

여수지역 대기확산의 수치 모사 - I. 지형의 영향 -

Simulation of Atmospheric Dispersion over the Yosu Area - I. Terrain Effects -

김 영 성 · 오 현 선
한국과학기술연구원 지구환경연구센터
(1998년 12월 20일 접수, 2000년 4월 26일 채택)

Young Sung Ghim and Hyun Sun Oh
Global Environment Research Center, Korea Institute of Science and Technology
(Received 20 December 1998; accepted 26 April 2000)

Abstract

The atmospheric dispersion of a pollutant emitted from a hypothetical source located in the middle of the Yochon Industrial Estate was simulated by using the Regional Atmospheric Modeling System (RAMS). Four horizontally nested grids were employed: the coarsest one covered the southern part of the Korean Peninsula including Mt. Chiri and the finest one covered the Yochon Industrial Estate and the surrounding area. Wind fields were initially assumed horizontally homogeneous with a wind speed of 4 m/s, the average for the Yosu area, and were developed without both external forces and diurnal changes in order to investigate the terrain-induced phenomena. Wind directions that could emphasize the terrain effects on the pollutant transport and that could carry pollutants to a highly-populated area were selected for the dispersion study. A pollutant was released for 24 hours from a grid-base volume source after a 24-h blank run for developing the wind field. The dispersion study showed that the pollutant from the present source location did not directly affect the Yosu City, but showed high concentrations at locations behind the hills 5 to 6 km away from the source according to wind directions. When the wind speed was low, close to calm conditions, the pollutant was detected at upstream locations 6 to 7 km from the source. In comparison with the results from the RAMS simulation, the Industrial Source Complex Short-Term Model (ISCST3) predicted a narrow dispersion that was sensitive to the wind direction. When the wind velocity was affected by the local environment, the ISCST3 calculation using that data also gave a lop-sided result, which was different from the distribution of the pollutant reproduced by RAMS.

Key words : RAMS simulation, terrain effects, sensitive location, low wind speed, ISCST3

1. 서 론

대기확산을 이해하고 해석하려는 노력이 여러 가

지 방법으로 시도되고 있으나, 평균적 의미에서도 실제 현상을 정확히 예측하기는 쉽지 않다. 평탄한 지형에서도 자연계에는 일주기(日週期), 관성 주기와 같은 대기순환이 존재하고, 복잡 지형에서는 지

형 변화에 의하여 발생하는 비정상적 비균일 바람장 때문에 오염물질의 거동을 짐작하기가 더욱 어려워진다(Pielke *et al.*, 1992). 정상적이고 균일한 바람장을 가정하여 확률적 관점에서 대기확산을 예측하는 가우시안 플룸이나 퍼프 모델과는 별도로, 많은 연구자들이 3차원 실제 공간에서의 대기 확산을 재현하고자 노력하고 있다. 오염물질은 대기와 함께 이동하므로 이와 같은 노력은 결국 어떠한 방식으로 기상을 예측하느냐와 연결된다. 이상적이라면 기상 관측소의 측정 자료를 이용하여 바람장을 구성할 수 있고, 이 경우 실제 측정 자료를 이용하므로 현실에 근접한 결과를 얻을 수 있다는 유리한 측면도 있다. 그러나 측정 자료의 시간적, 공간적 해상도가 언제나 문제가 되고, 무엇보다도 가정과 예측이 불가능하다(Kim *et al.*, 2000).

본 연구에서는 3차원 수치모델인 RAMS (Regional Atmospheric Modeling System)를 이용하여 대기 확산을 모사하였다. RAMS는 1970년대 콜로라도 주립대학에서 개별적으로 개발된 구름모델과 지형 변화에 의한 대기순환 모델을 결합시킨 기상 모델이다(Walko *et al.*, 1995). 기초 방정식은 연속 방정식과 운동 방정식, 열역학 방정식, 수분에 대한 물질 방정식이며, 기본적으로 압축성 유동을 모사하나 정역학 근사를 사용할 때에는 비압축성 유동 혹은, 압축성 유동으로부터 음파를 제거한 비탄성(anelastic) 유동을 가정할 수 있다. 1980년대 이후 중첩 격자(grid nesting) 기능의 강화와 함께 도시규모 이하부터 대규모의 대기순환까지 광범위하게 사용되도록 개발되었으나, 대규모 기상 변화를 주로 취급하는 여타 모델에 비하여 지형변화가 중요한 지역 단위의 중, 소규모 기상 해석에 강점이 있다. RAMS를 이용하는 방법은 (1) 각 측정소의 고층 기상자료로부터 등온위 분석을 이용하여 초기자료를 구성하고, 일정 시간 간격으로 실제 기상자료를 4DDA (4-Dimensional Data Assimilation) 기법으로 동화시켜 실제 기상상태를 모사하는 방법과, (2) 대표 측정소의 고층 기상자료를 이용하여 모델의 각 층에서 고도별로 균일한 초기조건을 가정한 후 기상 조건 아래서 기상 변수가 발달되는 과정을 관찰하는 방법이 있다.

여수지역은 복잡한 해안선의 반도에 산지가 분포되어 있어 통상적인 수단에 의한 대기확산 예측이

어려운 지역이다. 그럼에도 광양만을 중심으로 여천공단 등 대규모 공단이 위치하여 대기오염물질 배출이 많고 석유화학 공장으로부터 유독물질 누출사고의 가능성도 상존한다(김영성 등, 1998, 1999). 본 연구에서는 여수지역의 산지와 해안선 분포가 바람장 형성과 오염물질 확산에 미치는 영향을, 1, 2부 두 편의 논문을 통하여 알아보았다. 오염물질은 여천공단 중심의 한 지점에서 대기와 동일한 성질의 물질이 배출되는 것을 가상하였고, 1부에서는 영역 전체에서 일정 온도를 가정하여 지형의 영향을, 2부에서는 일사에 의하여 육지와 바다가 온도 차이를 보일 때 확산의 모습을 조사하였다. 관심 영역은 통상의 점오염원 배출에서와 같이 여천공단을 중심으로 사방 10여 km 정도이며, 따라서 수평방향으로 1 km 이내의 격자 분할과 이에 상응하는 수직 분할을 시도하였다. 아울러 본 연구의 농도분포 계산 결과를 보다 익숙한 가우시안 확산 모델의 계산 결과와 비교함으로써 3차원 수치모델 이용의 특성과 함께 확산모델 이용의 제한점, 확산모델 이용의 의미 등을 알아보았다.

2. RAMS 모사

2.1 모사 영역과 격자 구조

여천공단을 포함한 관심 영역의 크기는 한 변의 길이가 십 수 km를 넘지 않으나, 북쪽에는 해발 1,920 m의 지리산이, 남쪽에는 바다가 위치하여 이 지역 대기 순환의 큰 흐름을 결정한다. 따라서 본 논문에서는 그림 1과 같이 지리산부터 제주도 남쪽을 포함하는 420 km × 420 km의 영역을 격자 I로 하고, 여천공단을 중심으로 약 12 km × 12 km의 영역을 격자 IV로 하는 4개의 격자계를 설정하였다. 표 1은 격자별 수평, 수직 방향의 구분을 보여주고 있다. 영역이 축소됨에 따라 수평 방향의 격자 간격이 대략 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{2}$ 씩 줄고 있다.

1부 논문은 지표면의 지형 변화에 의한 대기 순환을 다루고자 하는 까닭에 수직 방향으로 높을 필요는 없으나 지리산의 높이를 감안하여 충분히 8 km까지 영역을 설정하였다. RAMS는 지형의 높이를 변수로 한 σ 좌표를 이용하고 있는데, 본 연구에서는 수직 방향으로 중첩 격자를 사용하지 않아 모든 격자에서 수직방향으로 격자 구분이 동일하였

Table 1. The model grid parameters.

	Grid I	Grid II	Grid III	Grid IV
Number of grid points in the X, Y, and Z directions	35 × 35 × 21	26 × 26 × 21	32 × 32 × 21	35 × 35 × 21
Horizontal grid spacing	12 km	3 km	1 km	1/3 km
Vertical grid spacing		30 m in the lowest layer 1,000 m in the highest layer		

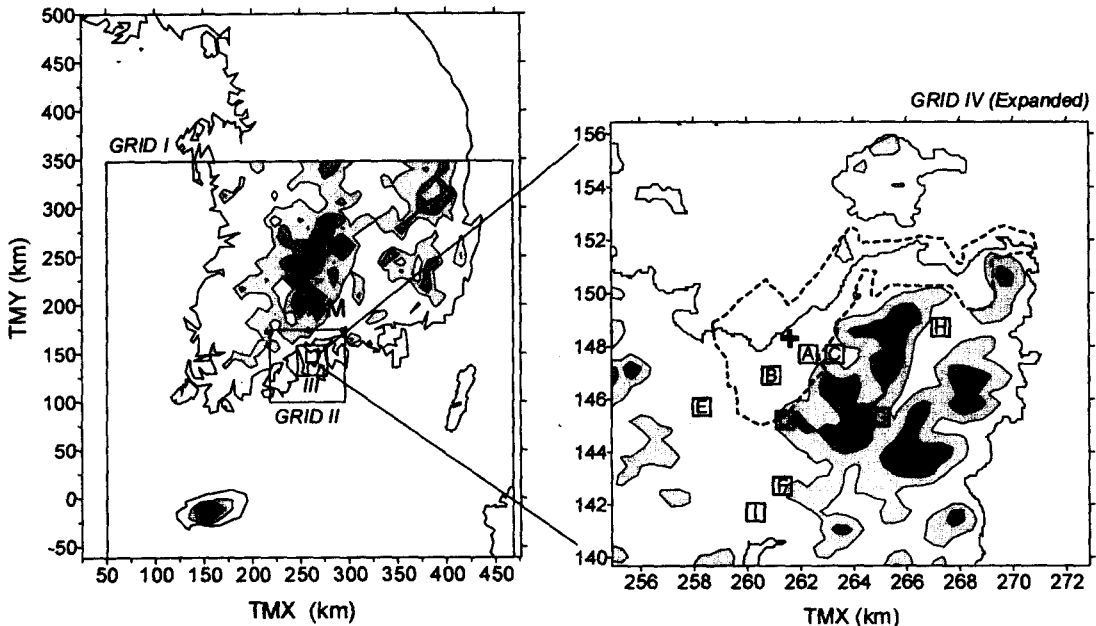


Fig. 1. Modeling domain and grid locations. The boundary of the Yochon Industrial Estate including the reclamation area is represented by a dotted line in the right figure. The domain of GRID IV is larger than the actual one, and the adjective "Expanded" is added to the designation (see the text for details). The filled contour represents the elevation above sea level at intervals of 200 m in the left figure and 100 m in the right figure. 'M' indicates Mt. Chiri whose peak is 1,920 m above sea level and the '+' symbol within the estate denotes the location of the hypothetical source. Capital letters [A] through [I] are receptors at administrative districts, 'dong': [A] Pyongyo, [B] Wolha, [C] Chungchung, [D] Chusam, [E] Haesan, [F] Ponggye, [G] Homyong, [H] Sangam, and [I] Yochon City Hall.

다. 최하층의 격자 간격은 지표 부근의 변화를 가능한 한 자세히 살펴보기 위하여 30m로 하였으며, 지표면부터 높이가 상승함에 따라 격자 간격을 크게 하여 최상층의 격자 간격은 1km로 하였다.

그림 1의 오른쪽 그림은 격자 IV로 설정한 여천 지역의 모습이다. 그림 1의 격자 IV 영역은 실제 모사영역보다 큰데, (1) 모사 과정에서 대기 흐름이 자연스럽게 발달될 수 있도록 풍향에 따라 격자 IV의 위치를 조금씩 이동시켰기 때문에 이들을 모두 포

괄함과 동시에, (2) 여천공단 주변의 지형 조건을 충분히 알아볼 수 있도록 하기 위함이었다. 점선으로 표시된 부분이 여천공단이며 오염물질은 공단 중앙의 공단 관리사무소 위치에서 배출되는 것으로 가정하였다. 배출원에서 내륙으로 월하동(B), 평여동(A), 중흥동(C)들이 인접해 있다. 이들 뒤로 400~500 m 높이의 산이 이어있고, 호명동(G)과 상암동(H)을 사이에 두고 비슷한 높이의 산들이 겹으로 놓여 있다. 반면 공단 남서쪽 해산동(E)부터 여수

시청 (I)에 이르는 지역은 비교적 평탄하다.

2. 2 모사 방법

초기 조건으로 모델의 영역 내 모든 층에서 수평 방향으로 균일하게 여수지방의 연평균 풍속 4 m/s 를 가정하였으며, 유입 방향으로는 기울기가 0, 유출 방향으로는 내부의 2점을 이용하여 경계값을 결정 함으로써 영역 내 대기 흐름이 자연스럽게 발달되 도록 하였다. 그러나 경계 부근에서 지형의 변화가 심할 때에는, 특히 유입 경계 부근에서 지형 변화가 심할 때에는 경계조건을 만족시키기 어려워 대기 흐름의 발달에 장애가 될 수 있기 때문에 경계면으 로부터 5개 격자점까지 지형의 높이가 일정하게 유지되는 것으로 가정하였다 (420 km × 420 km의 격자 I 영역에서 바깥쪽 사방 48 km가 가상의 지형 조건 을 이용하게 되므로 과도한 것으로 생각할 수 있으 나 실제에 있어서는 북쪽 경계를 제외하고는 대부분 해수면 높이이므로 크게 무리한 것은 아니었다). 표 2는 본 연구에서 사용한 모델의 조건들이다. 지 형 변화 외에 일사 등 기타 인자의 영향을 가능한 한 배제하였으며, 이에 따라 초기 조건으로써 지표

층에서는 기온과 습도 변화가 없는 것으로 가정하 였고, 고도에 따른 기온 변화는 대기의 평균 감율을 적용하였다.

먼저 다양한 조건에서 바람장이 발달되는 모습을 살펴보기 위하여 몇 개의 초기 풍향 조건을 지정한 후 대상 영역인 격자 IV 영역 내 바람장의 변화를 조사하였다. 그림 2가 그 결과인데, 이 때 속도 성분 의 최대 상대 변화는,

$$\text{Maximum Relative Change} = \frac{U^{(n+1)} - U^{(n)}}{U_{MAX}^{(n)}} \quad (1)$$

로 표시되며, U는 x, y 및 수직 속도성분인 u, v, w로 부터 $\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$ 와 같이 계산된다. 상첨자 (n)과 (n+1)은 해당 변수가 (n) 시간과 (n+1) 시간에 산 출되었음을, 하첨자 MAX는 해당 변수의 값이 격자 IV 영역 내 모든 격자점의 값 중 최대치임을 각기 의미한다. (1) 식은 지표층에 대하여서만 계산하였는 데 초기의 균일한 기상 조건이 지형 변화에 의하여 발달되는 과정에서 가장 큰 변화는 아무래도 지표 층에서 일어날 것으로 판단하였기 때문이다. 그림 2 는 초기 풍향에 관계없이 대부분의 변화가 처음 6

Table 2. RAMS options used in this study.

Model characteristic	Option used
Hydrostatic option	- Non-hydrostatic
Initialization	- Horizontally homogeneous initialization
Time differencing	- Hybrid scheme: · Leap-frog scheme for velocity and pressure components · Forward scheme for thermodynamic variables - Time-split differencing with implicit scheme for vertical pressure gradient and vertical divergence terms
Advection scheme	- 2nd-order flux form
Upper boundary	- Rigid lid ($w=0$ at the model top) with Rayleigh friction absorbing layer to damp gravity wave · Rayleigh friction layer: 3 layers from the top · Dissipation time scale: 90 s
Lateral boundary	- Klemp-Wilhelmson (1978a, b) condition applied on the coarse grid only to the normal velocity component · Phase speed of internal gravity waves: 20 m/s - Zero-gradient condition at inflow boundaries and radiative condition at outflow for other variables
Vertical diffusion	- Mellor and Yamada (1982) scheme based prognostic turbulent kinetic energy equation
Horizontal diffusion	- Deformation K-theory · Adjustment parameter: 0.2 · Ratio of horizontal K_h to K_m for deformation: 3.0
Surface layer	- Initially no heat and moisture fluxes, only considering momentum flux - Roughness length: 0.4 m - Albedo: 0.16 - Water surface temperature: 20°C

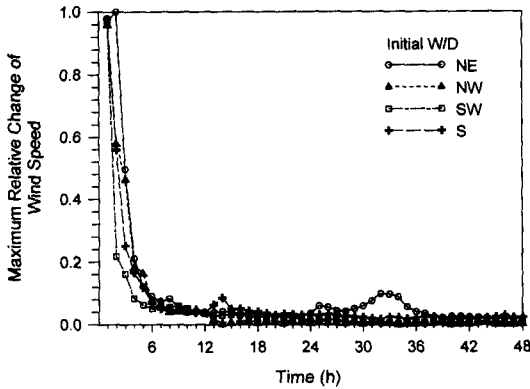


Fig. 2. Temporal variations of maximum relative change of the wind speed at the ground level on Grid IV.

시간 동안 이루어지며 대략 12시간이 지나면 최대 상대 변화의 크기가 10^{-2} 정도로 안정됨을 보여주고 있다.

따라서 본 논문에서는 (1) 초기 조건으로써 8개 풍향을 지정한 후 오염물질이 배출되지 않은 상태에서 12시간 동안 적분하여 모사된 바람장의 모습으로부터 확산이 문제될 것으로 예상되는 풍향을 선정하고, (2) 선정된 풍향에 대하여는 바람의 상대변화가 충분히 안정되도록 12시간을 더 모사하여 총 24시간 동안 바람장을 발달시킨 후 이후 24시간 동안 오염물질을 배출시키며 확산되는 과정을 조사하였다. 오염물질의 확산은 RAMS의 기본 변수에 스칼라량을 하나 추가하는 형태로 계산하였다. 오염물질은 그림 1과 같이 공단 중앙의 지표층 격자점에서 부피 오염원 형태로 대기와 같은 조건의 물질이 $1 \text{ mg/kg-air} \cdot \text{s}$ 의 속도로 배출되는 것으로 가정하였는데, 24시간 배출과 평지에서의 격자 크기 ($1/3 \text{ km} \times 1/3 \text{ km} \times 30 \text{ m}$)를 감안하면 총 배출량은 대략 346톤이다.

3. 예비 실험

3.1 바람장 분석

먼저 지표층¹⁾ 위치 격자 I 영역에서, 북풍, 북동풍,

동풍 등 초기 8개 풍향으로부터 12시간 동안 발달된 여수 지방의 바람장 모습을 살펴보면, 북동풍, 동풍, 남동풍의 모습이 거의 유사하였으며, 남서풍, 서풍, 북서풍의 모습 또한 거의 유사하였다. 그림 3은 풍향 선정을 위한 예비 모사실험 중 북동풍과 남서풍의 초기 조건에서 12시간 동안 발달된 격자 I 영역 지표층의 바람장 모습이다.

그림 3(a)는 초기 풍향이 북동풍일 때 바람장의 모습이다. 동쪽과 특히 남동쪽 바다에서는 대마도 등 일본의 섬을 지나며 지면 마찰에 의하여 부분적으로 풍속이 낮아지는 것을 제외하고는 초기 북동풍의 모습이 유지되고 있다. 그러나 서해에서는 초기 북동풍이 지리산 등 한반도 남쪽 산지에 가로막혀 힘을 잃으며 북풍으로 변하였고, 남해안과 남쪽 근해에서는 남쪽의 산지를 돌아가는 형태의 동풍이 발달되고 있다. 초기 풍향이 북동풍임에도 불구하고 여수 지역에는 동풍이 불게 되는데, 초기 풍향이 남동풍일 경우에는 남동쪽에서 접근하던 바람이 한반도 남쪽 산지에 막혀 방향을 전환하며 여수 지역에는 역시 동풍이 불게 된다.

그림 3(b)는 초기 남서풍 조건에서의 바람장 모습이다. 남서쪽에서 접근하던 풍향이 지리산 등에 막히며 서풍으로 전환되는 모습을 볼 수 있다. 결국 초기 풍향이 북동풍과 북서풍일 때는 남쪽의 산지를 돌아가는 바람이, 남동풍과 남서풍일 때는 남쪽의 산지에 막혀 여수 지방에는 각기 동풍과 서풍이 불게 된다. 초기 풍향이 동풍과 서풍일 때, 특히 서풍일 때는 상류에 산지가 위치함으로써 바람장이 다소 영향을 받으나 대략의 모습은 크게 다르지 않다.

따라서 그림 4에서는 그림 3에서 살펴본 초기 북동풍, 남서풍 조건과 함께 남풍과 북풍 조건에서 발달된 격자 IV 영역의 바람장의 모습을 살펴보았다. 그림 4(a)는 초기 풍향이 북동풍일 때의 바람장의 모습이다. 북쪽의 광양만에서는 그림 3(a) 여수 지역의 동풍이 유지되는 반면, 우측 아래쪽에 위치한 산지의 영향으로 공단 남동쪽 평탄한 지역에서는 북동풍이 많다. 초기 풍속이 4 m/s 였음에도 불구하고 산지의 지형이 높은 지역에서 풍속이 다소 높을 뿐 대부분의 지역에서 풍속이 2 m/s 이하로 낮다. 특히

¹⁾ 엇갈린 (staggered) 격자계를 채택함에 따라 u, v 등 수평방향 속도성분은 격자 중앙에서 정의된다. 그러나 표 1과 같이 수직 방향으로 격자 간격이 균일하지 않을 때에는 격자 중앙의 위치 역시 자연스럽게 변할 수 있도록 기하학적 (geometric spacing) 알고리즘을 이용하여 계산하게 된다 (Walko, 1999). σ 좌표계에서 지표층 격자크기는 지표면의 고도에 따라 변하므로 평탄한 지형을 가정하면 지표층 격자 크기는 30 m 이나 고도가 높아질수록 격자 간격이 점차 커지므로 u, v가 정의되는 지표층 격자 중앙의 높이는 정중앙의 15 m 보다 낮은 13.1 m 이다.

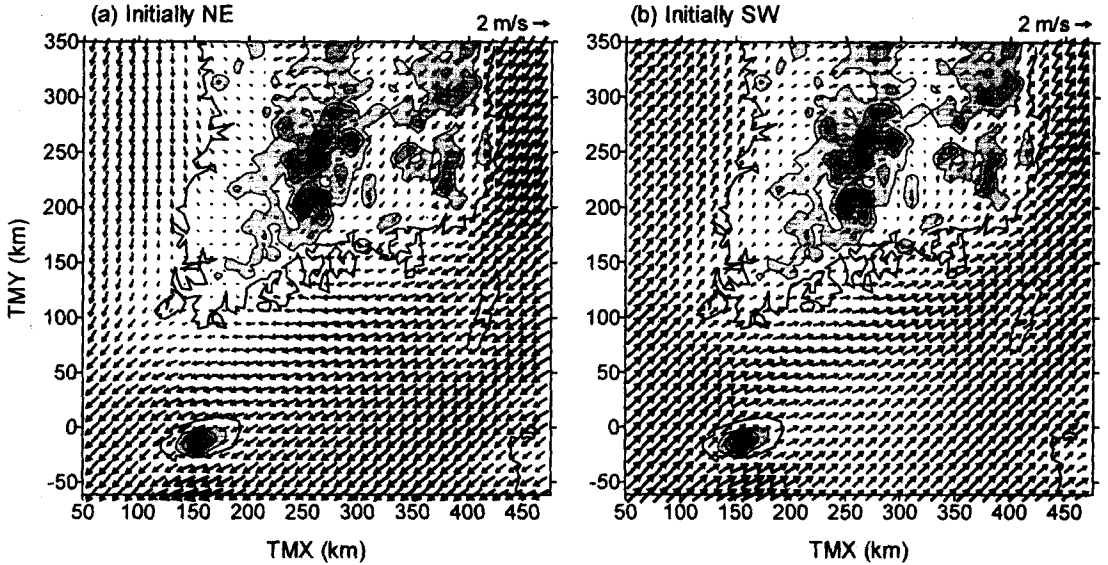


Fig. 3. Wind fields after 12-h simulation for Grid I. The filled contour represents the elevation above sea level at 200 m intervals. Initial wind directions are (a) northeasterly and (b) southwesterly.

남서쪽 중앙 여수 시청에 이르는 지역은 우측 아래 산지를 아래쪽에서 돌아오는 바람이 위쪽에서 불어 오는 북동풍과 만나며 풍속이 더욱 낮다.

그림 4(b)의 초기 남서풍 조건의 풍향은 그림 4(a)의 북동풍 조건의 풍향과 반대 양상을 보이고 있으나 육지 풍속은 대체로 그림 4(a)보다 낮다. 그림 4(c)와 그림 4(d)는 각기 초기 북풍과 남풍 조건의 바람장 모습인데 북쪽 지리산의 영향으로 풍속이 매우 낮다. 특히 그림 4(d)의 초기 남풍 조건의 바람장은 북쪽의 지리산이 바람을 막아 일부 산지를 제외하고는 풍속이 정체에 가까우며, 오염원 부근부터 광양만까지 육안으로 구분하기 어려우나 북쪽의 산지에 막혀 되돌아오는 바람도 있다.

3.2 풍향 선정과 풍속 특성

확산에 불리한 조건은 (1) 풍하측 인접지역에 지형지물이 있어 확산을 막는 경우, (2) 풍상측에 지형지물이 있어 오염원이 와류 영역에 드는 경우, (3) 오염원 주변의 풍속이 낮아 확산이 정체되는 경우, (4) 인구 밀집지역이나 병원, 학교 등 민감한 지역으로 오염물질이 확산되는 경우들이 있다. 그러나 그림 4에서 볼 수 있는 것과 같이 본 논문에서는 ①

산지로부터 얼마만큼 거리가 떨어진 해안가에 오염원을 배치하였고 ② 인접한 산지의 오염원 쪽 지형이 가파르지도 않아, 그림 4(c)와 같이 오염원에 가까운 산지로부터 바람이 불어간다 하여도 오염원이 상류측 지형지물의 와류 영역에 드는 (2)의 경우는 생각하기 힘들다.

따라서 본 논문에서는 (1)의 경우로써 오염원으로부터 바람이 산지를 향하는 남서풍과 북서풍을, (4)의 경우로써 오염물질이 우측 중앙의 평탄한 지역을 지나 인구 밀집지역인 여수시를 향할 수 있는 북동풍을, 그리고 (3)의 경우로써 가장 정체가 심한 남풍을 확산 실험을 위한 풍향으로써 각기 선정하였다. 이때 북동풍과 북서풍, 남서풍은 1961년부터 1990년까지 30년 통산 각기 13.2%, 12.9%, 8.9%로 여수관측소에서 가장 빈도가 높은 3개 풍향이며, 또한 남풍의 30년 평균 풍속은 2.6 m/s로 남남동풍과 함께 풍속이 가장 낮은 풍향이어서 본 논문의 선정 결과를 뒷받침하고 있다(기상청, 1991).

그림 5에서는 이와 같이 선정된, 대기확산 예측에 이용될 풍향별 풍속을 여수관측소 위치에서 관측치와 비교하였다. 관측치로는, 1991년부터 1997년까지 광주고층기상관측소에서 관측된 850 hPa의 풍속이

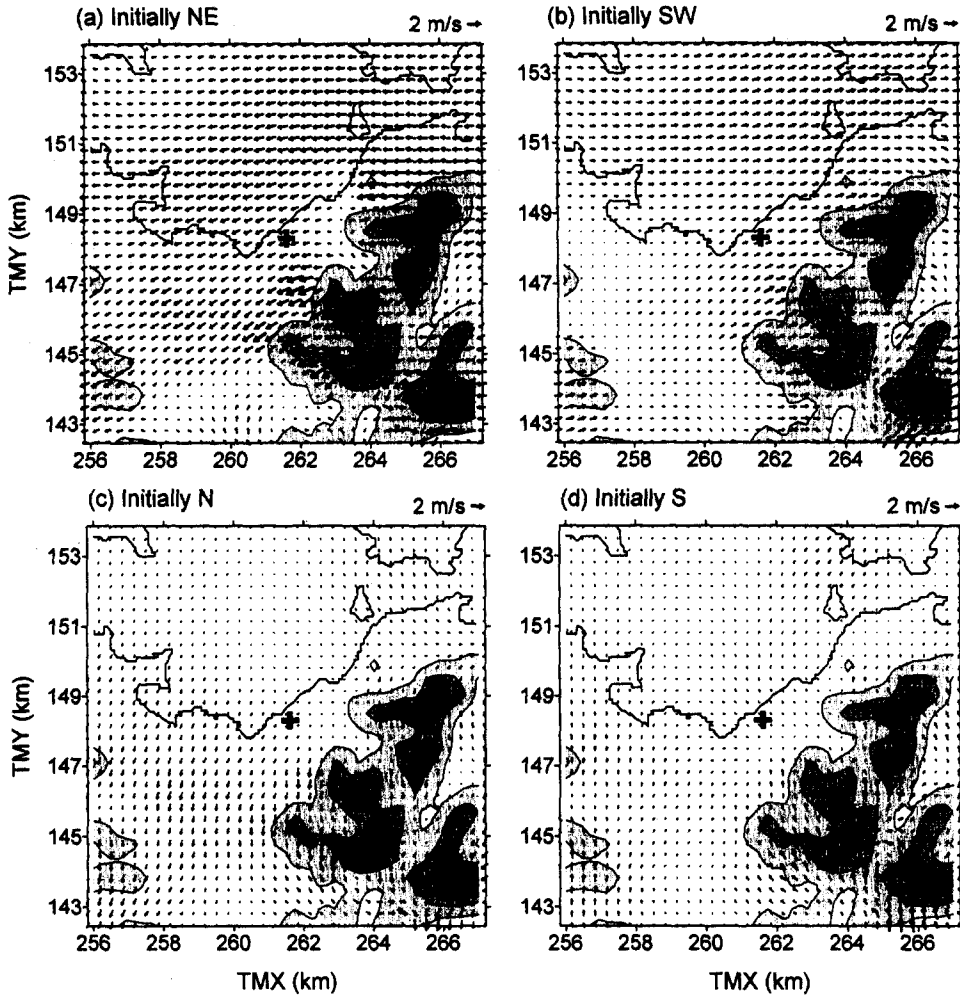


Fig. 4. Wind fields after 12-h simulation for Grid IV. The filled contour represents the elevation above sea level at 100 m intervals. The cross symbol at the center indicates the source location. Initial wind directions are (a) northeasterly, (b) southwesterly, (c) northerly, and (d) southerly.

2~6 m/s일 때 여수관측소의 풍향별 풍속분포를 조사하였는데, 850 hPa에서의 풍속을 제한한 이유는 초기 풍속 4 m/s가 상층에서는 거의 변하지 않고 유지되기 때문이었다. 계산치로는, 격자 III 영역의 여수관측소 위치의 격자점에서 풍향 선정에 사용된 12시간 계산치와 확산 예측의 마지막 시간대인 48시간 계산치를 함께 비교하였다. 먼저, 풍향별로 사각형으로 표시된 12시와 48시의 풍속 계산치를 살펴보면, 시간에 따른 차이가 거의 없거나 차이가 있더라도 크지 않아 본 연구의 확산 예측이 거의 정

상상태에서 이루어졌음을 나타내고 있다.

그러나 초기 북동풍과 남풍의 풍속은 평균으로부터 표준편차의 범위를 벗어나 있고 북서풍과 남서풍의 풍속도 표준편차 범위의 하한에 위치하는 등 본 연구의 풍속 조건은 통상의 측정치에 비하여 매우 낮다. 이는 기본적으로 본 연구의 바람장이, 평균 풍속을 기초로 초기 4 m/s를 설정한 이후 외력(external force)이 없는 상태에서 표 2와 같이 지표마찰에 의하여 지표층 풍속이 계속 저하되었기 때문이다. 그림 5를 보면 풍향별 풍속은 대략 0.5~1.0

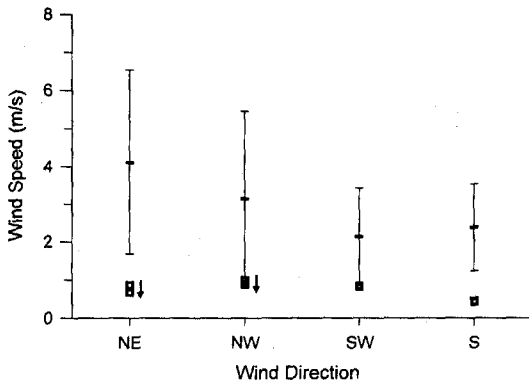


Fig. 5. Comparison of the wind speed used in the present calculation with the observed one at the Yosu weather station. Open rectangles denote the calculated wind speeds; two rectangles are those after 12 and 48 hours, respectively, and the arrow represents the variation between the two times. The wind direction of the calculated wind speed means that of the initial wind field. The range of the observations indicates the mean with the standard deviation. The observations at the Yosu station are taken when the wind speed at 850 hPa at the Kwangju upper-air station is between 2 and 6 m/s by considering the initial wind field of 4 m/s that is maintained except the surface layer throughout the simulation.

m/s 정도이다. 이와 같은 풍속은 평균 풍속에 비하여서는 낮은 풍속임에 틀림이 없으나 여수관측소 30년 통산 정온(calm) 비율이 8.2%로 낮지 않고(기상청, 1991), 맑은 날 일출을 전후하여 1 m/s 미만의 풍속이 적지 않음을 감안하면(오현선, 김영성, 2000) 이례적인 풍속은 아니다. 결국, 본 연구의 지형 영향 조사를 위한 확산 예측은 앞 부분의 확산에 불리한 풍향 선정과 함께 확산에 불리한 낮은 풍속 조건에서 수행된 것이다.

4. 오염 확산 예측

4.1 RAMS 계산

그림 6의 (a)부터 (d)는 각기 초기 조건이 북동풍, 북서풍, 남서풍, 남풍일 때 48시간 후 격자 IV 영역에서의 오염물질 확산 모습이다. 앞에서 설명한 바와 같이 오염물질은 바람장이 충분히 발달된 24시간 후부터 배출을 시작하였으므로 오염물질 배출

시간은 24시간이다. 오염물질이 자연스럽게 확산될 수 있도록 풍하층에 보다 넓은 영역을 할당하기 위하여 격자 IV의 위치를 이동시킨 결과 격자 IV 영역이 풍향에 따라 조금씩 다르다. 표 3(a)는 풍향에 따른 그림 1의 각 동별 대표 위치에서의 농도이다.

그림 4에서 보여주었던, 초기 풍향과 격자 IV 영역 내 풍향 차이에도 불구하고, 그림 6에서 오염물질이 확산되는 전체적인 모습에는 초기 풍향의 영향이 작지 않다. 그림 6(c)의 남서풍의 오염물질 확산이 배출 초기를 제외하고는 동쪽을 향하고 있고, 그림 6(d)의 남풍의 오염물질 확산이 북서쪽을 향하고 있는 점들이 다른 정도이다.

그림 6(a)는 초기 북동풍 조건에서의 확산 모습이다. 배출 초기 오염원 남동쪽 산기슭에서는 확산이 제한되며 농도가 높고, 오염물질은 북동풍을 따라 서쪽과 남동쪽 산지 사이의 평지를 따라 이동하나 남쪽의 여수 시청 북쪽에서 중심선이 약간 서쪽으로 이동하여 시청이 직접 영향을 받지는 않는다. 이에 따라 표 3(a)를 보면 I-여수 시청의 오염물질 농도는 확산의 중심선에서 완전히 벗어나 있는 G-호명과 그림의 오른쪽 경계 밖의 H-상암을 제외하고는 인접한 F-봉계와 함께 가장 낮다. 그럼에도 이때 여수 시청의 오염물질 농도는 본 연구에서 고려한 어느 조건에서의 오염물질 농도보다 높다.

그림 6(b)의 초기 북서풍 조건은 (c)의 남서풍 조건과 함께 풍하층에 지형지물의 영향이 예상되는 풍향 조건이다. 특히 북서풍 조건은 겹으로 놓인 산지가 정면을 막고 있는 상태에서, 그림 4에서 짐작할 수 있는 것과 같이 산지 위에서는 풍속도 빨라 지형지물의 영향이 더욱 커질 수 있다. 표 3(a)를 함께 보면 산지를 등지고 있는 A-평여, C-중흥의 농도가 매우 높고, 오염물질의 확산이 비교적 용이한 평지 쪽의 B-월하, D-주삼의 농도도 높다. 오염물질이 산지를 타고 넘는 과정에서 좌우 확산 폭이 커지고 있고, 특히 오염원으로부터 4 km 이상 떨어져, 산지 후면에 위치한 G-호명의 농도가 B-월하 다음으로 높아 주목할 만하다.

그림 6(c)의 초기 남서풍 조건은 지형지물이 측면에 위치하여 전체적으로 오염물질이 산지를 돌아가는 양상을 보이고 있다. 이에 따라 안쪽 산지 방향의 A-평여, C-중흥의 농도가 높고, 다음으로는 오염물질이 산지를 돌아 계곡에 위치한 H-상암의

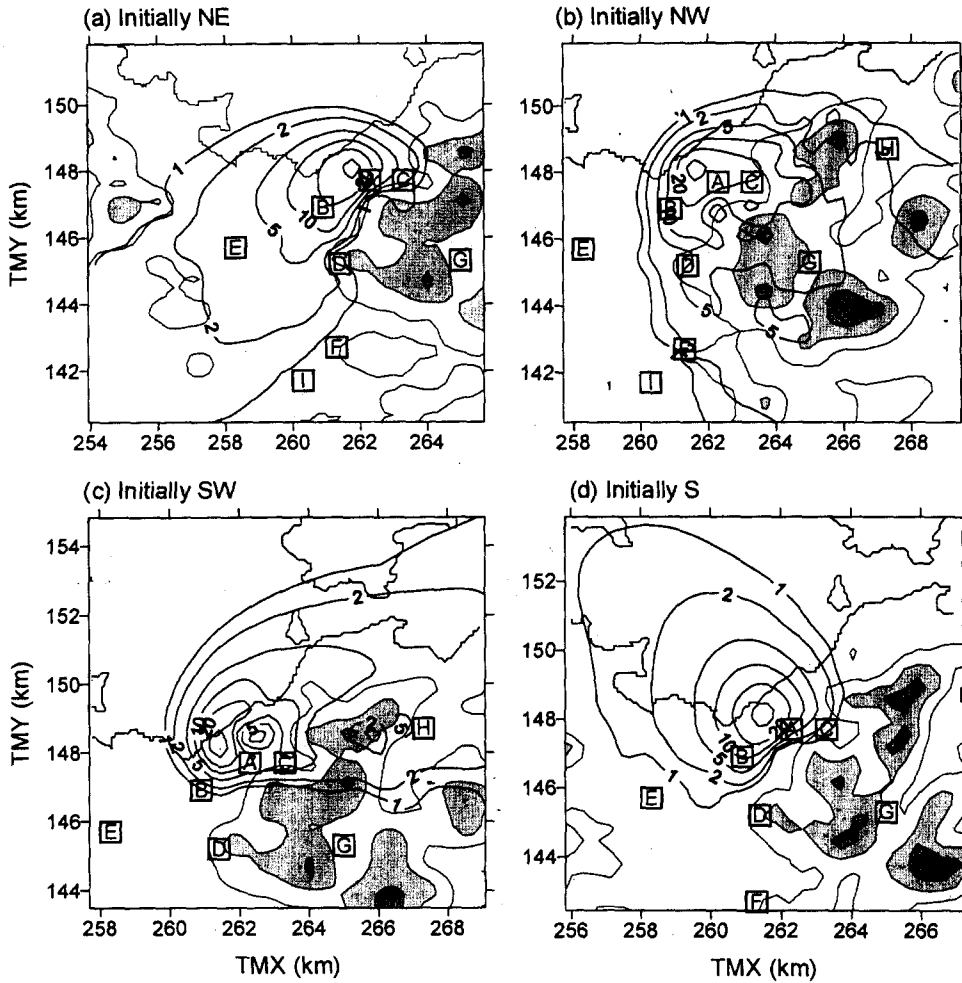


Fig. 6. Concentration distributions on Grid IV after 24-h release at a rate of 1 mg/kg-air · s following 24-h blank simulation for developing the wind field. The label of the concentration contour is expressed in mg/kg-air. The filled contour represents the elevation above sea level. Capital letters [A] through [I] indicate the receptors in the present study. See Table 3 for the designation of the receptors and pollutant concentrations at those sites.

농도가 높다. 그림 6(d)의 초기 남풍 조건에서는, 그림 4의 바람장에서는 풍속이 너무 낮아 관찰하기 어려우나 전체적으로 지리산을 서쪽으로 우회하려는 바람이 형성되며 오염물질이 북서쪽으로 확산되고 오염물질의 확산 폭도 어느 풍향 조건보다 작다. 그러나 정체에 가까운 낮은 풍속으로 풍향의 효과가 상대적으로 작아 상당히 거리가 떨어진 풍상의 I-여수 시정을 비롯하여 F-호계, G-호명들에서도 오염물질이 검출되고 있다.

4.2 가우시안 확산모델과의 비교

국내외에서 수치모델의 이용이 늘고 있으나 상세함에 못지 않게 모델 변수가 많고 현실에 대한 정확성이 이들 변수의 선택에 크게 좌우된다는 점이 부담이 되고 있다. 반면 가우시안 확산모델은 상세함과 정확성은 현저하게 낮지만 지침에 충실할 경우(예를 들면, USEPA, 1986 and ff.) 일정 수준의 결과를 비교적 손쉽게 얻을 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 RAMS에 의한 바람장의 토대 위

Table 3. Pollutant concentrations at selected sites after 24-h release^a (mg/kg-air).

Site Name	Reference Letter in Figs. 6 and 7	Initial Wind Direction			
		Northeasterly	Northwesterly	Southwesterly	Southerly
(a) RAMS calculation ^b					
Pyongyo	A	24.3	33.0	11.6	14.0
Wolhwa	B	16.3	11.8	0.8	9.6
Chunghung	C	2.4	21.9	10.5	1.0
Chusam	D	1.0	6.1	0.0	0.1
Haesan	E	2.6	0.0	0.0	1.7
Ponggye	F	0.6	2.0	0.0	0.1
Homyong	G	0.0	8.6	0.2	0.0
Sangam	H	0.0	1.7	4.1	0.0
City Hall	I	0.8	0.4	0.0	0.1
(b) ISCST3 calculation ^c					
Pyongyo	A	0.0	185.7	0.0	0.0
Wolhwa	B	0.8	0.0	0.0	0.0
Chunghung	C	0.0	0.0	0.0	0.0
Chusam	D	0.0	0.0	0.0	0.0
Haesan	E	0.0	0.0	0.0	0.0
Ponggye	F	0.0	0.0	0.0	0.0
Homyong	G	0.0	14.2	0.0	0.0
Sangam	H	0.0	0.0	0.0	0.0
City Hall	I	0.0	0.0	0.0	0.0

^a Release at a rate of 1 mg/kg-air · s, which corresponds to 346-ton release for 24 hours.

^b Ground-level release from the volume of 1/3 km × 1/3 km × 30 m.

^c Release at 15 m from a point source equivalent to the volume source used in the RAMS calculation.

에서 RAMS의 계산 결과와 확산모델의 계산 결과를 비교하였다. 따라서 수치해석 과정의 오차를 감안하더라도 RAMS에 의한 농도 계산은 주어진 바람장의 특성을 비교적 정확하게 반영한 결과로 볼 수 있다. 복잡지형 확산모델 중에도 CTDMPPLUS (Perry *et al.*, 1989)나 최근의 AERMOD (Paine *et al.*, 1999)와 같이 수치모델에 상응하는 입력자료를 수용할 수 있는 정밀한 모델이 없는 것은 아니다. 그러나 Paine 등(1999)이 AERMOD의 특성을 ISCST3와 비교하여 설명한 것과 같이 ISC (Industrial Source Complex)는 대표적 가우시안 확산모델로서 개발되어 왔고(USEPA, 1995) 국내에서도 중요한 오염원의 영향평가에 수차례 이용된 바 있다(오현선 등, 1997; 조승현 등, 1998).

그림 7은 오염원 위치에서의 바람자료를 이용하여 계산한 ISCST3 계산결과를 그림 6의 RAMS 계산결과와 비교한 것이다. RAMS에서는 지표면에 위치한 부피오염원을 가정하였으나 가우시안 확산모델의 경우 지표 오염원은 배출의 영향이 너무 인근

에 국한되므로(김영성과 손재익, 1993), 본 연구에서는 부피오염원 높이의 1/2인 15m 높이의 점오염원을 가정하였다. ISCST3의 풍향, 풍속은 오염원 위치에서의 값을 이용하였고 RAMS에서도 일사를 고려하지 않았으므로 대기안정도는 중립을 가정하였다.

그림 7을 보면, RAMS의 결과와 비교하여 ISCST3의 결과는 (1) 확산 폭이 너무 작고, (2) 풍향 지정에 민감하다. 표 3(b)는 ISCST3에 의하여 계산된 그림 1의 각 동별 대표 위치에서의 오염물질 농도이다. 표 3(a)의 RAMS 계산 결과와 달리 대부분의 위치에서 농도가 0으로 표시되어 있는데 (a) 북동풍의 E-해산과 (b) 북서풍의 C-중흥, (d) 남풍의 A-평여 등은 거의 등농도 곡선 위에 있음에도 미세한 차이로 농도가 나타나지 않고 있다. USEPA (1986 and ff.)는 풍향에 큰 비중을 두지 않고 오염원으로부터의 거리만을 생각하여 결과를 해석한다면 정확도가 향상될 수 있다고 언급하고 있다. 그러나 복잡지형의 경우, 1차 분석을 위한 CTSCREEN (Perry *et al.*, 1990)도 영역 내 지형 위에 수용체를 지정하여야

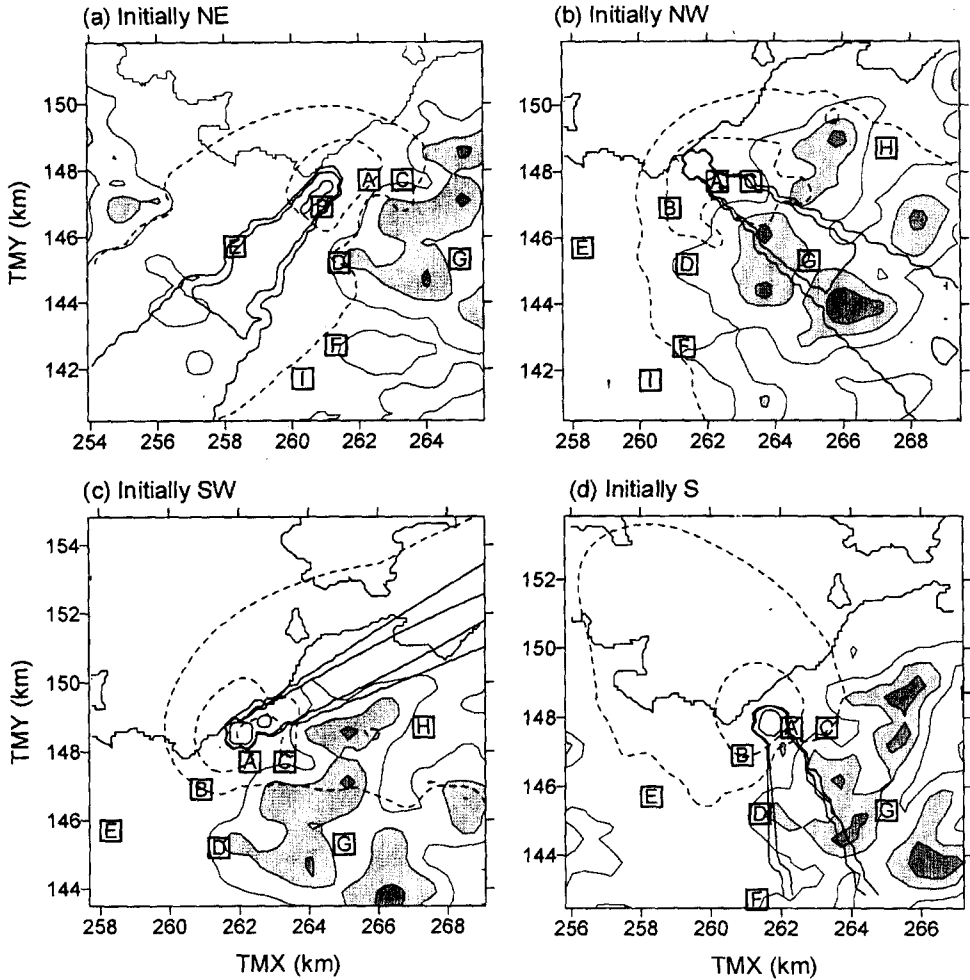


Fig. 7. Comparison of the concentration distributions predicted by RAMS and ISCST3. Concentration contour intervals are 1, 10 and 100 mg/kg-air. Wind data at the source location are used for ISCST3. See Fig. 6 for detailed information on the figure. Also see Table 3 for pollutant concentrations at the receptors denoted by **A** through **I**.

하는 것과 같이 오염원으로부터의 방향에 따라 지형의 효과가 달라지기 때문에 이와 같은 원칙을 적용하기 쉽지 않다.

그림 7에서 가장 극적인 것은 (d) 남풍의 경우이다. 풍속이 낮아 구분하기 쉽지 않으나 오염원 주변 지표층에 국지적으로 광양만으로부터 불어오는 북북서풍이 형성되었고 이를 확산모델의 바람자료로 사용하여 오염물질 이동이 반대로 예측되었다. 혼한 현상은 아니겠으나 복잡지형의 경우, 오염원 위치에

서 실측한 바람자료를 이용할 때에는 주변 관측소와의 비교를 통하여 국지풍 여부와 규모들을 반드시 점검하여야 한다는 좋은 예가 될 수 있다.

5. 결 론

3차원 수치모델인 RAMS (Regional Atmospheric Modeling System)를 이용하여 평균 풍속과 주풍을 고려한 균일한 초기 조건 아래서 지형 조건에 따른

바람장의 변화를 살펴보고, 확산에 취약한 풍향 조건에서 오염물질의 확산을 조사하였으며, 이를 대표적 확산모델인 ISCST3 계산 결과와 비교하였다. 오염물질은 여천공단 중앙의 공단 관리사무소 위치에서 배출되는 것으로 가정하였다. 이에 따라 북동풍과, 북서풍, 남서풍, 남풍들이 자기 인구밀집 지역으로의 확산, 풍하층의 지형지물, 정체 조건의 가능성 때문에 확산에 불리한 풍향으로 선정되었다. 확산이 진행되는 24시간 동안 여수관측소 위치의 풍속은 거의 정상상태였으며 풍속 범위는 풍향에 따라 차이가 있었으나 0.5~1.0 m/s로 낮았다.

조사한 네 경우의 풍향과 배출 조건에서는 인구 밀집지역인 여수시 방향으로는 오염물질이 확산되지 않았으나 풍향에 따라 오염원으로부터 산지 후면에 위치한 5~6 km 거리의 호명동 (G)과 상압동 (H)에서도 농도가 높았으며, 정체에 가까운 풍속 조건에서는 농도가 높지는 않았으나 상당한 거리의 상류에서도 오염물질이 검출되었다. 그러나 이와 같은 계산결과는 풍향, 풍속 등에서 확산에 취약한 대표적 조건을 바탕으로 하였음에도 불구하고, 예를 들어 오염원이 공단 남서쪽 공장 밀집지역에 위치할 경우 오염지역의 분포가 전혀 달라질 수 있는 등 조건 설정에 따라 차이를 보일 수 있으므로 충분히 상대적 관점에서 이해되어야 한다.

ISCST3 계산 결과는 확산 모델의 계산이 풍향 지정에 매우 민감하다는 사실과 함께, 오염원 위치에서 바람자료를 측정하여 이용할 때에는 국지풍 여부를 점검하여야 한다는 점을 다시 한번 확인시켜 주었다. 이는 수치모델 이용이 아직 많은 연구자들 사이에서 공통된 결과를 이끌어내기 어려운 현실 속에서, 정상상태의 복잡지형의 경우에도 일반적 확산모델을 이용한 예측이 쉽지 않음을 의미하는 것이다. 여수지역과 같이 대형 공단이 위치하여 있고 자연 조건이 복잡한 지역의 대기 확산을 조사하기 위하여서는 신중하고 다양한 접근이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 국책사업인 방재기술개발사업과 한국과학기술연구원 자체지원 사업의 일환으로 수행되었습니다. 연구비를 지원하여 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

- 기상청 (1991) 한국기후표, 제 II 권 월별평년값.
- 김영성, 손재익 (1993) 점오염원과 면오염원의 대기환경영향 분석, 한국대기보전학회지, 9, 168-173.
- 김영성, 송철한, 심상규, 김용표, 문길주 (1998) 여천공업단지 봄, 가을 대기중 휘발성 유기화합물 농도 비교 연구, 한국대기보전학회지, 14, 153-160.
- 김영성, 윤도영, 장영수, 문길주 (1999) 여천지역 누출사고 시나리오에 따른 인근지역 피해 분석, 한국대기환경학회지, 15, 151-158.
- 오현선, 김영성 (2000) 여수지역 대기확산의 수치 모사 - II. 일사에 의한 일변화, 한국대기환경학회지, 16, 225-236.
- 오현선, 김영성, 김진영, 문길주, 홍옥희 (1997) 보령화력 지역의 복잡지형이 대기확산 모델링에 미치는 영향 비교, 한국대기보전학회지, 13, 427-437.
- 조승현, 김영준, 원재광, 윤순창 (1998) 대기오염확산모델 (ISCST3)를 이용한 시화지구 내에서의 오염물질 농도분포에 관한 연구, 한국대기보전학회 춘계학술대회, 5월 8-9일, 한양대학교, 논문 번호 J-4.
- Kim, J.Y., Y.S. Ghim, Y.P. Kim, and D.D. Dabub (2000) Determination of domain for diagnostic wind field estimation in Korea, Atmospheric Environment, 34, 595-601.
- Klemp, J.B. and R.B. Wilhelmson (1978a) The simulation of three-dimensional convective storm dynamics, J. Atmos. Sci., 35, 1070-1096.
- Klemp, J.B. and R.B. Wilhelmson (1978b) Simulations of right- and left-moving storms produced through storm splitting, J. Atmos. Sci., 35, 1097-1110.
- Mellor, G.L. and T. Yamada (1982) Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. Rev. Geophys. Space Phys., 20, 851-875.
- Paine, R., R. Lee, R. Brode, R. Wilson, A. Cimorelli, S. Perry, J. Weil, A. Venkatram, and W. Peters (1999) AERMOD: model formulation and evaluation results, A&WMA's 92nd Annual Meeting & Exhibition, June 20-24, St. Louis, MO, Paper No. 99-476.
- Perry, S.G., D.J. Burns, L.H. Adams, R.J. Paine, M.G. Dennis, M.T. Mills, D.G. Strimaitis, R.J. Yamartino, and E.M. Insley (1989) User's Guide to the Complex Terrain Dispersion Model Plus Algorithms for Unstable Situations (CTDMPLUS): Vol. I. Model Description and User Instructions, EPA-

- 600/8-89-041, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, N.C.
- Perry, S.G., D.J. Burns, and A.J. Cimorelli (1990) User's Guide to CTDMPLUS: Volume 2. The Screening Mode (CTSCREEN), EPA/600/8-90/087, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, N.C.
- Pielke, R.A., W.R. Cotton, R.L. Walko, C.J. Tremback, W.A. Lyons, L.D. Grasso, M.E. Nicholls, M.D. Moran, D.A. Wesley, T.J. Lee, and J.H. Copeland (1992) A comprehensive meteorological modeling system - RAMS, Meteorol. Atmos. Phys., 49, 69-91.
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) (1986 and ff.) Guideline on Air Quality Models (Revised), EPA-450/2-78-027R, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, N.C.
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) (1995) User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models: Vol. I - User Instructions, EPA-450/B-95-003a; Volume II - Description of Model Algorithms, EPA-450/B-95-003b, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, N.C.
- Walko, R.L. (1999) ASTER Division/Mission Research Corporation, Fort Collins, CO., personal communication.
- Walko, R.L., C.J. Tremback, and R.F.A. Hertenstein (1995) RAMS - The Regional Atmospheric Modeling System Version 3b. User's Guide, ASTER Division/Mission Research Corporation, Fort Collins, CO.