

'96 춘계 학술발표회 논문집

한국원자력학회

축압기 유량조절용 Vortex 밸브의 유동 특성

김영인, 황영동, 김성오, 이기영, 장문희

한국원자력연구소

요 약

차세대원자로의 안전계통 성능향상을 위하여 축압기 설계에서 채택하고 있는 피동적 유량조절 장치인 vortex 밸브의 특성을 분석하였다. 단순화된 해석모델을 이용하여 vortex chamber의 유동 pattern을 분석하였으며 vortex 밸브의 성능에 중요한 영향을 미치는 기하학적 인자들의 영향과 유동모드 전환시 주유량이 공급되는 수관의 수위거동 특성을 분석하였다. 또한 3차원 모의가 가능한 FLUENT 코드를 사용하여 vortex chamber의 유동장을 해석하여 vortex 밸브의 유동특성을 분석하였다.

1. 서 론

차세대원전은 냉각재상실사고시 초기에는 대유량의 노심 냉각수를 공급하고 재관수 및 장기냉각을 위하여 소유량의 노심 냉각수가 피동적 방법으로 장기간 공급되도록 설계하고 있다. 이러한 유동상태의 전환은 기존원전의 축압기에 vortex 밸브를 설치하여 인위적인 조작 없이 피동적 방법에 의하여 공급하도록 하고 있다. 이때 사고초기에 요구되는 대유량의 노심 냉각수는 유동저항이 작은 반경방향의 주유입구(main port)를 통하여 공급되며 재관수 기간에 요구되는 소유량의 노심 냉각수는 제어유입구(control port)를 통하여 tangential 방향으로 공급되며 이 유동은 chamber 내에 vortex 유동장을 형성하여 매우 큰 유동저항을 생성한다.

그림 1은 차세대원전에 적용될 vortex 밸브가 설치된 축압기의 개념도를 보여주고 있다. Vortex 밸브는 축압기의 하단 부에 설치되며 초기의 대유량은 수관으로 연결된 축압기의 상부의 주유입구로부터, 제어유량은 축압기 하단 부의 vortex chamber와 같은 level에서 공급되도록 설계되고 있다. 정상 운전시 축압기는 전체용량의 80%의 높이까지 물로 채워져 있으며 상부는 43.2 bar의 질소기체로 채워져 있다. Vortex밸브의 출구압력은 4.8 ~ 0.8 bar이며 밸브의 작동초기에는 동일한 수위를 공유하고 있으므로 수관을 통하여 공급되는 주유량과 제어 port를 통한 유로의 압력손실은 동일하다. 이때 chamber에는 vortex 유동장이 형성되나 공급 port로부터 유입되는 유체

저항은 비교적 작기 때문에 출구에서는 사고초기에서 요구되는 대유량의 냉각수가 chamber의 반경방향으로 공급된다. 축압기의 수위가 주유입구의 수관 아래로 내려가면 제어유입구만을 통하여 소유량의 냉각수가 공급되며 이때 chamber내에는 강력한 vortex 유동장이 형성된다.

Vortex 밸브는 chamber내 유동장의 압력변화와 수관을 이용한 유동전환을 통하여 냉각제상실 사고시 각 단계별로 요구되는 유량이 파동적 방법으로 조절되어 주입되므로 안전계통의 성능 및 신뢰도 향상에 따른 원자력발전소의 설계개선효과가 기대된다. 그러나 vortex 밸브를 차세대원자로 설계에 채택하기 위해서는 사고시 작동이 요구되는 전 영역에서의 유량-압력간의 특성곡선 개발과 chamber내 유동장의 물리적 특성 및 주유량이 유입되는 수관의 수위거동 등 vortex 밸브의 성능에 중요한 영향을 미치는 인자들의 영향 평가가 필요하다.

본 연구에서는 차세대원자력 발전소의 축압기에 적용하기 위한 vortex 밸브를 개발하기 위한 기초연구가 수행되었다. 단순화된 해석모델을 이용하여 vortex 밸브의 주요 성능인자 및 수관의 수위거동을 파악 하였다. 또한 FLUENT 코드를 사용하여 vortex 밸브를 해석하였으며 그 결과를 분석하여 vortex 밸브의 유동기구 및 chamber내의 유동 pattern을 파악하였다.

2. Vortex 밸브의 유동 Pattern

2.1 수관내의 수위거동

Vortex 밸브를 통하여 공급되는 유량은 축압기 상부의 주유입구로부터 공급되는 주유량과 제어유입구를 통하여 공급되는 제어유량의 변화에 따라서 조절되며 이들 유량변화는 초기의 대유량을 공급하기 위해 설치된 수관의 수위거동에 영향을 미친다.

그림 2는 축압기의 수위변화에 따른 vortex 밸브의 수위거동 해석을 위한 모델로써 축압기 상부에서 동일한 기체공간을 공유하는 유로 면적이 서로 다른 두 수직관과 이 두 수직관을 통하여 공급되는 유량은 밸브의 출구를 통하여 배출되도록 단순화 하였다.

그림 3은 단순화한 모델에 대하여 두 수관의 입구와 출구사이에 과도유동 Bernoulli식을 적용하여 수관의 수위거동을 해석한 결과로써 유로 면적이 작은 수관의 수위가 넓은 수관에 비하여 훨씬 더 빠른 속도로 감소하는 경향을 보여 주고 있다. 축압기가 작동되는 사고 초기에는 밸브에 연결된 두 수관이 동일 수면을 공유하고 있으므로 수관을 통하여 공급되는 주유량과 제어유량이 같은 크기의 압력손실을 가지고 vortex chamber로 유입된다. 이때 tangential 방향으로 주입되는 제어유량으로 인하여 chamber내의 vortex 유동장이 변화되나 주유입구를 통하여 공급되는 유량에 비하여 상대적으로 작기 때문에 유동저항이 비교적 작아 사고초기에 필요한 대유량의 냉각수를 공급할 수 있다. 축압기의 수위가 주유입구와 제어유입구가 분리되는 위치에 도달하면 주유입구에

연결된 수관은 작은 유로 면적으로 인하여 제어유입구에 연결된 수관에 비하여 수위가 더 빠른 속도로 감소하여 제어유로와 공급유로의 수두차에 의한 압력차가 발생하여 이후 chamber내로 유입되는 대부분의 유량은 제어유입구를 통하여 공급된다. 이때 제어유입구를 통해 tangential 방향으로 공급되는 유체에 의하여 chamber내에는 강력한 vortex 유동장이 형성되어 공급유로로부터의 유량유입을 방해하며 시간이 경과함에 따라 chamber에 생성된 배압의 영향으로 수관의 수위는 새로운 level로 회복되게 된다. 즉 두 수관의 수위는 수관간의 상호간섭 및 chamber내 운동량변화의 과도특성에 의하여 유로 면적이 작은 수관의 수위가 빠른 속도로 감소하며 유동 전환 후 tangential 방향으로 유입되는 제어유량의 증가에 의해 chamber내에 형성된 vortex 유동장의 영향으로 다시 증가하는 변화의 과정을 겪는다. 따라서 vortex 밸브의 설계에서는 유동 전환시 주유입구 수관의 수위가 급격히 감소하므로 축압기의 압축기체가 수관을 통하여 원자로 내로 주입되지 않도록 최소수위가 확보되도록 설계되어야 하며, 또한 이러한 수관의 과도특성이 밸브작동의 불안정성을 야기하는 원인이 되지 않도록 설계하여야 한다.

2.2 Vortex Chamber의 유동 Pattern

Vortex 밸브의 유동 pattern은 유체의 흐름이 chamber의 중앙으로 진행됨에 따라 tangential 방향의 유속이 증가하는 free vortex와 solid body의 회전과 같이 tangential 방향의 속도가 반경에 비례하는 forced vortex로 나뉘어 진다. Free vortex는 chamber중앙에서의 속도가 무한대가 되므로 chamber의 전 영역에 존재할 수 없으며 유동이 chamber 중앙으로 진행됨에 따라서 forced vortex로 변한다.

그림 4 는 Wormley[4]의 모델을 이용하여 vortex chamber의 유동장을 재해석한 결과로써 다음의 식으로 정의되는 chamber내의 유동 지배인자 수정경계층계수 BLC^* (modified boundary layer) 와 chamber내의 압력분포를 결정하는 순환분포에 대한 상관 관계를 보여주고 있다.

$$BLC^* = \frac{2 r_o f \lambda}{h \left(\frac{\rho u_o h}{2 \mu} \right)^{1/4}} \quad (1)$$

위 식에서 f 는 마찰계수, h 는 chamber의 높이, ρ 는 밀도, μ 는 동점성계수, λ 는 swirl number(w_o/u_o) 를 나타낸다.

그림 4에서 수정경계층계수 $BLC^* < 0.25$ 인 경우에는 chamber내의 순환분포가 일정한 potential vortex, 즉 chamber의 전 영역에 free vortex의 유동장이 형성됨을 보여주고 있다. $BLC^* > 0.25$ 의 경우에는 chamber내의 유동 pattern이 free vortex에서 forced vortex로 천이되는 지점이 존재하며, $BLC^* > 2.5$ 인 경우에는 potential vortex는 chamber 외곽의 극히 일부분에 존재하고 있다.

이 영역에서는 각운동량(angular momentum)이 보존되지 않으며 유동이 chamber 중앙으로 진행됨에 따라서 swirl velocity는 감소하게 된다. 따라서 $BLC^* < 0.25$ 의 경우에는 단순한 비점성 가정에 의해 vortex chamber의 유동해석이 가능하며, $BLC^* > 0.25$ 인 영역에서는 chamber의 중심부 주위에 유체의 유입이 배제되는 dead zone이 형성되므로 chamber내로 유입되는 유체의 유동은 벽면의 경계층에 제한되게 된다. BLC^* 가 증가하면 이 dead zone은 chamber 중앙의 전 영역으로 확장된다.

Vortex chamber의 유동자배인자인 수정계층계수 BLC^* 는 다음과 같이 vortex 밸브의 유동인자와 기하학적 인자로 나타낼 수 있다[4].

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

위 식으로부터 vortex chamber의 유동은 주유량 $\overline{W_o}$, 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 chamber 높이의 영향은 비교적 작음을 알 수 있다.

3. FLUENT 코드를 이용한 Vortex 밸브의 유동해석

FLUENT 코드는 유체유동, 열전달, 화학반응 등을 모의할 수 있는 범용 전산코드로서 다양한 유체역학적 문제들을 해석할 수 있다. FLUENT 코드는 유한체적법에 의하여 Navier-Stokes 방정식을 해석할 수 있는 전산코드로서 vortex 밸브를 2차원과 3차원으로 모델링하여 유동장을 해석하였다.

그림 5는 vortex 밸브를 2차원 축대칭을 가정하여 모의 계산한 결과로서 chamber내의 stream function과 반경방향의 속도 분포를 보여주고 있다. 그림 6에서 chamber내 반경방향의 속도분포는 chamber 상.하단 벽면 근처에서 최대값을 가지며 chamber의 mid-plane에 인접한 영역에서는 음(-)의 값을 가짐을 보여주고 있다. 반경방향의 유속이 음(-)인 영역은 유체가 chamber의 중앙으로부터 chamber 외곽의 벽면방향으로 유동하고 있음을 나타내며, 그림의 속도분포는 출구로의 유동이 chamber의 벽면에 인접한 경계층영역에서 이루어지고 있음을 보여주고 있다. 이 그림은 수정계층 계수 $BLC^* = 0.67$ 인 경우로서 속도분포는 Wormley 해석에 사용된 속도 profile과 유사하나 swirl number가 큰 경우 chamber의 mid-plane 영역에서 역방향 유동의 형성되기 때문에 mid-plane영역에서 영의 속도를 가지는 Wormley 모델과는 다른 결과를 보여주고 있다[4].

그림 7은 주유량과 제어유량이 동시에 유입되는 경우를 3차원 모델링에 의해 계산한 chamber

내의 속도 vector를 보여주고 있다. 주유량과 제어유량이 동시에 유입되면 제어 port를 통하여 유입되는 유체에 의하여 chamber내에 유동장이 변화되며, 제어유량의 크기가 주유량에 비하여 상대적으로 작은 경우에는 그림 7에서 볼 수 있듯이 유동장의 변화는 매우 작으며 주유량이 비교적 적은 저항을 가지고 출구로 배출됨을 알 수 있다. 그림 8은 강한 tangential 방향의 제어유량이 유입되는 경우로써 chamber내에 강력한 vortex 유동장이 형성되어 매우 큰 유동저항이 생성되고 있음을 보여주고 있다.

4. 결 론

차세대원자로의 안전계통 성능향상을 위하여 축압기 설계에서 채택하고 있는 피동적 유량조절 장치인 vortex 밸브의 특성을 분석하였다. Vortex 밸브의 특성은 chamber의 유동 pattern에 의해 결정되며 chamber내의 유동이 free vortex에서 forced vortex로 변하는 천이점이 vortex 밸브의 성능에 중요한 영향을 미치는 설계인자로 파악되었다. 또한 유동모드 전환시 초기의 대유량을 공급하기 위해 설치된 수관의 최소수위 및 과도특성에 의한 밸브작동의 불안정성에 대한 고려가 설계시 필요한 것으로 나타났다.

FLUENT 코드에 계산한 vortex chamber의 속도 profile은 Wormley 모델에서 사용한 속도 profile과 유사하게 나타났으나 코드계산에 의한 반경방향의 속도는 chamber mid-plane에서 swirl이 강한 경우 reverse flow가 형성된다. FLUENT 코드는 vortex 밸브의 3차원 해석에 적용할 수 있는 것으로 판단되었으며, 현재 FLUENT코드의 user program을 이용하여 주유량이 유입되는 수관과 vortex 밸브를 연결한 차세대원전 축압기의 vortex 밸브의 설계 개념(안)에 대한 분석을 수행 중에 있다.

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. 심윤섭 "Vortex Valve 개념 검토 및 작동특성 분석", KAERI/TR-611/95, 1995

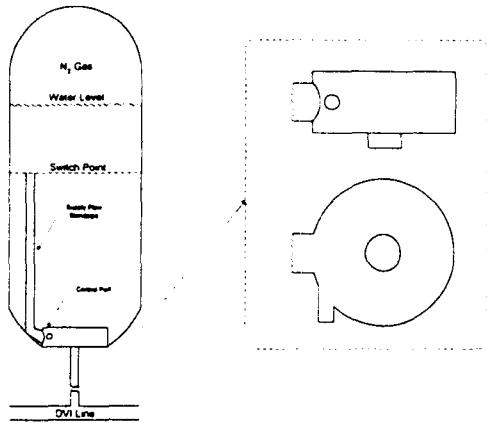


그림 1. 차세대원전 축압기의 개념도

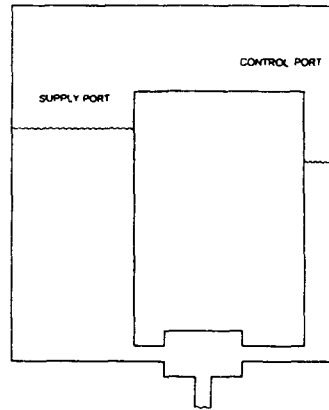


그림 2. 축압기의 수위거동 해석모델

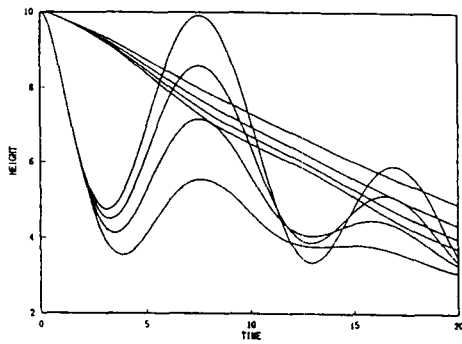


그림 3. 축압기 수관의 수위거동

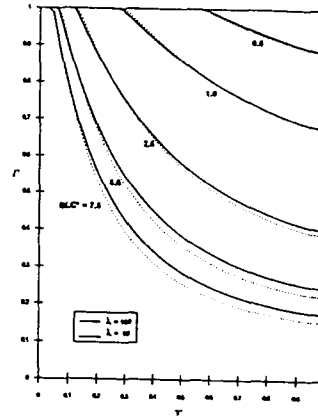


그림 4. Vortex Chamber내의 순환 분포

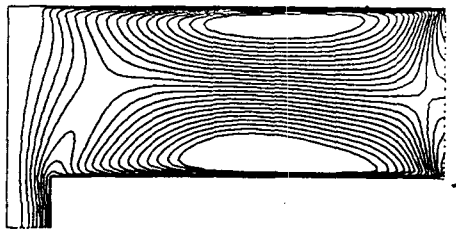


그림 5. Vortex Chamber내의 Stream Function (2D Model)

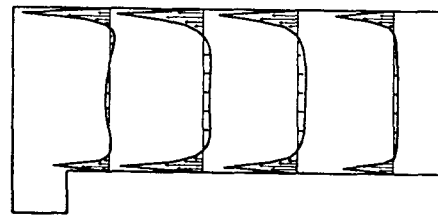


그림 6. Vortex Chamber내의 반경방향 속도 Profile (2D Model)

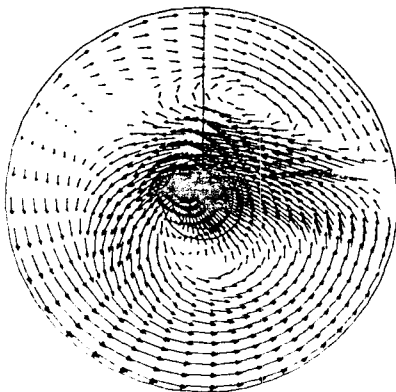


그림 7. Vortex Chamber내의 속도 Vector (선경 및 절선방향 유량주입 3D Model)

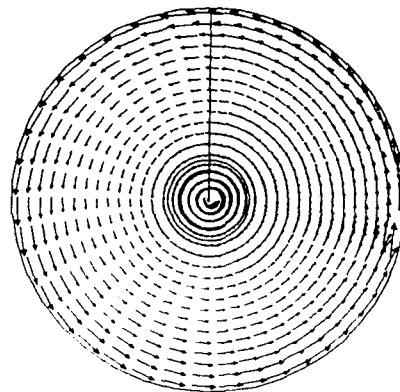


그림 8. Vortex Chamber내의 속도 Vector (절선방향 유량주입 3D Model)