

# 혼합 성능 최적화를 위한 반복 기반 설계

정량·정성 분석을 통한 실린더 형상 최적화 연구 및 고찰

전산유체역학(3274) 기말보고서

최건 202214139

2025년 6월 18일

지도교수 : 나양교수님

건국대학교 기계항공공학부

**Abstract :** 본 연구는 단일 실린더 내 연료-공기 혼합 성능을 향상시키기 위한 실린더 형상 최적화를 반복 기반 설계 접근을 통해 수행하였다. 초기 형상에 대해 피스톤의 실제 운동을 반영한 동적 격자 시뮬레이션을 구현하고, 수렴성을 고려하여 해석 조건을 설정하였다. 이후 포트 각도 및 위치를 변수로 설정한 복수의 설계안을 정량·정성적으로 비교 분석하였다. 최종적으로 가장 우수한 혼합 특성을 보이는 형상을 도출하였고, 반복적 해석을 통한 설계 접근의 타당성을 확인하였다.

## Index

### 1. Introduction

### 2. Baseline Model Development

#### 2.1 CAD Modeling(Initial Design)

#### 2.2 Meshing and Grid Independence

#### 2.3 Numerical Setup

### 3. Baseline Model Analysis

#### 3.1 Problem 1 (Streamlines & Mass fraction)

#### 3.2 Problem 2 (Fuel Distribution)

### 4. Design Iteration and Optimization

#### 4.1 Alternative Geometry Cases

#### 4.2 Qualitative and Quantitative Comparison

#### 4.3 Final Geometry Selection

### 5. Conclusion

### 6. References

## 1. Introduction

본 프로젝트는 반복 기반 설계를 통해 연료-공기 혼합 성능을 최적화할 수 있는 포트 형상을 도출하는 것을 목적으로 한다. 분석 대상은 단일 실린더 내 흡입 행정 구간(TDC~BDC)으로 한정하였으며, 초기 형상에 대한 해석을 기반으로 포트 각도와 위치를 변수로 설정한 복수의 형상을 비교 분석하였다. 각 설계안은 정량적·정성적 지표를 통해 평가되며, 이를 통해 최적 형상을 단계적으로 도출하는 설계 프로세스를 구축하였다.

## 2. Baseline Model Development

### 2.1 CAD Modeling(Initial Design)

설계인자	치수
보어(Bore)	83 mm
스트로크(Stroke)	90 mm
흡기 포트 직경	28 mm
흡기 포트 개수	1 EA
흡기 포트 각도	20°
밸브 헤드 직경	29 mm
밸브 깊이	10 mm
연료 포트 개수	2EA
연료 포트 각도	25°
연료 포트 직경	2.5 mm
하단 Tip 두께	1 mm

Table 1. Cylinder Geometry 치수

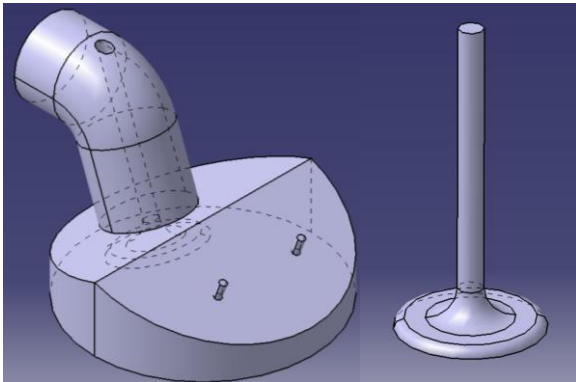


Fig 1. Initial Model & Intake valve (CATIA V5 R20)

### 2.2 Meshing and Grid Independence

#### 2.2.1 Mesh Generation

##### 1) Global Sizing

메쉬의 전반적인 해상도 설정은 Ansys Meshing 25R.1에서 제공하는 최대 메쉬 수 제한을 고려하면서 최대한의 해상도를 얻기 위해 최대 메쉬 크기를 1.5e-3m의 크기로 설정하였다

##### 2) Edge Sizing

Intake Valve 말단 부근의 유동 박리와 복잡한 유동을 정밀하게 해석하기 위해 해당 모서리에 Edge Sizing 5e-4 m를 적용하여 국

부 해상도를 향상시켰다.

##### 3) Contact Sizing

분할된 형상에 대해 생성된 interface에 대해 Contact Sizing – Resolution = 4(default)를 설정하였다. 이를 통해 Fine mesh인 fuel port에서 상대적으로 coarse mesh인 Cylinder Head 사이에 부드러운 전환이 이루어지도록 설정하였다.

##### 4) Inflation

유체와 벽 경계층에서의 흐름을 정확하게 분석하기 위해 흡기 포트, 밸브, 실린더 헤드에 대해 Prism Layer를 생성하였다.

Smooth transition	0.272(default)
Growth Rate	1.1
Maximum Layers	3

Table 2. Prism layer mesh settings

##### 5) Face Sizing

Hex와 Tet 격자를 사용하는 실린더 바디와 헤드 사이의 원활한 연결과 해상도 제어를 위해 접촉면에 Face Sizing을 적용하여 메쉬 전환 품질을 확보하였다.

#### 2.2.2 Grid Independence

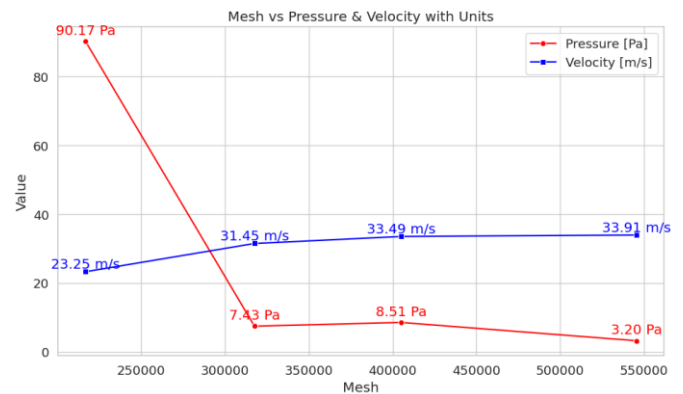


Fig 2. Grid independence: Pressure & Velocity

유속 변화가 큰 지점 중 하나인 (0, -0.001, 0.013)에서 관측한 결과, 약 45만 개 이상의 격자부터 해가 점차 안정화되는 경향을 보였다. 다만, 전체 격자 수가 충분하지 않아 수렴 여부를 명확히 판단하기에는 제한이 있다.

#### 2.3 Numerical Setup

##### 2.3.1 Solver Setup

항목	설정값	비고
Solver Type	Pressured-based	최대 유동 속도 약 105m/s따른 $MA < 0.3$ -> 비압축성 가정
Time	Transient	Dynamic Mesh 고려
Velocity	Absolute	절대 유동장 해석 적절

Table 3. Solver Setup

### 2.3.2 Turbulence Model

Model	Features
Realizable $k-\epsilon$	개선된 $k-\epsilon$ , $y^+ < 300$
$SST\ k-\omega$	벽 근처 정밀, $y^+ \approx 1$ 요구

Table 4. Features of Turbulence Models

난류 모델로 Realizable  $k-\epsilon$ 를 채택하였다. 기존 Standard  $k-\epsilon$  모델은 회전(swirling) 및 박리(separation) 유동의 예측 정확도가 낮고, 복잡한 내부 유동을 포착하는 데 한계가 있다. 이에 반해 Realizable  $k-\epsilon$  모델은 개선된  $\epsilon$  방정식과 물리적 제약 조건을 통해 보다 정확한 유동 해석이 가능하며, 수렴 안정성이 높고 계산 자원 소모가 적다. 또한 벽함수를 사용하여  $y^+ \geq 30$ 에서도 유효하게 작동하므로 현 상황 제한된 격자에서 유용하다

Near-Wall Treatment	Features
Standard Wall Functions	$y^+ > 30$ , 계산 효율 높음
Enhanced Wall Treatment	넓은 $y^+$ 범위제공, 낮은 $y^+$ 에서 직접해석해 높은 정확도

Table 5. Features of Near-Wall Treatment

벽 근처 유동 해석의 정확도를 높이기 위해 Enhanced Wall Treatment (EWT)를 적용하였다. EWT는 단순한 벽 함수(Standard Wall Function)보다 복잡한 벽면 유동 구조에 더 적합하며, 이를 통해 전단 응력 및 난류 전개 양상의 예측 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

#### 1) Solution Method

본 해석에는 압력-속도 결합 방식으로 SIMPLE 알고리즘을 적용하였다. 해당 방식은 계산 비용이 낮고, 본 프로젝트에서 충분한 수렴성을 보여 적합하다고 판단하였다.

#### 2) Spatial Discretization(공간 이산화)

공간 이산화에는 운동량, 에너지, 종분율 항에 Second-Order Upwind Scheme을 난류에너지와 난류소산율에 First Order Upwind Scheme을 사용하였다. 이 기법은 제트 유입, 혼합 경계 등에서의 급격한 기울기를 정밀하게 포착하고, 수치 확산을 억제하는 데 효과적이다. 수렴의 어려움으로 난류 메시드는 First Order Upwind를 사용하였다.

#### 3) Initialization

초기 조건 설정에는 Hybrid Initialization을 적용하였다. 연료와 공기의 다성분 유입, 복잡한 경계 조건, 이동 경계(피스톤) 등을 고려할 때, Standard Initialization만으로는 물리적 일관성과 초기 수렴 안정성을 확보하기 어렵다. 이에 따라, 도메인 전체에 물리 기반 초기장을 보다 안정적으로 부여할 수 있는 Hybrid 방식을 선택하였다.

Scheme	Simple
Spatial Discretization	2 <sup>nd</sup> Upwind
Initialization	Hybrid

Table 6. Summary of solver scheme and numerical settings

### 2.3.3 Boundary Conditions

	Inlet_Air	Inlet_Fuel
Mass flow rate	0.019055kg/s	0.000648kg/s
Mass fraction	Air : 1, $C_8H_{18}$ : 0	Air : 0, $C_8H_{18}$ : 1

Table 7. Mass flow Inlet Boundary Conditions

본 해석에서는 연료로 기화된 n-octane ( $C_8H_{18}$ )을 사용하고, 공기와의 비반응 혼합을 가정하였다. Inlet Type은 이론적인 당량비(stoichiometric ratio) 설정 및 연-공기 혼합비 제어가 용이한 mass flow rate 방식으로 지정하였다.

### 2.3.4 Turbulence Boundary conditions

Specification method	Features
Intensity and viscosity Ratio	-간단하지만 물리적 기반이 약함. -자동 설정에 자주 사용됨
Intensity and Hydraulic Diameter	-직관적인 값 설정 가능

Table 8. Features of Turbulence Boundary Condition Methods

Intensity and Hydraulic Diameter를 선택하였다. 형상 기반의 물리적 입력을 반영할 수 있어, 복잡 유로에서의 유동 특성을 고려할 때 정밀도와 신뢰성이 상대적으로 높다고 판단하였다.

### 2.3.5 Calculation Setup

Time step 수	180개
Time step size	0.0001041667 s
Max iteration	100
residual criteria	1e-12

Table 9. Calculation Setup

Time step 수는 Crank Angle기준  $1^\circ$  간격으로  $180^\circ$ 까지 해석을 수행하였기 때문에, 총 180 step으로 설정하였다. 각 step의 계산이 설정한 반복 횟수 이전에 종료되지 않도록, residual 기준값은  $1 \times 10^{-12}$ 로 충분히 엄격하게 설정하였다.

### 2.3.6 Residuals Convergence

초기 단계의 계산 안정성을 고려하여, 첫 번째 time step에서는 initialization 값이 해에 충분히 가까운 값을 제공하지 않을 가능성을 반영해 200 iteration까지 수행하였다. 이를 통해 잔차 감소율이 0에 수렴함을 확인한 후, 2번째 step부터는 100 iteration으로 설정하여 전체 계산을 진행하였다.

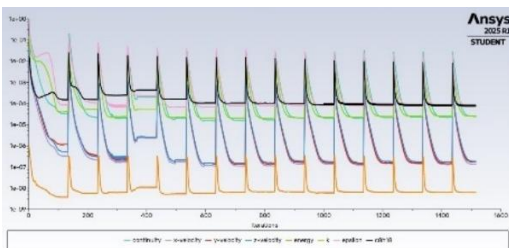


Fig 3. 초기 모델 Residuals(Ansys Fluent 25R.1)

### 2.3.7 Dynamic Mesh Settings

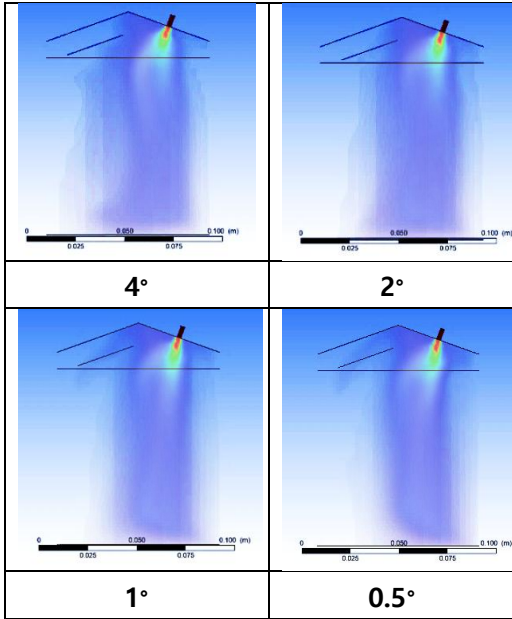


Fig 4. Comparison of mass fraction by crank angle step size

Intake valve 부근(그림기준 좌측 상단)의 연료 분포는 1°와 0.5° 시뮬레이션에서만 관찰되었으며, 두 경우 모두 분포 형태가 유사하게 나타났다. 반면, 다른 조건에서는 해당 영역에 연료 분포가 거의 존재하지 않았다. 이를 통해 1°에서도 물리적 현상이 충분히 구현됨을 확인하였고, 계산 효율성을 고려해 1°를 최종 타임스텝으로 선정하였다.

Dynamic Mesh Final Settings	
Method	Layering
Crank shaft speed	1600 rev/min
Angle step size	1°
Connecting Rod	0.16 m
Crank Radius	0.045 m
Starting Crank Angle	0
Crank Period	720

Table 10. Dynamic Mesh Settings

본 해석은 In-Cylinder 모델 기반의 Dynamic Mesh 기법을 사용하여, 피스톤 하강에 따른 체적 변화와 유동장을 모사하였다. Dynamic Mesh 설정을 위해 실린더 하단 면은 piston, 측면 벽은 deforming wall로 지정하였으며, 계산 안정성과 mesh 움직임 확보를 위해 실린더 하단 tip의 간격은 1.5 mm로 설정하였다.

### 3. Baseline Model Analysis

#### 3.1 Problem 1 (Streamlines & Mass fraction)

Fig. 5를 통해, Streamline 상에서 회전 유동이 형성된 영역에서 연료 혼합이 일부 이루어진 양상이 관찰되었다. 그러나 Mass Fraction 분포는 연료가 흡기 유동과 충분히 결합하지 못하고 한쪽으로 치우치는 경향을 보였으며, 이는 설계상의 분사 위치 또는 방향에 구조적 문제가 존재할 가능성을 시사한다.

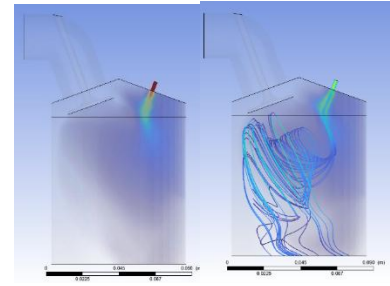


Fig 5. Streamlines & Mass fraction Contour(CFD-POST 25R.1)

#### 3.2 Problem 2 (Fuel Distribution)

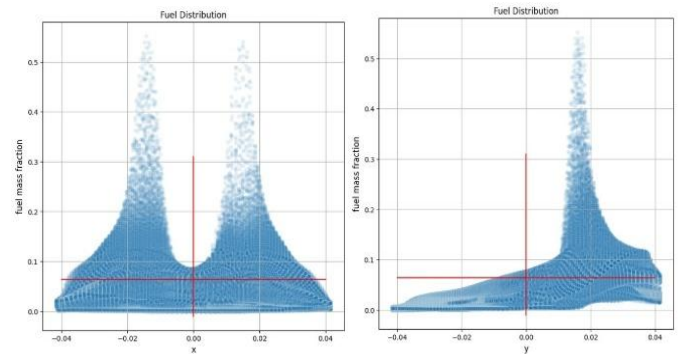


Fig 6. Fuel Distribution (XZ / YZ view)

연료 포트를 한쪽에 편중 배치할 경우, 연료가  $xz$ 평면( $y = 0$  기준)을 중심으로 고르게 분포되지 못하는 경향이 나타나며, 이는 혼합 균일성을 저해한다고 판단하였다.

### 4. Design Iteration and Optimization

#### 4.1 Alternative Geometry Cases

혼합 성능 저하의 원인을 개선하기 위해, 연료 포트 위치, 분사 각도, 밸브 형상을 중심으로 설계를 단계적으로 변경하였다. 설계는 유동 가속, 전단 교반, 유입 경로 최적화를 목표로 진행되었으며, 각 모델은 이전 단계의 결과를 바탕으로 점진적으로 개선되었다.

##### 4.1.1 Model 1

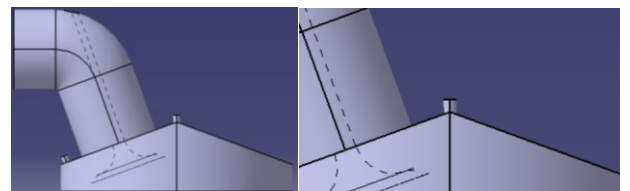


Fig 7. Model 1( CATIA V5 R20)

연료 포트를 흡기 포트의 전방과 후방에 각각 배치하였으며, 혼합 성능 최적화를 위해 흡기 포트 각도를 10°, 15°, 20°, 25°, 30°로 단계적으로 변경하여 유동 해석을 수행하였다.

※ 해당 해석 결과, 흡기 각도 20° 조건이 가장 합리적인 유동 특성을 보였으며, 이에 대한 정성 평가는 4.2절에서 후술한다

#### 4.1.2 Model 2,3

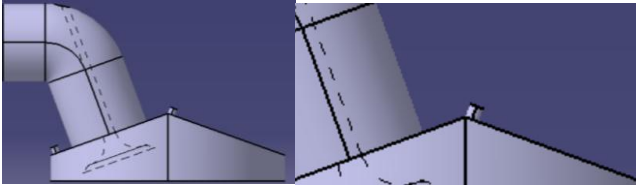


Fig 8. Model 2

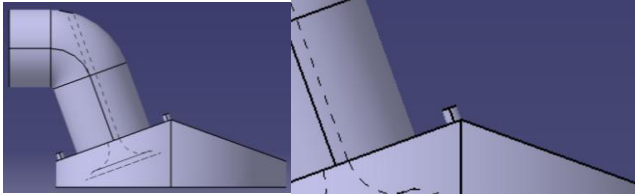


Fig 9. Model 3

Model 2, 3는 모두 흡기 포트 각도를 20°로 고정한 상태에서, 연료 분사 방향이 혼합에 미치는 영향을 평가하기 위해 설계되었다. Model 2과 Model 3에서는 각각 우측 20°, 좌측 20°로 분사 각도를 조정하여 연료가 실린더 중심부를 향해 유입되도록 유도하였다. 이는 앞선 모델에서 관찰된 중심부 확산 부족 문제를 개선하기 위한 시도로, 분사 방향 변화가 유동 구조 및 혼합 특성에 미치는 영향을 비교하고자 하였다.

#### 4.1.3 Model 4

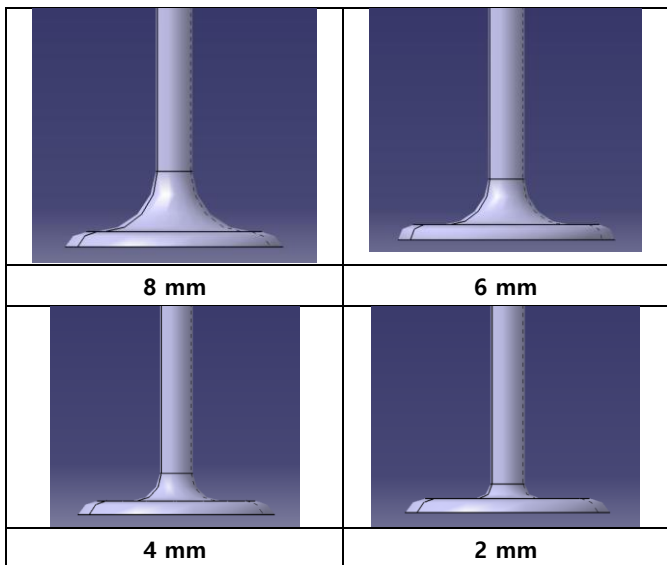


Fig 10. Valve(곡률 R8, R6, R4, R2)

흡기포트 20도, 중앙 연료포트 수직분사(Model1)기준으로 밸브 형상이 유동에 미치는 영향을 분석하기 위해 Model 4를 설계하였다. Model 4에서는 헤드 직경은 29 mm로 축소하고, 밸브 스템 곡률 반지름을 8 mm, 4 mm, 2 mm로 변경하면서 형상 변화가 유동 구조 및 혼합 성능에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

※ Model 2 및 Model 3의 정량 및 정성 평가 결과, Model 1이 상대적으로 우수한 성능을 보였기에 이를 기준으로 위 모델을 설정하였고, 이에 대한 비교는 4.2절에서 후술한다.

#### 4.1.4 Model 5

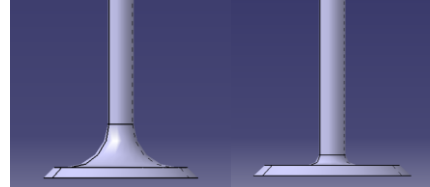


Fig 11. Model 5 (좌측부터 8 mm, 2 mm 챔퍼)

추가적으로 생산 원가 절감의 측면에서 밸브 헤드를 챔퍼처리하여 계산을 수행하였다. 밸브 스템 반지름 8 mm, 2 mm에 대해서 헤드를 45도 각도로 깎아내었다.

### 4.2 Mixing Performance Comparison

개선 전 모델에서의 문제점을 바탕으로, 개선 후 모델들은 다음의 정성 및 정량 평가를 기준으로 혼합의 정도를 판단하기로 하였다.

#### 4.2.1 Quantitative Evaluation

##### 1) Optimal Fuel Ratio(연료 적정 비율)

$$\text{적정비율 } \sigma = \frac{\sum_i \bar{V}}{\sum_i V} \times 100 (\%)$$

이상적인 혼합비 범위(예:  $\pm 5\%$ ) 내에 존재하는 부피의 비율을 나타내며, 균일한 연료-공기 혼합이 이루어진 공간적 분포의 정도를 직관적으로 반영한 정의이다.

$\sigma$ 수준	Features
High $\sigma$	균일하고 안정된 혼합상태
Low $\sigma$	혼합 불균일(국부적 과농/과공상태), 연소 가능성 저하 가능

Table 11. 적정비율( $\sigma$ ) 수준별 혼합 특성

##### 2) RMSE of Mixing Ratio

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_i (f_i - f_{ideal})^2}}{N}$$

RMSE(Root Mean Square Error)는 각 지점에서의 연료 질량 분율  $f_i$ 이 이론적인 이상 혼합 상태  $f_{ideal}(1/15.7)$ 와 얼마나 오차를 갖는지를 평가하는 지표로 혼합의 이상적 상태에 따른 공간적 수렴도를 정량적으로 평가할 수 있다.

RMSE 값	Features
RMSE ↓	대부분의 셀이 이상값에 근접, 혼합이 고르게 이루어짐
RMSE ↑	연료 분포의 편차가 크고 불균일함

Table 12. RMSE 평가 기준



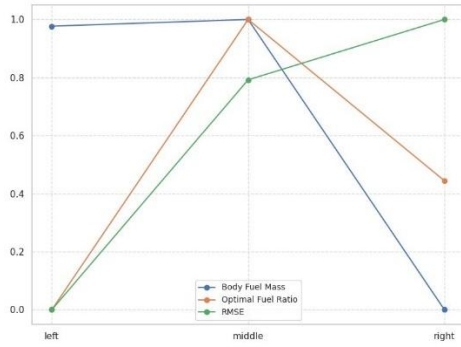


Fig 12. Model 1,2,3 대해 정규화한 정량 지표

중앙 연료 포트가 수직(Middle)일 경우, RMSE가 가장 낮고, Body Fuel Mass 및 Optimal Fuel Ratio가 가장 높게 나타나 혼합 균일성과 연료 분포 효율 측면에서 가장 우수한 구성으로 판단되었다.

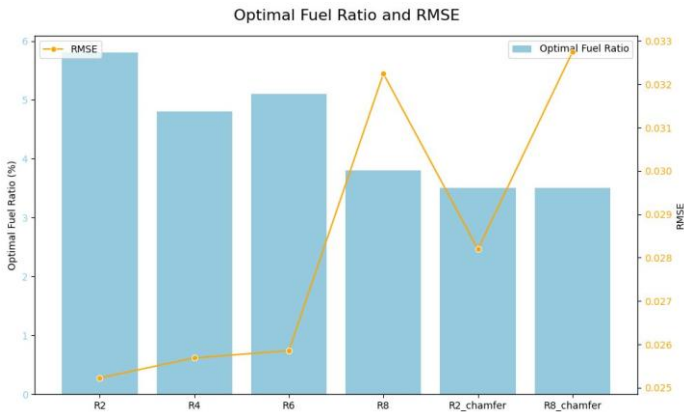


Fig 13. Model 4,5 에 대한 정량 지표

Fig 12 에서 선정된 중앙 연료 포트 기준 모델을 바탕으로, 밸브 스템 곡률 반지름을 변화시킨 결과, 2 mm 곡률 반지름(R2) 모델이 가장 낮은 RMSE와 Optimal Fuel Ratio를 보여 혼합 균일성이 가장 우수한 모델로 판단되었다.

#### 4.2.2 Qualitative Evaluation

##### 1) Vortex Core Region

본 해석에서는 swirl 및 tumble과 같은 회전 유동 구조를 시각화하기 위해, Swirling Strength 기반의 Vortex Core Region 분석을 수행하였다. Vortex Core Region은 회전 중심이 존재하는 영역만을 추출하여 등치면으로 표시하는 기법으로, 그 중 Swirling Strength는 속도장의 실제 회전 중심(core)을 기준으로 회전 영역만 선별하기 때문에, 전단 성분까지 포함하는 Q-criterion보다 swirl/tumble 식별에 더 효과적이다

Method	Features
Swirling Strength	순수 회전만 추출, swirl/tumble 식별에 적합,
Q-criterion	회전 > 변형 영역 추출, 전단 포함, 회전 영역 넓게 표현

Table 13. Vortex Core Region Settings

Core 시각화는 Swirling Strength 값이 설정 임계값(Level) 이상인

영역을 등치면(isosurface)으로 표시하는 방식이며, 모델 간 비교의 일관성을 위해 절대 임계값 Level = 0.006[1/s]를 고정 적용하였다. Core 주변의 유동 방향과 강도 분포를 통해 swirl 및 tumble 형성 여부, 그리고 혼합 유도 가능성이나 국부 정체 영역(dead zone) 등을 정성적으로 유추할 수 있을 것으로 기대되며, 이를 바탕으로 혼합 특성 비교에 활용하였다.

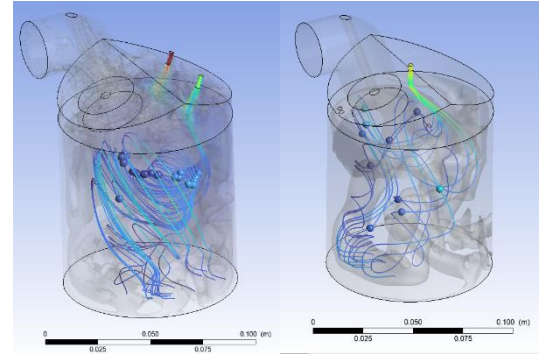


Fig 14. 초기모델, 개선모델(R2) Vortex Core region

개선 이전 모델에서 오히려 더 풍부한 회전 구조(core 영역)가 형성되어 있는 것으로 나타났다. 그러나 해당 모델은 정량적 지표(RMSE, Mass Fraction)에서 개선 모델보다 혼합 품질이 낮은 결과를 보였다. 이는 Vortex Core Region 분석이 swirl/tumble 등 회전 유동 구조의 형성과 위치 분석에는 효과적이지만, 혼합 균일성 자체를 정량적으로 평가하기에는 한계가 있음을 시사한다. 따라서 본 해석에서는 정성 평가 지표 단독 해석에 의존하기보다는, 정량 지표와의 상호 비교 및 보완적 해석을 병행하는 방향으로 접근하였다.

##### 2) Streamlines

Streamline은 유체 입자의 순간 유동 방향을 선으로 시각화한 것으로, swirl, tumble, 재순환, 전단층 등 주요 유동 구조를 직관적으로 파악하는 데 효과적이다. 특히 실린더 내 혼합 성능의 시각적 평가에 유용한 도구로 활용된다.

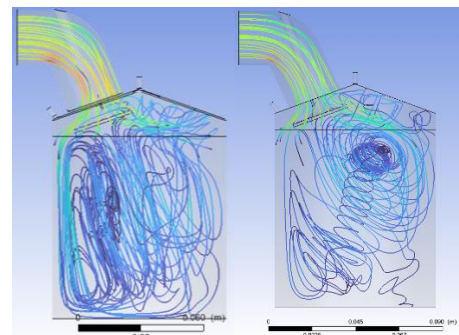


Fig 15. 20°(Best), 25°(Worst) Streamlines by CFD-POST 25R.1

Model 1의 Streamline 분석 결과, 흡기포트 20°에서 가장 안정적인 회전 구조가 형성되어 혼합 유도에 유리하다고 판단하였고, 후속 모델의 기준 조건으로 선정하였다.

##### 3) Mass fraction

Mass Fraction은 연료가 전체 혼합물에서 차지하는 질량 비율로,

혼합의 균일성, 확산 범위, 분포 편향 등을 직관적으로 판단할 수 있다.혼합이 잘된 경우, Mass Fraction 분포가 넓고 고르게 형성되는 특성을 보인다.

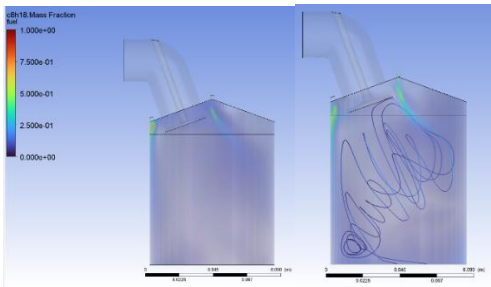


Fig 16. Model 1(흡기포트 20°, 중앙 연료포트수직) Mass fraction

Mass Fraction 분포는 시각적으로 혼합이 균일하게 이루어진 것으로 보이며,Streamline 분석을 통해 회전 유동과의 연계성도 확인할 수 있었다.

#### 4) 2D Vector Fields

2D 벡터장 분석은 복잡한 3차원 유동장을 절단면 기준으로 시각화하여, swirl 및 tumble과 같은 회전 유동 구조를 직관적으로 해석할 수 있는 보조 수단이다.특히 재순환 영역, 소용돌이 형성, 유동 비대칭성 등을 통해 회전 유동의 형성과 발달 양상을 파악할 수 있으며,이러한 특성은 포트 형상이나 유입 조건 변화에 따른 혼합 성능 차이를 정성적으로 비교하는 데 유용하다.

후술할 Fig. 17에서 보이듯, 회전 유동의 방향성과 발달 양상은 streamline 형성과 유사하게 나타나며,streamline은 연료 분포와 일정한 상관관계를 가지기 때문에,2D 벡터장은 정량 해석과 연계 가능한 보조 지표로 활용될 수 있다. 다만, 2D 벡터장만으로는 전체 유동장의 정량적 평가에 한계가 있으므로, 본 해석에서는 Mass Fraction, RMSE,  $\sigma$  등과의 공간적 상관성 분석을 병행하여 타당성을 확보하였다.

본 해석에서는 ZX및 YZ 두 수직 단면을 활용하여 유동 구조를 정성적으로 비교하였다.임의 단면 설정에 따른 해석 결과의 주관성을 줄이기 위해 수평 절단면(XY)은 제외하였다.

수직 단면	확인가능한 유동 특성
ZX 단면	공기 유동 방향성, -Z 방향 유도 여부, 좌우 유동 대칭성, bulk motion 형성 양상
YZ 단면	연료 분사축 정렬, 포트 구조,재순환 형성, 중심 유동 분포

Table 14. 절단면 유형별 유동 특성

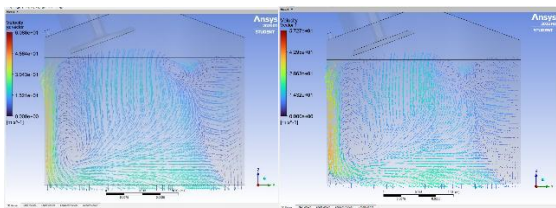


Fig 18. R2 Filet Model, R2 Chamfer Model (YZ View)

Fig. 18의 YZ 단면 벡터장 비교 결과, 두 모델 간 유동 구조는 전체적으로 유사하며, 시각적 차이는 제한적으로 나타났다.일부 영역에서 회전 유동의 세기나 유동 집중도에 차이가 관찰되었으나, 정성적 판단만으로 혼합 성능을 명확히 구분하기는 어려웠으며,보다 정밀한 분석을 위해 다른 절단면에서의 보조 평가가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

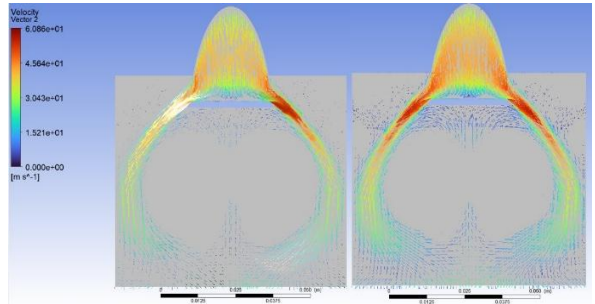


Fig 17. R2 Filet Model, R2 Chamfer Model (ZX View)

우측 Chamfer 형상은 공기 유동이 보다 -Z 방향으로 유도되면서, 내부 유동은 상대적으로 작은 bulk motion을 형성하게 되었고,이로 인해 혼합 유도 효과가 저하되는 경향이 나타났다.

#### 4.3 Final Geometry Selection

정성·정량 평가를 통한 최종 모델은 다음으로 선택하였다.

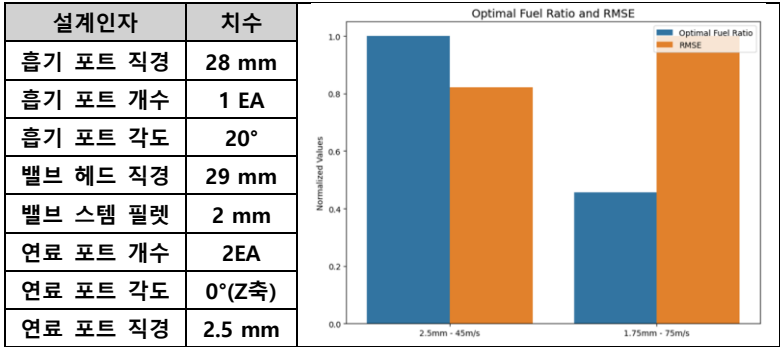


Table 15. 최종 모델 치수 & 연료 포트 직경 및 유속비교 그래프

추가적으로, 최종 선정된 R2모델을 기준으로 Fuel Port 직경을 축소하여 유입 속도를 증가시키는 실험을 수행하였다.이는 속도 상승이 혼합을 촉진할 수 있다는 가정을 검토하기 위함이었으나,해석 결과, 과도한 유속은 연료 분포의 불균형과 국부적인 혼합 저해 현상을 유발할 수 있음이 확인되었다.이에 따라 전체적인 혼합 안정성을 고려했을 때, 기존 직경인 2.5 mm를 유지하는 것이 더 적절하다고 판단하였다.

#### 5. Conclusion

최종 선정 모델과 유사한 실제 형상을 참고하고자 했으나, 흡기 포트 수와 제어 방식의 차이로 인해 직접적인 비교는 어려웠다. 다만, 과거 유사 형상 연구에서 20° 포트 각도가 가장 우수한 혼합 특성을 보였고, 수직 연료 포트를 적용한 양산 사례도 확인되어, 본 모델의 설계 타당성을 간접적으로 입증할 수 있었다.

## 6. Appendix

### 연료 공기 질량유량 계산방법

- 엔진 사양 : 1.999 L, 4기통 현대 LF 소나타 누 엔진
- 속도 : 80 km/h
- 연비 : 12 km/L
- 연료 밀도 : 0.7 kg/L
- 엔진 회전 수 : 1600 RPM
- 이론 공연비(AFR) : 14.7

정속 주행 시 초당 연료 소비량

$$: \dot{m}_{\text{fuel, total}} = \frac{80}{12} \cdot \frac{0.7}{4} = 3.2407 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$$

사이클 주기 계산

$$: 1600 \text{ RPM} = \frac{1600}{60} = 26.67 \text{ rev/s} = 13.33 \text{ cycle/s}$$

사이클당 연료 소비량

$$: \dot{m}_{\text{fuel, cycle}} = \frac{3.2407 \times 10^{-4}}{13.33} = 2.4306 \times 10^{-5} \text{ kg/cycle}$$

흡입 행정 시간 (TDC → BDC)

$$: \Delta t_{\text{intake}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{60}{1600} = 0.01875 \text{ s}$$

흡입 행정 동안 연료 질량 유량

$$: \dot{m}_{\text{fuel}} = \frac{2.4306 \times 10^{-5}}{0.01875} = 0.001296 \text{ kg/s}$$

공기 질량 유량 (AFR 기준)

$$: \dot{m}_{\text{air}} = \dot{m}_{\text{fuel}} \cdot 14.7 = 0.001296 \cdot 14.7 = 0.019056 \text{ kg/s}$$

<APPENDIX 1>

$f_{\text{ideal}} = 1/(1 + 14.7)$  : 이상적인 연료 질량분율

$f_{\text{ideal, max}} = 1.05 \times f_{\text{ideal}} = 0.0714$

$f_{\text{ideal, min}} = 0.95 \times f_{\text{ideal}} = 0.0646$  } Tolerance :  $\pm 5\%$

$\bar{V}$ : 연료 질량분율이  $f_{\text{ideal, min}}$ ,  $f_{\text{ideal, max}}$  사이인 부피

$V$ : 전체 부피

<APPENDIX 2>

$\text{Mass(kg)} = \sum_i^N (V_i, \rho_i, Y_{\text{fuel, i}})$

$N$ : 전체 셀의 수(총 계산 영역의 격자 개수)

$i$ : 셀 인덱스

$V_i$ : 셀  $i$ 의 체적(Volume)

$\rho_i$ : 셀  $i$ 의 밀도(Density)

$Y_{\text{fuel, i}}$ : 셀  $i$ 에서의 연료 질량분율(Fuel mass fraction)

<APPENDIX 3>

## 7. References

1. 배충식, 이재호, 오승목, 강건용. (1999). 4-밸브 SI 엔진에서 텀블, 스웰 유동의 영향에 따른 화염전파 과정. 한국자동차공학회논문집, 7(2), 50-58.
2. 이주형, 박성영, "소형엔진 흡기포트의 유동특성," 『2009년 한국산화기술학회 추계학술발표논문집』, pp. 520-525, 2009.