



GLOVE에서의 전산유체역학 데이터의 2차 변수 생성을 위한 시스템 설계 및 구현

The Design and Implementation for Generating Secondary
Variables of CFD Data in GLOVE

KISTI Technical Report

2020.11.

허영주

목차

1. 서론	1
2. 2차 변수 생성 기능	2
가. 정의	2
나. 2차 변수 생성의 필수 요소	2
1) Fluid Property	3
2) Reference Values	4
3) Field Variables	4
다. 기능 정의	5
1) Secondary Variables	6
2) Variable Derivatives	7
3) Integral Parameters	8
3. 소프트웨어 인터페이스 분석	9
가. EnSight	9
나. TecPlot	16
다. EnSight와 TecPlot의 인터페이스 비교	22
4. GLOVE의 2차 변수 생성 기능	24
가. 기능 설계	24
1) 기능 구현할 2차 변수의 범위	24
2) 2차 변수 생성 과정	28
3) 2차 변수 생성을 위한 서버 기능	29
4) 2차 변수 생성을 위한 클라이언트 기능	32
나. 2차 변수 생성을 위한 사용자 인터페이스	38
5. 결론	50

1. 서론

CFD 유동 해석 분야는 유체 현상을 기술한 방정식을 수치 기법을 적용한 알고리즘을 사용하여 해석하는 것으로, 컴퓨터를 사용하여 유체와 기체의 상호작용을 시뮬레이션하는 분야의 학문이다. CFD 계산 결과로 압력, 속도, 밀도 등의 다양한 변수를 생성할 수 있으며, 이런 변수간 상호 관계에 의해 새로운 변수를 계산할 수도 있다. 넓은 의미의 2차 변수는 이렇게 새로 생성된 모든 변수를 의미한다고 볼 수 있다.

이런 2차 변수는 변수의 종류에 따라 간단한 수식에서부터 복잡한 편미분 방정식에 이르기까지 다양한 수식을 적용함으로써 생성할 수 있다. 변수에 따른 다양한 알고리즘이 적용되며, 변수간 상호관계에 의해 필요 변수를 계산하면서 최종 변수를 생성할 수 있는데, 이 과정에서 많은 컴퓨팅 자원이 소요되기도 한다. 즉, 초기 데이터를 생성하는 것 이상의 자원과 노력이 소요되며, 특히 대용량 데이터의 변수 계산은 일반 PC 환경이 아닌 고성능 컴퓨팅 자원을 필요로 한다.

본 문서는 GLOVE 고성능 컴퓨팅 환경에서 2차 변수 생성 기능을 수행하기 위한 기능 및 인터페이스 설계를 다룬다. GLOVE는 고성능 컴퓨팅 환경에서 데이터를 효과적으로 분석하고 가시화하여 공유할 수 있게 하는 프레임워크로, 현재는 CFD 유동 해석 분야에 필요한 기능 및 인터페이스를 제공하고 있다. 특히 GLOVE는 high-end 사용자를 위한 가상현실 클라이언트와 일반 PC 사용자를 위한 클라이언트를 모두 제공하고 있는데, 여기에서는 PC 클라이언트를 위한 기능 및 인터페이스 설계를 다룰 것이다. 실질적으로 2차 변수 생성을 위한 입력을 수행하기에 가상현실 인터페이스는 부적절한 측면이 많기 때문에 PC 클라이언트에의 적용을 우선적으로 수행했다. 향후 가상현실 인터페이스에서 많은 입력을 편리하게 처리하는 방안이 마련된다면, 2차 변수 생성 기능을 가상현실 클라이언트에도 적용할 수 있을 것이다.

본 문서는 다음과 같이 구성된다. 본 문서의 2장에서는 2차 변수 생성에 관한 일반적인 정의와 기능 정의를 설명한다. 3장에서는 기존 CFD 가시화 소프트웨어의 인터페이스 분석에 관한 내용을 다루며, 4장에서는 GLOVE의 2차 변수 생성 기능/인터페이스 설계에 대해 다룰 것이다.

2. 2차 변수 생성 기능

가. 정의

2차 변수는 1차적으로 생성된 유동 데이터에 적절한 수식이나 알고리즘을 가해서 생성된 변수다. 이런 2차 변수는 간단한 수식에서부터 복잡한 편미분 방정식에 이르기까지 다양한 수식이나 알고리즘을 적용함으로써 생성할 수 있으며, 변수에 따라서는 고성능 컴퓨팅 자원을 필요로 하기도 한다.

넓은 의미로 2차 변수는 원 데이터를 가공해서 생성할 수 있는 모든 종류의 변수를 지칭한다. 일반적으로 유동 해석 분야에서는 압력, 밀도, 속도, 온도를 기본적으로 생성하고 이 값에 근거해서 그 외의 변수를 생성하는 계산을 수행한다. 이런 2차 변수를 생성하는 데는 필수 변수가 있으며, 이 필수 변수들은 fluid property, reference value, field variable로 구분할 수 있다.

일반적으로 많이 계산되는 2차 변수로는 각종 gradient, 변수의 max/min, Q-criteria, vorticity 등을 들 수 있다.

나. 2차 변수 생성의 필수 요소

2차 변수 생성에는 초기에 반드시 입력돼야 하는 필수 변수들이 있으며, 이 변수들은 fluid property, reference value, field variable로 구분할 수 있다. 2차 변수는 이 3가지 요소에 대한 입력을 토대로 생성할 수 있다.

1) Fluid Property

Fluid property는 시뮬레이션을 통해 생성된 원데이터 생성에 사용된 parameter 값을 나타낸다. 즉, 시뮬레이션 계산의 입력 parameter로, 2차 변수를 1차 변수와 동일한 입력조건에서 계산을 위한 요소다. 계산을 위한 입력 parameter로서의 fluid property 요소는 다음과 같다.

property	Name	Definition
Re	Reynolds Number	레이놀즈수
T_w	Wall Temperature	
Pr_L	Laminar Prandtl Number	0.72
Pr_T	Turbulent Prandtl Number	0.9
R	Ideal Gas Constant	287.15
γ	Ratio Of Specific Heats	비열비, 1.4
$\mu_{T,\infty}$	Freestream Eddy Viscosity	자유류 난류점성, 0.009
I_∞	Freestream Turbulence Intensity	자유류 난류강도 0.08
C_v	Constant-Volume Specific Heats	$R/(\gamma-1)$
C_p	Constant-Pressure Specific Heats	$\gamma R/(\gamma-1)$

2) Reference Values

Reference value로는 다음 값들을 필요로 한다.

- Mach number(M_∞)와 velocity(U_∞)중 택 1
- Density(ρ_∞)와 Pressure(P_∞)중 택 1
- Temperature(T_∞)
- 특성길이 L

이 중, 특성길이 L 은 차원화된 값을 계산하는데 필요한 요소로, 일반적으로 1로 설정해서 사용한다.

3) Field Variables

Field variable은 1차 데이터로 생성된 변수중 2차 변수 생성에 필수적인 요소다. 다음 변수는 반드시 생성돼 있어야 2차 변수 생성이 가능하다.

- Velocity(u, v, w)와 Momentum(u, v, w)중 택 1
- Density(ρ), Pressure(P), Temperature(T), Total Energy(E_0)중 택 2

일반적인 CFD 시뮬레이션에서는 위의 조건을 만족하는 field variable을 생성하므로, 생성된 1차 변수를 토대로 지정하면 된다.

2번째 조건의 2개 변수를 지정할 때, 2개 변수가 Temperature와 Total Energy로 설정된 경우는 생성 불가능한 2차 변수가 존재하므로, 반드시 그 외의 변수를 지정해야 한다.

다. 기능 정의

2차 변수는 시뮬레이션의 결과로 나온 데이터를 토대로 계산함으로써 생성할 수 있는 모든 변수를 통칭한다. 따라서, 간단한 수식 적용을 통해 계산할 수 있는 평균, 총합 등의 요소를 포함해서 복잡한 편미분 방정식 적용으로 계산되는 요소에 이르기까지 다양한 요소를 모두 2차 변수라 통칭할 수 있다.

이런 2차 변수를 계산하는 데는 2가지 방법이 있다. 한 가지는 생성시마다 원하는 수식 입력을 통해 계산하는 것이고, 다른 한 가지는 사전에 정의된 함수를 적용해서 계산하는 것이다.

수식 입력을 통해 계산하는 방식은 사용자의 필요성에 대한 자유도가 매우 높으며, 변수에 간단한 가공을 가할 때 매우 유용한 방식이다. 사전 정의 함수를 활용하는 방식은 일반적으로 CFD 분야에서 많이 사용되는 변수에 대한 함수를 적용, 기존 데이터를 토대로 새로운 변수를 생성하는 방식으로, 정형화된 변수를 생성하는데 적합한 방식이다. 이런 변수로는 enthalpy, entropy, gradient, helicity, mach number, normal, Q-criteria, speed of sound, vorticity 등을 들 수 있으며, 유동의 vortex를 분석하는데 유용한 변수들이다. 이런 변수들은 1차 변수로 생성할 수도 있지만, 일반적으로 데이터 저장 공간이나 생성에 걸리는 시간을 고려했을 때, 분석이 필요할 때마다 기본 데이터를 가지고 생성하는 방식이 보다 효율적이라 할 수 있겠다.

GLOVE의 2차 변수 생성 기능은 사용자 수식 입력 기능을 포함하지 않으며, 사전 정의 함수 활용 방식의 생성 기능만 포함한다.

GLOVE에서 사전 정의 함수 방식으로 제공할 2차 변수는 다음과 같다.

1) Secondary Variables

일반 계산식을 통해 생성할 수 있는 변수를 의미하며, 다음과 같은 변수가 있다.

- Pressure
- Density
- Temperature
- Total Energy
- Velocity
- Momentum
- Velocity Magnitude
- Speed of Sound
- Mach Number
- Velocity Divergence
- Internal Energy
- Enthalpy
- Total Pressure
- Total Temperature
- Total Enthalpy
- Dynamic Viscosity
- Heat Conductivity

2) Variable Derivatives

편미분 방정식을 적용, 생성할 수 있는 변수로, 다음과 같은 변수가 존재한다.

- Velocity Derivatives
- Rotation Rate Tensor
- Vorticity
- Vorticity Magnitude
- Strain Rate Tensor
- Magnitude of Mean Strain Rate
- Q Criterion
- λ_2 Criterion
- Helicity
- Streamwise Vorticity
- Pressure Gradient
- Temperature Gradient
- Density Gradient
- Numerical Schlieren

3) Integral Parameters

적분 방정식 적용을 통해 생성할 수 있는 변수로, 다음과 같은 변수가 있다.

- Displacement Thickness
- Momentum Thickness
- Shape Factor
- Mass Flow Rate

이외에도 다양한 형태의 2차 변수가 존재한다.

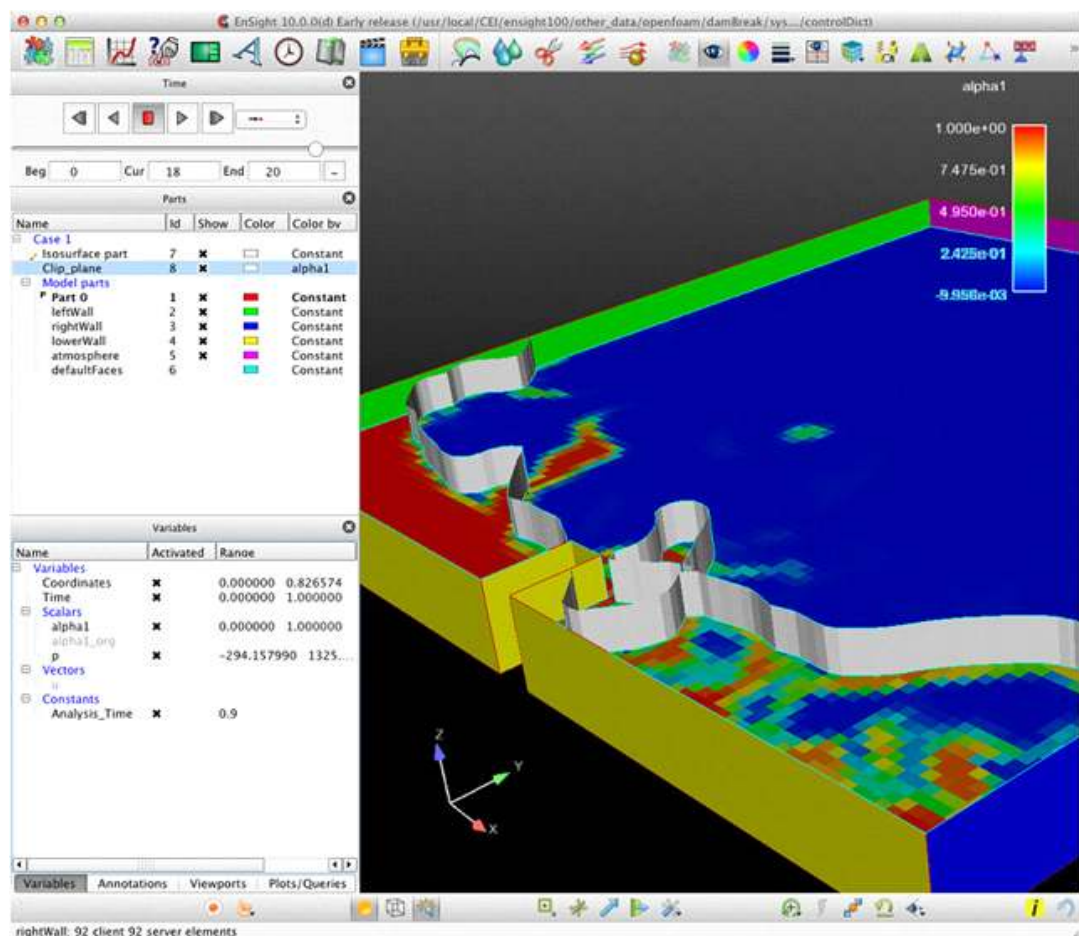
GLOVE 클라이언트에서는 위에서 정의한 2차 변수 기능을 구현, 제공하며, 향후에는 사용자 정의 수식을 변수에 적용하는 방안을 제시할 것이다.

3. 소프트웨어 인터페이스 분석

가. EnSight

EnSight는 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 가시화하고 분석하는 툴이며, CFD(Computational Fluid Dynamics), CSM(Computational Structural Mechanics) 및 CAE(Computer Aided Engineering) 분야에 특화된 기능을 제공, 가장 널리 사용되는 데이터 분석 툴이다.

EnSight 역시 2차 변수 생성을 위한 기능을 제공하며, 사용자는 calculator라는 툴을 통해 해당 기능을 수행할 수 있다. EnSight의 전체적인 GUI는 다음 그림과 같다.



EnSight의 GUI

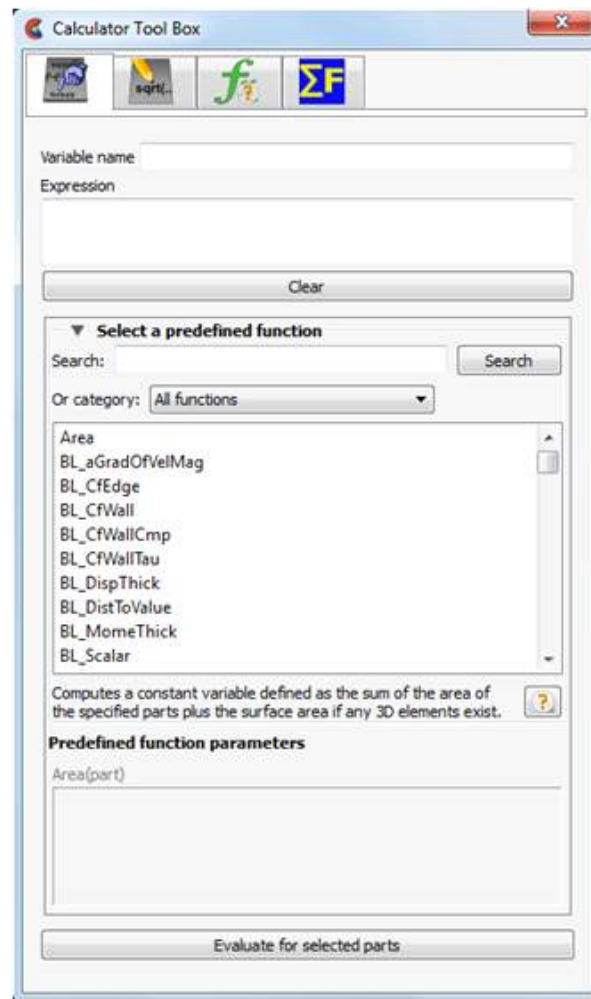
변수 정의는 다음과 같다.

변수(Variables): 분석용 소프트웨어로부터 제공되거나, 혹은 그 소프트웨어에서 생성된 수치값.

EnSight는 scalar, vector, constant 및 tensor 데이터 타입을 모두 지원한다.

EnSight는 변수 생성을 위해 대략 100개 정도의 함수(pre-defined functions)를 제공하는데, 변수 생성은 Calculator라는 인터페이스를 통해 수행할 수 있다. 다른 분석용 툴과 마찬가지로, 변수 생성은 원 데이터를 입력함으로써 수행할 수 있으며, contour나 vector arrow같은 분석용 데이터로는 2차 변수를 생성할 수 없다.

EnSight의 2차 변수 생성용 인터페이스인 Calculator는 변수 생성을 위해 2가지 종류의 인터페이스를 제공한다. 즉, 사용자가 생성 함수를 정의할 수 있는 계산기 형태의 인터페이스와 사전 정의된 함수를 적용하는 방식의 함수 인터페이스를 제공한다. 사전 정의 함수는 거의 필수로 생성하기 때문에 자주 사용하거나, 입력이 매우 복잡한 수식을 사전에 정의해 두고 적용하는 방식이다. 이와 같은 기능을 수행하는 EnSight의 Calculator 인터페이스는 다음 그림과 같다.



EnSight Calculator의 사전정의 함수 적용을 위한 인터페이스

위의 그림은 Calculator의 첫 번째 탭인 predefined function 적용을 위한 인터페이스를 보여준다. Variable name은 사용자가 생성하고자 하는 변수명을 입력하는 부분이고, Expression은 아랫단에서 predefined function을 선택하면 자동으로 입력되는 구조로, 변수 생성에 필요한 생성식을 나타낸다.

함수를 선택하면 Expression이 나타나면서 아랫단에 2차 변수 생성에 필요한 변수 및 상수를 입력하는 입력란이 나타난다. 입력에 필요한 사항을 입력하고, Evaluate for selected parts 버튼을 누르면 predefined function에 명시된 수식을 계산, 새로운 변수가 생성된다. 새로 생성된 2차 변수는 EnSight의 데이터 타입, 즉, scalar, vector, constant, tensor 중 한가지 타입으로 생성되며, GUI 왼편의 변수 목록에 나타난다.

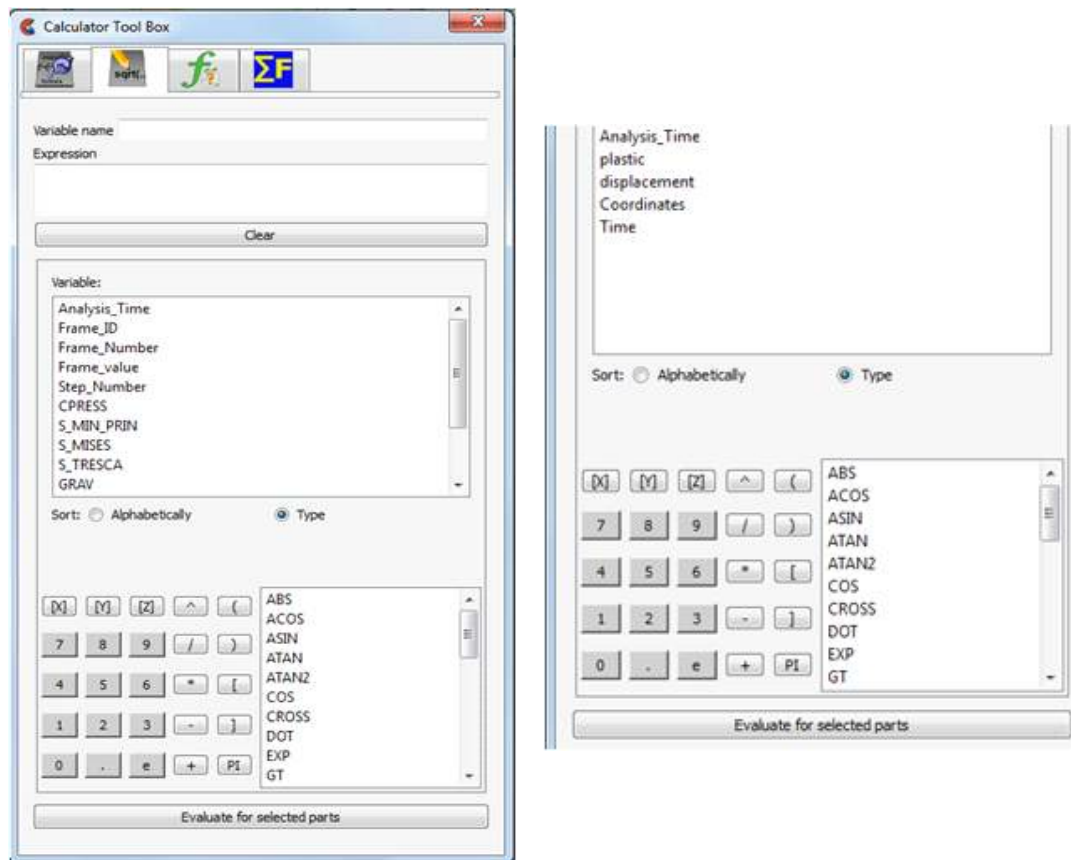
EnSight에서 제공하는 predefined function 중 주요 함수는 다음과 같다.

- Area
- Boundary Layer: Gradient of velocity magnitude / edge skin-friction coefficient / wall skin friction coefficient / wall fluid skin friction coefficient / wall fluid shear-stress / displacement thickness / distance to value from wall / momentum thickness / recovery thickness / shape parameter / thickness / velocity at edge / Y1+ off wall
- Case Map / Case Map Image
- Complex / Complex Argument / Complex Conjugate / Complex Imaginary / Complex Modulus / Complex Real / Complex Transient Response
- Density / Log of Normalized Density / Normalized Density / Normalized Stagnation Density / Stagnation Density
- Distance Between Nodes
- Distance to Parts: Node to elements, node to nodes
- Divergence
- Energy: Total energy / kinetic energy
- Enthalpy / Normalized Enthalpy / Stagnation Enthalpy / Normalized Stagnation Enthalpy
- Entropy
- Flow / Flow Rate
- Force / Force 1D
- Gradient / Gradient Approximation / Gradient Tensor / Gradient Tensor Approximation
- Helicity: Helicity density / relative helicity / filtered relative helicity
- Integrals: Line integrals / volume integrals
- Lambda2
- Mach Number
- Max / Min
- Moment / Moment Vector

- Momentum
- Pressure / Pressure Coefficient / Dynamic Pressure / Normalized Pressure / Log of Normalized Pressure / Stagnation Pressure / Normalized Stagnation Pressure / Stagnation Pressure Coefficient / Pitot Pressure / Pitot Pressure Ratio / Total Pressure
- Q_criteria
- SOS Constant
- Surface Integral
- Temperature / Normalized Temperature / Log Of Normalized Temperature / Stagnation Temperature / Normalized Stagnation Temperature
- Tensor: Tensor component / tensor determinate / tensor eigenvalue / tensor eigenvector / tensor make / tensor make asymmetric / tensor tresca / tensor von mises
- Velocity
- Volume / Volume Integral
- Vorticity / Vorticity Gamma

EnSight Calculator의 기능 중, 변수를 생성할 수 있는 2번째 방법은 calculator 탭을 이용하는 것이다. Calculator 탭은 사용자가 정의한 함수를 변수에 적용함으로써 새로운 변수를 정의하는 방식으로, 계산기와 동일한 인터페이스를 사용해서 수식을 적용할 수 있다.

EnSight Calculator 인터페이스의 calculator 탭은 다음 그림과 같다.



Calculator 인터페이스

Calculator 탭은 변수 목록을 표기하는 부분과 계산기 부분, 그리고 수학 함수를 선택할 수 있는 부분으로 구성돼 있다. 계산기와 수학함수 선택 부분을 통해 Expression에 수식을 입력할 수 있으며, 이 때 필요 변수를 입력할 수 있으며, 여기에 입력한 수식 적용을 통해 사용자가 정의한 새로운 변수가 생성된다.

Calculator 탭에 대한 입력 가능한 식을 예로 들어보면 다음과 같다.

주어진 변수: analysis_time, pressure, density, velocity

expression 예제:

- $-13.5 / 3.5$
- $\text{SQRT}(\text{pressure}[73] * 2.5) + \text{velocity}[x][73]$
- $\text{velocity} * \text{density}$
- $\text{analysis_time} / 60.0$
- $\text{velocity} ^ 2$
- $(\text{pressure} / \text{pressure_max}) ^ 2$
- $\text{pressure}\{19\}$

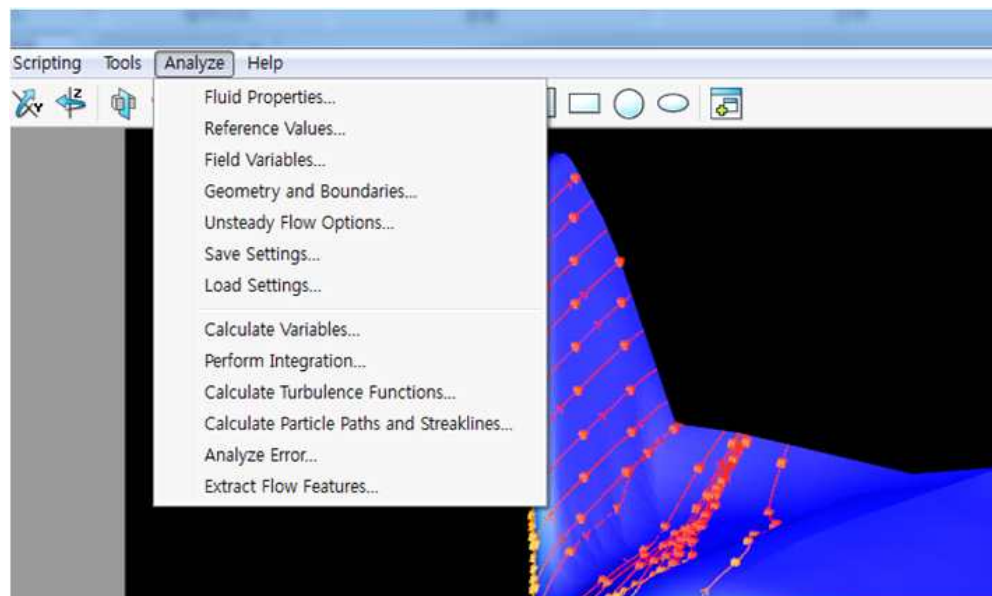
위 식 중 { }로 둘러싸인 숫자는 transient data에서 타임스텝을 나타낸다. 즉, calculator 탭에서는 특정 타임스텝에 대한 값을 계산하는 것도 가능하다.

이와같이 EnSight는 predefined function 탭과 calculator 탭을 통해 다양한 방식으로 2차 변수를 생성하는 방법을 제공한다.

나. TecPlot

TecPlot은 EnSight와 마찬가지로 CFD 분야에서 가장 널리 사용되고 있는 분석용 소프트웨어로, 복잡한 데이터를 분석하고 이해하는 유용한 툴로 사용되고 있다.

TecPlot은 Analyze라는 메뉴로 2차 변수를 생성하는 기능을 제공하고 있는데, Analyze 메뉴의 기능은 다음 그림과 같다.



TecPlot의 Analyze 기능

TecPlot의 Analyze 메뉴는 크게 필요 변수를 설정하는 부분과 실제로 계산을 수행하는 부분으로 나눌 수 있다. 메뉴의 윗부분은 설정 부분이고, 아랫부분은 계산 부분이다.

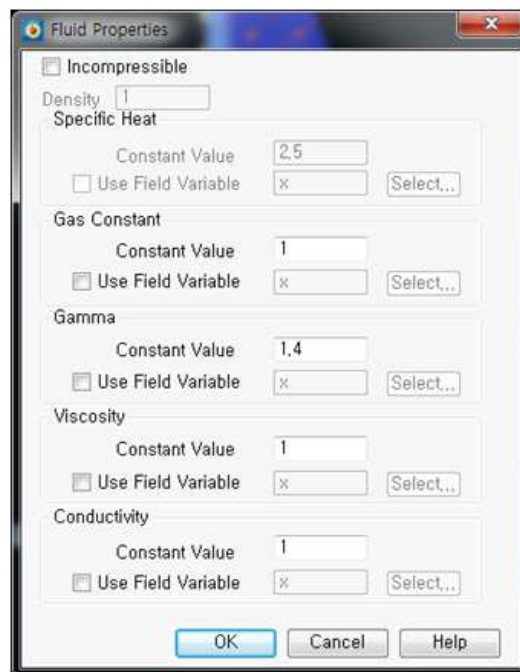
TecPlot은 시뮬레이션 관련 변수를 미리 입력해 두고 계산 시에 사용하는 방식을 사용하며, 이때 입력을 필요로 하는 시뮬레이션 관련 변수는 Fluid Properties, Reference Values, Field Variables, Geometry and Boundaries, 그리고 Unsteady Flow Options로 분류할 수 있다. 이 중 가장 핵심적인 변수는 Fluid Properties, Reference Values, 그리고 Field Variable 이 3가지인데, 각 변수를 입력하는 창은 서로 별개의 창으로 분리된 인터페이스를 사용하고 있다.

Fluid Property는 시뮬레이션 단계에서 입력된 조건을 의미하며, 유동의 성질을 나타내는 속성이다.

TecPlot 인터페이스에서 입력을 요구하는 Fluid Property는 다음과 같으며, 입력

창은 다음 그림과 같다.

- Specific Heat (C_v)
- Gas Constant (R)
- Gamma (γ)
- Viscosity (μ)
- Conductivity (k)



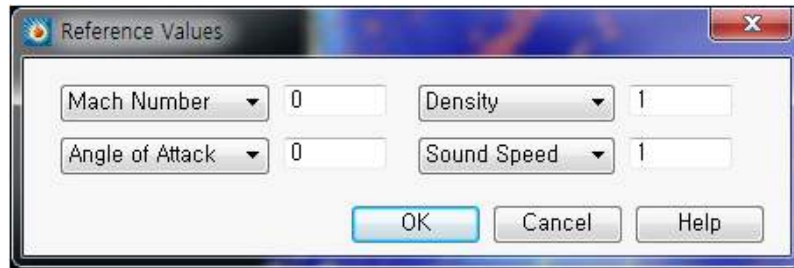
Fluid Properties 입력을 위한 인터페이스

인터페이스에서 볼 수 있듯이 각 fluid property에 해당하는 속성에 field variable을 입력해서 사용할 수도 있다.

TecPlot에서 Reference Value로 필요로 하는 값은 다음과 같다.

- Mach Number 또는 U velocity
- Angle of Attack 또는 V velocity
- Density 또는 Pressure
- Sound Speed 또는 Temperature

Reference Value를 입력을 위한 사용자 인터페이스는 다음 그림과 같다.

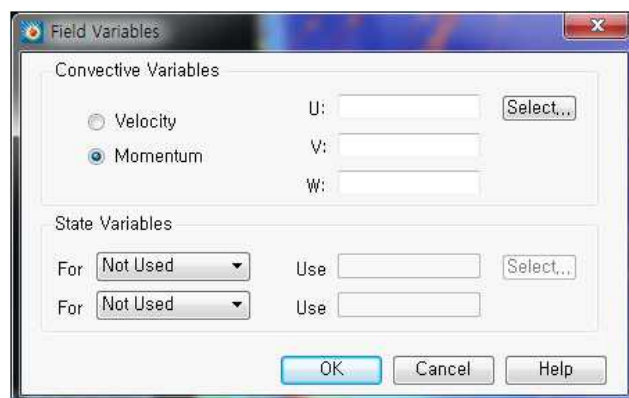


Reference Value 입력을 위한 인터페이스

Field Variable은 2차 변수의 계산에 필요한 입력 변수를 의미한다. 즉, 계산의 입력으로 필요한 변수를 의미하는데, EnSight는 각 함수에 따라 그때그때 필요한 변수를 입력하는 방식을 채택한 반면, TecPlot은 필수 입력 변수를 입력해 두고 그 변수들을 활용해서 모든 계산을 수행하는 방식을 택하고 있다.

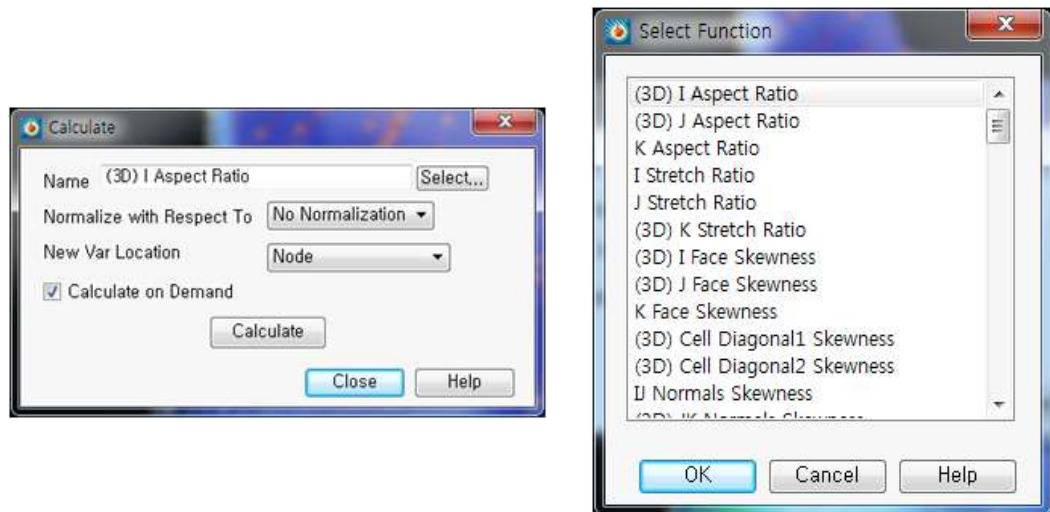
TecPlot에서 2차 변수 생성을 위해 필요로 하는 Field Variable은 크게 Convective variable과 State Variable의 2가지로 구분된다. TecPlot에서 필요로 하는 변수와 이 변수의 입력을 위한 사용자 인터페이스는 다음과 같다.

- Convective Variable: Velocity 혹은 Momentum중 1가지를 선택.
- State Variable: Pressure, Temperature, Density, Stagnation Energy, Mach Number중 2가지를 선택.



Field Variable 입력을 위한 사용자 인터페이스

Fluid Properties, Reference Values 및 Field Variables에 대한 입력이 끝나면 Caculate 기능으로 2차 변수를 생성할 수 있다. 2차 변수를 생성하는 Calculate 인터페이스 및 적용 가능한 함수는 다음 그림과 같다.



TecPlot의 Calculate 인터페이스와 제공 함수

TecPlot에서 제공하는 중요한 2차 변수 생성 함수는 다음과 같다.

- Density / Stagnation Density
- Pressure / Stagnation Pressure
- Pressure Coefficient / Stagnation Pressure Coefficient
- Pitot Pressure / Pitot Pressure Ratio
- Dynamic Pressure
- Temperature / Stagnation Temperature
- Enthalpy / Stagnation Enthalpy
- Internal Energy / Stagnation Energy / Stagnation Energy Per Unit Volume
- Kinetic Energy
- U Velocity / V Velocity / W Velocity
- Velocity Magnitude
- Mach Number
- Speed of Sound
- X Momentum / Y Momentum / Z Momentum
- Entropy / Entropy Measure S1
- X Vorticity / Y Vorticity / Z Vorticity
- Vorticity Magnitude
- Helicity / Relative Helicity / Filtered Relative Helicity
- Pressure Gradient Magnitude
- Density Gradient Magnitude
- X Density Gradient / Y Density Gradient / Z Density Gradient
- Divergence of Velocity
- Velocity (vector)
- Vorticity (vector)
- Momentum (vector)
- Pressure Gradient(vector) / Density Gradient(vector) / Velocity Gradient(vector)

다른 옵션을 모두 입력한 뒤, Calculate 버튼을 누르면, 처음 해당 변수를 계산시에는 적용 함수명으로 생성된 변수가 자동으로 dataset에 저장된다. 동일한 함수를 적용, 동일한 계산을 2번 이상 수행할 경우에는 생성될 변수를 이전에 계산한 변수에 덮어쓰기 할 것인지를 묻는 선택창이 나타난다.

TecPlot은 이외에도 Integration을 통해 적분 계산을, Turbulenc Functions를 통해 난류 계산을 수행하는 인터페이스를 제공함으로써 다양한 형태의 2차 변수를 생성할 수 있게 해준다.

다. EnSight와 TecPlot의 인터페이스 비교

EnSight와 TecPlot의 2차 변수 생성 관련 인터페이스 관련 특징은 다음 표와 같다.

Software	특징
Tecplot	<ul style="list-style-type: none"> • CFD 기능 특성에 맞게 구분돼 있는 입력창 • Save/Load 기능을 제공 • 입력을 요하는 변수 특성마다 새로운 창을 띄워야 함 • 상관관계가 없는 기능들이 한 메뉴로 묶여 있어서 하나의 카테고리화를 이루고 있음
EnSight	<ul style="list-style-type: none"> • Tab을 이용한 단일창을 사용하는 입력 환경 • Predefined function의 경우 필요 변수를 함수 실행시마다 매번 입력하도록 인터페이스가 구성돼 있음

Tecplot은 2차 변수 생성에 관련한 다양한 기능을 제공하고 있으며, 필수 입력 변수에 대한 한 번의 입력만으로 다양한 2차 변수를 생성할 수 있어서 사용자가 편리하게 사용할 수 있다. 그러나, 입력을 요하는 변수의 종류에 따라 매번 새로운 창을 띄워서 입력해야 하므로 초기값 입력이 불편하며, 특별히 상관관계가 없는 기능들을 Analyze 메뉴로 묶어서 사용자에게 혼란을 초래할 수 있다.

반면, EnSight는 tab을 이용, 다양한 형태의 calculator를 사용할 수 있으며, 초기 입력값을 받지 않는다. 반면, 함수를 실행할 때마다 매번 필요 변수를 입력하도록 인터페이스가 구성돼 있으므로, 2차 변수 생성 작업을 여러 번 실행해야 하는 경우에는 사용자 인터페이스에 대한 효율성이 현저히 떨어진다. 또, 실행 함수에 대한 변수가 한가지로 고정돼 있으므로, 반드시 사전에 함수에 필요한 변수를 모두 생성해줘야 한다는 불편함이 존재한다.

GLOVE는 상용 소프트웨어의 장/단점을 파악함으로써 사용자 편의성을 높일 수 있는 기능 및 사용자 인터페이스를 설계, 구현했다. 이에 대한 구체적인 내용은

4장에 설명하기로 한다.

4. GLOVE의 2차 변수 생성 기능

4장에서는 GLOVE의 2차 변수 생성 기능에 대해 다룬다. 우선 2차 변수 생성 기능에 대한 변수 범위 및 기능 설계를 설명한 뒤, GLOVE 서버와 클라이언트의 역할에 대해 각각 기술한다. 그런 다음, 사용자 인터페이스 구현 내용을 기술할 것이다.

가. 기능 설계

1) 기능 구현할 2차 변수의 범위

GLOVE 에서 생성 기능을 제공할 2차 변수는 미분 방정식을 사용하지 않는 변수와 미분을 사용하는 variable derivatives로 구분할 수 있다. 다음 표는 미분 방정식을 사용하지 않는 2차 변수 및 변수 생성에 필요한 함수와 변수 목록이다.

Variab les	Name	Expressions	
P	Pressure	pressure(Density, Temperature, ideal gas constant)	
ρ	Density	density(Pressure, Temperature, ideal gas constant)	
T	Temperature	temperature(Pressure, Density, ideal gas constant)	
		temperature2(Total Energy, Velocity Magnitude, constant volume specific heats)	
E0	Total Energy	totalEnergy(Temperature, Velocity Magnitude, constant volume specific heats)	
V	Velocity	velocity(Momentum, Density)	
Mo	Momentum	momentum(Velocity, Density)	
V	Velocity Magni tude	velocityMag(Velocity)	magnitude(Velocity)
a	Speed of Soun d	sos(Temperature, ratio of specific heats, ideal gas constant)	

Variab les	Name	Expressions	
M	Mach number	mach(Velocity Magnitude, Speed of Sound)	
		mach2(Velocity Magnitude, Temperature, ratio of specific heats, ideal gas constant)	
	Velocity Divergence	velocityDiv(Velocity)	div(Velocity)
E	Internal Energy	internalEnergy(Temperature, constant volume specific heats)	
H	Enthalpy	enthalpy(Temperature, constant pressure specific heats)	
p_0	Total Pressure	totalPressure(Pressure, Density, Velocity Magnitude)	
T_0	Total Temperature	totalTemp(Temperature, Velocity Magnitude, constant pressure specific heats)	
H_0	Total Enthalpy	totalEnthalpy(Enthalpy, Velocity Magnitude)	
		totalEnthalpy2(Temperature, Velocity Magnitude, constant pressure specific heats)	
μ	Dynamic Viscosity	dynamicViscosity(Temperature, freestream eddy viscosity, freestream temperature)	
κ	Heat Conductivity	heatConductivity(Dynamic Viscosity, constant pressure specific heats, prandtl no)	
		heatConductivity2(Temperature, freestream eddy viscosity, freestream temperature, constant pressure specific heats, prandtl no)	

다음 표는 미분식을 사용하는 2차변수 목록과 그에 대한 표현식이다.

Variable s	Name	Expressions	
$\frac{\sigma V}{\sigma x}$	Velocity Derivatives (Tensor)	velDerivatives(Velocity)	derivatives(Velocity)
Ω_{ij}	Rotation Rate Tensor	rotRaTensor(Velocity Derivatives)	
ξ	Vorticity	vorticity(Velocity Derivatives)	
Ω	Vorticity Magnitude	vorMag(Vorticity)	magnitude(Vorticity)
		vorMag2(Rotation Rate Tensor)	
		vorMag3(Velocity Derivatives)	
S_{ij}	Strain Rate Tensor	strain(Velocity Derivatives)	
S	Mag. of Mean Strain Rate	magMeanStr(Strain Rate Tensor)	
		magMeanStr2(Velocity Derivatives)	
Q	Q Criterion	qCriterion(Vorticity Magnitude, Mag of Mean Strain Rate)	
		qCriterion2(Vorticity, Mag of Mean Strain Rate)	
		qCriterion3(Rotation Rate Tensor, Mag of Mean Strain Rate)	
		qCriterion4(Vorticity Magnitude, Strain Rate Tensor)	
		qCriterion6(Vorticity, Strain Rate Tensor)	
		qCriterion7(Rotation Rate Tensor, Strain Rate Tensor)	
		qCriterion8(Velocity Derivatives, Mag of Mean Strain Rate)	
		qCriterion9(Vorticity Magnitude, Velocity Derivatives)	
		qCriterion10(Velocity Derivatives, Strain Rate Tensor)	
		qCriterion11(Vorticity, Velocity Derivatives)	
		qCriterion12(Rotation Rate Tensor, Velocity Derivatives)	
		qCriterion13(Velocity Derivatives)	
λ_2	λ_2 criterion	lambda(Rotation Rate Tensor, Strain Rate Tensor)	
		lambda2(Rotation Rate Tensor, Velocity Derivatives)	
		lambda3(Strain Rate Tensor, Velocity Derivatives)	
		lambda4(Velocity Derivatives)	

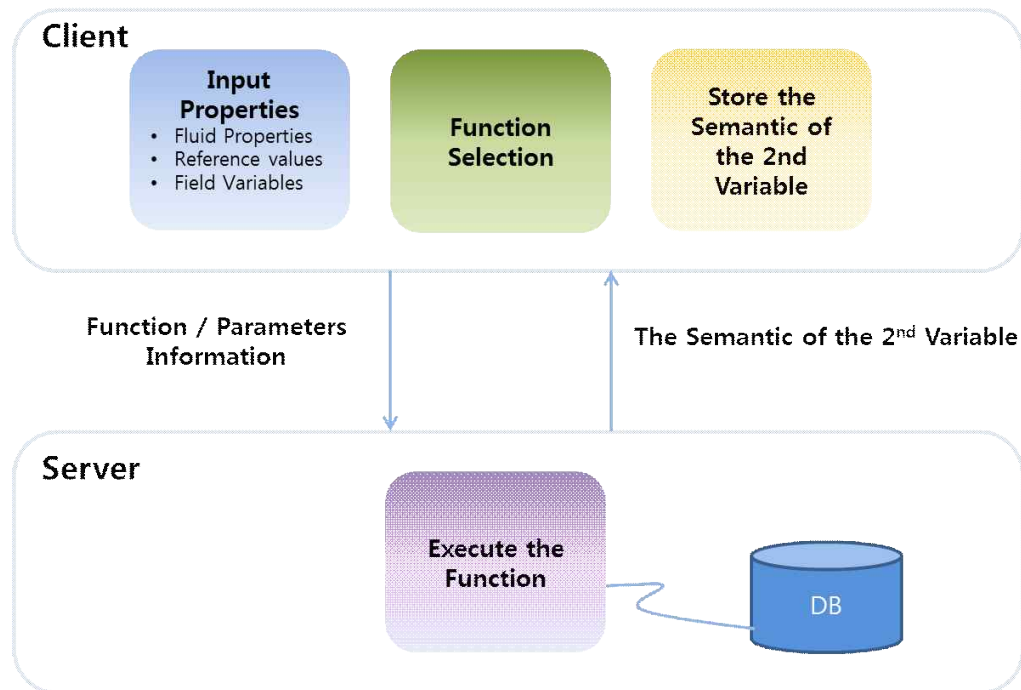
Variables	Name	Expressions
H	Helicity	helicity(Vorticity, Velocity)
		helicity2(Rotation Rate Tensor, Velocity)
		helicity3(Velocity Derivatives, Velocity)
		helicity4(Velocity)
Ω_s	Streamwise Vorticity	streamVor(Helicity, Velocity Magnitude)
		streamVor2(Vorticity, Velocity, Velocity Magnitude)
		streamVor3(Vorticity, Velocity)
		streamVor4(Rotation Rate Tensor, Velocity, Velocity Magnitude)
		streamVor5(Rotation Rate Tensor, Velocity)
		streamVor6(Velocity, Velocity Derivatives, Velocity Magnitude)
		streamVor7(Velocity, Velocity Derivatives)
		streamVor8(Velocity, Velocity Magnitude)
		streamVor9(Velocity)
	Pressure Gradient	gradPressure(Pressure)
	Temperature Gradient	gradTemperature(Temperature)
	Density Gradient	gradDensity(Density)
	Numerical Schlieren	numSchieren(Density)

표에서 빨간 색으로 표시된 변수는 솔버로부터 생성된 solution variable을 의미한다. 파란 색으로 표시된 변수는 2차 변수를 의미하며, 보라색으로 표시된 변수는 2차 변수이지만 거의 solution variable처럼 취급되는 변수를 의미한다. 또, 초록색으로 표시된 변수는 상수값을 나타내며, 검정 색은 함수 자체를 나타낸다. 2차 변수 기능은 Expression 부분의 함수와 변수를 이용함으로써 구동할 수 있다. 표의 Expression 부분은 실제 수식을 단순화시킨 함수와 변수 생성에 필요한 입력 변수를 나타낸다. 예를 들어 Pressure Gradient 변수를 생성하고 싶다면 grad Pressure 함수를 호출하면 되는데, 이 함수에 대한 입력 인자는 Pressure가 된다는 것이다. Expression이 여러개 있는 경우에는 현재 존재하는 변수를 토대로 실행 가능한 함수를 호출하게 된다. 예를 들어, Streamwise Vorticity를 생성하고자 할 때, 현재 존재하는 변수가 Velocity밖에 없다면 streamVor9(Velocity) 함수가

호출되는 것이다. 함수 호출에 대한 자세한 루틴은 4절의 클라이언트 기능 부분에서 자세히 설명하기로 한다.

2) 2차 변수 생성 과정

다음 그림은 GLOVE에서의 2차 변수 생성 과정을 나타낸다.



GLOVE의 2차변수 생성 기능

클라이언트에서는 기본적인 사용자 입력과 출력을 담당한다. 기본적인 fluid property와 reference value, 그리고 field variable은 입력돼 있어야 기본적으로 2차 변수를 생성할 수 있으므로, 2차 변수 생성 전에 이 속성들은 클라이언트에서 입력해야 한다. 단, GLOVE에서는 이런 속성들을 처음 한 번만 입력해서 지정해 두면 2차 변수 생성에 이후에도 계속 사용할 수 있으므로, 지정 변수를 변경하고자 하지 않는 이상, 한 번만 입력하면 된다.

사용자가 field variable을 입력하면, 입력된 field variable과 solution variable을 바탕으로 생성 가능한 변수 목록을 클라이언트가 파악해서 사용자에게 보여준다. 사용자가 새로 생성할 변수를 선택, 생성을 실행하면 클라이언트는 서버에 생성할 변수에 대한 정보를 전송한다. 이 정보에는 실행할 함수를 포함해서 기존에 입력했던 각종 파라미터(fluid property, reference value 등) 정보가 포함된다.

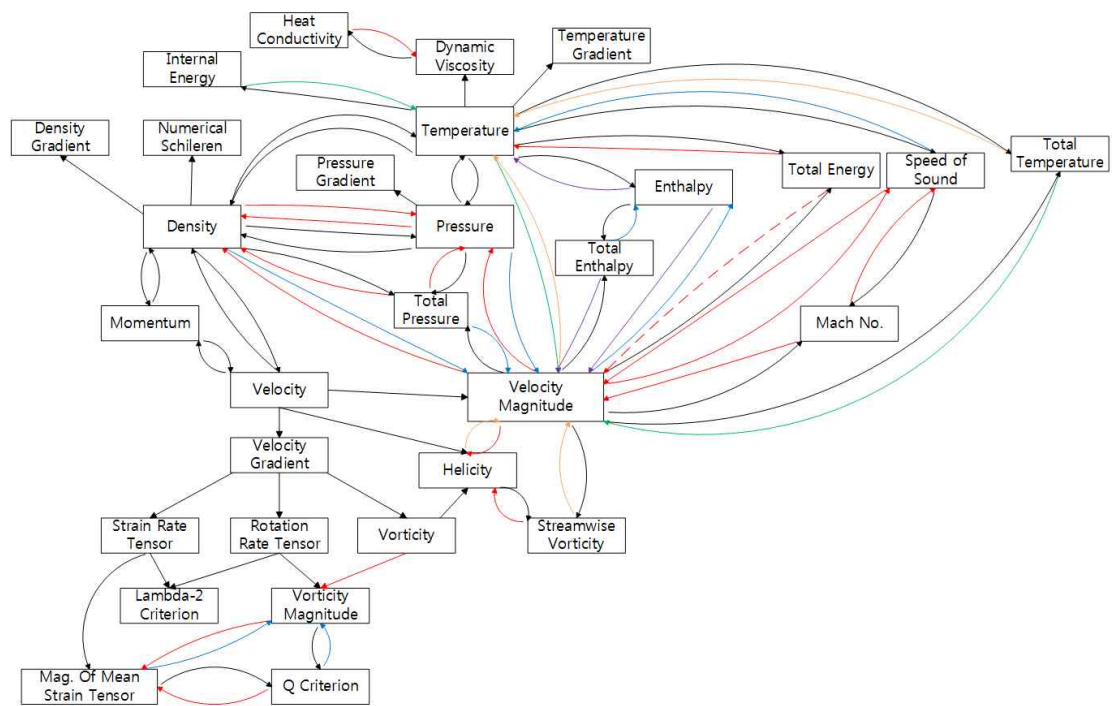
변수 생성 메시지를 받은 서버는 해당 함수를 실행해서 변수를 생성해서 DB에 저장하고, 생성된 변수와 관련된 semantics 정보를 클라이언트로 전달한다. 클라이언트는 전달받은 semantics 정보를 해석, solution variable로 인지하고 관련 정보를 저장해서 추후에 있을 2차 변수 생성에 대비한다.

3) 2차 변수 생성을 위한 서버 기능

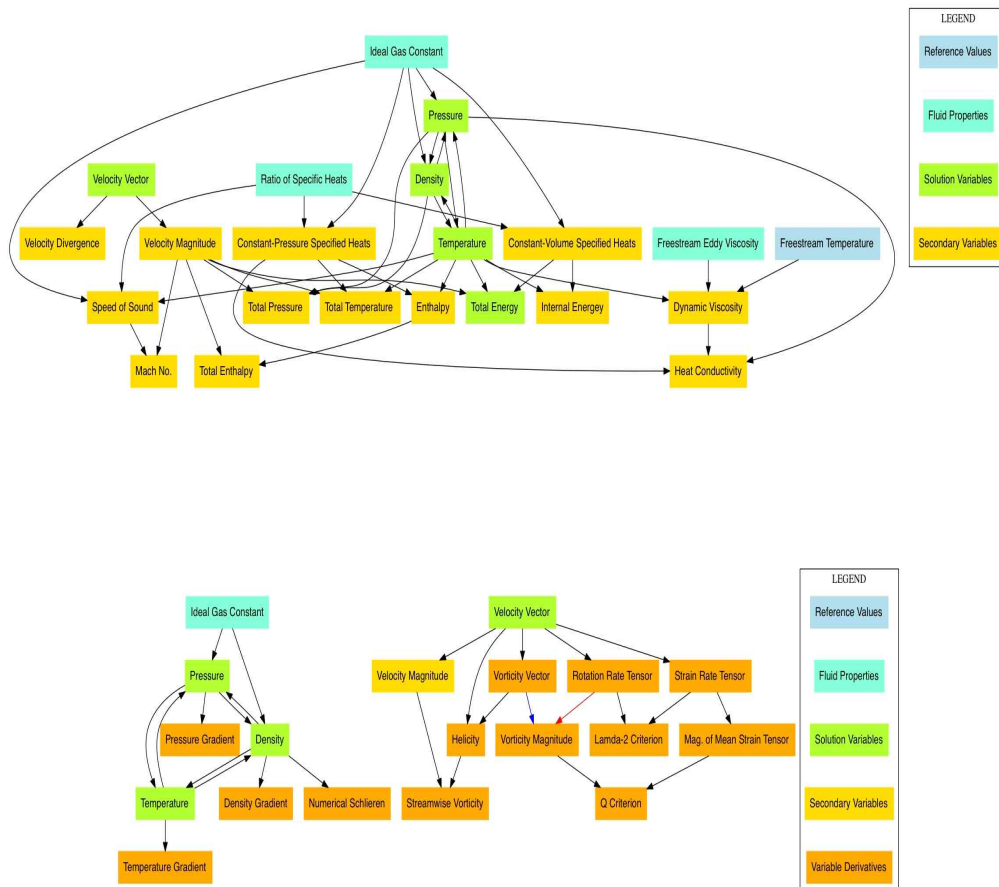
서버는 클라이언트의 2차 변수 생성 요청을 받아들여서 실제로 계산을 수행하고 변수를 저장한 뒤, 생성된 변수에 대한 semantics 정보를 클라이언트에게 전송하는 동작을 수행한다.

한 변수를 계산하기 위해서는 여러 종류의 다른 변수들이 필요한데, 예를 들어 변수 a를 계산하기 위해 변수 b와 c가 필요하다면 변수 a는 변수 b와 c에 종속된다고 할 수 있다. 다음 그림은 이런 변수들 간의 종속관계를 도식화한 종속 그래프로, 그래프상의 정점(vertex)은 변수, 정점을 연결하는 간선(edge)은 각 변수 간 종속관계를 나타낸다. 한 정점을 기준으로 화살표의 방향이 들어오는 간선은 진입 간선(incoming edge), 나가는 간선은 진출간선(outgoing edge)인데, 각 정점은 진입 간선으로 연결된 정점에 종속되고, 진출 간선으로 연결된 정점을 부속한다.

서버는 초기 변수의 집합(field variable과 solution variable)이 주어졌을 때, 특정 목표 변수를 생성하기 위한 가장 빠른 경로를 종속 그래프에서의 최단 거리를 찾는 방식으로 탐색하고, 여기에 변수 계산 비용 요소를 추가하여 최적의 방식으로 변수를 계산한다.



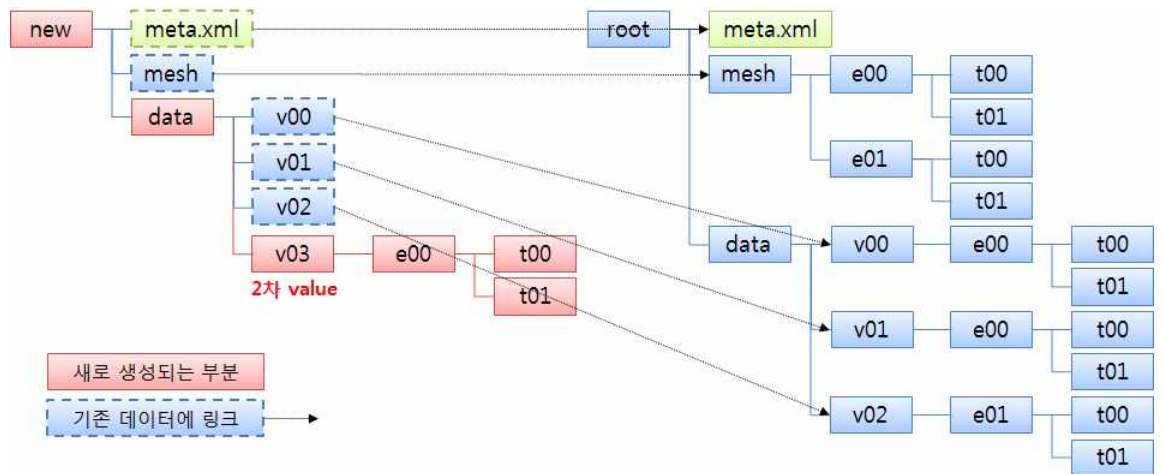
2차 변수 종속 그래프



변수 상관관계 분석 그래프

GLOVE 서버는 주어진 초기 변수로부터 목표 변수까지 최단 거리를 구하기 위해 2차 변수 종속 그래프를 일반적인 유향 그래프(directed graph)로 변환, 최단 경로를 결정한다. 이 과정에서 각 변수의 계산 비용이 서로 상이한 점을 보완, 실제 계산시간에서의 최적 경로를 예측하기 위해 변수들의 계산 비용을 추정하고, 이를 유향 그래프의 간선에 가중치로 반영했다. 이렇게 변수 종속 그래프를 일반적인 가중 유향 그래프로 변환한 뒤, 최적 경로 탐색에 다익스트라 알고리즘을 이용, 목표 변수와 초기 변수간 최단 경로를 설정해서 최적의 방법으로 2차 변수를 계산하는 방법을 설계, 구현했다.

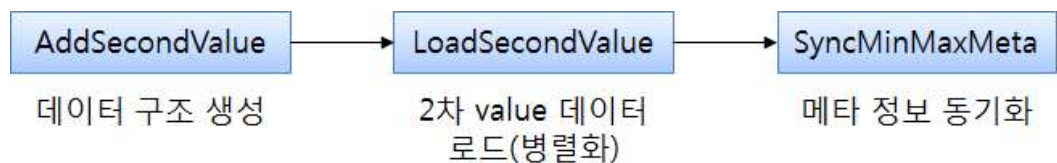
이렇게 생성된 2차 변수는 AddSecondValue 함수를 통해 자료 구조를 생성함으로써 저장되고, 추후 로딩을 위해 메타 데이터에 추가된다. 또한, 사용자의 요청이 있을 경우 파일에 따로 저장할 수도 있는데, 기존 데이터와 구분해서 따로 저장돼야 하며, 파일 복사를 최소화하기 위해 2차 변수를 제공한 기존 데이터는 심볼릭 링크로 구성된다.



2차 변수가 저장되는 디렉토리의 구성

위 그림과 같이 2차 변수가 저장되는 별도의 디렉토리가 구성되면 메모리 상의 2차 변수를 병렬 프로세스로 파일에 저장한다.

GLOVE 서버의 전반적인 2차 변수 추가 과정은 다음 그림과 같다.



2차 변수 추가 과정

GLOVE 서버는 2차 변수 생성에 대한 요청을 받아들여서 실제로 2차 변수를 생성하고, 자료구조를 생성, 저장한 뒤, 이에 대한 메타 데이터를 클라이언트에 전송하는 일련의 작업을 수행한다.

4) 2차 변수 생성을 위한 클라이언트 기능

클라이언트는 2차 변수 생성에 필요한 각종 파라미터와 변수를 입력받아서 변수 생성에 관한 요청을 생성해서 서버로 전달하고, 서버가 생성한 2차 변수에 관한 정보(semantics)를 받아서 새로 생성된 변수를 가시화하고 추후 활용을 위해 정보를 저장하는 일련의 과정을 수행한다.

앞서 설명했듯이 2차 변수를 생성하기 위해서는 fluid property, reference value,

field variable과 같은 입력 요소가 필요한데, 이런 요소의 입력과 관련된 설명은 뒤에서 사용자 인터페이스를 다루며 하기로 한다.

일반적으로 2차 변수를 계산하는 데는 fluid property, reference value같은 파라미터가 필요하며, 현재 갖고 있는 데이터를 나타내는 field variable에 이런 파라미터 값을 적용해서 새로운 값을 계산하게 된다. 2차변수 계산을 위해 기본적으로 반드시 입력돼야 하는 field variable은 다음과 같다.

- Convective variable: Velocity(u, v, w), Momentum(u, v, w) 중 1개의 변수
- State variable: Density, Pressure, Temperature, Total Energy 중 2개의 변수

일반적으로 간단한 2차 변수는 field variable을 이용해서 간단히 계산할 수 있으며, field variable 간에도 서로 계산하는 것이 가능하다. 그러나 복잡한 계산을 필요로 하는 2차 변수의 경우에는 입력된 field variable을 이용해서 다른 변수를 계산하고, 그렇게 새로 계산된 variable을 새로운 입력으로 최종값을 계산해야 하는 경우도 종종 발생한다. 데이터 용량이 크고 변수 개수가 많은 대용량 데이터의 경우, 이런 중간 변수의 계산에 많은 시간이 소요되는데, 이때 기존에 계산해 둔 중간 변수, 혹은 기본적인 field variable 이외의 변수를 활용할 수 있다면 계산시간이 훨씬 줄어들 수 있다. 이런 변수를 통칭해서 solution variable이라 한다.

GLOVE 클라이언트는 field variable과 solution variable을 입력하기 위한 사용자 인터페이스를 제공하며, 입력된 변수에 variable id를 부여해서 저장하는 자료구조를 제공한다. 클라이언트에서 사용하는 자료 구조를 변수 맵핑 테이블이라 하는데, 이 자료 구조는 실제 변수와 데이터 구조상의 변수를 매칭 해주는 역할을 하며, 이를 이용해서 사용자에게 생성 가능한 2차 변수를 결정해서 목록을 나열할 수 있다.

변수 맵핑 테이블의 구조는 다음과 같다.

Variable	Variable ID
Velocity magnitude	3
Speed of sound	7
Rotation rate tensor	12
...	...

variable mapping table

맵핑 테이블은 변수를 나타내는 구분자와 로딩된 변수의 ID를 맵핑 해주는 구조로 이뤄져 있다. 변수 맵핑 테이블은 2차 변수 계산 프로그램의 내부 데이터 구조로, 모든 가능한 변수를 맵핑할 수 있게 해주는 자료구조다. 이 맵핑 테이블은 field variable뿐만 아니라, CFD 데이터가 가질 수 있는 모든 형태의 variable을 맵핑할 수 있다. 이 맵핑 테이블을 채워넣을 수 있는 방법은 자동과 지정, 2가지 방식이 있다.

- 지정(수동) 맵핑: field variable과 같이 사용자가 제공된 사용자 인터페이스를 통해서 직접 variable을 입력해서 맵핑하는 방식이다. 이미 생성돼 있는 변수를 맵핑할 때 사용하는 방식으로, 변수 지정에 관한 configuration file을 로딩해서 일괄적으로 맵핑을 수행할 수도 있고, GLOVE 클라이언트에서 제공하는 사용자 인터페이스를 통해 일일이 지정할 수도 있다. GLOVE 클라이언트는 field variable뿐만 아니라 solution variable을 지정해서 맵핑하는 사용자 인터페이스를 제공한다.
- 자동 맵핑: 사용자가 2차 변수를 생성하는 루틴을 수행할 경우 해당 변수를 생성한 뒤, variable id를 자동으로 맵핑 테이블에 채워 넣는 방식이다. 이때, 클라이언트는 사용자가 생성 요청하는 변수를 인지하고 있어야 하며, 서버로부터 전송되는 semantics 정보를 추출해서 맵핑을 수행한다.

맵핑 테이블에 입력된 정보를 활용하면 현재 변수들로부터 생성 가능한 2차 변수의 목록을 파악하는 것이 가능하다. 앞서 2차 변수 생성 함수 목록에서 볼 수 있듯이, 맵핑 테이블에 입력된 변수와 생성 함수의 입력 변수간 매칭을 통해서 생

성 가능한 2차 변수를 파악할 수 있기 때문이다. 예를 들어, Velocity Derivative 라는 변수가 현재 생성돼 있다면, Rotation Rate Tensor, Vorticity, Vorticity Magnitude, Strain Rate Tensor, Magnitude of Mean Strain Rate, Q Criterion, λ_2 criterion이 생성 가능하다. 일반적으로 사용자는 현재 생성돼 있는 변수 목록에서 새로 생성 가능한 변수를 파악하는 데 많은 시간을 소요한다. 실수로 생성할 수 없는 변수에 대한 생성 명령을 내리고 시스템으로부터 오류 통보를 받을 때까지 오랜 시간이 소요되기도 한다. GLOVE는 변수 맵핑 테이블을 이용한 변수 자동결정 루틴을 제공함으로써 사용자 편의성을 높이고, 불필요한 시간과 노력의 소모를 줄일 수 있다.

또 다른 맵핑 테이블의 장점은 중간 변수를 활용할 수 있다는 점을 들 수 있다. 예를 들어 rotational rate tensor같은 변수는 기본적으로 많이 생성하는 변수는 아니지만, Vorticity Magnitude, Q Criterion, Helicity 등의 여러 변수를 계산하는 데 사용될 뿐만 아니라 생성식에 미분 공식이 들어가는 복잡한 변수이기도 하다. 이 변수가 만약 2차 변수로 이미 생성돼 있고, 맵핑 테이블에 저장돼 있어서 이후 다른 복잡한 2차 변수의 계산에 활용한다면 중복 계산의 확률이 낮아지면서 여러 복잡한 변수 계산에 소요되는 시간을 줄일 수 있을 것이다.

2차 변수 생성에 관한 요청을 받아들인 서버는 변수 생성이 완료되면 클라이언트에 생성된 변수에 관한 semantics를 전송해서 변수 생성이 완료됐음을 알린다.

다음은 생성 완료된 변수에 대한 semantics 구조와 실제 생성된 semantics의 예시를 보여준다.

```
<semantics>
<metafile>   파일 경로   </metafile>
<variable>
  <semantic> Variable을 나타내는 expression </semantic>
  <id> value id </id>
</variable>
<constant>
  <semantic> Constant를 나타내는 expression </semantic>
  <data> 실제 상수 </data>
</constant>
</semantics>
```

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<constants>
  - <constant>
    <semantic>IdealGasCon</semantic>
    <data>287.15</data>
  </constant>
  - <constant>
    <semantic>VolSpecHeats</semantic>
    <data>0</data>
  </constant>
  - <constant>
    <semantic>RatioSpecHeats</semantic>
    <data>1.398</data>
  </constant>
  - <constant>
    <semantic>FreestrVisco</semantic>
    <data>0.009</data>
  </constant>
  - <constant>
    <semantic>PressureSpecHeats</semantic>
    <data>0</data>
  </constant>
  - <constant>
    <semantic>PrandtlNo</semantic>
    <data>0.72</data>
  </constant>

```

생성된 변수에 대한 Semantics 구조와 사례

Semantics는 생성된 변수가 변수인지 혹은 상수인지에 따라 구조가 달라지며, 변수일 경우에는 variable id를, 상수일 경우에는 상수값을 통보한다. Semantic의 최상위에는 변수에 대한 정보를 포함하는 메타 파일의 위치가 포함되서 향후 활용에 대비한다. Semantic을 수신함으로써 변수 생성이 완료됐음을 인지한 클라이언트는 변수 관련 정보를 맵핑 테이블에 저장하고 메타 파일의 위치를 기억해서 향후 사용에 대비한다.

클라이언트 관점에서의 2차변수 계산과정은 다음과 같다.

- fluid property, reference value 및 기본적인 field variable과 solution variable을 입력한다. 이 정보는 처음 1번만 입력해서 향후 계속 활용한다.
- 저장된 field variable과 solution variable 정보를 토대로 맵핑 테이블을 구성하고, 구성된 정보를 바탕으로 현재 상태에서 생성 가능한 2차 변수 목록을 구성한다.
- 생성 가능한 2차 변수 목록에서 사용자가 생성할 변수를 선택, 실행하면 서버로 관련 정보를 전송한다.
- 2차 변수 생성이 끝난 서버로부터 semantics 형태의 완료 통보를 받으면 관

런 정보를 맵핑 테이블에 자동 저장한다.

- 갱신된 맵핑 테이블의 정보를 토대로 생성 가능한 2차 변수 목록을 새로 구성한다. 이를 통해 2차 변수 생성 공식을 단순화하고 중복 계산을 방지할 수 있으며 계산시간을 줄이는 것도 가능하다.

이렇게 생성된 맵핑 테이블은 configuration file 형태로 저장해 두고 이후에 다시 활용하는 것이 가능하다. configuration file의 활용은 변수 중복 입력을 방지하면서 사용성을 높일 수 있으며, 중복 계산을 방지함으로써 계산의 효율성을 높일 수 있다.

나. 2차 변수 생성을 위한 사용자 인터페이스

2차 변수를 생성하는 데는 필수로 입력해야 하는 요소 변수들이 있다. GLOVE는 이를 Fluid Property, Reference Value, Field Variable로 구분해서 공통 입력을 받는 방식으로 인터페이스를 제공한다. 각 입력 변수별 특징은 다음과 같다.

- Fluid Property

Fluid Property는 시뮬레이션을 통해 데이터를 생성할 때 사용되는 parameter를 나타낸다. 즉, 시뮬레이션 계산에 대한 입력 parameter를 나타내는 것으로, 2차 변수를 시뮬레이션 데이터와 동일한 입력조건에서 계산하기 위한 입력 요소다. 2차 변수 계산을 위한 입력 parameter로서의 fluid property 필수 입력 요소는 다음과 같다.

Fluid Properties

property	Name	Definition
Re	Reynolds Number	레이놀즈수
Tw	Wall Temperature	
PrL	Laminar Prandtl Number	0.72
PrT	Turbulent Prandtl Number	0.9
R	Ideal Gas Constant	287.15
γ	Ratio Of Specific Heats	비열비, 1.4
$\mu_{T,\infty}$	Freestream Eddy Viscosity	자유류 난류점성, 0.009
I_∞	Freestream Turbulence Intensity	자유류 난류강도 0.08
Cv	Constant-Volume Specific Heats	$R/(\gamma-1)$
Cp	Constant-Pressure Specific Heats	$\gamma R/(\gamma-1)$

- Reference Value

2차 변수 계산을 위해 필수로 입력해야 하는 reference value는 다음과 같다.

- Mach Number(M_∞)와 Velocity(U_∞)중 택 1
- Density(ρ_∞)와 Pressure(P_∞)중 택 1
- 특성길이 L

이 중, 특성길이 L은 차원화된 값을 계산하는데 필요한 요소로, 일반적으로 1로 설정해서 사용한다.

- Field Variable

Field variable은 1차 데이터로 계산된 변수 중, 2차 value 생성을 위해 반드시 있어야만 하는 요소 변수다. 다음 변수는 반드시 지정돼 있어야 2차 변수 생성이 가능하다.

- Velocity(u, v, w)와 Momentum(u, v, w)중 택 1
- Density(ρ), Pressure(P), Temperature(T), Total Energy(E_0)중 택 2

일반적으로 CFD 시뮬레이션 데이터를 생성할 때는 위의 조건을 field variable로 생성한다. 따라서, GLOVE에서는 위의 시뮬레이션 변수를 지정할 수 있는 사용자 인터페이스를 제공한다.

2번째 조건의 2개 변수를 지정할 때, 지정된 2개 변수가 Temperature와 Total Energy인 경우에는 다양한 2차 변수를 생성하기가 어려우므로, 한 변수를 Temperature나 Total Energy를 선택해서 지정했다면, 다른 하나는 이외의 변수를 지정하는 인터페이스를 고려해서 제공해야 한다.

앞서 분석에서 본 EnSight와 TecPlot의 2차 변수 생성 관련 사용자 인터페이스의 특징과 보완점을 정리하면 다음 표와 같다.

	특징	장점	보완점
Tecplot	<ul style="list-style-type: none"> ○ 시뮬레이션 코드가 미리 생성한 변수 및 조건 값을 사용자 입력을 통해 2차 value를 생성할 수 있는 인터페이스 ○ Reference values / Field variables / Calculate 창으로 구성됨 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 사용자가 사전에 입력한 변수를 토대로 2차 value 생성 가능 ○ 함수에 따른 반복입력이 없어서 사용성 관점에서 편리함 ○ 약 40여 가지에 이르는 다양한 함수 제공 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 변수를 입력할 때마다 새로 창을 띄움 ○ 복잡한 2차 value 계산의 경우, 중간값을 여러 번 중복 계산함으로써 시간과 자원의 낭비가 예상됨
Ensign	<ul style="list-style-type: none"> ○ Pre-defined function 탭과 calculator 탭으로 구성됨 ○ Pre-defined function 탭은 사전에 정의된 solution variable을 생성하는 기능을 제공 ○ Calculator 탭은 field variable을 사용자 정의 연산을 통해 재정의하는 기능을 제공 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2차값 계산을 위한 parameter를 직접 입력, 이미 계산된 값은 계산하지 않고 활용 가능 ○ 사용자가 field variable을 사용자 정의 연산을 통해 재정의하는 기능을 제공 ○ 100여 가지가 넘는 다양한 함수 제공 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 함수마다 필요한 parameter를 매번 입력해야 함

GLOVE의 2차 변수 생성을 위한 인터페이스는 기본 입력값을 통해 생성하는 방식으로 설계했으며, 기존에 생성한 solution variable이 존재하는 경우에는 이 값을 입력함으로써 연산 횟수를 줄일 수 있게 유도하는 사용자 인터페이스를 제공한다. 기존 도구에 대한 GLOVE 2차 변수 생성 사용자 인터페이스 보완 방안은 다음과 같다.

기존 도구의 문제점	보완 방안
카테고리가 다른 입력이 필요할 때마다 새로운 창을 띄워야 함	<ul style="list-style-type: none"> ○ 입력에 필요한 창을 탭 구조로 구성함으로써, 한 창에서 모든 입력이 가능
중간계산 결과 값 및 미리 저장된 결과 값을 다른 변수 계산에 활용할 수 없음	<ul style="list-style-type: none"> ○ 시뮬레이션 해석 코드가 저장한 값이나 이전에 계산해 놓은 2차 value를 solution variable 탭에서 그 값이 무엇을 의미하는지 입력하는 인터페이스를 제공함으로써 또 다른 2차 value의 계산에 그 값을 활용할 수 있음 ○ 입력 parameter 및 새로 생성된 변수에 대한 semantic 저장 ○ 저장된 semantic을 바탕으로 자동으로 수식 결정, 계산.
함수마다 필요한 parameter를 매번 입력	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2차 value 계산에 필요한 변수들을 미리 입력해서 저장하여 관리함으로써 매 계산마다 parameter를 입력해야하는 단점 보완 ○ Parameter 지정이 필요 없는 calculate 인터페이스 구성

GLOVE는 카테고리가 다른 입력이 필요할 때마다 새 창을 띄워야 하는 불편함을 보완, 탭 구조의 입력 창을 제공한다. 이 탭 구조의 입력창에서는 Fluid Property, Reference Value, Field Variable을 입력할 수 있으며, 중간 변수를 인지해서 계산시간을 줄일 수 있도록 Solution Variable도 입력할 수 있게 했다.

다음 그림은 기본 입력 탭 중 Fluid Property를 입력하는 창으로, Reynolds Number, Wall Temperature, Laminar Prandtl Number, Ideal Gas Constant, Ratio of Specific Heats, Freestream Eddy Viscosity, Freestream Turbulence Intensity같은 파라미터를 입력할 수 있다.

Constant-Volume Specific Heats와 Constant-Pressure Specific Heats 값은 사용자가 기존에 입력한 다른 변수값을 토대로 자동으로 계산, 입력된다. Fluid Property의 입력값인 Reynolds Number, Wall Temperature, Laminar Prdttl Number, Turbulent Prandtl Number, Ideal Gas Constant, Ratio Of Specific Heats, Freestream Eddy Viscosity, Freestream Turbulence Intensity 항목을 입력할 수 있는 인터페이스를 제공한다. Constant Volume Specific Heats와 Constant Pressure Specific Heats는 입력값을 바탕으로 자동 계산되므로, 입력을 막고 계산된 값만 보여주는 인터페이스를 제공한다.

Open Save Reset All

Fluid Properties Reference Value Field Variables Solution Variables

Reynolds Number : 0.0000000

Wall Temperature : 0.0000000

Laminar Prandtl Number : 0.7200000

Turbulent Prandtl Number : 0.9000000

Ideal Gas Constant : 287.15000

Ratio Of Specific Heats : 1.4000000

Freestream Eddy Viscosity : 0.0090000

Freestream Turbulence Intensity : 0.0000000

Constant Volume Specific Heats : 717.8750000

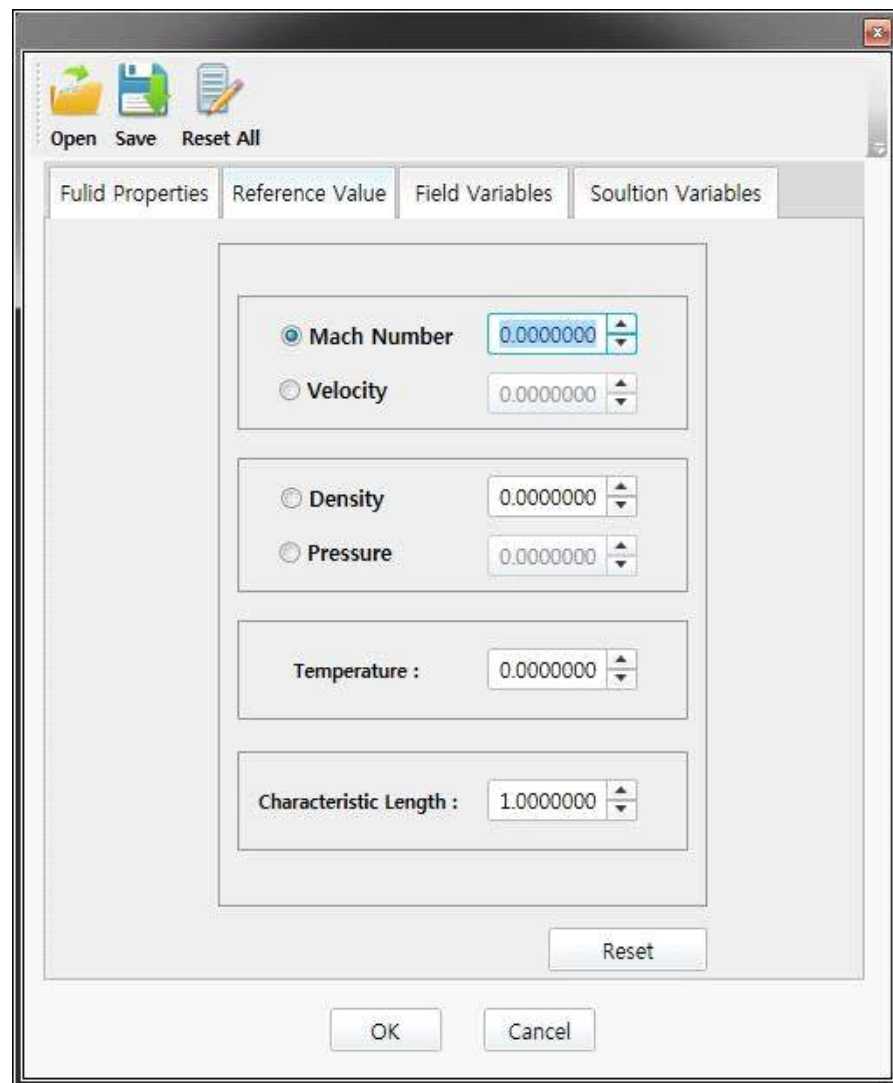
Constant Pressure Specific Heats : 1,005.0250000

Reset

OK Cancel

Fluid Property 입력을 위한 UI

다음 그림은 기본 입력 탭 중 Reference Value를 입력하는 창이다. Mach Number/Velocity, Density/Pressure, Temperature, Characteristic Length를 포함하는 Reference Value를 상수로 입력을 받는다.

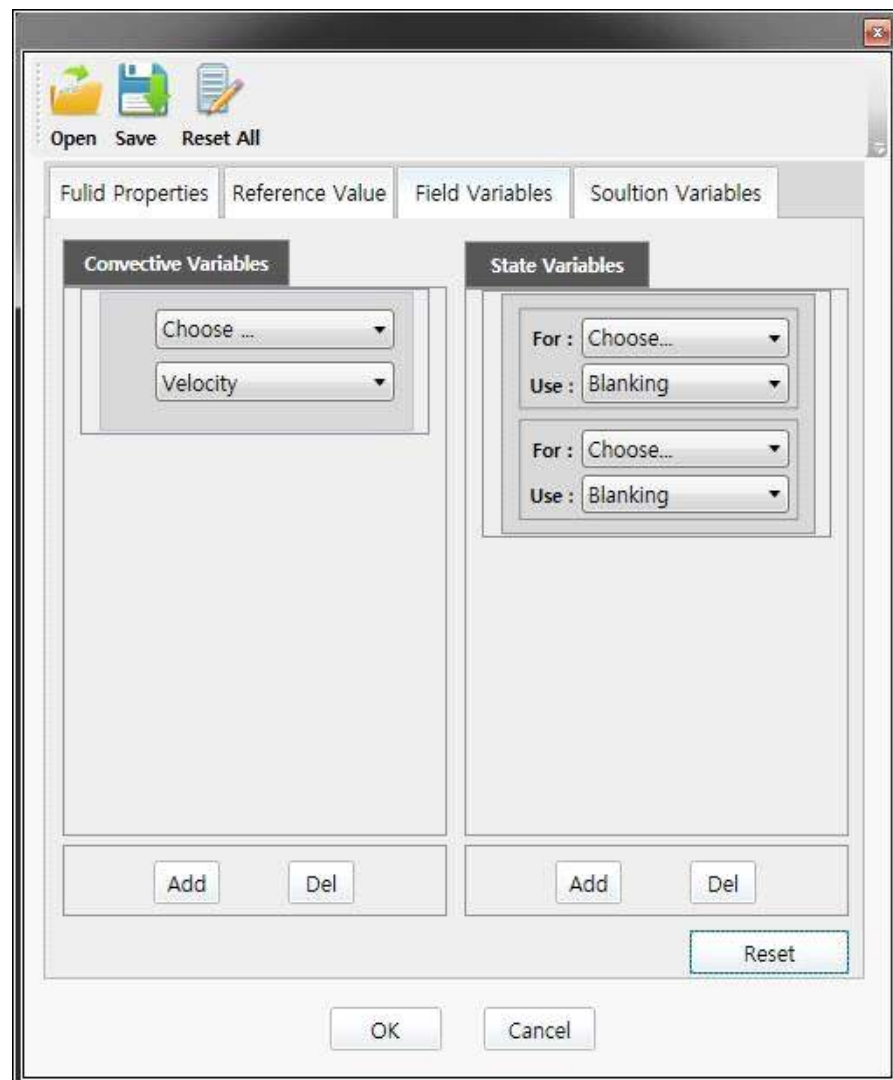


The image shows a software dialog box titled "Reference Value" with a standard Windows-style title bar (minimize, maximize, close buttons). At the top, there are three icons (Open, Save, Reset All) and their corresponding labels. Below these are four tabs: "Fluid Properties", "Reference Value" (which is selected), "Field Variables", and "Solution Variables". The main area of the dialog contains several input fields, each with a radio button to its left. The first group has "Mach Number" (selected) and "Velocity", both with numeric input fields showing "0.0000000". The second group has "Density" and "Pressure", both with numeric input fields showing "0.0000000". The third group has "Temperature :" with a numeric input field showing "0.0000000". The fourth group has "Characteristic Length :" with a numeric input field showing "1.0000000". At the bottom right of the main area is a "Reset" button. At the very bottom of the dialog are "OK" and "Cancel" buttons.

Reference Value 입력을 위한 UI

Field Variable 입력창은 기본적으로 Velocity/Momentum 중 1개의 변수를, Density/Pressure/Temperature/Total Energy 중 2개의 변수를 입력하면 되지만, 더 많은 변수가 사전에 입력돼 있을 경우에는 계산 가능한 2차 변수의 종류가 많아지고, 중간 변수의 유무에 따라 계산시간이 단축될 수 있으므로 2개 이상의 변수를 입력할 수 있도록 설계했다.

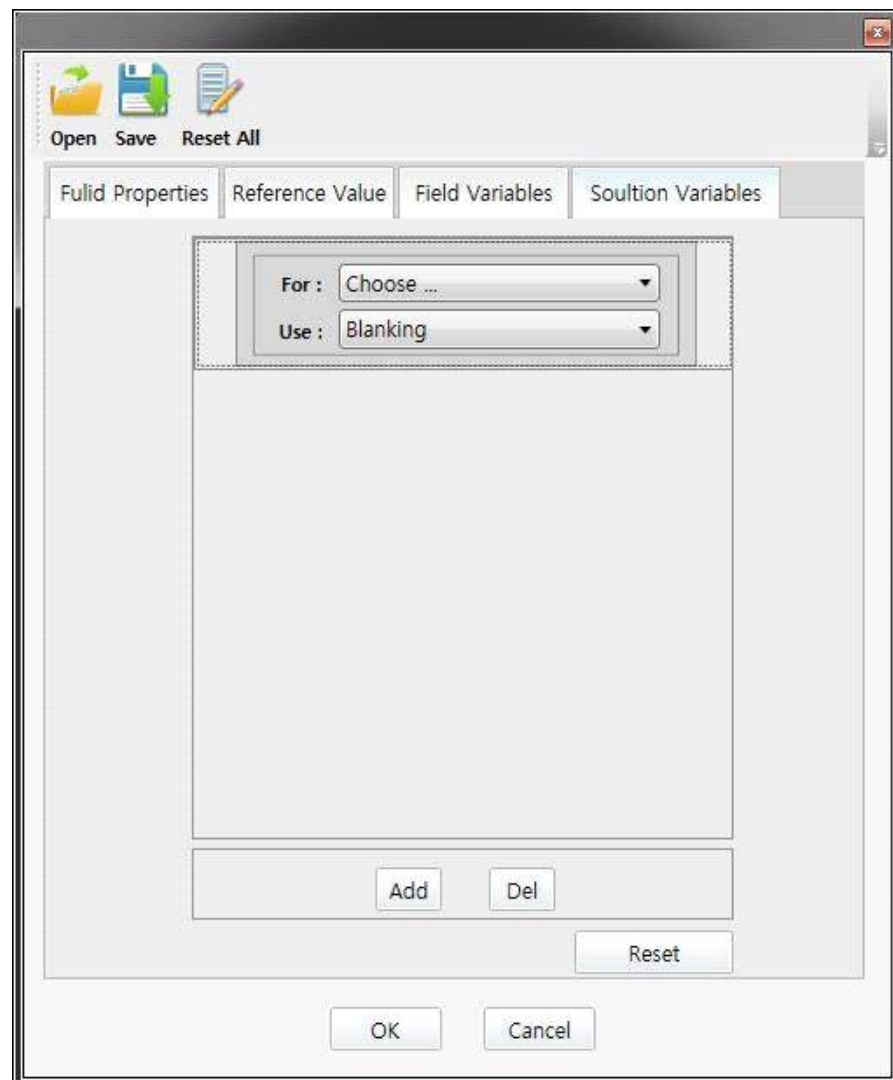
사용자 인터페이스 하단의 Add 버튼을 눌러서 추가하면 원하는 만큼의 입력 단위를 추가해서 변수를 입력하는 것이 가능하다.



Field Variable 입력을 위한 UI

GLOVE의 2차 변수 생성을 위한 사용자 인터페이스의 가장 큰 특징은 Solution Variable을 입력하는 사용자 인터페이스의 제공에 있다. 기존의 field variable 외에 시뮬레이션 해석 코드가 생성한 값이나 이전에 계산해 놓은 2차 변수를 solution variable 탭에서 입력, 재사용함으로써 복잡한 2차 변수 계산에 드는 시간과 경로를 크게 단축하고 연산의 효율성을 높일 수 있다. 이렇게 solution variable로 지정 가능한 변수는 매우 다양하며, 기본 변수 및 2차 변수가 모두 포함된다. Solution variable의 예로는 Velocity Magnitude, Speed of Sound, Mach Number, Velocity Divergence, Internal Energy, Enthalpy, Total Pressure, Total Temperature, Total Enthalpy, Dynamic Viscosity, Heat Conductivity, Velocity Derivatives 등을 들 수 있다.

Solution Variable을 입력하는 사용자 인터페이스는 다음 그림과 같다.



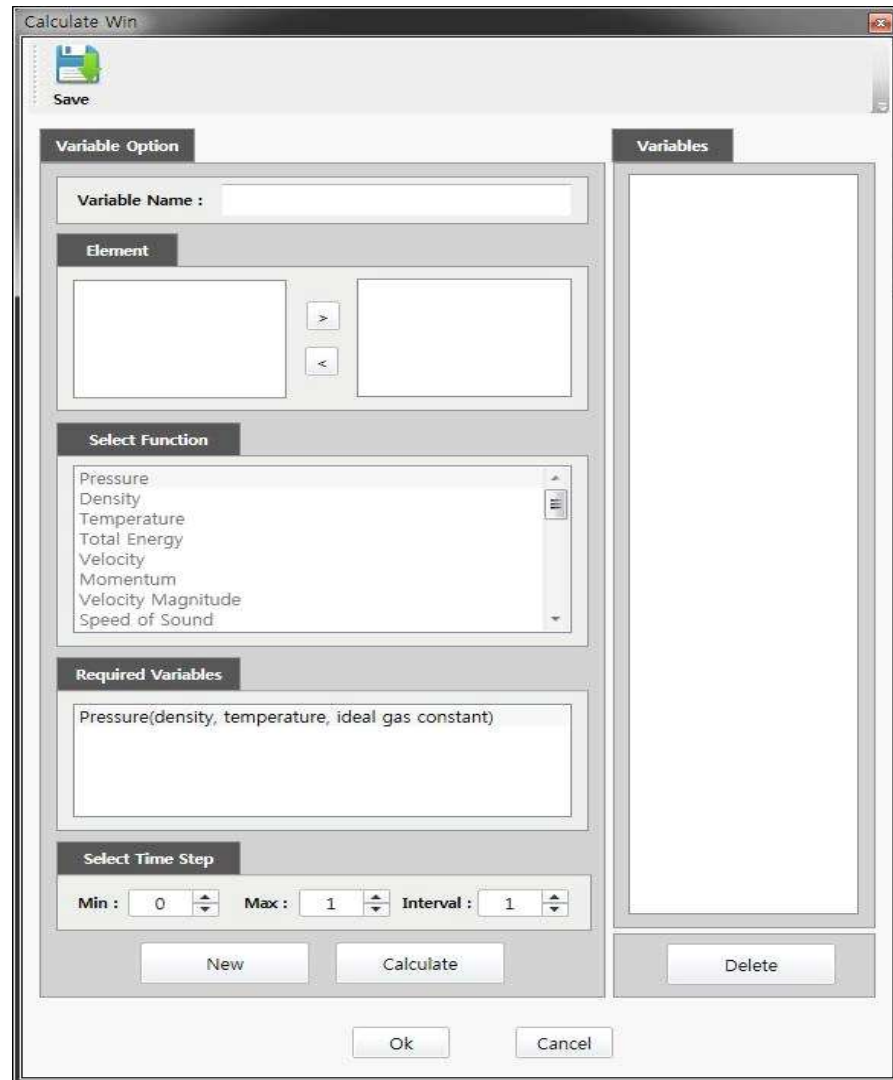
Solution Variable 입력을 위한 UI

Field Variable을 입력할 때와 마찬가지로 Add 버튼으로 항목을 추가해서 가능한 많은 변수를 지정 입력하는 것이 가능하다.

이렇게 사용자 인터페이스를 통해 입력된 field variable과 solution variable은 지정시 부여받은 variable id와 함께 GLOVE 내 자료구조인 변수 맵핑 테이블에 저장됨으로써 생성 가능한 2차 변수 목록을 구성해서 사용자 편의성을 향상시키고 중간 계산값으로 활용됨으로써 연산 비용을 낮추는 역할을 수행한다. 이렇게 저장된 변수 외에 사용자 요청에 의해 새로 생성된 2차 변수 역시 시스템적으로 인지해서 계산의 중간값으로 활용하는 것이 가능한데, 이를 위해 GLOVE는 입력 parameter 및 새로 생성된 변수에 대한 semantics를 저장, 활용하며, 이 semantics를 통해 변수를 인지함으로써 자동으로 2차 변수에 대한 수식을 결정하고 계산한다.

앞서 설명했듯이 semantics는 xml 형식을 가지며, 이를 이용해서 기 생성된 변수를 인지하고 자동으로 수식으로 결정한다. GLOVE는 이렇게 2차 변수 계산에 필요한 변수들을 미리 입력해서 인지하게 함으로써 2차 변수 계산 시마다 파라미터를 입력할 필요가 없으며, semantic 관리를 통해 parameter 지정이 필요 없는 calculator 인터페이스를 구성할 수 있다.

최종적으로 2차 변수를 생성하는 명령을 내리는 calculator 입력창은 다음 그림과 같다.

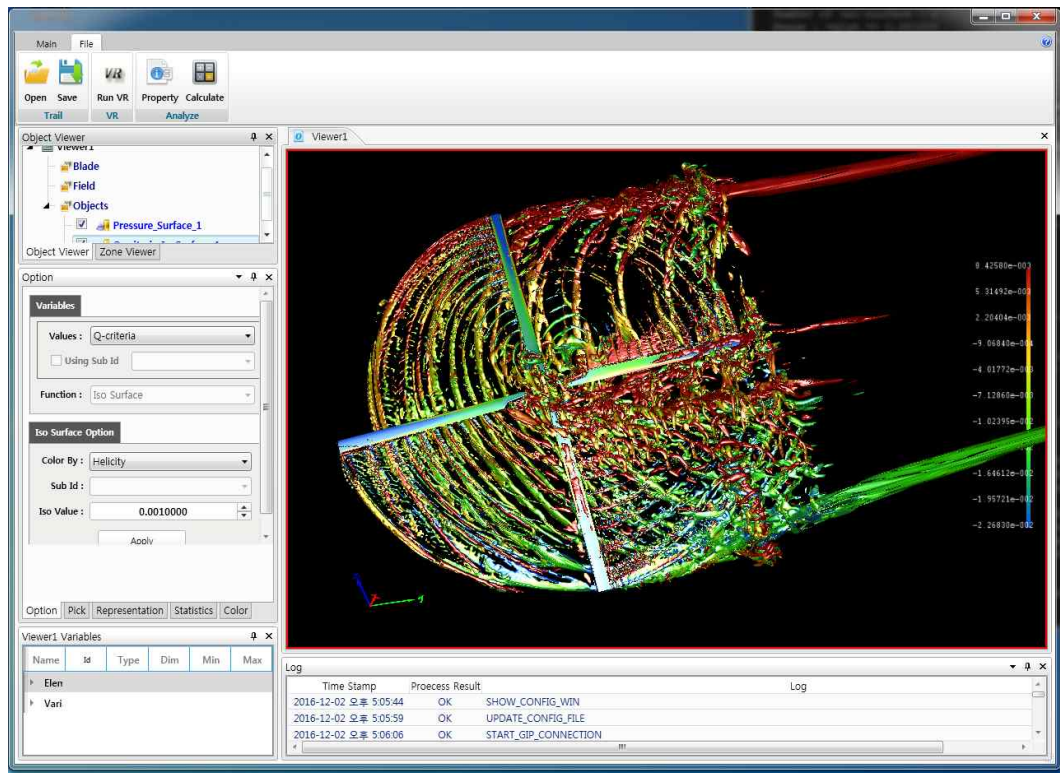


2차 변수 생성을 위한 Calculator UI

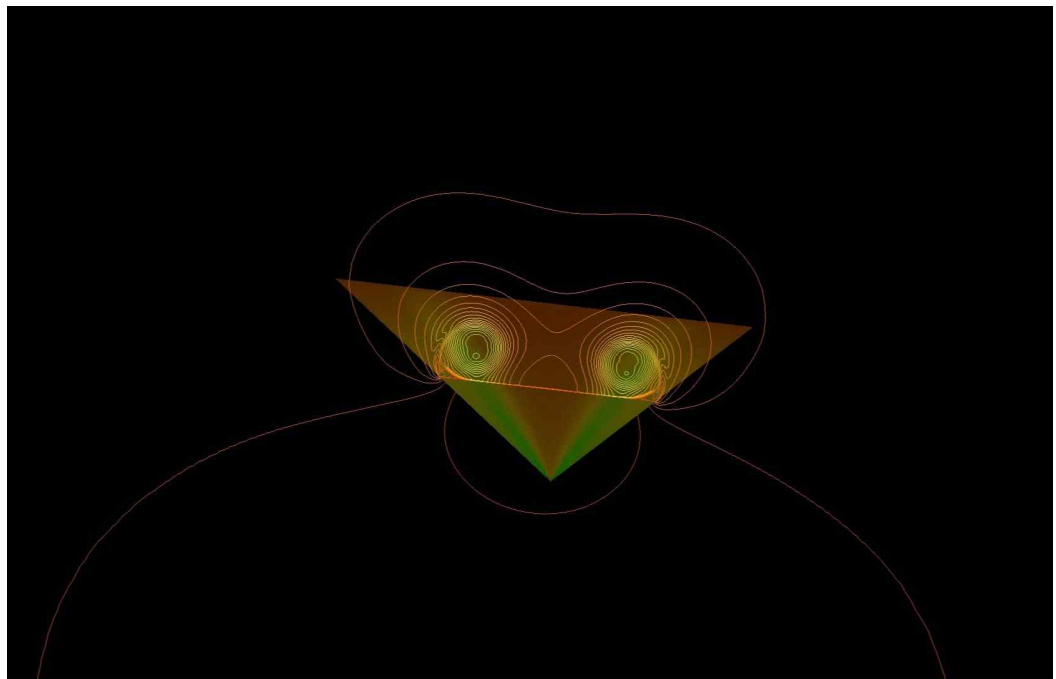
Calculator 사용자 인터페이스에서는 변수명과 영역을 설정하고 나면 Select Function 창에서 입력 가능한 변수에 기반, 계산 가능한 함수를 볼 수 있다. 앞서 강조한 대로 별도의 parameter 지정이 필요치 않으며, 현재 입력된 변수에 따라 자동으로 계산 가능한 2차 변수를 목록화해서 보여주는 사용자 인터페이스를 제공하므로, 사용자가 변수나 수식에 대한 직접적인 파악 없이 단시간에 원하는 2차 변수를 계산하게 하는 것이 가능하다.

다음 그림은 실제로 GLOVE를 사용해서 2차 변수를 생성, 가시화한 결과다. 생성한 변수는 Helicity와 Total Enthalpy다.

Helicity 생성을 위한 사용자 인터페이스



Helicity 가시화 결과



Cutting plane 형태로 가시화한 Total Enthalpy

5. 결론

2차 변수는 1차적으로 유동 해석 솔버(solver)에서 생성한 유동 데이터로부터 수학 및 통계 연산을 이용해서 새롭게 계산하는 변수를 뜻한다. 넓은 의미로 2차 변수는 원 데이터를 통해 생성 가능한 모든 종류의 변수를 지칭할 수 있으며, 일반적으로 유동 해석 분야에서는 압력, 밀도, 속도, 온도를 기본적으로 생성하고 이 값에 근거해서 그 외의 변수를 생성하는 계산을 수행한다.

이렇게 생성할 수 있는 2차 변수 중에는 간단한 계산을 통해 생성할 수 있는 것도 있지만, 복잡한 수식을 적용해야만 생성할 수 있는 것도 있으며, 변수에 따른 다양한 알고리즘을 적용해서 생성할 수 있다. 특히 변수간 상호 관계에 의해 필요 변수를 중간중간 계산하며 최종 변수를 생성하는 경우도 존재할 수 있는데, 이 과정에서 많은 컴퓨팅 자원이 소요되며, 특히 대용량 데이터의 변수 계산은 고성능 컴퓨팅 자원을 필요로 할 정도로 시간과 자원이 소요된다.

본 문서에서는 GLOVE 고성능 컴퓨팅 환경에서 2차 변수 생성을 효율적으로 수행할 수 있는 기능과 인터페이스를 소개했다. GLOVE의 2차 변수 생성의 효율성은 2가지로 측면에서 생각해볼 수 있다. 우선 사용자 인터페이스 측면에서 활용 가능한 변수를 사전에 지정하거나 자동으로 지정해서 시스템이 생성 가능한 2차 변수를 자동으로 목록화할 수 있게 함으로써 사용자가 현재 상태에서 생성 가능한 변수를 파악하기 위해 들여야 하는 시간과 노력의 소모를 줄임으로써 사용성을 대폭 개선했으며, 최종 변수 계산을 위한 중간 변수를 시스템적으로 인지함으로써 계산 시간을 효과적으로 줄일 수 있었다. 또한, 동일한 2차 변수에 도달하기 위한 다양한 루트를 제공함으로써, 연산 가능한 2차 변수의 범위를 늘렸으며, 연산 비용을 감안한 최종 루트 파악 알고리즘을 구현함으로써 연산에 드는 시간과 자원을 감소시킬 수 있었다.

GLOVE의 2차 변수 생성 기법은 CFD 응용을 위한 데이터 분석 및 가시화 도구에서는 물론 다양한 관련 콘텐츠에서 활용 가능하며, 향후 CFD 콘텐츠 분석을 보다 효과적으로 수행할 수 있을 것으로 기대된다.