

환경영향평가용 대기질 모델을 위한 AWS자료의 4 차원 동화 기법에 관한 고찰

김 철 희

국립환경연구원

On the applications of AWS into the Four-Dimensional Data Assimilation Technique for 3 Dimensional Air Quality Model in Use of Atmospheric Environmental Assessment

Kim, Cheol-Hee

National Institute of Environmental Research

Abstract

The diagnostic and prognostic methods for generating 3 dimensional wind field were comparatively analyzed and 4 dimensional data assimilation (FDDA) technique by incorporating Automatic Weather System (AWS) into the prognostic methods was discussed for the urban scale air quality model. The AWS covered the urban scale grid distance of 10.6 km and 4.3 km in South Korea and Kyong-in region, respectively. This is representing that AWS for FDDA could be fairly well accommodated in prognostic model with the meso γ ~ micro α scale (~5 km), indicating that the 3 dimensional wind field by FDDA technique could be a useful interpretative tool in urban area for the atmospheric environmental impact assessment.

Key words : 4 Dimensional Data Assimilation Technique, Automatic Weather System, Air Quality Model, Atmospheric Environmental Impact Assessment

I. 서 론

우리나라는 1980년대 초반부터 환경영향평가가 시행되고 있어 신도시나 특정 지역을 개발할 때 환경이 받게 될 영향을 예측 평가하는 것을 의무화하고 있다. 이에 따라 대기질 영향 평가 부분에서도 많은 대기 오염 확산 모델들이 소개되어 왔

으나 지금까지는 대상 지역의 지형이나 국지적인 대기의 순환을 반영하는 모델의 사용은 극히 드물었고 거의 대부분 가우시안(Gaussian) 모델을 사용하여 왔다¹⁾. 가우시안 모델은 그 나름대로의 장점이 있으나 대상지역이 미국과 같은 넓은 평원에 적합하도록 설계되어 산악지역이 대부분인 우리나라에 적절하지 못하다는 사실을 학계에서도 오랫동안

동안 지적해 왔다^{2)~4)}. 예를 들어 서울과 같이 넓은 대상지역의 경우에도 대부분 1 개의 기상 관측소의 결과를 가우시안 모델에 이용하였으므로 대상 지역의 3 차원적 기상 특성을 충분히 반영하지 못하였던 것이 사실이다. 특히 최근의 컴퓨터의 급속한 발달에 따라 다양하고 복잡한 모델이 개발 되었음에도 불구하고 아직도 국내의 대기질 모델의 주축은 미국의 지형이 없는 지역에 무리 없이 적용할 수 있는 가우시안 모델이 대부분이다.

그러나 삼면이 바다이며 70%가 산지여서 산악 국가로 분류되는 우리나라의 국지 기상 현상은 종관 규모 대기 현상과 더불어 지표면의 물리적 성질의 차이(예 농촌과 도시, 육지와 바다 등), 지형 등에 의한 대기의 순환이 복잡하게 작용하여 나타난다⁵⁾. 즉 해안가에서는 해륙풍과 같은 국지 순환이 활발할 뿐만 아니라 복잡한 지형이 있는 산악 내륙 지방에서는 지형의 영향으로 산곡풍⁶⁾이 발달하며 도심지에서는 농촌 지역과 도시 지역의 지표면의 물리적인 차이로 인하여 도시 열섬 현상⁷⁾이 나타난다. 이러한 다양한 대기의 주기나 순환을 대기환경영향평가에 제대로 반영하기 위해서는 3 차원 대기질 모델이 필수적이며 당연히 3 차원 대기질 모델의 입력자료인 국지적 3 차원 바람장의 연구가 절실히 요구된다. 이러한 국지적 3 차원 바람장에 대한 연구는 인구밀도가 매우 높은 우리나라의 경우 한정된 국토의 효율을 극대화시키고 또 주변 환경을 자연친화적으로 이끌어 내는 데 중요한 연구가 될 것이다. 나아가 시·공간적인 기상 관측 자료의 부족으로 여러 대기질 연구에 제약을 받아 온 해양과 산악지역에서 매우 유용하게 사용 될 것이며 또한 대기질을 효율적으로 관리할 수 있는 종합적이고 합리적인 대책을 세우는 데 중요한 자료를 제공할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 이러한 국지 순환을 고려한 3 차원 바람장 도출 방법 중 하나인 4 차원 자료동화(Four-Dimensional Data Assimilation: 이하

FDDA) 기법⁸⁾을 소개하고 한반도에 산재한 500 여개의 AWS(Automatic Weather System) 자료를 FDDA에 적용할 때 그 특성 및 분해능을 먼저 살펴보고자 한다. 또 AWS 자료를 FDDA 기법에 활용할 때 주의할 사항들을 살펴보고자 한다.

II. 대기질 모델을 위한 3 차원 바람장 도출 방법

일반적으로 3 차원 바람장을 계산하는 방법은 수치 모델을 이용하는 예측적 방법(Prognostic Method)⁹⁾과 관측 자료를 객관 분석법에 기초하여 이용하는 진단 방법(Diagnostic Method)¹⁰⁾이 있다. 그러나 두 방법 모두 각각의 단점으로 인해 도시 규모의 3차원 바람장에 활용되기에는 한계가 많다. 예측적 방법은 지형이 복잡하고 격자 거리가 짧은 수 km 영역에서는 수치 계산 시간이 방대하고 초기 조건을 얻기 어려운 단점이 있다. 반면 객관 분석에 기초한 진단적인 방법은 관측 자료의 수가 대상 지역의 국지 순환을 묘사할 수 있는 조밀성을 필요로 하게 된다. 예측적인 방법의 또 다른 문제점은 대부분의 모델이 정역학 방정식(hydrostatic equation)을 채택하고 있어서 모델 영역이 좁은 경우에는 격자 거리가 짧음으로 인한 수치적 잡음과 모델 안정도의 문제에 직면하게 된다. 또 진단적인 방법은 현재 운영되고 있는 AWS의 대부분이 도심지역에 집중되어 있고 해안가나 산악지역에서는 소하게 위치하고 있기 때문에 지역에 따라 순수하게 진단적인 방법만으로는 3 차원 자료를 만들기에 어려울 수 있다. 이러한 경우 현재 이용 가능한 관측 자료를 최대한 활용하되 진단적인 방법의 단점을 보완하기 위하여 예측적인 접근 방법을 활용하는 FDDA기법을 검토해 볼 만하다. FDDA기법이란 예측모델을 이용하되 그 단점을 보완하기 위하여 과거의 관측된 자료의 주기와 특성을 예측 모델의 역학에 강제적으로 동화시켜 대기의 순환을 실측치에 더

가깝게 모의하는 기법을 말한다. 본 연구에서는 기상청 관할 수도권 내의 AWS 자료를 이용하여 진단적으로 3차원 바람장을 계산한 다음 이를 해륙풍과 같은 예측 모델에 너징(nudging)시키는 방법인 FDDA 기법을 적용시켜 보고자 한다.

Fig. 1은 FDDA 기법으로 바람장을 도출하는 순서도를 나타내었다. 사용된 예측 모델인 3 차원 해륙풍 모델로서 그 방정식은 박순웅(1994)¹¹⁾, 김철희와 전종갑(1992)⁹⁾, Pielke(1974)¹²⁾, Neuman and Mahrer(1971)¹³⁾ 등에 잘 수록되어 있으므로 본 연구에서는 생략한다. 또 현재 기상청 수치예보과에서 운영하는 예측 모델(RDAPS)은 이미 5 km 격자 거리까지 계산하고 있으며 현재 가동중인 AWS의 조밀성도 꽤 향상되어 있어(현재 전국 약 450여개의 AWS 운용) FDDA 기법을 이용하여 <5 km의 미세격자 자료를 충분히 생산할 수 있는 단계에 이르렀다고 보아야 할 것이다. 따라서

이러한 상세 격자상의 3 차원 바람 구조를 도출하는 FDDA 기법은 향후 그 활용도 및 신뢰도가 더욱 높아질 것으로 판단되며 이에 따라 AWS를 비롯한 자료의 특성 및 관측 분해능을 자세히 살펴보는 것은 매우 중요한 과정이라 판단된다

III. 4 차원 자료 동화 기법

1. 운동 방정식

해륙풍 모델과 같은 예측 모델을 십분 활용하기 위해서는 관측 자료를 이용한 FDDA 과정에 동화될 AWS 자료의 수평규모를 잘 파악해야 하며 또 그 규모에 맞는 최적화된 스케일을 가진 예측 모델을 선정하여야 한다. 그러기 위해서는 관측 자료가 어떻게 예측 모델의 운동 방정식에 기여하는지를 우선적으로 이해하는 것이 필요하다. 예를 들어 예측 모델에서의 한 격자점에서의 수평 바람의 동서 성분인 u 에 대한 예측 운동 방정식은 다음과 같이 표시된다. 즉

$$\frac{\partial u}{\partial t} = F + G \left[\frac{\sum_{n=1}^N W_n \gamma_n u_n}{\sum_{n=1}^N W_n} - \hat{u}_n \right] \quad (1)$$

여기서 오른쪽 첫 항 F 는 일반적으로 운동방정식에 주어지는 강제력 항으로서 지형좌표계 ($z^* = \overline{S}(z-z_g/S-z_g)$)에서 다음과 같이 주어진다.

$$F = fV - fVg - \theta \frac{\partial \pi}{\partial x} = g \frac{z^* - \overline{S}}{\overline{S}} \frac{\partial z_g}{\partial x} - g \frac{z^*}{\overline{S}} \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) \left(\frac{\overline{S}}{\overline{S} - z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_z \frac{\partial u}{\partial z^*} \right) \quad (2)$$

이다. 이 때 u, v 는 각각 x, y 방향의 수평바람성분이며 t 는 시간, θ 는 온위를 나타내며 S 는 물질면까지의 높이, \overline{S} 는 모델 상단의 높이, z_g 는 지형의 높이, U_g, V_g 는 각각 x, y 방향의 지균풍을 나타낸다. 그리고 K_H 는 수평확산계수, K_z 는 수직확산계

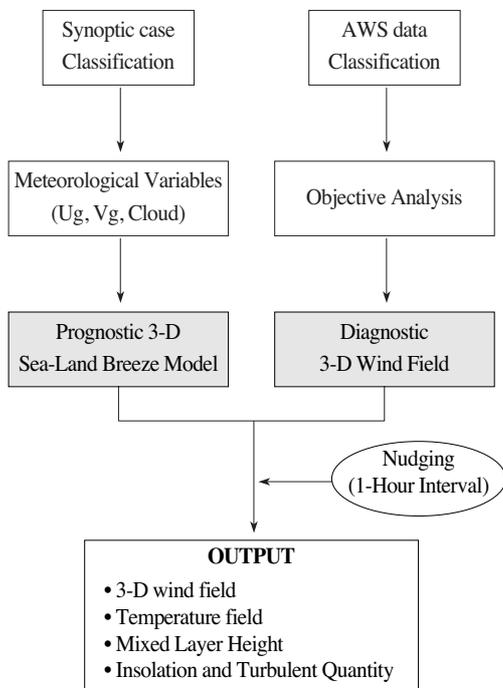


Fig. 1. A flow chart for the 3 dimensional wind field generation using FDDA(four-dimensional data assimilation) technique.

수를 나타낸다.

또 식 (1)에서 둘째 항은 너징가속도 항이다. 그리고 $W_n = W_{Hn} W_{On} W_m$ 은 가중함수 항이며, W_{Hn} , W_{On} , W_m 은 각각 수평 방향, 연직 방향, 그리고 시간에 대한 가중치를 나타낸다. 수평가중치 W_{Hn} 은

$$W_{Hn} = \begin{cases} \frac{R_n^2 - D_n^2}{R_n^2 + D_n^2} & \text{for } D_n \leq R_n \\ 0 & \text{for } D_n > R_n \end{cases} \quad (3)$$

과 같이 Cressman function을 사용하였다¹⁴⁾. 여기서 R_n 은 관측지점으로부터의 수평방향 영향반경이고 D_n 은 격자점에서 관측지점까지의 거리를 나타낸다. 그리고 연직방향 가중치 W_{On} 은 각 고도에서 1이며 다음 관측 고도에서는 0 이 되게 하였으며 시간 가중치 W_m 은 Time-lag에 따라 Hat function¹⁴⁾을 사용하였다. u_n 은 관측지점에서의 u 의 값이고 \hat{u}_n 은 관측지점에서 모델로 내삽하여 구한 값이며 γ_n 은 자료 신빙도 계수이고 G 는 nudging 계수(relaxation 시간 스케일)를, 그리고 N 은 관측수 수이다. 여기서 G 는 일반적인 강제력 항인 $F = 0$ 일 경우 $1/G$ 는 모델이 관측된 상태로 동화되는 e-folding 시간 규모를 나타낸다¹⁴⁾. 일반적으로 G 는 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{sec}^{-1}$ 이 기상시스템에 적합하나 관측 자료의 신뢰도 그리고 대상 지역의 국지 순환의 수평 및 시간 규모 등을 고려하여 결정하여야 한다. 일반적으로 수평 규모에 비례하여 그 시간 규모도 커지므로 대상 지역의 국지 순환의 규모를 잘 파악하고 또 관측된 자료의 밀도가 그 지역 순환의 특성 규모를 얼마만큼 분해할 수 있는가를 잘 파악하여야 할 것이다.

2. 대기질 모델을 위한 관측 자료의 분해능

대기 확산 모델은 대상 지역의 규모에 따라 분류할 수 있다. 이종범(1995)²⁾은 그 크기의 순서대로 대륙간 이동 규모(interregional scale) 모델, 지역규모(regional scale) 모델, 도시 규모(urban scale) 모델, 그리고 국지 규모(local scale) 모델로

분류하였다. 이러한 규모의 분류도 재정립이 필요하지만 이 연구에서 분류된 대략의 수평 규모를 살펴보면 국지 규모 < 1 km, 도시 규모 < 10 km, 지역 규모 < 100 km, 대륙간 이동 규모 > 1000 km로 분류하였다.

모델의 규모는 결국 대상 지역의 크기에 따라 결정되지만 일반적으로 그에 비례하여 그 분해능도 결정된다. 현재 대기질 모델을 예를 들면 1세대 대기 오염 모델로 구분할 수 있는 가우시안 플룸 모델의 규모는 주로 수 km~수십 km 정도의 규모이며 이러한 모델링 영역은 이제 국지 규모에서 지역규모 혹은 도시 규모(urban scale)로 확장해 가고 있는 추세이다¹⁵⁾.

대상 지역의 영역이 변하면 규모에 맞는 정확한 대기질 모델링을 위해서 이에 맞는 3 차원 기상 입력 자료의 규모가 매우 중요하다. 이는 모델링에 사용될 기상 입력 자료는 모델링 결과의 승패에 직접적인 영향을 주기 때문이다. 따라서 FDDA 기법에 이용될 관측 자료의 분포와 특성을 파악하고 그 특성에 맞는 기상 예측모델을 모색하는 것은 필연적인 단계라고 판단된다.

3. AWS의 분포

현재 전국에 산재한 70여개의 전국 기상 관측소 및 측후소는 도시 규모(urban scale) 이상 혹은 지역 규모(regional scale)와 같은 비교적 큰 스케일의 대기질 모델에 적합할 것으로 판단된다. 그러나 도시 규모 이하 혹은 국지 규모(local scale)의 대기질 영향 평가를 위해서는 무인 관측기인 AWS를 활용하지 않으면 현재로서는 불가능해 보인다.

Fig. 2에 전국의 운영중인 AWS 자료를 얻을 수 있는 지점을 도시하였다. 한반도의 약 450여개의 AWS 자료는 지표에서 관측되는 인자인 풍향, 풍속, 온도, 습도, 일사량 등 5개 자료를 포함한다. 이 자료의 수평 분해능이 어떤 규모의 바람장을 반영하는가를 살펴보기 위하여 각 지점에서 인접

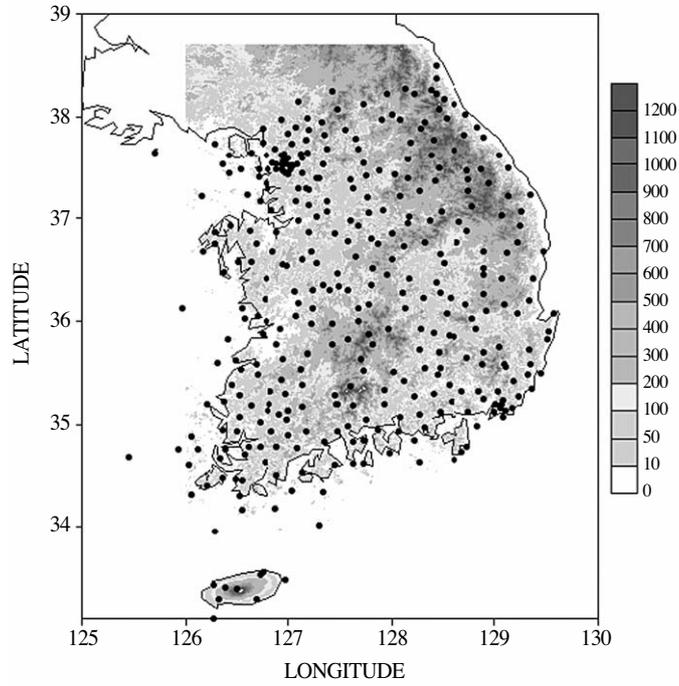


Fig. 2. Locations of AWS (Automatic Weather System) over the South Korea

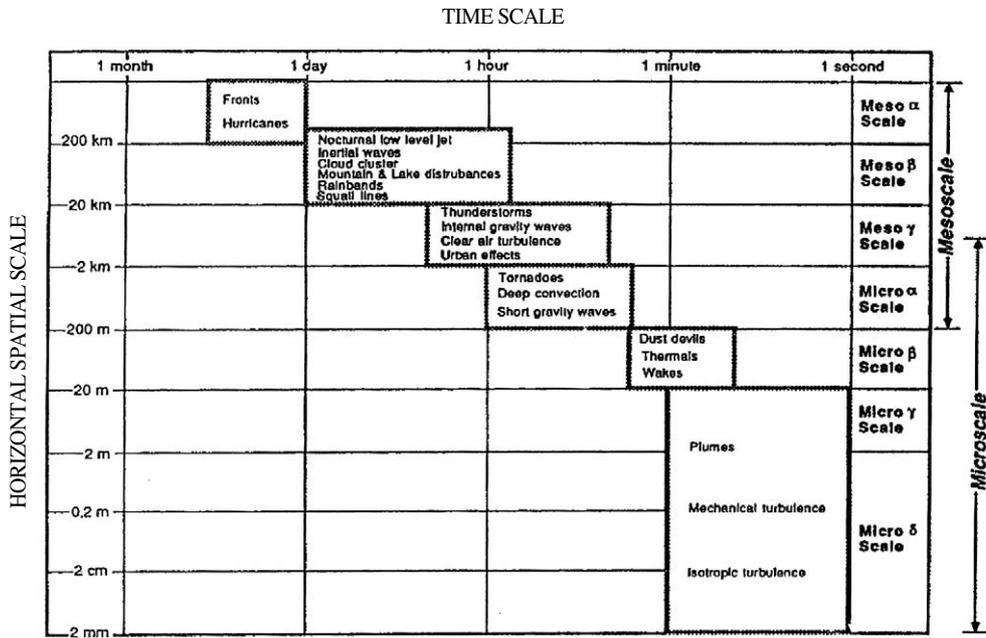


Fig. 3. Typical time and space orders of magnitude for micro and mesoscales (Stull, 1988)¹⁶⁾

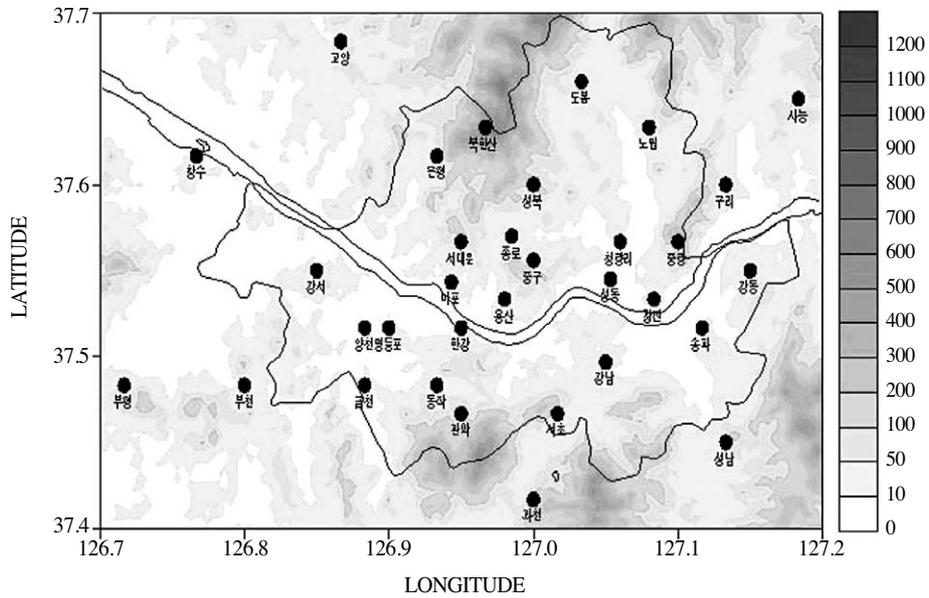


Fig. 4. Locations of AWS (Automatic Weather System) in the Kyongin region

한 지점까지의 거리를 계산해 본 결과 인접한 지점까지의 평균 거리가 10.6km (1.5km ~ 26.3km)로서 비교적 상세한 수평 분해능임을 알 수 있다. 이러한 관측 분해능이 예측 모델에 가장 효율적으로 동화되기 위해서는 meso γ ~micro α 규모의 기상 모델이 가장 적합하다고 판단된다(Fig. 3). 더 조밀하게 운영 중인 대도시 영역 중 수도권 역의 AWS만을 대상으로 하여 그 분포를 Fig. 4에 도시하였다. 전국의 분포보다 더 밀집되어 있어(인접 지점끼리 평균 5.3 km) 수도권 및 그 위성도시의 환경 영향 평가에 매우 유용하게 활용될 수 있음을 보여준다. 이러한 분해능을 가진 관측 자료의 효율을 최대화하기 위해서는 이에 맞는 수평 규모를 모의할 수 있는 최적의 예측(해륙풍) 모델이 선정되어야 할 것이다.

4. 4 차원 자료 동화의 응용시 주의 사항

AWS를 비롯한 한반도에 시·공간적으로 산재되어있는 관측자료는 성질이 서로 다른 규모의

운동의 복잡한 상호관계에 의한 영향을 받은 자료이므로 FDDA 기법으로 관측자료를 동화시킬 때 그 자료의 선정 및 동화에 따른 역학적인 이해가 필요하다¹⁷⁾. 한 지점에서 관측되는 AWS 자료의 일변화는 중관 규모 바람, 해륙풍 및 산곡풍과 같은 지역 규모의 바람, 그리고 지표면의 여러 미기상학적 요인 등에 의해 다양하게 영향을 받은 자료이므로 FDDA기법에 이용될 때 신중을 기할 필요가 있다. 예컨대 관측되는 해륙풍 순환의 경우 중관 규모의 대기 운동의 영향을 받으면 그 강도 및 내륙으로의 진입 거리 등이 변화하게 되므로 중관 규모의 영향인자를 분류하여 동일한 영향권 내의 자료들만을 골라내어야 비로소 역학적인 해륙풍 순환을 연구할 수 있는 기초 자료가 된다. 바꾸어 말하면 중관 규모의 영향인자가 동일할 때 더 작은 규모인 해륙풍 및 산곡풍의 지역 규모 혹은 도시 규모의 상대적 특성을 연구할 수 있게 된다. AWS 자료 역시 동일한 중관 기상 영향권 하의 날에 대해 평균한 다음 이를 3 차원 해륙풍 모델에 너징하여야 대기과학적으로 의미

있는 FDDA 기법이 될 것이다.

이러한 종관 규모의 기상장을 분류하기 위해서는 그 기준이 되는 영향인자를 결정하여야 한다. 박과 윤¹⁸⁾은 종관 기상별 한반도의 국지 기상 특징을 파악하기 위하여 종관 규모의 영향 인자를 0000GMT의 인쇄 일기도 혹은 GPV 자료의 850 hPa의 지균풍향(4 방위), 지균풍속(2 등급), 운량(2 등급) 및 한반도의 고층 기상 관측 자료를 평균하여 850hPa와 700hPa 층 사이의 온위의 연직 감률(대기 안정도: 2 등급)을 그 지표로 사용하였다. 마찬가지로 FDDA 기법을 활용할 시에도 먼저 종관 기상장을 분류하여 동일한 종관 규모 영향권 아래에서 관측된 AWS 자료를 활용하여야 한다. 이 때 대상 지역의 지형 및 국지 기상의 효과를 고려하기 위한 관측되는 자료의 분해능에 각별히 주의를 기울일 필요가 있다. 특히 도시 규모 대기확산 모델과 같이 10~20 km의 짧은 범위를 고려하는 경우에는 수평 및 수직적 바람장의 변화를 충분히 분해할 수 있는 상세한 그리드를 활용하여 수치 모의를 행하여야 할 것이다. 즉 복잡한 지형을 포함한 우리나라 도시 규모의 전형적인 수평 방향의 특성 길이를 약 ≤ 10 km로 가정하였을 때 대기질을 모의하는 격자의 구성도 특성 길이 이하의 도시규모의 대기 흐름을 분해할 수 있는 분해능을 필요로 하게 된다. 만약 격자의 크기가 관측되는 자료의 수평적 규모와 비교하여 매우 큰 경우에는 대기의 순환의 최소 주기보다 격자의 최소 주기가 길기 때문에 지표면 관측되는 자료의 파동 수를 잘못 인식하는 aliasing 문제가 발생하여 국지 규모의 관측 자료의 효과가 잘못 표출될 가능성이 크다. 따라서 이러한 문제점을 제거하기 위해서는 충분한 공간적 분해능을 갖는 격자계를 생각하여야 할 것이다.

산지가 대부분인 우리나라의 경우 스케일과 연관된 또 하나의 사실은 일반적으로 지형이 복잡할수록 입력자료인 바람 자료의 중요성은 더욱 증가하므로¹⁹⁾ 내륙지방과 같이 매우 복잡한 지형

을 고려하는 경우 바람장의 분해능은 상대적으로 더 상세해야 할 것이다. 바람장, 대기 혼합고 등의 확산 모델링에 있어서 매우 중요한 기상 인자는 지형이 복잡할수록 지형의 영향이 더욱 커지게 되므로 관측 자료의 분포 및 특성 연구와 병행하여 대상 지역의 지형 분포 또한 면밀히 분석하여야 할 것이다.

IV. 요약 및 결론

대기오염모델을 이용하여 오염물질의 이동 및 확산은 기상 현상과 밀접한 관계를 가지고 있다. 풍향은 어느 방향으로, 풍속은 얼마만큼 오염물질을 빨리 수송시킬 수 있는지의 척도가 되며 대기 경계층 내의 난류는 오염물질을 확산시키게 된다. 따라서 정확한 대기 환경의 예측을 위해서는 이러한 국지 순환 및 지형을 고려하는 3차원 바람장이 필수적이다. 이러한 맥락에서 도시 규모의 공간 및 시간적 특성을 반영할 수 있는 3차원 바람장을 도출하여 대기질 모델에 활용될 수 있는 4차원 자료 동화 기법의 활용도를 토의하였다. 이를 위해 현재 남한에서 운영중인 AWS 자료를 얻을 수 있는 450여 관측 분해능을 살펴 보았는데 이 자료의 수평 분해능은 AWS 자료를 진단적 방법으로만 사용할 경우에도 ~10 Km의 meso γ ~micro α 규모의 대기질 예측에 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 나타났다. 따라서 현재 운영 중인 AWS의 자료의 공간 분해능은 도시 규모 대기확산 모델과 같이 수십 km의 짧은 범위를 고려하는 경우 충분히 활용이 가능하며 이를 위해 3차원 대기질 모델의 격자 구성도 이러한 수평 및 수직적 바람장의 변화를 충분히 분해할 수 있는 상세한 격자 간격을 구성하여 수치 모의를 행하여야 할 것이다.

또한 사용될 AWS 자료는 항상 종관 규모 기상 역학의 영향을 받은 자료이므로 지역 규모 혹은 도시규모의 대기의 순환에 의한 오염물질의 이동

및 확산을 잘 모의하기 위해서는 동일한 종관 기상 영향권 하의 날에 대한 자료를 선택하여 3차원 해륙풍 모델 혹은 바람장 모델에 너정하여야 역학적으로 의미있는 FDDA 기법이 될 것이다.

이상의 주의 사항을 염두에 둔다면 상술한 FDDA 기법은 산악지역을 포함한 우리나라의 상대적으로 관측 지점이 소한 지역에서 관측 자료의 부족으로 인한 진단적 모델의 문제점을 극복할 수 있으며 이에 비례하여 대기질 모델의 결과도 한 단계 높일 수 있을 것으로 판단되며 따라서 향후 조성될 도시 규모 이상의 환경 영향 평가에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 더불어 AWS 자료의 모델에의 적용시 자료의 처리 방법 및 절차 그리고 확보된 자료의 관리 등에 대한 노력도 기울여야 할 것이다.

참고문헌

1. 장영기, 송동웅, 1995, 국내 대기오염 모델링의 현황과 과제, 한국 대기보전학회지, 11(1), 1-14.
2. 이종범, 1995, 우리나라에 적합한 국지 확산 모델의 개발 방향, 한국 대기보전학회지, 11(1), 15-28.
3. 장영기, 조경두, 1993, 도시형 TCM 개발에 관한 연구, 한국 대기보전학회지, 9(2), 132-139.
4. 이종범, 김용국, 1990, Pasquill 안정도계급의 평가와 안정도 parameter 추정 방법의 개발, 한국 대기보전학회지, 6(2), 168-175.
5. Park, S-U., I-H. Yoon, 1987, Diurnal and seasonal variations of radiative fluxes on inclined surfaces, J. Korean Meteor. Soc., 23(3), 40-53.
6. Atkinson, B. W., 1981, Meso-scale atmospheric Circulations, Academic Press, 1-495.
7. Landsberg, H. E., 1981, The Urban Climate, Academic press, 1-275.
8. Yamada, T. C., C.-Y. J. Kao, and S. Bunker, 1989, Airflow and air quality simulations over the western mountainous region with a four dimensional data assimilation technique, Atmospheric Environment, 23(3), 539-554.
9. 김철희, 전종갑, 1992, 종관바람을 고려한 한반도에서의 3차원 해륙풍 수치모의, 한국기상학회지, 28(2), 165-181.
10. 김병곤, 박순웅, 1993, 대기경계층내의 바람과 기온의 연직 구조에 관한 진단적 모델링, 한국기상학회지, 29(4), 281-305.
11. 박순웅, 1990, 한반도에서의 3 차원 해륙풍 모델의 결과, 한국기상학회지, 26(2), 66-77.
12. Pielke, R. A., 1974, A three-dimensional numerical model of the sea breeze phenomena over south Florida, Monthly Weather Review, 102, 115-139.
13. Neuman, J. and Y. Mahrer, 1971, A theoretical study of the sea and land breeze circulation, Journal of Atmospheric Science, 28, 532-542.
14. Stauffer, D. R. and N. L. Seaman, 1990, Use of four dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model part I; Experiments with synoptic data. Monthly Weather Review, 118, 1250-1277.
15. 이상미, 윤순창, 1999, 오일러리안 모델의 문제점 및 개선 방향, 대기 모델링의 현황과 문제점- 대기환경학회 workshop 요지집, 167-175.
16. Stull, R. B., 1988, An Introduction to Boundary Layer Meteorology, Kluwer Academic Publisher, 1-666.
17. Stauffer, D. R. and N. L. Seaman, 1994, Multiscale four-dimensional data assimilation. Journal of Applied Meteorology, 33, 416-434.
18. 박순웅, 윤일희, 1991, 한반도의 국지 기상 특징, 한국기상학회지, 27(2), 88-118.
19. U.S. Environmental Protection Agency, 1996, Guidline on Air Quality Models, EPA-450/2-78-027R.