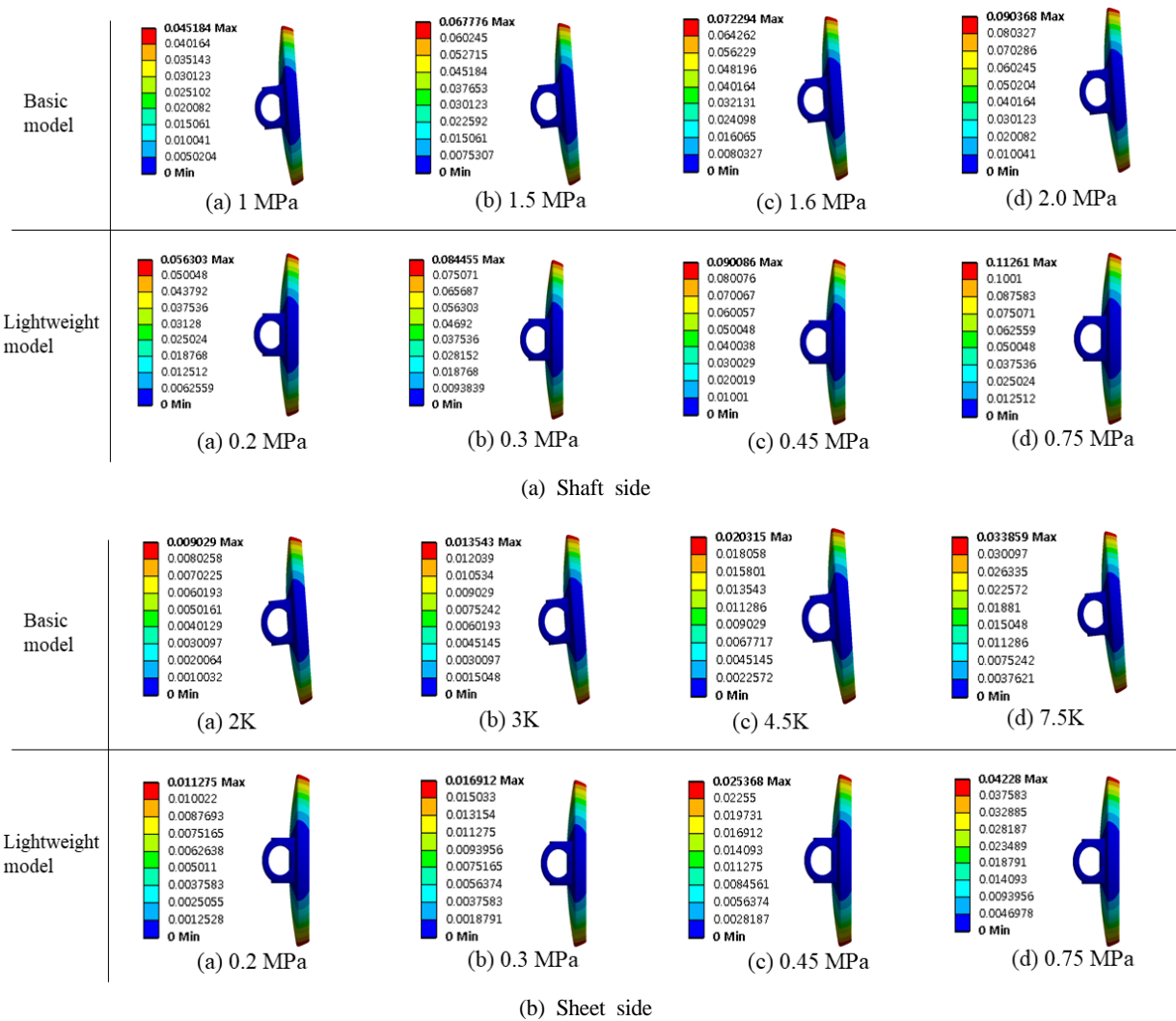


Fig. 15. Contours of maximum deformation with various applied pressure

### 5. 결론

본 연구에서는 위상최적화에 의해 설계된 버터플라이 밸브 디스크의 설계 유효성 및 구조적 안전성을 확인하였으며 다음과 같이 정리된다.

(1) 밸브 디스크의 열림각에 따른 유량이 점차 비선형적으로 증가하다 60° 이상부터 완만한 증가를 보여선행연구 경향과 일치되며 업체 및 수요자들에게 유량 및 제원 선정에 유용한 참고자료로 활용된다.

(2) 밸브 디스크의 열림각에 따른 공동현상을 조사한 결과 열림각이 작은 120일 때 더 낮은 출구 압력조건에서 공동화 현상이 발생할 수 있는 증기압 이하의 압력이 넓게 분포되었다. 실질적인 공동현상 분석을 위해 본 결과는 다양한 디스크 열림각

및 입출구 차압 조건에서 기포 생성 및 소멸 등에 대한 상변화를 포함한 다상유동해석 자료로 활용될 것이다.

(4) 밸브 디스크의 강도해석을 통한 유효응력을 KS B 2333의 최대허용압력 1.35MPa를 적용한 해석적 유효응력과 비교하였으며 Shaft side 및 Sheet side 모두 재료의 항복강도보다 낮은 값을 주어 구조적으로 안전함을 확인하였다.

(5) KS B 2333의 최대허용압력 1.35MPa를 적용하여 밸브 디스크의 강성해석을 수행하였으며 해석 후 변형량이 선행연구의 보수적인 변형량보다 충분히 낮은 값을 주어 기밀에 효과적일 것으로 예측된다.

궁극적으로 본 연구를 통해 위상최적화에 의해 설계된 경량 버터플라이 밸브 디스크의 구조적 안전성이 유효함을 확인하였다.



## 후 기

이 논문은 2017학년도 청주대학교 학술연구조성비 (특별연구과제)에 의해 연구되었음.

## References

- Han, S. H., Lee, K. C., Ahn, J. T., Han, J. W., 2011, Structural Safety Analysis of Butterfly Valve for Nuclear Power Plant., Proceedings of the KSME Conference, pp. 241-242.
- Son, I. S., Hur, K. D., Lee, C. G., Oh, B., Kim, Y. G., Park, K. T., 2017, Study on Development of 600°C Class Butterfly Valve., Proceedings of the KSMPE Conference, pp. 195.
- Lee, S. P., Kim, K. S., Koh, B. K., 2009, Evaluation of Design Safety for Butterfly Valve., Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 18, No. 1, pp. 29-35.
- Shin, M. S., Yoon, J. Y., Park, I. W., Lee, S. H., Park, H. Y., Jung, S. H., 2011, A Study on Structural Analysis of Butterfly Valve Components by Pressure Testing of the Industrial Standard., Journal of Fluid Machinery, Vol. 14, No. 3, pp. 5-9.
- Shin, M. S., Yoon, J. Y., Park, I. W., Lee, S. H., Park, H. Y., Jung, S. H., 2009, A Study on Structural Stability by Shape of Butterfly Valve Disc., R&D Conference of Korean Society for Fluid Machinery, pp. 523-528.
- Kwak, K. M., Cho, J. S., Kim, J. D., Lee, J. H., 2012, A Study on Flow Coefficient and Flow Characteristics for Butterfly Valve by Numerical Analysis., Journal of the Korea Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 4, pp. 62-66.
- Lee, H. S., Jung, J. H., Song, X., Park Y. C., 2010, Prediction of Flow Coefficient of Butterfly Valve using CFD., Proceedings of the KSME Spring Conference, pp. 283-284.
- Son, I. S., Hur, K. D., Lee, C., Shin, H. K., Jeong, E. A., Kim, Y. G., Park, K. T., 2017, The KSNVE Autumn Conference, pp. 151.
- Kim, T., 2018, Shape Design based on Topology Optimization for Manufacturing of Lightweight Valve Disc by 3-D Printing., Journal of Energy Engineering, Vol. 27, No. 4, pp. 13-19.
- Park, S. M., Choi, H. K., Yoo, G. J., 2013, Flow Research of Butterfly Valve with Thick Disc., Proceeding of the KSMPE Spring Conference, pp. 131.
- Yoon, J. Y., Lee, S. J., Kim, E. S., 2004, Numerical Analysis of Flows in Butterfly Valves to Prevent Cavitation., Journal of Fluid Machinery, Vol. 7, No. 1, pp. 9-16.
- ASTM A351, 2000, Cast Stainless Steel CF8M., 4<sup>th</sup> Ed., ASM Material Data Series, ASM International, Materials Park, OH.
- KS B 2333, 2015, Butterfly Valves., pp. 1-10.