

소형풍력발전의 현황과 요소기술

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 이홍원
(hongwlee@reseat.re.kr)

1. 머리말

최근에 들어 화석에너지의 고갈에 대한 대응과 지구환경보존을 위해 주요 신재생에너지원의 하나인 풍력발전이 크게 확대되고 있다. 1970년대부터 독일, 네덜란드, 영국 및 덴마크 등 북유럽 국가에서 본격적으로 설치한 풍력발전은 누적발전용량 기준으로 2001년의 23GW가 2016년에는 486GW로 급성장하고 있다. 특히 2009년부터 중국은 풍력산업을 급성장시켜 2016년 말에는 누적발전용량이 168GW(점유율 34.7%)에 이르러 2위인 미국을 크게 앞서고 있다.⁽¹⁾

풍력발전은 발전용량이 수MW급으로 대형화되면서 대규모 풍력단지가 늘어나고 있고, 설치도 바람자원이 풍부한 해상으로 확대되고 있지만 대형풍력발전은 소음 등의 환경문제와 단지 부족 등으로 확대에 어려움을 겪고 있다. 이러한 배경과 도시의 그린화 추세에 따라 소규모 풍력발전기를 고층빌딩 등에 설치하는 도시형풍력발전(urban wind turbine)의 필요성이 커지고 있다. 즉 소형풍력발전(SWT: Small Wind Turbine) 시스템을 도심지의 거리조명, 고층의 공공주택·상업빌딩 등에 설치하는 분산형 풍력발전에 대한 관심이 모아지고 있다. 다음은 이러한 소형풍력발전시스템에 있어서, 개요 및 시장 규모와 함께 요소기술 및 적용 연구 사례에 대해 기술한다.

2. 소형풍력발전의 개요

2-1. 소형풍력발전의 정의⁽³⁾

풍력발전시스템은 일반적으로 로터(rotor)의 지름과 정격출력에 따라 용량을 구분하는데 아직은 국가마다 분류 기준이 다르게 적용되고 있다. IEC 61400-2는 소형풍력발전을 로터 회전(swept) 면적이 200m² 이하, 용량은 약 50kW 이하로 규정하고 있다. 한편 소형풍력을 생산하는 5개국은 소형풍력으로 정의하는 정격출력의 상한 값을 15~100kW 범위에서 운용하고 있다. 또한 Dutton⁽²⁶⁾은 용량 크기를 기준하여 ①마이크로 풍력터빈(micro wind turbine): 10kW 이하, ②소형 풍력터빈(small wind turbine): 10~100kW), ③대형풍력터빈(large wind turbine) : 100kW 초과로 분류하고 있다.

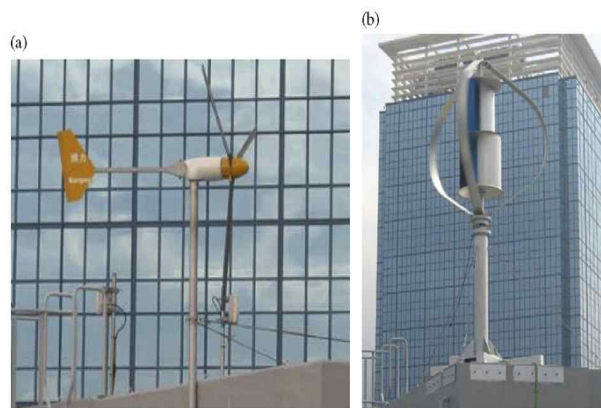
2-2. 소형풍력발전의 분류

소형풍력터빈(SWT)은 로터축이 수직방향인 수직축 풍력터빈(VAWT: Vertical Axis Wind Turbine)과 수평방향인 수평축 풍력터빈(HAWT: Horizontal Axis Wind Turbine)의 두 종류로 나눌 수 있다(그림 2-1). 지금까지는 수평축 방식이 일반적으로 사용되었지만 최근에 들어 도심 설치용 SWT에 수직축 풍력발전기에 관심을 모이고 있다.

VAWT는 비교적 바람의 변화와 난류에 덜 민감하고, 출력 당 중량이 작으며 회전에 의한 시각적인 영향이 적은 장점으로 도시환경에 적합하다. 이 방식은 바닥 등 낮은 높이에 설치 가능하므로 유지보수가 쉽다. VAWT는 다리우스(Darrieus) 풍력터빈과 사보니우스(Savonius) 풍력터빈의 두 종류의 형태로 구분된다. 다리우스 풍력터빈은 수직 프레임에 평탄하거나 굴곡 형태의 다수의 블레이드가 장착되고 회전 시 발생된 양력(lift)으로 작동한다. 다리우스 풍력터빈은 스스로 회전이 불가능한 유일한 수직축 풍력터빈으로서 다른 풍력발전기나 전기모터를 필요로 한다. 사보니우스 풍력터빈은 단면이 2~3개의 S자 모양인 국자(scoop)로 구성되고 항력(drag)을 이용한다. 바람에 의해 움직일 때 항력의 차이가 회전을 지원하지만 항력으로 인해 효율은 다른 형태의 터빈에 비해 낮다. 수평축 방식은 대부분 자기시동(self-starting)이 가능하지만 바람의 방향에 크게 영향을 받으므로 요(yaw) 기구가 필요하고 수직축 방식에 비해 높은 위치에 주로 설치한다. 터빈 효율이 50~60% 수준으로 비교적 높고 성능 향상과 더불어 비교적 낮은 가격 등으로 여전히 많은 용도로 적용되고 있다.

소형풍력발전터빈은 또한 작동원리에 따라 양력방식과 항력방식으로 구분하기도 한다. 수평축과 수직축 방식 중 다리우스 풍력터빈은 양력방식이고 사보니우스 풍력터빈(수직축 방식)은 항력방식이다. 발전기 효율이 15% 정도로 낮은 항력방식보다는 상대적으로 높은 효율을 낼 수 있는 양력방식이 많이 사용되고 있다.

세계적으로 가장 많이 사용되는 10kW 이하의 소형풍력터빈은 소음발생과 유지보수가 필요한 전동장치가 없이 직접 구동되는 영구자석발전기를 사용한다. 2kW 이하의 풍력터빈의 출력전압은 일반적으로 24V나 48V이고 주로 배터리 충전 목적으로 사용된다.



<그림 2-1> 수평축 풍력터빈(a)과 수직축 풍력터빈(b)⁽⁴⁾

2-3. 소형풍력발전의 이용⁽³⁾

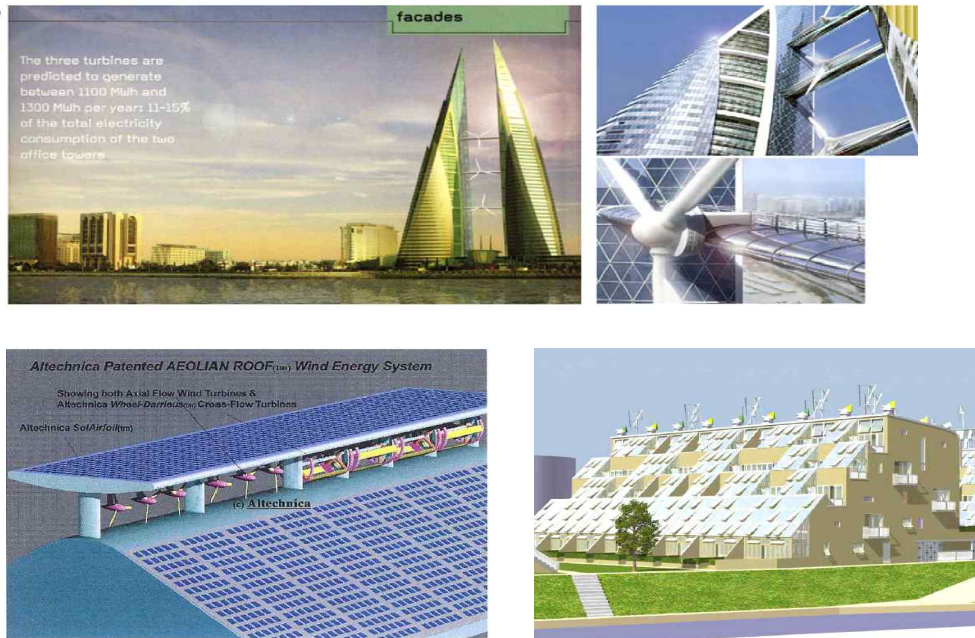
지금까지 대부분의 풍력발전은 바람의 자원이 풍부한 해안지대 등을 중심으로 대형 시스템으로 편중되어 있다. 이런 추세에서 도시 그린화와 제로에너지 빌딩의 구축 일환으로 주거 공간 혹은 이와 가까운 도심 공간에 적합한 풍력발전시스템을 도입하려는 시도가 있다. 이와 같이 도시주변에서 사용되는 풍력발전을 도시형풍력발전이라 할 수 있다. 이러한 곳에 적용이 검토되는 발전시스템은 대부분 소형발전시스템으로서 수직축과 수평축이 구분되지 않고 사용 용도에 적합한 형태로 적용되고 있다. 이와 같은 도시형풍력발전의 지원을 위해 EU의 유럽위원회는 “Horizon 2020 Energy Efficiency 프로그램”을 통해 1~20kW의 도심지소형풍력발전을 대상으로 WINEUR(Wind Energy Integration in the Urban Environment) 프로젝트를 지원하는 등 SMT 확대에 노력하고 있다.

국내의 경우, 도심지의 풍속이 2~4m/s로 높지 않아 풍력발전에 효율적이지 못하지만 수직형 풍력터빈은 비교적 저속에서도 발전이 가능하며, 최근 15층 이상의 고층 공동주택과 빌딩이 늘어나고 있어 이들 건물에 대한 SWT 도입이 적극 추진될 필요가 있다. 도시형 풍력발전시스템은 응용 예는 다음과 같이 나눌 수 있다. ①도심지의 독립형 풍력발전 : 가로등용 풍력발전 등 건물 가까이 풍력 조건이 비교적 양호한 지상 및 공간 등에 설치하는 방법, ②기존 빌딩의 풍력발전 : 건물의 외형을 변경하거나 건물의 구조 보강 없이 기존 빌딩에 설치한다(그림 2-2).

③건물일체형 풍력발전 : 풍력발전을 초고층 빌딩의 한 부분으로 흡수하여 보다 효율적으로 전력을 생산할 수 있는 방법으로 BUWT(Building Integrated/Mounted Wind Turbine)라고 하며, 이 범주 내에서 특히 건물의 외형을 풍력을 속도를 높일 수 있도록 재구성하는 방식을 BAWT(Building Augmented Wind Turbine)라고 한다. 이 방식은 건물의 조명 설계 등의 많은 변화를 요구하며 새로운 도시형 풍력발전으로 정착해갈 것으로 전망된다(그림 2-3).



<그림 2-2> 기존 빌딩의 풍력발전⁽³⁾



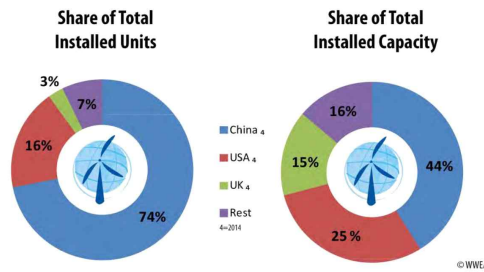
<그림 2-3> 건물일체형 풍력발전(위쪽: 바레인 세계무역센터, 하부좌측: Altechnica사 Aeolian roof™, 하부우측: Bill Dunster Architects)⁽³⁾⁽⁴⁾

3. 소형풍력발전의 시장 규모⁽⁵⁾

전 세계 소형풍력터빈은 2015년 말 누적설치대수 990,000대로 전년대비 5% 성장에 그쳐 2014년(8% 성장)에 미치지 못했다. 한편 이 자료에는 인도 등 주요 시장 자료가 빠져 실제로는 100만대 전후일 것으로 보인다. 국가별로는 중국이 732,000대로 74%를 차지하고 미국과 영국이 각각 160,995대(16%), 28,917대(3%)대로 뒤를 잇고 있다. 우리나라는 1,900대로 11번째로 조사되었다. 누적설치용량에 있어서는 2015년 말 948MW로 전년 대비 14% 성장했다. 중국이 전체 용량의 44%인 415MW를 차지하고 미국과 영국이 25%, 15%로 뒤를 잇고 있으며, 우리나라는 1,200kW가 설치되어 17위 수준에 머무는 것으로 조사되었다.



<그림 3-1> 전 세계 소형풍력발전의 누적설치용량 및 대수⁽⁵⁾



<그림 3-2> 소형풍력발전의 누적설치용량 및 대수의 점유율⁽⁵⁾

전 세계 SMT의 평균 용량은 2010년 0.83kW에서 2015년에는 0.96kW로 점차 커지고 있다. 2015년 국가별로는 중국이 0.56kW, 미국 1.4kW, 영국 5.1kW이고 이탈리아는 37.1kW로 평균용량에서 큰 차이를 보이고 있다. SMT의 제조에서는 2011년 말 기준 330사 이상의 SMT 제조사의 절반 이상이 5개국(캐나다, 중국, 독일, 영국, 미국)에서 운영되고 있다. SMT의 형식에서는 2011년 327개 SMT 제조사에 대한 조사에 의하면 74%가 수평축 방식에 투자하고 18%만이 수직축 타입을 적용하며 6%가 양쪽 기술을 모두 개발하는 것으로 알려졌다. 수직축 모델은 대부분 개발된 지 5~7년이 지났으며 시장 점유율도 비교적 낮다. VAWT의 정격용량의 중간값은 2.5kW이며 평균정격용량은 7.4kW로 추정된다. 종래의 수평축 형식에 비교하면 평균 및 중간 정격용량이 크게 작은 수준을 보이고 있다. SWT의 운전형태에 있어서는 2009년 기준으로 계통연계형이 약 34.4MW로 전체 시장의 82%의 점유율을 보이고 있다. 향후 소형풍력시장은 연 평균 12% 성장을 이어가 2020년에는 1.9GW의 누적설치용량에 도달할 것으로 예측되고 있다.

4. 소형풍력발전터빈(SMT)의 요소기술⁽²⁾

풍력터빈에 대한 연구는 대부분 블레이드 성능에 있어서 TSR(Tip Speed Ratio, 익단속도비), 로터 속도(rotor speed), 피치각(pitch angle)과 같은 파라미터에 대한 영향에 집중되고 있다. 대형풍력터빈에 비해 많은 연구가 이뤄지지 않은 SMT에 대한 연구 확대가 필요하다. 이러한 파라미터에 관련된 성능 연구 외에도 비용절감, 제조 및 취급의 용이성을 고려하는 최적화 설계 기술에 대한 연구도 필요하다.

4-1. 수평축 풍력터빈(HAWT)의 성능 개선

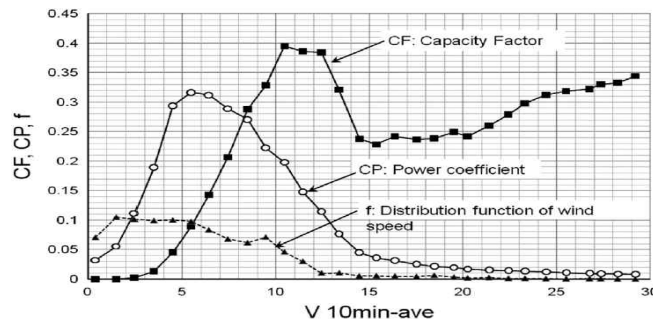
Freere 등⁽⁷⁾은 저가격 풍력터빈 MG4520에 대해 성능을 검토했다. 로터직경 2.1m인 3-블레이드 터빈을 풍속을 13m/s까지 풍동에서 실험했다. TSR 2~8의 다양한 풍속 중 TSR 6에서 0.2의 최대 Cp(Coefficient of Power, 출력계수)를 얻었으며, 노즈콘(nose con)의 존재가 블레이드 출력에 뚜렷한 영향을 주지는 않았다. 특정 풍속에서 요 각도가 커지면 최대 출력값이 감소하는 것으로 관측됐다. Refan 등⁽⁸⁾은 맞바람형(upwind), 3-블레이드의 소형 HAWT의 공기역학적 성능을 실험과 이론적으로 확인했다. 2.2m 로터의 소형풍력터빈의 로터 성능 모델링에 BEM(Blade Element Momentum) 이론의 적용가능성을 풍동

실험(풍속 11m/s까지)에서 평가했다. BEM 해석을 이용하여 블레이드의 끝(tip) 영역에는 Wortmann FX 63 137 익형(airfoil)을 적용하고, 뿌리(root) 영역에는 NACA 6515를 채택했다. 출력곡선을 알기 위해 넓은 범위에서 풍속 실험을 했으며, 저속 실험에서의 공기역학적 출력곡선을 통해 풍속 9m/s에서 최대출력 470W와 약 5m/s의 높은 로터 컷인속도(cut-in speed, 회전시작 풍속)를 얻었다. BEM 이론에 의한 예측은 실험 결과와 잘 부합되었지만 대형풍력터빈에서 더욱 정밀하게 해석할 수 있다.

Singh 등⁽⁹⁾은 Air-x 해상용 400W 풍력터빈에 맞춰 설계한 2-블레이드 직경 1.26m 로터의 저속 풍력터빈 로터 성능을 실험했다. 저속에서의 공기역학적 성능 향상을 위해 로터에는 기하급수적으로 꼬이고(exponential twisted) 경사진 형태의 AF300익형을 적용했다. 15°, 18°, 20°의 피치각(pitch angle)에서 성능을 실험했다. 3-블레이드의 로터(직경 1.16m)와 비교한 결과, 풍속 4, 5, 6m/s에서 기준 로터가 0.052, 0.112, 0.15의 C_p 를 나타내는데 비해 0.1, 0.217, 0.225의 C_p 를 나타냈다. 즉 3~7m/s의 풍속에서 2-블레이드의 C_p 가 더 높게 나타났다. 최적 피치각인 18°에서 2-블레이드는 기준 로터보다 2배 이상의 출력을 냈다. 15°의 피치각과 4m/s에서만 두 로터의 출력은 같은 수준을 보였다.

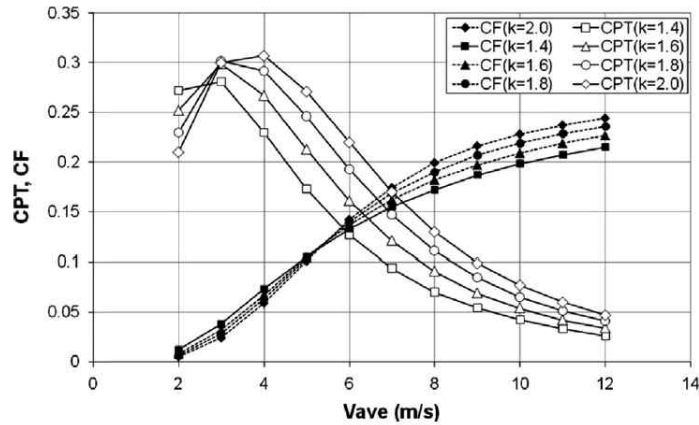
Kishore 등⁽¹⁰⁾은 5m/s 이하에서 동작하는 직경 39.4cm 로터의 소형이동식풍력터빈(SWEPT)을 설계했다. 성능 실험에서 2.9m/s의 팁 속도에서 14%의 최대 성능계수를 얻었다. 2.7m/s의 낮은 컷인속도를 나타냈으며 정격풍속인 5m/s에서 0.83W의 전기출력을 냈다. 출력향상을 위해 확산기(diffuser)를 부착한 SWEPT(길이와 직경은 동일)는 부착이 안 된 SWEPT보다 1.4~1.6배의 높은 출력을 발생했다. Hirahara 등⁽¹¹⁾은 4-블레이드 소형풍력터빈 μ F500(로터지름 500mm, NACA 2404 익형)을 제작하고 실험을 수행했다. 결과에서 8~12m/s의 풍속에서 높은 효율을 보여 순효율과 출력계수가 각각 0.25와 0.36을 나타냈다. TSR 2.7에서 약 0.40의 최대 출력계수를 보여 낮은 TSR에서 성능이 높게 나타났다.

Matsumiya 등⁽¹²⁾은 50m/s까지의 넓은 풍속범위에서 사용되는 1kW HAWT Airdolphin에 대해 현장추적실험을 실시했다. 바람으로부터 출력 가능한 정도를 나타내는 수집능력(Captureability: $CPT=P_{turbine}/P_{wind}$)과 정격출력에 대한 풍속 전 구간에 걸쳐 집적한 출력량을 보여주는 수집계수(Capacity Factor: $CF=P_{turbine}/P_{rated}$) 지표를 사용했다. <그림 4-1>과 같이 모든 k(Weibull parameter)에 대해 연평균 풍속이 증가하면 CF도 증가했다. 반대로 CPT는 k와 연평균풍속에 크게 영향을 받았다(그림 4-2).



<그림 4-1> Airdolphin(No.1)의 평균(bin-averaged) f, CF 및 CP⁽²⁾

CPT는 CF에 비해 기본적인 물리현상에 영향을 더 받고 CF에서와 같은 오류가 없어 성능지표로 더 적합하다. 실험 결과에 따라 $k=2$ 일 때 연평균풍속 6, 10, 12m/s에서 각각 15, 20, 25%의 총(또는 평균) CF를 기대할 수 있다.



<그림 4-2> 연평균풍속과 k에 대한 Airdolphin의 CPT 및 CF⁽²⁾

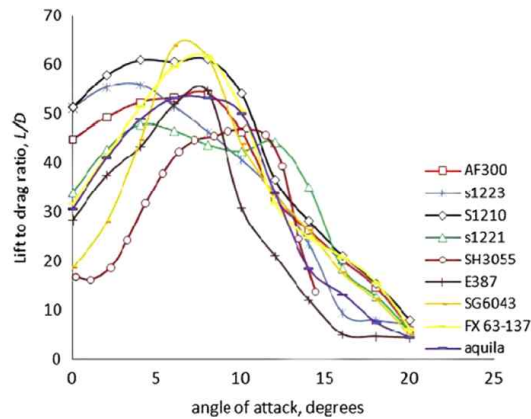
Mayer 등⁽¹³⁾은 소형 HAWT에서의 기동 특성에 대해 조사했다. 로터직경 5m의 5kW 풍력터빈에 대해 종래의 날개깃 요소(blade element) 이론과 후류(wake) 모델에 기초하여 계산했다. 피치각 0°에서 받음각(angles of attack)이 매우 크기 때문에 공회전 시간(idling period)이 길었으며 이 시간은 피치각이 커질수록 짧아졌다. 20°의 피치각에서 가장 짧은 시간에 시동이 이뤄졌다.

이상에 기술한 여러 연구 결과를 통해 최대 출력계수는 FX 63-137을 적용한 경우의 0.5이었으며 평균 출력계수는 0.2~0.35이었다.

4-2. 소형 HAWT의 블레이드 설계

도시의 환경에 적합한 새로운 고 양력의 익형이 Henriques와 Silva⁽¹⁴⁾에 의해 개발되었다. 이 익형은 레이놀즈수(Reynolds number) $6 \times 10^4 \sim 1 \times 10^6$ 에서 양력계수(C_L : Lift Coefficient) 값이 2에 가깝다. Giguere와 Selig⁽¹⁵⁾는 소형 HAWT에 대해 SG 시리즈의 얇은 익형(SG6040~6043)의 적용가능성을 실험했다. 이 익형들은 레이놀즈수 $1 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5$ 에서 작동한다. Selig와 McGranahan⁽¹⁶⁾은 레이놀즈수 $1 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5$ 에서 작동하는 6가지 익형에 대해 실험했다. 이 중 FX63-137과 SH3055 두 종류는 끝이 뾰족한 익형(cusped airfoil)이다. 이 익형들은 확대된 코 부위(nose region)로 인해 공기역학적 성능이 향상되었고 필요 영역에서 C_L 값은 1.8을 나타냈다.

소형 HAWT에서 시동 특성과 저 풍속에서의 성능 개선을 위한 익형이 설계되고 있다. Singh 등⁽¹⁷⁾은 낮은 레이놀즈수에서 개선한 익형(AF300)에 대해 풍동실험을 실시했다. 이 익형을 저 레이놀즈수에서 소형 HAWT용으로 설계한 8종의 다른 익형과 비교했다. 다양한 받음각에 대한 AF300과 8종 익형들의 L/D비, C_L 값이 <그림 4-3>에 표시되었다.



<그림 4-3> 8가지 블레이드의 받음각에 대한 L/D, C_L 값⁽²⁾

받음각 변화에 대해 양력과 항력이 계산됐으며 익형 표면의 압력분포를 알 수 있었다. 최대 양력계수는 14°의 실속각(stall angle)에서 나타났다. PIV와 스모크 유동가시화장치를 통해 받음각 8°에서 레이놀즈수가 56,000로 낮은 상태에서부터 모든 흐름이 블레이드 표면에 부착되었다. 이 현상은 레이놀즈수가 75,000로 낮은 상태에서 받음각이 14°로 커질 때까지 지속되는 것으로 나타났다.

Song 등⁽¹⁸⁾은 BEM을 이용하여 피치각이 고정된 1kW 3-블레이드의 HAWT 익형을 설계했다. 이 블레이드는 로터직경 2.5m, 맞바람형, 11% 풍속과 5.85의 TSR에서 1000W 규격의 Bergey XL 1.0 터빈에 맞게 설계했고 SD 7062 익형을 선택했다. 새롭게 설계한 블레이드는 높은 풍속에서 양호한 공기역학적 성능을 나타냈지만 저속에서는 기존 블레이드의 성능이 더 높았다. 종래의 블레이드는 설계 피치각 0°와 4.5 미만의 TSR에서 신형 날개보다 C_p 가 높고 높은 TSR에서는 새로운 날개의 C_p 가 더 높을 것으로 예측됐다. 새 날개는 5°의 피치각과 9% 이상의 풍속에서 출력이 가장 높은 반면 9°의 피치각에서는 전반적으로 출력이 낮았다. 하지만 낮은 풍속에서는 성능이 가장 좋았으며 출력은 5~9%의 풍속에서 비슷하게 나타났다.

4-3. 소형 HAWT의 제어

대부분의 소형 풍력터빈은 꼬리날개를 이용하여 방향을 조절한다. 풍속의 급속한 변화 시 높은 자이로 모우멘트로 인해 블레이드가 파손될 우려가 있다. 소형 풍력터빈에서 요 움직임(yaw movement)에 대한 적절한 제어가 필요하다.

소형 HAWT에서의 최대 요 속도를 조사하기 위해 수동적 요 거동(passive yaw behavior)에 대한 실험 연구가 Nishizawa 등⁽¹⁹⁾에 의해 수행되었다. 모델에는 5-블레이드, 1m 직경의 풍력 터빈과 2가지 형태의 꼬리 핀(tail fin)이 사용되었다. 모델에 대해 0°에서 120°의 요 방향 변화에 따른 요 모우멘트, 회복 모우멘트(restoring moment), 요 각속도를 조사하기 위해 풍동실험을 실시했다. 실험 결과, 로터의 요 움직임은 TSR에 영향을 받으며 60°의 요 각도에서 로터의 요 모우멘트의 방향이 변화했다. 두 가지 꼬리 핀에 대해 6, 8, 10%의 풍속 실험에서 돌아옴 모우멘트는 풍속이 커질수록 증가하고

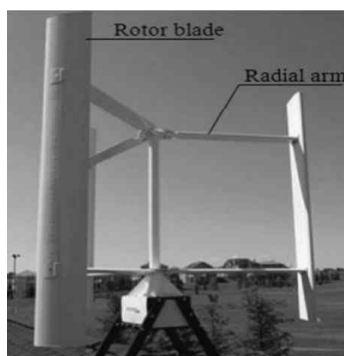
120°의 요 각도에서 최대값을 보였다. 요 각속도는 풍속과 고리 핀 면적이 증가할수록 커졌고 로터의 회전속도가 증가함에 따라 감소되었다. 풍속 10m/s에서 요 각속도는 3.84rad/s로 최대가 되었고 종래의 3rad/s보다 큰 값을 나타냈다. 요 동작에 대한 새로운 이론식이 Watanabe 등⁽²⁰⁾에 의해 수립되었다. 이 식은 로터 직경, 설계 TSR, 꼬리핀 면적, 요 축 주위의 관성 모멘트와 같은 다양한 설계변수를 감안하여 요 속도(요잉부하 산출용) 계산에 이용된다. 이 식은 풍동실험 결과와의 비교를 통해 검증되었다.

4.4. 소형 수직축형 풍력터빈(VAWT)

로터 축이 수직 방향인 VAWT은 바람방향을 향할 필요가 없기 때문에 바람방향이 자주 바뀌는 장소에서 적용하기에 유리하다. 또한 수평축 터빈에 비해 소음이 낮아 주거지 등 도심지역에 적합하다. 하지만 블레이드가 바람 속에서 회전할 때 발생하는 추가 항력 때문에 수평축 방식에 비해 효율이 낮다. 따라서 효율 개선을 위해 VAWT의 항력계수 감소를 위한 기술 개발이 요구되고 있다. VAWT은 최근 풍속, TSR, 견고성(solidity), 로터 블레이드의 표면 마무리(surface finish)와 같은 다양한 파라미터에 관한 실험이 진행되고 있다. VAWT은 일반적으로 다리우스형과 사보니우스형으로 분류된다. 이외에도 여러 형태(Sweeney type, Sistan type wind mill 등)의 VAWT가 있다.

4.4.1. 다리우스 VAWT

1931년 프랑스 항공엔지니어인 Georges Jean Marie Darrieus가 특허를 낸 다리우스 풍력터빈은 VAWT 중에서는 가장 효율이 높으며 양력을 이용하는 방식이다. 즉 블레이드에 작용하는 양력에 의해 로터 회전과 전기를 생산한다. 이 터빈은 단순 구조와 낮은 비용이 장점이지만 기동 토크, 블레이드 양력과 효율이 낮은 점이 단점이다. <그림 4-4>는 3-블레이드 다리우스 VAWT의 겉모양을 보여준다. VAWT에 대한 연구는 HAWT에 비해 적게 이뤄지고 있다.



<그림 4-4> 다리우스형 풍력터빈⁽²⁾

Takao 등⁽²¹⁾은 블레이드가 평탄한 형태를 갖는 VAWT의 성능에 대한 가이드 깃(guide vane)의 영향에 대해 실험 연구를 수행했다. 사용한 익형은 익현(chord) 100mm, 직경 600

mm, 높이 700mm의 NACA 0018이었다. 개방된 제트타입 풍동 실험 결과, 가이드 깃을 부착함으로써 출력계수는 미 부착 시보다 약 1.8배가 높은 0.205의 피크 출력계수를 나타냈다.

McLaren 등⁽²²⁾은 고강도(high solidity) 3-블레이드형의 H형 다리우스 VAWT(NACA 0015 익형, 익현 0.4m)에 대한 포지티브, 네거티브 사전설정 피치(preset pitch)의 영향과 블레이드 장착 포인트 위치의 오프셋에 따른 영향을 조사했다. 네거티브 사전설정 피치 경우는 블레이드 성능이 29%까지 향상되는데 비해 포지티브 사전설정 피치일 때는 블레이드 성능이 47%까지 급격하게 떨어졌다. 그리고 블레이드 장착 포인트를 전연(leading edge) 쪽으로 이동하면 출력이 떨어지는 것으로 나타났다.

Miau 등⁽²³⁾은 소형 VAWT에 있어서 낮은 TSR에서의 기동 토크 개선에 피치를 변경하는 방법에 초점을 두었다. 실험과 수치해석 양쪽을 통해 변동 피치의 경우가 고정 피치보다 성능이 높게 나타났다. 고정 피치는 피치각 -10° , 0° , $+10^{\circ}$ 도가 적용되었다. 모델은 피치각 0° , 풍속 7m/s 에서 풍동실험으로 확인되었다. 변동 피치 모드에서는 $0\sim 2$ 의 TSR에서 피치각 $-70^{\circ}\sim +70^{\circ}$ 의 경우가 $-10^{\circ}\sim +10^{\circ}$ 의 피치각인 경우보다 성능이 좋았다. TSR 1.1, 피치각 $-18^{\circ}\sim +18^{\circ}$ 에 대해 47° 의 최대 받음각에서 공기역학적 토크가 가장 개선되었다.

이상 소형 다리우스 풍력터빈에 대한 많은 실험은 주로 NACA 0015 익형과 다양한 로터 직경 및 피치각에서 수행되었다. 효과적인 피치 제어를 통해 로터 직경 0.9m에서 0.55(Miau 등의 연구)의 최대출력계수를 얻을 수 있었다.

4-4-2. 사보니우스 VAWT

사보니우스 풍력터빈(그림 4-5)은 핀란드 기술자 Sigurd Johannes Savonius가 발명했고 주로 항력을 이용한다. 이 터빈은 블레이드의 볼록한 부위에 가해지는 네거티브 항력과 단일회전 중에 로터의 토크가 바뀌므로 풍향에 따라 로터의 자기시동이 영향을 받는 단점이 있다. Emmanuel 등⁽²⁴⁾은 실험 연구를 통해 블레이드 매수를 늘리고 볼록 부위로 바람이 닿지 않게 구성함으로써 터빈 효율을 개선했다. 즉 로터를 차폐구조로 구성함으로써 6-블레이드 로터의 효율을 0.3 수준으로 개선했다.



<그림 4-5> 사보니우스형 풍력터빈⁽²⁾

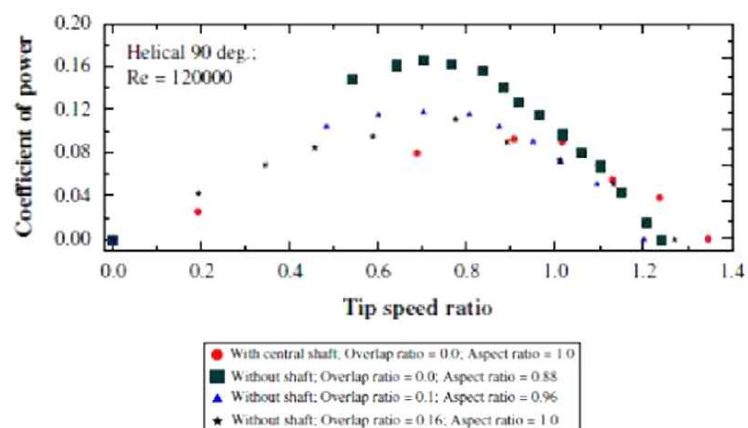
Plourde 등⁽²⁵⁾은 <그림 4-6>과 같이 캡을 설치한 VAWT를 휴대폰 중계 탑에 설치하고 성능을 실험했다. 78.7Ω의 전기저항 부하와 10m/s, 11m/s의 풍속에서 출력이 각각 200W, 270W 수준으로 증가하는 것으로 나타났다. 통기(venting) 효과는 VAWT 성능에는 거의 영향이 없는 것으로 나타났다.



<그림 4-6> 사보니우스(capped and vented) 풍력터빈⁽²⁾

180°비틀린 형태의 나선형 사보니우스 로터에 대해 실험이 수행되었다. 공기역학적 검토가 이뤄졌으며 레이놀즈수와 중첩비의 영향에 대해 검토했다. 400mm×400mm 직육면체 풍동 내의 12.7m/s 풍속 실험에서 나선형 로터는 종래 터빈보다 성능이 향상되었으며 레이놀즈수에 매우 민감한 것으로 나타났다.

0~360°에 따른 정적 토크(static torque)에서의 변동 폭을 줄이기 위해 90°의 비틀림 각도를 갖는 나선형 사보니우스 로터에 대한 실험이 Kamoji 등⁽²⁷⁾에 의해 수행됐다. 중첩비(aspect ratio)에 따른 나선형 사보니우스 로터의 성능실험 결과, TSR 0.9에서 성능계수는 0.09 이상으로 나타났다. 중첩비 0.1과 0.16일 때와의 비교에서 중첩비(overlap ratio)가 0일 때의 0.174의 최대 출력계수가 얻어졌다. <그림 4-7>에서와 같이 로터의 성능은 낮은 중첩비에서 더 높게 나타났다.

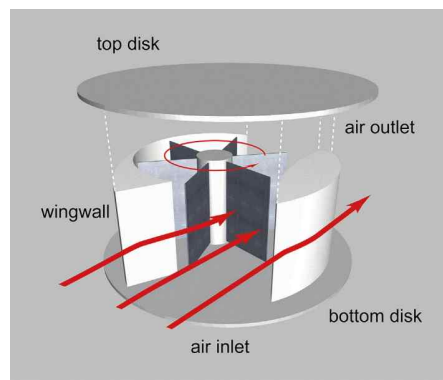


<그림 4-7> 나선형 비틀림 사보니우스 터빈의 TSR에 대한 C_p ⁽²⁾

4-5 다른 방식의 VAWT

4-5-1. 시스탄형 윈드밀(Sistan type wind mill)

이 수직축 풍력터빈은 오래전부터 이란의 Sistan과 Khorasan지역에서 사용되어 온 역사가 긴 풍력터빈이다. 이 방식은 항력으로 구동되고 쉽게 구성할 수 있는 장점이 있다. 성능 개선에 있어 Muller 등⁽²⁸⁾은 종래 터빈의 로터 상하부에 원판을 추가하는 방법을 제안했다(그림 4-8). 터빈 효율이 30%까지 향상되었고 블레이드 매수를 4에서 6으로 늘림으로써 효율을 6~7% 더 개선했다.



<그림 4-8> 시스탄형 윈드밀⁽²⁾

4-5-2. 트위스트 스위니형 풍력터빈(Twisted Sweeney type wind turbine)

Sweeney가 제안한 수직축 방식으로서 Nemoto 등⁽²⁹⁾에 의해 터빈 블레이드의 형태를 변경하는 방식으로 출력계수와 운전 TSR가 크게 향상되었다. <그림 4-9>에서와 같이 블레이드를 비틀린 곡면 형태를 갖도록 구성함으로써 낮은 풍속에서의 출력계수를 개선했으며, 최종적으로 비틀리지 않은 종래의 터빈 대비 출력계수를 2배로 개선했다.

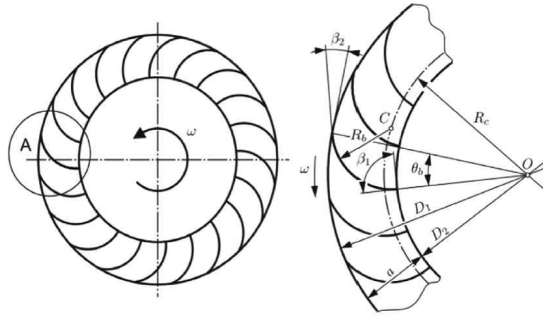
Type	a	b	c	d	e
Cross section					
Shape					
Curvature	None	None	Small	Small	Large
Twist	None	Twisted	None	Twisted	Twisted

<그림 4-9> 트위스트 스위니형 풍력터빈의 로터 형태⁽²⁾

4-5-3. 횡류 러너(cross flow runner)

VAWT의 주요 문제 중에는 저속 운전 조건에서의 작동 불능을 들 수 있다. 이에 대

해 Dragomirescu⁽³⁰⁾는 저속에서도 높은 효율을 내는 <그림 4-10>과 같은 모양의 횡류러너를 설계했다. 이 터빈은 0.6의 낮은 TSR에서도 작동되며 3.6의 높은 시동토크계수(starting torque coefficient)를 달성했다. 이 수치는 대다수의 터빈보다 높은 것으로 확인되었으며 출력계수에서도 0.45의 높은 수준으로 나타났다.



<그림 4-10> 횡류 러너의 형태⁽²⁾

4-6. 소형풍력터빈의 공력소음 개선 기술

풍력터빈으로부터 발생하는 소음은 풍빈 설계에서의 매우 중요한 요소가 된다. 소음문제에 의해 대부분의 터빈 블레이드 설계에서는 회전속도를 주요 고려 요소로 삼는다. Migilore⁽³¹⁾은 SMT 블레이드에 대해 경계층 트리핑(boundary layer tripping), 끝 모양(tip shape), 후연(trailing edge) 두께의 영향에 대해 조사했다. 실험은 실 운전 조건인 레이놀즈수 170,000~397,000에서 6가지 끝 모양, 3가지의 경계층 트립 높이, 2가지의 후연 두께에 대해 속도/받음각(speed/angle of attack)의 72가지 조건 매트릭스에서 실험을 진행했다. 결과에서 저속 조건(레이놀즈수 170,000)에서 끝단 모양에 따라 총 음압(sound pressure level)이 3.8dB의 차이를 발생했고, 고속 조건(레이놀즈수 315,000)에서는 1.3dB의 차이를 나타냈다. 이 결과로부터 블레이드 회전소음에서 블레이드 끝 모양의 중요성이 확인되었다.

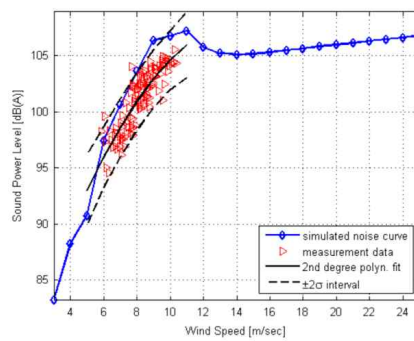
Clifton-Smith⁽³²⁾는 출력성능을 조절하여 소음을 줄이기 위해 DE(Differential Evolution, 차등진화) 기법을 제시했다. 가장 좋은 타협 조건으로, TSR 5.5에서 출력계수를 1% 줄이면 총 음압과 시동시간이 각각 4%(2dB), 6% 감소되거나 1.5%(0.7dB), 16% 개선되는 것으로 나타났다. 후연 두께는 소음감소 측면에서 1mm 수준이 적절했다.

Taylor 등⁽³³⁾의 연구에서 마이크로/소형 풍력터빈으로부터 인접한 가정에서 가장 많이 들리는 소음은 '휙(swooshing)', '윙윙(humming)', '휘파람소리(whistling)'로 알려졌다. 5kW 풍력터빈에서는 휘파람소리에 비해 저주파수가 우세했다. 풍력터빈 설치에 비판적인 사람들은 그렇지 않은 경우보다 소음을 더 많이 느끼는 것으로 조사되었다.

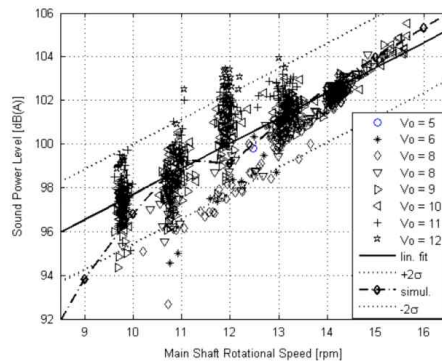
마이크로 HAWT의 소음에 대한 난류의 영향에 관한 조사가 수행되었다. 첫 번째 실험은 마이크로 풍력터빈(MWT: Micro-Wind Turbine)의 음 스펙트럼을 정량화하기 위해 1/3 옥타브 음압을 측정하고 두 번째는 동일 MWT에서의 난류 효과로 인한 소음을 측정하는 것이다. 결과에서 난류강도가 0.3에서 0.6이 되면 음향에너지 레벨이 2배로 나타났다. 바람방향이 로터에 수직이 아닐 때 공력소음이 커지는 것으로 관측되었다. 음압

레벨에서 인간 귀에 거의 들리지 않는 120~160kHz 주파수대와 대표적인 공력소음을 만드는 넓은 2~12.5kHz 주파수대, 두 개의 뚜렷한 주파수대가 측정되었다.

2.3MW SWT-2.3-9.3 풍력터빈의 소음 연구가_Leloudas 등⁽³⁴⁾에 의해 수행됐다. 시뮬레이션을 실험과 함께 반 실증 음향모델(semi-empirical acoustic mode)과 비교했다. 결과는 <그림 4-11>과 같이 예측한 값과 측정값이 잘 일치했다. 익단속도와 피치 설정으로 풍력터빈의 성능/소음을 최적화하기 위한 파라미터 검토에 음향모델을 적용했다. 예측 소음 등고선은 피치각과 회전속도의 함수로 밝혀졌다. 소음은 회전속도 증가에 따라 커지고 피치각 또한 영향을 끼친다(그림 4-12). 일정한 회전속도에서 피치각이 작아지는 동안 소음이 증가하고 받음각이 커지며 블레이드는 실속 상태로 진입한다.



<그림 4-11> Siemens SWT-2.3-9.3 풍력터빈의 컴퓨터 예측값 대 측정값⁽²⁾



<그림 4-12> 회전속도의 함수로서 컴퓨터 예측값 대 측정값⁽²⁾

5. 초고층 건물에 대한 소형풍력발전의 적용 연구 사례⁽⁶⁾

최근에 들어 도심지 중심으로 에너지를 대량 사용하는 초고층 건물이 늘어나고 있어 전 세계적인 신재생에너지 이용 확대 측면에서 고층건물에 대한 신재생에너지 이용에 관심이 커지고 있다. 특히, 초고층 건물은 상층부는 빠른 풍속으로 고밀도의 풍력에너지 활용이 가능하여 소형풍력발전(SWT) 시스템을 적용하려는 시도가 이루어지고 있다. 국내에서는 이에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 이 연구는 초고층 건물의 풍력에너지

이용을 촉진하는 기초자료로 확보하는 것을 목적으로 한다.

5-1. 소형풍력발전 적용 시의 고려 요소

5-1-1. 대상 지역

초고층 건물에서 SMT 시스템 적용에는 우선 대상지역의 기후 특성을 분석하여 적용 가능성을 판단해야 한다. 이러한 기후 분석 자료들은 풍동실험 또는 CFD 시뮬레이션에 기초자료로 사용된다. 대상지역에서의 기후 특성과 바람환경 분석을 위해서 필요한 요소들은 풍속, 풍향, 최대순간풍속, 풍속분포가 있다.

5-1-2. 대상 건물

초고층 건물이 많은 도심지의 압력 분포와 기류 특성은 건물 주위 풍속에도 영향을 주는 등 주변 환경에 의해 매우 복잡하게 변화한다. 따라서 대상 건물의 압력 분포와 기류 특성을 정확하게 분석하여 높은 풍속이 확보되고 난류가 적게 분포하는 지점을 찾아 최적 설치 위치를 결정할 필요가 있다.

5-1-3. SMT 시스템

SMT 시스템은 성능과 안전에 대해서 객관적인 검증이 필요하다. 특히, 소음과 진동은 건물 내 거주자의 쾌적성과 직접적으로 연관되기 때문에 중요한 요소이다. 여기서는 국내 신에너지 및 재생에너지개발·이용·보급촉진법 시행규칙 제7조 1항의 설비인증심사 기준, 제2항의 설비심사 기준, IEC 61400 시리즈를 기초로 작성된 SMT 시스템의 설비심사 세부기준 내 시험기준을 요소로 한다.

5-2. 소형풍력발전 적용 프로세스 구성

앞서 기술한 고려 요소들을 바탕으로 초고층 건물에의 SMT 시스템 적용 프로세스를 ①적용 가능성 평가, ②적용계획, ③적용 방안 검토의 세 단계로 구성한다.

①적용 가능성 평가 단계: 대상 건물의 전체 설계 내용과 해당 지역의 지리적 특성을 파악하고 기후 특성과 바람 환경을 검토하여 CFD 해석, 풍동실험을 통해 대상 건물의 SMT 시스템의 적용 가능성을 검토한다.

②적용계획 단계: 건물의 전력 사용량을 분석하여 발전량과 같은 에너지 성능 목표와 설계 목표로 나눠 적용 목표를 수립한 후 CFD 시뮬레이션에 의한 건물의 기류 분석을 통해 풍속이 높고 난류 발생이 적은 위치를 선정한다. 설정된 목표와 설치 위치에 따라 시스템을 선정한다.

③적용방안 검토 단계: 적용계획에서 수립한 적용 방안에 대하여 SMT 시스템의 에너지 성능을 평가하여 목표에 부합하는 최적 적용방안을 도출한다.

5-3. 소형풍력발전의 적용 프로세스 검증

5-3-1. 대상 건물의 개요

대상 건물은 서울 영등포구 여의도동에 위치한 IFC 건물 중 THREE IFC로 높이는 284m이다. 대상 건물은 한강에 인접해 있어 풍력에너지의 이용 잠재력이 높으며 주변에 영향을 줄 수 있는 고층 건물이 많지 않아 SMT 시스템 설치에 유리한 건물로 볼 수 있다.

5-3-2. 대상 지역의 기후 분석

(1) 대상 지역의 풍향 및 풍속: 2003~2007년 대상 건물이 위치한 영등포 지역의 기상청 실측 풍향 및 풍속 자료를 분석한 주요 내용은 다음과 같다. 연 평균 풍속은 3.7m/s로 나타났으며, 계절별 평균 풍속은 봄(4.0m/s)과 여름철(3.8m/s), 겨울(3.5m/s), 가을(3.4m/s) 순으로 풍속이 높았다. 또한 풍속이 5m/s를 초과한 비율에서는 연간으로 15.6%로 나타났으며, 계절별로는 봄철이 약 31.5%로 가장 높고 여름(15.9%), 겨울(10.8%), 가을(8.1%) 순이었다. 풍향에서는 연중으로는 서풍이 22.9%의 비율로 가장 많이 불었고, 계절별로는 봄(서풍, 30%), 여름(서풍, 20.1%), 가을(동풍, 21.8%), 겨울(북서풍, 26.8%)이었다. 실제 대상 건물의 상층부에서는 풍속이 더 높을 것으로 예상되었다. 또한 2006년~2010년까지 서울 지역의 최대 순간풍속은 약 20m/s로서 SMT 시스템의 파손에는 별다른 영향은 없을 것으로 판단된다.

(2) 대상 건물 높이에서의 풍속 : SMT 시스템의 적용 가능성을 평가하기 위해 대상 건물 높이에서 발생하는 풍속을 Deacon 방정식을 이용하여 도출하였다. Deacon 방정식에서 지면 거칠기는 대도시 기준인 1.6m로 적용하였으며, 풍속은 기상청에서 기상예보를 위한 10m에서 측정한 1.7m/s를 기준하였다. 풍속 보정을 통해 높이가 올라갈수록 풍속이 증가하므로, 100m 높이에서는 4.04m/s, 200m 높이는 4.73m/s 마지막으로 300m 높이에서는 5.12m/s의 풍속이 나오는 것을 예측할 수 있다. 또한 대상 건물 높이인 284m에서는 약 5.07m/s로 SMT 시스템의 적용 가능성은 충분한 것으로 판단된다.

5-4. 시뮬레이션을 통한 대상 지역 바람 환경 검토

5-4-1. 시뮬레이션 분석

이 연구에서는 건물 주위의 형상에 따른 유동박리의 정확한 해석을 위해 CFD 시뮬레이션 프로그램인 STAR-CCM+ 4.02를 사용하여 기류분석을 실시하였다. 분석 결과, 바람이 불어오는 쪽의 건물들은 대체적으로 강한 풍속분포를 보였다. 대상 건물은 수직 높이에 따라서 강한 풍속 분포를 보였으며, 건물 옥상에서의 최대풍속은 약 6.5m/s로 분석되어 같은 높이에서의 보정풍속인 5m/s보다 26% 높았다. 이는 SWT에 필요한 최소풍속인 3m/s보다 2배 이상 높아 건물 옥상은 SMT 시스템 설치에 적합한 환경으로 판단된다.

5-5. 소형풍력발전의 적용계획

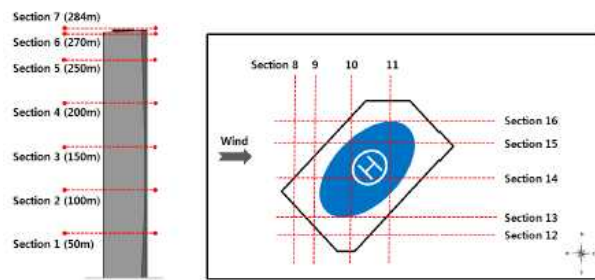
5-5-1. SWT 시스템의 목표 전력량 설정

SMT 시스템을 적용은 우선 예상 전력량을 분석하여 전력생산량을 설정함으로써 시스

템의 용량과 대수를 정해야 한다. 시공사로부터 제공받은 대상 건물의 전력사용량 자료를 통해 전체 전력사용량은 연간 33,344MWh로 분석되었다.

5-5-2. 시뮬레이션을 통한 최적 설치 위치 선정

대상 건물의 기류분석을 위해 <그림 5-1>와 같이 대상 건물의 높이 방향으로 50m씩 높이 250m까지 총 5개 단면(section)으로 나누고, 건물 옥상바닥 270m와 헬리포트가 위치한 284m 부분을 추가로 나누었다. 또한 주풍향이 불어오는 옥상 부분을 중심으로 수평방향으로는 주풍향을 직각으로 받는 건물의 정면부분과 측면부분까지 총 9개의 단면으로 나누어 분석을 수행하였다.

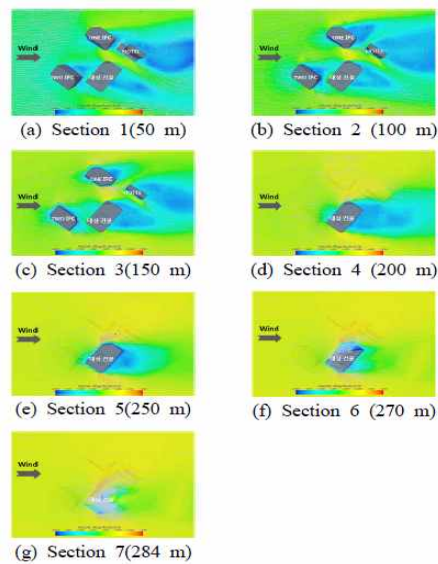


<그림 5-1> 건물의 해석을 위한 단면도⁽⁶⁾

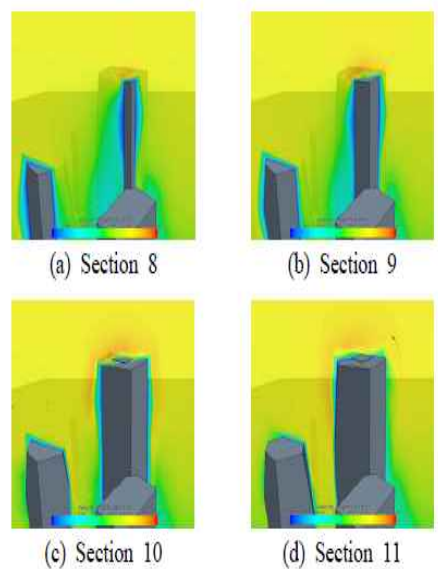
대상 건물을 높이별로 나눈 단면 1~단면 7의 기류분석은 <그림 5-2>와 같이 50~200m 높이에서는 대상 건물을 포함한 모든 건물의 후면으로 소용돌이 형태의 난류영역이 형성되었으며, ONE IFC와 대상 건물 사이에서는 벤추리 효과로 인해 5m/s의 강한 풍속의 바람이 흘러나가는 것으로 나타났다. 대상 건물은 앞에 위치한 TWO IFC의 간섭으로 인하여 정면에서는 소용돌이와 역류가 발생하여 주변보다 약한 풍속이 나타났다. 하지만 TWO IFC의 건물 높이인 199m 이상부터 대상 건물에 대한 간섭이 점차 줄어들고 높이 270m 에서는 거의 영향을 받지 않으며, 상층부로 갈수록 대상 건물 뒤쪽의 난류영역 역시 점차 줄어들어 가는 것으로 나타났다. 주풍향의 영향을 가장 먼저 받는 면에서 최대 6.5m/s의 강한 풍속이 분포하여 SMT 시스템 설치에 유리한 것으로 판단되지만 헬리포트 뒤쪽에서의 풍속은 0~2m/s로 나타나 SMT 시스템을 설치하기에 적합하지 않은 것으로 보인다.

단면 8~단면 11의 기류분석 결과는 <그림 5-3>에서와 같이 건물옥상의 난류영역과 풍속은 옥상의 헬리포트에 영향을 많이 받는 것으로 나타난다. 단면 8은 주풍향의 영향을 가장 먼저 받는 부분으로 안정적인 풍속과 난류영역이 적게 분포하는 것으로 나타났고, 단면 9의 경우 건물 옥상 모서리에 부딪힌 바람이 다시 헬리포트 하부 면을 따라 흐르면서 난류영역 위로 6m/s 이상의 강한 풍속이 분포하는 것으로 나타났다. 단면 10은 위쪽으로 강한 풍속이 계속 존재하고 양 측면 역시 위쪽보다는 약하지만 약 4m/s의 풍속이 확인되었다. 단면 11은 헬리포트에 의한 상승 난류의 영향으로 인하여 상대적으로 풍속이 약하며 측면에서 난류영역이 커지는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 헬리포트 앞

쪽의 지점들이 SMT 시스템을 설치하기에 유리할 것으로 판단된다.



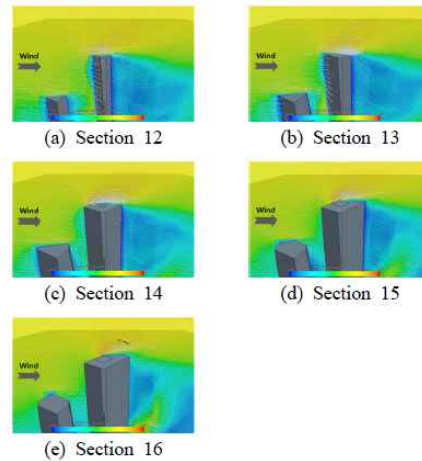
<그림 5-2> 단면1-7 해석⁽⁶⁾



<그림 5-3> 단면8-11 해석⁽⁶⁾

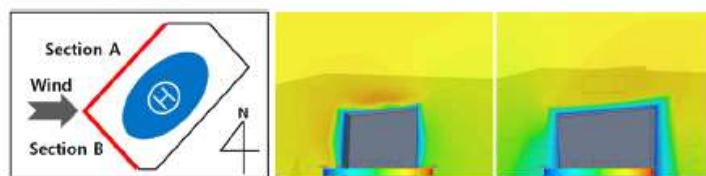
단면 12~16 분석 결과는 <그림 5-4>와 같이 건물 모서리에 가까운 단면 12와 단면 13에는 주 풍향을 직접 받는 곳을 중심으로 강한 풍속이 분포되며, 옥상 모서리에 부딪힌 바람이 위쪽으로 흘러나가는 것으로 나타났다. 또한 건물 뒤편에는 건물의 하단부에서 생성된 소용돌이 일부와 상승풍이 벽면을 타고 올라와 불규칙한 풍속이 형성되기 때문에 건물의 뒤편은 SMT 시스템 설치에 적합하지 않은 것으로 분석되었다. 단면 14의 옥상 왼쪽 모서리 부위는 헬리포트의 영향이 작기 때문에 기류 흐름이 안정적이지만 오른쪽은 헬리포트 면을 타고 부딪쳐 흘러나가는 바람으로 인해 불규칙한 난류영역이

넓게 형성되며, 단면 15와 16도 같은 상태를 나타내고 있다. 따라서 주 풍향을 가장 먼저 받는 앞부분이 SMT 시스템 설치에 가장 적합할 것으로 판단된다. 시뮬레이션분석을 종합한 결과, SMT 시스템 설치에 가장 적합한 위치는 <그림 5-5>와 같이 단면 A와 단면 B인 것으로 분석되었다.



<그림 5-4> 단면 12-16 해석⁽⁶⁾

각 지점에서 난류영역은 평균적으로 건물 옥상 바닥면에서 최대 2m 높이까지 분포하기 때문에 설치 높이를 2m 이상으로 하여 SMT 시스템을 설치하는 것이 적합할 것으로 판단된다. 건물 옥상 바닥을 기준으로 높이 2m 지점에서 단면 A에서의 평균 풍속은 약 6.28%, 단면 B의 평균 풍속은 약 5.52%로 나타났다.



<그림 5-5> SWT 최적의 설치 위치⁽⁶⁾

5-5-3. 소형풍력발전시스템 선정

대상 건물에 적용할 SMT 시스템은 출력이 높고 풍향에 관계없이 운전이 가능한 정격 출력 3kW의 수직축형 제품으로 선정하였다. 내부는 항력형 사보니우스 블레이드, 외부는 양력형 다리우스 블레이드의 이중 블레이드 구조로 효율이 높은 제품이다. 또한 시스템 자체의 소음, 진동, 하중은 신재생에너지 설비심사 세부기준에 모두 적합하였다.

5-5-4. 소형풍력발전시스템 배치 계획

대상 건물에서의 기류분석 결과, 설치 위치에서 난류 영향이 적은 3m를 타워의 높이로 정하였고 최소 허브 높이는 5m로 설정하였다. SWT 간 영향을 방지하기 위해 적당

한 이격거리를 유지해야 하며, 이때의 적정이격거리는 로터지름의 2~4배가 최적이다. 선정된 발전시스템인 3kW급의 로터지름은 4m이므로 최소 적정 이격거리는 8m이며, 단면 A의 길이는 52.5m로 4대, 단면 B는 34.5 m로 3대, 최대 7대의 SMT 시스템을 설치할 수 있는 것으로 나타났다. SMT 시스템 옥상 설치 시 이격거리를 포함한 시스템 하나의 설치면적은 8.73㎡, 설치 하중은 1ton이며, 단위 면적당 작용하는 하중은 114.5kg/㎡로 건물 옥상의 등분포적재하중 기준인 500kg/㎡보다 크게 낮아 하중안전 문제는 없을 것으로 판단된다.

5-5. 결론

이상으로 실제 초고층 건물에 SMT 시스템의 적용에 대해 조사했다. 먼저 대상 건물에 SMT 시스템의 적용에 적합한 환경인 것으로 평가하고 건물의 전력사용량을 분석하여 적용 목표를 설정하고 CFD 시뮬레이션을 통해 주풍향을 가장 먼저 받는 쪽 모서리 부분이 SMT 시스템 적용에 가장 적합한 것으로 분석되었다. 이 연구에서 신재생에너지 관련 프로젝트의 표준통합 분석 평가 프로그램인 RETScreen을 이용하여 대상 건물에 적용된 SMT 시스템 7대의 연간 발전량을 산출한 결과, 총 17MWh/년으로 나타났다.

6. 맺음말



최근 들어 우리나라는 원전 신고리 5, 6호기 건설여부를 비롯한 장단기 원전 운용 계획과 이와 관련된 신재생에너지 확대 계획 등 국가 전력수급 문제가 크게 이슈화되고 있다. 여기에 신기후 체제인 파리협정에 따라 국제사회에 천명한 국가 온실가스 감축 목표도 달성해야 하는 과제들이 놓여있다. 이와 같은 과제 해결에는 풍력발전과 같은 신재생에너지 이용의 확대가 필수적일 것이다. 하지만 중대형 규모의 육·해상 풍력발전은 소음 등 환경 및 생업 관련 민원으로 확대에 어려움을 겪고 있다. 따라서 분산발전 개념의 소형풍력발전(SMT)은 이러한 문제를 완화하는 데에 도움이 될 수 있을 것으로 보인다.

주로 각 고층건물에 설치되는 SMT는 집단민원의 우려가 거의 없고 독립형 발전방식이나 계통연결형 발전방식 양쪽으로 전력수요를 분담할 수 있다. 한편 SMT의 확대를 위해서는 낮은 풍속에서도 전력출력이 가능하도록 저전압 자기시동(self starting) 기술 및 출력계수(coefficient of power) 향상 기술 등이 한 단계 진전되어야 한다. 또한 경제성을 위해 시스템의 부품의 모듈화와 표준화를 통한 가격인하와 함께 설치 및 유지보수의 편리성 개선도 필수적이다. 여기에 발전차액지원제도 등 공공부문에서의 지원제도도 확대되어야 한다. 이러한 노력들이 모아 결실을 맺어 소형풍력발전이 확대됨으로써 풍력산업 전체의 성장에도 크게 기여할 것으로 기대된다.

<참고문헌>

1. WEC, "Global Wind Statistics 2016", Global World Energy Council, 2017, pp.1~4
2. Tummala A, Velamati RK, Sinha DK, Indrajaya V, Krishna VH, "A review on small scale wind turbines", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 56, 2016, pp.1351~1371
3. 홍원표, "그린도시를 위한 소형풍력발전시스템 기술동향", 조명·전기설계학회지, 27(1), 2013, pp.57~70
4. Lin Lu, Ka Yan Ip, "Investigation on the feasibility and enhancement methods of wind power utilization in high-rise buildings of Hong Kong", Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, 2009, pp.450~461
5. WWEA, "2017 Small Wind World Report Summary", World Wind Energy Association, 2017, pp.1~16
6. 박영현, 박정하, 박진철, 이연구, "초고층 건물에서의 소형풍력발전시스템 적용에 관한 연구", 대한설비공학논문집, 25(4), 2013, pp.187~193
7. Freere P, Sacher M, Derricott J, Hanson B, "A low cost wind turbine and blade performance", Wind Eng, 34(3), 2010, pp.289~302.
8. Refan M, Hangan H, "Aerodynamic performance of a small horizontal axis wind turbine", J Sol Energy Eng, 134(2), 2012, 021013 - 021013
9. Singh RK, Ahmed MR, "Blade design and performance testing of a small wind turbine rotor for low wind speed applications", Renew, Energy, 50, 2013, pp.812~819
10. Kishore RA, Coudron T, Priya S, "Small-scale wind energy portable turbine (SWEPT)", J Wind Eng Ind Aerodyn, 116, 2013, pp.21~31
11. Hirahara H, Hossain MZ, Kawahashi M, Nonomura Y, "Testing basic performance of a very small wind turbine designed for multi-purposes", Renew Energy, 30(8), 2005, pp.1279~1297
12. Matsumiya H, Ito R, Matsushita D, Iida M, Arakawa C, Kawakami M, "Field operation and track tests of 1-kW small wind turbine under high wind conditions", J Sol Energy Eng, 132(1), 2010, 011002
13. Mayer C, Bechly ME, Hampsey M, Wood DH. "The starting behaviour of a small horizontal-axis wind turbine", Renew Energy, 22(1), :2001, pp.411~417
14. Henriques JCC, Marquesda Silva F, Estanqueiro AI, Gato LMC, "Design of a new urban wind turbine airfoil using a pressure-load inverse method", Renew Energy, 34(12), 2009, pp.2728~2734
15. Giguere P, Selig MS, "New airfoils for small horizontal axis wind turbines", J Sol Energy Eng, 120(2), 1998, pp.108~114
16. Selig MS, McGranahan BD, "Wind tunnel aerodynamic tests of six airfoils for

- use on small wind turbines”, J Sol Energy Eng, 126(4), 2004, pp.986~1001
17. Singh RK, Ahmed MR, Zullah MA, LeeY-H, “Design of a low Reynolds number airfoil for small horizontal axis wind turbines”, Renew Energy, 42, 2012, pp.66~76
 18. Song Qiyue, Lubitz William David, “Design and testing of a new small wind turbine blade”, J Sol Energy Eng, 136(3), 2014, 034502
 19. Nishizawa Y, Tokuyama H, Nakajo Y, Ushiyama I, “Yaw behavior of horizontal-axis small wind turbines in an urban area”, Wind Eng, 33(1), 2009, pp.19~30
 20. Watanabe F, Takahashi T, Tokuyama H, Nishizawa Y, Ushiyama I, “Modelling passive yawing motion of horizontal axis small wind turbine: derivation of new simplified equation for maximum yaw rate”, Wind Eng, 36(4), 2012, pp.433~442
 21. Takao M, Kuma H, Maeda T, Kamada Y, Oki M, Minoda A, “A straight-bladed vertical axis wind turbine with a directed guide vane row-effect of guide vane geometry on the performance”, J Therm Sci, 18(1), 2009, pp.54~57
 22. McLaren K, Tullis S, Ziada S. “Measurement of high solidity vertical axis wind turbine aerodynamic loads under high vibration response conditions”, J Fluids Struct, 32, 2012, pp.12~26
 23. Miao JJ, Liang SY, Yu RM, Hu CC, Leu TS, Cheng JC, Chen SJ, “Design and test of a vertical-axis wind turbine with pitch control”, Appl Mech Mater, 225, 2012, pp.338~343
 24. Emmanuel B, Jun W. “Numerical study of a six-bladed savonius wind turbine”. J Sol Energy Eng, 133(4), 2011, 044503
 25. Plourde BD, Abraham JP, Mowry GS, Minkowycz WJ, “An experimental investigation of a large, vertical-axis wind turbine: effects of venting and capping”, Wind Eng, 35(2), 2011, pp.213~222
 26. A.G. Dutton, “The Feasibility of Building-Mounted/Integrated Wind Turbines”, Energy Research Unit, CCLRC, Final report 4, May. 2005
 27. Erickson DW, Wallace JJ, Peraire Jaime, “Performance characterization of cyclic blade pitch variation on a vertical axis wind turbine”, Proceedings of the 49th AIAA aerospace sciences meeting including the new horizons forum and aerospace exposition, 2011
 28. Müller G, Jentsch MF, Stoddart E. “Vertical axis resistance type wind turbines for use in buildings”, Renew Energy, 34(5), 2009, pp.1407~1412
 29. Nemoto Y, Anzai A, Ushiyama I, “A study of the twisted sweeney-type wind turbine”, Wind Eng, 27(4), 2003, pp.317~321
 30. Dragomirescu A, “Performance assessment of a small wind turbine with cross-flow runner by numerical simulations”, Renew Energy, 36(3), 2011, pp.957 - 965
 31. Migliore P, “The potential for reducing blade-tip acoustic emissions for small

- wind turbines”, Subcontractor Report, SR-500-43472, NREL, 2009. pp.4
32. Clifton-Smith MJ, “Aerodynamic noise reduction for small wind turbine rotors”, Wind Eng, 34(4), 2010, pp.403~420
 33. Taylor J, Eastwick C, Lawrence C, Wilson R, “Noise levels and noise perception from small and micro wind turbines”, Renew Energy,55, 2013, pp.120~127.
 34. Leloudas Giorgos, et al, “Prediction and reduction of noise from a 2.3 MW wind turbine”, IOP Publishing, J Phys Conf, Ser 75(1), 2007

