

바람권역 구분을 통한 부산지역 국지바람 분석 - Part II : 국지 대기유동장 수치모델을 이용한 상세 바람정보 -

정 우 식 · 이 화 운* · 임 현 호*
인제대학교 대기환경정보공학과, *부산대학교 대기과학과
(2006년 8월 28일 접수; 2006년 11월 6일 채택)

Analysis of Local Wind in Busan Metropolitan Area According to Wind Sector Division - Part II : Detailed Wind Information Using A Local-Scale Atmospheric Circulation Model -

Woo-Sik Jung, Hwa-Woon Lee* and Heon-Ho Leem*

**Department of Atmospheric Environment Information Engineering, Inje University, Gimhae 621-749, Korea*

**Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea*

(Manuscript received 28 August, 2006; accepted 6 November, 2006)

We have analysed the observed surface and vertical meteorological data to get atmospheric information over the Busan metropolitan area. For this, we have selected 10 days in all season such as spring, summer I(Jangma season), summer II(hot season), autumn and winter. The result which have performed cluster analysis using atmospheric data represented that these days are included to most frequently appeared synoptic cluster. We have simulated wind field around Busan metropolitan area which is assigned as 1km^2 using RAMS. The calculated air temperature and the wind speed was similar to the observed the that, and the trends of daily variation showed good agreement. RMSE and IOA also showed reliable value. These results indicated the RAMS is able to simulate and predict detailed atmospheric phenomenon.

Key Words : Wind sector division, RAMS

1. 서 론

대기 중에 배출된 대기오염물질은 그 자체로 배출원에 가만히 존재하는 것이 아니라 대기의 조건에 따라 여러 가지 복잡 다양한 이동과 확산경로를 가지며 주변지역으로 퍼져나간다. 즉, 기본적으로 넓은 지역에 걸쳐 있는 종관기상장의 영향에 의해 이동과 확산이 영향을 받으며 국지적으로는 배출원 주변의 지리적, 지형적 조건에 따라 형성되는 국지적 대기순환계에 의해 또 다시 복잡, 다양한 이동과 확산의 형태를 보이게 된다. 이와 같이 대기오염물

질의 거동이 주변의 지형조건이나 기상조건에 영향을 받는다는 것은 이전의 여러 연구를 통해 익히 잘 알려져 있고 이들 서로간의 관계에 대한 여러 통계 분석 연구¹⁻³⁾가 수행되었다. 따라서 기존의 대기오염자동측정소의 위치는 대기화학적 관점에서 여러 가지가 고려되어 있으나 이와 같은 기준만으로 측정망의 위치를 결정하는 데는 다시 여러 가지 문제가 발생할 수 있으므로 측정소 위치 결정의 새로운 방법이 제시되어 기존의 측정망 위치 선정 조건과 함께 운영될 필요성이 있는 것이다.

부산지역의 경우에는 여러 가지 국지적 대기순환계가 나타날 수 있는 지리적, 지형적 조건들을 두루 갖추고 있다. 부산은 남쪽과 남동방향으로 바다와 접해 있어 해륙풍 순환계의 영향을 직접적으로 받을 수 있는 조건에 있으며, 내륙으로도 평지의 육상

Corresponding Author : Woo-Sik Jung, Department of Atmospheric Environment Information Engineering, Inje University, Gimhae 621-749, Korea
Phone: +82-55-320-3932
E-mail: wsjung1@inje.ac.kr

지형 형태가 아닌 높고 낮은 구릉지가 복잡하게 얹혀 있는 지형적 조건을 형성하고 있으며, 해안선의 형태 또한 동해연안에 접해 있는 다른 지역들처럼 단순한 형태가 아니라 굴곡이 심한 형태를 가지고 있다. 더불어 이러한 좁은 지역에서 지형경사각이 복잡하게 나타나는 경우에는 산곡풍 순환계가 다양하게 동시다발적으로 형성될 수 있으며, 해안선의 굴곡이 심한 경우에는 해륙풍의 생성과 발달 등이 좁은 지역에서 상이하게 나타나기 때문에 단순히 해륙풍과 산곡풍 순환계의 영향을 받는다고 설명하기에도 많은 무리가 있다. 또한 부산은 거대 도심지역이 형성되어 있어 대도시 열섬현상이 나타날 가능성이 크다.

본 연구에서는 선행연구⁴⁾에서 도출된 부산지역의 바람권역 대분류 군집분석 결과를 바탕으로 각 대분류 권역별 상세권역 재분류 연구의 기초입력자료 도출을 위해 본 연구에서는 상세 바람장 수치모의를 중점적으로 수행하였다. 이들 풍환경 대분류 군집분석 결과를 바탕으로 대분류 각 군집 내에서의 상세한 바람권역을 분석하기 위해 상세군집 분석을 수행하여야 하는데 이를 수행하기 위해서는 대분류 각 군집영역 내에서 상세한 기상자료의 제공이 무엇보다 필요하다. 그러나 부산지역에서 관측되는 기상자료의 지점 수는 지극히 제한되어 있으므로 공간적으로 상세한 기상정보를 제공받을 수 있는 가능한 최선의 방법은 국지 대기유동장 수치모의를

통해 기상자료를 도출하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 여러 연구를 통해 타당성을 검증받은 기상장 수치모델인 RAMS를 이용하여 공간적으로 상세한 바람자료를 도출하고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 부산전역을 대상으로 상세격자별 대기유동장 수치모의를 수행하였다.

2. 관측 자료를 통한 바람권역 대분류

선행연구⁴⁾인 Part I에서 분석한 바와 같이 최근 5년 동안(2000년 1월 1일~2004년 12월 31일)의 양산을 제외한 부산지역 내 9개 기상관측지점에서 관측한 풍향·풍속 자료를 토대로 공간적 바람권역을 분류한 결과, 부산지역은 1차적으로 6개의 군집으로 분류되었다. 하지만 기상관측지점의 공간적 광역성으로 인해 수확, 통계적 방법의 군집분석에서는 제외되었던 부산도심지, 강서구, 그리고 기장군은 지형적 특징이나 지역의 범위 등을 고려해 볼 때 이들 6개의 1차 분류 바람권역에 분할되어 포함되는 것은 부적절하므로 이들 지역을 독립적인 바람권역으로 판단하여 부산지역은 최종적으로 모두 9개의 대분류 바람권역으로 구분되었다(Fig. 1). 그림을 보면 A로 표시된 대분류 권역은 행정구역상 북구와 사상구 지역이며 B로 표시된 권역은 금정구와 동래구 지역, C로 표시된 권역은 수영구와 해운대구, D로 표시된 권역은 남구 일부지역을 포함한다. 그리고 E로 표시된 권역은 주로 영도구 지역을 포함하며 F

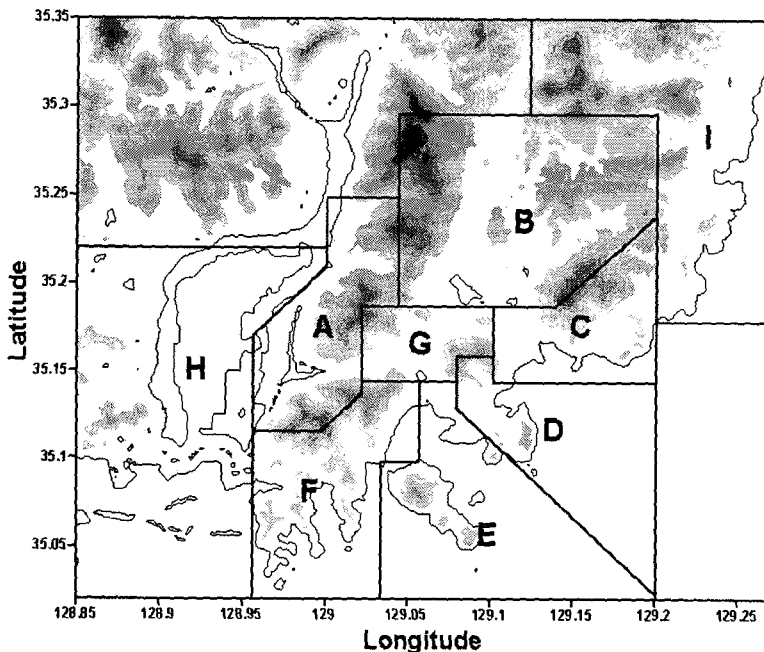


Fig. 1. Schematic expression of the coarse division of wind sector.

로 표시된 권역은 서구가 주된 영역이다. 또한 위에 서술한 바와 같이 부산도심지역(G)과 강서구(H) 그리고 기장군(I)이 그림과 같이 구분될 수 있다. 이 내용에 대한 구체적 설명은 선행연구⁴⁾에 상세히 제시되어 있다.

3. 연구 방법

본 연구에서는 수치모의 수행에 필요한 사례일을 선정하기 위해 과학적 객관성이 확보된 K-평균 군집분석을 이용하여 하였다. 즉, 여러 가지 사례에 대해 선택한 입력변수에 기준하여 상대적으로 동질적인 사례들을 분류하는 군집분석을 수행함에 있어 본 연구는 그 방법 및 결과에 있어 가장 안정하고 정확한 K-평균 군집분석을 이용하였다. K-평균 군집분석의 상세한 설명은 선행연구⁴⁾에 상세히 소개되어 있다. 이상의 K-평균 군집분석을 통해 도출된 사례일을 대상으로 부산지역의 시, 공간적 상세 국지 기상장 분석을 수행하기 위하여 대기유동장 수치모의를 수행하였다. 본 논문에서 도출되는 상세 국지 대기유동장 수치모의 결과는 선행연구에서 구분한 부산지역의 대분류 바람권역 결과를 바탕으로 차후에 수행될 대분류 권역별 상세 바람권역 구분을 위한 기초 입력자료로 활용되는 중요한 정보가 될 것이다.

4. 수치모의 사례일 선정

최근 5년간의 모든 날에 대해 부산지역에서의 상세 격자별 바람장을 수치모의하기란 여러 가지 측면에서 거의 불가능하므로 최근 5년 동안에 부산지역에서 가장 발생 빈도가 높은 종관 기상상황의 대표일을 선정하여 이 날들을 대상으로 상세 격자별 기상장 수치모의를 수행하였다.

본 연구에서는 위에서 설명한 K-평균 군집분석 방법을 이용하여 계절별 수치모의 사례일을 선정하기 위해 6곳의 기상청(서울, 부산, 대전, 대구, 광주, 인천)과 2곳(제주, 오산)의 정시기상관측자료, 그리고 2곳(오산, 포항)의 상층기상관측자료를 활용하였다. 이들 자료를 바탕으로 Davis와 Kalkstein⁵⁾이 제

시한 바와 같이 일평균 현지기압, 일 기압변화량, 1000hPa 지오퍼텐셜 고도, 1000hPa-500hPa 층후, 500hPa 풍속을 이용하여 5년간(총 1,727일)의 각 날을 각 계절별 종관일로 분류하였다. 즉, 위의 관측 자료를 토대로 일평균 현지기압 등 5개의 기상요소를 입력변수로 하여 K-평균 군집분석을 이용하여 연구기간 1727일을 각 계절별 종관일로 객관적으로 분류하였다. 그 결과 총 1727일 가운데 봄철은 401일, 여름철은 460일로 분류되었다. 이 가운데 여름철은 다시 장마기와 무더위기로 각각 243일과 217일로 구분되었으며 가을과 겨울철은 389일과 477일로 구분되어 겨울철과 여름철이 다소 많은 날로 구분되었다. 이 1727일을 5개의 각 계절별 종관일로 분류한 결과는 Table 1에 나타내었다.

Table 1과 같이 K-평균 군집분석에 의해 본 연구기간인 2000년 1월 1일부터 2004년 12월 31일까지 5년 동안의 각 계절별 종관일로 구분된 날들에 대하여 지상 및 상층일기도를 바탕으로 계절별로 종관 대표일을 2일씩 선정하였다. 즉, 군집분석을 통하여 각 계절별 종관일을 봄, 여름 I(장마기), 여름 II(혹서기), 가을, 겨울의 5개으로써 객관적으로 분류하였고 각 계절별로 분류된 날들을 대상으로 다시 지상일기도 및 상층 500hPa 일기도를 이용하여 해당 계절의 가장 전형적인 종관기압 상황일(가장 발생빈도가 높은 종관상황일)을 2일씩 선정하여 이 날들을 계절별 수치모의 사례일로 선정하였다. 그림 3은 본 연구에서 선정한 총 10일의 수치모의 사례일에 대한 지상일기도를 나타낸 것이다. 지면관계상 500hPa 고도의 상층일기도는 제시하지 않았으나 분석내용은 본문에 간단히 추가하였다.

봄철 종관 대표일로 선정된 2002년 3월 12일(Fig. 2a)은 대륙성 기단의 가장자리인 화중 및 양쯔강 지역에서 변질, 이동성 고기압으로 변화되어 우리나라 전면 및 그 중심부가 우리나라에 위치함으로 일교차가 큰 전형적인 봄철 일기패턴을 나타내고 있다. 500hPa 고도에서도 우리나라 전면인 황해지역 및 화중지역으로 약한 기압능 발달하였고 동시에 온도

Table 1. Result of cluster analysis

List	Season	Number of clusters	Average distance from center of cluster
1	Spring	401	2.81
2	Summer I (Rain season)	243	2.43
3	Summer II (Hot season)	217	1.65
4	Fall	389	3.41
5	Winter	477	1.23

장에서도 약한 온도능이 발달하여 전형적인 봄철의 이동성 고기압 패턴을 보이고 있었다. 그리고 2003년 3월 20일(Fig. 2b)의 경우도 우리나라 전면으로

약하게 발달한 상층 기압능 및 온도능과 함께 이동성이 빠른 고기압이 지상에 위치하여 봄철의 대표적인 양쯔강 기단에 의한 이동성 고기압 패턴을 나



Fig. 2. Surface synoptic weather charts.

타내고 있다.

둘째, 여름철 가운데 장마기의 종관 대표일로 선정된 2001년 7월 15일(Fig. 2c)의 경우, 우리나라 남부지역을 중심으로 북태평양 고기압 및 오호츠크해 고기압으로 인해 형성된 수렴대로 인하여 장마전선이 형성되어 있어 전국이 흐리고 비가 내리는 종관 기압계 패턴을 보이고 있다. 동시에 상층 500hPa 일기도에서도 5,820지위고도(geopotential meter, 이하 gpm)을 기준으로 남쪽에 키 큰 고기압인 북태평양 고기압이 완전히 나타나는 가운데 우리나라 전면 및 남부지역으로는 기압능이 분석되어 완전한 정체 전선과 함께 장마기의 전형적인 종관기압패턴을 나타내고 있었다. 그리고 2003년 7월 13일(Fig. 2d)의 경우에도 북태평양 고기압과 오호츠크해 고기압 사이에 우리나라가 위치, 우리나라 남부지역을 중심으로 저기압열 또는 전선대가 형성, 전형적인 장마철 종관기압계를 나타내고 있고 상층에서도 그 수렴대가 형성되어 있다.

셋째, 장마기와 달리 전형적 여름철 무더위 기간의 종관 대표일로 2001년 8월 2일(Fig. 2e)과 2002년 7월 29일(Fig. 2f)을 선정하였다. 사례일의 종관상황을 살펴보면 우리나라는 완전한 북태평양 고기압 영향을 받고 있다. 즉, 두 사례일 모두 1,012hPa 이상의 북태평양 고기압 영향을 받고 있으며 상층 500hPa에서도 5,880gpm 이상의 북태평양 고기압 영향권에 우리나라가 위치하여 전국이 남서풍이 우세한 가운데 매우 무덥고 습한 전형적인 여름철 무더위 날씨를 나타내고 있었다.

넷째, Fig. 2g와 Fig. 2h는 가을철 종관 대표일로 선정된 2000년 11월 3일과 2003년 9월 23일에 대한 지상일기도를 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 먼저, 2000년 11월 3일 우리나라 북동쪽에 중심을 둔 고기압의 영향을 받고 있는 가운데 전국적으로 북동풍이 우세하고 날씨를 보이고 있다. 동시

에 500hPa 일기도에서도 우리나라 북동쪽 및 오호츠크해로 약하게 기압능과 온도골이 형성되어 우리나라가 오호츠크해 고기압의 영향을 받고 있음을 알 수 있었다. 그리고 2003년 9월 23일의 경우도 기압계의 위치는 약간 달리하나 우리나라는 일본 사할린 및 오호츠크해 중심을 둔 고기압의 영향을 받고 있으며 상층 500hPa에서도 차가운 한랭 고기압인 오호츠크해 고기압임을 나타내 우리나라의 전형적인 가을철 기압패턴임을 알 수 있었다.

다섯째, 2003년 12월 7일(Fig. 2i)과 2003년 12월 18일(Fig. 2j)을 겨울철 종관 대표일로 선정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 뚜렷한 서고동저형의 종관기압패턴을 알 수 있으며 상층 500hPa 일기도 분석에서도 같이 우리나라는 대륙성 기단인 시베리아 고기압의 완전한 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

Table 2 는 이들 수치모의 사례일의 종관적 특징과 분류 정리한 것이다. Table 2에 나타난 바와 같이 서고동저의 종관기압계 패턴이 뚜렷하였던 2003년 12월 7일과 2003년 12월 18일을 겨울철 대표 사례일로, 대륙성 기단의 가장자리에서 변질됨으로 인해 생성된 이동성 고기압 패턴을 보인 2002년 3월 12일과 2003년 3월 20일을 봄철 대표 사례일로, 장마전선이 우리나라에 영향을 미친 2001년 7월 15일과 2003년 7월 13일을 여름철 장마기 대표 사례일로, 그리고 완전한 북태평양 기단의 영향으로 매우 무더웠던 2001년 8월 2일과 2002년 7월 29일을 여름철 대표 사례일로 선정하였으며 우리나라 북동쪽의 오호츠크해에서 발달한 고기압의 세력이 뚜렷하였던 2000년 11월 3일과 2003년 9월 23일을 가을철 대표 사례일로 하여 종관기압계 패턴에 준한 총 10일의 계절별 수치모의 사례일을 최종 선정하였다.

5. 대기유동장 수치모의

여기서는 Table 2에서 제시한 계절 대표일을 대

Table 2. Seasonal typical synoptic days

Sorting	Air mass & synoptic pattern	Date
Spring	Center and edge of Migratory anticyclone located in the Yellow sea	2002. 3. 12 2003. 3. 20
Summer I	Changma front due to North Pacific High and Okhotsk air mass	2001. 7. 15 2003. 7. 13
Summer II	Edge of typical North Pacific High	2001. 8. 2 2002. 7. 29
Autumn	Development of Okhotsk air mass	2000. 11. 3 2003. 9. 26
Winter	Edge of typical Siberian air mass	2003. 12. 7 2003. 12. 18

상으로 기상장 분석을 수행하고자 한다. 앞서 설명한 바와 같이 부산지역의 경우에는 남쪽과 남동쪽에 바다를 접하고 있고 해안선의 형태 또한 굴곡이 심하게 나타나고 있다. 또한 내륙에 형성되어 있는 육지의 지형형태 또한 수평적으로 완만한 평지의 형태를 지니고 있는 것이 아니라 높고 낮은 구릉지가 매우 복잡하게 형성되어 있는 지형적, 지리적 특성이 있다.

이러한 지형적, 지리적 특성에서는 기상조건에 따라 좁은 지역별로 각각의 국지순환계가 형성될 가능성이 있으며 결국에는 바람의 진행방향이 단순히 예측하기에는 어려운 복잡성을 나타내게 된다. 따라서 이러한 부산지역의 지형적, 지리적 특성을 고려해 좁은 지역에서의 상세한 바람장의 형태와 시간에 따른 바람의 진행경로 등을 구체적으로 살펴보기 위해서는 상세한 기상정보를 제공할 수 있는 대기유동장 수치모델링이 반드시 필요한 것이다.

본 연구에서는 이전의 여러 연구들을 통해 모델의 타당성과 정확성을 검증 받은 바 있는 RAMS 모델을 이용하여 연구를 진행하고자 한다.

5.1. 모델 개요

본 연구에서는 지역규모 대기순환모델인 RAMS (Regional Atmospheric Modeling System)를 이용하여 부산지역의 상세기상장을 예측하고자 하였다. 미국 Florida 지역에 적용했던 해륙풍 모델인 RAMS는 콜로라도 주립대에서 추가 개발된 구름모델과 지형변환에 의한 대기순환 모델을 결합시킨 기상모델이다⁶⁾. 이러한 RAMS 모델은 1980년대 이후 등지격자(nested grid) 기능의 도입을 통해 도시 규모 이하에서부터 대규모의 대기순환까지 광범위하게 사용되도록 개발되었으나, 대규모 기상 변화를 주로 취급하는 여타 모델에 비하여 지형변화가 중요한 지역 단위의 중·소규모 기상현상을 해석하는데 매우 유리하다.

기초 방정식은 연속 방정식, 운동 방정식, 열역학 방정식, 수분에 대한 물질 방정식이고, 기본적으로 비정역학 방정식을 사용한 압축성 유동을 모사하나 비압축성 유동 혹은 압축성 유동으로부터 음파를 제거한 비탄성 유동을 가정한 정역한 근사로 제공하고 있다. 격자 구조는 Arakawa-C grid⁷⁾를 사용하며, 시간적분 방법은 기본적으로 시간 분리 구성(time-splitting scheme)을 사용하고 있다. 또한 RAMS에서 사용하는 좌표계는 수평으로는 중규모 수치모델에 적합한 극-평사 투영법(polar-stereographic projection)을, 연직으로는 최상층은 평면, 하층은 지형의 굴곡을 따르는 체계인 σ_z 지형좌표계^{8~9)}를 사용하고 있다. MPI(Message passing Interface)

라이브러리를 이용한 병렬처리과정을 제공함으로써 대용량 계산에 상당히 효과적이다.

RAMS를 이용한 기상장에 대한 선행연구들을 살펴보면 Cai와 Steyn¹⁰⁾은 캐나다의 복잡한 해안지역에서의 해륙풍 수치모의를 위해 RAMS 모델을 사용하였으며 광화학 모델링 시스템의 수치모의 평가를 위해 RAMS 등의 수치모델 기상장 결과를 사용하여 비교, 분석하였다. 국내에서는 정우식 등¹¹⁾과 이화윤 등¹²⁾이 포항지역을 대상으로 겨울철 탁월풍과 전형적 해풍이 불어오는 기상조건에서의 바람장 분포 특성을 구체적으로 살펴본 바 있으며 김영성과 오현선¹³⁾은 여천공단 등 대규모 공단이 위치하고 있는 광양만을 중심으로 대기오염물질의 배출이 많고 석유화학 공장으로부터 유독 물질의 누출사고 가능성이 큰 여수 지역에서의 대기확산을 수치모의하기 위해 RAMS 모델로 산출된 기상장을 이용한 연구가 있었다. 이들 많은 연구들이 주로 중, 소규모 지역을 대상으로 하고 있는 바와 같이 RAMS 모델은 지역적으로 발생 가능한 국지적 기상현상 분석에 효과적임을 알 수 있다.

5.2. 수치모의 결과

본 연구에서는 계산영역에 있어서 초기 및 측면 경계 조건을 개선하고 불필요한 부분의 계산에 소요되는 시간의 낭비 혹은 컴퓨터의 용량문제 등의 단점을 해결하기 위해 성긴격자 영역 계산치를 사용하여 미세격자 영역의 경계치를 구하는 nesting 방법을 적용하여 계산하였다. Fig. 3은 수치모의에 사용된 계산 영역을 나타낸 것이다.

초기 기상장 입력 자료로는 NCAR(National Center for Environment Prediction/National Center for Atmospheric Research) 재분석 자료의 매 6시간 값을 사용하여 총 60시간에 걸쳐 수치적분을 수행하였고 이 결과를 바탕으로 해당 사례일의 부산지역 대기유동장을 분석하였다. 본 연구에서 사용한 수치모델의 초기 입력조건은 Table 3에 나타내었다.

계절별 수치모의 사례일에 대한 지표부근 수평 바람장분포를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4는 봄철 수치모의 사례일인 2002년 3월 12일과 2003년 3월 20일 09시와 18시의 수평바람장 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 두 사례일 모두에서 일출부근 시간대인 09시의 바람분포에서 지형에 따른 바람의 굴곡현상이 더욱 뚜렷하게 나타나고 있다. 이에 비해 일몰부근 시간대인 18시의 결과를 보면 주간시간대 동안에 균일하게 형성된 주풍계가 형성이 되어 전체적으로 부산광역시에 걸쳐 지역별 차이가 크게 없는 일정한 형태의 바람 경향을 보이고 있다. 이러한 이유는 야간에 지

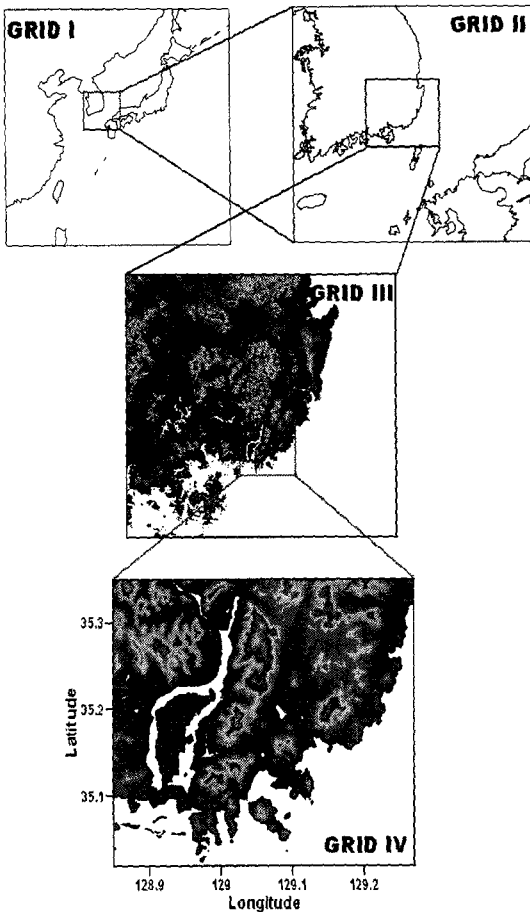


Fig. 3. Calculation domain considered in this study.

구복사냉각에 의해 지표부근의 기온이 낮아지면 대기 저층의 공기는 밀도가 커져 지표부근으로 수축되어 내려오게 되고 이들 지표부근으로 내려온 공기는 지형의 굴곡을 따라 저지대로 흘러가는 경향을 가지기 때문에 야간시간대, 특히 새벽시간대의 지표부근 대기에서의 공기 흐름을 보면 지형의 형태를 따라 흘러가는 풍계를 보이는 경향을 가지게 된다. 그러나 주간에는 일반적으로 태양 일사라는

강력한 열원이 존재하여 지면이 가열하게 되고 부산광역시와 같이 바다를 접하고 있는 지역에서는 이와 같은 육지내륙에서의 지면가열과 바다에서의 가열의 차이에 의해 수평적 기온경도가 발생하여 바다에서 육지로 향하는 경향의 흐름이 부산광역시역에 크게 영향을 미치게 된다. 따라서 주간 경우에는 거대한 바다로부터 불어오는 비교적 대규모의 풍계가 부산광역시역 전체에 걸쳐 작용하므로 소규모적 지형 굴곡에 의한 바람의 변형효과가 야간이나 새벽시간대에 비해 약하게 작용하게 되어 주간에는 비교적 넓은 지역에 걸쳐 균일한 바람의 분포가 나타나게 되는 것이다.

Fig. 5는 봄철 수치모델의 사례일인 2002년 3월 12일과 2003년 3월 20일의 09시와 18시 수평온도장 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 일출 시간 부근대인 09시에는 내륙안쪽지역이 연안지역에 비해 다소 낮은 기온 분포를 보이고 있음을 볼 수 있다. 그러나 낮시간 동안 일사에 의한 지면가열 효과가 충분했던 18시의 온도분포를 보면 09시에 비해 내륙에서 기온의 상승이 많이 상승한 것을 알 수 있다. 이것은 지면과 해수면의 '물리적 특성(지면 : 고체, 해수면 : 액체) 차이'와 해양이 가지는 '물의 유동성', 그리고 '육지-해양간 비열차이'에 의해 해수면보다 육지에서 빠른 기온 상승이 나타나게 되는 것이다. 09시와 18시의 결과 모두에서 내륙의 고지대인 금정산 자락과 장산, 금련산, 그리고 구덕산 자락에서 낮은 기온분포를 보이고 있음을 알 수 있는데 이는 고도 증가에 따른 기온감소 효과에 의한 것이다. 봄철 수치모델의 사례일인 두 날의 경우, 2003년 3월 20일이 2002년 3월 12일에 비해 전반적으로 기온분포가 낮은 경향을 보이고 있다. 이처럼 봄철의 경우에 바람장과 온도장의 수치모델의 결과를 보면 봄철에 형성되는 일반적 형태의 경향을 잘 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 부산지역에서 계절별로 가장 빈번하게 형성되는 바람장의 분포를 상세히 살펴보는 것이 주 목적이므로 나머지 계절의 지표부근 기온

Table 3. RAMS condition used in this study

Run time	60 hours
Grid structure	horizontal grid resolution : 48, 12, 3, 1(km)
	vertical levels : 30 layers (vertical stretch ratio : 1.15)
	soil layers : 11 layers Arakawa C grid (u,v,w 1/2Δx)
Radiation scheme	Mahrer/Pielke ¹⁴⁾ long/shortwave model
Initial atmospheric field	NCEP/NCAR CDAS data
Input dataset	DEM30s, Micro43, ogedata, SST43, topo10m

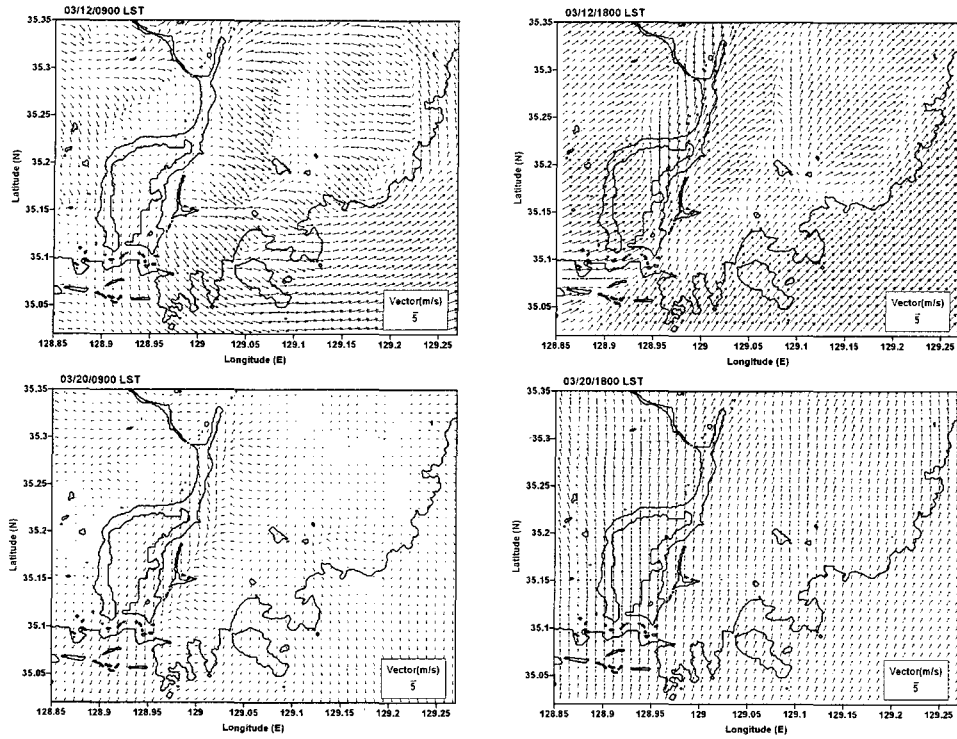


Fig. 4. Distributions of surface wind filed on spring case.

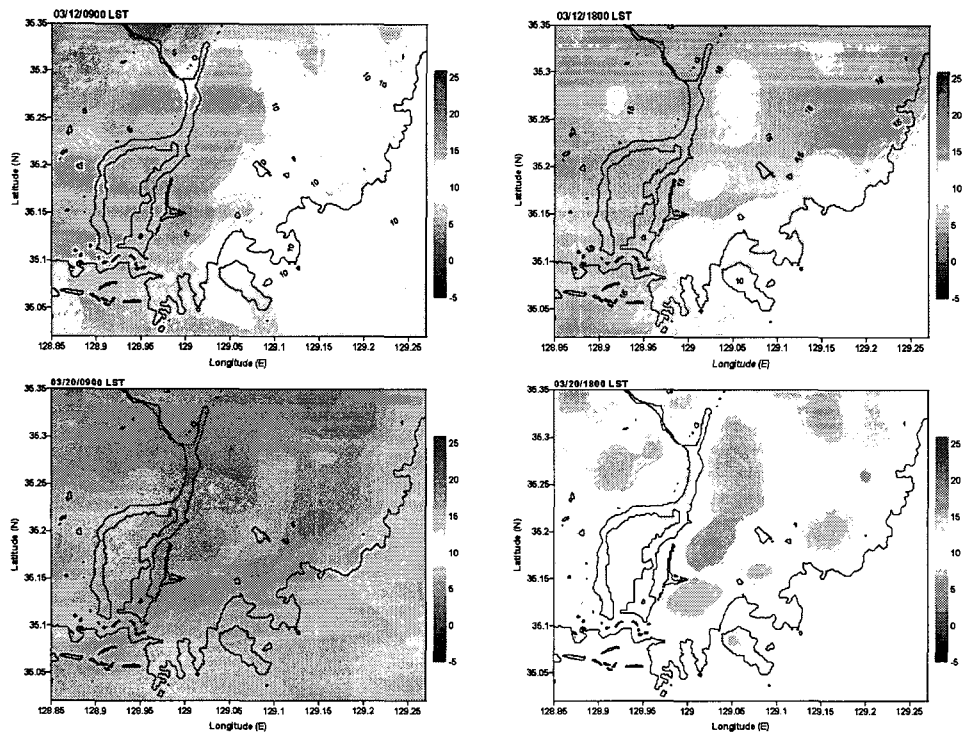


Fig. 5. Same as Fig. 4. except for air temperature.

분포도는 지면관계상 생략하였다.

Fig. 6은 장마철 수치모의 사례일인 2001년 7월 15일과 2003년 7월 13일 09시와 18시의 바람장 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 2001년 7월 15일은 전반적으로 하루 중 남서풍계열의 바람이 우세한 경향을 보이는 날이었다.

Fig. 7은 일 년 중 가장 무더운 한 여름철의 수치모의 사례일인 2002년 7월 29일과 2001년 8월 2일 09시와 18시의 바람장 수치모의 결과를 나타낸 것이다. 그림을 보면 하루 중 지속적으로 남동풍계열의 바람이 불고 있어 부산광역시지역은 해양으로부터 지속적인 공기의 유입이 있는 것을 알 수 있다. 앞서 온도장 수치모의 결과 분석에서 설명한 바와 같이 이 날은 야간 및 새벽시간대의 기온이 25°C 가 넘는 전형적인 부산지역 열대야일이라는 것을 살펴본 바가 있는데, 이러한 이유는 바로 여기서 제시하고 있는 바람장 분포를 통해 이해할 수 있는 것이다. 즉, 이 날의 경우에 우리나라의 남동쪽에 위치하고 있는 강력한 북태평양 고기압의 강력한 영향으로 무더운 남동풍이 부산지역 일대로 지속적으로 불어 오게 되며 부산지역의 남동방향에 분포하고 있는 해양으로부터 습기의 유입이 이때 함께 일어나므로 결국 부산지역은 매우 무덥고 습한 공기가 일종 지

속적으로 유입되게 되는 것이다. 따라서 이러한 날은 새벽시간까지 기온이 높고 습도 또한 높아 잠을 설치게 되는 매우 전형적인 ‘열대야’를 보이는 기상장 패턴을 보이고 있다고 할 수 있겠다.

Fig. 8은 가을철 수치모의 사례일인 2003년 9월 23일과 2000년 11월 3일의 09시와 18시의 수평바람장 분포를 나타낸 것이다. 우리나라는 가을철에 한반도의 북동쪽에 위치한 오호츠크 고기압의 영향을 많이 받는다. 그림을 보면 두 사례일 모두 전반적인 바람의 분포가 북동풍을 보이고 있는 것을 뚜렷이 볼 수 있다. 즉, 가을철의 대표적인 한반도 지배 기압분포에 의한 바람장의 전형적 분포를 잘 나타내고 있다.

Fig. 9는 추운 전형적 겨울철 수치모의 사례일인 2003년 12월 7일과 2003년 12월 18일의 09시와 18시 지표부근 바람장 분포를 나타낸 것이다. 겨울철은 일반적으로 잘 알려져 있는 바와 같이, 우리나라가 시베리아 고기압의 영향을 뚜렷하게 받는 계절이다. 따라서 한반도 전역은 대체적으로 북서계절풍의 영향으로 대부분의 경우에 북서풍 또는 북풍계열의 바람이 우세하게 나타나게 되는 것이다. 본 연구에서 선정한 겨울철 수치모의 사례일인 두 날의 경우에 있어서도 일출부근 시간대인 09시와 일몰부근

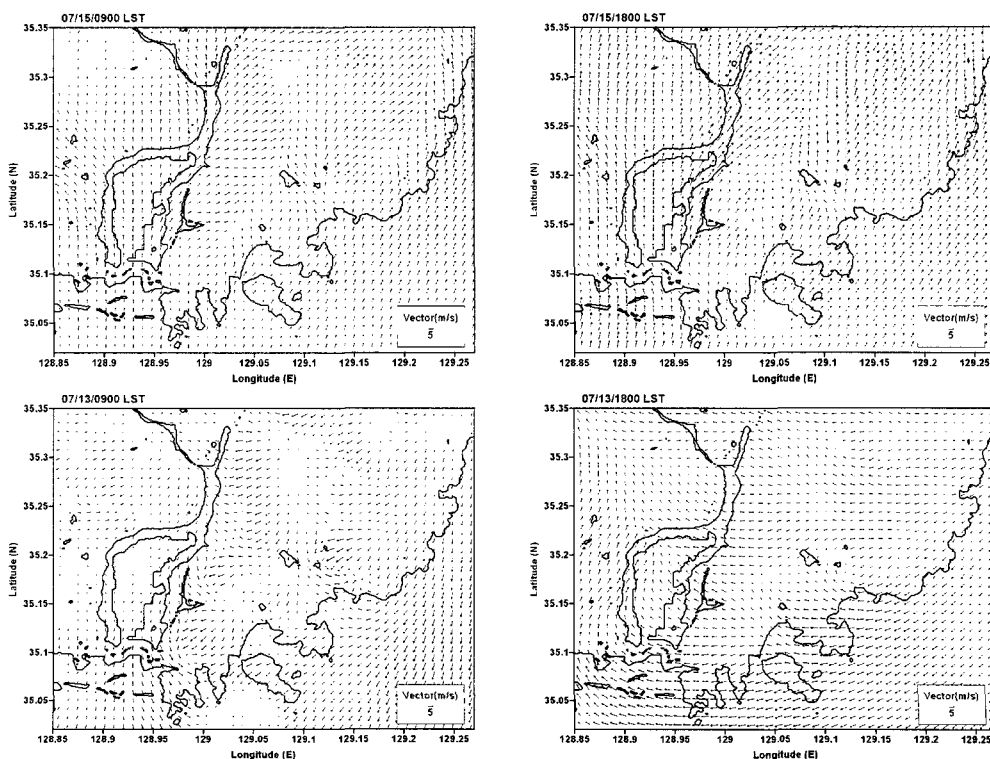


Fig. 6. Same as Fig. 4 except for summer I case (Jangma case).

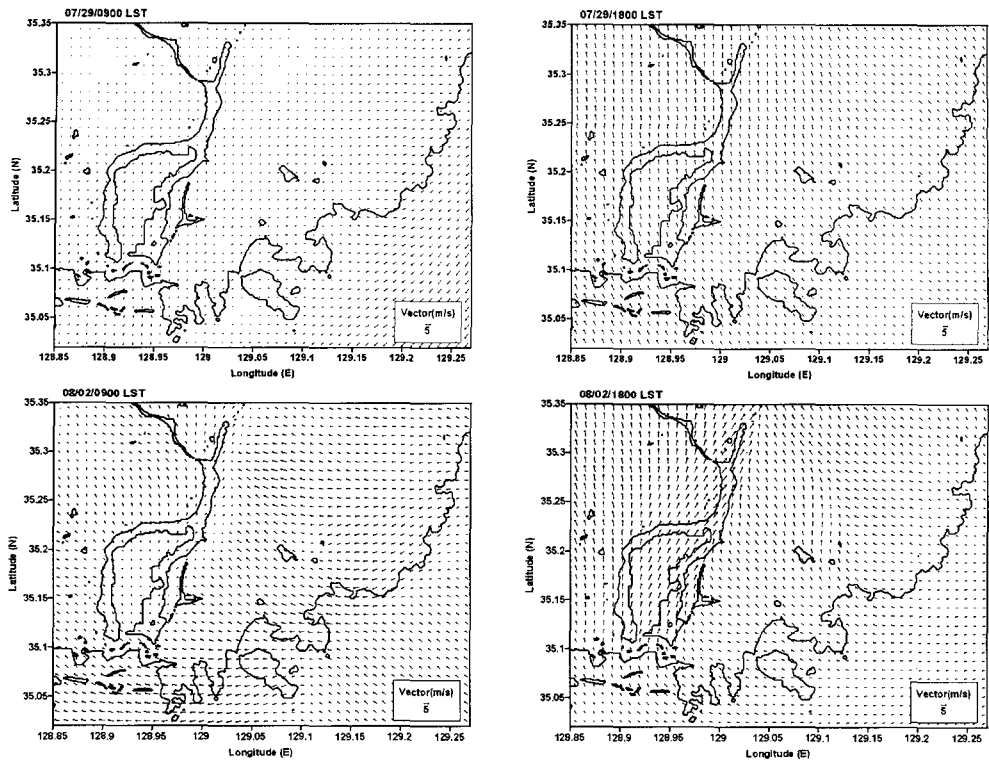


Fig. 7. Same as Fig. 4 except for summer II case (hot summer case).

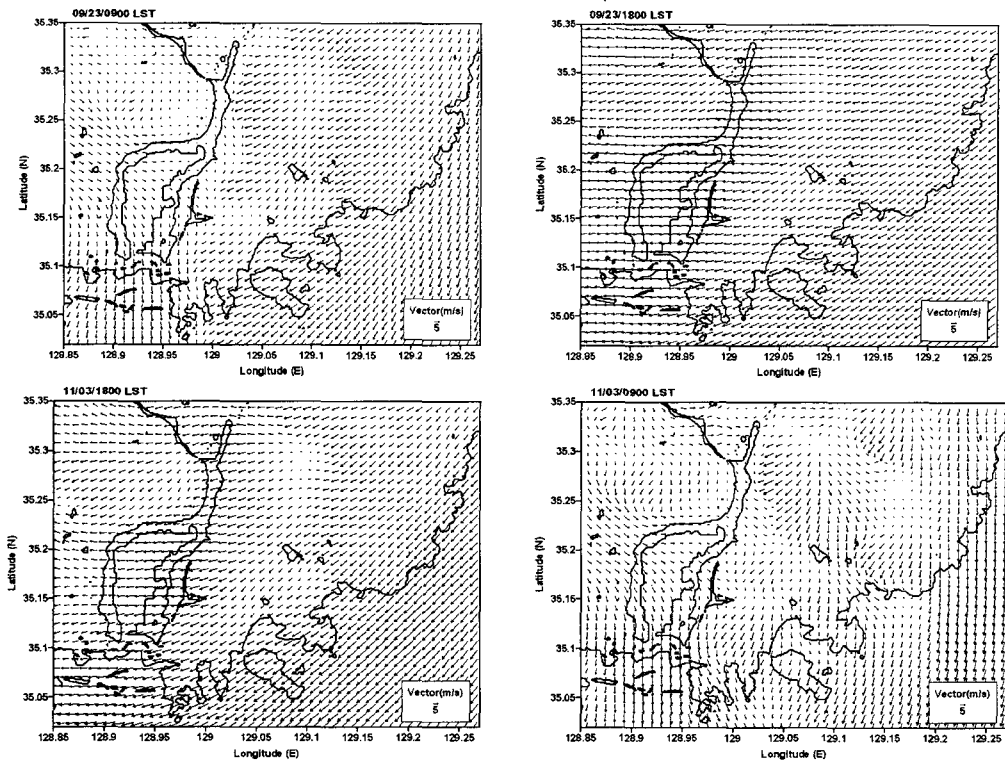


Fig. 8. Same as Fig. 4 except for autumn case.

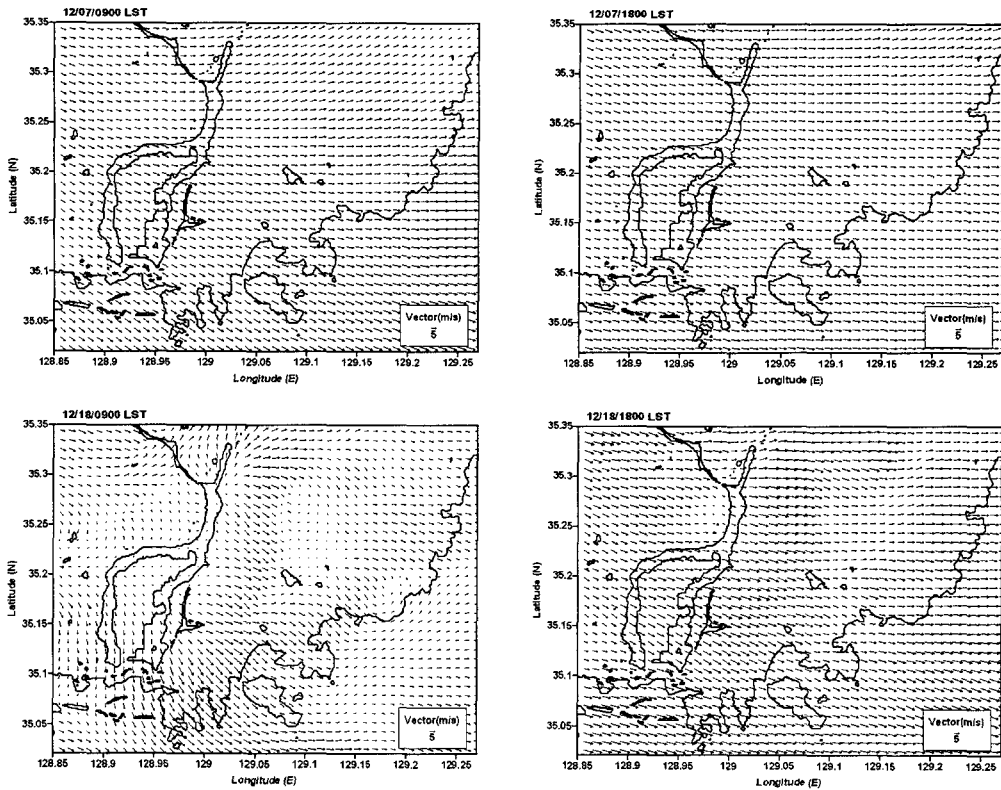


Fig. 9. Same as Fig. 4 except for winter case.

시간대인 18시의 바람장 분포를 보면 전반적으로 북서계열의 바람이 상당히 우세하게 잘 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

따라서 이상의 수치모의 사례일의 바람장을 구체적으로 살펴본 결과, 본 연구에서 선정한 계절별 수치모의 사례일이 계절적 특징을 잘 나타낼 수 있는 전형적인 종관장 패턴을 가지고 있는 날이라는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 이 날들을 대상으로 수치모의하여 도출되는 기상자료는 각 계절의 대표성을 잘 나타내고 있는 것을 볼 수 있고 이들 수치모의된 기상자료 전체를 이용하여 도출되는 결과는 결국 계절별 대표성과 함께 연간 평균적 의미의 연간 나타날 수 있는 가장 빈번한 종관상태의 결과라고 볼 수 있는 것이다.

5.3. 수치모의 결과의 타당성 검증

5.3.1. 관측자료와 비교

앞서 RAMS 모델을 이용하여 도출된 수치모의 결과에 대한 타당성과 정확성을 평가하기 위하여 부산지역 일대에서 관측된 기상자료와 수치모의 결과를 비교하였다.

Fig. 10~15는 각각의 계절별 대표일을 대상으로 수치모의된 결과와 관측결과를 비교하여 나타낸 것

이다.

Fig. 10은 봄철 수치모의 사례일인 2002년 3월 20일의 풍속의 일변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 전반적으로 수치모의를 통해 계산된 풍속값이 각 지점에서 관측된 풍속의 일변화 경향과 크기 정도와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그림에서처럼 일변화 크기가 작고 풍속의 강도도 약한 부산지방기상청(159)의 관측값의 특성을 수치모의된 풍속 또한 유사하게 나타내고 있음을 알 수 있고 이러한 일변화 경향 및 강도 비교에 있어서 해운대(937), 부산진(938), 동래(940) 지점에서도 관측값과 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다.

풍속의 경우에는 관측지점 주변의 지형적 조건에 가장 크게 받는 기상요소 중 하나이다. 일반적으로 풍속이나 기온과 같은 기상요소는 중간에 강하고(높고) 야간시간대에 약한(낮은) 경향을 보이지만 풍속의 경우에는 기온과 달리 주변의 지형조건에 더욱 민감하고 뚜렷하게 영향을 받기 때문에 풍속의 강도 및 변화 경향을 정확히 예측하는 것이 다른 기상요소에 비해 쉽지 않은 것이 사실이다. 하지만 그러한 이유로 해서 풍속에 있어서는 강도(크기)뿐만 아니라 일 중 나타나는 일변화 경향을 정확히 모사하

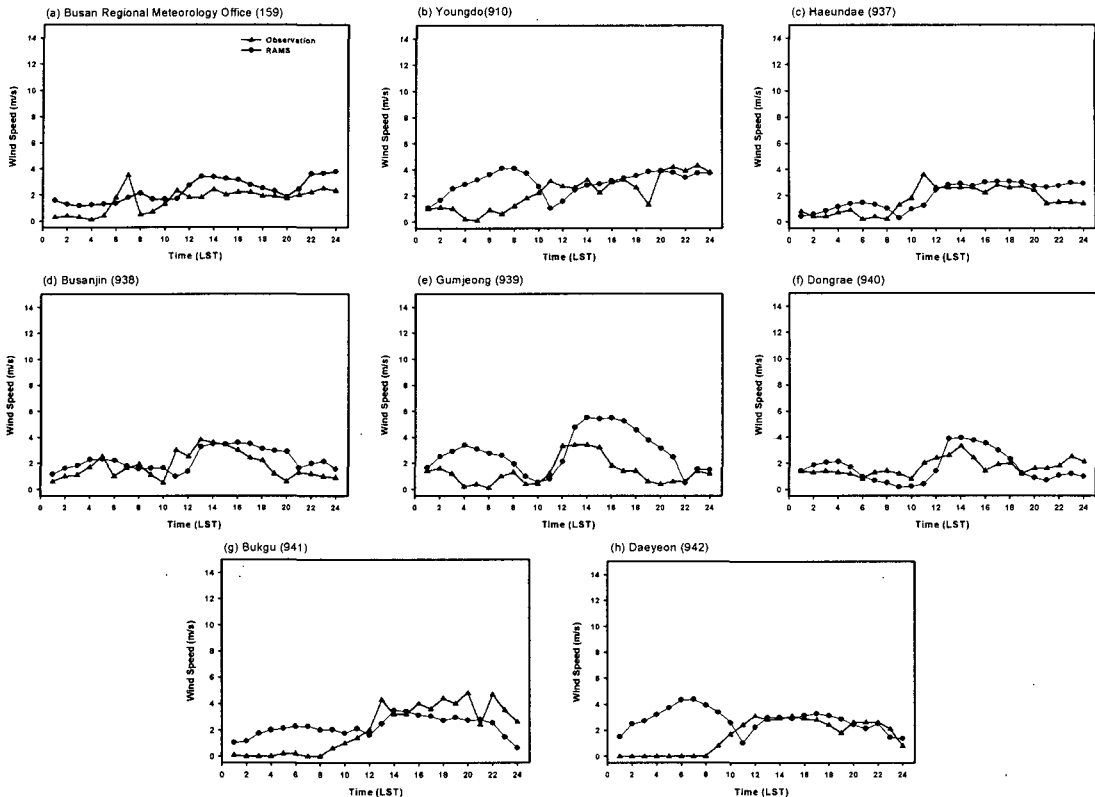


Fig. 10. Daily variation of wind speed at each site on 20 March 2002.

는 것이 그만큼 중요하다 할 수 있다. 이러한 측면에서 볼 때 Fig. 10에서 보는 바와 같이 일변화 정도가 작은 2002년 3월 20일의 전반적인 특성을 수치모의 결과가 대체로 잘 묘사하고 있는 것은 본 연구에서 사용한 RAMS 모델이 이날의 전반적 기상상황을 잘 재현하고 있다는 것을 의미하는 것이라 판단할 수 있다.

Fig. 11은 봄철 수치모의 사례일인 2002년 3월 20일의 기온 일변화를 비교해서 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 관측지점별로 나타나는 기온의 일변화 경향성과 기온값을 RAMS 수치모델이 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다. 즉, 내륙에 위치한 금정(939)지점과 동래(940)지점의 관측결과에서 나타나는 일변화 경향 및 기온값의 분포와 연안에 위치한 영도(910)지점과 해운대(937)지점에서의 일변화 경향 및 기온값의 분포 특성이 차이가 나타나고 있는데 이러한 지역적 위치에 따른 지점별 기온변화의 특성을 RAMS 수치모의 결과가 잘 나타내고 있다. 이러한 좋은 일치는 봄철의 경우뿐만 아니라 나머지 계절별 대표일의 경우에서도 뚜렷이 볼 수 있다. 이처럼 관측에서 나타나는 지점별 기온변화의 특성을 본 연구에서 사용한 RAMS 수치모델은 상

당히 잘 나타내고 있다. 본문에서는 지면관계상 제시하지 못하였으나 나머지 계절에서도 관측값과 수치모의 결과값이 좋은 일치를 보였다. 전체 수치모의 대상일(10일)의 수치모의 결과값과 관측값과의 정확도 평가는 뒤에서 상세하게 제시할 것이다.

Fig. 12와 Fig. 13은 장마철(Summer I)과 무더운 여름철(Summer II)의 수치모의 사례일인 2001년 7월 15일과 2002년 7월 29일의 풍속 일변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 앞서 봄철과 마찬가지로 관측에서 나타난 풍속의 일변화 경향 및 풍속의 크기를 비교적 잘 수치모의하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 14와 Fig. 15는 가을철과 겨울철의 수치모의 사례일인 2003년 9월 23일과 2003년 12월 18일 풍속의 일변화를 나타낸 것이다. 앞서 봄철, 장마철, 한여름철의 경우에서 살펴본 바와 같이 전반적으로 각 지점별 풍속의 변화 경향 및 강도와 본 연구에서 사용한 RAMS 모델의 결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

이상의 풍속 관측값과 수치모의 결과값 비교에서 나타난 바와 같이, 중규모 대기유동장 수치모델인 RAMS가 부산지역에서 나타나는 연중 가장 빈번한

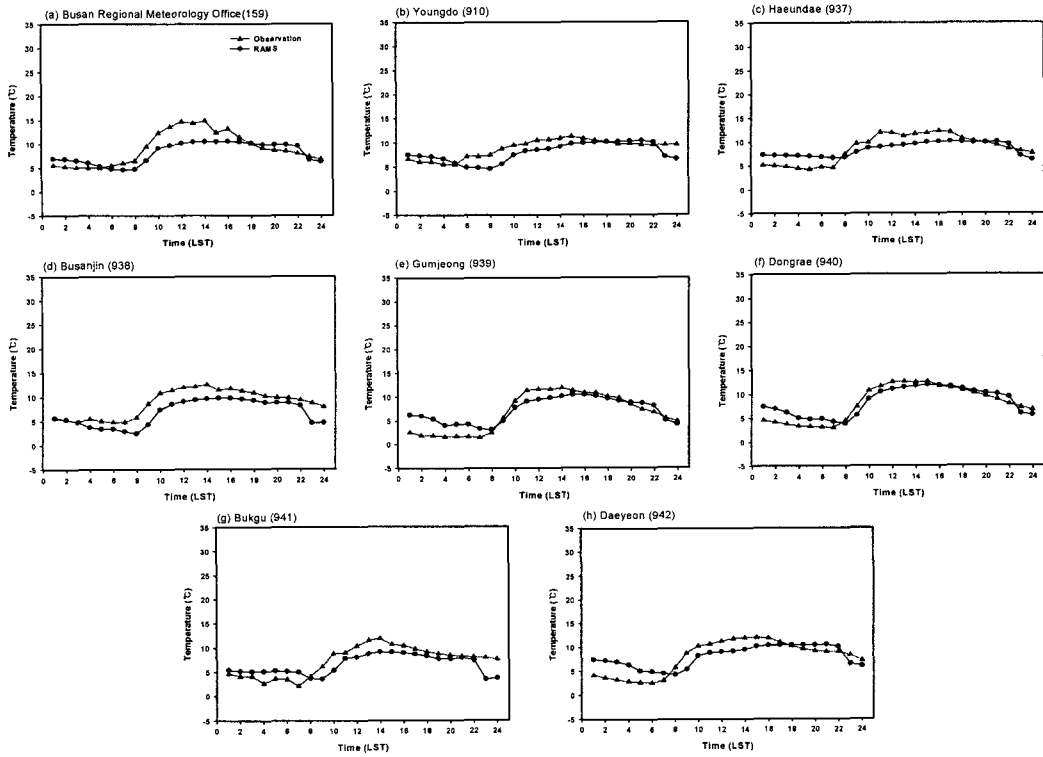


Fig. 11. Same as Fig. 10 except for air temperature.

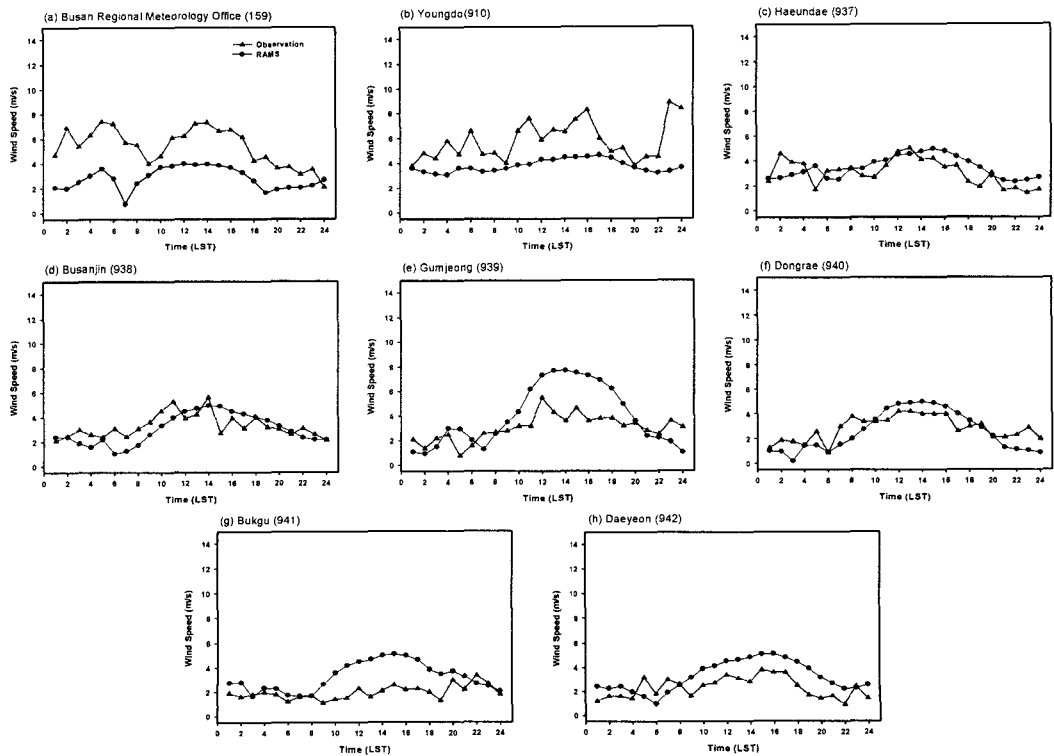


Fig. 12. Same as Fig. 10 except for summer I case.

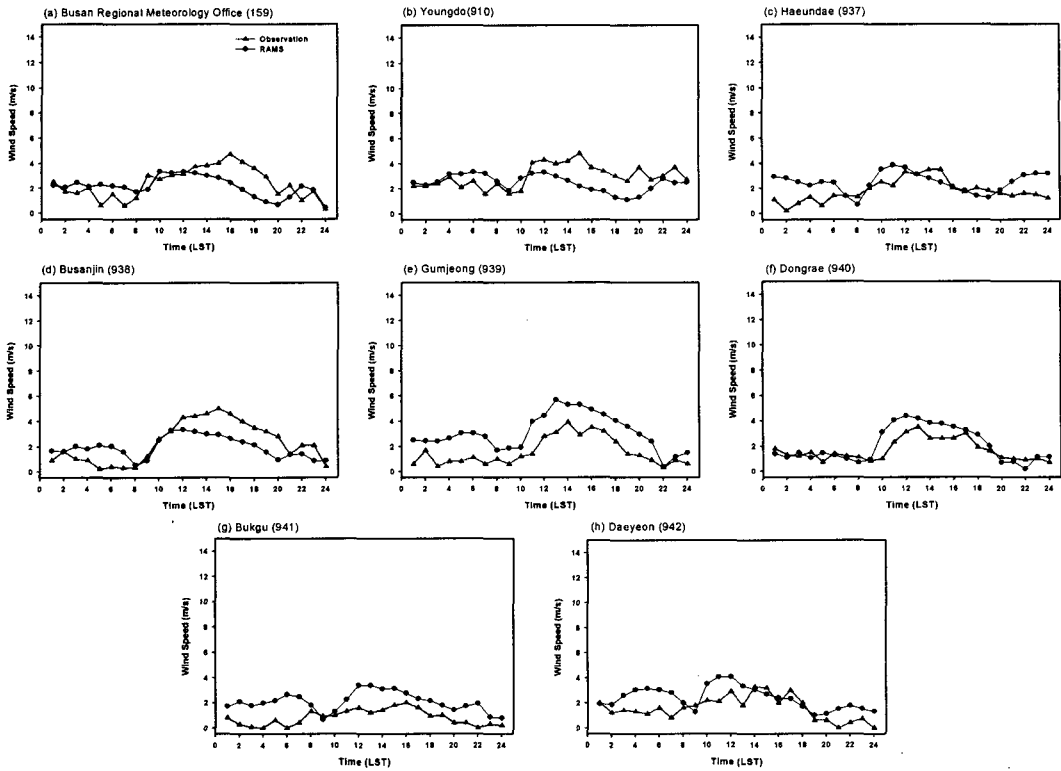


Fig. 13. Same as Fig. 10 except for summer II case.

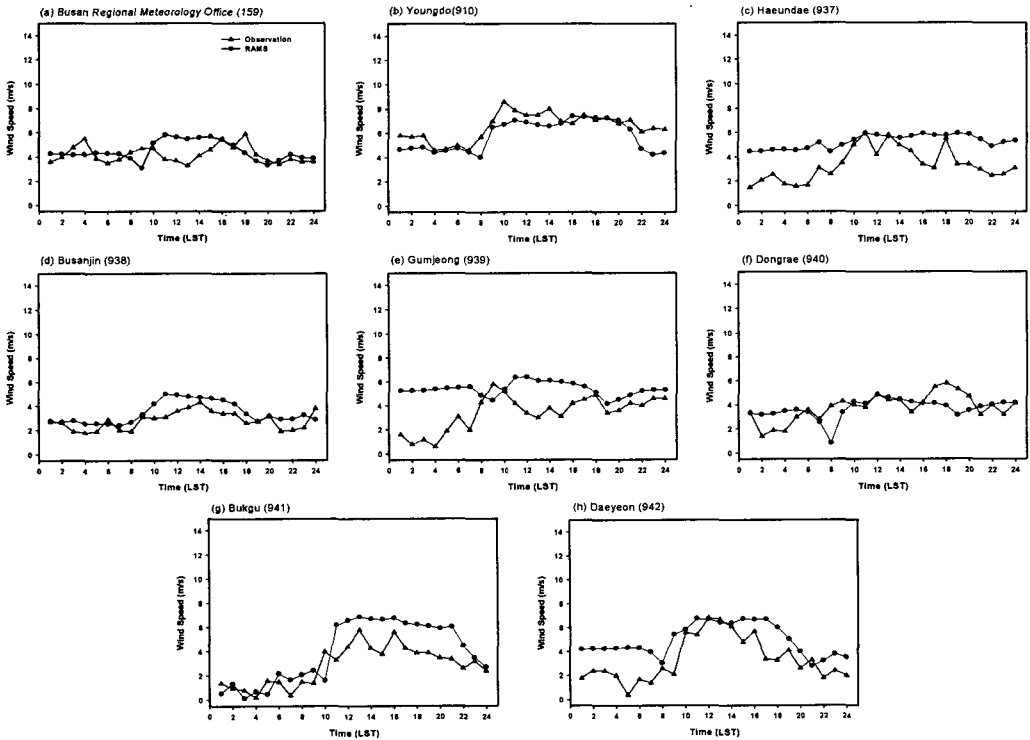


Fig. 14. Same as Fig. 10 except for autumn case.

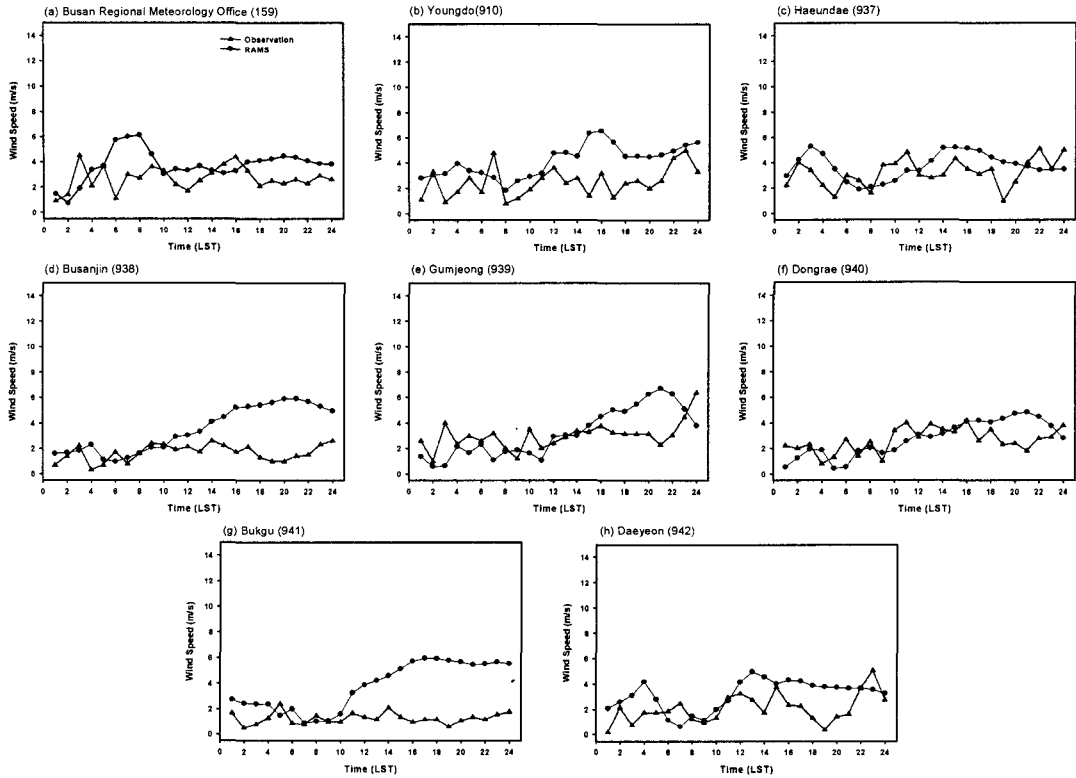


Fig. 15. Same as Fig. 10 except for winter case.

종관기상 조건일 때의 풍속분포 경향을 잘 나타내고 있다.

따라서 본 연구에서 계절별 대표일을 대상으로 수치모델의 지점별 풍속의 강도와 변화경향이 그림에서 보는 바와 같이 전반적으로 관측값과 유사하게 분석된 점은 수치모델의 격자별 바람정보를 활용하여 분석할 바람권역의 상세분류에서 신뢰할만한 결과를 제공할 수 있을 것이라는 의미를 가진다고 할 수 있다. 즉, 공간적으로 해상도가 낮아서 부산지역일대의 기상정보를 정확하게 파악할 수 없었던 문제점은 RAMS 수치모델을 통해 생산되는 시, 공간적으로 상세한 기상요소별 정보 제공으로 많은 부분 해소될 수 있다.

이와 같은 측면에서, RAMS 수치모델을 통해 생산된 부산지역 일대의 공간적으로 상세한 격자별 기상정보는 뒤에서 수행될 부산 각 지역의 상세 군집 분석에 중요한 기초 입력자료로 활용이 될 것이고, 여기서 수행된 비교분석을 통해 얻은 입력자료의 정확도에 대한 객관적 타당성은 상세 군집 분석 결과의 신뢰성을 더욱 높여줄 수 있을 것이다.

5.3.2. 통계적 방법

10곳의 관측지점에 대한 결과들의 통계적 분석

평가를 위해 각 관측소 지점별로 Root Mean Squared Error(RMSE)와 Index Of Agreement (IOA)를 살펴보았다. RMSE는 관측값과 모델 결과가 어느 정도의 차이를 보이는가를 나타내는 것으로 그 값이 작을수록 모델결과를 신뢰할 수 있으며, IOA는 모델 결과값과 관측값이 얼마나 일치한가를 나타내는 것으로 0~1사이의 값을 가지고 1일 때 완벽한 일치를 나타낸다. RMSE와 IOA를 구하는 식은 다음과 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (P_i - O_i)^2}$$

$$IOA = 1 - \frac{\sum (P_i - \bar{O})^2}{\sum (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$

P_i : Prediction

O_i : Observation

\bar{O} : Averaged Observation

기온과 풍속에 대하여 각 지점에 대한 통계분석 결과를 Fig. 16에 나타내었다. 그림을 보면 기온의 경우에 있어서 일치도 지수인 IOA(Index of

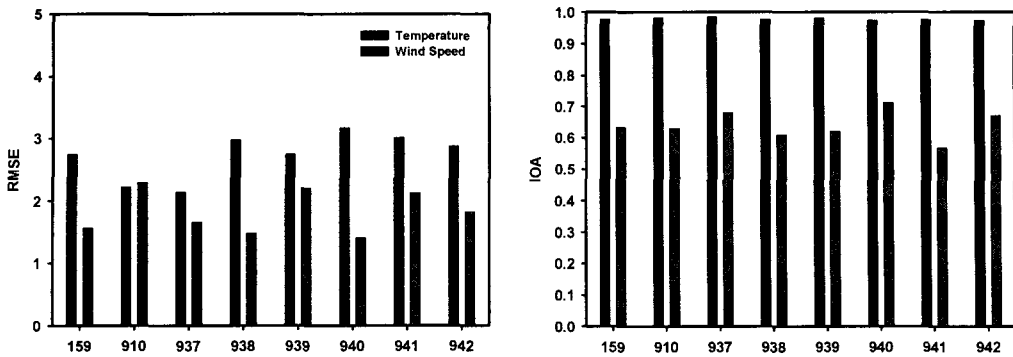


Fig. 16. RMSE and IOA using the result of 10 typical synoptic days.

Agreement)가 거의 1에 가까운 값을 보여 모델링 결과에 대한 신뢰도가 높게 나타나고 있음을 판단할 수 있다. 또한 기온의 RMSE가 2~3℃ 정도로 나타나서 좋은 결과를 보이고 있음을 볼 수 있다. 풍속의 경우에는 풍속값의 절대치가 작기 때문에 일정 규모의 오차에 의한 일치도 지수의 감소가 동반될 수 있다. 따라서 이러한 점을 감안한다면 그림에서 보는 바와 같이 0.6이상의 일치도 지수값은 비교적 좋은 결과를 나타내고 있다고 판단할 수 있으며 RMSE 또한 1.5m/s 내외로 좋은 결과를 보임을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 부산지역의 연간 기상장을 가장 잘 대표하는 날의 상세한 기상정보를 도출하기 위해 우선 부산지역의 계절별(봄철, 장마철, 한여름철, 가을철, 겨울철) 대표일을 각각 2일씩 총 10일 선정하였다. 이를 위해 본 연구에서는 최근 5년간(2000년 1월 1일 ~ 2004년 12월 31일)인 1,727일 각 날의 종관장 군집분석을 수행하였다. 분석결과 선정된 각 계절별 대표일은 해당 계절별로 가장 발생빈도가 높았던 종관상황 군집에 해당되는 날이며 해당 군집 내에서도 가장 중심에 있는 날을 선정한 것이므로 결국, 각 계절을 가장 잘 대표하는 가장 일반적이고 전형적인 날이라 할 수 있다.

이렇게 선정된 총 10일의 계절별 대표일을 대상으로 부산지역 전반을 공간적으로 1km²의 상세한 격자로 할당하여 수치모의를 수행하였다. 수치모의를 수행한 결과, 수치모의된 기온과 풍속자료가 관측값과 비교해 타당한 것을 알 수 있었다. 지점별 기온과 풍속의 변화 경향과 일변화 과정을 비교적 잘 수치모의 하였고 통계적 분석 결과에서도 결과의 타당성을 확인 할 수 있었다.

따라서 본 연구에서 계절별 대표일을 대상으로

수치모의한 지점별 풍속의 강도와 변화경향이 전반적으로 관측값과 유사하게 분석된 점은 수치모의된 격자별 바람정보를 활용하여 분석할 바람권역의 상세분류에서 신뢰할만한 결과를 제공할 수 있을 것이라는 의미를 가진다고 할 수 있다. 즉, 공간적으로 해상도가 낮아서 부산지역일대의 기상정보를 정확하게 파악할 수 없었던 문제점은 RAMS 수치모델을 통해 생산되는 시, 공간적으로 상세한 기상요소별 정보 제공으로 많은 부분 해소될 수 있다.

이와 같은 측면에서, RAMS 수치모델을 통해 생산된 부산지역 일대의 공간적으로 상세한 격자별 기상정보는 차후 수행될 부산 각 지역의 상세 군집 분석에 중요한 기초 입력자료로 활용이 될 것이고, 여기서 수행된 비교분석을 통해 얻은 입력자료의 정확도에 대한 객관적 타당성은 상세 군집 분석 결과의 신뢰성을 더욱 높여줄 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 1) Eder, B. K., 1989, A principal component analysis of SO₄²⁻ precipitation concentrations over the eastern United States, *Atmospheric Environment*, 23, 2739-2750.
- 2) Eder, B. K., J. M. Davis and P. Bloomfield, 1993, A characterization of the spatiotemporal variability of non-urban ozone concentrations over the eastern United States, *Atmospheric Environment*, 27A, 2645-2668.
- 3) Statheropoulos, M., N. Vassiliadis and A. Pappa, 1998, Principal component and canonical correlation analysis for examining air pollution and meteorological data, *Atmospheric Environment*, 32, 1087-1095.
- 4) 이화운, 정우식, 임현호, 이귀옥, 최현정, 지효은, 이현주, 성경희, 도우근, 2006, 바람권역 구분을

통한 부산지역 국지바람 분석 - Part I : 기상관측 자료를 이용한 바람권역 대분류 -, 한국환경과학회지, 15(9), 835-840.

- 5) Davis, R. E. and L. S. Kalkstein, 1990, Development of an automated spatial synoptic climatological classification. *International Journal of Climatology*, 10, 769-794.
- 6) Walko, R. L., C. J. Tremback, R. A. Pielke and W. R. Cotton, 1995, An interactive nesting algorithm for stretched grids and variable nesting ratios, *Journal of Applied Meteorology*, 34, 994-999.
- 7) Mesinger, F. and A. Arakawa, 1976, Numerical methods used in atmospheric models, GARP Publication Series, No. 14, WMO/ICSI Joint Organizing Committee, 64pp.
- 8) Clark, T. L., 1977, A small-scale dynamic model using a terrain-following coordinate transformation. *Journal of Computational Physics*, 24, 186-215.
- 9) Tripoli, G. J. and W. R. Cotton, 1980, A Numerical Investigation of several factors contributing to the observed variable intensity of deep convection over South Florida, *Journal of Applied Meteorology*, 19, 1037-1063.
- 10) Cai, X. M. and D. G. Steyn, 2000, Modelling study of sea breezes in a complex coastal environment, *Atmospheric Environment*, 34, 2873-2885.
- 11) 이화운, 정우식, 김현구, 이순환, 2004, 대기오염 확산 해석을 위한 포항지역 기상장 연구 - 바람장 수치모의 -, 한국대기환경학회지, 20, 1-15.
- 12) 정우식, 이화운, 김현구, 2003, 포항지역의 겨울철 남서계열 탁월풍 현상에 관한 분석 및 수치모의, 한국지구과학회지, 24, 533-548.
- 13) 김영성, 오현선, 2000, 여수지역 대기확산의 수치 모사 - I. 지형의 영향-, 한국대기환경학회지, 16, 211-223.
- 14) Mahrer, Y. and R. A. Pielke, 1977, The effect of topography on sea and land breeze in a two-dimensional numerical model, *Mon. Wea. Rev.*, 105, 1151-1162.