

## 연안도시지역 해풍지연이 오존분포에 미치는 영향 Effects of Late Sea-breeze on Ozone Distributions in the Coastal Urban Area

오 인 보\* · 김 유 근 · 황 미 경

부산대학교 대기과학과

(2004년 1월 26일 접수, 2004년 5월 10일 채택)

In-Bo Oh\*, Yoo-Keun Kim and Mi-Kyoung Hwang  
*Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University*

(Received 26 January 2004, accepted 10 May 2004)

### Abstract

The late sea-breeze and its impacts on ozone distributions were investigated during April to September from 1998 to 2002, in the Busan metropolitan area (including surrounding areas) using the surface ozone concentrations (obtained at 9 monitoring sites), local meteorological variables (obtained near the shore), together with synoptic data. The urban scale ozone concentration was also simulated using the MM5/UAM-V to better understand the role of late sea-breeze in Busan. The results from observation study showed that most of the late sea-breeze occurred when weak offshore synoptic flow (northwesterly) suppressed development of sea-breeze, and the ozone concentration level and frequencies exceeding ozone standard increased with the onset time of sea breeze. We also found that the late sea-breeze clearly induces relatively weak wind speed and high temperature during the daytime. As a result it enhances the photochemical ozone accumulation and delays the occurrence time of the averaged maximum ozone concentrations. The results of simulation for high ozone episode (24 August, 2001) by MM5/UAM-V revealed that the late sea-breeze interacted with weak offshore synoptic wind can contribute significantly to high ozone concentration in the coastal urban area. The simulated horizontal and vertical distribution of ozone concentration indicated that ozone can be accumulated over the sea under stagnant condition and return to the land in the late afternoon with the sea breeze, suggesting both the relationship between late sea-breeze and recirculation and the importance of late sea-breeze effects influencing severe ozone pollution in Busan.

**Key words :** Late sea-breeze, Ozone distributions, MM5/UAM-V

### 1. 서 론

대기하층의 오존은 인위적, 자연적 배출원으로부터

대기 중으로 방출된 전구물질들간의 복잡한 광화학 반응을 통해 생성되며, 광화학적 축적과 소멸, 수송 및 침적과정 등을 통해 그 농도가 시·공간적으로 변화한다. 이러한 농도변화에는 지역 배출원 환경의 영향이 우선되나 오존의 수송과 고농도발생에 깊이 관여하는 기상의 역할은 결정적이다.

\* Corresponding author  
Tel : +82-(0)51-583-2652, E-mail : oinbo@pusan.ac.kr

오존분포에 영향을 주는 기상조건은 다양하지만 지역에 따라 그 기여정도가 다르며 고농도발생과 직관되어 작용하는 특징적인 조건이 존재한다. 예로, 서울과 같이 풍속이 약한 지역에서는 일 최고 기온이 오존농도 변화에 높은 상관관을 보이는 반면(김유근 등, 2002), 배경지역에서는 특정 풍향의 바람이 농도 변화에 크게 관여함을 볼 수 있다(Kim *et al.*, 2003). 무엇보다 우리나라는 해양에 둘러싸여 있는 지리적 특성으로 인해 육지와 바다와의 부등가열로 발생하는 해륙풍이 연안지역에서 탁월하게 나타나게 되는데, 이는 주요 도시지역 연구에서 밝혀졌듯이 오존의 분포변화와 고농도발생에 밀접한 관계를 가진다(오인보, 2003; Ghim and Chang, 2000).

해륙풍 순환과정이 오존 거동에 미치는 영향에 관한 연구는 국외 여러 연안도시지역을 대상으로 관측자료 분석과 수치모델링을 통해 수행되어 왔다. 주요 현상으로는 오전 해륙풍 반전에 따른 전구물질 축적과 오후의 고농도발생을 들 수 있으며, 해풍발달과 함께 나타나는 오존수송이 대표적이다. 여러 연구에서 뚜렷한 해륙풍 순환이 오존의 고농도 발생에 기여하며, 배출원 인근 풍하측 오존축적에 관여함을 보여주었고(Cheng, 2002; Liu *et al.*, 2002), 해풍에 의한 오염물질의 재 순환 과정 역시 연안지역 오존분포를 변화시킴을 알 수 있었다(Hurley and Manins, 1995).

또한 연안 도시지역에 나타나는 해풍현상은 그 시기와 강도에 따라 오존분포 변화에 기여하는 정도가 달라질 수 있다. 예로, 오인보와 김유근(2002)의 연구에서는 해풍의 빠른 유입이 도시의 풍속을 강화시켜 오히려 오존의 국지적 축적을 저해하는 역할을 할 수 있음을 도시간의 비교를 통해 간접적으로 보여주었다. 반면 해풍의 시작이 늦어지는 지연현상은 오염물질의 축적 및 수송과 관련하여 오존농도를 상승시킬 수 있음이 연구되었다(Ma and Lyons, 2003). 따라서 해풍의 형성과 발달에 관한 연구는 연안도시 지역 오존오염 연구에 중요한 부분으로 볼 수 있다.

해풍의 형성과 발달은 종관기상조건과 밀접한 관련을 가진다(Prakash *et al.*, 1992; Helmis *et al.*, 1987). 특히 종관류가 해풍과 반대기류(offshore flow)일 때 해풍의 지연이 발생하며, 해풍전선은 강하게 발달함을 사례분석과 수치모의를 통해 연구되었다(Melas *et al.*, 1998; Helmis *et al.*, 1995; Arritt, 1993). 종관풍의 역할은 해풍현상이 탁월한 연안지역 오염물질의 이

류 및 확산에 영향을 미치게 되는데(Yamada *et al.*, 1992; Physick and Abbs, 1991), Camps *et al.* (1997)의 연구에서는 종관류가 해풍을 지연시켜 오염물질의 내륙침투를 억제시키는 반면 대기상층의 해풍반류와 결합하여 해안지역으로 오염물질이 재이류 되는 것을 보여주었다.

상기 여러 연구결과는 연안도시지역 오존분포와 고농도현상에 해풍의 형성과 발달이 중요하게 관련할 수 있음을 뒷받침해주고 있는 것이며, 보다 많은 관측자료와 상세 모델링을 통한 연구의 필요성을 보여주었다. 특히 국내에서는 그 동안 해풍과 관련한 오존 및 오염물질 이동에 관한 연구가 많이 수행되었으나 관측자료의 한계로 인해 현상해석의 불확실성이 상당부분 존재하였고, 아울러 종관풍이 고려된 해풍의 형태가 오존분포 변화에 미치는 영향을 구체적으로 수행한 연구는 매우 미흡하다. 따라서 국내 주요도시가 연안 가까이 위치하고 해륙풍 순환과정이 지역고유의 환경특성을 반영한다고 볼 때 이에 대한 연구의 필요성은 매우 크다.

본 논문은 해륙풍 순환과정과 오존분포와의 관계를 면밀히 파악하기 위한 부분 연구로 해풍지연현상이 연안도시의 오존분포에 미치는 영향을 분석하는데 목적을 두었다. 이를 위해 우리나라 최대 연안도시인 부산지역을 대상으로 해풍의 발생시간과 관련한 기상조건을 상세히 분석하였고, 해풍지연으로 유발되는 오존분포 변화와 고농도 발생 특성을 관측자료 분석과 사례일 광화학 모델링을 통해 연구하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 자료의 구성

본 연구의 수행을 위해 우선 지역 내 관측된 지상 기상인자와 대기오염물질 농도 자료가 사용되었다. 자료 산출 기간은 최근 5년간(1998~2002년)으로 하였고 대부분의 고농도오존 현상이 나타나는 오존 계절(4~9월)로 한정하였다. 주요 기상자료(바람, 기온, 습도)의 경우 신뢰성 있는 분석을 위해 주위 지형의 영향을 적게 받으며 도심으로 유입되는 공기괴의 특성을 잘 대표할 수 있는 5부두 AWS(그림 1)(해발고도 약 20m)의 관측자료를 사용하였으며, 여기서 관측되지 않은 기타 기상인자(일사량, 강수, 운

량)는 부산기상청 노장에 위치한 AWS (해발고도 약 87 m)에서 관측된 값을 사용하였다. 5부두에 위치한 AWS는 1997년 부산대학교 대기과학과에서 설치한 것으로, 풍향·풍속계와 온도습도계는 미국 Campbell Scientific 사가 제작한 모델 (model 05103, HMP45C) 이며 설치 이후 정기적으로 관리되어 왔다. 바람에 대한 관측오차는 풍향과 풍속이 각각  $\pm 0.3 \text{ deg.}$ ,  $\pm 0.3 \text{ ms}^{-1}$  이고 10분 평균된 정시자료를 사용하였다. 온도의 경우  $20^\circ\text{C}$ 에서  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 의, 상대습도는  $\pm 2 \sim 3\%$ 의 관측오차를 가진다. 이상과 같은 지상 기상 자료의 사용과 함께 중관기상조건의 분석을 위해 연구기간 중의 일본 기상청 발행 지상 수치일기도를 참조하였다.

오염물질 농도자료는 부산지역 환경부 산하 9개 지점 (그림 1)에서 측정된 1시간 평균  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$ , CO 농도 값을 사용하였다. 해풍일 지점별 농도 분석에서는 전형적인 해풍의 방향과 국지적 특성을 고려하여 동삼, 범천, 연산동을 각각 풍상측, 도심, 풍하측을 대표하는 지점으로 선정하였다. 물론 세 지점의 선정은 현 측정망 본포의 한계를 고려할 때 최선의 선택이지만, 상호간의 거리와 배출원 환경을 고려한다면 오염물질 농도의 큰 특성 차이를 기대하기는 사실 어렵다. 상기 언급된 분석자료의 신뢰성을 위해 대기오염물질 및 기상자료의 구성에 있어 일 75% (1시간 평균자료 기준) 이상 측정된 날의 자료를 유효자료로 처리하였다.

### 2.2 해풍일 및 시작 시간

해풍 발생 및 지연과 관련한 오존분포 변화를 분석하기 위해 연구기간 동안 해풍일을 선정하고 각 날에 대해 해풍이 뚜렷이 관측되는 시간(이하 “해풍 시작 시간”으로 칭함)을 정의하였다. 해풍일 선정은 5부두 AWS에서 산출된 풍향, 풍속자료를 바탕으로 하였으며, 그 기준은 다음과 같다. 우선 오후(1300~1800 LST)의 정시 풍향이 4시간 이상 남동 내지 남풍 ( $90 \sim 225^\circ$ )이 나타나고, 평균풍속이  $2 \sim 5 \text{ ms}^{-1}$  구간에 포함되는 조건이다. 풍향의 경우 부산지역 해안선의 모습과 지형적 특성을 반영한 것이며, 풍속구간은 전형적인 해풍의 풍속범위와 중관풍의 영향을 최대한 배제시키고자 고려한 것이다. 오후의 풍향, 풍속 특성과 더불어 보다 뚜렷한 해풍일 선정을 위해 약한 중관풍의 영향과 해륙풍 반전에 따른 오전(0600

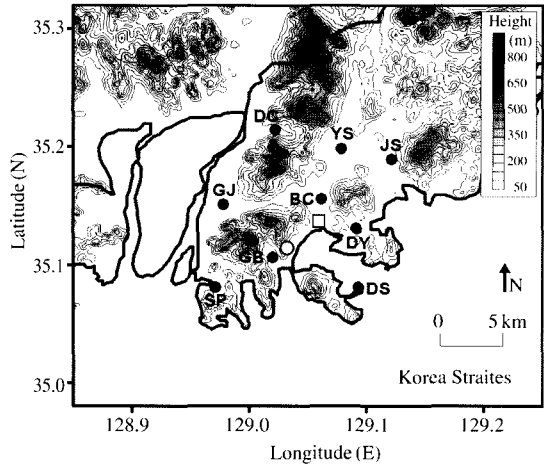


Fig. 1. Map depicting locations of monitoring sites and topographical features in Busan. Solid circles indicate monitoring sites (DS: Dongsam, DY: Daejeon, BC: Beomcheon, YS: Yeonsan, JS: Jaejeon, SP: Synpyeong, GJ: Gamjeon, DC: Dukchen, and GB: Gwangbok). Open circle and rectangle indicate locations of Busan weather station and Pier 5 AWS, respectively.

~0900 LST)의 저풍속 현상(평균풍속이  $2 \text{ ms}^{-1}$  이하)을 반영하였고, 강수일과 운량이 9 이상 흐린 날은 제외하였다.

이상과 같은 부산지역 해풍일 선정의 기준에 있어 기존의 몇몇 선행연구 (임현호, 2000; 전병일 등, 1994a)와 다소 차이를 볼 수 있는데, 이는 사용된 기상 관측소의 지리적 위치와 기준시간의 차이로 볼 수 있다. 무엇보다 본 연구의 해풍일 선정에 있어 도시로 유입되는 기류를 비교적 잘 파악할 수 있는 관측지점을 선정하였고, 수 시간동안의 주풍을 고려하였다는 측면에서 그 의미가 있다. 해풍 시작 시간은 해풍 발생일을 대상으로 해풍으로의 풍향전환과 함께  $2 \text{ ms}^{-1}$  이상의 풍속이 나타나는 시점으로 정의하였고, 해풍유입시 나타나는 지상 기온의 감소와 습도의 증가현상이 함께 고려되어 선정되었다.

### 2.3 MM5/UAM-V 모델의 적용

해풍지연이 나타난 사례일을 대상으로 기상장과 오존농도 분포를 모사하기 위해 중규모 기상모델인 MM5 (NCAR/PennState Fifth Generation Mesoscale Model)와 광화학 모델인 UAM-V (The Variable grid

**Table 1. Ozone statistics and meteorological conditions of sea breeze days (SB) and non-sea breeze days (NSB) in Busan during the ozone season (April~September), 1998~2002. Mean and 1 $\sigma$  deviation values are shown as "mean  $\pm$  S.D."**

Case	Ozone statistic				Meteorological condition	
	Daily max. 1-h con.	No. of days > 1-h/100 ppb	Daily max. 8-h con.	No. of days > 8-h/60 ppb	Daily max. temperature	Daily mean wind speed
SB (192 days)	59.3 $\pm$ 15.32	30	46.6 $\pm$ 12.48	105	24.3	2.1
NSB (709 days)	43.4 $\pm$ 13.58	11	35.3 $\pm$ 11.84	146	23.8	2.8

Urban Airshed Model)를 사용하였다. MM5 모델링을 통해 산출된 매 시간 기상자료(기온, 바람, 습도, 고도별 기압, 연직 확산계수)는 UAM-V의 기상 입력 자료로 사용되는데, MM5 모델링 영역과 수행방법은 김유근 등(2003)의 연구에서 제시된 내용과 동일하다.

UAM-V 모델링은 연구기간 동안 해풍지면에 따라 고농도오존 현상이 나타난 2001년 8월 24일을 중심으로 4일간(22일 0000 LST~25일 2300 LST) 수행되었으며, 첫날 24시간은 오염물질의 이류 및 확산이 충분히 이루어지고 가정된 초기조건의 불확실성을 완화하기 위해 초기적응 시간(spun-up period)으로 처리하였다(SAI, 1996). 수평적인 모델링 영역(그림 9 참조)과 격자정보는 김유근 등(2003)이 사용한 것과 동일하게, 각각 100 km  $\times$  100 km (34.75~35.65°N, 128.51~128.61°E)의 영역과 총 50  $\times$  50개(2 km 간격) 격자로 하였고, 연직적으로는 MM5 출력 결과 중 약 20 m에서 3 km까지 8층( $\sigma = 0.998, 0.970, 0.945, 0.900, 0.850, 0.805, 0.740, 0.675$ )을 선정하여 구성하였다(그림 10 참조). 여기서 모델링 수평영역의 규모를 도시규모 이상으로 크게 설정한 것은 경계조건 수치의 불확실성을 최소화하기 위함이다.

배출량은 부산광역시에서 수행한 대기환경개선 실천 계획 수립을 위한 연구에서 산출된 값을 사용하였는데, 배출량 분포와 주요특징은 김유근 등(2003)과 부산광역시(2002)의 연구에 구체적으로 제시되어 있다. 대기오염물질 농도의 초기조건은 대상영역 내 위치한 대기질 측정소의 O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, CO 농도자료를 바탕으로 내·외삽 하여 생성시켰다. 측면과 상부 경계조건의 경우 UAM-V의 모델링 영역보다 큰 영역을 대상으로 수행한 광화학모델의 출력결과를 사용하거나 측정을 통한 실측농도를 입력하는 것이 바람직하나, 연구수행의 한계와 측정자료의 부족으로

SAI(1999)에서 제공하는 수치와 배경지역 등 인근의 지상 오염물질 농도자료, 도시 내에서 수행한 상층 관측 오존농도 자료(부산광역시, 2002) 등을 참조하여 입력하였다. 오존농도의 경우 측면 경계 값은 20~80 ppb의 시간별 변화를 가지며 고도별 일정하게 입력하였고, 상부경계(약 3 km) 값은 80 ppb로 일정하게 처리하였다.

### 3. 해풍일과 오존통계

표 1은 본 연구의 해풍일 기준을 바탕으로 선정된 해풍일 및 비해풍일의 분포와 각각의 경우에 해당되는 오존통계치 및 기상조건을 나타낸 것이다. 5년 간 4~9월(총 901일) 중 해풍일은 192일(21.3%)로 나타났다. 표에 제시되지는 않았지만 5월과 6월에 높은 빈도(45%)를 차지했다. 이미 기준 선정 과정에서 언급했듯이 본 연구에서는 뚜렷한 해풍 발생일 조사를 위해 국지풍임을 판단할 수 있는 여러 조건을 함께 고려했기 때문에 중풍적 힘에 의해 바다에서 불어오는 바람(onshore wind)을 모두 고려한다면 실제 보다 높은 빈도의 해풍일이 나타날 수 있다.

오존통계치의 경우 비해풍일(709일)과 비교해서 상당한 차이를 볼 수 있는데, 전반적으로 해풍일의 값들이 높게 나타났다. 일 최고 1시간과 8시간 평균 농도의 경우 비해풍일의 값 보다 각각 16 ppb, 11 ppb 정도의 차이를 가지며 높게 나타났고, 특히 1시간 기준치(100 ppb) 초과일 수의 경우 총 해풍 발생 일인 192일 중 30일이 분포하여 비해풍일과 상당한 차이를 보여주었다. 8시간 기준치(60 ppb) 역시 절대적인 초과횟수는 비해풍일의 경우가 다소 많으나 총 일수를 감안한다면 해풍일의 경우가 우세하다. 하지만 비해풍일에 나타난 적지 않은 고농도 발생일수는

대기정체와 함께 나타나는 오존생성의 국지효과와 특정 종관풍의 영향 하에 나타나는 지역규모 이상의 장거리 수송효과가 존재함을 간접적으로 보여준다.

표 1의 오존통계치에서 나타난 해풍일의 고농도오존 현상은 전병일 등(1994 b)의 연구에서 조사한 오존농도 증가율의 상승 및 고농도 계급의 빈도증가 현상과 의미를 같이한다. 또한 연구기간 내 지역 배출원 환경의 큰 변화가 없다고 가정한다면, 비해풍일과 비교되는 오존생성에 적절한 기상조건의 영향으로 설명 가능하다. 실제로 표 1에서 비교되었듯이 오존의 광화학 생성에 크게 관여하는 일 최고기온과 평균 풍속의 경우 각각 0.5°C 높게, 0.7 ms<sup>-1</sup> 약하게 나타남을 알 수 있다. 아울러 이는 고농도오존일의 기상조건을 분석한 Ghim and Chang (2000) 등 여러 연구에서 제시된 오존농도와 해풍과의 깊은 연관성을 재확인시켜주는 결과이기도 하다.

#### 4. 해풍 시작 시간과 기상조건

일반적으로 해풍은 일출과 함께 해안에서부터 발생하지만 지형과 종관류의 영향으로 내륙으로 유입되는 시간이 달라진다. 특히 종관류가 offshore 기류일 때 해풍 시작이 지연되는 현상이 뚜렷하게 나타날 수 있는데, 이때는 해풍전선의 이동속도가 느려지며 내륙으로의 해풍침투가 억제된다(Melas *et al.*, 1998). 본 연구에서는 해풍 발생일로 선정된 192일을 대상으로 해풍 시작 시간을 분석하고 그 변화에 따른 지상 기상조건 및 종관 기상조건을 함께 분석하였다.

표 2는 해풍 시작 시간의 분포와 각 시간대별 해풍일수 및 지상 기상조건을 나타낸 것으로, 주요 특징을 살펴보면 다음과 같다. 우선 해풍 시작 시간이 0800LST에서 1400LST까지 상당히 넓은 범위로 분포하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 일 중 해풍 시작 시간의 다양한 분포는 지표 가열 시점의 차이로 나타날 수 있으나, 표 2에 제시된 최대 일사량 관측시점의 분포(1244~1304LST)가 뚜렷한 차이를 나타내지 않음을 고려해 볼 때 보다 큰 규모의 공기괴 움직임이 중요하게 관여함을 추정할 수 있다. 또한 전체 해풍일의 약 60%가 1000LST(64일)와 1100LST(51일)에 해풍이 시작되는 특성을 볼 수 있는데,

**Table 2. Number of days and meteorological conditions for a given onset time of sea breeze during the ozone season, 1998~2002. Mean and 1σ deviation values are shown as “mean±S.D.”**

Onset time of sea breeze (LST)	No. of days	Meteorological condition			
		Time of max. solar radiation (LST±min)	Daily max. T (°C)	Wind speed 1000~1500 LST (m s <sup>-1</sup> )	Land breeze (%)
0800	8	1300±32	27.7±3.01	4.2±0.64	13
0900	29	1252±38	24.4±4.16	3.3±0.93	45
1000	64	1304±34	24.2±4.45	3.3±0.75	47
1100	51	1250±41	23.2±5.21	2.9±0.61	55
1200	19	1248±37	23.5±3.95	3.0±0.84	42
1300	10	1248±47	25.8±3.14	2.8±0.55	60
1400	11	1244±56	28.7±2.76	2.8±0.72	64

이는 대상 관측지점의 지형적 특성이 반영된 결과로 해석되며 해안으로부터 유사한 거리의 위치한 다른 지점과 차이가 나타날 수 있다(이화운 등, 2000).

지상 기상조건의 경우, 각 시간대별 일 최고기온, 낮 동안(1000~1500LST)의 풍속, 육풍의 존재를 조사한 결과 해풍 시작 시간이 지연됨에 따라 주목할 만한 변화를 나타내었다. 우선 오존의 광화학 생성에 큰 기여를 하는 일 최고기온의 경우, 1100LST 이후부터 해풍 시작 시간이 늦어질수록 점차 높아짐을 확인할 수 있다. 이는 해풍지역이 상대적으로 차가운 해양 공기괴의 유입을 억제시킴으로서 나타나는 현상으로 설명 가능하다. 하지만 전체적인 시간대별 기온변화를 고려해 볼 때 이러한 경향을 해풍지역 현상만으로 해석하기 힘든 부분이며, 해풍 시작시간에 관계없이 일사가 강한 맑은 날 기온이 높게 나타날 수 있는 가능성은 충분하다.

낮 동안 평균된 풍속의 경우, 일 최고기온과는 달리 해풍지역에 따른 보다 뚜렷한 변화 경향을 볼 수 있다. 여기서 6시간동안 평균된 풍속은 일 최고 오존농도에 영향을 주는 공기괴의 움직임을 고려한 것으로, 오존 및 전구물질의 이동정도가 파악 가능하다. 표 2에 나타나 있듯이 전체적으로 해풍지역에 따른 풍속감소가 뚜렷하고, 크게는 30%의 이상의 감소 폭을 확인할 수 있다. 결과적으로 오전과 이른 오후의 풍속감소는 해풍지역 현상이 주는 뚜렷한 기상효과로 해석되며, 도시규모의 광화학적 오존축적에 기여할 수 있다.

또 하나의 뚜렷한 특징으로 해풍 시작 시간이 지연되는 날 새벽에 빈도 높은 육풍의 존재가 확인되었다. 특히 1300 LST 이후로는 60% 이상이 육풍이 나타남을 볼 수 있다. 본 연구에서는 뚜렷한 육풍의 존재를 조사하기 위해 그 기준을 0000~0600 LST 동안 북풍계열(NW, N, NE)의 바람이 4시간 이상 나타난 경우로 선정하였는데, 육풍의 약한 풍속(Atkinson, 1981)을 고려할 때 종관적으로 onshore 기류가 영향을 준다면 육풍의 존재는 관측되기 어렵다. 따라서 종관적으로 약한 offshore 기류가 영향을 줄 때 육풍의 모습이 뚜렷할 수 있으며, 이는 표 2의 결과가 해풍지연 현상이 약한 offshore 기류의 영향하에 있음을 간접적으로 시사한다. 아울러 뚜렷한 육풍의 존재는 새벽에 도심 오염물질이 인근 연안으로 이동되고, 일출 후 충분한 시간 동안 해양 위에서 축적된 오존이 늦은 오후에 해풍에 의해 다시 도시로 유입되는 오존의 재순환과정을 예상케 하는 부분이다.

해풍 시작 시간에 따른 풍계 특성을 보다 명확히 파악하기 위해, 해풍 시작이 0900 LST 이전에 나타난 날(early sea-breeze day, ESB, 37일)과 1200 LST 이후에 나타난 날(late sea-breeze day, LSB, 40일)로 나누어 종관 기압패턴 및 기류형태와 지상의 풍속 일 변화를 분석하였다. 종관조건 분석에 있어 0000 LST의 지상 수치일기도를 참조하였으며, NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)에서 제공하는 GDAS(Global Data Assimilation System) Final(FNL) Run 자료로부터 계산된 지상 기압장과 바람벡터를 사용하였다.

그림 2는 ESB와 LSB의 일 중 시간별 평균된 풍속변화를 나타낸 것이다. LSB의 경우 오전의 풍속 감소가 확인한데, 0900~1200 LST 동안에는 ESB와 비교해 평균  $0.7 \text{ ms}^{-1}$ 의 풍속차이를 나타내었다. 또한 LSB가 ESB와 비교해 일 최고풍속이 나타나는 시간이 1시간 지연되는 현상을 볼 수 있어 해풍의 영향이 늦음을 확인할 수 있다. 즉, 해풍의 지연은 오전에 국지배출로 오염된 공기괴의 이동을 억제시키는 역할을 하게 되고, 이는 일사가 풍부하고 기온이 높은 오후 시간까지 유지되어 오존의 광화학 생성과 고농도발생에 기여하게 된다.

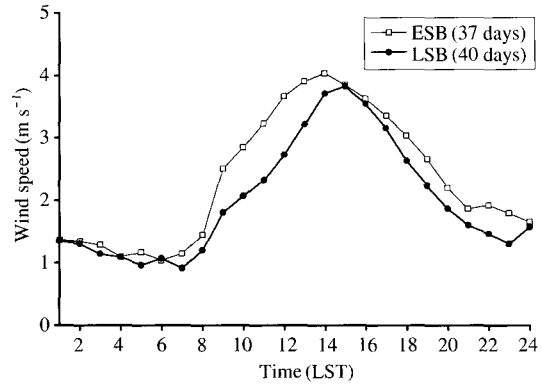


Fig. 2. Diurnal variations of wind speed at Pier 5 for ESB and LSB during the ozone season, 1998~2002.

종관 기압패턴과 기류형태를 조사한 결과 ESB와 LSB 각각의 경우에서 특징 있는 종관조건을 파악할 수 있었다. 여기서는 제시되지 않았지만 ESB의 경우 대부분이 부산을 중심으로 뚜렷한 기압배치가 없거나 부산이 고기압후면에 위치하여, 특징 없는 기류패턴과 약한 서 내지 남서계열의 종관류가 탁월하였다(여름철의 경우 북태평양 고기압의 가장자리에 부산지역이 위치하여 남풍계열의 종관류가 빈도 높게 나타남). 반면 LSB의 경우는 부산이 우리나라 서쪽에 중심을 둔 고기압의 영향을 받거나 약한 기압골 후면에 위치하여 약한 북서 종관류가 존재하는 날이 빈도 높게 나타나는(전체의 67.5%, 27일) 특징을 보였다.

그림 3은 LSB의 대표적인 종관조건을 보여주는 것으로 2001년 7월 8일과 8월 24일 0000 UTC의 해면기압 및 바람장을 나타낸 것이다. 그림에서 부산지역은 고기압 전면과 기압골 후면에 각각 위치하여 북 내지 북서 종관풍의 영향이 뚜렷함을 볼 수 있다. 결과적으로 이러한 종관조건은 낮동안 해풍발달을 지연시키는 역할을 하게 되고, 지상 풍속을 감소시켜 도시규모의 오존 축적과 고농도발생을 가능케 한다.

### 5. 해풍지연에 따른 오존분포 특성

표 3은 해풍 시작 시간에 따른 오존 통계치의 변화를 나타낸 것으로, 해풍이 지연될수록 모든 수치가

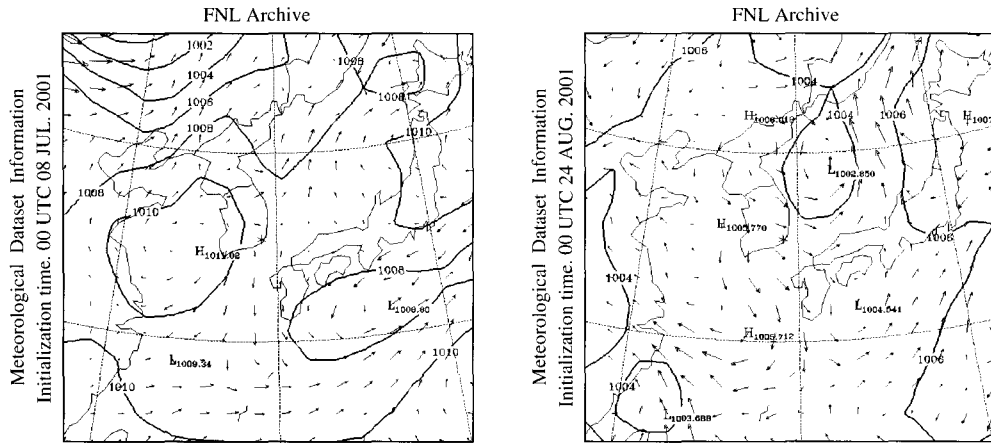


Fig. 3. Typical synoptic conditions associated with LSB in Busan. Sea surface pressure (thick lines) and wind field at 0000 UTC, 8 July (left) and 24 August (right) in 2001 are plotted from FNL ARLPLOT in NOAA's web site.

Table 3. Ozone statistics for a given onset time of sea breeze during the ozone season, 1998~2002. Mean and 1σ deviation values are shown as “mean ± S.D.”

Onset time of sea breeze (LST)	Ozone statistics			
	Daily max. 1-h con. (ppb)	No. of days > 1-h/ 100 ppb (%)	Daily max. 8-h con. (ppb)	No. of days > 8-h/ 60 ppb (%)
0800	45.1 ± 15.70	0 (0.0)	34.8 ± 12.19	2 (25.0)
0900	52.6 ± 10.66	1 (3.4)	41.6 ± 8.97	11 (37.9)
1000	58.7 ± 13.88	5 (7.8)	46.8 ± 11.55	32 (50.0)
1100	56.9 ± 13.04	7 (13.7)	44.2 ± 10.19	26 (51.0)
1200	62.1 ± 15.00	4 (21.1)	48.3 ± 9.96	13 (68.4)
1300	78.5 ± 11.03	6 (60.0)	62.2 ± 7.78	10 (100)
1400	75.7 ± 13.18	6 (54.5)	58.1 ± 12.99	11 (100)

전반적으로 증가 경향을 나타내었다. 일 최고 1시간 및 8시간 평균농도의 경우 최대 60% 정도 (각각 30.6 ppb, 23.3 ppb)의 증가를 확인할 수 있고, 각각의 기준치 초과 발생 확률(표 3의 괄호안 숫자) 역시 상승 정도가 뚜렷하다. 특히 해풍이 1300 LST 이후에 시작된 21일의 경우, 1시간 및 8시간 기준치 초과일수가 12일과 21일로 나타나 각각 57.1%와 100%의 높은 발생 확률을 보였다. 이상과 같은 결과는 4장에서 언급한 LSB의 기상조건을 잘 반영하는 것으로, 해풍지연과 함께 나타나는 기상효과가 오존의 광화학적 축적 및 고농도발생에 크게 기여함을 보여 주는 것이

다. 하지만 해풍지연 현상과 관련한 기상조건 변화가 오존 통계치의 변화를 모두 설명할 수 없음을 표 2와 3에 제시된 수치들의 상호비교에서 알 수 있는데, 이는 지역 내 배출 환경의 시간적 변화와 공간적인 오존거동의 충분한 이해가 바탕이 되어야 할 문제이다.

해풍지연에 따른 영향은 오존농도의 일 변화에서도 확인할 수 있다. 그림 4는 도시 내 세 측정지점(해풍 방향을 기준으로 풍상측, 도심, 풍하측)의 오존 및 NO<sub>2</sub>, CO농도의 일 변화를 상기 제시된 ESB와 LSB 경우로 나누어 나타낸 것으로 해풍 시작 시간에 따라 농도변화의 차이가 뚜렷하다. 새벽(0100~0600 LST)의 경우 지점별 다소의 차이는 있지만 NO에 의한 오존 소멸과정(NO<sub>x</sub> titration)으로 ESB와 LSB 경우 모두 오존농도가 낮게 나타났다. 또한 차이는 미세하나 동삼과 연산지점에서 LSB 경우가 보다 낮은 오존농도 수준을 보였는데, 이는 상대적으로 약한 풍속조건이 나타나는 LSB의 지상 기상조건(그림 2 참조)으로 일부 해석될 수 있는 부분이다. 특히 비교적 청정지역인 동삼지점의 경우는, LSB에 나타나는 뚜렷한 육풍의 형성(표 2 참조)이 인근 도심의 NO<sub>x</sub>를 이 지역으로 수송시켜 오존의 화학적 소멸에 기여함을 시사한다. 동삼지점 LSB의 경우 야간에 나타난 NO<sub>2</sub>와 CO의 상대적인 고농도는 이를 간접적으로 뒷받침한다.

반면 1400 LST 이후에는 세 지점 모두 LSB의 경

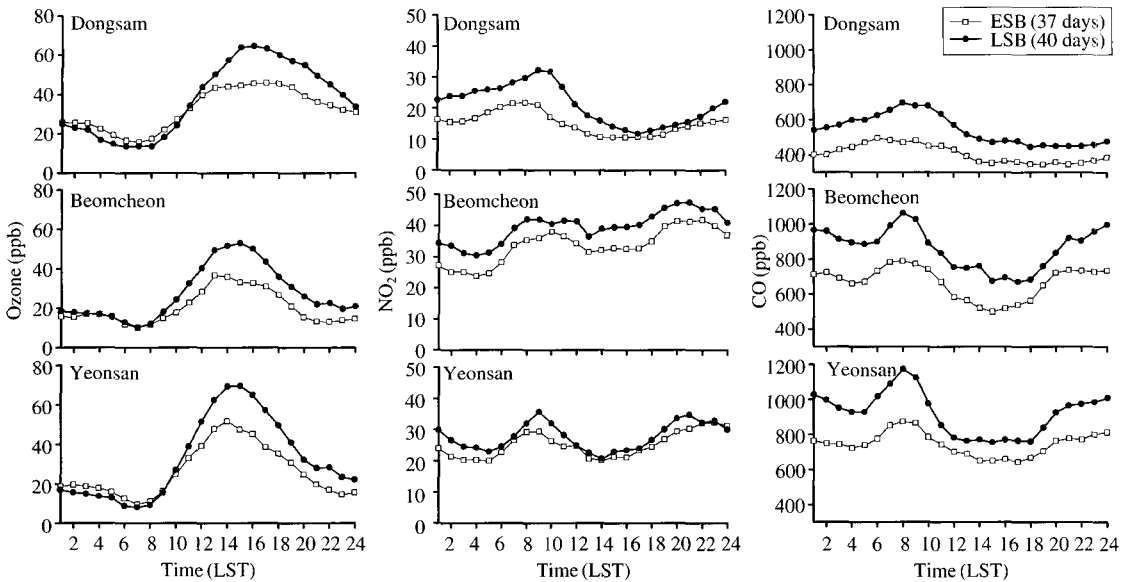


Fig. 4. Diurnal variations of O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, CO concentrations at upwind (Dongsam), urban (Beomcheon) and downwind (Yeonsan) for ESB and LSB during the ozone season, 1998~2002.

우가 ESB와 비교해 상당한 차이로 오존농도가 높게 나타났고, 동삼지점과 연산지점에서 보다 뚜렷하다. 차이가 가장 큰 시간대는 세 지점 모두 1500 LST로, 연산지점에서 22.1 ppb의 가장 큰 값을 보였다. 이와 같이 LSB에 나타난 늦은 오후의 고농도오존 현상은 해풍지연과 관련한 뚜렷한 해륙풍 순환과정과 낮 동안의 약한 풍속조건으로 설명된다. 특히, 해안에 바로 인접해 위치한 동삼지점의 고농도 현상은 야간에 인근 해양으로 수송된 도심 오염물질의 영향을 보여주는 것으로, 일출 후 대기정체조건 하에서 인근 육지보다 매우 적은 오존의 건성침적조건이 형성되는 (Wesely, 1989) 바다 상공에 축적된 오존이 늦은 오후 해풍발달과 함께 이 지점에 영향을 준 것으로 해석할 수 있다. 해륙풍 순환과정에 따른 내륙과 인근 바다간의 오존 및 전구물질 수송 현상은 Liu *et al.* (2002)과 김유근 등(2003)의 연구에서 제시한 바 있다.

또한 연산지점 LSB의 경우는 해풍의 늦은 발달로 나타나는 도심 인근지역의 고농도오존 현상을 잘 보여주고 있다 (MacDonald *et al.*, 2001). 도심인 범천지점과 비교해 상당한 수준차이를 나타내는 NO<sub>2</sub> 농도를 고려해 볼 때, 도심으로부터의 오존 및 전구물질

수송과 이 지점에서의 광화학적 오존축적을 예상할 수 있다. 하지만 이른 아침의 높은 CO농도는 이 지점의 오존농도 상승에 기여하는 국지효과를 배제할 수 없음을 보여준다.

세 지점 오존농도의 일 변화 패턴에서 파악되는 또 하나의 특징으로 일 최고 오존농도 발생시간의 지연을 들 수 있다. 지점에 따라 다소 차이는 있으나 LSB의 경우가 ESB와 비교해 1~2시간 지연됨을 볼 수 있다. 이는 해풍의 발달이 늦어져 풍속의 최대치가 늦게 나타나기 때문으로 해석할 수 있는데 (그림 2 참조), 강한 일사량과 높은 기온이 나타나는 오후 시간대에 형성된 약한 풍속조건은 오염물질의 확산과 희석과정을 억제하고 활발한 광화학 반응을 유도하여 생성된 오존을 국지적으로 축적시키기 때문이다 (Liang and Jacobson, 2000). 오인보와 김유근 (2002)의 연구에서는 서울과 부산을 비교 대상으로 해풍의 영향을 빨리 받는 부산지역에서 오존농도의 일 중 정점이 일찍 나타남을 보여주었다.

해풍지연으로 인한 오존분포의 변화는 공간적으로도 주목할 만 하다. 그림 5는 ESB와 LSB 경우의 일 최고 1시간 오존농도의 수평분포를 비교한 것으로, 농도수준과 분포 차이가 명확히 나타났다. ESB의 경



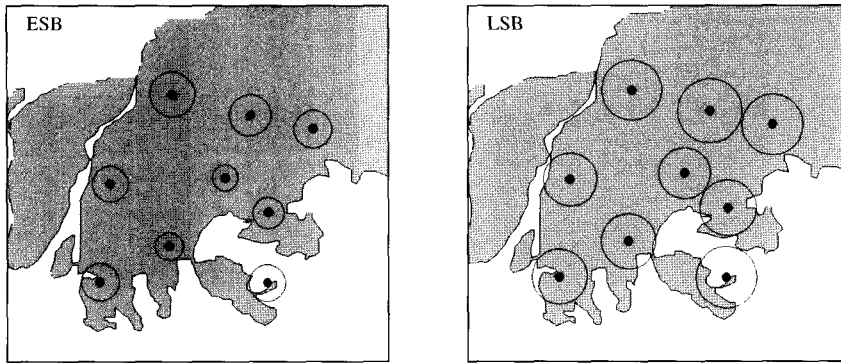


Fig. 5. Horizontal distributions of daily maximum 1-h ozone concentrations for ESB and LSB during the ozone season, 1998~2002. Size of circles denote the relative concentrations for comparison, varying from 43.2 to 76.5 ppb.

우 측정지점의 최고농도는 도심 풍하측인 덕천 (60 ppb), 연산(56 ppb)지점에서 나타났고, 국지배출이 집중되어 있는 범천 (도심)지점 (43.2 ppb)과 약 17 ppb의 큰 농도차를 보였다(지점간 농도 편차율 평균 : 7.9%). 이는 도시의 NOx 적정효과와 해풍으로 인한 오존수송의 결과로 설명될 수 있다.

반면 LSB의 경우 전체적인 분포경향은 ESB의 경우와 유사하나, 상대적으로 적은 농도 편차율(평균 4.6%)과 함께 나타난 도시 전방의 고농도 현상을 볼 수 있다. 특히 연안과 가까운 측정소들에서 나타난 높은 오존농도는 상기 언급한 해륙풍 순환과정으로 설명되어지는 부분이며, 아울러 offshore 기류에 의해 이동속도가 느려진 해풍전선의 수렴대가 연안역에 정체되면서 나타나는 국지적 오존축적현상 역시 하나의 원인으로 추정된다.

## 6. 사례일 MM5/UAM-V 수치모의

### 6.1 사례일 기상조건과 오존농도

해풍지연에 따른 오존분포 특성을 보다 상세히 파악하기 위해 대표적인 사례일을 대상으로 기상조건 분석과 MM5/UAM-V 수치모델링을 수행하였다. 선정된 사례일은 2001년 8월 24일로 동해상에 비교적 약한 저기압이 위치하였고, 부산지역은 약한 북서 중관풍의 영향을 받아(그림 3 참조) 해풍이 늦게 시작되었다. 당일 강수현상은 없었으며, 지상에서 관측된

최고 기온은 31.4°C이고, 풍계의 경우 새벽부터 약한 북서풍이 탁월하게 불다가 1400 LST부터 해풍이 시작되는 모습을 보였다. 주요 기상인자들의 자세한 시간변화는 이후 모델링 검증부분에 제시하였다. 즉 사례일은 중관풍의 영향으로 해풍지연 현상이 뚜렷하였고, 오전과 이른 오후의 약한 풍속 및 높은 기온조건으로 인해 오존의 광화학 생성 및 축적에 용이한 기상조건이 형성되었다.

사례일 오존농도의 경우, 부산지역 유효측정지점인 8개(광복지점 결측) 중 6개 지점에서 1시간 환경기준(100 ppb)을 초과할 정도로(최고치 120 ppb, 연산 등) 심각한 수준을 보였다. 그림 6은 사례일 주요 세 지점(동삼, 범천, 연산)의 오존농도 시계열을 나타낸 것으로 해풍지연 및 국지순환 관련해 특징 있는 일 변화 분포를 확인할 수 있다. 세 지점 모두 오전에 급격한 농도상승이 나타났으며, 1500 LST이후에 정점과 상당수준의 농도를 보였다. 상대적으로 해풍의 풍하측에 위치한 연산지점의 경우, 1700 LST에 2차 정점(120 ppb)이 나타났고 두 정점을 중심으로 늦은 오후까지 고농도현상을 보여 오존 및 전구물질의 수송효과를 알 수 있다. 또한 특징적으로 동삼과 범천 지점에서는 각각 1900 LST와 2100 LST에 2차 정점을 파악할 수 있는데, 이는 해륙풍 전환시점의 풍속 감소(그림 7 참조)와 함께 나타나는 오존축적 현상으로 해석되는 부분이다(Nair *et al.*, 2002). 특히 동삼 지점의 경우 1900 LST이후로 수 시간동안 100 ppb 전후의 고농도가 유지되었는데, 이는 상대적으로 적

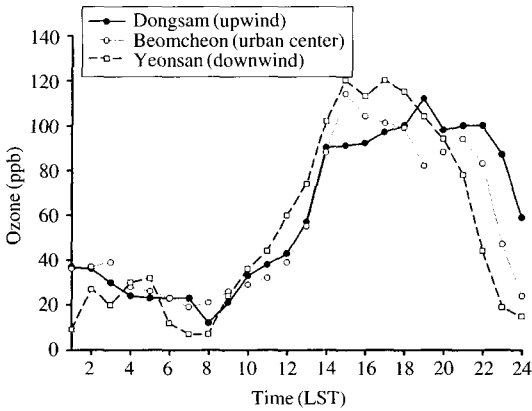


Fig. 6. Diurnal variations of ozone concentrations at 3 sites (Dongsam, Beomcheon and Yeonsan) in Busan on 24 August, 2001.

은 NO 배출과 지속된 약한 해풍의 영향으로 설명 가능하다.

### 6. 2 모델링 결과 평가

우선 UAM-V 모델의 기상입력 부분으로 사용되는 MM5 모델링 결과에 대한 신뢰성을 관측치와의 비교를 통해 평가하였다. 그림 7은 주요 기상인자인 기온, 풍향, 풍속에 대해 모델 계산치 (sigma level = 0.998, 약 20m)와 부산 기상청에서 관측된 수치(기온: 1.2m, 풍향·풍속: 17.8m)를 비교하여 시간별로 제시한 것이다. 전반적으로 관측치의 변화 경향을 모델 결과가 잘 반영하고 있는 모습이며, 사례일의 경우 역시 당일 주요 기상조건이 모델링을 통해 잘 현되었음을 알 수 있다.

기온의 경우 모델계산 결과가 전반적으로 약하게 과소 평가되는 경향 (mean bias error, MBE:  $-1.0^{\circ}\text{C}$ )을 보였으나, 유의한 오차수준 (root mean square error, RMSE:  $1.5^{\circ}\text{C}$ )을 가졌다. 일 최고, 최저값의 경우 상대적으로 큰 차이가 나타났는데, 이는 모의된 수치와 관측치의 산출고도차이로 해석될 수 있는 부분이다. 풍향, 풍속의 경우 전반적으로 큰 차이 없이 관측치와 비교적 잘 일치함을 보였고, 풍속의 경우 MBE, RMSE가 각각  $-0.1\text{ ms}^{-1}$ ,  $1.2\text{ ms}^{-1}$ 로 계산되어 모델링 결과해석에 유의한 수준의 신뢰성을 나타내었다. 하지만 기온과는 달리 변동경향에서 다소의 차이를 볼 수 있는데, 이는 모델의 한계와 더불어 10

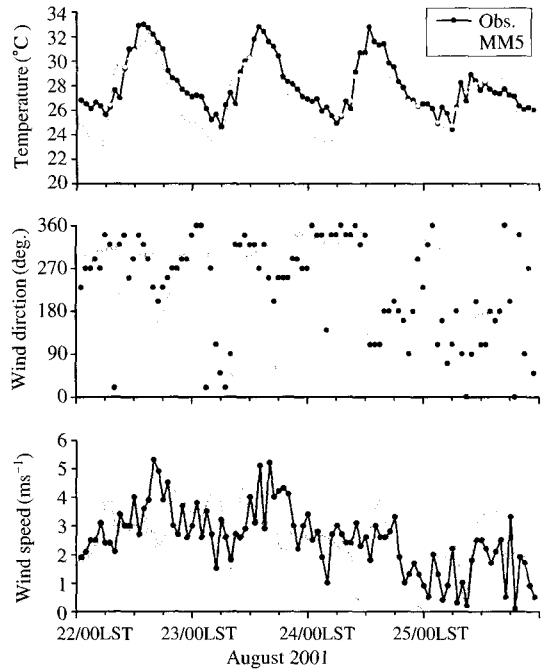


Fig. 7. Comparison of observed and simulated values of meteorological factors for 22~25 August 2001.

분 평균된 정시 관측치와의 비교 문제, 모델에서 고려할 수 없는 지상의 건물효과 등의 의해 유발되는 오차의 영향으로 해석된다.

특히, 사례일인 24일의 경우 관측지에서 나타난 해풍지연과 관련한 풍계 특성을 모델결과가 비교적 잘 반영하고 있다. 관측치보다 해풍으로의 풍계 전환이 다소 일찍 나타나는 차이를 볼 수 있지만, 모델결과에서 나타난 1000~1300 LST 풍속이 거의 정체수준으로 풍향의 의미는 사실상 없다고 볼 수 있으며 해풍 시작이 늦은 오후에 나타남은 관측치와 잘 일치하는 것이다.

표 4는 검정된 MM5 결과를 입력자료로 수행한 UAM-V 모델링 결과를 3일간의 9개 관측지점 (그림 1 참조)에서 측정된 매 시간별 측정자료를 사용하여 그 신뢰성을 평가한 것이다. 평가 기준은 대기질 모델의 정확성 평가를 위해 US EPA (1991)에서 제시하는 평균 상대편차 (mean normalized bias error, MNBE), 평균 상대오차 (mean normalized gross error, MNGE), 최고치의 정확도 (unpaired peak prediction accuracy, UPA)를 계산하였다. 표 안에 제시된  $C_{obs}$

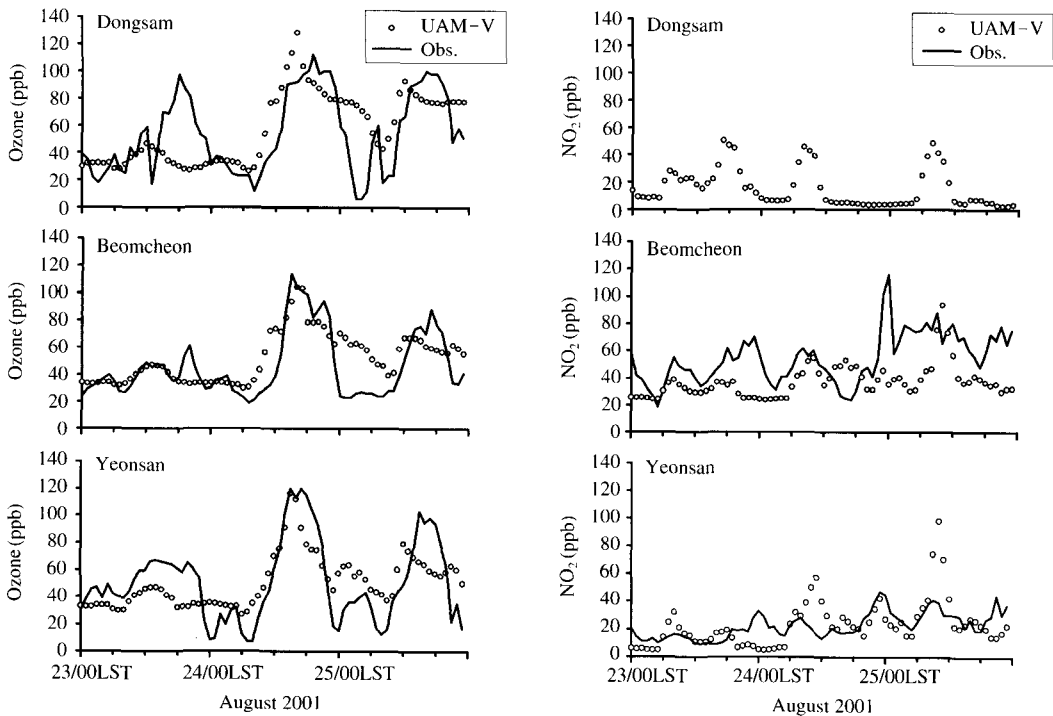
$C_{mod}$ 는 각각  $x$ 지점,  $t$ 시간의 측정치와 계산치를 의미하며  $n$ 은 전체 자료 수를 의미한다. 또한 평균 상대편차와 평균 상대오차는 각각 60 ppb, 40 ppb를 초과한 측정치에 대해 적용하였고, 최고치의 정확도 계산에 있어 모델의 최고치는 측정소 위치에서의 값을 대상으로 하였다. 모델 최고치 산출의 방법은 김진영과 김영성(2001)의 연구에서 사용한 것과 동일하다.

**Table 4. Evaluation statistics for UAM-V ozone prediction (hourly data).**

US EPA recommended evaluation statistics	Definition	Cutoff 60 ppb (%)	Cutoff 40 ppb (%)
Mean normalized bias error	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_{mod}(x, t) - C_{obs}(x, t)}{C_{obs}(x, t)}$	-17	-10
Mean normalized gross error	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ C_{mod}(x, t) - C_{obs}(x, t) }{C_{obs}(x, t)}$	25	27
Unpaired peak prediction accuracy	$\frac{C_{mod}(x, t) - C_{obs}(x, t)_{max}}{C_{obs}(x, t)_{max}}$	9	9

상기 언급한 세 가지 기준 통계치는 미국 EPA에서 권고하는 수치인  $\pm 5 \sim 15\%$  (MNBE),  $\pm 30 \sim 35\%$  (MNGE),  $15 \sim 20\%$  (UPA) 범위 내에 포함되면 모델 결과의 신뢰성을 인정할 수 있는 수준으로 평가된다 (Hogrefe *et al.*, 2001). 표 4에 제시된 수치에서 알 수 있듯이, 본 연구에서 수행한 UAM-V 모델링 결과는 60 ppb 초과 측정치를 대상으로 한 MNBE를 제외하고는 모든 수치가 유효범위에 포함되어 결과의 정확성이 평가되었다. 아울러 40 ppb와 60 ppb 초과 측정치를 대상으로 한 평가에서 상호간의 큰 차이를 볼 수 없어 전반적인 농도구간에서 모델의 모의능력 수준이 비슷함을 보여준다. 이러한 모델의 평가결과는 이후 제시될 오존농도의 시·공간적 분포변화 분석의 신뢰성을 뒷받침해 줄 수 있다.

그림 8에서는 모델링 기간인 3일 동안의 주요 세 측정지점 (동삼, 범천, 연산)을 대상으로 오존과 NO<sub>2</sub> 농도의 측정치와 계산치의 일 변화를 비교하였다 (동삼지역 NO<sub>2</sub> 측정치는 결측). 전반적으로 두 수치가 큰 차이 없이 유사한 경향으로 변화하고 있으며, 특



**Fig. 8. Diurnal variations of the observed and simulated O<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub> concentrations for 23~25 August 2001. NO<sub>2</sub> data from Dongsam site are not available.**

히 사례일의 고농도오존 현상과 늦은 오후까지 높은 농도가 지속되는 모습을 모델결과가 비교적 잘 나타내었다.

하지만 사례일 야간과 25일 새벽에는 실제 오존농도와 상당한 차이를 보였다(특히 동삼, 범천지점). 이는 이 시간대의 풍계 차이(그림 7 참조)로 인해 나타나는 결과로, MM5 모델에서 계산된 뚜렷한 북서풍이 도시 외곽 또는 산 위에 존재하는 상당수준의 오존을 수송시켜 오존상승에 기여한 것으로 추정된다. 물론 배출량 및 지표면상태 입력자료의 불확실성으로 인해 오존제거의 지표침적과 화학적 소멸이 충분히 고려되지 못한 점도 하나의 원인이 될 수 있다.

NO<sub>2</sub>의 경우 역시 오전과 저녁시간에 높은 농도를 보이며 관측값과 유사한 변동경향을 나타내었으나, 25일 새벽에 범천지점에서 다소 큰 농도차이를 확인할 수 있다. 특징적으로 비교적 청정지역인 동삼지점의 높은 NO<sub>2</sub> 농도는 주목할 만한 부분으로 도심배출의 수송을 시사한다.

### 6.3 오존농도의 시·공간적 분포

사례일 해풍 지연에 따른 오존농도의 시·공간적 분포와 고농도현상을 모델링 결과를 바탕으로 분석하였다. 그림 9는 연직 격자 1층(약 20 m)에서의 MM5 수평 바람장과 UAM-V에서 계산된 오존농도의 수평분포를 나타낸 것이다. 모델링 결과는 매 시간별 산출되나 오존농도의 뚜렷한 분포변화 및 해풍의 시작과 발달과정이 적절히 잘 나타난 0800, 1400, 1600, 1800LST를 중심으로 그 특징을 기술하였다.

0800LST의 경우, 영역 전반에 60ppb 이하의 농도가 나타나며, 부산 및 울산(그림 9의 U 지점) 연안과 인근 해안에 나타난 20~40ppb의 낮은 농도 분포가 특징적이다. 이는 국지배출이 집중되는 도심과 해안선을 따라 존재하는 NO 배출에 의한 오존소멸을 보여주는 것이며, 이전부터 탁월하게 나타난 북서풍(그림 7 참조)에 의한 영향을 반영하는 결과이기도 하다.

1400LST의 경우 남동풍의 해풍이 시작되어 내륙으로 유입되는 모습이나, 깊게 침투하지 못하고 있으며 도시 내 기류정체와 수렴현상을 보여 해풍지연의 바람분포를 잘 보여준다. 오존농도의 경우, 우선 부산지역 인근 앞 바다에 나타난 상당수준의 농도분포가 특징적이다. 이는 전일과 당일 새벽에 탁월한 북서풍과 함께 인근 바다로 수송된 오존전구물질의

영향으로 적절한 기상조건 하에 일어난 오존의 광화학 생성 결과로 해석된다. 또한 부산지역 내에서는 해풍전신을 전·후로 큰 농도 차를 보이며 후면에 고농역이 분포함을 볼 수 있다. 이는 약한 풍속조건 하에 국지배출에 의해 생성된 오존의 축적과 함께 해풍을 따라 인근 바다로부터 수송된 상당수준의 오존의 영향으로 분석된다. 아울러 해풍침투와 함께 나타난 혼합고 감소 역시 하나의 기여 원인으로 볼 수 있다(그림 10 참조).

1600LST의 경우, 여전히 해풍의 침투가 억제되고 있으며(1400LST와 비교해 약 4km 이동) 오존의 고농도역이 도시 내로 국한되는 모습이다. 아울러 약한 해풍을 따라 고농도역이 인근 풍하측으로 확대됨을 볼 수 있다. 인근 바다에서는 120ppb 이상의 고농도역이 다소 감소하였으나 1400LST와 큰 차이 없이 높은 농도수준이 유지되었다. 이는 위치적 차이는 있으나 인근 배경청정지역인 거제도 저구리(128.36°E, 34.42°N)에서 측정된 동일시간 오존농도(81ppb)와 잘 일치하는 결과이다. 1800LST의 경우, 해풍발달과 함께 영역 전체에 남동풍이 탁월한 모습이다. 도시내에서는 국지효과로 인해 상당수준 농도 감소가 나타났고 60~100ppb 구간의 농도역이 풍하측 내륙으로 이동되는 모습이 확인하다. 하지만 인근 바다에서는 여전히 높은 수준의 농도가 분포하고 있으며 바람에 의해 서쪽으로 고농도역이 이동함을 볼 수 있다.

이상의 결과에서 해풍의 지연현상으로 인해 인근 바다와 연안지역에 고농도오존 현상이 뚜렷이 나타났고, 늦은 오후까지 높은 수준의 농도가 유지됨을 볼 수 있었다. 아울러 늦게 발달한 해풍과 함께 도시 외곽으로 축적된 오존의 수송도 확인할 수 있었다.

그림 10은 사례일 주요 시간대의 오존, 바람벡터 및 온위의 연직적인 분포를 나타낸 것으로, 해풍지연과 관련한 대기하층 기상조건 변화와 고농도오존역의 공간적인 이동을 볼 수 있다. 연직 단면의 방향은 바람을 고려하여 결정하였고 구체적인 위치는 그림 9(0800LST)에 제시되어 있다. 0800LST의 경우 부산 연안을 중심으로 대기하층에 30ppb 이하의 낮은 오존농도가 나타나며 고도에 따라 농도가 증가하는 분포형태를 보였다. 이는 연직 온도 분포에서 알 수 있듯이 대기하층에 형성된 안정조건 하에 일어난 NO<sub>x</sub> 적정작용의 결과로 해석된다.

1200LST에는 전반적으로 대기하층의 오존농도가

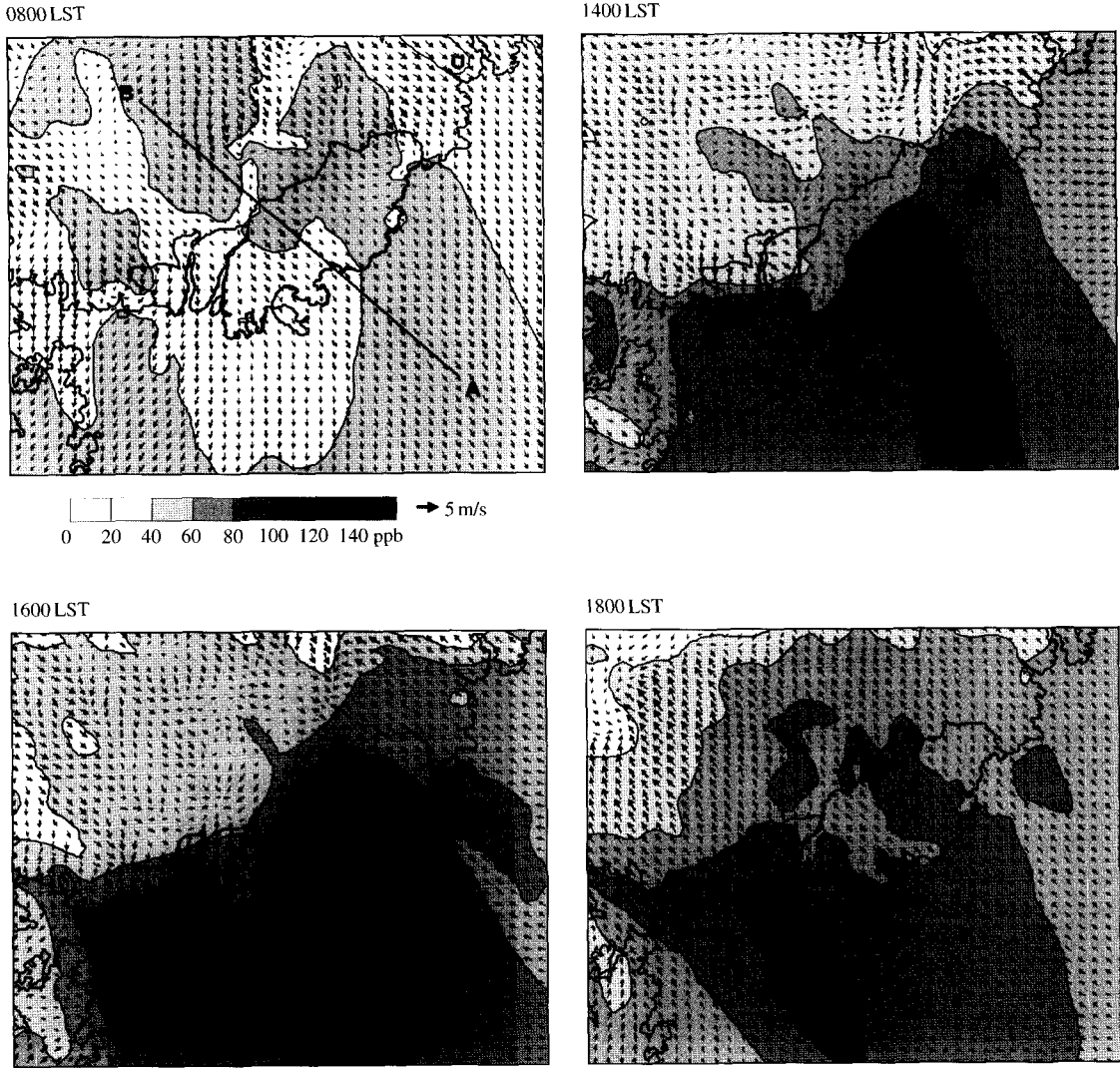


Fig. 9. Horizontal distributions of the simulated winds and ozone concentrations from MM5/JAM-V on 24 August 2001. Thick line indicates location of vertical cross section (A [mesh number: (IX, IY) = (15, 39)] and B [(IX, IY) = (38, 14)]).

상승하였고, 특히 인근 바다와 연안 상공(1 km 이내)에 대기정체조건 하에 상당수준의 오존농도가 나타났다. 연안역 약 4km까지 해풍전선이 침입하여 수렴지역이 형성되었으며, 고도 1km 이상에서는 해풍 반류와 결합된 종관풍의 영향이 뚜렷하다. 또한 해풍과 offshore 기류의 종관풍에 의해 강해진 연직적 대기의 움직임(Helmis *et al.*, 1987)이 오존을 고도별 일정하게 분포시키는 모습이다.

1400 LST에는 인근 바다와 연안에 보다 뚜렷한 농도상승을 볼 수 있다. 특히 연안에서 약 5 km 떨어진 곳의 500~800 m 상공에 140 ppb 이상의 고농도역이 주목할 만하다. 이는 대기정체 하의 광화학적 오존축적과 해풍 반류에 의한 오존수송(Liu *et al.*, 2002), 아울러 바다 위에 존재하는 낮은 혼합고 등의 원인으로 해석된다. 해풍의 침투는 여전히 약하게 일어나 연안으로부터 약 10 km 정도 해풍전선의 이동

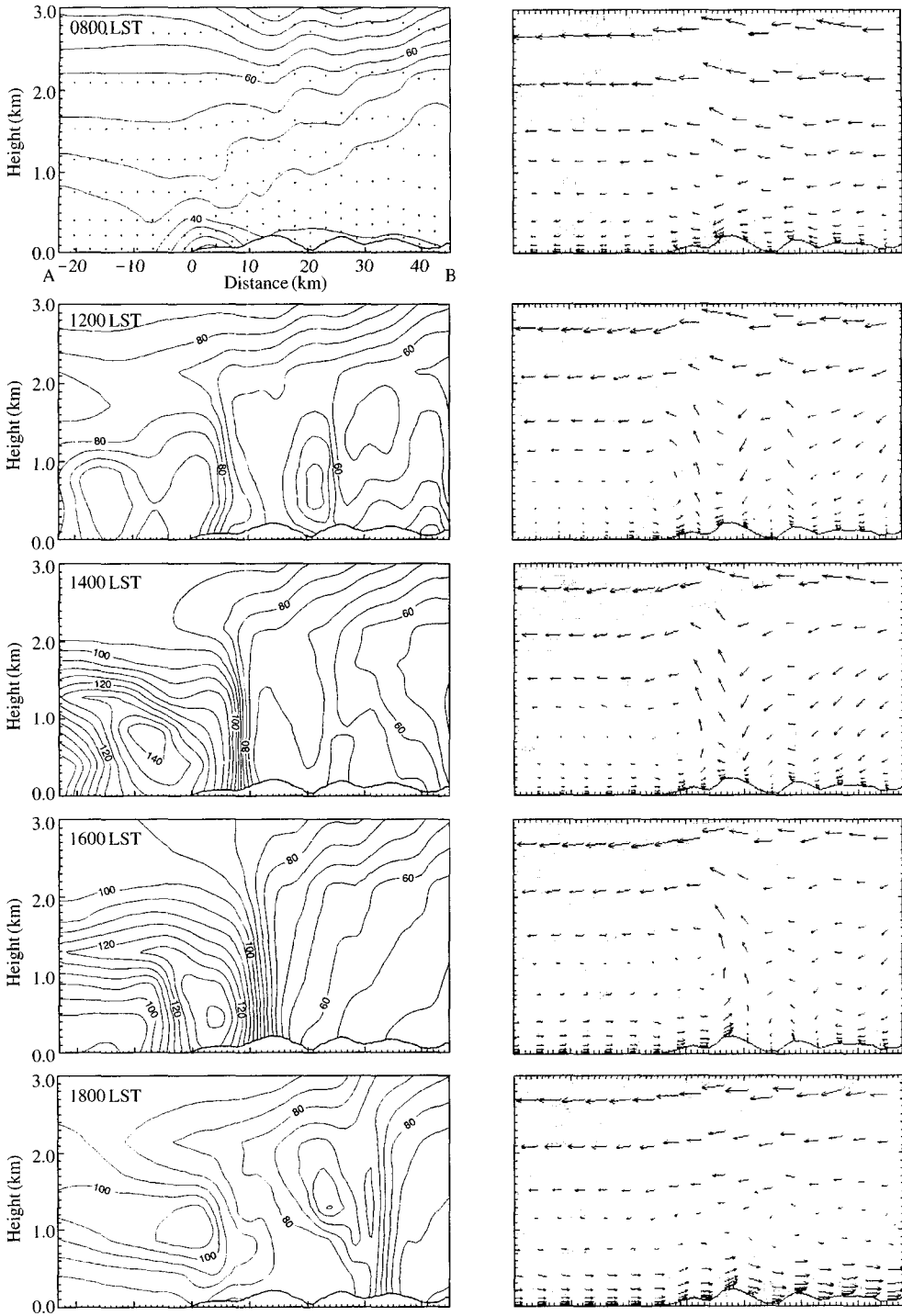


Fig. 10. Vertical distributions of ozone concentrations (left), winds and potential temperature (right) from MM5/UAM-V on 24 August 2001. A and B indicate the end points of cross section shown in Fig. 9. Dots are the locations of calculated ozone values in vertical domain.

을 볼 수 있으며, 전선 전·후로 큰 농도 차가 나타났다.

1600 LST의 경우 인근 바다 상공에 존재했던 고농도역이 해풍에 의해 내륙으로 이동된 모습을 볼 수 있으며, 고농도현상이 도시 내로 국한되는 모습이다. 1800 LST의 경우 하층대기 해풍 발달과 함께 도시 외곽 풍하측으로 상당수준의 오존농도가 나타났고, 연안지역 고도 1 km 부근에 100 ppb 이상의 오존층(ozone layer)이 나타나 해풍과 반류로 인한 상·하층 공기과의 분리현상을 보여주었다.

이상과 같은 결과에서 해풍지연과 함께 나타나는 대기하층의 기상조건 변화와 연직적 오존분포를 상세히 파악할 수 있었다. 무엇보다 오존의 광화학적 생성에 적절한 기상조건이 형성되는 오후에 나타난 해풍의 서행은 인근 바다와 도시 내에서 생성된 오존을 대기하층에 축적시키고, 연안과 인근 풍하측 지역에 고농도오존 현상을 일으키는 모습을 보여주었다. 물론 여기서 제시된 오존농도 분포는 모델링 경계조건을 포함한 입력자료의 불확실성으로 인한 다소의 오차를 감안해야 하며, 절대적인 농도수준의 평가보다는 분포경향 중심의 이해가 보다 타당하리라 생각한다.

## 7. 결 론

본 연구에서는 연안도시인 부산지역에 나타난 해풍의 지연현상이 오존분포에 영향을 미치며, 고농도 발생에 기여함을 보여주었다. 해풍지연은 부산이 고기압의 전면 또는 약한 기압골 후면에 위치하여 해풍과 반대방향의 약한 중관풍이 존재할 때 뚜렷이 나타났다. 해풍이 지연될수록 오전과 이른 오후에 약한 풍속조건이 형성되었고, 이는 도시 내 평균적인 오존농도의 상승과 고농도 발생 횟수를 현저히 증가시키는 역할을 하였다. 아울러 해풍지연일에는 일 최고 오존농도의 발생시간이 늦어지고 도시 전역의 고농도현상이 나타났으며, 특히 연안지역과 도심 인근 풍하측에 상당수준의 고농도가 분포하는 특징을 보였다.

사례일 수치모의 통해 해풍지연의 역학적 효과가 오존분포에 크게 기여함이 분석되었다. 특징적으로 중관풍과 해풍의 복합적인 작용에 의해 도시 오염공

기과의 재순환과정이 뚜렷하게 나타남을 볼 수 있었다. 특히, 늦은 오후에 발달한 해풍은 인근 해양과 연안 지역에 축적된 오존을 도시로 유입시켜 이른 저녁까지 도시전역에 상당수준의 오존농도가 유지되는 역할을 하였다. 아울러 해풍전선의 침투와 함께 그 후면으로 오존농도 상승이 뚜렷이 나타났고, 해풍이 충분히 발달한 이후에도 연안지역은 해풍의 상부에 고농도의 오존층이 존재하는 모습을 보여주었다.

결론적으로 해풍지연 현상은 연안도시의 오존분포 및 고농도현상과 관련하는 중요한 기상학적 조건이며, 특히 연안에 바로 인접한 대도시의 심각한 오존 오염현상을 상당부분 설명할 수 있는 인자로 파악되었다. 향후, 다양한 관측을 통해 3차원 기상 및 화학물질 농도자료의 분석이 수행되고 아울러 모델 입력자료의 개선을 통한 신뢰성 있는 모델링 연구가 함께 병행된다면 해풍지연효과의 보다 정확한 해석이 가능하리라 사료된다.

## 참 고 문 헌

김유근, 문윤섭, 오인보, 황미경 (2002) 서울 및 부산지역에서 기온과 국지풍이 지표고농도 오존발생에 미치는 영향, 한국기상학회지, 38(4), 319-331.

김유근, 오인보, 황미경 (2003) UAM-V를 이용한 부산지역 고농도 오존사태 수치모의, 한국대기환경학회지, 19(1), 1-11.

김진영, 김영성 (2001) 상세한 기상관측 자료를 이용한 1997년 서울·수도권 고농도 오존 사례의 모델링, 한국대기환경학회지, 17(1), 1-17.

부산광역시 (2002) 부산광역시 대기환경개선 실천 계획 수립-최종보고서.

오인보 (2003) 대도시지역 고농도 오존발생의 기상학적 메카니즘: 관측자료 분석과 수치모델링 연구, 부산대학교 대학원 박사학위 논문, 110 pp.

오인보, 김유근 (2002) 한반도 주요 대도시지역의 지표오존 특성: 추세, 일변화, 월변화, 수평분포, 한국대기환경학회지, 18(4), 253-264.

이화운, 김유근, 정우식 (2000) 복잡한 연안지역에서 해풍시작시 지형의 영향에 대한 수치모의, 한국기상학회지, 36(5), 561-572.

임현호 (2000) 부산지역에서 해륙풍의 선정과 기후학적인 특성에 관한 연구, 부산대학교 대학원 석사학위 논문, 108 pp.

전병일, 김유근, 이화운 (1994a) 부산 연안역의 바람 특성에

- 관한 고찰, 한국환경과학회지, 3(1), 1-9.
- 전병일, 김유근, 이화운 (1994b) 해풍이 부산지역의 대기오염 농도에 미치는 영향. 한국환경과학회지, 3(4), 357-365.
- Arritt, R.W. (1993) Effects of the large-scale flow on characteristic features of the sea breeze, *Am. Meteorol. Soc.*, 32, 116-125.
- Atkinson, B.W. (1981) *Meso-scale atmospheric circulations*, Academic Press, 207 pp.
- Camps, J., J. Massons, M.R. Soler, and E.C. Nickerson (1997) Pollutant transport in coastal areas with and without background wind, *Ann. Geophysicae*, 15, 476-486.
- Cheng, W.L. (2002) Ozone distribution in coastal central Taiwan under sea-breeze conditions, *Atmos. Environ.*, 36, 3445-3459.
- Ghim, Y.S. and Y.S. Chang (2000) Characteristics of ground-level ozone distributions in Korea for the period of 1990-1995, *J. Geophys. Res.*, 105, 8877-8890.
- Helmis, C.G., D.N. Asimakopoulos, and D.G. Deligiorgi (1987) Observations of sea-breeze fronts near the shoreline, *Boundary-Layer Meteorol.*, 38, 395-410.
- Helmis, C.G., K.H. Papadopoulos, J.A. Kalogiros, A.T. Soilemes, and D.N. Asimakopoulos (1995) Influence of background flow on evolution of Saronic Gulf sea breeze, *Atmos. Environ.*, 29, 3689-3701.
- Hogrefe, C., S.T. Rao, P. Kasibhatla, W. Hao, G. Sistla, R. Mathur, and J. McHenry (2001) Evaluating the performance of regional-scale photochemical modeling systems: Part II-ozone predictions, *Atmos. Environ.*, 35, 4175-4188.
- Hurley, P.J., P.C. Manins, G. Johnson, and M. Azzi (1995) Modelling the winds on days of high ozone in Perth, *Mathematical and Computer Modelling*, 21, 105-110.
- Kim, Y.K., H.W. Lee, I.B. Oh, Y.S. Moon, and S.K. Song (2003) Seasonal characteristics of surface ozone associated with flow patterns at Kanghwa background monitoring site in the western Korea, *Proceeding of the 8th International conference on ASAAQ*, 286 pp.
- Liang, J. and M.Z., Jacobson (2000) Effects of subgrid segregation on ozone production efficiency in a chemical model, *Atmos. Environ.*, 34, 2975-2982.
- Liu, K.Y., Z. Wang, and L.F. Hsiao (2002) A modeling of the sea breeze and its impacts on ozone distribution in northern Taiwan, *Environmental Modeling & Software*, 17, 21-27.
- Ma, Y. and T.J. Lyons (2003) Recirculation of coastal urban air pollution under a synoptic scale thermal trough in Perth, Western Australia, *Atmos. Environ.*, 37, 443-454.
- MacDonald, C.P., P.P. Roberts, H.H. Main, T.S. Dye, D.L. Coe, and J. Yarbrough (2001) The 1996 Paso del Norte Ozone Study: analysis of meteorological and air quality data that influence local ozone concentrations, *Sci. Total Environ.*, 276, 93-109.
- Melas, D., I. Ziomas, O. Klemm, and C.S. Zerefos (1998) Flow dynamics in Athens area under moderate large-scale winds, *Atmos. Environ.*, 32, 2209-2222.
- Nair, P.R., D. Chand, S. Lal, K.S. Modh, M. Naja, K. Parameswaran, S. Ravindran, and S. Venkataramani (2002) Temporal variations in surface ozone at Thumba (8.6 °N, 77 °E) - a tropical coastal site in India, *Atmos. Environ.*, 36, 603-610.
- Prakash, J.W.J., P. Ramachandran, K.N. Nair, K.S. Gupta, and P.K. Kunhikrishnan (1992) On the structure of sea-breeze front observed near the coastline of Thumba, India, *Boundary Layer Meteorol.*, 59, 111-124.
- Physick, W.L. and D.J. Abbs (1991) Modeling of summertime flow and dispersion in the coastal terrain of south-eastern Australia, *Am. Meteorol. Soc.*, 119, 1014-1030.
- Systems Applications International (SAI) (1999) *User's guide to the variable-grid urban airshed model (UAM-V)*, Systems Applications International Inc. (SYSAPP-99-95/27r2).
- US EPA (1991) *Guideline for regulatory application of the Urban Airshed Model*, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.
- Weserly, M.L. (1989) Parameterization of surface resistance to gaseous dry deposition in regional scale numerical models, *Atmos. Environ.*, 23, 1293-1304.
- Yamada, T., S. Bunker, and M. Moss (1992) Numerical simulations of atmospheric transport and diffusion over coastal complex terrain, *Am. Meteorol. Soc.*, 31, 565-578.