

CFD Investigation on Shape Effect of Helically Wrapped Wire Spacer in a Heat Pipe

May 14-16, 2021



Gi-Uk Choi^a, Han-Seop Song^a, Su-Jong Yoon^b, Min-Seop Song^{b*}, Jae-Ho Jeong^{a*}

^a*Gachon University, 1342, Seongnam-daero, Sujeong-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do*

^b*Idaho National Laboratory, 2525 Fremont Ave., Idaho Falls, ID 83415, United States*



CONTENTS

01 Introduction

02 Numerical Method

03 Result

04 Conclusion

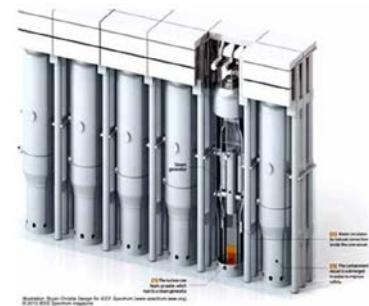
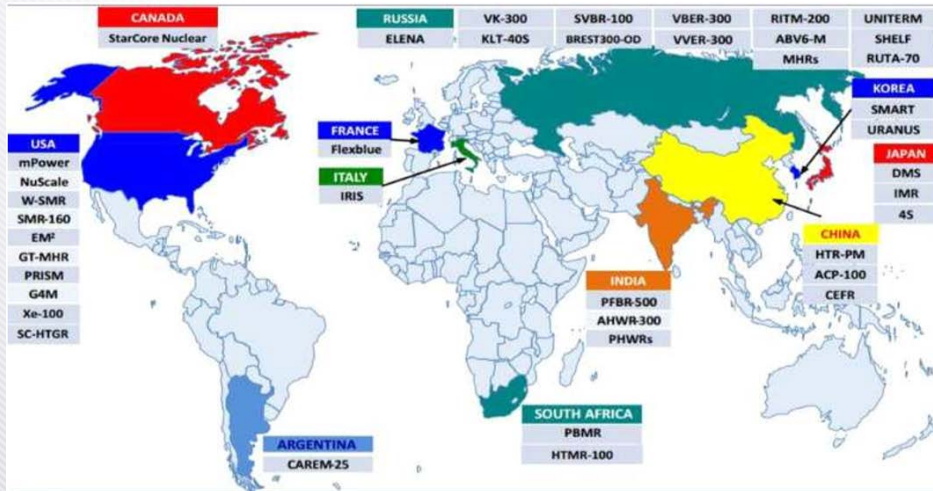


01

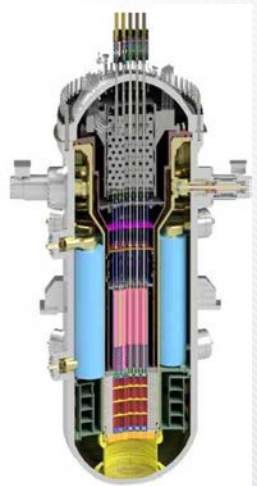
Introduction

소형 원자로 동향

- » 300MW 이하의 원자로를 소형원자로로 정의하며 많은 장점이 있음.
 - 크기가 작아 모듈 단위로 공장에서 제작하여 현장에서 설치 가능.
 - 분산전원, 난방열, 해수담수화 등 활용 가능.
 - 신재생에너지의 간헐성, 노후화된 화석연료 발전의 온실가스 문제점 해결 가능.
- » 전세계 50여국에서 소형원자로의 기술개발이 활발히 진행 중임.
 - 한국: SMART-100, KAIST-MMR, URANUS, REX-10
 - 미국: Nuscale, mPOWER, SUPERSTAR
 - 일본: DMS, IMR, 4S



<NuScale>

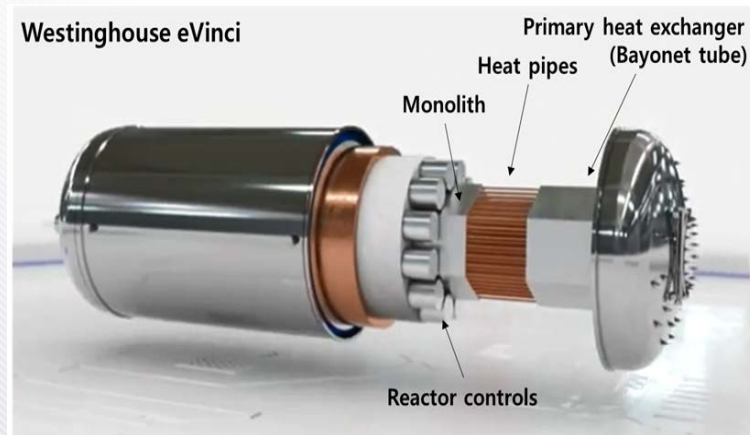


<SMART-100>

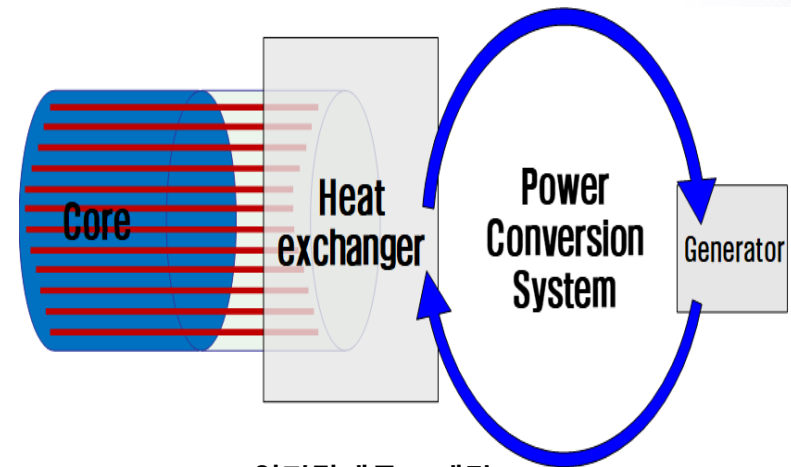


열전도관 원자로 (Heat Pipe Reactor, HPR)

- ▶ 중대사고가 배제되고 자율/원격운전이 가능한 **초소형 원자로**
 - ▶ 외부 전력공급없이 원자로 냉각 가능.
 - ▶ 단순한 설계로 복잡한 안전성 문제 배제 및 용이한 설치.
 - ▶ 제어봉 구동 없이 원자로 출력 자가조절이 가능함.
- ▶ 원자로 **소형화의 핵심기술로서 히트파이프 기술이 활용됨.**
 - ▶ 현재, 국내 열전도관 냉각 원자로 설계 기술의 경우 기초개념 연구개발 수준인 TRL 2 정도에 해당함.
 - ▶ 열전도관의 열전달 성능은 유체의 종류, 워의 구조, 가열부에서의 비등 열전달, 냉각부에서의 응축 열전달 등에 의해 결정됨.



<Westinghouse eVinci>



<eVinci 열전달계통도 계략도>

Theme

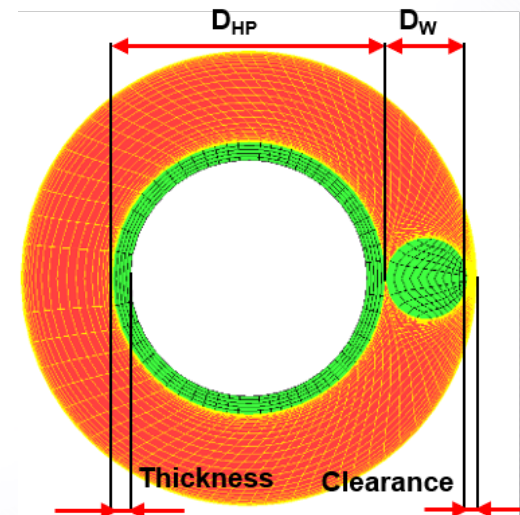
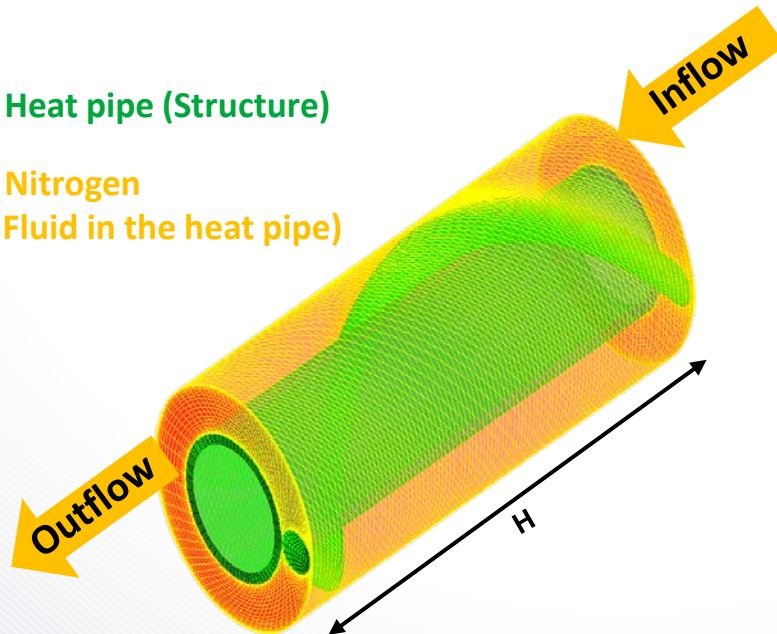
» CFD Investigation on Shape Effect of Helically Wrapped Wire Spacer in a Heat Pipe

» 냉각부는 대류에 의한 냉각이 이루어지기 때문에 **대류 열전달 성능이 중요함.**

- 열전도관 외부에 와이어를 감아 유체의 체류시간을 증가시켜 냉각 성능을 향상시킴.
- 와이어의 지름, 회전 거리 등 **형상 변수**와 강선 주변을 흐르는 유체의 **유동 특성**에 의한 영향을 받음.
- 와이어로 인해 접합부에서의 온도상승 및 역압력구배로 인해 복잡한 유동특성을 띤.

*초록색: Heat pipe (Structure)

*주황색: Nitrogen
(External Fluid in the heat pipe)



02

Numerical Method

Computational Grid System

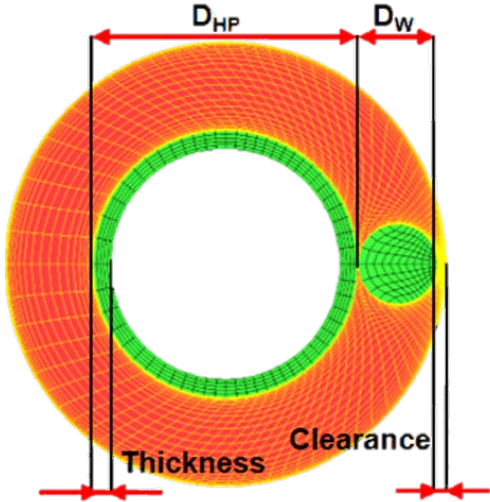
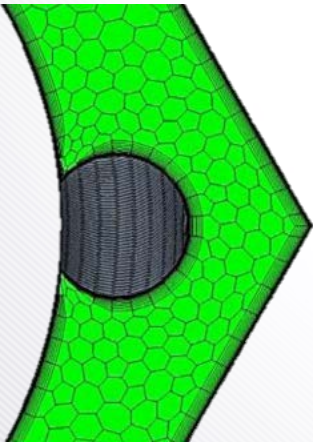
» Structured meshes (8-pitch)

- Fluid Region: 2,400,000 Cells
- Structures Region: 320,000 Cells

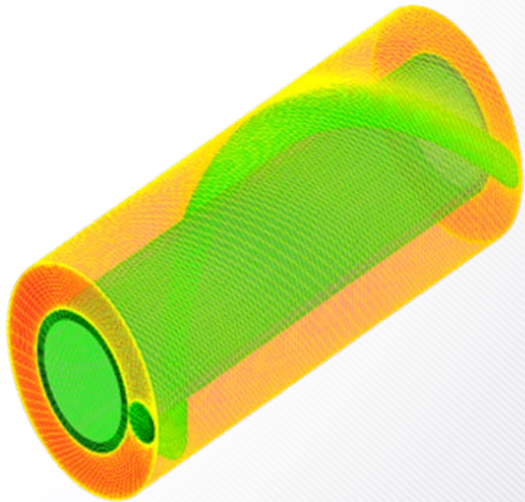
8-pitch	Cells	Nodes	Elements
Fluids	2,400,000	2,482,299	2,400,000
Structures	320,000	384,480	320,000
Total	2,720,000	2,866,779	2,720,000

» Innovative grid generation methodology

- Line contact simulation



<Cross sectional view Heat pipe with wire spacer>



<Perspective view Heat pipe with wire spacer>

[1] Dianle Wang., "Thermal-hydraulic analysis of a 7-pin sodium-cooled fast reactor wire-wrapped fuel bundle"

Modeling Method

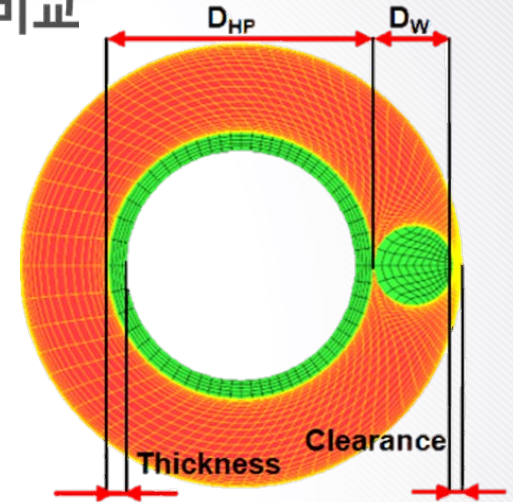
» Geometry shape에 따른 Friction factor 와 Nusselt Number 비교

➢ 8개 형상의 Case 비교

» 변수를 무차원화하여 형상을 비교함.

➢ D_w/D_{HP} : Wire diameter to Rod diameter ratio

➢ H/D_{HP} : Wire lead pitch to rod diameter ratio



Case	D_{HP} [mm]	D_W [mm]	H [mm]	D_w/D_{HP}	H/D_{HP}	Clearance [mm]	Thickness [mm]
1	3	0.9	12	0.3	4	0.1	0.2
2	6	0.9	24	0.15	4		
3	3	0.9	48	0.3	16		
4	6	0.9	96	0.15	16		
5	3	1.8	12	0.6	4	0.2	
6	6	1.8	24	0.3	4		
7	3	1.8	48	0.6	16		
8	6	1.8	96	0.3	16		

Boundary Condition

» Inlet

- Reynolds number에 따른 3가지의 입구 속도 설정
- $Re=5000, 10000, 15000$
- Temperature: 573.15 K
- Fluid: N_2

» Heat Source

- Heat pipe inner wall
- Constant Temperature: 953.15 K

» Turbulence Model

- RANS (Reynolds Averaged Navier–Stokes simulation)
- $k-\varepsilon$
- Convergence: Temperature & Velocity @ Outlet

» Outlet

- Relative Pressure: 0 Pa





03

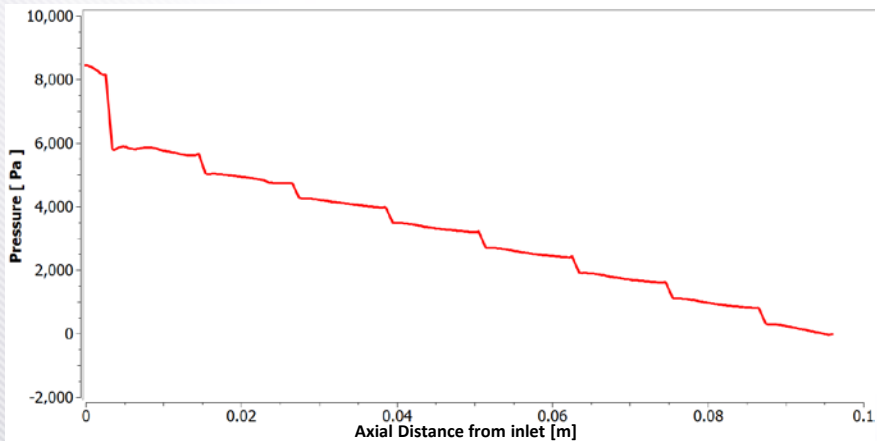
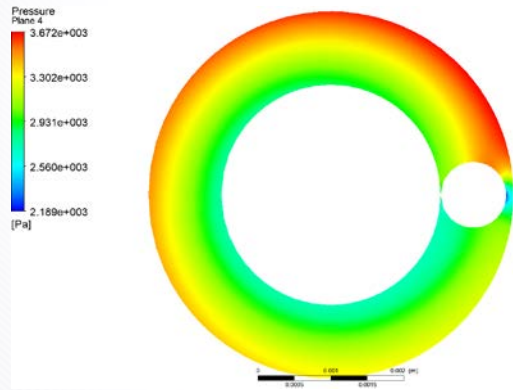
Result

Effect of Wire spacer - Pressure

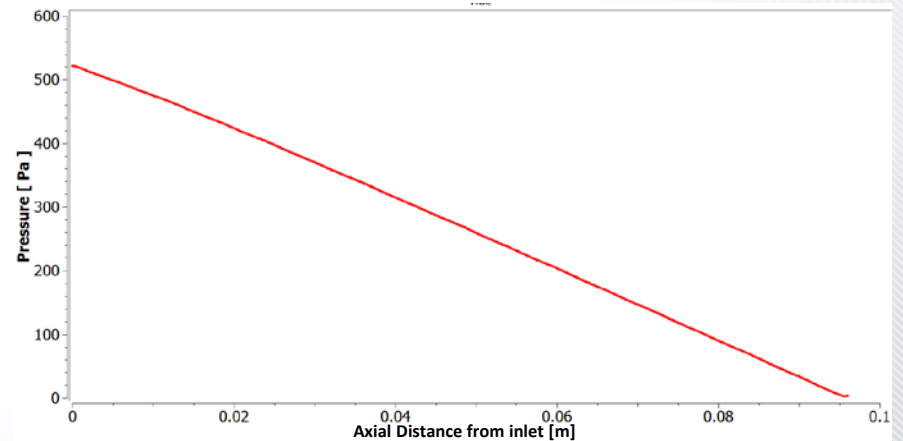
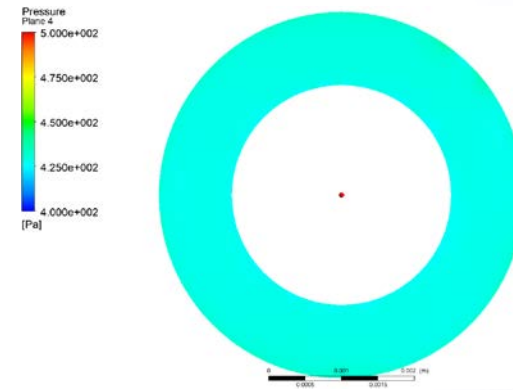
» Wire spacer에 의한 압력강하가 크게 나타난 것을 확인함.

- ▶ Wire spacer의 영향에 의해 급격한 압력강하가 나타남.
- ▶ Wire spacer와 인접한 부분의 축방향 속도가 증가함에 따라 국소적으로 압력이 감소됨.

<With wire spacer>



<Without wire spacer>

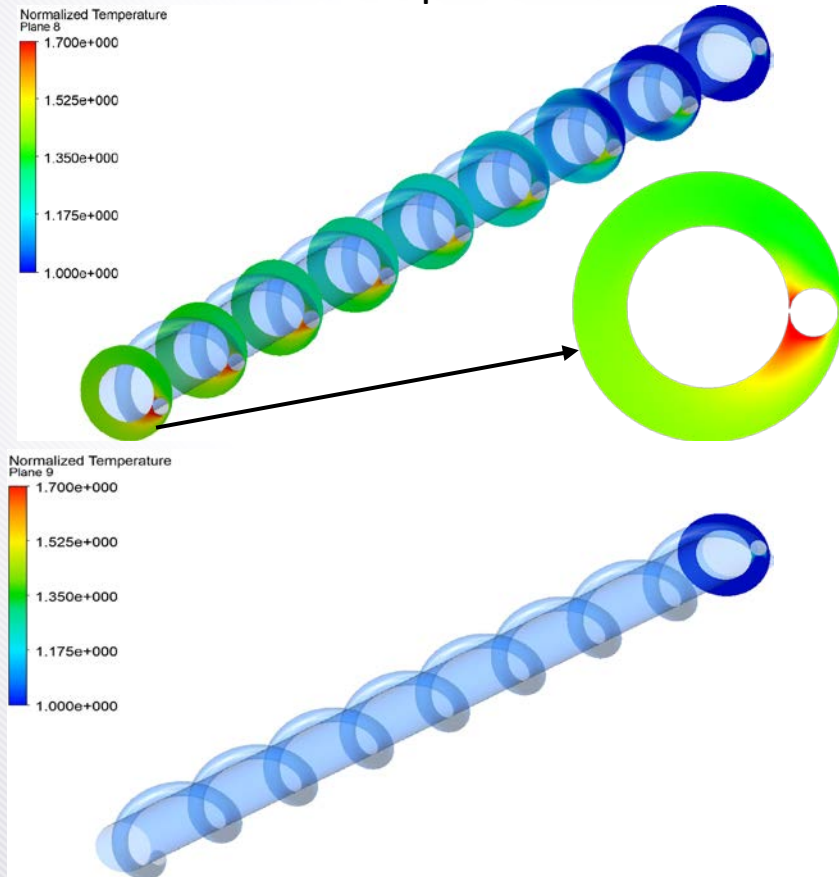


Effect of Wire spacer - Temperature

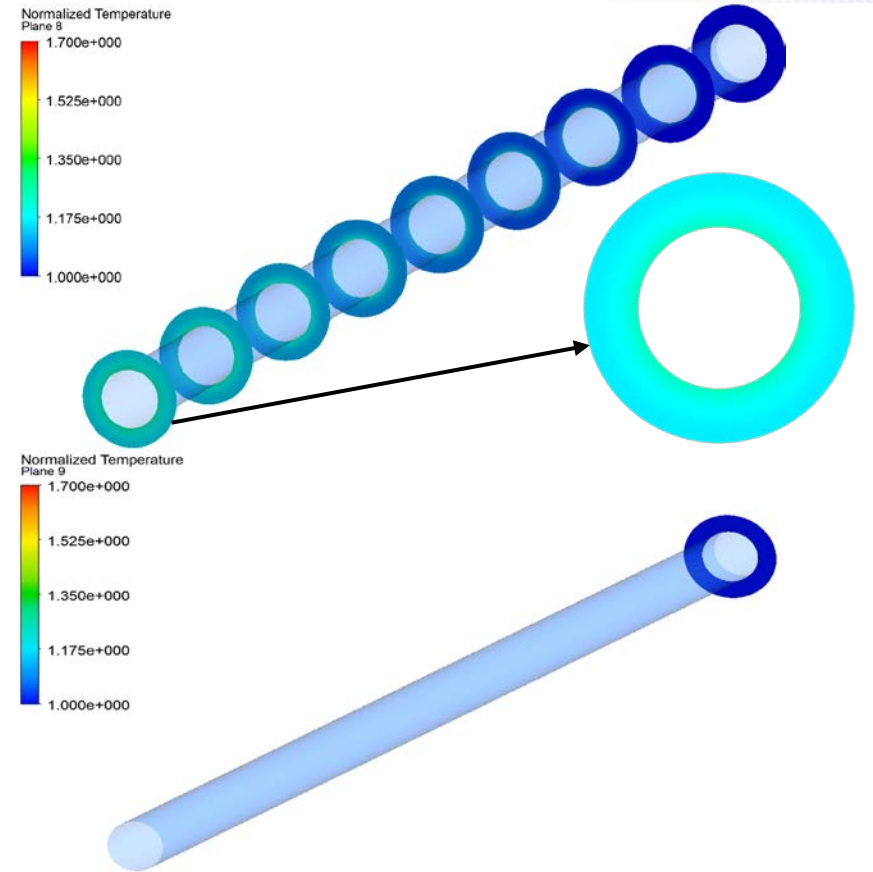
» Wire spacer에 의해 열전달 특성이 향상됨을 확인함.

- » Wire spacer의 기하학적 모양에 의해 난류강도와 속도가 증가하여 열전달특성이 증폭됨.

<With wire spacer>



<Without wire spacer>



Effect of Wire spacer

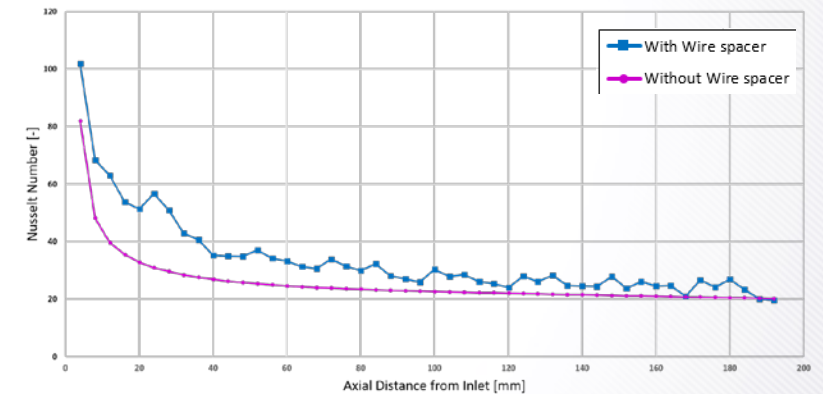
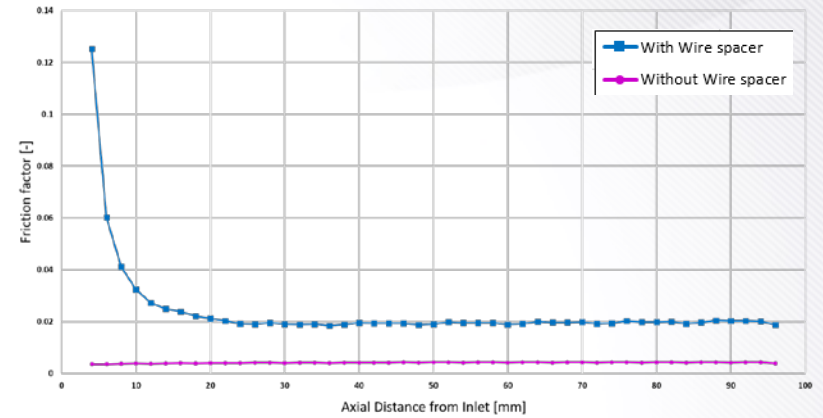
» 압력강하로 인한 Friction factor의 변화

- 축방향으로 1-pitch마다 6등분, 총 48등분하여 압력강하로 인한 마찰계수를 분석함.
- 약 2-pitch 이후부터 발달
- $$f = \Delta P \frac{D_h}{L} \frac{2}{\rho V^2}$$

» 대류열전달로 인한 Nusselt number의 변화

- 열 에너지는 대류에 의해 냉각유체로 전달됨.
- 약 4-pitch 이후부터 발달
- $$Nu = \frac{hD_h}{k_f}$$

» Wire spacer가 유체의 흐름에 충분한 영향을 끼침을 확인할 수 있음.



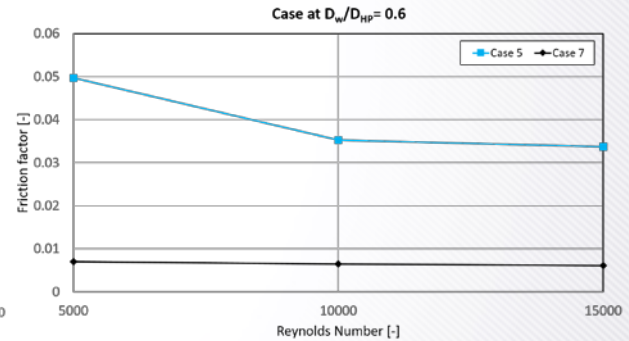
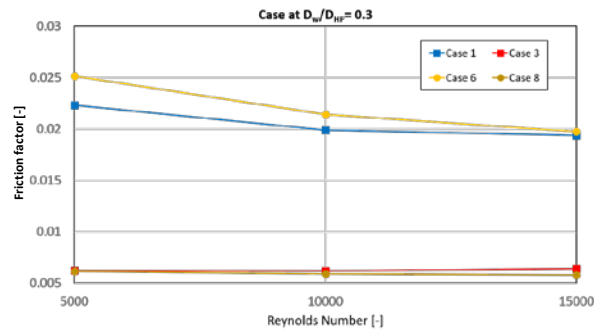
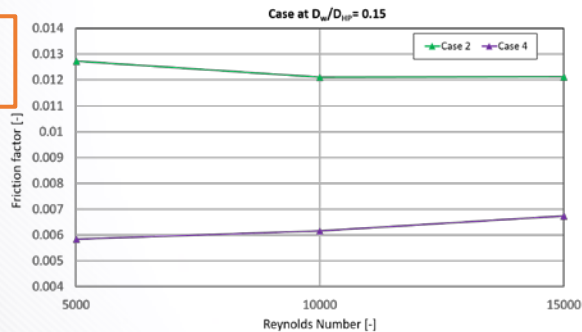
Case	Friction factor (Average)	Nusselt number (Average)
With Wire spacer	1.94×10^{-2}	2.84×10^1
Without Wire spacer	8.51×10^{-3}	2.27×10^1
	2.28 배	1.25 배

Friction factor with geometric shape difference by CFD

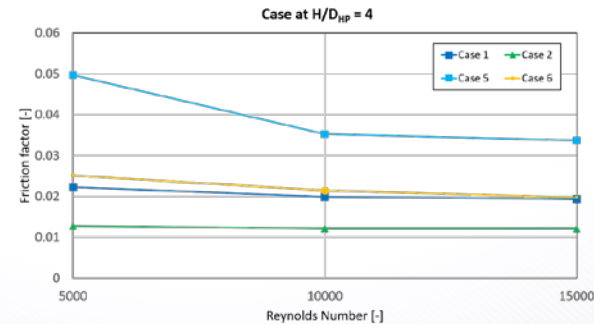
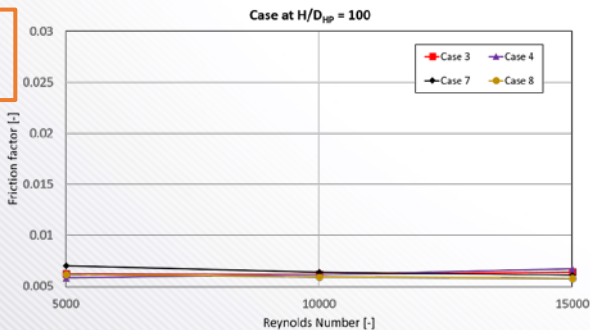
» 형상 변화에 따른 Friction factor를 분석.

- Reynold number가 커짐에 따라 마찰계수가 감소하는 경향이 있음.
- Wire spacer의 영향이 커질수록 마찰계수가 증가하는 경향이 있음.

Geometric shape of D_w/D_{HP}



Geometric shape of H/D_{HP}



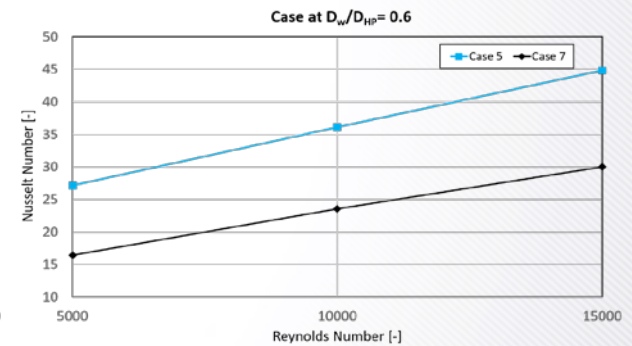
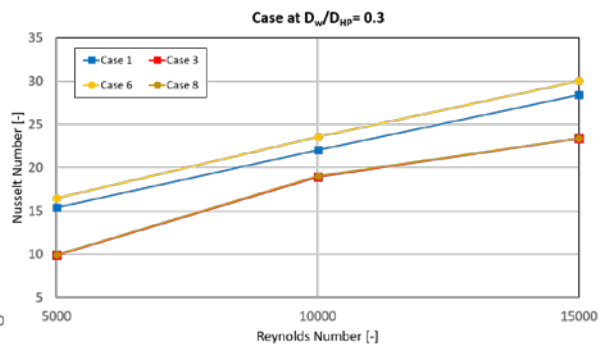
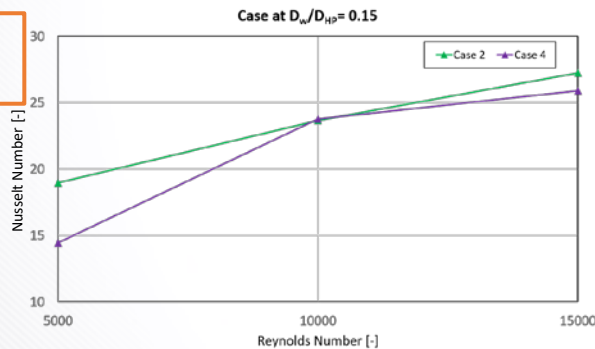
Case	D_{HP} [mm]	D_w [mm]	C [mm]	H [mm]	D_w/D_{HP}	H/D_{HP}
1	3	0.9	0.1	12	0.3	4
2	6	0.9	0.1	24	0.15	4
3	3	0.9	0.1	48	0.3	16
4	6	0.9	0.1	96	0.15	16
5	3	1.8	0.2	12	0.6	4
6	6	1.8	0.2	24	0.3	4
7	3	1.8	0.2	48	0.6	16
8	6	1.8	0.2	96	0.3	16

Nusselt number with geometric shape difference by CFD

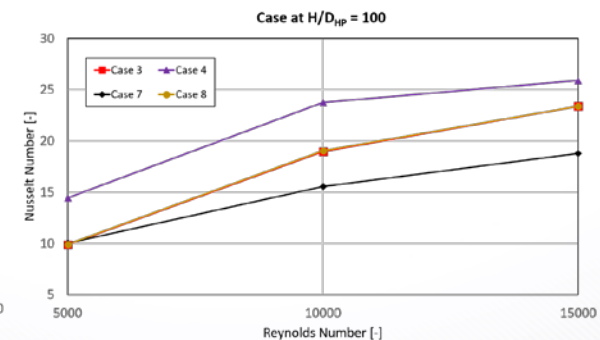
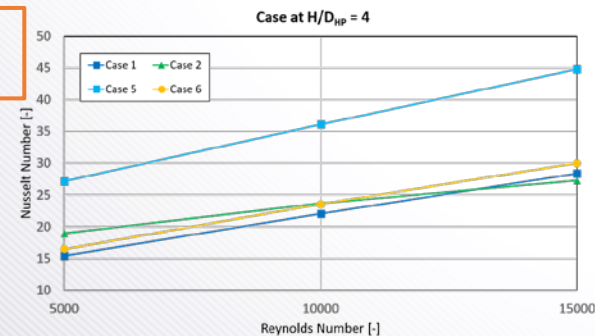
» 형상 변화에 따른 Nusselt number를 분석.

- Reynold number가 커짐에 따라 열전달 특성이 증가하는 경향이 있음.
- Wire spacer의 영향이 커질수록 열전달 특성이 증가하는 경향이 있음.

Geometric shape of D_w/D_{HP}



Geometric shape of H/D_{HP}



Case	D_{HP} [mm]	D_w [mm]	C [mm]	H [mm]	D_w/D_{HP}	H/D_{HP}
1	3	0.9	0.1	12	0.3	4
2	6	0.9	0.1	24	0.15	4
3	3	0.9	0.1	48	0.3	16
4	6	0.9	0.1	96	0.15	16
5	3	1.8	0.2	12	0.6	4
6	6	1.8	0.2	24	0.3	4
7	3	1.8	0.2	48	0.6	16
8	6	1.8	0.2	96	0.3	16

04

Conclusion

Conclusion

- » 히트파이프의 기하학적 형태의 차이에 따른 마찰계수 및 열전달 특성을 이해하기 위하여 CFD해석이 수행됨.
 - Wire spacer가 있는 히트파이프는 열전달 향상에 효과적임.
 - Wire spacer의 기하학적 형태는 Friction factor와 Nusselt number에 민감함.
 - 더욱 다양한 기하학적 형태와 난류모델로 CFD 시뮬레이션을 수행하여 AI를 이용한 히트파이프의 형상최적화를 진행할 예정임.

Thank you for your attention



Gi-Uk CHOI (Gachon University)

cgeeuk@gmail.com