

DR10) 그린벨트녹지의 대기정화기능 모델링

Analytic and Numerical Models for Air Pollution Removal by Vegetated Area Around Big Cities

김석철

한국환경정책·평가연구원(KEI)

1. 머리말

도시주변의 녹지의 대기정화기능이 중요하다는 인식이 일반화되어 있는 데 반하여, 여기에 대한 구체적인 분석이 이루어진 바는 없다. 특히, 전체면적의 87%가 녹지(임야, 전답 및 과수원)로 이루어진 개발제한구역(건설교통부, 1998)이 흡수하는 오염물질의 양은 공급할 뿐 아니라 최근 논의되고 있는 개발제한구역해제와 관련하여 민감한 사항이기도 하다. 본 연구에서는 녹지의 대기정화기능에 대한 정량적인 분석을 목적으로 오염물질의 대기 중 확산이론에 근거하여 해석/수치모델을 모색했다.

2. 해석적 모델

식물의 기공을 통해 흡수되는 가스 오염물질의 양은 다음 식으로 표시할 수 있다(戶塚 續와 三宅 博, 1991; Hill 1971).

$$F = K C \tag{1}$$

여기서, F는 수목에 의해 흡수되는 가스의 질량속(mass flux)이고, C는 대기 중 가스농도이다. K는 건성 침착속도(dry deposition velocity)이다. 침착속도는 식물의 종류와 잎면적, 기공개도, 기상조건 등의 가스농도를 제외한 제반 인자에 민감하게 의존한다. 이하의 좌표계는 오른손 직교좌표계로 x축은 바람 벡터와 일치한다(down-wind), y축은 지면에 평행하고 바람에 수직이며(cross-wind), z축은 연직방향이다. 배출원은 좌표계의 원점에 위치하고 있는 것으로 가정한다.

농도확산에 대한 지배방정식으로부터 녹지의 흡수작용으로 인한 대기 중 오염농도의 변화는 무차원침착속도(ϵ)에 밀접하게 의존함을 보일 수 있다. 무차원침착속도($\epsilon = k/U_0$)는 침착속도(k)를 풍속에 대한 특성기(U_0)로 나눈 값이다. 녹지에서 침착속도가 개략 0.1~1 cm/sec 자리크기(order of magnitude)이고(戶塚 續와 三宅 博, 1991; Sehmel, 1980), U_0 가 100 cm/sec 자리크기이므로, 무차원침착속도(ϵ)의 자리크기는 0.001~0.01에 해당한다. 무차원침착속도가 작은 값이라는 점에 착안하여 섭동법(perturbation method)을 적용하여(Van Dyke, 1975; Pedlosky, 1987), 오염농도의 분포를 다음과 같은 형태로 구할 수 있다.

$$C(x, y, z; \epsilon) = C_0(x, y, z) + \epsilon C_1(x, y, z) + \epsilon^2 C_2(x, y, z) + \dots \tag{2}$$

여기서 0차 항(C_0)은 녹지흡수가 없는 경우의 농도에 해당하며, 나머지 고차 항은 녹지의 흡수작용으로 인해 유발되는 농도변화에 해당한다. 식(2)와 연속방정식 및 확산방정식을 이용하여 각 차수별로 방정식을 유도하면, 1차 항(C_1)은 지면에 먼 오염원이 분포하고 있을 경우의 농도분포에 해당한다는 점을 발견할 수 있다. 이 때 C_1 의 분포를 결정하는 먼 오염원은 0차 항(C_0)에만 의존한다. 농도방정식의 해가 가우시안 형태로 주어진다고 가정할 때, 녹지의 흡수작용으로 인한 지면에서의 오염농도변화는 다음과 같이 유도할 수 있다(김석철, 1999b).

$$\frac{\Delta \bar{C}(x, y; \epsilon)}{C_0(x, y)} = \frac{\epsilon}{C_0(x, y)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{x_1}^x \frac{\bar{C}_0(\zeta, \eta) H(x_r)}{2\pi \sigma_{y_r}(x_r) \sigma_{z_r}(x_r)} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{y}{\sigma_{y_r}(x_r)} \right]^2} d\zeta d\eta + O(\epsilon^2) \tag{3}$$

식(3)에서 $\Delta \bar{C}(x, y; \epsilon) [= \bar{C}_0(x, y) - \bar{C}(x, y; \epsilon)]$ 는 지면에서의 녹지의 흡수작용으로 인한 지상농도변화를 나타내는 것으로, 녹지가 없을 경우의 지상농도($\bar{C}_0(x, y)$)에서 녹지가 있는 경우의 지상농도($\bar{C}(x, y; \epsilon)$)를 뺀 값이다.

영차 항의 형태에 따라 지면농도변화량은 당연히 달라진다. 단순한 경우로 영차 항이 균일한 농도분포를 지닐 때를 고려해보자. 녹지 폭이 4km라고 할 때 녹지의 흡수로 인해 발생하는 최대 농도 차는 식

(3)으로부터 다음과 같이 나타낸다: $\Delta\bar{C}(x;\epsilon)/\bar{C}_0(x)|_{x=4km} \approx 0.1\epsilon + O(\epsilon^2)$. 이 때 확산계수는 시골지역에 대한 Pasquill-Gifford의 계수를 적용했다. 무차원침착속도는 0.001~0.01정도이므로, 지상농도가 균일할 경우(곧, $\bar{C}_0(x)$ 가 상수인 경우) 폭 4km의 녹지의 흡수작용으로 인한 지상농도변화는 0.1% 이하에 해당한다. 이번에는 원점에 선 오염원이 y축과 평행하게 위치한 경우를 고려해보자. 복잡함을 피하기 위해 y 방향으로 농도변화가 무시될 수 있는 상황을 가정하면, 지상농도변화는 다음과 같은 분포를 지닌다.

$$\frac{\Delta\bar{C}(x;\epsilon)}{\bar{C}_0(x)} = \frac{\epsilon}{\sqrt{\pi/2} a} \left(\pi - 2 \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{x_1}{x-x_1}} \right) \right) + O(\epsilon^2) \quad (4)$$

여기서, x_1 는 녹지가 시작되는 지점의 x좌표를 의미한다. 녹지 폭이 4km일 때, 발생 가능한 최대지상농도변화는 다음과 같다: $\Delta\bar{C}(x;\epsilon)/\bar{C}_0(x)|_{x=4km, x_1=0} \approx 0.003 \epsilon + O(\epsilon^2)$. 선 오염원의 경우, 녹지흡수작용으로 인한 지면에서의 농도변화는 농도분포가 균등한 경우보다 더욱 감소하여 0.003% 미만인 것으로 나타난다.

3. 수치적 모델

식(1)의 녹지에 의한 질량속은 침착속도, 오염농도 각각에 대하여 선형(linear)이다. 따라서, 특정면적의 녹지가 일정기간 동안 흡수하는 오염물질량은 해당면적 및 기간에 대한 침착속도와 오염농도의 평균치의 단순 곱과 동일하다. 이러한 특성은 현재 널리 활용되고 있는 장기 대기확산모델을 이 문제에 용이하게 적용할 수 있는 근거가 된다. 앞에서 유도한 해석적인 모델은 균등한 침착속도와 비교적 단순한 형태의 배출원을 가정한 데 반해, 실제의 경우는 동일한 녹지라도 침착속도가 지역에 따라 다르고 배출원도 복잡한 형태가 혼재하여 확산현상이 3차원적으로 발생한다. 따라서, 단순한 해석적 모델로 실제현상을 분석하기에 한계가 있으므로 ISCLT모델을 이용하여 보다 실제적인 경우를 분석하였다(김석철, 1999a). 대전지역에 대한 관련자료(배출량자료, 기상자료, 수치지형도 및 입상도, 수종별 생물량증가자료 등)를 적용하여 대전시주변의 그린벨트녹지에 흡수되는 NO₂, SO₂양을 산정한 결과, 총 배출량의 1%에 이하로 나타났다. 그림 1은 NO₂ 및 SO₂에 대한 모델링 결과(동흡수량곡선)이다.

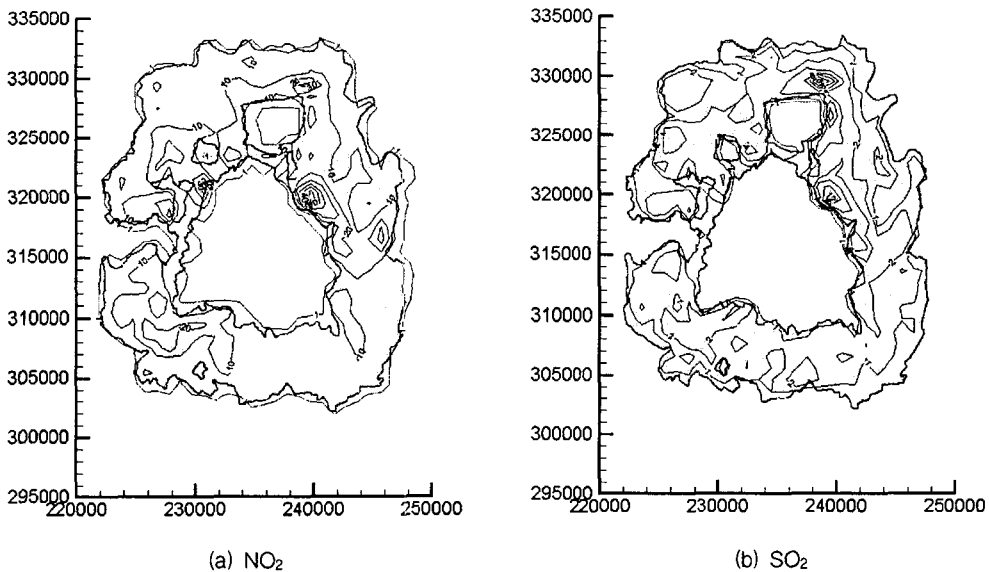


Fig. 1. Isopleth of NO₂ and SO₂ absorption(in mg/sec · km²) by vegetated area(Restricted Development Zone) around Taejeon(Kim, 1999a)

4. 맺음말

도시의 대기환경에 대한 도시주변 녹지의 순기능은 도시기상과 관련한 사항과 대기질과 관련한 사항으로 구분할 수 있다. 녹지의 도시기상 조절기능은 기존 (외국)연구에 따르면 매우 중요하다. 일례로, 오스트리아 그라쯔(Graz)시에서는 기상현상 및 오염확산에 대한 주변 미개발지역의 역할을 분석하기 위하여 수년간 연구를 수행했다. 그 결과, 주변 미개발지역이 그라쯔시의 대기질에 미치는 영향이 큰 것으로 밝혀져 대기환경의 보전을 목적으로 주변지역을 개발금지구역(zones of banned construction)과 개발제한구역(zones of restricted construction)으로 새로이 지정했다(Lazer and Podesser, 1999). 이는 개발제한구역 조정에 대한 환경기준연구가 단기간에 수행되고 해체여부를 결정하는 환경평가 필수항목에서 대기질이 배제된 국내여건과는 대조적이다. 또한, 미국 조지아주 아틀란타(Atlanta)시에서는 도시화에 따른 도시주변 녹지면적감소와 관련하여 도시열섬 및 대기질악화 등의 종합적인 대기환경변화에 대한 체계적인 연구가 수행된 바 있다. 이는 도시계획수립에 있어서 녹지감소에 따른 대기질 환경변화의 중요성이 인정되었기 때문이다.

대기질과 관련한 사항으로, 도시주변녹지의 순기능은 다시 두 가지로 구분될 수 있다. 하나는 대기정화작용으로 인하여 수목이 대기상의 오염물질을 흡수함으로써 대기 중의 오염물질농도를 낮추는 것이고, 또 하나는 대기오염물질 배출시설의 입지를 원천적으로 봉쇄함으로써 대기질 악화를 방지하는 역할이다. 도시주변녹지의 대기정화능력이 작은 것으로 나타난 연구의 결과는 도시대기환경과 관련한 녹지의 종합적인 기능을 배경으로 해석되어야 타당하다. 대기정화기능에 국한되는 본 연구의 결론이 확대 해석되어, 대기환경과 관련한 녹지의 모든 순기능이 미미하다는 것으로 오용될 수 있기 때문이다. 오히려 분석결과에 의하면, 녹지의 대기정화작용은 미미하지만 도시주변녹지가 개발됨에 따라 신규오염부하증가로 인한 대기오염도의 증가는 매우 심각할 수 있는 것으로 나타났다(김석철, 1999a).

참 고 문 헌

- 건설교통부, 1998. 10. 개발제한구역현황
- 김석철, 1999a. 개발제한구역조정을 위한 환경평가기준연구(2): 대기질 편, 한국환경정책·평가연구원
- 김석철, 1999b. 대기환경학회지(기고예정)
- 戸塚 續, 三宅 博, 1991. 녹지의 대기정화기능, 대기오염학회지, 제26권 제4호, pp.A71~A.80
- Hill, A.C, 1971. Vegetation: a sink for atmospheric pollutants, J. Air Pollut. Cont. Assoc., 21, pp.341~346
- Lazar, R., A. Podesser, 1999. An urban climate analysis of Graz and its significance for urban planning in the tributary valleys east of Graz(Austria), Atmos. Env. 33, 4195-4209
- Pedlosky, J. 1987. *Geophysical Fluid Dynamics*, 2nd Edition, Springer-Verlag, New York: pp. 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
- Schmel, G., 1980. Particle and gas dry deposition: A review, Atmos. Env. 14, pp.983
- Van Dyke M. D., 1975. *Perturbation Methods in Fluid Mechanics*, Annotated Edition, The Parabolic Press, Stanford, California
- Zannetti, P., 1990. *Air Pollution Modeling*, Van Nostrand Reinhold, New York: pp.141