

# 환경방사능 측정결과 방사선원항 재평가 방법론

김주열<sup>1\*</sup>, 이현하<sup>2</sup>, 이영민<sup>2</sup>, 박상현<sup>2</sup>, 진소범<sup>2</sup>, 정승영<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(주)미래와도전, 경기도 용인시 기흥구 흥덕1로 13

<sup>2</sup>한국원자력안전기술원, 대전광역시 유성구 과학로 62

\*gracemi@fnctech.com

## 1. 서론

후쿠시마 원전사고 이후 환경방사선/능 측정결과를 활용한 방사선원항 재평가의 중요성이 부각되어 방사성물질 방출정보를 추정하기 위하여 다양한 방법론에 관한 연구가 수행되었다[1,2]. 본 연구에서는 가우시안 플룸 해석해를 유도한 후 환경방사능 측정값을 안다고 가정하고 구속조건하 선형최소자승법(constrained linear least squares)에 의해 방사선원항을 재평가하는 방법론을 도출하였다.

## 2. 본론

일반적으로 atmospheric advection-diffusion equation은 다음과 같은 과정을 거쳐 gaussian plume solution으로 유도된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla C = \nabla \cdot (K \nabla C) + Q \quad (1)$$

$C(\vec{x}, t)$  = unknown concentration (kg/m<sup>3</sup>)

$\vec{u}(\vec{x}, t)$  = given wind velocity (m/s)

K = turbulent eddy diffusivity (m<sup>2</sup>/s)

$Q(\vec{x}, t)$  = emission source term (kg/m<sup>3</sup>s)

상기 이류-확산 식은 다음과 같이 유도된다.

$$U \frac{\partial C}{\partial x} - W_{set} \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial C}{\partial z}) + Q \delta(x) \delta(y) \delta(z-H) \quad (2)$$

$U \frac{\partial C}{\partial x}$  : wind,  $W_{set} \frac{\partial C}{\partial z}$  : settling

$\frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial C}{\partial z})$  : cross wind and vertical diffusion

$Q \delta(x) \delta(y) \delta(z-H)$  : point source

$W_{set} = W_{dep} = 0$ 으로 가정하고 라플라스 변환을 적용하여 가우시안 플룸 해석해를 유도할 수 있다.

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}) [\exp(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}) + \exp(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2})] \quad (3)$$

여기서  $\sigma_{y,z}^2(x) = 2xK_{y,z}/U$

침적(deposition) 및 침강(settling)을 고려한 가우시안 플룸 해는 다음과 같이 유도된다.

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}) \exp(-\frac{W_{set}(z-H)}{2K_z} - \frac{W_{set}^2 \sigma_z^2}{8K_z^2}) \times [\exp(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}) + \exp(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}) - \sqrt{2\pi} \frac{W_0 \sigma_z}{K_z} \exp(\frac{W_0(z+H)}{K_z} + \frac{W_0^2 \sigma_z^2}{2K_z^2}) \operatorname{erfc}(\frac{W_0 \sigma_z}{\sqrt{2} K_z} + \frac{z+H}{\sqrt{2} \sigma_z})]$$

$$\text{여기서 } W_0 = W_{dep} - \frac{1}{2} W_{set} \quad (4)$$

측정된 농도값을 알 때 미지의 방출율을 구하는 역산문제(inverse problem)는 다음과 같은 matrix-vector 형태이며 구속조건하 선형최소자승법으로 풀 수 있다.

$$\vec{C}_r = P_{rs} \vec{Q}_s \quad (5)$$

여기서 s은 선원항의 개수이고, r은 측정지점의 개수, P는 r×s 행렬이다.

본 연구에서는 다음과 같은 가정 및 절차로 선원항의 방출율을 계산하였다.

- 8개 다수호기(고리1호기~신고리4호기) 동시사고 가정(K1~K8)
- 방출높이 58 m, 방출율은 각각 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 MBq/s
- 가우시안 플룸모델 이용 Cs-137 지표농도 계산(forward problem)
- 임의의 9개 지점(P1~P9)에서의 농도는 각각 363.9, 474.6, 323.9, 1056.1, 570.9, 157.5, 205.2, 198.5, 269.1 Bq/m<sup>3</sup>
- 9개 지점의 계산농도를 측정값이라 가정하고 역으로 방출율 재계산

8개 방출원의 Cs-137 방출율(Bq/s)은 Table 1,

Fig. 1 및 Fig. 2와 같이 평가되었다. 각각의 서로 다른 방출율을 가지며 농도분포가 중첩된 선원항을 상관계수 0.9997로 잘 모사함을 알 수 있다.

Table 1. Estimated Emission Rate at Sources

K1 : 10036954.9	
K2 : 19943902.9	
K3 : 29988158.9	총합 = 360035792.6 Bq/s
K4 : 40023682.7	잔차 = 1.573062e-04
K5 : 51216460.0	상관계수 = 0.9997
K6 : 58843470.5	
K7 : 69894377.4	
K8 : 80088785.2	

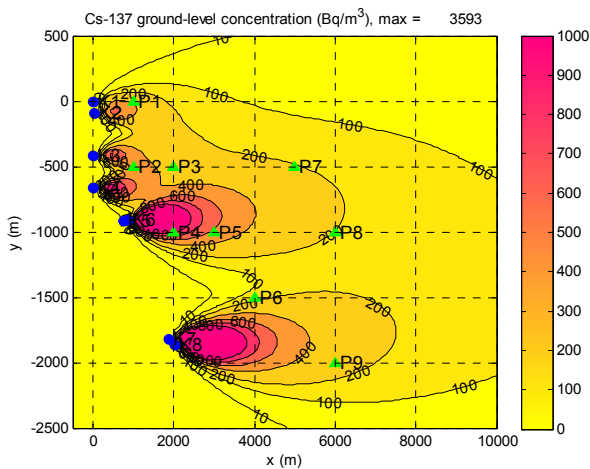


Fig. 1. Concentration Distribution by Multiple Sources.

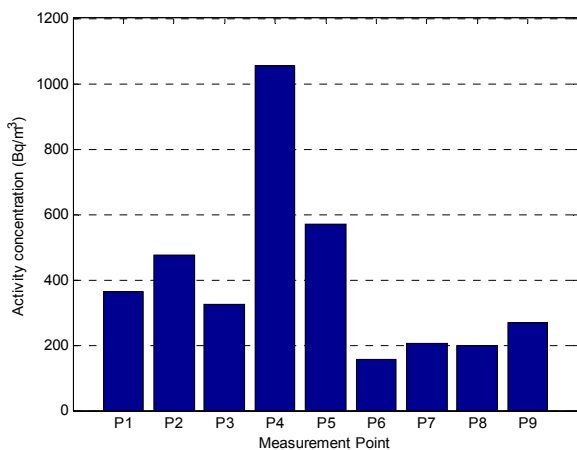


Fig. 2. Calculated Concentration at Nine Points.

### 3. 결론

후쿠시마 사고 교훈 중 하나는 환경방사능 측정 자료에 기반한 선원항 재평가 방법론 개발이다. 이를 위해 가우시안 플룸 해석해를 유도한 후 환경방사능 측정값으로 역산모델링에 의한 방사선원항 재

평가 방법론을 개발하였다. 본 연구에서는 선원항이 시간에 따라 일정하다고 가정하였지만 실제로는 방출율이 시간에 따라 변하고 방출시점 또한 상이할 것이므로 향후 이를 반영한 방법론 개선이 필요하리라 사료된다.

### 4. 참고문헌

- [1] Stohl et al., "Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant determination of the source term, atmospheric dispersion and deposition", *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, 2313-2343, (2012).
- [2] Chino et al., "Preliminary estimation of release amounts of  $^{131}\text{I}$  and  $^{137}\text{Cs}$  accidentally discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into the atmosphere", *Journal of Nuclear Science and Technology*, 48(7), 1129-1134, (2011).