

## 광양만권역에서의 자료동화된 대기 유동장이 대기 오염 물질의 확산장에 미치는 영향에 관한 수치모의

### Numerical Simulation of Effects of Atmospheric Flow Fields Using Surface Observational Data on Dispersion Fields of Air Pollutants in Gwangyang Bay

이화운 · 원혜영\* · 최현정 · 김현구<sup>1)</sup>  
부산대학교 대기과학과, <sup>1)</sup>포항산업과학연구원  
(2004년 12월 14일 접수, 2005년 3월 30일 채택)

Hwa Woon Lee, Hye Young Won\*, Hyun-Jung Choi and Hyun Goo Kim<sup>1)</sup>

*Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University*

<sup>1)</sup>*Research Institute of Industrial Science & Technology*

(Received 14 December 2004, accepted 30 March 2005)

#### Abstract

A critical component of air pollution modeling is the representation of atmospheric flow fields within a model domain, since an accurate air quality simulation requires an accurate portrayal of the three-dimensional wind fields.

The present study investigated data assimilation using surface observational data in the complex coastal regions to simulate a realistic atmospheric flow fields. Surface observational data were categorized into three groups (Near coastal region, Far coastal region 1, Far coastal region 2) by the locations where the sites are. Experiments were designed according to the location of observational stations and MM5/CALPUFF was used. The results of numerical simulation of atmospheric flow fields are used as input data for CALPUFF which predicts dispersion fields of air pollutants.

The result of this study indicated that data assimilation using data in the far coastal region 2 provided an attractive method for generating realistic meteorological fields and dispersion fields of air pollutants in Gwangyang area because data in the near coastal region are variable and narrow representation.

**Key words :** MM5/CALPUFF, Data assimilation, Dispersion fields, Surface observational data, Complex coastal regions

---

\* Corresponding author  
Tel : +82-(0)2-834-5920, E-mail: comet909@hanmail.net

## 1. 서 론

해안을 끼고 위치한 공단과 대도시 지역을 중심으로 산업화 및 도시화 과정에서 생겨난 많은 인위적인 배출원으로 인해 대기오염의 심각성을 나타내면서 많은 연구들이 이루어졌다. 현재도 환경보전과 더불어 쾌적한 삶의 영위라는 목표아래 수치모델을 적용하여 오염물질의 시·공간적 분포를 예측하고자 많은 연구가 시행되고 있다. 특히, 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 있다. (Mckendry, 1993; Liu *et al.*, 1987; Lalas *et al.*, 1982). 따라서 본 연구에서 전라남도 동부 연안에 위치한 대표적인 공업 및 항구 지역인 광양만권역을 대상으로 대기질 모델링을 함에 있어 기상장이 대기오염물질의 확산장에 미치는 영향에 대한 수치모의를 하였다. 특히 복잡한 지형에서의 좀 더 상세한 기상장 모의를 하기 위하여 연구 대상 지역 내 위치한 지상관측자료를 이용하여 MM5의 객관분석 과정을 통해 경계자료를 만든 후 분석완화 (analysis nudging)를 통한 자료동화를 수행하였다. 이는 여러 선행 연구들을 통해 보였듯이, 자료동화의 한 접근방법으로서 시·공간적으로 고르지 못하게 분포하는 관측값을 격자화 된 값으로 내삽하여 모델의 초기값을 향상시킨다 (Stauffer and Seaman, 1994). 그래서 Barna and Lamb (2000)은 대기 확산 모델인 CALPUFF의 입력자료로서 자료동화와 관련하여 3개의 서로 다른 기상장을 이용하여 좀 더 정확한 대기질 모델링을 하고자 하였으며, Chandrasekar *et al.* (2003)은 CALPUFF의 기상 입력자료로 중규모 기상 모델인 MM5의 결과를 이용하는 것이 효율적임을 보였다. 또한 진단 및 예단 모델을 통해 얻어진 각각의 기상장을 이용해 대기질 모델링의 입력자료로서의 영향 및 효과를 살펴 본 연구들도 있다 (Elbir, 2003; Lamprecht and Berlowitz, 1998; Kumar and Russell, 1996; Russell, 1995). 따라서 자료동화를 통하여 산출된 대기 유동장을 입력자료로 하여 CALPUFF 대기질 모델을 통해 대표적 1차 오염물질인 SO<sub>2</sub>의 시·공간적 확산 및 분포 특성을 수치모의 하였다.

## 2. 연구 방법 및 모델의 구성

### 2.1 대상지역과 자료 및 실험설계

광양만권은 해발 200 m 초과 지역이 전체 면적의 48.0%인 235 km<sup>2</sup> 정도를 차지하고 있으며, 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 “배산입해”형의 지형을 형성하고 있다. 이러한 지역에 위치하고 있는 관측소는 기상대 2곳과 자동무인관측소 (Automatic Weather System; AWS) 12개 지점으로 모두 14지점이며, 각각의 위치와 그 관측소의 지점번호를 그림 1에 나타내었다. 이들 14개 지상 관측소는 대부분이 해안에 위치하고 있어 자료동화 시 자료가 갖는 대표성을 검증하기 위하여 이화운 등 (2004)에서와 같이 해안으로부터의 거리에 따른 위치에 따라 3가지 그룹으로 나누어 보았다. 먼저 근거리 해안지역 (Near coastal region)은 해안으로부터 1 km 이내를 의미하며 이 지역에 위치한 관측소들은 총 5지점이며 해양과 육지의 가장 가까운 경계에 위치한다. 다음으로는 원거리 해안지역 1 (Far coastal

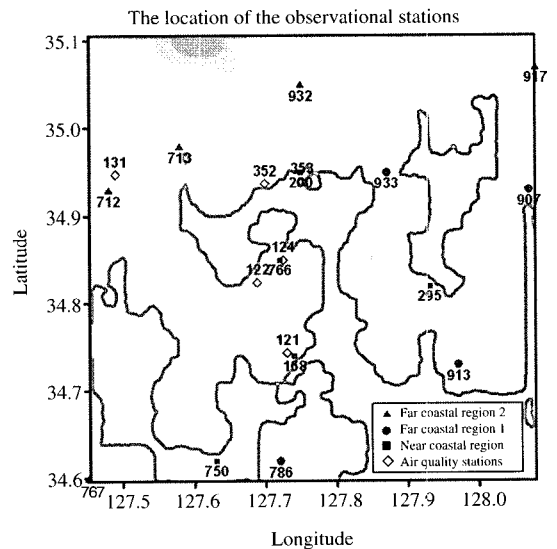


Fig. 1. The location of the surface observational stations in Gwangyang area.

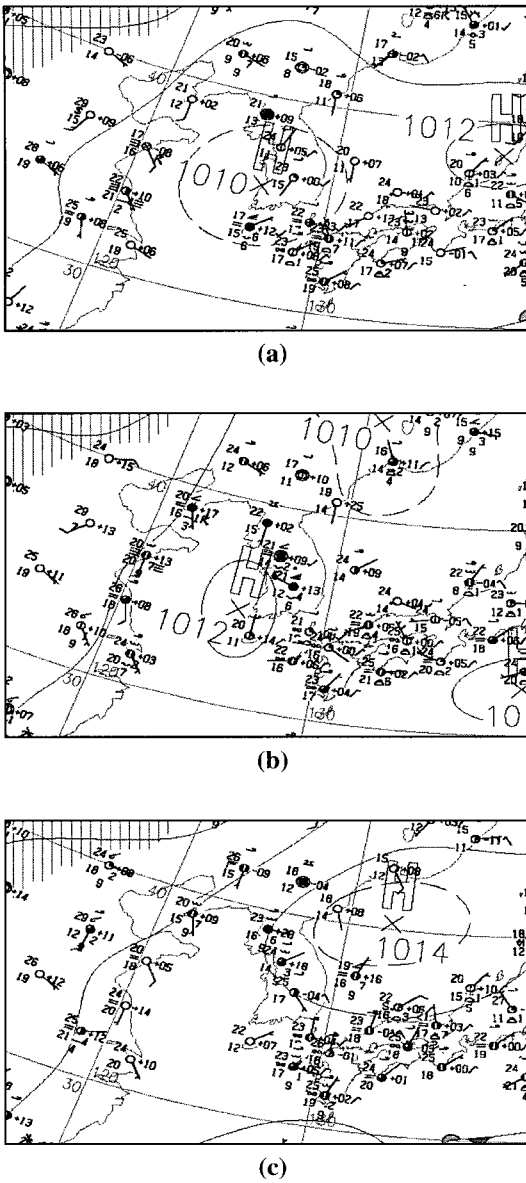


Fig. 2. Surface weather maps at (a) 0900 LST on 3 June, (b) 0900 LST on 4 June and (c) 0900 LST on 5 June 2002.

region 1)은 해안으로부터 1 km 이상 5 km 이내를 의미하며 이 지역에 위치한 관측소들은 총 4지점이다. 마지막으로 원거리 해안지역 2 (Far coastal region 2)는 해안으로부터 5 km 이상 떨어진 지역을 의미하며 이 지역에 위치한 관측소는 총 5지점이다. 본 연구에

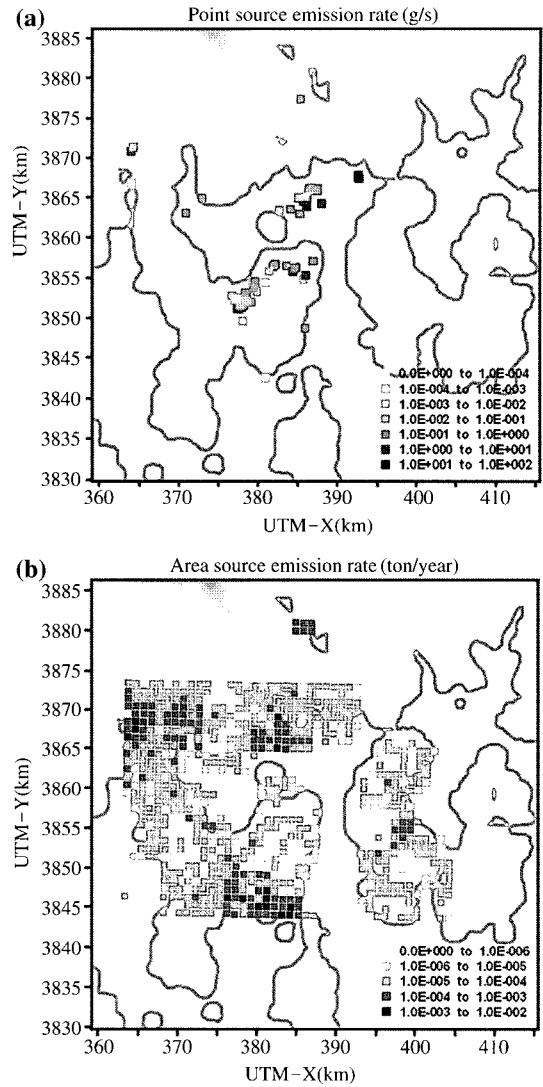


Fig. 3. Horizontal distributions of area (a) point and (b) area emissions for SO<sub>2</sub> in air quality modeling domain.

서 해안으로부터 가장 멀리 떨어진 지점은 장천 (712)관측소로 8.5 km 정도이다. 이러한 관측소의 위치별 분류를 통해 표 1과 같이 실험설계를 하였다. 지상 관측 자료동화시 사용되어지는 관측소의 위치를 달리하여 5개의 실험을 설계하였고 이때, 기상대의 관측 자료의 경우에는 기온, 기압, 이슬점 온도, 풍속, 풍향의 자료가 이용되었고, 자동 기상 관측소 자료의 경우에는 기압, 이슬점 온도를 제외한 기상요소

가 이용되었다. 수치모의를 하기위한 사례일은 2002년 6월 3일부터 5일까지 총 48시간이며 그림 2에 수치모의 기간 중 0900 LST에서의 지상 일기도를 나타내었다. 이날은 한반도 및 동해상에 걸쳐 고기압의 영향 하에 대체로 맑은 날씨인 가운데 약한 기압경

도로 종관장의 영향이 적은 날이었다. 광양만권역을 대상으로 SO<sub>2</sub>의 확산예측을 위해서 사용된 배출량을 그림 3에 나타내었다. 순천대학교 전남환경종합센터에서 광양만권 대기환경규제지역 지점에 따른 실천계획 수립(2002)이라는 과제수행 시 산출된 자료로 점오염원과 면오염원으로서 광양만에 위치한 산단과 여천공단 및 제철소 등지에서 점오염원의 배출이 많으며, 면오염원의 경우 여수를 비롯한 순천, 광양, 하동 일대에서 상대적으로 배출이 많은 모습이다.

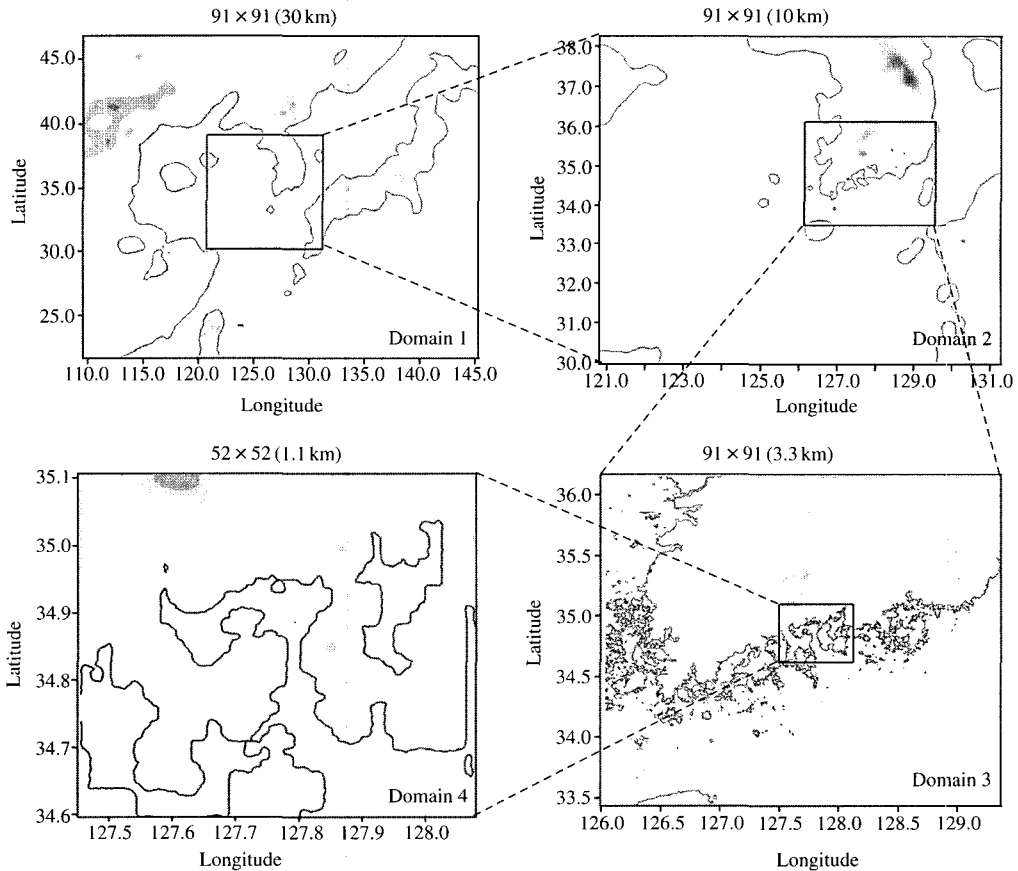
**Table 1. Experiment design.**

Experiment	Stations using objective analysis		Air quality modeling
	Near coastal	Far coastal	
Case 1	-	-	AQ
Case N	Near 5 (■)	-	AQ
Case F1	-	Far 1 (4 (●))	AQ
Case F2	-	Far 2 (5 (▲))	AQ
Case All	All (5 (■))	All (9 (●, ▲))	AQ

AQ : The case performed air quality modeling

**2. 2 모델의 구성 : MM5/CALPUFF Modeling System**

국지적 효과를 표현하는 기상장을 모의하기 위해 3차원 기상모델인 MM5와 대표적인 1차 오염물질인 SO<sub>2</sub>의 시·공간적 농도분포 특성을 살펴보기 위해



**Fig. 4. The domains of calculation for MM5: Each domain includes Korea Peninsula, South Korea, South coastal region and Gwangyang Bay, clockwise.**

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  $\sigma$ -좌표계로 쓰인 비정수(Non-hydrostatic)방정식계를 사용하며 Arakawa B 격자망으로 구성되어 있다(Grell *et al.*, 1994). MM5의 계산 영역은 광양만권역을 중심으로 수평적으로 동지격자기법을 도입하여 30, 10, 3.3, 1.1 km으로 구성하였으며 연직적으로는 33층으로 구성하였다. 고해상도 기상장 수치모의를 하기 위해서 대규모 영역부터 시작하여 관심 영역까지 계산을 하며 계산영역 경계에서의 feed-back을 허용하는 two-way nesting을 사용하였고 그림 5에는 계산영역과 격자 구성을 나타내었다. 먼저 MM5에서 NCEP/NCAR 재분석자료를 통해 초기 추정장을 만든 후, 객관분석과정(Little\_r)을 통해 3시간 간격으로 분석장(경계장)을 만들어 이를 사용하여 수치모의 기간동안에 적분하였다. 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 확산에 의해 그 크기가 성장한다. 또한 complex terrain effects, overwater 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 낸다(Scire *et al.*, 2000). 본 연구에서는 그림 5에서와 같이 MM5 수치모의를 통하여 산출된 기상장을 전처리 과정과 CALMET을 통해 CALPUFF의 입력 기상장으로 이용되어 대기 오염 물질의 확산을 계산하였다.

### 3. 수치모의 결과

#### 3.1 대기 유동장에 따른 SO<sub>2</sub>의 확산장

수치모의 사례일 중 2002년 6월 5일 0600 LST에 대하여 MM5의 결과 산출된 대기 유동장과 각 실험에 대한 SO<sub>2</sub>의 확산장을 같은 시각 각 관측소에서 관측된 풍향, 풍속과 함께 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)는 관측소에서 관측된 풍향과 풍속으로 전반적으로 북풍 계열의 육풍이 불어나오는 가운데 원거리 해안지역 2에서는 북서풍이 원거리 해안지역 1에서는 북풍이 근거리 해안지역에서는 북동풍이 불어나오며 새벽의 약한 기온 경도로 인해 풍속이 다소 약하게 관측되었다. 이를 토대로 나머지 그림 6(b)~(e)의 바람장에 따른 확산장을 비교해보면 그림 6(b)는 지상 관측 자료동화가 시행되지 않은 실험으로서 북풍계열의 육풍이 불어나오고 있는 가운데 다소 풍속에 약해진 광양만권역의 주위로 북풍으로 일관하기 보다는 남동풍 및 남서풍으로 불어 들어가다 등 광양시 북서쪽에 위치한 'ㄱ'자형 백운산의 지형적인 효과로 순천시 부근의 불어나오는 북서풍계열의 육풍과 함께 돌아 나오고 있다. 그림 6(c)는 원거리 해안지역 2의 5지점 지상관측 자료가 이용된 경우로

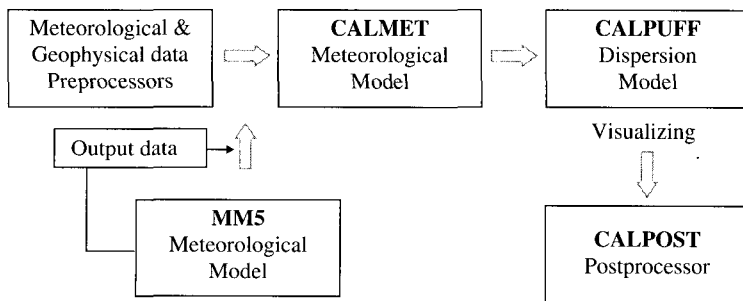


Fig. 5. The flow chart of MM5/CALPUFF Modeling System.

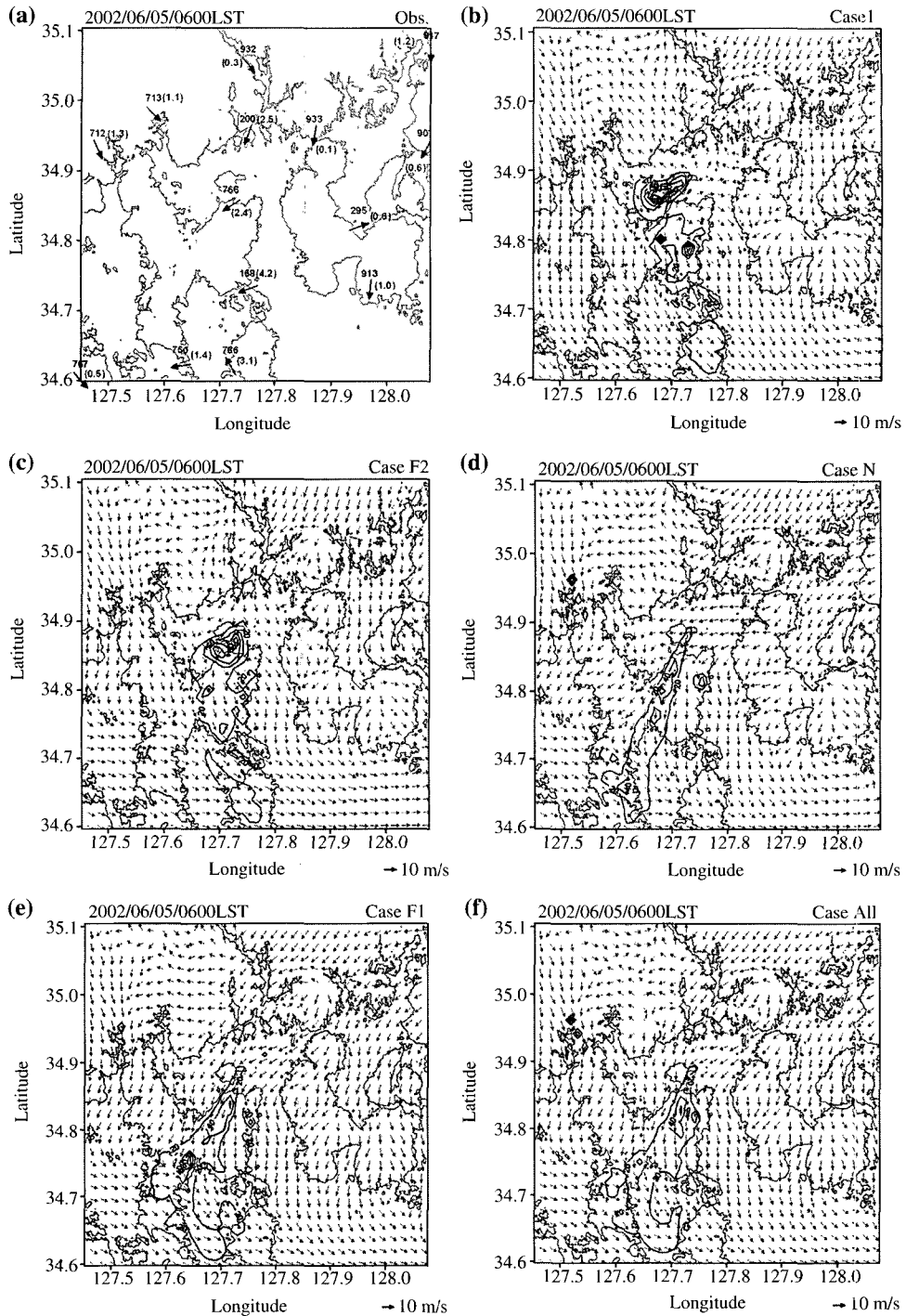


Fig. 6. (a) The wind directions and speeds observed at each station at 0600 LST on 5 June. The horizontal wind fields and SO dispersion fields at the same time for (b) Case F2, (c) Case N, (d) Case F1 and (e) Case All. Vectors mean the wind directions and the round bracketed numbers mean the wind speeds.

장천(712), 광양(713), 하동(932)에서는 내륙에서 북서풍으로 불어 나오는 관측값의 영향으로 북풍계열의 바람이 강해지는 한편 Case 1에서 육풍이 불어오는 시각에도 불구하고 광양시를 지나 백운산 바로 밑까지 남동풍으로 불어 들어가던 바람이 Case F2에서는 광양시 앞에서 돌아 순천시에서 북서풍으로 불어 나오는 바람과 함께 광양만 및 순천만으로 빠져나오고 있다. 그림 6(d)는 근거리 해안지역의 5지점 지상관측 자료를 이용한 경우로 여수(168), 광양(200-제철소 내 AWS), 여천(766), 백야(750)지점의 강한 북동풍 및 동풍의 육풍의 영향으로 사천시 부근에서 시작된 북동풍이 여수반도에까지 그 영향을 미치고 있어서 Case B의 광양만에서 북풍으로 불어 오던 바람이 율촌 부근에서 북동풍이 바뀌어 여수반도와 돌산도 사이에서 북서풍으로 돌아 나오고 있다. 그림 6(e)는 원거리 해안지역 1의 4지점 지상관측 자료의 이용으로 삼천포(907), 상주(913), 금남(933)지점의 북서풍에 의해 남해를 끼로 있는 삼천포 앞바다에서 북풍이었던 풍계가 북서풍으로 바뀌어 남해를 빠져나가고 있다. 그림 6(f)는 모든 관측소 지점의 자료가 이용되어 그림 6(b)-(e)에서 보였던 특징들이 모두 국지적으로 나타나고 있다. 그리고 그림 6(d)와 (c)에서는 해안으로 북풍계의 육풍으로 해안을 벗어나려다 동풍계열로 바뀌어 산을 넘어가는 것을 볼 수 있다. 그리고 남해도 앞바다에서 북풍으로 내려오던 육풍이 돌산도 남부까지 내려오다 순천시에서 남해 반도를 돌아 나오던 북서풍의 육풍과 함께 북서풍의 풍계를 보이고 있다. 하지만 그림 6(c)의 경우는 오히려 지형적인 효과로 백운산에서 내려오는 북서풍계의 산풍과 함께 능선을 따라 북쪽으로 불어 들어가는 것을 볼 수 있다. 또한 북풍의 육풍이 불어나가는 통로가 되어 여수반도 뒤를 돌아 나오는 북서풍과 함께 여수시 앞바다에서 벌써 북서풍으로 풍향이 바뀌어 불어나가는 모습을 보인다. 이와 같이 각 실험에서 사용되는 관측 자료들의 자료동화 시 그 효과들이 각각의 대기 유동장에 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 위치별 지상 관측 자료동화에 따라 설계된 5개의 실험 결과를 대기질 모델인 CALPUFF의 입력자료로 이용하여 산출된 SO<sub>2</sub>의 수평 농도장을 각 실험별로 살펴보면 그림 6(b)는 배출원 지점을 중심으로 여수반도의 여천공단 주위로 확산이 다소 정체되는 듯 하면서 여수시와 돌산도에

서 남동방향으로 확산되고 있다. 이는 기온 경도가 약한 야간에 광양만 주위의 바람이 약해지면서 기류의 수렴대가 형성되어 나타나는 모습이다. 그림 6(c)는 관측소별 풍향을 통해 보았듯이 원거리 해안지역 2의 북서풍계열의 자료의 영향으로 백운산을 돌아 나오는 육풍이 강해지고 Case 1에서 보였던 다소 정체되었던 모습이 사라지면서 낮은 농도를 보이며 남동방향으로 확산되고 있다. 그림 6(d)는 근거리 해안지역의 강한 북동풍의 영향으로 배출원으로부터 남서방향으로 멀리 확산되고 있다. 그림 6(e)는 원거리 해안지역 1의 북풍계열의 바람과 돌산도에서의 남동풍 바람의 영향으로 여수반도를 따라 남서방향으로 확산되다 반시계 방향으로 우회하고 있다. 그림 6(f)는 대기 유동장에서도 보았듯이 모든 관측소의 자료

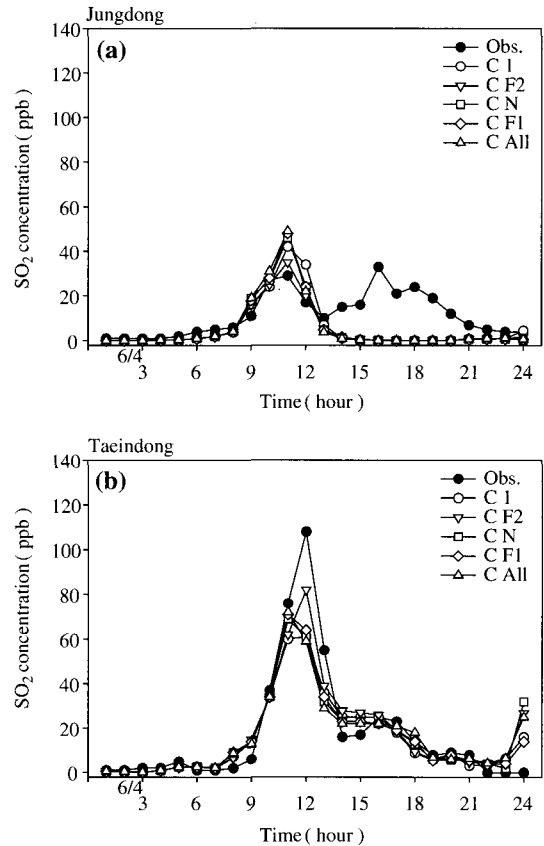


Fig. 7. Time series of SO<sub>2</sub> concentration for the air quality stations at (a) Jungdong and (b) Taeindong as the result of Experiment.

가 이용되어 각 실험별 확산 특징을 모두 나타나고 있는 가운데 남서방향으로 확산되고 있다.

### 3.2 시계열 분석 및 통계적 분석

2002년 6월 4일의 관측된 SO<sub>2</sub>농도 일변화와 함께 각 실험별 농도의 일변화를 태인동과 중동 대기질 관측소에 대하여 그림 7에 나타내었다. 대기오염물질의 확산예측 시 최고농도가 나타나는 시각과 그 농도값을 예측하는 것이 중요한데, 108 ppb의 고농도를 보였던 태인동 지점의 경우, 관측값과 유사한 일변화를 보이는 가운데 Case F2의 경우에 1200 LST에 일최고농도가 나타나는 시각을 따르며 양적 측면에서도 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 중동 지점에서 일변화 경향을 잘 표현하는 가운데 1100 LST의 일최고농도가 나타나는 시각이 모든 실험에서 보이며 Case F2의 경우가 농도의 양적인 측면에서 관측값을 잘 모의하고 있다. 자료동화된 기상장의 영향을 살펴보기 위해 입력되는 기상장에 따른 SO<sub>2</sub>농도에 대하여 통계적 분석 및 검증을 위해 Regression (이하 R)과 Unpaired Peak Prediction Accuracy (이하 UPA)를 이용하였다. Regression (이하 R)은 두 변수간의 증가 혹은 감소 등의 상관관계를 나타내는 것으로 0.0~1.0의 값을 가지며 관측값과 예측된 값의 경우에는 양의 값을 가지되 1.0에 가까울수록 예측된 값이 유효함을 나타낸다. UPA는 EPA (U.S Environmental Protection Agency)에서 권장하는 모델의 평가 통계식으로 농도의 최고값이 나타날 때의 모델의 정확도를 나타내며 작은 값일수록 정확도가 큼을 나타낸다 (Hogrefe *et al.*). 앞서 SO<sub>2</sub>농도의 일변화에서 보였듯이 각 관측소별 일최고농도가 나타날 때 UPA를 구해보았다. 각각의 지수를 구하는 식은 아래에 제시하였다.

$$R = \frac{\overline{(P_i - \bar{P}) \times (O_i - \bar{O})}}{\sqrt{\overline{(P_i - \bar{P})^2} \times \overline{(O_i - \bar{O})^2}}} \quad (1)$$

$$UPA = \frac{P_{cmax} - O_{cmax}}{O_{cmax}} \quad (2)$$

- $P_i$ : Prediction
- $O_i$ : Observation
- $\bar{P}$ : Averaged prediction
- $\bar{O}$ : Averaged observation

그림 8에 모델의 해석 능력이 가장 뛰어났던 태인동 지점과 그리고 모든 관측소에서 평균된 R과 중동, 태인동, 모든 관측소에서의 UPA를 나타내었다.

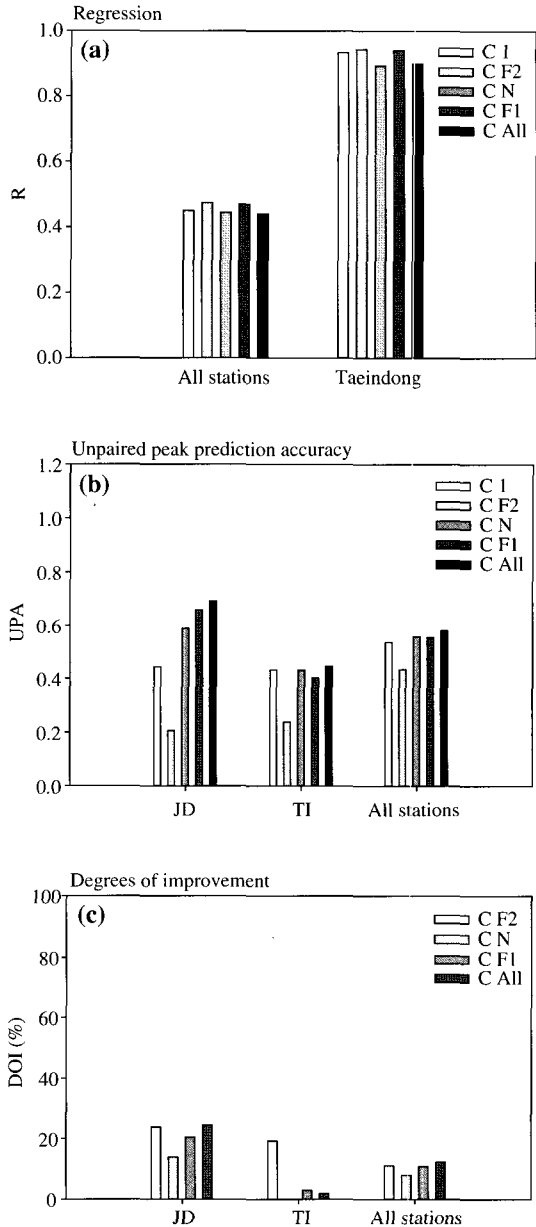


Fig. 8. SO<sub>2</sub> concentration statistics calculated for Experiment in terms of (a) Regression, (b) Unpaired Peak Prediction Accuracy and (c) Degrees of Improvement.



그림 7을 통해 보았던 결과와 같이 SO<sub>2</sub>의 일변화를 잘 표현하였던 Case F2에서 상관정도가 크게 나타났으며 Case N에서 가장 작은 값을 보임으로서 상관정도가 낮음을 그림 8(a)를 통해 알 수 있었다. 이는 일최고농도에 관한 UPA에서도 같은 결과를 보이고 있는데 그 값이 작을수록 관측값과 계산된 값의 오차가 적음을 의미하므로 모델의 해석능력이 뛰어난을 의미한다. 그림 8(b)를 보면 다른 실험에 비해 Case F2가 확연히 그 값이 적음을 보이고 있다. 이로써 각 실험에 대한 향상정도를 살펴 보기위해 SO<sub>2</sub>의 농도(변수)에 대하여 Case 1에 대한 각각의 실험별로 농도값의 차이를 통해 향상정도를 백분율(%)로 나타내었을 때(그림 8(c))에도 원거리 해안지역 2의 대표성이 상대적으로 높은 자료를 이용한 Case F2에서 기상장에 따른 SO<sub>2</sub>의 확산장에 평균 20% 정도의 향상을 보이거나 Case N에서는 가장 낮게 나타나고 있다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 지상 관측 자료동화된 대기 유동장이 대기 오염 물질의 확산장에 미치는 영향을 수치모의하기 위하여 먼저 광양만권에 존재하는 지상 관측소를 해안으로부터의 거리를 통해 크게 3지역(근거리 해안지역, 원거리 해안지역 1, 원거리 해안지역 2)으로 분류하였고, 이에 따라 자료동화 시 사용되는 지상 관측 자료를 달리하여 5개의 실험을 설계한 후 중규모 기상모델인 MM5를 이용하여 수치모의를 하였으며, 그 결과 얻어지는 대기 유동장을 CALPUFF의 입력자료로 이용하여 SO<sub>2</sub>의 시·공간적 분포를 살펴보고 하였다. 사용되어지는 지상 관측 자료의 위치에 따라 대기 유동장 뿐 아니라 오염물질의 확산장에 있어서도 다른 결과를 보이고 있음을 결과를 통해 확인할 수 있었다. 해안에 인접한 곳인 근거리 해안지역에 위치한 관측값을 사용하기 보다는 좀 더 해안에서 떨어진 원거리 해안지역 2에 위치한 관측값을 사용하는 것이 관측값과의 유사성이 높은 수치모의 결과를 얻었다. 이는 이화운 등(2004)에서 도출한 결과를 비추어 볼 때, 복잡한 해안과 많은 봉우리로 인해 형성된 복잡한 광양만권에서의 지상관측 자료동화시에 해안에 가까이 위치한 대표성

이 낮은 자료의 이용보다는 상대적으로 국지적 효과를 표현하면서 모델 내에서의 영향반경을 충분히 대표할 수 있는 원거리 해안지역 2의 자료를 사용하였을 때 실제 대기의 흐름과 유사한 결과를 얻을 수 있다. 이와 더불어 지상관측 자료동화를 통해 향상된 대기 유동장을 대기질 모델링의 입력 자료로 사용하였을 때에 SO<sub>2</sub>의 시·공간적 확산예측에 있어서도 긍정적인 결과를 보였다.

이상의 연구의 결과는 복잡한 해안지역을 대상으로 위치한 지상 관측소의 자료를 이용하여 상세한 대기 유동장을 얻고자 할 때 해안으로부터의 거리에 따른 분류를 통해 대표성을 검증함으로써 자료동화 시 사용되어지는 관측소의 자료의 선별(Quality Control)부분에 있어서 중요한 자료를 제시할 것으로 사료되며, 또한 대기질 모델링의 입력 자료서의 정확한 대기 유동장을 산출함에 있어 중요한 자료가 될 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

- 이화운, 원혜영, 최현정(2004) 복잡한 해안지역에서의 지상 관측 자료를 이용한 대기 유동장 수치모의, 한국 대기환경학회지, 20(5), 633-645
- 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
- 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
- Elbir, T. (2003) Comparison of model predictions with the data of an urban air quality monitoring network in Izmir, Turkey, Atmospheric Environment, 37, 2149-2157
- Grell, G.A., J. Dudhia, and D.R. Stauffer(1994) A description of the fifth-generation Penn State/NCAR meso-scale model (MM5), NCAR technical Note TN-398+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO.
- Hogrefe, C., S.T. Rao, P. Kasibhatla, W. Hao, G. Sistla, R. Mathur, and J. MaHenry(2001) Evaluating the

- performance of regional-scale photochemical modeling systems : Part II-ozone predictions, *Atmos. Environ.*, 35, 4175-4188
- Kumar, N. and A.G. Russell (1996) Comparing prognostic and diagnostic meteorological fields and their impacts on photochemical a quality modeling, *Atmospheric Environment*, 30(12), 1989-2010
- Lalas, D.P., V.R. Veirs, G. Karras, and G. Kallos (1982) An analysis of the SO<sub>2</sub> concentration levels in Athens Greece, *Atmospheric Environment*, 16(3), 531-544
- Lamprecht, R. and D. Berlowitz (1998) Evaluation of diagnostic and prognostic flow fields over prealpine complex terrain by comparison of the lagrangian prediction of concentrations with tracer measurements, *Atmospheric Environment*, 32(7), 1283-1300
- Liu, S.C., M. Trainer, F.C. Fehsenfeld, D.D. Parrish, E.J. Williams, D.W. Fahey, G. Huber, and P.C. Murphy (1987) Ozone production in the rural troposphere and implications for regional ozone distributions, *Journal of Geophysical Research*, 92, 4191-4207
- McKendry, I.G. (1993) Ground - level ozone in Montreal, Canada, *Atmospheric Environment*, 27B(1), 93-103
- Russell, A. (1995) Impact of using prognostic and objective wind fields on the photochemical modeling of Athens Greece, *Atmospheric Environment*, 29(24), 3633-3653
- Scire, J.S., D.G. Strimaitis, and R.J. Yamartino (2000) A User's Guide Guide for the CALPUFF Dispersion Model. Earth Inc
- Stauffer, D.R. and N.L. Seaman (1994) Multiscale four-dimensional data assimilation, *Journal of Applied Meteorology*, 33, 416-426