응용통계연구 (2009)
22(5), 943-960

한반도 바람자원의 TMY(typical meteorological year)구축 알고리즘에 관한 연구

김혜중[1] · 정선[2] · 최영진[3] · 김규랑[4] · 정영림[5]

[1]동국대학교 통계학과, [2]동국대학교 통계학과, [3]국립기상연구소 응용기상연구과
[4]국립기상연구소 응용기상연구과, [5]국립기상연구소 응용기상연구과

(2009년 8월 접수, 2009년 9월 채택)

요 약

본 연구는 한반도 바람자원 TMY(typical meteorological year)의 구축에 적절한 알고리즘을 제안하고, 이를 전국 77개 기상관측소에서 1998년~2008년 기간 동안 관측한 바람자료에 적용하여 TMY를 구축하였다. 제안된 알고리즘은 Filkenstein-Shafer(FS) 통계모형 하에서 정의된 다양한 통계를 사용하여 연/월별 바람자료의 설명력 측도인 TMM(typical meteorological month)점수를 구하고, TMM점수에 기준하여 TMY를 구축하는 절차이다. 알고리즘은 두 단계 계산알고리즘으로 구성되었으며, 첫 단계는 각 관측소의 바람개황 그리고 둘째 단계는 한반도의 바람개황을 대표하는 TMY가 되도록 설계하였다. 11년 바람자료와의 비교분석, 경쟁모형에 의해 구축된 TRY(typical reference year)들과의 비교, 기상요소 추가에 따른 TMY의 영향평가 등 여러 종류의 비교 및 평가를 통하여 한반도 바람자원의 개황에 대한 TMY의 대표성과 효용성을 보였다.

주요용어: 풍력자원지도, 수치기상모의, Filkenstein-Shafer의 통계모형, TMM점수, TMY, 주성분분석, 군집분석, RMSD.

1. 서론

풍력에너지와 관련된 산업은 자연을 이용하는 대표적인 저탄소 녹색산업으로 각광받고 있다. 이러한 풍력에너지의 효율적인 사용을 위한 선행과제는 과학적 기반을 가진 고해상도의 풍력자원지도를 개발하여 잠재적 풍력자원을 정확히 평가하는 것이다. 현재 풍력자원지도의 작성방법으로는 등고선법, 이론적 선형유동모델, 자료동화법 (김용상 등, 2002) 등 여러 방법들이 제안되어 있다. 이들 중 최근에 일반적으로 사용되는 방법들은 다음의 절차로 이루어져 있다. 첫째는 기상요소(풍속, 풍향, 기온, 습도 등)에 대한 4차원(3차원 공간 및 시간)의 수치기상모의를 사용하여 중규모지역(10Km)의 바람장을 작성하는 단계이며, 둘째는 중규모의 바람장에 우수한 유동모델로 표현된 상세지형의 정보를 합성시키는 통계적 동적축소화(SDD; statistical dynamic downscaling)로 고해상도(1Km 이하)의 바람지도를 구축하는 단계이다 (김현구 등, 2006). 세계 각국은 바람지도 작성을 위해 기상모델을 개발하여 수치기상모의에 사용하고 있으며 우수한 유동모델들도 함께 개발하고 있다. 예를 들면, 한국의 KMM5 및 WRF-UCM, 덴마크의 KAMM, 호주의 MM5, 미국의 MASS 등이 해당 국가의 수치기상모의에 사용되는 것들이다.

한편 바람장 작성 시 사용되는 수치기상모의에는 초기 입력 자료가 필요하며, 이것은 대상지역의 일별(또는 시간별) 기상요소(풍속, 풍향, 기온, 습도 등)에 대한 장기간의 기상개황을 정확히 대표할 수 있

본 연구는 기상청 국립기상연구소 주요 과제인 '신생활산업 기상기술 개발연구' 사업의 지원으로 수행되었습니다.
[1]교신저자: (100-715) 서울시 중구 필동 26-3, 동국대학교 통계학과, 교수. E-mail: kim3hj@dongguk.edu

는 기상통계로 이루어진다. 이를 위해 장기간의 기상개황 자료를 모두 수집하고 대표값을 계산하여 수치기상모의에 입력하는 방법을 생각할 수 있으나, 이는 방대한 수치기상모의 작업이 필요하여 시간 및 비용의 제약이 따르는 방법이다. 이러한 문제의 해결책으로 태양광연구 분야에서는 TMY를 입력 자료로 사용하는 방법을 선택하고 있으며, 이에 대한 연구가 다양하게 진행되어 왔다 (Chan 등, 2006). TMY는 미국과 유럽 등에서 기상연구 및 예측에 사용되는 기상통계 데이터베이스이며, 장기간(10년 내외)에 걸쳐 지속적으로 발생되는 월/계절의 기상적인 특징을 충분히 반영할 수 있는 12개(1월~12월)의 TMM을 선택한 후 TMM을 월별로 연결시킨 1년 치 기상자료를 뜻한다 (Klein 등, 1975). 따라서 TMY는 기상변수가 가진 일별(또는 시간별) 변동패턴의 특성에 대한 정보를 유지함과 동시에 월(또는 계절)평균이 장기간 기상자료의 것과 유사한 값을 가져, 기상현상의 예측 및 수치모의 실험에서 입력 자료로 유용하게 사용된다 (Skeiker, 2004).

본 연구는 한반도 바람지도 작성에서 수치모의모델의 초기자료로 사용될 TMY를 FS통계모형 (Finkelstein과 Schafer, 1971) 하에서 구축하는 방법에 관한 것이다. 이를 위해 Chan 등 (2006)과 Skeiker (2004) 등이 사용한 기존의 방법과 차별화된 2단계 TMY구축 알고리즘을 고안하여 한반도 바람자원의 TMY 구축하였다. 또한 TMY의 대표성 및 안정성 평가를 통해 제안된 알고리즘의 유용성을 보였다. 한반도 바람자원의 TMY구축에는 전국 77개 기상관측소에서 11년(1998년~2008년)간 관측된 풍속, 풍정, 최대풍속, 순간풍속자료가 사용되었으며, TMY구축 알고리즘은 다음의 두 단계로 이루어진다. 그 첫 번째 단계는 장기간(11년) 기상자료의 연/월별 및 기상요소별 FS통계를 77개 기상관측소 별로 계산하여, 그 가중합을 바탕으로 한반도 바람자원의 기상관측소별 TMY를 구축할 수 있는 통계를 제공하는 절차이다. 두 번째 단계는 77개 기상관측소 별로 계산된 FS통계의 가중합의 표준화 및 합산을 통해 TMM 후보군(각 month 당 5개년도)을 1998년~2008년 중에서 선택한다. 그리고 후보 TMM과 11년 기상요소별 자료 간의 RMSD(root mean squared distance) 기준에 의해 정해지는 최종 TMM들을 연결시켜 TMY를 구축하는 절차이다. 본 연구에서 구축된 TMY의 안정성과 대표성에 대한 평가도 이루어졌다. TMY의 안정성은 TMY의 구축에 사용한 바람자료에 추가자료(온도, 기압, 습도자료)를 포함시켜 얻은 TMY(제안된 알고리즘 적용)와의 비교를 통해 평가하였고, TMY의 대표성은 두 종류의 군집분석으로부터 얻은 TRY들과의 비교분석 및 11년 한반도 바람자료와 TMY의 비교를 통해 평가했다.

2. 한반도 바람자원의 TMY

2.1. 한반도 바람자원자료

한반도 바람자원을 분석하기 위해 1998년~2008년 기간 동안 전국 77개 기상관측소에서 시간대별로 관측한 풍속(m/sec), 기압(hPa), 온도(℃) 및 습도(%) 값과 일풍정합(100m), 일최대풍속(m/sec), 일최대순간풍속(m/sec)을 수집하였다. 그림 2.1은 1998년에서 2008년 동안 관측된 월평균 풍속시계열과 X-11 ARIMA로 분해해낸 풍속시계열의 추세패턴을 함께 그린 것이다. 또한 장기간에 걸친 풍속시계열의 변화 추이를 검정하기위해 Dickey-Fuller 단위근 검정과 추세패턴에 대한 단순선형회귀분석을 실시하였다. 그 결과 단위근 검정의 p-값은 0.5104이었고 회귀계수 추정치는 0.000594(p-값 $<.001$)이었다. 따라서 지난 11년간 한반도의 풍속은 미세한 증가추세를 가진 것으로 나타났다. 그림 2.2는 1998년~2008년 기간 동안에 관측된 한반도 월평균풍속의 Box Plot이다. 그림 2.2에 의하면 1월~4월의 풍속이 5월~12월 풍속보다 빠름을 알 수 있고, 이 사실은 이원배치 ANOVA(p-값 $<.001$)에 이은 월별풍속의 다중비교에 의해 검정되었다. 이와 동일한 방법으로 풍속 외 다른 기상요소(기압, 온도, 습도, 풍정, 최대풍속, 최대순간풍속)들의 변화추이를 분석하여 기상요소간의 관계 및 영향분석 등으로 지난 11년간 한반도에서 발생된 바람자원의 개황을 파악할 수 있을 것이다.

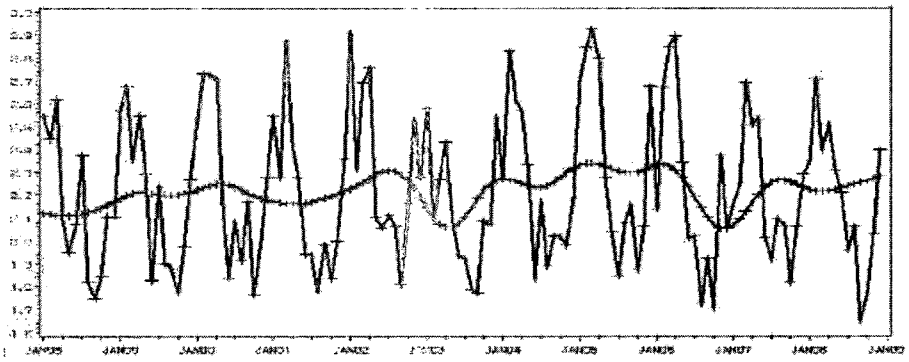

그림 **2.1.** 풍속의 월별시계열(—+——+—) 및 추세패턴 (—X——X—)

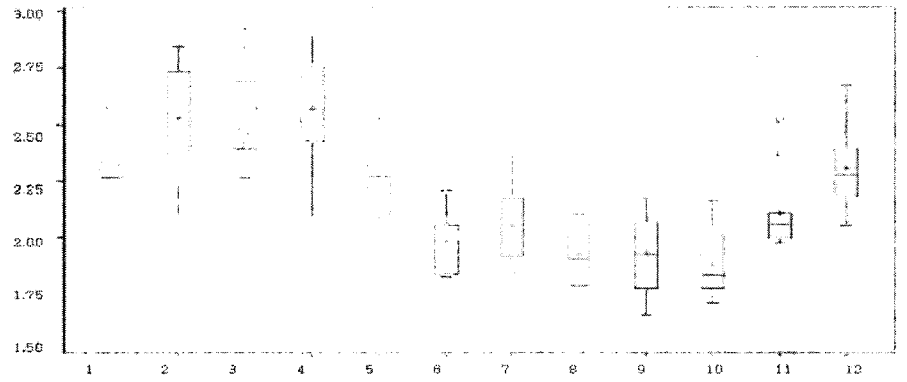

그림 **2.2.** 월평균 풍속(1998년 2008년)의 Box Plot

한편, 풍력발전소 입지선정, 풍력발전장비의 효율성 평가, 고층건축물이 받는 바람(와류 등)의 영향 등과 같이 바람자원과 관련된 여러 연구에는 대부분 과거 장기간에 걸쳐 축적된 바람자원의 개황을 분석함과 동시에 1년(또는 계절, 월)동안의 기상자료를 input으로 사용하는 모의실험이 필요하다. 이러한 모의실험에 사용될 input 자료로는 연구대상 지역에서 1년(계절, 월)동안 발생되는 기상현상을 연구의 목적에 맞게 반영하는 바람자원자료(TMY)가 사용되는 추세이다. TMY 구축에는 여러 가지 방법(Argriou와 Lykoudis, 1999)이 있으며, 이들 중에서 Hall 등 (1978)이 FS 통계를 기반으로 제안한 방법이 현재 널리 사용되고 있다. 이 방법은 10년 내외의 장기간 관측된 기상요소 데이터베이스로부터 각 월을 대표하는 TMM을 FS통계 기준으로 선정한 후, 이들을 연결시켜 TMY를 구하는 절차로 이루어진다. 여기서 FS통계는 선택된 TMM들이 다음의 세 가지 조건을 만족하도록 고안된 것이다. 이들 조건을 열거하면, 첫째로 장기간 관측 자료가 가진 기상요소 빈도분포와의 유사성, 둘째로 기상요소의 특징적인 일별 변동패턴의 반영조건, 셋째로 실제 기상요소들이 가진 상호연관성에 대한 정보포함 조건이 있다.

본 장에서는 전국 77개 기상관측소에서 11년(1998년~2008년)에 걸쳐 측정된 시간별 기상자료를 요약하여, 11년 간 한반도 전역에서 발생한 바람자원의 개황을 대표하는 TMY의 구축알고리즘을 제안하고, 구축된 한반도 바람자원 TMY의 유용성을 보이고자 한다. TMY 구축알고리즘은 두 단계로 이루어지며, 첫 단계는 77개 기상관측소 지역의 바람자원 FS통계의 계산에 관련된 절차이고, 둘째 단계는 FS통

계를 사용하여 한반도 바람자원의 TMM년도를 선택하는 절차이다. 이러한 목적으로 제안될 두 단계의 계산 알고리즘을 "2단계 TMY 구축알고리즘"이라 하고, 이를 통해 TMY를 구하는 절차는 다음과 같다.

2.2. 기상관측 지역의 기상요소 FS통계

1998년에서 2008년 기간 동안 각 기상관측소($k = 1, \ldots, 77$)에서 측정된 시간별 기상자료로부터 얻은 일평균풍속(X_1), 일풍정합계(X_2), 일평균최대풍속(X_3), 일평균순간최대풍속(X_4) 데이터를 사용하여 FS통계를 다음과 같이 정의한다.

$$\mathrm{FS}_k(x_i; y, m) = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} |\mathrm{CDF}_k(x_{ij}; m) - \mathrm{CDF}_k(x_{ij}; y, m)|, \quad i = 1, \ldots, 4, \tag{2.1}$$

여기서 $\mathrm{CDF}_k(x_{ij}; m) = k$번째 기상관측소에서 11년간 m번째 월에서 관측된 변수 X_i의 누적도수분포, $\mathrm{CDF}_k(x_{ij}; y, m) = k$번째 기상관측소에서 y년의 m번째 월에서 관측된 변수 X_i의 누적도수분포, N = 누적도수분포의 계급의 수, $x_{ij} = X_i$ 변수 관측치들의 누적도수분포에서 j번째 계급의 하한을 나타낸다. 따라서 N이 관측 값의 수와 동일하면 CDF 함수는 변수 X_i의 경험적 분포함수(empirical distribution function)와 같아진다.

식 (2.1)에서 정의된 FS통계는 주어진 기상관측소에서 기상요소(X_i)의 관측 자료가 가진 y년(1998년~2008년)에 포함된 $m(m = 1, \ldots, 12)$월의 빈도분포와 동일 관측소에서 11년 동안 관측된 m월의 빈도분포의 유사성을 나타내는 통계적측도이다. 그리고 k번째 기상관측소에서 y년도에 관측된 m월의 바람자원($X_1, \ldots, X_4$) 빈도분포와 동일 관측소에서 11년 동안 관측된 m월의 바람자원들 빈도분포간의 유사성은 각 기상요소의 자료로부터 계산된 FS통계의 가중합으로 측정된다. FS 가중합은 다음과 같이 정의한다.

$$\mathrm{WS}_k(y, m) = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} w_k(i)\mathrm{FS}_k(x_i; y, m), \tag{2.2}$$

여기서, $M = 4$이고 $w_k(i)$는 k번째 기상관측소에서 기상요소(X_i)가 가지는 바람자원의 변동에 대한 가중치를 나타내며, $\sum_{i=1}^{M} w_k(i) = 1$이다. 본 알고리즘에서 각 변수의 가중치 $w_k(i)$는 기상관측소별로 다음과 같이 계산하였다. k번째 기상관측소 바람자원($X_1, \ldots, X_4$)의 11년 관측 자료들을 대상으로 주성분분석을 실시하여 얻은 첫 번째 주성분의 계수($c_k(i)$)들의 합이 1이 되도록 표준화시켜 얻은 값을 $w_k(i)$로 사용한다. 따라서 $w_k(i)$는 다음과 같이 정의된다.

$$w_k(i) = \frac{c_k(i)}{\sum_{i=1}^{4} c_k(i)}, \quad i = 1, \ldots, 4;\ k = 1, \ldots, 77. \tag{2.3}$$

참고로 주성분분석에서 총 분산에 대한 첫 번째 주성분의 설명비율이 가장 낮은 지역은 해남였으며, 설명비율은 71.38%였다. 바람자원 TMY 구축알고리즘의 첫 번째 절차는 4개 기상요소(X_i)의 FS통계를 대상기간(y년의 m월)에 맞게 각 기상관측소 (k)별로 구하고 이들의 가중합인 WS통계도 함께 계산하는 절차이다. 예를 들어, 표 2.1은 부산지역에서 1월에 관측된 일별풍속의 단기($\mathrm{CDF}_{BUSAN}(x_{1j}; y, 1)$, y년에 해당되는 단기)와 11년 장기누적도수분포($\mathrm{CDF}_{BUSAN}(x_{1j}; 1)$)를 나타낸다.

표 2.1에서 첫 번째 열(column)은 누적도수분포를 구성하는 10개 계급의 하한(x_{1j})값을 나타내고, 이 표의 2열~12열은 계급의 하한을 사용하여 얻은 각 년도(y년)의 단기누적도수분포이다. 그리고 이들 도

표 **2.1.** 부산지역 일평균풍속의 1월 장·단기 누적도수분포함수: $\mathrm{CDF}_{BUSAN}(x_{1j};1) = \mathrm{CDF}$

풍속	CDF											CDF
	98년	99년	00년	01년	02년	03년	04년	05년	06년	07년	08년	
1.00	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
1.72	31	29	30	30	30	31	29	30	30	29	30	30
2.44	29	24	27	30	30	29	21	27	17	23	27	26
3.16	21	18	22	24	26	24	8	19	10	13	21	19
3.88	13	12	15	11	17	16	4	6	5	8	6	10
4.60	9	0	5	7	8	13	1	3	2	4	3	5
5.32	4	0	1	3	7	8	1	1	0	1	1	2
6.04	2	0	0	2	3	5	0	0	0	1	1	1
6.76	1	0	0	1	2	2	0	0	0	0	0	1
7.48	1	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0

표 **2.2.** 부산지역 일평균풍속의 연·월별 FS통계표

Year	Month											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1998	1.65	3.31	1.42	0.89	0.97	4.64	4.00	2.04	0.64	2.56	1.50	0.75
1999	1.49	0.96	0.79	0.72	2.25	0.87	3.60	0.92	1.29	1.44	0.99	1.76
2000	1.30	1.28	1.10	1.46	1.68	1.40	1.64	1.18	2.89	1.14	1.03	1.14
2001	1.45	0.93	2.37	1.23	1.15	2.91	0.60	1.58	2.16	1.68	1.59	0.85
2002	3.05	0.96	0.92	1.59	1.95	1.87	1.85	2.98	1.39	2.22	3.03	4.89
2003	3.55	1.07	0.89	1.63	2.79	1.56	2.50	1.72	1.45	1.23	0.85	1.62
2004	3.05	0.94	2.26	2.03	1.07	3.23	1.19	2.36	0.91	1.09	2.76	2.31
2005	1.15	0.74	1.38	0.77	3.50	1.47	3.46	1.82	1.17	1.77	2.05	1.45
2006	3.06	0.96	1.06	0.87	0.96	3.26	2.07	2.14	1.33	2.50	2.75	3.11
2007	1.55	2.04	0.89	1.07	1.52	0.67	2.56	0.46	0.97	1.17	0.98	0.67
2008	1.25	1.35	1.36	1.83	1.25	1.29	1.19	0.98	3.60	2.45	0.70	1.14

수의 평균으로 얻은 장기누적도수분포를 표 2.1의 마지막 열에 나타내었다. 이러한 장·단기 누적도수분포표를 1월 뿐 아니라 2월~12월의 것도 각각 만들었다(각 월마다 적절한 계급하한(x_{ij})값을 선정).

누적도수분포표로부터 얻은 $\mathrm{CDF}_{BUSAN}(x_{1j};y,m)$와 $(\mathrm{CDF}_{BUSAN}(x_{1j};m))$ 값을 $(m=1,\ldots,12)$ 식 (2.1)에 적용시켜 부산지역 일평균풍속의 연·월별 FS통계값($\mathrm{FS}_{BUSAN}(\text{Wind Speed};y,m)$)을 계산한 결과는 표 2.2에 나타내었다. 다른 바람자원 변수인 일풍정합계, 일평균최대풍속, 일평균최대순간풍속의 연·월별 FS통계 값들도 함께 계산하여 FS통계의 가중합인 $\mathrm{WS}_{BUSAN}(y,m)$을 식 (2.2)에 의해 구했다. 표 2.3은 부산지역 바람자원의 WS통계표이며, 식 (2.2)의 적용에 필요한 4개의 기상요소변수의 가중치는 식 (2.3)으로 구하였다. 부산지역 바람자원 자료의 주성분분석으로부터 계산된 각 변수의 가중치는 $w_{BUSAN}(1)=0.25$, $w_{BUSAN}(2)=0.25$, $w_{BUSAN}(3)=0.26$, $w_{BUSAN}(4)=0.24$였다. 표 2.3에 나타난 특정 월의 열에서 WS통계값이 작은 연도 일수록 해당 월의 11년간 바람자원의 개황을 더 일치되게 설명하는 것으로 해석한다. 예를 들어 표 2.3의 둘째 열(1월)에서 2005년과 2003년이 각각 최소와 최대 WS통계 값을 가졌다. 따라서 2005년의 1월이 부산지역에서 11년(1998년~2008년)동안 발생한 바람자원의 1월 개황을 가장 잘 설명하는 반면에 2003년 1월이 최악의 설명력을 가진 것으로 해석할 수 있다. 이러한 해석은 그림 2.3에 의해 설명이 가능하다. 그림 2.3은 표 2.3에서 나타낸 월별 최소(or typical) 및 최대(or worst) WS통계값을 가진 년도에 해당되는 것들(2개년)의 부산지역 월평균 풍속과

표 **2.3.** 부산지역 기상요소들의 연·월별 FS통계의 가중합: WS통계표

Year	Month											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1998	1.64	2.53	1.72	1.03	0.90	3.74	2.91	2.03	1.03	2.35	1.60	1.55
1999	1.85	1.27	1.28	1.21	2.26	1.07	2.79	1.04	1.49	2.05	1.47	2.27
2000	1.47	1.18	1.23	1.64	1.80	1.37	1.59	1.02	2.13	1.18	0.79	1.22
2001	1.52	1.24	1.97	1.01	1.07	2.31	0.94	1.34	1.86	1.33	1.70	1.24
2002	2.02	1.59	0.95	1.53	1.58	1.32	1.77	2.78	1.24	2.60	3.93	4.53
2003	3.75	1.21	1.10	1.52	2.74	1.41	1.96	1.49	1.36	0.92	1.02	1.49
2004	2.59	1.02	1.81	2.00	1.30	2.53	1.08	1.99	0.83	1.00	2.30	2.11
2005	1.00	0.94	1.27	0.64	3.15	1.06	2.93	1.64	1.07	1.66	1.95	1.35
2006	3.30	0.87	1.15	0.78	1.10	2.53	1.63	2.04	1.08	2.14	2.63	2.44
2007	1.55	1.70	0.83	1.20	1.62	0.73	2.22	1.00	0.88	1.21	1.11	0.90
2008	1.13	1.20	1.61	1.60	1.20	1.22	1.37	1.14	2.90	2.26	0.81	1.29

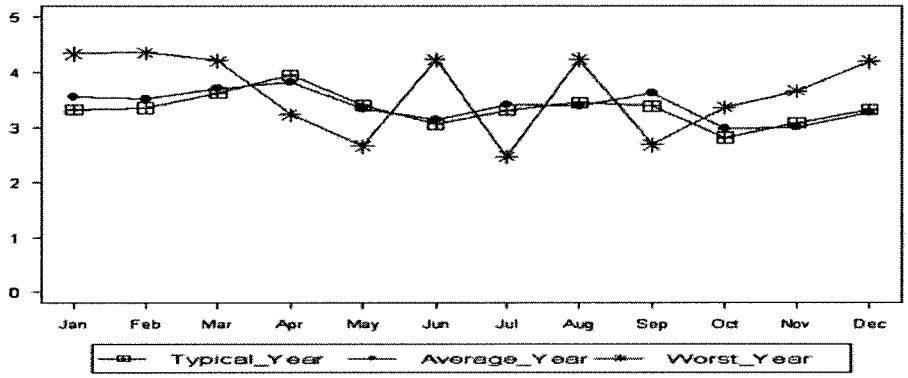

그림 **2.3.** 최소 및 최대 WS통계값에 해당되는 년도(typicalyear와 worstyear)의 월평균풍속과 11년 자료의 월평균(averageyear) 풍속의 비교: 부산지역

11년 월평균(average)풍속을 월별로 비교한 그림이다. 그림 2.3에서 최대간극을 나타낸 월은 9월 이었고, t-검정 (3장 참조)에 의하면 최대간극이 유의하지 않았다(p-값 = .113). 이 검정 결과는 그림 2.3에서 최소 WS통계값을 가진 연도들의 월평균풍속선이 11년 자료의 월평균풍속선과 그의 일치함을 의미한다.

따라서 한반도 바람자원의 개황에 대해 특정 연/월이 가진 설명력은 WS 앞에서 설명된 계산절차를 차례로 적용하여 전국 77개 기상관측소 지역의 WS통계표를 작성하는 것이 한반도 통계에 의해 적절히 측정될 수 있음을 알 수 있다. 바람자원의 TMY 구축알고리즘의 첫 번째 단계이다. 첫 번째 단계에서 필요한 계산들을 차례로 요약하면 다음과 같다.

[한반도 바람자원 TMY 구축알고리즘: 1단계]

- 각 기상요소(X_i)의 관측소별/월별 단기 및 장기 누적도수분포표
  작성(4(기상요소) × 77(관측소) × 12(월) = 3696개)
- 각 기상요소(X_i)의 관측소별 FS통계표 계산(4(기상요소) × 77(관측소) = 308개)
- 각 관측소 소재 지역별 기상요소 가중치 계산 및 WS통계표 계산(77개)

표 **2.4.** 한반도 바람자원의 연·월별 TWS통계표

Year	Month											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1998	6.77	6.12	6.20	10.43	8.20	7.71	8.23	7.05	6.35	5.58	5.96	6.05
1999	6.51	5.77	7.26	6.08	7.10	6.95	8.04	6.65	6.58	6.66	6.55	7.40
2000	7.42	8.81	8.50	8.59	7.38	8.11	7.15	6.90	8.39	7.32	7.06	6.57
2001	6.63	6.36	7.17	6.40	6.78	6.76	6.78	7.27	7.56	7.01	7.11	6.45
2002	8.32	6.30	6.44	6.42	7.44	6.69	6.77	7.47	6.40	9.23	11.46	6.58
2003	6.41	9.24	9.61	6.41	7.92	6.14	7.05	6.08	6.53	7.65	6.82	8.02
2004	5.97	8.58	5.30	6.11	5.50	7.03	5.70	6.20	6.02	6.97	6.02	6.59
2005	6.67	6.36	6.73	6.39	5.31	5.66	6.70	5.95	5.93	5.86	5.63	9.18
2006	7.61	4.55	6.05	7.11	5.58	5.83	6.02	7.14	6.48	7.85	7.93	7.29
2007	6.91	5.98	5.09	5.71	8.41	6.14	6.23	7.52	6.74	5.36	5.38	5.30
2008	6.42	7.56	7.29	5.99	6.01	8.61	6.96	7.57	8.82	6.32	5.89	6.35

2.3. 한반도 바람자원의 후보 TMM년도 선택기준

바람자원의 TMY 구축에 필요한 두 번째 계산단계는 다음과 같이 이루어진다. 먼저 77개 기상관측소 지역의 WS통계표를 표준화한 후 이들을 합산하여 한반도 전역의 바람자원의 TMM 후보년도(5개년도)를 선택하는 것이다. 연·월별 기상자료가 가진 한반도 전역의 바람자원에 대한 설명력은 77개 관측소지역에서 계산된 WS통계값($\mathrm{WS}_k(y,m)$)들의 표준화 및 합산으로 계산된다. 여기서 각 관측소에서 계산된 WS통계 값의 표준화(SWS통계)는 다음의 식으로 얻어진다.

$$\mathrm{SWS}_k(y,m)=\frac{\mathrm{WS}_k(y,m)}{\sum_{l=1}^{11}\mathrm{WS}_k(y(l),m)},\quad k=1,\ldots,77,\ m=1,\ldots,12. \tag{2.4}$$

여기서 $y(l)$은 1998년에서 2008년 중에서 l번째로 빠른 연도를 나타낸다. 그리고 77개 관측소의 연·월별 SWS통계의 합으로 계산되는 TWS통계는 다음과 같다.

$$\mathrm{TWS}(y,m)=\sum_{k=1}^{77}\mathrm{SWS}_k(y,m). \tag{2.5}$$

TWS통계는 특정 연·월이 지닌 한반도 바람자원에 대한 정보(또는 설명력)를 나타내며, 그 값이 작을수록 정보는 더 많은 것으로 해석한다. 여기서 표준화 작업은 각 관측소의 WS통계가 TWS통계의 계산에 미치는 영향을 균등하게 하는 효과를 가지게 하기 위한 것이다. 표 2.4는 위의 계산 절차에 따라 77개 관측소 지역의 WS통계표들을 각각 표준화하고 합산하여 얻은 연·월별 TWS통계를 나타낸 표이다. 이미 정의한 것과 같이 TWS통계는 특정자료가 지닌 한반도 바람자원에 대한 정보(또는 설명력)의 크기를 측정한다. 따라서 한반도 바람자원의 TMM 후보년도(5개년도)는 최소 TWS통계값 기준으로 선택하는 것이 바람직하다. 즉 표 2.4의 각 열(column)에서 TWS통계 값이 작은 순으로 다섯 개를 고르고, 그 값에 해당하는 연도를 선택하여 TMM 후보년도로 선택한다. 이러한 선택법을 표 2.4의 각 열에 적용하여 얻어낸 결과는 표 2.5에 나타나있다. 표 2.5에 의하면 1월의 TMM 후보년도 5개는 (1999년, 2001년, 2003년, 2004년, 2008년)이며, 2월의 TMM 후보년도는 (1998년, 1999년, 2002년, 2006년, 2007년)이다.

2.4. TMM년도의 최종 선택기준

앞 절에서 구한 5개의 TMM 후보년도들 중에서 1개의 TMM 년도를 최종적으로 선택하기 위해서는

표 2.5. 월별 TMY 후보 5개년도

Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1999	1998	1998	1999	2001	2002	2002	1999	1998	1998	1998	1998
2001	1999	2002	2004	2004	2003	2004	2000	2002	1999	2004	2000
2003	2002	2004	2005	2005	2005	2005	2003	2004	2005	2005	2001
2004	2006	2006	2007	2006	2006	2006	2004	2005	2007	2007	2007
2008	2007	2007	2008	2008	2007	2007	2005	2006	2008	2008	2008

4개 기상요소(풍속 $= X_1$, 풍정 $= X_2$, 최대풍속 $= X_3$, 최대순간풍속 $= X_4$)에 대해 TMM 후보년도의 자료와 11년(1998년~2008년)동안 관측된 자료의 차이(또는 일치관계)를 측정하는 통계가 필요하다. 이러한 목적에 부합하는 통계로서 각 기상요소(X_i)의 RMSD를 사용할 수 있으며, RMSD는 다음 식으로 정의된다.

$$\mathrm{RMSD}_{x_i}(y,m) = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{d=1}^{n}(\overline{x}_i(y,m,d) - \overline{x}_i(m,d))^2}, \quad i = 1,\ldots,4, \tag{2.6}$$

여기서 $\overline{x}_i(y,m,d) =$ 후보년도인 y년의 m월/d일 77개 관측소에서 관측한 기상요소 X_i의 일평균값, $\overline{x}_i(m,d) = m$월/d일 77개 관측소에서 11년 동안 관측한 기상요소 X_i의 일평균값, n은 m월에 포함된 날짜 수이다.

단위가 서로 다른 기상요소들의 RMSD를 표준화시키는 방법에는 Pissimanis 방법 (Pissimanis 등, 1988)이 일반적으로 사용되며, 이 방법을 사용하여 RMSD의 표준점수 $S_{x_i}(y,m)$를 계산한다.

$$S_{x_i}(y,m) = \frac{\min\limits_{j=1,\ldots,5} \mathrm{RMSD}_{x_i}(y(j),m)}{\mathrm{RMSD}_{x_i}(y,m)}, \quad j = 1,\ldots,5, \tag{2.7}$$

여기서 $y(j)$는 5개 후보년도를 시기별로 순서화했을 때 얻어지는 j번째 후보년도를 나타낸다. 식 (2.7)에서 분자는 특정 월(m월)의 5개 TMM 후보년도에서 계산한 기상요소 X_i의 RMSD값들 중에서 최소값을 나타낸다. 따라서 $S_{x_i}(y,m)$는 기상요소의 단위와 무관하게 최대값이 1이 되도록 표준화시키며, $S_{x_i}(y,m) = 1$의 의미는 y년도 자료에서 계산된 $\mathrm{RMSD}_{x_i}(y,m)$값이 TMM 후보년도의 RMSD_{x_i} 값들 중에서 최소라는 것이다. 표 2.5에 구해진 모든 TMM 후보년도를 대상으로 표준점수 $S_{x_i}(y,m)$를 기상요소별로 구한 후 이들의 가중합을 다음의 식으로 계산한다.

$$S(y,m) = \sum_{i=1}^{4} w_{x_i} S_{x_i}(y,m). \tag{2.8}$$

$S(y,m)$을 TMM점수라 부르고, 이 점수기준에 의해 TMM년도를 최종적으로 선택한다. 즉 m월($m = 1,\ldots,12$)의 TMM년도가 q년이면 다음을 만족시킨다.

$$S(q,m) = \max S(y,m). \tag{2.9}$$

식 (2.8)에 사용될 가중치 w_{x_i}는 11년간(1998년~2008년) 77개 관측소에서 관측된 4개 기상요소의 일평균자료를 주성분분석으로 계산한다. 즉, 첫 번째 주성분의 계수들의 합이 1이 되도록 조정하여 얻은 가중치이며, 가중치들은 $w_{x_i} = 0.25$, $i = 1,\ldots,4$로 동일하였다. 표 2.6에 구해진 TMM 점수에 최종 TMM 선택기준 식 (2.9)를 적용시키면 한반도 바람자원의 TMM년도를 구할 수 있다. 표 2.7은 이러한 절차로부터 구한 최종 TMM년도를 월별로 나열한 것이다. 앞에서 설명된 일련의 계산알고리즘

표 **2.6.** TMM 후보년도들의 TMM 점수

TMM 후보	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1998			0.91							0.70	0.74	0.95
1999	0.90	0.73						0.60				
2000												
2001					0.89							
2002		0.90	0.97			0.85	0.63		0.97			0.97
2003	0.80			0.90		1.00		0.84	0.59			
2004	0.92		0.98	1.00	0.83		0.63	0.92	0.87	0.69	0.74	0.94
2005	0.92	0.82		0.69	1.00	0.88	1.00	0.92	0.64	1.00	0.98	
2006		1.00	0.91		0.85	0.88	0.68	0.89	0.99			
2007		0.87	0.83	0.93	0.00	0.94	0.78			0.72	0.94	0.78
2008	1.00			0.85	0.79					0.75	0.87	0.96

표 **2.7.** 한반도 바람자원의 TMM년도

Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2008	2006	2004	2004	2005	2003	2005	2004	2006	2005	2005	2002

에 의해 얻은 TMM년도를 표 2.7에 나타내었다. 그리고 표 2.7의 TMM년도에 해당되는 바람자료를 1월(2008년도 1월의 바람자료)에서 12월(2002년도 12월의 바람자료)까지 차례로 정리·연결하여 구축한 1년 치 자료를 한반도 바람자료 TMY라 한다. 이러한 절차는 TMY 구축 계산알고리즘의 두 번째 단계에 해당되는 것으로 본 절에서 설명된 일련의 통계계산 절차를 요약하면 다음과 같다.

[한반도 바람자원 TMY 구축알고리즘: 2단계]

- 표준화된 WS(SWS)통계표 계산(77개)
- 77개 SWS통계표를 합산하여 얻은 TWS통계표로부터 TMM 후보년도(월별 5개씩) 선정
- 기상요소별 RMSD 및 표준점수(Pissimanis 방법) 계산
- 기상요소별 표준점수의 가중합(주성분분석에 의한 가중치 계산)인 TMM 점수를 기준으로 최종 TMM 선택
- TMY 구축: 최종 TMM 자료의 정리 및 연결

따라서 한반도 바람자원의 TMY 구축알고리즘은 2.2절과 2.4절에서 각각 설명된 1단계(77개 기상관측소별 FS통계 계산단계)와 2단계(한반도 바람자원 TMM 계산알고리즘)로 구성된다. 이런 이유로 본 연구에서 제안된 알고리즘은 2단계의 계산을 필요로 하는 알고리즘이며, 기존의 TMY 구축알고리즘(본 논문의 1단계 계산알고리즘에 해당)과 차별성을 보이는 것이다.

3. TMY의 대표성 평가

본 연구에서 제안된 2단계 계산알고리즘은 한반도 바람자료 TMY가 1998년에서 2008년 기간 동안의 바람자료의 빈도분포와 일별 변동패턴 및 기상요소들이 가진 상호연관성에 대한 정보를 최대한 포함하도록 개발되었다. 본 연구에서 구축한 TMY가 이러한 조건들을 만족시키는 지에 대한 검정은 곧 TMY의 유용성에 대한 평가이다.

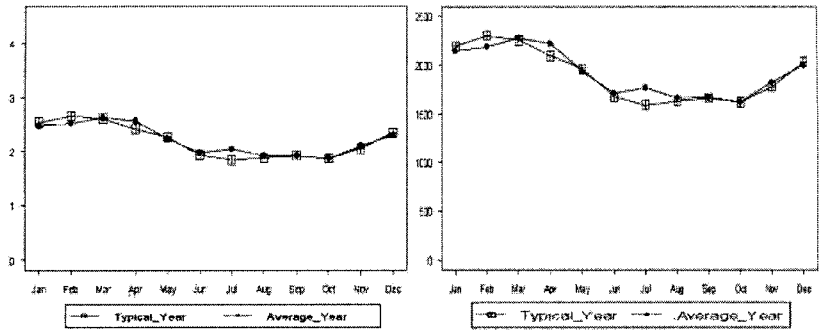

그림 **3.1.** TMY와 1998년-2008년의 월평균풍속비교(왼쪽)와 월평균풍정비교(오른쪽)

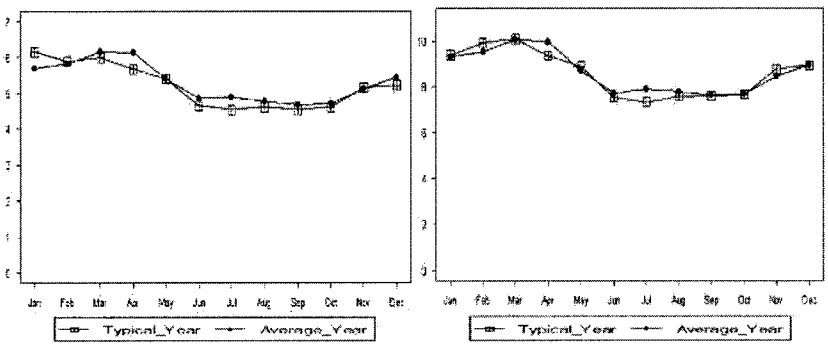

그림 **3.2.** TMY와 1998년-2008년의 월평균최대풍속비교(왼쪽)와 월평균최대순간풍속비교(오른쪽)

표 **3.1.** 최대 간극에 대한 t-검정결과 ($H_0 : \mu_{X_i} = \mu_{average}(X_i),\ i = 1, \ldots, 4$)

기상요소	t-통계값	p-값
풍속(X_1)	−0.6297	0.2668
풍정(X_2)	−0.6278	0.2674
최대풍속(X_3)	−0.7624	0.2259
최대순간풍속(X_4)	1.0041	0.1617

3.1. TMY의 분포와 11년 자료 분포의 비교

한반도 바람자원 TMY의 용도는 국내·외 연구소 등에서 바람자원의 연구 및 예측에 사용될 기상통계 자료이다. 이를 위해 11년(1998년~2008년)에 걸쳐 지속적으로 발생된 월/계절의 기상적인 특징을 충분히 반영할 수 있도록 12개(1월~12월)의 TMM을 선택하였고, 이들 자료를 연결시켜 얻은 1년 치 바람자료를 TMY로 구축했다. 그림 3.1(왼쪽)은 TMY의 풍속(X_1) 월평균(typical year)과 11년 자료(1998년에서 2008년의 바람자료)로부터 계산된 풍속 월평균(average year) 쌍을 함께 나타낸 것이다. 풍속 외 3개의 기상요소(풍정, 최대풍속, 순간풍속) = (X_2, X_3, X_4)들의 월평균 쌍들은 그림 3.1(오른쪽)~3.2에 나타내었다. 그림에 의하면 기상요소의 월평균 쌍들 간에는 차이가 거의 없으며, 그림의 월별 변동패턴은 유사한 것으로 나타났다.

표 3.1은 이와 같은 현상을 검정한 결과이다. 각 기상요소의 그림에서 TMY와 11년 자료의 월평균 간의 차이가 가장 큰 월에 대해 그 간극의 유의성을 t-검정(one sample t-test)한 결과를 표 3.1에 나타

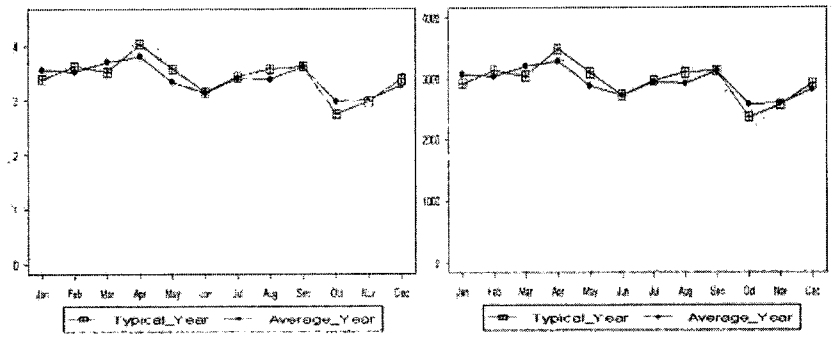

그림 **3.3.** TMY와 1998년-2008년의 부산지역 월평균풍속비교(왼쪽)와 월평균풍정비교(오른쪽)

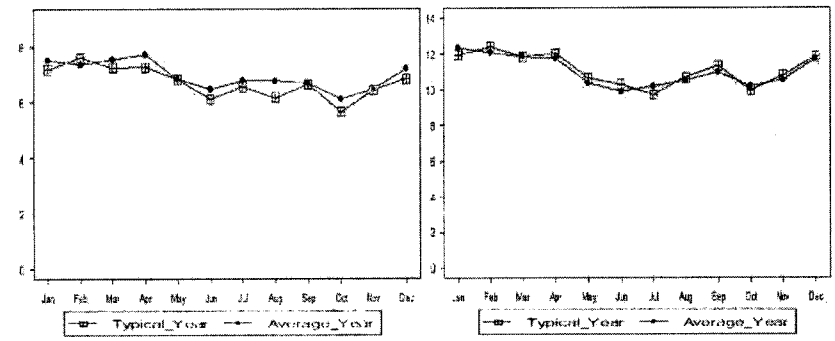

그림 **3.4.** TMY와 1998년-2008년의 부산지역 월평균최대풍속비교(왼쪽)와 월평균최대순간풍속비교(오른쪽)

표 **3.2.** 최대 간극에 대한 t-검정결과 ($H_0 : \mu_{X_i} = \mu_{average}(X_i)$, $i = 1, \ldots, 4$): 부산지역

기상요소	t-통계값	p-값
풍속(X_1)	1.0485	0.151377
풍정(X_2)	1.0512	0.150780
최대풍속(X_3)	−1.8287	0.038695
최대순간풍속(X_4)	−0.8499	0.201044

내었다. 최대 간극의 유의성에 대한 t-검정은 귀무가설이 $H_0 : \mu_{X_i} = \mu_{average}(X_i)$, $i = 1, \ldots, 4$이며, TMY(또는 TMM)자료를 사용하여 검정하였다.

여기서 μ_{X_i}는 간극이 가장 큰 월의 TMY분포에서 기상요소 X_i의 모평균이고, $\mu_{average}(X_i)$는 해당 월에서 관측된 X_i에 대한 11년 자료의 평균값을 나타낸다. 표 3.1에 의하면 TMY와 11년 자료의 월평균에는 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 구축한 한반도 바람자료 TMY는 11년 바람자료가 가진 기상요소들의 월평균분포 (그림 2.2참조)에 대한 정보를 충분히 가지고 있는 것으로 나타났다.

한편 각 관측소 지역(77개소)의 11년 바람자료에 표 2.7의 TMY년도를 적용시키면, 해당관측소 지역의 바람자원 TMY(77개)을 얻을 수 있다. 그림 3.3~3.4는 77개 관측지역 TMY 중에서 부산지역의 TMY를 선택하여, 동일지역의 11년 자료와 기상요소 월평균을 비교한 그림이다. 이들 그림에 의하면 두 자료에서 계산된 기상요소(X_i)의 월평균은 차이가 없으며, 그림의 월별 변동패턴도 유사한 것으로 나타났다. 이에 대한 검정결과는 표 3.2에 나타나있다. 따라서 본 연구에서 구축된 TMY는 한반도 바

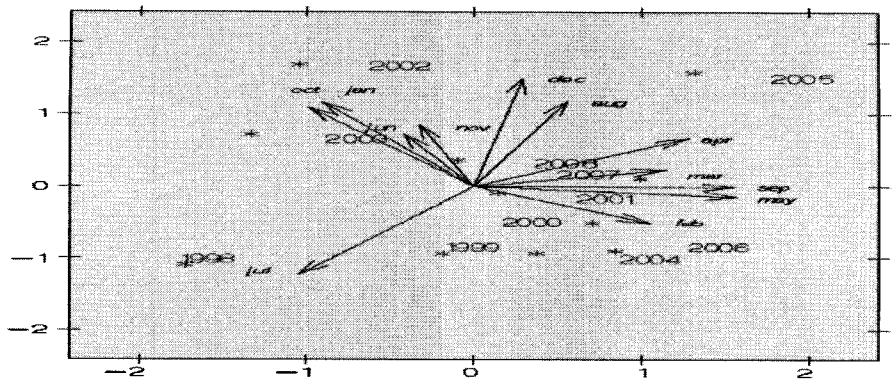

그림 3.5. TRY1계산에 사용된 Ward의 계보적 군집분석결과의 행렬도

람자원 뿐 아니라 77개 각 관측소 지역의 11년 바람자료의 분포를 동시에 대표할 수 있는 특성을 가졌다. 즉 TMY는 한반도 및 각 기상관측소지역의 기상요소가 가진 일별(또는 시간별) 변동패턴의 특성을 유지하면서도 월(또는 계절)평균이 장기간 기상자료의 것과 유사한 값을 가져, 한반도 또는 각 기상관측소지역의 기상현상의 예측 및 수치 모의실험에서 입력 자료로 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

3.2. TMY와 TRY의 비교

3.1절의 내용과 같이 본 연구에서 구축된 TMY는 장기간 자료의 분포 및 변동패턴을 정확하게 대표하는 것으로 나타났으나, TMY의 유용성 검정에는 TMY 방법과 타 방법과의 비교 평가가 추가로 필요하다. 이 절에서는 TMY를 대신할 수 있는 두 종류의 바람자료를 2단계 TMY 구축알고리즘과 상이한 기법에 의해 구축하고, 이들과 TMY를 대표성(11년 바람자료에 대한 대표성) 측면에서 비교 평가하고자 한다. 이를 위해 군집분석을 사용하여 두 종류의 바람 자료인 TRY1과 TRY2를 새로이 구축하였으며, 이들과 TMY를 대표성 측면에서 비교하였다. 본 연구에서 TRY1과 TRY2로 명명된 바람자료들의 계산절차는 다음과 같다.

[TRY1 구축알고리즘]

- 1998년에서 2008년으로 구성된 11개년도(개체)를 대상으로 군집분석: 각 연도의 속성인 각 월의 평균풍속을 군집변수(12개 변수)로 하여 K개 군집형성.
- 군집 $k(k = 1, \ldots, K)$의 centroid 벡터와 그 군집에 포함된 연도의 군집변수벡터(월평균풍속)간의 유클리드(Euclidean)거리들을 계산하여 각 군집에서 최소 유클리드거리를 가진 연도(y_k) 선택.
- 각 군집을 대표하는 y_k년도($k = 1, \ldots, K$)의 바람자료(K개)의 합을 평균하여 얻은 1년간 자료를 사용하여 TRY1 구축.

본 연구의 TRY1은 알고리즘에 따라 다음의 절차로 계산되었다. 첫째, Ward의 계보적 군집방법에 의해 얻은 두 개의 군집($K = 2$)은 각각 1998년, 2002년, 2003년과 1999년, 2000년, 2001년, 2004년, 2005년, 2006년, 2007년, 2008년이었다. 둘째로, 유클리드거리에 의해 구한 두 군집의 대표년도는 각각 2003년과 2000년이었다. 마지막으로, 2000년과 2003년에서 관측된 바람자료들을 관측된 시점별로 평균하여 TRY1을 구축하였다. 그림 3.5는 TRY1계산에 사용된 군집분석결과를 행렬도(biplot)로 나타낸 것이다. 그림 3.5에 의하면 1998년, 2002년, 2003년으로 구성된 군집의 대표년도는 2003년이며,

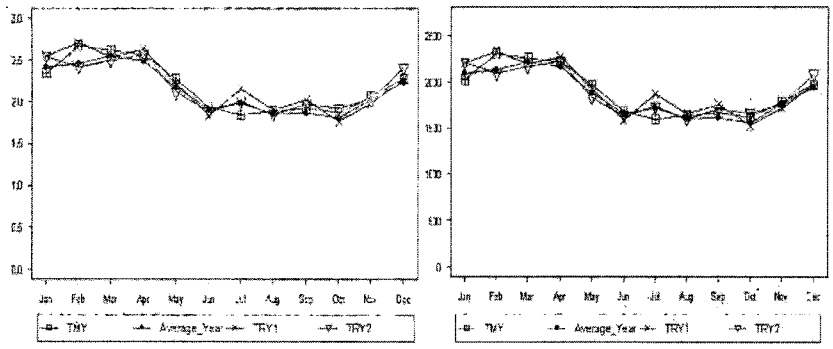

그림 **3.6.** 월평균풍속 비교(왼쪽)와 월평균풍정 비교(오른쪽)

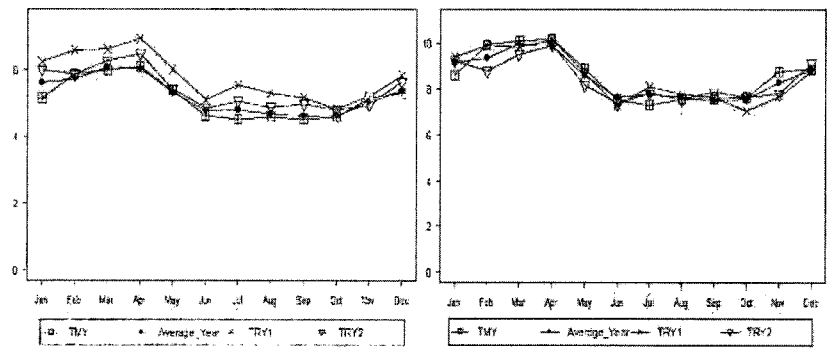

그림 **3.7.** 월평균최대풍속 비교(왼쪽)와 월평균순간최대풍속 비교(오른쪽)

1월 및 7월, 10월의 풍속패턴이 타 연도들의 군집과 많은 차이가 있음을 보여주고 있다.

[TRY2 구축알고리즘]

- 1998년에서 2008년으로 구성된 11개년도(개체)를 대상으로 군집분석: 각 연도의 속성인 계절별평균풍속(4개), 계절별평균풍정(4개), 계절별평균최대풍속(4개), 계절별평균 순간최대풍속(4개), 계절별평균기압(4개), 계절별평균습도(4개), 계절별평균온도(4개)를 군집변수(총 28개)로 하여 K개 군집 형성
- 군집 $k(k = 1, \ldots, K)$에 속한 년도들의 군집변수벡터와 그 군집의 centroid 벡터간의 유클리드 거리를 계산하여 각 군집에서 최소 유클리드거리를 가진 연도(y_k) 선택
- 각 군집을 대표하는 y_k년도($k = 1, \ldots, K$)의 바람자료(K개)의 합을 평균한 1년간 자료를 사용하여 TRY2 구축

위의 알고리즘에 따라 TRY2는 다음의 절차로 계산되었다. 첫째, Ward의 계보적 군집방법에 의해 얻은 두 개의 군집($K = 2$)은 각각 1998년, 1999년, 2001년, 2003년, 2004년, 2007년, 2008년과 2000년, 2002년, 2005년, 2006년이었다. 둘째로, 유클리드거리에 의해 구한 두 군집의 대표년도는 각각 1999년과 2000년이었다. 마지막으로, 1999년과 2000년에서 관측된 바람자료를 관측시점별로 평균하여 TRY2를 구축하였다.

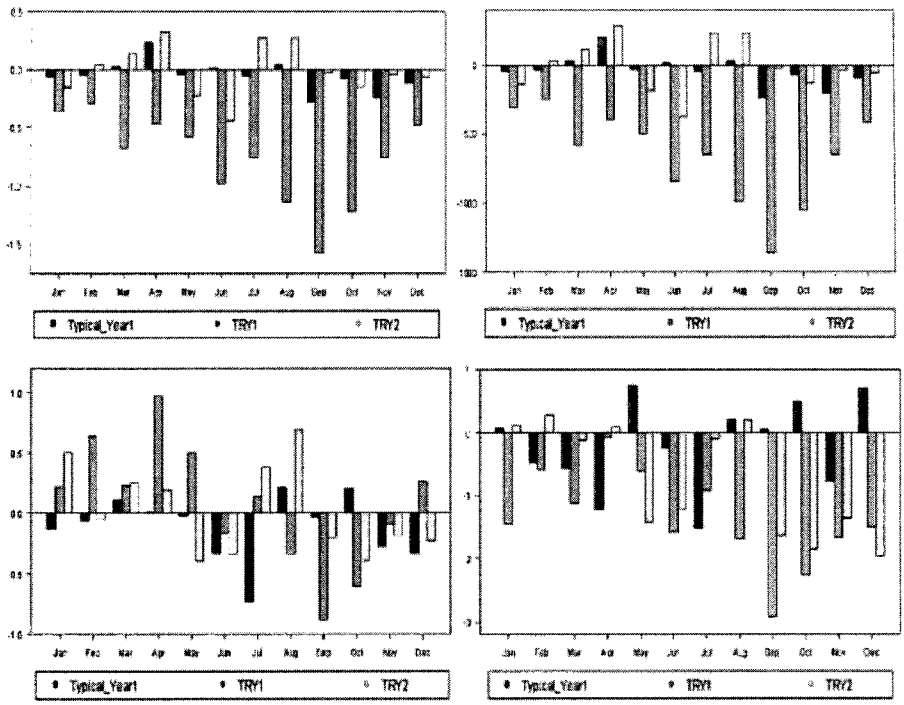

그림 **3.8.** 서귀포 지역의 각 기상요소 추정값의 아노말리(anormaly)그림: 첫째, 둘째, 셋째 막대의 높이들은 TMY와 11년 자료의 월평균의 차, TRY1과 11년 자료의 월평균의 차, TRY2와 11년 자료의 월평균의 차를 차례로 나타냄.

TMY의 대표성 평가를 위해 비교 대상으로 고안한 TRY1과 TRY2 외에도 군집변수의 선택에 따라 여러 종류의 TRY를 구축할 수 있다. 군집변수 선택과 관련된 통계적 기준이나 절차는 존재하지 않으나, 한반도 바람자원의 TRY를 얻기 위해서는 한반도의 풍속과 관계가 있는 변수들이 군집변수가 되어야 한다. 이러한 점에서 군집변수(12개 변수)로 월평균풍속을 사용한 TRY1은 월 또는 계절에 따라 변동이 심한 한반도 바람자원을 충분히 반영할 수 있는 TRY가 될 것이다. 한편 TRY2는 기상학적으로 바람자원과 관련이 있는 모든 변수들을 군집변수로 사용한 것이다. 따라서 TRY2는 군집분석법으로 얻을 수 있는 TRY중에서 한반도의 바람자원을 가장 잘 대표할 수 있는 것이 된다.

그림 3.6~3.7은 한반도 바람자원의 기상요소별 TMY, TRY1, TRY2의 월평균을 11년 월평균값(Average Year)과 비교한 그림이다. 이들 그림은 모든 기상요소에서 TMY가 TRY1과 TRY2보다 한반도 바람자원의 11년 월평균을 더 정확하게 추정해주는 것을 보이고 있다. 이러한 현상은 관측소 지역의 바람자원 추정에서 더욱 명확하게 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 예를 들어 그림 3.8은 서귀포 지역의 11년 기상요소 월평균과 TMY, TRY1, TRY2의 서귀포 지역 자료로 부터 추정된 월평균의 차를 기상요소별로 아노말리분석을 한 결과이다. 그림에 의하면 TMY와 11년 자료의 차가 모든 기상요소에서 다른 두 자료(TRY1과 TRY2)보다 현저히 작은 값을 가짐을 알 수 있다.

이 절에서 얻은 분석 결과를 요약하면, 첫째로 군집분석을 사용한 TRY1과 TRY2 구축방법은 군집변수의 선택에 따라 군집을 이루는 구성년도들이 상이하여 대표자료(TRY)를 안정적으로 구축하는 방법으로는 부적합하다. 둘째로 TMY와 TRY들을 비교한 결과 TMY자료가 TRY들보다 한반도의 바람자 료의 월평균 및 변동패턴을 더 정확하게 추정하였다 (그림 3.6~3.7 참조). 셋째로 TMY는 TRY들과는 달리 관측소 지역(77개)의 바람자료의 월평균 및 변동패턴도 정확하게 추정하였다 (그림 3.8 참조).

표 **3.3.** TMY1의 TMM년도

Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2008	2006	2004	2004	2005	2003	2005	1998	2006	2005	2005	2002

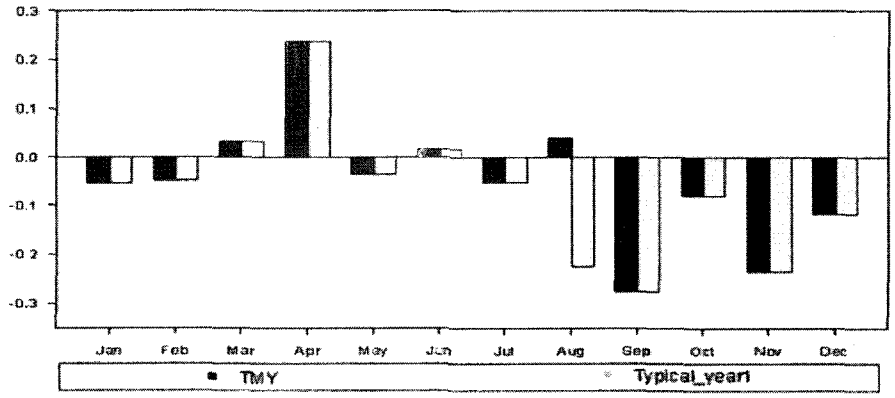

그림 **3.9.** 서귀포 지역의 TMY와 TMY1의 아노말리분석: 첫째 막대 = TMY의 아노말리, 둘째 막대 = TMY1의 아노말리

3.3. 추가변수에 대한 TMY의 안정성

이 절에서는 TMY의 안정성을 보이기 위해 새로운 기상요소의 추가가 TMY의 대표성에 미치는 영향을 평가하였다. 2.2절과 2.4절에서 제안한 2단계 TMY구축 알고리즘에 사용된 기상요소(일평균풍속, 일풍정합계, 일평균최대풍속, 일평균순간최대풍속)에 일평균습도, 일평균기압, 일평균온도를 추가하여 TMY1(7개 기상요소 사용)을 구축하였다. 알고리즘 적용에서 WS통계 및 TMM점수 계산에 사용된 기상요소별 가중치는 추성분분석 결과에 의해 일평균풍속 = 일풍정합계 = 일평균최대풍속 = 일평균순간최대풍속 = .182, 일평균습도 = 일평균기압 = 일평균온도 = .091로 두었다(습도, 기압, 온도의 가중치는 바람자원의 측면에서 풍속의 1/2배로 가정). 본 연구에서 제안한 2단계 TMY 구축알고리즘에 7개 기상 기상요소의 자료(1998년~2008년 자료)를 사용하여 얻은 TMM년도를 표 3.3에 나타내었다. 표 3.3는 TMY1과 TMY가 8월의 TMM년도에서 서로 차이가 있음을 보인다 (표 2.7 참조).

표 2.7과 3.3을 비교하면 8월만 차이가 있으며, 8월에서 TMY의 TMM년도는 2004년인 반면에 TMY1은 1998년이다. 따라서 TMY와 TMY1는 8월 바람자료에서 차이가 있다. 8월 자료를 대상으로 11년 바람자료에 대한 TMY와 TMY1의 아노말리분석을 한 결과 한반도와 77개 관측소 지역 모두에서 TMY가 TMY1 보다 더 대표성이 있는 것으로 나타났다. 11년 자료의 월평균풍속에 대한 TMY와 TMY1의 아노말리 분석을 서귀포 지역을 예로 들어 한 결과는 그림 3.9과 같다. 이 그림은 8월에서 TMY가 TMY1보다 장기간(11년) 8월 평균풍속을 더 정확하게 추정하는 것을 보이고 있다. 그림 3.10은 TMY1 구축을 위해 추가한 기상요소(습도,기압, 온도)들의 월평균값들을 11년 자료의 월평균과 비교한 그림이다. 그림 3.10에 나타난 TMY와 TMY1의 월평균값들은 8월을 제외하고는 동일하며, 8월 값들도 11년 자료 값과 거의 일치하는 것으로 나타났다. 본 절에서의 분석 결과를 요약하면, 첫째 4개의 기상요소(풍속, 풍정, 최대풍속, 최대순간풍속)를 사용하여 구축한 TMY의 대표성은 다른 기상요소를 추가한 경우보다 높게 평가되었다 (그림 3.9 참조). 둘째로, TMY의 TMM년도는 4개의 기상요소와 상관이 큰 기상요소(습도, 기압, 온도)들의 장기간 정보를 대표하는 TMM으로도 사용이 가능하다는 것을 보였다 (그림 3.10 참조).

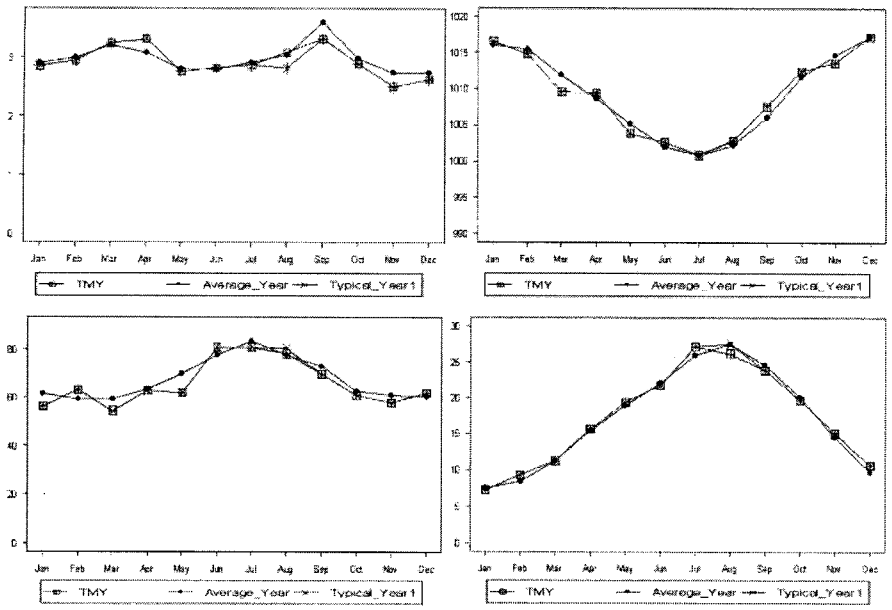

그림 **3.10.** 11년 자료(averageyear), TMY(TMY), TMY1(typicalyear1)의 월평균 풍속, 기압, 습도, 온도그림

4. 결 론

본 연구는 최근 11년(1998년~2008년)동안 전국 77개 관측소에서 측정한 한반도 바람자료를 대표할 수 있는 1년 치 자료(TMY)를 구축하는 방법에 대한 것이다. 이를 위해 FS통계 모형을 기본으로 한 2단계 TMY구축알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘의 첫째 단계는 FS와 WS통계와 같이 각 관측소의 11년 바람자료에 대한 대표성을 측정할 수 있는 통계의 생산 단계이고, 둘째 단계는 TWS통계와 TMM점수를 사용하여 11년 한반도 바람자료의 빈도분포와 일별 변동패턴 및 기상요소들 간의 상호연관성을 충분히 대표할 수 있는 TMY를 구축하는 단계이다. 이러한 두 단계의 알고리즘으로 한반도 바람자원의 TMY를 구축하였으며, 구축된 TMY의 대표성과 안정성을 다양한 방법으로 평가하였다. 그 결과 본 연구에서 제안된 TMY는 다른 기법으로 얻은 자료(TRY1과 TRY2)보다 더 정확하게 지난 11년간의 바람자료를 대표하는 것으로 평가되었으며, 새로운 기상요소를 2단계 알고리즘에 추가하여 구한 것(TMY1)과의 비교에서도 전자의 비교와 동일한 결과가 얻어졌다. 따라서 본 연구에서 제안한 TMY(표 2.7 참조)는 1998년~2008년 동안 전국 77개 관측소에서 측정된 한반도 바람자료를 안정적으로 대표하는 1년 치 자료로 사용될 수 있다.

참고문헌

김용상, 박옥란, 황승언 (2002). 기상연구소의 국지규모 기상분석 및 예측시스템(KLAPS)의 실시간 운영, <한국기상학회지>, **38**, 1–10.

김현구, 장문석, 경남호, 이화운, 최현정, 김동혁 (2006). 수치바람모의에 의한 저해상도 국가 바람지도의 구축, <한국태양에너지학회>, **26**, 31–38.

Argiriou, A. and Lykoudis, S. (1999). Comparison of methodologies for TMY generation using 20 years data for Athens, Greece, *Solar Energy*, **1**, 33–45.

Chan, A. L. S., Chow, T. T., Fong, S. K. F. and Lin, J. Z. (2006). Generation of a typical meteorological year for Hong Kong, *Energy Conversion Management*, **47**, 87–96.

Finkelstein, J. M. and Schafer, R. E. (1971). Improved goodness of fit tests, *Biometrika*, **58**, 641–645.

Hall, I. J., Prairie, R. R., Anderson, H. E. and Boss, E. C. (1978). Generalization of typical meteorological years for 26 Solmet 97ations, Sandia Laboratory Report, *Energy Conversion Management*, SAND 78–1601, Albuquerque, New Maxico.

Klein, S. A., Cooper, P. I., Freeman, T. L., Beekman, D. M., Beckman, W. A. and Duffie, J. A. (1975). A method of simulation of solar processes and its applications, *Solar Energy*, **17**, 29–37.

Pissimanis, D., Karras, G., Notaridou, V. and Gavra, K. (1988). The generation of a "Typical Meteorological Year" for the city of Athens, *Solar Energy*, **40**, 405–411.

Skeiker, K. (2004). Generation of a typical meteorological year for Damascus zone using the Filkenstein-Schafer statistical method, *Energy Conversion and Management*, **45**, 99–112.

A Study on an Algorithm for Typical Meteorological Year Generation for Wind Resource of the Korean Peninsula

Hea-Jung Kim[1] · Sun Jung[2] · Yeoung Jin Choi[3] · Kyurang Kim[4] · Young Rim Jung[5]

[1]Department of Statistics, Dongguk University; [2]Department of Statistics, Dongguk University
[3]National Institute of Meteorological Research; [4]National Institute of Meteorological Research
[5]National Institute of Meteorological Research

(Received August 2009; accepted September 2009)

Abstract

This study suggests an algorithm for generating TMY(typical meteorological year) for the Korean peninsula, and generates the TMY based on the algorithm using 11 years(1998~2008) wind data observed at 77 sites of Regional Meteorological Offices(RMO). The algorithm consists of computing TMM scores based on the various statistics defined by the Fikenstein-Shafer statistical model and, in turn, generating TMY based on the TMM scores. Also the algorithm has two stages designed to yield the best representation of the regional wind characteristics appeared during the 11 years(1998~2008). The first stage is designed for the representation of each of 77 regions of RMO and the second is for the Korean peninsula. Various comparison studies are provided to demonstrate the properties of the TMY like its utility and typicality.

Keywords: Wind resource map, numerical weather simulation, TMY, Filkenstein-Shafer statistical model, TMM score, cluster analysis, RMSD, principal component analysis.

This research was supported by a Grant "Development of Industrial Meteorological Techniques for New Life" from the National Institute of Meteorological Research.

[1]Corresponding author: Professor, Department of Statistics, Dongguk University, 86-1 Pil-Dong, Jung-Gu, Seoul 100-715, Korea. E-mail: kim3hj@dongguk.edu