

CFD Analysis to Suppress Condensate Water Generated in Gas Sampling System of HANARO

하나로 기체시료채취계통에서 생성된 응축수 억제를 위한 CFD 해석

SungHwan Cho¹, JongHyeon Lee^{1,*}, and DaeYoung Kim²

¹Chungnam National University, 99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

²Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

조성환¹, 이종현^{1,*}, 김대영²

¹충남대학교, 대전광역시 유성구 대학로 99

²한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received April 16, 2020 / Revised July 14, 2020 / Approved August 14, 2020)

The high-flux advanced neutron application reactor (HANARO) is a research reactor with thermal power of 30 MW applied in various research and development using neutrons generated from uranium fission chain reaction. A degasifier tank is installed in the ancillary facility of HANARO. This facility generates gas pollutants produced owing to internal environmental factors. The degasifier tank is designed to maintain the gas contaminants below acceptable levels and is monitored using an analyzer in the gas sampling panel. If condensate water is generated and flows into the analyzer of the gas sampling panel, corrosion occurs inside the analyzer's measurement chamber, which causes failure. Condensate water is generated because of the temperature difference between the degasifier tank and analyzer when the gas flows into the analyzer. A heating system is installed between the degasifier tank and gas sampling panel to suppress condensate water generation and effectively remove the condensate water inside the system. In this study, we investigated the efficiency of the heating system. In addition, the variations in the pipe temperature and the amount of average condensate water were modeled using a wall condensation model based on the changes in the fluid inlet temperature, outside air temperature, and heating cable-setting temperature.

Keywords: HANARO (high-flux advanced neutron application reactor), Condensate water, CFD (computational fluid dynamics), Wall condensation model, Heating system

* Corresponding Author.

JongHyeon Lee, Chungnam National University, E-mail: jonglee@cnu.ac.kr, Tel: +82-42-821-6596

ORCID

SungHwan Cho
DaeYoung Kim

<http://orcid.org/0000-0002-3436-2144>
<http://orcid.org/0000-0003-2916-1126>

JongHyeon Lee

<http://orcid.org/0000-0003-3193-9128>

HANARO (High-flux Advanced Neutron Application Reactor)는 우리나라의 핵분열 연쇄반응에서 생성된 중성자를 이용하여 다양한 연구개발을 수행하는 열출력 30 MW 규모의 연구용 원자로이다. 탈기탱크는 HANARO의 부속시설에 설치되어 있다. 탈기탱크는 내부환경요인으로 인해 기체오염물질을 발생시킨다. 탈기탱크는 기체오염물질을 허용 가능한 수준 이하로 유지하기 위해 필요하며 기체시료채취판넬의 분석기에 의해 모니터링 된다. 응축수가 발생하여 기체시료채취판넬의 분석기 내부로 유입된다면, 분석기의 측정 챔버 내부에 부식이 발생하여 고장을 야기한다. 응축수의 생성 원인은 탈기탱크에 존재하는 기체가 분석기로 유입되는 과정에서 탈기탱크와 분석기사이 온도 차이이다. 응축수 생성을 억제하고 계통 내부에 생성된 응축수를 효율적으로 제거하기 위해 탈기탱크와 기체시료채취판넬 사이에 히팅시스템이 설치되었다. 이 연구에서 우리는 히팅시스템의 효율성을 알고자 한다. 또한 Wall Condensation Model을 이용하여 유체 입구온도, 외부온도 및 히팅 케이블 설정온도 변화에 따른 파이프 온도와 평균응축량의 변화를 모델링하였다.

중심단어: 하나로, 응축수, 전산유체역학, 벽응축모델, 히팅시스템

1. 서론

HANARO (High-flux Advanced Neutron Application Reactor)는 우리나라의 핵분열 연쇄반응에서 생성된 중성자를 이용해서 다양한 연구개발을 수행하는 열출력 30 MW 규모의 연구용 원자로로 한국원자력연구원이 우리 기술로 설계·건설해서 1995년부터 운영하고 있다[1].

HANARO의 부속시험시설 중에 밀폐구조의 탈기탱크 (Degasifier tank)가 설치되어 있다. 이 시설은 내부의 환경요인에 의해 기체오염물이 생성될 수 있다. 탈기탱크는 기체오염물을 허용 수준 이하로 유지하기 위해 필요하며 시료채취계통의 분석기에 의해 모니터링 된다. 오염기체는 폐기물 저장탱크로 탈기가 이루어지며, 정상운전 중에는 수소를 이용하여 탈기탱크를 퍼지한다. 탈기탱크내의 수소 및 산소 농도를 분석하기 위해서 다른 계통인 시료채취계통의 기체샘플링판넬 내부에 분석기가 설치되어 있다. 분석기는 탈기탱크 내의 기체농도를 상시 계측한다[2].

기체샘플링판넬의 분석기 내부로 응축수(Condensate water)가 생성되어 유입된다면, 분석기의 측정챔버 내부에 부식이 발생하여 고장을 야기한다¹. 응축수의 생성 원인은 탈기탱크에 존재하는 기체가 분석기로 유입되는 과정에서 탈기탱크와 분석기사이 온도차이다[3]. 온도차를 감소시켜 응축수 생성을 억제하고 계통 내부에 생성된 응축수를 효율적으로 제거하기 위하여 탈기탱크와 기체샘플링판넬 사이의 연결 Pipe 및 기체샘플링판넬 내부에 히팅시스템을 제작 및

설치하였다¹. 또한, 히팅시스템에 의해 제거되지 않는 경우를 대비하여 기체샘플링판넬 내부에 응축수를 수집하여 배수시킬 수 있는 Drain-port를 제작 및 설치하였다[4].

이 연구를 통하여, 응축수가 생성되는 것을 억제시킴으로써 부식으로 인한 분석기 오류와 고장을 방지하고 정확한 기체농도를 계측할 수 있게 하는지 알고, 히팅시스템이 응축수의 생성 억제에 어느 정도 영향을 끼치는지 알고자 한다.

히팅케이블의 사용량과 전력 소모량을 감소시키기 위해서 Pipe에 일정한 간격을 두고 히팅케이블을 포설한 것으로 해석하였다. 또한, Fluid inlet temperature, Outside air temperature 및 히팅케이블의 온도변화에 따라 Pipe 온도와 평균응축량의 변화를 예측하고자 한다. 온도변화 값은 펌프와 각종 장비들에서 발생하는 방출열을 고려하였다.

CFD (Computational Fluid Dynamics)를 이용하여 Pipe의 응축량을 해석하였다. 해석은 유한체적법(FVM, Finite Volume Method) 기반의 상용 CFD 소프트웨어인 Ansys CFX를 사용하였다. 모델은 Wall Condensation Model을 이용하여 응축수의 생성량을 정량화하였다. 응축수를 억제하기 위하여 Pipe에 설치한 히팅케이블의 설정온도 변화와 위치에 따라 열전달이 응축에 주는 영향을 평가하였다.

¹ KAERI, "EMR of sampling panel for gas", HANARO (2011)

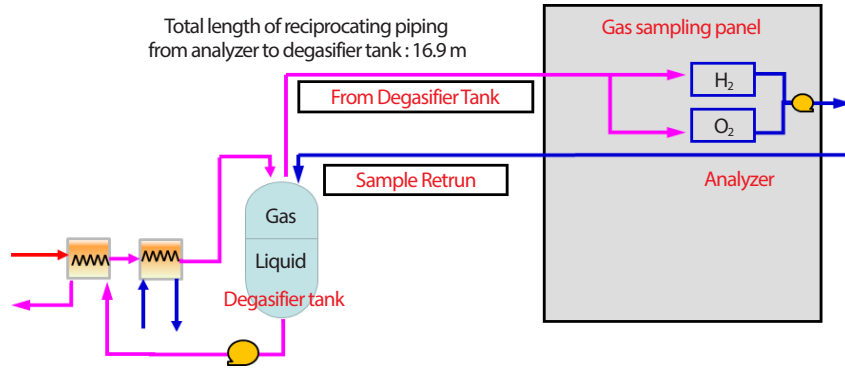


Fig. 1. Schematic diagram of between degasifier and gas sampling panel.

2. 계통

Fig. 1은 탈기탱크와 기체시료채취관널의 상호관계 개략도이다. 탈기탱크 상부에 모인 기체는 시료채취관널의 분석기를 통해 수소와 산소 농도를 측정하고 이 기체는 리턴 펌프에 의해 탈기탱크로 재순환한다[2]. 탱크가 설치되어 있는 계통에서 부식을 방지하기 위해 계통수의 용존산소를 0.1 ppm 이하로 관리하며, 수소가스 주입으로 산소농도를 유지시킨다. 탈기탱크는 냉각수 내의 용존산소를 일정하게 유지시키기 위해 99.9%의 수소가 충전된다[2].

계통운전 시 기체유량은 3 SCFH (Standard Cubic Feet per Hour)이며, 탈기탱크 내부 평균온도는 50℃ 이고, 기체 시료채취관널 내부에 설치된 분석기 근처의 온도는 30℃ 이다. 따라서, 탈기탱크와 분석기 입구 사이의 온도차는 20℃ 이다[5].

3. Wall Condensation Model

Wall Condensation Model은 증기 및 공기와 같은 가변 조성 혼합물의 응축 가능한 성분의 응축을 모델링하는데 사용된다. 얇은 액체막(Liquid film)으로 응축될 수 있도록 충분히 차가워진 벽 또는 유체 경계면에서 응축이 발생된다. 열전달에 대한 1차 저항은 응축성분 농도의 경계구배(Boundary gradient)에 의해 야기되고, 액체막은 열전달 저항에 대한 기여가 무시할 정도로 충분히 얇다고 가정한다. 응축은 응축 성분의 경계질량소멸(Boundary mass sink)로

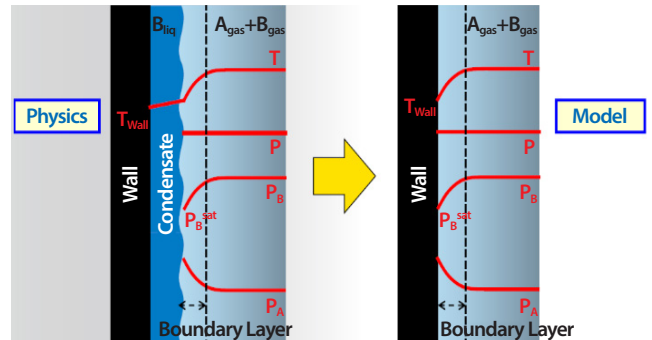


Fig. 2. Illustration of simplifications done in the Wall Condensation Model [6,7].

모델링되어 유체 도메인으로부터 응축수의 응축 질량을 효과적으로 제거한다. 액체막의 Flow는 모델링 되지 않는다 [6]. 유체 영역에서 액체막으로 들어가는 질량을 제거하여 질량소멸로 응축을 모델링하는 것이다.

Wall Condensation Model에서 수행된 원리 단순화는 Fig. 2에 나타내었다. 여기서, A는 비응축성 가스이며, B는 응축성물질이며, B_{liq} 는 응축수이며, T는 두께이며, P는 압력이며, P_B^{sat} 는 B의 포화압력이다[7].

Wall Condensation Model은 하나의 응축 가능한 구성 성분만 허용한다. 이 모델은 액체벽 막에 의해 유도된 열전달 저항의 변화는 무시하는 것으로 가정한다. 응축 가스의 농도 구배는 열전달 저항의 주 원인으로 가정한다. 층류 및 난류 경계층은 표면 Condensation mass flux 측면에서 다르게 처리된다[6,7]. 층류의 경우, Condensation mass flux (M_B)는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$M_B = m_B \ln\left(\frac{1 - x_B(\delta)}{1 - x_B(0)}\right) \quad (1)$$

m_B 가 Mass transfer coefficient인 경우, x 는 몰분율이고, δ 는 경계층의 높이이다. 아래 첨자 B는 응축 성분을 나타낸다. Mass transfer coefficient는 식 (2)와 같이 계산된다.

$$m_B = \frac{W_B}{W_m} \cdot \frac{D_{AB} \cdot \rho_m}{\delta} \quad (2)$$

W_B 및 W_m 은 각각 응축 및 혼합물(응축성 및 비응축성)의 분자량이며, D_{AB} 는 이성분 확산계수이며, ρ_m 은 혼합물의 밀도이다. 계면 및 액체막 열평형은 응축 몰분율을 얻기위해 계면에서 가정된다[6,7].

열평형은 수증기의 분압이 주어진 온도에서 포화압력과 같다는 것을 의미한다(수증기는 포화된 것으로 간주된다). 이는 Liquid interface (액체 계면)에서 증기가 과포화 습증기 일 수 있기 때문에 단순화한 것이다[6].

난류 경계층에 대해, Condensation mass flux는 식 (3)과 같이 계산된다.

$$M_{BW} = -T_M \cdot \frac{Y_{BP} - Y_{BW}}{1 - Y_{BW}} \quad (3)$$

T_M 이 난류 Wall function의 형태에 의해 결정된 Wall multiplier이며, Y_{BP} 는 Wall 근처의 그리드 지점에서 응축 성분의 Mass fraction이며, Y_{BW} 는 Wall에서 응축 성분의 Mass fraction을 나타낸다.

응축으로 인한 잠열은 고체 Boundary로 방출된다. 그러나 등은 Wall을 사용한다면 잠열 방출 효과는 무시할 수 있는 것으로 간주된다[6]. 이 모델을 사용하면 응축이 고체의 표면을 따라 고체 Boundary에 대한 열원으로 볼 수 있다.

방출된 열(Q)은 식 (4)에 도시한 바와 같이(난류 경계층에 대한 Condensation mass flux의 표시를 사용하여) 표현된다.

$$Q = -M_{BW} \cdot H \quad (4)$$

여기서 H 는 응축에서 방출된 잠열이다[6,7].

본 실험 조건에 의하면 Reynolds number는 층류에 가까운 조건으로 추정된다. 하지만, 실제 파이프가 곡관 형태를 포함하기 때문에 낮은 Reynolds number로 예측 되더라도 난류가 발생할 수 있다. 이러한 영향을 확인할 수 없어 층류

Table 1. Numerical grids properties

	Mesh 1	Mesh 2	Mesh 3	Mesh 4
Number of nodes	2292036	1688120	2995680	4272464
Number of elements	7352836	1517614	2810984	4032730
Avg. y^+ (Fluid)	0.03	0.03	0.001	0.0009

및 난류 모델에서의 응축 해석이 가능한 SST (Shear Stress Transport) Turbulence Model을 적용하였다. Option은 Automatic wall function이 사용되었다[6]. Wall Condensation Model에 사용된 SST Turbulence Model은 eddy-viscosity 공식의 이송 효과를 포함하여 불리한 압력 구배 하에서 개시 및 Flow 분리량을 매우 정확하게 계산하도록 설계되어있다[8]. 또한, SST Turbulence Model은 자동으로 근접 벽 처리를 실행하기위해 사용되며 층류 및 난류에 대한 응축 해석이 복합적으로 가능하다[6,8]. 본 연구에서도 이런 점들이 고려되어 SST Turbulence Model을 사용하였다.

Wall Condensation Model은 파이프나 탱크 같은 공간 내에서 공기 중 수증기가 벽면으로 응축해서 제거되는 양으로 응축량을 계산하는 해석 모델이며 단상 해석에 사용된다[8]. 이 연구는 유체가 파이프의 Inlet에서 Outlet으로 흐를때 벽면에서 제거되는 응축수량을 해석하는 것이므로 Wall Condensation Model을 선정하여 본 연구의 해석에 적용하였다.

3.1 Mesh information

Table 1은 4개의 Mesh를 생성하고 이것들의 그리드 속성을 나타낸 표이며 격자수와 y^+ 값을 평가하였다. y^+ 값이 약 0.03으로 같은 두 Mesh 중에서 격자수가 많은 Mesh 1을 선택하여 본 논문에 사용하였다. Table 1에서 Mesh 2 ~ 4는 Inflation 조건을 Mesh 1과 달리해서 해석한 것이다[6].

Dimensionless wall distance (무차원 벽 거리) y^+ 는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$y^+ \equiv \frac{u_* y}{\nu} \quad (5)$$

여기서 u_* ($m \cdot s^{-1}$)는 가장 가까운 벽에서 마찰 속도이며, y (m)는 가장 가까운 벽까지 거리이며, ν ($m^2 \cdot s^{-1}$)는 유체의

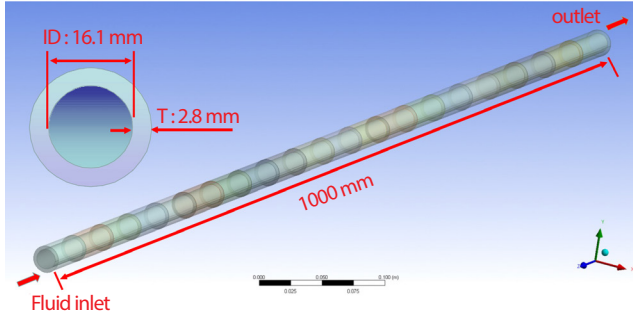


Fig. 3. The modeled pipe used between degasifier tank and gas sampling panel.

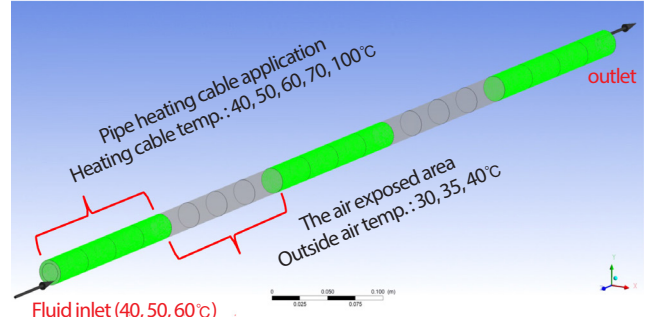


Fig. 4. Boundary condition of pipe heating cable application and no pipe heating cable.

Table 2. Main parameters of the instrument and fluid

Main Parameter	Value
Air molecular weight (g·mol ⁻¹)	28.966
Gas constant (atm·L·mol ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.0820578
Pipe inlet temp. (°C)	40, 50, 60
Outside air temp. (°C)	30, 35, 40
Heating cable temp. (°C)	40, 50, 60, 70, 100
Degasifier tank internal pressure (atm)	1.069
Gas flow rate (SCFH)	3(2.0388 mm ³ ·d ⁻¹)
Flow velocity (m·s ⁻¹)	0.1159

Table 3. Mass fraction according to the inlet temperature of the pipe (Relative Humidity 100%)

Pipe inlet temp. (°C)	Air density (at 1.069 atm, g·m ⁻³)	Saturated water vapor (at 1.069 atm, g·m ⁻³)	H ₂ O Mass fraction
40	1205.6	51.1	0.041
50	1168.27	82.8	0.066
60	1133.19	130	0.103

국소 동적 점성도이다. 즉, y^+ 는 벽면에서 첫 번째 격자까지 거리를 무차원으로 나타낸 것이다. 위의 공식에서 가장 가까운 벽까지의 거리 y 가 커지면 y^+ 가 커져서 벽면에서 첫 번째 격자까지 거리가 넓어지게 되는 것이고, y 가 작아지면 y^+ 가 작아져서 벽면에서 첫 번째 격자까지 거리가 좁아지게 되는 것을 의미한다.

y^+ 는 간단히 y plus라고 부르며 경계층 이론과 벽 법칙을 정의하는데 일반적으로 사용된다[9].

4. 해석조건

탈기탱크는 원통형 밀폐구조의 압력용기이며, 외경은 482.6 mm이며, 높이는 1.83 m이며, 설계압력은 1.138 kPa이며, 설계온도는 66°C이며, 용량은 0.35 m³이다. 탈기탱크에서 기체시료채취관넬의 분석기까지 파이프 길이는 약 16.9 m이다[3,10]. 탈기탱크와 연결되어 있는 Pipe의 설계 사양은 ASTM S-40S이며, DN15이며, 반지름(r)은 8.05 mm이며, 원면적(S)은 203.58 mm²이며, 기체유량은 3 SCFH (2.0388 m³·d⁻¹)이다.

Table 2는 기기와 유체의 주요변수에 대한 값이며, Table 3은 Pipe inlet temperature에 따른 질량분율을 나타낸다.

Fig. 4는 Pipe의 히팅케이블 적용과 미적용을 반복하여 구현한 상태와 열전달계수(Heat transfer coefficient), Outside air temperature, 히팅케이블의 설정온도를 전체적으로 보여주고 있다.

본 해석을 위해 선정된 Pipe의 길이는 1 m 이고, 5 등분 하였다. 히팅케이블은 20 cm 간격을 두어 구현하였다. 히팅케이블의 온도를 40, 50, 60, 70, 100°C로 각각 설정하여 열전달이 이루어지게 하였다. 열전달계수가 1 W·m⁻²·K⁻¹ 일 때, 0 kg·m⁻²·d⁻¹로 응축수가 생성되지 않았고, 열전달계수가 5 W·m⁻²·K⁻¹ 일 때, 약 0.0001 kg·m⁻²·d⁻¹의 응축수가 생성되었다. 이 두가지 경우를 비교했을 때, 열전달계수 1 W·m⁻²·K⁻¹과

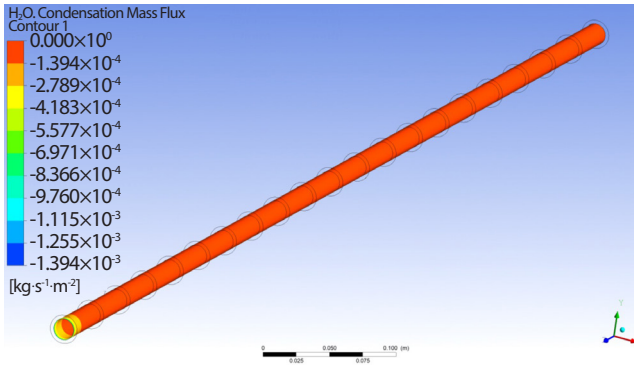


Fig. 5. Distribution of the amount of condensate water at the pipe boundary (Inlet temp. 50°C, Outside air temp. 40°C).

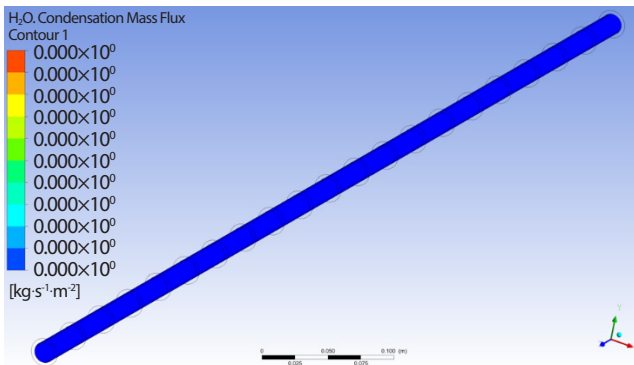


Fig. 6. Distribution of the amount of condensate water at the pipe boundary (Inlet temp. 40°C, Outside air temp. 40°C).

Table 4. Amount of average condensate water according to the change of the outside air temperature and inlet temperature of the pipe

Pipe inlet temp. (°C)	H ₂ O ave. condensate water (kg·m ⁻² ·d ⁻¹)		
	Outside air temp. (°C)		
	30	35	40
60	3.50	3.16	2.71
50	1.94	1.56	1.07
40	0.79	0.39	0

5 W·m⁻²·K⁻¹의 차이는 무시할만한 수준으로 판단되었다. 또한, 수렴성 문제로 열전달계수를 1 W·m⁻²·K⁻¹로 선정하였다 [11]. 히팅케이블을 전체가 아닌 일부만 포설한 것으로 구현하여 해석한 이유는 경제성을 고려한 것이다.

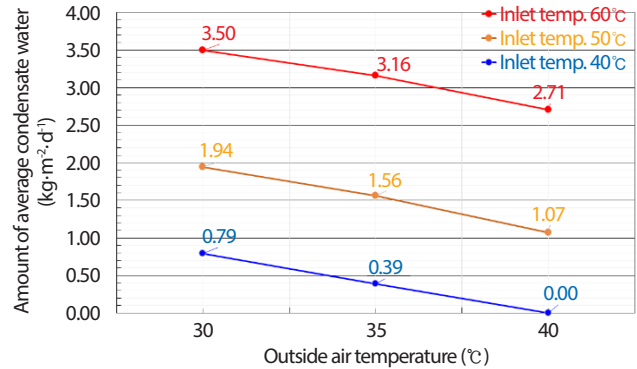


Fig. 7. Amount of average condensate water according to the change of the outside air temperature and inlet temperature of the pipe.

5. 결과 및 고찰

5.1 히팅케이블 미적용 결과

Fig. 5에서 유체의 Inlet temperature 50°C, Outside air temperature 40°C로 설정하고 히팅케이블을 적용하지 않았을 경우, 온도차에 의해 생성된 평균응축량은 1.06 kg·m⁻²·d⁻¹이다. 이때의 유속은 0.1159 m·s⁻¹ (3 SCFH)이며, H₂O Mass fraction은 0.066이다.

Fig. 6에서 히팅케이블을 적용하지 않고 Inlet temperature 40°C, Outside air temperature 40°C로 설정하였을 경우, 온도차가 없기 때문에 응축량이 0 kg·m⁻²·d⁻¹임을 알 수 있다. 이때의 유속은 0.1159 m·s⁻¹이며, H₂O Mass fraction은 0.041이다.

Table 4는 히팅케이블을 적용하지 않았을 경우, 파이프의 Inlet temperature와 Outside air temperature의 변화에 따라 해석한 평균응축량을 정리한 것이다. 파이프의 Inlet temperature 50°C, Outside air temperature 30°C 일때의 경우가 현장의 온도 조건과 가장 유사하며 이때 평균응축량은 1.94 kg·m⁻²·d⁻¹이다.

Table 4의 값을 아래 Fig. 7에 그래프로 나타내었다. 파이프 Inlet 온도가 증가함에 따라 평균응축량은 증가하였고 Outside air temperature가 증가할 때는 Inlet 온도와의 차이가 줄어들어 평균응축량은 감소하였다. 따라서, 히팅케이블을 미적용한 것으로 해석했을 경우, Outside air temperature의 변화가 응축량에 어느 정도 영향을 미치는 것으로 확인할 수 있다.

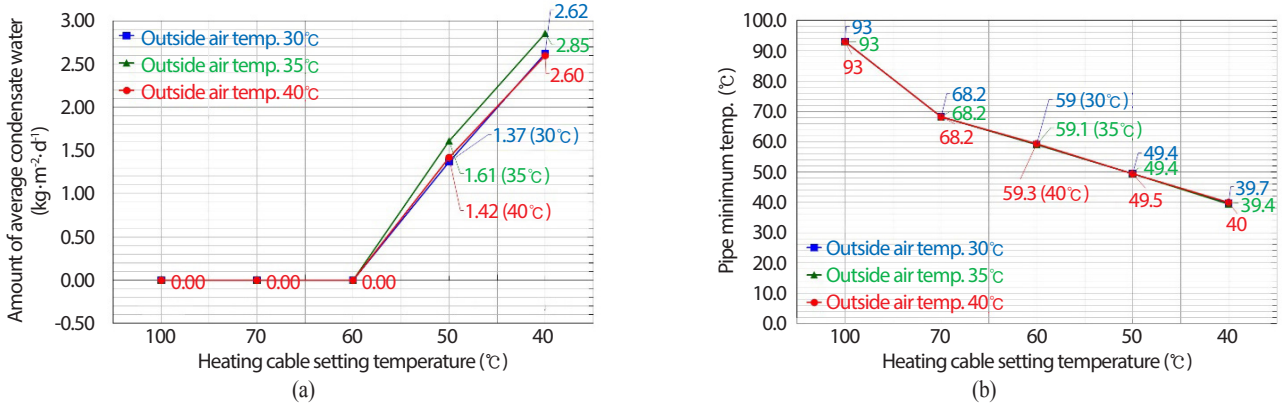


Fig. 8. (a) Amount of average condensate water and (b) Pipe minimum temperature: Analysis value according to the change of the heating cable setting temperature of the pipe at the fluid inlet temperature 60°C.

Table 5. Amount of average condensate water and minimum pipe temperature according to the heating cable setting temperature change of the pipe (Inlet temp. 60°C)

Inlet temp.: 60°C, Gas flow rate: 3 SCFH			
Heating cable setting temp. (°C)	Outside air temp. (°C)	Ave. condensate water (kg·m ⁻² ·d ⁻¹)	Pipe minimum temp. (°C)
100	30	0	93
70	30	0	68.2
60	30	0	59
50	30	1.37	49.4
40	30	2.62	39.7
100	35	0	93
70	35	0	68.2
60	35	0	59.1
50	35	1.61	49.4
40	35	2.85	39.4
100	40	0	93
70	40	0	68.2
60	40	0	59.3
50	40	1.42	49.5
40	40	2.60	40

5.2 히팅케이블 적용 결과

히팅케이블 적용 시, Table 5는 파이프 Inlet 온도 60°C일 경우, Table 6은 Inlet 온도 50°C일 경우, Table 7은 Inlet 온도 40°C일 경우를 Heating cable setting temperature에 따른 평균응축량과 Pipe의 최소온도를 각각 표로 나타내었다.

Table 5의 값을 Fig. 8에 그래프로 나타내었다. Fig. 8(a)는 평균응축수량이고 Fig. 8(b)는 파이프의 최소온도이다. 히팅케이블 온도를 Inlet temperature 60°C 보다 낮게 설정할 경우, 온도차에 의해 응축이 발생하기 시작하였고 Pipe의 최소 온도는 각각 히팅케이블의 적용온도 값에 가깝거나 같았다. 히팅케이블이 미적용되었을 경우와 달리 Outside air temperature가 응축에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다. Inlet 온도가 60°C일 경우, 히팅케이블의 설정온도 60°C 이상에서는 응축수가 발생하지 않았다.

Table 6의 값을 Fig. 9에 그래프로 나타내었다. Fig. 9(a)는 평균응축수량이고 Fig. 9(b)는 파이프의 최소온도이다. 히팅케이블 온도를 Inlet temperature 50°C보다 낮게 적용 할 경우, 응축이 발생하기 시작하였고 Pipe의 최소온도는 각각 히팅케이블의 적용온도 값보다 약간 작거나 같았다. 히팅케이블을 미적용하였을 경우와는 달리 적용으로 해석하였을 경우, Outside air temperature가 응축에 미치는 영향은 미미하였다. Inlet 온도가 50°C일 경우, 히팅케이블의 설정온도 50°C 이상에서는 응축이 발생하지 않았다.

Table 7의 값을 Fig. 10에 그래프로 나타내었다. Fig. 10(a)는

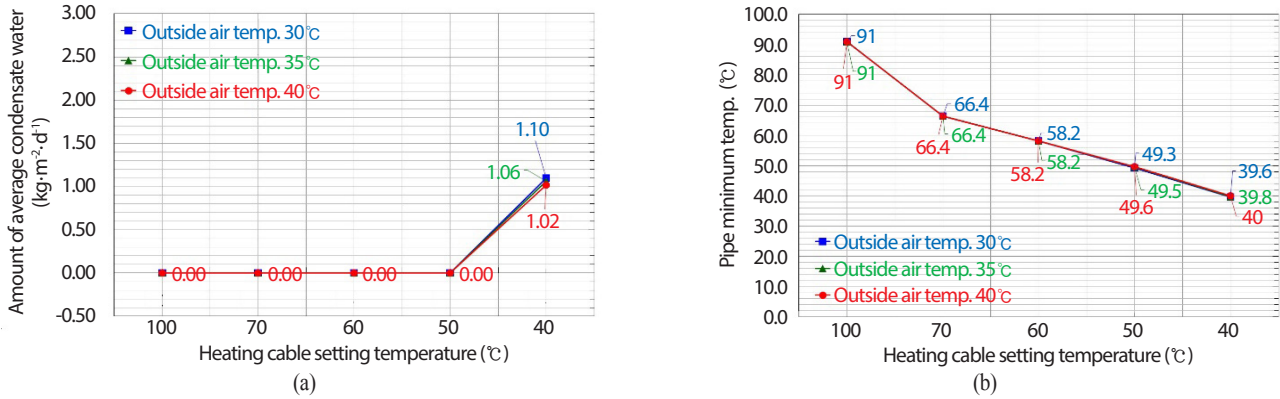


Fig. 9. (a) Amount of average condensate water and (b) Pipe minimum temperature: Analysis value according to the change of the heating cable setting temperature of the pipe at the fluid inlet temperature 50°C.

Table 6. Amount of average condensate water and minimum pipe temperature according to the heating cable setting temperature change of the pipe (Inlet temp. 50°C)

Inlet temp.: 50°C, Gas flow rate: 3 SCFH			
Heating cable setting temp. (°C)	Outside air temp. (°C)	Ave. condensate water (kg·m ⁻² ·d ⁻¹)	Pipe minimum temp. (°C)
100	30	0	91
70	30	0	66.4
60	30	0	58.2
50	30	0	49.3
40	30	1.10	39.6
100	35	0	91
70	35	0	66.4
60	35	0	58.2
50	35	0	49.5
40	35	1.06	39.8
100	40	0	91
70	40	0	66.4
60	40	0	58.2
50	40	0	49.6
40	40	1.02	40

평균응축수량이고 Fig. 10(b)는 파이프의 최소온도이다. Inlet 온도 40°C까지는 응축이 발생하지 않았고 Fig. 8(a) 또는 9(a)의 경향으로 응축수량을 미루어 볼 때, Inlet temperature 40°C 이하에서 응축이 발생하기 시작할 것으로 예상된다. 그러나, 히팅케이블 온도를 40°C 이하로 설정하여 Pipe의 최소 Inlet temperature 40°C와 비교하는 것은 의미가 없기 때문에 본 연구에서는 해석하지 않았다. Inlet temperature 40°C의 경우, Pipe의 최소온도는 각각 히팅케이블의 설정온도보다 약간 작거나 비슷했다. 히팅케이블을 미적용하였을 경우와 달리 Outside air temperature가 응축에 미치는 영향도 Fig. 8(b) 또는 9(b)와 마찬가지로 미미하였다. Fig. 10(a)는 히팅케이블 온도 40°C에서 Outside air temperature에 상관없이 평균응축량이 0인 것을 보여주며, 값이 모두 0으로 같기 때문에 그래프에 하나의 선으로 겹쳐서 나타난다. Fig. 10(b)는 Outside air temperature 30, 35, 40°C에 따른 Pipe 최소온도이며, 히팅케이블의 설정온도에 따라 Pipe 최소온도 값이 비슷하기 때문에 하나의 선으로 겹쳐서 나타나 보인다.

Fig. 11은 Inlet temperature 60°C, Outside air temperature 35°C 및 Heating cable setting temp. 40°C에서 응축량을 계산한 것이다. H₂O Mass fraction은 0.103이며, 유속은 0.1159 m·s⁻¹이다. 이때 평균응축량은 2.85 kg·m⁻²·d⁻¹이다.

Fig. 11에서 알 수 있듯이 Inlet temperature가 60°C일 때, 히팅케이블 온도를 40°C로 설정할 경우, Inlet temperature 60°C보다 Pipe 온도가 낮기 때문에 포화수증기량곡선에 따라 응축이 발생한다.

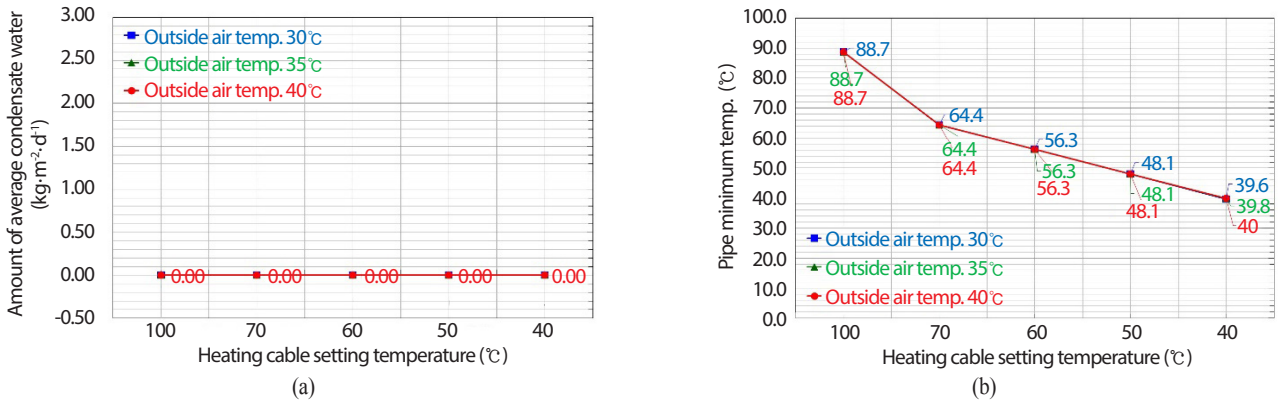


Fig. 10. (a) Amount of average condensate water and (b) Pipe minimum temperature: Analysis value according to the change of the heating cable setting temperature of the pipe at the fluid inlet temperature 40°C.

Table 7. Amount of average air condensate water and minimum pipe temperature according to the heating cable setting temperature change of the pipe (Inlet temp. 40°C)

Inlet temp.: 40°C, Gas flow rate: 3 SCFH			
Heating cable setting temp. (°C)	Outside air temp. (°C)	Ave. condensate water (kg·m ⁻² ·d ⁻¹)	Pipe minimum temp. (°C)
100	30	0	88.7
70	30	0	64.4
60	30	0	56.3
50	30	0	48.1
40	30	0	39.6
100	35	0	88.7
70	35	0	64.4
60	35	0	56.3
50	35	0	48.1
40	35	0	39.8
100	40	0	88.7
70	40	0	64.4
60	40	0	56.3
50	40	0	48.1
40	40	0	40

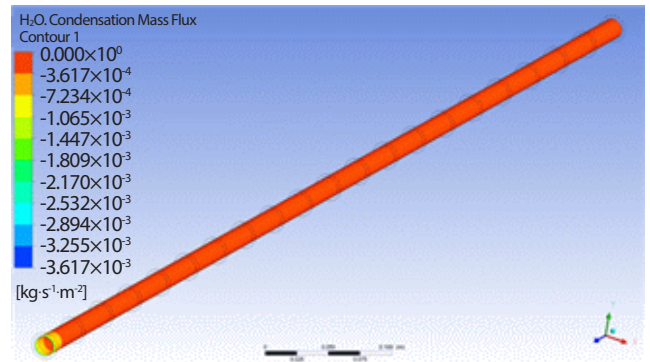


Fig. 11. Condensate water at the pipe boundary and temperature distribution in the pipe (Inlet temp. 60°C, Outside air temp. 35°C, and Heating cable setting temp. 40°C): Amount of average condensate water (2.85 kg·m⁻²·d⁻¹).

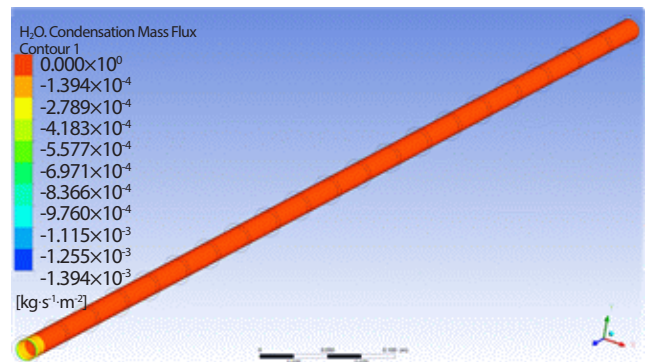


Fig. 12. Condensate water at the pipe boundary and temperature distribution in the pipe (Inlet temp. 50°C, Outside air temp. 35°C, and Heating cable setting temp. 40°C): Amount of average condensate water (1.06 kg·m⁻²·d⁻¹).

Fig. 12는 Inlet temperature 50℃, Outside air temperature 35℃ 및 Heating cable setting temp. 40℃에서 응축량을 계산한 것이다. H₂O Mass fraction은 0.066이며, 유속은 0.1159 m·s⁻¹이다. 이때 평균응축량은 1.06 kg·m⁻²·d⁻¹이다. Fig. 12에서 알 수 있듯이 Inlet temperature가 50℃일 때, 히팅케이블 온도를 40℃로 설정할 경우, Inlet temperature 50℃보다 Pipe 온도가 낮기 때문에 포화수증기량곡선에 따라 응축이 발생한다.

6. 결론

본 연구에서는 시료채취계통의 파이프에서 발생하는 응축수 생성 억제를 위해 모델링을 수행하였다. 히팅케이블 온도를 최소한 Inlet temperature 보다 높게 유지할 경우 응축수가 생성되지 않는 것을 알 수 있다. 히팅케이블 온도가 Inlet temperature 보다 낮으면 반드시 응축수가 생성되며, Inlet temperature 50℃, 히팅케이블 온도 40℃, Outside air temperature 35℃일 경우 생성되는 평균응축수의 양은 1.06 kg·m⁻²·d⁻¹이다. 이 응축수를 제거하기 위해서는 Inlet temperature 50℃보다 높은 히팅케이블 온도를 설정해야 한다.

Inlet temperature 60℃, 히팅케이블 온도 60℃ 및 Outside air temperature 30℃ 조건에서 60%의 히팅케이블 적용만으로 효율적으로 응축수 생성을 억제하여 경제성이 입증되었다. 히팅시스템에 의한 응축수 억제로 분석기의 사용수명을 충분히 연장시켜 줄 것으로 판단된다. 농도 측정 계측기를 설치하기 위해서는 사전에 계측기 주변에 온도차에 의해서 응축수가 생성될 가능성이 높은 위치는 피해서 설치해야 한다. 불가피하게 응축수가 생성될 수 있는 곳에 계측기를 설치해야 하는 경우에는 설치된 장치 주변에 응축수를 제거하기 위한 추가 히팅시스템이 반드시 필요하다.

REFERENCES

- [1] Korea Atomic Energy Research Institute, “HANARO SAR”, KAERI Technical Report, KAERI/TR-710/1996 (2020).
- [2] Korea Atomic Energy Research Institute, “HANARO SAR Chapter 11.7 FTL”, KAERI Technical Report, KAERI/TR-3898/2009 (2009).
- [3] Korea Atomic Energy Research Institute, “FTL: The High Temperature Function Test Procedures before Loading the Nuclear Fuel (Comprehensive Test Procedures of Letdown, Makeup and Purification System) Rev. 1”, KAERI Report, HAN-FL-S-062-DO-K104 (2008).
- [4] S.H. Cho, M.S. Kim, H.Y. Choi, and W.H. In, “Research on How to Remove Efficiently the condensate water of Sampling System”, Proc. of the Korean Nuclear Society 2015 Autumn Meeting, October 29-30, P08F01, Gyeongju (2015).
- [5] Korea Atomic Energy Research Institute, “FTL: The Room Temperature Function Test Procedures (Sampling System Test Procedures)”, KAERI Report, HAN-FL-S-062-DO-K008 (2007).
- [6] G. Zschaek, T. Frank, and A.D. Burns, “CFD modeling and validation of wall condensation in the presence of non-condensable gases”, Nucl. Eng. Des., 279, 137-146 (2014).
- [7] M. Lejon, “Wall Condensation Modelling in Convective Flow”, Kungliga Tekniska Högskolan School of Industrial Engineering and Management, Master of Science Thesis EGI-2013-092MSC EKV970, Stockholm (2013).
- [8] ANSYS CFX-Solver Theory Guide, R17, 72-75, 171-176, 183-191, ANSYS, Inc., Canonsburg, PA., Jan. 2016.
- [9] CFD Online, Mar. 28, 2014. “Dimensionless wall distance (y plus)”, Accessed Jul. 27 2020. Available from: [https://www.cfd-online.com/Wiki/Dimensionless_wall_distance_\(y_plus\)](https://www.cfd-online.com/Wiki/Dimensionless_wall_distance_(y_plus)).
- [10] Korea Atomic Energy Research Institute, “LMP Ion Exchanger etc. equipment capacity statement – purification filter, resin filter, mixed demineralizer, degasifier tank, chemical additional tank Rev. 3”, KAERI Report, HAN-FL-E-240-DC-H003 (2004).
- [11] S.Z. Kuhn, V.E. Schrock, and P.F. Peterson, “An investigation of condensation from steam-gas mixtures flowing downward inside a vertical tube”, Nucl. Eng. Des., 177(1-3), 53-69 (1997).