

수도권지역 오존오염 패턴과 기상학적 특성

Ozone Pollution Patterns and the Relation to Meteorological Conditions in the Greater Seoul Area

오 인 보* · 김 유 근 · 황 미 경

부산대학교 대기과학과

(2005년 2월 11일 접수, 2005년 5월 25일 채택)

In-Bo Oh*, Yoo-Keun Kim and Mi-Kyoung Hwang

Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University

(Received 11 February 2005, accepted 25 May 2005)

Abstract

The typical patterns of surface O₃ pollution and their dependence on meteorology were studied in the Greater Seoul Area (GSA) during warm season (April–September) from 1998 to 2002. In order to classify the O₃ pollution patterns, two-stage (average linkage then k-means) clustering technique was employed based on daily maximum O₃ concentrations obtained from 53 monitoring sites during high O₃ events (118 days). The clustering technique identified four statistically distinct O₃ pollution patterns representing the different horizontal distributions and levels of O₃ in GSA. The prevailed pattern (93 days, 49.5%) distinctly showed the gradient of O₃ concentrations going from west to east in GSA. Very high O₃ concentrations throughout GSA (24 days, 12.8%) were also found as a significant pattern of severe O₃ pollution.

In order to understand the characteristics of O₃ pollution patterns, the relationship between O₃ pollution patterns and meteorological conditions were analyzed using both synoptic charts and surface/upper air data. Each pattern was closely associated with surface wind interacted with synoptic background flow allowing to transport and accumulate O₃ and its precursor. In particular, the timing and inland penetration of sea-breeze were apparently found to play very important role in determining O₃ distributions.

Key words : O₃ pollution, Two-stage clustering technique, Meteorological condition, Sea-breeze

1. 서 론

최근 들어, 환경기준치 및 주의보 수준을 초과하는 오존농도가 수도권에 집중되어 빈도 높게 나타나고

있다 (환경부, 2003). 이는 수도권지역 오존오염 현상의 실태 및 다양한 원인파악을 위한 활발한 연구가 이루어져야 함을 시사한다. 무엇보다 수도권 지역 광화학 환경의 전반적인 고찰과 함께 고농도 현상에 기여하는 오존 및 전구물질의 수송/축적 과정을 이해하는 것이 중요하다. 이는 지배적으로 나타나는 지역의 주요 오염패턴과 기상학적 원인을 조사함으로써

*Corresponding author

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

써 전반적으로 파악될 수 있다. 이러한 연구 접근은 기존의 여러 연구에서 확인할 수 있다 (김진영과 김영성, 2001; 김철희 등, 1999; 김영성과 오현선, 1999; 오현선과 김영성, 1999; 정용승과 정재섭, 1991). 하지만 이러한 연구들은 고농도 오존일 전체의 평균적인 농도분포 특성이나 특정일의 사례분석으로 제한되는 문제점을 보였다.

따라서 본 연구에서는 수도권지역 오존오염 현상의 정확한 진단과 원인규명을 위한 기반연구로서, 지역을 대표할 수 있는 주요 오존오염 패턴을 수년간 축적된 오존농도 자료를 바탕으로 파악하고 각각의 패턴에 대한 기상학적 특징을 면밀히 분석하였다. 특히 군집분석(cluster analysis)을 사용하여 객관성 있는 패턴분류가 이루어졌으며, 상·하층 기상자료의 복합적인 분석을 통해 오존오염 패턴을 결정하는 주요 기상조건을 파악하였다.

2. 자료 및 연구 방법

본 연구에서 사용된 오존농도 자료는 1998~2002년(4~9월) 동안 서울, 인천, 경기 지역에 분포한 대기질 측정망에서 측정된 1시간 평균값이다. 신뢰성 있는 분석을 위해 연구기간 중 측정망 수의 변화와 자료의 질을 고려하여 53개의 분석지점(그림 1 참조)을 결정하였고, 이를 대상으로 유효측정일(일중 75% 이상의 시간별 자료가 있는 날)을 선정하였다(환경부, 2004). 선정된 날 중 한지점 이상 1시간 환경기준치(100 ppb)를 초과하는 날을 오존오염일(188일)로 정의하였고, 이 날들의 각 지점 일최고 오존농도 값을 입력자료로 하여 군집분석을 수행하였다. 입력자료 구성에 있어 같은 날에 나타난 특정 지점의 결측치는 상관이 큰 인근 지점의 농도를 활용하여 평균법을 통해 생성시켰다.

군집분석은 특정 현상의 객관적인 패턴을 분류할 수 있는 유용한 방법으로, 본 연구에서는 Davis and Kalkstein (1990)에 의해 개발된 two-stage clustering technique 방법을 사용하였다. 이는 군집의 결집력 측면에서 우수한 방법임이 증명되었고 대기오염과 기상의 관련성을 파악하는 연구에 사용되어 왔다(Davis *et al.*, 1998; Eder *et al.*, 1994; Davis and Gay, 1993). 군집분석의 수행은 통계프로그램인 SAS

(Statistical Analysis System)를 통해 이루어졌다. 첫 번째 단계로, 유사성이 가까운 개체들을 군집화하는 계층적 군집분석(hierarchical clustering) 방법 중 하나인 평균 연결법(average linkage method)을 사용하여 최적의 군집수를 결정하였다. 초기 군집수가 결정된 후 비계층적 군집분석(nonhierarchical clustering) 방법인 K-평균법(K-means method)을 사용하여 최종 군집을 분류하였다. K-평균법은 결정된 군집 수 K에 기초하여 군집의 중심을 선택하고, 각 항목을 가장 가까운 중심점을 갖는 군집에 할당하여 전체 자료를 상대적으로 유사한 K개의 군집으로 분류하는 방법이다.

이렇게 분류된 각각의 군집, 즉 오존오염패턴을 대상으로 농도 특성과 기상조건을 면밀히 분석하였다. 농도 특성은 패턴별 오존 통계치와 수평분포 차이를 통해, 기상조건은 종관일기도, 상층 및 지상 바람자료를 바탕으로 패턴별 상호간의 특성이 분석되었다. 사용된 자료의 상세한 언급은 연구 결과에서 제시하였다.

3. 군집분석 결과

표 1은 계층적 군집분석 결과 제시된 통계량으로 R^2 , pseudo-F, pseudo- t^2 의 군집수에 따른 변동을 보여주고 있다. 일반적으로 초기 군집의 개수는 각 연결단계 중에서 pseudo-F 값이 전후 단계보다 높은 결합의 단계나 pseudo- t^2 값이 낮아진 결합의 단계, R^2 값이 급격히 증가한 단계에서 결정되어 진다(박정균과 이동규, 1998; Eder *et al.*, 1994). 따라서 최적의 초기 군집의 개수를 4개로 선정하는 것이 통계적으로 유의함을 알 수 있다. 이렇게 결정된 초기 군집 수 K를 바탕으로 K-평균 군집분석을 수행하였고, 최종적으로 4개의 군집을 얻었다. 본 연구에서는 분

Table 1. Statistical tests for determining number of clusters to retain.

Number of clusters	R^2	Pseudo-F	Pseudo- t^2
6	0.348	19.1	3.6
5	0.312	20.4	10.2
4	0.297	25.4	3.7
3	0.165	18.0	33.7
2	0.125	25.2	8.7
1	0.000	-	26.2

Table 2. Monthly distributions of the number of O₃ pollution days for different patterns, 1998~2002.

O ₃ pattern	Number of days						
	Total ^a	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.
P1	43 (22.9)		2	11	13	11	6
P2	93 (49.5)	3	16	34	21	11	8
P3	24 (12.8)		1	14	3	2	4
P4	28 (14.9)		3	4	8	8	5

^a The values in parenthesis indicate the percentage of O₃ exceedances at each pattern

류된 각각의 군집 1~4를 오존오염 패턴 1~4로 명칭하였다.

표 2는 분류된 오존오염 패턴별 해당일수와 월별 분포를 나타낸 것이다. 패턴 1의 경우 전체 오존오염일 188일 중 43일 (22.9%)을 대표하며 대부분 6~8월에 분포하였다. 패턴 2의 경우는 가장 많은 날인 93일 (49.5%)의 오존오염일을 대표하는 패턴으로 분류되었고, 6월을 정점으로 5, 7월에 비교적 많은 날

들이 분포하였다. 한편 패턴 3은 4개 패턴 중 가장 적은 일수인 24일 (12.8%)이 속한 패턴이며, 6월에 집중되어 나타나는 것이 특징이다 (연중 14일, 58.3%). 또한 6월의 경우만 볼 때 전체 오존오염일의 22.2%가 패턴 3에 해당되어 패턴 2 다음으로 높은 빈도이다. 마지막으로 패턴 4는 28일 (14.9%)이 분포하였고 뚜렷한 월별 분포 경향을 볼 수 없다.

결과적으로 두 단계의 군집분석 결과, 4개의 군집 즉 오존오염 패턴으로 분류되었으며, 패턴 2가 수도권 오존오염 발생시 가장 빈도 높게 나타나는 패턴임을 알 수 있었다. 또한 특징적으로 패턴 2와 3의 경우 6월에 높은 빈도를 나타내는 시기적 편중 경향을 보였다.

4. 패턴별 오존농도 분포

군집분석을 통해 분류된 4개의 패턴을 대상으로

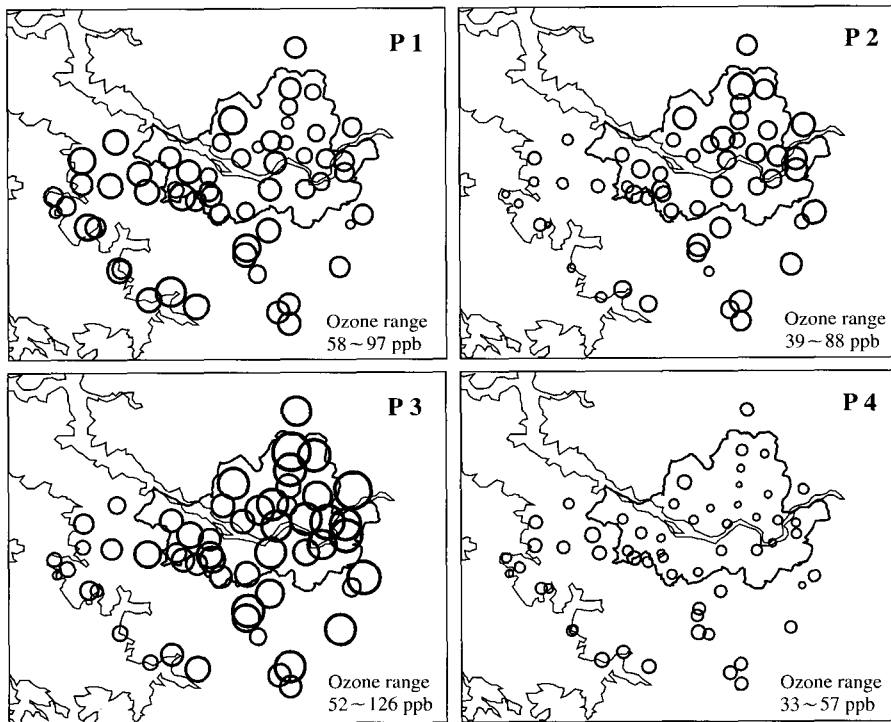


Fig. 1. Horizontal distributions of the daily maximum O₃ concentrations for different O₃ pollution patterns. Size of circles indicates the relative concentration for comparison, varying from 33 to 126 ppb.

패턴별 일최고 농도의 수평분포(그림 1)와 평균된 농도수준 및 기준치 초과 측정소 수를 조사하였다(표 3). 그 결과 각 패턴별 뚜렷한 오존농도 분포를 볼 수 있었다. 패턴 1의 경우 서울의 서쪽과 인천 및 연안지역에 상대적으로 높은 농도가 나타났다. 이는 서울에 집중된 오존전구물질의 배출환경을 고려해 볼 때 주목할 만한 분포 패턴이다. 4개의 패턴 중 두 번째로 높은 농도수준(78.6±7.9 ppb)을 보였고, 상당수의 지점에서(8.9±7.1개) 환경기준치(1시간 기준 100 ppb)를 초과하였다.

반면, 패턴 2는 동쪽으로 갈수록 농도가 높게 나타나며 서울의 동쪽 및 북동지역에서 고농도현상을 볼 수 있다. 특히 인천 및 연안지역의 낮은 농도는 패턴 1과 비교해 그 차이가 뚜렷하다. 이러한 경향은 패턴 2에 속한 높은 빈도수의 오존오염일을 고려해 볼 때(표 2 참조) 수도권지역의 평균적인 오존오염 분포로 해석될 수 있고, Ghim and Chang (2000)이 제시한 연평균 농도 분포와도 유사하다. 평균적으로 68.0±9.9 ppb의 농도 수준을 나타내며, 3.1±2.7개의 지점에서 기준치를 초과한 것으로 조사되었다. 하지만 이러한 수치는 서울 동쪽의 측정농도 값을 파악할 수 없기 때문에 다소의 과소평가가 예상되는 부분이다.

패턴 3은 일부 몇몇 지점을 제외하고 수도권 전역이 뚜렷한 고농도가 나타나는 것이 특징이다. 평균적인 농도수준은 92.0±17.2 ppb로 4개의 패턴 중 가장 높은 수치를 나타내었고 무려 21.3±9.3개 지점에서 기준치를 초과하였다. 특히 서울의 중심과 동쪽에서 매우 높은 수준의 오존농도를 볼 수 있다. 즉 패턴 3은 서울 중심의 심각한 오존오염 현상을 대표하는 것이며, 6월에 집중된 이 패턴의 분포경향으로 미루어 볼 때(표 2 참조) 시기적으로 특징 있는 오존의 생성과 축적환경을 예상할 수 있다. 마지막으로 패턴 4의 경우 뚜렷한 농도 분포 특징을 확인할 수 없으

며 전체적으로 60 ppb 미만의 낮은 농도가 기록되었다. 평균적으로 46.0±5.9 ppb의 낮은 농도 수준과 소수 지점(1.3±0.6개)에서 기준치 초과가 나타났다.

결과적으로 각 패턴에서 나타난 뚜렷한 오존농도 분포는 수도권 오존오염의 다양한 형태를 제시한 것이며, 연구기간 중 수도권 지역 내 오염물질 배출의 변화가 크지 않다고 가정한다면 오존 및 전구물질의 수송과 축적에 기여하는 기상역의 역할이 중요함을 보여주는 것이다.

5. 패턴별 기상학적 특성

패턴별 나타난 오존농도 분포의 원인을 이해하기 위해 주요 기상조건이 비교 분석되었다. 우선 전반적인 오존의 광화학 생성 환경 및 수송을 진단할 수 있는 종관규모 기압배치/기류방향과 지상의 주요 기상인자를 분석하여 표 4에 제시하였다. 여기서 일최고 기온, 일사량 합계, 평균운량 및 강수일수 비율을 조사하기 위해 선택된 서울기상청 관측지점은 패턴 결정에 있어 가장 많은 오존농도 자료가 입력된 서울을 대표하는 곳으로 지역의 전반적인 기상조건을 설명할 수 있다.

표 4에서 패턴 4를 제외하고는 수도권 지역이 고기압의 영향을 지배적으로 받음을 알 수 있다. 일최고 기온과 일사량 합계의 경우, 패턴 1~3이 큰 차이 없이 평균 30°C 전후의 높은 수치와 약 18 MJ m⁻² day⁻¹의 유사한 수치를 각각 나타내었고, 운량과 강수일수 비율 역시 패턴 1~3이 약 40% 정도와 10% 미만을 기록해 비교적 맑은 날이 형성되었음을 알 수 있다. 반면 패턴 4는 모든 항목에서 상대적으로 오존 생성에 좋지 못한 기상조건이 나타났고, 이는 표 3에 제시된 패턴 4의 낮은 오존농도 수준을 잘 설명한다.

결과적으로 패턴 4를 제외하고는 고기압의 영향 하에 맑은 날, 높은 기온과 강한 일사조건이 형성되어 오존농도를 상승시킬 수 있는 전형적인 기상조건이 나타났다. 하지만 이미 분석된 패턴 1~3에 나타난 뚜렷한 오존농도의 수준과 분포 차이를 고려한다면 오존을 포함한 오염 공기의 수송 및 축적이 오염패턴을 결정함을 강하게 시사한다. 결국 바람에 의한 역학적 효과가 중요하게 고려될 수 있는데, 이는

Table 3. Daily maximum O₃ concentrations and the number of stations exceeding standard for different patterns.

O ₃ pattern	Daily maximum O ₃ (ppb)	Number of stations exceeding 1-h standard of 100 ppb
P1	78.6±7.9	8.9±7.1
P2	68.0±9.9	3.1±2.7
P3	92.0±17.2	21.3±9.3
P4	46.0±5.9	1.3±0.6

표 4에 패턴별 나타난 주된 종관류의 차이와 함께 지상풍의 특징적인 분포를 예상할 수 있는 부분이다.

패턴별 종관류의 차이는 상층풍 관측자료의 분석을 통해서 재확인된다. 그림 2는 서울에서 남쪽으로

약 40 km 떨어진 경기도 오산에서 관측된 850 hPa 고도의 바람 분포를 제시한 것이다. 하루 6시간 간격으로 관측된 유효자료 중 1500 LST 자료를 대상으로 하였으며, 풍향의 경우 동서 (u), 남북 (v) 성분으로 나

Table 4. Synoptic meteorology and weather conditions for different patterns.

O ₃ pattern	Dominant surface pressure patterns	Major flow	Daily max. T. (°C)	Solar rad. (MJ m ⁻² day ⁻¹)	Cloud cover (%)	Rainy days (%)
P1	Okhotsk high extending to Korea (32%), Ridge of Pacific High extending to GSA (30%)	Easterly	31.4±1.7	17.7±4.1	38	7.0
P2	Weak high-pressure systems covering GSA (59%), Anticyclone over Yellow Sea (18%)	Weak westerly	29.4±2.2	17.8±3.9	41	7.5
P3	Slow moving anticyclone over East Sea (46%)	Weak easterly	31.2±2.0	17.7±3.2	38	4.2
P4	Weak low-pressure trough over GSA (43%) For some case, the pressure gradients strengthen (14%)	-	27.5±3.8	14.5±5.9	53	32.1

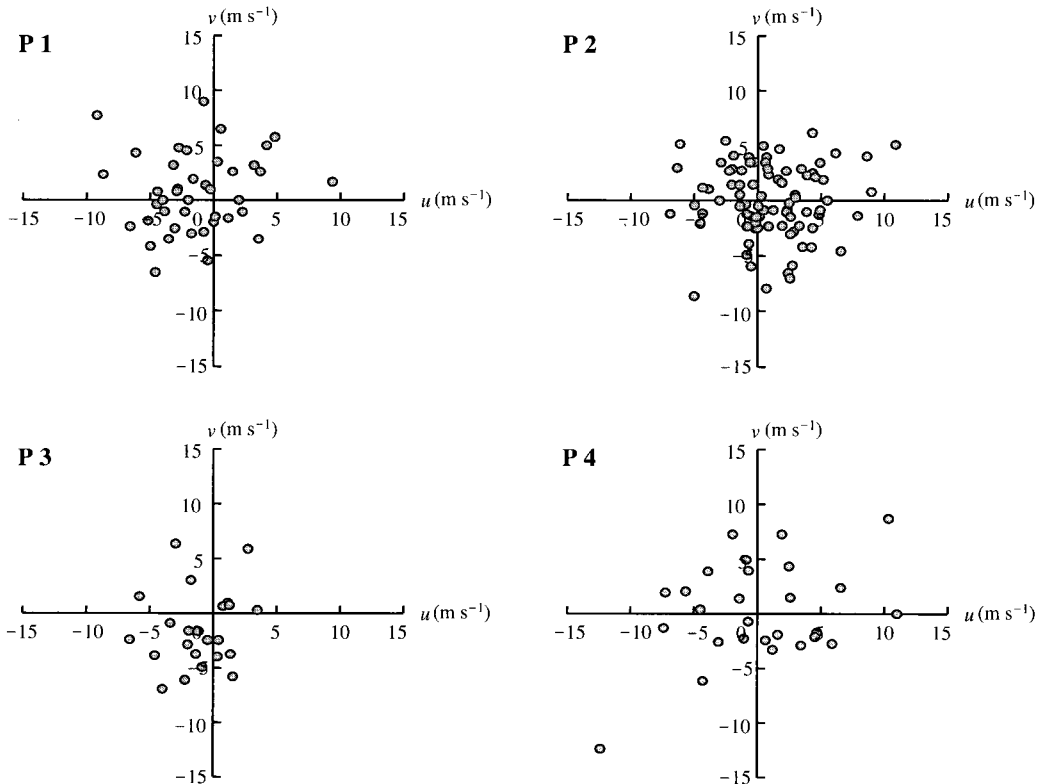


Fig. 2. Distributions of wind component (u , v) on 850 hPa observed at Osan upper air station (37.10° N, 127.03° E) for different O₃ pollution patterns. Positive u and v value indicate westerly and southerly wind, respectively.

누어 (양의 u, v 값은 각각 서풍과 남풍을 의미함) 각 패턴별 수치를 산출하였다. 분석결과 지상 기압배치를 통해 제시된 수도권지역의 패턴별 종관류 특성과 전반적으로 일치함을 알 수 있다. 패턴 1~3의 경우 평균적으로 5 ms^{-1} 이하의 약한 풍속이 나타났고 패턴 1과 3은 동풍계열이 (약 70%), 패턴 2는 서풍계열이 (약 65%) 탁월하여 뚜렷한 차이를 보였다. 이러한

상층풍의 차이는 수도권 지역이 서해와 접해 있고 대부분의 오존오염일이 맑고 기온이 높은 조건임을 고려해 볼 때, 해풍의 발달 및 지상 바람장에 큰 영향을 미칠 수 있다.

그림 3은 서울 기상청에서 관측된 하루 중 시간별 풍향빈도와 평균풍속을 패턴별로 나타낸 것으로 지상풍의 특징 있는 차이를 볼 수 있다. 전반적으로 패

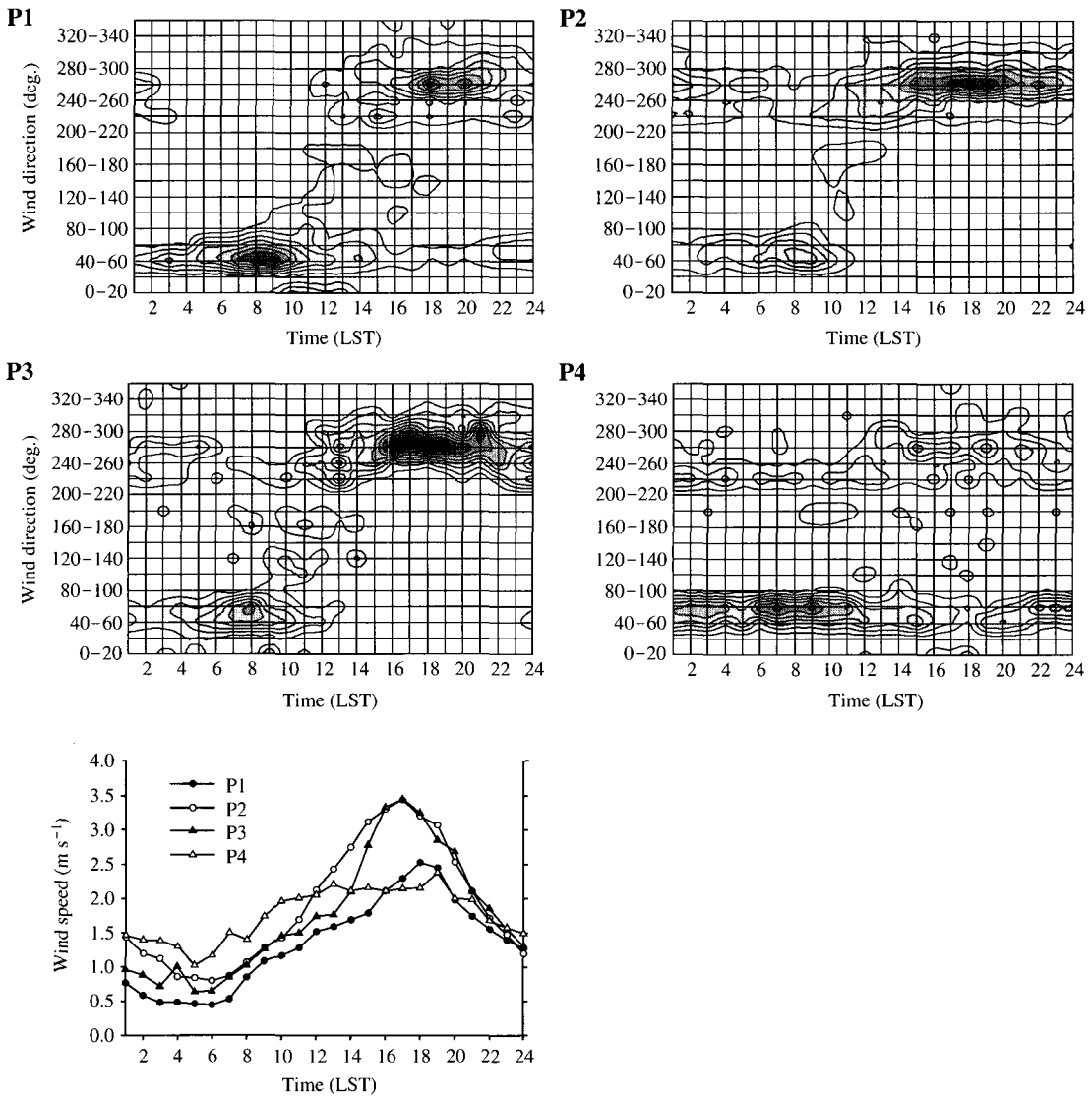


Fig. 3. Diurnal variations of the frequency of wind directions and averaged wind speeds at Seoul weather station for different O_3 pollution patterns. Wind directions for the speed of below 0.5 m s^{-1} have been discarded in the calculation. Contours vary from 5% to 55% with the interval of 5%.

턴 1~3의 경우 야간과 오전에는 약한 동풍이 오후에는 서풍이 탁월하게 나타나 해륙풍 순환이 잘 형성되었다. 하지만 육풍(동풍)의 탁월한 정도와 해풍(서풍)의 시작시간이 패턴별 다르게 나타나, 서울에서 배출 또는 생성된 오염물질의 축적과 수송효과의 차이를 예상할 수 있다.

수평 농도분포에서 상반된 차이가 나타난 패턴 1과 2의 바람변화를 비교해 보면, 패턴 1의 경우 야간과 오전에는 동풍이 탁월하다가 늦은 오후가 되어서야 풍향의 뚜렷한 전환과 함께 약한 서풍이 나타났다. 이는 해풍 침투가 억제된 결과로, 패턴 1에서 탁월하게 나타난 중관규모의 동기류(offshore flow)가 주요 원인이다. 중관규모에 의한 해풍의 지연 현상은 여러 연구에서 확인할 수 있다(Melas *et al.*, 1998; Helmis *et al.*, 1995; Arritt, 1993). 결과적으로 야간과 오전동안 뚜렷이 지속된 약한 동풍에 의해 서울의 오염공기괴가 서쪽으로 단거리 이동하게 되고, 이는

서울의 서쪽에 오존농도 상승을 가능케 한다.

반면 패턴 2의 경우, 패턴 1과는 다르게 풍향의 전환이 오전 중에 나타나며 서풍이 뚜렷하다. 이는 중관규모의 서기류(onshore flow)에 의해 해풍의 내륙 침투가 강화된 결과이며, 이른 오후에 나타난 상대적인 강한 풍속은 해풍의 유입을 의미한다. 결과적으로 서울의 오염 공기괴의 이동은 탁월한 서풍에 의해 동쪽으로 이동하며 오후의 오존 최고치가 서울의 풍하측에서 나타날 수 있다.

패턴 3의 풍계는 풍향전환의 시점과 정도차이로 패턴 1, 2와 비교된다. 패턴 1보다는 빠른, 패턴 2보다는 늦은 정오경에 풍향전환이 뚜렷하게 나타났다. 이는 하루 중 일사가 강하고 기온이 높은 시기에 서울지역에 대기 수렴이 나타남을 의미하는 것이고, 이른 아침에 동풍에 의해 풍하측으로 이동된 서울의 오염공기괴가 광화학적 오존생성의 '최적' 시간에 서울로 재순환되는 현상을 설명한다. 공기괴의 수렴현

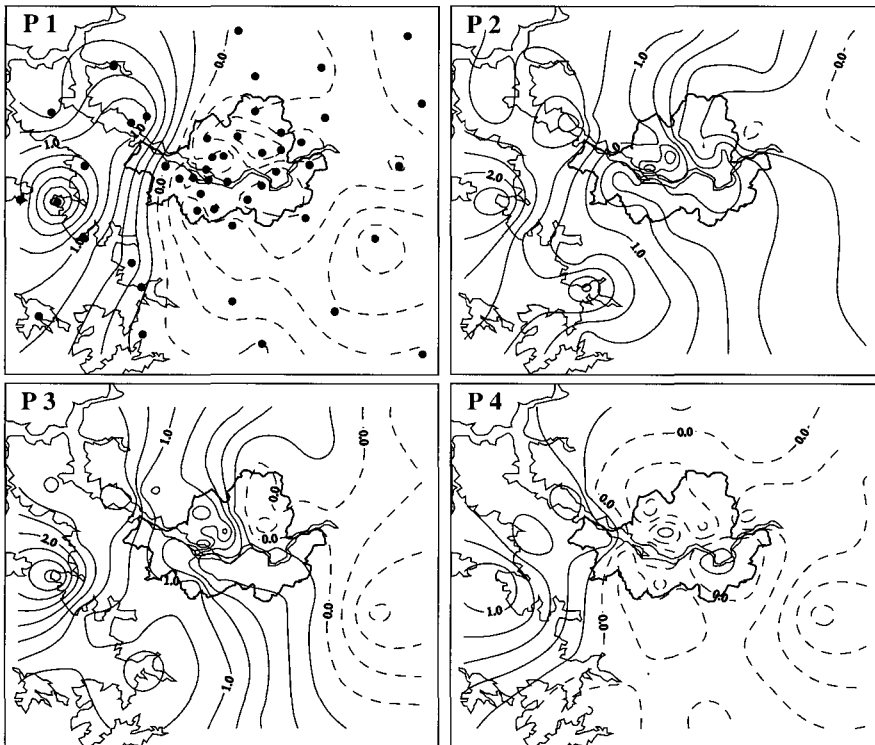


Fig. 4. Horizontal distributions of mean u-component observed at 1300 LST for different O₃ pollution patterns. The solid lines with positive values indicate westerly wind. The dots are the location of AWS in Greater Seoul Area.

상이 고농도역 분포와 관련함은 김철희 등(1999)의 연구결과에서 확인된다. 이러한 풍향전환의 시점과 함께 이후의 지속적인 해풍의 영향을 통해 결과적으로 패턴 3의 일 최고 오존농도의 수평분포를 이해할 수 있다. 패턴 4의 경우는 풍향, 풍속의 변화 경향에서 뚜렷한 풍향전환과 해풍의 영향을 볼 수 없다. 이는 해풍발달에 좋지 못한 일기상태로 해석되며, 패턴 4에 나타난 특징 없는 오존분포의 원인으로 해석된다.

패턴별 지상풍의 차이는 공간적인 바람 분포를 통해 보다 명확히 파악된다. 그림 4는 수도권 지역 내 48지점 AWS에서 관측된 (1300 LST) 패턴별 u 성분 바람의 평균 수평장을 나타낸 것으로 동서 방향의 바람 분포 차이가 뚜렷함을 보여준다.

패턴 1에서는 전반적으로 동풍이 탁월하며 해풍발달이 억제되어 수도권 서쪽에 해풍전선이 위치, 대기 수렴역이 나타났다. 이는 수도권지역 오염공기피의 수송과 광화학적 축적에 따른 패턴 1의 서쪽 고농도 현상을 설명한다. 또한 해풍의 지연과 관련하여 나타날 수 있는 오염공기피의 재순환(recirculation)과정 역시 수도권 서쪽 연안지역 고농도현상의 중요한 원인으로 고려될 수 있다(오인보 등, 2004). 반면, 패턴 2의 경우 영역전반에 서풍이 탁월하다. 즉 수도권 오염공기피가 동쪽으로 이동하며 광화학적으로 축적되어 풍하측에 높은 농도가 나타나게 된다.

이러한 패턴 1, 2의 바람특성에 따른 오존 및 전구물질의 수송, 오존의 고농도 현상은 여기서는 그림으로 제시되지 않았지만 일최고 오존농도의 발생시간 분포 차이 조사를 통해서도 파악되었다(패턴 1은 수도권 서쪽이 동쪽과 비교해 일최고 오존농도의 발생시간이 1시간 정도 늦은 반면, 패턴 2는 반대로 동쪽 지역에서 1~2시간 늦게 나타남).

패턴 3은 대기 정체와 수렴이 서울 내에서 뚜렷한 것이 특징이다. 이전 시간에 서울에서 관측된 풍향의 전환과 해풍의 유입을 고려할 때(그림 3 참고), 패턴 3에서 나타난 서울 중심의 심각한 고농도 현상은 지역전반의 광화학적 오존생성과 함께 오존을 포함한 서울지역 오염공기피의 재순환 과정이 중요한 원인으로 파악된다. 패턴 4의 경우 패턴 1과 다소 유사하나, 패턴 1~3과는 달리 오존생성에 좋지 못한 여러 기상조건으로 판단해 볼 때(표 4 참고) 의미 있는 해석이 될 수 없다.

이상과 같이 패턴별 나타난 기상조건을 분석한 결과, 특징 있는 종관류와 이에 따른 지상의 뚜렷한 바람분포 차이를 패턴 1~3에서 파악할 수 있었고, 이는 오존오염 패턴을 결정짓는 중요한 원인으로 제시되었다.

6. 결 론

본 연구에서는 최근 5년간(1998~2002년) 나타난 수도권 지역 오존오염일(188일)의 일최고 오존농도의 분포 패턴과 이와 관련한 기상학적 특성들이 분석되었다. 우선 두 단계의 군집분석을 통해 오존오염일이 4개의 패턴으로 분류되었고, 각각의 패턴이 시기적 발생 차이와 함께 특징 있는 농도 분포를 보였다. 서울의 서쪽과 연안지역에 상대적으로 높은 오존농도가 나타나는 패턴 1(22.9%), 서울의 동쪽에 높은 농도가 나타나는 패턴 2(49.5%), 서울을 중심으로 수도권 지역 전반에 고농도가 나타나는 패턴 3(12.8%)은 지역을 대표하는 주요 패턴으로 제시되었다. 특히 패턴 3의 경우 상대적으로 낮은 빈도이지만 농도 수준이 매우 높고 6월에 집중되는 특징을 보여 중요한 패턴으로 파악되었다.

분류된 각 패턴들의 농도 분포는 주요 기상조건에 의해 상당부분 설명되었다. 특히 지상의 바람장이 오존농도 분포와 밀접한 관련을 가져, 오존 및 전구물질의 수송/축적이 오염패턴을 결정짓는 중요한 인자임을 알 수 있었다. 패턴별 지상 바람장은 종관규모의 배경기류와 해풍의 상호작용에 의해 뚜렷이 구분되었으며, 이는 낮 동안 형성되는 해풍전선과 기류수렴의 위치 차이로 분석되었다. 특히 서울을 중심으로 수도권 전역에 높은 농도가 나타난 패턴의 경우는 광화학 오존생성에 좋은 기상조건 하에 형성된 해풍의 지연과 이와 관련한 오염공기피의 재순환과정이 중요한 기상효과로 파악되었다.

본 연구결과는 수도권 지역의 평균적·대표적인 주요 오존오염 패턴을 제시하였다는 점에서 중요한 의미가 있다. 아울러 주요 오존오염 패턴과 관련해 분석된 기상학적 특성은 지역 내 대기오염물질 수송과 광화학적 축적과정을 이해하는데 도움을 줄 것이며, 고농도 오존 현상의 발생을 예측하며 공간적인 분포변화를 파악하는데 크게 기여하리라 생각한다.

향후 수도권 오존오염 현상의 명확한 진단과 제어를 위해서는 배출원 환경의 정확한 파악 및 화학 측정 자료의 활용이 이루어져야 할 것으로 사료되며, 아울러 신뢰성 있는 대기질 모델링의 적용을 통해 다양한 패턴 사례분석이 뒷받침 되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 환경부에서 주관하는 “광화학 대기오염의 생성과정 규명과 저감대책 수립을 위한 종합 조사 연구”의 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

참고 문헌

김영성, 오현선(1999) 1990~1997 기간 중 서울·수도권 지역의 고농도 오존 사례 연구, 한국대기환경학회지, 15(3), 267-280.
 김진영, 김영성(2001) 상세한 기상관측 자료를 이용한 1997년 서울·수도권 고농도 오존 사례의 모델링, 한국대기환경학회지, 17(1), 1-17.
 김철희, 송창근, 박순웅(1999) 종관 바람장에 따른 경인지역에서의 지상 오존농도 분포모의, 한국기상학회지, 35(3), 441-456.
 박정균, 이동규(1998) 근접분석에 의한 아시아 동안에서 급격히 발달하는 저기압의 분류와 그 발달 기구, 한국기상학회지, 34(4), 523-547.
 오인보, 김유근, 황미경(2004) 연안도시지역 해풍지역이 오존 분포에 미치는 영향, 한국대기환경학회지, 20(3), 345-360.
 오현선, 김영성(1999) 서울·수도권 지역 고농도 오존 사례의 지상 및 종관기상 특성, 한국대기환경학회지,

15(4), 441-455.
 정용승, 정재섭(1991) 서울 수도권 지역의 광화학오존에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 7(3), 169-179.
 환경부(2003) 대기환경연보 2002, 65pp.
 환경부(2004) 대기환경월보 2004년 6월, 60pp.
 Arritt, R.W. (1993) Effects of the large-scale flow on characteristic features of the sea breeze, Am. Meteorol. Soc., 32, 116-125.
 Davis, J.M., B.K. Eder, D. Nychka, and Q. Yang (1998) Modeling the effects of meteorology on ozone in Houston using cluster analysis and generalized additive models, Atmos. Environ., 12(14/15), 2505-2520.
 Davis, R.E. and L.S. Kalkstein (1990) Development of an automated spatial synoptic climatological classification, Int. J. Climatol., 10, 769-794.
 Davis, R.E. and D.A. Gay (1993) A synoptic climatological analysis of air quality in the Grand Canyon National Park, Atmos. Environ., 27A, 713-727.
 Eder, B.K., J.M. Davis, and P. Bloomfield (1994) An automated classification scheme designed to better elucidate the dependence of ozone on meteorology, J. Appl. Meteorol., 33, 1182-1199.
 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., 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.
 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.