

연구노트

지역규모 장거리 대기오염 이동물질의 환경영향평가를 위한 종관기상 조건의 분류

김철희 · 손혜영 · 김지아 · 안태건

부산대학교 자연과학대학원 지구환경시스템학부 대기환경과학전공

(2006년 11월 14일 접수, 2007년 2월 6일 승인)

Classification of Synoptic Meteorological Patterns for the Environmental Assessment of Regional-scale Long Range Transboundary Air Pollutants

Kim, Cheol-Hee · Son, Hye-Young · Kim, Ji-A · Ahn, Tae-Keun

Division of Earth Environmental System, Collage of Natural Science,
Atmospheric Science Major, Pusan National University

(Manuscript received 14 November 2006; accepted 6 February 2007)

Abstract

In order to conduct the environmental assessment of long range transboundary air pollutants over East Asia, the moving pathways of air pollutants are of great importance, which are depending upon the meteorological weather patterns. Therefore regional scale modeling study requires the identified geopotential height distribution patterns to deal with behaviors of long range transport air pollutants for the effective long term atmospheric environmental assessment. In this study the synoptic meteorological classification using cluster analysis technique over Northeast Asia, and its previous applications of the regional scale air pollutant modeling studies were reviewed and summarized in detail. Other synoptic meteorological characteristics over Korean peninsula are also discussed.

Key words : Regional scale atmospheric environmental assessment, Long range transboundary air pollutants, Cluster analysis

1. 서론

수도권 대기질 특별법과 같은 도시 규모의 대기질 개선을 위한 환경관리 정책 방안을 구축하는 데 있어 장거리 이동과 같은 외부 요인에 의한 대기 오염물질의 정량적 유입량에 대한 계산이 중요해 지고 있다. 이와 같이 전통적으로 동북아시아 지역에서는 소위 월경성 대기오염물질(transboundary air pollutant)이라 하여 장거리 이동되는 대기오염에 관한 관심이 높아지면서 장기간의 산성비, 황사 등의 대기환경영향평가를 수행해야 하는 경우가 증가하고 있다. 이러한 장거리 이동 오염물질을 다루는 지역규모 대기질 환경 평가는 도시규모 대기질 모델링과 비교해 볼 때 배출량, 기상 조건 등의 필요한 입력자료 등은 동일하나 그 피해가 장기간에 걸쳐 나타나는 경우가 많아 이에 상응하는 장기간의 대기질 모델링을 수행해야 한다. 그러나 90년대 초에 G7 연구(환경부, 1999)가 시작된 이후 지금까지의 연구는 대부분 상세한 기상 모형과 대기확산·광화학·침착 모형으로 구성된 종합 산성 침착 모형을 이용하였으나 장기 모사 보다는 특정사례만을 단기적으로 모사하는 연구가 대부분이었다.

이렇게 종합 산성 침착 모형이 단기모사에 주로 사용된 것은 물리화학적 모델의 부정확으로 인한 전파오차의 증가 및 사용된 수치해석방법의 불안정성 등이 원인일 수도 있으나 더 큰 원인은 컴퓨터 계산 용량 부족으로 중·장기 모델링이 불가능하였던 것에 기인하였다. 특히 상세한 3 차원 기상 변수의 장기간의 생산은 매우 많은 계산 용량을 필요로 하므로 결국 장기 환경 평가를 위해서는 기상 모형에 소요되는 컴퓨터의 계산을 줄이는 것이 관건이라 해도 과언이 아니다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 매일 변하는 동아시아지역의 기상 패턴을 통계적으로 분류하여 사용하는 방법을 모색하면, 계산 시간을 획기적으로 줄이면서도 3 차원 대기질 모델링으로 중·장기 대기환경 평가를 매우 효율적으로 수행할 수 있을 것이다.

한편 수도권과 같은 도시규모 대기질 평가를 위한 기상장 생성은 그 규모상으로 볼 때 동아시아 전

체를 대상으로 하는 기상 패턴을 필요로 하지 않는다. 예컨대 만약 수도권 대기질과 같이 도시규모 평가를 위해 동아시아 전체의 일기 유형을 분류하여 적용한다면 공간규모가 맞지 않아 적용하기 어려운 경우가 많기 때문이다. 예를 들어 동아시아 전역에 대해 상층 기류 유형 분류 시 사용되는 Kirchhofer (1973) 방법에 의한 주요 기압배치는 동아시아 전역을 놓고 볼 때 고저기압의 상대적 위치에 의해 결정되므로 도시규모인 수도권 지역에 국한해서 볼 때는 한반도 상공에 정체성으로 기압배치가 자리한 경우를 제외하고는 그 상관성이 매우 낮게 나타나는 경우가 많다. 이는 반경 50km 이내의 국내 대부분의 대도시가 동아시아 규모에 비해 그 면적이 상대적으로 매우 작기 때문에 동아시아 규모와 같은 큰 스케일의 상층 기압배치 분류 결과와 연관성이 적은 경우가 많기 때문이다. 그러나 산성비 혹은 황사 등과 같은 동북아시아를 대상으로 하는 장거리 이동 오염물질의 경우, 중규모 스케일로 매일의 동북아시아 일기도를 클러스터 분석(cluster analysis)을 통하여 분류하는 것이 매우 필수적이다.

우리나라는 중위도 지역에 위치하고 있어 매일의 기상변화는 서에서 동으로 이동하는 종관 기압계와 깊은 관련이 있고, 동아시아 지역의 매일의 종관 기상 변화는 도시규모와 달리 그 시간 규모 또한 4~5일 정도 된다. 이는 도시지역에서 중요한 해륙풍, 산곡풍 등의 국지 기상 현상들은 하루(1일) 주기로 변하는 반면 종관 기상 인자의 주기는 하루 변화보다 훨씬 긴 4~5일 이상이 된다. 따라서 장거리 대기오염물질을 수송하는 이동 경로는 이러한 종관기상 시간 규모를 필요로 하게 된다. 바꾸어 말하면 장거리 이동 모델링을 수행할 경우 종관기상 상태 분류 방법을 이용하여 하나의 일기 유형을 결정하였다 하더라도 모델링 연구에 있어서 종관기상 시간 규모를 충분히 포함하는 모델링이 되도록 설계하여야 할 것이다.

본 연구에서는 동아시아 장거리 이동되는 대기오염물질의 장기 영향 평가를 위한 기초 연구의 일환으로 동아시아의 종관 기상 패턴 분류 방법 및 그

응용 실태에 대한 국내·외 관련 연구 결과를 조사하였다. 그 결과를 토대로 동아시아 장거리 이동 대기오염물질 영향평가에 적합한 현실적인 접근 방법을 논하였다. 이러한 방법론은 장거리 이동 자체 영향 평가뿐만 아니라 수도권 대기질과 같은 도시 규모 대기질 연구에 있어 장거리 이동 오염물질 영향을 고려할 경우 매우 효율적으로 활용할 수 있을 것이다.

II. 국내·외 종관 규모 기상 상태 분류 연구 동향

1. 국내 연구 동향

지금까지 동아시아의 일기 유형 분류에 관련된 국내 연구는 Table 1에 요약하였다. Table 1에서 조사된 바와 같이 국내 연구는 그 분류 방법과 연구 목적이 다양하였으며 연구 목적상 장거리 이동 오염물

질관련 연구는 그리 많지 않은 것으로 조사되었다. 문승의·김성렬(1980, 1981)은 동계에 있어 저기압의 이동경로, 전선이나 전선을 동반한 저기압, 전선의 길이 및 이동 속도, 저기압 중심으로부터의 거리, 저기압의 수 등을 조사하였다. 이를 바탕으로 동아시아 주변의 일기 유형을 분류하여 이에 따른 남한의 강수분포 특성을 조사하였다. 전종갑(1991)은 중국 대륙에서 배출된 오염 물질이 한반도로 수송되는 경로를 조사하였고 최근 이동규·김영아(1997)는 Lund법(1963)을 적용하여 봄철 일기 유형과 황사 현상의 발생간의 관련성을 조사하였다. 이러한 연구들은 모두 일기 유형 분류를 통해 저기압의 특성 혹은 강수 특성 연구를 위한 일환으로 수행되었다.

장거리 이동 대기오염물질과 관련해서는 전종갑(1991)은 중국 대륙에서 배출된 오염 물질이 한반도로 수송되는 경로를 살펴보기 위하여 각각의 일기도 사이의 상관계수를 응용하여, 700hPa과 850hPa

Table 1. Summary of Korean studies in association with classification of synoptic meteorological patterns

Author	Sub-division of Season	Applied Season	# of Patterns and (Method)	Used meteorological variables for classification	Application
Jhun (1991)	O	all season	(22, 40, 30, 10 for each season) (correlation coefficient method)	700hPa, 850hPa geopotential height	trajectory of long range transport of air pollution
Jung <i>et al.</i> (1996)	O	all season	2 X 4 Season (air pollution index method)	8 meteorological variables for 850, and 500hPa	local air pollution potential index
Kim <i>et al.</i> (2006)		all season	5 (cluster analysis)	300, 500, 850, 1000hPa geopotential heights	Asian Dust
Lee and Kim (1997)	O	spring	(5, 6, 7 for each month) (Linear regression correlation method by Lund(1963))	100hpa, 700hPa 850hPa 500hpa geopotential height	Asian Dust
Lee and Park (1997)	O	all season	6 X 4 Season (K-mean clustering)	10 meteorological variables including 850hPa geopotential heights	air pollution potential
Ministry of Environment (1999)	x	-	21, 18 for 850, 500hpa level (Kirchhofer method)	850hPa geopotential height	acid rain
Moon <i>et al.</i> , (1980, 1981)	O	winter	8 (direct observation classification)	locations of cyclones, pathways of fronts	precipitation patterns
Park and Lee (1998)	O	spring	15 (minimum variance method of cluster analysis)	geopotential height, wind speed, direction, temperature, relative humidity for seven layer	explosive cyclogenesis in Spring

등압면의 계절별, 기압 패턴별로 일기 유형을 분류한 바 있다. 2002년 완료된 환경부 G7 산성비 연구(환경부, 1999, 2002)에서는 10여개 이상의 유형으로 동아시아 일기 유형을 분류하여 그 특성을 조사한 연구가 있었다. 최근에 와서 Kim *et al.*(2006)은 황사 이동 경로를 파악하기 위한 종관 패턴 분류를 수행하여 황사가 한반도로 장거리 이동할 때의 종관 기상상태 특징을 조사한 바 있다.

종관 기상장이 대기 오염에 미치는 영향을 사전에 예측하려는 연구, 즉 대기오염 퍼텐셜(air pollution potential) 예측 연구가 수행되었다. 또 이보람·박순웅(1997)은 정연성 등(1996)에서 계산한 복합 대기 오염 퍼텐셜 지수(complex potential index)를 이용하여 지상 및 상층(850hPa와 500hPa)의 종관 기상 변수 중 대기오염 퍼텐셜과 관계가 있는 변수를 찾아 군집분석을 수행하여 대기 오염 퍼텐셜이 높은 군집의 종관 기상특징을 조사하였다.

이처럼 국내의 종관 기상 조건 분류에 관한 연구는 그 목적이 상이할 뿐만 아니라 접근 방법 또한 다양하게 나타났다. 예를 들어 여름철의 경우 장마와 관련된 강수 패턴과 몬순의 영향 등의 연구가 많으며, 이것은 월경성 대기오염물질 이동과 연관된 연구보다는 기상 현상 그 자체에 대한 분석적 연구가 많았다. 국내 장거리 이동 대기오염물질 환경영향평가 차원에서는 환경부 G7 산성비 연구(환경부, 2002)가 대표적이었으며 G7 연구결과를 제외하고는 지역규모 대기오염물질과 연관된 연구 결과는 매우 부족한 것으로 조사되었다. 따라서 국내의 종관 기상 패턴 분류의 방법론, 활용도 등 한반도를 포함한 지역규모 기상 패턴과 연관된 연구가 계속 필요할 것으로 사료된다.

2. 외국의 연구 동향

종관 일기 유형 분류에 관한 외국의 연구는 분류된 일기 유형을 지역적이거나 국지적 규모의 대기 순환에 따른 기후 특성의 연구가 많았고 또한 대기오염 등 환경 문제에 다양하게 적용한 사례도 많이 조사되었다(Table 2). Table 2에 조사된 바와 같이 종

관 기상 상태가 대기 오염에 미치는 영향 연구는 국내보다는 훨씬 광범위하게 진행되어 온 것으로 조사되었다.

외국에서 사용한 종관 자료 분석 방법에는 주로 다변량 분석 방법(multivariate technique)이 많이 쓰여졌는데(Sanchez *et al.*, 1990; Comrie *et al.*, 1992; Davis *et al.*, 1993), Sanchez *et al.*(1990)은 한 점의 지상 기상 관측소에서 관측한 기상 변수와 고층 기상 관측 자료 중 500hPa의 기상 변수를 이용해서 군집 분석을 수행하고, 각 종관 기상 군집에 따른 입자상 오염농도의 분포를 분석하여, 입자상 오염물질 농도 증가 가능성이 높은 군집을 밝혀내었다. 또 Davis and Gay(1993)은 21개의 관측소에서의 대기의 여러 층(800hPa, 700hPa, 500hPa, 250hPa)의 기상 관측 값을 이용하여 주성분 분석(principle component analysis)을 실시하여 6개의 직교 성분을 찾아낸 후, 군집분석을 수행하여 특정 지역에서의 시정이 좋고 나쁜 날의 종관 상태의 특징을 규명하였다. Ludwig *et al.*(1995)는 여러 개의 관측소에서 측정된 오존의 일 최고 농도 값을 이용하여 주성분 분석과 군집분석을 동시에 실시하고, 일 최고 오염농도가 특정한 공간분포를 가지는 경우의 각 기상 상태에 대하여 연구하였다.

기후 특성의 연구에 적용한 연구 또한 다양하게 진행되었다. Kidson(1994a, 1994b)은 경험적직교함수(Empirical Orthogonal Function; EOF) 및 군집분석(cluster analysis)을 뉴질랜드의 1000hPa 기압장에 적용하여 13개의 일기 유형으로 분류하여, 이들 유형과 기상 요소간의 일별 및 월별 변동의 관련성을 조사하였다. Davis *et al.*(1990)도 기온과 노점온도, 풍향, 풍속 등 각종 기후 요소의 군집분석을 통하여 미국 전역을 날씨 특성별로 구분하였다. 또 Maheras(1984)와 Yanal(1985)은 요인 분석(factor analysis)과 Kirchner 분류기법을 적용하여 각각 그리스와 북서 태평양 연안 지역에서 대기순환 패턴별 강수분포의 변화를 조사한 바 있다. 또 Brazel and Nickling(1986)은 Arizona에서 발생하는 먼지보라(dust storm)와 관련된 일기 유형을 분류하였

Table 2. Summary of foreign studies in association with classification of synoptic meteorological patterns

Author	Season subdivision	Applied Season	Number of Patterns (Method)	Used independent variables for classification	Application
Comrie and Yarnal (1992)	X	-	9 (synoptic classification)	surface weather maps for 10 years	ozone pollution patterns
Davis and Gay (1993)	O	-	9 (Kirchhofer technique)	pressure fields at sea level and 500hpa level	air quality distribution
Davis <i>et al.</i> (1998)	X	-	7 (average linkage & K-means)	temperature, specific humidity wind speed/direction, cloud cover	ozone distribution pattern
Davis and Kalkstein (1990)	O	all season	6 (K-mean clustering)	temperature, dew-Point temperature wind speed/direction, etc	weather forecasting
Eder <i>et al.</i> (1994)	X	-	7 (two-stage cluster analysis)	air temperature, dew-point temperature, pressure, cloud cover, wind speed. direction	dependency of ozone on meteorology
Gramsch <i>et al.</i> (2006)	X	-	5 (Intravariance based cluster Analysis)	concentrations of PM ₁₀ and ozone	temporal and spacial variations of air pollutants
Ludwig <i>et al.</i> (1995)	X	-	9 (EOF and cluster analysis)	temperature, pressure, mixed layer height, strenrth of the inversion	ozone and weather patterns
Kidson (1994)	X	-	13 (EOF & cluster analysis)	100hPa geopotential height	seasonal variation studies
Maheras (1984)	X	-	10 (factor analysis)	emperature, dew-Point temperature wind speed/direction, and 5 other meteorological variables	precipitation patterns
McKendry (1994)	O	summer	18 (Kirchhofer method)	mean sea level, 500hPa pressure field	ozone pollution patterns
Perry <i>et al.</i> (1973)	O	all season	6 for each Season (K-mean clustering)	10 meteorological variables including 850hPa geopotential heights	temperature variation
Sanches <i>et al.</i> (1990)	X	three season (spring, fall, winter)	5 (Q-mode clustering technique)	10 meteorological variables including pressure, temperature from surface level and to 500hpa	particulate pollutant concentrations
Yanal (1985)	X	-	6 (Kirchhofer method)	850hPa geopotential heights	precipitation patterns
Yu and Chang (2000)	X	-	4 (Kaiser's varimax rotation method)	ozone concentration	ozone pollution

으며 Jeft and Robert(1986)은 Kirchhofer Score의 값에 따라 동일 지역에서 일기 유형의 패턴수가 달라짐을 지적하였고, Yanal(1984)은 일기 유형 분류기법을 적용하여 규모에 따라 그 지역의 대기 순환의 특성이 국지적 규모에서 대규모 순환까지 영향을 미치고 있음을 보고하였다.

기상패턴 분류방법을 대기 오염문제에 적용한 예를 살펴보면, Mckendry(1994)는 Kirchhofer 분류기법으로 구한 종관 기상패턴과 캐나다 밴쿠버지방

의 지상 오존량간의 관련성을 조사한 결과, 밴쿠버지방의 오존의 1시간 평균 환경 기준치인 82ppb의 초과횟수는 하층 열적 저기압과 상층 기압골과 밀접한 관련이 있음을 밝혔다. 또 Comrie and Yarnal (1992)은 종관규모 대기 순환과 공업도시인 Pittsburgh 지역의 오존 농도와의 관련성을 조사하였다. 이상의 외국에서의 관련 연구를 모두 Table 2에 요약하였다.

III. 종관기상 조건 분류 방법론 - 군집 분석법

이상의 국·내외 연구 결과에서 조사된 바와 같이 종관 기상 조건의 분류는 현장에서 관측한 기상 관측자료를 직접적으로 이용하여 목적에 맞게 자의적으로 분류한 것을 제외하고는 기본적으로 군집 분석법을 이용한 연구가 대부분이었다. 군집분석이란 주어진 데이터들 중에서 유사한 속성을 가지는 개체들을 묶어서 각 집단의 특성을 파악하여 분류된 군집의 개별적 특성을 이해하는 방법을 말한다. 이러한 군집 분석은 인자 분석(factor analysis) 혹은 주성분분석(principal component analysis)과 같은 통계적 분류 방법에 비해 그 분류가 명확하고, 사용하는 변수의 갯수와 무관하게 충분히 분류가 가능하며, 자료의 내적 특성에 의해 군집 결정이 가능하다.

군집분석의 종류에는 크게 비계층적 방법(non-hierarchical method)과 계층적 방법(hierarchical method)으로 분류된다. 본 연구에서는 장거리 이동 오염물질 영향평가에 대한 보다 심도있는 연구를 위해 Kirchofer 군집분류법을 보다 상세하게 기술하였다. 이러한 연구는 최근에 대기오염과 산성비 등 환경오염 문제와 관련된 중요한 기초 연구가 될 것으로 사료된다.

1. 비계층적 분류기법(Non-hierarchical method)

‘K-means 알고리즘’ 혹은 ‘K-medians 알고리즘’ 이라고도 불리며 이 방법은 사전에 군집의 수를 정해 놓고 분류작업을 시작하여 군집내의 원소끼리의 오차 거리(유클리드 거리 혹은 군집 중심으로부터의 분산)를 계산하여 거리가 적은 집단부터 각 원소들을 묶어 가는 방법을 말한다. 여기서 거리가 가까울 수록 개체간의 유사성이 크며 거리가 멀수록 비유사성이 커서 군집간에 관련이 적음을 의미한다. 이 기법은 미국 NCEP(National Center for Environmental Protection) 모델 결과와 같이 격자점에서의 여러 기상 변수 자료를 이용할 경우 각 격자점의 기상 자료값을 최소자승 법(Least Squares

Method)을 사용하여 유클리드 거리를 결정한다. 각 날의 고도장에서의 유클리드 거리를 비교하여 거리가 가장 적다면 두 사례를 동일 일기 유형으로 분류한다는 원리이다.

단일 변량에 대해 군집분류 과정을 예를 들면, 총 N일의 자료 중 임의의 날을 먼저 초기 군집에 속하게 하고, 그 다음 각 군집에 속한 날의 기상 변수들의 평균값을 계산한다. 이 때 유클리드 거리 혹은 비유사성을 계산하여 이 거리가 짧은 날을 같은 군집에 소속시킨다. 유클리드 거리는 다음의 식 (1)과 같이 표현된다.

$$d_{i,k} = \sum_{j=1}^{NV} (X_{ij} - M_{kj})^2 \quad (1)$$

여기는 K는 군집 수이고, X_{ij} 는 K 군집에 속한 i번째 날의 j 번째 변수, M_{kj} 는 K 군집의 j 번째 변수의 중심값, NV는 군집 분류에 이용된 변수의 수이다. 이 때 분류된 K 군집에 속한 날들 i로 이루어진 집합을 $P(I, K)$ 라 하면, 군집의 수는 오차함수 $e[P(I, K)]$ 로 결정하게 된다. 한편, 오차함수 $e[P(I, K)]$ 는 다음의 식 (2)와 같이 표현된다.

$$e[P(I, K)] = \sum_k D(I, L(I))^2 \quad (2)$$

여기는 $L(I)$ 는 I 날이 속한 군집의 중심의 값이고, D는 I 날의 변수와 군집의 중심의 변수 값과의 차의 제곱을 나타낸다. 식 (2)의 오차 함수 값은 군집 수가 늘어남에 따라 급격히 감소한 후 거의 일정하게 되는데 이때 군집 수를 최종 군집수로 정하게 된다. 이 방법은 자체적으로 특정 변수의 특성에 따라 최적화될 수 있는 군집 갯수를 계산하는 대신 사전에 군집의 수가 이미 결정되어 있어서 군집 분류 결과가 계층적 분류기법보다 조밀하지 않는 단점을 가진다.

2. 계층적 분류기법(Hierarchical method)

‘Linkage method’ 라고 불리는 이 방법은 미리 군집의 수를 정해 놓지 않고 가장 가까운 거리의 개체들을 묶어가는 방법이다. 비계층적 분류 기법과 동일하게 군집끼리의 유사성을 거리의 개념으로 정의하나 계층적으로 군집을 분류해 놓고 유사성을 결정해 나간다. 군집간 거리를 계산하는 방법에 따라

단일 연결법(single linkage method), 완전 연결법(complete linkage method), 평균 연결법(average linkage method) 등으로 나누어진다. 즉 군집 A와 B의 개체의 개수를 각각 n_A , n_B 라 하고 A 군집의 i 번째 개체(X_{Ai})와 B 군집의 j 번째 개체(X_{Bj}) 간의 각 개체간 거리인 $dist(X_{Ai}, X_{Bj})$ 는 $n_A \times n_B$ 개가 된다. 따라서 군집간 거리(d)를 산출하는 방법에 따라 수학적으로 다음과 같이 분류된다.

- 단일연결법(single linkage method)은 두 군집 A와 B사이의 가장 가까운 거리로 다음과 같이 정의한다.

$$d(A,B) = \min (dist (X_{Ai}, X_{Bj})), \\ i \in (1, \dots, n_A), j \in (1, \dots, n_B)$$

- 완전연결법(complete linkage method)은 두 군집 A와 B사이의 가장 먼 거리로 다음과 같이 정의한다.

$$d(A,B) = \max (dist (X_{Ai}, X_{Bj})), \\ i \in (1, \dots, n_A), j \in (1, \dots, n_B)$$

- 평균연결법(average linkage method)은 두 군집 A와 B사이의 모든 거리를 평균하여 다음과 같이 정의한다.

$$d(A,B) = \frac{1}{n_A n_B} \sum_{i=1}^{n_A} \sum_{j=1}^{n_B} dist (X_{Ai}, X_{Bj})$$

그 외에도 군집간 거리를 정의하는 방법에 따라 Centroid linkage, Median linkage 등 다양하다. 일반적으로 개체 전체를 염두에 두고 어느 군집에 속하느냐를 따져야 하는 연구가 목적인 경우 평균 연결(average linkage)방법을 사용한 사례가 많다. 계층적 분류 기법은 사용한 자료들과 그 변수들에 의해 군집 갯수가 내부적으로 스스로 정해지므로 비계층적 분류 기법보다 임의성이 적고 해석상 더 유리하다. 그러나 계층적 분류 방법은 만약 두 개체가 처음에 서로 다른 군집으로 나누어진 경우, 군집수가 많아지더라도 같은 군집으로 재분류되지는 않는다는 점에서 비계층적 분류 기법보다 덜 유연하다고 할 수 있다. 계층적 분류 기법에서 군집 갯수의 최종 결정은 각 결합 단계에서의 R^2 , F, t^2 를 기준으로 결정할 수 있는데 각 결합단계 중에서 F 값이 높아졌다 낮아지는 단계나 혹은 t^2 값이 감소하는 군집

수로 결정한다. R^2 는 분류된 군집내에서 각 구성성분끼리 묶여진 설명 정도를 나타내므로 군집의 갯수 결정에는 주로 R^2 값이 사용되며 이 값이 급격히 증가하는 단계의 군집의 갯수를 선택하면 된다(김충린, 1994, 박정균과 이동규 1998).

3. 한반도 군집 분류된 일기 유형의 요약

장거리 오염물질과 같이 지역 규모 대기 오염물질의 이동을 다룰 경우 하층 제트와 연관된 850hPa 혹은 700hPa 등압면이 중요하다. 특히 선행 연구 결과인 G7 연구 결과(환경부, 1999, 2002)에 따르면 850hPa 등압면 일기 유형에서 가장 높은 출현빈도를 보이는 일기 유형은 전형적인 겨울철 서고동저형 기압배치로 나타났다. 이것은 우리나라가 속한 동아시아 지역이 전통적으로 겨울몬순이 탁월하여 그 결과 계절풍이 지배적이고, 시베리아 고기압과 알류산 저기압의 발달에 기인된 기압배치이므로 봄과 여름에 비하여 쉽게 변하지 않는 지속성을 가지고 있기 때문이다.

반면 여름형은 북태평양 고기압과 관련된 일기 유형인데 장마와 함께 북태평양 고기압의 확장 범위에 따라 세부적으로 다시 일기 유형을 분류한 연구가 많았다. 일반적으로 북태평양 고기압이 지배할 때 한반도를 포함한 동북아시아는 남고북저형이 주류를 이루며 또 동아시아 여름 몬순의 우기는 장마 전선과 관련되어 나타난다. 이에 따라 남서 기류가 탁월하며 여름에 높은 출현 빈도를 보였다.

봄철 및 가을철 형태는 두 가지로 나눌 수 있다. 첫번째는 봄과 가을에 주로 출현하는 이동성 고기압의 형태이며 두 번째는 동아시아 대기 순환계에서 여름몬순과 겨울몬순을 제외한 봄과 가을철의 850hPa 등압면 종관 규모 대기순환 중에서 출현빈도가 가장 높은 일기 유형들이다. 이 형태는 초여름에 나타나는 고온 건조 현상들과 관계가 깊은 일기 유형으로 해석되기도 한다.

IV. 우리나라 일기 유형 특성 및 장거리 오염물질 이동량 추정

우리나라는 중위도 지역에 위치하고 있어 매일의 기상변화는 서에서 동으로 이동하는 종관 기압계와 깊은 관련이 있고, 계절에 따른 날씨의 변화는 발원지에 따라 특성을 달리하는 기단의 영향을 크게 받는다. 이러한 기단들은 계절에 따라 탁월풍을 가져오게 되는데 전형적인 몬순 기후지역인 동아시아는 시베리아 기단과 북태평양 기단의 영향을 주로 받는다. 따라서 동아시아는 대륙에서 발원한 한랭 건조한 북풍계열의 겨울 몬순기류와 북태평양에서 발원된 고온다습한 남풍계열의 여름 몬순기류의 영향을 받는 지역이다. 이처럼 우리나라를 비롯한 중위도 지역은 몬순의 영향으로 계절에 따라 탁월한 풍계가 존재하기도 한다. 이렇게 계절에 따라 탁월풍이 존재하더라도 기압계의 강도나 위치에 따라 다양한 기류계의 생성, 발달 및 소멸로 말미암아 기상요소의 변동이 유발하게 된다.

중위도 지역의 매일의 기상 변화를 나타내는 종관 기상장의 시간 규모는 4~5일이 된다. 이것은 하나의 종관규모 기압시스템이 동진하여 한반도를 벗어나서 다시 하나의 새로운 종관규모 기압시스템이 오는데 걸리는 시간이 통계적으로 4~5일 정도 된다는 뜻이다. 따라서 종관기상 상태를 군집 분석으로 분류하여 통계적으로 몇 개의 종관기상 상태가 결정되면 해당 시스템을 커버하는 전과 후의 날을 포함하여 충분한 종관기상 시간 규모가 포함되도록 대기질 모델링을 설계하여야 효율적인 지역규모 대기환경영향평가가 이루어졌다고 볼 수 있다.

또 한가지 특징은 우리나라의 경우 상당부분 오염물질의 이동과 침적은 동진하는 온대 저기압과 연관되어 이루어진다는 점이다. 온대 저기압 자체에 대해서는 일반적으로 그 구조가 잘 알려져 있으나 그것과 관련된 오염물의 수송, 화학 변환, 침적에 대해서는 잘 연구되어 있지 않다. 다만 정성적으로 경압성이 강한 동아시아에서는 연중 온대 저기압이 통과하고 있어서 대기오염물질의 수송과 관련하여 온대저기압의 역할은 대단히 중요하다고 알려져 있다. 강수를

동반한 저기압이 우리나라 상공에 머무르면서 시작되는 습성 침적현상은 산성비 영향평가에 매우 중요하며 특히 중국 동부뿐만 아니라 중국 남동부 깊숙한 곳에서도 온대 저기압을 타고 빠르게 장거리 이동하여 한반도에 적잖은 영향을 미칠 수 있다.

이러한 기류계의 생성과 소멸에 따라 지역별 일기 유형이 변화하게 되므로 각 일기 유형들은 동아시아 대기순환 특성상 나름대로의 종관 기압계의 일생을 잘 고려하는 것이 통계적인 약점을 보완하는 방법이 될 것이다. 그러나 에피소드식 연구가 아닌 장거리 이동물질에 의한 장기간의 침적에 관한 통계적인 접근 방법인 만큼 시간이 걸리더라도 대기질 모델을 장기간 직접 수행하여 그 결과를 이상의 통계적 접근 결과와 비교, 검증하는 작업도 필요할 것으로 판단된다.

V. 결론

아시아 대륙의 동북 연변에 위치한 우리나라는 중국을 포함하여 지난 수십 년간 급속한 경제 성장과 더불어 북미, 북유럽과 함께 최대 오염지역으로 변화하고 있으며 매년 황사 등의 영향이 계속 증가 추세에 있다. 특히 중국에서 배출된 장거리 이동 오염물질의 증가는 한반도뿐만 아니라 여러 이웃 나라에까지 그 영향이 증가하고 있어서 이에 대한 현황을 정확히 파악하고 나아가 과학적인 방법으로 미래의 환경을 예측, 보존하는 노력이 시급히 요구되고 있다.

대기질 모델링을 이용한 장기간의 우리나라에 대한 대기환경영향을 평가하기 위해서는 배출량, 종합적 모델의 선정, 영향평가 방법 등이 다양하게 요구된다. 본 연구에서는 이 중에서 연속적인 장기간의 기상 모델링을 수행하여야 하는 경우 종관기상상태를 분류하여 분류된 각 기상 패턴에 대해서만 모델링을 수행하고 그 발생 빈도수에 비례하여 가중 평균치를 구하는 통계적인 접근을 위한 기초 조사를 수행하였다. 선행 연구 결과로부터 종관 기상 분류 방법을 살펴보고 우리나라에 구체적으로 적용하

기 위해서 기존의 군집 분류된 결과를 특징별로 조사하였다. 또 종관 규모 기상 현상의 주기가 4~5일 인 점을 감안하여 온대 저기압의 이동 경로를 잘 고려하여야 하나 산성물질 습성침적에 있어 그 발생, 이동 경로, 소멸까지 모두 포함할 수 있는 충분한 종관기상 시간 규모가 포함되도록 설계하여야 함을 강조하였다. 또 대기질 모델을 장기간 직접 수행하여 그 결과를 통계적 결과와 비교, 검증하는 연구도 필요할 것이다.

이러한 접근 방법은 지역 규모에서 장거리 이동 물질의 발생, 이동, 침적의 여러 단계를 모두 고려하되 이동되는 오염물질의 경로를 통계적으로 접근함으로써 산성비, 황사 등 지역규모 대기환경영향 평가를 수행할 수 있는 효율적인 방법이 될 것이다. 뿐만 아니라 수도권 특별법과 같은 도시 규모 모델링 연구에서도 장거리 이동 물질의 영향을 고려하기 위해서 장기간에 걸친 장거리 대기오염물질의 평균적인 연간 침적량 등을 추정하는 연구에서도 이러한 지역규모 기상 패턴 분류 방법과 같은 통계적 접근이 가장 바람직할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

김충련, 1994, SAS라는 통계상자, 데이터 리서치, 575pp.
 문승의, 김성렬, 1980, 동계 전선통과에 따른 남한의 강우분포특성, 한국기상학회지, 16(2), 1-13.
 박정균, 이동규, 1998, 군집분석에 의한 아시아 동안에서 급격히 발달하는 저기압의 분류와 그 발달 기구, 한국기상학회지, 34(4), 523-547
 이동규, 김영아, 1997, 1980-1989년 북동아시아의

봄철 일기 유형 및 황사 현상과의 관계, 한국기상학회지, 33(1), 17-40.
 이보람, 박순웅, 1997, 종관 기상 상태를 고려한 한반도 대기 오염 퍼텐셜 예측법, 한국기상학회지, 33(4), 641-656.
 전종갑, 1991, 대기 오염 물질 수송과 관련된 동부 아시아 상층 대기의 순환 특성에 관한 연구, 한국기상학회지, 27(2), 180-196.
 정영선, 박순웅, 윤일희, 1996, 한반도 각 지역의 대기질 특징과 이와 관련된 기상 조건, 한국기상학회지, 32(2), 271-290.
 환경부, 1999, 지구규모 대기환경 기초 및 기반기술 (산성비 감시 및 예측 기술 개발), G7 연구보고서.
 환경부, 2002, 지구규모 대기환경 기초 및 기반기술 (산성비 감시 및 예측 기술 개발), G7 연구보고서.
 Brazel, A. J. and Nickling, W. G., 1986, The relationship of weather types to dust storm generation in Arizona (1965-1980), J. Climatol., 6, 255-275.
 Comrie, A. C. and Yarnal, B., 1992, Relationships between synoptic-scale atmospheric circulation and ozone concentrations in Metropolitan Pittsburgh, Pennsylvania, Atmospheric Environment, 3, 301-312.
 Davis, R. E. and Kalkstein, L. S., 1990, Development of an automated spatial synoptic climatological classification, Int. J. Climatol., 10, 769-794.
 Davis, R. E. and Gay, D. A., 1993, A synoptic climatological analysis of air quality in the Grand Canyon National Park, Atmospheric Environment, 5, 713-727.
 Davis, J. M., Ederand, B. K., Nychka, D., and Yang, Q., 1998, Modeling the effects of meteorology on ozone in Houston using

- cluster analysis and generalized additive model, *Atmospheric Environment*, 32, 2505-2520.
- Eder, B. K., Davis, J. M., and Bloomfield, P. 1994, An automated classification scheme designed to better elucidate the dependence of ozone on meteorology, *J. of Applied Meteorology*, 33, 1182-1199.
- Gramsch, E., Cereceda-Balic, F., Oyola, P., and Baer, D., 2006, Examination of pollution trends in Santiago de Chile with cluster analysis of PM₁₀ and ozone data, *Atmospheric Environment*, 40, 5464-5475.
- Jeft, K. and Robert, G. C., 1986, A comparison of synoptic classification schemes based on 'objective' procedure, *J. Climatol.*, 6, 375-388.
- Kidson, J. W., 1994a, An automated procedure for the identification of synoptic types applied to the New Zealand region, *Int. J. Climatol.*, 14, 711-721.
- Kidson, J. W., 1994b, Relationship of New Zealand daily and monthly weather patterns to synoptic weather types, *Int. J. Climatol.*, 14, 723-737.
- Kim, Y.-K., Song, S.-K., Lee, H. W., Kim, C.-H., Oh, I.-B., Moon, Y.-S., and Shon, Z.-H., 2006, Characteristics of Asian Dust Transport Based in Synoptic meteorological Analysis over Korea, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 56, 306-316.
- Kirchhofer, W., 1973, Classification of European 500mb patten Arbeitsbericht der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt Nr. 43.
- Ludwig, F. L., Jiang, J.-Y., and Chen, J., 1995, Classification of Ozone and Weather Patterns associated with high ozone concentrations in the San Francisco and Monterey Bay areas, *Atmospheric Environment*, 29, 2915-2928.
- Maheras, P., 1984, Weather-type classification by factor analysis in the thessaloniki area, *J. Climatol.*, 4, 437-443.
- McKendry, I. G., 1994, Synoptic circulation and summertime ground-level ozone concentrations at Vancouver, British Columbia, *J. Appl. Met.*, 33, 627-640.
- Sanchez, M. L., Pascual, D., Ramos, C., and Perez, I., 1990, Forecasting particulate pollutant concentrations in a city from meteorological variables and regional weather patterns, *Atmospheric Environment*, 6, 1509-1519.
- Yarnal, B., 1984, The effect of weather map scale on results of a synoptic climatology, *J. Climatol.*, 4, 481-493.
- Yarnal, B., 1985, A 500mb synoptic climatology of pacific north-west coast winters in relation to climatic variability. 1948-1949 to 1977-1978, *J. Climatol.*, 5, 237-252.
- Yu, T.-Y. and Chang, L.-F., 2000, Selection of the scenarios of ozone pollution at southern Taiwan area utilizing principal component analysis, *Atmospheric Environment*, 34, 4499-4509.