

2017. 05. 19

Experimental Study on Natural Convection Air Flow Characteristics in a Finned-tube type Sodium-to-Air Heat Exchanger System

민재홍^a, 김형모^b, 어재혁^b, 신원규^a, 정지영^b

a: Chungnam national university

b: Korea Atomic Energy Research Institute

충남대학교 기계공학과
에너지 / 환경 / 열유체 실험실(EETF)

민재홍

INDEX

01. 연구배경 및 목적

02. 실험 방법

03. 실험 결과

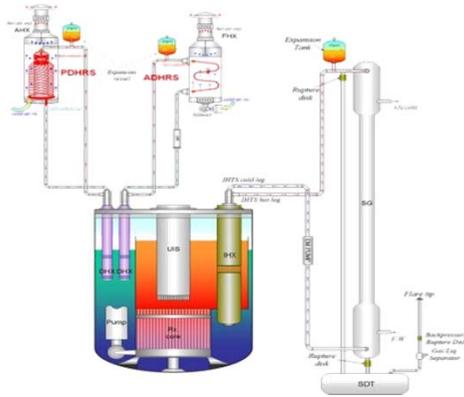
04. 결론

연구배경 및 목적

연구배경 및 목적

연구배경

1. Importance of natural convection operation in nuclear plant



PGSFR



자연대류 냉각 시스템으로 인한 안전성 강화

연구배경 및 목적

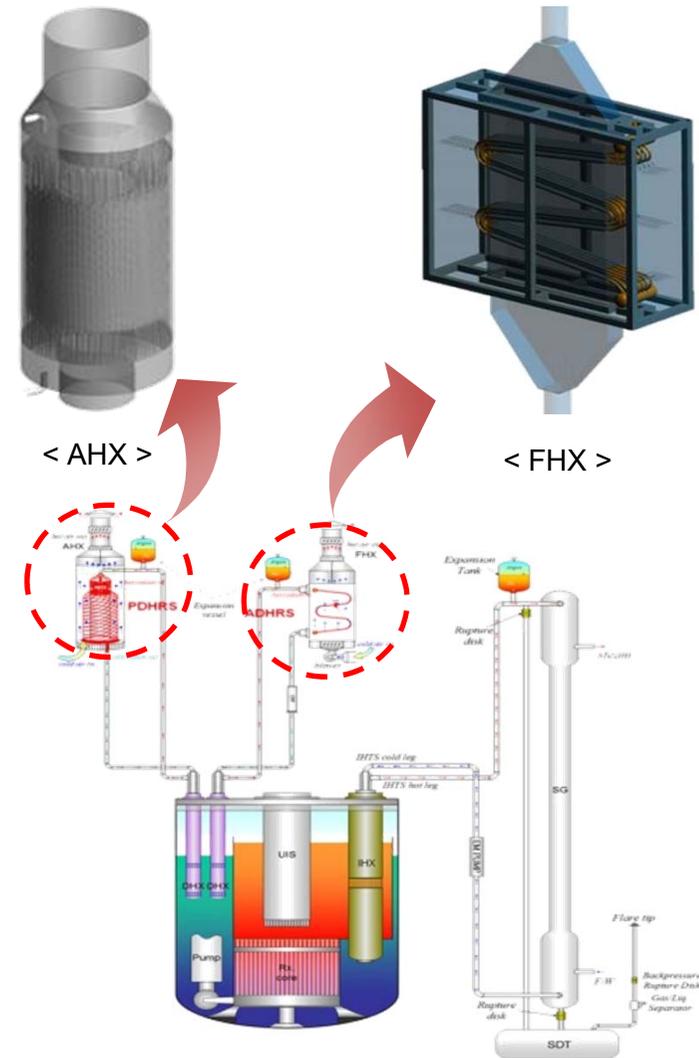
연구배경

피동형 잔열제거계통

- AHX (Natural draft sodium-to-Air Heat exchanger)
- 헬리컬(Helical) 형 튜브 배치
- 설계검증 완료(2014, KAERI).

능동형 잔열제거계통

- FHX (Forced draft sodium-to-air Heat exchanger)
- 흰튜브(Finned)형 튜브 배치(M-shape)
- Station blackout 상황을 대비한 피동형 모드
 - * 설계용량의 약 50% 열제거 성능 확보
- 설계검증 진행중



< DHRs of SFR schematic >

* DHRS : Decay Heat Removal System

연구배경 및 목적



연구목적

1. FHX의 공기측 자연대류 특성 연구의 중요성

- 피동안전성 강화를 위한 실험적인 증명 필요.
- 실험을 통하여 소둠과 공기의 온도 및 유량 데이터 확보
- 이론적인 해석 및 계산결과 검증

2. 다양한 조건에 따른 실험 수행

- 소둠온도 조건에 따른 실험 수행
- 1차원 시스템 코드의 해석결과와 상호비교 및 평가

3. 실험 데이터베이스 확보

- 자연대류는 잠재적인 불확실성을 내포
- 자연대류 특성에 대한 이론적인 계산 및 정량적인 검증

실험 방법

실험 방법

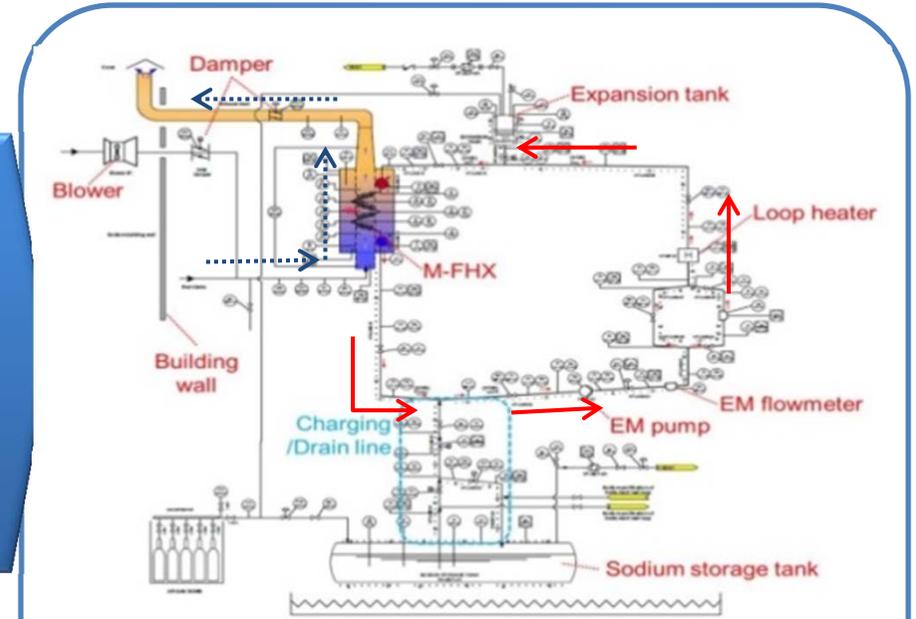
실험장치 소개

SELFA

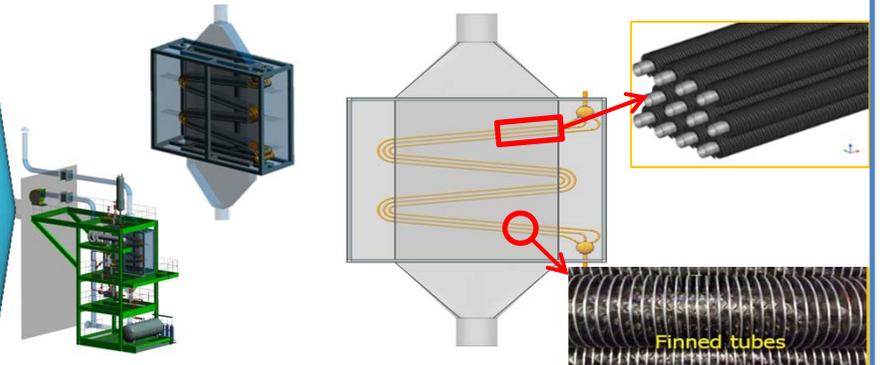
- Sodium thermal-hydraulic Experiment Loop for Finned-tube Sodium-to-Air heat exchanger
- Closed sodium loop and circulate the sodium.
- 'M' 형태의 소듐 전열관-군 포함(Model heat exchanger)
- EM-Pump, EM-Flowmeter, Loop heater.
- Air in/outlet damper, blower.

M-FHX (Model-FHX)

- 원형로 FHX의 성능을 보존하기 위한 설계
 - * 유량 및 열량만을 축소설계
 - * 그 외 기하학적인 요소 보존
- Shell & tube 형 열교환기.
- 4개의 분리된 섹션의 소듐 전열관 번들(serpentine)
- 열전달 효율을 높이기 위한 흰(Fin) 형 튜브



< SELFA P&ID and Facility schematic >



< Detailed schematic of M-FHX >

실험 방법

실험절차

1. 고정 변수(fixed test conditions)

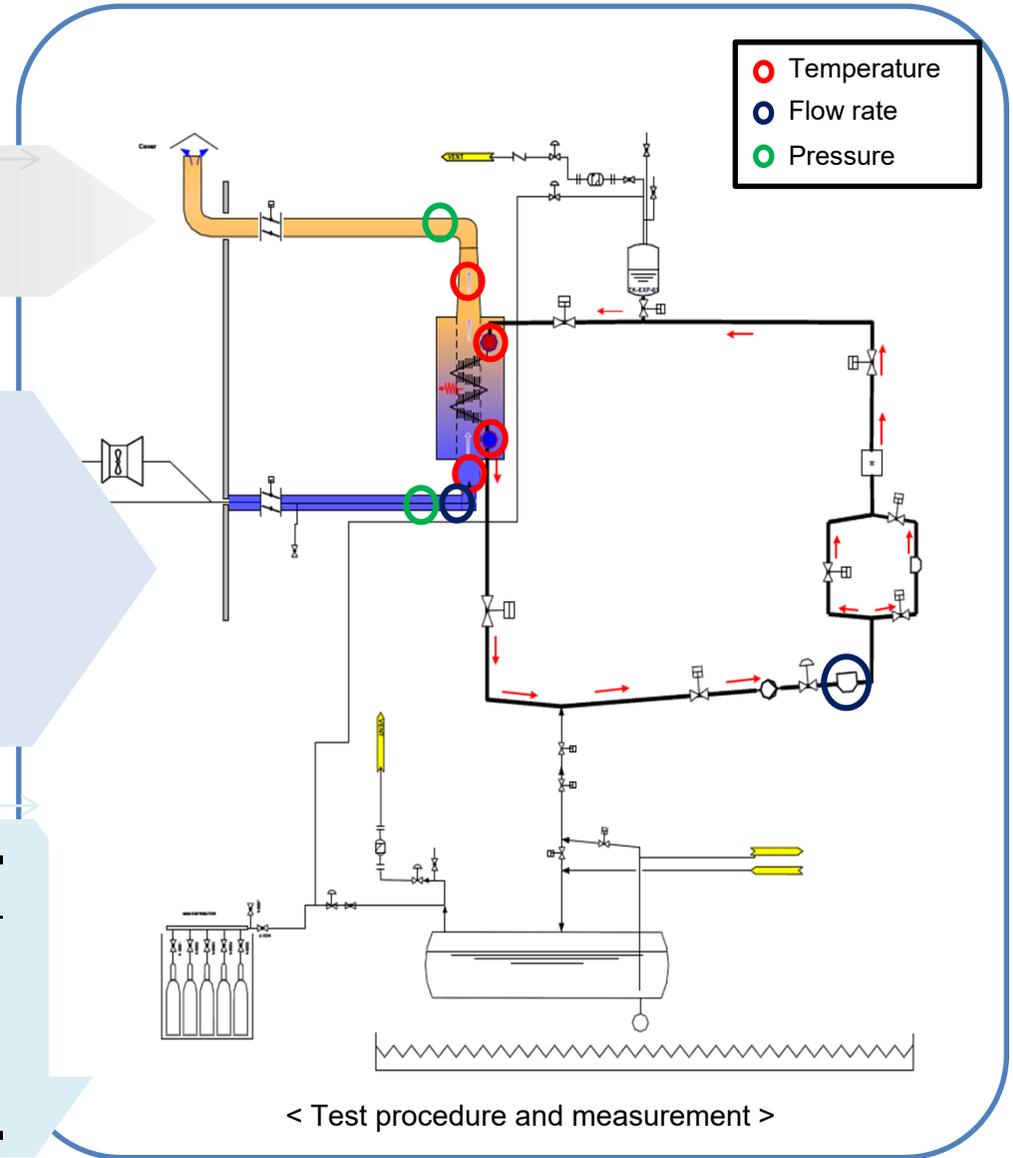
- 열교환기 소듐측 입구온도
- 소듐 유량

2. 측정변수 (processing variables)

- 온도
 - * 소듐측 출구
 - * 공기측 입/출구
- 공기 유량
- 공기 압력

3. 실험조건

Case	Temperature _{Sodium}	Temperature _{Air}	Flow rate _{Sodium}
Case 1	300 °C	1.17 °C	2 kg/s
Case 2	200 °C	11.12 °C	



실험 방법

MARS-LMR

MARS-LMR 노드화 방법론

- 소듐측과 공기측으로 분리.
- 소듐측: 강제순환 / 공기측: 자연순환
- 공기측 강제순환을 위한 가상의 볼륨 설정.

Finned-tube 형상 분석

- 원의 열전달 해석을 위한 Surface-extension factor 적용.

$$Q = hA_{out}\Delta T = h \left(\frac{A_{out}}{A_{in}} \right) A_{in}\Delta T = h \cdot SF \cdot A_{in}\Delta T$$

$$SF = \frac{A_{out}}{A_{in}} \eta = \frac{L_j + \frac{A_{Fin}}{2\pi(R_i + t)}}{W_{left,j}} \eta$$

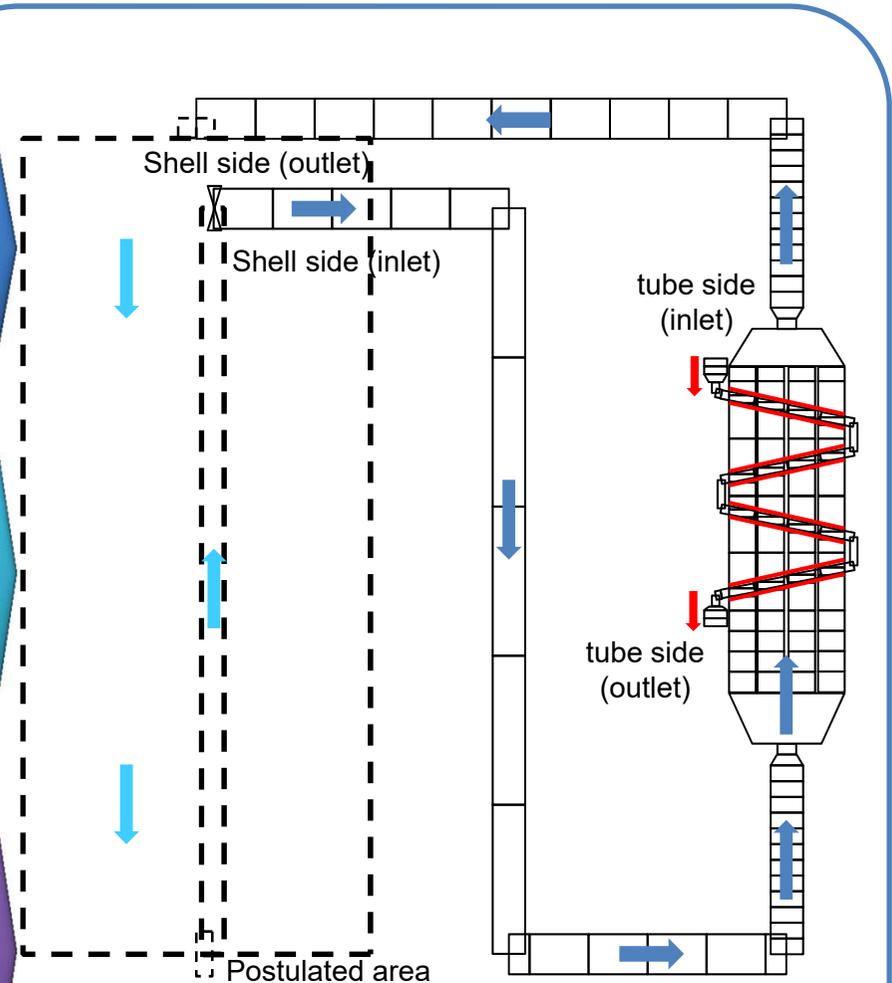
Heat structure approach

- Heat transfer 열전달 상관식.

* Finned tube type : Zukauskas staggered (Shell-side)

$$Nu_f = C_1 \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0.25} Re_{D,max}^m Pr_f^{0.36}$$

$$Nu = C_2 \left(\frac{S_T}{S_L} \right)^{0.25} \left(\frac{S}{D} \right)^{0.18} \left(\frac{h}{D} \right)^{-0.14} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0.25} Re_{D,max}^m Pr_f^n$$

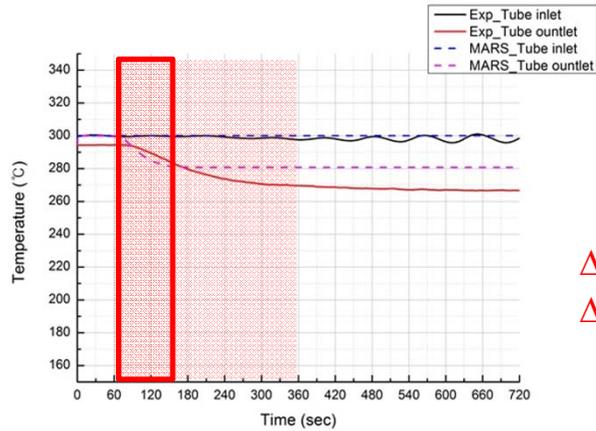


< Nodalization on MARS-LMR of FHX test modeling >

실험 결과

실험 결과

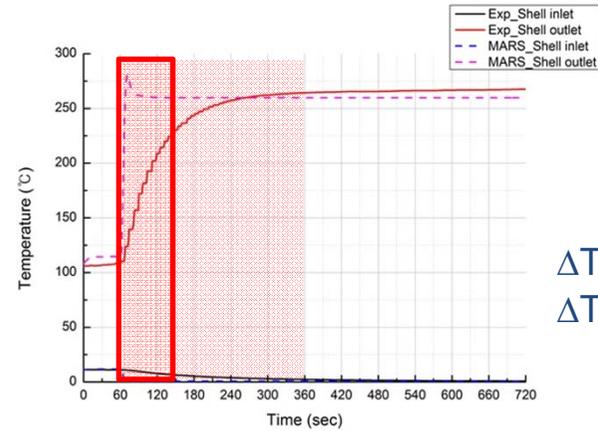
온도 분포



$$\Delta T_{\text{exp}} = 27.08 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{MARS}} = 19.29 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

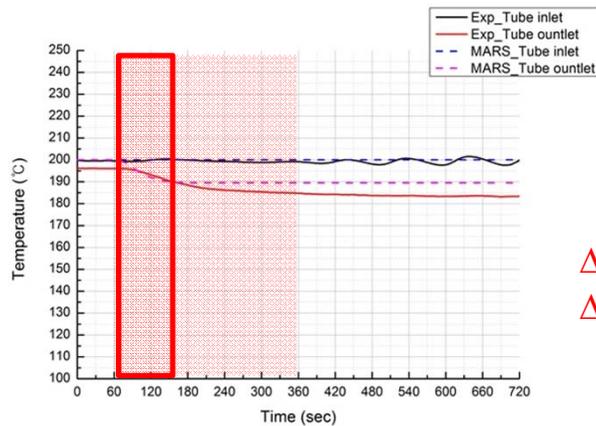
< Case 1 Sodium temperature >



$$\Delta T_{\text{exp}} = 265.11 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{MARS}} = 260.37 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

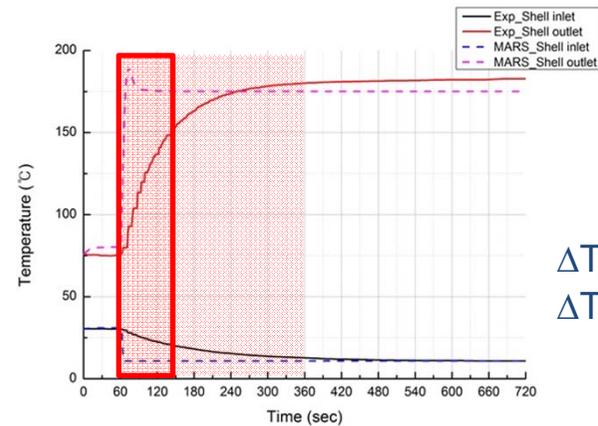
< Case 1 Air temperature >



$$\Delta T_{\text{exp}} = 12.46 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{MARS}} = 10.49 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

< Case 2 Sodium temperature >



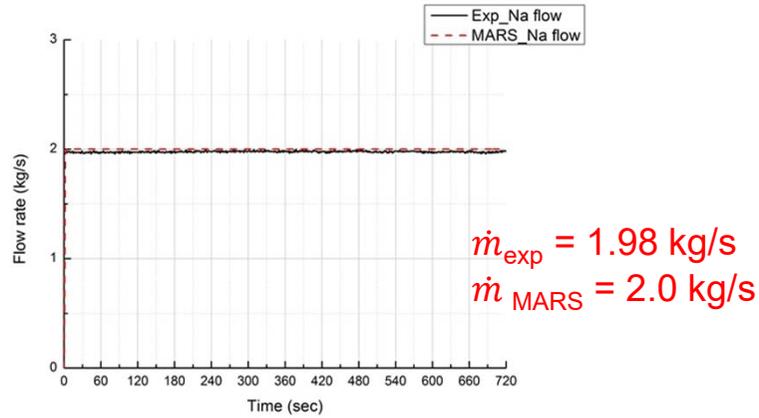
$$\Delta T_{\text{exp}} = 170.75 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{MARS}} = 159.18 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

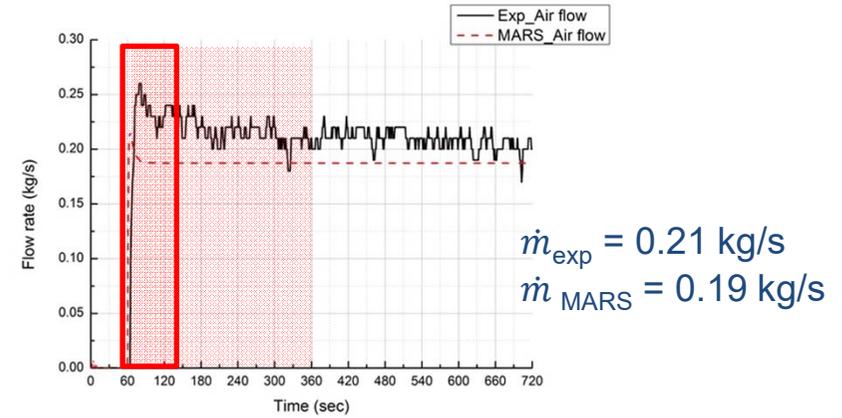
< Case 2 Air temperature >

실험 결과

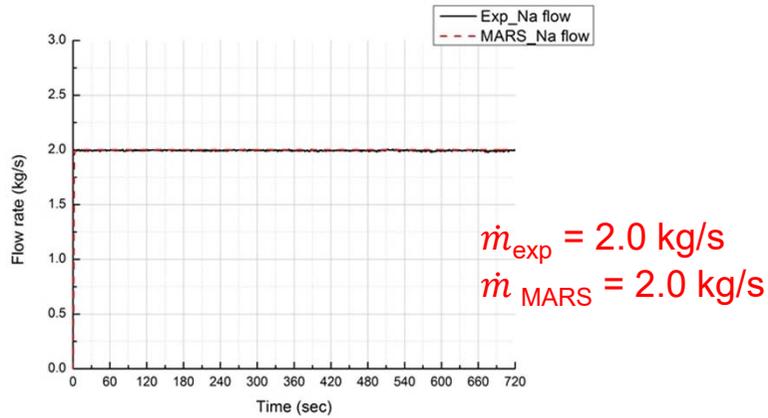
유량 분포



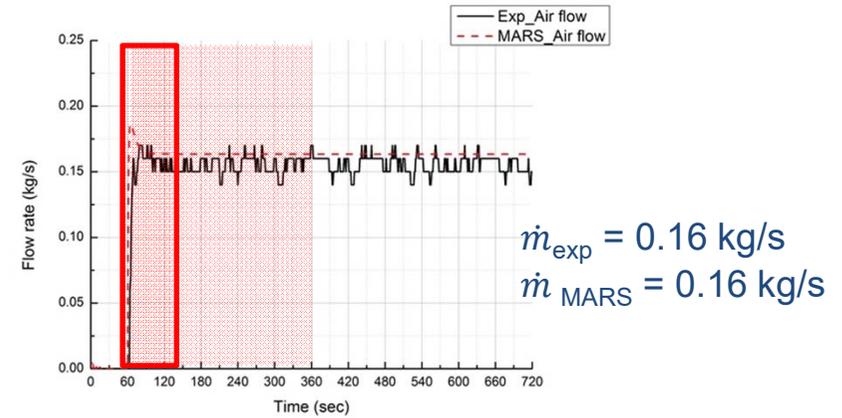
< Case 1 Sodium flow rate >



< Case 1 Air flow rate >



< Case 2 Sodium flow rate >



< Case 2 Air flow rate >

실험 결과

열전달량

Case 1_Heat transfer rate			
	Tube side	Shell side	Difference
Experiment. Q [W]	65451.68	57218.32	8233.35
MARS-LMR Q [W]	49343.00	49343.00	0
Difference [%]	32.65	15.96	

< table of total heat transfer rate_Case 1 >

Case 2_Heat transfer rate			
	Tube side	Shell side	Difference
Experiment. Q [W]	31457.64	27090.96	4366.67
MARS-LMR Q [W]	27173.00	27173.00	0.0
Difference [%]	15.77	0.3	

< table of total heat transfer rate_Case 2 >

$$* Q = \dot{m}C_p\Delta T$$

결 론

결과 활용 계획

- 본 연구결과 외 다양한 자연대류 실험
- 실험데이터로 향후 핀(Fin)튜브 타입 소뿔 대 공기 열교환기의 자연대류 열제거 성능 데이터베이스 사용
- 잔열제거계통 설계개발 연구에 참고자료로 사용

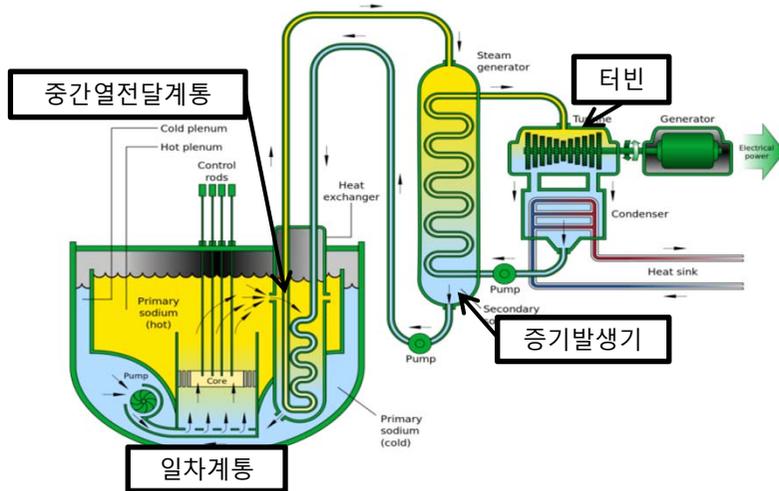
감사합니다.

APPENDIX

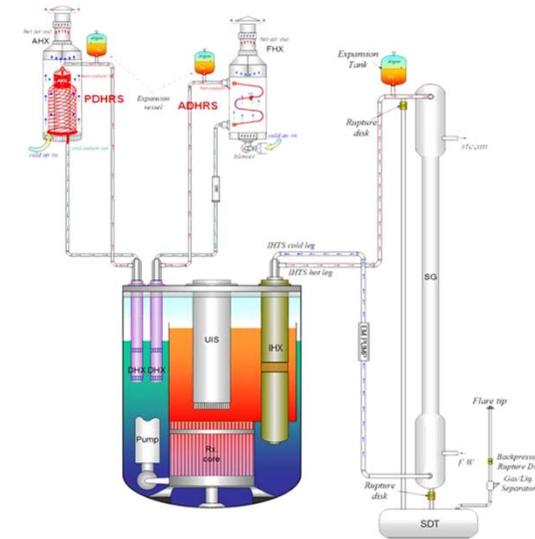
APPENDIX

소듐냉각고속로 (SFR, Sodium-cooled Fast Reactor)

- 경수로와 달리 냉각제로 용융 소듐을 사용하는 특징.
- 고온 및 저압 운전이 가능하며 경수로대비 열효율을 40% 이상 높일 수 있는 차세대 원자로.
- 일차계통 → 중간열전달계통 → 증기발생기 → 터빈 → 일차계통 : cycle
- 증기발생기의 소듐-물 반응 발생을 방지하기 위해 중간열전달계통을 설치.
 - 사고 시 중간열전달계통을 통해 증기발생기와 일차계통 격리.
- 증기발생기 고장 또는 소 내 전원공급 차단 등의 사고 시 잔열제거계통 가동
 - 후쿠시마 원전 사고와 같은 외부전원 상실사고가 발생해도 발전소를 안전하게 정지시키는 역할.



< 소듐냉각고속로 >



< 소듐냉각고속로 잔열제거계통 >

APPENDIX

잔열제거계통 (DHRS, Decay Heat Removal System)

- 핵연료봉의 지속적인 열 출력으로 인한 추가사고를 대비.
- 작동 신뢰성을 향상시키기 위해 다중성, 다양성 철학을 통해 설계
- 잔열제거계통은 능동형 (ADHRS)과 피동형 (PDHRS)으로 나뉨.
 - 능동형 잔열제거계통 (ADHRS, Active Decay Heat Removal System)
 - FHX (Forced-draft sodium-to-air Heat exchanger)
 - **Finned-type tube sodium-to-air heat exchanger(빨지 말지??)**
 - 열교환기의 쉘 내부로 외부의 공기를 강제송풍하여 튜브 내로 흐르는 고온 소듐과 열교환.
 - 피동형 잔열제거계통 (PDHRS, Passive Decay Heat Removal System)
 - AHX (natural-draft sodium-to-air Heat exchanger)
 - **Helical tube type sodium-to-air heat exchanger(빨지 말지??)**
 - **쉘 내부에서 고온튜브의 열에 의해 외부공기의 자연대류가 형성되면서 튜브와 열교환.(표현 맞는지?)**
- **열교환 된(?) 냉각 된(?)** 소듐은 붕괴열교환기 (DHX, Decay Heat Exchanger)를 통해 일차계통으로 전달.
- FHX를 연구하기 위해 축소 설계한 M-FHX를 **포함하고 있는 SELFA 실험장치를** 구축하여 실험을 통한 검증



< FHX >



< AHX >



< DHX >

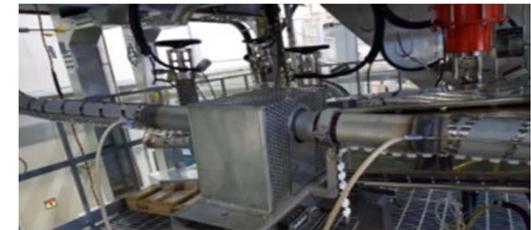
연구 방법

SELFA facility

- 원형로 FHX 성능을 보존하기 위해 유량과 열량을 축소 설계, 그 외 기하학적인 요소는 보존하도록 설계.
- **폐루프로 구성되어 있으며, 펌프와 Heater로 소듐을 순환 및 가열.**
- M-FHX는 튜브측과 셸측으로 나뉘며, 소듐과 공기가 열교환.
- 주요 Component 및 역할
 - 전자펌프 (EMP, ElectroMagnetic Pump) : 유량제어
 - 전자유량계 (EMF, ElectroMagnetic Flowmeter) : 유량계측
 - Loop heater : 소듐 가열 및 열교환기 입구온도 제어
 - Damper : 셸측 입출구 On/off valve



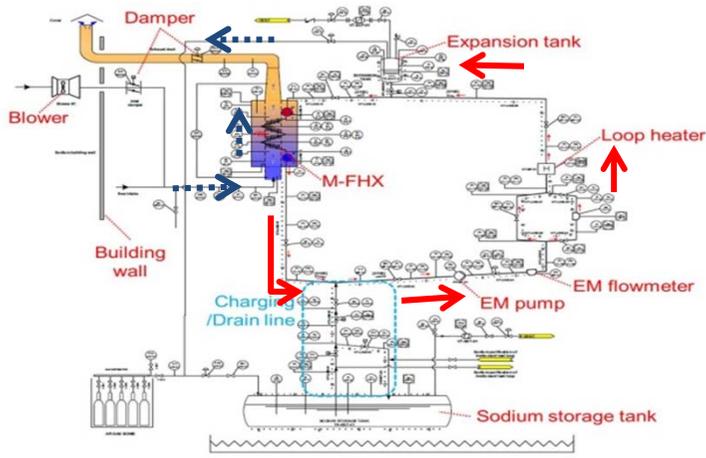
< EMP >



< EMF >



< Loop heater >



< SELFA P&ID >



< SELFA Facility >