

2024 한국유체기계학회 하계학술대회

2024. 07. 05

이중 격자 기법을 사용한 판형-핀 열교환기 CFD 성능 해석

넥스트폼(주) 김현식, 이현웅, 길재흥

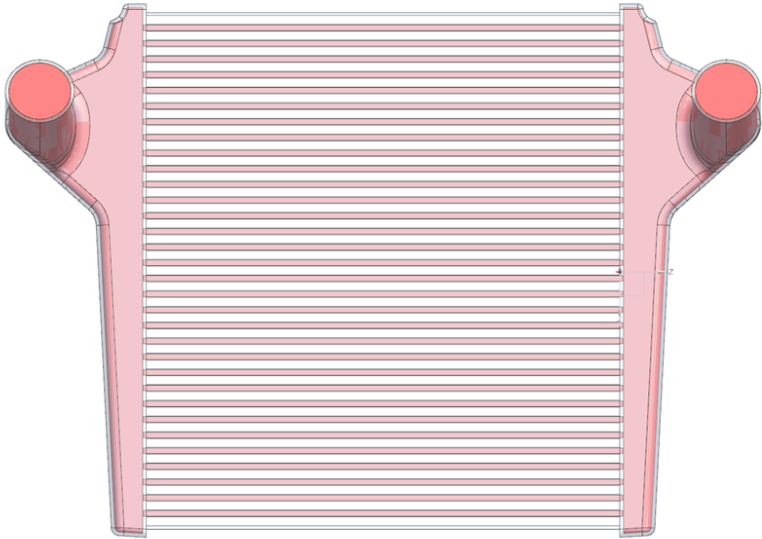
한국전자기술연구원 이명성



목차

- 1. 개요
- 2. 옵셋핀 매개변수 해석
- 3. Plate-Fin 열교환기 전체 형상 성능 해석
- 4. 결론

Plate-Fin 열교환기



- Plate-Fin 열교환기는 고성능 고밀도 열교환기 중 하나로서 자동차 및 항공 우주 등의 다양한 분야에서 널리 사용됨
- Plate-Fin 열교환기는 plain fin, wavy fin, louvered fin, offset trip fin(OSF) 등의 fin 형상이 사용됨

01 목표

- 열교환기 전체에 대한 유동 현상 모사
- 열교환기의 CFD 해석 최적화

02 해석방법

- 열교환기 유로 내부의 핀 부분을 유체와 고체가 겹친 이중 격자(Dual Cell) 기법 적용
 - 유체의 유동에 의한 압력 강하는 이중 격자 내에서 다공성 매질 기법을 적용하여 예측
 - 열 교환은 유체와 고체 각각의 격자에서 서로의 온도 차이에 의한 생성항(source term)의 형태로 해석
 - 핀의 형상과 유동의 속도에 따라 변화하는 f-factor와 j-factor의 실험식을 적용

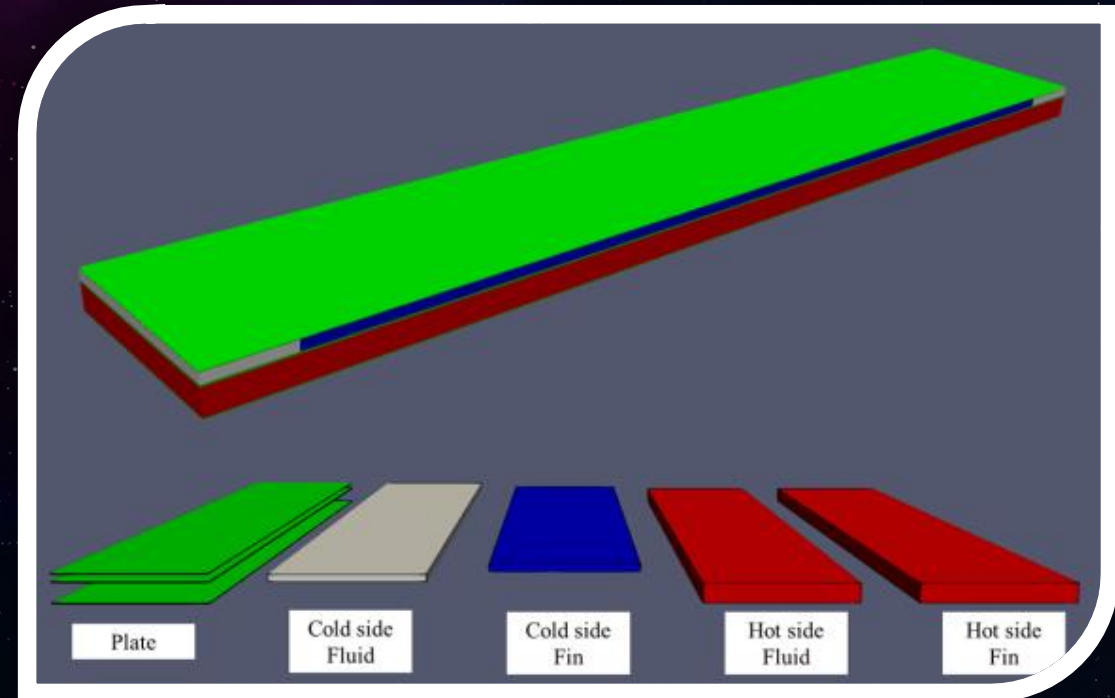
이중 격자(Dual Cell) 모델링

Plate-Fin 열교환기 : 이중 격자 모델링

01

핀의 고밀도 영역 열교환기의 핀 영역을 유체와 고체가 겹친 이중 격자로 해석

- 열교환기 유로 내부의 핀 부분을 유체와 고체가 겹친 이중 격자(Dual Cell) 기법 적용
 - 열교환기는 Hot side, Cold side 그리고 Plate로 구분
 - Plate는 Hot side와 Cold side를 구분 짓고 두 영역을 감싸는 형태
 - Hot side와 Cold side는 각각 Fluid와 Fin 영역으로 구분하여 모델링



지배 방정식

다공성 매질의 중첩을 고려한 에너지 보존 방정식 수정

- 기존 에너지 보존 방정식

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} + \nabla \cdot (\rho U H_f) = -\nabla \cdot q'' + \nabla \cdot (\bar{\tau} \cdot U) + f_s \cdot U + S$$

- Porous media 내 고체 상에 의한 유체 속도 변화 고려

$$\gamma = \frac{V_f}{V_{porous}} \quad u^* = \gamma U$$

- Porous media내 상 분율에 의한 열 전도율 변화

$$q'' = -k_{eff} \nabla T \quad k_{eff} = \gamma k_f + (1 - \gamma) k_s$$

- Porous media내 상 분율에 의한 열 전도율 변화

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \int_V (\gamma \rho_f E_f + (1 - \gamma) \rho_s c_s T) dV + \int_A \rho_f H_f u^* \cdot dA \\ & = - \int_A q'' \cdot dA + \int_A \bar{\tau} \cdot u^* dA + \int_V f_s \cdot u^* dV + \int_V S_u dV \end{aligned}$$

J-factor

J-factor : fin에 의한 열전달 효율을 나타내는 무차원수

$$j = StPr^{2/3}$$

- j-factor와 유체의 Pr 을 알고 있다면 St 을 이용해 열전달 계수 h 를 구할 수 있다.

$$St = \frac{h}{\rho U C_p}$$

- 다양한 형태의 fin이 갖는 j-factor는 다양한 실험식으로 구해낼 수 있다.
- 일반적으로 j-factor는 관내 유체의 Re 와 fin의 geometrical parameter에 의해 변화함

$$j = A_0 \left(\frac{l}{D_e} \right)^{A_1} \phi^{A_2} \alpha^{A_3} \gamma^{A_4} \delta^{A_5} Re_j^*$$

- 이중 격자를 이용한 열전달을 계산할 때 격자 자신의 속도를 불러와 열전달 계수로 활용함

F-factor

F-factor : 관내 압력강하를 나타내는 무차원수

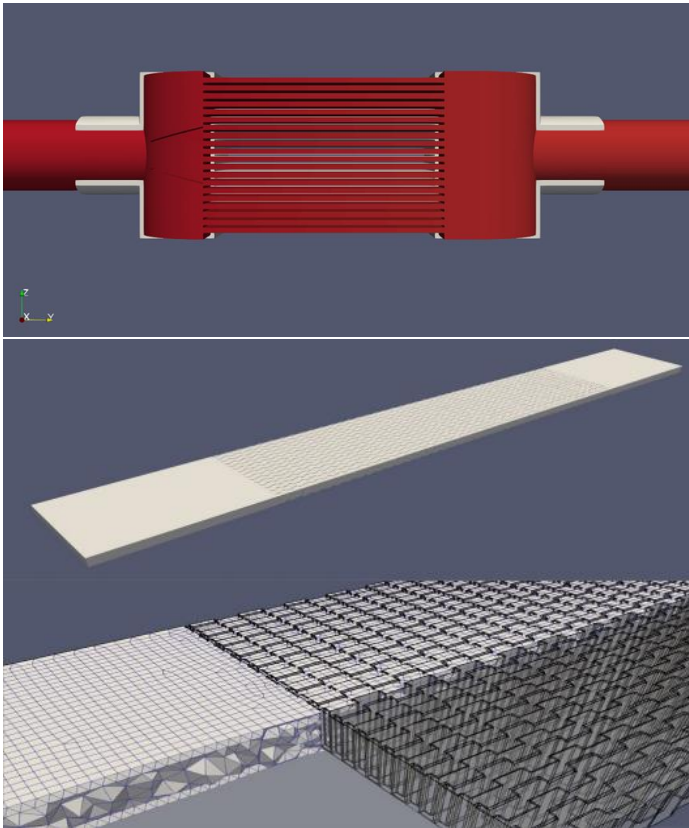
$$\frac{\Delta P}{L} = f \frac{2\rho U^2}{D_h}$$

- 다양한 형태의 fin이 갖는 f-factor는 다양한 실험식으로 나타난다.
- f-factor는 관내 유체의 Re 와 fin의 geometrical parameter에 의해 구해낼 수 있다.

$$f = B_0 \left(\frac{l}{D_e}\right)^{B_1} \phi^{B_2} \left(\frac{1}{1-2\alpha}\right)^{B_3} \left(\frac{1}{1-2\gamma}\right)^{B_4} \delta^{B_5} Re_f^*$$

- Porosity의 압력강하 계수를 계산할 때 격자 자신의 속도를 불러와 활용함

옵셋핀 모델링

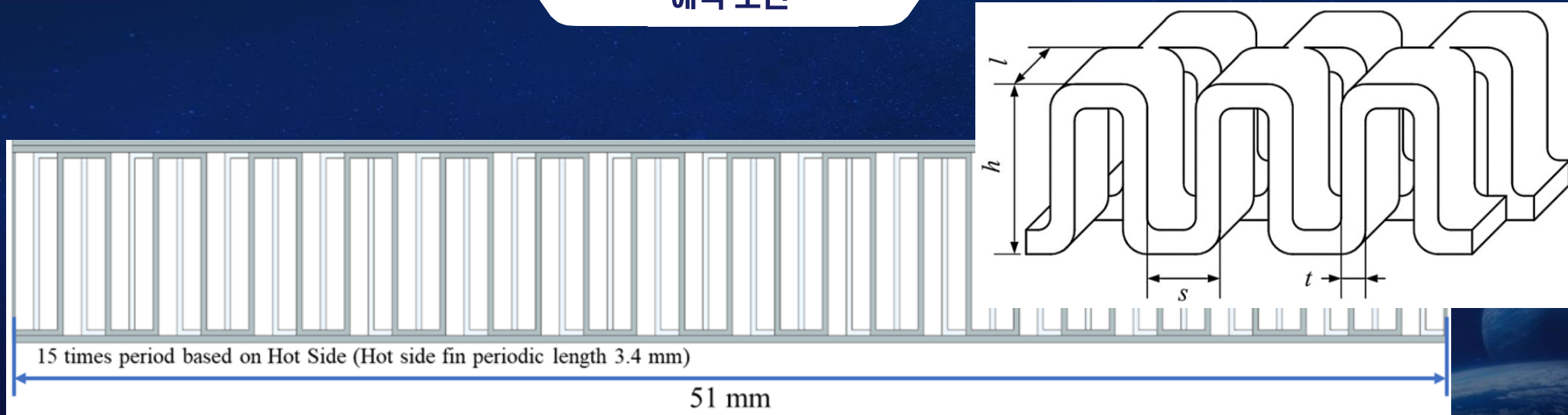


- (위) 판형 옵셋핀 열교환기 고체 및 유체 영역
- (아래) 옵셋핀 유로 단일 층 형상, 격자 수 - 1,178,913 개

01 개요

- 옵셋핀에 대한 직접 모사 해석(Parametric Study)을 진행하는 것으로 열교환기의 핀에 의한 압력 강하 및 열전달의 모델링 계수를 추적해 해석의 정확도 향상
 - 열교환기의 단일 층을 왼쪽 아래 그림과 같이 유체 영역만 모사하여 유체의 속도 별 압력 및 온도 변화를 해석

해석 조건



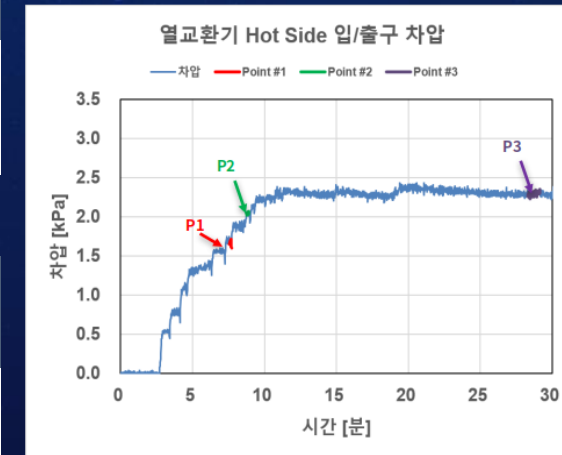
- 매개변수 해석을 위해 옵셋핀의 4가지 Geometry 조건(h, s, t, l)을 고정하고 유체의 물성치를 고정된 값으로 설정했다.

Properties	mol	Density (kg/m^3)	Specific heat (kJ/kg)	Viscosity ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	Pr
Air	28.9	1.75	1007	$2.04\text{e-}05$	0.7

열교환기 성능 실험 결과

Hot-side	point	열교환기 입구온도 [°C]	열교환기 출구온도 [°C]	유량 [kg/s]	열교환량 [kW]
	Point#1	59.626	6.911	0.255	13.578
	Point#2	68.189	9.020	0.296	17.647
	Point#3	87.876	18.835	0.323	22.527

Cold-side	point	열교환기 입구온도 [°C]	열교환기 출구온도 [°C]	유량 [kg/s]	열교환량 [kW]
	Point#1	7.143	12.364	0.601	13.121
	Point#2	8.292	14.627	0.601	15.923
	Point#3	17.578	25.980	0.605	21.234



• 해석의 대상이 되는 열교환기의 실제 가동 유량 범위와 이에 대해 실험적으로 측정된 압력 및 온도 변화 값을 기반으로 CFD 테스트 매트릭스 작성

테스트 매트릭스

- CFD 해석 케이스는 유량 별 14개의 케이스로 구성

케이스	고온측			저온측	
	입구			출구	입구
No.	압력 (bar)	온도 (°C)	유량 (kg/s)	압력 (bar)	온도 (°C)
설계점	1.7	87.876	0.323	-	17.578
1	zeroGradient	87.8	0.025	1.7	17.5
2	zeroGradient	87.8	0.05	1.7	17.5
3	zeroGradient	87.8	0.1	1.7	17.5
4	zeroGradient	87.8	0.15	1.7	17.5
5	zeroGradient	87.8	0.2	1.7	17.5
6	zeroGradient	87.8	0.25	1.7	17.5
7	zeroGradient	87.8	0.3	1.7	17.5
8	zeroGradient	87.8	0.35	1.7	17.5
9	zeroGradient	87.8	0.4	1.7	17.5
10	zeroGradient	87.8	0.5	1.7	17.5
11	zeroGradient	87.8	0.7	1.7	17.5
12	zeroGradient	87.8	0.95	1.7	17.5
13	zeroGradient	87.8	1.15	1.7	17.5
14	zeroGradient	87.8	1.4	1.7	17.5

옵셋핀 매개변수 해석 – F-factor

F-factor

$$\frac{\Delta P}{L} = f \frac{2\rho U^2}{D_h}$$

$$f = \frac{D_h \Delta P}{2\rho U^2 L}$$

$$f = A_0 Re^{A_1 + A_2 \beta} \alpha^{A_3} \gamma^{A_4} \delta^{A_5}$$

$$\frac{1}{Re^{A_2 \beta} \alpha^{A_3} \gamma^{A_4} \delta^{A_5}} \frac{D_h \Delta P}{2\rho U^2 L} = A_0 Re^{A_1}$$

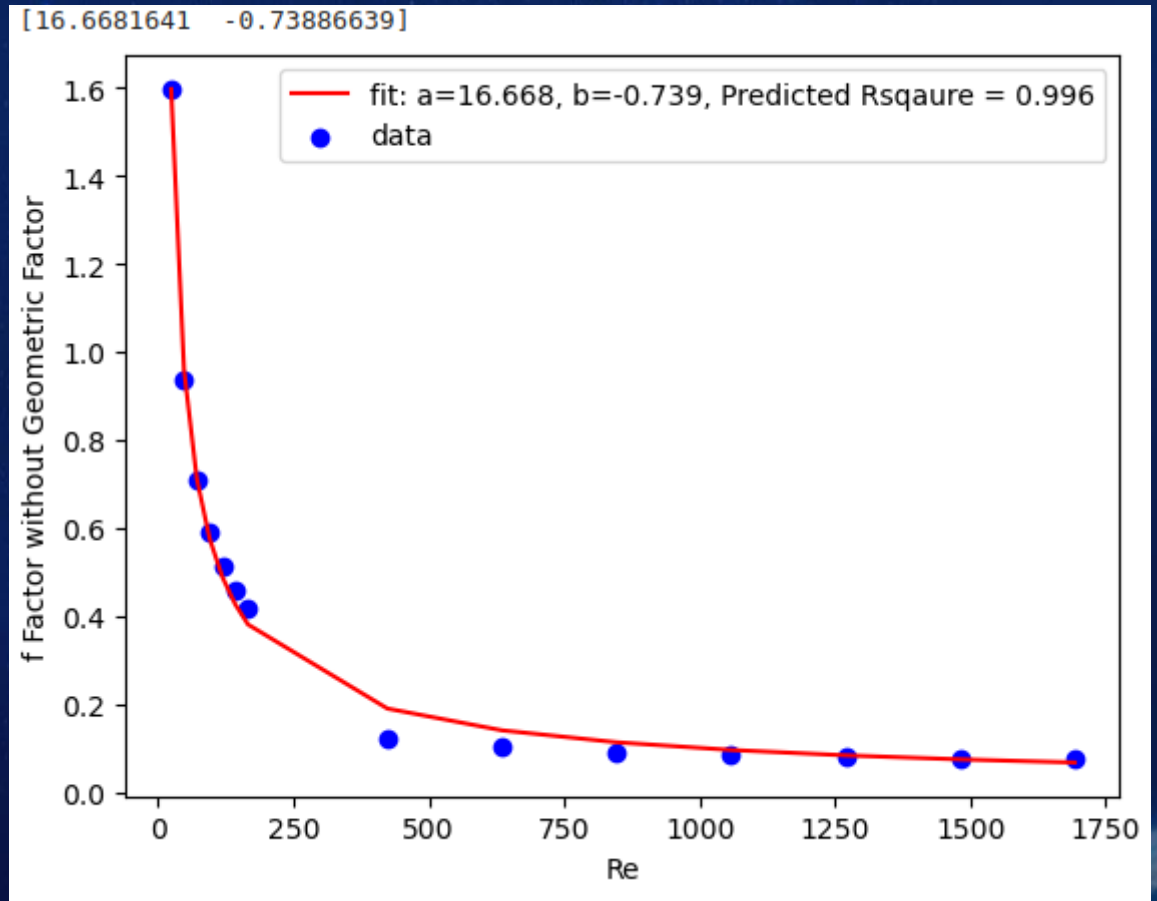
$$f_{noGeometric} = A_0 Re^{A_1}$$

L	0.24	α	0.0308 (Hot)
ρ	1.75 (Hot)		0.08 (Cold)
	1000 (Cold)	β	0.5667 (Hot)
D_h	0.002287 (Hot)		2 (Cold)
	0.002308 (Cold)	γ	0.1176 (Hot)
A_2	-0.0205		0.0667 (Cold)
A_3	-0.1856	δ	0.0667 (Hot)
A_4	0.3053		0.1334 (Cold)
A_5	-0.2659		

옵셋핀 매개변수 해석 – F-factor

	Re	$f_{noGeometric}$
Case 1	142.52	0.3695
Case 2	284.86	0.2333
Case 3	569.42	0.1588
Case 4	853.92	0.1316
Case 5	1138.38	0.1172
Case 6	1422.81	0.1082
Case 7	1707.23	0.1022
Case 8	1991.63	0.0978
Case 9	2276.01	0.0946
Case 10	2844.77	0.0899
Case 11	3982.26	0.0846
Case 12	5404.10	0.0828
Case 13	6541.63	0.0818
Case 14	7963.67	0.0810

F-factor



$$f_{noGeometric} = 16.6681 Re^{-0.7389}$$

옵셋핀 매개변수 해석 – J-factor

J-factor

$$j = StPr^{2/3}$$

$$St = \frac{h}{\rho UC_p}$$

$$j = B_0 Re^{B_1 + B_2 \beta} \alpha^{B_3} \gamma^{B_4} \delta^{B_5}$$

$$\frac{1}{Re^{B_2 \beta} \alpha^{B_3} \gamma^{B_4} \delta^{B_5}} StPr^{2/3} = B_0 Re^{B_1}$$

$$j_{noGeometric} = B_0 Re^{B_1}$$

C_p	1007 (Hot)	α	0.0308 (Hot)
	4181 (Cold)		0.08 (Cold)
ρ	1.75 (Hot)	β	0.5667 (Hot)
	1000 (Cold)		2 (Cold)
Pr	0.7 (Hot)	γ	0.1176 (Hot)
	6.62 (Cold)		0.0667 (Cold)
B_2	-0.03599	δ	0.0667 (Hot)
B_3	-0.1541		0.1334 (Cold)
B_4	0.1499		
B_5	-0.0678		

옵셋핀 매개변수 해석 – J-factor

J-factor

• 해석 결과에서 열전달 계수 h 를 구하는 방법

$$St = \frac{h}{\rho U C_p}$$

$$Q = hA\Delta T$$

$$A = Pdx$$

$$Q = \dot{m}C_p\Delta T$$

$$T'(y) = T'(z) = 0$$

$$\dot{m}C_p(T_{inlet} - T(x)) = \int_0^x hP(T(x) - T_{wall})dx$$

미분

$$-\dot{m}C_p T'(x) = hP(T(x) - T_{wall})$$

적분

$$T'(x) = \frac{hP}{\dot{m}C_p}(T_{wall} - T(x))$$

$$T(x) = C_1 e^{-\frac{hP}{\dot{m}C_p}x} + C_0$$

$$T(\infty) = T_{wall} \rightarrow T(x) = C_1 e^{-\frac{hP}{\dot{m}C_p}x} + T_{wall}$$

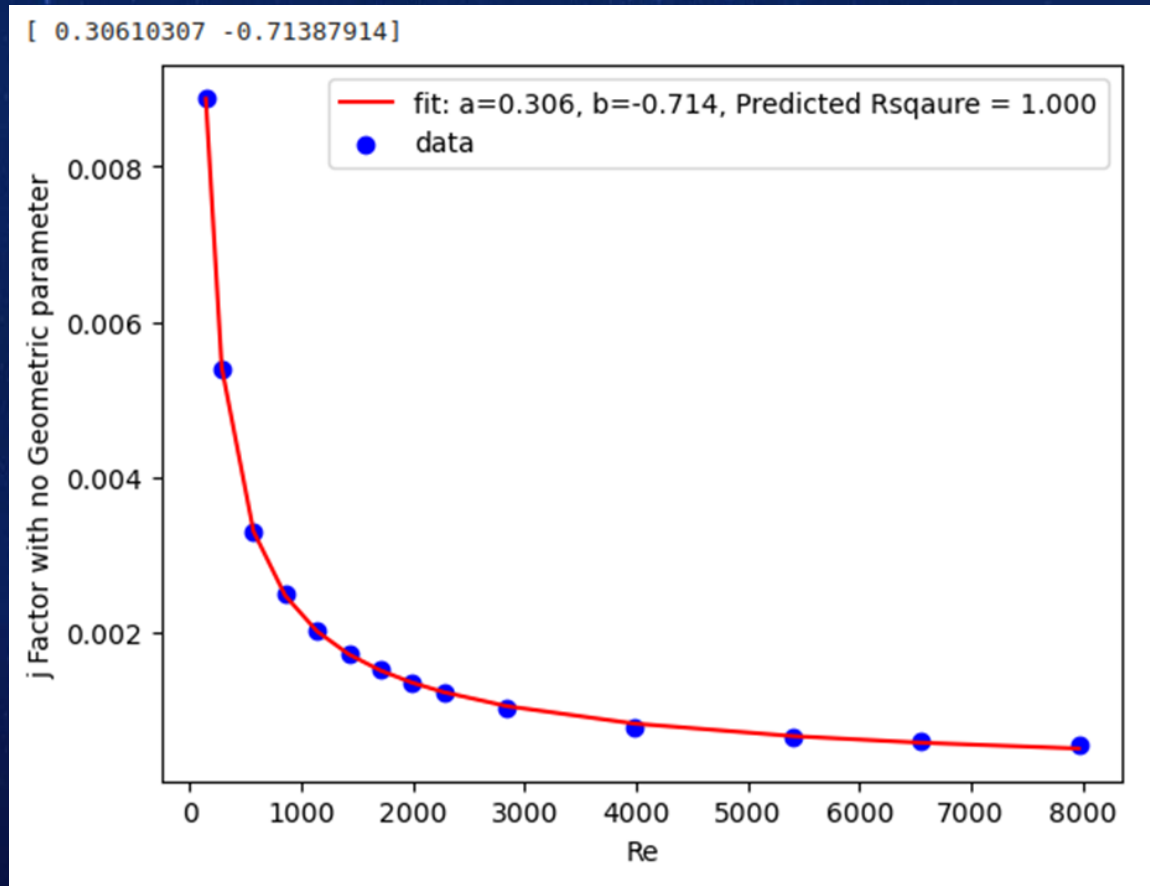
$$T(0) = T_{inlet} \rightarrow T(x) = (T_{inlet} - T_{wall})e^{-\frac{hP}{\dot{m}C_p}x} + T_{wall}$$

$$T(L) = T_{outlet} \rightarrow h = -\frac{\dot{m}C_p}{PL} \ln \left(\frac{T_{outlet} - T_{wall}}{T_{inlet} - T_{wall}} \right)$$

옵셋핀 매개변수 해석 – J-factor

	Re	$f_{noGeometric}$
Case 1	142.52	0.00889
Case 2	284.86	0.00538
Case 3	569.42	0.00330
Case 4	853.92	0.00249
Case 5	1138.38	0.00203
Case 6	1422.81	0.00173
Case 7	1707.23	0.00151
Case 8	1991.63	0.00135
Case 9	2276.01	0.00122
Case 10	2844.77	0.00102
Case 11	3982.26	0.00079
Case 12	5404.10	0.00065
Case 13	6541.63	0.00059
Case 14	7963.67	0.00054

J-factor

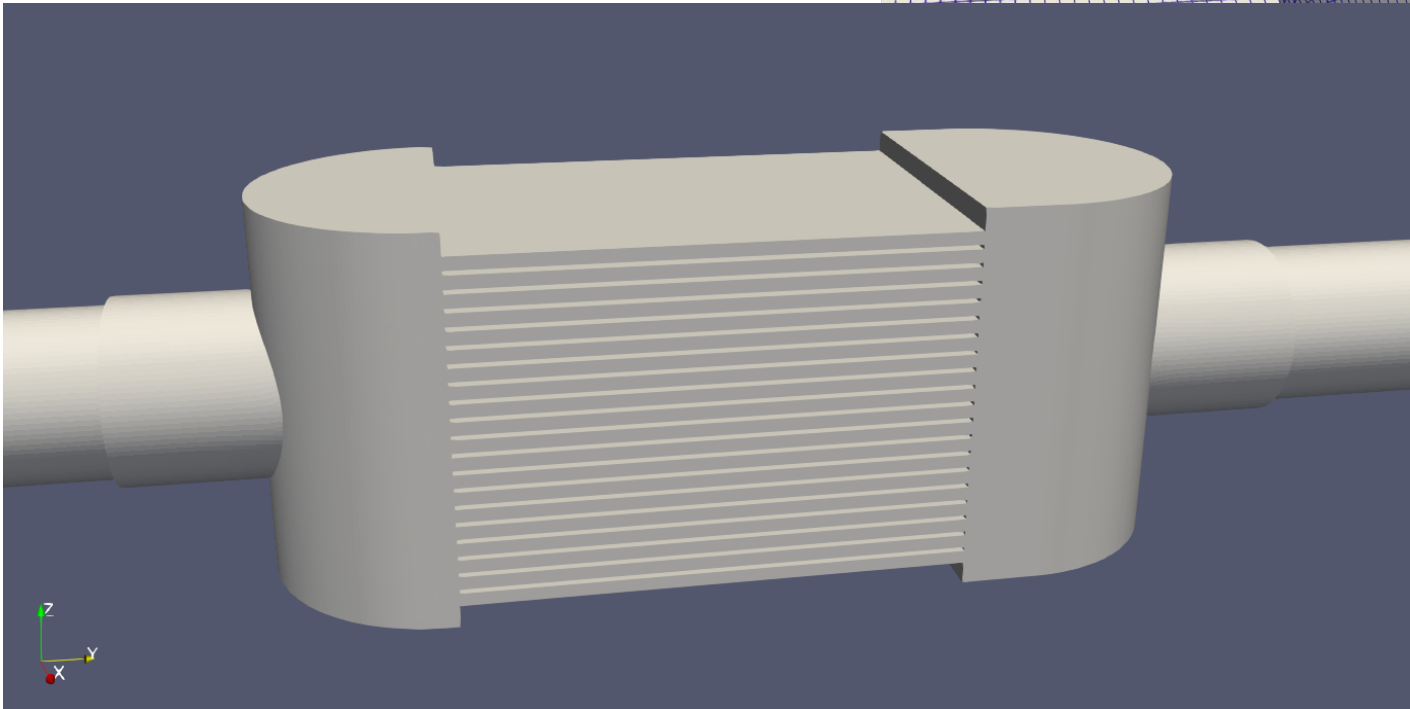
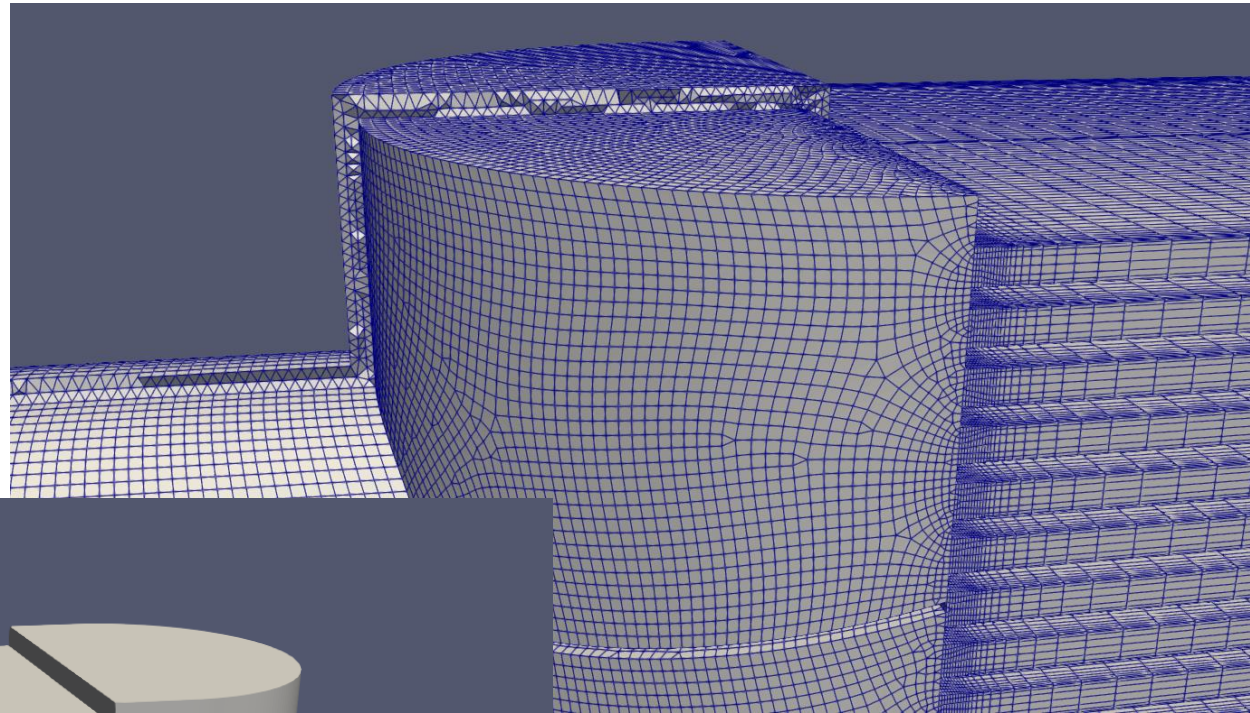


$$J_{noGeometric} = 0.30610307 Re^{-0.71387914}$$

● 열교환기 전체 형상

• Cell 개수

- Fluid region : 5,227,351
- Solid region : 3,348,147



해석 조건

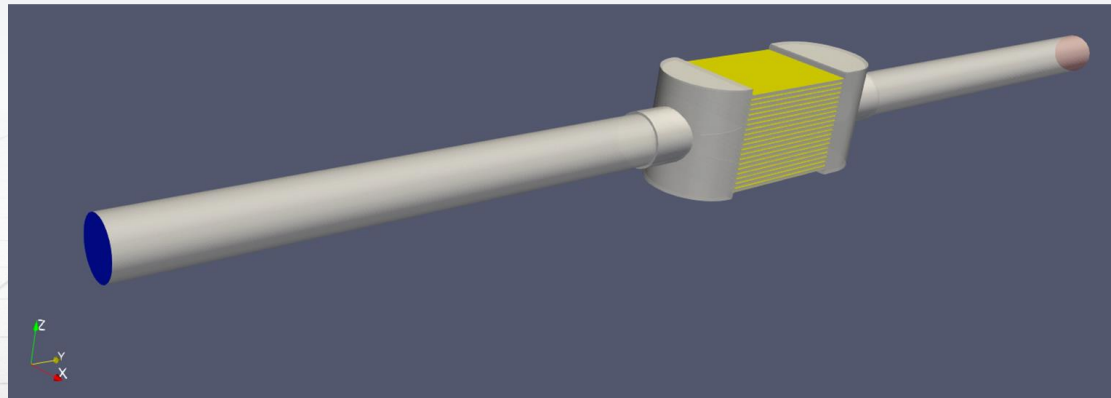
열교환기 해석 조건 설정

Region	입출구 유량	입구 압력	입구 온도	AoV	Porosity	h	s	t	l
Hot	0.323 kg/s	1.7 bar	87.52 °C	1324	0.8552	6.5	3	1.7	0.2

Region	벽면 온도
Cold	17.5 °C

물성치	mol	Cp	mu	Pr/kappa	rho(0)	R	Equation of state
Air	28.9	1007	2.04e-05	0.7	-	-	Incompressible PerfectGas
Plate	26.98	871	-	240	2719	-	rhoConst

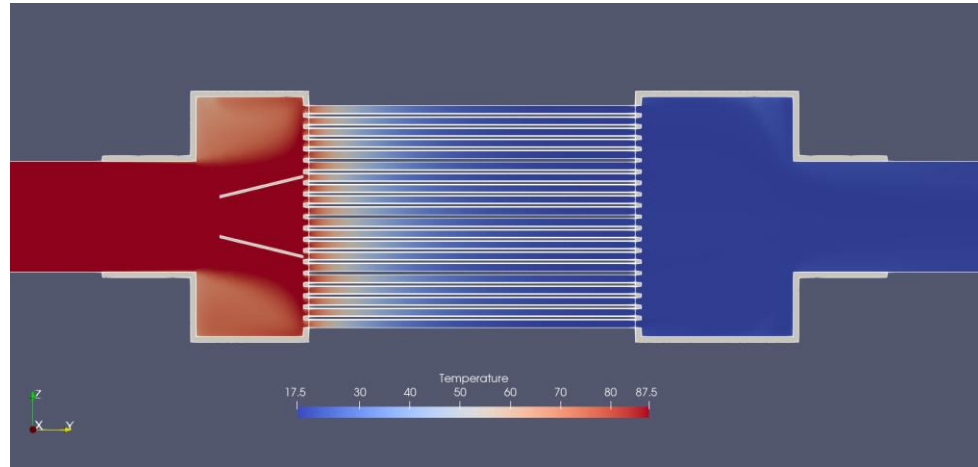
Inlet patch
 Outlet patch
 Adiabatic
 Constant Temperature



해석 결과 비교

Simulation results

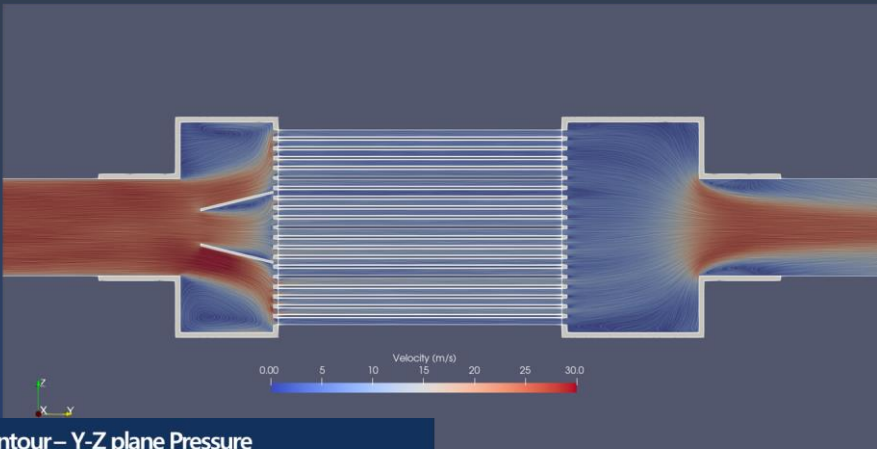
- Del P : **-2.54 kPa**
 - Ave. of cold side inlet pressure : 174,792 Pa
 - Ave. of cold side outlet pressure : 172,252 Pa (1.7 bar)
- Del T : **-69.7 °C**
 - Ave. of fluid inlet temperature : 87.8 °C
 - Ave. of fluid outlet temperature : 18.1 °C



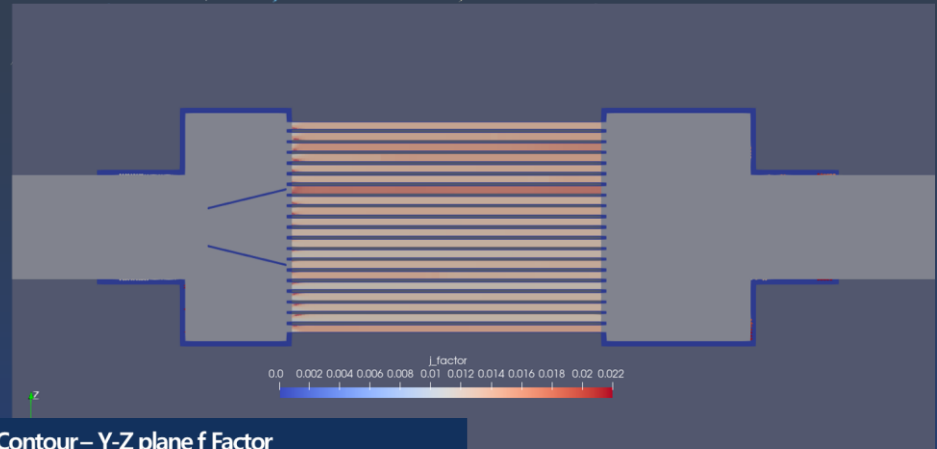
구분		Heat Exchanger	
		Experimental	Simulation
Hot Region	ΔP	2,280 Pa	2,539 Pa
	ΔT	70.94 K	69.7 K

해석 결과

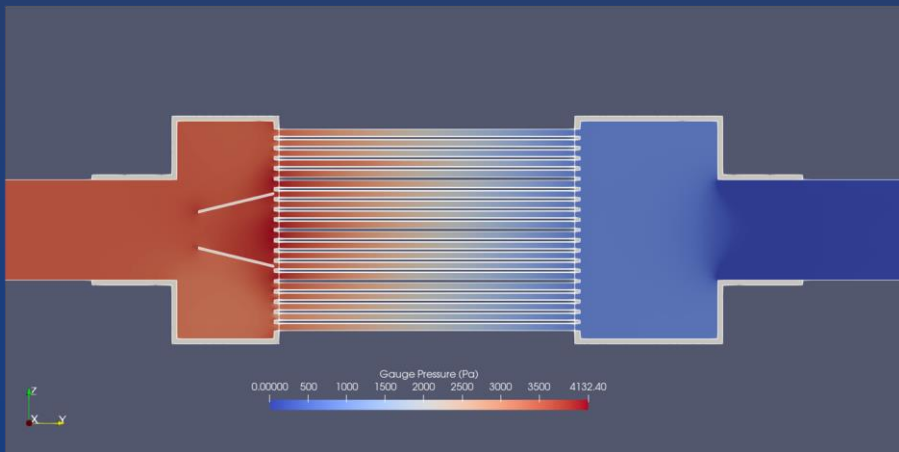
Contour – Y-Z plane Velocity



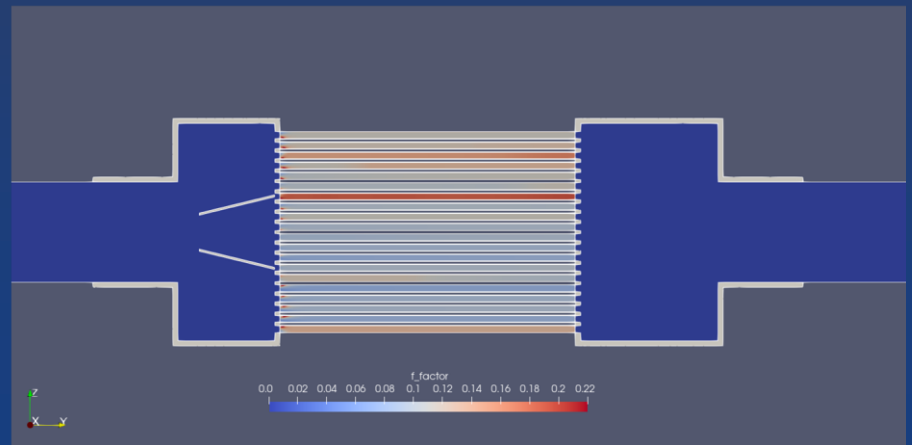
Contour – Y-Z plane j Factor



Contour – Y-Z plane Pressure

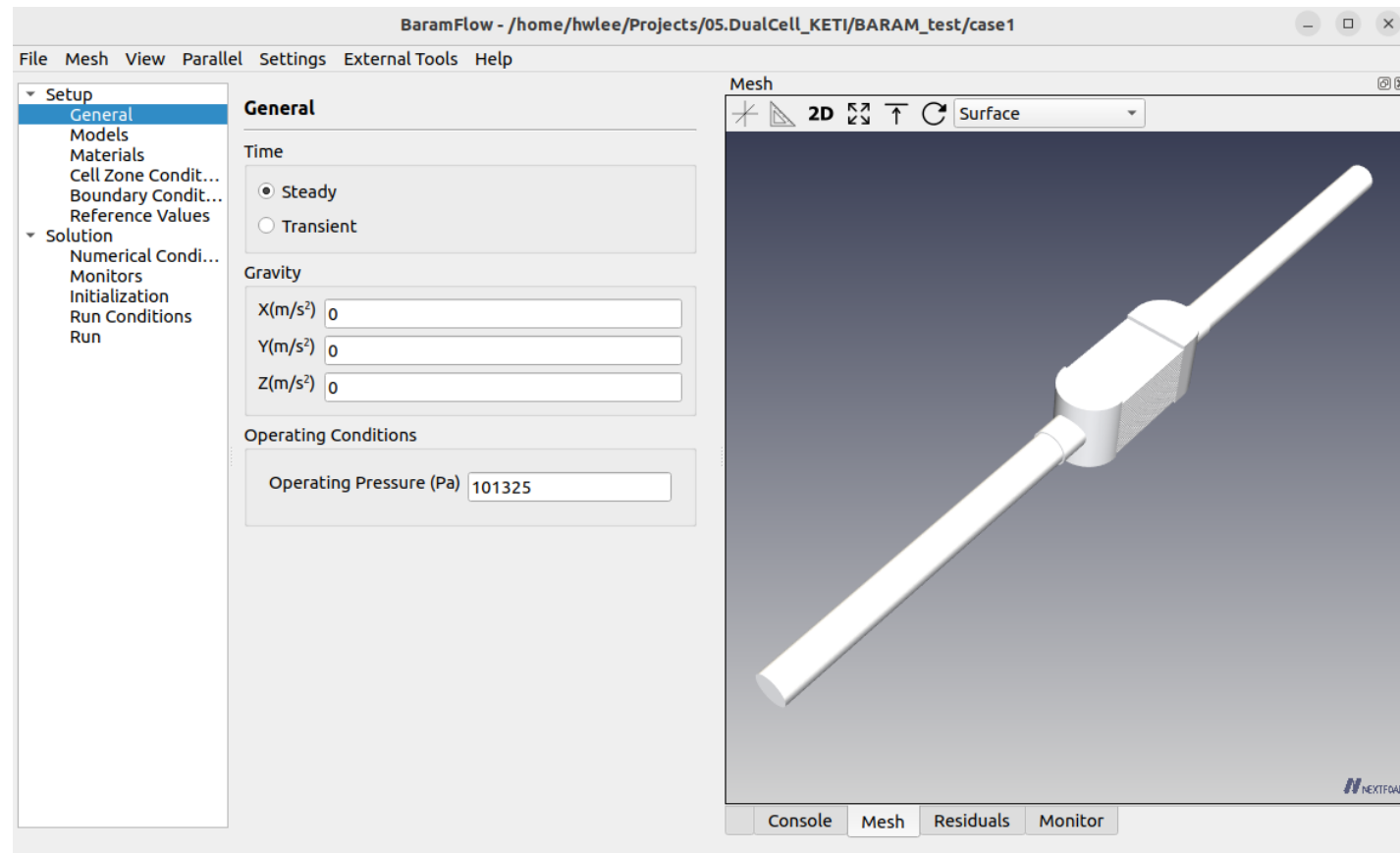


Contour – Y-Z plane f Factor



● 열교환기 성능해석 결론

- 이중 격자 기법을 사용해 열교환기 내 유체의 분배와 흐름을 고려한 성능 해석이 가능함.
- 실험 결과와 성능을 비교한 결과, 10% 내의 우수한 성능 예측을 확인했음.



- [1] J. Kitto, J. Robertson, Effects of maldistribution of flow on heat transfer equipment performance, *Heat Transfer Eng.* 10 (1) (1989) 18–25
- [2] Z. Zhang, Y. Li, CFD simulation on inlet configuration of plate–fin heat exchangers, *Cryogenics* 43 (2003) 673–678.
- [3] N.C. Dejong, A.M. Jacobi, An experimental study of flow and heat transfer in parallel–plate arrays: local, row–by–row and surface average behavior, *Int. J. Heat Mass Transfer* 40 (6) (1997) 1365–1378
- [4] R.M. Manglik, A.E. Bergles, Heat transfer and pressure drop correlations for the rectangular offset strip fin compact heat exchanger, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 10 (2) (1995) 171–180
- [5] ANSYS. Inc., *Ansys Fluent Theory Guide* (2022)