

연직관측자료를 통한 복잡 연안지역의 오존 이류특성 Characteristics of Ozone Advection in Vertical Observation Analysis Around Complex Coastal Area

이화운 · 박순영* · 이순환¹⁾ · 임현호

부산대학교 지구환경시스템학부, ¹⁾부산대학교 BK21 연안환경시스템 사업단

(2008년 12월 15일 접수, 2009년 2월 17일 채택)

Hwa Woon Lee, Soon-Young Park*, Soon-Hwan Lee¹⁾ and Heon-Ho Leem

¹⁾BK21 Coastal Environment System School, Pusan National University

Division of Earth Environment System, Pusan National University

(Received 15 December 2008, accepted 17 February 2009)

Abstract

In order to clarify the vertical ozone distribution in planetary boundary layer of coastal area with complex terrain, an observation campaign was carried out around Gwangyang Bay with dense pollutant emission sources during two days from June, 4 2007. For this observation are Radiosonde, SODAR (SOmic Detection And Ranging) and Tethered ozone sonde were employed. The surface meteorological and photochemical observation data provided by AWS (Automatic Weather System) and AQMS (Air Quality Monitoring System) were also applied for analysis.

Synoptic condition is strongly associated with lower level ozone distribution in complex terrain coastal area. Since mesoscale circulation induced by difference of characteristics of land and sea and orographic forcing is predominant under calm synoptic condition, vertical distribution of ozone is complicate and vertical ozone concentration greatly fluctuated. However in second day when synoptic influence become strong, ozone concentration in lower levels is vertically uniform regardless of observation level. This results in vertical observation indicates that vertical ozone distribution is often determined by synoptic condition and also affects surface ozone concentration.

Key words : Vertical ozone, Tethered sonde, Ozone advection, Sea breeze, Planetary boundary layer

1. 서 론

한반도 내의 대부분의 공업지역은 물류 수송 등 경제적인 영향으로 연안지역에 위치하고 이들 대규

모 공업도시는 자체뿐 아니라 인근지역의 대기질에도 영향을 미친다. 특히 한반도 남서부에 위치한 광양만지역은 국가 산업단지로 지정된 이후 제철소, 여천국가산업단지, 석유화학 산업단지, 화력발전소 등의 산업시설들이 신설, 운영되면서 대기질 악화가 초래되었다(전라남도, 2004). 특히 오존의 경우 서울, 부산 등 대도시와 비교하여도 높은 농도수준을 유지

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)51-583-2651, E-mail : soon@pusan.ac.kr

하고 있으며 오존주의보 발령일수 또한 매년 증가하고 있다(환경부, 2007).

도시의 대기질은 국지적인 바람과 밀접하게 관계한다. 특히 복잡한 지형을 가진 연안지역은 해륙풍과 산곡풍 등 다양한 강제력에 의한 중규모 기류장이 혼재하기 때문에 정확한 대기질 예측에 어려움이 많다(Lee *et al.*, 2007; 이화운 등, 2005; 류찬수 등, 2004; 이순환 등, 2002). 이러한 복잡한 기류장에 관련된 대기질 연구는 먼저 관측 자료에 의한 분석이 필수적이라 할 수 있다.

관측을 통한 하층 기류에 관한 연구는 많이 수행되어져 왔다. Tsuang *et al.* (2003)은 대류권 하층의 상세한 연직 기상 관측을 바탕으로 도심지의 거칠기 길이와 불안정 등급에 관한 분석을 실시하였으며, Talbot *et al.* (2007)은 해풍 침투 시 발생하는 하층 대기의 성층에 의한 경계층 특성을 해풍의 구조와 함께 밝히기 위해 lidar와 sodar 관측과 함께 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 이러한 기상 관측과 더불어 오존의 직접 관측을 통한 연직구조 분석에 관한 연구도 실시되었는데, Helmig *et al.* (2002)은 Greenland 지역에서 Tethered ozone sonde를 사용하여 경계층 오존의 연직 분포특성을 시·공간적으로 분석하였고 오존의 광화학 현상과 이류 특성 그리고 침적 현상 등 다양한 오존 생성 원인을 밝혔다. Lin *et al.* (2007)은 대만의 남부에 위치한 가오슝지역에서 연안 지역의 공업지역이 내륙의 도시의 지표 오존에 미치는 영향을 분석하기 위해 하층 대류권의 연직 오존 관측을 실시하였다. 오존에 대한 직접 관측 외에도 위성자료를 활용한 연구도 많이 진행되었다(Edwards, 2006; Chance *et al.*, 1997; Fishman *et al.* 1990). 최근의 연구 중 Tie *et al.* (2007)은 위성관측 자료인 TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer)와 GOME (Global Ozone Monitoring Experiment)의 자료를 사용하여 동남아시아에서 나타나는 대류권의 오존과 이산화질소의 시공간적인 특성을 살펴본 바 있다.

그러나 국내에서는 국외의 연구에서 널리 수행되어온 집중 관측을 통한 연구는 부족한 편이다. 황미경 등(2008)은 서울지역의 연직 오존분포에 관한 연구에서 오존존대를 통해 연직 오존분포와 대기 경계층의 구조관계를 연구한 바 있다. 하 훈 등(2006)은 광양만 지역의 오존생성 메커니즘을 분석하기 위해 지상관측 자료를 이용하여 3년간 오존농도의 특성을

분석하였으며, 심상규 등(1997)은 여천-동광양지역의 오존 상승원인을 연구하기 위해 지상관측 자료와 수치 실험을 통하여 밝히고자 하였다. 그 밖에 광양만 일대의 대기질 개선을 위한 지자체와 정부부처의 연구가 있어 왔으나 연직 오존농도를 관측한 연구는 없었다(전라남도, 2004; 환경부, 1998; 한국과학기술연구원, 1996).

지표 오존농도를 결정하는 요인은 관심지역에서의 오존발생뿐 아니라 인근 지역에서 이류되어 온 오존의 영향도 크게 작용한다. 특히 연안지역의 공업지역에서 발생한 오염물질의 이류는 높은 배출원과 발달된 혼합층의 영향으로 지표부근 이류뿐 아니라 연직 수송에 의한 영향 또한 크게 작용한다. 그러나 이전의 연구는 위성자료를 통한 대류권하부를 간접적으로 측정하여 큰 규모의 대류권오존의 특성을 연구하거나 지상관측자료 또는 실험실 수치 시뮬레이션만을 통하여 오존발생과 이류 현상을 파악하고자 하였기 때문에 직접 관측에 의한 경계층내의 연직 오존 분포 특성이 지표 대기질에 미치는 영향을 확인한 연구는 없었다. 그리고 오존 분포 특성에 관한 대부분의 연구가 오존 발생이 활발한 오후 시간대에 집중되어 있으며, 대기경계층 이하 하층의 상세관측이 부족하였다.

그러므로 본 연구에서는 2007년 6월 4일부터 5일까지 Radiosonde, SODAR (SONic Detection And Ranging) 그리고 Tethered ozone sonde를 통한 집중관측을 통하여 고해상도의 연직 관측으로부터 기상장과 오존의 연직 분포 특성을 파악하였다. 그리고 자동기상측정망(AWS, Automatic Weather System)과 대기오염 자동측정망(AQMS, Air Quality Monitoring System)을 통해 기상과 오존의 지표근처에서의 수평적 특징을 분석하여 이 지역의 오존생성 메커니즘을 입체적으로 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 관측 장비와 관측 방법

본 연구에서 수행한 연직 관측 장비는 Radiosonde, SODAR 그리고 Tethered ozone sonde이다(그림 1). 먼저 Radiosonde는 하층과 상층의 대기를 관측하는 장비로 기온, 기압, 습도 그리고 GPS장치를 이용하여

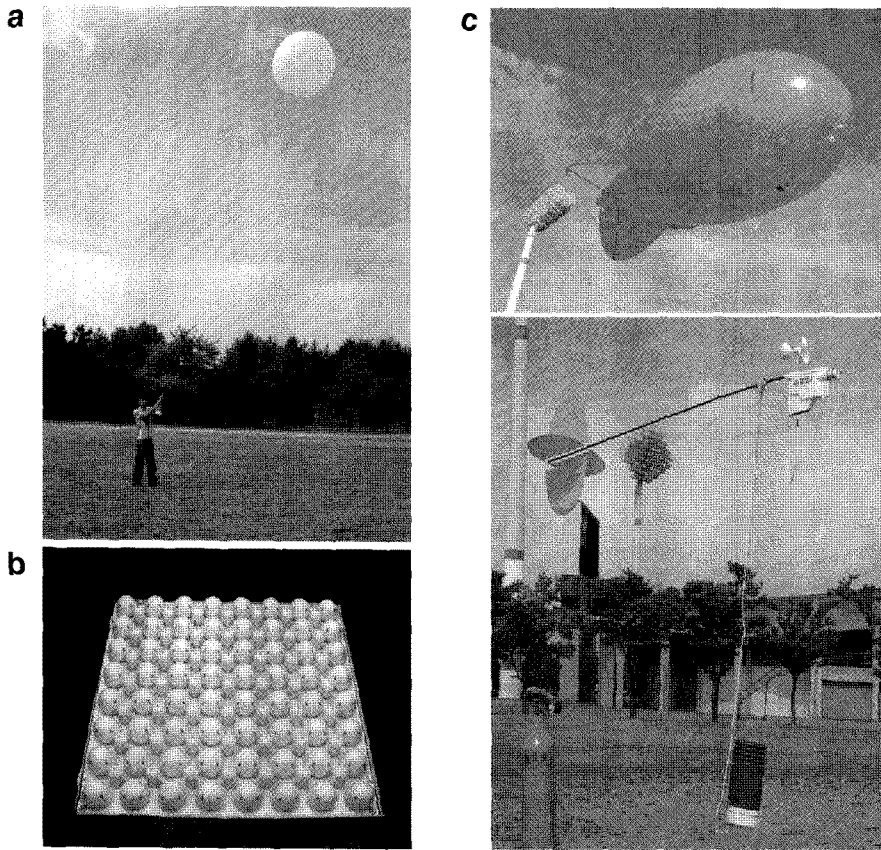


Fig. 1. Equipments for observation of planetary boundary layer structure; (a) Radiosonde, (b) SODAR, and (c) Tethered ozone sonde.

풍향과 풍속을 측정한다(Graw, 2008). 이 장치는 대기경계층구조를 파악하기 위한 목적으로 사용되었다.

SODAR는 음파를 이용하여 발신된 신호음이 각 대기층에서 반사되어 올 때 기류의 이동에 의한 주파수 변화를 바탕으로 수평 및 수직 방향의 풍향과 풍속을 측정하는 기기이다(Scintec, 2006). 주로 하층 대기의 조밀한 바람을 관측하는 장비로 자료는 20분 간격으로 수집되고 연직고도 500 m까지 10 m 간격으로 관측이 가능하다. 이 장비는 높은 해상도로 지표 근처의 상세한 바람 변화를 관측할 수 있다.

기상요소와 함께 오존농도를 관측할 수 있는 Tethered ozone sonde는 지표에 고정된 줄에 기구를 달아 그 줄에 기상과 오존 센서를 연결하여 관측을 하는 장비이다. 기상관측 요소는 기상센서를 통해 풍

향, 풍속, 기압, 기온 그리고 습도가 있다. 오존 관측에 사용된 센서는 전기화학식 오존센서(Komhyr, 1969)로 오존 기체가 센서를 통과하게 되면 센서의 화학물질간 산화, 환원반응이 일어나는데 이때 발생하는 전류를 측정함으로써 오존농도의 측정이 가능하다(Vaisala, 2005, 2002a, b; Science Pump Co., 2004). 2007년 6월 5일 15시까지 3시간 간격으로 관측을 하였고 관측은 SODAR와 같은 500 m까지 실시하였다.

2.2 관측 지점과 예상 오염원

그림 2는 AWS, AQMS 그리고 연직관측지점(obs.)의 위치를 나타낸 그림이다. 광양만은 연안으로는 해안선이 복잡하며 매립지가 발달하였고 내륙으로는 산악지형이 발달하여 고도 1,200 m 이상의 백운산이

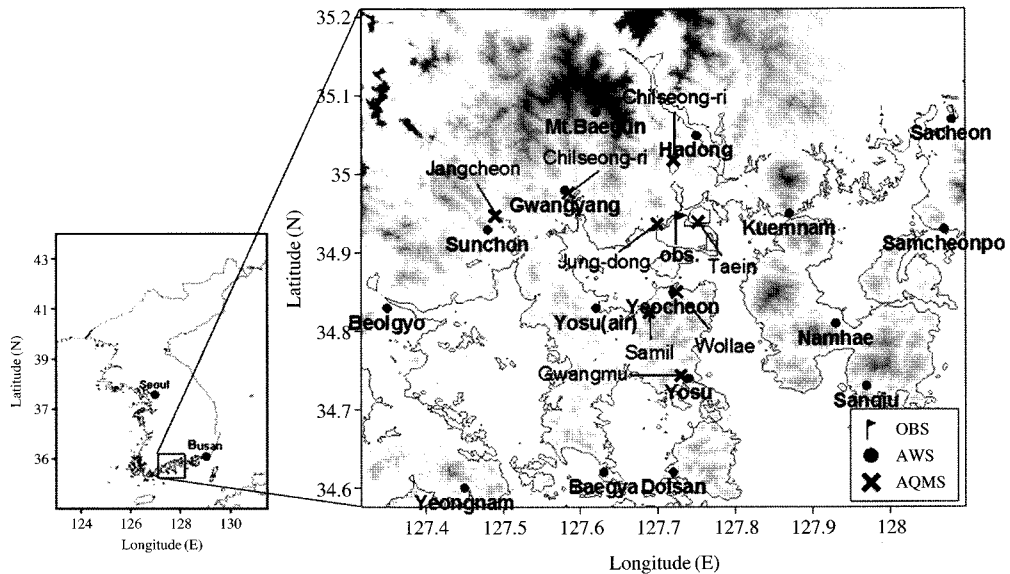


Fig. 2. Topography and locations of the vertical observation (OBS), Automatic Weather System (AWS) and Air Quality Monitoring Station (AQMS) sites.

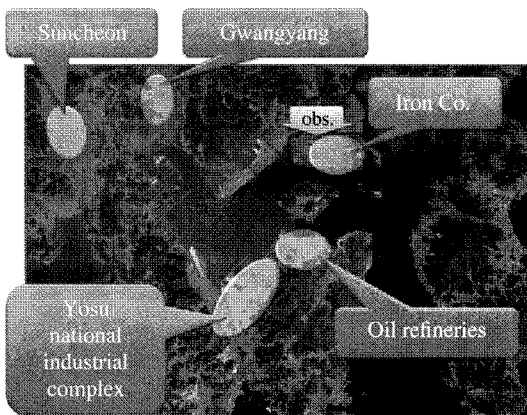


Fig. 3. Location of main inventories of air pollutants, which can be divided into 5 categories in target domain.

자리하고 있다. 이러한 연안과 내륙의 지형적 특징에서 상층 종관풍의 영향에 따라 해륙풍과 산곡풍 같은 국지풍이 발달하면 복잡한 국지순환계를 형성함을 짐작할 수 있다(Talbot *et al.*, 2007).

관측소 주변의 오염원의 위치를 그림 3에 나타내었다. 관측지점 바로 남동쪽에 제철소가 위치하고 있

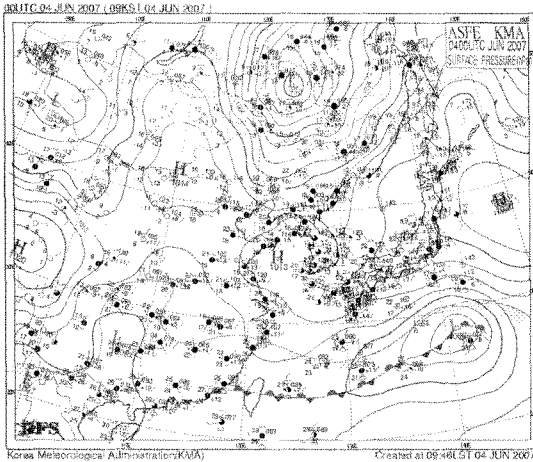
고 인근의 큰 도시로는 서쪽으로 순천시와 광양시가 위치하여 도심지 배출원이 존재한다. 특히 남쪽으로 광양만을 건너 여수 국가 산업단지가 위치하고 있는데 주로 석유 화학 단지가 집중되어 있어 오존의 전구물질인 휘발성 유기화합물(VOC)의 배출원이 풍부할 것으로 판단된다. 이 산업단지는 광양만의 해륙풍 순환계 속에 위치하여 연안지역에 위치한 배출원에 의해 인근지역뿐 아니라 내륙의 거주지역의 대기 질에 큰 영향을 줄 것이다(Cheng, 2002).

3. 결과 및 고찰

3.1 관측일 종관상태

관측을 실시하였던 2007년 6월 4일과 5일은 장마 전선이 북상하기 전으로 전형적인 초여름의 종관상태였다(그림 4). 본 사례일의 우리나라 기상상태는 일사가 매우 강하고 수증기 유입량이 작아 고농도 오존이 발생하기 쉬운 날이다. 과거의 지상 오존 관측 자료를 살펴 볼 때 광양만의 고농도 오존 사례는 6월초에 많이 발생하였다(환경부, 2007). 그러한 이유로 본 사례일의 관측을 실시하였다.

(a) 09LST, 4 June 2007



(b) 09LST, 5 June 2007

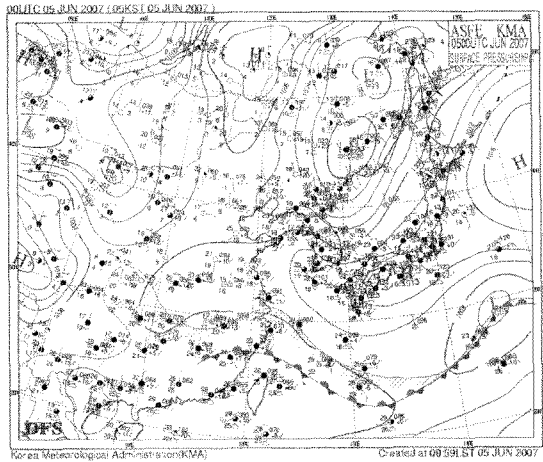


Fig. 4. The synoptic charts at 09LST on (a) 4 and (b) 5 June 2007.

하지만 4일과 5일은 종관적 영향에 있어서 큰 차이를 나타내고 있다. 먼저 4일에 우리나라는 중국 내륙과 일본 동쪽 해상에 중심을 둔 큰 고기압의 영향권의 가운데 위치하여 맑은 날씨를 보였고 등압선 간격이 넓어 종관풍의 영향이 약한 형태를 나타내었다. 그러나 5일의 경우 전날 만주지역의 저기압이 남동진함으로 인해 우리나라에 위치해 있던 고기압영향을 일본 쪽으로 몰려나게 하여 등압선 간격이 좁아진 형태를 보였다. 이 경우 전날에 비해 종관적 영향이 커지고 그에 따라 다소 강한바람이 발생하였다.

3.2 AWS와 AQMS 결과

그림 5와 그림 6에 관측 양일간 지상 관측소에서 관측된 바람과 오존의 결과를 나타내었다. 먼저 4일의 경우 06시에는 야간에 발생한 육풍에 의해 전반적으로 북풍계열의 바람이 남쪽 해안으로 불어 나가고 있다. 이후 일사가 시작되고 약한 종관풍의 영향하에서 해풍과 곡풍이 발달되어 12시에는 거의 모든 관측소에서 남풍의 바람이 불고 있다. 오존의 농도는 15시에 급격히 증가하여 중동과 순천에서 기준치를 초과하고 있는데 이는 해풍의 침투에 의해 연안지역의 오염물질이 내륙으로 이류되어 지표 오존농도증가에 영향을 준 것으로 판단된다. 야간이 되면서 해풍은 다시 육풍으로 전환이 일어나 서풍계열로 풍향의 변화가 나타나고 오존의 농도는 감소하였다. 이와

는 대조적으로 5일에는 야간에 지속되던 서풍계열의 바람이 주간이 되면서 남서풍으로 바뀌고 풍속 5m/s 이상의 강한 바람이 불고 있다. 이는 그림 4에서 설명한 바와 같이 강한 종관 기압계의 영향으로 일종 풍속이 강하고 풍향변화가 거의 나타나지 않았다. 이러한 강한 종관풍에 의하여 오존농도는 60 ppb 이하의 평균적인 농도로 전날과 상이한 분포를 나타내었다.

오존농도에 영향을 주는 요인으로는 오존을 생성하는 전구물질의 농도, 태양의 자외선 강도 그리고 국지 기상 조건이 있다. 관측을 실시한 6월 4일과 5일은 평일로 광양만 일대의 산업 활동이 동일하다고 가정할 수 있다. 그러므로 VOC와 NO_x 같은 오존 전구물질의 배출정도에서 나타나는 차이보다는 기압계의 영향으로 풍속이 강해지면 오존농도의 국지적 수렴이 발생하지 않아 고농도 오존사례는 발생하지 않음을 알 수 있다. 하지만 해풍의 침투경로를 따르는 남북으로의 광무, 삼일, 월례, 중동, 진상(그림 7B)은 일정한 수준의 농도를 오후와 야간 동안 유지하였다.

광양만 영역의 모든 AQMS의 오존농도 시계열을 그림 7에 나타내었다. 먼저 바람이 약했던 4일은 일사와 이류에 의한 일변화패턴이 잘 나타나지만 5일은 일종 비슷한 농도변화를 보여 준다. 이 또한 종관장이 시간에 따른 오존 농도변화에 영향을 준다는 것을 의미한다. 이러한 오존농도의 분포특성을 시공

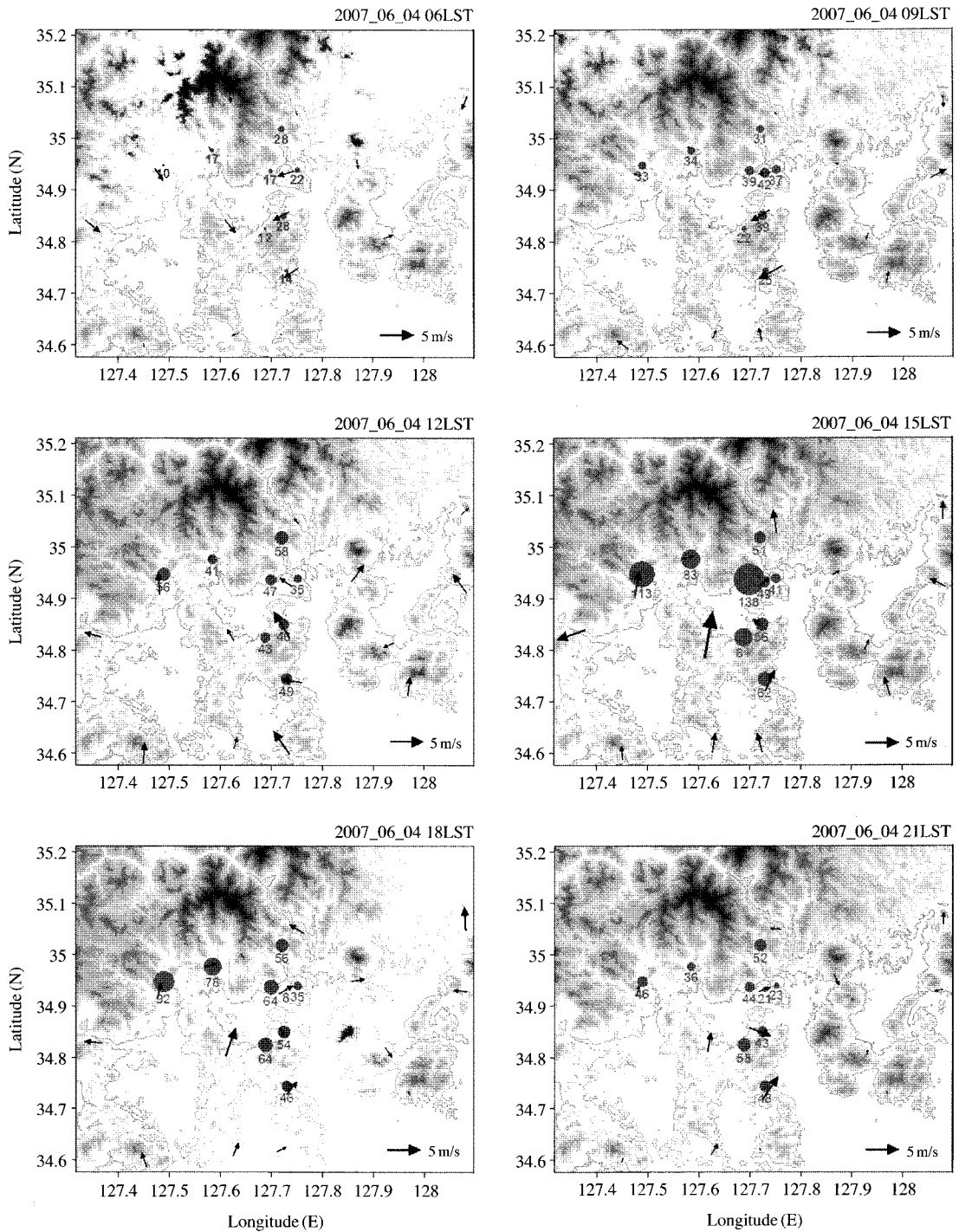


Fig. 5. The spatial distributions of ozone (circle) and wind (vector) observed at AWS and AQMS respectively on 4 June 2007. The unit of ozone concentration and wind are ppb and m/s, respectively.

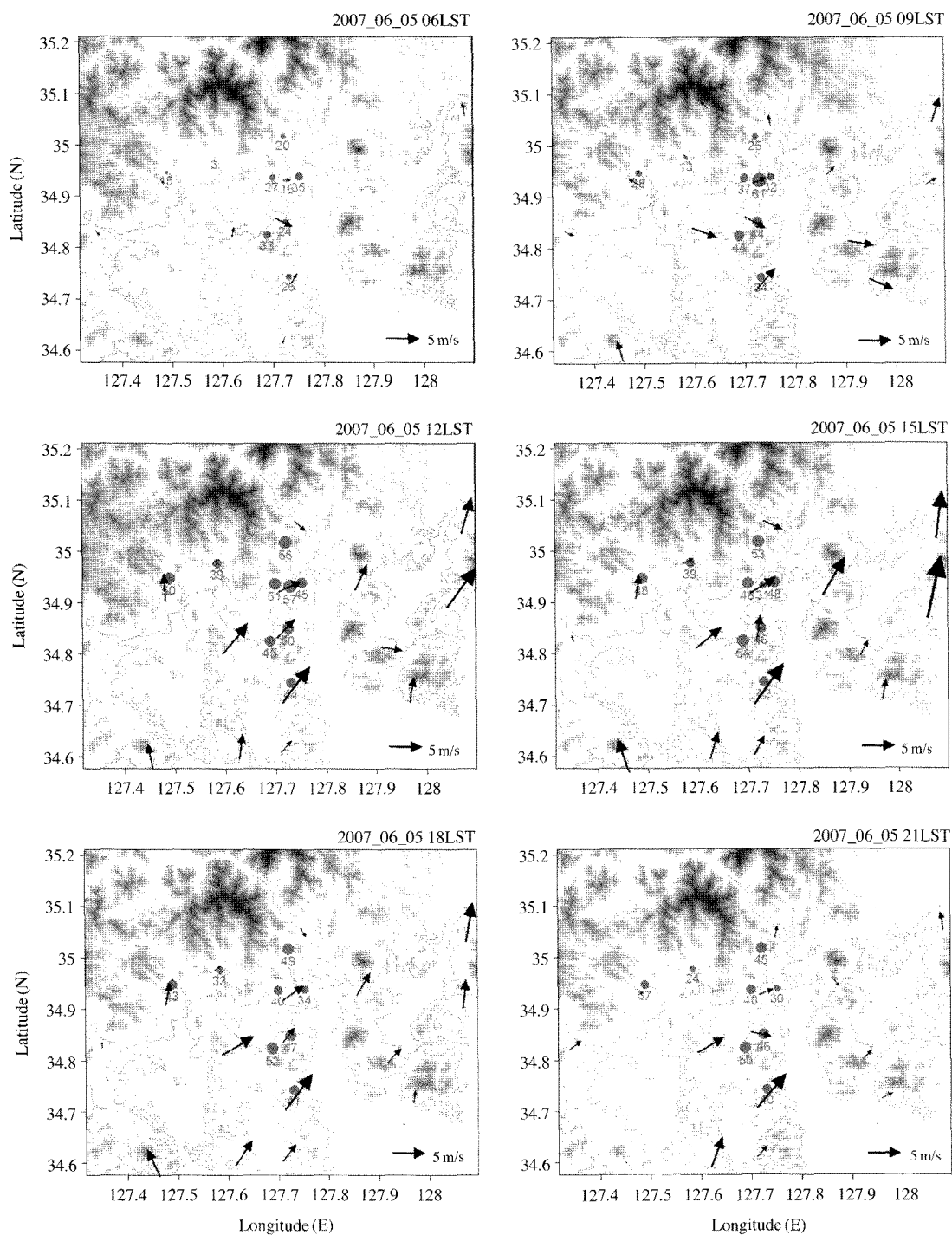


Fig. 6. Same as Fig. 4. but on 5 June 2007.

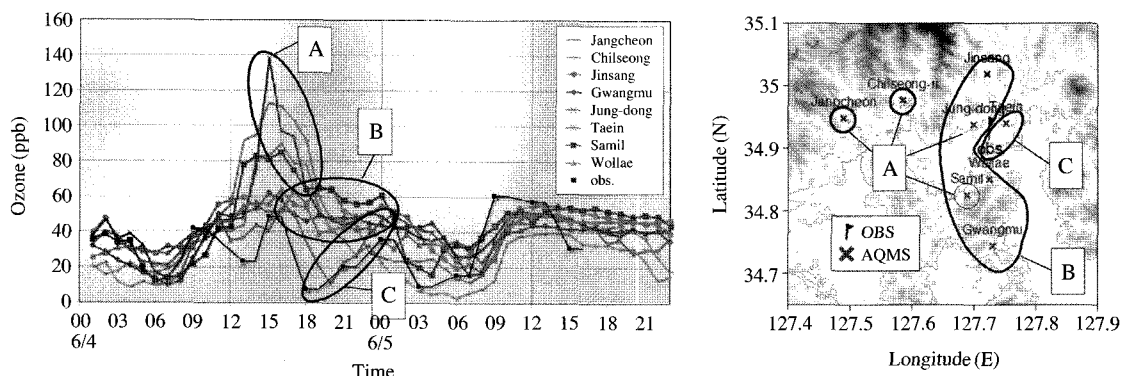


Fig. 7. Temporal variation of ozone observed in 8 AQMS sites and vertical observation site. A and B circles indicate high ozone concentration in the early afternoon and late afternoon including night, respectively, and the ozone concentrations observed in sites inside circle C are low values during daytime but relatively high during the night.

간적으로 분석하면 우선 배출원 주변지역인 장천, 칠성, 중동, 삼일지역(그림 7A)에서 이른 오후에 고농도를 보이고 칠성과 장천 지점에서는 늦은 오후로 접어들면서 계속해서 감소하지만 해풍의 침투경로를 따르는 남북으로의 광무, 삼일, 월례, 중동, 진상(그림 7B)은 일정한 수준의 농도를 오후와 야간 동안 유지하였다. 이것은 해풍의 진입경로가 일중 오존농도의 변화에 영향을 준다고 볼 수 있다. 특히 관측지점과 태인 지점(그림 7C)은 오존농도가 낮 시간에 어느 정도 증가하지만 다른 지점에 비해 낮은 수준이고 이후 크게 감소하였으나 야간에 다시 증가하였다. 일사가 없는 야간에 오존농도의 증가는 주간 해풍인 남풍이 야간에 서풍으로 변하면서 그에 따른 이류에 의한 것으로 낮 시간 고농도를 보인 순천과 광양시의 오존으로 사료된다.

3.3 Radio sonde 결과

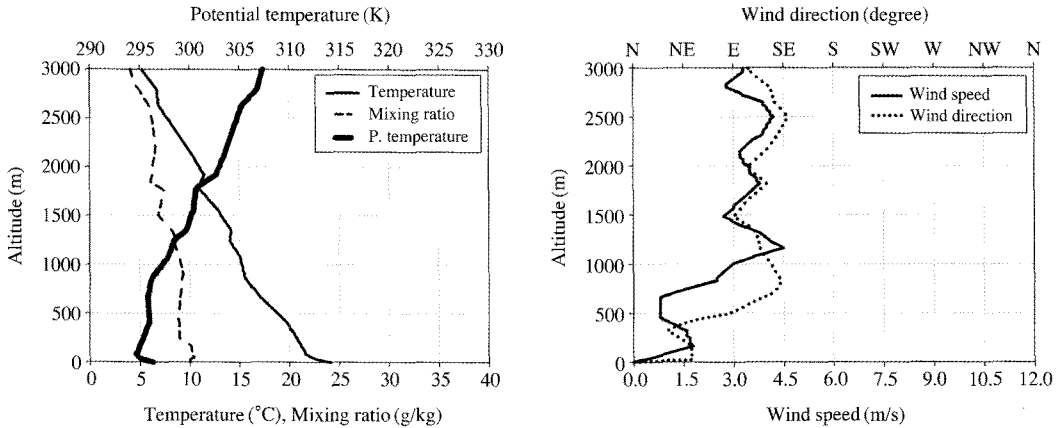
그림 8에 관측 양일 실시한 라디오존데 결과를 나타내었다. 4일과 5일 모두 오전시간부터 강한 지표가열로 혼합층이 잘 발달하였음을 알 수 있다. 4일의 경우 09시의 연직 온도 분포를 볼 때 혼합층은 약 고도 800m부근까지 발달하였다. 온위가 지표부근에서 강한 불안정을 나타내는 것으로 지표가열에 의한 강한 열속이 대기 중으로 공급됨을 알 수 있다. 또한 혼합비의 결과에서도 알 수 있듯이 온위가 일정한 고도까지 혼합비가 고르게 분포하고 있다. 바람

의 결과에서도 혼합층에서 풍속과 풍향이 거의 일정하고 그 상층으로 풍속의 증가와 풍향의 변화가 발생하였다. 12시가 되면 혼합층은 더욱 발달하고 지표의 강한 불안정은 더욱 커지고 있다. 5일의 경우 온위와 혼합비 결과는 4일과 비슷한 연직 분포를 보이고 12시 이후에는 1km 이상으로 혼합층이 크게 성장하였다. 그러나 바람의 경우 오전부터 남서풍이 강하게 불고 있음을 알 수 있다. 이것은 수평 관측소 결과와 마찬가지로 강한 종관풍의 발달로 인한 결과이다. 또한 중관기압패턴에서 보았던 저기압의 남동진에 의해 2.5km 이상의 상층대류권에서 북풍계열의 바람이 관측되었다.

3.4 SODAR 결과

SODAR 관측을 실시하여 시간과 연직공간으로 높은 해상도의 층별 풍속변화를 살펴보았다. 그 결과는 그림 9에 나타내었다. 먼저 4일보다 5일에 풍속이 강하게 관측된 결과는 앞서 설명한 AWS와 Radio Sonde 관측 결과와 일치함을 알 수 있다. 그리고 주간보다 야간에 상하층간 풍속차가 더 크게 나타나고 있다. 주간에는 강한 혼합층의 발달로 운동량의 연직 혼합에 의해 풍속이 비슷한 분포를 보이거나 야간에는 안정층의 발달로 지표마찰이 큰 지표근처에서는 풍속이 낮고 상층으로 갈수록 풍속이 높아지면서 연직 풍속차가 커진다.

(a) 09LST, 4 June



(b) 12LST, 4 June

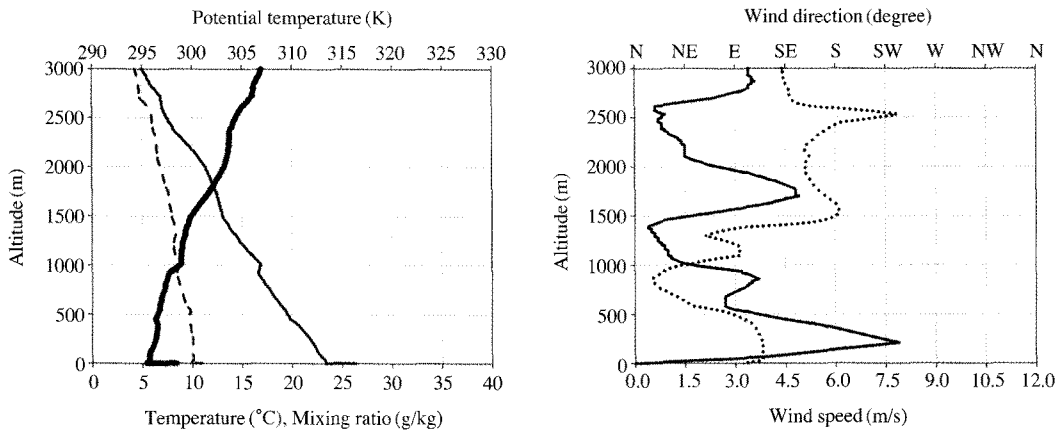


Fig. 8. Vertical profiles of Radio sonde observation at (a) 09 LST 4, (b) 12 LST 4, (c) 09 LST, 5 and (d) 12 LST 5 June. Solid, thick and dashed lines in left panels indicate temperature, potential temperature and mixing ratio, respectively and solid and dotted lines in right panels indicate wind speed and wind direction.

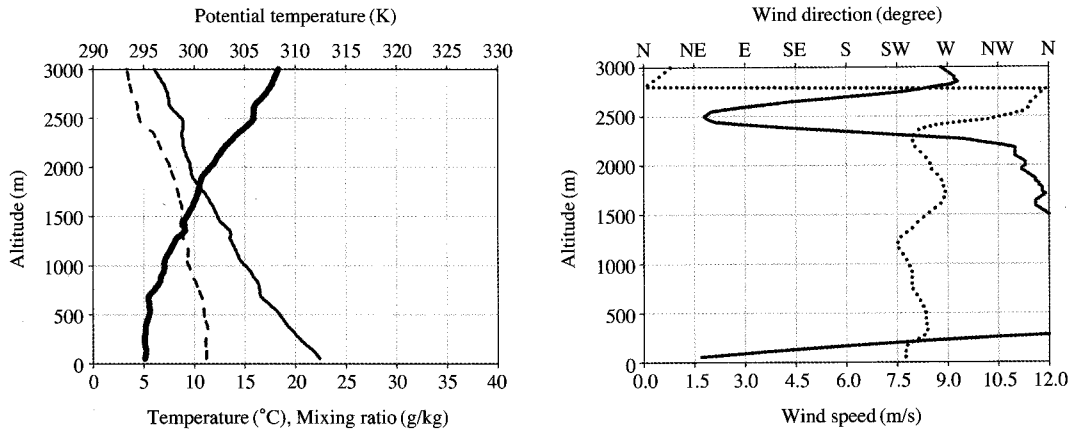
3.5 Tethered ozone sonde 결과

Tethered ozone sonde를 통한 오존과 기상의 연직 관측 결과를 그림 10, 11, 12에 나타내었다.

그림 10의 6월 4일 주간 결과부터 보면 오전에 풍향은 북동풍 및 동풍으로 야간에 지속되던 북풍계열의 육풍에서 해풍이 완전하게 불어 들어오기 전의 상태인 동풍계열로 풍향의 변화가 나타나기 시작한다(09LST). 12시가 되면 동풍-남동풍의 바람으로 풍향의 변화가 발생하며 온위와 혼합비의 결과에서 혼합층의 발달과 지표근처의 강한 불안정을 확인할 수 있다. 태양에의 지표가열이 충분히 이루어진 14시

에는 오존농도에 있어서 관측 범위 내에서 40~50 ppb 내의 비교적 일정한 농도를 나타내었다. 이 시간은 해풍이 발달하여 풍향이 남풍계열로 완전히 전환된 시간이다. 그러나 오존의 수평적인 이류현상은 나타나지 않았다는 것을 연직으로 균일한 오존농도를 통해 확인 가능하고 연직 혼합에 의한 것임을 알 수 있다. 또한 모든 관측 요소에서 고도에 따른 변동(perturbation)이 발생하는 것은 활발한 혼합층의 발달과 함께 열적, 기계적 난류가 발생함을 말해 준다. 이런 난류를 통해 오존농도의 연직 혼합이 발생하였다. 마지막의 15시 결과를 14시와 비교해 보

(c) 09LST, 5 June



(d) 12LST, 5 June

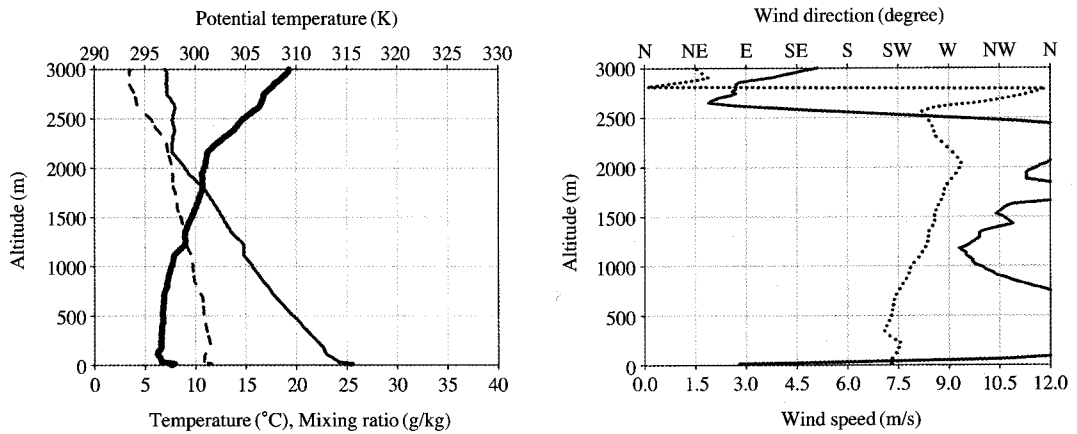


Fig. 8. Continued.

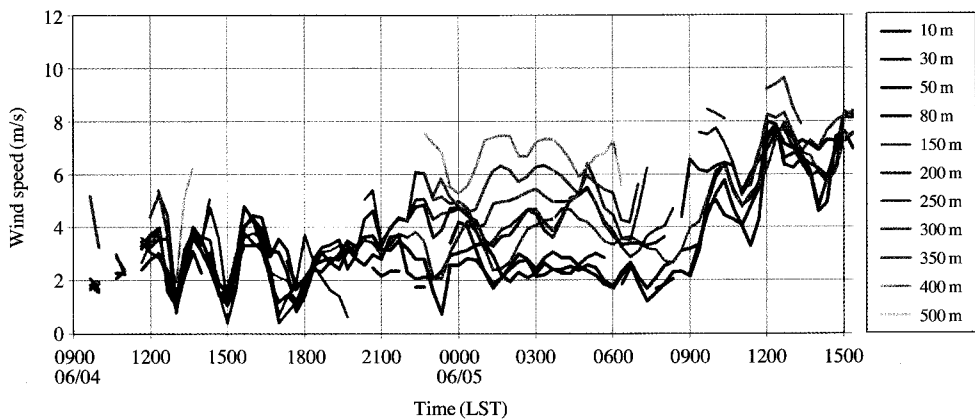


Fig. 9. Time variations of wind speed observed by SODA at 15 different levels from 10 m to 500 m.

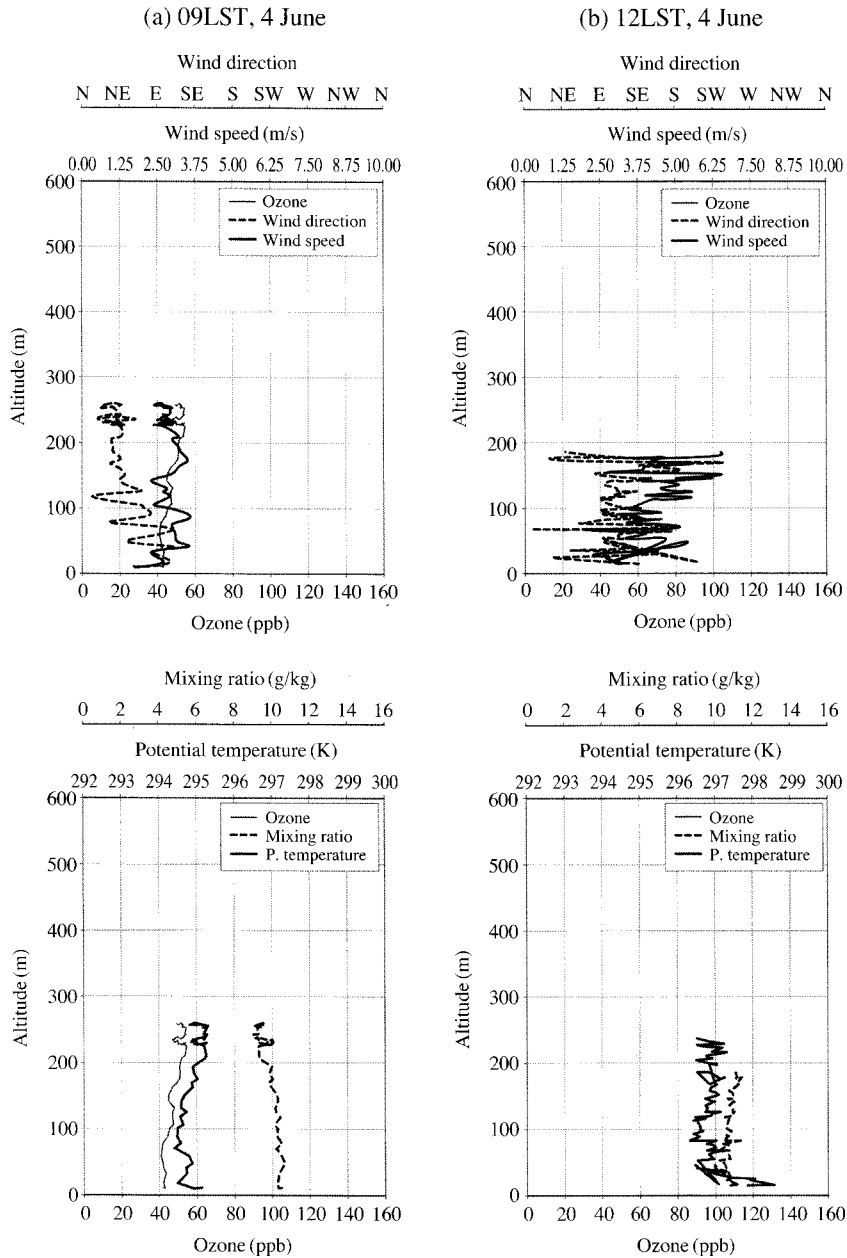


Fig. 10. Vertical profiles of tethered ozone sonde at (a) 09 LST, (b) 12 LST, (c) 14 LST, and (d) 15 LST, 4 June. Dashed and thick lines in upper panels mean wind direction and speed, respectively and dashed and thick lines in lower panels indicate mixing ratio and potential temperature, respectively. All solid lines are ozone concentration in ppb.

면 온위와 혼합비의 결과는 비슷하여 강한 지표 불안정에 의한 혼합층이란 점은 같은 결과를 보이나 오존과 바람의 결과가 상이하게 나타났다. 층간 오존

농도가 균일하지 않고 풍향과 풍속이 상하층간에 다르게 관측 되었다. 200m를 기준으로 그 하층으로는 남동-남풍의 상층보다는 강한 풍속이 관측되고 오존

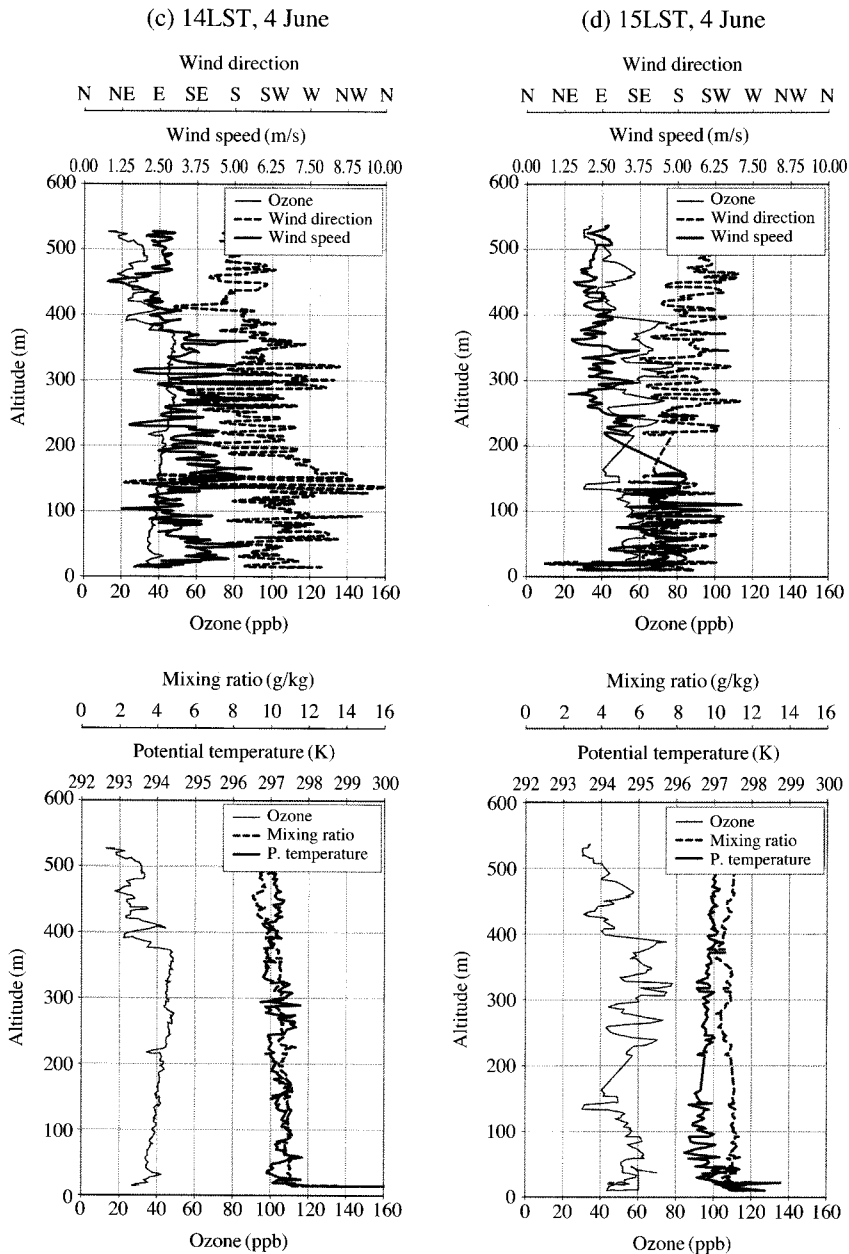


Fig. 10. Continued.

농도는 60 ppb 이하의 농도가 관측 된 반면 200 m 이상의 상층에서 남풍-남서풍의 바람과 함께 간헐적으로 60 ppb 이상의 높은 농도가 관측 되었는데 이는 하층보다는 상층에서 높은 농도의 오존이 2.5 m/s의 남서풍의 바람에 의해 이루어졌음을 말해준다. 이

러한 결과는 이전연구에서 밝힌 바 있는 해륙풍 발생 시 열적 내부 경계층에 의해 상하층간 다른 공기의 특성이 발생하는 현상과 일치함을 분석을 통해 발견할 수 있었다(Lin *et al.*, 2007). 이 시간대는 중등에서 138 ppb라는 고농도 오존이 발생한 시간대이다.

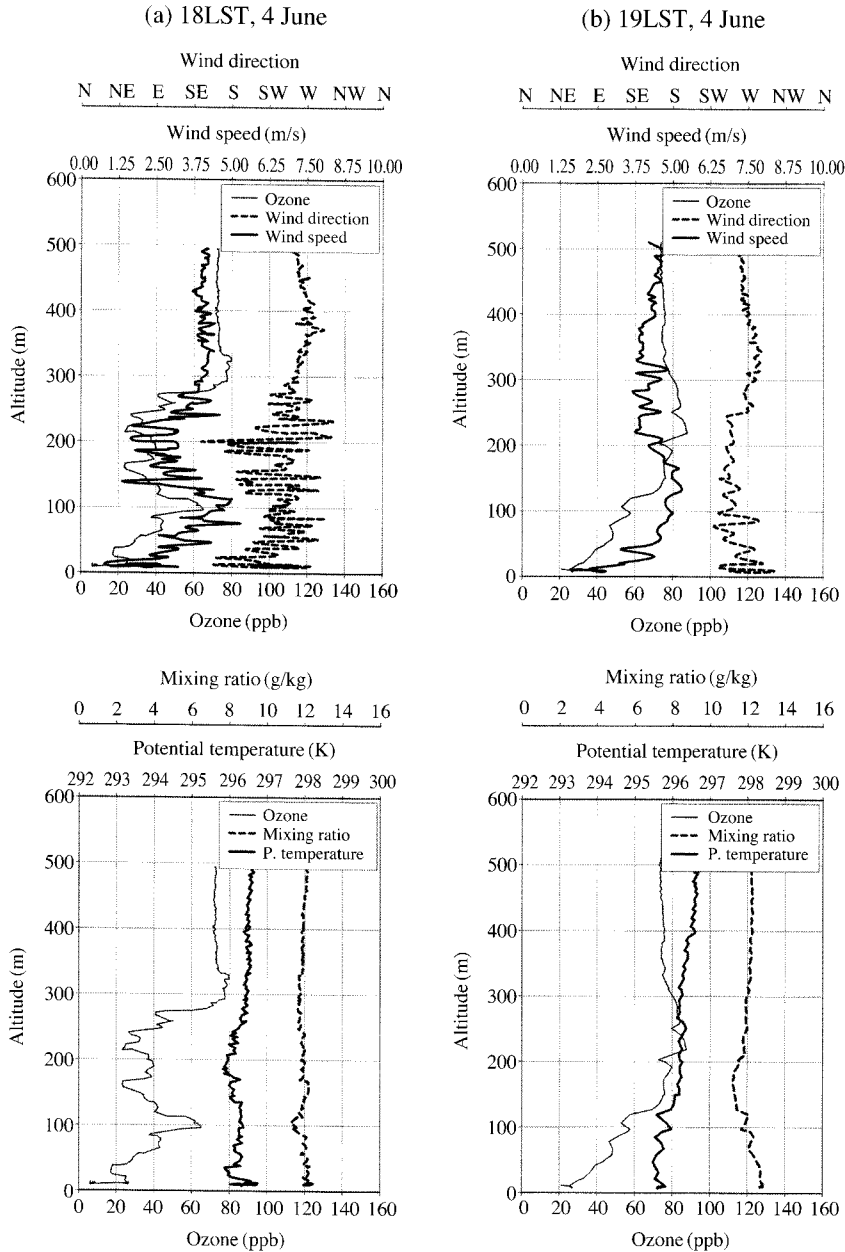


Fig. 11. Same as Fig. 10 but at (a) 18 LST, (b) 19 LST, (c) 21 LST 4 June, and (d) 03 LST 5 June.

본 연직 관측을 통해 확인할 수 있는 점은 연직혼합에 의해 연안지역에서 발생한 상층의 오존이 해풍에 의해 내륙의 주거지인 중동지역으로 이류되었고 혼중 (fumigation) 현상을 통해 지표오존농도에 영향을 주었다는 점이다 (Gunter, 2007). 특히 중동지역은 내

륙으로 200 m 이상의 높은 산이 자리 잡고 있어 오존농도가 수렴하기 쉬운 지형적인 특징을 가지고 있다. 이러한 기상학적 현상과 지형적 특징이 맞물려서 오존농도가 기준치를 초과함을 본 사례에 대한 관측을 통해 설명할 수 있다.

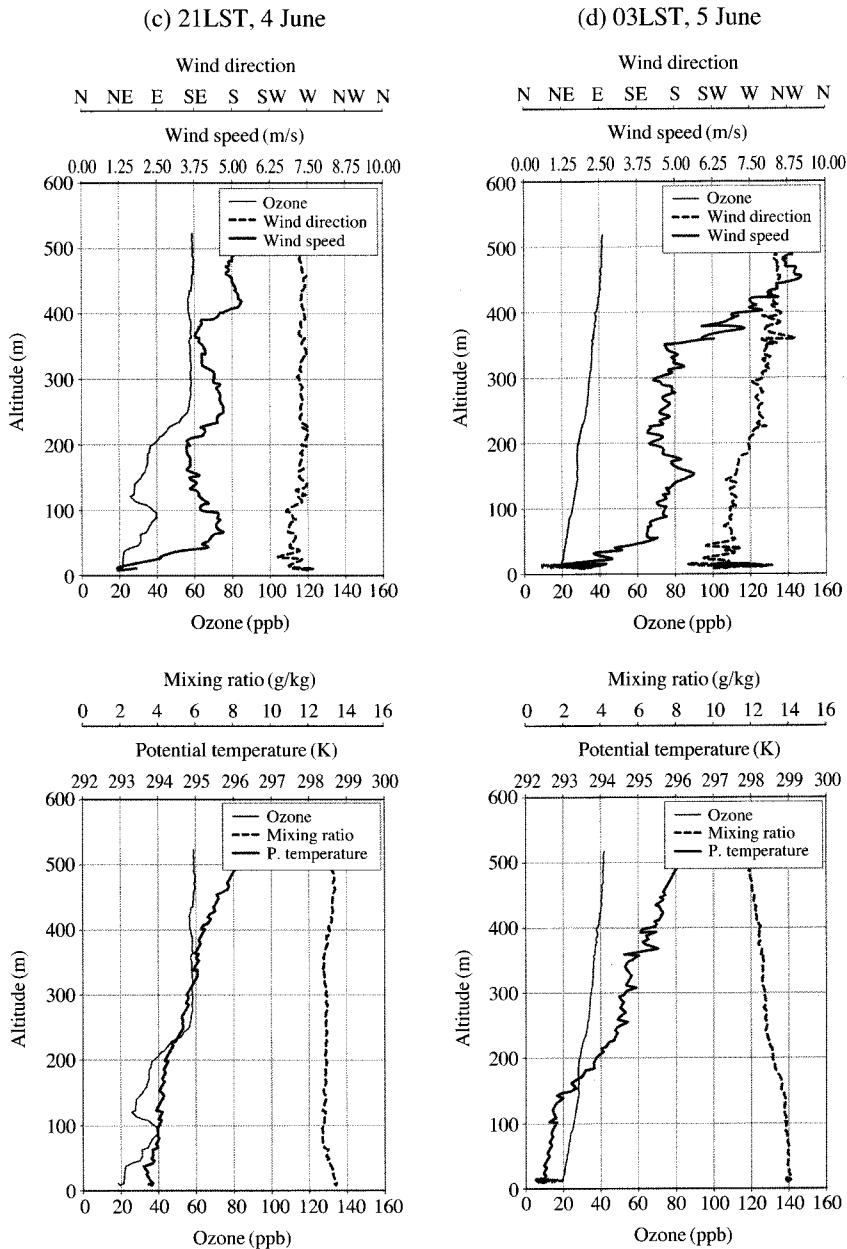


Fig. 11. Continued.

그림 11은 6월 4일 야간과 6월 5일 새벽의 결과로 각각 18, 19, 21, 03 LST의 결과이다. 야간에는 혼합층의 발달이 멈추고 지표냉각이 시작되면서 지표부근부터 안정층이 발생한다. 이에 따라 열적난류는 사라지고 기계적 난류만 존재하는데 관측 결과의 변동

폭이 작아진 점으로 난류현상이 주간에 비해 약해졌음을 알 수 있다. 먼저 18시의 결과를 보면 아직은 안정층의 모습은 보이지 않고 있다. 이 시간 관측에서 특이한 점은 풍속의 연직 분포와 오존의 연직 분포가 매우 비슷한 양상을 나타내었다는 것이다. 300 m

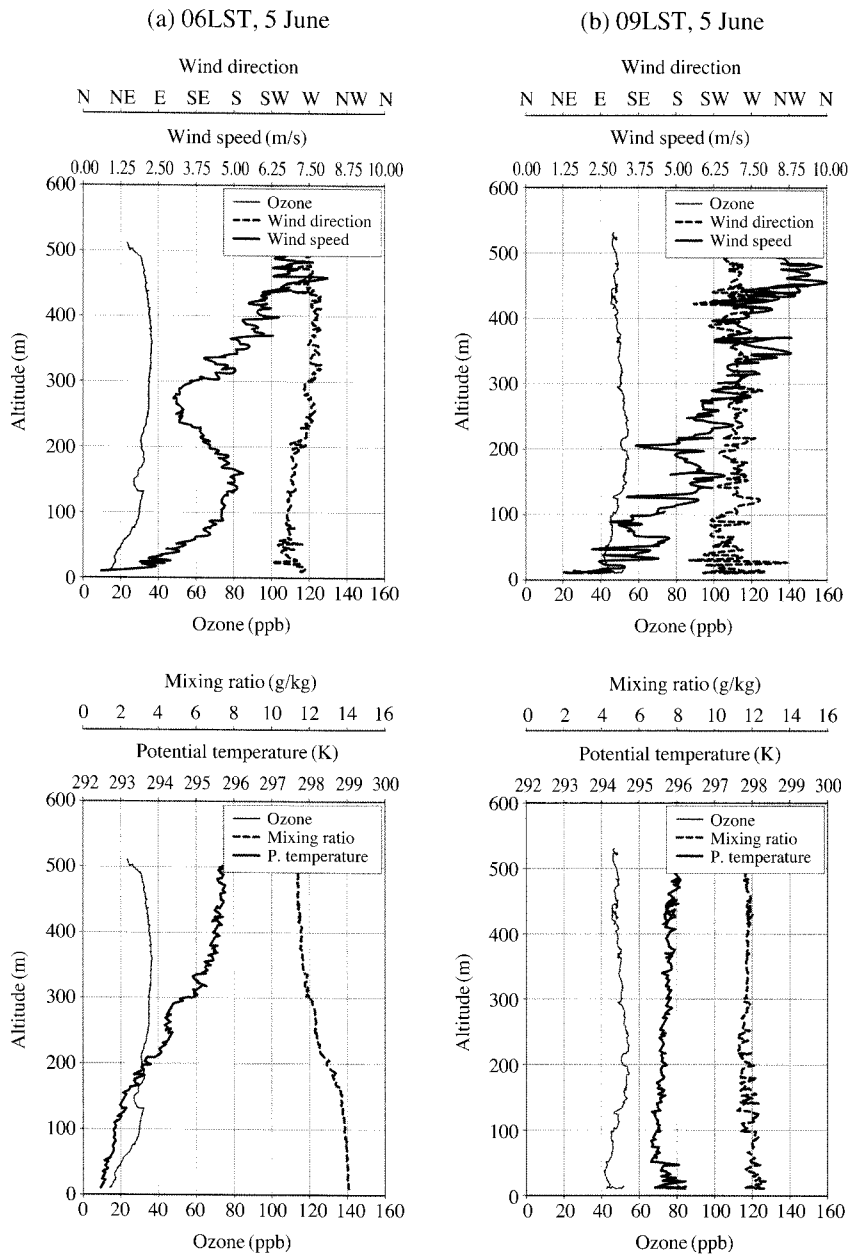


Fig. 12. Same as Fig. 10 but at (a) 06 LST, (b) 09 LST, (c) 12 LST, and (d) 15 LST 5 June.

하층에서 남서풍의 바람이 그 상층에서는 서풍의 바람이 관측되었고 이런 바람변화와 함께 오존이 이류되었음을 입증한다. 특히 상층의 오존농도는 약 70 ppb로 주간보다 높은 농도를 보였다. 이것은 앞서 AQMS 시계열 분석에서 언급한 바 있는 야간 지표

오존농도 상승을 설명하는 것으로 서쪽의 순천시와 광양시에서 발생한 오염물질이 해풍 순환에 의해 서풍을 타고 이류되어와 관측지점과 태인 지역에서 늦은 오후와 야간에 오존농도를 증가시킨 것으로 판단된다. 19시와 21시 결과에서 하층의 빠른 농도감소

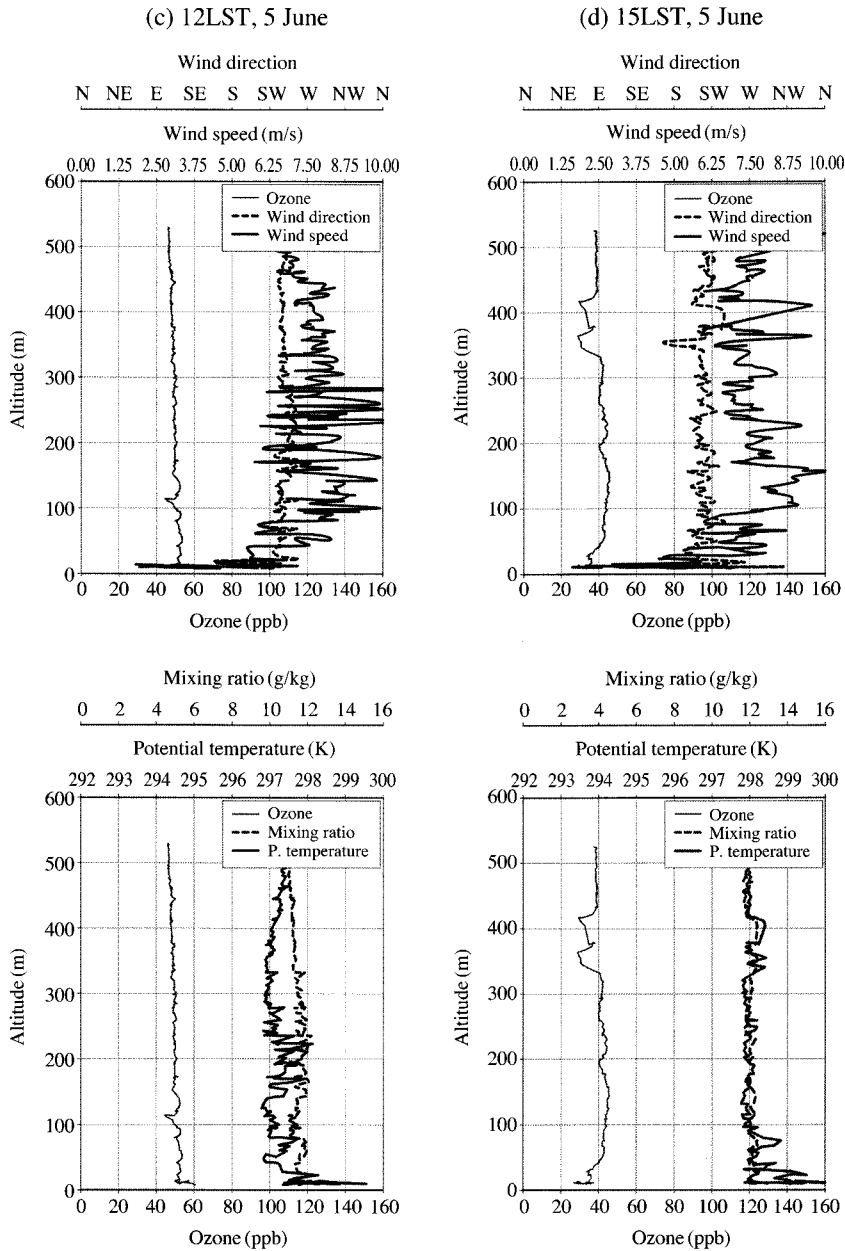


Fig. 12. Continued.

에 반해 250 m 이상에서 여전히 70 ppb 이상의 높은 농도의 오존이 존재하는데 이 또한 서쪽 도심에서 주간에는 혼합층의 발달로 상층에 존재한 오존이 야간 이 되면 지표부근부터 안정층이 발달하여 상층의 잔류층에 존재하게 되고 이 오존이 서풍에 의해 이류

되었음을 말해준다(Salmond and Mckendry, 2002; 이 화운과 정우식, 2001). 19시에는 해풍순환이 완전히 일어나 전 층에서 서풍이 관측되었으나 5일의 상층 종관풍인 서풍과 맞물려 육풍인 북풍계열로 순환은 발생하지 않았다. 서서히 안정층이 발달하였고 오존

농도는 전체적으로 감소하였다. 특히 03시의 결과에서 혼합비가 하층이 높고 상층이 낮게 나타난 점, 온위가 하층이 낮은 점 등은 안정층이 발달하였음을 보여준다. 이에 따라 오존농도의 전체적인 감소와 함께 큰 이류현상은 발견하지 못하였다.

6월 5일 주간의 결과를 그림 12에 나타내었다. 4일과 마찬가지로 강한 혼합층 발달과 열적난류에 의한 에디(eddy)활동은 관측 결과를 통해 확인할 수 있었다. 그러나 바람의 결과는 앞서 설명한 다른 관측기기의 결과와 마찬가지로 4일과 큰 차이를 보였다. 우선 풍향은 오전에 서풍이 약하게 해풍의 영향을 받아 남서풍으로 변하였고 전체적으로 강한 종관풍으로 일중 남서풍이 불었다. 풍속은 6시와 9시에 하층보다 상층에서 먼저 강한 바람이 불기 시작하여 주간에 되면서 5m/s 이상의 강한 종관풍이 전 층에서 관측되었다. 이런 기상상태에 의해 오존의 연직 분포가 결정되었다. 우선 강한 바람에 의해 오존농도의 국지적인 수렴이 발생하지 않고 오염물질이 발산함으로 낮은 오존농도가 관측되었고 상하층간 풍속과 풍향이 일정한 바람이 불어 연직으로 변화가 없는 오존농도가 관측되었다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 최근 전국에서 오존에 의한 대기질 저하가 가장 큰 지역 중 하나인 광양만을 대상으로 고농도 오존 발생에 대한 연구의 한 단계로 기상 및 대기질의 연직관측을 실시하고 분석하였다. 관측은 2007년 6월 4일과 6월 5일 양일간 실시하였고 이 두 날은 종관적 영향에 있어서 첫째 날은 약한 종관장으로 국지풍이 강하게 발달하였고 둘째 날은 강한 종관풍을 보이며 차이를 보였다. 본 연직 관측에 대한 분석에 앞서 지상 관측소의 결과를 먼저 분석한 결과 4일에는 해풍발생과 함께 국지적인 고농도 오존 사례가 발견되었고 5일에는 강한 종관풍으로 낮은 오존농도가 관측되었다. 각 AQMS에서 오존의 시계열을 살펴보았을 때 해풍의 순환에 의한 바람의 변화는 오존농도의 일변화로 나타남을 알 수 있었다. 그리고 radiosonde와 SODAR 관측을 분석하여 두 날 모두 혼합층이 잘 발달하였음을 발견하였지만 풍속은 관측 두 날 중 지상관측소와 마찬가지로 5일에

5m/s 이상의 강한 풍속을 보였다. 이러한 혼합층의 발달은 지표근처에서 오존의 이류뿐 아니라 상층에서의 이류 또한 짐작할 수 있었고 tethered ozone sonde를 통한 기상과 오존의 연직 프로파일을 분석함으로써 고도에 따른 이류의 특성이 종관장의 영향에 의해 더욱 차이가 났다. 4일에 약한 종관장으로 하층에서 해풍이 발달하여 연직으로 이질적인 바람과 오존농도 분포가 나타났으나 5일에 강한 종관장으로 국지순환계는 발생하지 못하였고 연직으로 거의 균일한 바람과 오존농도분포가 나타났다. 특히 6월 4일 15시에는 연안에 위치한 산업단지에서 이류되어 온 오염물질이 지형적 영향과 맞물려 연직 관측지점보다 내륙에 위치한 중동지역에서 고농도 오존을 발생시켰다. 또한 4일 야간에 상층에서 주간과 비슷한 70 ppb의 오존이 관측된 것은 해풍순환에 의해 서풍의 바람이 불어 관측 지점의 서쪽에 위치한 순천시와 광양시에서 주간에 발생한 오존에 의한 것으로 분석하였다. 또한 5일에 연직으로 일관된 풍향과 풍속 때문에 오존농도에 있어 큰 변화를 보이지 않았고 강한 종관풍으로 고농도 오존 또한 관측되지 않았다.

비록 본 연구에서는 다루지 않았지만 수치모의를 통한 기상 시뮬레이션을 실시하여 수평관측망보다 높은 해상도로 기상현상을 이해할 필요가 있다. 특히 6월 4일 15시에 중동에서 138 ppb의 기준치 초과가 발생하였지만 관측지점과 인근의 태인 지점은 그만큼 높은 농도가 관측 되지 않은 점은 해풍의 진입 경로에 따라 그 특징이 달라지는 것으로 짐작되는바 향후 기상뿐 아니라 대기질 모델링을 통한 분석이 이루어져야할 것이다.

감사의 글

본 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-2205)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

류찬수, 신유미, 이순환(2004) 해안지형 복잡성이 중규모순환장에 미치는 영향에 관한 수치실험, 한국기상

- 학회지, 40(1), 71-86.
- 심상규, 김철희, 정관영, 송철한, 김진영, 오현선 (1997) UAM 모델을 이용한 여천-동광양 지역의 오존 상승 원인 연구, 한국기상학회 학술대회 논문집, pp. 213-217.
- 이순환, 이화운, 김유근 (2002) 복잡지형에서 도시화에 따른 대기오염 확산에 관한 시뮬레이션, 한국대기환경학회지, 18(2), 67-83.
- 이화운, 원혜영, 최현정, 김현구 (2005) 광양만권에서의 자료 동화된 대기 유동장이 대기오염 물질의 확산장에 미치는 영향에 관한 수치모의, 한국대기환경학회지, 21(2), 169-178.
- 이화운, 정우식 (2001) 대기오염물질의 증거리 수송에 대한 관측적 분석, 한국기상학회지, 37(5), 475-486.
- 전라남도 (2004) 광양만권 대기환경규제지역 지정에 따른 실천계획수립.
- 하 훈, 이상득, 이종기, 박찬오, 문태룡 (2006) 광양만권의 오존농도 특성과 시공간적 분포, 한국대기환경학회지, 22(5), 642-652.
- 한국과학기술연구원 (1996) 여천-동광양 지역 광화학 오존 상승 원인 조사 연구.
- 환경부 (1998) 광양만권역 종합환경영향조사사업.
- 환경부 (2007) 대기환경 연보 2006.
- 황미경, 김유근, 오인보, 송상근, 임윤규 (2008) 서울지역 연직 오존 분포 : 2003년 6월 6-9일 오존존네 관측, 한국대기환경학회지, 24(2), 196-205.
- Chance, K.V., J.P. Burrows, D. Perner, and W. Schneider (1997) Satellite measurements of atmospheric ozone profiles, including tropospheric ozone, from UV/visible measurements in the nadir geometry : A potential method to retrieve tropospheric ozone, J. Quant. Spectrosc. Radiative Transfer, 57, 467-476.
- Cheng, W.L. (2002) Ozone distribution in coastal central Taiwan under sea-breeze conditions, Atmospheric Environment, 36, 3445-3459.
- Edwards, D.P. (2006) Air quality remote sensing from space. Eos. Trans. Amer. Geophys. Union, 87, 327.
- Fishman, J., C.E. Watson, J.C. Larsen, and J.A. Logan (1990) Distribution of tropospheric ozone determined from satellite data, J. Geophys. Res., 95, 3599-3617.
- Graw (2008) Upper Air Sounding System.
- Gunter, R.L. (2007) Assessment of boundary layer variations in the Tampa Bay Area during the Bay Region Atmospheric Chemistry Experiment (BRACE), Atmospheric Environment, 41, 4165-4176.
- Helmig, D., J. Boulter, D. David, J.W. Birks, N.J. Cullen, K. Steffen, B.J. Johnson, and S.J. Oltmans (2002) Ozone and meteorological boundary-layer conditions at Summit, Greenland, during 3-21 June 2000, Atmospheric Environment, 36, 2595-2608.
- Komhyr, W.D. (1969) Electrochemical concentration cells for gas analysis, Annals of Geophysical, 25, 203-210.
- Lee, S.-H., Y.K. Kim, H.S. Kim, and H.W. Lee (2007) Influence of dense surface meteorological data assimilation on the prediction accuracy of ozone pollution in the southeastern coastal area of the Korean Peninsula, Atmospheric Environment, 41(21), 4451-4465.
- Lin, C.H., C.H. Lai, Y.L. Wu, H.C. Lai, and P.H. Lin (2007) Vertical ozone distributions observed using tethered ozonesondes in a coastal industrial city, Kaoshiung, in southern Taiwan, Environ. Monit. Assess., 127, 253-270.
- Salmond, J.A. and I.G. McKendry (2002) Secondary ozone maxima in a very stable nocturnal boundary layer : observations from the Lower Fraser Valley, BC, Atmospheric Environment, 36, 5771-5782.
- Science Pump Co. (2004) Operator's Manual Model 6A ECC Ozonesonde.
- Scintec (2006) Hardware Manual SFAS.
- Talbot, C., P. Augustin, C. Leroy, V. Willart, H. Delbarre, and G. Khomenko (2007) Impact of a sea breeze on the boundary-layer dynamics and the atmospheric stratification in a coastal area of the North Sea, Boundary-Layer Meteorology, 125, 133-154.
- Tie, X., S. Chandra, J.R. Ziemake, C. Granier, and G.P. Brasseur (2007) Satellite Measurements of Tropospheric Column O₃ and NO₂ in Eastern and Southeastern Asia : Comparison with a Global Model (MOZART-2), J. Atmos. Chem., 56, 105-125.
- Tsuang, B.J., J.L. Tsai, M.D. Lin, and C.L. Chen (2003) Determining aerodynamic roughness using tethered sonde and heat flux measurements in an urban area over a complex terrain, Atmospheric Environment, 37, 1993-2003.
- Vaisala (2002a) Tethered Ozonesonde TTO111 User's Guide.
- Vaisala (2002b) Tethersonde TTS111 User's Guide.
- Vaisala (2005) DigiCORA Tethersonde System TT12 User's Guide.