히트파이프 제조/설계 및 전력변환계통 연계

극한환경 전력의 해법, 히트파이프 원자로 개발 현황

한국원자력학회 2026 추계 학술대회
경상북도 경주시 HICO, 2026년 10월 28일

김찬수
한국원자력연구원 고온원자로개발부 부장

KOREA ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE

KAERI 한국원자력연구원 Korea Atomic Energy Research Institute

목차

- 히트파이프 원자로 로드맵 및 과제 현황
- 히트파이프 설계 및 제조
- 히트파이프 집합체 시험
- 전력변환계통 연계
- 맺음말

01

히트파이프 원자로 연구개발 로드맵

건설허가 신청 운영허가 신청

-2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030- 2034

원자력융복합기술개발

- 히트파이프 원자로개념개발
- 히트파이프 원자로 기초 설계 기술
- 히트파이프 설계/제작 기술
- 개별 굽힘가공 히트파이프 개발/검증

극한환경 원자력 전원공급 시스템 기술 개발

- 히트파이프 원자력 전원공급 시스템 기본설계 체계구축
- 히트파이프 제조기술 개발 및 집합체 종합 검증 시험
- 핵연료 및 노심구조물 제조 및 평가기술 개발

후속 히트파이프 원자로 실증 사업

- 건설허가 신청 (기본설계 완료)
- 원자로 건설
- 운영허가 신청 (상세설계 완료)

창의형 융합연구사업

- 스털링 엔진 개발
- 히트파이프-스털링 연계 시험



NUSPACE Power

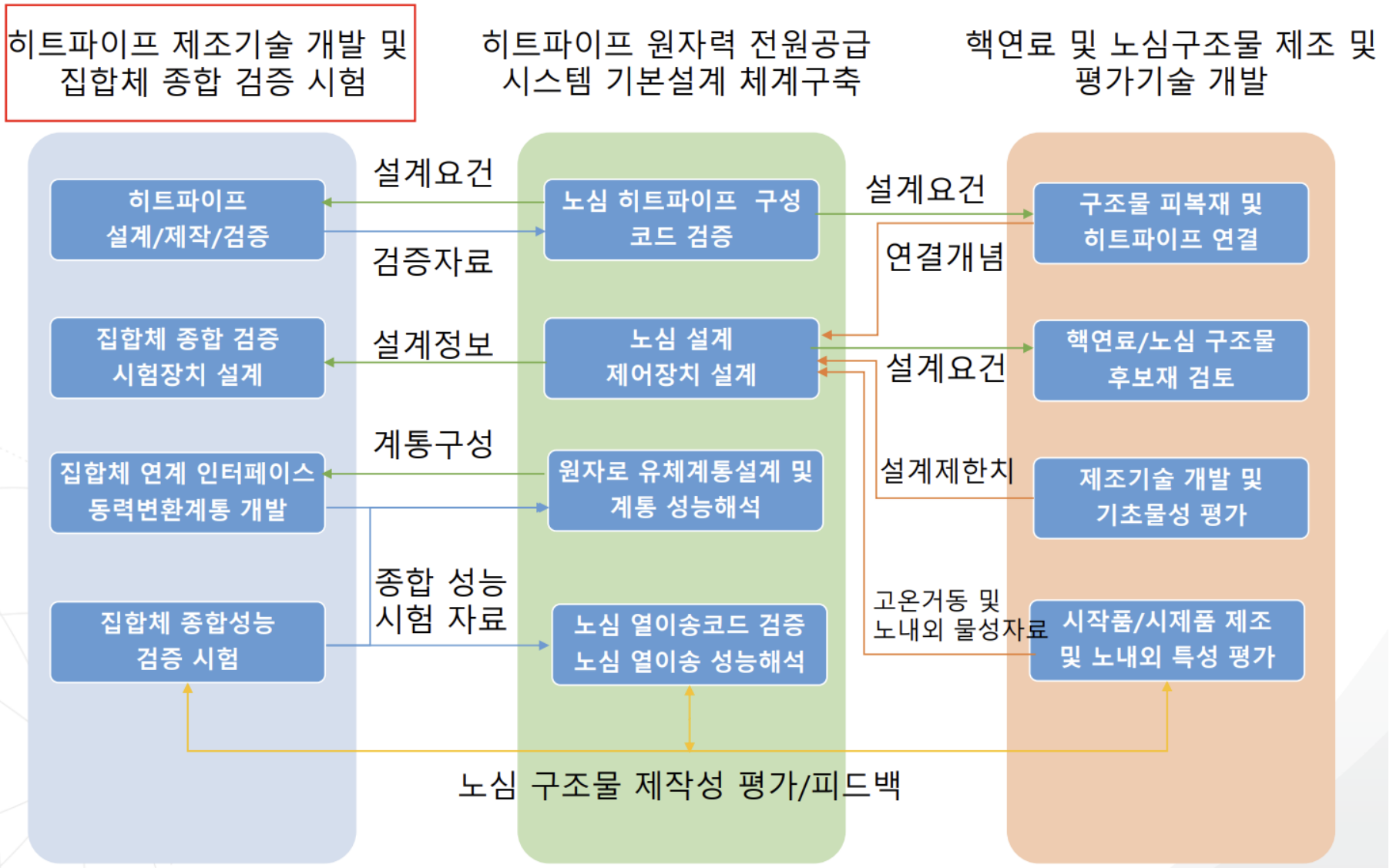
KAERI Korea Atomic Energy Research Institute



EXCORE Poerw

02

극한환경 원자력전원공급 시스템 기술 개발 사업



03

히트파이프 양산 및 집합체 시험 추진 체계



04

창의형융합연구 추진 체계 (스털링엔진 연계)

달기지 전력 생산용 히트피아프원자로 –스털링엔진 연계기술 개발

KAERI: 김찬수

우주용 히트파이프 구동 스털링엔진 계통설계 기술 개발 및 검증

KAERI: 김찬수

우주용 250We 스털링엔진 기술 개발

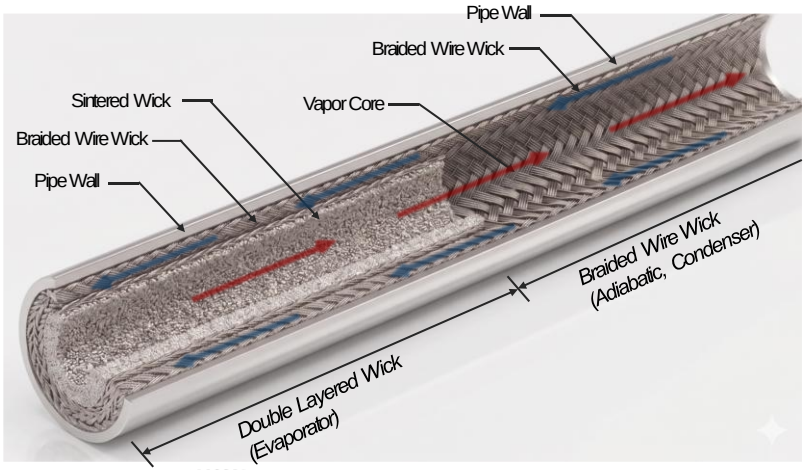
KIMM: 고준석

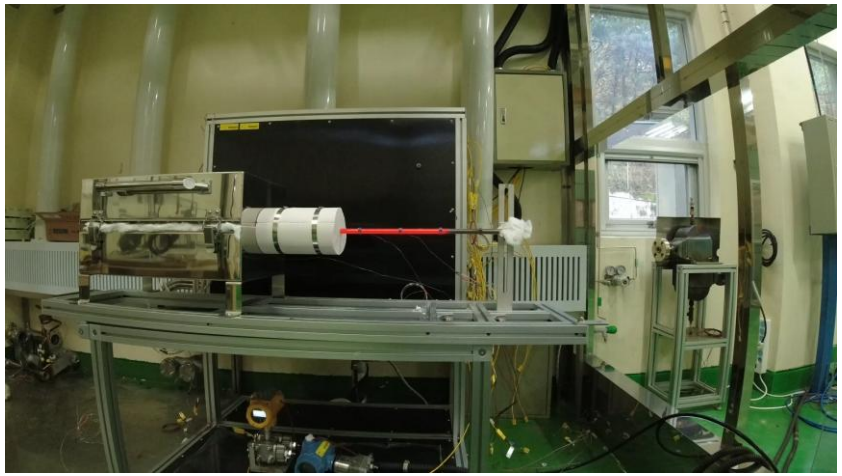
편조윅 기초물성치 자료 구축 및 히트파이프 설계 최적화

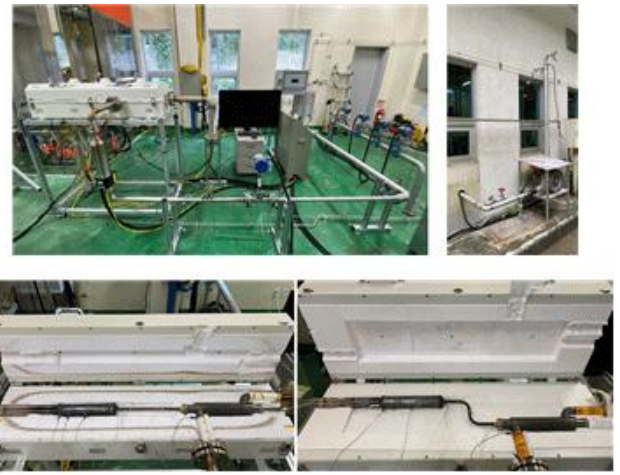
경희대: 김형대

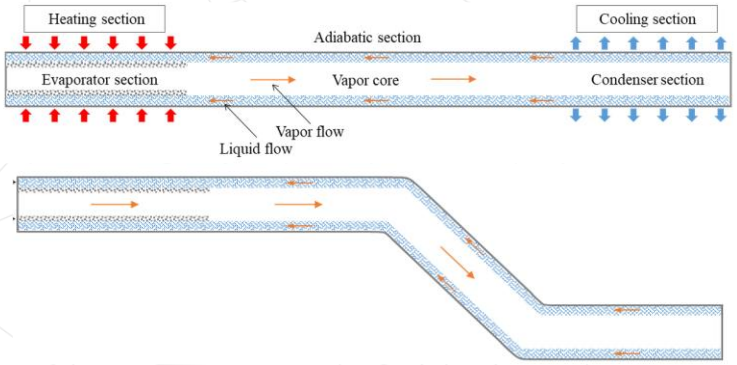
05

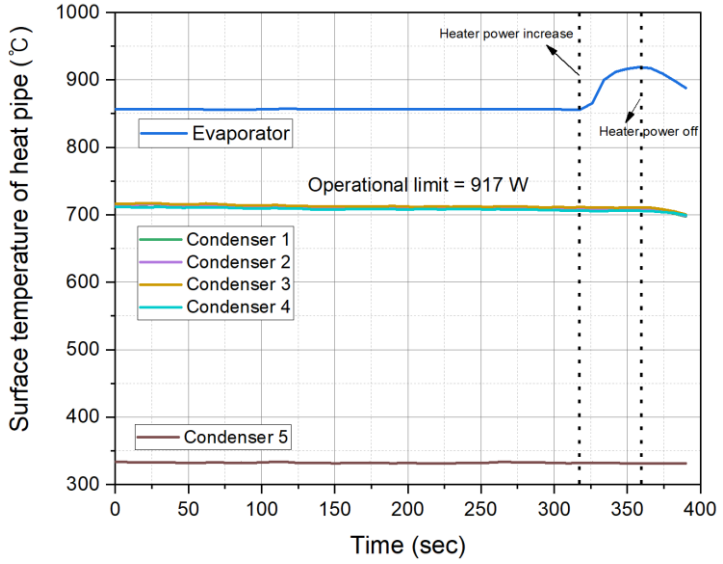
굽힘가공 가능한 히트파이프 혼합윅구조물 및 시험 결과

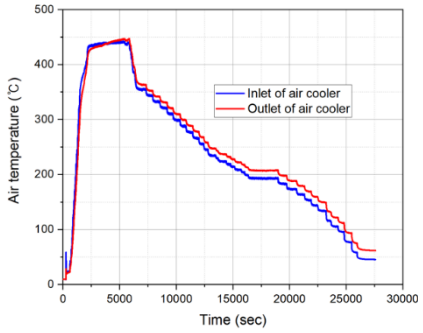


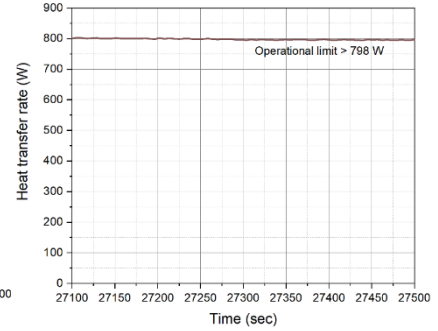












06

개별 히트파이프 성능 평가 및 개선

개별 히트파이프 차이점 분석 및 제조사 피드백



HP #9



HP #8



HP #7

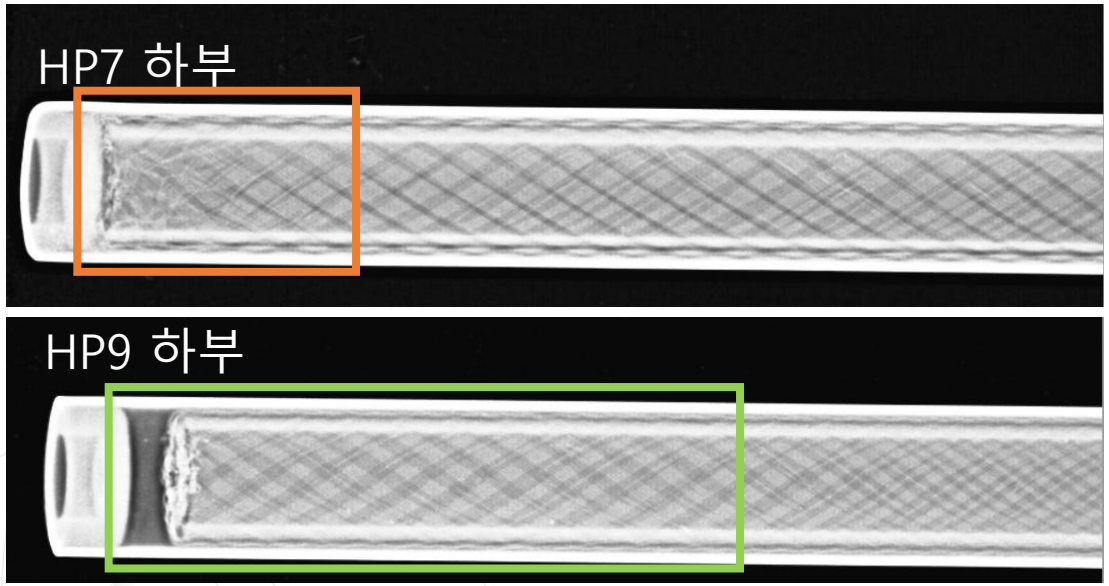
운전 특성 차이 분석

내부 구조 분석

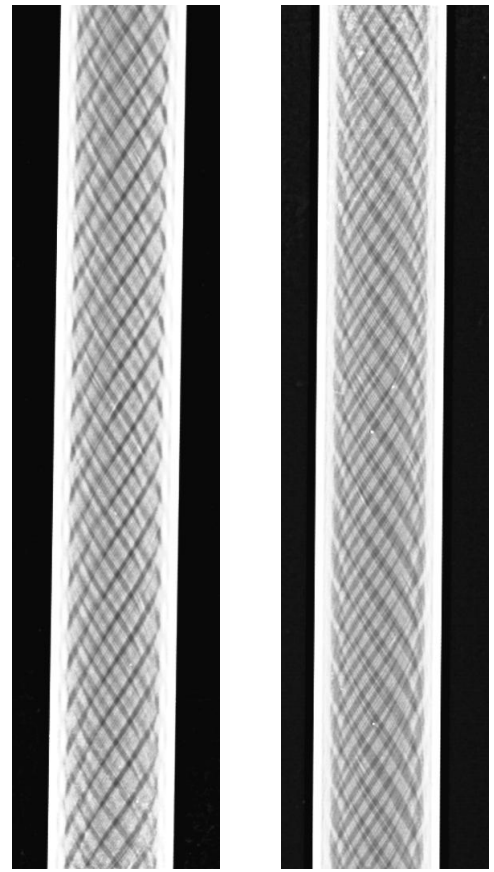
07

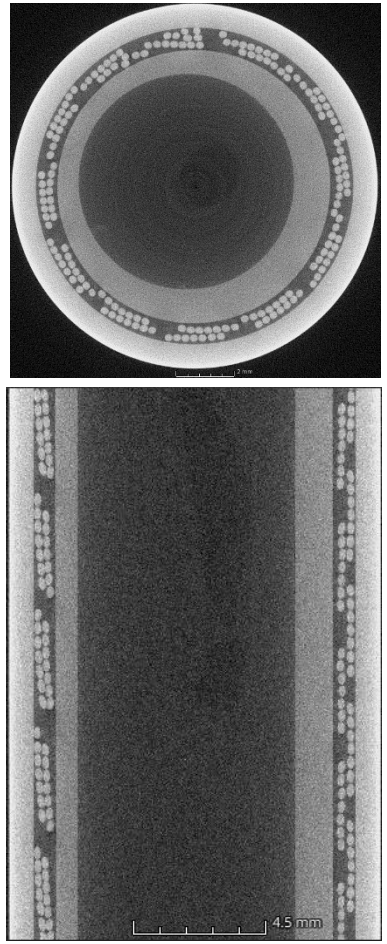
히트파이프 윅구조물 가시화

- 내부 구조 분석



HP9 상부 HP11 상부





윅 유지 윅 풀림

- 윅 구조물 마감 및 형상에 따른 성능 차이 존재
- 공동연구기관 협업을 통해 형상 일관성 확보

08

히트파이프 소듐 충전량 평가 및 운전한계 평가

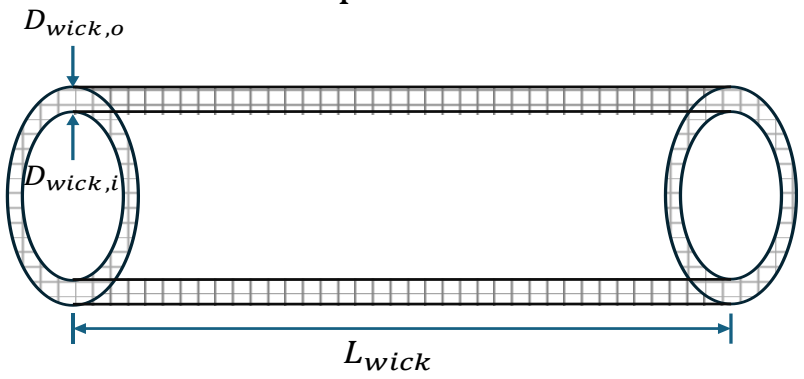
- 목적 : 극한환경 히트파이프 소듐 충전량을 평가
- 범위 : 길이 1m / 작동온도 700oC / 윅구조물 기공(pore)가 완전히 충전되는 상태를 정격(100%) 조건

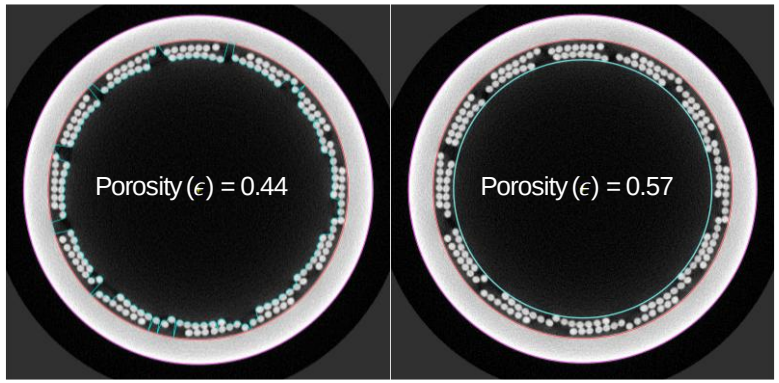
- 충전률(Filling Ratio, FR)

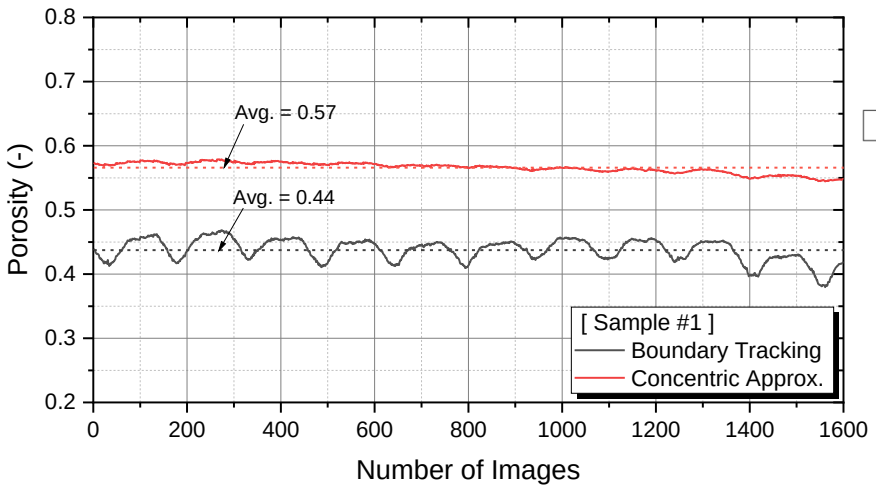
$$FR(\%) = \frac{V_{wick,fluid}}{V_{wick,pore}} = \frac{V_{wick,fluid}}{\epsilon \cdot V_{wick}}$$

where $porosity(\epsilon) = 1 - \frac{V_{wick,solid}}{V_{wick}}$

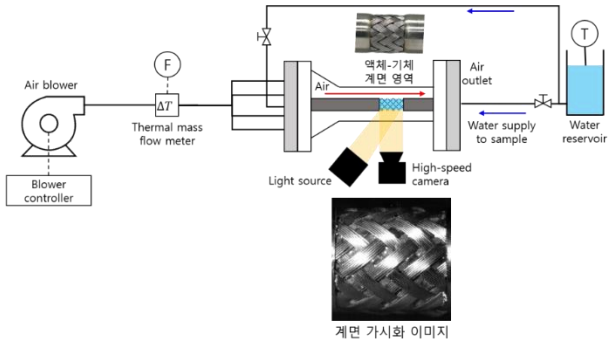
$$V_{wick} = \frac{\pi}{4}\left(D_{wick,o}^2 - D_{wick,i}^2\right) \cdot L_{wick}$$







← 편조윅 CT 이미지 평가결과, 윅구조 영역을 동심원으로 가정할 경우, **약 55 ~ 57%**의 기공률을 갖는 것으로 평가됨



경희대학교의 편조윅 비산한계 모델 개발 시험

09

히트파이프 탈기 및 작동 시험 장치 (대홍기업)

- 히트파이프 탈기 및 작동 시험 장치 다수 확보 (4 Zone 제어)

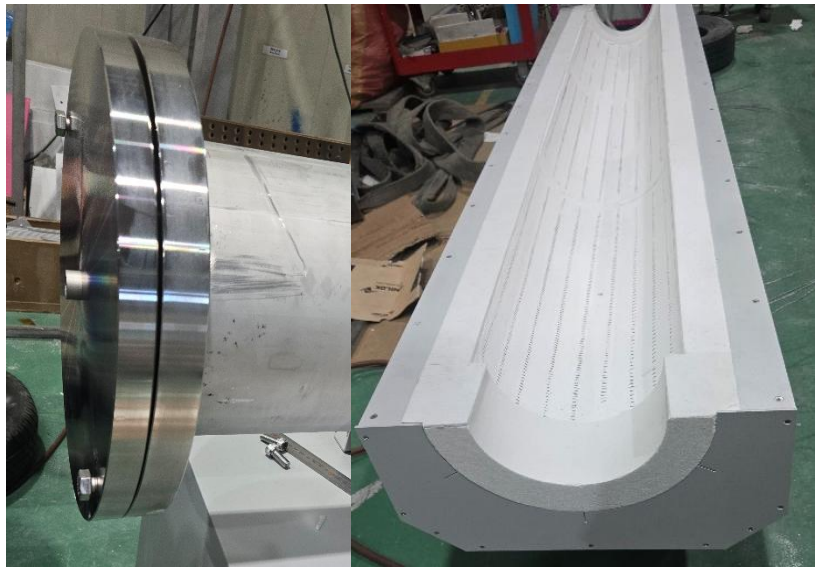


히트파이프 진공 탈기 장치 (대홍기업)

제작 중인 히트파이프 진공 탈기 장치 (2m 히트파이프)







히트파이프 진공 탈기 공정

진공도 1.2 x10-7 Torr



탈기 온도 : 800℃





고진공, 고온 탈기 전

고진공, 고온 탈기 후

비응축가스 제거 및 작동

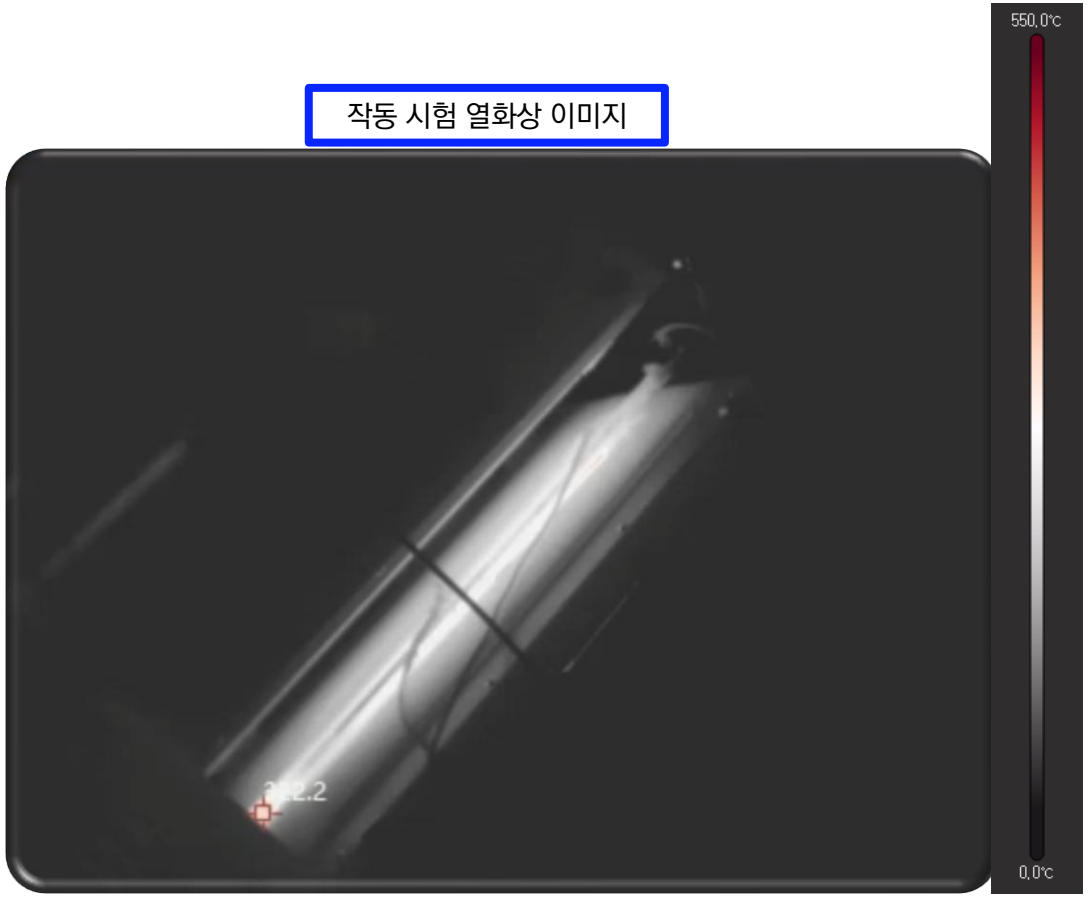
HP 3/4 inch
Braided



HP 3/4 inch
Screen+Artery

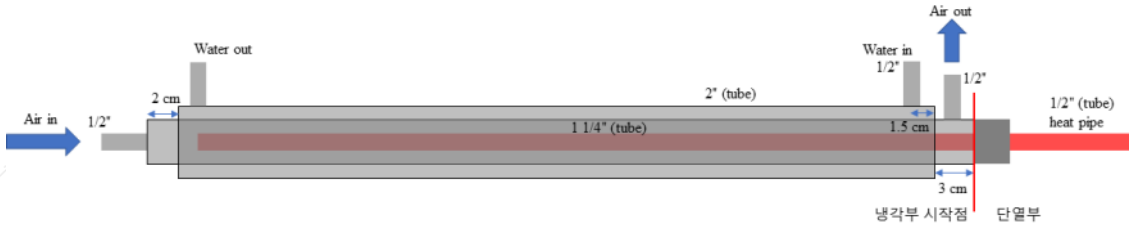


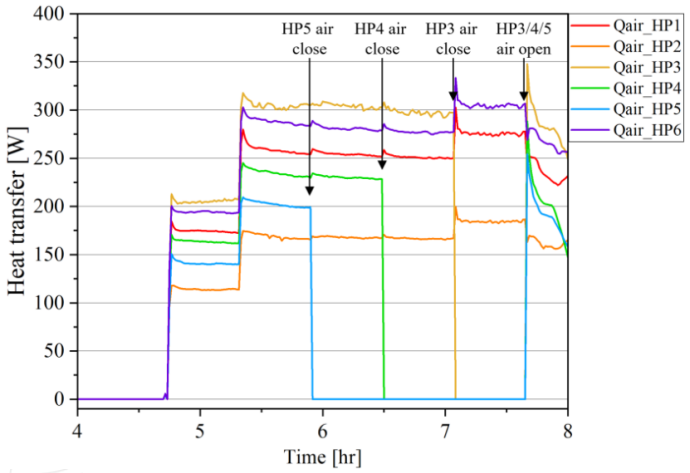
작동 시험 열화상 이미지

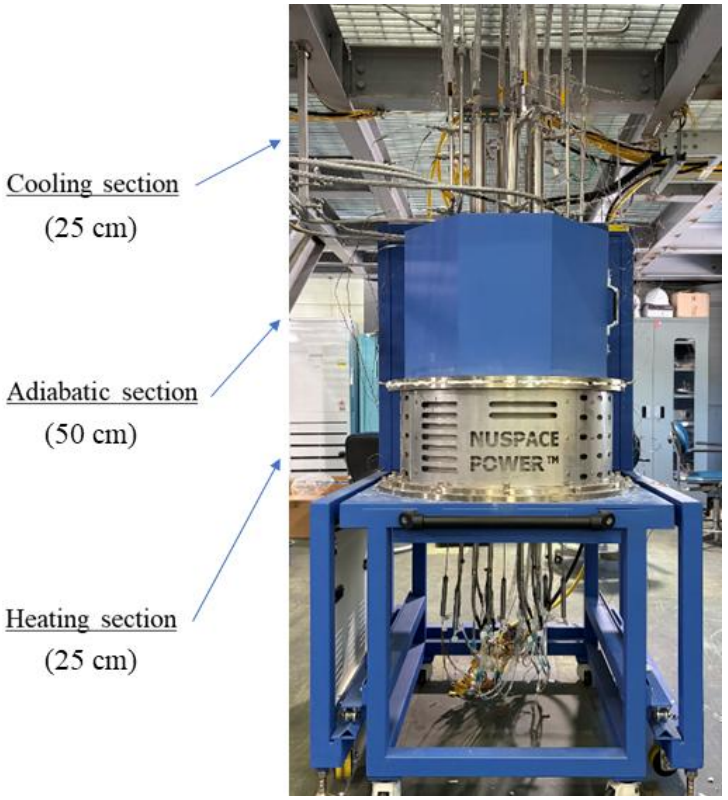


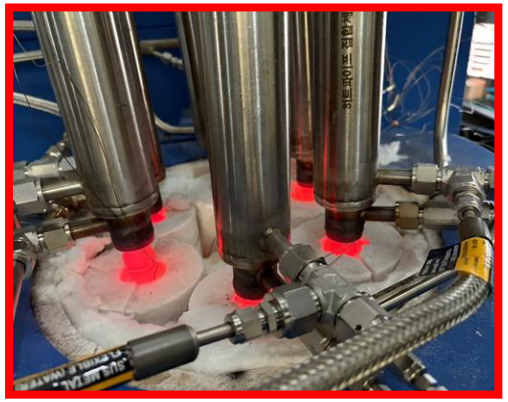
kW급 원자로 히트파이프 집합체 성능 시험











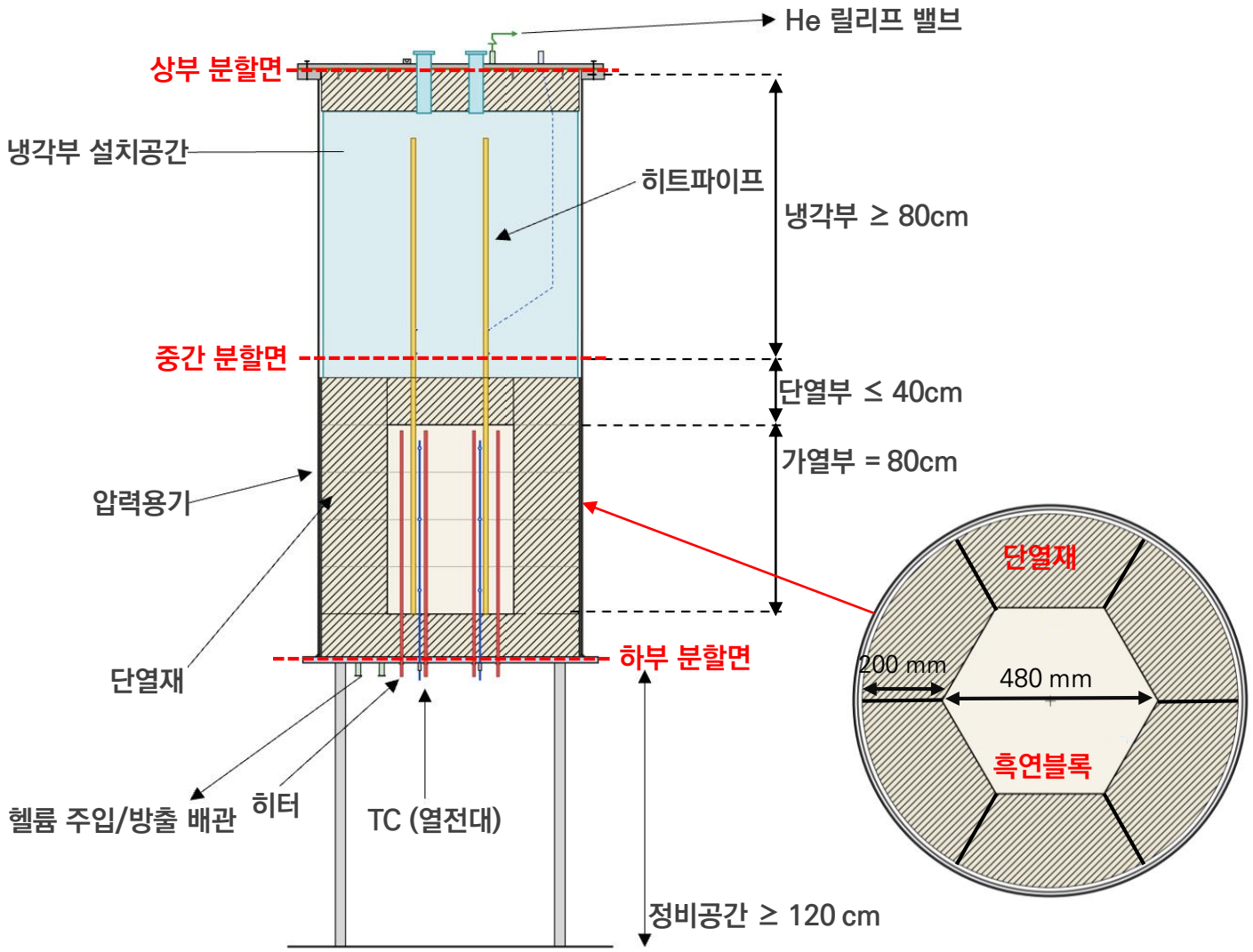
- 6 소듐 히트파이프
- 2.8 kWth 열제거
- 히팅 블록 내 온도 분포

히트파이프 집합체 종합성능 시험 장치 기계 설계

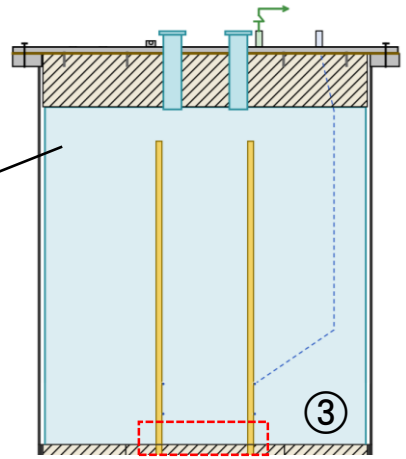
- 히트파이프 소재
  - 316L, 316H, Ni계 합금으로 단계적 전환 추진
  - 허용 응력 및 크립 수명 외 화학, 제작성, 경제성 등 고려하여 선정
- 기술 규격
  - ASME Sec.III Div.5 (304 SS, 316 SS)
  - ASME Sec.VIII Div.1 (304 SS, 316 SS, Haynes230
  - Haynes230이 가장 우수하나 SS재료도 코드 요건에 부합
  - 실험장치는 Sec.III Div.5 적용

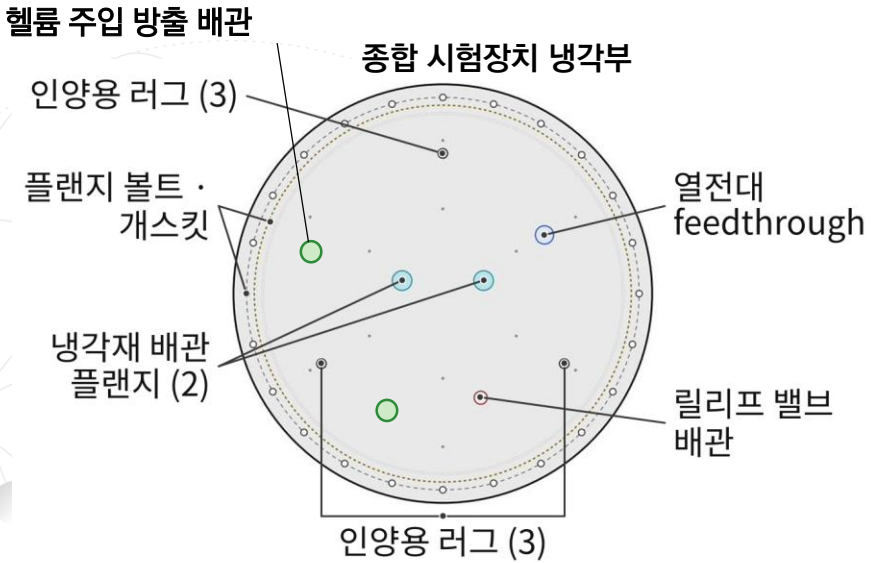
집합체 종합 검증 시험장치

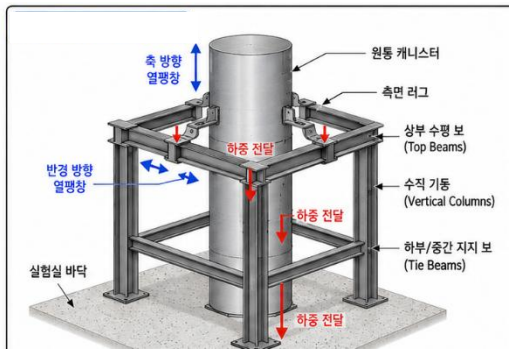
설계 값
설계 압력 / 온도: 2 bar(g) / 300 ℃, 헬륨
SS316L, 상·중·하부 분할 Ø946 / Ø966 mm, t 10 mm
너비 48 cm × 높이 80 cm
48 EA, Ø12.0 mm, 1,125 W (총 54 kW)
18 EA, Ø19.05 mm, 길이 2m, 700 ℃ · 3 kW
Ø1,186 mm, t 30 (용접) / 45 mm (볼팅)
세라믹 보드 (초안), 두께 200 mm



집합체 종합 검증 시험장치 냉각부 연계 고려 사항





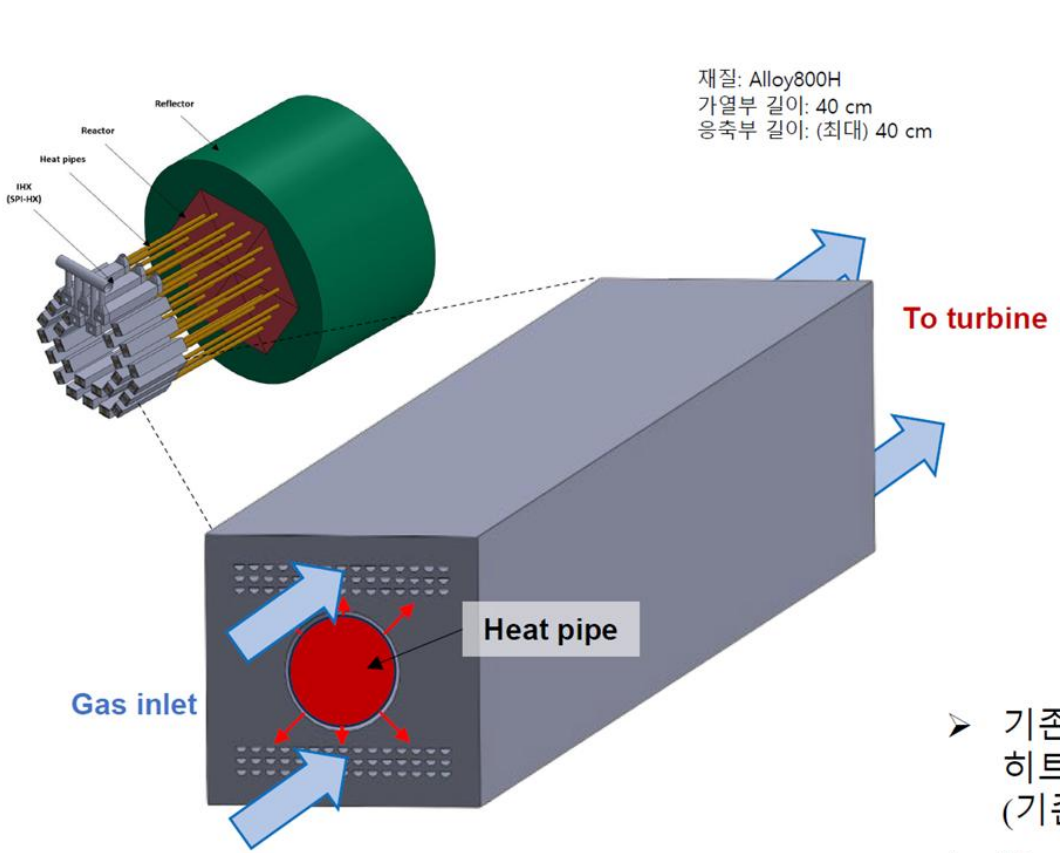


② 외부 프레임 지지 예시

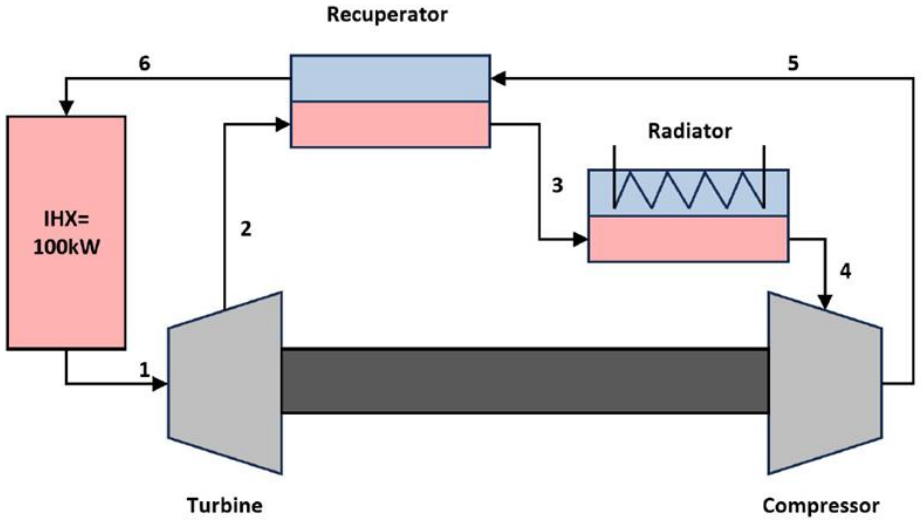
	냉각부 설계에 따른 항목	설계 고려 사항
①	냉각부가 압력용기 내부에 위치 가능 여부	상부 head 사용 여부 압력용기 높이/두께 재설정
②	냉각부 높이 · 배치 · 무게	냉각부 지지 방식 (외부 프레임 사용 / 하부 Plate 단독)
③	히트파이프–냉각부 체결 방식	냉각부가 압력용기 내부일 때: 지지판, 클램프 거치 냉각부가 압력용기 외부일 때: 관통부 체결(밀봉) 반영

동력변환계통 사이클 및 열교환기 설계 (1)-POSTECH

IHX: Intermediate heat exchanger
SPI-HX: Single pipe integrated heat exchanger



<히트파이프 원자로 & SPI-HX 중간열교환기 예상도>



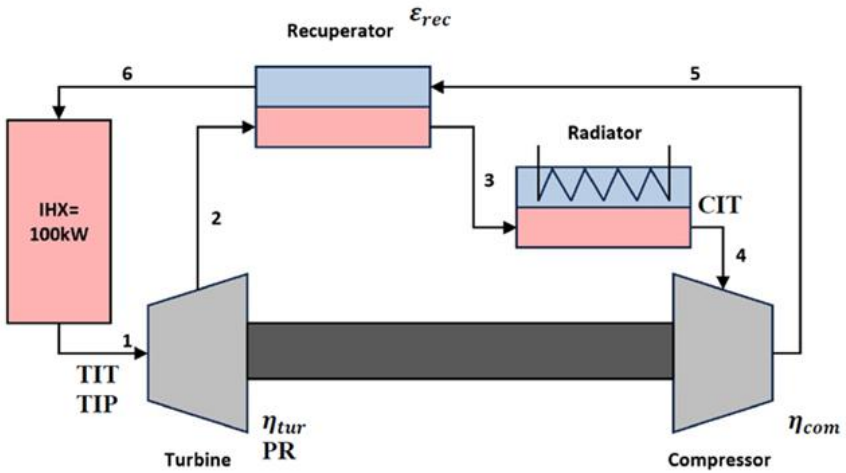
<N_2 브레이튼 사이클 레이아웃>

- 기존 열교환기 방식의 낮은 유용도 및 높은 중량을 가지는 문제점 개선을 위해 히트파이프 개당 분리하여 밀집된 중간열교환기로 디자인 수정 (기존대비 무게 약 70% 감소)
- N_2 브레이튼 사이클 레이아웃으로 재생기가 있는 1C1T 레이아웃 선정 → 사이클 분석을 통한 설계 지점 계산

동력변환계통 사이클 및 열교환기 설계(2)-POSTECH

동력변환계통 사이클 코드 및 최적화 조건

CIT: Compressor inlet temperature
PR: Pressure ratio
TIT: Tubine inlet temperature
TIP: Tubine inlet pressure



<N_2 브레이튼 사이클 레이아웃>

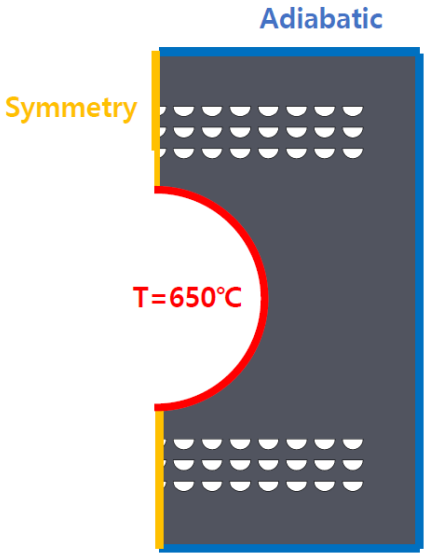
< 사이클 열효율 최적화 계산을 위한 입력 변수들 >

	Input parameter	Value
IHX (Intermediate heat exchanger)	q	100 kW_{th}
	ΔP	10 kPa
Turbine	TIT	530 - 730 °C
	TIP	10 – 30 bar
	PR	1.4 – 2.4
	η	0.85
Compressor	T_{in}	27 °C
	η	0.82
Recuperator	ε	0.95
	ΔP	5 kPa
Pre-cooler	ΔP	5 kPa

- 사이클 인하우스 코드 (MATLAB 기반)를 통한 최적 지점 계산
- IHX 열전달량, 터보 기계 효율 등 고정 입력값 선정
- TIT, TIP, PR 변수에 따른 사이클 효율 민감도 분석으로 사이클 최적 지점 계산
- TIT를 630 °C로 설정, TIP, PR에 따른 최적화, 이후 TIP에 따른 민감도 분석 진행

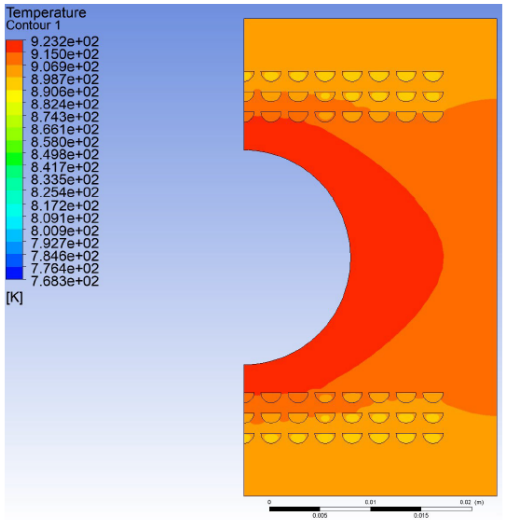
동력변환계통 사이클 및 열교환기 설계(3)-POSTECH

- **히트파이프 통합형 열교환기 성능 평가**

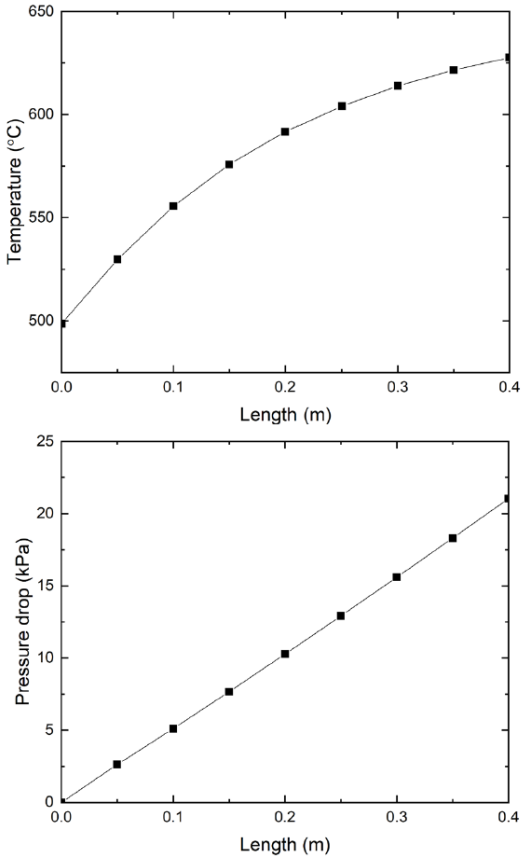


Parameters	Value
Inlet temperature	495 ℃
Outlet pressure	19 bar
flow rate	0.66 kg/s
# Channel layers (#Channel / 1 layer)	**6 (15)**

<중간열교환기 경계조건 및 채널 유동 조건>



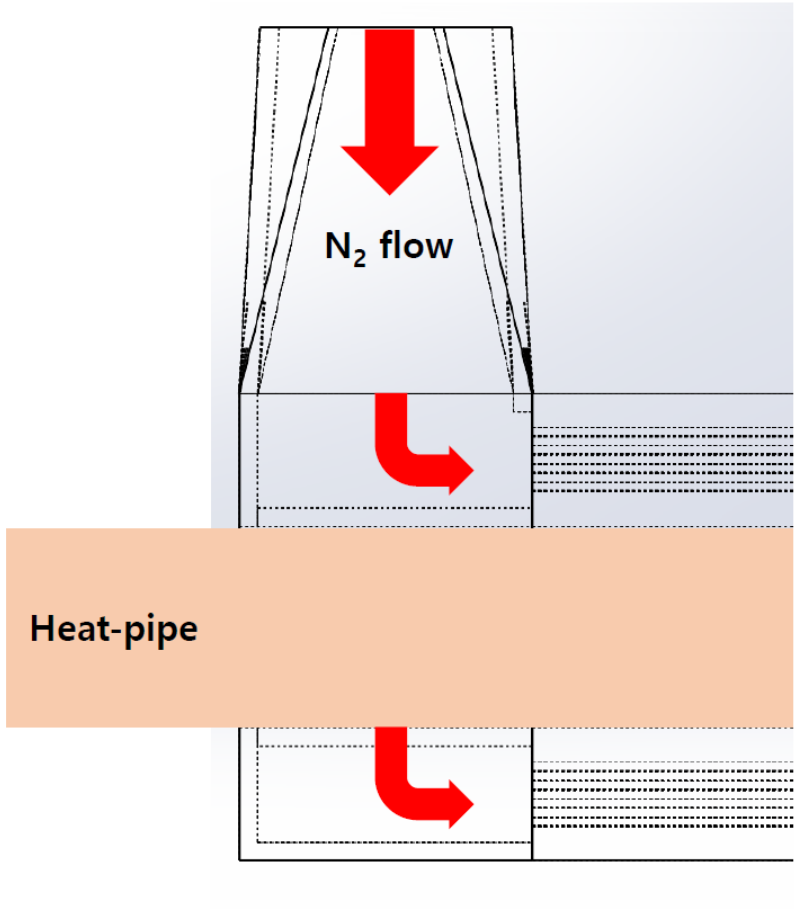
<중간열교환기 온도 분포>



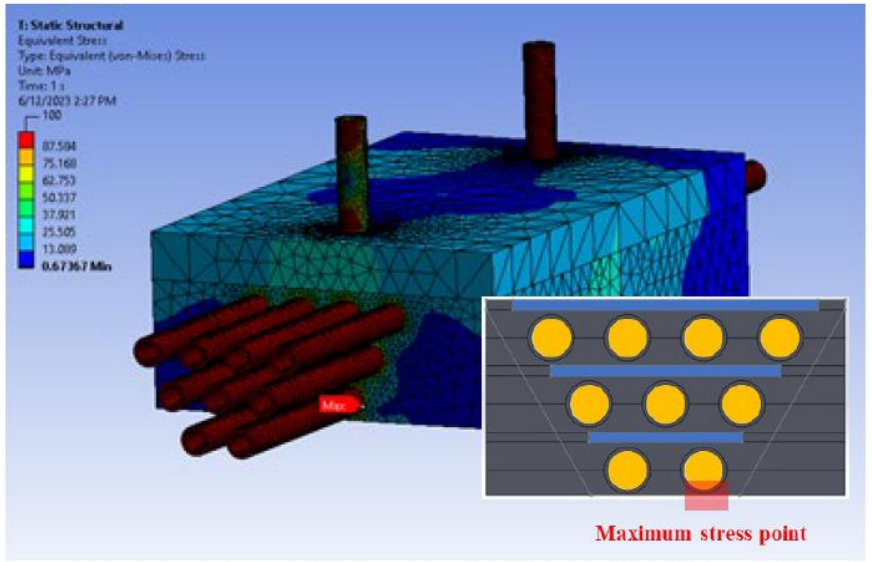
<중간열교환기 길이에 따른 출구 온도, 압력강하>

- **CFD(ANSYS CFX)**를 통한 열교환기 내 열전달 및 압력강하 평가 수행
- 길이에 따라 열전달면적이 증가함에 따라 출구 온도가 상승함
- 0.4 m 기준으로 **출구온도** 628 ℃ 도달 (유용도 86% , 사이클 효율 약 36 %)
- **압력강하**는 최대 21 kPa로 사이클 압력의 1.1 % 수준으로 확인

동력변환계통 사이클 및 열교환기 설계(4)-POSTECH



< 열교환기 헤더 개념도 >



<중간열교환기 구조건전성 평가 예시>

맺음말

- 히트파이프는 안전등급 기기는 아니나, 원자로 성능의 핵심 기기
- kW급 원자로에 적합한 굽힘 가공 가능한 히트파이프 열성능 입증
- 대흥기업과 협업으로 히트파이프 제조 양산기술 개발
- 냉각 개별 히트파이프 집합체 시험 수행 중
- kW급에서 100kW급 원자로 실증이 가능한 전력변환계통 연계 기술 개발 중
  - 스털링엔진 연계, 브레이튼 사이클 연계
- 미국 제외 히트파이프 기술은 낮은 TRL





kcs1230@kaeri.re.kr