

## 포항지역의 겨울철 남서계열 탁월풍 현상에 관한 분석 및 수치모의

정우식<sup>1,\*</sup> · 이화운<sup>1</sup> · 김현구<sup>2</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 대기과학과, 609-735 부산시 금정구 장전동 산 30번지

<sup>2</sup>포항산업과학연구원 환경에너지 연구센터, 709-330 경상북도 포항시 남구 효자동

### An Analysis and Numerical Simulation on Southwestern Prevailing Wind Phenomenon around Pohang in Winter

Woo-Sik Jung<sup>1,\*</sup> · Hwa Woon Lee<sup>1</sup> · Hyun-Goo Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

<sup>2</sup>Environment & Energy research center, Research Institute of Industrial Science & Technology,  
Pohang, 709-330, Korea

**Abstract:** The prevailing wind phenomenon around Pohang in winter was investigated by using surface and vertical observatory datas and a numerical simulation was carried out to analyse this phenomenon using RAMS. Direction of the prevailing wind was westerly at upper atmosphere. However, near the surface, southwestern wind prevailed in winter. Using the RAMS to simulate a winter wind system numerically, it was found out that this phenomenon was strongly affected by the geographical features such as directions of coastline and low level valley, and distributions of land and sea. To investigate the accuracy of the model results, wind speed, temperature and wind direction of typical continuous southwestern wind occurring days were compared with observation data. Analyzing the characteristics of local circulation system was very hard because of horizontally sparse observation data. But from the result above, a numerical simulation using the RAMS, which satisfies the spatial high resolution, will provide more accurate results.

**Keywords:** prevailing wind, geographical features, RAMS, wind field

**요약:** 지표 및 연직기상자료를 이용하여 포항지역 주변의 겨울철 탁월풍 현상을 살펴보고 이 현상을 분석하기 위해 RAMS를 이용한 수치모의를 수행하였다. 조사결과, 상층대기에서는 서풍을 보였으나 지표부근에서는 남서풍이 탁월하였다. RAMS를 이용하여 겨울철 풍계를 살펴본 결과, 이러한 겨울철 탁월풍 현상은 해안선의 형태와 낮은 구릉지, 그리고 바다와 육지의 분포 등의 지형적 특징에 의해 크게 영향을 받는 것으로 분석되었다. 이상의 모형결과의 정확성을 살펴보기 위해 일 중 지속적인 남서풍이 관측되었던 날들의 풍속, 기온, 풍향을 대상으로 관측값과 모형결과값을 비교하였다. 일반적으로 기상관측망은 공간적으로 조밀하지 못하기 때문에 국지순환계의 특징을 자세히 살펴보기가 쉽지 않다. 하지만 이러한 공간적 고분해능을 만족하는 수치모형을 이용한다면 더욱 정확한 결과를 제공할 수 있을 것이다.

**주요어:** 탁월풍, 지형적 특성, RAMS, 바람장

## 서론

바다에 접해 있는 연안에 대규모의 공단이 형성되어 있는 포항지역은 거대한 대기오염물질의 배출원으로

로 작용할 수 있는데, 배출된 대기오염물질은 중관장의 영향 정도에 따라 복잡, 다양한 수송 및 확산현상을 보일 수 있다. 즉, 대기오염 배출원에서 방출된 물질에 의한 대기오염문제는 대규모 배출원이 위치하고 있는 지역만의 문제가 아니라 그 일대에서 형성되는 대기흐름에 의해 주변지역으로 영향을 미칠 수 있다는 점에서 심각한 문제가 된다.

지역규모에서의 대기질 정도는 대기오염물질의 배

\*Corresponding Author: wsjung1@pusan.ac.kr

Tel: 82-51-583-2651

Fax: 82-51-515-1689

출량과 이들 오염물질의 화학반응뿐 만 아니라 난류 확산 및 수송과정, 침적현상 등의 기상인자에 의해 큰 영향을 받게 되므로 이들에 대한 이해는 지역적 종합오염도를 조사하는데 있어 필수적이라고 할 수 있다. 이를 위해서는 기상관측소 등의 관측자료를 충분히 이용하는 것이 가장 이상적인 방법이다. 이 경우에는 실제 관측된 자료를 이용하므로 현실에 가장 근접한 분석 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있지만 측정지점의 공간적 불균일성과 광역성 등 여러 가지 요인에 의해 이들 관측자료를 이용하는 데에는 다소 한계가 있다. 따라서 이러한 한계에 제약받지 않고 공간적으로 세밀하고 정확한 기상학적 정보를 제공할 수 있는 대기유동장 모형을 이용하는 것이 이러한 한계를 극복할 수 있는 한가지 방법이 된다.

대기유동장 모형을 이용한 연구들은 이전부터 많이 수행되어 오고 있는데 Kikuchi(1975), Atkinson(1981) 그리고 Pielke(1974) 등이 여러 가지 대기유동장 모형을 개발하여 많은 연구를 수행하였다. Kurita *et al.*(1985)은 모형의 개발을 통해 일본 관동(Kanto) 평원을 대상으로 3차원 국지순환을 수치모의 하였고 이화운(1987)은 일본 오사카 지역의 국지순환모형을 개발하여 이 지역의 대기오염농도 분포를 분석, 예측하였다. 또한 Stephan *et al.*(1998)은 평탄한 저지대에서 산으로 둘러싸인 분지 안으로 기류의 이동을 2차원으로 수치모의 하였는데 여기서 기류의 이동은 상층에 형성된 수평온도경도가 중요한 역할을 한다는 것을 밝혔다. Kimura and Kuwagata(1993)는 관측결과를 바탕으로 수치모의를 통하여 분지지형과 평야지역에서의 지형적 차이에 따른 국지순환의 형성과 그 영향을 논의한 바 있으며, Bossert(1997)는 오염된 공기의 상층이동에 대한 기상조건과 지형의 영향을 논의하였다. 이 밖에도 우리나라 연안지역인 부산광역시 일대에서 나타나는 국지순환계의 특성에 대해 분석한 연구들이 있었다(이화운 외, 2000, 정우식과 이화운, 2002).

본 연구에서는 포항지역을 포함하는 영역의 바람장을 상세하게 살펴보기 위해 CSU-RAMS(Colorado State University-Regional Atmospheric Modeling System, 이하 RAMS) 모형을 사용하여 연구 과정을 진행하였다. RAMS 모형을 이용한 기상장에 대한 선행연구들을 살펴보면, Batchvarova *et al.*(1999)이 대기오염물질의 농도예측에 중요한 역할을 하는 해안지역에서 발달하는 내부경계층 높이의 예측을 위해

RAMS 모형을 이용하여 얻어진 기상장 결과를 입력 및 분석자료로 사용하였으며 Cai와 Steyn(2000)은 캐나다의 복잡한 해안지역에서의 해륙풍 수치모의를 위해 RAMS 모형을 사용하였다. 또한 Hogrefe *et al.*(2001)은 광역규모 광화학 모델링 시스템의 수치모의 평가를 위해 RAMS 등의 수치모형 기상장 결과를 사용하여 비교, 분석하였다. 국내에서는 김영성과 오현선(2000)과 오현선과 김영성(2000)의 광양만을 중심으로 여천 공단 등 대규모 공단이 위치하고 있어 대기오염물질의 배출이 많고 석유화학 공장으로부터 유독 물질 누출사고의 가능성이 큰 여수 지역에서의 대기확산을 수치모의하기 위해 RAMS 모형으로 산출된 기상장을 이용한 연구가 있었다.

이와 같은 선행 연구들을 바탕으로 본 연구에서는 RAMS 모형을 사용하여 포항지역에서 겨울철에 나타나는 탁월한 남서풍 현상을 분석하고 포항일대의 바람장을 구체적으로 살펴보기 위하여 바람장 수치모의를 실시하고자 한다.

## 포항지역 수평, 상층풍계 분석

### 수평풍계 분석

포항 지역에서의 수평 바람장을 살펴보기 위해 1991~2000년의 기상연보자료를 이용하여 풍향, 풍속을 분석하였으며 그 중에서 1997년부터 2000년까지의 연간 바람장미도를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 포항에서는 연간 남서풍계열이 우세하게 나타났으며 평균풍속은 2.7m/s로 조사되었다.

이와 더불어 일반적으로 4계절 분류시 동계인 12월, 1월, 2월과 겨울에 가까운 11월의 10년간 월평균 바람장미를 살펴보면 포항지역에서는 다른 풍향에 비해 압도적으로 남서풍계열의 바람의 발생 빈도가 높게 나타남을 볼 수 있다(Fig. 2). 이러한 경향은 다른 지역(영천, 서귀포, 구미, 양산)에서 분석된 바람장미를 나타낸 Fig. 3과 비교해 보면 포항지역에서 특징적으로 나타나는 현상이라는 것을 잘 알 수 있다.

그림에서 나타난 바와 같이 우리나라는 겨울철에 시베리아에서 장출하는 대륙성기단의 영향으로 우리나라 전역에 일반적으로 북풍 또는 북서풍계열의 바람이 지배적으로 나타나는 것을 알 수 있지만 포항에서는 이와 달리 남서풍계열의 바람이 탁월하게 나타나고 있는 것이다.

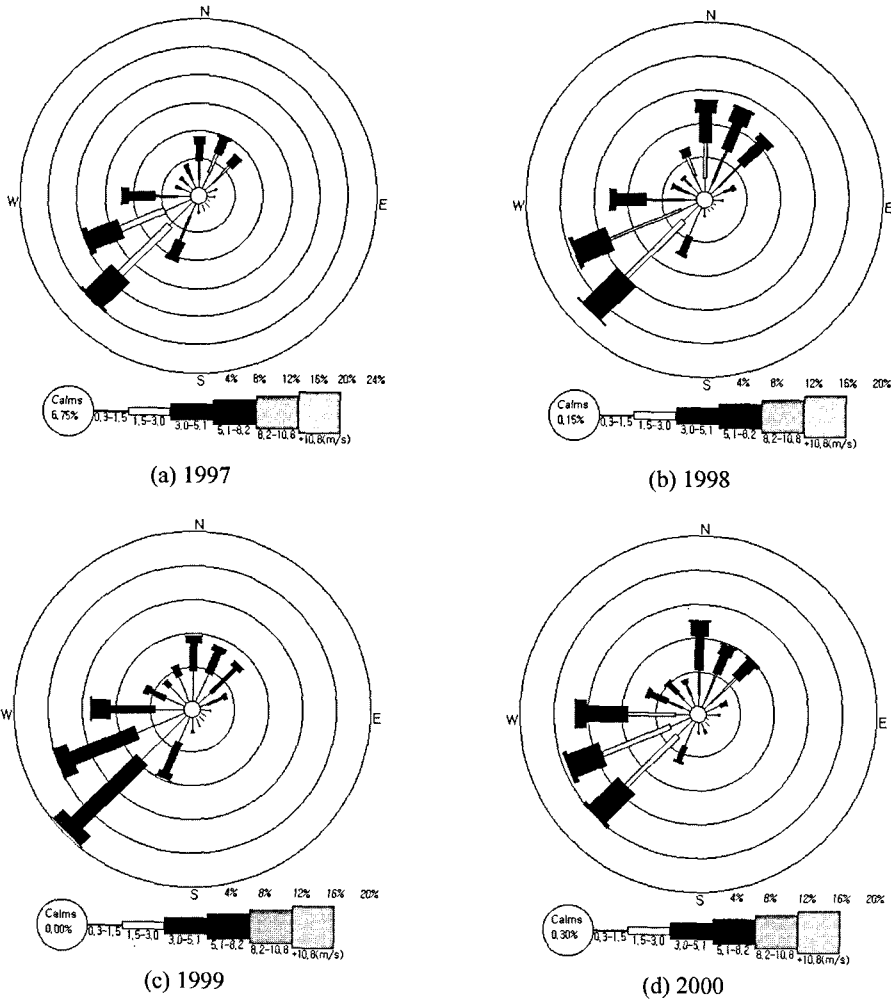


Fig. 1. Annual mean windrose at Pohang.

**상층풍계 분석**

포항기상대의 최근 10년 간 고층기상 자료를 이용하여 기준 고도면에서의 계절별 평균값으로 포항지역의 고층기상특성을 분석하였다. Fig. 4는 기준고도 1000, 925, 850, 500hPa에서의 계절별 바람장미이다. 바람장미 분석결과, 기준고도 1000hPa에서는 지표면과 크게 다르지 않은 서풍계열의 바람이 우세하게 나타났는데, 이처럼 탁월풍계가 남서풍에서 서풍으로 바뀌어 나타난 것은 고도가 점차 높아지면 지형적 영향을 점차적으로 덜 받기 때문으로 이해할 수 있다. 이후 상층으로 갈수록 지표에서와는 달리 점차적으로 북서계열의 바람 빈도가 크게 나타나 우리나라가 겨울철에 전형적인 북서계열풍 영역에 포함되어 있다는 것을 확인할 수 있다. 즉, 850hPa의 기준고도

인 약 1500m 정도의 상층에서는 일반적인 계절풍계를 나타내고 있었다. 그리고 기준고도 700hPa에서는 850hPa의 경향과는 다소 다르게 강한 서풍 계열의 바람 빈도가 월등하게 증가하고 북서계열의 바람은 그 빈도가 다소 적어진 것을 볼 수 있는데 이를 통해 상층으로 갈수록 우리나라가 편서풍 지대에 위치하고 있다는 사실을 잘 알 수 있다.

이상의 분석을 통해, 포항지역에서 겨울철에 나타나는 지상부근에서의 풍계는 다른 지역에서 일반적으로 나타나는 북서풍계를 보이고 있지 않다는 것을 알 수 있었다.

그렇다면 어떠한 이유로 이러한 결과가 나타났는지에 대해서 살펴볼 필요가 있다. 이를 위해서는 포항지역을 포함한 주변일대의 상세한 바람장이 제공되어

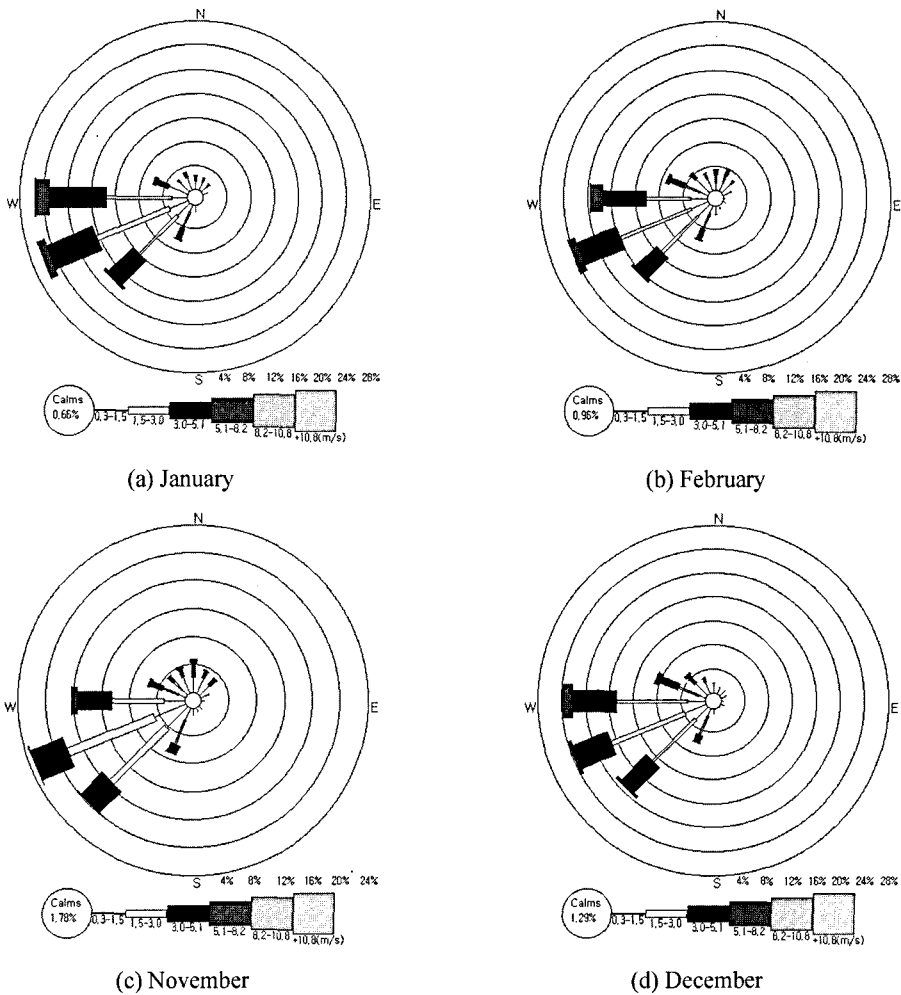


Fig. 2. Monthly mean windrose at Pohang.

야 하지만 현재의 관측망을 통해서도 시·공간적으로 충분히 세밀하게 제공받을 수 없다. 따라서 지역규모의 바람장을 조밀하게 제공할 수 있는 중규모 대기 유동장 모형을 이용한 분석이 필요하게 되는 것이다.

**RAMS 모형의 개요**

RAMS는 1970년대 콜로라도 주립대학에서 개별적으로 개발된 구름모델과 지형변화에 의한 대기순환

모델을 결합시킨 기상모델이다. 비정수(non-hydrostatic) 레이놀드 평균된 원시방정식(Reynolds-averaged primitive equation)으로 기초방정식은 다음과 같은 운동방정식, 열역학방정식, 수분에 대한 물질방정식, 비습방정식, 연속방정식이며, 기본적으로 압축성 유동을 모사하나 정역학 근사를 사용할 때에는 비압축성 유동 또는 압축성 유동으로부터의 음파를 제거한 비탄성 유동을 가정할 수 있다.

운동방정식

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} - \theta \frac{\partial \pi}{\partial y} - fu + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_m \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_m \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} - \theta \frac{\partial \pi}{\partial x} - fv + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_m \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_m \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

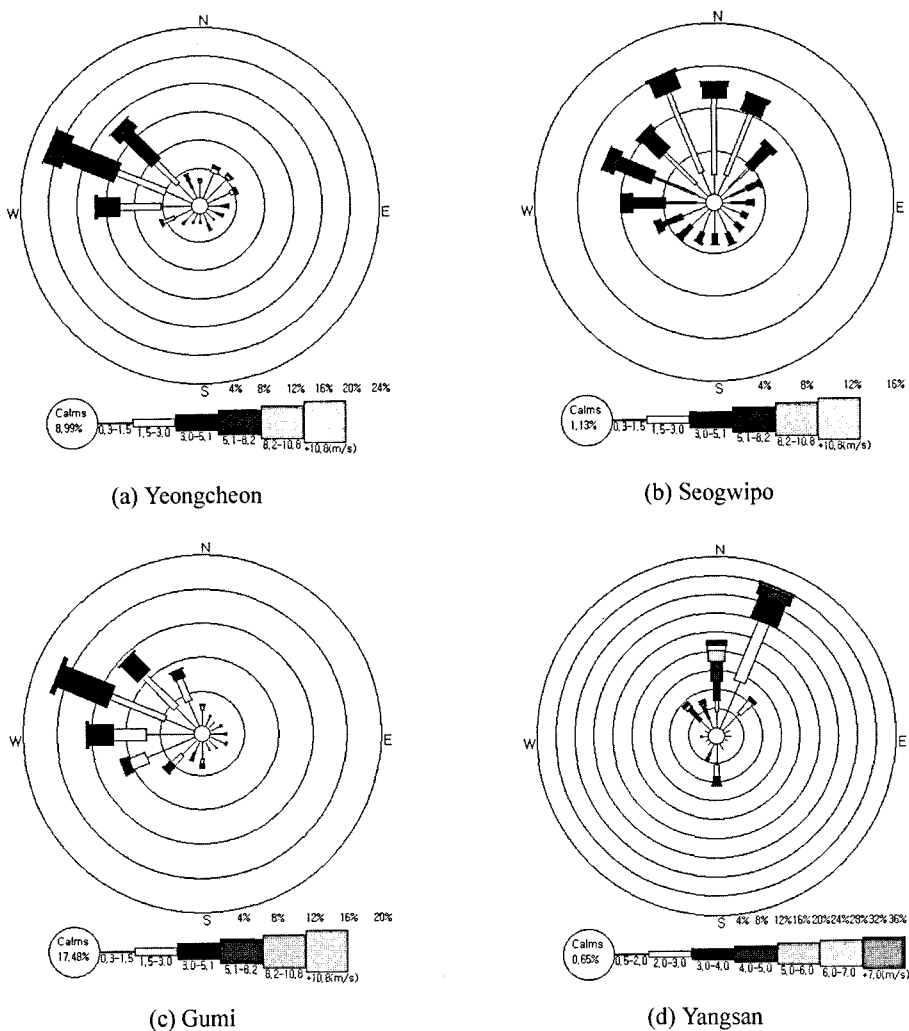


Fig. 3. Mean windrose during wintertime on each cities.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -u \frac{\partial w}{\partial x} - v \frac{\partial w}{\partial y} - w \frac{\partial w}{\partial z} - \theta \frac{\partial \pi}{\partial y} - \frac{g \theta_v}{\theta_0} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_m \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_m \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (1)$$

열역학방정식

$$\frac{\partial \theta_{il}}{\partial t} = -u \frac{\partial \theta_{il}}{\partial x} - v \frac{\partial \theta_{il}}{\partial y} - w \frac{\partial \theta_{il}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial z} \right) + \left( \frac{\partial \theta_{il}}{\partial t} \right)_{rad} \quad (2)$$

수분에 대한 물질 방정식

$$\frac{\partial r_n}{\partial t} = -u \frac{\partial r_n}{\partial x} - v \frac{\partial r_n}{\partial y} - w \frac{\partial r_n}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_h \frac{\partial r_n}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_h \frac{\partial r_n}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_h \frac{\partial r_n}{\partial z} \right) \quad (3)$$

연속방정식

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} = -\frac{R \rho_0}{c_v \rho_0 \theta_0} \left( \frac{\partial \rho_0 \theta_0 u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_0 \theta_0 v}{\partial y} + \frac{\partial \rho_0 \theta_0 w}{\partial z} \right) \quad (4)$$

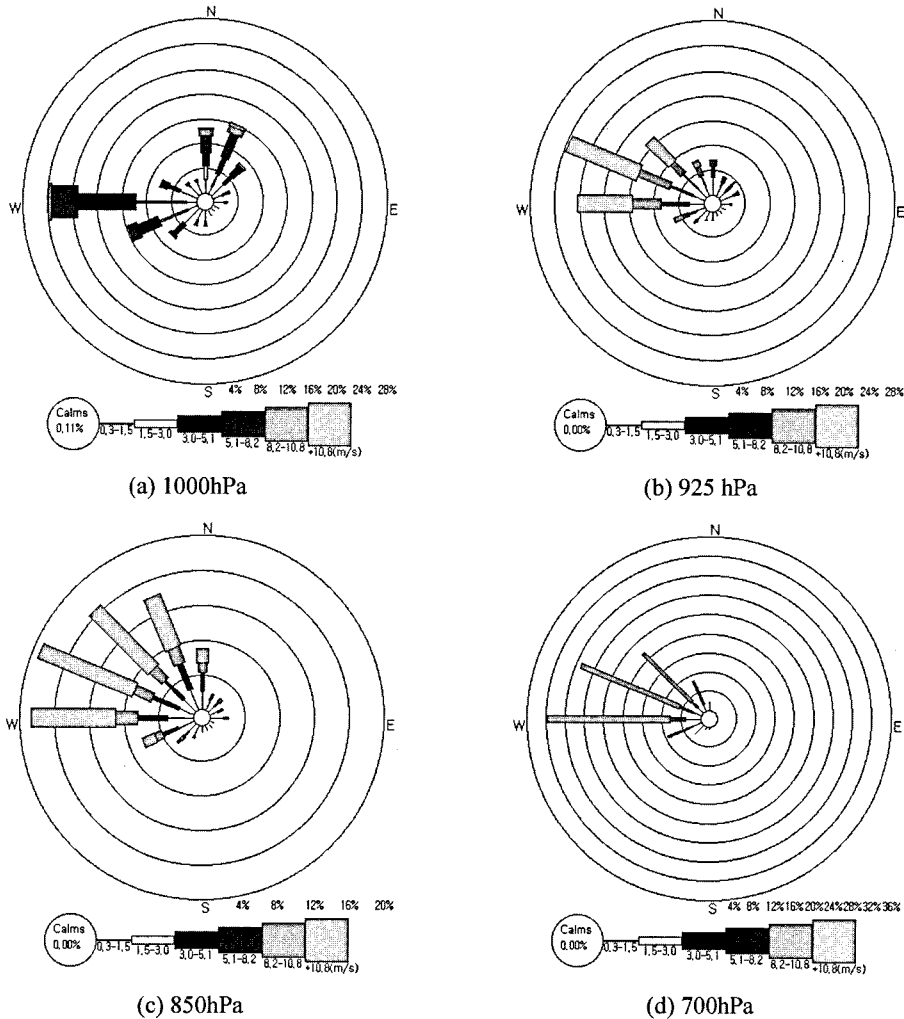


Fig. 4. Wintertime mean windrose on the height of (a) 1000hPa, (b) 925hPa, (c) 850hPa, and (d) 700hPa at Pohang.

여기서  $u, v, w$ 는  $x, y, z$ 방향의 속도성분,  $f$ 는 Coriolis parameter,  $K_m$ 은 운동량에 대한 와 점성계수 (eddy viscosity coefficient),  $K_h$ 는 열과 수분에 대한 와 점성계수,  $\theta_{il}$ 은 ice-liquid water에 대한 온도,  $r_m$ 은 혼합비,  $\rho$ 는 밀도,  $\pi_0$ 는 exner function의 평균,  $\pi$ 는 exner function의 섭동(perturbation),  $\theta_v$ 는 가온위,  $p$ 는 기압을 나타낸다.

이러한 RAMS 모형은 1980년 대 이후 등지격자 (nested grid)기능의 강화와 함께 도시 규모 이하에서 부터 대규모의 대기순환까지 광범위하게 사용되도록 개발되었으나, 대규모 기상 변화를 주로 취급하는 여 타 모델에 비하여 지형변화가 중요한 지역 단위의 중·소규모 기상 현상을 해석하는데 많이 사용되고

있다.

RAMS에서 격자 구조는 Arakawa-C Grid(Mesinger and Arakawa, 1976)를 사용하며 시간 적분 방법은 기본적으로 시간 분리 구성(time-splitting scheme)을 사용하고 있다. 또한 RAMS에서 사용하고 있는 좌표 계는 수평으로는 중규모 수치모의에 적합한 극·평사 투영법(polar-stereographic projection)을, 연직으로는 다음 식과 같은 모델 영역의 최상층은 평면, 하층은 지형의 굴곡을 따르는 체계인  $\sigma_z$  지형좌표계(Gal-Chen and Somerville, 1975; Clark, 1977; Tripoli and Cotton, 1982)를 사용하고 있다.

$$z^* = H \frac{z - z_g}{H - z_g} \tag{5}$$

여기서 H는 모델 최상층의 높이를,  $z_g$ 는 x와 y함수로써 지형고도를 나타낸다.

지표면 자료는 USGS(U.S. Geographic Survey)의 자료를 사용하였으며, 자료의 해상도는  $1\text{km} \times 1\text{km}$ 이며, RAMS에서는 대상 격자에 존재하고 있는 지표면 종류의 비율을 고려하여 지표면 특성을 고려하고 있다.

지표면 열수지 모델은 Businger *et al.*(1971)에 의해 모수화되고 Louis(1979)에 의해 수정된 모델을 사용하였으며, 토양 모델은 McCumber와 Pielke(1981)에 의해 초기화되고, Tremback과 Kessler(1985)에 의해 수정된 방법을 사용하였다.

그리고 RAMS 내에 구축되어 있는 등온위면 분석(Isentropic Analysis Package, RAMS/ISAN)을 이용하여 수치모의의 초기 기상장과 수치모의 기간동안 측면 경계로 사용하였으며, 등온위 분석은 대기 상층에서 등온위면과 바람장이 거의 나란하므로, 자료동화를 실시할 때 발생할 수 있는 오차를 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다.

### 계산 영역 및 경계 조건

본 연구에서 사용한 측면 경계조건은 다음과 같은 복사 경계 조건(Olanski, 1976)을 사용하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -c \frac{\partial u}{\partial x} \quad (6)$$

여기서 는 위상속도(phase speed)이고 Klemp and Wilhelmson(1978) 방법을 사용하여 계산하였다. 상층 경계 조건은 상층으로 진행되는 내부 중력파를 효과적으로 흡수할 수 있도록 하기 위하여 Klemp and Durran(1983)의 중력과 복사조건(gravity wave radiative condition)을 사용하였다.

본 연구에서는 포항지역의 풍환경을 파악하기 위해 설정한 계산 영역은 다음과 같다.

- 성긴격자영역(Coarse domain)
  - 위 도: 35도 29분 51초~36도 67분 22초 (100분 위 표기)
  - 경 도: 128도 60분 60초~129도 98분 30초
- 상세격자영역(Fine domain)
  - 위 도: 35도 92분 94초~36도 17분 15초
  - 경 도: 129도 32분 30초~129도 64분 90초

연구에서 설정한 성긴격자영역은 포항시를 중심으로 격자간격 5km로 설정하여 동서방향으로 200km,

남북방향으로 150km의 영역을 각각 40과 30격자점으로 나타내었으며 연직 격자는 총 30층으로 구성하였다(Fig. 5). 그림에서 보는 바와 같이 포항시의 남쪽에 있는 울산광역시와 수치모의 영역에 포함되어 있으며 서쪽으로는 포항과 동서방향으로 좁은 저지대의 끝의 끝자락에 위치한 대구광역시가 포함되어 있다. 또한 포항에서 보면 남서방향에, 울산에서 보면 북서방향의 저지대 끝자락에 청정지역인 경주시가 포함되어 있고 부산과 울산의 북북서방향에 위치한 고지대의 가지산일대가 포함되어 있다. 전체적으로 보면 그림에서도 알 수 있는 것처럼, 성긴격자영역은 포항시의 바람장에 대한 주변지역의 지형 및 지리적 영향을 상세히 살펴볼 수 있기에 충분한 범위로 설정되어 있다.

성긴격자영역은 포항지역의 바람장을 상세히 살펴 보는데 다소 어려움이 있다. 따라서 성긴격자영역에서 포항지역을 대상으로 상세격자영역을 구성하여 포항시에서의 상세한 바람장을 살펴보고자 하였다.

상세격자영역은 격자간격 1km로 설정하여 동서방향으로 40km, 남북방향으로 30km의 영역으로 구성하였고 연직 격자는 성긴격자 체계와 동일하게 총 30층으로 구성하였다. 기본적으로 포항시는 내륙으로 비교적 깊숙이 들어와 있는 영일만의 끝자락에 위치하고 있고 지역의 지형적 경사가 비교적 완만한 경향을 보인다. 포항시의 동쪽으로는 약간의 지형경사를 지닌 장기곶과 감포 일대가 독특한 해안선의 형태를 띄며 위치하고 있으며 포항시의 남서방향으로 다소 경사가 있는 지역이 포함되어 있다.

## 포항지역 기상장 수치모의

### 남서풍일에 대한 수치모의

앞서 포항지역의 기상분석에서 살펴본 바와 같이 포항지역에서의 바람은 연간 남서풍 계열이 뚜렷한 주풍으로 나타나고 있다. 따라서 여기서는 포항의 주풍인 남서풍이 우세한 종관장을 고려하여 수치모의를 수행하였다. 여기서 수치모의에 필요한 초기조건을 구성하기 위하여 남서풍이 일중 우세하였던 날들을 선정하였다. 그러나 포항지역의 지리적, 지형적 특징을 보면 포항지역의 남서방향으로 저지대의 끝이 위치하고 있음을 알 수 있다.

여기서 한가지 생각해 볼 수 있는 점은 우리나라의 남동지역의 연간 바람장미를 살펴보면 일중 남서

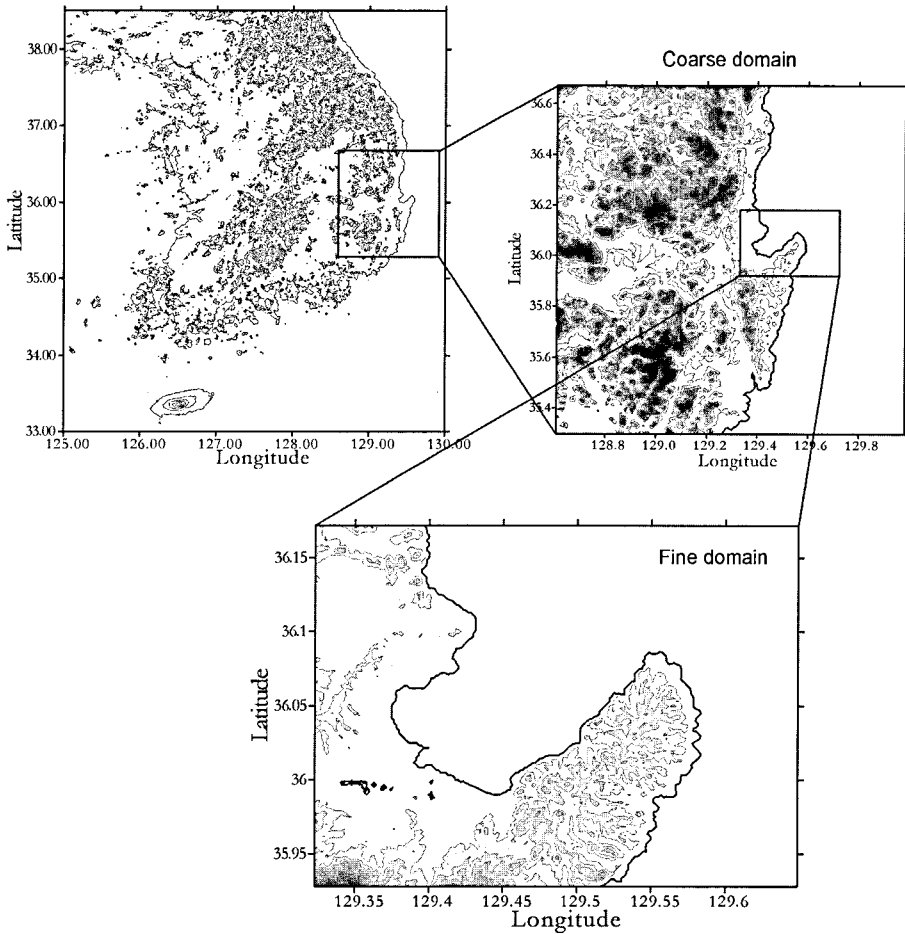


Fig. 5. Computational domain for numerical simulation.

풍이 우세한 날들은 그다지 많지 않다는 점이다. 우리나라의 경우에는 겨울철에 시베리아에서 장출하는 고기압의 영향으로 북서풍 내지는 서풍이 전국에 지배적으로 나타나는 경우가 대부분이다. 그러나 앞서 기상분석에서 살펴본 바와 같이 다년간(1997~2000년)의 연간 바람장미를 살펴보면 포항지역에서 북서풍 계열의 바람빈도가 매우 적게 나타나고 있음을 알 수 있고 또한 월별 바람장미를 살펴보아도 겨울철인 12월, 1월, 2월의 바람분포에서도 북서풍 계열의 바람이 거의 나타나고 있지 않다. 오히려 이 기간동안에도 포항지역에서는 남서풍이 지배적으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 포항지역에서 나타나는 겨울철 남서풍 계열의 바람은 한반도로 불어오는 북서풍 또는 서풍 계열의 바람이 지형적인 영향으로 포항의 남서쪽에 형성되어 있는 저지대를 통해 돌아 들어오는 바람이라는 것을 유추할 수 있다. 이를 토대로 포

항지역에서 나타나는 남서풍을 정확히 묘사하기 위해서 일중 북서풍이 일중 지속되었던 날들을 1차적으로 선정하였으며 그 중에서도 서풍에 가까운 바람이 우세한 날들을 다음 단계에서 선정하였다. 이런 경우에, 포항지역의 북서방향과 남서방향에 있는 고지대의 영향으로 포항지역으로 불어오는 서풍이나 북서풍은 저지대의 골의 형태를 하고 있는 포항지역의 남서방향으로 불어 들어올 가능성이 매우 높기 때문에 포항지역에 남서풍의 형태로 나타나게 될 가능성이 높다. 따라서 포항지역에 지배적으로 나타나는 남서풍이 부는 날들의 지표 바람장을 살펴보기 위해서 우리나라가 일중 서풍이 우세하였던 날들을 대상으로 수치모의를 수행하였다.

우리나라 전역에 서풍이 우세하게 나타났던 날들은 대부분 겨울철의 날들이 선정되었는데 이는 우리나라 겨울철에 영향을 크게 미치는 시베리아 고기압의 영



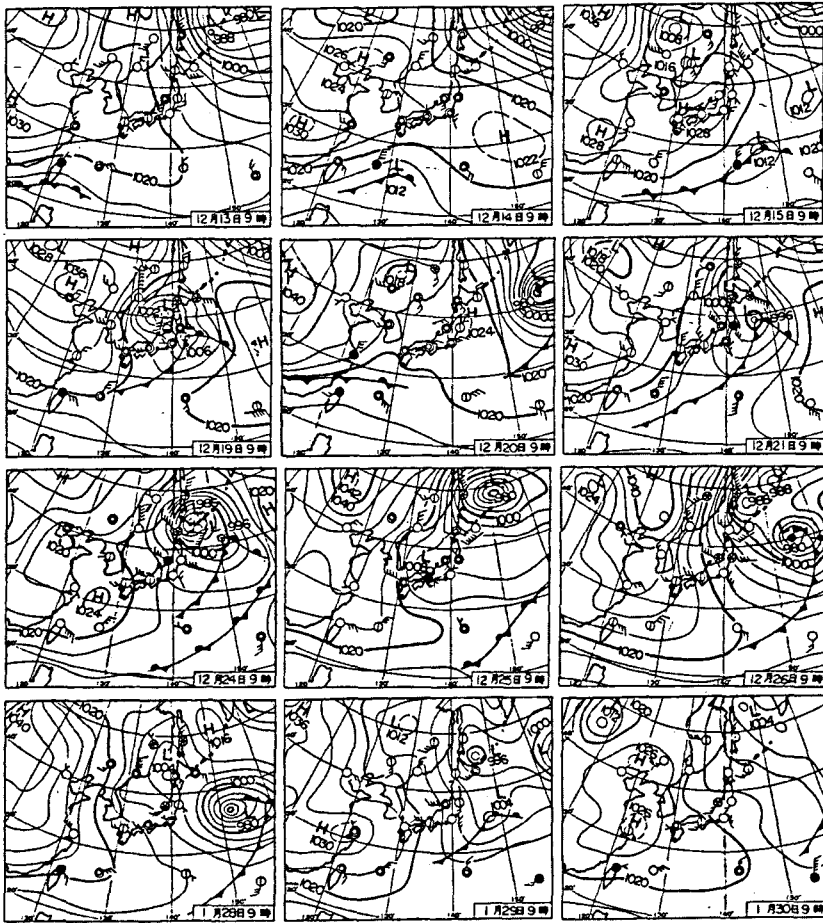


Fig. 6. Surface weather charts at 0900LST on 13-15 December, 19-21 December, 24-26 December 2000, and 28-30 January 2001).

향이 우리나라로 진출하여 포항에서 일중 서풍이 나타난 날들이다. 선정된 날들은 2000년 12월 13~15일, 19~21일, 24~26일과 2001년 1월 28~30일로 모두 12일이 선정되었으며 이 날들의 지상 중관 일기도는 Fig. 6에 나타내었다.

선정일로 정한 날들의 중관 일기 상태는 다음과 같다.

2000년 12월 13일에서 15일까지 우리나라는 차가운 대륙성 고기압의 가장자리에 위치하여 중북부 지역과 남동부 먼 해상에서 높은 구름이 조금 있는 매우 맑은 날씨를 보이고 있는 가운데 바람은 북서 내지 서풍이 부는 조금 쌀쌀한 초겨울의 전형적인 날씨 유형을 나타내고 있으며 2000년 12월 19일에서 21일 사이도 아직 완전히 발달하지 않았지만 서고동저형의 전형적 겨울 날씨 유형을 점차 형성해 가는

차가운 대륙성 고기압의 전면에서 우리나라가 위치하여 구름 조금인 대체로 맑은 날씨를 보이고 있으며 북서 또는 서풍의 바람이 지배적으로 불고 있다. 2000년 12월 24일에서 26일의 경우도 전형적인 서고동저형의 겨울 일기 기압배치를 나타내고 있어 우리나라 전국이 매우 건조하고 차가운 대륙성 고기압의 영향으로 구름 없이 매우 맑고 차가운 날씨를 보이고 있으며 바람 또한 북서 내지 서풍이 다소 강하게 부는 날을 보이고 있다. 2000년 1월 28일에서 30일은 강한 대륙성 고기압이 우리나라 부근에서 분리되지만 중심기압은 오히려 강화되는 또 다른 우리나라 겨울철의 전형적인 일기 유형중의 하나로 전국이 구름 없이 맑은 가운데 바람의 경우 중북부는 북풍, 남부 지역은 북서 내지 서풍이 조금씩 약화되어 부는 날씨를 보이고 있다.

이상에서 선정한 북서풍 또는 서풍계열이 우세한 날을 대상으로 수치모의를 수행하기 위해 위에서 선정한 날들의 포항지역 21시 평균기온인 2.55°C와 겨울철 우리나라 남동해안의 평균해수면 온도인 11.8°C, 그리고 12월의 평균 적위를 고려하였으며 대상일의 21시에 관측된 연직 기상자료를 이용하여 초기입력자료를 구성하였다.

Fig. 7은 성긴격자영역을 대상으로 수치모의한 지표부근 바람장의 결과를 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 계산영역 전반에 걸쳐 서풍계열의 바람이 우세하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

새벽시간대를 살펴보면, 02시부터 08시까지는 전반적으로 지표바람장의 형태에 큰 차이가 나타나지는 않는다. 이 시간대는 전체적으로 육지의 기온이 바다의 기온보다 낮아서 육지에서 바다로 바람이 불어 나가는 경향(육풍)이 강하게 나타나는 시간대이다. 이러한 야간 풍계와 종관 바람인 서풍이 함께 나타나서 균일한 형태의 지표바람장을 보여주고 있는 것으로 분석된다. 여기서 한가지 주목할 점은 포항이 위치한 영일만 일대의 지표바람 풍향이다. 앞서 에서도 언급한 바와 같이 우리나라에 일중 서풍이나 북서풍계열이 우세하게 나타나는 경우에는 포항지역에 서풍보다 다소 남풍계열의 바람성분이 포함된 남서풍계열의 바람이 나타날 수 있는 지형적, 지리적 조건을 가지고 있다고 하였는데, 수치모의 결과에서도 보면 해안에서 일정거리 내륙에서 서풍이 전반적으로 우세하게 나타나고 있으나 포항지역은 바다와 접하는 해안선의 방향과 포항지역의 남서방향에 형성되어 있는 저지대의 영향으로 남서풍계열의 바람이 뚜렷하게 나타나고 있고 이러한 남서풍계열의 바람은 새벽시간대 동안 지속적으로 나타나고 있다.

이를 통해 앞서 포항지역의 기상분석에서 본 겨울철 바람장미와 연간 바람장미에서, 남서계열의 바람이 지배적으로 나타나는 것은 서풍계열의 바람이 포항지역의 지리적, 지형적 특성에 의해 남서풍계열의 바람으로 편향되어 나타난 것이라는 점을 분명히 이해할 수 있는 것이다. 즉, 포항이 접하고 있는 해안선의 방향이 북서-남동 방향으로 되어 있기 때문에 수평기온경도 및 이와 연관된 수평기압경도는 이 방향을 따라서 가장 크게 나타나게 되며 또한 포항 앞 바다의 북서방향과 남동방향에 육지가 형성되어 있어 바람이 빠져나가는 통로는 남서-북동방향이 된다. 이

와 함께 위에서 언급한 바와 같이 포항지역의 남서방향이 저지대로 내륙과 연결되어 있다. 따라서 크게 이러한 3가지 요인으로 인해 야간 및 서풍이 지배적인 종관조건 하에서는 포항지역에 남서풍계열의 바람이 지배적으로 불게 되는 것이다.

이와 함께 지형의 굴곡 및 경사가 심한 내륙에서는 지표바람장이 다양한 형태로 나타나고 있다. 고지대에서는 저지대로 불어 나가는 바람을 볼 수가 있고 저지대에는 고지대에서 불어 내려와 흘러가는 형태의 바람을 보여주고 있다. 하지만 이들 그림에서도 알 수 있듯이 이들 고지대에서도 동편 경사지역을 통해 불어 내려가는 바람은 뚜렷하게 나타나고 있지 않고 서편 경사지역을 통해 바람이 강하게 불어 내려가고 있는데 이는 종관바람인 서풍에 의한 영향으로 볼 수 있다.

08시에도 새벽시간대와 이른 아침에 나타났던 지표바람장과 크게 다른 형태를 보이지는 않지만 전반적으로 육지에서 바람의 강도가 다소 약해진 것을 볼 수 있다. 이는 일출에 의해 지면가열이 나타나서 육지의 기온이 상승함에 따라 내륙 안쪽에서부터 불어 나가는 육풍의 성분이 약해졌기 때문으로 해석된다. 이러한 변화는 10시가 되면 좀 더 나타나는데, 감포가 위치한 연안바다에서 바람의 방향이 남풍의 형태로 약간 바뀐 것을 볼 수 있다. 그리고 12시가 되면 해상에서의 바람이 시간에 따라 남풍의 형태로 변하고 있음을 볼 수 있다. 이는 육지가열에 의해 바다에서 육지로 불어 들어가는 해풍의 성분들이 서서히 커졌기 때문으로 나타난 결과로 분석된다. 이후의 주간시간대에는 12시의 지표바람장의 형태와 거의 차이가 없이 이러한 경향이 지속적으로 나타나고 있으며 야간시간대에는 위에서 언급한 새벽시간대의 바람장의 형태와 유사하게 나타났으므로 본문에서는 그림을 생략하였다.

이상에서 성긴격자 수치모의를 통해 나타난 경상도 일대의 지표 바람장을 볼 수 있었다. 결과를 통해 볼 때, 하지만 성긴격자영역에 대한 수치모의는 기본적으로 포항을 중심으로 한 좁은 영역에서의 상세한 풍계를 살펴보는 데는 다소 한계가 있다. 따라서 포항시를 중심으로 상세격자영역을 설정하여 이 지형을 대상으로 수치모의 하여 그 결과를 Fig. 8에 제시하였다.

앞서 성긴 격자영역의 계산결과와 유사하게 새벽시간대와 주간에 지표바람장의 형태는 크게 다르지 않

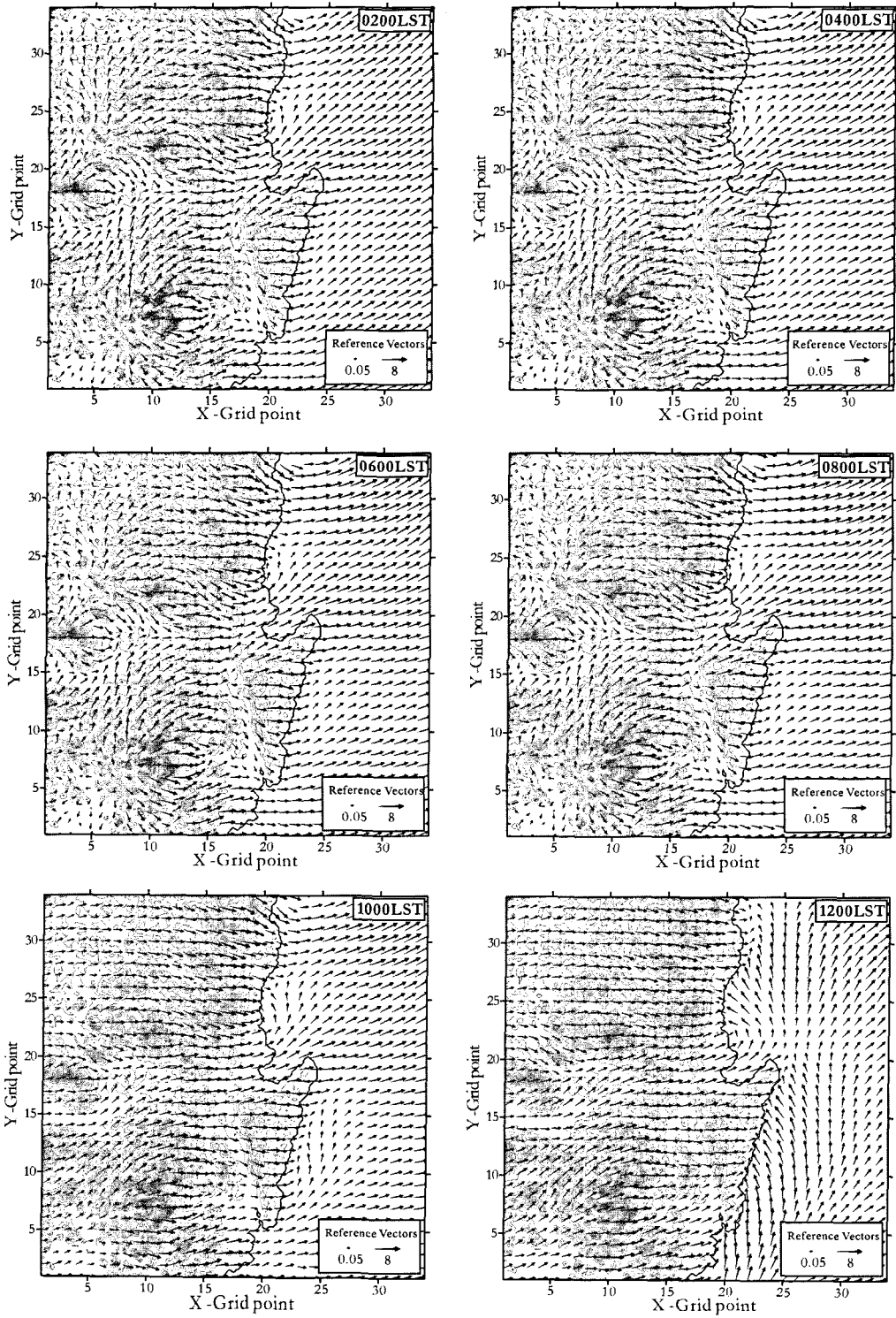


Fig. 7. Distributions of simulated wind fields over coarse domain.

다. 다만 여기서도 포항인근지역의 지표바람이 남서풍계열의 바람으로 나타나고 있다는 점은 성긴지역의 계산결과에서 보다 좀 더 분명히 알 수 있다.

새벽시간대와 이른 아침시간대의 바람은 전반적으로 전 영역에 걸쳐 균일한 남서풍계열의 바람을 보여주는데, 이는 포항지역이 대체로 지표고도가 낮고 지형의 경사가 심하지 않은 평지의 형태로 이루어져 있으므로 지표바람장의 형태가 비교적 균일하게 나타나는 것이다. 그러나 포항의 동쪽에 위치한 간절곶과 지행지역에서는 다소 경사가 있는 지형이 있기 때문에 포항시내와는 다소 다른 형태의 바람이 나타나고 있다.

10시, 12시에는 포항지역에서 나타났던 남서풍계열의 바람이 점차 서풍으로 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이는 일출 후, 시간이 지날수록 일사에 의해 지면가열이 전반적으로 진행되어 이와 같은 풍향의 변화에는 더 이상 국지적인 지형굴곡 등의 지형적 특성이 아니라 육지와 바다라는 거대한 열적 구성체의 분포가 큰 영향을 미치게 된다. 즉, 포항인근의 국지적 지형굴곡 및 해안선의 형태에 의한 바람의 변화 효과는 약해지게 되고 육지와 바다 그리고 서풍이 부는 중관조건이 전체적인 바람에 영향을 주게 되는 것이다. 따라서 포항을 포함한 인근지역에서 서풍계열의 바람이 나타나게 된다.

이후 주간시간대에도 이러한 경향이 나타나다가 저녁시간대가 되면 다시 위에서 언급한 바와 같이 포항지역에서 남서풍계열의 바람이 나타나서 유지되었다.

### 수치모의 결과와 관측값 비교

여기서는 수치모의 계산값에 대한 정확성을 살펴보기 위해서 관측값과의 비교를 수행하였다.

비교 대상일은 앞서 남서풍일로 선정한 12일의 시간별 평균자료를 이용하였다. 하지만 풍향의 경우는 다른 기상요소와는 달리 주변 지형, 지물의 영향을 비교적 크게 받으며 360°라는 제한된 영역에서 반복되는 값이기 때문에 평균을 구하는 것에는 무리가 따른다. 따라서 풍향값의 비교는 대상으로 선정한 남서풍일중에서 가장 뚜렷한 풍계를 나타낸 2000년 12월 14일을 비교대상일로 하였다.

이와 같은 과정을 바탕으로 포항지역과 인근지역에 설치되어 있는 기상대 및 자동기상관측장비에서 관측되는 기온, 풍향, 풍속자료와 수치모의된 결과값을

비교하였다.

비교에 사용된 포항기상대 및 포항인근지역 AWS의 위치는 Fig. 9와 같다. 여기서 포항과 장기곶의 관측자료는 상세격자영역에 포함되는 지역이므로 상세격자결과와 비교하였으며 감포의 관측자료는 성긴격자결과와 비교를 수행하였다.

Fig. 10은 남서풍일의 시간별 평균 기온과 수치모의된 시간별 기온값을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 전반적인 일변화 경향을 수치모의 결과가 잘 모사하고 있음을 알 수 있다. 약 19시 이후의 야간시간대에 계산결과가 관측값에 비해 다소 과소평가되고 있지만 전반적으로 지역별로 나타나는 특징을 잘 모사하고 있다. 즉, 일 최고기온 및 일교차의 경우 장기곶에서 다른 지역에 비해 낮은 일최고기온과 적은 일교차의 특징을 수치모의 결과가 잘 나타내고 있다.

Fig. 11은 시간별 평균 풍속과 수치모의된 결과값을 비교한 것이다. 기온과 마찬가지로 지역별로 나타나는 특징과 일변화 경향을 잘 모사하고 있다. 포항의 경우에는 일중 풍속차가 거의 없이 3~4m/s 내외의 값을 나타내고 있는데 이러한 경향을 수치모의 결과도 잘 나타내고 있다. 장기곶의 경우에는 이 날 오히려 주간에는 낮은 풍속을 나타내고 새벽시간대와 야간에 강한 풍속을 나타내는 특이한 경향을 나타내고 있다. 이 경우에도 수치모의 결과는 주간에는 낮은 풍속을, 새벽과 야간에 오히려 풍속이 급증하는 특이한 일변화 경향을 매우 잘 모사하고 있다. 이와 마찬가지로 감포의 경우에도 주간에는 낮은 풍속과 야간으로 갈수록 풍속이 강해지는 특이한 경향을 수치모의 결과가 풍속값과 일변화 특징을 잘 모사하고 있다.

Fig. 12는 2000년 12월 14일에 관측된 지점별 풍향값과 수치모의된 풍향값을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 포항의 경우에 일중 남서풍이 지속적으로 불었는데 수치모의 결과에서도 이러한 일중 남서풍의 특징을 정확히 모사하고 있다. 장기곶의 경우에는 새벽시간대와 주간에 지속적인 남서풍을 나타내다가 17시에 19시경에 남풍계열의 바람을 보이고 있다. 이러한 변화경향을 수치모의 결과도 잘 모사하고 있는데 수치모의 결과에서는 몇 시간 빨리 이러한 변화의 특징을 모사하고는 있지만 포항과 달리 오후에 일시적으로 남풍이 나타난다는 특징을 수치모의 결과는 잘 재현하고 있다. 감포의 경우에도 일중 북서풍이 불다가 남남서풍으로 잠시 나타나는 특징을

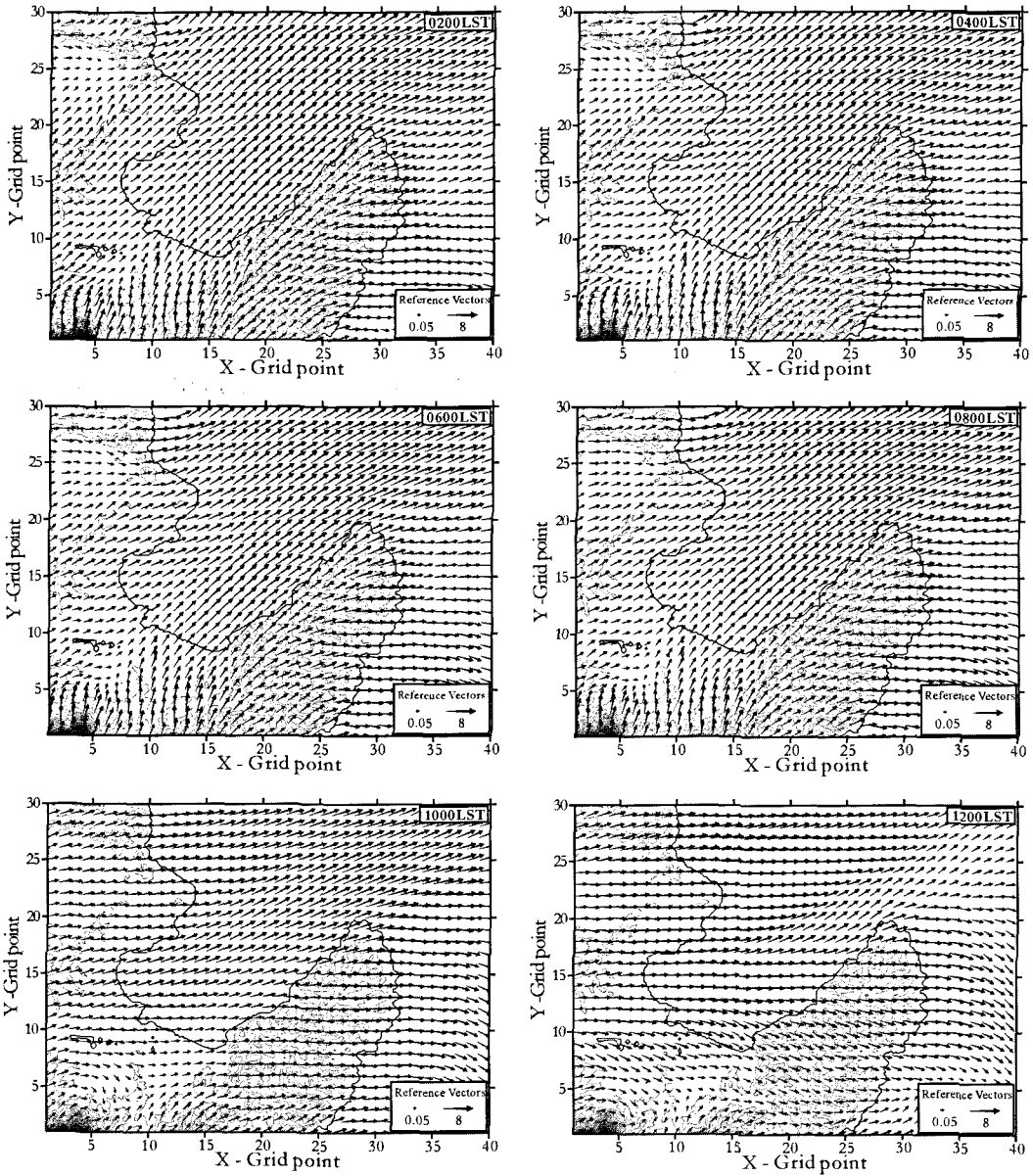


Fig. 8. As in Fig. 7 except for fine domain.

수치모의 결과는 잘 묘사하고 있다. 즉, 새벽과 오전에 포항과 장기곶과 달리 북서풍계열의 바람을 잘 묘사하고 있으며 시간대에 약간의 차이가 나타나지만 남남서풍이 일시적으로 나타나는 특징 또한 잘 재현하고 있다.

이상에서 관측값과의 비교를 통해 남서풍일을 대상으로 수치모의한 계산결과의 정확성을 상세히 살펴보았다. 비교 결과, 기온, 풍속, 그리고 풍향에서 지역

별로 나타나는 세밀한 특징적인 현상들을 수치모의 결과 또한 잘 재현하고 있음을 볼 수 있었으며 이는 본 연구에서 제시한 수치모의 결과가 여러 가지 조건에 대한 가상 시나리오 모델링이나 장, 단기적으로 포항지역의 기상상태를 예측하는데 정확한 정보를 제공할 수 있음을 보여주는 것으로 큰 의미가 있다고 할 수 있다.

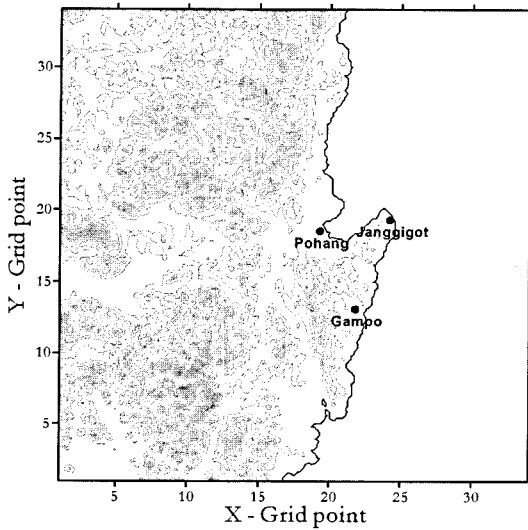


Fig. 9. Map of a computational domain showing the locations of observational sites.

### 결론

본 연구에서는 연안에 위치하고 있으며 대규모의 제철소와 공단이 형성되어 있는 포항지역에 형성되는 바람장을 구체적이고 정확하게 살펴보았다. 그러나 이를 위해서는 충분한 기상관측자료를 제공할 수 있는 조밀한 관측망 분포가 필수적이지만, 현재 설치되어 있는 관측망은 상당히 광역적이기 때문에 현실적으로 상세한 국지적 풍환경을 살펴보는 데는 한계가 있다. 따라서 이를 해결하는 대안으로 대기유동장 수치모형을 이용한 풍환경 분석이 반드시 필요한 것이다.

우선 관측자료를 통해 포항지역에서 나타나는 겨울철 풍계를 살펴본 결과, 겨울철에 지표부근에서 일반적으로 볼 수 있는 계절풍인 북서풍의 빈도는 매우 약하게 나타나고 오히려 서풍과 남서풍의 빈도가 지배적으로 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이와 더불어 상층풍 분석에서는 저층대기인 1000hPa, 925hPa에서는 지표부근의 풍계와 유사하게 나타났지만 상층대기인 850hPa에서는 겨울철 계절풍의 형태인 북서풍을 뚜렷이 볼 수 있었다. 이를 통해 포항지역에서 나타나는 지표부근의 풍계에 영향을 미치는 어떠한 요인이 있다는 것을 알 수 있었고 이를 정확히 확인하기 위해 대기유동장 수치모형인 RAMS를 이용하여 바람장 수치모의를 수행하였다.

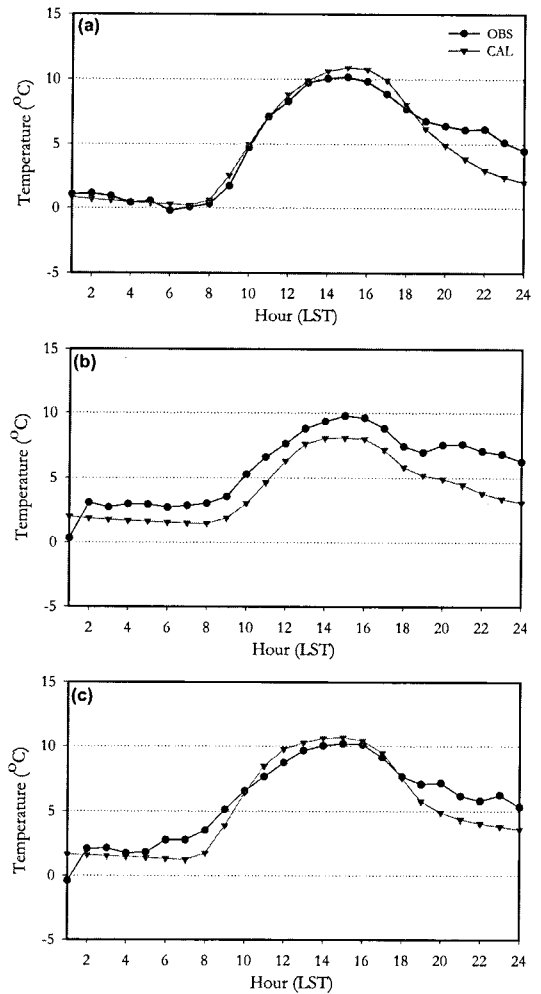


Fig. 10. Simulated and observed temperature for (a) Pohang, (b) Janggigot, and (c) Gambo.

수치모의를 수행한 결과, 겨울철 포항지역의 지표부근에서 나타나는 남서풍의 높은 빈도는 포항이 접하고 있는 해안선의 방향이 북서-남동 방향으로 되어 있기 때문에 수평기온경도 및 이와 연관된 수평기압경도가 이 방향을 따라서 가장 크게 나타난다는 점과 포항 앞바다의 북서방향과 남동방향에 육지가 형성되어 있어 바람이 빠져나가는 통로는 남서-북동방향이 된다는 점, 그리고 이와 함께 포항지역의 남서방향이 저지대로 내륙과 연결되어 있다는 3가지 요인으로 인해 포항지역에 남서풍계열의 바람이 지배적으로 부는 것으로 분석되었다.

이상의 수치모의 결과들에 대한 정확도를 살펴보기 위해 관측값과의 비교를 수행하였는데, 수치모의 결

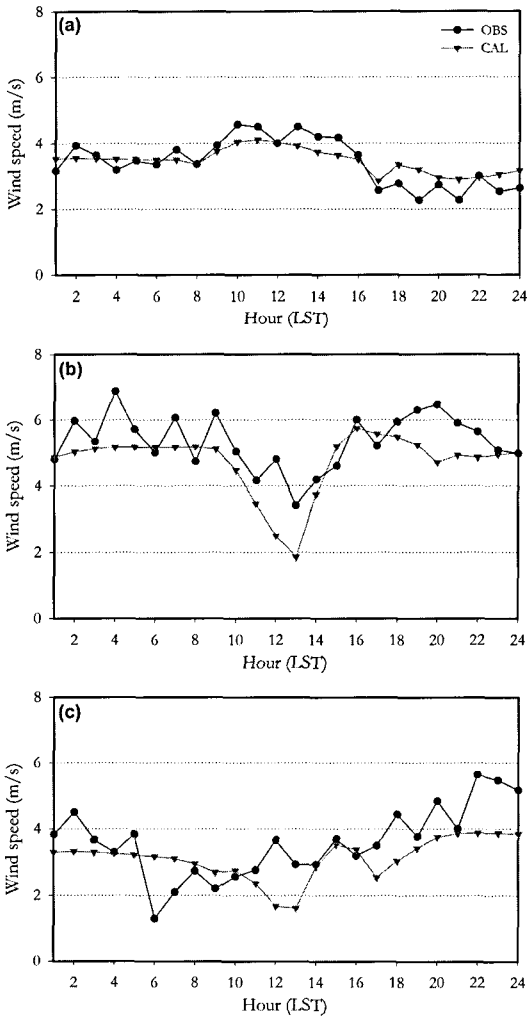


Fig. 11. As in Fig. 10 except for wind speed.

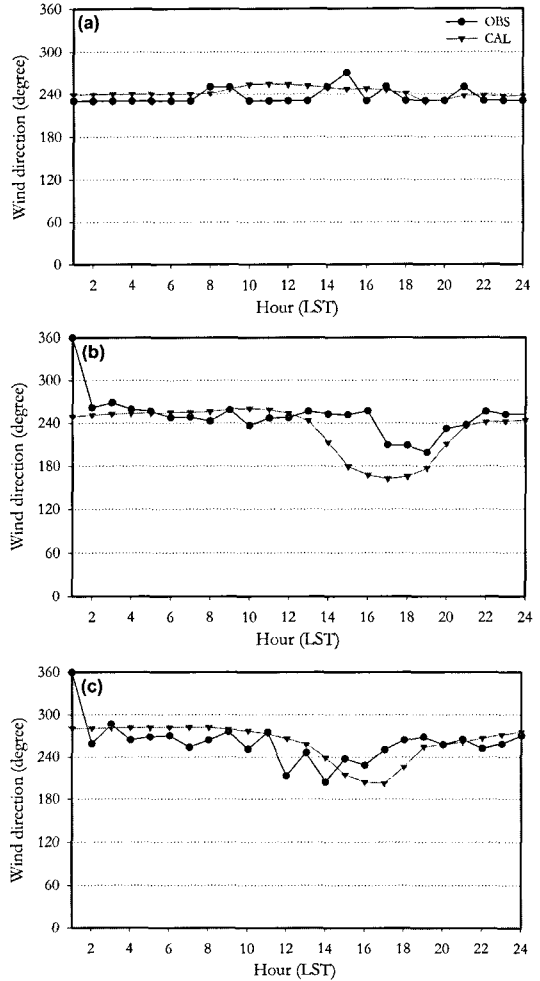


Fig. 12. As in Fig. 10 except for wind direction on 14 December 2000.

과가 관측값과 잘 일치하는 것으로 보아 본 연구에서 사용한 수치모형이 타당한 결과를 제공할 수 있는 것을 알 수 있었다.

오염원에서 배출되는 대기오염물질은 대기화학적 측면에서도 중요하지만 지역적으로 형성되는 국지 기상장의 영향에 의해 확산, 수송되기 때문에 지역별 국지 기상장을 정확히 파악하는 점은 문제해결 및 대안 마련에 매우 중요한 정보를 제공한다. 따라서 본 수치실험에서 살펴본 바와 같이 객관성을 입증한 모형결과값을 이용한다면 관측을 통해 공간적으로 정확히 살펴볼 수 없었던 국지 기상장의 해석을 더욱 상세히 살펴볼 수 있으므로 상당히 유용한 정보를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

### 참고 문헌

김영성, 오현선, 2000, 여수지역 대기확산의 수치모사-I. 지형의 영향. 한국대기환경학회지, 16(3), 211-223.  
 오현선, 김영성, 2000, 여수지역 대기확산의 수치모사-II. 일사에 의한 일변화. 한국대기환경학회지, 16(3), 225-236.  
 이화운, 1987, 지역대기환경의 수치예측 모델에 관한 연구. 일본 오사카대학교 박사학위논문, 105 p.  
 이화운, 김유근, 정우식, 2000, 복잡한 연안지역에서 해풍시작시 지형의 영향에 대한 수치모의. 한국기상학회지, 36(5), 561-572.  
 정우식, 이화운, 2002, 해풍시작에 영향을 미치는 지형성 강풍현상에 대한 고찰. 한국환경과학회지, 11(4), 289-295.

- Atkinson, B. W., 1981, Meso-scale Atmospheric Circulation. Academic Press, London, 125-209.
- Batchvarova, E., Cai, X. M., Gryning, S. E. and Steyn, D., 1999, Modelling internal boundary-layer development in a region with a complex coastline. *Boundary-Layer Meteorology*, 90, 1-20.
- Bossert, J. E., 1997, An Investigation of Flow Regimes Affecting the Mexico City Region. *Journal of Applied Meteorology*, 36, 119-140.
- Businger, J. A., Wingaard, J. C., Izumi, Y. and Bradley, F., 1971, Flux-Profile relationships in the atmosphere surface layer. *Journal of Atmospheric Sciences*, 28, 181-189.
- Cai, X. M. and Steyn D. G., 2000, Modelling study of sea breezes in a complex coastal environment. *Atmospheric Environment*, 34, 2873-2885.
- Clark, T. L., 1977, A small-scale dynamic model using a terrain-following coordinate transformation. *Journal of Computational Physics*, 24, 186-215.
- Gal-chen, T. and Somerville, R. C. J., 1975, On the use of a coordinate transformation for the solution of the Navier-Stokes equation. *Journal of Computational Physics*, 17, 209-228.
- Hogrefe, C., Rao, S. T., Kasibhatla Prasad, Kallos G., Tremback C. J., Hao W., Olerud, D., Xiu, A., McHenry J. and Alapaty, K., 2001, Evaluating the performance of regional-scale photochemical modeling systems: Part I-meteorological predictions. *Atmospheric Environment*, 31, 4159-4174.
- Kikuchi, Y., 1975, Kairikufu no suchi simulation (Numerical simulation of land and sea breeze). *Kisho-Kenkyu Note*, 125, 21-49.
- Kimura, F. and Kuwagata, T., 1993, Thermally Induced Wind Passing from Plain to Basin over a Mountain Range. *Journal of Applied Meteorology*, 32, 1538-1547.
- Klemp, J. B. and Durran, D. R., 1983, An upper boundary condition permitting internal gravity wave radiation in numerical mesoscale models. *Monthly Weather Review*, 111, 430-444.
- Klemp, J. B. and Wilhelmson, R. B., 1978, The simulation of three-dimensional convective storm dynamics. *Journal of Atmospheric Sciences*, 35, 1070-1096.
- Kurita, H., Sasaki, K., Muroga, H., Ueda, H. and Wakamatsu, S., 1985, Long-range transport of air pollution under light gradient wind conditions. *Journal of Climate Applied Meteorology*, 24, 425-434.
- Louis, J. F., 1979, A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. *Boundary-Layer Meteorology*, 17, 187-202.
- McCumber, M. C. and Pielke, R. A., 1981, Simulation of the effects of surface fluxes of heat and moisture in a mesoscale numerical model, Part I: Soil layer. *Journal of Geophysical Research*, 86, 9929-9938.
- Mesinger, F. and Arakawa, A., 1976, Numerical method used in atmospheric models. GARP Publication Series, No. 14, WMO/ICSU joint Organizing Committee, 64.
- Orlanski, I., 1976, A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows. *Journal of Computational Physics*, 21, 251-269.
- Pielke, R. A., 1974, A three dimensional numerical model of the sea breeze over the South Florida. *Monthly Weather Review*, 102, 115-139.
- Stephan, F. J., Wekker, De, Shiyuan, Z., Jerome, D. F. and David, W., 1998, A Numerical Study of the Thermally Plain-to-Basin Wind over Idealized Basin Topographies. *Journal of Applied Meteorology*, 37, 606-622.
- Tremback, C. J. and Kessler, R., 1985, A surface temperature and moisture parameterization for use in mesoscale numerical models. Preprint, 7th Conference on Numerical Weather Prediction, 17-20 June 1985, Montreal, Canada, AMS.
- Tripoli, G. J. and Cotton, W. R., 1982, The Colorado State University three-dimensional cloud/mesoscale model-1982. Part I: General theoretical framework and sensitivity experiments. *Journal of Atmosphere*, 16, 185-220.

---

2003년 6월 26일 원고 접수  
 2003년 8월 4일 수정원고 접수  
 2003년 9월 20일 원고 채택