

연구논문

방사능위해성평가 프로그램 RADCONS의 개발 및 적용

정효준 · 박미선 · 황원태 · 김은한 · 한문희

한국원자력연구원

(2012년 11월 17일 접수, 2013년 1월 24일 승인)

Development and Application of Radiological Risk Assessment Program RADCONS

Hyojoon Jeong · Misun Park · Wontae Hwang · Eunhan Kim · Moonhee Han

Korea Atomic Energy Research Institute

(Manuscript received 17 November 2012; accepted 24 January 2013)

Abstract

RADCONS Ver. 1.0 (RADiological CONSequence Assessment Program) was developed for radiological risk assessment in this study. A Gaussian plume model was used to analyze the fate and transport of radionuclides released into the air in case of accidents. Both single meteorological data and time series meteorological data can be used in RADCONS. To assess the radiological risk of the early phase after an accident, ED (Effective Dose) estimated by both deterministic and probabilistic approaches are presented. These EDs by deterministic and probabilistic will be helpful to efficient decision making for decision makers. External doses from deposited materials by time are presented for quantifying the effects of mid and late phases of an accident. A radiological risk assessment was conducted using RADCONS for an accident scenario of 1 Ci of Cs-137. The maximum of ED for radii of 1,000 meters from the accident point was $8.51E-4$ mSv. After Monte-Carlo simulation, considering the uncertainty of the breathing rate and dispersion parameters, the average ED was $8.49E-4$, and the 95 percentile was $1.10E-3$. A data base of the dose coefficients and a sampling module of the meteorological data will be modified to improve the user's convenience in the next version.

Keywords : Effective dose, Gaussian plume model, Monte-Carlo simulation, Radiological risk assessment

1. 서론

우리나라는 세계 5위의 원자력에너지 생산국으로 전체 전기의 절반에 가까운 양을 원자력에 의존하고 있다. 국내 원자력시설은 매우 안전하게 운영되고 있으며 만일의 사고 시 국민의 안전을 확보하기 위해 방사능 위해성 평가 체계를 갖추고 있다. 그러나 방사능테러나 원자력시설의 사고를 해석하기 위한 컴퓨터프로그램의 대부분을 외국에서 생산한 코드에 의존하고 있어 국산화가 필요한 실정이다.

방사성 물질의 대기 중 거동 해석 및 이로 인한 리스크 평가를 위해 현재까지 많은 컴퓨터 코드들이 개발되어 사용되고 있다. 방사성 물질의 대기확산 해석 모델에 따라 다음과 같이 구분할 수 있다. 원자력시설 주변 거주민의 확률론적 위해성 평가(PRA: Probabilistic Risk Assessment)를 위해 U.S. NRC (Nuclear Regulatory Commission)에서 개발한 MACCS2(MELCOR Accident Consequence Code system, Version 2), 원자력시설 사고와 테러에 의한 방사능 영향을 평가하기 위해 NARAC(National Atmospheric Release Advisory Center)에서 개발한 HotSpot, U.S. EPA(Environmental Protection Agency)의 AIRDOS 등은 가우시안 플룸 모델을 방사성 물질의 대기확산 해석을 위해 사용하고 있다(LLNL, 2009; US EPA 2007). US NRC에서 원자력시설의 비상시 환경영향 평가를 위해 개발한 RASCAL (Radiological Assessment System for Consequence Analysis), Hanford 사이트의 환경영향 해석을 위해 개발한 RATCHET (Regional Atmospheric Transport Code for Hanford Emission Tracking) 등은 가우시안 퍼프 모델을 방사성물질의 대기 중 거동해석에 이용하고 있다(PNLL, 2006; US NRC, 2004). RASCAL과 RATCHET는 5분 간격으로 한 개의 퍼프가 방출되어 풍향에 따라 이동하는 퍼프의 합으로 방사성 물질의 대기 중 거동을 해석한다. 반면, 플룸 모델인 MACCS2의 경우 연간 시간 평균 기상자료 8760개 중 선택된 기상에 대해서 대기확산인자를 계산하여

선량평가에 이용하고 HotSpot은 단일 기상자료만을 사용하여 대기확산을 추정하여 피폭선량을 평가한다.

방사능 리스크 평가 프로그램들은 사고 기간 중 시간 누적 대기 중 농도와 침적농도를 계산하고 각 핵종별 선량계수(DCF: Dose Conversion Factors) 데이터베이스에서 평가하고자 하는 핵종의 선량계수를 호출하여 피폭선량을 추정하는 알고리즘을 가지고 있다. 방사능 사고 평가 프로그램은 공표된 프로그램 이외에도 연구자들이 각자 개발하여 사용하고 있는 많은 코드들이 있다. 또한 특정 사고 시나리오에 대한 계산결과와 상호 비교 연구도 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 원자력 시설의 사고나 방사능 테러로 인한 리스크 평가를 위해 RADCONS (Radiological CONSequence Assessment Program) Ver. 1.0을 개발하였다. 원자력시설에서 발생하는 기체상 방사성 물질의 방출 사고나 방사능 테러로 인한 방사성 플룸의 거동해석을 위해 가우시안 플룸 모델을 사용하였다. 본 연구에 사용된 수정된 가우시안 플룸 모델은 국내 영광원자력부지 확산실험 자료를 이용하여 모델의 적용성을 검토하였다(정효준, 2003). 기존의 외국프로그램들은 기상자료의 입력방식이 매우 복잡하거나 번거로운 형태로 되어있다. 본 연구에서 개발한 프로그램은 기상자료를 엑셀화일 형식으로 매우 단순하게 입력하도록 하고 기상자료의 처리과정은 내부함수로 작성하여 단순화하였다. 또한 다른 프로그램과 달리 기상자료를 단일 혹은 시계열 자료를 모두 사용할 수 있도록 설계되어 원자력시설의 사고 뿐만 아니라 정상 운영 중 방사선량 및 위해성평가에도 이용할 수 있도록 하였다. 사고 초기 영향은 결정론적 유효선량(Effective Dose)값과 확산계수 및 호흡량의 불확실성을 고려하여 Monte Carlo Simulation으로 계산된 확률론적 유효선량을 제시하도록 하였다. 침적된 방사성 물질에 의한 외부 피폭량을 시간의 경과에 따라 제시하여 중장기 영향을 평가하도록 설계하였다.

II. RADCONS 개발

1. 대기확산 모델

원자력시설 운영이나 방사능 테러로 인해 방사성 물질이 대기 중으로 배출되면 피폭선량 및 위해도 추정을 위해 방출지점(release point)과 수용점(receptor point) 사이의 물질이동 메카니즘 해석이 필요하다. 이러한 기체상 방사성 물질의 대기 중 거동을 평가하는데 대기확산모델이 이용된다. 본 RADCONS 프로그램은 가우시안 플룸 모델을 사용하고 있다. 기체상 방사성 물질이 일정기간 동안 연속적으로 동일한 비율로 방출되었다고 가정하면 풍하방향의 방사성 물질의 농도는 다음과 같이 Gaussian식으로 나타낼 수 있다(Nazaroff, 2001).

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y \sigma_z u_H} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (1)$$

- C: 방사성물질의 대기 중 농도 (Bq/m³)
- Q: 방출선원량 (Bq/s)
- σ_y : 수평 확산계수 (m)
- σ_z : 수직 확산계수 (m)
- x: 방출점에서 풍하방향의 거리 (m)
- y: 플룸 중앙선에서 수직거리 (m)
- u_H : 유효방출고도에서 평균풍속 (m/s)
- H: 유효 방출고도 (m)

수평 및 수직 확산계수는 풍하방향의 거리에 따른 수평 및 수직 확산을 모수화한 것으로 일반적인 식은 다음과 같다.

$$\sigma = ax^b + c \quad (2)$$

RADCONS 프로그램에서 확산 계수 계산에 이용되는 a, b, c는 원자력 시설 사고 시 대기확산을 계산하기 위한 프로그램인 PAVAN(PNNL, 1982)에서 사용하고 있는 값과 동일하다. 풍하방향의 거리에 따른 수평 및 수직 확산계수는 Figure 1과 같다. 확산계수는 풍하방향의 거리와 대기안정도의 함수로 대기가 불안정 상태를 나타내는 A인 경우 확산이 활발하여 오염물질의 희석이 크게 나타나

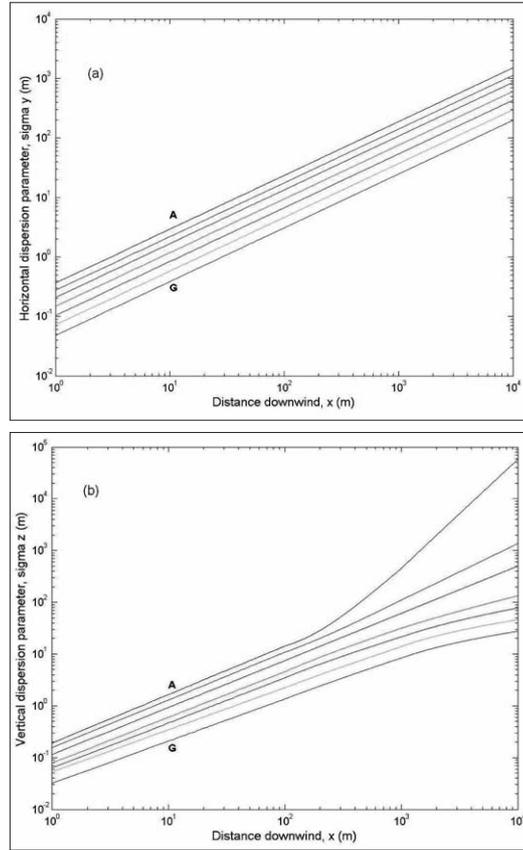


Figure 1. Horizontal and vertical dispersion parameters

고, 대기가 절대 안정 상태인 G의 경우 다른 대기상태에 비해 방사성 물질의 희석이 작음을 알 수 있다.

RADCONS는 확산인자를 저풍속과 건물 단면적에 따라 보정한다. 확산인자의 보정은 U.S. NRC의 주제어실 거주성 평가 프로그램인 ARCON96 알고리즘을 이용하였다(PNNL, 1997). 수정된 확산계수는 다음과 같다.

$$\Sigma_y = (\sigma_y^2 + \Delta\sigma_{y1}^2 + \Delta\sigma_{y2}^2)^{1/2} \quad (3)$$

$$\Sigma_z = (\sigma_z^2 + \Delta\sigma_{z1}^2 + \Delta\sigma_{z2}^2)^{1/2} \quad (4)$$

$$\Delta\sigma_{y1}^2 = 9.13 \times 10^5 \left[1 - \left(1 + \frac{x}{1000U} \right) \exp\left(-\frac{x}{1000U}\right) \right] \quad (5)$$

$$\Delta\sigma_{z1}^2 = 6.67 \times 10^2 \left[1 - \left(1 + \frac{x}{100U} \right) \exp\left(-\frac{x}{100U}\right) \right] \quad (6)$$

$$\Delta\sigma_{y2}^2 = 5.24 \times 10^{-2} U^2 A \left[1 - \left(1 + \frac{x}{10\sqrt{A}} \right) \exp\left(-\frac{x}{10\sqrt{A}}\right) \right] \quad (7)$$

$$\Delta\sigma_{z2}^2 = 1.17 \times 10^{-2} U^2 A \left[1 - \left(1 + \frac{x}{10\sqrt{A}} \right) \exp\left(-\frac{x}{10\sqrt{A}}\right) \right] \quad (8)$$

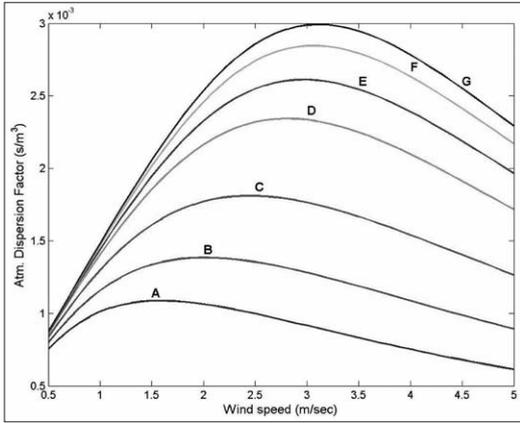


Figure 2. Variations of atmospheric dispersion factor by wind speeds

여기서, Σ_y, Σ_z 는 수정확산계수를 나타내며 $\Delta\sigma_y^2, \Delta\sigma_z^2$ 는 풍속에 대한 보정, $\Delta\sigma_y^2, \Delta\sigma_z^2$ 는 건물로 인한 효과(building wake)에 대한 보정을 나타낸다. Figure 2는 수정된 확산인자를 이용한 풍속에 따른 대기확산인자 변화를 나타낸 것이다. 지표방출, 풍하방향 45 m, 건물단면적 1,000 m²을 가정한 것이다. 식(1)에 따르면 대기확산인자는 풍속에 반비례하지만 Figure 2에 나타낸 바와 같이 수정된 대기확산인자를 사용할 경우 일정 정도의 풍속까지는 대기확산인자가 증가하다가 감소하는 경향을 나타낸다. 대기확산인자 변곡점 풍속은 대기가 불안정한 상태에서 1.6 m/sec로 가장 작고, 대기가 절대안정 상태인 G에서 3.1 m/sec로 가장 크게 나타났다. 유효방출고도는 배출되는 기체상 물질의 온도에 따른 부력과 속도에 의한 운동에너지에 의해 결정된다. RADCONS에서는 유효방출고도를 계산하지 않으며 사용자가 별도로 입력하거나 보수적인 계산의 경우 지표방출 혹은 굴뚝높이를 입력하면 된다.

2. 방사선량 및 위해성 평가

방출점과 수용점사이의 대기확산은 방출선원을 단위방출(unit mass emission)로 가정한 후 좌변으로 이동시켜 특성화할 수 있다. 이것을 대기확산인자(atmospheric dispersion factor: ADF)라 하고 단위는 s/m³이다. 계산하고자 하는 지점의 대기

확산인자에 총방출량을 곱하면 대기 중 방사성물질의 농도를 구할 수 있다. 방사성물질의 지표 농도, 방출률 및 대기확산인자와는 다음과 관계가 성립한다.

$$C(x, y) [Bqm^{-3}] = Q[Bqs^{-1}] \cdot ADF[(Bqm^{-3})/(Bqs^{-1})] \quad (9)$$

식 (9)에서 방출률 대신 총방출량(total quantity; QT)을 대입한 방사성물질의 시간누적 공기농도(Time integrated air concentration; TIC)는 다음과 같다.

$$TIC(x, y) [Bqsm^{-3}] = QT[Bq] \cdot ADF[s m^{-3}] \quad (10)$$

공기 중 방사성 물질은 침적(deposition)을 통해 일정부분 제거된다. 침적은 방사성물질의 종류에 따라 침적되는율이 결정되는데, Noble gas의 경우 침적영향은 미미하며 입자의 경우 크기 및 형태에 따라서도 다르다. 침적량은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$DEP(x, y) [Bqm^{-2}] = v_d [ms^{-1}] \cdot TIC[Bqsm^{-3}] \quad (11)$$

여기서, v_d 는 침적속도를 의미한다.

환경으로 누출된 방사선원으로 인해 사람이 받는 피폭선량은 호흡에 의한 내부피폭, 방사능 플룸(cloudshine)에 의한 외부피폭과 침적된 방사성 물질(groundshine)로부터 발생하는 외부피폭으로 구성된다. 호흡에 의한 내부피폭은 다음과 같이 계산된다.

$$DOSE_{inh}(x, y) [mSv] = Q_{inh} [m^3 s^{-1}] \cdot DCF_{inh} [mSv Bq^{-1}] \cdot TIC(x, y) [Bqsm^{-3}] \quad (12)$$

DOSE_{inh}: 호흡으로 인한 유효선량

Q_{inh}: 호흡률

DCF_{inh}: 핵종별 호흡 선량계수

방사성 플룸에 의한 외부피폭은 공기 중 방사성 물질 농도에 대한 함수로 다음과 같다.

$$DOSE_{cl} [mSv] = DCF_{cl} [(mSvs^{-1})/(Bqm^{-3})] \cdot TIC(x, y) [Bqsm^{-3}] \quad (13)$$

DOSE_{cl}: cloudshine으로 인한 유효선량

DCF_{cl}: cloudshine에 대한 선량계수

침적된 방사성 물질에 의한 외부피폭은 침적농도에 대한 함수로 다음과 같으며 시간의 경과에 따른

붕괴률이 고려되어야 한다.

$$DOSE_{gr} [mSvs^{-1}] = DCF_{gr} [(mSvhr^{-1})(Bqm^{-2})] \cdot DCF(x,y)[Bqm^{-2}] \quad (14)$$

DOSE_{gr}: groundshine으로 인한 유효선량
 DCF_{gr}: groundshine에 대한 선량계수

식 (12)-(14)를 이용하여 유효선량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$ED = DOSE_{inh} + DOSE_{cl} + DOSE_{gr} \quad (15)$$

방사성물질이 인체로 들어가면 최종적으로 암과 같은 질병을 일으키는 원인으로 작용한다. 원자력 시설의 중대사고를 제외한 사고 및 방사능 테러로 인한 방사선량은 매우 낮다. 따라서 본 연구에서는 저선량에서 인구집단에 나타날 수 있는 위해도를 U.S. EPA(Environmental Protection Agency)의 FGR(Federal Guidance Report) 13에서 제시하는 방법으로 계산하였다 (US EPA, 1999).

$$Risk = r \cdot I \quad (16)$$

r: 핵종별 호흡에 대한 암사망 위해도 계수 (per Bq)
 I: 호흡을 통해 체내로 축적된 방사성물질 총량 (Bq)

식 (16)으로 계산된 위해도는 원자력 사고 시 방사선 방호 최적화를 위한 것은 아니며, 저선량에 피폭된 인구집단의 위해도를 정량화하기 위해 사용되는 값이다.

3. RADCONS 구성

Figure 3은 RADCONS의 GUI(Graphical User Interface)를 나타낸다. 피폭지점 탭에서는 평가 지점으로부터 폭발/방출지점까지의 직선거리 (r)와 평가지점에서 바라보는 폭발/방출지점의 각도 (θ)를 입력으로 받아 극좌표를 형성한다. 극좌표는 입력되는 풍향을 이용하여 풍하방향을 x축으로 하는 직각 좌표계로 변환되도록 설계되어 있다. 기상자료/선원항 탭에서는 미리 작성한 기상자료와 선원항을 입력한다. 기상자료는 엑셀 파일로 구성하여야 하며 첫 번째부터 연도, 줄리안 데이(julian day), 시간, 풍향, 풍속, 대기안정도 순으로 입력하여야 한다. 선량계수/반감기 탭에는 평가하고자 하는 방사성 핵종의 호흡선량계수, 방사성 플룸 선량계수, 침적 선량계수와 해당하는 방사성 핵종의 반

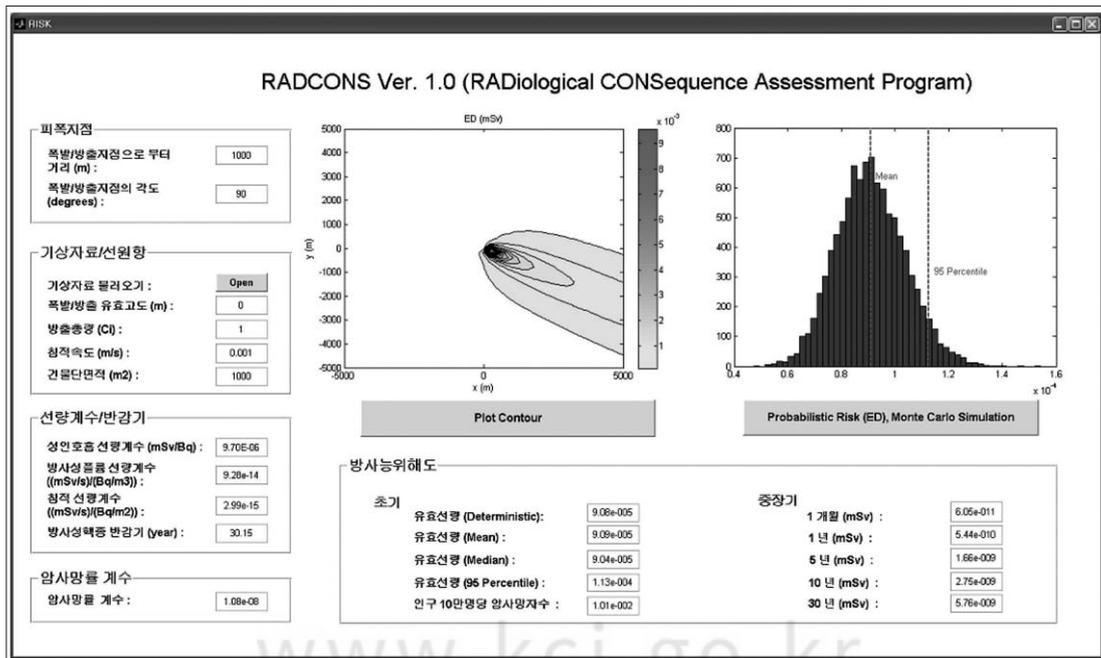


Figure 3. Graphical user interface of the RADCONS

값을 순차적으로 입력한다.

Plot Contour 버튼을 클릭하면 화면왼쪽에 입력한 자료를 이용하여 사고지점으로부터 반경 5 km이내의 유효선량 분포를 나타내도록 되어있다. 유효선량의 분포는 반경 5 km 이내만 표시하지만 평가지점은 반경 5 km 이상을 선택해도 된다. Probabilistic Risk 버튼을 클릭하면 평가 지점의 사고기간 동안 유효선량을 계산하여 방사능위해도 탭의 유효선량(Deterministic)에 나타낸다. 유효선량계산에 필요한 호흡률은 $3.34E-4 \text{ m}^3/\text{sec}$ 가 내부변수로 설정되어 있다. 또한 확률론적 위해도를 계산하기 위해 유효선량에 대한 몬테카를로 시뮬레이션을 수행한다. 유효선량 계산에 영향을 미치는 인자 중의 하나인 내부피폭은 개개인의 호흡량과 대기 중 핵종 농도의 함수이다. 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하기 위해 호흡량에 대한 확률밀도함수(probabilistic density function)가 필요하다. RADCONS에서 호흡량은 평균 $3.33 E-4 \text{ m}^3/\text{sec}$ 에 표준편차를 평균의 10 %로 미리 설정된 정규분포인 확률밀도함수를 이용하도록 프로그램 되어 있다. 한편, 평가하고자 하는 방사성 핵종의 호흡으로 인한 내부피폭, 방사성 플룸으로 인한 외부피폭과 침적으로 인한 외부피폭은 모두 대기 중 방사성 핵종의 농도 함수이다.

대기 중 농도에 대한 불확실성을 정량화하기 위해 계산지점의 수평 및 수직확산계수 값들의 10 %를 표준편차로 하는 정규분포 형태의 확률밀도함수를 내장하고 있다. 이러한 분포로부터 랜덤샘플링을 10,000회 실시하여 그 빈도분포를 Figure으로 나타내도록 프로그래밍 하였다. 몬테카를로 시뮬레이션 실행 후 나타난 분포로부터 평균, 중앙값 그리고 95percentile 값을 방사능위해도 탭에서 제시하도록 설계하였다. 사고 시 방출된 핵종이 여러 개일

경우 각각의 피폭선량을 합하여 출력한다. 민감도 분석을 위해 입력변수의 불확실성을 외부에서 고려하는 기능은 향후 추가할 계획이다.

III. RADCONS를 이용한 방사능사고 위해성평가

사고 시나리오는 특정 원전과 관련이 없으며 임의로 작성한 것이다. Table 1에 나타난 바와 같이 사고는 00년 0월 1일 13시 A원전에서 발생하여 0월 3일 종료시까지 59시간 지속되었으며, 이때 Cs-137 1 Ci가 사고시간동안 동일비율로 방출되었다고 가정하였다. 기상자료는 00기상청에서 측정된 1시간 간격의 풍향, 풍속을 이용하였으며 대기안정도는 PCRAMMET을 이용하여 구하였다 (US EPA, 1996). 대기안정도 A는 5.01%, B는 22.03%, C는 18.64 %, D는 12.25 % E는 11.86 %, F는 27.12 %로 나타나 방사성 물질의 확산에 불리한 F가 가장 많았다.

Figure 4의 바람장미에 나타난 바와 같이 사고기간 동안 북서풍이 우세해 남동쪽에 위치한 사람에 대한 피폭선량이 클 것으로 판단된다. A원전을 중심으로 반경 1,000 미터의 16개 방위에 대하여 RADCONS를 실행하였다. 선량계수는 ICRP72에 나타난 Type M 성인호흡 선량계수 $9.70E-6 \text{ mSv/Bq}$, FGR 12의 방사성 플룸 선량계수 $9.28E-14 ((\text{mSv/s})/(\text{Bq}/\text{m}^3))$, 침적 선량계수 $2.99E-15 ((\text{mSv/s})/(\text{Bq}/\text{m}^2))$ 와 FGR13의 암사망률 계수 $2.19E-10$ 을 적용하였다. 건물 단면적은 $1,000 \text{ m}^2$, 방출점의 높이는 0인 지표방출을 가정하여 수정된 확산계수와 정상확산계수를 각각 적용하여 계산한 유효선량을 비교하였다. 한편, 풍속이 0.5 m/sec 미만의 정온(calm)인 경우 풍속을 0.5

Table 1. Accident scenario

Radiation source	Total activity	Duration time of accident	Dose conversion factor for inhalation	Dose conversion factor for deposition
Cs-137	1 Ci	59 hrs	$9.70E-6 \text{ mSv/Bq}$	$2.99E-15 ((\text{mSv/s})/(\text{Bq}/\text{m}^2))$

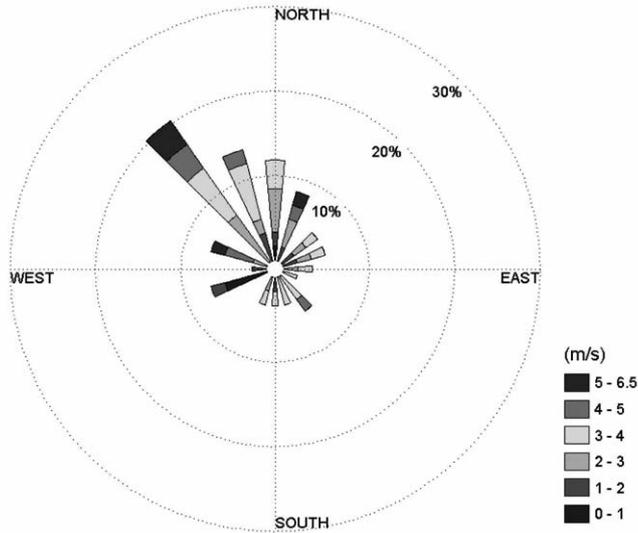


Figure 4. Wind rose for the accident period

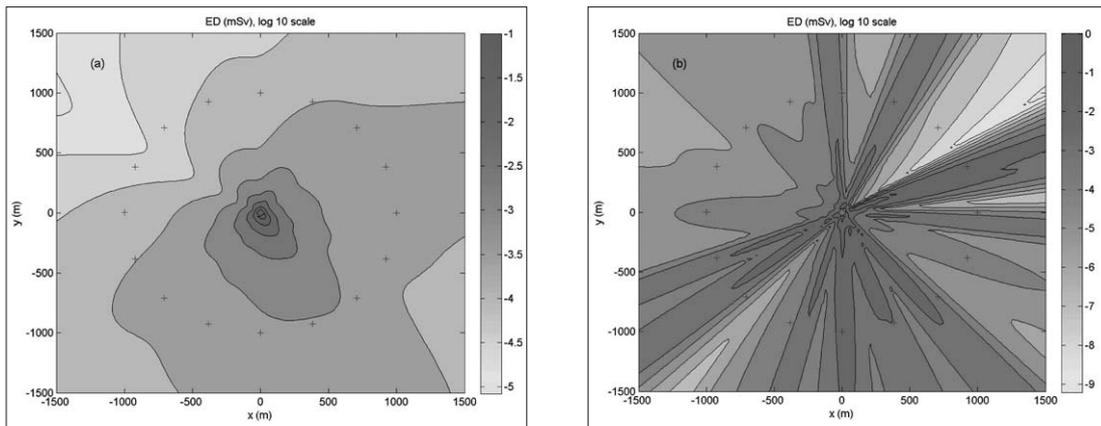


Figure 5. Effective dose contours for the accident: (a) modified dispersion parameters applied, (b) normal dispersion parameters applied: + means 16 wind directions.

m/sec로 처리하도록 설계되어 있다.

Figure 5는 사고 기간 동안 계산된 유효선량 분포를 나타낸 것이다. Figure 5(a)는 수정된 대기확산인자를 적용한 유효선량을 나타낸 것으로 유효선량이 높은 부분을 보면 대략적으로 Figure 4의 바람장미에 나타난 주풍향인 북서방향의 반대쪽인 남동방향으로 유효선량 분포가 높게 그려지고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 정상 확산계수를 사용한 Figure 5(b)를 보면 3 m/sec 이하 저풍속이 가장 많이 분포한 북풍에 의해 남쪽에서 최고 농도가 나타나고 유효선량 분포도 저풍속이 많은 북풍에 의

해 좌우 되고 있음을 알 수 있다. Figure 5(b)의 유효선량 분포를 보면 Figure 5(a)에 비해 날카로운 모양을 나타내고 있다. 이것은 입력된 59시간의 기상자료 중 3 m/sec 이하 저풍속이 유효선량의 분포에 절대적인 영향을 나타내고 있는 것이 원인으로 판단된다. 사고 기간 동안 풍속이 3 m/sec 이상인 경우는 수정 확산계수와 정상 확산계수를 사용하여 계산된 유효선량의 패턴은 거의 유사하였다. 수정된 확산계수를 적용하였을 경우 최고 선량이 관측된 SSE방향의 유효선량은 $8.51E-4$ mSv였으며, 정상 확산계수를 적용하였을 경우 최고 선량이 관

측된 SE방향의 유효선량은 $5.23E-3$ mSv으로 나타났다. 적용된 확산계수에 따라 최고선량이 관측된 지점이 상이하였으며, 정상확산계수를 적용할 경우의 최고선량이 수정확산계수를 적용한 경우에 비해 6.15배 큰 것으로 나타났다. 한편, 1000 미터 동심원의 16방위 중 SW, S, SE, ENE에서 정상 확산인자를 적용할 경우의 유효선량 값이 크게 나타났고 그 외의 방향에서는 수정된 확산계수를 적용한 경우가 크게 나타났으나 그 정도는 미미하였다. 사고 기간 동안 3 m/sec 이하 저풍속이 많이 발생하였을 경우 수정된 확산계수를 적용할 경우와 정상 확산계수를 적용할 경우의 유효선량은 더 큰 차이를 나타낼 것으로 판단된다.

Figure 6은 RADCONS 프로그램에서 사용하는 수정된 확산계수를 사용하여 1,000 미터 16개 동심원 중 유효선량의 최고값이 나타난 SSE방향에 대하여 확률론적 위해도를 계산하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 실행한 결과를 나타낸 것이다. 유효선량 중앙값(median)은 $8.43E-4$ mSv, 평균(mean)은 $8.49E-4$ mSv 그리고 95 percentile은 $1.10E-3$ mSv로 나타났다. 몬테카를로 시뮬레이션 결과 나타난 유효선량 95 percentile은 유효선량의 결정론적 값보다 1.29배 큰 값이다. 실제 원자력시설의 사고나 방사능 테러 시 의사결정자는 주민보호와 제염 등을 위해 결정론적인 값 뿐만 아니라 확

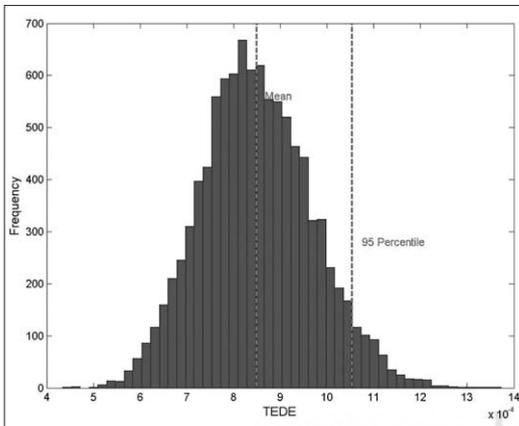


Figure 6. Stochastic estimation of effective dose at the receptor point

률론적인 값도 세밀히 검토하여 대응책을 입안하여야 한다. 방사선량의 결정론적인 값은 사고 후 초기 대응을 위해 사용가능하며, 불확실성을 고려한 확률론적 값은 중장기 대응책 마련을 위해 사용될 수 있다. 본 사고 시나리오로 인한 인구 10만명당 암사망율은 $9.42E-2$ 로 나타났다. 제시된 암사망률은 모든 피폭자가 사고 반경 1,000 미터 중에서 피폭선량이 가장 높은 지점에 사고 기간 동안 계속적으로 위치하고 있었다고 가정하여 추정된 것이기 때문에 매우 보수적인 값이다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 원자력 시설 혹은 방사능 테러로 인한 사고 리스크 평가 프로그램인 RADCONS Ver. 1.0을 개발하여 원전 가상 사고에 대한 리스크를 평가하였다. 수정된 확산계수와 정상 확산계수를 적용하여 유효선량을 계산해 본 결과 정상확산계수의 적용시 유효선량값이 상대적으로 높게 나타났다. 이것은 저풍속에서 풍속에 따른 대기확산인자의 비례 및 반비례 설정에 기인한 것으로 실제 적용시 저풍속이 많을 경우 피폭선량의 계산에 더 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 1년간 시간별 혹은 15분간 기상자료를 사용하여 기상자료 파일을 작성하면 RADCONS를 연간 방사능위해성 평가에 이용할 수 있다.

RADCONS 프로그램은 여러 핵종에 대한 평가를 위해서는 각각 핵종에 대한 평가결과를 더해야 하며 선량계수를 직접 입력해야 하는 번거로움이 있다. 이러한 문제는 향후 점차적으로 사용자가 편리하도록 수정해 나갈 예정이다. 더불어 확률론적 위해도 평가에 대한 다양한 시나리오 제공을 위해 기상자료를 샘플링하는 기능을 추가해 나갈 예정이다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 원자력안전위원회의 중장기연구개발사업으로 수행되었습니다. (과제

번호: 2012011939 및 2012028803)

참고문헌

- Lawrence Livermore National Laboratory, 2009, HotSpot-Health physics codes version 2.07 user's guide, LLNL-TM-411345.
- Pacific Northwest National Laboratory, 1997, Atmospheric relative concentrations in building wakes, NUREG/CR-6331 PNNL-10521 Rev. 1.
- Pacific Northwest National Laboratory, 1982, PAVAN: An atmospheric-dispersion program for evaluating design-basis accidental releases of radioactive materials from nuclear power stations, NUREG/CR-2858 PNL-4413.
- Pacific Northwest National Laboratory, 2006, Regional atmospheric transport code for Hanford emission tracking, Version 2 (RATCHET2), PNNL-16071.
- U.S. EPA, 1999, Cancer risk coefficients for environmental exposure to radionuclides, Federal guidance report No. 13.
- U.S. EPA, 2007, CAP88-PC version 3.0 user guide.
- U.S. EPA, 1996, PCRAMMET user's guide.
- U.S. NRC, 2004, Comparison of average transport and dispersion among a Gaussian, a two-dimensional, and a three-dimensional model, NUREG/CR-6853.
- W.W. Nazaroff, 2001, L. Alvarez-Cohen, Environmental engineering science, John Wiley & Sons Inc.
- 정효준, 김은한, 서경석, 황원태, 한문희, Linear Programming을 이용한 가우시안 모형의 확산인자 수정에 관한 사례연구, 대한방사선방어학회 28(4), 311-319

최종원고채택 13. 01. 31