

남한지역 풍력자원 평가 및 바람지도 구축을 위한 바람권역 분류

정우식 · 이화운* · 박종길 · 김현구** · 김은별 · 최현정* · 김동혁* · 김민정*

인제대학교 대기환경정보공학과/대기환경정보연구센터,

*부산대학교 지구환경시스템학부, **한국에너지기술연구원 풍력발전연구센터

(2009년 5월 20일 접수; 2009년 6월 2일 수정; 2009년 7월 14일 채택)

Classification of Wind Sector for Assessment of Wind Resource and Establishment of a Wind Map in South Korea

Woo-Sik Jung, Hwa Woon Lee*, Jong-Kil Park, Hyun-Goo Kim**, Eun-Byul Kim,
Hyun-Jung Choi*, Dong-Hyuk Kim* and Min-Jung Kim*

*Department of Atmospheric Environment Information Engineering/Atmospheric Environment
Information Research Center, Inje University, Gimhae 621-749, Korea*

**Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea*

***Wind Energy Research Center, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea*

(Manuscript received 20 May, 2009; revised 2 June, 2009; accepted 14 July, 2009)

Abstract

We classified wind sectors according to the wind features in South Korea. In order to get the information of wind speed and wind direction, we used and improved on the atmospheric numerical model. We made use of detailed topographical data such as terrain height data of an interval of 3 seconds and landuse data produced at ministry of environment, Republic of Korea. The result of simulated wind field was improved. We carried out the cluster analysis to classify the wind sectors using the K-means clustering. South Korea was classified as 8 wind sectors to the annual wind field.

Key Words : Wind sector, Wind resource, Cluster analysis

1. 서 론

우리나라는 좁은 공간적 영역 내에서도 복잡하고 다양한 경사와 굴곡의 지형적 특성을 보이고 있어 공간적 측면에서 바람의 일률성이 현저히 낮게 나

타나는 경향이 있다¹⁾. 특히, 이러한 복잡한 구조의 지형은 우리나라 일부 지역에 한정되는 것이 아니라 거의 전 국토의 내륙에 걸쳐서 나타난다. 더불어, 삼면이 바다로 둘러싸여 있는 해안지역 또한 동해 일부지역을 제외하고는 남해와 서해쪽의 해안선의 형태가 굴곡이 심한 형태를 보이고 있다. 이처럼 내륙의 복잡한 지형적 구조와 해안지역에서의 굴곡이 심한 해안선의 형태는 필연적으로 다양한 형태의 국지적 대기순환계가 복잡하게 형성되며 이와 연관

Corresponding Author : Jong-Kil Park, Department of Atmospheric Environment Information Engineering/Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 621-749, Korea
Phone: +82-55-320-3250
E-mail: envpjk@inje.ac.kr

된 바람의 특성(풍향, 풍속의 변화 등) 또한 일반적으로 진단하거나 예측할 수 있는 정도를 넘어서는 독특한 경향을 지니기도 한다²⁾.

이와 같이 우리나라의 지형적, 지리적 특성으로 인한 복잡 다양한 형태의 국지 대기순환계 형성은 단순히 '복잡한 바람구조를 나타낼 수 있다'는 측면보다 더욱 의미심장한 내용을 내포하고 있다. 즉, 공간적으로 좁은 지역에 걸쳐 복잡 다양한 바람이 나타날 수 있다는 것은 우리나라의 경우, '바람특성에 있어서 지역적 유사성(일치성)은 단순히 거리만의 함수가 될 수 없다'는 것을 의미하는 것이다. 즉, 특정 지점에서의 바람이 그 지점과 거리상으로 먼 지역에서의 바람보다 인근한 지역의 바람과 특징적으로 더욱 유사하다고는 할 수 없는 것이다. 지표면의 상태나 지형적 조건 등이 비교적 균일(homogeneous)하거나 평탄(flat)한 조건에서는 지점간의 거리가 가까울수록 바람을 비롯한 여러 기상요소들이 거리상으로 멀리 떨어진 지점에서의 그것들보다 상관성이 높아 유사성이 더욱 크게 나타날 수도 있으나, 우리나라와 같은 경우에는 그러하다고 단순하게 평가할 수 없는 것이다³⁾.

최근으로 오면서 전 세계적으로 대기오염의 심화와 화석연료의 고갈에 대한 고민은 향후 미래의 쾌적한 환경에 대한 대비와 에너지확보의 차원에서 무공해 청정자원인 신재생에너지에 대한 관심과 노력을 요구하게 되었다. 이에 전 세계적으로 십 수 년 전부터 풍력을 비롯한 여러 신재생 대체에너지의 개발에 선진국을 비롯한 여러 국가에서 열성적으로 뛰어들어 치열한 경쟁과 연구를 진행하고 있으며 이러한 전 지구적 움직임에 우리나라 또한 큰 관심과 노력을 기울이고 있다.

풍력의 경우에는 이미 유럽 일부국가를 비롯하여 미국, 중국 등 많은 국가에서 그 가능성과 지속가능성을 예견하고 풍력단지 및 풍력발전기의 개발을 서두르고 있고 우리나라 또한 풍력관련 연구가 급속히 진행되고 있다.

풍력발전의 경우, 풍력연구의 제반 분야가 모두 중요하지만 그 중에서도 다른 무엇보다, 과연 우리나라에서 풍력발전과 관련된 풍환경(wind environment)이 어느 정도이며, 어떠한 특성을 가지고 있는지에 대한 정확한 파악이 가장 중요하다 할 수 있다.

아무리 풍력발전 및 이와 관련된 개발에 대한 의지와 노력이 있다 하더라도 풍력개발에 있어 발전 가능성이 없다면 풍력발전과 관련된 모든 것들의 의미와 가치가 떨어지기 때문이다. 따라서 풍력발전 및 개발에 있어 우리나라에서의 풍환경에 관한 다양하고 정확한 정보가 가장 중요하다 할 수 있는 것이다.

앞서 언급한 바와 같이, 우리나라는 지형적 복잡성과 지리적 특수성으로 인해 풍력자원 개발을 위한 바람특성의 평가 및 단지개발에 있어 일정 규모 이상의 영역을 포괄하거나 대표하는 바람정보의 생산 등이 고도로 어려운 것이 사실이다. 즉, 평탄형 지형구조를 가지는 일부 외국의 경우와 달리 지형적 복잡성으로 인해 야기되는 풍계의 변화 및 강도가 일률적이지 않고 이로 인한 바람의 진단 및 예측에 많은 어려움이 있다. 따라서 풍력자원개발 및 평가와 관련된 현장 적용적 측면에서 활용 가능한 정보의 제공은 다른 무엇보다 중요하고 우선적인 필요가 있다.

이러한 관점에서 우리나라의 경우, 풍력단지개발에 있어 유사 풍황정보를 나타내는 영역의 구분과 이에 대한 정보의 도출이 필요하다. 국내에서도 이와 유사한 연구로 우리나라의 지상풍을 유형별로 분류한 연구⁴⁾가 있었으나, 이 연구에서는 전국에 설치된 기상관측소 중에서 54개 지점에서의 기상정보만을 활용하였고, 더욱이 공간적인 바람권역의 구분이 아니라 바람의 유형을 분류한 연구였기에 풍력자원개발의 활용적 측면에서 공간적 해상도가 너무 낮으며 유사풍계에 대한 정보를 제공하고 있지 않다는 문제점이 있다.

따라서 본 연구에서는 풍계의 복잡성과 다양성이 복합적으로 나타나는 남한 지역 전역을 대상으로 유사 바람특성을 나타내는 풍계(바람)권역의 분류를 수행하여 구분된 권역별 상세 바람특성 분석과 함께 공간적 범위정보를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 기상장 수치모의

육지에서의 풍력에너지에 대한 예측 및 진단과정은 다른 어떠한 과정보다 정확하고 객관적으로 수행되어야 한다. 이는 풍력발전기의 허브(Hub)가 회전하는 고도에서 풍속의 작은 오차가 결국은 풍력

에너지의 큰 오차로 직결되기 때문에 실제 회전축 고도에서의 풍속의 예측 및 진단이 중요하다는 것을 의미하는 것이다. 하지만 우리나라의 경우에는 좁은 영역에서 국지적 대기순환계의 발생과 변화로 인해 짧은 시간, 좁은 공간에서의 정확한 분석과 판단이 어렵다. 그리고 육상에 설치되어 있는 대부분의 정규기상관측지점과 자동기상관측지점(AWS)에서는 지면고도 10 m에서의 바람정보를 도출하므로 일반적인 풍력발전기가 회전하는 70~100 m에서의 바람정보를 도출할 수 없어 정확한 풍력에너지 정보를 파악하기 어려운 점이 있다. 그러므로 시·공간적으로 충분한 해상도의 기상정보를 도출하여 우리나라 남한 지역의 육상 풍력자원 평가를 위해서는 기상수치모의 시스템의 구축과 이를 활용한 우리나라 전역에서의 균일한 간격의 격자화된 기상정보의 도출이 필수적이다.

본 연구에서는 최근까지도 기상관련 연구에서 가장 많이 활용되고 있는 중규모 대기유동장 모형인 MM5⁵⁻⁷⁾(PSU/NCAR mesoscale model)를 이용하여 우리나라 남한내륙에서의 바람정보를 도출하였다. 본 모델은 미국 기상연구소(U.S. National Center for Atmospheric Research)와 펜실베이니아 주립대학(Penn Stat. Univ.)이 공동 개발한 모델로, 초기에는 중규모 현상의 기상에측에 주로 사용되었으나 최근 중규모와 미규모 기상현상에 적용 가능하게 되었고 대기 오염물질 광화학반응/이동/침착 모델의 입력자료 생성에도 사용할 수 있도록 수정·보완되었다. 연직 격자로는 지형(terrain)을 따라가는 시그마 좌표계(σ -coordinate)를 사용하고, 완전 시그마 층(full sigma level)에서 연직 속도가 정의되면 반 시그마 층(half sigma level)에서 수평 바람 성분 및 온도, 습도 등이 정의된다. 다중 격자계를 채용하여 여러 개의 단방향이나 양방향 등직격자를 사용할 수 있다. 공간적으로 2차 중앙차분법을 사용하며, 시간 적분 방법은 반암시(semi-implicit scheme) 및 시간 분리 방안(time splitting scheme)이 사용되고 있다. 또한 기상분석과 관측자료(종관, 비종관)의 4차원 객관분석(FDDA)이 가능하며, 관측 자료의 선별적 적용(Quality Control)도 가능하게 설계되어 있다.

본 연구에서는 위에서 설명한 기상장 수치모형을 이용하여 남한 육상영역에서의 바람을 비롯한 여러 기상요소에 대하여 시, 공간적으로 상세한 정보를

도출하였다. 여러 기상정보의 도출과정과 도출된 결과들의 타당성에 관한 기상통계학적 제반 분석 결과는 김 등⁸⁾과 Lee 등⁹⁾의 연구에 상세히 소개되어 있다. 이들 연구에서 평가된 바와 같이 도출된 여러 기상요소들의 현실진단성(관측값과의 비교) 및 통계적 평가 결과가 상당히 우수함을 알 수 있었고, 특히 김 등의 연구에서는 이러한 결과들을 이용한 풍력자원평가에 활용가능성이 높음을 제시하고 있다.

본 연구에서 사용한 기상장 수치모형이 위에서 언급한 연구들에 활용된 기상장 수치모형과 동일한 시스템을 사용하였고 이 기상장 수치모형으로부터 도출된 바람정보에 대한 여러 정량적 분석결과들이 위의 연구들에 상세히 소개되어 있으므로 이 과정에 대한 설명은 생략한다.

이상에서 설명한 기상장 수치모형을 이용하여 2003년 1년간을 대상으로 수치모의된 결과를 바탕으로 공간해상도 10 km 간격의 바람정보를 도출하여 유사 바람특성을 보이는 바람권역 구분 및 분석을 수행하였다.

2.2. 바람권역 분류

우리나라 남한 영역을 대상으로 유사특성의 바람이 나타나는 바람권역을 구분하기 위하여 본 연구에서는 K-평균 군집분석을 이용하였다. K-평균 군집분석은 여러 가지 사례에 대해 선택한 입력변수를 기준으로 상대적으로 동질적인 사례들을 분류하는 것으로 방법적 측면이나 도출결과에 신뢰도가 높은 방법으로 평가받고 있다.

2.2.1. K-평균 군집분석¹⁰⁾

군집분석이란 실험의 결과나 표본 등에서 얻어진 결과들을 어떤 성질에 따라 분류하는 분석방법이다. 먼저, 이러한 군집분석은 일반적으로 다음의 4가지 과정으로 구성되어진다.

첫째는 변수의 측정과정으로 개체들을 군집화하는데 이용될 수 있는 각 개체의 특성을 측정하는 변수들을 구한다. 즉, 군집을 나누고자 하는 목적에 맞게 그 군집의 특성을 정확히 대변하며 관련있는 변수들을 선정하는 것이다. 둘째는 유사성의 측정으로써 측정한 변수들을 이용하여 모든 개체들 간의 거리(distance) 또는 비유사성(dissimilarity)을 계산하여 모든 개체들 사이의 비유사성을 나타내는 거리행렬을 구한다. 유사성은 값이 클수록 두 개체사이

가 가깝다는 것을 의미하고, 비유사성, 거리는 값이 클수록 두 개체사이의 거리가 멀다는 것을 의미한다. 셋째로는 군집화 과정으로써 각 개체들의 쌍을 대상으로 유사성/비유사성을 측정된 결과에 따라 각 개체들을 가까운 순서대로 군집화하는 과정이다. 군집화를 하는 방법으로는 두 개체집단 사이의 유사성 측정기준에 의하여 최단연결법, 최장연결법, 평균연결법등이 있다. 마지막은 각 군집의 성격과 상호관계를 파악하는 과정으로 군집분석을 수행하게 된다.

이 과정에 의하여 군집을 분류하는 유형으로는 크게 2가지가 있다. 하나는 한 군집이 다른 군집의 내부에 포함되나 군집 간에는 중복되지 아니하는 나무모양의 구조를 가지는 계층적 군집(Hierarchical cluster)과 다른 하나는 각 개체가 상호배반적인 여러 군집들 중 하나에만 속하는 유형인 상호배반적 군집(Disjoint cluster)이다.

그리고 각각의 군집유형에 대하여 거리라는 측도를 이용하여 유사성 및 비유사성을 나타내는데 앞서 언급한 바와 마찬가지로 거리 측도가 작을수록 가깝고 개체간의 유사성이 크며 클수록 비유사성이 커서 군집 간에 관련이 적음을 의미한다. 이러한 거리(비유사성) 측정방법에는 유클리드(Euclid) 거리, 유클리드(Euclid) 제곱거리, 체비셰프(Chebyshev)의 거리, 시가거리(City-block 또는 Manhattan distance) 등이 있는데 이때 각 변수의 측정단위가 서로 다르면 각 변수의 중요도가 달라지므로 각 변수들을 표준화한 후에 측정해야 한다.

이와 같은 군집분석 가운데 대표적인 분석 방법인 K-평균 군집분석은 계층적 군집분석과는 달리 개체가 어느 한 군집에만 속하도록 하는 상호배반적 군집방법이다. 이 방법은 군집의 수를 미리 정하고, 유클리드 거리를 계산하여 그 거리 측도에 따른 유사성에 따라 각 개체가 어느 군집에 속하는 지를 분석하는 방법으로서 대량의 데이터의 군집분석에 유용하게 이용되는 가장 보편적 통계 분류분석 방법이다.

3. 결과 및 고찰

우리나라 남한 육상영역을 대상으로 유사 바람특성을 보이는 영역을 구분하기 위하여 남한 전역을

대상으로 공간해상도 10 km 간격으로 계산된 바람장 수치모의 결과를 이용하여 군집분석을 수행하였다.

이를 위해, Glahn과 Lowry¹¹⁾가 지적하였던 것과 같이 진북을 기준으로 시계방향으로 10° 간격으로 관측한 풍향 및 m/s 단위의 풍속을 그대로 적용하지 않고 이 풍향, 풍속을 바람의 동서성분 풍속(u)과 남북성분 풍속(v)으로 변환하여 군집분석에 입력하였다. 이는 바람의 풍향정보가 360°를 기준으로 다시 0°를 나타내게 되는데 360°와 0°가 동일한 바람(정북풍)임에도 불구하고, 수치상으로는 '360'과 '0'이 전혀 다른 값으로 표현되게 된다. 또한 355°와 5°의 풍향각 또한 거의 유사한 방향의 풍향각을 나타내고 있지만 수치적 연산에서는 매우 큰 차이를 나타내는 풍향값으로 인식하게 되므로 일반적 표현법의 풍향값을 그대로 사용하여 군집분석을 수행하면 이 두 값을 전혀 다른 풍향 정보로 인식하여 의도하지 않은 결과가 도출될 수 있다. 따라서 군집분석 수행시 이러한 오류를 제거하기 위해서 수치모의된 풍향과 풍속자료를 Glahn과 Lowry⁸⁾가 제안한 방식대로 재처리하였다. 또한 이처럼 동서성분 풍속과 남북성분 풍속으로 구분하는 경우, 이들 바람성분에 풍향과 풍속의 의미가 모두 포함되므로 이 정보를 활용해 도출된 각각의 바람권역은 유사한 풍향과 풍속을 보이는 하나의 영역으로서 의미를 가질 수 있게 된다. 즉, 이론적으로는 동일 바람권역으로 구분된 영역 내에서는 어느 지점에서나 유사한 풍속을 가진 바람이 유사한 방향에서 불어오게 된다는 것이다.

3.1. 연간 바람권역 군집분석 결과

위에서 설명한 바와 같이 수치모의된 풍향, 풍속 자료를 바람의 동서성분(U)과 남북성분(V)으로 재처리 군집분석을 수행한 결과, 가장 타당한 군집개수는 10개로 분석되었다. Table 1에서 보는 바와 같이 군집개수가 10개인 경우 R^2 증가분이 크게 나타나고 그 이후에는 증가분이 0.01이하로 작게 나타남을 알 수 있다. 또한 SAS 패키지 프로그램내에서 군집의 개수를 판정하기 위해서 사용되는 CCC(Cubic Clustering Criterion)의 값이 군집개수 10에서 국소적 최고점을 나타내고 있어 군집개수는 10개가 적합하다고 판단된다(Fig. 1과 Fig. 2). 이와 더불어 군집간의 거리를 의미하는 PSF의 결과에서는 군집의 개수

Table 1. Statistics result of cluster analysis

NCL	FREQ	R ²	PSF	CCC
1	1212	0		0
2	530	0.406628	829.1918	-9.9290
3	682	0.510856	631.3316	-24.4051
4	592	0.606967	621.8441	-24.8249
5	388	0.700132	704.5256	-21.0806
6	142	0.752829	734.6434	-19.7564
7	451	0.786926	741.7186	-19.4558
8	236	0.819369	780.2176	-17.8095
9	90	0.845025	819.9421	-16.1673
10	349	0.862033	834.4675	-15.5889
11	88	0.873383	828.4267	-15.8491
12	141	0.883868	830.2757	-15.7927
13	197	0.893017	834.0355	-15.6608
14	152	0.901310	841.6143	-15.3762
15	88	0.908613	850.0822	-15.0590

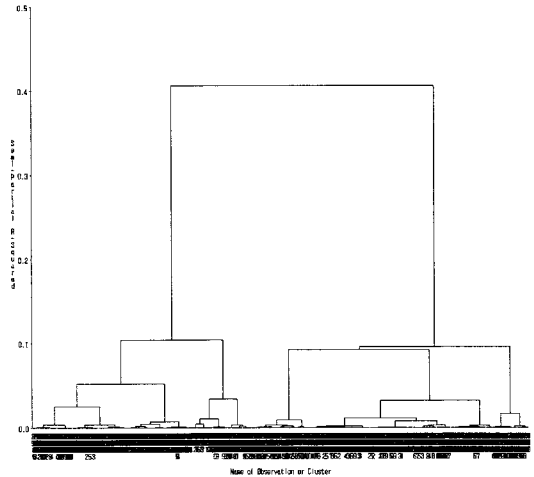


Fig. 2. Dendrogram of a K-mean clustering of annual wind.

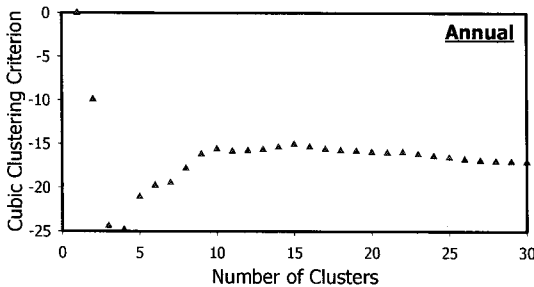


Fig. 1. Plot of CCC and NCL(number of cluster).

가 10일 경우를 전후하여 증가와 감소의 경향을 나타내는 것을 통해, 통계적인 관점에서의 군집은 10개로 분류되는 것으로 판단되었다.

그렇다면 이들 각각의 권역이 제대로 구분되었는지에 대한 검토가 필요하다. 군집분석을 통한 각 바람권역 분류는 서로 특징이 유사한 지점들끼리의 구분이므로, 동일한 바람권역으로 구분된 지점들은 서로 유사한 풍향각을 보이면서 동일 바람권역 전체로 볼 때 풍향각의 분산이 크지 않게 나타난다면 군집분석을 통해 결정된 바람권역의 구분이 객관적이고 타당하다 할 수 있다.

Fig. 3은 남한 육상영역 전 지점(계산 격자점)들의 연간 대표 풍향을 바람권역별로 모두 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 각 바람권역별로 권역에 포함된 모든 지점들의 연간 대표 풍향각의 분산이 크지 않고 권역내에서 특정한 균일한 풍향을 보이고 있다. 특히, 4권역, 6권역 등은 36방위로

구분된 풍향각 분류에서 각각 2개의 풍향각으로만 나타나고 있어 각 바람권역에 해당하는 지점들이 상당히 유사한 바람특징을 나타내는 지점들로 잘 분류되었다는 것을 알 수 있다. 이외에도 1권역, 5권역, 8권역, 10권역들에 포함되는 지점들이 3개의 풍향각으로만 나타나서 이들 바람권역들도 동일 풍향각의 경향이 있는 지점들끼리 잘 분류된 것을 알 수 있다. 또한 풍향각의 분산이 다른 지점에 비해 다소 크게 나타난 2권역, 3권역 이외의 나머지 바람권역들인 7권역, 9권역이 여러 풍향각으로 나타나고 있는 것으로 보여지지만 자세히 살펴보면 발생비율이 높은 3가지 풍향각을 제외하면 나머지 2개 풍향각의 발생 비율이 5%내외로 나타나서 이들 7권역, 9권역에 해당하는 지점들도 3가지 풍향각에 해당하는 바람이 95%정도 나타나고 있음을 알 수 있고, 이것은 이들 7권역, 9권역에서도 아주 일부의 지점들을 제외하고는 거의 동일한 풍향각을 나타내고 있는 지점들로 분류된 것을 알 수 있으며 이것 또한 본 연구에서의 군집분석을 통한 바람권역의 분류가 상당히 명확하게 이루어진 것으로 평가할 수 있다. 2권역과 3권역의 경우에는 풍향각의 분산이 비교적 크게 나타나고 있지만, 이들 바람권역도 바람이 전 풍향각에 걸쳐 골고루 나타나고 있는 것이 아니라 각각 북서풍 계열의 풍향각과 북북동풍 계열의 풍향각을 가진 비교적 일정한 풍향각의 바람들로만 분류되고 있어 전혀 연관성이 없는 지점들로만 바

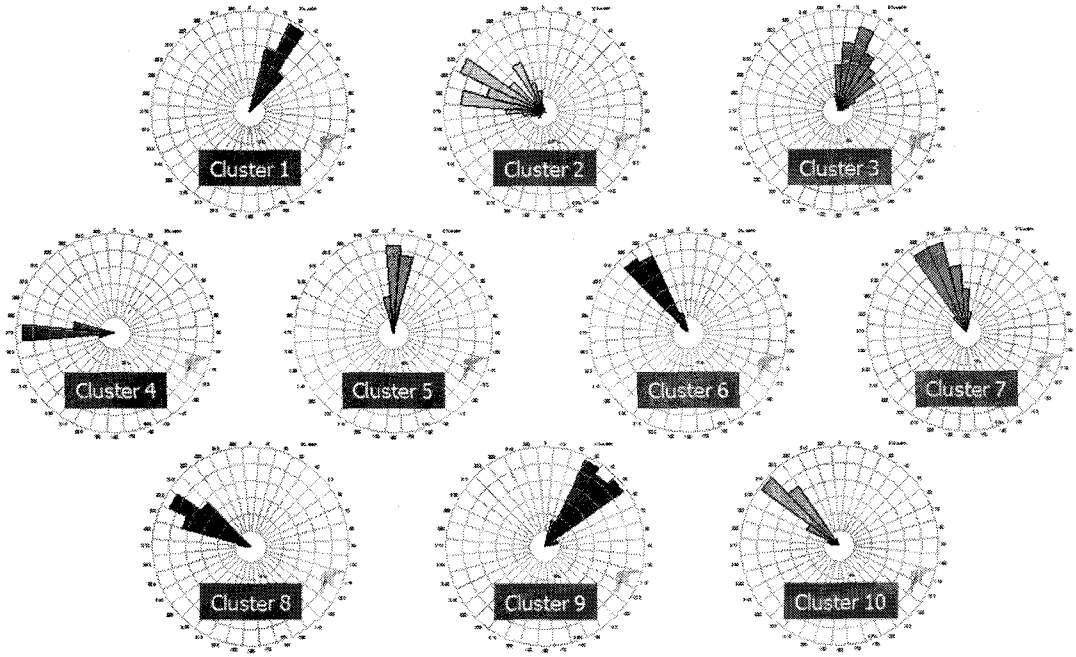


Fig. 3. Wind rose at each wind sector(cluster).

람권역을 형성하고 있는 것은 아님을 알 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이, 2권역과 3권역을 제외하거나 아니면 이들 바람권역을 포함하더라도 본 연구에서 K-평균 군집분석 방법을 활용하여 격자간격 10 km의 바람정보를 바탕으로 우리나라 남한 육상영역에서 유사 바람특성을 보이는 바람권역을 구분한 결과가 상당히 타당하고 신뢰성 있게 나타난 것을 알 수 있다.

하지만 여기서 우리는 한 가지 의문이 생길 수 있다. 과연 이러한 과정으로 도출된 10개 바람권역으로의 구분결과가 실제 응용적 측면에서 볼 때 타당하고 충분히 활용 가능할 것인가 하는 것이다.

Table 2는 분류된 각각의 군집이 차지하는 영역의 비율과 지점수를 나타낸 것이다. 표에서 보는 바

와 같이, 남한지역 육상영역 전체에서 3군집에 속하는 바람의 특성을 보이는 영역의 비율이 17.3%이고 이에 해당하는 지점수가 210개라는 의미이다. 표를 보면 우리나라는 10권역이 가장 넓은 23.5%의 비율을 차지하는 바람권역이며 다음으로 7권역, 그리고 3권역의 순으로 나타나고 있다. 반면, 1권역과 4권역, 그리고 9권역은 각각 작은 면적의 바람권역으로 분류되고 있다.

앞서 살펴본 바와 같이 연간 바람장 정보를 바탕으로 군집분석한 순수 통계적 측면에서의 결과로는 우리나라 남한 육상 영역이 10개의 바람특성이 나타나는 것으로 분류된 것을 알 수 있었다. 그러나 Table 2에 나타난 바와 같이 1권역과 4권역의 경우, 전체 면적 대비 권역의 비율이 각각 2.1%, 3.2%밖에

Table 2. Result of cluster analysis using annual wind

Cluster	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Area(%)	2.1	9.8	17.3	3.2	5.4	9.4	19.1	6.0	4.0	23.5
Num. of points	36	119	210	39	66	114	231	73	49	285
Nearest Cluster	9	10	9	8	1	7	10	10	1	2

되지 않는다. 이에 과연 이 권역들을 우리나라에 나타나는 바람의 특정한 권역으로 구분하는 것이 타당한 것인가에 대한 문제제기가 있을 수 있는 것이다. 비록, 통계 분석적 측면에서는 1권역과 4권역이 특징 있는 바람의 영역으로 구분되었다 하더라도, 실제 응용적 측면에서 보면 남한 육상영역 전체에서 약 2~3%를 차지하고 있는 영역을 하나의 독립된 분류로 구분하는데 문제가 있을 수 있다. 따라서 이들 영역을 포함해서 면적비가 5%가 되지 않는 권역은 독립된 하나의 권역으로 구분하지 않는 것으로 하였다. 이렇게 되면 앞서 언급한 1권역과 4권역, 그리고 9권역이 독립된 권역에서 제외되지만 이 경우, 이들 제외된 권역의 처리에 대한 문제가 발생한다.

군집분석을 수행하면 Table 2에서 보는 것처럼 특정 개수의 군집으로 구분된 결과와 더불어 각각으로 분류된 군집간의 관계에 관한 정보도 도출할 수 있다. 즉, 구분된 10개의 권역 간에 서로 유사성이 더 높은 권역이 있다는 점이다. 따라서 구분된 군집들 중에서 서로 연관성이 높은 군집은 다른 나머지 군집들보다 바람의 특성이 더욱 유사하기 때문에 위에서 나타낸 바와 같이 남한 육상영역의 전체면적 대비 각 군집의 면적비율이 작은 1, 4, 9권역을 다시 분류할 수 있는 것이다. 이러한 측면에서, 앞서 통계적 관점에서 분류된 10개의 바람권역을 재분석해 보면 1권역과 9권역이 서로 유사성이 가장 높고 이 두 권역을 합친 면적비율이 6.1%로 5%를 넘어서므로 하나의 독립된 권역으로 구분이 가능하며 이러한 과정을 통해 새롭게 결정된 이 바람권역은 우리나라 남서지역과 제주도 대부분을 대표하는 바람권역으로서 충분히 중요하고 의미 있는 권역으로 인정할 수 있다. 또한 4권역은 8권역과 유사성이 높으므로 이 두 권역을 합쳐 면적비율 9.2%의 독립된 하나의 권역으로 구분할 수 있다. 이와 같은 과정으로부터 K-평균 군집분석을 통해 도출된 순수 통계적 측면에서의 10개 바람권역이 실제 응용적 측면에서의 재분석을 통해 8개의 바람권역으로 최종 구분될 수 있다.

이러한 과정을 통해 도출된 연간 바람정보를 이용한 남한지역에서의 바람권역을 구분한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 1권역과 9권역은 붉은색으로 표시하여 동일한 특성을

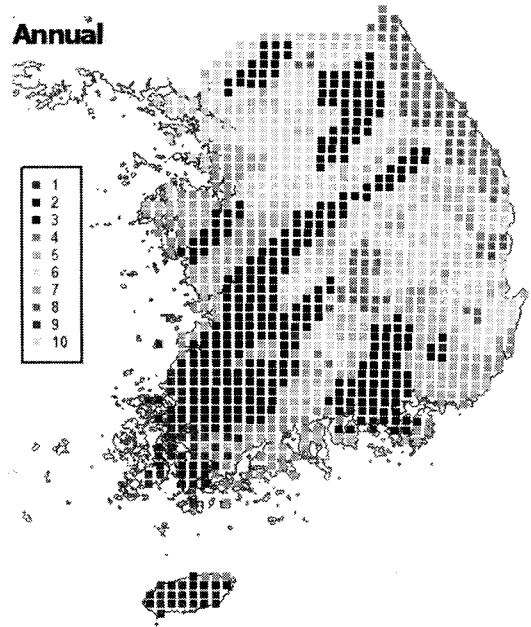


Fig. 4. Result on classification of annual wind sectors in South Korea.

나타내는 하나의 바람권역으로 나타내고 있고, 4권역과 8권역 또한 초록색으로 표시하여 동일한 바람권역으로 나타내고 있다.

앞서 설명한 바와 같이 각 지점에서 계산된 바람정보를 바탕으로 군집분석을 수행하기 위해 각 지점별로 3시간 간격의 1년간 풍향, 풍속을 동서성분 풍속(u)과 남북성분 풍속(v)으로 구분하였었다. 이들 3시간 간격의 동서성분 풍속에 대한 연평균값과 남북성분 풍속에 대한 연평균값을 활용하여 각 지점에서의 연간 바람정보를 하나의 값으로 표현하게 되는데 이러한 과정을 통해 각 지점별로 하나의 값으로 표현되는 바람정보가 어느 정도 타당한지 살펴볼 필요가 있다. Fig. 5는 각 격자점에서의 연간 대표풍계가 타당하게 분석되었는지를 알아보기 위해 임의의 지점들에서의 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 검은색 화살표는 연평균 동서성분 풍속과 연평균 남북성분 풍속을 이용하여 나타낸 해당지점에서의 연간 대표풍향을 나타낸 것이고 바람장미도는 해당 지점에서의 수치모의된 1년간 3시간 간격의 풍향별 발생빈도를 나타낸 것이다(물론, 바람의 성분을 이용하면 풍향뿐만 아니라 풍속의 정보도

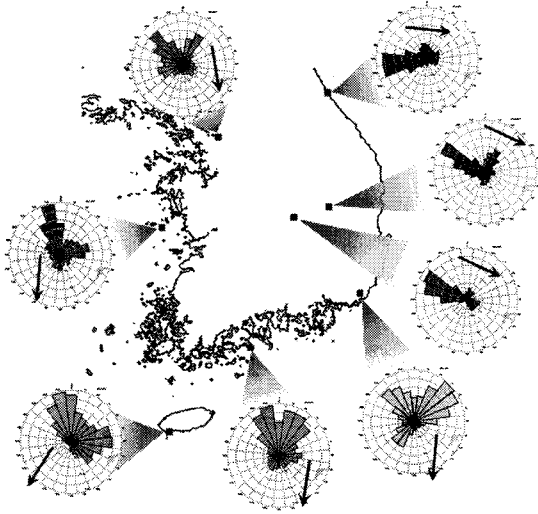


Fig. 5. Comparison of wind rose with a representative wind direction (a black arrow) at each site.

함께 도출되지만, 이 그림에서는 대표풍향의 도출 정확도를 살펴보기 위해 풍속정보는 나타내지 않았다. 따라서 그림에서 지점별로 검은색 화살표의 크기는 동일하게 표현하였다. 그림에서 보는 바와 같이 연평균 바람성분으로 나타낸 각 지점에서의 대표풍향이 바람장미도에서 파악할 수 있는 지점별 주풍향의 경향을 잘 나타내고 있다. 여기서 나타내고 있는 연평균 대표풍향은 일반적 풍향 분석에서 활용되는 주풍향(the prevailing wind direction)과 정확히 일치하지는 않는다. 연평균 대표풍향은 해당 지점에서 연간 나타나는 모든 풍향각의 발생빈도별 가중치를 고려하여 표현한 것이고 주풍향은 연간 발생하는 모든 풍향각 중에서 가장 발생빈도가 높은 해당 풍향각만을 나타낸 것이기 때문에 엄밀히 살펴보자면 대표풍향과 주풍향이 정확히 일치하는 것은 아니다. 따라서 Fig. 4에서 보는 바와 같이 대표풍향과 바람장미에서 추정할 수 있는 주풍향과의 풍향각이 정확히 일치하지는 않는 것이다. 예를 들어 부산지역에서 연간 수치모의된 3시간별 풍향의 바람장미도를 보면 ‘북동풍’이 주풍향인 것을 알 수 있다. 그러나 북서풍, 남서풍 계열 등 ‘서풍’계열의 바람빈도도 비교적 높게 나타나고 있고 이들 풍향각에서의 발생빈도가 고려되어 부산지역에서의 연간 대표풍향은 주풍향으로 나타난 북동풍보다 좀

더 서풍의 경향이 고려된 ‘북북동풍’으로 나타나서 주풍향과 대표풍향에 약간의 차이가 있음을 알 수 있다.

제주지역에서의 결과, 또한, 대표풍향과 주풍향에 다소간의 차이가 있는 것으로 보여진다. 이 지역은 ‘북동풍(45°)’을 대칭으로 두 풍향각에서 발생빈도가 거의 비슷해서 발생비율을 고려해서 정보를 도출하는 대표풍향각이 두 풍향각의 중간부분인 북동풍계열로 나타나고 있는 것이다.

이처럼 특정 풍향에서의 발생빈도가 거의 동일할 경우, 대표풍향의 해석력이 다소 떨어질 수 있다. 이 부분에 대해서는 좀 더 보완적인 분석방법이 개발되어야 할 부분이라 하겠다. 하지만, 대부분의 지점들에서 대표풍향으로 분석된 풍향각이 해당 지점들에서의 주풍향을 상당히 잘 분석해내고 있어서 전반적인 활용에는 큰 무리가 없다고 판단된다. 더욱이, 바람의 성분(동서, 남북)을 활용하면 대표풍향뿐만 아니라, 풍속정도도 함께 도출할 수 있기 때문에 유사한 풍향 및 풍속영역을 파악하는 바람권역 구분에 있어는 바람 성분을 활용하는 방법이 현 시점에서 가장 유용하다 할 수 있다.

3.2. 계절별 바람권역 군집분석 결과

우리나라는 비교적 계절의 구분이 뚜렷한 편이다. 물론, 최근 들어 지구온난화와 같은 기후변화의 영향으로 과거에 비해 그 구분이 불분명해지기는 하였지만, 그래도 여전히 계절의 변화가 있으며 계절별로 우리나라 주변의 기압배치 변화에 따른 바람의 특성도 달라진다. 즉, 우리가 익히 잘 알고 있는 것처럼 여름에는 남동계절풍, 겨울에는 북서계절풍 등, 계절에 따른 풍계의 변화가 나타난다. 특히, 우리나라는 복잡한 지형적 특성 때문에 이들 계절별 바람 또한 내륙에서 다양한 변화를 유발하게 되므로 계절별로 바람권역의 구분이 달라질 수 있다.

각 계절별 바람장 군집분석을 수행한 결과는 Fig. 6에 나타내었다(계절별 분석에서는 Table 1과 같은 통계적 결과는 지면관계상 제시하지 않았음). 그림에서 보는 바와 같이 봄철의 경우에는 CCC값이 11에서 국소적 최고점을 나타내고 있어 남한 영역이 11개의 바람군집으로 분류되었으며(R^2 값의 증가분도 11개로 분류될 때 가장 크게 나타남), 여름철의 경우에는 8개의 바람권역, 그리고 가을철과 겨울철에는 12개

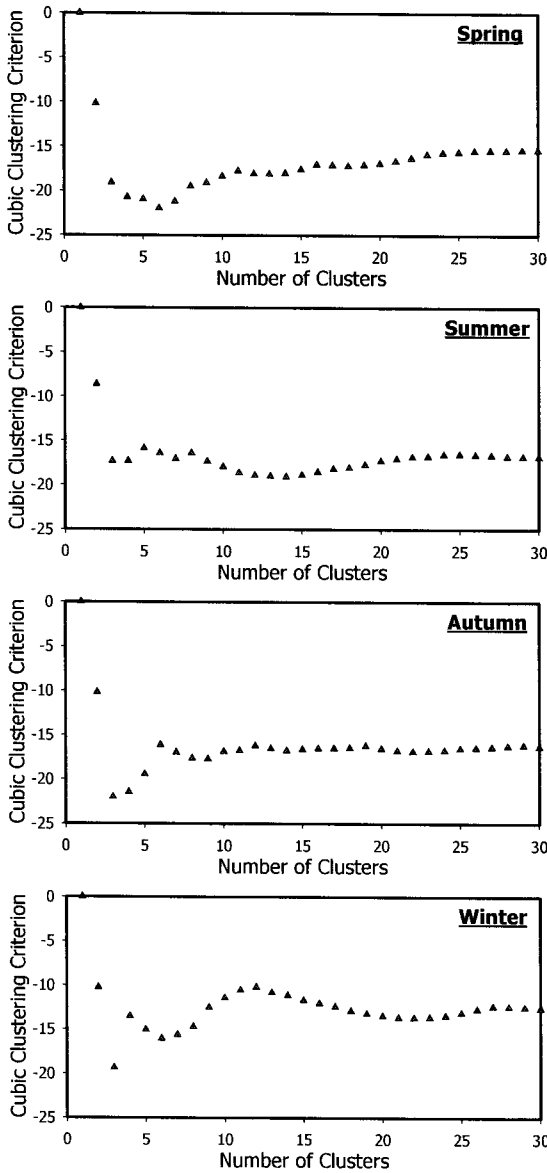


Fig. 6. Plot of CCC and NCL in each season.

의 바람권역으로 구분되는 것으로 나타났다.

그러나 앞서 연간 바람권역 구분에서 설명한 바와 마찬가지로, 계절별로 구분된 각각의 바람권역이 차지하는 면적비를 고려해서 5%미만의 바람권역은 유사성이 가장 큰 바람권역과 통합하는 과정을 거치는 것이 실제 응용적 측면에서 유용하다. Table 3은 각 계절별로 군집분석을 통해 나타난 바람권역의 구분에 관한 결과를 나타낸 것인데, 표에

제시된 바와 같이 봄철에는 11개의 군집으로 바람권역이 구분될 수 있다. 하지만, 1권역, 6, 7, 8, 9권역의 면적비가 0.5%~2.5% 정도로 매우 작게 나타나서 이들 권역을 실제 응용적 측면에서 하나의 뚜렷한 바람특성을 가지는 일정 규모 이상의 바람권역으로 설정하는 것은 의미가 없다. 즉, 남한지역 육상영역에서 지역적 또는 공간적으로 대표할만한 규모가 되지 못하므로 이들 각각의 권역은 유사성이 높은 다른 바람권역에 포함하여 최종적으로 활용 가능한 바람권역으로서의 재분류를 수행할 필요가 있는 것이다. 따라서 이 과정을 수행하면 1권역과 9권역이 서로 유사성이 높아 하나의 바람권역으로 통합하면 면적비가 4.62%가 되며 6권역이 9권역과 유사하고 나머지 7권역 또한 6권역과 유사하므로 1, 6, 7, 9권역을 통합하여 5.95%의 면적비를 가지는 하나의 새로운 바람권역으로 나타낼 수 있다. 또한 2.48%의 면적비를 가지는 8권역은 11권역과 유사성이 높으므로 8권역과 11권역을 통합하여 또 다른 새로운 바람권역으로 분류할 수 있다. 이렇게 되면 봄철에는 남한지역이 7개의 바람권역으로 구분된다.

마찬가지로 방법으로 여름철 바람권역을 분석해보면, 군집분석 결과 8개의 바람권역으로 구분될 수 있지만 면적비가 작은 7권역이 5권역과 유사하므로 이를 통합할 수 있게 되고, 여름철도 7개의 바람권역으로 구분할 수 있다. 가을철은 군집분석 결과 12개의 바람권역으로 구분될 수 있지만 면적비가 작은 2, 3, 4, 5, 6, 9, 12권역을 대상으로 바람권역간 유사성을 바탕으로 재분석하면 2, 4, 9권역이 통합될 수 있으며, 3, 5, 12권역 또한 하나의 새로운 바람권역으로 통합된다. 그리고 나머지 6권역은 7권역에 포함하면 가을철에도 7개의 바람권역으로 구분할 수 있게 된다. 겨울철도 12개의 바람권역으로 구분되는데 면적비가 작은 2, 3, 9, 10, 11, 12권역을 대상으로 재분석할 수 있다. 이 중에서 11, 12권역을 통합되어 하나의 새로운 바람권역으로 나타낼 수 있으며 2권역과 9권역은 8권역에 포함시키고 3권역과 10권역은 4권역에 포함시켜 각각 새로운 바람권역으로 구분할 수 있다. 이렇게 하면 최종적으로 겨울철도 7개의 바람권역으로 구분할 수 있게 된다.

따라서 남한영역은 계절별로 모두 7개의 바람권역으로 분류될 수 있다. 하지만 계절별로 바람권역

Table 3. Result of cluster analysis in each season

		Cluster											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Spring	Area (%)	2.4	13.2	19.1	7.6	10.2	0.5	0.8	2.5	2.2	25.6	15.9	-
	Num. of points	29	160	231	92	124	6	10	30	27	310	193	-
	Nearest Cluster	9	10	10	10	9	9	6	11	1	3	3	-
Summer	Area (%)	9.5	7.4	34.5	6.1	17.9	15.9	3.2	5.5	-	-	-	-
	Num. of points	115	90	417	74	214	193	39	67	-	-	-	-
	Nearest Cluster	2	1	8	8	6	5	5	4	-	-	-	-
Autumn	Area (%)	10.2	4.7	2.5	2.6	3.5	3.9	15.5	30.5	0.9	13.9	7.0	4.8
	Num. of points	123	57	31	32	42	47	188	369	11	169	85	58
	Nearest Cluster	11	4	12	2	3	7	6	10	2	8	8	3
Winter	Area (%)	12.8	3.0	4.6	7.3	18.5	8.3	22.9	13.7	4.0	0.2	1.5	3.2
	Num. of points	155	36	56	89	224	100	278	166	48	2	18	40
	Nearest Cluster	7	8	4	3	6	5	1	9	8	4	12	11

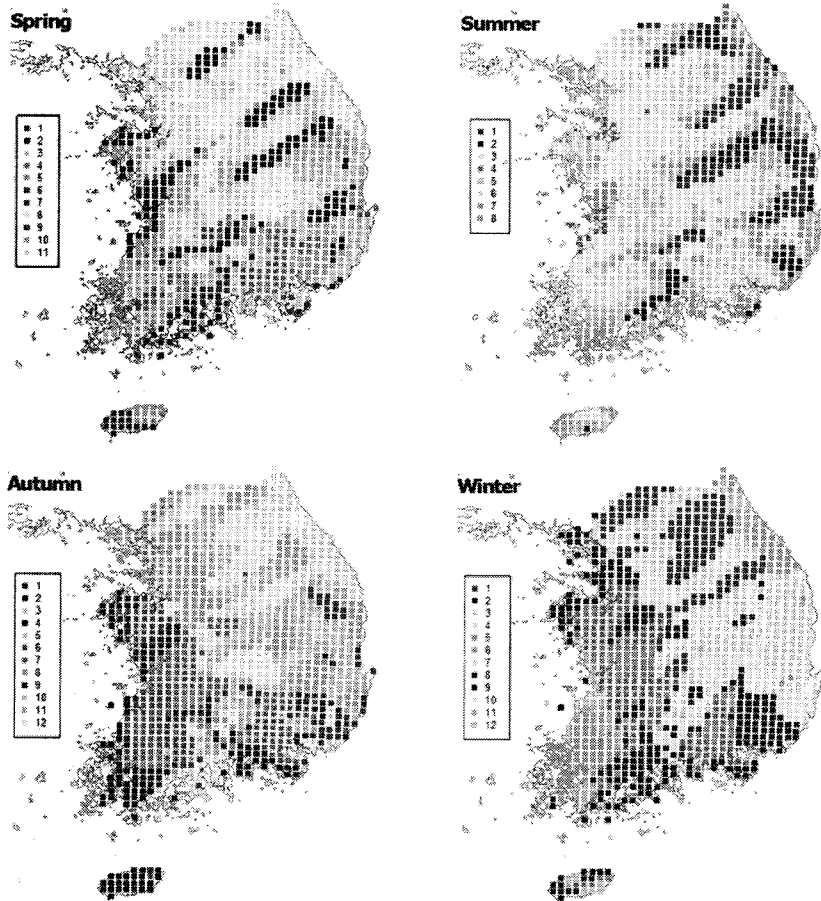


Fig. 7. Result on classification of wind sectors in each season.

의 개수가 동일할 뿐, 분류된 각 계절별 바람권역의 형태 및 면적비는 조금씩 차이가 있다.

이러한 과정을 통해 도출된 계절별 바람권역의 분류 결과는 Fig. 7에 제시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 통계 분류된 군집들이 보정과정을 통해 계절별로 모두 7개의 바람권역(7가지의 색)으로 구분되어 있다. 부분적으로는 각 계절별로 바람권역의 구분형태와 면적비가 다르게 나타나고 있지만, 전반적인 분류의 형태는 다소 유사한 경향을 가지고 있다. 동해안에 걸쳐진 남북방향의 백두대간을 따라 모든 계절에서 연간 바람권역 분류와 유사하게 분류되는 경향을 보이고 있으며, 백두대간을 따라서 쪽 방향으로 바람권역의 구분형태 또한 각 계절별로 유사한 경향성을 보인다. 또한 경상도에서 바람권역의 구분형태, 그리고 남해연안, 전라도, 충청도 일대에서도 계절별로 차이는 있지만 부분적 유사한 형태를 느낄 수 있다. 이 외에도 이상의 결과를 바탕으로 각 권역에서의 상세 바람분석을 포함한 남한영역 전반에 걸쳐 여러 다양한 바람정보를 분석해 낼 수 있다. 하지만, 이에 관해서는 차후 연속되는 연구에서 여러 분석과정을 통해 계절별 바람권역의 제반 특성 분석을 더욱 심도 깊게 수행하여 그 결과를 따로 상세히 소개할 예정이다. 본 연구에서는 우리나라 남한 영역에서의 연간 및 계절별 바람권역의 분류하는 연구과정을 소개하고 이러한 과정을 통해 도출된 결과물을 소개하고자 하는 것이 우선적 목표이다.

3. 결 론

우리나라의 지형적, 지리적 특성을 고려한 상세 기상장 수치모의를 수행하는데 있어 지형자료 및 지표특성자료의 정밀화를 통해 기존의 기상장 수치모의 결과보다 더욱 향상된 기상정보 도출이 가능하였다. 이를 바탕으로 격자화된 자료를 활용하여 바람권역 분류를 위한 군집분석을 수행한 결과, 우리나라는 남한 육상지역에서 연간 8개의 바람권역으로 구분되었으며 각 계절별로는 모두 7개의 바람권역으로 구분되었다. 이들 구분된 연간, 계절별 각각의 바람권역의 구분이 타당한지에 관해 검토한 결과, 각 격자점에서의 바람장미도와 격자점별로 도출된 대표풍향의 상당히 좋은 일치율을 보여 실제 응용적

측면에서 우수한 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단되었다. 이들 결과를 통해 군집분석에 의한 각각의 권역분류가 타당성이 있음을 알 수 있었다.

이상의 결과는 향후 차세대 청정 녹색에너지원인 풍력발전을 위한 발전소 입지 타당성 분석 과정에서 지역별 풍황 특성 파악의 실증적 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

10 km 격자 간격의 바람정보를 활용한 현재의 연구는 차후 고해상도 수치기상모의를 통해 도출된 1 km 격자 간격의 바람정보를 활용하여 바람권역별 상세 고해상도 바람권역 구분연구로 연결될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술연구원의 「신재생에너지 및 한반도 풍력에너지 자원지도 구축」 사업에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) 이화운, 정우식, 임현호, 이귀옥, 최현정, 지효은, 이현주, 성경희, 도우곤, 2006, 바람권역 구분을 통한 부산지역 국지바람 분석 - Part I : 기상관측 자료를 이용한 바람권역 대분류, 한국환경과학회지, 15(9), 835-846.
- 2) 정우식, 이화운, 2003, 지형적 특징이 해풍시작에 미치는 영향에 대한 연구, 한국대기환경학회지, 19(6), 757-772.
- 3) 정우식, 이화운, 박종길, 김현구, 김동혁, 최효진, 김민정, 2009, 고해상도 육상바람지도 구축을 위한 기상장 수치모의 및 지상강풍 추정, 2009년 태양에너지학회 춘계학술대회, 145pp.
- 4) 이중희, 한국의 지상풍 유형과 특성, 1996, 박사학위논문, 지리학과, 경북대학교, 대구.
- 5) NCAR, PSU/NCAR Mesoscale Modeling System, 2003, Tutorial class notes and user's guide.
- 6) Grell G. A., Dudhia J., Stauffer D. R., 1994, A description of the fifth-generation Penn State/ NCAR mesoscale model(MM5), NCAR technical Note TN-398+STR, NCAR, Boulder, CO.
- 7) Reisner R. A., Uliasz M., 1998, Use of meteorology models as input to regional and mesoscale air quality models- limitations and strengths, Atmospheric Environment, 32, 1455-1466.
- 8) 김현구, 장문석, 경남호, 이화운, 최현정, 김동혁, 2006, 수치바람모의에 의한 저해상도 국가 바람지

- 도의 구축, 한국태양에너지학회 논문집, 26(4), 31-38.
- 9) Lee H. W., Choi H. J., Lee S. H., Kim Y. K., Jung W. S., 2008, The impact of topography and urban building parameterization on the photochemical ozone concentration of Seoul, Korea, Atmos. Environ., 42, 4232- 4246.
- 10) 이화운, 정우식, 임현호, 최현정, 이귀옥, 2005, 부산지역 대기오염측정소의 위치 적정성 평가, 부산 지역환경기술개발센터, 72pp.
- 11) Glahn H. R., Lowry K. A., 1972, The use of model output statistics(MOS) in objective weather forecasting, J. Appl. Meteorol., 11, 1203-1211.