

## 하층대기의 연직 안정도 지표를 이용한 차량 2부제의 수도권 대기오염도 저감효과 분석

### Evaluation of the Effect of Traffic Control Program on the Ambient Air Quality in Seoul Metropolitan Area Using the Lower Level Stability Index of Atmosphere

김철희<sup>1)\*</sup> · 박일수 · 이석조 · 김정수 · 홍유덕 · 한진석 · 진형아

<sup>1)</sup>부산대학교 대기과학과

국립환경연구원 대기연구부

(2003년 10월 31일 접수, 2005년 3월 30일 채택)

C.-H. Kim<sup>1)\*</sup>, I.-S. Park, S.-J. Lee, J.-S. Kim,  
Y.-D. Hong, J.-S. Han and H.-A. Jin

<sup>1)</sup>*Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University*

*Atmospheric Research Division, National Institute of Environmental Research*

(Received 31 October 2003, accepted 30 March 2005)

#### Abstract

The effects of Traffic Control Program (TCP) on the ambient urban air quality of SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, and PM<sub>10</sub> were evaluated in Seoul metropolitan area by using the lower atmospheric vertical stability index and daily mean wind speeds. The vertical stability index; temperature lapse rate between 1000 hPa and 850 hPa geopotential height fields, were used to identify daily vertical stability index during the 2002 World Cup period where traffic amount was reportedly reduced to half the number of vehicles. The indicated air quality levels of TCP days were then compared with those of the cases observed with analogous vertical stability during the recent 3 years from 2000 to 2002.

The result indicates that the effect of TCP on the primary air pollutants are found to be approximately 39%, 23%, and 20% lower for SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> and PM<sub>10</sub>, respectively. The secondary air pollutant; ozone, showed relatively smaller decreasing rate (13%) of daily mean concentrations (even increased during the night time). The comparison of daily maximum or peak concentrations reveals that the pronounced decreasing effects of TCP on the ambient air quality for both primary and secondary air pollutants, suggesting that TCP is one of the effective strategies to control peak or higher concentrations for most urban scale air pollutants in and around the Seoul metropolitan area.

**Key words :** Traffic Controlling Program (TCP), Air quality, Seoul, Metropolitan area, Vertical Stability Index of the Lower Atmosphere

\*Corresponding author

Tel : +82-(0)51-510-3687, E-mail : chkim2@pusan.ac.kr

## 1. 서 론

“서울시의 총 배출량을 절반으로 줄이면 수도권 대기질이 얼마나 개선될 수 있을까?” 이러한 질문은 모델을 이용한 민감도 실험을 통해서나 그 해답을 얻을 수 있는 질문이다. 일반적으로 1차 오염물질의 경우 저감된 배출량에 비례하여 대기오염도가 개선되는 것이 통상적인 상식이나 도시 경계에서의 오염물질의 유·출입 량에 따라 다르며, 오존과 같은 2차 오염물질의 경우는 그 상황이 더 복잡하므로 모델링을 통해 그 효과를 간접적으로 추론하는 것만이 가능할 것이다. 그러나 사용되는 모델의 입력 변수로서 배출량, 기상 요소 등 여러 불확실성이 복합적으로 내재되어 신뢰성 있는 해답을 찾기 위해서는 매우 신중한 접근이 요구된다.

한편 측정 자료를 통해 배출량 저감에 따른 대기오염도 개선 효과를 찾아내는 것 역시 현실적으로 매우 어려운데 이는 근본적으로 매일 매일의 기상 조건이 다르며 또 무엇보다도 배출량을 절반 가까이 줄일 수 있는 여건이 아니어서 정확한 배출량 저감에 따른 오염도 자료를 얻기란 거의 불가능하기 때문이다. 그러나 이동오염원의 배출량 저감 효과는 차량 2부제와 같은 교통량 저감 프로그램(Traffic Control Program; 이하 TCP)을 통해 어느 정도 그 효과를 정성적으로 살펴 볼 수는 있을 것이다. 예컨대 2002년 국민적 관심이 집중된 월드컵 기간 중에 차량에 의한 교통혼잡을 완화하고 대기오염을 저감하기 위해 시행한 차량 2부제는 사상 유례없는 많은 인원이 동참한 TCP로서 이동오염원의 배출량 저감에 따른 대기 오염도 개선 효과를 어느 때보다도 정확히 분석할 수 있는 기회가 되었다.

대기질의 진단에 있어 오염물질 농도와 기상 인자와의 연관성은 국내·외 여러 연구들을 통해 강조되어 왔다. 기상 분야별로도 매우 다양하여 혼합고와의 관계(이, 1993; 박, 1990), 대기 안정도와와의 관계(Erbrink, 1991; 김과 이, 1990), 전반적인 기상 인자와의 관련성(김 등 1994; 이, 1993; 신 등, 1992; 박 등, 1991) 등이 보고되었다. 이러한 연구들은 특정 도시의 배출량은 연중 동일하다는 가정 하에서 순전히 기상 조건에 따른 대기오염도의 변화 경향을 분석한 연구로 분류될 수 있다. 이는 특정 도시의 배출량은

도시화가 급격히 이루어지지 않는 한 그 변화 경향이 장기적이어서 결국 당일의 대기오염도는 대부분 기상 조건에 의해 좌우된다고 해도 과언이 아니기 때문이다.

그러나 TCP의 시행에 따른 대기 오염도 개선 효과 분석은 기존의 연구와는 반대의 가정, (즉 기상 조건은 동일하다는 가정) 하에서 이동 배출량 변화에 따른 대기 질의 변화를 추적함으로써 가능하다. 따라서 TCP를 시행한 당일과 이와 유사한 기상 조건을 가진 평일을 골라 두 경우의 측정된 오염물질의 농도를 비교함으로써 가능할 것이다. 이러한 접근 방법은 하나의 인자, 즉 배출량을 일정하다고 가정하고 여러 기상요소의 변화에 따른 대기오염도의 변화를 추적하는 기존의 연구와는 달리, 일정해야 할 기상 요소는 수십 수백 가지라는 점, 그리고 그 변화의 폭과 주기가 배출량보다 훨씬 다양하다는 점에서 필연적으로 기존의 연구 결과보다 낮은 신뢰도가 예견될 수 있다.

대기오염도와 관련하여 기상 상태를 분류하는 방법에는 여러 가지가 있을 수 있다. 가장 일반적인 방법으로는 대기 안정도를 들 수 있으며 대기 안정도와 오염물질의 농도 사이의 상관 관계에 대해서도 상당히 잘 알려져 있다(Benarie, 1980). 지금까지 널리 사용되는 대기 안정도 지수는 Pasquill (1975)의 안정도 지수, 연직 온도 경도(Miller and Little, 1980), 그리고 대기 난류의 강도(Karlsson, 1986; Sedefian *et al.*, 1980)를 이용하는 방법 등을 들 수 있다. 이 중 국내에도 가장 많이 사용되는 방법은 지상 정규 관측 자료를 P-G (Pasquill and Gifford) 도표에 대입하여 등급별로 안정도를 분류하는 방법이다. 그러나 P-G 도표에 의한 대기 안정도는 태양 복사량을 유일한 가열 근원으로 취급하므로 상·하층 기온의 연직 구조에 관계없이 기층의 안정도를 추정하게 되어 상층 자료의 관측에 의한 판별보다 부정확하다는 약점이 지적된다.

기상 조건의 두 번째 분류 방법으로는 대기 오염물질의 확산을 지배하는 기상 요소로서 환기율(ventilation factor)을 이용하는 방법이다(Dobbins, 1979). 환기율이란 혼합층 내에서 얼마나 빨리 수송될 수 있는지를 보여 주는 값으로 혼합층의 높이에 해당하는 혼합고에 혼합층 평균 풍속을 곱한 값에 반비례한다. 환기 효과를 계산하려면 연직으로 오염

물질이 얼마만큼 확산되는지를 결정하는 인자인 혼합고(연직 환기효과)와 혼합고내의 평균 풍속(수평 환기효과)을 곱한 인자 즉 환기지수(ventilation factor)를 계산함으로써 가능하다. 이 때 혼합고의 성장은 대기의 연직 안정도를 반영하는 중요한 기상 인자이지만 혼합고의 일변화를 계산하려면 지면에서의 현열속과 혼합층 상부의 유입과정(entrainment), 그리고 종관 이류와 침강 등 다양한 기상 인자를 고려해야 하므로(Steyn and Oke, 1980; Deardorff, 1979) 적용상 용이하지 않은 면도 적지 않다.

기상 상태 분류의 또 접근 방법으로는 종관 기상장의 시간 규모를 감안하여 매일 매일의 종관 기상 상태를 분류하는 방법이다. 이 방법은 널리 이용되지는 않았지만 최근에 와서 대기오염 패턴을 판단하는 데 매우 유망한 방법으로 부각되고 있다. 이 방법은 대기의 여러 변수(예를 들어 지오퍼텐셜 고도, 온도, 상대습도, 풍향, 풍속, 안정도)에 대해 군집 분석(cluster analysis)을 수행하여 각 군집 대기의 순환 특성을 분석할 수 있다(Davis *et al.*, 1993; Comrie *et al.*, 1992; Sanchez *et al.*, 1990). 국내에서도 이러한 종관 기상 상태에 의한 대기 오염 농도 공간 패턴을 분류한 바 있다(김 등, 1997; 이, 1997).

본 연구에서는 근본적으로는 위의 두 번째 및 세 번째를 모두 감안한 접근 방법으로서 850 hPa 지오퍼텐셜 고도를 이용하여 종관 기상 상태를 우선 구분하고 또 흔히 주위에서 구할 수 있는 미기상 및 고층 관측 자료를 이용하여 하층 대기의 일평균 풍속(수평 환기효과와 연관)과 혼합고와 유사한 개념의 하층 연직 대기안정도(연직 환기효과와 연관)를 계산한 다음 TCP 시행일과 유사한 종관기상 상태와 환기 지수를 가진 날을 선정하여 그 날의 오염도를 TCP 시행일과 비교하고자 한다. 이러한 연구는 국제 행사 때마다 시행되는 TCP를 단순한 교통 혼잡 완화 측면을 넘어 오염원 저감이라는 차원에서 대기 오염도 개선 효과를 평가하는 데에도 적용될 수 있을 것이다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1 자료

월드컵 기간 중 강제 차량 2부제가 시행된 5월 30일~31일, 6월 12일~13일, 24일~25일 총 6일에 대

해 각 날의 대기오염도 저감효과를 살펴보기 위해 사용된 자료는 환경부 및 지자체 관할 3년간(1999년~2002년)의 서울을 포함한 매시간 수도권 지역 주요 대기 오염물질(SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, 그리고 O<sub>3</sub>) 농도 자료를 사용하였다. 또 한반도 상공의 종관 기상 상태를 분류하기 위하여 기상청 850 hPa(00UTC) 일기도를 이용하였다.

연직 대기 안정도를 계산하기 위해 기상청에서 매달 발간하는 오산지역 고층 기상관측 자료를 이용하였고, 수평 환기 효과를 분류하기 위해 3년간의 매시간 관측되는 지상 기상관측 자료 중 일 평균풍속과 일평균 기온(기상청 website의 요소별 일 값)을 사용하였다. 또 이차 오염 물질인 오존의 경우 광화학 반응의 주요 영향 인자를 고려하기 위해 일평균 기온(및 당일 일최고 기온)을 참고로 사용하였다.

### 2.2 연구 방법

대기 오염물질의 농도에 직접적으로 영향을 미치는 국지 기상 현상(예: 해륙풍, 산곡풍 등)은 종관 바람의 방향과 세기에 의해서 달라진다. 특히 본 연구처럼 일 평균 풍속을 이용하여 수평 환기효과를 계산할 경우 종관 바람의 풍향이 매우 중요한 인자가 되므로 특정한 날의 종관 기상 패턴을 분류하는 것이 선행되어야 한다. 종관 바람 패턴을 분류하기 위해서 상층 850 hPa 일기도 상에서 남한 지역의 중앙의 한 지점(37°N, 128°E)을 중심으로 동서 방향과 남북 방향으로 위·경도 각각 5°지점의 지오퍼텐셜 고도차(그림 1의 A, B 지점과 C, D 지점)를 이용하여(Park and Yoon, 1991) 다음과 같이 동서 및 남북 성분의 지균풍 풍속을 계산하였다. 지균풍의 동서, 남북 성분은 각각

$$u_g = \left(-\frac{g}{f}\right) \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right)$$

$$v_g = \left(\frac{g}{f}\right) \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)$$

로 주어진다. 지균풍 풍향은  $\Theta = \tan^{-1}(u_g/v_g)$ 로 구할 수 있고, 지균풍 풍속은  $|V_g| = (u_g^2 + v_g^2)^{1/2}$ 로 계산된다.

여기서  $f$ 는 코리올리 매개변수로 37°N에서의 값이고,  $g$ 는 중력 가속도를, 그리고  $\Phi$ 는 00UTC 850 hPa 면의 지오퍼텐셜 고도이다.

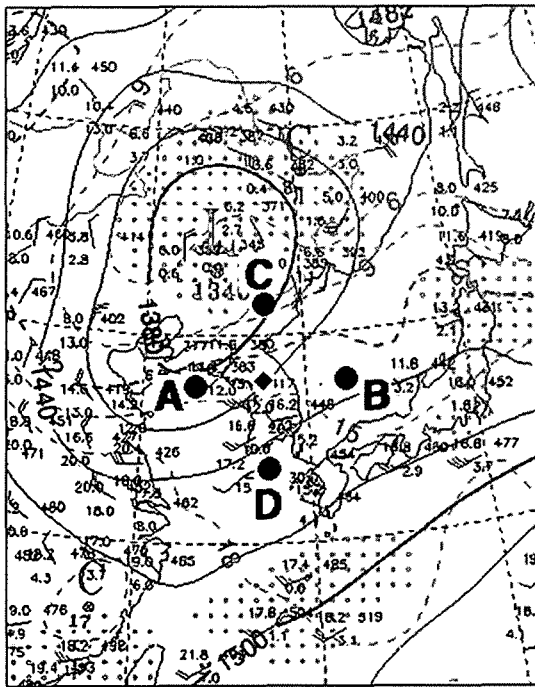


Fig. 1. A 850 hPa chart. The letters A, B, C, D indicate the locations (●) where the geopotential heights are read to compute the geostrophic wind at the center (◆).

대기의 연직 환기 효과와 연관되는 인자로서 일변화를 하는 혼합고 대신 하루를 하나의 인자로 표현할 수 있는 방법으로서 매일 관측되는 고층(850 hPa, 1000 hPa) 기온 자료를 이용하여 하층의 연직 대기안정도를 이용하였다(변 등, 1995). 즉 1000 hPa 공기괴를 단일 과정을 통해 850 hPa까지 상승시킨 다음 이것(T1)과 본래의 850 hPa의 기온(T2)과의 차이에 의해 하층 대기의 연직 안정도가 결정된다는 개념이다.

$$S = T2 - T1$$

로 정의할 수 있다. 이때 S는 SSI(Showalter Stability Index)와 유사하나 SSI보다 더 하층을 대상으로 삼는 것으로서 양의 값은 음의 부력을 의미하며 값이 클수록 안정함을, 그리고 음의 절대치가 클수록 불안정해지는 작용이 강해짐을 의미한다. 이상의 방법으로 과거 3년간(2000~2002년) 오산 지역의 상층 기

상 관측 자료를 통해 구한 S를 이용하고 이 중 각각의 TCP 시행일과 유사한 하층 안정도를 가진 날을 선정하여 그 오염도를 비교, 분석하였다.

그리고 지상 바람에 의한 수송 효과는 혼합층까지의 평균 풍속 대신 기상청 웹사이트에서 쉽게 구할 수 있는 요소별 일값(지상 평균 풍속)을 주요 기상인자 사용하였다. 또 오존과 같은 광화학 반응이 중요한 오염물의 보다 정확한 분석을 위해 일 평균기온을 고려하였고, TCP 시행일에 일부 강수가 관측됨에 따라 그 세정 효과가 유사하도록 일 강수량을 참고하여 비교 대상 일을 최종 선정하였다. 본 연구의 비교 대상일 선정 방법을 요약하면 다음과 같다.

- ① TCP 기간의 850 hPa의 지균풍향·풍속에 따른 종관 분류
- ② TCP 기간의 하층 대기 안정도 및 지상 일평균 풍속 산출
- ③ 위의 ①, ② 조건과 유사한 날 선정(2000년~2002년)
- ④ 선정된 날에서 관측된 기온, 강수량의 차이가 큰 날 제외

### 3. 자동차 2부제 및 사업장 관리 시행 내용

2002년 월드컵 기간 중 배출량 감소와 관련된 주요 시행 내용은 차량 2부제와 사업장 관리이다. 이 중 차량 2부제의 경우 서울을 포함한 수도권은 일일 교통생활권이라는 점을 감안하여 수도권 공동으로 추진되었다. 수도권 개최도시(서울, 인천, 수원)에서 각각 경기가 열리는 날과 그 전날에 해당도시에서는 강제 차량 2부제를 시행하고, 수도권의 다른 도시 및 지역에서는 자율 차량 2부제를 시행(서울에서 경기 개최시 서울은 강제 2부제 인천, 수원, 경기도는 자율 2부제 시행)하게 되었다. 서울지역의 경우 대기오염 저감을 위해 10인 이하 비사업용 승용·승합차 뿐만 아니라 3.5톤 이상의 비사업용 화물차를 포함하여 시행(10,157대)하였으며, 시행 시간은 15시간(07:00~22:00)이었다(환경부, 2002). 사업장관리는 월드컵 기간 중 대형배출시설 가동률(조업률) 조정·억제 및 특별 단속, 홍보 등을 통하여 VOC, 미세먼지 등 오염물질 배출량저감을 위한 다양한 방법을

**Table 1. The surface meteorological conditions for the period of Traffic Control Program enforced over the Seoul metropolitan area.**

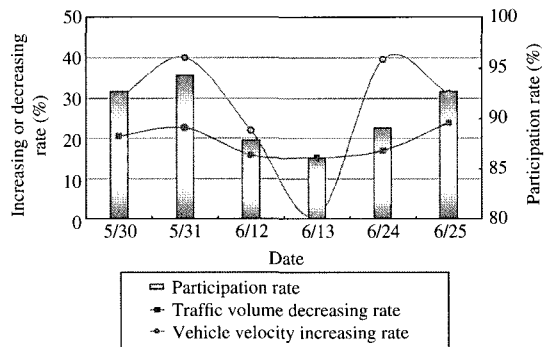
Case	Date	TCP time	Stability (S) (°C)	Geostrophic Wind (850 hPa)		Surface wind speed (m/s)	Relative humidity (%)	Mean Temp. (°C)	Max. Temp. (°C)	recipitation (mm)
				Speed (m/s)	Direction (Degree)					
Case 1	30/May	06:00~18:00	9.0	8.6	262 (W)	3.9	78	19.0	24.5	4.0
Case 2	31/May	06:00~18:00	9.0	5.1	308 (NW)	3.0	79	19.5	25.7	1.5
Case 3	12/Jun.	06:00~18:00	6.6	8.7	240 (SW)	0.9	71	18.6	22.9	15.5
Case 4	13/Jun.	06:00~18:00	-4.3	5.2	256 (W)	3.3	70	19.8	24.4	-
Case 5	24/Jun.	06:00~18:00	5.4	4.7	122 (SE)	2.7	76	16.4	17.7	6.0
Case 6	25/Jun.	06:00~18:00	3.3	4.9	6.7 (NE)	2.0	49	19.8	25.0	-

강구하였다.

본 연구에서는 총 차량 2부제 (자율+강제 2부제) 기간이 15일에 해당하지만 참여율이 저조한 자율 차량 2부제 기간은 제외하고 강제 차량 2부제 기간인 6일에 대해 집중적으로 그 저감 효과를 살펴보고자 한다. 표 1에 강제 차량 2부제가 시행된 날과 그 날의 기상 조건을 나타내었다.

서울지역의 자동차 2부제 기간인 6일 동안의 일차별 참여율을 살펴보면 월드컵 개막식이 열린 5월 31일(시행 둘째 날)에 가장 높은 94.3%의 참여율을 나타냈으며, 지방선거일인 6월 13일에는 노약자 등 거동불편자의 투표를 위해 운행하는 차량에 대한 단속 제외로 제일 낮은 87.9%를 보였으며, 2부제가 시행된 총 6일 중 1, 2일째와 6일째의 참여율이 90%대 이상이었고, 3, 4, 5일째의 경우 90% 미만의 참여율을 나타내었다(그림 2).

특히 사례 3, 4일째가 낮은 이유는 1, 2일째로부터 많은 기간이 떨어져 있어 홍보효과가 감소되었을 뿐만 아니라 지방선거 투표와 관련된 2부제 시행유보논란에 따른 혼선, 그리고 단속제외대상 추가(노약자 등 거동불편자) 등에 따른 것으로 보이나 시행 5, 6일째의 경우 2부제에 대한 대대적인 홍보와 우리나라 월드컵 팀의 선전에 따라 월드컵에 대한 관심이 고조되면서 다시 참여율이 대폭 증가하였다. 이 때 사업장 가동율 조정 등에 대한 참여율은 서울 99.3%, 인천과 수원이 95.3%로 나타났다. 또 교통량 감소에 따른 통행속도의 변화는 시행 기간 중 2일째인 5월 31일의 경우(참여율 94.3%, 교통량 22.6% 감소) 통행속도도 가장 높은 40.0% 증가율을 보였으며 6일 전체 평균적으로 볼 때 서울지역의 차량 2부제



**Fig. 2. The participation rate of Traffic Control Program and its associated traffic volume factors**

시행기간 중 교통량 변화는 평균 19.2% 감소하였으며 통행속도변화는 평균 32.1% 증가한 것으로 나타났다(환경부, 2002).

## 4. 결과 및 토의

### 4.1 사례별 종관 기상 분류 및 특징

TCP 기간의 각 사례별 850hPa 지균폭향, 풍속, 연직 대기안정도, 평균 풍속뿐만 아니라 기온, 그리고 강수의 유무 등을 표 1에 수록하였다. 또 연직 대기안정도의 전반적인 이해를 위해 10년간(1980~1989) 안정도별 월별 분포 특성 즉 연직 안정도 지수의 평균, 표준 편차, 불안정일의 안정도 지수의 평균, 불안정일의 발생횟수, 안정일의 안정도 지수의 평균, 안정일의 발생 횟수의 월별 분포(변 등, 1995)를 참고로 표 2에 요약하였다. 표 2에 의하면 한반도 중

**Table 2.** Monthly data associated with vertical stability index of the lower atmosphere over Osan (from Byun *et al.*, 1995).

Month	Mean (m) (°C)	Standard Deviation ( $\sigma$ ) (°C)	Mean of less than ( $m-\sigma$ ) (°C)	Tot.days less than ( $m-\sigma$ ) (°C)	Mean of greater than ( $m+\sigma$ ) (°C)	Tot. days greater than ( $m+\sigma$ ) (°C)
Jan.	6.68	3.17	2.47	54	11.90	48
Feb.	6.14	2.83	2.13	48	10.58	48
Mar.	5.75	2.64	1.89	52	9.87	50
Apr.	6.47	3.26	1.78	46	11.52	41
May	5.64	3.25	0.92	49	10.50	50
Jun.	3.97	2.62	0.55	45	8.18	38
Jul.	1.88	2.00	-	0	5.40	31
Aug.	1.77	1.89	-	0	5.05	42
Sep.	3.12	2.83	0.04	45	8.40	39
Oct.	4.73	2.78	0.04	45	8.40	39
Nov.	5.15	3.05	1.14	51	10.00	52
Dec.	6.03	3.75	1.23	52	11.87	56

부 지방의 하층 대기(1000 hPa-850 hPa)의 연직 안정도는 7, 8월이 가장 불안정하고 다른 월로 갈수록 안정한 경향을 보였고 표준 편차 또한 같은 경향을 보여 겨울철이 여름철보다 더 안정함을 보여준다.

각 사례별 종관 기상 패턴의 특징을 살펴보기 위해 TCP 기간 00UTC의 850 hPa 지오퍼텐셜 고도장을 그림 3에 나타내었다. Case 1(2002년 5월 30일)에서는 북만주근처에 형성된 저기압이 점차 남동진하며 우리나라의 850 hPa 지균폭풍이 비교적 강한 서풍계열(262°)의 종관 기상 패턴을 보였으며 다음날인 Case 2(2002년 5월 31일)까지 지균폭풍의 변화가 크지 않은 유사한 패턴을 보였다. Case 2에서는 Case 1에 비해 만주 지방에 위치한 저기압 중심이 약화되면서 남동진하여 지균폭풍이 약 5 m/s로 약화되었고 지균폭풍은 서풍계열에서 북서풍(308°)으로 소폭 순전(veering)하였다(그림 3). Case 3과 4는 만주 지방의 저기압 중심이 Case 1과 2에 비해 훨씬 남하하여 한반도 바로 위 만주 지역에 중심을 두어 지균폭풍이 남서풍 계열을 보였고 Case 4는 Case 3에서 저기압이 더 남하하여 북한 일부지역까지 저기압 중심이 걸쳐 있었다(그림 3). 따라서 Case 3~Case 4에서는 저기압 중심이 남진에 따라 850 hPa에서 서풍 혹은 남서풍 계열(240°~256°)의 지균폭풍이 지배하였다. 특히 Case 4에서는 우리나라 상공의 등압선 간격이 Case 3에 비해 상대적으로 소하여 지균폭풍을 유지하면서 지균폭풍이 다소 약화된 사례로 볼 수 있다.

Case 5와 6은 비교적 양량이 적고 약한 풍속의 종

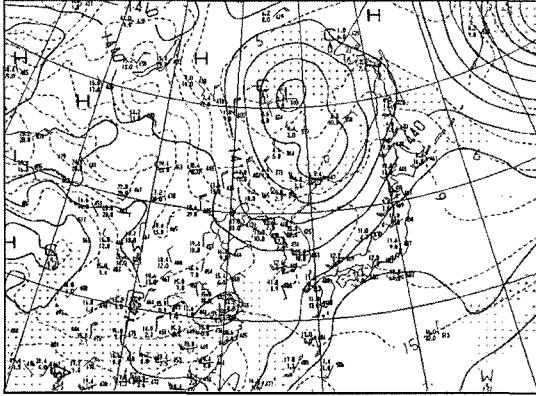
관장이 형성된 사례로서 비교적 약한 이동성 고기압의 중심이 중국 대륙의 북동 혹은 동쪽에 위치하였고 이 중심이 서서히 동진하며 한반도로 이동하는 패턴이다. 이동한 이동성 고기압 및 황해상의 약한 저기압으로 한반도 지균폭풍은 Case 5에서는 동풍 계열(67°~122°)로, Case 6에서는 북동풍계열로 바뀌었다. 그러나 등압선 간격은 두 사례 모두 소하여 5 m/s 이하의 지균폭풍을 보여(그림 3, 표 1) 낮은 환기효과로 지표농도가 높을 가능성이 큰 패턴임을 시사해 준다.

#### 4.2 사례별 비교 대상일 선정

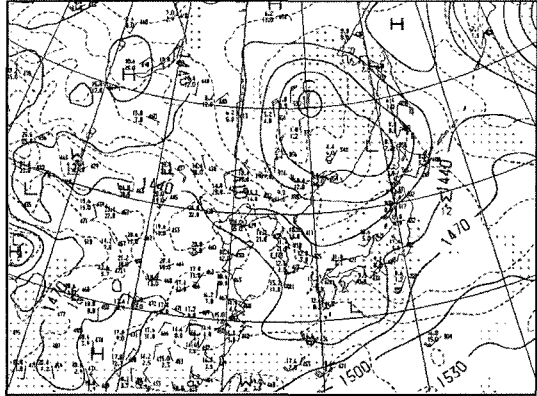
이상의 각 사례별 지균폭풍과 풍속으로 살펴본 850 hPa 종관기상 패턴, 매일의 연직 대기 안정도, 일평균 풍속을 이용하여 2000년~2002년 여름철 중에서 TCP 기간과 유사한 기상 조건을 가진 날 모두 선정하였다. 선정된 날 중에서 오존 농도의 생성과정에 큰 영향을 미치는 기상 요소인 일평균 및 일 최고기온을 고려하였고(예. 기온차가 3°C 이상의 날은 제외), 차량 2부제 기간에 일부 강수가 관측됨에 따라 그 세정 효과가 유사하도록 일 강수량을 참고하여(예. 일강수량의 차가 50 mm 이상인 날은 제외시킴) 비교 대상 일을 최종 선정하여 표 3에 모두 열거하였다.

결국 최근 3년간 총 일수 중 비슷한 종관 기상상태 하에서 두 가지 기상 인자, 즉 하층 대기 안정도(S), 일평균 풍속을 열거하여 그 분포를 파악하고 각

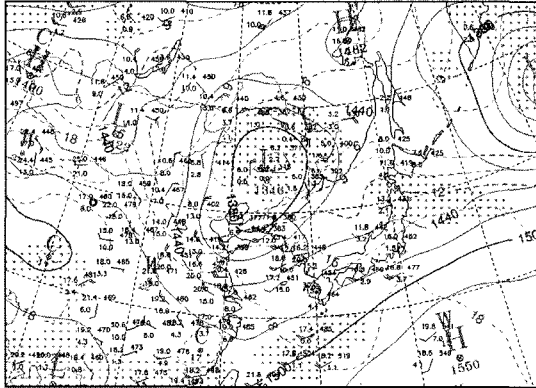
a) Case 1 : 2002/05/30



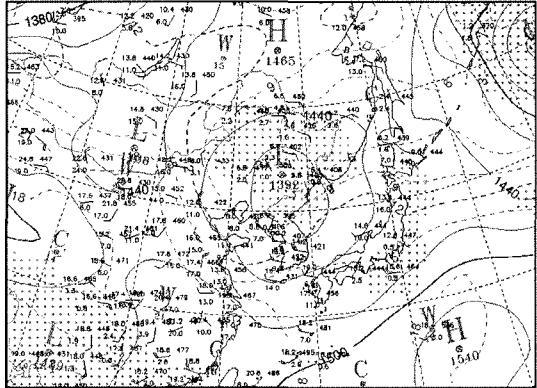
b) Case 2 : 2002/05/31



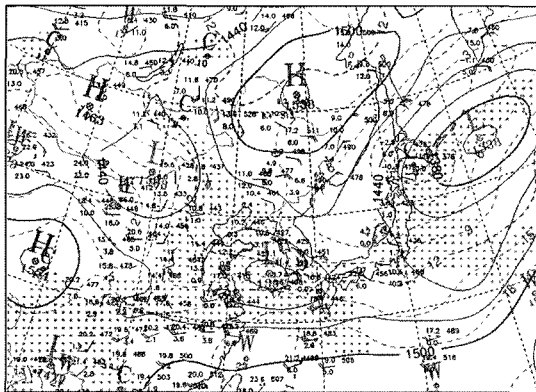
c) Case 3 : 2002/06/12



d) Case 4 : 2002/06/13



e) Case 5 : 2002/06/24



f) Case 6 : 2002/06/25

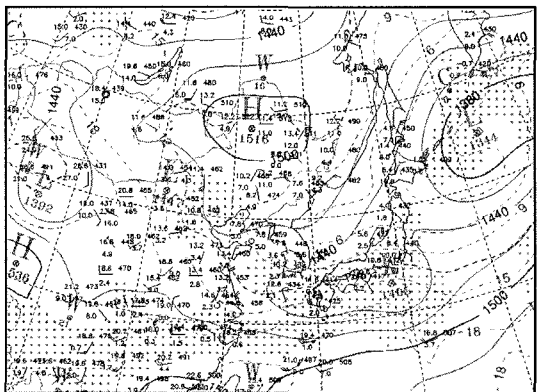


Fig. 3. The 850 hpa 00UTC weather charts for six cases (from Case 1 to Case 6) when the TCP (Traffic Control program)-enforced days.

**Table 3. List of selected days for analyzing the effect of Traffic Control Program and the summary of their meteorological conditions.**

Case	Date	Stability (S)(°C)	Wind speed (m/s)	Cloud (1/10)	Precipitation (mm)	Temp. (°C)	Max Temp. (°C)	O/X <sup>1)</sup>	Geostrophic (850 hPa)		O/X <sup>2)</sup>	O/X <sup>3)</sup> (selected day)
									Wind Speed (m/s)	Direction (Degree)		
Case 1	2002 5 30	9	3.8	9.3	4.0	19.1	24.5	-	8.6	262 (W)	-	-
	2001 5 15	8.4	2.9	7.1	0.7	16.1	19.0	○	8.1	261 (W)	○	●
	2001 5 18	9.9	4.1	9.8	0.1	17.9	20.1	○	9.8	247 (SW)	○	●
	2001 5 30	7.5	2.9	10.0	-	19.5	21.5	○	3.9	230 (SW)	○	●
	2001 6 30	11.9	3.0	10.0	53.9	21.3	23.5	○	10.7	249 (W)	○	●
	Average	9.5	3.2	9.2	10.6	18.7	21.7	-	8.1	-	-	-
Case 2	2002 5 31	9.0	3.1	7.1	1.5	19.4	25.7	-	5.1	308 (NW)	-	-
	2000 6 7	5.4	2.8	7.8	-	22.4	27.0	○	7.2	257 (W)	○	●
	2001 5 15	8.4	2.9	7.1	0.7	16.1	19.0	×	8.1	265 (W)	○	×
	2001 5 25	9.3	2.5	6.6	0.0	21.4	26.9	○	4.7	286 (W)	○	●
	2001 5 30	7.5	2.9	10.0	-	19.5	21.5	○	3.9	230 (SW)	○	●
	2002 5 30	9.0	3.8	9.3	4.0	19.1	24.5	○	8.3	221 (SW)	○	●
	2002 6 1	7.1	2.4	6.0	0.2	20.2	24.8	○	6.7	304 (NW)	○	●
Average	7.8	2.9	7.8	1.3	19.8	24.9	-	6.5	-	-	-	
Case 3	2002 6 12	6.6	0.8	8.4	15.5	18.6	22.9	-	8.7	240 (SW)	-	-
	2000 6 9	6.2	1.5	5.4	-	20.1	27.1	○	4.0	338 (N)	○	●
	2001 5 22	8.0	1.3	9.3	7.9	20.3	24.8	○	6.0	90 (E)	×	×
	2001 6 16	6.2	1.1	8.1	0.0	21.9	25.1	○	4.0	219 (SW)	○	●
	2001 6 19	9.0	0.3	6.1	0.5	21.7	26.8	○	4.0	221 (SW)	○	●
	2001 6 24	9.3	0.6	9.5	7.8	20.6	22.5	○	5.9	230 (SW)	○	●
Average	7.7	1.0	7.7	5.3	20.9	24.9	-	4.8	-	-	-	
Case 4	2002 6 13	-4.3	3.3	4.1	-	19.7	24.4	-	5.2	256 (W)	-	-
	2000 5 24	1.6	2.7	3.6	-	21.9	27.4	○	6.5	293 (NW)	○	●
	2000 5 28	1.6	3.5	3.4	-	18.8	23.7	○	7.8	310 (NW)	○	●
	2000 6 6	2.9	3	1.8	-	22.3	28.3	○	4.8	321 (NW)	○	●
Average	2.0	3.1	2.9	-	21.0	26.0	-	6.4	-	-	-	
Case 5	2002 6 24	5.4	2.7	9.6	6.0	16.4	17.7	-	4.7	122 (SE)	-	-
	2000 5 18	1.6	2.4	7.9	-	16.9	23.8	○	1.9	212 (SW)	○	●
	2000 5 23	2.8	2.3	7.5	-	19.3	25.1	×	6.5	276 (W)	×	×
	2000 5 27	7.2	2.1	9.9	13.3	18.0	19.1	○	6.4	193 (S)	○	●
	2001 5 15	8.4	2.9	7.1	0.7	16.1	19.0	○	8.1	261 (W)	×	×
	2002 5 15	7.6	2.7	10.0	8.0	18.1	22.0	○	9.0	134 (SE)	○	●
	2002 5 16	4.2	3.2	9.9	3.5	14.9	17.3	○	6.4	152 (SE)	○	●
	2002 6 23	8.2	2.1	10.0	1.5	18.1	21.3	○	1.6	219 (SW)	×	×
Average	5.7	2.5	8.9	5.5	17.3	19.8	-	5.7	-	-	-	
Case 6	2002 6 25	3.3	2.0	4.1	-	19.8	25.0	-	4.9	67 (NE)	-	-
	2000 5 22	3.5	2.2	6.4	-	20.2	25.5	○	7.0	265 (W)	×	×
	2000 5 29	1.6	1.9	2.4	-	20.7	27.0	○	7.9	298 (NW)	×	×
	2000 5 31	0.5	2.4	4.8	-	19.9	25.7	○	7.6	81 (E)	○	●
	2000 6 1	4.3	2.2	5.4	0.3	20.4	26.3	○	5.2	299 (NW)	×	×
	2000 6 2	0.8	1.8	5.9	-	21.8	28.3	○	2.8	238 (SW)	×	×
	2000 6 9	6.2	1.5	5.4	-	20.1	27.1	○	4.0	338 (N)	○	●
	2002 6 26	6.7	1.5	2.1	-	20.9	27.7	○	3.3	23 (NE)	○	●
Average	3.4	1.9	4.6	0.15	20.6	26.6	-	5.4	-	-	-	

※ The marks of O/X<sup>1)</sup> and O/X<sup>2)</sup> indicate acceptable (○) or discarded (×), respectively. The discarded cases are ascribed to the references denoted by bold. The mark O/X<sup>3)</sup> is the final indication resultant to the accepted (●)/discarded (×) cases for this study.

인자가 TCP 시행일과 가장 유사한 기상 조건을 가진 날들을 선정한 다음 이 중 광화학 오존 농도 비교를 위해 일평균 기온이 현저히 차이가 나거나 강수에 의한 세정 효과의 차이가 클 것으로 판단되는



날을 제외시킴으로써 최종 비교 대상일을 선정하였다. 그 결과 각 사례별 선정된 날이 TCP 시행일과 얼마나 유사한지 상대적으로 살펴보기 위하여 K-평균 군집 분류 방법(K-mean Divisive Cluster Analysis)에서 사용하는 유클리드 거리(군집 중심으로부터의 분산)를 계산하여 각 사례별 일치도를 상대적으로

비교하였다. 유클리드 거리( $d_i = \sum_{j=0}^N (X_{i,j} - M_j)^2$ )는 어느

한 군집에 속한  $i$  번째 사례의  $j$  번째 변수인  $X_{i,j}$ 는  $j$  번째 변수의 중심값인  $M_j$ 와 비교하여 얼마나 거리가 짧은가를  $N$ 개의 기상 변수에 대해 계산하는 것이다. 이 때  $d$ 가 짧을수록 해당 군집과 유사하게 나타나게 된다. 기상 변수의 갯수인  $N$ 은 계절과 무관하게 공

통적으로 관계되는 기상변수를 모두 사용하여야 하나(이, 1997) 본 연구에서는 대기오염도를 크게 좌우하는 확산 및 수송에 중요한 두 가지 기상 변수(연직 대기안정도 및 일평균 지표풍속)만을 이용하여 각 사례별 유클리드 거리의 평균치를 구하여 각 사례별 상대적인 차이를 살펴보았다.

그 결과 각 선정 사례일(표 3)로부터의 분산에 해당하는 유클리드 거리의 평균은 각각 Case 1 (3.69), Case 2 (3.46), Case 3 (3.20), Case 4 (40.01), Case 5 (7.12), 그리고 Case 6 (5.49)으로서 연직 대기안정도 와 일평균 풍속만으로 평가해 볼 때 Case 3의 경우가 가장 유사한 기상 조건이, 그리고 Case 4가 상대적으로 그 일치도가 떨어지는 기상 조건이 선정되었음을 암시한다. 특히 Case 4는 6월 대기안정도의 통

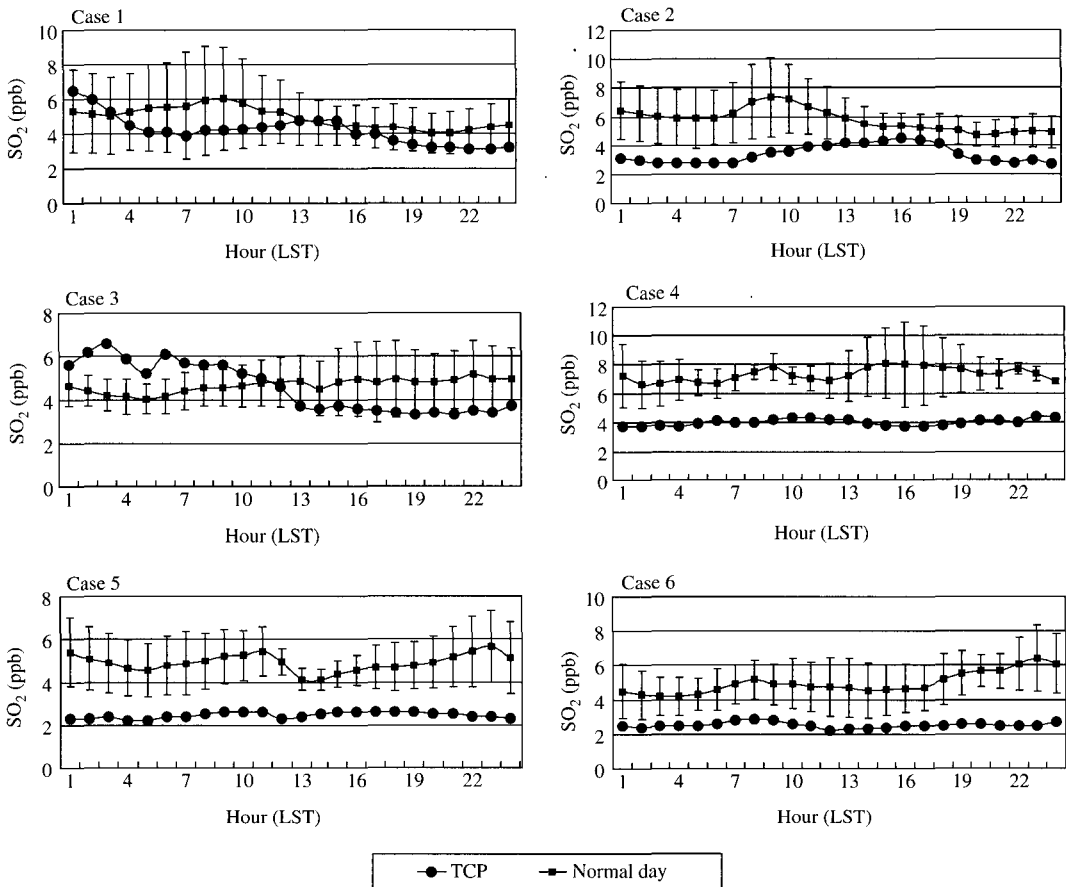


Fig. 4. Diurnal variations of SO<sub>2</sub> concentrations from Case 1 to Case 6 for the period of Traffic Control Program compared with those for the days with similar meteorological condition.

계에서 볼 때  $m-\sigma$  ( $=-0.12^{\circ}\text{C}$ ) 이하의 사례가 10년 간 한번도 발생하지 않은 반면 본 연구의 Case 4는  $-4.3^{\circ}\text{C}$ 로서 매우 비 이상적으로 불안정한 날로 분류되므로 결국 오염도 저감 분석의 신뢰도가 가장 낮을 수 있음을 암시한다(여기서  $m$ 과  $\sigma$ 는 연직 대기안정도 지수의 평균과 표준 편차를 각각 의미한다). 따라서 Case 4의 경우 향후 유사한 기상 조건의 발생일에 따른 오염 농도 자료의 축적이 이루어져야 보다 정확한 대기 오염 저감 분석이 가능할 것으로 판단된다.

한편 대기안정도 및 지상 평균 풍속과는 별도로 강수의 유무는 대기오염물질의 세정 효과에 기여하므로 그 지역의 대기 오염도에 매우 중요하게 작용하게 된다. 뿐만 아니라 강수의 형태, 강수율(precipitation rate) 등을 복합적으로 고려하려면 대기오염도

와 연관되는 기상 조건의 분류는 더욱 복잡해진다. 이런 점에서 평균 일강수량이 10 mm 이상이 관측된 Case 3의 경우와 강수량이 6.0 mm로 관측된 Case 5의 경우도 강수효과를 정확히 알 수 없어 분석결과 의 불확실성이 상대적으로 커질 수 있음을 암시해 준다. 이상을 종합하면 Case 1 보다는 Case 2의 경우가, 그리고 Case 3~5 보다는 Case 6의 경우가 TCP 참여율(그림 2)뿐만 아니라 비교 대상 일을 선정하는 측면에서도 상대적으로 더 유리한 분석 결과를 도출될 것으로 판단된다.

### 4.3 차량 2부제기간 수도권 대기 오염도 저감 효과

(그림 4)~(그림 7)에  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{PM}_{10}$ 에 대한 TCP 시행일과 각 사례별 선정된 비교대상일의 농도

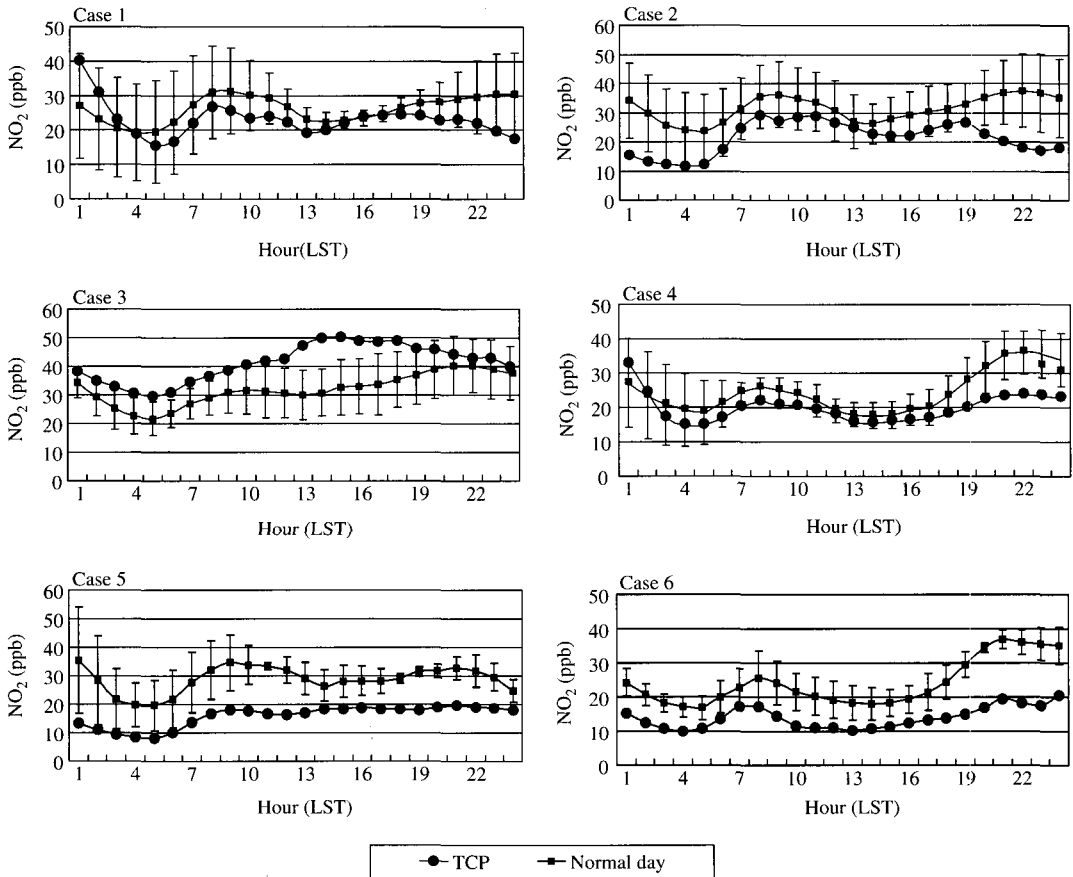


Fig. 5. The same as Fig. 2, except for  $\text{NO}_2$ .

및 표준 편차의 일변화를 나타내었다. SO<sub>2</sub>의 경우(그림 4) Case 1과 Case 3을 제외하고는 모두 TCP 시행에 의한 대기오염도 저감효과가 뚜렷하였고 그 저감 효과도 Case 2, 4, 6에서 평균 약 38% 이상 낮게 나타났다. Case 1과 Case 3에서도 대기오염도 저감 효과를 어느 정도 확인할 수 있는데 Case 1과 Case 3의 바로 전날 야간의 높은 농도가 사례 당일 새벽의 높은 농도로 나타났다. 그러나 Case 1에서는 오전부터, Case 3에서는 오후부터 SO<sub>2</sub>농도가 낮아지기 시작하였다. 특히 Case 3에서는 TCP 시행일 오전에는 평일에 비해 오히려 높은 농도를 보였으나 오전 10시 경부터 농도가 낮아져서 정오경부터 평일보다 낮은 농도를 보였다. 그러나 Case 1과 Case 3을 제외한 모든 사례에서는 모든 시간대에서 뚜렷한 저감효과를 보였다.

NO<sub>2</sub>의 경우(그림 5)도 Case 1과 Case 3에서 그 양상이 다르게 나타났다. Case 3에서는 오히려 평일보다 높게(약 28%) 나타났고 Case 1에서도 저감효과가 낮아(11.5%) 다른 사례의 평균 감소율(약 33%)의 절반 이하로 나타났다. 전반적으로 TCP 시행 첫째날인 Case 1, 3, 4에서는 TCP 시행일 새벽(1~3시경) NO<sub>2</sub> 농도가 평일보다 오히려 높게 나타났으며 특히 Case 4는 늦은 오후부터 뚜렷한 저감 효과를 발견할 수 있었다.

오존의 경우(그림 6)는 사례별 그 저감 효과가 더 복잡하게 나타났는데 사례별 전체 평균 저감율이 약 12.5%정도로 다른 오염물에 비해 낮았고 Case 1과 2에서는 오히려 측정 농도가 증가하여 대기질을 악화시키는 결과로 나타났다. 그러나 오존의 저감 효과의 특징은 주간의 오존 최대 농도는 상대적으로 낮

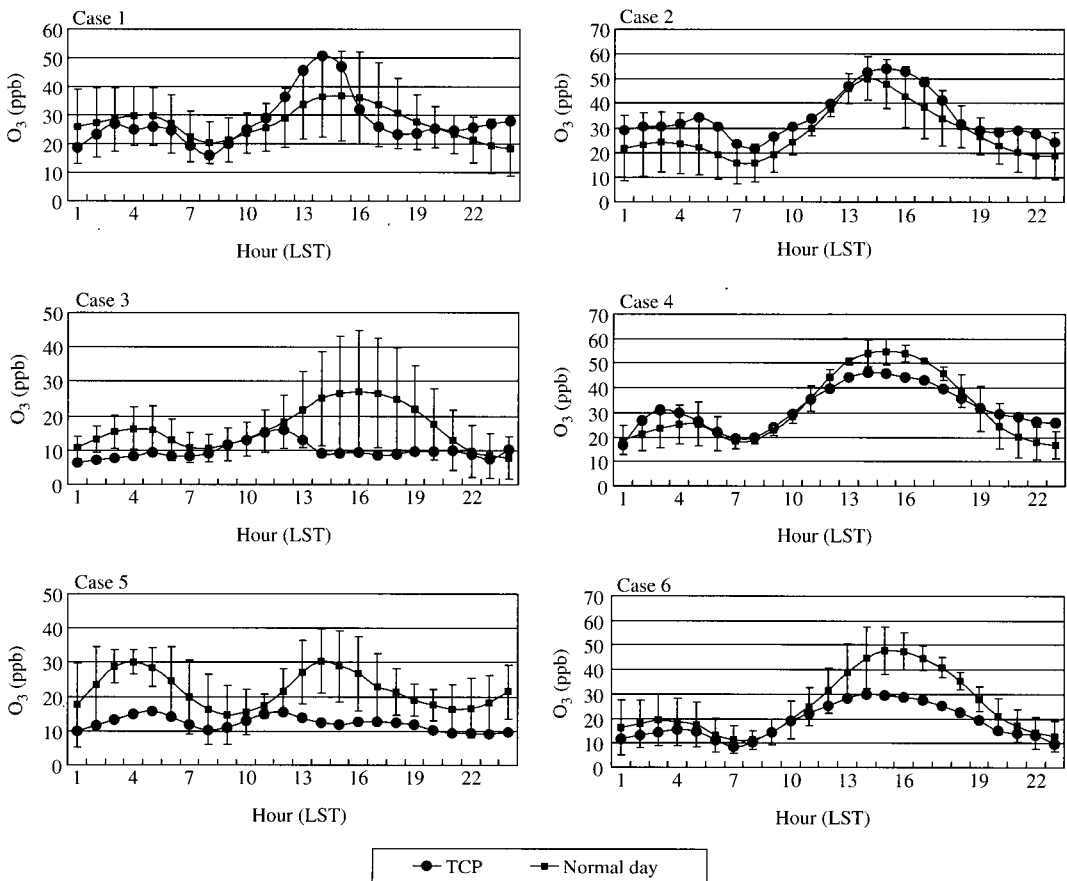


Fig. 6. The same as Fig. 2, except for O<sub>3</sub>.

은 농도를 보인 반면 야간에서는 오히려 증가하는 양상을 Case 4와 6에서 확인할 수 있다. Case 1에서는 NO<sub>2</sub>와 SO<sub>2</sub>에서 확인하였듯이 그 저감효과가 오후에 나타나기 시작함에 따라 오존의 최고치가 나타난 후 급격히 오존이 감소하는 경향을 보인 반면 야간에는 오히려 오존 농도가 증가하여 그 다음 날인 Case 2의 새벽의 높은 농도로 이어졌다. 이렇게 오존 농도가 최대인 시점에서 급격히 감소하는 경향은 Case 3과 5에서도 확인되었고 최대 오존 농도가 나타나는 시점 또한 평일에 비해 약 2시간 가량 일찍 나타나는 양상을 보였다. 반면 TCP 시행 둘째 날 (Case 2, 4 및 6)의 새벽 시간 secondary peak값은 평일보다 크게, 그리고 낮 시간의 최대 농도 값은 작게 나타나는 양상을 보였다.

PM<sub>10</sub>의 경우(그림 7) TCP 기간의 일변화는 평일

과 비교하여 전혀 다른 패턴을 보였다. 평균 약 21%의 오염도 감소율을 가져 왔으나 Case 5와 Case 6에서만 그 저감효과가 탁월할 뿐 Case 1~Case 4에서는 그 저감효과를 찾아보기가 어려웠다. 그러나 Case 3에서는 주간의 상대적으로 낮은 오염도는 야간에 급격히 증가하여 120 µg/m<sup>3</sup>을 보여 다음날인 Case 4의 오전 농도를 높인 반면 Case 4에서는 오전부터 점차 감소하여 오후에는 그 저감효과가 가시적으로 나타나고 있어 바로 전날의 오염도와 연관성을 잘 시사해 주었다.

#### 4. 4 토의

이상의 네 가지 오염물질인 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>의 TCP 시행일과 평일을 비교하여 그 저감효과를 간략히 살펴보았다. SO<sub>2</sub>와 NO<sub>2</sub>의 경우 TCP 기간이 이를

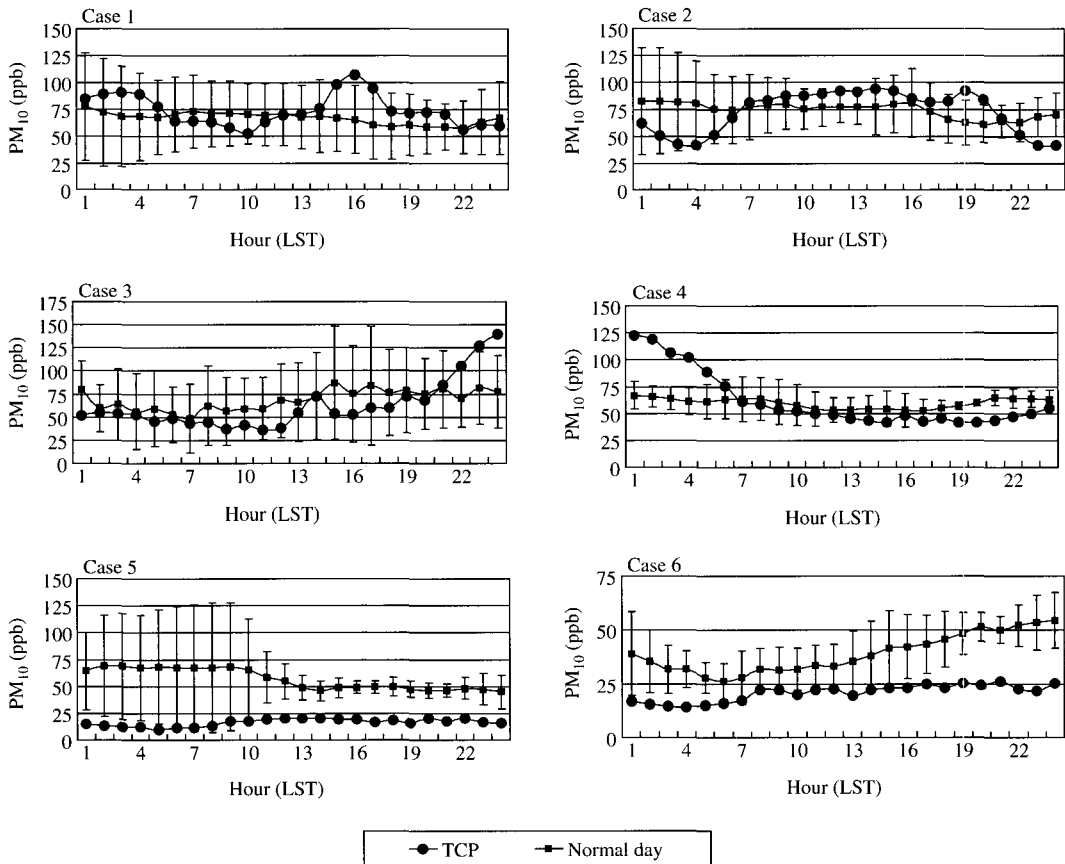


Fig. 7. The same as Fig. 2, except for PM<sub>10</sub>.

연속인 점을 감안해 볼 때 시행 첫날인 Case, 1, 3, 5의 경우보다 Case 2, 4, 6에서 보다 탁월한 대기오염도 저감효과가 나타났는데(그림 4, 그림 5) 이것은 전날 야간의 대기 오염도가 다음날인 TCP 기간의 새벽 오염도에 영향을 준 것으로 판단된다. 예를 들어 Case 4의 NO<sub>2</sub>에서 보는 바와 같이 전날인 Case 3에서 그 저감 효과가 없어 Case 4의 새벽에까지 영향을 준 반면 Case 1의 저감효과로 인한 야간의 낮은 농도는 다음 날인 Case 2의 저감 효과에 큰 영향을 준 것으로 나타났다. 특히 Case 3의 경우 예년에 비해 NO<sub>2</sub> 농도가 오히려 더 높게 나타나고 있는데 오염물질이 강수의 세정 효과(당일 15.5 mm 강수량)에 의해 예상되는 낮은 농도와는 달리 평일(평균 5.3 mm)보다 높게 나타난 것은 설명하기 매우 어렵다. 따라서 당일의 통행량에 의한 배출량 저감의 효과보다 강수의 세정 효과에 의한 저감효과라는 불확실성이 크게 작용할 수 있어 배출량 감소 및 세정효과에 의한 대기 오염도 저감 효과를 또다시 구별하여야 그 정확한 해석이 가능할 것이다.

전반적으로 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> 모두 TCP 시행 첫째 날(Case 1, 3, 5)에서 오전보다는 오후에 대기오염도의 저감효과를 더 잘 확인할 수 있었고 NO<sub>2</sub>는 TCP 시

행 둘째 날(Case 2, 4, 6)에서도 오전보다는 오후에 그 효과가 크게 나타났다. 특히 강수가 비교적 적거나 없었던 Case 4~Case 6의 경우 평균 40% 정도 낮게 나타났고 Case 5와 같이 출퇴근 시간에서 생기는 최고치 역시 매우 둔화되어 나타났거나 평일보다 50% 이상 낮게 나타나는 효과를 확인할 수 있었다. 이는 NO<sub>2</sub>의 주 배출원이 자동차임을 고려하면 세정 효과가 없는 맑은 날 TCP 시행에 의한 NO<sub>2</sub> 저감 효과는 매우 탁월할 수 있음을 시사해 준다.

오존과 PM<sub>10</sub>의 경우 배출량 저감 효과는 상대적으로 낮았는데 2차 오염물질인 오존은 단순히 그 원인물질인 NO<sub>x</sub> 배출량을 저감하는 것만으로는 일평균 오존 농도를 낮추는데 효과적으로 기여하지 못한 것으로 해석할 수 있을 것이다. 또 주간의 최고 오존 농도는 그 저감효과가 확인되는 반면 야간의 오염도는 오히려 높게 나타나 결국 일평균 오존 농도의 저감 효과가 1차 오염물에 비해 매우 둔화되어 나타났다. 즉 TCP 시행에 의한 오존 농도의 일변화 패턴은 평일에 비해 저농도 부근에서 농도가 높게, 고농도에서는 농도가 낮게 나타나는 패턴을 보였다.

PM<sub>10</sub>의 경우 다른 1차 오염물질에 비해 그 저감율이 상대적으로 적게 나타났는데 이는 강수 등 수

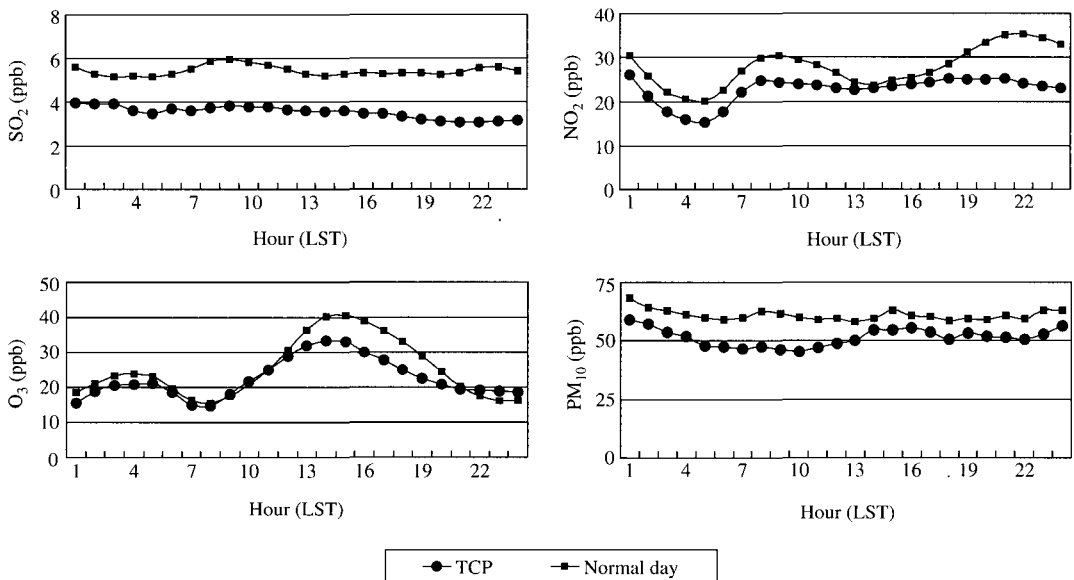


Fig. 8. Diurnal variations of a) SO<sub>2</sub>, b) NO<sub>2</sub>, c) O<sub>3</sub>, and d) PM<sub>10</sub> averaged over the total-TCP(Traffic Control Program)-enforced cases.

증기 증가에 의한 대기화학적 효과가 일부 기여한 것으로 볼 수 있다. 즉 외부로부터 PM<sub>10</sub>의 유입이나 혹은 정체된 대기 내에서 높은 습도에 의하여 입자상 오염물질이 2차 생성(비균질산화반응) 되었을 가능성이 있는데, 흡습성이 큰 입자상물질이 높은 습도 조건에서 표면에 액상층이 형성되어 가스상 물질의 흡수·산화 반응이 촉진되어 황산암모늄과 같은 미세먼지의 생성이 증가되었을 가능성도 배제할 수 없다. 이는 풍향에 따른 외부 유입 경로 뿐 아니라 충분한 수증기에 의해 2차 미세먼지 생성의 원인이 되었을 것으로 추정된다. 그러나 강수가 전혀 없었던 사례 6의 경우 약 60% 이상의 저감 효과를 보여 그 저감효과를 확인할 수 있었다.

(그림 8)은 총 사례 기간 네 가지 오염물에 대해 TCP 시행일과 비교대상일의 전체 평균 오염 농도의 일변화를 나타낸 것이다. 그 결과 TCP 시행에 따른 평균적인 대기오염 저감효과는 SO<sub>2</sub> (38.5%), NO<sub>2</sub> (23.0%), PM<sub>10</sub> (19.8%), O<sub>3</sub> (12.6%) 순으로 나타났으며 특히 모든 오염물의 일 중 최대치는 현저히 둔화되어 나타났다. 그러나 2차 오염물질인 오존의 경우 그 저감 효과가 1차 오염물질에 비해 낮게 나타났을 뿐 아니라 야간의 농도는 오히려 높게 나타나는 등 1차 오염물질보다 복잡한 양상을 보여 2차 오염물질의 농도 저감은 쉽지 않음을 잘 암시해 준다.

이상의 결과는 TCP가 시행된 날이 비교대상일의 기상 조건과 동일하다는 가정하에 분석하였으나 매 시간 수시로 변하는 기상 상태를 분류하여 동일한 조건을 가진 날을 찾아내기란 쉽지 않다. 그러므로 더 정확한 분석 결과를 도출하기 위해서 보다 효과적인 분석틀이 연구되어야 할 것으로 판단된다. 또 TCP 당일의 농도가 전날의 야간의 오염 농도에 좌우됨을 볼 때 전날 야간의 농도가 유사한 수준을 유지하는 평일을 선정한다면 보다 정확한 연구가 가능했을 것으로 사료된다.

## 5. 요약 및 결론

측정 자료로부터 배출량 저감에 따른 대기오염도 저감 효과 분석방법의 하나로 850 hPa 지근 풍향과 지근 풍속을 이용하여 종관 기상 상태를 분류한 후, 850~1000 hPa 하층 대기의 기온에 의한 연직 난류

상태를 진단하는 연직 대기 안정도와 지상 기상 관측소에서 측정하는 일평균 풍속을 주요 기상 인자로 하여 기상 조건을 분류한 후 2002년 국제적 행사인 월드컵 기간 강제 차량 2부제를 실시한 기간과 유사한 기상 조건을 가진 날의 대기 오염도를 비교·분석하였다.

그 결과 대기 오염도 저감 효과가 가장 큰 오염물질은 SO<sub>2</sub>였으며 그 다음으로 NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> 순으로 나타났다. 상대적으로 저감효과가 적은 PM<sub>10</sub>은 TCP 시행일 중 일부 사례는 강수가 있어 대기 중의 수증기에 의한 입자상 오염물질의 2차 생성과 같은 대기화학적 과정이 작용하였을 가능성도 있었을 것으로 추정된다. 반면 2차 오염물질인 오존의 경우 일평균 감소율은 1차 오염물질보다 낮은 저감 효과를 보였으나 광화학 반응이 활발한 낮 시간의 경우 당일 최고 농도의 감소 효과는 크게 나타났다. 이는 평소보다 적게 배출된 NO<sub>x</sub>가 광화학 오존 생성을 둔화시켜 최고 오존 농도를 낮추는 역할을 하기 때문으로 판단된다. 그러나 야간의 오존 농도는 오히려 증가하는 경향을 보여 그 다음날 오전까지도 그 영향이 나타나기도 하였다. 이는 낮 시간에 생성된 오존이 야간에 지상에서는 NO<sub>x</sub> 등의 오염물질에 의하여 소멸되는데 이 때 적게 배출된 NO<sub>x</sub>는 오존 소멸을 약화시키는 역할을 하게 되므로 야간 농도는 증가하는 경향을 보인 것으로 해석된다.

이상의 연구 결과는 모두 각 사례별로 선정된 비교대상일의 종관 기상 상태가 TCP 시행 기간과 동일한 것으로 가정하여 분석하였으나 수시로 변하는 매시간의 기상 조건은 모두 다르게 나타나며 그 변화 폭 또한 매일 다양하게 나타나므로 본 연구 결과 또한 그만큼 불확실성을 가지고 있음을 뜻한다. 결국 대도시를 중심으로 지역별 대기 오염도를 예측하거나 대기 오염의 피해를 예방하기 위해서는 배출량을 줄이는 노력과 함께 기상조건이 대기 오염에 미치는 영향을 잘 이해하여야 할 것인데 이러한 차원에서 기상 상태의 분류방법에 대한 고찰 및 적용에 관한 연구 역시 다양하게 진행되어야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 2004년도 부산대학교 교내학술연구비(신임교수연구정착금)에 의한 연구결과임.

참 고 문 헌

김용국, 이종범(1990) Pasquill 안정도 계급의 평가와 안정도 parameter 추정 방법의 개발. 한국대기보전학회지, 6(2), 168-175.

김유근, 홍정혜, 전병일(1994) 미기상 특성에 따른 대기오염 농도 분포에 관한 연구. 한국환경과학회지, 3(1), 31-38.

김시완, 박순웅, 이보람(1997) 종관 기상장에 따른 SO<sub>2</sub>, NOx, CO 그리고 O<sub>3</sub> 농도의 변화. 한국기상학회지, 33(2), 273-287.

박영주(1990) 서울시에서 혼합고의 일변화에 관하여. 서울 대학교 대기과학과 석사학위논문. 65pp.

박일수, 이덕길, 강인구(1991) 서울 지역 겨울철 SO<sub>2</sub> 농도를 지배하는 기상 인자. 한국대기보전학회지, 7(2), 91-104.

변희룡, 이동규, 정삼연(1995) 하층대기의 연직 안정도와 연관된 850 hPa 지오폠펌셜 고도장의 종관적 특성. 한국기상학회, 31(3), 213-228.

신찬기, 한진석, 김윤신(1992) 대기오염농도와 기상인자의 관련성 연구. 한국대기보전학회지, 8(4), 213-220.

이보람(1997) 종관 기상상태를 고려한 한반도 대기오염 퍼텐셜 예측법. 서울대학교 대기과학과 석사학위논문. 54pp.

이종범, 김용국, 김태우(1993) 춘천 지역 도시 열섬의 특징과 대기질에 미치는 영향. 한국대기보전학회지 9(4), 303-309.

이화운(1993) 대기혼합층 발달과정의 모의실험과 수치해석. 한국환경과학회지, 2(1), 17-26.

환경부, 국립환경연구원(2002) 2002년 9월 대기환경월보, 73pp

Benarie, M.M. (1980) *Urban Air Pollution Modelling*. Macmillan Press, London.

Comrie, A.C. and B. Yarnal (1992) Relationships between synoptic scale atmospheric circulation and ozone concentrations in Metropolitan Pittsburgh, Pennsylvania. *Atmospheric Environment*, 3, 301-312.

Davis, R.E. and D.A., Gay (1993) A synoptic climatological analysis of air quality in the Grand Canyon National Park. *Atmospheric Environment*, 5, 713-727.

Deardorff, J.W. (1979) Prediction of convective mixed layer entrainment for realistic capping inversion structure. *J. of Atmos. Sci.* 36, 424-436.

Dobbins, R.A. (1979) *Atmospheric Motion and Air Pollution*. A Wiley-interscience publication, 137-139.

Erbrink, J.J. (1991) A practical model for the calculation of and  $\sigma_y$  and  $\sigma_z$  for use tall stacks based on wind fluctuations. *Atmospheric Environment*, 25A (2), 277-283.

Karlsson, S. (1986) The applicability of wind profiles formulas to an urban-rural interface site. *Boundary Layer Meteor.*, 34, 333-355.

Miller, C.W. and C.A. Little (1980) Accuracy of Gaussian plume dispersion model predictions as a function of three atmospheric stability classification calculations. *Health Physics*, 39, 773-982.

Pasquill, F. (1975) *Atmospheric Diffusion*. John Wiley, New York.

Sanchez, M.L., D. Pascual, C. Ramos, and I. Perez (1990) Forecasting particulate pollutant concentrations in a city from meteorological variables and regional weather patterns. *Atmospheric Environment*, 6, 1509-1519.

Sedifian, L. and E. Benett (1980) A comparison of turbulence classification schemes. *Atmospheric Environment*, 14, 741-750.

Steyn, D.G. and T.R. Oke (1982) The depth of the daytime mixed layer at two coastal sites : A model and its validation. *Boundary Layer Meteor.*, 24, 161-180.