

핀형 소듐-공기 열교환기의 자연순환 특성

윤정* · 김형모*[†] · 이제환* · 민재홍**

Natural Circulation Characteristics of Finned-tube Type Sodium-to-air Heat Exchanger

Jung Yoon*, Hyungmo Kim**, Jewhan Lee*, Jaehong Min**

Key Words : Natural circulation(자연순환), Finned-tube type sodium-to-air heat exchanger(핀형 소듐-공기 열교환기), Sodium-cooled Fast Reactor(소듐냉각고속로), Decay Heat Removal System(잔열제거계통)

ABSTRACT

In order to verify the natural circulation flow characteristics of FHX(finned-tube type sodium-to-air heat exchanger) for the case which the active decay heat removal system is used as passive at emergency situation in the sodium-cooled fast reactor, experiments were conducted for various conditions including the variation of external air temperature using SELFA test facility, and comparative verification with analyses results using MARS-LMR were performed. As a result, the heat transfer from sodium side to air side decreased as the sodium side inlet temperature decreased, so that the air side temperature and the natural circulation flow of air side decreased. Also, the temperature difference between sodium side inlet and outlet was occurred even before the air side damper was opened due to the radiation heat transfer and heat loss inside the M-FHX. Due to this, the difference between experiment and analysis result was occurred, however, the analysis results seem to reflect the experiment results properly.

1. 서론

한국원자력연구원에서 개발 중인 소듐냉각고속로 원형로(Prototype Gen-IV Sodium-cooled Fast Reactor; PGSFR)는 제4세대 원자력시스템의 기술목표 중 하나인 “안전성의 획기적 향상 및 입증”이라는 명제의 만족을 위해 혁신 안전계통에 대한 성능검증이 필수적이며, 이를 위해 현재 대규모 소듐 열유동 종합효과시험인 STELLA(Sodium Integral Effect Test Loop for Safety Simulation and Assessment) 프로그램이 진행 중이다. 본 프로그램의 1단계로 추진된 소듐 열유체 개별효과시험장치(STELLA-1)는 피동 잔열제거계통 열교환기의 성능시험 및 기계식 소듐펌프의 열유동 특성시험을 목적으로 하는 연구시설로 기 수행 연구를 통해 소듐 열교환기 설계 전산코드의 V&V 및 기계식 소듐 펌프의 물도의 실험 타당성 확인이라는 연구성과를 이루었다. STELLA

프로그램의 2단계로 추진 중인 대규모 소듐 열유동 종합효과 시험장치(STELLA-2)는 PGSFR 안전계통의 성능 입증 및 잔열제거계통과 일차열전달계통의 상호영향에 대한 평가를 위한 핵심 연구시설로, 2020년 현재 실험장치의 제작 및 설치가 진행 중이다.

일반적인 원자로는 일어날 수 있는 예상 가능한 사고 외에도 정전이나 자연재해 등의 예상치 못한 사고 상황을 대비하여 설계를 수행한다. 특히, 사고로 인해 발전소 내/외에서 전원공급이 차단되고 운전이 불가능하게 될 경우에 노심에서 발생하는 붕괴열을 제거할 수 있는 적절한 냉각수단이 없다면 심각한 상황에 직면할 수 있다. 그러므로 원자로 설계 시 신뢰성 높은 잔열제거 수단을 강구하는 것이 원자로의 안전성을 확보하는 데 매우 중요하다. 따라서 일반적인 원자로에서는 잔열제거계통을 구비하고 있으며, 다양성(Diversity) 및 다중성(Redundancy) 확보를 위해서 서로 다른 방식의 잔

* 한국원자력연구원 다목적계통기술개발부 (Korea Atomic Energy Research Institute)

** (주)이노윌 (INNOWILL Corp.)

[†] 교신저자, E-mail : hyungmo@kaeri.re.kr

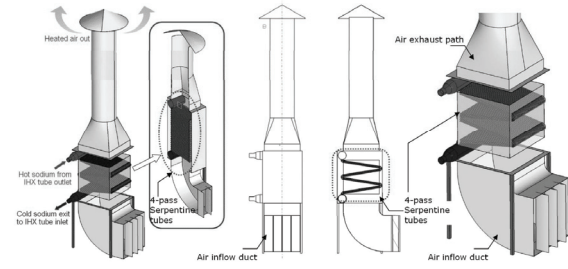


Fig. 2 Schematic of FHX

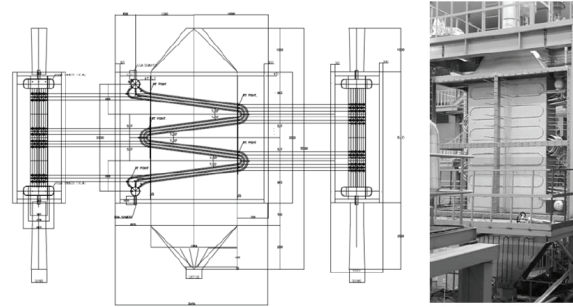


Fig. 3 Detailed shape of M-FHX and finned-tube

2.2 모형 FHX

원형 FHX의 자연대류 열유동 특성을 그대로 모의하여야 함은 물론, 제작성과 운전 편의성을 종합적으로 고려하여 축소 모형 FHX의 설계를 수행하였다⁽⁴⁾. 특히, 자연대류 특성 보존을 위하여 길이 및 온도 척도비를 원형과 동일하게 유지 하되, 전열관의 개수와 유량을 1/8로 축소하여 열전달, 압력 손실 등 주요 물리현상에 대한 왜곡을 최소화하도록 설계하였다. Table 1에 원형 및 모형 FHX의 상세 설계사양을 비교 하여 나타내었으며, Fig. 3에 모형 FHX의 구조 및 튜브 형상을 나타내었다.



2.3 SELFA 실험장치

SELFA 시험 루프는 소듐 이송을 위한 전자펌프, 실험에 필요한 소듐 온도조건을 만들어주기 위한 루프히터(Loop heater), 루프 내 온도변화에 따른 소듐의 팽창으로 인한 압력 변화를 수용할 목적의 소듐팽창탱크, 시험에 사용되는 소

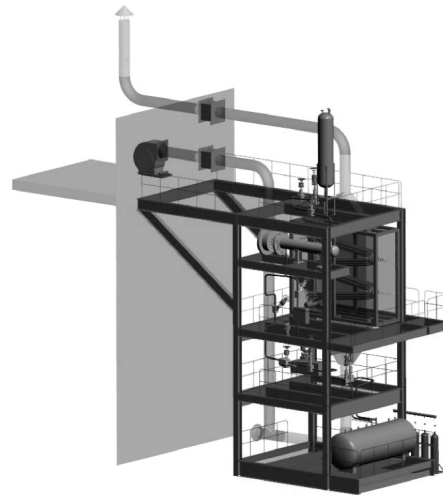


Fig. 4 General assembly of SELFA

Table 1 Design specifications of FHX and M-FHX

| Design Parameter | | FHX (PGSFR) | M-FHX (SELFA) |
|-----------------------------|------------------------|-------------|---------------|
| Thermal duty, MWt | | 2.5 | 0.3125 |
| No. of tubes | | 96 | 12 |
| Tube material | | P91 | STS304 |
| Bare tube OD/ID, mm | | 34.0/30.7 | 34.0/30.7 |
| Thickness, mm | | 1.65 | 1.65 |
| Finned tube length, m | | 8.0 | 7.722 |
| Fin height, mm | | 15.0 | 15.0 |
| Tube inclined angle, degree | | 7.2 | 7.2 |
| No. of fin(per unit length) | | 152 | 157 |
| Spacing between fins, mm | | 5.08 | 4.87 |
| Tube (Sodium) | Flow rate, kg/s | 17.54 | 2.19 |
| | Inlet/outlet temp., °C | 334.6/226.2 | 335.0/224.2 |
| | Pressure drop, Pa | 742.1 | 512 |
| Shell (Air) | Flow rate, kg/s | 13.63 | 1.70 |
| | Inlet/outlet temp., °C | 40.0/226.2 | 20.0/213.9 |
| | Pressure drop, Pa | 451.6 | 47 |

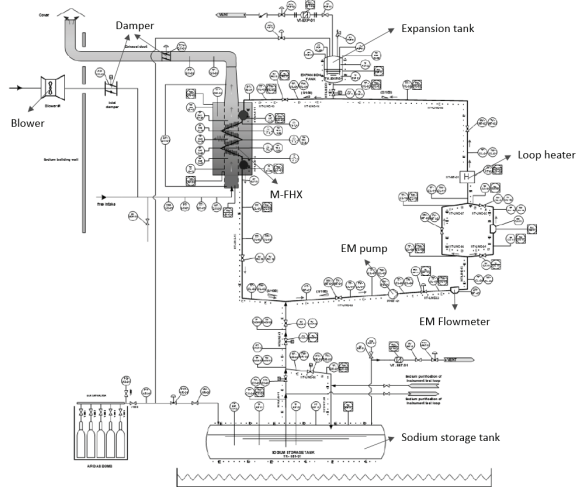


Fig. 5 Piping & instrument diagram of SELFA

뚝을 보관하고 가동 준비단계에서 용융하며, 유사시 혹은 종료 시 시험 장치의 소듐을 배출하여 저장하는 용도의 소듐저장탱크, 소듐 고화 방지를 위한 배관 예열히터, 공기 유량을 만들어주고 조절하기 위한 송풍기와 댐퍼, 소듐이 저장되어 있는 각종 탱크 내부를 불활성 분위기로 만들어주기 위한 Ar 가스공급계통, 각종 밸브의 구동을 위한 압축공기계통, 소듐의 누설을 감지하고 소듐 누출로 인한 화재 발생 시 소화 기능을 수행하는 화재방호계통 등으로 구성된다. Fig. 4와 Fig. 5에 SELFA 시험 루프의 상세 형상 및 P&ID를 나타내었다.

2.4 실험방법

본 연구에서는 FHX의 자연순환 성능 평가를 위하여 다양한 소듐측 입구 온도 및 유량에 대하여 공기측 입구온도 대비 출구온도의 변화 및 자연순환 유량 변화를 관찰하였다. 소듐측 입구 온도는 최대 350℃부터 50℃ 간격으로 총 4포인트에 대해 실험을 수행하였으며, 이때 소듐 유량은 4kg/s로 고정하였다. 소듐측 입구 온도조건 한 가지에 대해 서로 다른 일자에 총 8회 실험을 수행하여 다양한 외기조건에 따른 실험결과를 확보할 수 있도록 하였다. Table 2에 FHX의 자연순환 성능 평가를 위한 Test matrix를 나타내었다.

실험은 소듐측 전자펌프와 루프히터를 작동하여 각각의 실험조건에 대한 소듐측 입구 온도를 맞춰준 상태에서 어느 정도 정상상태가 유지되면 공기측 댐퍼를 열어서 FHX를 통과한 공기가 열전달에 의해 자연스럽게 순환이 이루어질 수 있도록 하였다. 이후 소듐측, 공기측의 온도가 각각 ±1℃, ±5℃ 이내에서 300초 이상 유지되면 정상상태에 도달했다고 판단하였다.

또한, 실험 수행 시 공기측 댐퍼를 열지 않은 상태에서 소듐을 순환시킬 경우 소듐측 입/출구 온도가 동일해야 하나, 실험장치의 특성상 M-FHX 내부에서 복사에 의한 열전달 효과가 존재하고 완벽한 단열의 어려움에 의해 발생하는 열손실에 의해 실제로는 소듐측 입/출구 간의 온도차이가 발생하였다. 따라서, 열전달로 인해 발생하는 소듐측 온도 변화는 댐퍼가 열리는 시점에서의 소듐측 출구 온도와 열교환 이후 정상상태로 판정되는 시점에서의 소듐측 출구 온도와의 차이로 계산하였다.

2.5 1-D 해석을 위한 입력 체계

2.5.1 Nodalization

FHX의 공기측 자연순환 특성 평가를 위한 실험결과와의 비교 검증을 위하여 1-D 계통해석 코드인 MARS-LMR을 활용하였다. 해석 대상은 SELFA 시험 루프 중 M-FHX와 공기 배관이다. M-FHX와 연결되는 소듐 배관은 경계조건으

Table 2 Test matrix of natural circulation for M-FHX

| Case | Temperature (°C) | | Flow rate (kg/s) | |
|-----------------|------------------|-----|------------------|-----|
| | Sodium | Air | Sodium | Air |
| A-1 ~ A-8 | 350.00 | 측정값 | 4.00 | 측정값 |
| B-1 ~ B-8 | 300.00 | | 4.00 | |
| C-1 ~ C-8 | 250.00 | | 4.00 | |
| D-1 ~ D-8 | 200.00 | | 4.00 | |

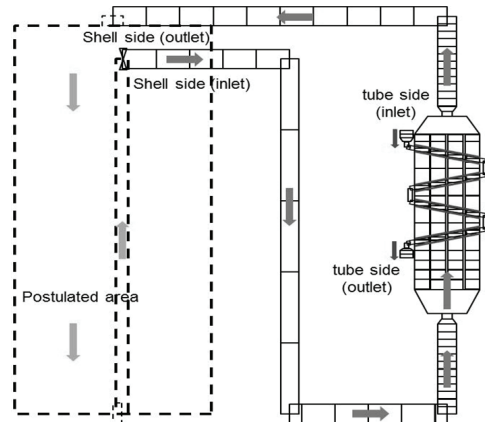


Fig. 6 MARS-LMR nodalization on M-FHX

로 처리하였으며, 공기 배관의 경우 외기를 모의하기 위해 가상의 큰 공간을 두고 이를 공기배관 입/출구와 연결하여 폐루프(Closed loop)로 구성하였다. 또한, 공기측 입구에 댐퍼(Damper)를 두어 이를 개방할 시 열교환기 내에서 자연순환이 형성되도록 구성하였다. Fig. 6에 MARS-LMR 해석을 위한 입력 노드 체계를 나타내었다.

2.5.2 열전달 상관식

FHX의 소듐 배관은 열전달 효율을 극대화하기 위하여 핀(Fin)형 전열관의 형태로 구성되어 있다. 따라서, 핀에 의한 전열면적 증가로 나타나는 전열성능 향상 효과를 식 (1)과 같은 표면적 확장계수(Surface extension factor)를 이용하여 표시할 수 있다.

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

A_{fin} 및 A 는 각각 핀의 총 표면적과 핀을 포함하는 총 전열면적을 나타내며, η_f 는 단일 핀의 효율을 나타내며⁽⁹⁾, 이에 따라 전열량 Q 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = hA_0\Delta T = h\left(\frac{A_{fin}}{A}\right)\eta\Delta T = h\eta A_0\Delta T \quad (2)$$

소듐측 열전달 상관식으로는 식 (3)의 Lyon-Martinelli 상관식⁽¹⁰⁾이 사용되었으며, 공기측 열전달 상관식으로는 핀이 달린 원관-군 영역에서의 공기 교차류 냉각에 사용되는 Zhukauskas 상관식⁽⁹⁾이 식 (4)와 같이 사용되었다. FHX의 공기측 영역은 핀 전열관 배열에 의해 결정되는 유동 채널 면적 및 둘레 길이에 의해 열전달 성능이 영향을 받게 되므로, 열전달 상관식은 전열관의 수평 및 수직 피치대 직경비 (P/d)에 의해 결정되는 인자들의 함수로 표현된다.

$$Nu = 4.0 + 0.025Pe^{0.8} \quad (3)$$

$$Nu_f = 0.192\left(\frac{a}{b}\right)^{0.2}\left(\frac{s}{d}\right)^{0.18}\left(\frac{h}{d}\right)^{-0.14} Re_f^{0.65} Pr_f^{0.36} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0.25}$$

for $1 \times 10^2 \leq Re_f \leq 2 \times 10^4$
 $1.1 \leq a \leq 4.0, 1.03 < b < 2.5$
 $0.07 < h/d < 0.715, 0.06 < s/d < 0.36$

$$Nu_f = 0.0507\left(\frac{a}{b}\right)^{0.2}\left(\frac{s}{d}\right)^{0.18}\left(\frac{h}{d}\right)^{-0.14} Re_f^{0.8} Pr_f^{0.4} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0.25}$$

for $2 \times 10^4 \leq Re_f \leq 2 \times 10^5$
 $1.1 \leq a \leq 4.0, 1.03 < b < 2.5$
 $0.07 < h/d < 0.715, 0.06 < s/d < 0.36$

$$Nu_f = 0.0081\left(\frac{a}{b}\right)^{0.2}\left(\frac{s}{d}\right)^{0.18}\left(\frac{h}{d}\right)^{-0.14} Re_f^{0.95} Pr_f^{0.4} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0.25} \quad (4)$$

for $2 \times 10^5 \leq Re_f \leq 1.4 \times 10^6$
 $2.2 \leq a \leq 4.2, 1.27 < b < 2.2$
 $0.125 < h/d < 0.6, 0.125 < s/d < 0.28$

식에서 사용된 하첨자 f 는 핀이 부착된 공기 교차류 영역을 의미하며, a, b 는 각각 횡간 피치(P_T : Transverse pitch) 및 종간 피치(P_L : Longitudinal pitch) 대 직경비를 의미한다. 또한 h, δ, s 는 각각 핀의 높이, 두께, 및 핀 사이의 간격을 의미하며, d 는 핀의 높이를 제외한 전열관의 직경을 의미한다. Re_f 의 계산에 사용되는 속도 항은 관-군 (Tube bank) 사이를 유동하는 유체의 최대 속도에 의해 정의되는 값으로서, 역시 기하학적 형상을 반영한 횡간 피치 및 종간 피치의 함수로 계산된다. 유체의 최대 속도 V_{max} 는 비압축성 유체에 대한 질량보존 조건으로부터 결정되며, V 는 전열관-군 진입 이전의 유체속도를 의미한다. 또한 $Re_{A,flow}$ 는 핀이 차지하는 면적에 의해 단일 핀 주변의 유동 면적이 감소하는 비율을 의미한다. 상관식에 사용되는 계수들은 원관-군의 엇갈림 격자 배열 및 정렬 격자 배열에 대한 특성을 반영하여 구하게 된다. 참고문헌⁽⁹⁾에서는 Re 수와 Pr 수에 사용된 지수 m 과 n 에 대하여 다양한 기하학적인 형상에 따른 값들을 제공하고 있으며, 그 중에서 핀-튜브형 열교환기와 가장

유사한 값을 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 온도 및 유량

각 케이스 별 소듐측, 공기측 입/출구 온도 및 유량에 대해 실험결과 및 MARS-LMR 해석 결과를 Fig. 7~11과 같이 비교하여 나타내었다. 서로 다른 외기조건에 대해 실험을 수행하였으나 사실상 외기조건 자체는 계절이 다르지 않는 한 큰 차이가 없으므로, 전체적인 경향성 확인을 위해 각 케이스 별로 8가지 외기조건에 대한 결과를 평균하여 비교하였다. 먼저 소듐측을 살펴보면 Fig. 7에서와 같이 소듐측 입구 온도가 낮아짐에 따라 전체적인 온도가 감소하는 경향을 보이며, 해석결과의 경우 실험결과보다 입구온도는 최대 2.1%, 출구온도는 최대 2.7% 높게 예측하였다. 그림 8은 소듐측 입/출구 온도차에 대해 MARS-LMR 해석결과와 실험결과를 비교한 그림이다. 여기서, $dT(Exp.)_{in}$ 은 실제 소듐 입구온도와 출구온도 간의 차이를, $dT(Exp.)_{out}$ 은 공기측 댐퍼 개방 전의 소듐 출구온도와 개방 후의 소듐 출구온도 간의 차이를 나타낸다. 따라서, $dT(Exp.)_{out}$ 은 복사열전달 및 열손실에 따른 차이가 배제된 값으로 볼 수 있다. $dT(Exp.)_{in}$ 과 MARS-LMR 해석결과를 비교할 경우 절대적인 차이는 크지만 저온으로 갈수록 그 차이가 감소하는 경향을 보이며, $dT(Exp.)_{out}$ 과 해석결과를 비교할 경우 절대적인 차이는 작지만 $dT(Exp.)_{in}$ 과는 다소 상이한 경향이 나타난다. 이는 실험과 해석상에 발생할 수 있는 여러 가지 원인들(모델링, 상관식, 계측 불확도 등)이 복합적으로 작용하는 것으로 판단된다.

공기측의 경우도 마찬가지로 Fig. 9에서와 같이 소듐측 입구 온도가 낮아짐에 따라 전체적인 온도가 감소하는 경향을 보이나, 소듐측과는 반대로 해석결과가 실험결과보다 입구온도는 최대 3.5%, 출구온도는 최대 8.7% 낮게 예측하였다. 또한, 공기측 입/출구 온도차는 Fig. 10에서와 같이 소듐측 입구 온도가 낮아질수록 해석결과가 실험결과보다 약 0.4~8.2%만큼 크게 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 공기 유량은 Fig. 11에서와 같이 입/출구 온도차가 감소함에 따라서 자연순환 유량이 감소하는 경향을 보이며, 전반적으로 해석결과가 실험결과를 잘 예측하는 것으로 판단된다. 위와 같이 나타나는 실험결과 및 해석결과의 차이는 앞서 언급한 바와 같이 M-FHX에서 발생하는 복사열전달 및 열손실, 실험과 해석상에 발생할 수 있는 여러 가지 원인들(모델링, 상관식, 계측 불확도 등)이 복합적으로 작용하는 것으로 판단된다. 따라서, 이를 보다 면밀히 관찰하기 위해서는 추가적인 실험 및 분석이 요구된다.

총 32가지의 케이스 중에서 대표적으로 Case A-1(소듐측

핀형 소듐-공기 열교환기의 자연순환 특성

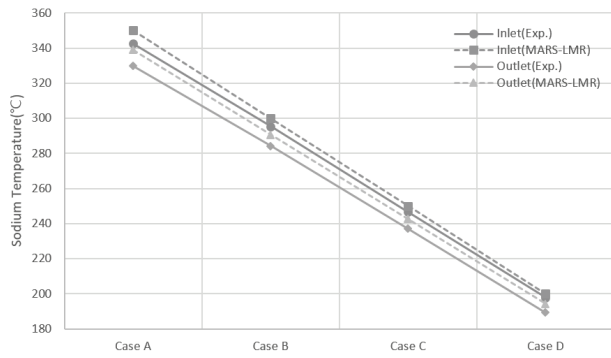


Fig. 7 Sodium inlet/outlet temperature comparison

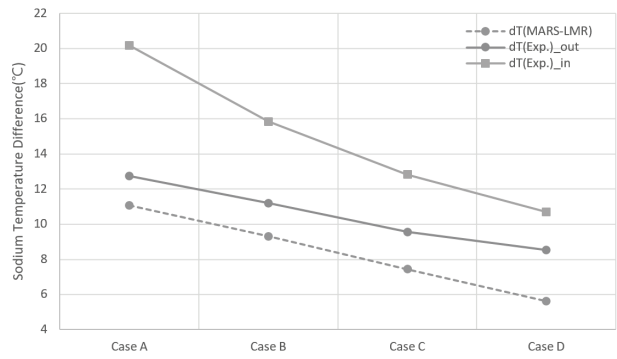


Fig. 8 Sodium inlet/outlet temperature difference comparison

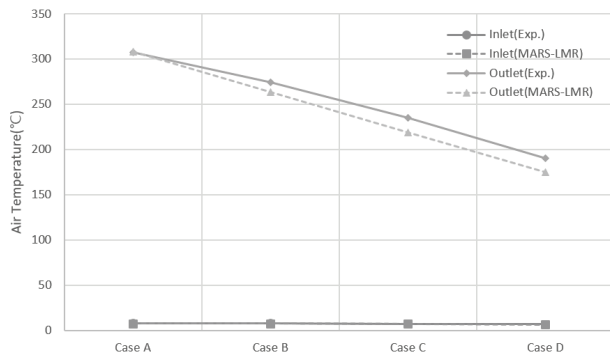


Fig. 9 Air inlet/outlet temperature comparison

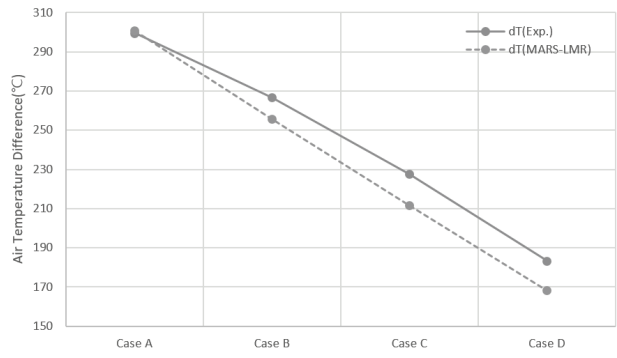


Fig. 10 Air inlet/outlet temperature difference comparison

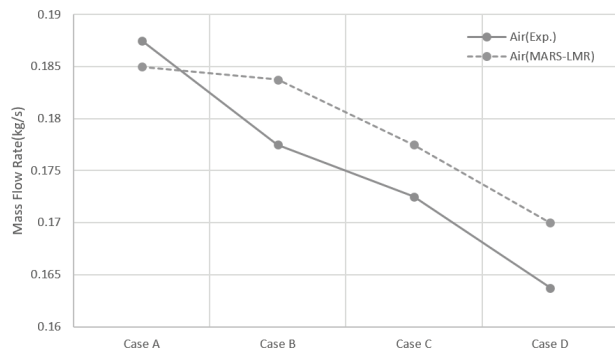


Fig. 11 Air mass flow rate comparison

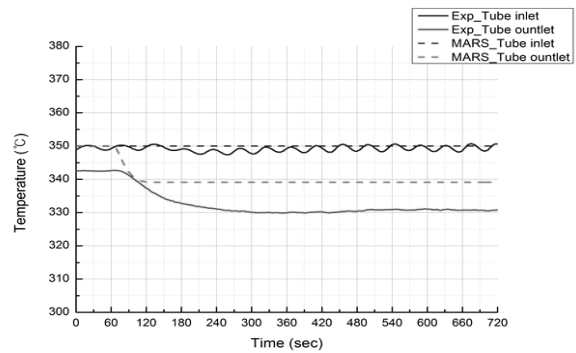


Fig. 12 Sodium inlet/outlet temperature comparison(Case A-1)

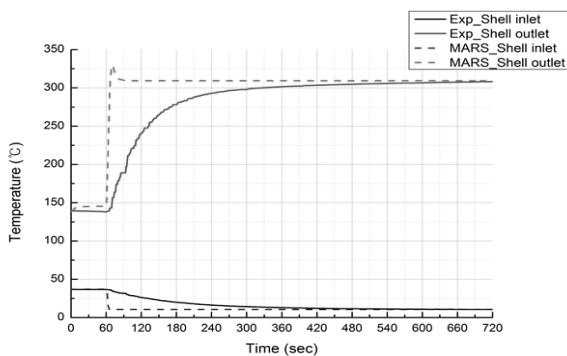


Fig. 13 Air inlet/outlet temperature comparison(Case A-1)

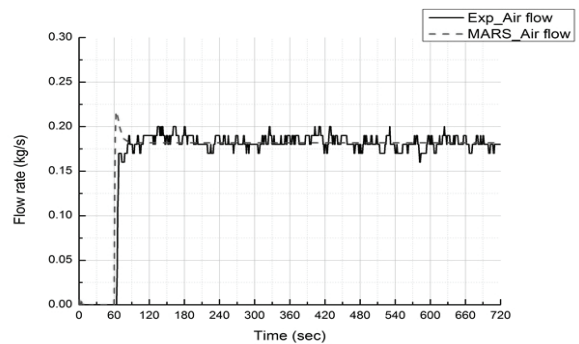


Fig. 14 Air mass flow rate comparison(Case A-1)

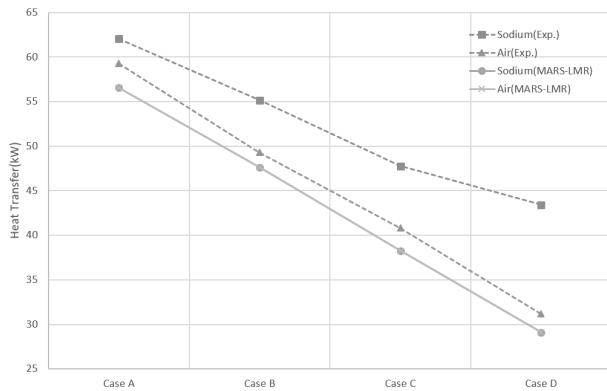


Fig. 15 Heat transfer comparison

입구 온도가 350°C인 경우)에 대하여 시간에 따른 소듐측, 공기측 입/출구 온도변화 및 공기측 유량변화를 Fig. 12~14에 나타내었다. 60초에 공기측 댄퍼가 개방된 이후 소듐측에서 공기측으로 열이 전달되어 소듐측 출구 온도가 감소하고 공기측 출구 온도가 증가하는 모습을 확인할 수 있다. 댄퍼 개방 이후의 온도변화와 관련해서는 실험결과와 경우 해석결과에 비해 늦게 반응하는 경향을 보이는데, 이는 MARS-LMR의 모델링에서는 구조물을 별도로 모의하지 않아서 구조물에 축적되는 에너지가 전혀 고려되지 않기 때문이다. 또한, 입구 온도가 진동하는 것은 설정된 온도를 유지하도록 루프히터를 제어하는 과정에서 발생하는 현상이다. 전반적으로는 소듐측에 비해 공기측의 실험 및 해석 결과가 잘 일치하며, 소듐측도 복사열전달 및 열손실에 의한 차이를 감안하면 대체로 큰 차이가 발생하지 않는 것으로 판단된다.

3.2 전열량

각 케이스 별 소듐측 및 공기측 전열량에 대해 실험결과 및 MARS-LMR 해석 결과를 Fig. 15와 같이 비교하여 나타내었다. 마찬가지로 전체적인 경향성 확인을 위해 각 케이스 별 8가지 외기조건에 대한 결과를 평균하여 비교하였다. 전반적으로 소듐측 입구 온도가 감소함에 따라 전열량은 감소하는 추세를 보이며, 해석결과는 소듐측, 공기측 전열량이 동일하나 실험결과는 소듐측에서 발생하는 복사열전달 및 열손실 때문에 소듐측 전열량이 증가하여 소듐측 및 공기측 전열량의 차이가 발생한다. 그럼에도 공기측 전열량은 실험결과와 해석결과 간의 차이가 최대 7% 정도로 대체로 잘 일치하였으며, 이를 감안하면 대체로 해석결과는 실험결과를 적절히 반영하고 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

소듐냉각고속로를 대상으로 긴급 상황 시 피동 안전성을 향상하기 위하여 ADHRS를 피동형으로 사용하는 경우에 대해 최종 열침원 열교환기인 FHX의 자연순환 유동 특성을 실험적으로 검증하기 위하여 외부 공기온도의 변화를 포함하는 다양한 조건들에 대해 실험을 수행하고, MARS-LMR을 활용한 해석결과와 비교 검증하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 소듐측 입구 온도를 200~350°C 범위 내에서 50°C 간격으로 변화시켜가며 다양한 외기조건에 대해 총 32케이스에 대해 실험을 수행하였으며, 그 결과, 소듐측 입구 온도가 낮아질수록 공기측으로 전달되는 열량이 감소하면서 온도가 하락하고, 이에 따라 자연순환 유량이 감소하는 현상이 나타났다.

2) 실험 수행 시 공기측 댄퍼를 열지 않은 상태에서 소듐을 순환시킬 경우 소듐측 입/출구 온도가 동일해야 하나, 실험장치의 특성상 FHX 내부에서 복사에 의한 열전달 효과가 존재하고 완벽한 단열의 어려움에 의해 발생하는 열손실에 의해 실제로는 댄퍼를 열지 않았음에도 불구하고 소듐측 입/출구 간의 온도차가 발생하였으며, 그 외에도 모델링, 상관식, 계측 불확도 등의 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용하여 이로 인해 실험결과와 해석결과 간의 차이가 발생하였으나, 이를 감안하면 대체로 해석결과는 실험결과를 적절히 반영하고 있는 것으로 판단된다.

3) 공기측 댄퍼 개방 이후 시간에 따른 소듐/공기측 온도 변화와 관련하여 실험결과와 경우 해석결과에 비해 늦게 반응하는 경향을 보이는데, 이는 MARS-LMR의 모델링에서는 구조물을 별도로 모의하지 않아서 구조물에 축적되는 에너지가 전혀 고려되지 않기 때문인 것으로 판단된다.

4) 본 연구에서는 일정한 소듐 유량에 대해서 소듐측 입구 온도의 변화에 따른 공기측 입/출구 온도 변화와 이로 인해 발생하는 자연순환 유량 변화를 모의하기 위해 다양한 외기 조건에 대해 실험을 수행하고 그 결과를 해석과 비교하였으며, 추후 좀 더 넓은 범위에서의 소듐측 입구 온도 변화 및 소듐 유량 변화 등 다양한 조건에 대해 추가실험을 수행하고 해석을 위한 모델링을 개선하여 FHX의 자연순환 유동 특성을 이해하기 위한 데이터베이스를 구축할 계획이다.

후 기

본 연구는 과학기술정보통신부의 원자력연구개발사업(2016 M2B2B1944981) 및 국가과학기술연구회 창의형 융합연구사업(No. CAP-20-03-KAERI)의 지원을 받아 수행됨.

References

- (1) Eoh, J. H., Han, J. W., Lee, T. H., Kim, S. O., 2010, "New design options free from a potential sodium freezing issue for a Passive DHR System of KALIMER", Nuclear Technology, Vol. 170, pp. 290~305.
- (2) Eoh, J. H., 2012, "Conceptual design report of decay heat removal system for PGSFR", SFR-FS500-ER-01-2012, Internal report, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon.
- (3) Kim, D. E., 2013, "FHX thermal sizing calculation", SFR-513-DF-462-002, Internal report, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon.
- (4) Kim, H. M., 2016, "Construction report of Sodium thermal-hydraulic Experiment Loop for Finned-tube Type Sodium-to-air Heat Exchanger", SFR-710-TF-486-002, Internal report, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon.
- (5) Kim, H. M., Kim, B. Y., Ko, Y. J., Cho, Y. I., Kim, J. M., Son, S. K., Jo, Y. C., Kang, B. S., Jung, M. H., Eoh, J. H., Lee, H. Y., Jeong, J. Y., 2016, "Design evaluation of thermal-hydraulic test facility for a finned-tube sodium-to-air heat exchanger", Transactions of Korean Nuclear Society Spring Meeting, Jeju, Korea.
- (6) Kim, H. M., 2017, "Heat transfer performance test report of finned-tube type sodium-to-air heat exchanger", SFR-710-TF-458-023, Internal report, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon.
- (7) Mori Y. and Nakayama W., 1967, "Study on forced convective heat transfer in curved pipes - 2nd report, turbulent region", Int. J. of Heat and Mass Transfer, vol. 10, pp. 37~59.
- (8) Neil E. Todreas and Mojid S. Kazimi, 1990, Nuclear Systems (I), Hemisphere Publishing Corporation, New York.
- (9) A. Zhukauskas, 1989, High-performance single-phase heat exchangers, Revised and augmented edition, Hemisphere Publishing Corporation, New York.
- (10) 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.