

## Source term estimation using least squares method in a radiological emergency

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

Korea Atomic Energy Research Institute

### 원자력 비상시 최소자승법을 이용한 선원항의 추정

정효준 · 김은한 · 서경석 · 황원태 · 한문희

한국원자력연구소

(2003년 9월 18일 접수, 2004년 7월 28일 채택)

**Abstract** - Atmospheric dispersion modelling has been widely used to predict the fate and transport of radioactive or toxic materials released from nuclear facilities, which is an unlikely accidental event. To improve the forecasting performance of the dispersion model, it is required that source rate and dispersion characteristics must be defined appropriately. Generally, source term of the radioactive materials is much uncertain at the early phase of an accidental event. In this study, we computed the source rate with the experimental field data monitored at the Yeoung-Kwang nuclear site and obtained the optimal source rate to minimize the errors between the measured concentrations and the computed ones by the Gaussian plume model. Computed source term showed a good result within 24% of the artificially released source rate.

**Key words** : source term estimation, Gaussian plume model, least squares method

**요약** - 원자력시설에서 만일의 방사성 물질의 누출이나 화학시설에서 독성물질의 누출시 오염물질의 환경 중 거동을 파악하기 위해서 대기확산 모형이 많이 이용된다. 대기확산 모형을 통한 환경 중 유해물질의 농도 예측에 대한 정확도를 높이기 위해서는 무엇보다 모형으로 입력되는 선원항에 대한 정확한 정보를 필요로 한다. 본 연구는 이러한 선원항 추정을 위하여 최소자승법을 적용하였다. 영광원자력 시설에서 실시된 추적자 확산실험 자료를 이용하여 가우시안 모형으로 계산한 값과 비교를 시도하였으며, 가우시안 모형으로 계산한 값들과 추적자 확산실험 결과 값들의 오차의 계급이 최소가 되도록 선원항을 추정하였다. 추정한 선원항은 확산실험시 실제 추적자 방출량의 1.24정도로 비교적 정확한 예측력을 나타내었다.

**중심어** : 선원항 예측, 가우시안 플룸 모형, 최소자승법

### 서 론

원자력 발전소를 비롯한 방사능 관련시설에 관한 안전성을 확보하기 위하여, 원자력시설에서 발생할 수 있는 방사능 사고와 관련한 대기 중 방사성물질의 거동에 관한 많은 연구들이 진행되어 왔다. 방사성 물질의 대기확산 모델링은 위와 같은 연구의 많은 부분을 차지하고 있다[1-3]. 사고

발생시 혹은 사고 발생을 가정한 시나리오를 수치모형을 이용하여 방사능 오염정도를 계산하는 많은 프로그램들이 개발되었다. 이러한 수치모형은 확산지역의 기상상황과 지형 및 토지이용 자료를 이용하여 계산값이 실측값을 잘 반영하도록 하는 모델보정(model calibration)의 과정을 거쳐 특정지역 혹은 시간에 대한 농도 예측을 통해 의사결정을 지원하도록 설계된다. 대기확산 모델의

예측정확도를 높이기 위해서는 환경으로 누출된 총량과 누출율 등에 대한 정보(이하 선원항)에 대한 정확한 정보와 오염물질의 이송 및 확산에 영향을 미치는 유체(바람) 해석에 대한 상세기술을 필요로 한다.

선원항은 사고발생시 해당 시설의 운전상태 진단 또는 방사능 배출 감지기 등을 통하여 평가된 값이 대기확산모델의 입력조건으로 제공되며, 누출된 방사성 물질의 대기 중 농도는 환경방사능 모니터링 시스템(environmental radiation monitoring system)을 통하여 관측이 가능하다. 여러 지점에 설치된 모니터링 시스템을 통하여 생산되는 방사성 물질의 농도는 일정한 시간 간격의 시계열(time series)자료이다. 이 자료들은 사고발생 지점의 시간에 따른 방출량에 대한 정보 뿐만 아니라 방출지점에서부터 모니터링 지점에서 일어나는 기상현상 등의 복합작용을 포함하고 있다. 따라서 관측값을 이용하여 선원항 및 수치모델의 자동보정(auto-calibration) 기능을 수행할 수 있는데 이러한 기법을 자료동화 기술(data assimilation technique)이라고 한다. 자료동화 기술은 기상예측을 비롯하여 해양환경의 예측, 대기오염 물질의 거동 해석 및 수문자료의 해석 등에 널리 쓰이고 있다[4-5].

자료동화 기술은 관측벡터를 이용하여 시스템 방정식을 설정한 후 관측값과 예측값의 차를 이용하여 시스템 방정식을 쇄신하는 순환알고리즘인 칼만필터링(Kalman filtering) 방법을 비롯하여 [6-7], 단순히 관측값과 예측값의 오차를 최소화하도록 모델의 입력값을 수정을 유도하는 최소자승법(least squares method)[8], 어느 시간의 관측자료가 전후 시간의 관측치에 영향을 주고 받는다고 가정하는 것으로 기상자료 및 대기환경의 예측에 이용되고 있는 4-DVAR 방법(4 dimensional variational method)[9] 등이 있다.

원자력시설 주변에서 관측된 방사성물질의 측정농도를 이용한 선원항의 예측은 미지의(unknown)의 참값(true value)을 찾아가는 과정으로, 모델에 의해 예측된 값이 실험에 의해 관측된 값을 반영하도록 선원항을 탐색해 가는 것을 말한다. 본 연구에서는 영광원자력발전소 부지에서 실시한 확산실험 자료와 가우시안 모델로 예측된 추적자의 농도자료를 사용하여 최소자승법을 이용한 추정된 선원항과 확산실험시 방출된 선원항을 비교하였다.

## 연구방법

본 연구에 사용된 자료는 영광원자력 발전소 부지에서 실시된 SF<sub>6</sub>의 확산실험자료를 이용하였으며, 관측지점의 추적자 농도를 예측하기 위해 가우시안 플룸 모델을 이용하였고, 모델의 예측값과 관측값간의 차가 최소가 되도록 하는 최소자승법을 이용하여 선원항을 추정하였다.

### 추적자 확산실험

영광 원자력 발전소는 북위 35°24', 동경 126°25'에 위치하며 지리상으로 우리나라 서해에 위치하고 있다. 부지내 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 방출점으로 하여, 반경 3km(A-line)와 8km(B-line)선상에 각각 51개와 40개의 포집점을 선정하였다. 영광원전은 해안가에 위치하고 있어 일반적으로 바람의 방향은 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.

원전부지에서의 확산실험일정은 실험 1주일 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 시작시간을 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. 실험시점에서의 풍속을 고려하여 115.2kg/hr의 양을 평균 방출률로 하여 포집시

간 30분 전부터 방출을 시작하여 90분 동안 지속적으로 방출하였다. 방출물은 추적자 방출구에 연결된 니들밸브와 유량계로 조절하였으며 방출전 후에 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 종이 박스에 넣어 분석장소로 운반하였다. 포집된 가스는 가스크로마토그래피의 ECD를 이용하여 분석하였다. 확산실험 당일의 기상은 우리나라의 중부에 고기압이 위치하여 매우 화창한 날씨였다. 실험기간중 기상관측을 위하여 방출점에 10m의 간격이 풍향·풍속계를 설치하였고, 고공기상 관측을 위하여 SODAR(SONIC DETECTION AND RANGING)을 이용하여 고도 1.0km까지 풍향, 풍속, 난류 성분, 온도 등을 측정하였다[10].

**가우시안 플룸 모형**

대기중에서 일어나는 오염물질의 거동 특성을 파악하는데, 가장 널리 사용되고 있는 모형이 가우시안 모형이다. 이는 대기확산을 통계학적인 정규분포로 가정하여 수용자 측의 농도를 예측하는 방법이다[11]. 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 시간동안 동일한 양이 일정하게 배출된 것에 근접하므로 가우시안 모형을 적용하였다. 추적자의 방출지점에서 풍하방향을  $x$ 라 하고, 풍하방향에 수평의 직각성분을  $y$ , 연직방향으로 수직인 성분을  $z$ 라고 할 때, 계산된 농도  $C$ 는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z U} \text{EXP}\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[ \text{EXP}\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \text{EXP}\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (1)$$

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 이용

하여 구하게 된다. 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.

**최소자승 추정법[12-13]**

최소자승 추정법은 최소분산추정법의 일종으로 통계적인 가정에 의존하지 않는 방법이기 때문에 다른 자료동화 기법에 비해 그 적용이 비교적 용이하다. 관측된 자료들과 모형이 계산한 계산값의 차를 최소화하도록 모형의 입력치를 수정하는 것으로 시스템 방정식은 식 2이나 식 3의 형태로 표시할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & \dots & h_{1n} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & \dots & h_{2n} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & \dots & h_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{l1} & h_{l2} & h_{l3} & \dots & h_{ln} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Hx = z \quad (3)$$

여기서  $H$ 는 관측연산 행렬,  $x$ 는 상태벡터를 의미한다. 위와 같은 시스템 방정식에서 상태벡터  $x$ 의 추정치를  $\hat{x}$ 라고 하면 관측오차의 추정치는  $H\hat{x} - z$ 이다. 이러한 관측오차를 Euclidean vector norm의 형태인  $|H\hat{x} - z|$ 와 같이 나타낼 수 있다. 따라서 오차의 제곱항은 식 4와 같이 표현 가능하다.

$$\epsilon^2(\hat{x}) = |H\hat{x} - z|^2 \quad (4)$$

$$= \sum_{i=1}^m \left[ \sum_{j=1}^n h_{ij} \hat{x}_j - z_i \right]^2 \quad (5)$$

여기서 상태벡터의 추정벡터인  $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3, \dots, \hat{x}_n$ 은 미분가능 형태이다. 오차의 제곱항을 상태벡터항으로 미분한 값이 0을 만족하는 방정식의 해를 구하면 오차를 최소로 하는 상태벡터의 추정치를 얻을 수 있다.

$$0 = \frac{\partial \epsilon^2}{\partial \hat{x}_k} \quad (6)$$

$$= 2 \sum_{i=1}^m h_{ik} \left[ \sum_{j=1}^n h_{ij} \hat{x}_j - z_i \right] \quad (7)$$

위의 식 7에서  $k = 1, 2, 3, \dots, n$ 일 때 식 7의 후반부는 식 8과 같이 나타낼 수 있으며 이를 이용하여 식 6을 수정하면 식 9 및 식 10과 같다.

$$\sum_{j=1}^n h_{ij} \hat{x}_j - z_i = \{H\hat{x} - z\}_i \quad (8)$$

$$0 = 2H^T[H\hat{x} - z] \quad (9)$$

$$= 2H^T H\hat{x} - 2H^T z \quad (10)$$

여기서,  $H^T$ 는  $H$ 의 전치행렬을 나타내며 식 9는  $H^T H\hat{x} = H^T z$ 와 같다. 추정상태벡터  $\hat{x}$ 의 해는 그래머 행렬(Gramian matrix)을 이용하여 식 11과 같이 표현하여 구할 수 있다.

$$\hat{x} = (H^T H)^{-1} H^T z \quad (11)$$

### 연구결과

#### 가우시안 모형을 이용한 대기확산의 평가

영광원자력시설에서의 확산실험은 1996년 5월 29일에 시작되었으며, 15:00에 방출을 시작하여 30분 후인 15:30부터 10분 간격으로 정해진 포집점에서 포집을 시작하였다. 방출을 시작한지 90분 후인 14:30에 포집을 종료하였으며 방출량은 115.2 kg/hr였고 총방출량은 172.8 kg이었다. 확산실험당시 평균풍속은 1.684 m/s였으며, 이에 따른 Pasquill-Gifford방법에 의한 대기안정도는 B등급이었다. 따라서 확산인자  $\sigma_y$  및  $\sigma_z$ 는 대기안정도 B를 가정한 식에 의해 계산되도록 하였다 [14]. Fig. 1은 방출점으로부터 x방향으로 20km까지 0.01km간격으로 구분하고 y방향은 풍하방향을 기준으로 상하 5,000m를 10m 간격으로 구분하여 지표의 대기중 농도를 계산한 값을 그래프로 제시한 것이다. 풍하방향으로 400m 근방에서 최대농도 나타난 후 급격하게 농도가 감소하고 있음을 알 수 있다.

관측값들은 샘플링 지점에서 포집한 시료를 실험실에서 분석하는 동안 샘플링 오차 및 실험오차 등 상당한 오차를 포함하고 있다. 이러한 오차의 의해 발생할 수 있는 선원항 과대추정이나 과소추정을 최소화하기 위해 관측된 데이터 중 반경 3km 근방의 A-line은 포집된 샘플의 분석시 결측이 한번도 발생하지 않고 관측지점의 자료가

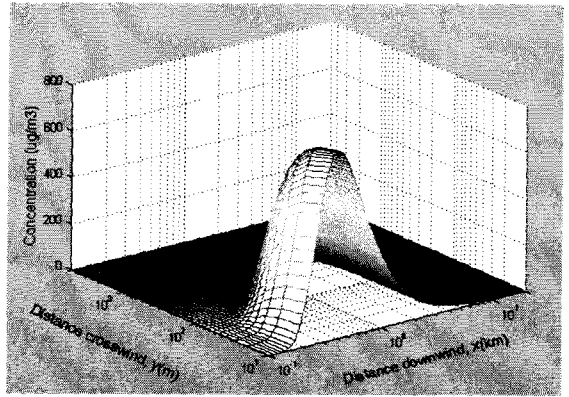


Fig. 1. Concentration distribution according to the distance.

0을 포함하고 있지 않은 지점을 선택하였다. 추적자 확산실험을 실시한 90분 중 10분 간격으로 관측한 풍속의 평균은 1.684 m/sec를 기록하였으며 이는 추적자인 SF<sub>6</sub>를 방출한 후 30분이면 반경 3km까지 도달할 수 있는 속도이므로 포집된 6개의 샘플 중 결측이 한번도 발생하지 않은 지점의 시료를 평균한 농도를 해당격자의 농도값으로 규정하고 가우시안 모형의 계산결과와 비교를 시도하였다. 한편, 반경 8km의 B-line의 경우는 도달시간을 고려하여 추적자 방출 후 80분 후와 90분에 관측한 자료 중 결측이 발생하지 않은 자료의 평균을 정상상태에서 그 지점의 농도값으로 가정하고, 가우시안 모형이 계산한 결과와 비교하였다. 이러한 기준에 의해 선택된 지점은 표 2와 같다.

격자형 가우시안 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 [15]. 각 통계적인 인자의 수식은 아래와 같다.

$$AI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - a + |O_i - a|^2)} \quad (12)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - O)(P_i - P)}{\sigma_O \sigma_P} \quad (13)$$

$$RMSE = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \right)^{1/2} \quad (14)$$

Fig. 2는 확산실험을 통하여 측정된 농도와 가우시안 모형을 통하여 계산한 결과를 비교한 것으로 방출점에서 3 km근방에 위치한 지점이 방출점에서 상대적으로 거리가 먼 8 km 근방보다 양호한 예측력을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서, 가우시안 플룸모델에 의한 예측의 정확도는 방출점에서 가까운 A-line이 우세한 것으로 판단된다(Table 1). Table 1에서 RMSE가 B-line이 작은 값으로 나타나는 것은 B-line의 평균이 A-line에 비해 현저하게 작기 때문이다. 일반적으로 가우시안 모형은 방출점에서 10 km이내의 단일 방출원에 적용하기 용이한 것으로 알려져 있으며 방출점에서 멀어질수록 예측력은 감소한다.

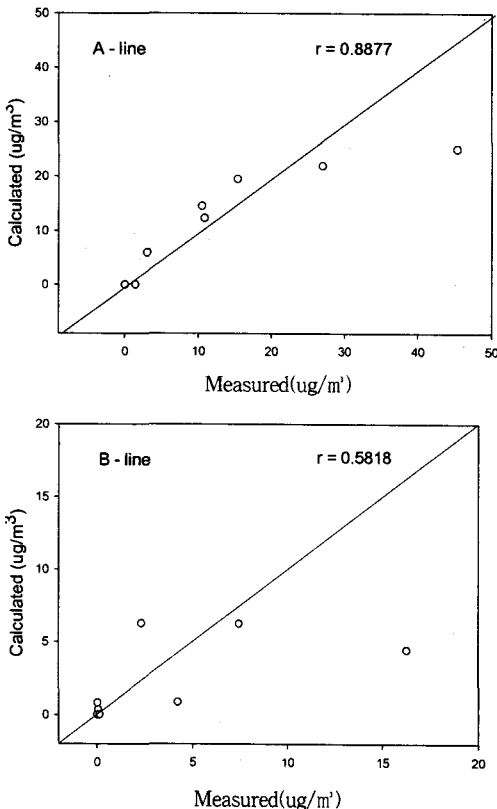


Fig. 2. Comparison of the calculated concentrations and the measured ones.

최소자승법에 의한 선원항 추정

가우시안 모형으로 계산한 추적자의 농도값과 실제 샘플링한 시료를 분석한 결과값과의 비교를 통하여 이들간의 오차를 최소로 하는 선원항  $x$ 를 계산하도록 Fig. 3과 같이 반복계산을 실시하였다. 본 연구에서는 추적자를 일정시간 동안 동일한 양을 연속적으로 방출하였으므로  $x$ 행렬은 시간에 관계없이 동일한 값으로 가우시안 모형으로 입력된다. 열벡터(column vector)인  $z$ 와  $y$ 의 열벡터는 Table 2의 A와 B에 해당되는 행렬이다.

화학물질의 누출이나 방사성 물질의 사고시, 대기확산 모형의 입력인자인 초기 선원항은 정확하게 알려지지 않는 경우가 많으므로 본 연구에서는 초기 선원항을 사고가 발생하지 않았다는 전제하에 0으로 가정하고 오차의 역전파를 통하여 선원항인 상태벡터와 관측행렬이 조정되도록 반복 계산하였다.

시료의 분석결과와 단위가  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이므로 모형의 입력인자인 선원항이  $\mu\text{g}/\text{sec}$ 의 단위를 가지도록 하였다. 따라서, 실제 방출물인 115.2 kg/hr은 32,000,000  $\mu\text{g}/\text{sec}$ 에 해당된다. 초기 선원항을 0으로 가정했을 때의 각 관측지점에서의 오차의 제곱합은 3599.61이었다.

표 2의 A 및 B를 이용하여 최소자승법에 의해 추정된 선원항은 39,783,163  $\mu\text{g}/\text{sec}$ 이었으며 이때의 오차의 제곱합은 535.23으로 나타났다. 이것은 실제 방출된 추적자의 1.24배에 해당하는 것으로

Table 1. Coefficients related to the forecasting ability at the A-line and B-line.

	A-line	B-line
AI	0.8839	0.6223
r	0.8877	0.5818
RMSE	7.7793	4.5876

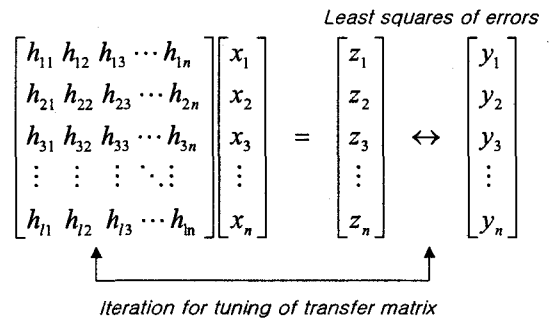


Fig. 3. Schematic diagram of least squares method.

Table 2. The Calculated and the measured concentrations for the selected coordinates to estimate source term.

x(m)	y(m)	predicted; A( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	measured; B( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
3,732	314	21.9209	26.9764
3,669	410	19.4775	15.3130
3,510	570	14.4814	10.4902
3,402	634	12.2855	10.8210
3,831	91	25.0369	45.3440
2,680	-1,899	0.0001	1.4500
2,032	-2,432	5.2720E-14	0.0469
3,243	826	5.9845	3.0361
7,620	-295	6.2443	7.4361
7,528	-834	4.4425	16.2586
6,807	-1,779	0.8644	4.2117
6,429	-2,029	0.3620	0.0693
5,469	-3,100	0.0006	0.0038
7,795	84	6.2571	2.3331
7,394	1,866	0.8162	0.0284
6,373	5,082	1.0579E-08	0.1493

최소자승법의 의한 선원항 추정이 상당히 양호한 결과를 나타냄을 증명하여 준다.

하면 시간에 따른 방사성물질의 누출량을 추적할 수 있을 것으로 사료된다.

## 요약 및 결론

본 연구는 영광원자력 시설 부지에서 실시된 추적자 확산실험 자료를 이용하여 선원항을 최소자승법을 이용하여 추정하였으며, 이 선원항 추정 방법은 원자력시설의 비상시 방사선원 추정에도 사용될 수 있을 것이다. 추적자 확산 실험 자료 중 결측이 발생하지 않은 양호한 자료를 선택하여 실험오차에 의한 오차의 전이를 최소화하였으며, 초기 조건은 선원항을 0으로 설정하여 정상운영 상황을 가정하였다. 관측지점의 추적자 농도를 이용하여 선원항이 수정되도록 프로그래밍하였다. 오차의 역전과를 통하여 계산된 선원항은 실제 확산실험에 사용된 값보다 24 %정도 큰 값으로 계산되었다. 이는 선원항을 비교적 근사하게 추정하고 있는 것으로 판단되었다.

한편, 본 연구에서는 추적자 확산실험이 시간에 따른 변화가 없는 정상상태를 가정하고 진행되었으나 실제 원자력시설에서 사고 발생시 방사성물질의 누출은 시간에 따라 누출량이 일정하지 않은 비정상상태인 경우가 대부분이다. 따라서 동적인 비정상상태를 모사할 수 있는 대기확산모형과 최소자승법에 의한 선원항의 추정방식을 결합

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관하는 원자력중장기 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Y. Zhou, J.I. Levy, J.K. Hammitt and J.S. Evans, "Estimating population exposure to power plant emissions using CALPUFF: a case study in Beijing, china", Atmospheric Environment, 37(6), 815-826(2003)
2. S. Galmarini, R. Bianconi, R. Bellasio and G. Graziani, "Forecasting the consequences of accidental releases of radionuclides in the atmosphere from ensemble dispersion modelling", Journal of Environmental Radioactivity, 57(3), 203-219(2001)
3. V. P. Gavrilov, N. V. Klepikova, N. I. Troyanova and H. C. Rodean, "Stationary model for resuspension of radionuclides and assessments of  $^{137}\text{Cs}$  concentration in the near-surface layer for the contaminated areas in the Bryansk Region of Russia and

- Belarus, Atmospheric Environment", 29(19), 2633-2650(1995)
4. M.J. Bell, R.M. Forbes and A. Hines, "Assessment of the FOAM global data assimilation system for real-time operational ocean forecasting", Journal of Marine Systems, 25(1), 1-22(2000)
  5. W.F. Dabberdt and E. Miller, "Uncertainty, ensembles and air quality dispersion modeling: applications and challenges", Atmospheric Environment, 34(27), 4667-4673(2000)
  6. G.E. Serafy, R.H. Eskes and H. Kelder, "Assimilation of 3D ozone field in global chemistry-transport models using Kalman filter", Advances in Space Research, 30(11), 2473-2478(2002)
  7. X.F. Zhang and A.W. Heemink, "Data assimilation in transport models", Applied Mathematical Modelling, 21(1), 2-14(1997)
  8. L.L Edwards, R.P. Freis, L.G. Peters and P.H. Gudiksen, "The use of nonlinear regression analysis for integrating pollutant concentration measurements with atmospheric dispersion modeling for source term estimation" Nuclear technology, 101, 168-180(1993)
  9. H. Elbern, H. Schmidt, O. Talagrand and A. Ebel, "4D-variational data assimilation with an adjoint air quality model for emission analysis", Environmental Modelling & Software, 15(6-7), 539-548(2000)
  10. 한국원자력연구소, 실시간 방사선 피폭해석시스템 구성연구, 219-234(1996)
  11. W.W. Nazaroff, L. Alvarez-Cohen, Environmental engineering science, John Wiley & Sons, Inc. 454-469(2001)
  12. J. Neter, M.H. Kutner, C.J. Nachtsheim and W. Wasserman, Applied linear statistical models, Times Mirror Higher Education group, Inc., 176-216(1996)
  13. M.S. Grewal and A.P. Andrews, Kalman filtering theory and practice using matlab, John Wiley & Sons, Inc. 1-24(2001)
  14. G.A Davidson, "A modified power-law representation of the Pasquill-Gifford dispersion coefficients", Journal of the Air & Waste Management Association, 40, 1146-1147(1990)
  15. T. Elbir, "Comparison of model predictions with the data of an urban air quality monitoring network in Izmir, Turkey", Atmospheric environment 37, 2149-2157 (2003)