

# 열수력 계통해석 코드 개발 현황 및 향후 계획

**2022. 05. 18**

이승욱

한국원자력연구원

## 1. 열수력 계통해석 코드 현황

PWR 중심 (MARS, SPACE)

## 2. SPACE 개발 현황

- 1) 수치해법 모델
- 2) 열수력 모델
- 3) 핵연료 모델
- 4) 다중스케일/다물리 연계해석 모델
- 5) 기타 노형 모델 (일체형 원전 및 연구로)

## 3. 향후 계획

# 1.계통 열수력 해석 코드

PWR 중심 (MARS, SPACE)

## 2.SPACE 개발 현황

- 1) 수치해법 모델
- 2) 열수력 모델
- 3) 핵연료 모델
- 4) 다중스케일/다물리 연계해석 모델
- 5) 기타 노형 모델 (일체형 원전 및 연구로)

## 3.향후 코드 개선 사항

# (1) 열수력 계통해석 코드 현황



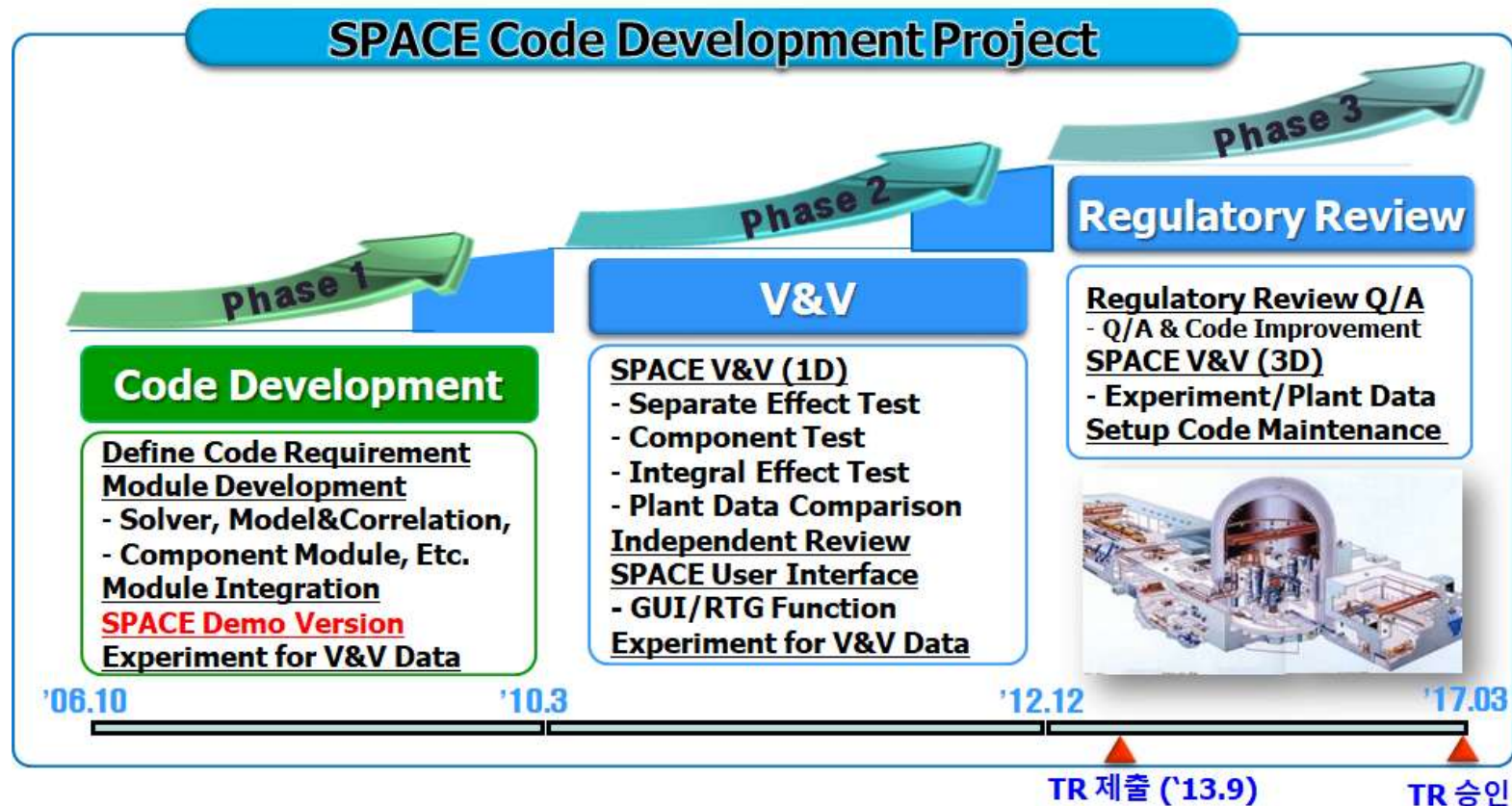
## ❖ MARS Development (1997~)

- RELAP5와 COBRA-TF의 implicit coupling
- 메모리 구조 현대화 및 최신 물성치 도입
- 신규 열수력 컴포넌트 개발 (Multid, CANDU, Tank...)
- MARS 코드 종류
  - MARS-KS (PWR)
    - KINS 규제 코드로 활용
    - RELAP5 개선사항 및 사용자 요구사항 반영 (NuSTEP)
  - MARS-LMR (SFR)
    - 액체금속 물성치 테이블 (소듐, LBE)
    - 노심 압력 강하 모델, 반응도 제한 모델,  
노심/열교환기(증기발생기, 피동안전계통) 열전달 모델
  - MARS-GCR (VHTR)
    - Gas 물성치 테이블 (He, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>...)
    - Pebble bed / PCHE 압력강하 및 열전달 모델, 단상기체 대류  
열전달 모델, 구조물 간 접촉 열전달

# (1) 열수력 계통해석 코드 현황

## ❖ SPACE 코드 개발 이력

- 국내 원자력 유관 기관 협업 (KHNP, KAERI, KEPCO-ENC, KEPCO-NF)
- C++언어로 코딩
- 2-Phase 3-Field equations 적용 (액체, 기체, 액적)



# (1) 열수력 계통해석 코드 현황



## ❖ MARS / SPACE 코드 비교

MARS	SPACE
(1D/Multid) Two-fluid 7 equations (3D vessel) Two-fluid 9 equations - Equal temperature Liquid, drop	Three-field 10 equations -Mass/Energy/Momentum: Liquid, drop, Vapor/gas -Non-condensable gas transport -Not equal temperature/velocity between liquid and drop
(1D/Multid) Boron transport Non-condensable species transport Extension of 1D flow for Multid	Boron transport Non-condensable species transport Formulated for 1-D and 3-D

# 1.계통 열수력 해석 코드

PWR 중심 (MARS, SPACE)

## 2.SPACE 개발 현황

- 1) 수치해법 모델
- 2) 열수력 모델
- 3) 핵연료 모델
- 4) 다중스케일/다물리 연계해석 모델
- 5) 기타 노형 모델 (일체형 원전 및 연구로)

## 3.향후 코드 개선 사항

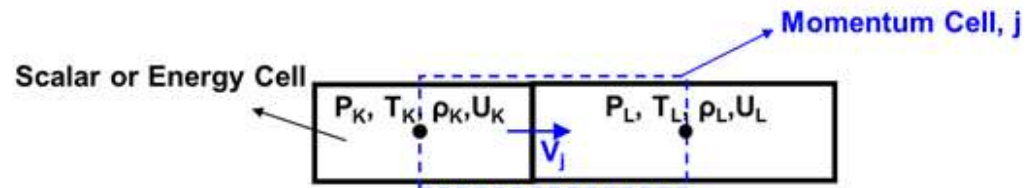
## (2-1) 수치해법 모델 개선

### ❖ 에너지 보존 방정식의 에너지 소산 항 개선

- Internal energy equation of SPACE

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k e_k}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha_k \rho_k e_k U_k)}{\partial z}$$

$$= -p \frac{\partial \alpha_k}{\partial t} - \underbrace{p \frac{\partial (\alpha_k U_k)}{\partial z}}_{\substack{\downarrow \\ -\frac{\partial (p \alpha_k U_k)}{\partial z} + \alpha_k U_k \frac{\partial p}{\partial z}}} + q_{ki} + \Gamma_k h_{ki} - \frac{\partial (\alpha_k q_k)}{\partial z} + \underbrace{(F_{wk} U_k + \alpha_k \rho_k L_k U_k) U_k}_{\text{Momentum Cell, j}}$$

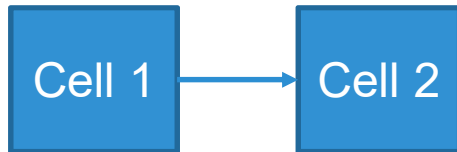


- Original Form of SPACE
  - Cell pressure, explicit Cell 속도 사용, form loss 소산항 무시
- Modified Form for staggered grid
  - Cell pressure  $\rightarrow$  pressure gradient
  - 소산항 계산에 implicit Face 속도 적용
  - Form loss 소산항 고려



## (2-1) 수치해법 모델 개선

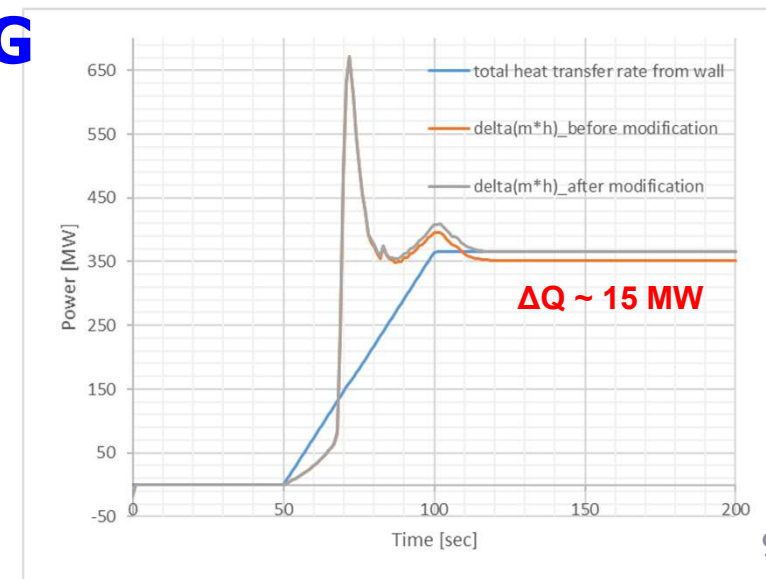
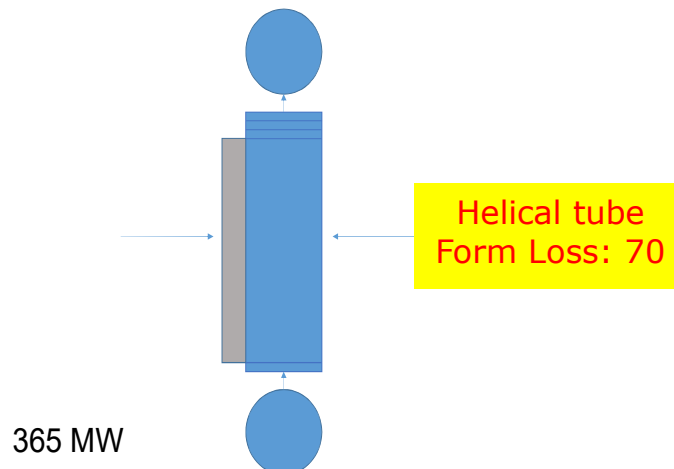
### ❖ 검증: Adiabatic Expansion of Hydrogen



	Cell 1	Cell 2
Pressure [MPa]	0.2	0.1
Temperature [K]	300	300
Hydrogen Mass [kg]	161.644	80.8218

Parameters	Cell No.	Analytic solution	Original Form	Modified Form
Hydrogen mass [kg]	Cell 1	131.619	130.263 (+1.03%)	131.563 (+0.04%)
	Cell 2	110.847	112.149 (-1.17%)	110.850 (+0.00%)
Hydrogen temperature [K]	Cell 1	276.328	275.326 (+0.36%)	276.423 (-0.03%)
	Cell 2	328.108	319.702 (+2.56%)	327.934 (+0.05%)
Hydrogen pressure [MPa]	Cell 1	0.15000	0.14792 (+1.39%)	0.14999 (+0.01%)
	Cell 2	0.15000	0.14792 (+1.39%)	0.14999 (+0.01%)

### ❖ 검증: Large Pressure Drop in SG



# (2-1) 수치해법 모델 개선

## ❖ 다차원 유동 모델 개선

- 운동량 보존 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha \rho u) + \nabla \cdot (\alpha \rho u u) = F$$

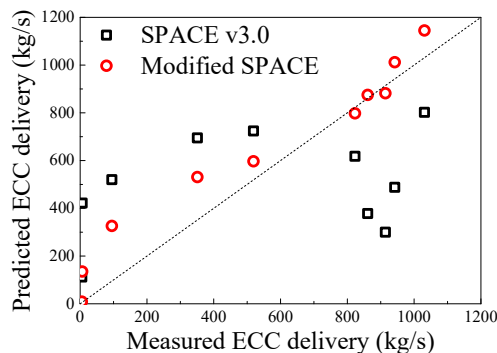
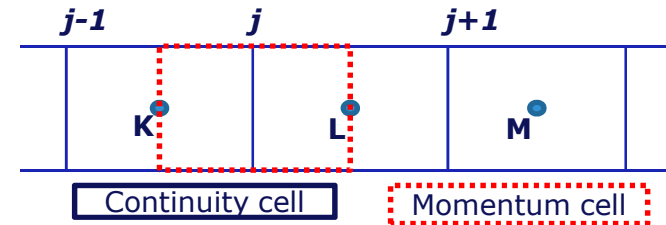
- 비보존형 운동량 방정식 (계통 코드 대부분 사용)

$$\alpha \rho \frac{\partial}{\partial t} u + \alpha \rho u \cdot \nabla u + u \Gamma = F \quad (\Gamma = \frac{\partial}{\partial t}(\alpha \rho) + \nabla \cdot (\alpha \rho u))$$

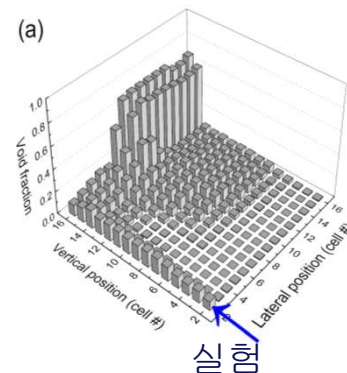
$$\alpha \rho \frac{\partial}{\partial t} u + \alpha \rho \nabla \cdot (u u) - \alpha \rho u \nabla \cdot u + u \Gamma = F$$

- 반보존형 운동량 방정식 (Jeong et al., 1997) 도입

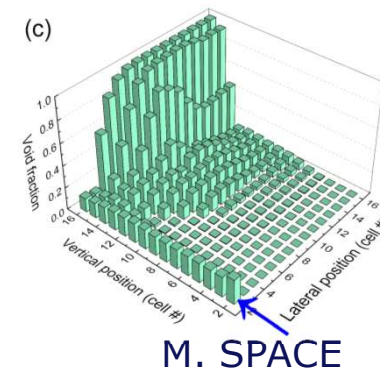
$$\alpha \rho \frac{\partial}{\partial t} u + \nabla \cdot (\alpha \rho u u) - u \nabla \cdot (\alpha \rho u) + u \Gamma = F$$



<UPTF Test7>



<DYNAS AE04>



## (2-1) 수치해법 모델 개선



### ❖ 이상유동 개별 상의 소멸 시 행렬 안정성 저하

- 기존에는 대각항 요소를 보정하여 안정성 강화
  - Huge interfacial heat transfer coefficients for very small phase
  - Unphysical mass transfer due to huge IHT coefficients

### ❖ SVD(Singular Value Decomposition) 기법 도입

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b} \quad \mathbf{A} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{\Sigma} \cdot \mathbf{V}^T$$

$\mathbf{U}, \mathbf{V}$  : Orthogonal matrix ( $\mathbf{U} \cdot \mathbf{U}^T = \mathbf{V} \cdot \mathbf{V}^T = \mathbf{I}$ )

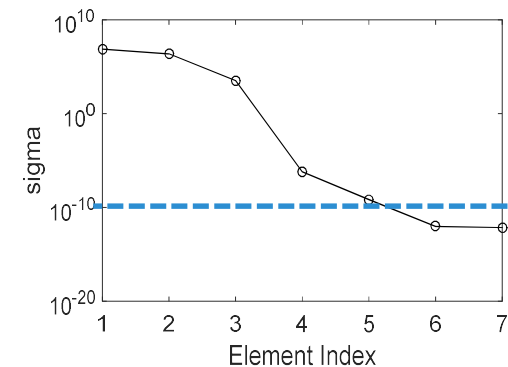
$\mathbf{\Sigma}$  : Diagonal matrix of  $\sigma_i$

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{\Sigma}^{-1} \cdot \mathbf{U}^T \cdot \mathbf{b}$$

- Small  $\sigma_i$  that cause ill-conditioning can be truncated

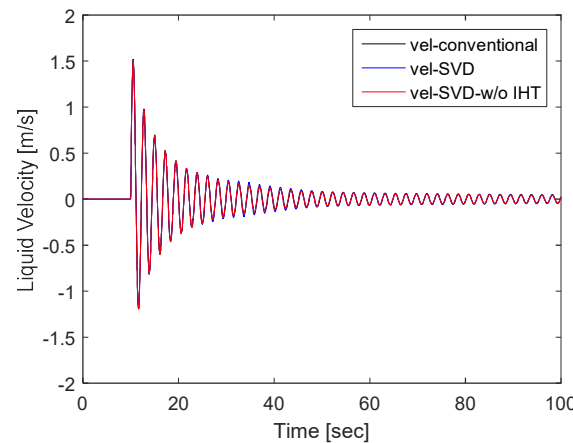
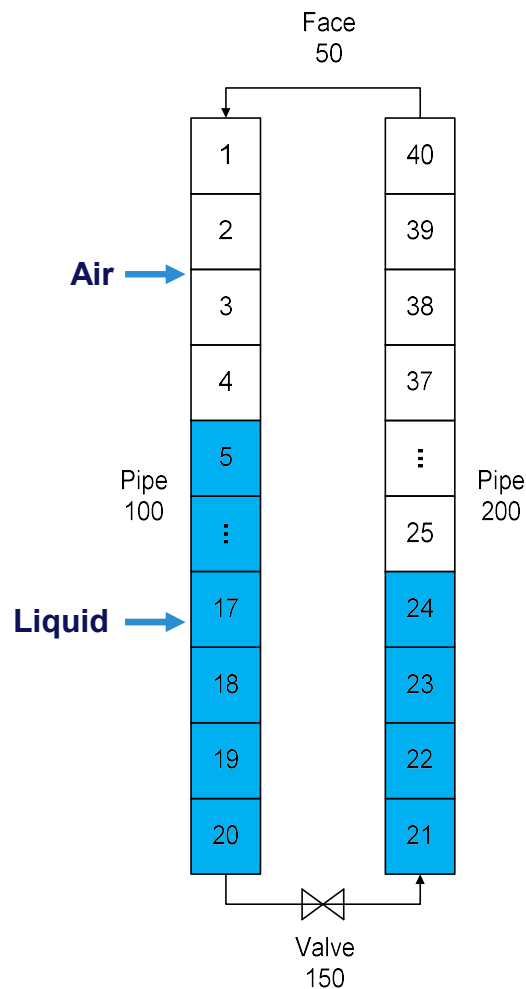
$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \cdots > \sigma_6 > \sigma_7$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \cong \mathbf{U}_t\mathbf{\Sigma}_t\mathbf{V}_t^T = \mathbf{A}_t$$

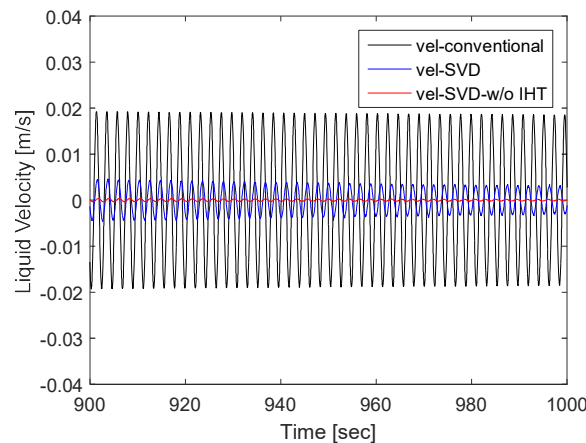


# (2-1) 수치해법 모델 개선

## ❖ 검증: Oscillating Manometer Problem



First 100 seconds of simulation



Last 100 seconds of simulation

Conventional Solution	SVD-Based Solution
Large interfacial heat transfer between vapor and liquid	Negligible interfacial heat transfer between vapor and liquid
Excessive vaporization and condensation	Negligible vaporization and condensation
Considerable variation in pressure	Negligible variation in pressure
Continuous oscillation of liquid slug	Completely dissipated momentum flows

## (2-2) 열수력 모델 개선

### ❖ 대형 배관 Interfacial Area 예측 개선

- 대형 배관에서는 Interfacial instability로 인해 Slug flow가 형성되기 어려움 (Shen & Hibiki, 2015)

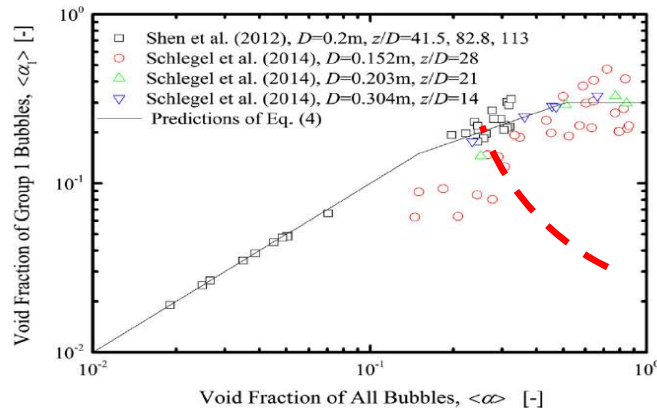
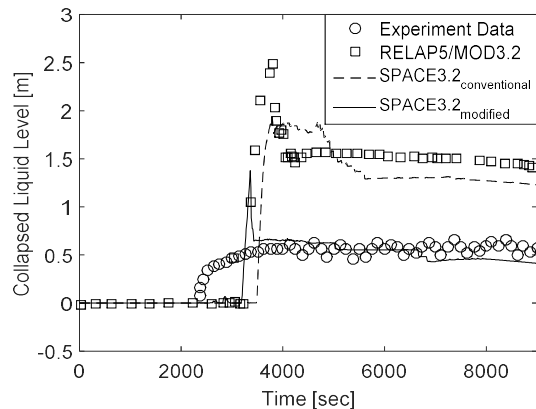


Fig. 1. Change of group 1 bubble void fraction with all bubble void fraction.

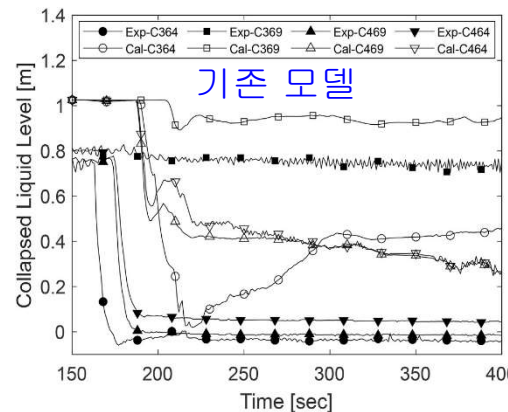
$$\langle \alpha_1 \rangle = \begin{cases} \langle \alpha \rangle & \langle \alpha \rangle \leq 0.15 \\ 0.417\langle \alpha \rangle + 0.0875 & 0.15 < \langle \alpha \rangle \leq 0.51 \\ 0.3 & \langle \alpha \rangle > 0.51 \end{cases}$$

$$\langle a_{i1} \rangle = 3.37 \times \frac{\langle \alpha_1 \rangle Re_1^{0.0836}}{Lo} = 3.37 \times \frac{\langle \alpha_1 \rangle \epsilon_1^{0.0279}}{Lo^{0.889} v_f^{0.0836}}$$

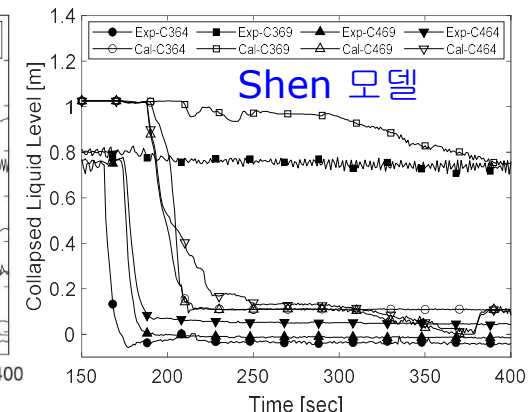
$$\langle a_{i2} \rangle = 1659 \langle \alpha_2 \rangle^{0.796} (1 - \langle \alpha_2 \rangle)^3 \frac{Lo^{0.525} \epsilon_2^{0.131}}{v_f^{0.394}} \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{0.314} \left[ \frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)} \right]^{-0.5} N_{\mu f}^{1.124}$$



Pressurizer level of LSTF



Loop seal clearing (ATLAS)



## (2-2) 열수력 모델 개선

### ❖ 수평관 환상/성층 유동에서의 액적 모델 개발

- 수평관에서의 액적 이탈 및 점착에 관한 실험/모델은 거의 없음

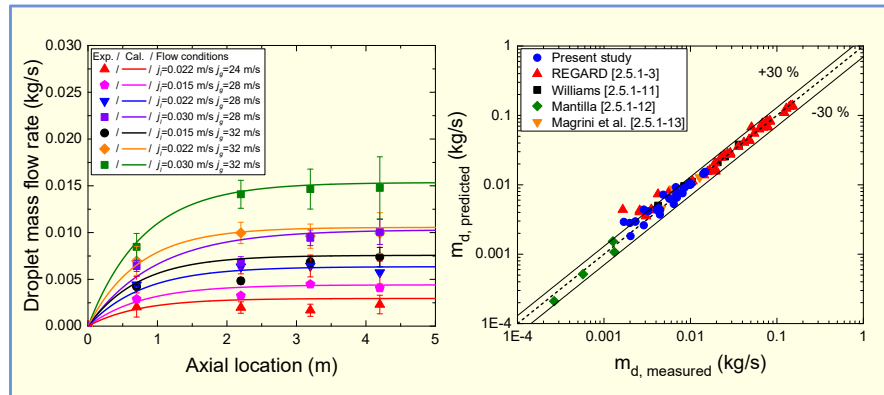
- SPACE 코드의 액적 이탈/점착 모델 (수직관 모델 사용)

- Entrain model:  $S_e = k \frac{\mu_l}{VD_h} \left[ We_g \left( \frac{\Delta \rho}{\rho_g} \right)^{0.5} (Re_{lf} - 80) \right]^{0.925} \left( \frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{0.26}$  (Lopez, 1997)

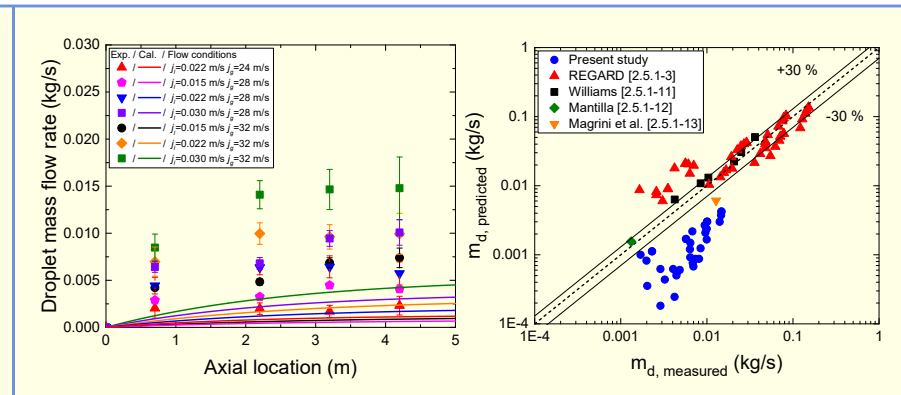
- Deposition model:  $S_{de} = k_D \frac{\alpha_d \rho_d A_i}{V}$  (Mckoy&Hanratty, 1977)

- 부산대 실험 및 모델 개발

- Entrain/Deposition model:  $S_e = k_E \frac{\sqrt{\rho_g \rho_l} u_g^2}{\sigma} \frac{m_{lf} - m_{lfc}}{P}$   $S_{de} = k_D \frac{m_d}{m_g / \rho_g u_d / u_g + m_d / \rho_d}$



PNU Entrain/Deposition model



기존 Entrain/Deposition model

## (2-2) 열수력 모델 개선



### ❖ EVVD\* 기반 부수로 유동 혼합 모델

\*EVVD = Equal Volume Void Drift

- $w''_{g,i-j} = \beta \frac{\bar{G}_{i,j}}{\bar{\rho}_{i,j}} \theta \left\{ [(\alpha\rho)_{g,i} - (\alpha\rho)_{g,j}] - K_{VD} \frac{G_i - G_j}{\bar{G}_{i,j}} \bar{\rho}_{g,i,j} \right\} : \text{gas phase}$
- $\theta$  (two-phase multiplier) : determined by flow regime
- $\beta$  (mixing coefficient),  $K_{VD}$  (void drift coefficient) : User's input

### ❖ NVG 모델 및 에너지 분배 모델

- PSBT 실험(B5, B6, B7) 평가를 통해 PNU 저압 비등 모델 채택

### ❖ 검증 계산

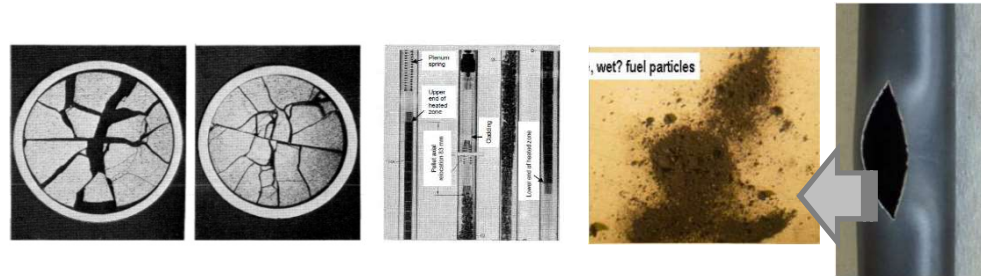
- GE, ISPRA :  $\beta(0.005)$ ,  $K_{VD}(1.0)$  / PSBT :  $\beta(0.04)$ ,  $K_{VD}(1.0)$
- $K_{VD} = f(P) = 0.112 + 16.4e^{-0.329P}$  (J.Jeong)

Experiment	GE(3x3)			PELCO-S(4x4)			EUROP_BWR(4x4)			EUROP_PWR(4x4)			PSBT(5x5)		
RMS error	Corner	Side	Inner	Corner	Side	Inner	Corner	Side	Inner	Corner	Side	Inner	B5	B6	B7
Original SPACE	0.0890	0.0123	0.0218	0.1020	0.0243	0.0086	0.0630	0.0241	0.0092	0.0228	0.0104	0.0323	0.1280	0.0905	0.1016
Modified SPACE	0.0394	0.0139	0.0188	0.0544	0.0199	0.0164	0.0366	0.0229	0.0143	0.0203	0.0137	0.0339	0.0351	0.0424	0.0254
Jeong's model	0.0305	0.0141	0.0166	0.0425	0.0198	0.0214	0.0290	0.0224	0.0174	0.0160	0.0157	0.0286	0.0356	0.0418	0.0349

## (2-3) 핵연료 모델 개선

### ❖ 핵연료 파편화, 재배치, 분산 모델 (FFRD) 개발

- ECCS 허용기준 개정으로 LOCA 해석에서 핵연료 파편화, 재배치, 분산 고려 필요



### ❖ 핵연료 파편화 및 축방향 이동 모델 (Fragmentation & Relocation)

- Quantum technology (QT) 모델 적용
- 열출력 재배치 모델을 추가 적용 → 전체 출력 보존
- 파편 입자 크기에 따른 이동 제한 적용 (저연소도 재배치 억제)

### ❖ 핵연료 열전도 방정식 수정

- 핵연료 상태 변화에 따라 열전도도, 열용량 보정

### ❖ 핵연료 입자 방출/수송 모델 개발 (Dispersal)

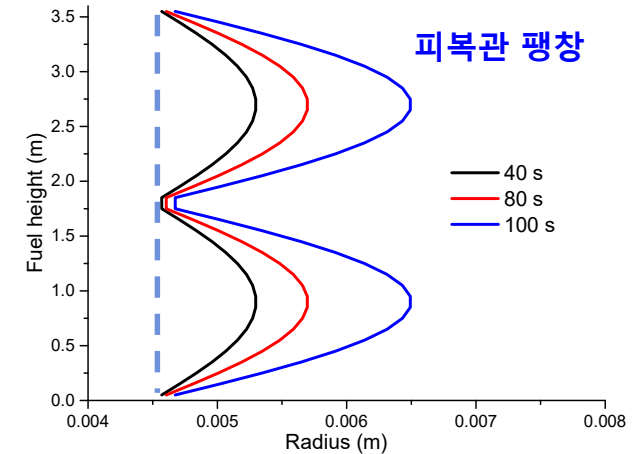
- 피복관 파열부 형상, 입자 방출량, 냉각재 입자 수송



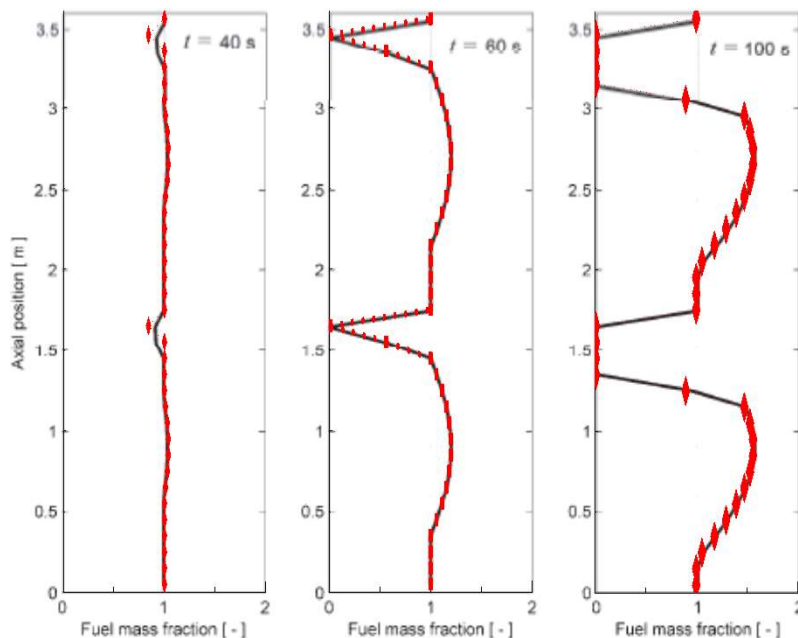
## (2-3) 핵연료 모델 개선

### ❖ 핵연료 재배치 개념 문제 검증

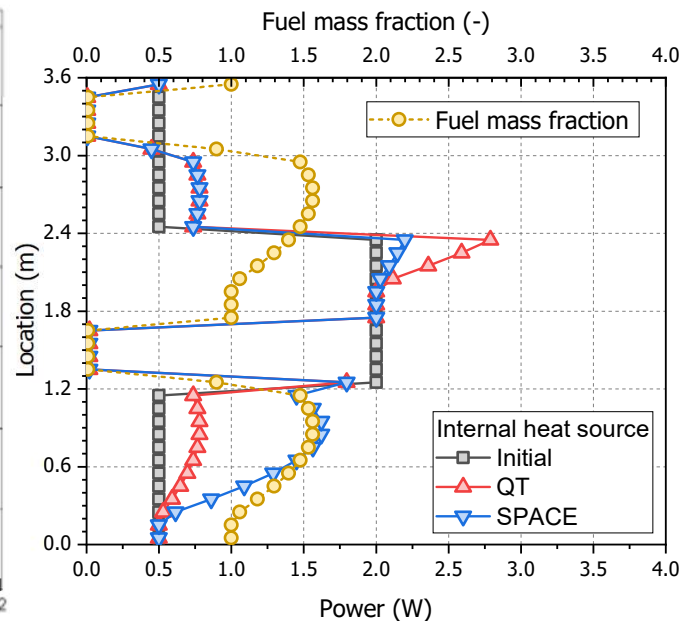
- 피복관 이중 팽창 조건
- 모의 결과
  - QT 모델과 동일한 핵연료 재배치 결과
  - QT 모델의 열출력 비보존 문제 해결



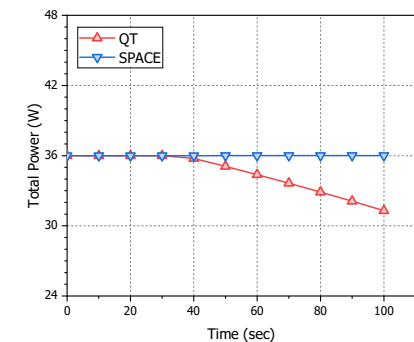
높이별 핵연료 재고량  
FRAPTRAN(Black), SPACE(Red)



높이별 핵연료 재고량 및 출력

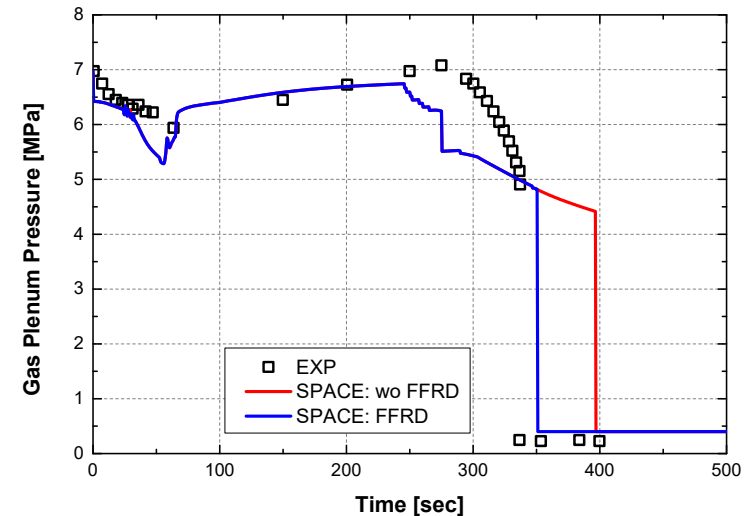
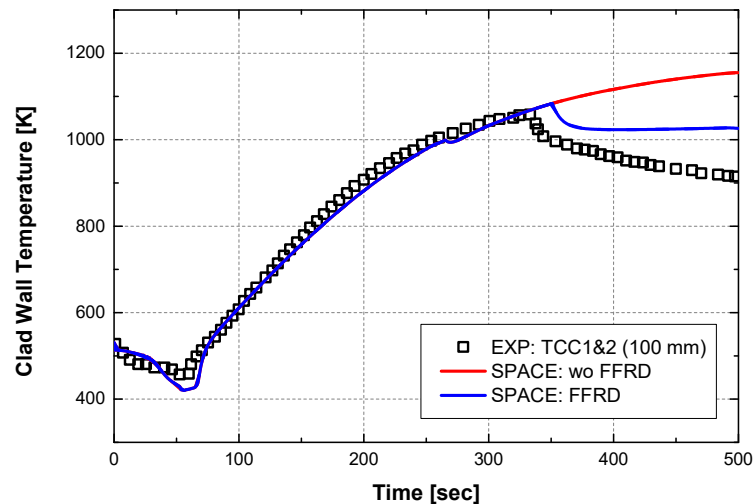
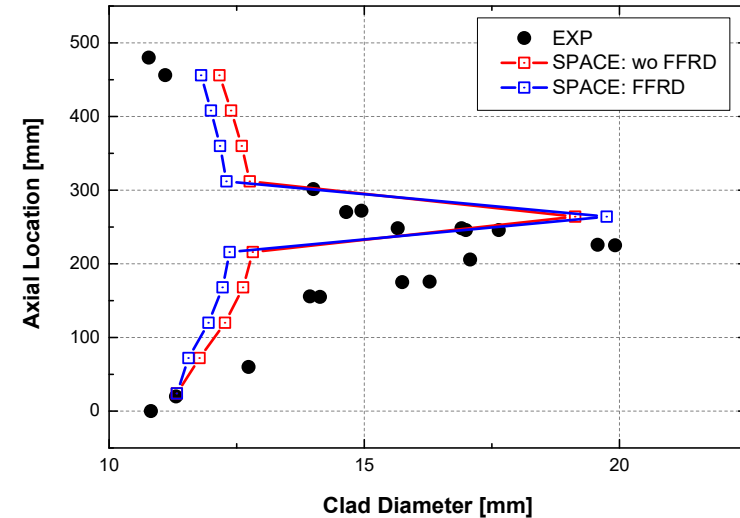
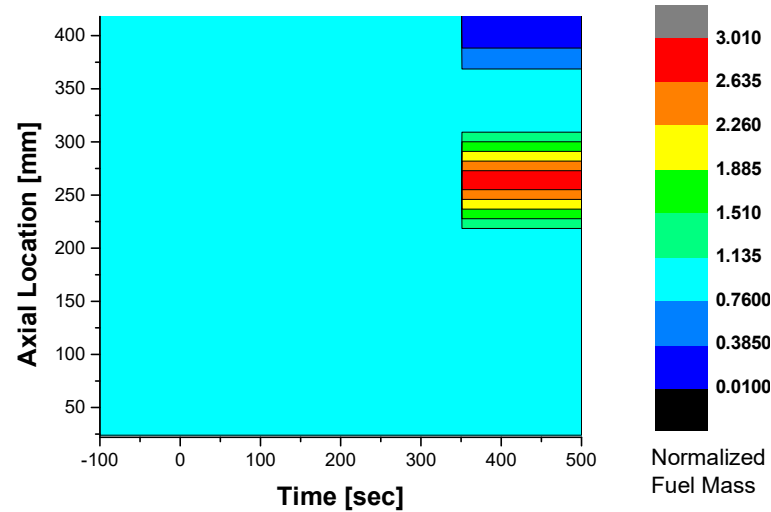


핵연료 총출력 변화



## (2-3) 핵연료 모델 개선

### ❖ IFA 650.4 시험 모의 결과 (92 MWd/kg)



## (2-3) 핵연료 모델 개선

### ❖ 과도 핵분열 기체 생성 (FGR) 모델

- Long term 효과(정상운전)는 초기 기체성분 입력으로 처리
- 과도기간 동안 FGR에 의한 봉내압 및 간극 열전도 변화 고려
- SPACE 탑재 FGR 모델
  - Fractional release rate model (중대사고 해석 모델)
  - Burnup-dependent model (DG-1327 모델)

#### Fractional release rate 모델

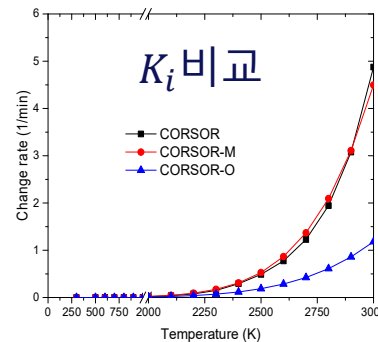
$$\frac{dM_i}{dt} = -K_i(T)M_i$$

$$\frac{M_i}{K_i}$$

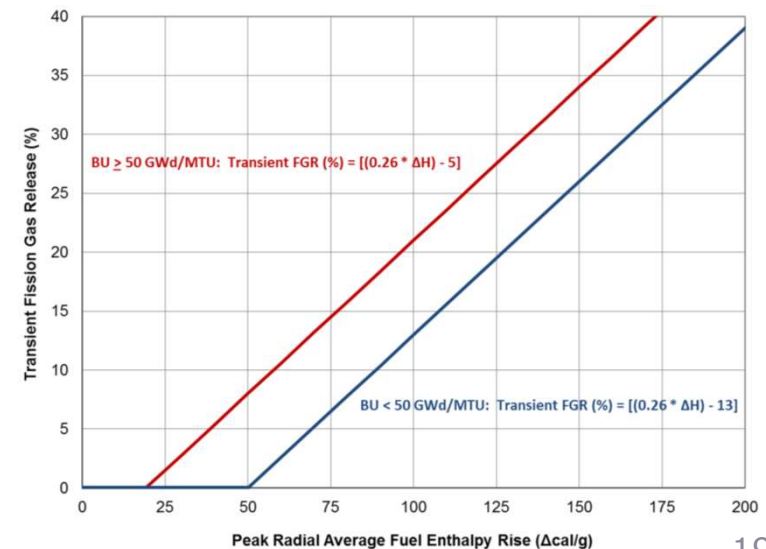
$$K_i(T) = A_i \exp(B_i T)$$

$$K_i(T) = k_{oi} \exp(-Q_i/RT)$$

$$K_i(T) = R_{xi} k_{oi} \exp(-Q_i/RT)$$



#### DG-1327 FGR 모델



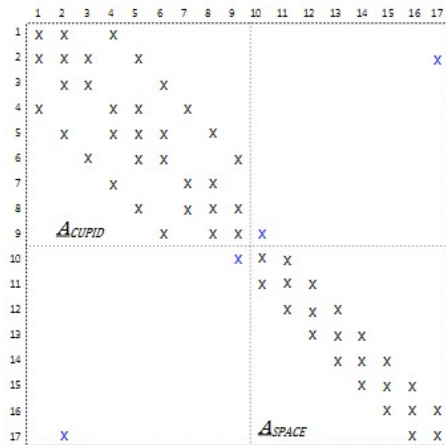
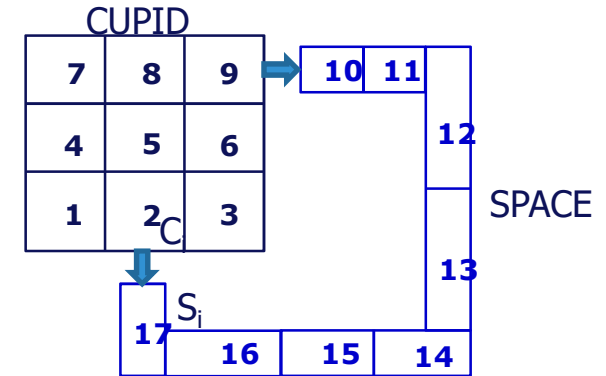
## (2-4) 다중스케일 연계 해석

### ❖ Coupling with component or CFD scale codes

- Explicit coupling: time step size limitation
- Overlap coupling: violate conservation laws

### ❖ Coupling Strategy: similar to MARS-CUPID Coupling method

- Numerically implicit coupling
- MASTER (SPACE) & DLL (CUPID)



$$A_S \cdot \delta P = b_S + \sum_{i=1}^{NC} (s_l \cdot V_{l,i}^{n+1} + s_g \cdot V_{g,i}^{n+1})$$

$$V_{k,i}^{n+1} = \alpha_{k,i} + \beta_{k,i} (\delta P_{Ci} - \delta P_{Si})$$

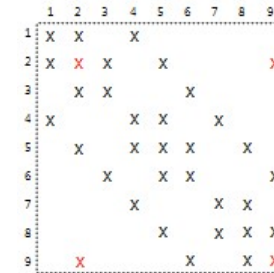
$$A'_S \cdot \delta P = b'_S + \sum_{i=1}^{NC} d \cdot \delta P_{Ci}$$

$$\delta P_{Si} = \xi_i + \sum_{j=1}^{NC} \eta_{i,j} \cdot \delta P_{Cj}$$

$$V_{k,i}^{n+1} = \alpha_{k,i} + \beta_{k,i} (\delta P_{Ci} - \xi_i - \sum_{j=1}^{NC} \eta_{i,j} \cdot \delta P_{Cj})$$

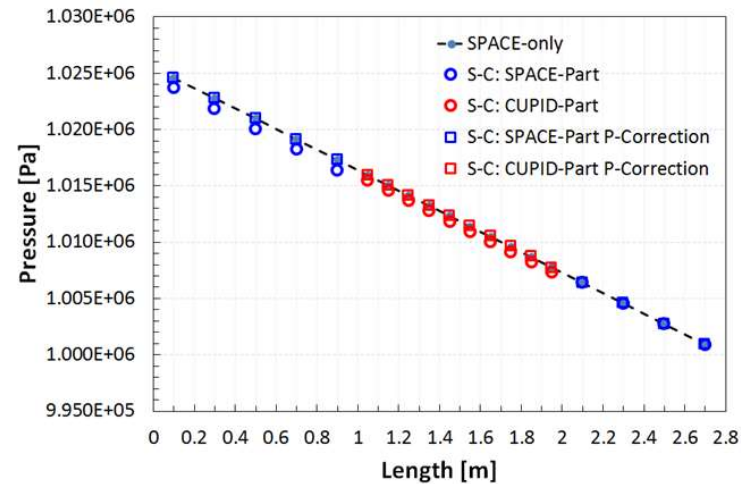
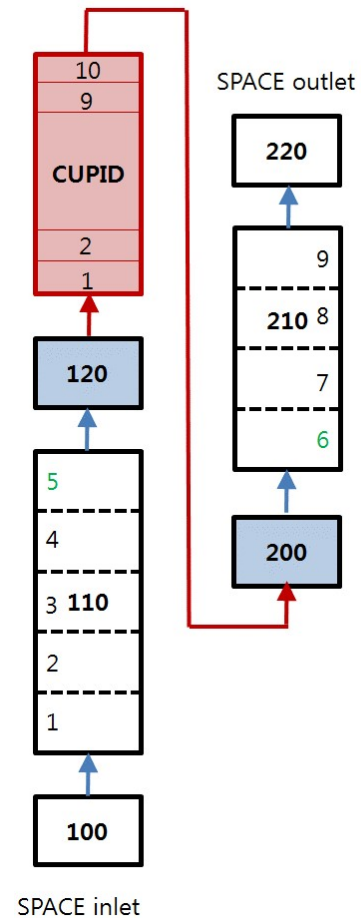
$$A_C \cdot \delta P = b_C + \sum_{i=1}^{NC} (c_l \cdot V_{l,i}^{n+1} + c_g \cdot V_{g,i}^{n+1})$$

CUPID matrix becomes:

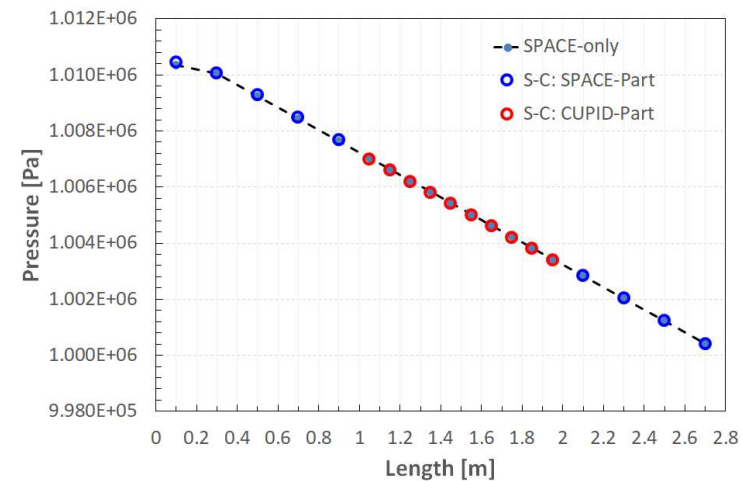


# (2-4) 다중스케일 연계 해석

## ❖ Verification of Coupling



<Single phase liquid>

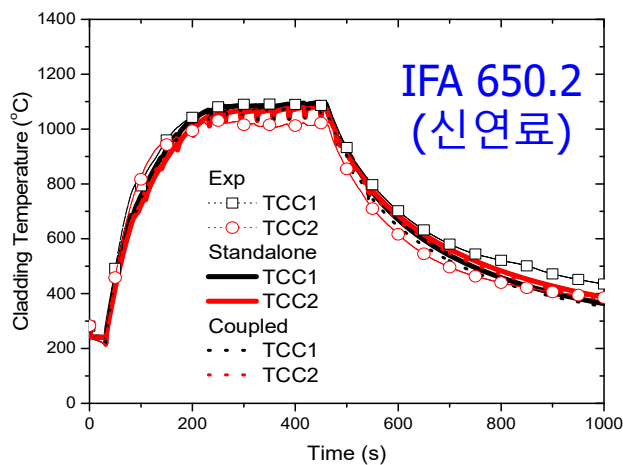
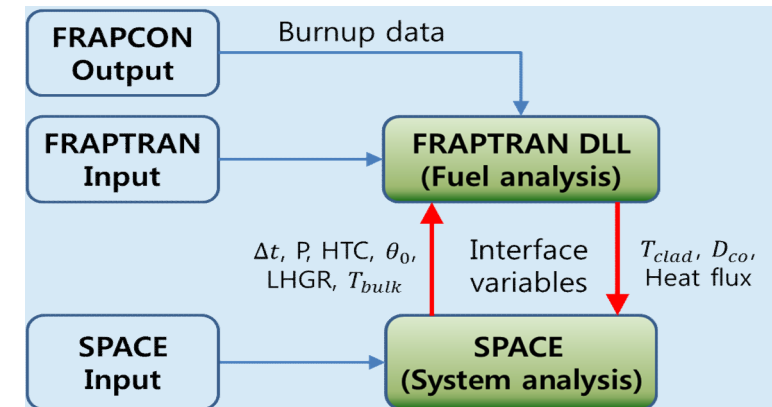
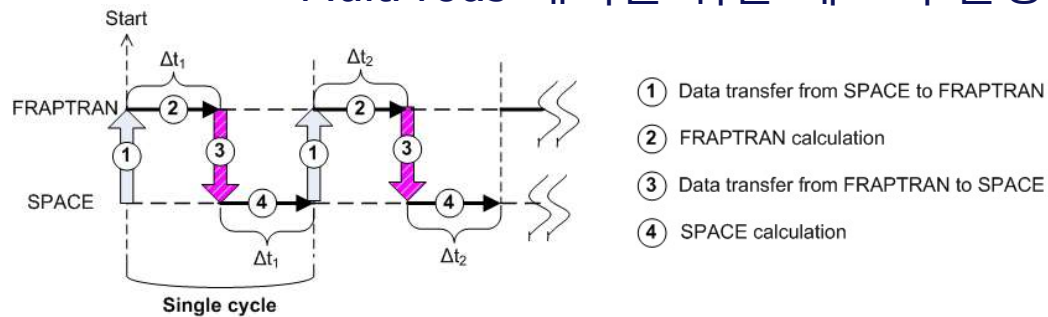


<Single phase Vapor>

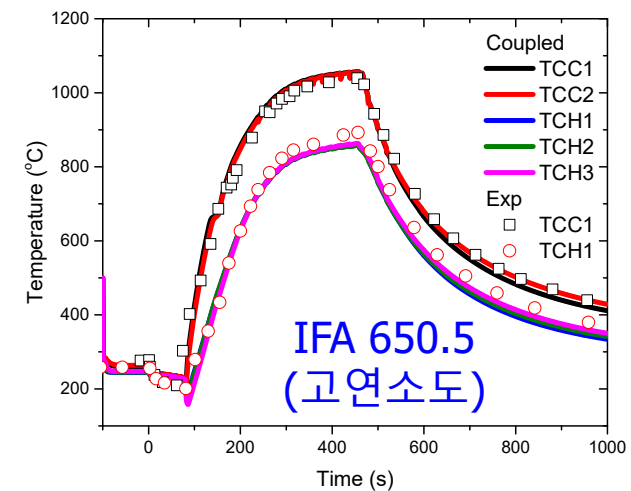
## (2-4) 다물리 연계 해석

### ❖ SPACE-FRAPTRAN

- 피복관 외부 경계면을 통한 연계 해석
  - 출력, 열전달계수, 유체 정보 (SPACE) ↔ 열속, 표면온도 (FRAPTRAN)
  - MASTER (SPACE) + DLL (FRAPTRAN)
  - Multi rods 해석을 위한 메모리 할당



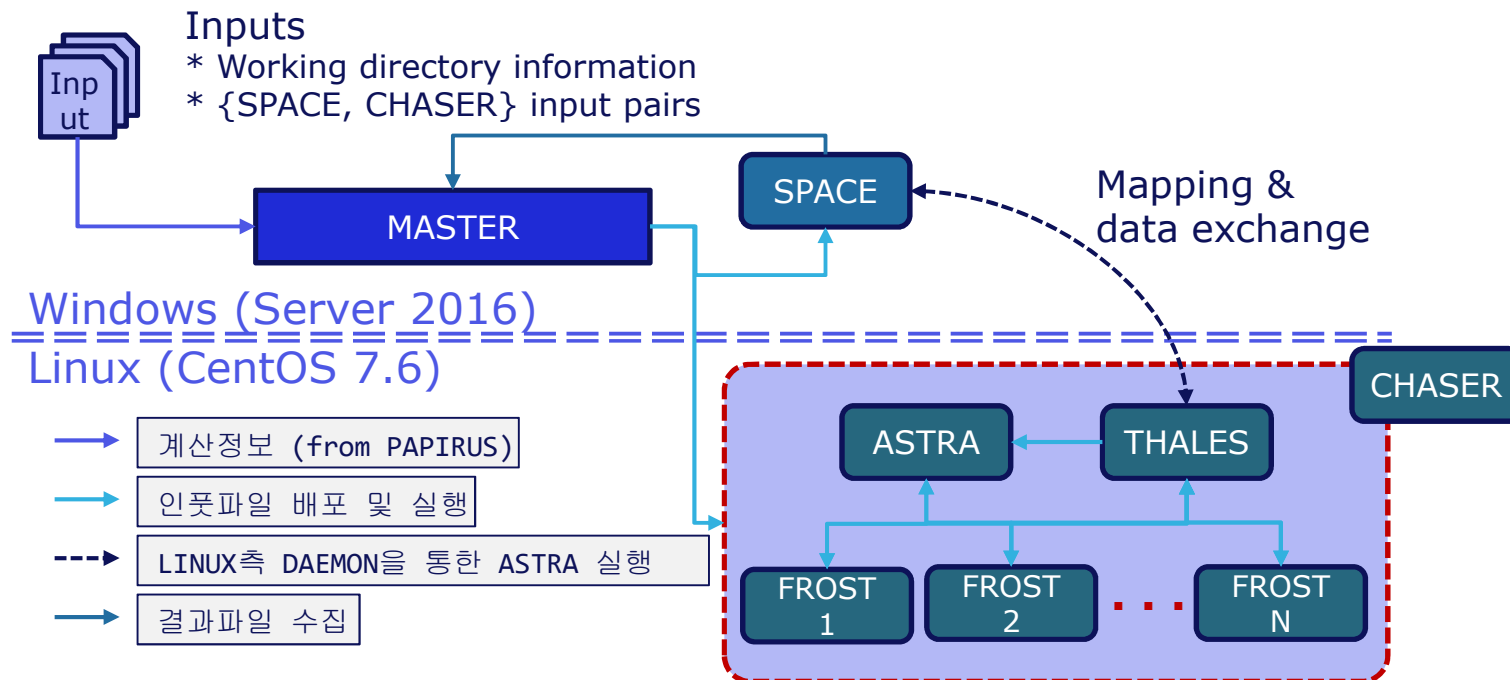
Halden 실험 평가



## (2-4) 다물리 연계 해석

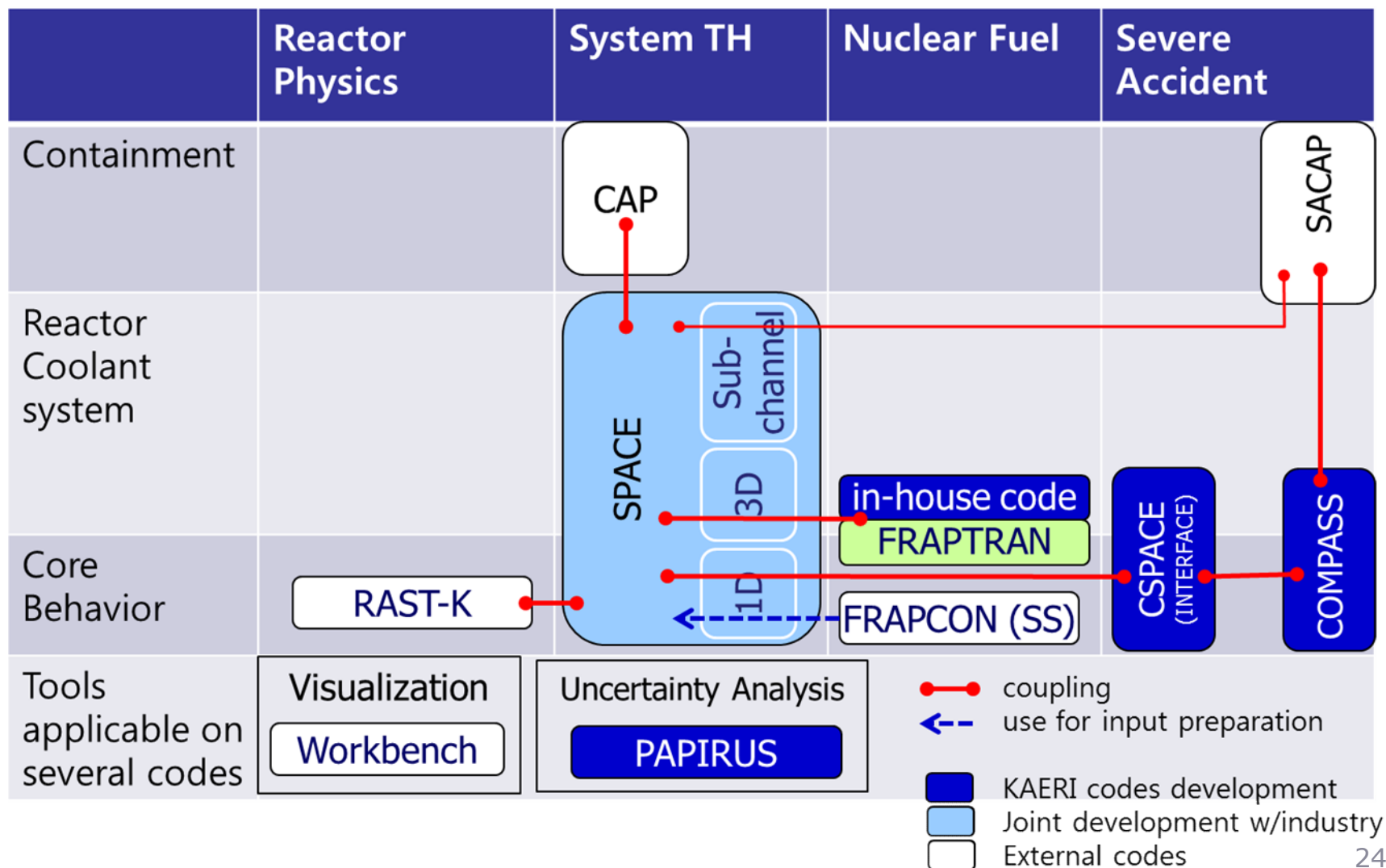
### ❖ SPACE-CHASER 코드통합체계 연계 개발 (KHNP-CRI)

- 3차원 노심해석 기반 non-LOCA 계통해석 방법론 개발 (KNF)
  - 규제요건 강화에 따른 기존 방법론의 지나친 보수성 완화 필요
- CHASER 코드 통합 체계와 계통해석을 위한 SPACE 연계
  - ASTRA (노심) + THALES (부수로) + FROST (연료봉)
  - THALES 노심 열수력 정보 → SPACE (노심 경계 정보 제공)



## (2-4) 다물리 연계 해석

### ❖ SPACE 코드 연계 해석 체계 (개발 완료)





## (2-5) 일체형 원전 모델

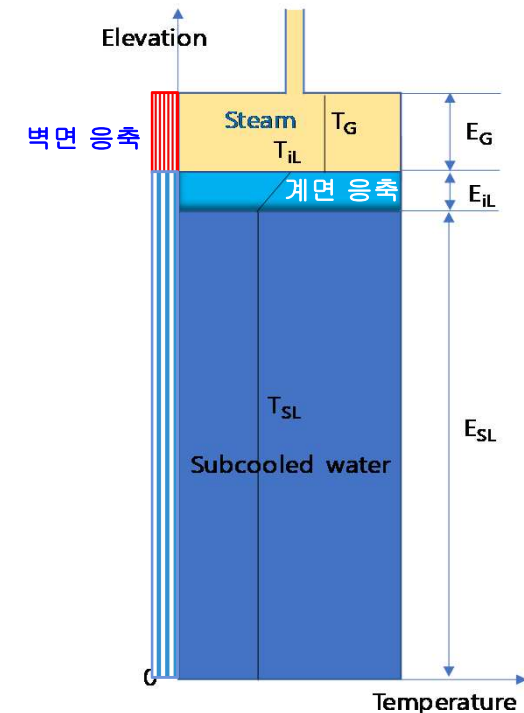
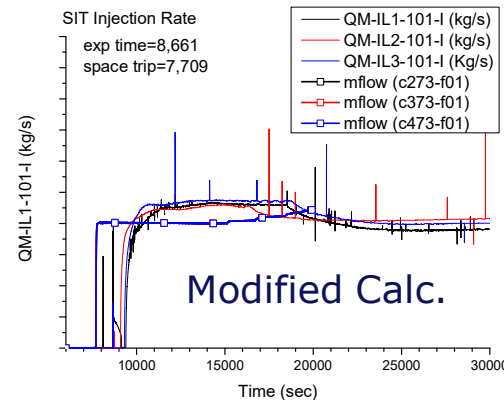
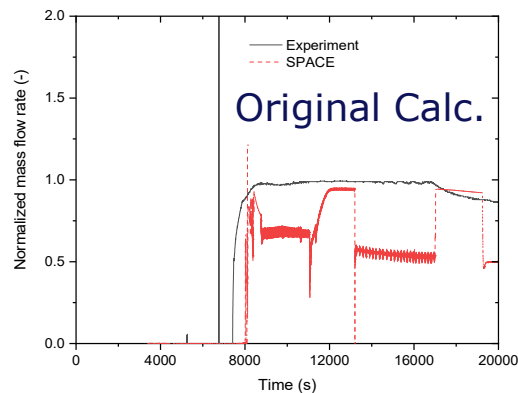
### ❖ Helical SG tube 모델

- 일체형 원전용 helical tube 열전달계수 모델 (MARS) 적용

### ❖ SMART 피동형 SIT/CMT 모델

- 기존 모델 문제점: 과냉 액체에 의한 과도한 응축
- Lumped tank 모델 도입
  - 성층 단일 노드
  - 유체 및 열구조체: 기포율 기반 영역 분할
  - 계면온도 설정

$$T_{il} = \frac{2[(E_{il} + E_{sl})T_l - E_{sl}T_{sl}]}{E_{il}} - T_{sl}$$



## (2-5) 일체형 원전 모델

### ❖ 해양원전용 일차원 동적 운동 모델 개발

- 선형 및 회전 가속항 추가 (코리올리 힘 제외)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k) + \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k) = -\alpha_k \frac{\partial p}{\partial x} + \mathbf{f}_{ik} + \mathbf{f}_{wk} + \alpha_k \rho_k \mathbf{g} + \mathbf{f}_{\text{fictitious}}$$

$$\mathbf{f}_{\text{fictitious}} = -\alpha_k \rho_k \ddot{\mathbf{R}} - \alpha_k \rho_k \dot{\boldsymbol{\Omega}} \times \mathbf{r}_k - 2\alpha_k \rho_k \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u}_k - \alpha_k \rho_k \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_k)$$

Translation effects   Euler effect   Coriolis effect   Centripetal effect

- 회전행렬 개선

- 경사 회전축 모의 용이: **완전한 3차원 운동** 모의 가능

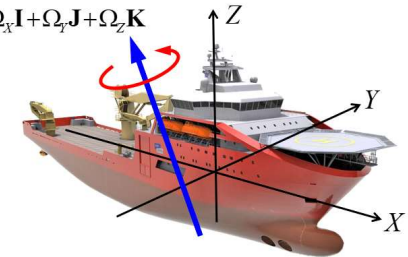
$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_z(\alpha) \mathbf{R}_y(\beta) \mathbf{R}_x(\gamma)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix}$$



$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \alpha + e_x^2 (1 - \cos \alpha) & e_x e_y (1 - \cos \alpha) - e_z \sin \alpha & e_x e_z (1 - \cos \alpha) + e_y \sin \alpha \\ e_y e_x (1 - \cos \alpha) + e_z \sin \alpha & \cos \alpha + e_y^2 (1 - \cos \alpha) & e_y e_z (1 - \cos \alpha) - e_x \sin \alpha \\ e_z e_x (1 - \cos \alpha) - e_y \sin \alpha & e_z e_y (1 - \cos \alpha) + e_x \sin \alpha & \cos \alpha + e_z^2 (1 - \cos \alpha) \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Omega} = \Omega_x \mathbf{I} + \Omega_y \mathbf{J} + \Omega_z \mathbf{K}$$



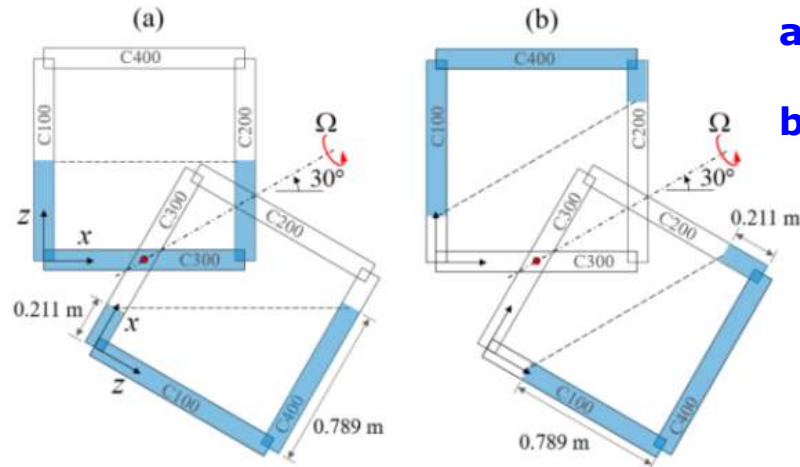
$$e_x = \Omega_x / |\boldsymbol{\Omega}|$$

$$e_y = \Omega_y / |\boldsymbol{\Omega}|$$

$$e_z = \Omega_z / |\boldsymbol{\Omega}|$$

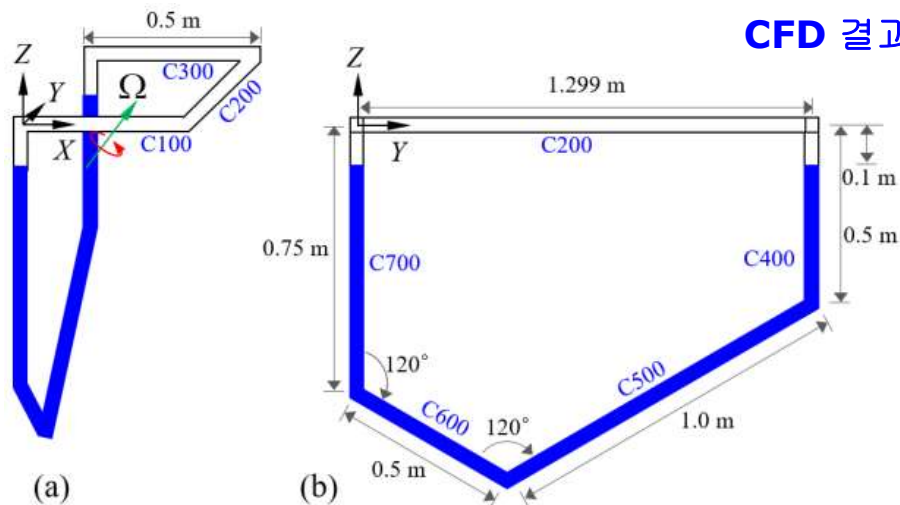
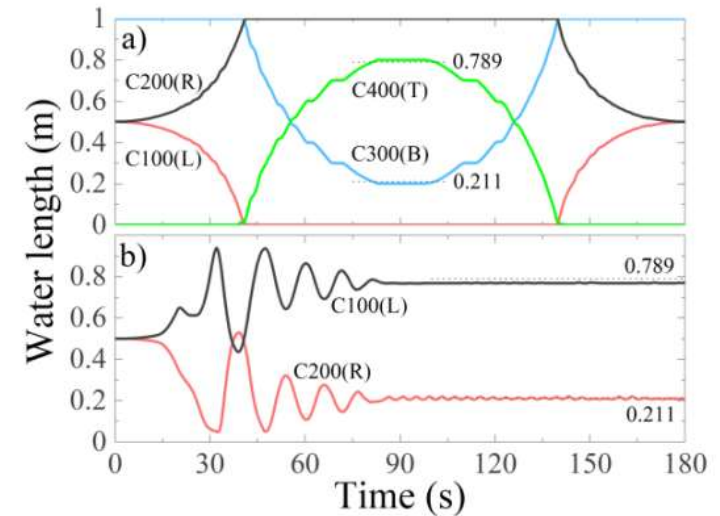
# (2-5) 일체형 원전 모델

## ❖ 경사축 회전 문제 (3차원 회전)

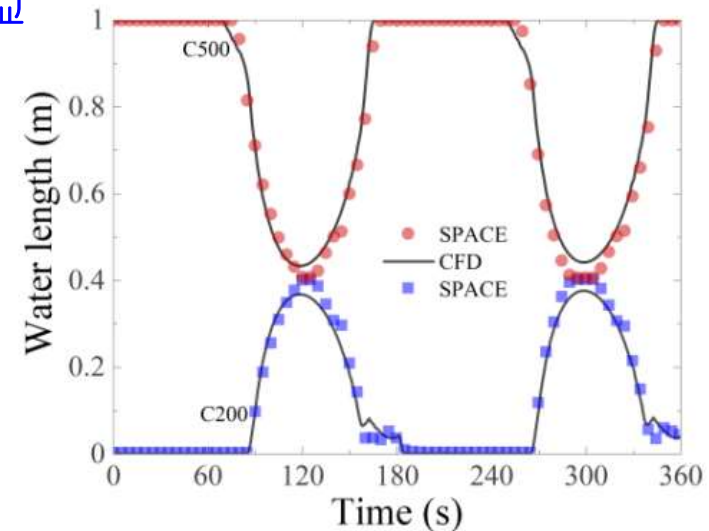


a) 중력 +  $2^\circ/\text{s}$

b) 무중력 +  $90^\circ/\text{s}$



CFD 결과 비교



## (2-5) 연구용원자로 해석 모델



### ❖ 연구로 노심 열수력 모델 개발

- 연구로 핵연료 형상 및 열수력 조건
  - 판형 및 핀부착 봉형 핵연료, 저온/저압 조건
- 열수력 모델 선정
  - RELAP5 및 TRACE 모델(판형), 하나로 모델(핀부착 봉형)

### ❖ 연구로 설계제한치 모델 개발

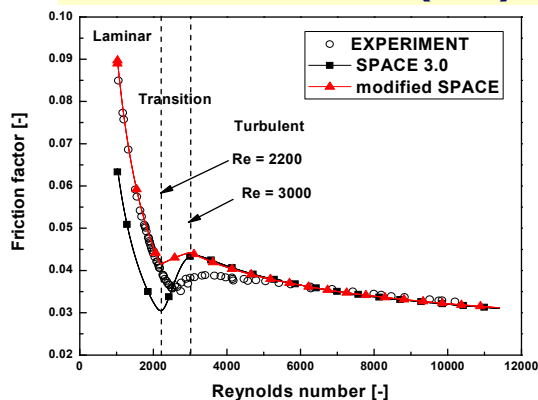
- 개발 목적
  - 안전관련 설정치의 결정과 안전성 평가를 위하여 사용됨
  - 사용자 편의를 위한 설계제한치 계산 모델 내장
- 개발 범위
  - ONB, OSV(NVG), CHFR : 판형 및 핀부착 봉형 핵연료
  - OFI : 판형 핵연료

## (2-5) 연구용원자로 해석 모델

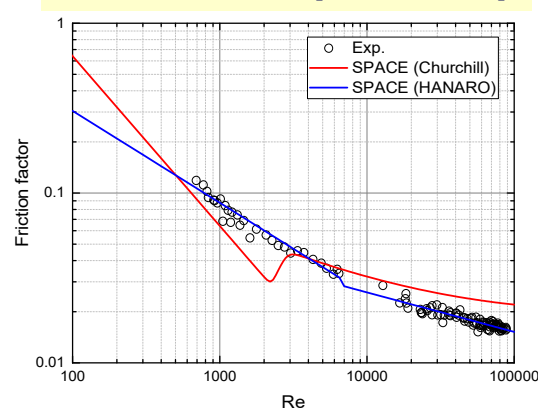
### ❖ 실험 DB를 활용한 연구로 안전해석코드 검증

- 연구로 특성 반영을 통해 전반적으로 예측 능력이 향상됨

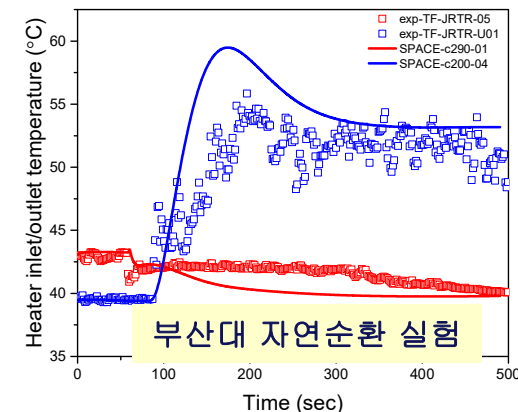
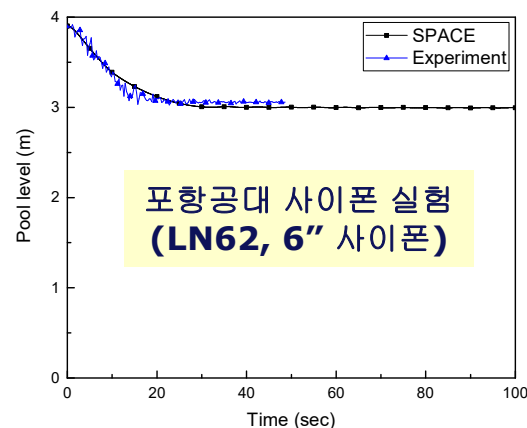
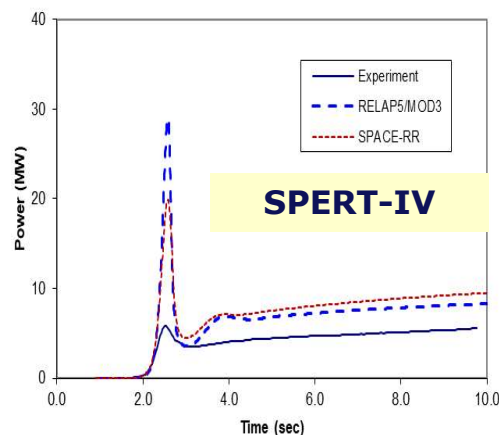
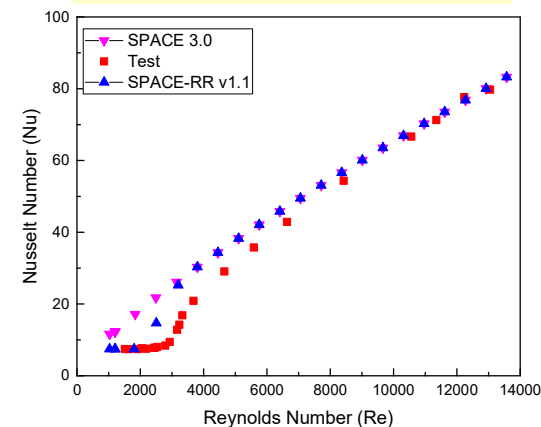
사각관 형상 마찰계수 (판형)



하나로 마찰계수 (핀부착 봉형)



강제대류 열전달계수 (판형)



# 1.계통 열수력 해석 코드

PWR 중심 (MARS, SPACE)

## 2.SPACE 개발 현황

- 1) 수치해법 모델
- 2) 열수력 모델
- 3) 핵연료 모델
- 4) 다중스케일/다물리 연계해석 모델
- 5) 기타 노형 모델 (일체형 원전 및 연구로)

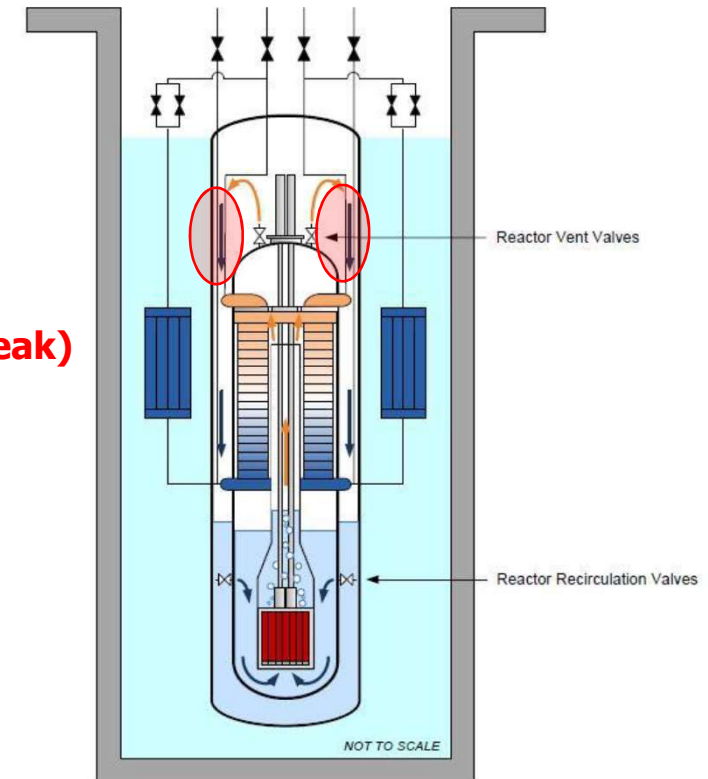
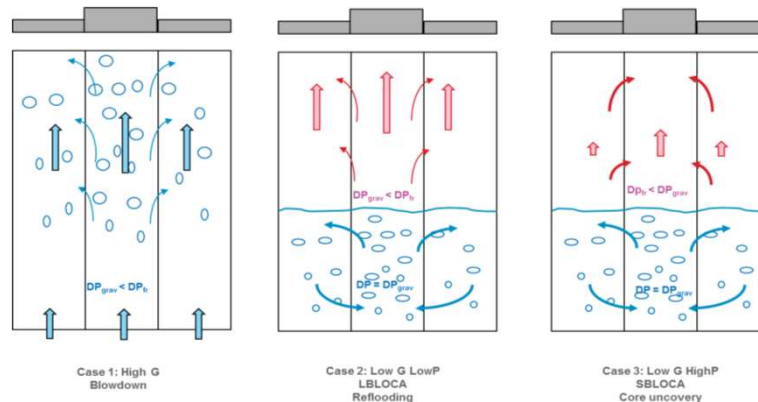
## 3.향후 계획

## ❖ SMR 안전해석

- 격납용기 내벽 응축
- 다차원 유동 (노심, 원자로 pool)

## ❖ IBLOCA 해석 모델 (IB = Intermediate Break)

- Chimney effect를 포함한 노심 다차원 유동 모델 및 유동 맵 개선
- IBLOCA PIRT 개발을 통해 필요 모델 항목 도출 예정
- 코드 계산속도 향상 (구조 개선, 병렬화...)



\*LOCA-type Scenario Simulation for NuScale-SMR with RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4, Katarzyna Skolik, NURETH-18, 2019

**Chimney effect at quenching front (D. Bestion)**

**감사합니다 !**