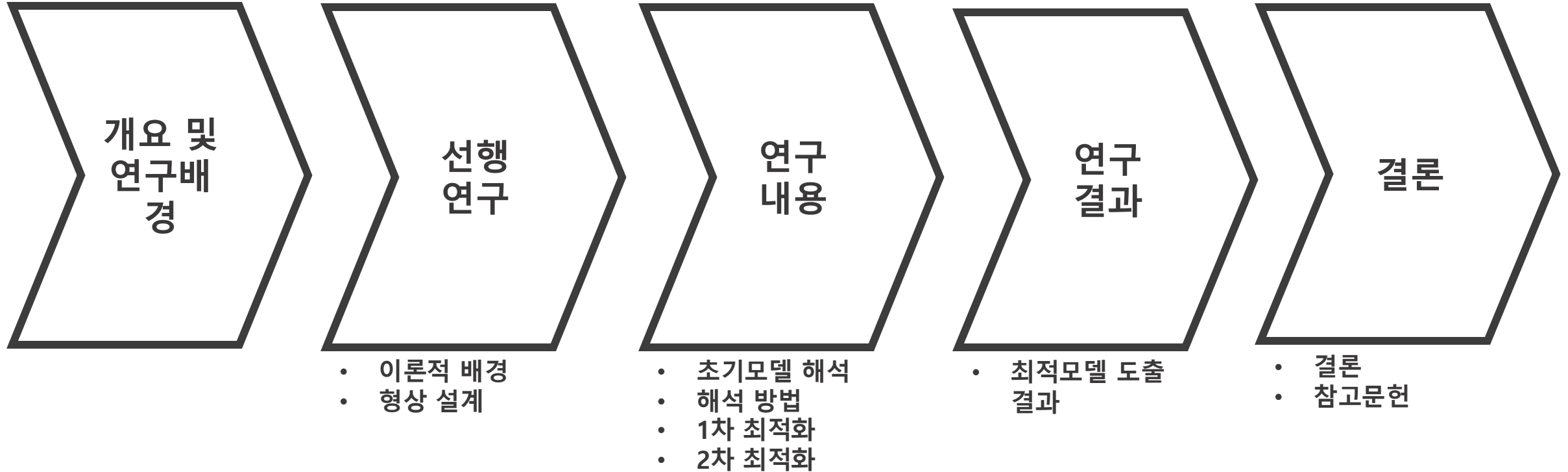


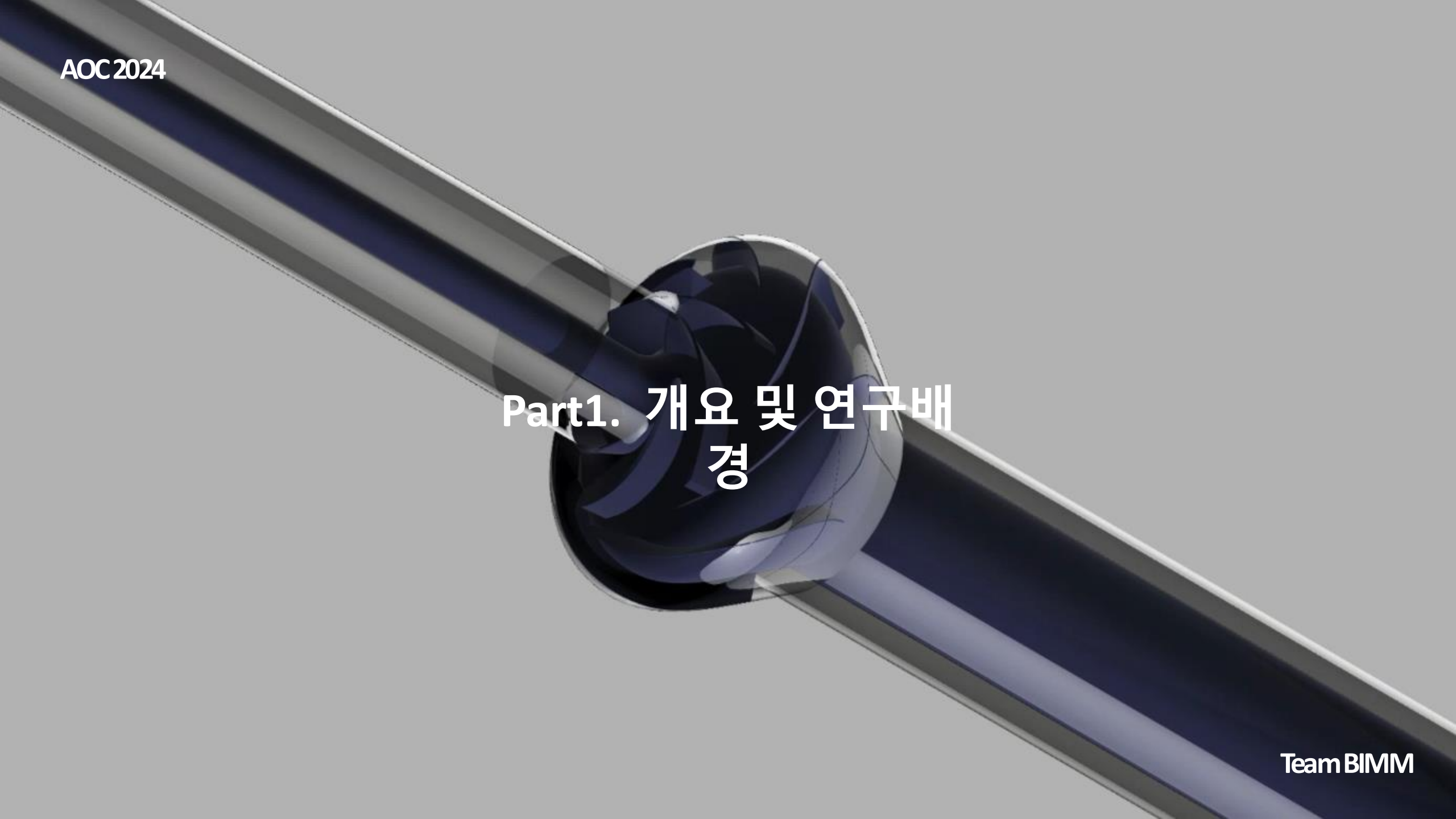
# 차량용 EWP의 최적설계에 대한 수치해석적 연구

Team BIMM

한양대학교 기계설계공학과 김준범  
경희대학교 기계공학과 이광은



AOC 2024



Part1. 개요 및 연구배  
경

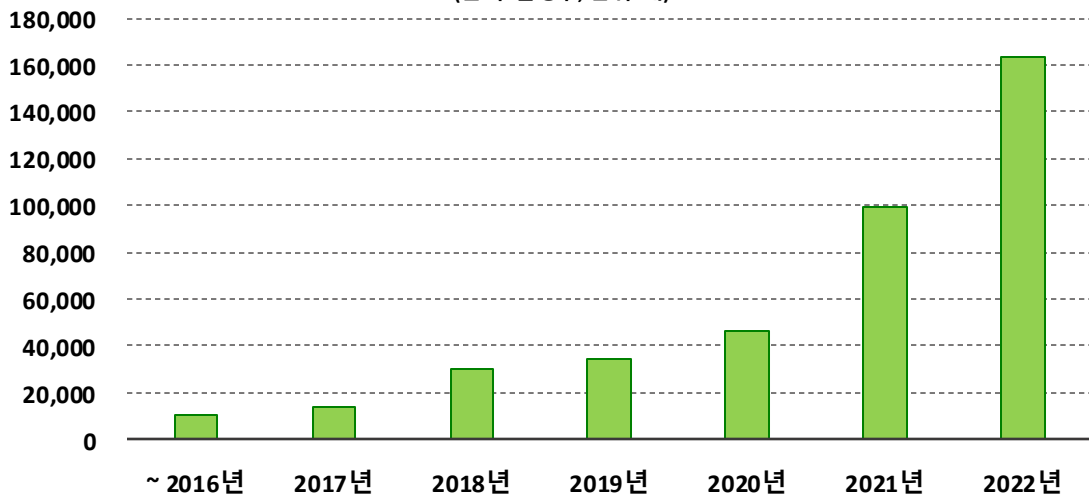
Team BIMM

환경부 자료에 의하면 **전기동력자동차(xEV)**의 보급 실적은 해를 거듭할수록 증가하고 있다. xEV가 대중화됨에 따라 배터리, 전기 모터에 대한 **열관리 시스템** 기술 분야에서 **연구 개발이 활발히** 수행되고 있다.

xEV 차량의 열관리 시스템은 배터리 냉각을 위한 유로와 PEEM (Power Electronics and Electric motor) 냉각을 위한 유로로 구성된다. 발열부품 열관리 시스템은 배터리, 전장부품, 구동부품 등에서 발생한 열을 냉각수에 전달해 온도를 제어한다. 그리고 **시스템 내 냉각수 순환을 위해 다수의 워터 펌프가** 필요하다.

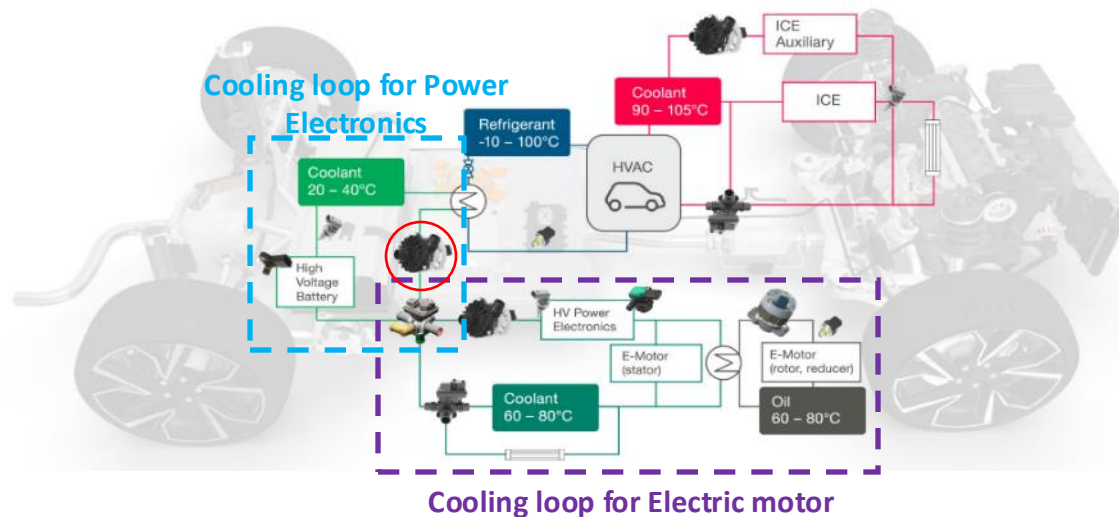
### 전기자동차 연도별 보급 실적

(출처: 환경부, 단위: 대)



이때, **xEV 차량의 연비 향상**을 도모하기 위해서 **내부 시스템의 전력 효율성을 개선**시키는 작업이 요구된다. 그런데 xEV 차량은 주행상황에서 PEEM, 배터리의 열관리를 위해 12V 저전압을 통해 작동되는 EWP를 이용한다. 그리고 **EWP의 성능 최적화**를 통해서 **주행거리와 연비 향상**에 직접적으로 도움이 될 수 있도록 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 **xEV용 EWP의 효율 향상**에 초점을 맞춰 설계 조건에서 펌프의 효율 극대화를 연구 목표로 한다.

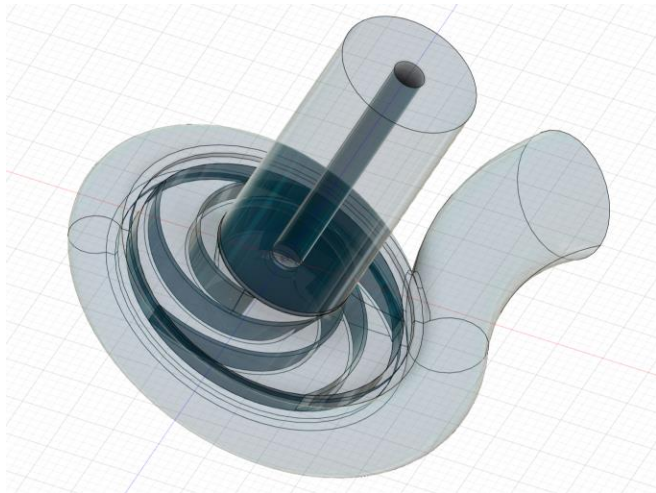


## EWP (Electric Water Pump)

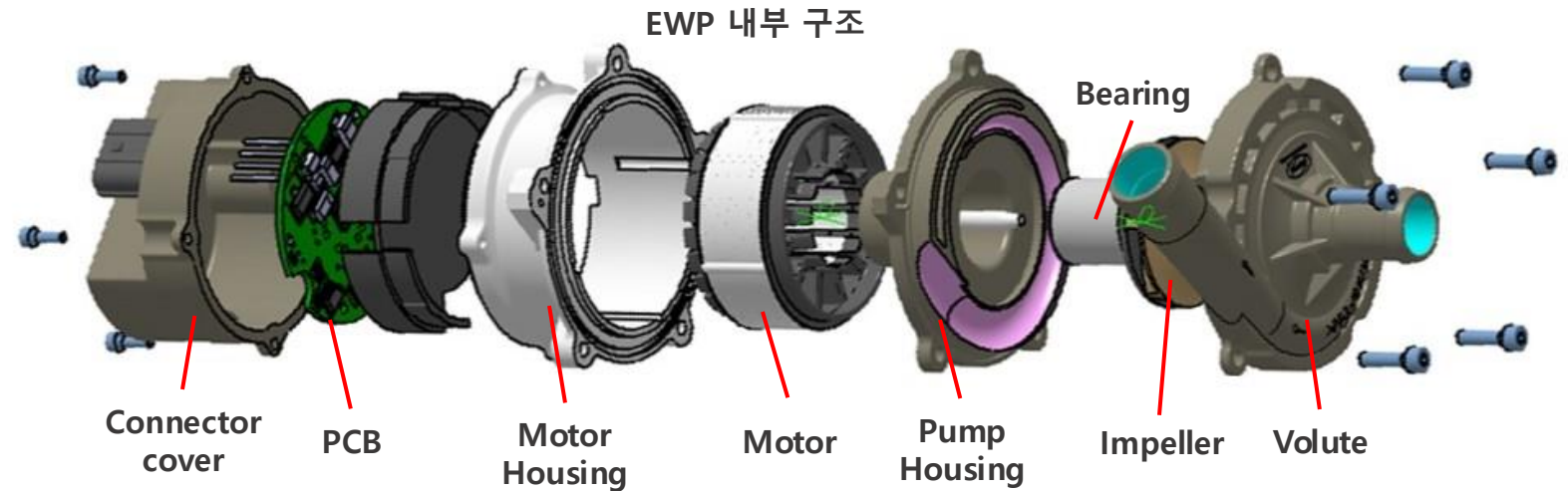
- 펌프(Pump): Impeller를 회전시켜 유체에 원심력을 주어 운동에너지를 압력에너지로 변환하는 원리로 유체를 낮은 곳에서 높은 곳으로 올리는 유체 기계
- 펌프는 Housing, Impeller, 그리고 유동의 흐름을 유도 해주는 Volute 부분과 그 외 부속 부품으로 구성됨
- 구성 부품 중 Impeller는 EWP 성능과 유동 특성에 핵심적인 파트로서, 다양한 설계변수를 조정해서 특정 Flow rate(유량)과 Head(양정)에서의 Efficiency(효율)을 최적화 할 수 있음



EWP 제품



펌프 모델링 예시



설계 시작



선행연구



Stepanoff 이론에 의한 초기모델 설계



Blade 개수 별 (z) 유동 해석



1차 최적화: 최적 Blade 개수 선정



상세 설계변수 지정 ( $\beta_1, \beta_2, \theta$ )



SimLab Acusolve를 이용한 유동 해석



HyperStudy를 이용한 최적화



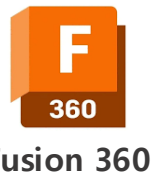
2차 최적화: 설계변수 최적 수치 도출



초기 모델과 성능 비교

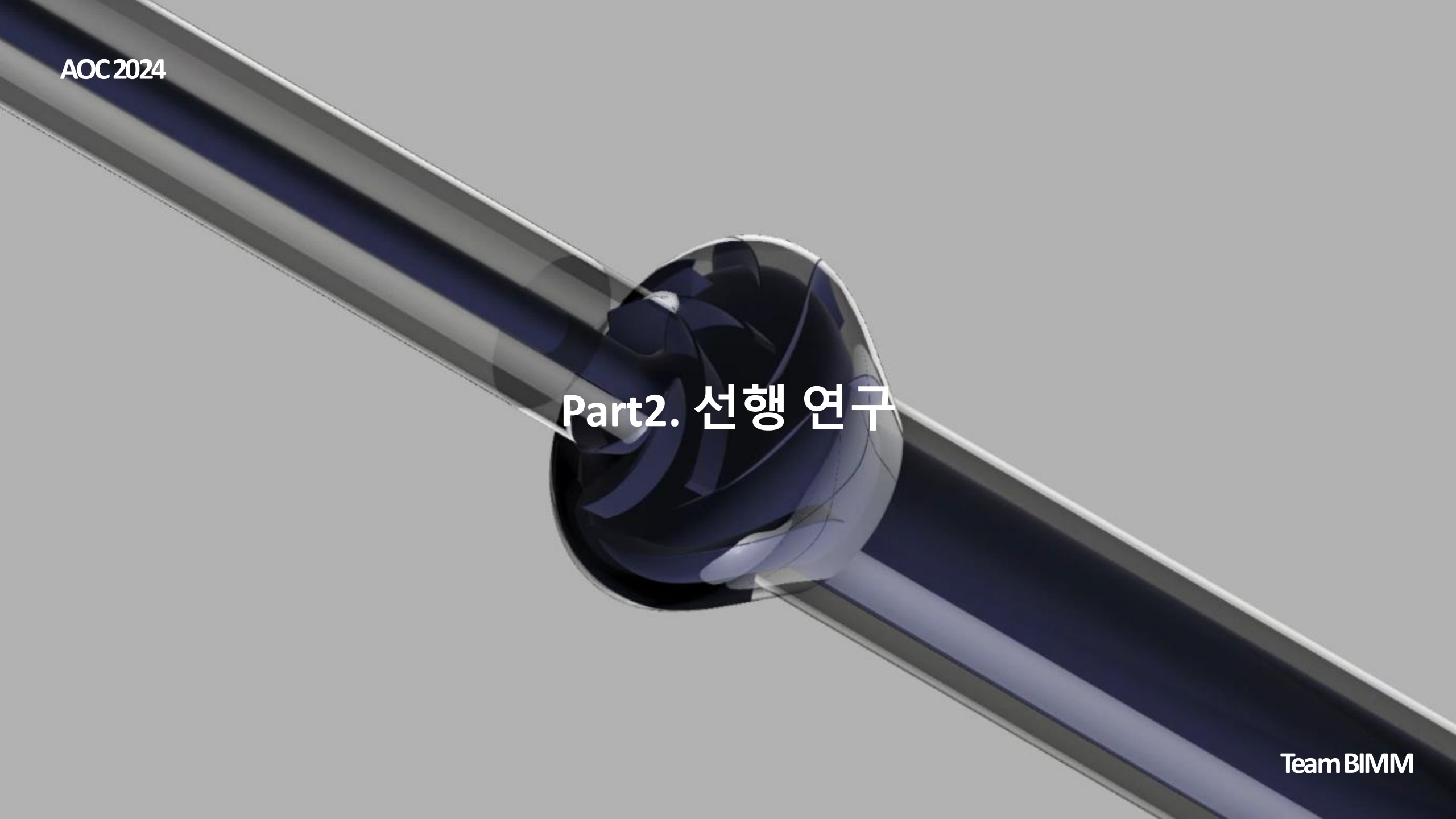


- Fusion 360을 이용해 Stepanoff 이론에 기반한 Impeller 초기 형상 설계
- Case study를 위한 해석 모델 집합 정립
- SimLab Acusolve solver를 이용해 유동 해석 진행
- 15개 Case에 대한 분석을 통해 Blade 개수 최적 점 도출 (1차 최적화)



- 1차 최적화 결과를 바탕으로 새로운 설계변수 지정
- SimLab Acusolve solver를 이용해 유동 해석 진행
- 15개 Case에 대한 데이터에 기반하여 반응표면법을 통해 최적모델 도출 (2차 최적화)

AOC 2024

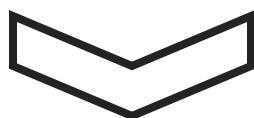


Part2. 선행 연구

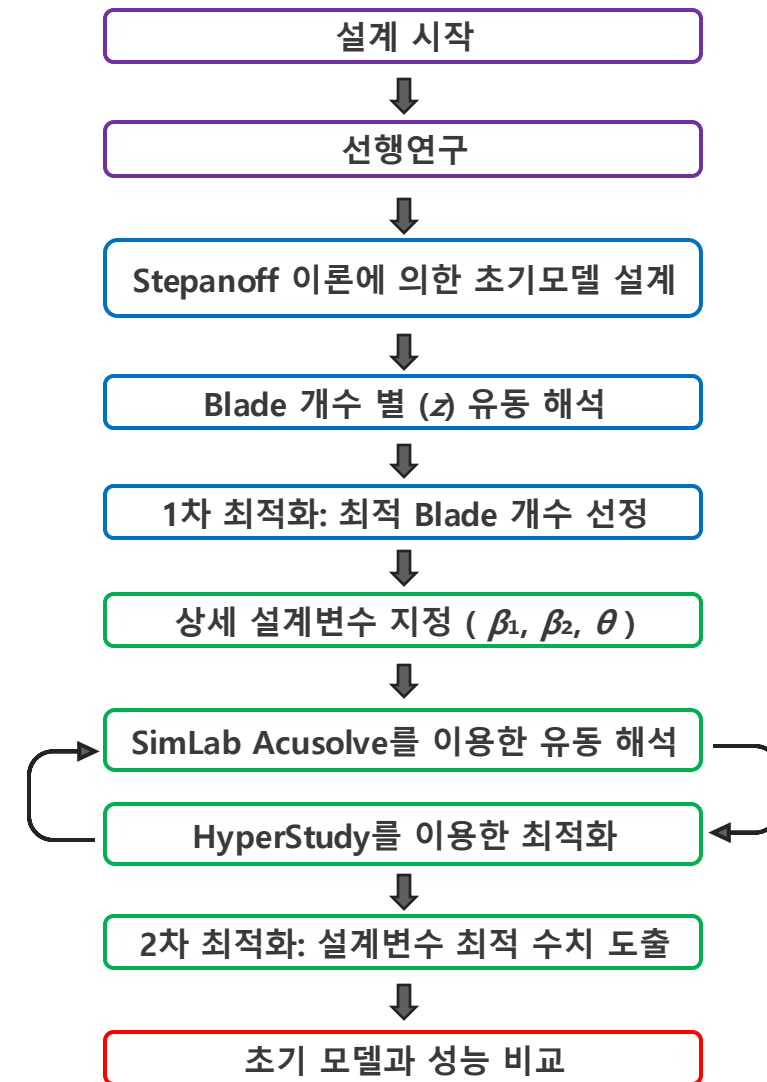
Team BIMM

## 선행연구 기반 Desing Point, Initial Condition 설정

- xEV 열관리 시스템의 배터리 유로 및 PEEM 유로 겸용 워터펌프 성능 설계<sup>5)</sup>
- Optimization of Blades and Impellers for Electric Vehicle Centrifugal Pumps via Numerical Analysis<sup>4)</sup>
- EWP 모듈 내 임펠러의 형상에 따른 펌프 성능에 관한 연구<sup>8)</sup>
- 반응표면기법을 이용한 원심펌프 임펠러의 최적설계 및 벌류트 설계<sup>9)</sup>
- 실험계획법을 사용한 원심펌프 임펠러의 최적설계<sup>10)</sup>



Initial Condition	<p><math>Q</math>: 25 LPM      <math>N</math>: 5000 RPM</p> <p><math>H</math>: 1 bar        <math>T</math>: 65 °C</p>
Working Fluid	Water (338K)
Design Topology	Setepanoff Theory
Design Parameter	<p>1st Optimization: <math>z</math> (블레이드 개수)</p> <p>2nd Optimization: <math>\beta_1</math> (유동 입구 각), <math>\beta_2</math> (유동 출구 각), <math>\theta</math> (스윙 각)</p>
Response	$H$ (양정), $\eta$ (효율)
Goal	$H \geq 10.385\text{m}$ , Efficiency max

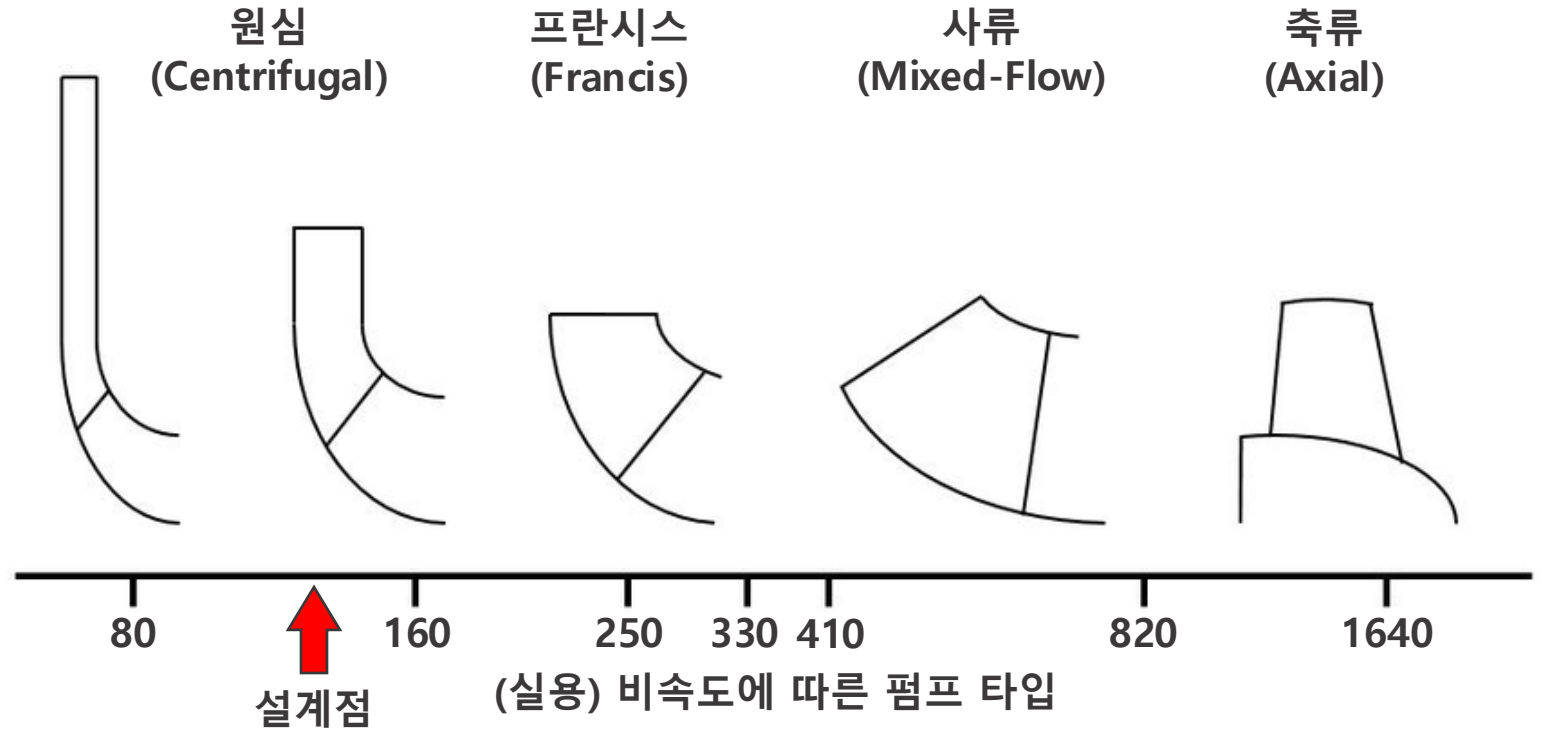




# 설계점에 의한 펌프 형태 결정

체적 유량	L/min	$Q$	25.000
압력 상승	bar	$\Delta p_t$	1.000
양정	m	$H$	10.395
회전속도	RPM	$N$	5000
비속도	-	$N_s$	0.333
실용 비속도	-	$n_s$	136.558

최적 설계를 진행할 펌프의 설계점



- **비속도**: 펌프의 특성을 표시하는 중요한 무차원수
- 비속도를 통해 가장 효과적일 것으로 예상되는 **펌프 타입**을 선택
- 관행에 의해 **차원이 있는 비속도**가 자주 사용되며, 이를 **실용 비속도**라 함
- **실용 비속도**는 아래와 같은 산식으로 계산됨

$$n_s = \frac{N[\text{RPM}] \cdot (Q[\text{CMM}])^{1/2}}{(H[\text{m}])^{3/4}}$$

- 표와 같이 **차량용 EWP**의 정격 작동조건에 해당하도록 **설계점** 정의
- **비속도 산출 후 설계점에 가장 적합한 펌프 형상**을 선정 가능
- **실용 비속도가 약 137**이므로 펌프 타입을 **원심 펌프**로 결정

# Stepanoff 이론에 의한 초기 설계

선행 연구 & 형상 설계

초기 모델 해석

1차 최적화

2차 최적화

성능 비교

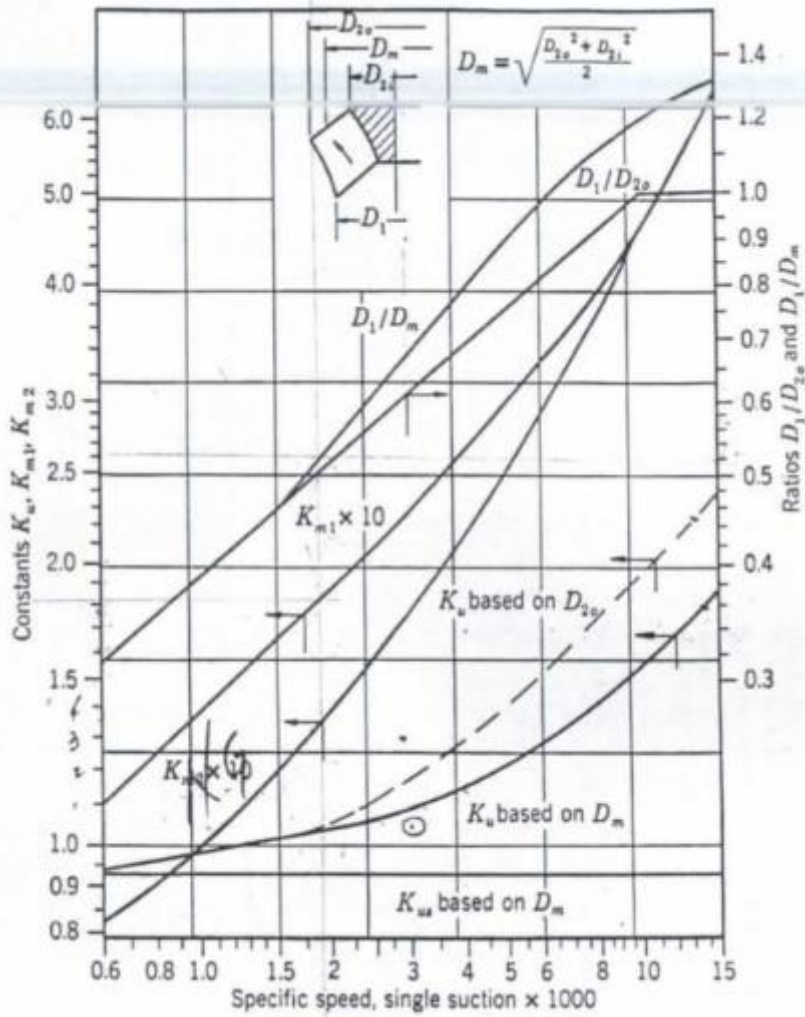


FIG. 5.2. Impeller constants.

1. 설계점 정의				5. 회전차 자오면 상세 치수			
체적 유량	L/min	$Q$	25.000	이상 체적 유량	m <sup>3</sup> /s	$V$	4.39E-04
압력 상승	bar	$\Delta p$	1.000	동점성 계수	m <sup>2</sup> /s	$\nu$	0.400
양정	m	$H$	10.395	Stepanoff 지름 비	-	$b/d_o$	0.216
회전속도	RPM	$N$	5000	회전차 입구 자오면 폭 (원 지름)	mm	$b_1$	4.0
비속도	-	$N_s$	0.333	Stepanoff 지름 비	-	$d_{1m}/d_{1o}$	0.957
실용 비속도	-	$n_s$	136.558	회전차 입구 중간 지름	mm	$d_{1m}$	17.7
2. 주요 초기 변수				회전차 윤곽 경사도	°	$\delta$	5.0
추정 효율	-	$\eta$	0.850	회전차 입구 자오면 절대속도	m/s	$C_{m1}$	1.97
추정 기계 효율	-	$\eta_m$	0.950	회전차 입구 중간 주 속도	m/s	$u_{1m}$	4.634
추정 체적 효율	-	$\eta_v$	0.950	6. 깃 개수 및 두께			
추정 수력 효율	-	$\eta_h$	0.890	추정 깃 두께에 의한 증속률	-	$\lambda$	1.400
주 속도 계수	-	$K_u$	0.971	깃 입구 각	°	$\beta_{1m}$	30.78
회전차 출구 주 속도	m/s	$u_2$	13.872	깃 출구 각	°	$\beta_2$	25.0
회전차 외곽 지름 비	-	$d_1/d_{2o}$	0.373	깃 개수 (Stepanoff)	-	$z$	8.3
회전차 출구 외곽 지름	mm	$d_{2o}$	53.0	깃 개수 (Pfleiderer)	-	$z$	4.7
회전차 입구 외곽 지름	mm	$d_{1o}$	18.5	깃 개수 (결정)	-	$z$	9.0
3. 펌프 유입부 치수				깃 두께	mm	$s$	1.0
펌프 유입부 지름 비	-	$\nu$	0.568	깃 전단 원주 방향 두께	mm	$s_{u1}$	2.0
펌프 유입부 외곽 지름	mm	$d_s$	18.5	깃 두께에 의한 증속률	-	$\lambda_1$	1.463
펌프 유입부 축 지름	mm	$d^*$	10.5	깃 후단 원주 방향 두께	mm	$s_{u2}$	2.0
4. 회전차 입구/출구 속도 삼각형				7. 회전차 출구 폭 최종 결정			
회전차 입구 자오면 속도 계수	-	$K_{m1}$	0.013	회전차 출구 자오면 폭 (원 지름)	mm	$b_2$	25.9
회전차 출구 자오면 속도 계수	-	$K_{m2}$	0.010				
목표 회전차 입구 자오면 절대속도	m/s	$C_{m1}$	0.189				
회전차 출구 자오면 절대속도	m/s	$C_{m2}$	0.137				

Stepanoff 이론을 통해 Impeller 형상에 대한 설계변수 결정





# 임펠러 형상 설계 결과 예시

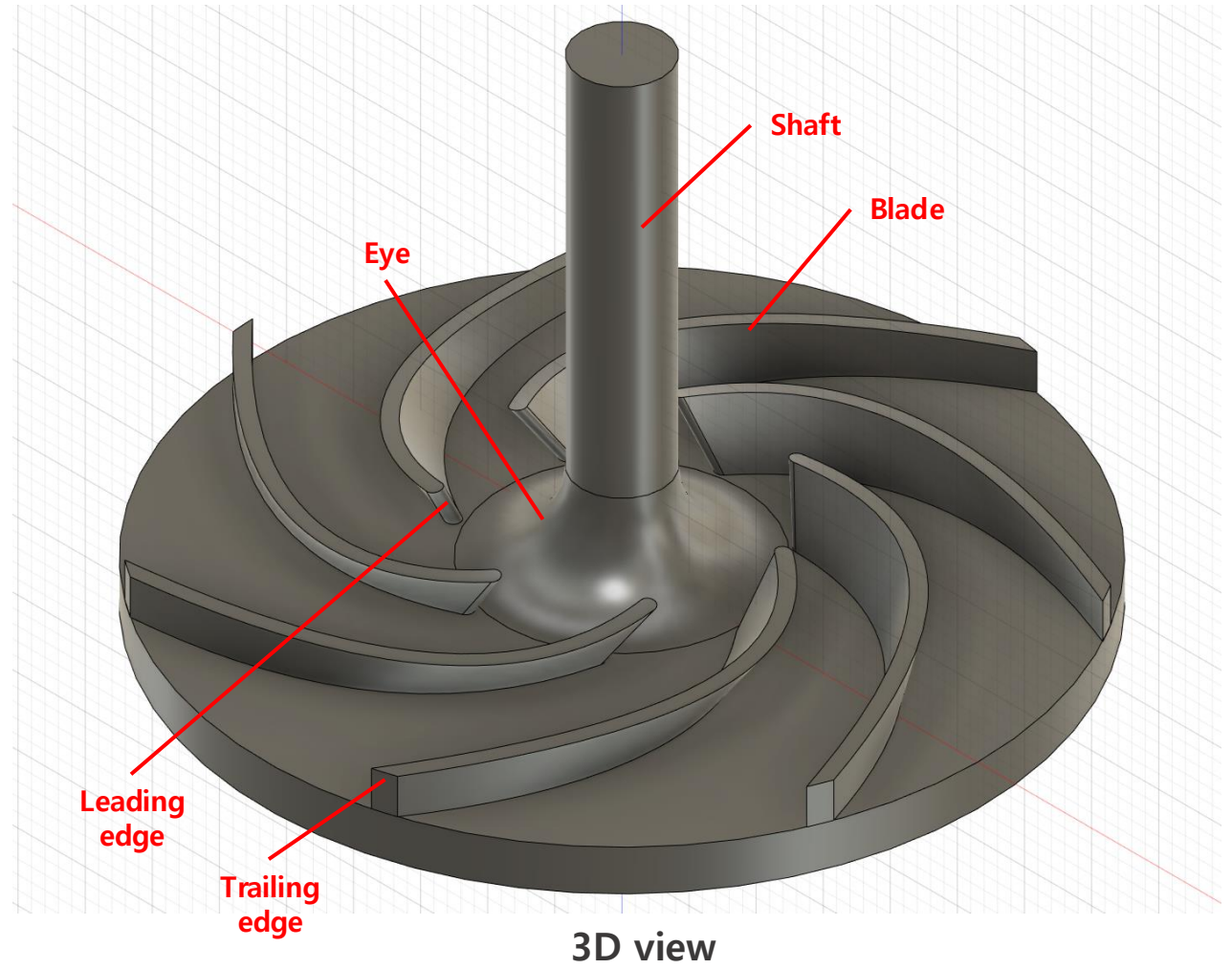
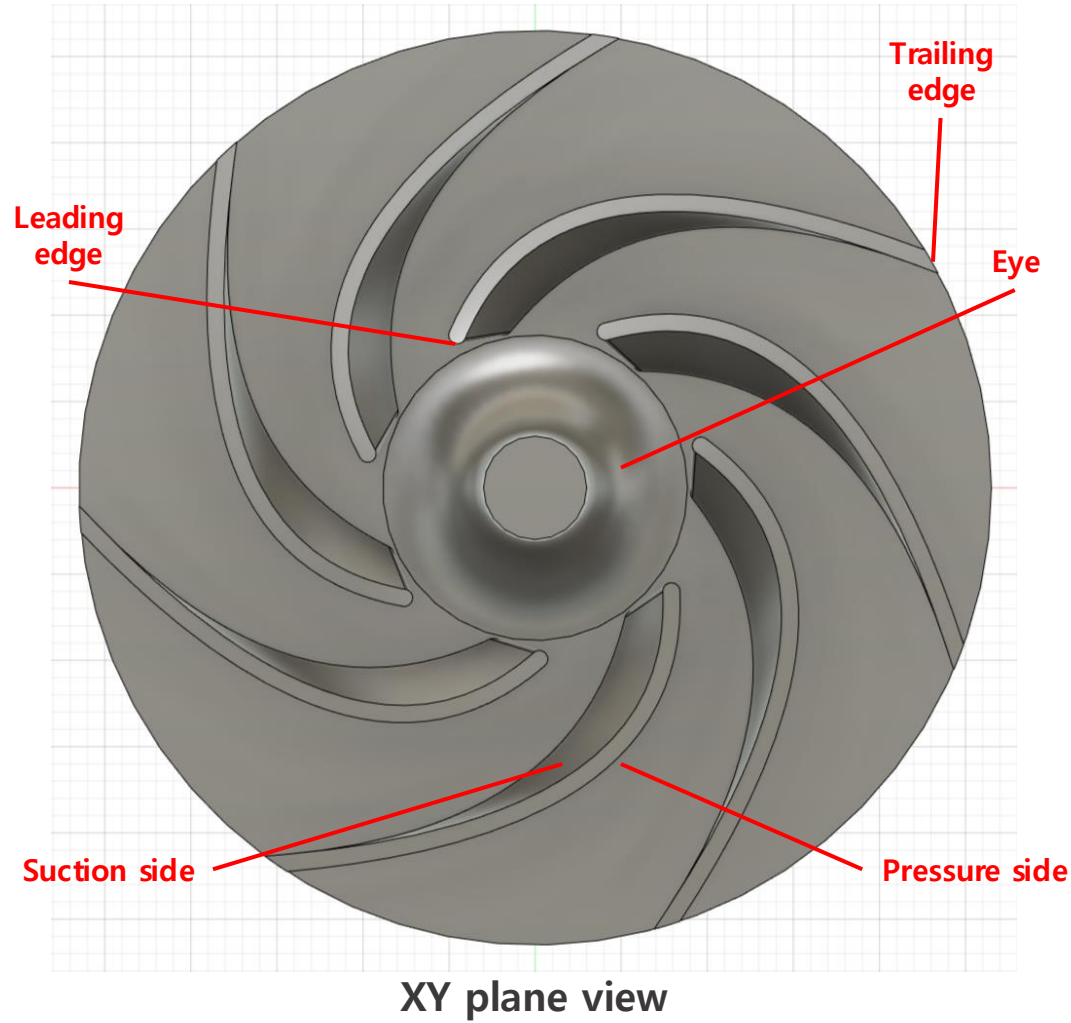
선행 연구  
&  
형상 설계

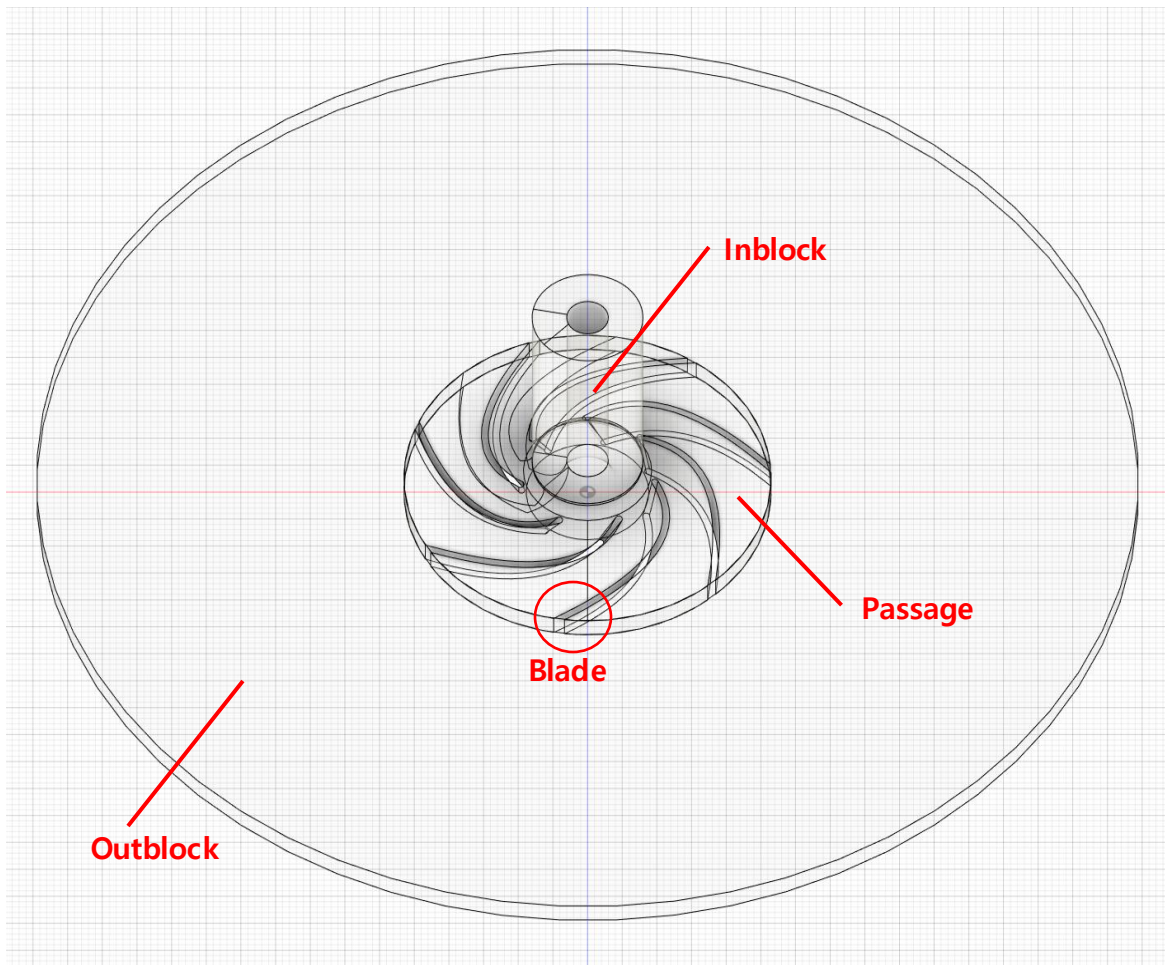
초기 모델  
해석

1차  
최적화

2차  
최적화

성능  
비교





Flow path design

f: 사용자 매개변수				
☆ 사용자 매개변수	BladeLimitOffset	mm	$\text{BladeThickness} * \text{BladeLimitOffsetFactor} * (\cos(\text{Beta1}) + 1)$	1.115
★ 사용자 매개변수	BladeThickness	mm	1 mm	1.00
★ 사용자 매개변수	Beta1	deg	30.8 deg	30.8
★ 사용자 매개변수	Beta2	deg	25 deg	25.0
★ 사용자 매개변수	Theta	deg	-20 deg	-20.0
★ 사용자 매개변수	yShroudCP	mm	3.2 mm	3.20
☆ 사용자 매개변수	b2	mm	2.6 mm	2.60
☆ 사용자 매개변수	b1	mm	4 mm	4.00
☆ 사용자 매개변수	dBoss	mm	3 mm	3.00
☆ 사용자 매개변수	dIi	mm	$(17.7 / 2) * 1 \text{ mm}$	8.85
☆ 사용자 매개변수	dIo	mm	$(18.5 / 2) * 1 \text{ mm}$	9.25
☆ 사용자 매개변수	dShroud	mm	8 mm	8.00
☆ 사용자 매개변수	d2	mm	$(53 / 2) * 1 \text{ mm}$	26.50
☆ 사용자 매개변수	Aux	mm	2 mm	2.00
★ 사용자 매개변수	Z		7	7
☆ 사용자 매개변수	BladePitch	deg	$(360 / Z) * 1 \text{ deg}$	51.4
★ 사용자 매개변수	BladeLimitOffsetF...		0.6	0.6
★ 사용자 매개변수	InflowLength	mm	$d2 * 1$	26.50
★ 사용자 매개변수	OutflowLength	mm	$d2 * 2$	53.00

Design parameters

- 특정 값으로 고정하거나 변화시키고자 하는 설계 변수는 Fusion 360 내 매개변수 기능을 활용하여 위 리스트와 같이 관리
- Impeller 자체의 특성을 파악하기 위해 왼쪽과 같은 이상적 형태의 유동장을 사용
- 펌프의 실제 운전환경과는 다르나, 유체 기계 연구현장에서 자주 사용되는 방식
- Passage는 Blade를 포함하는 회전 유체영역 (MRF)
- Inblock 및 Outblock은 회전하지 않는 유체영역
- Inblock 높이 및 Outblock 반지름은 해석의 수렴성 개선을 위해 각각 Impeller 반지름의 1배, 2배를 적용해 구성 (유동장 내 Flow circulation에 의한 영향 최소화 목적)

AOC 2024

## Part3. 연구 내용

Team BIMM

- 연속방정식 (Continuity Equation): 유체의 물리량이 보존되는 상태로 이송됨을 기술

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0$$

- 운동량 방정식 (Momentum Equation): 유체의 운동에서 외력에 의한 영향을 기술

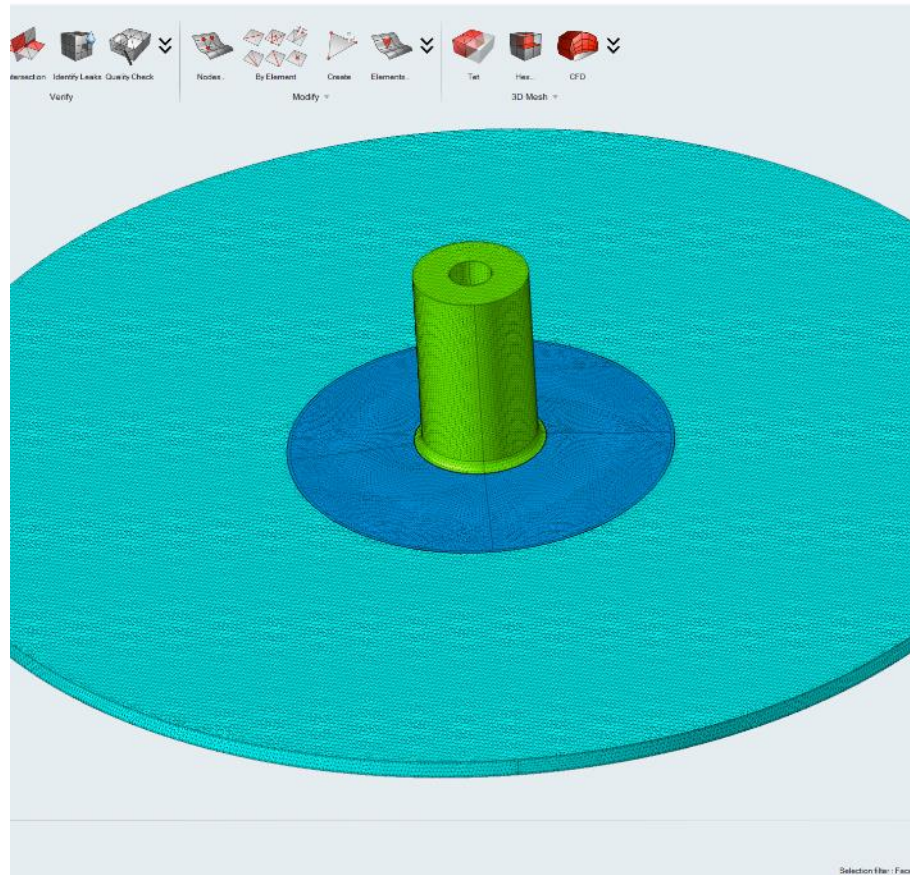
$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\rho \vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \nabla \cdot \tau$$

- 에너지 방정식 (Energy Equation): 열역학 1법칙을 유체의 물리량과 맞게 변환

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \vec{u} \cdot \tau + S$$

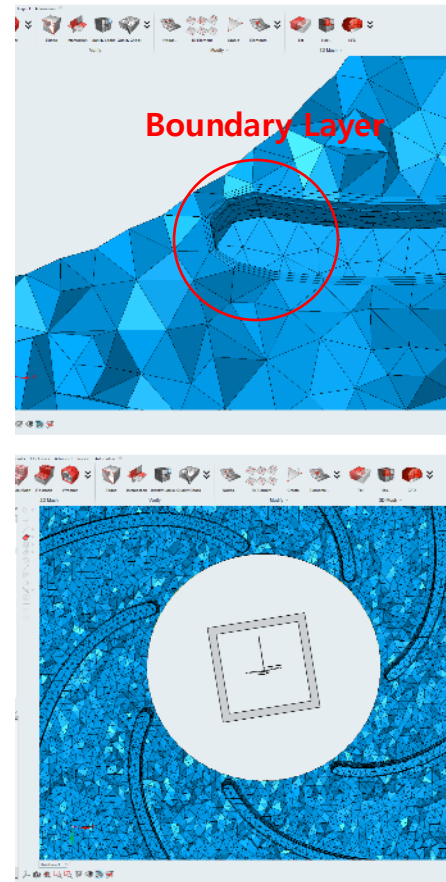
- Navier-stokes Equation : 응력 텐서와 유체의 거동 사이의 운동량 보존 방정식 표현

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\rho \vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{u}$$



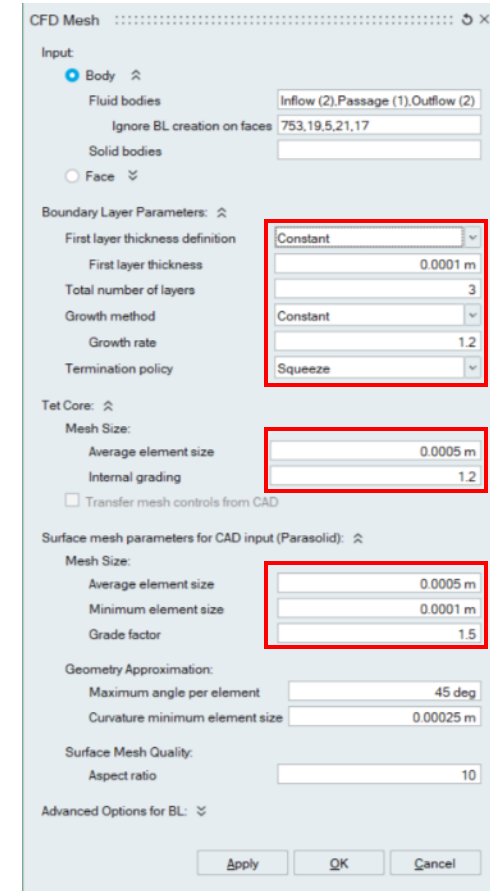
형성된 격자계

- SimLab의 격자 생성 기능 중 **CFD Mesh**를 사용
- 격자 생성 대상은 Blade를 둘러싸는 **MRF 영역**과 **Inblock, Outblock**
- **Tetra** (Domain 전체) 및 **Prism** (Boundary Layer 한정)이 혼합된 격자계 생성



Boundary Layer 상세

- **Blade** 및 **Wall** 근처에서 **Shear Stress**에 의한 유동 정확성을 위하여 **Boundary Layer** 적용
- Domain 간 **접촉면** 및 **Inlet, Outlet**에 대해서는 **Boundary Layer** 생성 시 **예외 처리**



CFD Mesh 생성 설정



**Solution** [X]

Name: Flow

Solver: AcuSolve

Solution type: Steady State

Select bodies: Outflow (2), Passage (1), Inflow (2)

Physics:

Incompressible

Mildly compressible

Flow type: Turbulent

Turbulence: Shear Stress Transport

Transition mode: None

Heat Transfer

Include Gravity

Species

OK Cancel

해석 정의

**Solver Settings** [X]

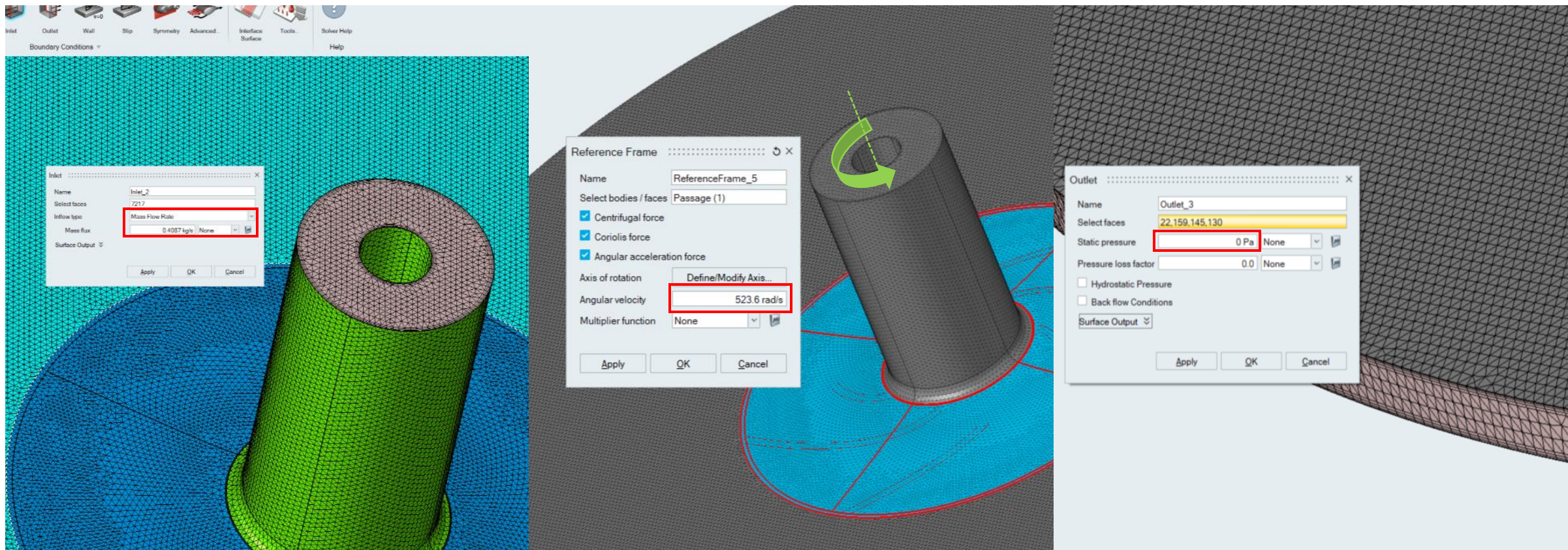
Name	Value
<b>Offsets</b>	
Absolute pressure offset	0 Pa
Absolute temperature offset	0 K
<b>Auto Solution Strategy</b>	
Maximum no. of time steps	20
Initial time increment	1e10 s
Convergence tolerance	0.001
Number of krylov vectors	10
Relaxation factor	0.3
Flow	<input checked="" type="checkbox"/> True
Turbulence	<input checked="" type="checkbox"/> True
<b>Advanced Solution Settings</b>	
<b>Restart Parameters</b>	
<b>Default Wall Parameters</b>	
Wall velocity type	Match Mesh Velocity
Turbulence wall type	Wall Function
Roughness height	0 m
Wall function heat flux factor	1
Gap	0 m
Gap factor	1
Crease angle	90 deg
Split internal surfaces	<input checked="" type="checkbox"/> True

Description:  
Maximum number of time steps allowed for the run. The run may terminate earlier due to other criteria. If zero, this option is ignored

OK Cancel

Solver Settings

- 해석 종류는 **Steady State**로 진행
- Solver는 **AcuSolve** 기본 지정
- 난류 모델은 복잡한 유동 현상에 의한 난류를 모사하는데 적합한 **Shear Stress Transport** 모델을 사용
- 펌프 내 유동장은 **비압축성**이며, 열 전달과 중력에 의한 영향이 없는 **이상적인 상태**라고 가정 후 적합한 설정을 적용
- **Solver Settings**의 경우 **최대 Time step** 제한을 제외한 다른 설정은 기본값으로 설정



Inlet 조건 - 질량 유량  
(0.4087 kg/s)

Reference Frame 조건 - 회전 MRF 영역  
(523.6 rad/s)

Outlet 조건 - 정압  
(0 Pa)

- 사용할 해석조건 정의의 유형: Inlet, Outlet, Wall, Reference Frame
- Inlet에 질량 유량(Mass Flow rate), Outlet에 정압(Static pressure)을 부여
- Wall의 경우 SimLab의 AutoWall 기능을 사용하여 해석 구동 시 자동으로 지정
- Passage 부분을 MRF 영역으로 지정하기 위하여 회전하는 Reference Frame 조건 부여

작동 유체 주요 물성치 (물)				
물리량			State 1	State 2
온도	°C	$T$	338.15	338.15
압력	bar	$p$	1.0132	2.000
밀도	kg/m <sup>3</sup>	$\rho$	980.95	981.38
엔탈피	kJ/kg	$H$	272.93	273.75
엔트로피	kJ/kg·K	$S$	0.893	0.893
등적 비열	kJ/kg·K	$c_v$	3.949	3.947
등압 비열	kJ/kg·K	$c_p$	4.185	4.183
점성 계수	μPa·s	$\mu$	433.13	433.38
동점성도	m <sup>2</sup> /s	$\nu$	0.442	0.442

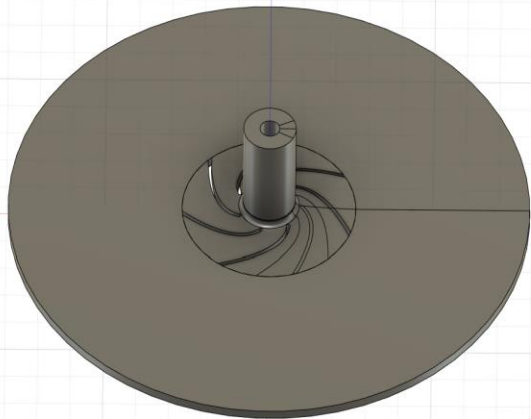
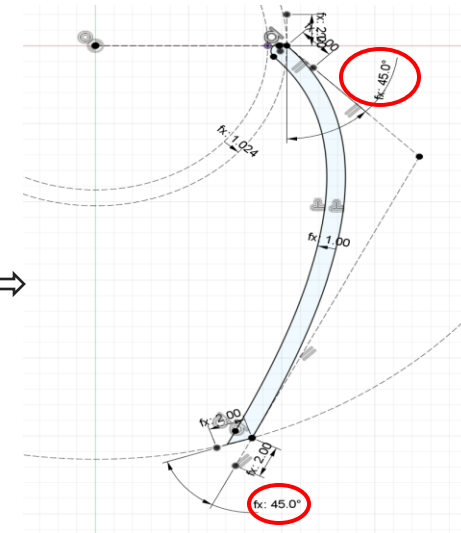
Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP), National Institute of Standard and Technology (NIST)

- 해석조건 중 필요한 물성치는 미국 국립표준기술원의 REFPROP을 참고
- 펌프의 운전 조건에 부합하는 온도와 압력에서의 물성치를 SimLab의 Material 데이터에 입력

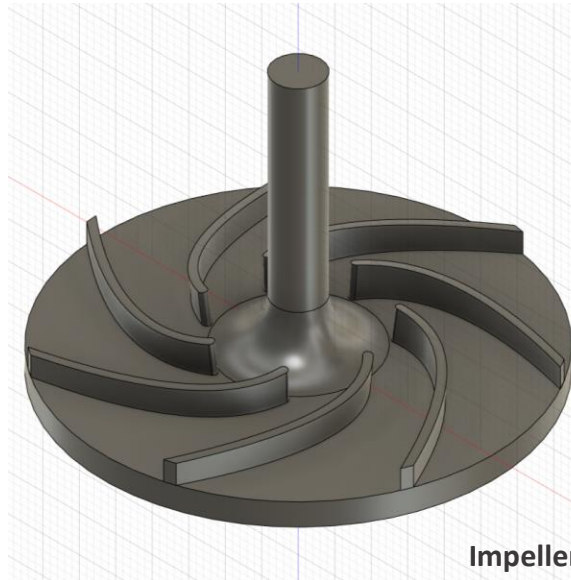
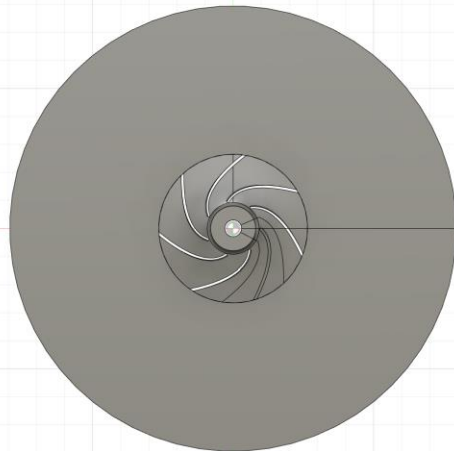
★ 즐겨찾기

★ 사용자 매개변수	BladeThickness	mm	1 mm
★ 사용자 매개변수	Beta1	deg	45 deg
★ 사용자 매개변수	Beta2	deg	45 deg
★ 사용자 매개변수	Theta	deg	0 deg
★ 사용자 매개변수	yShroudCP	mm	3.28 mm
★ 사용자 매개변수	Z		7
★ 사용자 매개변수	BladeLimitOffsetFactor		0.6
★ 사용자 매개변수	InflowLength	mm	d2 * 1
★ 사용자 매개변수	OutflowLength	mm	d2 * 2
★ 사용자 매개변수	MRFClearance	mm	0.1 mm

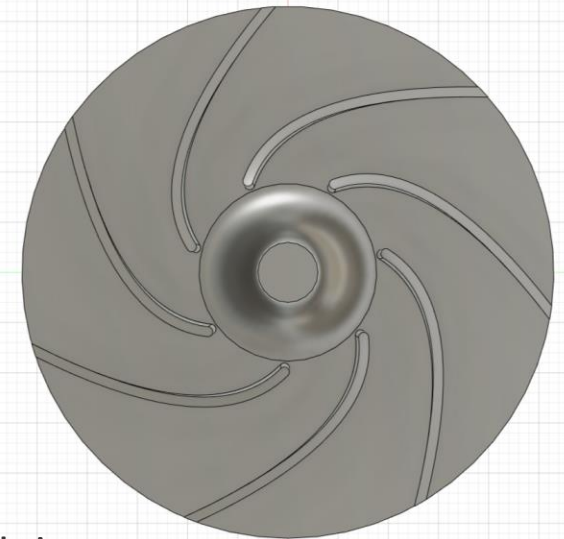
해당 parameter 수치로 초기모델 지정

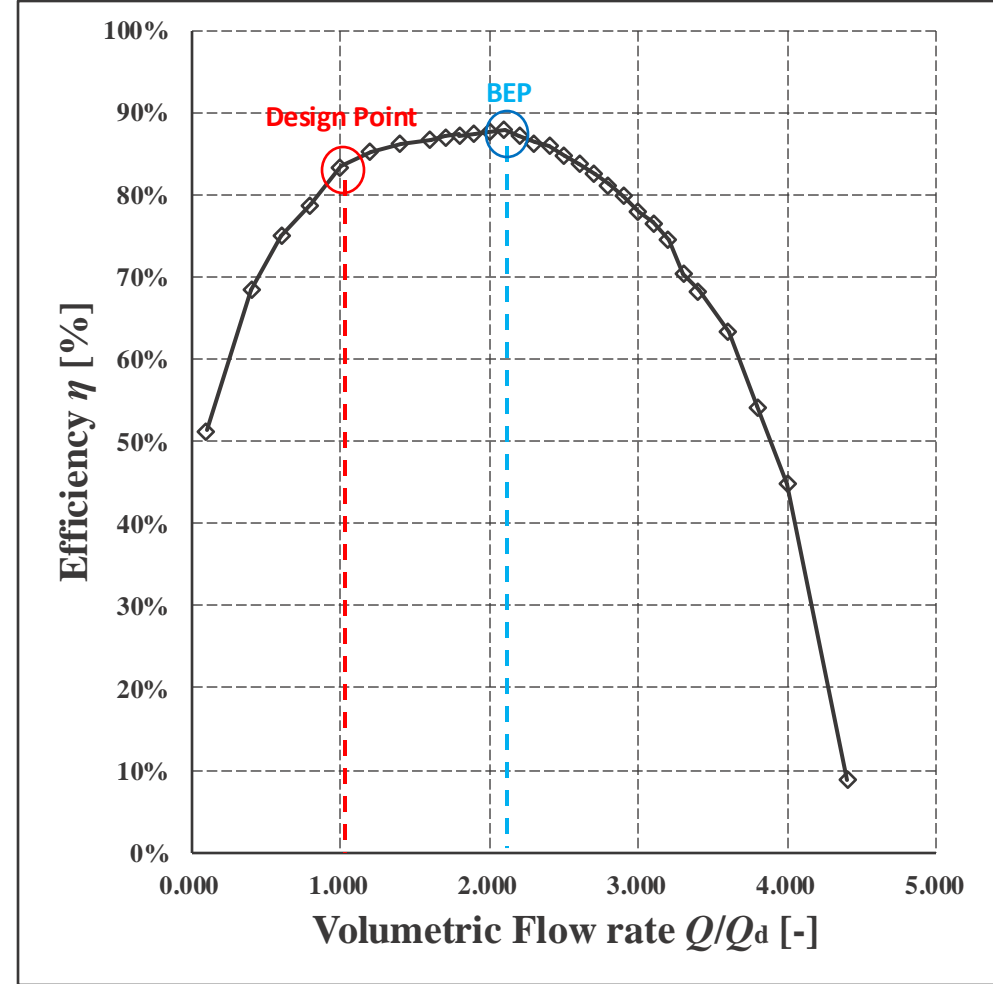
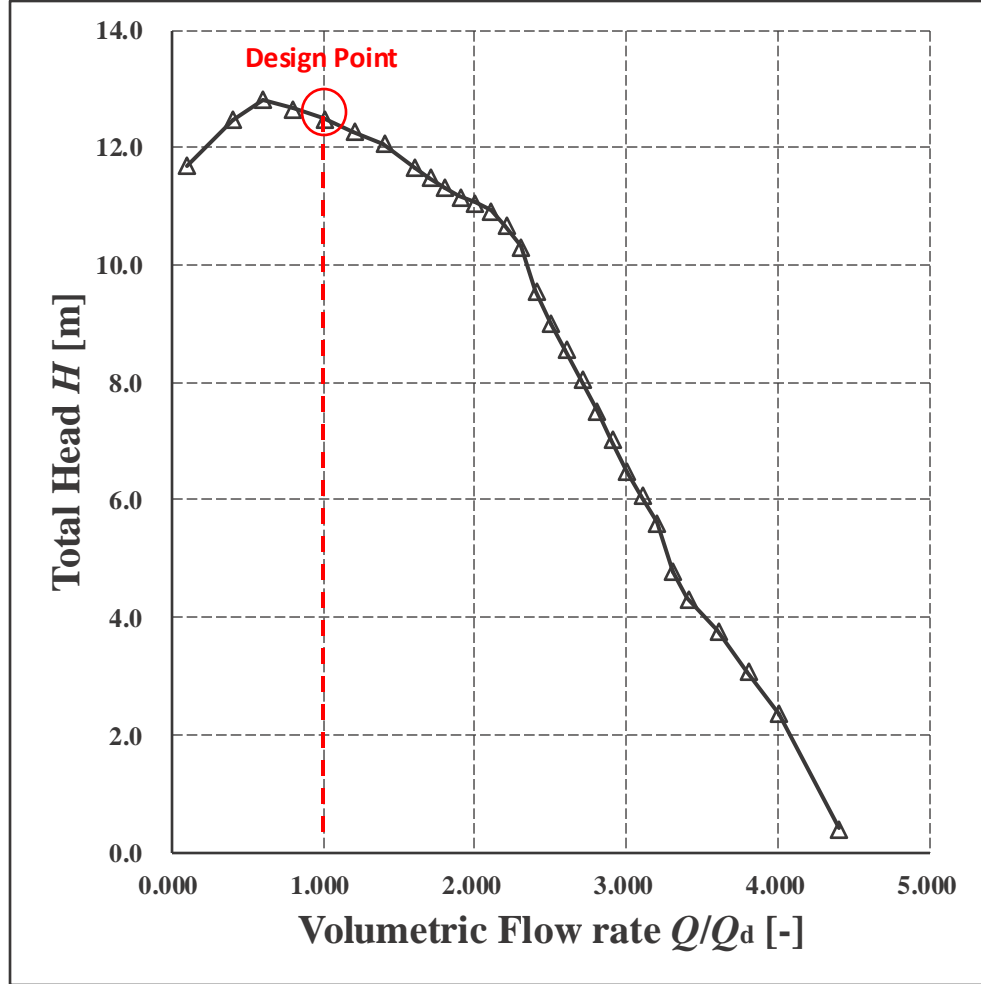


Flow path Geometry



Impeller design



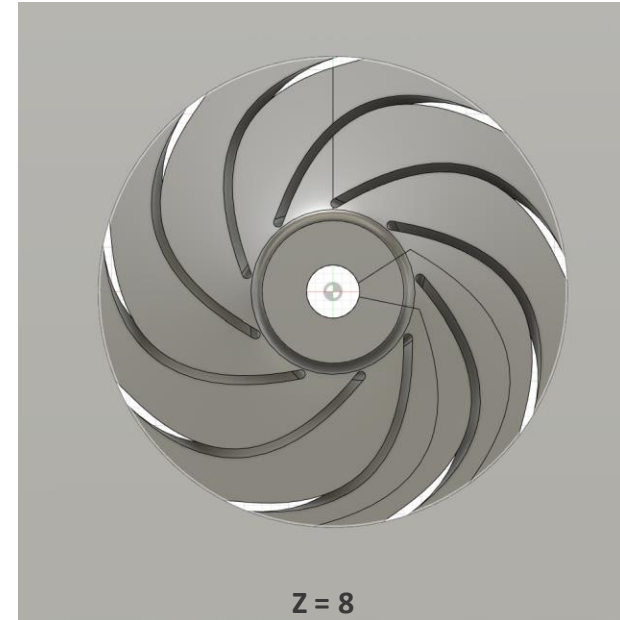
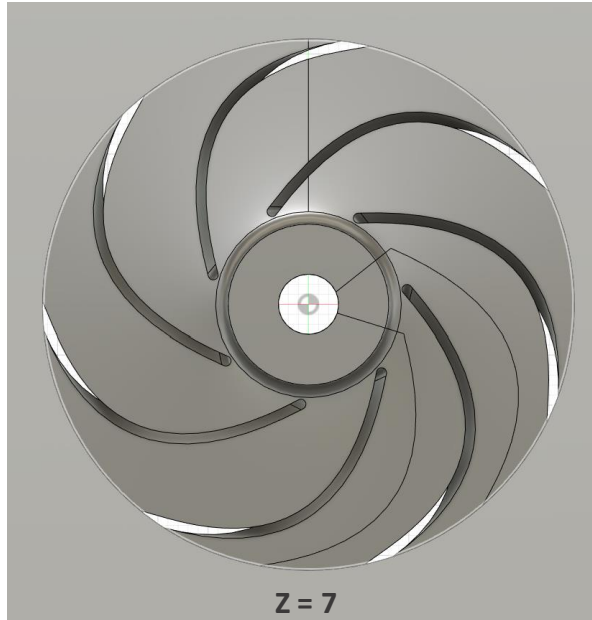
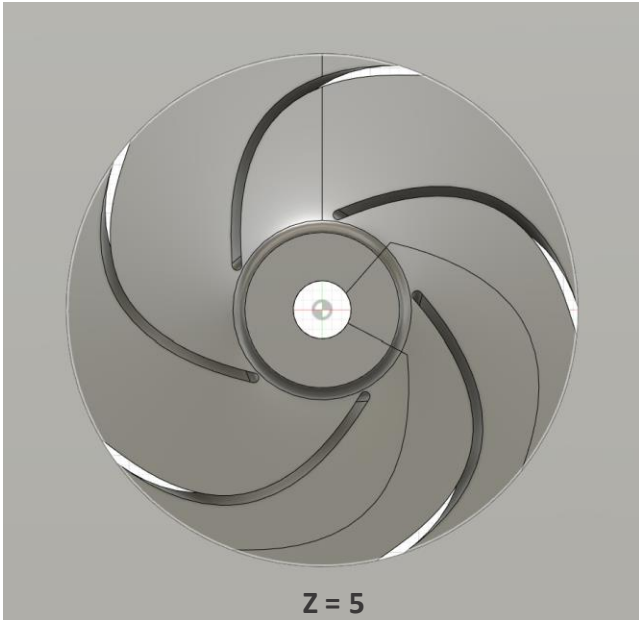


- 다수의 작동 유량점에서 양정 및 효율을 해석을 통해 반복 산출하여 위와 같은 성능 곡선을 도출
- 초기 모델의 경우 설계점( $Q/Q_a = 1.0$ )에서의 효율이 83.5%이며, BEP(Best Efficiency Point;  $Q/Q_a = 2.1$ )에서의 효율은 87.9%로 확인 됨
- 설계점과 BEP 사이의 상당한 유량 간격이 존재하므로, 이를 감소시켜 설계점과 BEP가 일치하도록 최적화할 필요가 있음

★ 사용자 매개변수	BladeThickness	mm	1 mm
★ 사용자 매개변수	Beta1	deg	45 deg
★ 사용자 매개변수	Beta2	deg	45 deg
★ 사용자 매개변수	Theta	deg	0 deg
★ 사용자 매개변수	yShroudCP	mm	3.28 mm
★ 사용자 매개변수	Z		7
★ 사용자 매개변수	BladeLimitOffsetFactor		0.6
★ 사용자 매개변수	InflowLength	mm	d2 * 1
★ 사용자 매개변수	OutflowLength	mm	d2 * 2
★ 사용자 매개변수	MRFClearance	mm	0.1 mm



Z를 변화시키며 Head, Efficiency 도출



# 블레이드 개수 최적화 결과

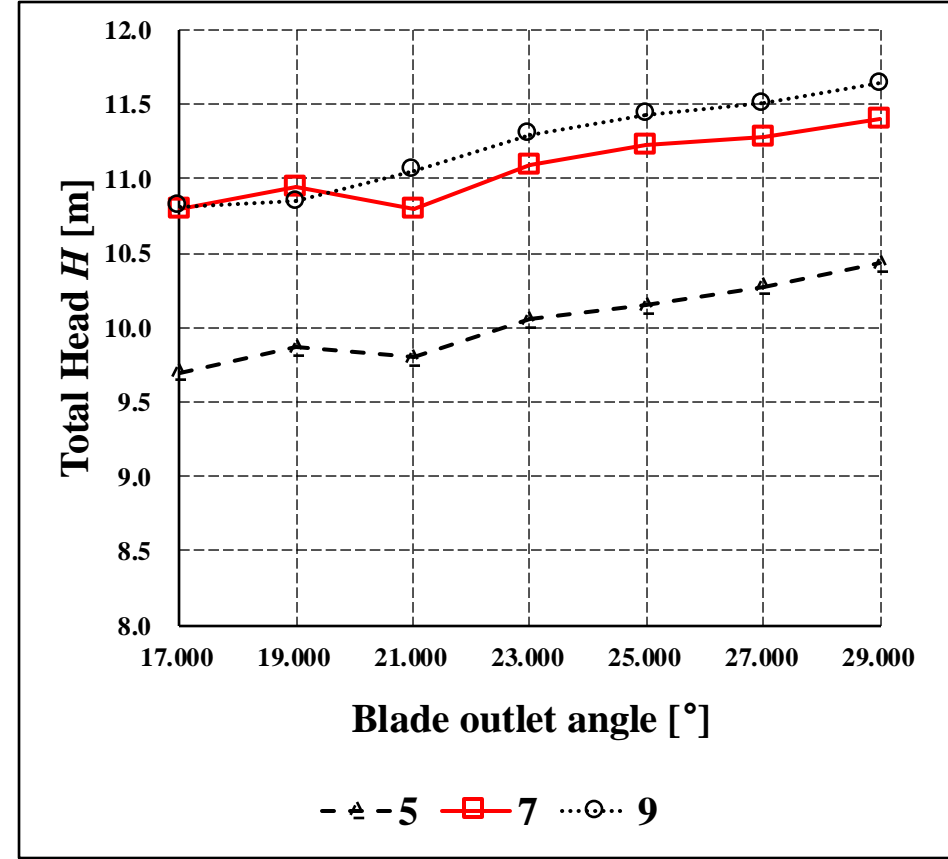
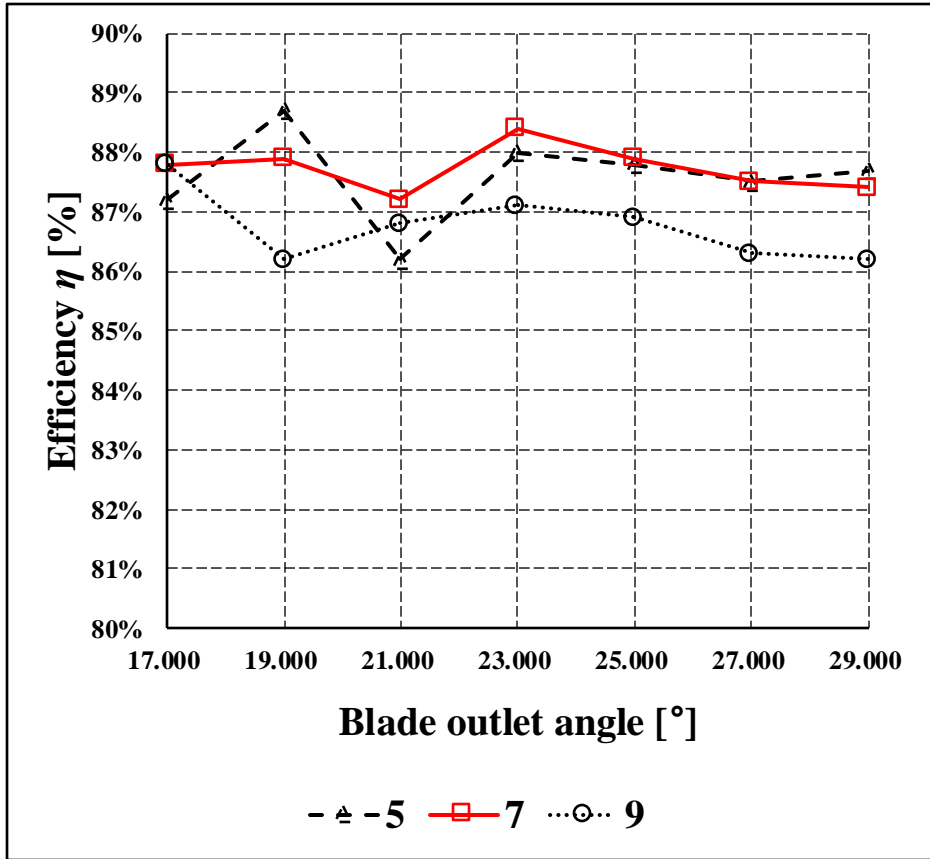
## Analysis Point

1st Optimization $\beta_1 = 30.8, \theta = 10$ $CP_2 = 0.00328$	$z \setminus \beta_2$	17	19	21	23	25	27	29
	5	1-1.1 $z = 5, \beta_2 = 17$	1-1.2 $z = 5, \beta_2 = 19$	1-1.3 $z = 5, \beta_2 = 21$	1-1.4 $z = 5, \beta_2 = 23$	1-1.5 $z = 5, \beta_2 = 25$	1-1.6 $z = 5, \beta_2 = 27$	1-1.7 $z = 5, \beta_2 = 29$
	7	1-2.1 $z = 7, \beta_2 = 17$	1-2.2 $z = 7, \beta_2 = 19$	1-2.3 $z = 7, \beta_2 = 21$	1-2.4 $z = 7, \beta_2 = 23$	1-2.5 $z = 7, \beta_2 = 25$	1-2.6 $z = 7, \beta_2 = 27$	1-2.7 $z = 7, \beta_2 = 29$
	9	1-3.1 $z = 9, \beta_2 = 17$	1-3.2 $z = 9, \beta_2 = 19$	1-3.3 $z = 9, \beta_2 = 21$	1-3.4 $z = 9, \beta_2 = 23$	1-3.5 $z = 9, \beta_2 = 25$	1-3.6 $z = 9, \beta_2 = 27$	1-3.7 $z = 9, \beta_2 = 29$

## Result

	Unit	Value						
		1-1.1	1-1.2	1-1.3	1-1.4	1-1.5	1-1.6	1-1.7
Total pressure In	Pa	105235.000	105323.000	104461.000	105323.000	104834.000	105037.000	104987.000
Total pressure Out	Pa	198511.000	202014.000	198728.000	202014.000	202450.000	203916.000	205336.000
Static Pressure In	Pa	101315.000	101327.000	101324.000	101327.000	101324.000	101325.000	101325.000
Static Pressure Out	Pa	197369.000	200752.000	197757.000	200752.000	201218.000	202774.000	204073.000
Pressure rise	Pa	93276.200	96690.900	94266.500	96690.900	97615.300	98878.500	100349.000
Head	m	9.696	10.051	9.799	10.051	10.147	10.279	10.431
Input power	W	62.397	45.778	45.576	45.778	46.308	47.100	47.699
Output power	W	54.412	40.289	39.280	40.289	40.673	41.199	41.812
Efficiency	-	0.872	0.880	0.862	0.880	0.878	0.875	0.877

1-2.1	1-2.2	1-2.3	1-2.4	1-2.5	1-2.6	1-2.7	1-3.1	1-3.2	1-3.3	1-3.4	1-3.5	1-3.6	1-3.7
105112.000	105181.000	104789.000	105181.000	105341.000	105558.000	105541.000	105014.000	105429	105607	105429	105414	105683	105680
208979.000	211877.000	210664.000	211877.000	213332.000	214011.000	215232.000	209048.000	214082	211968	214082	215374	216347	217666
101308.000	101324.000	101321.000	101324.000	101325.000	101325.000	101322.000	101313.000	101323	101308	101323	101324	101324	101324
207769.000	210581.000	209350.000	210581.000	212034.000	212700.000	213892.000	207815.000	212768	210711	212768	214052	214999	216301
103868.000	106696.000	105875.000	106696.000	107991.000	108453.000	109690.000	104033.000	108653	106361	108653	109960	110664	111986
10.797	11.091	11.002	11.091	11.226	11.274	11.402	10.815	11.295	11.056	11.295	11.431	11.504	11.637
49.289	50.275	50.371	50.275	51.185	51.672	52.300	49.386	51.949	51.012	51.949	52.707	53.404	54.124
43.278	44.457	44.114	44.457	44.996	45.189	45.704	43.348	45.272	44.316	45.272	45.817	46.11	46.661
0.878	0.884	0.876	0.884	0.879	0.875	0.874	0.878	0.871	0.869	0.871	0.869	0.863	0.862



유동 해석 결과로 나온 데이터를 바탕으로, 최적 블레이드 개수 (Z) 결정

- 효율을 극대화 하는 것이 목표이기 때문에, z = 5 or 7 로 결정
- 하지만 양정의 경우 z = 5인 경우에는 최소 양정인 10.395m를 만족하지 못하는 경우가 생기므로 **z = 7로 결정**



1st Optimization  
z = 7



## ① DOE 구성: 중심 합성 계획법 설계

### [선행연구]

- “각각의 변수의 영향성 분석 결과 임펠러 출구각 임펠러의 양정 및 효율에 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났으며<sup>9)</sup>”
- “요인실험의 수치해석 결과 날개 전개도 변수 헤드와 효율에 가장 많은 영향을 주는 변수는 임펠러 입구각, 출구각이다. <sup>10)</sup>”

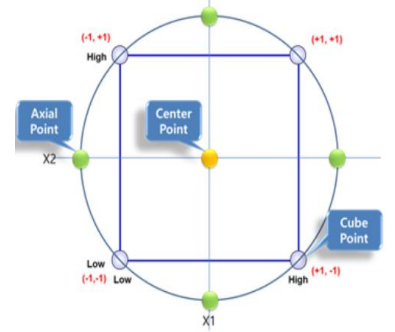


### [설계변수 선정]

$\beta_1$  (깃 입구 각),  $\beta_2$  (깃 출구 각),  $\theta$  (스윙 각)



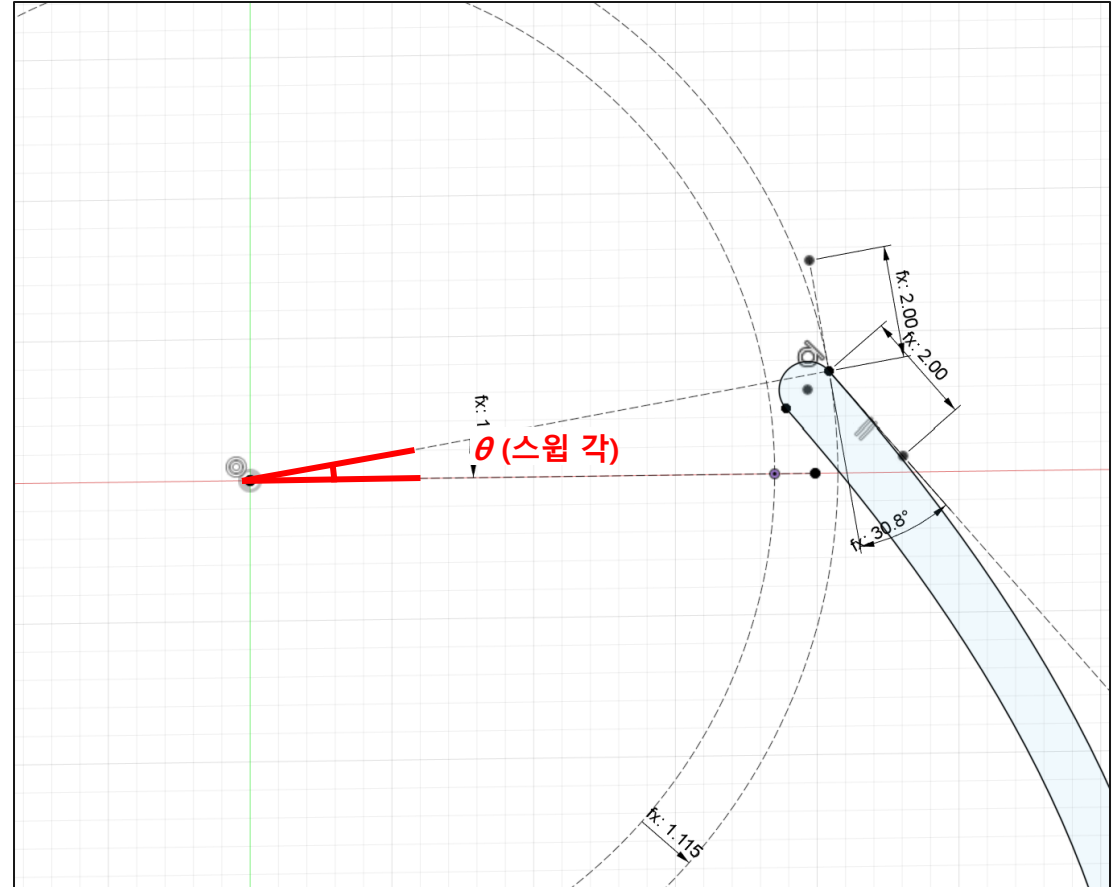
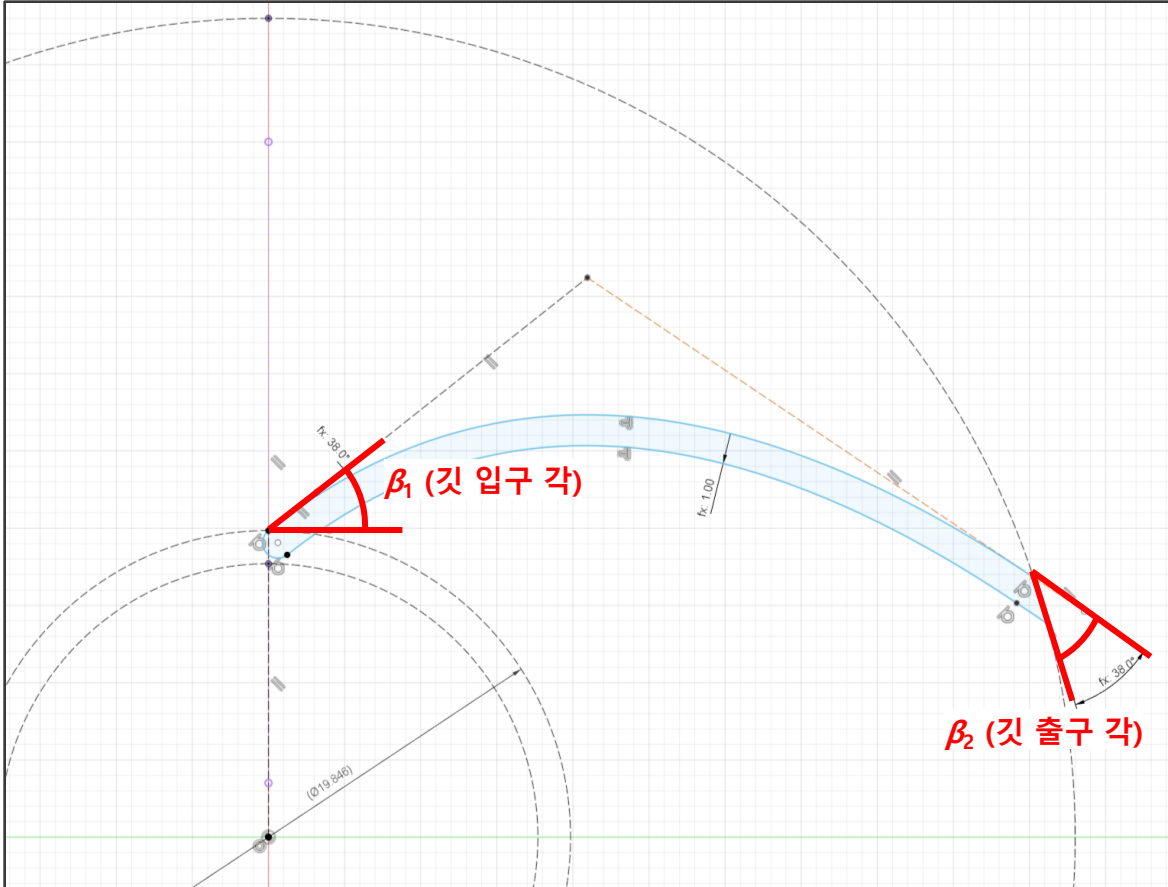
★ 사용자 매개변수	BladeThickness	mm	1 mm
★ 사용자 매개변수	Beta1	deg	30.8 deg
★ 사용자 매개변수	Beta2	deg	25 deg
★ 사용자 매개변수	Theta	deg	-20 deg
★ 사용자 매개변수	yShroudCP	mm	3.2 mm
★ 사용자 매개변수	Z		7
★ 사용자 매개변수	BladeLimitOffsetFactor		0.6
★ 사용자 매개변수	InflowLength	mm	d2 * 1
★ 사용자 매개변수	OutflowLength	mm	d2 * 2



Case	$\beta_1$	$\beta_2$	$\theta$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\theta$	Point
1	21	21	4	-1	-1	-1	Cube Point
2	38	21	4	1	-1	-1	
3	21	38	4	-1	1	-1	
4	38	38	4	1	1	-1	
5	21	21	16	-1	-1	1	
6	38	21	16	1	-1	1	
7	21	38	16	-1	1	1	
8	38	38	16	1	1	1	
9	15.2048	29.5	10	-1.68179	0	0	Axial Point
10	43.7952	29.5	10	1.68179	0	0	
11	29.5	15.2048	10	0	-1.68179	0	
12	29.5	43.7952	10	0	1.68179	0	
13	29.5	29.5	-0.0908	0	0	-1.68179	
14	29.5	29.5	20.0908	0	0	1.68179	
15	29.5	29.5	10	0	0	0	Central Point

- 선행연구를 기반으로 설계변수  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  (깃 입, 출구 각도),  $\theta$  (스윙 각)으로 결정
- 3인자에 대해 중심 합성 계획법을 기반으로 실험계획 설계
- Rotatable 경우에서 Axial point까지의 거리를 1.682 경우로 설정하고 진행

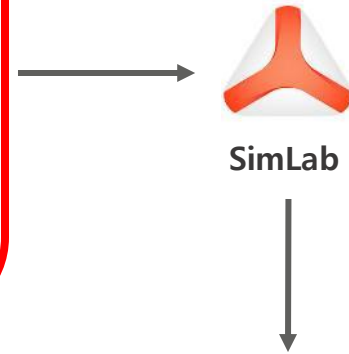
## ① DOE 구성: 중심 합성 계획법 설계



## ① DOE 구성: 중심 합성 계획법 결과

Analysis Point

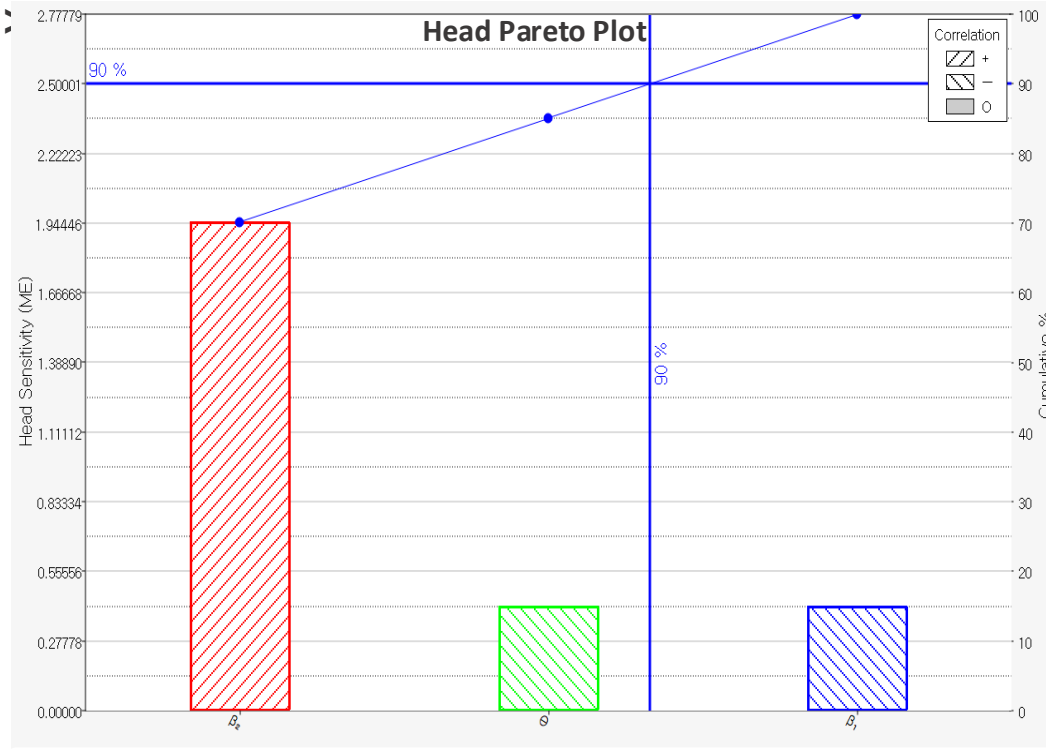
Case	$\beta_1$	$\beta_2$	$\theta$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\theta$	Point
1	21	21	4	-1	-1	-1	Cube Point
2	38	21	4	1	-1	-1	
3	21	38	4	-1	1	-1	
4	38	38	4	1	1	-1	
5	21	21	16	-1	-1	1	
6	38	21	16	1	-1	1	
7	21	38	16	-1	1	1	
8	38	38	16	1	1	1	
9	15.2048	29.5	10	-1.68179	0	0	Axial Point
10	43.7952	29.5	10	1.68179	0	0	
11	29.5	15.2048	10	0	-1.68179	0	
12	29.5	43.7952	10	0	1.68179	0	
13	29.5	29.5	-0.0908	0	0	-1.68179	
14	29.5	29.5	20.0908	0	0	1.68179	
15	29.5	29.5	10	0	0	0	Central Point



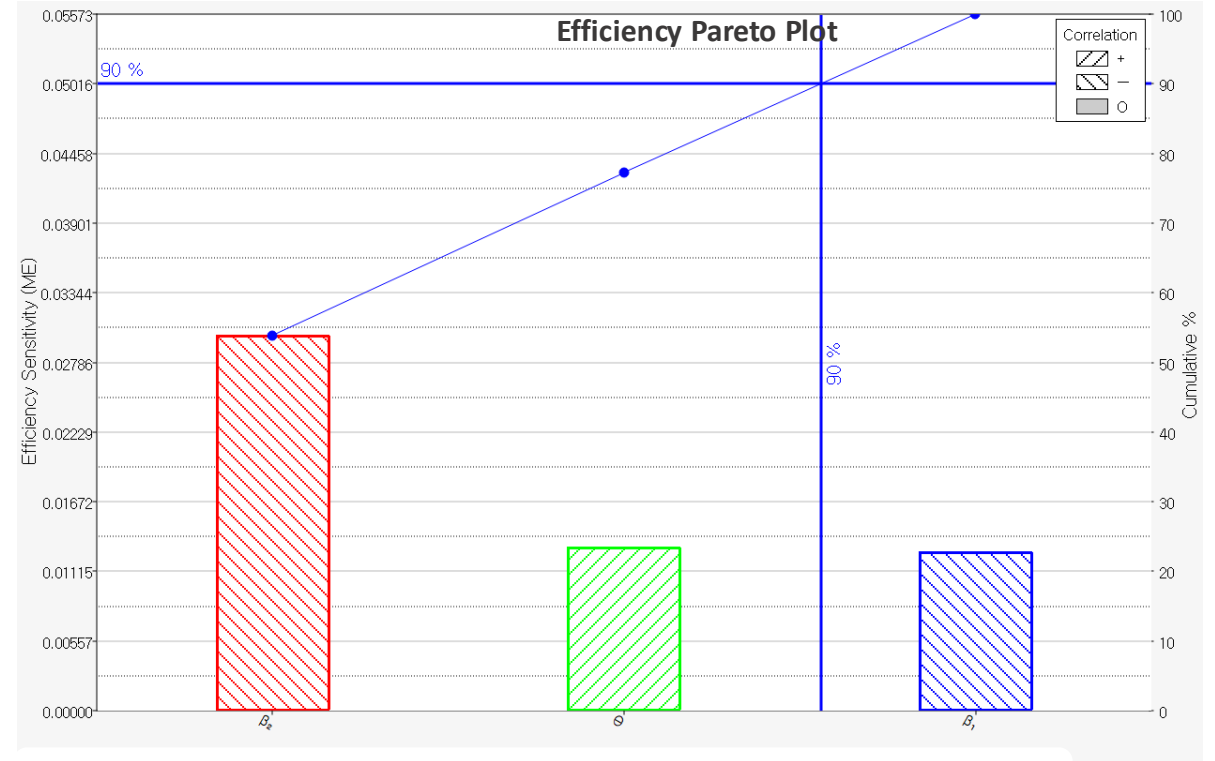
## Result

Quantity	Unit	value														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Total pressure In	Pa	105245.000	104918.000	104965.000	105011.000	105690	104859.000	104644.000	105226.000	104845.000	105195.000	105116.000	105056.000	105165.750	105430.500	105146.000
Total pressure Out	Pa	213591.000	209805.000	221928.000	222148.000	211977	206418.000	220978.000	221486.000	218023.000	213579.000	208220.000	226303.000	218846.000	213575.500	211509.000
Static Pressure In	Pa	101315.000	101306.000	101311.000	101311.000	101306	101311.000	101317.000	101320.000	101319.000	101300.000	101303.000	101315.000	101296.750	101321.000	101315.000
Static Pressure Out	Pa	212315.000	208563.000	220545.000	220722.000	210741	205187.000	219591.000	220049.000	216679.000	212302.000	206991.000	224861.000	217519.250	212239.500	210224.000
Pressure rise	Pa	108346.000	104887.000	116963.000	117137.000	106287	101559.000	116334.000	116260.000	113179.000	108384.000	103104.000	121248.000	113680.500	108144.500	106363.000
Head	m	11.263	10.903	12.159	12.177	11.049	10.557	12.093	12.085	11.765	11.267	10.718	12.604	11.817	11.242	11.057
Input power	W	51.638	50.246	56.657	58.342	51.115	48.217	56.147	57.017	54.024	52.590	7.007	59.464	55.435	52.258	50.879
Output power	W	45.144	43.703	48.735	48.807	44.283	42.317	48.473	48.441	47.159	45.159	6.137	50.519	47.366	45.034	44.319
Efficiency	-	0.874	0.870	0.860	0.837	0.866	0.878	0.863	0.850	0.873	0.859	0.876	0.850	0.854	0.862	0.871

## ② DOE Pareto Plot

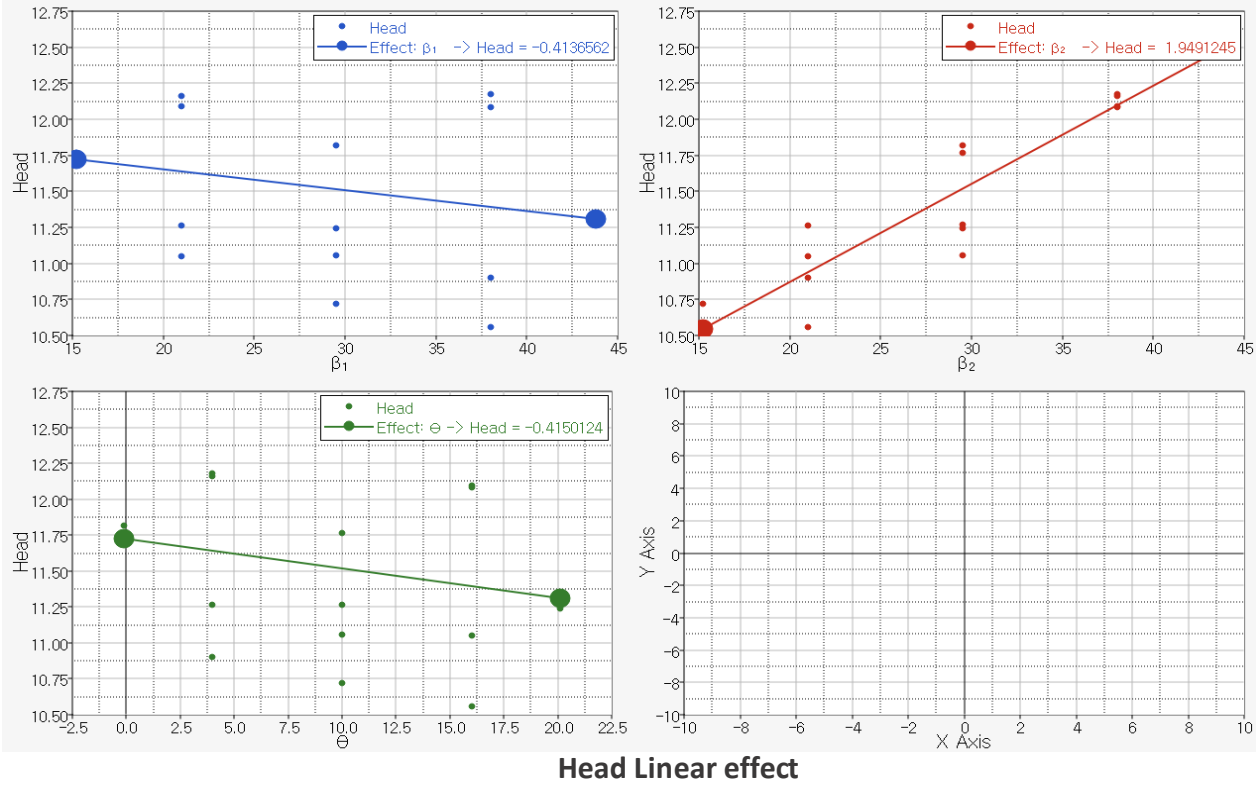


- 인자들의 양정에 미치는 영향  
 $\beta_2$  (깃 출구 각) >  $\theta$  (스윙 각) >  $\beta_1$  (깃 입구 각)
- $\beta_2$  (깃 출구 각),  $\theta$  (스윙 각)에 의해 90% 영향을 받는 것을 확인할 수 있고,  $\beta_1$  (깃 입구 각)은 작은 영향을 보인다.

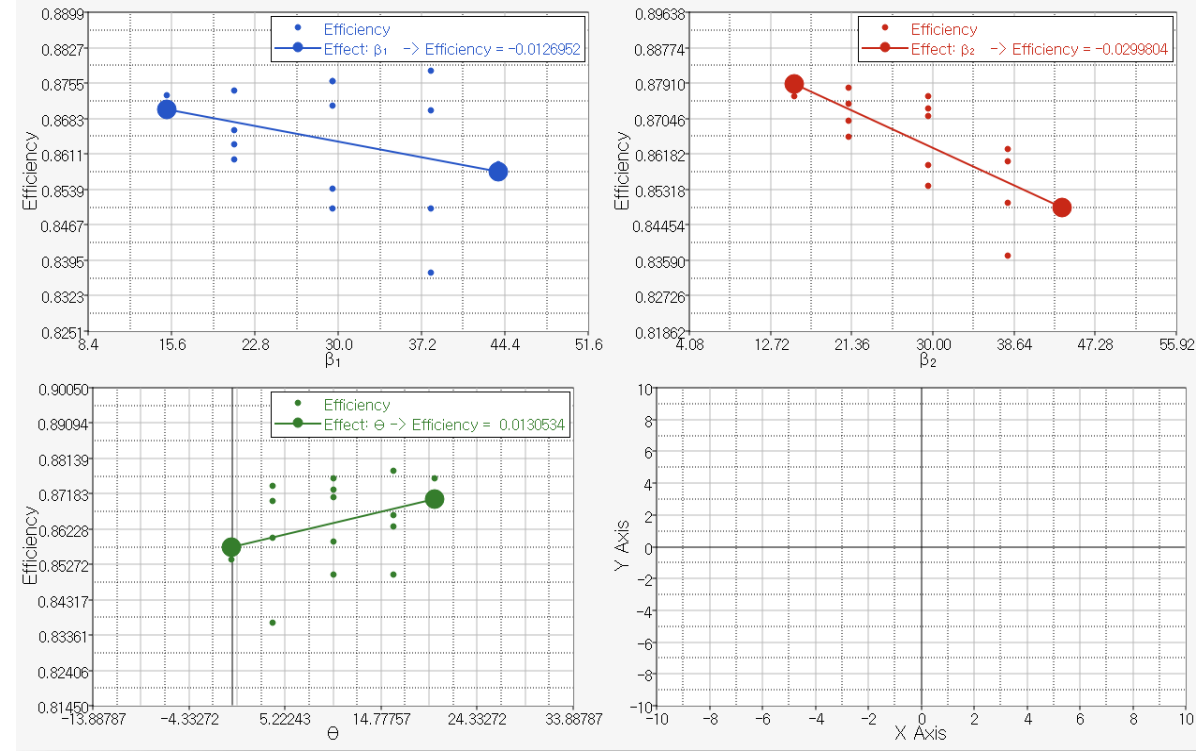


- 인자들이 효율에 미치는 영향  
 $\beta_2$  (깃 출구 각) >  $\theta$  (스윙 각) >  $\beta_1$  (깃 입구 각)
- $\beta_2$  (깃 출구 각),  $\theta$  (스윙 각)에 의해 90% 영향을 받는 것을 확인할 수 있고,  $\beta_1$  (깃 입구 각)은 작은 영향을 보인다.

## ② DOE Linear Effects



Head Linear effect

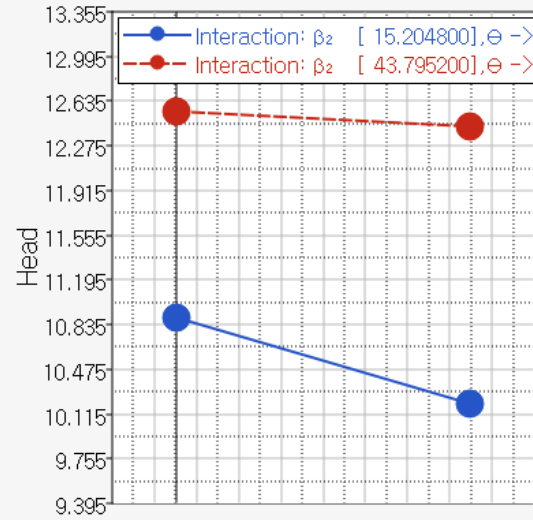
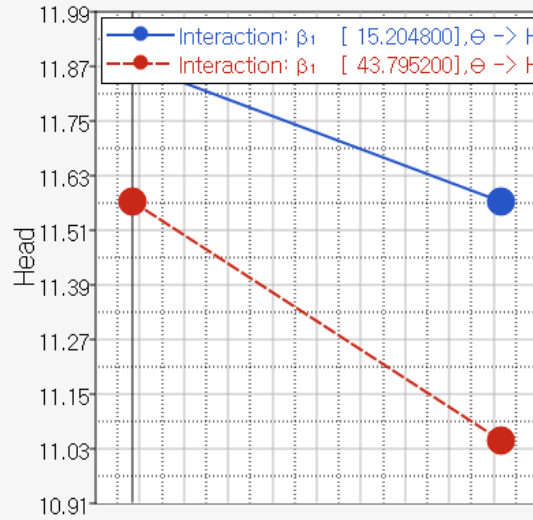
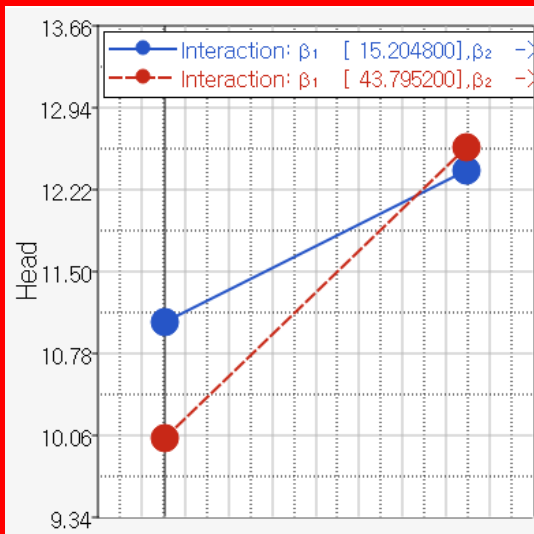


Efficiency Linear Effect

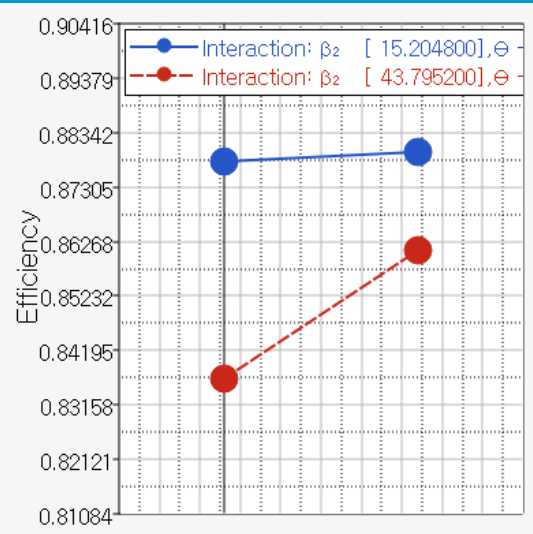
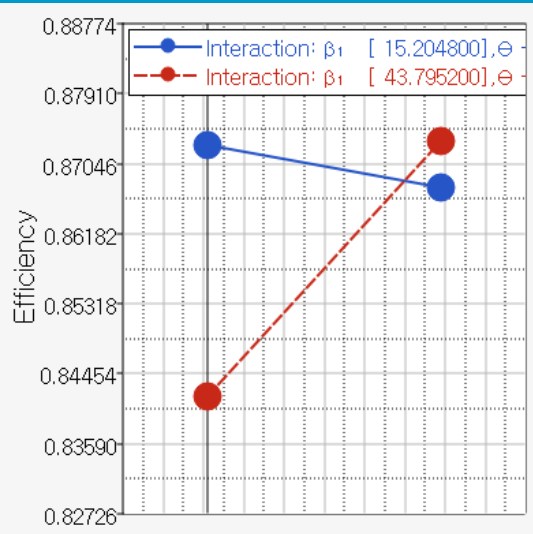
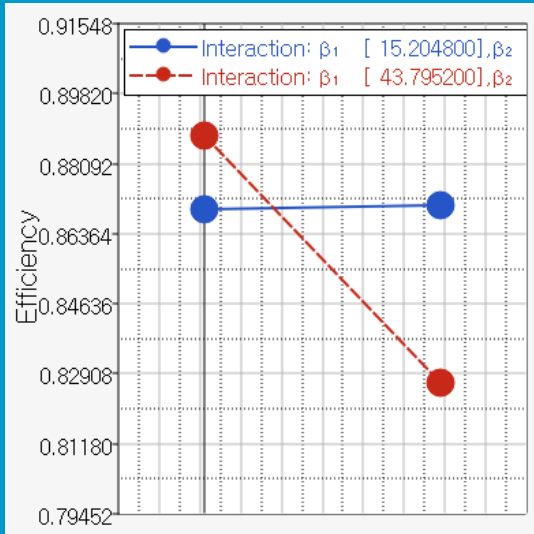


- Pareto Chart에서 확인 할 수 있듯이,  $\beta_2$  (깃 출구 각)에 의한 주 효과도가 가장 큰 것을 확인 할 수 있다. 즉, Linear effect의 기울기가 가장 가파른 것을 알 수 있다.
- $\beta_1$  (깃 입구 각) 을 제외하고 인자들이 반응 값에 미치는 영향은 반대로 작용하는 것을 알 수 있다.

② DOE Interactions

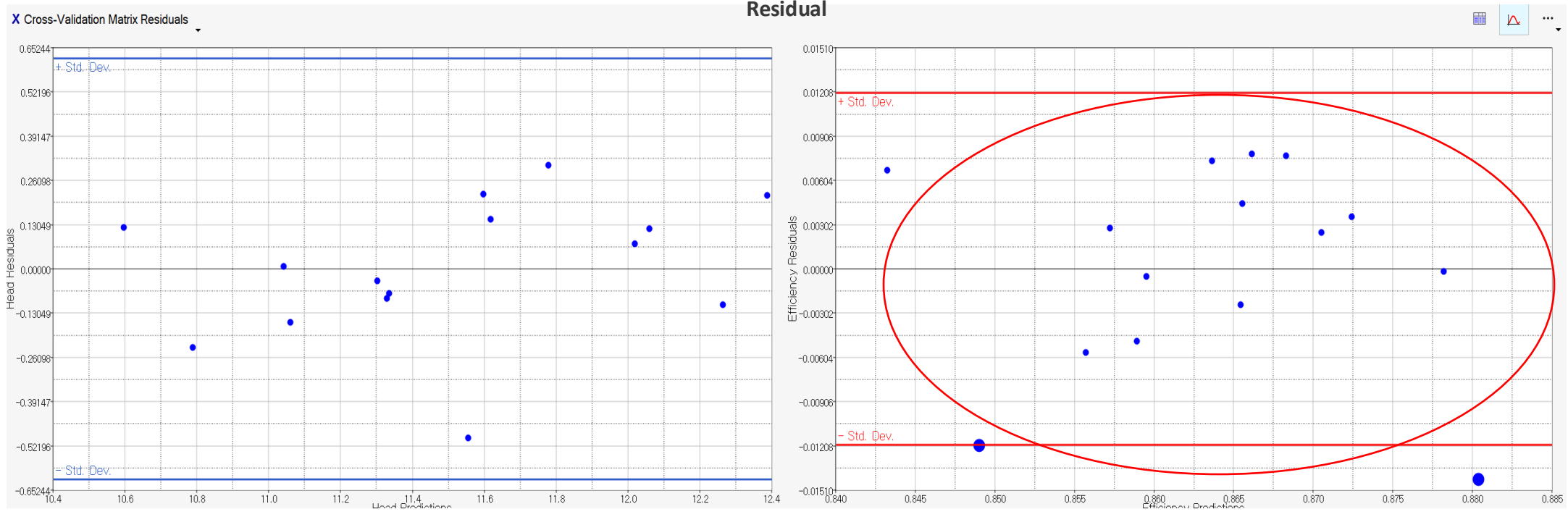


Head  
Interaction effect

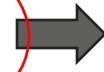


Efficiency  
Interaction effect

③ Fit Residuals Diagnostics

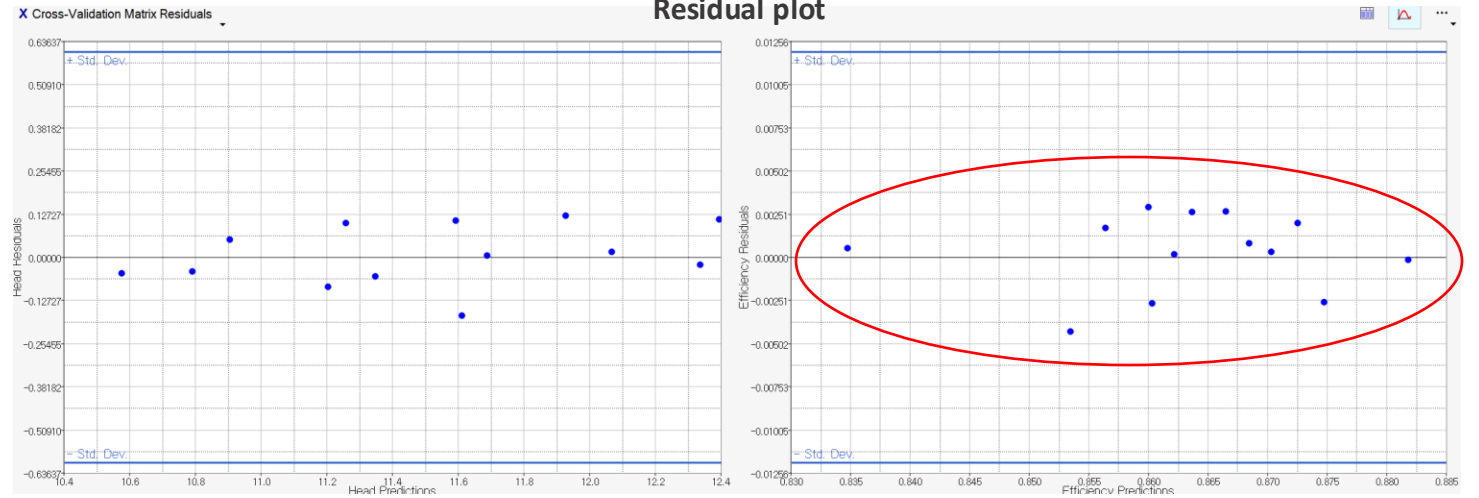
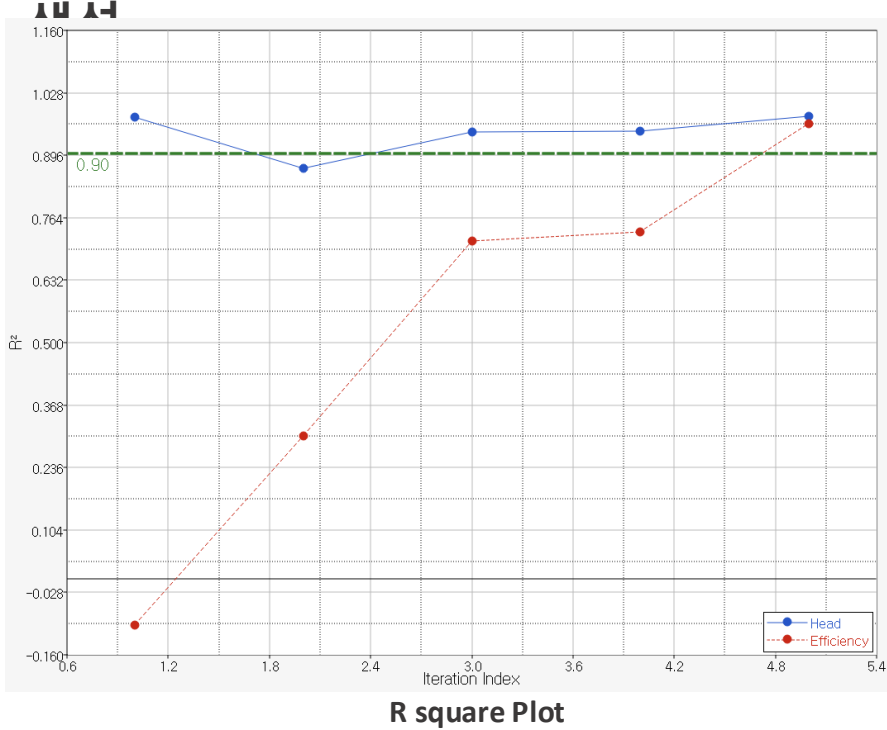


	Active	Label	Fit Type	Fit Specifics	X	R <sup>2</sup>
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Head	RBF	constant - Multi...		0.8895468
2	<input checked="" type="checkbox"/>	Efficiency	RBF	linear - Multiqua...		0.6617394



- 양정의 Regression model의 결정계수는 0.889로서 높은 상관관계를 보여주지만, 효율의 경우는 0.66으로서 상관관계가 약하다.
- Residual의 경우에도 효율은 회귀식으로부터 오차가 상당 존재하는 것을 확인 가능하다.

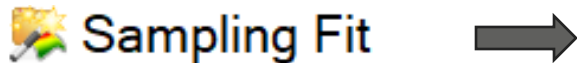
## ③ Sampling Fit기능을 이용한 높은 정확도의 Regression model



	Active	Label	Fit Type	Fit Specifics	R <sup>2</sup>
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Head	RBF	constant - CS21 - 1.00...	0.9778964
2	<input checked="" type="checkbox"/>	Efficiency	RBF	constant - Multiquadric...	0.9631763

Diagnostics

### Sampling fit 기능을 통한 높은 예측율을 가진 모델 생성

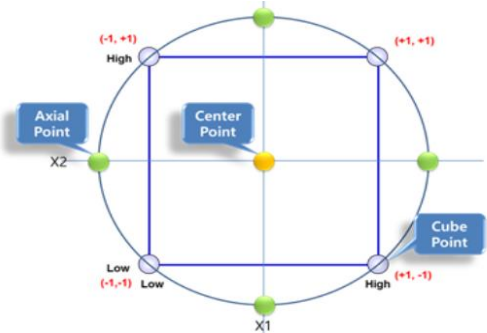


- 선행연구에 의하면 효율은 다양한 인자에 영향을 받기때문에 비선형이 높음 (양정은 Impeller의 Diameter를 맞추면 설계 양정이 대략 나타남)
  - 중심 합성법에 의한 15개 Case로 제작한 Fit 모델은 정확도에 문제가 있을 수 있다.
- ∴ Sampling fit 기능을 이용해 정확도 높은 모델을 도출



## ④ Optimization > 반응표면법(Response Surface Method)를 이용한 최적화

중심합성법 (Central Composite Desing)을 이용한 DOE 설계



	beta1	beta2	theta	beta1	beta2	theta	etc
1	25.8	21	5	-1	-1	-1	구석점
2	35.8	21	5	1	-1	-1	
3	25.8	29	5	-1	1	-1	
4	35.8	29	5	1	1	-1	
5	25.8	21	15	-1	-1	1	
6	35.8	21	15	1	-1	1	
7	25.8	29	15	-1	1	1	
8	35.8	29	15	1	1	1	
9	22.391	25	10	-1.68179	0	0	축점
10	39.209	25	10	1.68179	0	0	
11	30.8	18.2728	10	0	-1.68179	0	
12	30.8	31.7272	10	0	1.68179	0	
13	30.8	25	1.591	0	0	-1.68179	
14	30.8	25	18.409	0	0	1.68179	
15	30.8	25	10	0	0	0	중심점



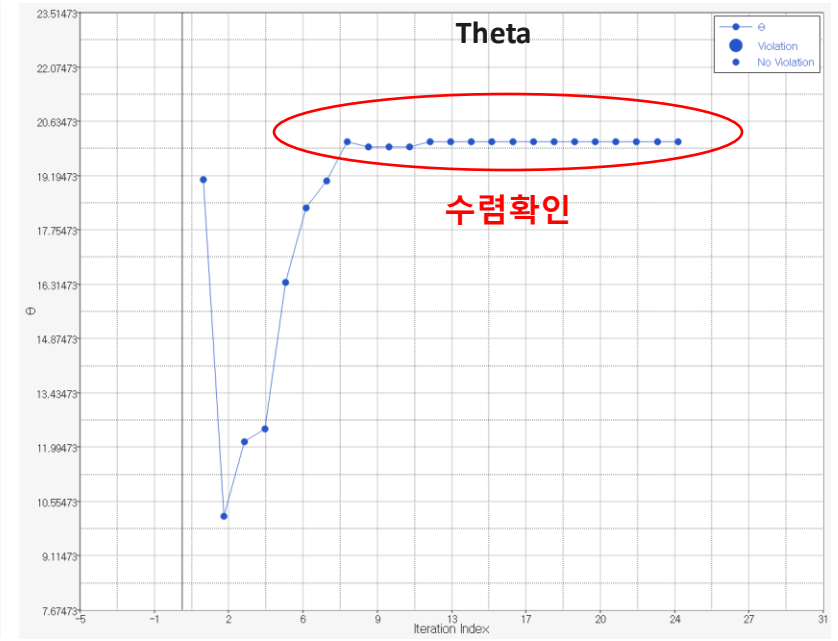
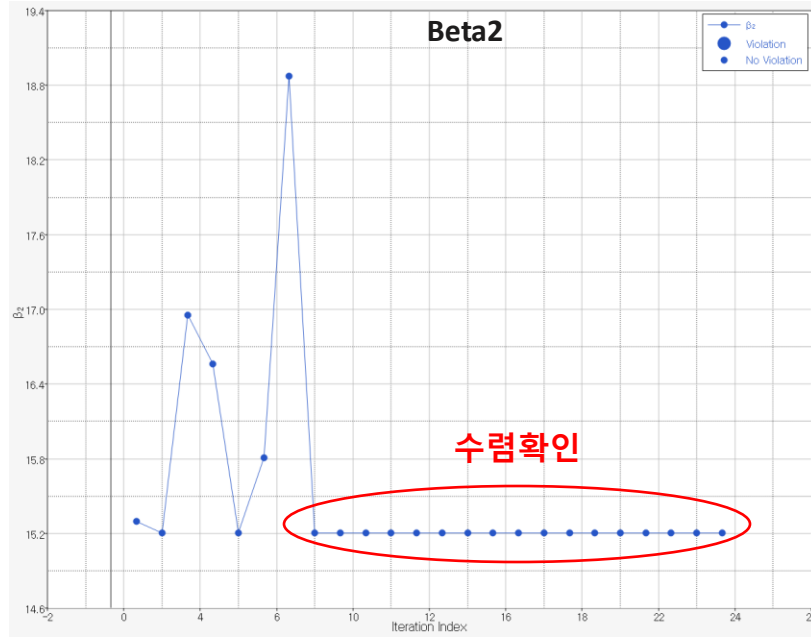
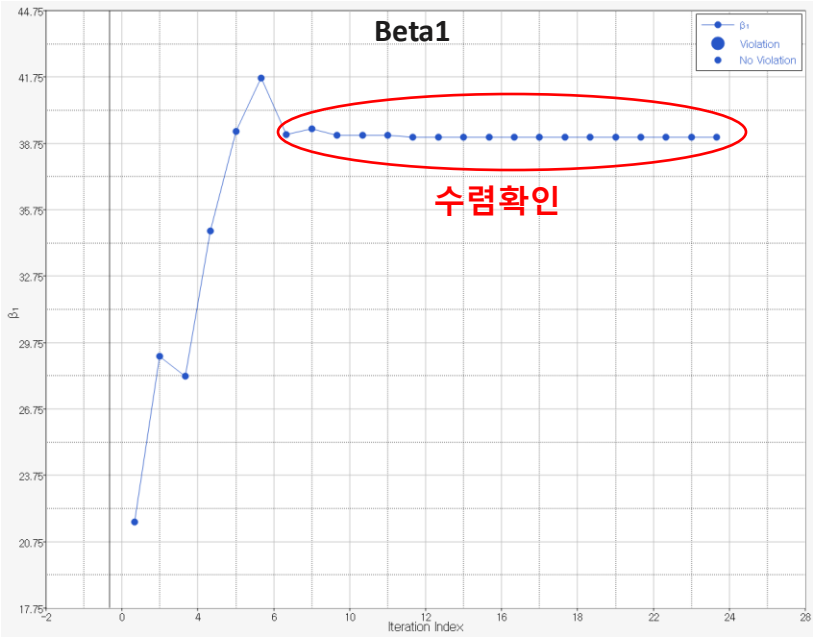
설계변수	Beta1(입구 유동 각), Beta2(출구 유동 각), Theta(스윙 각)
설계 조건	GRSM
목적함수	Efficiency Maximize
구속 조건	Head ≥ 10.395

Active	Label	Varname	Apply On	Type	... 1 ...	... 2 ...	Comment
<input checked="" type="checkbox"/>	Goal 1	goal_1	Head ( r_1 )	Constrai...	>=	10.395...	...
<input checked="" type="checkbox"/>	Goal 2	goal_2	Efficiency ( r_2 )	Maximize	N/A	N/A	...

- 중심점에서 반복은 제외하고 15개 case에 대해서 DOE 결과를 바탕으로 최적화 진행
- Sampling fit 기능을 이용해 회귀모델 제작

- 양정은 설계점 이상, 효율을 최대화 하는 지점이 최적 목표점
- GRSM(Global gradient-based search)를 이용해 최적점 도출

## ④ Optimization > 반응표면법(Response Surface Method)를 이용한 최적화



$\beta_1$	$\beta_2$	$\theta$	Head	Efficiency
36.238112	15.204800	14.097418	10.477457	0.8824500

➔ **최적 점에서의 설계 변수 치수 도출**

AOC 2024



## Part4. 연구 결과

Team BIMM

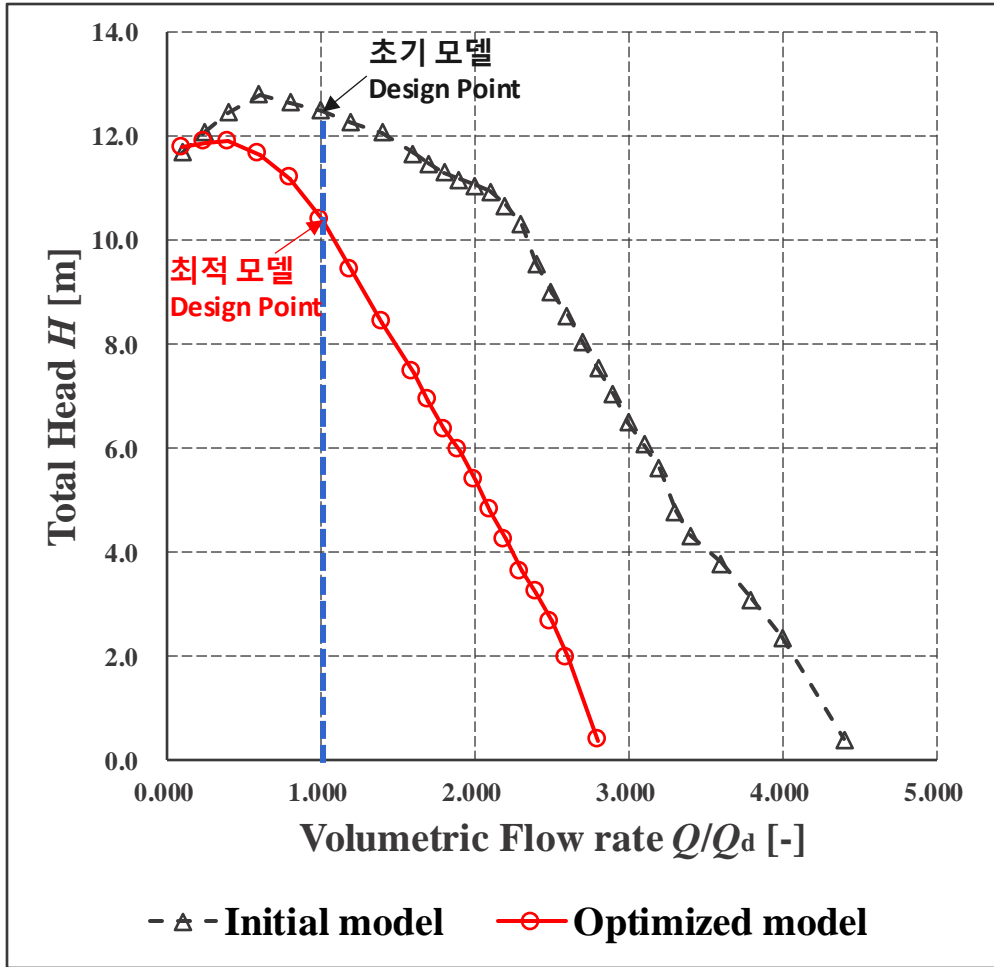
## 초기 모델과 최적 모델과의 비교 & Hyperstudy 결과값 검증

	$\beta_1$ (유동 입구 각)	$\beta_2$ (유동 입구 각)	$\theta$ (스윙 각)	H (양정)	$\eta$ (효율)
초기 모델	45°	45°	0°	12.495 [m]	83.5%
최적 모델	36.238112°	15.2048°	14.097418°	10.399 [m]	88.4%
변화량	8.761888°	29.7952°	14.097418°	-2.096 [m]	4.9%
최적 모델	36.238112°	15.2048°	14.097418°	10.399 [m]	88.4%
Hyperstudy 예측값	36.238112°	15.2048°	14.097418°	10.477457 [m]	88.245%
차이값	0°	0°	0°	0.078467 [m]	0.015 %

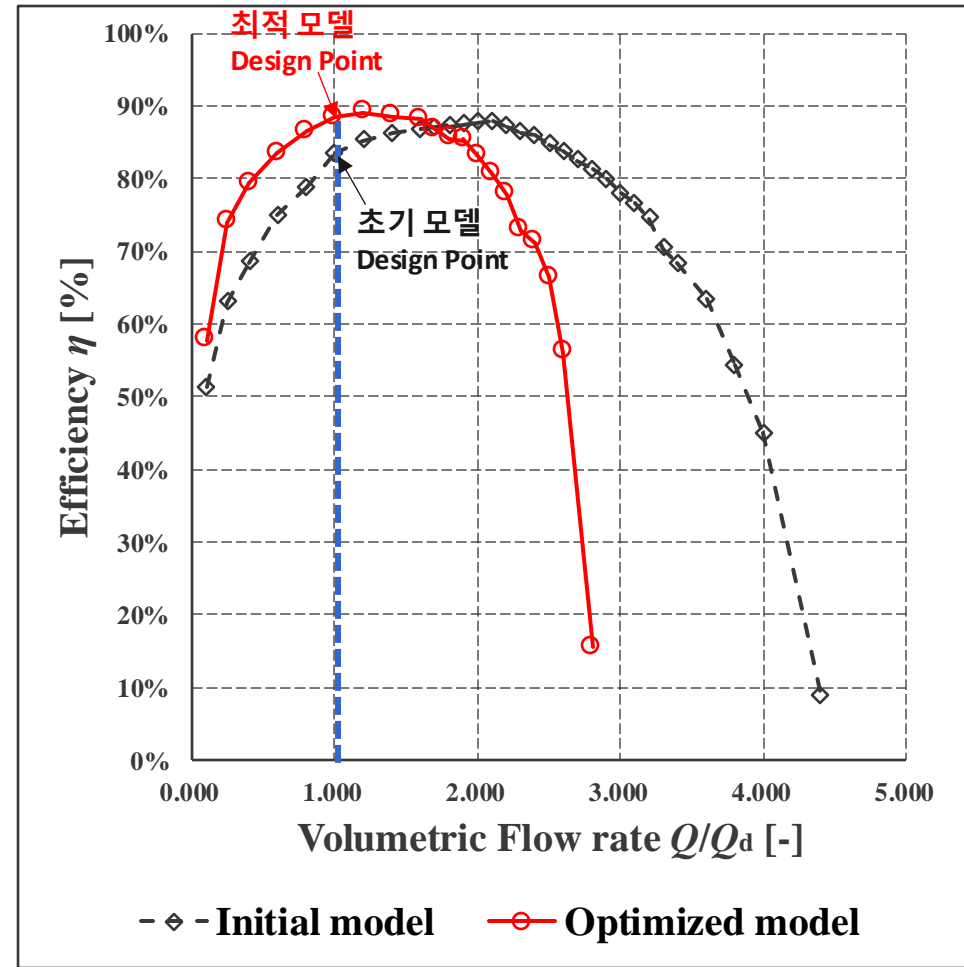
- 최적 모델은 초기 모델에 비해 양정은 2.096m 감소했지만, 설계 조건인 양정 10.395m 이상이므로 유효한 결과값이다.
- 최적모델의 효율은 초기모델에 비해 4.9% 향상되었기에, 최적화된 형상이 설계되었다고 생각할 수 있다.
- Hyperstudy에서 도출한 FIT 모델을 기반으로 한 최적점과 SimLab Acusolve 해석 결과로 나타난 Response 값의 차이가 작아서 유의미한 FIT 모델이 도출되었다고 생각할 수 있다.



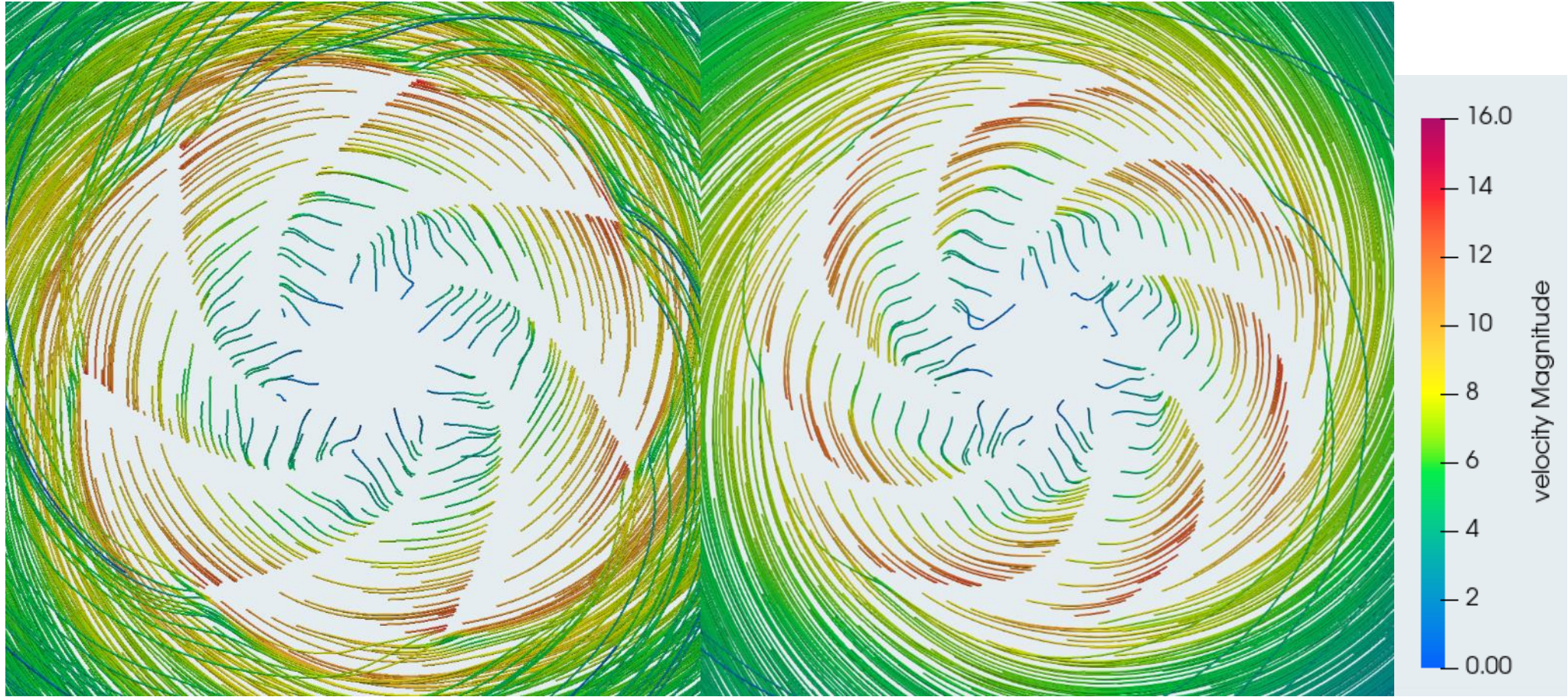
목표 양정 10.395m를 만족하고 효율 4.9% 향상된 최적모델 제안



- 초기모델에 비해 고유량 영역에서의 양정이 낮아짐
- 그러나 설계 유량점에서의 양정은 10.399m로 **설계 양정 10.395m 이상을 만족**



- 초기모델에 비해 저유량 영역 및 설계 유량점 근처에서의 효율이 상당히 향상됨
- 설계 유량에서의 **효율은 4.9% 증가함**



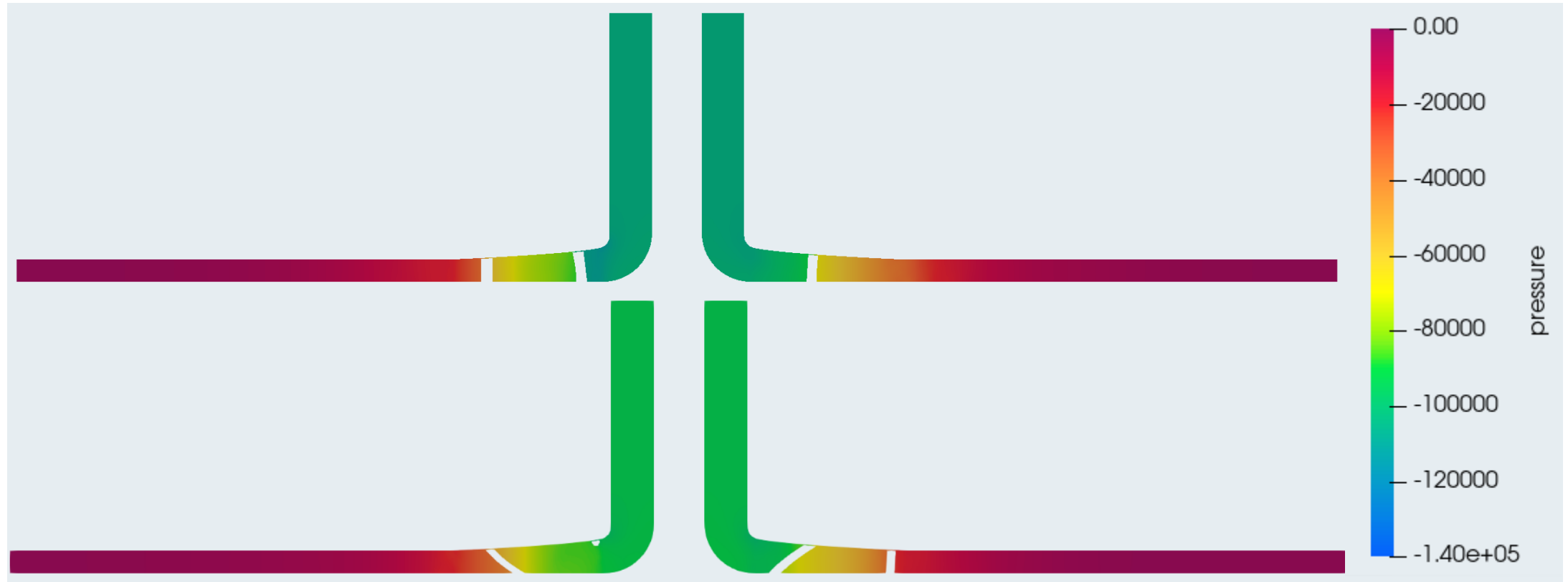
초기모델

최적모델

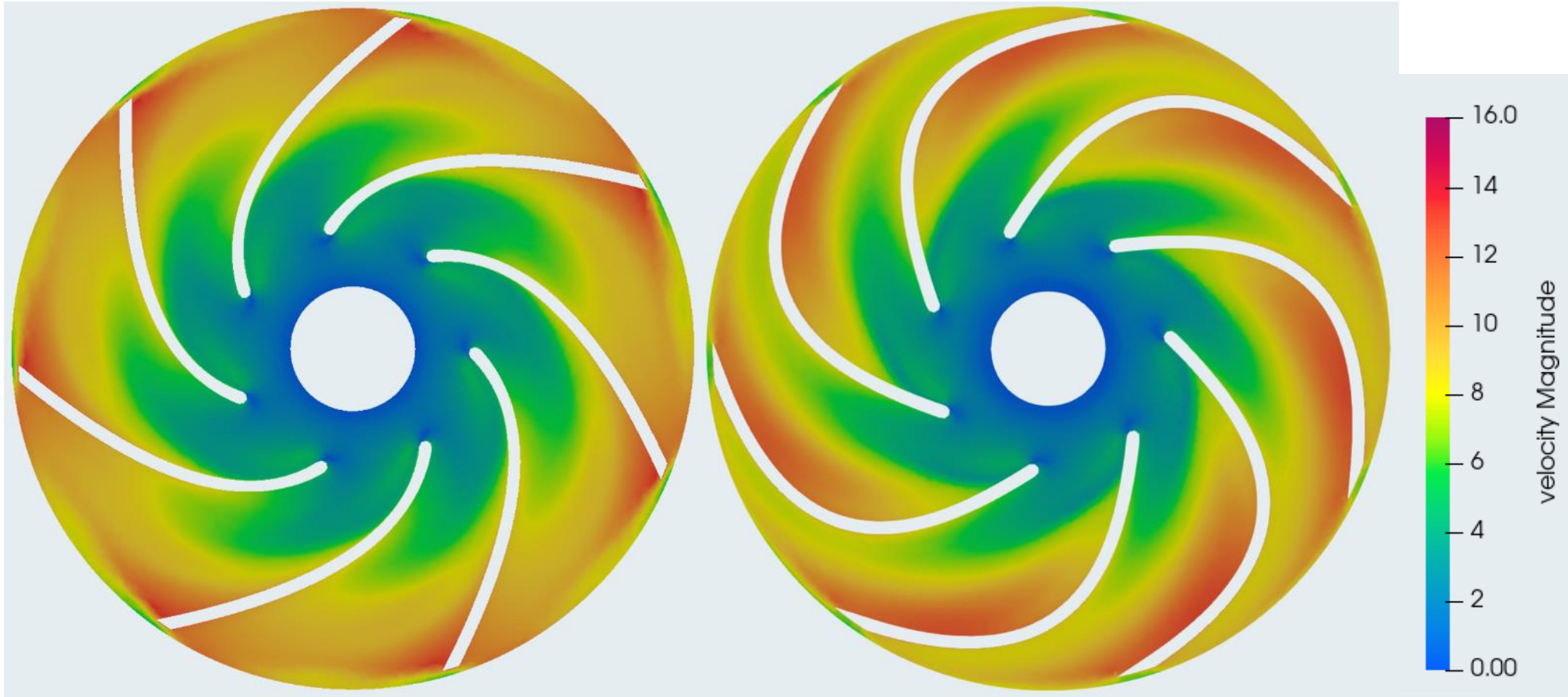
XY 평면 위에서 본 유선 비교 결과

초기모델

최적모델



자오면 위에서 본 압력 분포 비교 결과

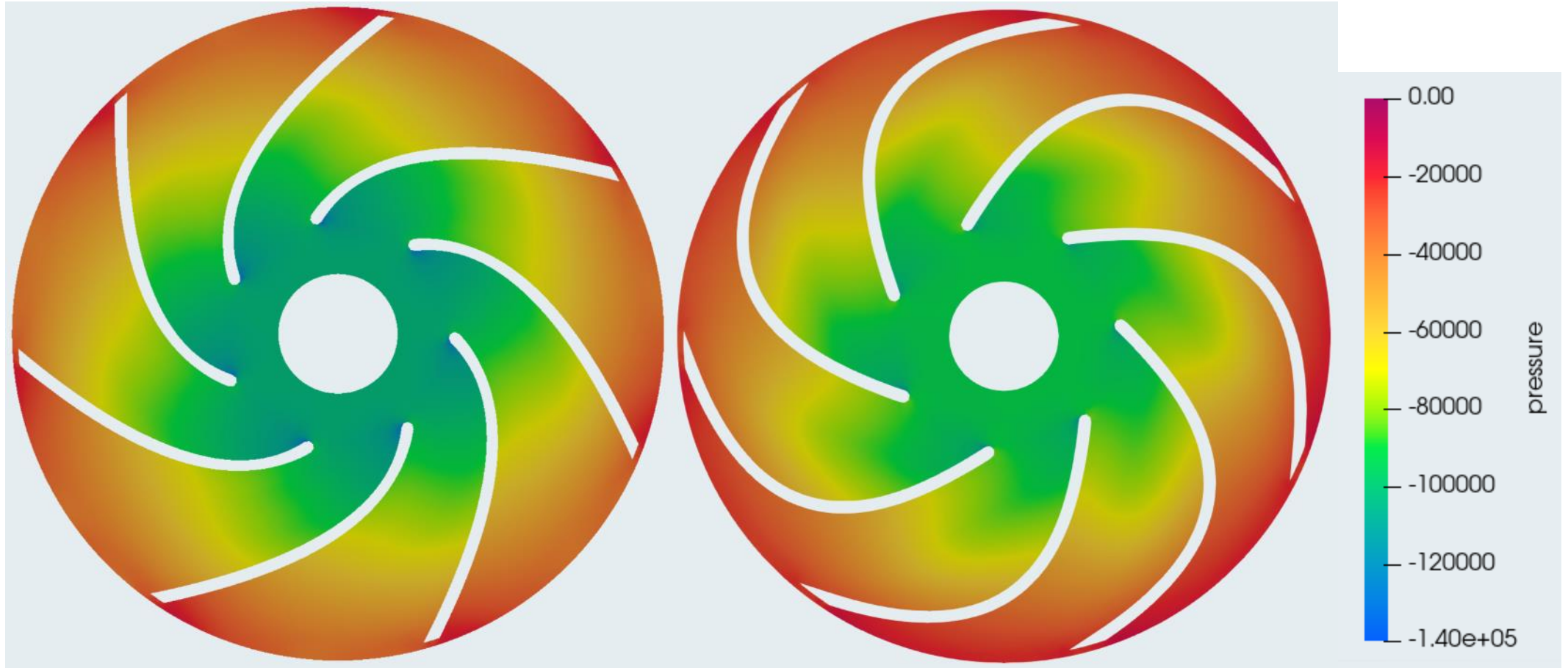


초기모델

최적모델

- XY 평면 위에서 본 속도 분포를 보면, 최적모델은 초기모델에 비해 Blade에 의해 유동이 가속되어 빠른 유속이 나타나는 영역이 더 넓음
- 또한 Blade 근처에서 유속이 높은 영역이 Suction side에 더 균일하게 분포하므로, 유동을 더 효율적으로 가속시킴을 확일 할 수 있음

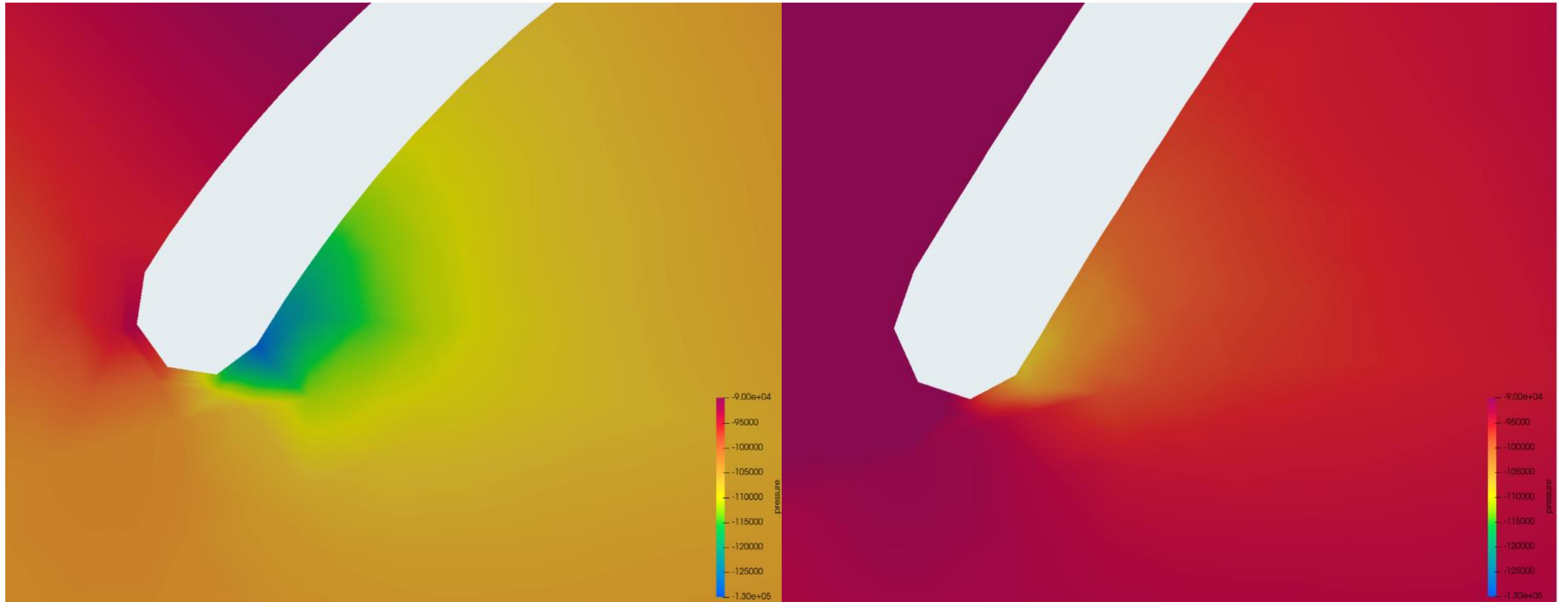




초기모델

최적모델

- XY 평면 위에서 본 압력 분포를 비교하면, 최적모델은 초기모델에 비해 압력 상승이 발생하는 외곽 영역이 더 넓음
- 또한 Impeller Eye 영역에서 압력이 상대적으로 높게 유지되므로, Cavitation 및 Backflow 발생 가능성이 더 적을 것으로 예상할 수 있음



초기모델

최적모델

- Blade의 Leading edge 근처에서의 국소적 압력분포를 살펴보면, 초기모델은 Suction side의 일부분에서 상당한 압력 강하가 발생함
- 압력 강하로 인해 초기모델은 해당 부위에서의 증기압 약화 및 유동박리로 인한 와류가 발생할 수 있으며, 이는 성능 및 안정성에 직접적 영향을 줌
- 그에 반해 최적모델은 상대적으로 압력 강하의 정도가 약하며, 이는 최적모델이 성능과 Cavitation 특성 부분에서 개선됨을 나타냄

AOC 2024



Part5. 결론

- 본 연구에서는 차량용 EWP의 설계점을 정의하고 정해진 설계조건에서 효율을 극대화 시키기 위해 유동해석과 실험계획법을 통해 최적설계를 진행함
- Blade 개수 별 해석을 통한 검증결과, **7개**에서 설계 양정을 만족하면서 전반적으로 높은 효율을 보이는 모델을 확인
- CFD 기반 DOE 해석결과 **깃 출구 각**에서 양정과 효율에 대한 가장 높은 민감도를 보임
- Linear Effect Chart에 의해서 **깃 입구 각은 작을수록, 깃 출구 각은 높을수록, 스윙 각은 높을수록 효율이 증대된다고 예측됨**
- Sampling FIT 모델에서 제안된 최적점을 바탕으로 최적모델을 도출하였으며, 해석을 통해 설계점에서 양정은 **2.096m** 감소하였지만 설계 양정은 만족하며, **효율은 4.9% 증대된 결과를 확인함**
- 초기모델과 비교했을 때, 최적모델의 도입을 통해 **펌프의 설계점 및 저유량 영역에서의 에너지 소비절감 효과**가 기대되며, 동시에 **xEV에서의 연비 향상에 도움이 될 것이라고 예상됨**

## Reference

1. Shuang Teng et al. (2024). "Optimization of impeller blades of an electric water pump via computational fluid dynamics." *Journal of Mechanical Science and Technology* 38 (3)
2. Jose Gonzlez et al. (2002). "Numerical Simulation of the Dynamic Effect Due to Impeller-Volute interaction in Centrifugal Pump." *Transaction of the ASME*.
3. Wei Li et al. (2020). "Numerical and experimental study of variable speed automobile engine cooling water pump." *Science Progress*. Vol. 103(2) 1-27.
4. Hyeonchang Jeon et al. (2024). "Optimization of Blades and Impeller for Electric Vehicle Centrifugal Pump Via Numerical Analysis." *Energies* 2024, 17, 853.
5. 배정석 et al. (2020). "xEV 열관리 시스템의 배터리 유로 및 PEEM 유로 겸용 워터펌프 성능 설계." *2020 한국자동차공학회 추계학술대회*.
6. 김현범 et al. (2022). "원심식 볼류트 펌프의 임펠러와 볼류트 간극에 따른 출력, 효율, 소음 특성 연구." *2022 한국자동차공학회 추계학술대회*.
7. 이준용 et al. (2021). "EV용 워터펌프의 축 추력 저감 설계를 위한 해석적 연구." *2021 한국자동차학회 추계학술대회*.
8. 조민철 et al. (2023). "EWP 모듈 내 임펠러의 형상에 따른 펌프 성능에 관한 연구." *한국기계공학회지*, 제 22권, 제5호, pp. 37~46(2023.05).
9. 편권범 et al. (2012). "반응표면기법을 이용한 원심펌프 임펠러 최적설계 및 볼류트 설계" *유체기계저널*. 제 15권, 제3호, 2012
10. 김 성 et al. (2008). "실험계획법을 사용한 원심펌프 임펠러 최적설계." *유체기계저널*: 제11권, 제3호, pp 36~42, 2008
11. 조원우 et al. (2018). "유동해석을 통한 원심펌프 임펠러의 설계 인자 최적화." *journal of the korea of Manufacturing Technology Engineering* 27:2 (2018) 125~131.
12. 정세영 et al. (2008). "전동식 워터펌프 개발." *한국신, 재생에너지 학회 2008 춘계학술대회 논문집* pp. 576~579
13. 이제은 et al. (2023). "EWP용 원심펌프 설계에 관한 수치해석적 연구." *2023 한국유체기계학회 동계학술대회 논문집*.
14. K. Imaichi, Y. Murakami, and H. Tsurusaki, "遠心・斜流ポンプの設計例," *パソコンによるポンプ設計の基礎 : パソコンによるターボマシン設計の基礎*, Tokyo, Japan: 日本工業出版, 1989, ch. 7, sec. 3, pp. 157-159. (Transl.: in KR. Cho, Ed., PC에 의한 펌프설계의 기초: 유체역학적 설계, 강도설계 및 PC에 의한 설계계산, Gyeonggi-do, Republic of Korea: 대영문화사, 1989, ch. 7, sec. 3, pp. 157-159).