

대기오염 확산 해석을 위한 포항지역 기상장 연구
-바람장 수치모의-

A Study of Atmospheric Field around the Pohang for
Dispersion Analysis of Air Pollutants
- Numerical Simulation of Wind Field -

이화운 · 정우식* · 김현구¹⁾ · 이순환²⁾

부산대학교 대기과학과, ¹⁾포항산업과학연구원 환경에너지 연구센터

²⁾조선대학교 과학교육학부

(2003년 5월 15일 접수, 2003년 10월 30일 채택)

Hwa Woon Lee, Woo-Sik Jung*, Hyun-Goo Kim¹⁾ and Soon-Hwan Lee²⁾

Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University

¹⁾*Environment & Energy research center, Research Institute of Industrial Science & Technology*

²⁾*Division of Science Education, Chosun University*

(Received 15 May 2003, accepted 30 October 2003)

Abstract

Sea/land circulation system is a representative mesoscale local circulation system in coastal area. In this study, wind fields around coastal area, Pohang, which is affected by this system was investigated and its detailed characteristic analysis was carried out.

The following can be found out from the numerical simulation.

Generally, at nighttime mountain winds prevail and land breeze toward the coastal area was well simulated. During daytime, valley wind and sea breeze was simulated in detail. Especially, as a result of analyzing the land breeze path, it could be found along the coastline as it flows out through low land coastal area.

In order to investigate the accuracy of model results, wind speed, temperature and wind direction of continuous typical sea/land breeze occurrence day was compared with observation data. Analyzing the characteristics of local circulation system was very hard because of horizontally sparse observation data but from the above result, a numerical simulation using RAMS, which satisfies the spatial high resolution, will provide more accurate results.

Key words : Sea/land breeze, RAMS, Coastal area, Wind field

* Corresponding author

Tel : +82-(0)51-583-2651, E-mail: wsjung1@pusan.ac.kr

1. 서 론

최근에 규모면에서 대도시보다 작다 하더라도 지역 특유의 산업형태와 관련해서 대기환경학적인 측면의 중요성이 강조되고 있는 중·소도시들에 대한 연구의 필요성과 관심이 점차적으로 증가되고 있다. 예를 들어, 우리나라 최대의 철강단지를 이루고 있는 포항지역을 보면, 이들 지역이 그 규모면에서 대도시보다 작지만 포항에 위치한 철강단지가 거대한 규모로 형성되어 있고 도시의 상당부분을 차지하고 있으며 또한 지리적으로 여러 가지 대기순환계에 영향을 받을 수 있는 조건에 있기 때문에 도시의 대기환경학적인 관심도가 증가되고 있는 것이다.

바다에 접해 있으면서 연안 곳곳에 대규모의 공단이 형성되어 있는 포항지역은 거대한 대기오염물질의 배출원으로도 작용할 수 있는데, 배출된 대기오염물질은 중관장의 영향이 약한 날에 형성된 여러 가지 국지순환계와 더불어 복잡, 다양한 수송 및 확산현상을 보일 수 있다. 이 말은 오염원에서 배출된 물질에 의한 대기오염문제는 각각의 대규모 배출원이 위치하고 있는 도시나 지역만의 문제가 아니라 이들 지역에서 형성되는 해륙풍이나 산곡풍 등 각각의 국지순환계와 이들의 결합에 의해 다른 지역으로 수송된다는 측면에서도 심각하고 중요한 문제가 된다. 따라서 지역규모에서의 대기질은 대기오염물질의 배출량과 난류확산 및 수송, 화학반응, 침적현상 등에 의해 결정되어지므로 이들을 지배하는 기상인자들에 대한 이해는 지역적 종합오염도를 조사하는데 있어 필수적이라고 할 수 있다.

이러한 연구 및 조사를 위해서는 기상관측소 등의 측정 자료를 충분히 이용하는 것이 가장 이상적인 방법이다. 이 경우에는 실제 측정자료를 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 기상장을 제공할 수 있는 중규모 대기유동장 모형을 이용한 연구들이 많이 수행되어 오고 있다.

이전부터 여러 가지 대기유동장모형이 Kikuchi (1975), Atkinson (1981) 그리고 Pielke (1984) 등에 의

해서 개발되어 왔으며 이들 모형을 이용한 많은 연구들이 수행되었다. 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(정우식과 이화운, 2001; 이화운 등, 2000).

본 연구에서는 포항지역을 포함하는 영역의 바람장을 상세하게 살펴보기 위해 CSU-RAMS (Colorado State University-Regional Atmospheric Modeling System, 이하 RAMS) 모형을 사용하여 과정을 수행하였다. 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 Cai *et al.* (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 김영성 등 (2000)과 오현선 등 (2000)의 광양만을 중심으로 여천 공단 등 대규모 공단이 위치하고 있어 대기오염물질의 배출이 많고 석유화학 공장으로부터 유독물질 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 대상영역에 대한 바람장 수치모의를 실시하고, 이러한 수치모의 결과로 나온 결

과를 이용하여 연구 대상 지역에 대한 보다 신뢰성 있는 대기질 예측을 가능하게 하고자 한다.

2. CSU-RAMS 모형의 개요

CSU-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 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(RAMS manual, 2002). RAMS 모형은 1980년대 이후 동지격자(nested grid)기능의 강화와 함께 도시 규모 이하에서부터 대규모의 대기순환까지 광범위하게 사용되도록 개발되었으나, 대규모 기상 변화를 주로 취급하는 여타 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. 지표면 자료는 USGS (U.S. Geographic Survey)의 자료를 사용하였으며, 자료의 해상도는 1×1 km이고 대상 격자에 존재하고 있는 지표면 종류의 비율을 고려하여 특성을 살펴볼 수 있다.

2.1 계산 영역 및 경계 조건

본 연구에서 사용한 측면 경계조건은 복사 경계 조건(Olanski, 1976)을 사용하였으며 상층 경계 조건은 상층으로 진행하는 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. 연구에서 설정한 성긴격자영역은 포항시를 중심으로 동서, 남북방향으로 약 170 km의 범위를 나타낸다(그림 1). 그림

에서 보는 바와 같이 포항시의 남쪽에 있는 울산광역시 수치모의 영역에 포함되어 있으며 서쪽으로는 포항과 동서방향으로 좁은 저지대의 골의 끝자락에 위치한 대구광역시도 포함되어 있다. 또한 포항에서 보면 남서방향에, 울산에서 보면 북서방향의 저지대 끝자락에 청정지역인 경주시가 포함되어 있고 부산과 울산의 북북서방향에 위치한 고지대의 가지산 일대가 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 살펴보는 데는 다소 어려움이 있다. 따라서 성긴격자영역에서 포항지역을 대상으로 상세격자영역을 구성하여 포항지역에서의 상세한 바람장을 살펴보고자 하였다. 상세격자영역은 동서방향으로 40 km, 남북방향으로 30 km의 영역을 나타내고 있다. 기본적으로 포항시는 내륙으로 비교적 깊숙이 들어와있는 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.

3. 포항지역 기상장 수치모의

3.1 해륙풍일에 대한 수치모의

본 연구에서는 해륙풍일을 대상으로 수치모의를 수행하였다. 일반적으로 해륙풍이 탁월한 날은 종관계의 영향이 약해서 지역적으로 형성되는 국지 대기순환계가 그 특징을 뚜렷이 나타내게 된다. 종관계의 영향이 강해서 일률적이고 강한 풍향에 따라 확산 및 이류에 의한 환기작용이 큰 경우와 달리, 해륙풍일은 비교적 바람이 약하므로 지역적으로 배출된 대기오염물질에 대한 기상학적 세정효과가 작아서 지역에 따라 정체현상이 나타날 수 있다. 이러한 경우 대기오염물질의 수송에 직접적인 영향을 주는 것이 국지적 대기순환계라 할 수 있다. 포항시를 포함한 포항지역은 동쪽으로 전반적으로 바다를 접하고 있기 때문에 대표적인 중규모 국지순환계인 해륙풍순

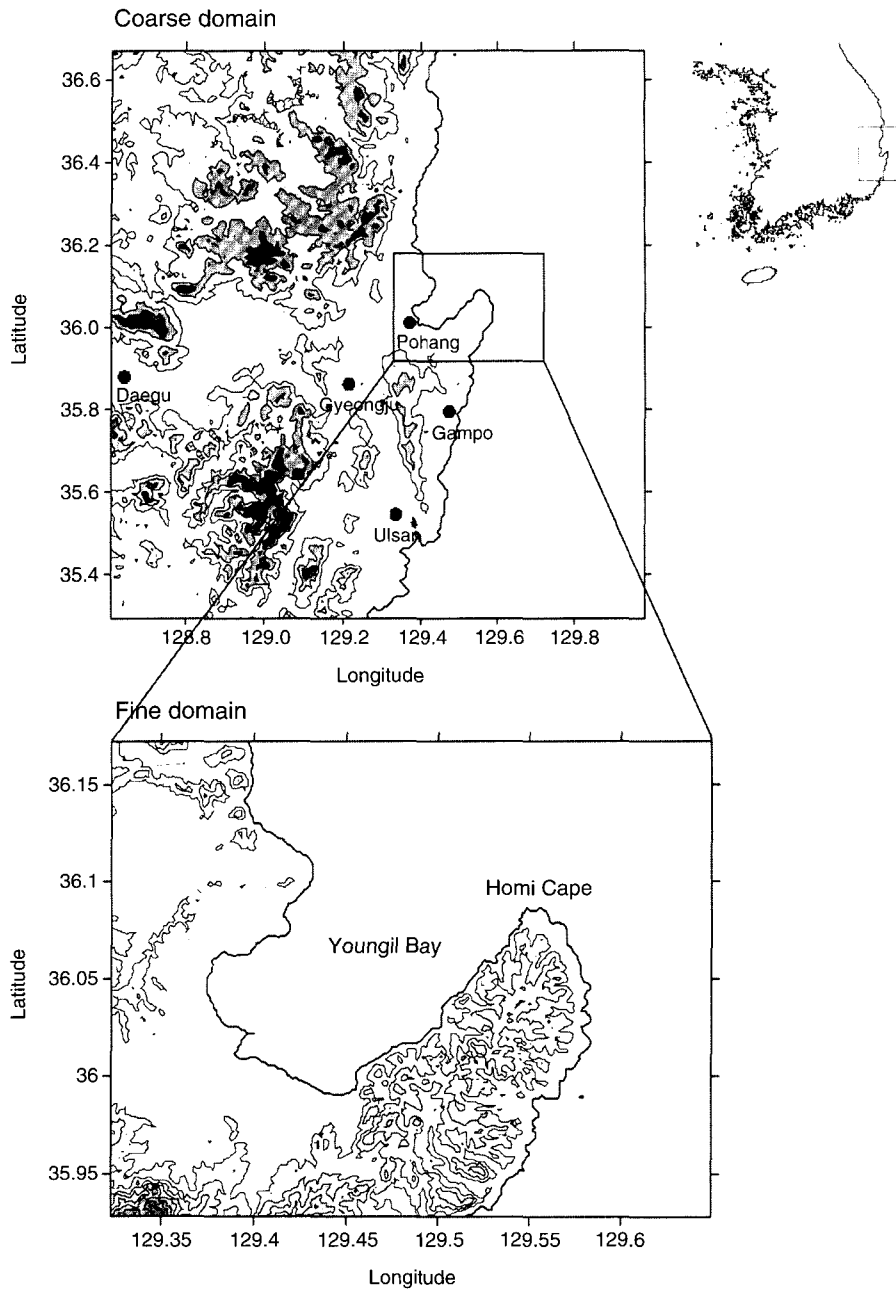


Fig. 1. Computational domain for numerical simulation.

환계의 영향을 직접적으로 받게 된다. 또한 저지대 평지인 포항시의 북서방향과 남서방향에 점차적으로 고도가 높아지는 고지대가 형성되어 있으므로 일 중

산곡풍순환계의 영향도 생각할 수 있다. 이러한 국지 순환계들이 복합적으로 작용하는 경우, 포항을 포함한 주변지역의 바람장은 복잡, 다양해질 수 있으며

이에 대한 결과는 앞으로의 대기오염물질에 대한 대책을 마련하는데 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

본 수치모의에서는 봄철의 전형적인 해륙풍일을 대상으로 수치모의를 수행하였으므로 중관장의 영향을 배제하는 의미에서 상층의 지균류는 고려하지 않았다.

그림 2는 성긴격자영역을 대상으로 수치모의한 지표부근 바람장의 결과를 나타낸 것이다. 새벽시간대에서 06시까지 해안지역을 중심으로 육지에서 바다로 불어나가는 지속적이고 비교적 일률적인 형태의 육풍이 거의 균일하게 나타났으므로 여기서는 06시 결과만을 제시하였다. 특히 포항지역을 살펴보면 포항의 서북방향과 서남방향에 존재하는 고지대에서 불어내려온 바람이 저지대의 포항으로 불어와서 바다로 열려있는 영일만을 따라 불어나가고 있다. 이때 포항의 동남방향에서 동북방향으로 돌출되어 있는 지형의 영향으로 육풍의 방향이 서풍이 아닌 서남풍의 형태를 나타내고 있다. 이와 함께 내륙에서 바다로 불어나가는 육풍은 육지에서 벗어나 바다 멀리 이동하면서 시계방향으로 굴절되는 것을 알 수 있다. 포항의 남쪽에 위치한 울산지역의 경우에도 육풍의 방향이 포항과 마찬가지로 지형적 특징에 따라 나타나고 있음을 알 수 있는데, 울산지역의 서북방향에 길게 형성되어 있는 저지대의 좌우에 위치한 고지대의 공기가 냉각에 의해 골에 수렴되고 이 저지대 골의 방향을 따라 육풍이 불어나오고 있다. 이때 울산지역 해안선의 방향과 저지대 지형의 영향으로 육풍의 방향이 북서계열의 바람으로 나타나고 있다. 전반적으로 해안선을 따라 불어나오는 육풍의 형태를 보면 기본적으로 해안선의 방향에 직각으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 이와 함께 내륙의 바람을 살펴보면, 탁월한 중관풍이 없는 해륙풍일의 경우에는 지형의 경사 및 굴곡을 따라 흘러가는 바람을 잘 나타내고 있음을 알 수 있는데, 고지대에서 불어내려가는 공기는 복잡한 형태를 띠고 있는 저지대로 불어내려가서 수렴되는 양상을 보여주고 있다. 따라서 해륙풍일의 경우, 야간에 지역적으로 형성된 국지풍인 산풍과 해안선을 따라 바다로 불어나가는 육풍이 분명하게 그 특징을 나타낼 수 있으며 이러한 경우 오염물질의 거동 또한 복잡 다양해 질 수 있다.

09시가 되면 심야시간대에 내륙에서 나타났던 지형을 따르는 뚜렷한 산풍의 존재는 급격히 약해지고

낮은 고지대에서는 정상을 향해 서서히 불어오는 약한 곡풍의 형태를 볼 수 있고 경사가 급한 고지대에서는 저지대를 향해 불어내려가는 산풍이 상당히 약해진 것을 볼 수 있다. 또한 해안선을 따라서는 야간에 불어나간 육풍이 다소 약화되었지만 관성력에 의해 지속적인 형태의 육풍을 나타내고 있다. 09시에는 해안선을 따라 앞 시간대에 비해 상당히 변화한 형태의 풍향을 볼 수 있다. 즉, 야간시간대에는 해풍에 비해 비교적 약한 풍속을 나타내며 해안선의 방향에 직각방향으로 불어나가는 경향이 강하게 나타났으나 09시가 되면 해안선을 따라 많은 변화가 나타나고 있다. 이는 서서히 지속적으로 지면 가열이 일어나면서 가열된 육지를 향해 바다에서부터 불어 들어가는 힘이 나타나게 되기 때문이다. 이러한 풍향의 변화는 전 해안선을 따라 볼 수 있으나 포항지역의 북쪽에 있는 일직선의 해안선을 보면 잘 알 수 있다. 이 지역에서는 새벽시간대에 서북서풍의 바람이 지속적으로 나타났으나 지면가열에 의해 바다에서 육지로 향하는 기압경도력의 영향으로 바람이 북풍계열로 변화한 것을 볼 수 있다. 이러한 변화는 11시 이후에 분명한 동풍계열의 해풍으로 뚜렷하게 변환한 것을 알 수 있었다. 하지만 포항지역의 경우에는 야간에 고지대로부터 수렴된 잔류 산풍이 서쪽의 저지대를 타고 불어나가는 서풍계열의 육풍으로 남아있음에 따라 여전히 서남서풍의 형태를 보이고 있다. 이러한 특징은 울산지역을 통해서도 볼 수 있다. 10시가 되면 앞서 언급한 대로 포항지역의 북쪽에 있는 일직선의 해안선을 따라서는 동풍계열의 해풍이 시작되어 내륙으로 서서히 진행하는 것을 볼 수 있으며 포항지역 및 울산지역에도 해풍의 시작이 나타나고 있다. 이때 해풍의 진행방향은 해안선을 따라 직각방향으로 나타나서 해안선을 따라 전체적으로 일률적인 풍향을 나타내고 있지는 않다. 또한 앞 시간대까지 내륙에서 불어나온 육풍은 먼바다에서는 여전히 존재하고 있음을 알 수 있고 해안에서 일정 부분 떨어진 해상에서 이들 육풍의 일부가 해풍으로 전환되어 내륙으로 다시 불어들어오는 것을 볼 수 있다. 따라서 주간에 배출된 대기오염물질이 내륙으로 수송되었다가 일부는 야간에 다시 바다로 불어나가게 되는데 시간이 지나 다음날 이른 아침에 해안선부근에서 시작된 해풍에 의해 또다시 내륙으로 재수송될 수 있는 가능성을 다시 한번 생각해 볼 수

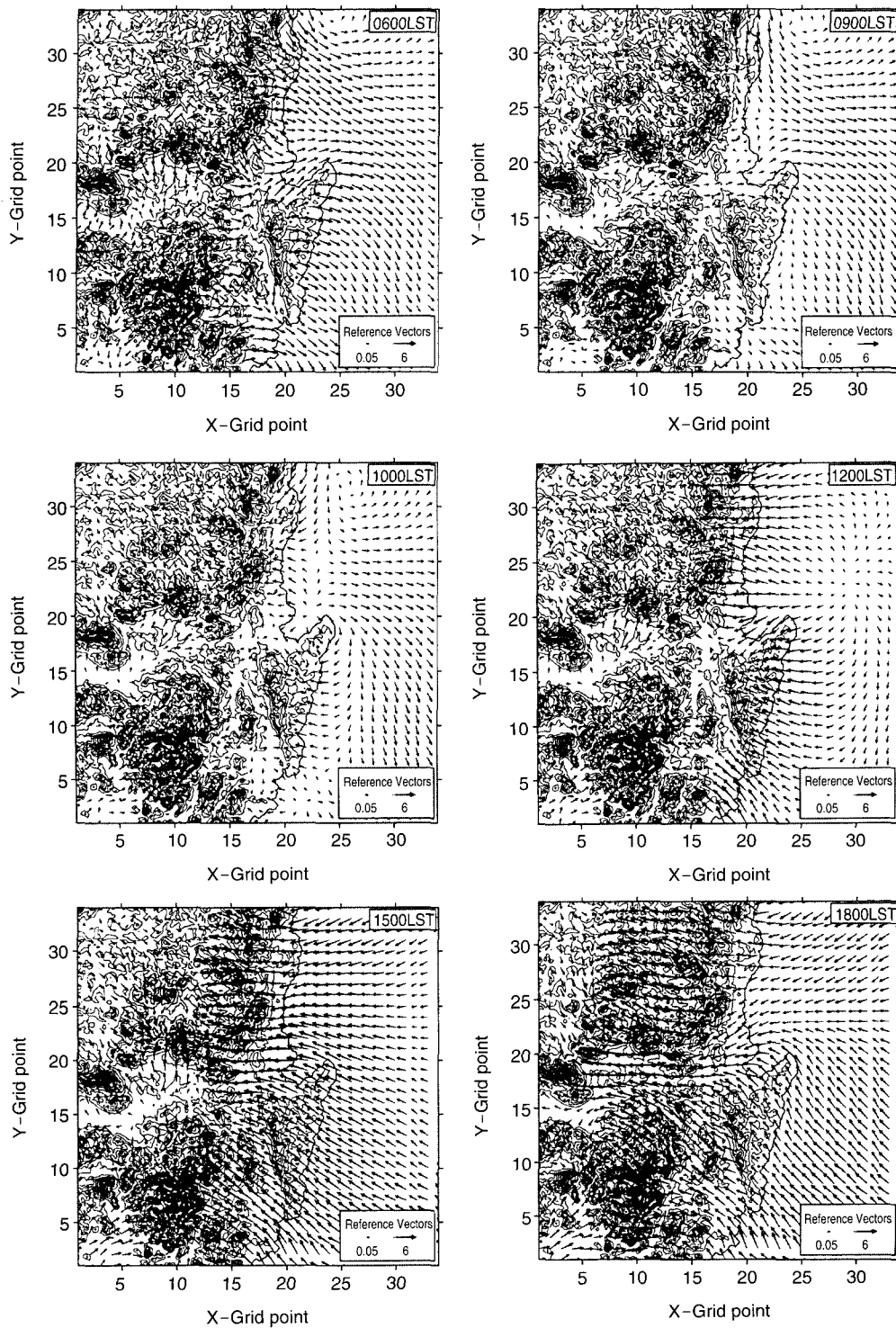


Fig. 2. Distributions of simulated wind fields over coarse domain.

있는 것이다. 내륙에서는 앞 시간대에 비해 좀 더 뚜렷해진 곡풍을 볼 수 있는데, 경사가 급한 고지대를 향해서는 저지대로부터 불어 올라가는 경향을 잘 볼 수 있다.

12시에는 포항에서의 풍향이 점차적으로 북동풍에서 동풍으로 변해가며 해풍의 침투와 뚜렷해진 내륙 곡풍을 볼 수 있으며 울산지역에서 시작된 남동풍계열의 해풍이 상당히 내륙으로 많이 진행된 것을 볼 수 있다. 특히 포항지역에서 시작된 해풍이 서진하여 내륙으로 진행함에 따라 경주지역부근으로 접근하는데 마찬가지로 감포지역 및 울산지역에서 시작된 해풍 또한 경주부근으로 접근하고 있다. 이러한 바람의 진행은 15시의 바람장을 보면 경주부근에서의 풍향이 남남동으로 나타나고 있어서 경주지역에 도달하는 바람은, 전형적인 해륙풍일인 경우에, 포항보다는 남쪽의 감포 및 울산에서 시작된 해풍성분으로 보여진다. 이는 다음의 사실에서 유추할 수 있는데, 경주에서 보면 포항지역은 동북방향, 약 50도 방향에 위치하고 있으며 감포와 울산은 남동방향, 약 130도, 140도 방향에 위치하고 있다. 따라서 포항지역에서 시작된 해풍이 경주에 직접적으로 영향을 미친다면 북동 또는 북북동풍의 나타나겠지만, 경주에서의 풍향이 남남동풍인 것을 보아 감포 및 울산지역에서 시작된 해풍이 도달한 것으로 생각되어 진다. 또한 15시가 되면 포항지역에서의 바람은 서서히 동풍계열에서 남동계열로 변화하는데 이는 장기곶의 남쪽과 감포지역에서 시작된 해풍이 서서히 포항지역으로 진행하고 영일만에서 불어들어오는 북동계열의 해풍과 수렴되어 풍향각이 변화하였기 때문이다. 특히 이 시간대에 가지산 일대를 살펴보면 가지산일대의 동쪽에서 형성된 곡풍과 울산지역에서 시작된 해풍이 결합을 통해 하나의 풍계를 나타낸다는 것이다. 이는 이전에 Kurita *et al.* (1985)이 제시한 바와 같이 여러 가지 국지풍의 결합에 의해 일정시간이 지나면 거대한 하나의 지역순환계를 형성한다는 연구결과를 잘 나타내고 있는 것으로 사료된다. 18시가 되면 해풍의 내륙진행은 더욱 분명히 나타나고 있으며 울산과 포항지역에서 시작된 해풍은 대구지역을 거쳐 지나가고 있음을 알 수 있다. 특히 중간에 걸쳐 불어들어가는 해풍은 저지대의 골을 따라 강하게 불어들어가는 것을 알 수 있다. 특히, 포항과 대구 사이에 형성되어 있는 동서방향의 저지대를 따

라 해풍은 꾸준히 진행하고 있음을 알 수 있다.

이상에서 성긴격자 수치모의를 통해 나타난 경상도 일대의 지표 바람장을 볼 수 있었다. 결과를 통해 볼 때, 전형적인 해륙풍일에는 지역적으로 형성된 국지풍계가 뚜렷하게 나타나며 야간에는 지형적, 지리적 특성에 풍계가 상당히 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 또한 해풍의 시작시에는 해안선의 굴곡에 따라 지역별로 해풍의 방향이 차이가 있으며 내륙의 곡풍을 잘 볼 수 있었다. 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 그림 3에 제시하였다.

01시에서 06시까지의 결과를 보면 앞서 성긴격자영역의 수치모의 결과에서도 살펴보았듯이 육지에서 바다로 불어나가는 뚜렷한 육풍의 존재를 잘 볼 수 있다. 포항제철 및 공단이 위치한 저지대 평지에서는 남서풍계열의 바람이 나타나고 있으며 이 지역을 통해 불어나가는 육풍은 바다 멀리 진행하면서 서서히 시계방향으로 전향하고 있다. 이는 포항시의 동쪽에 위치한 돌출지형에 의한 마찰력과 바람의 오른쪽으로 작용하는 전향력에 의해 변화하는 것으로 볼 수 있다. 그리고 장기곶에서의 풍향은 좀 더 서풍에 가까운 서남서풍을 나타내고 있다. 09시가 되면 새벽과는 상당히 다른 형태의 지표바람장의 구성을 볼 수 있다. 즉, 복잡한 해안선을 따라 거의 직각방향으로 시작되는 해풍을 구체적으로 볼 수 있다. 포항제철과 공단이 위치한 지역의 해안선을 따라서는 북동풍계열의 해풍이, 장기곶부근에서는 동풍계열이, 장기곶의 왼편 해안선을 따라서는 북서풍계열이, 오른편을 따라서는 동풍 및 남서풍계열의 해풍이 각각 존재하고 있다. 이를 통해 해풍이 시작되는 시점에서 해풍의 풍향이 해안선의 형태에 상당히 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다. 또한 포항의 남서쪽에 형성되어 있는 고지대를 향하는 곡풍이 서서히 나타나고 있음을 볼 수 있다. 포항제철이 위치한 해안선을 기준으로 북쪽방향의 해안 돌출지역에서는 육풍에서 해풍으로의 변환과정이 반시계 방향이며 동쪽 지역의 해안 돌출지역에서는 시계방향으로 변화하고 있다.

10시가 되면 해안선을 따라 시작된 해풍이 좀 더

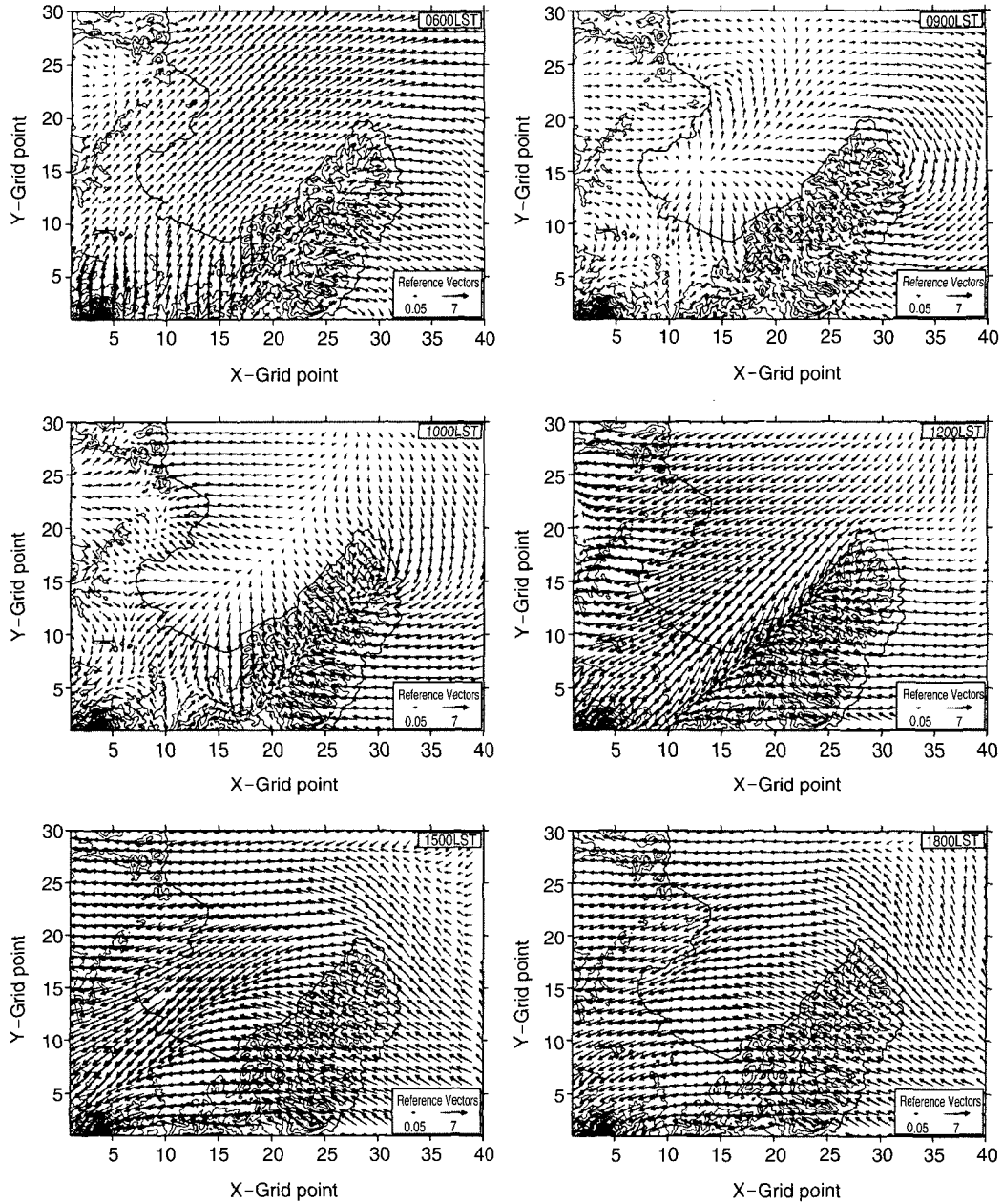


Fig. 3. As in Fig. 2 except for fine domain.

뚜렷하게 해풍의 형태를 띄며 내륙으로 진행하는 것을 볼 수 있다. 결과를 잘 살펴보면, 장기곶 아래의 지역에서는 왼편과 오른편에서 시작된 해풍이 다소의 고지대 중심부에서 수렴되는 것을 볼 수 있고 영

역의 서북쪽 저지대에서 불어나오는 서풍계열의 육풍과 포항시의 남쪽에서 불어나오는 남풍계열의 육풍이 바다에서 시작된 해풍이 만나 수렴대를 형성하고 있다. 이러한 현상은 수렴되는 지역에서의 바람이

매우 약한 것을 통해 알 수 있다. 또 한가지는, 09시에 포항시의 해안선을 따라 시작된 해풍과 고지대를 향해 불어가는 곡풍이 따로 존재하였으나 10시가 되면 이들 곡풍과 해풍이 결합하는 것을 볼 수 있다. 이처럼 상세격자영역의 수치모의를 통해서 구체적이고 상세한 지표바람장을 잘 볼 수 있다. 12시가 되면 이 지역에서 나타난 수렴대의 서쪽 이동이 더욱 뚜렷이 나타나고 있으며 포항시를 통과하는 해풍과 남서방향에서 시작된 곡풍이 거의 결합하여 하나의 풍계를 형성하고 있음을 볼 수 있다. 또한 이 시간대가 되면 영역 전체에 걸쳐 해풍이 나타나고 있다. 이때 포항시에서의 풍향은 거의 균일하게 북동풍을 나타내고 있다. 또한 영역의 서북쪽 내륙에서 나타난 해풍의 굴곡이 거의 동풍계열의 해풍으로 구성되어 있는 것을 알 수 있고 영역의 남동쪽에서 시작된 해풍과 포항시를 돌아 들어오는 북동계열의 해풍이 만나는 수렴대가 더욱 내륙으로 이동하여 수치모의 영역의 남서쪽에 나타나 있다. 또한 포항제철과 공단이 위치한 해안선의 동쪽지역이 서서히 동풍계열의 해풍에 영향을 받는데 이러한 동풍계열 해풍의 진행은 시간이 지남에 따라 좀 더 서쪽으로 진행하게 된다. 장기곶을 돌아들어오는 해풍의 방향 또한 10시부터 북북서풍에서 11시에는 북동풍, 12시에는 동북동풍, 13시에는 동풍, 그리고 이후에는 남동풍계열로 서서히 변한 것을 알 수 있었다. 이후 시간대로 갈수록 전반적으로 해풍의 형태와 배치는 크게 변하지 않는다. 그리고 대상으로 선택한 수치모의 영역에 걸쳐서는 약 13시가 되면 모두 해풍의 영향권에 들어가므로 해풍이 약해지는 18시 정도까지는 큰 변화를 보이지 않는다. 다만 포항제철과 공단이 위치한 해안지역은 시간이 지남에 따라 점차적으로 동풍계열의 해풍으로 변하는 것을 볼 수 있다.

이상의 상세격자 수치모의를 통해, 복잡 다양한 국지순환계의 출현이 기대되는 경우의 포항지역 지표바람장의 경향을 상세히 살펴볼 수 있었다.

본 수치모의는, 앞서 언급한 대로, 국지순환계의 출현이 아주 용이한 해륙풍일을 대상으로 하였다. 이는 서두에 밝힌 바와 같이 종관장의 영향이 강해서 대기의 환기효과가 지대하거나 지표바람장의 경향이 균일해서 일반적인 풍계를 예상할 수 있는 경우에는 수송이라는 측면에서 본다면 큰 어려움이나 궁금증이 없다. 하지만 지역별로 형성된 국지풍들에 의해

풍계의 혼합이 있는 경우에는 분명히 지역별로 수렴되거나 좁은 지역에서도 상이한 풍계가 나타나게 되며, 비교적 약한 풍속의 분포를 지니므로 대기의 환기효과가 크지 않다. 이 경우에 예측하기 어려운 대기오염문제가 발생할 수 있는 것이다. 따라서 이러한 경우를 대상으로 하는 수치모의는 상세한 바람장의 분포를 제공하여 대기오염물질의 거동을 예측하는데 기초 참고자료로서의 활용성이 있는 것이다.

3.2 해륙풍일에 대한 수치모의 결과와 관측값 비교

이 절에서는 포항지역과 영남권의 상세한 기상장을 살펴보기 위해 수행한 수치모의 계산값과 관측값과의 비교를 통해서 계산결과에 대한 정확성을 살펴보고자 한다.

여기서는 전형적인 해륙풍일을 대상으로 수치모의를 수행하였으므로 맑은 날로 우리나라 부근에 약한 기압경도와 풍속이 지속되어 전형적인 해륙풍이 관측되었던 날들을 비교 대상으로 선정하였다(그림 4). 이를 위해 본 연구에서는 앞서 포항지역의 기상 분석에 제시한 해륙풍일 선정조건을 이용하여 2001년 4월에서 5월 중 전형적인 해륙풍일이 3~4일간 지속되었던 날들을 선정하고 이 날들의 관측값을 이용하여 시간별 평균기상자료를 구성하고 수치모의 결과값과 비교하였다. 이는 수치모의에 적용한 초기 기상조건이 봄철에 발생한 해륙풍일의 평균 상태를 고려하였으므로 여러 해륙풍일의 평균 기상자료를 구성하여 비교하는 것이 타당하기 때문이다.

이 기간 동안 선정된 전형적인 해륙풍일은 2001년 4월 4~7일, 15~19일, 그리고 5월 12~15일 이었다. 이들 기간동안 우리나라 부근에 형성되어 있는 종관 기상 개황은 다음과 같다.

2001년 4월 4일에서 7일까지 우리나라는 온화한 이동성 고기압 중심권에 위치하여 남부 일부지역에서 높은 구름만 조금 있는 대체로 맑은 가운데 바람 없는 날씨를 보이고 있다. 특히, 6일과 7일은 매우 맑은 가운데 전국 대부분 지역에서 큰 일교차 및 높은 최고기온을 보여 매우 따뜻한 날씨였다.

2001년 4월 15일에서 19일, 우리나라는 동쪽과 서쪽에 위치한 고기압의 안상부에 위치하고 있어 큰 기압변화가 없는 가운데 바람이 매우 약하며 남동해상에만 구름 조금인 전국이 대체로 맑고 따뜻한

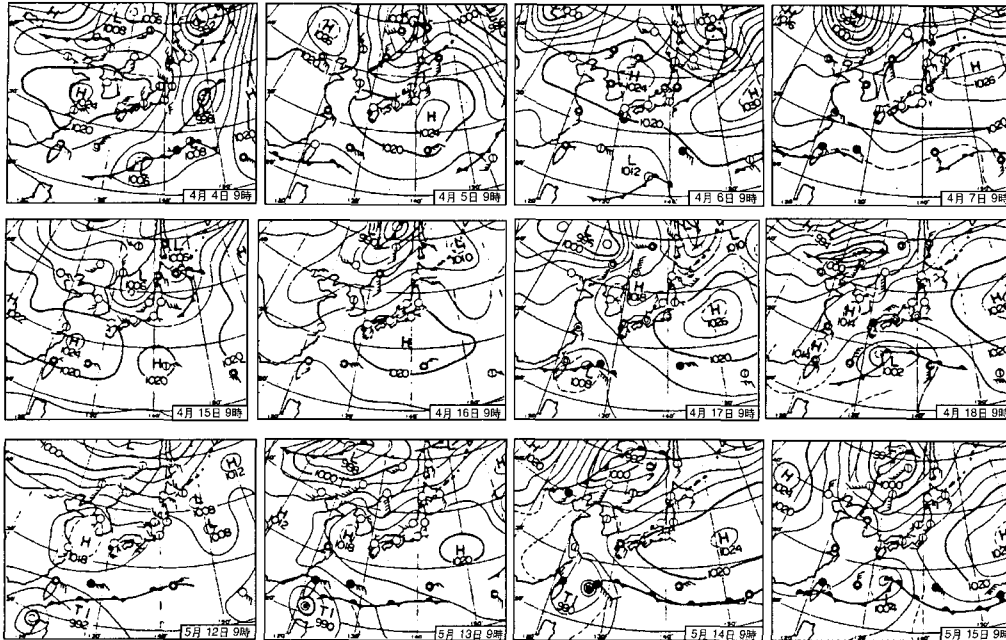


Fig. 4. Synoptic weather charts at 0900LST on 4~7 April, 15~18 April, and 12~15 May.

날씨를 보였다.

2001년 5월 12일에서 15일까지 우리나라는 이동성 고기압의 중심권 및 안상부에 위치하여 맑고 다소 무더운 날씨를 보이고 있는 가운데 전국이 남동내지 남서풍이 매우 약하게 불었다. 이 날들의 종관 지상일기도는 그림 4와 같다.

이상의 날들을 비교대상일로 설정하여 포항지역과 인근지역에 설치되어 있는 기상대 및 자동기상관측장비에서 관측되는 기온, 풍향, 풍속자료와 수치모의된 결과값을 비교하였다.

비교에 사용된 포항기상대 및 포항인근지역 AWS의 위치는 그림 5와 같다. 여기서 포항과 장기곶의 관측자료는 상세격자지역에 포함되는 지역이므로 상세격자자료와 비교하였으며 청하, 지행, 감포, 기계, 경주의 관측자료는 성긴격자자료와 비교를 수행하였다.

그림 6은 시간별 평균기온과 수치모의한 기온의 일변화를 비교해서 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 그림에서 지행에서 늦은 오후에 나타나는 약간의 불일치를 제외하고는 각각의 지역에서 시간별 관측치와 상당히 유사한 결과를 나타내는 것을 알 수 있으며, 특히 지역마다의 특징적인 일변화 경

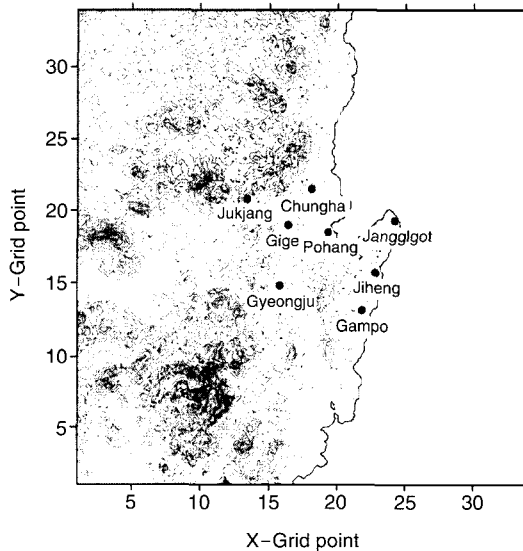


Fig. 5. Map of a computational domain showing the locations of observational sites.

향을 잘 나타내고 있다. 특히, 연안에 위치한 장기곶과 감포 관측자료에서 보여지는 기온의 일변화 폭이

적은 특징을 수치모의 결과가 잘 묘사하고 있음을 볼 수 있고 내륙지역인 경주의 낮 시간대 관측값이 연안지역보다 높은 경향을 수치모의는 잘 묘사하고 있다. 또한 포항지역 역시 연안에 위치하고 있으나 동북방향을 제외하고는 육지로 둘러싸여 있어 주간 에 다소 높은 기온을 나타내게 되는데 이러한 특징 적인 현상도 수치모의는 잘 묘사하고 있다.

그림 7은 시간별 평균풍속과 수치모의된 풍속의

일변화를 나타낸 것이다. 앞서 기온의 경우와 마찬가지로 풍속의 경우에도 관측값을 상당히 잘 묘사하는 결과를 볼 수 있다. 그림을 보면 지행의 새벽시간대 와 장기곶에서 주간에 다소 과소평가되는 경향이 있 으나 전반적으로 지역별로 나타나는 풍속의 일변화 경향과 풍속의 강도를 잘 묘사하고 있다. 즉, 포항에 서 보여지는 주간의 강한 해풍과 지행 및 청하에서 나타나는 주간의 약한 풍속의 특징 및 포항과 지행

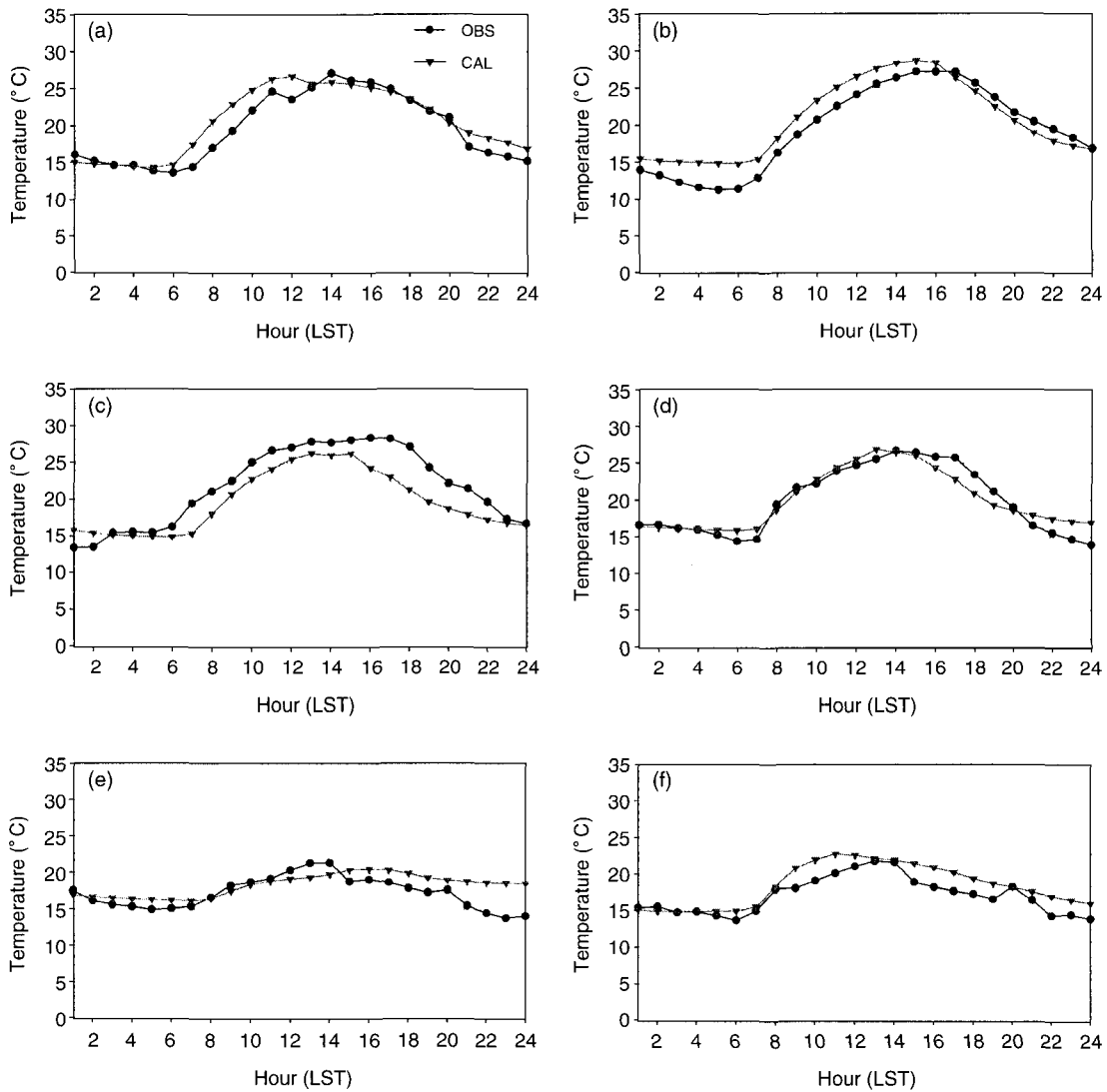


Fig. 6. Simulated and observed temperature for (a) Pohang, (b) Gyeongju, (c) Jiheng, (d) Chungaha, (e) Janggigot, and (f) Gampo.

그리고 청하의 육풍에서 해풍으로의 변화시 나타나는 풍속의 급변을 수치모의는 상당히 잘 묘사하는 것으로 평가된다.

그림 8은 관측된 풍향값과 수치모의된 풍향의 일변화를 나타낸 것이다. 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 대상일로 선정된 해륙풍일 중 전반

적으로 가장 뚜렷한 해륙풍일의 특징을 보인 날인 2001년 4월 7일을 대상으로 각 지역에서 관측된 풍향값과 수치모의된 풍향값을 비교하였다.

풍향의 비교 결과를 보면, 앞서 기온과 풍속의 경우와 마찬가지로 전반적으로 좋은 일치를 보이고 있다. 전 지역에 대해 야간 육풍의 풍향 및 주간의 해풍 풍향을 상당히 잘 묘사하고 있다. 야간의 경우에는 전 지역에서 약간의 차이를 보이고 있으나 전반적인 서풍 또는 북서계열의 풍향각을 보이고 있는

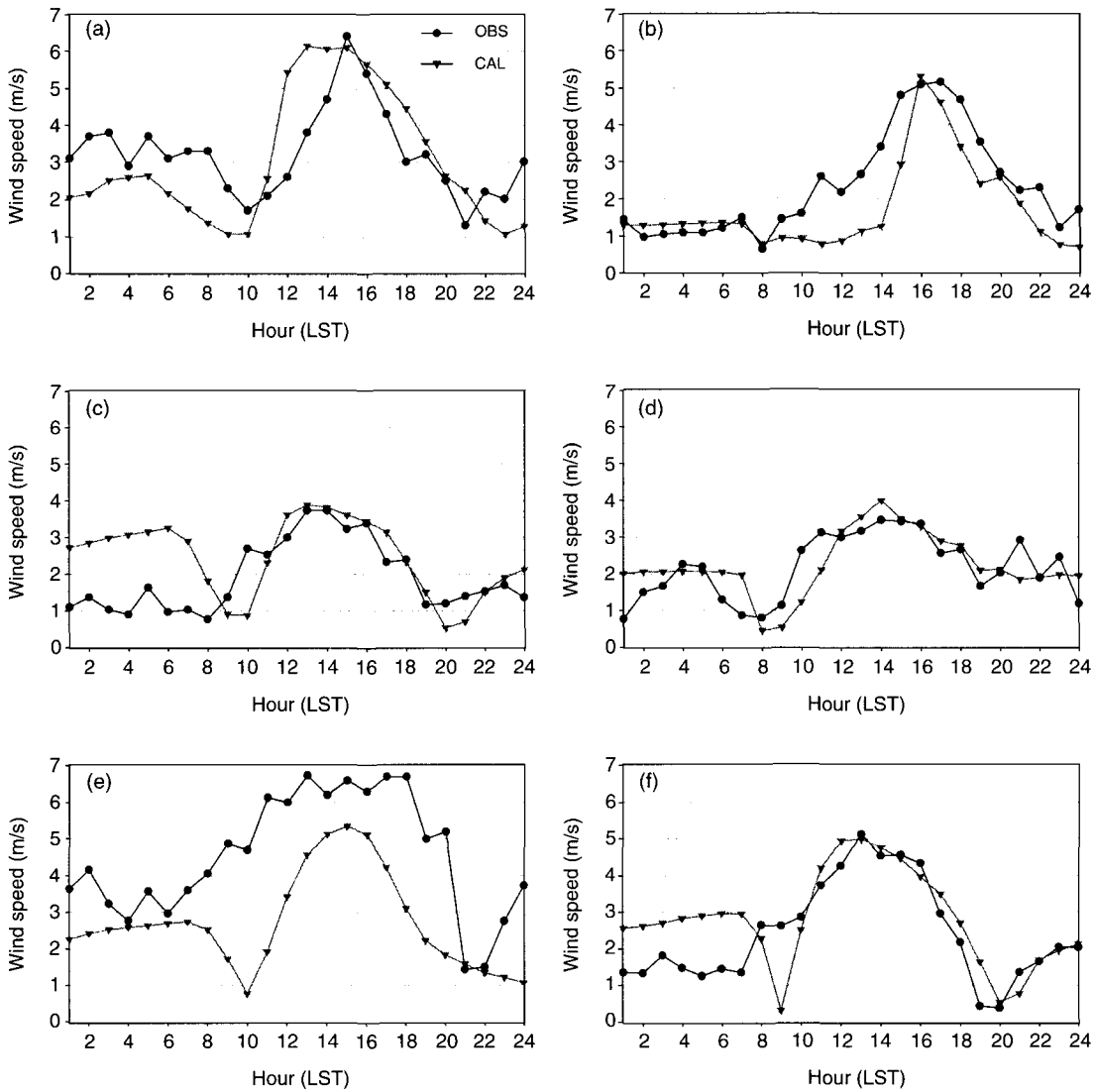


Fig. 7. As in Fig. 6 except for wind speed.

점을 수치모의는 잘 모사하고 있는데, 이는 관측지점의 동쪽에 바다가 위치하고 있는 지리적 특성상 야간 육풍의 방향이 동쪽으로 불어가는 서풍계열의 바람을 나타내는 것으로 볼 수 있다. 또한 주간 경우에는 특히, 관측지점별로 나타나는 해풍 풍향의 특징을 잘 모사하고 있다. 즉, 포항의 경우에는 해풍시간대의 풍향이 동풍계열을 나타내다가 늦은 야간시간대가 되면 서서히 시계방향의 회전을 하여 북풍계열의 바람으로 변하는데 이러한 변화경향을 잘 모사하

고 있으며, 경주의 경우에는 주간 해풍이 동풍계열로 나타나다가 포항의 경우와 달리 서서히 반시계 방향으로 북풍으로 변하는데 이러한 변화경향을 또한 잘 재현하고 있다. 지행의 경우에는 해풍의 방향이 동남풍계열을 보이고 있는데 수치모의 결과에서도 포항, 경주와 달리 좀 더 분명한 동남풍계열을 보여주고 있다. 그리고 늦은 야간으로 갈수록 시계방향으로 북풍계열의 바람이 나타나는 특징을 모사하고 있다. 장기곶의 경우에도 상당히 유사한 결과를 보여주고 있

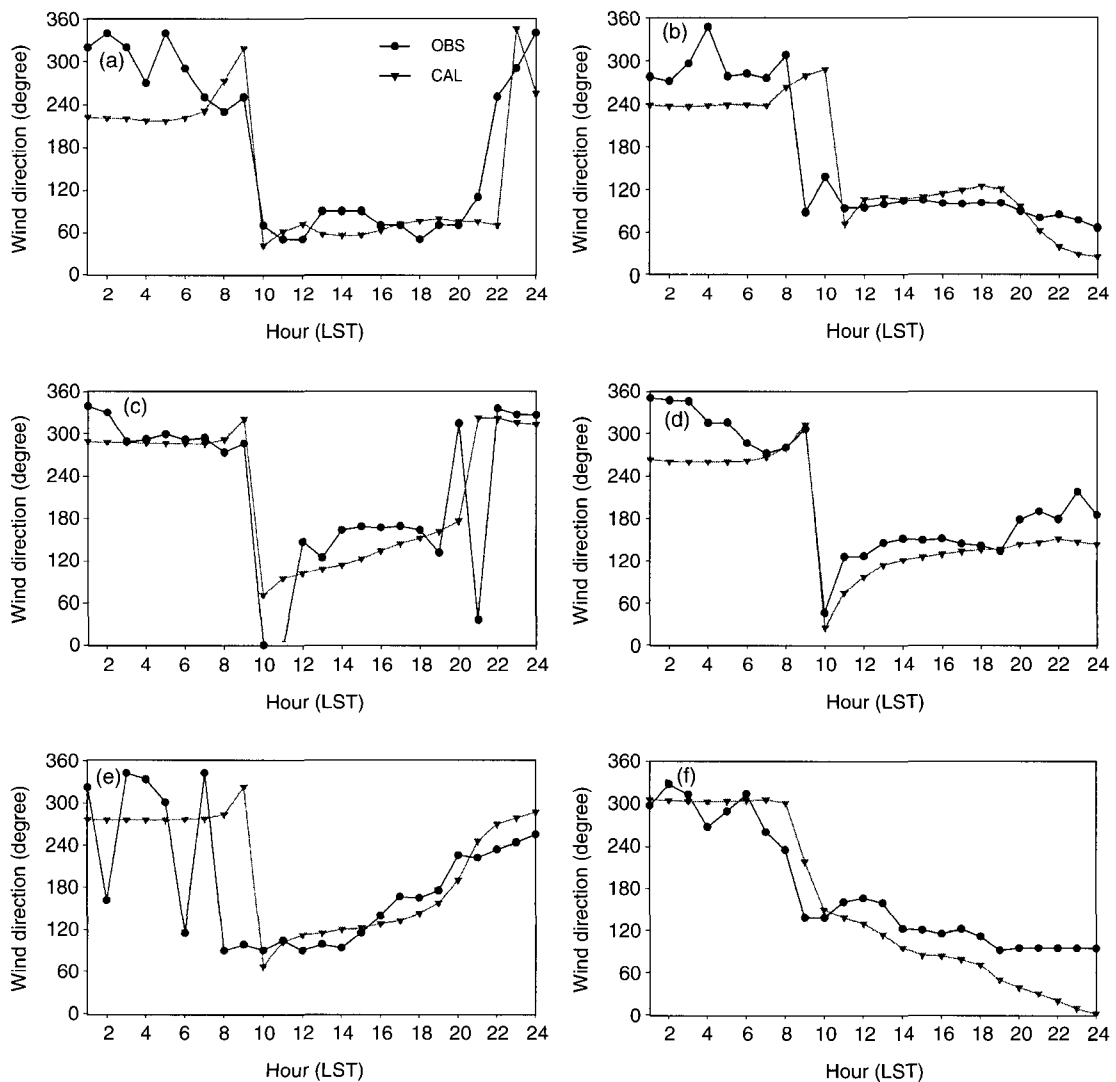


Fig. 8. As in Fig. 6 except for wind direction.

는데 주간에 동남풍계열의 해풍에서 늦은 야간시간대로 갈수록 큰 변화없이 남풍계열로 서서히 변해가는 특징을 수치모의는 잘 나타내고 있다. 감포와 기계의 경우에도 이들 지역과 마찬가지로 야간 풍향 및 주간의 해풍, 그리고 늦은 야간으로 가면서 바뀌는 해풍의 변화경향을 잘 나타내고 있다. 이와 같이 풍향에서 나타나는 주, 야간시간대의 방향과 그 변화 과정은 지역적인 지리적, 지형적 특징에 매우 민감하고 이들 특징을 잘 나타내는 요소이기 때문에 본 수치모의 결과와 같이 풍속의 관측자료와 계산값이 잘 일치한다는 점은 계산결과의 정확도를 설명하는데 있어 뚜렷한 증거자료로 볼 수 있다.

4. 결 론

현재 설치되어 있는 관측망은 상당히 광역적이기 때문에 상세한 국지적 풍환경을 살펴보는 데는 한계가 있다. 따라서 이를 해결하는 대안으로 수치모형을 이용한 풍환경 분석이 반드시 필요한 것이다. 본 연구에서는 연안에 위치하고 있으며 대규모의 제철소와 공단이 형성되어 있는 포항지역에 형성되는 풍환경을 구체적이고 정확하게 살펴보기 위하여 수치모의를 수행하였다.

여기서는 전형적인 해풍일에 대해서 구체적인 포항의 풍환경을 살펴보았는데 해풍일은 지역적으로 형성되는 국지순환계에 의해 오염원에서 배출된 대기오염물질의 수송경향이 복잡, 다양해 질 수 있기 때문이다.

수치모의를 수행한 결과, 새벽시간대에 고지대에서 저지대로 불어 내려가는 산풍과 연안지역을 중심으로 육지에서 바다로 불어나가는 육풍의 존재를 뚜렷이 살펴볼 수 있었으며 주간에는 반대로 저지대에서 고지대로 불어 올라가는 곡풍과 바다에서 육지로 불어 들어가는 해풍의 상세한 흐름을 잘 살펴볼 수 있었다.

이상의 수치모의 결과들에 대한 정확도를 살펴보기 위해 관측값과의 비교를 수행하였는데, 수치모의 결과가 관측값과 잘 일치하는 것으로 보아 본 연구에서 사용한 수치모형이 타당한 결과를 제공할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 앞으로 여러 가지 기상 시나리오 및 예측에 있어 매우 정확한 정

보를 제공해 줄 수 있을 것으로 생각된다. 또한 앞서도 언급한 바와 같이 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.

참 고 문 헌

- 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, 105pp.
- 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., X.M. Cai, S.E. Gryning, and D. Steyn (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, J. Appl. Meteor., 36, 119-140.
- Cai, X.M. and D.G. Steyn (2000) Modelling study of sea breezes in a complex coastal environment, Atmospheric Environment, 34, 2873-2885.
- Hogrefe, C., S.T. Rao, P. Kasibhatla, G. Kallos, C.J. Treback, W. Hao, D. Olerud, A. Xiu, J. McHenry, and K. Alapaty (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 T. Kuwagata (1993) Thermally Induced Wind Passing from Plain to Basin over a Mountain Range, J. Appl. Meteor., 32, 1538-1547.
- Klemp, J.B. and D.R. Durran (1983) An upper boundary condition permitting internal gravity wave radiation in numerical mesoscale models, Mon. Wea. Rev., 111, 430-444.
- Kurita, H., K. Sasaki, H. Muroga, H. Ueda, and S. Wakamatsu (1985) Long-range transport of air pollution under light gradient wind conditions, J. Climate Appl. Meteor., 24, 425-434.
- Mesinger, F. and A. Arakawa (1976) Numerical method used in atmospheric models, GARP Publication Series, No. 14, WMO/ICSU joint Organizing Committee, 64pp.
- Orlanski, I. (1976) A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows, J. Comp. Phys., 21, 251-269.
- Pielke, R.A. (1974) A three dimensional numerical model of the sea breeze over the South Florida, Mon. Wea. Rev., 102, 115-139.
- RAMS manual (2002) Technical Description.
- Stephan, F.J., De Wekker, Z. Shiyuan, D. F. Jerome, and W. David (1998) A Numerical Study of the Thermally Plain-to-Basin Wind over Idealized Basin Topographies, J. Appl. Meteor., 37, 606-622.