

## Monte Carlo 방법을 이용한 대기오염 배출률 예측의 불확실성 평가

정 호 준 · 김 은 한 · 서 경 석 · 황 원 태 · 한 문 희  
한국원자력연구소 원자력환경연구부  
(2005년 10월 5일 접수; 2006년 3월 28일 채택)

### Uncertainty Evaluation of the Estimated Release Rate for the Atmospheric Pollutant Using Monte Carlo Method

Hyo-Joon Jeong, Eun-Han Kim, Won-Tae Hwang,  
Kyung-Suk Suh and Moon-Hee Han

Nuclear Environment Research Division, KAERI, Daejeon 305-353, Korea  
(Manuscript received 5 October, 2005; accepted 28 March, 2006)

Release rate is one of the important items for the environmental impact assessment caused by radioactive materials in case of an accidental release from the nuclear facilities. In this study, the uncertainty of the estimated release rate is evaluated using Monte Carlo method. Gaussian plume model and linear programming are used for estimating the release rate of a source material. Tracer experiment is performed at the Yeoung-Kwang nuclear site to understand the dispersion characteristics. The optimized release rate was 1.56 times rather than the released source as a result of the linear programming to minimize the sum of square errors between the observed concentrations of the experiment and the calculated ones using Gaussian plume model. In the mean time, 95% confidence interval of the estimated release rate was from 1.41 to 2.53 times compared with the released rate as a result of the Monte Carlo simulation considering input variations of the Gaussian plume model. We confirm that this kind of the uncertainty evaluation for the source rate can support decision making appropriately in case of the radiological emergencies.

Key Words : Uncertainty evaluation, Monte Carlo simulation, linear programming, Gaussian plume model

#### 1. 서 론

대기확산모형은 대기 중 오염물질의 거동을 수식화 한 것으로 입력 자료에 따라 목표 지점의 농도를 생산해 낸다. 이러한 확산모형은 확산지역의 기상상황과 지형 및 토지이용 자료, 배출량 정보 등을 이용하여 계산값이 실측값을 잘 반영하도록 하는 모델 보정(Calibration)과 검증(Verification)의 과정을 거쳐 특정 지역 혹은 시간에 대한 농도 예측을 통해 오염물질로 인한 피해를 최소화하기 위한 의사결정을 지원한다<sup>1)</sup>.

원자력 시설에 설치된 환경모니터링 시스템은 대기 중 방사성 물질의 농도를 일정시간 간격으로 생산해 낸다. 환경모니터링을 이용하여 생산된 자료는

대기확산 모형의 신뢰성 평가나 환경영향평가 및 오염물질로 인한 대책을 수립하는데 이용된다. 원자력 시설에서 만일의 사고 발생시 환경모니터링 자료와 대기확산 모형을 통하여 배출률(Source rate or release rate)에 대한 재구성이 가능하다. 확산모형을 이용하여 방사성 물질의 누출로 인한 대기 중 환경영향을 평가하기 위해서는 기상자료, 지형자료 및 방사성 물질의 누출량을 나타내는 배출률 자료가 요구된다. 이들 중 배출률은 특정지역 혹은 지점의 방사성 물질의 농도에 가장 영향을 크게 미친다. 계산된 배출률은 향후 환경영향평가나 제염과 관련된 의사결정자의 의사결정 지원 자료로 활용될 수 있다. 따라서 계산된 배출률에 대한 불확실성을 정량화하여 신뢰구간을 제시하는 것이 필요하다. 대기확산 모형의 불확실성은 입력자료 변동에 기인하는 것으로, 대부분의 연구가 모형 입력의 변동에 따른

Corresponding Author : Hyo-Joon Jeong, Nuclear Environmental Research Division, KAERI, Daejeon 305-353, Korea  
Phone: +82-42-868-2087  
E-mail: jeong1208@kaeri.re.kr

모사결과와 불확실성을 평가하는데 초점을 맞추고 있다<sup>2-4)</sup>. 그러나 본 연구에서는 최적화 함수를 연계하여 입력 자료 중 배출물을 예측하고 예측된 배출물에 대한 불확실성을 평가하고자 하였다.

배출물의 불확실성을 평가하기 위해서는 대기확산모형으로 입력되는 입력 자료의 분포를 결정해야 하며, 각 측정지점별 측정 자료와 모형의 계산 자료의 오차가 최소화되도록 모형의 입력 자료중의 하나인 배출물을 최적화하는 과정을 거쳐야 한다<sup>5)</sup>. 본 연구에서는 가우시안 플룸 모형과 확산실험 자료를 이용하여 선형계획법(Linear programming)에 의해 배출물을 추정하였으며, 입력 자료의 변동에 따른 배출물의 불확실성을 몬테카를로 분석을 통하여 평가하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 추적자 확산실험

영광 원자력 발전소는 북위 35°24', 동경 126°25'에 위치하며 지리상으로 우리나라 서해에 위치하고 있다. 부지 내 기상탑을 중심으로 남동방향 1.5km에 약 200m 높이의 산이, 남쪽방향으로 7km에 약 300m 높이의 산이 있다. 부지내 기상탑은 영광 1호기 옆의 공터에 위치하며 10m, 58m 높이의 2개의 기상탑이 운영되고 있다. 부지내 기상탑을 추적자의 방출점(Release point)으로 하여, 반경 3km 근방과 8km 근방에 각각 51개와 40개의 포집점을 선정하였다(Fig. 1). 영광원전은 해안가에 위치하고 있어 일반적으로 바람의 방향은 표면에서 낮 동안에는 바다에서 육지로 불고, 일몰 이후에는 육지에서 바다로 불어가는 해륙풍 현상이 발생한다. 따라서 포집점의 위치를 방출점을 중심으로 육지방향(남동, 북동 및 동쪽)으로 풍하방향 약 3km와 8km의 동심원상에 160도의 각도내(북쪽을 0도로 기준)에 선정하였다. 포집기는 이동을 고려하여 도로상이나

논두렁 위에 설치하도록 하였다<sup>6)</sup>.

원전부지에서의 확산실험일정은 실험1주일 전부터 한국원자력연구소가 보유한 기상장비를 이용한 기상관측을 시작으로 실험전에 포집점의 정확한 위치를 측량하여 각 포집점에 말뚝을 박아 표시하고, 포집기의 배치, 추적자의 방출, 포집, 분석의 순서로 계획하였다. 포집기를 배출할 때 포집점을 쉽게 찾도록 하기 위하여 지도를 작성하였으며 말뚝에는 포집점의 번호를 표시하였다. 현장에서 기상관측 및 부지내 기상탑의 10m, 58m, 기상탑의 1년간 기상자료 분석을 토대로 실험 시작시간이 결정하여 포집기를 배치하고 추적자를 방출하며 처음 방출된 추적자가 바람에 실려 이동하여 확산중심선 전체에 퍼졌으리라 예측되는 시간까지 기다린 후에 포집기를 작동시켜 포집을 시작하였다. 1시간에 10분씩 6번의 포집이 수행되었고 부지내 58m 기상탑의 방출점에서 SF<sub>6</sub> 가스를 일정한 양으로 약 90분 동안 지속적으로 방출하였다. 방출율은 추적자 방출구에 연결된 니들밸브와 유량계로 조절하였으며 방출전후에 실린더의 무게를 측정하여 실제 방출된 양을 측정하였다. 추적자 포집은 방출점을 중심으로 반경 3km에 51개, 반경 8km에 40개 총 91개의 포집상자를 배치하였고 한 개의 포집상자에는 6개의 포집백을 배치하였다. 따라서 전체 수거된 포집백은 546개였다. 추적자 포집백은 일련번호를 부친 후 파손을 방지하기 위하여 모두 종이박스에 넣어 분석장소로 운반하였다. 포집된 가스는 가스크로마토그래피의 ECD(Electron Capture Detector)를 이용하여 분석하였다.

확산실험 당일의 기상은 우리나라의 중부에 고기압이 위치하여 매우 화창한 날씨였다. 실험기간 중 기상관측을 위하여 방출점에 10m의 간이 풍향·풍속계를 설치하였고, 고공기상 관측을 위하여 SODAR(Sonic Detection And Ranging)을 이용하여 고도 1.0km까지 풍향, 풍속, 난류성분, 온도 등을 측정하였다.

### 2.2. 가우시안 플룸 모형

대기 중에서 일어나는 오염물질의 거동 특성을 파악하는데, 가장 널리 사용되고 있는 모형이 가우시안 모형이다. 이는 대기확산을 통계학적인 정규분포로 가정하여 수용체(Receptor)의 농도를 예측하는 방법이다<sup>7)</sup>. 가우시안 모형이 지표면의 특성 및 비정상상태의 배출원에 대한 농도예측에는 한계가 있지만, 3차원 동역학적 모형의 개발 및 적용에 있어서 기본이 된다는 점에서 많은 비교연구에 이용되고 있다. 본 연구에서도 추적자의 방출이 정해진 시간 동안 동일한 양이 일정하게 배출된 것이므로 가우시안 모형을 적용하였다.

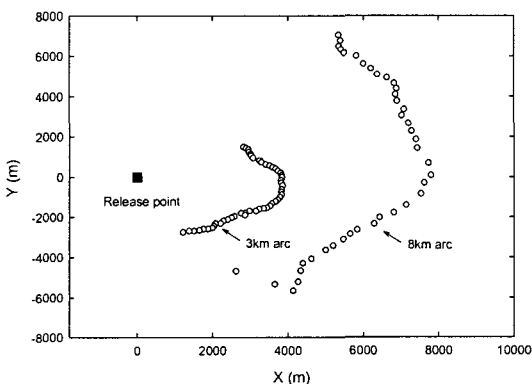


Fig. 1. Location of the release point and the sampling units.

추적자의 방출지점에서 풍하방향을  $x$ 라 하고, 풍하방향에 수평의 직각성분을  $y$ , 연직방향으로 수직인 성분을  $z$ 라고 할 때, 지표에서의 농도는  $C$ 는 식1과 같이 정의 할 수 있다.

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z U} \text{EXP}\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[ \text{EXP}\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \text{EXP}\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (\text{식1})$$

여기서  $Q$ 는 추적자의 방출농도,  $U$ 는 풍속,  $H$ 는 방출점의 높이,  $\sigma_y$  및  $\sigma_z$ 는 풍속, 운량 및 주야의 상황이 고려된 확산정도를 나타내는 정규분포의 표준편차를 의미한다.  $\sigma_y$  및  $\sigma_z$ 는 일반적으로 Pasquill 및 Gifford가 개발한 경험적인 식을 이용하여 구하게 된다<sup>8)</sup>. 본 연구에 사용된 추적자인 SF<sub>6</sub>는 실제 방사성 물질과는 감쇠계수나 침적의 양상이 상이할 수 있으나 식 1에 반응항이나 침적항등을 추가함으로써 해결할 수 있다.

2.3. Monte Carlo Simulation

몬테카를로 시뮬레이션이란 불확실한 상황에서의 의사결정을 목적으로 확률적 시스템(Probabilistic system)의 모의실험에 이용되는 일련의 절차이다. 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 모형의 입력변수에 대한 분포를 결정하여야한다. 입력변수에 대한 분포는 축적된 측정 자료를 분석하여 얻을 수 있다. 축적된 측정 자료가 없을 경우는 적절한 가정을 통하여 분포를 결정하여 사용할 수 있다. 입력변수에 대한 분포가 결정되면 적절한 샘플링 기법을 이용하여 샘플링한 값을 이용하여 모의실험을 진행하여야 한다. Fig. 2는 본 연구의 전체적인 흐름을 나타낸 것이다. 먼저 가우시안 모형의 입력인자에 대한 분포를 결정하고, 입력분포로부터 샘플링을 통해 가우시안 모형을 수행한다. 다음으로 모형의 결과값들과 실측값들간의 오차의 제곱합을 최소로 하는 배출물을 계산하는 과정을 반복하도록 되어있다.

본 연구에서는 가우시안 모형의 입력인자 중 풍속, 방출고도 및 샘플링 지점의 좌표변동을 고려하여 모형의 계산값과 실측값간의 오차의 제곱합을 최소로 하는 목적함수를 설정하였다. 목적함수의 해는 선형계획법을 이용하여 구하였다. 선형계획법은 제한 조건을 가진 목적함수를 최적화하는데 이용되는 방법으로 본 연구에서는 측정값과 계산값간의 오차의 제곱합이 목적함수이다<sup>9)</sup>.

배출물은 가능한 포집지점의 측정값들과 가우시안 플룸 모형을 통하여 계산된 값들과의 오차 제곱합이 최소로 조정되도록 식2와 같은 목적함수의 제한조건으로 설정되었다.

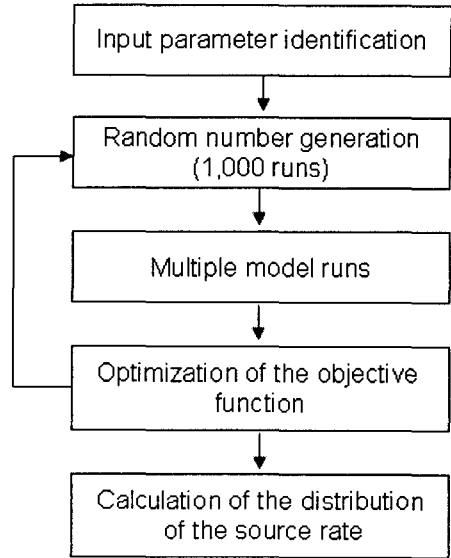


Fig. 2. Scheme of the uncertainty analysis for the estimated source rate.

$$\text{Minimize } ((O_1 - P_1)^2 + (O_2 - P_2)^2 + \dots + (O_n - P_n)^2) \quad (\text{식2})$$

bounded to  $0 < \text{source rate} < \text{infinity}$

여기서,  $O_i$ 는 추적자 실험의 관측값을 나타내며  $P_i$ 는 가우시안 플룸 모형의 계산값을 나타낸다. 배출물의 초기값은 비사고시를 가정하여 0으로 설정하였다. 포집지점의 대기 중 추적자 농도를 계산하기 위한 가우시안 플룸 모형에 입력 자료의 분포를 반영할 수 있도록 Decision engineering사의 불확실성 분석함수를 연계하였다<sup>10)</sup>. 입력 자료의 변동에 따른 결과값의 불확실성을 평가하기 위한 샘플링의 방법은 랜덤샘플링(Random sampling)과 라틴하이퍼큐브 샘플링(Latin hypercube sampling)이 있다. 라틴하이퍼큐브 샘플링은 구간을 적절히 구분하여 구분된 구간에서 동일한 횟수의 샘플링을 진행하므로 비교적 적은 횟수의 모의(Simulation)를 통해 불확실성을 평가할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 라틴하이퍼큐브 샘플링 방법으로 1,000회 샘플링을 실시하여 식2의 목적함수의 해를 찾는 모의실험을 수행하였다. 이렇게 계산된 가우시안 농도의 불확실성은 선형계획법의 목적함수를 만족시키기 위한 제한 조건인 배출물의 불확실성으로 전이된다. 따라서 목적함수의 최적화와 입력 자료의 변동이 동시에 진행하면 계산된 배출물의 분포를 구할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 실험 자료의 모사

추적자 확산실험을 통하여 관측된 SF<sub>6</sub>의 농도는 10분 간격으로 포집된 샘플의 평균값이다. Table 1

에 나타난 실험 당시의 풍속 2.1m/sec을 고려하여 3km 아크 근방의 샘플링 지점은 30분 이후에 포집된 자료의 평균을 8km 아크 근방의 샘플링 지점은 70분 이후에 포집된 자료의 평균값을 그 지점의 추적자 농도로 정의하였다. 포집된 추적자를 분석한 결과 대부분의 지점에서 결측값을 포함하고 있어 정상상태의 대푯값으로 사용하기엔 무리가 있어 10분마다 연속적으로 관측된 자료 중 결측이 하나도 발생하지 않은 지점을 3km 아크와 8km 아크에서 8지점씩을 Table 2와 같이 선정하여 오차제거합의 최소화를 위한 배출물의 최적화에 이용하였다.

추적자의 농도는 방출점으로 부터 x방향으로 20km까지 0.01km간격으로 구분하고 y방향은 풍향 방향을 기준으로 상하 5,000m를 10m 간격으로 구분하여 지표의 대기중 농도를 Matlab을 이용하여 계산하였다.

Table 1. Conditions of the tracer release experiments

Experimental period	15:00 - 16:30 (May 29 <sup>th</sup> 1996)
Emission material	SF <sub>6</sub>
Release rate	115.2 kg/hr
Sampling interval	Every 10 min.
Wind speed	2.1 m/sec
Wind direction	W-WNW
Atmospheric stability class	B(unstable)

Table 2. Sampling points available for the calculation of the source rate

	x coordinate[m]	y coordinate[m]	Distance
3km arc	3,732	314	3,745.186
	3,669	410	3,691.837
	3,510	570	3,555.980
	3,402	634	3,460.572
	3,831	91	3,832.080
	2,680	-1,899	3,284.600
	2,032	-2,432	3,169.171
	3,243	826	3,346.539
8km arc	7,620	-295	7,625.708
	7,528	-834	7,574.057
	6,807	-1,779	7,035.630
	6,429	-2,029	6,741.578
	5,469	-3,100	6,286.490
	7,795	84	7,795.452
	7,394	1,866	7,625.824
	6,373	5,082	8,151.187

\* Release point is the (0, 0).

가우시안 플룸 모형의 계산치와 관측치의 적합정도를 판단하기 위하여 일치도 계수(agreement index, AI), 상관계수(correlation coefficient, r) 및 평균제곱오차(root mean square error, RMSE)등을 산정하였다. 일치도 계수의 경우 관측치와 계산치가 동일할 경우 1이다. 따라서 일치도 계수가 1에 근접할수록 모형의 예측력은 증가하는 것으로 판단할 수 있다. 상관계수의 경우도 관측치와 계산치의 값이 일치하면 1의 값을 나타낸다. RMSE의 경우는 모형의 적합정도를 판단하는 매우 유용한 인자이나 비교 대상의 평균값이 서로 다른 경우 모형의 예측력 판단에 한계가 있다<sup>11)</sup>. 각 통계적인 인자의 수식은 아래와 같다.

$$AI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - A| + |O_i - A|)^2} \quad (식3)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - O)(P_i - P)}{\sigma_O \sigma_P} \quad (식4)$$

$$RMSE = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right)^{1/2} \quad (식5)$$

여기서 N은 비교 데이터쌍의 개수, O는 관측값들의 평균, P는 예측값들의 평균,  $\sigma_O$ ,  $\sigma_P$ 는 각각 관측값과 예측값의 분산을 의미한다. Fig. 3은 확산실험을 통하여 측정된 농도와 가우시안 모형을 통하여 계산한 결과를 비교한 것으로 방출점에서 3 km 근방에 위치한 지점이 방출점에서 상대적으로 거리가 먼 8 km 근방보다 양호한 예측력을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서, 가우시안 플룸모형에 의한 예측의 정확도는 방출점에서 가까운 3km arc가 우세한 것으로 판단된다(Table 3). Table 3에서 RMSE가 8km arc가 작은 값으로 나타나는 것은 8km arc의 평균 추적자 농도가 3km arc에 비해 현저하게 작기 때문이다. 일반적으로 가우시안 모형은 방출점에서 10 km 이내의 단일 방출원에 적용하기 용이한 것으로 알려져 있으며 방출점에서 멀어질수록 예측력은 감소한다. 배출물 추정을 위한 목적함수의 해를 구하기 위해 3km arc 와 8km arc를 구분하지 않고 전 지점의 자료 모두를 사용하였다.

### 3.2. 배출물의 불확실성 평가

가우시안 모형의 풍속과 방출고도는 정규분포로, 이들 변수의 변동은 평균값에서 10% 이내로 가정하였다. 가우시안 플룸 모형은 실험기간 동안 풍향변화가 전혀 없는 것을 가정한다. 그러나 추적자 확산 실험동안 풍향은 미세하게 변화가 있었다. 따라서

가우시안의 가정에 최대한 근접하면서 풍향변화에 따른 샘플링 좌표변화를 고려하기 위해 Fig. 4와 같은 좌표변환을 식6으로 계산되도록 하였다. 식6에 나타난 바와 같이 풍향을  $\theta$ 라고 했을 때, x좌표는 원점에서 샘플링 포스트까지의 거리에 대한 cosine 값으로 결정되며, y좌표는 sine값으로 결정된다. 풍향의 분포는 로그노말(Log-normal)분포로 가정하고 그 변동은 10% 이내로 하였다.

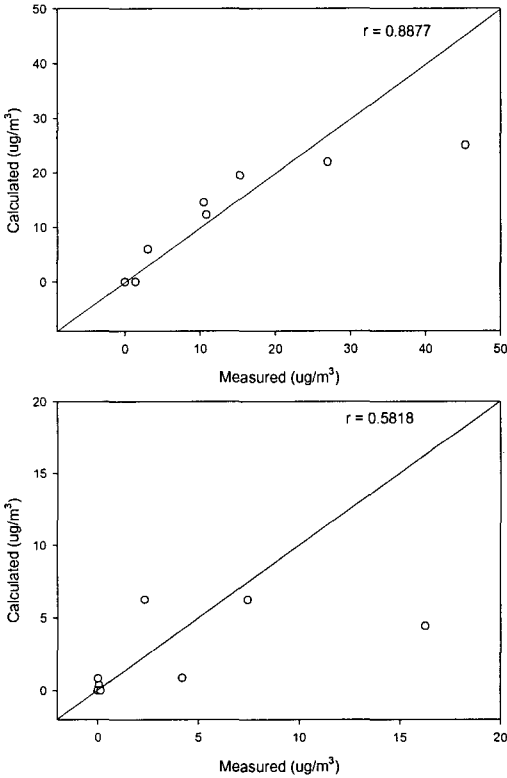


Fig. 3. Comparison of the measured concentrations and the calculated ones at the 3km arc and the 8km arc.

Table 3. Coefficients related with the forecasting ability at the 3km arc and the 8km arc

	3km arc	8km arc
AI	0.8839	0.6223
r	0.8877	0.5818
RMSE	7.7793	4.5876

$$\vec{r}_0 = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_0 \cos(\theta - \theta_0) \\ r_0 \sin(\theta - \theta_0) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{식6})$$

위와 같은 변동분포를 고려하여 몬테카를로 방법

에 의해 모의실험을 실시하고 이 결과를 목적함수의 최소화에 적용한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 목적함수인 오차 합의 95%신뢰구간은 304.00에서 1056.67로 나타났다. 이 결과를 이용하여 배출물의 95%신뢰구간을 구하면 162.40kg/hr에서 291.60kg/hr와 같다. 실험시 방출한추적자의 양 115.2kg/hr과 비교하면 최소 1.41에서 최대 2.53배의 범위가 95% 신뢰구간임을 확인 할 수 있다. 목적함수의 최적화는 10회 반복 계산 후 최급 하강하였으며, 그 이후로는 변동이 거의 미미하여 193회 반복계산에서 최소오차에 도달하였다.

한편, 위와 같이 입력변수의 변동을 고려하지 않고 풍속과 방출고도 및 샘플링지점을 평균값으로 고정하여 목적함수를 최적화한 결과 배출물은 180.0kg/hr로 나타났으며 이것은 실제 배출물의 1.56배에 해당한다. 이 값은 확률적인 분포가 반영되지 않은 결정론적인 값으로 입력값의 변동이 없는 경우에 적절하다. 그러나 환경 중에서 관측된 자료들은 일정 정도의

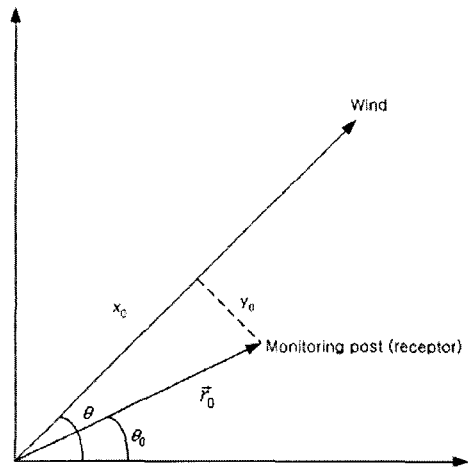


Fig. 4. Coordinate conversion for the sampling points according to the change of wind direction.

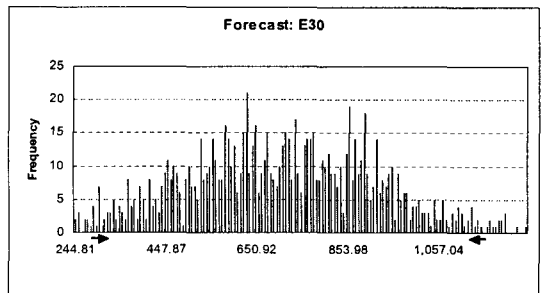


Fig. 5. Frequency distribution of the objective function for evaluating uncertainty of the release rate.

변동을 포함하고 있기 때문에, 대기 중으로 방사성 물질이 누출되었을 경우 입력변수의 평균값만을 이용하여 추정된 배출률보다는 입력변수의 변동을 고려한 배출률의 불확실성을 제시함으로써 의사결정을 효율적으로 지원할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 확산실험 자료와 가우시안 플룸 모형을 이용하여 계산된 값들 간의 오차의 제곱합이 최소가 되도록 제한조건을 배출률로 하는 목적함수를 설정하고, 입력 자료의 변동에 따른 배출률의 불확실성을 평가하였다. 목적함수의 최소값에 해당하는 결정론적인 배출률은 실제 방출량의 1.56배에 해당하는 180.0kg/hr로 나타났으며, 입력 자료의 변동을 고려한 몬테카를로 분석에서는 배출률의 95%신뢰구간은 실제 배출률의 1.41배에서 2.53배의 범위로 나타났다.

원자력 시설에서 방사능 물질의 누출 사고 발생 시 배출률은 오염물질의 대기 중 농도를 결정하는 중요한 요소 중의 하나이다. 본 연구는 특정지역의 기상조건에 따른 배출률의 불확실성을 평가하여 제시한 것이나 이러한 방법론은 향후 대기질 예측 자료를 이용하여 이루어지는 일련의 사고 대응 시나리오에 대한 의사결정을 지원하는데 유용할 것으로 판단된다. 한편, 본 연구에서는 포집된 추적자의 대표성이나 측정상의 불확실성은 고려하지 않았으나 향후 이러한 사항들이 추가적으로 고려된다면 더욱 신뢰성있는 배출률 추정치를 생산할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기연구개발 사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

1) Yegnan, A., D. G. Williamson and A. J. Graettinger, 2002, Uncertainty analysis in dispersion modelling, *Environmental Modelling & Software*, 17, 639-649.

2) Hanna, S. R., Chang, J. C. and Fernau, M. E., 1998, Monte Carlo estimates of uncertainties in predictions by a photochemical grid model (UAM-IV) due to uncertainties in input variables, *Atmospheric Environment*, 32(21), 3619-3628.

3) Sullivan, D. A., M. T. Holdsworth and D. J. Hlinka, 2004, Monte Carlo-based dispersion modeling of off-gassing releases from the fumigant metham-sodium for determining distances to exposure endpoints, *Atmospheric Environment*, 38, 2471-2481.

4) Warren, R. F. and H. M. ApSimon, 1999, Uncertainties in integrated assessment modelling of abatement strategies: illustrations with the ASAM model, *Environmental Science & Policy*, 2, 439-456.

5) 정효준, 김은한, 황원태, 2004, 서경석, 한문희, 원자력 비상시 최소자승법을 이용한 선원항 추정, *대한방사선방어학회지*, 29(3), 157-164.

6) 한국원자력연구소, 1996, 실시간 방사선 피폭 해석시스템 구성연구, 219-234.

7) Nazaroff, W. W. and L. Alvarez-Cohen, 2001, *Environmental engineering science*, John Wiley & Sons, Inc., 454-469.

8) Davidson, G. A., 1990, A modified power-law representation of the Pasquill-Gifford dispersion coefficients, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 40, 1146-1147.

9) Albright, S. C., W. L. Winston and C. Zappe, 2002, *Data analysis & decision making with Microsoft Excel*, Duxbury press.

10) *Decisioneering*, 2001, Developer kit user manual.

11) Elbir, T., 2003, Comparison of model predictions with the data of an urban air quality monitoring network in Izmir, Turkey, *Atmospheric Environment*, 37, 2149-2157.