

고차압 밸브의 속도제어형 트림에서 캐비테이션 억제에 관한 수치적 연구

김 대 권* · 손 채 훈*†

* 세종대학교 기계공학과

Numerical Study on Cavitation Reduction in Velocity-Control Trim of Valve with High Pressure Drop

Dae Kwon Kim* and Chae Hoon Sohn*†

* Department of Mechanical Engineering, Sejong Univ.

(Received March 25, 2013 ; Revised July 12, 2013 ; Accepted July 17, 2013)

Key Words: Cavitation(공동 현상), Velocity Control(속도제어형), Valve Trim(밸브 트림), High Pressure Drop(고차압)

초록: 본 수치적 연구에서는 국내의 발전소에서 사용되는 일반적인 고차압 트림의 형상 중 대표적으로 사용되는 형상의 트림을 기본형 트림으로 정하여, 이를 설계한 후 캐비테이션과 유량의 관점에서 유동 특성을 살펴보았다. 실제로 운전되는 발전소시스템의 운전조건을 참고하여 고차압 조건으로서 입·출구 차압을 18.7 MPa로, 온도를 160 ℃로 설정하였다. 트림의 주요 설계 인자로서 유로의 면적, 유로의 단(stage)과 유로의 방향을 채택하여, 유량과 캐비테이션 발생 특성을 개선하기 위해 기본형 트림을 재설계하였다. 개선을 위해 트림을 반경방향으로 세 영역으로 나눈 후 각 영역에서 재설계 인자를 이용하여 형상을 변경하였다. 4가지의 재설계 모델을 제안하였으며, 각 모델 형상에 대한 수치해석을 수행하였다. 유량 및 캐비테이션 발생량의 관점에서 기본형 트림과 설계개선 트림들을 비교하여 재설계 모델의 성능이 개선되었음을 확인하였다.

Abstract: Flow characteristics of velocity-control trim in a valve is investigated numerically with high pressure drop. A basic trim widely used for a valve in domestic powerplants is selected and designed for a baseline of velocity-control trim. The numerical analysis is focused on flow rate and cavitation with the basic trim. For a condition of high-pressure drop, pressure drop between inlet and outlet and fluid temperature are selected to be 18.1 MPa and 160℃, respectively, which are typical ones considering operating conditions adopted in powerplants. With this baseline model and condition, design changes are made for improvement of flow rate and cavitation phenomenon. For re-design, trim is divided into three zones in radial direction and design parameters of flow area, stage, and flow direction are considered in each zone. With these combined parameters applied to each zone, 4 models with design changes are proposed and their flow rates and cavitation areas are investigated. From comparison with those in the baseline model of a basic trim, proposed models show better performance in both flow rate and cavitation.

- 기호설명 -

u_i : i -방향 속도

x_i : i -방향 좌표계

p : 압력

Q : 체적 유량 [cm^3/s]

t : 시간

τ : 응력

ρ : 밀도 [kg/m^3]

1. 서론

밸브는 작동유체의 유량 및 압력제어를 위해 사용되는 중요한 유체기계 부품의 한 종류이다. 특히, 발전소 및 일반/특수 기계계통에서 사용되는 고차압용 밸브는 밸브의 운전 특성상 고온 고

† Corresponding Author, chsohn@sejong.ac.kr

압의 작동조건에서 사용된다. 고온·고압에서 사용되는 밸브로는 주로 버터플라이 밸브, 볼 밸브, 글로브 밸브가 사용된다. 그중 글로브 밸브는 다용도로 사용되고 있으며, 유지보수가 쉽고 고온·고압에서도 사용이 가능하다는 장점때문에 널리 사용되고 있다.⁽¹⁾ 본 연구에서는 글로브 밸브에 장착되어 있는 트림장치에 대한 연구를 진행하였다.

고차압용 글로브 밸브내에서는 유체가 밸브를 통과할 때 강력한 압력강하가 발생하게 되는데, 이러한 차압은, 밸브 안에 장착되어 있는 트림이라는 장치를 통과하면서 형성된다. 이러한 트림의 종류는 크게 압력제어형 트림과 속도제어형 트림으로 구분된다. Fig. 1에 압력제어형과 속도제어형 트림을 나타내었다. 압력제어형 트림은 유체가 오리피스관을 통과하면서 압력을 잃었다가 다시 회복하는 것을 반복하면서 단계적으로 형성되는 차압을 이용한 것으로, 설계 및 제작이 용이하며 대부분의 트림에서 적용되는 방식이다. 하지만 압력제어형 트림 내부의 베나교축부(vena contracta)에서 압력이 낮아지고 속도가 빨라지므로 교축부에 캐비테이션 현상이 집중되고 이로 인해 캐비테이션 제어가 어려운 단점을 가지고 있다.⁽²⁾ 캐비테이션이 발생하면 유동내에 기포가 형성되어 밸브 벽에 손상을 주며 심한 경우 구멍이 생기게 되어 밸브 수명이 급격히 단축된다. 압력제어형의 경우 유로 수축부에서의 유동 가속을 이용하여 압력 강하를 유발하므로 캐비테이션 현상의 국부적 집중 현상을 피할 수 없고, 본질적으로 캐비테이션 발생을 회피하기 어렵다. 한편, 속도제어형 트림에서는 트림의 좁은 유로를 고속의 유체가 지나감으로써 유체가 유로면적과 접촉하면서 발생하는 유체저항으로 고차압을 실현시키기 때문에 캐비테이션 현상이 압력제어형에 비해 적게 나타나고 특정부위에 집중되는 현상을 피할 수 있다.

현재 국내에서 트림 개발은 주로 압력제어방식인 케이지 홀(cage hole) 트림에 관한 연구가 주를 이루고 있다. 케이지 홀의 구멍(hole) 크기 변경이나 베나교축부 면적의 변화로 원하는 설계를 수행한다. 강민구⁽³⁾는 글로브 밸브에서의 케이지 홀의 크기를 달리한 모델을 장착한 밸브의 캐비테이션 발생량을 측정하였다. 안영준 등⁽⁴⁾은 트림을 장착한 글로브 밸브의 트림부 형상에 따른



(a) Pressure-control trim (b) Velocity-control trim

Fig. 1 Photographs of control-valve trims

캐비테이션 발생을 연구하였으며 트림형상을 바꾸어가며 밸브의 전체적인 유동장을 확인하였다. 김대권 등⁽⁵⁾은 속도제어형 트림의 요소 유로 연구를 수행하여, 굴곡횟수와 길이에 따른 유동해석을 수행하여, 굴곡횟수에 따라 일정한 길이의 비에서 유량의 최대치가 나타남을 확인하였다. 기존 선행연구를 바탕으로 본 연구에서는 속도제어형 트림의 설계변경을 통해 유량범위 500~666 cm³/s (30~40 LPM)를 만족하고, 캐비테이션 발생량을 줄이는 모델을 고안하여 제안하고자 한다.

2. 수치해석 및 방법

2.1 지배방정식

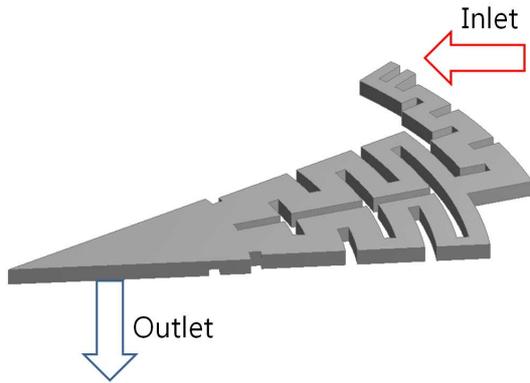
연속방정식과 운동량방정식, 즉 Navier-Stokes 방정식의 풀이를 통해 유로 내부의 유동장을 모사하였다. 지배방정식은 다음과 같다.^(6,7)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

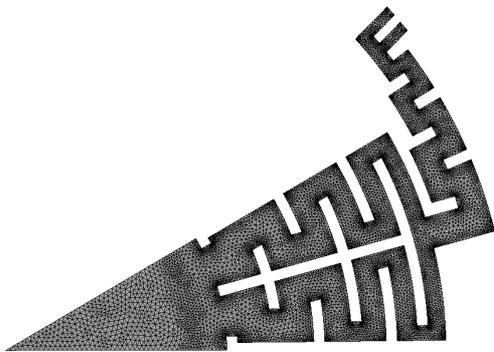
$$\frac{\partial (\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j u_i)}{\partial x_i} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_i} \quad (2)$$

고차압 밸브내 유동 계산의 경우, 계산 영역내의 매우 좁은 구간에서 유동 변화 현상이 발생하게 된다. 이러한 상황에서 경계층과 경계층 밖의 유동현상을 잘 모사할 수 있는 난류 모델로서 SST (shear stress transport) 모델을 선정하였다.⁽⁷⁾ 캐비테이션 모델로는 Rayleigh-Plesset 식⁽⁸⁾을 채택하였다.

지배방정식의 풀이를 위해 유체해석 코드인 ANSYS-CFX⁽⁸⁾를 사용하였다. 수치해석 방법과 수치모델의 유도에 관한 자세한 내용은 참고문헌^(9,10)에 자세히 기술되어 있으므로 여기에서는 생략하였다.



(a) Geometry of a basic trim



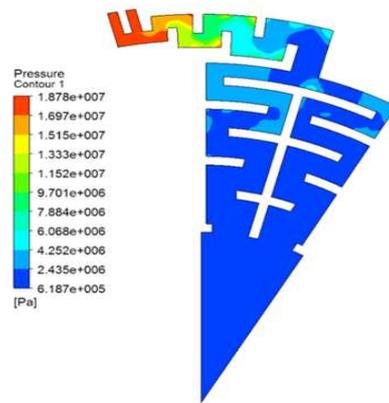
(b) Computational grids

Fig. 2 Geometry and computational grids of a basic trim (outer diameter: 82 mm, inner diameter: 32 mm)

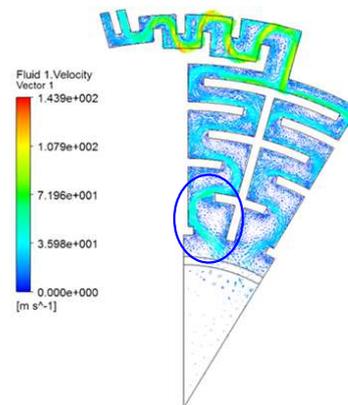
2.2 경계조건

본 연구에서의 수치해석 경계조건으로 트림에서의 입·출구의 압력은 각각 18.8 MPa, 0.7 MPa로 설정해주었고, 작동유체인 물의 온도와 포화증기압을 160°C, 0.627 MPa로 설정하였다. 이러한 계산조건은 실제 발전소 운전계통의 데이터를 참고하여 결정하였다.

기본형 트림의 단면 형태의 최소 단위의 형태와 사용된 비정렬 격자계를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)에서 회색으로 음영 표시된 부분이 유체가 흐르는 유로를 나타내며, 흰색으로 나타낸 부분은 고체 벽 부분이다. 외곽에 입구(inlet)가 있으며, 중심부에 수직으로 유체가 빠져나가는 출구(outlet)가 있다. 이 형태가 원주방향으로 반복되어 디스크 모양을 갖게 된다. 해석시간의 단축을 위해 트림 단면에서 반복되는 최소단위 형태의 유로, 즉 Fig. 2에 나타낸 유로(중심각 30도에 해당)에 대해 수치해석을 수행하였다. 좌우의 경



(a) Pressure Field



(b) Velocity vector field

Fig. 3 Pressure and velocity vector fields in a basic trim

계에는 주기적 경계조건(periodic boundary condition)을 부여하였다. 벽 근처에서는 표준 벽 함수(standard wall function)를 사용하였다.

예비 계산을 통해 계산 결과에 끼치는 격자의 존성을 확인하여 충분한 격자를 사용하도록 하였다. 이를 통해 본 수치해석에서 계산에 사용된 격자의 수는 약 55만개로 정하였다. 이에 따라 y^+ 값으로 약 100 내외의 값을 갖게 하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 기본형 트림의 해석 결과

본 연구의 해석대상 트림으로 먼저 기본형 트림을 선정하였다. 기본형 트림은 굴곡방향이 일 반적인 형태인 90° 지그재그 형태를 가지며 유로의 단(stage; 유동방향이 바뀌는 부분) 수를 맞추기 위해 입구부에서는 접선 방향으로 흐르다가

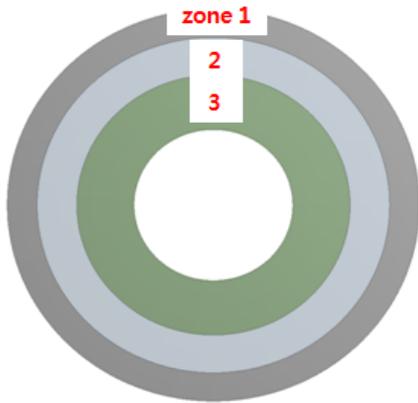


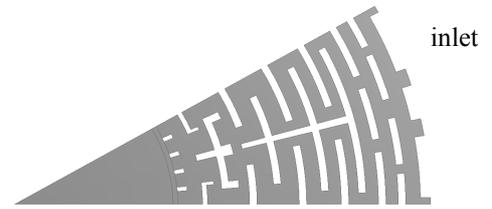
Fig. 4 Three zones in a trim for redesign (outer diameter: 82 mm, inner diameter: 32 mm)

반경 방향으로 전환이 되는 트림으로 유로의 단(stage)수는 총 24개이다. 속도제어형 트림에서 통상적으로 채택되는 단의 수를 가지고 있는 형상을 초기 모델로 선정하여 해석을 실시하였다. 해석 결과로부터 유량 및 캐비테이션 발생량을 조사하였다.

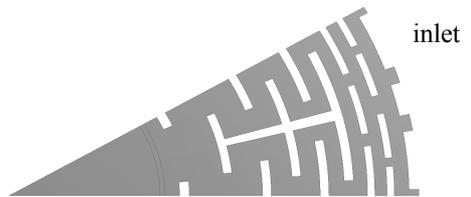
기본형 트림의 해석 결과로부터 압력장과 속도 벡터장을 추출하여 각각 Fig. 3에 나타내었다. 기본적인 유로방향이 유로의 모양대로 90° 지그재그 형태로 나타나고 유로 출구부분에서의 면적이 커서 급격한 압력저하가 없을 것으로 예측된다. 기본형 트림의 속도장을 보면 입구부에서 압력의 섭동을 일으키며 단(stage)를 지나지만 가운데 부분인 대칭유로를 통과하면서 속도가 일정하게 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 기하학적 형상으로 대칭 부분에 유량이 고르게 분포되지 못하고 왼쪽으로 상당히 치우쳐 많은 유량이 흐르는 것을 관찰할 수 있다. 비대칭적 유동은 유로의 끝단에서 심한 와류현상을 발생시키고, 한쪽 유로 즉, 비대칭적 유동에서 많은 유량이 흐르는 유로쪽에서 발생하는 강한 와류 유동으로 인해 캐비테이션 현상이 쉽게 일어날 것으로 예상할 수 있다. Fig. 3(b)의 타원 표시 부분에서 광범위하게 캐비테이션이 발생하였다.

3.2 설계 변경

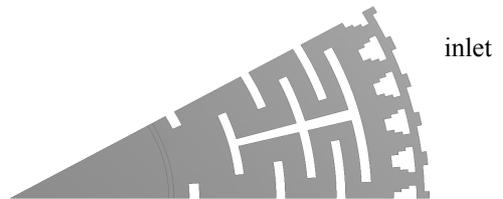
트림의 형상을 재설계하여 외경과 내경을 유지한 채로, 유량은 설정 범위인 500~666 cm³/s를 만족하고, 캐비테이션 발생부위가 기존 트림에서보다 줄어드는 효과를 보고자 하였다. 이를 위해 몇 가지 설계인자를 이용하여 재설계하였다. 트림의 재설계 인자로는 굴곡 방향과 유로의 폭(width),



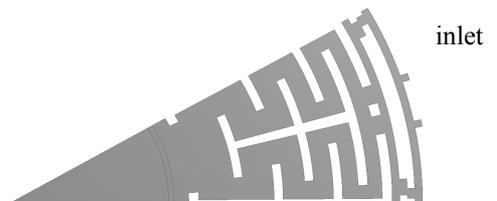
(a) Redesign 1



(b) Redesign 2



(c) Redesign 3



(d) Redesign 4

Fig. 5 Geometries of redesigned trim models

유로의 단(stage)을 꼽을 수 있다. 본 연구에서는 이러한 세 가지 설계 인자를 바탕으로 설계 변경을 수행하였다. 재설계시 트림의 원관 전체를 반경방향으로 세 영역(입구부, 중간부, 출구부)으로 나누어 각 영역에 적합한 설계 인자값을 적용하였다. 이를 통해 트림의 성능 개선을 달성할 수 있을 것으로 기대하였다. Fig. 4에 트림의 재설계를 위해 구분한 세가지 영역(zone)을 나타내었다.

3.3 재설계 모델의 수치해석 결과

Fig. 5에 재설계한 트림 모델의 형상을 나타내

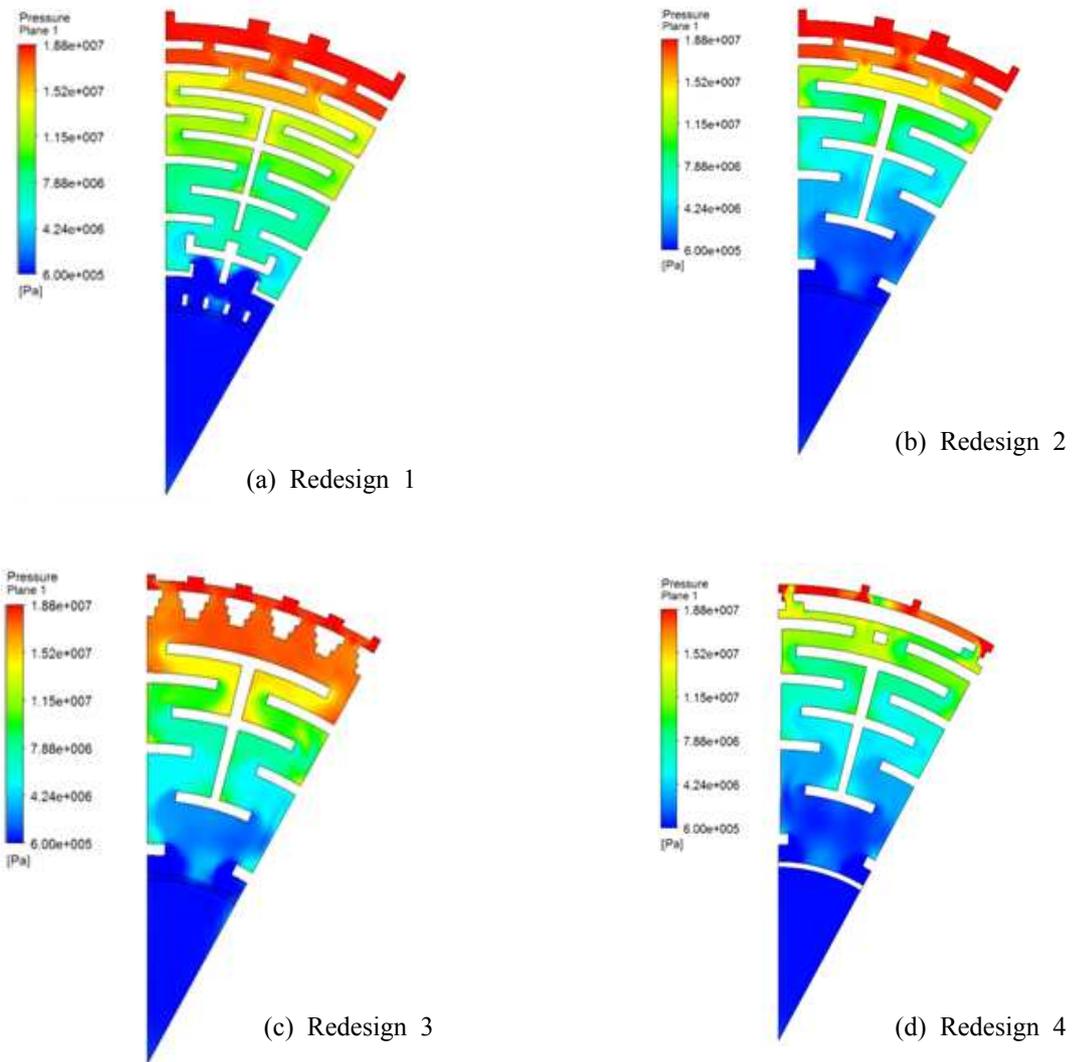


Fig. 6 Pressure fields for several redesigned trims

었다. 제안된 4개의 트림은 각각 재설계 인자를 반영한 모델로써 4가지 모델 모두 기본트림에서 채택했던 입구부의 접선 방향의 유로를 반경 방향으로 바꾸어주었다. Fig. 5(a)는 재설계 1번 모델을 나타낸다. 입구부분을 포함하는 영역 1에서 반경 방향으로 유로를 바꾸어주었고, 굴곡방향은 일반형이 아닌 계단형 유로방향으로 설계하였다. 이는 유동이 안정적으로 트림유로를 통과하도록 하기 위함이며, 유량이 감소할 것을 기대하였다. 영역 2는 기본형 트림과 기하학적 형상은 비슷하나 유로 면적을 변화시켰다. 영역 1로 들어온 유체가 안정적으로 흐를 수 있게 설계하였다. 설계시 면적변화의 폭을 작게 하였다. 출구부를 포함하는 영역 3에서는 블록형상과 유로가 와류섭동을 일으킬 수 있도록 유로 면적을 작게 하고 형

상을 복잡하게 하였다. 이로써 차압의 효과를 얻으면서 유량을 감소시키도록 고안하였다.

Figure 5(b)는 재설계 두 번째 모델을 나타낸다. 이 모델에서는 영역 1과 영역 2의 기하학적 형상이 서로 동일하게 설계되었고, 영역 3부분의 형상은 영역 2와 비슷한 형상으로 설계하였다. 영역 2와 3부분에서 재설계 모델 1과는 다르게 유로 면적의 변화를 크게 주었다. 이는 재설계 모델 1과 비교하여, 영역 3부분이 어떠한 결과 값의 차이를 유발하는지를 파악하기 위함이다. Fig. 5(c)는 재설계 모델 3을 나타내었다. 이 모델의 영역 1은 계단식으로 점차 확장되는 유로를 가지고 있다. 재설계 모델 1, 2와는 다르게 입구측에서 계단형으로 유로가 확장되는 설계 변경 아이디어는 영역 1부분에서 유체의 압력을 떨어뜨려

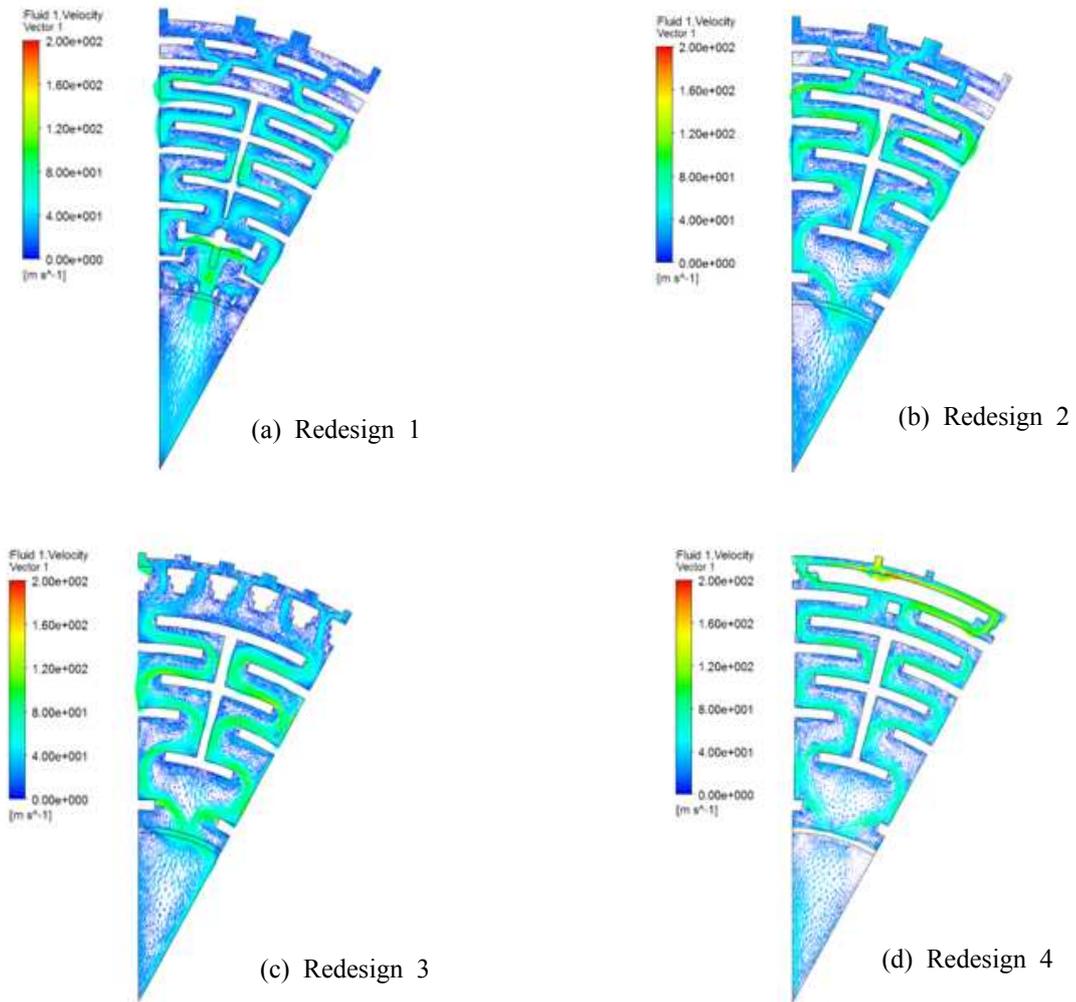


Fig. 7 Velocity-vector fields for several redesigned trims

영역 3부분에서 순간적인 압력저하가 발생하는 현상을 줄이기 위해 고안되었다. 영역 2와 3부분은 재설계 모델2와 동일하게 설계되었다. 재설계 모델 4는 Fig. 5(d)에 나타내었고 일반형태의 유로구조를 가지고 있다. 유로의 면적은 꾸준히 증가하는 형태를 띠고 있다. 속도제어형 트림이 출구로 나가면서 면적이 증가하는 일반적인 형태에서 착안하여 고안된 설계변경으로서 캐비테이션 발생량의 저감을 목적으로 하였다. 또한 입구면적은 다른 모델보다 더 작게 설계하여, 유량을 낮추고자 하였다.

네 가지 재설계 모델은 기본형 모델에서 영역을 나누어 영역별로 특성을 고려하여 설계 변경한 모델들로서 기본형 유로의 단점인 불안정적인 유량분포를 모든 모델에서 수정하였고, 안정적인 압력 저하를 유도하는 계단형 형태의 유로를 채

택하였다. 이러한 점은 저자들의 이전의 연구⁽¹¹⁾에서 파악한 사실로서, 계단형 유로가 안정적인 압력저하를 유도하는 형태이며 이를 통해 압력이 상대적으로 일정하게 떨어지는 효과를 볼 수 있다.

Figure 6과 7에 재설계 모델의 계산 결과로서 압력장과 속도벡터 분포를 나타내었다. 우선 Fig. 6(a)의 압력장을 살펴보면, 입구부부터 출구부까지 굴곡에 따라 압력이 서서히 감소함을 확인할 수 있다. 영역 2에서 반경방향으로 가면서 중간 영역의 압력은 크게 저하되지 않음을 알 수 있다. 반면 출구부의 고속영역에서 압력이 급감함을 알 수 있는데 이로부터 해당영역에서 캐비테이션이 발생할 것으로 예상된다.

재설계 1번 모델의 속도벡터장인 Fig. 7 (a)를 확인하면 출구부 영역에서 속도가 급격히 상승한

다. 이는 면적의 변화가 매우 커서 발생하는 것으로 판단되며 이에 해당부위에서 캐비테이션이 발생할 가능성이 높다고 판단할 수 있다.

Fig. 6 (b)에 나타난 재설계 2번 모델의 유동패턴을 살펴보면 재설계 1번 모델에 비해서 2영역에서의 압력저하가 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있었다. 이는 2영역에서의 초기 면적은 동일하나 굴곡에 따른 면적변화가 재설계 모델 1번보다 크게 증가함에 따라 압력강하에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다. 반면 속도장으로부터 유로 후단 부분에 와류가 생성됨을 확인하였고, 생성된 와류의 강도는 약하고 넓은 부분에 분포하였다. 넓은 영역에 걸쳐 형성된 약한 와류장은 국부압력 손실을 줄일 수 있기 때문에 해당영역에서의 캐비테이션 생성량은 매우 적을 것으로 기대된다. Figure 8에 재설계 모델 2번에 대한 캐비테이션 발생 부위를 나타내었다. 캐비테이션 발생량은 유체 유동중에 발생한 증기의 질량 분율(vapor mass fraction)로 정량화하였다. 예상대로 아주 작은 체적에서 캐비테이션이 발생하였다. 다른 모델의 경우에도 주로 영역 3에서 캐비테이션이 발생하였으며, 모델 2보다 더 넓은 영역에서 관찰되었다.

재설계 3번 모델에 대한 압력장을 나타낸 Fig. 6(c)로부터, 입구 초반부에 유로 면적이 급격하게 상승하고 다시 굴곡형상으로 줄어드는 형상으로 인해 특징적인 현상이 관찰되었다. 즉, 압력 분포

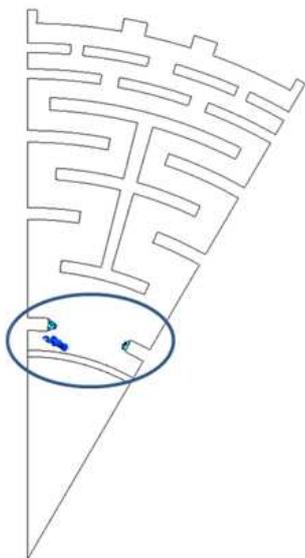


Fig. 8 Cavitation formation zones in redesign model 2

로부터 영역1 부분에서의 압력이 다른 모델보다 낮아짐을 알 수 있다. 또한, 영역 2의 중간부분에서의 속도가 다른 모델에서 보다 높게 나왔다. 재설계 3번 모델에서는 입구가 많고 입구면적의 합이 크므로 질량보존법칙에 의해 평균속도가 상대적으로 낮게 나오는 것을 확인할 수 있었다.

재설계 모델 4번의 결과를 나타낸 Fig. 6 (d)을 보면 입구부 압력이 전반적으로 낮지만 국부적으로 압력이 높게 나오는 부분을 확인할 수 있다. 재설계 모델 중 가장 작은 입구부 면적을 갖고 있으며 유로 면적이 꾸준히 상승하는 모델인 4번 모델에서의 유동패턴은 기하학적 대칭 형상부분에서 유동이 균등하게 퍼지는 것을 확인할 수 있다. 이는 안정적인 유동을 유지하는데 도움이 될 것이라고 판단된다. 다른 모델에 비해서 꾸준한 면적변화로 인해 안정적인 유동형태를 띄는 4번 모델의 경우 평균 속도가 매우 낮게 나오는 것을 확인할 수 있었다.

Figure 9에 기본형 트림 및 재설계 트림의 캐비테이션 발생량과 유량을 나타내었다. 재설계 모델 1은 영역 3부분에서 캐비테이션 발생이 가장 심하게 나타났다. 영역 3부분에서 형상의 복잡성이 캐비테이션의 생성을 촉진하는 것으로 판단된다. 재설계 모델 2의 경우, 입구부분이 계단형으로 되어 있어 안정적으로 유량을 공급할 수 있었고, 영역 3부분에서의 형상을 단순화시키고 유로 면적이 넓어진 효과로 캐비테이션이 감소하였다. 재설계 모델 3의 경우, 영역 1부분에서 압력이 고르게 떨어지는 것이 캐비테이션 감소에 영향을 주었을 것으로 판단된다. 영역 3부분의 진입부를

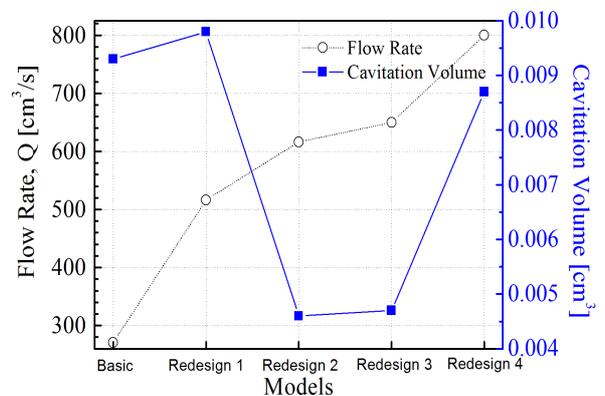


Fig. 9 Flow rates and cavitation volumes for a basic and 4 redesigned Trims

넓힌 효과에 의해서도 캐비테이션이 부분적으로 감소하였을 것으로 판단된다. 재설계 모델 4의 경우 초기 유량을 작게 하려고 입구면적을 작게 설정하였는데, Fig. 8에서와 같이 가장 큰 유량 흐름을 보이고 있다. 재설계 트림 4의 경우를 제외하고 나머지 세가지 모델의 트림이 의도했던 유량설계 범위안에 있다. 캐비테이션 발생량이 상대적으로 작은 두 모델, 즉 재설계 2와 3의 모델은 적절한 범위에 속하는 유량을 보여주었고, 캐비테이션 발생량이 감소하였으므로 고차압 트림의 저개도 부분에서 적합한 트림이라고 판단된다. 즉, 적절한 트림의 두가지 설계 조건(적절한 유량 범위 및 캐비테이션 발생 최소화)을 만족시킬 수 있는 모델이라고 판단된다.

4. 결 론

발전소의 고차압 밸브에 사용되는 속도제어형 트림의 기본형 모델을 설계하고 수치해석을 수행하여 유동장으로부터 유량과 캐비테이션 발생경향을 예측하였다. 기본형 트림의 해석 결과를 토대로 4가지 재설계 모델을 제안하였다. 수치해석 결과, 재설계 모델의 입구부에 들어오는 유량이 기하학적 형상이 대칭이 되는 곳에서 비대칭적인 유동장을 형성하면 국부적인 압력강하로 인하여 캐비테이션이 발생하는 것을 알 수 있었다.

재설계 모델 4의 계산 결과로부터, 유로의 면적이 꾸준히 증가하는 경우 입구부의 면적이 매우 작더라도 가장 큰 유량성능을 보임을 알 수 있었다. 이로써 입구부의 면적이 유량을 좌우하는 요소가 될 수 없음을 알 수 있었다. 또한 캐비테이션의 생성은 입구에서 유동이 얼마나 안정적으로 흘러가느냐가 중요한 요소라는 것을 알 수 있었다. 재설계 2와 3이 유동이 안정적으로 흐르는 모델이다. 또한 유동이 안정적으로 흐르더라도 유로의 마지막 부분에서 면적이 작고 와류가 심하면 캐비테이션 발생량이 급속하게 증가하는 것을 알 수 있었다. 재설계 모델로 파악한 결과 끝단에서의 면적은 증가하고 입구부에서 안정적인 유량이 흘러 들어올 경우 캐비테이션의 발생량이 감소함을 확인하였다.

본 연구에서와 같은 수치해석적 접근을 통해 우수한 성능을 가진 모델을 설계 개선 모델로서 제시할 수 있다. 향후, 좀 더 체계적인 접근과 정량화 방법을 도입하여 최적화 설계 절차를 확립

할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 키벨브기술(주) 및 부산원자력발전소의 일부 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다. 저자중 손채훈은 2013년도 세종대학교의 연구년 지원을 통해 본 연구를 수행하였음을 밝힙니다. 또한, 본 연구는 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 부분적으로 받아 수행되었음(No. 2013-023030).

참고문헌

- (1) Skousen, P. L., 2005, *Valve Handbook*, Mc-Graw Hill, New York.
- (2) Yan, Y. and Thorpe, R. B., 1990, "Flow Regime Transitions due to Cavitation in The Flow Through an Orifice," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol 16, Issue 6, pp. 1023~1045.
- (3) Kang, M. K, 2008, "A Study on Characteristics of Cavitation Formation in a Globe Valve with Cages Hole Size of Different Geometry," Master Thesis, Chungnam National University.
- (4) Ahn, Y. J., Kim, B. J. and Shin, B. R., 2007, "Numerical Analysis on Flow Characteristics of High Pressure Drop Control Valve with Anti-Cavitation Trim," *Journal of Korean Fluid Machinery Association*, Vol. 10, No. 4, pp. 61~70.
- (5) Kim, D. K. and Sohn, C. H., 2010, "A Numerical Study on Flow Characteristics in Elementary Paths of a Velocity-Control Trim," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 35, No. 3, pp. 245~253.
- (6) Alexandrou, A., 2002, *Principles of Fluid Mechanics*, Prentice-Hall, New Jersey, USA.
- (7) Menter, F. R., Kuntz, M., and Langtry, R., 2003, "Ten years of Industrial Experience With the SST turbulence Model," in *Turbulence Heat and Mass Transfer 4* (Edited by K. Hangalic, Y. Nagano, and M. Tummers), Begell House Inc., New York, pp. 625~632.
- (8) ANSYS Inc, 2009, *CFX User Manual*, Ver. 12,

Southpointe.

(9) ANSYS Inc, 2009, *CFX Advanced Turbulence Models*, Southpointe.

(10) Mentor, F., Ferreira, J. C., Esch, T. and Konno, B., 2003, "The SST Turbulence Model with Improved Wall Treatment for Heat Transfer Predictions in Gas

Turbines," *Proceedings of the International Gas Turbine Congress*, IGTC-2003-TS-059.

(11) Kim, D. K., 2011, " A Numerical Study on Anti-Cavitation Trim in a Globe Valve of High Pressure Drop," Master Thesis, Sejong University.