



한국원자력학회

2025년 Spring Conference  
원자력시설해체 및 방폐물관리 3

# 심해 침수된 사용후핵연료 운반용기로부터 방사성 핵종 유출률 계산: 서로게이트 모델 접근법

Calculating radionuclide release rates from deep-sea submerged spent fuel casks:  
a surrogate model approach

2025-05-23

정구현, 이상훈\*

\*shlee1222@kmu.ac.kr



啓明大學校  
KEIMYUNG UNIVERSITY



CAOD LAB

Computer-Aided Optimal Design



1. 연구개요

2. 연구방법

3. 연구결과

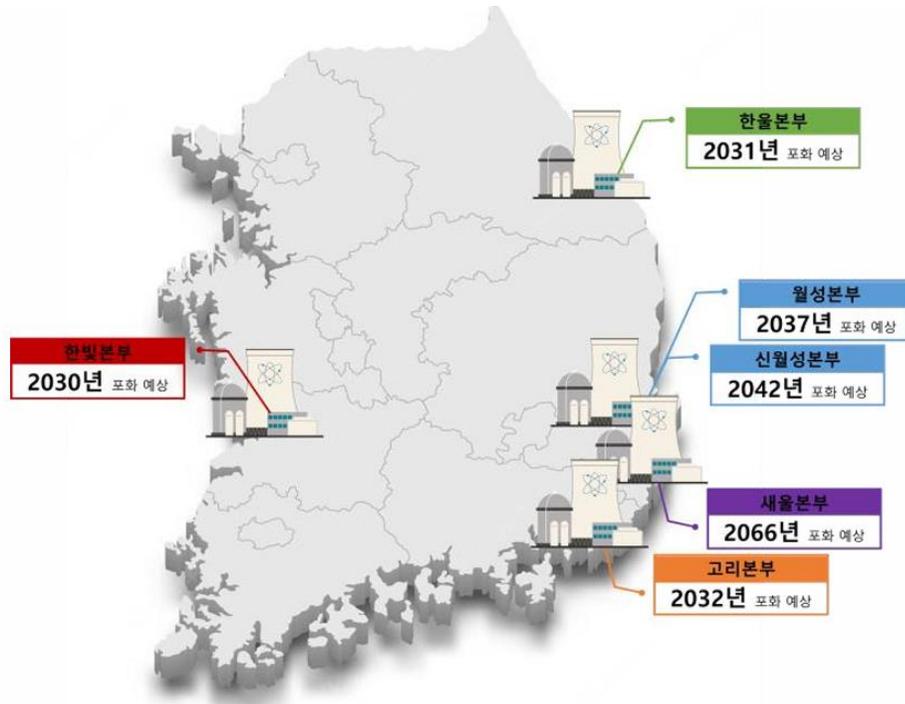
4. 결론



## 사용후핵연료 해상운반

a. Development of Equivalent Beam Model of High Burnup Spent Nuclear Fuel Rods under Lateral Impact Loading

- 중·장기적으로 사용후핵연료의 집중 관리를 위한 중간저장 시설의 개발은 불가피 하며 이러한 시설로의 운반이 필요함.
- 모든 원전이 연안에 위치한 국내 특성상 사용후핵연료의 해상운반은 필수임.
- 사용후핵연료의 해상운반시 위험도 평가는 필수적임.
- 위험도 평가는 코드를 이용하여 경로 별로 수행됨. [2]

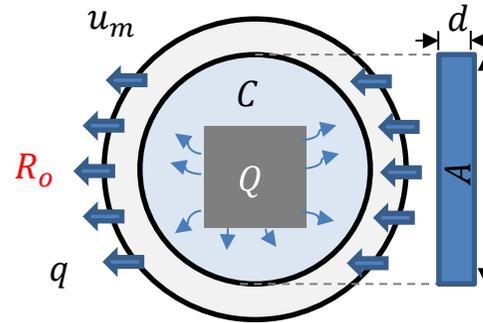


# 연구개요

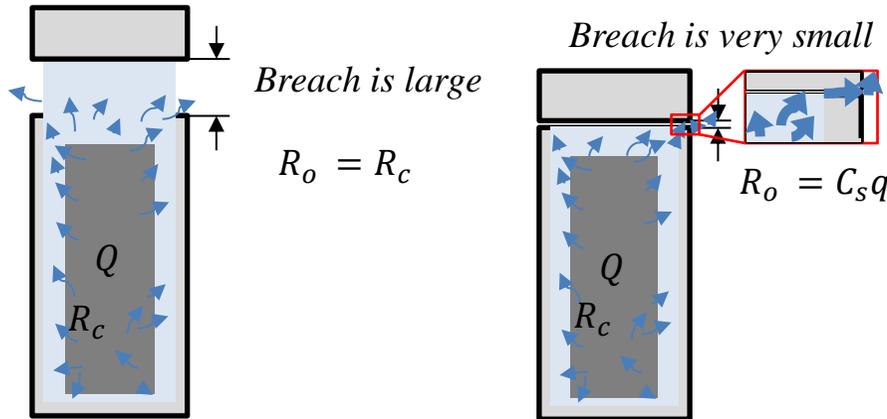


## 사용후핵연료 해상운반 위험도 평가 코드

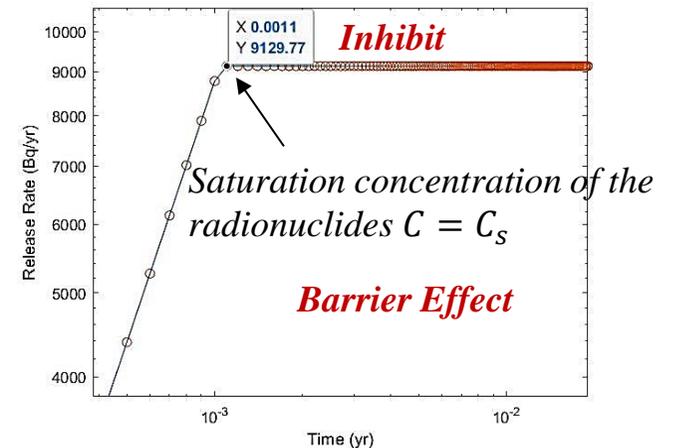
- 유실 시, 방사성물질 유출률 평가 필요
- 해상운반 위험도 평가 코드
  - MARINRAD(USA)
  - POSEIDON(France)
  - **Barrier Effect Model(Japan)**



$u_m$ : Flow velocity  
 $R_o$ : Release rate of radionuclides  
 $q$ : Release rate of seawater  
 $C$ : Nuclide concentration  
 $Q$ : Nuclide inventory  
 $d$ : Breach size  
 $A$ : projected area  
 $R_c$ : Leaching rate



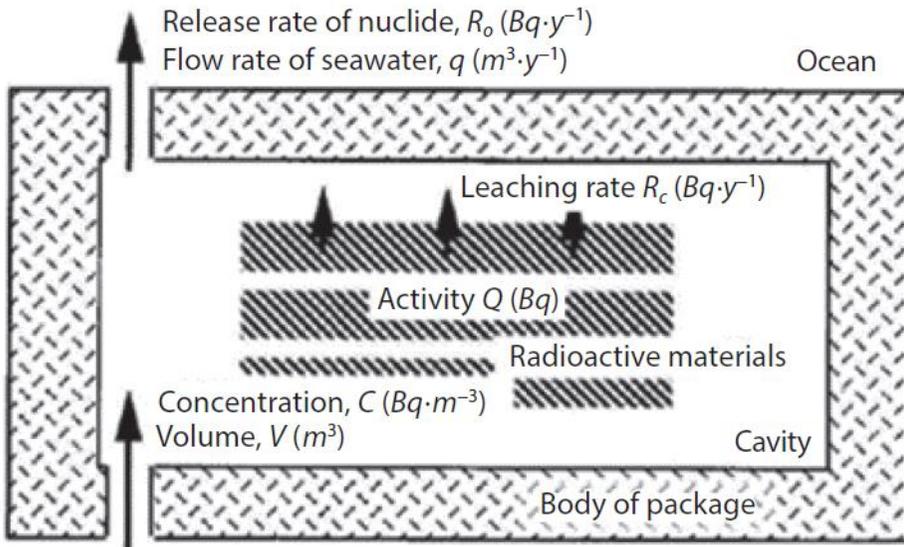
MARINRAD(USA)  $R_c < R_o$      Barrier Effect Model(Japan)  $R_c > R_o$





## Barrier Effect Model 개선 (q)

- Cask가 매우 극심한 사고에 노출되더라도 유로 크기는 작을 것으로 예상됨.
- Barrier Effect 모델을 참조함.
- 국내 상황에 적합한 유출률 평가 모듈 개발 필요



〈CRIEPI 개략도〉

$$R_o = Cq = C_s A u_m$$

$$u_m = \left( \frac{2\rho g \beta \Delta\theta L}{\left(1 + \frac{\lambda_f L}{de}\right) \rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$Q$ : 핵종재고량  
 $C$ : 핵종농도  
 $R_c$ : 침출률  
 $A$ : 유로투영면적  
 $\beta$ : 바닷물 체팽창계수

### 제한적

1. 수평 방향
2. 자연대류 상황
3. 부력을 기전
4. 유로폭 가정 (0.01 mm)

$\Delta\theta$ : 내·외부 온도차  
 $L$ : 채널 길이(m)  
 $\lambda_f$ : 채널의 마찰 계수  
 $Re$ : 레이놀즈 수  
 $de$ : 유로폭(m)

〈CRIEPI 주요 식 [6]〉



## 해수 유출률 평가 모델 개발

- 심해 환경 해석을 위한 **Control Volume** 선정
  - 용기 규격을 기준으로 설정

- Only cladding vs Fuel rod

- Cladding, Pellet
- Bonded, De-bonded PCI

- Cladding,
- arious interface condition
- Epoxy

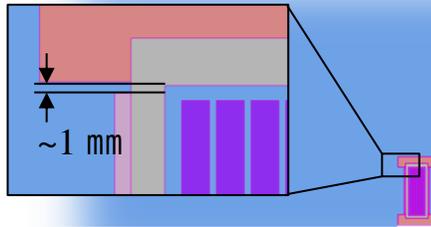
# 해수 유출률 평가 모델



## 심해 환경 해석을 위한 Control Volume 선정

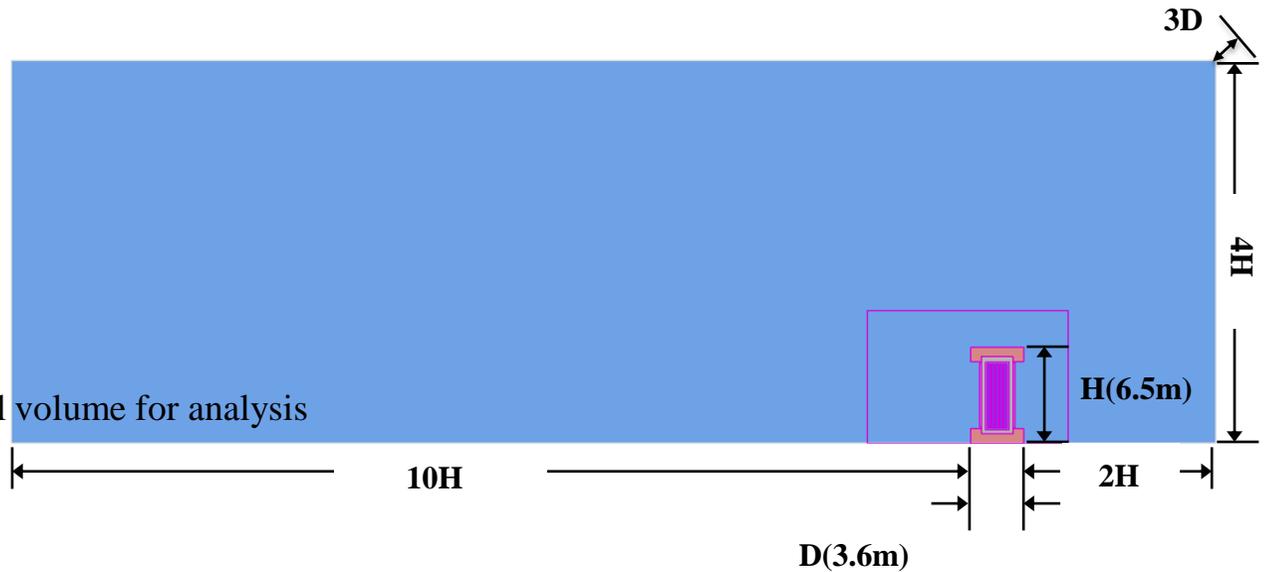
- 해양환경 반영을 위해선 운반용기 내·외부 해석 수행 필요
- 심해 환경 해석을 위한 Control Volume 선정

The width of breach is so tiny



The scale of the deep-sea environment is very vast.

Setting an appropriately sized control volume for analysis



# 해수 유출률 평가 모델

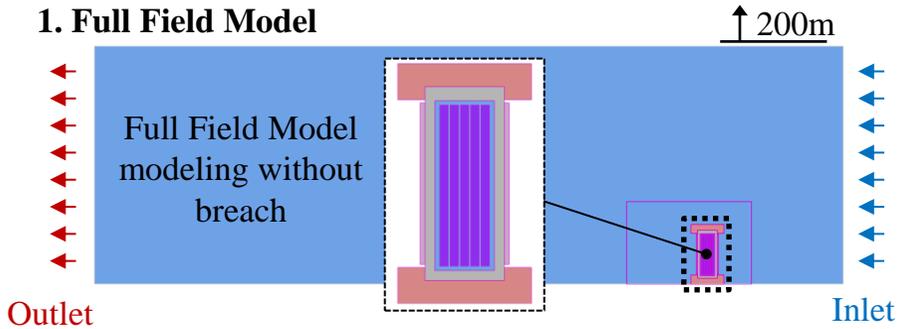


## 모델 개발(Sub-Modeling 이용)

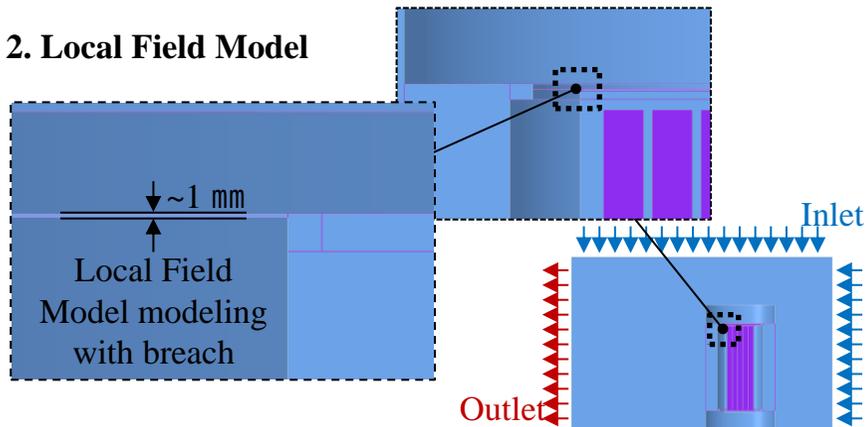
- 운반용기 외부 유동장과 breach 사이 Scale 차이를 반영하기 위해 Sub-Modeling 기법 사용
- 두 모델 개발 후 파라미터를 통해 결합(Temperature, Velocity, Total pressure)

### Developed Two Models to Use Sub-Modeling Technique

#### 1. Full Field Model

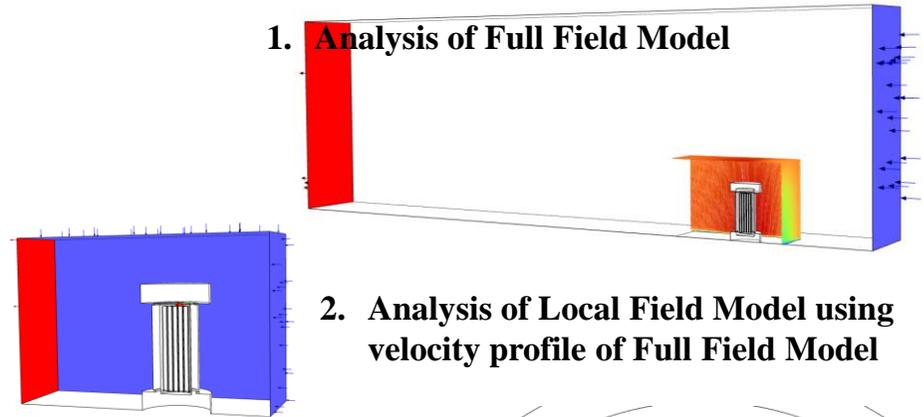


#### 2. Local Field Model

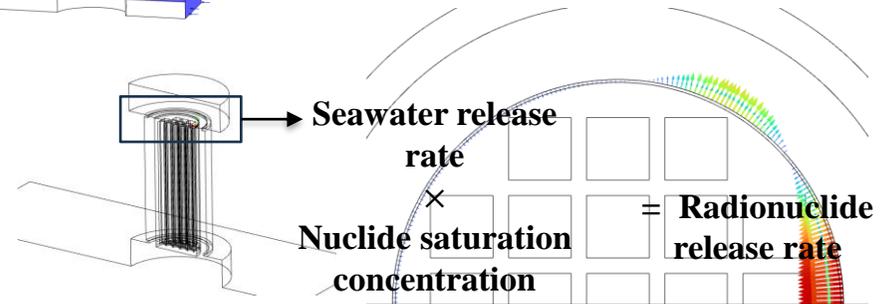


### Using the Sub-Modeling Technique to Evaluate Radioactive Material Release Rates

#### 1. Analysis of Full Field Model



#### 2. Analysis of Local Field Model using velocity profile of Full Field Model



#### 3. Evaluate radioactive material release rates

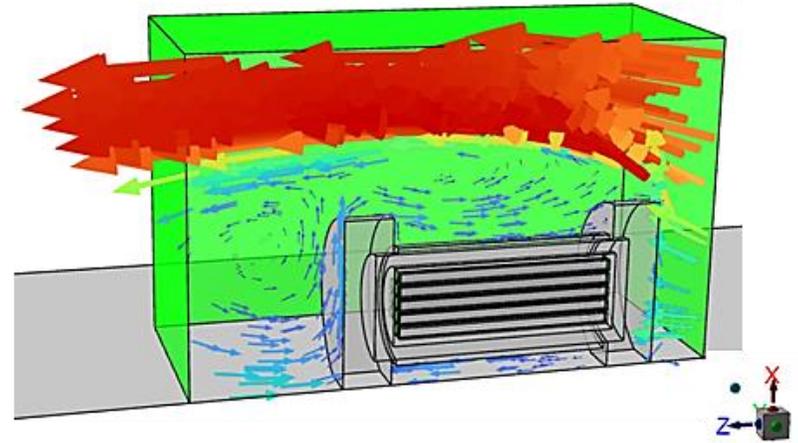
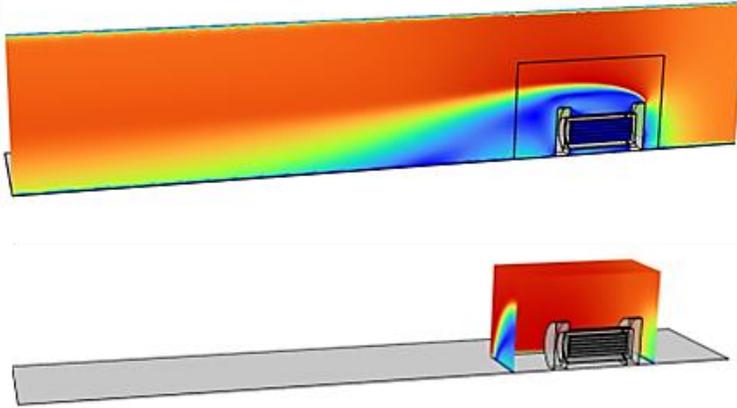
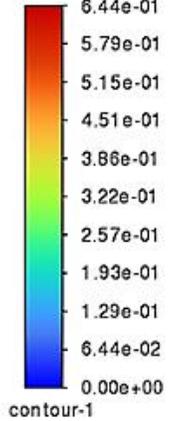
# 해수 유출률 평가 모델



## 해수 유출률 평가 모델 결과(유속)

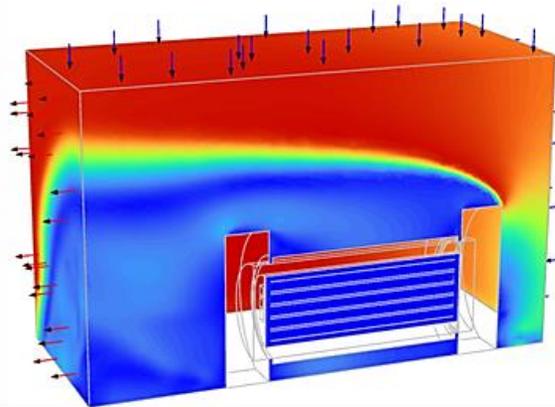
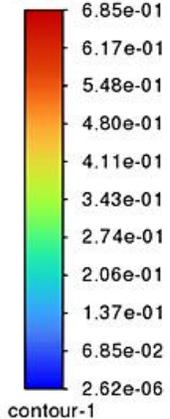
### Full-Field Model

Velocity Magnitude  
[ m/s ]

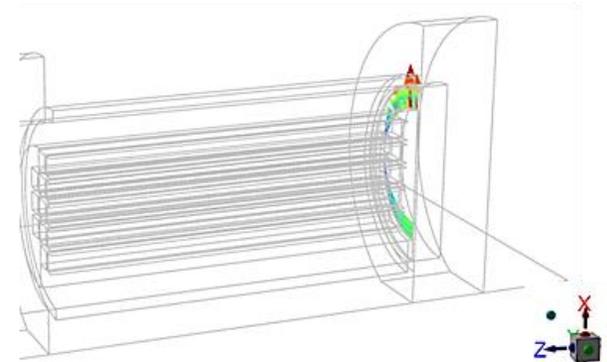
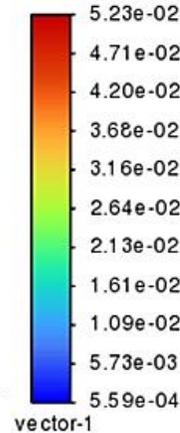


### Local-Field Model

Velocity Magnitude  
[ m/s ]



Velocity Magnitude  
[ m/s ]



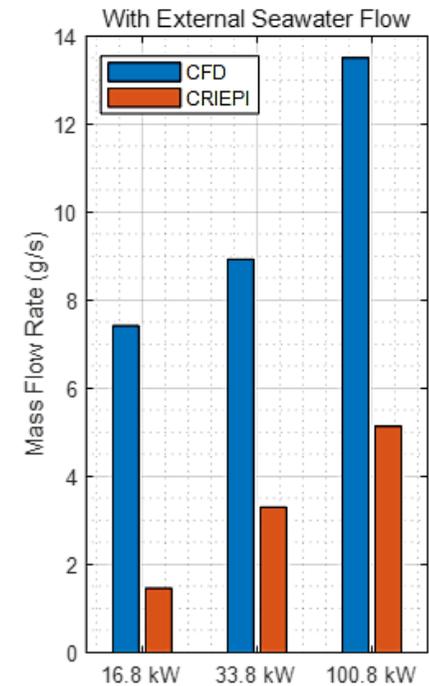
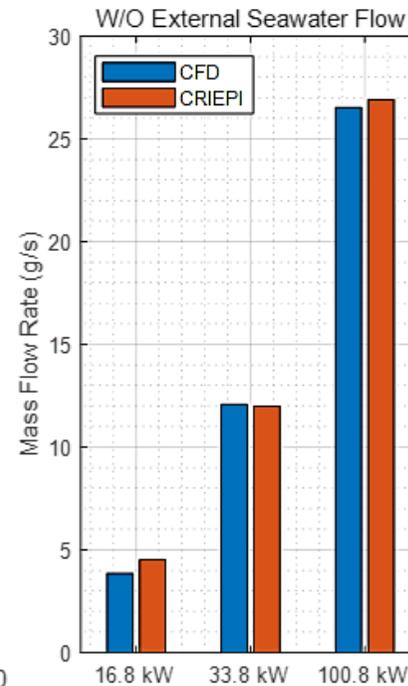
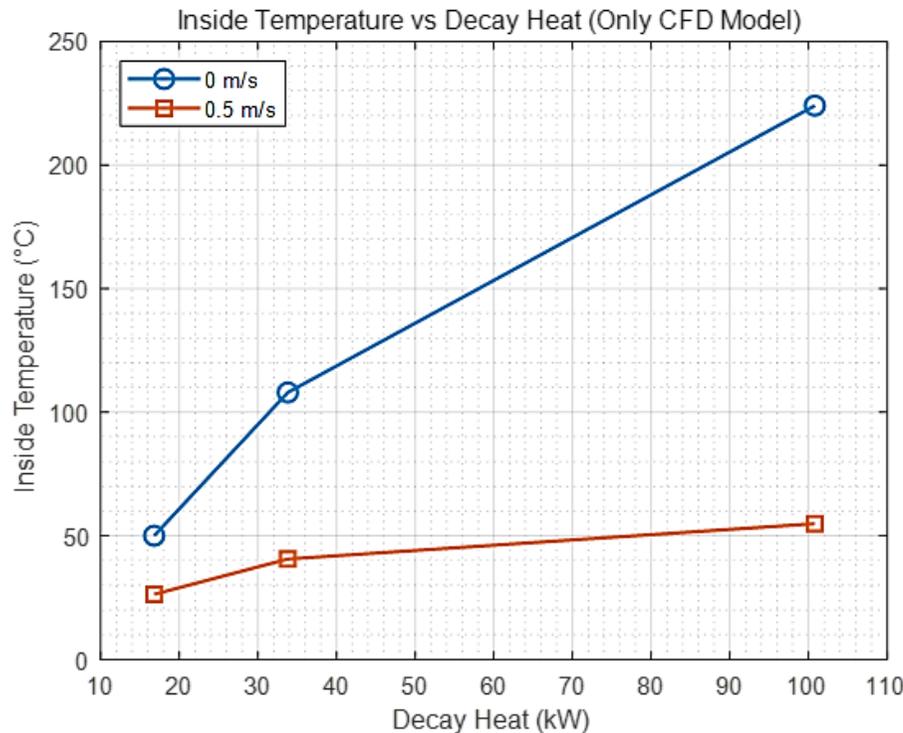


# 해수 유출률 평가 모델



## 해수 유출률 평가 모델 검증

- Barrier Effect Model을 통해 검증 수행
- 외부 해수 유동 유무에 따라 유출량 경향이 달라짐 (자연대류 vs 강제대류).
- 외부 유동 존재 시 CFD 결과는 Barrier 모델 대비 최대 5.1배 높은 유출량 예측.
- 보수적 방사성 물질 유출 평가에 외부 유동 효과 반드시 반영 필요.

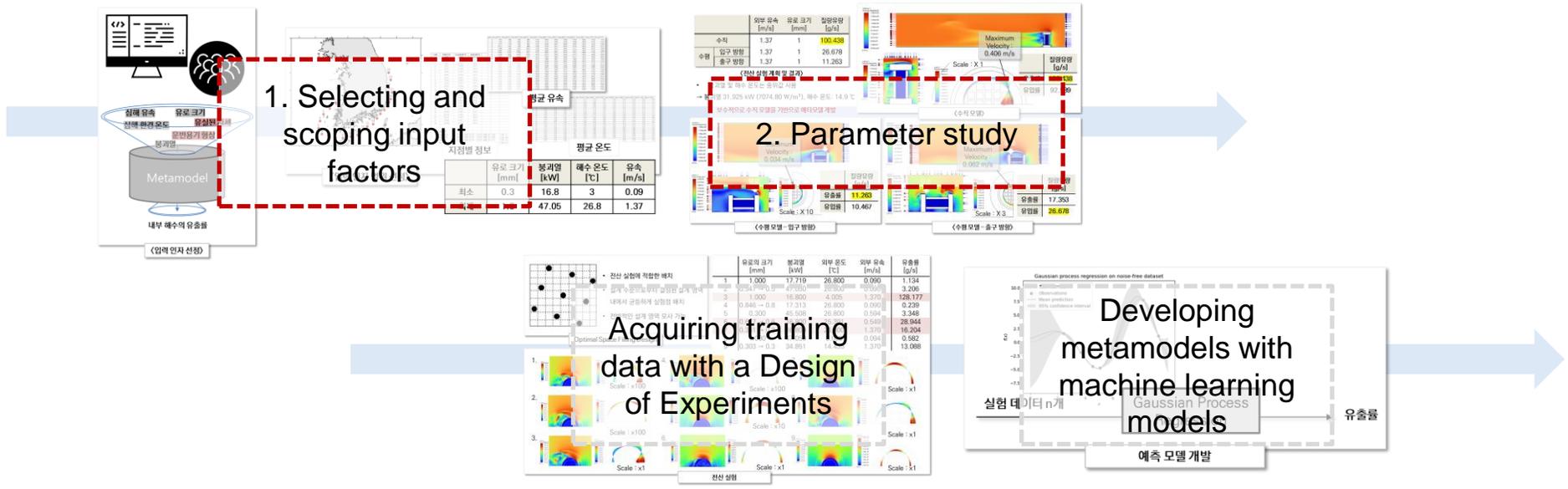




# 해수 유출률 평가 모듈(메타모델)

## 기계학습을 활용한 메타모델 개발 개략도

- Fitting 함수: 기계학습 기법



# 메타모델 개발을 위한 요인효과 분석

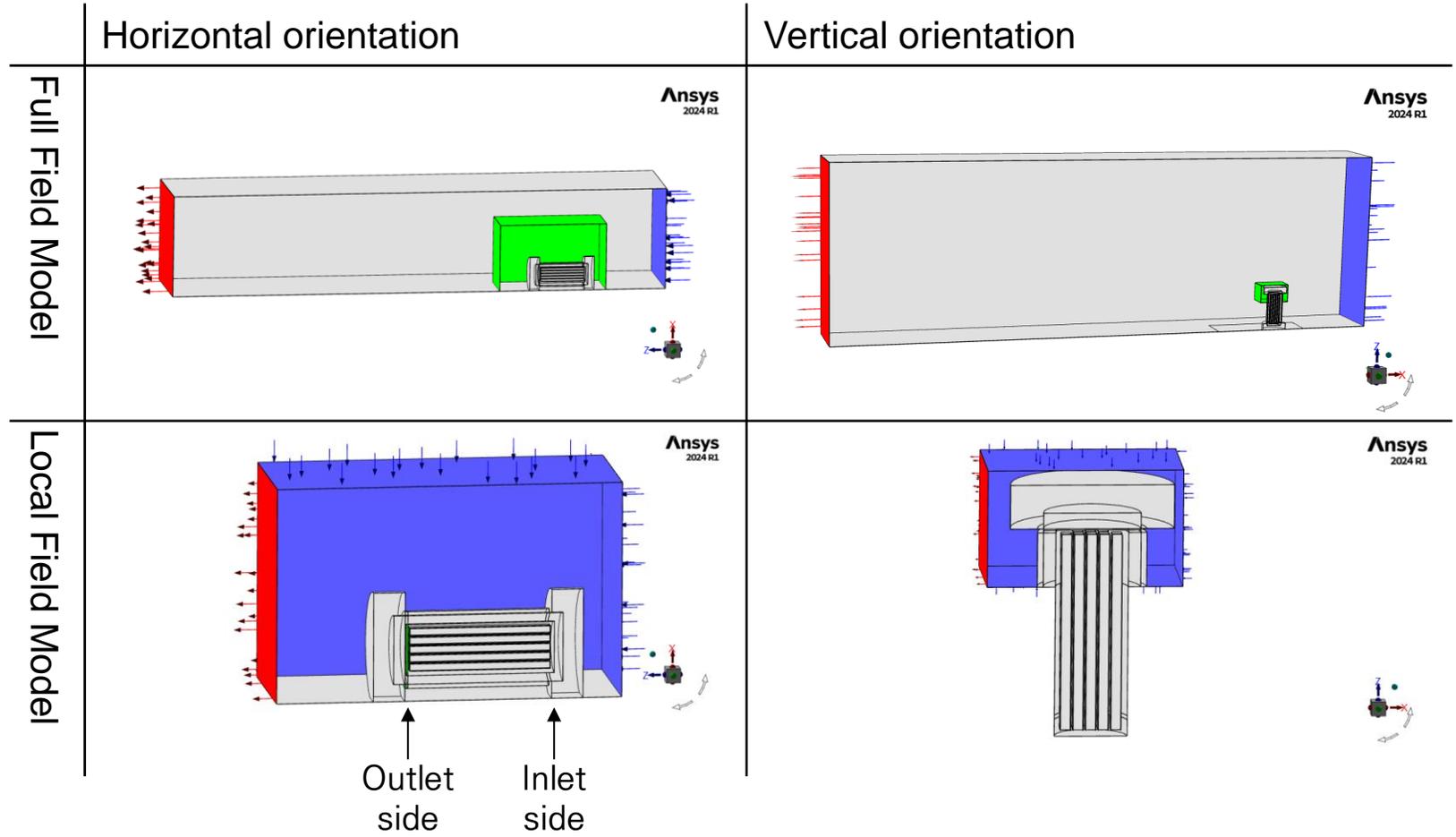


## 심해에 유실된 운반용기 자세 결정

- 유출률 관점에서 보수적인 자세 결정
  - 자세별로 모델을 개발하기에는 많은 자원이 소모되므로, 효율적인 메타모델 개발을 위해 보수적인 자세를 결정하고자 함.

### 해석조건

- 유속: 0.5, 0 m/s
- 온도: 15 °C
- 방괴열: 16.8 kW
- 유로크기(폭): 1 mm



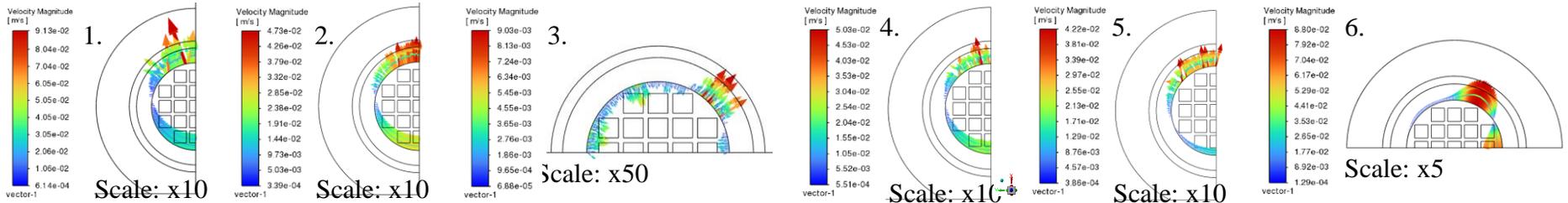


# 메타모델 개발을 위한 요인효과 분석

## 심해에 유실된 운반용기 자세 결정

- 유출률 관점에서 볼 경우 자연대류 상황일 경우 수평 방향, 강제대류 상황일 경우 수직 방향이 보수적
- 메타모델 개발 시 수직, 수평 방향 모두 해석 후 보수적인 값 사용

Velocity (m/s)	Orientation		Case	Release rate [g/s]	Release temp [°C]
0	Horizontal	Inlet side	1	15.63	43.85
		Outlet side	2	13.59	35.96
	Vertical		3	1.528	42.71
0.5	Horizontal	Inlet side	4	11.09	32.80
		Outlet side	5	14.38	32.89
	Vertical		6	20.02	30.12

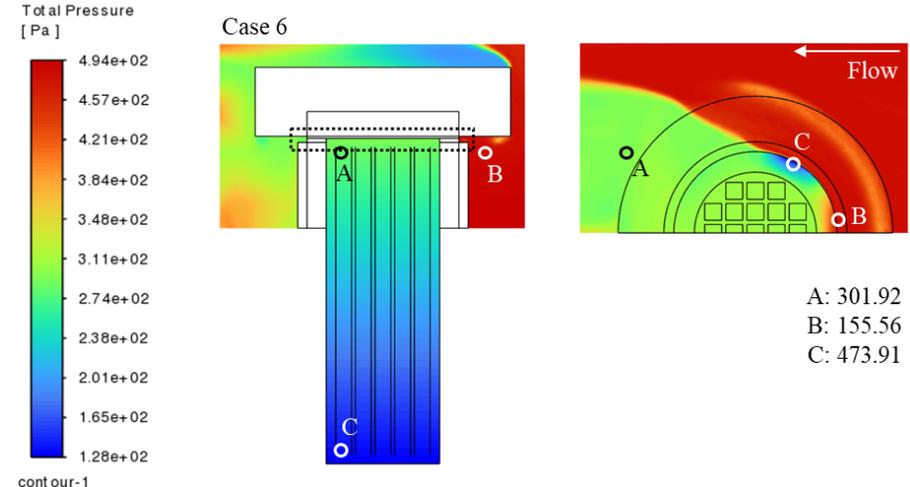
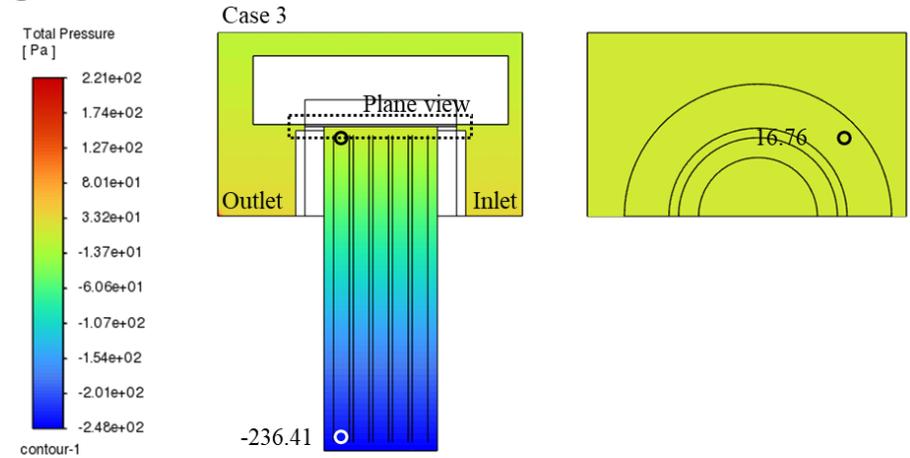
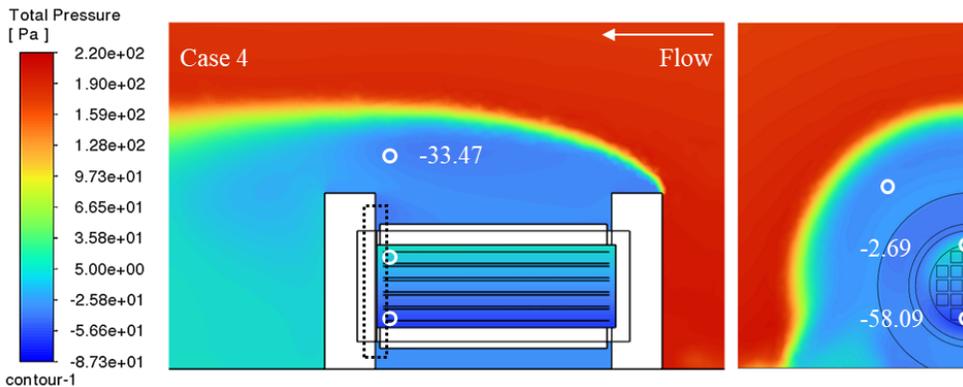
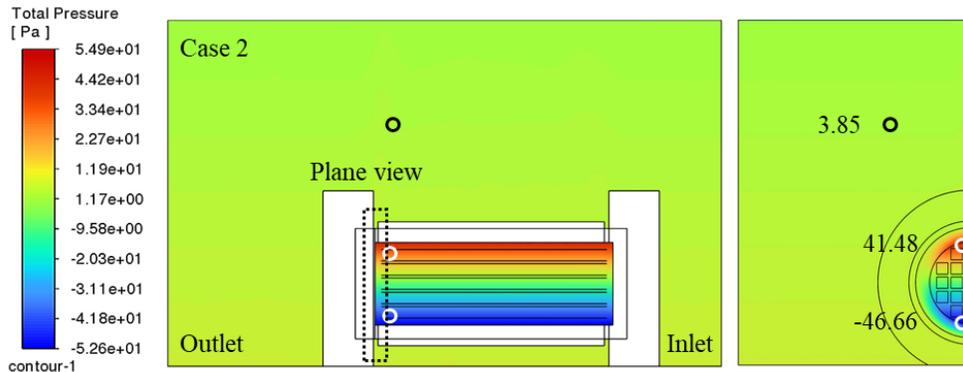


# 메타모델 개발을 위한 요인효과 분석



## 심해에 유실된 운반용기 자세 결정

- 유출률 관점에서 볼 경우 자연대류 상황일 경우 수평 방향, 강제대류 상황일 경우 수직 방향이 보수적
- 메타모델 개발 시 수직, 수평 방향 모두 해석 후 보수적인 값 사용



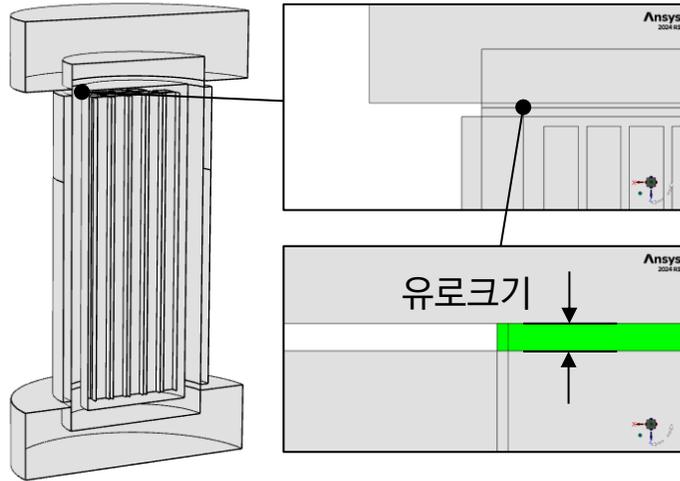


# 메타모델 개발을 위한 요인효과 분석

## 메타모델 개발을 위한 인자 및 범위 선정

- 유로크기, 붕괴열, 외부온도, 외부유속 등 4개의 인자 선정
- 확보한 DB를 활용하여 합리적으로 범위 산정

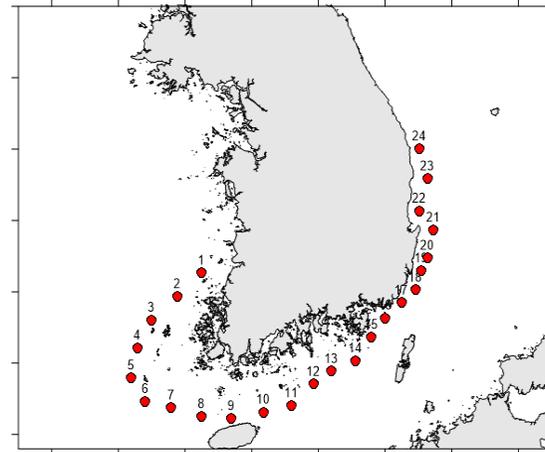
$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$



유로크기 (사고가혹도 반영)

PLUS7	HU 55 GWd/MTU
	LU 45 GWd/MTU
ACE7	HU 55 GWd/MTU
	LU 45 GWd/MTU

붕괴열 (선원항 반영)



### 해양관련 정보

- 지점별 정보
- 월별 평균 온도
- 월별 평균 유속
- 최대 유속

외부온도, 외부유속 (해양환경 반영)

	유로크기 [mm]	외부온도 [°C]	외부유속 [m/s]	붕괴열 [kW]
최소	0.3	3	0.09	3.665
최대	1.0	26.8	1.37	47.050

입력인자 범위



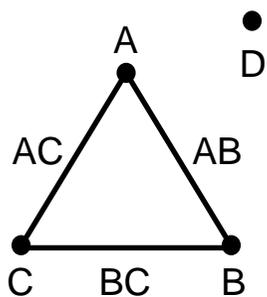
# 메타모델 개발을 위한 요인효과 분석

## 다구찌 실험계획법 (Taguchi experimental design)

- 소수의 실험을 통해 주요 인자의 영향을 평가 가능
- 4요인 2수준 직교배열 모델 사용 ( $L_8$ )
- 인자간 교락이 생기지 않도록 배치

	유로크기 [mm]	외부온도 [°C]	외부유속 [m/s]	붕괴열 [kW]
최소	0.3	3	0.09	3.665
최대	1.0	26.8	1.37	47.050

4요인 2수준



Exp	A	C	AC	B	AB	BC	D
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2
3	1	2	1	2	2	1	2
4	1	2	2	1	1	2	1
5	2	1	1	1	2	2	1
6	2	1	2	2	1	1	2
7	2	2	1	2	1	2	1
8	2	2	2	1	2	1	2

L8 모델

Designs	Single-level designs			
	2 level	3 level	4 level	5 level
L4	2-3			
L8	2-7			
L9		2-4		
L12	2-11			
L16	2-15			
L16			2-5	
L25				2-6
L27		2-13		
L32	2-31			

사용 가능한 다구찌 모델

column	A	C	AC	B	AB	BC	D
유출률	붕괴열	외부 온도		외부 유속			유로 크기
유출온도	외부 온도	외부 유속		유로 크기			붕괴열

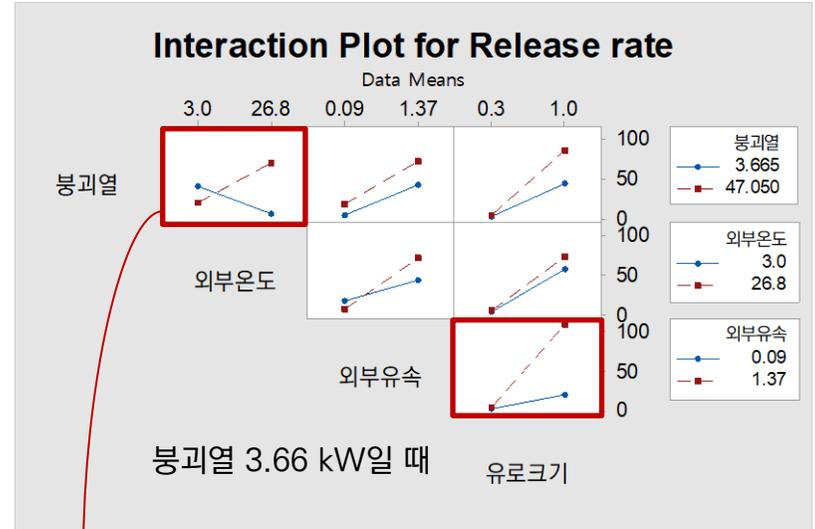
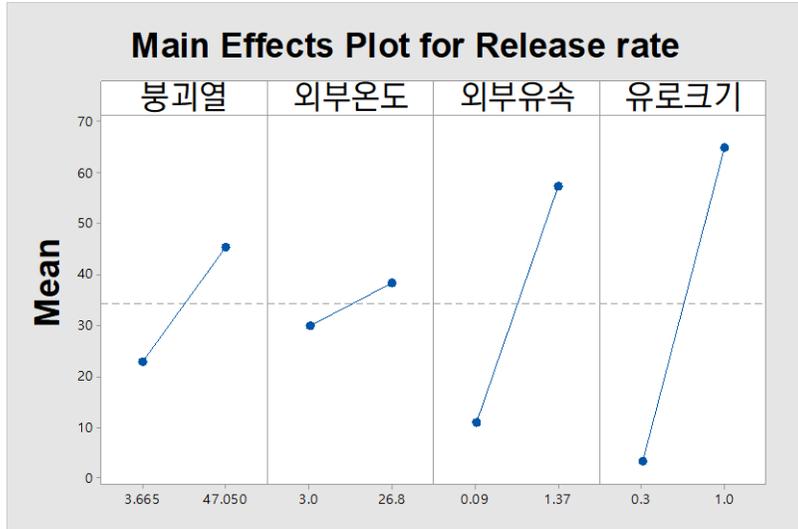
사용한 배열표

# 메타모델 개발을 위한 요인효과 분석



## 다구찌 실험계획법 (Taguchi experimental design)

- 유출률에 영향을 미치는 인자 : 유로크기 > 외부유속 > 봉괴열 > 외부온도



온도 3 °C  
온도 26.8 °C

요인	자유도	Seq SS	기여율	Adj SS	Adj MS
봉괴열	1	997.6	5.63%	546.4	450.2
외부온도	1	143.0	0.81%	2002.3	1231.7
외부유속	1	4297.7	24.25%	246.7	4297.7
유로크기	1	7601.0	42.90%	7601	7601.0
봉괴열*외부온도	1	3793.5	21.41%	3793.5	3793.5
봉괴열*외부유속	1	109.8	0.62%	109.8	109.8
외부온도*외부유속	1	776.8	4.38%	776.8	776.8
<b>Total</b>	7	17719.5	100.00%		

분산 분석

	봉괴열	외부온도	외부유속	유로크기	유출률	방향
1	3.665	3	0.09	0.3	0.096	수평
2	3.665	3	1.37	1	80.982	수직
3	3.665	26.8	0.09	1	6.9406	수평
4	3.665	26.8	1.37	0.3	3.945	수직
5	47.05	3	0.09	1	33.116	수평
6	47.05	3	1.37	0.3	5.527	수직
7	47.05	26.8	0.09	0.3	3.768	수평
8	47.05	26.8	1.37	1	138.89	수직

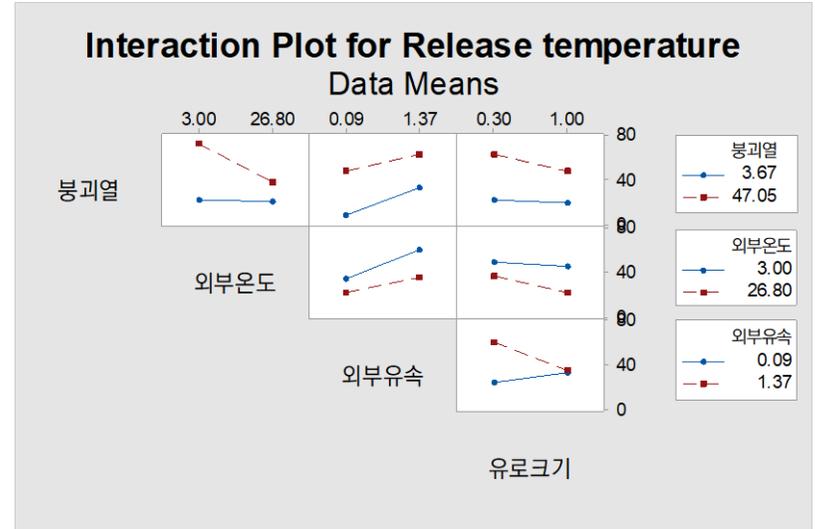
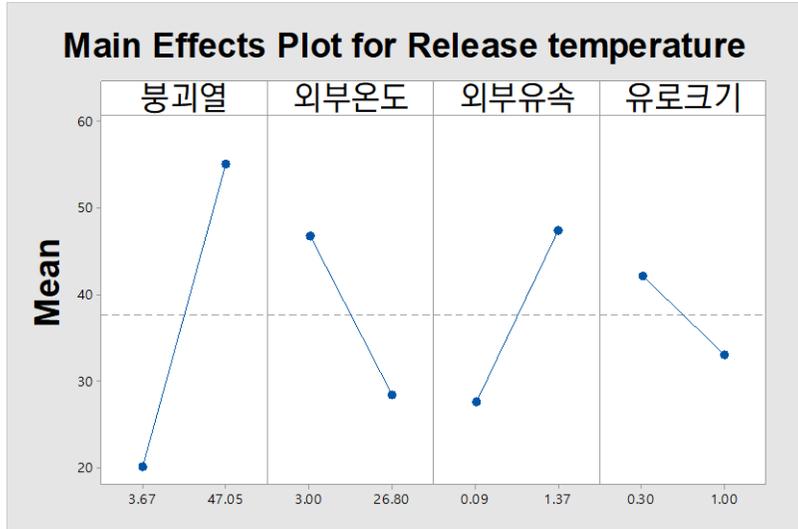
전산실험 결과 (유출률)

# 메타모델 개발을 위한 요인효과 분석



## 다구찌 실험계획법 (Taguchi experimental design)

- 유출온도에 영향을 미치는 인자 : 봉괴열 > 외부온도 > 유로크기 > 외부유속



요인	자유도	Seq SS	기여율	Adj SS	Adj MS
봉괴열	1	2445.17	51.05%	2445.17	2445.17
외부온도	1	682.65	14.25%	34.17	34.17
외부유속	1	785.63	16.40%	1226.51	1226.51
유로크기	1	160.74	3.36%	122.32	122.32
외부온도*외부유속	1	70.54	1.47%	70.54	70.54
외부온도*유로크기	1	57.81	1.21%	57.81	57.81
외부유속*유로크기	1	587.15	12.26%	587.15	587.15
Total	7	4789.7	100.00%		

분산 분석

	봉괴열	외부온도	외부유속	유로크기	온도	방향
1	3.67	3.00	0.09	0.30	9.80	수평
2	47.05	3.00	0.09	1.00	58.31	수평
3	47.05	3.00	1.37	0.30	87.65	수직
4	3.67	3.00	1.37	1.00	31.97	수직
5	47.05	26.80	0.09	0.30	37.60	수평
6	3.67	26.80	0.09	1.00	5.43	수평
7	3.67	26.80	1.37	0.30	33.65	수직
8	47.05	26.80	1.37	1.00	37.14	수직

전산실험 결과 (유출온도)



고연소도 핵연료봉의 단순화 모델 정합성 향상을 위해,  
파괴역학 기반 계면 특성 모사와 주요 인자 최적화를 수행하였다.

## [연구 내용]

- CIRFT 응답 곡선 기반 계면 해석 수행
- TSL 기반 Surface-based Cohesive Behavior 모델 구성 (총 6개 인자 역추정 수행)
- MIGA를 이용한 최적화 수행 (RMSE, AE 기반 2 목적함수 정식화)
- 계면 손상 시나리오 분석 → 초기 손상 계면(CP/PP)에 따른 차이 평가

## [향후 연구]

- 핵연료 성능평가 결과 등 CP, PP 파손 순서 결정을 위한 추가 정보 취득
- 계면 특성 변화를 고려한 핵연료봉 단순화 모델 개발 (Beam 요소)
- 집합체 수준 해석에서 계면 반영 단순화 모델의 적용성 평가



END