

3차원 프린팅에 의한 경량 밸브 디스크 제조를 위한 위상최적화 기반의 형상 설계

김태형[†]

청주대학교 항공기계공학과

(2018년 10월 26일 접수, 2018년 12월 10일 수정, 2018년 12월 12일 채택)

Shape Design based on Topology Optimization for Manufacturing of Lightweight Valve Disc by 3-D Printing

Taehyung Kim[†]

Department of Aeronautical and Mechanical Engineering, Cheongju University

(Received 26 October 2018, Revised 10 December 2018, Accepted 12 December 2018)

요 약

본 연구에서는 위상최적화에 기초한 발전설비용 버터플라이 밸브 디스크 부품의 경량설계가 수행되었다. 이때 상용 유한요소해석 소프트웨어가 사용되었으며 기존 상용 밸브 디스크의 외형을 유지시키면서 내부의 불필요 공간을 제거하여 경량구조를 갖도록 하였다. 먼저 밸브 디스크의 원판과 브라켓을 분리하여 각각 최적설계 하였다. 최적의 형상이 선정되면 이들을 조립하여 3차원 경량 밸브 디스크 모델을 완성하였다. 이후 이 모델에 설계 압력을 적용하여 유한요소해석 후 구조적 안전성을 확인하였다.

주요어 : 버터플라이 밸브 디스크, 3차원 프린팅, 위상최적화, 유한요소해석, 경량설계

Abstract - In this study, the lightweight design of butterfly valve disc component for power plant based on topology optimization was performed. Here, commercial finite element (FE) analysis software was used. The external shape of the basic disc model was not deformed, and the internal element density was removed to make it lightweight. Optimal design was performed each other after the disc plate and two brackets attached on the surface of the disc were separated. Once the optimal shapes were selected, they were assembled to build up the 3-D lightweight valve disc model. After applying pressure to this model, FE analysis was performed to confirm the structural safety.

Key words : Butterfly Valve Disc, 3-D Printing, Topology Optimization, Finite Element Analysis, Lightweight Design

1. 서론

발전설비 및 일반 산업용 설비에는 중대형 유체 배관들이 다수 설치되어 있고 이들 배관들 내부로 흐르는 유체의 유량 및 유속을 효율적으로 제어하기 위해 다양한 밸브들이 사용된다. 이들 밸브류들

은 대부분 금형을 이용한 단조 및 주조방식으로 제조되므로 내부가 모두 금속으로 채워져 중량이 크다. 이는 결국 이웃하는 부품 및 부속자재들에게도 큰 하중을 전달하게 되므로 설비의 규모가 커지고 고난도의 고강도 안전성 설계가 요구된다. 뿐만 아니라 그만큼 원소재의 사용량이 많기 때문에 제품 단가가 높아 생산능률의 저하를 초래할 수도 있다. 이와 같은 이유로 최근 3차원 금속 프린팅 기술을 이용한 다양한 형태의 금속 부품 제조공정 기술이

[†]To whom corresponding should be addressed.
Tel : +43-229-8449 E-mail: kthmax@cju.ac.kr

소개되고 있으며 초기의 단순한 부품 형상을 제조하는 수준을 벗어나 구조와 성능 향상 개선시킬 수 있는 기술도 소개되고 있다. 이와 더불어 위상최적화 기반의 형상설계 연구도 활발하게 수행되고 있으며 그 응용분야도 확대되고 있다. 위상최적화 연구는 **Michell**이 최초로 논문을 발표⁽¹⁾한 이후 **Prager**와 **Rozvany**에 의해 레이아웃 최적화 또는 최적설계로 확장되었다.⁽²⁾ 1980년대에 **Bendosoe**와 **Kikuchi**에 의해 복합재료의 강성계수를 계산법을 응용하여 연속체 구조물에도 반영할 수 있다는 이론을 소개하였다.⁽³⁾ 이후 되도록 간결하면서 계산이 빠른 밀도법이 개발되었고 현재 다양한 산업분야에서 활용이 가능한 위상최적 설계용 소프트웨어들^(4,5)의 보급 속도가 증가하고 있으며, 이들 소프트웨어를 이용한 연구들도 꾸준히 증가하고 있다.⁽⁶⁻¹⁰⁾ 하지만 이들 대부분 제품의 외형을 변형시키면서 경량설계가 이뤄진다는 특징이 있어 밸브 디스크와 같이 외형이 변경될 경우 연관된 설비 부품들의 형상들도 모두 변경되어야 하는 이차적 문제가 발생할 수 있다. 따라서 외형은 기존 설계 제원을 유지하면서 내부의 불필요한 공간을 제거할 수 있는 최적의 경량설계가 필요하다. 이후 금속 3차원 프린팅을 이용하여 제품을 제조할 수 있는 최적의 경량 형상설계 및 공정설계 기술이 개발되어야 한다. 이에 본 연구에서는 위상최적화 기반의 3차원 금속 프린팅을 위한 발전설비용 밸브 디스크의 경량 설계기술을 제안하고 구조해석을 통해 설계기법의 유효성을 확인한다.

2. 밸브 디스크의 예비 위상최적 설계

2-1. 밸브 디스크의 재질 및 물성

Fig. 1은 본 연구에서 위상최적 설계를 위한 버터플라이 밸브 디스크의 3차원 캐드 형상을 보여준다. 밸브 디스크의 표준 규격은 200A로써 호칭지름이 200 mm임을 의미한다. 그리고 디스크의 두께는 16

mm이며, 3차원 곡면으로 설계되어 있다. 디스크 상부 면에는 밸브 개폐 시 디스크의 회전을 지지하는 두 개의 브라켓이 부착되어 있다. 본 연구에 사용된 호칭지름이 200A인 버터플라이 밸브 디스크는 주강품으로써 재질이 SC450인 일반구조용품에 해당된다. 재료의 물성⁽¹¹⁾들로서 항복강도는 225 MPa, 인장강도는 450 MPa, 탄성계수는 210 GPa, 푸아송의 비는 0.3이다.

2-2. 밸브 디스크의 경량설계 예비해석

Fig. 2는 밸브 디스크 부품의 위상최적화 예비해석을 위한 임의의 원판 디스크 모델을 보여준다. 2차원 축대칭 모델을 채택하였고, 디스크 원판의 직경 D 는 200 mm(반지름 $R=100$ mm)로 하였으며, 두께 t 는 16 mm로 정하였다. 경계조건으로서 디스크 상부 면에 본 연구의 설계 압력 조건인 0.4 MPa를 반영하였으며 바닥면은 완전구속처리 하였다. 본 연구에서는 3차원 프린팅 공정으로 제품을 출력할 경우 제품의 외형에 변형이 가지 않으면서 강성을

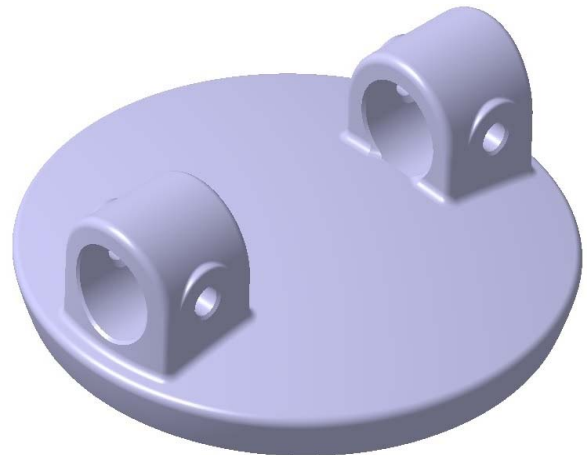


Fig. 1. Butterfly valve disc

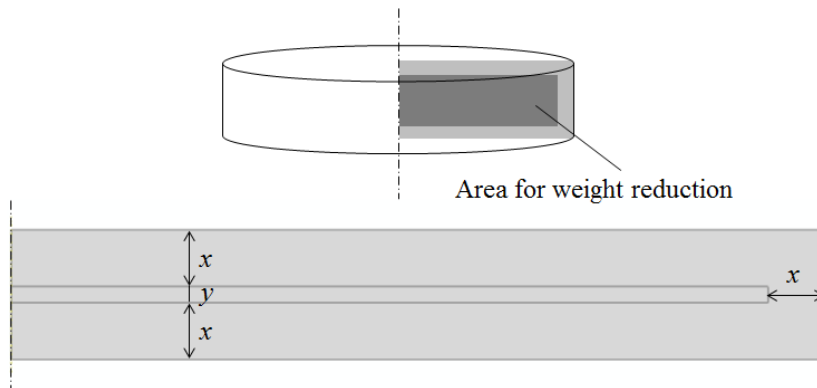


Fig. 2. Definition of internal element density for lightweight design of valve disc

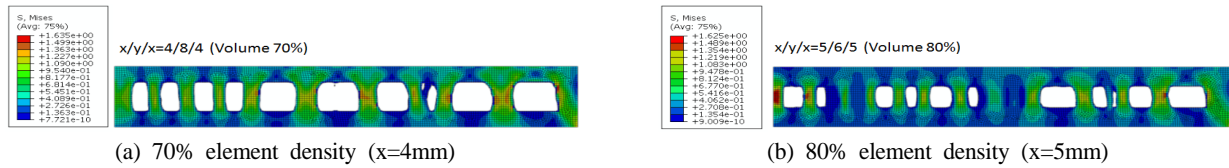


Fig. 3. Optimal shapes of the disc after FE analysis based on topology optimization

최대로 할 수 있는 제품 형상을 완성하는 것이 목표이다. 따라서 해석모델 외부 표면으로부터 내부로 일정한 두께를 1차 설계 변수 x 로 정의하였다. 표면 두께 x 가 정의되면 내부에 지정되지 않은 공간의 높이가 결정되는데 이를 y 라 하였다. 해석모델의 내부에 요소밀도 제거를 위한 공간을 확보한 후 위상최적화 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 상용 유한요소해석 소프트웨어인 ABAQUS⁽¹²⁾를 사용하였으며 위상최적화 옵션을 선택하여 해석 후 설계 압력에 대한 밸브 디스크의 유효응력을 얻고 가장 작은 응력값을 주는 해석모델의 최적화 단면을 선정하였다. 예비해석 후 Fig. 3의 (a) 및 (b)와 같이 x 가 4 mm 및 5 mm일 때, 요소밀도가 각각 70% 및 80%에서 가장 유효한 응력 값을 주어 경량화에 큰 효과를 보였다.

3. 버터플라이 밸브 디스크의 2차원 위상최적 설계

3-1. 밸브 디스크 원판 최적화

예비해석 결과를 참고하여 본 절에서는 밸브 디스크의 위상최적화 해석연구가 수행되었다. 가장 먼저 밸브 디스크의 원판 디스크의 두께에 대한 위상최적화 해석을 수행한 후 원판 상부면에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 4의 (a)는 축대칭 2차원 밸브 디스크 원판 유한요소 모델 및 내부 요소밀도 면적을 보여준다. 해석모델에 사용된 요소는 4절점 축대칭 요소인 CAX4를 사용하였으며, 요소의 최소크기를 약 1mm가 되도록 자동요소생성 옵션을 이용하였다. 해석모델의 축 중심을 따라 디스크 원판의 원주 방향으로 변위를 구속 ($U_x=0$) 하였고, 디스크 후면을 구속처리 ($U_y=0$) 하고 전면 부에는 설계 압력 4 kgf/cm^2 (0.4 MPa)을 적용하였다. 표면으로부터 내부로의 두께 x 값을 반영하고 내부의 요소밀도 면적을 정의함으로써 다양한 요소밀도 면적에 대한 위상최적화 해석을 수행하였다. Fig. 4의 (b)는 x 가 4mm이고 내부 요소밀도 면적비가 60%인 경우와 x 가 5 mm이고 내부 요소밀도가 70%일 때 위상최적화 해석 후 밸브 디스크 두께에 대한 단면의 최적형상 및 유효응력들을 보여준다. 해석 후 요소밀도가 60%인 경우 최대응력이 3.5 MPa이고 70%인 경

우 2.8 MPa로써 모두 재료의 항복강도 225 MPa 보다 충분히 작은 값을 주어 안전한 범위에 포함됨을 확인하였다. 이들 두 해석모델들 중에서 x 가 5 mm이고 요소밀도가 70%일 때 최대 응력 값이 더 작아 이를 1차 최적형상으로 선정하였다.

이어서 디스크 원판 평면에 대한 위상최적화 해석을 수행하였다. Fig. 5의 (a)는 1/4 2차원 디스크 원판 유한요소 모델을 보여준다. 사용된 요소는 2차원 4절점 감차적분 평면응력 요소인 CPS4R를 사용하였으며, 자동요소생성 옵션을 이용하여 요소의 최소 크기가 약 1mm가 되도록 유한요소망을 구성하였다. 해석모델의 중심을 기준으로 x 축 및 y 에 대해 칭 조건을 부여하였으며, 요소밀도의 제거를 위해 원주 방향으로 설계 압력의 1/10이 되는 0.4 kgf/cm^2 (0.04 MPa)을 부여하였다. 앞서 1차 설계 변수로 선정된 x 를 5 mm로 고정된 후 요소밀도를 50%로 반영하였다. Fig. 5의(b)는 위상최적화 해석 후 제거된 요소밀도 및 유효응력을 보여준다. 정의된 요소밀도 50%에 대해 요소밀도 감소를 확인하였으며 최대응력 또한 재료의 항복강도보다 충분히 작아 단면 형상이 유효하였다.

3-2. 밸브 디스크 브라켓 최적화

Fig. 6의 (a)는 버터플라이 밸브 디스크를 구성하는 부분 중 디스크 원판의 전면 부에 부착된 브라켓의 2차원 단면을 보여준다. 본래의 외형을 유지하도록 하고 고강도 경량화 밸브 디스크의 설계를 위해 브라켓 표면으로부터 부분적으로 일정한 간격을 띄웠다. 브라켓 상부의 두께가 9 mm이므로, 내외 표면으로부터 각각 3mm씩 띄웠으며, 하부의 경우 좌우 대칭으로 삼각형 구조를 이루고 있어 측면, 내부면, 하부면에서 각각 3 mm, 3 mm, 1 mm씩 간격을 유지시켰다. 이로부터 구성된 내부의 면적들은 부피 감소로 인한 경량화 및 강성 유지를 위한 최적설계 공간으로 이용된다. 해석에 사용된 요소는 2차원 4절점 감차적분 평면응력 요소인 CPS4R를 사용하였으며, 자동요소생성 옵션을 이용하여 요소의 최소 크기가 약 1 mm가 되도록 유한요소망을 구성하였다. 그리고 해석모델의 내부 원주면과 바닥면을 완전구속($U_x=U_y=0$) 하였고, 외부 면에는 유체의 작용 압력을 고려하여 설계된 압력 4 kgf/cm^2 (0.4 MPa)을 부여하였다. Fig. 6의 (b)는 위상최적화 해

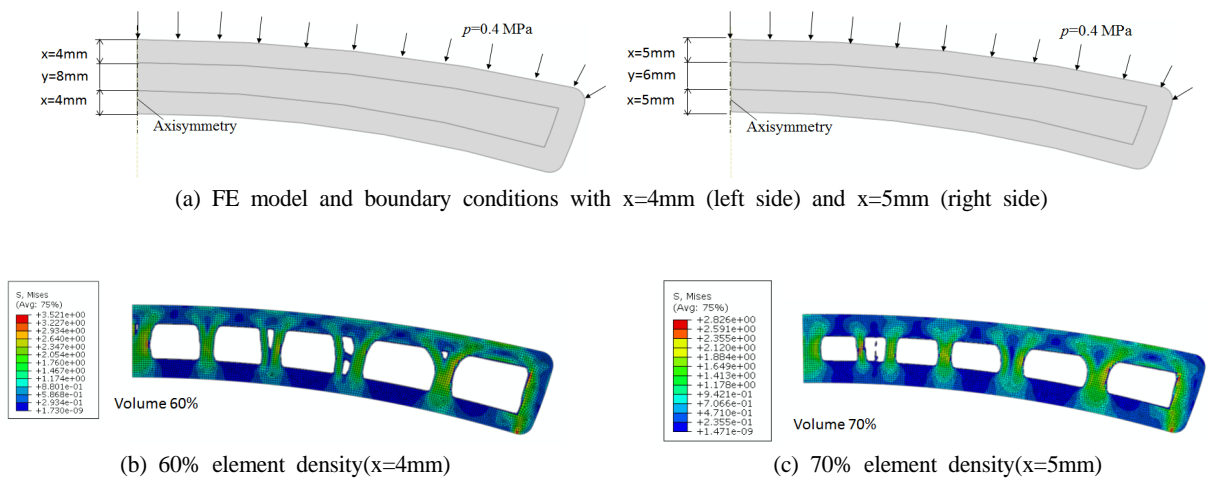


Fig. 4. First optimal shape of the disc thickness after FE analysis based on topology optimization

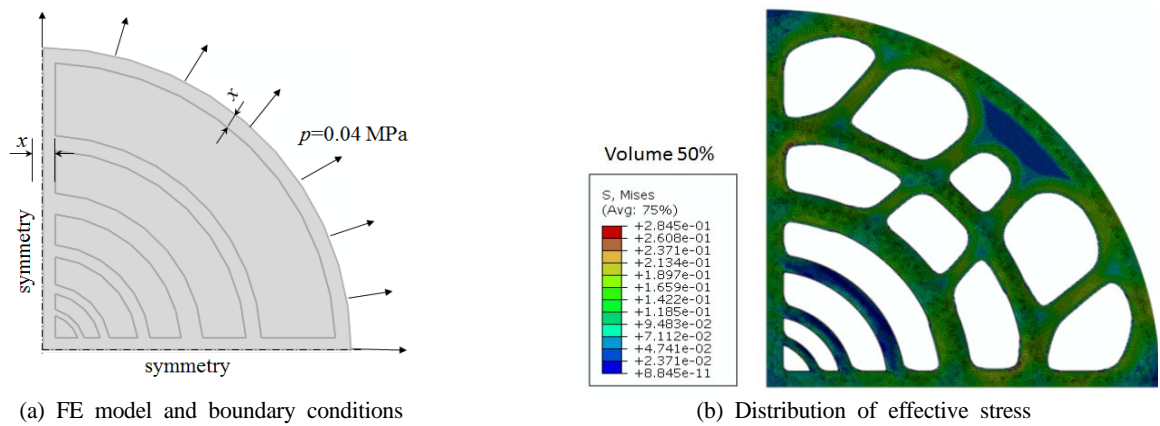


Fig. 5. Second optimal shape of the disc plane after FE analysis based on topology optimization

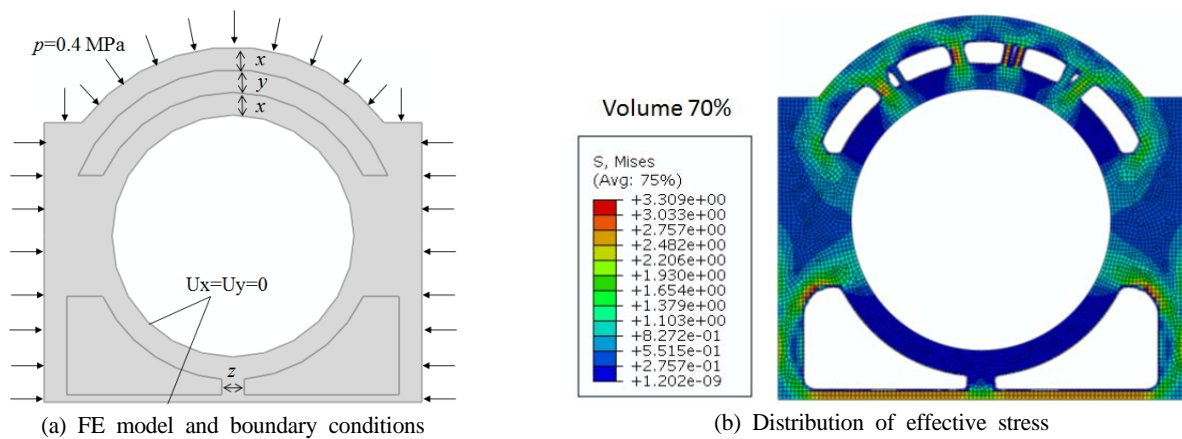


Fig. 6. Third optimal shape of the disc plane after FE analysis with topology optimization

석을 통한 브라켓의 응력 분포를 보여준다. 재료의 항복강도 225 MPa를 기준으로 할 때 최대 유효응

력이 3.3 MPa이므로 본 위상최적화 해석에 의해 얻은 최종 형상은 충분히 안정된 강도를 유지할 수 있

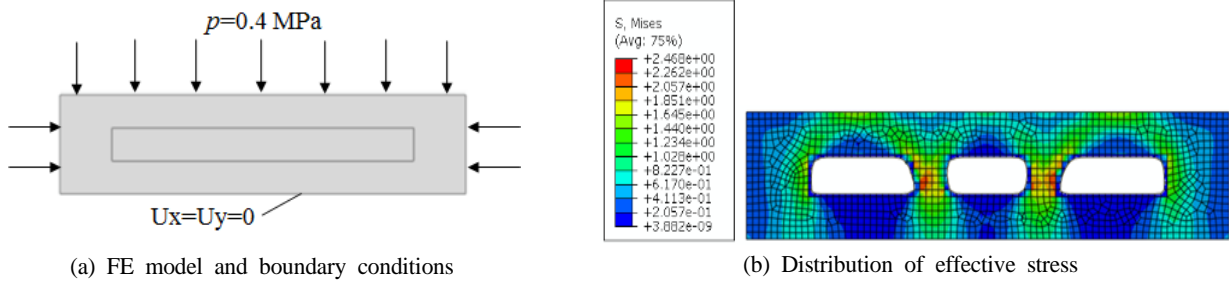


Fig. 7. Third optimal shape of the disc plane after FE analysis with topology optimization

음을 알 수 있다. 또한 브라켓 전체 단면을 기준으로 약 30%의 단면적 감소설계로 인해 경량화가 가능함을 확인하였다.

Fig. 7의 (a)는 브라켓의 단면을 기준으로 깊이 또는 길이 방향에 대한 위상최적화 해석을 위한 2차원 내부 단면을 보여준다. 이 단면을 기준으로 윗면 및 아랫면에서부터 각각 3 mm씩 간격을 유지시켰고, 좌측 및 우측면에서부터 각각 5 mm씩 간격을 유지시켰다. 2차원 평면요소를 사용한 유한요소 모델을 수립하고 2차원 4절점 감차적분 평면응력 요소인 CPS4R를 사용하였으며, 자동요소생성 옵션을 이용하여 요소의 최소 크기가 약 1 mm가 되도록 유한요소 망을 구성하였다. 브라켓의 내경 면에 해당하는 아랫 면은 완전구속처리($U_x=U_y=0$) 하였고, 그 외의 외부 면들에는 설계 압력 4 kg/cm^2 (0.4 MPa)을 부여하였다. Fig. 7의 (b)는 위상최적화 해석을 통해 요소밀도가 제거된 단면과 유효응력을 보여준다. 재료의 항복강도 225 MPa 를 기준으로 최대 응력이 2.5 MPa 이므로 충분히 안정된 강도가 유지되고 약 30%의 단면적 감소에 의한 경량설계가 가능함을 확인하였다.

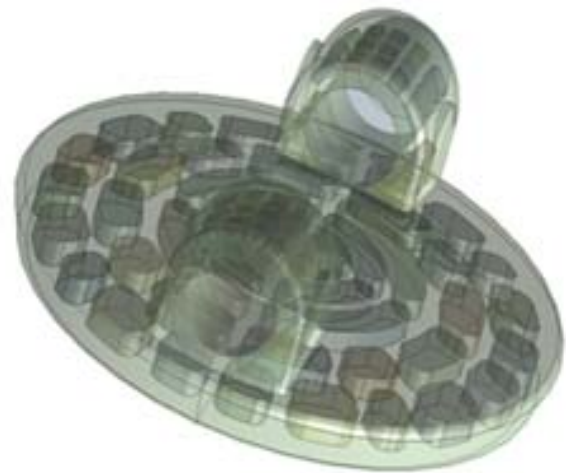


Fig. 8. Optimal three dimensional lightweight model after topology optimization

4. 최적의 3차원 밸브 디스크 모델 및 구조적 안정성

4-1. 3차원 밸브 디스크 유한요소 모델

전 절에서 디스크 원판 및 브라켓의 부위별 위상최적화 해석 후 얻은 최적의 경량 단면들을 모두 조합하여 Fig. 8과 같이 최적의 3차원 버터플라이 밸브 디스크 모델을 완성하였다. 이 최적화 모델은 상용 제품과 같이 외형은 그대로 유지되고 있으며, 내부에만 요소밀도가 제거되어 빈 공간이 포함된 형상을 갖는다. Fig. 8은 내부 공간의 크기와 위치를 확인할 수 있도록 투영된 모습을 보여준다. 내부의 요소밀도가 제거된 후 응력집중을 발생시킬 있는 모서리를 모두 곡면 처리하여 최적화 모델을 완성하였다.

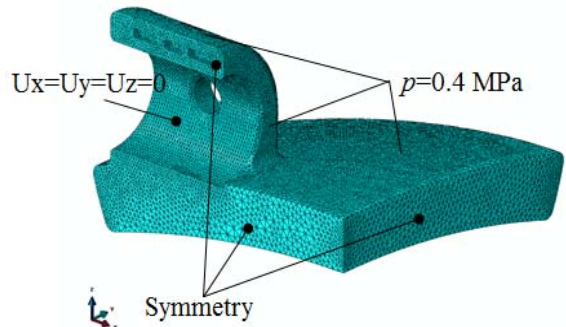


Fig. 9. FE model for structural analysis of the optimal valve disc and boundary conditions

4-2. 유한요소해석에 기초한 최적모델의 구조적 안전성

위상최적화 해석 후 3차원 경량 밸브 디스크 모델을 이용하여 구조적 안정성을 검토하고자 유한요소해석을 수행하였다. 먼저 해석시간의 단축을 위해 Fig. 9와 같이 밸브 디스크를 1/4 대칭의 유한요

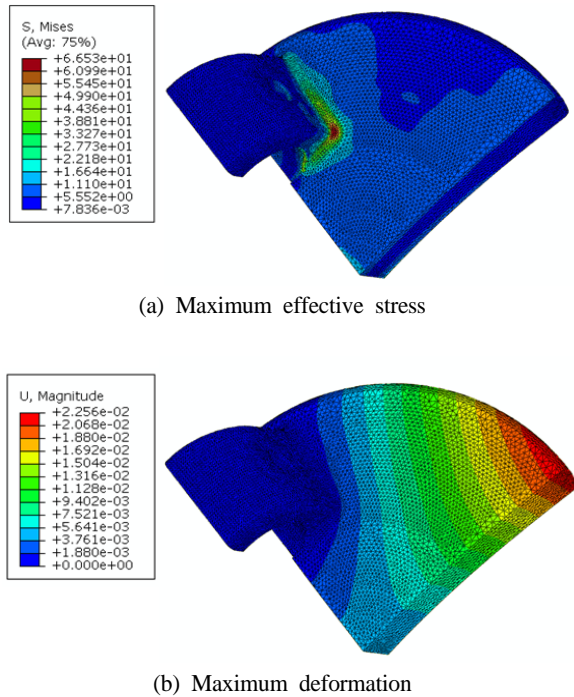


Fig. 10. Effective stress and deformation after FE analysis of optimal 3-D valve disc model



Fig. 11. Optimal butterfly valve disc printed by 3D printer

소 모델을 수립하고 경계조건을 부여하였다. 밸브 디스크의 전면부에 부착된 두 개의 브라켓 원통 내면을 완전구속($U_x=U_y=U_z=0$) 처리하였고 1/4로 잘린 면들에 대칭조건을 적용하였다. 또한 밸브 디스크의 후면과 측면 부위를 제외한 모든 면들에 설계 압력 4 kg/cm^2 (0.4 MPa)를 적용하였다. 해석에 사

용된 요소는 3차원 10절점 4면체 요소인 C3D10을 사용하였다. 해석 후 밸브 디스크의 유효응력 값을 얻어 재료의 항복강도와 비교하여 건전성을 살펴보았다. 또한 밸브 디스크의 누유 여부를 판단하기 위해 해석 후 디스크의 최대 변형량과 위치를 살펴보았다. Fig. 10의 (a)는 최적의 밸브 디스크 모델에 대한 구조해석 후 응력분포를 보여준다. 밸브 디스크의 전면부와 브라켓의 접하는 각이 진 곳에서 응력집중을 확인할 수 있었으며 유효 응력 값이 6.65 MPa 이었다. 밸브 소재인 SC450의 항복강도 225 MPa 에 비해 극히 미미한 값에 해당되므로 최적화된 버터플라이 밸브 디스크 모델의 강도는 건전한 범위에 포함된다. 또한 Fig. 10의 (b)는 해석 후 변형량을 보여준다. 상용 버터플라이 밸브 디스크에서 확인되는 변형위치와 동일하게 디스크 원주에서 가장 큰 변형량을 주었으며, 해석에 의한 변형량은 0.0226 mm 이다. 이는 상용 밸브 디스크의 설계 기준 0.25 mm 보다 낮은 값으로서 최적화 모델이 유효함을 확인하였다.

4-3. 경량 버터플라이 밸브 디스크 제작

Fig. 11은 위상최적화 해석 및 설계를 통해 완성된 밸브 디스크 부품이 3차원 프린팅으로 제작이 가능한지 확인하기 위해 상용 3차원 프린터를 이용하여 출력한 밸브 디스크를 보여준다. 우선 파일시스템의 변환이 필요하여 3차원 부피를 갖는 최적화된 캐드 모델링 데이터를 3차원 프린팅을 위한 STL 파일로 변환하였다. 3차원 프린팅을 위한 파일 확장자 변환을 마친 후 3차원 프린터를 이용하여 위상최적화한 버터플라이 밸브 디스크를 출력하였다. 이때 사용된 필라멘트는 PLA 타입이다. 3차원 프린팅을 이용한 최적의 밸브 디스크 제작이 가능함을 확인하였고 본 연구의 위상최적화 해석 및 설계 기법의 유효성을 확인하였다. 향후 다양한 형상과 크기를 가지는 발전설비용 부품의 경량 설계 및 제조가 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 3차원 프린터를 이용하여 발전설비용 버터플라이 밸브 디스크 부품의 제조가 가능한 위상최적화 설계 방법을 제안하였으며, 본 연구를 통해 수행된 내용을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 버터플라이 밸브 디스크를 디스크 원판과 브라켓으로 구분하여 각각 위상최적 설계 후 최적의 단면을 얻어 다시 조립하는 과정을 거쳐 최적의 3차원 경량 밸브 디스크 모델을 완성하였다.
- (2) 최적의 3차원 밸브 디스크 모델을 이용하여

설계 압력 4 kgf (0.4 MPa)을 적용한 후 유한요소해석을 수행하였다. 해석 후 밸브 디스크 원판과 브라켓이 교차되는 부위에서 최대 유효응력을 주었으나 재료의 항복강도보다 극히 작은 값을 주었다. 또한 디스크 원판의 원주 끝에서 최대 변형을 보였으나 설계 기준 값보다 작아 최적 모델의 구조적 안전성을 확인하였다.

(3) 3차원 프린팅을 이용하여 최적의 3차원 버터플라이 밸브 디스크 모델이 출력이 가능함을 확인하였으며 본 연구의 위상최적 설계기법의 유효성을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2017학년도에 청주대학교 산업과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었음.

References

1. Michell, A. G. M., 1904, The limits of economy of material in frame structures, *Philosophical Magazine*, Vol. 6(8), pp. 589-597.
2. Prager, W., Rozvany, G. N., 1977, Optimization of the structural geometry. In Bednarek A. R., Cesari, L.(Eds.), *Dynamical systems, Proceedings of International Conference on Gainsville Florida*, New York, pp. 265-293.
3. Bendsoe, M. P., Kikuchi, N., 1988, Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 71, pp. 197-224.
4. Dassault Systems, 2016, *Topology and shape optimization with ABAQUS*
5. NX8.0 Documentation, 2012
6. Hans, A. E., Niels, O., 2001, Topology optimization of continuum structures: A review, *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 54(4), pp. 331-390.
7. Stolpe, M., Svanberg, K., 2001, An alternative interpolation scheme for minimum compliance topology optimization, *Structural Multidisciplinary Optimization*, Vol. 22, pp. 116-124.
8. Sigmund, O., Clausen, P. M., 2007, Topology optimization using a mixed formulation: An alternative way to solve pressure load problems, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 196, pp. 1874-1889.
9. James, K. A., Hansen, J. S., Martins, J. R. R. A., 2009, Structural topology optimization for multiple load cases using a dynamic aggregation technique, *Engineering Optimization*, Vol. 41(12), pp. 1103-1118.
10. Martine, P. B., Niels, O., John, E. T., 1983, A variational formulation for multicriteria structural optimization, *Journal of Structural Mechanics*, Vol. 11, pp. 523-544.
11. KS D4101, 2011, Carbon steel castings, pp. 1-14.
12. Dassault Systems, 2017, *ABAQUS User Manual*.