

'95 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

Vortex Valve의 설계인자 및 성능특성 분석

김영인, 황영동, 장문희

한국원자력연구소

요 약

원자력발전소의 안전성 향상을 목적으로 신형원자로 안전주입계통의 축압기 설계에 적용이 고려되고 있는 피동적 유량조절 장치인 vortex 밸브의 유동장을 해석하여 밸브의 특성에 영향을 미치는 주요 인자들을 도출하고 이 인자들의 영향을 분석하였다. 분석 결과 Vortex 밸브의 성능 특성은 수송유량, 제어유량, chamber의 반경, 입구면적, 마찰계수 등의 영향을 받는 것으로 나타났으며 이들 인자 중 chamber의 반경의 영향이 가장 크고 Reynolds수의 영향은 비교적 작은 것으로 파악되었다. 또한 주어진 유동조건에서 제어유량이 작은 경우 점성손실이 vortex 밸브의 유동특성에 미치는 영향이 증대되는 경향을 보였으며 유량이 증가할수록 Reynolds수의 영향은 감소하는 것으로 나타났다.

1. 서 론

Vortex 밸브 (혹은 vortex triode)는 입구, 출구 및 제어 port를 가진 원통형의 short chamber로 구성된 피동적 유량조절 장치로써(그림 1) 최근 개발되고 있는 신형원자로에서는 안전성 향상을 목적으로 안전주입계통의 축압기에 설치하여 안전주입유량을 조절할 수 있도록 설계하고 있다[1]. Vortex 밸브를 축압기에 설치하여 피동적 유량조절장치로 이용할 경우 냉각재상실사고 발생 초기에 요구되는 대유량과 초기유량의 약 20% 정도인 재관수 단계의 요구유량을 동시에 만족시킬 수 있도록 설계할 수 있다. 즉 축압기에 vortex 밸브를 설치할 경우 시간의 경과에 따라 자동적으로 유량조절이 이루어지므로 냉각재상실사고시 축압기에 저장된 봉산수를 노심냉각에 장기간 이용할 수 있으며 유량조절이 피동적 특성에 의하여 이루어지므로 원자력발전소의 신뢰도 및 안전성 향상이 기대된다.

그러나 vortex 밸브의 실제 적용을 위해서는 설계에 필요한 모든 작동 조건에서의 특성곡선의 개발과 실험을 통한 밸브의 성능의 검증이 필요하며 이를 위해서는 vortex 유동장의 물리적인 특성과 vortex 밸브의 설계 및 성능에 영향을 미치는 주요 인자들의 영향 파악이 선행되어야 한다.

본 연구에서는 기존 모델을 이용한 vortex chamber의 유동장 해석을 통하여 vortex 밸브의 성능에 영향을 미치는 유동 및 기하학적 인자들을 도출하고 일차원 해석 모델에 의한 성능해석 및 문헌조사를 통해 입수한 실험 데이터를 이용하여 이 인자들의 영향을 분석하였다.

2. Vortex Chamber의 유동 해석

2.1 해석모델

Vortex chamber내의 압력분포는 chamber내의 접선(tangential) 및 반경(radial) 방향의 속도 분포에 의해 결정되며 vortex chamber내의 유동은 chamber 상.하단 벽면에서의 점성효과에 크게 영향을 받는다. 본 연구에서는 vortex chamber의 유동장을 Wormley[4]의 모델에 따라 developing flow region과 developed flow region으로 나누고, chamber 상.하 벽면의 인접한 경계층유동과 chamber 중앙의 core flow로 분리하여 해석하였다(그림 2). Core flow는 비점성 유동으로 가정하였으며 접선 및 반경방향의 경계층은 동일한 두께를 가지고 chamber 외곽에서부터 발달하기 시작하는 것으로 가정하였다. 또한 경계층에 유입된 유체는 출구에 도달 할 때까지 경계층에 잔류하는 것으로 가정하면 비압축성 유체에 대한 vortex chamber의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\text{연속방정식} \quad \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\text{운동량식} \quad u \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{v^2}{r} + w \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_r}{\partial y} \quad (2)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{uw}{r} + w \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_t}{\partial y} \quad (3)$$

$$\text{Core의 운동량식} \quad u_\delta \frac{\partial u_\delta}{\partial r} - \frac{v_\delta^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (4)$$

$$u_\delta \frac{\partial v_\delta}{\partial r} + \frac{u_\delta v_\delta}{r} = 0 \quad (5)$$

위 식에서 u, v, w 는 반경방향, 접선방향 및 축방향의 속도를 나타내며 u_δ, v_δ 는 경계층과 core flow의 경계에서의 반경 및 접선방향의 속도, p 는 압력, τ 는 벽면에서의 shear stress를 나타낸다.

Chamber내의 유동을 축 방향의 압력이 일정한 상하 대칭유동으로 가정하고 방정식 (1)~(5)에 경계층에 대한 적분법을 적용하면 무차원화된 5개의 비선형 1차 연립미분방정식으로 변환할 수 있다. 방정식의 변환에는 상사법칙을 적용하여 구한 경계층의 velocity profile과 평판난류유동에 대한 Prandtl의 shear law를 사용하였으므로 이 방정식은 경계층 안에서의 속도 profile과 shear law가 주어지면 진행적분법에 의하여 해를 구할 수 있다.

변환된 비선형 1차연립 미분방정식은 문헌[4]에 주어진 속도분포 상관식과 shear law를 사용하여 Runge-Kutta Method를 이용한 수치적분법에 의해 해석하였다.

2.2 해석 결과

Vortex chamber의 압력분포에 가장 중요한 영향을 미치는 순환 분포(circulation distribution)에 대한 해석결과를 그림 3에 요약하였다. 이 그림에서 chamber내의 순환 분포는 두 변수 즉 swirl $\lambda (=v_\theta/u_0)$ 와 수정경계층 계수 $BLC^*(= \lambda \times BLC)$ [4]의 함수임을 보여 주고 있다. 여기서 경계층 계수 BLC 는 다음과 같이 정의된다.

$$BLC = \frac{2r_0 f}{h \left(\frac{\rho u_0 h}{2\mu} \right)^{1/4}} \quad (6)$$

그림 3에서 BLC^* 가 작은 값을 가지는 경우($BLC^* < 0.5$)에는 순환 분포가 일정한 potential vortex를 형성하며 BLC^* 가 증가함에 따라, 즉 swirl(λ), chamber 높이비(r_0/h), 또는 마찰계수(f)가 증가함에 따라 순환은 점차 감소하고 potential vortex는 chamber의 극히 일부분에 존재하고 있음을 보여주고 있다. 또한 BLC^* 가 일정한 경우를 비교하면 chamber 내의 전 영역에서 순환 분포가 거의 유사한 값을 가지므로 chamber 내의 압력분포 계산에 가장 중요한 인자는 수정 경계층 계수 BLC^* 임을 알 수 있다. 즉 순환 분포는 단일변수 BLC^* 의 지배적인 영향을 받으며, chamber내의 압력분포는 단일변수 BLC^* 에 의하여 결정됨을 알 수 있다.

수정 경계층 계수 BLC^* 를 vortex 밸브의 유동인자와 기하학적 인자로 표시하면 다음과 같다.

$$BLC^* = \lambda \times BLC = \frac{4\pi f \varepsilon r_o^2 W_c^2}{A_c (\overline{W_o})^{1/4} (0.5R_w)^{1/4}} ; R_w = \frac{W_m}{2\pi \mu r_o} \quad (7)$$

위 식에서 BLC^* 는 전체 수송유량 $\overline{W_o}$, 제어유량 $\overline{W_c}$, chamber 반경 r_o , 제어 port 면적 A_c , 입구 Jet recovery factor ε , 상하 양단 벽면에서의 마찰계수 f 에 크게 영향을 받으며 Reynolds 수 R_w 와 밸브 chamber의 높이에 비교적 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 또한 BLC^* 는 동작유체의 종류, 전체 수송유량, 제어유량, 입구 및 출구 압력 등의 유동조건이 주어지면 chamber 반경의 증가(또는 control port 면적이 감소)함에 따라 증가한다. 따라서 제어유량이 작은 경우 chamber 반경은 증대하고 control port 면적은 감소하므로 점성손실이 vortex 밸브의 특성에 미치는 영향이 증대되는 것을 알 수 있다.

3. Vortex 밸브의 설계인자 및 성능 특성

3.1 설계인자 및 성능해석 모델

Vortex chamber의 유동장 해석결과로부터 vortex 밸브의 성능특성은 제어 port 면적(A_c), 공급 port 면적(A_s), chamber의 반경(r_o) 및 높이(h), 출구면적(A_e) 등의 기하학적 인자와 최대유량을 기준으로 한 Reynolds수에 의하여 크게 영향을 받는 것으로 분석되었다.

Vortex 밸브의 성능해석은 R.T. Bichara 모델[5]을 이용한 전산프로그램으로 해석을 수행하였으며 해석결과를 수집된 실험 데이터와 비교하여 유동 및 기하학적 설계 인자들의 영향을 분석하였다. 이 모델은 입구의 혼합영역 및 main chamber 영역에서의 점성효과와 출구영역에서의 축방향 속도분포의 영향을 포함하고 있으며 해석시 요구되는 chamber 벽면에서의 점성손실 계수는 참고문헌[5]에 제시된 값을 사용하였다.

3.2 Vortex의 성능 특성 분석

Vortex 밸브의 특성에 중요한 영향을 주는 인자들을 설계변수로 나타내면 입구와 출구 면적비 (A_s/A_e), 제어 port 면적과 출구 면적비(A_c/A_e), chamber의 반경비(r_d/r_e) 및 chamber의 길이와 반경비(h/r_o)와 Reynolds수로 나타낼 수 있다.

그림 4는 Reynolds수를 변화시켜 수행한 실험 데이터[2]를 모의한 결과로써 해석결과는 실험 데이터를 비교적 정확히 모의하고 있다. 여기서 W_m 은 제어유량의 공급이 없는 경우의 최대 유량이며, 밸브의 공급측 압력과 출구측 압력이 일정한 조건에서의 값이다. 이 그림에서 $R_w = 940$ (물), 1340(공기), 1910(공기)에 대한 특성곡선은 해석결과와 실험 데이터 동작유체의 종류에 관계없이 동일한 특성을 나타내고 있으며 Reynolds수의 변화에 따른 영향도 비교적 작은 것으로 나타났다. 일반적으로 vortex 밸브의 특성은 Reynolds수가 큰 경우에는 Reynolds수의 변화에 큰 영향을 받지 않으나 Reynolds수가 작은 경우($R_w < 750$)에는 매우 민감한 것으로 알려져 있다.

그림 5는 출구면적을 고정시키고 제어 port 면적을 변화시켜 계산한 결과로써 제어 port 면적이 감소함에 따라 특성곡선의 각 점에서 요구되는 제어유량은 감소하고 있다. 이 결과는 제어유량이 일정할 경우 제어 port 면적이 감소하면 chamber 외곽에 형성되는 tangential velocity가 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 제어 port 면적이 감소하면 특성곡선의 각 점에서 요구되는 제어 압력은 증가한다.

그림 6은 공급 port와 출구의 면적비(A_s/A_e)의 변화에 따른 영향을 나타낸 그림으로 A_s/A_e 값이 큰 경우($A_s/A_e > 3.0$)에는 입구면적의 변화에 따른 밸브특성의 변화는 없는 것으로 나타났다. 그러나 A_s/A_e 의 값이 작은 경우에는 A_s/A_e 값이 감소함에 따라 특성곡선의 각 점에서 요구되는 제어 유량은 증가하였다.

그림 7은 반경비(r_o/r_e)의 변화에 따른 vortex 밸브의 성능곡선의 변화를 보여 주고 있다. 이 그림에서 전체수송유량이 일정한 경우 반경비 또는 출구면적이 증가함에 따라 요구 제어유량은 감소하는 것으로 나타났다. 또한 밸브의 반경비가 증가함에 따라 특성곡선의 모양도 변하고 있다. 그림 7을 살펴보면 $r_o/r_e = 0.089$ 인 밸브의 특성은 $0.45 < \overline{W} < 0.9$ 사이에서 전체유량의 변화가 비교적 일정한 비례특성을 보이거나 $r_o/r_e > 0.12$ 에서는 반경비가 증가함에 따라 밸브의 특성이 bistable한 경향이 있다. 반경비가 증가함에 따라 밸브의 특성이 proportional에서 bistable로 변화하는 특성은 vortex chamber의 점성손실효과와 직접적인 관계가 있는 것으로 알려져 있다[2].

그림 8은 참고문헌[2]의 chamber의 형상비에 대한 실험 데이터로써 vortex 밸브의 특성이 chamber의 높이에 거의 영향을 받지 않음을 보여주고 있다. 그러나 밸브의 특성이 chamber의 길이에 영향을 받지 않는 영역은 h/r_o 또는 r_o/r_e 에 의하여 제한을 받는다[2,3].

4. 결 론

Vortex chamber의 유동장 해석을 수행하여 유동의 물리적인 특성을 파악하고 vortex 밸브의 성능에 주요한 영향을 미치는 유동 및 기하학적 인자들을 파악하고 이 인자들이 vortex 밸브의 성능특성에 미치는 영향을 분석하였다.

분석 결과 vortex 밸브의 성능특성은 전체 수송유량, 제어유량, chamber의 반경, 제어유량 입구면적, 마찰계수와 Reynolds수 등에 의하여 결정되며 이들 인자 중 chamber 반경의 영향이 가장 크며 Reynolds수의 영향은 비교적 작은 것으로 분석되었다. 또한 주어진 유동조건에서 제어유량이 작은 경우 점성손실이 vortex 밸브의 유동특성에 미치는 영향이 증대되는 경향을 보였다.

또한 이들 유동인자와 기하학적 인자들의 영향을 해석 결과와 문헌조사를 통해 수집한 데이터를 중심으로 분석한 결과 vortex 밸브의 성능특성은 출구반경을 기준으로 한 chamber의 반경비에 가장 큰 영향을 받으며 chamber의 반경비는 밸브의 proportional 또는 bistable 특성을 결정하는 가장 중요한 인자로 밝혀졌다. 한편 Reynolds수의 영향은 비교적 작은 것으로 검토되었다.

5. 참고문헌

1. T. Shiraishi, et al., "Development of the Flow Controlled Accumulator." Proceedings of ANP92. 1992.
2. D. N. Wormley and H. H. Richardson, "A Design Basis for Vortex-Type Fluid Amplifiers Operating in the Incompressible Flow Regime". Trans. ASME, J. Basic Engineering, Vol. 92. 1970
3. H. Brombach, "Vortex Device in Hydraulic Engineering", Proceedings of the 5th Cranfield Conference, Cranfield, BHRA, 1972
4. D. N. Wormley "An Analytical Model for the Incompressible Flow in Short Vortex Chamber," Trans. ASME, J. Basic Engineering, Vol. 91, 1969
5. R. T. Bichara and P. A. Orner. "Analysis and Modeling of the Vortex Amplifier," Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering, Vol.91, 1969.

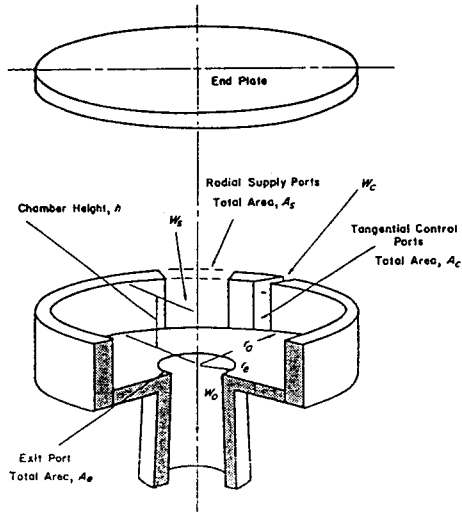


그림 1. Vortex 밸브의 개념도

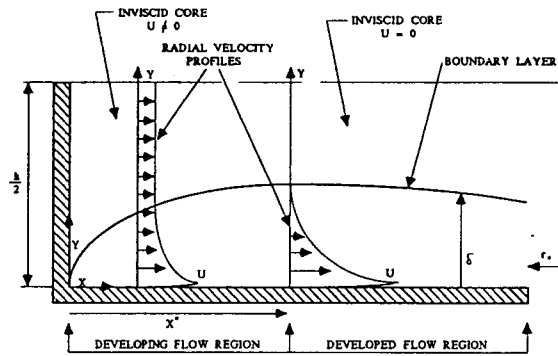


그림 2. Vortex Chamber의 유동장 해석 모델

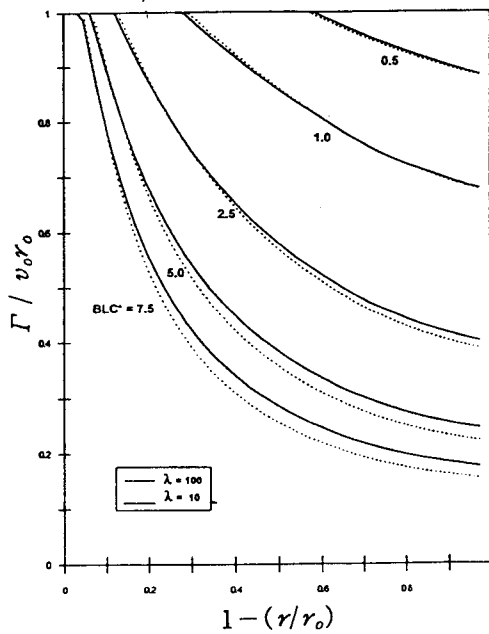


그림 3. Vortex Chamber의 순환 분포

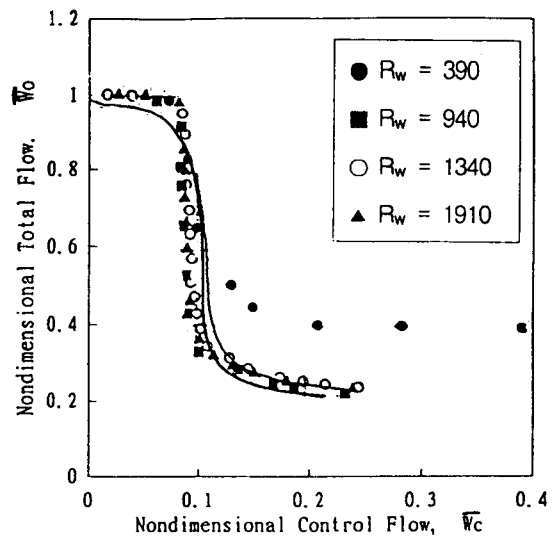


그림 4. Reynolds수 (R_w) 변화에 따른 성능특성 (실험데이터 : Ref.2)

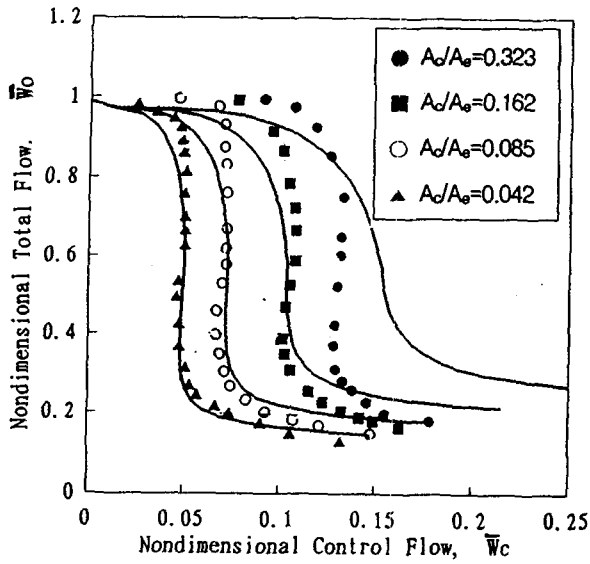


그림 5. 제어Port (A_c) 면적 변화에 따른 성능특성 (실험데이터 : Ref.2)

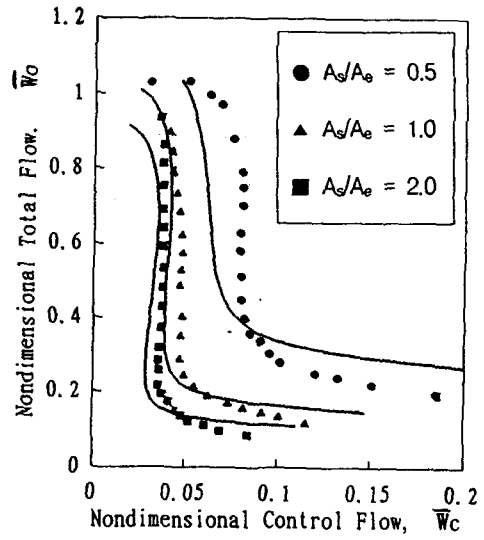


그림 6. 공급Port (A_s) 면적 변화에 따른 성능특성 (실험데이터 : Ref.2)

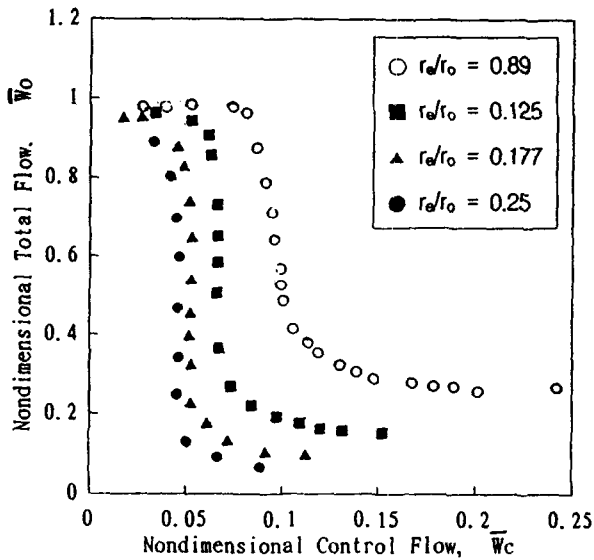


그림 7. 출구반경 (r) 변화에 따른 성능특성 (Ref.2)

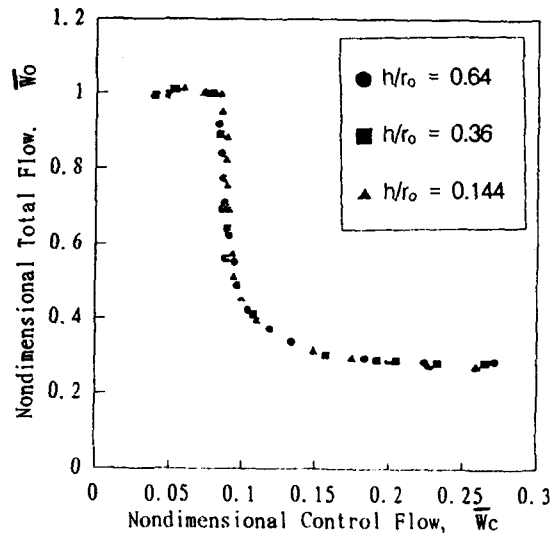


그림 8. 형상비 (h/r) 변화에 따른 성능특성 (Ref.2)