

Surface film model을 이용한 강판의 냉각 모델 기초 연구

이원강¹

¹서울대학교 조선해양공학과

목차

I. 연구 개요

II. 해수 공급 시스템 모델링

III. 해석 솔버 개발

IV. 해석 결과

V. 결론 및 향후 연구

목차

I. 연구 개요

II. 해수 공급 시스템 모델링

III. 해석 솔버 개발

IV. 해석 결과

V. 결론 및 향후 연구

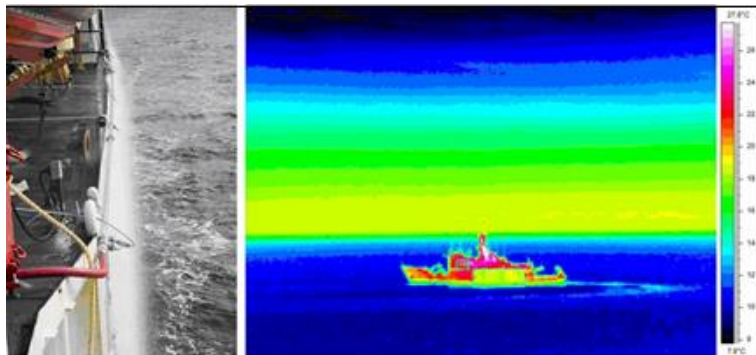
연구 배경 및 필요성

■ 연구 배경

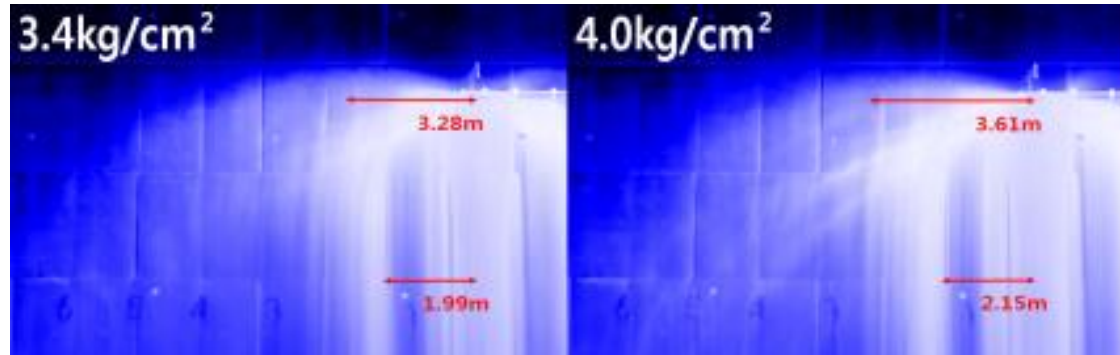
- 함정의 적외선 스텔스 기술은 함정이 방출하는 적외선 신호를 억제함으로써 피탐성은 낮추고, 생존성을 높이는 기술임
- 함정이 방출하는 적외선 신호의 원인은 함정의 내부(내부 열원)와 외부(태양 열 복사)로 구분됨
- 현대 함정에는 함 외부에 설치된 해수 분사 노즐을 통해 해수를 함정 표면에 분사하여 선체 표면을 냉각시켜, 방출되는 적외선 신호를 저감함

■ 연구 필요성

- 설계변인에 따라 해수가 분사되는 영역을 추정하고, 해당 영역에서 선체 냉각 성능의 추정이 필요함



< 해수 분사 시스템을 이용한 적외선 신호 저감* >



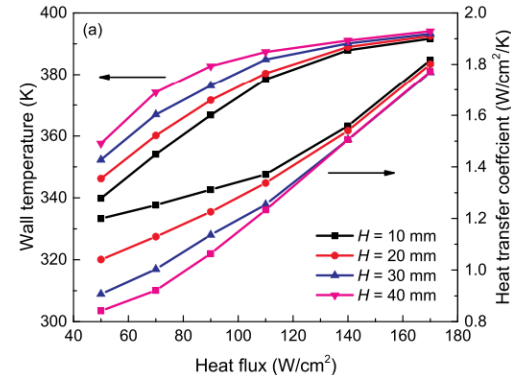
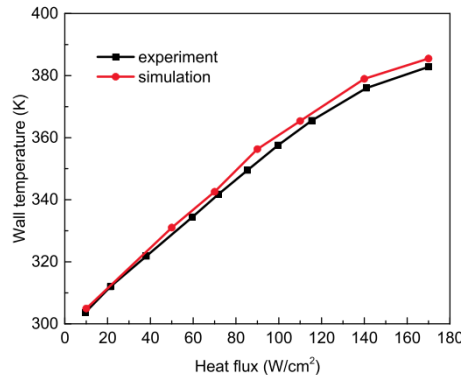
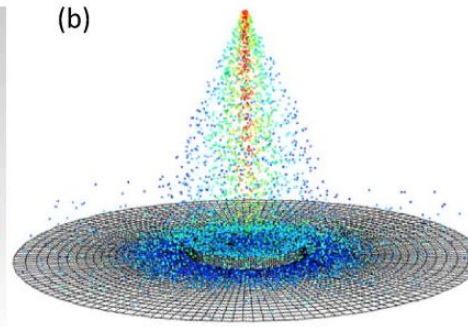
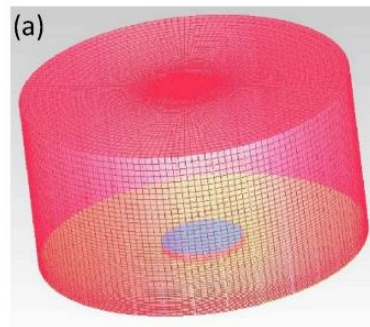
< Thermal image of nozzle experiment* >

*Yoon, S., Jung, H., & Cho, Y. (2017). An Experimental Study on the Dispersion Characteristics of Seawater Injection Nozzle for Hull Cooling. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 20(6), 767-773.

* 대한조선학회(2012), "함정", 텍스트북스

선행연구 조사 (1)

- 전산유체역학을 사용한 냉각 효과 추정
 - 스프레이의 거리에 따른 냉각 효과를 추정함
 - 해석자로 Ansys Fluent를 사용함
 - 노즐과의 거리 1-4cm에 위치한 직경 8cm의 디스크에 스프레이를 분사하여 냉각 효과를 추정함



* Raju, M., Sarma, R. N., Suryan, A., Nair, P. P., & Nižetić, S. (2022). Investigation of optimal water utilization for water spray cooled photovoltaic panel: A three-dimensional computational study. *Sustainable energy technologies and assessments*, 51, 101975.

선형연구 조사 (2)

- 태양광 발전에 사용하는 photovoltaic panel 냉각을 위해, 다양한 위치에서 스프레이를 분사하고, 분사한 스프레이에 의한 냉각 효과를 추정
 - Ansys Fluent를 사용하였으며, flow rate를 변화하여 해석 수행

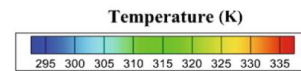
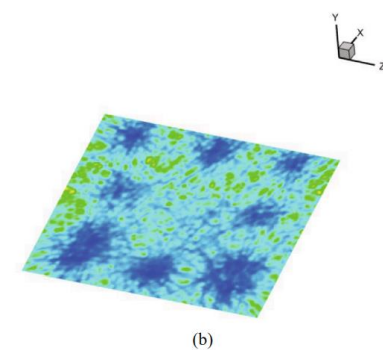
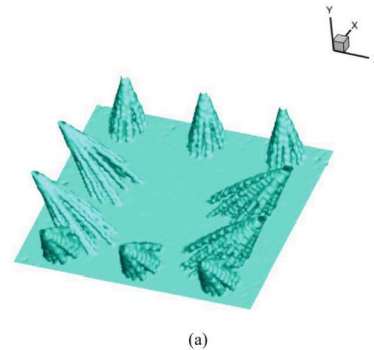
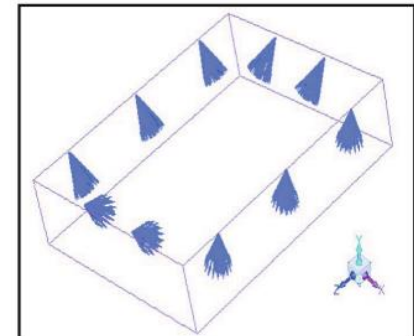
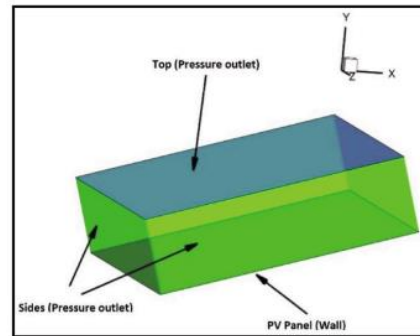


Table 2
Flow through nozzles for top cooling.

| Flow Rate (L/h) | Flow Rate (kg/s) | Spray Velocity (m/s) |
|-----------------|------------------|----------------------|
| 70 | 0.0196 | 2.50 |
| 90 | 0.0252 | 3.21 |
| 112.5 | 0.0315 | 4.02 |
| 130 | 0.0364 | 4.65 |
| 150 | 0.0420 | 5.36 |
| 170 | 0.0476 | 6.08 |
| 190 | 0.0532 | 6.79 |
| 250 | 0.0700 | 8.94 |
| 300 | 0.0840 | 10.73 |
| 500 | 0.1400 | 17.88 |

* Raju, M., Sarma, R. N., Suryan, A., Nair, P. P., & Nizetić, S. (2022). Investigation of optimal water utilization for water spray cooled photovoltaic panel: A three-dimensional computational study. *Sustainable energy technologies and assessments*, 51, 101975.

연구 목표 및 내용

■ 연구 목표

- 해수 공급 시스템의 해수 분사 영역 추정
- OpenFOAM을 사용한 선체 표면의 냉각 효과 추정
 - 추정한 해수 분사 영역 이용

■ 연구 내용

- 설계변인에 따라 따라 해수가 분사되는 영역 추정
 - 한화오션 측에서 제공한 실험 데이터 이용
- 물과 강판 사이 열전달 효과를 계산할 수 있는 해석 솔버 개발
 - Surfaec film model을 이용한 reactingParcelFoam 코드 분석
 - reactingParcelFoam 코드를 이용하여 새로운 해석 솔버 개발
- 개발한 솔버를 이용한 해석
 - 간단한 예시 케이스를 구성하여 해석 수행 후, 이론적으로 계산한 결과와 비교

목차

I. 연구 개요

II. 해수 공급 시스템 모델링

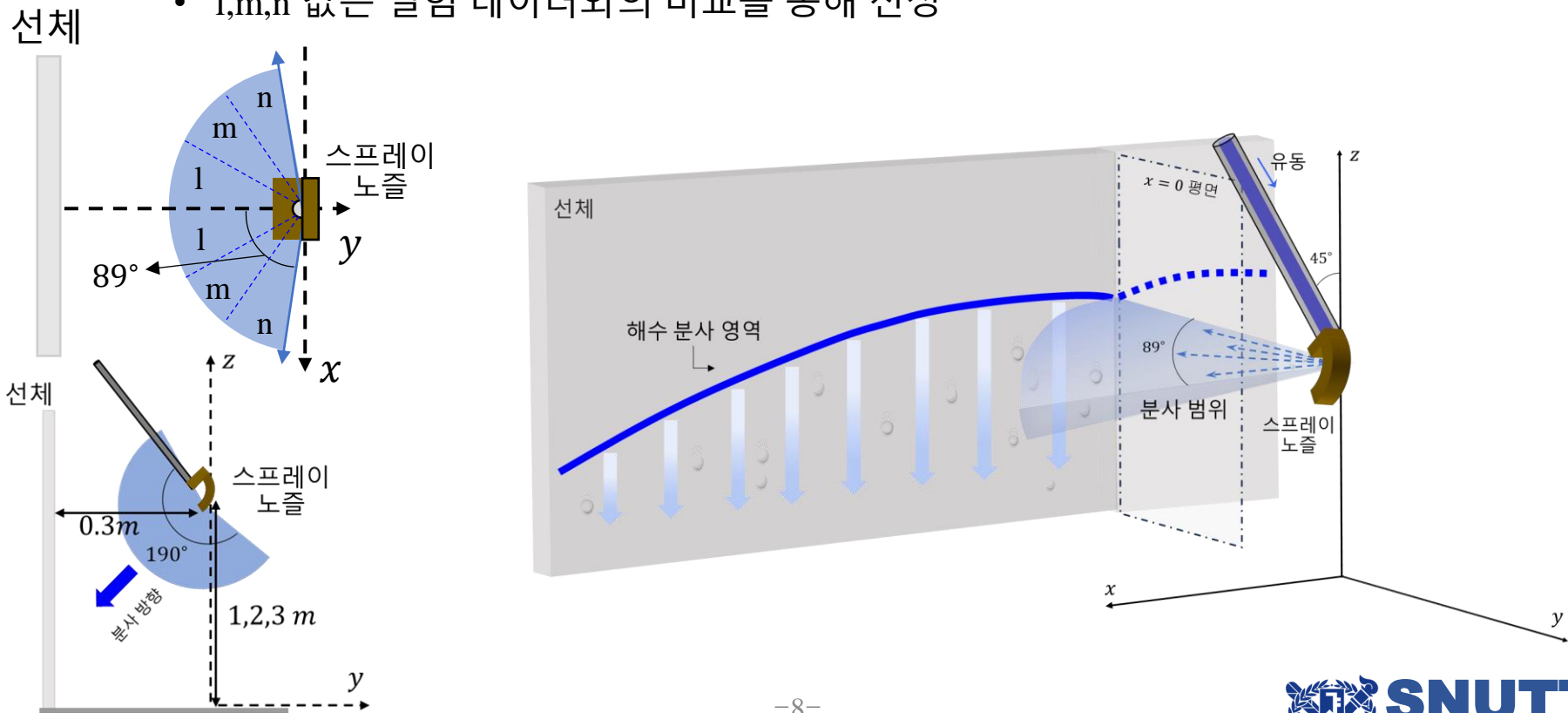
III. 해석 솔버 개발

IV. 해석 결과

V. 결론 및 향후 연구

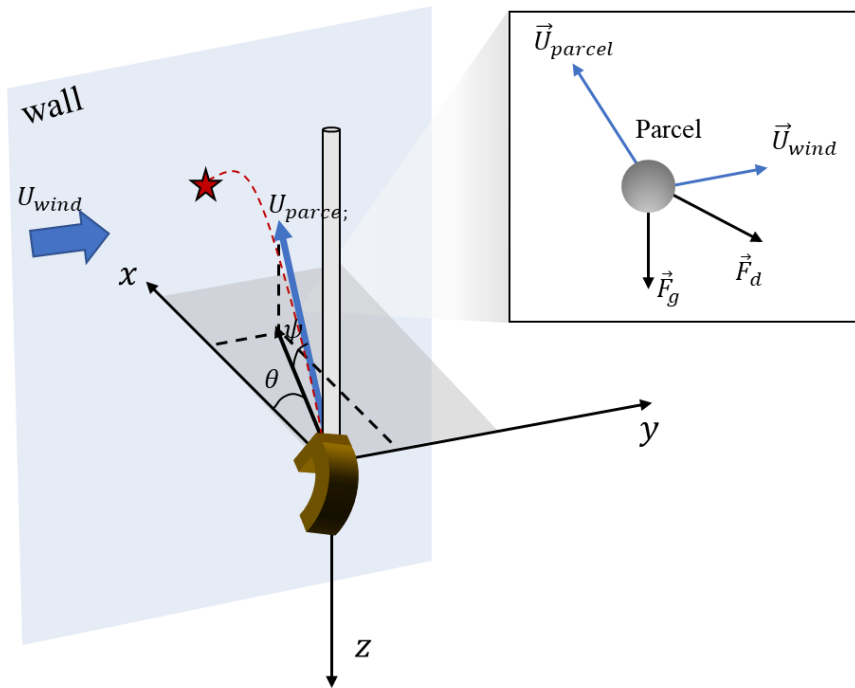
해수 공급 시스템 모델링

- 해수는 부채꼴 형태로 분사된다고 가정함
 - xy, yz 평면 상 최대 분사 각도는 한화오션 측으로부터 제공받은 데이터를 바탕으로 선정함
 - 노즐의 분사 특성을 고려하여 분사 각도에 따른 입자 개수를 다르게 설정
 - 그림에서의 l, m, n 은 각 분사 각도 범위에 포함되는 유체 입자 개수를 의미
 - l, m, n 값은 실험 데이터와의 비교를 통해 선정



이론적인 방법을 이용한 분사 영역 추정

- 유체 입자에 대한 가정 및 가해지는 힘
 - 유체 입자의 크기, 속도가 주어질 경우 함정 표면에 입자가 충돌하는 위치를 이론적으로 계산할 수 있음
 - 유체 입자의 모양은 **구로 일정하게** 유지되고, break-up은 없다고 가정
 - 모두 **동일한 크기의** 유체 입자가 분출된다고 가정
 - 방향에 상관없이 유체 입자의 **속력은 모두 동일하다고** 가정



- 아래 수식과 같이 **중력과, 항력만** 고려
- 속도에 대한 비선형 미분 방정식 이기 때문에 **해석해가 존재하지 않음**
- 시간에 따라 적분하여 최종 위치 계산

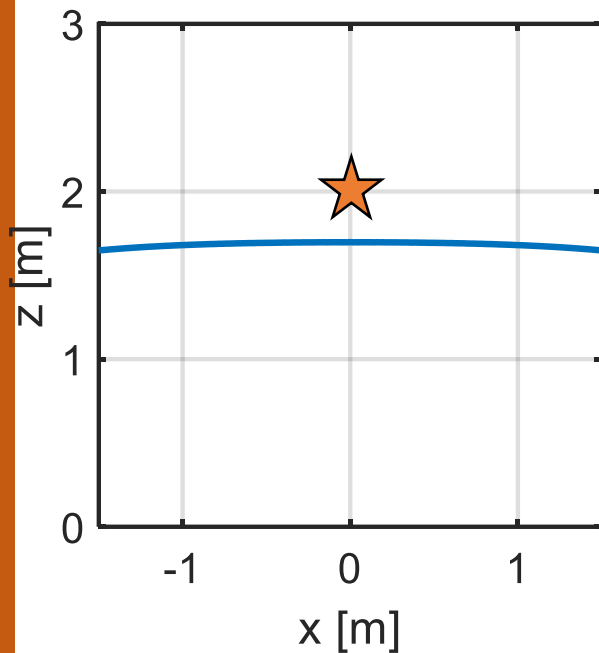
$$\frac{\pi}{6} \rho_{\text{water}} d^3 \frac{d\vec{U}}{dt} = \vec{F}_g + \vec{F}_d = m\vec{g} + \vec{F}_d$$

$$\vec{F}_d = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} C_d \frac{\pi}{4} d^2 |\vec{U} - \vec{U}_{\text{wind}}| (\vec{U} - \vec{U}_{\text{wind}})$$

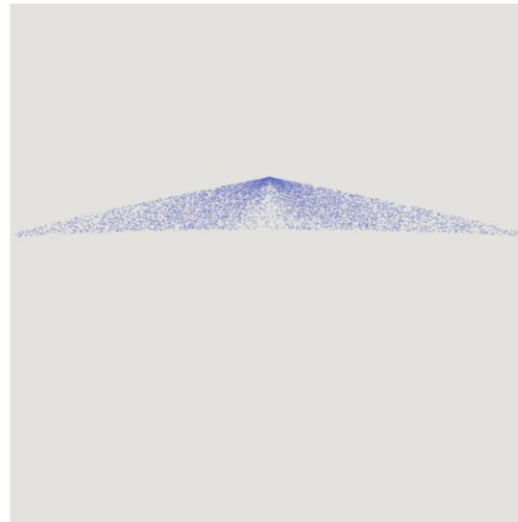
$$C_d \cong 0.5$$

분사 영역 추정 비교

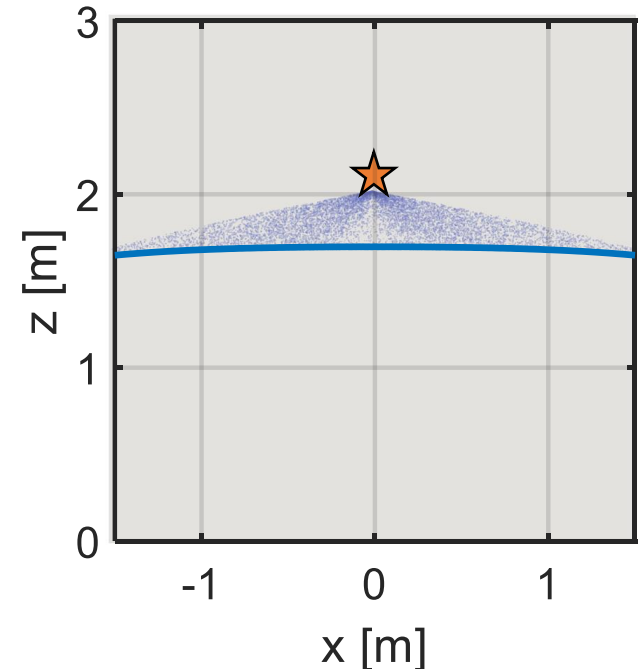
- 이론적으로 구한 분사 영역과 전산 해석을 통한 분사 영역 비교
 - 전산 해석은 OpenFOAM의 reactingParcelFoam 솔버 사용
 - 스프레이 분사 라이브러리를 수정하여 앞서 가정한 방식과 같이 분사 영역 추정
 - 아래 그림은 이론적으로 구한 최종 분사 영역과 전산 해석을 통한 분사 영역을 비교한 그림임
 - 이론적으로 분사영역을 추정하는 것이 더 효율적인 추정 결과임



< 이론적으로 구한 분사 영역 >



< 전산 해석으로 구한 분사 영역 >



< 두 결과의 비교 >

분사 영역 추정 기법 선정

- 전산 유체역학 해석을 이용한 분사 영역 추정 방법의 문제점
 - 연구 목적과 부합하지 않음
 - 연구의 주된 목적은 **함정 표면에서 얇은 유체 막으로 인한 선체 냉각 성능을 추정**
 - 입자의 대기 중 분포가 중요하지 않고, 입자의 분사 중 기화, break-up과 같은 복잡한 현상은 다루지 않음
 - 특정 속도, 특정 크기의 유체 입자가 어느 위치에서 선체에 충돌하는지가 중요
 - 따라서, 해석 중 모든 입자들을 하나하나 모두 구현할 필요가 없음
 - 계산 용량이 늘어남
 - 입자들을 위치시키기 위해 선체 표면과 노즐 사이 공간을 해석 영역으로 설정
 - 불필요한 메모리 소모
 - 동일한 궤적으로 이동하는 입자들을 모두 메모리 상에 구현 필요
 - 해석이 진행됨에 따라 해석 영역에 더 많은 입자들이 해석 공간 상에 위치할수록 **계산 속도가 급격히 저하됨**
 - 이론적으로도 동일한 분사 영역 추정 가능

목차

I. 연구 개요

II. 해수 공급 시스템 모델링

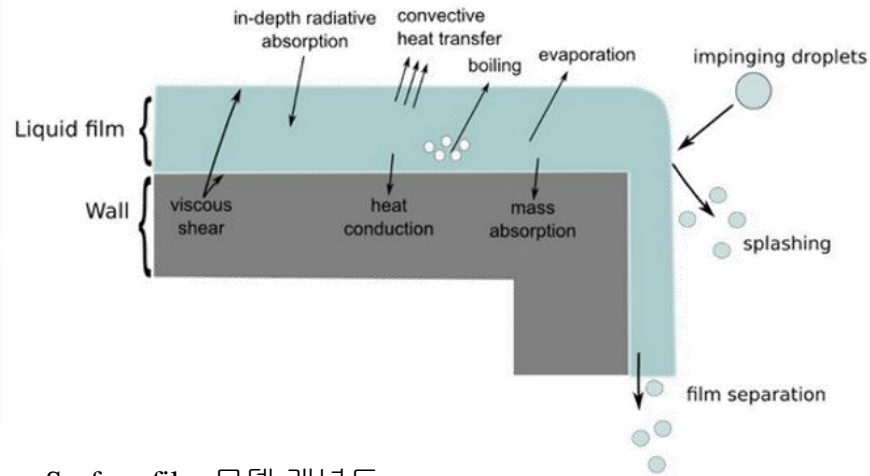
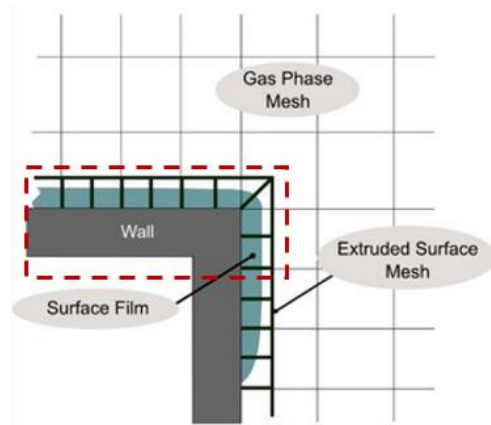
III. 해석 솔버 개발

IV. 해석 결과

V. 결론 및 향후 연구

해수에 의한 액체 박막 모사 기법

- 액체 박막 모사를 위해 surface film model을 사용
 - 액체 박막에서 벽면과 수직한 방향의 속도는 무시할 수 있다고 가정
 - 벽면과 평행한 방향의 운동량, 에너지의 diffusion이, 벽면과 수직한 방향의 diffusion에 비해 무시할 수 있을 만큼 작다고 가정
- 벽면 표면에 가상의 extruded surface mesh를 구성하고, extruded surface mesh에서 surface film의 두께에 대한 지배 방정식을 구성
 - 지배 방정식을 풀이하여 surface film의 이송 계산



<Surface film 모델 개념도>

액체 박막 모사를 위한 surface film 지배 방정식

- Control volume에 대하여 지배 방정식을 세워, film의 높이인 δ 가 곱해진 형태로 되어 있음

- Continuity equation

$$- \frac{\partial \rho \delta}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho \delta U] = S_{\rho \delta}$$

- $\int \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = A \int_0^{\delta} \frac{\partial \rho}{\partial t} dy = A \frac{\partial \rho \delta}{\partial t}$

- $\int \nabla \cdot [\rho u] dV = \nabla \cdot \int_0^{\delta} [\rho u] dV = \nabla \cdot A \int_0^{\delta} [\rho u] dy = A \nabla \cdot \rho \delta \cdot \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} [u] dy = A \nabla \cdot [\rho \delta U]$

- Momentum equation

$$- \frac{\partial \rho \delta U}{\partial t} + \nabla_s \cdot [\rho \delta U U] = -\delta \nabla_s p + S_{\rho \delta U}$$

- $\int \frac{\partial \rho u}{\partial t} dV = A \int_0^{\delta} \frac{\partial \rho u}{\partial t} dy = A \frac{\partial \rho \delta U}{\partial t}$

- $\int \nabla \cdot [\rho u u] dV = \nabla \cdot \int_0^{\delta} [\rho u u] dV = \nabla \cdot \rho A \int_0^{\delta} [u u] dy = A \nabla \cdot \rho \delta \cdot \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} [u u] dy = A \nabla \cdot [\rho \delta U U]$

- Enthalpy equation (Energy equation)

$$- \frac{\partial \rho \delta h}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho \delta U h] = S_{\rho \delta h}$$

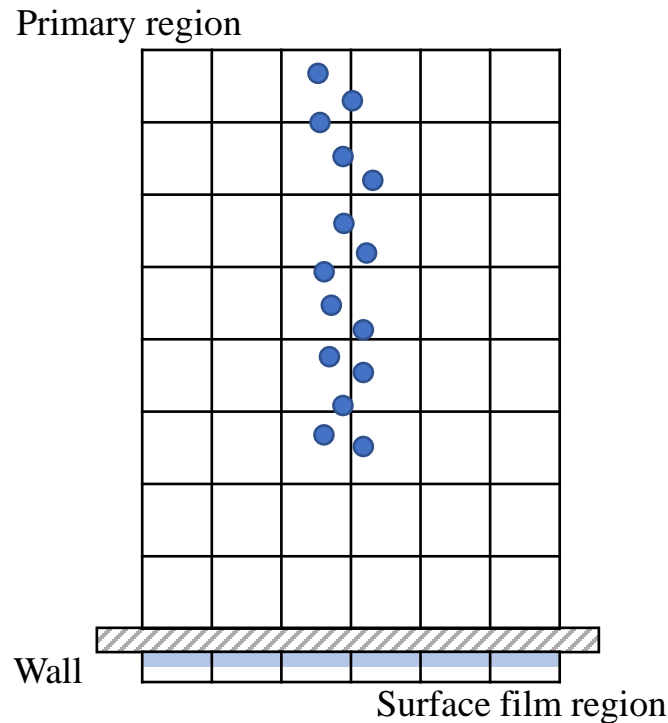
- $\int \frac{\partial \rho h}{\partial t} dV = A \int_0^{\delta} \frac{\partial \rho h}{\partial t} dy = A \frac{\partial \rho \delta h}{\partial t}$

- $\int \nabla \cdot [\rho u h] dV = \nabla \cdot \int_0^{\delta} [\rho u h] dV = \nabla \cdot \rho A \int_0^{\delta} [\rho u h] dy = A \nabla \cdot \rho \delta \cdot \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} [u h] dy = A \nabla \cdot [\rho \delta U h]$

Surface film model을 이용한 OpenFOAM의 기본 솔버

■ ReactingParcelFoam

- 기본적으로 multi-region solver 형식으로 구성
 - 대기 중의 영역인 primary region 과 surface film이 존재하는 surface film region으로 구성
- reactingParcelFoam은 primary region에서 물이 분사되는 과정을 구현하는 spray model과, surface film region 에서 film의 유동을 계산하는 surface film model이 합쳐져 있음



ReactingParcelFoam 솔버 구성

- 세부적인 솔버 구성은 아래와 같이 나뉨
 - 1. Parcel의 움직임을 tracking
 - 2. Surface film region에서 유동 해석
 - 3. Primary region(대기중의 영역)에서 유동 해석
- Primary region에서 유동은 관심 없음
 - 그러나, primary region을 풀지 않아도 surface film 라이브러리 자체가 무조건 multi-region 격자에서 작동하도록 되어 있음
 - 격자는 multi-region으로 구성해야 함
- Parcel의 움직임을 tracking하는 것도 관심 없음
- Surface film region에서의 유동 해석하는 부분은 반드시 필요

```
parcels.evolve();
surfaceFilm.evolve();

if (solvePrimaryRegion)
{
    if (pimple.nCorrPimple() <= 1)
    {
        // #include "rhoEqn.H"
    }

    // --- PIMPLE loop
    while (pimple.loop())
    {
        // #include "UEqn.H"
        // #include "YEqn.H"
        // #include "EEqn.H"

        // --- Pressure corrector loop
        while (pimple.correct())
        {
            #include "pEqn.H"
        }

        if (pimple.turbCorr())
        {
            turbulence->correct();
        }
    }

    rho = thermo.rho();
}
```

< ReactingParcelFoam main문 >

강판 냉각 열전달 해석 솔버 설명

- ReactingParcelFoam에서 spray model을 구현하지 않고, **surface film model만** 사용하는 것으로 솔버 수정
 - Primary region에서의 유동 해석하는 부분을 제거함
- Surface film 내부 유동 해석 수행 시, 계산되는 **source term 수정**
 - Source term은 Parcel 라이브러리와 surface film 라이브러리를 이용하여 계산됨
 - Parcel 라이브러리에서 계산되는 source term은 필요가 없으므로 제거함
 - addSource 함수를 이용하여 앞서 **추정한 해수 분사 data를 source term으로 가함**
 - addSource 함수는 surface film 라이브러리의 thermoSingleLayer 클래스 안에 있는 멤버 함수로 surface film 유동에 source term을 update하는 함수임
 - Source term은 특정 주기마다 추가되는 식으로 하여, **quasi-steady로 해석을 수행할 수 있게 수정함**

강판 냉각 열전달 해석 솔버 설명 – surface film 라이브러리 (1)

- Surface film 라이브러리에서는, splash, separation, evaporation, radiation 등의 필요 없는 option은 끄

 : addSource 함수로 계산

 : Surface film 라이브러리에서 option으로 구현

- Continuity equation ($\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho U] = S_{\rho\delta}$)

- $S_{\rho\delta} = \underbrace{S_{\rho\delta,imp} (= S_{\rho\delta,abs} + S_{\rho\delta,spl})}_{\text{blue dashed box}} + \underbrace{S_{\rho\delta,vap} + S_{\rho\delta,sep}}_{\text{orange dashed box}}$

- ✓ $S_{\rho\delta}$ 는 단위면적당 총돌($S_{\rho\delta,imp} =$ 흡수($S_{\rho\delta,abs}$) or 튼($S_{\rho\delta,spl}$)), 증발($S_{\rho\delta,vap}$), 분할($S_{\rho\delta,sep}$) 등에 의한 질량소스로 나뉨

강판 냉각 열전달 해석 솔버 설명 – surface film 라이브러리 (2)

- Momentum equation ($\frac{\partial \rho \delta U}{\partial t} + \nabla_s \cdot [\rho \delta U U] = -\delta \nabla_s p + S_{\rho \delta U}$)

- $p = p_{imp} (= p_{abs} + p_{spl}) + p_{vap} + p_{\sigma} + p_{\delta} + p_g$
 ✓ 압력항은 총돌($p_{imp} =$ 흡수(p_{abs}) or 튼(p_{spl})), 증발(p_{vap}), 모세관(p_{σ}), 정(p_{δ}), 상변화(p_g) 압력으로 나뉨
- $S_{\rho \delta U} = S_{\rho \delta U, imp} (= S_{\rho \delta U, abs} + S_{\rho \delta U, spl}) + \tau_g - \tau_w + \tau_{mar} + \rho g \delta + \tau_{\theta} + S_{\rho \delta U, sep}$
 ✓ $S_{\rho \delta U}$ 는 총돌($S_{\rho \delta U, imp} =$ 흡수($S_{\rho \delta, abs}$) or 튼($S_{\rho \delta, spl}$)), gas-film 사이 전단응력(τ_g), wall-film(τ_w) 경계면에서의 전단응력, 열 모세관 응력(τ_{mar}), 체적력($\rho g \delta$), 접촉각 힘(τ_{θ}) 등으로 나뉨

- Enthalpy equation ($\frac{\partial \rho \delta h}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho \delta U h] = S_{\rho \delta h}$)

- $S_{\rho \delta h} = S_{\rho \delta h, imp} (= S_{\rho \delta h, abs} + S_{\rho \delta h, spl}) + \dot{q}_g'' - \dot{q}_w'' + S_{\rho \delta h, vap} + S_{\rho \delta h, rad} + S_{\rho \delta h, sep}$
 ✓ $S_{\rho \delta h}$ 는 gas로부터 surface film으로의 대류 열 플럭스(\dot{q}_g''), surface film으로부터 벽으로의 대류 열 플럭스(\dot{q}_w''), 증발($S_{\rho \delta h, vap}$), 복사($S_{\rho \delta h, rad}$), 총돌($S_{\rho \delta h, imp}$), 튼($S_{\rho \delta h, spl}$), 박막 분할($S_{\rho \delta h, sep}$), 고체 벽에 흡수되는 질량에 의한 에너지 손실($S_{\rho \delta h, abs}$)으로 나뉨

열전달 라이브러리 수정

- 기존의 surface film과 벽면 사이의 열전달 효과를 계산하는데 필요한 열전달계수는, 해석 케이스 파일의 dictionary 내에 적혀 있는 일정한 값을 이용하여 계산됨
 - $\dot{q}_w'' = h_{\text{conv},w}(T_{\text{wall}} - T_{\text{fluid}})$
- 열전달계수 $h_{\text{conv},w}$ 는 Al Khalil*(1991)에 의해, 아래의 식과 같이 계산됨
 - $\overline{Nu}_f = \frac{h_{\text{conv},w}\delta}{k} = 3.2 + 0.000237Re_f$
 - 열전달계수 $h_{\text{conv},w}$ 을 위의 식에 의해 계산되도록 라이브러리를 수정함

*AL-KHALIL, K. M., KEITH, T. G. J., & de Witt, K. J. (1991). Hydrodynamic and thermal analysis of rivulet flow down a vertical solid surface. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 1(1), 63-76.

목차

I. 연구 개요

II. 해수 공급 시스템 모델링

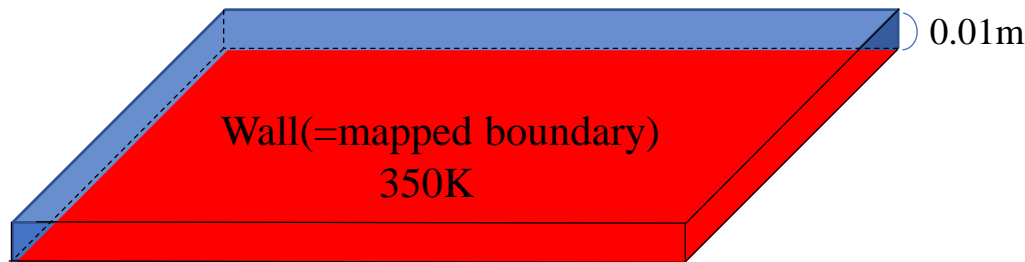
III. 해석 솔버 개발

IV. 해석 결과

V. 결론 및 향후 연구

예시 케이스 구성

- 직사각형 평판 위에 물이 놓여있는 상황의 예시 케이스 구성
 - 유체인 물과 고체인 벽면 사이의 열전달 효과 계산
 - 평판 온도는 350 K, 물 온도는 300 K으로 설정
 - Surface film의 두께는 0.01m로 설정
 - 물과 벽면사이 전달되는 열 플럭스는 아래와 같이 계산됨
 - $\frac{\partial \rho \delta h}{\partial t} = -\dot{q}_w'' = h_{conv,w}(T_{wall} - T_{film}) \rightarrow \frac{h^{i+1}\delta - h^i\delta}{\Delta t} = \frac{h_{conv,w}(T_{wall} - T_{film})}{\rho}$
 - 한 time step ($\Delta t=1$)이 지난 후, 물의 온도는 아래와 같이 계산됨
 - $\overline{Nu}_f = \frac{h_{conv,w}\delta}{k} = 3.2 + 0.000237Re_f \rightarrow h_{conv,w} = 192$
 - $h^{i+1} = h^i + \frac{h_{conv,w}(T_{wall} - T_{film})}{\rho\delta} \Delta t \rightarrow T^{i+1} = T^i + \frac{1}{c_p} \frac{h_{conv,w}(T_{wall} - T_{film})}{\rho\delta} \Delta t$
 $= 300 + \frac{1}{4183} \cdot \frac{192 \cdot (350 - 300)}{1000 \cdot 0.01} \cdot 1 = 300.233$



< 예시 케이스 구성 >

예시 케이스 해석 결과

- 한 time step ($\Delta t = 1$)이 지난 후의 해석 결과 확인
 - 직접 계산한 결과와 해석 결과가 동일한 것을 확인

■ 경계 조건

| | Temperature | Velocity | Delta |
|----------------|-------------|----------|---------|
| Side | Neumann | slip | Neumann |
| ExtrudedFace | Neumann | Slip | Neumann |
| MappedBoundary | Dirichlet | No slip | Neumann |

■ 수치해석 기법

- Time discretization scheme
 - Crank-Nicolson scheme
- Spatial discretization scheme
 - Gradient scheme: Linear
 - Divergence scheme: Second-order upwind

```
Starting time loop
Courant Number mean: 0 max: 0
Film max Courant number: 0
deltaT = 1
Time = 1

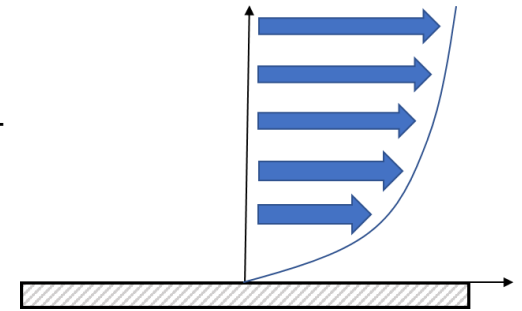
Solving 3-D cloud reactingCloud1
Cloud: reactingCloud1
Current number of parcels = 0
Current mass in system = 0
Linear momentum = (0 0 0)
[Linear momentum] = 0
Linear kinetic energy = 0
model:
  number of parcels added = 0
  mass introduced = 0
Parcels absorbed into film = 0
New film detached parcels = 0
New film splash parcels = 0
Parcel fate (number, mass)
- escape = 0, 0
- stick = 0, 0
Temperature min/max = 0, 0
Mass transfer phase change = 0
Mass transfer devolatilisation = 0
Mass transfer surface reaction = 0

Evolving thermoSingleLayer for region wallFilmRegion
diagonal: Solving for deltaf*rhof, Initial residual = 0, Final
diagonal: Solving for deltaf*rhof, Initial residual = 0, Final
smoothSolver: Solving for Ufx, Initial residual = 0.730494937,
smoothSolver: Solving for Ufy, Initial residual = 0.730494937,
smoothSolver: Solving for Ufz, Initial residual = 0.9929550814
smoothSolver: Solving for hf, Initial residual = 1, Final resi
smoothSolver: Solving for deltaf, Initial residual = 0.4136146
diagonal: Solving for deltaf*rhof, Initial residual = 0, Final

Surface film: thermoSingleLayer
added mass = 0
current mass = 9.945114684
min/max(mag(U)) = 0, 1.206647633e-15
min/max(delta) = 0.01, 0.01
coverage = 1
injected mass = 0
- patch: region0_to_wallFilmRegion_floorFaces: 0
transferred mass = 0
- patch: region0 to wallFilmRegion_floorFaces: 0
min/mean/max(T) = 300.2330668, 300.2330668, 300.2330668
```


경계조건 관련 의문점

- Mapped boundary에 해당하는 wall을 제외한, surface film에서의 경계조건은 바꾸어도 결과가 변하지 않음
 - Surface film 격자는 물리적으로 의미가 없는 가상의 격자임
 - 경계조건을 줄 경우 문제가 있음
 - $\frac{\partial \phi}{\partial n} = C \rightarrow \frac{\phi_b - \phi_p}{h_{cell}} = C \rightarrow \phi_b = \phi_p + Ch_{cell}$
 - h_{cell} 을 surface film 격자의 높이라고 했을 때, 높이가 달라지면 경계에서 값이 달라지는 것은 말이 안 됨
 - 실제 film에서의 속도 분포가 오른쪽 그림과 같이 나타난다고 했을 때, 속도를 제대로 계산하기 위해서는 수직 방향으로 다수의 격자를 쌓고 정확한 경계조건을 주어야 함
 - 그러나, surface film 격자는 single layer region을 사용하므로 경계조건을 주는 것이 의미가 없음
 - Surface film 라이브러리에는 속도 분포를 quadratic으로 가정하여 경계조건으로 들어가야 하는 부분을 analytic하게 가정하여 계산 후 source term으로 가함



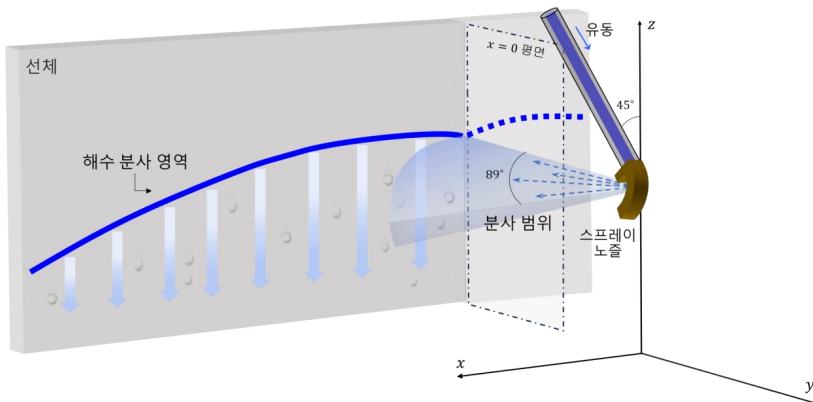
$$\bullet u(z) = \frac{3\bar{U}}{\delta} \left(z - \frac{z^2}{2\delta} \right), \left(\bar{U} = \frac{1}{\delta} \int_{\{0\}}^{\{\delta\}} u dz \right) \Rightarrow \tau_w = \mu \frac{3\bar{U}}{\delta}$$

추가적인 솔버 수정

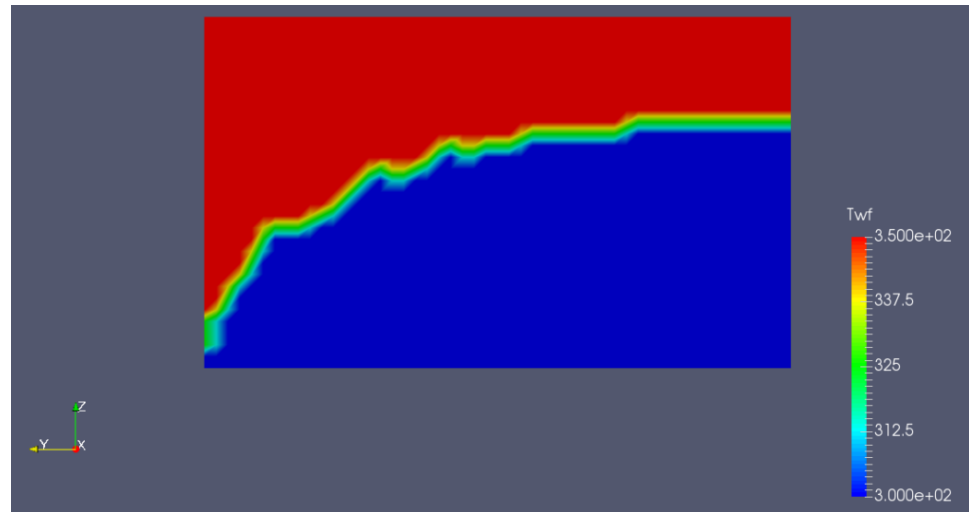
- 기존 surface film 라이브러리의 경우 thermo 경계조건이 Dirichlet 외에는 적용되지 않음
 - wall에서 온도를 update할 수 있는 방법이 없고, 오로지 Dirichlet 경계에서만 사용할 수 있도록 강제함
 - 아래의 벽면과 film 사이 대류 열 플럭스를 계산하는 과정에서 T_{wall} 을 update하는 과정은 없음
 - $\dot{q}_w'' = h_{conv,w}(T_{wall} - T_{film})$
 - T_{wall} 은 변하지 않음
- 따라서, 아래와 같이, 일정한 열 플럭스가 가해질 때, surface film의 온도를 계산하고 벽의 온도를 update하는 식으로 솔버 수정
 - 현재, 열원의 정보가 없어, 우선은 열 플럭스가 일정하게 가해지는 것으로 설정함
 - Constant source $\dot{q}_w'' = \text{const.}$ 를 직접 엔탈피 방정식의 source term으로 가함
 - 엔탈피 방정식을 풀고, $T_{film} = \frac{h_{film}}{c_p} + T_{ref}$ 를 update함
 - $\dot{q}_w'' = h_{conv,w}(T_{wall} - T_{film})$ 을 이용하여 T_{wall} 을 update함

해석 결과

- 개발한 솔버를 이용하여 해수 공급 시스템의 선체 냉각 효과를 추정한 결과임
 - 왼쪽 그림은 선체 표면에 해수가 분사되는 상황을, 오른쪽 그림은 해수 분사 시 선체 표면의 온도를 나타냄
 - 해석 시간 감소를 위해 primary region의 격자는 한 층으로 구성하였으며, 반폭으로 해석을 수행함
 - 현재 해석 솔버에는 natural heat convection은 없다고 가정함
 - 현재 해석 결과에는, 엔진, 태양열등의 열원이 고려되지 않음



< 해수 공급 시스템 투시도 >



< 해수 분사 시, 선체 표면의 온도 >

목차

I. 연구 개요

II. 해수 공급 시스템 모델링

III. 해석 솔버 개발

IV. 해석 결과

V. 결론 및 향후 연구

결론 및 향후 연구

- 한화오션 측에서 제공한 실험 데이터를 이용하여 해수 분사 영역을 추정함
 - 설계변인에 따른 해수 분사 영역 추정
- 물과 강판 사이 열전달 효과를 계산할 수 있는 해석 솔버를 개발함
 - 간단한 예시 케이스를 이용하여 열전달 효과가 잘 계산되는지 확인함
- 향후 연구
 - 개발한 해석 솔버를 이용하여 선체 냉각 효과 추정 예정
 - 엔진, 태양열에 의한 열 플럭스 고려 예정

감사합니다.