

# CFD 해석을 이용한 누설 포집 시스템 해석 방법 수립 및 평가

최대경\* · 박원만\* · 어동진\*\* · 권태순\*\* · 최청열\*†

## Establishment and Evaluation of Leak Collection System Analysis Method Using CFD Analysis

Dae Kyung Choi\*, Won Man Park\*, Dong-Jin Euh\*\*, Tae-Soon Kwon\*\*, Choengryul Choi\*†

*Key Words* : Computational fluid dynamics(전산유체역학), Small amount of leakage(소량 누설), Leak detection(누설 탐지), Leak collection system(누설 포집 시스템), Humid air behavior(습공기 거동)

### ABSTRACT

Suppose a small amount of leakage exceeds the limit of the operating conditions of a nuclear power plant. In that case, losses due to the nuclear power plant shutdown may occur, or accidents due to leakage may occur. Consequently, there has been a need to develop a system capable of quickly detecting even small amounts of leakage, and research has been conducted to address this need. To develop such a system, it is necessary to understand the thermal-hydraulic characteristics of the system. This study established a CFD-based evaluation process for evaluating leak detection systems. A numerical analysis model was used to simulate leakage, and a two-step CFD analysis was performed to assess its applicability. In the first step, a study of the leakage behavior in the insulation material was conducted, and the effect of the gap between the pipe insulation material and the outer cover was evaluated. In the second step, the collection loop was analyzed using the results of the leakage behavior analysis in the insulation as an input condition. The results of this study were used to construct the collection loop experimental device and will help in understanding the heat flow characteristics in the collection loop.

### 1. 서 론

원자력발전소의 원자로 계통, 1·2차 계통 등의 주요 계통에는 수많은 기기나 다양한 형태의 배관 및 밸브 등으로 이루어져 있다. 원자력 발전소의 노후화, 배관 감육, 기기 진동에 의한 피로파손 등의 다양한 원인으로 인하여 발전소 내 취약부분에서 고온·고압의 원자로냉각재가 일부 누설될 가능성이 있다<sup>(1-3)</sup>. 국내의 운영 중인 원자력발전소에서도 일부 누설이 발생한 사례가 보고되고 있다<sup>(4-6)</sup>. 2008년 고리원전 3호기에서 증기발생기 배수밸브 용접부에서 누설이 발생하였으며, 2017년에는 고리 4호기에서 증기발생기 수실 배수 배관에서 누설이 발생한 사례가 보고되었다. 또한 월성 2호기에서도 격납건물 내 정지냉각펌프 출구 배관과 증기발생기에 연결된 수위계측기의 압력전송 배관에서 핀홀로 인한

누설 사례가 보고되었다. 일부 사례와 같이 원전의 운전제한 조건을 초과하는 미확인누설이 발생하는 경우에는 방사성 물질의 누설로 인한 피해나 운전 중인 원전의 정지로 인한 경제적 손실이 발생하게 되므로 이러한 누설이 발생하였을 때 이를 신속히 탐지할 수 있는 시스템을 개발 및 적용하는 것이 필요하다.

원자력발전소에서는 원자로냉각재 압력경계에서 발생한 누설감지를 위하여 USNRC Reg. Guide 1.45의 요건에 맞추어 누설감지 시스템이 설계된다. 미확인누설을 직접적인 감시를 위하여 원자로건물 및 원자로공동 배수조, 원자로건물 대기 방사선감시기등이 사용되며, 간접적인 감시 방법으로는 원자로건물의 압력/온도/습도/음향누설 감시 등이 사용되고 있다<sup>(7)</sup>. 하지만 국내 원전에서 발생한 누설사례를 보았을 때 기존에 사용하는 누설감시 방법은 미확인누설과 같이

\* (주)엘솔텍(Elsoltec Inc.)

\*\* 한국원자력연구원(Korea Atomic Energy Research Institute)

† 교신저자, E-mail : crchoi@elsoltec.com

2023 한국유체기계학회 하계학술대회 발표 논문, 2023년 7월 5일~7월 7일, 평창 알펜시아

The KSFJ Journal of Fluid Machinery: Vol. 26, No. 5, October 2023, pp.34~43(Received 23 Jun. 2023; revised 18 Aug. 2023; accepted for publication 18 Aug. 2023)

소량 누설을 짧은 시간 안에 감지하기에는 성능이 충분치 않은 것으로 확인되었다. 이에 따라서 소량 누설 발생 후 짧은 시간 안에 누설을 감지하기 위한 기술에 대한 필요성이 대두되었다<sup>(8)</sup>.

이에 따라서 미확인 누설을 감지하기 위하여 음향누설감시계통, 영상신호 기반 배관누설감시 기술 등이 개발되었으며, 본 연구의 해석 대상인 원자로냉각재계통의 미확인 누설을 실시간 수준으로 감지할 수 있는 시스템도 개발이 진행되고 있다<sup>(8)</sup>. 본 연구에서는 누설 탐지 시스템 모의 실험 장치를 평가하기 위한 수치해석 기반의 평가 프로세스를 수립하였다. 누설을 모의하기 위한 수립된 수치해석 모델을 이용하여 적용성 평가를 수행하였다. 배관 누설 이후 포집 시스템을 이용하여 이송하는 과정을 해석하기 위하여 두 단계로 나누어 CFD 해석을 수행하였다. 첫 번째 단계로 배관 소량 누설 습공기 확산 해석이 수행되었으며, 배관 단열재와 외부커버의 겹에 의한 영향을 평가하였다. 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계 해석 결과를 입력 조건으로 활용하여 포집 루프에 누설 유동이 유입되고 이송튜브를 통하여 이송 후 상대 습도 프로파일을 평가하고 실험과 비교 검증하였다.

## 2. 수치해석 방법

### 2.1 지배방정식

포집기 유동장 해석에서 수행된 CFD 해석에 고려된 지배방정식과 주요 해석 방법은 다음과 같다. 배관에서 고온·고압의 증기가 누설되면, 누설부에서는 증기 제트와 같이 압축성 유동 특성을 가지게 된다. 이와 같은 압축성 유동을 평가하기 위하여 수치해석 시 지배방정식은 연속방정식(식 (1)), 운동량방정식(식 (2)) 및 에너지방정식(식 (3))이 사용되었다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) \\ = -\nabla p + \nabla \cdot (\overline{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) \\ = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\overline{\tau_{eff}} \cdot \vec{v})) + S_h \end{aligned} \quad (3)$$

다중물질 수송 해석이란 단상 혼합물 내의 화학종간 혼합, 확산, 화학반응 등의 현상을 모사하는 해석기법으로서, 배관 외부커버 및 포집 루프 내부에 존재하는 증기 및 공기 간의 확산, 혼합 현상을 해석하기 위해 사용되었다.

### 2.2 수치해석 기법

#### 2.2.1 해석 공통 적용 모델

해석기법은 유한체적법 기반의 상용 CFD 코드인 ANSYS Fluent version 18에서 활용 가능하도록 수립되었으며, 2차원 또는 3차원 비정상상태 해석이 수행되었다. 본 연구에서는 기존 연구 결과를 기반으로 압력기반 솔버(pressure-based solver)를 사용하였으며, 압력-속도 커플링 알고리즘으로는 수치적 안정성이 높고 압축성과 비압축성 유동이 공존하는 문제에서 효율성이 좋은 coupled 알고리즘을 적용하였다<sup>(9)</sup>.

본 연구에서 수행한 해석에서 배관과 외부커버 사이 영역, 포집 루프 내부는 직관에 유사한 형태이기 때문에 난류 영향을 고려하기 위하여 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stoke) 기반 난류모델 중 수렴성과 안정성이 우수하여 가장 널리 사용되는 standard k-ε 모델이 사용되었다.

배관에서 누설 발생 시 포화증기가 배출되는 조건을 적용하였으며, 응축 현상을 고려하였다. 누설 포집 루프 해석에서는 포집 루프 내부에는 고습도의 공기와 증기가 유입되게 되며, 포집 및 이송 과정에서 응축 현상이 발생하므로 이를 고려하였다. 본 연구에서는 증기의 상변화를 고려하기 위하여 다중물질 수송 해석 기법에 응축 모델을 적용하여 해석하는 방식을 사용하였다. 해석 대상에 따라서 두 가지의 응축 모델을 사용하였다. 배관 소량 누설 습공기 확산 해석에서 유동장 해석에서는 Lee 모델의 증기 응축을 고려하였다. 소량 누설 포집 루프 해석에서는 Lee 모델의 증기 응축을 고려하고, 고습도의 공기가 응축되는 현상을 고려하기 위하여 상대습도 기반으로 상변화를 할 수 있도록 모델을 추가하였다. 예비 해석을 통하여 공기의 질량분율이 0.1 이상인 영역에서는 상대습도 기반 상변화 모델을 적용하고, 그 외에 영역에서는 Lee 모델을 적용하도록 설정하였다. 상기 증기 응축 모델을 적용하고 증기가 응축될 때 생성되는 응축수는 고려하지 않았다.

Lee 모델에서는 증기의 응축을 모사하기 위하여 질량 전달은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \text{If } T_v < T_{sat} (\text{condensation}): \dot{m}_w \\ = \text{coeff} \times \alpha_v \rho_v \frac{(T_{sat} - T_v)}{T_{sat}} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, α는 phase의 체적 분율, ρ는 밀도이며, coeff는 실험 상수이다. 본 연구에서 coeff는 0.1을 사용하였다. 에너지 방정식의 source term은 질량 전달률에 잠열을 곱하여 적용한다.

상대습도에 기반한 상변화 모델에서는 다음과 같이 응축 시 질량 전달이 계산된다.

$$RH > 100\%(\text{condensation}) : \dot{m}_{cl} = (w_{H_2O(g),limit} - w_{H_2O(g)}) \times \rho_{mix} / dt \quad (5)$$

여기서,  $w$ 는 기체의 질량 분율,  $\rho$ 는 밀도이다. 에너지 방정식의 source term은 질량 전달률에 현열을 곱하여 적용하였다.

### 2.2.2 배관 소량 누설 습기 확산 해석

배관 단열재의 재료는 glass wool이며, 다공성 매질(porous media)로 모델링하였다. 단열재의 다공성 매질 특성 및 열전도도는 기 발표된 연구에서 제시한 수치를 적용하였다<sup>(10)</sup>. Permeability의 경우 원통 좌표계를 기준으로 반경 방향은  $2.69 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$ , 접선 및 축 방향으로  $4.66 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$ 를 사용하였으며, porosity는 0.969를 사용하였다. 단열재의 열전도도는 Fluent의 UDF(user-defined function)를 사용하여 상대습도의 함수로 모델링하였다. 열전도도는 상대습도 0~95 %에서 따라서 반경방향은 0.0529~0.1686 W/m·K, 접선 및 축 방향에서는 0.0404~0.0513 W/m·K의 범위로 적용되도록 모델링하였다. 작동유체는 공기-증기 혼합물이며, 공기와 증기는 이상기체로 가정함으로써 압축성 효과를 고려하였다. 액적의 경우 원자로 격납건물의 설계 기준온도인 322.04 K의 물성치를 사용하였다. 배관 재료로 SUS304를 적용하였으며, SUS304의 밀도, 비열, 열전도도는 각각  $7900 \text{ kg/m}^3$ ,  $500 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ ,  $16.2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이다.

### 2.2.3 소량 누설 포집 루프 해석

개발 중인 포집기에는 다공성 소결체가 부착된다. CFD 해석 시 다공성 소결체의 형상을 모사하여 해석하기에는 과도

한 컴퓨팅 리소스가 필요하므로 이를 다공성 매질(porous media)로 모사하여 압력강하를 근사하는 모델링 기법을 사용하였다.

CFD 해석 시 다공성 매질을 통과하는 유동의 압력강하는 운동량 방정식의 생성항(momentum source)에 의해 계산된다. 다공성 매질의 압력강하 모사를 위한 생성항은 아래의 식 (6)과 같이 정의된다.

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha_i} V_i + C_i \frac{1}{2} \rho |V| V_i\right) \quad (6)$$

여기서,  $\alpha_i$ 는 permeability,  $C_i$ 는 inertia loss coefficient,  $\mu$ 는 유체의 점성계수,  $\rho$ 는 유체의 밀도이다. 다공성 매질의 압력강하 평가를 위한 운동량 생성항은 viscous loss term과 inertia loss term으로 구성된다. Viscous loss term은 유속에 대한 일차 함수의 형태이며 permeability( $\alpha_i$ )의 역수에 비례한다. Inertia loss term은 유속에 대한 이차 함수의 형태이며 inertia loss coefficient( $C_i$ )에 비례한다.

기존 연구결과 상관식을 이용하여 다공성 매질의 permeability, inertia loss coefficient를 계산하는 경우 실험에 비하여 CFD 해석이 압력강하를 과도히 예측하는 결과를 보였다. 다공성 매질을 통과하는 유동 압력강하는 점성 저항 효과(viscous resistance effect)와 관성 저항 효과(inertia resistance effect)가 복합적으로 작용한 결과이며, 다공성 매질로 모델링 된 포집기 다공성 소결체의 압력강하를 근사하기 위해서는 다공성 매질로 설정된 영역의 permeability와 inertia loss coefficient가 정의되어야 한다. 다공성 매질의 압력강하 특성은 두 개의 porous coefficient의 영향을 받으므로 본 연구에서는 두 계수를 동시에 변화시켜가며 실험과 유사한 압력강하 특성이 나타나는 permeability 및 inertia loss coefficient를 도출하여 적용하였다<sup>(11)</sup>. 이 때 사용된 값은 permeability  $3.3902\text{E}-13 \text{ m}^2$ , inertia loss coefficient  $1.1897\text{E}+07 \text{ m}^{-1}$ 이다.

### 2.3 누설 포집 시스템 모의 실험 장치

개발 중인 소량 누설감시 시스템의 개념도는 Fig. 1과 같다. 격납건물 내 주요 기기 인근 및 배관에 이송배관과 포집부가 포함된 포집 시스템을 병렬로 설치한다. 포집 시스템은 누설 발생 시 증기가 포집부 내부로 자연 유입되면, 주기적으로 순환공기를 공급하여 포집부 내부로 유입된 고습도 공기를 이송계통을 통하여 습도 감지 센서로 이동시킨 후 습도 변화를 측정함으로써 누설여부를 감지할 수 있도록 구축되었다. 배관 누설 발생 시 포집부 입구를 통하여 유입되는 고습도 공기를 이송하는 과정에서 저습도의 순환공기와 고습도 공기의 혼합/확산이 발생하므로 포집부 입구에서 유입된 고습도 공기는 이송 과정에서 습도가 점차 낮아지게 된다.

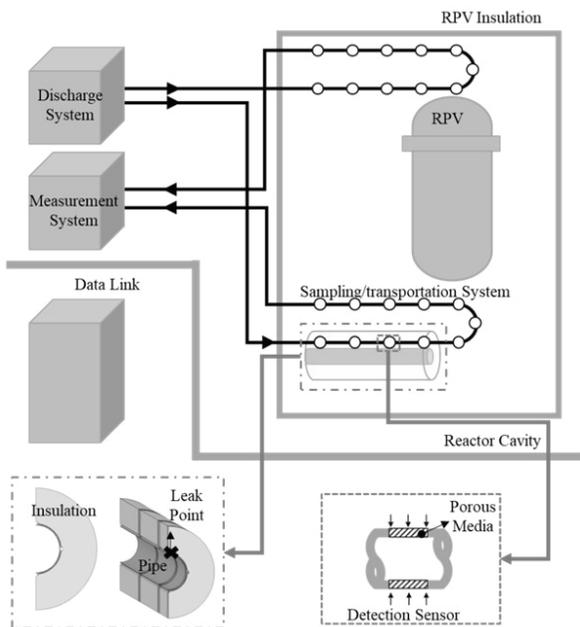


Fig. 1 Schematic of the leak detection systems

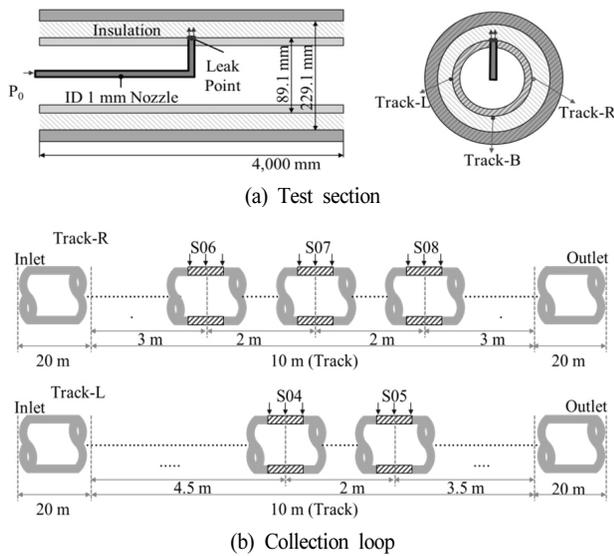


Fig. 2 Schematic of experimental setup for performance evaluating leak detection system

배관 내 누설 발생 시 누설 포집 시스템의 성능에 대한 모의 실험을 위하여 Fig. 2와 같이 실험부가 구성되었다. 실험부는 외경 89.1 mm 배관을 모사하여 배관을 감싸는 단열재와 그 밖의 외부 덮개로 구성되어 있으며 총 길이는 4 m이다. 소량 누설 상황을 모의하기 위하여 배관 내 직경 1 mm 노즐이 설치되었다. 포집 시스템의 포집 루프(Track-L/R/B)는 Fig. 2 (a)와 같이 누설 방향으로부터 90 도 간격으로 설치되었다. CFD 해석에 사용된 포집 루프의 형상은 전단 이송 튜브의 길이 20 m, 포집기가 설치된 Track의 길이 10 m, 후단 이송튜브 길이 20 m로 구성된다(Fig. 2 (b)). Track-R은 누설 배관의 우측에 설치되며 포집기가 2 m 간격으로 3 개 배치된다. Track-L은 누설 배관의 좌측에 설치되며 포집기가 2 m 간격으로 2 개 배치된다.

### 3. 배관 소량 누설 습공기 확산 해석

#### 3.1 해석 형상 및 격자 모델

##### 3.1.1 해석 형상

배관 소량 누설 습공기 확산 해석에서 사용된 배관 단열재의 내경은  $\varnothing$  89.1 mm, 외경은  $\varnothing$  229.1 mm이며, 총 길이는 4 m이다. 해석 형상이 누설부를 기준으로 좌·우, 앞·뒤 대칭적인 형상이므로 1/4 형상을 사용하여 CFD 해석이 수행되었다(Fig. 3). 누설은 배관의 상부에서 위쪽 방향으로 발생하는 조건이며, 이 때 누설부는 직경 1 mm인 원형 홀로 모델링하였다. 예비 실험에서 단열재와 단열재 연결부, 배관 외부 커버 사이로 배출되는 증기가 상당히 많은 것으로 관측되어 이에 대한 효과를 고려하기 위하여 3가지 갭을 물리적으로 모델링 하였다(Fig. 3). Gap 1은 배관&포집 루프-단열재 간의 갭을 고려하기 위하여 1~3 mm로 모델링하였다.

Gap 2는 단열재-단열재 간의 갭을 고려하기 위하여 1~2 mm로 간격을 설정하고 누설부(0.0 m)를 기준으로 축 방향으로 0.4 m, 1.2 m 위치에 모델링하였다. Gap 3은 단열재-배관 외부 커버 간의 갭을 고려하기 위하여 해석 영역(1/4 형상)의 표면에 0.5 mm의 갭을 단열재 영역의 상/하 위치에 모델링 하였다. 또한 누설 포집을 위한 포집 루프가 고온관 상/하부 및 양쪽 측면에 설치되므로 포집 루프의 영역을 직경 6.35 mm인 원통으로 가정하고 해석 영역에서 제외하였다.

##### 3.1.2 격자 모델

1/4 형상에 대하여 복합 격자를 사용하여 3차원 격자를 모델링하였다(Fig. 4). 누설부 인근에는 누설 증기가 분출되기 때문에 매우 조밀한 격자를 사용하였으며, 해석 해의 구배가 크게 나타날 것으로 예상되는 벽면과 좁은 갭에도 조밀한 형태의 격자를 구성하였다. 해석 영역에 사용된 총 격자는 약 16,000,000 개 수준이다.

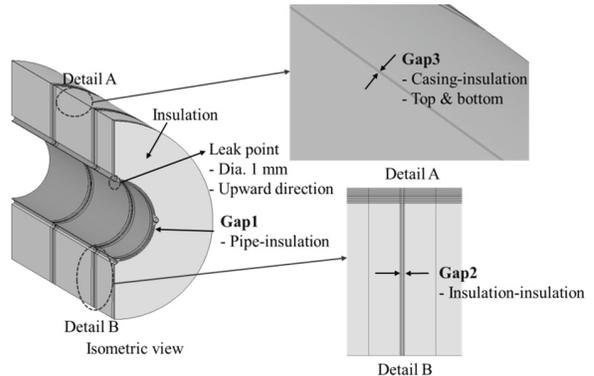


Fig. 3 CAD model for humid air diffusion analysis in pipe insulation

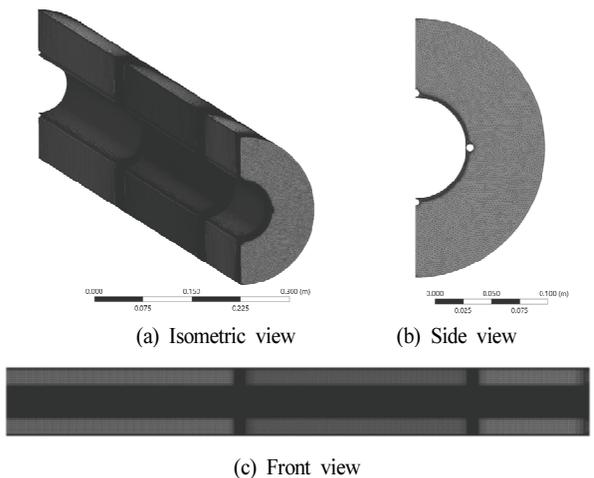


Fig. 4 Mesh model for humid air diffusion analysis in pipe insulation

### 3.2 초기 및 경계 조건

단열재 내부 열유동 평가를 위하여 3차원 비정상상태 해석이 수행되었다. 초기 조건으로 내부 압력은 대기압 (1 atm), 온도 30 °C, 상대습도 10 %를 적용하였다.

CFD 해석 시 사용된 주요 경계조건은 Fig. 5와 같다. 앞·뒤, 좌·우 대칭적인 형상이므로 각각 대칭 조건을 적용하였다. 누설부에서 조건을 정의하기 위하여 ANSI/ANS 58.2에서 제시된 제트 모델에서 사용하는 homogeneous equilibrium model(HEM)을 이용하여 임계 유량 및 목압력을 계산하여 적용하였다<sup>(12)</sup>. 임계 유동을 모사하기 위한 해석 방법은 선행 연구를 통하여 검증이 완료되었다<sup>(13~14)</sup>. HEM 모델을 이용하여 계산된 임계유량은 10,630.2 kg/m<sup>2</sup>·s이고, 목압력은 4,361,643 Pa이다. 임계유량을 환산하여 적용된 증기의 유량은 0.007863 kg/s이다. 갭(Gap 1~3)과 우측 출구에는 압력경계 조건을 적용하였으며, 이때 게이지 압력은 0 Pa로 설정하였다. 단열재 외부 표면에는 대류열전달 조건이 적용되었다. 주변 온도는 30 °C이고 두께 1 mm인 SUS304로 감싸여있으며, 열전달계수는 10 W/m<sup>2</sup>·K를 사용하였다. 갭의 내측면(고온관 외측면)에는 고온관에 의한 열전달을 고려하기 위하여 323 °C 고정 온도 조건을 부여하였다. 비정상상태 해석 시 60 초까지 시간간격은 0.05 초, 이후에는 시간간격을 0.1 초로 설정하였다. Gap 1과 Gap 2의 간격에 따라서 총 5개의 case에 대하여 해석이 수행되었다(Table 1).

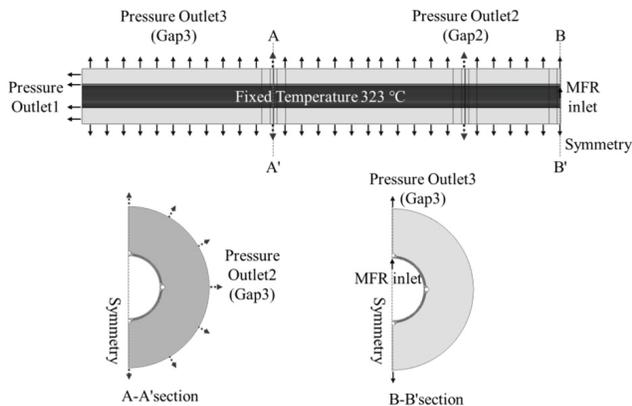


Fig. 5 Boundary conditions

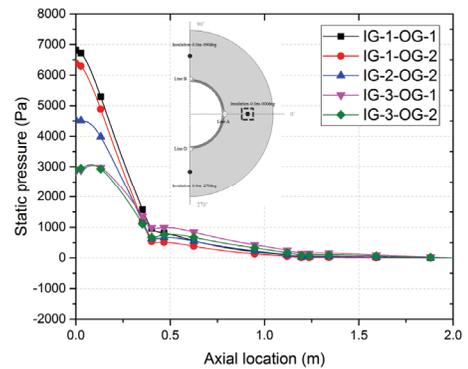
Table 1 Analysis cases

Case name	Gap 1 (pipe-insulation gap)	Gap 2 (inter-insulator gap)	Gap 3 (casing-insulation gap)
IG-1-OG-1	1 mm	1 mm	0.5 mm
IG-1-OG-2	1 mm	2 mm	
IG-2-OG-2	2 mm	2 mm	
IG-3-OG-1	3 mm	1 mm	
IG-3-OG-2	3 mm	2 mm	

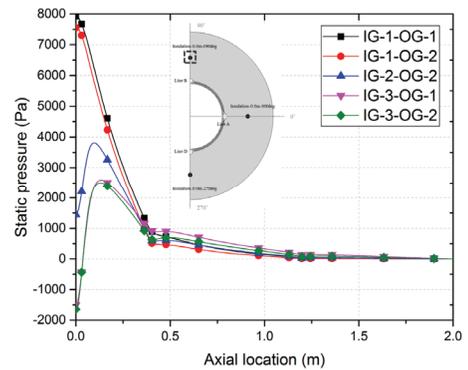
### 3.3 해석 결과 및 고찰

배관 단열재 및 갭 사이 열유동 특성을 분석하기 위하여 압력, 온도, 증기의 질량 분율을 모니터링 하였다. 축 방향으로 0.0 m(누설 위치), 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m 거리에 각 모니터링 포인트를 생성하였다. 포집 루프의 포집기가 설치되는 지점과 인접한 영역과 배관 단열재의 중간 위치에서 데이터를 취득하였다.

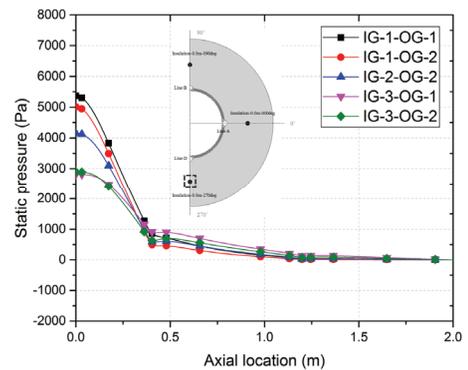
배관 단열재 중간 지점에서 누설 발생 후 500 초 시점에서 배관 단열재 내 축 방향 정압 분포를 Fig. 6에 나타냈다. Gap 1 간격 1 mm, Gap 2 간격 1 mm(IG-1-OG-1)인 경우, 누설부 인근(x=0.0 m)에서 정압은 수천 Pa 수준으로 나타났



(a) Insulation-000deg



(b) Insulation-090deg



(c) Insulation-270deg

Fig. 6 Static pressure distribution at the midpoints of the insulator in the axial direction at 500 s

다. 축 방향으로 0.5 m 떨어진 지점에서는 정압이 수백 Pa 수준으로 급격히 감소한다. 이는 0.4 m 지점에 위치한 Gap 2를 통하여 누설 유동이 빠져나가기 때문으로 판단된다. Gap 2의 간격이 2 mm로 증가(IG-1-OG-2)함에 따라서 누설부 인근의 압력도 수백 Pa 수준으로 약간 감소하는 경향을 보였다. Gap 1의 간격이 2~3 mm로 증가하는 경우에는 누설부 인근 압력이 크게 감소하는 경향이 나타났다.

Gap 1의 두께가 1 mm에서 3 mm로 증가하면 누설부 주위에서 압력이 수천 Pa 수준 감소하는 결과가 나타났다. Gap 1의 두께가 증가할 경우(2~3 mm) 누설부 상부에 저압으로 역류가 일부 발생되었다. Gap 2의 경우 누설부에서 Gap 2까지 압력이 급격히 감소하는 경향을 보였으며, Gap 2의 두께가 증가할수록 압력이 다소 감소하는 경향을 보였다. Gap 3의 두께는 1 mm로 고정되어 있으나, 해석결과 약 48

~75 % 수준의 유량이 Gap 3에서 발생하였다. 실험 시에도 단열재 외부 커버의 갭을 통하여 상당량의 증기가 배출되는 경향이 나타났으며, 정량적인 비교는 어렵지만 CFD 해석도 이러한 현상을 반영하고 있는 것으로 판단된다.

상기 결과를 보았을 때 누설부 인근에서는 누설 방향 반대에 설치된 포집 루프에서도 압력이 3,000 Pa 이상 증가하므로 포집기로 누설 증기가 자연유입 될 것으로 예상된다. 현재 개발 중인 시스템에서는 포집 루프 내 진공을 형성시키는 운전 모드를 사용하므로 누설부에서 0.5 m 떨어진 지점에서 압력은 수백 Pa 수준이지만 측정부에서 누설 여부를 감지 가능한 수준의 누설 증기가 포집 루프로 유입될 것으로 예상된다.

본 해석 결과를 이용하여 Fig. 7과 같이 포집 루프의 Track에 따른 포집기의 위치 (S5~S8)에 대하여 정압, 온도, 증기의 질량분율의 시간이력 데이터를 생성하였다. Gap 1이 큰 경우(2~3 mm) 다량의 누설 증기가 누설부 인근에서 Gap 3를 통하여 배출되므로 IG-1-OG-1의 결과를 사용하였다. 생성된 포집기 위치에서 데이터는 두 번째 단계인 소량 누설 포집 루프 해석 시 포집기의 입구조건으로 활용되었다.

#### 4. 소량 누설 포집 루프 해석

##### 4.1 해석 형상 및 격자 모델

개발 중인 포집 루프는 운전 조건이나 포집기의 설치 위치에 따라서 포집되는 누설의 양이 변화되어 포집 루프 후단에 연결되는 측정부에서 감지되는 상대습도 신호의 크기에 영향을 주게 된다. 현재 연구에서는 수행된 여러 가지 실험 중 대표적인 한 개의 실험 조건에 대하여 CFD 해석을 수행하고 실험 결과와 비교하였다.

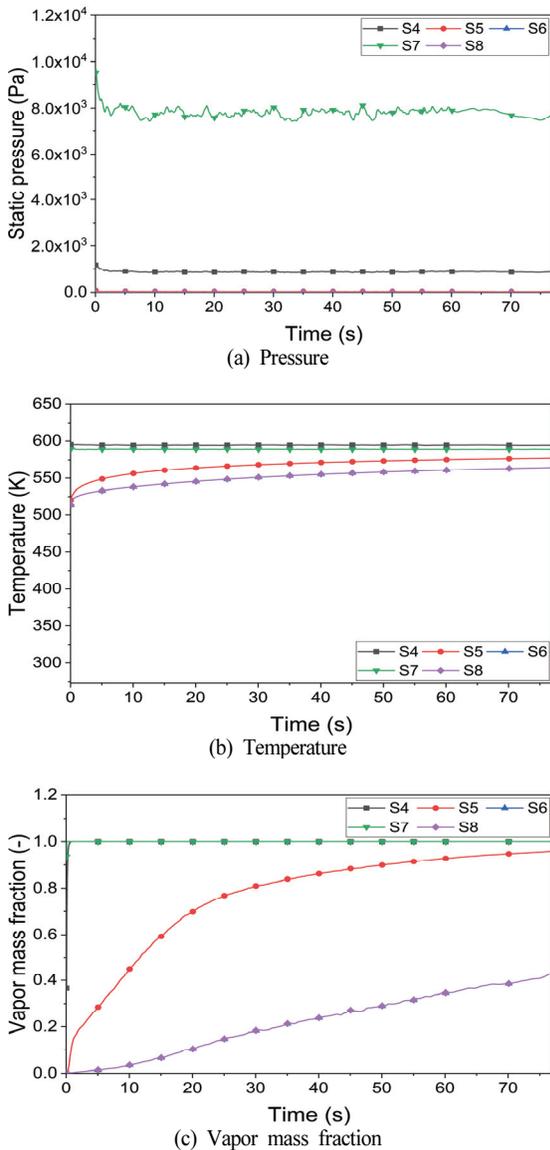


Fig. 7 Static pressure, temperature, and vapor mass fraction results at the collector location (IG-1-OG-1)

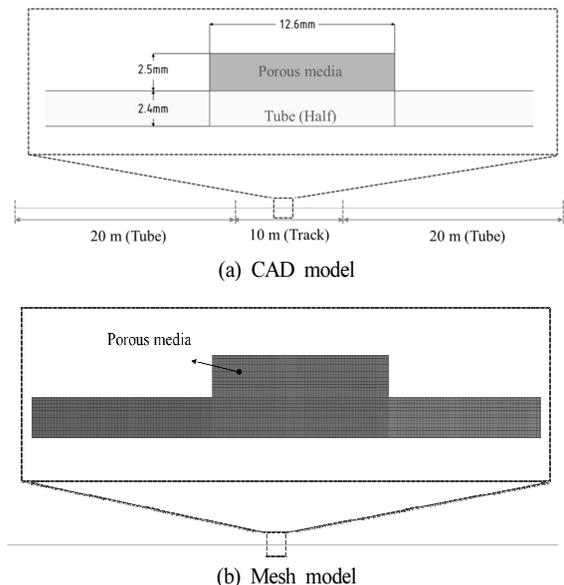


Fig. 8 CAD and mesh models for collection loop analysis

4.1.1 해석 형상

이송튜브와 다수의 포집기가 설치된 Track을 포함하여 총 길이 50 m로 이루어진 포집 루프에 대해 해석이 수행되었다. CFD 해석에 사용된 포집 루프의 형상은 전단 이송튜브의 길이 20 m, 포집기가 설치된 Track의 길이 10 m, 후단 이송튜브 길이 20 m로 구성된다(Fig. 8(a)). Track-R은 누설 배관의 우측에 설치되며 포집기 3개가 누설부(0.0 m)를 기준으로 -2.0 m(S06), 0.0 m(S07), +2.0 m(S08)에 각각 설치된다(Fig. 2). 포집 루프에 사용되는 이송튜브 내경은  $\varnothing$  4.8 mm, 다공성 소결체는 내경  $\varnothing$  4.8 mm, 두께 2.5 mm, 길이 12.6 mm를 사용하였다(Fig. 8(a)).

4.1.2 격자 모델

포집 루프 해석 형상이 축대칭이므로 2차원 형상을 사용하였다. 정렬 격자를 이용하여 격자를 구성하였으며, 반경방향 격자 크기를 0.2 mm로 조밀하게 적용하였다(Fig. 8(b)). 축 방향에서 격자 크기는 입/출구 인근에서는 0.2 mm로 조밀한 격자를 적용하고, 튜브 중간 부위에서는 격자가 다소 커지도록 모델링하였다. 총 격자수는 607,000 개 수준이다.

4.2 초기 및 경계 조건

2차원 비정상상태 CFD 해석이 수행되었다. CFD 해석의 초기 조건을 수립하기 위하여 실험 데이터 중 flushing mode, discharge mode의 데이터의 평균값을 계산하여 적용하였다. CFD 해석 시 초기 조건으로 내부 압력은 대기압 (101.325 kPa), 온도는 23 °C, 상대습도는 0.3171 %가 각각 적용되었다.

포집 루프의 각 운전 모드별 경계 조건은 Fig. 9와 같다. 포집 루프는 네 가지 운전 모드가 순차적으로 작동하도록 설계 되었다. 첫 번째 모드는 flushing mode( $t=0$  s~30 s)이며, 포집 루프의 전단에서부터 건조 공기를 공급하여 포집 루프 내부를 건조하게 된다. Flushing mode에서 포집 루프의 전단은 압력 입구 조건을 적용하였으며, 이 때 절대압력 220.18 kPa로 설정하였다. 공급되는 건조 공기의 온도는 23 °C, 상대습도는 0.3171 %이다. 포집 루프의 후단은 압력 출구 조건을 적용하고 절대압력 113.56 kPa이 되도록 조건을 적용하였다. 포집기의 유입구에는 압력 출구 조건을 적용하고, Fig. 7과 같이 단열재 해석을 통하여 얻어진 포집기 위치에서의 압력, 온도, 증기의 질량분율 데이터를 Fluent의 user-defined functions를 사용하여 시간에 대한 함수 형태로 적용하였다. 또한 포집기의 다공성 소결체는 porous media로 모사하였으며, 이 때 사용된 수치는 2장에 기술한 바와 같다.

두 번째 모드는 vacuuming mode( $t=30$  s~31 s)이며, 포집 루프의 후단에서부터 공기를 흡입하여 포집 루프 내부에

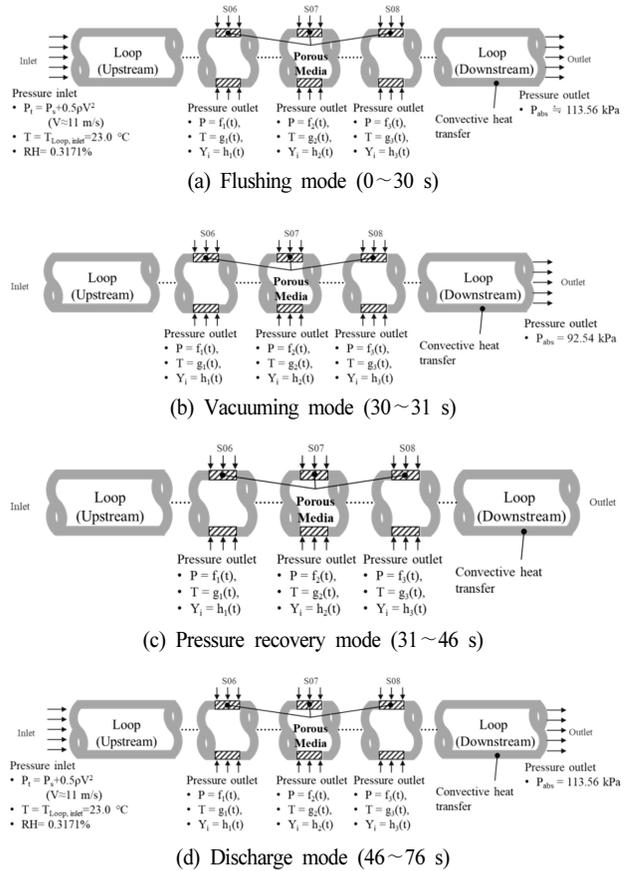


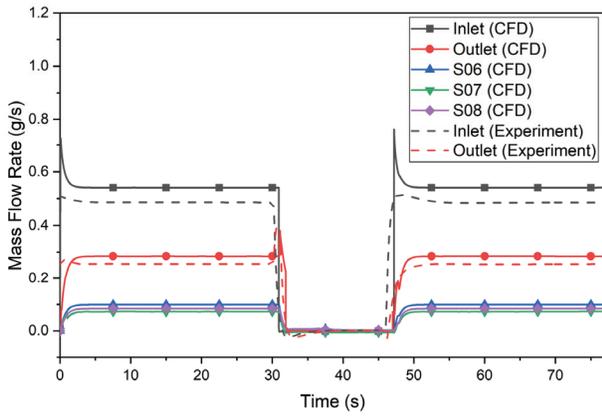
Fig. 9 Boundary conditions by the operation mode in detection loop analysis

진공을 형성하는 조건이다. Vacuuming mode에서 포집 루프의 전단은 유체의 유입이 되지 않도록 유동을 차단하였다. 포집 루프 내에 진공을 형성하기 위하여 포집 루프 후단에 절대압력 92.54 kPa 조건을 적용하였다. 포집기 조건은 flushing mode와 동일하게 적용되었다.

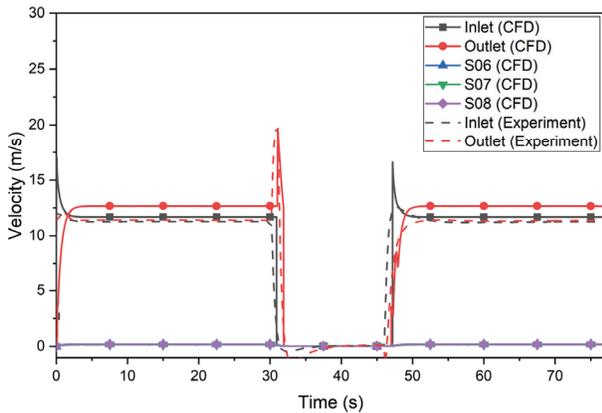
세 번째 모드는 pressure recovery mode( $t=31$  s~46 s)이며, 포집 루프 진공 형성 후 포집기를 통하여 외부 유체가 유입되면서 포집 루프 내 압력이 회복되는 조건이다. 포집 루프의 후단에 유체의 유입이 되지 않도록 차단하였다. 나머지 조건은 vacuuming mode와 동일하다.

네 번째 모드는 discharge mode( $t=46$  s~76 s)이며, 포집기를 통하여 유입된 습공기(또는 누설 공기)를 계측 시스템으로 이송하는 과정이다. Discharge mode에서는 flushing mode와 동일하게 포집 루프의 전단에는 압력 입구 조건, 포집기와 포집 루프의 후단에는 압력 출구 조건을 적용하였다.

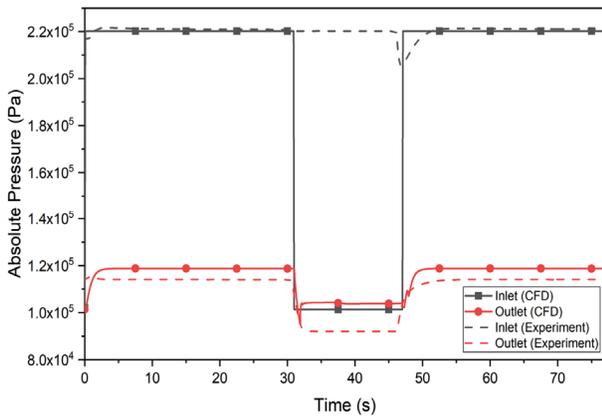
공통 적용 조건으로 이송튜브에는 대류 열전달 조건을 적용하였다. 이 때 열전달 계수는  $11.441$  W/m<sup>2</sup>·K, 주변 온도 18.3181 °C로 적용되었다. 적용된 열전달 계수는 온도 290 °C 공기가 주변온도 18.3181 °C 조건에서 이송튜브를 통하여 20 m 이송 될 때 값을 계산하여 적용하였다.



(a) Mass flow rate



(b) Velocity

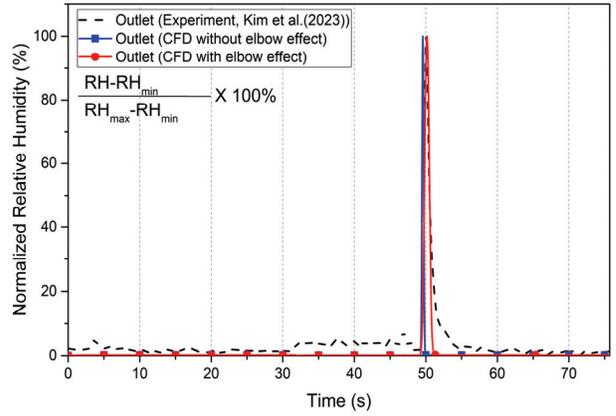


(c) Absolute pressure

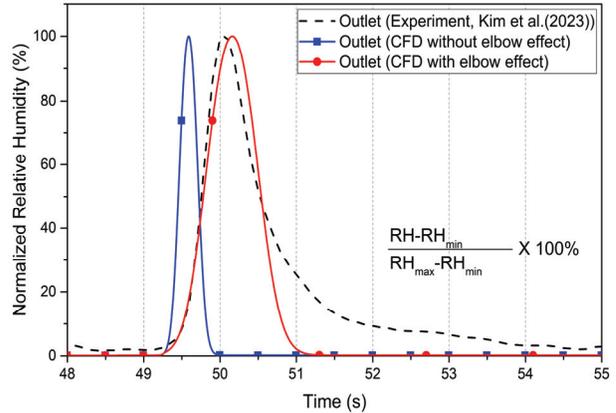
Fig. 10 Comparison of results between experiment and CFD analysis

### 4.3 해석 결과 및 고찰

포집 루프의 입/출구에서 유량, 유속, 절대 압력 결과를 Fig. 10에 나타냈다. 0 초부터 30 초까지는 flushing mode 이므로 포집 루프 전단을 통하여 건조 공기가 공급되며, 공급된 공기의 약 52.8 %는 포집 루프의 후단으로 빠져나가고 나머지 공기는 포집기 S06, S07, S08 순으로 18.3 %, 13.4 %, 15.52 %가 각각 배출된다. 포집 루프 내 압력이 포집기



(a)  $t = 0 \sim 75.7$  s (full time)



(b)  $t = 48 \sim 55$  s

Fig. 11 Comparison of the normalized relative humidity profile at the end of the collection loop

외부에 비하여 높기 때문에 포집기를 통하여 포집 루프 내부로 유입되는 유동은 발생하지 않는다. 30 초부터 31 초까지는 vacuuming mode이며 포집 루프 내 압력이 대기압 이하로 떨어진다. 이로 인하여 일부 포집기를 통하여 포집기 외부의 습공기가 포집 루프 내부로 유입된다. 31 초부터 46 초까지는 pressure recovery mode이며 대기압 이하였던 포집 루프 내 압력이 포집기를 통하여 유동이 유입되므로 압력이 회복되는 경향이 나타났다. 다만 실험에서는 압력 측정 센서가 포집 루프 전단에서는 개폐 밸브 앞에 설치되고, 포집 루프 후단에서는 개폐 밸브 후단에 설치되므로 포집 루프 전/후단에서 압력이 vacuuming mode와 동일하게 나타나는 것으로 판단된다. 또한 vacuuming mode 시작 이후부터 포집기 S06을 통하여 누설 증기가 유입되며, 약 15.7 초 동안 96.4 g이 포집 루프로 유입되었다. 46 초 이후에는 discharge mode로 포집 루프 전단에서 건조 공기를 공급하므로 포집부를 통하여 포집 루프 내부로 유입된 습공기가 이송되면서 49 초 이후에 포집 루프 후단에서 상대습도 변화가 나타났다.

실험과 CFD 해석에서 나타난 포집 루프 후단에서의 상대 습도 결과를 비교하기 위하여 평가된 상대습도를 최소-최대

정규화 하여 나타냈다(Fig. 11)<sup>(45)</sup>. 실험과 CFD 해석 결과를 비교하였을 때, 실험에 비하여 CFD 해석에서 고습도 구간이 짧게 나타나는 경향을 보였다. 이는 CFD 해석에서는 이송튜브를 직관으로 모델링하였으나 이송튜브의 길이가 매우 길기 때문에 실험장치 구축 시 이송튜브 중간에 곡관이 사용됨에 따른 차이로 판단된다. 고습도 공기가 곡관을 통과하면서 직관에 비하여 고습도 공기가 더 길게 퍼질 수 있다. 이러한 곡관에 의한 영향을 검토하기 위하여 곡률반경 5 D인 180 도 곡관에 대하여 CFD 해석이 추가로 수행되었다. 직경 1.2 mm인 구형의 고습도 공기를 공급하였을 때 동일한 길이의 직관 대비 180 도 곡관에서 고습도 영역의 길이가 약 11.8 % 증가하는 결과가 나타났다. 이러한 곡관에 의해 고습도 영역이 확산되는 효과를 고려하기 위하여 곡률반경 5 D인 180 도 곡관 10 개를 이송튜브에 포함시켜 포집 루프 후단의 측정부의 상대습도 변화를 보정하여 나타냈다. 비교 결과 곡관을 통과하면서 발생하는 습공기의 영역의 확산을 고려하였을 때 실험과 CFD 해석 간에 유사한 형태의 상대습도 변화가 나타나는 것으로 판단된다. 정규화 된 상대습도 50 % 이상의 습공기가 탐지되는 시간을 비교하였을 때 0.929 초이며, CFD 해석에서는 0.760 초로 평가되었다. 본 연구 결과 포집 루프는 소량 누설 발생 시 현재의 운전 모드를 통하여 누설 발생 여부를 감지할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 포집 루프를 설치하는 장소에 따라서 곡관이 과도하게 많이 사용될 경우 고습도 공기의 확산을 촉진시켜 상대습도를 감소시킬 수 있으므로 이를 설치 시 고려해야 할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 누설 탐지 시스템의 평가를 위한 수치해석 기반 해석 방법을 수립하고 이를 활용하여 모의 실험 장치에 대한 CFD 해석이 수행되었다. 배관 소량 누설 습공기 확산 해석이 먼저 수행되었으며, 상기 해석 결과를 입력 조건으로 활용하여 소량 누설 포집 루프 해석을 수행하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

배관 소량 누설 습공기 확산 해석에서는 배관에서 누설 발생 시 배관을 감싸고 있는 단열재 및 외부 커버에서 누설 거동을 평가하고, 배관과 단열재 및 외부 커버 사이의 갭에 의한 영향을 비교하였다. 또한 배관에 설치되는 포집 루프로 누설 증기가 자연유입 될 가능성에 대하여 검토를 수행하였다. 배관 소량 누설 습공기 확산 해석의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 누설부 인근에서는 압력이 최소 3,000 Pa 이상으로 증가하므로 포집 루프의 포집기로 누설 증기가 자연유입 될 것으로 평가된다.
- 2) 누설부에서 0.5 m 떨어진 지점에는 약 500 Pa 수준으로 누설부 인근에 비하여 비교적 낮은 압력이 발생하지

만 개발 중인 시스템에서는 포집 루프 내 진공을 형성시키는 운전 모드를 사용하므로 측정부에서 누설 여부를 감지 가능한 수준의 누설 증기가 포집 루프로 유입 될 것으로 예상된다.

소량 누설 포집 루프 해석에서는 선정된 실험 조건(포집 루프 운전 조건)을 적용하여 CFD 해석을 수행하고 이를 실험 결과와 비교하였다. 소량 누설 포집 루프 해석의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 포집 루프 후단에서의 최소-최대 정규화한 상대습도 결과를 비교하였을 때 이송튜브의 곡관에 의한 습공기의 확산 효과를 고려하지 않으면 습공기 영역을 다소 짧게 예측할 수 있는 것으로 평가되었다. 포집시스템은 격실 내 복잡한 구조물 사이에 설치되므로 이송튜브에 곡관이 다수 사용된다. 따라서 포집시스템 설치 시에 곡관에 의한 습공기 확산 효과도 고려해야 할 것이다.

향후 연구에서는 본 연구에서 수립된 해석 프로세스를 활용하여 더 다양한 포집기의 위치(거리, 각도)에 대한 해석을 수행하여 포집시스템의 성능을 평가를 수행할 예정이다.

## 후 기

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20211510100050).

## References

- (1) Jeon, H. S., Suh, J. S., Chae, G. S., Son, K. S., Kim, S. O. and Lee, N. H., 2016, "Development of Leak and Vibration Monitoring System for High Pressure Steam Pipe by Using a Camera," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 36, No. 6, pp. 496-503.
- (2) Chexal, B., Horowitz, J. and Dooley, B., 1998, "Flow-accelerated corrosion in power plants. Revision 1," EPRI-TR-106611-R1.
- (3) Ballesteros, A., Sanda, R., Peinador, M., Zenger, B., Negri, P. and Wenke, R., 2014, "Analysis of events related to cracks and leaks in the reactor coolant pressure boundary," Nuclear Engineering and Design, Vol. 275, pp. 163~167.
- (4) Korea Institute of Nuclear Safety, 2008, "Reports of Accident and Breakdown in the Nuclear Power Plant," 080606K3.
- (5) Korea Institute of Nuclear Safety, 2018, "Reports of Accident and Breakdown in the Nuclear Power Plant," 170327K4.
- (6) Korea Institute of Nuclear Safety, 2022, "20th Regular

- Inspection Reports of Wolsong Nuclear Power Site Unit 2,” KINS/AR-500, Vol. 20.
- (7) Korea Institute of Nuclear Safety, 2019, “Operating Permit Examination Report of Shin Kori Nuclear Power Plant Unit 4,” KINS/AR-1140.
- (8) Kim, Y. S., Euh, D. J., Kim, W. S. and Kwon, T. S., 2019, “Investigation of Leakage Characteristics on Major Equipment/Component in Reactor System,” *The KSFJ Journal of Fluid Machinery*, Vol. 22, No. 6, pp. 30~35.
- (9) ANSYS Inc., 2017, “ANSYS Fluent User Guide,” Ver. 18.2.
- (10) Marmoret, L., 2017, “Thermo-Physical Characteristics of Building Glass Wool Insulant: A Review of Experimental Results and Well-Adapted Techniques,” *International Journal of Systems Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 1~9.
- (11) Choi, D. K., Park, W. M., Son, S. M., Kim, W. S., Kwon, T. S., Euh, D. J., Kim, Y. S. and Choi, C., 2022, “Analysis of the pressure characteristics of a porous medium in the leakage collection device,” *The KSFJ Journal of Fluid Machinery*, Jeju City, South Korea.
- (12) American Nuclear Society, 1988, “Design Basis for Protection of Light Water Nuclear Power Plants Against the Effects of Postulated Pipe Rupture,” ANSI/ANS 58.2-1988.
- (13) Oh, S., Choi, D. K., Park, W. M., Choi, C. and Kim, W. T., 2019, “Development of CFD-based High-energy Line Break Evaluation Methodology and Its Application in the Evaluation of Supersonic Jet Impingement Load Characteristics,” *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 43, No. 5, pp. 349~359.
- (14) Choi, D. K., Park, W. M., Kim, W. S., Euh, D. J., Kwon, T. S. and Choi, C., 2023, “Steam-Jet Evaluation for Predicting Leakage Behavior and Interpretation of Experimental Verification,” *Science and Technology of Nuclear Installations*, Vol. 2023.
- (15) Kim, W. S. and Kwon, T. S., 2023, “Performance Verification of Reactor Unidentified Leakage Detection System,” *The KSFJ Journal of Fluid Machinery*, Vol. 26, No. 4, pp. 46~53.