

도시 고층건물 지붕에서의 소형 풍력발전기 발전량 예측

*최 형식¹⁾, **장 호남²⁾

Estimation of wind power generation of micro wind turbine on the roof of high rise buildings in urban area

*HyungSik Choi, **HoNam Chang

Key words : Micro wind turbine(소형풍력발전), Building integrated wind turbine(건물 일체형 풍력발전)

Abstract : Potential yield of micro wind turbine on the roof of urban high rise buildings is estimated. Urban wind profile is modeled as logarithmic profile above the mean building height with roughness length 0.8, displacement 7.5 m. Mean wind velocity from the meteorological agency data at the height of 50m is used. Wind velocity changes are simulated on the rectangular roof of 26, 45, 53 degree pitch and the circular roof by computational fluid dynamics and RNG k- ϵ turbulence models. Wind velocity increased approximately by a factor of the order of 270 % on the 26 degree pitched roof. In the 100 m and 200 m high buildings, wind enhancement is greater at the front side than at the center of the building. In the building arrangement model wind velocity changes abruptly and it becomes wind gusts. When commercial wind turbines are installed on the building roof, average power and annual power generation enhanced by 3~4 times than normal wind velocity at 50m and 6 kw wind turbine can generate 1053 kwh per month on the 26 degree pitched roof at 50m height and sufficiently supply electrical power with 15 household for common electrical use and food waste disposer. However, power output will vary significantly by the wind conditions in the order of ± 20 %.

Nomenclature

V : wind speed, m/s
D : rotor diameter, m
H : building height
 H_f : average building height
K : carman constant
 U_* : friction velocity
 U_h : wind velocity at the reference height
 λ_f : dimensionless frontal area
z : height
 z_o : roughness constant
d : displacement length
 ΔH : height above the roof.

subscript

BIWT : building integrated wind turbine

1. 서론

인류의 화석연료 사용에 따른 온실가스 배출로 인하여 기후변화가 진행 중이며 이에 대응하기 위하여 재생 가능한 에너지 개발과 에너지 절감을 위한 노력이 진행 중이다. 그 중 풍력에너지는 대형화에 성공하여 가장 빠르게 성장하는 재생에너지이며 육상 풍력발전을 넘어 해양 그리고 도심으로 그 범위를 확장하고 있다. 대부분의 인구가 밀집해 있고 대량의 에너지를 소비하는 도시에서 친환경 에너지를 생산하는 방향은 원거리에서 에너지를 전송하는 비용을 절약 하고 에너지 자원을 활용

1) 저자의 소속
E-mail : hschoi08@kaist.ac.kr
Tel : (042)350-5952 Fax : (042)350-3910

2) 저자2의 소속
E-mail : hnchang@kaist.edu
Tel : (042)350-3912 Fax : (042)350-3910

을 다원화 하는 방법으로 주목받고 있다. 최근 자체생산 에너지로 수요를 100 % 충족하는 그린홈의 개념이 제시되면서 건물에서 태양광, 풍력, 지열 등의 에너지원을 활용하는 방안이 연구되고 있다.

그 중 도심에서 사용될 수 있는 건물일체형 소형풍력발전(BIWT)은 영국, 미국 등에서 선도적으로 연구되고 있으며 시장 또한 급속히 성장하고 있다. 하지만 도심에서는 건물의 방해에 의한 풍속 감소로 인하여 풍력에너지 밀도가 낮으며, 난류와 돌풍에 따른 성능저하, 풍력발전기에 의해 전달되는 진동으로 인한 건물을 손상 문제 그리고 주거 생활에 방해가 되는 소음 문제로 인해 소형풍력 발전의 보급에 걸림돌이 되고 있다.¹⁾

이를 극복할 수 있는 대안으로 건물형상을 이용하여 낮은 풍속을 상승시킬 수 있는 건물 일체형 발전 그리고 진동과 소음이 적고 난류와 낮은 풍속에서 고효율의 성능을 보이는 수직형 풍력발전기가 주목을 받고 있다. 그리고 소형 풍력발전기 설치 타당성 평가를 위하여 투자 비 회수 기간 산정 작업이 필요하며 이를 위해 지역과 지형 그리고 설치 장소에 따른 발전기의 정확한 연간 발전량의 예측이 필요하다. 실측을 통해 산정하는 것은 많은 시간과 비용이 들기 때문에 CFD 기술을 사용하여 빠른 시간 내에 정확한 예측을 하는 연구가 진행 중이다.

본 연구는 기상청 풍력자원지도 보고서에 제시된 각 도시의 기상청 관측지점의 평균 풍속데이터를 바탕으로 우리나라의 대표적인 주거문화인 아파트 건물 옥상에서 소형 풍력발전기의 발전량을 2-D 시뮬레이션 하였다. 도시의 평균 풍속 데이터, 건물 지붕형상 그리고 세 가지 소형풍력발전기 모델을 가정하였다. 도심 교외의 주변 지역 평균 건물 높이가 10m 이고 50m 건물 높이의 15층 아파트의 다섯 가지 유형의 건물 지붕에서 일어나는 풍속 상승 효과를 분석하였다. 그리고 단독 빌딩 높이에 따른 풍속의 변화, 40m 간격으로 배치된 아파트 단지에서 풍속의 변화를 CFD를 통해 분석하였다. 시뮬레이션 결과로 얻은 상승된 평균 풍속으로 소형 풍력발전기 통해 얻을 수 연간 발전량을 계산하고 아파트 공동 관리 전기 비용을 얼마나 충당할 수 있는지 계산하였다. 향후 풍력자원지도 데이터를 바탕으로 지형과 도심 건물 특성에 따른 3-D 시뮬레이션을 통하여 보다 정확한 풍력발전량 산정 연구가 필요할 것이다.

2. 도심풍력 및 건물 모델

2.1 도심에서의 풍력자원

기상청에서 발간한 풍력자원지도 연구개발 보고서에 따르면 우리나라 주요 도시인 서울, 인천, 대전, 군산, 부산, 목포, 강릉에서의 풍속은 표1과 같다.²⁾

표1의 일급 도시 50m 고도에서 평균 풍속은 4.5 m/s이다. 도시의 지상 10m 높이에서는 주변 건물 영향에 의해 풍속이 2 ~ 3 m/s 에 머물지만 50m 높이인 건물 15 ~ 20층 높이에서는 4 ~ 5 m/s 가량의 보다 높은 바람이 불고 있다. 이 영역의 풍

속은 class 1에 속하는 낮은 풍속 에너지 영역이지만 높이와 건물 형상에 의해 증대되는 풍력 에너지를 활용하여 풍력발전량을 향상시킬 수 있다.

Table 1 Average wind velocity in cities

(m/s)	10m	30m	50m
서울	2.5	3.7	4.2
인천	2.6	4.0	4.5
대전	2.0	3.2	3.6
군산	2.6	3.8	4.2
부산	3.0	4.4	4.8
목포	3.7	4.9	5.4
강릉	3.1	4.3	4.8

2.2 도심 풍력속도 프로파일

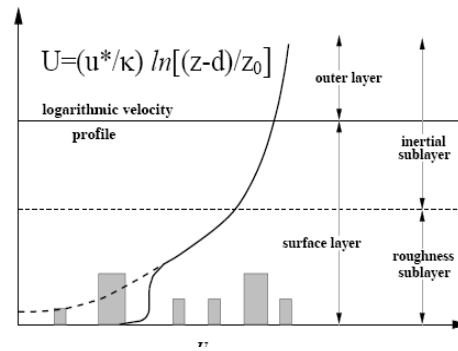


Fig. 1 wind profile in urban area ⁴⁾

도심 풍력 프로파일은 대기 경계층 모델링에 따라 평균 빌딩 높이 H_f 의 상부와 하부에 따라 나타낼 수 있다.

건물 평균 높이 H_f 상부의 풍속 프로파일 ³⁾은 마찰상수와 기준 높이에서의 평균속도 그리고 마찰속도로 모델링이 가능하다.

$$U(z) = \frac{U_*}{K} \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right)$$

$$U_* = \frac{K U_h}{\ln\left(\frac{h+z_0}{z_0}\right)}$$

평균 높이 H_f 하부에서는 지수함수로 나타낼 수 있다.

$$U(z) = U_H \exp\left(a\left(\frac{z}{H} - 1\right)\right)$$

$$\frac{d}{H_f} = 0.7 + 0.35(\lambda_f - 0.15)$$

도심에서 일반적으로 사용되는 $Z_0 \sim 0.8$, $\lambda_f \sim 0.3$, $a = 2.88$ 를 적용하여 풍속 프로파일 모델링에 사용하였다.⁴⁾ 도시의 교외 지역에서 평균 빌딩 높이를 10m로 가정하였고 50m에서의 도심 평균 풍속 4.5 m/s를 기준으로 하여 나타난 도시에서의 풍력 프로파일은 Fig.2와 같다. 주요도시의 평균 풍속 4.5 m/s와 서울, 목포 지역의 평균 풍속 데이터로 구한 도심에서의 풍속 프로파일은 Fig.2와 같다.

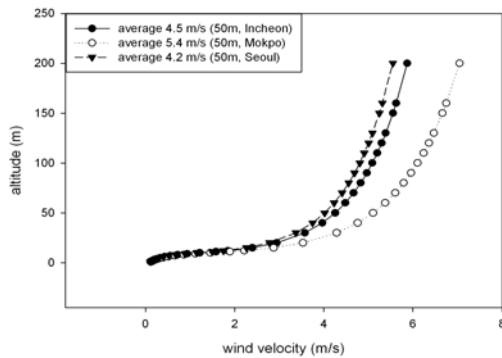


Fig. 2 wind velocity profile

2.3 건물 모델

2.3.1 독립형 건물 모델

평균 건물 높이 10m를 가정하고 15 ~ 20층 건물 높이 45~53m의 아파트 건물을 대상으로 삼았다. 5가지 형태의 지붕 모양을 가정하였다. 일반적인 아파트 건물 모형인 사각 지붕과 26° 경사지붕 형태를 기본으로 한다. 풍속 상승을 위한 효과적인 지붕 형상을 알아보기 위해 45°, 53°의 경사지붕 그리고 원형의 지붕을 비교 모델로 선정했다. 고

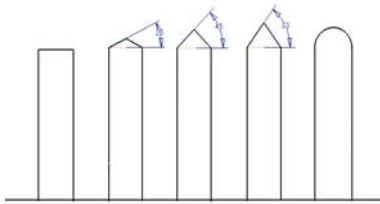


Fig. 3 single building model

도에 따른 풍속 변화를 확인하기 위해 26° 경사 지붕 형태의 100m, 200m 건물 모델을 고려하였다.

Table 2 single building model

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
높이	45	48	51	53	51
지붕 각도	0	26	45	53	원형

2.3.2 건물 단지 모델

아파트 주거단지에서의 각 동의 지붕에 설치되는 풍력발전기에 미치는 바람의 영향을 고려하기 위해 동일한 높이의 건물이 배열되어 있는 형태를 가정하였다. 각 동의 배치 각도와 간격에 따라 바람 유동의 변화가 가변적이지만 40m 간격으로 동일하게 배치되어 있는 50m 높이의 26° 경사지붕 형태를 가정하였다.

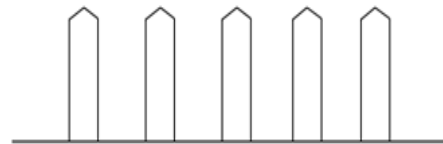


Fig. 4 building arrangement

3. CFD 시뮬레이션

CFD를 수행하기 위한 해석 영역은 건물 높이 $h=50m$ 를 기준으로 건물상향과 하향을 각각 10h, 그리고 도메인의 높이를 20h로 지정하고 상용 소프트웨어인 ANSYS FLUENT 12를 사용하여 2D 정상상태 해석을 수행했다.

점성유동 지배방정식은 레이놀즈 평균 나비에 스톱스 (RANS : Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식을 채용했으며 난류해석을 위하여 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였다. 난류상수는 동일 모델을 실험을 통하여 구한 논문을⁵⁾ 참고하였고 경계조건에서의 유동의 변화를 정확히 해석하기 위해 비평형벽함수(Non-equilibrium wall function)를 사용하였다.

입구와 출구 경계 조건은 각각 속도유입조건 (velocity inlet), 압력배출조건 (pressure outlet)을 적용했으며 상부경계는 대칭조건 (symmetry) 빌딩과 하부경계는 벽(wall)조건을 적용했다. 약 150 ~ 200 만개의 사면체(tetrahedral) 격자를 생성하여 해석을 수행하였다. 시뮬레이션 수행 후 건물 지붕 위 1 ~ 4 m 구간의 평균 풍속 데이터를 활용하여 평균 풍속을 구하였다.

4. 결과 및 토의

4.1 독립형 건물 해석 결과

일반적인 건물 형태인 직각형 지붕(①)에서는 건물 중심에서 와류(vortex)를 형성하고 심한 풍속 변화를 일으킨다. 풍속 평균 풍속은 9.7 m/s로 상승하였지만 풍력발전기에 유리한 균일한 바람

을 형성하지 않는다. 일반적인 아파트 지붕 형태로 볼 수 있는 경사형 (26°, ②)에서도 유동박리가 일어나 와류가 형성되었지만 지붕 위 1m 위치부터 약 12.8 m/s 풍속으로 증가하며 균일한 바람 흐름을 형성하였다. 45°, 53° 경사 모델인 ③, ④ 에서는 유동이 건물 외벽을 타고 흐르면서 와류가 형성되지 않고 비교적 균일한 형태를 띠면서 9.8, 11.2 m/s 풍속으로 증가한다. 마지막 모델인 원형 지붕 (⑤)에서는 형상 저항이 가장 적은 형태로 유동이 자연스럽게 건물 외벽 위로 진행하면서 풍속이 증가한다. 풍력발전기 설치를 위한 높이로 건물 끝단으로부터 1 ~ 4m 위에 위치한 영역에서의 평균 풍속은 각각 9.7 m/s, 12.3 m/s, 9.8m/s, 11.2 m/s, 11.3 m/s로 26°경사 지붕에서 가장 높은 풍속 증가를 보였다.

Table 3 wind velocity the roof at 50m

모델	①	②	③	④	⑤
평균풍속 (m/s)	9.7	12.3	9.8	11.2	11.3

Table 5 velocity contour above the roof at 50m

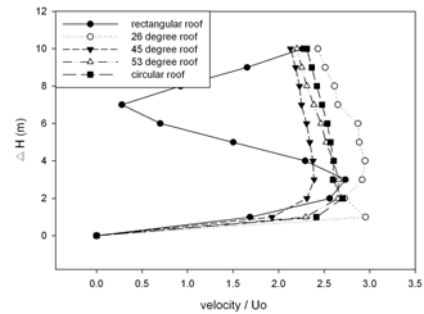
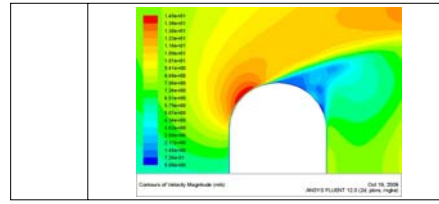
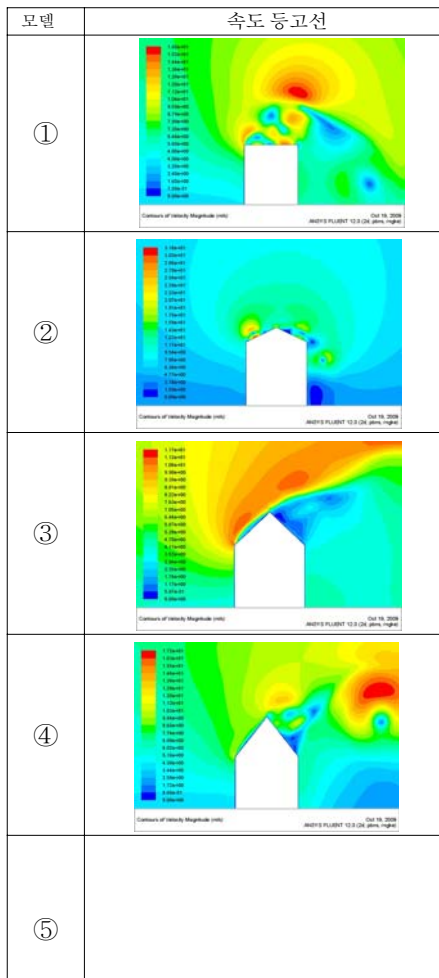


Fig. 5 wind profiles on various building roof

4.2 독립형 건물 높이에 따른 해석 결과

건물 높이에 따른 풍속의 증가는 지붕 위치에 따라 차이를 보였다. 바람을 맞는 앞면에서는 벽을 타고 상승하는 바람과 건물을 향해 불어오는 바람이 더해져 약 2 ~ 3배가량 풍속이 급속히 증가한다. 반면 건물 중앙에서는 유동박리로 인하여 와류가 형성되고 후류의 영향에 의하여 유동의 심한 변화가 일어남에 따라 풍속이 저하는 구간이 발생하여 풍력발전에 유리한 균일한 바람을 형성 하지 않는다. 이에 따라 고층 건물에서의 발전기 위치는 바람 맞는 앞면이 유리함을 보인다. 100m, 200m 의 고층건물에서는 풍속이 2배 증가했지만 50m 높이의 건물 앞면에서 약 3배의 높은 풍속 증가를 보였다. 100m ~ 200m 고층 건물의 높이에서는 주변 건물에 의한 바람의 변형이 적기 때문에 안정적으로 풍력발전을 할 수 있는 유리한 점을 지니고 있지만 높이에 따른 발전량 증가는 크지 않음을 알 수 있다.

Table 4 average wind velocity

위치 \ 높이	50m	100m	200m
중앙평균풍속 (m/s)	12.3	5.3	10.3
앞단 (m/s)	16.1	12.7	13.9

Table 5 wind velocity contour above the roof

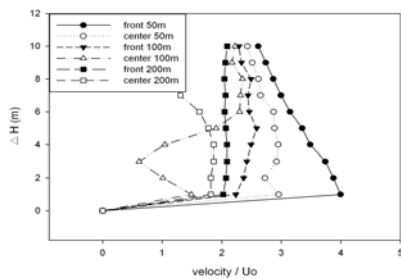
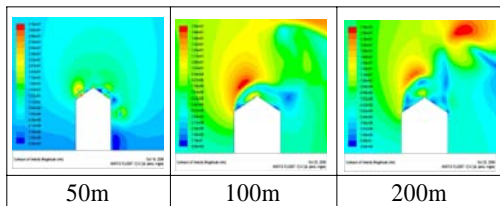


Fig. 6 wind profile at 50m, 100m and 200m

4.3 집단 건물에서 해석 결과

40m 간격의 건물 배치에서는 난류의 정상상태 해석의 특성에 따라 건물 사이에서 급격한 풍향 변화를 보였다. 20~ 30m/s 사이의 돌풍이 형성되어 풍력발전기의 기계적 손상을 일으킬 위험성이 있어 설계와 발전기 유지 보수에 이를 고려해야 발전기 운전률을 높일 수 있을 것이다. 동일한 높이의 건물이 일정간격으로 배열되어 있는 경우라도 전방 건물에 대한 바람 차단 효과는 크지 않으며 각 건물 위해서 풍력 발전기를 활용 할 수 있을 것으로 보인다. 하지만 마지막 건물에서는 평균 풍속이 8.15 m/s 로 독립형 보다 저하된다. 첫 번째와 두 번째 건물 사이에서는 건물 사이에 강한 후류간섭이 발생하여 지붕위의 풍속이 급격히 증가하는 경향을 보인다. 풍력발전기 설치 시에 풍향에 대한 고려와 함께 건물 사이 간격에 따른 유동의 변화 현상, 과도 상태의 유동 변화를 추가로 연구할 필요가 있다.

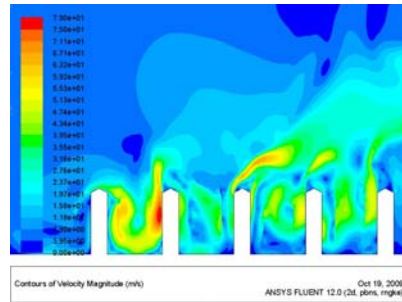


Fig. 7 wind velocity contour at building arrangement

Table 6 average wind velocity at building arrangement

빌딩 순서 (최측순)	#1	#2	#3	#4	#5
경사지붕	30.5	21.9	15.3	18.6	8.15

5. 발전량 추정

5.1 소형 풍력발전기의 파워 및 연간 발전량




건물일체형 풍력발전기로 세 가지 모델을 선정하였다. 각 제품은 저소음, 고효율의 우수한 성능을 보이며 도심형 소형 풍력발전기로 주목을 받고 있다.

연간 풍력발전량을 산정하기 위하여 건물 형상에 의한 풍속 상승을 평균 풍속으로 가정하고 풍속의 Rayleigh 분포를 가정하였다. 제품 카다로그에 제시된 파워커브를 이용해 평균출력을 구하였다. aerotecture를 제외하고 모든 방향의 바람을 이용할 수 있고 aerotecture는 바람의 방향에 영향을 받기 때문에 70%의 바람을 이용할 수 있다고 가정하였다.

Fig.8에서 6kw 용량의 quietrevolution 모델이 2번 건물 모델(26도 경사지붕)에서 1.4 kw 평균 파워를 낼 수 있었으며 다른 지붕 형상에서도 비슷한 결과를 얻었다. aerotecutre와 swift 모델은 낮은 정격 출력으로 인해 높은 풍속에서도 평균 파워는 약 350 w에 머물렀다. 하지만 건물 지붕에서의 풍속 상승효과가 없는 첫 번째 모델에서는 세 발전기 모두 300w 또는 약 100w의 매우 낮은 파워를 보인다. Fig.9에서 연간 발전량

은 정격 출력이 높은 quietrevolution 모델이 풍력에너지를 효율적으로 변환하여 약 26도 경사 지붕에서 12,000 kwh의 생산하며 가장 많은 전력을 생산하는 것으로 예측되며 다른 두 모델에서는 정격 출력의 한계로 인하여 3000 kwh, 2000 kwh의 낮은 발전량을 보인다.

Table 7 micro wind turbine models

제품			
제품명	quiet revolution	aerotecture	swift
제작사 (국적)	quietrevolution ltd (영국)	Aerotecture International Inc. (미국)	Cascade eng.
정격출력 (정격 풍속)	6 kw (14 m/s)	2 kw (18.3 m/s)	1.5 kw (15 m/s)
cut in ~ cut out (m/s)	4.5 ~ 16	2.8 ~ 14.2	2.3 m/s ~
소음	< 45 dB	•	< 35dB
높이×지름	5 × 3 m	2.72 × 1.42 m	(D) 2.13 m
연간 발전량 (kwh)	7000~10000	•	2000
특징	aerodynamic 설계, 수직형, 전방향 풍력이용	나선형 블레이드, 하이브리드 형태	디퓨저와 결합, 풍향에 따라 회전

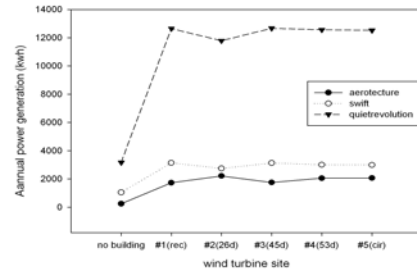


Fig.9 annual power generation on the various turbine site. no building augmentation (upstream velocity at the same height), #1(rectangular roof), #2(26 degree roof), #3(45 degree roof), #4(53 degree roof), #5(circular roof)

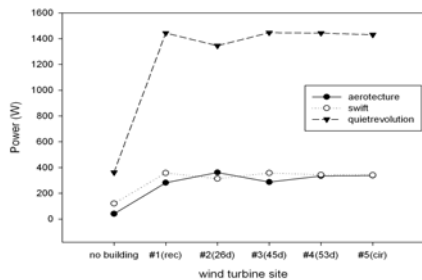


Fig. 8 average power on the various turbine site. no building augmentation (upstream velocity at the same height), #1(rectangular roof), #2(26 degree roof), #3(45 degree roof), #4(53 degree roof), #5(circular roof)

5.2 풍력발전기 설치에 의한 에너지 대체 효과

Table 8 average electrical charge for common use ⁶⁾

단위 (kwh)	도곡동 타워팰리스	목동한신 청구아파트	강원 주공아파트
특징 (전용면적)	주상복합 50-60층 (333.88 m ²)	중형 15층 (109 m ²)	소형 15층 (72-85 m ²)
한 가구 평균 공동 전기비용	826	88	55
HEROS 가구당 평균전기사용량 ⁷⁾	10	10	10
15 가구 평균	12,540	1,470	975

평균 풍속이 4.5 m/s 인 지역의 50m 아파트 26도 경사의 지붕 위에서 설치된 quietrevolution 풍력발전기로 월 1053 kwh 전력 발전이 가능하다. 도곡동 타워팰리스의 월간 가구당 총전기사용량과 공동전기 사용량은 각각 1349kwh, 826kwh로 목동 청구한신의 401kwh, 88kwh에 비해 3.4 배, 9.3배이고, 강원주공의 273kw, 55kw에 비해서는 4.9배, 15배에 해당한다. 이와 같은 약 260m 높이의 고층 주상복합 아파트의 경우 내부 환기, 조명, 편의 시설을 위한 공동 전기 사용

량이 일반 아파트 평균의 10배 가까이 크기 때문에 풍력 발전기의 설치로 공동 전기 사용 전력 공급이 충분하지 않으며 아파트 옥상 외에서의 신재생에너지 생산과 활용방안이 적극 강구되어야 할 것이다. 반면 중형, 소형 아파트 경우 약 50 ~ 80 kwh의 평균 공동 전기사용량을 보이는 경우 15층 아파트 라인 하나 당 6kw의 풍력 발전기를 설치하여 공동전기 사용과 음식물처리시스템(HEROS)⁷⁾ 운영에 필요한 전력 공급이 가능할 것으로 예측된다.

하지만 풍력발전기의 발전량 예측은 불확실성이 존재하며 $\pm 20\%$ 변동을 예상한다. 지역과 지형 그리고 주위 건물의 영향, 난류강도 등의 변수에 따라 영향을 받기 때문에 풍력발전 설치 전 정확한 바람의 영향을 분석하는 과정이 필요할 것이다.

6. 결론

주요 도시의 지상 50m 높이 고도의 풍속 4.5 m/s를 가정하여 건물 지붕위에서 풍속 상승효과를 CFD를 통해 2-D 시뮬레이션 한 결과는 다음과 같다.

- (1) 50m 높이 아파트에서 고려한 5가지 지붕 모델 중 26도 경사 지붕에서 풍속이 약 2.7 배 상승하며 풍력발전을 하기에 가장 적합하다.
- (2) 건물 높이에 따라 풍속의 증가는 크지 않으며 100m, 200m 높이에서는 지붕의 중앙보다 바람을 맞는 면에 풍력 발전기를 설치하는 것이 유리하다.
- (3) 일정한 바람이 지속적으로 불어 올 경우 정상 상태에서 아파트 단지 지붕 위에서의 풍속은 급격히 증가함에 따라 돌풍이 발생하여 풍력발전기에 기계적 결함을 가할 위험이 있다.
- (4) 도심 50m의 아파트 단지에서 6kw 풍력 발전기 설치로 월 1053 kwh 전력생산이 가능하며, 중·소형 15층 아파트 15가구의 공동전기비와 음식물 처리시스템 사용에 필요한 전력 공급이 가능하다. 평균 풍속이 높은 인천, 강릉, 부산, 목포와 같은 해안 도시의 바람의 방해가 적은 교외 지역에서 가능할 것으로 예상된다.
- (5) 향후 풍력자원지도를 활용하여 특정 지형 특성에 따른 3-D 해석을 수행하고 실험 데이터와 비교한다면 보다 정확한 풍력발전량 예측이 가능할 것이다.

References

- [1] A. G. Dotton, J. A. Halliday, 2005, "The

Feasibility of Building-Mounted/Integrated Wind Turbines : Achieving their potential for carbon emission reductions, Final Report", Energy research unit, CCLRC

[2] 기상청 자료관리 서비스팀, 2007.9, 풍력자원지도연구개발보고서, 기상청

[3] Malcolm A,Heath, 1997 , "Estimating the Potential Yield of Small Building-mounted Wind Turbines

[4] Marina K-A N., 2005, "Modelling the wind flow in complex urban topographies : a computational-fluid-dynamics simulation of the central london area", 5th GRACM international Congress on computational Mechanics

[5] Richards, 1993 , "Appropriate boundary conditions for computational wind engineering modles using the $k-\epsilon$ turbulence model", J.Wind Engrg.Ind,46&47, 145-153

[6] 한국에너지신문, <http://www.koenergy.co.kr/news/articleView.html?idxno=8437>

[7] 장호남, 장승택, 정한무, 강종원, 정창문, KR-A-2009-0085960, 02.05.2008, 집단주거시설의 음식물 쓰레기를 처리하는 방법