

수치 해석 및 다공성 매질 모사를 통한 앵글 밸브 유동 특성 분석

정우석* · 최재민* · 지현** · 장영운** · 김홍집*†

Analysis of Angle Valve Flow Characteristics through Numerical Analysis and Porous Media Modelling

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

Key Words : Angle valve(앵글 밸브), Valve loss coefficient(손실 계수), Flow coefficient(유량 계수), Porous media(다공성 물질), Numerical analysis(수치 해석)

ABSTRACT

A numerical analysis was performed on a reduced-sized angle valve. Using dimensionless numbers such as the Reynolds number and valve loss coefficient, flow characteristics of the angle valve were analyzed under various flow rate conditions. In addition, for analysis on a full-sized angle valve, the disk region was modeled as a porous media and the results were compared with the experimental data to validate. Through the results, the tendency of the valve loss coefficient according to flow rate was identified and the reliability of the porous media simulation analysis were validated, and it was considered helpful in modelling the full-sized valve.

1. 서 론

온실 가스로 인한 기후 문제에 대응하기 위한 탄소중립 정책을 시행하면서 산업 및 에너지 분야에서 탄소 배출 저감에 대한 연구가 수행되고 있다. 이 중 원자력 발전은 에너지를 생성하는 과정에서 탄소를 거의 배출하지 않아 재생에너지와 같이 저탄소 전원으로 분류되며 기저 부하를 안정적으로 공급할 수 있어서 발전원으로 주목받고 있다⁽¹⁻⁴⁾. 원자력 발전소 중 가장 널리 사용되는 원자로의 한 종류인 가압수형 경수로(Pressurized Water Reactor, PWR)는 가압된 경수를 냉각재와 감속재로 사용하는 원자로이다. 핵연료의 핵분열을 통해 발생한 열은 열교환을 통해 1차 계통에 전달되고 순환하여 증기 발생기의 열교환기를 통해 2차 계통에 전달된다. 2차 계통에서 공급된 열로 인해 생성된 증기는 터빈을 구동하여 전력을 생성하는 역할을 수행한다. 이 때 증기 발생기에서 생성된 증기를 터빈으로 보내는 과정에서 결함이 발생하여 터빈이 정지하는 상황이 발생하면 고온 고압의 증기를 대기로 방출하여 압력을 제어하고 열을 제거하는 주증

기 대기 방출 밸브(Main Steam Atmospheric Dump Valve, MSADV)를 사용하여 대응할 수 있도록 설계되어있다⁽⁵⁾. 이러한 압력 제어 및 열 제거 수행 기능과 밸브의 유동 조건을 고려하여 일반적으로 제어에 사용되는 글로브 밸브 대신 앵글 밸브 케이지를 통한 유량 제어를 수행하고 있다.

앵글 밸브는 유입되는 유체와 토출되는 유체의 방향이 수직을 이루는 밸브를 지칭하며 정밀한 유량 제어 역할을 수행하는 것으로 알려져 있다⁽⁶⁻⁹⁾. 밸브는 단순한 구조와 구동 방식을 가지고 있고 작동 중 누수가 매우 적은 특징으로 인해 발전소와 운송 시설과 같은 다양한 산업 분야에 사용되고 있다. 이러한 밸브는 밸브 개도에 따라 다양한 유량 조건에서 작동하기 때문에 정밀한 유량 제어를 위해 설계하는 과정에서 유량에 따른 유동 특성을 파악하는 것이 요구된다.

유동 시스템의 설계와 성능을 파악하는 단계에서 손실 계수는 유체의 압력 및 에너지 손실을 평가하는 역할을 수행한다. 손실 계수란 배관이나 밸브 또는 굴곡부 등 유체기계에 서 유동 혼합 및 분리, 와류와 같은 유동 특성으로 인해 발생

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

** (주)삼신(Samshin Limited Co., Ltd.)

† 교신저자, E-mail : khongjip@cnu.ac.kr

할 수 있는 국부 압력 손실을 나타내는 무차원 계수로 식 (1)과 같이 정의된다⁽¹⁰⁾.

$$\Delta P = K \times \frac{\rho V^2}{2} \quad (1)$$

여기서 ΔP 는 압력 손실, K 는 손실 계수 그리고 $\rho V^2/2$ 는 동압을 의미한다.

또한 Re 수는 유동의 점성력과 관성력의 관계를 나타낸 무차원 수이기 때문에 밸브에서의 압력 손실을 Re 수와 손실 계수 간의 상관관계로 나타내어 평가하며 관련된 이전 연구에서는 Re 수가 증가할수록 손실 계수가 감소하는 경향을 보이며 높은 상관관계를 가지고 있다고 언급하였다⁽¹¹⁾. Re 수는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (2)$$

여기서 μ 는 유체의 점성계수, ρ 는 유체의 밀도, V 는 평균 유속 그리고 D 는 특성 길이를 의미한다.

밸브의 특성을 파악하기 위해서 이전 연구에서는 오랫동안 실험적인 방법을 사용해왔었다. 그러나 본 연구에서 고려하는 MSADV는 고온 고압의 환경에서 작동하며, 이러한 운용 조건에서 특성 간의 상관관계를 파악하기 위한 반복된 실험은 높은 비용을 요구하는 문제점이 존재한다. 이에 반해 수치 해석은 시뮬레이션 반복을 통해 밸브 크기 및 구성, 입구 및 출구 조건 등 광범위한 열, 유체역학적 조건을 포괄하는 다차원 계산 결과를 확보할 수 있다. 또한 해석 결과로부터 도출된 Re 수와 손실 계수는 모두 무차원 인자로, 기하학적 및 역학적 상사를 이용하여 축소된 형상에서의 특성 간 상관관계를 파악하면 실제 크기의 형상을 대상으로도 예측이 가능하다는 특징이 있다. 따라서 본 연구에서는 MSADV를 대상으로 형상 설계 전 축소된 앵글 밸브 형상을 대상으로 다양한 운전조건에서의 CFD를 수행하여 무차원 인자 간의 상관관계를 파악하고 분석하여 실제 크기의 형상 설계에 유용한 데이터를 확보하고자 한다.

2. 수치적 방법

2.1 Re 수와 손실 계수에 대한 상관관계

유체 기계에서의 압력 손실에 관한 연구는 이전부터 다양한 형상들에 대하여 연구된 바 있다. M. Solek⁽¹²⁾은 게이트 밸브에서 다양한 단면적 조건에서 개도 변화에 따른 Re 수와 압력 손실 계수간의 상관관계를 분석하였다. Heinz Herwig⁽¹³⁾은 곡률을 갖는 배관에서 흐르는 유체의 Re 수와 압력 손실

계수간의 상관관계를 분석하였다. 또한 Heinz Herwig⁽¹⁴⁾은 배관이 구부러지는 정도와 횡수에 따라서 배관 내 유체의 Re 수와 압력 손실 계수가 갖는 상관관계에 대하여 연구하고 관계식을 도출하였다. Barton L. Smith⁽¹⁵⁾는 유체 기계의 출구 면적 변화가 Re 수와 압력 손실 계수 간의 관계에 주는 영향에 대하여 분석하였다. Nuno M. C. Martins⁽¹⁶⁾는 오리피스를 통과하는 유체에 대하여 상관관계를 분석하였고, P. Krishnan Vijayan⁽¹⁷⁾은 이상 유동에 대하여 여러 유체 기계의 형상 조건에 대하여 Re 수와 압력 손실 계수 간의 관계를 분석하고 관계식을 도출하여 경향을 예측하였다. 언급된 연구들의 결과들은 손실 계수는 대부분 유체의 Re 수에 반비례하는 경향을 갖는다는 것을 보여주고 있다. 특히 면적 변화와 유동 방향 변화가 존재하는 유체 기계에서의 상관관계를 연구한 P. Krishnan Vijayan⁽¹⁷⁾의 연구는 본 연구에서 고려하는 밸브 유로 형상과 가장 유사한 구조를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 유체의 Re 수와 손실 계수간의 상관관계는 식 (3)과 같은 경향을 보일 것으로 고려하였다.

$$K = K_c + Ae^{(-Re/B)} \quad (3)$$

밸브의 정방향 손실 계수는 정상적인 동작과 관련이 있고 역방향 손실 계수는 차단 및 역류 방지 기능과 연관되어 있다. 역방향 손실 계수가 높으면 역류 억제 부분에서는 유리하나 개폐 속도 지연이 발생할 수 있고 손실 계수가 낮으면 역류 발생 및 안정성이 낮아질 수 있는 문제점이 존재한다⁽¹⁸⁾. 역방향 손실 계수를 예측하는 과정에서 정방향 손실 계수와 동일하다고 단순하게 고려한다면 밸브 내 차압 크기를 과대 또는 과소평가 할 수 있는 문제점이 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 밸브의 정방향 유동뿐만 아니라 역방향 유동에 대한 손실 계수 및 유동 특성 간의 상관관계까지 고려하였다.

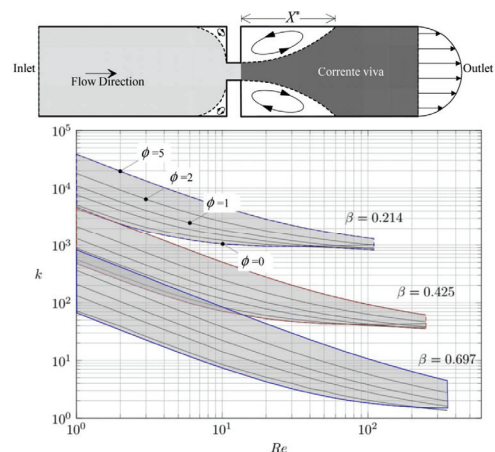


Fig. 1 Correlation between Re and k-factor with various orifice⁽¹⁶⁾

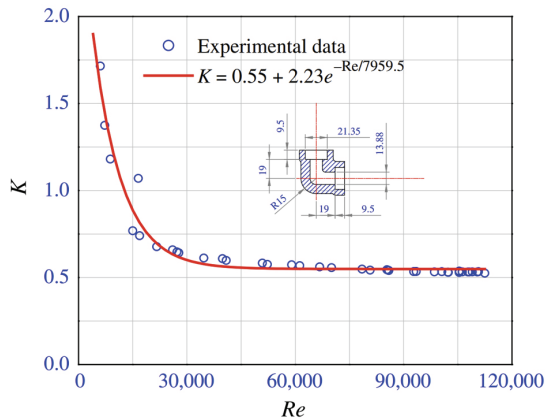


Fig. 2 Correlation between Re and k-factor with various configuration of fluid machinery⁽¹⁷⁾

2.2 해석 조건 설정

본 연구에서의 해석 대상은 앵글 밸브로 입구와 출구에서 직교하게 흐르도록 설계된 밸브 바디와 유로를 포함한 케이지로 구성되어 있으며 Fig. 3은 형상의 구조를 보여주고 있다. 밸브 중심의 축과 수직하게 유체가 케이지로 유입되어 케이지 내 유로를 통과하고 모여서 축과 평행하게 배출되도록 구성되어있다. 축과 연결된 모터를 구동하여 축의 위치를 조정하고 축과 연결된 플러그는 케이지의 유로 개폐 기능을 수행하여 밸브의 개도 조절을 통해 유량을 제어하는 역할을 수행한다. 본 연구에서는 밸브의 최대 개도로 가정하여 유량이 가장 높은 조건을 고려하여 수치 해석을 진행하였다.

해석을 위해 사용한 수치해석 프로그램은 ANSYS Fluent v14.5를 사용하였고 모델링 과정에서 유동 안정화를 위해 밸브 바디의 입구 직경(D)을 고려하여 입, 출구 부근의 영역을 10D만큼 연장하여 모델링하였다. 격자를 생성하는 과정에서 밸브 내부의 구조가 매우 복잡하고 밸브 바디의 크기에 비해 케이지 내 유로의 크기가 매우 작은 점을 고려하여 케이지 및 케이지 부근 바디 영역은 비정렬, 그 외 부분은 정렬 격자로 생성하여 약 100만개의 격자로 해석을 수행하였다. Fig. 4는 생성된 격자 구조를 보여주고 있다.

밸브의 작동 유체는 기존 실험 데이터와 비교를 통한 검증을 고려하여 상온의 물로 선정하였다. 작동 유체가 액체이고 밸브 벽면이 단열인 점을 고려하여 에너지 방정식은 해석에서 고려하지 않았다. 난류 방정식은 본 연구와 유사한 형상의 유동 특성을 분석한 선행 연구^(19,20)를 고려하여 RNG $k-\epsilon$ model을 적용하였다. 작동 유체의 물성치는 상온의 물인 점을 고려하여 상수로 입력하였다. 경계 조건은 입구와 출구를 Pressure-Inlet과 Pressure-Outlet로 설정하고 출구는 대기압으로 고정 후 입구 압력을 변경하여 밸브 내 최대 2 MPa까지의 차압을 모사하였다. 해석을 진행하면서 equation

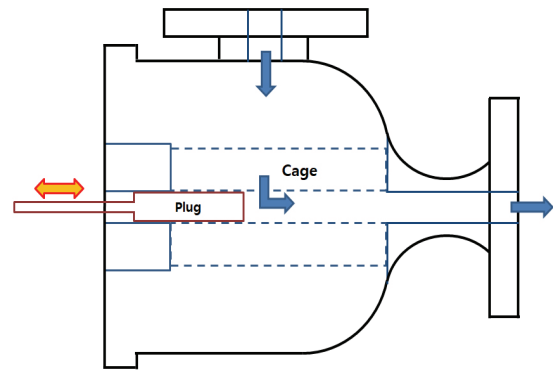


Fig. 3 Configuration of angle valve

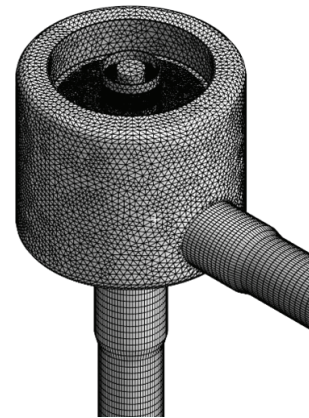


Fig. 4 Modelling and mesh for fluid region

residual과 출구에서의 면적 평균 속도 프로파일을 바탕으로 수렴 여부를 판단하였다. 또한 본 연구에서는 핵심 변수인 Re 수 및 손실 계수에 대하여 밸브 전체를 대상으로 밸브 출구에서의 직경과 면적 평균 유속 및 밸브 입, 출구 간 압력차를 고려하여 계산하였다.

2.3 신뢰성 검증

해석 기법의 신뢰성을 검증하는 과정에서 두 가지 방법을 통해 검증을 수행하였다. 첫 번째는 밸브 내부에서의 압력 및 유속 컨투어를 통한 현상 분석으로 이는 Fig. 5에 나타내었다. 유체가 밸브 바디에 비해 매우 작은 크기의 유로에 유입되면서 케이지 내 유로에서 주된 압력 감소가 발생하고 모든 유로에서 거의 균일한 차압이 발생하여 유동이 균일하게 나뉘어 통과한 후 통합되어 출구로 배출되는 현상을 통해 해석 설정이 정상적으로 구현된 것을 확인하였다. 두 번째는 실험 데이터와의 유량 계수 비교를 통해 검증하였다. 유량 계수는 밸브나 오리피스와 같은 유체 기계를 통과하는 유체의 양과 저항을 나타내는 성능 지표로 압력 손실 대비 통과할 수 있는 유체의 양을 의미하며 식 (4)와 같이 표현된다.

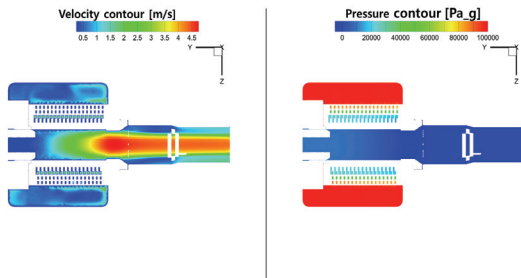


Fig. 5 Velocity and pressure distribution contour

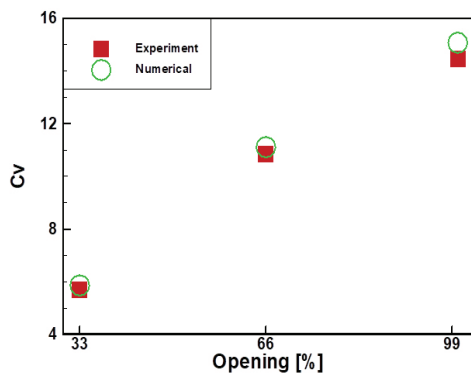


Fig. 6 Comparison between experiment and numerical data

Table 1 Comparison of C_v difference between experiment and numerical data with various opening

Opening	Experiment	Numerical	Error [%]
33%	5.70	5.85	2.68
66%	10.84	11.11	2.51
100%	14.45	15.08	4.35

$$C_v = Q \sqrt{\frac{SG}{\Delta P}} \quad (4)$$

여기서 C_v 는 유량 계수, Q 는 유량 그리고 SG 는 비중을 의미한다.

Fig. 6에 보이는 것처럼 상온의 물을 작동 유체로 실험하여 측정한 개도 별 유량 계수와 해석 데이터를 비교했을 때 Table 1에서 제시한 것처럼 최대 오차가 약 4.35%의 미소한 크기로 거의 오차가 없는 점을 통해 해석 기법의 신뢰성을 검증하였다.

2.4 다공성 물질을 이용한 유로 모사

앵글 밸브는 바디 내부에 다수의 케이지가 고정된 상태로 축 위치 제어를 통해 케이지 내 유로 면적의 변화로 유량을 제어한다. 케이지 내 유로의 크기는 밸브 전체 크기에 비해 상대적으로 매우 작아서 격자 생성 및 해석 수행에 있어서 높은 비용을 요구한다. 그리고 Fig. 5에서 보이는 것처럼 케

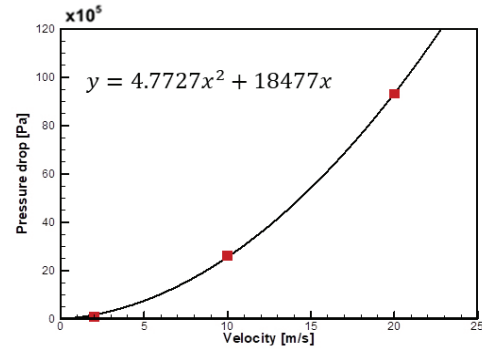


Fig. 7 Correlation between pressure drop and velocity

이지 내 유로를 통과하는 과정에서 주된 압력 감소가 발생하며 유로 간 거의 균일한 압력 및 속도 분포를 갖는다는 것을 확인하였다. 이러한 현상은 실제 관 내부의 다공성 물질을 통과하는 유동과 매우 흡사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 케이지 내 작은 유로를 다공성 물질로 모사하여 해석을 수행하였을 때 실험 결과와 유량 계수를 비교하여 모사 가능성에 대해 분석하고자 하였다.

다공성 물질을 통과하는 유동에 발생하는 저항은 점성 저항과 관성 저항으로 모사되며 해석에서는 momentum sink의 역할을 수행한다. 저항의 메커니즘은 식 (5)와 같이 표현된다.⁽²¹⁾

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i\right) \quad (5)$$

여기서 μ 는 유체의 점도, α 는 투과율, v_i 는 유속 벡터, C_2 는 관성 저항 인자 그리고 ρ 는 유체의 밀도를 의미한다.

식에서 첫 번째 항은 유체의 점성으로 인해 발생하는 점성 저항, 두 번째 항은 관성의 효과로 발생하는 관성 저항을 의미한다. 식 (5)에서 보이는 것과 같이 점성 저항은 속도, 관성 저항은 속도 제곱에 비례하며 이를 기반으로 유로에서의 유속에 따른 차압 크기를 계산하여 관계식을 도출하고 이를 바탕으로 각 저항 식의 계수를 도출하여 해석에 입력하여 실험 데이터와 비교하였다. Fig. 7은 유속 별 차압 및 관계식을 보여주고 있다.

3. 해석 결과

정방향 유동의 경우 Fig. 8에서 보이는 것처럼 낮은 Re 수의 범위에서는 손실 계수가 선형적으로 감소하는 경향을 보이며 높은 Re 수의 범위에서는 거의 변화가 없는 경향을 보이고 있는 것을 파악하였다. 전체적으로 Re 수에 반비례하는 경향을 보이고 있으며 이는 앞서 언급한 선행 연구에서 알 수 있는 경향과 매우 유사한 것을 확인할 수 있다. 정방향에서의 Re 수와 손실 계수 간 상관관계는 식 (6)과 같이 도출되었다.

$$K_f = 38.3 + 9.80e^{\left(-\frac{Re}{18.6}\right)} \quad (6)$$

역방향 유동에서의 결과는 Fig. 9에 나타내었다. 역방향 유동의 경우 정방향에서의 경향과 매우 흡사한 경향을 보이 나 정방향에 비해 다소 낮은 압력 손실 계수를 보이는 것을 확인하였다. 역방향에서의 Re 수와 손실 계수 간의 상관관계는 식 (7)과 같이 도출되었다.

$$K_b = 38.0 + 10.3e^{\left(-\frac{Re}{14.0}\right)} \quad (7)$$

두 방향에서의 결과를 통합하여 나타내었을 때, Fig. 10에서 보이는 것처럼 손실 계수의 차이가 존재하며 특히 낮은 Re 수의 범위에서 뚜렷한 것을 파악하였다. 이는 케이스 내 유로가 비대칭으로 설계되어 있어 발생하는 비대칭적인 압력분포 특성과 기하학적인 특성으로 인한 결합 후의 유선 형태 차이로 인해 발생한 현상으로 유추하였으며^(22,23) Fig. 11에서 보이는 정방향과 역방향에서의 유선 컨투어를 통해 확인할 수 있다. 통합된 데이터를 바탕으로 Re 수와 손실 계수 간의 상관관계를 식 (8)과 같이 도출하였다.

$$K_{all} = 38.2 + 10.1e^{\left(-\frac{Re}{16.0}\right)} \quad (8)$$

또한 2.4절에서 언급한 것과 같이 다공성 물질을 통한 유로 모사 해석 결과를 실험 데이터와 비교하여 Fig. 12에 나타내었다. 다공성 물질로 모사하여 해석을 수행했을 때 Table 2에서 나타난 것처럼 실험 결과와 비교하여 최대 약 1.88%의 매우 낮은 오차를 보여주고 있으며 이를 통해 모사 기법의 신뢰성 및 이를 기반으로 다수의 케이스가 존재하는 실제 크기 앵글 밸브에서의 모사 해석 가능성을 보여주고 있다.

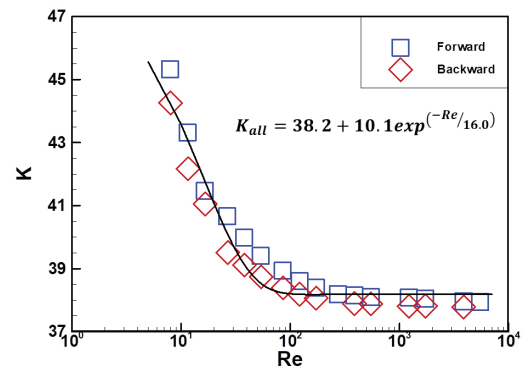


Fig. 10 Re-K correlation in all flow

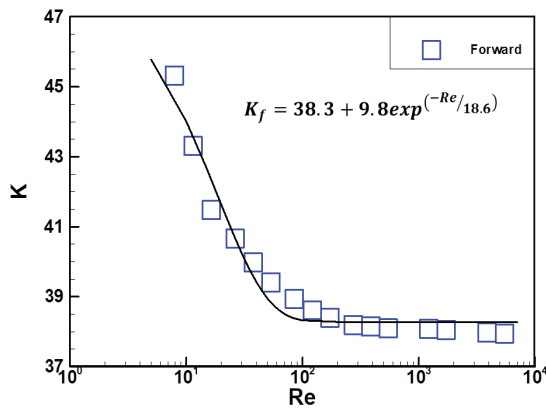


Fig. 8 Re-K correlation in forward flow

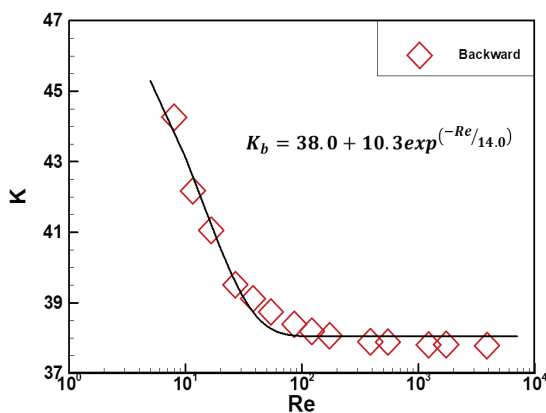


Fig. 9 Re-K correlation in backward flow

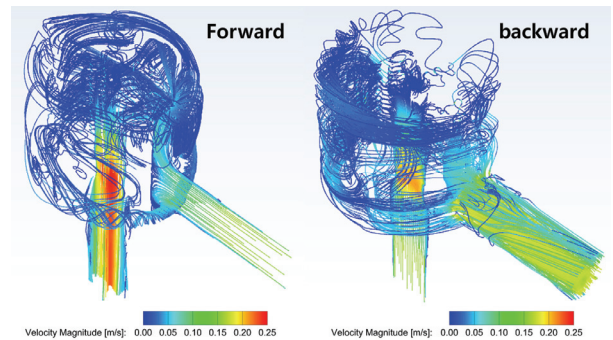


Fig. 11 Pathline contour of forward and backward flow

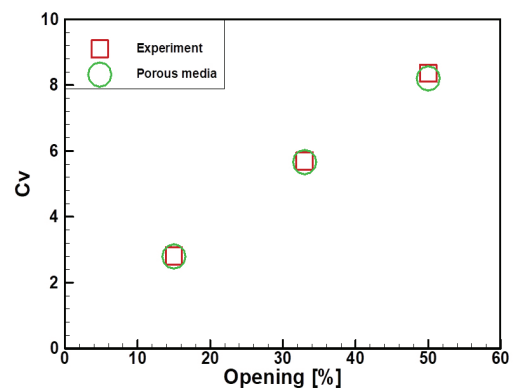


Fig. 12 Comparison between experiment and porous media analysis

Table 2 Comparison of C_f difference between experiment and porous media simulation with various opening

Opening	Experiment	Porous media	Error [%]
15%	2.82	2.80	0.73
33%	5.70	5.66	0.60
50%	8.36	8.20	1.88

4. 결 론

본 연구에서는 유량 제어를 위해 주로 사용되는 앵글 밸브를 대상으로 유동 특성에 따른 손실 계수의 경향을 파악하였다. 앵글 밸브의 차압이 증가함에 따라 Re 수가 높아지며 그에 따른 손실 계수와 Re 수의 상관관계를 분석하였다. 저유량 영역에서는 Re 수가 높아짐에 따라 손실 계수가 급격하게 낮아지면서 선형적으로 변화하는 경향을 보이는 것을 파악하였으며 일정 Re 수 이상의 고유량 영역부터는 거의 변함이 없는 경향을 보이는 것을 파악하였다. 이를 통해 증기를 방출하는 과정에서 2차 계통의 압력 감소로 인해 유량이 감소하면 손실 계수의 크기 및 변동 폭이 증가하는 영역에 천이될 수 있기 때문에 이를 고려하여 세밀한 운용이 요구되는 것이 고려된다. 그리고 실제 운용 시 고온 고압의 증기를 대상으로 수행하기 때문에 매우 높은 유량 조건의 경우 유로 일부 또는 전체 영역에서 압축성 효과가 발생할 수 있기 때문에 본 연구에서 제시한 결과에 비해 과대 또는 과소 예측할 수 있기 때문에 이를 고려하여 보정을 수행해야 한다.

또한 앵글 밸브의 유동 방향 관점에서는 역방향의 유동에 서 비교적 낮은 손실 계수를 보이고 있으나 거의 유사한 경향을 갖고 있으며 이러한 차이가 발생하는 원인은 밸브 내 비대칭적인 기하학적 특징인 것으로 고려된다.

추가로 디스크 내 유로를 다공성 물질로 모사하여 해석을 수행했을 때 기존 실험 결과와 비교 시 큰 오차 없는 점을 통해 모사 기법의 신뢰성을 검증하였다. 본 연구에서의 결과를 바탕으로 실제 크기의 밸브를 설계하는 단계에서 성능 및 해석 기법에 대해 제시할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원 “현장수요대응 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) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) Hadebe, X. P., Tchomeni Kouejou, B. X., Alugongo, A. A., & Sozinando, D. F., 2024, “Finite element analysis and computational fluid dynamics for the flow control of a non-return multi-door reflux valve,” Fluids, Vol. 9, No. 10, p. 238.
- (11) Tan, K. B., & Idris, A. F. A., 2025, “Effect of Reynolds Number on Minor Loss Coefficient for 3 Different Brands of Ball Valves,” Research Progress in Mechanical and Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 1, pp. 418~426.
- (12) Sołtek, M., & Mika, Ł., 2019, “Ice slurry flow through gate valves-local pressure loss coefficient,” In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 214, No. 1, p. 012112). IOP Publishing.
- (13) Herwig, H., & Schmandt, B., 2014, “How to determine losses in a flow field: A paradigm shift towards the second law analysis,” Entropy, Vol. 16, No. 6, pp. 2959~2989.
- (14) Herwig, H., Schmandt, B., & Uth, M. F., 2010, “Loss coefficients in laminar flows: Indispensable for the design of micro flow systems,” In International Conference on

- Nanochannels, Microchannels, and Minichannels (Vol. 54501, pp. 1517~1528).
- (15) Smith, B. L., 2004, "Pressure recovery in a radiused sudden expansion," *Experiments in fluids*, Vol. 36, No. 6, pp. 901~907.
 - (16) Martins, N. M., Covas, D. I., Meniconi, S., Capponi, C., & Brunone, B., 2023, "Hydrodynamics of laminar pipe flow through an extended partial blockage by CFD," *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 25, No. 6, pp. 2268~2280.
 - (17) Vijayan, P. K., Nayak, A. K., & Kumar, N., 2019, "Governing differential equations for natural circulation systems," *Single-Phase, Two-Phase and Supercritical Natural Circulation Systems*, pp. 69~118.
 - (18) Zhao, Y. J., Tong, J. B., Zhang, Y. L., Xu, X. W., & Tong, L. H., 2024, "Hydraulic loss experiment of straight-through Tesla valve in forward and reverse directions," *Science progress*, Vol. 107, No. 3, 00368504241269433.
 - (19) 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.
 - (20) Yang, Q., Zhang, Z., Liu, M., & Hu, J., 2011, "Numerical simulation of fluid flow inside the valve," *Procedia Engineering*, Vol. 23, pp. 543~550.
 - (21) Fluent, A. N. S. Y. S., 2011, "Fluent 14.0 user's guide," Ansys Fluent Inc.
 - (22) Jin, Z. J., Gao, Z. X., Zhang, M., Liu, B. Z., & Qian, J. Y., 2018, "Computational fluid dynamics analysis on orifice structure inside valve core of pilot-control angle globe valve," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 232, No. 13, pp. 2419~2429.
 - (23) Liao, Y., Yuan, H., Lian, Z., Feng, J., & Guo, Y., 2015, "Research and analysis of the hysteresis characteristics of a large flow directional valve," *Journal of Mechanical Engineering (Strojnicki Vestnik)*, Vol. 61, No. 6, pp. 355~364.