

WindSim을 이용한 싱가포르 바람지도 작성

김현구* · Jia-Hua Lee¹⁾

한국에너지기술연구원 풍력발전센터, ¹⁾싱가폴 국립대학교 기계공학과
(2010년 12월 24일 접수; 2011년 4월 14일 수정; 2011년 4월 25일 채택)

Wind Mapping of Singapore Using WindSim

Hyun-Goo Kim*, Jia-Hua Lee¹⁾

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

¹⁾Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore, 119077, Singapore

(Manuscript received 24 December, 2010; revised 14 April, 2011; accepted 25 April, 2011)

Abstract

We have established a wind map of Singapore, a city-state characterized its land cover by urban buildings to confirm a possibility of wind farm development. As a simple but useful approximation of urban canopy, a zero-plane displacement concept was employed. The territory is divided into 15 sectors having similar urban building layouts, and zero-plane displacement, equivalent roughness height at each sector was calculated to setup a terrain boundary condition. Annual mean wind speed and mean wind power density map were drawn by a CFD micro-siting model, WindSim where Changi International Airport wind data was used as an in-situ measurement. Unfortunately, predicted wind power density does not exceed 80 W/m^2 at 50 m above ground level which would not sufficient for wind power generation. However, the established Singapore wind map is expected to be applied for wind environment assessment and urban planning purpose.

Key Words : Singapore, Wind map, CFD(Computational Fluid Dynamics), Urban canopy, Zero-plane displacement

1. 서론

도시국가인 싱가폴은 말레이 반도 최남단, 필리핀과 인도네시아 중간의 적도 부근에 위치하고 있으며 기후통계에 따르면 아침 최저 23°C 에서 낮 최고 32°C 의 열대 기후대이다. 적도에서는 태양복사가 강하기 때문에 바람이 수렴하고 공기가 상승하는 열대 수렴대가 형성되어 이른바 적도무풍대(doldrums)가 형성된다. 따라서 싱가폴은 저풍속 지역임을 쉽게 예상할

수 있다.

그럼에도 불구하고 싱가폴 입장에서는 현재 전 세계를 휩쓸고 있는 재생에너지의 거대한 흐름에 동참하고자 하는 정부, 산업계 및 연구계의 열망이 매우 높다. 이에 싱가폴의 풍력자원 잠재력이 떨어진다고 하더라도 그 사실을 과학적으로 확인하기 위하여 싱가폴 바람지도를 작성하였다.

싱가폴 바람지도 작성은 싱가폴의 지형특성상 도시건물군으로 형성되는 도시캐노피(urban canopy)의 효과적인 대기유동장 모델링이 관건이며, 따라서 본 연구에서는 도시캐노피의 영변위를 산출하여 해석하는 실용적인 모델링 방법을 적용하였다.

*Corresponding author : Hyun-Goo Kim, Wind Energy Center, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea
Phone: +82-42-860-3376
E-mail: hyungoo@kier.re.kr

2. 바람지도 입력자료

대기유동장의 지배방정식인 연속방정식과 운동방정식 즉 나비에-스톡스(Navier-Stokes) 방정식을 수치 해석적으로 풀기 위해서는 입력자료로서 지면조건과 기상조건이 주어져야 한다.

2.1. 지면자료(terrain data)

싱가폴은 국토의 23% 만이 숲 또는 호수이고 이를 제외한 나머지 77% 영역에는 평균높이 15 m의 건물 약 6만 채가 전역을 덮고 있다(Figs. 1과 2 참조).

바람지도 작성에 필요한 지면조건은 지형고도(terrain elevation)와 지표면거칠기(surface roughness)이다. 지형고도로는 수평공간해상도 90 m의 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission) 공개자료를 이용하되(Fig. 3) 건물군 주제도(Fig. 2)에 대한 GIS(Geographical Information Systems) 해석을 통하여 산출한 영변위를 합산한 지형고도를 사용하였다.

지표면거칠기는 수평공간해상도 1 km의 MODIS 토지피복도(land cover)를 기본으로 하되 싱가포르 국가 지리정보를 이용하여 수계, 녹지 등의 영역에 대하여 설정 해상도를 상세화 하였다. 도시캐노피 지역에서는 도시건물군 GIS 해석을 거쳐 영변위 방식에 의해 산출된 거칠기높이(roughness height)와 MODIS 토지 피복도로부터 산출된 거칠기높이 중 큰 값을 배정하였다. 도시캐노피에서의 영변위 산출방식에 대해서는 3.1에서 자세히 설명하기로 한다.

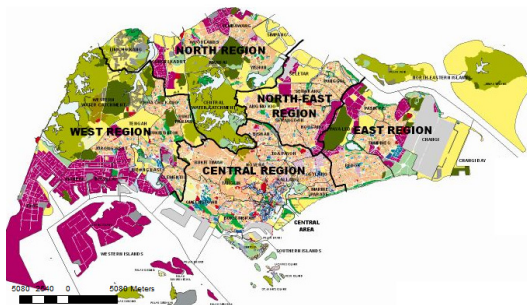


Fig. 1. Land cover map of Singapore.

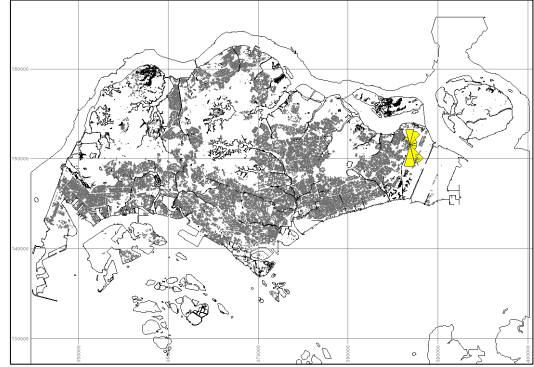


Fig. 2. Theme map of buildings (source: Singapore Air Force Mapping Unit).

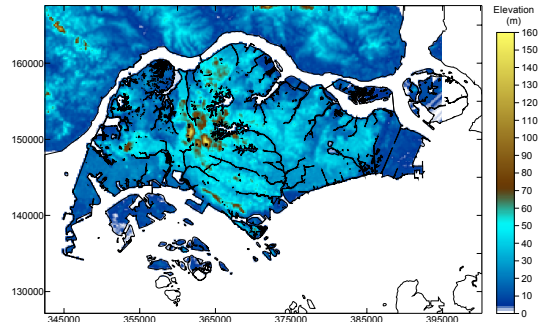


Fig. 3. Topography map of Singapore.

2.2. 기상자료(climatology data)

풍력자원평가를 위한 국소배치(micrositing) 바람 지도를 작성하기 위해서는 대상영역의 국지기상 대표 지점에서 측정된 1년 이상의 풍향자료가 필요하다.

본 연구에서는 창이(Changi) 국제공항 기상관측대(Fig. 2의 우측에 도시된 바람장미 지점)의 2006년도 기상자료를 싱가포르 NEA(National Environment Agency)로부터 입수하여 사용하였다. 창이 국제공항 풍향자료는 지상 10 m 높이의 관측자료이며 다소 결측이 존재하지만 싱가포르 유일의 WMO(World Meteorological Organization) 등록 기상관측소이다.

2006년도 기상통계분석에 따르면 평균풍속 2.3 m/s, 최대풍속 8.8 m/s이며 북북동풍과 남남서풍의 탁월한 두 개의 주풍향이 나타난다(Fig. 4). Fig. 5에 도시한 창이 국제공항의 풍속분포 특성을 보면 와이블(Weibull) 확률분포함수로 곡선접합할 경우 형상계수

와 등급계수가 각각 $k=1.4$, $c=2.51$ 로 나타났다. 이는 풍력의 중요한 비중을 차지하는 고풍속 영역의 분포 빈도가 매우 적으며 따라서 풍력밀도 역시 매우 낮은 수준일 것임을 의미하는 값이다.

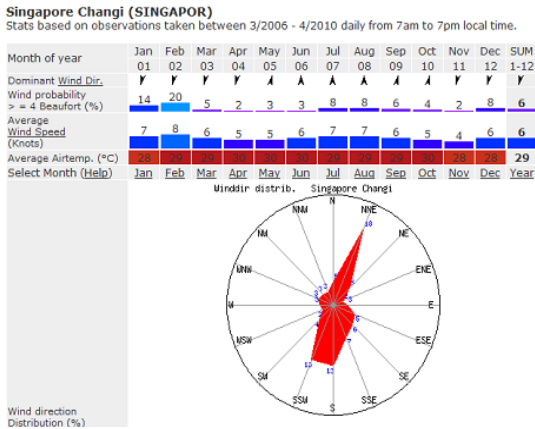


Fig. 4. Climatology observation data of 2006 at Changi Airport.

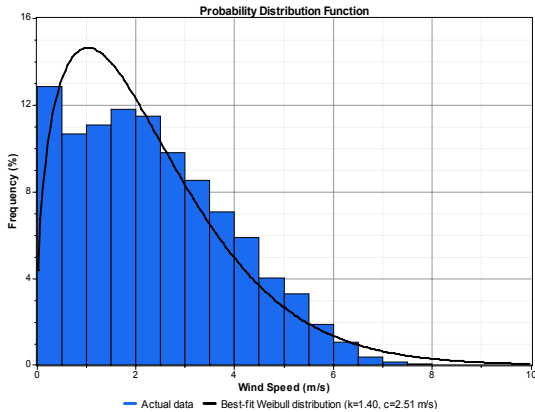


Fig. 5. Wind speed distribution at Changi Airport.

3. 바람지도 작성방법

3.1. 도시캐노피 모델링

Fig. 6은 도시건물군을 지나가는 대기유동장의 풍속 분포 특성을 도시한 그림으로, 건물의 영향을 직접적으로 받는 대기경계층 하단부 도시캐노피 내에서는 복잡한 유동형상을 보이지만 건물의 영향이 약해지는 천이층(transition layer)을 지나 로그층(logarithmic layer)에서는 대기경계층 풍속분포가 실험적 이론식

인 로그법칙을 따르는 형상으로 복귀함을 보여준다. 이때 가상의 로그법칙 풍속분포 영점이 시작되는 높이를 영변위(zero-plane displacement, d)라고 하며 그에 해당하는 거칠기높이(roughness height, z_o)로 나타낼 수 있다.

영변위와 거칠기높이는 건물군의 형상 및 배치에 따라 변화한다. 특정 도시건물군 구역에 대한 상세한 풍환경 분석이 필요한 경우라면 개별 건물형상 및 배치를 모두 고려한 대기유동장 상세해석이 필요하나, 반대급부로 엄청난 해석부하 즉, 전산자원과 계산시간을 감수하여야 한다.

본 연구는 싱가포르 전국도에 대한 바람지도를 작성하여 풍력자원 잠재량의 개괄을 평가함이 그 궁극적인 목적이다. 따라서 엄청난 계산부하가 요구되는 도시거리(urban street) 수준의 대기유동장 상세해석은 그 개괄적 평가라는 목적에 비추어볼 때 현실적으로 부적합하다. 대신 실용적이면서도 해석결과의 신뢰성을 확보할 수 있도록 적절한 수준으로 간략화된 도시건물군 모델링 방법의 도입이 요구된다.

이에 본 연구에서는 영변위 방식을 채택하였는데, 영변위 모델링이란 도시캐노피 내부의 대기유동장은 무시하고 그 외부의 대기유동장을 해석하는 것이다. 즉, 영변위 상부의 대기유동장은 평지 대기경계층의 풍속분포인 로그법칙을 따른다고 가정하여 지면조건을 $h=0$ 인 실제지면이 아닌 $h=d$ 인 가상의 지면에 부과하는 것이다. 여기서 h 는 지표면으로부터의 연직높이이다. 이를 위해서는 도시캐노피에서의 영변위와 지표면거칠기가 산정되어야 한다.

도시건물군에서 영변위 산출방법에 대하여 종합적으로 고찰한 선행연구(Grimmond와 Oke, 1999)에 따르면 간단하면서도 실용적인 영변위 및 거칠기높이의 계산식은 각각 Eqs. (1) 및 (2)와 같다.

$$d = \frac{2}{3} z_H \tag{1}$$

$$z_o = \gamma(z_H - d) \tag{2}$$

위 식에서 γ 는 건물군의 형상 및 밀집도에 따라 0.2~0.4의 값을 갖는 상수이며 z_H 는 건물군의 평균높이이다.

영변위 방식을 적용하여 지면정보를 재산정하는 순서를 설명하면 다음과 같다. Fig. 1의 토지피복도에 따라 15개로 분류된 영역에 대해 Fig. 2의 건물군 주제도로부터 해당 영역의 건물군 평균높이를 산출한 후 Eqs. (1)과 (2)를 이용하여 영역별 영변위 및 거칠기높이를 산출한다. 그리고 Fig. 3의 SRTM 지형고도에 산출된 영변위를 합산하여 새로운 지형고도를 생성하며, 지면거칠기는 2.1절에서 설명한 바와 같이 MODIS 거칠기높이와 Eq. (2)로 계산된 거칠기높이 중 큰 값으로 갱신한다.

싱가폴은 매우 평탄한 지형으로 최고로 높은 티마산의 해발고도는 불과 165 m 밖에 되지 않는다(Fig. 3). 따라서 대기경계층 풍속분포가 단지 건물군에 의해서만 영향을 받는다는 Fig. 6의 가정 하에 영변위 방식을 적용한 바람지도 작성방법은 유효하다고 판단된다.

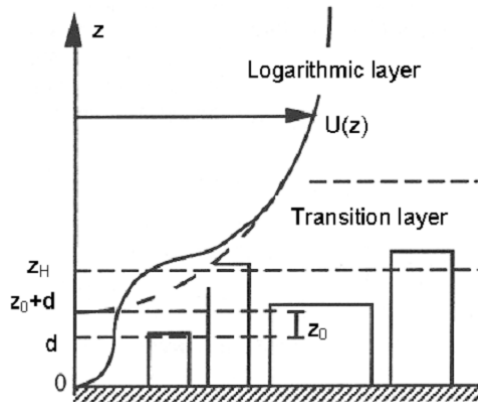


Fig. 6. Atmospheric boundary layer structure in an urban canopy.

3.2. 국소배치 소프트웨어 선정

본 연구에서는 전산유동해석 기반의 국소배치 (micrositing) 프로그램인 WindSim v5.0을 이용하였다(WindSim AS, 2010). WindSim은 특히 산지지형에서의 난류 대기유동장 수치해석을 통하여 국소배치 바람지도를 작성함으로써 풍력단지를 설계하는 소프트웨어이다(김 등, 2010).

WindSim은 Svenssen 등의 산림캐노피(forest canopy) 모델이 포함되어 있으며(Svensson과 Haggkvist,

1990), 산림의 다공도와 두 개의 항력계수를 입력하여야 한다. 그러나 산림캐노피 또는 도시캐노피에서 이 세 가지 계수를 추정하는 일반적인 방법이 없기 때문에 현재로서는 실측자료에 의존하여 이들 계수를 조정단계가 필연적으로 요구된다. 따라서 본 연구의 경우에는 이러한 산림캐노피 모델을 적용하는 것은 부적합하다고 판단하였다. 대신 3.1절에서 설명한 바와 같이 영역별 건물군 평균높이를 산정하고 Eq. (1)로부터 영변위를 산출하여 지형고도에 합산하였으며 Eq. (2)로부터 건물군의 거칠기높이를 계산하여 지면자료로 입력하였다.

계산영역은 Fig. 5와 같이 싱가포르를 포함하며 동서남북으로 2 km 여유공간을 갖는 영역으로 설정하였고 전산영역을 90 m 지형해상도로 전산유동해석하였다.

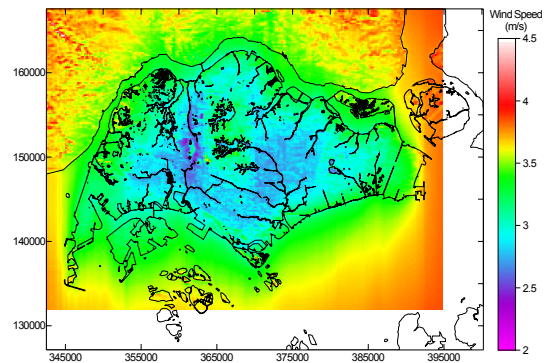


Fig. 7. Annual mean wind speed map of Singapore (50 m above ground level).

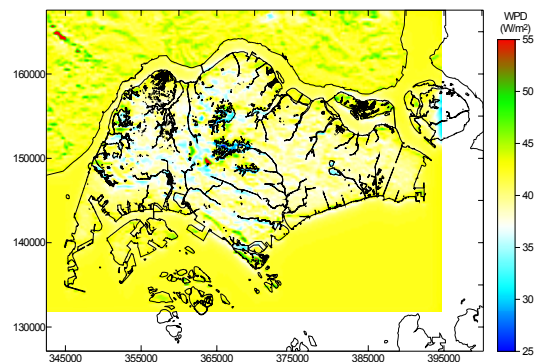


Fig. 8. Annual mean wind power density map of Singapore (50 m above ground level).

4. 바람지도 작성결과

Figs. 7과 8은 각각 싱가포르 평균풍속 및 평균풍력밀도 분포도로 지면 50 m 높이에서 추출된 바람지도이다. 참고로 국소배치 바람지도 작성을 위한 풍황자료로 창이 국제공항 기상관측대의 2006년도 계측자료를 이용하였으므로 2006년도 연평균 풍속 및 풍력밀도 바람지도가 정확한 표현이다.

서론에서 예상하였듯이 싱가폴은 저풍속 영역이며 고풍속 출현빈도가 매우 낮기 때문에 Figs. 7과 8에서 확인되듯이 평균풍속 및 평균풍력밀도 최대값은 싱가포르 중심부의 치마산 정상에서 각각 4.7 m/s, 77 W/m²에 불과하다. 참고로 미국 재생에너지연구소(NREL; National Renewable Energy Laboratory)의 바람등급 구분에 따르면 이는 가장 낮은 1등급에 해당되어 풍력발전 효율성이 거의 없다고 판단할 수 있다.

5. 결론

풍력자원 잠재량의 확인을 통한 풍력발전 가능성을 판단하기 위하여 싱가포르 바람지도를 작성하였다. 예상한 바와 같이 싱가포르 전역은 지면 50m 높이에서 바람등급 1등급에 불과한 매우 저조한 풍력자원 분포를 보였기에 풍력발전의 도입은 부적합하다고 판단할 수 있다.

본 연구에서는 학술적인 관점에서 도시건물군으로 형성되는 도시캐노피의 영향을 고려한 바람지도 작성시 간단하면서도 실용적인 방법으로 영변위 모델을 적용하였다. 즉, 지리정보시스템 해석을 통하여 건물군의 특성을 통계분석하여 영역별 영변위와 거칠기높이를 산출하여 지면조건으로 부과함으로써 효과적으

로 도시건물군에 의한 지면거칠기 상승효과를 고려한 대기유동장 해석을 수행하였다. 그러나 이러한 국지 기상 해석의 정확도에 대해서는 차후 실측자료와의 비교를 통한 검증이 필요하다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 싱가포르국립대학교(National University of Singapore)의 기술지원 요청 및 연구원 파견에 의하여 한국에너지기술연구원과의 국제공동연구로 수행되었으며, 한국에너지기술연구원의 부처임무사업의 재정적 지원을 받았습니다.

작성된 싱가포르 바람지도는 싱가포르 도시풍환경 평가에 활용할 수 있도록 싱가포르 도시계획국(Singapore Urban Planning Department)에 제출되었습니다.

참 고 문 헌

- 김현구, 황효정, 2010, 국가바람지도 및 국가지리정보에 의한 국내 해상풍력단지 개발계획의 비교분석, 한국태양에너지학회 논문집, 30(5), 44-55.
- 김현구, 황효정, 김주현, 고수희, 정우식, 2010, OpenWind를 이용한 풍력단지설계 사례연구-영덕풍력단지, 한국환경과학회지, 19(9), 1169-1175.
- Grimmond, C. S. B., Oke, T. R., 1999, Aerodynamic properties of urban areas derived from the analysis of surface form, *J. Appl. Meteorol.*, 38, 1262-1292.
- WindSim AS, 2010, WindSim 5.0 Getting Started.
- Svensson, U., Haggkvist, K., 1990, A two-equation turbulence model for canopy flows, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 35, 201-211.