

여수지역 대기확산의 수치 모사 - II. 일사에 의한 일변화 -

Simulation of Atmospheric Dispersion over the Yosu Area - II. Diurnal Variations by Solar Radiation -

오 현 선 · 김 영 성

한국과학기술연구원 지구환경연구센터
(1998년 12월 20일 접수, 2000년 4월 26일 채택)

Hyun Sun Oh and Young Sung Ghim

Global Environment Research Center, Korea Institute of Science and Technology

(Received 20 December 1998; accepted 26 April 2000)

Abstract

Diurnal variations of wind field and pollutant dispersion over the Yosu area under the insolation conditions of summer and winter were investigated by using the Regional Atmospheric Modeling System (RAMS). Initially, horizontally homogeneous wind fields were assumed on the basis of sounding data at the Kwangju upper-air station for days whose morning wind speeds were below 2 m/s. In these days, the sea breeze prevailed in summer while the land breeze lasted for a few hours in the morning; the effect of synoptic winds was strong in winter with some inclusion of wind variations owing to the interaction between sea and land. The predicted wind direction at the location of the Yosu weather station captured an important change of the sea-land breeze of the observed one. The predicted wind speed and the air temperature agreed with observed ones in a reasonable range. In the morning, both in summer and winter, winds around the source location were diverged and became weak between the mountainous area to the southeast and the Kwangyang Bay to the north. Winds, however, accelerated while blowing to the east and south and blowing on the mountainous area. Complicated wind fields resulted in high pollutant concentrations at almost all receptors considered. These high concentrations in the morning were even comparable to the ISCST3 calculations with the worst-case and typical meteorological conditions designated by USEPA (1996). On the other hand, in the afternoon, the wind field was rather uniform even in the mountainous area with development of mixing layer and the concentration distributions being close to the Gaussian distributions.

Key words : Sea-land breeze, complicate shoreline, pollutant dispersion, seasonal variations, diurnal variations

1. 서 론

일사량 등 대기 운동의 주요 변수가 일변화를 가

짐에 따라, 육지와 해양, 산과 계곡 등 지형 변화가 다양한 경우의 바람장 예측이 더욱 복잡하여 진다. 정상 상태의 균일한 바람장을 가정하는 가우시안 확산모델은 물론 관측자료를 이용하여 바람장의 변

화를 고려할 수 있는 퍼프 모델도 관측 자료의 해상도가 상당한 수준에 이르지 않는 한 이용이 어렵다. 우리나라는 많은 지역이 복잡 지형으로 구성되어 있을 뿐 아니라 해안으로부터도 멀지 않기 때문에 산지와 해양의 영향이 중첩되는 것이 보통이다. 여천공단과 같이 대규모 공단의 영향을 조사할 때에는 복잡 지형 못지 않게 해륙풍의 영향을 고려하여야 하나 우리나라에서는 아직 복잡 지형 모델 이용 조차 흔치 않다(김영성 등, 1998a; 오현선 등, 1997).

해륙풍은 해안선을 사이에 두고 일사에 의한 육지와 바다 온도 차이의 일변화에 의하여 발생되므로 기본적으로 비정상 상태의 3차원적 특성을 지니고 있다(예를 들면, Lyons *et al.*, 1995; Lyons, 1975). 따라서 해륙풍을 정확히 예측하기 위하여서는 3차원 수치모델을 이용하여야 하나 이에 관한 우리의 연구는 이제 시작 단계이다(이화운 등, 1999; 김유근 등, 1996). 이상적으로는 인근의 상층 및 지상 관측 자료를 이용하여 바람장을 구성할 수도 있으나 좁은 영역에서 다양한 변화가 일어나는 우리나라와 같은 대기환경에서는 활용이 쉽지 않은 것이 보통이다(Kim *et al.*, 1998).

본 연구에서는 여천공단의 누출사고 피해평가를 위하여 여수지역을 대상으로 지형 조건에 의한 바람장의 변화와 오염물질 확산을 조사하였던 1부 김영성과 오현선(2000)의 연구에 이어 3차원 수치모델인 RAMS (Regional Atmospheric Modeling System; Pielke *et al.*, 1992)를 이용하여 여름과 겨울의 계절별 일사에 의한 바람의 변화와 이에 따른 오염물질 확산을 살펴보았다. 초기 조건으로서는, 수직 방향의 변화는 있으나 앞의 경우와 같이 수평방향으로 균일한 바람장을 가정하였다. 1부에서와 같이 먼저, 여름과 겨울의 계절별 기상 특성을 검토하여 확산에 불리한 기상 조건을 파악한 후 이들 조건에

서 기상 변수와 오염물질 확산의 일변화를 조사하였으며, 단기 확산 모델링에서(비정상 상태 불균일한) 실제 기상 조건의 1차 근사로서 흔히 이용되는 최악의 조건과 전형적 조건의 확산모델 결과(US-EPA, 1996)와 비교함으로써 이들 조건 설정의 의미를 알아보았다.

2. RAMS 모사

2.1 모사 영역과 격자 구조

1부에서는 수직이나 수평 방향으로 범위가 제한적인 지형의 영향만을 다루었으나 본 논문에서는 일사에 의한 육지와 바다의 온도 변화와 이에 의한 상호 작용이 중요하므로 다음과 같이 모사 영역과 격자 구조를 조정하였다. (1) 격자 I 영역을 동서로 36 km, 남북으로 12 km 넓혀 456×432 km²의 영역을 설정하였으며, 이에 따라 가장 작은 격자 IV의 영역도 13.3×12.3 km²로 넓어졌다. (2) 수직 방향으로 모델 영역을 대류권 전체와 성층권 일부가 포함되도록 18 km까지 높였다. (3) 지표층 높이가 너무 작을 경우 기상변수의 수직변화가 커지면 계산이 불안정해질 수 있으므로 평지에서의 지표층 높이를 70m로 높였다. 표 1은 지형의 영향만을 조사하였던 1부와 비교한 본 논문의 모사 영역과 격자 구조이다.

그림 1은 모사 영역과 격자 모습이다. 격자 I 영역이 다소 넓으나 1부와 거의 유사하다. 1부에서는 여천공단이 위치한 격자 IV를 중심으로 바람장과 농도 분포를 살펴보았다. 그러나 본 연구에서는 육지와 바다사이에 대기순환이 중요하므로 이의 구조를 알아보기 위하여 바람장은 격자 I과 함께 격자 III 영역에서 주로 살펴보았고, 농도 분포만을 1부와 같이 관심 영역인 격자 IV 영역에서 주로 조사하였다.

Table 1. Model grid parameters in the present study compared with those in the previous one for investigating the terrain effects.

	Grid I	Grid II	Grid III	Grid IV	Important changes from the previous study
Number of grid points in the X, Y, and Z directions	39×37 ×25	26×22 ×25	29×29 ×25	41×38 ×25	Model domain is enlarged from 420×420×8 km ³ to 456×432×18 km ³ by adding 4, 2, and 5 grid points in each direction. Horizontal grid spacing is the same as before, but the depth of the lowest layer is increased from 30 m to 70 m.
Horizontal grid spacing	12 km	3 km	1 km	1/3 km	
Vertical grid spacing		70 m in the lowest layer 1,000 m in the highest layer			

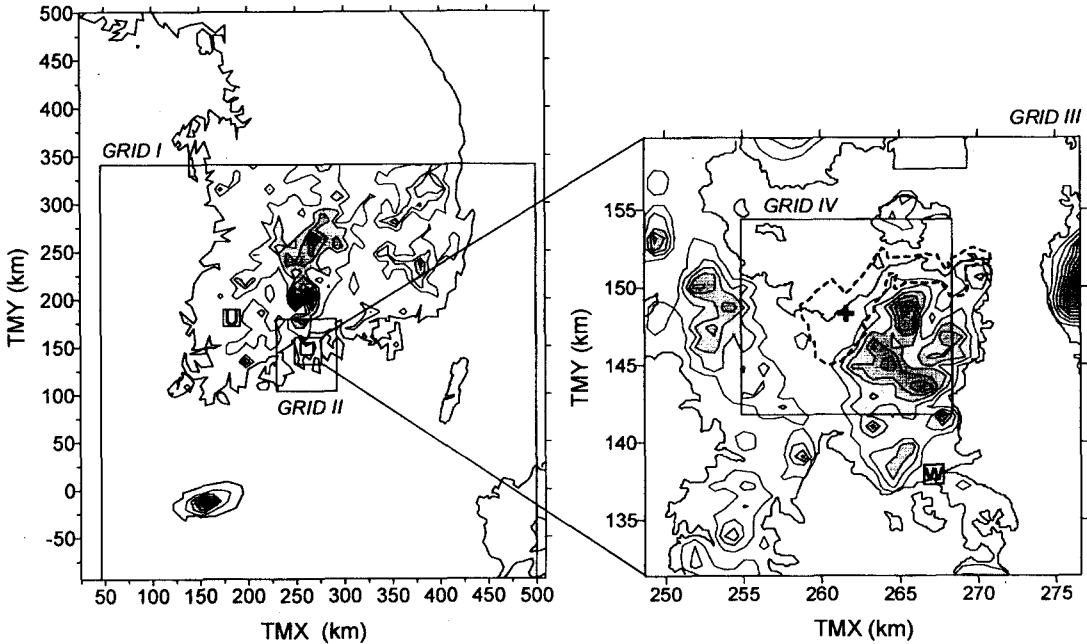


Fig. 1. Modeling domain and grid locations. The boundary of the Yochon Industrial Estate including the reclamation area is represented by a dotted line in the right figure. The filled contour represents the elevation above sea level at intervals of 200 m in the left figure and 50 m in the right figure. The '+' symbol within the estate denotes the location of the hypothetical source. W in the right figure is the Yosu Weather Station and U in the left figure is the Kwangju upper-air station.

2.2 여수지역의 기상 특성

그림 2는 여수 기상관측소에서 1990년부터 1998년까지 9년간 관측한 여름과 겨울철 풍속, 풍향의 일변화이다. 풍속은 벡터 평균이고 풍향은 16방위 관측자료의 최다 빈도 풍향이다. 해륙풍은 육지와 바다의 일변화가 큰 여름철 맑은 날에 발달하는 것이 보통이다. 그림 2의 여름철 풍향 변화는 해륙풍 발달에 불리한 강수와 구름이 있었던 날을 모두 포함한 결과임에도 오전에는 육지에서 남쪽 해양으로 향하는 북북동풍이, 오후에는 해양에서 육지로 향하는 남남서풍의 발달이 뚜렷하다. 그러나 겨울철에는 일사가 약하여 육지와 바다의 온도 차이에 의한 해륙풍이 발달하지 못하는 대신 강한 중관풍의 영향으로 서풍계열의 바람이 거의 일정하게 유지되고 있다. 지표면 근처의 풍속은 겨울철에는 4 m/s 이상이었으나 여름철에는 낮에도 4 m/s를 넘지 못하며, 계절에 따른 풍속의 차이는 밤에 더 크다.

사실 여수지역은 북쪽의 지리산과 남해 사이의

해안에 위치한 까닭에 우리나라에서 평균 풍속이 가장 빠른 지역의 하나이다. 그림에도 김영성 등 (1998b)에 의하면 여름철 맑은 날 이른 새벽에는 안정된 대기조건에서 풍속이 2 m/s 이하로 떨어지고 있다. 평균 운량이 3/10 미만이고 강수가 없었던 날을 맑은 날로 보아 1990년부터 1998년까지 날수를 조사하면 여름철 22%, 겨울철 54%로 강수가 잦은 여름철의 빈도수가 훨씬 낮다. 그림 3은 여름철 여수관측소의 풍속을 2 m/s 구간으로 나누어 평균 운량이 3/10 미만인 맑은 날과 5/10보다 많은 흐린 날의 일변화를 비교한 것이다. 맑은 날에는 밤 11시부터 아침 7시 즉, 일출 때까지 풍속 2 m/s 미만의 낮은 풍속 비율이 약 50%이나 흐린 날에는 이보다 10% 이상 작다. 낮에는 2~4 m/s 구간의 풍속이 현저하게 많아지며 오후 2~4시에 최대가 된다. 반면, 겨울철에는 맑은 날에도 2 m/s 미만의 풍속이 25% 정도로 낮고 맑은 날과 흐린 날의 구분도 명확하지 않다.

그림 2에서 여름철과 겨울철의 빈번한 풍향이 남

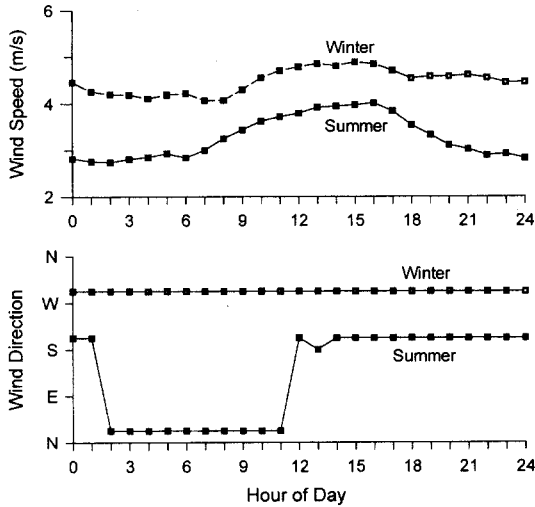


Fig. 2. Diurnal variations of ground-level average wind speed and most-frequent wind direction at the Yosu weather station in summer (June to August) and winter (December to February) from 1990 to 1998.

서, 북동, 북서 등, 1부에서 지형의 영향이 예상되어 확산에 취약한 것으로 분류하였던 풍향이라는 점도 주목할 만하다. 이들 풍향이 확산의 또 다른 주요 요소인 그림 3의 낮은 풍속과 결합될 경우 더욱 불리함은 물론이다. 본 연구에서는 여름과 겨울 계절별로, 아침 풍속이 낮은 맑은 날에 대하여, 일출 부근과 오후의 바람장과 농도 분포를 풍속이 낮을 경우와 높을 경우의 전형적 형태로 보아 특성을 살펴 보고 비교하였다.

2.3 모사 방법

모사 방법은 기본적으로 1부와 유사하다. 그러나 앞의 모사가 초기의 바람장 설정 후 어떠한 외부의 힘도 가해지지 않은 채 지형 조건에 의한 바람장 변화를 조사하였던데 비하여 본 연구에서는 일사에 의한 지표면의 온도 변화를 모사하여야 하므로 토양층이 포함되고, 지표층의 수직 변화 등이 고려되었다. 표 2는 1부와 본 연구 모사 방법의 중요한 차이를 정리한 것이다. 토양층은 1m 깊이에 7개 층을 가정하였다. 토양층의 초기 온도는 여수관측소의 관측치를 이용하였으나 수분량은 관측치가 없어 계절

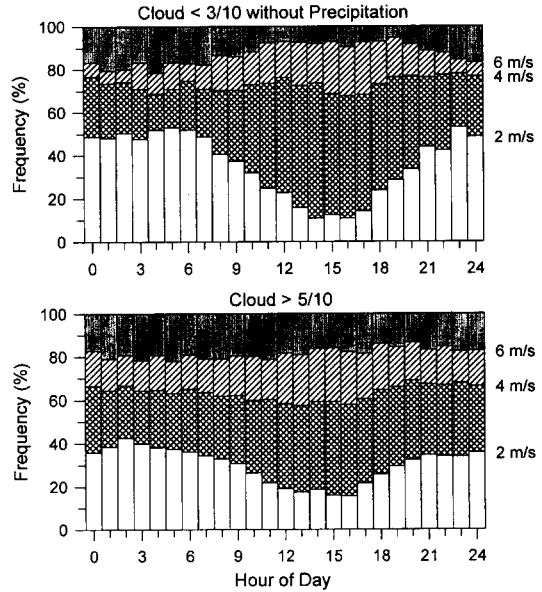


Fig. 3. Diurnal variations of wind speed distribution at the Yosu weather station in summer from 1990 to 1998. Each section represents the frequency of wind speed < 2 m/s, 2 to < 4 m/s, 4 to < 6 m/s, and 6 m/s and higher from the bottom, respectively. The upper figure shows variations on clear days with mean cloud cover below 3/10 and the lower figure on cloudy days with mean cloud cover above 5/10.

별로 모사실험을 통하여 추정하였다(오현선, 김영성, 1999). 토양과 식생은 영역 내에 균일하다고 보아 모래가 섞인 점토질의 이암(sandy clay loam)과 침엽수림을 가정하였다. 해수면 온도는 NCAR(National Center for Atmospheric Research)에서 제공하는 우리나라 지역의 일평균 온도를 사용하였고 모사 기간 동안 일정하였다.

1부에서도 언급하였지만 균일한 초기조건을 가정하는 현재의 모사실험에서는 하층만이 변할 뿐 상층의 모습은 거의 그대로 유지되면서 하층의 기상 변화에 지속적인 영향을 미치므로 초기조건 설정이 중요하다. 본 연구에서는 그림 2와 3의 결과에 따라 다음의 3단계에 걸쳐 여름과 겨울 각각 아침에 확산이 불리한 맑은 날 평균일의 초기조건을 설정하였다. 즉, 1990년부터 1998년까지 9년간 여수관측소 기상 관측치로부터 여름과 겨울 각각, (1) 강우가 없

Table 2. Important modeling options used in the present study being different from the previous one.

Model characteristic	Previous study for investigating the terrain effects	Present study for investigating the diurnal variations
Initialization	Uniform wind field with a speed of 4 m/s at a given direction	Horizontally homogeneous wind field on the basis of observations at the Kwangju upper-air station
Surface Layer	Initially no heat and moisture fluxes, only considering momentum flux	Louis (1979) parameterization of vertical heat, vapor and momentum fluxes
Soil and vegetation	Not considered	Multi-level prognostic soil model (Tremback and Kessler, 1985) and vegetation parameterization (Lee, 1992)
Radiation	Not included	Without cloud effect (Mahrer and Pielke, 1977)

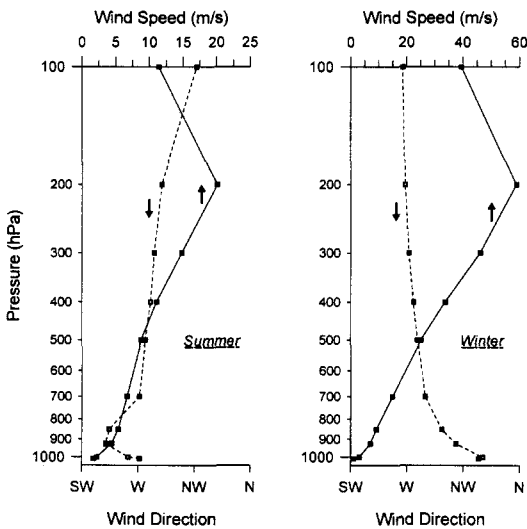


Fig. 4. Vertical profiles of mean wind direction and speed on clear days in summer and winter from sounding data at the Kwangju upper-air station.

고 운량이 3/10 미만인 날 중 (2) 오전 6시부터 8시 사이의 평균 풍속이 2 m/s 미만인 날을 선정하여 (3) 선정된 날에 대하여 광주고층기상 관측소의 오전 9시와 오후 9시 관측치를 평균한다. 여기서 평균에 사용된 날수는 여름 104일 (12.5%), 겨울 111일 (13.7%)이었다.

총 모사 시간은 0시부터 48시간이며 특별한 언급이 없는 한 본 연구에서 제시한 결과는 둘째날의 결과이다. 그림 4는 초기조건으로 사용한 즉, 첫날 0시의 풍향과 풍속의 수치 분포이다. 여름에는 지표 부근부터 서풍에서 서남서풍→서풍→북서풍으로 변하며, 겨울에는 북북서풍→서풍으로 변하고 있다.

풍속은 지표부근부터 200 hPa까지 계속 증가하며, 겨울의 고층 풍속이 여름보다 월등 빨라 강한 종관 풍의 영향을 짐작할 수 있다.

오염물질은 1부에서와 같이 그림 1의 지표층 격자점에서 부피 오염원의 형태로 대기와 같은 조건의 물질이 1 mg/kg-air · s의 속도로 배출되는 것으로 가정하였다. 그러나 1부와 달리 바람장의 모습이 일변화를 가지므로 둘째날 여름과 겨울 각각, 풍속이 낮은 일출 부근 시간과 풍속이 빠른 오후 시간을 선택하여 1시간씩을 연속 배출 후 확산 모습을 관찰하였다. 1시간 배출의 경우 평지에서의 격자 크기 (1/3 km × 1/3 km × 70 m)를 감안하면 배출량은 약 34톤이다.

3. 바람장 예측

그림 5는 여름철 맑은 날의 여수관측소 관측치를 계산치와 비교한 것이다. 관측치는 1990년부터 1998년까지 맑은 날의 평균 변화이고 계산치는 격자 III의 관측소 위치 격자점에서의 변화이다. 관측치는 같은 날의 변화를 반복시킨 것이며 계산치는 앞에서 언급한 바와 같이 주로 둘째날의 결과이다. 관측치를 보면, 오전 6시경 일출을 전후하여 북북동풍의 육풍이 잠깐 나타날 뿐 대부분 남풍 내지 남남서풍의 해풍이 불고 있다. 육풍이 불 때 풍속이 1 m/s 부근으로 낮고 오후 4, 5시 풍속이 3.5 m/s까지 높다. 그림 2의 여름 평균과 비교하여 그림 5의 맑은 날에는 육풍의 지속 시간이 훨씬 짧고 특히 풍속이 낮는데, 일사가 강하여 한낮에 가열된 지표면이 밤에도 충분히 냉각되지 못한 채 육풍의 발달을 억제하기 때문으로 해석된다.

계산치와 관측치를 비교하면, 풍속 계산치는 관측

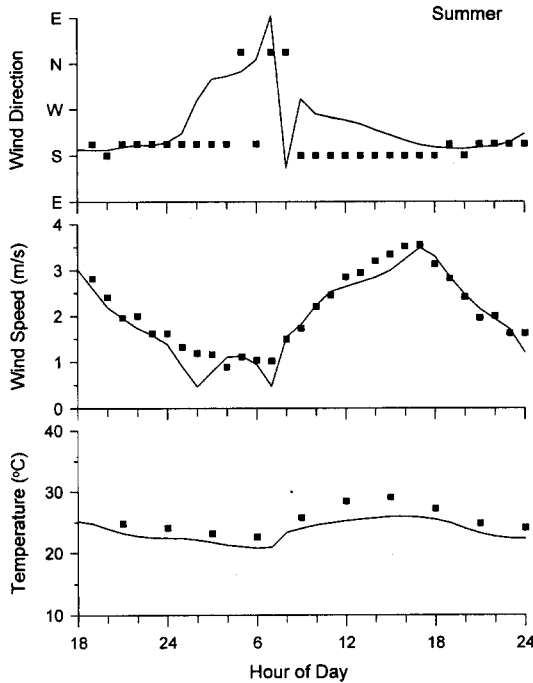


Fig. 5. Comparison of observed and predicted values of wind direction, speed, and air temperature at the Yosu weather station on clear days in summer. The solid rectangle denotes observed values and the solid line predicted values.

치와 상당히 잘 일치하고 풍향 계산치 역시 해륙풍의 중요한 변화를 재현하고 있다. 그러나 실제에 있어 풍속의 경우, 관측치는 보통 10m 높이에서 주어 지는데 비하여 모델 계산치는, 해수면을 가정할 경우(지표층의 풍속 계산 높이에 관한 상세한 내용은 1부를 참조할 수 있다) 지표층의 격자높이가 70m 인 본 연구에서 33.8m 높이에서 계산되므로 높이를 맞추게 되면 그림 5의 풍속 계산치는 계산치보다 작아지게 된다. 풍속에 관한 지수식을 이용하여 10m 높이에서의 풍속 계산치를 추산하면, 지수로써 0.15를 가정할 경우(USEPA, 1995) 풍속 계산치는 그림 5보다 20%씩 줄게 되어 결과적으로 풍속 계산치는, 차이가 크지는 않아도 관측치보다 작다. 풍향, 풍속과 달리 지표층의 기온 계산치는 해풍에 발달하는 한낮에 최대 3°C 이상 낮으는데, 해수면의 온도는 일정하므로, 높이를 맞출 경우 그림 5에서 풍속 계산치가 관측치보다 낮은 한 이유가 될 수 있다.

그림 6은 여름철 격자 I과 III 영역에서의 지표층 바람과 기온 분포이다. 일출 직후인 오전 6시, (왼쪽 위) 격자 I 영역에서는 해수면 온도가 육지보다 높아 육풍을 관찰할 수 있으나 매우 약하다. (오른쪽 위) 격자 III 영역의 여수반도에서는 오염원 위치에서 북쪽의 광양만을 향하는 약한 육풍을 볼 수 있으며, 오염원 남동쪽 산지에서는 큰 규모 육풍과 같은 방향의 육풍이 지형 효과로 가속되고 있다. 오염원 주변과 여수관측소 위치 등 바람이 발산하는 지역이나 산지 후면 와류 지역에서는 풍속이 낮다. 오후 3시에는(왼쪽 아래) 지표면의 온도가 해수면보다 높아 격자 I 영역 전체에서 바다로부터 육지로 해풍이 발달하고 있으며(오른쪽 아래), 여수반도 주변에는 남서풍이 지배적이다(오른쪽). 격자 III 영역을 보면, 아침의 바람장과 비교하여 오후 3시에는 가열된 지표 위에 충분히 높은 위치까지 혼합층이 발달함에 따라 지형에 관계없이 영역 전체에서 남서풍이 비교적 균일하다.

그림 7은 겨울철의 여수관측소 관측치와 계산치를 비교한 것이다. 먼저 관측치의 변화를 살펴보면, 종관풍인 서북서풍이 지배적인 가운데 오전 7시부터 오후 6시까지 낮동안 풍향이 북북동풍부터 남풍까지 변하고 있다. 이를 육풍에서 해풍으로 변하는 해륙풍으로 볼 수 있으나에는 논란의 여지가 있을 수 있으나 전형적 변화는 아니라도 일사에 의한 육지와 바다의 온도차에 의하여 촉발된 변화임에는 틀림이 없다. 계산치에서도 관측치와 유사한 변화가 일어나고 있으나 특히 풍속 변화가 심한데, 변화의 형태로 보아 여수관측소가 주풍인 서북서풍 하에서 산지 지형의 후면의 와류의 영향 때문으로 이해된다. 풍속 계산치의 빈번한 변화에도 불구하고 전체적 경향은 관측치와 잘 일치하며, 기온 계산치 역시 관측치와 상당히 유사하다.

그림 8은 겨울철 격자 I과 III 영역에서의 지표층 바람과 기온 분포이다(왼쪽). 격자 I 영역을 보면, 오전과 오후 구분없이 북서풍이 지배적이며 그림 6의 여름철과 달리 풍속이 빠르다(왼쪽 위). 강한 북서풍 조건 아래서도 서해안 등에서는 오전에 육풍을 관찰할 수 있는데, 밤사이 지표가 냉각되어 해수면과 온도 차이가 커진 때문이며(왼쪽 아래), 이와 같은 지표면의 온도는 낮에도 크게 상승하지 않아 상대적으로 해풍은 분명하지 않다(오른쪽 위). 오전의

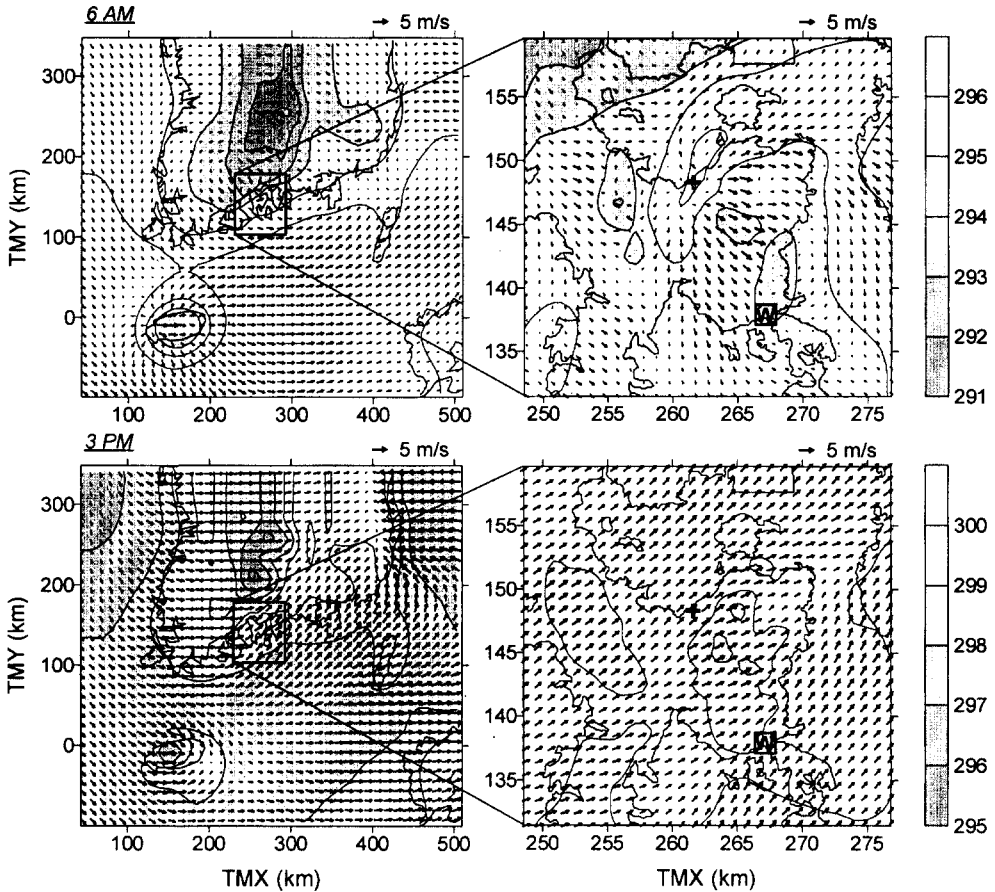


Fig. 6. Distributions of ground-level wind velocity and air temperature on Grids I and III in summer. As in Fig. 1, symbol '+' and 'W' in the right figure indicate the locations of the source and the Yosu weather station, respectively. Darkness scale in the right side denotes the scale of air temperature in °K.

격자 III 영역의 바람장은 풍속이 빠른 것을 제외하고는 그림 6과 매우 유사하다. 그러나(오른쪽 아래) 오후에는 한반도 서남단을 돌아오는 바람과 영역 III 북서쪽의 서해안으로부터 불어오는 바람이 만나 영역의 북서쪽부터 남동쪽까지 수렴대를 형성하고 있다. 같은 시간대 그림 6에서와 같이 오후의 격자 III 영역에서는 혼합층이 높아져 지형의 효과가 뚜렷하지 않다.

4. 농도 예측

그림 9는 여천공단이 위치한 격자 IV 영역에서의

여름과 겨울, 아침과 오후의 농도 분포이다. 그림 6과 8의 바람장 조건에서 오염물질 배출을 시작하여 1시간 후의 농도 분포이므로 그림 9의 시간은 그림 6과 8보다 1시간씩 늦다. 대문자(A)부터 (I)는 1부에서와 같이 영역 내 주거지역들로 지점별 명칭과 농도는 표 3과 같다. 여름철 7시(왼쪽 위), 오염원 남동쪽 산지 앞에서 바람이 북동쪽과 남쪽으로 발산됨에 따라 배출된 오염물질 역시 마치 산지를 돌아가듯 북동쪽과 남쪽으로 확산되고 있다. 그러나 일부 오염물질은 산지를 넘어 오염원 동쪽 산지 후면의 H-상암에서도 농도가 높다.(오른쪽 위) 오후 4시에는 혼합층의 발달로 바람장이 균일하여 농도

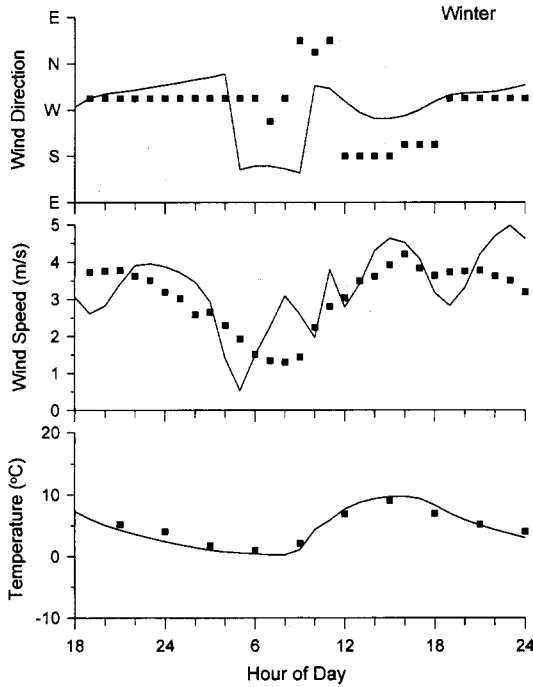


Fig. 7. Comparison of observed and predicted values of wind direction, speed, and air temperature at the Yosu weather station on clear days in winter. The solid rectangle denotes observed values and the solid line predicted values.

분포도 가우시안 분포에 가깝다. 그러나 풍속이 빨라 풍하층 농도는 높지 않다. (왼쪽 아래) 겨울철 오전의 농도 분포도 여름철과 크게 다르지 않다. 단지 북동쪽과 산지를 넘어가는 흐름이 약한 대신 남쪽

을 향하는 오염물질의 농도가 높다. (오른쪽 아래) 오후에는 오염물질 이동이 산지를 향하고 있으나 역시 혼합층의 발달로 1부의 북서풍 조건에서와 같이 광범위한 지형의 영향은 나타나지 않고 있다.

표 3의 여름과 겨울 아침 시간의 지점별 농도는 영역 내 복잡한 풍향 분포로 말미암아, 1부에서 풍향에 따라 지점별 농도를 보여주었던 표 3(a)와 비교하여 마치 북동풍과 북서풍, 남서풍의 결과를 혼합한 듯한 양상을 보여주고 있다. 앞서서도 언급하였지만 여름과 겨울 어느 계절이나 아침 시간에는 B, D, E, F와 함께 I-여수 시청이 위치한 남쪽으로 오염물질이 확산되고 있는데, 특히 겨울에 이와 같은 경향이 강하여 유의할 필요가 있다.

거의 정상상태에서 지형의 영향을 조사하였던 1부에서는 오염원 위치에서의 바람자료를 이용한 ISCST3 (USEPA, 1995)와 RAMS의 계산 결과를 비교하였다. 그러나 본 연구와 같이 바람장이 일변화를 가질 때에는 바람장의 공간 분포뿐 아니라 시간 변화도 문제가 된다. 따라서 보통의 확산 모델링에서는 개개의 바람자료가 중요한 단기 모델링보다 바람자료의 통계적 특성이 중요한 장기 모델링을 권하고 있다 (USEPA, 1986 and ff.). 그러나 누출사고 평가와 같이 단기적 특성이 필수적인 모델링에서는 정밀분석에 앞서 특징적 기상자료를 이용함으로써 오염물질 확산의 1차적 특성을 파악할 필요가 있다. USEPA (1996)는 이와 같은 필요에 따라 최악의 조건으로써 풍속 1.5 m/s, 안정도 F와, 전형적 조건으로써 수년간의 평균 풍속과 안정도 D의 이용을 권하고 있다. 또한 풍향은 고려하지 않고 중심선상

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

Site Name	Reference Letter in Figure 9	Summer		Winter	
		7 a.m.	4 p.m.	9 a.m.	3 p.m.
Pyongyo	A	14.1	8.7	41.7	6.8
Wolhwa	B	17.4	0.0	22.0	3.9
Chunghung	C	2.9	1.2	0.6	0.7
Chusam	D	2.0	0.0	1.7	0.0
Haesan	E	4.3	0.0	13.8	0.0
Ponggye	F	1.7	0.0	0.3	0.0
Homyong	G	0.0	0.0	0.0	0.6
Sangam	H	0.3	0.2	0.0	0.0
City Hall	I	1.3	0.0	1.5	0.0

^a Ground-level release at a rate of 1 mg/kg-air · s from the volume of 1/3 km × 1/3 km × 70 m, which corresponds to 34-ton release for an hour.

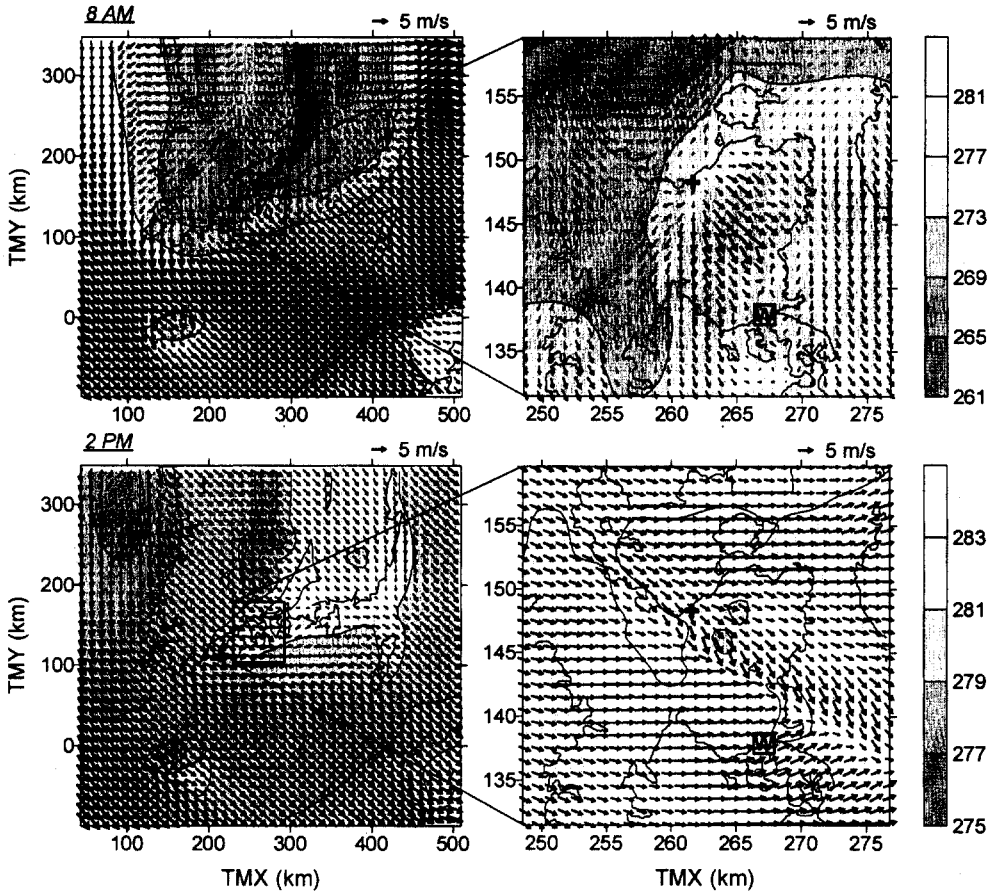


Fig. 8. Distributions of ground-level wind velocity and air temperature on Grids I and III in winter. As in Fig. 1, symbol '+' and W in the right figure indicates the locations of the source and the Yosu weather station, respectively. Darkness scale in the right side denotes the scale of air temperature in °K.

의 농도를 영역 내 균일하게 적용하며, 지표면 배출과 평탄한 지형을 가정한다.

그림 10은 최악의 조건과 전형적 조건에서 계산한 ISCST3의 중심선 상의 농도와 여름과 겨울 아침 시간대 RAMS의 풍하거리에 따른 최고농도를 비교한 것이다. ISCST3의 경우도 RAMS와 동일하게 부피 오염원을 가정하였는데, 최악의 조건의 ISCST3 결과는 외삽을 통하여 짐작할 수밖에 없는 아주 근접지역을 제외하고는 모든 지역에서 현저하게 높다. RAMS 계산 결과는 거리가 멀어짐에 따라 농도가 급격하게 떨어지는데, 영역 내 균일한 바람장을 가정하는 ISCST3와 달리 오염원 주변에서는

풍속이 낮지만 거리가 멀어지면서 풍속이 빨라지기 때문에 나타난 현상으로 이해된다. 겨울 아침의 RAMS 계산 결과는 모든 풍하거리에서 전형적 조건의 ISCST3 계산 결과보다 높다.

그림 10은 USEPA (1996)의 1차 분석을 위한 최악의 조건과 전형적 조건의 확산모델 계산 결과가, 맑은 날 아침 시간이라는 실질적 조건의 RAMS 계산 결과와 유사한 변화 범위 내에 위치함을 보여주고 있다. 이는 기상 조건에 관한 한 USEPA의 1차 분석 조건, 특히 전형적 조건은 아침 시간의 복잡한 풍향 변화와 낮은 풍속 등 우리나라의 실질적으로 불리한 조건까지를 포함하여 충분히 안전한(con-

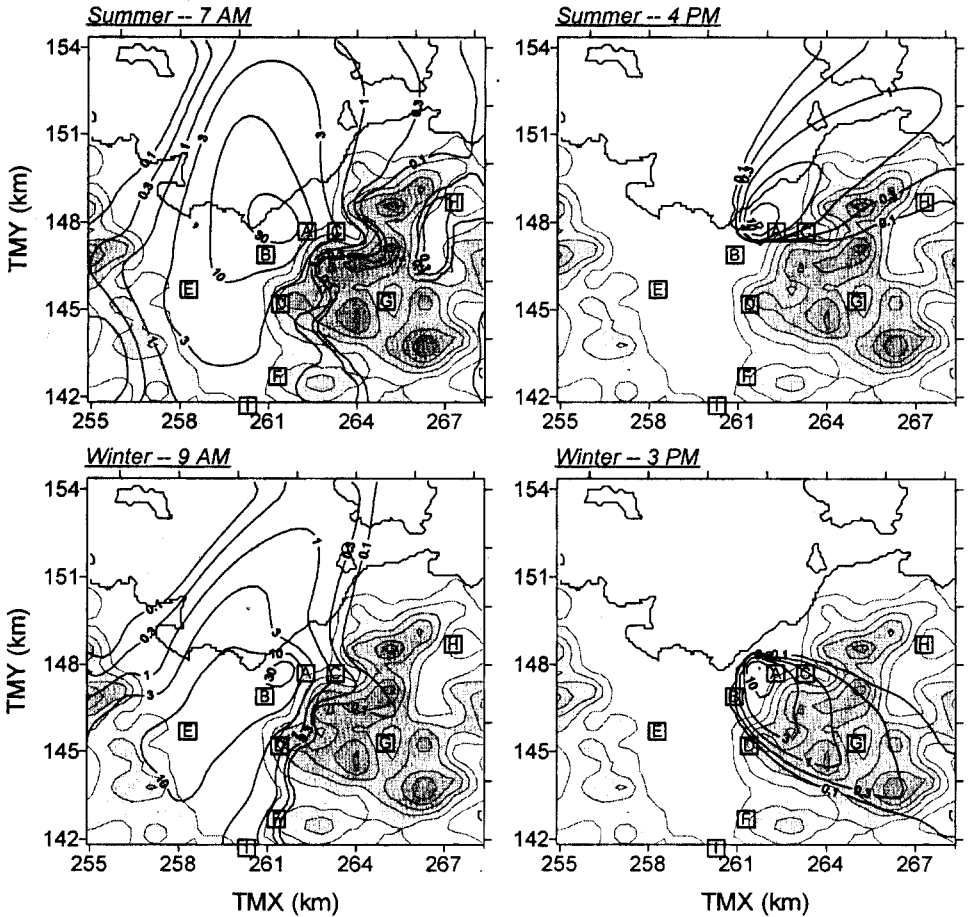


Fig. 9. Concentration distributions on Grid IV after one-hour release in summer and winter, respectively. Concentration of the labeled contour is expressed in mg/kg-air. The filled contour behind the concentration contour represents the elevation above sea level at a 50 m interval. Capital letters A through I indicate the receptors in the present study. See Table 3 for the designation of the receptors and pollutant concentrations at those sites.

servative) 결과를 주지 못할 수도 있음을 의미하므로 관심이 필요하다.

5. 결 론

영역 내 균일한 온도를 가정하고 지형의 효과만을 조사하였던 1부 김영성과 오현선(2000)에 이어 여름과 겨울의 일사 조건에서 바람장의 변화와 이에 따른 오염물질 확산의 변화를 살펴보고 확산 모델의 예측 결과와 비교하였다. 오염물질 확산에

불리한 날로써 맑고, 아침 시간에 풍속이 낮은 날을 선택하여, 수평방향으로 종관풍 형태의 균일한 바람장을 초기 조건으로 가정하고 계절별로 아침 시간과 오후의 바람장과 농도 분포를 비교하였다. 이들 날들은 여름철에는 해풍이 지배적인 반면 육풍은 짧고 약했으며, 겨울철에는 역시 종관풍의 영향이 강하였다. 여수관측소 위치에서 살펴본 지표층 계산치는 여름철 해륙풍 등 풍향의 중요한 변화를 잘 재현하였고 풍속과 기온도 관측치와 비교적 잘 일치하였다. 겨울철의 경우 관측치에서는 명확치 않았

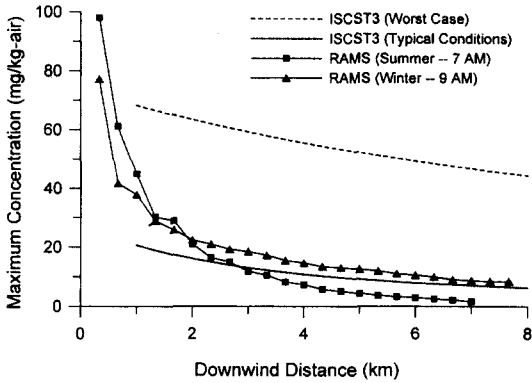


Fig. 10. Comparison of maximum concentrations with downwind distance calculated with ISCST3 and RAMS. In the ISCST3 calculation, the worst case indicates the wind speed of 1.5 m/s and F stability; the typical conditions indicate the average wind speed and D stability; the flat terrain was assumed in both cases.

던 낮 동안의 풍향, 풍속 변화의 원인이, 계산치의 변화를 통하여 여수관측소가 산지 후면의 외류 영역에 위치함으로써 나타난 현상으로 이해되기도 하였다.

계절에 관계없이 관심 영역인 격자 IV 영역의 아침 시간에는 오염원을 중심으로 남동쪽 산지와 북쪽의 광양만 사이에서 바람이 발산되며 풍속이 낮고 영역 전체로는 남동쪽 산지를 에워싸는 형태의 바람장이 형성되며 풍향 변화가 복잡하였다. 이에 따라 영역 내 농도 분포는 1부의 북동풍과 북서풍, 남서풍 조건의 특성을 혼합한 듯한 모습이었다. 특히 겨울에는 여수 시정(I)이 위치한 남쪽으로 확산되는 오염물질의 비율이 상대적으로 높았다. 그러나 오후에는 일사에 의하여 혼합층이 발달되어 바람장이 균일하고 농도 분포도 가우시안에 근접하였다. 이와 같은 현상은 일사가 상대적으로 약한 겨울철에도 동일하여, 영역 내 남동쪽 산지를 향하는 북서풍이 지배적임에도 1부와 같이 지형의 영향이 두드러지지 않았다.

바람장이 공간 변화와 함께 일변화를 보임에 따라 특정 시간의 바람 자료를 이용하는 대신 USEPA (1996)가 권유한 최악의 조건과 전형적 조건의 ISCST3의 중심선 농도와 RAMS의 풍하거리별 최고 농도를 비교하였다. 균일한 바람장을 가정하는

ISCST3에 비하여 RAMS는 오염원 주변에서는 풍속이 낮으나 거리에 따라 풍속이 높아지면서 풍하 거리에 따라 농도가 급격히 감소하였다. 최악의 조건의 ISCST3 농도가 높기는 하였으나 RAMS 농도의 변화 범위 내에 있었고 전형적 조건의 ISCST3 농도는 RAMS의 겨울 아침 농도보다 언제나 낮았다. 보통 가우시안 확산모델의 이용은 단순한 반면 현실과 차이가 있더라도 안전하게 높은 값을 주는 것으로 이해되고 있으나 이와 같은 일반적 사실이 낮은 풍속이 적지 않은 우리나라 현실에서도 언제나 적용되는지에 대하여 관심이 필요하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 국책사업인 방재기술개발 사업의 일환으로 수행되었습니다. 연구비를 지원하여 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

기상청(1991) 한국기후표, 제 II권 월별평년값(1961~1990).
 김영성, 오현선(2000) 여수지역 대기확산의 수치 모사 - I. 지형의 영향, 한국대기환경학회지, 16, 211-223.
 김영성, 오현선, 윤도영, 장영수(1998a) 복잡지형의 대기확산 모델 비교, 한국대기보전학회지, 14, 81-93.
 김영성, 문길주, 김중수, 심상규, 김용표, 배귀남, 김형만, 손채훈, 오현선, 김진영, 이승복, 나광삼, 이종훈, 한용택, 진현철(1998b) 대형산업시설물(가스,유류)의 안전사고 대응기술 개발, 한국과학기술원 보고서, 97-ND-03-01-A-02(UCN1725-6310-6), 과학기술부.
 김유근, 이화운, 전병일(1996) 부산 연안역에서의 국지풍 모델을 이용한 이류확산 수치 모의, 한국대기보전학회지, 12, 29-41.
 오현선, 김영성, 김진영, 문길주, 홍유희(1997) 보령화력 지역의 복잡지형이 대기확산 모델링에 미치는 영향 비교, 한국대기보전학회지, 13, 427-437.
 오현선, 김영성(1999) 지표특성 변화에 따른 해륙풍 발생 연구, 한국대기환경학회 춘계학술대회, 5월 14-15일, 한국의국어대학교 용인캠퍼스, 논문 번호 DRI.
 이화운, 김유근, 원경미, 조인숙(1999) SST (Sea Surface Temperature) 효과를 고려한 대기오염의 3차원 수치예측 모델링, 한국대기환경학회 춘계학술대회, 5월 14-15일, 한국의국어대학교 용인캠퍼스,

논문 번호 DR9.

- Kim, J.Y., Y.S. Ghim, and Y.P. Kim (1998) Photochemical modeling of July 1994 ozone episode in the Metropolitan Seoul Area, A&WMA's 91st Annual Meeting & Exhibition, June 14~18, San Diego, CA, U.S.A., Paper No. 98-WPD.03P.
- Lee, T.J. (1992) The impact of vegetation on the atmospheric boundary layer and convective storms, Ph.D. Dissertation, Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins, CO.
- Louis, J.F. (1979) A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere, *Boundary-Layer Meteorol.*, 17, 187-202.
- Lyons, W.A. (1975) Turbulent diffusion and pollutant transport in shoreline environments, *Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analysis*, Edited by D.A. Haugen, Amer. Meteorol. Soc., Boston, Mass., Chapter 5.
- Lyons, W.A., R.A. Pielke, C.J. Tremback, R.L. Walko, D.A. Moon, and C.S. Keen (1995) Modeling impacts of mesoscale vertical motions upon coastal zone air pollution dispersion, *Atmospheric Environment*, 29, 283-301.
- Mahrer, Y. and R.A. Pielke (1977) A numerical study of the airflow over irregular terrain, *Beitrage zur Physik der Atmosphere*, 50, 98-113.
- 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.
- Tremback, C.J. and R. Kessler (1985) A surface temperature and moisture parameterization for use in mesoscale numerical models, Preprints, 7th Conference on Numerical Weather Prediction, Amer. Meteorol. Soc., June 17~20, Montreal, Canada.
- 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; Vol. II - Description of Model Algorithms, EPA-450/B-95-003b, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, N.C.
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) (1996) RMP Offsite Consequence Analysis Guidance.