

## 궤적분석을 활용한 고농도 오존 원인규명에 관한 연구

도우곤<sup>†</sup> · 조정구  
대기보전과

### Investigation of the Cause of High Ozone Episode Days Using Trajectory Analysis

Do Woo-gon<sup>†</sup> and Cho Jeong-goo  
*Air Preservation Division*

#### Abstracts

High ozone concentrations result from an increase in the emission of precursors and the complex interaction between the synoptic weather condition caused by the pressure pattern and the local circulation induced by the topography. The increase in the emission of precursors is a direct cause of high ozone concentrations but in reality, it is impossible to know the hourly change of the emission correctly. So the cause of the high ozone concentrations is inferred indirectly from analyzing the hourly variation of ozone concentrations at regional air quality stations and the air current.

Busan is located on the southeast coastal area in the South Korea and has various air pollution emission facilities. Moreover the Busan is influenced by the neighboring industrial complex and has the typical circulation frequently occurred in the coastal area such as land-sea breeze. And therefore high ozone concentrations appear widely. In this sense, it is necessary to estimate the location of the emission source and to analyze the trajectory path of air current in order to control air pollution problems efficiently. The forward and backward trajectories in the urban scale like the Busan can be calculated by the HYSPLIT(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) model usually used to analyze the long range transport such as the Asian dust, with the result from three-dimensional atmospheric dynamic model, WRF(Weather Research and Forecast).

In this study the high ozone episodes, the days of the daily maximum ozone concentration exceeding 0.1 ppm at least two stations or more, were selected according to the ozone concentrations at air quality monitoring stations in the Busan and the surrounding area. The detailed wind fields and meteorological elements in the Busan and the surrounding area at the high ozone episode days were calculated by WRF with 4 domains, the AWS(automatic weather station) data in domain and the NCEP FNL(Final) operational global analysis data. The result of WRF simulation was entered into the HYSPLIT model to find out the forward and backward trajectories of the air current. The trajectory patterns were compared to the hourly variations of the ozone concentration at regional air quality stations to find out the transport of ozone from the surrounding area.

**Key words** : WRF/HYSPLIT, high ozone concentration, trajectory analysis

#### 서론

대기오염 저감대책 마련과 규제 및 환경관리를 위해서

는 대기오염 물질의 확산과 이류 현상에 관한 정확한 정보를 획득하는 것이 필수적인 일이다. 우리나라의 남동 연안에 위치한 부산, 울산, 경남지역은 해양의 영향과 내

<sup>†</sup> Corresponding author, E-mail : dou777@korea.kr  
Tel : +82-51-309-2928, Fax : +82-51-309-2929

륙의 복잡한 지형 등으로 인하여 해륙풍, 산곡풍 등 복합적인 국지규모 순환계와 중관규모 순환계가 모두 나타나므로 오염물질의 확산과 이류에 불리하여 대기오염이 심화되는 지역적 특성을 가지고 있다<sup>1)</sup>. 내륙지역과는 다른 대기오염 현상을 일으킬 수 있는 중요한 지형적 특성으로 인해 연안지역의 대기질을 수치적으로 연구한 여러 예가 있다<sup>2-4)</sup>. 연안지역의 혼합고 및 해륙풍의 발달 강도<sup>5)</sup>, 정체고기압 영향 하의 해풍과 지형에 의한 국지풍 등이 연안지역의 고농도 오존 현상과 깊은 관련이 있으며 해풍 발달에 의해 해안가에 위치한 공업도시들로부터 배출된 오염물질이 내륙 깊숙이 수송되는 등 다양한 사례가 밝혀지기도 하였다<sup>6)</sup>.

실제로 고농도 대기오염 에피소드는 대기오염 물질 배출량의 증가와 더불어 기압 배치와 같은 중관 규모의 기상요인, 지형 등에 의하여 형성되는 바람장과 같은 국지적인 기상요인이 복합적으로 작용하여 발생한다. 고농도 대기오염 에피소드의 직접적인 원인이 되는 대기오염 물질 배출량의 변화를 시간대별로 정확하게 파악하는 것은 현실적으로 불가능하므로 주변지역의 대기오염도 및 기류의 변화를 통하여 발생원과 이동경로를 파악함으로써 간접적으로 그 원인을 분석할 수 있다. 한반도의 남동 연안 지역에 위치한 부산은 다양한 배출원을 가지고 있으며 인접한 울산, 경남지역 공업단지의 영향과 연안지역에서 발

생하는 기상조건 등이 복합적으로 작용하여 고농도 대기오염 에피소드가 자주 나타나고 있으며 이러한 고농도 현상이 주변의 울산과 경남지역에 걸쳐 광역적으로 나타나기도 한다.

황사와 같은 장거리 수송현상의 기류 분석에 주로 사용되는 HYSPLIT 모델에 상세 기상장 모델의 결과를 입력 자료로 사용함으로써 부산지역과 같은 도시규모에서 전후방 궤적분석이 가능하다<sup>7)</sup>. 본 연구에서는 부산 및 인접지역의 대기오염 측정소를 바탕으로 고농도 오존일을 선정하고 WRF/HYSPLIT 시스템으로 전, 후방 궤적분석을 하여 고농도 오존 사례일에 대하여 기류의 이동경로 및 발생원을 파악하여 대기오염 제어대책 수립의 기초 자료로 활용하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 고농도 오존 사례일 선정

인접한 지역간의 기류에 의한 고농도 오존의 수송 현상을 파악하기 위하여 부산, 울산, 경남지역에서 운영중인 대기오염 측정소를 대상으로 고농도 오존 사례일을 선정하였다(Fig. 1). 2012년 현재 부산, 울산, 경남 지역에서

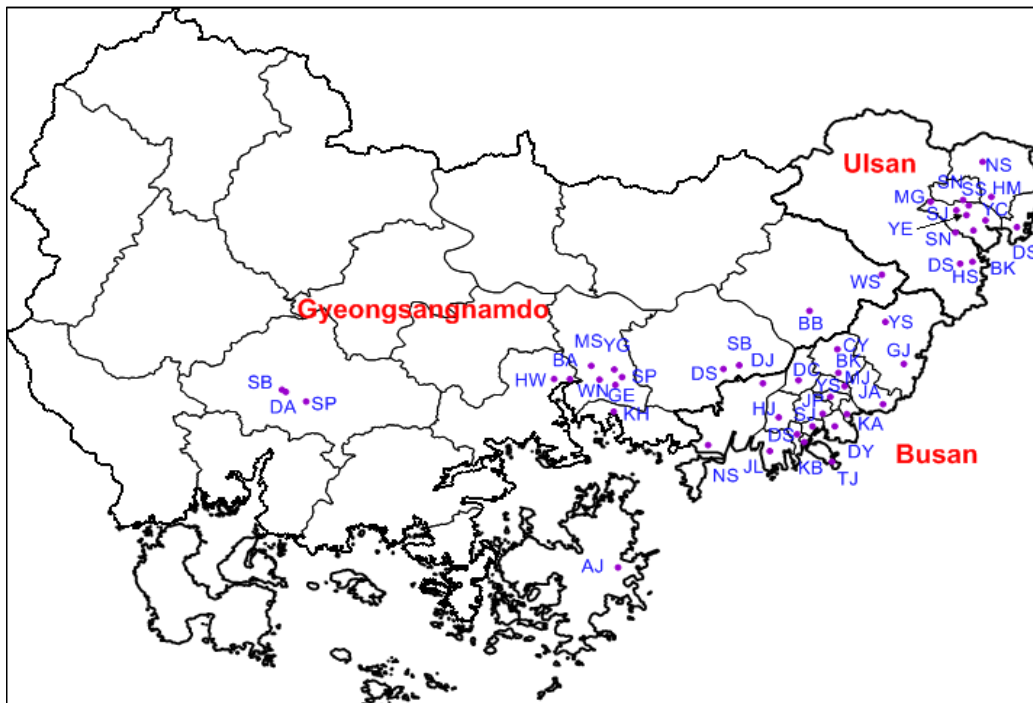


Fig. 1. Investigation area and locations of air quality monitoring stations.

운영중인 대기오염 측정소 중 본 연구에서 포함된 측정소는 총 48개소로(Table 1) 부산 19개소, 울산 16개, 경남 13개소를 대상으로 하였다. 경남에서 운영중인 하동읍 측정소는 경남지역의 가장 서쪽에 위치하여 본 연구 대상 범위인 부산, 울산, 경남의 경계지역과 멀리 위치한 지리적인 이유로 제외하였다. 이들 총 48개소의 대기오염 측정소를 대상으로 부산, 울산, 경남지역에 대하여 고농도 오존일을 산정하였다. 2007년에서 2012년까지 부산, 울산, 경남지역 대기오염 측정소의 시간별 오존 측정자료를 바탕으로 2개소 이상에서 일 최고 오존농도가 0.1 ppm 이상인 날을 고농도 오존일로 선정하였다. 정확한 분석을 위하여 일 가동율이 75%(일 자료 18개미만) 미만인 경우 해당일을 제외하고 분석하였다<sup>11)</sup>.

### 궤적분석 모델링

공기괴의 운동은 eulerian과 lagrangian의 두 가지 관점으로 볼 수 있는데 eulerian model은 고정된 그리드에서 이류, 확산 공식을 사용하여 열, 물질 전달 현상의 일반적 접근법을 사용하는 모델이다. Lagrangian model

은 공기 덩어리의 이류와 확산을 독립적으로 계산하고 fluid의 이동을 농도와 위치 변화의 관계로 파악하는 모델이다. 이 공기덩어리의 움직이는 경로를 trajectory라고 하며 trajectory의 이동식을 산출하기 위해서는 초기에 아주 작은 공기 덩어리가 존재한다는 가정 하에서 출발한다. 본 연구에서는 기류의 이동 경로를 계산하기 위하여 미국의 NOAA/ARL(National Oceanic and Atmospheric Administration/Air Research Lab.)에서 개발된 HYSPLIT(Hybrid Single Particle Lagrangian Intergrated Trajectory) 모델을 사용하였다. HYSPLIT 모델은 각종 기상예측 모델의 결과인 격자 기상자료를 입력자료로 하여 공기괴의 이동경로를 계산한다. 기상모델로부터 얻어진 격자 기상자료는 지형자료에 선형적으로 외삽하여 적용시킨다. 기상모델로부터 도출된 수평 풍속 성분의 U와 V, 온도 T, 고도 Z, 압력 P 그리고 지표에서의 압력  $P_0$ 를 이용하여 이류에 의한 3차원 궤적이 계산된다. 초기 궤적의 위치인  $P(t)$ , 첫 예상 궤적 위치인  $P'(t+\Delta t)$ 는 다음 식으로 계산된다<sup>8)</sup>.

Table 1. Lists of air quality monitoring stations in Busan, Ulsan and Gyeongsangnamdo

Busan		Ulsan		Gyeongsangnamdo	
Station name	ID	Station name	ID	Station name	ID
Gwangbok-dong	KB	Mugeo-dong	MG	Aju-dong	AJ
Jangrim-dong	JN	Bugok-dong	BK	Dongsang-dong	DS
Hakjang-dong	HJ	Samsan-dong	SS	Sambang-dong	SB
Deokcheon-dong	DC	Sinjeong-dong	SJ	Bukbu-dong	BB
Yeonsan-dong	YS	Yaeum-dong	YE	Ungsang-eup	WS
Daeyeon-dong	DY	Yeocheon-dong	YC	Daean-dong	DA
Cheongnyong-dong	CY	Daesong-dong	DS	Sangdae-dong	SP
Jeonpo-dong	JP	Nongso-dong	NS	Sangbong-dong	SB
Taejongdae	TJ	Hyomun-dong	HM	Gaeumjeong-dong	GE
Gijang-eup	GJ	Deoksinri	DS	Gyeonghwa-dong	KH
Daejeo-dong	DJ	Sangnamri	SN	Myeongseo-dong	MS
Bugok-dong	BK	Hwasanri	HS	Bongam-dong	BA
Gwangan-dong	KA	Seongnam-dong	SN	Sapa-dong	SP
Myeongjang-dong	MJ			Yongii-dong	YG
Noksan-dong	KS			Ungnam-dong	WN
Yongsuri	YS			Hoewon-dong	HW
Jaw-dong	JA				
Sujeong-dong	SJ				
Daesin-dong	DS				

$$P'(t + \Delta t) = P(t) + V(P,t)\Delta t \quad (1)$$

$$P(t + \Delta t) = P(t) + 0.5[V(P,t) + V(P,t + \Delta t)]\Delta t_{zz} \quad (2)$$

여기서  $V$ 는 삼차원 속도 벡터를 나타낸다.

본 연구에서는 두 가지 목적으로 HYSPLIT 모델을 사용하였다. 먼저 고농도 오존일의 종관적인 상태를 파악하기 위하여 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)에서 제공하는 전 지구 기상자료인 GDAS(Global Data Assimilation System) FNL(Final)를 사용하여 48시간 역궤적 분석을 실시하였다. 모델링 시작 지점은 부산지역의 중심부에 해당되는 연산동으로 설정하였다. 전 지구 기상자료의 경우 수평해상도가 1° 로 비교적 넓기 때문에 부산지역의 전반적인 종관상태를 파악하기에는 무리가 없을 것으로 판단된다. 다음으로 고농도 오존일의 지점별 공기괴의 상세 이동경로를 파악하는 전, 후방궤적 분석을 실시하였다. 이 경우에는 인접한 지점간의 공기괴의 이동경로의 차이가 나타나야 하기 때문에 기상장 모델링을 활용하여 연구대상 영역의 상세 기상장을 산출하고 이를 전, 후방궤적 분석을 위한 HYSPLIT 모델의 입력 자료로 활용하였다.

### 기상장 모델링

본 연구에서는 고농도 오존일의 공기괴의 이동경로를 파악하기 위하여 역궤적 모델링을 활용하였다. 비교적 좁은 영역에 해당되는 부산, 울산, 경남지역의 세부 지점별 공기괴의 이동경로를 파악하기 위해서는 상세한 기상자료

의 입력이 필수적이다. 전, 후방궤적 분석에 입력되는 상세 기상자료 산출을 위하여 기상장 모델링을 활용 하였다(Fig. 2). 먼저 부산지역 전체에 걸친 상세 기상장을 생성하기 위하여 중규모 기상모델 WRF(Weather Research and Forecasting model)를 수행하여 1 km 격자(73×70)의 상세 기상장을 산출하였다. 상세 기상장 생성에 사용된 WRF는 최근에 연구 및 현업에서 널리 사용되고 있는 대기모의 시스템이다. WRF 시스템은 역학 해석에 따라 NCAR(National Center for Atmospheric Research)에서 개발된 ARW(The Advanced Research WRF)와 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)에서 개발된 NMM(The Nonhydrostatic Mesoscale Model)의 두 종류가 있으며, 본 연구에서는 ARW(3.3 버전)가 사용되었다. ARW는 수 m에서 수천 km의 규모에 적용 가능하며 모수화 연구, 자료동화 연구, 예보연구, 실시간 수치예보 등에 사용된다<sup>9)</sup>. 초기 입력장으로는 1.0° × 1.0° 의 해상도를 가지며, 6시간 간격으로 제공되는 NCEP FNL 자료를 사용하였다. 지형 자료는 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission) 3 초 자료를 사용하였고, 토지이용 자료는 USGS(United States Geological Survey)의 토지이용 자료를 사용하였다. 도메인 구성은 수평 해상도가 각각 27 km, 9 km, 3 km, 1 km인 4개의 도메인으로 설정 하였으며 마지막 도메인은 부산 전체에 걸친 상세 기상장 생성을 위하여 부산지역을 중심으로 울산과 경남 일부가 포함되도록 설정하였다. 세부 모델 설정내용은 Table 2와 같다. WRF 모델링으로 산출된 상세 기상자료는 고농도 오존일의 지

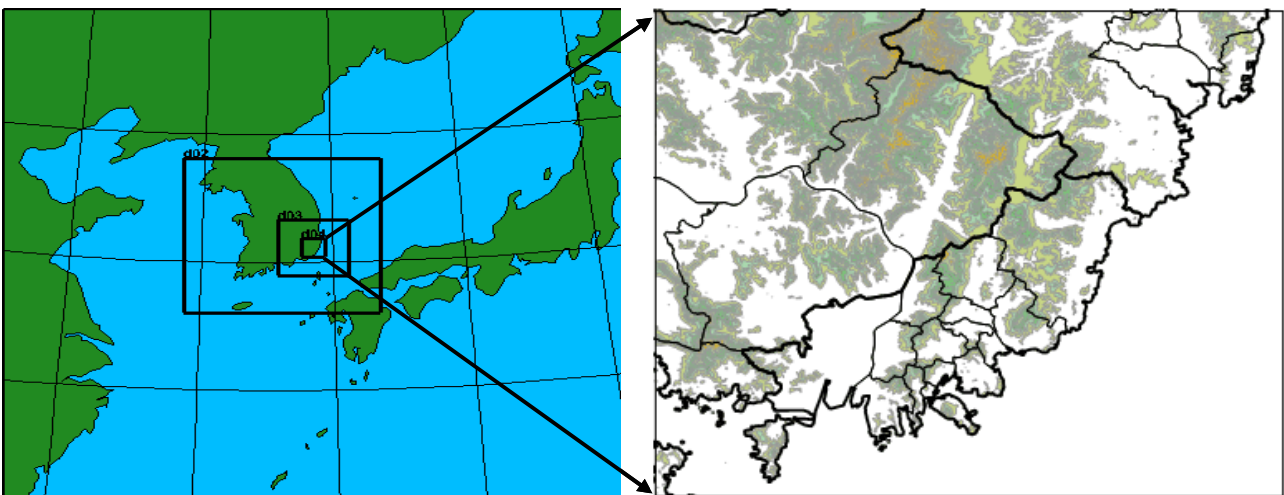


Fig. 2. WRF domain configurations. Right plot shows the location of domain 4 and left plot shows the locations of domain 1 to domain 4.

Table 2. The configurations of WRF

	Domain1	Domain2	Domain3	Domain4
Horizontal grid	108×108	91×91	61×55	73×70
Horizontal resolution	27 km	9 km	3 km	1 km
Vertical layers	34 layers			
Physical options	WRF Single-Moment 6-class scheme RRTM schem Dudhia schem MM5 similarity Noah Land Surface Mode Yonsei University schem Kain-Fritsch schem			
Initial data	NCEP FNL(Final) Operational Global Analysis data			

Table 3. Number of high ozone episode days from 2007 to 10 2012 in Busan, Ulsan and Gyeongsangnamdo

Year	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	total
2007	1	3		2	3	2		11
2008	1	3	3	7	4	3	3	24
2009	3	3	4	1	3	4		18
2010	3		9	3	4	3		22
2011	1	2	6	3		1		13
2012	1	12	4	7	2	5	1	32
total	10	23	26	23	16	18	4	120

점별 기류 이동경로를 파악하기 위하여 HYSPLIT 모델에 입력 자료로 사용하였으며 고농도 사례일에 대한 전, 후 방궤적 분석을 실시하였다.

## 결과 및 고찰

### 고농도 오존 사례일 선정

인접한 지역간의 기류 이동에 의한 고농도 오존 수송현상을 파악하기 위하여 부산, 울산, 경남지역에서 운영중인 48개 대기오염 측정소의 2007년에서 2012년까지의 시간별 오존 측정자료를 바탕으로 2개소 이상에서 일 최고 오존농도가 0.1 ppm 이상인 날을 고농도 오존일로 선정하였다. Table 3은 고농도 오존 사례일로 선정된 날의 연도별과 월별 분포를 나타낸 것이다. 총 120일의 고농도 오존일이 선정되었으며 2012년에 총 32일로 가장 빈도가 높았고 2007년이 11회로 가장 낮은 빈도가 나타났으며 전반적으로 연간 10회 이상의 고른 발생 빈도를 보이고

최근에 다소 증가하는 패턴을 알 수 있다. 월별 발생횟수를 살펴보면 6월이 26회로 가장 많았으며 5월과, 7월에 각각 23회로 다음으로 높은 빈도를 보였고 10월에도 2008년과 2010년에 걸쳐 총 4회나 발생하였다.

### 고농도 오존 사례일의 공간패턴 분류

부산, 울산, 경남지역의 2007년부터 2012년 까지 선정된 총 120일의 고농도 오존일에 대하여 일 최고 오존농도의 공간분포 패턴을 분류하였다. 각 고농도 오존일에 대하여 지점별 일 최고 오존농도의 공간적인 분포를 몇 개의 패턴으로 구분하고 각 패턴별로 해당되는 날짜를 구분하였다. 고농도 오존의 공간적인 분포특성은 전구물질의 배출분포와도 상관이 있지만 무엇보다도 기상요인에 의한 영향을 크게 받는다. 이는 대기오염 물질의 배출분포는 비교적 일정한 위치지만 바람이나 기온 등 종관기상 또는 국지적인 기상요소는 매일매일 다르기 때문이다. 따라서 일 최고 오존의 공간분포를 패턴으로 나누고 각 패턴별로 기상요소나 기류 패턴의 차이를 분석하여 인접지역간의

기류 이동에 의한 고농도 오존 수송현상을 파악하는 것이 가능하다.

일 최고 오존 공간분포의 패턴 분류에는 군집분석을 사용하였다. 군집분석이란 여러 변수로 기술되어지는 자료들을 서로 유사한 성질을 갖는 집단으로 분류할 때 사용되는 유용한 방법이다. 본 연구에서는 비계층적(non-hierarchical) 군집분석 방법의 하나인 k-평균 군집분석을 적용하여 2007년에서 2012년간 고농도 오존일에 대하여 일 최고 오존농도의 공간분포에 따라 군집분석을 실시하고 구분된 각각의 패턴에 대하여 부산, 울산, 경남지역의 일 최고 오존농도 분포를 분석하였다.

k-평균 군집분석에 사용되는 타당한 군집수 k를 산정하기 위하여 유사성이 가까운 개체들을 군집화하는 계층적(hierarchical) 군집분석 방법 중 하나인 평균 연결법(average linkage)을 사용하였다. Table 4는 평균 연결법 결과 산정된 군집수의 변경에 따른  $R^2$ , Pseudo-F, Pseudo- $t^2$  값을 나타낸다. 일반적으로 적절한 군집개수는 각 연결단계 중에서 Pseudo-F 값이 전후 단계보다 높은 결합의 단계나 Pseudo- $t^2$  값이 낮아진 결합의 단계,  $R^2$  값이 급격히 증가한 단계에서 결정되어진다. 이에 따라 일 최고 오존농도의 공간분포 패턴은 4개의 패턴으로 나눌 수 있음을 확인할 수 있다<sup>10)</sup>. 산정된 최적의 군집수를 바탕으로 k-평균 군집을 수행하여 120일의 고농도 오존일을 4개의 패턴으로 구분하였다.

Table 5는 2007에서 2012년간 고농도 오존일에 대하여 일 최고 오존농도의 공간분포에 대한 군집분석 결과를 나타낸 것이다. 총 120개의 고농도 오존일에 대하여 총 4개의 군집이 결정되었으며 각각을 패턴1~패턴4로 명명하였다. Fig. 3은 각각의 패턴에 대하여 일 최고 오존의 공간분포를 나타낸 그림이다.

먼저 각 패턴의 특징을 살펴보면 패턴1의 경우 부산과 경남의 대부분과 울산의 외각 지역에서 비교적 높은 일 최고 오존농도를 보이는 것을 특징으로 한다. 울산의 중심지역과 부산의 좌동, 학장동 지점에서는 상대적으로 낮은 일 최고 오존농도가 나타나고 있다. 패턴2는 경남과 울산지역에서 높은 일 최고 농도를 나타내고 있고 부산지역은 경남과 인접한 녹산동과 용수리 지점에서 높은 농도가 나타나지만 도심과 해안쪽에서는 상대적으로 낮은 농도를 보이는 것을 특징으로 한다. 패턴3은 부산과 경남의 도심지역에서는 전반적으로 낮은 일 최고 농도를 보이고 있으며 울산의 상남리, 야음동, 신정동과 무거동, 양산의 웅상읍, 부산의 용수리 지역에서 비교적 높은 일 최고 농도를 보여 부산의 북동쪽 지역과 울산의 남구지역에 걸쳐

비교적 높은 일 최고 농도를 보이는 것을 특징으로 한다. 패턴4는 부산과 울산 전 지점에서 낮은 일 최고 오존농도를 보이고 경남의 창원지역을 중심으로 높은 일 최고 농도를 보이는 특징이 있다.

전체 120일에 대한 패턴별 발생빈도를 보면(Table 5) 패턴3이 39일(32.5%)로 가장 높은 빈도를 보였고 다음으로 패턴4가 36일로 30.0%의 발생빈도를 보였다. 부산지역이 고농도 오존의 영향을 받게 되는 패턴2와 패턴1은 각각 23, 22일로 19.2, 18.3% 발생하였다. 월별 발생빈도를 살펴보면 패턴1은 22일 중 5월에 10일이 발생하여 가장 많은 빈도를 보였고 패턴2는 전체 23일중 6월과 7월에 13일이 발생하여 가장 높은 빈도를 보이고 있다. 패턴3은 5, 6, 9월에 각각 9일씩 발생하였고 7월에도 7일 발생하여 전반적으로 봄과 여름에 걸쳐 고르게 발생하는 경향을 보이고 있다. 패턴4는 전체 36일중 7월과 8월에 각각 11일, 7일 총 18일 발생하여 여름철을 중심으로 높은 빈도를 보이고 있다.

부산의 도심지역에서 고농도 오존이 발생할 경우 울산, 경남지역에서도 오존농도가 높게 나타나며(패턴1) 부산의 일부지역에서 고농도 오존이 발생해도 경남(패턴2) 또는 울산의 일부지역에서(패턴3) 같이 오존농도가 증가함을 알 수 있다. 이를 바탕으로 부산지역의 고농도 오존은 인접한 경남, 울산 지역과도 밀접한 관련이 있음을 알 수 있으며 배출원의 위치가 고정적인 것을 감안하면 고농도 오존을 일으키는 기상조건이 넓은 범위에서 발생하거나 국지적인 효과에 의하여 오존 또는 전구물질의 수송이 있었음을 짐작하게 한다.

### 고농도 오존 사례일의 종관 패턴 분류

2007년에서 2012년까지 6년간 산정된 120회의 고농도 오존일에 대하여 종관적인 기류 특성을 파악하기 위하여 HYSPLIT 모델을 이용하여 역궤적 분석을 실시하였다. 부산지역의 중심에 해당되는 연산동 측정소(Fig. 1, YS)에서 전 지구 기상자료인 GDAS(Global Data Assimilation System) FNL(Final)를 입력자료로 하여 48시간 역궤적을 계산하였다. 전 지구 기상자료의 경우 수평해상도가 1° 로 비교적 넓기 때문에 계산시작 지점의 위치에 관계없이 부산지역의 전반적인 기류상태를 파악할 수 있다. 또한 산정된 역궤적 경로 최종위치의 유사성을 가지고 추가적으로 군집을 분류하여 유사한 기류 패턴을 구분하였다.

Fig. 4는 120일의 고농도 오존 사례에 대하여 부산지역에서 계산한 역궤적 분석결과를 나타낸 그림이다. 고농

Table 4. Statistical test for determining number of clusters to retain

Number of clusters	$R^2$	Pseudo-F	Pseudo- $t^2$
6	0.245	7.3	2.3
5	0.216	7.9	4.3
<b>4</b>	<b>0.194</b>	<b>9.2</b>	<b>3.2</b>
3	0.070	4.4	17.6
2	0.036	4.4	4.3
1	0	-	4.4

Table 5. Monthly and yearly number of days for daily maximum ozone patterns(1-4) during 2007 to 2012 for days any of two ozone monitoring station exceeding 0.1 ppm in Busan, Ulsan and Gyeongsangnamdo

Pattern	Year	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Total
1 (18.3%)	2007		1			1			2
	2008		2	1			1	1	5
	2009	1	2				1		4
	2010		1	3					4
	2011								0
	2012		4			2	1		7
	Total		1	10	4	0	3	3	1
2 (19.2%)	2007					1			1
	2008				1				1
	2009	1		3		1			5
	2010			3		1	1		5
	2011	1		1					2
	2012		4	1	4				9
	Total		2	4	8	5	3	1	0
3 (32.5%)	2007		1		1		2		4
	2008	1	1	2	2		2		8
	2009		1	1		2	1		5
	2010		2	3	2	1	1		9
	2011		2	3	2				7
	2012		2				3	1	6
	Total		1	9	9	7	3	9	1
4 (30.0%)	2007	1	1		1	1			4
	2008				4	4		2	10
	2009	1			1		2		4
	2010				1	2	1		4
	2011			2	1		1		4
	2012	1	2	3	3		1		10
	Total		3	3	5	11	7	5	2

The value in parenthesis indicate the frequencies(%) of the classified cluster.

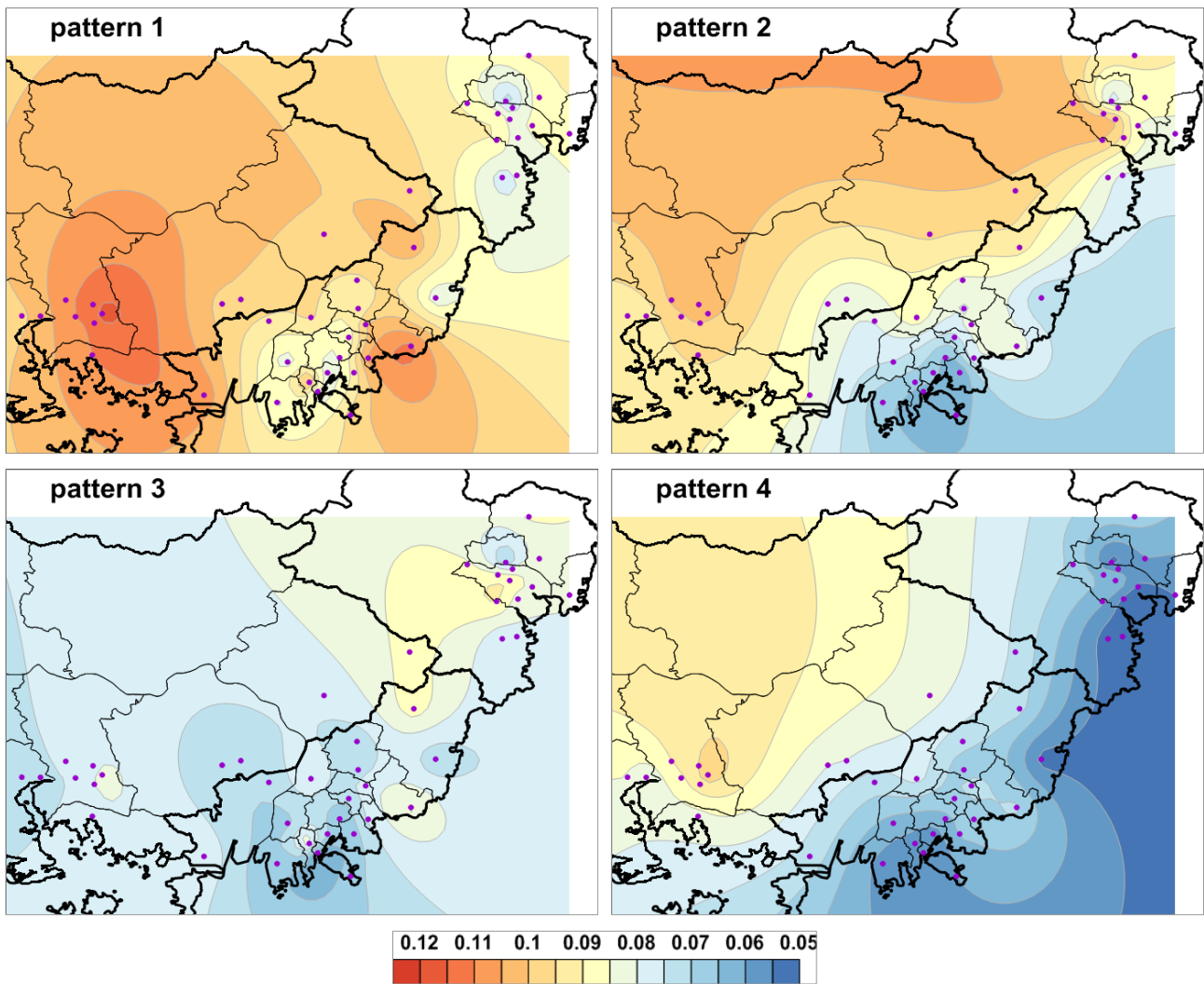


Fig. 3. The spatial distributions of mean daily maximum ozone concentrations for each pattern(unit : ppm).

도 오존 사례일에 대하여 역궤적 별 최종위치의 유사성을 가지고 군집을 분류한 결과 총 3개의 군집으로 분류되었다(Fig. 4 왼쪽 위).

군집1은 평균적으로 우리나라의 서쪽 중국대륙에서부터 부산지역으로 불어오는 기류 패턴을 보이고 있으며 전체 120일 사례일 중 약 42%인 50일이 이 경우에 해당되는 것으로 나타났다. 군집1의 개별 역궤적을 살펴보면(Fig. 4 오른쪽 위) 중국대륙 내부에서 기원하는 경우와 서해상에서 기원하는 경우가 혼재해 있는 것을 알 수가 있으며 이 경우 서~북서풍 계열의 중관풍이 강한 날과 약한 날이 같이 포함된 경우로 이해할 수 있다. 48시간 역궤적 길이가 길면 서풍계열의 바람이 강하게 불었을 경우로 부산, 울산, 경남지역에 유사한 기상조건이 유지되었을 것이고 궤적의 길이가 짧은 경우는 중관기상의 영향이 다

소 약하게 되어 국지적인 기상조건과 복합적으로 영향을 미친 것으로 이해할 수 있다.

군집2는 전체 120일 중 가장 많은 빈도를 보인 경우로 약 46%인 55일이 해당되었다. 부산지역을 중심으로 여러 방향에서 기류가 불어 들어오면서 순환하는 모양을 보이고 있지만 평균적인 이동거리가 짧은 경우이다. 풍향이 일정하지 않은 편이기 때문에 부산, 울산, 경남지역에 유사한 기상조건을 가져오는 종관기상장이 약한 날로 지역에 따라서 차이가 보이는 국지적인 기상효과가 강하게 나타나는 경우로 이해할 수 있다. 광역적인 고농도 오존 발생할 경우 인접한 지역간에 오존 또는 전구물질의 수송, 이류에 의한 효과를 짐작하게 할 수 있는 경우이다.

군집3은 전체 120개의 사례일 중 가장 낮은 빈도를 보인 경우로 약 13%인 15일의 사례가 해당되는 경우이다.



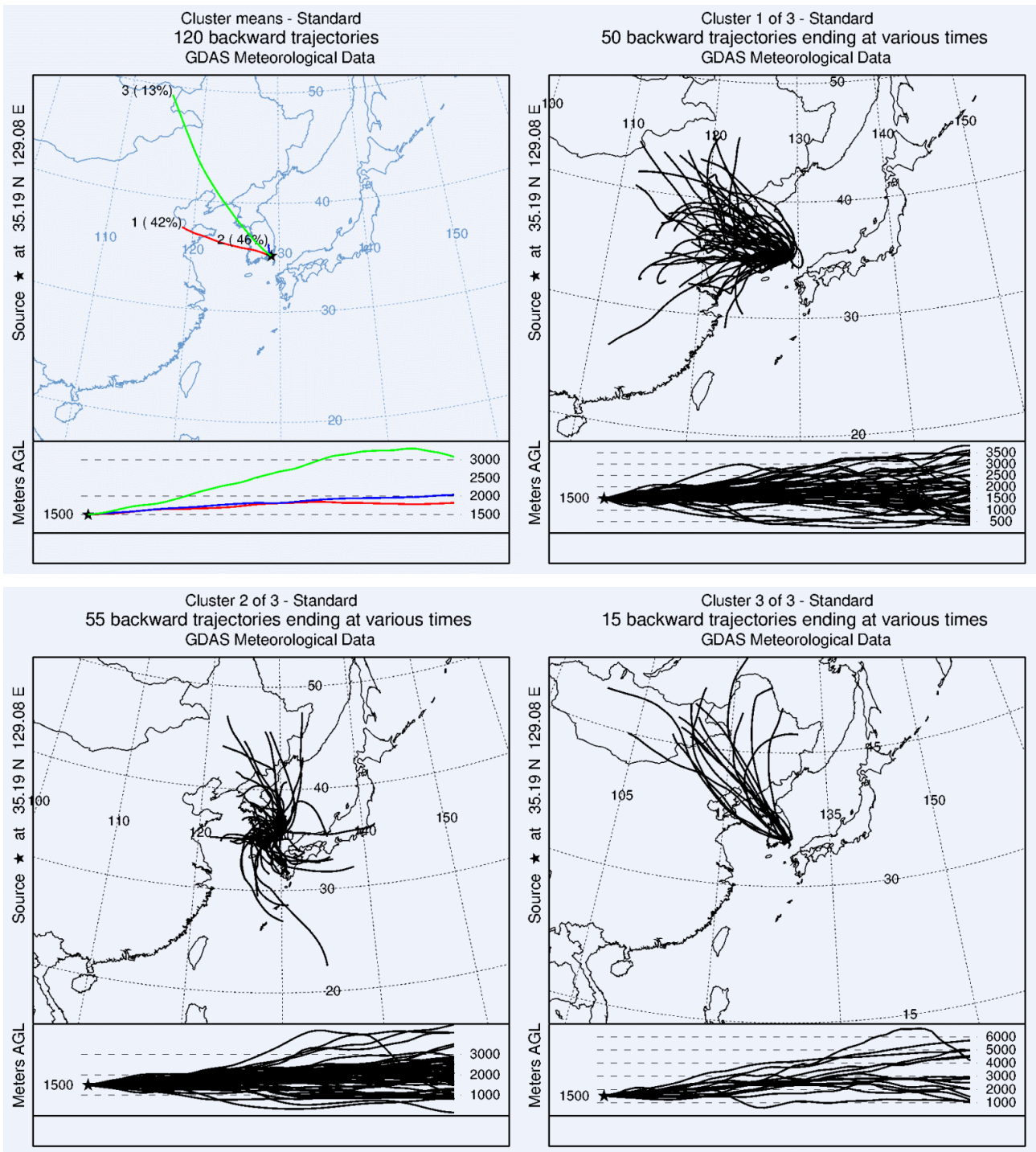


Fig. 4. Three clusters of synoptic backward trajectories in high ozone episodes. The left upper figure denotes the mean trajectories of each cluster.

평균적인 기류의 이동거리가 가장 긴 경우로 북서쪽 내륙에서부터 부산지역으로 직접적으로 기류가 이동해 오고 있어 부산, 울산, 경남지역에 북서풍계열의 바람이 비교적 강하게 나타나고 유사한 기상조건이 유지되는 중관기

상의 영향이 강한 날로 이해할 수 있다.

고농도 오존 사례일에 대하여 중관적인 기류패턴을 구분한 결과 중관기상장의 영향이 약하여 오존 또는 전구물질의 이류가 예상되는 경우가 전체 120일 중 약 46%인

Table 6. The number of days for daily maximum ozone patterns(1-4) according to the synoptic trajectory cluster(1-3)

	patter1	pattern2	pattern3	pattern4	total
cluster1	5	12	18	15	50
cluster2	14	9	11	21	55
cluster3	3	2	10	0	15
total	22	23	39	36	120

55일 발생하였고 넓은 범위에 유사한 기상조건을 가져오는 종관기상 효과가 강한 날은 약 13%인 15일이 발생하였으며 약 42% 50개의 사례일은 두 가지 경우가 복합적으로 일어난 것으로 나타났다.

Table 6은 고농도 오존 일에 대하여 일 최고 오존농도의 공간패턴별로 역궤적 기류의 군집별 발생 횟수를 나타낸 표이다. 패턴1은 넓은 범위에서 고농도 오존이 나타날 경우로 부산과 경남 울산의 외곽 지역에서 높은 일 최고 오존농도를 보이는 경우이다(Fig. 3). 패턴1의 경우 부산 지역을 중심으로 여러 방향에서 기류가 불어 들어오면서 순환하는 모양을 보이고 있지만 평균적인 이동거리가 짧은 군집2가 전체 22일 중 14일로 가장 많은 빈도를 보이고 있다. 종관장의 영향이 강하게 나타나 부산, 울산, 경남 지역 전체에서 북서풍계열의 바람이 강하게 나타나는 군집3의 경우는 전체 22일 중 3일 발생하여 가장 낮은 빈도를 보이고 있다.

패턴2는 경남과 울산지역에서 높은 일 최고 농도를 나타내고 있고 부산지역은 경남과 인접한 녹산동, 용수리 지점에서 지역에서 높은 농도가 나타나고 도심과 해안쪽

에서는 상대적으로 낮은 농도를 보이는 경우로 패턴1과 더불어 부산지역에서 고농도 오존이 나타나게 되는 경우이다. 이 경우에도 국지적인 기상효과가 강하게 나타날 수 있는 군집2가 전체 23일 중 9일 발생하여 비교적 높은 빈도를 보이고 있으며 종관기상의 영향이 강할 것으로 예상되는 군집3은 전체 23일 중 2일로 가장 낮은 빈도를 보이고 있음을 알 수 있다. 부산과 인접한 지역 또는 부산과 인접한 지역의 일부에서 고농도 오존이 나타나게 되는 경우 종관기상장의 영향보다는 국지적인 기상효과가 강하게 영향을 미치는 것을 알 수 있으며 광역적으로 고농도가 발생하는 경우는 오존 또는 전구물질의 지역간 수송이 있음을 짐작할 수 있다.

군집별 사례 분석

패턴1의 경우는 다른 패턴들과 다르게 부산과 경남, 울산의 외곽 지역 등 비교적 넓은 범위에서 고농도 오존이 나타나는 것을 특징으로 한다. 이 경우 국지적인 기상효과가 나타나는 군집2의 기류패턴이 가장 높은 빈도를 보이고 있으며 종관기상의 효과가 강하게 나타나는 군집3이

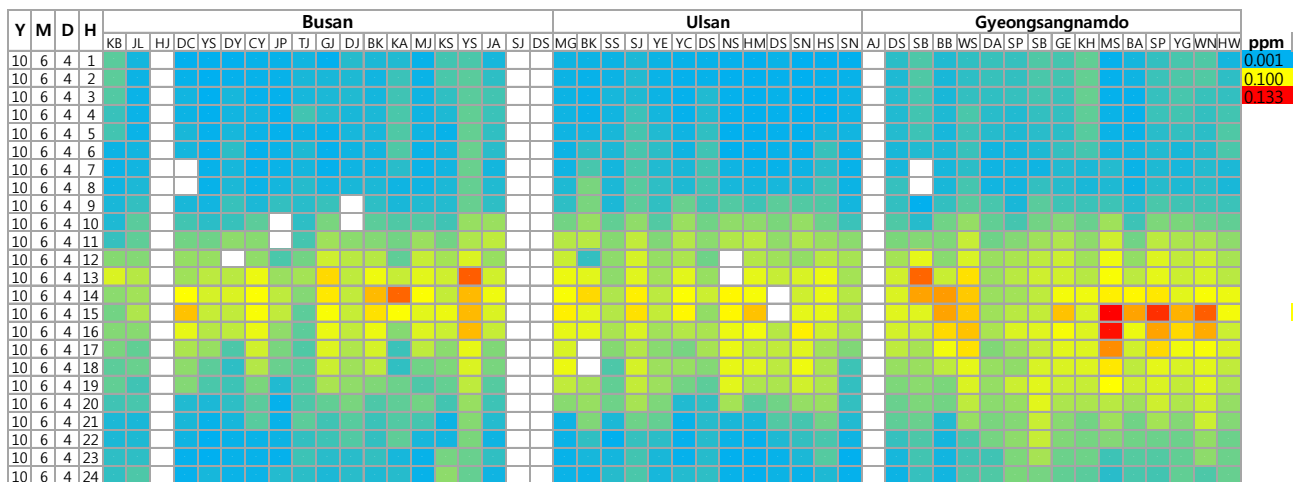


Fig. 5. Diurnal variations of ozone concentrations at 48 air quality monitoring stations within Busan, Ulsan and Gyeongsangnamdo at 4 Jun 2010.

가장 낮은 빈도를 보이는 것으로 나타났다. 본 절에서는 패턴1의 군집2와 군집3의 개별 사례 일중에 오존농도가 0.1 ppm을 초과한 측정소수가 가장 많은 날을 2일씩 선택하여 지점별 상세 기류패턴을 분석하였다. 국지적인 기상효과의 영향이 클 것으로 예상되는 군집1의 경우는 2010년 6월 4일과 5일을 사례일로 선정하였고 종관기상장의 영향이 큰 군집3의 사례일로는 2010년 5월 21일과 2012년 5월 26일을 선정하였다.

**2010년 6월 4일**

2010년 6월 4일은 연구대상 48개 측정소 중 21개소에서 일 최고 오존농도가 0.1 ppm을 초과한 날이다. 부산지역의 경우 13시부터 기장과 용수리 측정소에서 각각 0.105, 0.121 ppm의 오존농도를 보였으며 용수리 측정소에서는 16시까지 0.1 ppm을 초과한 농도가 유지되었다. 14시 이후에는 덕천동, 부곡동, 광안동 측정소에서도 0.1 ppm을 초과하는 농도가 나타났다.

울산지역의 경우 14시부터 부곡동, 신정동, 농도동 측정소에서 각각 0.105, 0.102, 0.101 ppm으로 농도가 증가하기 시작하여 16시까지 0.1 ppm을 초과하는 농도를 보였다. 경남지역의 경우 13시부터 김해시 삼방동과 양산시 웅상을 측정소에서 각각 0.120, 0.104 ppm으로 농도가 증가하기 시작하여 19시까지 9개 지점에서 0.1 ppm 이상의 농도가 나타났다.

2010년 6월 4일의 경우 13시부터 19시까지 부산, 경남, 울산지역의 48개 대기오염 측정소 중 21개소에서 0.1 ppm이상의 농도가 지속된 것으로 나타났다.

Fig. 6은 2010년 6월 4일의 일 최고 오존농도의 공간 분포와 고농도가 나타난 지점에서의 전, 후방 궤적분석을 실시한 그림이다. 궤적의 출발 시간은 부산 울산 경남지역에서 전체의 평균 농도가 가장 높은 15시를 중심으로 8시간 전, 후방 궤적을 계산하였다. 궤적의 계산지점은 오존 농도가 높게 나타난 경남의 명서동, 부산의 덕천동, 용수리 측정소 울산의 효문동 측정소이다.

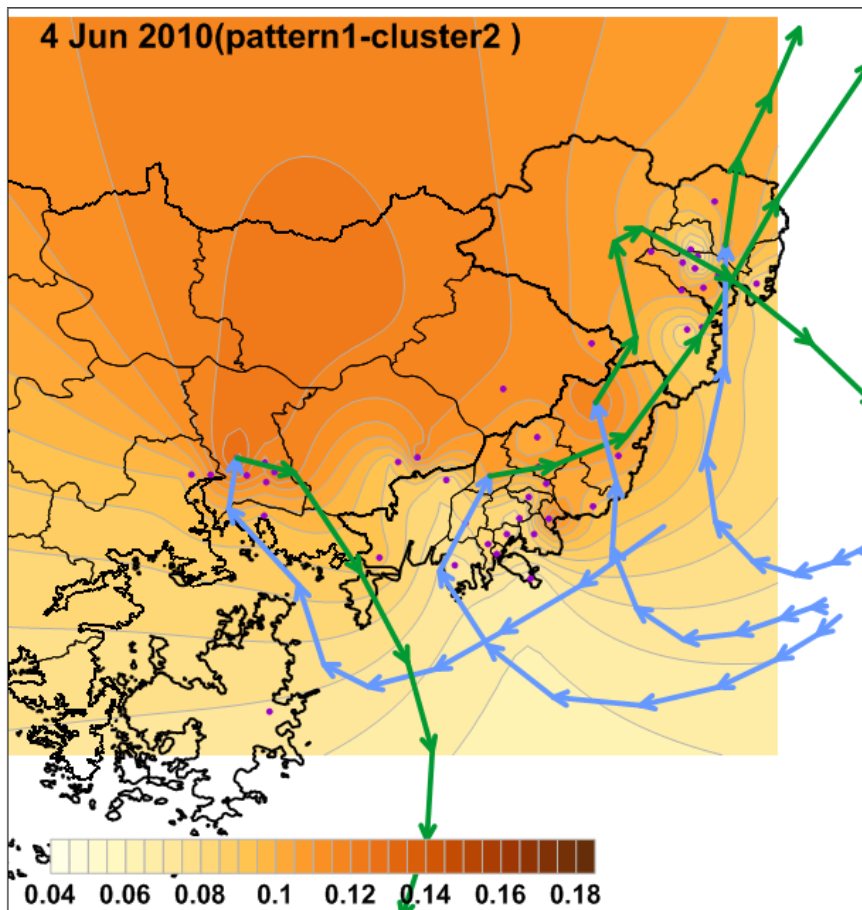


Fig. 6. The daily maximum ozone concentrations(unit : ppm) and forward and backward trajectories at MS, DC, YS, HM and 15LST(±8 hr).

본 사례일은 패턴1의 군집2에 해당되는 날로써 국지적인 기상효과로 인하여 지점별로 다른 기류 패턴이 나타날 것으로 예상되는 날이며 Fig. 6에서 이를 확인할 수 있다. 각 지점별로 해상에서 기류가 이동해 오는 것은 비슷하나 측정소를 통과한 이후 이동방향은 지점별로 차이가 나고 있다. 부산의 덕천동과 용수리 측정소의 공기괴는 북동방향으로 더 진행하여 울산지역으로 영향을 미치고 있으며 울산의 효문동 측정소는 해상에서 바로 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 경남의 명서동의 경우는 측정소를 지난 공기괴가 다시 해상으로 빠져나가는 모습을 보이고 있어 다소 차이를 보이고 있다. 기류의 이동 패턴만을 보면, 6월 4일의 울산지역은 해상에서 불어 들어오는 유입되는 공기괴와 부산지역을 거쳐서 불어 들어오는 공기괴의 영향을 같이 받고 있는 것으로 알 수 있다.

**2010년 6월 5일**

2010년 6월 5일은 연구대상 48개 측정소 중 34개소에서 일 최고 오존농도가 0.1 ppm을 초과한 날이다. 부산지역의 경우 12시부터 태종대, 부곡동, 용수리 측정소에서 각각 0.109, 0.103, 0.103 ppm으로 농도가 높아지기 시작하여 용수리 측정소는 22시, 태종대 측정소는 23시까지 0.1 ppm 이상의 농도가 유지되었으며 태종대 측정소는 21시에 0.173 ppm까지 농도가 증가하였다. 자료가 없는 3개소와 도심내부에 위치한 덕천동, 연산동, 명장동 측정소를 제외하고 전 지점에서 0.1 ppm이상의 농도가 나타나 고농도 오존의 영향이 광역적으로 나타났음을 알 수 있다.

울산지역에서도 부산과 같은 시간대인 12시부터 6개 지점에서 0.1 ppm이상의 농도가 나타나기 시작하였으며 20시까지 0.1 ppm이상의 농도가 유지되었다. 경남지역에서는 12시에 명서동 측정소에 0.104 ppm으로 농도가 높아지기 시작하여 20시까지 4개 지점을 제외하고 전 지점에서 0.1 ppm이상의 농도를 기록하였다. 명서동 측정소는 부산의 태종대 측정소와 비슷하게 17시에 0.157 ppm으로 가장 높은 농도를 기록하였다.

2010년 6월 5일의 경우는 48개 측정소 중 부산, 울산, 경남의 대부분 지역인 34개소에서 0.1 ppm 이상의 오존 농도가 나타났으며 12시부터 야간인 23시까지 지속된 것을 알 수 있었다.

Fig. 8은 2010년 6월 5일의 일 최고 오존농도의 공간분포와 전, 후방 궤적분석을 실시한 그림이다. 궤적의 출발 시간은 부산, 울산, 경남지역에서 전체의 평균 농도가 가장 높은 16시를 중심으로 8시간 전후방 궤적을 계산하였다. 궤적의 계산지점은 경남의 명서동, 부산의 녹산동, 태종대 측정소 울산의 무거동 측정소이다. 6월 4일의 사례일과 동일하게 패턴1의 군집2에 해당되는 날로써 국지적인 기상효과로 인하여 지점별로 다른 기류 패턴이 나타날 것으로 예상되는 날이다.

6월 4일의 경우와 유사하게 해상에서 기류가 이동해 오는 방향은 비슷하게 나타나고 있으나 측정소를 통과한 이후 이동방향은 지점별로 차이가 나고 있다. 부산의 녹산동 측정소의 경우 경남 김해지역을 통과하여 양산지역으로 영향을 주고 있고 태종대를 통과한 기류는 부산지역에서 재순환하여 용수리와 기장읍 측정소 부근으로 이동하는 것을 알 수 있다. 울산의 무거동 측정소는 해상에서

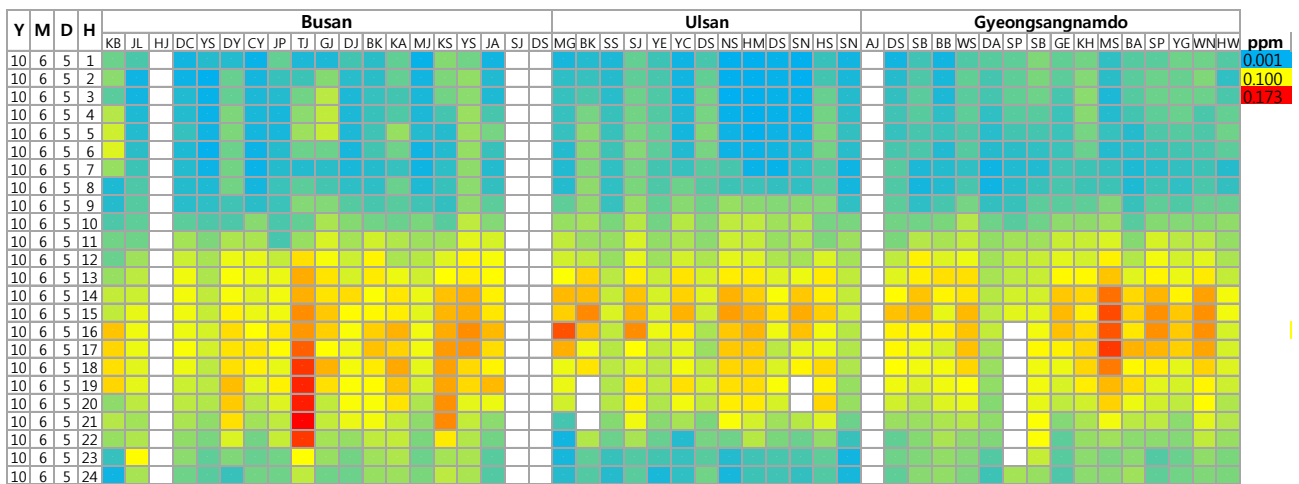


Fig. 7. Diurnal variations of ozone concentrations at 48 air quality monitoring stations within Busan, Ulsan and Gyeongsangnamdo at 5 Jun 2010.



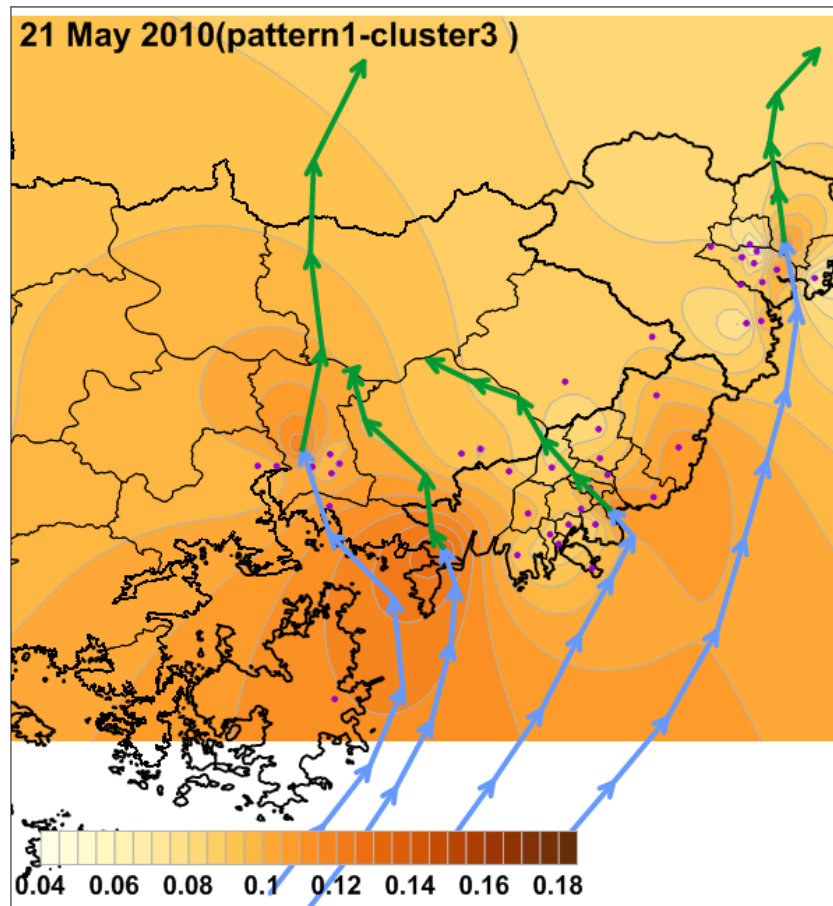


Fig. 10. The daily maximum ozone concentrations(unit : ppm) and forward and backward trajectories at MS, KS, KA, HM and 16LST( $\pm 8$  hr).

시에 0.131 ppm으로 가장 높은 농도를 기록하였다.

울산지역은 부산지역보다 1시간 빠른 12시부터 여천동, 화산리 측정소에서 각각 0.108, 0.101 ppm으로 오존 농도가 상승하기 시작하여 15시까지 0.1 ppm이상의 농도가 유지 되었다. 경남지역에서는 명서동 측정소에서 13시에 0.108 ppm으로 농도가 증가하기 시작하여 부산지역과 같이 18시까지 0.1 ppm이상의 농도가 지속되었다.

2010년 5월 21일의 경우는 48개 측정소 중 12개 측정소에서 0.1 ppm 이상의 농도가 나타났으며 12시부터 18시까지 지속되었다.

Fig. 10은 2010년 5월 21일의 일 최고 오존농도의 공간분포와 고농도가 나타난 지점에서의 전, 후방 궤적분석을 실시한 그림이다. 궤적의 출발 시간은 부산, 울산, 경남지역에서 전체의 평균 농도가 가장 높은 16시를 중심으로 8시간 전후방 궤적을 계산하였다. 궤적의 계산지점은 경남의 명서동, 부산의 녹산동, 광안동 측정소 울산의 효

문동 측정소이다.

본 사례일은 패턴1의 군집3에 해당되는 날로써 부산, 울산, 경남 지역이 종관기상장의 영향으로 유사한 기류 패턴이 나타날 것으로 예상되는 날이며 군집2의 경우와 다르게 지점별로 유사한 기류패턴이 나타나고 있음을 그림에서 확인할 수 있다. 전 지점에서 해양에서 이동해 온 기류가 북~북서 방향으로 계속 진행하고 있는 것을 알 수 있다. 2010년 5월 21일은 부산, 울산, 경남지역의 전 지점에서 해양에서 기원하는 기류가 내륙으로 진행하는 패턴을 보이는 것을 확인 할 수 있다.

#### 2012년 5월 26일

2012년 5월 26일은 2010년 5월 21일과 같이 기류패턴이 군집3에 해당되는 날로서 부산, 울산, 경남지역에 종관기상장의 영향이 강한 날이다. 연구대상 48개 측정소 중 14개소에서 일 최고 오존농도가 0.1 ppm을 초과한 날

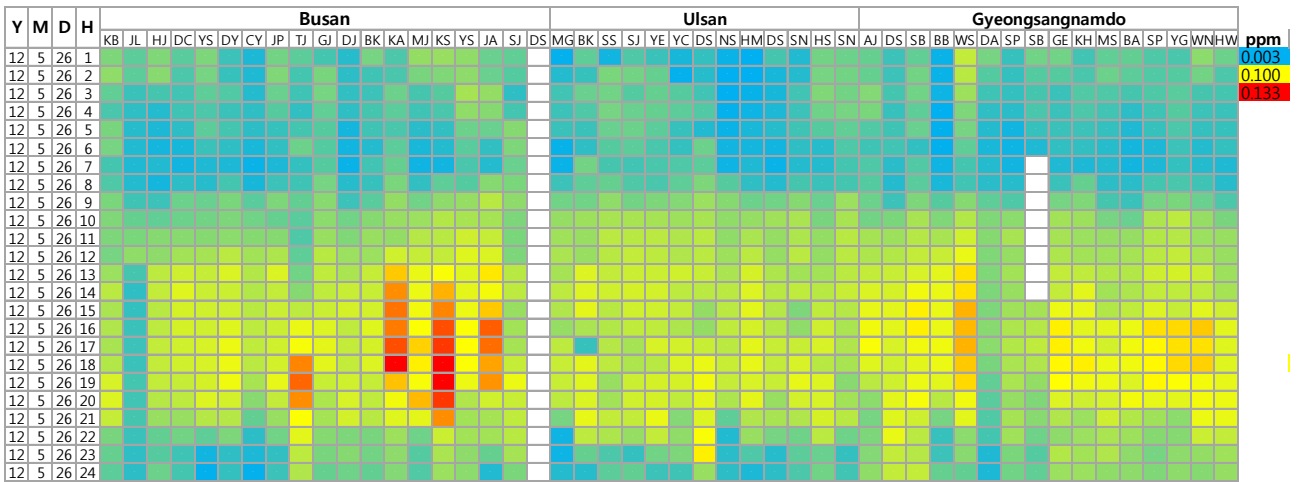


Fig. 11. Diurnal variations of ozone concentrations at 48 air quality monitoring stations within Busan, Ulsan and Gyeongsangnamdo at 26 May 2012.

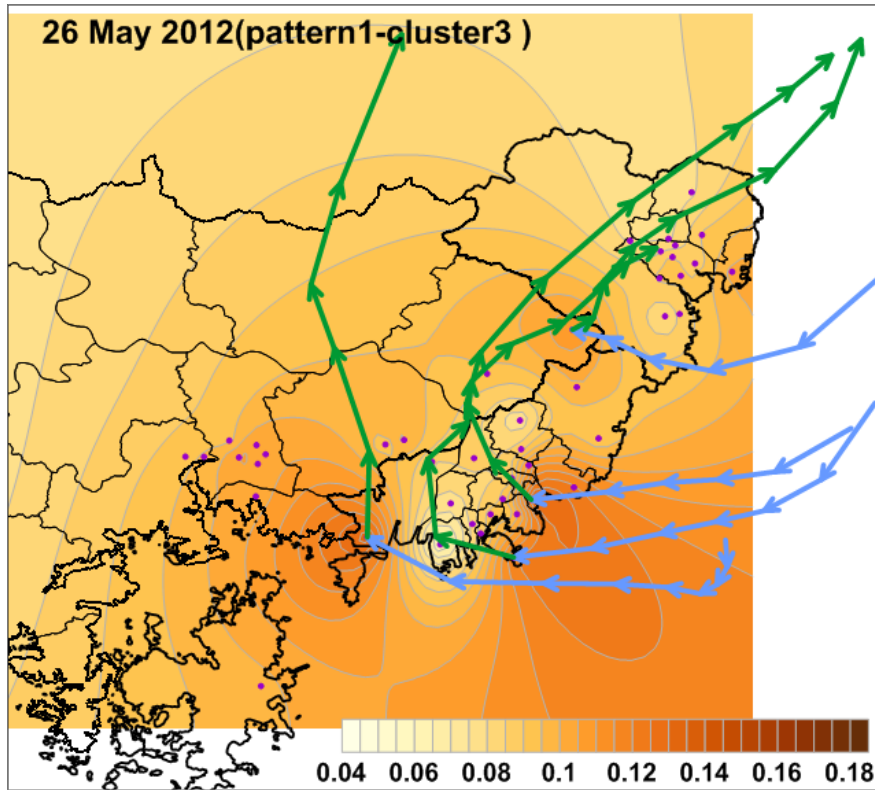


Fig. 12. The daily maximum ozone concentrations(unit : ppm) and forward and backward trajectories at KS, TJ, KA, WS and 18LST( $\pm 8$  hr).

로서 부산지역에서는 13시부터 광안동, 좌동 측정소에서 각각 0.107, 0.103 ppm으로 농도가 증가하기 시작하여 녹산동 측정소에서 21시까지 0.1 ppm이상의 농도가 나타나고 있다.

울산지역에서는 야간 23시에 울주군 대송동 측정소에

서 0.102 ppm으로 0.1 ppm이상의 농도가 나타났다. 경남지역에서는 13시 양산시 웅상읍 측정소에서 0.104 ppm으로 농도가 증가하기 시작하여 19시까지 0.1 ppm이상의 농도가 지속되었다.

2012년 5월 26일의 경우는 48개 측정소 중 14개 측정

소에서 0.1 ppm 이상의 농도가 나타났으며 13시부터 23 시까지 비교적 긴 시간동안 지속되었다.

Fig. 12는 2012년 5월 26일의 일 최고 오존농도의 공간분포와 고농도가 나타난 지점에서의 전, 후방 궤적분석을 실시한 그림이다. 궤적의 출발 시간은 부산, 울산, 경남지역에서 전체의 평균 농도가 가장 높은 18시를 중심으로 8시간 전후방 궤적을 계산하였다. 궤적의 계산지점은 경남의 웅상읍 측정소, 부산의 녹산동, 태종대, 광안동 측정소 측정소이다. 본 사례일도 패턴1의 군집3에 해당되는 날로써 부산, 울산, 경남지역이 종관기상장의 영향으로 유사한 기류 패턴이 나타날 것으로 예상되는 날이다.

18시 이전까지는 전체 지점에서 동풍계열의 바람이 나타나고 있음을 알 수 있으며 전 지점에서 동쪽 해상에서 기원하는 기류가 측정소를 통과한 후 북~북동쪽으로 진행하는 것을 알 수 있다. 부산지역을 통과한 기류는 북동방향으로 진행하면서 경남의 양산지역과 울산의 내륙지역에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 이를 바탕으로 앞의 2010년 5월 21일과 다르게 종관장의 영향이 강한 날에도 수송 또는 이류의 효과가 있음을 짐작하게 하는 사례이다.

### 결론 및 제언

인접한 지역간의 기류에 의한 고농도 오존의 수송 현상을 파악하기 위하여 부산, 울산 경남 지역에서 운영중인 대기오염 측정소 48개소를 대상으로 2007년에서 2012년 간 2개 지점 이상에서 일 최고 오존농도가 0.1 ppm 이상인 날을 대상으로 일 최고 오존농도의 공간패턴과 종관기류 군집을 분류하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 고농도 오존일의 일 최고 오존농도의 공간분포는 총 4개의 패턴으로 구분할 수 있었다. 패턴1의 경우 부산과 경남, 울산지역 전체에서 비교적 높은 일 최고 오존농도를 보이는 것을 특징으로 하며, 패턴2는 경남과 울산지역에서 높은 일 최고 농도를 나타내고 있고 부산지역은 경남과 인접한 지역에서 높은 농도가 나타나지만 내륙에서는 상대적으로 낮은 농도를 보이는 것을 특징으로 한다. 패턴3은 대부분의 지점에서 전반적으로 낮은 일 최고 농도를 보이고 있으며 울산 내부와 양산의 웅상읍, 부산의 용수리 지역에서 비교적 높은 일 최고 농도를 보이고 있다. 패턴4는 부산과 울산 전 지점에서 낮은 일 최고 오존농도를 보이고 경남의 창원지역을 중심으로 높은 농도를 보이는 특징이 있다.

2. 전구 자료를 이용한 HYSPLIT 모델의 역궤적 계산

결과 고농도 오존일의 종관기류 분포는 총 3개의 군집으로 분류 할 수 있었다. 종관기상장의 영향이 약하여 오존 또는 전구물질의 이류가 예상되는 경우(군집2)가 전체 120일 중 약 46%인 55일 발생하였고 넓은 범위에 유사한 기상조건을 가져오는 종관기상 효과가 강한 날(군집3)은 약 13%인 15일이 발생하였으며 약 42%인 50개의 사례일은 두 가지 경우가 복합적으로 일어난(군집1) 것으로 나타났다.

3. 일 최고 오존의 공간패턴과 종관규모 기류의 군집을 비교한 결과 부산과 경남, 울산지역 전체에서 비교적 높은 일 최고 오존농도를 보이는 패턴1의 경우 군집2가 전체 22일 중 14일로 가장 많은 빈도를 보이고 있고 부산, 울산, 경남지역 전체에서 북서풍계열의 바람이 강하게 나타나는 군집3의 경우는 전체 22일 중 3일 발생하여 가장 낮은 빈도가 나타났다. 경남과 울산지역, 부산의 일부 지역에서 높은 일 최고 농도를 나타내는 패턴2의 경우도 국지적인 기상효과가 강하게 나타날 수 있는 군집2가 전체 23일 중 9일 발생하여 비교적 높은 빈도를 보이고 있으며 종관기상의 영향이 강할 것으로 예상되는 군집3은 전체 23일 중 2일로 가장 낮은 빈도를 보이고 있음을 알 수 있었다.

4. 패턴1의 군집2와 군집3의 개별 사례 일인 2010년 6월 4일과 5일, 2010년 5월 21일과 2012년 5월 26일에 대하여 상세 기류패턴을 분석한 결과 6월 4일은 울산지역에서 부산지역의 영향을 받고 6월 5일은 경남의 김해, 양산 지역이 부산 서부 지역 영향을 받고 있음을 알 수 있었으며 군집3에 해당되는 2010년 5월 21일과 2012년 5월 26일은 부산, 울산, 경남지역에 종관기상장의 영향으로 전 지점에서 비슷한 기류패턴이 나타났음을 알 수 있었다.

### 참고문헌

1. Bigler, T. B., Engler, V., Brown, H. W., "Analysis of an ozone episode during the San Diego air quality study : The significance of transport aloft", *J. apl. Met.*, 34(8), pp.1863~1876(1995).
2. 김유근, 이화운, 전병일, 홍정혜, "부산연안역의 오존 농도에 미치는 해풍의 영향", *한국환경과학회지*, 5(3), pp.265~275(1996).
3. 류찬수, 신유미, 이순환, "해안지형 복잡성이 중규모 순환장에 미치는 영향에 관한 수치실험", *한국기상학*



- 회지, 40(1), pp.71~86(2004).
4. 이순환, 이화운, 김유근, “복잡지형에서 도시화에 따른 대기확산에 관한 수치시뮬레이션”, 한국대기환경학회지, 18(2), pp.67~83(2002).
  5. Betchtold, P., Pinty, J. P., Mascart, P., "A numerical investigation of the influence of large-scale winds on seabreeze/inland-breeze type circulations", *J. appl. Met.*, 30(9), pp.1268~1279(1991).
  6. Boucouvala, D., Bornstein, R., "Analysis of transport patterns during a SCOS97-NARDTO episode", *Atmospheric Environment*, 37(2), pp.73~94(2003).
  7. Air Resources Laboratory - HYSPLIT Home Page, [http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT\\_info.php](http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT_info.php)(2012).
  8. 한영지, “수용원 모델을 사용한 대기 중 수은 오염원의 위치 추정에 대한 연구”, 한국대기환경학회지, 22(2), pp.179~189(2006).
  9. WRF USERS PAGE, [http://www.nmm.ucar.edu/wrf/users\(2012\)](http://www.nmm.ucar.edu/wrf/users(2012))
  10. 최현정, 이화운, 임헌호, 송재활, “광양만 권역에서 고농도 오존 사례에 대한 기상 및 대기질 분석”, 한국환경과학회지, 17(7), pp.743~753(2008).
  11. 김유근, 이소영, 임윤규, 송상근, “중회귀 모형을 이용한 울산지역 오존 포텐셜 모형의 설계 및 평가”, 한국대기환경학회지, 23(1), pp.14~28(2007).