

1차원 시스템 코드를 활용한 소듐 열유동 종합효과시험장치 잔열제거계통 내 소듐-공기 열교환기 열전달 성능 분석

김한나* · 추희제* · 신용훈** · 김형모*†

Heat Transfer Performance Analysis of Sodium-to-Air Heat Exchangers in the Decay Heat Removal System of STELLA-2 Using a 1-D System Code

Hanna Kim*, Huije Choo*, Yong-Hoon Shin**, Hyungmo Kim*†

Key Words : Sodium-cooled fast reactor(소듐냉각고속로), Decay heat removal system(잔열제거계통), Sodium-to-air heat exchanger(소듐-공기 열교환기), 1-D system code(1차원 시스템 코드)

ABSTRACT

Sodium Integral Effect Test Loop for Safety Simulation and Assessment (STELLA-2) is a comprehensive sodium thermal-hydraulic test facility developed by the Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) to evaluate the performance of safety systems in a sodium-cooled fast reactor (SFR) and the interaction between decay heat removal systems and the primary heat transfer system. In this study, the heat transfer performance of the FHX (finned-tube-type sodium-to-air heat exchanger) and AHX (helical-type sodium-to-air heat exchanger) within the decay heat removal system of STELLA-2, was analyzed using the GAMMA+ 1-D system code. Each heat exchanger was modeled by nodalizing its components and reflecting the heat transfer characteristics according to its structure in the GAMMA+ input file. Initially, a simulation based on design values provided by KAERI showed discrepancy in heat removal rate (Q) by 1.6% on the tube side and 8.0% on the shell side for the FHX, and 5.7% on the tube side and 2.7% on the shell side for the AHX, confirming that the GAMMA+ modeling adequately aligns with the design conditions. Based on this verification analyses were conducted using experimental data under natural and forced circulation conditions to evaluate the actual performance of the heat exchangers. The results revealed larger differences compared to the design conditions, with GAMMA+ overpredicting heat transfer performance. This difference is mainly due to the limitations of empirical correlations used within GAMMA+. Future studies will focus on enhancing GAMMA+ by improving its input file to provide more accurate predictions of heat exchanger performance. In addition, transient performance evaluations will be conducted to further validate GAMMA+, aiming to enhance the reliability of SFR operational safety evaluations.

1. 서론

소듐냉각고속로 (SFR, Sodium-cooled Fast Reactor)는 액체 소듐을 냉각재로 사용하는 제 4세대 원자로이다. 냉각재로 사용되는 액체 소듐은 열전도도가 높고 점도가 낮아 고

온 환경에서도 안정적인 열전달이 가능하다. 또한, SFR은 고속 중성자 스펙트럼을 활용하여 사용후핵연료 재활용과 고준위 방사성 폐기물 감소가 가능하다는 점에서 최근 탄소 중립 실현을 위한 유망한 기술로 주목받고 있다. 이와 같은 SFR의 안정적이고 안전한 운전을 위해서는 원자로가 정지한

* 경상국립대학교 기계공학부(Mechanical Engineering, Gyeongsang National University)

** 한국원자력연구원(Korea Atomic Energy Research Institute)

† 교신저자, E-mail : hyungmo@gnu.ac.kr

이후에도 지속적으로 발생하는 노심 붕괴열(Decay Heat)을 효과적으로 제거하는 기술이 필수적이다. 잔열제거계통 (DHRS, Decay Heat Removal System)은 계획 정지 및 비상 정지 시 노심 붕괴열을 제거함으로써 원자로의 안전성을 확보하는 계통이다. 특히, 잔열제거계통 내 소듐-공기 열교환기는 최종 열침원으로, 효율적으로 잔열을 대기로 방출함으로써 원자로의 안전성을 확보하는 중요한 요소이다. 따라서, 이러한 소듐-공기 열교환기의 열전달 성능을 예측하고 평가하는 것은 중요하다. 이러한 배경으로, 본 연구에서는 1차원 시스템 코드인 GAMMA+를 활용하여 한국원자력연구원 (KAERI, Korea Atomic Energy Research Institute)이 개발한 소듐 열유동 종합효과시험장치 내 잔열제거계통의 소듐-공기 열교환기인 핀형 소듐-공기 열교환기 (FHX, Finned-tube-type sodium-to-air heat exchanger)와 나선형 자연대류 소듐-공기 열교환기 (AHX, Helical-type sodium-to-air heat exchanger)의 열전달 성능을 분석하고자 한다.

소듐 열유동 종합효과시험장치 (STELLA-2, Sodium Integral Effect Test Loop Safety Simulation and Assessment)는 한국원자력연구원(KAERI)에서 SFR의 잔열 제거 및 안전 계통 성능을 검증하고 주요 열전달 계통 간의 상호작용을 평가하기 위해 개발된 축소 모형 시험 장치이다. 이 시험 장치는 소듐을 냉각재로 사용하는 복잡한 열유동 시스템에서 발생하는 물리적 현상을 실험적으로 모사할 수 있어, SFR 설계 및 성능 분석과 관련된 연구에 중요한 기반을 제공한다. Fig. 1의 STELLA-2 시스템 개략도에서 보듯, 시험 장치에는 총 5가지 유형의 열교환기 (FHX, AHX, DHX; Decay heat exchanger, UHX; Straight-tube-type Ultimate sodium-to-air heat exchanger, IHX; Intermediate heat exchanger)가 포함되어 있다. 이 중 잔열제거계통은 DHX, FHX, AHX 등의 열교환기로 구성되며, 본 연구에서는 소듐-공기 열교환기인 FHX와 AHX를 대상으로 성능 분석을 수행하였다. 해당 열교환기는 구조적으로 다르지만 같은 역할을 수행하는 것으로, 원자로 안전 철학에 근거해 다양성 및 중복성을 확보해 설계상의 안전성과 신뢰성을 보장하기 위함이다⁽¹⁾.

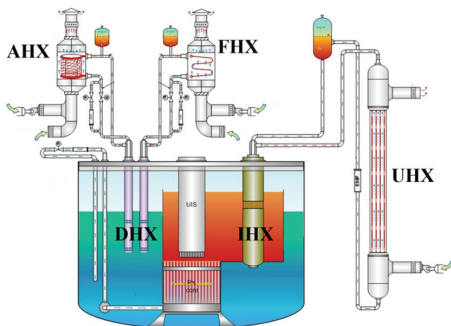


Fig. 1 STELLA-2 Schematic

본 연구를 수행하기 위해 사용한 1차원 시스템 코드는 KAERI에서 개발한 GAMMA+ 코드이다. GAMMA+ (General Analyzer for Multi-component and Multi-dimensional Transient Application)는 고온가스로 (HTGR, High Temperature Gas-cooled Reactor)의 과도 해석을 위해 개발되었으나, 다양한 열 및 유체 유동 시스템에 유연하게 적용할 수 있는 특성을 가지고 있어, 다른 원자로 시스템 해석에도 유용하게 사용되고 있다. 특히, 소듐의 물성치, 대류 열전달 그리고 압력 강하에 대한 경험적 상관식이 추가되어 SFR 시스템 특성을 수용할 수 있도록 개선되었다. 이 코드는 여러 국내의 프로젝트를 통해 검증되었으며, 복잡한 원자로 시스템을 분석하는 과정에서 신뢰성을 입증하였다. 1차원 해석 코드는 복잡한 시스템을 단순화하여 효율적으로 분석할 수 있을 뿐만 아니라 과도 해석이 가능하여 사고 시나리오와 같은 비정상 상태에서의 성능 분석이 가능하다. 이러한 특성 덕분에 GAMMA+는 다양한 원자로 설계와 성능 평가에 중요한 도구로 자리 잡고 있다⁽²⁾.

본 연구는 각 열교환기를 1차원으로 모델링하고 열전달 구조를 모사할 수 있는 상관식을 고려하여 GAMMA+ 코드 입력 파일을 작성하였다. 입력값은 KAERI에서 제공 받은 설계값을 기반으로 먼저 해석을 수행하여 GAMMA+ 코드 모델링의 적합성을 검증하였으며, 이후 정상 상태 실험 데이터를 활용하여 두 열교환기의 열전달 성능을 분석하였다. 본 연구를 통해 FHX와 AHX의 성능을 정량적으로 평가하고 소듐-공기 열교환기에 대한 GAMMA+ 코드 예측 능력 향상을 위한 수정 방향을 제시하였다. 이러한 분석 결과는 SFR 시스템의 안정성 평가에 유용한 기초 데이터를 제공할 것으로 기대된다.

2. 1차원 시스템 모델링

2.1 핀형 소듐-공기 열교환기(FHX, Finned-tube Sodium-to-Air Heat Exchanger)

2.1.1 기능 및 구조

FHX는 능동 잔열제거계통(ADHRS, Active Decay Heat Removal System)에 설치된 핀(Fin)형 강제대류 소듐-공기 열교환기로, 계획정지 시 일차계통(PHTS, Primary Heat Transport System)에 축적된 열하중을 최종 열침원인 대기로 제거하는 역할을 수행한다. 또한, 피동 잔열제거계통(PDHRS, Passive Decay Heat Removal System)은 소외 전원이 차단되어 능동 계통을 활용하지 못하는 경우에도 노심에서 발생하는 잔열을 제거하는 데 활용된다.

FHX는 구조적으로 Fig. 2 (a)에 나타난 바와 같이, 18개의 핀형 전열관이 3열로 배열되어 있으며, 전체적으로 M자 형태를 이루고 있다. 열교환이 주로 이루어지는 영역은

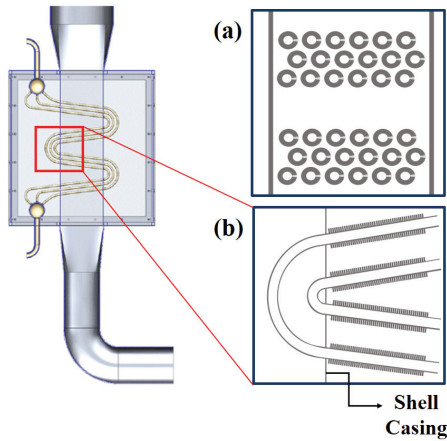


Fig. 2 (a) Finned-tube arrangement in air flow cross section (b) U-bend structure

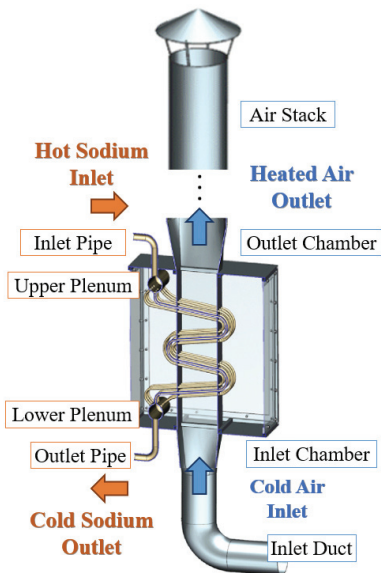


Fig. 3 Flow path of the FHX

U-bend를 제외한 전열관이 위치한 shell 내부 영역이며, 이 경계는 Fig. 2 (b)에 나타내었다. 소듐은 DHX의 전열관에서 가열된 후, 고온관을 통해 FHX 상부 플레넘(plenum)으로 유입된다. 유입된 소듐은 핀형 전열관을 따라 아래 방향으로 흐르면서 외부 공기와의 열 교환을 통해 냉각된다. 반면, 외부 공기는 하부 덕트를 통해 유입되어 직육면체 형태의 shell에 의해 형성된 유로를 따라 위로 흐르며 소듐 전열관을 냉각시킨다. 열 교환 후 가열된 공기는 상부 챔버(chamber)와 굴뚝(stack)을 통해 대기로 방출된다. FHX의 유로 구조는 Fig. 3에 제시되어 있으며, 이를 통해 소듐과 공기의 흐름 경로를 시각적으로 명확히 나타내고자 하였다⁽¹⁾.

2.1.2 Nodalization

KAERI에서 제공한 STELLA-2 형상 정보를 바탕으로, FHX의 1차원 모델링을 수행하였다. 핀형 튜브, 소듐 플레

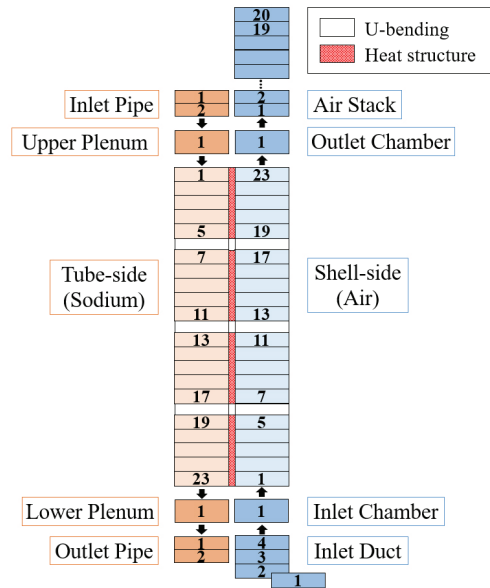


Fig. 4 1-D modeling of the FHX

넘, 공기 챔버 등 주요 구성 요소로 구분한 뒤, 각 요소를 노드화하여 열전달과 유체 흐름을 시뮬레이션할 수 있도록 단순화하였다. 각 노드는 설계 보고서를 기반으로 실제 고도 변화(elevation)를 반영하여 작성되었으며, 이를 통해 구성 요소 간의 물리적 높이 차이를 모델링에 적절히 구현하였다. Fig. 4는 이러한 노드화 접근법을 기반으로 복잡한 시스템을 블록 구조로 단순화한 모습을 보여준다. 이와 같은 접근법은 요소 간의 상호작용과 흐름 분포를 계산하는 데 유용하다.

2.2 나선형 자연대류 소듐-공기 열교환기(AHX, Helical-type Sodium-to-Air Heat Exchanger)

2.2.1 기능 및 구조

AHX는 피동 잔열제거계통(PDHRS)에 설치된 나선형 자연대류 소듐-공기 열교환기로, 원자로 정지 후 노심 붕괴열로 인해 일차 열전달 계통(PHTS)에 축적된 열하중을 DHX와 함께 최종 열침원인 대기로 제거하는 역할을 수행한다.

AHX는 관-통형 열교환기 구조로, 대향류 방식으로 설계되어 잔열제거 루프의 소듐 냉각재에서 외부 공기로 열을 효율적으로 전달한다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이, AHX의 중앙에는 내부 원통(inner cylinder)이 설치되어 있으며, 이 원통 주변을 나선형 전열관 군(helical-type tube bank)이 둘러싸고 있다. 이러한 구조는 동일 체적을 갖는 열교환기 대비 공기와 접촉하는 전열 면적을 극대화하여 높은 열전달 성능을 제공한다. 또한, 정상 운전 중 저온 소듐과 과도 상황에서의 고온 소듐 유입으로 인한 전열관 변들의 열팽창 및 수축 영향을 효과적으로 흡수할 수 있는 구조적 유연성을 갖추고 있다.

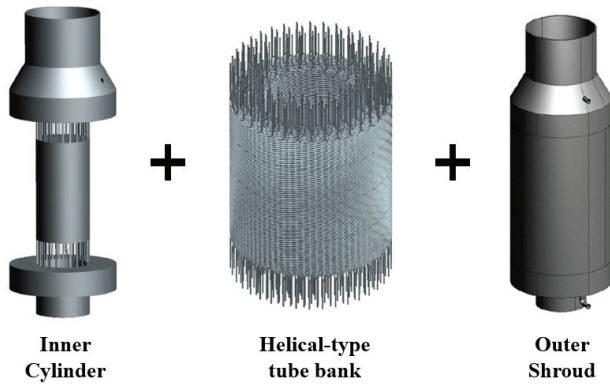


Fig. 5 Structure of the AHX

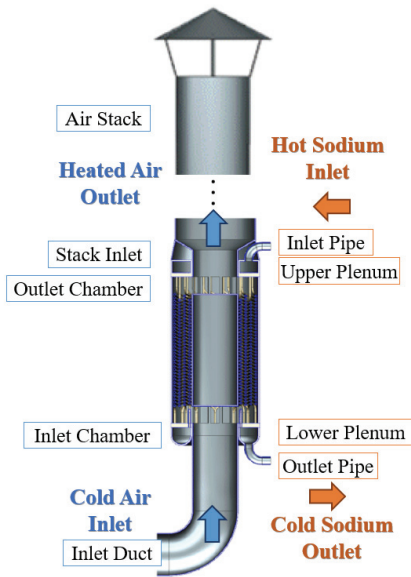


Fig. 6 Flow path of the AHX

소듐은 DHX 전열관에서 가열되어 잔열제거 루프의 고온관을 따라 AHX로 유입된다. 유입된 고온 소듐은 나선형 전열관을 통해 아래 방향으로 흐르며 외부 공기와 열교환을 수행한다. 냉각된 소듐은 AHX 하부 챔버에서 저온관을 통해 다시 DHX로 순환되며, 폐순환 유로를 형성하여 잔열 제거를 지속한다. 외부 공기는 AHX 하부의 공기 덕트를 통해 자연 대류 방식으로 유입되며, 나선형 전열관 외부를 감싸는 공간을 따라 상승한다. 소듐의 열을 흡수하여 가열된 공기는 AHX 상단의 챔버와 굴뚝(stack)을 통해 대기 중으로 방출된다. Fig. 6은 AHX의 소듐 및 공기 유로 구조를 시각적으로 나타내고 있다⁽¹⁾.

2.2.2 Nodalization

AHX의 1차원 모델링은 FHX와 동일한 방식으로 KAERI에서 제공한 STELLA-2 형상 정보를 바탕으로 수행되었다. 복잡한 열교환기 시스템을 나선형 전열관, 상부 및 하부 소듐 플레넘, 상부 및 하부 공기 덕트 등 주요 구성 요소로 구

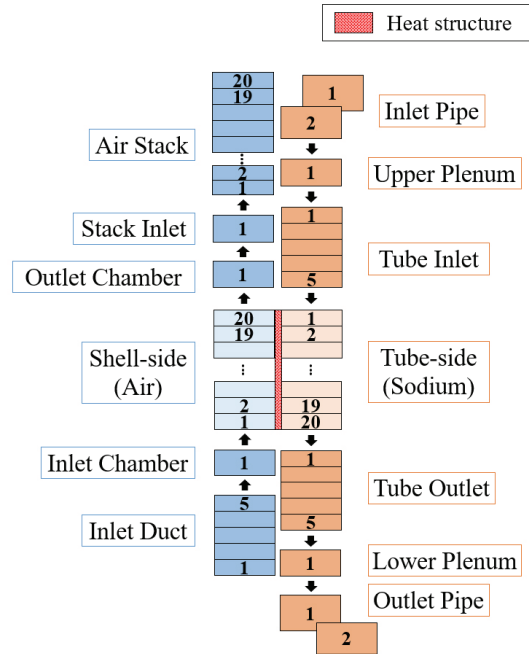


Fig. 7 1-D modeling of the AHX

분한 뒤, 각 요소를 노드화하여 열전달과 유체 흐름을 시뮬레이션할 수 있도록 단순화하였다. 각 노드는 설계 보고서에 명시된 실제 고도 변화를 반영하여 작성되었으며, 시스템 내 구성 요소 간의 물리적 높이 차이를 모델링에 적절히 구현하였다. 이와 같은 접근법은 AHX의 열전달 경로를 효과적으로 분석할 수 있도록 한다. Fig. 7은 이러한 노드화 과정을 통해 단순화된 AHX의 블록 구조를 시각적으로 보여준다.

3. GAMMA+ 해석

3.1 핀형 소듐-공기 열교환기(FHX, Finned-tube Sodium-to-Air Heat Exchanger)

3.1.1 GAMMA+ Input Modeling

GAMMA+ 코드 내에는 핀형 열교환기의 구조적 특성에 따른 열전달 특성을 고려한 상관식이 입력되어 있으며, 본 연구에서는 이를 FHX의 환경에 적절한 값을 입력하여 입력 파일을 작성하였다. 소듐 측 열전달에는 식 (1)의 Lyon & Martinelli 상관식이 적용되었다. 이 상관식은 고온 액체 금속의 열전달 특성을 평가하기 위해 개발된 경험적 관계식으로, 소듐의 높은 열전도도와 낮은 점도를 반영하여 튜브 내부 소듐의 열전달 성능을 정량으로 평가할 수 있다⁽³⁾. 공기 측 열전달에는 식 (2)의 Zukauskas 상관식이 사용되었다. 이는 교차 배열 핀형 튜브 (Staggered Finned Tube Bundle) 구조의 공기 대류 열전달을 계산하는 상관식이다. 전열관의 배열 방식(S_T/S_L), 핀의 형상($s/D, h/D$), 그리고 공기 흐름의 난류 효과(Re_D^m, Pr^n)를 반영하여 열교환 성능을 정밀히 평가한다⁽⁴⁾.

Table 1 FHX design values and steady-state experimental boundary condition

Parameter		Design	Exp.	
			N.C.	F.C.
Inlet Temp.(°C)	Sodium	334.6	354.1	350.0
	Air	40.0	31.2	31.6
Flow Rate(kg/s)	Sodium	0.3	0.2	0.2
	Air	0.3	0.3	0.3

$$N = 4.0 + 0.025(Pr)^{0.8} \quad (1)$$

$$N = C_2 C \left(\frac{S_r}{S_L} \right)^{0.2} \left(\frac{s}{D} \right)^{0.18} \left(\frac{h}{D} \right)^{-0.14} Re_{D,max}^m Pr^n \left(\frac{Pr_f}{Pr_{LSUBw}} \right)^{0.25} \quad (2)$$

또한, 핀에 의한 전열 면적 증가로 나타나는 전열 성능 효과를 고려하였다. 핀으로 인해 증가된 열전달 면적(A_{fin})과 핀이 없는 전열관의 면적 비율(A)을 계산하여 열전달 효율을 식 (3)으로 산출하였다. 해당 면적 비율에 multiplier를 적용하여 GAMMA+ 입력 파일에 반영하였다⁽⁵⁾.

$$\eta = 1 - \frac{A_{fin}}{A} \cdot (1 - \eta_f) \quad (3)$$

모델링한 입력 파일에는 Table 1에 제시된 경계 조건이 작성되었으며, 설계값과 실험값에서 각 유체의 유입 온도와 유량이 입력되었다. 실험값으로는 자연순환 (N.C., Natural Circulation)과 강제순환 (F.C., Forced Circulation) 조건에서의 정상 상태 데이터를 활용하였다.

3.1.2 해석 결과

본 연구에서는 모델링한 GAMMA+ 입력 파일에 KAERI에서 제공받은 설계값을 작성하여 해석을 수행하였으며, 그 결과는 Table 2에 제시되어 있다. 소듐 측(Tube-side)과 공기 측(Shell-side)의 출구 온도 및 열전달량(Q)을 비교한 결과, 소듐이 잃은 열량과 공기가 얻은 열량 간의 차이가 작아 열수지(Heat Balance)가 충족되는 것을 확인하였다. 그리고 설계값과 GAMMA+ 해석 간의 열전달량 비교에서는 튜브 측에서 1.6%, 셸 측에서는 8.0%의 차이가 발생하였다. 이는 모델링한 GAMMA+ 코드가 FHX의 실제 조건을 비교적 유사하게 반영하고 있음을 나타낸다. 설계점에서의 GAMMA+ 모델링의 적합성을 확인한 후, KAERI에서 제공받은 정상 상태 실험 데이터를 입력하여 추가 해석을 진행하였다. Table 3은 실험 데이터를 기반으로 FHX의 실제 성능을 분석한 결과를 요약한 것이다. 자연순환(N.C.) 조건에서는 소듐 측과 공기 측에서 각각 11.4%와 16.2%의 차이가 발생하였고, 강제순환

Table 2 Comparison of the GAMMA+ results with design value for FHX

Parameter		Design	GAMMA+	Q Diff.(%)
Tube side	Outlet Temp.(°C)	226.2	224.4	1.6
	Q(kW)	-44.4	-43.9	
Shell side	Outlet Temp.(°C)	224.2	209.9	8.0
	Q(kW)	46.6	42.9	

Table 3 Comparison of the GAMMA+ results with experimental value for FHX

Parameter		Exp.		GAMMA+		Q Diff.(%)	
		N.C.	F.C.	N.C.	F.C.	N.C.	F.C.
Tube side	Outlet Temp.(°C)	177.5	175.0	157.3	151.0	11.4	13.5
	Q(kW)	-38.1	-36.5	-42.5	-41.4		
Shell side	Outlet Temp.(°C)	164.3	162.8	185.8	181.4	16.2	14.2
	Q(kW)	37.6	37.3	43.7	42.6		

(F.C.) 조건에서는 각각 13.5%와 14.2%의 차이가 발생하였다. 전체적으로 GAMMA+ 코드가 실험값보다 열전달량을 다소 높게 해석하는 경향도 확인되었다. 이러한 경향은 코드 내 입력된 상관식과 실제 열교환기의 실험 환경 및 구조 차이에서 기인하는 것으로 판단된다. GAMMA+에서 FHX의 공기 측 열전달 계산에 사용된 Zukauskas 상관식은 Staggered Finned Tube Bundle에 대해서만 고려하였으나, 실제 FHX는 Staggered 배열과 Aligned 배열이 혼합된 구조이기 때문이다. 상관식은 다양한 데이터들이 일반화된 경험적 관계식으로 FHX의 열전달 성능을 완전히 모사하기에는 한계가 있다. 또한, GAMMA+ 입력 파일에서 핀에 의한 전열 성능 효과는 고려되었으나, 공기 측 유로를 형성하는 shell casing 내부에서 외부로 전달되는 열전달 효과를 고려하지 못한 점이 값의 차이의 또 다른 원인으로 판단된다.

3.2 나선형 자연대류 소듐-공기 열교환기 (AHX, Helical-type Sodium-to-Air Heat Exchanger)

3.2.1 GAMMA+ Input Modeling

GAMMA+ 코드 내에는 나선형 열교환기의 구조적 특성을 반영한 열전달 상관식이 포함되어 있으며, 본 연구에서는 이를 AHX 환경에 맞는 값으로 적용하여 입력 파일을 구성하였다. 소듐 측에는 FHX와 동일하게 Lyon&Martinelli 상관식인 식 (1)이 적용되었다. 공기 측도 Zukauskas 상관식이 사용되었으나 직렬 배열 튜브 구조(Aligned Tube Bundles in Crossflow)식인 식 (4)가 사용되었다. 이 상관식은 나선형 전열관 구조에서 발생하는 공기 흐름 분포와 난류 효과

Table 4 AHX design values and steady-state experimental boundary condition

Parameter		Design	Exp.	
			N.C.	F.C.
Inlet Temp.(°C)	Sodium	334.6	359.6	346.33
	Air	40.0	35.4	30.86
Flow Rate(kg/s)	Sodium	0.3	0.1	0.2
	Air	0.2	0.1	0.3

(Re^{m_p}, Pr^n)를 고려하여 열전달 성능을 정밀하게 평가한다⁽⁴⁾.

$$N = C_2 C Re_{D,max}^m Pr^n \left(\frac{Pr_f}{Pr_{LSUBw}} \right)^{0.25} \quad (4)$$

입력 파일에는 Table 4에 제시된 경계 조건이 작성되었으며, 설계값과 실험값에서 각 유체의 유입 온도와 유량이 입력되었다. 실험값으로는 자연순환 (N.C.)과 강제순환 (F.C.) 조건에서의 정상 상태 데이터를 활용하였다.

3.2.2 해석 결과

FHX와 동일하게 GAMMA+ 코드가 설계점에서 유사한 결과를 산출하는 지 확인한 후, 실험 결과에 대한 해석을 수행하였다. Table 5에 설계값에 대한 해석 결과를 제시하였으며, GAMMA+가 소듐 측(Tube-side)과 공기 측(Shell-side)의 열수지(Heat balance)를 충족함을 확인할 수 있다. 설계값과 GAMMA+ 간의 열전달량 비교에서는 소듐 측에서 5.7%, 공기 측에서 2.7%의 차이가 발생하였다. 이는 GAMMA+ 코드가 AHX 설계 조건을 유사하게 반영하고 있음을 나타낸다. 따라서, KAERI에서 제공 받은 정상 상태 실험 데이터를 활용하여 추가 해석을 진행하였다. Table 6은 실험값을 기반으로 AHX의 성능을 분석한 결과를 보여준다. 자연순환 (N.C.) 조건에서는 열전달량이 소듐 측과 공기 측에서 각각 12.6%와 19.1%의 차이가 발생하였고, 강제순환 (F.C.) 조건에서는 각각 23.4%와 19.0%의 차이가 발생하였다. 전체적으로 GAMMA+ 코드가 실제 실험 조건에 비해 열전달 성능을 과대평가하는 경향도 확인되었다. 이러한 경향은 코드 내 입력된 상관식과 실제 열교환기 간의 실험 환경 및 구조 차이에서 기인하는 것으로 판단된다. AHX의 나선형 전열관 배열은 열(row)별로 반대 회전방향으로 감도록 설계되어 완전한 직렬 배열이 아니므로, Aligned Tube Bundle에 대한 Zukauskas 상관식을 사용하는 것은 결과값의 차이를 발생시킬 수 있다.

또한, 강제순환(F.C.) 조건에서의 열전달량 차이가 자연순환(N.C.)보다 더 큰 차이를 보이는 것은 유속 증가로 인해 열전달 상관식의 민감도가 커져 모델링의 오차가 더 크게 반영되었다고 판단하였다.

Table 5 Comparison of the GAMMA+ results with design value for AHX

Parameter		Design	GAMMA+	Q Diff.(%)
Tube side	Outlet Temp.(°C)	226.2	220.1	5.7
	Q(kW)	44.36	46.9	
Shell side	Outlet Temp.(°C)	279.0	272.6	2.7
	Q(kW)	47.0	45.8	

Table 6 Comparison of the GAMMA+ results with experimental value for AHX

Parameter		Exp.		GAMMA+		Q Diff.(%)	
		N.C.	F.C.	N.C.	F.C.	N.C.	F.C.
Tube side	Outlet Temp.(°C)	249.0	167.6	235.1	126.57	12.6	23.4
	Q(kW)	-19.4	-44.0	-21.8	-54.4		
Shell side	Outlet Temp.(°C)	266.7	190.7	310.8	221.026	19.1	19.0
	Q(kW)	18.4	47.1	22.0	56.0		

4. 결론

본 연구는 1차원 시스템 코드인 GAMMA+를 활용하여 STELLA-2 잔열제거계통(DHRS) 내 소듐-공기 열교환기인 FHX와 AHX를 1차원으로 모델링하고 정상 상태에 대한 열전달 성능을 분석하였다. 각 열교환기의 구성 요소에 대한 노드화를 진행하고 구조적 특성에 따른 열전달 특성을 반영하여 GAMMA+ 입력 파일을 작성하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 각각 FHX와 AHX의 설계값 및 실험값과 이를 기반으로 해석한 GAMMA+ 결과에서 발생한 열전달량 차이를 보여준다. 해석 결과, GAMMA+는 시스템 내 소듐과 공기 간의 열수지(Heat Balance)를 충족하였으며, 설계 조건에서 각 유체의 열전달량을 비교한 결과, 10% 이내의 차이를 보여 비교적 유사하게 모델링되었음을 확인하였다. 모델링의 적합성을 확인한 후, 실제 실험 조건을 기반으로 해석을 수행한 결과, 설계 조건과 비교하여 보다 큰 차이가 발생하였다. Fig. 8과 Fig. 9에서 각각 전체적으로 GAMMA+는 실제 열교환기 열전달 성능보다 과대평가하는 경향을 보였으며, 이에 대한 주된 원인은 경험적 관계식의 한계에서 기인한 것으로 판단하였다. FHX와 AHX는 Staggered 배열과 Aligned 배열이 결합된 복잡한 구조로 설계되었으나 GAMMA+에서 각 열교환기의 공기 측 열전달 계산에 사용된 상관식은 복잡한 열교환기 구조와 달리 특정 기하학적 형상에서 얻어진 데이터를 기반으로 일반화된 경험적 관계식으로 도출되었다. 이로 인해, 실제 규모에서의 환경적 요인과 각 열교환기의 복잡한 형상이 열전달 성능에 미치는 영향을 충분히 반영하지 못하였다. 또한, 공기 측 유로의 casing 내부에서 외부로 전달되는 열

전달 효과를 고려하지 않은 점도 결과값 차이 발생의 원인으로 판단하였다. 이러한 결과는 현재 모델링된 GAMMA+가 보수적이지 않은 해석 결과를 도출할 가능성을 뜻하며, 실질적인 열교환기 성능 예측에서 위험 요소로 작용할 수 있다. 따라서, GAMMA+의 소듐-공기 열교환기 열전달 성능 예측 능력을 향상시키기 위해 보다 실제 열교환기 구조를 반영할 수 있도록 열전달 상관식을 수정하거나 새로운 상관식을 추가 적용하는 방향으로 코드를 개선할 필요가 있다. 향후 연구에서는 본 연구에서 파악된 한계를 극복하기 위해 입력 파일을 개선하고 나아가, 정상 상태 해석뿐만 아니라 과도 상태 해석을 수행하여 GAMMA+가 다양한 시나리오에서 보다 정확하게 잔열제거계통(DHRS) 내 소듐-공기 열교환기 열전달 성능을 예측할 수 있도록 하고자 한다. 이러한 분석 결과는 GAMMA+ 코드를 개선하기 위한 수정 방향을 제시하고 SFR 시스템의 안전성 평가에 필요한 기초 데이터를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부) 재원으로 한국연구재단 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00257279)

References

- (1) Jewhan Lee, Jaehyuk Eoh, Jung Yoon, Seok-Kwon Son, and Hyungmo Kim, 2023, "Heat transfer system design of sodium test facility STELLA-2", *Annals of Nuclear Energy*, Vol.191, pp. 15
- (2) Nam-il Tak, Hong Sik Lim, Jonggan Hong, Jung Yoon, Byung Ha Park, and Jaehyuk Eoh, 2002, "Improvement of GAMMA+ code for system transient and thermo-fluid safety analysis of sodium-cooled fast reactors", *Nuclear Engineering and Design*, Vol.399, pp. 1~11
- (3) Michael P. Heisler, 1982, "Development of scaling requirements for natural convection liquid-metal fast breeder reactor shutdown heat removal test facilities", *Nuclear Science and Engineering*, Vol.80, pp. 347~359.
- (4) A. Zhukauskas, 1989, *High-performance single-phase heat exchangers*, Revised and augmented edition, Hemisphere Publishing Corporation, New York.
- (5) Jung Yoon, Hyungmo Kim, Jewhan Lee, Jaehong Min, 2020, "Natural Circulation Characteristics of Finned-tube Type Sodium-to-air Heat Exchanger", *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol.23, pp. 28~35.

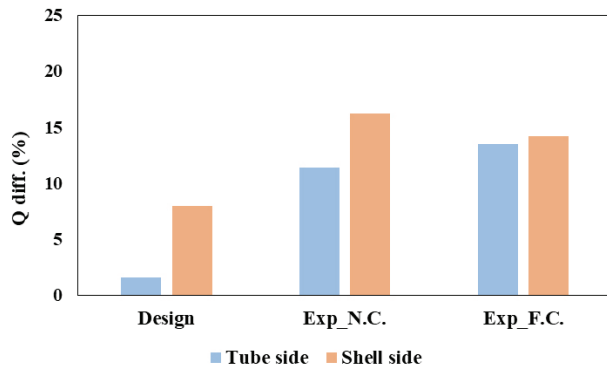


Fig. 8 Comparison of heat removal rate(Q) differences from FHX GAMMA+ results

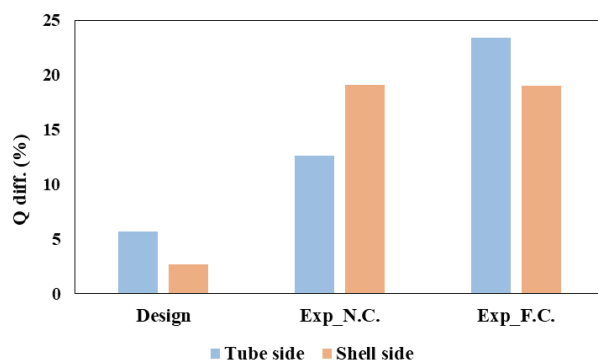


Fig. 9 Comparison of heat removal rate(Q) differences from AHX GAMMA+ results