

광양만 권역의 영역 설정에 따른 입자확산 및 대기질 수치모의 비교

Numerical Simulation and Comparison of Particle Dispersion and Air Quality with Domain Setting of Gwangyang Bay Area

이 현 미 · 이 화 운* · 이 순 환¹⁾

부산대학교 지구환경시스템학부, ¹⁾부산대학교 환경문제연구소
(2010년 5월 12일 접수, 2010년 7월 12일 수정, 2010년 9월 28일 채택)

Hyun Mi Lee, Hwa Woon Lee* and Soon Hwan Lee¹⁾
Division of Earth Environmental System, Pusan National University
¹⁾*Institute of Environmental Studies, Pusan National University*
(Received 12 May 2010, revised 12 July 2010, accepted 28 September 2010)

Abstract

Recirculation of air mass in coastal region occurs because of the change from land to sea breeze and was shown to produce a contrary result on air quality. This study examines the numerical simulation to analyze the effect of recirculation flow in Gwangyang Bay, Korea. For this purpose two case studies are performed by the WRF-FLEXPART-CMAQ modeling system, each for a different Meso-Synoptic Index. Additionally this research make a comparative study of large domain (Domain L) and small domain (Domain S). The horizontal wind fields are simulated from WRF. Changes in the land-sea breeze have an effect on the particle dispersion modeling. The numerical simulation of air quality is carried out to investigate the recirculation of ozone. Ozone is transported to eastward under strong synoptic condition (Case_strong) because of westerly synoptic flow and this pattern can confirm in all domain. However ozone swept off by the land breeze and then transported to northward along sea breeze under conditions of clear sky and weak winds (Case_weak). In this case re-advected ozone isn't simulate in Domain S. The study found that recirculation of air mass must be concerned when numerical simulation of air quality is performed in coastal region, especially on a sunny day.

Key words : FLEXPART, Recirculation, Land-sea breeze, CMAQ

1. 서 론

해륙풍은 해안가에 위치한 대다수의 도시에서 나

타나는 중규모 순환이다. 이에 대한 최초의 연구는 Defant (1951)에 의해 이루어졌으며, 종관규모 바람과 대기 안정도의 영향을 포함하였다. 이후 해륙풍 순환의 물리적인 근거는 다양한 선행연구에 의해 밝혀져 왔다 (Arrit, 1989; Estoque, 1962). 특히 복잡한 지형, 코리올리의 영향, 종관규모의 바람, 대기 안정도에 따

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)51-510-2291, E-mail : hwlee@pusan.ac.kr

른 흐름에 대한 분석은 현재까지 관심 있는 연구 주제로 여겨지고 있다(Arrit, 1993).

주기적인 해륙풍 순환은 연안지역에서 대기오염물질 확산에 중요한 영향을 미치며(Lu and Turco, 1995; Lyons *et al.*, 1995), 관측 및 수치 연구들을 통해 해륙풍이 어떻게 대기오염물질을 육지로 수송하고, 순환 안에 물질들을 가두어 놓는지에 대해 입증하였다(Mahrer, 1991). 한편 Lu and Turco(1994)는 해륙풍 순환이 언덕이나 산지를 포함한 복잡한 지형이 존재하는 해안가에서 발생한다면 대기오염물질 및 바람장의 복잡성은 증가한다고 주장하였다.

우리나라는 반도 형태로, 복잡한 해안선 및 산지를 포함하는 지형적 특성을 가지고 있다. 이로 인해 다양한 국지 순환계가 발달하여 수치모의에 어려움이 발생한다(Lee *et al.*, 2008). 특히 연구 대상 지역인 광양만 권역은 백운산(1,218 m), 지리산(1,915 m), 와룡산(799 m) 등과 같은 크고 작은 산들과 접해있으면서, 복잡한 해안선을 가지는 연안지역에 위치하는 지형적 특성으로 인해 국지풍 순환이 복합적으로 발생한다. 또한 광양만 권역에는 우리나라의 대표적인 석유화학 산업단지인 여수국가산업단지와 광양제철소 등을 비롯하여 다수의 지방산업단지, 화력발전소 등이 조성되어 있다. 이곳에서 배출되는 물질은 대기질에 큰 영향을 미치며, 광양만 권역의 복잡한 풍계와 결합할 경우 고농도 대기오염 현상을 발생시키기도 한다. 특히 해륙풍 순환에 의해 공기괴가 배출원으로 되돌아오는 재순환 현상은 해안지역에서의 대기질에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Ainslie and Steyn, 2007).

재순환 현상 분석을 위한 수치모의 시 도메인의 크기가 작게 설정되면 재유입 되는 공기괴를 고려할 수 없으며, 그 결과 해안지역에서의 재순환 현상이 대기오염에 미치는 영향이 간과될 우려가 있다. 이처럼 정확한 수치모의를 위해서는 공기괴의 재순환 현상을 이해하고, 수치모의 시 고려되어야 함에도 불구하고 광양만 권역에 대해서는 이에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 중규모 기상모델인 The Weather Research and Forecasting Model(이하 WRF)과 라그랑지안 입자확산모델인 FLEXPART를 이용하여 광양만 권역에서 공기괴의 재순환 현상을 모의해보았다. 이 때 종관적 특성과 모델링 시 설정한 도메인

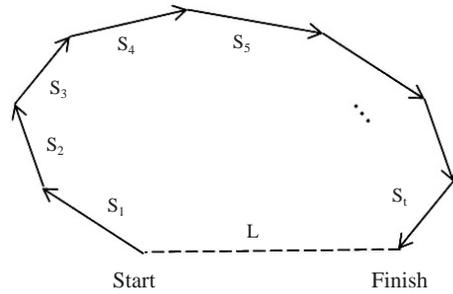


Fig. 1. An instance of particle's movement.

크기에 따른 특성을 중점적으로 분석해보고자 하였으며, 이후 The Community Multiscale Air Quality Modeling System(이하 CMAQ)을 이용한 대기질 수치모의를 통해 재순환 현상이 오존농도의 수평분포에 미치는 영향을 분석해보았다.

2. 연구방법

2.1 사례일 선정

사례일은 Meso-Synoptic Index를 이용하여 선정하였다(Lee *et al.*, 2010). Meso-Synoptic Index는 입자가 바람에 의해 그림 1과 같이 움직인다고 할 때, 입자 이동 시작 시 위치와 이동 종료 시 위치 사이의 거리(L)와 입자가 이동한 총 거리($\sum S_i$)의 비로 나타내며, 그 값이 1에 가까울수록 풍향 변화량은 작다고 할 수 있다.

2005년부터 2007년(5월, 6월, 8월)까지 여수, 남해, 광양, 순천 관측소의 풍향·풍속 자료를 이용하여 Meso-Synoptic Index를 산출한 후, 상관도 분석을 통해 지형이 복잡한 광양만 권역에 가장 잘 적용될 수 있는 지점으로 여수를 선정하였다. 대기질 관측값과 비교해본 결과 입자가 이동한 총 거리($\sum S_i$)가 300 이상인 경우 장거리 수송으로 인해 고농도 대기오염이 발생하지 않는 것으로 나타났기 때문에, 입자가 이동한 총 거리($\sum S_i$)가 300 이하인 경우 중에서 Meso-Synoptic Index가 다른 두 사례일을 선정하였다.

첫 번째 사례일은 Meso-Synoptic Index가 0.79로 나타난 2005년 6월 23일(이하 Case_strong)이다. 그림 2(a)에 나타난 지상 일기도를 살펴본 결과 우리나라는 주변에 위치한 저기압과 전선의 영향을 받았으

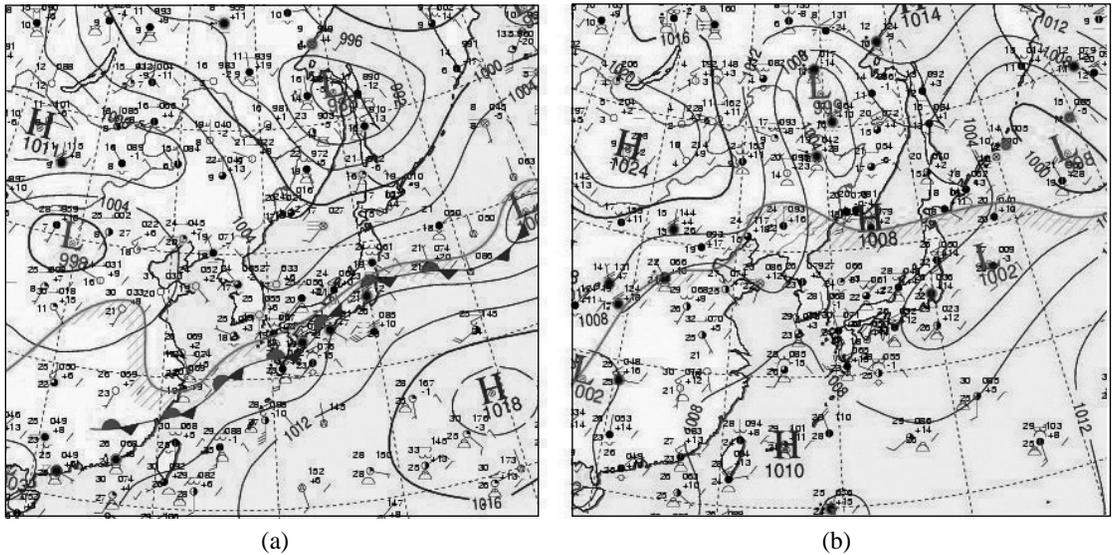


Fig. 2. Surface weather maps at 0900 LST on (a) June 23 2005 and (b) August 16 2005.

며, 이로인해 광양만 권역에서 서풍 계열의 비교적 강한 바람이 관측되었다. 두 번째 사례일은 Meso-Synoptic Index가 0.52로 비교적 작게 나타난 2005년 8월 16일(이하 Case_weak)이다. 그림 2(b)의 지상 일기도를 보면 한반도는 동해와 동중국해에 중심을 둔 고기압의 사이에 위치하고 있으며, 등압선 간격이 매우 넓어 풍속이 약하고 맑은 날씨를 보였다. 그 결과 국지규모의 대기운동이 발생할 가능성이 높은 것으로 예상되었다.

2.2 실험설계

먼저 NCEP FNL (The National Centers for Environmental Prediction Final Operational Global Analysis data) 자료를 초기 입력자료로 사용하여 WRF 수치모의를 실시하였으며, 이 때 4개의 등지격자를 설정하였다. 수평격자 크기는 각각 9km, 3km, 1km, 1km로 중규모 및 중규모 대기운동을 살펴볼 수 있도록 하였으며, 모델 도메인은 그림 3에 나타내었다. 세 번째 도메인과 네 번째 도메인은 해상도는 동일하지만 크기를 다르게 설정하였고, 두 도메인 모두 Domain 2의 결과를 입력자료로 사용하였다. 도메인 설정 시에는 입자 모델을 이용하여 연안지역에서의 확산 모델링을 수행한 Lee *et al.* (2010)의 선행연구를 참고하였

다. 선행연구에서 고힘반도와 지리산, 통영시를 포함하는 영역 내에서는 재순환 현상에 따른 입자의 이류·확산을 살펴볼 수 있었으며, 광양만을 중심으로 여수반도와 남해도를 포함하는 영역 내에는 배출된 입자의 30%만이 분포하였다. 따라서 본 연구에서는 수평 해상도는 동일하게 하고, 수평 격자수는 세 번째 도메인(이하 Domain L)을 151×151, 네 번째 도메인(이하 Domain S)을 70×70으로 설정함으로써 재순환의 반영 여부에 따른 영향을 살펴보고자 하였다. 이러한 실험 설계를 바탕으로 각 사례일마다 초기화 시간을 포함하여 48시간 동안 수치 적분을 실시하였다.

WRF를 이용한 기상장 수치모의 후, Domain L과 Domain S의 WRF 출력 파일을 이용하여 FLEXPART 모델링을 실시하였다. FLEXPART는 라그랑지안 입자확산모델로서 대기 중에 입자를 띄우는 방식으로 공기괴의 재순환 현상을 수치모의 할 수 있으며, 매 시간 입자 각각의 정보를 제공하여 정량적인 분석을 하는데 유용하다. 수치모의의 시 배출원은 광양제철소와 여수국가산업단지로 가정하였고, 각각의 배출원에서는 대기 중에서 반응하지 않는 입자가 1분에 10개씩, 모의기간인 24시간 동안 지속적으로 배출되었다. 또한 입자는 연직고도 20m 이내에서 무작위로 배출

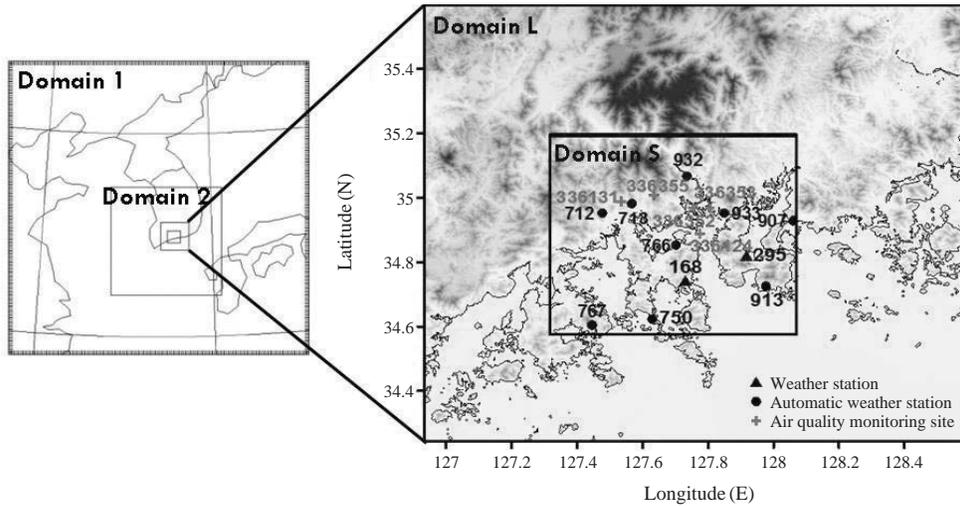


Fig. 3. Model domain for WRF and location of observation sites (168: Yeosu, 295: Namhae, 712: Suncheon, 713: Gwangyang, 750: Baekya, 767: Youngnam, 766: Yecheon I. C., 907: Samcheonpo, 913: Sangjумыun, 932: Hadong, 933: Geumnam, 336124: Wolrae, 336131: Jangcheon, 336352: Jungdong, 336353: Taein, 336355: Chiulsungli).

되도록 설정하였다.

이후, 광양만 권역에서의 재순환 현상이 오존 농도에는 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위하여 대기질 수치모의를 수행하였다. 각각의 사례에 대해 WRF의 Domain L과 Domain S 결과를 입력자료로 사용하였다. CMAQ에 입력되는 배출량은 환경부에서 산정한 대기보전 정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, 이하 CAPSS) 자료를 이용하였고, 수치모의 기간은 WRF 모델링과 동일하게 각 사례마다 48시간으로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기상장 수치모의

3.1.1 수평 바람장 분석

실험 설계를 토대로 WRF 모델링을 수행한 후, 공기괴의 흐름 패턴을 살펴보기 위해 Domain L과 Domain S를 대상으로 수평 바람장 분석을 실시하였다.

그림 4에 나타난 Case_strong의 경우, 해륙풍 순환은 광양만 부근에서 약하게 나타나고, 비교적 강한 서풍 및 남서풍 계열의 바람이 남해안 부근에서 지속

적으로 발생하는 모습을 보였다. 이를 통해 일중 지속적으로 서풍 계열의 바람이 발생하는 Case_strong에서 공기괴의 재유입 현상 가능성은 낮은 것으로 분석되었다. 그림 5에 제시한 Case_weak의 경우, 0600 LST에 여수반도와 광양만 부근에서는 북풍 계열의 육풍이 뚜렷하게 발생하였다. 1800 LST에는 고흥반도, 순천만, 여수반도, 광양만, 남해도 모두에서 남풍 계열의 비교적 강한 해풍이 발생하였고, 이들은 골을 따라 내륙 안쪽으로 깊숙이 유입되었다. 광양만 권역에서 발생했던 해풍 및 육풍은 Domain S 영역을 벗어나 남해에서도 모의되었다. 이와 같이 해륙풍 순환이 활발한 Case_weak의 경우에는, 오전에 육풍을 따라 바다로 나갔던 공기괴가 오후에 해풍을 타고 재유입 될 수 있는 가능성이 존재함을 예상할 수 있다.

3.1.2 관측치와의 비교

수치모의 결과가 신뢰성이 있는지 살펴보기 위해 최종 도메인 안에 위치하는 기상대 및 자동기상관측소(그림 3)의 자료와 모델링 결과 자료를 이용하여 기온, 풍속 및 풍향 관측값과의 비교를 실시하였다. 이 때 Domain L과 Domain S의 예측값을 모두 나타내어 두 도메인 사이에 어떤 차이가 있는지도 알아보았다.

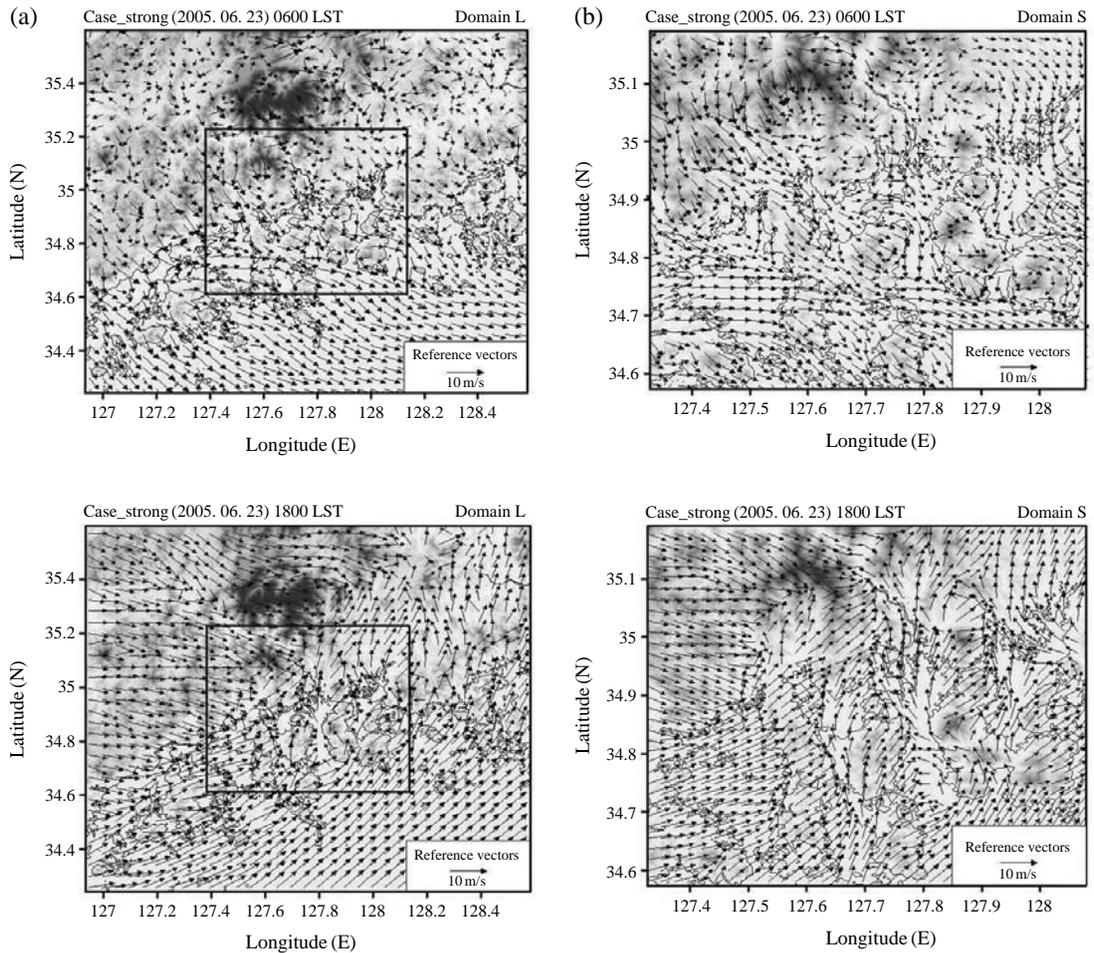


Fig. 4. Horizontal distributions of the simulated wind vector over (a) Domain L and (b) Domain S on 23 June 2005. The inner rectangle indicates the smallest domain.

Case_strong의 풍속, 풍향에 대해 삼천포, 여수 지점에서의 비교 결과를 그림 6(a)에 나타내었다. 풍속은 일변화 경향을 비교적 잘 모의하였으며, 평균 Root Mean Square Error (이하 RMSE)는 Domain L의 경우 1.75, Domain S의 경우 1.81로 나타나 관측값과 예측값의 차이가 크지 않았다. 또한 풍향의 경우, 약한 해륙풍 순환으로 인해 여수 지점에서 뚜렷한 풍향 변화가 없는 것으로 나타났다. 그림 6(b)에는 Case_weak의 결과를 제시하였고, 전반적으로 Case_strong에 비해 풍속이 낮은 것을 알 수 있었다. 평균 RMSE는 Domain L의 경우 1.35, Domain S의 경우 1.38로 나타나 관측값과 예측값이 비교적 유사한 것으로 나

타났다. 한편, 해륙풍 순환이 뚜렷하게 나타난 Case_weak에서 풍향은 1200 LST부터 변하기 시작하며 이는 수치모의에서 잘 나타났다. 육풍에서 해풍으로의 전이기간에 발생한 관측값과 예측값의 차이는 광양만 권역의 복잡한 지형 때문인 것으로 분석되었다.

시계열 분석을 통해 두 도메인 사이에 풍속과 풍향 차이는 크지 않음을 알 수 있었다. 다만 그림 7에 나타난 일평균 풍속 비교를 통해서도 알 수 있듯이 도메인 경계에 위치한 몇 개의 지점에서 Domain L에 비해 Domain S에서 풍속을 강하게 모의하는 특징이 나타났다. 이는 Domain L이 지리산을 포함한 크고 작은 지형을 1 km 격자로 모의함으로써 발생하는 큰

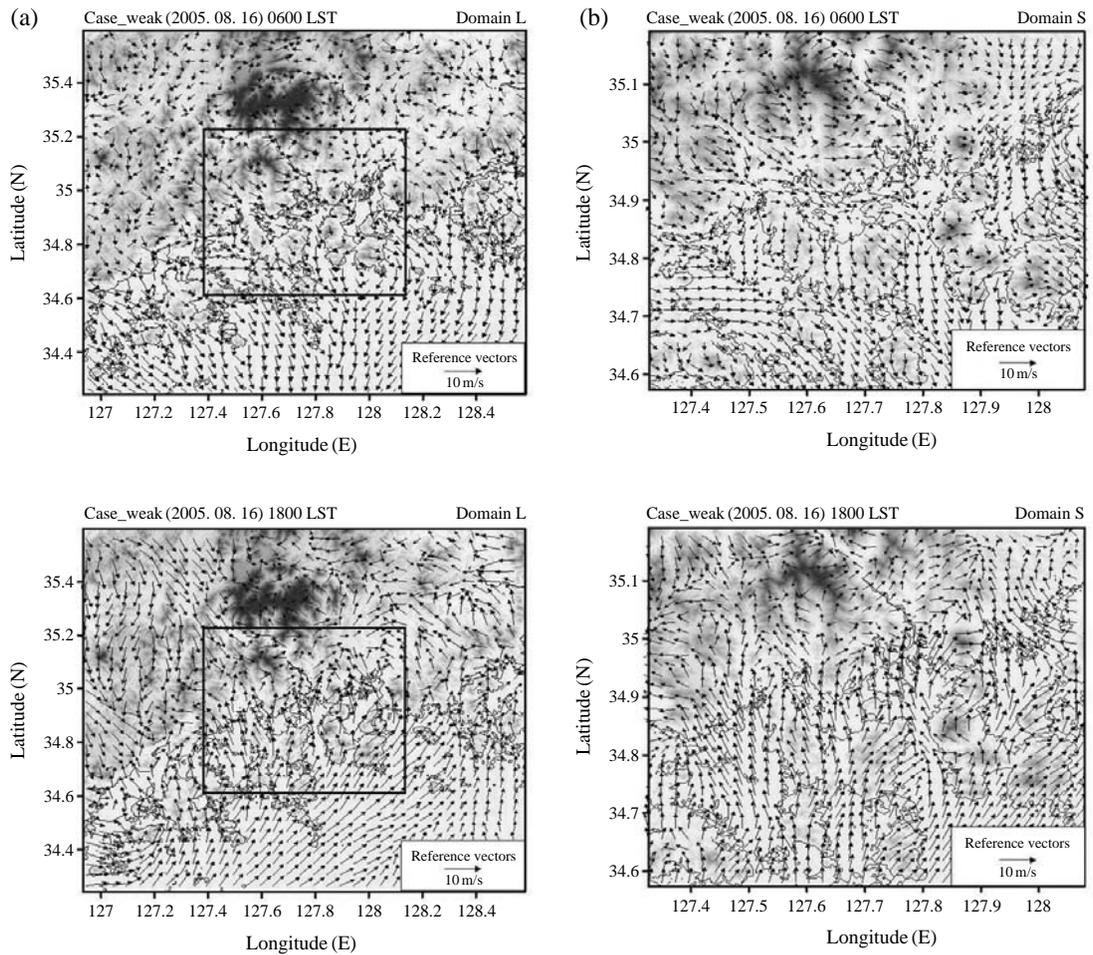


Fig. 5. Same as Fig. 4 but on 16 August 2005.

거칠기로 인해 풍속이 약화된 것으로 사료된다. 반면 Domain S는 수평 해상도가 3 km인 Domain 2의 결과를 초기 데이터로 사용하여 지리산 등의 주변 지형을 비교적 평탄하게 모의함으로써 Domain L에 비해 강한 풍속을 나타낸 것으로 분석하였다. 특히 서풍 계열의 바람이 지속적으로 발생하는 Case_strong의 경우에 삼천포 지점의 북동쪽에 위치한 와룡산(799 m)은 Domain S에서는 모의되지 않지만 Domain L에서는 모의되어 두 도메인 사이에 풍속차가 나타났다. 이처럼 동일한 격자 간격일지라도 경계지역에서 도메인 크기에 따른 바람장 차이가 존재하며, 바람장의 차이는 다음 절에서 나타낼 입자 및 오존을

포함한 공기괴의 확산에 영향을 초래할 것으로 예상된다. 하지만 본 연구에서는 지역 특색에 따른 풍속, 풍향 차이보다는 공기괴의 총 이동거리를 의미하는 전체적인 순환장의 규모를 중요시하였다.

한편 기온의 경우 일출 직후인 7시경부터 상승하여 13시경에 최고값을 나타내는 일변화 경향을 잘 예측하고 있다(그림 8). 평균 RMSE는 Case_strong에 대해 Domain L과 Domain S에서 각각 1.95°C, 1.94°C로 나타났으며, Case_weak의 경우 Domain L과 Domain S에서 각각 1.80°C, 1.82°C로 나타났다. 이를 통해 기온의 수치모의 결과는 유의하며, 두 도메인 사이에서의 기온 차이가 적음을 알 수 있다.

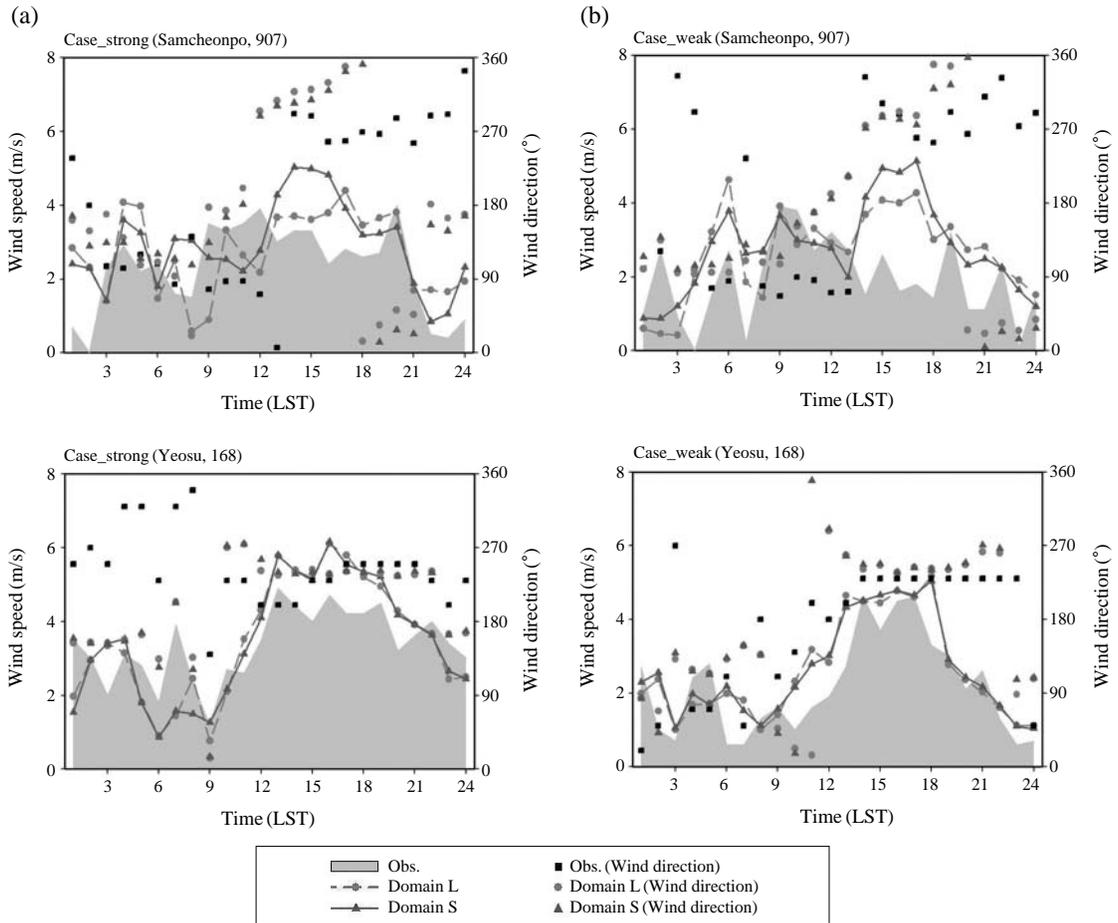


Fig. 6. Comparison of observed and simulated wind speed, direction at Samcheonpo (top), Yeosu (bottom) for (a) 23 June 2005 and (b) 16 August 2005.

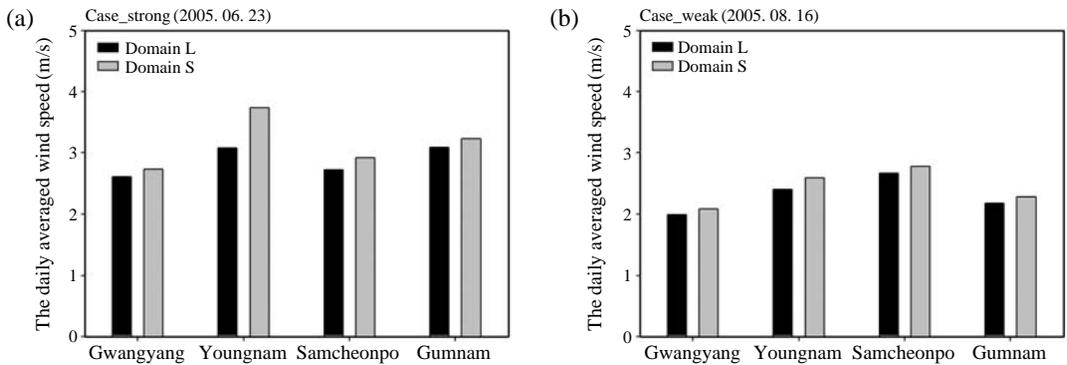


Fig. 7. Comparison of the daily averaged wind speed of Domain L and Domain S at Gwangyang, Youngnam, Samcheonpo and Gumnam for (a) 23 June 2005 and (b) 16 August 2005.

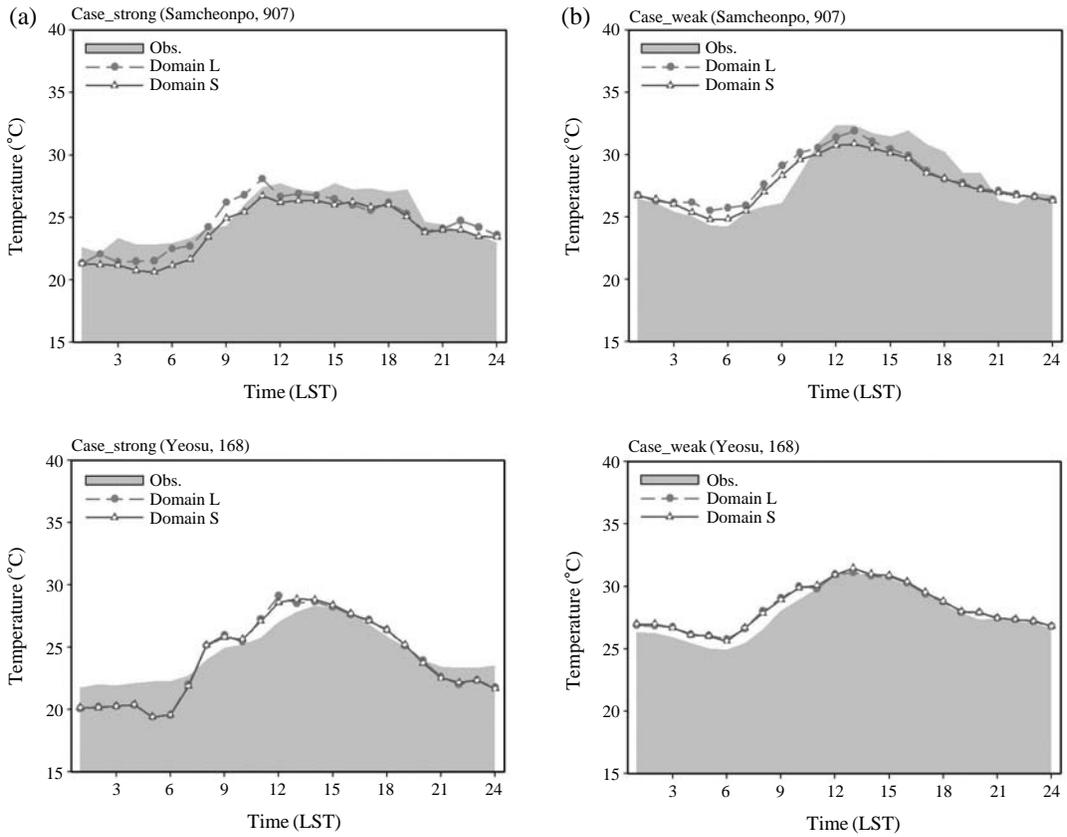


Fig. 8. Same as Fig. 6 but for temperature.

3.2 입자 확산 수치모의

배출된 입자들의 수평 확산 패턴을 분석해본 결과 Case_strong의 경우 입자들이 지속적으로 동쪽으로 확산되며(그림 9), 이러한 경향은 Domain S에서도 확인할 수 있었다. Case_weak의 경우에는 수평 바람장에서 모의되었던 해륙풍 순환을 따라 확산되는 패턴이 Domain L에서 잘 나타났으며(그림 10), Domain S 영역만을 고려한 경우에는 경계를 벗어나는 입자들이 반영되지 않는 것으로 나타났다.

시간에 따른 입자들의 수평 확산 패턴을 더 자세히 살펴보기 위해 각 사례별 플룸의 궤적을 그려보았다. Case_strong의 경우(그림 11(a)) 광양제철소에서 배출된 입자들은 진주만을 통과하여 동쪽으로 이동하는 것으로 나타났으며, 여수국가산업단지에서 배출된 입자들도 광양제철소에서 배출된 입자들과 비슷한 경로로 비교적 빠르게 이동하였다. Case_weak의 경

우에는(그림 11(b)) 광양제철소에서 배출된 입자들이 여수반도를 거쳐 남해도 인근까지 이동한 뒤, 1500 LST 이후에 광양만을 따라 재유입되는 것을 알 수 있었다. 여수국가산업단지에서 배출된 입자들은 여수만을 돌아 확산된 후 1500 LST부터는 광양만을 따라 재유입되며, 입자들은 배출원으로부터 최대 약 60km 까지 확산되었다가 해풍을 따라 다시 유입되는 것으로 나타났다. 이 때 플룸의 궤적이 최종도메인의 경계와 맞닿아 있어 재유입되는 입자들이 최종도메인에서는 고려되지 않을 가능성이 있다.

이후 도메인 영역 내에 존재하는 입자의 수를 세어 도메인 크기에 따른 차이를 분석해보았다(그림 12). 분석 시 Domain S에서의 입자 수와, Domain L 중에서 Domain S와 동일한 영역 내에 존재하는 입자의 수를 비교하는 방법을 이용하였다. 그 결과 Case_strong의 경우에는 두 도메인 사이의 입자 수 차이는

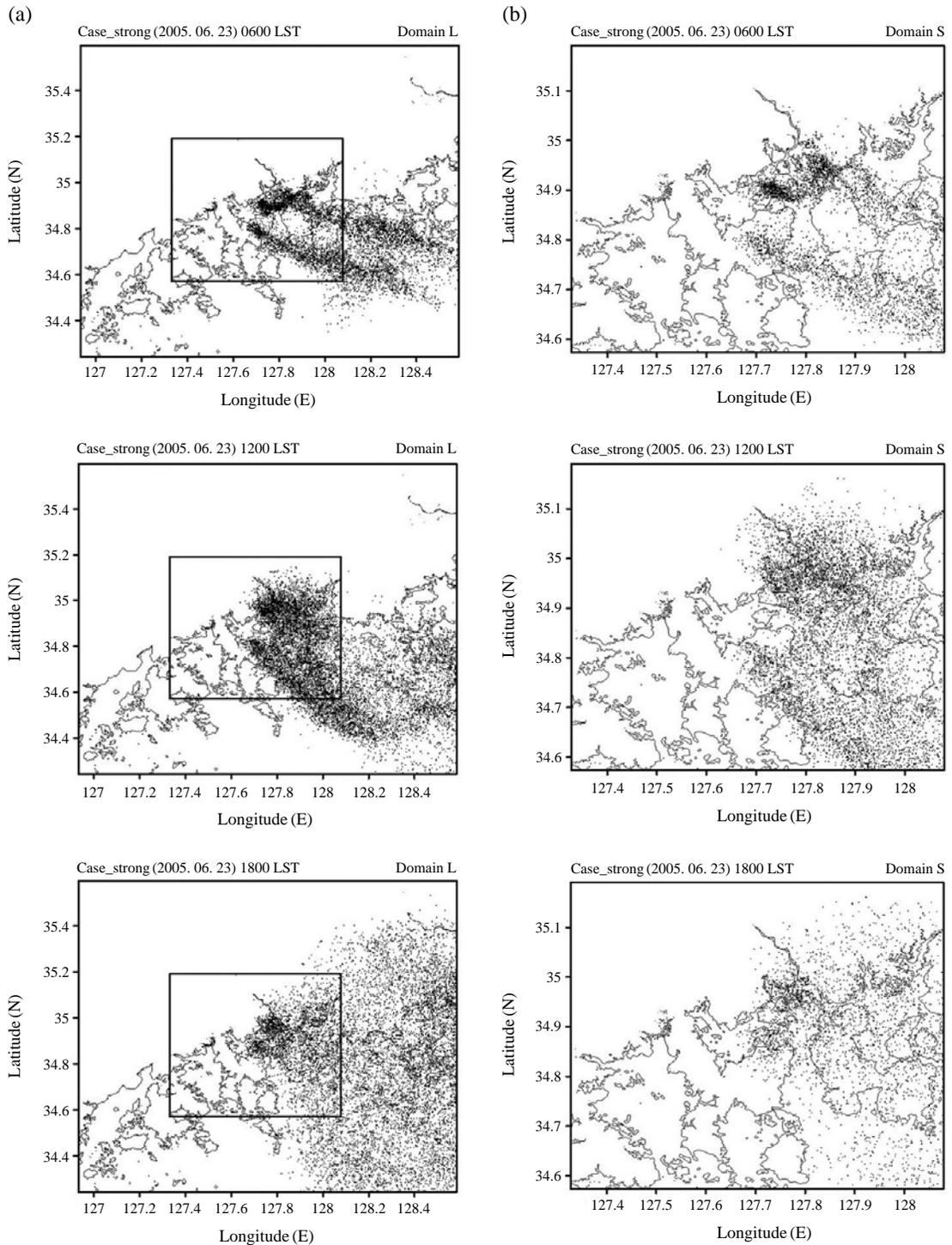


Fig. 9. Horizontal particle dispersion at six hour intervals on 23 June 2005 over (a) Domain L and (b) Domain S. The inner rectangle of Domain L indicates the smallest domain.

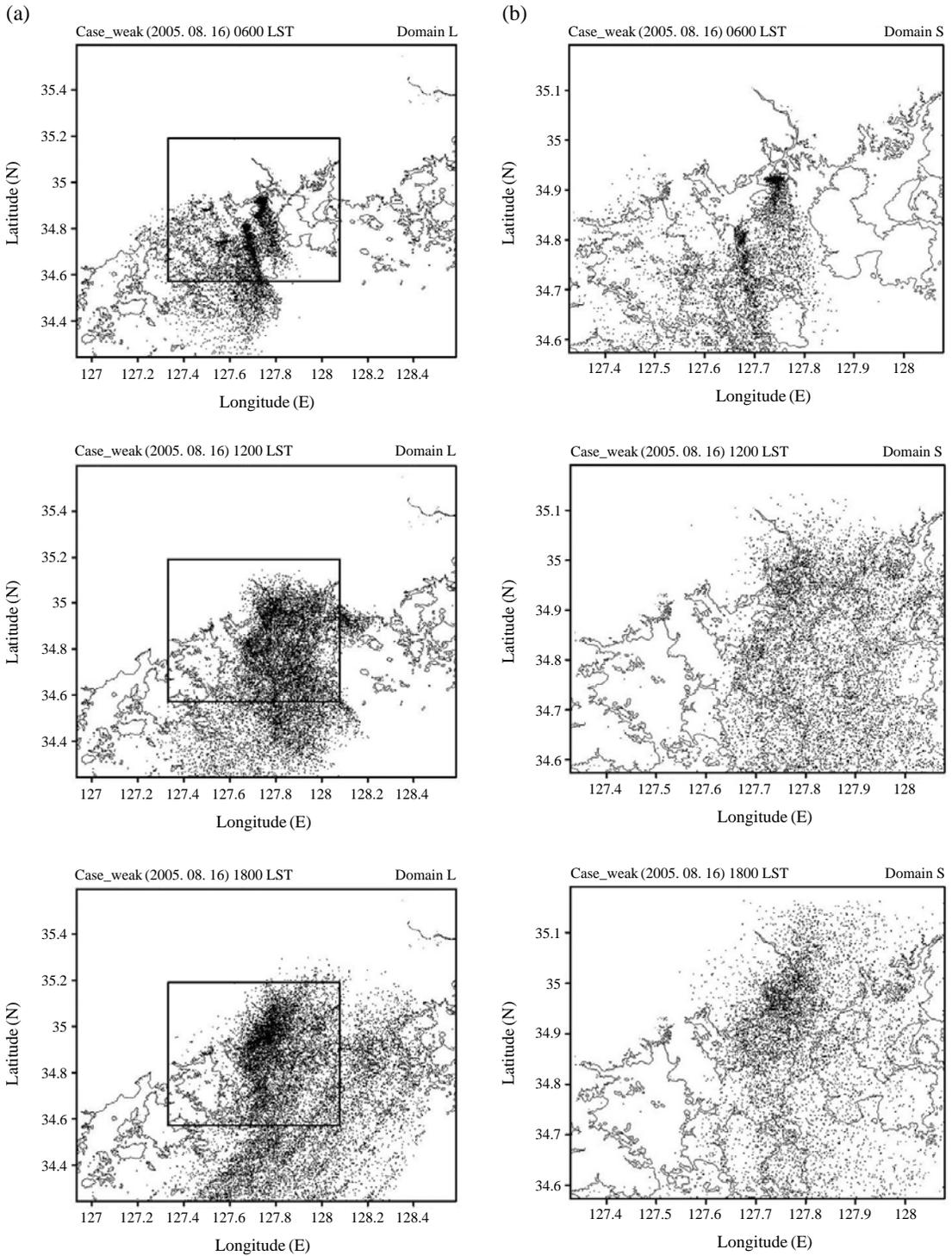


Fig. 10. Same as Fig. 9 but on 16 August 2005.

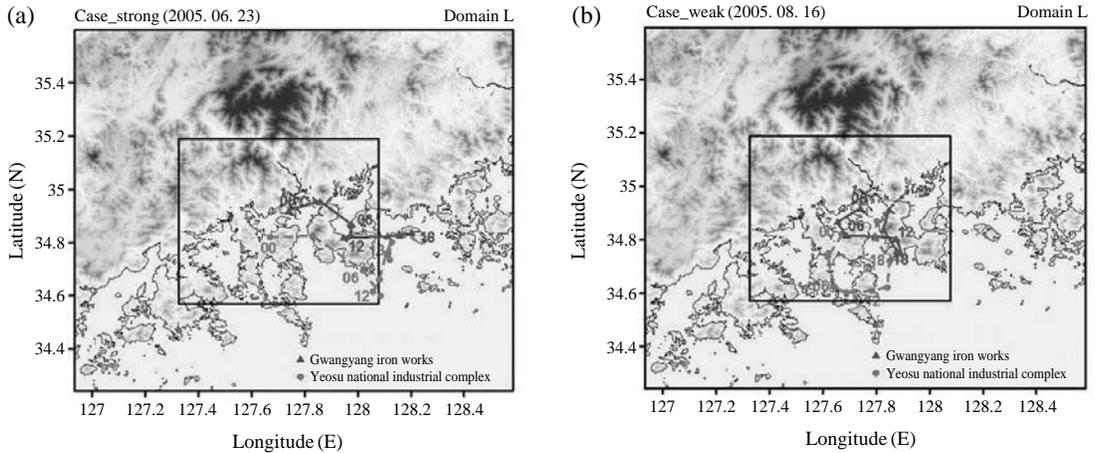


Fig. 11. Simulated horizontal plume trajectory at three hour intervals on (a) 23 June 2005 and (b) 16 August 2005. Release points are Gwangyang iron works and Yeosu national industrial complex. The inner rectangle indicates the smallest domain.

200개 미만으로 크지 않았으나, Case_weak의 경우에는 시간이 지남에 따라 입자 수의 차이가 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 특히 1200 LST 이후부터 Case_weak에서 입자 수의 차이가 급격히 증가하는 것으로 보아 Domain L은 도메인 경계를 벗어난 뒤 재순환되어 들어오는 입자들을 고려한 반면, Domain S에서는 재유입 되는 입자들을 고려하지 못한 것이 가장 큰 이유로 분석된다.

3. 3 대기질 수치모의

3.3.1 오존 수평장 분석

대기질 수치모의 결과, 두 사례일에서 오존은 일사량이 증가하는 0900 LST 이후 여수반도 부근에서부터 생성되기 시작하며, 활발한 광화학반응으로 인해 1200 LST 이후 최고 오존 농도를 나타냈다. 오존 및 전구물질을 포함한 공기괴는 Case_strong의 경우 서풍 계열의 주풍을 따라 동쪽으로 확산되었고, Case_weak의 경우에는 육풍을 따라 바다쪽으로 확산된 후 오후에 해풍을 타고 내륙으로 재유입되는 것으로 나타났다. Domain L에서는 이러한 재순환 현상이 고려되어 오존의 확산 패턴을 잘 살펴 볼 수 있었으나, Domain S에서는 1200 LST를 전후로 하여 도메인 영역을 빠져나간 오존이 고려되지 않아 오후에 재유입되는 현상이 모의되지 않았다. 이로 인해 Domain S의

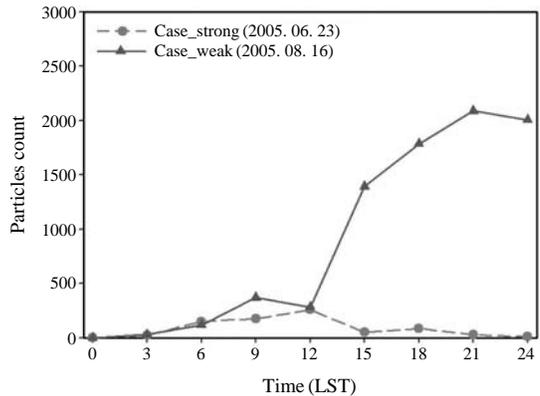


Fig. 12. Particles count difference between two domains on each cases.

남쪽 경계 부근에서는 Domain L에 비해 오존 농도가 비교적 낮게 모의되었다.

Domain L과 Domain S의 수치모의 결과를 비교하기 위해, 고농도의 오존 발생 및 재유입 현상이 발생하는 1300 LST부터 1500 LST까지 두 도메인 사이의 오존 농도 차이를 그림 13에 제시하였다. 그림 13(a)에 나타난 Case_strong의 경우 Domain S의 오른쪽 경계에 위치한 삼천포, 와룡산 부근에서 오존 농도 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 기상장 수치모의에서 나타났던 풍속 차이로 인해 Domain L은

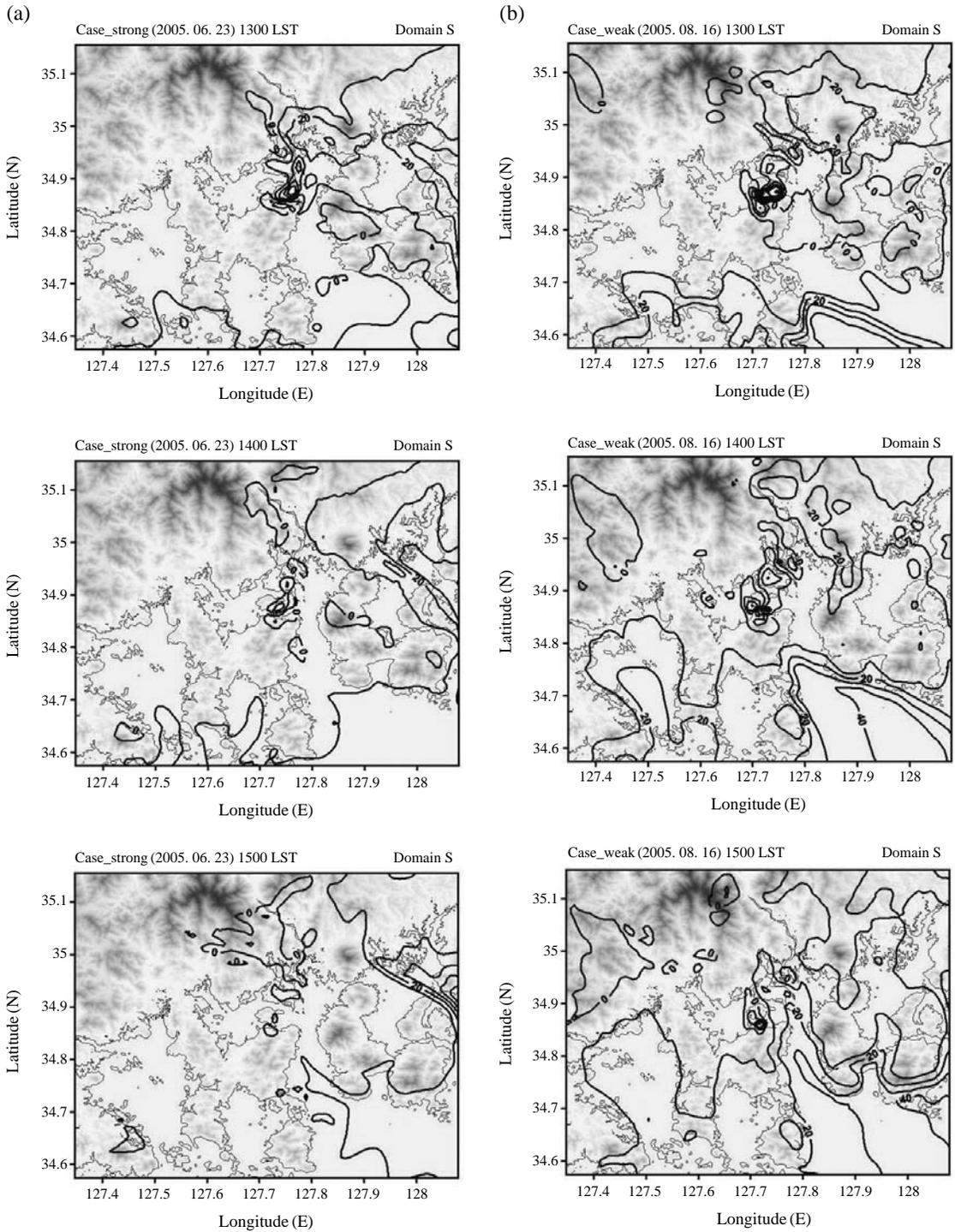


Fig. 13. Difference fields of ozone concentration between Domain L and Domain S from 1300 LST to 1500 LST on (a) 23 June 2005 and (b) 16 August 2005.

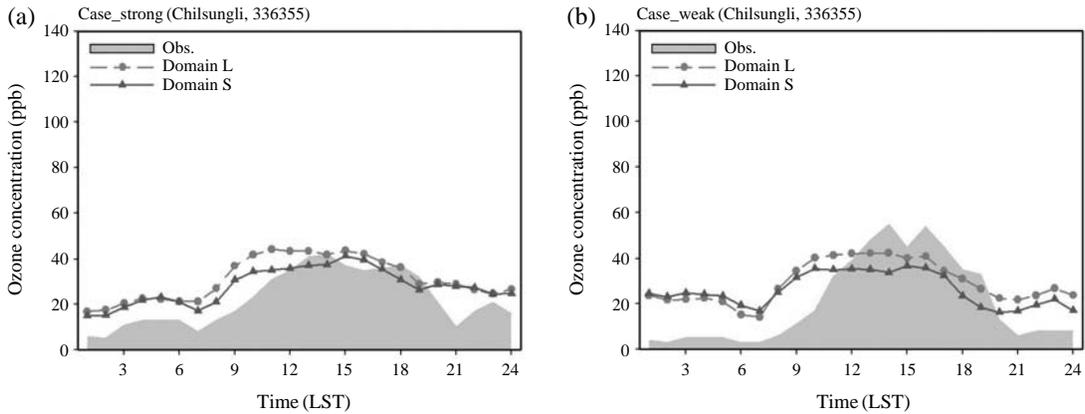


Fig. 14. Diurnal variation of ozone concentration between simulated and observed value at Chilsungli for (a) 23 June 2005 and (b) 16 August 2005.

Domain S에 비해 높은 오존 농도를 모의하는 것으로 분석하였다. 따라서 Case_strong에서 발생하는 두 도메인 사이의 오존 농도 차이는 지형이나 에디에 의해 발생하는 것으로 설명할 수 있다.

한편 Case_weak에서는 남해 부근에서의 오존 농도 차이가 두드러지게 나타났다(그림 13(b)). 이러한 차이는 육풍에 의해 남해로 확산되었다가 해풍을 따라 재유입되는 오존의 확산 패턴이 Domain L에서는 모의되었지만, Domain S에서는 모의되지 않아 발생한 것으로 분석되었다. 1300 LST에 영남, 백야, 돌산 부근에서 오존 농도의 차이가 발생하기 시작하였고, 해풍이 유입됨에 따라 오존 농도 차이가 발생하는 영역도 점차 북쪽으로 확장되었다. 그 결과 1500 LST에는 재유입된 오존이 여수반도와 남해도 사이의 광양만까지 영향을 미치는 것으로 나타났고, 남해도 일부 지역에서는 약 40 ppb의 차이가 발생하는 것으로 모의되었다. 이러한 재순환 현상이 수 일 지속된다면 고농도 오존 현상이 발생할 것으로 예상된다.

3.3.2 시계열 분석

대기질 수치모의를 통해 예측된 오존 농도와 광양만 권역 내에 위치한 대기오염 자동측정망의 오존 농도 관측값을 이용하여 시계열 분석을 실시하였다. 각 지점의 위치는 그림 3에 나타내었다.

대기질 수치모의의 결과는 일 최고값을 과소평가하는 경향이 있으나 전반적으로 오존의 일변화 패턴을

잘 모의하는 것으로 나타났다(그림 14). 대기질 모델의 검증에 위해 광양만 권역 내에 위치하는 대기오염 자동측정망 관측값과 모델 예측값을 이용하여 Normalized Mean Bias(이하 NMB)를 산출한 결과, Case_strong의 경우 Domain L에서 -7.42%로 나타났고, Domain S에서는 -14.62%로 나타났다. 또한 Case_weak의 경우에는 Domain L에서 NMB가 3.98%로 나타났고, Domain S에서 NMB가 10.21%로 나타나 U.S. Environmental Protection Agency(EPA)의 기준치인 $\pm 15\%$ 를 만족하였다.

하지만 대기오염 자동측정망은 광양만 주변에 집중적으로 위치하여, 공기과 재유입 현상으로 인한 영향을 분석하기에는 어려움이 있다. 따라서 대기질 관측지점은 아니지만, Domain S의 남쪽 경계에 위치한 세 지점(영남, 백야, 돌산)에 대한 분석도 추가하였다. 세 지점에서 동일한 경향을 보이는 것으로 나타남에 따라 백야 지점의 결과만을 그림 15에 나타내었다.

Case_strong의 경우에는 백야 지점에서 두 도메인 사이의 오존 농도 차이가 5 ppb 내외로 나타났다. 이는 앞서 설명했듯이 경계에 위치한 지형이나 작은 규모의 에디에 의한 영향으로 분석된다. 한편, Case_weak의 경우에는 Case_strong과 동일한 이유로 발생하는 차이 이외에도 Domain S의 오존 농도가 1200 LST를 지나면서 갑자기 감소하는 특징이 나타났다. 반면 Domain L에서는 1200 LST 이후에도 오존 농도

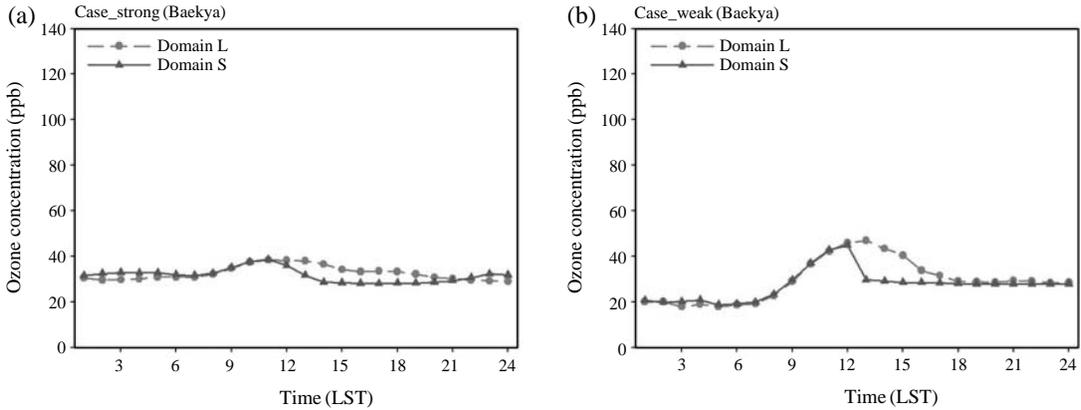


Fig. 15. Comparison of simulated ozone concentration between Domain L and Domain S at Baekya for (a) 23 June 2005 and (b) 16 August 2005.

가 증가하여 1500 LST 이후에 감소하는 것으로 나타났다. 그 결과 1200 LST 이후에 Domain L과 Domain S의 오존 농도 차이가 15 ppb 이상까지 나는 것으로 모의되었다. 즉, 오전에 발생한 북풍 계열의 육풍으로 인해 오존이 1200 LST까지 남해로 확산된 후, 해풍을 따라 육지로 재유입되며, Domain L에서는 이러한 현상이 고려되어 오존의 일변화 경향이 비교적 잘 모의되었다. 하지만 Domain S에서는 1200 LST에 경계를 벗어난 오존이 오후에는 고려되지 않아 오존 농도가 갑자기 감소하는 것으로 모의된 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 대규모 오염원들이 위치하고, 지형적 특성으로 인해 복잡한 국지순환이 활발하게 발생하는 광양만 권역을 대상으로 재순환 특성을 분석하기 위한 수치모의를 수행하였다. 먼저 Meso-Synoptic Index를 이용하여 약한 중관장의 영향을 받았던 2005년 6월 23일(Case_strong)과 고기압의 가장자리에 위치했던 2005년 8월 16일(Case_weak)을 사례일로 선정하였다.

Case_strong의 경우 광양만에서 약한 해륙풍 순환이 나타났고, Domain L 영역 밖에 위치한 남해에서는 지속적인 서풍 계열의 바람이 발생하였다. 이후 라그랑지안 입자 확산 모델링과 대기질 모델링을 수행한 결과, 입자 혹은 오존을 포함한 공기괴는 주풍

을 따라 동쪽으로 확산되는 것으로 나타났다.

한편 Case_weak의 경우에는 광양만 권역과 Domain L 영역에 포함되는 남해에서 뚜렷한 해륙풍 순환이 나타나 공기괴의 재유입 가능성을 예상할 수 있었다. 광양제철소와 여수국가산업단지에서 배출된 입자 수 비교를 통해 Domain S에서는 재유입되는 입자들이 고려되지 않음으로써 시간이 지남에 따라 두 도메인 사이의 입자 수 차이가 증가하는 것을 알 수 있었다. 이러한 경향은 대기질 수치모의에서도 확인할 수 있었다. 즉, 1200 LST 이후에 바다로부터 재유입되는 오존의 확산 패턴이 Domain L에서 충분히 모의되었던 반면, Domain S에서는 모의되지 않는 것으로 나타났으며, 이는 시계열 비교에서도 뚜렷하게 나타났다.

수치모의를 통해 고기압의 영향을 받은 맑은 날에는 국지풍이 활발하게 발생하고, 특히 연안에 위치한 광양만 권역의 경우 해륙풍 순환이 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 해륙풍 순환으로 인한 오존 및 전구물질을 포함한 공기괴의 재유입은 도메인의 크기에 따라 모의 여부가 달라질 수도 있는 것으로 나타났다. 따라서 연안지역에서의 대기질 수치모의 및 분석시에는 재순환 현상을 고려하는 것이 필수적이라고 할 수 있고, 이로 인해 대기질 수치모의의 정확도가 향상될 것으로 기대한다. 앞으로 다양한 종관 상태에 따른 분석이 수행되어야 할 것이며, 사례일을 늘려 재순환 현상이 다음 날 오존 농도의 초기치에 미치는 영향에 대한 분석도 요구된다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- Ainslie, B. and D.G. Steyn (2007) Spatio-temporal trends in episodic ozone pollution in the Lower Fraser Valley, British Columbia, in relation to mesoscale atmospheric circulation patterns and emissions, *J. Appl. Met.*, 46, 1631-1644.
- Arrit, R.W. (1989) Numerical modelling of the offshore extent of sea breezes, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 115, 547-570.
- Arrit, R.W. (1993) Effects of the large-scale flow on characteristic features of the sea breeze, *J. Appl. Meteor.*, 32, 116-125.
- Defant, F. (1951) Local winds. In compendium of meteorology, Boston, Amer. Meteor. Soc., 655-672.
- Estoque, M.A. (1962) The sea breeze as a function of the prevailing synoptic situation, *J. Atmos. Sci.*, 19, 244-250.
- Lee, H.W., H.M. Lee, S.W. Lee, and H.J. Choi (2010) Numerical simulation for recirculation of air mass in the coastal region using lagrangian particle dispersion model, *J. of the Environ. Sci.*, 19(2), 157-170. (in Korean with English abstract)
- Lee, H.W., W.B. Jeon, S.W. Lee, and H.J. Choi (2008) Analysis of numerical meteorological fields due to the detailed surface data in complex coastal area, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 24(6), 649-661. (in Korean with English abstract)
- Lu, R. and R.P. Turco (1994) Air pollutant transport in a coastal environment. Part I: Two-dimensional simulations of sea-breeze and mountain effects, *J. Atmos. Sci.*, 51, 2285-2308.
- Lu, R. and R.P. Turco (1995) Air pollutant transport in a coastal environment-II. Three-dimensional simulations over Los Angeles basin, *Atmos. Environ.*, 29, 1499-1518.
- Lyons, W.A., R.A. Pielke, C.J. Tremback, and R.L. Walko (1995) Modeling impacts of mesoscale vertical motions upon coastal zone air pollution dispersion, *Atmos. Environ.*, 29, 283-301.
- Mahrer, Y. (1991) Mesoscale models and their application to air quality studies, *II Nuovo Cimento*, 14C, 347-361.