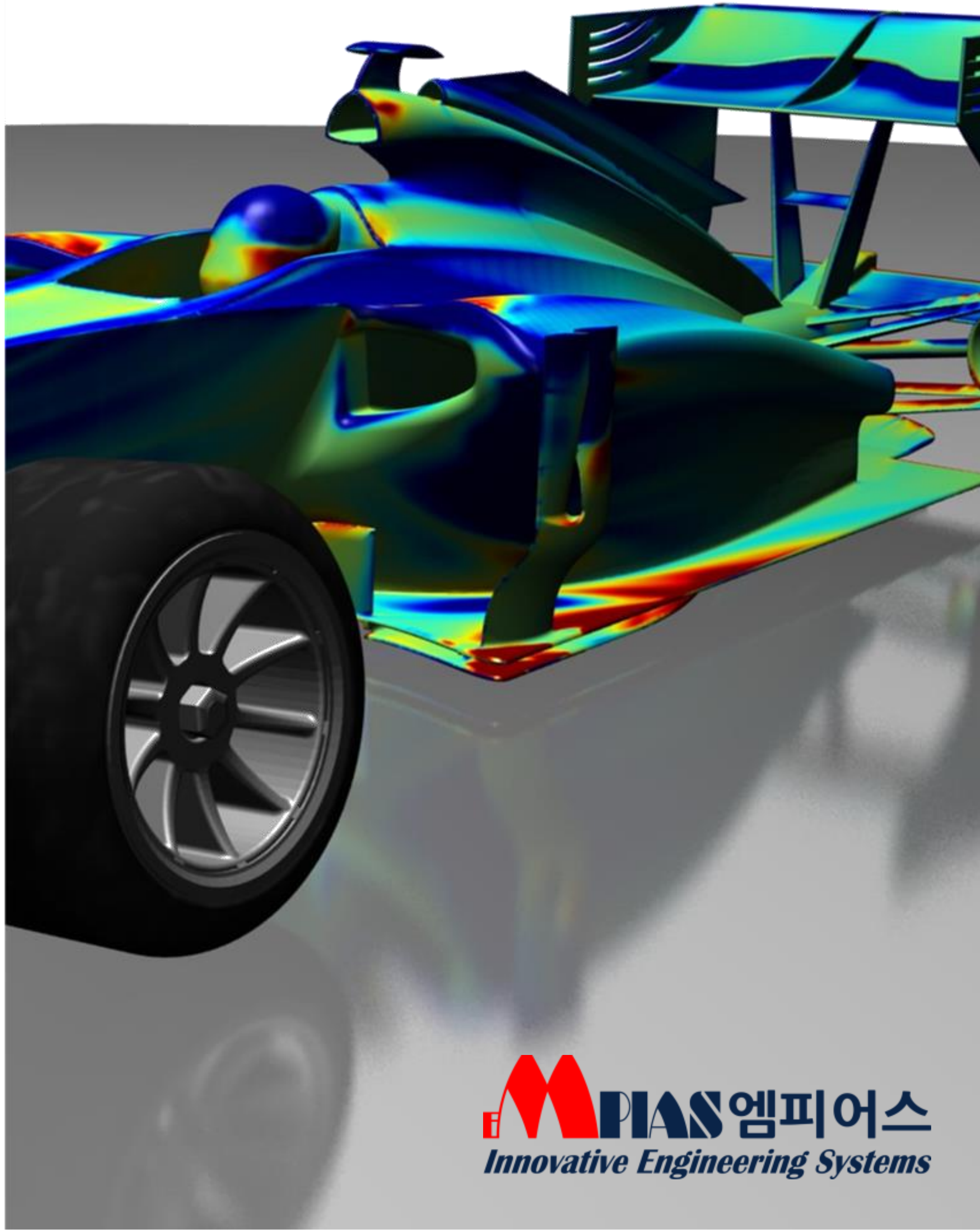
# HELYX® ADJOINT 를 통한 CFD 최적화 설계 및 응용

HELYX-Adjoint CFD Optimization
for Next Generation Design

2018. 11. 1

류 수 열 이사/Ph.D.

7th OpenFOAM Korea Users Community Conference



MPIAS 엠피어스
Innovative Engineering Systems

# OUTLINE

# HELYX-Adjoint CFD Optimization

- 개발배경 및 동기
- 최적화 기법 비교(DOE vs. Adjoint)
- 최적화 기법 비교(Continuous vs. Discrete)
- HELYX Continuous Adjoint 기법
- Adjoint 민감도(Sensitivities) 기법
- 위상 최적화(Topology Optimization)
- 위상 최적화 프로세스
- 위상 최적화 응용
- 형상 최적화(Shape Optimization)
- Node-based(NB) deformation
- 형상 최적화 프로세스
- 형상 최적화 검증
- 형상 최적화 응용
- 주요특색

# HELYX-Adjoint | 개발배경 및 동기

**Volkswagen 요청 (2009년)**

- 누구나 사용할 수 있는 현실적 최적화 구축
- 가능한 최단 시간 내에 다수 설계변수의 최적화
- 정확성, 편리성, 강건성

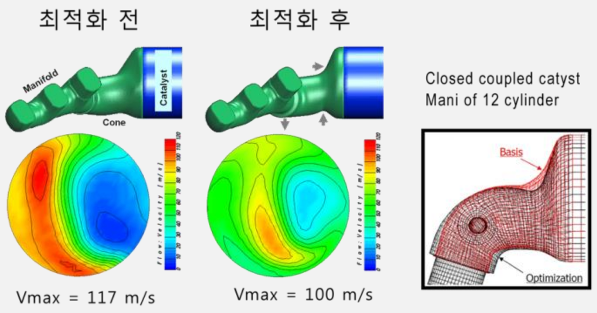
Based on theoretical work by C. Othmer, VW Research

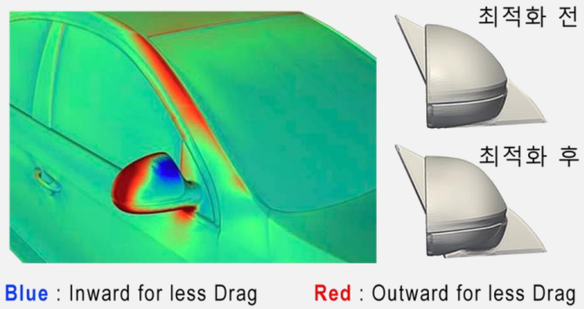
**ENGYS 개발**

## HELYX Continuous Adjoint Optimization

- Primal 과 Dual 계산에 의한 빠른 위상 및 형상 최적화
- 수 많은 시험 검증 테스트에 의한 신뢰성
- 다중 목적 함수(Force, Pressure loss, Mas flow, Swirl, …)
- Free Node-based deformation에 의한 자동모핑 최적화
- RANS 또는 DES/LES time-averaged 시뮬레이션
- 산업체 문제 : > 200M cells

| 위상 최적화 | 형상 최적화 |
| --- | --- |

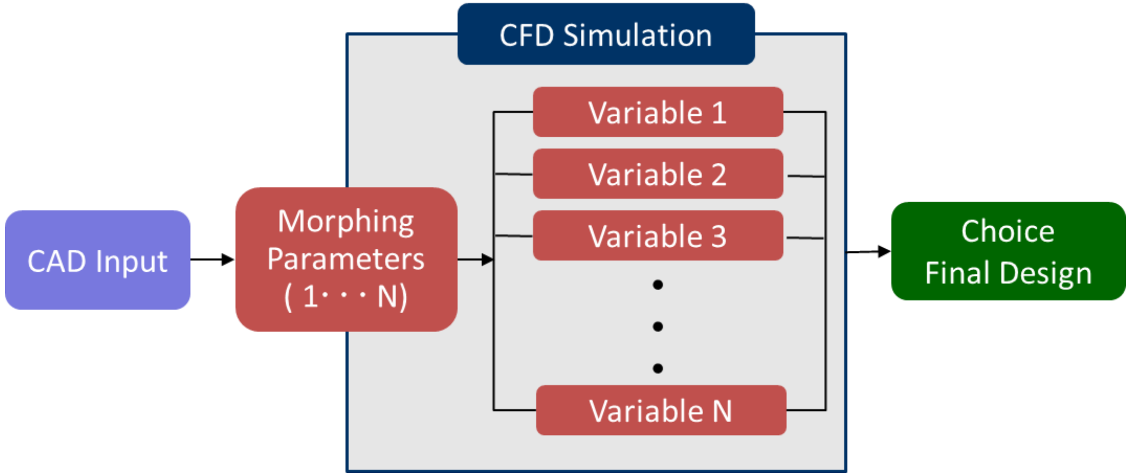


# 최적화 기법 비교(DOE vs. Adjoint)

## 시험기반(DOE) /통계학적 기법

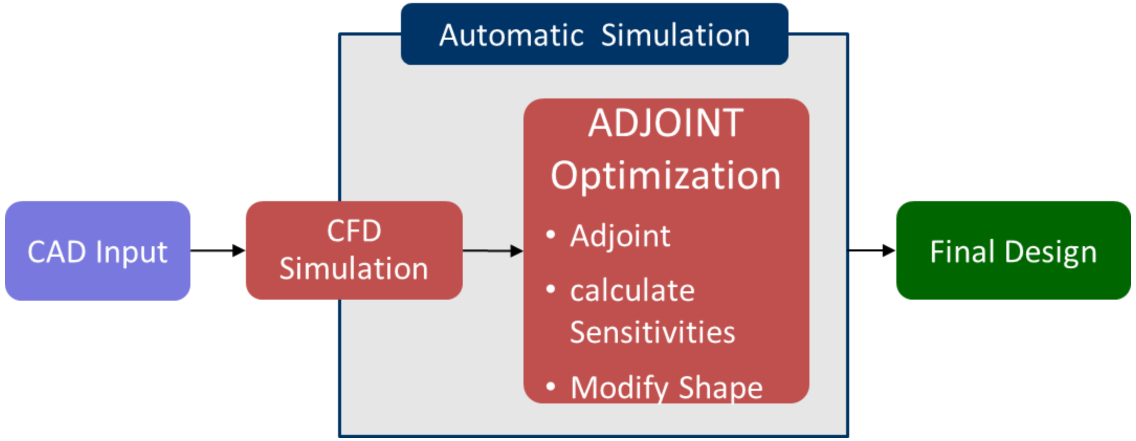
- N 설계변수 :
  - N+1 flow calculation 요구 (Parameters Simulation.)
- 비효율: 많은 리소스
  - 비용, 계산/개발시간, 맨파워 소요




(N+1 parameters CFD calculation)

## HELYX-Adjoint 기법

- N 설계변수 :
  - 1 flow + 1 Adjont calculation
- 효율 : 최소한의 경제적 리소스 필요
- 설계변수의 독립적 계산 수행




(1 flow + 1 adjont) calculation

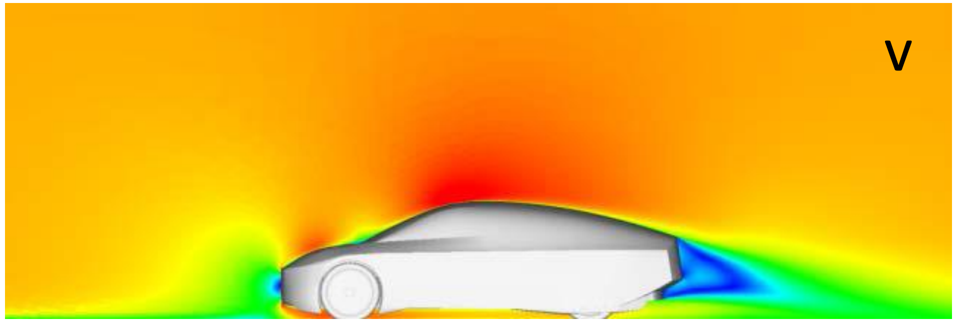
# 최적화 기법 비교(Continuous vs. Discrete)

| Continuous Adjoint | Discrete Adjoint |
| --- | --- |
| Differentiate → Discretise → Solve | Discretise → Differentiate → Solve |
| › 난이도의 시간 소모적 지배방정식 유도<br>› 직관적 수치기법,<br>› 매우 근접한 민감도 구현 (경사기반기법과 결합)<br>› 고효율 RAM 활용 | › 코드에 대한 수동 / 자동 미분기법<br>› 블랙박스 수치기법,<br>› 정확한 민감도 구현(일관성)<br>› 고용량 RAM 요구 |

# HELYX Continuous Adjoint 기법

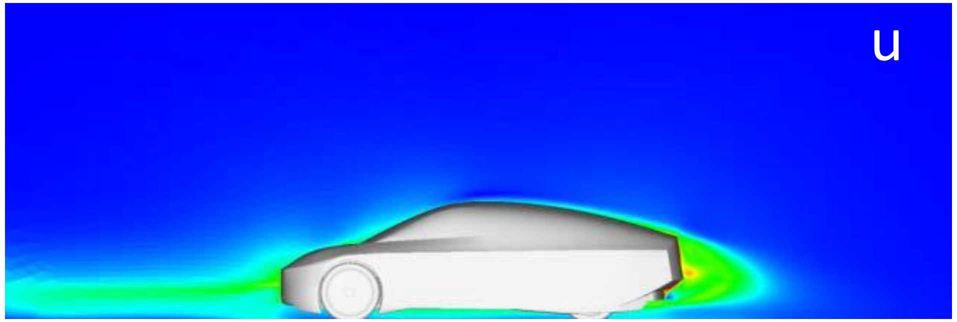
› **CFD 계산**: v, p → primal fields

$$
\begin{aligned}
(\mathbf{v}\cdot\nabla)\,\mathbf{v} &= -\nabla p + \nabla\cdot(\nu\,\nabla\mathbf{v}) - \alpha\mathbf{v} \\
\nabla\cdot\mathbf{v} &= 0
\end{aligned}
$$




› **Adjoint CFD 계산**: u, q → “dual” fields

$$
\begin{aligned}
-(\nabla\mathbf{u})\,\mathbf{v} - (\mathbf{v}\cdot\nabla)\,\mathbf{u} &= -\nabla q + \nabla\cdot(\nu\,\nabla\mathbf{u}) - \alpha\mathbf{u} \\
\nabla\cdot\mathbf{u} &= 0
\end{aligned}
$$




› **민감도 계산**

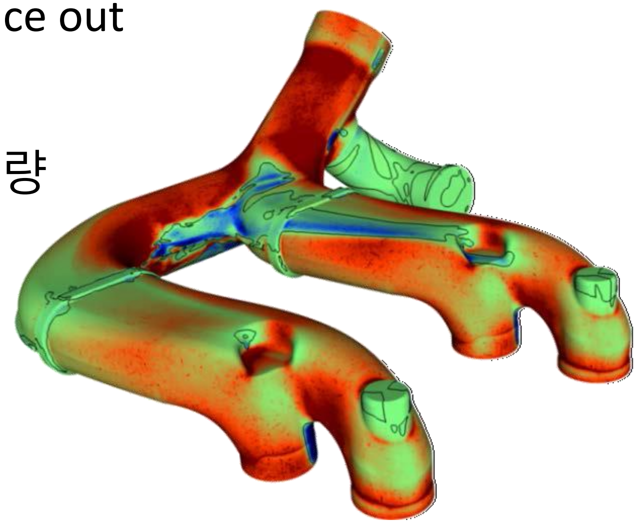
- 표면 민감도 → $\frac{\partial J}{\partial \beta} \sim \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial n}\cdot\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial n}$
- 체적 민감도 → $\frac{\partial J}{\partial \alpha} \sim \mathbf{v}\cdot\mathbf{u}$

# Adjoint 민감도(Sensitivities) 기법

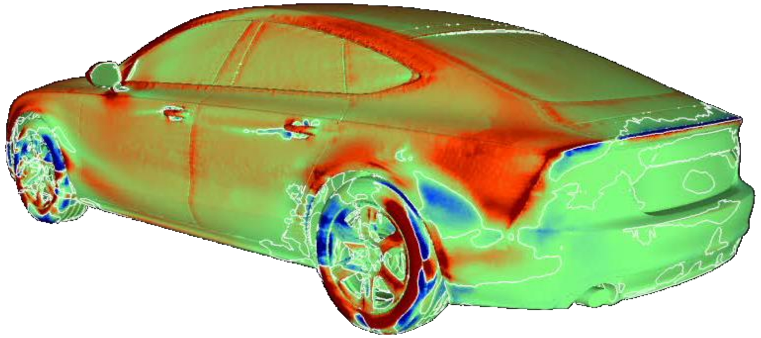
## 표면 민감도 $\partial J/\partial\beta$

red → push surface in
blue → push surface out

$\frac{\partial J}{\partial\beta}$ → 질량유량

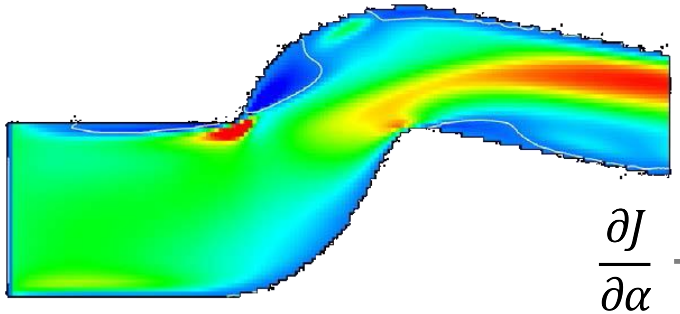


$\frac{\partial J}{\partial\beta}$ → 항력(drag)

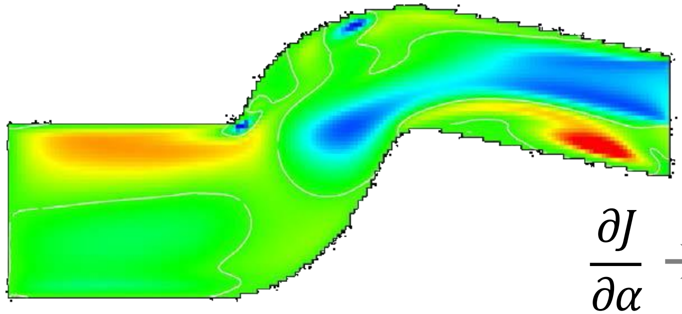


## 체적 민감도 $\partial J/\partial\alpha$

red → free volume cells
blue → penalise volume cells



$\frac{\partial J}{\partial\alpha}$ → 압력강하



$\frac{\partial J}{\partial\alpha}$ → 유동 균일성

# HELYX-Adjoint | 위상 최적화

**원시해 (Primal Solution) 계산**
RANS 또는 DES/LES time-averaged

↓

Adjoint 시스템으로부터
**쌍대해(Dual Solution) 계산**

↓

**최적 민감도 산출**

↓

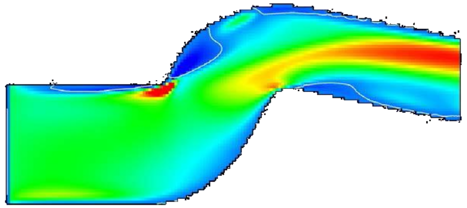
**"불량 셀" 페널라이징**
(Level Set + Immersed wall boundaries)에
따른 최적화 인터페이스 추적

↓

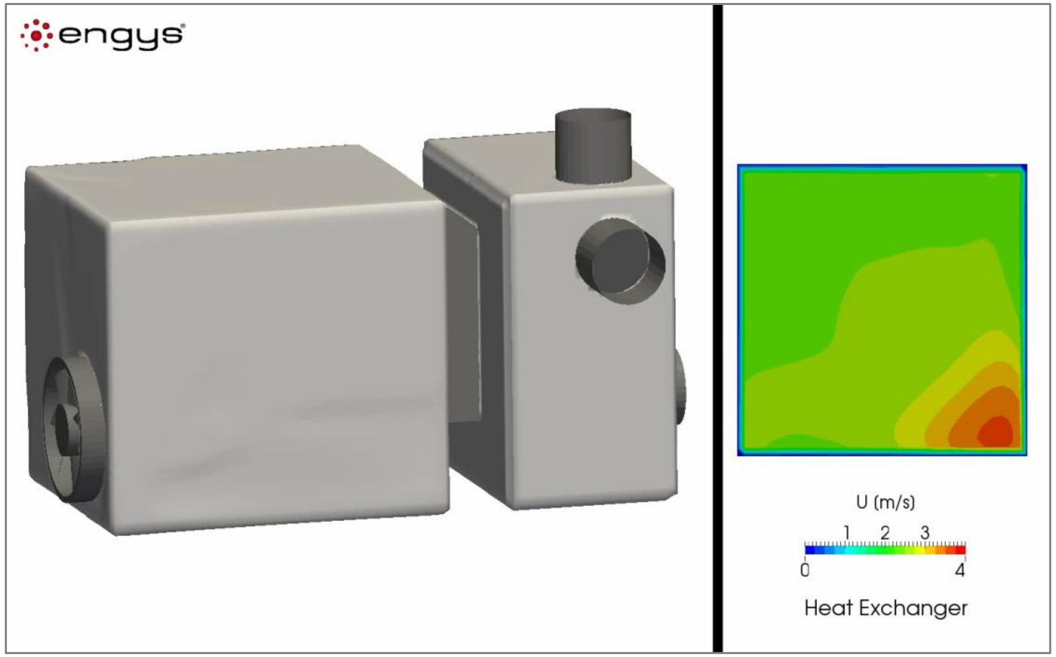
**경사도 기반기법을 사용하여**
**최적화 목적물 확인**

## 체적 민감도

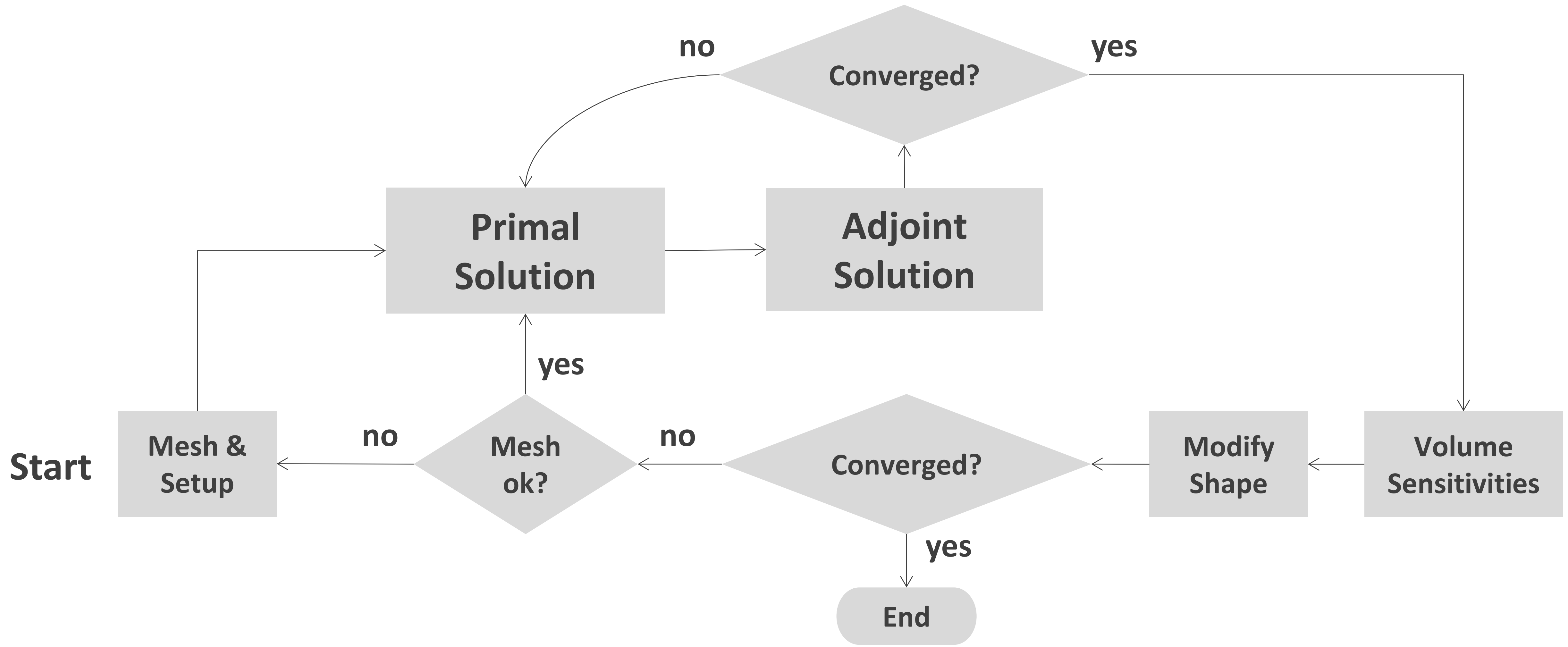
red → free volume cells
blue → penalise volume cells



$\frac{\partial J}{\partial \alpha}$ → 압력강하



# HELYX-Adjoint | 위상 최적화 프로세스

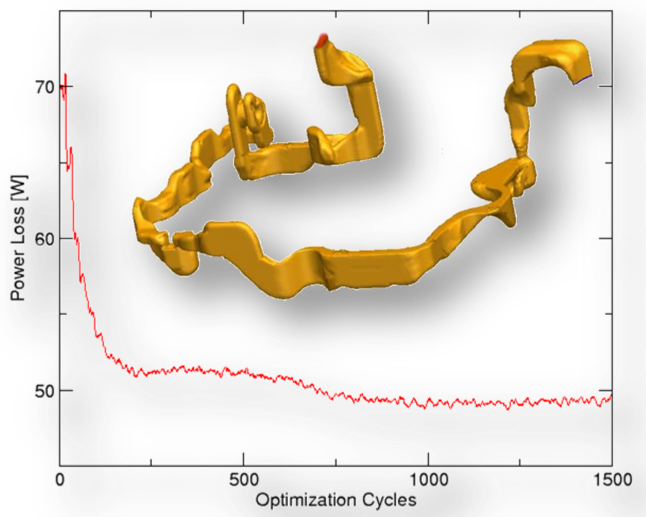


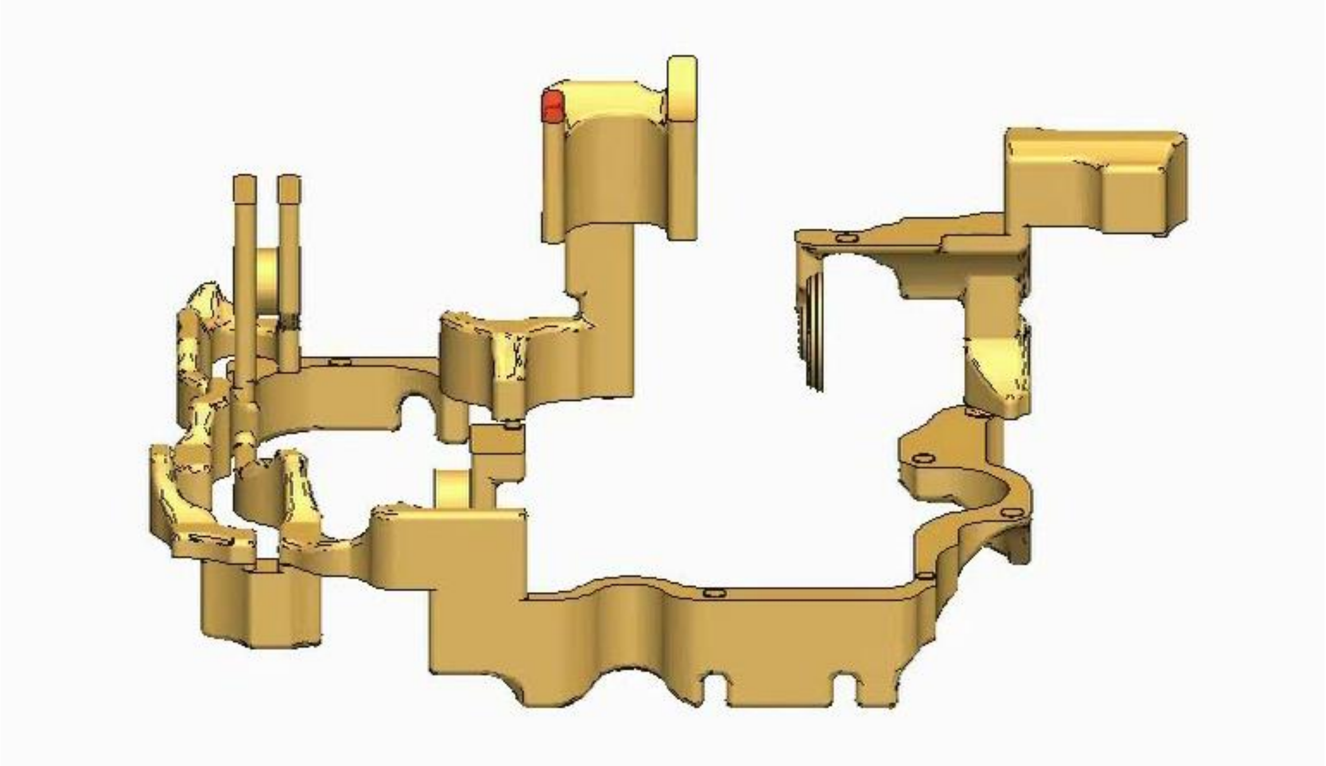
# HELYX-Adjoint | 위상 최적화 응용

## › Transmission Oil Channel

- 시스템 Power 손실 경감
- 로컬 최적화 유도 재순환 완화

Power 손실의 약 30% 경감



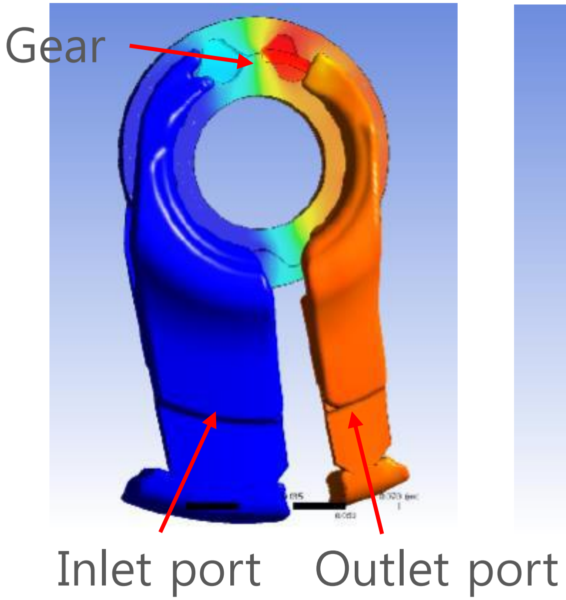


EMPIAS 엠피어스
Innovative Engineering Systems

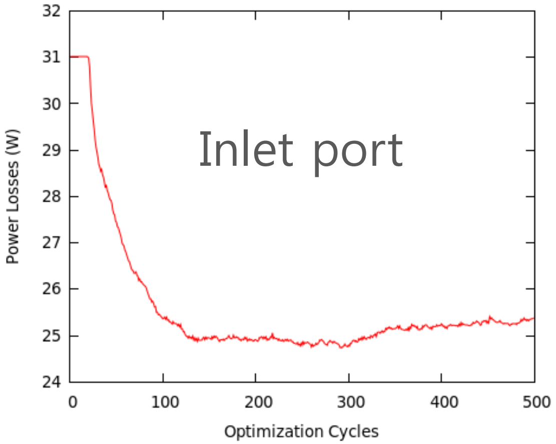
# HELYX-Adjoint | 위상 최적화 응용

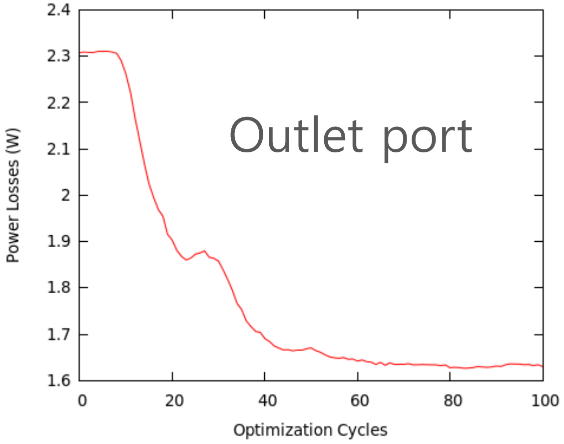
## › Gear Pump

- Power Loss의 최소화
- 두개로 분리된 케이스
  - Inlet port(low pressure)
  - Outlet port(high pressure)






| Power Losses | Inport | Outport | Gear Pump |
|---|---|---|---|
| 최적화 전 | 2.208 W | 31.017 W | 33.325 W |
| 최적화 후 | 1.635 W | 25.379 W | 27.013 W |
| 백 분 율 | 29.17 % | 18.18 % | **18.94 %** |

# HELYX-Adjoint | 형상 최적화

**원시해(Primal Solution) 계산**
RANS 또는 DES/LES time-averaged

Adjoint System으로부터
**쌍대해(Dual Solution) 계산**

**표면 민감도 추출**

Free-form Node-based Deformation 사용
**형상표면 모핑**

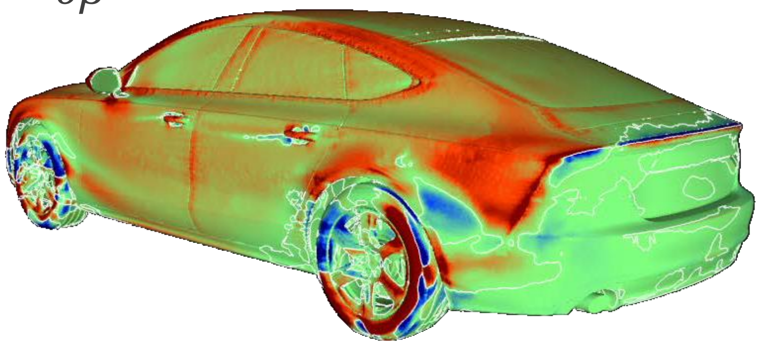
경사도 기반 기법 사용
**최적화 목적물 확인**

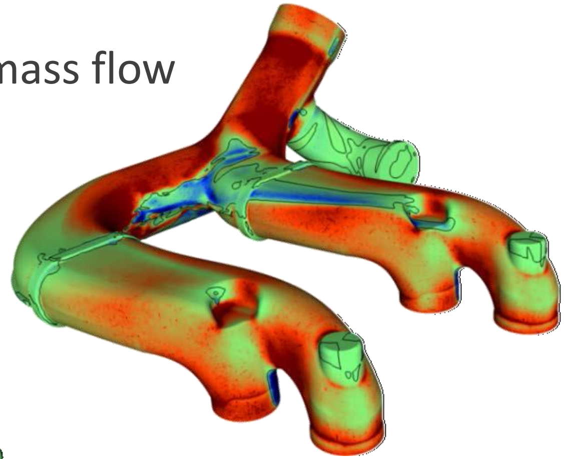
## 표면 민감도

red → push surface in
blue → push surface out

$\frac{\partial J}{\partial \beta}$ → mass flow

$\frac{\partial J}{\partial \beta}$ → drag

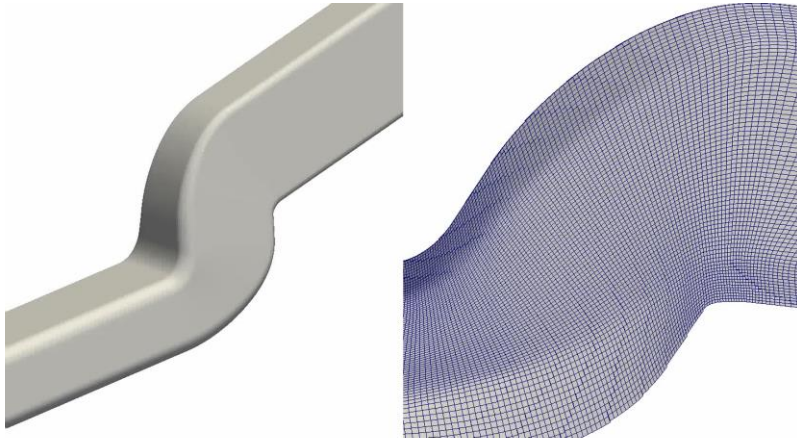




# HELYX-Adjoint | Node-Based(NB) Deformation

- Smooth for vector $\vec{d} = \bar{G} \cdot \vec{n}$
- Smooth the magnitude of the displacement:

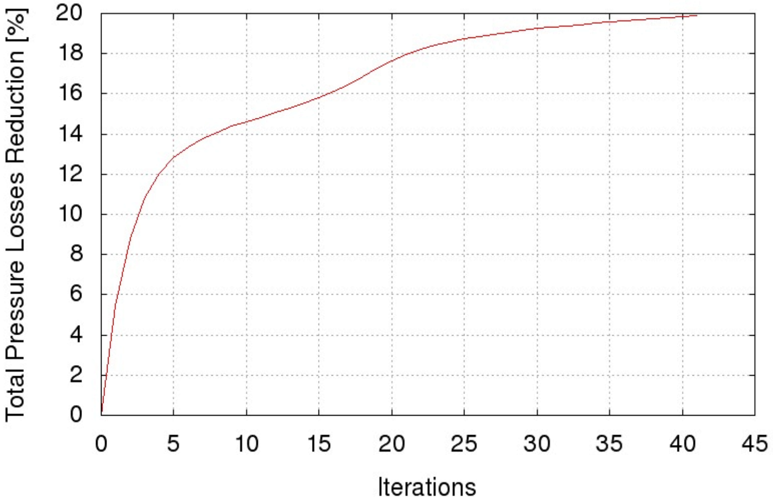
$$\vec{d} - \varepsilon \nabla^2 \vec{d} = \overrightarrow{d_{init}}$$

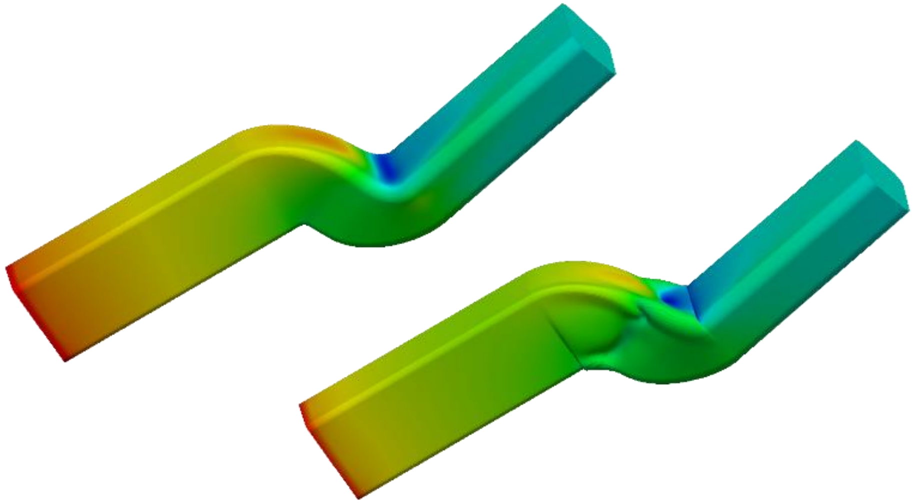


*$\overrightarrow{d_{init}}$: Initial Field*

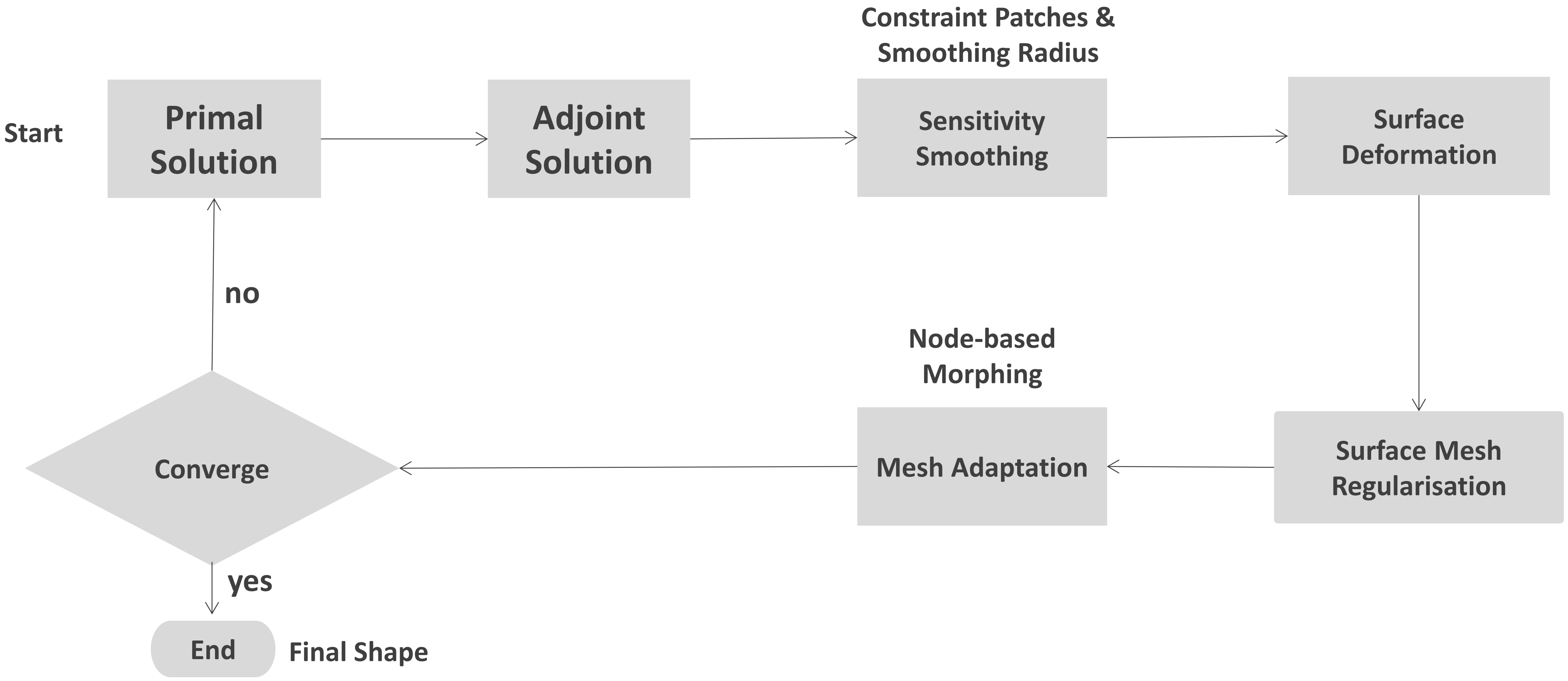
*$\vec{d}$: Smooth Field*

*$\varepsilon$: smoothing intensity*



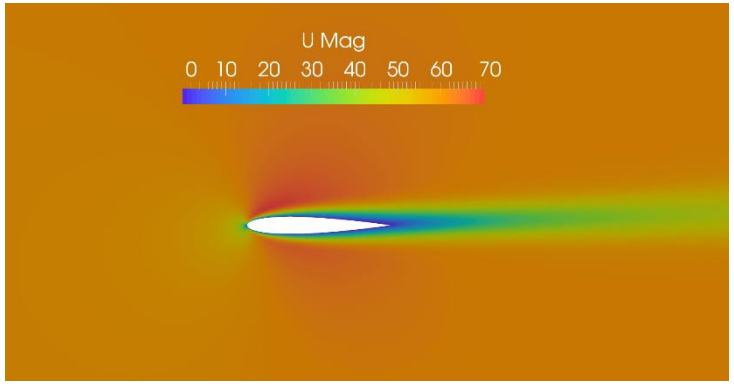



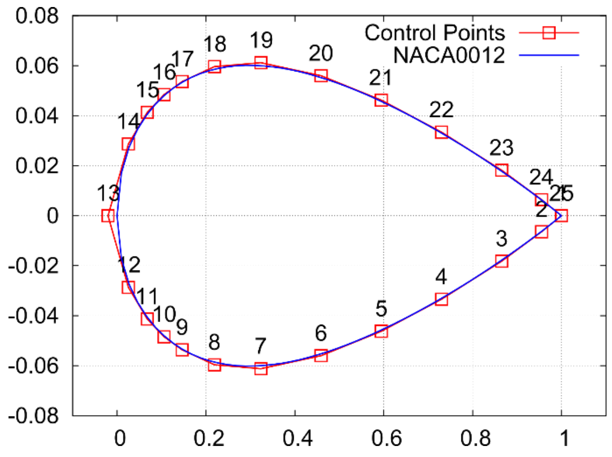
# HELYX-Adjoint | 형상 최적화 프로세스



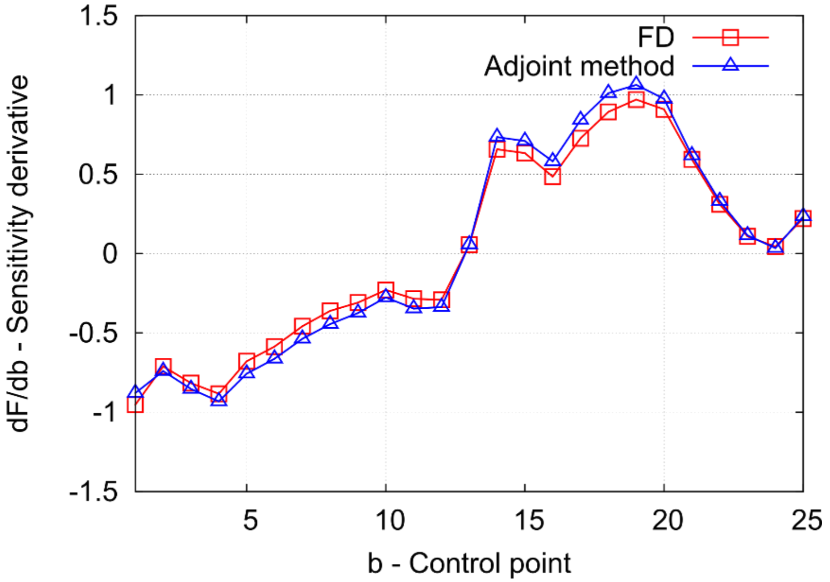
# HELYX-Adjoint | 형상 최적화의 검증

## ◈ NACA 0012




- 받음각(AoA) = 2 deg
- Re = 1000
- 형상최적화(Shape Optimization)
  - 설계변수 → NURBS Control Points
  - Airfoil 의 항력 최소화
- 유한차분(FD, Finite Difference) 민감도
  - 설계변수 없이 비용의존
  - 2 x 25 = 50 Primal 계산



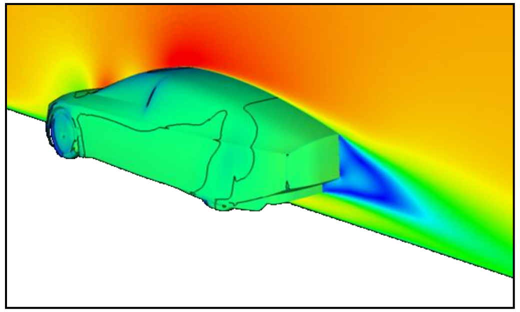
# HELYX-Adjoint | 형상 최적화 응용

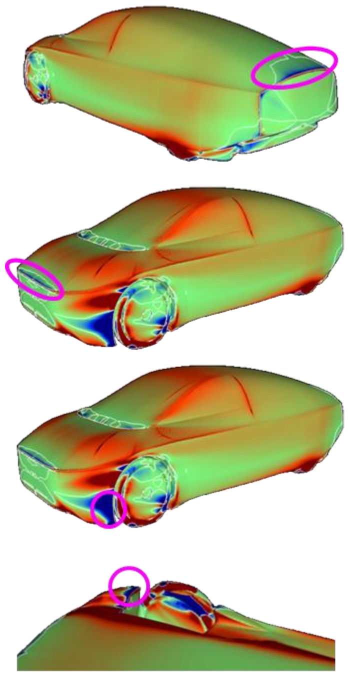
## ◈ XL1 공력 최적화 설계

› 항력 최소화(목적)

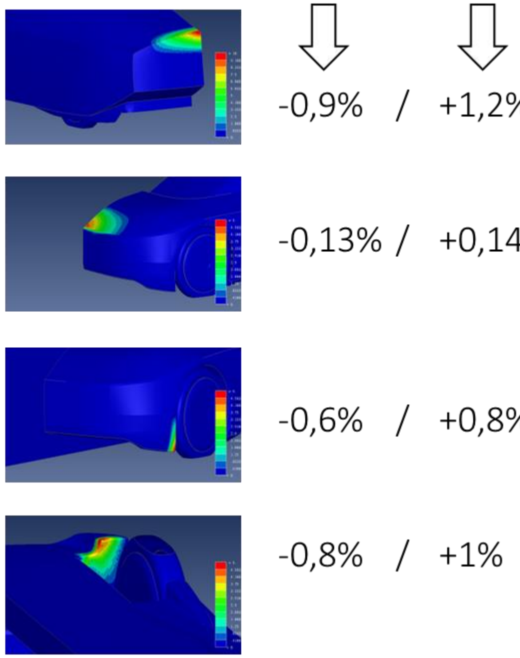
› Primal: Time-averaged DES
- 항력 및 양력계수 계산
- Time-averaged U & P 및 Steady RANS
- 평균 U, p, nut에 대한 Adjoint RANS 실행

› 질적 동의만 고려(sign correct)
- 풍동시험 검증 및 5% 이상의 항력감소



Morphing **according to** / **opposite to** sensitivities



| | | |
|---|---|---|
| -0,9% | +1,2% | for 10mm displacement<br>Confirmed in wind tunnel |
| -0,13% | +0,14% | for 5mm displacement |
| -0,6% | +0,8% | for 5mm displacement |
| -0,8% | +1% | for 10mm displacement<br>Confirmed in wind tunnel |



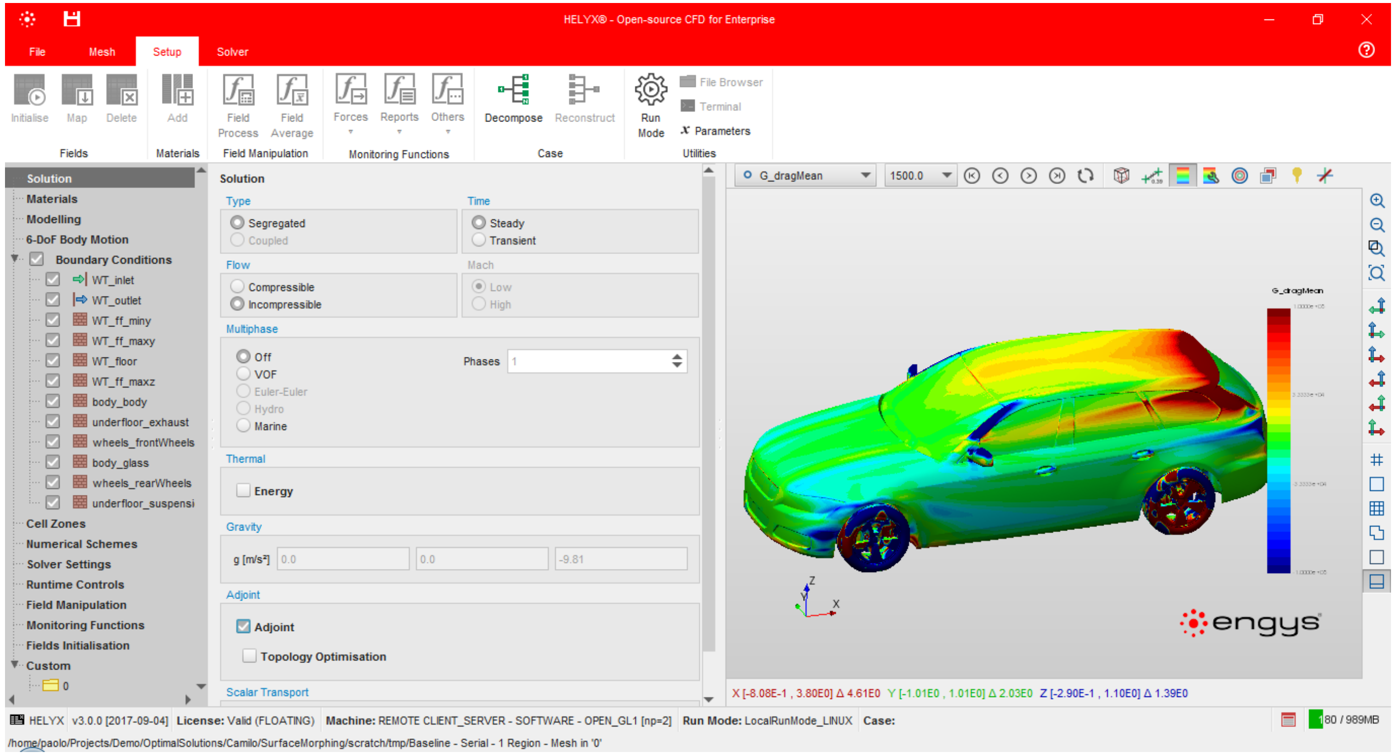


EMPIAS 엠피어스 Innovative Engineering Systems

# HELYX-Adjoint | 주요특색

- 위상 최적화와 형상최적화에 적합한 ENGYS 고유의 Continuous Adjoint 기법
- 다중 목적함수( 20+ 목적비용함수)

  forces & moments, uniformity,
  pressure loss, mass flow split, swirl, …
- 다중 제약조건
  - 제조성 (Manufacturability)
  - 가중치(Weighting)
  - 확장 라그랑지 승수(ALM) 제약
- Adjoint 난류모델 및 벽함수
- $2^{nd}$ order Adjoint Advection
- 복합열전달(CHT)/온열 Adjoint 최적화(Beta)
- 비 전문가도 손쉽게 접근 및 사용



# OUTLINE

# 3D 덕트의 Adjoint 최적화

- 해석조건
- 해석모델 및 격자
- CFD 및 위상 최적화 조건 설정
- 위상 최적화 해석 결과
- 형상 최적화 수행
- HELYX-Adjoint 최적화 결과
- HELYX-Adjoint 최적화 결과(변형 모션)
- 총 해석 소요시간
- 결론

# 3D 덕트의 Adjoint 최적화

## ◈ 해석조건

› 목적 : Power Loss의 최소화를 통한 입출구 차압개선

› 유동조건

- 유량 = 1000kg/h
- $\rho$ = 1.2 kg/m$^3$
- $\mu$= 1.9137e-5 Pa·s
- 비압축성

› 입출구 형상 구속

Geometry

⇩

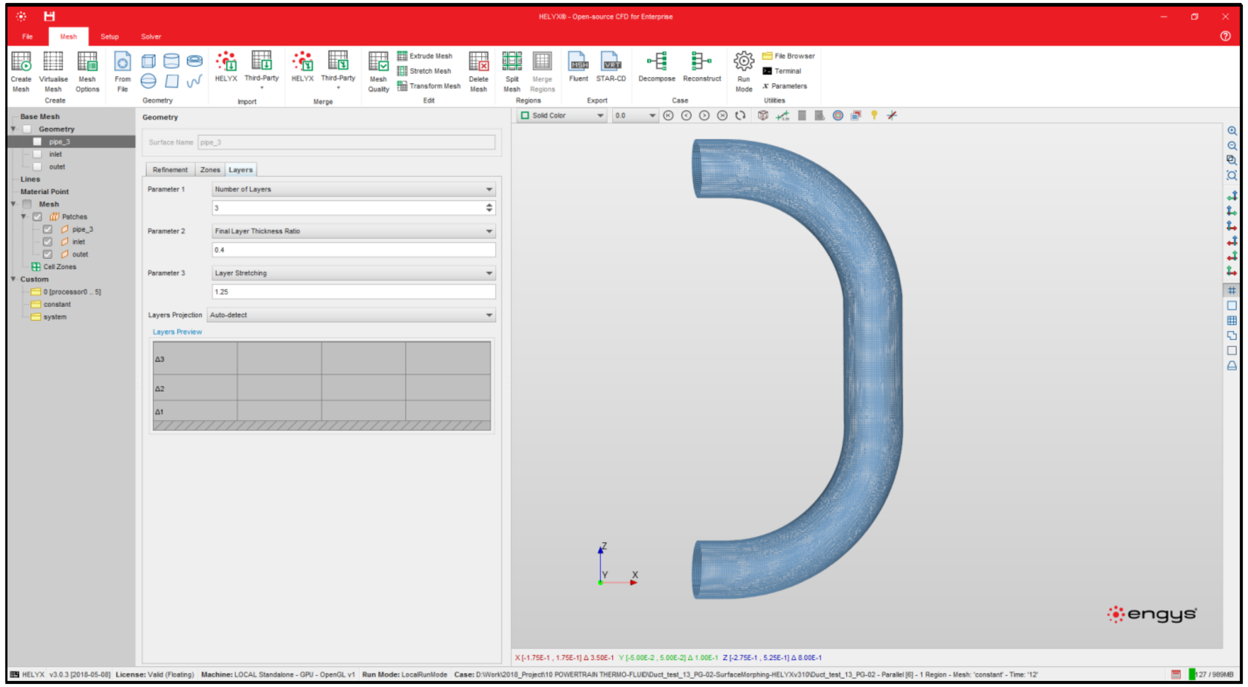
Base Mesh size (3mm)

⇩

Wall Layers(3개)

⇩

Auto Meshing (create meshing)



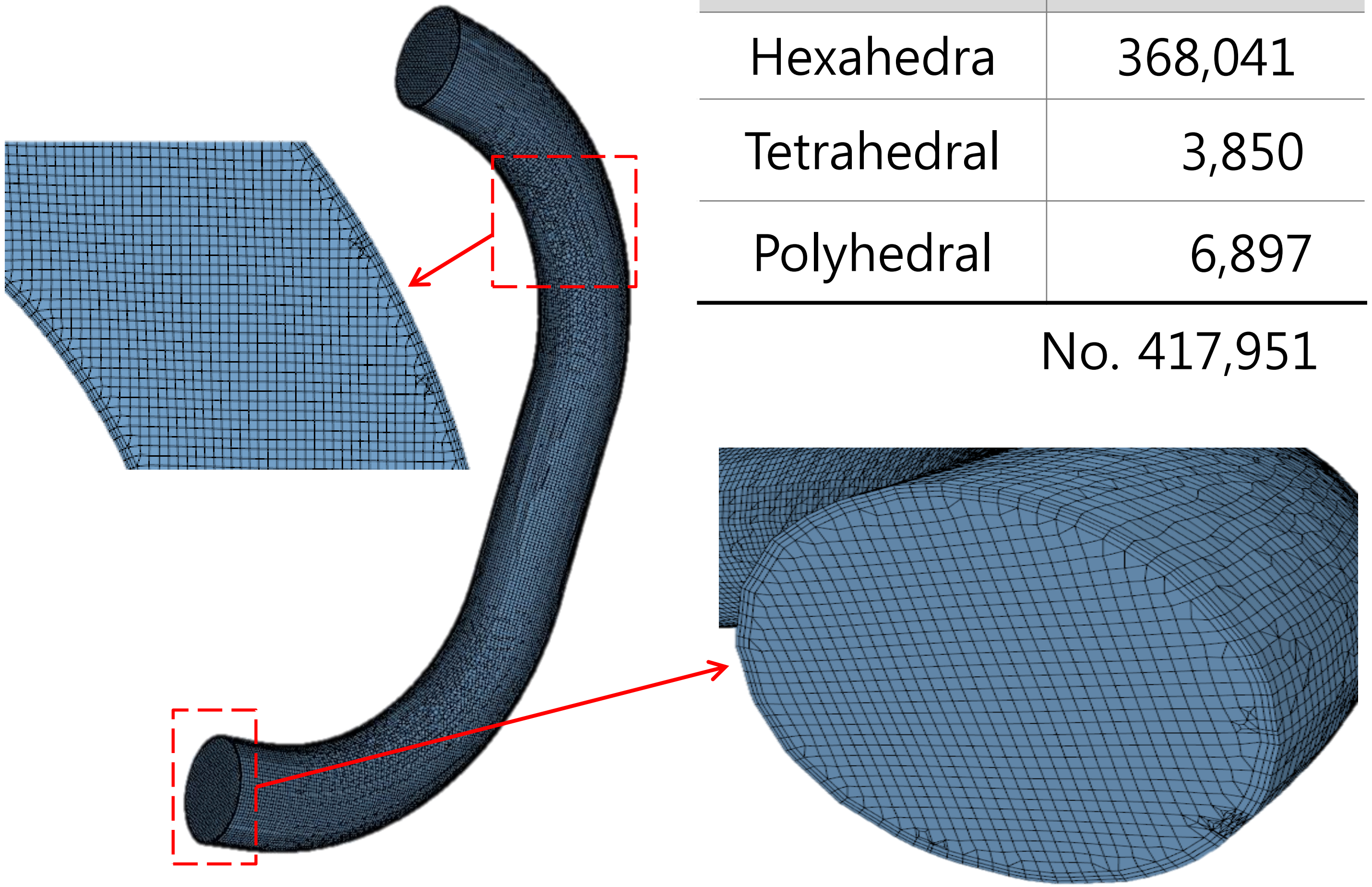
HELYX HEXA 지배의 자동격자 처리

# 3D 덕트의 Adjoint 최적화

## ◈ 해석모델 및 격자

- CFD
  - Segregate
  - Steady Incompressible
  - RANS k-ω SST model
  - Bounded Linear Upwind 2nd order(U, k, ω)
- Adjoint
  - Volume Sensitivities$(\partial J/\partial\alpha)$
  - Topology

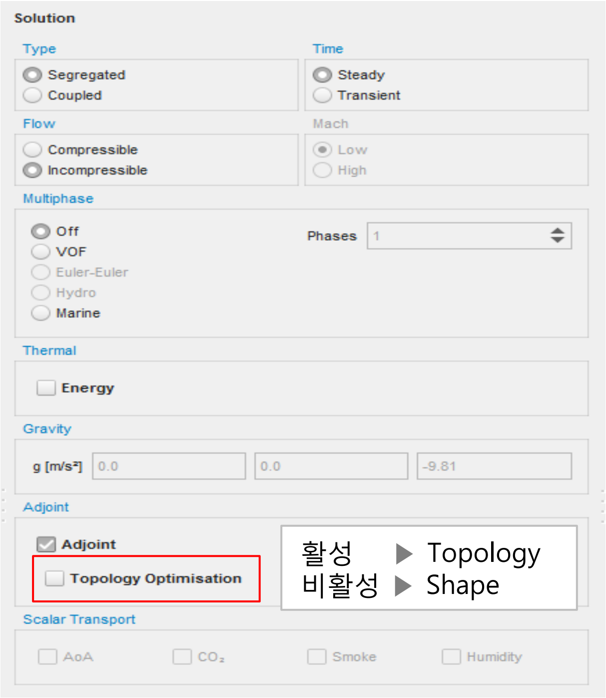
| 격자 타입 | 총 격자 수 |
|---|---|
| Hexahedra | 368,041 |
| Tetrahedral | 3,850 |
| Polyhedral | 6,897 |
| | No. 417,951 |



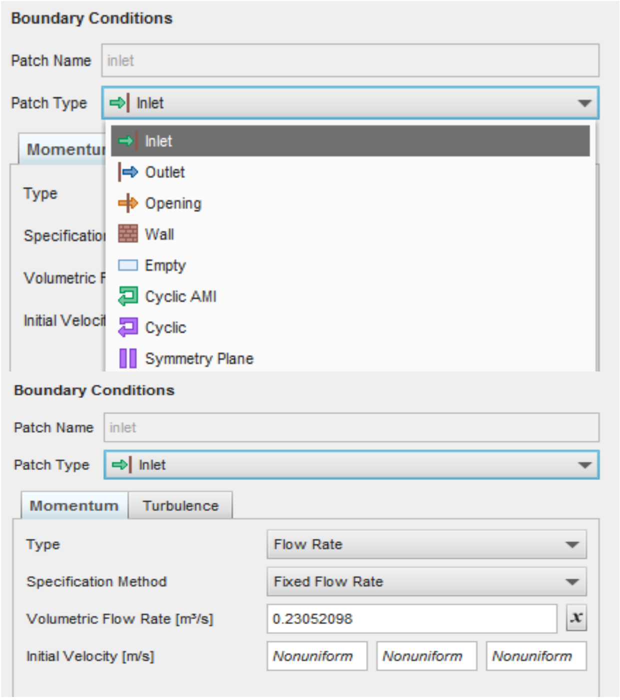
# 3D 덕트의 Adjoint 최적화

## ◈ CFD 및 위상 최적화 조건 설정

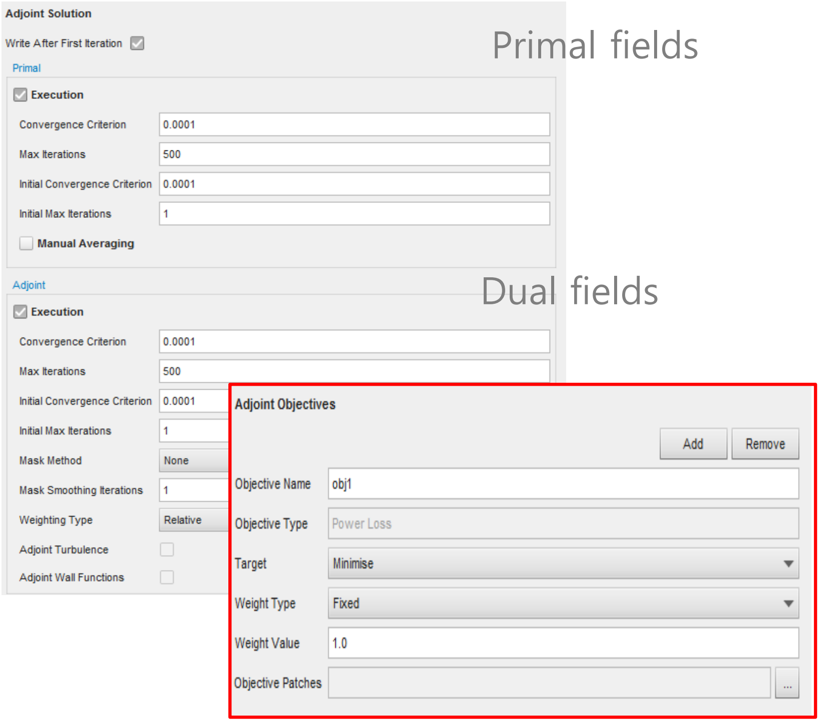
솔루션 설정




경계조건 설정




최적화 설정




목적 함수 선택

# 3D 덕트의 Adjoint 최적화

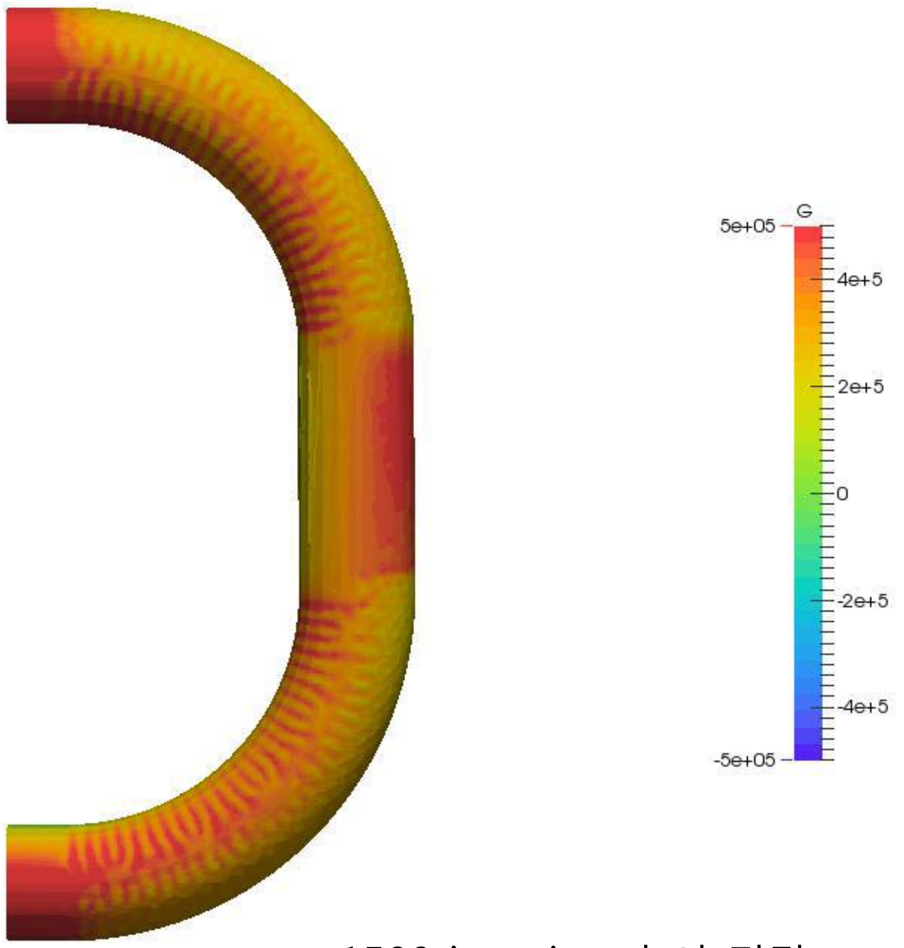
## ◈ 위상 최적화 해석 결과

민감도 계산 결과
내향변형 불가.

차압 개선하기 위하여
외향변형 요구.

⇩

형상 최적화 수행

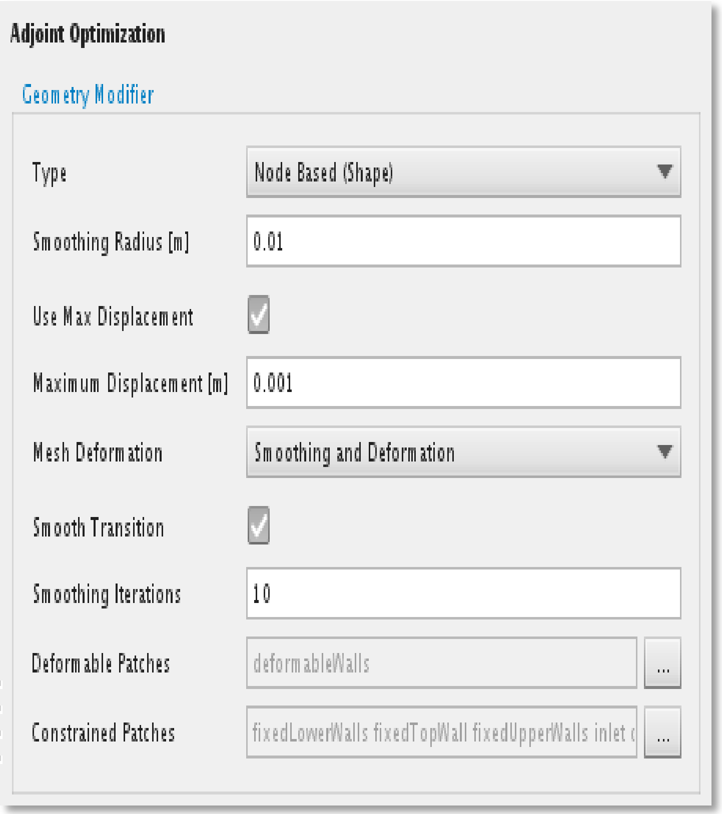


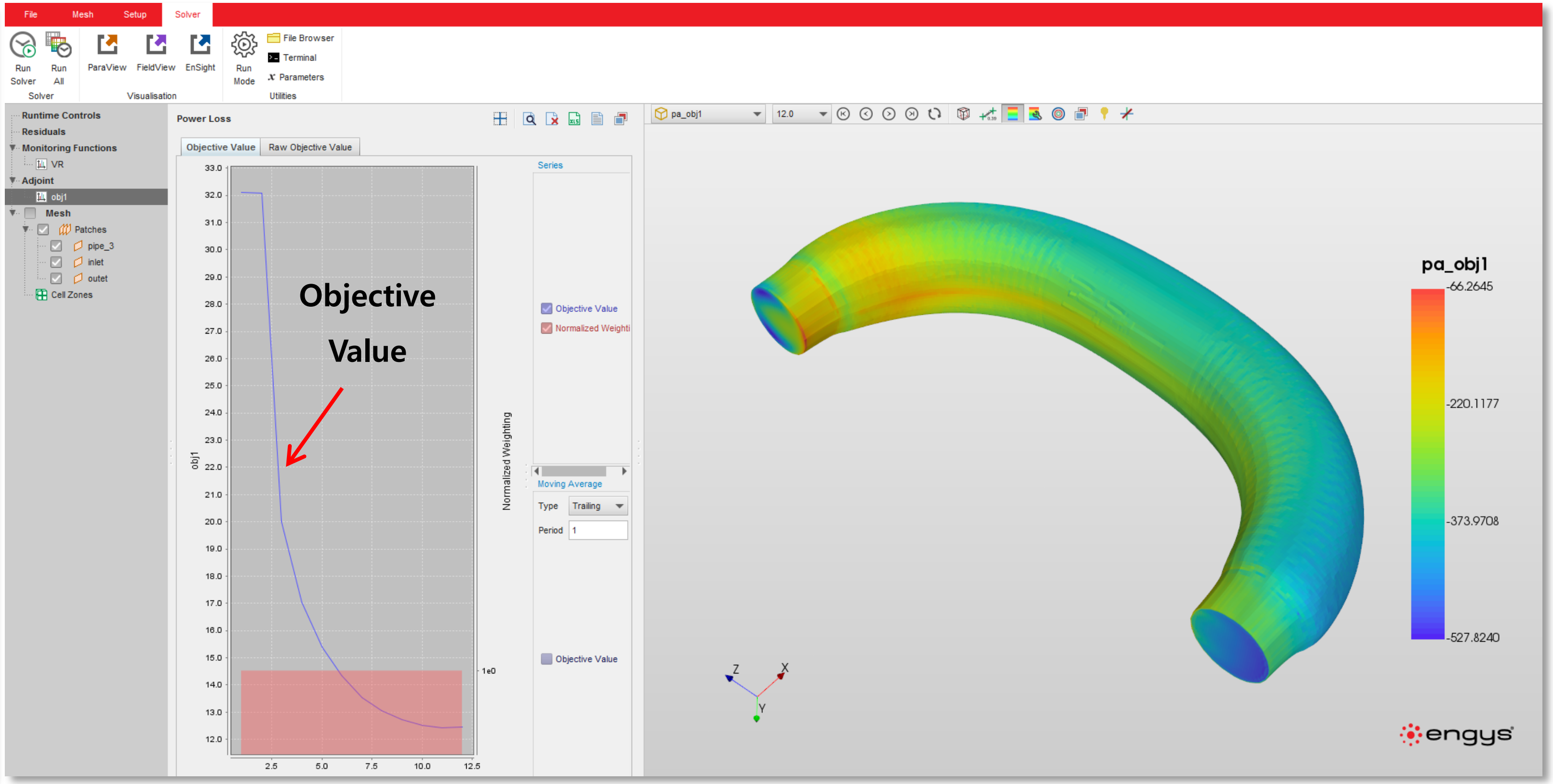

1500 iteration 후의 민감도

# 3D 덕트의 Adjoint 최적화

## ◈ 형상 최적화(Shape Optimization) 수행

› Node-based Deformation 기법 (HELYX Geometry modifier 적용)

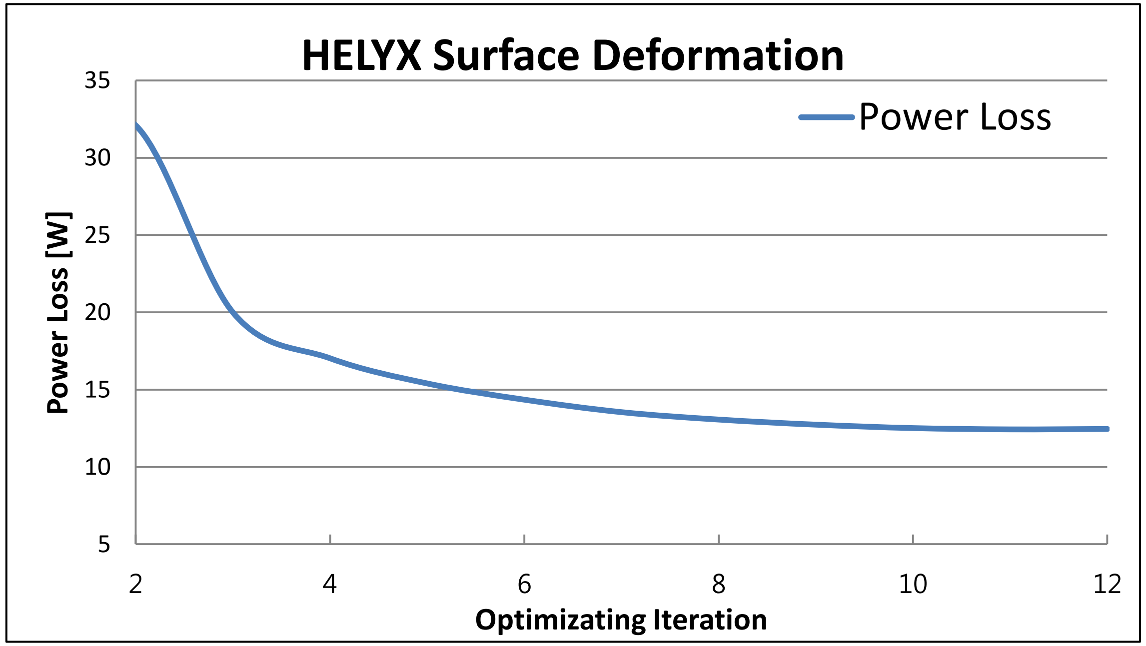


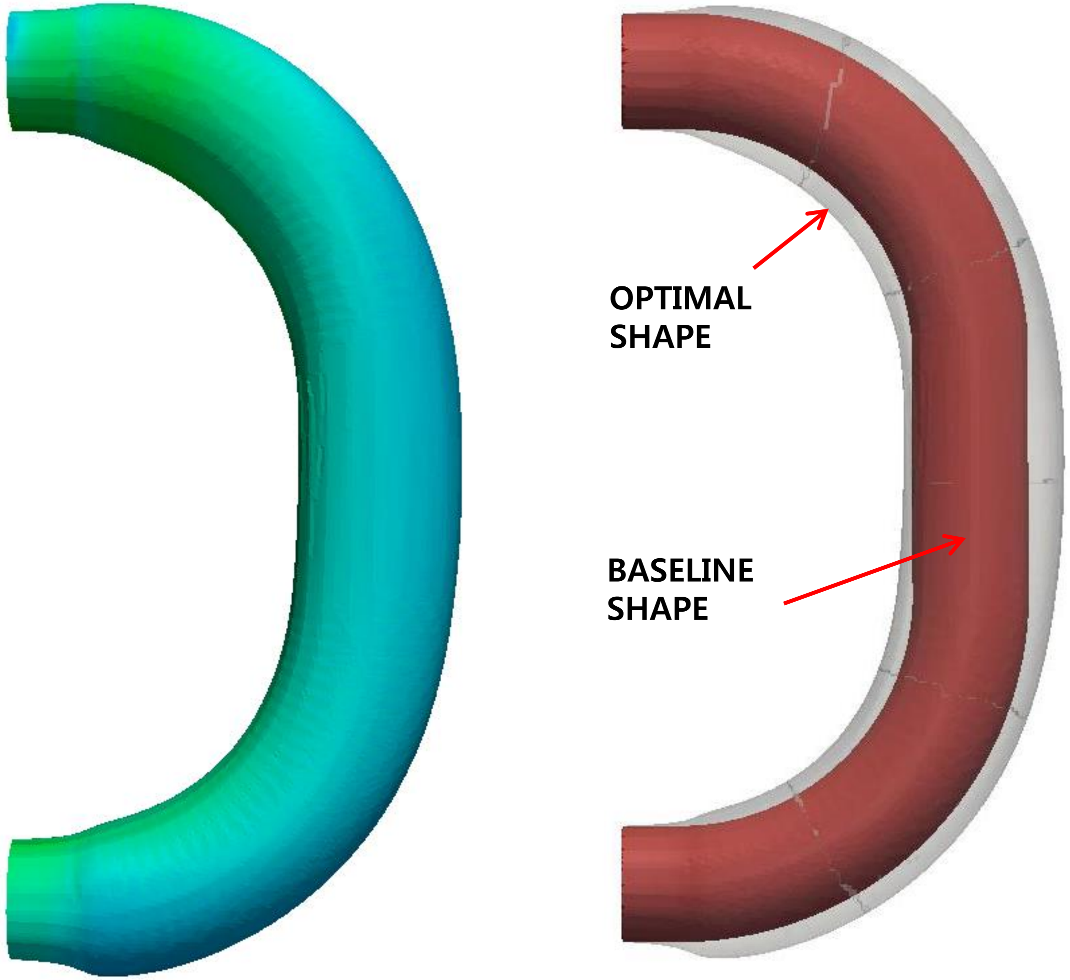



# 3D 덕트의 Adjoint 최적화

## ◈ Helyx-Adjoint 최적화 결과

- 파이프 내 압력손실 최소화
- Power loss ≈ +50% 개선



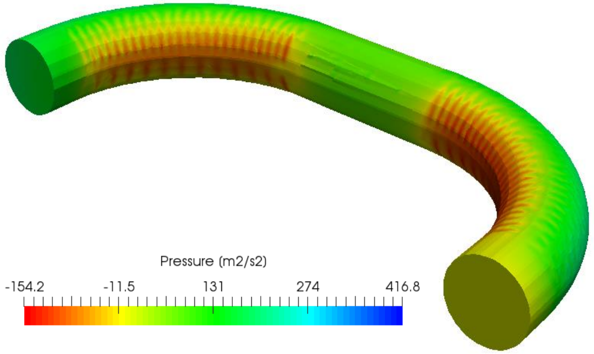
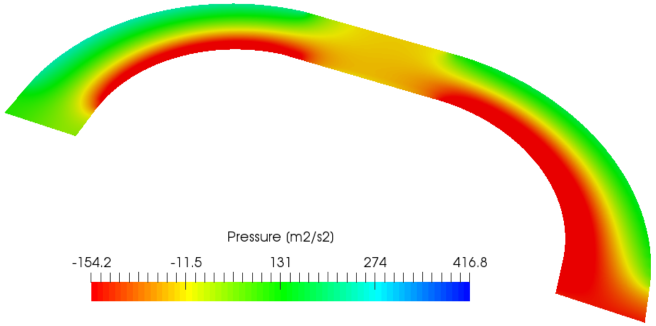
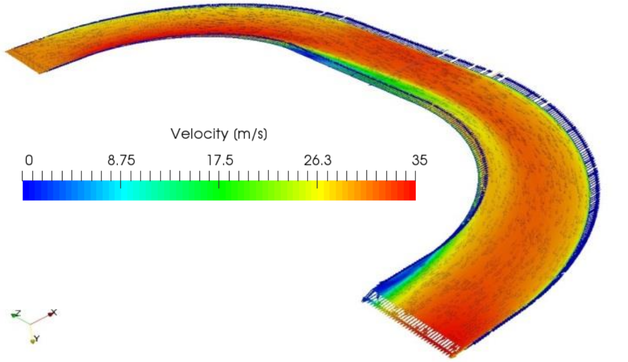
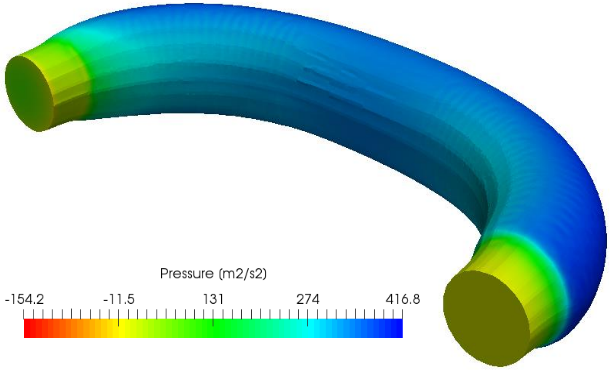
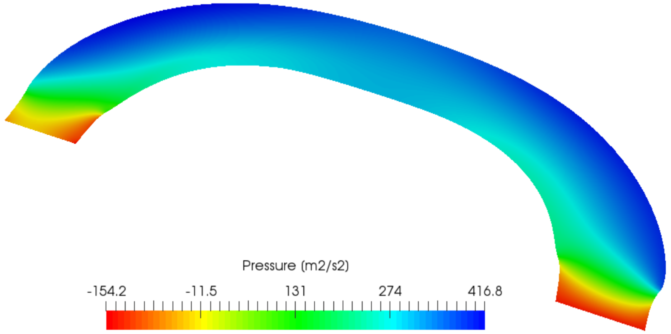
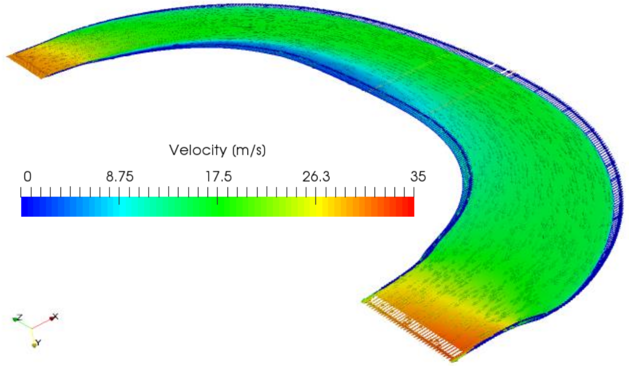






EMPIAS 엠피어스 Innovative Engineering Systems

# 3D 덕트의 Adjoint 최적화

## ◈ HELYX-Adjoint 최적화 결과

| 분 류 | 압 력 분 포 | | 속도분포 |
|---|---|---|---|
| 최적화 전 |   |   |   |
| 최적화 후 |   |   |   |

# 3D 덕트의 Adjoint 최적화

## ◈ HELYX-Adjoint 최적화 결과(변형모션)





EMPIAS 엠피어스
Innovative Engineering Systems

# 3D 덕트의 Adjoint 최적화

## ◈ 총 해석 소요시간

› 형상 ->최적화 형상(출력파일 ▶ STL 파일)

› Intel XEON E5-2690V2 cluster 12 core, Memory 24GB

| Type | | CPU-hours | Man-hours |
|---|---|---|---|
| CAD Repair | | 0 | 0 |
| Meshing | | 0.01 | 0.1 |
| Case Setup | | 0.1 | 0.1 |
| Calculated Computation | Topology | 1.6 | 0.005 |
| | Shape | 0.6 | 0.005 |
| Post-processing | | 0 | 1 |
| **Total Time(h)** | | **2.31** | **1.21** |

# 결 론

› HELYX-Adjoint는 ENGYS 고유의 최적화 기법

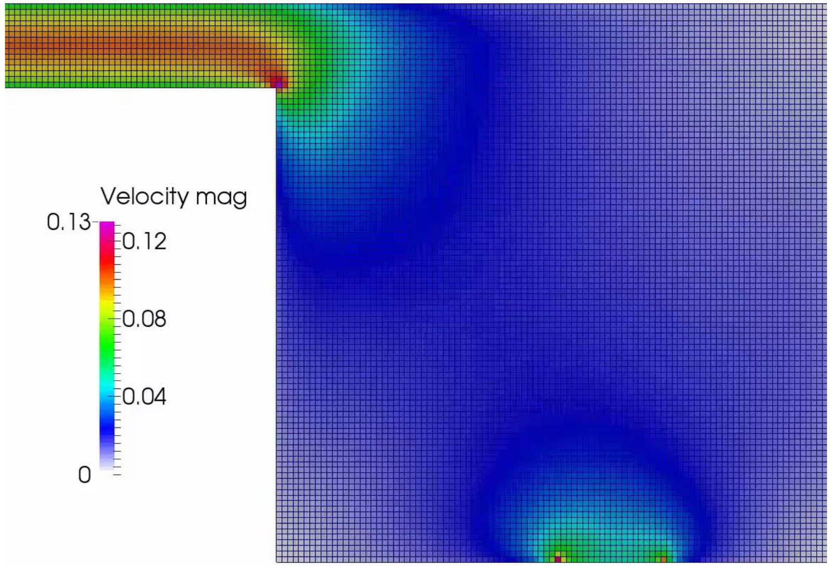
› 누구나 쉽게 사용할 수 있는 현실적 최적화 툴

› 정확하고 빠르게 다중 설계변수에 대하여 최적화

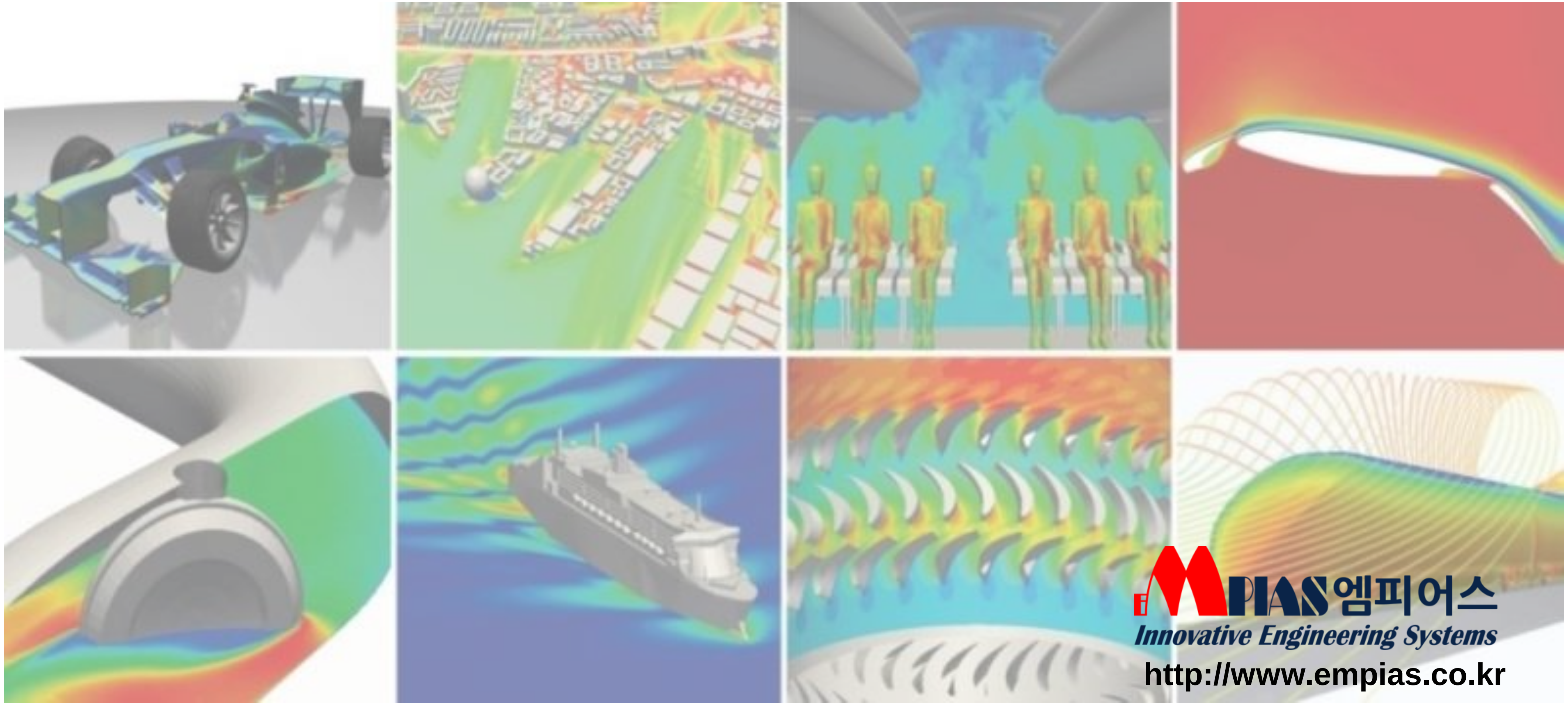
› 자유형 노드기반 변형 기법에 의한 자동 Surface Morphing

› 대규모 격자(200M 이상)에 수행 처리 가능

› 다양한 다 목적 함수 및 다중 제약 조건



# Questions?




Phone: 02-2042-8200(ext.201 )
e-Mail : syryu@empias.co.kr