



#### 공학전문석사 학위 연구보고서

## PCHE를 이용한 CVCS 열교환기 소형화 설계 기술 개발

Development of a design method for printed circuit heat exchanger for compact design of heat exchangers of CVCS

2023년 2월

서울대학교 공학전문대학원

응용공학과 응용공학전공

최정대

# PCHE를 이용한 CVCS 열교환기 소형화 설계 기술 개발

지도교수 김 응 수

이 프로젝트 연구보고서를 공학전문석사 학위 연구보고서로 제출함 2023년 2월

> 서울대학교 공학전문대학원 응용공학과 응용공학전공 최 정 대

최정대의 공학전문석사 학위 연구보고서를 인준함 2023년 2월

위	원장_	최성열	(인)
위	원	김 국 헌	(인)
위	원	김 희 집	(인)
위	원	이 유 호	(인)
위	원	김 응 수	(인)

#### PCHE를 이용한

#### CVCS 열교환기 소형화 설계 기술 개발

크기는 small modular reactor (SMR)의 가장 중요한 지표 중 하나라고 할 수 있는데, 작은 크기의 원자로는 공장에서 제작하여 원격지로 운송 이 가능하게 하여, 건설비용 및 공기를 극적으로 낮출 수 있음에 기인한 다. 이는 원자로의 필수 보조 계통인 chemical and volume control system (CVCS)은 소형 모듈화 되어 공장 제작이 가능하게 되어 이러한 SMR 주 요 지표 달성에 기여해야 하는 것을 의미한다.

일반적인 대형원전의 CVCS는 두 개의 원통다관형 열교환기 2개를 가 지고 있는데, 이를 고성능 열교환기인 인쇄형열교환기(PCHE)로 대체한다 면, 큰 공간적 절약이 가능하다. 이를 위해 본 연구에서는 Engineering Equation Solver (EES)를 이용한 PCHE 설계 방법론을 제시하고, 그 결과 로 SMR CVCS에 사용될 수 있는 PCHE의 수치적 크기를 제시했다. 더 불어, EES를 사용하여 PCHE를 설계하는 방법론 검증을 위해 실험 결과 와 비교했다.

이 PCHE는 반원단면적을 가진 직선 채널로 구성되어 있으며, 기존의 두 개의 원통다관형 열교환기의 기능을 모두 수행하며, 가열 및 냉각되 는 작동유체는 모두 단상의 물이기 때문에 수치해석 범위는 난류 영역으 로 확장되었다. 본 연구의 결과로서, PCHE가 SMR CVCS 열교환기로 도 입된다면, 열용량 등 열수력 성능 등은 만족하면서도, 기존의 열교환기 대비 상당한 공간을 절약할 수 있는 것으로 평가되었다.

주요어 : Printed Circuit Heat Exchanger, Small Modular Reactor, Chemical and Volume Control System (CVCS)

학 번: 2018-28745

목 차	
제1장 서로	1
11 即方	<b>ء</b> 1
1.1 - 11~0	י ג
	5
제2장 PCHE 열교환기 설계 방법론	5
2.1 PCHE 소개 및 특성	5
2.1.1 PCHE 소개	5
2.1.2 확산용접(Diffusion Welding)과 허용압력	7
2.2 PCHE의 SMR 열교환기 적용 시 고려 사항	11
2.2.1 CVCS 열교환기 관련 규제 및 산업기준 현황	11
2.2.2 PCHE 적용성 및 Technical Knowledge Gap	16
2.3 PCHE 열교환기 설계 방법론	19
2.3.1 PCHE 열 설계 ·····	21
2.3.2 PCHE 구조설계	29
2.4 EES를 이용한 열교환기 설계 코드 개발	31
2.4.1 EES를 이용한 열교환기 설계 코드	31
2.4.2 열교환기 설계를 위한 EES 코드 검증	32
제3장 파라미터 분석 및 PCHE 최적 설계	38
3.1 경계 조건 및 고려 사항	38
3.1.1 경계 조건	38
3.1.2 설계 변수 및 제한 사항	42
3.2 파라미터 분석	43
3.2.1 열전달계수의 영향	43
3.2.2 직경과 유로수에 대한 부피 영향	46
3.2.3 차압	47
3.2.4 PCHE 전단부 고온측 출구 온도와 직경의 부피 영향	48
3.2.5 Fouling에 대한 영향	50
3.2.6 PCHE 전단부와 후단부의 부피 및 길이	51
3.2.7 유로 개수에 따른 영향	52

	3.2.8 PCHE 종횡비 (높이-길이 비)	54
	3.2.9 유로수에 따른 유속	56
3.3	PCHE 설계 최적화	57
제4장	결론	65
4.1	연구 결과 요약	65

### 표 목 차

표	1	실험결과와 일치하는 EES 해	34
표	2	PCHE 설계를 위한 주요 입력	41
표	3	비슷한 부피를 가지는 경우 비교	55
표	4	직경에 따른 유로 폭 및 길이	58
표	5	PCHE 최적화 모델 ······	62
표	6	PCHE 도입에 의한 체적 감소 효과	63
표	7	PCHE 최적 모델 주요 지표	66

그림 목차

그림 1 configuration of a 600MWt VHTR system
그림 2 APR1400 CVCS 개략도
그림 3 PCHE가 적용된 SMR CVCS 개략도4
그림 4 Heat transfer surface area density spectrum of exchanger surfaces $\cdots$ 5
그림 5 PCHE 개략도6
그림 6 Core Block of PCHE7
그림 7 Three-Stage Mechanistic Model of Diffusion Welding
그림 8 Microscopic structure of diffusion-bonded interface9
그림 9 Allowable stress vs. temperature 10
그림 10 원자력 법 및 산업표준 계층도
그림 11 The Basic Principle Of Frequency vs. Consequences13
그림 12 와전류시험 (Eddy Current Test)
그림 13 PCHE 설계 방법론 19
그림 14 PCHE 형상과 변수20
그림 15 PCHE 열설계 방법
그림 16 역류 유로 형성 배열
그림 17 직교류 유로 형성 배열
그림 18 PCHE 내부 다중 유로27

그림	19	직경이 판의 두께보다 더 큰 PCHE 유로예			
그림	20	작동유체 3개를 가진 PCHE 내부 유로			
그림	21	직교류 형태 입출구를 가진 역류 유로 배열			
그림	22	EES 구동 화면			
그림	23	KAIST 공기실험시설 개략도			
그림	24	총괄열전달계수 비교 - EES vs. KAIST실험			
그림	25	가정된 CVCS SMR 기동 환경 39			
그림	26	Average temperature profile of primary fluid according to			
	unc	ertainty of material property (Water) 43			
그림	27	Temperature profile in primary side by the heat transfer correlations			
	(Wa	ater)			
그림	28	Friction factor correlations 44			
그림	29	Heat transfer correlations			
그림	30	상관관계식에 따른 Re vs. Nu45			
그림	31	직경(m)과 유로수의 부피에 대한 영향46			
그림	32	직경에 따른 차압 (Tho=530K) ~~~~~ 47			
그림	33	PCHE 전단부 고온 출구 온도와 직경 vs. 열교환기 체적 48			
그림	34	PCHE 전단부 고온 출구 온도와 직경 vs. 열교환기 길이 49			
그림	35	Fouling에 따른 PCHE 부피			
그림	36	Fouling에 따른 PCHE 길이			
그림	37	PCHE 전단부 부피 및 후단부 부피			
그림	38	PCHE 전단부 및 후단부 길이			
그림	39	유로 개수에 따른 PCHE 부피			
그림	40	유로 개수에 따른 PCHE 길이 53			
그림	41	PCHE 부피 비교 - 정육면체 vs. 직육면체			
그림	42	채널수 vs. 유속			
그림	43	내부 유로 평면도 (직경 4mm, 유로수 1000개)			
그림	44	내부 유로 평면도 (직경 5mm, 유로수 1000개) 59			
그림	45	PCHE 설계안 60			
그림	46	PCHE 내부 유로 최적안61			

Nomenclature		Q	Heat Load [W]	
Δ	Cross-Sectional Flow Area	S	Heat Transfer Surface [m <sup>2</sup> ]	
11	$[m^2]$	Т	Temperature [K]	
C	Specific Heat Canacity	t	Thickness [m]	
Cp	[J/kg-K]	U	Overall Heat Transfer	
D	Diameter Of Semi-Circle		Coefficient [W/m <sup>2</sup> -K]	
D	[m]	vel	Velocity [m/s]	
Deh	Hydraulic Diameter [m]	σ(sigma	Allowable Pressure [Pa/m <sup>2</sup> ]	
dP	Pressure Dron	p(rho)	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	
f	Fanning Factor	µ(visc)	Viscosity [Pa-s]	
FF	Founling Factor [m <sup>2</sup> -K/W]	$\Delta \mathbf{p}$	Pressure Difference [Pa]	
L	Length [m]			
LMTD	LMTD Log Mean Temperature		Subscript (Or Second Letter)	
	Difference $[\Delta K]$	1	PCHE Part.1 (전단부)	
m	Mass Flow Rate [kg/s]	2	PCHE Part.2 (후단부)	
N	Number Of Channels	c	Cold Side	
k	Thermal Conductivity	h	Hot Side	
	[W/m-K]	i	Inlet	
h	Enthalphy [J/kg]	NOP	Normal Operating Pressure	
НТС	Heat Transfer Coefficient		and Temperature	
	$[W/m^2-K]$	0	Outlet	
Re	Reynolds Number	р	Plate	
Nu	Nusselt Number	Х	Wide	
Р	Perimeter [m]	у	Height	
Pitch	Pitch [m]	W	Wall	
Pr	Prandtl Number	Z	Axial	

#### 제1장 서론

#### 1.1 배경

지구온난화를 완화하기 위한 탄소중립은 인류의 중요한 과제이지만, 막대한 규모의 전력망 신규 공급 필요성 및 재생에너지 전력 생산의 간 헐성이라는 현실적 한계가 있다. International Energy Association(IEA)은 기후변화에 대응하는 태양광 및 풍력발전이 꼭 필요하지만, 날씨에 따라 출력이 크게 변동되는 것을 고려하여, 획기적인 양의 ESS 도입 및 배전 망 확충이 필요함을 주장하고 있다. 하지만 ESS 증설 및 배전망 확충은 많은 시간과 비용이 소요된다. 이런 문제에 대한 대책으로 IEA는 소형모 듈형원자로(Small Modular Reactor, 이하 SMR)는 태양관 및 풍력발전과 함께, 새로운 전력을 공급하는데 역할을 할 수 있음을 주장한다. 이러한 흐름에서 더 나아가 최근 원자력에너지를 무탄소 청정 에너지원으로 분 류하여 전력 공급하려는 움직임이 있다.[1]

향후 기대되는 SMR의 활용 분야는 전력망 접근이 어려운 원격지에 전력 공급, 노후 된 석탄 발전소 등을 SMR로 대체하여 청정에너지원에 의한 전력 생산으로 변경 및 SMR 부하추종운전을 통해 재생에너지의 간헐성을 보완하는 것이다.[2] 이 같은 활용 분야를 고려하면 SMR은 새 로운 에너지 분야라고 할 수 있으며, 현재 전 세계 주요국들은 적극적으 로 SMR에 투자하고 있다.

크기는 SMR의 가장 중요한 지표 중 하나라고 할 있다. 이는 작은 크 기의 원자로는 공장에서 제작하여 원격지로 운송이 가능하게 하며, 동시 에 건설비용 및 공사 기간을 극적으로 낮출 수 있음에 기인한다. 따라서 원자로의 필수 보조 계통인 화학 및 체적 제어계통 (Chemical and Volume Control System, 이하 CVCS)가 모듈화 되어 공장 제작이 가능하 다면, 이러한 SMR 주요 지표를 달성하는데 기여 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서 대형원전 CVCS 열교환기를 더 작지만 고강도 고

효율 성능을 가진 인쇄회로형열교환기(Printed Circuit Heat Exchanger, 이 하 PCHE)로 대체하여 공간적 절약 실현하도록 한다.

한편 4세대 원자로인 고온가스냉각원자로(HTGR)의 운전 압력 및 온도 는 7 MPa 및 900℃에 이르며, 그림 1은 HTGR의 구성도이다. 작동유체 가 기체인 경우 열전달 계수는 필연적으로 낮아지는데, HTGR에서는 이 를 고려한 중간열교환기(intermediate heat exchanger)용 고성능 열교환기 개발이 필요하였고, 나선형열교환기 (Helical Coil Heat Exchanger)와 함께 PCHE를 도입하는 것이 그동안 연구되었다. PCHE는 화학적 식각 및 확 산 결합(Diffusion Bonding)과 함께 적층되는 공정을 통해 제조되는데, 기 존의 원통다관형 열교환기 및 판형열교환기 대비 열교환기 체적 감소와 보다 높은 설계압력을 가진 강점이 있다.[3][4]



그림 1 configuration of a 600MWt VHTR system [5]

PCHE를 포함한 Compact Heat Exchanger에 사용될 수 있는 상관식은

상당히 연구되었다.[6]

많은 연구는 He과 같은 기체를 작동유체로 사용하고 층류로 제한한 가운데, 열전달계수 및 열전달을 높이는 연구가 많았다. KAIST에서는 PCHE 열유체 성능 시험이 있었는데, 헬륨과 공기를 작동유체로 한 열유 체 성능 시험이 있었으며, 상관관계식이 제시되었다. 또한, SMR의 원통 다관형 증기발생기를 PCHE로 대체하는 연구 및 도 있었다.[7][8][9] 더불 어, 층류 영역에서 PCHE의 크기를 최적화하기 위한 연구도 수행되었다. [5]

#### 1.2 연구 목적

그림 2은 OPR1000과 APR1400 등 한국형 대형원전의 일반적인 CVCS 개략도이며, 원통다관식 열교환기 2대가 설치되어 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 그 2개의 열교환기를 그림 3와 같이 하나의 PCHE로 대체하 여 CVCS 열교환기를 위한 공간을 줄일 수 있도록, PCHE 설계 방법을 제시하고자 한다. 이를 위해서, PCHE는 세부적으로 전단부와 후단부로 나뉘고, 기존의 2개의 CVCS 열교환기를 각각 대체 할 것이다.

먼저 engineering equation solver (EES)를 이용한 PCHE 설계방법론을 제시하고, 그 결과로 SMR CVCS에 사용될 수 있는 PCHE의 수치적 크 기를 제시했다. EES를 사용하여 PCHE를 설계하는 설계 방법의 검증을 위해, EES 수치해석결과와 실험 결과를 비교하였다. PCHE 설계 결과에 는 유로의 크기 및 형태, 유로의 개수, PCHE 크기 등이 제시되었다. 단, 본 보고서의 연구범위는 열교환기의 코어만 설계로 제한하며, 내진설계 와 지지 구조물 설계 등 기존의 설계방식을 준용할 수 있는 것은 포함되 지 않는다.



그림 3 PCHE가 적용된 SMR CVCS 개략도

#### 제2장 PCHE 열교환기 설계 방법론

1장에서는 PCHE 도입은 SMR CVCS 소형화에 기여 하며, 이는 SMR 의 주요한 목표인 SMR 소형화에 기여 함을 설명하였다.

이번 장에서는 PCHE특성과 PCHE 도입시 고려할 사항을 소개한다. 먼 저 PCHE는 강점과 관련 연구결과를 소개한다. 이후 이것들을 고려하여 열설계 및 구조설계를 포함한 PCHE 설계 방법론을 소개한다. 열교환기 설계하는데 있어 가장 중요한 열전달계수도 소개되는데, 레이놀즈수와 상관관계가 있는 누셀수도 같이 제시한다. 더불어, PCHE 설계 방법론의 유효성을 확인하기 위해 실험결과와 EES 해석 결과를 비교하였다.

#### 2.1 PCHE 소개 및 특성

#### 2.1.1 PCHE 소개

그림 4은 열교환기의 대략적인 종류와 유효 열전달 면적 대비 부피를 보여준다. 원통다관형 열교환기가 가장 일반적으로 많이 쓰인다. 하지만, 설치 용도 및 요건에 따라 고성능 열교환기가 필요할 경우 Compact Heat Exchanger가 사용되며, PCHE도 Compact Heat Exchanger로 분류된다.[6]



그림 4 Heat transfer surface area density spectrum of exchanger surfaces [10]

PCHE는 상대적으로 매우 높은 열 전달 효율과 부피 대비 큰 유효전열 면적을 가진다. 일반적으로 PCHE는 쉘 및 튜브와 같은 기존 열교환기와 비교할 때 장치의 전체 설치 공간, 부피 및 무게를 최대 85%까지 줄인 다. 또한, 지지대 및 배관 설치가 간편하다.

확산결합(Diffusion Bonding) 및 화학적 식각(Chemical Etching)으로 만들 어진 마이크로 유로를 열전달을 하는 것은 PCHE로 하여금 900기압 이 상의 높은 설계압력과 성능을 가지게 한다. 이러한 장점은 PCHE는 상대 적으로 높은 압력강하와 축 방향 전도 손실을 보완 할 수 있게 한다.

PCHE은 평평한 판을 화학적으로 식각(Etching)하여 유로 패턴을 새기 면, 그것이 유로인 동시 열성능 특성이 된다. 즉, 패턴 설계를 통해 다양 한 성능 구현이 가능하다. 심지어, 2상이 작동유체 및 비대칭 흐름이 사 용되기도 한다.



그림 5 PCHE 개략도 [11]

반드시 시트 한 장으로 열교환기로 구성할 필요는 없으며, 필요한 열 전달 또는 열용량 영역을 생성하기 위해 여러 블록을 함께 확산용접을 사용기도 한다. [12]



그림 6 Core Block of PCHE [11]

이러한 PCHE의 강점을 이용하기 위해, VHTR(Very High Temperature Reactor) 또는 AHTR(Advanced High Temperature Reactor)에서 나선형열교 환(Helical Coil Heat Exchanger)와 함께 중간열교환기(IHX)의 후보로 여겨 지고 있다.[3]

#### 2.1.2 확산용접(Diffusion Welding)과 허용압력

확산결합(Diffusion bonding), 고체 상태 결합(solid-state bonding), 압력 결합(pressure bonding), 등방성 접합(isostatic bonding), 열간 프레스 접합 (hot press bonding)으로 불리기도 하는 확산 용접(Diffusion Welding)은 오 래된 용접 방법이며, 현대에 들어서는 스테인리스강, 티타늄 합금, 철, 니 켈 및 코발트 기반 초합금과 같은 근래 개발된 재료를 결합하는데 사용 된다. 용접부의 강도는 모재의 강도와 같다고 여겨지는데, 일반적으로는 500기압이상의 항복응력을 가진다. [13][14]

확산 용접은 주로 고부가가치 부품에 사용되는 비교적 자본 집약적인 고정밀 공정인데, 깨끗하고 정밀한 표면이 필요할 경우 사용된다. 산화를 피하면서, 확산결합을 촉진하기 위해서는 진공 또는 불활성기체 환경을 갖추어야 하고, 이 경우 확산용접은 몇 시간 정도 소요된다.

원칙적으로 깨끗하고 완벽하게 평평한 금속 표면이 밀접하게 접촉하면 개별 조각의 원자가 전자가 상호 작용하고 결정학적 제약 조건에 따라 실온에서 즉시 단결정 또는 결정립계를 형성한다. 이 경우 열을 가하지 않고 두 조각에서 한 조각을 만드는 이상적인 용접이 된다. 하지만, 이러 한 현상은 일반적으로 대부분의 재료들은 원자적으로 깨끗하지 않기 때 문에 현실에서 일어나기 힘들다.

그래서 거시적 변형을 일으키지 않는 범위에서 압력을 가하면, 돌기가 평평해지고 오염 물질이 이동하면서 금속 대 금속 원자 접촉이 이루어지 며 오염 물질은 미세 구조를 통해 확산결합이 된다. 일반적으로 재료 용 융 온도의 60%를 초과하는 높은 온도가 필요하며, 그림8은 이러한 확산 결합 과정을 보여주고 있다.



(B) Second Stage—Grain Boundary Migration and Pore Elimination

(C) Third Stage—Volume Diffusion Pore Elimination

그림 7 Three-Stage Mechanistic Model of Diffusion Welding[13]

아래 그림8은 확산결합 계면을 현미경으로 관찰한 것이다.



그림 8 Microscopic structure of diffusion-bonded interface [3]

확산 용접은 구리 및 티타늄 합금과 같이 자체 산화물에 대한 용해도 가 높은 금속을 접합하기 위하여 항공우주 산업에서 광범위하게 사용되 어왔다.[3] 이같이 산화에 강한 특성을 보이는 크롬 함유 합금도 사용할 수 있는 부분은 부식을 일으키는 붕산에 노출되는 원자력기기 사용 가능 성을 보여준다.

일반적으로 용접부는 기기에서 가장 취약한 부분으로 여겨지지만, 확 산용접은 이러한 제한에서 자유로운 부분이 많다. Heatric에 따르면 그림 9과 같이 PCHE의 허용압력은 300℃기준 1,000기압이 넘는다. 이는 상용 원자로 설계압력이 209기압 정도 인 것을 고려하면, 매우 높은 허용압력 이라 할 수 있다.[14]



그림 9 Allowable stress vs. temperature[15]

# 2.2 PCHE의 SMR 열교환기 적용 시 고려 사항2.2.1 CVCS 열교환기 관련 규제 및 산업기준 현황

#### 원자력 규제요건 및 산업기준 체계

미국과 한국의 원자력에너지 관련 규정 및 산업기준은 아래와 같다.



그림 10 원자력 법 및 산업표준 계층도

원자력 법(Law)은 대표적 미국의 10CFR, 한국의 원자력법 등이 있으 며, 규제 (Technical Regulation)로는 미국의 NRC Regulatory Guide, 과기부 고시 등 있다. 기준표준(Codes & Standard)에는 ANS, ASME, KEPIC 등이 대표적인데, 규제요건에 의해 강제되는 경우 많다. 기기 제작에 쓰이는 ASME 대표적인 예이다. 예를 들어, ASME Section III NB의 경우, ANS/ANSI 51.1에 따라 안전등급 1로 구분되는 기기 제작에 사용되는 코 드이다. 이들은 품질, 내진, 전기 등급에 대한 표준을 제시하며, 법 및 규 제 기준에 따라 강제된다.[16]

#### <u> 안전등급</u>

미국/한국의 원자력발전소 기기의 안전등급의 경우 결정론적 기능에 따라 분류하는 ANSI 51.1(1983)에 따라 안전등급을 분류했었다. 하지만 일본 후쿠시마원전 사고 이후 안전성 강화를 위한 방법으로 새로운 안전 등급 분류가 필요해졌다. 이에 맞추어 기능, 빈도, 결과, 시점 등 리스크 를 종합적으로 고려하여 안전등급 분류를 하는 IAEA SSG-30(2014)가 발 행되었다. 그 외 주요한 규제지침 및 산업표준은 다음과 같다. [17]

- IAEA SSR-2/1 (2016) & SSG-30 (2016) [18]
- EUR Rev.E(2016) [19]
  - ✔ SSG-30 전면 수용
  - ✓ EUR은 (신규) 원전에 대한 인허가성이 높은 설계 요건을 표준 화하여, 인허가성을 높이고 비용을 낮추기 위해 발행됨
  - ✔ 유럽, 중동, 아프리카 등은 IAEA/EUR등의 요건을 준용

리스크기반 안전등급 분류는 그림 6과 같이 사고결과 방사선량 제한치 초과 정도에 High/Medium/Low로 구분하며, 여기에 빈도를 고려하여, Safety Class 1,2,3으로 구분한다. 사고 후 결과가 심각하며 빈도가 높을 수 있다면, Safety Class 1 지정된다. 그 중 원자로정지 혹은 안전계통 (Engineered Safety Features)의 작동 횟수를 줄이는 CVCS 충전기능은 Safety Class 3으로 배정하고 있다. [17]

하지만 규제요건은 정당성(Justification)이 있다면, 예외를 인정하고 있다. NuScale CVCS의 충전기능은 미국 NRC에서 예외로 인정되어 비안전 등급 및 비안전기능으로 설계되었다. 즉, 한국형 SMR CVCS가 비안전계 통으로 설계될 경우, 열교환기의 안정등급 역시 비안전등급 기기가 될 수 있다. [20]



그림 11 The Basic Principle Of Frequency vs. Consequences [17]

#### <u>가동전/가동중 검사</u>

안전기능을 하는 기기의 경우 가동전 및 가동중 검사를 수행해야 한 다. 안전기능을 하는 펌프와 밸브는 ASME OM에 따라 검사하며, 그 외 기기들은 ASME Section XI에 따라 가동중 검사를 하여야 한다.

ASME XI 주요한 가동중검사는 크게 시각검사(Visual Test), Eddy Current Test 포함한 표면 검사(Surface Test)와 체적 시험(Volumetric)으로 나뉘며, 이를 위한 공간이 설계 시 고려되어야 한다. 벽면 두께의 경우 필요시 측정하게 되어 있는데, 안정성을 보장할 수 있는 특정 두께가 설 계 시 정해져야 한다.



시각검사의 경우 정의된 표면 또는 부피를 가진 구성요소에 대해 방사 선 또는 초음파 검사를 수행하는 것이다. 이 검사는 균열, 마모, 부식 또 는 침식과 같은 조건을 포함하여 구성 요소 표면의 불연속성 및 결함을 감지하기 위해 수행된다. 또한, 시스템 압력 테스트를 수행하는 동안 필 요에 따라 압력 유지 구성 요소에서 누출의 증거를 감지하기 위해 수행 된다. 더불어, 물리적 상태 변화를 확인하기 위해 지지대, 볼트 또는 용 접 연결부가 느슨하거나 누락된 부품, 파편, 부식, 마모 또는 침식과 같 은 불연속성 및 불완전성을 감지한다.

표면 검사의 경우 와전류 시험(Eddy Current Test)이 이 대표적이지만, 초음파도 사용되기도 한다.

마지막으로 체적 검사는 재료의 체적 전체에 걸쳐 불연속성이 있음을 나타내며 구성 요소의 내부 또는 외부 표면에서 수행되며, 방사선 검사, 초음파 검사, 와전류 검사, 음향 방출 검사 등이 사용된다.

단, 위 세 가지 검사 이외에 동등하거나 우수하다고 입증되는 경우, 대 체 검사 방법, 방법의 조합 또는 새로 개발된 기술로 가동중검사를 할 수 있다.[22]

#### EUR Rev.E의 (관형)열교환기 관련 주요 요건

European Utilities Requirement, Rev.E는 대한민국이 원전수출시 고려 필 요하며, 전 세계에서 가장 통용되는 규제 및 기술기준을 아우르는 사업 자요건서라고 할 수 있다. 이 문서의 의도는 요건을 먼저 제시함으로써 보편적인 기술기준을 만족하여 인허가성을 높이는 동시, 경제성을 높이 는 데 있다.

EUR Rev.E의 (판형)열교환기 관련 주요 요건 아래와 같다.[19]

○ (공간 확보를 포함한) 정비가 가능한 설계를 할 것

○ 재장전 16일, 가동중검사 36일 (휴일 포함)

판형열교환기는 최소 요구 온도차가 1℃ 정도로 원통다관형(3~5℃) 보 다 매우 작아서, 일반적으로 판형열교환기는 쉘앤튜브의 1/5이하의 크기 를 가진다. 하지만 일반적으로 많이 쓰이는 개스캣형식 판형 열교환기는 설계압력이 15기압에 불과하다. 원자로의 압력이 150기압인 원전에서는 일차계통 기기들의 설계 압력은 대부분 15기압 이상 요구하고 있다는 것 을 고려하면, 현재는 15기압 이상의 압력을 견딜 수 있는 용접형 판형열 교환기만 원전에서 사용 가능하다. 하지만, 용접형 판형 열교환기는 ASME OM에서 요구하는 가동전/중 검사를 가용한 시험 방법은 현재 없 다.

또한, 판형열교환기는 사용은 가능한 피해야 하며, 사용한다면 충분한 유속과 차압 확보, 전단에 정화기기 및 적절한 계측기 설치 및 가급적 저압에서 열교환기 운전이 필요하다. [19]

대부분의 경우 안전성을 높이면, 경제성은 하락하는 것이 일반적이다. 예외적으로 경제성을 높이기 위한 요건도 있는데, 계획예방정비

(Overhaul)기간을 5시간까지 줄이는 것이다. 이를 위해서는 원자로 정지 후 냉각시간을 줄이는 것이 핵심인데, EUR Rev.E에서는 새롭게 원자로 냉각재펌프 기동조건에서 냉각하는 것을 요건으로 제시하고 있다. 이 요 건은 사우디 등 최종 열의 온도가 40℃ (105°F)에 이르는 국가에 원전수 출을 할 때, 증가되는 열교환기 크기에 맞추어 발전소 보조건물의 배치 가 바뀌어야 하는 중대한 설계 변경으로 적용될 수 있다. 현재 PWR의 경우 쉘 앤 튜브 형식의 열교환기를 이용하여 원자로 냉각을 하고 있는 데, PCHE가 도입된다면 원통다관형 열교환기 대비 부피는 줄어들지만 개선된 열전달을 하여, 관련 요건 만족을 할 수 있을 것으로 보인다.

#### <u>중기발생기 검사</u>

일차계통의 열교환기라고 할 수 있는 증기발생기는 NEI 97-06, TSFF-449 등에 의해 비안전기능임에도 가동중검사를 수행해야 한다. 검 사 항목은 육안 검사, 수압시험, ECT, He 검사 등이 있다.[23][24]

미국형 SMR인 NuScale의 코일형 증기발생기도 동일하게 NEI 97-06를 적용하고 가동중검사를 수행하도록 되어 있어, 일반적인 대형원전과 다 르지 않다. [25]

#### 2.2.2 PCHE 적용성 및 Technical Knowledge Gap

이전 절에서 소개되었듯이 PCHE는 고강도 고성능을 가진 열교환기이 지만, 현재 PCHE 제작 및 검사를 하는 Standard는 없다. 이는 미국기계 공학학회(ASME)에서도 주요한 Technical Knowledge Gap으로 인지하고 있다. 이러한 기술 갭(Gap)을 매우기 위한 연구가 진행되고 있으며, ASME Section Ⅲ Division 5에 포함될 예정이다. [26]

복잡한 형상으로 확산용접되는 PCHE는 현존하는 비파괴검사(NDE)로 검사하는 것은 매우 어렵다. 이에 따라 새로운 비파괴검사에 대한 연구 가 진행 중에 있다. 크게 X-ray, 중성자조사, 변형 센서(Strain Sensor)를 조합한 비파괴 검사에 대한 연구가 미국 에너지부 (U.S. Department of Energy's Office of Nuclear Energy)의 Intergrated Research Project (IRP)를 통해 수행되고 있다.[26][27]

PCHE에 대한 필요한 비파괴검사는 아래와 같이 간략하게 정리된다. [26]

- PCHE몸체와 배관 용접부: 현존하는 NDE로 검사 가능
- PCHE의 압력 경계가 되는 표면: 새로운 NDE 필요
- 유로 내부: 새로운NDE 필요

Selby(2020)은 PCHE의 비과괴 검사 방법으로, UT, X-ray, Neutron radiography, Strain Sensor 등을 제시하였으며, 아래와 같은 특성이 있다. [26]

- UT: 비교적 큰 크기의 것 우수한 검침
- X-ray: 비교적 작은 크기 (0.41x0.41m) 에서 우수한 결과
- Neutron radiography: 변형되는 곳의 외벽 형상의 중요한 정보 제공
- Strain Sensor (novel method): 크랙성장이 변형을 유발하는 것을 이용

PCHE 파열 실험 (burst test) 시험이 있었는데, ASME Section Ⅲ Division 5에서는 Class A기기에 대해 허용한 5가지 재료 중 Incoloy 800, Stainless Steel 304H, 316H, 304L 등 4가지로 실험을 진행되었다. 316H는 연구 목적 소량 생산은 어려워 제외하였다. 또한, 다양한 크기의 시편 및 열교환기를 만들어 실험 수행 하였다. (115x36x32mm ~ 595x1370x55mm)

더불어, 의도적으로 홈(notch)를 만들어 크랙이 성장하는 과정 및 결과 관찰하였다. 대체적으로 작은 크기 열교환기경우 파열전 이상거동 감지 되었지만, 큰 열교환기에서는 그러지 못 했다. 다양한 파열 실험 결과, 1000기압 이상에서 파열되는 양상을 이고, Pin-hole 누설, 판 분리, 하단강화판 누수 등 3가지 형태가 일반적이였다.

초음파 검사 (UT)는 Electric Power Research Institute (EPRI)에 의해 수 행되었는데, PCHE 판 표면의 확산 결합 결함 부분과 실험전 의도적으로 만든 비교적 정확히 지침하였다. 하지만, UT 빔보다 작은 직경은 UT 빔 직경으로 인식하는 한계가 있음

다음으로, X-ray 경우 비교적 작은 크기의 열교환기(~ 0.41x0.41 m)만 검사 할 수 있다는 것이 한계이다. Neutron Radiography의 경우 X-ray와 달리 중성자는 특성상 두꺼운 금속도 통과되며, 수소, 붕소, 물 등 낮은 원자번호를 가지는 물체에 흡수된다. 즉, X-ray와 상호보완적인 검사 가 능하다.

더불어, 변형에 대한 중요한 정보 제공하는 것이 큰 장점이다. 반면, 중성자에 의한 열교환기 방사화로 반감기를 고려한 오랜 기간 동안 차단 필요할 수 있다.

마지막으로, Strain Sensor를 열교환기에 삽입하여 비파괴 검사를 하는 것을 연구하였다. 이는 크랙의 성장이 변형을 수반하는 것을 이용한 것 인데, 노치(notch)가 있는 부분에서 크랙 성장과 변형이 측정된 점을 고 려하면 합당한 결과로 판단된다. 하지만, 열팽창의 의한 변형에 대한 연 구가 더 필요하다.

#### 2.3 PCHE 열교환기 설계 방법론

그림13은 본 연구에서 제시하는 PCHE설계 방법론이다. 먼저 PCHE설 계를 위해 설계 요건을 조사 후, 열설계와 구조설계를 수행한다. 열설계 와 구조설계는 상호 영향 관계에 있다고 할 수 있지만, 구조 설계의 경 우 재료의 허용압력을 고려하여 PCHE의 벽두께, 판두께만 결정하므로, 열설계 및 PCHE 최적화에 제한적인 영향을 준다. 하지만 구조설계가 제 한조건이 되는 경우가 있으므로 면밀한 검토가 필요하다.[28]

또한 PCHE의 열부하(Heat Capacity)가 원자로냉각재 체적 및 정화 요 건 등 주변 환경을 고려하여 정해지므로, log mean temperature difference (LMTD)를 이용하여 열교환기를 설계하는 것으로 한다.



본 연구에서 사용되는 PCHE의 개략적인 형상 및 변수 정의는 그림 16 과 같다.



그림 14 PCHE 형상과 변수

#### 2.3.1 PCHE 열 설계

PCHE 열설계 경계조건은 고온/저온측 작동 유체의 온도/압력/유량 등 이 있다. PCHE 설계 변수는 열교환 형식 (Parallel, Counter or Cross Flow), 유로의 크기 및 유로의 개수 및 단수가 있다. 전체적인 PCHE 열 설계는 그림 18과 같다.



그림 15 PCHE 열설계 방법

물성치, 상관관계식 및 지배 방정식은 다음과 같다.

LMTD는 다음과 같이 구해진다.

$$LMTD = \frac{dT_1 - dT_2}{\ln\left(dT_1/dT_2\right)} \left[K\right]$$

 $\begin{array}{l} where \\ d\,T_1 = \,T_{h,i} - \,T_{c,o} \\ d\,T_2 = \,T_{h,o} - \,T_{c,i} \end{array}$ 

Reynold수, Prantl수 와 수력직경(Hydraulic Diameter)는 다음과 같다.

$$Re = rac{
ho \, u \, d_{eh}}{\mu}, \quad \Pr = rac{C_p \, \mu_h}{k}, \quad deh = rac{4 \, A}{P} \left[m
ight]$$

열전달계수(Heat Transfer Coefficient, HTC) 상관식은 다음과 같다.

$$Nu = \frac{convective \ heat \ transfer}{conductive \ heat \ transfer} = \frac{h}{k/L} = func(Re, \Pr, \ldots)$$

Hesselgreaves에 따르면 반원단면적을 가지는 내부유동의 경우, 층류영 역에서 Friction Factor와 Nusselt 수는 다음과 같다. [6]

f = 15.78 / Re (Re < 2100) Nu = 4.089

즉, 본 연구에 사용되는 반원의 경우, 층류영역에서 (패닝)마찰계수와 레이놀즈수의 곱은 4.067로 항상 일정하다. 하지만, 다른 형상의 경우 다 른 상수를 마찰계수와 레이놀즈수의 곱은 달라진다. 또한, 표면 거칠기가

내경의 100분의 1 이하의 경우 완전히 발달된 Nu 및 f에 영향을 미치지 않는다. [10]

Bhatti and Shah (1987)에 따르면, 천이 및 난류 영역에서 friction factor 는 다음과 같다.  $f = 0.0054 + 2.3 \times 10^{-8} \times Re^{(3/2)}$  (2100 < Re < 4000)  $f = 0.00128 + 0.1143 \times Re^{(-1/3.2154)}$  (4000 < Re < 10<sup>5</sup>) Accuracy ±2%

Hesselgreaves(2016)은 Gnielinskin(1976)식을 사용하는 것을 제안했지만, Ramesh(2003)는 이 식의 천이영역에서 정확하지 않으며, 전체 오차는 10%로 제시하였다. 따라서, Petukhov and Popov식을 사용한다.[6][10] Petukhov and Popov(1963)에 따르면, Nusselt Number는 다음과 같다. 단, 천이영역에서는 Winterton(1998) 식을 사용한다.

$$Nu = 0.023 \ Re^{0.8} \ Pr^{0.4} \qquad 2300 \le Re \le 4000 \qquad Winterton(1998)$$
$$Nu = \frac{(f/2)Re \cdot Pr}{C + 12.7(f/2)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \qquad 4000 \le Re \le 5 \times 10^6, \qquad Petukhov \text{ and } Popov(1963)$$
$$0.5 \le Pr \le 10^6 \qquad Accuracy \pm 5\%$$

고온 및 저온측 유효 열전달 면적은 다음과 같다.

$$S_h = (\frac{\pi d_h}{2} + d_h) \times L \times N_h \ [m^2] \ , \ S_c = (\frac{\pi d_c}{2} + d_c) \times L \times N_c \ [m^2]$$

총 유효 열전달 면적은 다음과 같다.

$$S = \frac{S_h + S_c}{2} \ [m^2]$$

압력강하 상관식은 다음과 같다.

$$f = func(Re, Pr, ..., ...) \qquad \Delta P = \frac{1}{2}\rho \times vel^2 \times \frac{4L}{d_h}f$$

축방향 열전도는 아래 식과 같이 근사화될 수 있다. 본 연구에서는 축 방향 열전도양은 0.1% 이하로 예상되므로 무시한다.

축방향 열전도율 = 
$$\frac{(k/L) \times A}{\dot{m} \times C_p}$$

열교환기 운전시간이 축적됨에 따라 열교환기 표면에 오염물이 부착되 면서, 열전달 불량이이 발생하는 것이 일반적이며, 이러한 Fouling은 열 적 성능(Thermal Performance) 및 차압에 큰 영향을 미친다. 이는 총괄열 전달계수(Overall heat transfer coefficient) 감소로 이어진다. 더불어, Fouling에 의한 유로반경 감소 및 차압 증가로 인해, 필요 양정이 높아진 다. [29]

작동유체가 액체인 경우, Fouling은 아래와 같이 분류 될 수 있으며, 아래의 요인들이 중첩되어 작용한다면, Fouling은 더 촉진된다.

- Precipitation (crystallization) fouling: 유체 내부에 용해된 고체 성분이 열교환기 표면에 누적되는 현상이다.
- Particulate fouling

- Chemical reaction fouling: 열교환기 재질은 포함되지 않은 화학반응에
   의해 발생한 물질이 쌓여 발생하는 현상
- corrosion fouling: 열교환기 표면 재질에서 발생
- Biological fouling: 작동유체가 기체인 경우에는 영양분이 없어서 발생 하지 않음
- solidification(freezing) fouling: 유체의 freezing으로 발생

Fouling은 매우 복잡한 현상이며, 유체종류, 열교환기 형상, 작동 조건 에 따라 그 결과가 매우 다르며, 현재 Fouling을 적용은 열전달계수계산 시 fouling factor 더하는 것이 실제 사용 가능한 방법이다. 본 보고서에서 는 폐회로에서 관리되는 물의 fouling factor을 선정한다.

Fouling Factor for Closed-loop treated water: 0.000175 [m<sup>2</sup>-K/W] [29]

현재 생산 가능한 최대 PCHE 코어 판 크기는 600 x 1500 mm으로 추 정된다. 하지만, 필요한 경우 여러 블록을 결합하여 최종 교환기 코어를 형성할 수 있다.[12] PCHE 형상을 고려하면, 고온/저온 유로수가 동일하 며, 이 유로를 일렬로 배열했을 때, 유로직경, 유로개수, 유로 길이는 다 음과 같은 상관관계를 가진다.

$$W = N_h d_h + (N_h - 1) t_h = N_c d_h + (N_c - 1) t_c$$

혹은, 저온측 유로수가 고온측 유로수의 2배일 때 아래의 상관관계를 가진다.

$$2 \times (N_h d_h + (N_h - 1)t_h) = N_c d_h + (N_c - 1)t_c$$

정면에서 폭과 높이가 같을 때, Lx와 Ly는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$Ly = L_x$$
  
 $L_x = (W_h \times th_{p,h} + W_c \times th_{p,c})^{0.5}$   
판의 단수 =  $(W_h/L_x + W_c/L_y)$ 

열전달과 총괄열전달계수 및 비열의 상관관계는 다음과 같다.  $Q = U \times S \times LMTD = m \times C_p \times dT$ 

또한, 총괄열전달계수는 다음과 같다.

$$rac{1}{U} = rac{1}{h_h} + rac{1}{h_c} + rac{t_w}{K_w} + FF_h + FF_c$$

LMTD 최대화를 위해 일반적으로 그림18 처럼 역류 형태로 열교환기 를 배치해야 한다. 하지만 유로 형상을 설정하는데 공간 절약을 위한 배 관 설치를 고려하면, 그림 19과 같이 직교류 형태의 배열이 필요하다. 하 지만, 직교류의 경우 LMTD에 1 이하의 상관계수를 곱해야 하며, 이는 PCHE의 열전달 성능 저하로 이어진다.



그림 17 직교류 유로 형성 배열

내부 유로의 경우 그림 18과 같이 단순 역류, 다중 패스 역류 등 다양 한 유로를 형성할 수 있다.



그림 18 PCHE 내부 다중 유로[12]
또한, 내부 유로 직경이 판의 두께를 넘는 경우에도, 그림 19과 같이 PCHE 코어 판 제작이 가능하다.



또한, 아래와 같이 3개 혹은 그 이상의 작동 유체를 사용하기 위한 복합 적인 유로 설계가 가능하다.



그림 20 작동유체 3개를 가진 PCHE 내부 유로 [15]

따라서, LMTD 최대화를 위하여 PCHE 배치는 그림 23처럼 직교류 형 태로 다른 각기 다른 사분면에 입출구를 가지지만, 역류를 형성하는 유 로를 설정한다. 단, 직교류가 형성되는 구간에서는 보수적으로 열전달이 되지 않는다는 것을 가정하고, 최종 길이의 10%를 설계여유도로 배정한 다. 또한, 곡관은 무시하고 유로 전체가 직관인 것으로 가정한다.



그림 21 직교류 형태 입출구를 가진 역류 유로 배열

#### 2.3.2 PCHE 구조설계

구조설계의 입력 조건은 고온/저온측 작동 유체의 온도/압력/유량 및 열교환기의 재료가 있다. 이에 대한 출력은 플레이트 두께, 유로 사이의 간격, 작동 유체의 최대 허용 압력 및 코어의 최종 크기 등이 있다.

PCHE의 기계적 파손을 방지하기 위해 유로 벽 두께 및 판 두께는 설 계기준보다 커야 한다. 먼저 재료에 대한 허용응력은 보수적으로 600°F (316℃) 값을 적용한다.

 $\sigma = 12.4 [ksi] = 8.55 \times 10^7 [Pa]$ 

PCHE에서 플레이트는 내부 반경이 d/2이고 외부 반경이 t인 두꺼운 벽 실린더로 가정할 수 있으며, 판의 두께는 다음과 같이 계산 될 수 있 다.[6]

$$\sigma_D = \Delta p \left( \frac{1}{N_f t_f} - 1 \right)$$

피치, 유로사이 벽 두께와 판의 두께는 다음과 같이 계산될 수 있다. [4]

$$pitch_{minimum} = d + t_{f, minimum} \ge \left(1 + \frac{(\Delta P)}{\sigma_{max}}\right) d$$

 $t_{f, minimum} = pitch_{minimum} - d$ 

$$t_{f,minimum} \ge rac{pitch_{minimum}}{(rac{\sigma_D}{\Delta P} + 1)}$$

$$\frac{t_{P,minimum}}{D_{j}/2} \geq \begin{cases} \sqrt{\frac{\sigma_{\max} + P_{P}}{\sigma_{\max} + 2P_{s} - P_{p}}} & where P_{p} \geq P_{s} \\ \sqrt{\frac{\sigma_{\max} - P_{P}}{\sigma_{\max} - 2P_{s} - P_{p}}} & where P_{p} < P_{s} \end{cases}$$

## 2.4 EES를 이용한 열교환기 설계 코드 개발

## 2.4.1 EES를 이용한 열교환기 설계 코드

Engineering Equation Solver (EES)는 수천 개의 비선형 대수 및 미분 방 정식을 수치적으로 풀 수 있는 일반 방정식 풀이 프로그램이다. 이 프로 그램은 또한 미분 및 적분 방정식이 해를 구하고 불확실성 분석을 제공 할 수 있다. 또한, 선형 및 비선형 회귀, 단위 변환, 단위 일관성 확인 기 능이 있다.

특히, EES Liabrary를 통해 수백 가지 물질의 밀도, 엔탈피 등 열역학 적 수치를 제공하며, 이를 방정식 풀이 기능과 같이 사용할 수 있는데, 이는 공학자로 하여금 방정식을 세우고, 물성치를 입력하는 수고를 매우 줄일 수 있다. 더불어 새로온 상관식을 세우고 사용할 수 있는데, 이 기 능 역시 기능들과 동시 사용이 가능하다.

본 연구는 이러한 강점을 가진 EES를 이용하고 PCHE를 설계한다.



그림 22 EES 구동 화면

## 2.4.2 열교환기 설계를 위한 EES 코드 검증

EES를 이용하여 열교환기를 설계하는 것에 적절한지 확인을 위해, 그 림 23과 같이 KAIST에서 수행된 실험데이터와 비교하였다. 이 실험은 층류영역에서 고온/저온측 모두 공기가 작동유체이며, 고온측은 20 kW, 저온측은 10 kW로 동일한 동기가 다른 양을 가열된 한 뒤 주입된다.[7] [7]

Song(2006)은 총괄열전달계수는 층류 영역에서 106~280W/m<sup>2</sup>-K 형성되 며, 고온 유로 축구 온도와 저온측 유로 출구 온도 차이는 매우 작다고 하였다.



그림 23 KAIST 공기실험시설 개략도[7]

지배 방정식은 유로가 지그재그 형상인 것을 고려하여 본 연구의 PCHE설계 쓰인 상관식이 아닌, 실험으로 도출된 아래의 실험식을 사용 한다.

 $f = 4.17 \times Re^{-0.76}$  $N = 0.08 \times Re^{0.74} \times Pr^{2.69}$ 

형상정보는 아래와 같다.

 $N_h = N_c = 1280$ 

 $d_h = d_c = 0.00151[m]$ 

그림 24는 EES를 이용하여 열교환기 설계를 수행한 결과와 KAIST실 험 결과와 동일한 비율을 적용하여 비교한 결과이다. 단, 열교환기 열용 량 추산에 큰 영향을 주는 입출구 온도 정보가 부족하여, 임의로 가정하 였다. 그 결과, EES가 계산한 결과는 실험결과와 20% 이상 차이가 있었 다..

반면, 실험된 질량과 총괄열전달계수를 경계조건으로 설정한다면, 실험 결과와 일치하는 경계조건 다수를 도출할 수 있었으며, 표 1은 그 예이 다.



그림 24 총괄열전달계수 비교 - EES vs. KAIST실험 [7]

m <sub>h</sub>	U	Q	C <sub>p</sub>	t <sub>h,i</sub>	t <sub>c,i</sub>	t <sub>h,o</sub>	t <sub>c,o</sub>
[kg/s]	$[W/m^2-K]$	[W]	[J/kg-K]	[K]	[K]	[K]	[K]
0.0222	100.0	548.2	1032	523.0	503.0	505.0	522.0
0.0233	110.0	603	1032	533.0	493.0	495.0	532.0
0.0268	120.0	657.9	1032	543.0	483.0	485.0	542.0
0.0304	130.0	712.7	1032	553.0	473.0	475.0	552.0
0.0339	140.0	767.5	1032	563.0	463.0	465.0	562.0
0.0375	150.0	822.3	1032	573.0	453.0	455.0	572.0
0.0410	160.0	877.2	1032	583.0	443.0	445.0	582.0
0.0446	170.0	932	1032	593.0	433.0	435.0	592.0
0.0481	180.0	986.8	1032	603.0	423.0	425.0	602.0
0.0517	190.0	1042	1032	613.0	413.0	415.0	612.0
0.0552	200.0	1096	1032	623.0	403.0	405.0	622.0
0.0587	210.0	1151	1032	633.0	393.0	395.0	632.0
0.0623	220.0	1206	1032	643.0	383.0	385.0	642.0
0.0658	230.0	1261	1032	653.0	373.0	375.0	652.0

표 1 실험결과와 일치하는 EES 해

m <sub>h</sub>	U	Q	C <sub>p</sub>	t <sub>h,i</sub>	t <sub>c,i</sub>	t <sub>h,o</sub>	t <sub>c,o</sub>
[kg/s]	$[W/m^2-K]$	[W]	[J/kg-K]	[K]	[K]	[K]	[K]
0.0695	240.0	1316	1032	663.0	363.0	365.0	662.0
0.0222	100.0	548.2	1031	523.0	493.0	495.0	522.0
0.0233	110.0	603	1031	533.0	485.0	487.0	532.0
0.0268	120.0	657.9	1032	543.0	477.0	479.0	542.0
0.0304	130.0	712.7	1032	553.0	469.0	471.0	552.0
0.0339	140.0	767.5	1032	563.0	461.0	463.0	562.0
0.0375	150.0	822.3	1032	573.0	453.0	455.0	572.0
0.0410	160.0	877.2	1032	583.0	445.0	447.0	582.0
0.0446	170.0	932	1033	593.0	437.0	439.0	592.0
0.0481	180.0	986.8	1033	603.0	429.0	431.0	602.0
0.0517	190.0	1042	1033	613.0	421.0	423.0	612.0
0.0552	200.0	1096	1033	623.0	413.0	415.0	622.0
0.0587	210.0	1151	1033	633.0	405.0	407.0	632.0
0.0623	220.0	1206	1034	643.0	397.0	399.0	642.0
0.0658	230.0	1261	1034	653.0	389.0	391.0	652.0
0.0695	240.0	1316	1034	663.0	381.0	383.0	662.0
0.0222	100.0	548.2	1030	523.0	483.0	485.0	522.0
0.0233	110.0	603	1030	533.0	476.0	478.0	532.0
0.0268	120.0	657.9	1031	543.0	469.0	471.0	542.0
0.0304	130.0	712.7	1031	553.0	462.0	464.0	552.0
0.0339	140.0	767.5	1031	563.0	455.0	457.0	562.0
0.0375	150.0	822.3	1032	573.0	448.0	450.0	572.0
0.0410	160.0	877.2	1032	583.0	441.0	443.0	582.0
0.0446	170.0	932	1032	593.0	434.0	436.0	592.0
0.0481	180.0	986.8	1033	603.0	427.0	429.0	602.0
0.0517	190.0	1042	1033	613.0	420.0	422.0	612.0
0.0552	200.0	1096	1033	623.0	413.0	415.0	622.0
0.0587	210.0	1151	1033	633.0	406.0	408.0	632.0
0.0623	220.0	1206	1034	643.0	399.0	401.0	642.0
0.0658	230.0	1261	1034	653.0	392.0	394.0	652.0
0.0695	240.0	1316	1034	663.0	385.0	387.0	662.0

m <sub>h</sub>	U	Q	C <sub>p</sub>	t <sub>h,i</sub>	t <sub>c,i</sub>	t <sub>h,o</sub>	t <sub>c,o</sub>
[kg/s]	$[W/m^2-K]$	[W]	[J/kg-K]	[K]	[K]	[K]	[K]
0.0222	100.0	548.2	1029	523.0	473.0	475.0	522.0
0.0233	110.0	603	1030	533.0	467.0	469.0	532.0
0.0268	120.0	657.9	1030	543.0	461.0	463.0	542.0
0.0304	130.0	712.7	1030	553.0	455.0	457.0	552.0
0.0339	140.0	767.5	1031	563.0	449.0	451.0	562.0
0.0375	150.0	822.3	1031	573.0	443.0	445.0	572.0
0.0410	160.0	877.2	1032	583.0	437.0	439.0	582.0
0.0446	170.0	932	1032	593.0	431.0	433.0	592.0
0.0481	180.0	986.8	1032	603.0	425.0	427.0	602.0
0.0517	190.0	1042	1033	613.0	419.0	421.0	612.0
0.0552	200.0	1096	1033	623.0	413.0	415.0	622.0
0.0587	210.0	1151	1034	633.0	407.0	409.0	632.0
0.0623	220.0	1206	1034	643.0	401.0	403.0	642.0
0.0658	230.0	1261	1034	653.0	395.0	397.0	652.0
0.0695	240.0	1316	1035	663.0	389.0	391.0	662.0
0.0222	100.0	548.2	1028	523.0	463.0	465.0	522.0
0.0233	110.0	603	1029	533.0	458.0	460.0	532.0
0.0268	120.0	657.9	1029	543.0	453.0	455.0	542.0
0.0304	130.0	712.7	1030	553.0	448.0	450.0	552.0
0.0339	140.0	767.5	1030	563.0	443.0	445.0	562.0
0.0375	150.0	822.3	1031	573.0	438.0	440.0	572.0
0.0410	160.0	877.2	1031	583.0	433.0	435.0	582.0
0.0446	170.0	932	1032	593.0	428.0	430.0	592.0
0.0481	180.0	986.8	1032	603.0	423.0	425.0	602.0
0.0517	190.0	1042	1033	613.0	418.0	420.0	612.0
0.0552	200.0	1096	1033	623.0	413.0	415.0	622.0
0.0587	210.0	1151	1034	633.0	408.0	410.0	632.0
0.0623	220.0	1206	1034	643.0	403.0	405.0	642.0
0.0658	230.0	1261	1035	653.0	398.0	400.0	652.0
0.0695	240.0	1316	1035	663.0	393.0	395.0	662.0
0.0222	100.0	548.2	1027	523.0	453.0	455.0	522.0

m <sub>h</sub>	U	Q	C <sub>p</sub>	t <sub>h,i</sub>	t <sub>c,i</sub>	t <sub>h,o</sub>	t <sub>c,o</sub>
[kg/s]	$[W/m^2-K]$	[W]	[J/kg-K]	[K]	[K]	[K]	[K]
0.0233	110.0	603	1028	533.0	449.0	451.0	532.0
0.0268	120.0	657.9	1028	543.0	445.0	447.0	542.0
0.0304	130.0	712.7	1029	553.0	441.0	443.0	552.0
0.0339	140.0	767.5	1030	563.0	437.0	439.0	562.0
0.0375	150.0	822.3	1030	573.0	433.0	435.0	572.0
0.0410	160.0	877.2	1031	583.0	429.0	431.0	582.0
0.0446	170.0	932	1031	593.0	425.0	427.0	592.0
0.0481	180.0	986.8	1032	603.0	421.0	423.0	602.0
0.0517	190.0	1042	1033	613.0	417.0	419.0	612.0
0.0552	200.0	1096	1033	623.0	413.0	415.0	622.0
0.0587	210.0	1151	1034	633.0	409.0	411.0	632.0
0.0623	220.0	1206	1034	643.0	405.0	407.0	642.0
0.0658	230.0	1261	1035	653.0	401.0	403.0	652.0
0.0695	240.0	1316	1036	663.0	397.0	399.0	662.0

위 결과들이 타당한지 분석을 해보면, Song(2005)은 열교환기 고온측 입구는 저온측 출구 온도와 비슷하며, 고온측 출구 온도는 저온측 입구 온도와 비슷하다고 하였는데, EES 계산 결과 역시 비슷하다. 또한, 열교 환기 작동온도를 고려했을 때, 비열이 거의 일정한 것 역시 타당하다.

정리해보면, 그림 24의 20%이상의 오차는 임의로 가정된 열교환기 전 후단 온도에 의해 발생하였고, EES 계산 결과로 표현된 것으로 보인다. 하지만 질량, 열전달양 등 실험 결과를 경계 조건으로 설정한 경우, 합당 한 열교환기 입출구 온도를 도출하였다. 따라서 EES를 이용한 열교환기 설계는 타당함을 알 수 있다.

# 제3장 파라미터 분석 및 PCHE 최적 설계

3장에서는 PCHE 특성 및 고려 사항을 설명하고, 이후 PCHE 설계방법 론을 제하였다. 그 이후, 이 방법론의 정당성을 부여하기 위해 실험 결과 와 비교하였다.

이번 장에서는 SMR 열교환기 설계에 필요한 입출구 압력, 온도, 유량 등 경계 조건을 가정사항과 제한요건과 함께 제시한다. 이후 각 유로 직 경 및 개수 등 주요 파라미터의 PCHE 부피 등에 대해 영향을 분석하고, 최적화된 PCHE 모델을 제시한다.

### 3.1 경계 조건 및 고려 사항

#### 3.1.1 경계 조건

현재 국내외 SMR의 경우 대부분 연구 단계이며, 일차계통의 체적 및 열출력 등 주요 지표가 개발되지 않았다. 따라서, SMR 주요 지표들과 CVCS 열교환기 성능요건은 대형원전의 성능요건[30]과 공학적 판단에 의한 가정사항을 통해 도출해야 한다. 단, 이후 적용성을 높이기 위해 보 수적인 가정이 필요하다.

따라서, 그림 25과같이 압력과 온도는 대형원전의 수준을 유지하였고, 유량은 보수적으로 대형원전의 절반 수준인 256 L/min으로 가정한다.



그림 25 가정된 CVCS SMR 기동 환경[31]

또한, 가열과 냉각되는 양쪽의 모든 유체는 단상 액체의 물이며, 핵반 응 생성물등 오염물 침적 등에 의한 Foulingd을 최소화하기 위해 직관 (Straight Channel)을 채용했다. 더불어, 가열 및 냉각되는 작동유체는 모 두 단상의 물이기 때문에 보다 높은 열전달을 위하여 수치해석 범위는 난류 영역으로 확장하는 것이 바람직하다. 따라서, 다음과 같이 가정사항 이 정리 될 수 있다.

#### 설계 가정 사항

유로 형상: Counter Flow, Semi-Circular, Straight Channel
 ✓ 유로 단면적이 변하지 않은 반원(Semi-Circular) 모양의 직관

(Straight line). 단, 유로 Counter Flow, Straight 배관.

- ✓ 그림 22를 참고하여, LMTD 최적화를 위해 역류(Counter Flow)로 고온/저온 유로를 설정한다. 단, 유로 입구는 각기 다른 사분면에 위 치하지만, 내부 유로 설계로 역류를 형성한다.
- ✓ PCHE 전단부 고온측과 PCHE 후단부 고온측은 같은 유체가 같은
   유량으로 연속적으로 흐르는 구조로 반원 직경은 동일
- ✓ PCHE 설계 단순화를 위하여, 저온측 유로수는 고온측 유로 수와 동일하거나 2배로 설정한다.

✓ PCHE 폭과 높이는 같다고 가정한다.

- PCHE 전단 고온/저온측 유량: 265 L/min
- PCHE 후단 저온측 유량 : 795 L/min (= 3 × 265 L/min)
- PCHE 후단부에 냉각수로 주입되는 입구 온도(T<sub>ci</sub>): 40℃(105°F)
- PCHE 후단부 출구 온도: 40℃(105°F)+LMTD
- 재료: Stainless Steel A304 (현재 원전 열교환기에 사용되는 재료)
- Fouling Factor: 0.000175 [m<sup>2</sup>-K/W] (Closed-loop treated water)

이 가정 사항을 고려하면, 표 2과같이 EES를 이용한 PCHE 설계코드에 입력 할 수 있다.

표 2 PCHE 설계를 위한 주요 입력

PCHE 전단부	PCHE 후단부
$Th_{i} = 273.15 \ [K] + 265 \ [K]$ $Th_{avr} = \frac{Th_{i} + th_{o}}{2}$	$Th_{i2} = th_{o}$ $Th_{o2} = 322 [K]$ $Th_{avr2} = \frac{Th_{i2} + Th_{o2}}{2}$
$Tc_0 = 273.15 [K] + 240 [K]$ $Tc_1 = 273.15 [K] + 48.9 [K]$ $Tc_0 = Tc_0 + Tc_1$	Tc <sub>o2</sub> = Tc <sub>i2</sub> + LMTD Tc <sub>i2</sub> = 313.7 [K]
$Pr_{avr} = \frac{0}{2}$ $Ph_{i} = 1.541 \times 10^{7}$ [Pa]	$Tc_{avr2} = \frac{Tc_{o2} + Tc_{i2}}{2}$
$Pc_{i} = 1.7 \times 10^{7} [Pa]$	Ph <sub>i2</sub> = Ph <sub>i</sub> – dPh
$\rho_{NOP} = \rho(water, T = 322.05, P = Ph_i)$	Pc <sub>i2</sub> = 3x10 <sup>6</sup> [Pa]
mh = $\frac{265}{60} \cdot \frac{\rho_{NOP}}{1000}$	mh2 = mh
mc = mh	$mc2 = 3 \cdot mh$ Nh2 = Nh
$w = k (Stainless_{AISI304}, T = Tw)$ $\sigma_{A304} = 8.55 \times 10^7 [Pa]$	dh2 = dh Q2 = mh2 $\cdot$ (hh <sub>i2</sub> - hh <sub>o2</sub> )

### 3.1.2 설계 변수 및 제한 사항

PCHE의 설계 변수 및 제한사항은 다음과 같다.

### <u>주요 설계 변수</u>

- Fouling 전후 열교환기성능 변화
- PCHE Part.1 출구 온도:Th\_o
- 직경: dh, dc, dh2, dc2
- 유로수: Nh, Nc, Nh2, Nc2

#### 제한사항

- 열교환기 길이는 최대 12m를 넘지 않음 (40ft 컨테이너 기준)
- (Heatric 기준) 현재 제작할 수 있는 PCHE 판의 크기는 1.5m × 0.6m 이다. [12]
- 유속은 지나치게 빠른 건 FIV를 방지하기 위해 5m/s 이상의 유속은 지양한다. [32]

## 3.2 파라미터 분석

## 3.2.1 열전달계수의 영향

열전달계수(Heat Transfer Coefficient)는 열교환기를 설계에 있어 가장 중요한 파라미터 중 하나이다. 그림26은 열전달계수를 제외한 변수들을 변경했을 때, 열교환기 성능이라고 할 수 있는 온도 프로파일에 오차가 상대적으로 작음을 알 있다. 반면, 그림27은 다른 열전달계수 상관식을 이용해서 다른 변수에 비해 열교환기 성능(출구온도)에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다.



그림 26 Average temperature profile of primary fluid according to uncertainty of material property (Water) [33]



그림 27 Temperature profile in primary side by the heat transfer correlations (Water) [33]

Kim(2008)은 Wavy 유로의 Reynold 수에 Friction Factor와 Nusselt Number 상관관계식을 비교하였다.



그림 28 Friction factor correlations [5]



그림 29 Heat transfer correlations[5]

그림 30은 상관관계식 사용범위를 무시하고, 일률적으로 레이놀즈수 에 대응하는 Nusselt수를 EES로 계산한 것이다. 여기서도, 무시할 수 없 는 차이가 있으며, 각 유로 형상 및 작동유체에 대응하는 Nusselt수 및 Friction Factor 상관식을 사용하는 것은 매우 중요함을 알 수 있다.



그림 30 상관관계식에 따른 Re vs. Nu

3.2.2 직경과 유로수에 대한 부피 영향

그림 34를 보면 직경이 커질수록, 유로수가 증가 할 수록 체적이 커지 는 것 임을 알 수 있다.



그림 31 직경(m)과 유로수의 부피에 대한 영향

#### 3.2.3 차압

그림 33은 PCHE 전단부 고온후단 온도가 530K일 때, 직경에 따른 각 유로의 차압이다. 1mm에서는 매우 높은 차압이 발생하였지만, 이후 급 격히 작아진다.

CVCS 열교환기의 작동유체는 단상 유체(액체)로 펌프로 압력을 높이 는데 많은 에너지가 소모되지 않는다. 이는 기체가 작동유체인 VHTRs에 서는 압력을 높이기 위해서는 압축기에 많은 전력이 많이 필요하다는 것 과 다른 점이다. 축마력이 아래 식과 같이 구해진다.



축마력 [kgf·m/s] = 비중량[kgf/m<sup>3</sup>] x 펌프 유량[m<sup>3</sup>/s] x 펌프 전양정[m]

그림 32 직경에 따른 차압 (Tho=530K)

또한, 대형원전의 경우 130기압 정도의 압력이 오리피스 7~8개를 통해 강하 되는 것을 고려하면, 10기압 이하의 차압에서는 케비테이션이 발생 안 할 것으로 판단된다. [34] 3.2.4 PCHE 전단부 고온측 출구 온도와 직경의 부피 영향

아래 그림33과 그림34은 유로 개수가 각각 1000개일 때, 유로직경이 PCHE 전체 부피 및 길이에 가장 큰 영향을 주고 있다는 것이 관찰된다. 특히, 유로 직경이 4mm 이상 커지면서, 부피가 상대적으로 더 크게 늘 어난다. 더불어 PCHE 전단부 고온 출구 온도(Tho)가 낮을수록 PCHE 부 피 역시 커지는 경향을 보인다.

PCHE 전체 길이는 PCHE 전단부 고온 출구 온도가 높을수록 짧아지 지만, 유로직경이 작아질수록 길어진다.



그림 33 PCHE 전단부 고온 출구 온도와 직경 vs. 열교환기 체적



그림 34 PCHE 전단부 고온 출구 온도와 직경 vs. 열교환기 길이

## 3.2.5 Fouling에 대한 영향

그림 35과 36을 분석해 보면, Fouling은 PCHE 부피는 선형적으로 증가 시키지만, 길이의 경우 7mm에서 변곡점이 생기며, 유로직경이 1mm까지 작아지면 급격히 증가한다.



그림 35 Fouling에 따른 PCHE 부피



그림 36 Fouling에 따른 PCHE 길이

### 3.2.6 PCHE 전단부와 후단부의 부피 및 길이

그림 37와 그림 38을 보면, PCHE 전단부 고온측 출구온도가 500K이상 이면, PCHE 후단부의 부피와 길이가 90% 이상이 된다.



그림 37 PCHE 전단부 부피 및 후단부 부피



그림 38 PCHE 전단부 및 후단부 길이

#### 3.2.7 유로 개수에 따른 영향

그림 39는 PCHE 전단부 고온출구 온도가 530K일 때, 유로 개수에 따 른 열교환기 부피이다. 유로수가 증가하면, 부피 역시 증가하는 경향을 보인다. 직경이 7mm 이상에서 다소 복잡한 경향을 보이는데, 난류/천이 영역에서 층류영역으로 들어서는 영향으로 판단된다.

또한, 저온측 유로를 2배로 한 경우 PCHE 부피가 증가한다. 즉, 저온 측 유로가 2배가 되는 것은 길이는 짧아지는 것 보다, 폭이 증가하는 영 향이 더 커서 오히려 열교환기 체적이 커지는 경향을 보인다.



그림 39 유로 개수에 따른 PCHE 부피

그림 40을 보면 PCHE의 길이는 유로 개수가 작을수록 길어진다. 8mm 이상에서 천이영역을 지나 층류 영역에 들어선다.

또한, 저온측 유로를 2배로 한 경우, 유로개수가 500개 이하인 구간에 서 PCHE 길이 감소된다.



그림 40 유로 개수에 따른 PCHE 길이

#### 3.2.8 PCHE 종횡비 (높이-길이 비)

Kim(2008)은 VHTR의 열교환기의 크기와 마찰 손실 효과를 고려하여 경제적인 관점에서 최적화를 연구하였는데, 열교환기의 총비용은 설치비 용(Capital Cost)과 운영비용(Operating Cost)의 합으로 계산하였다. 비용에 절대적인 영향을 주는 것이 부피라는 것을 고려하면, 비용을 줄이는 설 계는 곧 체적을 줄이는 설계라고 할 수 있다.

600MWt VHTR의 IHX로 대비 종횡비가 1.0일 때 Cost는 1/4까지 감소 하는 것으로 조사되었다. 또한, 종횡비가 1.0인 형상의 경우 배치에도 상 당한 이점이 있을 것으로 판단된다.[5]

Kim(2008)에 따르면 작은 직경은 유효열전달면적 및 열전달향상 효과 가 있지만, 저항이 커짐에 따라 차압이 증가한다. 또한, 5MWt 의 PCHE 모듈의 경우 최적 종횡비(Aspect Ratio = Length / Height)는 1.0~2.5 였다.

하지만 위 연구 결과를 직접 적용하는 것은 어려울 수 있다. 그림 41 을 보면, 정육각형 모양으로 PCHE를 설계하면 부피가 더 늘어나는 것을 알 수 있다. 또한 유로 직경이 3mm가 넘어가면, 정육각형의 경우 한 변 의 길이가 0.6m 넘어가서, 식각 할 수 있는 판의 최대 크기(1.5m×0.6m) 를 넘는다. PCHE를 정육면체형으로 변경 시 얻을 수 있는 이익은 적은 것으로 보인다.



그림 41 PCHE 부피 비교 - 정육면체 vs. 직육면체

표 3는 최적화 모델과 동일한 부피를 가지는 경우와 비교한 것이다. 현재 안과 비슷한 PCHE 설계안이 충분히 나올수 있음을 보여주고 있다.

Т					402	т	L_total	Volume
I <sub>h,o</sub>	dh	Nh	Nc	Nc2		Lfouled	_fouled	total_fouled
[m]					[ra]	[111]	[m]	[m]
520	0.0035	1000	1000	1000	22459	0.2768	5.371	0.1288
490	0.0035	700	700	700	48772	1.066	7.679	0.1289
470	0.0035	500	500	500	103329	2.15	10.76	0.129
480	0.003	2000	2000	2000	9809	0.6282	3.67	0.1293
450	0.003	1000	2000	2000	9919	1.337	4.889	0.1292
510	0.0035	700	1400	1400	11368	0.4272	5.158	0.1299
470	0.003	1300	2600	2600	5737	0.7855	3.753	0.1289
480	0.003	1500	3000	3000	4272	0.5744	3.269	0.1296
490	0.0035	500	1000	1000	23677	1.012	7.131	0.1282
500	0.0035	1000	500	500	90118	0.7676	7.183	0.1292
530	0.0035	1300	650	650	51145	0.1225	5.478	0.1281
440	0.003	1500	750	750	71185	1.93	6.559	0.13
460	0.0035	500	250	250	426367	3.283	14.36	0.1291
460	0.003	2000	1000	1000	38881	1.118	4.913	0.1298

표 3 비슷한 부피를 가지는 경우 비교

### 3.2.9 유로수에 따른 유속

지나치게 높은 유속은 Flow Induced Vibration의 원인이 된다. 이에 일 반적으로 5 m/s 이하의 유속이 선호된다.[32] 따라서, 그림 42을 참고하 면, 유로수 1000개 이상, 3mm 이상의 유로 직경이 요구된다.



### 3.3 PCHE 설계 최적화

이전 절의 파라미터 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 열전달계수 상관관계식은 열교환기 설계에 매우 중요하다.
- 1mm 직경은 차압과 유속 측면에서 지양해야 한다.
- 직경과 채널수가 증가할수록, 부피도 같이 증가한다.
- PCHE 전단부 고온 출구 온도가 높을수록, 직경이 작을수록 부피 가 작다
- fouling의 영향은 1~2mm일 때 크며, 특히 1mm에서는 극적으로 더 커진다.
- PCHE 후단부가 전체 부피 대부분을 차지 한다.
- 저온 유로 개수를 고온 대비 2배로 늘려도 부피에 대한 이익은 적
   다
- 정육각형 형태의 PCHE를 설계할 경우, 동일한 열용량을 갖고, 길 이가 긴 직육면체 모양의 PCHE대비 부피가 증가한다.
- 유체의 속도를 5m/s 이하로 유지하기 위해서는, 3mm 이상의 유로 직경이 선호된다.

정리해보면, 3mm 이상의 직경을 가지고, 고온 및 저온 유로 수는 같은 것이 좋다. 다만, SMR CVCS 열교환기를 설계하는데 있어 가장 중요한 지표는 크기이기 때문에, 가능한 직경은 작아지는 것이 좋다. 작은 직경 은 작은 체적으로 이어지는 경향이 뚜렷하기 때문이다.

하지만 여기에 아래의 제한 사항이 반영되어야 한다.

- 현재 제작 가능한 PCHE 판 크기 1.5m × 0.6m
- 직교 유로 형성구간에서는 보수적으로 열전달이 없다고 가정
- 유지보수를 고려한 PCHE 전체 길이 5m 이내 (컨테이너 길이

12m)

즉, 현재 PCHE 제작자들이 만들 수 있는 판의 면적은 1.5m × 0.6m로 정해져 있다. 여러 판의 적층 용접을 통해 접합할 수 있지만, 공정 최소 화 및 단순화를 위해 이 방법은 배제한다.

따라서, 그림 22을 참고하여, 그림 50과 같이 유로를 형성할 수 있으 며, 직경에 해당하는 유로의 폭 및 길이는 표 4와 같다.

직경 (mm)	10	9	8	7	6
유로 폭 (Lx)	0.3679	0.3311	0.2943	0.2575	0.2207
전단부 유로 길이 (m)	0.3471	0.3369	0.3362	0.3294	0.3278
후단부 유로 길이 (m)	4.6950	4.7390	4.6410	4.5990	4.6400
총 유로 길이 (m)	5.0420	5.0750	4.9770	4.9290	4.9680
유로 면적(m <sup>2</sup> )	1.8550	1.6803	1.4647	1.2692	1.0964
직경 (mm)	5	4	3	2	1
유로 폭 (Lx)	0.1839	0.1472	0.1104	0.0736	0.0366
전단부 유로 길이 (m)	0.3346	0.3561	0.4069	0.5319	0.9555
후단부 유로 길이 (m)	4.8120	5.2150	6.0800	8.1100	14.8300
총 유로 길이 (m)	5.1470	5.5710	6.4870	8.6420	15.7800
유로 면적(m <sup>2</sup> )	0.9465	0.8201	0.7162	0.6358	0.5768
제작 가능 한 판의 면적 (m²)			0.9		

표 4 직경에 따른 유로 폭 및 길이

즉, 직경 4mm인 경우, Fouling 환경을 가정 했을 때, PCHE 전단부는 0.3561m의 길이만 필요하며. 이는 길이 0.45m<sup>1</sup>) 의 첫 번째 직선 유로만 PCHE 전단부로 사용될 수 있다는 것이다. 이는 PCHE전단부와 PCHE 후 단부 구역이 단순하게 나뉘는 것이므로, PCHE 작동유체의 입출구 및 공

1) 판 가로폭 - 0.5 ×유로 폭(Lx) × 2 = 0.6 - 0.15 / 2 × 2 [m]

간 최적화에 도움이 된다.

판의 전체 길이 1.5m를 고려하면, 유로개수가 1000개인 경우, 직경 4 mm의 경우 유로는 그림43와 같이 5번 왕복이 가능하지만, 5mm의 경우 그림 48을 보면 4번에 불과하다. 직경이 4mm일 때, 평면도 상 유로의 면적은 0.82m<sup>2</sup>이며, 1.5m × 0.6m 판의 면적인 0.9 m<sup>2</sup> 중 빈 공간은 설계 여유도 및 유로 사이 벽을 형성한다.



그림 43 내부 유로 평면도 (직경 4mm, 유로수 1000개)



그림 44 내부 유로 평면도 (직경 5mm, 유로수 1000개)

제한 조건을 정리해 보면, 차압 및 파울링 현상과 부피 최소화를 고려 하여 직영은 3~5mm로 제한되어야 하며, 유로 개수는 700~1500개 사이가 되는 것이 타당하다. 또한, PCHE 폭, 전단부, 후단부의 길이는 각각 0.15m, 0.45m, 5.25m로 제한되어야 한다. 이러한 범위를 0.1mm 및 유로 수 1개 단위로 총 16,821개의 경우를 계산해 본 결과, 위 제한 조건을 만 족하는 범위에서 PCHE 부피가 최소가 되는 모델은 직경 3mm, 유로 각 1224개이다.

따라서, 이와 같이 최적화된 열교환기 유로의 직경은 3mm로 정하며, 그 외 열교환기 재원 및 치수는 그림45, 그림46 및 표 4 와 같다.



그림 45 PCHE 설계안



그림 46 PCHE 내부 유로 최적안

Design Specifi	ication for	· PCHE fo	or SMR CV	VCS				
Core Size [m]	0.1241×0.1	175×5.484	Channel Leng Part1 [m]	gth, 0.346				
Core Block Size[m]	0.6×0.1	175×1.5	Channel Leng Part2 [m]	gth, 5.137				
Core/Block Volume [m <sup>3</sup> ]	0.07994/0.1058		Total Chann Length [m]	el 5.484				
The Number of channel per a layer	36	The Numb	er of Layer	68				
Compactness [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	647.3	Workir	ng Fluid	Water				
Total Heat Duty [MW]		4.	701					
	Hot Side,	Hot Side,	Cold Side,	Cold Side,				
	Part 1	Part 2	Part 1	Part 2				
Thermal Parameters								
Channel Type	straight	straight	straight	straight				
Mass rate [kg/s]	4.4	13.19	4.4	4.4				
Quantity of channel	1,224	1,224	1,224	1,224				
Diameter [m]	0.003	0.003	0.003	0.003				
Hydraulic Diameter [m]	0.001833	0.001833	0.001833	0.001833				
Cross Section Area [m <sup>2</sup> ]	0.004324	0.004324	0.004324	0.004324				
Surface [m <sup>2</sup> ]	3.269	48.48	3.269	48.48				
Temperature (in/out)[℃]	290.6/256.9	256.9/48.9	48.9/239.9	40.6/152.0				
LMTD [°C]	111.0	38.0	111.0	38.0				
Inlet Pressure [MPa]	15.4	15.4	17	3				
Pressure Drop [Pa]	836.2	12175	826.9	89607				
Cph[J/kg-K]	4989	4268	4245	4205				
Viscosity [Pa-s]	0.0000991	0.0001827	0.0001944	0.0002940				
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	774.9	922.7	931	962.4				
Nusselts Number	53.41	38.05	37.07	79.43				
Reynolds Number	18806	10196	9585	19008				
Heat Transfer Coefficient (Clean/Service) [W/m <sup>2</sup> -K]	7087/8583	2036/2144	7087/8583	2036/2144				
Heat Duty [MW]	0.741	3.96	0.741	3.96				
	Mechanical	Parameters						
Pitch [m]	0.003435	0.003435	0.003435	0.003435				
Plate Thickness [m]	0.001727	0.001727	0.001727	0.001727				

표 5 PCHE 최적화 모델

대형원전과 SMR의 원통다관식열교환기 적용되었을 때 체적과 PCHE 체적을 비교하면, 표 7과 같다.

	APR1400 Shell & Tube HE (RHX+LHX)	SMR Shell & Tube HE (RHX+LHX)	PCHE
열용량(MW)	9.13 (2.73+6.4)	4.56 (9.13/2)	4.7
입구 압력 (bar)	152.4	152.4	152.4
입/출구 온도 (℃)	290.6 / 48.9	290.6 / 48.9	290.6 / 48.9
코어 블록 부피 (m <sup>3</sup> )	1.4170 (0.1711+1.2449)	$\begin{array}{c} 0.6756 \\ (0.0856^{2}) + 0.5891^{3}) \end{array}$	0.1058
차압 (bar)	$4.07 \\ (=3.24 + 0.83)$	1.024)	0.13 / 0.9 (고온/저온측)
전열면적 (m <sup>2</sup> )	RHX19.32	51.75	
유량 (L/min)	530		
내경(m)	RHX 0.005	0.003	
유로개수	RHX 81	1224	

표 6 PCHE 도입에 의한 체적 감소 효과

결과적으로 PCHE 도입에 따른 CVCS 열교환기와 필요 공간은 코어블 록 기준으로 APR1400 열교환기 대비 7.5%, SMR 열교환기대비 15.7% 수 준으로 예상된다.

하지만, 관련 규제 및 산업기준에 따라 확보하였던 기존의 두 대의 열

- 2) RHX: 유량을 고려하여 APR1400 RHX의 50% 적용,
- 3) LHX: https://www.alfalaval.com/
- 4)  $4.07 \times (\frac{265}{530})^2$
교환기 유지보수 공간은 한 대의 열교환기 유지보수 공간만 필요하게 된 다. 즉, 없어지는 열교환기 한 대 분의 지지대 및 유지보수를 위한 공간 만큰 공간 절약이 될 것이다. 따라서, PCHE가 SMR 열교환기로 적용된 다면, SMR에 적용될 수 있는 원통다관형 열교환기 대비 1/10 이하, APR1400에 적용되는 원통다관형 열교환기 대비 1/20 이하가 예상된다.

## 제4장 결론

### 4.1 연구 결과 요약

본 연구에서는 CVCS의 두 개의 원통다관형 열교환기 2개를 작지만, 고강도 고성능을 가진 PCHE로 대체하는 것을 제안하였으며, 그 결과 PCHE가 SMR CVCS 열교환기로 도입된다면, 열부하 등 열수력 성능 등 은 만족하면서도, 기존의 열교환기 대비 상당한 공간을 절약할 수 있는 것으로 평가되었다.

이를 위해, Engineering Equation Solver를 이용한 PCHE 설계방법론을 제시하고, 그 결과로 SMR CVCS에 사용될 수 있는 PCHE의 수치적 크 기를 제시했다. 이 PCHE의 반원 단면적을 가진 직선 유로로 구성되어 있으며, 오염물의 퇴적과 같은 파울링 조건을 적용하여 보수적 설계를 하였다. 또한, 가열 및 냉각되는 작동유체는 모두 단상의 물이기 때문에 수치해석 범위는 난류 영역으로 확장되었다. 더불어, EES를 사용하여 PCHE를 설계하는 설계 방법의 검증을 위해, EES 수치해석결과와 실험 결과를 비교하였다.

PCHE를 설계 하는데 있어 가장 영향이 있는 변수 중 하나는 직경이 다. 직경의 변화에 따라 열교환기 길이 및 부피는 크게 변하였다. 특히 오염된 열교환기 표면을 가정한 환경에서는 직경이 작을수록 길이와 차 압이 급격히 증가한다. 따라서 2mm 이하의 반원직경은 타당하지 않은 것으로 판단되었다. 또한, 유로 수가 많아지면 길이는 짧아지지만, PCHE 부피는 오히려 증가하는 경향을 보였다.

SMR CVCS 유량은 원자로 크기 감소에 따라 256 L/min로 감소하고, 원자로 압력은 유지된다고 가정하였을 때, 최적화된 PCHE의 주요 설계 사양은 표 7와 같다.

표 7 PCHE 최적 모델 주요 지표

코어 크기 (가로×세로×길이)	0.1241 m $\times$ 0.1175 m $\times$ 5.484 m (0.07994 m <sup>3</sup> )
코어 블록 크기 (가로×세로×길이)	0.6 m × 0.1175 m × 1.5 m (0.1058 m <sup>3</sup> )
유로 (반원)직경	3 mm
고온/저온 유로수	1,224개

그 결과, PCHE가 SMR CVCS 열교환기로 적용된다면, 열교환기 설치 에 필요한 공간은 SMR에 적용될 수 있는 원통다관형 열교환기 대비 1/10 이하, APR1400에 적용되는 원통다관형 열교환기 대비 1/20 이하가 예상된다.

SMR에 있어 부피는 가장 중요한 지표 중 하나인 것으로 고려하면, 이는 중요한 진전이라고 할 수 있다. 이러한 작은 크기의 열교환기는 CVCS 계통 전체를 모듈화하여 공장에서 제작할 수 있게 하여, 건설비용 및 공사 기간을 줄이는 데 큰 도움이 될 것으로 기대된다. 이와 더불어 확산용접(Diffusion Welding)을 통해 열교환기가 제작되므로 안정성은 더 커질 것으로 기대된다.

#### 4.2 결론 및 제언

현재 많은 SMR의 경우, 대형원전의 원자로건물 역할까지 모두 할 수 있는 원자로용기(Containment Vessel)을 공장에서 완제품을 생산하고, 원 전현장에서는 설치만 하여 경제성을 확보하는 것이 큰 목표이다. 이러한 흐름에 맞추어 CVCS도 컨테이너 박스 혹은 동등한 운송 패키지에 운송 될 수 있어야 한다. PCHE 도입 된다면, CVCS 주요 기기의 많은 부피를 차지하는 열교환기 공간을 줄임으로서 이 목표에 더 다가설 수 있을 것 이다. 또한, PCHE 코어의 전체 길이가 컨터네이너 길이 12m 보다 훨씬 짧아 수리 및 교환이 가능하도록 설계하였다.

PCHE의 허용압력은 원자로 설계압력의 5배에 이르며, 크기는 원통다 관형열교환기 대비 1/10 이하이다. 이러한 PCHE의 성능과 안정성을 고 려하면, 고온고압의 SMR CVCS의 가혹한 환경을 버티는 데 충분한 것으 로 판단된다. 또한, 최적화된 CVCS PCHE의 코어블록의 크기 0.1058 m<sup>3</sup> 를 고려했을 때, 모듈형 CVCS 설계로서 컨네이너안에 설치 될 수 있을 것으로 보인다.

한편, 아직 PCHE 설계, 제작 및 검사에 대한 기준(Standard)가 없는 것 은 PCHE가 원전에 도입되기 전 해결되어야 할 현안이다. 하지만 현재 ASME Section Ⅲ Division 5 High Temperature Reactor에 PCHE 설계, 제 작 및 검사 요건을 추가하기 위한 연구가 진행되고 있고, UT, X-ray, Neutron radiography, Strain Sensor 등이 비파괴검사 방법으로 논의되고 있 다는 점은 현안 해결에 대한 청사진을 그리게 한다. 더불어, 원전에 여러 개의 예비품을 구비 해두고, 계획예방정비(Overhaul)동안 예비품을 설치 뒤 연구실 등으로 PCHE를 이송하여 비파괴 검사를 하는 것도 방법이다.

더불어, 현재 대형원전에서 사용되고 있는 원통다관식 열교환기를 PCHE로 대체할 경우, 중동 등 가혹한 원전 운전환경에서도 EUR Rev.E 의 더 엄격해진 원자로 냉각 시간 요건을 만족할 수 있을 것으로 기대된 다.

마지막으로 이 연구를 하는 데 있어 경계조건이라고 할 수 있는

CVCS 열교환기 성능요건은 보수적으로 가정되었다. 추후 SMR CVCS 계통설계가 진행되어 완화된 기준을 PCHE에 적용한다며, 더 작은 PCHE 설계가 가능할 것으로 기대된다.

# 참 고 문 헌

- 1. World Energy Outlook. 2020.
- Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities. OECD, NEA : 2021.
- Piyush, Sabharwall and Kim, Eung Soo . Feasibility study of secondary heat exchanger concepts for the advanced high temperature reactor. Idaho National Lab.(INL). 2011. INL/EXT-11-23076.
- Yoon, Su-Jong , Sabharwall, Piyush and Kim, Eung-Soo . Analytical study on thermal and mechanical design of printed circuit heat exchanger. Idaho National Lab.(INL). Idaho Falls, ID (United States) : 2013. INL/EXT-13-30047.
- Simplified optimum sizing and cost analysis for compact heat exchanger in VHTR. Kim, ES , Oh, C. H. and Sherman, S . 2008. Nuclear Engineering and Design. Vol. 238.10, p.2635-2647.
- Hesselgreaves, John E., Law, Richard and Reay, David .
  Compact Heat Exchangers: : selection, design and operation.
  Butterworth-Heinemann : 2016.
- Song, Sung Chu, Thermal-hydraulic performance of a printed circuit heat exchanger in an air test loop. 2006.
- 8. Kim, IH . Experimental and numerical investigations of thermal-hydraulic characteristics for the design of a Printed

Circuit Heat Exchanger (PCHE) in HTGRs. 2012.

- Experimental study for pressure drop and flow instability of two-phase flow in the PCHE-type steam generator for SMRs. Shin, Chang Wook and No, Hee Cheon . 2017. Nuclear Engineering and Design. Vol. 318, p. 109-118.
- 10. Shah, Ramesh K and Sekulic, Dusan P. Fundamentals of heat exchanger design. John Wiley & Sons : 2003.
- 11. https://www.vpei.com.
- 12. https://www.heatric.com.
- American Welding Society. Diffusion Welding and Diffusion Brazing. Welding Handbook. 9. 2007, p.421 - 450.
- 14. "Diffusion bonding in compact heat exchangers." SouthallDavid. Tokyo : 2009. Proceeding of ICAPP'09. Volume 14,
- Design Considerations for Compact Heat Exchangers. Southall, David , Renaud, Renaud Le and Dewson, Stephen John. 2008. Proceedings of ICAPP '08. Paper 8009.
- "Nuclear Safety Criteria for the Design of Stationary Pressurized Water Reactor Plants." ANS/ANSI. 1983. ANSI 51.1.
- Safety Classification of Structures, Systems and Components in Nuclear Power Plants. IAEA. 2014. SSG-30 .
- 18. Safety of Nuclear Power Plants. IAEA. 2016. SSR-2/1.
- 19. European Utility Requirements. EUR. 2016.

- Exemptions NuScale Standard Plant Design Certification Application. U.S. NRC. PART 7 - Exemptions.
- 21. http://www.ndttechnologies.com/
- Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components. "ASME Boiler and Pressure Vessel Code." ASME, 2021
- Steam Generator Management Program: Pressurized Water Reactor Steam Generator Examination Guidelines. Electric Power Research Institute. 2007. TSF 449.
- Steam Generator Program Guidelines. Nuclear Energy Institute.
  2011. NEI 97-06.
- "Reactor Coolant System and Connecting Systems." U.S. NRC.
  2020. NuScale Standard Plant Design Certification Application. Chapter 5.
- Non-destructive examination of diffusion-bonded compact heat exchangers. Selby, Greg , Aakre, Shaun and Fan, Zhaoyan .
   2020. American Society of Mechanical Engineers. Vol. 83839, p. V003T03A025.
- 27. Thermal and Hydraulic Behavior of High-Temperature Fluids in Diffusion-Bonded Heat Exchangers. Aakre, Shaun Robert . 2021. The University of Wisconsin-Madison.
- Le Pierres, Renaud , Southall, David and Osborne, Stephen .
  Impact of mechanical design issues on printed circuit heat

exchangers. Proceedings of SCO2 power cycle symposium. University of Colorado Bolder : 2011, Vol. 2011,

- 29. RohsenowWarren M, HartnettJames P, ChoYoung I. "Handbook of heat transfer." McGraw-Hill : 1998.
- 30. APR1400 DESIGN CONTROL DOCUMENT TIER 2. KEPCO/KHNP, 2018. APR1400-K-X-FS-14002-NP.
- 31. APR1400 System Design. KEPCO/KHNP : 2016. APR1400-Z-M-EC-16002-NP.
- 32. Flow of Fluids. 2009. Technical Paper No.410.

## Abstract

# Development of a design method for printed circuit heat exchanger for compact design of heat exchangers of CVCS

CHOI, Jungdae

Department of Engineering Practice Graduate School of Engineering Practice Seoul National University

Compact size is one of the most important parameters for small modular reactor (SMR) to facilitate factory fabrication and shipping to remote site. So, chemical and volume control system (CVCS) for the SMR should be more compact because the size of the CVCS is considerable in nuclear power plant.

Meanwhile, printed circuit heat exchanger (PCHE) is one of the most promising heat exchangers of an intermediate heat exchanger in high temperature gas-cooled reactors (HTGRs) with helical tube heat exchanger, since PCHE offers high effectiveness and a compact size. Thus, in this study, the numerical sizing of PCHE for CVCS heat exchangers is proposed by replacing two shell and tube heat exchangers for CVCS with a PCHE.

The numerical solutions is obtained by equation solver program,

Engineering Equation Solver (EES). For validation of the design method using the EES to design the PCHE, the program's output had been compared with experimental data in the experiment conditions. As a result of this study, size and thermal-hydraulic performance such as heat capacity for the PCHE for the SMR had been investigated and it was evaluated that the size of the CVCS heat exchangers for SMR would reduce dramatically if PCHE applies to the SMR. Differ from PCHE for HTGRs, the numerical simulation range was expanded to turbulent area because the working materials of the both sides are single phase of water.

keywords : Printed Circuit Heat Exchanger, Small Modular Reactor, Chemical and Volume Control System Heat Exchanger, Heat transfer enhancement

Student Number : 2018-28745