

방사성물질의 대기확산예측에 대한 연구

리 철 만

현재 국지구모에서 방사성물질의 대기확산 및 수송과정에 대한 연구는 아직 초기단계에 있다. 일반적으로 원자로사고와 관련한 방사성물질의 대기확산연구는 가우스모형을 리용하여 진행하고있다. 이 모형은 평가속도는 빠르나 평탄한 지형과 시공간적으로 변하지 않는 바람마당을 전제로 하였기때문에 현실과 잘 맞지 않는 결함이 있다.[1, 2]

본문에서는 국지구모와 변하는 바람마당조건에서 방사성물질의 대기확산과 선량평가방법에 대하여 고찰하였다.

1. 방사성물질의 대기확산방정식과 초기 및 경계조건

대기중에 방출된 방사성물질의 확산방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = k_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + \frac{Q}{V} \quad (1)$$

여기서 c 는 방사성물질의 농도, u, v, w 는 x, y, z 방향의 바람속도 k_x, k_y, k_z 는 x, y, z 방향의 막흐름확산계수, t 는 시간, V 는 방사성원천의 체적, Q 는 방사성원천의 방사능이다.

방사성물질의 대기확산방정식을 풀기 위한 초기 및 경계조건은 다음과 같이 설정하였다.

— 초기조건

$$\left. \begin{aligned} c(x, y, z) &= 0 \\ Q(x_k, y_k, z_k) &= c_0 \\ Q(x, y, z) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

— 경계조건

우, 아래경계조건

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{t=t_{\text{최소}}} &= 0 \\ \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{t=t_{\text{최대}}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

측면경계조건

$$\left. \begin{aligned} c \Big|_{x=x_{\text{최소}}} &= 0 \\ \frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{x=x_{\text{최대}}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (u \geq 0) \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} c \Big|_{x=x_{\text{최소}}} &= 0 \\ \frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{x=x_{\text{최대}}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (u < 0) \quad (5)$$

$$\left. \begin{array}{l} c|_{y=y_{\text{최소}}} = 0 \\ \frac{\partial c}{\partial y}|_{y=y_{\text{최대}}} = 0 \end{array} \right\} \quad (v \geq 0) \quad (6)$$

$$\left. \begin{array}{l} c|_{y=y_{\text{최소}}} = 0 \\ \frac{\partial c}{\partial y}|_{y=y_{\text{최대}}} = 0 \end{array} \right\} \quad (v < 0) \quad (7)$$

여기서 $x_{\text{최소}}, x_{\text{최대}}, y_{\text{최소}}, y_{\text{최대}}$ 는 각각 x, y 방향에서 계산구역의 마지막경계이다.

수평바람속도성분 u, v 는 x 및 y 의 정의 방향 혹은 부의 방향으로 될수 있으므로 측면경계조건은 이것을 반영하고있다.

지형의 영향이 프로그램작성에 반영되도록 확산방정식을 지형에 따르는 자리표계에서 고찰한다. 이때 지형자리표 ξ, η, ζ 와 직각자리표 x, y, z 사이에는

$$\xi = x, \eta = y, \zeta = \sqrt{\frac{z - Z_g(\xi, \eta)}{H - Z_g(\xi, \eta)}} \quad (8)$$

의 관계가 성립한다. 여기서 H 는 모형화공간의 웃경계높이(m), $Z_g(\xi, \eta)$ 는 매 그물의 지형 높이(m)이다.

따라서 확산방정식은 다음과 같이 쓸수 있다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -u \frac{\partial c}{\partial \xi} - v \frac{\partial c}{\partial \eta} - \bar{w} \frac{\partial c}{\partial \zeta} + k_{\eta} \left(\frac{\partial^2 c}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial \eta^2} \right) + k_z \frac{1}{4\zeta^2 [H - Z_g^2(\xi, \eta)]} \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial \xi^2} + \frac{Q}{V} \quad (9)$$

여기서 다른 특성량들은 앞에서와 같고 H 는 모형의 웃경계높이(m)이다. \bar{w} 는 지형자리표계에서 수직바람속도성분이다. 즉

$$\bar{w} = \frac{\zeta^2 - 1}{2\zeta [H - Z_g(\xi, \eta)]} \left[u \frac{\partial Z_g(\xi, \eta)}{\partial \xi} + v \frac{\partial Z_g(\xi, \eta)}{\partial \eta} \right] + \frac{w}{2\zeta [H - Z_g(\xi, \eta)]}$$

이다.

2. 확산방정식의 수값풀이에 의한 방사성물질의 분포평가

식 (9)를 계차식으로 넘기면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} c_{i,j,k}^{n+1} = & \frac{u_{i,j,k}^n}{\Delta \xi} (\Delta c_i^n) \Delta t + \frac{v_{i,j,k}^n}{\Delta \eta} (\Delta c_j^n) \Delta t - \frac{\bar{w}_{i,j,k}^n}{\Delta \xi} (\Delta c_k^n) \Delta t + \\ & + k_{\eta_{i,j,k}}^n \left[(c_{i+1,j,k}^n - 2c_{i,j,k}^n + c_{i-1,j,k}^n) / \Delta \xi^2 + (c_{i,j+1,k}^n - 2c_{i,j,k}^n + c_{i,j-1,k}^n) / \Delta \eta^2 \right] \Delta t + \\ & + k_{y_k} / [\Delta \xi_k^2 (H - Z_{g i,j})^2 \cdot (c_{i,j,k+1}^n - 2c_{i,j,k}^n + c_{i,j,k-1}^n) \Delta \eta^2] \Delta t + c_{i,j,k}^n + \frac{Q_{i,j,k}}{V_{\xi i,j,k}^n} \Delta t \end{aligned} \quad (10)$$

여기서

$$V_{\xi i,j,k} = 2\Delta \xi \Delta \eta (H - Z_{g i,j}) \Delta \zeta$$

$$\Delta c_i^n = \begin{cases} c_{i,j,k}^n - c_{i-1,j,k}^n & (u_{i,j,k}^n \geq 0) \\ c_{i+1,j,k}^n - c_{i,j,k}^n & (u_{i,j,k}^n < 0) \end{cases},$$

$$\Delta c_j^n = \begin{cases} c_{i,j,k}^n - c_{i,j-1,k}^n & (v_{i,j,k}^n \geq 0) \\ c_{i,j+1,k}^n - c_{i,j,k}^n & (v_{i,j,k}^n < 0) \end{cases},$$

$$\Delta c_k^n = \begin{cases} c_{i,j,k}^n - c_{i,j,k-1}^n & (\bar{w}_{i,j,k}^n \geq 0) \\ c_{i,j,k+1}^n - c_{i,j,k}^n & (\bar{w}_{i,j,k}^n < 0) \end{cases}$$

이다.

계산의 안정성을 보장하기 위하여 시간걸음(Δt)을 다음과 같이 설정한다.

$$\Delta t = \left\{ \frac{u_{\text{최대}}}{\partial \xi} + \frac{v_{\text{최대}}}{\partial \eta} + \frac{\bar{w}_{\text{최대}}}{2\zeta_k(H - Z_{gi,j})} + 2 \left[\frac{2k_{H_{\text{최대}}}}{\Delta \xi^2} + \frac{k_{V_{\text{최대}}}}{2\Delta \zeta(H - Z_{gi,j})} \right] \right\}^{-1}$$

수평막흐름확산결수는 다음의 식으로 결정하였다.[3]

$$k_H = \frac{5}{4}(\alpha \Delta)^2 \cdot \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} = k_x = k_y$$

여기서 Δ 는 그물사이거리, α 는 결수로서 0.28이다.

각이한 성층권조건에서 대기층경계높이를 $H(m)$ 라고 할 때 수직막흐름확산결수는 다음의 식으로 계산한다.

$$k_z(z) = k_V(z_1) \cdot \frac{z}{z_1} \exp \left[-\frac{\rho(z - z_1)}{H} \right]$$

여기서 z 는 대기층높이(m), z_1 은 지상바람 관측높이(10m)이다.

z_1 높이에서 수직막흐름확산결수 $k_V(z_1)$ 와 결수 ρ 는 대기안정도에 따라 표 1과 같이 설정하였다.[3]

표 1. $k_V(z_1)$ 와 ρ 의 값

대기안정도	A	B	C	D	E	F
$k_V(z_1)$	45.0	15.0	6.0	2.0	0.4	0.2
ρ	6	6	4	4	2	3

경계층높이는 다음과 같다.

$$H = \begin{cases} a_s \cdot \frac{u_{10}}{f} & (\text{대기안정도가 A, B, C, D인 경우}) \\ b_s \sqrt{\frac{u_{10}}{f}} & (\text{대기안정도가 E, F인 경우}) \end{cases}$$

여기서 a_s , b_s 는 대기혼합결수, u_{10} 은 10m 높이에서 바람속도, f 는 코리올리변수이다.

국지규모에서 방사성물질의 운동특성을 Matlab로 계산하였다. 이때 7kg의 ^{235}U 가 완전히 연소된 경우 지면분포를 평가하고 선행연구결과[4]와 비교하였다.

바람방향은 서남풍, 대기안정도가 D인 조건에서 계산하였으며 방사성물질의 침하는 확산방정식의 수직바람속도성분항에 침하속도를 고려하는 방식으로 고찰하였다. 실험은 20km²의 수평구역에서 분해능을 200m로 설정하고 진행하였다.(표 2와 그림 1, 2)

선행연구자료[4]와 비교하여보면 비방사능등고선의 계산결과가 약간의 차이는 있지만 대체로 일치한다. 그것은 대기막흐름계산방법이 선행연구에서 리용한 방법과 일정한

차이를 가지고있기때문이다.

표 2. 방사성물질의 오염면적과 비방사능(확산후 2h)

핵연료/kg	오염면적(km ²)		최대비방사능(Bq/m ²)		최소비방사능(Bq/m ²)	
	선행연구자료[4]	계산값	선행연구자료[4]	계산값	선행연구자료[4]	계산값
36	0.79	0.76	$2.6 \cdot 10^3$	$2.3 \cdot 10^2$	$1.3 \cdot 10^2$	$1.7 \cdot 10^2$
72	2.36	2.54	$2.1 \cdot 10^3$	$6.9 \cdot 10^2$	$2.9 \cdot 10^2$	$3.2 \cdot 10^2$
100	4.81	4.90	$9.3 \cdot 10^3$	$8.7 \cdot 10^2$	$4.4 \cdot 10^2$	$3.8 \cdot 10^2$

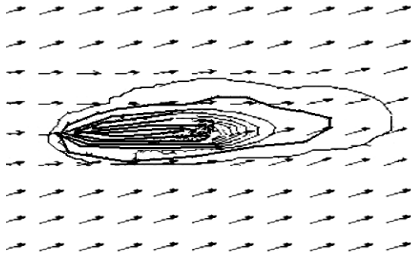


그림 1. 확산후 2h 지난 다음 비방사능의 지면분포(선행연구[4]결과)

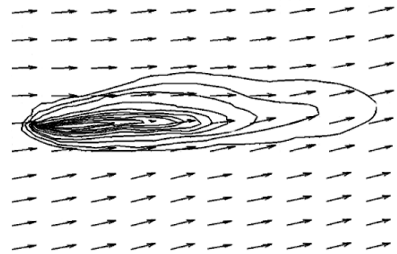


그림 2. 확산후 2h 지난 다음 비방사능의 지면분포(계산결과)

맺 는 말

- 1) 방사성물질의 침하예측을 위한 확산모형을 구성하고 수평 및 수직확산파라미터를 결정하였다.
- 2) 핵연료량이 36, 72, 100kg일 때 지면에 조성되는 비방사능등고선을 평가하였다.

참 고 문 헌

- [1] W. R. Cotton et al.; Meteor Atmos. Phys., 82, 5, 2003.
- [2] Caroline Gatti-Bono et al.; Journal of Computational Physics, 216, 589, 2006.
- [3] 曲静原 等; 辐射防护, 27, 4, 208, 2007.
- [4] 吴兑 等; 大气物理学, 北京大学出版社, 38~46, 2005.

주제107(2018)년 6월 5일 원고접수

Estimate of Diffusion of Radiation Material in Atmosphere

Ri Chol Man

We made a diffusion model for estimating the subsidence of the radiation material and determined the diffusion parameters in the horizontal and the vertical directions respectively. Then we evaluated the contour lines of the specific radioactivity on the earth surface when the quantities of the nuclear material are 36, 72, and 100kg respectively.

Key words: diffusion, radiation material, specific radioactivity