



# Comparative Analysis of Near-Field Atmospheric Dispersion Models for Nuclear Emergency Planning Zone Sizing

김기범, 김성엽

2026.05.07

한국원자력학회 2026 춘계학술대회  
@제주국제컨벤션센터

A nuclear research institute  
**reshaping the future** based on  
peoples trust

**KAERI**

Korea Atomic Energy Research Institute

- 01** 개요
- 02** EPZ 평가 방법론
- 03** 사례 연구
- 04** 결론

CONTENTS



Korea Atomic Energy  
Research Institute

KOREA  
ATOMIC  
ENERGY  
RESEARCH  
INSTITUTE

01

개요

## Background

- SMR 및 차세대 원자로들이 낮은 출력 및 높아진 안전성을 바탕으로 비상계획구역 (Emergency Planning Zone, EPZ) 크기 축소 추진 (부지경계 EPZ)
  - 부지 확보 유연성 증대, 도심지 건설 수용성 향상, 경제성 향상
- EPZ 평가 – 사고 시나리오 식별, 방출 선원항 평가, 대기확산 평가, 선량평가
  - 다만, 현재 국내는 선량평가 기반이 아닌, 규제에서 정하는 거리로 EPZ 설정
- EPZ 축소를 위해서는 방출 방사성 물질의 근거리 대기확산 거동이 중요
  - 근거리에서는 사행효과, 건물와류효과 등 복잡한 거동이 나타남

## Purposes

- EPZ 평가 방법 및 근거리 대기확산 모델 소개
- 근거리 대기확산 모델 간 비교 분석 사례 연구 수행



Korea Atomic Energy  
Research Institute

KOREA  
ATOMIC  
ENERGY  
RESEARCH  
INSTITUTE

02

EPZ 평가 방법론

## ☒ NUREG-0396

### ☐ 설계기준사고(DBA: Design-Basis Accident) 시

- 전망선량이 미국환경청의 PAG(Protective Action Guides)를 초과할 수 있는 지역

\* PAG 기준: 1~5 rem/4d (10~50mSv/4d)

### ☐ 덜 심각한 중대사고(Less-severe accident) 시

- 전망선량이 미국환경청의 PAG를 초과할 수 있는 지역

### ☐ 더 심각한 중대사고(More-severe accident) 시

- 초기 치명적 보건영향을 충분히 줄일 수 있는 지역

➔ 10 miles plume EPZ, 50 miles Ingestion EPZ 의 근거

## ☒ 10 CFR 50.160 및 RG1.242

### ☐ 10 CFR 50.160 – ‘Emergency preparedness for small modular reactors, non-light-water reactors, and non-power production or utilization facilities’

### ☐ NUREG-0396 방법론을 일반화한 RG1.242 발행

- 사고 선정, 선원항 정의, 기상 데이터, 대기확산 모델링 등 수용 가능한 방법 제시
  - 대기확산에 대해 근거리 효과를 고려할 수 있는 방법을 식별해야 함.
- 과거와 달리 충분한 물자 및 food chain에 대한 이해 개선으로 SMR 및 non-LWR 에 대한 Ingestion EPZ 고려하지 않음

➔ NuScale 등 EPZ 평가 방법론 제시 – U.S. NRC 승인

## NuScale EPZ 평가 방법론

- 설계기준사고(DBA) 총유효선량당량(TEDE: Total Effective Dose Equivalent)이 10~50mSv/4일\* 이하인 거리
- 덜 심각한 중대사고(Less severe accident) 총유효선량당량이 10~50mSv/4일 이하인 거리
- 심각한 중대사고(More severe accident) 적색골수선량\*\*이 2Sv/1일\*\*\* 이하인 거리
- 부지경계 거리

➔ 4가지 중 가장 큰 EPZ 반경을 선정

\*평균 기상 조건에서 10mSv, 95 백분위 기상조건에서 50mSv

\*\*NuScale이 전신 선량의 적절한 대체 선량으로 선정함

\*\*\*PAG 기준으로 2Sv/1일을 언급하고 있으나, NuScale이 제시한 값은 비공개(Blank) 처리됨

# EPZ 평가 방법론

## ☑ 대기확산 평가

### ☑ 개요

- 방사성 물질 누출 초기 주된 확산 요인
- EPZ 평가시 누출된 방사성 물질의 공간상 분포를 계산

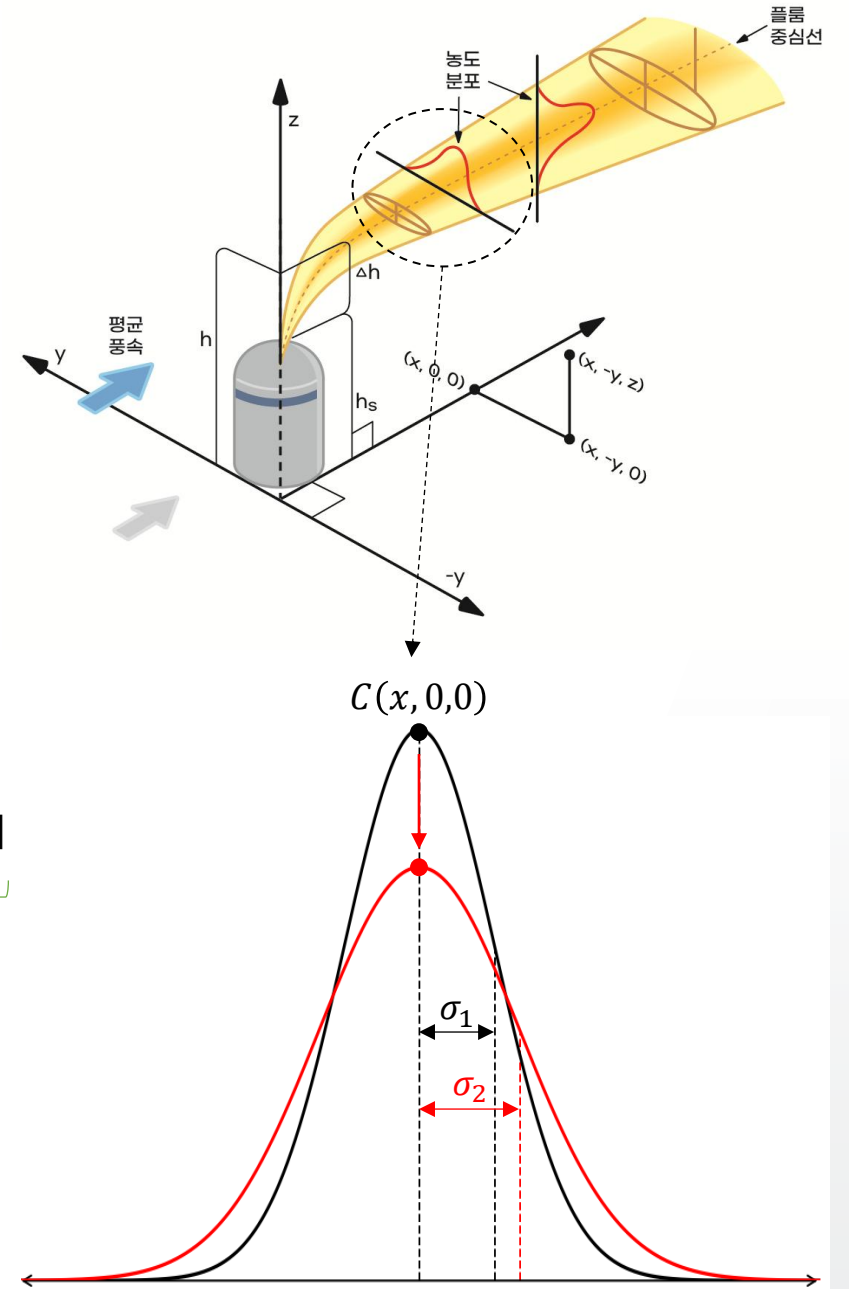
### ☑ 가우시안 플룸 모델 (Gaussian Plume model)

- 확산 분포가 중심선으로부터 수평, 수직 방향으로 가우시안 분포를 갖는다고 가정

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y(x) \sigma_z(x)} * \underbrace{\exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y(x)^2}\right)}_{\text{수평방향}} * \underbrace{\left[\exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z(x)^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+2H)^2}{2\sigma_z(x)^2}\right)\right]}_{\text{수직방향}}$$

- $C(x, y, z)$ : 방사성 물질 대기확산 농도 [ $Bq \cdot s/m^3$ ]
- $Q$ : 방출량 [ $Bq$ ]
- $u$ : 풍속 [ $m/s$ ]
- $\sigma_y(x)$ : 수평확산 계수 [ $m$ ]
- $\sigma_z(x)$ : 수직확산 계수 [ $m$ ]

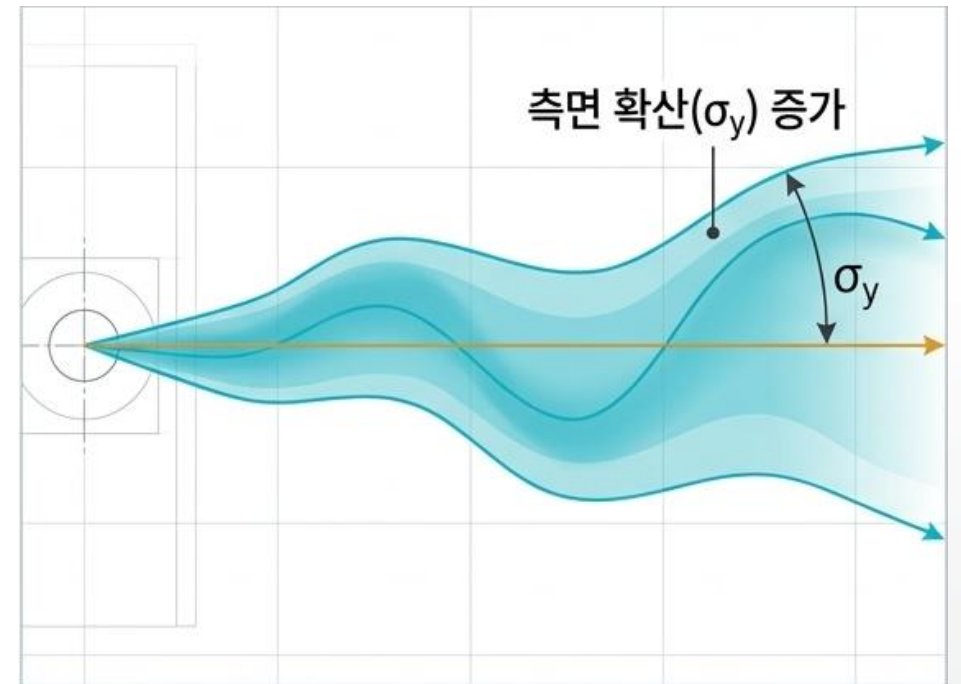
→ 중심선 농도  $C(x, 0, 0) \propto \frac{1}{u \sigma_y \sigma_z}$



## ☑ 근거리 대기확산 모델

### ■ 사행효과

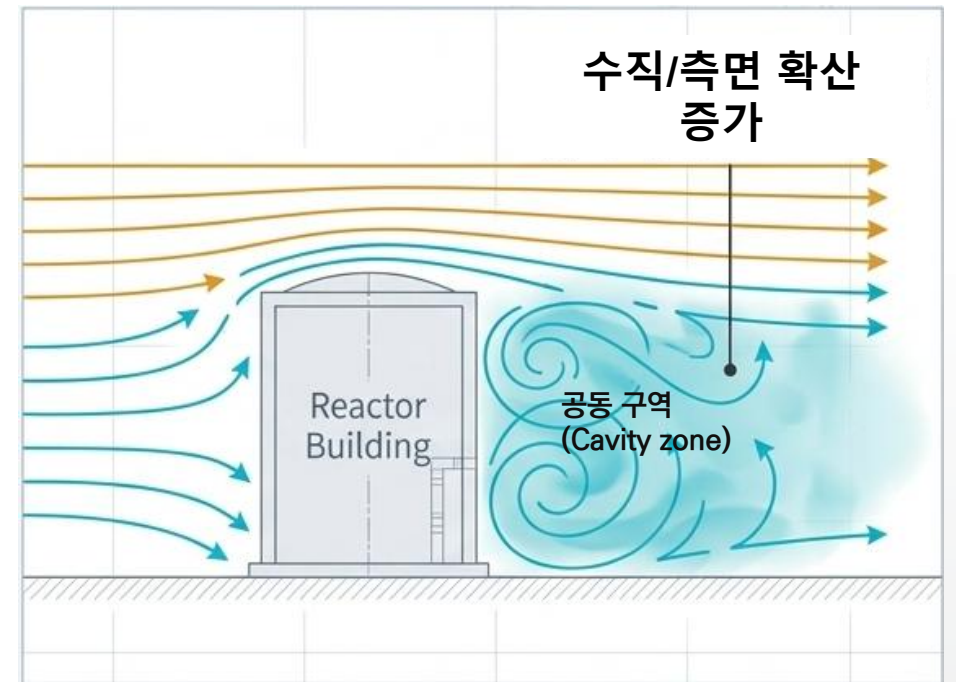
- 이동 방향이 일정하지 않고 좌우로 흔들리면서 오염물질이 더 넓은 범위로 퍼지는 현상
- 주로 저풍속(보통 2m/s 이하) 및 안정적인 대기 상태에서 발생
  - ➔ 확산 증가
  - ➔ 확산 폭이 넓어지고, 중심선 농도 감소



## ■ 근거리 대기확산 모델

### ■ 건물와류효과

- 바람이 건물이나 구조물을 만났을 때 건물 후면에 와류와 역류 영역이 형성
- 건물 후면에 공동 구역이 형성되며 복잡한 흐름을 형성하고 증가된 확산을 야기함
  - ➔ 확산 증가
  - ➔ 확산 폭이 넓어지고, 중심선 농도 감소



# EPZ 평가 방법론



## 근거리 대기확산 모델

$$C(x, 0, 0) \propto \frac{1}{u\sigma_y\sigma_z} \rightarrow \frac{1}{u\sigma_{ym}\sigma_z}$$

### RG1.145

- 사행과 건물와류 효과를 고려한 계수를 곱하여 수평확산 계수 보정

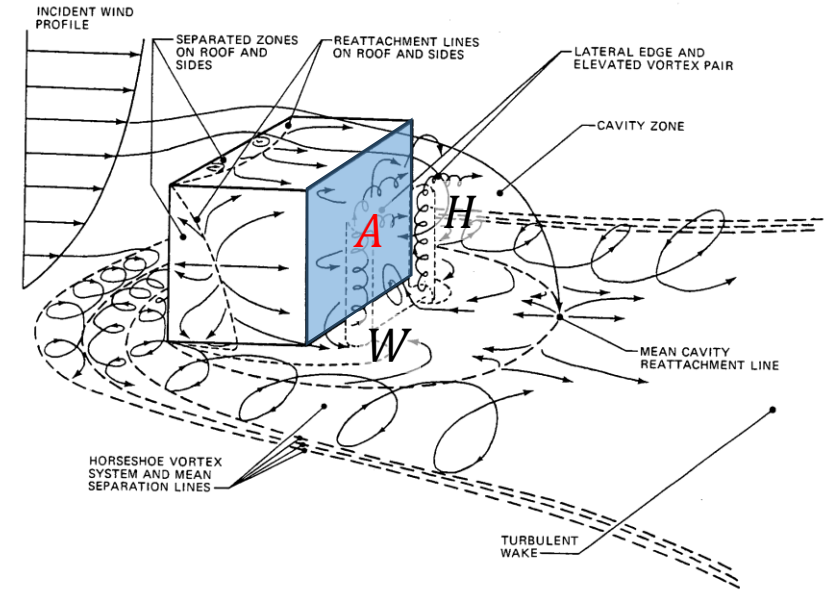
$$\sigma_{ym}(x) = \begin{cases} \max[\min(f_{ym1}, f_{ym2}), f_{ym3}] \cdot \sigma_y(x) & x \leq 800m \\ (f_{ym} - 1)\sigma_y(800) + \sigma_y(x) & x > 800m \end{cases}$$

$$f_{ym1} = 1 + \frac{0.5A}{\pi\sigma_y(x)\sigma_z(x)} \quad \left. \vphantom{f_{ym1}} \right\} \text{ 건물 와류}$$

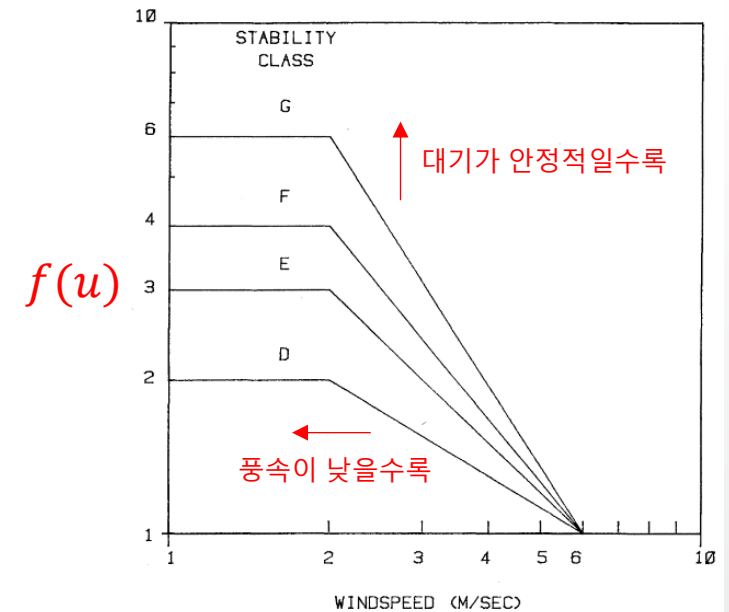
$$f_{ym2} = 3$$

$$f_{ym3} = f(u) \quad \text{사행 효과 (풍속의 함수)}$$

$$f(u) = \begin{cases} m & u \leq 2 \\ \exp \left[ \left( 1 - \frac{\ln(u) - \ln(2)}{\ln(6) - \ln(2)} \right) \ln(m) \right] & 2 < u \leq 6 \\ 1 & 6 < u \end{cases}$$



<건물와류효과>



## ☒ 근거리 대기 확산 모델

$$C(x, 0, 0) \propto \frac{1}{u\sigma_y\sigma_z} \rightarrow \frac{1}{u\Sigma_y\Sigma_z}$$

### ☒ Ramsdell and Fosmire (RAF)

- 사행 및 건물와류효과 계수를 더하여 확산 계수 보정

$$\Sigma_y = (\sigma_y^2 + \Delta\sigma_{y_1}^2 + \Delta\sigma_{y_2}^2)^{1/2}$$

풍속에 반비례

$$\Delta\sigma_{y_1}^2 = 9.13 \times 10^5 \left\{ 1 - \left( 1 + \frac{x}{1000U} \right) \exp\left(-\frac{x}{1000U}\right) \right\}$$

사행효과

$$\Delta\sigma_{y_2}^2 = 5.24 \times 10^{-2} U^2 A \left\{ 1 - \left( 1 + \frac{x}{10\sqrt{A}} \right) \exp\left(-\frac{x}{10\sqrt{A}}\right) \right\}$$

건물와류

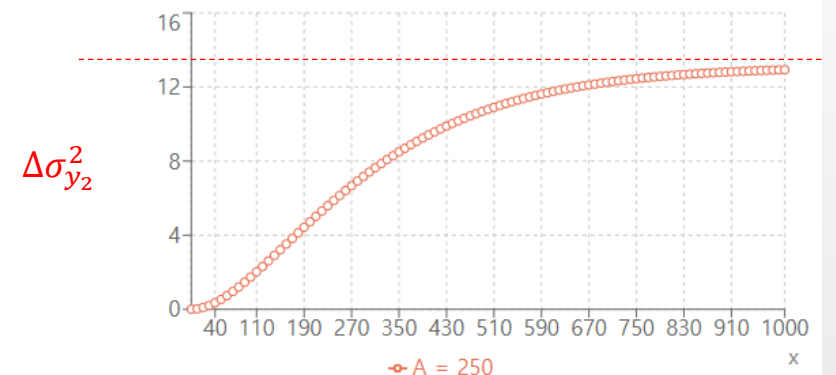
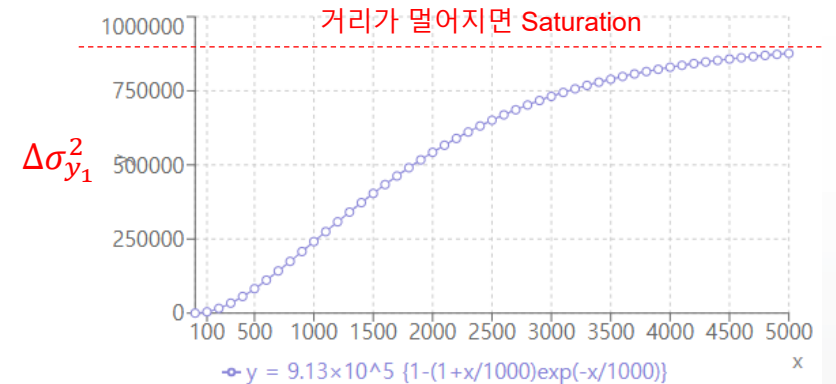
건물 면적에 비례

$$\Sigma_z = (\sigma_z^2 + \Delta\sigma_{z_1}^2 + \Delta\sigma_{z_2}^2)^{1/2}$$

$$\Delta\sigma_{z_1}^2 = 6.67 \times 10^2 \left\{ 1 - \left( 1 + \frac{x}{100U} \right) \exp\left(-\frac{x}{100U}\right) \right\}$$

$$\Delta\sigma_{z_2}^2 = 1.17 \times 10^{-2} U^2 A \left\{ 1 - \left( 1 + \frac{x}{10\sqrt{A}} \right) \exp\left(-\frac{x}{10\sqrt{A}}\right) \right\}$$

$$\Sigma_y \cong \sigma_y$$





Korea Atomic Energy  
Research Institute

KOREA  
ATOMIC  
ENERGY  
RESEARCH  
INSTITUTE

03

사례 연구

## EPZ 분석 조건

### 분석 도구

- MACCS
  - **부지 및 노형을 특정하지 않고,**  
MACCS 기본 입력 및 기본 예제 데이터 활용

### 분석 범위

- 반경 10km

### 선원항

- 단일 핵종
- I-131 (초기 단계 피폭 및 갑상선 보호 관점에서 중요)
- Cs-137 (장기적인 관점에서 중요)

### 방출량

- 핵종 재고량, 노심 → 격납 건물 → 환경 방출 분율 등 고려해야 함
- 본 사례 연구에서는 단순히 환경으로 방출된 양으로 가정하고 민감도 분석 수행

### 플룸

- 단일 플룸의 1시간 방출 가정 (사고 초기에 전부 방출)

### 선량계수

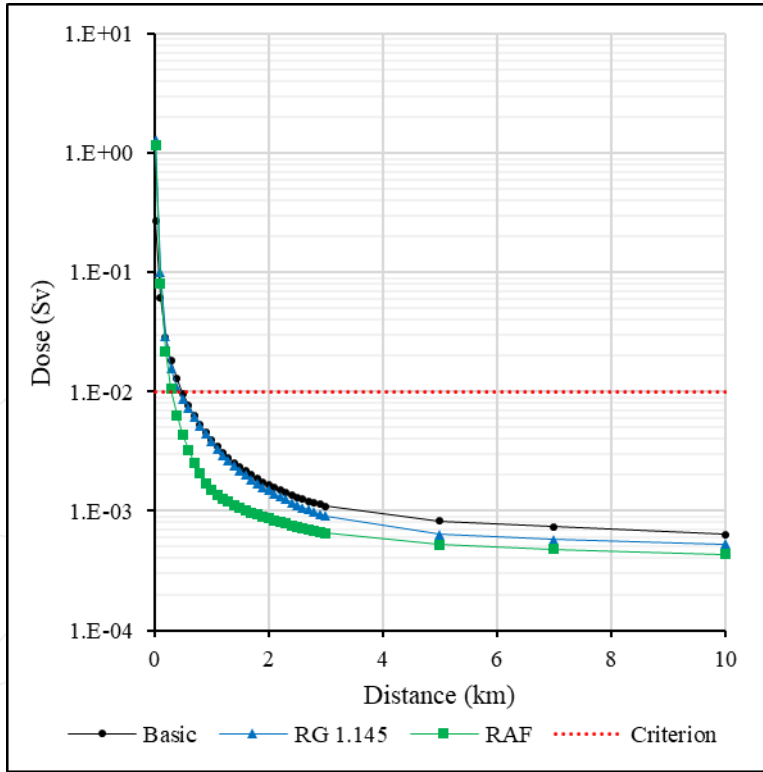
- FGR 13

### EPZ 선량 기준

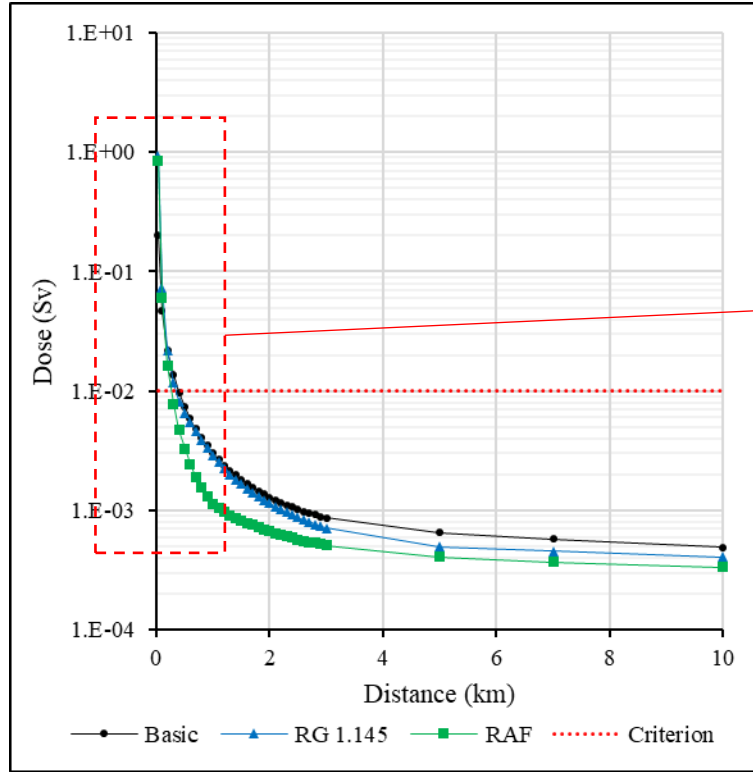
- 10mSv/4d (전신선량)

Parameter	Value / Description
거리 [km]	0.05-10
핵종	I-131, Cs-137
방출량 [Bq]	$10^{13}$ , $10^{14}$ , $10^{15}$ , $10^{16}$ , $10^{17}$
플룸 개수	1
방출 기간 [s]	3600
기상 데이터	MACCS example data
확산 계수	Eimutis-Konicek table data
표면 거칠기 [cm]	10 (Urban)
건물 높이/너비 [m]	50/50
선량 계수	FGR-13
근거리 대기확산 모델	Basic, RG 1.145, RAF
EPZ 선량 기준	10mSv/4d

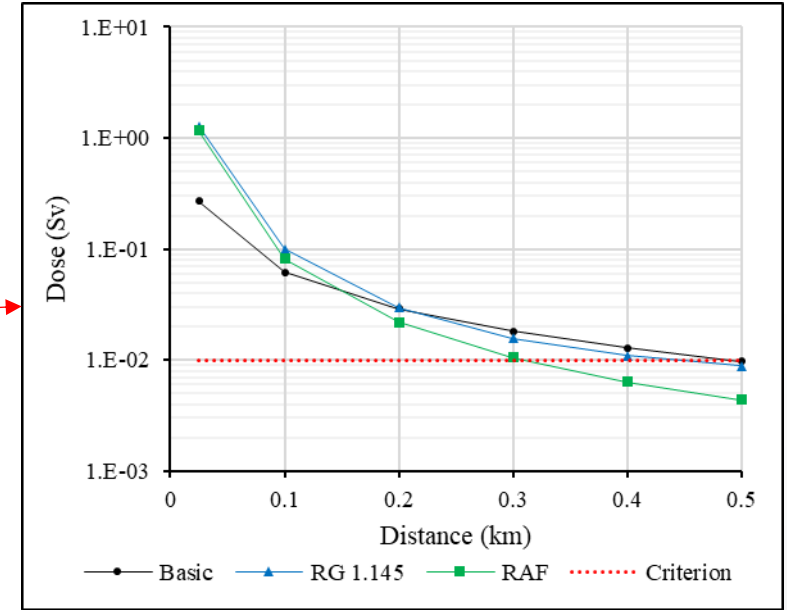
## 결과 – Distance vs. Dose



<거리에 따른 선량 (I-131, 1e+15 Bq)>



<거리에 따른 선량 (Cs-137, 1e+15 Bq)>



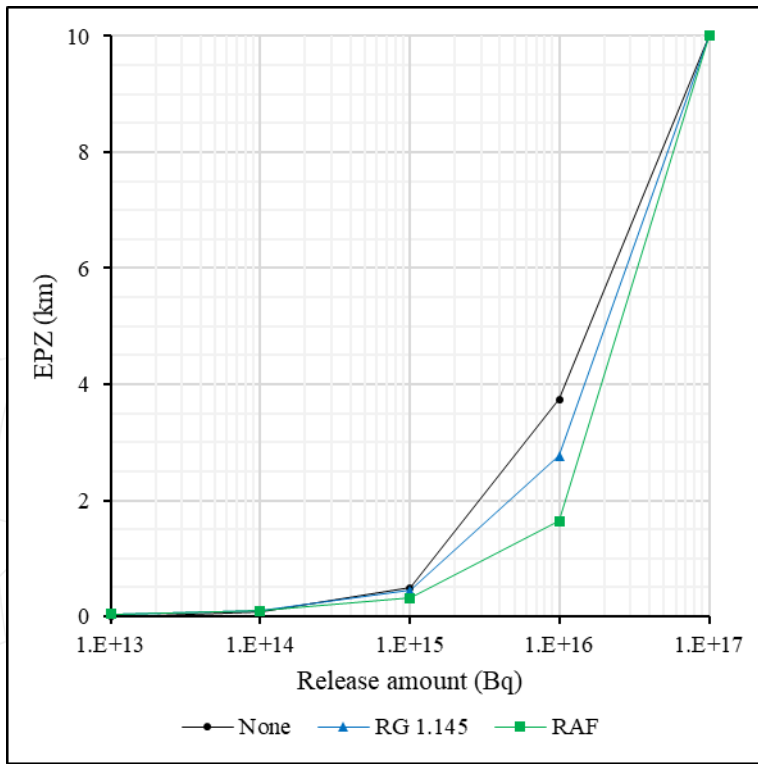
- MACCS는 기본 모델은 초기 방출 지점에서 **Area 방출 선원 가정**
- RG1.145 및 RAF는 **Point**  
 → 확산 계수 초기값 - 기본 모델 > RG1.145, RAF  
 → 초기 선량이 기본 모델이 더 낮으나 이후 역전

➔ 사행 및 건물와류 효과를 고려했을 때 근거리에서 큰 차이를 보임  
 거리가 멀어질수록 차이가 줄어듦

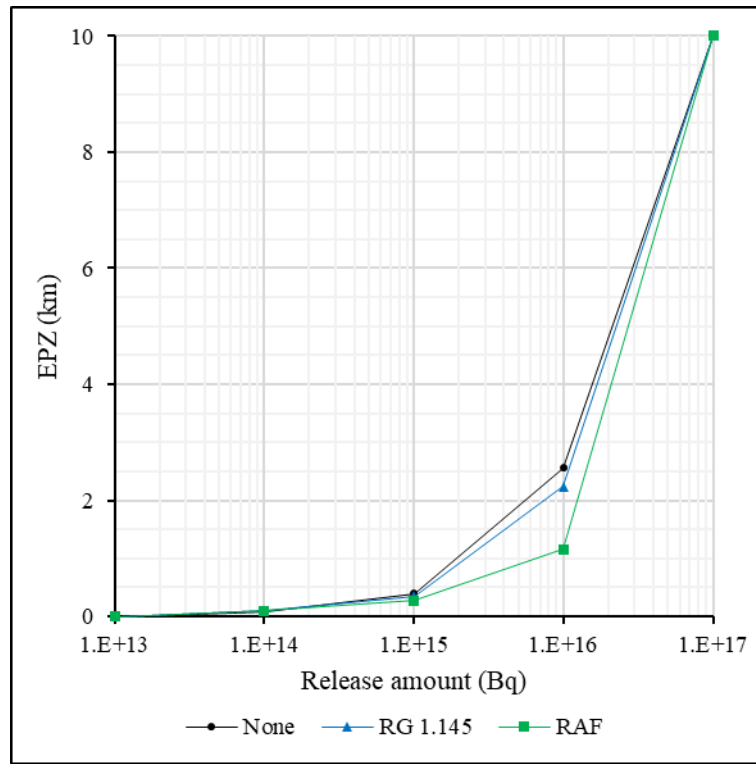
# Protective action modeling using ABM

## 결과 - EPZ 크기

\* 방출량이 낮아 EPZ 크기가 약 0.1km 보다 작아지면 해당 구간에서 기본 모델의 선량이 더 작으므로 RG1.145 및 RAF 모델의 EPZ가 더 크게 보일 수 있음



<EPZ 크기 (km) - I-131>



<EPZ 크기 (km) - Cs-137>

Nuclide	Model	Release amount (Bq)				
		10 <sup>13</sup>	10 <sup>14</sup>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>16</sup>	10 <sup>17</sup>
I-131	Basic	0.000	0.086	0.491	3.738	>10
	<b>RG 1.145</b>	<b>0.043</b>	<b>0.100</b>	<b>0.446</b>	<b>2.768</b>	<b>&gt;10</b>
	Reduction (%)	<0	-16%*	9%	26%	-
	<b>RAF</b>	<b>0.036</b>	<b>0.099</b>	<b>0.312</b>	<b>1.644</b>	<b>&gt;10</b>
	Reduction (%)	<0	-14%	36%	<b>56%</b>	-
Cs-137	Basic	0.000	0.074	0.393	2.559	>10
	<b>RG 1.145</b>	<b>0.000</b>	<b>0.098</b>	<b>0.349</b>	<b>2.238</b>	<b>&gt;10</b>
	Reduction (%)	-	-31%	11%	13%	-
	<b>RAF</b>	<b>0.000</b>	<b>0.096</b>	<b>0.274</b>	<b>1.159</b>	<b>&gt;10</b>
	Reduction (%)	-	-29%	30%	<b>55%</b>	-

<EPZ 크기 (km)>



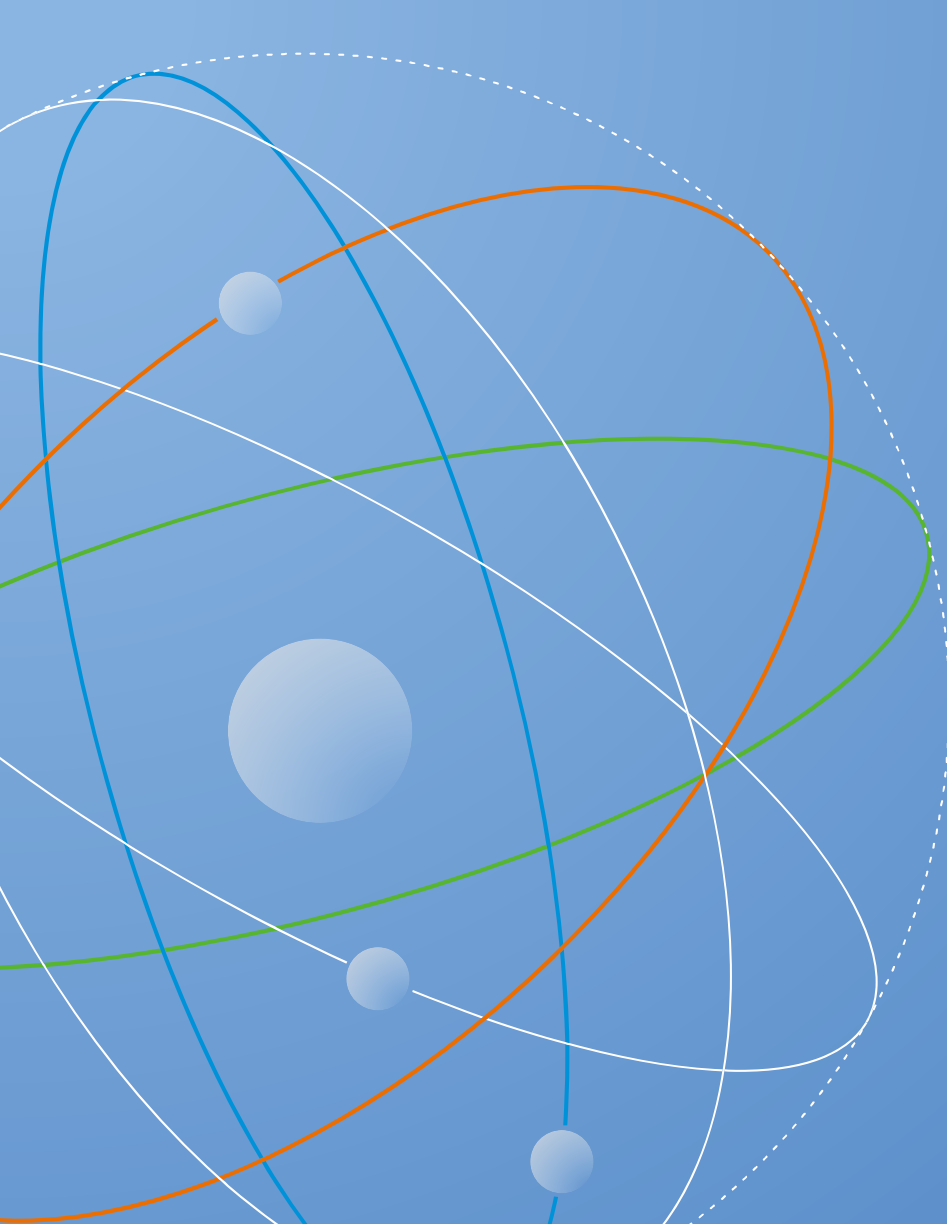
Korea Atomic Energy  
Research Institute

KOREA  
ATOMIC  
ENERGY  
RESEARCH  
INSTITUTE

04

결론

- ❑ SMR 및 차세대 원자로의 EPZ 최소화 추진
  - 낮아진 열출력, 높아진 안전성
  - 도심지 건설 수용성, 경제성 향상에 중요
  
- ❑ EPZ 최소화를 위해서는 근거리에서 보다 정교한 분석이 중요함
  - 특히, 사행 및 건물와류 효과는 근거리에서 증가된 확산을 야기함
  
- ❑ RG1.145, RAF 근거리 대기확산 모델을 이용한 EPZ 평가 사례 연구
  - 기본 모델 > RG1.145 > RAF 순으로 선량이 더 낮아지고 이에 따라, EPZ 크기가 더 작아짐
  - 가상의 노형 및 부지에 대한 결과이므로 값 자체는 의미가 없고, 경향성에 주목
  
- ❑ EPZ는 급성 선량 중심으로 분석
  - 중심선 농도가 중요
  - 확산계수 증가가 중심선 농도 및 급성 선량 저감에는 유리하나,
  - 제염, 섭취를 고려한 장기 선량 관점에서는 추가적인 분석 필요



A nuclear research institute  
**reshaping the future** based  
on **peoples trust**



# THANK YOU

[gbkim@kaeri.re.kr](mailto:gbkim@kaeri.re.kr)

This work was supported by an Innovative Small Modular Reactor Development Agency grant funded by the Korean Government (MCEE) (No. RS-2023 00258118).



**Korea Atomic Energy  
Research Institute**