

연구논문

도시규모 중 · 장기 대기질영향평가를 위한 종관기상조건의 분류

김철희 · 손혜영 · 김지아

부산대학교 지구환경시스템학부 대기환경과학전공
(2006년 11월 14일 접수, 2007년 3월 28일 승인)

Classification of Synoptic Meteorological Conditions for the Medium or Long Term Atmospheric Environmental Assessment in Urban Scale

Kim, Cheol-Hee · Son, Hye-Young · Kim, Ji-A

Division of Earth Environmental System, Pusan National University
(Manuscript received 14 November 2006; accepted 28 March 2007)

Abstract

In case there is a need to run the multi-year urban scale air quality model, it is a difficult task due to the computational demand, requiring the statistical approach for the long time atmospheric environmental assessment. In an effort to approach toward long term urban assessment, the sixteen synoptic meteorological conditions are statistically classified from the estimated geostrophic wind speeds and directions of 850 hPa geopotential height field during 2000 ~ 2005. The geostrophic wind directions are subdivided into four even intervals (north, east, south, and west), geostrophic wind speeds into two classes ($\leq 5\text{m/s}$ and $>5\text{m/s}$), and daily mean cloud amount into 2 classes ($\leq 5/10$ and $>5/10$), which result into sixteen classes of the synoptic meteorological cases for each season. The frequency distributions for each 16 synoptic meteorological case are examined and some discussions on how these synoptic classifications can be used in the environmental assessment are presented.

Key words : classification of synoptic meteorological condition, geostrophic wind, urban scale atmospheric environmental assessment

1. 서론

최근 환경영향평가는 3차원 대기질 모델을 직접 이용하여 수행하는 경우가 많아지고 있다. 지금까지

대기질 부문에서는 1980년대부터 가우시안 (Gaussian) 모델들을 가장 많이 사용하여 왔으나 모델 자체의 여러 문제점들이 여러번 지적되었다(장영기와 조경두, 1993, 이종범과 김용국, 1990). 그

러나 이를 근본적으로 보완할 수 있는 방법으로 3차원 대기질 모델이 이용되고 있으나 3차원 모델의 입력 변수로서 배출량, 기상 요소 등 여러 복합적인 요소가 많아 매우 신중한 접근이 요구되었다. 그러나 전산 기능의 발달과 함께 다양한 입력 자료가 가능해짐에 따라 CMAQ (Community Multi-scale Air Quality Model)과 같은 3차원 대기질 모델을 이용한 환경영향평가가 빈번해지고 있다. 근래에 와서는 MM5 (The Fifth-Generation NCAR / Penn State Mesoscale Model) 혹은 RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) 모델과 같은 3차원 중규모 기상 모델을 이용하는 연구가 늘어나면서 단기적인 3차원 기상장을 이용한 대기질 모델링이 자주 이용되고 있다.

단기적인 에피소드 분석과는 달리, 3차원 대기질 모델링으로 1년 혹은 그 이상의 중·장기 대기환경영향 평가를 수행하는 것은 많은 인력과 시간을 요하는 작업이다. 이러한 문제를 해결할 수 있는 방법은 여러 가지가 있을 수 있으나 근본적으로 매일 매일 변하는 3차원 기상장을 어떻게 처리하느냐가 관건이 된다. 이 경우 일정기간을 대표할 수 있는 몇 개의 전형적인 기상 사례로 나누어 접근하는 통계적인 방법이 매우 효율적이다. 즉 매일 매일 진행되는 기상 조건을 몇 가지 한정된 개수로 분류하여 각각의 분류된 기상 조건이 분석기간 중 몇% 차지하는가를 따져서 그에 비례하는 가중치를 주어 평균하는 방법이 현실적이다. 이러한 접근은 근본적으로 기상 현상은 여러 특정 주기를 가지며 그 주기는 통계적으로 반복된다는 가정에서 출발한다. 따라서 자주 발생하는 기상 조건의 경우는 매우 빈번한 주기로 나타나므로 이를 대표하는 특정한 몇 날들을 선택하여 기상모델로 수행함으로써 3차원 기상 모델링의 계산 시간을 줄여 보는 것이다. 그러나 특정 지역의 3차원 기상장은 매일 매일 다르며 특히 풍향 풍속 그리고 혼합고 등의 대기질의 진단에 있어 오염물질 농도에 영향을 주는 3차원 기상 인자가 다양하여 장기간의 대표성을 찾기는 쉽지 않다.

대기질 모델 결과에 영향을 미치는 국지 기상 변

수는 여러 가지가 있으나 이들 중 가장 중요한 변수들은 바람, 대기 난류, 대기 안정도 및 혼합고 등이다. 특히 대기질 수준은 지표층과 대기경계층 내에서 발생하는 대기 난류의 정도에 따라 달라지며 이것은 지표면의 성질과 국지 기상 현상에 의해 좌우된다. 이러한 국지 기상 특성은 종관기상 조건에 따라 좌우되므로 결국 체계적인 종관기상 분류 작업이 국지 기상 조건을 결정하는 중요한 관건이 된다. 따라서 이러한 종관 기상 조건을 분류하기 위하여 상층 바람 구조(종관풍)를 파악하는 것은 매우 중요한 의미를 가진다.

한반도 상공의 종관 기상 조건을 분류하기 위하여 매일의 일기도로부터 우리나라 주변의 지오펜셀 고도 패턴을 종관기상 스케일로 분류한 연구는 목적상 여러가지가 있다. 특히 우리나라는 여름의 남고북저형, 그리고 겨울의 서고동저형이 탁월하여 일견 매우 유용한 면이 없지 않다. 특히 최근에 와서 대기오염 포텐셜을 판단하는 데 매우 유망한 방법으로 부각되고 있는 데 이 방법은 대기의 여러 변수(예를 들어 지오펜셀 고도, 온도, 상대습도, 풍향, 풍속, 안정도)에 대해 군집 분석(cluster analysis)을 수행하여 각 군집의 대기의 순환의 특성을 분석할 수 있다(Sanchez *et al.*, 1990; Comrie *et al.*, 1992; Davis and Gay, 1993). 국내에서도 이러한 종관 기상 상태에 의한 대기 오염 물질 공간 패턴을 분류한 바 있다(김시완 등, 1997; 이보람 1997). 그러나 도시 규모 대기 환경영향평가를 수행하기 위한 종관기상 조건 분류로서는 불합리한 점이 없지 않다. 특히 종관 규모로 기상 조건을 분류할 경우 한반도 중심의 분류보다는 동아시아 전체를 두고 그 기압배치를 분류하는 것이므로 동일한 종관 분류에 속한 날임에도 불구하고 한반도 내의 도시 규모에서의 풍향, 풍속의 일관성이 낮은 경우가 있을 수 있기 때문이다. 따라서 한반도 상공의 종관풍(상층풍)만을 분류 기준으로 삼아 통계적으로 활용하는 방법이 매우 효율적이다.

따라서 본 연구에서는 도시 규모 장기 대기질 영향평가를 효과적으로 수행하기 위해서 동아시아 전

체가 아닌 한반도 상공의 종관풍(상층풍) 및 운량을 기준으로 종관기상 조건을 분류하고 그 빈도수를 통계적으로 살펴보고 몇 개의 분류된 결과로부터 중장기 대기 환경영향평가를 위한 도시규모 기상장의 활용 방법을 기술하고자 한다. 이는 만약 장기간의 3차원 대기질 모델링을 수행하기 어려운 경우 가장 대표적인 기상 조건을 선정하는 경우와 해당 기상 조건의 발생 빈도수를 살펴 보는 데 도움이 될 것이며 이에 따른 도시규모 대기질 모델링을 이용한다면 행정 복합도시 혹은 신도시 건설과 같은 도시 규모의 3차원 장기 대기질 영향평가 연구 등에 활용할 수 있는 의미있는 연구 결과가 될것이라 사료된다.

II. 연구 배경 및 필요성

도시 규모 3차원 기상장은 종관 기상 상태의 영향을 직접적으로 받는다. 따라서 3차원 기상 조건을 분류한다는 것은 결국 종관 기상 상태를 분석하는 것과 유사한 개념이 된다. 그러나 지금까지는 도시규모 대기질 평가가 목적이 아니라 지역규모 그 자체의 대기오염물질 연구를 위한 종관 기상 조건을 분류하는 것이 많이 연구되었다. 예를 들어 산성비 혹은 황사 등과 같은 동북아시아를 대상으로 하는 중규모 스케일을 배경으로 매일의 일기도를 클러스터 분석(cluster analysis)을 수행한 경우가 대표적이다. 이러한 연구 결과들을 도시규모 대기질 연구에 연관시키기에는 많은 부분 적용하기 어려운 경우가 많다. 예를 들어 동아시아 전역에 대해 상층 기상 유형 분류시 사용되는 Kirchhofer(1973) 방법에 의한 주요 기압배치는 동아시아 전역을 놓고 볼 때 고·저기압의 상대적 위치에 의해 결정되며 따라서 주요 국내 대도시 상공에 정체성으로 기압배치가 자리한 경우를 제외하고는 그 상관성이 매우 낮게 나타나는 경우도 많다. 이는 반경 50km 이내의 국내 대부분의 대도시가 동아시아 규모에 비해 그 면적이 상대적으로 매우 작기 때문에 동아시아 규모의 상층 기압배치 분류 결과와 연관성이 적게 나타나는 경우가 많기 때문이다.

동아시아 종관규모 기상 패턴과는 별도로 도시규모 대기질에 영향을 미치는 대표적인 기상 인자는 여러 가지가 있으나 우리나라 환경영향 평가와 같은 도시규모 스케일의 경우 하루(1일)주기의 국지 순환에 의해 좌우되며 이는 한반도 상공의 상층풍향과 풍속에 의해 근본적으로 달라진다. 이는 대도시의 대기오염도에 많은 영향을 미치는 국지적 풍속은 종관풍속의 영향을 필연적으로 받기 때문이다. 결국 하루 평균 종관풍을 분류하면 하루 주기의 국지 순환 분류가 가능해 질 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 상층풍을 기상 조건의 분류 기준으로 정하고 대기 안정도를 분류할 수 있는 운량(혹은 일사량)을 기준으로 1일 주기의 기상 조건을 통계적으로 분류하여 그 발생 빈도수를 조사하였다. 나아가 조사된 통계 결과를 이용하여 수도권에서의 중장기 대기질 영향 평가를 수행할 수 있는 3차원 기상장의 통계적 활용방법을 사례 분석을 통해 제시하고자 한다.

III. 연구방법

본 연구에서는 850hPa 일기도에 나타난 지오포텐셜 고도를 이용하여 산출한 지균풍향, 풍속과 연직 난류 확산과 밀접한 연관이 있다고 판단되는 일평균 운량을 이용하여 매일 매일의 기상 조건을 분류하였다.

(a) 지난 6년간의 850mb의 일기도를 이용하여 매일 매일의 지균풍의 풍향 풍속을 구한다(한반도 중앙 지점을 택하여 (Fig. 1)과 같이 위도 경도 거리가 10도 되게 격자점을 정하고 이 점의 지오포텐셜 고도를 구한다).

(b) 850mb의 지균풍을 풍향은 4방위 풍속은 2등급(지균풍속>5m/s와 지균풍속 ≤ 5m/s)의 두 경우로 나누어 종관 기상 상태를 8경우로 나눈다.

(c) 매일의 운량을 고려하여 운량이 적은날(맑은 날, 운량 ≤ $\frac{5}{10}$)과 운량이 많은날(흐린날, 운량 > $\frac{5}{10}$)로 그 경우로 나눈다.

(d) 종관 기상 상태를 모두 지균풍 바람에 의한 8

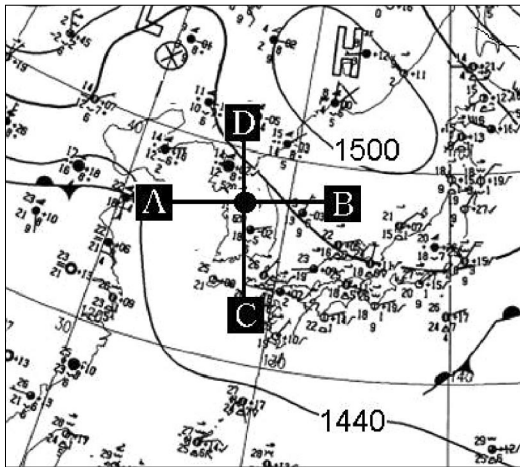


Fig. 1. A 850hPa chart. The letters A, B, C and D indicate the locations where the geopotential heights are read to compute the geostrophic wind at the center marked by a block dot.

가지 경우와 맑고 흐린 2가지 경우로 나누면 16가지의 경우가 생긴다.

(e) 이렇게 분류된 16가지 경우를 이용하여 매일 매일 분류하여 그날의 종관장을 분류한다.

(f) 각 월별로 16가지의 경우 총 발생빈도를 구한다.

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 지오펜셀 고도차(Fig. 1의 A, B 지점과 C, D 지점)를 이용하여(박순웅과 윤일희, 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 방향은 $\Theta = \tan^{-1}(u_g/v_g)$ 로 구할 수 있고, 지균풍 속은 $|V_g| = (u_g^2 + v_g^2)^{\frac{1}{2}}$ 로 계산된다. 여기서 f 는 코리올리 매개변수로 37°N에서의 값이고, g 는 중력 가속도를, 그리고 Φ 는 00UTC 850 hPa 면의 지오펜셀 고도이다. 또 일평균 운량은 수도권을 가정하여 3 개 도시(서울, 인천, 수원)의 일평균 운량을 정규 기상 관측소로부터 평균

하여 사용하였다. 자료는 최근 6년간인 2000년~2005년까지를 사용하였고 분류된 결과는 모두 열거하여 그 발생 빈도와 분포를 파악하였다.

조사된 통계결과를 토대로 가장 빈번한 수도권 3차원 기상장을 생산하여 그 특성을 파악하고 이를 대기질 영향평가에 활용하는 통계적인 방법을 구체적으로 제시하였다.

IV. 결과 및 토의

최근 약 6년간 매일의 850hPa 지균풍을 기상청에서 발행하는 일기도로부터 모두 구하여 계절 및 월별로 그 발생 빈도수를 산출하였다. 매일 매일 구해진 850mb의 지균풍을 풍향은 정북을 기준으로 시계방향으로 4방위(북풍(N): 315°~45°; 동풍(E): 45°~125°; 남풍(S): 125°~225°; 서풍(W): 225°~315°)로 나누고(Fig. 2), 풍속은 2등급(풍속 Index 1 - 지균풍속 ≤ 5m/s 그리고 풍속 Index 2 - 지균풍속 > 5m/s의 두 경우)으로 나누어 종관 기상 상태를 8 경우로 나누었다. 당일 관측한 하루 평균 운량은 2 등급으로서 각각 운량이 적은 날(운량 Index 1 - 맑은날, 운량 ≤ 5/10)과 운량이 많은 날(운량 Index 2 - 흐린 날, 운량 > 5/10)로 나누었다. 그 결과 종관 기상 상태를 지균풍 바람에 의한 8가지 경우(풍향 4등급, 풍속 2 등급)와 맑고 흐린 2가지 경우로 나누어 모두 16가지의 경우로 나누어 각 계절별로 XYZ 형태의 3자리 Index(여기서, X: 풍향 Index, Y: 풍속 Index 그리고 Z: 운량 Index)로 나타내었다. 16가지 경우에 대한 각 종관기상 상태와 각 계절 별 발생빈도를 6년간 구하여 Table 1에 나타내었고 월별로 더욱 세분화하여 Table 2에 수록하였다.

Table 1에서 알 수 있듯이, 사계절 모두 지균풍의 발생빈도수는 서풍(58.7%), 북풍(23.2%), 남풍(10.7%), 동풍(7.5%) 순서로 나타나 최대 빈도수가 서풍 계열로 나타났다. 이는 한반도가 편서풍대에 위치함을 시사해 주고 있다. 계절별로도 그 특징이 나타나는데 서풍 계열의 바람은 사계절 모두 우세한 가운데 봄(62%), 가을(52%), 겨울(73%)에 특히 우세

Table 1. Seasonal frequency distributions of 850hPa geostrophic winds and cloud amount for the period of January 2000 to December 2005

Case	Spring			Summer			Autumn			Winter			Sub-total	Total (%)	
	WS (m/s)	WD (deg)	CL (1/10)	WS (m/s)	WD (deg)	CL (1/10)	WS (m/s)	WD (deg)	CL (1/10)	WS (m/s)	WD (deg)	CL (1/10)			
N	27			50			53			11			141	508 (23.18%)	
	3.0	350.8	2.8	2.8	358.9	2.7	2.8	351.5	1.9	3.0	342.1	2.2			
	17			21			28			7			73		
	2.9	352.9	7.1	2.3	345.1	7.3	2.6	346.8	7.4	3.0	348.1	8.0			
N21	67			12			57			104			240		
	8.5	332.5	2.0	5.5	359.7	2.4	7.2	340.0	1.7	11.3	325.3	1.2			
N22	24			4			13			13			54		
	8.0	336.5	6.5	5.4	357.7	7.6	7.4	339.2	6.7	8.3	326.1	6.8			
E	4			17			28			2			51	164 (7.47%)	
	1.5	70.9	3.7	2.6	83.5	3.0	2.8	81.0	3.1	3.9	68.5	4.1			
	8			24			24			2			58		
	3.2	92.1	7.3	2.5	88.6	7.9	2.7	102.4	7.9	3.4	76.7	9.2			
	E21	7			6			10			-				23
		6.0	81.9	3.1	6.6	91.1	2.9	7.6	63.2	3.0	-	-	-		
E22	8			12			10			2			32		
	9.1	113.0	9.0	10.5	102.2	8.3	9.6	88.6	8.7	5.8	106.3	9.5			
S	9			18			6			-			33	234 (10.68%)	
	2.4	181.9	2.3	3.0	202.0	3.6	2.9	217.3	3.7	-	-	-			
	14			58			24			4			100		
	3.1	187.3	8.5	2.4	182.4	8.0	2.4	186.8	7.4	2.4	191.3	9.1			
	S21	1			8			-			-				9
		6.5	209.8	2.1	6.4	186.7	3.7	-	-	-	-	-	-		
S22	25			55			9			3			92		
	8.4	196.9	8.7	7.4	199.0	9.0	7.4	196.3	8.5	7.7	207.7	9.2			
W	24			32			53			25			134	1286 (58.67%)	
	3.4	269.4	2.7	3.0	278.2	3.3	3.4	281.8	2.5	3.6	291.9	3.0			
	33			70			27			21			151		
	3.1	271.0	8.1	2.8	261.2	7.7	3.2	263.0	7.5	2.9	272.1	7.6			
	W21	176			26			122			235				559
		9.6	288.2	2.2	6.7	279.8	3.6	8.8	292.2	2.4	10.4	300.0	2.3		
W22	108			139			82			113			442		
	9.2	269.3	7.5	7.8	259.0	8.4	8.1	274.7	7.4	9.3	281.8	7.2			
Total	552			552			546			542			2192	2192	

하였고 여름철의 경우 48%로 상대적으로 낮은 빈도수를 보였다. 반면 남풍 계열의 경우 여름을 제외한 사계절 모두 10% 이하의 빈도수를 보였으나 여름철의 경우 25.2%의 높은 빈도수를 보여 여름철 우리나라의 지균풍향은 서풍계열에서 남풍 계열로 그 발생 빈도가 바뀐 것으로 해석된다. 이러한 결과는 겨울철 찬 대륙성 고기압의 영향과 여름철 동북아시아 대륙과 태평양 사이의 몬순 순환이 한반도에 걸쳐 우리나라에 영향을 미치고 있음을 말해주고 있다.

반면 북풍 계열은 사계절 각각 24.5%, 15.8%, 27.7%, 24.9%로 겨울과 봄철에 높게 나타났는데 특히 겨울철의 경우 동풍과 남풍이 각각 1.1%, 1.3%로 매우 낮은 발생 빈도수를 보여 대륙성 고기압이 주도한 겨울철에는 다른 풍계가 거의 나타나지 않는 것으로 나타났다.

계절별, 종관 기상 상태별 발생 빈도수를 살펴 보면, 봄철의 경우 가장 높은 종관기상 패턴은 W21(31.9%), W22(19.6%), N21(12.1%) 순으로 나타났

Table 2. Monthly frequency distributions of 850hPa geostrophic winds and cloud amount for the period of January 2000 to December 2005

	case	Month												Sub-Total	Total (%)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
N	N11	3	5	13	6	8	24	12	14	21	24	8	3	141	508 (23.18%)
	N12	2	2	4	3	10	5	6	10	17	6	5	3	73	
	N21	38	30	26	19	22	7	1	4	13	28	16	36	240	
	N22	5	6	14	6	4	2	-	2	5	7	1	2	54	
E	E11	1	-	-	1	3	6	5	6	18	10	-	1	51	164 (7.47%)
	E12	1	1	-	4	4	4	8	12	17	4	3	-	58	
	E21	-	-	-	2	5	1	1	4	8	2	-	-	23	
	E22	2	-	1	2	5	4	3	5	9	1	-	-	32	
S	S11	-	-	-	2	7	3	5	10	1	5	-	-	33	234 (10.68%)
	S12	2	1	3	2	9	17	16	25	16	5	3	1	100	
	S21	-	-	-	1	-	1	2	5	-	-	-	-	9	
	S22	1	2	-	9	16	16	21	18	5	2	2	-	92	
W	W11	11	7	4	8	12	13	8	11	10	24	19	7	134	1286 (58.67%)
	W12	8	9	6	14	13	28	24	18	11	9	7	4	151	
	W21	74	70	71	66	39	13	5	8	7	39	76	91	559	
	W22	38	37	44	35	29	36	69	34	22	20	40	38	442	
Total		186	170	186	180	186	180	186	186	180	186	180	186	2192	2192

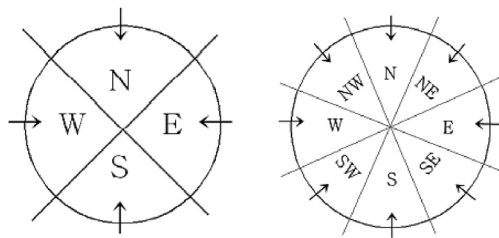


Fig. 2. Indications of 850 hpa geostrophic wind direction from 4 classifications (left), and 8 classifications (right).

고 지균풍속은 각각 9.6 m/s(풍향 288.2°, 운량 2.2), 9.2m/s(풍향 269.3°, 운량 7.5), 8.5m/s(풍향 332.5°, 운량 2.0) 순서로 나타났다. 봄철의 경우 가장 높은 중관기상 패턴은 W21(31.9%), W22(19.6%), N21(12.1%) 순으로 나타났고 지균풍속은 각각 9.6 m/s(풍향 288.2°, 운량 2.2), 9.2m/s(풍향 269.3°, 운량 7.5), 8.5m/s(풍향 332.5°, 운량 2.0) 순서로 나타났다. 여름철에는 W22(25.2%), W12(12.7%), S12(12.1%) 순으로 나타났고 가을철에도 봄철과 유사하게 W21(22.3%), W22(15.0%), N21(10.4%) 순으로 나타났고 겨울철에는 W21(43.4%), W22(20.9%), N21(19.2%) 순으로 나타났다(Table 1). 이 결과는 예를 들어 겨울철 대기질 영향평가를

수행하는 경우 3 사례(W21 + W22 + N21)만을 선정하여 그 영향평가를 각각 가중 평균하면 약 83.4% 정도의 설명력을 충분히 가지는 것으로 해석할 수 있다.

에피소드 분석시 참고로 하기 위해 풍향을 8방위(Fig. 2), 풍속을 2 등급으로 총 32가지 경우로 더욱 세분화하여 계절별로 분류한 결과를 Table 3에 수록하였다. Table 3에서 알 수 있듯이, 사계절 모두 지균풍의 발생빈도가 서풍 계열인 서풍, 남서풍 그리고 북서풍의 경우 순서로 최대 빈도수를 나타냈다. 특히, 남서풍(SW11 + SW12 + SW21 + SW22)의 발생 빈도수는 여름철의 경우 23.7%로 겨울철 2.2 %에 비해 거의 10 배 가까이 자주 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 여름철 동북아시아 대륙과 태평양 사이의 몬순 순환이 한반도에 걸쳐 지속적으로 영향을 미치고 있음을 말해주고 있다.

반면 북풍 계열인 북서풍(NW), 북풍(N) 그리고 북동풍(NE)의 빈도수는 봄철이 각각 33.7%, 9.1% 그리고 2.5%로 그 합이 45.3%이며, 여름철은 각각 14.6%, 6.0% 그리고 6.5%로 그 합이 27.1%, 가을철은 각각 36.3%, 8.7% 그리고 7.5%로 그 합이 52.5%이며, 한편 겨울철은 각각 61.8%, 4.6% 그리고 0.4%

Table 3. Same as in Table 1 except for the 850hPa geostrophic wind (with 8 directions).

Spring						Summer						Autumn						Winter					
Case	WS (m/s)	WD (deg)	Cloud (1/10)	freq.	%	Case	WS (m/s)	WD (deg)	Cloud (1/10)	freq.	%	Case	WS (m/s)	WD (deg)	Cloud (1/10)	freq.	%	Case	WS (m/s)	WD (deg)	Cloud (1/10)	freq.	%
N11	3.2	354.7	2.7	12	2.2	N11	2.8	2.9	2.9	21	3.8	N11	3.1	356.9	2.1	21	3.8	N11	2.9	359.9	2.9	5	0.9
N12	3.1	345.5	7.5	10	1.8	N12	2.0	355.1	7.5	7	1.3	N12	2.8	3.6	7.1	9	1.6	N12	2.7	1.3	7.9	5	0.9
N21	7.1	354.0	2.0	18	3.3	N21	6.1	5.6	1.3	3	0.5	N21	7.4	355.9	2.0	16	2.9	N21	9.6	346.5	1.0	12	2.2
N22	7.8	358.1	6.8	10	1.8	N22	5.3	6.2	7.5	2	0.4	N22	8.5	353.1	8.3	2	0.4	N22	7.3	351.8	7.3	3	0.6
NE11	3.3	38.3	3.0	6	1.1	NE11	3.3	39.6	2.5	18	3.3	NE11	3.1	48.1	2.2	24	4.4	NE11	4.5	66.5	4.9	1	0.2
NE12	3.2	39.7	7.5	5	0.9	NE12	3.2	51.9	6.8	10	1.8	NE12	3.0	40.6	7.2	5	0.9	NE12	4.8	66.7	9.0	1	0.2
NE21	9.8	41.2	3.2	3	0.5	NE21	6.3	42.2	3.3	5	0.9	NE21	8.0	43.0	1.4	11	2.0	NE21	-	-	-	-	-
NE22	-	-	-	-	-	NE22	8.7	48.1	6.8	3	0.5	NE22	4.8	41.6	9.8	1	0.2	NE22	-	-	-	-	-
E11	1.1	99.8	4.3	1	0.2	E11	2.7	81.0	3.0	9	1.6	E11	3.2	93.0	3.5	9	1.6	E11	3.3	71.2	3.2	1	0.2
E12	3.2	92.6	6.8	6	1.1	E12	2.4	87.6	8.2	10	1.8	E12	3.0	84.0	7.0	10	1.8	E12	2.3	98.0	9.3	1	0.2
E21	6.0	87.3	3.2	6	1.1	E21	6.3	79.1	2.4	4	0.7	E21	6.9	82.2	3.7	5	0.9	E21	-	-	-	-	-
E22	7.2	100.7	8.5	5	0.9	E22	1.7	88.6	8.5	4	0.7	E22	9.9	84.8	8.5	9	1.6	E22	5.2	86.5	9.1	1	0.2
SE11	1.7	134.4	2.4	3	0.5	SE11	3.2	127.8	2.6	5	0.9	SE11	2.8	127.0	3.7	6	1.1	SE11	-	-	-	-	-
SE12	2.6	138.1	8.4	5	0.9	SE12	2.4	137.0	8.1	19	3.4	SE12	2.5	127.9	8.2	18	3.3	SE12	2.0	147.1	9.5	1	0.2
SE21	-	-	-	-	-	SE21	7.9	143.4	3.7	4	0.7	SE21	-	-	-	-	-	SE21	-	-	-	-	-
SE22	9.9	133.8	9.8	6	1.1	SE22	1.3	130.2	9.0	9	1.6	SE22	7.3	140.5	9.5	2	0.4	SE22	6.9	121.1	9.9	1	0.2
S11	2.5	181.6	2.7	6	1.1	S11	3.5	191.6	3.9	7	1.3	S11	-	-	-	-	-	S11	-	-	-	-	-
S12	4.1	184.6	8.7	5	0.9	S12	2.8	180.0	8.2	32	5.8	S12	2.9	175.9	7.5	10	1.8	S12	2.1	180.7	9.8	2	0.4
S21	-	-	-	-	-	S21	5.9	170.8	3.0	1	0.2	S21	-	-	-	-	-	S21	-	-	-	-	-
S22	8.4	184.9	7.7	10	1.8	S22	7.6	186.7	9.0	25	4.5	S22	0.0	188.1	9.3	4	0.7	S22	5.3	158.6	7.7	1	0.2
SW11	3.6	236.0	2.8	8	1.4	SW11	3.1	223.1	3.8	12	2.2	SW11	3.0	229.5	3.0	12	2.2	SW11	-	-	-	-	-
SW12	3.3	221.7	8.4	11	2.0	SW12	3.0	226.6	8.0	38	6.9	SW12	3.1	225.2	7.7	17	3.1	SW12	3.1	233.5	9.0	4	0.7
SW21	8.8	238.1	3.0	6	1.1	SW21	7.1	222.1	3.7	8	1.4	SW21	8.0	243.1	2.2	5	0.9	SW21	7.0	243.0	3.1	2	0.4
SW22	9.1	228.0	8.2	33	6.0	SW22	8.1	229.4	8.9	73	13.2	SW22	6.9	233.9	7.8	13	2.4	SW22	6.9	231.1	8.7	6	1.1
W11	4.0	268.0	3.0	11	2.0	W11	3.0	269.4	3.4	19	3.4	W11	3.8	270.4	2.8	24	4.4	W11	3.3	274.2	3.4	11	2.0
W12	3.1	267.6	8.2	20	3.6	W12	3.0	266.8	7.7	31	5.6	W12	4.0	263.1	7.4	12	2.2	W12	3.4	267.8	7.2	13	2.4
W21	9.6	276.1	2.5	91	16.5	W21	7.1	271.3	3.8	12	2.2	W21	7.9	276.7	2.6	49	9.0	W21	9.2	283.0	2.9	63	11.6
W22	0.0	270.5	7.5	69	12.5	W22	8.4	266.5	8.4	80	14.5	W22	8.9	270.9	7.6	54	9.9	W22	9.9	274.0	7.4	73	13.5
NW11	3.3	320.4	2.5	17	3.1	NW11	3.5	317.0	2.8	26	4.7	NW11	3.3	313.5	2.0	44	8.1	NW11	3.7	310.5	2.4	20	3.7
NW12	4.0	306.3	6.9	10	1.8	NW12	2.8	311.7	7.2	26	4.7	NW12	2.8	321.1	7.4	22	4.0	NW12	2.9	314.7	7.5	7	1.3
NW21	9.9	310.7	1.9	127	23.0	NW21	7.3	309.5	3.1	15	2.7	NW21	9.2	309.9	2.1	103	18.9	NW21	1.1	311.8	1.7	262	48.3
NW22	8.9	310.4	6.8	32	5.8	NW22	6.8	303.1	7.0	14	2.5	NW22	7.5	310.7	6.4	29	5.3	NW22	9.2	305.1	6.7	46	8.5

로 그 합이 66.8%로 나타났다. 따라서 대륙의 고기압 대에 의한 북풍 계열은 겨울철, 봄철, 가을철 그리고 여름철의 순서로 그 발생빈도가 나타났다.

봄철의 경우, 강한 북서풍의 지균풍이 부는 맑은 날(NW21)의 빈도수가 23.0%로 가장 많으며, 그 때의 종관풍의 풍속은 9.9 m/s이며 풍향은 310.7°를 나타내고 있다. 여름철의 경우, 최다 빈도수를 나타내는 종관 상태는 강한 서풍의 지균풍이 부는 흐린 날(W22)이며 이때의 풍속은 8.4 m/s이며 풍향은 266.5°로 나타났다. 가을철의 경우에는 봄철과 마찬가지로 강한 북서풍의 지균풍이 부는 맑은날

(NW21)의 빈도수가 18.9%로 가장 많으며, 그 때의 종관풍의 풍속은 9.2 m/s이며 풍향은 309.9°를 나타내고 있다. 그리고 겨울철의 경우도 48.3%의 빈도수를 나타내는 강한 북서풍의 지균풍이 부는 맑은 날(NW21)의 종관 상태가 가장 많이 발생하며, 그 때의 종관풍의 풍속은 1.1 m/s이며 풍향은 311.8°로 나타났다. 이러한 결과는 대기질 환경영향 평가를 수행할 때 기상 조건별 사례 선정 등에 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

이상의 분류된 종관 기상 상태별 특성을 보다 상세히 살펴보기 위하여 각 종관 기상 상태별 평균 혼

합고(mixed layer height)를 산출하여 종관 기상 상태별 그 차이를 살펴보았다. 혼합고는 지면의 마찰 및 열적인 영향에 의해 형성되는 대기 경계층에는 활발한 난류 운동에 의해 생성되며 대기경계층(Atmospheric Boundary Layer; ABL) 혹은 행성 경계층(Planetary Boundary Layer; PBL)이라고도 한다. 대기오염 농도 분석에 있어서 기상 요소 중 풍속은 오염물질을 수평방향으로 얼마만큼 이동시킬 것인가에 대한 척도라면 대기 혼합고는 오염물질이 연직으로 확산될 수 있는 거리를 지배하는 매우 중요한 기상요소이다. 따라서 이상의 분류된 종관 기상 상태별 혼합고의 차이를 통해 그 특성을 분석할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 오후의 혼합고도를 추정하기 위하여 오산 지역의 고층 기상 관측 자료를 2001년에 대하여 Holzworth (1967)의 방법을 이용하였다. 즉 일 최고 온도에서 연직으로 건조 단열 감률로 올린 선이 오전의 고층 기상 자료의 연직 온도 분포와 만나는 고도로 추정하였다.

그 결과 종관 기상 조건에서 일평균 운량이 ($\leq 5/10$)인 맑은 날인 E11, E21, S11, S21, W11, W21, N11, N21의 혼합고는 약 1,000m ~ 1,700m까지 추정되었으며, 일평균 운량이 ($>5/10$)인 흐린 날(E12, E22, S12, S22, W12, W22, N12, N22)에는 평균 혼합고가 약 800m~1,000m 정도로 맑은 날보다 약 70~80% 적게 나타났다(Fig. 3). 흐린 날의 경우 강수 등에 따른 지면 가열이 방해받는 경우가 많아 혼합층의 성장이 추정되지 않는 경우도 상당수 있었으며 혼합고의 편차 또한 맑은 날의 경우가 흐린 날의 경우보다 적게 나타났다. 이것은 맑은 날의

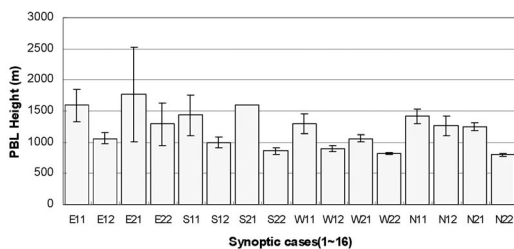


Fig. 3. Distributions of mixed layer height for the sixteen synoptic classes derived from the upper sounding meteorological observations during 2001

경우 지표로부터 가열된 상황에서 활발한 대류에 의해 지면의 현열속이 급속히 증가하여 혼합층이 대부분 성장하였기 때문으로 분석된다. 그러나 평균 운량이 ($5/10$)이하의 경우로서 맑은 날로 구분되었다라고 지균 풍향에 따른 혼합고의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 다만 지균 풍향이 서풍인 경우(W11, W21) 소폭 낮게 나타났고 E11, E21, S11, S21, N11, N21의 차이는 크지 않았다(Fig. 4). 서풍의 경우 혼합층이 낮게 나타난 것은 운량이 적고 일사량이 많아 서해상에서 발달하는 해풍의 발달과 함께 상대적으로 차가운 바다 공기가 유입되어 태양 복사 에너지에 의해 가열된 지면 위의 공기를 냉각시켜 대기 중으로 유입되는 현열 플럭스를 감소시킨 것에 기인한 것으로 분석된다. 계절별로는 여름철의 경우가 맑은 날과 흐린 날의 차이가 가장 크게 나타났는데 장마와 같은 강수과정이 지속된 날과 북태평양 고기압 하에서의 맑은 여름날의 오후처럼 대류가 활발하여 지면의 현열속이 탁월한 날이 대조된 것에 기인한 것으로 해석된다.

결론적으로 본 연구에서 분류한 종관 기상 상태에 따른 하루 주기인 연직 혼합고의 분포가 뚜렷이 구분되어 나타남에 따라 본 연구의 종관 기상 상태의 분류에 관한 연구는 도시 규모 기상 조건을 상층 풍속 및 풍향 그리고 운량으로 구분하여 특정 기간의 대표 사례일을 정할 때 효율적으로 구분하여 적용될 수 있을 것임을 시사해 준다.

V. 통계 결과의 활용 : 수도권 지역의 경우

수도권에서 봄철 강수가 없는 맑은 날의 3 차원 미세먼지 모델링을 수행하여 수도권 배출량 시나리오에 따른 장기간(10년 이상) 평균 농도 분포를 산출하고자 하는 경우를 사례로 가정하였다. 3 차원 모델링으로 봄철 맑은 날을 매일 매일 수행하여야 하나 본 연구의 Table 1의 결과를 이용하면 통계적 접근이 가능하다. Table 2에 따르면 본 연구의 조사기간 중 봄철(3월~5월) 맑은날의 빈도수는 총 315일($N11 + N21 + E11 + E21 + S11 + S21 + W11 + W21 = 315$)로 나타났으며 따라서 8개 전형적 사례

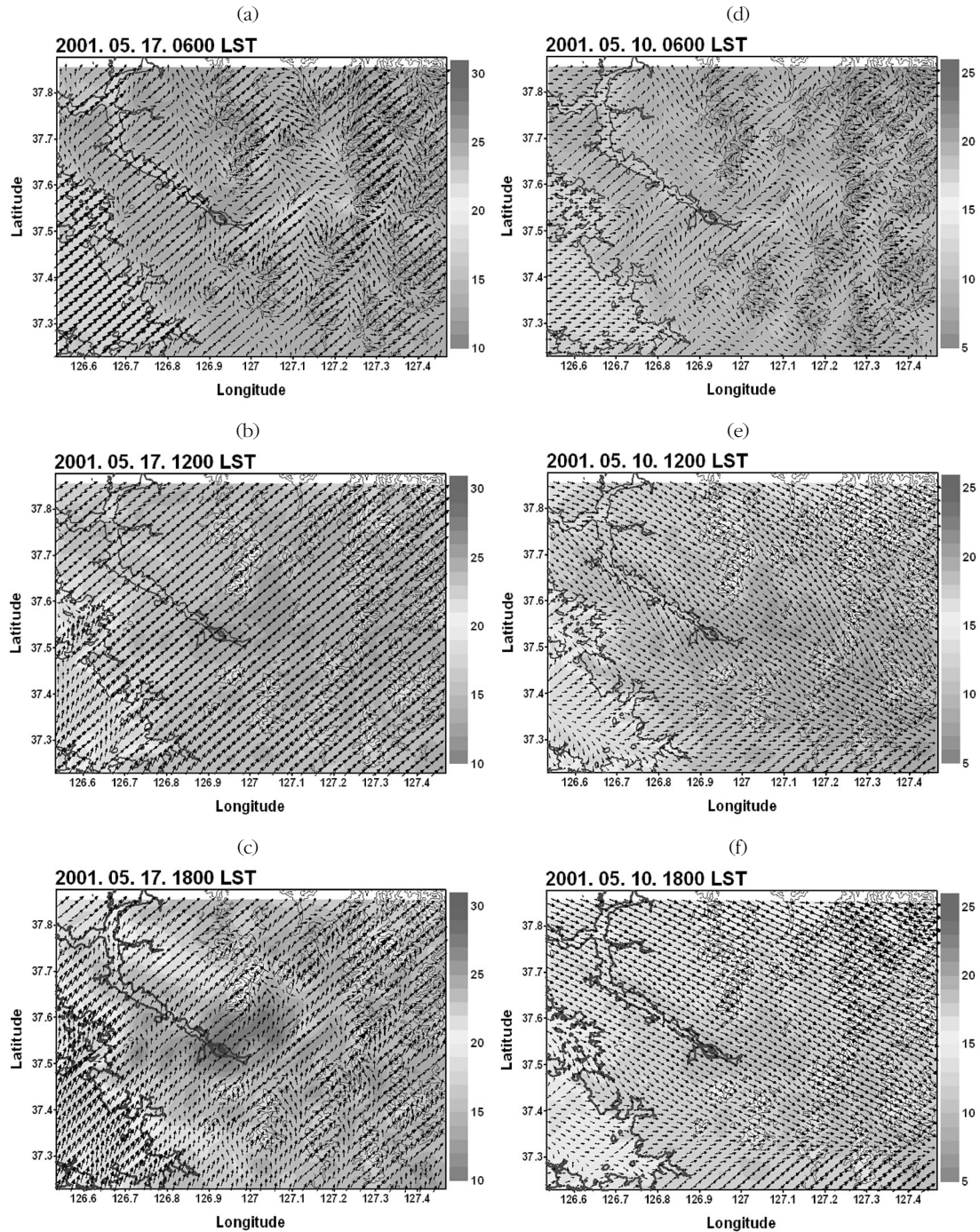


Fig. 4. Diurnal variations of the horizontal distributions of wind vectors with 6-hour interval in Spring for the case of strong westerly geostrophic winds (left panel), and strong northerly geostrophic winds (right panel) for clear days over the Seoul metropolitan area

를 각각 선정하여 사례별 대기질 모델링을 수행하여 이를 가중평균한다면 최종적인 대기질 농도 공간 분

포를 산출할 수 있을 것이다. 여기서는 모델의 입력 자료인 수도권 3 차원 기상장의 통계적 활용 방법만

을 사례로 들어 설명하고자 한다.

우선 Table 1에서 봄철 맑은 날의 각 분류된 8 사례 중 빈도수가 높은 서너 사례만을 택하여도 현실적으로 그 접근이 가능할 수 있다. 여기서는 두 사례만을 택할 경우를 예를 들어 설명하였다. 즉 Table 1의 결과 봄철 맑은 날의 8개 사례 중 W21의 경우가 176일로서 약 55.6%를 차지하며, 그 다음으로 N21의 경우가 67일로서 전체 21.3%를 차지한다. W21의 사례에 대한 수도권 상세 기상장을 생산하기 위하여 조사된 850hPa의 W21 사례의 지균풍속(9.6m/s), 지균풍향(288.2°), 운량(2.2/10)의 평균치와 가장 근접한 날인 2001년 5월 17일을 선정하였고, N21의 경우 평균 지균풍속(8.5m/s), 지균풍향(332.5°), 운량(2.0/10)의 평균치와 가장 가까운 2001년 5월 10일을 선정한 다음, 중규모 기상모델인 MM5(Mesoscale Model version 5)를 각각 수행하여 지상 10m에서의 기온 및 바람장 결과를 Fig. 4에 제시하였다.

Fig. 4에서 알 수 있듯이 수도권의 지상 바람장은 종관 기상 조건에 따라 크게 좌우되고 있음을 알 수 있는데 상층(850hPa) 분류 결과에 비해 지상에서의 바람은 지표 마찰의 영향으로 상층보다 지상풍향이 반시계 방향으로 회전하여 있음을 알 수 있다. 즉 W21(Fig. 4a~Fig. 4c)의 경우 남서풍이, 그리고 N21(Fig. 4d~Fig. 4f)의 경우 북서풍이 우세하여 결국 두 사례 모두 지상에서 상층으로 갈수록 순진(veering)하는 바람 구조를 보이고 있다. 또 수도권의 동쪽에 산재한 다양한 산악 지형의 영향으로 산곡풍과 같은 국지 순환이 모의되어 복잡한 수도권 바람장을 보였으나 서로 다른 종관풍향의 영향으로 두 사례가 구분되어 나타난 것을 볼 수 있다.

본 사례에서는 두 가지 사례(W21과 N21)만을 선정하였으므로 각 사례별 대기질 모델링으로 시간별 대기질 분포를 산출하여 55.6% 대 21.3%로 가중 평균한 결과는 $55.6\% + 21.3\% = 76.9\%$, 즉 수도권 대기질의 약 77%를 해석할 수 있다는 결론이 나온다. 이러한 접근은 한반도 공간 규모상으로 볼 때 겨울철 특정 기압 배치를 제외하고는 우리나라의 도시

전역이 동일한 종관기상 상태 아래에 있다고 가정하여도 무리가 아니므로 수도권이 아닌 다른 도시 지역에도 대부분 본 연구의 분류 결과가 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구의 결과를 바탕으로 장기간에 걸친 3차원 대기질 모델링을 수행하되 장기간에 걸친 매일의 모델링을 실제로 하지 않고서도 효율적으로 접근할 수 있는 기초자료를 제공할 수 있기 때문에 매우 중요한 기초자료가 될 것으로 사료된다.

VI. 요약 및 결론

도시규모의 3차원 대기질 모델을 이용하여 장기 대기질 환경영향평가를 수행하기 위해서는 3차원 기상 모델과 연동된 3차원 대기질 모델을 수행하여야 하나 많은 인력과 시간을 요한다. 따라서 장기간의 모델링 기간을 대표할 수 있는 몇 개의 전형적인 사례로 나누어 접근하는 통계적인 방법이 효율적인데 이때 기상 조건을 통계적으로 분류하여 가장 빈번히 나타나는 사례별로 기상 조건을 몇 가지 한정된 개수로 분류할 필요가 있다. 분류 결과에 따라 각 사례별로 장기적으로 몇% 발생하였는가를 따져서 가중치를 주어 평균적인 환경영향을 평가할 수 있다. 이를 위한 기초자료 조사로서 기상청에서 발행하는 최근 6년간(2000년~2005년)의 매일의 850hPa 상층 일기도로부터 계절 및 월별로 16가지의 종관 기상 상태를 분류하였다. 즉 850mb의 지균풍을 풍향은 4방위(동, 서, 남, 북)로 나누고, 풍속은 2등급(지균풍속 ≤ 5 m/s인 경우와 지균풍속 > 5 m/s인 경우)으로 나누었고 하루 평균 운량은 2등급(운량 $\leq 5/10$ 인 맑은 날과 운량 $> 5/10$ 인 흐린날)로 나누었다.

그 결과 사계절 모두 지균풍의 발생빈도가 서풍 계열인 서풍(58.7%), 북풍(23.2%), 남풍(10.7%), 동풍(7.5%) 순서로 최대 빈도수가 조사되었다. 계절별로는 여름철에는 남서풍의 발생 빈도수가 23.7%로서 겨울철 2.2%보다 월등히 많아 여름철 동북아시아 대륙과 태평양 사이의 몬순 순환이 한반도에 걸쳐 지속

적으로 영향을 미치고 있음을 말해주고 있다.

반면 북풍 계열인 북서풍(NW), 북풍(N) 그리고 북동풍(NE)의 빈도수는 봄철이 각각 33.7%, 9.1% 그리고 2.5%로 그 합이 45.3%이며, 여름철은 각각 14.6%, 6.0% 그리고 6.5%로 그 합이 27.1%, 가을철은 각각 36.3%, 8.7% 그리고 7.5%로 그 합이 52.5%이며, 한편 겨울철은 각각 61.8%, 4.6% 그리고 0.4%로 그 합이 66.8%로 나타났다. 따라서 대륙의 고기압 대에 의한 북풍 계열은 겨울철, 봄철, 가을철 그리고 여름철의 순서로 그 발생빈도가 나타나고 있다. 또 겨울철에는 북풍 계열의 풍향이 각 61.8%, 4.6% 그리고 0.4%로 그 합이 66.8%로 나타나 대륙성 고기압의 영향을 빈번히 받았음을 보였다.

분류된 사례별 연직 확산 능력이 분류되었는지를 알아보기 위하여 기상청에서 매달 발간하는 동기간의 오산지역의 고층 기상관측 자료를 이용하여 혼합고를 종관 기상상태별로 추정하여 보였다. 그 결과 종관 기상 조건에서 일평균 운량이 ($\leq 5/10$)인 맑은 날의 종관 기상 조건에서 추정된 혼합고는 약 1,000m~1,700m까지 추정되었으며, 일평균 운량이 ($> 5/10$)인 흐린 날의 종관 기상 조건에서는 평균 혼합고는 약 800m~1,000m 정도로 맑은 날의 경우보다 약 70~80%에 불과하였다. 따라서 이상의 종관 기상 상태를 분류한 결과가 연직 확산 능력을 구분해 내는 것으로 나타났다.

최근 우리나라에서도 오존 예보제를 도입하는 등 대기오염물질의 피해를 최소화하기 위한 정책적인 대응을 하기도 하였으나 이를 효율적으로 운영하기 위한 지역적인 국지 및 종관기상 현상에 대한 연구는 매우 필수적이다. 따라서 종관기상 현상(일기예보)을 고려한 대기질 평가가 계속 중요해 질 것이며 따라서 이와 연관된 대기 환경영향평가 역시 이를 반영하는 방향으로 진행해 나가야 할 것이다. 이 때 장기적인 환경영향 평가를 수행할 경우 매일매일 변하는 기상 상태를 통계적으로 최대한 반영하기 위해서 이상의 연구 결과를 이용하면 매우 효율적으로 접근할 수 있을 것이다. 그러나 본 연구 결과는 기상 조건을 분류하는 하나의 방법에 불과하고 또 통계적으로 분류된

기상장은 실제 기상장과 다를 수 있다. 따라서 연속적인 기상 모사와 통계적인 분류 방법에 의한 접근 결과의 차이점을 고찰할 예정이며 더 효율적인 기상 조건 분류 방법을 개발, 그리고 이를 대기질 모델링에 적용하는 연구는 계속 진행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 부산대학교 기초과학연구소 기초과학 연구기반조성연구비(RIBS-PNU-2005-501)의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- 김용국, 이종범, 1990, Pasquill 안정도 계급의 평가와 안정도 parameter 추정 방법의 개발, 한국대기보전학회지, 6(2), 168-175.
- 김시완, 박순용, 이보람, 1997, 종관 기상장에 따른 SO_2 , NO_x , CO 그리고 O_3 농도의 변화. 한국기상학회지, 33(2), 273-287.
- 박순용, 윤일희, 1991, 한반도의 국지 기상 특징, 한국기상학회지, 27(2), 88-118.
- 이보람, 1997, 종관 기상상태를 고려한 한반도 대기 오염 퍼텐셜 예측법. 서울대학교 대기과학 석사학위논문, 54pp.
- 장영기, 조경두, 1993, 도시형 TCM 개발에 관한 연구, 한국 대기보전학회지, 9(2), 132-139.
- 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.
- Holzworth C., 1967, Mixing heights, wind speed and potential for urban air

- pollution throughout the contiguous U.S. U. S. Environmental Protection Agency Report AP-101, 118pp.
- Kirchofer W., 1973, Classification of European 500mb patterns, Arbeitsbericht der Schweizerischen Meterologischen Zentralanstalt Nr. 43.
- 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.

최종원고채택 07. 04. 03