

A case study for the dispersion parameter modification of the Gaussian plume model using linear programming

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

Nuclear Environmental Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute

Linear Programming을 이용한 가우시안 모형의 확산인자 수정에 관한 사례연구

정효준 · 김은한 · 서경석 · 황원태 · 한문희

한국원자력연구소 원자력환경연구부

(2003년 8월 1일 접수, 2003년 11월 19일 채택)

Abstract - We developed a grid-based Gaussian plume model to evaluate tracer release data measured at Young Gwang nuclear site in 1996. Downwind distance was divided into every 10m from 0.1km to 20km, and crosswind distance was divided into every 10m centering released point from -5km to 5km. We determined dispersion factors, σ_y and σ_z using Pasquill-Gifford method computed by atmospheric stability. Forecasting ability of the grid-based Gaussian plume model was better at the 3km away from the source than 8km. We confirmed that dispersion band must be modified if receptor is far away from the source, otherwise P-G method is not appropriate to compute diffusion distance and diffusion strength in case of growing distance. So, we developed an empirical equation using linear programming. An objective function was designed to minimize sum of the absolute value between observed and computed values. As a result of application of the modified dispersion equation, prediction ability was improved rather than P-G method.

Key words : Grid-based Gaussian model, Pasquill-Gifford method, Forecasting ability, Dispersion factor, Linear programming.

요약 - 본 연구는 격자형 가우시안 플룸모형을 Matlab언어를 이용하여 구축한 후, 영광원자력시설의 부지에서 시행된 추적자 확산실험자료를 이용하여 예측력을 평가하였다. 풍하방향으로는 20km까지 10m간격으로 격자를 구분하였으며, 풍하방향에 수직인 지표방향은 방출점을 중심으로 상하 5km를 각각 10m 간격으로 구분하여 1,990×1,000×1의 격자망으로 구성하였다. 실험당시의 대기안정도는 P-G방법에 의해 B등급으로 나타났으며 이를 이용하여 각 격자의 농도예측을 수행하였다. 반경 3km의 A-line의 경우가 반경 8km근방의 B-line에 비해 격자형 가우시안 모형의 예측력이 뛰어난 것으로 나타났으며, 방출점에서 거리가 멀어질수록 P-G방법에 의한 확산폭의 산정은 모형의 예측력을 떨어뜨리는 것으로 나타났다. 모형의 예측력을 향상시키기 위하여 P-G방법에 의한 확산인자 σ_y 및 σ_z 를 선형계획법을 이용하여 수정하였다. 수정된 확산인자를 적용한 결과 3km와 8km 모두 모형의 예측력이 향상됨을 확인할 수 있었다. 향후 추적자 확산실험 데이터의 축적을 통해 기상조건에 따른 확산인자에 대한 경험식을 개발한다면 격자형 가우시안 모델이 원자력시설에서의 대기질 환경영향평가에 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 기대된다.

중심어 : 격자형 가우시안 모델, Pasquill-Gifford 방법, 선형계획법, 확산인자.

서 론

원자력시설에서 발생할 수 있는 사고를 대비한 방사능 물질의 대기 중 확산에 관한 수치해석 기법은, 사고시 주민의 대피와 관련된 의사결정자의 의사결정을 보조하는 양호한 도구로 사용되어 왔다. 따라서 이러한 확산모형의 개발은 정확한 예측정보를 얼마나 빠른 시간 안에 정책결정에 반영할 수 있느냐 하는 것이 최대의 관심사이다.

방사능물질의 대기 중 거동양상은 사고발생지역의 국지적인 기상조건에 크게 영향을 받는다. 따라서 원자력시설에서의 기상관측은 사고시 피해지역의 예측 및 대책 수립에 중요한 영향인자이다. 이러한 기상조건에 따른 오염물질의 확산을 모델링 하는데 가장 널리 쓰이는 방법이 가우시안 모델이다. 가우시안 모델은 오염물질의 확산정도가 정규분포모양을 따른다는 가정하에 수평방향 혹은 수직방향의 확산인자를 평가하여 모형에 입력함으로써 수용자측에서 오염물질의 농도를 계산할 수 있도록 한다. 가우시안 모형은 적용지역의 토지이용형태가 균일한 평야지역에만 적용할 수 있다는 한계로 인하여 소규모 실험적 모사에만 이용되다가 최근 들어서는 비균일지역에 대한 예측에 있어서 수평 혹은 수직확산인자의 수정을 통해 모형의 정밀도를 높여 그 적용범위가 상당히 크다. 또한 많은 다이나믹 모형들이 기본적으로 가우시안 모형에 기반하고 있기 때문에 특정지역의 확산특성을 이해하는데는 가우시안 모형을 이용한 확산의 평가가 모형의 개발에 기초작업이 되는 것이다.

Rege(1996)등은 대기중에서 도시지역에서 발생하는 대표적인 오염물질인 H_2S 및 NH_3 의 농도를 가우시안 모형으로 평가한 후, 풍하방향 및 수직방향의 확산인자를 수정한 식을 제시함으로써 가우시안 모형의 정확도를 높여 도시지역의 오염물질 분포양상의 예측을 수행한바 있으며[1], Namdeo(2002)등은 Eulerian 이송-확산식을 이용하여 이동하는 오염물질인 선오염원에 대한 모델링을 격자기반에서 수행하고, 대상지역의 토지이용 형태를 모형식에 반영함으로써 선오염원에 대한 대기오염관리 프로그램을 제시하였다[2]. 또한 Caputo(2003)등은 대기확산모형의 평가에서 가우시안 모형과 Lagrangian 모형을 비교하면서 격자형 플룸모형의 확산인자를 수정함으로써 농도에 측의 정확도를 향상시킬 수 있음을 보였다[3]. 한편, Rho(1998)등은 중수로에서 발생하는 삼중수소의 농도를 가우시안 모형을 이용하여 추적하는

프로그램을 개발함으로써 원자력시설에서의 대기 환경영향 평가에 이용하였다[4]. 그밖에도 수정된 가우시안 모델을 이용한 해안에서의 방사능 핵종의 확산 및 대기중 꽃가루의 확산현상에 대한 연구들이 진행되고 있다[5, 6]. 이렇듯, 가우시안 모형이 다른 모형에 비해 예측의 안정성(robustness)이 있기 때문에 많은 대기질 평가 프로그램들이 가우시안 모형에 기반하고 있다[7].

따라서 본 연구는 영광 원자력부지에서 실시한 추적자 확산실험 자료를 이용하여 격자형 가우시안 플룸모형을 Matlab언어로 프로그래밍한 후 모형의 정밀도 향상을 위해 선형계회법을 적용하여 Pasquill-Gifford(이하 P-G)의 확산식을 영광지역 국지기상 및 지형조건을 반영할 수 있도록 수정하였다.

연구방법

포집점의 선정

영광 원자력 발전소는 북위 $35^{\circ}24'$, 동경 $126^{\circ}25'$ 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 근방(A-line)과 8km 근방(B-line)에 각각 51개와 40개의 포집점을 선정하였다. 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[8].

확산실험

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 찾으려 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 SF₆ 가스를 일정한 양으로 약 90분 동안 지속적으로 방출하였다. 실험시점에서의 풍속을 고려하여 115.2kg/hr의 양을 평균 방출율로 하여 포집시간 30분 전부터 방출을 시작하여 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 종이 박스에 넣어 분석장소로 운반하였다. 포집된 가스는 가스크로마토그래피의 ECD를 이용하여 분석하였다.

기상관측

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.

가우시안 모형

대기중에서 일어나는 오염물질의 거동 특성을 파악하는데, 가장 널리 사용되고 있는 모형이 가우시안 모형이다. 이는 대기확산을 통계학적인 가우시안 분포로 가정하여 수용자측의 농도를 예측하는 방법이다[9]. 가우시안 모형이 지표면의 특성 및 비정상상태의 배출원에 대한 농도예측에는 한계가 있지만, 3차원 다이나믹 모형의 개발 및 적용에 있어서 기본이 된다는 점에서 많은 비교 연구에 이용되고 있다. 가우시안 모형은 시간에 따른 배출원의 변화 유무에 따라 가우시안 플룸

모형과 가우시안 퍼프모형으로 구분하기도 하지만 기본적인 가정은 유사하다. 본 연구에서는 추적자의 방출이 정해진 시간동안 동일한 양이 일정하게 배출된 것이므로 가우시안 플룸 모형을 적용하여 확산실험자료의 평가에 이용하였다.

추적자의 방출지점에서 풍하방향을 x 라 하고, 풍하방향에 수평의 직각성분을 y , 연직방향으로 수직인 성분을 z 라고 할 때, 계산된 농도 C 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

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

여기서 Q 는 추적자의 방출농도, U 는 풍속, H 는 방출점의 높이, σ_y 및 σ_z 는 풍속, 운량 및 주야의 상황이 고려된 확산정도를 나타내는 정규분포의 표준편차를 의미한다. σ_y 및 σ_z 는 일반적으로 Pasquill 및 Gifford가 개발한 경험적인 식을 이용하여 구하게 된다. 따라서 가우시안 모형을 Pasquill-Gifford모형이라고 하기도 한다. 가우시안 모델은 오염물질의 배출량과 오염물질의 대기 중 거동에 영향을 미치는 기상조건이 정상상태(steady state)라 전제하고 있다. 본 연구의 확산실험동안 관측된 풍속 및 P-G의 확산은 관측기 관동안의 기상조건을 평균하여 사용함으로써 정상상태를 가정하였다.

최적화 함수의 설계

가우시안 모형은 적용이 편리하기에 많이 이용하지만 지형이 복잡한 도시지형이나 산이 많은 지역을 모델링하기에는 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 지형효과를 반영한 확산인자를 산정하기 위해 가우시안 모형에서 확산폭을 결정하는 P-G식을 선형계획법을 이용하여 수정하였다. 선형계획법은 제한된 자원 같은 구속조건을 갖는 경우 이윤을 최대화하거나 비용을 최소화하여 원하는 목적을 만족시키는 최적화 문제를 해결하는데 주로 이용된다. 본 연구에서는 모형의 계산치와 실측치의 값의 차이가 최소가 되는 최적의 확산인자를 선정하는 것을 목적함수로 설정하였다. 오차의 최소화에 근거한 최적화 함수를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } Z \\ & \text{subject to } f(x) < a \\ & \text{bounded to } c < x_i < d \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 Z 는 모형의 계산치와 실측치의 차이들의 합이며 $f_1(x) < a$ 는 확산인자에 대한 조건을, $c < x_1 < d$ 는 확산인자의 변경가능 범위에 대한 제약조건으로 파라미터의 변경을 의미한다. 위의 목적함수의 최적해를 구하면 가우시안 모형의 확산인자인 σ_y 및 σ_z 에 영향을 미치는 값들을 설정할 수 있다. 위와 같은 최적화 함수의 가능해는 선형계획법의 단체법(simplex method)을 통해 산정할 수 있다. 이러한 최적해를 구하는 컴퓨터 프로그래밍 언어나 툴들이 많이 개발되어 있는데, 그 중 MS-Excel, MATLAB, MATHCARD, IMSL등이 많이 이용되고 있다[9, 10]. 본 연구에서는 해를 찾는 속도가 다소 떨어지는 단점이 있기는 하지만 데이터의 흐름을 일목요연하게 파악하기 용이한 MS-Excel을 사용하여 해를 구하였다.

연구결과

격자형 가우시안 모형의 구축

가우시안 모형을 이용하여 포집점에서의 농도를 계산하기 위하여 방출점을 중심으로 하여 풍하방향으로 0.1km부터 20km구간을 10m간격으로 구분하고, 수직성분인 y 는 상하측 5km씩 총 10km의 구간을 10m로 구분하여 1,990×1,000×1의 격자(grid)를 구성하여 지상에서의 추적자 농도가 10m×10m단위로 계산되도록 하였다. 지표면에서 높이 방향인 z 는 샘플의 포집점이 지표면인 점을 감안하여 격자를 구분하지 않고 하나의 볼륨으로 간주하였다. 영광원자력시설에서의 확산실험은 1996년 5월 29일에 시작되었으며, 15:00에 방출을 시작하여 30분 후인 15:30부터 10분 간격으로 정

해진 포집점에서 포집을 시작하였다. 방출을 시작한지 90분 후인 14:30에 포집을 종료하였으며 방출량은 115.2kg/hr였고 총방출량은 172.8kg이었다. 확산실험당시 평균풍속은 1.684m/s였으며, 이에 따른 P-G방법에 의한 대기안정도는 B등급이었다. 따라서 확산인자 σ_y 및 σ_z 는 대기안정도를 B로 가정한 식3, 4와 Table 1에 의해 계산되도록 하였다[11, 12]. 모든 계산은 MATLAB 6.5를 이용하여 M파일로 작성하였으며, 1,990×1,000×1격자(grid)의 농도값이 한번의 계산을 통하여 이루어지도록 하였다.

$$\sigma_y = a x^{b+c \ln x} \tag{3}$$

$$\sigma_z = d x^{e+f \ln x} \tag{4}$$

Fig. 1은 계산된 각 격자의 농도값을 3차원으로 도시한 것으로 풍하방향으로 400m 근방에서 최대농도 나타난 후 급격하게 농도가 감소하고 있음을 알 수 있다.

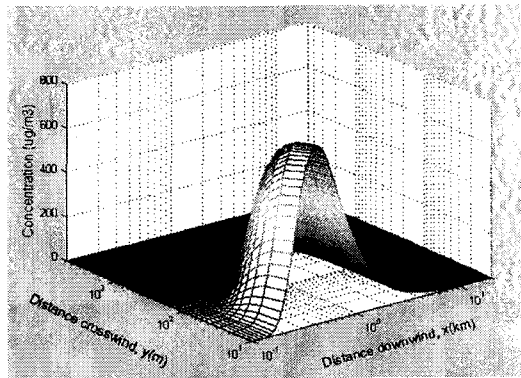


Fig. 1 Concentration distribution according to the distance

Table 1. Variables used in evaluating the horizontal dispersion parameter, σ_y , and vertical dispersion parameter, σ_z , for atmospheric Gaussian plume modeling

Stability class	Sigma y			Sigma z		
	a	b	c	d	e	f
B	154.7	0.8932	-0.006271	109.8	1.064	0.01163
B ¹	154.6987	0.6622	-0.003135	109.7996	1.015	0.00581
B ²				109.74407	0.59660	0.01739

B : Parameters for P-G equation

B¹ : Modified parameters for P-G equation(Sigma y applied at 0km≤x≤10km, Sigma z applied at 0km≤x≤3km)

B² : Modified parameters for P-G equation(Sigma z applied at 3km≤x≤10km)

추적자 확산실험은 많은 인력과 장비가 소요되는 작업이다. 그리고 측정값은 샘플링과정과 실험과정에서 발생할 수 있는 샘플링오차와 실험오차를 가지고 있어 모든 지점의 자료를 가지고 모형의 예측력을 평가하거나 P-G식을 수정할 경우 과도한 오차를 전이하는 결과를 가져올 수 있다. 추적자 확산실험을 실시한 90분 중 10간격으로 관측한 풍속의 평균은 1.684m/sec였다. 이는 추적자인 SF₆를 방출한 후 30분이면 반경 3km까지 도달할 수 있는 속도이므로 포집된 6개의 샘플 중 결측이 한번도 발생하지 않은 지점(Table 2의 좌표)의 시료를 평균한 농도를 해당격자의 농도값으로 규정하고 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 가정하였다. 또한 이들 지점의 자료를 이용하여 P-G식을 선형계획법을 이용하여 수정하였다.

선형계획법

가우시안 모형은 지표면의 성질이 균질한(homogeneous) 지역을 적용대상으로 하나 본 실험이 이루어진 영광원자력시설은 토지이용이 균질한 지역으로 보기에는 무리가 있다. 따라서 격

자형 가우시안 모형을 이용한 정확한 농도예측을 위해서는 확산폭을 결정하는 방법을 단순히 P-G 방법에 의존하기보다는 실측된 데이터를 이용한 지형특성을 반영된 식으로 변환하여 모형의 예측력을 살펴보았다.

확산인자를 수정하기 위한 최적화 함수는 관측값과 실측값의 차이의 합을 최소로 하는 목적함수를 설계하였다. 관측값과 계산값의 차이의 절대값을 취해 유클리디안 거리의 개념으로 표시한 것은 관측값과 계산값의 차이의 쌍의 합이 양의 값과 음의 값의 상쇄로 인해 실제로 차이가 크어도 불구하고 0에 근접하는 효과를 방지하기 위한 것이다.

풍하방향에 길이방향으로의 수직확산인자인 sigma y와 높이방향으로의 수직확산인자인 sigma z의 값이 비음(non-negative)조건을 만족시키도록 한 것은 어느 순간에도 대기중에서 추적자인 SF₆입자가 정지하지 않고 진행한다고 가정한 것이다. 한편, 가우시안 모형에서 확산의 정도 및 형태를 결정하는 sigma y 및 sigma z를 직접적으로 정의하는 P-G식의 파라미터인 a, b, c 및 d, e, f는 P-G식에서 대기안정도의 등급에 따라 제시하는 값의 범위에서 최대 50%를 초과하지 않는 범위에서 설정하였다. 이는 과도한 파라미터의 조정으로 인해 상위개념으로 설정된 대

Table 2. Dispersion range of the sigma y and sigma z for the P-G and modified P-G

	x좌표	y좌표	sigma y		sigma z	
			P-G	Modified	P-G	Modified
A-line	3,732	314	496.1639	368.0542	454.8918	422.6714
	3,669	410	488.8124	363.9783	446.4943	415.3163
	3,510	570	470.1808	353.5795	425.3751	396.7775
	3,402	634	457.4596	346.4205	411.0921	384.2049
	3,831	91	507.6818	374.4100	468.1210	434.2400
	2,680	-1,899	370.8972	296.2848	316.9905	300.5987
	2,032	-2,432	290.5083	247.0214	234.8401	226.2990
	3,243	826	438.6301	335.7321	390.1584	365.7256
B-line	7,620	-295	924.7424	2,026.9923	999.6141	396.0286
	7,528	-834	915.0457	1,898.9634	986.2135	392.8326
	6,807	-1,779	838.4323	1,131.5998	881.9561	367.3894
	6,429	-2,029	797.7992	859.1550	827.8587	353.7464
	5,469	-3,100	692.9904	423.3658	692.3373	318.0083
	7,795	84	943.1400	2,293.6017	1,025.1632	402.0783
	7,394	1,866	900.8911	1,726.2238	966.7339	388.1579
	6,373	5,082	791.7505	824.6371	819.8784	351.7060

기안정도의 개념을 파괴하지 않기 위함이다.

$$\text{Min. } Z = |C_1 - P_1| + |C_1 - P_2| + \dots + |C_n - P_n| \quad (5)$$

subject to

$$\text{sigma } y > 0$$

$$\text{sigma } z > 0$$

bounded to

$$0.5 \times P\text{-G value} < a, b, c < 1.5 \times P\text{-G value}$$

$$0.5 \times P\text{-G value} < d, e, f < 1.5 \times P\text{-G value}$$

위와 같은 목적함수의 최적화를 위한 해를 구하는 방법은 카마카의 투영축적법(Karmarkar's projective scaling algorithm), 심플렉스법(simplex method) 및 도표해법(graphical method) 등이 사용되고 있다. 도표해법은 2차원선상에 작성된 도표를 통하여 분석하는 것으로 의사결정변수의 수가 둘일 경우에만 사용가능하며 변수의 수가 셋 이상일 때에는 평면좌표에 제약조건과 풀이결과를 나타내기 힘들다[13, 14]. 따라서 변수와 제약조건의 수가 많을 때에는 일반적으로 컴퓨터를 이용한 심플렉스법이 사용되는데 본 연구에서도 심플렉스법을 이용하여 해를 구하였다(Table 1의 B¹, B²). 이를 이용한 각 지점별 sigma y 및 sigma z를 Table 2에 나타내었다.

계산치와 관측치의 적합정도를 판단하기 위하여 일치도 계수(agreement index), 상관계수(correlation coefficient) 및 평균제곱오차(root mean square error)등을 산정 하였다. 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 인자이다. 그러나 비교 데이터 쌍의 평균값이 서로 다른 경우 해석에 있어서 주의를 요한다[15]. 각 통계적인 인자의 수식은 아래와 같다.

$$AI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \quad (6)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - O)(P_i - P)}{\sigma_O \sigma_P} \quad (7)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right)^{1/2} \quad (8)$$

모형이 계산한 값과 추적자 확산실험을 통하여 얻어진 값을 비교해 보면 방출점에서 3km 근방에 위치한 지점이 방출점에서 상대적으로 거리가 먼 8km 근방보다 P-G방법, 선형계획법에 의해 수정된 P-G방법 모두 양호한 예측력을 나타내고 있음을 알 수 있다. 격자형 가우시안 플룸모델에 의한 예측의 정확도는 방출점에서 가까운 A-line이 우세한 것으로 판단된다.

수정된 확산인자를 적용한 경우 3km, 8km 모두 모형의 예측력이 증가하였으며 소스에서 가까운 3km 근방은 일치도 계수 및 상관계수가 거의 1에 근접함을 확인할 수 있었다(Table 3). 그러나 8km 근방의 값들은 수정된 확산인자를 적용한 경우 P-G방법보다는 일치도계수, 상관계수등이 증가하고 평균제곱오차는 감소하였으나, P-G방법 및 선형계획법에 의해 수정된 P-G방법 모두 방출점에서 거리가 증가함에 따라 예측력은 감소하고 있음을 확인할 수 있었다.

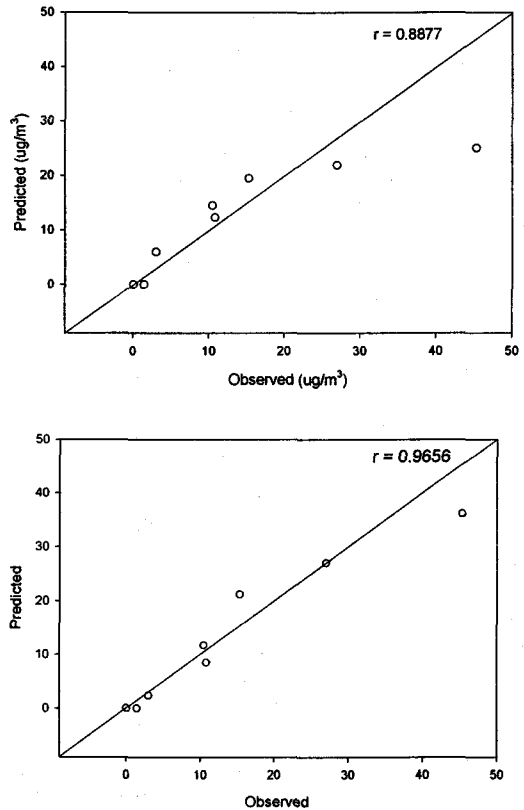


Fig. 2. Comparisons of observed and computed data using P-G equation at the A-line

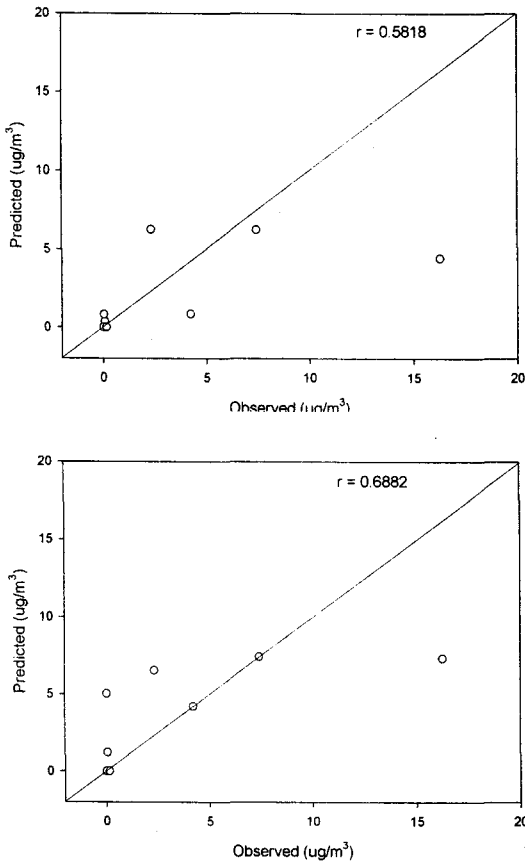


Fig. 3. Comparisons of observed and computed data using P-G equation at the B-line

Fig 4는 가우시안 모형의 확산인자를 결정하는 전통적인 방법인 P-G방법으로 계산된 풍하방향의 지표농도와 선형회계법을 이용하여 수정한 확산인자를 이용한 추적자의 농도를 나타내었다. 풍하방향의 농도변화를 직접 비교하기 위하여 y방향으로의 확산은 배제하고 표시하였다. 지표에서의 최고농도는 400m 근방에서 나타나고 있으며 P-G방법으로 계산된 농도는 $819\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 수정된 확산인자를 적용한 경우는 $684.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었다(Table 4). 이는 가우시안 모형이 장애물이 없는 평평한 지형을 가정한 것이나 수정된 확산인자에는 실제 지형적인 영향에 의한 확산특성의 국지적 변화가 반영된 것으로 판단된다.

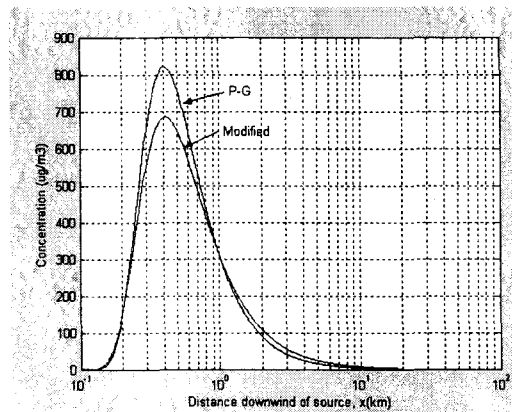


Fig. 4. Concentration of downwind according to the atmospheric stability

Table 3. Coefficients of the forecasting ability for the P-G and the modified P-G.

	A-line		B-line	
	P-G	Modified	P-G	Modified
AI	0.8839	0.9772	0.6223	0.7556
r	0.8877	0.9656	0.5818	0.6882
RMSE	7.7793	4.0281	4.5876	3.9278

Table 4. Statistical characteristics of the concentration for the P-G and modified P-G.

	Min.	Max.	Mean	Median	STD	Range
P-G	0.002027	819	39.56	3.769	119.5	819
Modified	0.01251	684.5	42.28	7.727	106.3	684.5

요약 및 결론

본 연구는 1996년 5월 행해진 영광원자력시설 부지에서의 추적자 확산 실험자료를 이용하여 격자형 가우시안 모형을 구축하고 이를 적용하여 모형의 예측력을 평가하였다. 격자형 가우시안 모형의 예측력을 증가하기 위해 P-G방법에 의한 확산인자 σ_y 및 σ_z 를 선형계획함수를 이용하여 수정한 후 예측력을 평가하여 격자형 가우시안 모형과의 예측력을 비교하였다. 격자는 풍하방향의 지표면에서 추적자의 농도를 계산하기 위하여 풍하방향(x)을 10m간격으로 방출점에서 0.1km부터 100km까지 격자로 나누었으며, 풍하방향과 수직인(y)방향은 10m간격으로 방출점을 중심으로 상측으로 5km 하측으로 5km까지 구분하였다. 자료는 영광 원자력부지의 기상탑에서 58m에서 추적자인 SF₆를 방출하여 반경 3km 지점과 8km 지점에서 포집기를 설치하여 포집한 후 추적자의 농도를 분석한 것이며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 격자형 가우시안 플룸 모형으로 계산된 농도와 실측한 농도의 비교에서 A-line인 반경 3km 지점에서는 일치도계수가 B-line에 비해 양호하게 나타났다. B-line의 경우는 반경 8km근방의 지점으로 소스에서 거리가 멀어질수록 격자형 가우시안 모형의 예측정확도는 떨어지는 것으로 나타났다. 따라서 가우시안 모형의 확산을 평가하는 대기안정도에 따른 확산폭을 결정하는 P-G방법은 소스에서 거리가 멀어질수록 P-G에 의한 확산인자 항을 수정할 필요가 있는 것으로 판단된다. 이를 수정하기 위하여 관측값과 실측값의 차이를 최소화하도록 하는 목적함수를 설정하고 이를 만족시키는 해를 구한 후, P-G식을 수정하여 가우시안 모형을 수행한 결과 예측의 정확도가 향상됨을 확인할 수 있었다. 그러나 본 연구에서 작성된 수정된 P-G식은 영광원자력 부지의 지형특성과 실험당시의 기상상태를 반영한 것으로 다른 지역에 사용하는 데는 한계가 있다. 따라서 각 원자력부지의 기상상태 및 추적자 확산실험 등의 결과를 축적하여 부지특성에 맞는 확산특성을 반영할 수 있는 경험식의 개발이 필요한 것으로 사료된다.

- 본 연구에서 격자형 가우시안 모형을 Matlab을 이용하여 M화일로 작성함으로써 풍하방향(x)이나 수직방향(y) 혹은 높이방향(z)으로 사용자가 원하

는 정밀도의 격자망을 구축할 수 있도록 함으로써, 타 지역에도 적용이 용이하여 방사능 사고 발생시 사고조건에 따른 신속한 농도계산이 가능하고, 수용자측의 방사능 물질의 농도 계산에 편리함을 증대시킬 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. M.A. Rege, R.W. Tock, "Estimation of point-source emissions of hydrogen sulfide and ammonia using a modified Pasquill-Gifford approach", *Atmospheric Environment* 30(18), 3181-3195(1996)
2. A. Namdeo, G. Mitchell, R. Dixon, "TEMMS: an integrated package for modelling and mapping urban traffic emissions and air quality", *Environmental Modelling & Software* 17(2), 177-188(2002)
3. M. Caputo, M. Gimenez, M. Schlamp, "Intercomparison of atmospheric dispersion models", *Atmospheric Environment* 37(18), 2435-2449(2003)
4. B.H. Rho, K.J. Lee, "Development and validation of atmospheric dispersion: computer program using tritium air concentrations in the environment around heavy water reactor power plants", *Annals of Nuclear Energy* 25(14), 1119-1132(1998)
5. R. Venkatesan, R. Mathiyarasu, K.M. Somayaji, "A study of atmospheric dispersion of radionuclides at a coastal site using a modified Gaussian model and a mesoscale sea breeze model", *Atmospheric Environment* 36(18), 2933-2942(2002)
6. H.P. Spijkerboer, J.E. Beniers, D. Jaspers, H.J. Schouten, J. Goudriaan, R. Rabbinge, W. Werf, "Ability of the Gaussian plume model to predict and describe spore dispersal over a potato crop", *Ecological Modelling* 155(1), 1-18(2002)
7. E. Canepa, C.F. Ratto, "Algorithms to simulate the transport of pollutant elements: a model validation exercise and sensitivity analysis", *Environmental Modelling & Software* 18(4), 365-372(2003)
8. 한국원자력연구소, 실시간 방사선 피폭해석시스

- 택 구성연구, 219-234(1996)
9. S.C. Chapra, R.P. Canale, Numerical Methods for Engineers: 3rd edition, McGraw-Hill Inc(1997)
 10. 강금식, Excel 2000 경영과학, 박영사(2000).
 11. W.W. Nazaroff, L. Alvarez-Cohen, Environmental engineering science, John Willey & Sons, Inc. 454-469(2001)
 12. 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)
 13. S.C. Albright, W.L. Winston, C. Zappe, Data analysis & decision making with Microsoft Excel, Duxbusy press(2002)
 14. 박광태, 김민철, Excel 활용 의사결정, 박영사(1999)
 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)