

# 녹지의 대기정화효과 분석을 위한 해석적 대기확산모델의 유도

## Analytic Model for Concentration Deficit Profile Caused by a Large Vegetated Area

김 석 철

(주) 라이다텍 연구소

(1999년 10월 8일 접수, 2000년 8월 11일 채택)

Seogcheol Kim

LidarTech Research Center

(Received 8 October 2000; accepted 11 August 2000)

### Abstract

A simple analytic model is proposed here to analyze the concentration deficit field caused by a large area of vegetated area. With non-dimensional deposition velocity chosen as small parameter, the regular perturbation method is exploited to derive the mass balance equation and the dynamic equations for the concentration deficit field. Analytic solutions to those equations are obtained in a closed form for several cases of interest, assuming that the concentration field is stationary and the plume can be nicely approximated as Gaussian for a point source. The results suggest that quite a negligible fraction (less than 1%) of the gaseous air pollutants emitted into the air is removed by the vegetated area of which width is 4 km in wind-wise direction, the typical dimension of the Restricted Development Zones around the metropolitan regions in South Korea.

**Key words** : deposition velocity, perturbation method, Gaussian plume model

### 1. 서 론

도시주변의 녹지의 대기정화기능이 중요하다는 인식이 일반화되어 있는 데 반하여, 여기에 대한 정량적인 분석이 구체적으로 이루어진 바는 거의 없는 듯하다. 특히, 전체면적의 87%가 녹지(임야, 전답 및 과수원)로 이루어진 개발제한구역(건설교통부, 1998)이 흡수하는 오염물질의 양은 궁금할 뿐 아니라 최근 논의되고 있는 개발제한구역해제와 관련하여 민감한 사항이기도 하다. 본 연구에서는 녹지의 대기정화기능에 대한 정량적인 분석을 목적으로 오

염물질의 대기 중 확산이론에 근거한 해석적인 모델을 모색해 보았다.

### 2. 모 델

수목에 의한 대기정화기능에 관해서는 많은 연구가 이루어졌다(戶塚 續과 三宅 博, 1991; 오정수 등, 1991; Hill, 1971). 식물의 기공을 통해 흡수되는 가스상 오염물질의 양은 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$F = K C \quad (1)$$

여기서,  $F$ 는 수목에 의해 흡수되는 가스의 질량속 (mass flux)이고,  $C$ 는 대기 중 가스농도이다.  $K$ 는 건성침착속도(dry deposition velocity)로 정의된 비례상수이다. 침착속도는 식물의 종류와 잎 면적, 기공개도, 기상조건 등의 가스농도를 제외한 제반 인자에 민감하게 의존한다. 그림 1은 대기오염물질의 확산과 녹지에 의한 흡수과정을 개략적으로 나타낸 것이다. 대기중으로 배출된 오염물질 가운데 일부는 식물에 의해 흡수 제거되는데, 그림에서  $F$ 는 식(1)에서 정의된 물질속을 나타낸다. 본 연구에서는 오른손 직교좌표계를 사용했다.  $x$ 축은 바람 벡터와 일치한다.  $z$ 축은 연직방향이다. 좌표계의 원점은 배출원( $Q_0$ )에 위치한다. 따라서, 그림에 나타내지는 않았지만  $y$ 축은 지면에 평행하고 바람벡터와 수직인 방향이다.

화학반응 등에 의한 대기 중 물질생성 혹은 소멸이 무시될 수 있는 경우에, 정상상태 연속방정식으로부터 오염물질에 대하여 다음과 같은 보존방정식을 유도할 수 있다(김석철과 이찬호, 1999).

$$\frac{d}{dx} \left( \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty C(x, y, z) V(x, y, z) dy dz \right) + \int_{-\infty}^\infty \varepsilon(x, y, z) C^*(x, y) dy = 0 \quad (2)$$

여기서  $C(x, y, z)$ 는 오염물질의 농도를 나타내며,  $C^*(x, y) [= C(x, y; z=0)]$ 는 지면에서의 농도이다.  $V$ 는 풍속( $U$ )을 풍속특성크기( $U_0$ )로 나눈 무차원 속

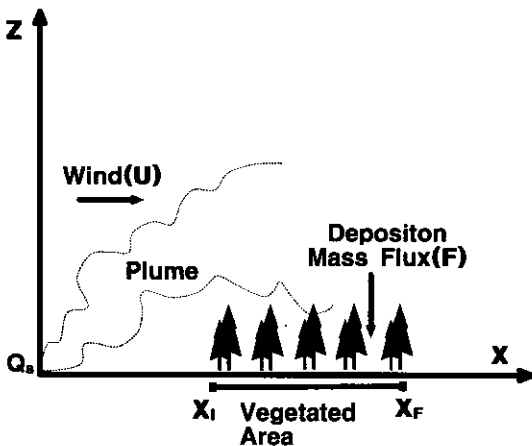


Fig. 1. The Coordinate System.

도이다. 따라서,  $V$ 는 정의에 의해 그 크기가 한자리 숫자이다. 식(2)의 두 번째 항의  $\varepsilon$ 은 무차원 침착속도로 다음과 같이 정의된다.

$$\varepsilon(x, y) = \frac{k(x, y)}{U_0} \quad (3)$$

녹지에 대한 침착속도의 개략 0.1~1 cm/sec 자리크기(order of magnitude)이고 (戶塚 續과 三宅 博, 1991; Sehmel, 1980),  $U_0$ 가 100 cm/sec 자리크기임을 고려하면, 식(3)으로부터 무차원 침착속도( $\varepsilon$ )의 자리크기는 0.001~0.01에 해당한다. 무차원 침착속도가 작은 값이라는 점에 착안하여 섭동법(perturbation method)을 적용하여(Pedlosky, 1987; Van Dyke, 1975), 적분 방정식(2)에 대한 해를 다음과 같은 형태로 구해보자.

$$C(x, y, z; \varepsilon) = C_0(x, y, z) + \varepsilon C_1(x, y, z) + \varepsilon^2 C_2(x, y, z) + \dots \quad (4)$$

식(4)를 식(2)에 대입하여 무차원 침착속도에 대하여 동일한 차수끼리 모으면 다음 식을 얻는다.

$$\frac{d}{dx} \left( \int_0^\infty \Phi_0(x, z) dz \right) + \varepsilon \left\{ \frac{d}{dx} \left( \int_0^\infty \Phi_1(x, z) dz \right) + \Phi_0^*(x) \right\} + \varepsilon^2 \left\{ \frac{d}{dx} \left( \int_0^\infty \Phi_2(x, z) dz \right) + \Phi_1^*(x) \right\} + O(\varepsilon^3) = 0 \quad (5)$$

여기서,

$$\Phi_i(x, z) = \int_{-\infty}^\infty C_i(x, y, z) dy \quad (6)$$

$$\Phi_i^*(x) = \int_{-\infty}^\infty C_i^*(x, y) dy \quad (7)$$

식(5)의 유도과정에서 무차원 침착속도( $\varepsilon$ )와 풍속( $U$ )은 일정하다고 가정하였다. 여기서 무차원 침착속도( $\varepsilon$ )가 일정하다는 가정은 침착속도가 녹지면에서 균등한 경우에 해당한다(즉,  $k(x, y) = K$ ).

식(5)로부터 0차 및 1차 해에 대한 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{d}{dx} \left( \int_0^\infty \Phi_0(x, z) dz \right) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{d}{dx} \left( \int_0^\infty \Phi_1(x, z) dz \right) + \Phi_0^*(x) = 0 \quad (9)$$

2차 이상의 해에 대한 방정식도 식 (9)와 동일한 구조를 지닌다. 식 (4)로부터  $\Phi_0(x, z)$ 는 녹지에 의한 흡수가 영일 경우에 해당한다. 따라서, 식 (8)은 녹지에 의한 흡수율이 전혀 없을 경우에 대기 중 오염물질의 질량속이 일정하다는 물리적인 사실을 표현한다.

녹지의 흡수작용으로 인한 농도분포의 변화는 고차 해,  $\Phi_i(x, z)$  ( $i=1, 2, 3 \dots$ )에 의해 표현된다. 이 중 가장 기여도가 큰 1차 해,  $\Phi_1(x, z)$ 을 살펴보자. 녹지의 흡수작용에 의해 유발되는 대기중 농도변화가 녹지면으로부터 충분히 먼 곳에서는 무시할 수 있다는 물리적인 특성으로부터,  $\Phi_1(x, z)$ 에 대한 경계조건은 다음과 같이 주어진다.

$$\lim_{x \rightarrow x_1} \Phi_1(x, z) = 0 \tag{10}$$

$$\lim_{z \rightarrow \infty} \Phi_1(x, z) = 0 \tag{11}$$

식 (10)에서  $x_1$ 는 녹지경계면의  $x$ 좌표에 해당한다. 즉  $x < x_1$ 인 경우에는 녹지가 없으며,  $x$  좌표의 범위가  $x \geq x_1$ 일 경우에만 녹지가 존재한다. 식 (9)를  $x$ 에 관해 적분하여  $\Phi_1(x, z)$ 에 대한 방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\int_0^x \Phi_1(x, z) dz = - \int_{x_1}^x \Phi_0^*(\xi) d\xi \tag{13}$$

여기서,  $x \geq x_1$ 이다.

적분방정식 (13)과 경계조건 (10), (11)으로는  $\Phi_1(x, z)$ 에 대한 유일해 (unique solution)를 구할 수 없다. 유일해를 위한 추가조건은 농도확산에 대한 역학(dynamics)관계로부터 구할 수 있다. 오염물질농도에 대한 확산 방정식의 일반적인 형태는 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla C = \mu c \nabla^2 C + R - S \tag{14}$$

여기서,  $\mathbf{v}$ 는 바람벡터이고,  $\mu c$ 는 확산계수이다.  $R$ 과  $S$ 는 바람장 내에 위치한 생성원과 흡수원을 의미한다. 여기서는 화학반응이 없고 바람장 내에 기타 오염물질 생성원 (source)이나 흡수원 (sink)이 없는 경우에 해당하므로 식 (14)에서 오른편 항의  $R$ 과  $S$ 는 사라진다.

녹지의 흡수작용에 의한 농도변화를 다음과 같이

정의하자.

$$\Delta C(x, y, z; \epsilon) = C(x, y, z; \epsilon = 0) - C(x, y, z; \epsilon) \tag{15}$$

여기서 녹지면에 의한 흡수가 전혀 없는 경우의 농도 ( $C_0$ )와 식 (16)의 농도차 ( $\Delta C$ : concentration deficit)에 대한 지배방정식이 같다는 사실은 주목할 필요가 있다.  $C_0(x, y, z)$ 와  $\Delta C(x, y, z; \epsilon)$ 는 우변의  $R$ 과  $S$ 가 영인 경우의 식 (14)를 동일하게 만족시킨다. 두 변수간의 차이는 지면 경계조건에서 나타난다.  $C_0$ 의 경우 지면에서 연직구배 (gradient)가 영인데 반해,  $\Delta C$ 에 대한 연직구배는 식 (1)과 식 (15)로부터 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial z} \Delta C|_{z=0} = - \frac{K}{\mu c} C(x, y, z; \epsilon)|_{z=0} \tag{16}$$

식 (15)의 농도변화는 식 (4)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta C(x, y, z; \epsilon) &= \Delta C_0(x, y, z) + \epsilon \Delta C_1(x, y, z) + \\ &\quad \epsilon^2 \Delta C_2(x, y, z) + \dots \\ &= \epsilon C_1(x, y, z) + O(\epsilon^2) \end{aligned} \tag{17}$$

식 (17)을 식 (14)에 대입하여 같은 차수끼리 정리하면,  $C_1(x, y, z)$ 에 대한 지배 방정식은 다음과 같이 식 (14)와 동일하게 나타난다.

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla C_1 = \mu c \nabla^2 C_1 \tag{18}$$

$C_1$ 에 대한 경계조건은 식 (16)과 식 (17)로부터 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial z} C_1(x, y, z)|_{z=0} = \frac{K}{\epsilon \mu c} C_0^*(x, y) \tag{19}$$

식 (19)는 단위면적당 배출량이  $\dot{q}_A$ 이고, 배출고도가 영인 면오염원에 해당한다. 식 (19)에 상응하는 면오염원은 다음과 같다.

$$\dot{q}_A(x, y; \epsilon) = - \frac{K}{\epsilon} C_0^*(x, y) \tag{20}$$

참고로  $K$ 의 크기는  $O(\epsilon)$ 이므로 식 (19)와 식 (20)은  $O(1)$ 의 크기를 갖는다. 방정식 (18)로부터  $C_1$ 을 구하기 위해 필요한 나머지 경계조건과 초기조건은 식 (4)로부터 homogeneous한 형태로 나타난다. 방정식

(18)과 경계조건 (20) 등의 결과를 종합할 때,  $C_1$ 은 지면으로부터 단위 면적당 배출량이 식 (20)과 같이 주어질 때 이에 상응하는 농도장으로 해석할 수 있다.

### 3. 가우시안 근사해

일정 시간동안 평균화된 오염물질농도의 정상상태 (steady state) 분포는 종종 가우시안 (Gaussian) 함수로 근사 된다 (Zannetti, 1990). 특정한 조건하에서 가우시안 농도분포는 지배방정식 (14)의 정확한 해가 되기도 한다 (Seinfeld, 1975). 식 (20)으로 정의된 면오염원에 대한  $C_1$ 의 가우시안 분포는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$C_1(x, y, z) = - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{x_1}^{\infty} \frac{C_0^*(\zeta, \eta) H(x_r)}{2\pi\sigma_y(x_r)\sigma_z(x_r)} e^{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{y_r}{\sigma_y(x_r)}\right)^2 + \left(\frac{z_r}{\sigma_z(x_r)}\right)^2\right]} d\zeta d\eta \quad (21)$$

여기서,

$$x_r = x - \zeta \quad (22)$$

$$y_r = y - \eta \quad (23)$$

$$H(x_r) = \begin{cases} 1 & (x_r \geq 0) \\ 0 & (x_r < 0) \end{cases} \quad (24)$$

식 (21)은 연속방정식 (13)을 당연히 만족한다.

녹지의 흡수작용으로 인한 지면에서의 농도변화는 식 (15)로부터 다음과 같다.

$$\Delta C^*(x, y; \epsilon) = C_0^*(x, y) - C^*(x, y; \epsilon) \quad (25)$$

식 (25)는 식 (4)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\Delta C^*(x, y; \epsilon)}{C_0^*(x, y)} = -\epsilon \frac{C_1^*(x, y)}{C_0^*(x, y)} + O(\epsilon^2) \quad (26)$$

여기서,

$$C_0^*(x, y) = C_0(x, y, z)|_{z=0} \quad (27)$$

$$C_1^*(x, y) = C_1(x, y, z)|_{z=0} \quad (28)$$

식 (21)과 식 (25)로부터, 다음 관계식을 얻는다.

$$\frac{\Delta C^*(x, y; \epsilon)}{C_0^*(x, y)}$$

$$= \frac{\epsilon}{C_0^*(x, y)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{x_1}^{\infty} \frac{C_0^*(\zeta, \eta) H(x_r)}{2\pi\sigma_y(x_r)\sigma_z(x_r)} e^{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{y_r}{\sigma_y(x_r)}\right)^2 + \left(\frac{z_r}{\sigma_z(x_r)}\right)^2\right]} d\zeta d\eta + O(\epsilon^2) \quad (29)$$

### 4. 토 의

녹지에 의한 흡수가 전혀 없는 경우의 농도분포 ( $C_0$ )로부터, 식 (29)를 이용하여 녹지흡수로 인한 지면에서의 농도변화 ( $\Delta C$ )를 구체적으로 계산할 수 있다.  $C_0$ 는 배출원의 형태 (점, 선, 혹은 면)와 배출고도에 따라 달라지고, 적분구간은 녹지의 분포형상에 따라 달라지므로, 지면 농도변화 ( $\Delta C$ )는 적분방정식 (29)를 계산하여 구한다. 이러한 계산은 수치해석적인 방법을 적용하여 쉽게 수행할 수 있지만, 여기서는 보다 단순한 경우에 성립하는 닫힌 형태 (closed form)의 해석해를 살펴보고자 한다.

y방향으로의 변화를 무시할 수 있는 경우를 고려하자. 확산으로 인한 농도변화가 x,z-평면에 국한되는 것으로, 지상농도가 균일하거나 매우 긴 선오염원이 바람에 직각방향으로 위치한 경우가 여기에 해당한다. 녹지가 위치한 x좌표의 범위는  $x_1 \leq x \leq x_f$ 인 것으로 가정하자. 이 경우, 식 (29)는 다음과 같이 단순화된다.

$$\frac{\Delta C^*(x; \epsilon)}{C_0^*(x)} = \frac{\epsilon}{\sqrt{\pi/2} C_0^*(x)} \int_{x_1}^{\infty} \frac{C_0^*(\zeta) H(x-\zeta)}{\sigma_z(x-\zeta)} d\zeta + O(\epsilon^2) \quad (30)$$

가장 간단한 경우로 지상농도가 균일한 경우 (곧,  $C_0^*(x)$ 가 상수인 경우)를 살펴보자. 가우시안 연직확산계수 ( $\sigma_z$ )로는 다음 식으로 표시되는 시골지역에 대한 Pasquill-Gifford 계수 (US EPA, 1995)를 사용하자.

$$\sigma_z(x) = a x^b \quad (31)$$

여기서, a와 b는 차원이 있는 상수로 대기안정도 및 풍황거리 (x)의 함수이다. 식 (31)을 적용하면, 식 (30)은 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{\Delta C^*(x; \epsilon)}{C_0^*(x)} = \frac{\epsilon (x-x_1)^{1-b}}{\sqrt{\pi/2} a (1-b)} + O(\epsilon^2) \quad (32)$$

여기서, 식 (32)는  $b$ 가 1보다 작은 경우에 성립하는 식이다.  $b$ 가 1 이상인 경우에는 식 (30)으로 기술된 농도는 특정한 지점에서 무한대로 발산한다. 이는 가우시안 분포가 배출원이 위치한 지점에서 특이해지는 (singular) 성질에서 기인하는 것으로, 물리적으로 타당한 결과를 얻기 위해서는 수학적 기교가 요구된다. 여기에 대한 자세한 고찰은 본 연구의 관심범주에서 벗어나므로 생략한다.

개발제한구역 녹지에 적용 가능한 숫자를 대입해보자. 개발제한구역 녹지의 폭을 4 km로 간주하자. 즉,  $x_F - x_1 = 4$  km인 셈이다. 식 (32)는  $x$ 에 대해 단조증가함수이므로, 녹지의 바깥 경계면, 곧  $x = x_F$ 인 지점에서 농도차가 가장 크게 나타난다. Pasquill-Gifford에 따라  $a = 950$ 과  $b = 1/2$ 을 선택하자. 가장 발생빈도가 높은 중립안정도일 경우  $b$ 의 값이 0.51 ~ 0.87에 해당한다. 식 (32)로부터,  $b$ 에 대하여 지상농도변화량은 단조감소함수로 나타난다. 따라서,  $b$ 가 0.5일 경우는 녹지의 흡수작용이 중립안정도보다 더욱 크게 나타나는 경우이다. 이상의 숫자를 대입하면 식 (32)로부터 농도차의 최대발생량은 다음과 같다.

$$\frac{\Delta C^*(x;\varepsilon)}{C_0^*(x)} \Big|_{x=x_F} \approx 0.1\varepsilon + O(\varepsilon^2) \quad (33)$$

관찰된 무차원 침착속도가 0.001 ~ 0.01임을 고려할 때, 지상농도가 균일할 경우 [곧,  $C_0^*(x)$ 가 상수인 경우] 폭 4 km의 녹지의 흡수작용으로 인한 지상농도변화는 0.1% 이하에 해당한다.

지금까지 살펴본  $C_0^*(x)$ 가 균등한 경우는 실제로 발생하기 힘든 특별한 상황이다. 이번에는 원점에 단위 길이당 배출량이  $Q_s$ 인 선오염원이 있는 경우를 살펴보자. 여기에 대한  $C_0^*(x)$ 의 가우시안 농도분포는 다음과 같다.

$$C_0^*(x) = \frac{Q_s}{\sqrt{\pi}/2} \frac{1}{\alpha_z(x)} \quad (34)$$

식 (31)과 식 (34)을 이용하면, 식 (30)의 지상농도변화가 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{\Delta C^*(x;\varepsilon)}{C_0^*(x)} = \frac{\varepsilon\sqrt{x}}{\sqrt{\pi}2a} \left\{ \pi - 2 \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{x_1}{x-x_1}} \right) \right\} + O(\varepsilon^2) \quad (35)$$

여기서,  $x$ 는  $x_1$ 보다 크다. 식 (35)를 유도하는 과정에

서 앞의 경우와 동일하게  $b = 1/2$ 를 적용하였다.  $C_0^*(x)$ 에 대한 지상농도변화 ( $\Delta C$ )는  $x$ 에 대한 단조증가함수로, 녹지의 안쪽 경계면 ( $x_1$ )에서 가장 작은 값인 0에 해당하고, 녹지 바깥 경계면 ( $x_F$ )에서는 최대값을 지닌다. 녹지폭이 4 km인 경우 (즉,  $x_F - x_1 = 4$  km) 안쪽 녹지경계면이 배출원 (원점)에 가까울수록,  $C_0^*(x)$ 에 대한 지상농도변화 ( $\Delta C$ )는 증가하여,  $x_1 = 0$ 일 때 최대가 된다. 앞의 경우와 마찬가지로,  $a = 950$ 을 적용하면,  $C_0^*(x)$ 에 대한 지상농도변화의 최대값은 다음과 같다.

$$\frac{\Delta C^*(x;\varepsilon)}{C_0^*(x)} \Big|_{x=x_F, x_1=0} \approx 0.2\varepsilon + O(\varepsilon^2) \quad (36)$$

선오염원의 경우 폭 4 km의 녹지의 흡수작용으로 인한 지상농도변화는 식 (33)의 균등한 농도분포의 경우보다 약간 증가하였지만 그 비율은 여전히 작아 0.2% 미만인 것으로 나타난다.

## 5. 결 론

가스상 오염물질에 대하여 수목에 의한 침착속도가 오염물질의 대기 중 평균이동속도, 곧 근사적으로 평균풍속에 비해 매우 작다는 점을 감안하여, 무차원 침착속도를 섭동변수로 취하여 대기오염물질에 미치는 녹지의 영향을 섭동법을 적용하여 분석했다. 그 결과, 녹지의 흡수작용으로 인해 유발되는 농도변화가 면오염원으로부터의 일반적인 농도확산 과정과 유사하다는 점을 발견했다. 이에, 현재 가장 광범위하게 사용되고 있는 가우시안 모델을 기반으로 녹지의 흡수작용으로 인하여 유발되는 정상상태의 농도장 (concentration field) 변화를 해석적인 형태로 유도하였다. 몇 가지 간단한 경우에 대해서, 지면에서의 농도변화를 기술하는 닫힌 형태의 방정식을 제시하였다. 본 연구의 단순모델을 이용하여 개발제한구역에 상응하는 녹지의 흡수작용을 분석한 결과, 그 영향이 미미한 것으로 나타났다.

본 연구의 등기는 수목의 흡수작용으로 인한 농도장의 변화를 모델링하는 것이었지만, 여기에서 제시한 모델의 적용범주가 수목의 대기정화기능에 국한될 필요는 없다. 경계면에서의 질량속이 농도에 비례하는 모든 확산문제에 대해서도 동일하게 적용되기 때문이다. 그러나, 여기서 채택한 농도장 변화

에 대한 가우시안 방정식은 문제의 본질을 유지하는 범위 내에서 가장 단순한 경우를 고려한 것이다. 따라서, 여기서 제시된 결과는 보다 완전한 모델에 대한 초보적이고 원시적인 형태라고 볼 수 있다. 향후 적절한 실측자료에 의해 모델을 보정하는 것이 필요하다. 또한, 적용조건을 보다 일반적인 경우로 완화하여 실용적인 측면에서 모델의 유용성을 향상시키기 위해서는 앞으로 연구가 필요하다.

### 참 고 문 헌

- 건설교통부(1998. 10) 개발제한구역현황, 서울
- 김석철, 이찬호(1999) 개발제한구역 제도개선을 위한 환경평가기준 연구(2): 대기질 분야, 건설교통부, 111-112.
- 오정수, 이돈구, 신준환, 이명보(1991) 산림의 공익적 기능 계량화 연구. 제 3장 산림의 이산화탄소 흡수기능, 과학기술처, 147-161.
- 戸塚 纈, 三宅 博(1991) 녹지의 대기정화기능, 대기오염학회지, 26(4), A71-A.80.
- Hill, A.C. (1971) Vegetation: a sink for atmospheric pollutants, *J. Air Pollut. Cont. Assoc.*, 21, 341-346.
- Pedlosky, J. (1987) *Geophysical Fluid Dynamics*, 2nd Edition, Springer-Verlag, NY, p. 213.
- U.S. Environmental Protection Agency (1995) User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Models; Volume II - description of model algorithms, EPA Publication No. EPA-454/B-95-003b, Research Triangle Park, North Carolina: pp. 1-15.
- Seinfeld, J.H. (1975) *Air Pollution: Physical and Chemical Fundamentals*, McGraw-Hill, NY, p. 295.
- Sehmel, G. (1980) Particle and gas dry deposition: A review, *Atmos. Environ.*, 14, 983-1011.
- Van Dyke M. (1975) *Perturbation Methods in Fluid Mechanics*, Annotated Edition, Parabolic, Stanford, California.
- Zannetti, P. (1990) *Air Pollution Modeling*, Van Nostrand Reinhold, NY, p. 141.