

복잡한 해안지역의 지역특성을 고려한 대기 유동장에 따른 SO₂의 확산장 수치모의

이 화 운 · 원 혜 영 · 최 현 정 · 이 강 열 · 김 현 구*
부산대학교 대기과학과, *포항산업과학연구원
(2004년 12월 31일 접수; 2005년 3월 15일 채택)

Numerical Simulation of Dispersion Fields of SO₂ according to Atmospheric Flow Field to Reflect local characteristics in Complex Coastal Regions

Hwa Woon Lee, Hye Young Won, Hyun-Jung Choi,
Kang-Yeol Lee and Hyun-Goo Kim*

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

*Research Institute of Industrial Science & Technology, Pohang 790-330, Korea

(Manuscript received 31 December, 2004; accepted 15 March, 2005)

Recently air quality modeling studies for industrial complex and large cities located in the coastal regions have been carried out. Especially, the representation of atmospheric flow fields within a model domain is very important, because an adequate air quality simulation requires an accurate portrayal of the realistic three-dimensional wind fields. Therefore this study investigated effect of using high resolution terrain height data and FDDA with observational data to reflect local characteristics in numerical simulation. So the experiments were designed according to FDDA and the detail terrain height with 3sec resolution or not. Case 30s was the experiment using the terrain height data of USGS without FDDA and Case 3s was the experiment using the detail terrain height data of Ministry of Environment without FDDA and Case 3sF was experiment using the detail terrain height data of Ministry of Environment with FDDA. The results of experiments were more remarkable. In Case 3s and Case 3sF, temperature indicated similar tendency comparing to observational data predicting maximum temperature during the daytime and wind speed made weakly for difference of terrain height. Also Case 3sF had more adequate tendency than Case 3s at dawn.

Key Words : MM5/CALPUFF, High resolution terrain height data, FDDA, Complex coastal regions

1. 서 론

대기 오염은 배출된 오염물질들의 난류 확산 및 수송, 화학 반응, 침적 현상등에 의해 결정되므로 이들을 지배하는 기상인자들에 대한 정확한 이해는 대기오염현상을 파악하고 이에 대한 오염 규제 대책을 세우기 위한 필수 요소라고 할 수 있다¹⁻³⁾. 특히 삼면이 바다로 둘러싸여 있어 해안을 끼고 위치

한 공단과 대도시 지역을 중심으로 산업화 및 도시화 과정에서 생겨난 많은 인위적인 배출원으로 인해 대기오염의 심각성이 나타나게 되었다. 배출된 오염물질은 난류확산이나 수송등과 관련하여 기상인자들에 의해 영향을 받으므로 이화운 등⁴⁾은 지형에 의한 해풍과 곡풍의 영향으로 수렴대가 형성되어 오염물질의 내륙으로의 이동함을 보였고, 장은숙 등⁵⁾은 대기오염 물질의 농도가 해륙풍의 출현일과 밀접한 관계가 있음을 보였다. 또한 이상득⁶⁾ 국지풍 순환모델을 통해 대기오염물질의 수치모의 하였다. 이 외에도 환경보전과 더불어 쾌적한 삶의 영위라는 목표아래 수치모델을 적용하여 오염물질의 시·

Corresponding Author : Hye Young Won, Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

Phone: +82-51-583-2651

E-mail: comet909@hanmail.net

공간적 분포를 예측하고자 많은 연구가 시행되고 있다. 복잡지형에서의 대기오염의 수치모의에 대한 국외연구로서 Kondo and Gambo⁷⁾는 혼합고의 발달 여부와 관련하여 해륙풍의 강도에 따른 대기오염물질의 확산에 관한 연구를 수행한 바 있으며, 또한 대상 지역의 지형 및 지리적 특성에 따른 대기오염에 관한 연구도 이루어진 바 있다^{8~12)}. Jacobson¹³⁾는 Los Angeles 지역을 대상으로 지표 경계자료로 주어지는 토양 수분량(soil moisture)의 초기값에 따른 기상장(기온과 바람)과 오염물질의 농도 분포에 대하여 수치모의를 하였고, Jazcilevich *et al.*¹⁴⁾은 Mexico city에 위치한 Texcoco 호수의 Land use의 변화에 따른 기상요소의 변화와 오염물질의 농도 변화에 대해 수치모의를 함으로써, 모델 내에 입력되어지는 지형 및 지표 특성에 따라 대기 유동장은 물론이고 그 지역의 대기 오염물질의 시·공간적 분포를 살펴보는 대기질 모델링에도 영향을 미치는 것을 보였다. 따라서 본 연구에서는 전라남도 동부 연안에 위치한 대표적인 공업 및 항구 지역인 광양만권역을 대상으로 대기질 모델링을 함에 있어 향상된 기상장이 대기 오염물질의 확산장에 미치는 영향에 대한 수치모의를 하였다. 특히 복잡한 지형에서의 좀 더 상세한 기상장 모의를 하기 위하여 연구 대상 지역 내 위치한 지상 관측 자료를 이용하여 MM5의 객관분석 과정을 통해 경계자료를 만든 후 분석완화(analysis nudging)를 통한 자료동화와 복잡한 지형을 상세히 표현하는 고해상도의 지형고도 자료를 사용하였다.

Barna and Lamb¹⁵⁾은 대기 확산 모델인 CALPUFF의 입력자료로서 자료동화와 관련하여 3개의 서로 다른 기상장을 이용하여 좀 더 실제 대기상태에 가까운 대기질 모델링을 하고자 하였으며, Chandrasekar *et al.*¹⁶⁾은 CALPUFF의 기상 입력자료로 중규모 기상모델인 MM5의 결과를 이용하는 것이 효율적임을 보였다. 따라서 본 연구에서도 앞서 언급한 방법들을 통해 산출된 대기 유동장을 입력자료로 하여 CALPUFF 대기질 모델을 통해 대표적 1차 오염물질인 SO₂의 시·공간적 확산 및 분포 특성을 수치모의 하였다.

2. 연구방법

2.1. 모델의 구성: MM5/CALPUFF Modeling System

기상장을 수치모의하기 위해 3차원 기상모델인 MM5와 대표적인 1차 오염물질인 SO₂의 시·공간적 농도분포 특성을 살펴보기 위해 대표적 대기확산 모델인 CALPUFF를 선택하여 수행하였다. MM5는 중규모 기상 모델로서 미국의 기상연구소(National

Center for Atmospheric Research)와 펜실베이니아 주립대학이 공동 개발한 후 지속적으로 개선되어 온 모델로서, 본 모델은 지형을 따르는 σ -좌표계로 쓰인 비정수(Non-hydrostatic)방정식계를 사용하며 Arakawa B 격자망으로 구성되어 있다¹⁷⁾. 본 연구에서 MM5의 계산 영역은 광양만권역을 중심으로 수평적으로 등지격자기법을 도입하여 고해상도 기상장 수치모의를 하기 위해서 대규모 영역부터 시작하여 관심 영역까지 계산을 하며 계산영역 경계에서의 feed-back을 허용하는 two-way nesting을 사용하였고, Fig. 1에는 계산영역과 격자 구성을 나타내었다. 수평격자 간격은 30, 10, 3.3, 1.1 km으로 구성하였으며 연직적으로는 33층으로 구성하였다. 적은 모수화 과정은 격자 크기가 10-30 km인 중규모에서 적합한 Grell cumulus Scheme을 사용하였다¹⁸⁾ PBL경계층에 대한 물리과정은 Hong and Pan¹⁹⁾의 해 제안된 것으로 NCEP MRF 모델에서 사용되었으며 PBL내 고해상도를 요하는 수치모의에서 적합한 MRF PBL Scheme을 사용하였다. 미세물리과정은 Reisner *et al.*²⁰⁾에서 제안한 Mixed-Phase Scheme을 사용하였는데 이는 상층의 과냉각수와 눈이 서서히 녹는 효과 등이 가미된 물리과정이다. 복사과정으로 사용한 RRTM longwave Scheme은 높은 정확도와 효과적인 방법으로 수증기, 이산화탄소, 오존 등의 상세한 흡수 스펙트럼의 효과를 나타낸다²¹⁾. 지표면 물리과정은 연직적으로 5개(1, 2, 4, 8, 16 cm)층으로 고정하여 연직 확산 방정식을 통해 계산되어지는 온도를 사용하여 연직적으로 지표면 온도의 일변화를 빠르게 모의하는 Five-Layer soil Scheme을 선택하였다²²⁾. CALMET은 3차원 진단 기상모델로서 3차원 바람 및 온도장과 2차원의 혼합고, 지표특성, 확산특성을 모사하고, CALPUFF는 Lagrangian Gaussian Puff 모델로서 굴뚝에서 연속적으로 배출되는 연기를 잘게 나누어진 연기덩어리(puff)로 배출된다고 가정하고, 이 배출된 연기덩어리가 공간적 해상도를 갖는 바람장을 따라서 이동 및 확산이 이루어질 때의 영향들을 종합적으로 고려하여 농도를 계산하는 모델이다. 배출된 연기덩어리는 바람장을 따라 이동하면서 확산이 의해 그 크기가 성장한다. 또한 complex terrain effects, over-water transport, coastal interaction effects, building downwash, wet and dry removal 등의 모듈이 포함되어 있다. CALPOST는 CALPUFF에서 계산된 결과를 바탕으로 각 receptor에서의 시간 평균된 농도값을 필요한 형태의 파일로 산출해 낸다²³⁾. 본 연구에서는 MM5 수치모의를 통하여 산출된 기상장을 전처리 과정과 CALMET을 통해 CALPUFF의 입력 기상장으로 이용되어 대기 오염 물질의 확산

복잡한 해안지역의 지역특성을 고려한 대기 유동장에 따른 SO₂의 확산장 수치모의

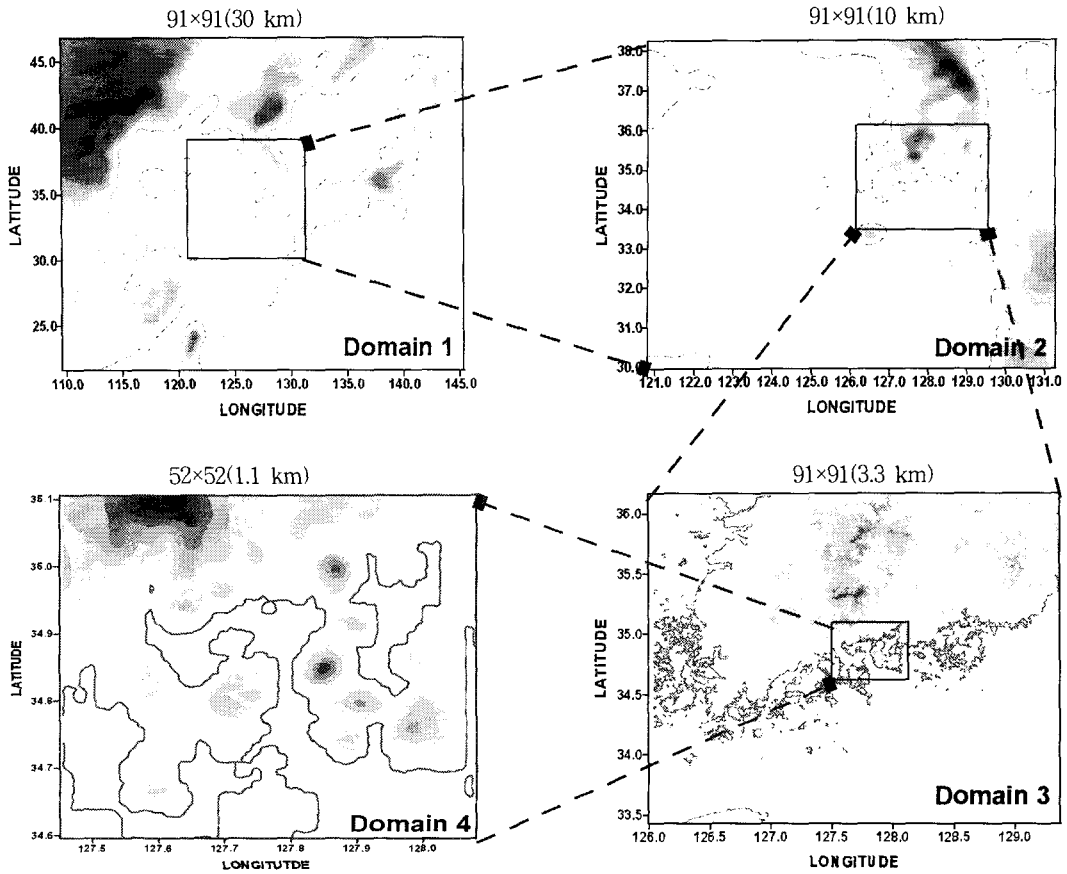


Fig. 1. The domains of calculation for MM5: Each domain includes Korea Peninsula, South Korea, South coastal region and Gwangyang Bay, clockwise.

을 계산하였다.

2.2. 자료 및 실험설계

광양만권은 소백산맥의 지맥인 ‘ㄱ’자 형태의 백운산(1,218 m)을 필두로 동서로 늘어선 일군의 산들이 구례군과 경계를 이루고 있는 남쪽으로는 급경사의 지맥으로 광양만을 향해 자연스럽게 형성되어 있다. 그래서 대상지역의 중심지점인 광양만을 둘러싸고 복잡한 해안선을 낀 “배산임해”형의 지형을 형성하고 있다. 대상지역에 위치하고 있는 관측소는 기상대 2곳과 자동무인관측소(Automatic Weather System; AWS) 12개 지점으로 모두 14지점이며 각각의 위치와 그 관측소의 지점번호를 Fig. 2(a)에 나타내었다. 이화운 외²⁴⁾에 의해 자료동화 시 자료가 갖는 대표성 때문에 14개 지상 관측소는 중에서 원거리 해안지역(해안으로부터 5 km 이상 떨어진 지역(Far coastal region)의 자료를 사용하는 것이 관측값과 유의한 결과를 보이므로, 본 연구에서는 지상관측 자료동화를 수행 시 원거리 해안지역의

자료만 이용하도록 하였다. 지상 관측 자료동화 시 사용되어지는 자료는 기상대의 관측 자료의 경우에는 기온, 기압, 이슬점 온도, 풍속, 풍향의 자료가 이용되었고, 자동 기상 관측소 자료의 경우에는 기압, 이슬점 온도를 제외한 기상요소가 이용되었다. 먼저 MM5에서 NCEP/NCAR 재분석자료를 통해 초기 추정장을 만든 후, 객관분석과정(Little_r)을 통해 3 시간 간격으로 분석장(경계장)을 만들어 이를 사용하여 수치모의 기간동안에 적분하였다. 객관분석과정은 계산영역 내의 관측값을 완화(nudging)시킴으로 모델의 초기 추정장을 향상시키는 과정이다. 또한 광양만권역을 상세히 표현하기 위해 고해상도의 지형고도자료를 이용하였다. 기본적으로 MM5내의 TERRAIN에서 제공하는 USGS(the U.S Geological Survey, 이하 USGS)의 자료 해상도가 1deg., 30min., 10min., 5min., 2min., 30sec.여서 상세한 지형을 표현하기에 부족함이 있으므로, 광양만권역의 복잡한 지형을 모델 내에서 표현하기 위해 환경부

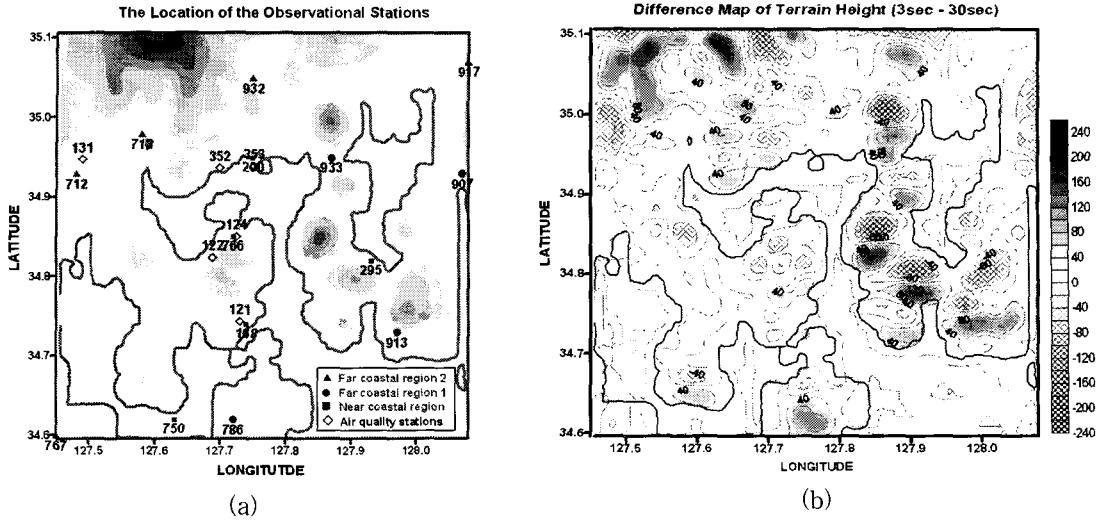


Fig. 2. (a)The location of the surface observational stations in Gwangyang area and (b)the difference map of terrain height between 3sec and 30sec in domain 4. The positive values mean terrain height of 3sec is higher than that of 30sec and solid line means terrain height is zero for 30sec.

에서 제공하는 3sec 지형고도 자료(이하 ME 3sec)를 이용하여 MM5내의 TERRAIN에서 수평적으로 지형 및 지표자료가 보간되어 질 때 상세한 지형경계 자료를 사용하게 하였다. ME 3sec 자료는 표고 수치모델의 결과로 얻어지는 것으로 USGS와 동일한 DEM파일 형식이며, 위·경도 1°에 대하여 3sec 간격으로 1200개의 자료가 포함되어 있어 USGS 30sec보다 해상도가 높아 복잡한 지역의 상세한 표현이 가능하다. 이를 토대로 Table. 1과 같이 3가지 실험을 정하였다. 관측값의 자료동화와 상세 지형고도 자료의 이용에 따라 Case 30s는 자료동화의 과정없이 USGS에서 제공하는 MM5내의 USGS 30sec 지형고도 자료를 이용한 경우이고, Case 3s는 자료동화의 과정없이 환경부에서 제공하는 ME 3sec 지형고도 자료를 이용하여 수치모델을 한 경우이고, 마지막으로 Case 3sF는 원거리 해안지역의 관측값을 이용하여 자료동화를 수행할 뿐 아니라 ME 3sec의 상세한 지형고도자료를 이용한 실험이다. Fig. 2(b)는 USGS 30sec과 ME 3sec의 지형고도차이를 나타낸 것이다. 최대 220 m, 최소 -225 m

정도의 차이를 보이고 있는 가운데 좌측 상단에 위치한 백운산의 높이가 상승하였으며 ‘ㄱ’ 자형의 지형도 자세히 표현이 되고 있다. 또한 남해도를 비롯한 대상영역 내의 크고 작은 봉우리들이 있는데 이들의 지형고도는 높아지고 봉우리 간의 골(valley)의 지형고도는 낮아져 복잡한 지형을 잘 표현함으로써 이에 따른 기온장과 바람장에 지형의 효과가 나타날 것으로 사료된다.

수치모델을 하기위한 사례일은 2002년 6월 3일부터 6일까지 총 72시간이며 Fig. 3에 수치모델의 기간 중 0900 LST에서의 지상 일기도를 나타내었다. 이날은 한반도 및 동해상에 걸쳐 고기압의 영향 하에 대체로 맑은 날씨인 가운데 약한 기압경도로 종관장의 영향이 적은 날이었다. 광양만권역을 대상으로 SO₂의 확산예측에 사용된 배출량은 순천대학교 전남환경종합센터에서 광양만권 대기환경규제지역 지정에 따른 실천계획 수립(2002)이라는 과제수행 시 산출된 자료로 Fig. 4에 나타내었다. 점오염원과 면오염원으로서 광양만에 위치한 산단과 여천공단 및 제철소 등지에서 점오염원의 배출이 많으며, 면오염

Table 1. The experimental designs

Experiment	Objective Analysis	Terrain Height Data	Air Quality Modeling
Case 30s	-	USGS 30sec	AQ
Case 3s	-	ME 3sec	AQ
Case 3sF	Far coastal regions (5 stations)	ME 3sec	AQ

AQ: The case performed air quality modeling

ME 3sec: Terrain height data gridded 3 sec of Ministry of Environment

복잡한 해안지역의 지역특성을 고려한 대기 유동장에 따른 SO₂의 확산장 수치모의

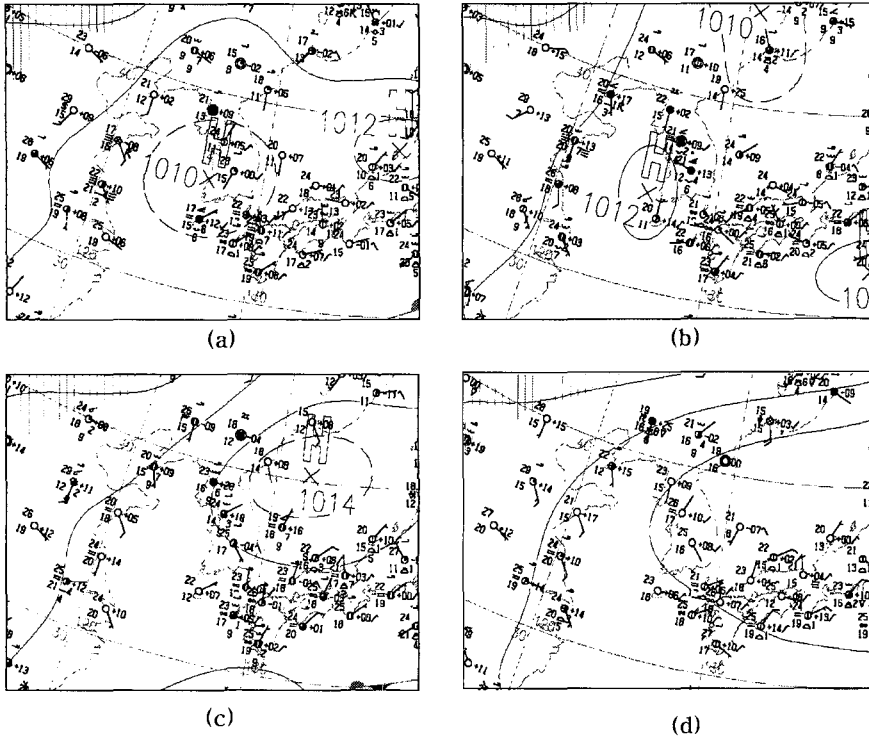


Fig. 3. Surface weather maps at (a)0900 LST on 3 June, (b)0900 LST on 4 June, (c)0900 LST on 5 June and (d)0900 LST on 6 June 2002.

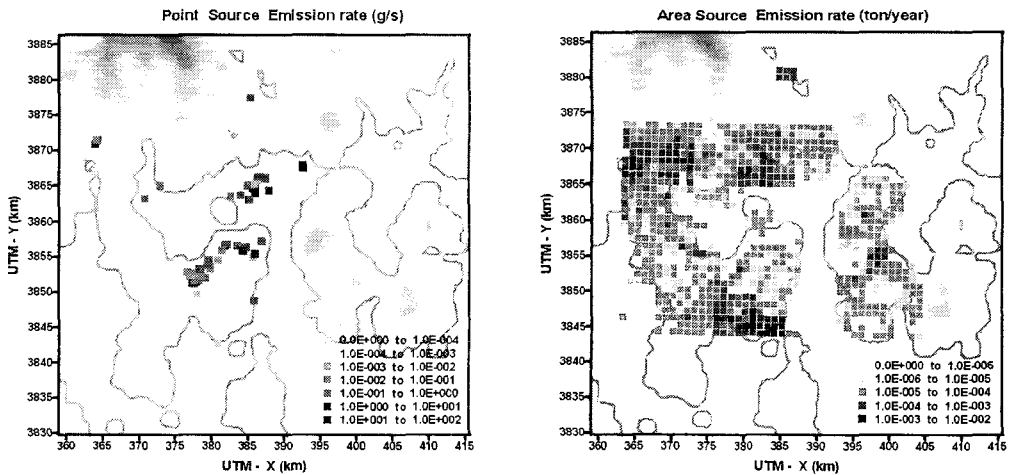


Fig. 4. Horizontal distributions of area emission and point emission for SO₂ in air quality modeling domain.

원의 경우 여수를 비롯한 순천, 광양, 하동 일대에서 상대적으로 배출이 많은 모습이다.

3. 수치모의 결과

3.1. 기온장과 바람장 및 관측값과의 비교

각 실험에 대하여 2002년 6월 4일 1500 LST와 6월 5일 0600 LST에서의 기온장과 바람장을 Fig. 5

와 Fig. 6에 나타내었고 기온에 대하여는 Case 30s와의 차이도 함께 나타내었다. 백운산과 여러 봉우리에서 높아진 지형고도에 의해 일최고기온이 최대 29.8°C를 보이고 있으며 급격한 지형고도의 변화가 있는 해안선을 따라 5.0°C 정도의 강한 기온 경도를 보이고 있다. 백운산 일대의 높아진 지형고도로 인해 일최고기온이 나타나는 1500 LST에서 2.5°C이

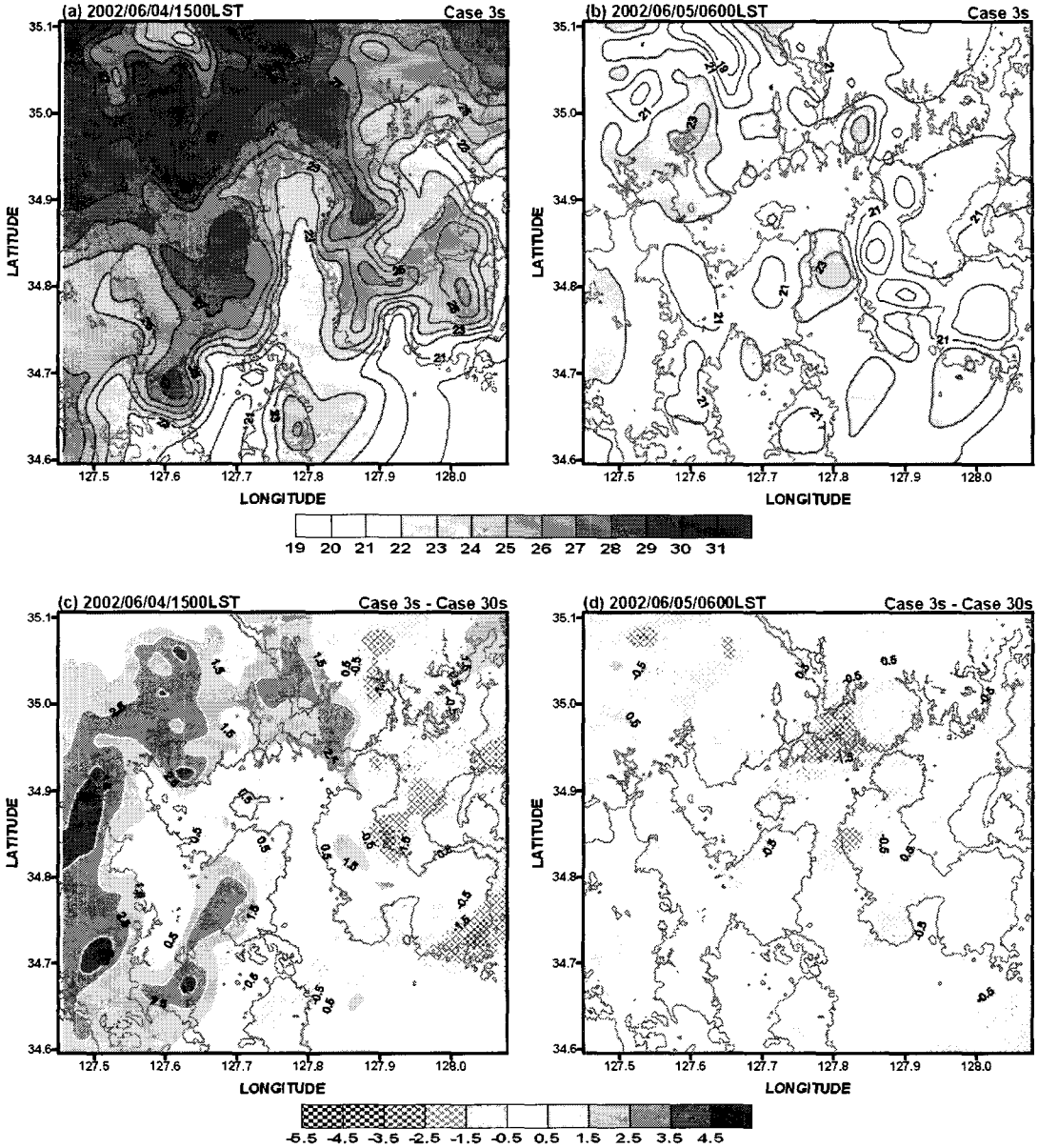


Fig. 5. The horizontal air temperature fields for Case 3s at (a)1500 LST on 4 June and at (b)0600 LST on 5 June and the difference between air temperature fields ((c) and (d)) at the same time.

상의 기온이 상승하였으며 남해도를 비롯한 높고 낮은 봉우리의 정상에서도 대체로 1.5-3.5°C의 기온 상승을 보였다. 지형고도가 낮은 골(valley)을 따라서는 0.5-1.5°C 정도의 기온하강이 보이고 있다. 반대로 일최저기온이 나타나는 0600 LST에서는 높은 봉우리를 따라 19.0°C의 저온역이 분포하고 있는 가운데 지형고도의 변화가 가장 큰 백운산에서는 17.6°C를 보이고 있으며 지형고도가 높아진 곳에서는 0.5°C의 기온하강, 지형고도가 낮은 곳에서는 0.5

°C정도의 기온상승이 나타났다.

바람장의 경우 Fig. 5와 마찬가지로 Case 30s에 대하여 (a)4일 1500 LST, (b)5일 0600 LST와 Case 3s에 대하여 (c)4일 1500 LST, (d)5일 0600 LST를 Fig. 6에 나타내고 있다. Fig. 6(a) 4일 1500 LST에는 전반적으로 남풍계열의 해풍이 광양만으로 불어 들어가고 있는 모습이다. 높고 낮은 산과 봉우리들로 인해 지형적인 골(valley)이 생긴 곳에 그 골을 따라 바람이 불어 들어가면서 풍속이 강해지는 곳

복잡한 해안지역의 지역특성을 고려한 대기 유동장에 따른 SO₂의 확산장 수치모의

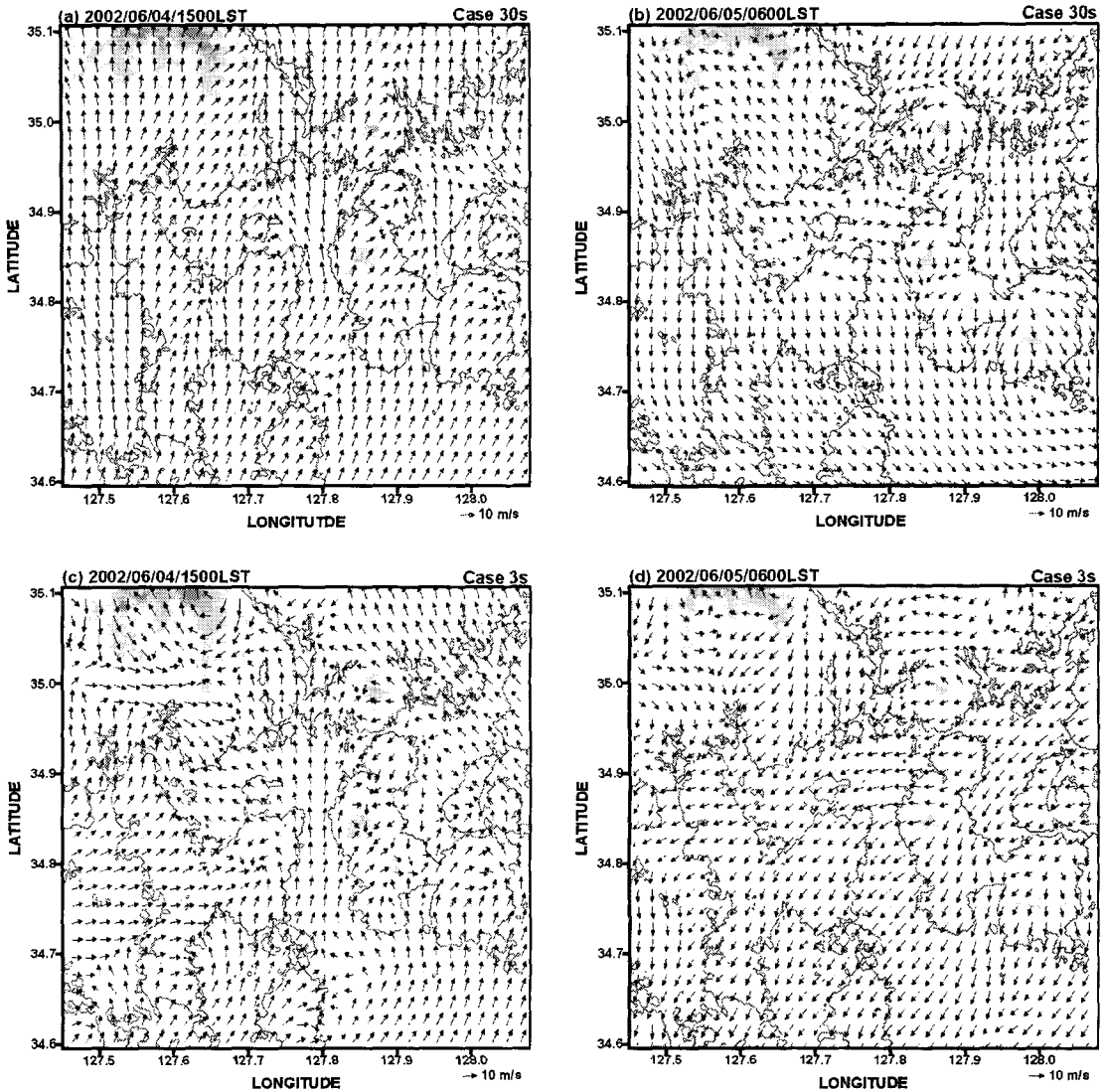


Fig. 6. The horizontal wind fields for Case 30s at (a)1500 LST on 4 June and (b)0600 LST on 5 June and for Case 3s at the same time((c) and (d)).

이 많으며 최대 7.5 m/s 풍속을 기록하고 있다. 특히 여수반도와 남해도 사이의 강한 기온의 경도와 더불어 지형적으로 생긴 골(valley)을 통해 강한 바람이 동광양시까지 불어 들어가는 것을 볼 수 있다. 또한 여수반도와 남해도, 돌산도의 해안선을 따라 높은 기온 경도로 인해 내륙으로 강하게 바람이 불어 들어가는 것을 볼 수 있다. Fig. 6(b) 5일 0600 LST에는 해풍이 부는 Fig. 6(a)와 반대로 전반적으로 약한 기온 경도로 인해 풍속이 약해졌으며 북풍계열의 육풍이 우세하게 나타나고 있으며, 광양시 부근에서는 기온경도가 약해 북풍계열로 일관하기 보다는 남동풍 및 남서풍으로 불어 들어가다 동광

양시 북서쪽에 위치한 'ㄱ'자형 백운산의 지형적인 효과로 순천시 부근의 불어나오는 북서풍계열의 육풍과 함께 돌아 나오고 있다. Fig. 6(c)에서는 해륙간의 비열차이로 기온 경도가 가장 큰 1500 LST로 남풍계열의 해풍이 불어 들어가는 가운데 Fig. 6(a)의 Case 30s에서는 크고 작은 봉우리들을 넘어갔던 해풍이 Case 3s에서는 높아진 지형고도와 이에 따른 강한 기온 경도로 바람의 수렴이 백운산을 비롯한 망운산, 금산 등지에서 나타나고 있다. 새벽녘인 Fig. 6(d) 0600 LST에서는 북풍 및 동풍계열의 육풍이 불어 나오고 있는 가운데 높은 봉우리를 넘지 못하고 골(valley)을 따라 돌아 나오며 특히 'ㄱ'자의

백운산을 돌아 나오면서 순천시와 광양시의 경계부근에서 바람이 수렴되는 모습을 볼 수 있다.

각 실험에 대하여 관측값과의 비교를 Case 30s, Case 3s, Case 3sF에 대하여 온도, 풍속의 시계열을 Fig. 7에 나타내되 각 관측소에 대하여 ME 3sec 자료의 이용할 때 지형고도의 변화를 살펴 본 후, 지형고도가 높아진 관측소와 낮아진 관측소 중에서 대표적인 한 관측소만 나타내었다. 지형고도의 변화는 장천(712)의 경우 21 m 정도 높아졌고, 사천(917)의 경우는 18 m 정도 낮아졌다. 먼저 기온에 대해 살펴보면, 전반적으로 일변화경향을 잘 모의하고 있는 가운데 장천(712)지점에서는 Case 3s와 Case 3sF 경우 높아진 지형고도로 인해 1200 LST-1500 LST에서 Case 30s에 비해 최대 3.0°C 정도의 차이를 보이면서 일최고기온을 따르고 있으며 더욱이 Case 3sF는 원거리 해안지역 2의 관측자료의 영향으로 야간의 기온을 더 잘 표현하고 있다. 사천(917)지점의 경우 또한 Case 3s와 Case 3sF가 낮 동안의 일최고기온을 Case 30s 보다 잘 표현하고 있는 가운데 특히, 다른 지점에 비해 일최저기온을 잘 모의하고 있으며 Case 3sF에서는 관측값의 영향으로 야간의 기온을 다른 실험에서보다 더 잘 표현하고 있다.

풍속은 Case 30s의 경우 모델 내에서 과대평가하고 있는 반면 Case 3s와 Case 3sF에서는 전체적으로 풍속이 약해진 모습을 보이고 있는 가운데 장천(712) 지점에서는 Case 30s에서 관측값과 최대 7.0 m/s의 차이를 보이고 있으며 이보다는 Case 3s와 Case 3sF가 관측값을 더 유사하게 표현하고 있다. 사천(917) 지점에서는 2.0 m/s 정도의 과대평가하고 있으나 Case 3s와 Case 3sF에서 풍속의 일변화 경향을 잘 모의하고 있는 반면 Case 30s에서는 최대 6.0 m/s의 차이를 나타내고 있다.

3.2. SO₂의 확산장 및 관측값과의 비교

설계된 3개의 실험에 따른 대기질 모델인 CALPUFF의 입력자료로 이용하여 산출된 SO₂의 수평 농도장을 수평 바람장과 함께 Fig. 8에 나타내었다. 2002년 6월 4일 1500 LST에서의 확산장의 모습으로 Fig. 8(a)를 보면 전체적으로 남풍계열의 해풍이 광양만으로 불어 들어가는 가운데 여수반도를 가운데로 두고 좌우로 돌아서 불어 들어가던 바람이 묘도 부근에서 기류의 수렴이 나타나면서 다소 정체된 'U'자형의 확산장이 나타나며 태인동 부근에서는 강한 남풍을 따라 북쪽 방향으로 멀리 확산되는 모습을

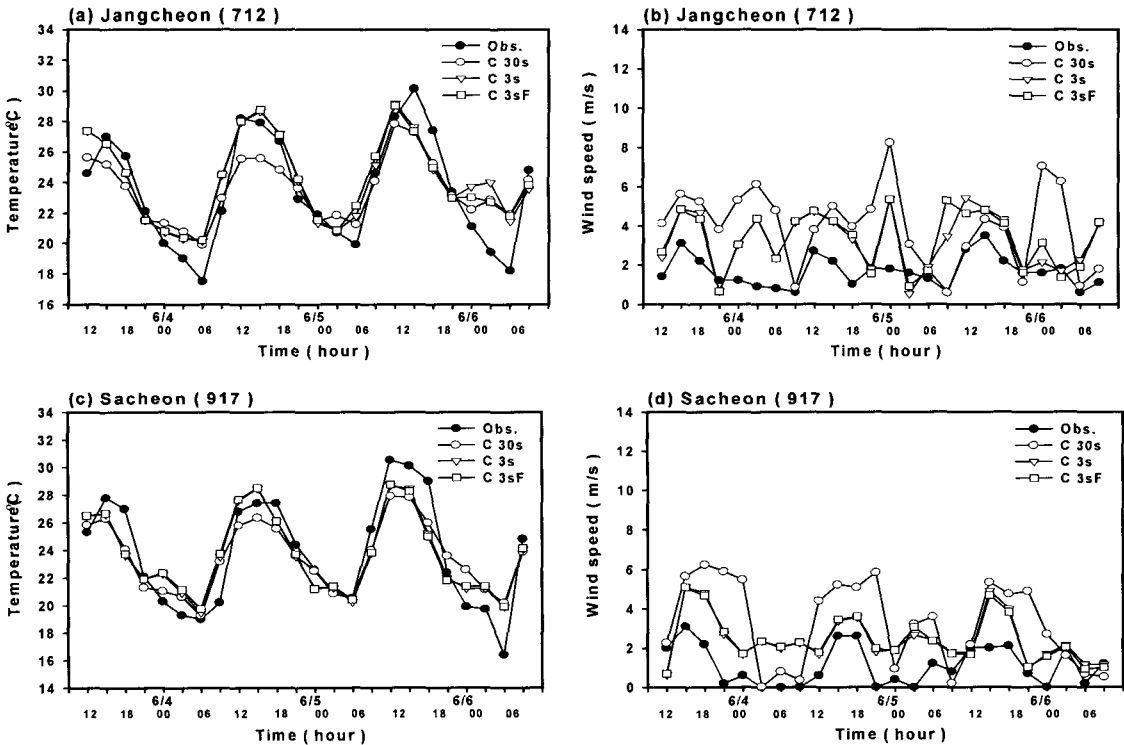


Fig. 7. Time series of temperature((a), (c)) and wind speed((b), (d)) for the surface station at Jangcheon and Sacheon as the results of experiments.

복잡한 해안지역의 지역특성을 고려한 대기 유동장에 따른 SO₂의 확산장 수치모의

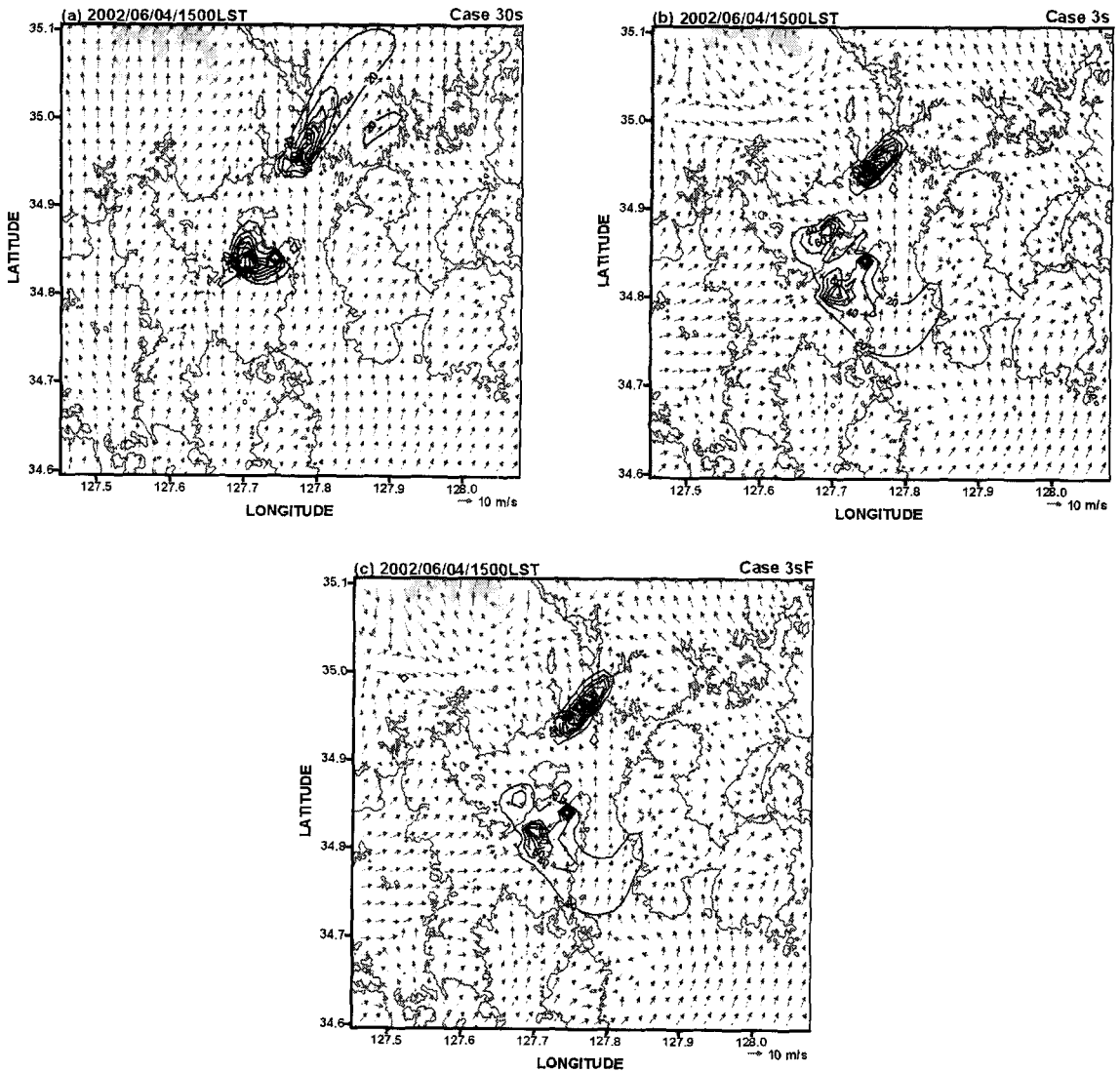


Fig. 8. The horizontal SO₂ dispersion fields at 0600 LST on 5 June for (a)Case 30s, (b)Case 3s and (c)Case 3sF. The contour lines represent SO₂ concentration and vector maps do wind fields.

보인다. 이에 반해 Fig. 8(b)-(c)경우에는 해풍이 불어 들어가면서 높아진 봉우리 주위로 바람의 수렴이 일어나 농도의 정체가 보이며 태인동 부근에서는 전체적으로 약해진 풍속에 의해 Case 30s와 같이 멀리 확산되지 못하고 정체된 모습을 보인다. 한편 원거리 해안지역 2의 남동풍계열의 해풍의 영향으로 Case 3sF는 묘도 부근의 확산정도가 Case 3s보다 크게 나타난다. Fig. 9는 중동과 태인동에서 SO₂농도에 대한 일변화를 나타내었다. 두 지점 모두 일변화 경향을 잘 나타내는 가운데 Case 3s와 Case 3sF가 Case 30s보다는 일변화경향이나 농도의 양적 측면에서 잘 표현하고 있으며 일최고농도

가 나타나는 시각도 일치하고 있다. 하지만 Case 3s와 Case 3sF는 1800 LST를 기점으로 또다시 농도가 향상되고 있는데 이는 Case 30s보다 상대적으로 약한 풍속의 바람에 의해 확산정도가 약해 그 지점에서의 농도의 상승이 보이는 것으로 사료된다. 전체적으로 Case 3sF의 경우에 SO₂농도 일변화를 관측값과 유사하게 잘 표현한다.

4. 통계적 분석

설계된 실험의 결과들을 통계적 분석 및 평가를 하기 위해 Willmott²⁶⁾에서 보였듯이 각 관측소 지점별로 관측값과의 오차(error)정도나 일치도 및 상관

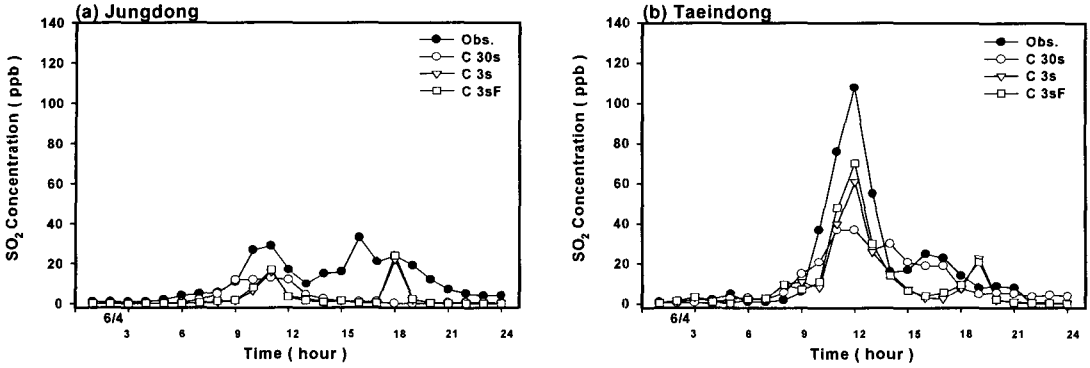


Fig. 9. Time series of SO₂ concentration for the air quality stations at (a) Jungdong and (b) Taeindong as the results of experiments.

정도를 살펴보았다.

Fig. 10에서 기온과 풍속에 대해 RMSE, IOA, R의 통계지수를 살펴보면 Case 30s에 비해 Case 3s와 Case 3sF에서 크게 향상되었음을 볼 수 있다. 일최고기온이 2.0-3.0°C 정도 높아지면서 기온의 RMSE가 0.5°C 줄었으며, 풍속에 있어서도 높아진 지형으로 인해 풍속이 줄어들어 RMSE가 0.5 m/s 작게 나타났다. Case 3sF는 이화운 외²¹⁾의 결과처럼 원거리 해안지역의 자료에 의해 야간의 기온을 1.0°C 정도 하강시킴으로 인해 Case 3s보다 좀더 향상된 결과를 보였다. CALPUFF 대기질 모델에 입력되는 기상장에 따른 SO₂농도에 대하여 통계적 분석 및 검증은 위해 Regression(이하 R)과 Unpaired Peak Prediction Accuracy(이하 UPA)를 이용하였다. UPA는 EPA(U.S Environmental Protection Agency)에서 권장하는 모델의 평가 통계식으로 농도의 최고값이 나타날 때의 모델의 정확도를 나타내며, 작은 값일수록 정확도가 큼을 나타낸다. 앞서 SO₂농도의 일변화에서 보였듯이 각 관측소별 일최고농도가 나타날 때 그 값을 구해보았다. Fig. 11에는 실험별 R과 UPA를 대표적으로 태인동, 중동 지점과 모든 대기질 관측소 지점의 평균된 값을 각각 나타내었다. 기상장 수치모의 결과에서도 보았듯이, Case 30s은 Case 3s와 Case 3sF와 큰 차이를 보이며 낮은 상관정도를 가지며 Case 3sF에서 상관정도가 0.9이상으로 큰 값을 나타냈다. 이는 UPA에서도 같은 결과를 보이는데 Case 3sF에서 UPA값이 가장 작으며 Case 30s과의 차이 또한 크기는 40 ppb 정도로 나타났다. Fig. 11(c)에서는 각 실험에 대한 향상정도를 살펴보기 위해 Case 30s와 각 실험별 향상정도를 백분율(%)로 나타내었다. 상세한 지형고도자료를 이용하며 또한 원거리 해안지역의 자료를 이용한 Case 3sF에서 30%정도의 향상을 보인다.

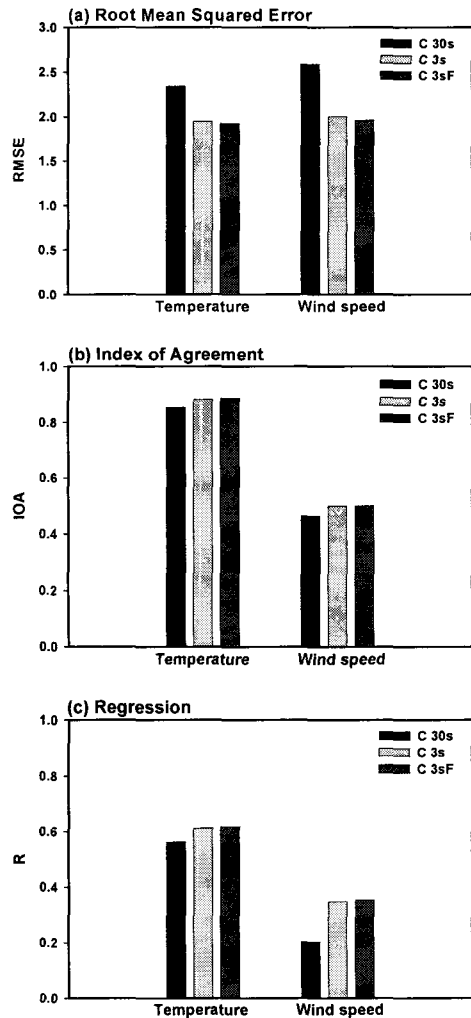


Fig. 10. Meteorological factors statistics calculated for experiment in terms of (a)RMSE, (b)Index of Agreement and (c)Regression.

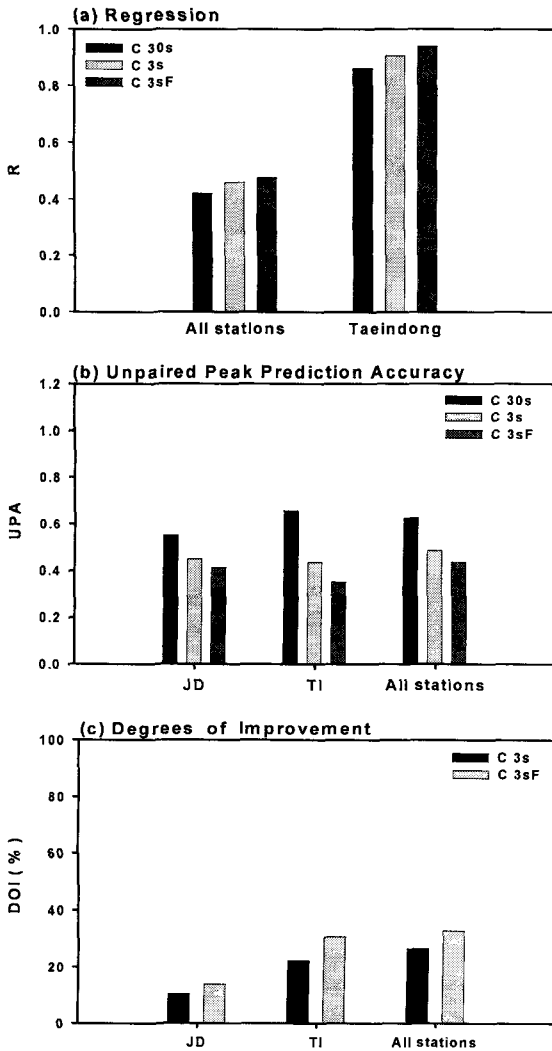


Fig. 11. SO₂ concentration statistics calculated for experiment in terms of (a) Regression and (b) Unpaired Peak Prediction Accuracy and (c) Degrees of Improvement.

5. 결과 및 고찰

SO₂의 시·공간적 분포를 예측함에 있어 대상영역의 복잡한 지형 특성을 고려한 대기 유동장 및 확산장을 수치모의하기 위해 자료의 대표성이 검증된 원거리 해안지역의 관측값을 이용한 자료동화와 고해상도의 3sec 지형고도자료의 이용에 따른 3개의 실험을 설계하였으며, 기상장은 중규모 기상모델인 MM5를 이용하여 수치모의를 하였고, 대표적 1차 오염물질인 SO₂의 확산분포 및 농도를 살펴보기 위해 각 실험별로 얻어지는 기상장을 대기질 모델인 CALPUFF의 입력자료로 이용하여 수치모의 하였다.

연구 대상영역인 광양만권역 내에서는 USGS 30

sec와 ME 3sec 사이에는 최고 200 m, 최저 -225 m 정도의 지형고도의 차이를 보였다. 특히, 높고 낮은 봉우리와 산들이 많은 복잡한 해안지역을 가진 광양만권역은 높은 산은 더 높게, 봉우리 사이의 골(valley)과 해안선은 낮고 넓게 표현되어 지형고도가 급변화를 하거나 경사가 급한 지역들이 해안을 따라 표현되었다.

이러한 지형의 차이로 인한 영향들이 기상장에 나타났는데, Case 3s와 Case 3sF에서 변화된 지형고도로 인해 기온의 일변화가 다양하게 나타났으며, 특히 일최고기온이 나타나는 1500 LST에서 Case 30s보다 최대 4.0°C 정도의 차이가 보이면서 관측값과 유사한 경향을 나타내었다. 또한, 산은 높아지고 골은 깊어져서 해안선을 따라 생긴 급격한 지형고도의 변화로 인해 기온경도가 Case 30s보다 강하게 나타났다. 바람의 경우에도 Case 30s에서 지형을 넘어 불어 들어가고 나왔던 기류들이 높아진 지형으로 인해 우회하거나 또는 수렴하는 현상들이 나타났고 또한 골을 따라 불어 들어가고 나가는 기류들이 상세히 표현되었다. 한편 Case 3s와 Case 3sF의 비교에서는 일최저기온이 나타나는 새벽녘의 기온을 잘 모의하며 상대적으로 자료의 대표성이 큰 원거리 해안지역의 자료를 이용했던 Case 3sF가 Case 3s보다 관측값과 유사한 경향을 표현하는 데 조금 더 뛰어났으며 SO₂의 일변화와 통계지수에서도 Case 3s가 20%정도, Case 3sF에서는 30% 이상의 향상을 보였다. 한편 Case 30s와 Case 3s, Case 3sF와의 뚜렷한 차이에 비해 Case 3s와 Case 3sF와의 차이는 크게 나타나지 않는데 이는 관측자료의 양적인 면에서 부족한 것과 더불어 복잡한 지형에서 관측값의 대표성을 확보하기 위해 초기 추정장에 관측값의 완화(nudging)시 영향반경의 정도의 차이 때문이다. 그래서 향후 관측자료의 양적인 면과 영향반경에 따른 대기 유동장의 민감도를 살펴봄으로서 적정의 양과 반경의 결정과 관련된 연구가 필요할 것이다. 이상의 결과에서 지역적 대표성이 고려된 자료동화와 상세지형자료의 이용으로 복잡지역인 광양만권역의 지역특성을 상세히 표현함으로써, 실제 대기에 가까운 기상장을 상세히 표현할 수 있었고 이를 대기질 모델의 입력자료로 이용하였을 때 오염물질인 SO₂의 확산예측에 있어서도 모델의 해석 능력에 유의한 결과를 보였다. 이러한 연구 결과가 향후 해안에 위치한 대도시와 공단지역의 기상장 수치모델링을 통해 국지적 효과가 반영된 기상정보를 제공함으로써 대기환경 유해물질에 확산 예측 및 장기적 대기환경 대책마련에 긍정적인 기여를 할 것이라 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) Lalas, D. P., V. R. Veirs, G. Karras and G. Kallos, 1982, An analysis of the SO₂ concentration levels in Athens Greece, *Atmospheric Environment*, 16(3), 531-544.
- 2) McKendry, I. G., 1993, Ground-level ozone in Montreal, Canada, *Atmospheric Environment*, 27B(1), 93-103.
- 3) Liu, S. C., M. Trainer, F. C. Fehsenfeld, D. D. Parrish, E. J. Williams, D. W. Fahey, G. Huber and P. C. Murphy, 1987, zone production in the rural troposphere and implications for regional ozone distributions, *Journal of Geophysical Research*, 92, 4191-4207.
- 4) 이화운, 김유근, 원경미, 오은주, 1997, 연안도시 지역의 대기유동장에서 대기오염물질의 확산과 이동에 관한 수치모의, *한국환경과학회지*, 6(5), 437-439.
- 5) 장은숙, 이화운, 1997, 부산지역에서의 대기흐름과 관련된 SO₂농도 3차원 수치모의, *한국환경과학회지*, 6(4), 359-367.
- 6) 이상득, 2003, 국지풍순환 모델을 이용한 광양만권 대기오염물질의 수치모델링, *한국대기환경과학회지*, 19(1), 13-23.
- 7) Kondo, H. and K. Gambo, 1979, The effect of the mixing layer on the sea breeze circulation and the diffusion of pollutants associated with land-sea breeze, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 57(6), 560-575.
- 8) 김영성, 오현선, 2000, 여수지역 대기확산의 수치모사 - I. 지형의 영향, *한국대기환경과학지*, 6(3), 211-223.
- 9) 류찬수, 신유미, 이순환, 2004, 해안지형 복잡성이 중규모순환장에 미치는 영향에 관한 수치모의, *한국기상학회지*, 40(1), 71-86.
- 10) 이순환, 이화운, 김유근, 2002, 복잡지형에서 도시화에 따른 대기오염확산에 관한 시뮬레이션, *한국대기환경과학회지*, 18(2), 67-83.
- 11) Carvalho, J. C., D. Anfossi, S. T. Castelli and G. A. Degraziid, 2002, Application of a model system for the study of transport and diffusion in complex terrain to the TRACT experiment, *Atmospheric Environment*, 36, 1147-1161.
- 12) Kusaka, H, F. Kimura, H. Hirakuchi and M. Mizutori, 2000, The effect of land-use alteration on the sea breeze and daytime heat island in the Tokyo metropolitan area, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 78(4), 405-420.
- 13) Jacobson, M. Z., 1999, Effects of Soil Moisture on temperatures, winds, and pollutant concentrations in Los Angeles, *American Meteorological Society*, 38, 607-616.
- 14) Jazcilevich, A. D., A. R. Garcia and L. Gerardo Ruis-Suarz, 2002, A modeling study of air pollution modulation through land-use change in the valley of Mexico, *Atmospheric Environment*, 36, 2297-2307.
- 15) Barna, M. and B. Lamb, 2000, Improving ozone modeling in regions of complex terrain using observational nudging in a prognostic meteorological model, *Atmospheric Environment*, 34, 4889-4906.
- 16) Chandrasekar, A., C. R. Philbrick, R. Clark, B. Doddridge and P. Georgopoulos, 2003, Evaluating the performance of a computationally efficient MM5/CALMET system for developing wind field inputs to air quality model, *Atmospheric Environment*, 37, 3267-3276.
- 17) National Center for Atmospheric Research (NCAR), 2003, PSU/NCAR Mesoscale Modeling System, Tutorial class notes and user's guide: MM5 modeling system version 3.
- 18) Grell, G. A., J. Dudhia and D. R. Stauffer, 1994, A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model(MM5), NCAR technical Note TN-398+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO.
- 19) Hong, S. Y. and H. L. Pan, 1996, Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model, *Monthly Weather Review*, 124, 2322-2339.
- 20) Reisner, J., R. J. Rasmussen and R. T. Bruintjes, 1998, Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 124B, 1071-1107.
- 21) Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono and S. A. Clough, 1997, Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere : RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, *Journal of Geophysical Research*, 102(D14), 1663-1682.

- 22) Dudhia, J., 1996, A multi-layer soil temperature model for MM5, The Sixth PSU/NCAR Meso-scale Model Users' Workshop, 22-24, July 1996, Boulder, Colorado, 49-50.
- 23) Scire, J. S., D. G. Strimaitis and R. J. Yamartino, 2000, A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model, Earth Inc..
- 24) 이화운, 원혜영, 최현정, 2004, 복잡한 해안지역에서의 지상 관측 자료를 이용한 대기 유동장 수치모의, 한국대기환경학회지, 20(5), 633-645.
- 25) Willmott, C. J., 1982, Some comments on the evaluation of model performance, Bulletin of the American Meteorological Society, 63, 1309-1313.