

중회귀 모형을 이용한 울산지역 오존 포텐셜 모형의 설계 및 평가

Design and Assessment of an Ozone Potential Forecasting Model using Multi-regression Equations in Ulsan Metropolitan Area

김유근 · 이소영* · 임윤규 · 송상근

부산대학교 대기과학과

(2006년 7월 27일 접수, 2007년 2월 5일 채택)

Yoo-Keun Kim, So-young Lee*, Yun-Kyu Lim and Sang-Keun Song

Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University

(Received 27 July 2006, accepted 5 February 2007)

Abstract

This study presented the selection of ozone (O_3) potential factors and designed and assessed its potential prediction model using multiple-linear regression equations in Ulsan area during the springtime from April to June, 2000 ~ 2004. O_3 potential factors were selected by analyzing the relationship between meteorological parameters and surface O_3 concentrations. In addition, cluster analysis (e.g., average linkage and K-means clustering techniques) was performed to identify three major synoptic patterns (e.g., P1 ~ P3) for an O_3 potential prediction model. P1 is characterized by a presence of a low-pressure system over northeastern Korea, the Ulsan was influenced by the northwesterly synoptic flow leading to a retarded sea breeze development. P2 is characterized by a weakening high-pressure system over Korea, and P3 is clearly associated with a migratory anticyclone.

The stepwise linear regression was performed to develop models for prediction of the highest 1-h O_3 occurring in the Ulsan. The results of the models were rather satisfactory, and the high O_3 simulation accuracy for P1 ~ P3 synoptic patterns was found to be 79, 85, and 95%, respectively (2000 ~ 2004). The O_3 potential prediction model for P1 ~ P3 using the predicted meteorological data in 2005 showed good high O_3 prediction performance with 78, 75, and 70%, respectively. Therefore the regression models can be a useful tool for forecasting of local O_3 concentration.

Key words : Synoptic pattern, O_3 potential model, Multiple-linear regression equation

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)51-583-2652, E-mail : shanny00@pusan.ac.kr

1. 서 론

대기질을 관리·보존하기 위한 노력은 다양한 각도에서 이루어져 왔는데, 최근 들어 사전에 대기질 악화에 대한 대책을 마련할 수 있도록 대기오염의 가능성을 예측하는 분야에 대한 관심이 높아지고 있다. 이미 선진 각국에서는 대기오염 예보 체제를 확립하여 대기질 보존에 많은 노력을 기울여 오고 있다(Berlyand, 1991; Malet *et al.*, 1983; Malet and Joukoff, 1978). 특히 Berlyand (1991)는 대기 오염에 대한 단계예보를 할 수 있는 수준의 연구를 수행하여 대기오염 확산이 잘 이루어지지 않는 기간 동안 배출량을 일시 규제함으로써 경제적으로 큰 손실 없이도 대기질 보존에 기여할 수 있게 하였다. NOAA에서는 고농도 대기오염이 대규모의 정체성 고기압권 내에서 일어난다는 판단 하에, 종관규모의 기상특성을 나타내는 요소를 기초로 하여 대기오염 가능성, 즉 대기오염 포텐셜(Air pollution potential)을 계산하여 통보하고 있다(WMO, 1972). 그리스 아테네 지역에서의 대기오염 최대 농도를 예보하기 위한 연구에서는 여러 기상 요소와의 관계를 파악하여 두 단계의 회귀식을 선정하고 주요 오염물질의 농도를 예측하였다(Ioannis *et al.*, 1995). 최근 태국에서는 SO₂ 농도를 예측하기 위해 종관장을 군집분석 방법으로 분류하고 고농도 현상과 종관패턴과의 관련성을 통계적 방법인 회귀식을 적용하여 연구한 바 있다(Oanh *et al.*, 2005).

우리나라에서는 기상요소와 대기오염 농도와의 단순 관계 비교를 통한 판정 작업을 바탕으로 한 연구(김유근 등, 1996)나 수도권을 중심으로 한 포텐셜 예측 연구, 전국 대도시를 포괄적으로 평가하는 등의 포텐셜 연구가 일부 이루어졌을 뿐(이보람과 박순웅, 1997; 김용국과 이종범, 1994; 허정숙과 김동술, 1993; 이종범, 1991) 지역규모를 대상으로 한 지리적·기상학적 특성을 상세히 분석한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 울산지역 오존 포텐셜을 예측하기 위해 군집분석(cluster analysis)을 사용하여 객관성 있는 종관패턴을 분류하였고 그에 따른 상·하층 기상자료를 분석해 오존농도와의 관계를 파악하였다. 이러한 분석을 통해 포텐셜 인자로 선정된 요소들을 수치화 하고 주요 종관패턴별 오존 포

텐셜 모형을 설계해 예측 능력을 평가하여 울산지역 고유의 지형적 특성을 반영하고 있는지 살펴보았다.

2. 자료 및 연구방법

2.1 자료의 구성

대기오염 포텐셜을 예측하기 위해서는 예측에 활용될 수 있는 포텐셜 인자를 선정해야 한다. 본 연구에서는 대기오염 농도와 각 기상 요소 등과의 관계를 파악하여 포텐셜 인자를 선정하였는데, 이를 위해 사용되어진 기상관측 자료와 대기오염 관측 자료의 관측소 위치는 그림 1에 나타내었다. 본 연구에서 분석한 기상 요소는 울산 기상대에서 관측된 기압, 기온, 풍향, 풍속, 습도, 강수량, 일조시간, 운량 등이며, 울산지역 내 해안에 위치한 공단 무인기상관측소의 풍향, 풍속 자료를 분석하였다. 오존 농도 자료는 울산지역에서 오존의 고농도 현상이 빈번하게 나타나는 봄철 4~6월을 대상으로 2000~2004년의 12개 대기질 측정망에서 측정된 1시간 평균값을 사용하였다(김유근, 2003). 신뢰성 있는 분석을 위해 연구기간 중 유효측정일(일 중 75% 이상의 시간별 자료가 있는 날)을 선정하였고(황경부, 2004), 선정된 날 중 두 지점 이상 1시간 환경 기준치의 80% 수준(80 ppb)을 초과하는 날을 고농도일로 정의하였다.

2.2 군집분석

종관패턴 분류를 위해, 외부의 기준 변량이 없는 경우 내부 변량을 이용해 동질 지역을 효과적으로 구분해 내는 방법인 군집분석을 사용했다(Brain, 1993). 군집분석은 개체들 간의 유사성(similarity) 또는 이와 반대 개념인 거리(distance)에 근거하여 개체들을 집단으로 묶는 통계적 방법을 뜻한다.

본 연구에서는 대기오염 포텐셜 예측을 위한 궁극적인 목적에 부합하기 위해 기상 상태를 가장 기본적으로 정의하는 종관장을 군집분석을 통해 분류하여 대기오염 고농도 가능성이 높은 패턴을 선별하고자 하였다. 따라서 선정된 연구기간 444일(2000~2004년, 4~6월 중 결측 제외)을 대상으로, 봄철 기압배치에 영향을 미친다고 생각되는 주요 지점을 선정하여 RDAPS (Regional Data Assimilation and Prediction System) 분석장 자료와 울산 기상대 자료를

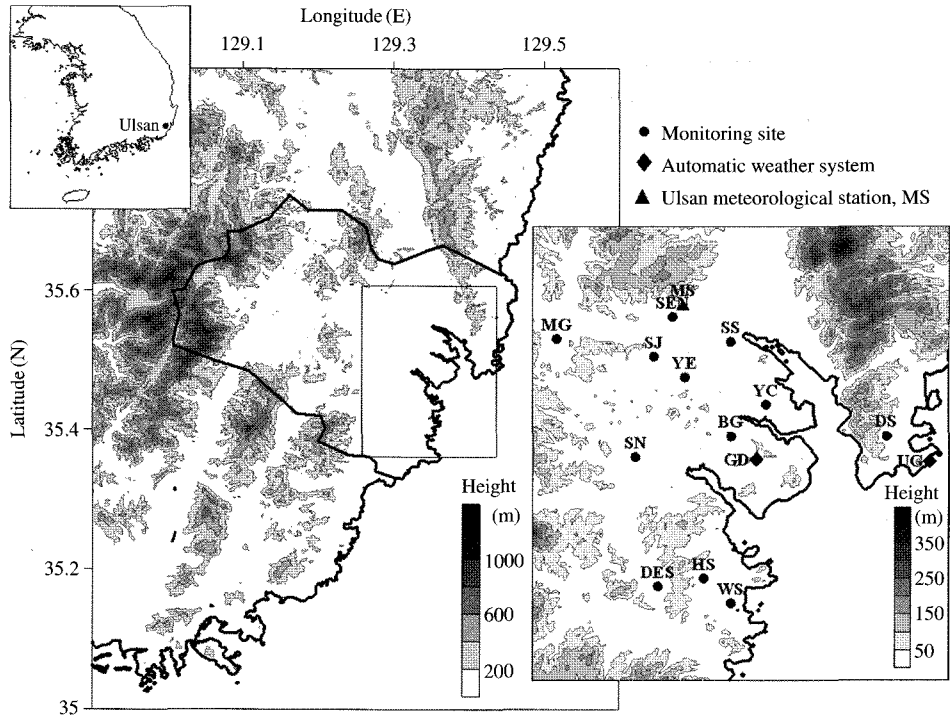


Fig. 1. Topographic map of the Ulsan metropolitan area in the southeastern Korea and the location of observation sites (UG: Ulgi, GD: Gongdan, DS: Daesong, SEN: Seongnam, BG: Bugok, YC: Yeochon, YE: Yaeum, SS: Sam-san, DES: Deoksin, MG: Mugeo, HS: Hwasan, WS: Wonsan, SN: Sangnam).

이용하여 군집분석을 수행하였다. RDAPS 분석장 자료는 122°E, 39°N에 중심을 두고 동서방향으로 191개, 남북방향으로 171개의 격자점과 연직방향 33개 층으로 이루어져 있다. 격자간격은 30km이며 3차원 최적내삽법으로 전국 예보장과 관측자료를 혼합하여 생성하고, 12시간 간격으로 제공된다(0000, 1200 UTC).

그림 2는 군집분석에 필요한 지점을 나타낸 것이다. 연구기간인 봄철에 자주 발생하는 중관장의 형태를 예상하여 특징적인 기압값을 가질 확률이 높은 울산(US)과 상해(SH), 북경(BJ), 정저우(ZZ) 4개의 지점을 선정하였다. 군집분석을 위해 사용한 변수는 4개 지점의 지난 12시간 1,000 hPa 지오폠펌셜 고도 변화량, 울산지점과 나머지 3개 지점간의 기압경도(PG1, PG2, PG3), 울산 기상대 자료에서 얻은 노점편차와 일 평균 운량이다. 군집의 결집력 측면에서 우수하며 대기오염과 기상의 관련성을 파악하는 연구에 주로 사용되어온 Davis and Kalkstein (1990)에 의

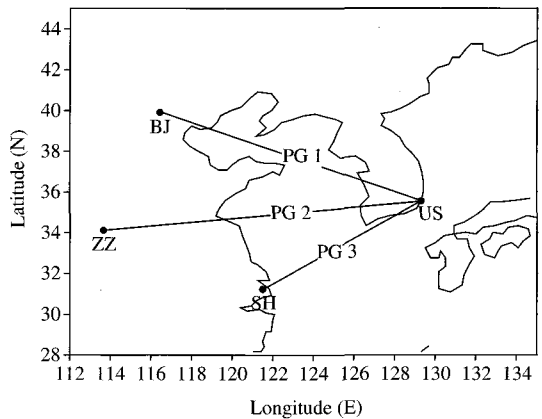


Fig. 2. Locations of each site used in meteorological pattern classification (US: Ulsan, BJ: Beijing, ZZ: Zhengzhou, SH: Shanghai).

해 개발된 two-stage clustering technique 방법을 사용하여 객관적인 패턴으로 분류하였다(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 군집수 K에 기초하여 군집의 중심을 선택하고, 각 항목을 가장 가까운 중심점을 갖는 군집에 할당하여 전체자료를 상대적으로 유사한 K개의 군집으로 분류하는 방법이다.

이렇게 분류된 각각의 군집, 즉 종관패턴을 대상으로 농도 특성과 기상조건을 분석하였다. 또한 각 패턴에 대해 포텐셜 산정 모형을 설계하여 종관장의 영향을 반영한 포텐셜 예측 시스템이 되도록 구성하였다.

2.3 중회귀 모형

본 연구에서는 현업 운영이 가능하도록 포텐셜 예측 모형을 구성하는 것이 목적이므로 오염농도와 기상 자료만으로 만들 수 있는 통계모형을 사용하였다. 사용 가능한 통계기법은 여러가지이지만, 모형이 단순하여 개발 및 운영이 비교적 쉽고 설명변수(독립변수)와 반응변수(종속변수) 간 관계를 설명하기가 쉬우며 계산시간이 적은 중회귀 모형을 이용하였다. 일반적인 중회귀 모형은

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_p x_{pi} + \varepsilon_i \quad (1)$$

i=1, 2, ..., n

과 같으며, 여기에서

- β_0, \dots, β : 회귀계수
- x_{1i}, \dots, x : 설명변수(독립변수)
- y_i, \dots, y : 반응변수(종속변수)
- $\varepsilon_i, \dots, \varepsilon$: 오차항

이다. 각 모형의 중요 독립변수는 STEPWISE 기법으로 선택하였고(유의수준 0.15), 군집분석에 사용한 SAS를 활용하였다. STEPWISE 기법은 모형에 독립변수를 하나씩 추가시키면서 남아있는 독립변수들 중에서 추가되는 독립변수로 인하여 필요 없게 되는

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

Number of clusters	Semipartial R ²	R ²	Pseudo-F	Pseudo-t ²
9	0.036	0.282	21.349	23.278
8	0.024	0.258	21.608	14.387
7	0.006	0.251	24.462	3.503
6	0.096	0.156	16.159	55.977
5	0.022	0.134	16.968	11.244
4	0.019	0.115	19.043	9.504
3	0.085	0.029	6.690	42.484
2	0.006	0.023	10.465	3.195
1	0.023	0.000	-	10.465

독립변수를 제거시키는 방법을 반복하되 더 이상 추가되거나 제거되는 독립변수가 없을 때까지 추가와 제거의 과정을 반복적으로 시행하는 방법이다.

3. 오존 포텐셜 예측 모형의 설계

3.1 오존 포텐셜 인자 선정

3.1.1 종관패턴 분류

표 1은 계층적 군집분석 결과 제시된 통계량으로 Semipartial R², R², Pseudo-F, Pseudo-t²의 군집수에 따른 변동을 보여주고 있다. 초기 군집의 개수는 각 연결단계 중에서 Pseudo-F 값이 전후 단계보다 높은 결합의 단계나 Pseudo-t²와 Semipartial R² 값이 낮아지는 결합의 단계, R² 값이 급격히 증가하는 단계에서 결정하게 된다(Shouquan *et al.*, 2000; 박정균과 이동규, 1998; Eder *et al.*, 1994). 따라서 최적의 초기 군집의 개수는 7개로 선정하는 것이 통계적으로 유의함을 알 수 있다. 이렇게 선정된 초기 군집 수 K를 바탕으로 K-평균 군집분석을 수행하였고, 최종적으로 분류된 군집을 P1~P7이라 명명하고 주요 종관패턴이라 정의하였다.

표 2는 각 패턴별 빈도수와 운량의 평균, 패턴별 오존 농도 평균을 나타낸 것이다. P4와 P6은 각각 118일(27%), 117일(26%)로 높은 빈도를 나타내었고, P1은 95일(21%)로 위의 두 패턴 다음으로 높은 빈도를 기록하며, P2, P3, 그리고 P5는 30일~40일 사이의 빈도수를 나타내어 비슷한 비율을 차지하고 있다. P7의 경우(군집분석에 포함된 총 444일 중 단 2일만 나타난 패턴) 통계적인 유의성이 결여되어 본

Table 2. Number of days for seven synoptic patterns and their cloud amount and O₃ concentration during April through June, 2000 ~ 2004.

Patterns	No. of days ^a	Daily mean cloud amount (tenth)	Daily mean con. (ppb)	Daily max. 1-h con. (ppb)	No. of days > 1-h/80 ppb ^b
P1	95 (21.4)	2.2	27.9	54.5	31 (32.6)
P2	34 (7.7)	3.0	26.8	54.3	7 (20.6)
P3	37 (8.3)	2.2	27.9	53.4	6 (16.2)
P4	118 (26.6)	5.4	24.3	44.0	11 (9.3)
P5	41 (9.2)	6.9	24.6	42.8	2 (4.9)
P6	117 (26.4)	8.2	21.9	39.1	4 (3.4)
P7	2 (0.5)	9.0	—	—	—

^aThe values in parenthesis indicate the frequencies of the classified cluster.

^bThe values in parenthesis indicate the probability of O₃ exceedances.

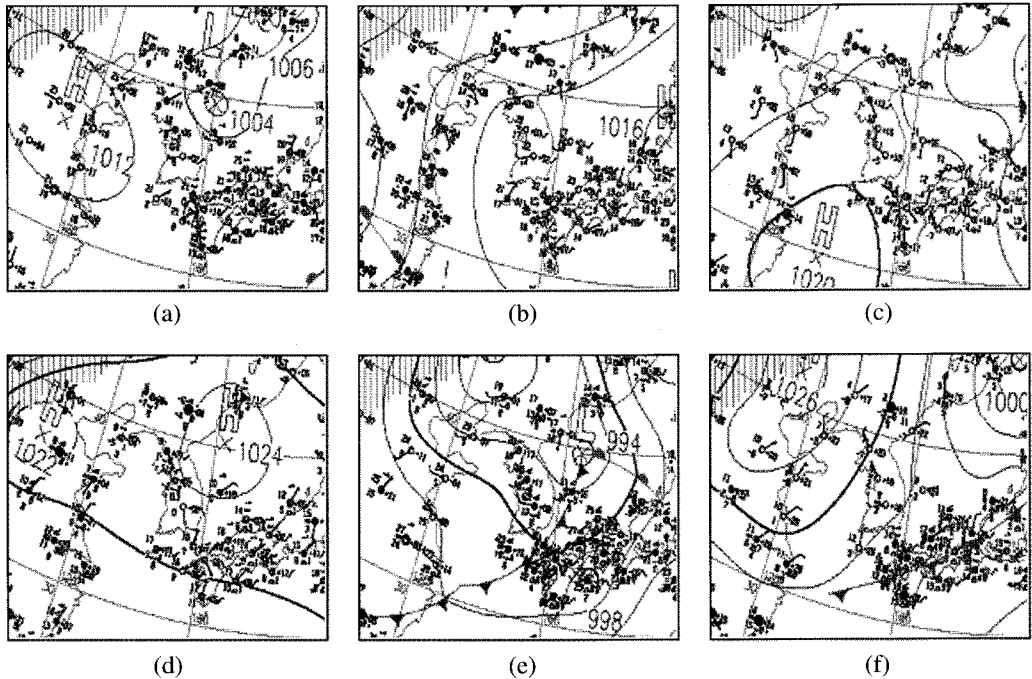


Fig. 3. Weather maps at 850 hPa over the Korean peninsula at 0000 UTC corresponding to each pattern: (a) P1 (23 May 2004), (b) P2 (25 May 2000), (c) P3 (5 April 2003), (d) P4 (15 June 2004), (e) P5 (11 June 2002), and (f) P6 (3 April 2001).

연구에서는 이를 제외한 P1~P6의 패턴에 대한 특성을 분석하였다.

분류된 6개의 종관패턴의 특성을 상세히 분석하기 위해서 일본기상청에서 발행한 0000 UTC의 지표 수치 일기도를 이용하였으며, 한반도를 중심으로 한 기압배치의 특성을 분석하였다.

그림 3은 종관패턴 분석결과 나타난 대표적인 날의 기상 일기도를 나타낸 것이다. P1 (95일)은 저기압이 한반도의 북동쪽을 통과하고 고기압이 점차 다가오는 형태로, 북동쪽에 자리 잡은 저기압에 의해 울산 지역은 북서 종관류의 영향을 받을 수 있다. 이러한 경우, 주간의 해풍 발달을 억제하는 해풍지연현상

이 나타나곤 하는데, 주로 오존의 고농도 현상과 관계가 깊은 것으로 알려져 있다(오인보 등, 2004; 김유근, 2003; Ma and Lyons, 2003). P2(34일)는 한반도를 중심으로 넓은 간격의 등압선이 분포하며 약하게 고기압의 영향을 받고 있어 대체로 맑은 날씨를 보이고 있다. 고기압의 영향을 약하게 받고 있지만 대체로 중관장의 영향을 거의 받지 않는 경우이며, 이러한 경우 지역 고유의 국지 바람장이 뚜렷하게 발달할 수 있다. P3(37일)은 이동성 고기압이 한반도로 다가오는 형태로 전형적인 봄철의 일기 패턴이라 할 수 있다. 한반도의 남서쪽에 고기압이 자리 잡고 있어 P1과 마찬가지로 울산지역은 북서 중관류의 영향을 받아 해풍지연현상이 나타날 가능성이 높다. P4(118일)는 울산지역이 고기압의 후면에 위치하여 약한 남동 기류의 영향을 받는 패턴으로, 연안에 위치한 공단의 오염물질이 내륙으로 수송될 수 있는 기상학적 메커니즘을 갖는 경우이다. P5(41일)는 한반도가 저기압이나 기압골의 영향을 받는 경우로 운량이 비교적 많은 것으로 나타나 오존의 고농도 가능성은 낮을 것이라 예상할 수 있다. P6(117일)은 한반도를 중심으로 서고 동저형의 기압배치를 보이고 있다. 동서로 고기압이 존재하는 경우일지라도 서쪽이 더 높은 기압값을 가지고 있음을 알 수 있다.

일기도를 통해 분석된 각 중관패턴은 각기 다른 오존 농도 평균값을 가지는 것으로 확인되었다(표 2). P1~P3은 나머지 3개의 중관패턴에 비해 일평균 농도와 일최대농도의 평균값이 높은 것으로 나타났다. 특히 일최대농도의 평균은 10 ppb 가량 높은 평균값을 보였다. 2지점 이상에서 80 ppb를 초과한 경우는 P1이 31일로 가장 많았고 패턴 내 출현 빈도도 33%로 높게 나타났다. 초과 빈도수는 11일로 P4가 더 높지만 출현 빈도로 보았을 때 P2가 21%, P3이 16% 순으로 나타났다. 또한 표 2에서 살펴본 패턴별 평균 운량 값에서 P1~P3은 3/10 이하의 낮은 운량을 기록했으므로 광화학 오염 물질인 오존의 생성에 유리할 것으로 분석된다. 이러한 결과를 종합해 볼 때 P1~P3은 오존의 고농도 가능성이 높은 패턴으로 오존의 포텐셜을 예측하는데 필수적으로 고려해야 할 패턴으로 분류할 수 있다.

3.1.2 국지 기상 조건

최근 5년간 4월에서 6월의 울산지역 12개 대기오

Table 3. A statistical summary of meteorological variables observed during O₃ episode and non-episode days (Mean ± 1σ).

	Episode day	Non-episode day
Daily mean temp. (°C)	21.7±2.7	17.6±3.9
Min. temp. (°C)	15.7±3.6	13.4±4.5
Max. temp. (°C)	28.1±2.5	22.1±4.4
Daily range of temp. (°C)	12.4±2.7	8.7±3.8
Amounts of cloud	2.9±2.2	5.4±3.2
Rate of sunshine	0.7±0.2	0.4±0.3
Daily mean RH (%)	53.5±8.8	63.0±16.1

염 측정 지점의 오존 자료를 고농도 일과 비고농도 일로 나누어 주요 기상 조건과의 관계를 분석해 보았다.

표 3은 오존 고농도일과 비고농도일에 대한 기온과 일조율, 상대습도, 운량의 평균값과 편차를 나타낸 것이다. 전반적으로 고농도일이 비고농도일에 비해 높은 기온 분포와 큰 일교차를 갖는 것을 알 수 있다. 특히 평균기온은 약 4°C 가량 고농도일이 높게 나타났으며, 일 최고기온은 편차값을 포함해서 25°C 이상의 분포를 보였다. 고농도일의 일교차는 대부분 10°C 이상으로 크게 나타났으며, 운량 또한 평균 3/10 내외로 비교적 안정하고 맑은 기상 상태임을 짐작할 수 있다. 이러한 분석은 기온의 증가에 따라 오존의 생성량이 증가함을 밝힌 기존의 여러 연구 결과와 일치하고 있다(김유근, 2004; 김유근 등, 2002; Olszyna *et al.*, 1997; Sillman and Samson, 1995; Vukovich, 1994). 높은 기온은 강하고 지속적인 일사에 의해 나타날 수 있으므로 일조시간을 가조시수로 나눈 일조율과 농도와의 관계를 살펴보았다. 일조시간은 태양광선이 구름이나 안개 등에 차단되지 않고 지표면을 비춘 시간을 말하며, 가조시수는 태양이 동쪽 지평선에 나타나면서부터 서쪽 지평선으로 사라질 때까지의 시간을 뜻하므로 일조율이 1에 가까울수록 구름이 적은 맑은 날씨임을 뜻한다. 고농도일은 평균 0.70의 일조율을 나타내어 상당히 맑은 날씨였음을 확인할 수 있으나 비고농도일은 평균값이 0.43이며 편차가 0.32로 나타나 일정한 날씨가 지속되지 않음을 확인할 수 있다. 상대습도의 값을 비교하면 고농도일은 50% 내외로 비교적 건조한 봄철 날씨를, 운량이 많았던 비고농도일은 60% 내외로 고농도일에 비해 상대적으로 습한 날씨를 보이고 있음을 알

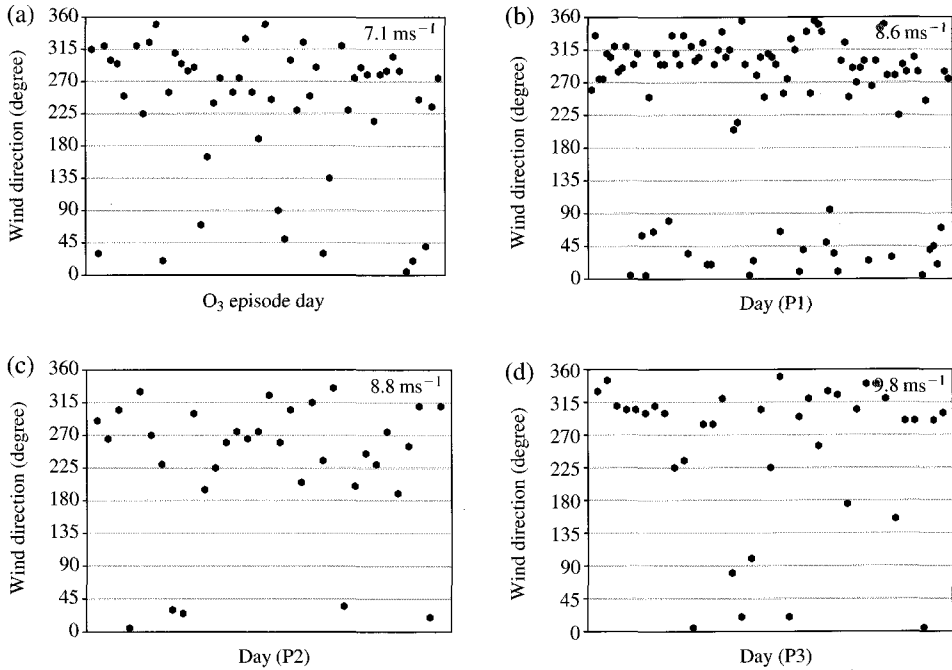


Fig. 4. Wind direction and mean wind speed at 850 hPa (0000 UTC) in Pohang during (a) O₃ episode days, (b) the days belonging to P1, (c) P2, and (d) P3, respectively.

수 있다.

3. 1. 3 850 hPa 상층풍

지상의 대기오염 물질은 대기의 흐름에 따라 다른 지역으로 이동하기도 하고 혹은 정체되어 그 피해 정도가 다르게 나타난다. 따라서 바람장의 형성에 기본이 되는 종관풍을 울산과 근접한 포항지점의 0000 UTC 상층 관측 자료의 850 hPa 상층풍 분석을 통해 알아보았다.

그림 4는 오존의 고농도일과 오존의 고농도 가능성이 높은 종관패턴으로 분류된 P1~P3의 850 hPa 0000 UTC의 풍향과 평균 풍속을 나타낸 것이다. (a)에서 확인할 수 있는 오존 고농도일의 특징은 해풍 지연효과를 유발할 수 있는 북서풍계의 바람이 상층에서 탁월하게 나타나고 있다는 것이다. 270°~360° 사이의 풍향이 발생한 빈도는 고층기상관측자료의 결측을 제외하여 얻은 52일 중 27일로 나타나 총 52%의 비율을 차지했다. 이때의 평균풍속은 연구기간(2000~2004년, 4~6월)의 850 hPa (0000 UTC) 풍속의 평균인 8.9 ms⁻¹보다 작은 7.1 ms⁻¹로 비교적

약한 북서 종관풍이 오존의 고농도 현상과 관계가 깊은 것을 알 수 있다. (b)와 (d)에서 나타내고 있는 P1과 P3의 풍향은 일기도 분석에서 언급한 것과 같이 실제 북서풍이 지배적으로 나타났다. P1의 경우 8.6 ms⁻¹의 평균풍속을 나타내어 연구기간의 평균풍속과 비슷한 수치를 보였으나, P3은 9.8 ms⁻¹로 다소 강한 풍속분포를 나타내고 있다. (c)의 P2는 종관장의 영향이 크지 않으나 약한 고기압의 영향이 존재하는 경우로서 북서풍의 빈도가 다른 풍향에 비해 크게 나타나지만 비교적 풍향이 분산된 모습을 보이고 있다. 평균 풍속은 8.8 ms⁻¹로 나타났다.

3. 1. 4 해풍의 발생 여부와 시작시간

해풍 발생일은 오인보 등(2004)의 선행 연구에서 제시한 기준을 토대로, 전운량이 8/10 이하인 맑은 날 중에 해풍의 도달 여부를 먼저 알 수 있는 평탄한 해안에 위치한 공단 AWS 지점의 1300~1700 LST 풍향이 남동풍 계열이며, 해당 시간의 평균 풍속이 2~5 ms⁻¹ 구간에 포함되는 경우로 선정하였다. 풍향은 울산지역 해안선의 모습과 지형적 특성을 반영한

것이며, 풍속구간은 전형적인 해풍의 풍속범위와 종관풍의 영향을 최대한 배제시키고자 고려한 것이다. 해풍 시작 시간은 해풍 발생일을 대상으로 해풍으로의 풍향전환과 함께 2 ms^{-1} 이상의 풍속이 나타나는 시점으로 정의하였고, 해풍 유입 시 나타나는 지상 기온의 감소와 습도의 증가현상이 함께 고려되어 선정되었다.

표 4는 본 연구의 해풍일 기준을 바탕으로 선정된 해풍일 및 비해풍일의 분포와 각각의 경우에 해당되는 오존의 통계치를 나타낸 것이다. 연구대상 기간 455일(2000~2004년, 4~6월) 중 해풍일은 98일(22%)로 나타났으며 비해풍일과의 농도 수준 비교에서 해풍일이 높은 값을 보임을 확인할 수 있었다. 일 최고 1시간 평균 농도의 경우 비해풍일의 값 보다 10 ppb 정도의 차이를 가지며 높게 나타났고, 특히 1시간 기준치(80 ppb) 초과일 수의 경우 총 해풍 발생일인 98일 중 35일이 분포하여 36%의 비율을 차지해 비해풍일과 상당한 차이를 보여주었다. 이렇게 뚜렷한 해륙풍 순환이 오존의 고농도 발생에 기여하는 것은 다수의 선행 연구에서 알려진 바 있다(Cheng, 2002; Liu *et al.*, 2002). 그러나 비해풍일에도 적지 않게 고농도 발생일수가 나타났는데, 대기정체와 함께 나타나는 국지적인 효과와 특정 종관풍의 영향 하에 나타나는 지역 규모 이상의 장거리 수송 효과 등이 존재함을 간접적으로 보여준다고 할 수

있다.

일반적으로 해풍은 일출과 함께 해안에서부터 발생하지만 지형과 종관류의 영향으로 내륙으로 유입되는 시간이 달라진다. 특히 종관류가 내륙에서 해안으로 향하는 offshore 기류일 때 해풍 시작이 지연되는 현상이 뚜렷하게 나타날 수 있는데, 이때는 해풍 전선의 이동속도가 느려지며 내륙으로의 해풍침투가 억제된다(Melas *et al.*, 1998). 이러한 해풍지연현상은 오염물질의 축적 및 수송과 관련하여 오존 농도를 상승시킬 수 있음이 연구되었으며(Ma and Lyons, 2003), 특히 오인보 등(2004)은 부산지역에 대해 해풍지연현상이 고농도 오존을 유발시키는 중요한 인자로 작용됨을 밝혀내었다. 본 연구에서는 해풍 발생일로 선정된 98일을 대상으로 해풍 시작 시간을 분석하고 그 변화에 따른 오존 농도를 함께 분석하였다.

표 5는 해풍 시작 시간의 분포와 각 시간대별 해풍일수 및 지상 기상조건, 그리고 오존 농도와와의 관계를 나타낸 것으로, 주요 특징을 살펴보면 다음과 같다. 해풍 시작 시간은 0800 LST에서 1300 LST까지 상당히 넓은 범위로 분포하고 있으며, 전체 해풍일의 약 57%가 0900 LST와 1000 LST에 해풍이 시작되고 있다. 대기오염물질의 이동 정도 파악이 가능한 주간(1000~1500 LST) 풍속은 해풍이 지연됨에 따라 감소 경향을 보인다. 한편, 해풍 시작 시간이 지연되는 날 새벽에 높은 빈도의 육풍 존재가 확인되었으며 특히 1100 LST 이후로는 70% 정도의 육풍이 나타남을 볼 수 있다. 육풍의 존재는 0000~0600 LST 동안 북서풍 계열의 바람이 4시간 이상 나타남 경우로 선정하였다(오인보 등, 2004). 육풍의 풍속이 매우 약하다는 것을 감안할 때 종관적으로 약한 offshore 기류의 영향을 받아 육풍의 존재가 뚜렷했음을

Table 4. O₃ statistics of sea breeze (SB) and non-sea breeze days (NSB).

	Daily max. 1-h con.	No. of days > 1-h/80 ppb
SB (98 days)	74.9 ± 23.6 ^a	35 (35.7)
NSB (357 days)	64.4 ± 17.8	65 (18.2)

^a Mean ± σ

Table 5. Meteorological conditions and O₃ statistics for a given onset time of sea breeze.

Onset time of sea breeze (LST)	Meteorological conditions			O ₃ statistics	
	No. of days	Wind speed 1000~1500 LST (ms ⁻¹)	Land breeze (%)	Daily max. 1-h con. (ppb)	No. of days > 1-h/80 ppb (%)
0800	9	4.0 ± 0.18	2 (22)	68.3	2 (22.2)
0900	19	3.8 ± 0.33	9 (47)	65.3	3 (15.8)
1000	37	3.8 ± 0.37	18 (49)	74.5	13 (35.1)
1100	14	3.7 ± 0.34	11 (79)	79.6	7 (50.0)
1200	11	3.6 ± 0.28	7 (70)	91.5	8 (72.7)
1300	8	3.5 ± 0.65	5 (63)	75.3	2 (25.0)

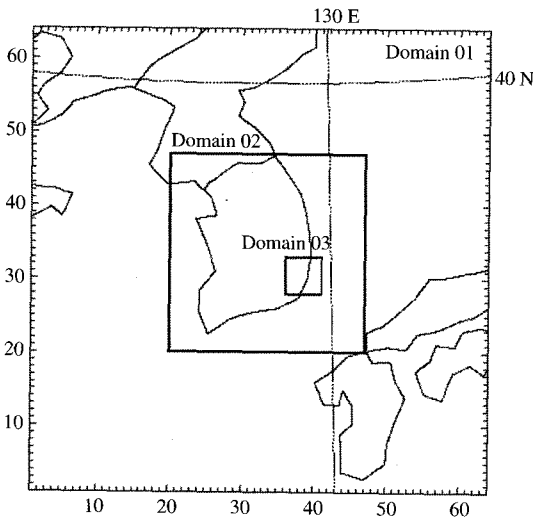


Fig. 5. Three horizontal domains for MM5 simulation.

유추할 수 있으며, 이는 표 5의 결과의 해풍지연 현상이 약한 offshore 기류의 영향 하에 있음을 간접적으로 시사한다. 아울러 뚜렷한 육풍의 존재는 새벽에 도심 오염물질이 인근 연안으로 이동되고, 일출 후 충분한 시간동안 연안 부근에서 정체되어 오존의 축적 현상을 나타내어, 고농도 대기오염 현상을 일으키는데 중요한 요소임을 알 수 있다. 해풍 시작 시간에 따른 오존 통계치의 변화에서 해풍이 지연될수록 전반적으로 모든 수치가 증가하는 경향을 보였고, 특히 1200 LST 이후에 해풍이 발달할 때 1시간 최대 농도의 평균이 92 ppb로, 1시간 기준치 초과 일수는 8회로 73%를 나타내어 가장 고농도의 가능성이 높은 것으로 나타났다.

3.1.5 대기혼합고

오염물질의 수직확산거리를 결정하는 혼합고는 그 고도내의 평균 풍속과 함께 혼합용량을 대변하는 중요한 변수에 해당한다. 그러나 지역의 대기혼합고(PBL, Planetary Boundary Layer)를 상시 관측할 수 없으므로 본 연구에서는 중규모 기상모델인 MM5(NCAR/PennState Fifth Generation Mesoscale Model)를 사용해 일별 혼합층 고도(PBLH, PBL height)를 산출하여 대기오염 농도와와의 관계를 분석하였다.

그림 5는 모델의 도메인을 나타낸 것이다. Two-way integrating nested grid system 방법을 사용하여

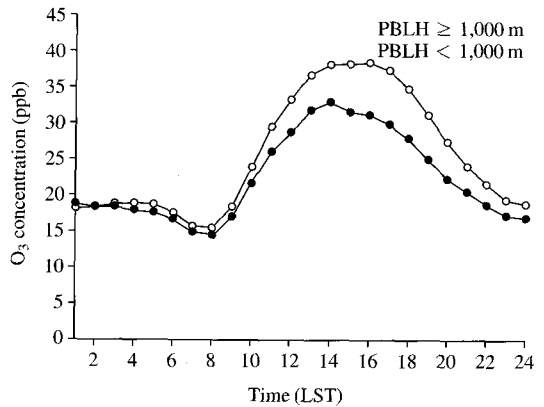


Fig. 6. Diurnal variations of O₃ concentrations for max. PBLH ≥ 1,000 m and max. PBLH < 1,000 m.

결과를 생산했다. 중심은 36°N, 128°E로 3개의 도메인을 설정하였으며, 각 도메인의 격자간격은 18, 6, 2 km, 수평영역은 62×62, 82×82, 40×40이다. 시그마 좌표를 사용한 연직층은 23개로 혼합고의 특성을 살펴보기 위해 약 300m의 간격을 가질 수 있도록 설정하였다.

모델의 초기 입력값의 균형을 맞추기 위해서 24시간 초기적응시간을 두었다. MM5의 초기 기상장 입력자료는 미국 대기환경예보센터(NCEP, National Centers for Environmental Prediction)에서 제공하는 전지구 분석자료(CDAS, Climate Data Assimilation System)를 사용하였다. CDAS 자료는 6시간 간격으로 연직 17층, 수평 2.5° 간격으로 구성된 전지구 관측자료로써 모델에 필요한 초기 기상입력 자료가 저장되어있다. 혼합고를 구하기 위해 모델을 수행한 기간은 2000~2004년의 4~6월이며, 혼합고를 산출한 지점은 울산 기상대 지점이다.

분석한 모델 결과의 평균 일 최대 혼합고는 약 1,400 m였으며, 평균값의 70%에 해당하는 1,000 m 이하의 혼합고를 연직적인 혼합 용량이 작은 경우로 간주하여 그림 6에 혼합고가 1,000 m 이상인 경우와 1,000 m 이하인 경우의 오존의 시간별 농도를 비교해 보았다. 일 최대 혼합고가 1,000 m 이상인 경우 주간에 높은 농도를 나타내는데, 대기 혼합 용량이 커졌음에도 불구하고 농도가 높은 이유는 오존의 고농도 현상에 높은 기온이 관여한다는 사실에서 원인을 찾을 수 있다. 혼합고는 연직적인 대기의 혼합 높

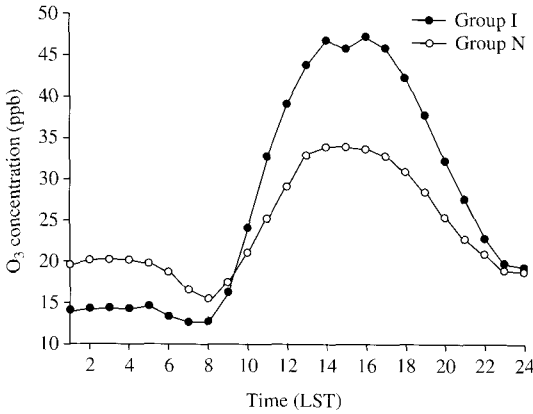


Fig. 7. Diurnal variations of O₃ concentrations for Group I (TSUM ≥ 2) and Group N (TSUM < 2).

이로 지표 가열이 활발할 때 원활한 대류 현상에 의해 높아지게 된다. 활발한 지표 가열은 높은 기온과 일사량이 충분할 경우 가능한데, 오존의 고농도 현상과 이 두 가지 요소가 관계가 깊다는 것을 앞서 밝혀낸 바 있다. 따라서 혼합고가 증가할수록 오존의 농도가 약하게 증가하는 경향을 보인 것은 고농도 오존의 기상학적 생성 메커니즘과 관계되어 나타난 것으로 보인다.

3. 1. 6 야간 안정도

일최대 혼합고가 주간의 대기혼합용량을 결정하는 요소라면 야간 안정도는 야간의 대기혼합용량을 나타내는 지표라 할 수 있다. 야간 기온의 연직 구조를 살펴 안정도를 나타내기 위해 본 연구에서는 10 m 타워 관측을 통해 2층 구조(2m와 10m)의 기상 인자값을 측정하였다. 야간 역전의 강도를 추정하기 위해 2층 온도구배 값이 역전을 나타내는 시간대의 기온 차의 합(TSUM)을 이용하였다(임윤규 등, 2005).

2층 타워는 2002년 6월 20일에 설치되어 자료가 수집되었으며, 2004년 봄철 자료는 기기의 결함 등을 이유로 자료가 누락되어 본 연구의 연구기간에 맞춰 사용한 자료는 2003년 4월에서 6월의 자료이다. TSUM이 2 이상일 때 역전 강도가 강한 경우(Group I)로 보고, TSUM이 2 이하일 때 역전 강도가 약한 경우(Group N)로 나누어 농도 시계열을 분석해 보았다.

그림 7은 Group I와 Group N에 대해 오존 농도

Table 6. Relationship between previous day max. concentrations and mean of today's max. concentrations.

Con. of previous day (ppb)	O ₃ ≥ 80	40 ≤ O ₃ < 80	O ₃ < 40
No. of days > 1-h/80 ppb (%)	30 (30.3)	24 (7.3)	1 (4.0)
Mean of today's max. con. (ppb)	79.9	64.2	48.8

시계열을 나타낸 것이다. 야간 농도가 Group I에 비해 Group N에서 높게 나타나고 있다. Group N의 경우 상·하층 대기가 비교적 잘 섞여있는 상태로 상층에 잔존하고 있는 상대적으로 높은 농도의 오존이 하층에 영향을 줄 수 있으나, Group I의 경우는 상·하층의 공기 교환이 거의 일어나지 않는 절대 안정층이므로 농도가 오히려 낮게 나타나고 있다(오인보, 2003). 주간의 농도는 Group I가 약 20 ppb 가량 높게 나타나는데, 이는 일출 전의 대기 안정 상태에서 오존전구물질이 많이 축적되어 다음 날의 광화학 반응에 영향을 미쳐 나타나는 현상이다. 따라서 야간의 역전 강도가 강할수록 주간의 농도는 높아질 확률이 높아진다고 할 수 있다.

3. 1. 7 전날 일 최대 오존 농도

야간의 역전층 형성이 다음 날의 대기오염 농도를 높일 수 있는 것은 역전층 내에 잔류하는 전날의 오염 물질에 의한 것이라 할 수 있다. 따라서 하루 전의 대기오염 농도와 오늘의 농도의 관계를 분석해 보았다.

표 6은 오존의 전날 일최대 농도를 3개의 구간으로 나누어 오늘의 일최대 농도와의 관계를 분석한 것이다. 오존은 전날의 일최대 농도가 1시간 농도 기준치 80 ppb 이상(구간 A), 그 절반 수준인 40~80 ppb(구간 B), 그리고 40 ppb 이하(구간 C)인 경우로 나누어 오늘의 일최대 농도 수준을 살펴보았다. 오늘의 일최대 농도 평균의 경우 구간 A가 80 ppb로 가장 높았고 구간 B는 64 ppb, 구간 C는 49 ppb로 나타났다. 구간 C를 제외하고 나머지 두 구간은 오늘의 일최대 농도 평균값이 구간에 대체로 포함되는 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 오늘의 1시간 농도 기준치 초과 횟수와 초과 비율을 살펴보면 구간 A가 가장 높고 구간 C는 단 하루가 초과했음을 보여 전날의 농도가 높을수록 오늘의 농도 역시 높아질 확률

Table 7. Various air pollution potential factors in association with high O₃ episode days.

	Potential factor	Marked variables
Synoptic patterns	P1, P2, P3	
Various meteorological parameters	Daily max. temperature (°C)	[Tmax]
	Rate of sunshine	[sun]
	Amounts of cloud	[cloud]
Synoptic flow	u and v component at 850 hPa	[U850] · [V850]
Sea breeze effect	Onset time of sea breeze	[time]
	Mean wind speed (1000~1500 LST)	[win (1015)]
Atmospheric stability	PBL (Planetary boundary layer) height	[PBLH]
	TSUM	[TSUM]
	Mean wind speed (0100~0600 LST)	[win (0106)]
	u and v component at 0500 LST	[U05] · [V05]
Persistence of high pollution levels	Concentration of previous day	[conc]

이 높은 것을 알 수 있다. 이는 오존의 생성역학과 관계가 깊다. 오존은 광화학 반응에 의해 생성되고 소멸되는 물질로 주간에는 높은 농도를 나타내어도 야간에는 NO와의 적정작용으로 인해 O₂와 NO₂로 해리되어 농도가 낮아진다. 이렇게 형성된 NO₂는 대기 중에 잔류하여, 일출 후 출근시간에 배출된 NO₂와 함께 오존을 형성시키는 전구물질의 역할을 수행하게 된다. 이러한 이유로 인해 전날의 높은 농도가 다음 날의 고농도를 야기할 수 있다.

3.2 중회귀 모형을 이용한 오존 포텐셜 예측 모형 설계

대기오염 포텐셜 계산을 위해 지금까지 분석한 대기오염 농도와 여러 기상요소들의 관계를 수치화 시키고 높은 상관성을 나타내었던 요소들을 중심으로 중회귀 모형의 입력변수를 선정하였다. 표 7은 선정된 변수와 그를 기호화한 것이다. 현재의 날씨를 가장 포괄적으로 정의할 수 있는 6개로 분류된 종관패턴 중에서 고농도와 관계가 깊은 P1, P2, P3의 세 가지 패턴에 대한 중회귀 모형을 설계한다. 각 회귀모형에 사용되는 포텐셜 인자는 다음과 같다. 일최대 혼합고의 발달에 영향을 미쳐 대기의 혼합 용량을 결정짓는 일최대 기온, 기온에 영향을 미치는 일조율, 일조시간을 결정짓는 운량은 가장 간단하면서도 기본적인 포텐셜 인자로 선정되었다. 또한 국지순환에 영향을 미치는 종관풍의 강도와 방향을 알아보기 위해 울산과 인접한 지역인 포항의 0000 UTC의 850 hPa U와 V를 사용하였다. 종관풍의 영향에 따라 발

Table 8. Multiple linear equations for predicting O₃ concentration.

Patterns	Equations	R ²
P1	[O ₃]=0.52066+2.09273 [Tmax]	0.4325
	+0.62618 [850 U]+0.77685 [time]	
	+0.00365 [PBLH]+4.35931 [TSUM]	
	+0.18495 [conc]	
P2	[O ₃]=12.37217+23.03921 [sun]	0.6685
	-1.18169 [850 V]+5.61329 [TSUM]	
	+0.61913 [conc]	
P3	[O ₃]=36.65667+14.84429 [sun]	0.4467
	+0.43776 [conc]	

생여부가 결정되는 울산지역의 대표적인 국지순환 형태인 해풍의 발생 유무를 0과 1의 수치로 표현하였으며, 해풍이 시작되는 시간에 따라 농도에 미치는 영향이 다름을 파악하고 해풍의 시작시간 또한 인자로 포함시켰다. 낮 동안의 풍속을 가늠하여 대기의 혼합 정도와 해풍의 강도 등을 나타내기 위해 1000~1500LST의 평균풍속 역시 포텐셜 인자로 사용하였다. 앞서 밝힌 일최고 기온과 해풍 등의 영향을 받아 대기의 연직 혼합 능력을 결정짓는 혼합고를 MM5 모델링을 통해 얻어 일최대 혼합고를 의미 있는 요소로 선정하였고, 야간의 역전 강도를 판단할 수 있는 TSUM을 울산 지역 내에 설치되어 있는 2층 타워에서 얻은 기상 자료로 구해 포텐셜 인자로 선정하였다. 이때 야간 안정도를 나타내는 TSUM의 결측이 많으므로 이를 보충하는 인자로 일출직전인 0500 LST의 U와 V, 0100~0600 LST의 평균 풍속을

사용하였다. 마지막으로 오늘의 대기에 잔류하는 대기오염 물질의 농도 수준을 나타낼 수 있는 전날의 일최대 농도를 최종 포텐셜 인자로 선정하였다.

표 8은 중관패턴별로 설계된 중회귀식과 회귀모형에 의해 종속변수가 설명되어지는 정도를 나타내는 값인 결정계수(R²)를 나타낸 것이다. 결정계수는 0~1 사이의 값을 가지게 되는데 객관적으로 결정계수의 값이 클수록 회귀식의 설명력이 높다고 알려져 있다. 그러나 결정계수가 0.9 이상이 되면 오히려 다중공선성(multicollinearity) 문제가 발생하여 회귀식을 통해 구한 종속변수의 값이 불안정할 확률이 높아진다. 따라서 표 9에 제시된 회귀식은 다중공선성의 문제를 발생시키지 않으면서 비교적 큰 결정계수를 가지는 경우로 선택된 것이다. 결정계수가 작은 경우에도 회귀식의 검증결과 적절하게 현상을 표현하고 있다면 설명력이 높은 회귀식이라고 연구자의 주관에 따라 판단이 가능하다.

4. 오존 포텐셜 예측 모형의 평가

각 패턴별로 선정된 회귀식의 타당성을 살펴보기 위해 회귀식 선정에 사용되었던 자료를 각 식의 변수에 대입해 그 결과를 비교해 보았다. 모형을 평가하기 위해 전체 날짜에 대한 산포도와 모의 정확도(O₃ Simulation Accuracy)를 분석하였다. 모의 정확도는 퍼센트 단위로 표현되며 값이 높을수록 예보의 정확도가 높다고 할 수 있다. 또한 포텐셜 예측의 주목적인 고농도일 예측 능력을 확인하기 위해 고농도일(1시간 농도 80 ppb 이상)과 비고농도일로 나누어

Bias와 RMSE를 분석하였다. Bias는 모형 결과값의 치우침 정도를 나타내는 것으로 1에 가까울수록 정확도가 높다고 할 수 있으며, RMSE는 관측값과 결과값 사이의 평균적인 오차 크기로 수치가 작을수록 오차가 적은 것이다. 예측 정확도와 Bias 분석에 사용된 분할표는 표 9와 식(2)~(4)에 나타내었고, RMSE는 식(5)에 나타내었다.

$$O_3 \text{ Simulation Accuracy} = (A+D)/N \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Bias (H)} = (B+D)/(C+D) \quad (3)$$

$$\text{Bias (NH)} = (A+C)/(A+B) \quad (4)$$

$$\text{RMSE} = [\sum (P_i - O_i)^2/n]^{1/2} \quad (5)$$

여기서, N=A+B+C+D로 자료의 개수를, P_i는 모형 결과값, O_i는 관측값, n은 예측 날짜 수이다.

그림 8은 산포도를 나타낸 것으로 P1~P3 모두 모형의 결과값이 관측 농도보다는 다소 과소모의 되고 있는 것을 알 수 있다. 이 중에서도 고농도 기준인 80 ppb보다 낮은 농도구간에서는 일부 과대모의 하는 경향이 나타났고 80 ppb를 초과하는 경우는 일부 과소모의 하는 것으로 나타났다. 표 9에서 제시한 분할표와 제시한 식을 바탕으로 계산한 모의 정확도

Table 9. Contingency table used for verification of ozone prediction accuracy.

	Predicted O ₃ conc. < 80 ppb	Predicted O ₃ conc. ≥ 80 ppb
Observed O ₃ conc. < 80 ppb	A	B
Observed O ₃ conc. ≥ 80 ppb	C	D

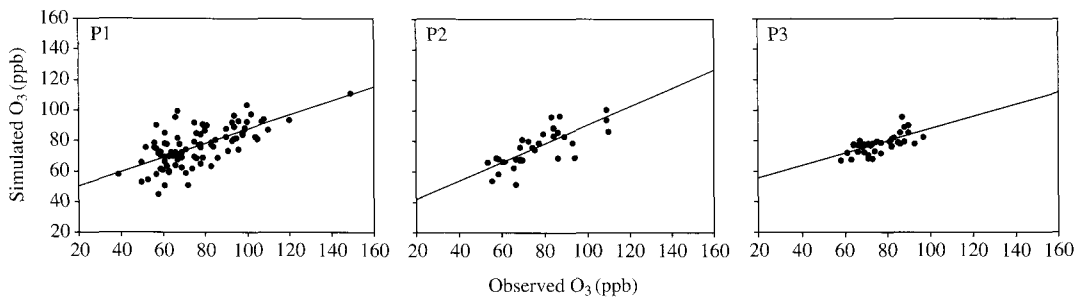


Fig. 8. Scatter plots of simulated (ordinate) versus observed (abscissa) concentrations using a multiple regression model during April through June, 2000~2004.

분석 결과 P1, P2, P3은 각각 79, 85, 95%로 나타나 P3이 가장 정확하게 고농도일과 비고농도일을 모의하는 것으로 나타났다.

표 10은 고농도일과 비고농도일로 나누어 RMSE와 Bias를 분석한 결과이다. 모의 정확도가 높은 것으로 나타난 P3의 경우 세 개의 패턴 중 RMSE 값이 낮고, Bias 값이 1.0으로 나타나 예측 능력이 가장 뛰어난 것으로 분석되었다. P1의 경우 고농도일은 다소 과대모의를, 비고농도일은 과소모의 하는 것으로 나타났고, P2의 경우 고농도일은 과소모의를, 비고농도일은 과대모의 하는 것으로 나타났다.

회귀모형을 미래의 포텐셜 예측에 사용한다고 가정하고, 설계 시 사용했던 입력 자료가 아닌 2005년 4~6월의 자료를 이용해 포텐셜 예측 능력을 검증해 보았다. 이를 위해 해당 기간의 종관패턴을 기상청에서 제공한 0000 UTC의 일기도를 살펴보고 주관에 따른 패턴분류를 시행했다. 총 91일 중 P5가 30일로 가장 빈번히 나타났으나 운량은 평균 7/10으로 많은 편이었고 일최대 1시간 농도 평균도 60 ppb로 평이한 수준으로 나타났다. P2는 29일, P3은 20일로 나타났고 각각 74, 78 ppb의 상당히 높은 일최대 평균농도를 나타냈으며 기준치 초과빈도는 9회(31%), 8회(40%)로 나타났다. P1이 9일, P4가 3일로 나타났으며 각각 65, 53 ppb의 일최대 1시간 농도 평균을 나타내었다. P6은 나타나지 않았다.

분석된 자료를 중회귀 모형에 입력하여 오존 포텐셜을 예측하고 예측율을 평가해 보았다. 그림 9는 중회귀 모형으로 예측된 오존 농도와 관측값과의 일치도를 확인하기 위해 산포도로 농도 분포를 나타낸 것으로 P1은 전체적으로 과대모의를, P2와 P3은 다

소 과소모의하는 것으로 나타났다. 모의 정확도를 분석한 결과 P1, P2, P3은 각각 78, 75, 70%로 나타나 모형을 설계한 입력자료를 넣어 검증한 결과보다는 낮은 수치임을 확인할 수 있었다.

고농도일과 비고농도일로 나누어 RMSE와 Bias를 분석한 결과는 표 11에 나타내었다. P1의 경우 80 ppb를 초과하는 관측값이 없어 고농도일 RMSE와 Bias 값이 계산되지 않았다. 3개의 패턴 모두 RMSE 수치가 표 10에 제시된 값과 비교 시 상승한 것을 알 수 있다. 이는 모형을 설계한 값이 아닌 새로운 입력자료로 인한 불안정성이 반영된 것으로 통계 모형의 한계를 나타내는 부분이라 할 수 있다. Bias 분석 결과 예측값과 관측값과의 차이가 2000~2004년 자료를 사용한 경우보다 다소 큰 것을 확인할 수 있다. 그러나 그 정도가 크지 않고 평균 정확도가 70% 이상으로 나타나 울산지역 포텐셜을 예측하는데 무

Table 10. Basic statistics for Ulsan ozone potential simulation (2000~2004).

	RMSE			Bias		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Episode day	11.2	10.8	5.5	1.1	0.9	1.0
Non-episode day	13.1	6.8	8.7	0.9	1.1	1.0

Table 11. Basic statistics for Ulsan ozone potential forecasts (2005).

	RMSE			Bias		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Episode day	-	12.7	18.4	-	1.1	0.8
Non-episode day	16.4	15.3	14.8	0.8	0.9	1.2

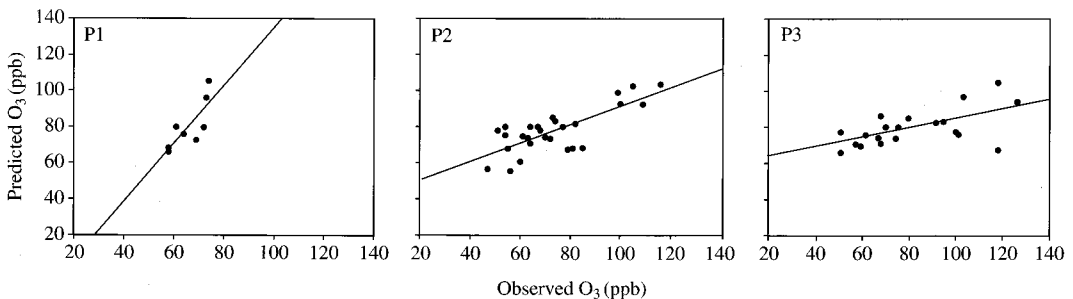


Fig. 9. Scatter plots of predicted (ordinate) versus observed (abscissa) concentrations using the multiple regression model during April~June, 2005.

리가 없는 것으로 사료된다.

따라서 본 회귀모형은 미래의 기상자료를 이용해 울산지역의 오존 포텐셜을 예측하는데 적절한 모형이라 사료된다. 특히 고농도 가능성이 높은 종관패턴을 중심으로 회귀식을 선정하여 패턴에 따른 포텐셜 예측 능력을 비교함으로써 고농도에 대한 접근을 보다 용이하게 하였으며 현업에서의 활용 가능성을 높이는데 기여하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 울산지역의 심각한 대기오염 물질인 오존을 대상으로 대기오염 포텐셜 인자 선정 및 예측 모형을 설계하였다. 오존 포텐셜 인자를 선정하기 위해 최근 5년간(2000~2004년) 오존의 고농도 현상이 가장 빈번하게 나타나는 4~6월을 대상으로 발생빈도와 농도분포 특성을 살펴보았다. 또한 기온과 국지 풍계에 의해 농도수준과 공간적인 분포가 달라지는 오존의 특성을 감안해 종관패턴 분류, 국지 기상특성 분석, 해풍, 혼합고, 야간 안정도, 전날 오존 농도 등을 현재 농도와 비교 분석하였다. 그 결과 수치화하여 변수로 사용할 수 있는 인자들을 울산지역 오존 포텐셜 인자로 선정하였고, 분류된 6개의 종관패턴(P1~P6) 중 오존의 고농도 현상이 가장 빈번하게 나타났던 3개의 종관패턴(P1~P3)에 대해 선정된 포텐셜 인자를 이용해 중회귀 모형을 설계하였다. 중회귀 모형을 적용한 결과 전체적으로 다소 과소모의 하는 경향이 있으나, 고농도일을 기준으로 한 모의 정확도 분석 시 약 80% 정도 모의 정확성을 가지는 것으로 나타나 실제 울산지역 오존의 포텐셜을 예측하는데 무리가 없는 것으로 판단되었다. 또한 모형 설계 시 사용하지 않았던 2005년 4~6월 자료를 이용하여 현업에서의 예측 능력을 판단해 본 결과, 평균 74%의 예측 정확도를 나타내어 현업에서도 큰 무리 없이 사용이 가능할 것으로 판단되었다.

본 연구결과는 울산지역 오존의 고농도 현상과 높은 상관성을 보이는 기상요소를 종관적·국지적으로 파악하여 이를 수치화하여 정리하였다는 점에서 중요한 의미가 있다. 또한 오존 포텐셜을 예측하여 고농도 가능성이 높은 날의 배출량을 규제하면 고농도 오존 현상의 발생을 예방하는데 크게 기여하리라 생각한다.

감사의 글

본 연구는 환경부 지정 울산지역 환경기술개발센터의 2006년 연구비로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

김용국, 이종범(1994) 하계의 일 최고 오존농도 예측을 위한 신경망모델의 개발, 한국대기보전학회지, 10(4), 224-232.

김유근(2003) 울산의 대기오염 기상조건과 기상여건에 따른 대기오염실태조사, 울산지역환경기술개발센터, 02-2-40-42.

김유근(2004) 울산의 대기오염 기상조건과 기상여건에 따른 대기오염실태조사, 울산지역환경기술개발센터, 03-2-40-42.

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

김유근, 이화운, 전병일, 홍정혜, 문윤섭(1996) 부산연안역에서의 대기오염기상 P보시스템 개발에 관한 연구, 한국환경과학회지, 5(4), 399-410.

박정균, 이동규(1998) 근접분석에 의한 아시아 동안에서 급격히 발달하는 저기압의 분류와 그 발달기구, 한국기상학회지, 34(4), 523-537.

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

오인보, 김유근, 황미경(2004) 연안도시지역 해풍지역이 오존분포에 미치는 영향, 한국대기환경학회지, 20(3), 345-360.

이보람, 박순용(1997) 종관 기상 상태를 고려한 한반도 대기 오염 퍼텐셜 예측법, 한국기상학회지, 33(4), 641-656.

이종범(1991) 중부지방 각지의 대기오염 잠재력에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 7(1), 41-47.

임윤규, 김유근, 오인보, 송상근(2005) Theherosonde와 기상탑 관측 자료를 이용한 울산지역 야간 역전에 따른 대기오염도 변화와의 관계, 한국환경과학회지, 14(6), 555-563.

허정숙, 김동술(1993) 다변량 통계분석을 이용한 서울시 고농도 오존의 예측에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(3), 207-215.

환경부(2004) 대기환경일보 2004년 6월, 60 pp.

- Berlyand, M.E. (1991) Prediction and regulation of air pollution, Kluwer Academic Pub., 312 pp.
- Brain, S. Everitt (1993) Cluster analysis, 3rd edit., Halsted Press, 170 pp.
- Cheng, S. and K.C. Lam (2000) Synoptic typing and its application to the assessment of climatic impact on concentrations of sulfur dioxide and nitrogen oxides in Hong Kong, 34, 585-594.
- Cheng, W.L. (2002) Ozone distribution in coastal central Taiwan under sea breeze conditions, Atmos. Environ., 36, 3445-3459.
- 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., 5, 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, Journal of Applied Meteorology, 33, 1182-1199.
- Ioannis, C.Z., M. Dimitrios, S.Z. Christos, and F.B. Alkiviadis (1995) Forecasting peak pollutant levels from meteorological variables, Atmos. Environ., 29(24), 3703-3711.
- 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.
- Malet, L.M. and A. Joukoff (1978) Meteorological factors and air pollution index, WMO Rept., 510, 135-142.
- Malet, L.M., A. Joukoff, and L. Tfullemans (1983), Daily forecasts of the air pollution meteorological potential for the five biggest Belgian urban areas using the forecasted data received from the European Center for Medium Weather Forecasts, WMO Rept., 394-408.
- 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.
- Oanh, N.T.Kim, P. Chutimon, W. Ekbordin, and W. Supat (2005) Meteorological pattern classification and application for forecasting air pollution episode potential in a mountain-valley area, Atmos. Environ., 39, 1211-1225.
- Olszyna, K.J., M. Luria, and J.F. Meagher (1997) The correlation of temperature and rural ozone levels in southeastern U.S.A., Atmos. Environ., 31, 3011-3022.
- Sillman, S. and P.J. Samson (1995) Impact of temperature on oxidant photo-chemistry in urban, polluted rural and remote environments, J. Geophys. Res., 100, 11947-11958.
- Vukovich, F.M. (1994) Boundary layer ozone variations in the eastern United States and their association with meteorological variation: Long-term variation, J. Geophys. Res., 99(D8), 16838-16850.
- WMO (1972) Dispersion and forecasting of air pollution, WMO technical note, No. 121, 115 pp.