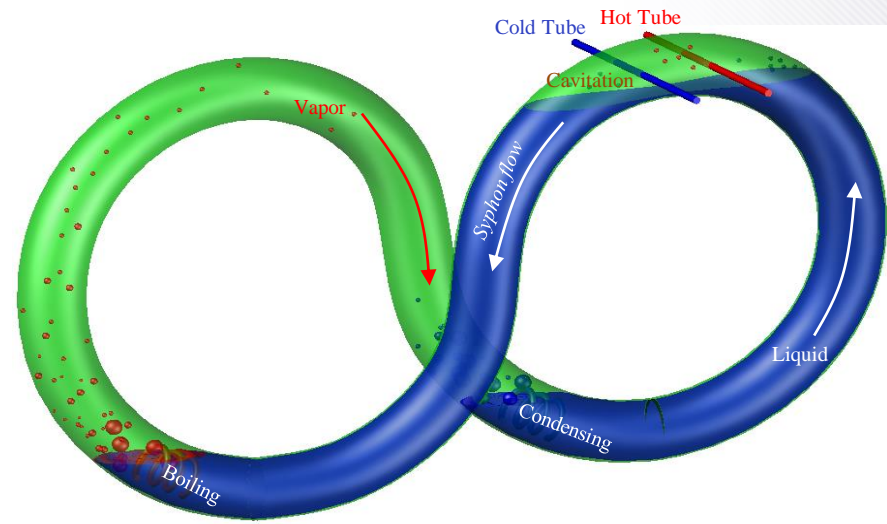


Passive Infinite (PX) Cooling based on Two-step Thermosiphon

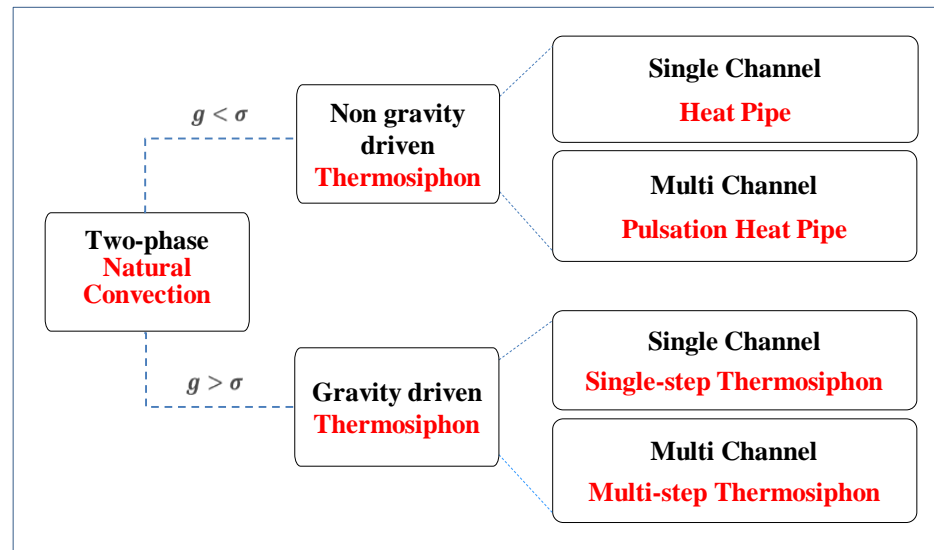
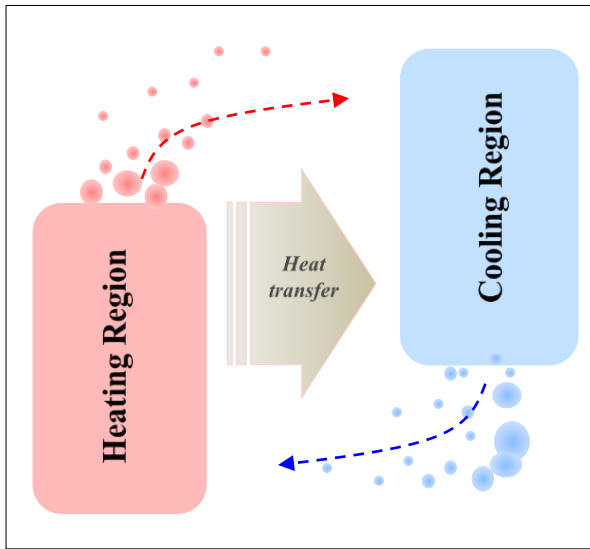
1. 개요
2. Multi-step thermosiphon
3. Two-step Thermosiphon
4. 검증 해석
5. PX : Asymmetric Two-step Thermosiphon의 SMR 적용
6. 요약



01 개요

상변화에 의한 자연 대류 열교환 방식 (Thermosiphon)

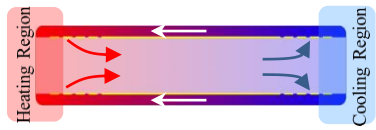
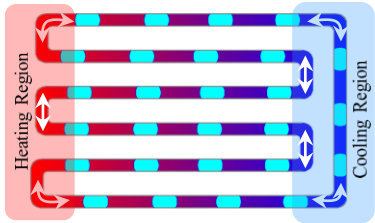
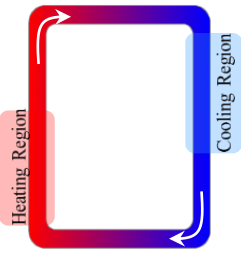
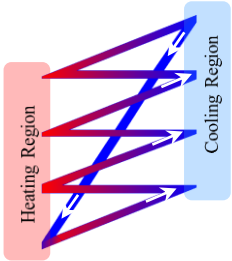
1. 고온에서 저온으로의 열전달 능력의 극대화는 비등과 냉각에 의한 열교환방식이 최적임
 - 1) 미세한 구조에서 열교환은 표면장력을 활용한 순환유동으로 이루어짐
 - 2) 비교적 큰 구조에서의 열교환방식은 중력장(원심력)에서 밀도차를 이용하는 방식
2. 단일 채널보다는 다중채널에 의한 열교환방식이 보다 효과적임.
 - 1) Single Heat Pipe < Pulsating Heat pipe
 - 2) Single-channel (Single-step Thermosiphon) < Multi Channel (*Multi-step Thermosiphon*)

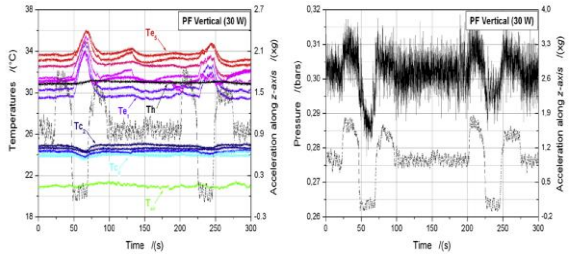


01 개요

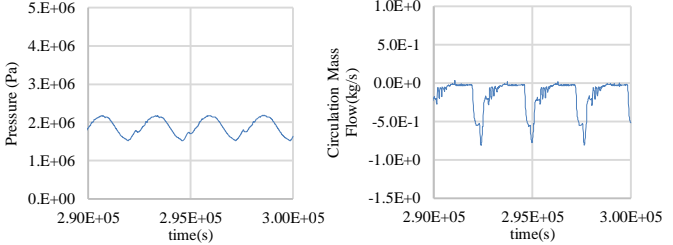
Thermosiphon 의한 열교환방식

- 1. Single-channel circulation : Single-step phase change
 - ✓ Heat pipe : Single-step thermosiphon
- 2. Multi-channel circulation : Multi-step phase change
 - ✓ Pulsating heat pipe : Multi-step thermosiphon

	Single-channel	Multi-channel
$g < \sigma$	 <p style="text-align: center;">Heat Pipe</p>	 <p style="text-align: center;">Pulsation Heat Pipe</p>
$g > \sigma$	 <p style="text-align: center;">Single-step Thermosiphon</p>	 <p style="text-align: center;">Multi-step Thermosiphon</p>



Experimental study of a closed loop flat plate pulsating heat pipe under a varying gravity force. *Int. J. Thermal Sciences* 96 (2015) 23-34



[1] P. Dunn and D. A. Reay, "Heat pipes." Pergamon press, 1978.
 [2] Amir Faghri, "Heat pipe science and technology." Taylor & Francis, 1995.
 [3] B.Y. Tong, T.N. Wong and K.T. Ooi, "Closed-loop pulsating heat pipe," *Applied Thermal Engineering*, 21, pp. 1845-1862, 2001

02 Multi-step Thermosiphon

Multi-step Thermosiphon 이론적 연구 (포화온도 영역기준)

- ❖ 고온에서 저온으로의 열교환 능력의 비교를 위한 열원과 열침원 Discretize
 - 1) N 개의 열원과 열침원 : Multi-step thermosiphon 모의를 위한 개수
 - 2) 각각의 열원과 열침원의 용량은 동일함
 - 3) Single-channel (Single-step phase change) : Top 포화상태
 - 4) Multi Channel (Multi-step Thermosiphon) : 각 step에서 포화상태

Saturated Liquid-Vapor Region, Full evaporation & Condensing Condition ($\rho_o^n = \rho_x^1$), $n \geq 2$			
	Single-step thermosiphon	Multi-step thermosiphon	Ratio
Flow rate (\dot{m})	$\left(\frac{2\bar{\rho}A^2}{f} g(\rho_o^0 - \rho_o^n) \Delta y \right)_o^{1/2}$	$\left(\frac{2\bar{\rho}A^2}{f} n g(\rho_x^0 - \rho_x^1) \Delta y \right)_x^{1/2}$	$\frac{\dot{m}_x}{\dot{m}_o} = n^{1/2}$
Total heat exchange power ($\sum Q^i$)	$\dot{m}_o \frac{h_{fg,o}}{\rho_{fg,o}} (\rho_o^0 - \rho_o^n)$	$n \dot{m}_x \frac{h_{fg,x}}{\rho_{fg,x}} (\rho_x^0 - \rho_x^1)$	$\frac{\sum Q_x^i}{\sum Q_o^i} = n^{3/2}$

Mass Balance Equation : $f \frac{\rho}{2} v^2 = \phi \Delta p$

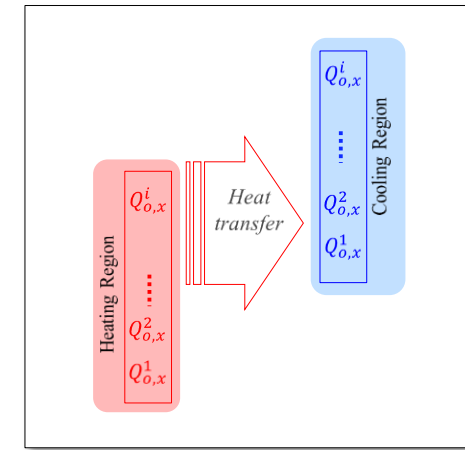
Energy Balance Equation : $Q = \dot{m} \Delta h$

$$\phi \Delta p_o = g[(\rho_o^0 + \rho_o^1 + \dots + \rho_o^{n-1}) - (\rho_o^1 + \rho_o^2 + \dots + \rho_o^n)] \Delta y$$

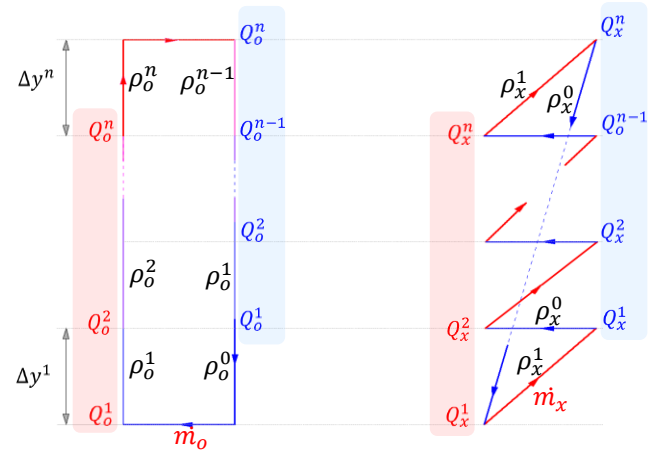
$$\phi \Delta p_x = g[(\rho_x^0 - \rho_x^1) + (\rho_x^1 - \rho_x^2) + \dots + (\rho_x^{n-1} - \rho_x^n)] \Delta y$$

$$\sum Q_o^i = \dot{m}_o \left[\frac{(\rho_o^0 - \rho_o^1)}{\rho_{fg,o}} h_{fg,o} + \frac{(\rho_o^1 - \rho_o^2)}{\rho_{fg,o}} h_{fg,o} + \dots + \frac{(\rho_o^{n-1} - \rho_o^n)}{\rho_{fg,o}} h_{fg,o} \right]$$

$$\sum Q_x^i = \dot{m}_o \left[\frac{(\rho_x^0 - \rho_x^1)}{\rho_{fg,x}} h_{fg,x} + \frac{(\rho_x^1 - \rho_x^2)}{\rho_{fg,x}} h_{fg,x} + \dots + \frac{(\rho_x^{n-1} - \rho_x^n)}{\rho_{fg,x}} h_{fg,x} \right]$$



Single-step thermosiphon Multi-step thermosiphon

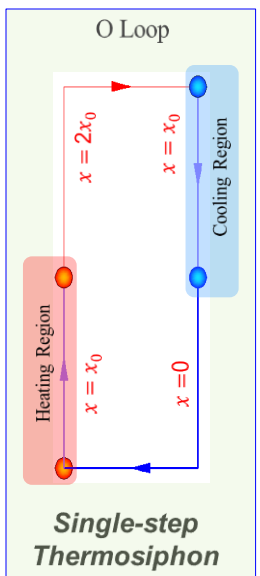


03 Single & Two-steps thermosiphon

활용가능 범위 경우의 열교환 방식 : $n = 2$, Vapor mass fraction $\alpha < 1$

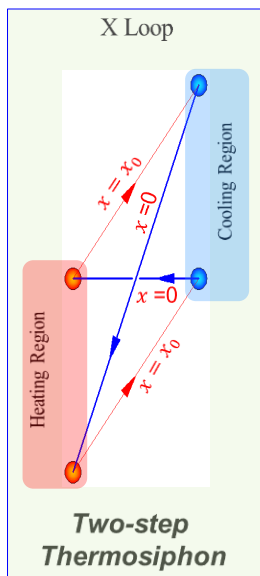
- Single step-thermosiphon : O loop, Two-Step thermosiphon : X loop
- 초기 포화상태 물에서 서서히 가열하여 최종 정상상태에서의 열교환 능력 비교

Steam T-s Graph



Average vapor fraction

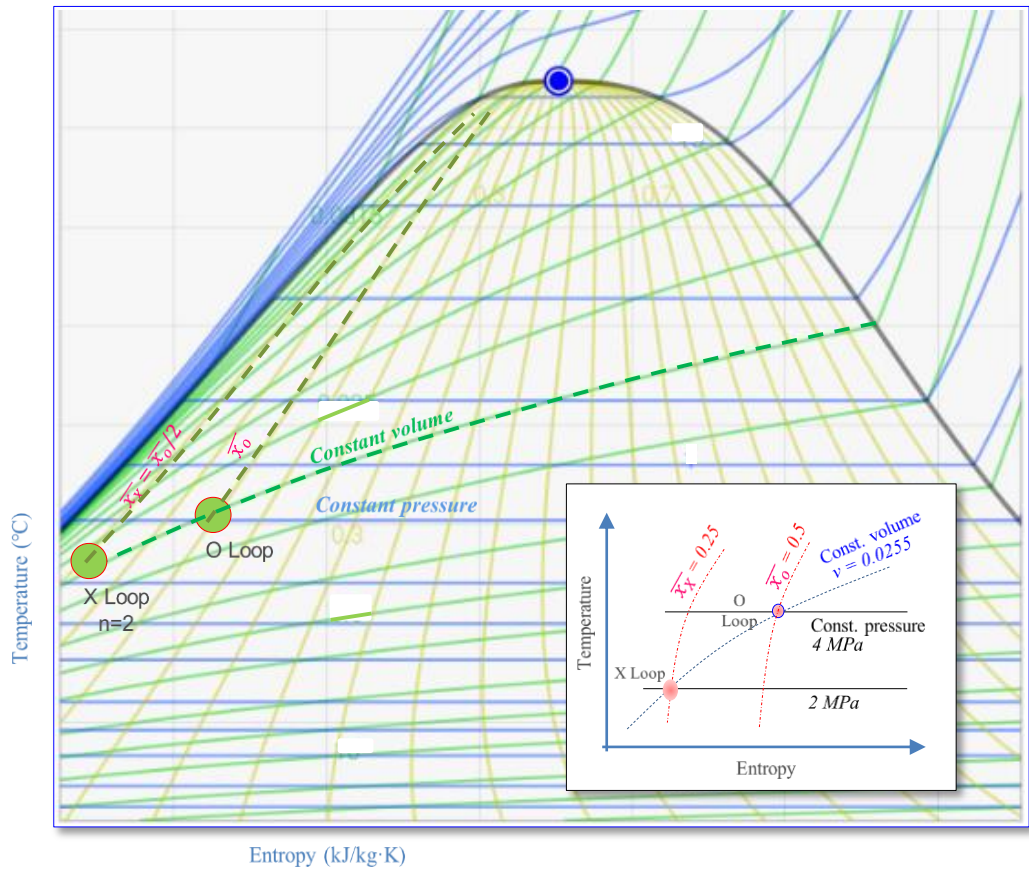
$$\bar{x}_O = \frac{x_0 + 2x_0 + x_0 + 0}{4} = x_0$$



Average vapor fraction

$$\bar{x}_X = \frac{x_0 + x_0 + 0 + 0}{4} = \frac{x_0}{2}$$

- O & X loop thermosiphons 열교환 비교 조건**
1. 각 계통의 초기 조건 동일
 2. 각 계통의 경계 조건 동일
 3. 각 열원과 열침원 크기 동일
 4. Loop의 폭은 높이에 비하여 작음
- Heating, ● Cooling

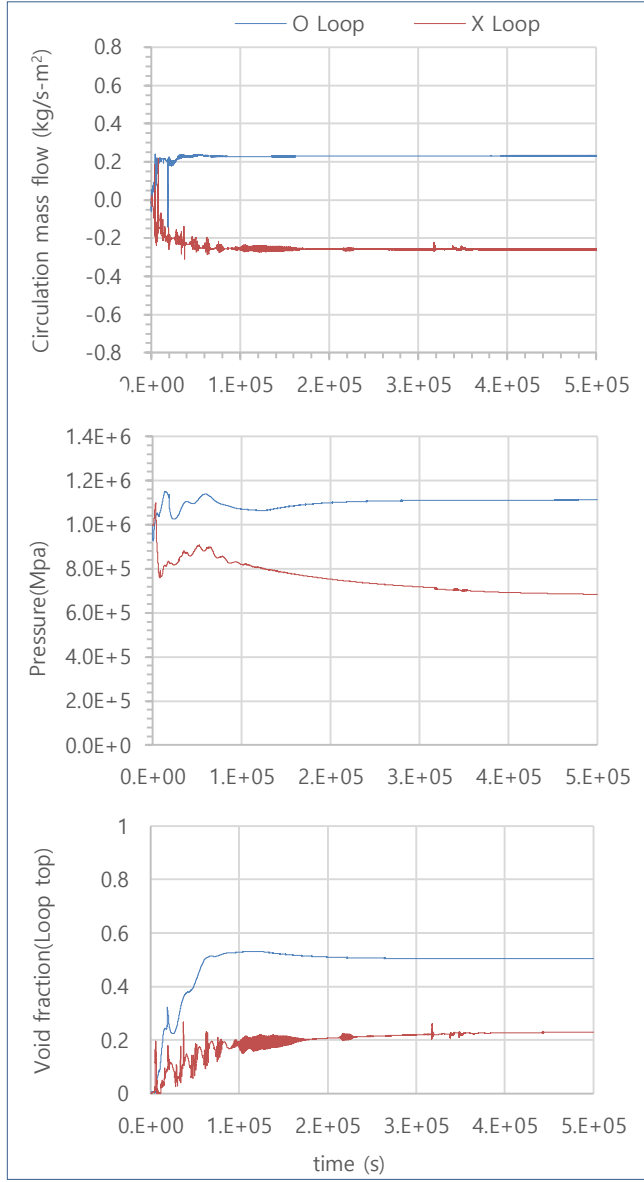
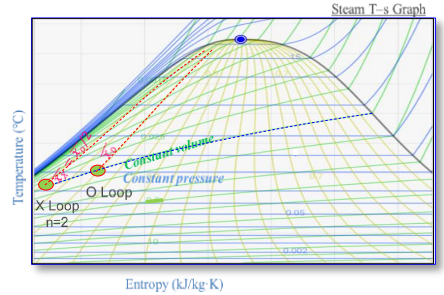
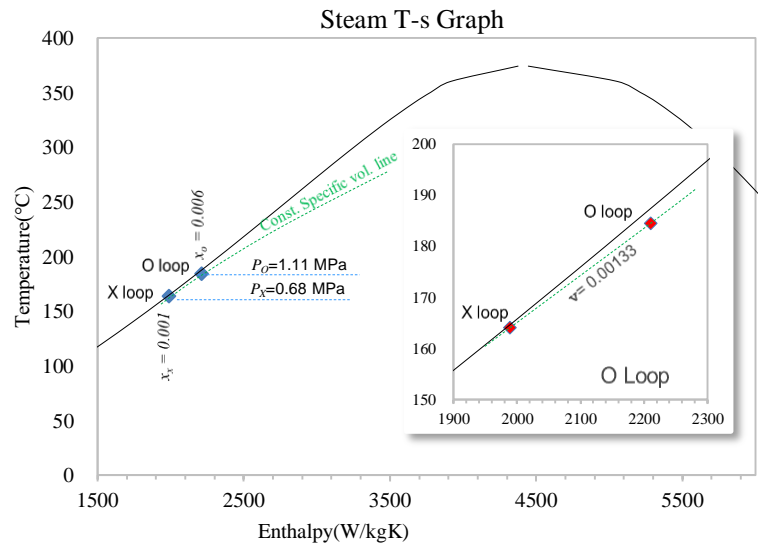
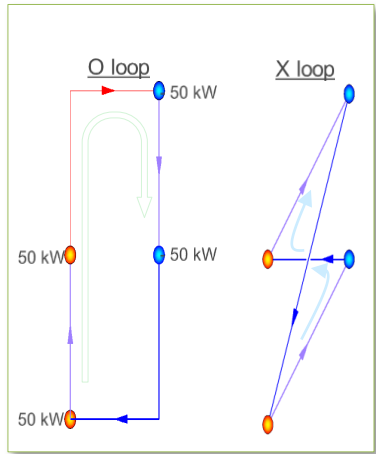


각 계통에 동일한 가열과 냉각으로 최종 정상상태 도달 후 압력과 온도 상태를 증기표 상에 나타냄 (A와 B 계통의 정상상태 최종 가열/냉각율은 A계통의 상부가 완전 비등이 일어나는 조건)

03 Single & Two-steps thermosiphon

Code Simulation Results (MARS code Ver. 1.5)

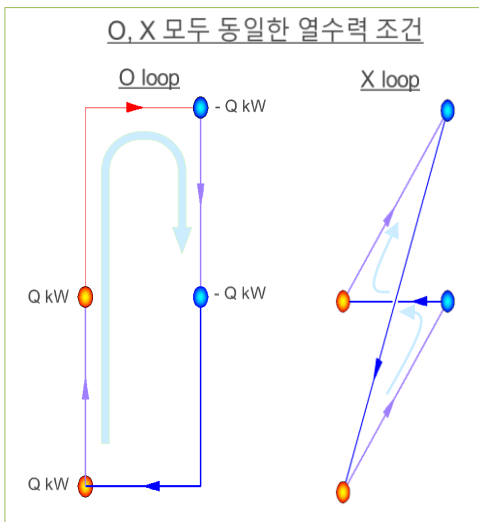
1. 초기조건 : 1.0 MPa, 포화온도 조건의 물상태
2. 경계조건 : 각 열원(열침원) 출력은 50 kW (Total 100kW)
3. 계산 안정성을 고려하여 가압기를 계통 상부에 부착
 ✓ 가압기 체적은 전체 체적의 15%
4. 계산 종료시 각 Loop 의 Total mass & energy errors $\approx 0.1\%$



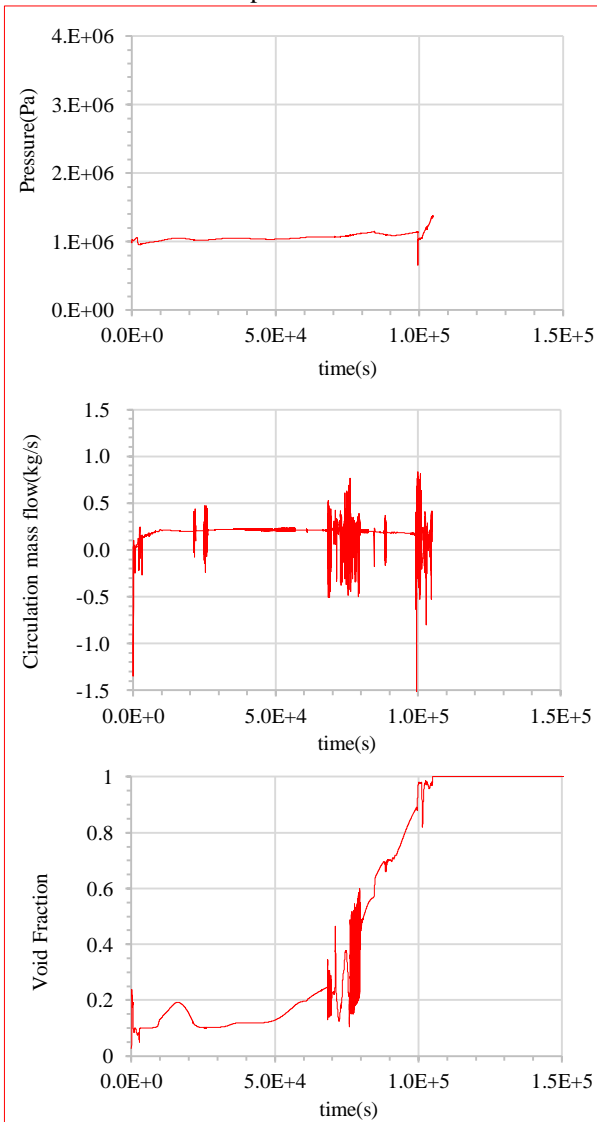
03 Thermosiphon 비교 해석 (Single-step Thermosiphon : O loop) (Two-step Thermosiphon : X loop)

출력에 따른 순환 유동 형태 비교

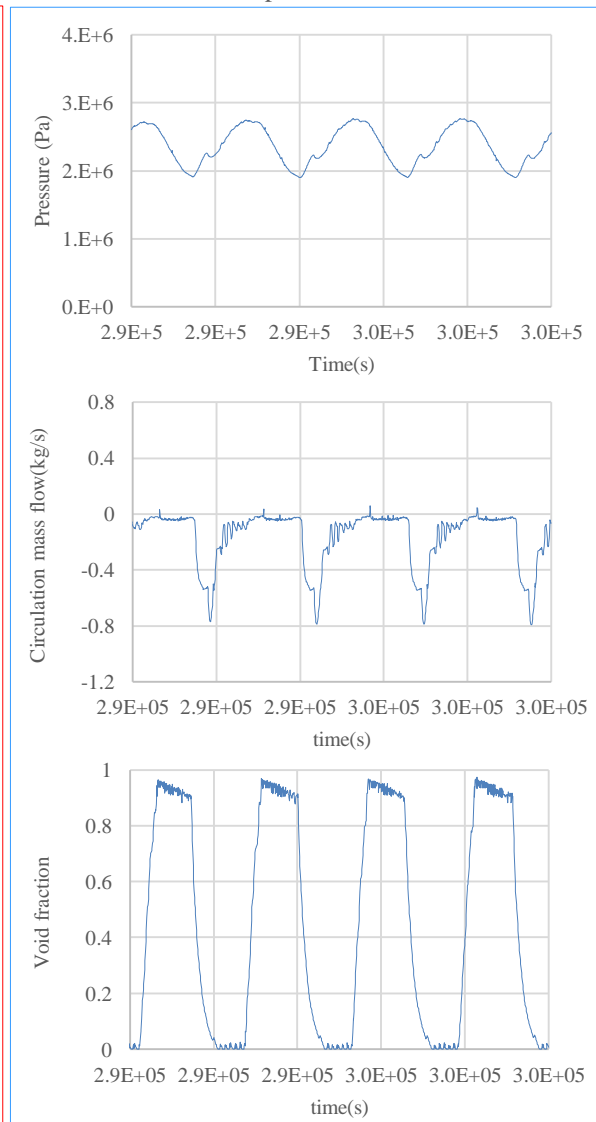
Power	O Loop	X Loop
150kW	Stable	Stable
200kW	Local dry out	Start Pulsation
300kW		Pulsation
350kW		Pulsation
450 kW		Local dry out



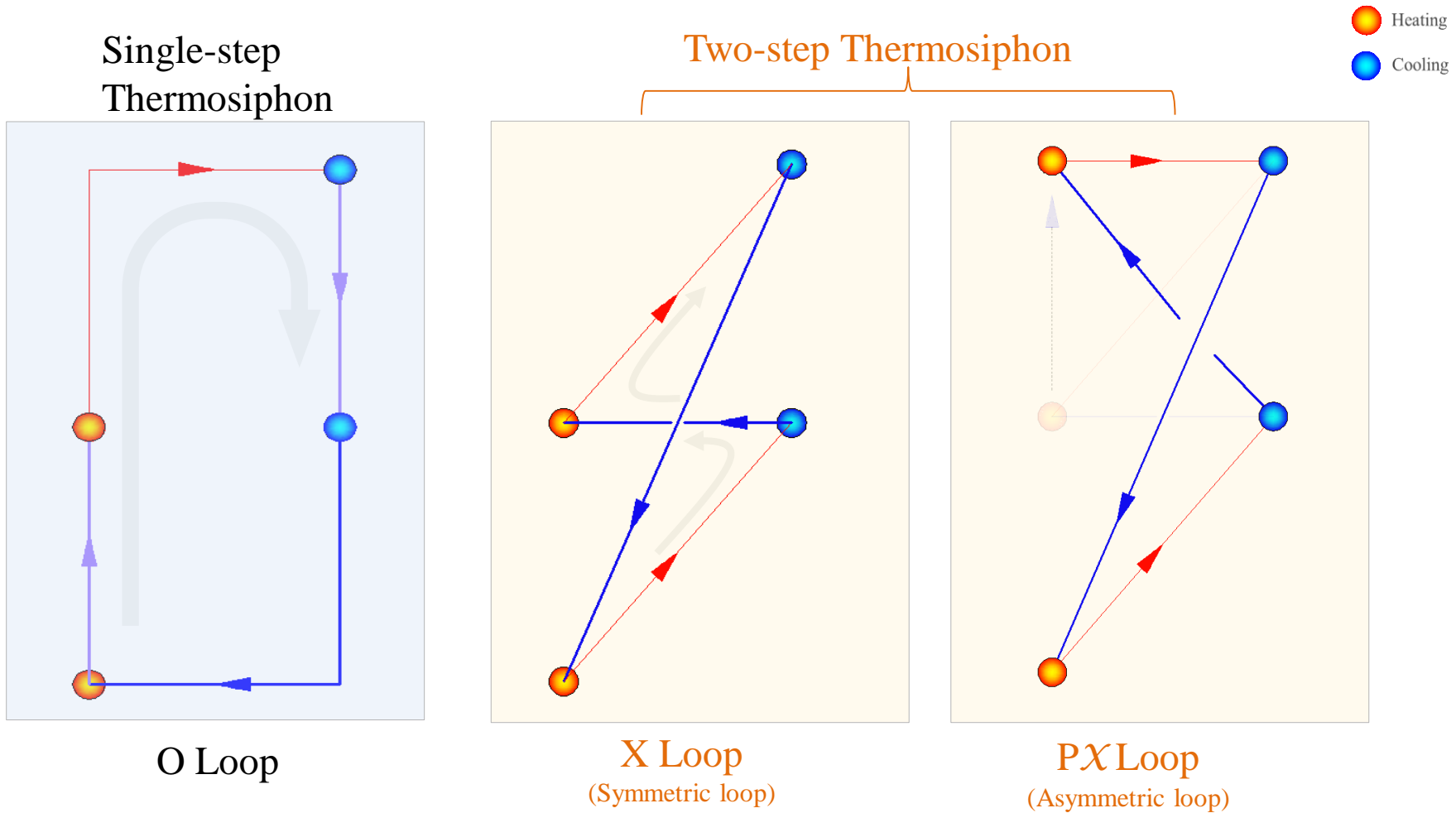
O loop Power : 200kW



X loop Power : 350kW



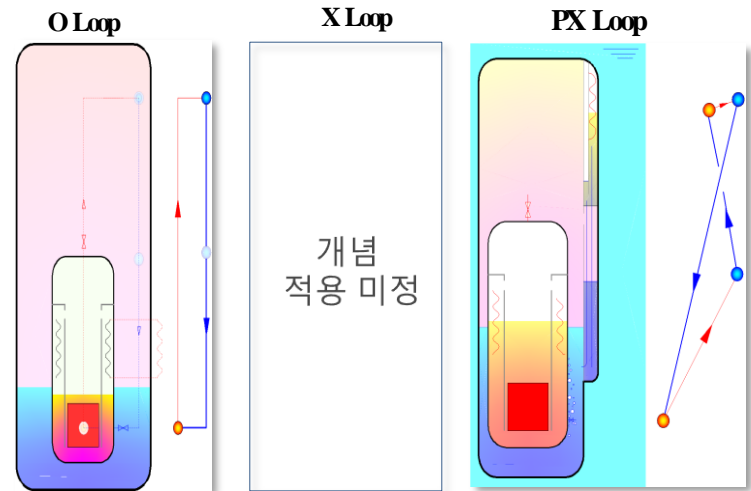
04 Two-step Thermosiphon 비교 (O, X & PX loop)



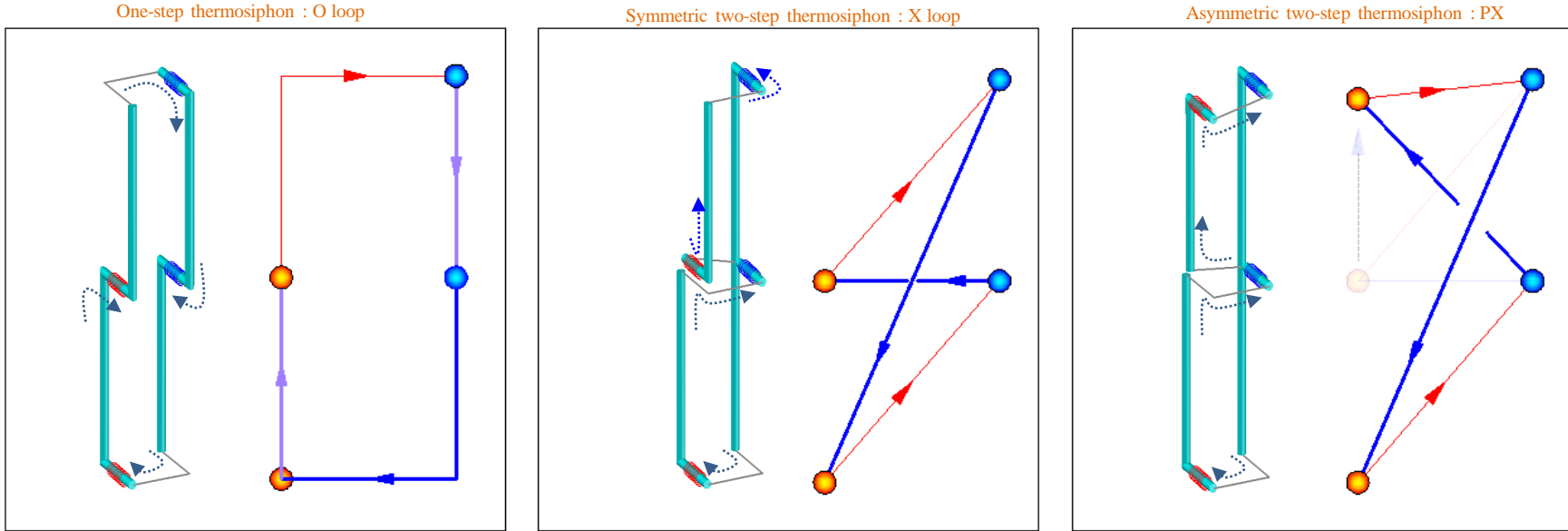
Single-step thermosiphon은 O loop이며, Two-step thermosiphon은 X와 PX loop에 해당한다. X와 PX loop의 차이는 두번째 가열부의 위치이다. PX는 두번째 가열부가 상부로 이동한 것으로 SMR 설계에 적용할 경우 원자로 내부 증기발생기를 순환하는 잔열냉각계통 고온 튜브의 높이에 해당한다.

04 각 Thermosiphon의 3차원 모델 및 적용

1. Thermosiphon 종류들의 열수력적 특성 비교를 위하여 모의 코드로 해석 수행.
2. 각 해석 모델의 부피는 8.3m³, 높이는 24m



해석 모델의 3차원 형상과 내부 유동 방향



해석코드 입력에서 파란색 배관부분은 volume, 검은색 선은 junction으로 처리하여 각 Loop 모델들의 체적은 동일함, 열전달 부분은 동일 높이

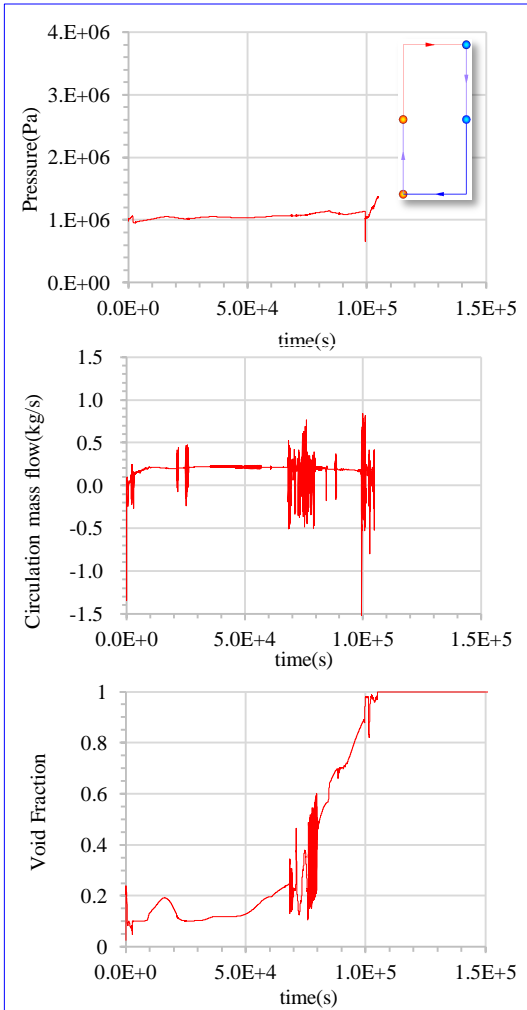
04

각 Loop 에 대한 해석 결과 비교

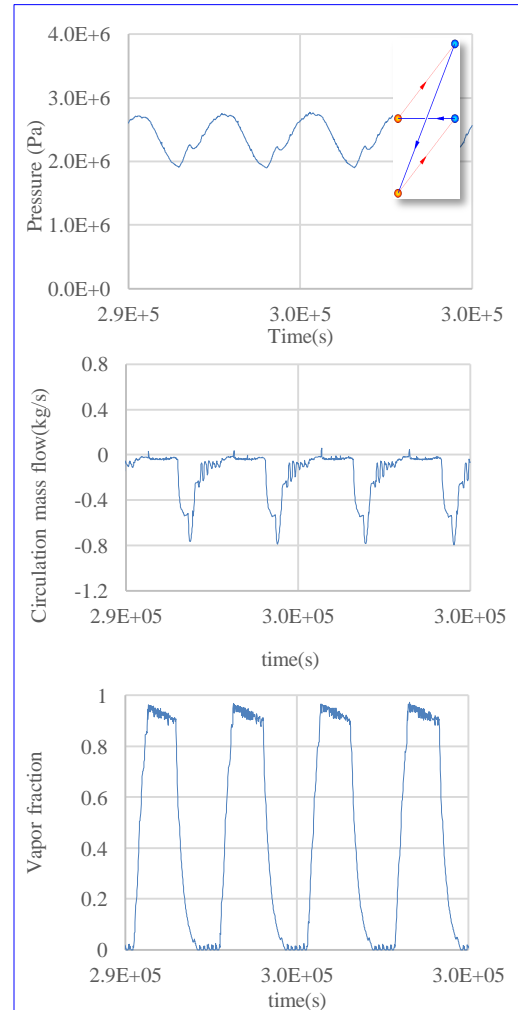
1. O loop은 150kW 이상에서 부터 과열증기발생
2. X loop은 350kW 이상에서 부터 과열증기발생
3. PX loop은 300kW 이상에서 부터 과열증기발생
4. 열교환 출력비에 대한 이론적 예측값에 근접
 $X \text{ loop} / O \text{ loop} = 2^{3/2}$, $PX \text{ loop} / O \text{ loop} = 2$

Power	O Loop	X Loop	PX Loop
150kW	Stable	Stable	Stable
200kW	Local dry out	Start Pulsation	Stable
300kW		Pulsation	Stable
350kW		Pulsation	Local dry out
450 kW		Local dry out	

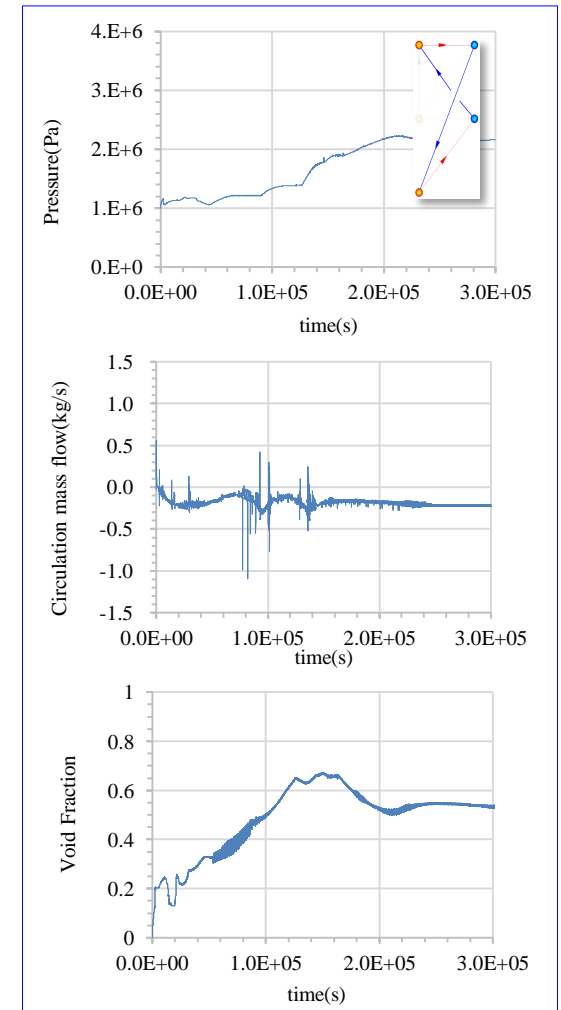
O loop Power : 200kW



X loop Power : 350kW

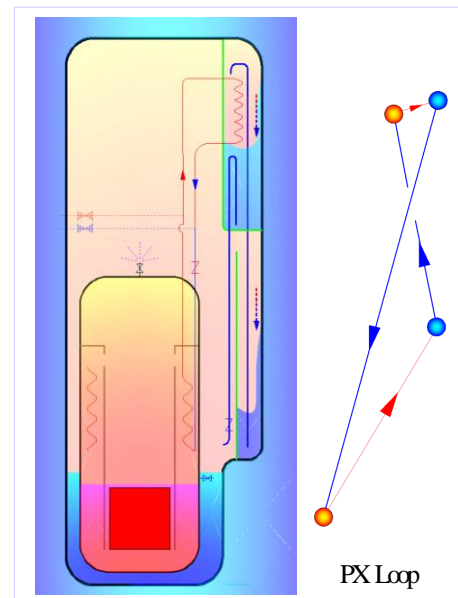
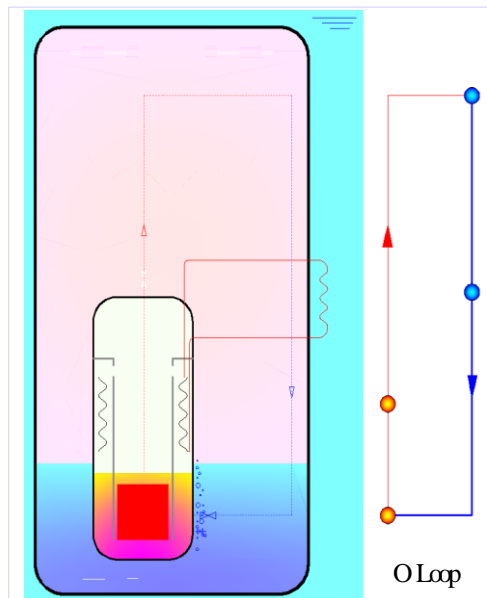


PX loop Power : 300kW



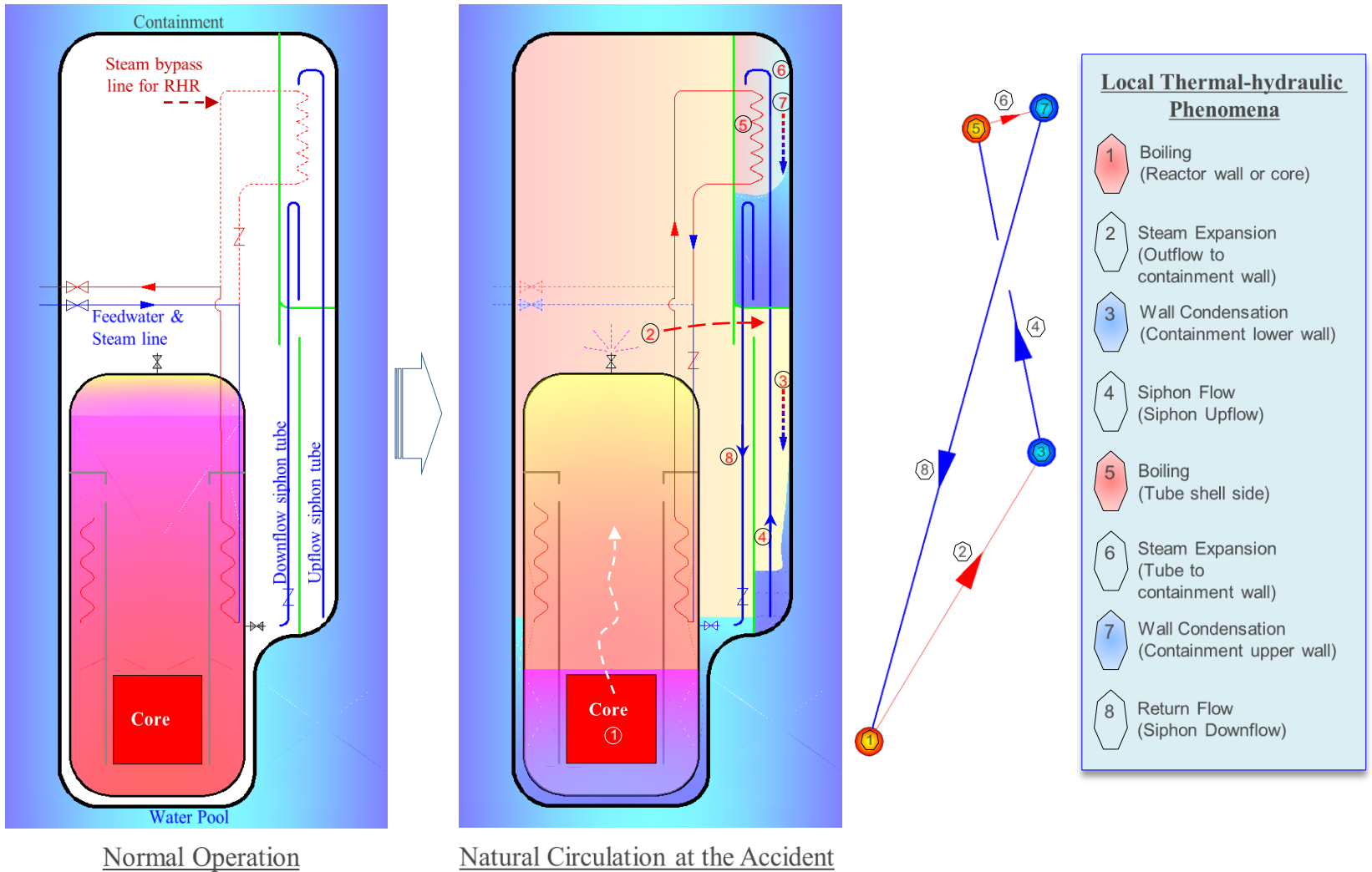
05 피동무한냉각(PX)의 SMR 격납용기 적용

- **PX : Asymmetric Two-steps Thermosiphon**
- **Lower Steam Pressure & Temperature**
- **Internal RHRS**



05 피동무한냉각(PX)의 SMR 격납용기 적용

SMR 격납용기 내부 열수력 현상

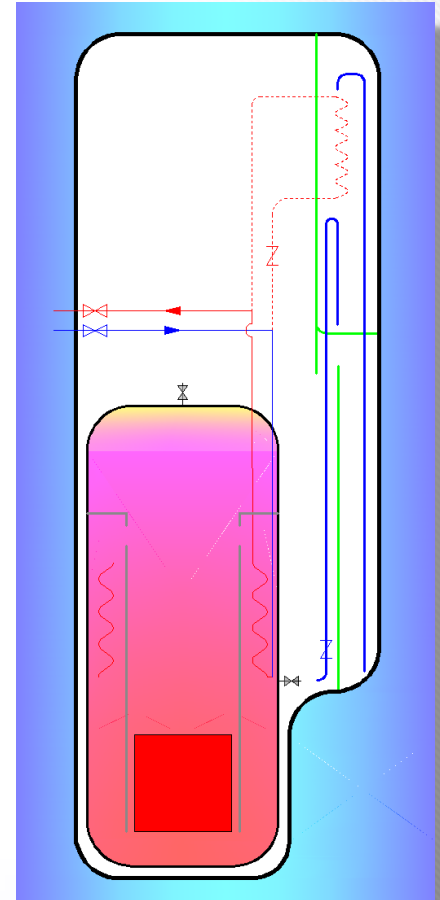


피동 무한냉각(PX)의 SMR격납용기 적용

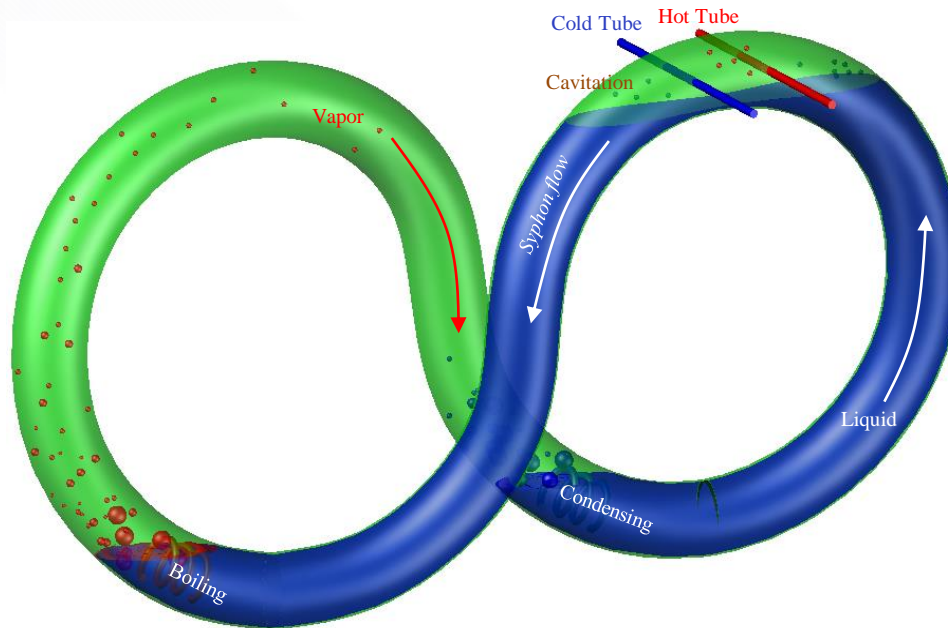
1. 단위 출력 당 가장 작은 부피와 낮은 압력
2. 격납용기 두께 감소로 설계 용이
 - 벽면 열방출 효과 증대
 - 용기 열응력 흡수
3. 잔열제거계통 내부 배치로 관통 배관 제거
4. 사고대처 용이 : 작동밸브 최소화

PX 과 NuScale의 설계 개념 차이

	PX	NuScale
구조	용기 내부 PRHR	용기 외부 PRHR
열수력	용기 압력 ≈ 2 MPa	용기 압력 ≈ 4 MPa
사고관리	VSBLOCA < 1 inch	SBLOCA > 1 inch



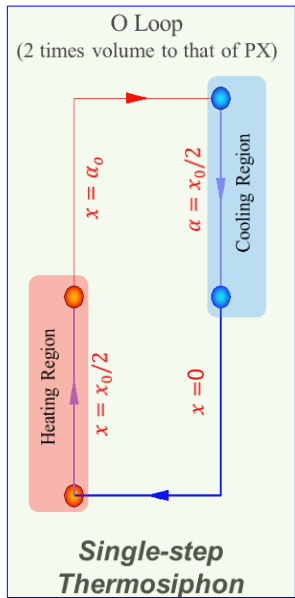
참고 자료



PX : Passive Infinite Cooling
(Asymmetric Two-step Thermosiphon)

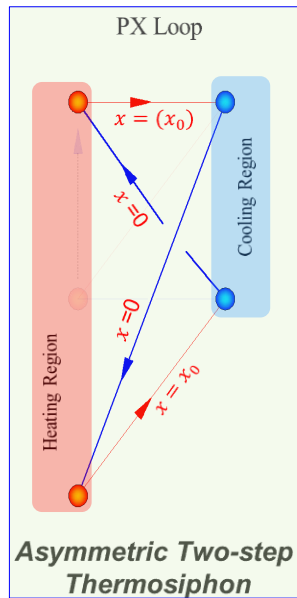
02 척도비에 따른 해석 결과

체적 척도비 ; $\frac{O \text{ loop volume}}{PX \text{ loop volume}} = 2.0$



Average void fraction

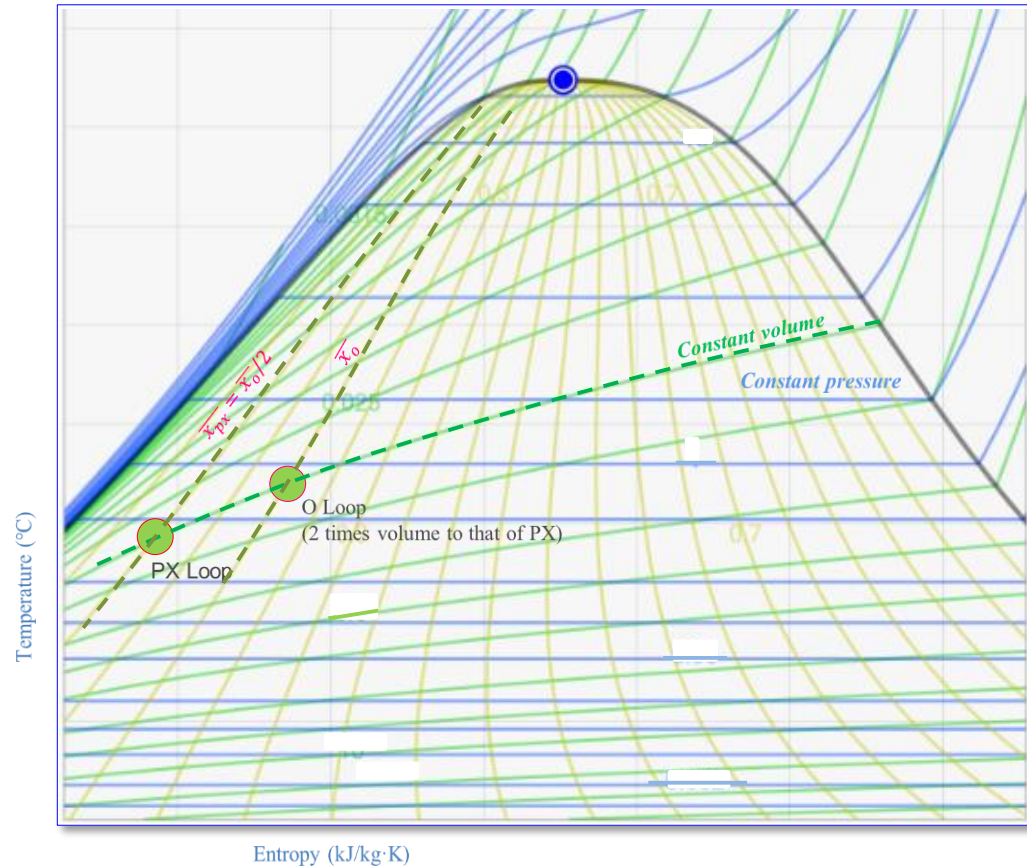
$$\bar{x}_o = \frac{x_o/2 + x_o + x_o/2 + 0}{4} = \frac{x_o}{2}$$



Average void fraction

$$\bar{x}_{px} = \frac{x_o + 0 + (0) + 0}{4} = \frac{x_o}{4}$$

Steam T-s Diagram

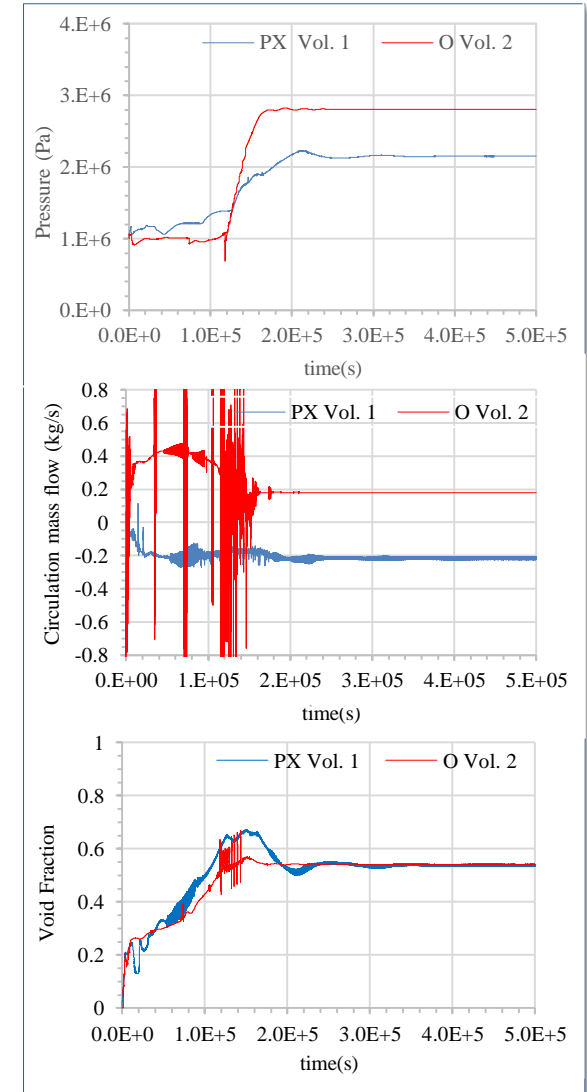
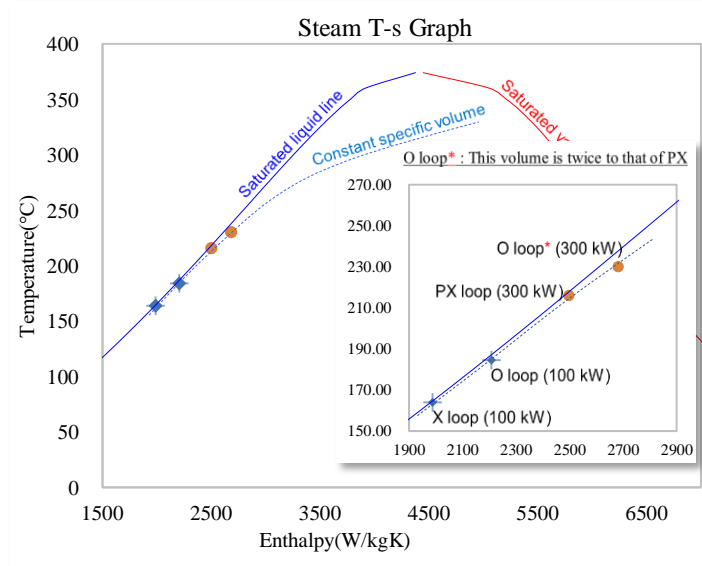
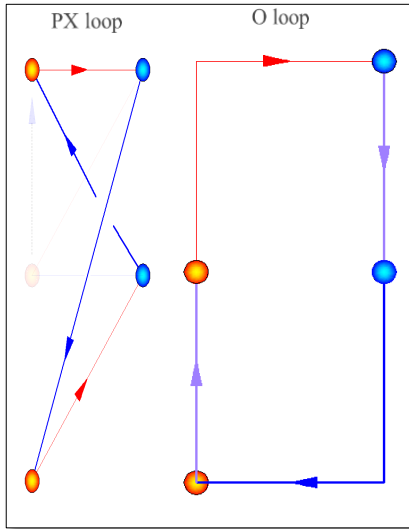


각 계통에 동일한 가열과 냉각으로 최종 정상상태 도달 후 압력과 온도 상태를 증기표 상에 나타냄 (A와 B 계통의 정상상태 최종 가열/냉각율은 A계통의 상부가 완전 비등이 일어나는 조건)

03 척도비에 따른 해석 결과

• Code Simulation Results (MARS code Ver. 1.5)

1. 초기조건 : 1.0 MPa, 포화온도 조건의 물상태
2. 경계조건 : 각 열원(열침원) 출력은 300 kW
3. 체적 비율 : O loop / PX loop = 2



PX 유동 개념 CFD 해석

» 전산 수치해석(CFD)에 의한 X 순환 냉각 개념 검증 (용기 내부 : 질소 대기압)

