

다공성 매질 모델을 활용한 MSADV의 유량계수 예측에 관한 수치적 연구

최재민* · 정우석* · 지현** · 장영운** · 김홍집*†

Numerical Study on Predicting the MSADV Flow Coefficient Using Porous Media Model

Jaemin Choi*, Wooseok Jeong*, Hyun Jee**, Young Woon Jang**, Hong Jip Kim*†

Key Words : MSADV(주증기 대기 방출 밸브), Angle valve(앵글 밸브), Porous media(다공성 매질), CFD(전산유체역학), Valve flow coefficient(밸브 유량 계수)

ABSTRACT

Numerical analysis was performed on the flow coefficients of MSADV used in nuclear power plants. Since MSADV contains a very large number of small flow paths, the analysis was performed by simulating it as a porous media for computational cost. For each flow path, various mass flow rate conditions were set to derive the correlation between pressure drop and velocity. The resistance coefficients of the porous media were calculated from the derived correlation and used in the analysis. Through the analysis, the flow coefficients were identified in various opening, and the reliability of the porous media simulation method was validated.

1. 서 론

원자력 발전은 핵분열을 통해 열에너지를 생성하고 생성된 열에너지를 통해 발생한 증기로 터빈을 구동하여 발전하는 발전시스템이다. 현대 기술 발전 과정에서 우리나라에서 원전 발전은 총발전량의 약 40%를 차지하고 있으며 경제성이 높아 대형 전력체계를 바탕으로 안정적인 기저부하를 공급할 수 있고 탄소 중립을 요구하는 시대에 원전 발전은 연료 연소로 인한 온실가스 배출이 없고 우라늄을 채굴하는 과정도 다른 화석연료에 비해 매우 낮은 수치를 갖고 있어서 환경적으로도 유리한 발전 방식으로 알려져 있다⁽¹⁻⁴⁾.

대한민국 원자력 발전 시스템은 발전 중 이상이 생겼을 때 방사능 누출 방지 및 시스템 냉각을 위해 비상 시스템이 자동으로 작동되도록 설계되어 있다. 특히 여자기나 증기발생기 등이 포함된 주증기 계통에 결함이 발생할 경우 발전용 터빈의 구동은 정지된다. 터빈 구동이 정지되면 핵분열 과정에서 발생한 열과의 교환으로 인해 고온고압의 증기가 잔류하

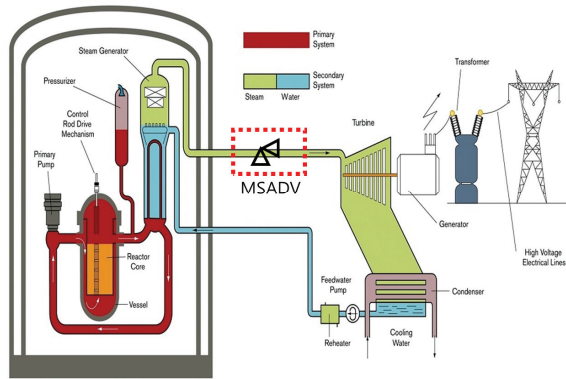
게 되고 점차 가압되어 주증기 계통 및 터빈에 손상을 줄 수 있는 위험이 존재한다. 따라서 이를 방지하기 위해 특정 압력에 도달하면 주증기 대기 방출 밸브(MSADV, main steam atmospheric dump valve)가 개방되어 증기를 대기로 방출하여 압력 상승 억제 및 2차 계통 압력이 적정 압력으로 감소할 때까지 제어하며 방출이 진행된다. 이러한 배출은 원자로 정지 후 잔존하는 붕괴열을 직접적으로 제거하는 heat sink의 역할도 동시에 수행한다^(5,6). MSADV는 주증기 계통과 대기 간의 높은 압력 차이 및 고온으로 인한 주변과의 열교환으로 증기 방출 과정에서 압력을 유지하고 유량을 제어하기 위해서는 세밀한 밸브 개도 조절이 필요하다. 따라서 부품 설계 시 사전 연구를 기반으로 개도에 따른 유동 특성을 파악하여 진행해야 한다.

CFD(Computational Fluid Dynamics)는 설계 전 유동 특성을 분석할 수 있는 방법 중 하나로 컴퓨터를 활용하여 유체의 거동을 모사하여 유동 및 열전달을 수학적으로 분석

* 충남대학교 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University)

** (주)삼신(Samshin Limited Co., Ltd.)

† 교신저자, E-mail : khongjip@cnu.ac.kr

Fig. 1 Schematic diagram of a pressurized water reactor⁽⁶⁾

하여 예측하는 방법이다. 이 기법은 형상과 조건을 자유롭게 변경하여 분석할 수 있는 것뿐만 아니라 실제 실험으로도 파악하기 어려운 내부의 데이터를 파악할 수 있는 장점이 있다. 그러나 급격한 면적 변화 및 굽이진 영역과 같이 급격한 압력과 속도 변화가 발생하는 유로의 경우 세밀한 분석을 위해 많은 격자가 요구되고 고려하는 영역이 넓어질수록 그에 비례하여 높은 계산 비용을 필요로 하게 된다.

따라서 본 연구에서는 크게 두 단계로 나누어 밸브 해석을 수행하였다. 첫 번째는 단일 유로에 대한 해석을 수행하였다. 본 연구에서 고려하는 형상은 아래 2.1절에서 자세하게 서술되는 것처럼 바디 내 수많은 케이지로 구성되고 케이지는 여러 개의 유로를 포함하고 있다. 여러 개의 유로 중 단일 유로만을 모델링하여 각 유로들의 유동 특성을 분석하였다. 두 번째는 각 유로들의 유동 특성을 기반으로 유량에 따른 압력 감소 관계를 통해 유로 내 유동 저항 정도를 도출하여 유로 영역을 다공성 매질로 모사하여 모델링하였다. 다공성 매질 모사를 통해 해석을 단순화하여 개도별 밸브의 유량 계수를 분석하고 실험 데이터와 비교하여 기법의 신뢰성을 검증하였다.

2. 수치적 기법

2.1 밸브 유형 및 구조

해석에서 고려한 밸브는 앵글 밸브로, 앵글 밸브는 입구에서 출구로 직교되어 흐르도록 설계된 밸브로 누수가 적고 유량 제어에 용이함으로 인해 많이 사용되는 밸브로 알려져 있다⁽⁷⁻¹⁰⁾. 본 연구에서 사용되는 앵글 밸브는 밸브의 바디와 유로가 포함된 케이지 및 플러그와 축 등으로 구성되어 있다. 축과 연결된 플러그는 구동기를 통해 위치가 조정되어 유로의 개폐를 통해 개도를 조정하고 축과 평행하게 유입되는 수증기는 케이지 내 유로를 통과하게 되어 축과 수직하게 배출되도록 설계되었다. 이때, 본 연구에서의 밸브 개도는 전체 행정 거리 대비 플러그의 실제 이동 거리의 비율(%)로

Table 1 Comparison of pressure drop with various shape of flow path

Type	Straight		Straight		Serpentine	
Cross section	Constant		Discharge		Discharge	
$\dot{m}$ [kg/s]	0.01	0.05	0.01	0.05	0.01	0.05
ΔP [bar]	0.04	12	0.03	8	10	80

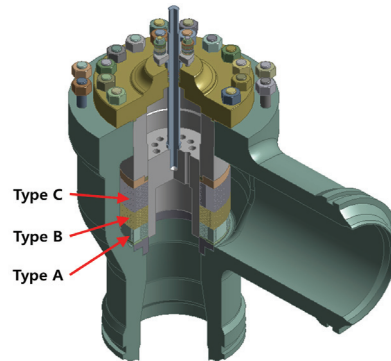


Fig. 2 Configuration of angle valve

정의한다. Fig. 2는 밸브의 전체적인 구조를 보여주고 있다.

케이지 내 유로는 고압의 증기를 대기로 방출하면서 동시에 작동 중 발생하는 공력 소음을 저감하기 위해 입구로부터 점차 면적이 증가하면서 구불구불한 특징이 존재한다. 이는 동일한 간격에서 일정한 면적의 직선 유로와 면적이 증가하는 직선 유로 그리고 본 연구에서 제시한 면적이 증가하는 구불구불한 유로에서의 압력 감소를 비교했을 때 Table 1에서 보이는 것처럼 연구에서 고려하는 형상이 유속을 감소시키는 것뿐만 아니라 높은 압력 감소 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

케이지는 Fig. 3에서 보이는 것처럼 밸브 입구와 가까운 순서로 3가지 유형(Type A, B, C)으로 구성되어 있으며 케이지 내에서 각각 Type A는 6개, Type B는 72개, Type C는 74개의 유로가 환형으로 배치되어 존재한다. 동일한 케이지에는 동일한 형상의 유로만이 존재하며 내부에서 외부로 흐르는 과정 중에 유로 면적의 증가 및 구불구불한 형상 특성으로 유속이 크게 증가되지 않고 밸브 전체 영역 중 유로에서 주로 차압이 발생한다.

2.2 수치적 접근

2.2.1 형상 모델링 및 격자 생성

모델링 과정에서 단일 유로 해석과 다공성 매질 모사 해석 모두 완전 발달 유동 및 경계로부터의 영향을 줄이고자 입, 출구 직경의 10배의 크기를 확장하여 모델링을 수행하였다. 다공성 매질 모사 해석의 경우 기존의 케이지 영역을 제거하

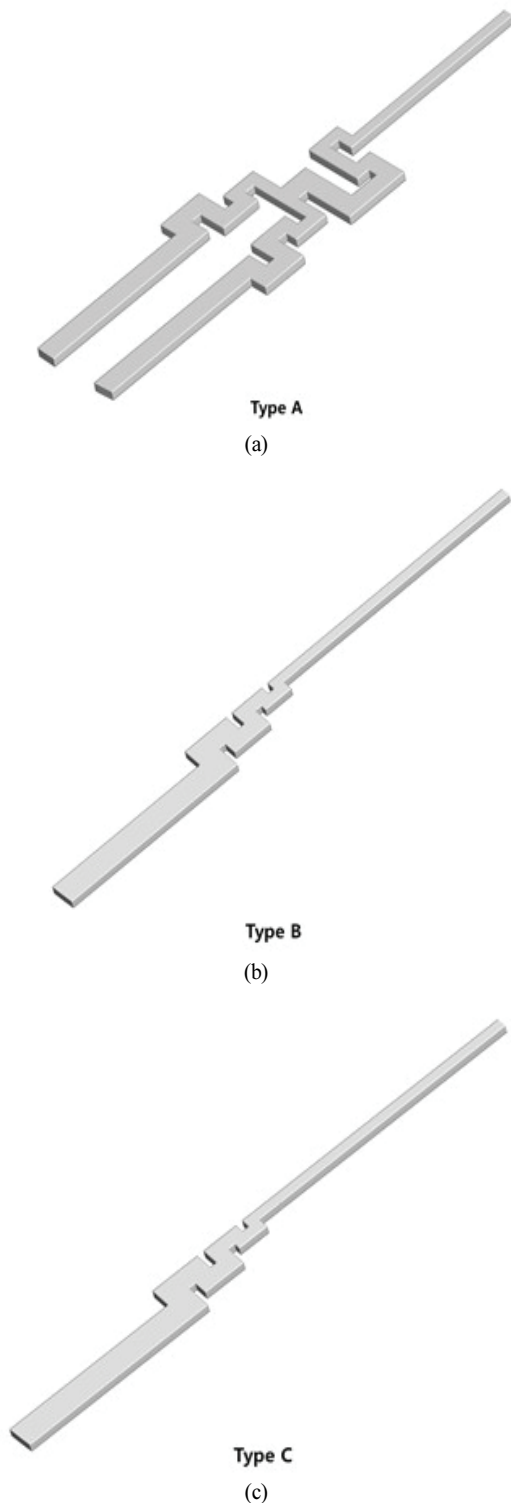


Fig. 3 Configuration of flow path in cage for (a) Type A, (b) Type B and (c) Type C

고 동일한 반지름의 원기둥으로 모델링하여 영역을 나누어 케이지 별로 저항을 설정할 수 있도록 수행하였다. 격자 생성 시 단일 유로 해석은 정렬 격자를, 다공성 매질 모사 해석은 다공성 매질로 모사된 케이지 영역과 입, 출구 부근은 정렬 격자를, 그 외의 영역은 비정렬 격자를 생성하여 해석을

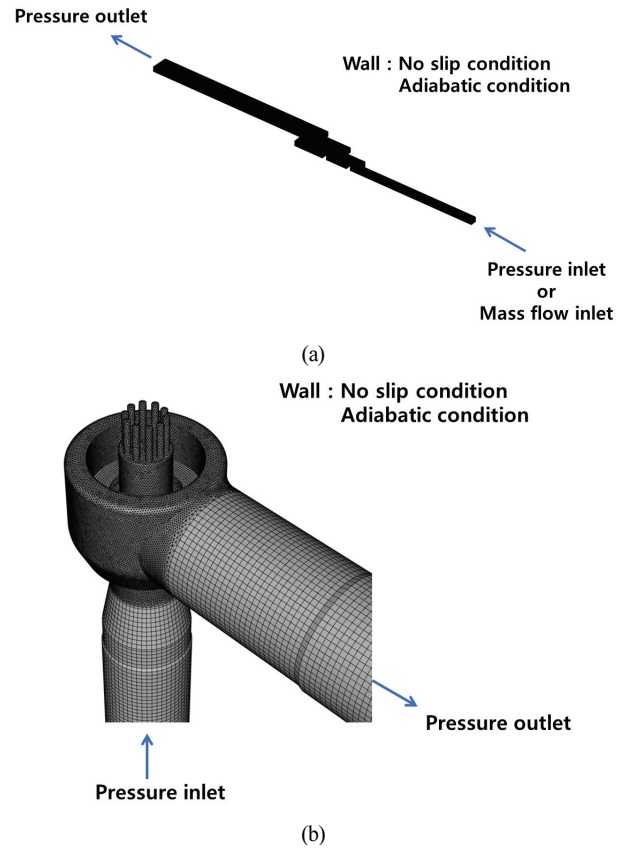


Fig. 4 Grid structure and boundary condition of (a) flow path and (b) angle valve

수행하였다. Fig. 4는 유체 영역의 모델링 및 생성된 격자 구조를 보여주고 있다.

2.2.2 해석 기법 및 경계 조건 설정

복잡한 형상을 가지는 밸브 내부에서의 열유동 특성을 파악하기 위하여 ANSYS Fluent v.14를 사용하였다. 유동 및 열전달과 관련된 질량, 운동량, 에너지 방정식과 높은 압력 차로 인해 발생하는 높은 유속을 고려하여 난류 방정식을 설정하였고 연구에서 사용된 난류 모델은 유사 형상에 대한 연구에서 많이 사용된 $k-\epsilon$ RNG 모델을 적용하였다^(11,12). 운용 조건의 경우 최대 개도 조건에서의 환경을 고려하였으며 이때 밸브에서의 입, 출구 압력 조건을 경계 조건으로 입력하였다. 단일 유로 해석은 분석 목적에 따라 두 가지 경계조건으로 나누어 수행하였다. 케이지 유로 내부의 유동 특성을 확인하기 위해서는 제공된 입·출구 차압 경계조건을 적용하였으며, 다공성 매질 저항 계수(α , C_2)를 도출하기 위한 목적의 해석에서는 입구의 mass flow rate inlet 조건을 적용하여 해석을 수행하였다. 다공성 매질 모사 해석은 입구와 출구에 pressure inlet과 pressure outlet 조건을 부여하여 해석을 수행하였다. 경계 조건으로 입력된 압력 수치는 게이지 압력을 기준으로 하였으며, 입구는 6.791 MPa, 출구는 2.068 MPa로 설정하였다. 유량의 경우 입구에서 0.01, 0.05,

0.1 kg/s로 입력하였다. 온도 조건의 경우 MSADV는 증기 발생기에서 발생한 고온의 증기를 방출하는 역할을 하기 때문에 고온의 수증기를 고려하여 입구에 558 K의 조건을 입력하여 해석을 수행하였다. 벽면의 경우 미끄러지지 않는 단열 조건을 부여하였다. 실제 작동 환경을 반영하여 고온·고압의 수증기를 작동 유체로 설정하였다.

2.3 Validation

단일 유로 해석 및 다공성 매질 모사 해석에 앞서서 실험 결과와의 비교를 통해 신뢰성을 검증하였다. 본 연구의 해석 대상인 앵글 밸브의 축소된 형상을 기반으로 상온 상압의 실험 조건과 동일하게 모사하여 밸브의 개도별 유량 계수를 비교하였다. 비교 시 Fig. 5에 보이는 것처럼 실험 결과와 거의 일치하는 것을 보였으며 이를 바탕으로 해석 방법의 신뢰성을 검증하였다.

2.4 지배방정식

본 연구에서는 밸브 내부를 흐르는 고온·고압 수증기의 유동 및 열전달 특성을 해석하기 위해 유동장을 3차원 정상상태(3D Steady-state)의 압축성 난류 유동으로 가정하였다. 지배방정식으로는 연속 방정식, 운동량 방정식 및 에너지 방정식이 적용되었으며, 각각 식 (1)~(3)과 같이 나타낸다.

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

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

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

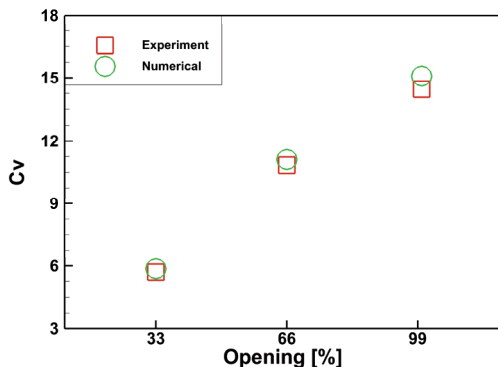


Fig. 5 Comparison between experiment and numerical data

식 (1)~(3)에서 u_i 및 u_j 는 속도 성분, ρ 는 밀도, p 는 압력, τ_{eff} 는 점성 전단응력 텐서, T 는 온도, k_{eff} 는 유효열전도도를 의미한다. 고온·고압 수증기의 열·유동장에 의한 온도 변화를 명확히 모사하기 위해 정상상태 에너지 방정식을 포함하였다.

난류 모델은 밸브 내부의 복잡한 형상으로 인해 발생하는 급격한 유량 변화, 박리 및 회전 유동을 효과적으로 예측하기 위해 RNG $k-\epsilon$ 모델을 적용하였다. 난류 운동 에너지(k)와 난류 에너지 소산율(ϵ)에 대한 방정식은 식 (4), (5)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon \quad (5)$$

식 (4)와 (5)의 좌변은 정상상태 대류항을 의미하며, 우변은 각각 확산항, 난류 생성항(G_k), 소산항 및 RNG 모델 고유의 변형률 보정항(R_ϵ)으로 구성된다. 여기서 μ_{eff} 는 분자 점성계수와 난류 점성계수를 고려한 유효 점성계수이며, α_k 와 α_ϵ 는 역 난류 슈미트수이다. 특히 식 (5) 우변의 R_ϵ 항은 유동의 변형률 변화를 추가로 고려하여 복잡한 내부 유동장에서의 예측 정확도를 높여준다.

3. 결과

3.1 단일 유로 해석

본 해석에 앞서서 다공성 매질 모델에서 요구하는 저항 계수를 도출하기 위해 단일 유로에 대한 유동 해석을 수행하였다. 유로를 통과하면서 발생하는 유동 특성 변화를 분석하고자 유로가 꺾이는 지점에서의 평균 압력 및 속도를 도출하였으며, 이 위치를 position으로 정의하였다. Fig. 6에서 보이는 것처럼 압력은 세 종류의 유로(Type A, B, C)에서 모두 일관되게 감소하는 경향을 보였다. 반면 속도의 경우, Type B와 C에서는 하류로 갈수록 유속이 증가하는 경향이 관찰되었으나 Type A에서는 뚜렷한 경향성이 보이지 않았다. 이는 앵글 밸브의 낮은 개도 구간에서 작동하는 Type A의 특성에 기인한다. 해당 구간에서 큰 차압을 발생시키기 위해 설계된 복잡한 형상이 유동 박리와 재순환 영역을 형성하고, 이로 인해 국부적인 흐름 불균일성이 발생한 것으로 분석된다.

또한, 다공성 매질의 저항 계수 산출을 위해 3가지 질량 유량 조건(0.01, 0.05, 0.1 kg/s)을 경계 조건으로 부여해 해석을 진행하였다. Fig. 7과 같이 도출된 유속별 차압 데이터

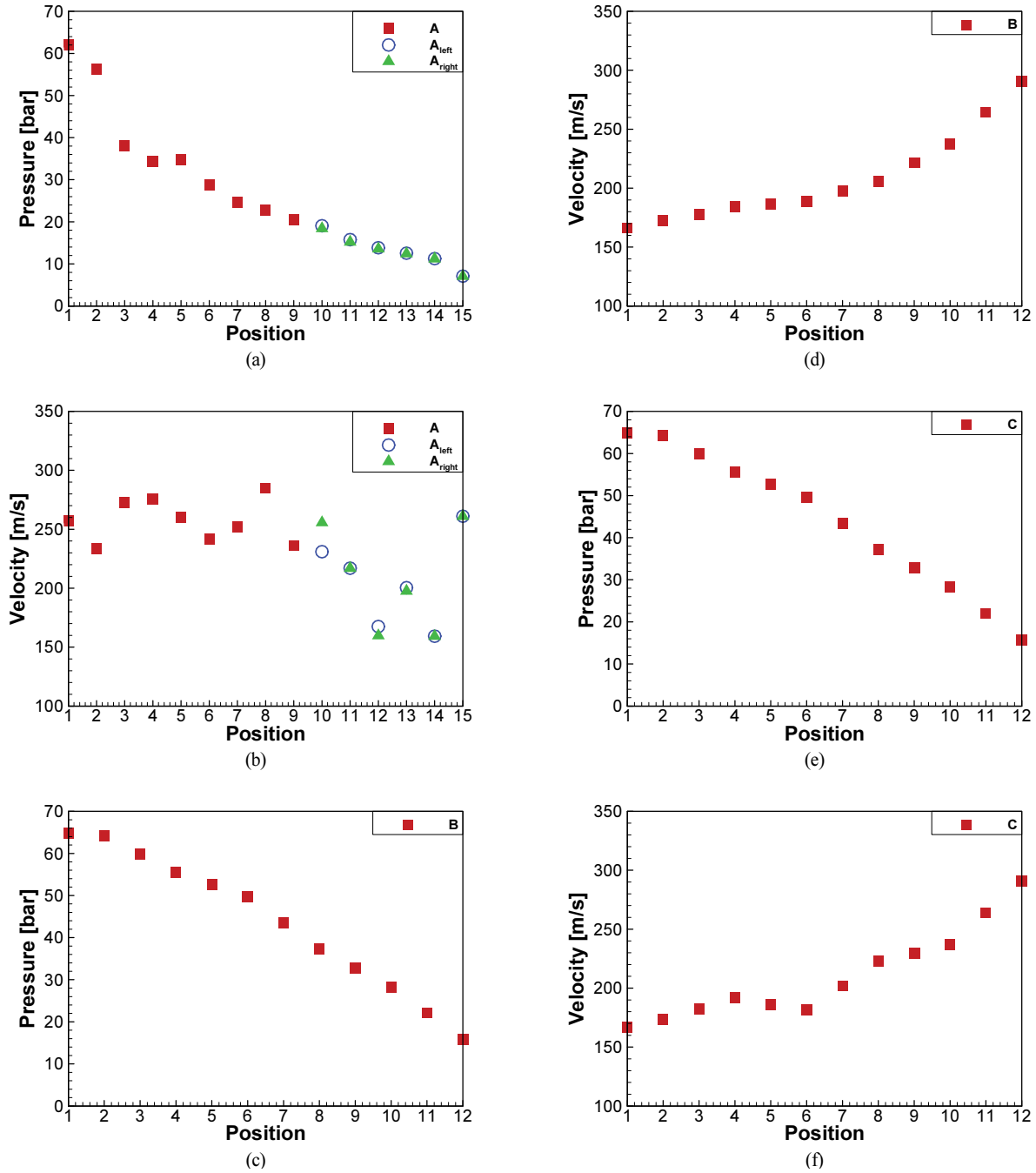


Fig. 6 Pressure and velocity distribution of (a) Type A pressure, (b) Type A velocity, (c) Type B pressure, (d) Type B velocity, (e) Type C pressure and (f) Type C velocity

를 바탕으로 운동량 소스 항(Momentum source term)의 점성 및 관성 저항 계수를 계산하였다. ANSYS Fluent에서 다공성 매질에 의한 압력 강하는 운동량 보존 방정식 내의 모멘텀 싱크(Momentum sink) 항으로 처리되며, 해당 수식은 식 (6)과 같이 표현된다⁽¹³⁾.

$$S_i = \nabla p = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{\rho |v_i| v_i}{2} \right) \quad (6)$$

해당 식에서 μ 는 작동 유체의 점도(Viscosity), α 는 투과율(Permeability)로서 점성 저항 계수를 결정하며, v_i 는 유체의 속도, C_2 는 관성 저항 상수, ρ 는 유체의 밀도를 나타낸다. 수식의 첫 번째 항은 유동의 점성 저항(Viscous resistance) 메커니즘을, 두 번째 항은 관성 저항(Inertial resistance) 메커니즘을 의미한다. 위 식에 다공성 매질 역할을 하는 케이지의 두께를 고려하면, 식 (7)과 같이 유속에 따른 차압(ΔP) 관계식으로 도출할 수 있다.

$$\Delta p_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{\rho |v_i| v_i}{2} \right) \times \Delta n_i \quad (7)$$

모멘텀 싱크 항은 유체 속도에 대한 2차 다항식으로 표현된다. 따라서 입구 질량 유량 변화에 따른 유로의 차압 해석 결과를 바탕으로 유속과 차압 간 2차 다항식 형태의 상관식

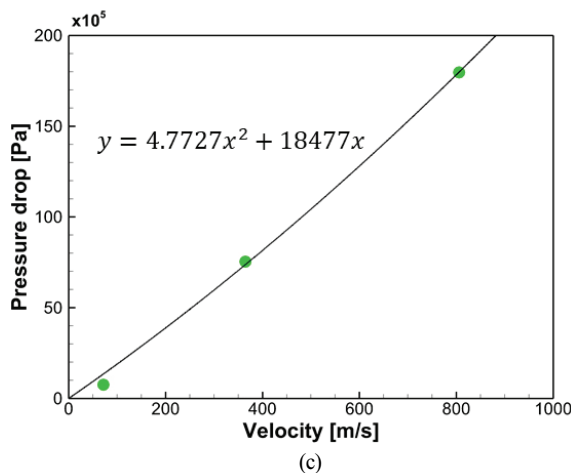
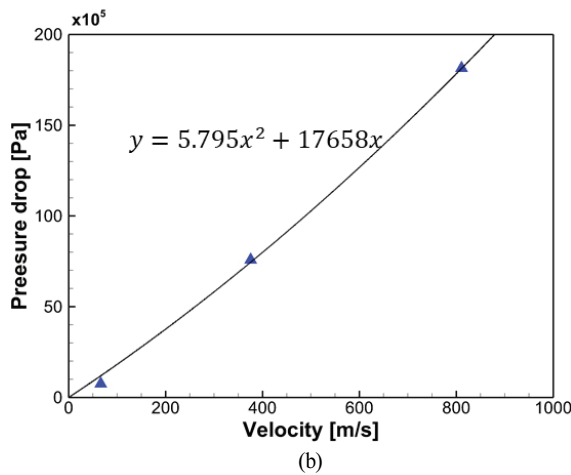
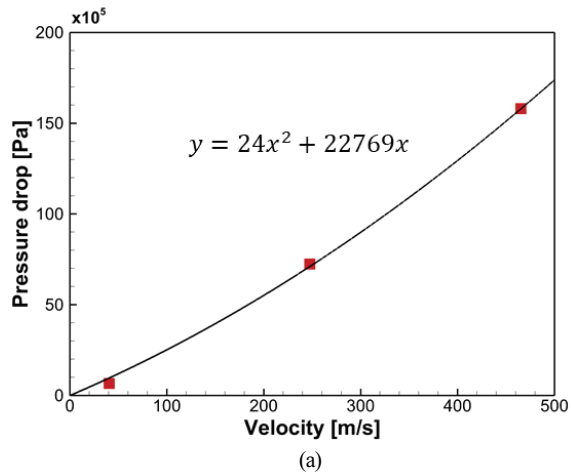


Fig. 7 Correlation between pressure drop and velocity in
(a) Type A, (b) Type B and (c) Type C

을 도출하였다. 실제 유량 조건을 상회하는 0.1 kg/s 조건에서는 밸브 출구 영역에서 초음속 유동이 관찰되었다. 전체 유로의 대부분은 아음속 영역에 해당하나 출구 근처에서 국소적인 초음속 유동이 발생함에 따라, 압력과 밀도의 상호연계성을 정확히 모사하기 위해 Coupled Scheme을 적용하여 해석을 수행하였다. 이 해석적 상관식의 계수를 이론적인 싱크 항의 계수와 비교 분석하여 α 및 C_2 를 산출하였으며, 도출된 변수들을 ANSYS Fluent의 다공성 매질 조건으로 입력하여 본 해석을 수행하였다.

3.2 Porous media 모사 해석

앞선 단일 유로 해석을 통해 도출한 점성 및 관성 저항 계수를 적용하여, 복잡한 내부 유로를 다공성 매질로 모사한 유동 해석을 수행하였다. 본 해석의 목적은 밸브 형상에 의해 결정되는 유량 계수(C_v)를 산출하는 것이므로, 경계 조건으로는 모든 유로가 개방된 최대 조건의 차압을 적용하였다. 밸브의 초기 시동인 1%의 개도에서는 플러그가 충분히 열리지 않아 케이지의 입구가 매우 좁게 형성되며 케이지 반경 방향의 유동이 아닌 플러그 축방향으로 향하는 불완전한 유동이 발생한다. 이를 다공성 매질로 모사하는 과정에서 해당 방향의 저항이 과도하게 반영되어 결과적으로 낮은 개도에서 유량 계수가 과소평가되는 문제가 발생한다. 이처럼 낮은 개도를 제외한 나머지 총 10가지 개도 조건에 대해서는 내부를 다공성 매질로 모사하여 유동 해석을 수행하였다. 각 개도별 해석 결과를 바탕으로 밸브 출구에서의 유속을 측정하여 C_v 를 계산하였다. 다만, 본 해석 모델은 케이지 영역 전체를 모두 다공성 매질로 모사하였으므로, 도출된 유량 데이터를 실제 물리적 유동 면적에 부합하도록 보정하는 과정이 필수적이다. 이에 따라 실제 유로의 입구 면적을 기준으로 해석된 밸브 출구 속도를 보정하여 최종적인 C_v 계산에 적용하였다.

해석 결과, 낮은 개도에서는 Type A의 강한 유동 저항으로 인해 낮은 C_v 를 보였으나, Type B가 포함되는 개도부터는 C_v 가 급격히 증가하였다. 이와 같이 개도에 따라 유량이 급증하는 경향은 제어 밸브의 전형적인 등비율(Equal - percentage) 특성과 일치하며, 이를 통해 당초 목적인 밸브의 유량 특성 설계가 타당함을 검증하였다⁽¹⁴⁾.

본 수치해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 상온·상압의 물을 이용한 실험 데이터와 비교를 수행하였다. 수치해석 결과의 검증을 위해 선행 연구의 실험 데이터를 활용하였으며, 해당 실험은 밸브 입·출구에 충분한 길이의 파이프를 연결하여 수행되었다. 실험값과의 정확한 비교를 위해 해석 모델에서도 동일한 측정 위치인 입구 배관 직경의 5배(5D), 출구 배관 직경의 10배(10D) 이격된 위치에서 데이터를 추출

하였으며, 해당 실험 장치의 개략도는 Fig. 8에 제시하였다. 해석은 고온·고압의 수증기를 대상으로 진행되어 작동 유체에 차이가 있으나, 밸브의 유량 계수는 유체의 물성보다는 기하학적 형상에 지배되는 고유 특성이므로 두 결과 간의 교차 검증이 타당하다고 판단하였다. Fig. 9에 나타난 바와 같이, 개도가 낮거나 높은 구간에서는 해석과 실험 결과가 비교적 잘 일치하였으나, 중간 개도 구간에서는 수치해석 결과가 실험값보다 유량 계수를 더 높게 예측하는 경향을 보였다. 이러한 오차의 원인은 선행 연구의 유동 특성과 결부하여 설명할 수 있다^(15,16). 낮은 개도에서는 제트 유동이 지배적이고 높은 개도에서는 유체가 유로를 충분히 채우며 흘러 재순환 영역이 크게 발달하지 않았다. 본 해석에 적용된 RANS (Reynolds - Averaged Navier - Stokes) 기반 난류 모델이 이러한 복잡한 재순환 영역의 크기와 난류 소산으로 인한 압력 손실을 다소 과소평가하여 해당 구간에서 C_v 값을 실제보다 크게 도출한 것으로 분석된다.

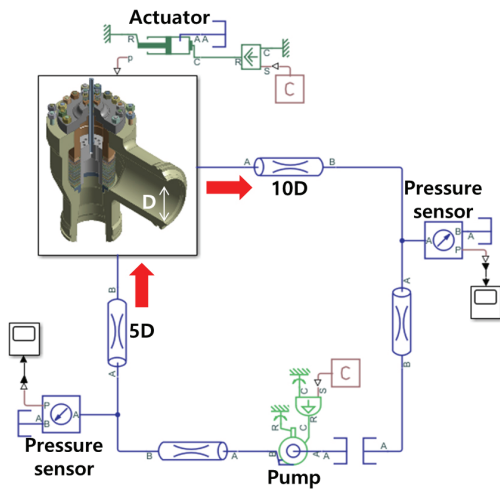


Fig. 8 Schematic diagram of the experimental setup for valve testing

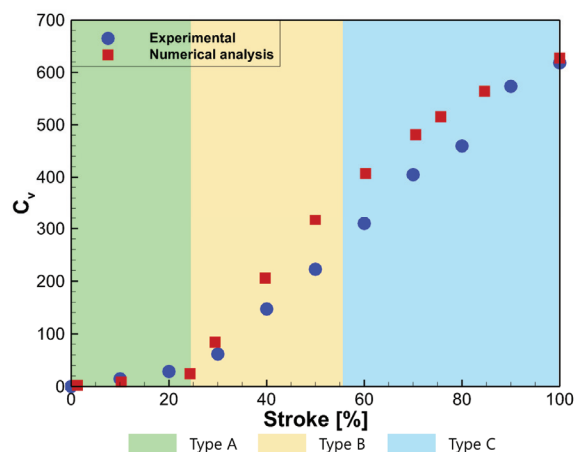


Fig. 9 Valve flow coefficient with various opening

4. 결 론

원자력 발전소 주증기 계통에 이상이 발생하여 터빈 구동이 정지될 경우, 계통 내부에 잔류하는 고온·고압의 증기가 점차 가압되어 터빈 및 배관 시스템에 심각한 손상을 초래할 위험이 존재한다. 이를 방지하고 붕괴열을 제거하는 주증기 대기 방출 밸브(MSADV)는 대기와의 극심한 압력 차이와 고온 환경 속에서도 증기를 안전하게 방출하기 위해 세밀한 개도 조절이 필수적이다. 그러나 밸브 내부가 다수의 유로를 포함하는 복잡한 다중 케이지 형태로 구성되어 있어, 부품 설계 시 필수적인 개도별 유동 특성을 명확히 파악하는 데 해석적 어려움이 따른다.

따라서 본 연구는 단일 유로 해석을 수행하고, 각 유로의 유동 특성을 분석하였다. 단일 유로의 차압 데이터를 바탕으로 유동의 점성 및 관성 저항 계수를 산출하였으며, 이를 기반으로 복잡한 유로 영역 전체를 다공성 매질(Porous media)로 모사하여 유동 해석을 진행하였다.

해석 결과, 개도 증가에 따라 유량 계수가 급격히 증가하는 제어 밸브의 전형적인 등비율(Equal - percentage) 특성이 나타남을 확인하여 밸브 유량 특성 설계의 타당성을 검증하였다. 또한, 다공성 매질 모사를 통해 도출한 유량 계수(C_v)를 실험 데이터와 비교하여 해석 기법의 신뢰성을 확인하였다. 교차 검증 결과, 개도가 낮거나 높은 구간에서는 해석과 실험 결과가 비교적 잘 일치하였다. 중간 개도 구간의 경우 적용된 RANS 기반 난류 모델이 복잡한 재순환 영역의 크기와 난류 소산으로 인한 압력 손실을 다소 과소평가하여 유량 계수를 높게 예측하는 오차가 존재하였으나, 전반적인 밸브의 유동 경향성을 신뢰성 있게 모사함을 확인하였다. 결론적으로 본 연구에서 적용한 단일 유로 및 다공성 매질 연계 해석 기법은 복잡한 내부 형상을 가진 제어 밸브의 유동 특성 및 성능예측에 효과적으로 활용될 수 있음을 입증하였다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원 “현장수요 대응 원전 첨단제조기술 및 부품, 장비 개발(RS-2024-00431187)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

Reference

- (1) Kok, K. D. (Ed.), 2016, “Nuclear engineering handbook,” CRC Press.
- (2) Yongseok Yang, 2008, “The Role of Nuclear Power for Sustainable Development: Assessment of Nuclear Power’s Contribution to National Economic Development,” Korean Energy Economic Review, Vol. 7, No. 2, pp. 209~243.

- (3) Weisser, D., 2007, "A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies," *Energy*, Vol. 32, No. 9, pp. 1543~1559.
- (4) Sovacool, B. K., 2008, "Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey," *Energy Policy*, Vol. 36, No. 8, pp. 2950~2963.
- (5) Woo-Rim Jeong, & Jae-Jun Jeong, 2019, "Accident analysis of NPP according to operator manual action in the event of LUHS and ELAP," *Proceedings of the KSFM Annual Meeting*, pp. 254~255.
- (6) Environment Agency, 2023, "Environmental permitting of Sizewell C: summary of decision," GOV.UK
- (7) Slama, V., Mrozek, L., Tajc, L., Klimko, M., & Zitek, P., 2021, "Flow analysis in a steam turbine control valve with through-flow valve chamber," *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*, Vol. 7, No. 2, p. 021401.
- (8) Zhang, Z., Sun, B., Wang, Z., Mu, X., & Sun, D., 2023, "Multiphase throttling characteristic analysis and structure optimization design of throttling valve in managed pressure drilling," *Energy*, Vol. 262, p. 125619.
- (9) Cao, L., Liu, S., Hu, P., & Si, H., 2020, "The influence of governing valve opening on the erosion characteristics of solid particle in steam turbine," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 118, p. 104929.
- (10) Yan, X., Wei, W., You, M., Fan-Ding, L., & Hao-Zhe, J., 2020, "The impact of inlet flash evaporation conditions on erosion damage characteristics of coal gasification black water angle valve and prevention strategies," *Mechanics & Industry*, Vol. 21, No. 6, p. 626.
- (11) Li, H., Lu, H., & Li, Q., 2024, "Numerical investigations of the influences of valve spool structure on the eccentric jet flow characteristic in high-pressure angle valves," *Energy*, Vol. 298, p. 131378.
- (12) Yang, Q., Zhang, Z., Liu, M., & Hu, J., 2011, "Numerical simulation of fluid flow inside the valve," *Procedia Engineering*, Vol. 23, pp. 543~550.
- (13) ANSYS Inc., 2011, "ANSYS Fluent Theory Guide (Release 14.0)," ANSYS Inc.
- (14) Fisher Controls, 1965, "Control Valve Handbook," Fisher Controls Company, pp. 123~124.
- (15) Prathamesh. S. Indule, 2022, "Study for the Comparison of CFD Analysis of Flow through Valves," *Journal of Thermal and Fluid Science*, Vol. 3, No. 2, pp. 59~72.
- (16) Said, M. M., AbdelMeguid, H. S., & Rabie, L. H., 2016, "The accuracy degree of CFD turbulence models for butterfly valve flow coefficient prediction," *American Journal of Industrial Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 14~20.