



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

준비모수 모형을 이용한 풍속의
확률분포 추정

濟州大學校 大學院

電算統計學科

李 健 宇

2017 年 6 月

준비모수 모형을 이용한 풍속의 확률분포 추정

指導教授 宋 竣 模

李 健 宇

이 論文을 理學 碩士學位 論文으로 提出함

2017 年 6 月

李健宇의 理學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ ①

委 員 _____ ①

委 員 _____ ①

濟州大學校 大學院

2017 年 6 月

Estimation of the probability distribution of wind speed using semi-nonparametric density

Keon-woo Lee
(Supervised by professor Junmo Song)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the
degree of Master of Science

2017 . 6 .

Department of Oceanography

GRADUATE SCHOOL

CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

표 목 차	i
그림목차	ii
국문초록	iii
Abstract	iv
제 1 장 서론	1
제 1 절 연구배경	1
제 2 절 연구목적	4
제 2 장 이론적 배경	6
제 1 절 와이블 분포 (Weibull Distribution)	6
제 2 절 준비모수 밀도함수 (Semi-Nonparametric density; SNP density)	7
제 3 절 SNP 밀도함수의 차수 결정	9
제 3 장 대상 지역의 풍속	10
제 1 절 풍속 자료	10
제 2 절 방위각별 풍향 분석	12
제 3 절 시간별 풍향 분석	14
제 4 절 대상 지역의 풍속에 대한 분포	16
제 4 장 SNP 밀도함수를 이용한 풍속 분포의 추정	18
제 1 절 SNP 밀도함수 및 와이블 분포의 추정	18
제 2 절 SNP 밀도함수와 와이블 분포의 추정결과 비교	20
제 5 장 결론	28
참고문헌	29

표 목차

표 1	SNP 밀도함수의 차수별 RMSE	18
표 2	SNP 밀도함수의 모수추정 결과	19
표 3	와이블 분포의 모수추정 결과	19
표 4	각 분포별 RMSE	20

그림 목차

그림 1 국가별 풍력 에너지의 설치 용량 (IEA 2013)-----	2
그림 2 1차 에너지 대비 신·재생에너지 생산량 증가 추이 (한국에너지공단, 2015)-	2
그림 3 총발전량 대비 신·재생에너지 발전량 증가추이 (한국에너지공단, 2015)-----	3
그림 4 철원(上)과 보은(下)의 지리학적 위치-----	-11
그림 5 철원지방과 보은지방 연간, 낮 시간대, 밤 시간대 풍배도-----	13
그림 6 철원지방 시간별 주풍향과 평균풍속-----	14
그림 7 보은지방 시간별 주풍향과 평균풍속-----	15
그림 8 철원(左)과 보은(右)지방 2016년 연간, 낮 시간대, 밤 시간대 풍속 분포----	17
그림 9 철원(上)과 보은(下) 2016년 연간 풍속 히스토그램과 Kernal, Weibull, SNP 밀도함수-----	22
그림 10 철원(上)과 보은(下) 2016년 낮 시간대 히스토그램과 Kernal, Weibull, SNP 밀도함수-----	23
그림 11 철원(上)과 보은(下) 2016년 밤 시간대 히스토그램과 Kernal, Weibull, SNP 밀도함수-----	24
그림 12 철원(上)과 보은(下) 2016년 연간 풍속, Weibull, SNP의 ECDP-----	25
그림 13 철원(上)과 보은(下)2016년 낮 시간대 풍속, Weibull, SNP의 ECDP-----	26
그림 14 철원(上)과 보은(下)2016년 밤 시간대 풍속, Weibull, SNP의 ECDP-----	27

초 록

풍력산업은 지속개발 가능한 무공해 천연 에너지를 개발하는 산업으로서 산업의 결과물이 환경에 미치는 영향이 거의 없으며 제방이나 산간오지 등을 개발하여 국토이용 효율을 높일 수 있는 장점을 지니고 있다. 이에 따라 풍력 발전은 앞으로 더욱 설비가 확충되고 그 비중은 더욱 높아질 것으로 기대된다. 새로운 풍력 발전 단지 건설 시 풍력발전량의 예측은 중요한 고려 대상이다. 풍력 발전량은 풍속에 의하여 결정되므로 풍속의 분포 추정은 풍력 발전과 풍력산업에 있어서 매우 중요하다 할 수 있다. 이에 부응하여 풍속 분포에 대한 많은 연구들이 수행되었다. 주로 포아송 분포, 와이블 분포, 레일리 분포, 감마 분포와 같은 모수적 분포를 이용한 추정 방법 등이 제안되었고 이 중에서 와이블 분포와 레일리 분포 등이 주로 사용되었다. 하지만 복잡지형 또는 대륙성 기후가 강하게 나타는 지역에서의 풍속은 와이블 분포 등과 같은 모수적 분포로 잘 적합되지 않는 경우들이 보고되고 있다. 본 논문에서는 모수적 분포로 잘 적합되지 않는 풍속 분포를 추정하기 위하여 준비모수적(SNP) 밀도함수를 이용한 추정방법을 제안한다.

SNP 밀도함수는 임의의 확률분포에 대하여 충분히 가깝게 근사시킬 수 있으므로, 풍속 분포가 모수적 분포에 적합하지 않는 경우에 SNP 밀도함수를 이용한 추정방법은 대안이 될 것으로 예상된다. 이를 확인하기 위하여, 본 연구에서는 대륙성 기후를 보이는 철원과 보은 지방의 풍속 분포를 SNP 밀도함수와 와이블 분포를 이용하여 추정하여 보았고, 그 결과를 비교하였다. 분석 결과 와이블 분포는 일부 경우에 대하여 적당하지 않은 반면 SNP 밀도함수를 이용한 추정은 대부분의 경우 좋은 적합정도를 보임을 알 수 있었다.

Abstract

Estimation of wind speed distribution has received a great deal of attention because of its importance in wind energy industry. Accordingly, many studies have been carried out on the estimation, and the parametric distributions such as Poisson, Weibull, Reily and Gamma distributions have been mainly proposed. In particular, Weibull distribution is popularly used in estimating wind speed distributions. However, empirical findings show that the Weibull distribution or other parametric distributions could not be well suited to the wind speed data from complex terrains or the areas with continental climate. To overcome such limitation, we propose to use semi-nonparametric (SNP) density in estimating the distribution of wind speed.

Since SNP density family can provide a good approximation for any probability density, it is anticipated that estimation method using SNP density can be a good alternative in the cases where wind speed distributions are not fitted properly by the parametric distributions. To see this, in this study, we estimate the distribution of the wind speed in Cheol-won and Boeun areas, which have continental climate, using SNP and Weibull densities, and compare the fitting results. As a result, we can see that Weibull distribution is not suitable for some cases, while SNP density better fits most of the wind speed data considered.

제 1 장 서론

제 1 절 연구배경

최근 석탄, 석유와 같은 화석 에너지 자원의 고갈 등의 문제와 이와 같은 화석연료를 통한 발전으로 인한 환경공해는 전 세계적인 문제로 대두되고 있고 최근 일본 후쿠시마 원자력발전소 사고는 기존 발전방식에 대한 불안을 키우고 있다. 또한 시시각각 변화하는 불안한 국제정세에 따라 국제유가의 변동시기 및 폭 또한 예측할 수 없는 상황이다. 이에 여러 국가들은 기후변화협약, 교통의정서와 같은 국제적인 환경규제를 맺기 시작했고 탄소배출권 거래제의 시행은 화석연료를 사용하고 있는 기존 산업분야에서는 큰 경제적 부담을 지니게 되었고 이를 대처하기 위한 친환경적인 신·재생에너지 개발에 힘을 쏟고 있다. 기존 원자력과 화력발전의 비중이 높고 이들의 해외에너지 의존도가 극히 높은 국내 특성상 태양열, 수력, 풍력 등과 같은 지속개발 가능한 신·재생에너지 개발은 환경적인 면이나 안정성 면에서 필수적인 요소라 볼 수 있다.

‘해외에너지 의존도가 95% 이상인 우리나라의 실정에서도 예외는 아니어서, 대체 에너지개발 및 이용·보급촉진법 제 2조에 대체에너지에 대한 정의를 규명하고, 이에 대한 개발과 보급에 노력을 경주하고 있는 실정이다. 풍력산업을 포함하는 대체에너지산업의 범위로는 석유, 석탄, 원자력, 천연가스가 아닌 재생에너지 8개 분야(풍력, 태양열, 태양광발전, 바이오매스, 소수력, 지열, 해양에너지, 폐기물에너지)와 신에너지 3개 분야(연료전지, 석탄액화·가스화, 수소에너지)로서, 풍력산업은 지속개발 가능한 무공해 천연 에너지를 개발하는 산업으로서 산업의 결과물이 환경에 미치는 영향이 거의 없고 국토가 비좁은 우리의 현실에서 제방이나 산간오지 등을 개발할 수 있다는 특성으로, 국토이용 효율을 높일 수 있는 장점을 지니고 있다.’(권영일의 2인, 2002)

국제에너지기구(IEA)는 2035년 세계에너지 수요는 30%정도 증가하여 전 세계 총 발전량 중 1/3 이상을 신·재생에너지가 담당할 것으로 “World Energy Outlook 2013”에서 전망하고 있다. 2012년 세계 풍력 에너지 총 발전량은 세계 전력 총 생산량의 2.3%를 생산하였다.(IEA, 2013)

한국에너지공단에 따르면 현재 국내 신·재생에너지 총 보급량은 2006년 4,879천

toe에서 2015년 13,293천toe까지 꾸준히 증가하고 있는 추세이며 1차 에너지 대비

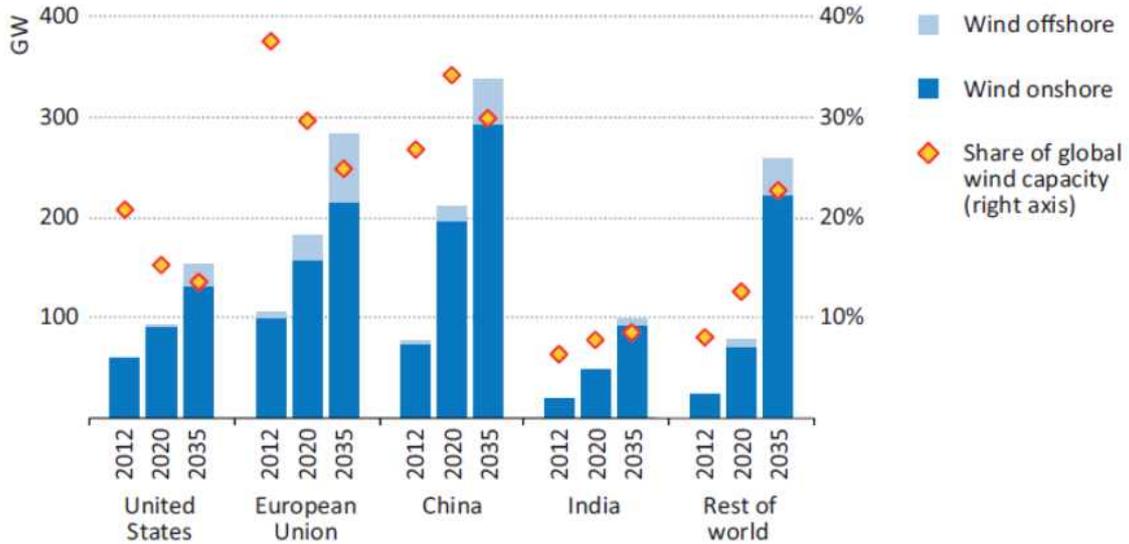


그림 1 국가별 풍력 에너지의 설치 용량 (IEA 2013)

공급비중 또한 2005년 2.13%에서 2015년 4.62%로 증가하였으며 2015년 4.62%중 재생에너지비중 4.54%, 신에너지비중 0.08%이다. 총 발전량 대비 신·재생에너지 발전의 경우 더욱 증가하였는데 총 발전량의 경우 2005년 3,950Gwh(1.08%)에서 2015년 37,079Gwh(6.61%)로 크게 증가하였다. 정부는 2008년에서 2030년까지 기준



그림 2 1차 에너지 대비 신·재생에너지 생산량 증가 추이 (한국에너지공단, 2015)



그림 3 총발전량 대비 신·재생에너지 발전량 증가추이 (한국에너지공단, 2015)

에너지 공급이 247백만toe에서 300백만toe로 증가하고 신·재생에너지는 6,360천toe에서 33,027천toe까지 증가할 것으로 보고 있으며 이는 총 발전량의 2.58%에서 11%로 약 5배 증가한 수치이다. (Han and Hyun, 2014)

또한 정부는 지속 개발 가능한 신·재생에너지 중 연안 풍력 발전을 기존에너지의 대안으로 생각하여 개발할 계획을 세우고 있다.(Seo et al., 2013)

제 2 절 연구목적

이러한 배경에 따라 풍력 발전은 앞으로 더욱 설비가 확충되고 발전 비중이 높아질 것으로 기대되므로 풍력 발전의 비중은 더욱 높아질 것으로 보인다. 새로운 풍력 발전 단지 건설 혹은 풍력 발전량 예측에 있어서 풍속은 중요한 요소 중 하나이기 때문에 풍속 분포의 추정은 중요하다.

바람의 에너지 P 는 다음과 같이 알려져 있다.

$$P = \frac{1}{2}\rho A V^3, \quad \text{수식 1}$$

여기서 ρ 는 공기밀도, A 는 로터의 회전면적, V 는 속도이다.

이 식에 따라 바람의 파워 해석에 있어서 가장 중요한 요소는 풍속이다. 바람의 에너지는 풍속의 무려 3제곱에 비례한다. 따라서 정확한 풍속 분포의 추정은 풍력 발전에 있어 매우 중요한 요소이다.

지금까지 풍속 분포의 연구는 많이 행해져 왔으며 포아송 분포, 와이블 분포, 레일리 분포, 감마 분포 등이 제안되었지만 이 중에서 주로 사용되어온 분포는 와이블 분포와 레일리 분포이며 현재는 와이블 분포가 풍속의 분포에 가장 적합하고 많이 사용되고 있다.(고경남과 허종철, 2007) Justus et al.(1978), Tuller and Brett(1984), Conradsen and Nielsen(1984) 등이 와이블 분포를 이용한 풍속의 분포를 추정하였으며, 국내 연구로는 고경남 외 2인(2008), 문채주 외 4인(2008), 허종철 외 2인(2009), 변지선 외 2인(2012) 등이 있다.

하지만 송호성과 권순덕(2012)의 연구에서처럼 복잡지형에서의 풍속의 분포는 와이블 분포가 잘 적합하지 않을 수 있다. 밤과 낮의 풍속 변화가 심한 지역 또한 와이블 분포가 다른 지역과는 달리 잘 들어맞지 않는 경우 또한 있다. 본 논문에서는 복잡지형 혹은 밤과 낮의 풍속 변화가 심한 지역에서의 정확한 분포추정을 위하여 Gallant와 Nychka(1987)의 준비모수(Semi-Nonparametric, 이하 SNP) 밀도함수를 이용하고자 한다. SNP 밀도함수를 이용한 추정방법은 Hermtie expansion을 이용하여 미지의 분포함수를 근사시키는 방법으로서 Gallant와 Nychka(1987)에 의해 제안되었다. 모수적 모형과 비모수적모형의 장점을 공유하고 있는 SNP 밀도함수는 여러 분야에서 활용되었는데, 특히 경제/금융 분야에서 활용한 국내 연구로는 정재식

(2000), 정재식과 박영준(2011), Lee and Song(2014) 등이 있다. 본 논문에서는 SNP 밀도함수를 이용하여 풍속의 분포를 추정하고자 한다.

우선 2장에서 본 논문에서 사용된 와이블 분포(Weibull distribution), 비모수적 추정법(SNP), 경험적 누적분포함수(ECDF) 등을 소개하고 3장에서는 연구 대상 지역 풍속의 특징을, 그리고 4장에서는 SNP 밀도함수를 이용하여 풍속의 분포를 추정하고 5장에서 결론을 설명하고자 한다.

제 2 장 이론적 배경

제 1 절 와이블 분포 (Weibull Distribution)

와이블 분포는 스웨덴의 수학자 와이블이 제안한 연속 확률 분포이다. 지수분포를 좀 더 일반화하여 두 모수의 값에 따라 다양한 확률분포의 형태를 나타낼 수 있는 유연한 분포이다. 와이블 분포는 그 유연성 때문에 신뢰성 분야의 응용 등 다양한 분야에서 자주 사용된다. 모수가 k 와 c 인 와이블 분포의 누적분포함수와 밀도함수는 다음과 같다.

$$F(x;k,c) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^k}, \quad x \geq 0, k > 0, c > 0, \quad \text{수식 2}$$

$$f(x;k,c) = \frac{k}{c} \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^k}, \quad x \geq 0 \quad \text{수식 3}$$

여기서 k 는 형상 모수(shape parameter), c 는 척도 모수(scale parameter)이다. 형상 모수 k 는 바람의 균질성을 표현하는 값으로, k 값이 높을수록 바람이 균질하다고 볼 수 있다. 척도 모수 c 는 평균 풍속의 크기와 관계되어 있으며, 레일리 분포에서는 형상 모수가 2로 고정되는 특별한 경우이다.

본 논문에서는 와이블 분포의 모수를 최대우도추정량(Maximum Likelihood Estimator, 이하 MLE)을 이용하여 추정한다. 와이블 분포의 우도함수(Likelihood function)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(k,c) &= \ln \prod_{i=1}^n \frac{k}{c} \left(\frac{x_i}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x_i}{c}\right)^k} \\ &= \sum_{i=1}^n \ln \frac{k}{c} \left(\frac{x_i}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x_i}{c}\right)^k}. \end{aligned} \quad \text{수식 4}$$

참고로, 평균 풍속과 척도 모수, 형상 모수는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$V_m = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right), \quad \text{수식 5}$$

여기서 V_m 은 평균 풍속, Γ 는 감마 함수이다. 평균 풍속이 일정하다면 척도 모수와 형상 모수는 서로에 의해 유일하게 결정되는 형태이다.(고경남과 허종철, 2007)

제 2 절 준비모수 밀도함수 (Semi-Nonparametric density; SNP density)

Phillips(1983)는 다음의 함수를 통하여 어떤 밀도함수라도 근사시킬 수 있음을 보였다.

$$h(u) = \frac{P^2(u)}{Q^2(u)}\phi^2(u|\tau, \Sigma), \quad \text{수식 6}$$

여기서 $P(u)$ 와 $Q(u)$ 는 다항식이고 $\phi(u|\tau, \Sigma)$ 는 평균이 τ 분산이 Σ 인 R^k 공간에서의 다변량 정규분포의 밀도함수이다. 이 후 Gallant와 Nychka(1987)는 위 식을 제약한 다음의 식을 제안하였다.

$$h_K(u) = P_K^2(u-\tau)\phi^2(u|\tau, \Delta), \quad \text{수식 7}$$

여기서 $P_K(\cdot)$ 는 차수가 K 인 다항식이고 Δ 는 대각행렬이다. Gallant와 Nychka(1987) 역시 위 식의 K 를 증가시키면 대부분의 밀도함수를 근사시킬 수 있음을 보였다. 본 논문에서는 위 다항식을 에르미트 다항식(Hermite polynomials)을 이용하여 SNP 밀도함수를 구현한다. 에르미트 다항식을 이용하여 SNP 밀도함수를 구현한 예는 주로 EMM을 이용한 확산과정의 모수추정에서 주로 사용되었다. (Andersen et al., 2002; Lee and Song, 2014) 본 논문에서 풍속의 밀도함수 추정을 위하여 사용할 SNP 밀도함수는 아래와 같다.

$$f_{SNP}(x) = \frac{\left\{1 + \sum_{i=1}^k a_i He(x;i)\right\}^2}{1 + \sum_{i=1}^k i! a_i^2} \phi(x), \quad \text{수식 8}$$

여기서 $He(x;k)$ 는 k 차 직교 에르미트 다항식(the k -th order orthogonal Hermite polynomial), $\phi(\cdot)$ 는 표준정규분포의 밀도(the density of the standard normal distribution), 에르미트 다항식(Hermite polynomials)은 직교 관계(orthogonal polynomials)를 만족 시키는 다음의 다항식¹⁾이다.

1) 에르미트 다항식은 일반적으로 2가지 형태로 사용되는데 본 논문에서는 그 중 “probabilists’ Hermite polynomials”이다.

$$\begin{aligned}
He(x;0) &= 1 \\
He(x;1) &= x \\
He(x;2) &= x^2 - 1 \\
He(x;3) &= x^3 - 3x \\
He(x;4) &= x^4 - 6x^2 + 3 \\
He(x;5) &= x^5 - 10x^3 + 15x \\
He(x;6) &= x^6 - 15x^4 + 45x^2 - 15 \\
He(x;7) &= x^7 - 21x^5 + 105x^3 - 105x \\
He(x;8) &= x^8 - 28x^6 + 210x^4 - 420x^2 + 105 \\
He(x;9) &= x^9 - 36x^7 + 378x^5 - 1260x^3 + 945x \\
He(x;10) &= x^{10} - 45x^8 + 630x^6 - 3150x^4 + 4725x^2 - 945 \\
He(x;11) &= x^{11} - 55x^9 + 990x^7 - 6930x^5 + 17325x^3 - 10395x \\
He(x;12) &= x^{12} - 66x^{10} + 1485x^8 - 13860x^6 + 52975x^4 + 62370x^2 - 10395 \\
He(x;13) &= x^{13} - 78x^{11} + 2145x^9 - 25740x^7 + 135135x^5 - 270270x^3 + 135135x \\
He(x;14) &= x^{14} - 91x^{12} + 3003x^{10} - 45045x^8 + 315315x^6 - 945945x^4 + 945945x^2 - 135135 \\
He(x;15) &= x^{15} - 105x^{13} + 4095x^{11} - 75075x^9 + 675675x^7 - 2837835x^5 + 4729725x^3 \\
&\quad - 2027025x
\end{aligned}$$

위 다항식은 다음을 만족한다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} He(x;m) He(x;n) e^{-\frac{x^2}{2}} dx = \sqrt{2\pi} n! \delta_{nm}, \text{ 여기서 } \delta_{nm} = \begin{cases} 0, & n \neq m \\ 1, & n = m \end{cases} \quad \text{수식 9}$$

k 차 SNP 밀도함수의 모수 a_1, \dots, a_k 는 다음의 목적함수가 최대가 되도록 정한다.

$$\begin{aligned}
\mathcal{L}(a_1, \dots, a_k) &= \ln \prod_{j=1}^n \frac{\left\{ 1 + \sum_{i=1}^k a_i He(x_j; i) \right\}^2}{1 + \sum_{i=1}^k i! a_i^2} \phi(x_j) \\
&= \sum_{j=1}^n \ln \left(\frac{\left\{ 1 + \sum_{i=1}^k a_i He(x_j; i) \right\}^2}{1 + \sum_{i=1}^k i! a_i^2} \right) \phi(x_j) \quad \text{수식 10}
\end{aligned}$$

제 3 절 SNP 밀도함수의 차수 결정

SNP 밀도함수에 관한 기존 연구에서는 주로 AIC(Akaike Information Criterion), BIC(Bayesian Information Criterion)을 이용하여 SNP 밀도함수의 차수를 결정하였다. 본 논문에서는 실제 풍속의 분포와 가장 가까운 밀도함수를 추정하는 것을 목표로 하므로, 기존의 AIC와 BIC 기준이 아닌 경험적 누적분포함수(empirical cumulative distribution function, 이하 ECDF)에 가장 가깝도록 SNP 밀도함수의 차수를 결정한다. 구체적으로 설명하기 위하여 x_1, \dots, x_n 을 실제 관측 자료라고 하자. 크기 순서대로 나열한 자료를 $x_{(1)}, \dots, x_{(n)}$ 라고 할 때 ECDF는 다음과 같이 정의된다.

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(x_{(i)} \leq x). \quad \text{수식 11}$$

추정된 k 차 SNP 밀도함수의 누적분포함수는 다음과 같다.

$$\hat{F}_{SNP,k}(x) = \int_0^x \hat{f}(x)_{SNP,k} dx \quad \text{수식 12}$$

여기서

$$\hat{f}_{SNP,k}(x) = \frac{\left\{1 + \sum_{i=1}^k \hat{a}_i He(x;i)\right\}^2}{1 + \sum_{i=1}^k i! \hat{a}_i^2} \phi(x), \quad \text{수식 13}$$

이고 $\hat{a}_1, \dots, \hat{a}_k$ 는 위 2장 2절의 방법에 의해서 구하여진 추정치이다. 이때, 최적의 차수 K 는 다음과 같이 얻어진다.

$$K = \operatorname{argmin}_k \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [F_n(x_{(i)}) - \hat{F}_{SNP,k}(x_{(i)})]^2} \quad \text{수식 14}$$

본 논문에서는 $\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [F_n(x_{(i)}) - \hat{F}_{SNP,k}(x_{(i)})]^2}$ 을 평균제곱근오차(Root Mean Squared Error, 이하 RMSE)로 정의하며 서로 다른 두 분포의 가까운 정도를 비교할 때 이 수치를 이용하고자 한다.

제 3 장 대상 지역의 풍속

제 1 절 풍속 자료

본 논문에서 사용된 풍속 데이터는 위도 38.1479, 경도 127.3042, 해발고도 154.8m인 강원도 철원과 위도 36.4876, 경도 127.7341, 해발고도 175.0m인 충청북도 보은에 위치한 기상청 관측지점 2, 57의 지상 17m 풍속계에서 1시간 단위로 수집된 2016년 연간 풍속데이터이다. 두 지역 모두 한반도 내륙 깊숙이에 위치하고 있어 대륙성 기후가 나타날 것으로 기대되는 지역이다. 두 지역 관측소의 위치는 그림 4에 나타나 있다. 철원지방은 강원북서내륙에 속해있으며 한반도의 중심부에 자리 잡고 있다. 또한 철원을 가로질러 흐르는 한탄강을 중심으로 북서쪽에 평야지대가 남동쪽에 산악지대가 자리 잡고 있으며 산악지대는 해발고도 1000m내외에 이른다. 기온차가 큰 대륙성 기후의 특징을 보이는 지역이기도 하다. 풍속은 비교적 약하나 3~5월에 다소 강하게 분다. 보은지방은 충북남부내륙에 위치하고, 지형적으로 산맥으로 둘러 쌓여있는 분지형태를 띄고 있다. 연교차가 27.8°C로 큰 기온차를 보이는 대륙성기후를 보이고 있다.

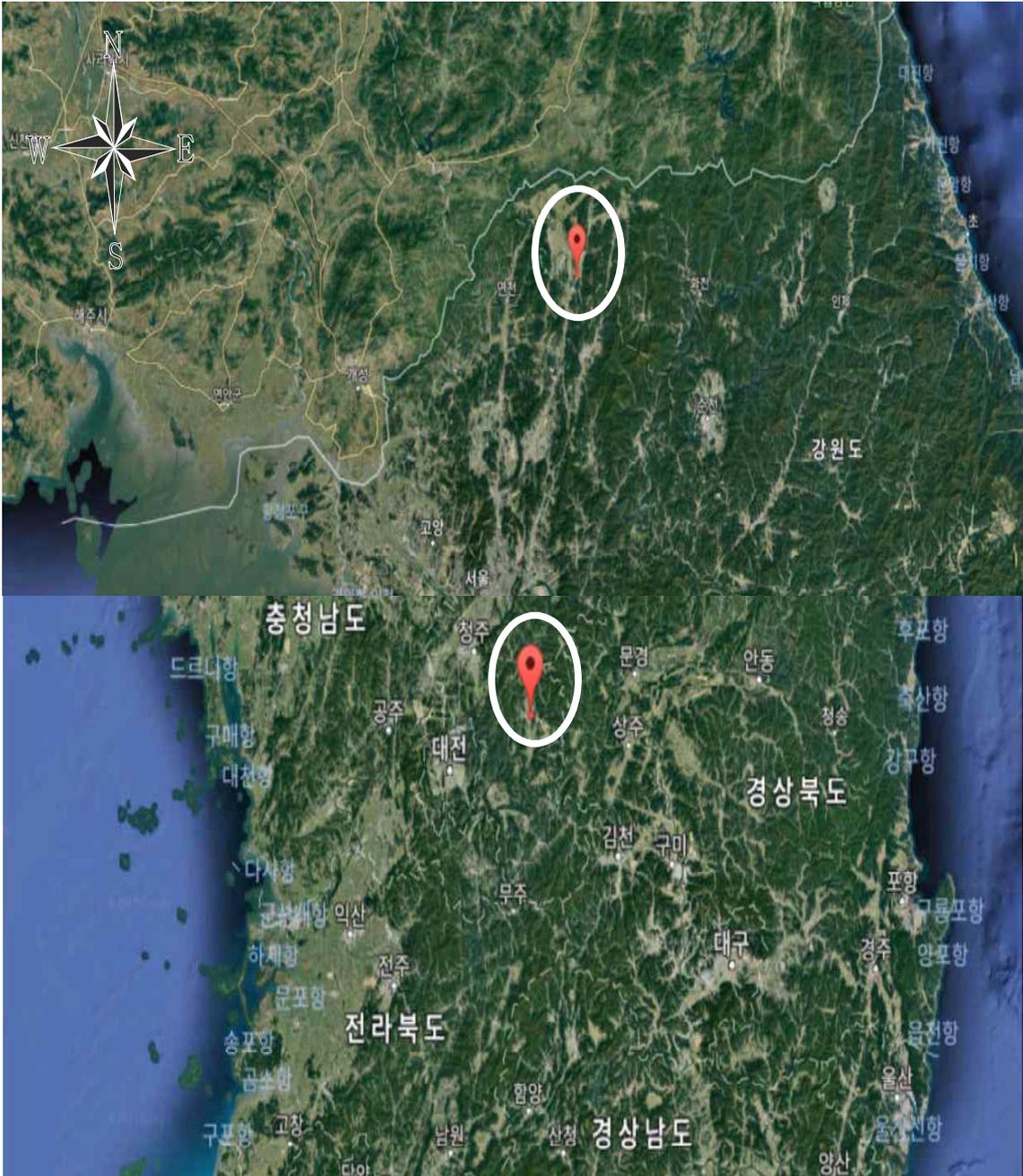
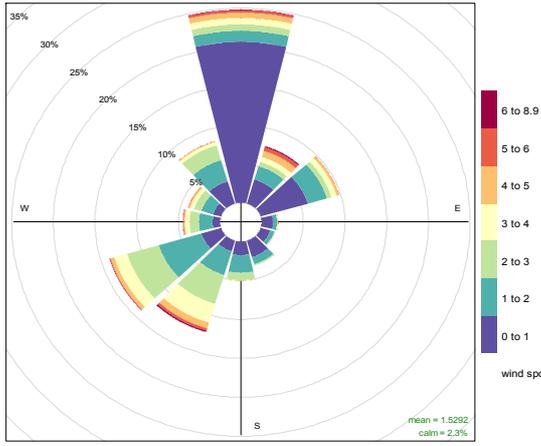


그림 4 철원(上)과 보은(下)의 지리학적 위치

제 2 절 방위각별 풍황 분석

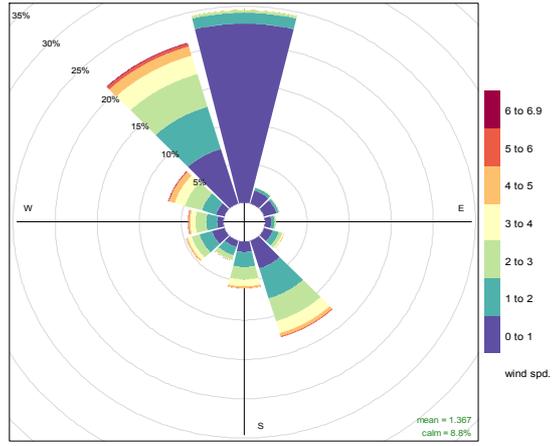
우선 풍배도를 그릴 때 낮과 밤 시간대로 나눈 기준은 3장 3절에서 밝히도록 하겠다. 철원지방과 보은지방의 연간 풍배도와 밤 시간대 풍배도를 비교해보면 모두 주풍향이 북풍이며 1m/s이하의 낮은 풍속을 이루는 상당히 유사한 형태를 띠고 있는 것을 알 수 있다. 하지만 낮 시간대의 풍배도를 보면 철원은 주풍향이 남서쪽으로, 보은은 주풍향이 북서쪽으로 바뀌어 있는 것을 확인할 수 있고 주풍향에서의 풍속이 북풍이 주풍향인 연간과 밤 시간의 풍배도에 비해 강해진 것을 확인할 수 있다. 철원지방 낮 시간대 풍향이 남서쪽인 이유는 지형적인 요소가 크게 작용하여 산곡풍이 불기 때문으로 추정된다. 3장 1절에서 밝혔다시피 한탄강을 중심으로 남동쪽에 산악지대가 위치하고 있기 때문에 곡풍이 불기 때문이다. 그리고 밤에는 북서쪽 평야를 향하여 산풍이 불기 때문에 다시금 북풍이 주풍향이 된다. 이를 통하여 2m/s이상의 풍속이 낮 시간대에는 일정 풍향으로 지속적으로 불어옴을 알 수 있다.

철원 2016 연간 풍배도



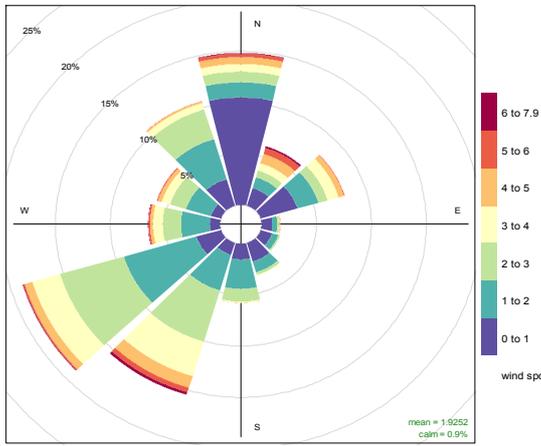
Frequency of counts by wind direction (%)

보은 2016 연간 풍배도



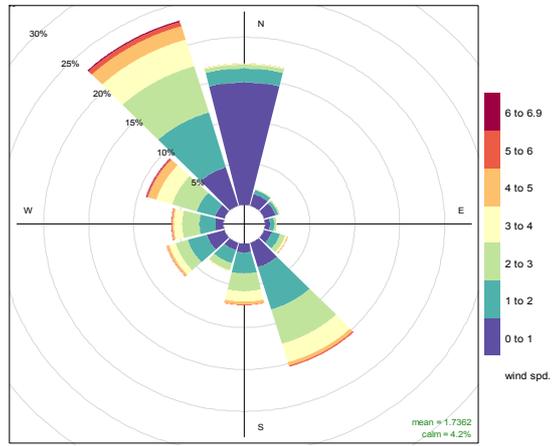
Frequency of counts by wind direction (%)

철원 낮 시간대 풍배도



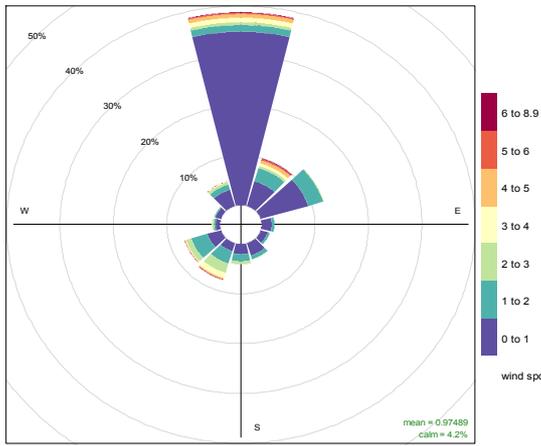
Frequency of counts by wind direction (%)

보은 낮 시간대 풍배도



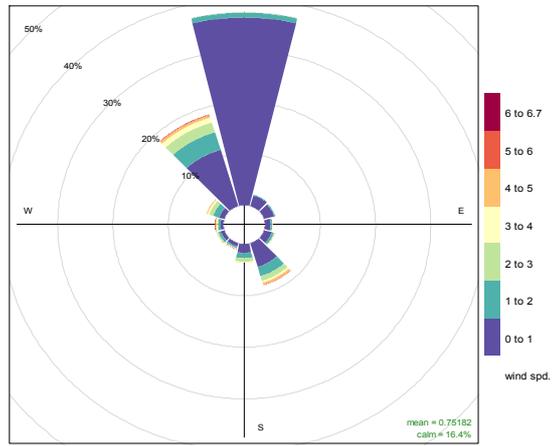
Frequency of counts by wind direction (%)

철원 밤 시간대 풍배도



Frequency of counts by wind direction (%)

보은 밤 시간대 풍배도



Frequency of counts by wind direction (%)

그림 5 철원지방과 보은지방 연간, 낮 시간대, 밤 시간대 풍배도

제 3 절 시간별 풍황 분석

철원지방과 보은지방의 시간별 주풍향과 평균풍속에 관하여 보고자 한다. 우선 그림 6을 보면 09시를 기점으로 주풍향과 평균풍속이 변하기 시작하고 주풍향은 15-17시쯤을 기점으로 다시 이전과 비슷하게 되돌아오지만 평균풍속은 22시를 기점으로 이전 수준과 비슷하게 된다. 이를 통하여 철원지방의 낮과 밤의 바람의 특성이 다른 것을 우선적으로 알 수 있고 산악지역에 위치하고 있고 대륙성 기후의 영향을 크게 받기 때문에 평균풍속은 해안지역에 비해 더 천천히 감소하는 것으로 추론할 수 있다. 다음으로 보은지방을 살펴보면 철원지방과 동일하게 9시를 기점으로 주풍향과 평균풍속이 변하는 것을 알 수 있다. 하지만 철원지방과는 다르게 주풍향과 평균풍속이 이전 수준으로 되돌아가는 것이 모두 23시쯤으로 좀 더 늦은 시각에 이르러 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 보은 기상관측소가 철원 기상관측소와 비슷하게 산악지역에 위치하며 내륙 가운데에 있지만 해발고도가 조금 더 높은 것에 위치하고 분지 형태를 이루기 때문에 이런 양상을 보이는 것이라 판단된다. 두 지역이 모두 특정 시간대를 기점으로 두 가지의 다른 바람의 특성을 보이고 있기 때문에 이를 기반으로 시간대를 나누어 풍속 분포를 추정하고자 한다.

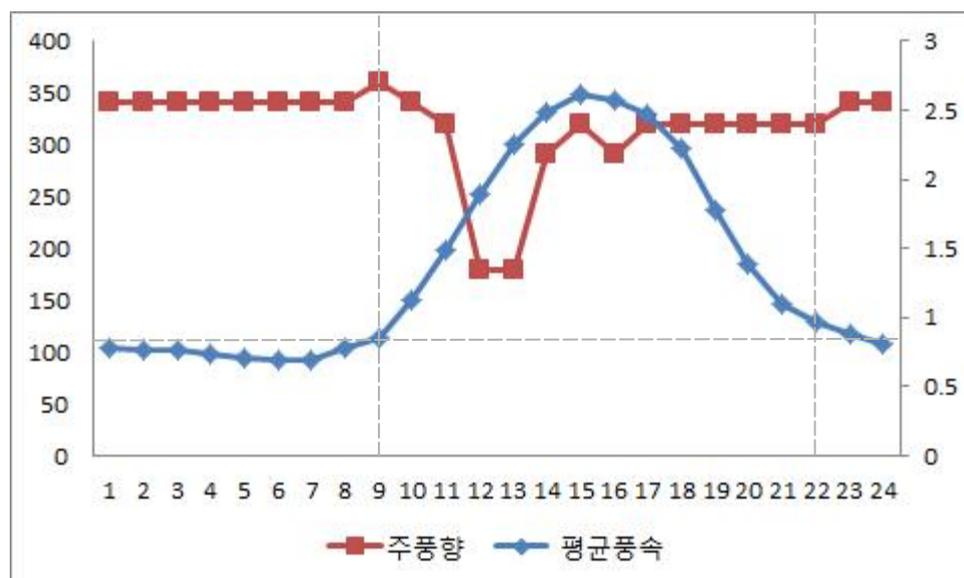


그림 6 철원지방 시간별 주풍향과 평균풍속

낮의 주시간대인 09-18시가 두 지역 모두 그런 양상의 기점에 들어가 있기 때문에 평균풍속의 변화에 중점을 두어 철원과 보은의 09-22시와 09-23시를 편의상 낮 시간대, 23-08시와 24-08시를 밤 시간대라 지칭하겠다.

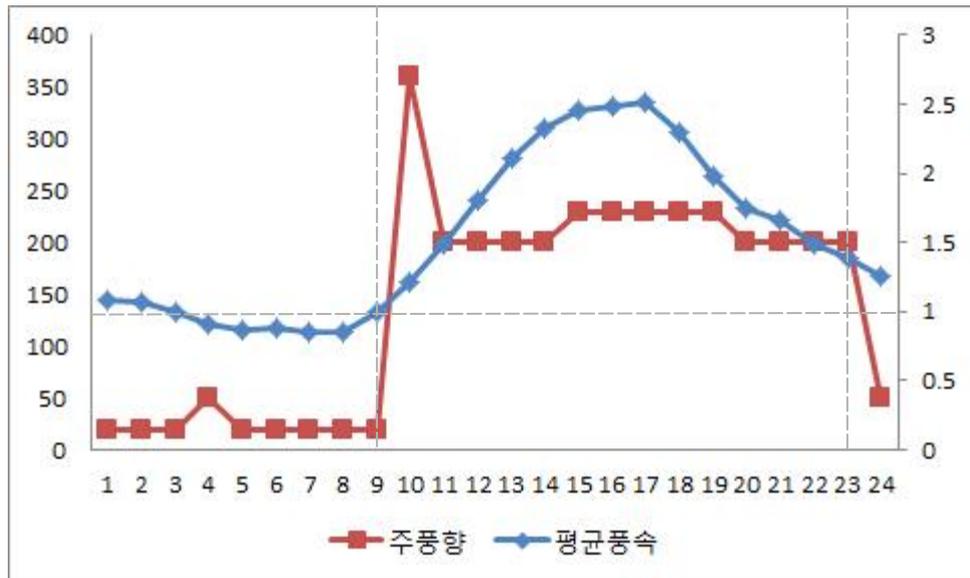


그림 7 보은지방 시간별 주풍향과 평균풍속

제 4 절 대상 지역의 풍속에 대한 분포

그림 8에서 보다시피 철원과 보은 두 지역의 연간, 낮 시간대, 밤 시간대 풍속 분포의 그림은 유사한 것을 알 수 있다. 이는 두 지역 모두 내륙 깊숙이 위치하여 있고 산악지역인 공통점을 가지고 있기 때문인 것으로 보인다. 또한 두 지역 모두 연간 풍속의 분포와 밤 시간대의 풍속 분포의 형태가 비슷하지만 이 두 시간대와 낮 시간대의 풍속의 분포가 완연하게 다르다는 것을 알 수 있다. 낮 시간대에는 태양에 의해 지표면이 가열되었다가 태양이 짐에 따라 냉각되므로 풍속이 점차 증가하다 낮아지고 밤 시간대에는 태양과 같은 지표면의 가열과 냉각의 요소가 없기 때문에 일정수준의 풍속을 유지하므로 풍속 분포의 형태가 다르게 나타나고 있다. 이런 두 시점의 다른 풍속 분포의 형태는 낮과 밤 시간대로 나누어 분포를 추정하여야 하는 근거가 된다. 따라서 본 논문에서는 3장 3절을 기준으로 하여 낮과 밤 시간대로 나누어 풍속의 분포를 추정하고자 한다.

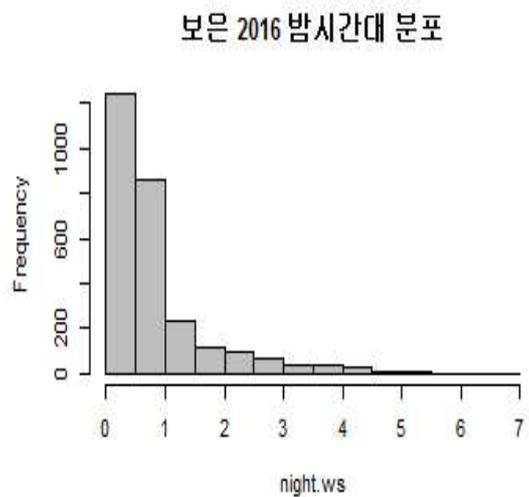
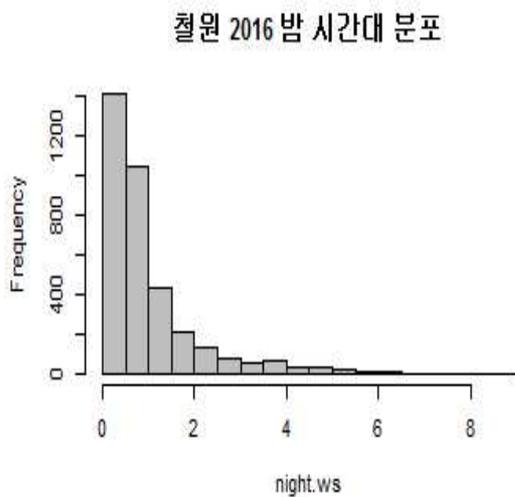
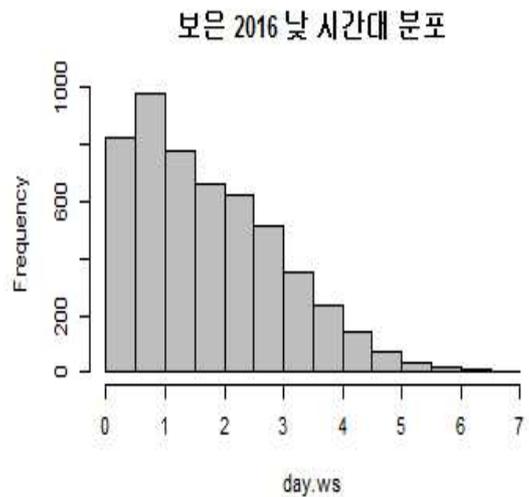
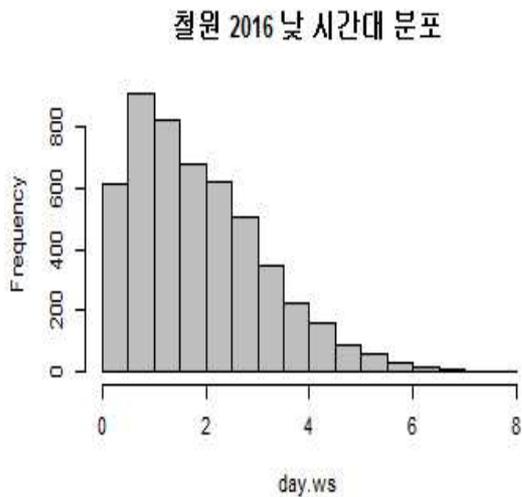
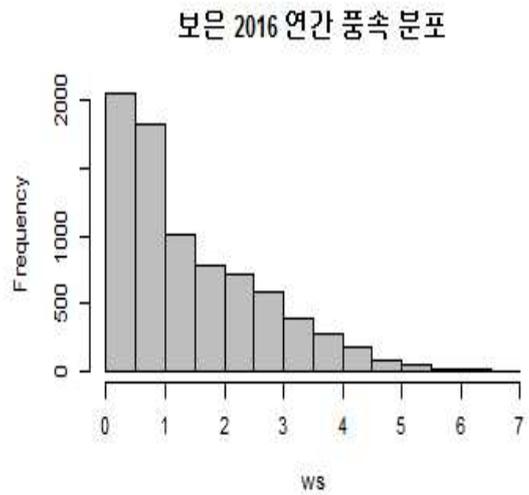
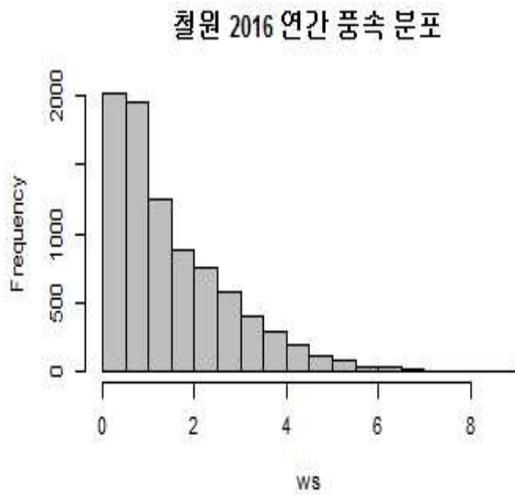


그림 8 철원(左)과 보은(右)지방 2016년 연간, 낮 시간대, 밤 시간대 풍속 분포

제 4 장 SNP 밀도함수를 이용한 풍속 분포의 추정

고경남 외 2인(2008), 문채주 외 4인(2008), 허종철 외 2인(2009), 변지선 외 2인(2012) 등의 연구에서는 와이블 분포를 이용하여 풍속의 분포를 추정하고 있다. 복잡지형의 경우 손호성과 권순덕(2012)은 혼합와이블 분포(Mixture-Weibull distribution)를 사용하여 추정하였다. 본 논문에서는 SNP 밀도함수를 이용하여 풍속의 분포를 추정하고 와이블 분포의 추정결과와 비교하고자 한다. 또한 연구 대상 지역이 대륙성 기후를 띄고 있어 일교차가 심한 지역이기 때문에 3장 3절과 4절에서 밝힌바와 같이 철원지방은 09시와 22시를, 보은지방은 09시와 23시를 기준으로 낮과 밤의 풍속 분포를 따로 추정하고자 한다.

제 1 절 SNP 밀도함수 및 와이블 분포의 추정

2장 3절에 소개된 방법을 이용하여 SNP 밀도함수의 차수를 결정하고 모수를 추정하였다. 각 지역과 시간대별로 SNP 밀도함수의 차수 결정을 위한 RMSE는 표1에 나타나 있다.

SNP 차수	철원 연간	철원 낮	철원 밤	보은 연간	보은 낮	보은 밤
1	0.05637	0.05825	0.06542	0.05892	0.05614	0.07682
2	0.06804	0.07554	0.07164	0.07221	0.07345	0.08246
3	0.05637	0.05825	0.06542	0.05892	0.05614	0.07682
4	0.03067	0.03471	0.03307	0.02866	0.02880	0.03985
5	0.01868	0.01576	0.03441	0.02290	0.01306	0.04873
6	0.02553	0.01916	0.03783	0.02690	0.01953	0.04299
7	0.02519	0.01895	0.03900	0.02760	0.01946	0.04616
8	0.01543	0.01243	0.02554	0.01787	0.01299	0.03212
9	0.01576	0.00968	0.02856	0.01934	0.01231	0.03622
10	0.01793	0.01259	0.02766	0.01921	0.01394	0.03090
11	0.01652	0.01205	0.02170	0.01664	0.01197	0.02753
12	0.01397	0.01144	0.02594	0.01356	0.01076	0.02671
13	0.01304	0.01004	0.02253	0.01200	0.00962	0.02176
14	0.01474	0.01051	0.01805	0.01104	0.01121	0.02254
15	0.01264	0.00905	0.01884	0.01328	0.01012	0.01751
MIN.	0.01264	0.00905	0.01805	0.01104	0.00962	0.01751

표 1 SNP 밀도함수의 차수별 RMSE

표 1에 따라 RMSE 최소값으로 SNP 밀도함수의 차수를 결정하였다. 그 결과 철원 연간, 낮, 밤의 차수는 15, 15, 14차이며, 보은 연간, 낮, 밤의 차수는 14, 13, 15이다.

이 때 추정된 모수는 다음과 같다.

모수	철원 연간	철원 낮	철원 밤	보은 연간	보은 낮	보은 밤
\hat{a}_1	0.9507292	1.1015444	0.7875513	0.9287112	1.0468788	0.7466006
\hat{a}_2	0.2275633	0.4049128	0.0226015	0.2112480	0.3505187	-0.0135930
\hat{a}_3	0.0116499	0.0764672	-0.0755138	0.0151421	0.0647149	-0.0743939
\hat{a}_4	0.0527867	0.0548783	0.0435852	0.0579435	0.0577454	0.0531640
\hat{a}_5	0.0342801	0.0341305	0.0346047	0.0337482	0.0330123	0.0353648
\hat{a}_6	0.0045714	0.0072580	0.0022127	0.0027143	0.0049728	0.0000066
\hat{a}_7	-0.0007386	0.0002101	-0.0016876	-0.0013357	-0.0005576	-0.0024573
\hat{a}_8	0.0004575	0.0004384	0.0005120	0.0004561	0.0003762	0.0005340
\hat{a}_9	0.0003455	0.0003198	0.0003598	0.0003304	0.0003021	0.0003772
\hat{a}_{10}	0.0000311	0.0000501	-0.0000075	-0.0000010	0.0000199	-0.0000355
\hat{a}_{11}	-0.0000123	-0.0000053	-0.0000416	-0.0000158	-0.0000112	-0.0000366
\hat{a}_{12}	0.0000012	0.0000007	-0.0000021	0.0000034	0.0000021	0.0000005
\hat{a}_{13}	0.0000016	0.0000013	0.0000011	0.0000019	0.0000012	0.0000028
\hat{a}_{14}	0.0000001	0.0000001	-0.0000004	-0.0000001		0.0000000
\hat{a}_{15}	-0.0000001	-0.0000001				-0.0000002

표 2 SNP 밀도함수의 모수추정 결과

표3은 와이블 분포의 모수추정 결과이다.

모수	철원 연간	철원 낮	철원 밤	보은 연간	보은 낮	보은 밤
\hat{k}	1.245277	1.531640	1.113425	1.229701	1.460546	1.1102336
\hat{c}	1.682503	2.158261	1.064245	1.605365	1.999169	0.9397617

표 3 와이블 분포의 모수추정 결과

제 2 절 SNP 밀도함수와 와이블 분포의 추정결과 비교

이 절에서는 실관측치의 ECDF를 기준으로 와이블 분포와 SNP 밀도함수의 ECDF를 비교한다. 실관측치의 ECDF에 더 가까운 분포가 주어진 풍속자료의 분포를 더 잘 설명한다고 할 수 있다.

그림 9 - 11은 철원과 보은지방의 히스토그램과 PDF를 나타낸 그림이다. 풍속의 실제 분포를 알 수 없기 때문에 풍속 실관측치 히스토그램과 SNP 밀도함수, 와이블 분포함수로 그린 PDF 그림의 유사성을 통하여 추정된 밀도함수가 풍속 분포를 잘 나타내고 있는지를 판단하고자 한다. 그림 9 연간 풍속의 히스토그램과 PDF 함수들을 먼저 보면 SNP 밀도함수와 와이블 분포의 PDF 그림이 조금은 다르지만 어느 정도 히스토그램의 형태를 비슷하게 따라가고 있는 것을 볼 수 있고 와이블 분포함수보다는 SNP 밀도함수가 조금 더 비슷한 형태인 것을 확인할 수 있다. 그림 10 낮 시간대 풍속의 히스토그램과 PDF 그림을 보면 SNP 밀도함수와 와이블 분포함수가 히스토그램의 형태를 잘 따라가고 있는 것을 볼 수 있으면 이 경우 그림만으로 판단했을 때 큰 차이는 없어 보인다. 마지막 그림 11 밤 시간대 풍속의 히스토그램과 PDF 그림을 보면 와이블 분포함수가 어느 정도 히스토그램의 형태를 나타내고는 있지만 SNP 밀도함수가 더 비슷하게 따라가고 있는 것으로 보인다. 이를 통하여 우리는 연간과 낮 시간대의 풍속에서는 SNP 밀도함수와 와이블 분포함수가 큰 차이를 보이지는 않지만 밤 시간대에는 어느 정도 차이가 있다는 것을 확인할 수 있으면 이 경우 와이블 분포함수보다는 SNP 밀도함수가 좀 더 나은 방법이라는 것을 추론할 수가 있다.

표 4는 위 2장 3절에 소개된 RMSE를 계산한 값이다.

	철원 연간	철원 낮	철원 밤	보은 연간	보은 낮	보은 밤
Weibull	0.01851	0.01187	0.03386	0.02279	0.01568	0.04085
SNP	0.01264	0.00905	0.01805	0.01104	0.00962	0.01751
차 이	0.00587	0.00282	0.01581	0.01175	0.00606	0.02334

표 4 각 분포별 RMSE

표 4는 철원, 보은의 풍속 분포를 추정된 와이블 분포와 SNP 밀도함수의 RMSE

값과 RMSE(와이블) - RMSE(SNP)의 차이를 보여주고 있다. 차이 값이 전부 양수가 나왔기 때문에 와이블 분포의 RMSE가 SNP 밀도함수의 RMSE보다 전체적으로 높다는 것을 알 수 있고 SNP 밀도함수가 이 지역에서 실제 풍속의 분포를 더 잘 적합한다고 할 수 있다.

그림 12 - 14는 철원과 보은지방의 실관측치 ECDF와 SNP 밀도함수 추정치의 ECDF, 그리고 와이블 분포 추정치의 ECDF를 나타낸 그림이다. 우리가 풍속의 실제 분포를 모르기 때문에 실관측치의 ECDF를 통하여 실제 분포를 추론해보고 추정한 SNP 밀도함수와 와이블 분포의 ECDF와 비교하여 어떤 밀도함수가 풍속 분포를 더 잘 추정하는지 확인하고자 한다. 우선 그림 12는 두 지역의 연간 풍속 데이터를 이용한 ECDF이다. ECDF의 형태를 보면 철원(上)의 경우 SNP 밀도함수와 와이블 분포가 비슷하지만 조금은 SNP 밀도함수가 나아보고 보은(下)의 경우 SNP 밀도함수가 와이블 분포에 비해 좀 더 잘 적합되고 있는 모습을 볼 수 있지만 그 차이는 그리 크지 않다. 그림 13 낮 시간대의 ECDF를 보면 SNP 밀도함수와 와이블 분포 모두 적절하게 실관측치의 ECDF를 따라가고 있는 것을 볼 수 있으나 모수의 개수가 적은 와이블 분포가 SNP 밀도함수에 비해 효율적인 것을 추론할 수 있다. 그러나 그림 14 밤 시간대의 ECDF를 보면 와이블 분포의 ECDF가 실관측치의 ECDF를 잘 따라가고 있지 못하지만 SNP 밀도함수의 ECDF는 잘 따라가고 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 밤 시간대에는 SNP 밀도함수가 와이블 분포보다 더 좋은 방법이라는 것을 추론할 수 있다.

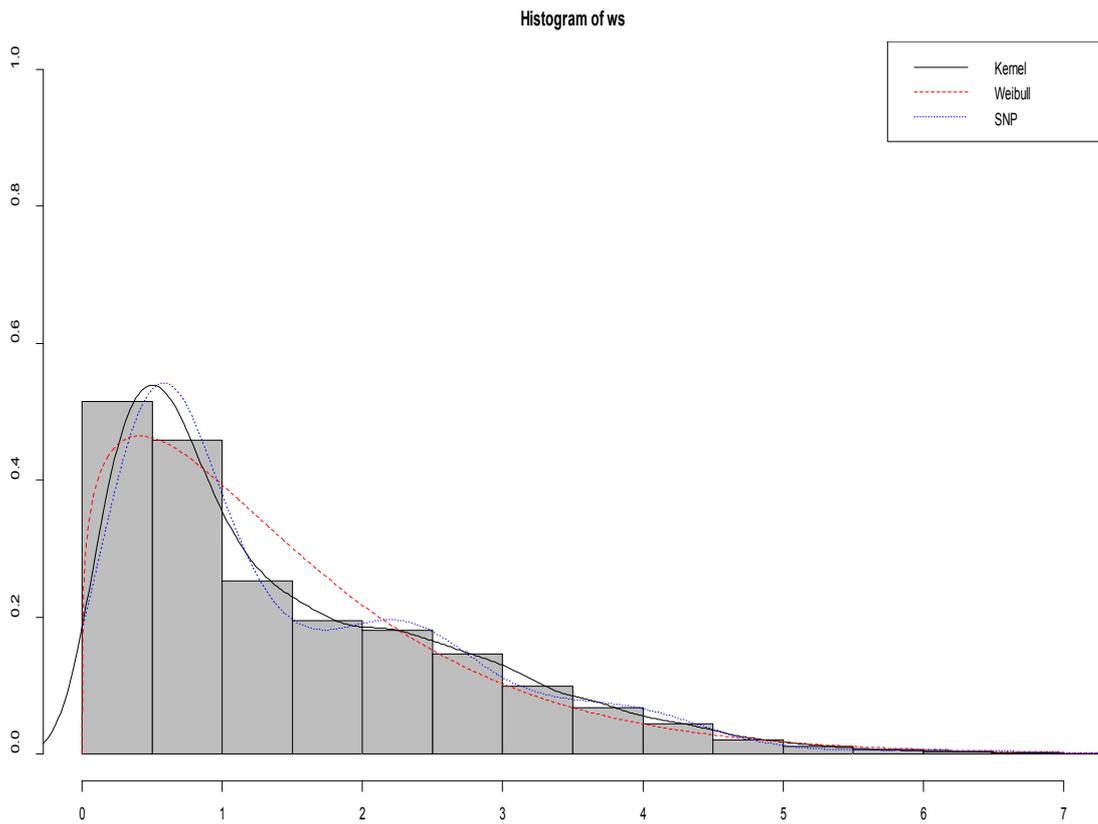
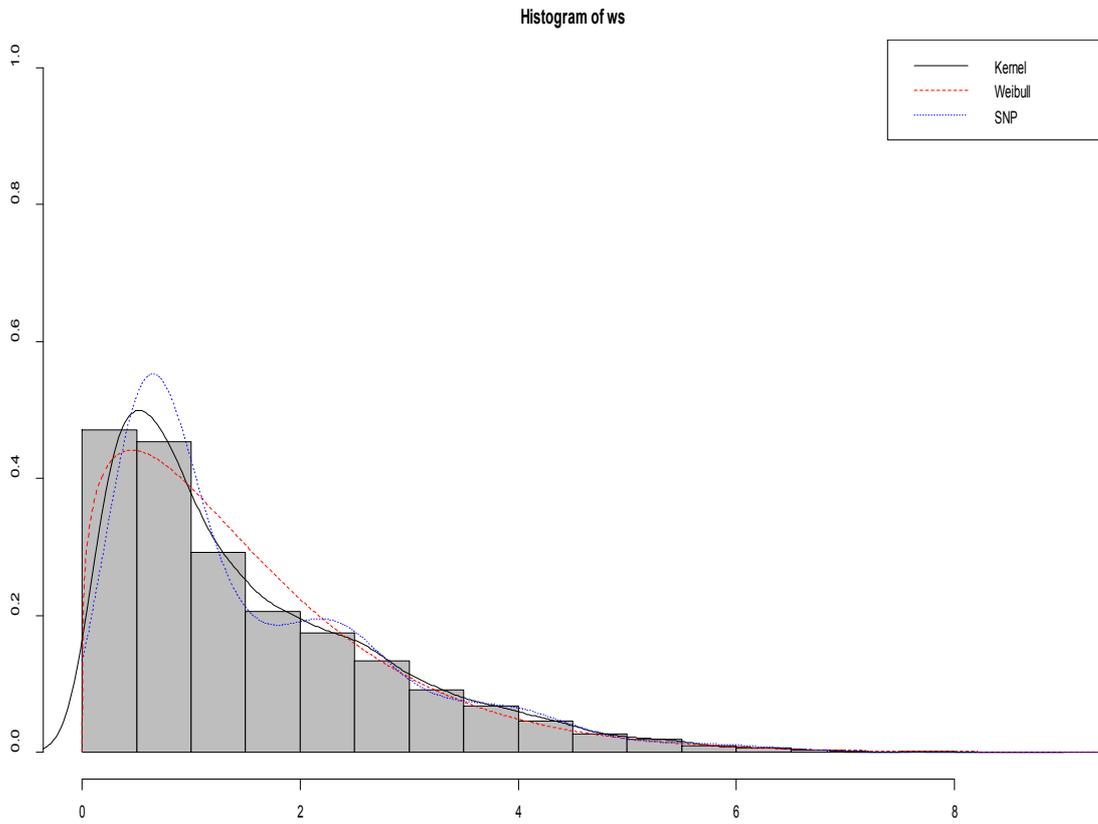


그림 9 칠원(上)과 보은(下) 2016년 연간 풍속 히스토그램과 Kernel, Weibull, SNP 밀도함수

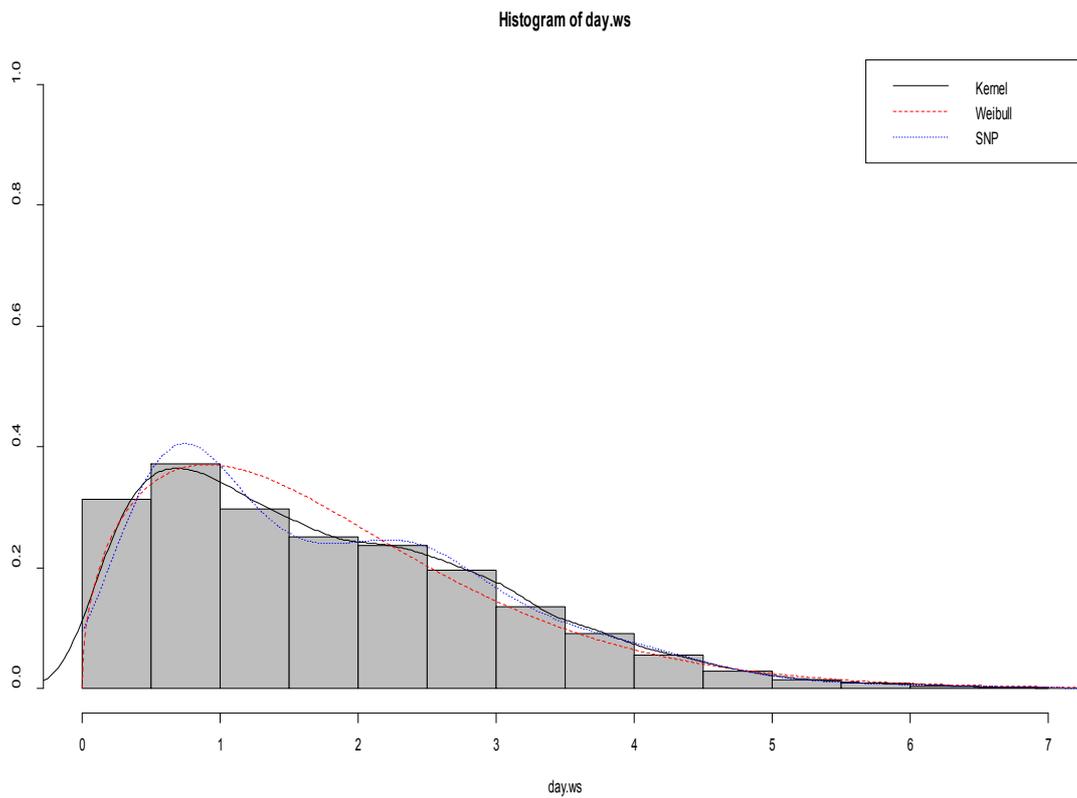
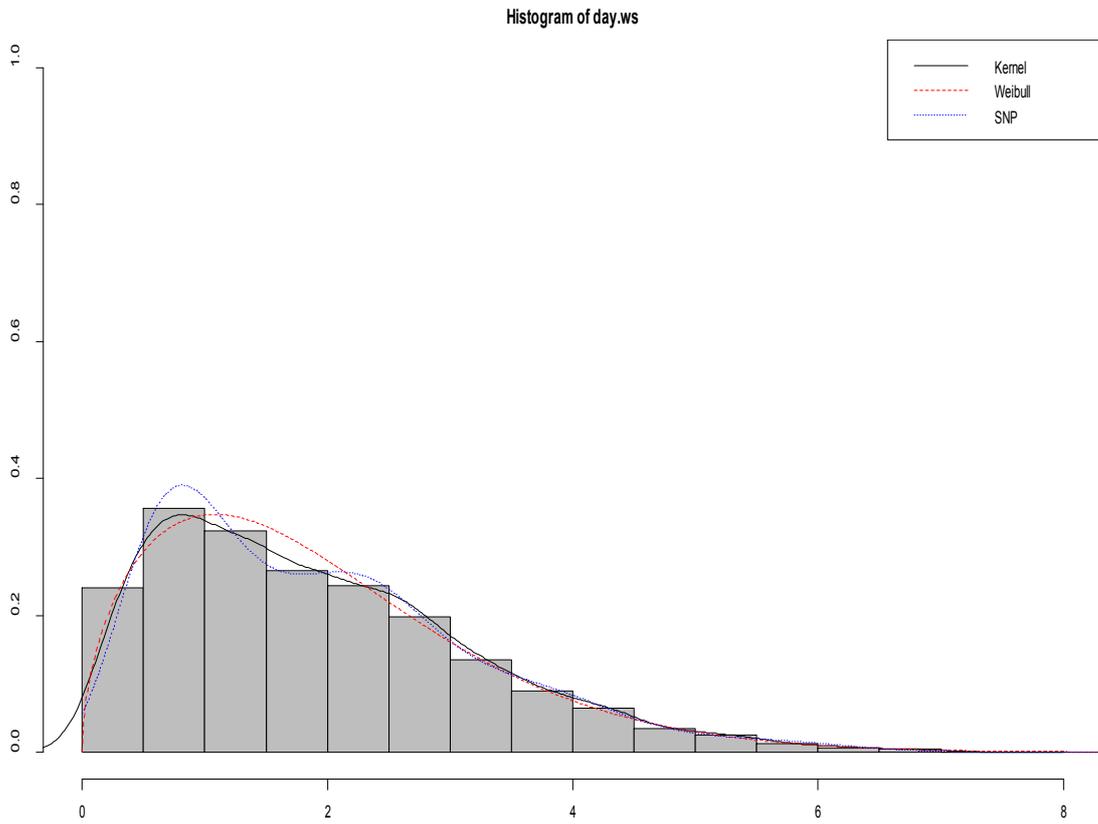


그림 10 철원(上)과 보은(下) 2016년 낮 시간대 히스토그램과 Kernel, Weibull, SNP 밀도함수

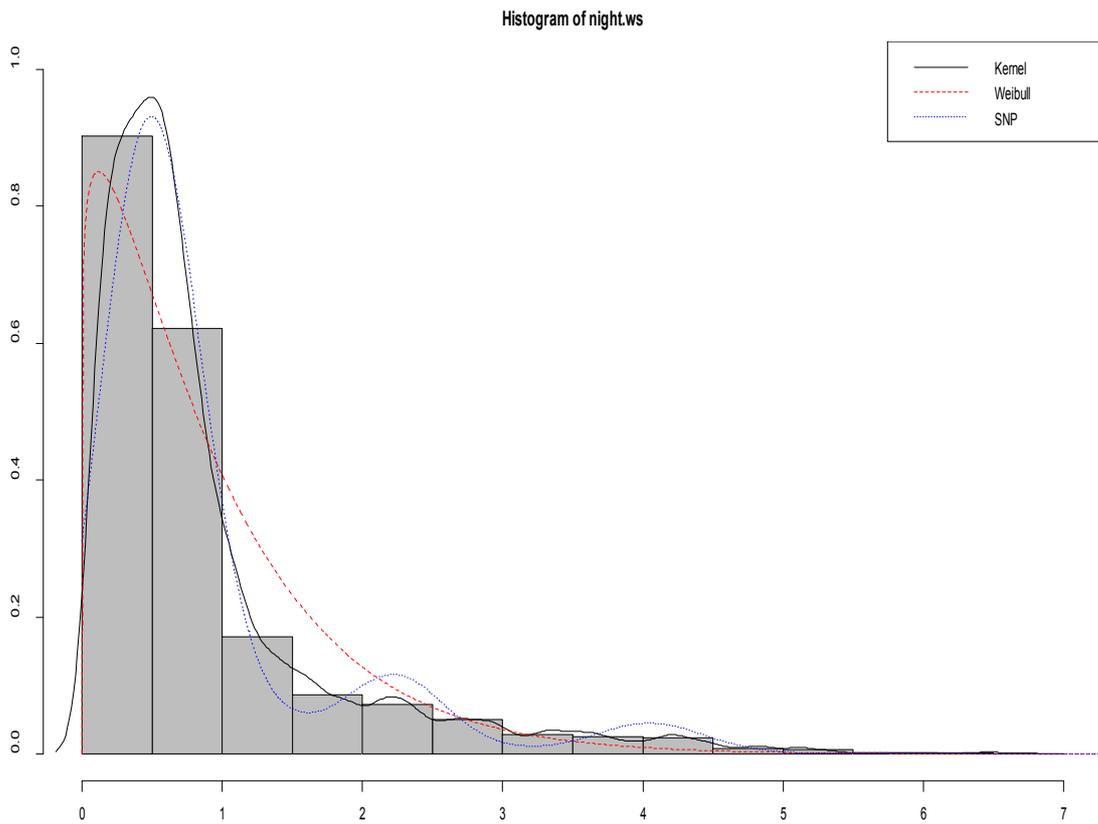
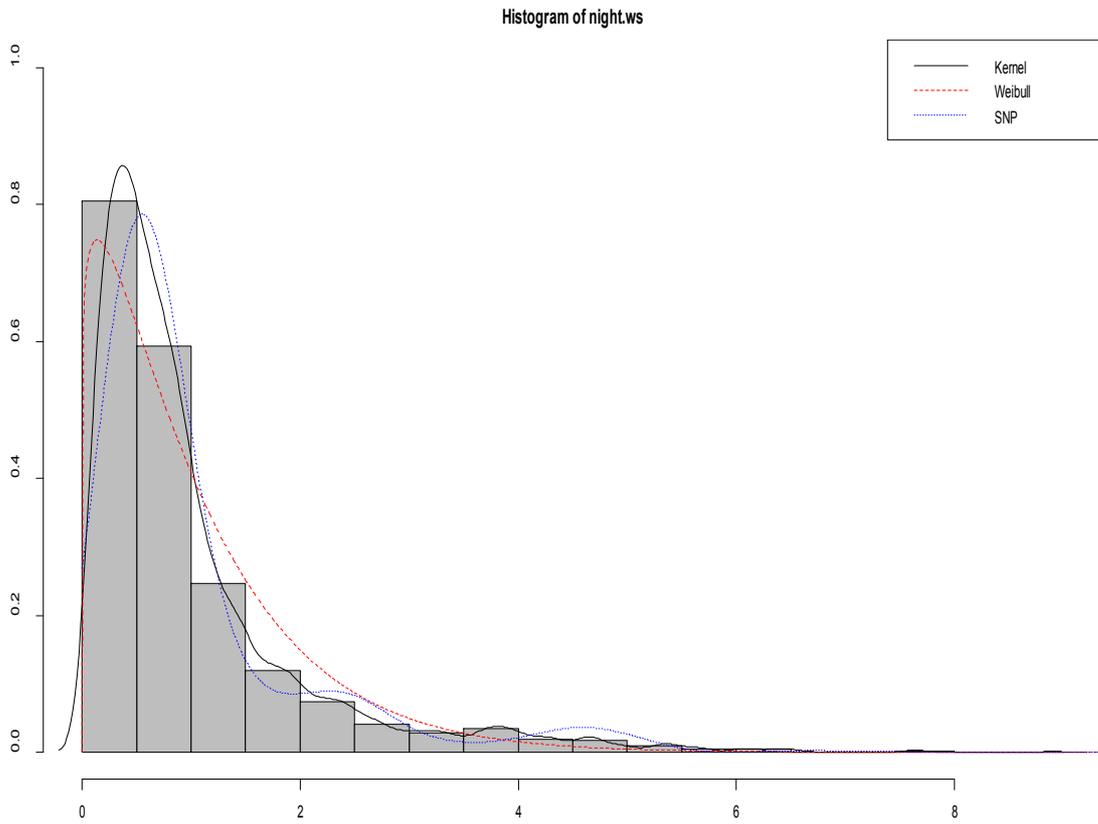


그림 11 철원(上)과 보은(下) 2016년 밤 시간대 히스토그램과 Kernel, Weibull, SNP 밀도함수

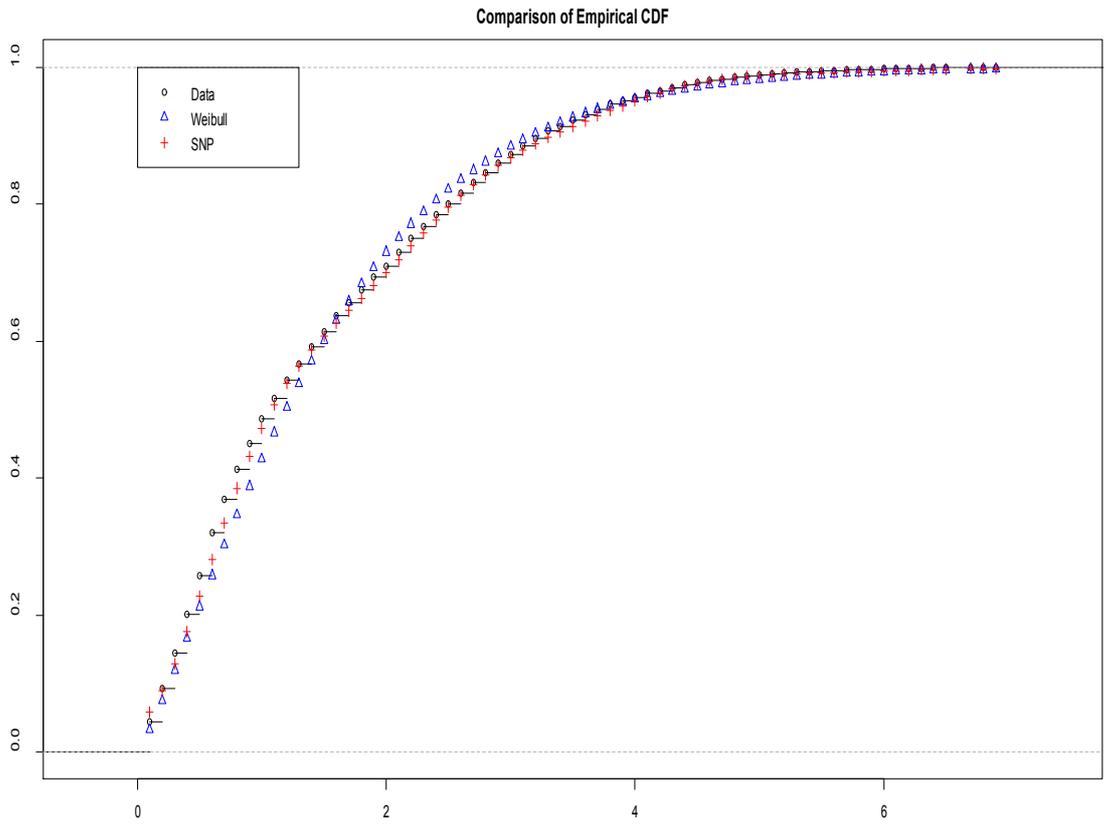
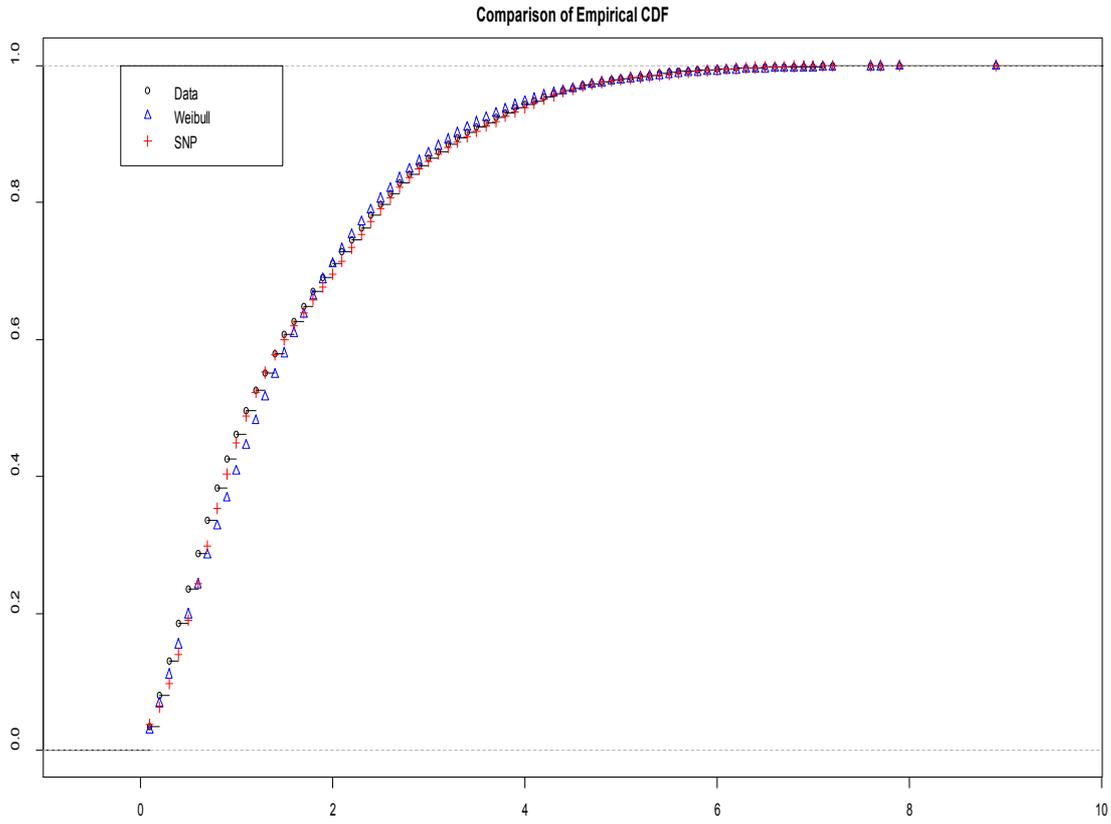


그림 12 철원(上)과 보은(下) 2016년 연간 풍속, Weibull, SNP의 ECDP

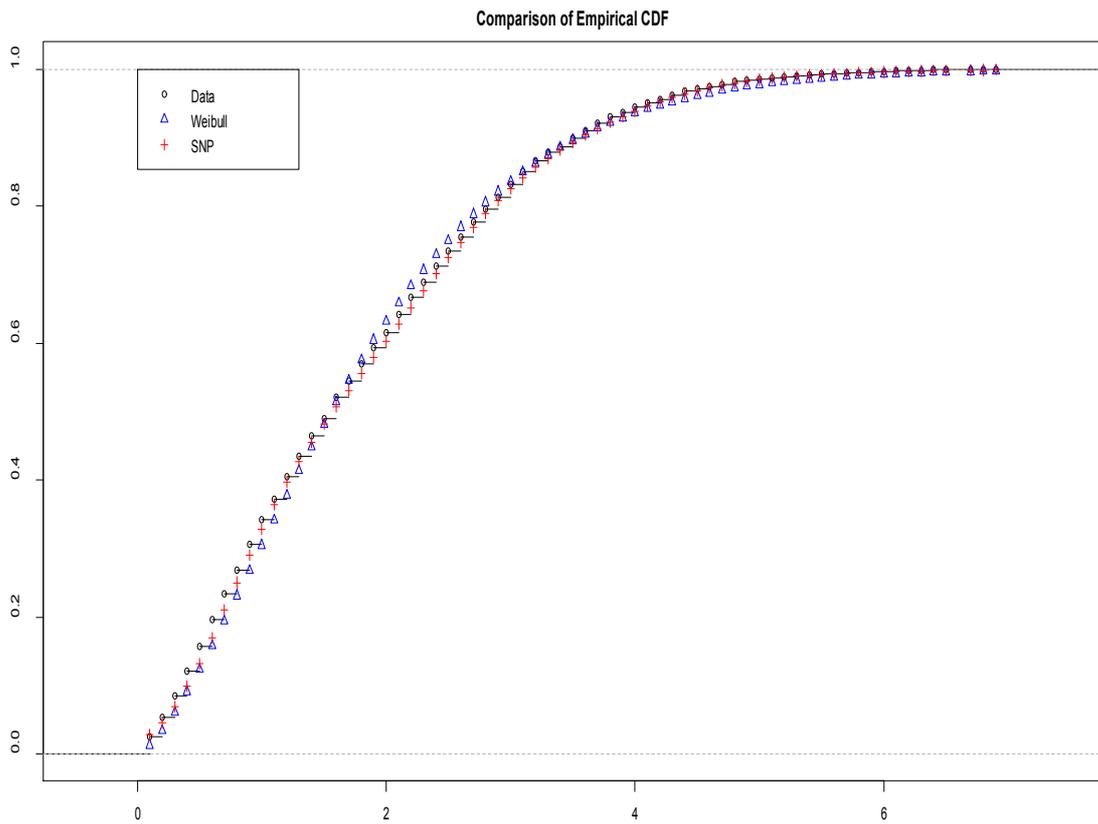
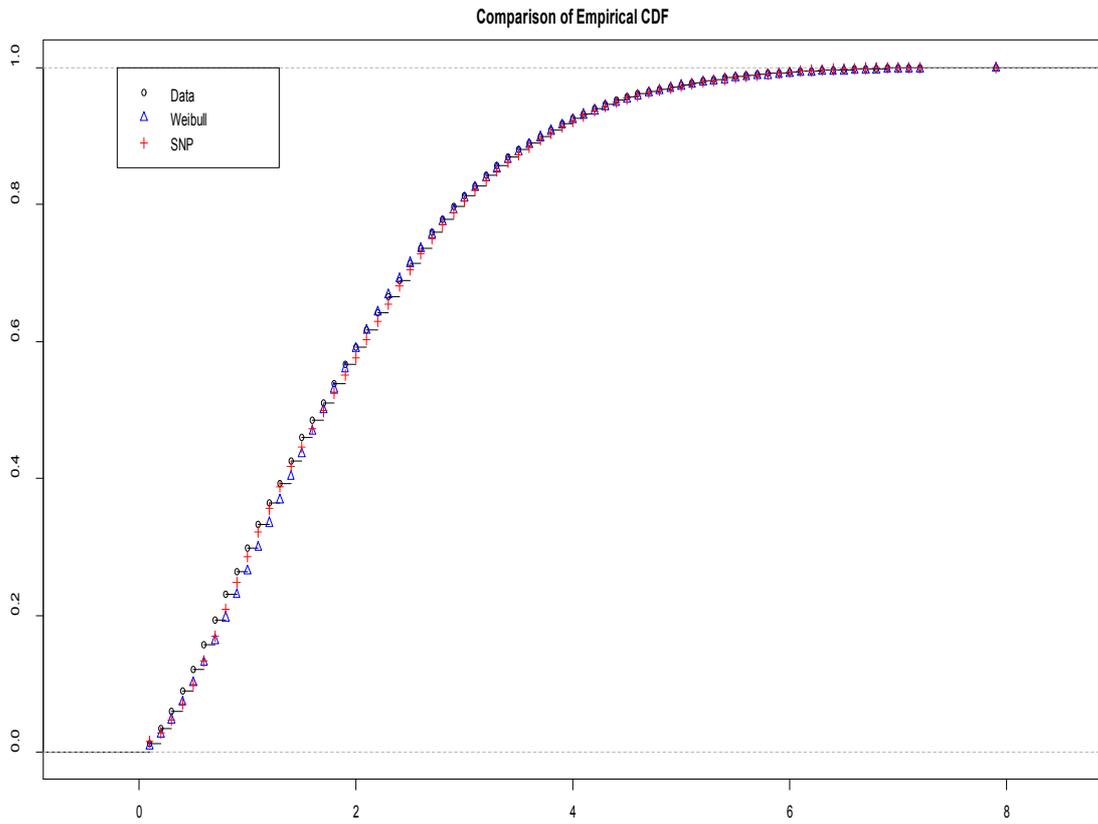


그림 13 철원(上)과 보은(下)2016년 낮 시간대 풍속, Weibull, SNP의 ECDP

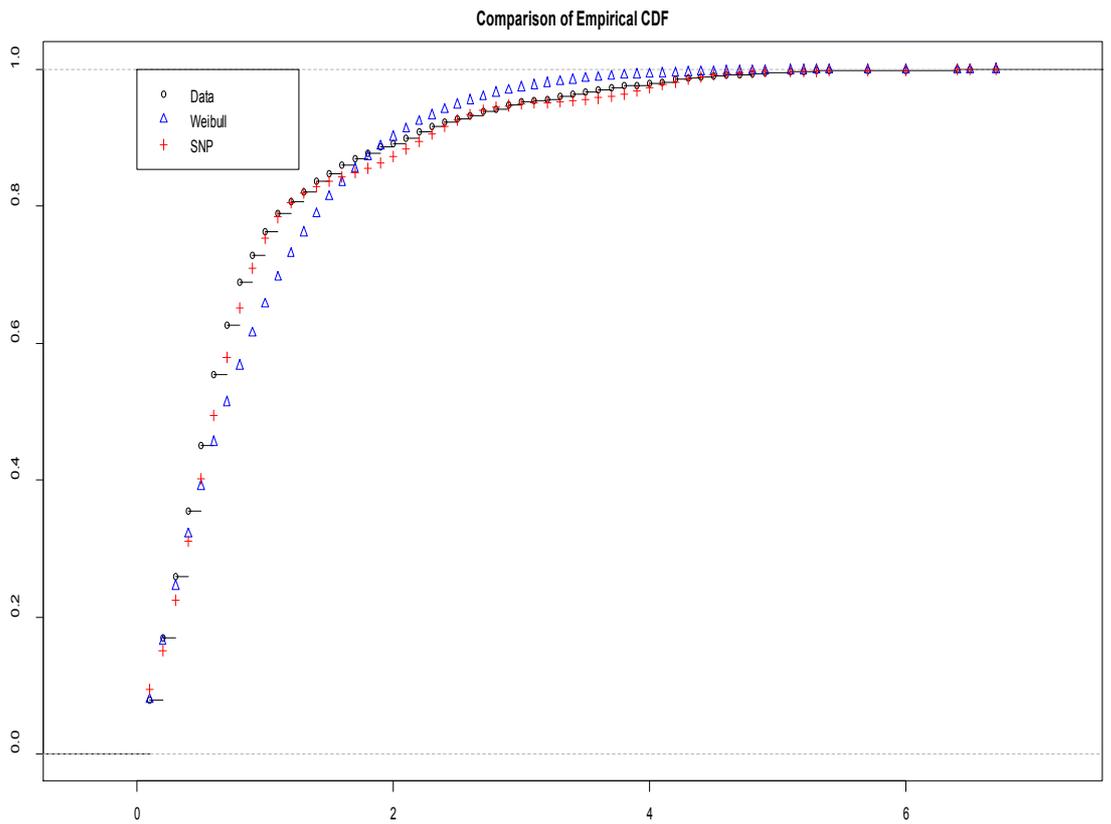
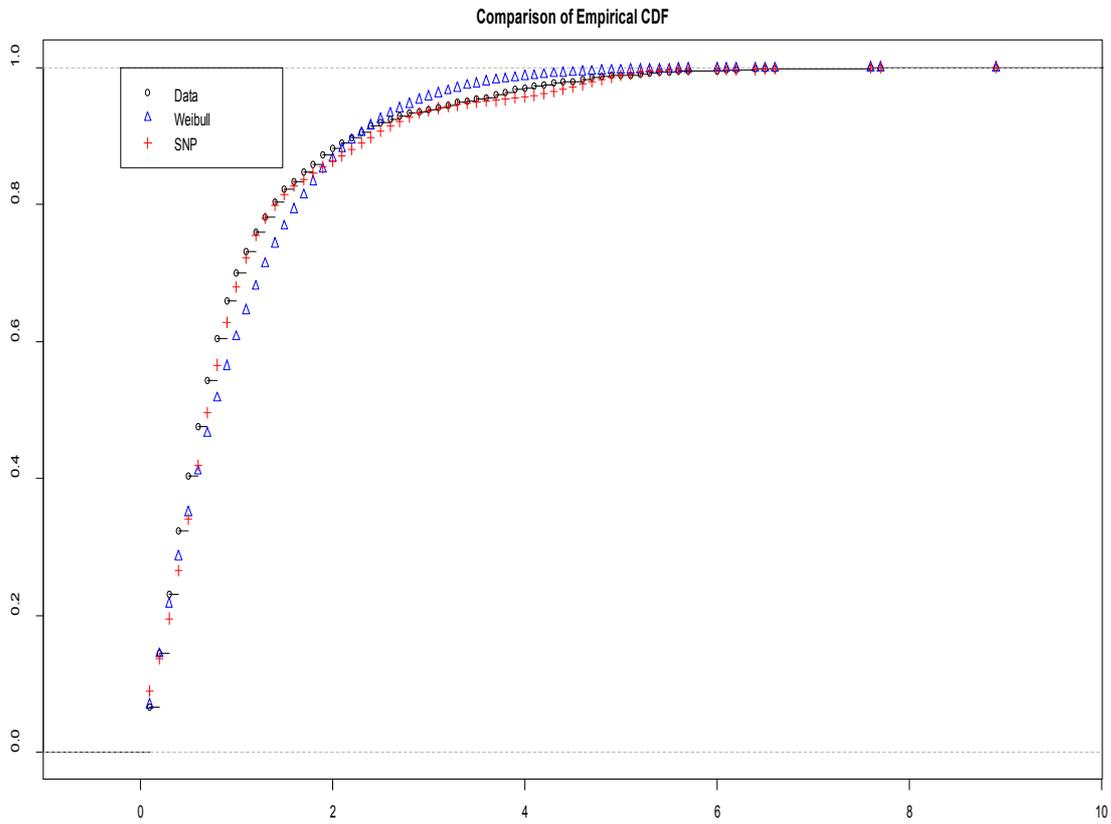


그림 14 철원(上)과 보은(下)2016년 밤 시간대 풍속, Weibull, SNP의 ECDP

제 5 장 결론

지금까지 철원과 보은지방의 연간, 낮 시간대, 밤 시간대의 풍속 분포에 대하여 추정을 하였다. 철원과 보은지방은 대륙성 기후가 나타나는 내륙 산지지형으로 낮과 밤의 풍속 분포의 형태가 다르다는 것을 3장 4절과 4장 3절의 히스토그램을 통하여 알 수 있었다. 지금까지 많은 풍속 분포 추정에 관한 연구는 와이블 분포를 사용하여 행해져 왔다. 하지만 복잡지형에서 낮과 밤의 풍속 분포가 다른 경우가 있었고, 이 경우 분포로 정확히 추정할 수 없는 경우가 생기며 이를 혼합확률분포인 혼합와이블 분포로 추정하면 잘 적합된다는 연구가 있었다.(송호성과 권순덕, 2012) 본 논문에서는 낮과 밤의 풍속이 다르게 나타나는 지역에서 와이블 분포가 잘 적합되지 않는 경우가 있고 이를 SNP 밀도함수를 통하여 추정하면 잘 적합된다는 것을 4장 3절의 RMSE와 ECDF를 통하여 보였다. 비록 낮 시간대의 풍속 분포는 SNP 밀도함수가 와이블 분포와 비교하여 비슷하게 적합되나 모수의 효율성면에서 와이블 분포가 더 적합하다는 결론이 나왔으나 밤 시간대에 와이블 분포보다 더 우수하게 적합되는 모습을 보였다. 이를 종합하면 풍속 분포의 추정에 있어서 와이블 분포가 잘 적합되지 않는 경우 SNP 밀도함수가 그 대체제가 될 수 있다는 것으로 보인다. 풍력발전에 있어서 풍속의 중요한 요인이므로 이에 대한 정확한 분포 추정은 필수적이라 할 수 있다. 그러므로 와이블 분포가 잘 적합되지 않는 경우 SNP 밀도함수는 풍속 분포추정에 대한 또 다른 분포 추정방법이 될 수 있을 것이라 생각한다. 1년이라는 짧은 시간의 풍속 데이터로 계절, 월별 요인 각각을 따로 분석하지 못한 것은 한계라고 생각되며 차후 장기 데이터를 통하여 계절, 월별 요인을 분리하여 분석한다면 더 정확한 풍속 분포의 형태를 추정할 수 있으리라 생각된다. 더 나아가 전력량 추정을 이용한 연구를 추가적으로 진행한다면 더 정확한 비교 분석이 될 것이라 생각한다.

참고문헌

권영일, 나도백, 조흥곤, "풍력발전", 한국과학기술정보연구원, 서울, 2002.

International Energy Agency, World Energy Outlook, OECD/IEA, 2013.

한국에너지공단, 신재생에너지보급통계, 2015

Han, SuHyeon, Hyun Woo Shin. "Policy trends of renewable energy in Korea." Renewable Energy Research and Application (ICRERA), 2014 International Conference on. IEEE, 2014.

Seo, Chul Soo, et al. "Offshore wind power planning in Korea." Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on. IEEE, 2013.

고경남, 허종철, 풍력공학입문, 문운당, 2007.

송호성, 권순덕. "혼합확률분포를 이용한 복잡지형의 풍력자원 평가." 한국태양에너지학회 논문집 33.2 (2013): 18.

Gallant, A. Ronald, Douglas W. Nychka. "Semi-nonparametric maximum likelihood estimation." *Econometrica: Journal of the Econometric Society* (1987): 363-390.

Gallant, A. Ronald, George Tauchen. "Seminonparametric estimation of conditionally constrained heterogeneous processes: Asset pricing applications." *Econometrica: Journal of the Econometric Society* (1989): 1091-1120.

Lee, Joon Haeng, Junmo Song. "Valuation of Long Maturity KIKO Options Under the Stochastic Volatility Model." *Asia Pacific Journal of Financial Studies* 43.4 (2014): 492-529.

Andersen, Torben G., Luca Benzoni, Jesper Lund. "An empirical investigation of continuous time equity return models." *The Journal of Finance* 57.3 (2002): 1239-1284.

Phillips, Peter CB. "ERA's: A new approach to small sample theory." *Econometrica: Journal of the Econometric Society* (1983): 1505-1525.

Justus, C. G., et al. "Methods for estimating wind speed frequency distributions." *Journal of applied meteorology* 17.3 (1978): 350-353.

Tuller, Stanton E., Arthur C. Brett. "The characteristics of wind velocity that favor the fitting of a Weibull distribution in wind speed analysis." *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23.1 (1984): 124-134.

Conradsen, K., L. B. Nielsen, L. P. Prahm. "Review of Weibull statistics for estimation of wind speed distributions." *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23.8 (1984): 1173-1183.

고경남, 김경보, 허종철, "제주 서광지역에 대한 풍력에너지의 장기간 (10년) 특성", 한국태양에너지학회 논문집, 2008, 28, 45-52.

문채주, 정의현, 심관식, 정권성, 장영학, "우리나라 지형특성을 고려한 풍력발전 타당성 연구", 한국태양에너지학회 논문집, 2008, 28, 24-32.

변지선, 고정우, 이병걸, "제주 북동부 지역의 와이블 풍속 확률 밀도 함수 적용에 대한 연구", 대한토목학회 학술대회, 2012, 2012, 2696-2699.

허종철, 고경남, 권기린, "기상데이터를 이용한 제주 해상풍력자원 평가", 한국동력
기계공학회 학술대회 논문집, 2009, 2009, 265-269.

정재식, "준비모수 모형을 이용한 원/달러환율의 특성분석", 국제경제연구, 2000, 6,
23-42.

정재식, 박영준, "준비모수 모형을 이용한 원/달러, 엔/달러 환율의 동태적 분석",
Journal of the Korean Data Analysis Society, 2011, 13, 901-913.