

## 광양만 권역에서의 고농도 오존 사례에 대한 기상 및 대기질 분석

최현정 · 이화운 · 임헌호 · 송재활\*

부산대학교 지구환경시스템학부, \*포항산업과학연구원  
(2008년 3월 10일 접수; 2008년 5월 9일 채택)

### The Analysis of Atmospheric Flow Field and Air Quality According to the High Level Ozone Case on Gwangyang Bay

Hyun-Jung Choi, Hwa Woon Lee, Heon Ho Leem and Jae-Hwal Song\*

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

*\*Research Institute of Industrial Science & Technology, Pohang 790-600, Korea*

(Manuscript received 10 March, 2008; accepted 9 May, 2008)

#### Abstract

Gwangyang Bay is often severely confronted by photochemical pollutants due to its location and dense emissions. It is located in a basin on the south coast of the Korean peninsula and is crossed by a remarkable cluster of hills and mountains of a small horizontal scale that forms a channel. Clearly, the air flow field has a great influence on the dispersion of air pollutants. The characteristics of the wind flow patterns have an important effect on the dispersion of pollutants emitted. In these situations, the distribution of the ozone concentration is extremely complicated because of the superposition of circulations of the air flow fields, especially in complex coastal region. In this study, we examined the distribution of the high level ozone on Gwangyang Bay particularly during the episode day (for 5 years). Among these days, A high level ozone was induced by the development of a sea/land breeze local circulation system, as well as by an anabatic/catabatic flow from the mountains and valley with weakening of the synoptic wind. High level ozone distribution pattern(6 types) on Gwangyang bay is analyzed and the comparison of each pattern reveals substantial localized differences in intensity and distribution of ozone concentration from the site coherence and UPA analysis of ozone concentration. The observed VOC concentration had much difference in concentrations and daily variations between Jungdong and Samil.

**Key Words :** Wind flow patterns, Distribution of ozone concentration, Synoptic wind

#### 1. 서 론

대기오염 저감대책 마련과 규제, 환경관리를 위

해서는 대기 오염물질의 확산에 대한 정확한 정보를 획득하는 것이 필수적인 일이다. 이 중 연안지역은 해륙풍 순환계, 내륙의 복잡한 지형 형태 및 심한 경사 등으로 인한 산곡풍 순환계 등 종관규모 순환계 및 복합적인 국지규모 순환계가 모두 나타나므로 오염물질의 확산과 이류에 불리하여 대기오염이

심화되는 지역적 특성을 내포하고 있다<sup>1,2)</sup>. 따라서, 연안지역은 내륙지역과는 다른 대기오염현상을 일으킬 수 있는 중요한 지형적 특성으로 인해 이 지역 대기질을 수치적으로 연구한 여러 예가 있다<sup>3-5)</sup>. 연안지역의 혼합고 및 해륙풍의 발달 강도<sup>6)</sup>, 정체고 기압 영향 하의 해풍과 지형에 의한 국지풍 등이 연안지역의 고농도 오존 현상과 깊은 관련이 있으며, 더욱이 해풍 발달에 의해 해안가에 위치한 공업도시들로부터 배출된 오염물질이 내륙 깊숙이 수송되는 경우<sup>7,8)</sup>도 있어 연구의 중요성이 확인되고 있다.

본 연구의 대상지역인 광양만 권역은 이러한 현상이 나타나는 대표적인 지역으로, 동서 간 길이가 27 km, 남북의 폭이 15 km로 광양, 순천, 여수, 남해, 하동으로 둘러싸인 폐쇄된 지형이며, 섬진강으로부터 연간 약 28억 8천만 톤의 담수가 유입되고 있는 협소한 내만이다. 이 협소한 내만에 광양제철소와 연관단지, 여천 석유화학단지, 울촌 산업공단, 여수 화학력발전소, 호남화학발전소, 현대LNG화학력발전소, 하동화학력발전소, 삼천포화학력발전소, 광양제철소 등 대형 사업장이 집중화되어 있어, 대기오염에 대한 인식과 적절한 관리에도 불구하고 장기간 오염물질이 누적되어 지역의 대기오염 환경 기준치를 초과하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 이 지역 오염물질의 확산과 이류에 관한 분석력 향상을 위하여 지형적 및 기상학적 특성에 기인하는 고농도 오존의 분포와 특성을 연구하였다. 이를 위해 광양만 권역의 최근 5년간(2002년~2006년)의 기상 및 대기질 자료를 바탕으로 고농도 오존일의 기상과 농도 분포의 특성을 진단하여, 이 지역 오염물질의 이류와 확산에 대한 타당성 있는 분석을 수행하였다.

## 2. 재료 및 방법

광양만 권역은 복잡한 지형과 아울러 해륙풍 및 산곡풍 순환계 등 국지기상의 영향이 큰 지역이므로 오염물질의 확산 및 이류에 관한 연구를 수행하기 위해서는 장기간의 대기질 및 기상관측요소의 연구 및 도출된 결과 분석이 필수적이라 할 수 있다. 따라서, 본 연구의 대상지역인 광양만 권역의 대기질 및 기상자료 분석 기간은 2002년에서 2006까지

5년간의 기간이며, 광양만 권역의 8개의 대기질 관측소(장천, 칠성, 진상, 중동, 태인, 광무, 월래, 삼일)에서 관측된 오존의 고농도 사례일을 도출하였다(Fig. 1). 이때, 고농도 패턴의 다양한 분석을 시도하기 위하여 대기질 관측소 8지역 중 오존 농도가 120 ppb 이상 나타난 고농도 사례일과 같은 시간대 2지점 이상에서 80 ppb 이상 120 ppb 이하 오존이 관측된 고농도 사례일을 분류하여 분석 사례일을 도출하였다.

대류권에서의 오존은 기본적으로 광화학 반응으로 생성되나 오존 농도의 지역적 분포는 기상현상과 밀접한 관계를 가지고 있다. 그러므로 특정지역의 오존 농도의 수평 분포를 예측하기 위해서는 광화학과정 뿐만 아니라 대상 지역 내의 바람장에 의한 오존 및 오존의 광화학적 전구 물질(precursor)의 이류, 외부로부터의 중·장거리 수송 등 여러 요인을 모두 고려해야 한다<sup>9)</sup>. 지역을 대표하는 바람장에 대한 조사는 대기오염 물질의 수송 및 확산 예측을 위한 중요한 자료가 된다. 이는 풍향과 풍속을 통해 대기오염물질의 정체 및 확산정도를 파악할 수 있기 때문이다. 또한 바람장은 지리적 여건에 따라 크게 변할 수 있다. 이러한 변화의 파악이 상층풍 관측의 주목적이다. 상층 바람구조의 정확한 파악은 그 지역을 대표하는 바람장을 찾아낼 수 있으며, 이를 이용하면 대기오염 물질의 수송과 확산을 정확히 예측할 수 있기 때문에 상층 바람장 관측은 아주 중

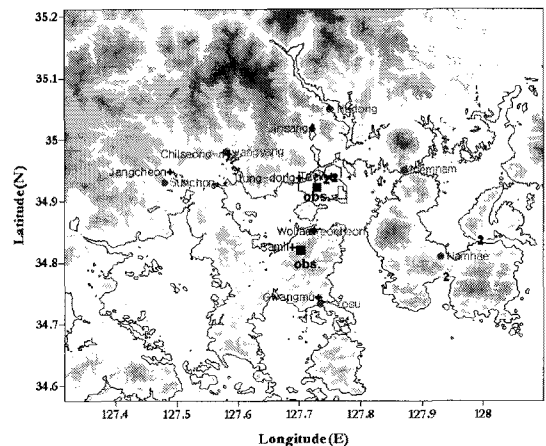


Fig. 1. The analyzed air quality(+), weather stations(●) and observed site(■) in this study.

요한 의미를 가지고 있다<sup>10)</sup>. 따라서 오존 및 전구 물질의 장거리 수송, 해륙풍 순환 등에 의한 이류, 대기정체 및 기온상승 등의 원인이 되는 종관규모의 대기운동, 국지규모의 대기운동, 일사나 기온 등 국지기상 조건 등의 파악을 위하여 분석된 고농도 사례일(147일)에 대한 지상 및 500 hPa 일기도를 참조하여 기압배치를 중심으로 종관패턴 분석을 실시하였다. 또한, 분석된 고농도 사례일에 대한 지상 기상 요소의 특징을 알아보기 위하여 대기질 관측소 부근의 기상관측소 7개소(Fig. 1)에서의 낮동안(0900LST~1500LST)의 일최고 기온, 오전(0600LST~0900LST)·오후(1200LST~1500LST)의 주풍향 및 풍속, 낮동안의 평균습도 등에 대한 분석을 실시하였다. 그리고, 기상 및 오존, VOC의 실제 관측을 통하여 국지적 기상 현황과 대기질 현황을 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 고농도 오존의 빈도분석

광양만 권역 오존의 분포와 확산 특징을 분석하기 위하여 최근 5년간(2002~2006)의 오존 관측 자료를 분석하였다. 분석된 고농도 사례일은 관측소 8지역 중 오존 농도가 같은 시간대 2지점 이상에서 80 ppb 이상 120 ppb 이하로 관측된 고농도 사례일(Fig. 2(a))과 한 지점 이상에서 120 ppb 이상이 나타난 고농도 사례일(Fig. 2(b))로 분류하여 각각 분석하였으며, 총 사례일은 147일이었다. Fig. 2(a)는 2지점 이상에서 80 ppb 이상 120 ppb 이하로 관측된 고농도 사례일(108 일)로 고농도 오존의 분포는 3월에서 11월 사이에 나타나고 있었으며, 6월의 경우 가장 높은 빈도를 나타내고 있었다. Fig. 2(b)는 한 지점 이상에서 120 ppb 이상이 나타난 고농도 사례일(39일)로 전체 사례일의 27.2 %였다. 5, 6월에 고농도 오존의 영향이 가장 많이 나타나며, 8월에 가장 낮은 빈도를 나타내었다.

#### 3.2. 고농도 오존의 분포특성 분석

분석된 총 사례일인 147일에 대하여 1200LST에서 1700LST 사이에 나타나는 고농도 오존의 공간적인 분포 유형을 분석하였다 (Fig. 3). 첫 번째 유형(이하 P-a)은 고농도 지역이 진상, 월래, 광무, 태인, 중동에서 나타나는 형태이고, 두 번째 유형(이하

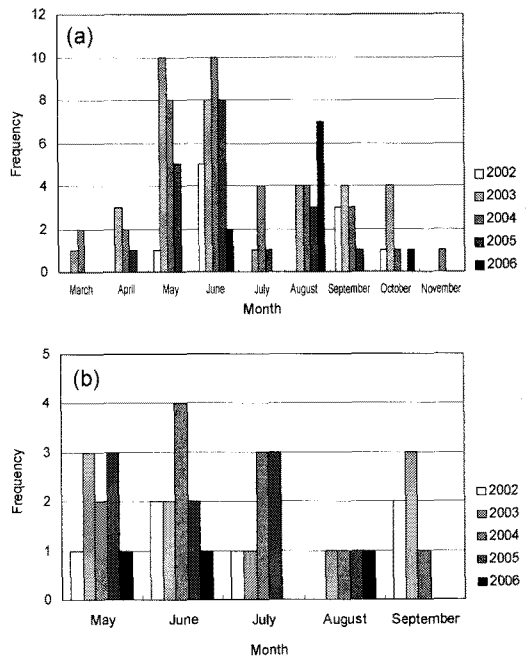


Fig. 2. High level ozone distribution on Gwangyang bay at 8 sites from 2002 to 2006 ((a): 80 ppb < O<sub>3</sub> < 120 ppb, (b): O<sub>3</sub> > 120 ppb).

P-b)은 태인과 중동지역에만 집중적으로 나타나는 형태, 세 번째 유형(이하 P-c)은 광양만 권 전체에서 고농도가 나타나는 것으로 광양만 권 대기질 관측소 8지점에서 모두 고농도가 나타났던 사례로 분류하였다. 또한 네 번째 유형(이하 P-d)은 광무, 삼일, 장천으로 나타나는 고농도 분포이며, 다섯 번째 유형(이하 P-e)은 태인, 중동, 장천에 이르는 고농도 분포이며, 여섯 번째 유형(이하 P-f)은 월래 삼일, 광무에서만 집중적으로 나타나는 고농도 유형으로 분류하였다.

한편, 광양만 권역의 공간적인 고농도 유형 뿐 아니라, 나타나는 고농도 유형의 강도를 분석하기 위하여 사례일 147일에 대한 농도 시계열 분석을 통하여, 2지점 이상 모두 고농도 경향이 연속적인 2일 동안 지속적으로 관측되는 유형(이하 P-A), 1지점 또는 2지점에서 고농도의 경향이 연속적인 2일 동안 지속적으로 관측되는 유형(이하 P-B), 1지점 또는 2지점에서 모두 고농도가 하루 동안 관측되며 그 사례일 이후 농도가 감소되거나 여전히 환경기준치

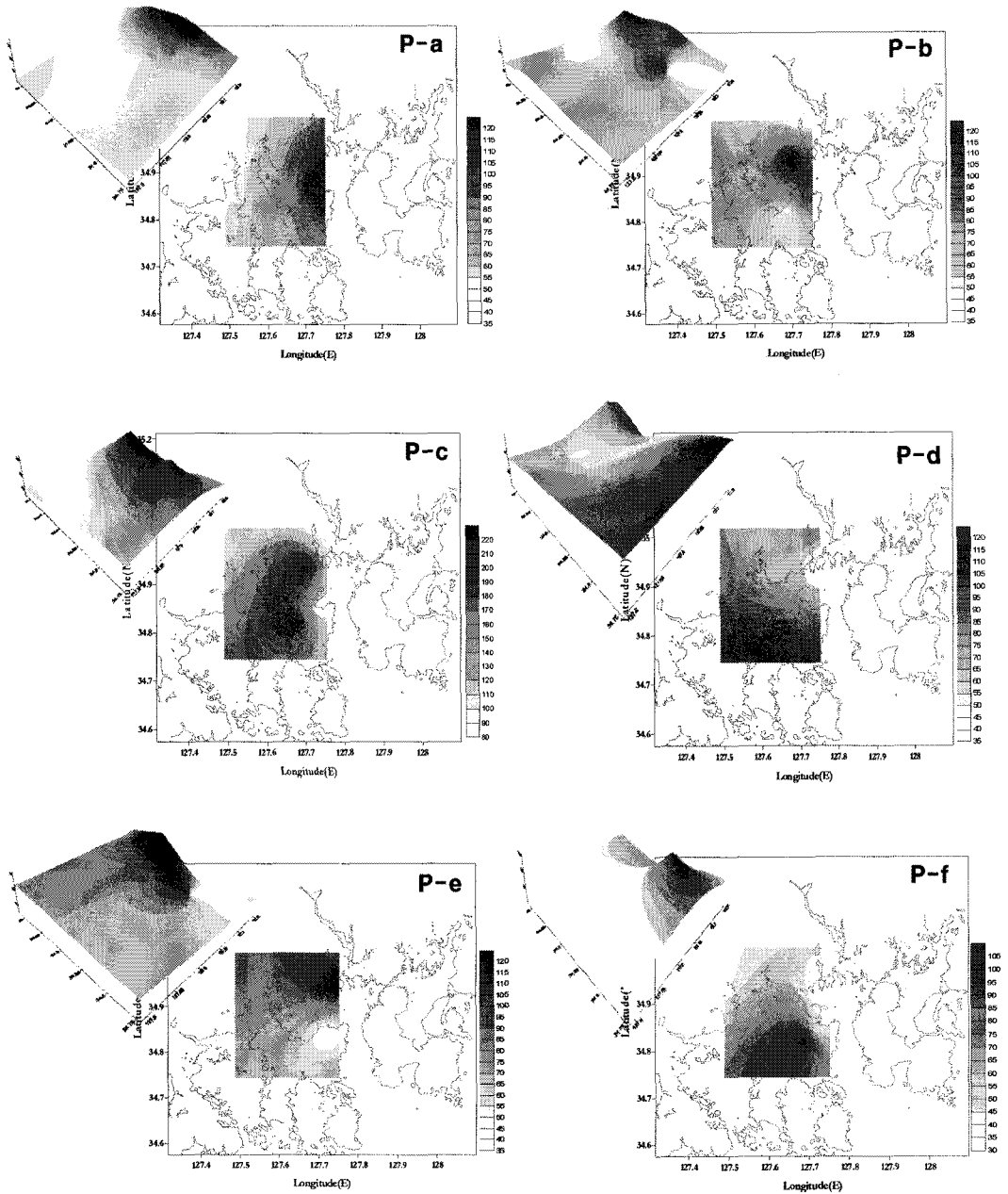
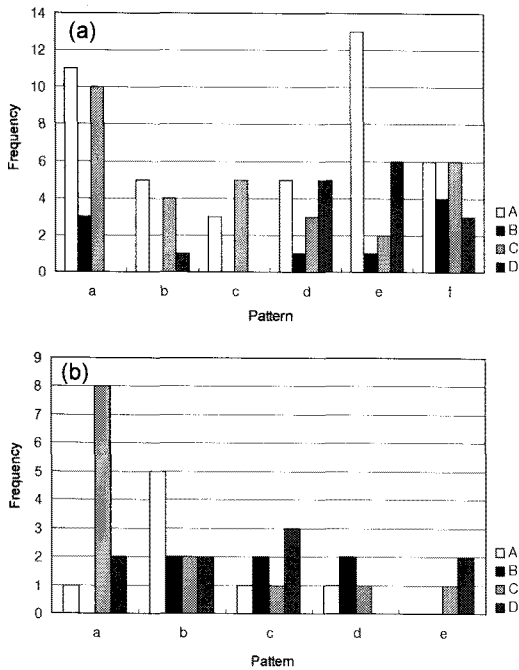


Fig. 3. High level ozone distribution pattern(6 types) on Gwangyang bay.

이상의 농도 관측되는 유형(이하 P-C), 1지점 또는 2지점에서 고농도가 하루 동안 관측되며 그 사례일 이후 환경기준치 이하의 농도가 관측되는 유형(이하 P-D)으로 분류하여 분석하였다. Fig. 4는 사례일 147일에 대해 분류된 6개 유형의 공간분포 빈도와

4개 유형의 강도분포 빈도를 나타낸 것이다. 그 중, Fig. 4(a)는 오존농도가 같은 시간대 2지점 이상에서 80 ppb 이상 120 ppb 이하로 관측된 고농도 사례일에 대한 빈도 분포이고, Fig. 4(b)는 한 지점이상에서 120 ppb 이상 나타난 고농도 사례일에 대한 빈도 분



**Fig. 4.** The frequency of high level ozone distribution pattern on Gwangyang bay:(a): 80 ppb < O<sub>3</sub> < 120 ppb, (b): 120 ppb < O<sub>3</sub>).

포 결과이다. Fig. 4(a)에서 나타난 결과는 공간분포

유형으로는 P-a, P-e 순으로 나타났으며, 이때 농도 강도분포로는 2 지점 이상 모두 고농도가 연속적인 2일 동안 지속적으로 관측되는 유형인 P-A가 지배적으로 나타나 비교적 고농도의 오존이 지속적으로 나타나게 될 경우가 많음을 알 수 있었다. Fig. 4(b)의 경우, 농도 분포 유형으로는 P-a, P-b가 지배적으로 나타나, P-a의 경우가 이 지역 고농도 유형에서 지배적인 분포로 나타났다. 특히 P-b의 경우, 같은 시간대 2지점 이상에서 80 ppb 이상 120 ppb 이하 오존이 관측된 고농도 사례일에서는 많지 않은 유형이었으나, 한 지점이상에서 120 ppb 이상 나타난 고농도 사례일에서는 가장 많이 나타나는 유형에 속했다. 이 경우에도 역시 고농도의 오존이 지속적으로 가지게 될 경우인 P-A가 지배적으로 나타나고 있다. 또한 한 지점이상에서 120 ppb 이상 나타난 고농도 사례일에서는 P-f가 나타나지 않고 있는 것도 특징적이다. 즉, 오존 농도가 같은 시간대 2지점 이상에서 80 ppb 이상 120 ppb 이하로 관측된 고농도 사례일에 대한 빈도 분포와 한 지점이상에서 120 ppb 이상 나타난 고농도 사례일에 대한 분석 결과에서 오존 농도의 공간분포나 강도분포는 분석상 특징이 뚜렷이 나타나고 있었다.

Table 1은 5년간 고농도 사례일인 147일에 대한

**Table 1.** The Site Coherence Analysis of ozone concentration on Gwangyang bay

| (a)       |      |          |          |          |          |          |
|-----------|------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Site      | Time | 1300LST  | 1400LST  | 1500LST  | 1600LST  | 1700LST  |
| Jungdong  |      | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| Samil     |      | 38.76073 | 37.27639 | 33.66225 | 36.50832 | 29.2609  |
| Wollae    |      | 36.31893 | 49.51442 | 45.37586 | 39.18107 | 34.14628 |
| Jangcheon |      | 32.91319 | 49.82414 | 46.90741 | 47.1858  | 31.76826 |
| Gwangmu   |      | 47.81689 | 50.50897 | 50.16488 | 45.8126  | 32.81364 |
| Taein     |      | 26.69061 | 42.71319 | 33.41407 | 33.2833  | 23.36545 |
| Jingsang  |      | 35.94536 | 50.66727 | 44.90979 | 40.4369  | 40.51096 |
| Chilseong |      | 21.69013 | 20.59686 | 24.86966 | 21.89178 | 17.67531 |

| (b)       |      |          |          |          |          |          |
|-----------|------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Site      | Time | 1300LST  | 1400LST  | 1500LST  | 1600LST  | 1700LST  |
| Jungdong  |      | 38.76073 | 37.27639 | 33.41475 | 36.50832 | 29.2609  |
| Samil     |      | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| Wollae    |      | 48.30784 | 38.88775 | 36.88825 | 25.78113 | 26.71454 |
| Jangcheon |      | 40.48425 | 45.84812 | 40.83456 | 31.95739 | 31.13318 |
| Gwangmu   |      | 45.99909 | 38.87909 | 38.34927 | 25.85689 | 23.68322 |
| Taein     |      | 46.24766 | 43.92522 | 36.21694 | 26.35764 | 26.60545 |
| Jingsang  |      | 44.74473 | 42.31555 | 43.50172 | 35.27038 | 38.23254 |
| Chilseong |      | 33.00253 | 39.3016  | 38.09965 | 27.42262 | 29.40238 |

**Table 2.** The Unpaired Peak Prediction Accuracy (UPA) of ozone concentration on Gwangyang bay

| Pattern | Site     | Jungdong | Samil | Wollae | Jangcheon | Gwangmu | Taein  | Jingsang | Chilseong |
|---------|----------|----------|-------|--------|-----------|---------|--------|----------|-----------|
| a       | Jungdong | 0.00     | 47.55 | 5.06   | 51.6      | 54.27   | 25.74  | 50.33    | 44.5      |
|         | Samil    | 90.67    | 0.00  | 41.01  | 71.04     | 12.80   | 41.58  | 5.30     | 50.2      |
| b       | Jungdong | 0.00     | 5.38  | 19.01  | 92.16     | 16.24   | 10.11  | 9.26     | 36.7      |
|         | Samil    | 5.10     | 0.00  | 23.14  | 82.35     | 20.51   | 4.49   | 13.89    | 45.7      |
| c       | Jungdong | 0.00     | 1.09  | 29.17  | 29.01     | 25.68   | 13.41  | 4.12     | 23.6      |
|         | Samil    | 1.08     | 0.00  | 27.78  | 29.77     | 24.32   | 12.20  | 5.15     | 21.6      |
| d       | Jungdong | 0.00     | 8.47  | 31.71  | 21.17     | 44.00   | 107.69 | 47.95    | 58.82     |
|         | Samil    | 9.26     | 0.00  | 43.90  | 13.87     | 57.33   | 126.92 | 61.64    | 73.53     |
| e       | Jungdong | 0.00     | 9.42  | 41.77  | 24.14     | 41.24   | 25.00  | 22.48    | 45.4      |
|         | Samil    | 12.34    | 0.00  | 29.41  | 39.72     | 18.52   | 37.50  | 52.86    | 33.9      |
| f       | Jungdong | 0.00     | 58.5  | 29.35  | 72.46     | 70.00   | 75.00  | 25.12    | 197.50    |
|         | Samil    | 46.4     | 0.00  | 28.26  | 71.01     | 68.57   | 73.53  | 43.90    | 195.00    |

여 광양만 권역에서 대표적 배출원을 갖는 광양만과 여수산단의 중동과 삼일에서의 농도값과 이를 제외한 관측지점의 시간별 농도값의 상관성(Site Coherence Analysis)을 통계분석(RMSD)을 통하여 알아본 결과이다. 먼저 Table 1a는 중동을 기준으로 살펴본 RMSD 결과로 매시 관측농도의 상관결과 지리적으로 가장 가까운 태인보다 칠성에서 가장 높은 상관성을 나타내고 있다. 삼일의 경우를 기준으로 살펴본 결과에서도 지리적으로 가까운 광무와 월래보다는 중동과 태인의 농도와 유사한 패턴을 보이고, 1300LST의 경우 월래에서 가장 낮은 상관성을 갖고 있었다. 또한 1500LST에서는 지리상 근접한 광무와 농도의 상관성이 높게 나타나고 있다. Table 2는 광양만 권역에서 고농도 오존의 공간분포에 대해 분류된 6개의 유형에 대하여 중동과 삼일의 최고치 농도 상관결과이다. 이때 이 두 지점의 최고 농도와 다른 지점에서 나타나는 최고 농도와의 상관성을 나타내기 위해 Unpaired Peak Prediction Accuracy (UPA)를 통해 분석했다.

$$UPA = \frac{C_{mod}(x,t)_{max} - C_{obs}(x,t)_{max}}{C_{obs}(x,t)_{max}}$$

P-a의 경우, 중동의 최고 농도는 월래와 장천의 최고 농도와 높은 상관성이 있으며, 광무와 진상의 최고 농도와는 상관성이 낮게 나타났다. 삼일의 최고 농도는 진상의 농도와 가장 높은 상관성이 있으며, 장천에서 가장 낮게 나타났다. P-b의 경우, 중동의 최고 농도는 삼일, 진상과 태인 순으로 최고 농도와 높은 상관성을 갖고 있었으며, 장천과 가장 낮은

상관을 나타내었다. 삼일의 최고 농도는 태인과 중동의 최고 농도와 높은 상관성을 가지며, 장천과는 가장 낮게 나타났다. P-c의 경우, 중동은 삼일과 가장 높은 상관성을 가지고 있으며, 삼일의 경우에서도 중동과 가장 높은 상관성을 나타내고 있다. P-d의 경우, 중동은 삼일과 가장 높은 상관성을 가지며, 지리적으로 가까운 태인의 최고 농도와는 가장 낮은 상관성을 갖고 있었다. 삼일의 경우에서도 중동과 가장 높은 상관성을 가지며, 태인과는 가장 낮은 상관성을 나타내고 있었다. P-e의 경우에서도 중동과 삼일은 각각 최고 농도에서 유사한 값을 나타내고 있었다. P-f의 경우에는 중동과 삼일은 각각 진상과 월래에서 가장 높은 상관성을 나타내었다.

### 3.3. 고농도 오존의 기상 특성 분석

Fig. 5는 5년간 고농도 사례일인 147일에 대하여 지상 및 상층기도를 중심으로 분석한 9개의 종관 패턴의 빈도 결과이다. P-I는 이동성 고기압의 중심이 우리나라 또는 일본의 남쪽해상에 위치하며 기압능의 가장자리에 우리나라가 위치하는 패턴으로 비교적 기압계의 이동속도가 빠르며, 주로 이 고기압 남동쪽아래에는 북태평양 고기압과 접하고 정체 정선이 존재하며 우리나라 북쪽에는 저기압이 위치하여 비교적 강한 남서풍 발달한 경우이다. P-II는 비교적 약한 이동성 고기압의 중심이 중국대륙의 북동 또는 동쪽에 위치하거나 서해에 위치하여 서서히 동진하며 우리나라로 접근하는 패턴으로 비교적 건조하고 맑은 날씨를 보이고 북서풍 내지 서풍 계열의 바람이 탁월하게 나타나고 때때로 강한 바

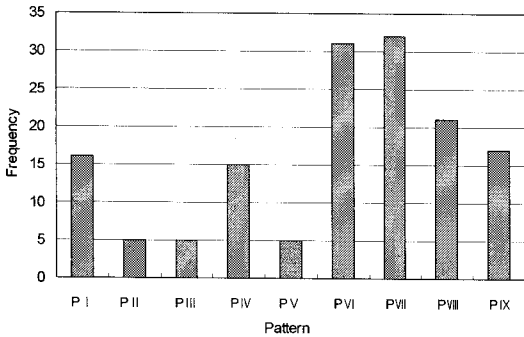


Fig. 5. The frequency of synoptic weather pattern of high level ozone episode on Gwangyang bay.

람이 나타나기도 한다. P-III은 한랭전선 후면을 따라 이동성 고기압 또는 기압능이 북서쪽에서 한반도로 접근하거나 한반도 상공에 위치하는 패턴으로 종관장의 이동속도가 빠르며, 상층 기압골과 지상 전선통과에 따른 하향 운동이 존재하는 경우이다. P-IV는 기압골이 우리나라에 걸쳐있는 패턴이며, 다소 운량이 많고 강한 종관풍 존재하는 경우이며, P-V는 우리나라로 태풍이 북상하며 기류순환 영역에 위치하는 경우로 맑은 날씨를 보이기도 하고 전반적으로 강한 동풍 존재한다. P-VI는 북태평양 고기압이 우리나라로 장출하여 영향을 주는 패턴으로 기온이 높고 강한 일사가 존재하며 남풍계열의 종관풍이 존재하는 경우이며, P-VII는 서행하는 이동성 고기압의 중심이 동해상에 위치하며 약한 기압능이 우리나라를 덮고 있는 형태로 수일간 지속되는 경우가 많다. 즉 우리나라는 고기압의 후면에 위치하며 매우 약한 종관풍(남동풍)의 영향을 받으며 해풍의 발달이 뚜렷하다. 우리나라가 오호츠크해 고기압의 영향을 받는 패턴이며, 우리나라 남쪽해상에 정체정선이 존재하고 전반적으로 종관규모의 대기정체 조건이 형성되고 약한 동풍 및 해륙풍 순환이 잘 일어난다. P-VIII는 대상 고기압의 영향으로 우리나라 동서로 이동성 고기압이 위치하며 약한 종관장과 함께 해륙풍 발달이 용이한 경우이며, P-IX는 한랭전선과 온난전선 사이에 위치하며 비교적 운량이 많고 약한 종관장을 나타낸다. 이중 종관규모의 대기운동이 탁월한 종관패턴은 P-I, II, III, IV, V(5개)이며, 종관규모의 대기운동과 국지규모의 대기운동이 발생할 종관패턴은 P-VI (1개)이며, 국

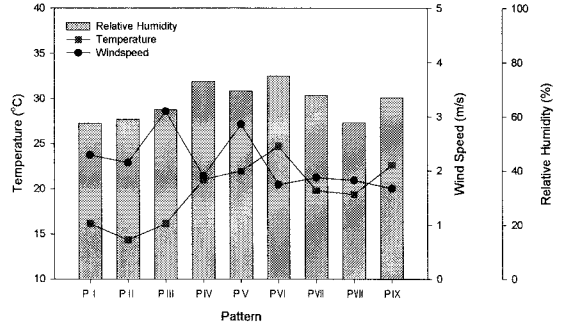


Fig. 6. The meteorological conditions by synoptic weather pattern of high level ozone episode on Gwangyang bay.

지규모의 대기운동 또는 대기정체가 나타날 패턴은 P-VII, VIII, IX(3개)로 분류하였다. Fig. 5에 나타난 결과에서 고농도 오존은 P-VI, P-VII에서 가장 높은 빈도를 나타내어 종관규모의 대기운동과 국지규모의 대기운동이 발생하거나, 대기정체의 패턴이 나타나는 종관상태에서 고농도 오존의 빈도가 많이 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 이러한 패턴에서는 분석된 기상 요소 중 기온, 풍속, 상대습도 경우 비교적 낮은 풍속과 높은 기온, 다소 낮은 습도를 유지하는 것으로 나타났다(Fig. 6).

### 3.4. 고농도 오존일의 관측 분석

고농도 오존이 관측되었던 2007년 6월 4일에 대하여 3시간 간격으로 기상 및 대기질 관측을 실시하였다. 관측지점은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 광양만의 금호(34.5N, 127.4E)에서 실시하였고, Radiosonde, Tethersonde, Ozonesonde, Sodar 등을 통하여 기압, 기온, 습도, 풍향, 풍속, 오존 농도의 연직 분포 등을 관측, 분석하였다.

Fig. 7은 광양만의 금호에서 해당일에 3시간 간격으로 관측된 오존 농도 및 기상요소 변화를 고도에 따라 나타낸 것이다. 먼저 오존 농도 관측결과에 있어 6월 5일 0600LST의 경우 지표 부근에서는 15 ppb 내외를, 그리고 지표로부터 150 m까지는 완만하게 증가하여 35 ppb 내외의 오존 농도 분포를 나타낸 반면 그 이상의 고도에서는 35 ppb ~ 40 ppb 내외의 오존 농도분포를 기록하였다. 이런 고도에 따른 오존 농도 분포는 0900LST에 이르러 지표 부근에서는 다소 증가하여 40 ppb 내외를 기록함과 동

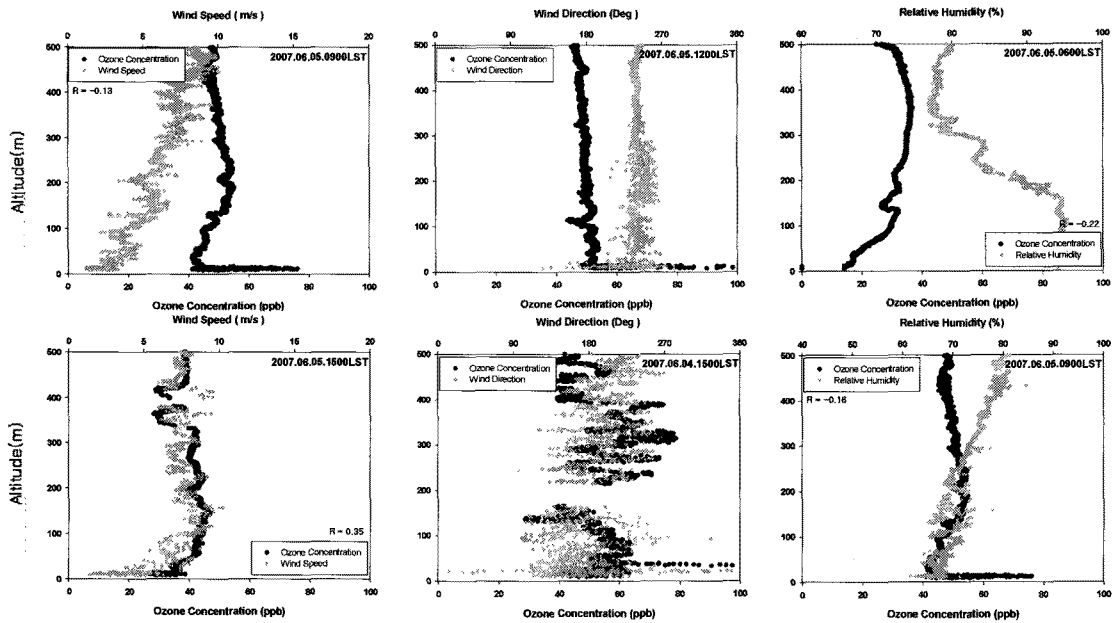


Fig. 7. The observed meteorological conditions and ozone concentration episode at Geumho.

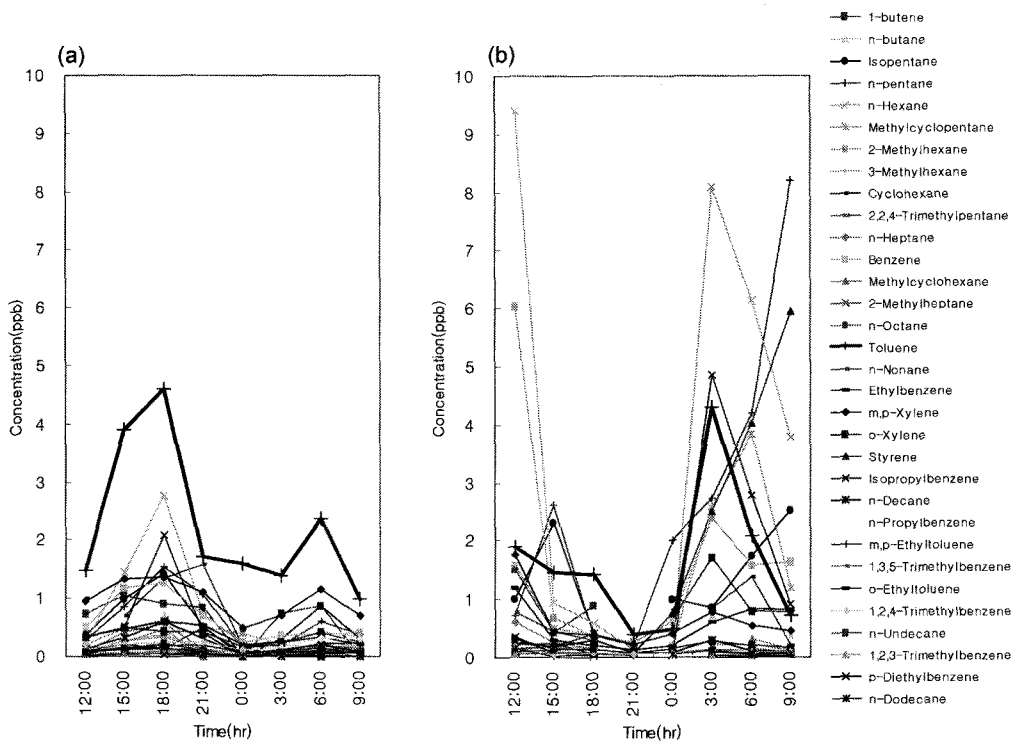


Fig. 8. The daily variations of observed VOC concentration at Jungdong(a) and Samil(b).



시에 고도 200 m까지는 완만히 상승하여 50 ppb 내외의농도 분포를 나타내었다. 그 상층으로는 다시 완만히 감소하여 고도 500 m에서는 45 ppb 내외를 나타내고 있다. 이는 일출과 더불어 일사로 인한 지표면서부터의 국지적 기온 상승이 지표면 부근에서의 오존 생성을 도운 것으로 분석된다<sup>1)</sup>. 또한, Fig. 7에서 보이는 바와 같이 지표면 부근에서의 3 m/s 내외의 약한 바람은 지표면에서의 국지적 가열을 방해하지 못하여 기온 상승 및 오존 생성을 양(positive)의 영향을 미친 것으로 분석된다. 그러나 상층 500 m까지는 점차적으로 풍속이 증가하여 10 m/s 내외의 다소 강한 바람이 불었는데 이는 고도에 따른 오존 생성에 있어 양의 영향으로 작용하지 않으므로 전 시간과 비교하여 오존 농도의 큰 증가를 가져오지 못한 것으로 사료된다. 특히, 상대습도와 의 비교에 있어서도 지표면 부근이 상대적으로 건조한 0900LST의 경우 단위 부피당 적은 수증기압이 오존 생성을 용이하게 한 것으로 분석된다<sup>2)</sup>. 또한 1200LST의 경우 지표면에서 500 m까지의 오존 농

도가 50 ppb 내외로 관측, 고도에 따른 연직적 오존 농도의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 강한 일사 및 지표와 상층에서의 균일한 바람으로 인해 대기 혼합층이 강하게 발달하였고 따라서 오존 농도 역시 강한 연직 혼합으로 인해 고도에 따라 거의 일정한 오존 농도를 나타낸 것으로 분석된다. 그러나 1500LST의 경우 1200LST의 유형과 비슷하나 전체적으로 5 ppb 정도의 오존 농도가 감소한 가운데 지표부근 및 상층 400 m 부근으로 30 ppb 내외의 오존 농도를 기록하였다. 즉, 이전 시간에 비해 지표면 부근에서의 오존 농도 감소는 일사의 감소 및 지속적인 해풍에 의한 이류효과에 기인한 것으로 분석되며 상층 일부 고도에서의 오존 농도 감소는 대류에 의한 연직 혼합의 효과가 상대적으로 약화되어 연직적으로 발산되는 대류 순환에 기인한 것으로 사료된다.

광양만 권역에서의 오존 농도에 대한 광화학적 전구 물질(precursor)의 발생과 이류정도를 알아보기 위하여 2007년 6월 4일에 대하여 3시간 간격의

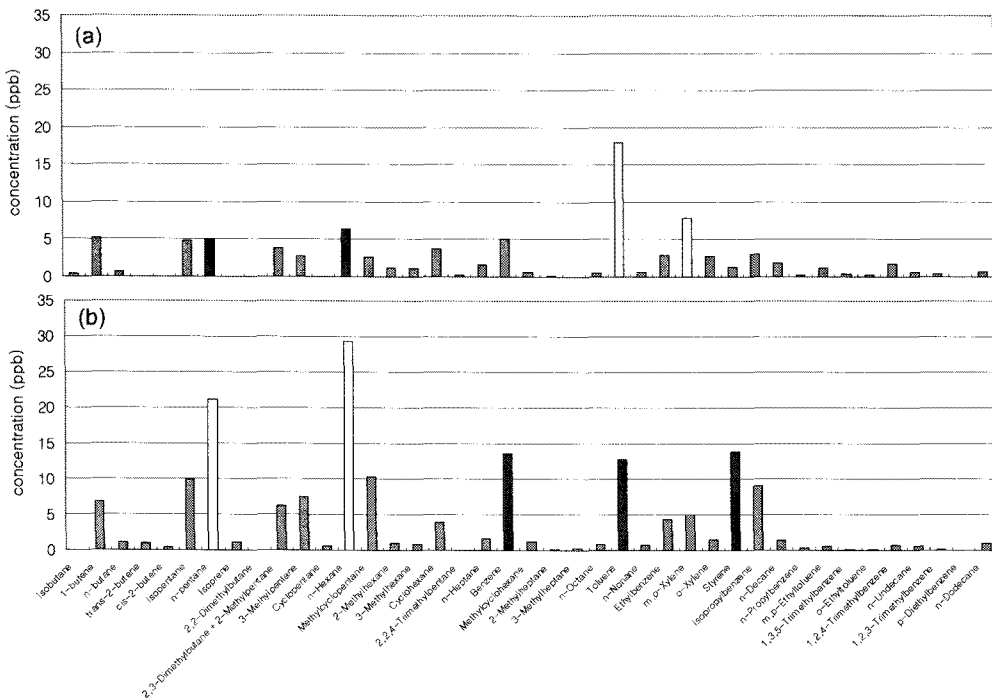


Fig. 9. The distribution of observed VOC concentration at Jungdong(a) and Samil(b).

VOC를 관측하였다. Fig. 8과 9는 같은 날 중동과 삼일에서 관측한 32종의 VOC 결과이다. 중동과 삼일에서 관측된 VOC의 총량은 각각 90.4 ppb, 170.5 ppb 였다. 이 중 중동에서는 toluene과 m,p-xylene 이, 삼일에서는 hexene, pentane 등이 주로 관측되어 두 지점 간에 관측된 VOC 종의 비가 달리 나타나고 있음을 알 수 있다. 이때 오존의 전구물질 중 가장 반응성이 높은 toluene의 경우도 두 지점에서 관측된 일변화 경향과 농도가 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

광양만 권역의 최근 5년간(2002년~2006년)의 기상 및 대기질 자료를 바탕으로 고농도 오존일의 기상과 농도 분포의 특성을 진단하여, 이 지역 오염물질의 이류와 확산에 대한 타당성 있는 분석을 시도하고자 본 연구를 수행하였다. 광양만 권역의 고농도 공간유형 뿐 아니라, 나타나는 고농도 유형의 강도를 분석하기 위하여 분류된 사례일 147일은 6개의 공간 유형과 4개의 강도 유형으로 나타낼 수 있었다. 같은 시간대 2지점 이상에서 80 ppb 이상 120 ppb 이하 오존이 관측된 고농도 사례일에 대한 빈도 분포에서는 P-a, P-e 순으로 나타났으며, 이때 농도 강도 분포로는 2지점 이상 모두 고농도가 연속적인 2일 동안 지속적으로 관측되는 유형인 P-A가 지배적으로 나타나 비교적 고농도의 오존이 지속적으로 나타나게 될 경우가 많음을 알 수 있었다. 또한 한 지점이상에서 120 ppb 이상 나타난 고농도 사례일에 대한 빈도 분포결과에서는 P-a, P-b가 지배적으로 나타나, P-a의 경우가 이 지역 고농도 유형에서 지배적인 분포로 나타날 수 있음을 알 수 있었다. 특히 P-b의 경우, 같은 시간대 2지점 이상에서 80 ppb 이상 120 ppb 이하 오존이 관측된 고농도 사례일에서는 많지 않은 유형이었으나, 한 지점이상에서 120 ppb 이상이 나타난 고농도 사례일에서는 가장 많이 나타나는 유형에 속했다. 또한 중관규모의 대기운동과 국지규모의 대기운동이 발생하거나, 대기정체의 유형이 나타나는 중관상태에서 고농도 오존의 빈도가 많이 나타나고 있음을 알 수 있었다. 5년간의 고농도 사례일인 147일에 대하여 광양만과

여수산단의 대표적 대기질 관측지점인 중동과 삼일에서의 농도값과 이를 제외한 관측지점의 시간별 농도값의 통계분석(RMSD)과 광양만권역에서 분류된 6개의 공간분포 유형에 대한 중동과 삼일의 최고치 상관결과(UPA)를 통해 지리적인 상관보다 다양하게 변하는 이류패턴에 따라 그 상관성이 높음을 알 수 있었다. 또한 이 지역 오존의 전구물질도 지점에 따라 일변화 경향과 농도가 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과들은 광양만 권역에서의 대기 순환, 수렴, 발산 구조 등을 보다 정확하고 실제적으로 파악할 수 있게 하며, 따라서 오염 물질의 확산을 가정했을 때 오염도가 높을 우려가 있는 지역에 대한 판단 및 토의도 가능하리라 기대된다.

#### 감사의 글

이 연구는 포항산업과학연구원(RIST)의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 1) Austin J., Tran H., 1999, A characterization of the weekend-weekday behavior of ambient ozone concentrations in California, Technical Support and planning division, California air resources board, Sacramento, CA.
- 2) Bigler T. B., Engler V., Brown H. W., 1995, Analysis of an ozone episode during the San Diego air quality study: The significance of transport aloft, J. appl. Met., 34(8), 1863-1876.
- 3) 김유근, 이화운, 전병일, 홍정혜, 1996, 부산연안역의 오존 농도에 미치는 해풍의 영향, 한국환경과학회지, 5(3), 265-275.
- 4) 류찬수, 신유미, 이순환, 2004, 해안지형 복잡성이 중규모 순환장에 미치는 영향에 관한 수치실험, 한국기상학회지, 40(1), 71-86.
- 5) 이순환, 이화운, 김유근, 2002, 복잡지형에서 도시화에 따른 대기확산에 관한 수치시뮬레이션. 한국 대기환경과학회지, 18(2), 67-83.
- 6) Betchtold P., Pinty J. P., Mascart P., 1991, A numerical investigation of the influence of large-scale winds on seabreeze/inland-breeze type circulations, J. appl. Met., 30(9), 1268-1279.
- 7) Boucouvala D., Bornstein R., 2003, Analysis of transport patterns during a SCOS97-NARSTO episode,

- Atmospheric Environment, 37(2), S73-S94.
- 8) Kondo H., Gambo K., 1979, The effect of the mixing layer on the sea breeze circulation and the diffusion of pollutants associated with land-sea breezes, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 57(6), 369-575.
- 9) 김철희, 송창근, 박순웅, 1999, 종관 바람장에 따른 경인 지역에서의 지상오존 농도분포모의, *한국기상학회지*, 35(3), 441-456.
- 10) 김시완, 박순웅, 이보람, 1997, 종관기상장에 따른 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO 그리고 O<sub>3</sub> 농도의 변화, *한국기상학회지*, 33(2), 273-287.
- 11) 김병곤, 박순웅, 1993, 대기 경계층내의 바람과 기온의 연직구조에 관한 진단적 모델링, *한국기상학회지*, 29(4), 281-305.