

라그랑지안 입자확산모델을 이용한 광양만 권역에서의 공기과 재순환현상 수치모의

이화운 · 이현미* · 이순환¹⁾ · 최현정

부산대학교 지구환경시스템학부, ¹⁾부산대학교 환경문제연구소
(2009년 9월 24일 접수; 2009년 10월 27일 수정; 2009년 12월 30일 채택)

Numerical Simulation for Recirculation of Air Mass in the Coastal Region Using Lagrangian Particle Dispersion Model

Hwa Woon Lee, Hyun Mi Lee*, Soon Hwan Lee¹⁾, Hyun Jung Choi

Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

¹⁾Institute of Environmental Studies, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Manuscript received 24 September, 2009; revised 27 October, 2009; accepted 30 December, 2009)

Abstract

Air mass recirculation is a common characteristic in the coastal area as a result of the land-sea breeze circulation. This study simulates the recirculation of air mass over the Gwangyang Bay using WRF-FLEXPART and offers a basic information about the effective domain size that can reflect recirculation. For this purpose, WRF is set up four nested domains and three cases are selected. Subsequently FLEXPART is operated on the basis of WRF output. During the clear summer days with weak wind speed, particles that emitted from Yeosu national industrial complex and Gwangyang iron works flow into emission sources because of the land-sea breeze. When land-sea breeze is strengthened, the recirculation phenomena appears clearly. However particles aren't recirculated under weak synoptic condition. Also plume trajectory is analyzed and as a consequence, the smallest domain area have to be multiplied by 1.3 to understand recirculated dispersion pattern of particles.

Key Words : Recirculation, Particle dispersion, Land-sea breeze

1. 서론

중규모 순환은 복잡한 지형구조와 지표면 특성에 의한 차등가열로 인하여 발생하기 때문에 이로 인해 나타나는 중규모 기상현상은 지형강제력과 밀접한 관계가 있다고 볼 수 있다. 만일 강한 중관장의 영향이 없다면 연안지역에서의 국지풍 순환은 육지와 바다

사이의 일주기 가열, 냉각 차이에 따라 결정되며, 이는 배출원으로부터의 오염물질 수송과 확산에 영향을 미친다(Manins 등, 1994). 국지풍 중 하나인 해풍과 육풍의 변화로 인해 수 시간 후에 공기과가 배출원으로 되돌아가는 재순환현상이 발생하게 되는데, 이러한 재순환현상은 해안가에 위치한 대다수의 도시에서 나타난다(Lu 와 Turco, 1994; Hurley and Manins, 1995). 특정한 기상학적, 지형학적 조건하에서 해안지역의 재순환현상은 고농도 대기오염을 야기할 수 있으며 이에 대한 다양한 선행연구들이 이루어져왔다.

Millan 등(1996)과 Martin 등(1991)은 스페인과 서

*Corresponding Author : Hyun Mi Lee, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
Phone: +82-51-583-2651
E-mail: hyunmi85@pusan.ac.kr

지중해지역의 여름 대기 순환 및 이와 관련된 대기오염 원동력에 대해 연구하였다. 이들은 오전에 해안가에서 배출된 오염물질이 해풍의 영향 하에서 육지에서 움직임을 보이고, 연속적인 산악지형에 의해 상승한 뒤 해풍반류에 의해 바다로 밀려나가 하강함을 설명하였다. 결국 이 공기괴는 해풍을 만나 재유입 된다고 주장하였다.

또한 재유입된 오염물질은 특정한 바람장 조건 하에서 같은 배출원으로부터 새롭게 배출된 공기괴와 결합되기도 한다(Alper-Siman 등, 1997). 이와 비슷하게 Robinsohn 등(1992)은 수치모델을 사용하여 Ashdod에서 관측된 SO₂ 농도의 약 50%는 발전소 플룸을 포함하는 공기괴의 수평적인 재순환의 결과라고 주장하였다. 즉 공기괴가 초기의 배출원 위치로 돌아가 새로 배출된 SO₂와 결합한 것이다.

공기괴의 재순환현상은 Stohl 등(1998)과 같이 유럽중기예보센터(ECMWF)의 기상데이터를 기초로 하는 라그랑지안 확산모델 FLEXPART를 이용하여 정당성이 입증되기도 한다. 이는 3번의 대규모 추적자(tracer) 실험으로부터의 관측데이터(CAPTEX, ANATEX, ETEX)가 사용되었으며, 모델 수행 결과 전선의 영향을 받는 경우를 제외하고는 관측데이터와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Hernandez 등(1994)은 여름에 해당하는 기상학적 조건에서 스페인의 복잡한 해안지역에 위치한 발전소 굴뚝 플룸의 확산을 모의하기 위해 라그랑지안 입자모델을 사용하였으며, Nguyen 등(1996)은 복잡지형에서 높은 점배출원으로부터의 확산모의를 라그랑지안 대기 확산모델인 LADM과 오일러리안 그리드 기초 모델인 CALGRID를 이용해 나타내었다.

또한 Levy 등(2009)은 동지중해에서 잠재적인 재순환의 공간분포를 나타내고, 플룸확산에 있어 종관 규모와 중규모 재순환의 결합된 영향을 설명하였다. RAMS-HYPACT 모델링 시스템 사용결과 약한 종관 장하에서 입자들은 동지중해에서 재순환되어 2-3일후에 육지에서 새로 배출된 입자들과 결합하는 것으로 나타났다. 동시에 해안 근처에서는 해륙풍 효과에 의해 하루 미만의 시간규모로 입자들이 재순환하였다.

선행연구를 통해 밝혀진 바와 같이 재순환현상은 오염된 공기괴가 배출원으로 다시 유입됨으로써 대기

질을 악화시키며, 이러한 영향은 대기 중에서 광화학 반응을 일으키는 대기오염물질의 경우에 더욱 가증될 수 있기 때문에 수치모의시 대기질의 정확한 예측을 위해서는 재순환현상이 고려되어야 한다. 라그랑지안 입자모델을 이용한 수치모의에서 도메인이 작게 설정된 경우에는 경계를 벗어난 입자들이 고려되지 않아 해안지역에서의 재순환현상이 대기오염에 미치는 영향이 간과될 수 있다. 이와 반대로 도메인이 필요 이상으로 크게 설정된 경우에는 계산상의 효율성이 떨어질 수 있다.

따라서 본 연구에서는 중규모 기상모델인 WRF와 라그랑지안 확산모델인 FLEXPART를 사용하여 복합적인 지형을 가진 광양만 권역에서 공기괴의 재순환현상을 모의하고, 광양만 권역을 중심으로 수치모델 수행 시 재순환현상을 고려할 수 있는 타당한 도메인에 대한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1. 대상지역

광양만 권역은 전라남도의 동남부 끝자락에 자리하여 광양만을 둘러싸고 있는 지역을 의미한다. 광양시의 동쪽에 위치한 섬진강을 경계로 하여 경상남도 하동군과 맞닿아있으며 서쪽으로는 순천시와 접해있다. 남쪽으로는 광양만을 끼고서 여수시 모도, 경남의 남해군 등이 있으며, 북쪽으로는 소백산맥의 지맥인 백운산(1218 m)을 필두로 동서로 늘어선 산들이 구례군과 경계를 이루고 있다.

광양만 권역에는 여수국가산업단지, 광양제철소 등 대규모 국가산업단지를 비롯하여 다수의 지방산업단지, 화력발전소 등이 구성되어 있다. 이들 중 여수국가산업단지는 우리나라의 대표적인 석유화학 산업단지이고, 광양제철소는 철광석 및 유연탄, 석회석 등의 원료를 다량으로 사용하여 지역 대기질에 미치는 영향이 매우 크다.

2.2. 수치모델

기상모델로 사용한 WRF(The Weather Research and Forecasting model)는 연구 및 현업을 위해 고안된 수치적 기후예보, 대기모의 시스템이다. 중규모 기후의 이해를 돕고 예보 능력을 발달시킬 수 있는 차세

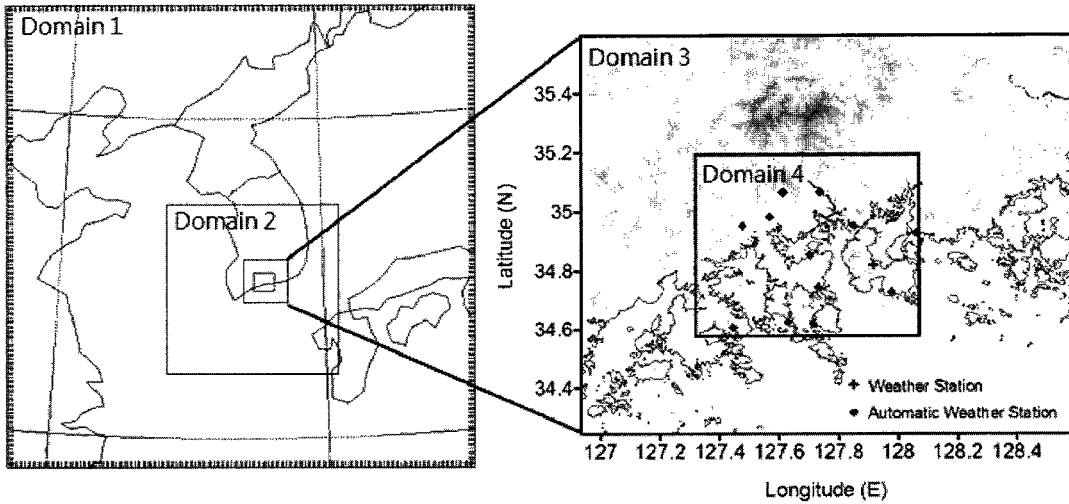


Fig. 1. WRF Model domains, weather stations and automatic weather stations used for model validation.

대 중규모 예보모델을 개발하기위해 미국 국립대기연구소의 중규모 및 미규모 기상학 부서 (NCAR's MMM Division), 미국 해양대기관리처의 국립환경예측센터와 지구시스템연구소 (NOAA's NCEP and ESRL) 등의 협동아래 발전, 개발되어오고 있다.

본 연구에 사용된 Advanced Research WRF(ARW) 모형의 방정식계는 압축성이며, 지형을 따르는 정역학 기압 연직 좌표를 사용한다. 수평격자는 Arakawa-C grid, 모델에서 수치적분 scheme은 3차 Runge Kutta scheme을 사용하고, 2차에서 6차의 이류 체계를 사용한다. 모델은 다양한 경계조건 옵션과 함께 이상적인 데이터와 실제 데이터를 지원한다. 또한 one-way, two-way와 이동격자 옵션도 제공한다(NCAR, 2008).

WRF를 이용한 수치모의에서 NCEP/NCAR의 CDAS

자료를 초기입력장으로 사용하였으며(Kanamitsu 등, 2002), 4개의 등지격자를 설정하였다. 수평격자 크기는 각각 9 km, 3 km, 1 km, 1 km로 하여 중규모 및 중규모 대기운동을 살펴볼 수 있도록 하였으며, 모델 도메인은 Fig. 1에 나타내었다. 첫 번째 도메인은 한반도 전체를 포함하고, 두 번째 도메인은 남한을 포함하도록 하였다. 재순환현상에 따른 입자의 이류·확산을 살펴보기 위해 세 번째 도메인은 고흥군, 지리산 그리고 통영시를 포함하게 설정하였으며, 마지막 도메인은 광양만을 중심으로 설정하였다.

최 등(2008)은 광양만 권역에서 발생한 최근 5년간의 고농도 오존 사례에 대한 분석을 통해 오존의 공간적인 분포 유형을 총 6가지로 분류하였다. 이러한 선행연구를 토대로 종관장이 약한 경우와 강한 경우를

Table 1. Configuration of WRF

	Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain 4
Horizontal grid	180 × 180	199 × 199	151 × 151	70 × 70
Horizontal resolution	9 Km	3 Km	1 Km	1 Km
Vertical layers	40 layers			
Physical options	RRTM long-wave scheme			
	Dudhia short-wave scheme			
	Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE scheme			
	Kain-Fritsch(new Eta) cumulus scheme			
Initial data	NCEP/NCAR reanalysis data			
Time Period	2004. 06. 03. 0000 UTC ~ 2004. 06. 05. 0000 UTC			
	2005. 08. 15. 0000 UTC ~ 2005. 08. 17. 0000 UTC			
	2007. 06. 03. 0000 UTC ~ 2007. 06. 05. 0000 UTC			

포함하여 3가지 사례를 선정하였으며, 이는 WRF의 물리적 옵션과 함께 Table 1에 나타내었다.

기상모델 수행 후 라그랑지안 입자확산모델인 FLEXPART를 이용하여 수치모의 하였다. FLEXPART는 노르웨이 대기연구소에서 개발된 입자확산모델로서 궤적모델인 FLEXTRA로부터 발전하였으며, 유럽 중기예보센터(ECMWF)의 수치기후예보모델 출력 자료를 초기 입력 자료로 사용한다. 점, 선, 먼, 부피 오염원으로부터 배출된 추적자(tracer)의 장거리·중규모 수송 및 확산, 방사성 물질의 붕괴, 습성침적, 건성침적 그리고 미립자의 중력침전을 계산하는 데에도 이용된다. 배출원으로부터 추적자(tracer)의 확산을 모의하기 위해 전방 추론을 사용하고, 주어진 수용체에 대해 잠재적인 배출 기여를 결정하기 위해 후방 추론을 사용한다(Stohl, 2002).

현재는 FLEXPART 코드의 광범위한 수정으로, WRF에 의해 만들어진 다양한 규모의 기상학적 예보 결과를 배출원-수용체 분석에 사용될 수 있게 되었다. 즉, WRF에 의해 생성된 NetCDF 출력 파일을 바로 읽을 수 있고, WRF 격자를 이용하여 각각의 입자 위치를 계산한다(Fast와 Easter, 2006). 입자 이동과 난류 확산은 WRF로부터 산출된 기상변수들을 입자의 위치에 내삽하고, 식 (1)에 나타난 랑주뱅 방정식(Langevin equation)을 풀이하여 계산된다.

$$dv_i = a_i(x, v_i, t)dt + b_{ij}(x, v_i, t)dW_j \quad (1)$$

바람성분 i 에 대한 난류 운동 v_i 는 랑주뱅 방정식

에 기초로 하여 매개변수화되며, 이 때 어떤 시스템의 현재 상태만 주어지면 미래 상태가 결정되는 마르코프 과정(Markov process)을 가정한다. 위의 식에서 이류항인 a 와 확산항인 b 는 위치, 난류 속도, 시간의 함수이며, dW_j 는 시간 변화(dt)동안 브라운 운동의 증가분을 의미한다.

본 연구에서 모의기간은 각 사례마다 24시간으로 설정하였고, 배출원은 여수국가산업단지과 광양제철소로 가정하였다. 각각의 배출원에서는 대기 중에서 반응하지 않는 입자가 1분에 10개씩, 모의기간인 24시간동안 총 28800개가 배출되었다. 또한 입자는 연직고도 20 m 이내에서 무작위로 배출되도록 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기상장 수치모의 분석

Fig. 2에 나타난 지상 일기도를 살펴보면 첫 번째 사례일인 2004년 6월 4일의 경우 한반도의 서해에 고기압의 중심이 위치하여 광양만 권역은 구름 없이 맑은 날이 지속되었음을 알 수 있다. 두 번째 사례일인 2005년 8월 16일에는 동해상과 동중국해에 고기압의 중심이 위치하고 있으며, 두 고기압 사이에 위치한 한반도는 등압선 간격이 매우 넓어 풍속이 약하게 나타났다. 그 결과 중관규모의 대기운동보다는 국지규모의 대기운동이 활발하게 발생할 수 있는 조건이 충족되었다. 마지막 사례일인 2007년 6월 4일의 경우 우리

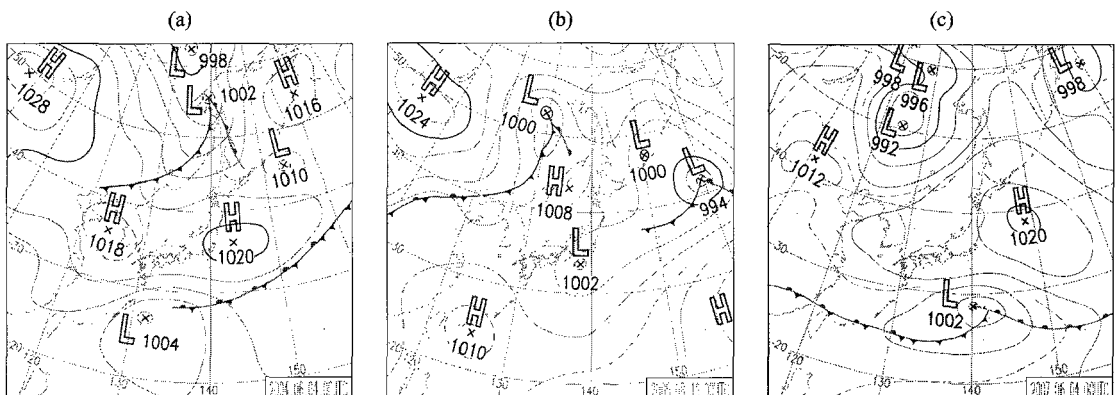


Fig. 2. Surface weather charts at 0900 LST (a) 4 June 2004, (b) 16 August 2005 and (c) 4 June 2007.

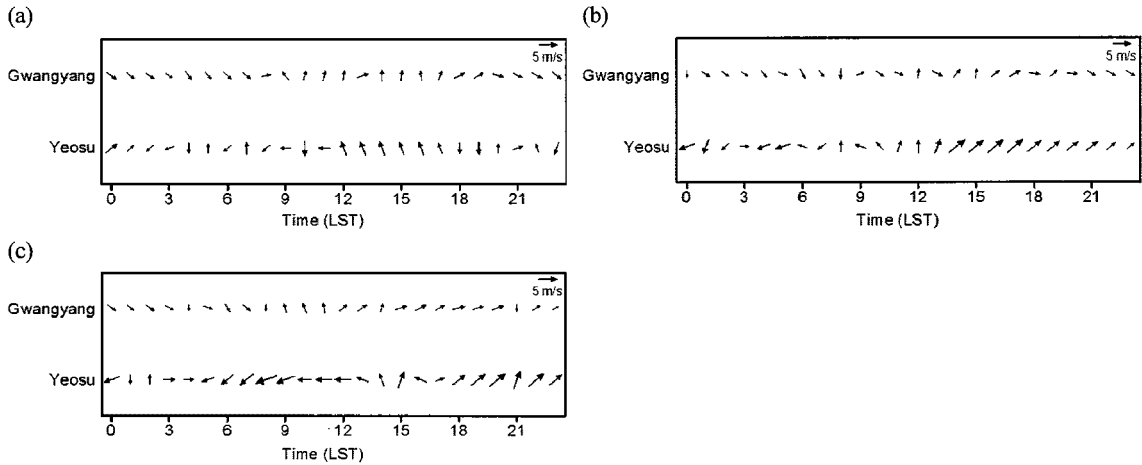


Fig. 3. Time series of observed wind vectors for Gwangyang automatic weather station and Yeosu weather station at (a) 4 June 2004, (b) 16 August 2005 and (c) 4 June 2007.

나라는 일본 동쪽 해상에 위치한 고기압의 가장자리에 위치하여 맑은 날씨를 보였다. 하지만 동중국해에서부터 일본 남쪽 해상으로 이동해온 저기압으로 인해 6월 4일 오전까지 우리나라 남해안 부근은 약한 종관장의 영향을 받은 것으로 나타났다.

광양만 권역에서 각각의 사례일에 대한 바람장 변화를 살펴보기 위해 광양과 여수에서 관측된 바람 벡터를 Fig. 3에 나타내었다. 이를 통해 오전에는 북풍계열의 육풍이, 오후에는 남풍계열의 해풍이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 또한 지상일기도에서 살펴본 것과 마찬가지로 세 번째 사례일 오전에는 일본 남쪽 해상에 위치한 저기압의 영향을 받아 여수에서 동풍계열의 바람이 비교적 강하게 부는 것으로 관측되었다.

종관장 분석에 이어 WRF를 이용한 수치모의 결과를 알아보기 위해 예측된 수평 바람장 분포와 관측된 바람 벡터를 Fig. 4에 함께 나타내었다. 먼저 종관장이 약한 2004년 6월 4일 0600 LST에 광양만과 순천만 중심으로 나타났던 육풍은 지표면이 충분히 가열된 1800 LST에 해풍으로 변화하였다. 이러한 국지풍 순환은 관측값과 비교적 유사하게 표현되었으며, 두 번째 사례일인 2005년 8월 16일에 더 뚜렷하게 나타났다. 즉 0600 LST에 순천만과 광양만 뿐만 아니라 여수반도에서도 육풍이 발생하고 있으며, 1800 LST에는 바다에서 육지쪽으로는 해풍이 잘 나타나고 있다. 세 번째 사례일인 2007년 6월 4일 0600 LST의 경우,

관측치와 마찬가지로 광양만과 순천만 북쪽의 내륙지역에서는 육풍이 나타나고 있으나 여수반도를 포함한 해상에서는 비교적 강한 동풍이 모의되었다. 그리고 동풍을 유발했던 일본 남쪽 해상의 저기압이 서쪽으로 이동한 후인 1800 LST에는 다른 사례일과 마찬가지로 해풍이 불어오고 있다. 이와 같이 오후에 해풍이 발생하더라도 오전에 배출되었던 입자들이 비교적 빠른 풍속에 의해 동쪽으로 확산되었다면, 재순환현상에 의해 입자가 배출원으로 재유입될 가능성이 적음을 예상할 수 있다.

3.2. 통계적 검증

수치모의 결과의 유의성 검증을 위해 Root Mean Square Error (RMSE) 와 Index of Agreement (IOA) 를 사용하였다. 네 번째 도메인 안에 위치하는 기상대 및 자동기상관측소 (Fig. 1) 의 자료와 모델링 결과 자료를 이용하여 통계 분석을 실시하였으며, RMSE와 IOA의 정의는 아래의 식 (2)와 (3)에 나타낸 바와 같다.

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

$$IOA = 1 - \frac{N(RMSE)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i| + |O_i|)^2}, \quad 0 \leq IOA \leq 1 \quad (3)$$

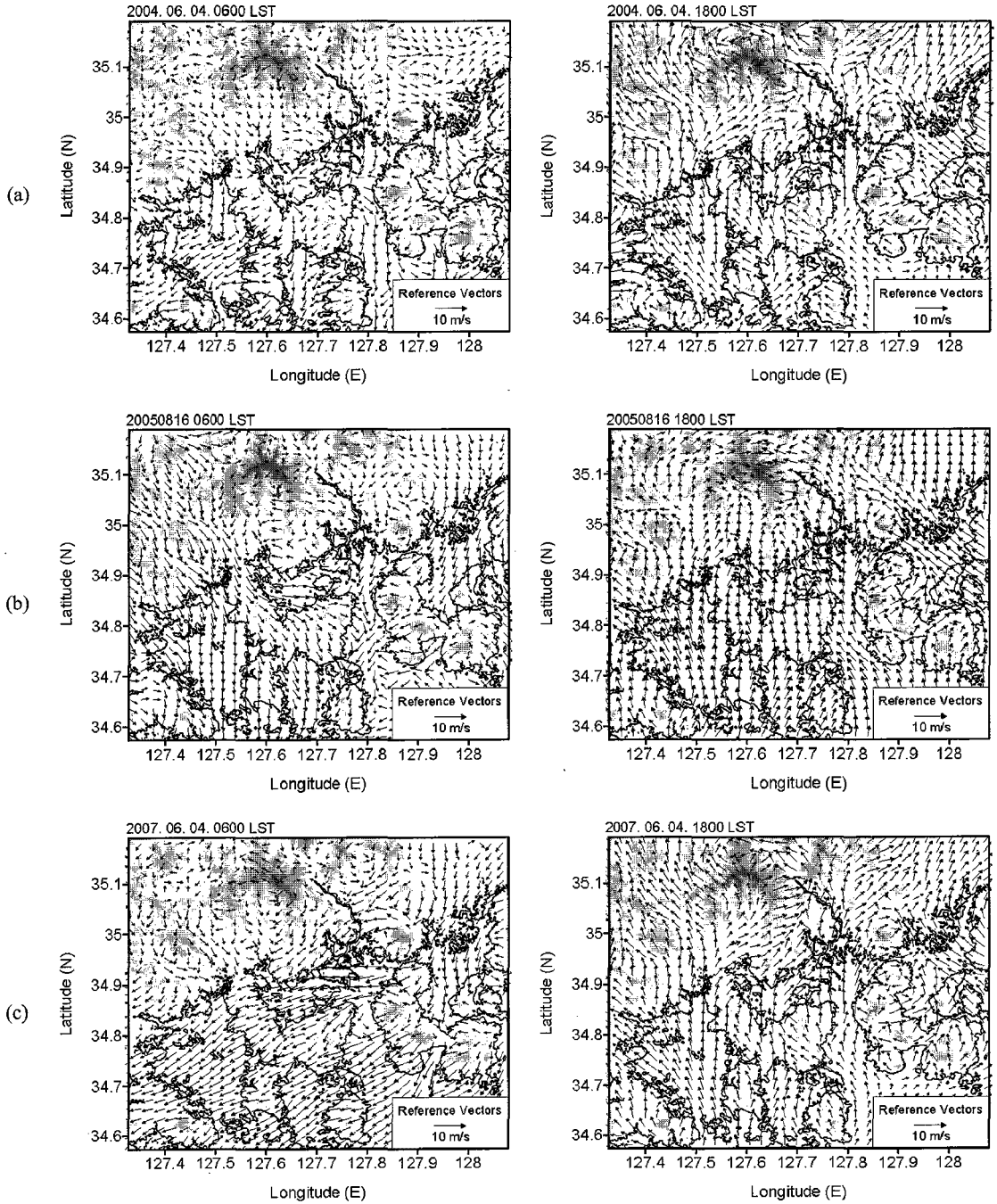


Fig. 4. Horizontal distributions of the simulated wind vectors (black) and observed wind vectors (red) at 0600 LST (left) and 1800 LST (right) on (a) 4 June 2004, (b) 16 August 2005 and (c) 4 June 2007.

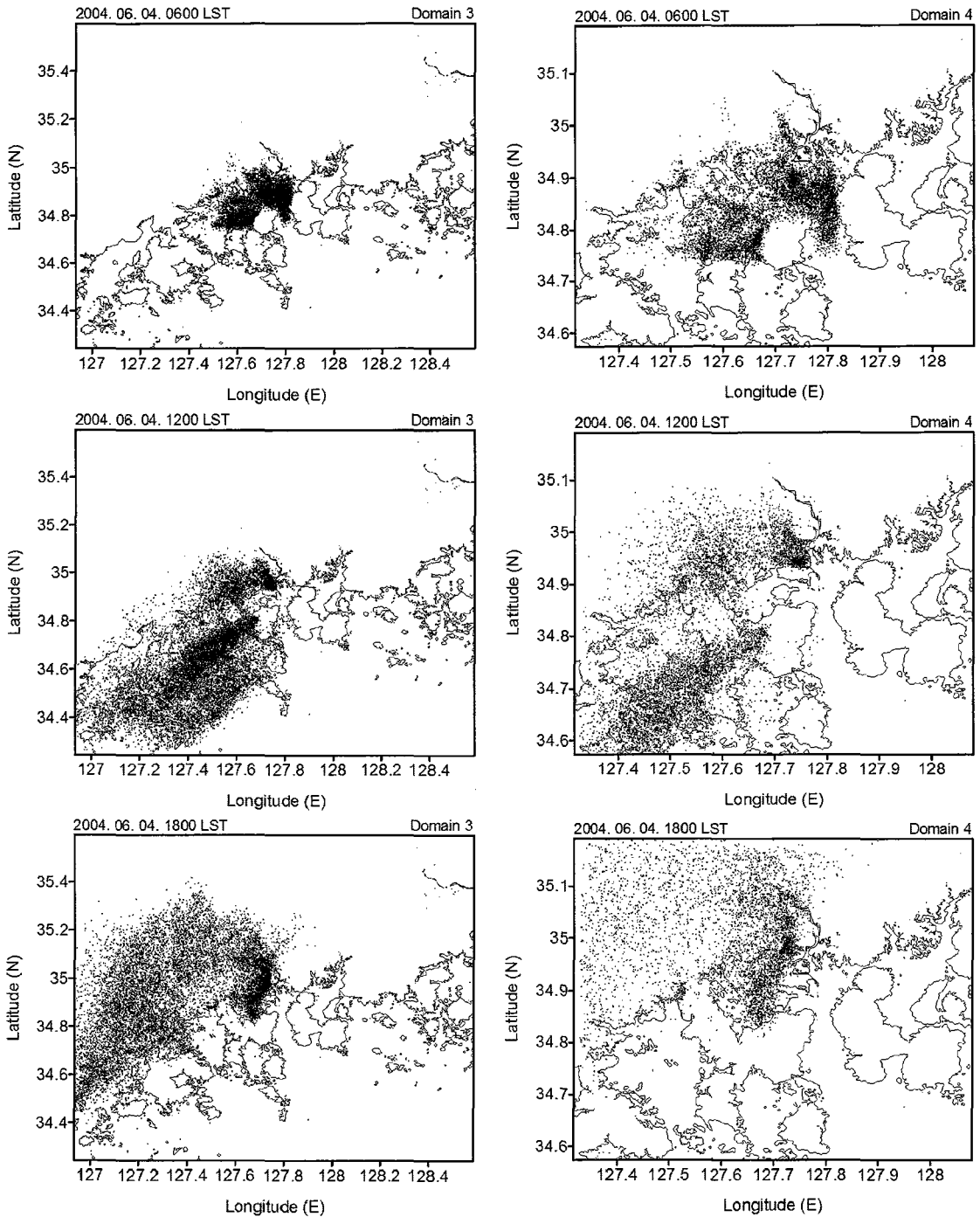


Fig. 5. Particle dispersion on 4 June 2004 at six hour intervals over domain 3 (left) and domain 4 (right).

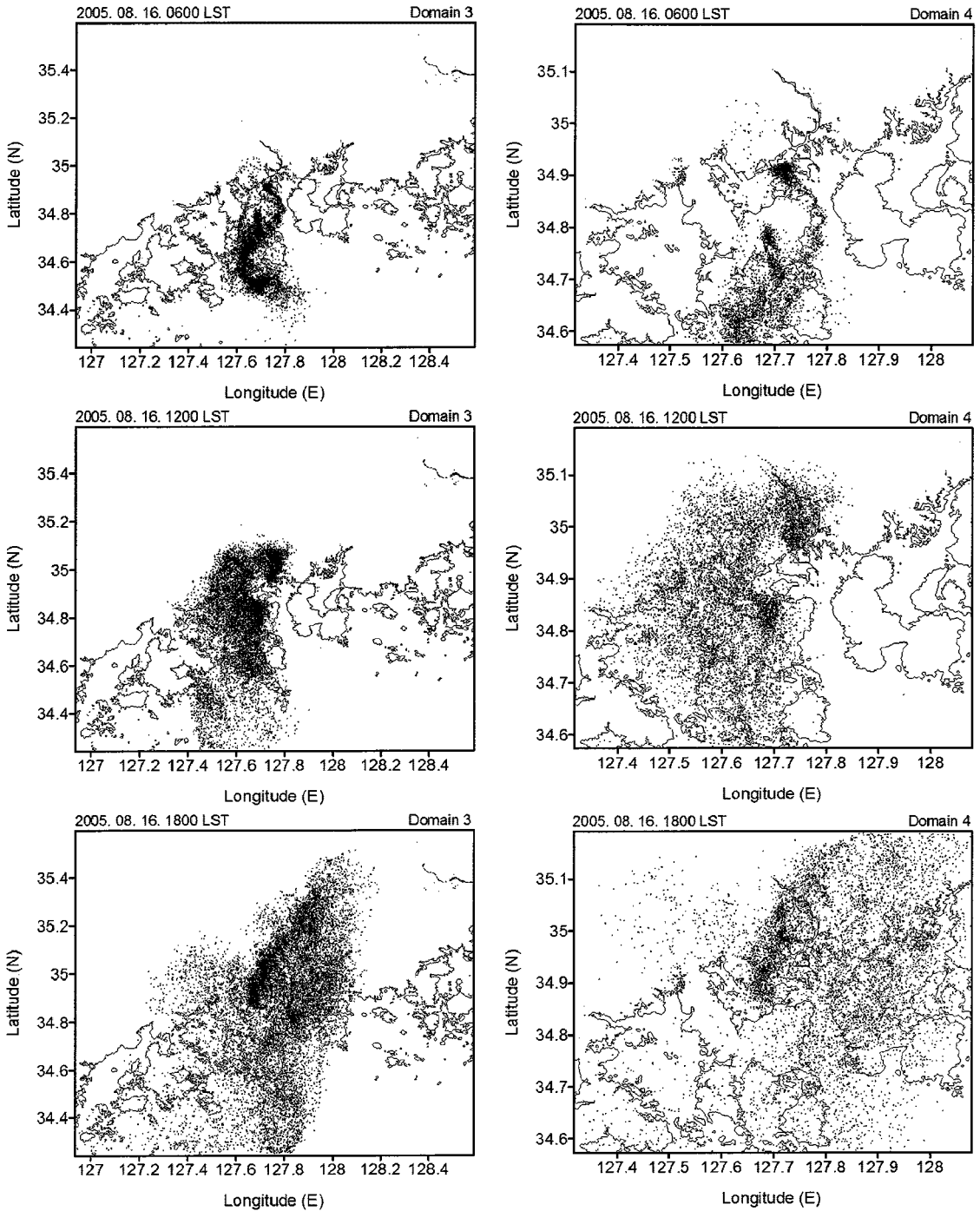


Fig. 6. Same as Fig. 4 but on August 16 2005.

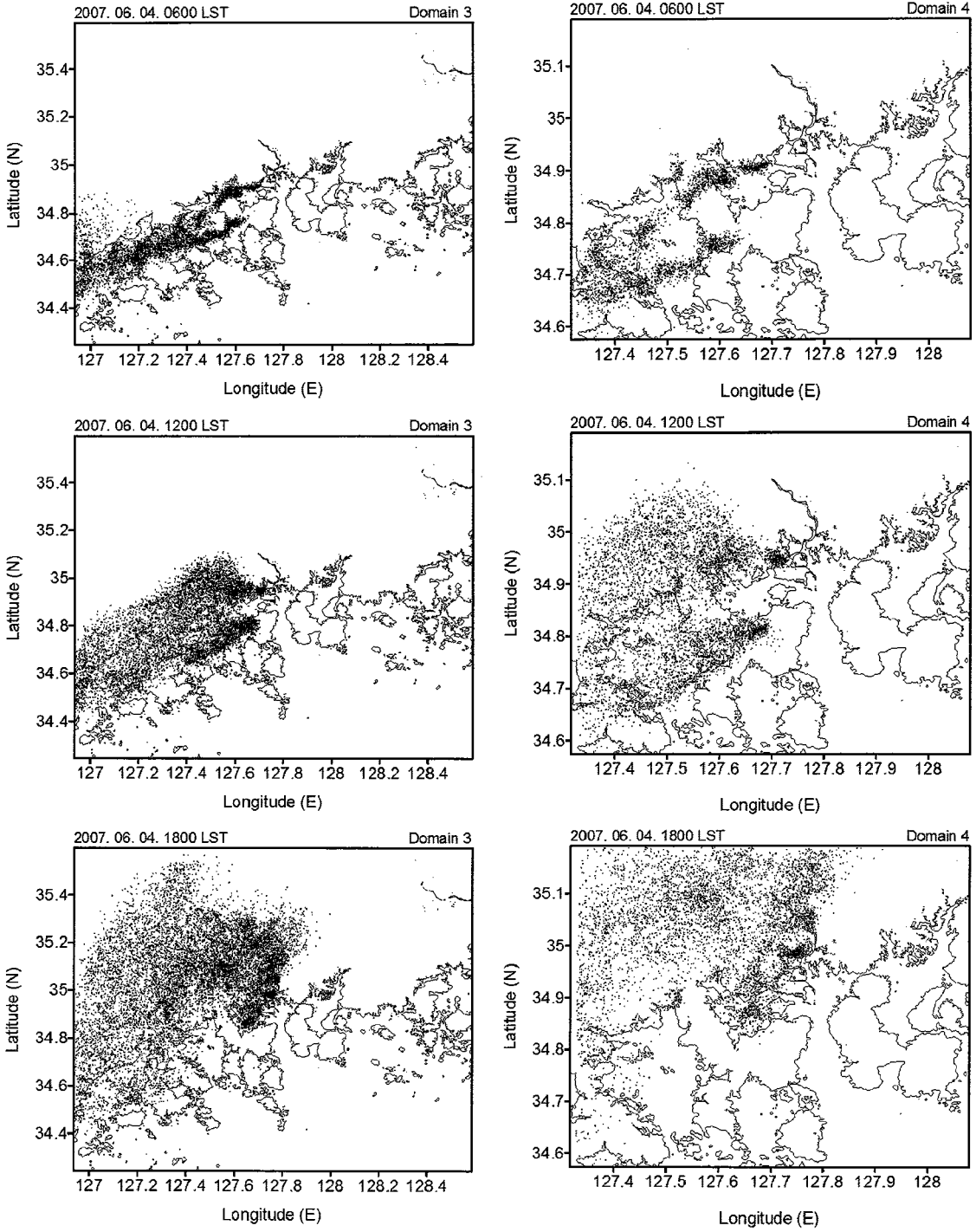


Fig. 7. Same as Fig. 4 but on 4 June 2007.

여기서 P_i 와 O_i 는 각각 모델 예측값과 관측값 평균의 차이, 관측값과 관측값 평균의 차이를 나타내며, N 은 데이터의 개수를 의미한다.

RMSE는 관측값과 예측값의 평균적인 차이를 나타냄으로서 두 독립적인 자료가 얼마나 밀접한지를 나타내는 통계치이다. 하지만 이러한 통계치가 상대적인 차이에 대한 정보를 제공하지 않고 값이 한정되지 않아서 다른 변수와의 비교가 어려우므로 이러한 단점을 보완하기 위해 두 자료의 일치도를 나타내는 IOA의 값을 추가로 계산하였다(Willmott, 1982). IOA는 관측값과 예측값이 전혀 일치하지 않는 0과 완벽히 일치하는 1사이의 값을 가지게 된다.

풍속과 기온에 대한 평균 RMSE와 IOA 값을 각각의 사례일에 대해 Table 2에 나타내었다. 평균 RMSE는 풍속에 대해 1.12 m/s에서 1.57 m/s의 값을 가지며, 기온에 대해서는 2.45 °C에서 2.51 °C 정도로 관측값과 예측값 사이에 비교적 작은 차이를 보였다. 이와 비슷하게 IOA 역시 풍속의 경우 약 0.7 m/s, 기온의 경우 0.89 °C에서 0.95 °C 정도로 높은 값을 나타내어 수치모의 결과가 유의함을 알 수 있었다.

Table 2. Mean statistical correlation (RMSE, IOA) between weather stations and corresponding model grid cells at the smallest grid, for wind speed and temperature for each case study

Case	Wind speed		Temperature	
	RMSE (m/s)	IOA	RMSE (°C)	IOA
1	1.12	0.69	2.45	0.95
2	1.52	0.71	2.51	0.89
3	1.57	0.70	2.50	0.89

3.3. 입자 확산

입자확산모델인 FLEXPART를 수행한 후, 여수국가산업단지과 광양제철소에서 배출되는 입자의 분포상태를 0600 LST부터 6시간 간격으로 그려보았다. 재순환현상을 고려하기 위해 최종 도메인과 해상도는 같지만 4배정도 넓은 면적으로 설정한 도메인 3은 왼쪽에, 광양만 권역만을 포함한 도메인 4는 오른쪽에 나타냈다.

Fig. 5는 첫 번째 사례일인 2006년 6월 4일로서 0600 LST에 배출된 입자들은 남서쪽으로 확산되는 경향을 보이며 이는 1200 LST에 뚜렷하게 나타난다. 이 때 입자들은 도메인 4 영역을 벗어나게 되므로 오른쪽에 있는 도메인 4만을 고려하는 경우, 무시되는 입자들이 존재하게 된다. 이후 해풍이 불고 있는 1800 LST에는 입자들이 배출직후 북쪽으로 확산되고 있으며 이전에 배출되었던 입자들은 북동쪽을 향해 되돌아오고 있다.

Fig. 6에 나타난 두 번째 사례일에는 0600 LST에 비교적 강한 육풍이 발생하여 두 배출원에서 배출된 입자들은 남쪽에 위치한 바닷가로 확산되는 모습을 볼 수 있다. 여수시 돌산지역 부근을 남쪽 경계로 설정한 도메인 4에서는 바다쪽으로 빠져나간 입자들의 확산 패턴을 더 이상 확인할 수 없음을 알 수 있다. 1200 LST 이후 육지 가열로 인해 발생하는 해풍을 따라 입자들은 북쪽으로 이동하게 되며 이러한 확산 패턴은 1800 LST까지 유지된다.

세 번째 사례일인 2007년 6월 4일의 경우는 지상 일기도와 수치모의 된 수평 바람장을 분석해 본 결과 일본 남쪽에 위치한 저기압이 전날부터 동쪽으로 이동해 옴에 따라 오전까지는 비교적 강한 동풍이 발생함을 알 수 있었다. 이로 인해 0600 LST에 배출된 입자들은 서쪽으로 확산되었으며 1200 LST에도 동풍의 영향을 받아 이동하고 있다 (Fig. 7). 오전까지 영향을 미쳤던 저기압이 동쪽으로 물러가면서 오후에는 남풍 계열의 해풍이 불어왔으며, 1800 LST에 보이는 입자들은 북쪽으로 확산되는 경향을 나타내었다.

도메인 4에서의 입자 수와, 도메인 3 중에서 도메인 4와 동일한 영역 내에 존재하는 입자의 수를 비교해 봄으로써(Fig. 8) 도메인의 크기에 따라 분포하는 입자 수에 차이가 남을 알 수 있었다. 이러한 차이를 구체적으로 살펴보기 위해 두 도메인에서의 입자 수의 차이를 Fig. 9에 나타내었다.

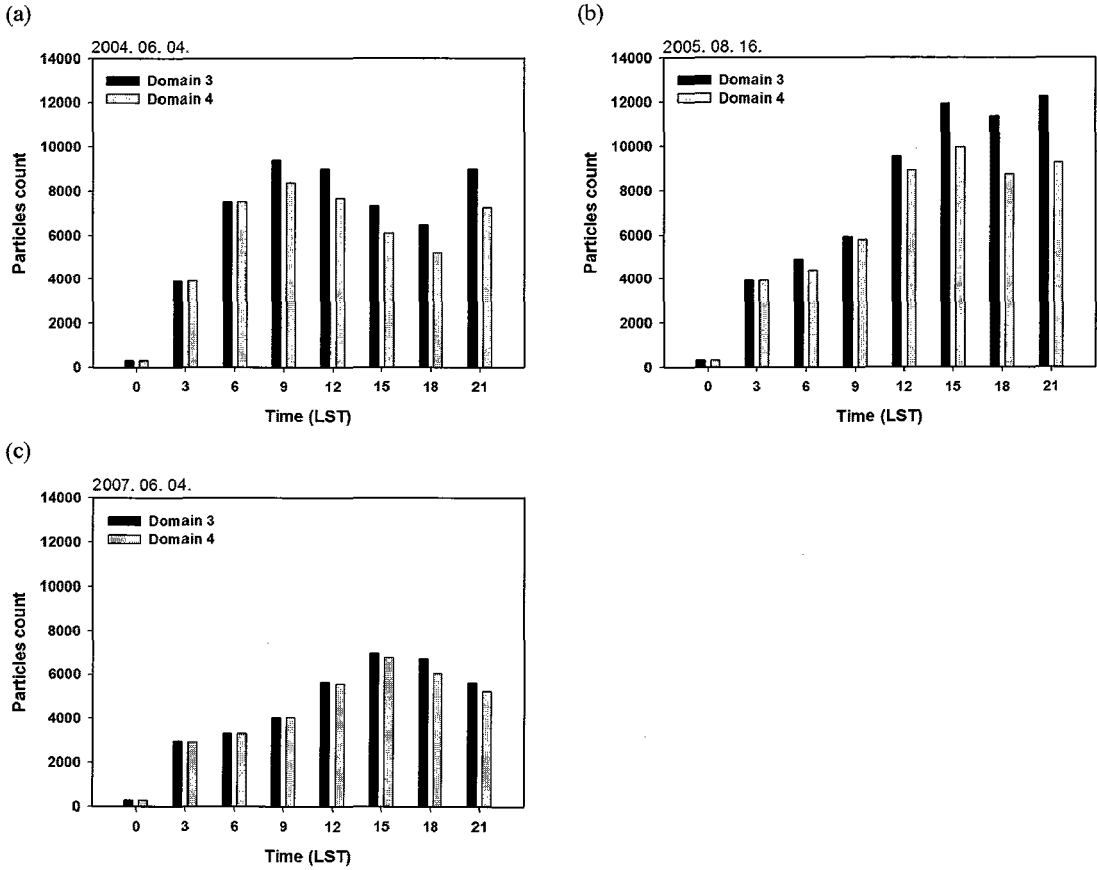


Fig. 8. Particles count at Domain 3 (in the same as Domain 4 only) and Domain 4 on (a) 4 June 2004, (b) 16 August 2005 and (c) 4 June 2007.

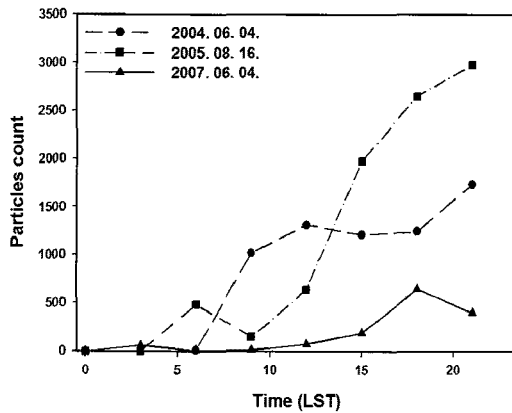


Fig. 9. Particles count difference between the two domains on each cases.

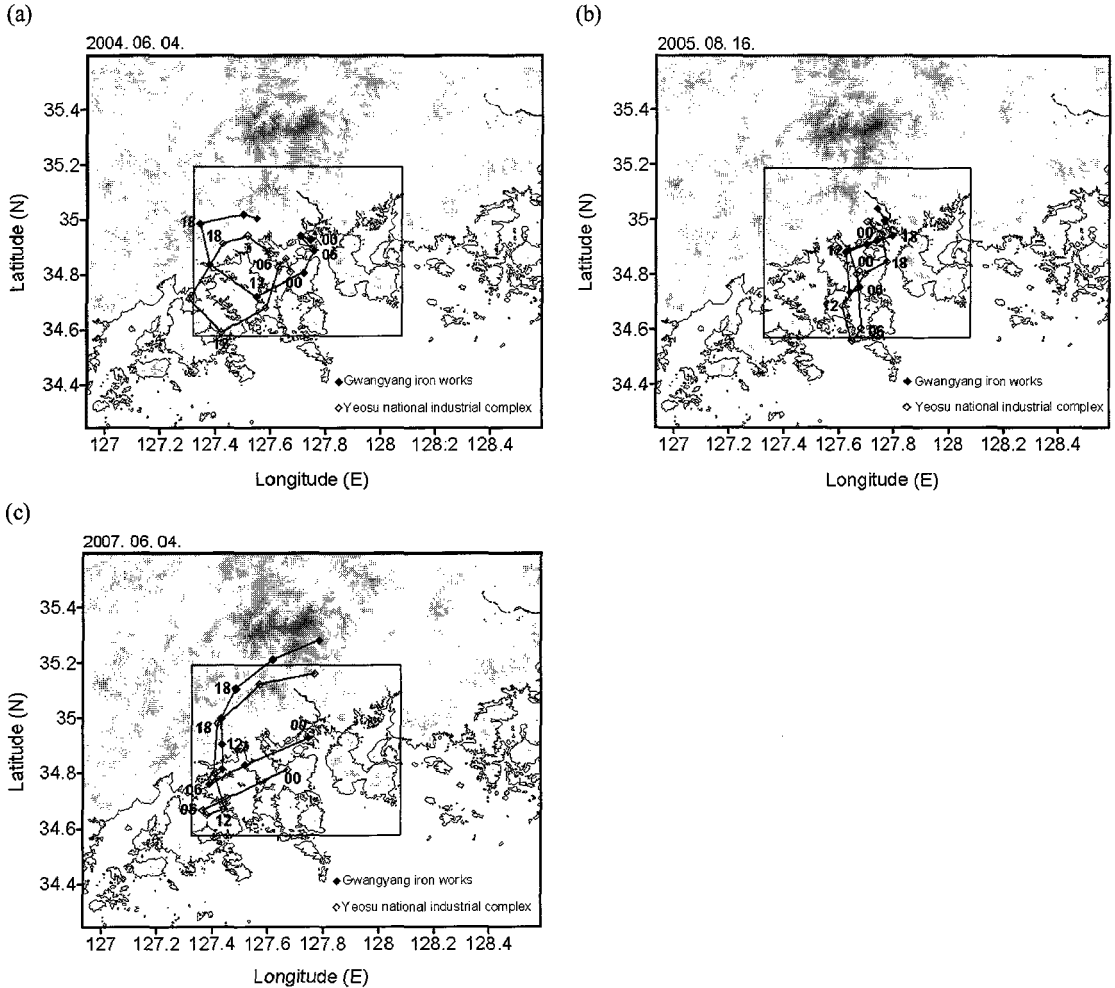


Fig. 10. Simulated plume trajectory at three hour intervals (a) 4 June 2004, (b) 16 August 2005 and (c) 4 June 2007. Release points are Gwangyang iron works and Yeosu national industrial complex. The inner rectangle indicates the smallest domain.

그 결과 첫 번째 사례일에 대한 수치모의 시작 시에는 두 도메인에 존재했던 입자의 수가 동일했으나 지남에 따라 차이가 증가하는 경향을 보였다. 이러한 차이는 2100 LST에 1730개로 가장 크게 나타났다.

국지적 대기운동이 활발하게 일어나 배출원에서의 재유입현상이 비교적 잘 나타나는 두 번째 사례일의 경우, 시간이 지날수록 두 도메인에서 입자수의 차이가 커질 것으로 예상되며 이는 Fig. 9에 나타난 결과와 일치한다. 즉 2100 LST에 도메인 3 중에서 도메인 4와 동일한 영역에 존재하는 입자의 수는 12204개인

반면 도메인 4에는 9231개의 입자만이 존재하여 약 3000개의 차이가 발생하는 것을 알 수 있었다.

세 번째 사례일의 경우, 두 도메인에 존재하는 입자수를 비교해보면 모의기간 내내 큰 차이가 나지 않음을 알 수 있다. 이는 해풍이 발생하기 전에 입자들은 이미 약한 종관장의 영향으로 인해 서쪽으로 멀리 확산되었기 때문으로 사료된다.

시간에 따른 입자들의 확산 패턴을 더 자세히 살펴보기 위해, 각 사례일별 플룸의 궤적을 Fig. 10에 그려 보았다. 검은선이 여수국가산업단지로부터 배출된 플

플룸의 이동 경로를 나타낸 것이고, 파란선이 광양제철소로부터 배출된 플룸의 이동 경로를 나타낸 것이다. 바깥 영역은 도메인 3을, 내부 영역은 도메인 4를 나타내며 포인트마다의 시간 간격은 세 시간이다.

첫 번째 사례일의 경우 (Fig. 10(a)) 광양제철소에서 배출된 입자들은 여수반도와 순천만을 거쳐 이동하며 결국 광양시로 재유입되었다. 여수국가산업단지에서 배출된 입자들 역시 고흥반도까지 확산되어 순천만 주변을 돌아오는 것으로 나타났다. 플룸의 궤적이 최종 도메인의 경계와 맞닿아 있어 재유입되는 입자들을 고려하기에는 현재 최종도메인의 크기가 다소 작게 설정되었음을 알 수 있다.

두 번째 사례일의 경우는 Fig. 10(b)에 나타낸 것과 같이 여수국가산업단지와 광양제철소에서 시작된 플룸의 궤적은 모두 여수반도를 거쳐 남쪽에 위치한 바닷가로 이동하며, 그 경로와 비슷하게 육지쪽으로 재유입되는 모습을 보인다. 이 때 여수국가산업단지에서 배출된 입자들은 배출원으로부터 최대 약 60 Km 까지 확산되었다가 해풍을 따라 다시 유입되는 것으로 나타났다. 따라서 첫 번째 사례일과 마찬가지로 현재 설정된 도메인의 크기만으로는 재순환현상을 고려하기 어려울 것으로 사료된다.

세 번째 사례일은 Fig. 10(c)에 보인바와 같이 플룸은 약한 종관장의 영향으로 고흥반도까지 비교적 빠르게 이동한 뒤 오후에는 북쪽을 향해 확산된 것으로 나타났다. 하지만 이 경우에는 모의기간이 종료되는 시간에 입자가 배출원 근처까지 재유입되는 모습이 나타나지 않았다. 또한 이는 Fig. 9에서 살펴본바와 같이 도메인 3과 도메인 4 사이에 입자 수의 차이가 작은 것으로 나타났으므로 현재 설정된 도메인의 크기에 큰 문제가 없는 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 해안가에 위치하며 다양한 배출원을 가지는 광양만 권역을 대상으로 공기과의 재순환현상을 수치모의하였다. 그리고 그 결과를 토대로 하여 수치모델 수행시 설정된 도메인의 크기가 재순환현상을 고려할 수 있는지에 대해 분석해보았다. 이러한 목적으로 종관규모 흐름 패턴이 다른 세 가지 사례

를 선정하여 증규모 기상모델인 WRF와 라그랑지안 확산모델인 FLEXPART를 이용하여 수치모의 하였다. 먼저 WRF모델 수행 결과 첫 번째 사례일과 두 번째 사례일의 경우에는 국지규모의 대기운동이 활발하여 오전에는 육풍이, 육지가 가열된 후에는 해풍이 발생하는 것으로 나타났다. 해륙풍순환은 두 번째 사례일에 더 뚜렷하게 발생하였다. 한편, 세 번째 사례일에는 일본 남쪽 해상에 위치한 저기압으로 인해 오전까지 약한 종관장의 영향을 받았으며, 저기압이 서쪽으로 물러난 오후에는 해풍이 모의되었다. 기상모델을 통해 얻어진 예측값들은 관측값과의 비교와 통계적 분석을 실시하여 유의성을 검증하였다. 기상장 수치모의에 이어 공기과의 재순환현상을 모의하기 위해 대기 중에서 반응하지 않는 입자를 지속적으로 대기 중에 방출하는 방식으로 FLEXPART 모델링을 실시하였다. 입자의 확산 분포를 살펴본 결과 첫 번째 사례일의 경우에는 배출원에서 배출된 입자들이 남서쪽방향으로 확산되었다가 배출원 부근으로 재유입되었고, 두 번째 사례일에는 남쪽으로 확산된 후 재순환되어 배출원 부근으로 돌아왔다. 마지막 사례일의 경우에는 오전에 약한 종관장의 영향을 받아 입자의 재유입 현상이 발생하지 않았다. 이와 같은 입자의 확산 패턴은 플룸 궤적 분석을 통해 다시 확인할 수 있었다. 끝으로 보성만과 통영시까지 포함하는 도메인 3과 광양만 권역을 포함하는 도메인 4에 존재하는 입자의 수를 비교해 보았다. 첫 번째 사례일과 두 번째 사례일의 경우에는 시간이 지남에 따라 두 도메인에서 입자 수의 차이가 증가하는 것으로 나타났으며, 이러한 차이는 도메인 4의 경계 혹은 경계를 벗어나 재유입되는 입자들 때문인 것으로 생각된다. 반면, 세 번째 사례일의 경우에는 두 도메인에서 입자 수의 차이가 비교적 작게 나타났다.

FLEXPART 모델링 결과 풍속이 약하고 맑은 날 연안지역에 위치한 광양만 권역에서 해륙풍순환에 의한 공기과의 재순환현상이 모의되었고, 재순환현상이 발생하는 경우 도메인 4만으로는 재순환현상을 고려하기에 다소 무리가 있는 것으로 판단되었다. 또한 광양만 권역의 재순환현상을 수치모의하기 위해서는 첫 번째 사례일에서 최종도메인의 남쪽 경계 및 서쪽 경계를 빠져나가는 입자들과 두 번째 사례일에서 최종

도메인의 남쪽 경계를 빠져나가는 입자들을 고려해야 함을 알 수 있었다. 따라서 현재와 동일하게 광양만 권역을 중심으로 하여 최종도메인을 설정하되 면적을 약 1.3배 증가시켜 (80×80 정도의 수평격자), 동쪽으로는 남해군을, 서쪽으로는 고흥 덕량만을, 남쪽으로는 여수 남면을, 북쪽으로는 백운산을 포함시키는 것이 적절하다고 사료된다.

대기 중에서 광화학반응을 일으키는 대기오염물질을 고려할 때, 재순환현상은 예상보다 더 심각하게 대기질에 영향을 미칠 수 있다는 점에서 재순환현상을 고려할 수 있는 도메인의 크기에 대한 논의는 의미가 있다고 생각된다. 재순환현상은 종관 상태에 따라 발생여부 및 공간적인 규모에 차이가 발생할 수 있으므로, 앞으로 다양한 종관 상태에 따른 사례일 분석을 통해 도메인의 크기에 관한 구체적인 가이드라인이 제시되어야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진개발사업(CATER2006-2205)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 최현정, 이화운, 임현호, 송재활, 2008, 광양만 권역에서의 고농도 오존 사례에 대한 기상 및 대기질 분석, 한국환경과학회지, 17(7), 743-753.
- Alper-Siman, T. D., Peleg, M., Matveev, V., Mahrer, Y., Seter, I., Luria, M., 1997, Recirculation of polluted air masses over the east mediterranean coast, Atmos. Env., 31(10), 1441-1448.
- Fast, J. D., Easter, R. C., 2006, Development of a Lagrangian Particle Dispersion Model Compatible with the Weather Research and Forecasting (WRF) Model, Pacific Northwest National Laboratory, 1-8.
- Hernandez, J. F., Cremades, L., Baldasano, J. M., 1994, Dispersion modelling of a tall stack plume in the spanish mediterranean coast by a particle model, Atmos. Env., 29(11), 1331-1341.
- Hurley, P., Manins, P., 1995, Meteorological modelling in high ozone days in Perth, Western Australia, J. appl. Met., 34(7), 1643-1652.
- Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S. K., Hnilo, J. J., Fiorino, M., Potter, G. L., 2002, NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2), Bull. Amer. Met. Soc., 83(11), 1631-1643.
- Levy, I., Mahrer, Y., Dayan, U., 2009, Coastal and synoptic recirculation affecting air pollutants dispersion: A numerical study, Atmos. Env., 43(12), 1991-1999.
- Lu, R., Turco, R. P., 1994, Air pollutant transport in a coastal environment. Part I: two-dimensional simulations of sea-breeze and mountain effects, J. Atmos. Soc., 51(15), 2285-2308.
- Manins, P. C., Physick, W. L., Hurley, P. J., Noonan, J. A., 1994, The role of coastal terrain in the dispersion of pollutants from Australia's major cities, Clean Air '94, Proceedings of the 12th International Conference of the Clean Air Society of Australia and New Zealand INC., Vol. 2, Perth, Western Australia, 179-188.
- Martin, M., Plaza, J., Andres, M. D., Bezares, J. C., Millan, M. M., 1991, Comparative study of seasonal air pollutant behavior in a Mediterranean coastal site: Castellon (Spain), Atmos. Env., 25(8), 1523-1532.
- Millan, M. M., Salvador, R., Mantilla, E., Artinano, B., 1996, Meteorology and Photochemical air pollution in Southern Europe: experimental results from EC research projects, Atmos. Env., 30(12), 1909-1924.
- National Center for Atmospheric Research, 2008, ARW Weather Research & Forecasting Version 3 Modeling System User's Guide, 74-75.
- Nguyen, K. C., Noonan, J. A., Galbally, I. E., Physick, W. L., 1996, Predictions of plume dispersion in complex terrain: Eulerian versus Lagrangian models, Atmos. Env., 31(7), 947-958.
- Robinson, J., Mahrer, Y., Wakshal, E., 1992, The effects of mesoscale circulation on the dispersion of pollutants (SO_2) in the eastern Mediterranean, southern coastal plain of Israel, Atmos. Env., 26(3), 271-277.
- Stohl, A., Hittenberger, M., Wotawa, G., 1998, Validation of the lagrangian particle dispersion model FLEXPART against large-scale tracer experiment data, Atmos. Env., 32(24), 4245-4264.
- Stohl, A., 2002, The Flexpart Particle Dispersion Model Version 5.0 User's Guide, 2-4.
- Willmott, C. J., 1982, Some comments on the evaluation of model performance, Bull. Amer. Met. Soc., 63(11), 1309-1313.