

## 외부 감마피폭해석 (II)

### Analysis of External Gamma Exposure (II)

한문희, 김은한, 서경석, 황원태, 최영길  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

감마선원과 피폭자 사이의 거리, 방사선원의 크기 그리고 평균 감마에너지에 따른 외부 감마피폭선량률의 변화를 분석하였다. 임의 형태로 공기중에와 지표에 침적된 방사성물질로부터 외부 감마피폭선량을 평가하기 위해 개발된 방법을 이용하여 분석을 수행하였다. 분석결과 방사선원의 분포형태와 평균 감마에너지가 외부 감마피폭선량의 변화에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

#### Abstract

The distributional effects of radioactive materials on external gamma exposure have been analyzed. An approximate method for estimating external gamma dose given from an arbitrary distribution of radioactive material has been developed. The analysis shows that external gamma exposure is strongly dependent on the distribution of radioactive materials in the environment.

#### 1. 서 론

방사선 비상시에는 주변의 기상과 지형 등의 환경 특성을 고려하여 신속히 방사성물질의 이동경로를 파악하고 다양한 경로를 통해 주민에게 주어지는 방사선 피폭선량을 예측할 필요가 있다. 외부 감마피폭선량은 피폭선량 평가의 기본이 되며 특히 방사선 비상초기에 주민보호를 위한 방호대책을 결정할 때 가장 중요한 자료로 이용된다. 대기중에 임의 형태로 분포된 방사성물질로부터 주어지는 외부 감마피폭선량의 계산은 매우 복잡하다. 그 이유는 방사성물질을 포함한 방사능 구름이 대기중을 이동하며 분포형태가 시시각각 변하고, 방사성물질은 대기중을 이동하며 일부가 지표면에 침적되며 그리고 감마선의 영향력이 공기중에서 수 백미터의 먼 거리까지 미치기 때문이다[1]. 지금까지 대기중의

방사성물질의 분포를 정규분포 형태로 가정한 여러 가지의 단순 모델들이 개발되어 왔다 [2~5]. 이들 모델들은 기본적으로 넓고 평탄한 지형을 대상으로 하고 있다. 따라서 우리나라와 같이 복잡한 산악지형에 정규분포 형태를 가정한 단순모델을 적용할 경우 오염물질의 확산과 피폭평가에 오류가 크게 발생할 수 있다. 그러므로 복잡한 지형에 임의 형태로 분포된 방사성물질로부터 피폭계산이 가능한 상세 모델의 개발이 필요하다. 상세 피폭해석모델을 개발하기 위해서는 방사성물질의 분포 특성이 외부 감마피폭에 미치는 영향을 상세히 분석할 필요가 있다.

외부 감마피폭선량률은 방사선원과 피폭자 사이의 거리, 감마선원의 평균 감마에너지 그리고 방사성물질의 분포특성 등에 따라 다르게 나타난다. 본 연구에서는 공기중에 위치한 점 선원(point source), 체적 선원(volume source) 및 지표에 침적된 방사성물질의 면 선원(area source)에 의한 외부 감마피폭선량률을 분석하였다. 점 선원으로부터의 외부 감마피폭선량률은 널리 사용되는 기본 산술식을 이용하였다. 본 연구에서는 Romberg 구적법[6]을 이용하여 외부 감마피폭선량률 평가하기 위하여 개발된 방법을 적용하여 분석을 수행하였다[7].

## 2. 외부 감마피폭 평가

### 2.1 공기중 점선원으로부터의 피폭

공기중에  $E_\gamma$ [MeV]의 평균에너지와  $q$ [Ci]의 크기를 갖는 점선원으로부터 거리  $r$ [m]만큼 떨어진 지점에 피폭자가 위치해 있을 때, 점선원으로부터 주어지는 외부피폭 선량률  ${}_\gamma \dot{D}$  [rad/sec]는 아래의 식으로 나타낼 수 있다[2].

$${}_\gamma \dot{D}_{(x,y,z,t)} = 0.0404 \frac{\mu_a \cdot q \cdot E_\gamma \cdot B(\mu, \mu_a, r) \cdot e^{-\mu r}}{r^2} \quad (1)$$

여기서,  $\mu_a$ 는 공기중에서의 에너지 흡수계수[1/m],  $\mu$ 는 공기중에서의 총 감쇄계수 [1/m], 그리고 B는 재생계수(buildup factor)를 나타낸다.

공기중에서 에너지 흡수계수 값은 0.07 MeV에서 최소값을 나타내며 그 이유는 0.07 MeV 보다 낮은 에너지 영역에서는 광전자 흡수효과(photoelectric absorption)에 의해 공기중 흡수효과가 크고, 0.07 MeV 이상으로 에너지가 증가하면 쌍전자 생성(pair production)효과에 의해 공기중 흡수효과가 커지기 때문이다[8].

### 2.2 지표면위 반구형태의 방사성물질로부터의 피폭

공간에 분포한 방사성물질로부터 주어지는 피폭선량은 식(1)로 표현되는 점 선원에 의한 피폭계산식을 방사성물질이 존재하는 모든 공간에 대하여 적분하여 얻을 수 있다. 본 연구에서는 반구형태의 방사능 분포로부터의 외부감마피폭을 평가하기 위해 개발된 수치적분식에 Romberg 구적법을 이용하였다[7].

### 2.3 지표면에 침적된 방사성물질로부터의 피폭

대기중으로 누출된 방사성물질의 일부는 공기중을 이동하는 중에 지표에 침적된다. 이들 방사성물질은 제염조치가 취해지지 않으면 오랜동안 지표에 존재하며 외부감마피폭에 기여하게 된다. 공기중 반구형태의 방사선원으로부터의 피폭계산에서와 같이, Romberg 구적법을 적용하여 지표면의 원판형태의 방사성물질의 분포로부터의 피폭선량을 평가하였다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 공기중 점선원으로부터의 피폭

공기중에서 점선원과 피폭자 사이의 거리를 변화시켜 가면서 감마에너지에 따른 외부감마피폭선량을 평가하여 그림 1에 제시하였다. 이 결과를 살펴보면 점선원과 피폭자 사이의 거리가 10 m 이내로 짧은 경우에는 0.07 MeV에서 피폭선량의 최소값이 나타나고 있다. 그러나 선원과 피폭자간의 거리가 20m 이상 떨어진 경우에는 최소값이 나타나지 않고 감마에너지의 증가에 따라 피폭선량이 계속 증가한다. 점선원이 1 m 거리에 근접해 있는 경우 0.02 MeV에서의 피폭선량이 0.07 MeV에서의 피폭선량에 비해 5 배 정도 높다. 따라서 10 m 이내의 짧은 거리에서의 작업이 대부분인 실내 방사선 작업의 경우에는 0.07 MeV 이하의 낮은 감마에너지를 갖는 선원에 대해서도 신중한 취급이 요구된다.

#### 3.2 지표면위 반구형태의 방사성물질로부터의 피폭

다량의 방사성물질이 누출되어 넓은 지역에 퍼지는 경우에는 피폭자가 방사성물질을 포함한 공기 덩어리 속에 갇히게 되는 경우가 있을 수 있다. 그림 2는 반구형태의 공기 덩어리의 반지름의 크기에 따른 변화를 나타낸다. 본 계산에서는 피폭자가 반구의 중심에 위치해 있는 경우에 대하여 평가를 수행하였다. 이 결과를 보면 반구의 반지름이 20 m로 작은 경우에는 근접해 있는 점선원의 경우와 같이 0.07 MeV에서 피폭선량이 최소가 되는 경향을 나타내고 있다. 그러나 반구의 반지름이 40 m 이상으로 커지게 되면 감마에너지 증가에 따라 계속적으로 증가 하는 것으로 나타났다.

표 1에는 점선원의 경우 감마선의 세기가  $1/e$  로 줄어드는 감쇄거리(relaxation length)와 거리와 에너지별 피폭선량을 그리고 각 거리별로 0.02 MeV 에서와 0.07 MeV에서의 피폭선량의 비를 나타냈다. 두 에너지 값에서의 피폭선량의 비는 거리 증가에 따라 급격히 감소하고 있다. 즉 피폭선량에 영향을 미치는 감쇄거리, 공기중 흡수계수 및 감마에너지 등의 영향으로 거리가 20 m 정도 이상에 위치한 감마선원의 경우에는 0.02 MeV의 감마선원은 0.07 MeV의 선원의 기여분의 13% 정도에 지나지 않고 50 m 떨어진 경우엔 1.3% 정도만 기여한다. 따라서 체적선원(volume source)의 경우엔 부피가 커지게 되면 20 m 이상 떨어진 거리에 위치한 선원의 경우는 0.07 MeV에서의 최소값이 나타나는 경향이 사라지게 된다.

#### 3.3 지표면에 침적된 방사성물질로부터의 피폭

그림 3은 반지름 R인 원판 형태의 지표면 위의 선원에 대하여 원판의 중심에 서있는 피폭자에게 미치는 감마피폭선량을 원판의 크기와 감마에너지별로 계산한 결과를 나타

냈다. 이 결과를 보면 지표면 침적 방사성물질로부터의 피폭의 경우에는 원판의 크기에 상관없이 0.07 MeV에 피폭선량률의 최소값이 나타난다.

그림 2에 나타낸 체적선원의 경우에서와는 다르게 면선원의 경우에는 선원의 크기에 상관없이 0.07 MeV에서 최소 피폭선량률이 나타난다. 이 이유는 표 1에 나타난 바와 같이 0.02 MeV와 0.07 MeV에서의 피폭선량률의 비를 낮출 때 체적선원의 경우에는 0.07 MeV의 선원이 3차원 공간에 위치할 수없이 많은 선원이 피폭에 기여하여 근접한 0.02 MeV에서의 피폭선량률보다 더 크게 기여하지만, 면적분의 경우는 2차원 평면상에 존재하는 선원의 기여분이 0.02 MeV에서의 값을 초과하지 못하지 때문에 그림 3에서와 같이 어느 경우든 0.07 MeV에서 최저 피폭선량률이 발생한다.

그림 4는 피폭자가 위치한 중심으로부터 반경  $r_{st}$ 까지는 방사성물질이 존재하지 않고  $r_{st}$ 부터 반경 500 m 까지 방사성물질이 존재한다고 가정하여 감마피폭을 평가한 결과를 나타낸다. 이 결과를 보면 원판선원의 경우에도 피폭에 기여를 시작하는 반경이 10 m 이상인 경우에는 감마에너지의 증가에 따라 계속적으로 피폭이 증가하는 현상이 나타내고 있다.

#### 4. 결론

공기중에 점선원이 존재하는 경우, 점선원과 피폭자 사이의 거리가 10 m 이내로 짧은 경우에는 0.07 MeV에서 피폭선량률이 최소값을 나타낸다. 그러나 선원과 피폭자간의 거리가 20 m 이상으로 멀어지면 감마에너지의 증가에 따라 계속적으로 피폭선량률이 증가하는 경향을 나타낸다. 따라서 10 m 이내의 짧은 거리에서의 작업이 대부분인 실내 방사선 작업의 경우에는 0.07 MeV 이하의 낮은 감마에너지를 갖는 선원의 경우에 신중한 취급이 요구된다. 반구형태의 방사능 구름을 방사선원으로부터 감마피폭이 주어지는 경우 반구의 반지름이 40 m 이상으로 커지게 되면 감마에너지 증가에 따라 계속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 원전사고와 같이 다량의 방사성물질이 대기로 누출되는 경우에는 대부분 방사능 구름의 크기가 반지름이 40m 이상인 경우가 된다. 따라서 원전사고의 경우에는 감마에너지의 증가에 따라 감마피폭선량률은 계속적으로 증가한다고 생각할 수 있다. 지표에 침적된 방사선원으로부터 피폭을 받는 경우에는 지표선원의 크기에 상관없이 0.07 MeV에서 최소 피폭선량률이 나타난다.

연구결과 방사선원의 분포형태가 외부 감마피폭선량에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 본 연구결과는 다양한 감마에너지를 갖는 방사핵종이 동시에 환경으로 누출되는 원전사고의 해석에 활용될 수 있을 것이다. 또한 부지 주변의 지형효과를 고려한 실시간 방사선피폭해석에도 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관하는 원자력중장기연구를 통해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. S. R. Hanna, G. A. Briggs, and R. P. Hosker, Jr., 1982, "Handbook on

- Atmospheric Diffusion," DOE/TIC-11223, U.S. DOE.
2. J. W. Healy and R. E. Baker, 1968, "Radioactive Cloud-Dose Calculation," In: D. H. Slade, ed. Meteorology and Atomic Energy-1968. Oak Ridge, TN:U.S. Atomic Energy Commission, Technical Information Center, 301-377.
  3. K. Imai and T. Iijima, 1970, "Assessment of Gamma - Exposure due to a Radioactive Cloud released from a point source," *Health Phys.* 18, 207-216.
  4. G. P. Lahti, R. S. Hubner, and J. C. Golden, 1981, "Assessment of  $\gamma$ -ray Exposures due to Finite Plumes," *Health Phys.* 41, 319-340.
  5. Y. P. Nie, T. J. Overcamp, and R. A. Fjeld, 1985, "An approximate Method for Estimating the Short-term Centerline  $\gamma$  Absorbed Dose Due to a Continuous, Ground-level Release," *Health Phys.* 49, 100- 105.
  6. B. Carnahan, H. A. Luther, and J. O. Wilkes, 1969, "Applied Numerical Methods," John Wiley and Sons, New York.
  7. M. H. Han, M.H. Chun, K.J.Lee and G.S. Choi, 1995, "Approximation in Gamma Dose Calculations and its Application to an Emergency Response Action at Kori Reactor Site in Korea," *Ann, Nucl. Energy* Vol. 22, No. 7.
  8. Lamarsh J. R. (1983) Introduction to nuclear engineering. Addison Wesley.
  9. Imai K. et al. (1985) SPEEDI: A computer code system for the real-time prediction of radiation dose to the public due to an accidental release. Tokai JAERI: JAERI-1297.

Table 1. Gamma Exposure Rate as a Function of Gamma Energy and Distance.

감마에너지 [MeV]	Relaxation Length [m]	거리별 피폭선량률 [Gy/hr]				
		5 m	10 m	20 m	50 m	100 m
.020	10.9	3.138E-02	5.687E-03	7.143E-04	1.184E-05	5.006E-08
.035	26.6	4.471E-02	1.193E-02	2.964E-03	2.960E-04	2.038E-05
.045	33.7	4.987E-02	1.461E-02	4.150E-03	5.552E-04	5.812E-05
.055	38.7	5.288E-02	1.624E-02	4.918E-03	7.567E-04	9.713E-05
.065	42.4	5.413E-02	1.695E-02	5.293E-03	8.776E-04	1.264E-04
.070	43.9	5.424E-02	1.704E-02	5.361E-03	9.102E-04	1.365E-04
.080	46.4	5.375E-02	1.685E-02	5.326E-03	9.317E-04	1.482E-04
.100	50.2	5.172E-02	1.588E-02	4.967E-03	8.899E-04	1.519E-04
.200	62.8	4.566E-02	1.289E-02	3.748E-03	6.697E-04	1.314E-04
.500	90.6	4.139E-02	1.071E-02	2.811E-03	4.652E-04	1.011E-04
1.000	123.1	4.027E-02	1.013E-02	2.550E-03	4.006E-04	8.913E-05
2.000	171.5	3.991E-02	9.944E-03	2.465E-03	3.792E-04	8.579E-05
D(0.02)/D(0.07)		0.5786	0.3337	0.1332	0.0130	0.0004

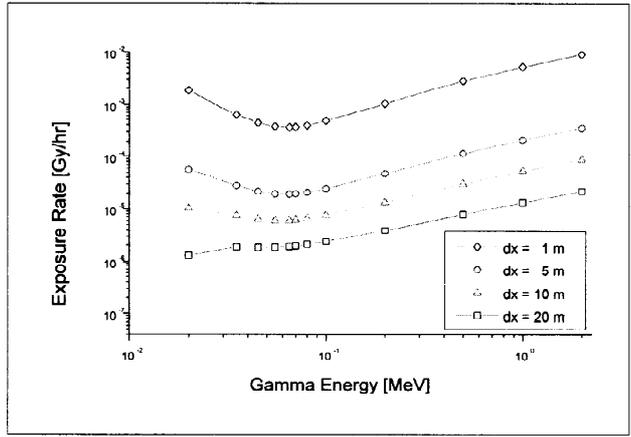


Fig. 1. Effects of Receptor to Point Source Distance on Gamma Exposure Rate.

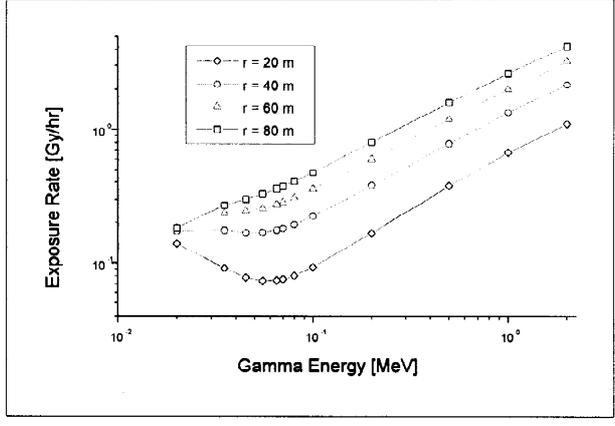


Fig. 2. Effects of the Volume of Radioactive Materials in the Air.

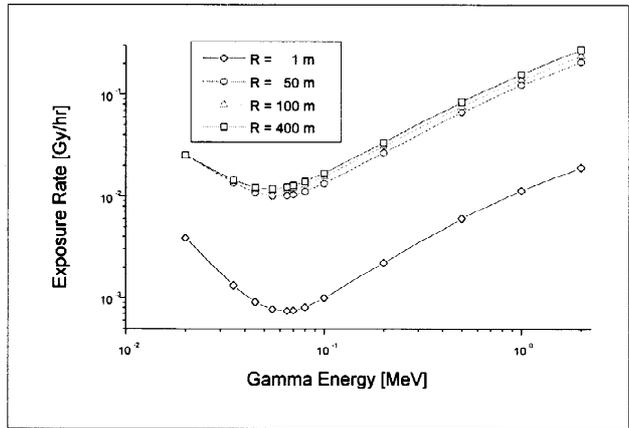


Fig. 3. Effects of the Area of Radioactive Materials Deposited on the Ground.

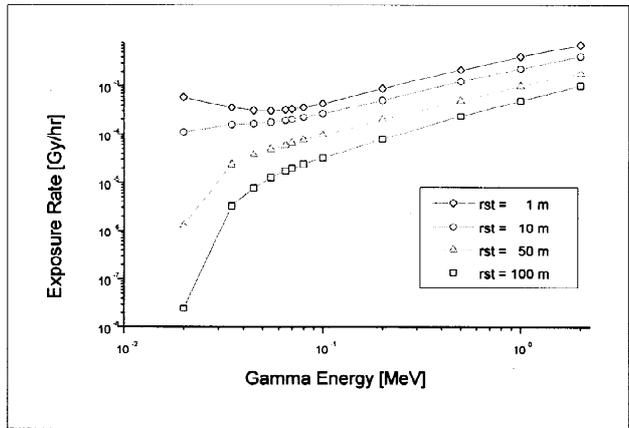


Fig. 4. Gamma Exposure Rate Given from radius " $r_{st}$ " to 500m Circular Plate.