

벽면 모델링과 비정상 열전달 해석

김종태

한국원자력연구원 열수력중대사고안전연구부

2017 6회 한국 오픈폼 학술대회

국제원자력교육훈련센터, 9/21 - 22

서론

- 비정상/과도 열유동
- 벽면 열전달의 일반적 모델링

고체 벽면 열전달

- 포물형 온도분포 가정 기반 모델링
- 격자 템플릿을 이용한 1차원 열전도 해석 모델
- 단순 테스트 케이스
- 실험장치 설계 해석

HM1-1 실험 해석

- HYMERES HM1-1 실험 소개
- 수치 방법 및 결과

요약 및 결론

서론

과도 비정상 대류 열전달

- 현재 낮아진 계산비용으로 인해 비정상/과도 열유동 해석이 일반화 되고 있다.
- 과도 열유동 현상에 대한 관심
 - 열유동의 과도 특성을 이해하려는 시도
 - 특히 시스템의 고장/사고 등에 대한 영향을 분석
 - ▶ 본 연구의 목적은 원자력발전소의 사고시 격납건물 내 비정상/과도 열수력 현상을 모의할 수 있는 도구를 개발하는 데 있다.
- 비정상/과도 열전달
 - 정상상태 열전달과 달리 비정상/과도 상태에서는 벽면과 내부 구조물의 비열이 열전달에 큰 영향을 미침
 - ▶ 유동장의 열손실 혹은 지연된 열전달
 - ▶ 벽면 수증기 응축에 의한 상변화 잠열 흡수 및 이로 인한 온도 상승



벽면 열전달에 대한 일반적 모델링

□ 정상상태 벽면 열전달

- 등온 조건 (Constant temperature)
 - ▶ 일정 온도로 벽면 온도 유지
- 열속 조건 (Assumed heat transfer (heat flux) condition)
 - ▶ 일반적으로 단열 혹은 열속/열전달계수 지정

□ 과도/비정상 해석에서의 열손실 모델링

- 등온 혹은 단열 조건
 - ▶ 비현실적 조건이 될 수 있으며 유체의 온도가 실제보다 더 높거나 낮을 수 있음.
- 가정된 열전달/열속 조건
 - ▶ 벽면 근처에서의 유동이 발달되어 있지 않은 경우 벽면에서 제거되는 열속에 의해 유체의 온도는 급격히 낮아지는 현상 발생
 - 벽면 근처 유체 온도의 비물리적인 값을 갖는 경우 수치계산은 발산할 수 있음.

□ 벽면 열전달 모델의 구분

○ Basic rule에 따른 구분

- ▶ 열속 평형 조건에 기반한 모델링

$$q_{in} = q_{out}$$

- ▶ 비정상 열전달에 기반한 모델링

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T)$$

○ 적용영역에 따른 구분

- ▶ 단순 유동장의 벽면
- ▶ 유체/고체 연계 해석
- ▶ baffles

오픈폼의 현재 활용가능한 모델 (2)

□ 열속 평형에 기반한 벽면 열전달 모델 (경계조건)

○ 매우 얇은 유동장 내부 구조물

- ▶ `thermalBaffle1D` : heat transfer on a baffle
- ▶ `turbulentTemperatureCoupledBaffleMixed`

○ 유동 경계

- ▶ `wallHeatTransfer`: wall heat transfer BC
- ▶ `turbulentHeatFluxTemperature`: wall heat flux BC
- ▶ `externalWallHeatFluxTemperature`: wall heat transfer including thermal resistance of the solid
- ▶ `turbulentTemperatureRadCoupledMixed`: wall heat transfer for multi-region case

오픈폼의 현재 활용가능한 모델 (3)

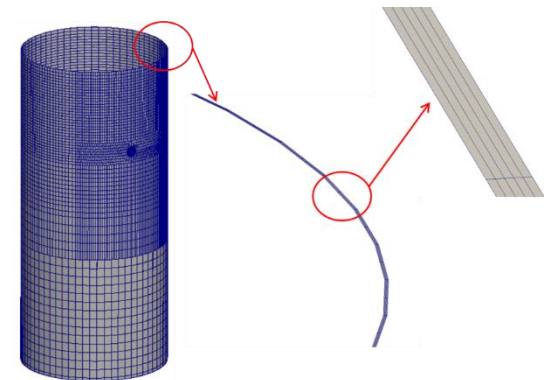
□ 비정상 열전도 방정식 기반 모델

○ 유체/고체 연계해석 (Conjugate heat transfer model, solver-level implementation)

- ▶ 다중 영역 모델
- ▶ 유동장 및 구조체 격자 필요

○ thermalBaffle model (patch-level implementation)

- ▶ region 모델
- ▶ 배플 격자는 자동 생성



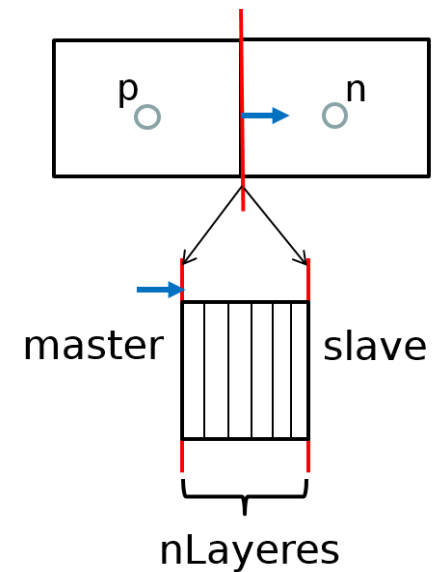
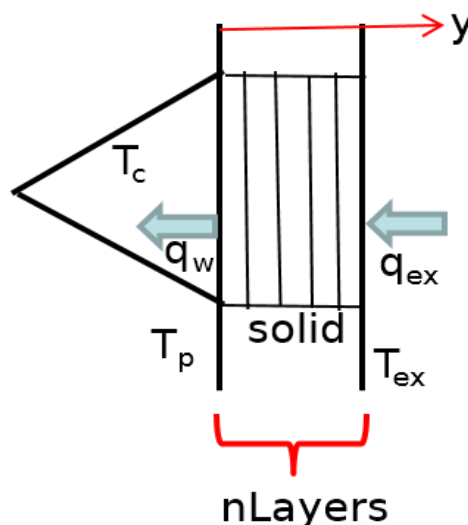
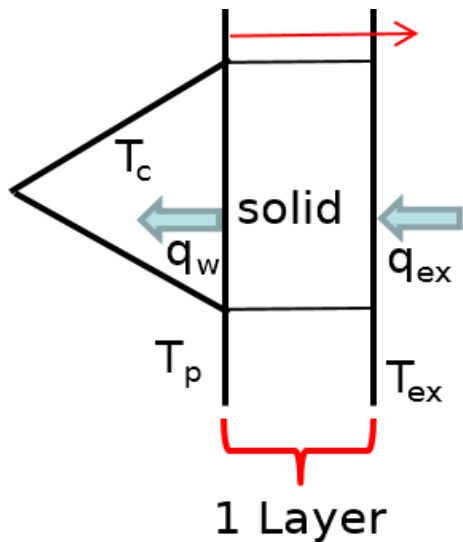
□ 벽면 온도 경계조건 추가

○ 배경

- ▶ 격납건물과 같이 매우 복잡한 형상의 내부 구조물에 대하여 성긴 격자를 이용한 열전달 해석이 가능한 모델 개발

○ 비정상/과도 벽면 열전달 모델

- ▶ 적분형(lumped) 모델: `turbulentHeatFluxParabolicTemperature`
- ▶ 1-D 모델: `externalSolidWallTemperature/thermalBaffleUnsteady1D`



□ turbulentHeatFluxParabolicTemperature

- 벽면의 비열을 고려하기 위하여 두께방향으로 포물형 온도분포를 가정한 적분형 에너지 방정식을 이용

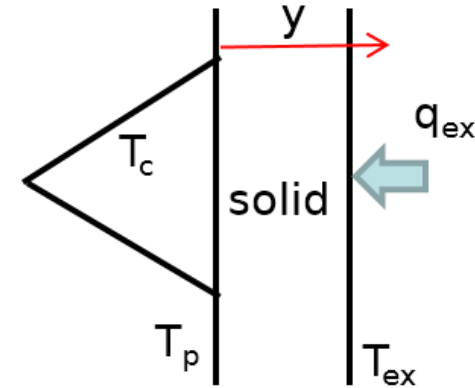
```
pipeWall
{
    type                compressible::turbulentHeatFluxParabolicTemperature;
    heatSource          flux;
    q                   uniform 4663.8811;
    kappaMethod         fluidThermo;
    Qr                  none;
    rhoWall             7900;
    kappaWall           17;
    CpWall              500;
    deltaWall           2.2e-3;
    Ts                  $internalField;
}
```

적분형 벽면 열전달 모델 (2)

□ turbulentHeatFluxParabolicTemperature

○ 체적평균 에너지 방정식

$$\rho_s C_{ps} \frac{dT_s}{dt} = \nabla q \quad \xrightarrow{\text{lumping}} \quad T_s = T_s^o + \frac{\Delta t}{\rho_s C_{ps} \delta_s} (q_{ex} - q_w)$$



○ 온도 분포

▶ 포물형 온도 분포 가정

$$T = a + by + cy^2$$

$$\frac{dT}{dy} = b + 2cy$$

①

▶ 구조물 에너지 보존

$$T_s \delta_s = \int_{\delta} T dy = a \delta_s + \frac{1}{2} b \delta_s^2 + \frac{1}{3} c \delta_s^3 \quad \xrightarrow{\quad} \quad T_s = a + \frac{1}{2} b \delta_s + \frac{1}{3} c \delta_s^2 \quad \text{②}$$

적분형 벽면 열전달 모델 (3)

□ turbulentHeatFluxParabolicTemperature

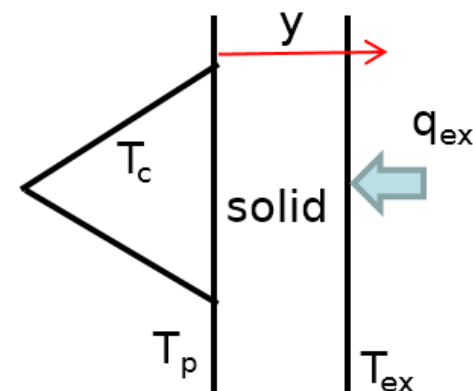
○ 경계 조건

$$at\ y = 0, T = T_p \quad (3)$$

$$at\ y = 0, q_w = \frac{k_w}{\delta} (T_p - T_c) = q \quad (4)$$

$$at\ y = \delta_s, T = T_{ex} \quad (5)$$

$$at\ y = \delta_s, q = q_{ex} \quad (6)$$



▶ **b is from eq 4** $q_w = k_s b \Rightarrow b = q_w / k_s$

▶ **c is from eq 6** $k_s (b + 2c\delta_s) = q_{ex} \Rightarrow c = \frac{q_{ex}/k_s - b}{2\delta_s} = \frac{q_{ex}/k_s - q_w/k_s}{2\delta_s} = \frac{q_{ex} - q_w}{2k_s\delta_s}$

▶ **a is from eq 2** $T_s = a + \frac{1}{2}b\delta_s + \frac{1}{3}c\delta_s^2 \Rightarrow a = T_s - \frac{1}{2}\frac{q_w}{k_s}\delta_s - \frac{1}{3}\delta_s^2 \frac{q_{ex} - q_w}{2k_s\delta_s}$

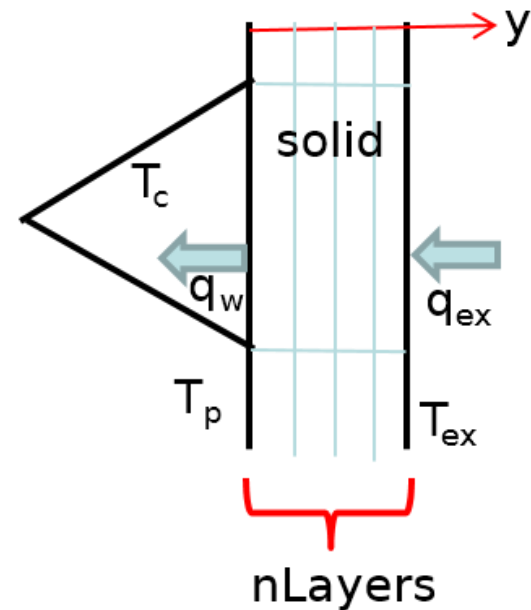
○ wall temperature (patch face) $T_p = a$



externalSolidWallTemperature

- 벽면 face에 수직한 방향으로 사용자가 정의한 수의 층을 만들어 1차원 열전달 방정식을 풀어 벽면 열속을 구한다.

```
pipeWall
{
    type            externalSolidWallTemperature;
    value           uniform 298.15;
    kappaMethod     fluidThermo;
    mode            heatFlux; //heatTransfer;
    q               uniform 4663.8811;
    h               uniform 0;
    Ta              uniform 298.15;
    curvature        80;
    nLayers          5;
    thicknessLayers  uniform 0.44e-3;
    kappaLayers      uniform 17;
    CpLayers         uniform 500;
    rhoLayers        uniform 7900;
    QLayers          uniform 0;
}
```



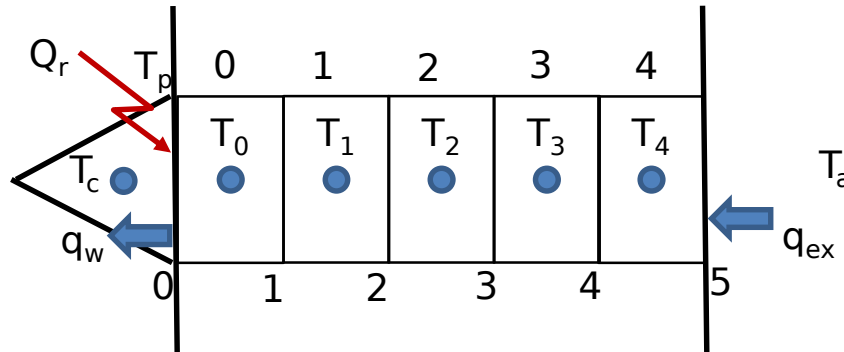
externalSolidWallTemperature model

□ 열전도 방정식의 이산화

○ 열전도 셀에서의 열전도 방정식

$$\rho C_p \frac{(T - T^n)}{\Delta t} \delta = k \left. \frac{dT}{dx} \right|_e - k \left. \frac{dT}{dx} \right|_w$$

○ 벽 구조물의 열전도 셀의 numbering



○ 이산화 방정식의 solver

- ▶▶ Implicit method: TDMA
- ▶▶ Explicit method: 4-step Runge-Kutta

thermalBaffleUnsteady1D model

□ 열전도 방정식의 이산화

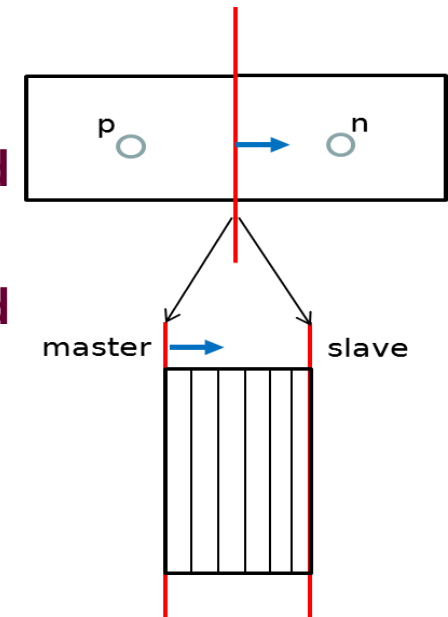
○ 열전도 셀에서의 열전도 방정식

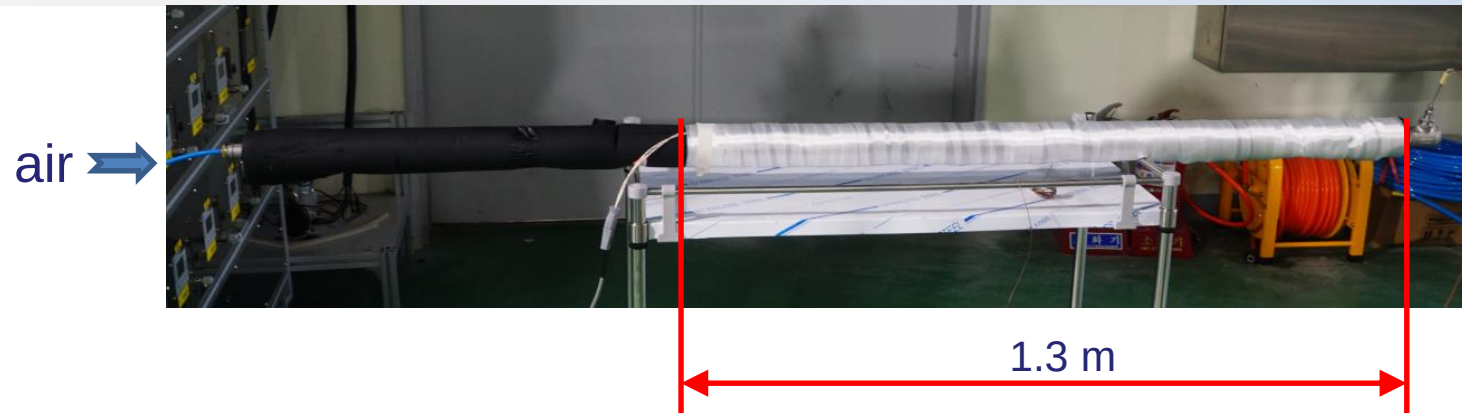
$$\rho C_p \frac{(T - T^n)}{\Delta t} \delta = k \left. \frac{dT}{dx} \right|_e - k \left. \frac{dT}{dx} \right|_w$$

○ 열전도 셀의 두께 리스트를 이용한 1차원 격자 생성

○ externalSolidWallTemperature과의 차이점

- ▶▶ For a master patch, slave patch temperature is used as a fixed value
- ▶▶ For a slave patch, master patch temperature is used as a fixed value





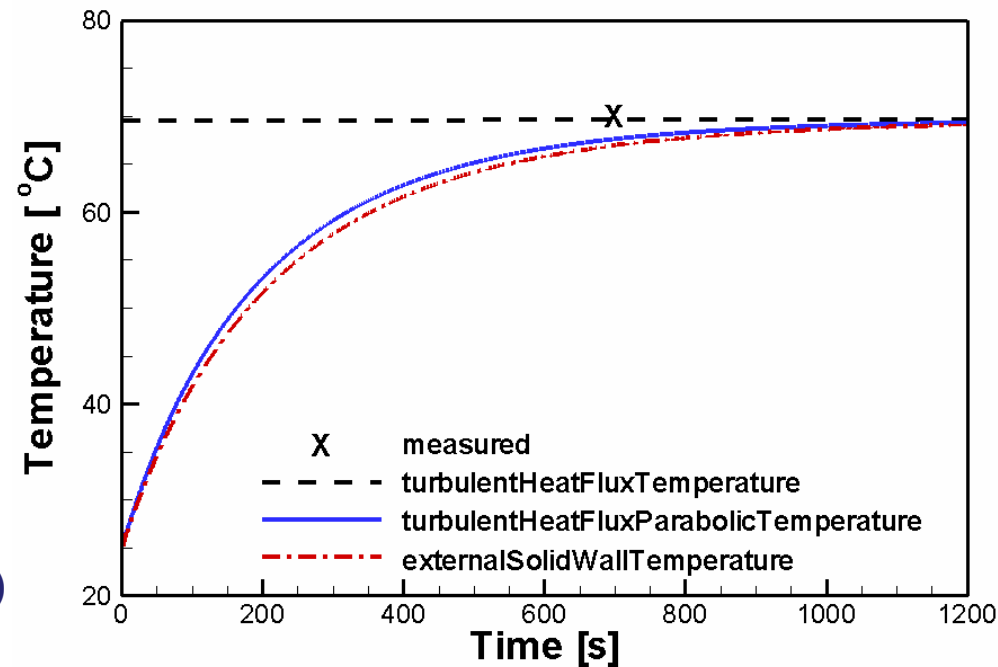
□ 파이프 내 공기 가열 실험

○ 파이프 형상

- ▶ 가열관 길이: 1.3 m
- ▶ 직경: 0.025 m
- ▶ 두께: 2.2 mm

○ 실험 조건

- ▶ 공기 주입 온도: 20 °C
- ▶ 가열 열량: 560W
- ▶ 유량/유속: 390 l/min ($U=13.24\text{m/s}$)
- ▶ 출구온도 70 °C (약 700s 후)



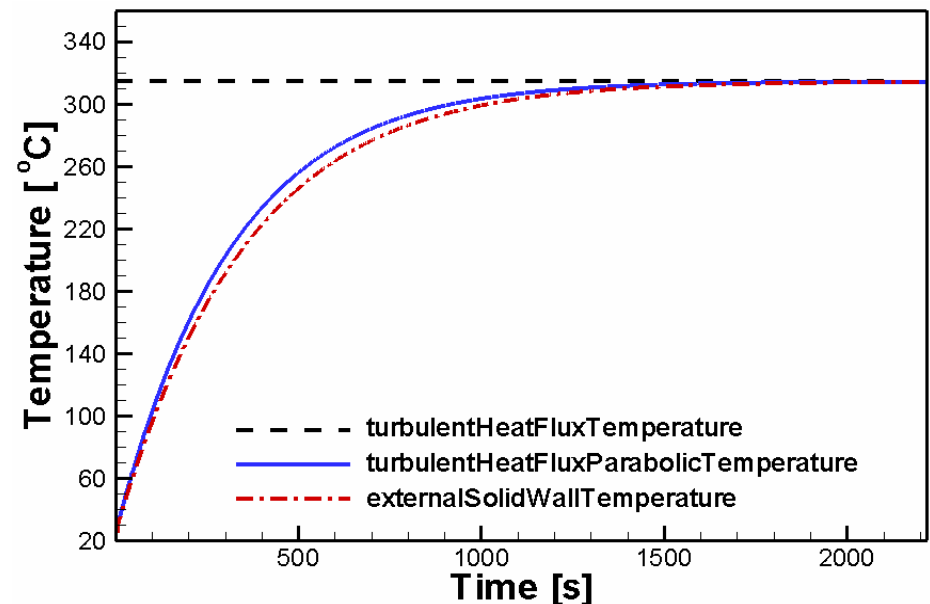
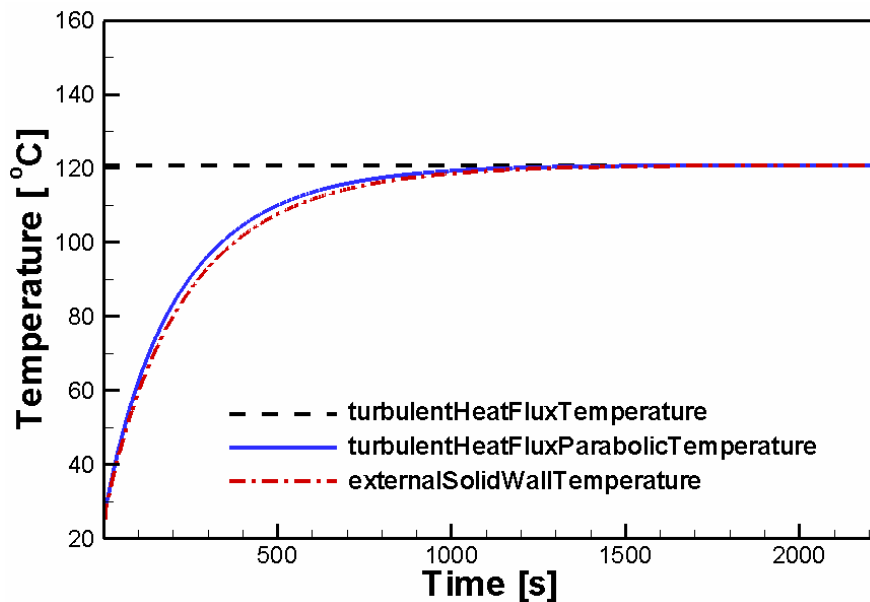
□ 가스 주입관 가열장치 예비해석

○ 파이프 형상

▶ 가열관 길이: 2 m, 직경: 0.025 m, 두께; 2.2 mm

○ 계산 결과

▶ 정상상태 도달 시간: 1000 초, 관 중심 공기 온도 120 °C, 관 내벽 온도 315 °C



□ HYMERES

○ 국제공동연구

- ▶ OECD/NEA 주관
- ▶ 과제 수행 기관: Swiss PSI, France CEA
- ▶ 참가국: 14 개국

○ 목적

- ▶ 격납건물 내 수소 거동 및 위험도에 대한 이해를 높이고, 가동중 혹은 미래 원전의 안전성 평가를 위한 해석 모델링 능력을 향상 시키는 것을 목적으로 함,

□ HM1-1 test

- MISTRA 실험장치(프랑스 CEA)에서 수평으로 주입되는 고온의 공기에 의해 상부에 성층화된 헬륨이 혼합되는 현상 모의
- 블라인드 벤치마크로 진행

HYMERES HM1-1 실험장치

□ HM1-1 실험장치

○ 용기 형상

▶ 체적 97.6 m^3 , 높이 7.38m, 내경 4.25m

○ 내부 구조물

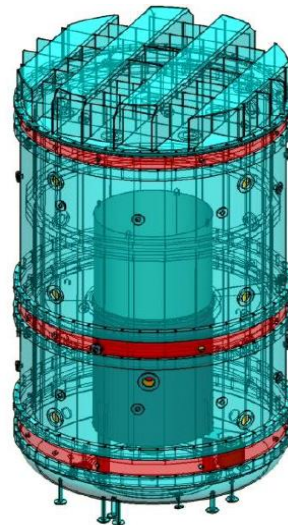
▶ 바닥이 밀폐되고 상부가 개방된 얇은 두께의 원통 : 두께 3 mm

▶ 원판 : 두께 3 mm

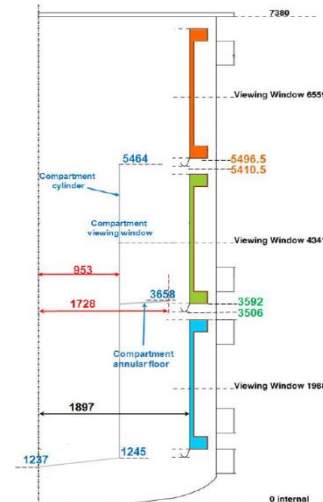
▶ 벽면 온도 제어를 위한 3 개의 원형 냉각기



Photo of the facility



3-D view of the facility



Vertical cut view

수치 해석 방법 및 결과

□ 유동 특성 및 해석 solver

- ▶ 헬륨과 공기의 부력을 포함한 난류 혼합
- ▶ 고온 제트의 벽면 충돌

○ rhoReactionBuoyantFoam

- ▶ assumption of unit Le number

- Energy

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} h_s) - \nabla \cdot \left(\frac{\mu}{Pr} \nabla h_s \right) = \frac{\partial p}{\partial t} - \left[\frac{\partial}{\partial t}(\rho K) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} K) \right] + \dot{R}$$

$$\vec{q} = \frac{\mu}{Pr} \nabla h_s - \frac{1}{Sc} (Le - 1) \mu \sum_i h_{si} \nabla Y_i$$

▶ ,

▶ 난류 모델

- buoyant k-ε model with SGDH
- realizable buoyant k-ε model with GGDH

$$G_b = \overline{\rho \mathbf{U}'} \cdot \mathbf{g} = - \frac{v_t}{Pr_t} \nabla \rho \cdot \mathbf{g}$$

$$G_b = \overline{\rho \mathbf{U}'} \cdot \mathbf{g} = C_\theta \frac{k}{\varepsilon} (\mathbf{R} \cdot \nabla \rho) \cdot \mathbf{g}$$

수치 해석 방법 및 결과 (2)

□ 내부 원통과 원판의 열전달 모델링

○ 정상상태 열속평형 모델

▶ 구조물 비열 무시: thermalBaffle1D

○ 3D thermal baffle 모델

▶ 3차원 열전도 방정식 : thermalBaffle

○ 1D thermal baffle 모델

▶ 1차원 열전도 방정식: thermalBaffleUnsteady1D

○ conjugate heat conduction (CHT)

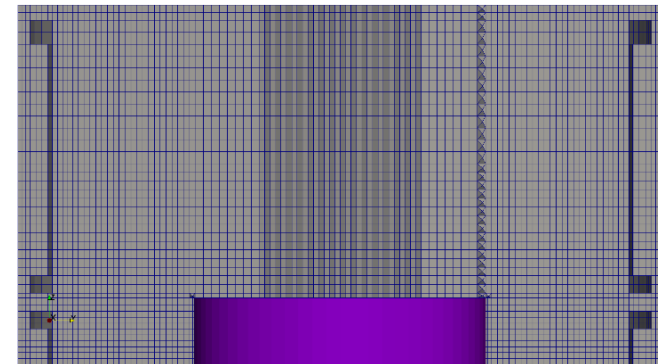
▶ 유체-고체 연계해석: cht solver

▶ 격자의 셀 크기로 인해 사용에 제약

▶ 0.5 M 셀 수의 격자에 대해

– 실린더 주변 셀 사이즈 40 mm

– 실린더 두께 3 mm는 셀 크기의 1/13



수치 해석 방법 및 결과 (3)

□ 사용된 격자

○ 기본 격자 (유동장)

▶ 셀 수: 467,296

– 463,328 hexahedra, 384 prisms, 3584 polyhedra

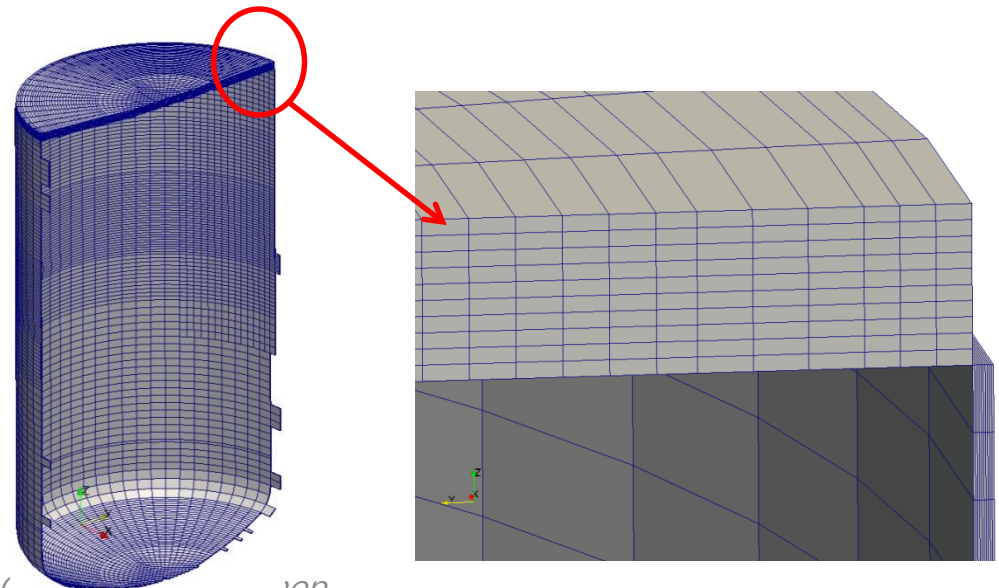
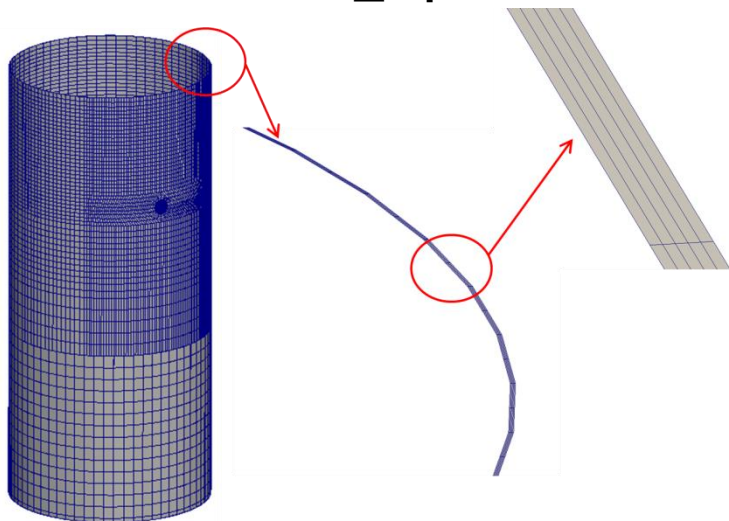
○ region 격자 (구조물)

▶ 용기 외벽 격자

– 셀 수: 192,460

▶ 내부 원통 region 격자

– 셀 수: 43,200

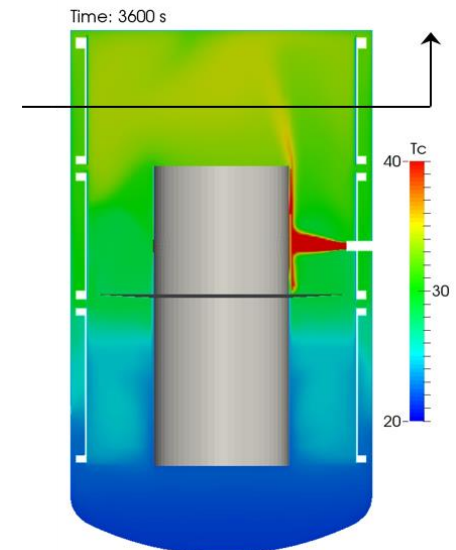
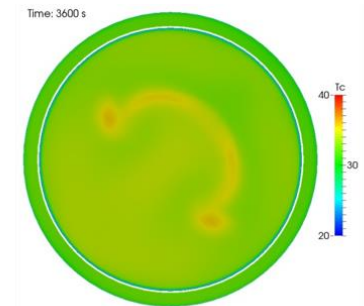
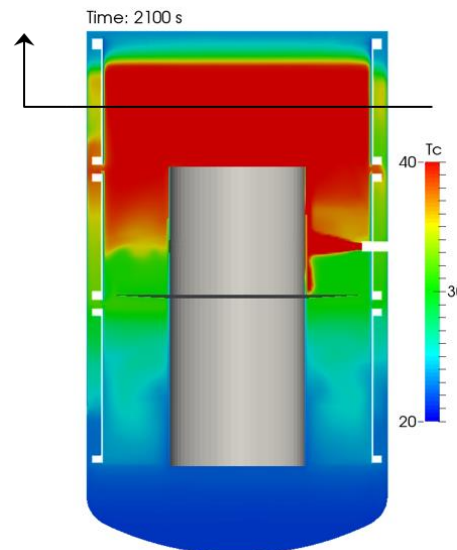
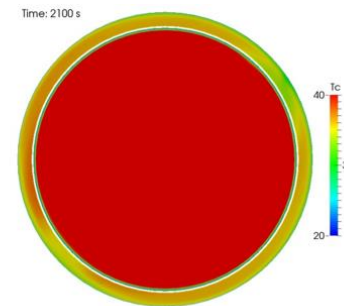
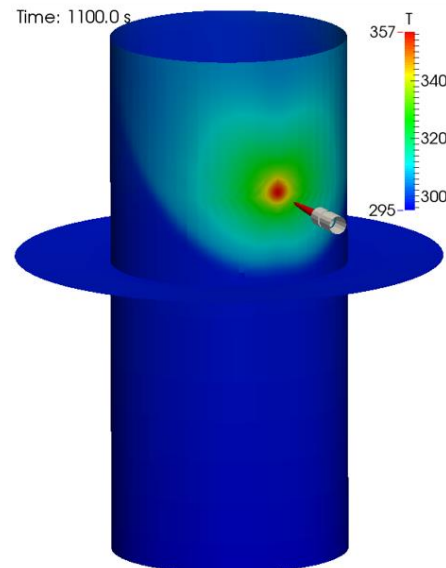
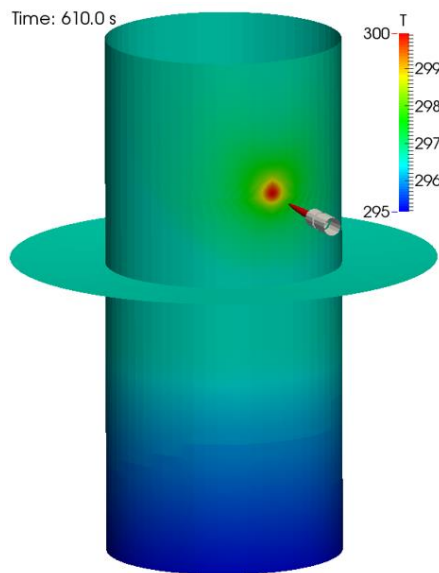


□ HM1-1 test 블라인드 벤치마크 결과

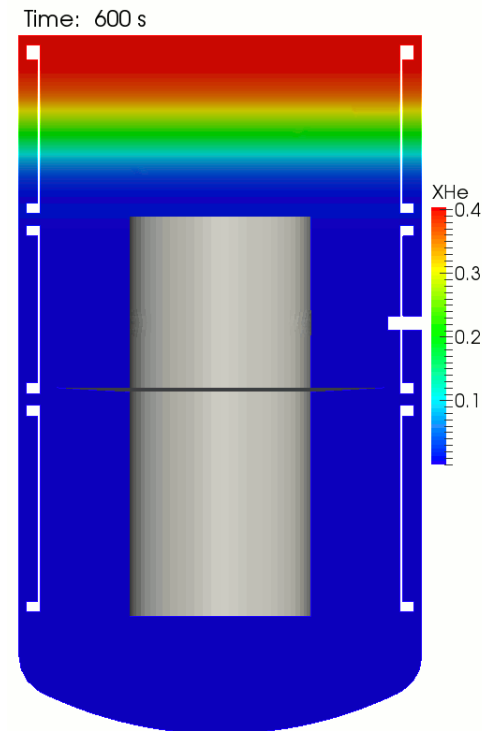
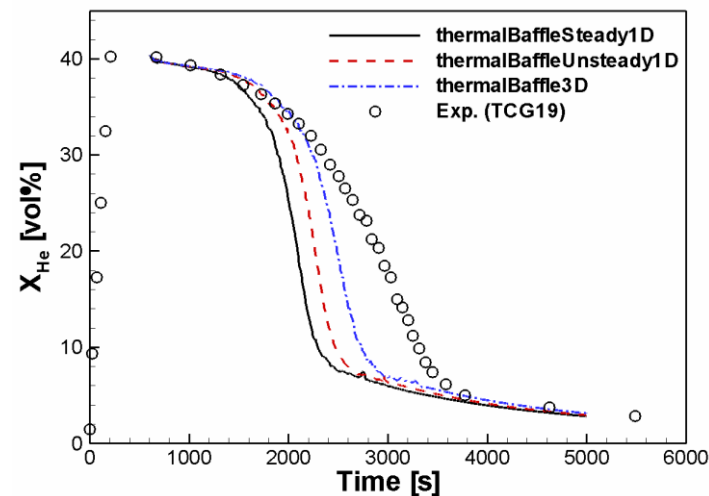
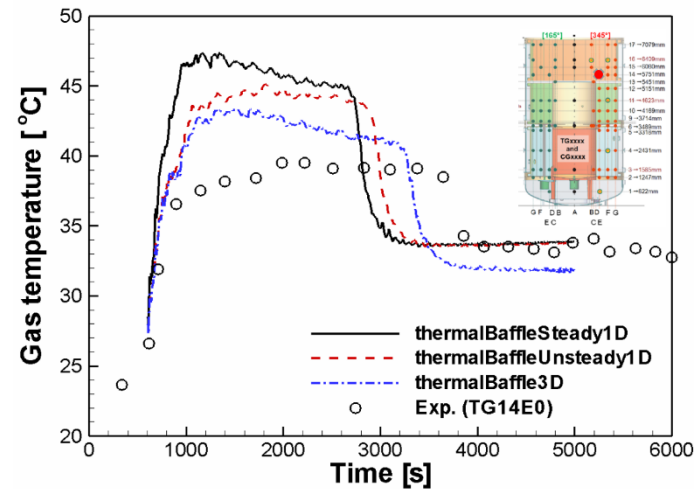
○ 내부 원통 벽면의 온도 조건

▶ theramlBaffleUnsteady1D 모델 사용

○ 온도 분포



□ HM1-1 test의 블라인드 벤치마크



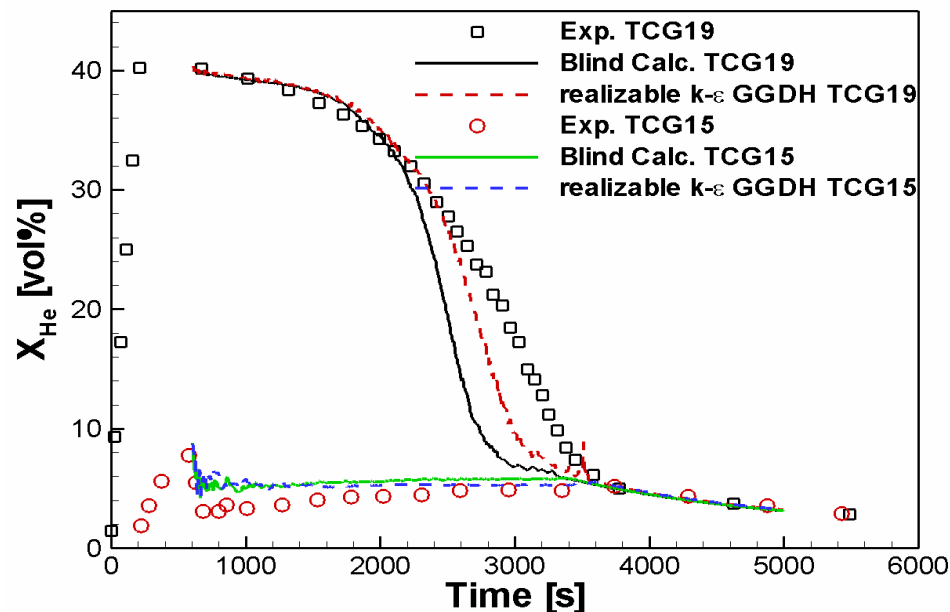
□ HM1-1 test의 오픈 벤치마크

○ buoyant realizable k-ε

- k equation
$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_k$$

- ε equation
$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \mathbf{U}) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \rho c_1 S \varepsilon - \rho c_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} c_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon$$

- Buoyancy production
$$G_b = \overline{\rho' \mathbf{U}'} \cdot \mathbf{g} = C_\theta \frac{k}{\varepsilon} (\mathbf{R} \cdot \nabla \rho) \cdot \mathbf{g} \quad \text{by GGDH}$$



요약 및 향후 연구

□ 단순한 비정상/과도 벽면 열전달 모델 개발

- 체적평균 기반 열전도 모델 및 1차원 포물형 온도분포 기반 열전도 모델은 비정상 열전도 방정식을 기반으로 하여 비정상/과도 열전달 해석에 활용할 수 있다.
- 두 모델은 격자를 생성하지 않기 때문에 매우 복잡한 형상의 열유동 해석에 있어 데이터 처리에 매우 유리하다.

□ 벽면 열전달 모델의 검증

- 파이프 가열 실험 및 HYMERES HM1-1 실험 해석을 통하여 해석 모델의 검증

□ 격납건물 내 벽면 수증기 응축 현상 해석에 활용

- 벽면 수증기 응축에 의해 방출되는 열은 벽면 응축 액막을 통하여 벽면으로 전달되며 이를 모델링하기 위하여 벽면 응축모델과 연계된 벽면 열전달 모델의 개발



감사합니다.