

## 연안 대도시 해풍 풍하측 계곡지역의 지표오존 분포 특성: 계절변화와 바람과의 관계

강재은 · 오인보<sup>1)</sup> · 송상근 · 김유근\*

부산대학교 지구환경시스템학부, <sup>1)</sup>울산대학교 환경보건센터  
(2011년 5월 20일 접수; 2011년 12월 6일 수정; 2012년 1월 26일 채택)

### Characteristics of Surface Ozone in a Valley Area Located Downwind from Coastal Cities under Sea-breeze Condition: Seasonal Variation and Related Winds

Jae-Eun Kang, In-Bo Oh<sup>1)</sup>, Sang-Keun Song, Yoo-Keun Kim\*

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

<sup>1)</sup>Environmental Health Center, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

(Manuscript received 20 May, 2011; revised 6 December, 2011; accepted 26 January, 2012)

#### Abstract

The seasonal variations of ozone (O<sub>3</sub>) concentrations were investigated with regard to the relationship between O<sub>3</sub> and wind distributions at two different sites (Jung Ang (JA): a semi-closed topography and Seo Chang (SC): a closed topography) within a valley city (Yongsan) and their comparison between these sites (JA and SC) and two non-valley sites (Dae Jeo (DJ) and Sang Nam (SN)) located downwind from coastal cities (Busan and Ulsan). This analysis was performed using the data sets of hourly O<sub>3</sub> concentrations, meteorological factors (especially, wind speed and direction), and those on high O<sub>3</sub> days exceeding the 8-h standard (60 ppb) during 2008-2009. In summer and fall (especially in June and October), the monthly mean values of the daily maximum O<sub>3</sub> concentrations and the number of high O<sub>3</sub> days at JA (and SC) were relatively higher than those at DJ (and SN). The increase in daytime O<sub>3</sub> concentrations at JA in June was likely to be primarily impacted by the transport of O<sub>3</sub> and its precursors from the coastal emission sources in Busan along the dominant southwesterly winds (about 5 m/s) under the penetration of sea breeze condition, compared to other months and sites. Such a phenomenon at SC in October was likely to be mainly caused by the accumulation of O<sub>3</sub> and its precursors due to the relatively weak winds under the localized stagnant weather condition rather than the contribution of regional transport from the emission sources in Busan and Ulsan.

**Key Words** : Ozone concentration, Valley, Downwind of coastal city, Transport effect

#### 1. 서론

지표부근 오존은 질소산화물(NO<sub>x</sub>)과 휘발성유기

화합물(VOCs)등이 포함된 오염공기과 내에서 광화학 반응으로 생성되는 대표적인 2차 대기오염물질이다. 오존농도는 전구물질 배출과 수송, 축적 과정을 통해 일반적으로 배출원 풍하측에서 상대적으로 높게 나타난다(Derwent, 2000; Lin 등, 1996; NRC, 1991). 연안 대도시지역의 경우, 해풍유입은 오존 및 전구물질의 인근 내륙으로 수송시켜 풍하측(교외지역 포함)

\*Corresponding author : Yoo-Keun Kim, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea  
Phone: +82-51-510-2282  
E-mail: kimyk@pusan.ac.kr

의 오존농도를 빈번히 상승시키는 중요한 역할을 한다(Liu와 Chan, 2002; Lu와 Turco, 1995). 해풍에 의한 풍하측 오존 고농도현상은 국외 여러 지역을 대상으로 한 연구에서 이미 많이 알려진 사실이다. Carroll과 Dixon(2002)은 캘리포니아 연안에서 해풍발달시 40-80 km의 풍하측에서 나타난 100 ppb 이상 오존농도를 조사하였고, Wang 등(2001)은 홍콩지역 해풍의 풍하측 수렴현상이 고농도 오존발생의 주요 원인임을 제시하였다. 타이완의 남서지역에서는 해풍이 도시 풍하측 교외지역 오존농도 상승에 기여함을 수치모의 실험으로 제시하였다(Lin 등, 2007).

연안 대도시지역으로부터 발달된 해풍의 풍하측에 계곡 분지지형이 위치하게 되면, 지형 특성에 따른 배수류 및 산곡풍 등의 영향과 함께 다양한 해륙풍 영향으로 인해 지역 내 오염물질의 거동이 복잡하게 된다(Arteta와 Cautenet, 2007; Lee 등, 2009; McKendry와 Lundgren, 2000). 활승류(upslope winds) 및 산풍(up-valley winds)에 의한 혼합층 발달은 확산 및 환기(ventilation)를 강화시켜 계곡 내 오염물질 농도를 감소시킬 수 있으며(Orgill, 1989), 찬기류에 의한 대기 안정화(약한 풍속)의 강화는 오염물질을 축적시켜 농도를 증가시킨다(Corsmeier 등, 2006; Salmond와 McKendry, 2005; Savov 등, 2002). 또한 산지지형 내 해풍유입 기류의 정체는 국지배출된 오염물질의 영향에 수송된 오염물질의 영향이 더해져 지역 내 대기질을 보다 악화시키기도 한다(Boucouvala와 Bornstein, 2003; Kalthoff 등, 2005; Liu와 Chan, 2002).

우리나라에서는 서울을 포함한 수도권 지역을 대상으로 해풍 발달 및 유입에 의한 풍하측 지역의 오존농도 분포와 고농도 현상의 특성을 분석한 바 있다(김 등, 1999; 김 등, 2002; 정과 정, 1991; Hwang 등, 2007). 우리나라는 다수의 연안 대도시를 가지고, 국토의 70% 이상이 산지지형으로 해풍의 풍하측에 복잡지형조건이 형성되어 있으며, 아울러 최근 도시 팽창과 주변 복잡지형의 개발은 대도시 배출원의 영향과 풍하측 복잡지형 내에서의 오존거동에 대한 평가가 요구된다.

한반도 남동지역의 경우, 연안에 대도시인 부산과 울산이 위치하고 있으며, 남풍에서 동풍계열의 해풍이 탁월하게 발달한다. 이러한 해풍 풍하측 내륙으로

는 복잡한 산지지형 내에 다수의 도시들(양산, 김해 등)이 위치한다. 최근 수치모의 실험결과에 따르면 남동지역 도시 간 오염물질 수송에 따른 대기질 변화가 상당수준에 있는 것으로 예측된 바 있으며(Lee 등, 2008), 관측자료 분석 결과에서는 이러한 해풍 풍하측 도시들에서의 오존에 대한 대기환경기준치 초과빈도가 높은 수준을 가지는 것으로 나타났다(2008년 8시간 60 ppb 대기환경기준치 초과 횟수: 양산 68회, 김해 76회; 환경부, 2009).

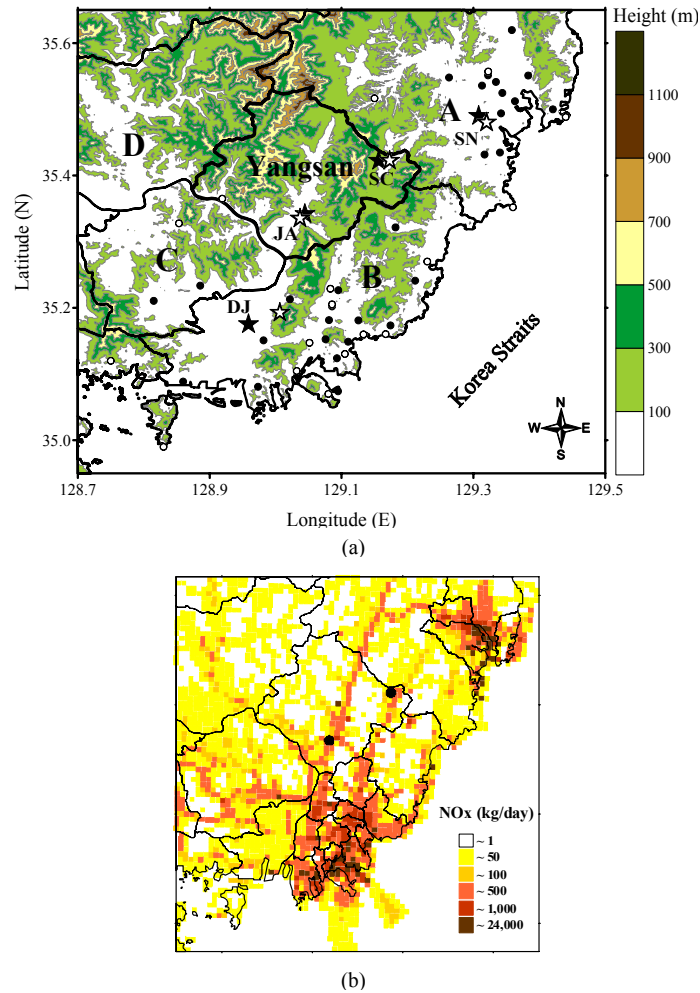
본 연구에서는 남동연안의 해풍발달시 부산과 울산의 대도시 풍하측에 위치하는 양산시를 대상으로 내륙 계곡분지 지형 내 지표 오존농도의 분포 특징을 살펴보고, 인근 두 대도시로부터의 수송 영향을 바람 분석을 통해 진단하였다. 또한 대도시 풍하측 계곡지형의 영향을 보다 명확히 평가하기 위해 풍하측 비계곡 지형조건을 가진 지점과의 비교연구를 수행하였다.

## 2. 재료 및 방법

연구 대상도시인 양산시는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 내륙 계곡지형 내에 발달된 도시로 북동쪽에는 주요 산업도시인 울산광역시, 남동쪽에는 다수의 인구가 밀집된 부산광역시, 남서쪽에는 중소산업단지가 위치한 김해, 북서쪽에는 비교적 청정지역인 밀양에 둘러싸여 위치하고 있다. 두 대도시 내 오존 전구물질인 NO<sub>x</sub>와 VOCs 배출량 수준(1999-2006년 평균)은 양산시와 비교해 각각 부산은 12배와 9배, 울산은 12배와 20배에 이른다(국립환경과학원, 2011).

양산시는 해안선으로부터 약 50 km 이내에 위치하고 있어 남풍 내지 동풍계열의 해풍시 연안 대도시들로부터의 오염물질 수송영향을 받는다. 또한 산(최고 해발고도: 약 800 m) 사이의 계곡 분지에 도심 및 공업단지가 발달되어 있고 도시 간 이동교통량이 많은 경부고속도로가 위치하고 있어(양산구간 6만5천대/일), 지역 내 배출된 오염물질의 이동이 산곡풍 등의 국지풍에 의해 크게 영향을 받을 수 있는 환경을 가지고 있다(한국도로공사, 2011).

본 연구에서 사용한 기상과 대기질 자료는 양산시와 인근 지역에 위치한 기상청 산하 AWS와 환경부



**Fig. 1.** (a) Locations of meteorological (○ and ☆) and air quality monitoring (● and ★) sites, and (b) distributions of NO<sub>x</sub> emission (kg/day) in a valley city (Yangsan) of Korea (A: Ulsan, B: Busan, C: Gimhae, and D: Miryang). Sites of Jung Ang (JA) and Seo Chang (SC) in valley areas of Yangsan city and selected sites of Dae Jeo (DJ) and Sang Nam (SN) in non-valley areas located downwind from coastal large emissions in Busan and Ulsan, respectively.

산하 대기질 측정망(Fig. 1)으로부터 얻어졌다. 양산시 내에 위치한 대기질 측정망은 두 개 지점으로, 반개방형 계곡 내에 위치한 중앙(JA)지점과 폐쇄형 계곡 내에 위치한 서창(SC)지점이다. 또한 남동연안 해풍유입 방향과 지형을 고려할 때 중앙(JA)와 서창(SC)지점의 해풍유입시 풍상측에 위치할 가능성이 높은(Fig. 3 참조) 부산시의 대저(DJ)지점과 울산시의 상남(SN)지점의 자료가 비교를 위해 사용되었다. 대저(DJ)와 상남(SN)지점은 비계곡 지형에 있으며, 중

앙 및 서창지점과 유사하게 각각 부산과 울산의 주요 배출원지역(공단지역 등)에서 형성된 오염공기괴의 이동 경로에 위치한다(이후 ‘비교지점’으로 표기, Fig. 1). 또한 인근 2 km 이내에 기상관측지점이 있어 해당 지점별 국지적 기상조건의 비교가 가능하다.

사용된 기상 및 대기질 자료의 기간은 대상지점 모두 분석에 유효한 수준의(75% 이상) 자료가 존재한 2008-2009년이다. 본 연구에서 적용한 고농도 오존발생일 기준은 현 우리나라 대기환경기준치이자 WHO

권고기준인 8시간 기준 60 ppb를 초과한 날로 정의하였다. 시간별 고농도 오존의 기준은 80 ppb 초과시로 하였으며, 이는 다수의 국내 오존연구에서 고농도 수준으로 적용된 바 있다(김, 2000; 하 등, 2006).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 오존농도와 바람의 계절변화 특성

Fig. 2는 계곡에 위치한 양산시 두 지점(중앙(JA)과 서창(SC))과 부산과 울산의 두 비교지점(대저(DJ) 및 상남(SN))에서의 일최고 오존농도의 월변화를 나타낸 것이다. 모든 지점에서 일최고 농도의 1차 정점은 4월 또는 5월에 2차 정점은 10월에 나타났다. 이는 타 도시(예로 서울)에서의 변화와는 다소 차이가 있는 것으로 선행연구 결과(오와 김, 2002)와 유사하게 기상조건과 연계된 연안지역에서의 오존농도 변화 특성이 반영된 것으로 볼 수 있다. 겨울과 봄의 중앙(JA)과 서창(SC)지점 농도수준은 비교지점들(대저(DJ)와 상남(SN))과 유사하며, 이는 오존의 낮은 광화학 생성율과 관계된다. 그러나 여름과 가을(6-10월) 동안 중앙(JA)과 서창(SC)지점 오존농도 수준은 각각의 비교지점보다 연속적으로 높으며, 특히 중앙(JA)지점은 6월과 10월(+9 ppb)에 서창(SC)지점은 9-10월(+7 ppb)에 크게 증가된 농도값 차이를 가진다.

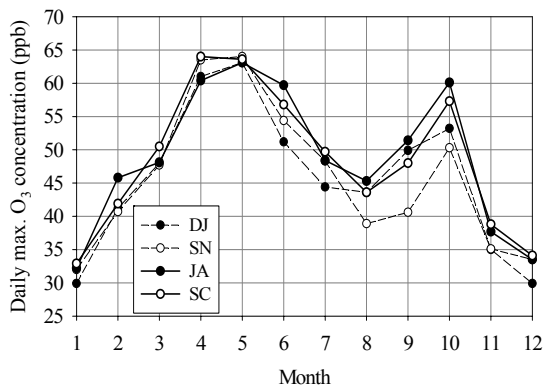


Fig. 2. Monthly variations of the mean values of daily maximum O<sub>3</sub> concentrations (ppb) at sites Jung Ang (JA) and Seo Chang (SC) in Yangsan and sites Dae Jeo (DJ, in Busan) and Sang Nam (SN, in Ulsan) during 2008-2009.

대상지점의 고농도 오존 발생현황과 인근 지역의 발생수준을 비교하기 위해 우리나라 남동부에 위치한 측정지점별 고농도 오존 발생빈도를 대상기간동안 조사한 결과, 연안 대도시인 부산과 울산은 전반적으로 배출원이 집중된 산업지역과 도심을 중심으로 발생빈도가 낮고 인근 외곽지역으로 높았다(해당결과 그림 미제시). 특히, 계곡 분지지형 내 위치한 연안 대도시 외곽 지점들에서 보다 높은 고농도 발생빈도가 나타났으며(최고 132일), 중앙(JA)과 서창(SC)지점 역시 각각 80일과 90일로 연평균 40일 이상의 높은 빈도를 가졌다. 이 빈도는 두 비교지점(대저(DJ) 74일, 상남(SN) 69일)보다 높아 내륙계곡 지역 내 기류정체 등의 영향이 예상된다.

Fig. 3은 양산 두 지점과 비교지점의 고농도 오존 발생빈도를 월변화로 나타낸 것이다. 여름철 강수현상의 증가로 인해 한반도 내 여타 주요 도시 및 배경지역(제주 등)에서의 결과와 유사하게 봄과 가을에 상대적으로 높은 발생빈도를 보인다(김, 1996; 서 등, 1995). 폐쇄적 지형 내 서창(SC)지점은 4월에서 6월까지 가장 높은 빈도를 보이며, 중앙(JA)지점은 동일 기간에 월별 15회 이상의 유사수준 빈도를 유지한다. 중앙(JA)지점은 6, 7, 10월에, 서창(SC)지점은 4-10월(7월 제외)에 비교지점보다 높은 빈도를 가진다. 특히, 중앙(JA)과 서창(SC)지점의 일최고 농도 평균값이 각

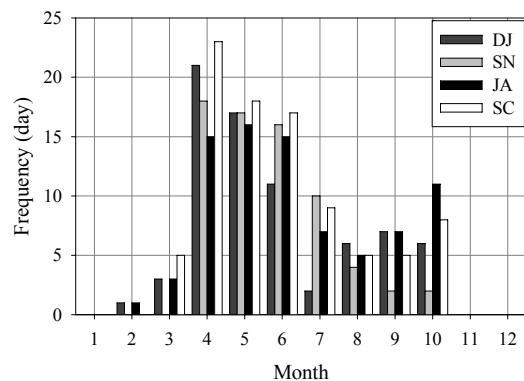


Fig. 3. Monthly variations of the number of high O<sub>3</sub> days (exceeding 8-h standard of 60 ppb) at sites Jung Ang (JA) and Seo Chang (SC) in Yangsan and sites Dae Jeo (DJ) and Sang Nam (SN) during 2008-2009.

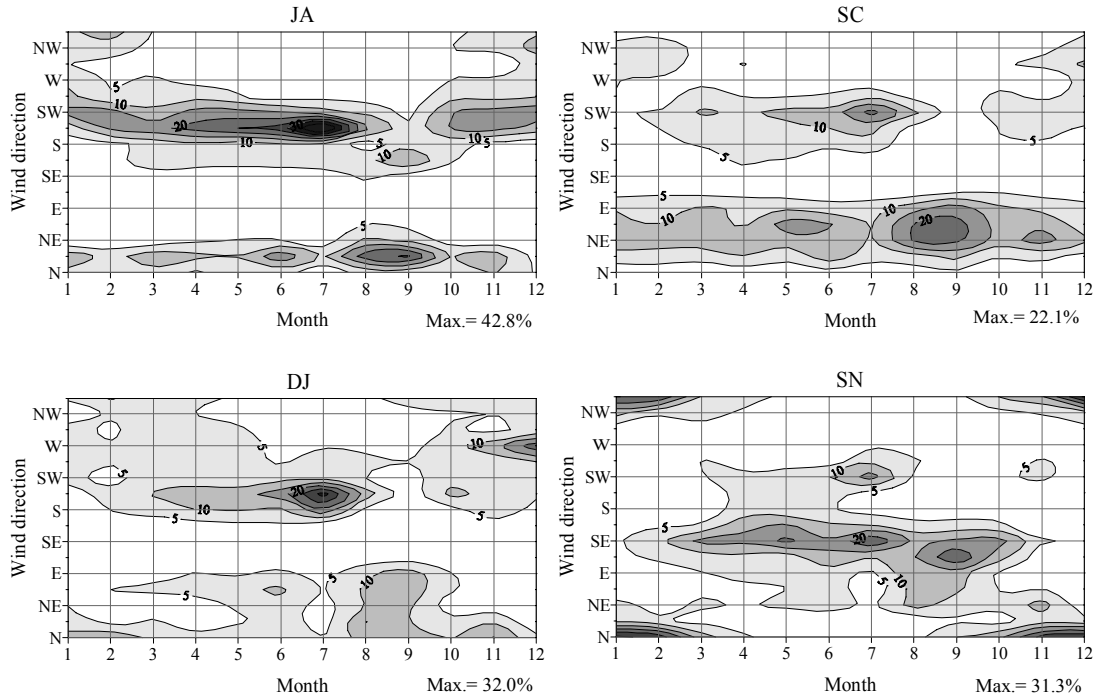


Fig. 4. Monthly variations of frequency (%) of wind direction (10:00-17:00 LST, corresponding to the wind speed of > 1.0 m/s) at sites Jung Ang (JA) and Seo Chang (SC) in Yangsan and sites Dae Jeo (DJ) and Sang Nam (SN) during 2008-2009.

각의 비교지점보다 뚜렷이 높았던 6월과 10월에 두 지점의 고농도 오존일 발생빈도 역시 보다 높음을 알 수 있다(중앙 6월 +5회, 10월 +5회, 서창 10월에 최대 +6회). 가을철 고농도 오존일 발생빈도의 경우 부산이 여타 대도시(서울과 대구)보다 높은 수준에 있으며, 이는 상대적으로 높은 일최고 기온과 해풍 영향 때문임을 언급한 바 있으나(김 등, 2002), 본 연구에서는 양산지역 내 두 지점의 빈도가 부산 연안의 대저(DJ) 지점보다 높은 수준에 있다.

Fig. 4는 해당지점들에서의 월별 주간(10:00-17:00 LST) 풍향(1 m/s 이상) 발생빈도를 나타낸 것이다. 중앙(JA)지점은 높은 수준의 오존농도가 나타난 4-7월(20% 이상, 최대 43%), 그리고 10월(10% 이상)에 남서풍이 지배적이며, 이 풍향의 풍상측 대저(DJ)지점 역시 동일기간 중 남서풍이 가장 빈번하다(10% 이상). 즉, 중앙(JA)지점은 오존농도가 높은 계절동안 대저(DJ)지점 및 연안에 위치한 오염원들로부터의 기류

유입 영향이 빈번함을 알 수 있다. 반면, 8-9월은 북동풍 빈도가 증가하여 두 지점 간 기류 영향이 낮으며, 10월에는 두 지점 모두 남서풍 빈도가 높으나 여름보다 그 빈도가 감소하였다. 서창(SC)지점은 5-8월 그리고 10월에 남서풍과 함께 북동풍의 영향이 빈번하나(최대 22%), 10월에는 무풍 발생빈도가 높아 두 풍향의 발생빈도가 상대적으로 낮다. 북동풍의 풍상측에 위치한 상남(SN)지점은 동일기간동안 해풍유입 방향인 남동풍 빈도가 높으나, 북동풍 빈도가 5% 이상 지속적으로 나타나(7월 제외) 두 지점 간 기류영향이 예상된다.

Fig. 5는 양산 내 두 지점이 각각의 비교지점들보다 뚜렷이 높은 농도수준 및 발생빈도를 가졌던 6월과 10월의 고농도 오존일에 대한 풍향과 풍속별 오존농도 분포(10:00-17:00 LST)와 해당시간의 풍향-풍속 구간별 발생빈도를 나타낸 것이다. 6월 중앙(JA)지점 고농도 오존일은 남서 및 남풍 발생빈도가 탁월하게 높으

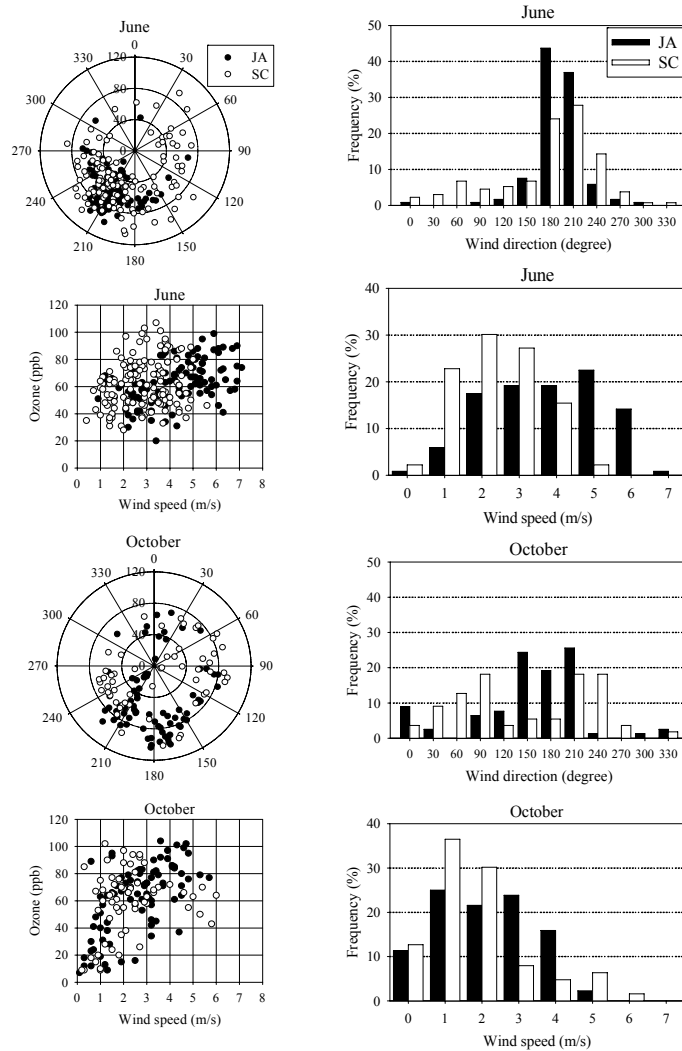


Fig. 5. Distributions of O<sub>3</sub> concentrations (ppb) as a function of wind direction (degree) and speed (m/s) and the frequency (%) of wind direction and speed, respectively, at sites Jung Ang (JA) and Seo Chang (SC) on high O<sub>3</sub> days (10:00-17:00 LST) in June and October, 2008-2009.

며(150-240°: 88%), 시간별 고농도(80 ppb 이상) 역시 남서풍 조건에서 지배적이다. 또한 강한 풍속조건(3 m/s 이상)에서의 농도분포가 빈번하고(76%) 시간별 고농도가 대체로 5 m/s 이상에서 발생하였다. 또한 광화학 반응으로 인한 오존생성시 나타나는 저농도(20 ppb 이하)의 발생빈도가 낮아 약한 풍속조건하에서의 국지적 오존생성 및 축적영향이 크지 않으며, 외부로부터의(특히, 부산을 포함한 남쪽 풍상측 지역) 수송

영향 가능성이 큰 농도분포 모습을 가진다. 서창(SC) 지점의 6월 고농도 오존일 역시 남풍 및 남서풍 빈도가 가장 높으나(150-240°: 59%) 북동풍 및 동풍 빈도가 일정수준 발생하였으며(30-120°: 14%), 중앙(JA) 지점과 비교시 약한 풍속(3 m/s 미만)의 발생빈도(55%)가 높다. 그러나 중앙(JA)지점과 유사하게 낮은 농도 발생빈도와 함께 시간별 고농도 오존이 강한 풍속에서 빈번하여 수송영향이 높은 농도분포임을 알

수 있다. 즉, 6월 서창(SC)지점에서 발생된 고농도 오존은 남서(부산 포함)와 북동(울산 포함)의 풍상측 지역으로부터 기류유입 조건과 함께 폐쇄적 지형 내 국지적 오존축적을 야기하는 약한 풍속 조건하에서 발생하였다.

10월 고농도 오존일의 경우, 중앙(JA)지점은 여전히 남서풍과 남풍 조건에서 탁월한 오존 발생빈도를 가진다(150-240°: 69%). 그러나, 6월보다 약 2.5배 증가된 약한 풍속조건하에서(58%), 저농도와 고농도의 발생빈도가 크게 증가하여 국지적 광화학 오존생성 영향의 발달을 짐작할 수 있다. 한편 반 개방형 계곡지형을 따라 발달되는 강한 남풍 조건에서는 60 ppb 이하 농도의 발생빈도가 낮고 시간별 고농도 발생빈도가 높아 해당풍향의 풍상측(부산 포함)으로부터의 수송영향이 동시에 예상된다. 서창(SC)지점의 10월 고농도 오존일은 남서풍(210-270°: 36%)과 북동풍(30-120°: 40%) 빈도가 높으나, 인근 중앙(JA)지점보다도 뚜렷이 증가된 약한 풍속조건에서 (저농도가 함께) 고농도 오존 발생이 빈번하여(79%), 국지적 광화학 오존생성 및 축적영향이 농도상승에 크게 기여하게 될 것으로 분석된다.

### 3.2. 계절 대표 고농도 사례 분석

연안 내륙지역 해풍 풍하측의 지형조건 차이를 가진 지점 간에 뚜렷한 농도차와 고농도 발생차이를 가지며, 고농도 발생시 바람조건 특성 차이를 보였던 6월(여름)과 10월(가을)을 대상으로 대표적인 고농도 사례를 선정하여 계곡지형 내 시간별 농도 및 기상요소의 변화 특성을 분석하였다.

#### 3.2.1. 6월 고농도 발생 사례

앞서 6월의 양산 내 두 지점의 오존농도 상승은 다소 강한 바람조건하에서 연안에 위치한 풍상측 오염원으로부터의 수송영향이 클 것으로 분석되었다. 따라서, 연안을 향한 반개방형 지형 내에서 해풍유입의 바람조건이 보다 빈번한 중앙(JA)지점의 고농도 오존일인 2009년 6월 13일을 해당월의 대표 사례일로 선정하였다.

Fig. 6은 해당 사례일의 중앙(JA)지점과 비교지점인 대저(DJ)에서의 시간별 오존농도와 기온, 풍속, 풍향 변화를 나타낸 것이다. 중앙(JA)지점의 일최고 오

존농도는 대저(DJ)지점보다 2시간 늦은 16:00 LST에 약 10 ppb 더 증가된 농도값을 가진다(87 ppb). 중앙(JA)지점은 지형특성상 일출시간 이후 남풍계열의 산풍이 발달되어 해풍유입(남풍)에 의한 풍향전환이 뚜렷하지 않으나, 13:00-14:00 LST에 기온 변화폭 둔화 이후 나타난 기온증가와 풍속증가는 해풍유입에 의한 기상요소 변화모습으로 설명된다(정과 이, 2000; Melas 등, 1995; Simpson 등, 1977; Simpson, 1994). 대저(DJ)와 중앙(JA) 두 지점은 일최대풍속(대저 13:00 LST, 중앙 15:00 LST) 이후에 농도감소가 아닌 농도 증가로 일최고농도값(대저 14:00 LST, 중앙 16:00 LST)이 발생하였다. 해풍 풍하측에 위치한 두 지점간

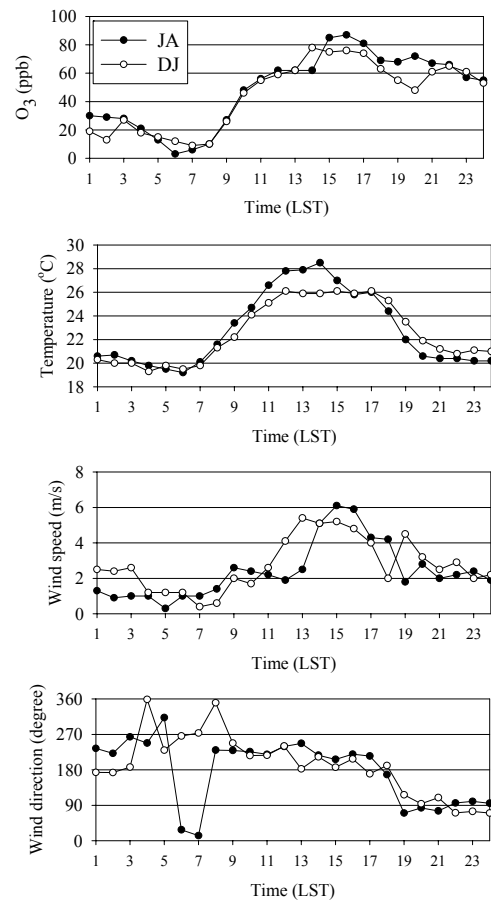


Fig. 6. Diurnal variations of O<sub>3</sub> concentrations (ppb), temperature (°C), wind speed (m/s), and wind direction (degree) at sites Jung Ang (JA) and Daejeo (DJ) on June 13, 2009.

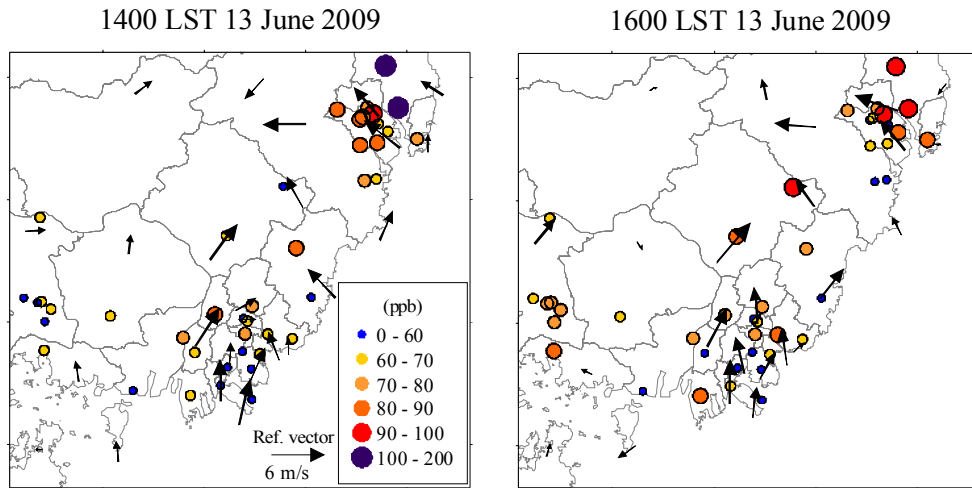


Fig. 7. Horizontal distributions of wind vector (m/s) and  $O_3$  concentrations (ppb) in the study area and its surrounding at 14:00 and 16:00 LST on June 13, 2009.

의 풍속변화와 유사풍향 발달, 그리고 오존농도 증가의 발생시간 차이를 함께 고려할 때, 중앙(JA)지점의 오후 오존농도 증가는 발달된 해풍의 유입과 관련된 것으로 보인다.

Fig. 7은 대상지점들을 포함한 인근 지점들의 오존 및 바람벡터의 수평분포로, 중앙(JA)지점에 해풍유입 영향이 예상되었던 14:00 LST와 이후 16:00 LST를 제시하였다. 14:00 LST의 수평분포에서 볼 수 있듯이 중앙(JA)지점의 강한 남서풍(5 m/s)은 연안에 위치한 풍상측의 다른 지점과 함께 발달되어 해풍 영향에 의한 바람분포임을 확인할 수 있다. 이후 16:00 LST(15:00 LST부터)에 중앙(JA)지점은 지속된 강한 남서풍의 해풍유입과 함께 오존농도가 증가하여 대저(DJ) 비교 지점을 포함한 인근 남서 풍상측 지점들보다 높은 오존농도값을 가졌다. 중앙(JA)지점의 일최고 오존농도가 나타난 16:00 LST의 풍속은 인근 지점들보다 강한 약 6 m/s로, 국지적으로 배출된 오존 전구물질들에 의한 광화학 오존생성 영향은 작아지게 된다.

### 3.2.2. 10월 고농도 발생 사례

양산지역 내 10월의 오존농도 상승은 약한 풍속조건하에서 빈번하였으므로, 정체성 대기조건이 예상되며 폐쇄적 지형에 위치한 서창(SC)지점에서 고농도 오존이 지속된 2008년 10월 3-4일을 대표 사례일로

선정하였다.

Fig. 8은 해당사례일의 전날인 2일부터 4일까지의 오존농도와 기온, 풍속, 풍향의 시간별 변화를 나타낸 것이다. 서창(SC)지점의 시간별 오존농도를 보면 비교지점인 상남(SN)과 달리 2일부터 4일까지 일최고 오존농도값이 점차 증가하였다. 해당기간에 나타난 25°C 이상에서 일최고 기온의 증가는 국지배출량이 증가하는 시간대인 07:00-09:00 LST의 약한 풍속(1.5 m/s 이하)과 함께 국지적 광화학 오존생성을 발달시킨다. 또한 사례일 이틀동안 지속된 3 m/s 이하의 약한 풍속조건은 수송 및 확산을 약화시켜 생성된 오존 및 전구물질들의 국지적 축적을 돕는다. 특히, 4일의 경우 서창(SC)지점은 지속된 약한 풍속 조건하에서 인근 상남(SN)지점보다 약 30 ppb 높은 일최고농도값을 가졌다. 또한 해당일의 일최고농도값 발생시간은 6월 사례보다 빠른 14:00 LST로 대체로 일사량이 최대인 시간대이며, 일최대풍속 발생(15:00 LST) 이후 농도가 크게 감소하여 광화학 오존 생성에 의한 농도변화 모습을 확인할 수 있다. 또한 고농도 오존일 동안(3-4일) 상남(SN)지점으로부터의 풍향(북동풍)이 발달하지 않아 울산 연안 오염원으로부터의 오존 및 전구물질의 수송영향은 크지 않게 된다.



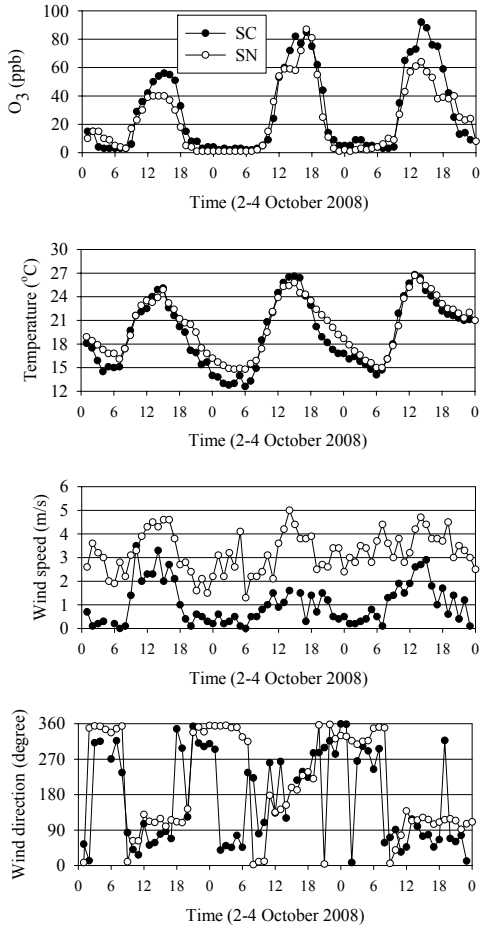


Fig. 8. Diurnal variations of  $O_3$  concentrations (ppb), temperature ( $^{\circ}C$ ), wind speed (m/s), and wind direction (degree) at sites Seo Chang (SC) and Sang Nam (SN) on October 2-4, 2008.

#### 4. 결론

본 연구를 통해 남동연안의 내륙 계곡분지 내 위치한 도시(양산시)에서의 지표오존농도의 계절변화 특성을 계곡의 지리/지형적 특성에 따른 농도변화와 바람과의 관계분석을 바탕으로 분석하였다. 양산시 내 반 개방형 계곡에 위치한 중앙지점과 폐쇄형 계곡에 위치한 서창지점은 여름부터 가을까지(특히, 6월과 10월) 해풍발달시 풍상측 두 연안 대도시(부산과 울산) 내 비계곡 지형에 위치한 각각의 인근 비교지점(각각 대저와 상남)보다 대체로 높은 일최고 오존농도

와 고농도 오존 발생빈도를 가져 연안 내륙 계곡지형 내 오존농도의 증가를 확인하였다.

6월 고농도 오존일(10:00-17:00 LST)의 경우, 중앙지점은 탁월한 남풍(88%)과 5 m/s 이상에서 시간별 고농도(80 ppb 이상)가 빈번히 발생되어 풍상측 기류 유입이 오존농도 증가와 밀접한 관련을 보였다. 연안으로부터 해풍이 발달된 고농도 사례에서 중앙지점은 풍상측 비계곡 비교지점보다 늦은 시간에 동일한 남풍조건하의 보다 강한 일최대 풍속(15:00 LST, 약 6 m/s)과 이후 16:00 LST에 보다 높은 일최고 농도값(+10 ppb)을 가졌다. 즉, 계곡 내 해풍유입으로 인해 남쪽 연안 대도시(부산 포함) 오염원들로부터의 오존 및 전구물질의 수송이 늦은 오후 농도상승에 기여한 것으로 분석된다. 반면, 서창지점은 강한 풍속의 남서풍과 북동풍이 빈번하여(각각 59%와 14%) 부산과 울산으로부터의 오염공기과 수송영향이 예상되었다.

10월의 중앙지점 고농도 오존일 역시 지형조건에 의해 강한 남풍조건에서 고농도가 발생되었으나 약한 풍속조건이 크게 증가하여(58%) 계곡 내 오존오염시 국지적 배출오염물질의 영향이 증가할 것으로 보였다. 인근 서창지점은 약한 풍속이 보다 지배적이며(79%), 대표 고농도 사례에서는 수일간 증가된 일최고기온, 지속된 3 m/s 이하의 풍속(특히, 07:00-09:00 LST 1.5 m/s) 등 정체된 대기조건에서 인근 지점들보다 높은 수준의 일최고 오존농도 증가(+30 ppb)를 보여 폐쇄적 지형 내 오존의 국지적 광화학 생성 및 축적에 의한 농도변화를 확인하였다.

결론적으로 남동 연안 대도시 해풍 풍하측 계곡지역은 계절별 차이는 있으나 국지적 광화학 오존 생성 및 축적영향과 함께 해풍유입에 의한 두 연안 대도시 내 오염공기과의 이동영향이 예상되는 오존농도와 바람분포를 가졌다. 또한 계곡 지형의 특성에 따라 주풍향 및 풍속조건이 차이를 가지며, 이는 계곡 내 지표오존농도의 변화차이를 유발하는 주요 원인 중 하나로 설명된다. 그러나 일반적으로 외부 수송영향은 계곡 내 고도에 따라 차이를 가지게 되므로, 보다 상세한 진단 및 평가를 위해 기상 및 대기질의 연직관측과 함께 복잡지형 및 지표상태와 상세 배출량이 고려된 3차원 광화학 수송모델을 통한 다양한 사례별 정량분석이 요구된다. 이러한 연구결과들은 지역적 규모 고농도

오염발생시의 대책 방안 및 향후 도시 간 대기환경 개선에 관한 정책 마련의 기초자료에 활용될 수 있다.

### 감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다.

### 참 고 문 헌

- 국립환경과학원, 2011, 대기오염물질 배출량, <http://airemissioner.go.kr/main.jsp>.
- 김영성, 1996, 1991~1993년 사이 우리나라의 오존 농도 변화, *한국대기환경학회지*, 12(1), 55-66.
- 김영성, 2000, 우리나라의 오존농도 변화 추이와 주요 인자, *한국대기환경학회지*, 16(6), 607-623.
- 김유근, 문윤섭, 오인보, 황미경, 2002, 서울 및 부산지역에서 기온과 국지풍이 지표 고농도 오존 발생에 미치는 영향, *한국기상학회지*, 38(4), 319-331.
- 김철희, 송창근, 박순웅, 1999, 종관 바람장에 따른 경인지역에서의 지상 오존(O<sub>3</sub>) 농도 분포 모의, *한국기상학회지*, 35(3), 441-456.
- 서명석, 박경윤, 이호근, 장광미, 강창희, 허철구, 김영준, 1995, 청정지역과 도시지역의 오존농도 특성 연구, *한국대기환경학회지*, 11(3), 253-262.
- 오인보, 김유근, 2002, 한반도 주요 대도시지역의 지표오존 특성: 추세, 일변화, 월변화, 수평분포, *한국대기환경학회지*, 18(4), 253-264.
- 정용승, 정재섭, 1991, 서울 수도권 지역의 광화학오존에 관한 연구, *한국대기환경학회지*, 7(3), 169-179.
- 정우식, 이화운, 2000, 연안복합지역에서 해풍시작에 대한 지형의 영향, *한국기상학회지*, 36(2), 245-256.
- 하훈, 이상득, 이중기, 박찬오, 문태룡, 2006, 광양만권의 오존농도 특성과 시·공간적 분포, *한국대기환경학회지*, 22(5), 642-652.
- 한국도로공사, 2011, 구간별 평일/주말 교통량, <http://www.ex.co.kr/portal/index.jsp>.
- 환경부, 2009, 대기환경연보(2008), 291-295.
- Arteta, J., Cautenet, S., 2007, Study of ozone distribution over the south-eastern France (ESCOMPTE campaign): discrimination between ozone tendencies due to chemistry and to transport, *J. Atmos. Chem.*, 58(2), 111-130.
- Boucouvala, D., Bornstein, R., 2003, Analysis of transport patterns during an SCOS97-MARSTO episode, *Atmos. Environ.*, 37(2), S73-S94.
- Carroll, J. J., Dixon, A. J., 2002, Regional scale transport over complex terrain, a case study: tracing the Sacramento plume in the Sierra Nevada of California, *Atmos. Environ.*, 36(23), 3745-3758.
- Corsmeier, U., Kossmann, M., Kalthoff, N., Sturman, A., 2006, Temporal evolution of winter smog within a nocturnal boundary layer at Christchurch, New Zealand, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 91(1-4), 129-148.
- Derwent, R. G., 2000, Ozone formation downwind of an industrial source of hydrocarbons under European conditions, *Atmos. Environ.*, 34(22), 3689-3700.
- Hwang, M. K., Kim, Y. K., Oh, I. B., Lee, H. W., Kim, C. H., 2007, Identification and interpretation of representative ozone distributions in association with the sea breeze from different synoptic winds over the coastal urban area in Korea, *J. Air. Waste. Manage.*, 57(12), 1480-1488.
- Kalthoff, N., Kottmeier, C., Thrauf, J., Corsmeier, U., Sařd, F., Fręjafon, E., Perros, P. E., 2005, Mesoscale circulation systems and ozone concentrations during SCOMPTE: a case study from IOP 2b, *Atmos. Res.*, 74, 355-380.
- Lee, S. H., Sung, K. H., Lee, H. W., 2008, Impact of regional trans-boundary ozone associated with complex terrain on urban air quality, *Atmos. Environ.*, 42(32), 7384-7396.
- Lee, S. M., Princevac, M., Mitsutomi, S., Cassmassi, J., 2009, MM5 simulations for air quality modeling: an application to a coastal area with complex terrain, *Atmos. Environ.*, 43(2), 447-457.
- Lin, C. Y., Wang, Z., Chou, C. C. K., Chang, C. C., Liu, S. C., 2007, A numerical study of an autumn high ozone episode over southwestern Taiwan, *Atmos. Environ.*, 41(17), 3684-3701.
- Lin, X., Roussel, P. B., Laszlo, S., Taylor, R., Melo, O. T., 1996, Impact of Toronto urban emission on ozone levels downwind, *Atmos. Environ.*, 30(12), 2177-2193.
- Liu, H., Chan, J. C. L., 2002, An investigation of air-pollutant patterns under sea-land breezes during a severe air-pollution episode in Hong Kong, *Atmos. Environ.*, 36(4), 591-601.
- Lu, R., Turco, R. P., 1995, Air pollutant transport in a

- coastal environment-II. Three-dimensional simulations over Los Angeles Basin, *Atmos. Environ.*, 29(13), 1499-1518.
- McKendry, I. G., Lundgren, J., 2000, Tropospheric layering of ozone in regions of urbanized complex and/or coastal terrain: a review, *Prog. Phys. Geog.*, 24(3), 329-354.
- Melas, D., Ziomas, I. C., Zerefos, C. S., 1995, Boundary layer dynamics in an urban coastal environment under sea breeze conditions, *Atmos. Environ.*, 29(24), 3605-3617.
- National Research Council (NRC), 1991, Rethinking the ozone problem in urban and regional air pollution, National Academy Press, Washington, D.C., 98-107.
- Orgill, M. M., 1989, Early morning ventilation of a gaseous tracer from a mountain valley, *J. Appl. Meteorol.*, 28(7), 636-651.
- Salmond, J. A., McKendry, I. G., 2005, A review of turbulence in the very stable nocturnal boundary layer and its implications for air quality, *Prog. Phys. Geog.*, 29(2), 171-188.
- Savov, P. B., Skakalova, T. S., Kolev, I. N., Ludwig, F. L., 2002, Lidar investigation of the temporal and spatial distribution of atmospheric aerosols in mountain valleys, *J. Appl. Meteorol.*, 41(5), 528-541.
- Simpson, J. E., Mansfield, D. A., Milford, J. R., 1977, Inland penetration of sea-breeze fronts, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 103(435), 47-76.
- Simpson, J. E., 1994, Sea breeze and local winds, Cambridge University Press, New York, 85-94.
- Wang, T., Wu, Y. Y., Cheung, T. F., Lam, K. S., 2001, A study of surface ozone and the relation to complex wind flow in Hong Kong, *Atmos. Environ.*, 35(18), 3203-3215.