

대기로 확산된 방사성물질로부터 방출되는 감마선에 의한 피폭선량을 계산하기 위한 근사화 방법

김태욱 · 박종복 · 노성기
한국원자력연구소

요 약

대기로 방출된 방사성 물질의 대기 확산 형태를 파스킬의 대기안정도에 따른 모델인 타원형 근사화 모델로 가정하고 인체가 받을 수 있는 감마선에 의한 피폭선량을 계산하였다. 이 결과를 대기 확산 기본 모델인 가우스플룸 모델을 적용하여 계산한 결과 및 이미 발표된 원형 근사화 모델에 의한 결과와 비교하여 보았다.

제시한 타원형 근사화 모델을 이용하여 피폭선량을 계산한 결과는 가우스플룸 모델의 결과와 비슷하고, 원형 근사화 모델의 경우보다 오차가 적었으며, 동시에 기본 모델인 가우스 플룸 모델과 비교할 때 1/40 정도의 계산 시간이 걸렸다.

Keywords : 방사성물질, 대기확산, 가우시안 플룸, 타원체 모델, 근사계산

서 론

원자력 발전소 및 사용후 핵연료 저장시설 등의 원자력 시설로부터 방사성물질이 대기로 누출될 경우 대기 확산 모델은 가우스 플룸 모델을 따른다고 가정하여 인체의 방사능 피폭을 계산한다 [1]. 그러나 가우스 플룸 모델은 방사성 플룸의 농도 분포식이 몇개의 가우스 함수 및 다항식으로 표현되고, 이러한 함수와 적분 좌표계 사이에 선형성이 없어 수치적분 계산에서 어려움이 따른다 [2].

이와 같은 어려움을 제거하기 위해 가우스 플룸 모델을 방사성 물질의 농도가 일정한 원형 근사화 모델로 가정하여 피폭선량을 계산한 연구가 이루어졌다 [3]. 그러나 방사성 플룸의 수직 대기 확산이 수평 대기 확산에 비하여 미약할 경우, 즉 대기가 안정될 때에는 적지 않은 오차를 나타내므로 원형 근사화 모델로 대기 안정도에 따른 가우스 플룸 모델을 근사화하기 위하여는 보정이 필요하다.

이와 같은 단점이 있는 원형 근사화 모델을

보완하기 위하여 본 연구에서는 가우스 플룸 모델을 대기 안정도 변화에 따라 플룸의 근사화 형태가 변화될 수 있는 타원형 근사화 모델을 제시하였으며 본론에서 제시한 타원 근사화 모델의 타당성을 검증하기 위하여 가우스 플룸 모델과 원형 근사화 모델에서 사용한 동일한 계산 조건을 이용하여 타원형 근사화 모델에 의한 피폭선량을 계산하고 가우스 플룸 모델과 원형 모델의 결과와 비교하고자 한다.

피폭선량을 계산

1. 가우스 플룸 모델

방사선 물질이 대기로 방출되면 가우스 플룸 모델에 따라 확산된다고 가정하며 [1], 플룸이 연속적으로 방출되어 바람의 방향대로 이동할 경우 플룸의 대기 확산은 그림 1의 사선안의 부분과 같이 원추형으로 퍼져 나가게 된다. 플룸 중심의 좌표는 방출 지점을 원점으로 하여 x , y , z 좌표로 표시할 수 있고, 플룸 내의 방사성 물질의

농도 분포는 플룸 중심을 원점으로 하여 x', y', z' 좌표로 나타낼 수 있다. 이러한 플룸의 방사성 물질의 농도 분포는 그림 2 및 식(1)로 표시할 수 있다.[1].

$$X(x', y', z') = \frac{Q'(x')}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp(-y'^2 / 2\sigma_y^2) \quad (1)$$

$\times \{ \exp[-(z'-h)^2 / 2\sigma_z^2] + \exp[-(z'+h)^2 / 2\sigma_z^2] \}$
 여기서 $X(x', y', z')$ 는 플룸 내의 한점 x', y', z' 에서의 농도 분포를 표시하며(Bq/m^3), $Q'(x')$ 는 방사성 물질의 붕괴와 침적을 고려한 x' 위치에서의 단위 시간당 누출된 방사능의 세기이고(Bq/sec), u 는 바람의 속력(m/sec), σ_y 및 σ_z 는 각각 수평 및 수직 방향의 대기확산인자(m), h 는 방사성 플룸의 누출 높이이다(m).

방사성 물질의 누출 지점으로부터 r 만큼 떨어진 거리에서 방사성 플룸으로부터 받게되는 피폭선량은 다음과 같이 표현된다.

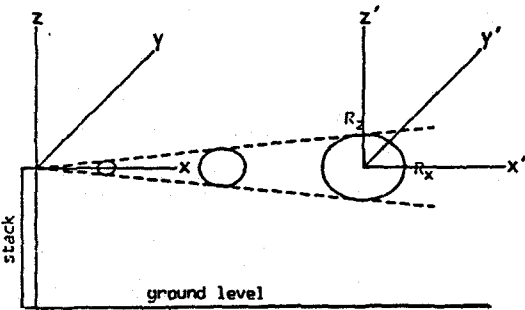


Fig. 1. The dispersion model of a plume due to a puff or continuous stack release.

$$D'(x) = K \mu_a E_\gamma$$

$$\times \iiint \frac{B(E, \mu r) \exp(-\mu r) X(x', y', z')}{4\pi r^2} dx' dy' dz' \quad (2)$$

여기서 $D'(x)$ 은 누출 지점에서 거리 x 떨어진 지점에서 인체가 받을 수 있는 피폭선량이고(Gy/sec), K 는 감마선의 에너지를 피폭선량의 단위로 바꾸어 주는 선량환산인자로서 $K=1.3735 \times 10^{-13}(Gy/MeV/m^3)$ 로 주어지며 [4], μ_a 는 공기중

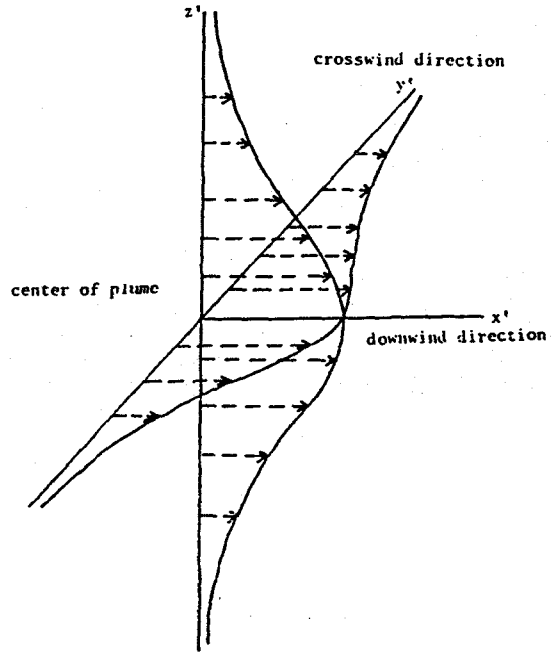


Fig. 2. The concentration distribution of the Gaussian plume in the x' -plane. -

의 감마선 에너지 흡수계수($1/m$), μ 는 공기중의 감마선 에너지 감쇠 계수($1/m$), E_γ 는 감마선의 평균 에너지이며(MeV), $B(E, \mu r)$ 는 에너지 E_γ 인 감마선의 축척인자(buildup factor)[1]로 식(3)과 같이 주어진다.

$$B(E, \mu r) = 1 + k\mu r \quad (3)$$

여기서 k 는 $(\mu - \mu_a) / \mu_a$ 로 주어지고, r 은 피폭자와 플룸사이의 거리를 나타낸다. 이 축척인자는 방사성 플룸이 무한 분포를 할 때는 비교적 정확한 계산 결과를 주나 세부적으로는 r 이 작을 때 실제보다 과대 평가되고 r 이 클때 과소 평가된다고 알려져 있다. 식 (2)에 표시된 $\exp(-\mu r)$ 은 감마선이 공기중을 지나면서 감쇠되고 남는 피폭 지점에서의 감마선의 양을 나타낸다.

2. 타원형 근사화 모델

본 연구에서 제시한 대기 안정도에 따른 타원형 근사화 모델을 그림 3에 나타내었는데 $\sigma_x / \sigma_y > 1$

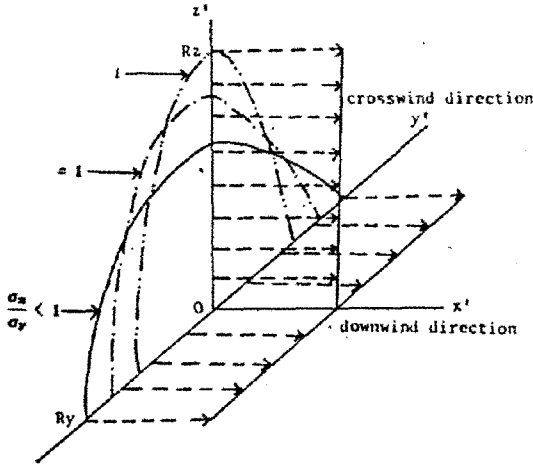


Fig. 3. The radioisotope distribution within a plume due to a meteorology stability.
 $\sigma_z/\sigma_y > 1$: unstable, $\sigma_z/\sigma_y < 1$: stable,
 $\sigma_z/\sigma_y = 1$: neutral ; this case is representative of the circular approximation model.

일 때는 대기가 불안정한 경우 타원형 근사화 모델의 농도 분포를 타나내며, $\sigma_z/\sigma_y \leq 1$ 일 때는 대기가 안정된 경우 ($\sigma_z/\sigma_y = 1$ 의 경우 플룸의 타원 형태가 원형이 되므로 원형 근사화 모델의 플룸 형태와 같다)의 타원형 근사화 모델의 농도 분포를 나타낸다.

가우스 플룸 모델에서의 방사성 물질의 농도는 그림 2에 표시한 것과 같이 플룸 중심을 최대값으로 하고 중심에서 멀어질수록 감소하는 반무한 농도 분포를 하는데 반하여 타원형 근사화 모델의 농도 분포는 그림 3에 표시한 것과 같이 플룸 내 위치에 관계없이 플룸 중심의 농도와 같은 것으로 가정하고, 타원 모델의 x 위치에서의 총 방사성 물질의 양은 가우스 플룸 모델의 x 위치에서의 총 방사성 물질의 양과 같은 것으로 가정하여 플룸이 유한성을 갖도록 한 것이다.

그러므로 가우스 플룸 모델과 타원형 근사화 모델 사이에 방사성 물질 양의 보존 법칙이 성립하도록 하기 위하여 타원의 반경을 정하자.

의 y' 축 반경 R_y 와 z' 축 반경 R_z 의 비율을

σ_y 와 σ_z 의 비율과 동일하게 정하고 이를 C라고 하면 다음의 관계식이 성립한다.

$$\pi C R_z^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-y'^2/2\sigma_y^2 - z'^2/2\sigma_z^2) dy' dz' \quad (4)$$

$$= 2\pi C \sigma_z^2$$

따라서 R_z 와 R_y 는 각각 식(5)와 같이 주어진다,

$$R_z = \sqrt{2} \sigma_z, \quad R_y = \sqrt{2} \sigma_y \quad (5)$$

R_z 와 R_y 가 같은 경우는 원형 근사화 모델과 같으며, 이때 방사성 물질의 대기 확산 농도 분포는 지표면의 반사를 고려하지 않았을 경우 식(1)은 식(6)과 같이 주어진다.

$$X(x', y', z') = \frac{Q'x'}{2\pi\sigma_y\sigma_z} ; y' \leq R_y, z' \leq R_z \text{ 일때} \quad (6)$$

$$= 0 ; \text{타원 플룸의 외부에서}$$

식(6)을 식(2)에 대입하면 타원 근사화 모델에 의한 피폭선량률은 다음과 같이 표현된다.

$$D'(x) = K \mu_a E_\gamma \frac{1}{4\pi\sigma_y\sigma_z} \int_0^\infty \frac{Q'(x')}{\sigma_y\sigma_z} G(x') dx' \quad (7)$$

$$G(x') = \iint_s \frac{B(E, \mu r) \exp(-\mu r)}{2\pi r^2} dy' dz' \quad (8)$$

식(8)의 적분은 적분 구간을 타원에 내접하는 원의 부분 G_1 과 나머지 부분 G_2 로 나누어 계산할 수 있다.

$$G(x') = G_1(x') + G_2(x')$$

함수 $G_1(x')$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$G_1(x') = \int_0^{R(x')} \frac{\exp(-\mu r)}{(1 + k\mu r) r^2}$$

여기서 L 은 원판 내의 적분 판의 반경이며, 식(10)의

같이 표현된다.

$$G_1(x') = E_1(\mu d) - E_1(\mu[R^2 + d^2]^{1/2}) + k\{\exp(-\mu d) - \exp(-\mu[R^2 + d^2]^{1/2})\} \quad (11)$$

식 (11)에서 $d = |x - x'|$ 이며, $E_1(x)$ 는 제1차 지수 함수로서 식 (12)와 같이 표현된다[5].

$$E_1(x) = x \int_x^\infty \frac{\exp(-t)}{t} dt \quad (12)$$

식 (12)를 급수로 전개하면 x 값이 적을 때는

$$E_1(x) = -\gamma - \ln(x) + x - \frac{x^2}{2 \cdot 2!} + \frac{x^3}{3 \cdot 3!} - \dots \quad (13)$$

x 값이 클 때는

$$E_1(x) = \frac{\exp(-x)}{x} \left[1 - \frac{1!}{x} + \frac{2!}{x^2} - \frac{3!}{x^3} + \dots \right] \quad (14)$$

와 같이 전개된다. 여기서 γ 는 오일러의 상수로 $\gamma = -0.5772157$ 이다. 원밖의 타원 부분을 플룸의 중심에서 거리 $(R_1 + R_2)/2$ 만큼 떨어진 두 개의 점선원으로 보면 함수 $G_2(x')$ 는 식(15)와 같이 표현된다.

$$G_2(x') = \frac{R_1 |R_1 - R_2| (1 + k\mu d) \exp(-\mu d)}{2 d^2} \quad (15)$$

여기서 d 는 점선원과 피폭 지점 사이의 거리로 $d = \sqrt{[(R_1 + R_2)/2]^2 + (x - x')^2}$ 로 주어진다.

결과 및 토의

본론에서 제시한 타원형 근사화 모델의 근사화 효과를 알아보기 위하여 먼저 가우스 플룸 모델에 의한 피폭선량률 계산 결과와 타원형 근사화 모델에 의한 피폭선량률 계산 결과를 σ_y/σ_z 의 비율을 변화시키면서 플룸 중심과 피폭자 사이의 거리별로 상대 비교를 하였다(그림 4). 비교를 쉽게 하기 위하여 $\sigma_z = 20m$, $u = 1m/sec$, $Q' = 1Ba/sec$ 로 가정하였고, 시간에 따른 방사성 물질의 붕괴와 침적을 무시하였다.

그림 4를 보면 $\sigma_y/\sigma_z = 1$ 일 때 가우스 플룸 모델과 비교하여 상대 오차가 가장 크고 그 밖의 값에서는 오차가 적게 나타남을 볼 수 있다. 오차가 가장 큰 $\sigma_y/\sigma_z = 1$ 의 경우 타원형 근사화 모델의 농도 분포와 원형 근사화 모델의 농도 분포와 같으며 이는 참고문헌 [3]의 결과와 동일하다. 따라서 타원 근사화 모델은 원형 근사화 모델의 오차보다 적은 것으로 평가된다.

또 타원형 근사화 모델의 오차는 거리가 멀어질수록 적어지는데 이는 원형 근사화 모델의 오차 경향과 동일하다. 그러므로 타원형 근사화 모델이나 원형 근사화 모델은 가까운 거리에서는 오차가 크고 먼 거리에서는 오차가 적어짐을 나타낸다.

그림으로 나타내지 않았지만 σ_z 의 값이 20m 보다 적을 경우에는 플룸의 형태가 점선원에 가까워져 $\sigma_z = 20m$ 의 경우와 비교할 때 타원형 근사화 모델과 가우스 플룸 모델 간의 피폭선량률 계산 오차가 적어지며, σ_z 의 값이 20m보다 클 경우는

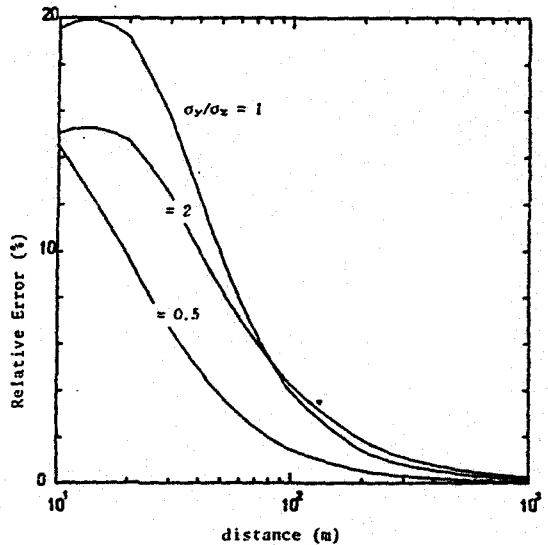


Fig. 4. Overestimate of the absorbed dose computed for a single ellipse-shaped distribution of concentration. The value of σ_z is 20m, and the photon energy is 1 MeV.

반대로 오차가 커진다. 여기서 도시한 $\sigma_z = 20\text{m}$ 는 대략 대기 안정도 D, 거리 500m 일 때의 수직 방향 대기 확산 인자의 값이다.

다음으로 그림 5에 대기안정도별로 거리에 따른 피폭선량을 계산 결과를 나타내었다. 수치적분 방법은 참고문헌[2, 6]의 방법을 응용하였다.

원형 가우스 모델에 의한 피폭선량 결과는 대기가 안정될수록 가우스 플룸 모델의 결과와의 오차가 커지는데 비하여 타원형 근사화 모델에 의한 결과는 대기안정도에 따라 오차의 변화를 별로 나타내지 않았다. 또한 타원형 근사화 모델의 피폭선량 결과는 항상 원형 근사화 모델의 결과

보다 더 가우스 플룸 모델의 결과에 근접하였다.

따라서 대기가 보통의 상태에 있을 경우에는 원형 근사화 모델이나 타원형 근사화 모델이나 거의 비슷한 결과를 나타내지만 대기가 안정되거나 불안정 할 수록 타원형 근사화 모델이 원형 근사화 모델에 비하여 더 정확한 것으로 나타났다.

또 USNRC[2]에서 권장하고 있는 48차 Gauss-Legendre Quadrature의 적분 방법을 이용할 경우 적분 시간을 비교하여 보면 가우스 플룸 모델을 그대로 적분할 경우보다 타원형 근사화 모델을 이용할 경우 1/40 정도 계산 시간이 적게 걸리며 이는 원형 근사화 모델의 경우와 거의 같다.

결론

본 연구에서 제시한 타원형 근사화 모델은 기존의 근사화 모델에서 해결하지 못한 대기안정도에 따른 보정을 하여 가우스 모델에 기존의 모델보다 더 근접한 결과를 얻었다. 또 계산 시간도 원형 근사화 모델의 계산 시간과 거의 같은 가우스 플룸 모델의 1/40정도로 나타났다.

비록 본 연구의 타원형 근사화 모델이 아직 수치적분적 오차가 크지만 원형 모델 보다 오차가 적고, 다른 모델 보다 계산 시간이 적게 걸리므로 급박하게 진행되는 사고시 주변 주민들의 방사선에 의한 피폭량 예측에 여러 모델에 우선하여 이용될 수 있으리라고 보여진다.

참고문헌

1. D. H. Slade, *meteorology and Atomic Energy*, U.S. Atomic Energy Commission (1968).
2. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Calculation of annual doses to man from routine releases of effluents for the purpose of evaluating compliance with 10CFR Part 50, Appendix F," *Regulatory Guide 1. 109, Rev 1*. Washington DC, Nuclear Regulatory Commission (1977).
3. Yong Feng Nie *et al.*, "An Approximation Me-

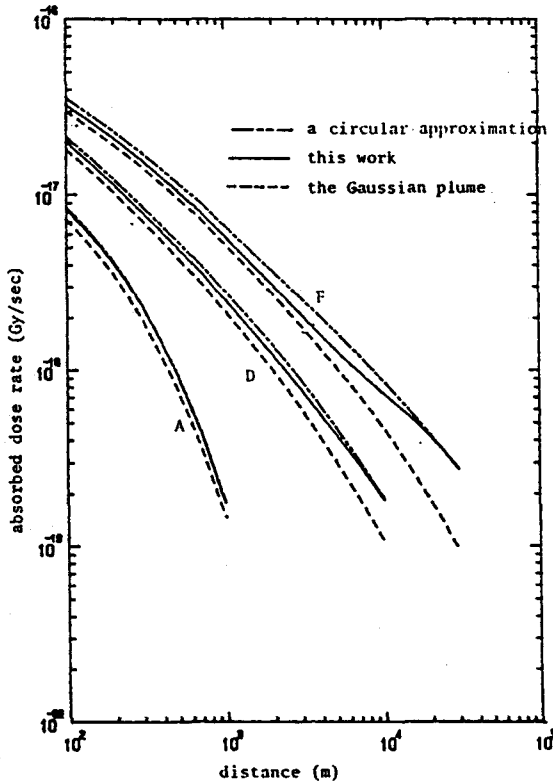


Fig. 5. Tissue absorbed dose rate on the centerline of a plume due to a ground-level release of 1 Bq/sec for pasquill stability classes A, D and F. Wind speed of 1 m/sec, and 1 MeV photon energy was used.

- thod for Estimating the Short-term Centerline Gamma Absorbed Dose Due to a Continuous, Ground-level Release," *Health Phys.* 49, 100-105(1985).
4. J. R. Lamarsh, *Introduction to Nuclear Engineering* Addison Wesley(1975).
 5. Morgan & Turner, *Principles of Radiation Protection*, John Wiley & Sons Inc., New York London Sydney, 291-295(1967).
 6. U.S NRC, *PAVAN: An Atmospheric-Dispersion Program for Evaluating Design-Basis Accidental Release of Radioactive Materials from Nuclear Power Stations*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREC/CR-2858 PNL-4413 (1982).

An Approximation Method for the Estimation of Exposed dose due to Gamma-rays from Radioactive Materials dispersed to the Atmosphere

T.W. Kim, C.M. Park, and S.G. Ro
Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, Korea

ABSTRACT

The dispersing model of radioactive plume in the atmosphere was assumed to form finite ellipseshaped volumes rather than a single plume and gamma absorbed doses from the plume were computed using the proposed model.

The results obtained were compared with those computed by the Gaussian plume and the circular approximation models.

The results computed by the proposed ellipse-shaped approximation model were close to those by the Gaussian plume model, and more accurate than those by the circular approximation model. The computing time for the proposed approximation model was one fortieth of that for the Gaussian plume model.

Keywords: Radionuclide, Atmospheric dispersion, Gaussian plume, Ellipse model, Approximation.