

Numerical Investigation of Thermal-hydraulic Phenomena in a Full-scale Fuel Assembly

2021 원자력학회 추계학술발표회

2021.10.22



최기욱^a, 최선락^b, 송민섭^{c*}, 정재호^{a*}

^aDepartement of Mechanical Engineering, Gachon University

^bKorea Atomic Energy Research Institute

^cDepartment of Nuclear Engineering, Seoul National University



CONTENTS



01 Introduction



02 Numerical Method



03 Result



04 Conclusion



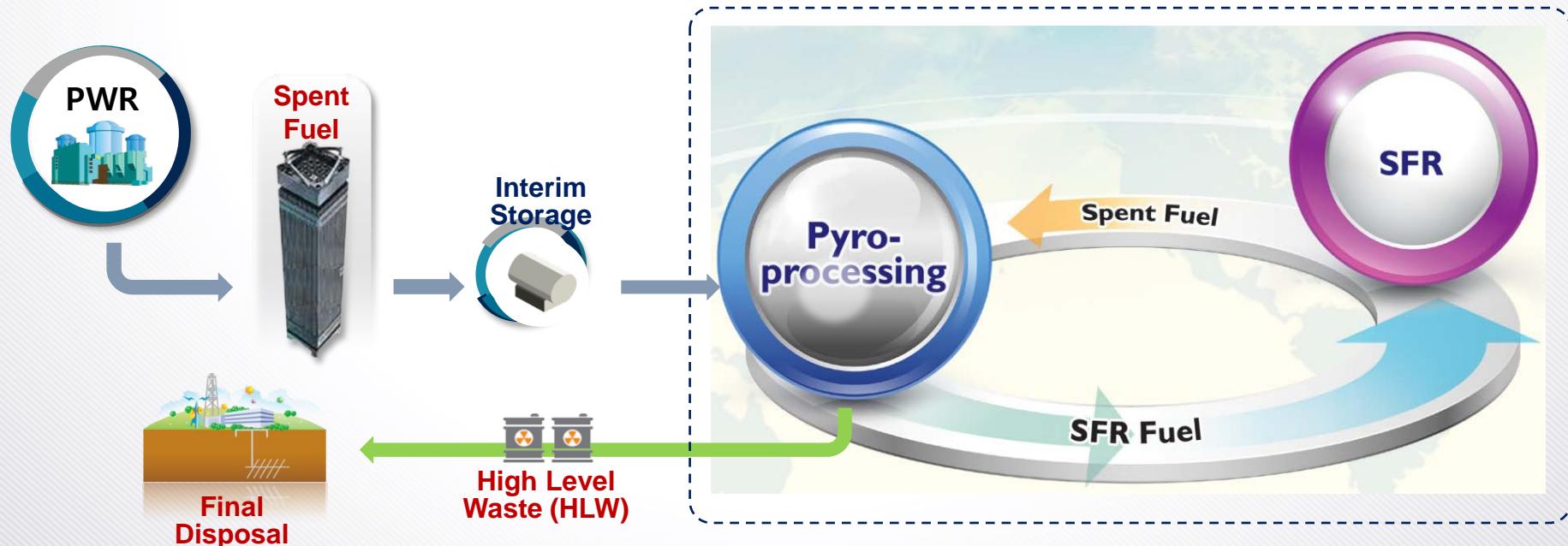
01

Introduction

제4세대 원자로 : Sodium-cooled Fast Reactor

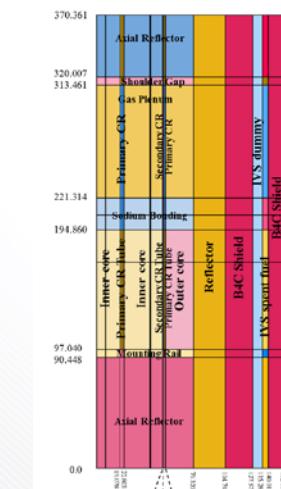
» 사용 후 핵연료(Spent Nuclear Fuel)의 관리에 문제성이 꾸준히 제기됨.

- › 파이로프로세싱과 연계한 사용후핵연료 활용 기술로 폐기물 저감 및 우라늄 자원 활용률 향상 (Pyroprocessing: 고온의 용융염을 이용하여 전기화학적인 방법으로 SNF에서 우라늄 등 유용한 핵물질을 분리하는 기술.)
- › 파이로 공정의 최종 결과물인 TRans Uranium(TRU,초우라늄)을 원료로 사용
- › 사용후핵연료 폐기물량을 1/20 감소, 우라늄 자원 활용률은 경수로보다 100배 이상 향상
- › 초우라늄원료는 신뢰성 높은 제조기술과 재료 및 부품의 안전성 확보가 필수적임
- › 노심 내의 핵연료집합체에서 발생하는 다양한 사고 시나리오의 열유동현상을 CFD를 통해 해석함으로써 원자로 노심의 안전성 확보방안 제시.

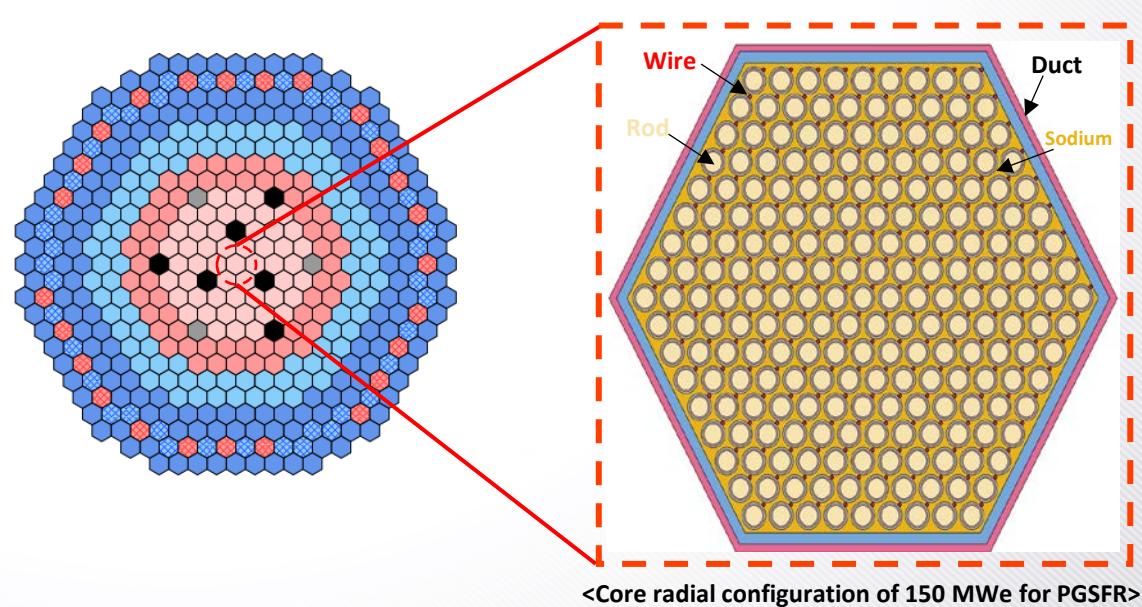


Research Purpose

- » 핵분열에 의해 발생하는 높은 열에너지로 인해 Cladding 주위에 상당한 온도 변화가 가해짐.
 - › 핵연료집합체 내 냉각재의 속도와 온도 프로파일 예측이 중요함.
 - › 피복재 및 냉각수 온도를 조사함으로써 안전 허용 기준을 충족해야함.
- » 본 연구에서는 RANS 기반 CFD 방법론을 사용하여 KAERI-PGSFR의 Full-scale 217Pin Wire-wrapped Fuel assembly의 열수력거동을 조사하였음.
 - › ANSYS CFX 코드를 이용하여 정상운전영역에서의 CFD 해석을 수행함.
 - › 다양한 Reynolds number 범위에서의 Friction factor와 Nusselt number를 다양한 상관식으로 검증하였음.



<Axial configuration of PGSFR core>



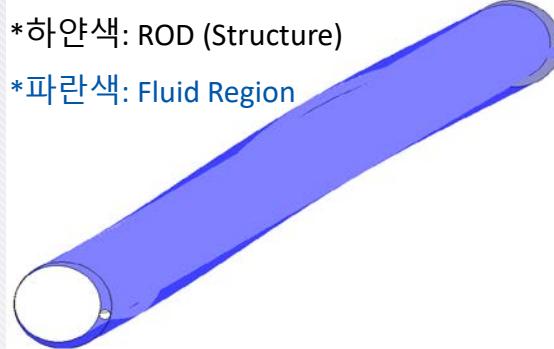
<Core radial configuration of 150 MWe for PGSFR>

02

Numerical Method

217PIN Fuel assembly computational grid system

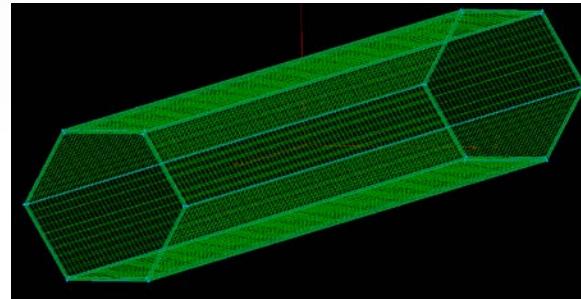
Rod (Inner Fluid)



*하얀색: ROD (Structure)

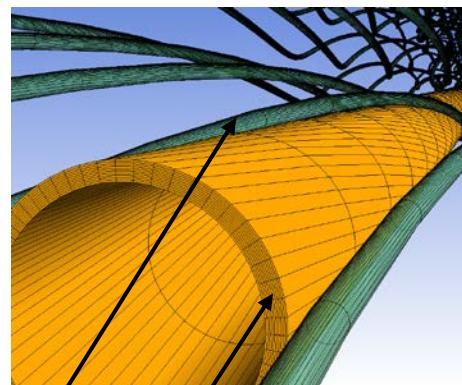
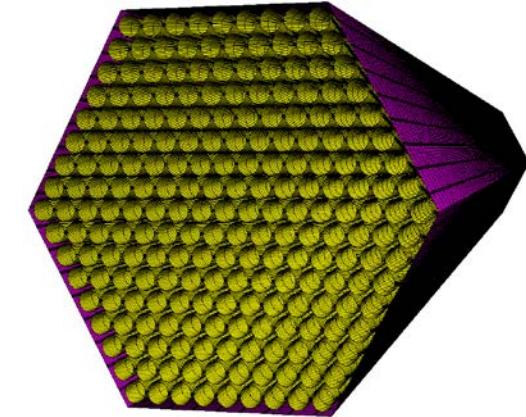
*파란색: Fluid Region

Duct



&

Outer Fluid



Wire Cladding

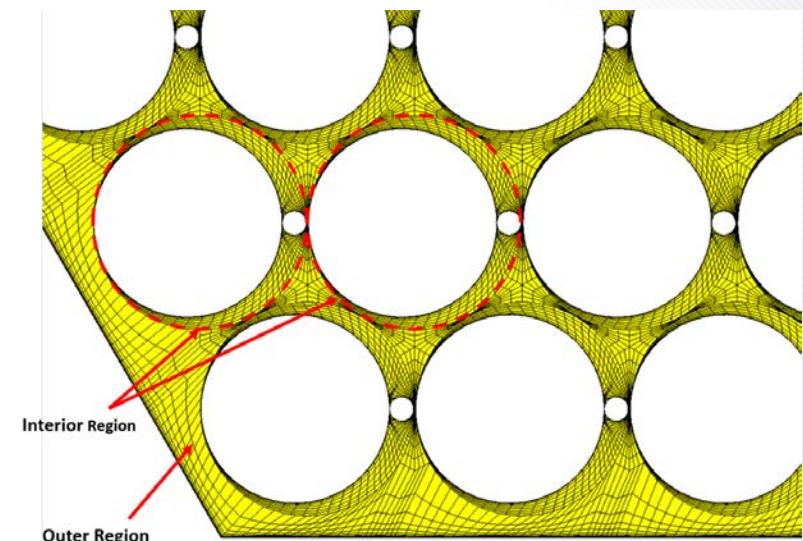
덕트 영역: 1000만

유체영역: 11만*217 = 2387만

구조영역: 7.7만*217 = 1671만
(Rod + Wire spacer)

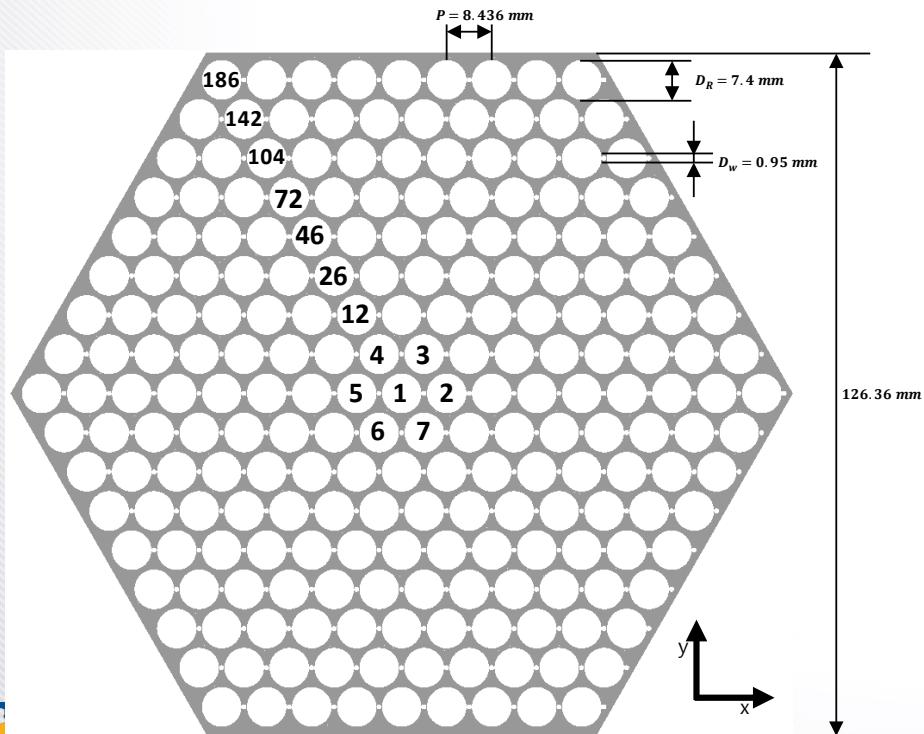
Rod Total: 40,580,000 cells

Total: 50 Million
(Hexahedron mesh)



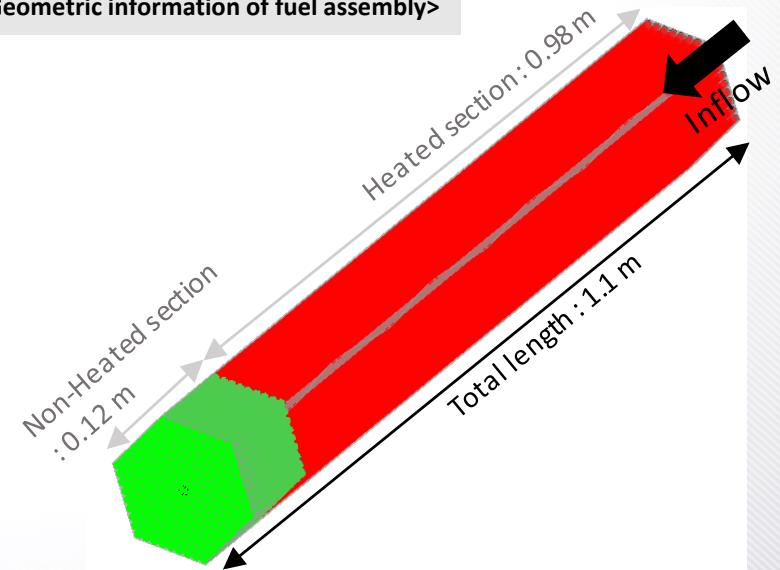
CFD Modeling (1)

» Designed by the KAERI in 2014.



Parameter	Value
Number of pins	217
Pin diameter	7.4 mm
Clad thickness	0.5 mm
Wire diameter	0.95 mm
Wire lead pitch	221 mm
Pin pitch	8.436 mm
Total length	2.15 m
CFD computation length	1.1 m
Active length	0.98 m
Non-Heat length	0.12 m
Duct width	126.36 mm
Coolant	Sodium

<Geometric information of fuel assembly>

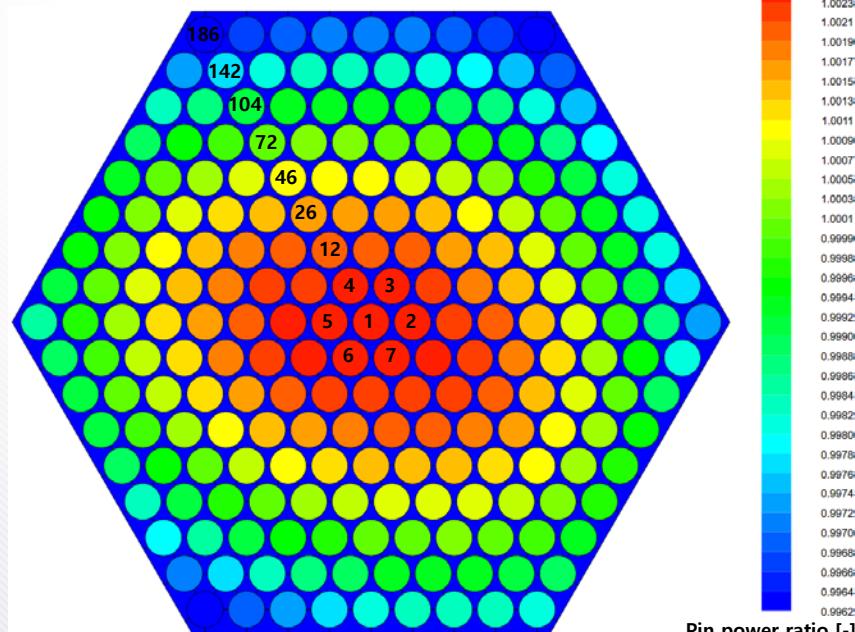


CFD Modeling (2)

» PGSFR의 코어에는 U-Zr의 금속 연료가 탑재되어 392.2MWt의 핵열을 생성함.

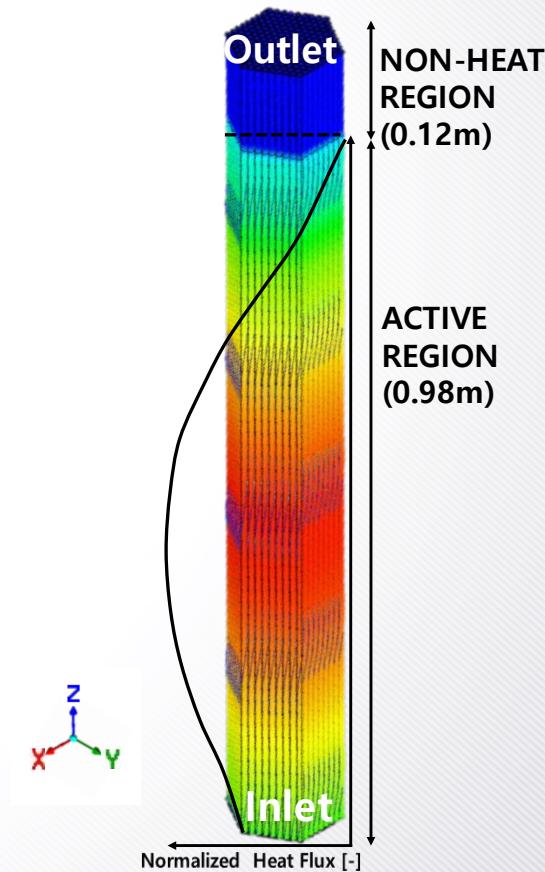
- › Power distribution은 코어 설계를 통해 선택되었음.
- › 노심의 중심에 가까울수록 연료 집합체의 열 출력이 높아져 핀마다 전력 분포가 다르게 표시됨.
- › CFD는 PGSFR 217 핀 연료 집합체의 Heated region에서 수행됨.

$$\sum_i^{217} P(pin_i) * P(z) * Q_{avg} = Total\ Power\ [MW]$$



< Pin power distribution and Pin number position: Flow group 01,BOL >

Pin power ratio [-]



<Axial heat flux distribution>

CFD Modeling (3)

» Boundary Condition

- Inlet : Sodium, 390 °C, 23.551 kg/s
- Outlet : Relative Pressure 3.5 bar
- Total power : FG01, BOL 5.567 MW
- Cladding : Stainless

» Turbulence model

- RANS based SST k-w model

Boundary domain	Condition	Value
Inlet	Mass flow rate	Variable [kg/s]
Outlet	Relative pressure	3.5 [bar]
Rod outer	No slip	-
Wire outer	No slip	-
Duct wall	No slip Adiabatic	-
Heat source (clad inner surface)	Function of Z axis	P(z)

<Boundary condition of CFD analysis>

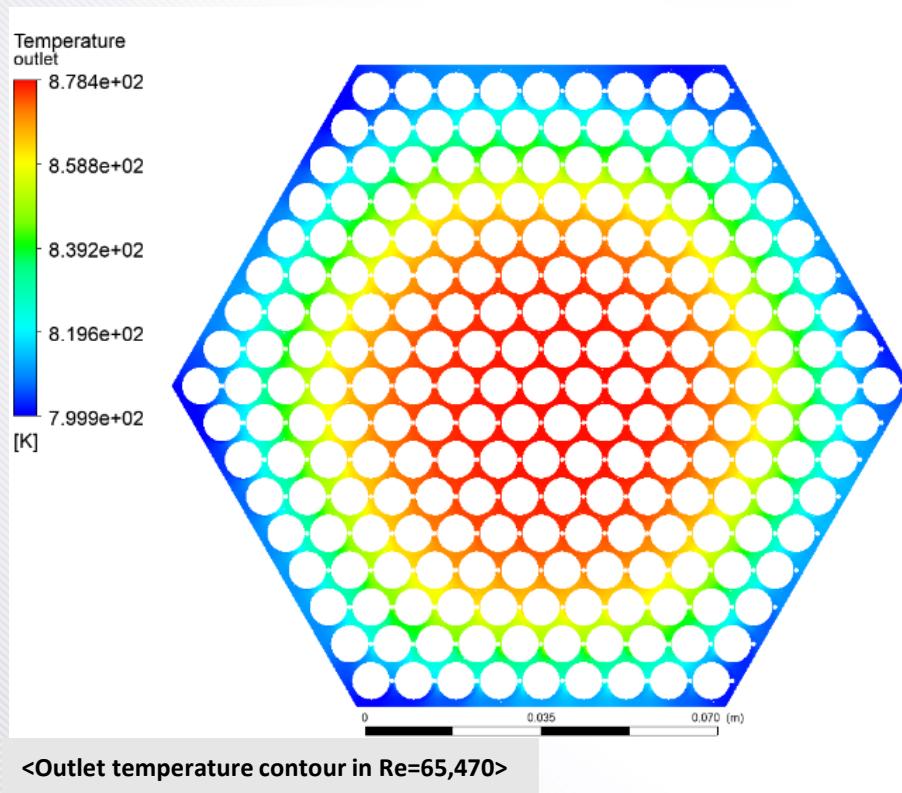
03

Result

Code verification

» 정상 상태에서의 CFD 결과를 검증하기 위해 MARS-LMR 코드와 비교함.

- MARS-LMR은 SFR의 DBE 과도 해석을 수행하기 위해 개발된 코드임.
- 동일한 조건에서 시스템해석코드와 DBE 사고 초기조건을 비교하였을 때 냉각수 최고온도가 동일함.



Parameters	Design Value	MARS-LMR Calculated Value	SAS4A/SASSYS-1 Calculated Value	CFD Value
Core Power [MWt]	392.2	392.2	392.2	392.2
Core flowrate [kg/s]	1984.2	1988.1	1992.95	1984.2
Core inlet temperature [°C]	390	390.12	390.00	390.0
Peak coolant temperature [°C] (FA outlet region)	569.1	568.91	565.9	569.51

<Comparison of initial conditions for transient analysis>

Pressure drop

» Wire-wrapped fuel assembly의 마찰계수 상관관계를 도출하기 위해 많은 실험이 진행되었음.

- Rehme [1973], Engel [1979], Cheng and Todreas [1986,2018] correlation과 다양한 Reynolds number에서 friction factor를 비교하였음.
- 본 CFD결과는 Normal operating range에서 UCTD Correlation과 가장 잘 일치하며, UCTD correlation은 압력강하 수치를 제일 잘 예측한다고 보고됨.

The Rehme(1973) correlation

$$f = \left(\left(\frac{64}{Re} \right) F^{0.5} + \left(\frac{0.0816}{Re^{0.133}} \right) F^{0.9335} \right) (Nr) \pi (D + D_w) / St$$

The Engel(1979) correlation

Turbulent flow : $f = \frac{0.55}{Re^{0.25}}$ for $Re \geq 5000$

The simplified Cheng and Todreas(1986) correlation

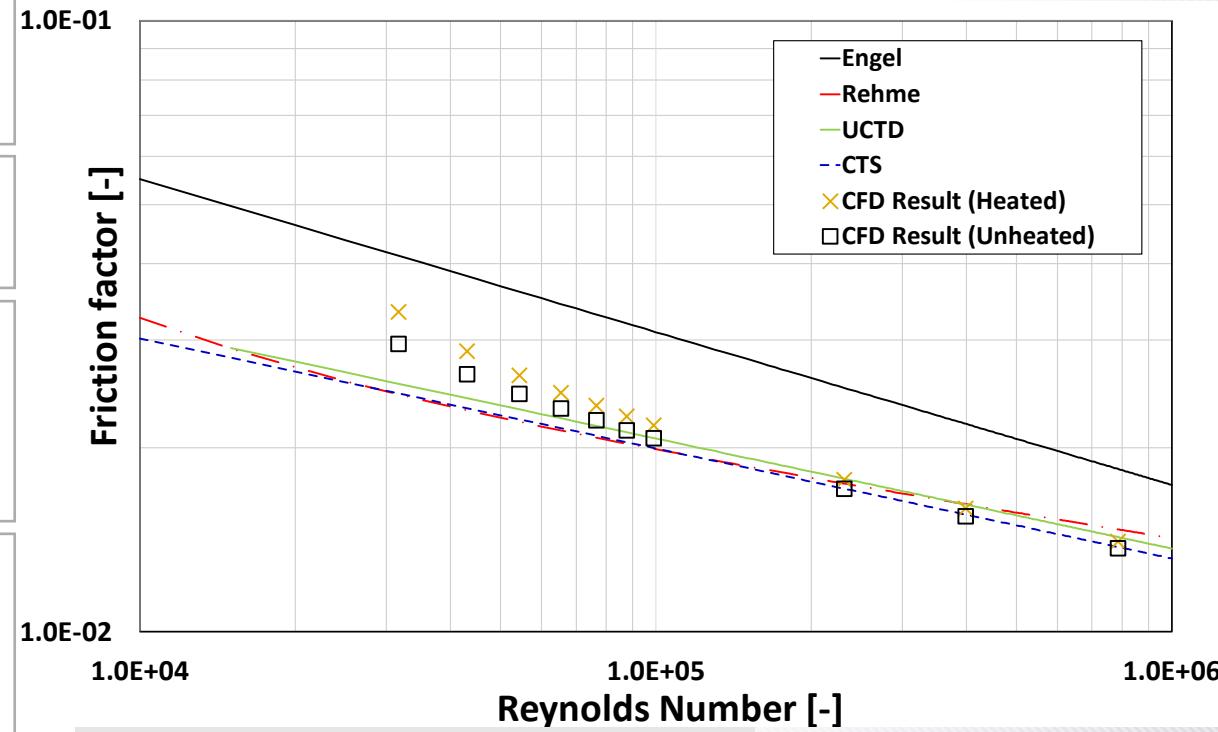
Turbulent flow : $f = \frac{C_{fT}}{Re^{0.18}}$ for $Re_T \leq Re$

$$C_{fT} = (0.8063 - 0.9022(\log H/D)) + 0.3526(\log(H/D)^2) \times (P/D)^{0.7} (H/D)^{1.78-2.0(P/D)}$$

The detailed Upgraded Cheng and Todreas(2018) correlation

Turbulent flow : $f = \frac{C_{fT}}{Re^{0.18}}$ for $Re_T \leq Re$

$$C_{fT} = De_b \left(\sum_{i=1}^3 \left(\frac{N_i A_i}{A_b} \right) \left(\frac{De_i}{De_b} \right)^{0.0989} \left(\frac{De_i}{C_{fiT}} \right)^{0.54945} \right)^{-1.82}$$



Heat transfer

» 핵분열로 인한 열에너지는 대류에 의해 냉각제로 전달됨.

$$\mu = \mu_l + \mu_t$$

- › Sodium은 일반적으로 0.01 미만의 매우 작은 Pr Number .
- › 난류 열전달은 eddy diffusivity의 개념을 사용하는 난류 프란틀 수를 사용함. $\frac{\mu}{Pr} = \frac{\mu_l}{Pr_l} + \frac{\mu_t}{Pr_t}$
- › $Pr_t = 0.02$ 인 CFD 결과를 Mikityuk[2009], Subbotin[1965] and Borishanski[1969] Correlation과 비교함.

The Mikiyuk correlation (2009)

$$Nu = 0.047(1 - e^{-3.8(P/D-1)})(Pe^{0.77} + 250)$$
$$(1.1 \leq P/D \leq 1.95, 30 \leq Pe \leq 5000)$$

The Subbotin correlation (1965)

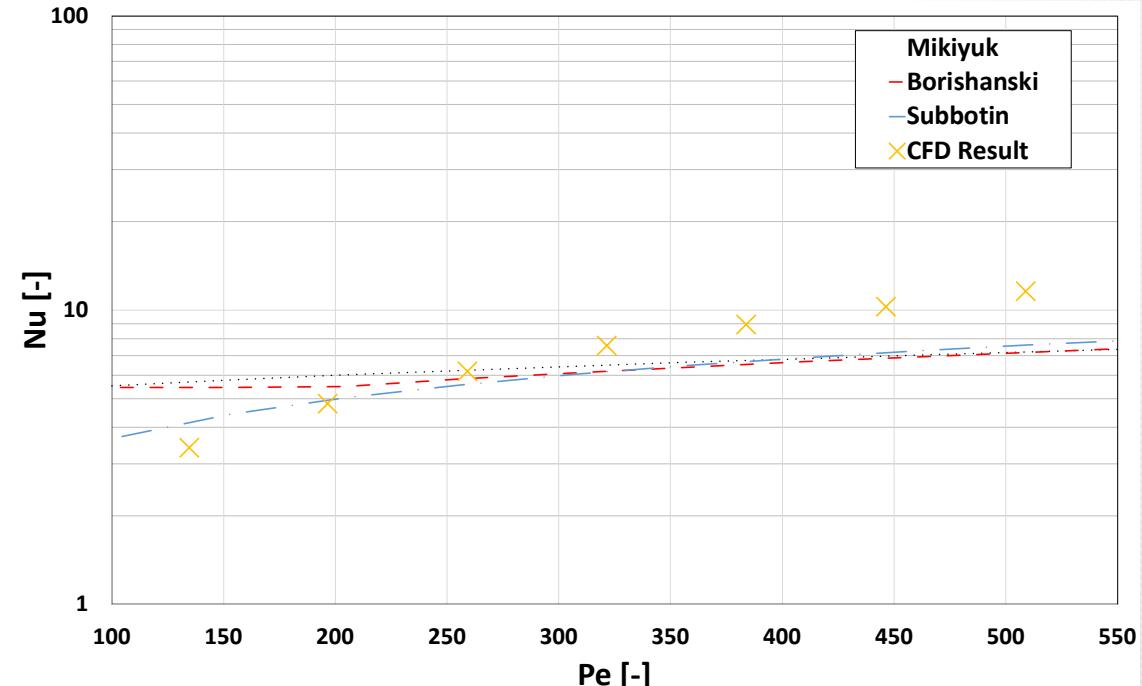
$$Nu = 0.58 \left(\frac{D_h}{D}\right)^{0.55} Pe^{0.45}$$
$$(1.1 \leq P/D \leq 1.5, 80 \leq Pe \leq 4000)$$

The Borishanski correlation (1969)

$$Nu = 24.15 \log \left(-8.12 + 12.76 \left(\frac{P}{D}\right) - 3.65 \left(\frac{P}{D}\right)^2 \right)$$
$$+ 0.0174(1 - e^{-6((P/D)-1)})B$$

Where:

$$B = \begin{cases} 0, Pe < 200 \\ (Pe - 200)^{0.9}, Pe \geq 200 \end{cases}$$
$$(1.1 \leq P/D \leq 1.5, 60 \leq Pe \leq 2200)$$

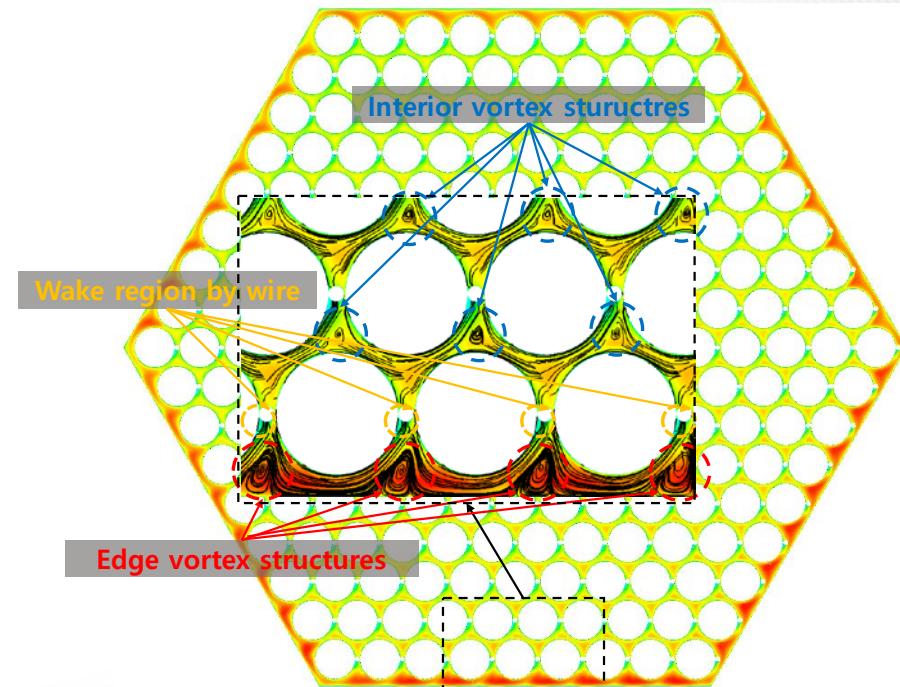
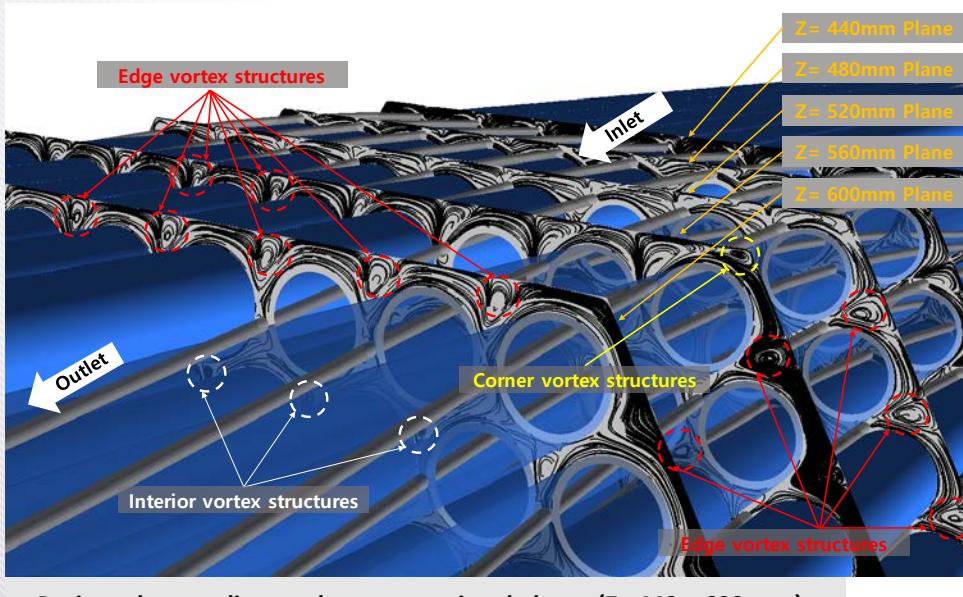


<Heat transfer comparison of correlations and the CFD results>

Vortical flow phenomena

» 핵연료집합체의 복잡한 흐름 현상은 SST turbulence model을 사용한 CFD 해석과 Critical point theory에 기반한 와류 구조 식별 기술에 의해 조사되었음.

- › Wire와 덕트 벽면의 상대적인 위치가 변경됨에 따라 Edge, Comer, Interior vortex 구조가 주기적으로 변경됨.
- › Edge vortex는 다른 와류보다 축방향 속도가 더 크며, Edge vortex는 longitudinal vortex의 일종으로 다른 Subchannel에서의 와류구조보다 크기가 큼.
- › 와류구조는 열전달 특성에 영향을 미치며, Edge vortex는 Comer 및 Interior vortex보다 더 나은 열전달 특성을 얻을 수 있음.



04

Conclusion

Conclusion

- » 217-Pin Wire-wrapped fuel assembly of KAERI PGSFR의 정상 운전 설계값에서의 열수력 현상을 CFD를 통해 분석하였음.
 - › CFD 분석 결과는 MARS-LMR 결과와 잘 일치하였음.
 - › 다양한 Reynolds 수 범위에서 Friction factor가 평가되었으며 UCTD Correlation과 매우 근접한 값을 갖음.
 - › Nusselt number 또한 상관관계와 일치하는 경향을 보임.
 - › 해석결과의 타당성을 핵연료집합체에서의 중요한 관계식과 비교하여 분석함.
 - › 본 연구를 바탕으로 각종 설계기준사고에서의 자연순환효과 등의 열수력 거동을 조사할 예정임.
 - › 또한, DBA 중 연료 피복재의 피로 해석을 피로해석 프로그램(Abaqus & fe-safe)과 MARS-LMR 코드와 결합하여 수행할 예정임.

Thank you for your attention

