

브러시 및 워터젯을 이용한 풍력 발전 블레이드 표면 청소 효율 측정

Efficiency Evaluation of Wind Power Blade Surface Cleaning using Brush and Water Jet

전민석¹, 김병곤¹, 박소라¹, 홍대희^{2,✉}
Minseok Jeon¹, Byunggon Kim¹, Sora Park¹, and Daehie Hong^{2,✉}

¹ 고려대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea Univ.)

² 고려대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea Univ.)

✉ Corresponding author: dhong@korea.ac.kr, Tel: +82-2-3290-3369

Manuscript received: 2013.06.24 / Accepted: 2013.8.18

Blades of wind energy plants are exposed to external shocks or internal cracks during operation. Furthermore, the blade surfaces can be contaminated by substances such as dust, blood of birds, salt or insects which can decrease the electricity generation efficiency significantly. For this reason, many blade cleaning companies started to appear and a variety of methods for cleaning were suggested. Despite these diverse methods, there has been no study to investigate how effectively to clean the substances in quantitative manner. In this paper, the cleaning efficiency of two rotor blade cleaning methods, brush and water-jet, is examined through experiments by changing operating parameters. Then, the optimal operating conditions for both methods are derived.

Key Words: Wind Power Blade (풍력 발전 블레이드), Cleaning (청소), Efficiency (효율), Water jet (워터 젯), Brush (브러쉬)

1. 서론

세계적으로 오일 쇼크가 일어나고, 지구 온난화가 진행되면서 대체에너지 개발이 중요해지고 있다. 대체에너지 중 풍력발전은 청정에너지인 바람을 에너지원으로 사용하여 각광을 받고 있다. 이에 따라 최근에는 풍력발전기가 대형화 되고 그 수가 늘어나면서 풍력 발전 용량이 증가하고 있는 추세이다.¹

풍력발전기 블레이드는 표면에 이물질이 있으면 표면 거칠기가 높아져 Double Stall Effect 현상이 일어나 공력성능을 저하시키기 때문에 청소를 통

해서 공력성능을 관리 해야 한다.^{2,3} 풍력발전기는 설치 특성상 높고, 바람이 많이 부는 곳에 위치하기 때문에 표면을 청소하기 위해서는 다양한 방법이 필요로 하다.

국외에서는 이미 몇몇의 회사가 블레이드 청소를 하고 있다. 대표적인 방법으로는 영국의 EXTREME Wind Services[®]가 있다.⁴ 크레인을 이용하여 2개의 큰 브러시를 풍력발전 블레이드에 접근시켜 청소하는 방법이다. 또 하나의 청소 방법에는 스페인의 BladeCleaning[®]이 있다.⁵ 풍력발전기 기둥에서 물을 블레이드로 분사하고 풍력발전기 블레이드 원심력을 이용하여 물을 블레이드 팁으

로 보내 청소하는 방법이다. 앞서 언급한 2개의 청소에는 브러쉬와 워터젯이 사용 되었다.

대형화 되가는 블레이드에 맞춰서 자동으로 검사나 청소를 할 수 있도록 로봇이 사용되고 있는 추세이다.^{6,7} 이와 같은 로봇으로 청소를 수행 할 때 어떻게 청소를 하여야 블레이드 표면에 붙은 오염물을 효과적으로 제거 할 수 있는지는 현재 나와 있는 연구된 바가 없다. 워터젯의 형태에 따른 청소 효율을 측정한 연구는 다양하지만 워터젯 각도에 대한 실험적 연구는 없다.^{8,9} 이에 따라 5MW 급 풍력발전기와 동일한 재질로 블레이드 시편을 제작하고 블레이드 표면에 묻은 오염물을 실제와 비슷한 환경으로 구현하여 청소 효율 측정을 하고자 한다.

청소 방법으로는 브러쉬와 워터젯을 사용하였고, 블레이드 표면 오염물로는 소금과 돼지 피를 섞은 살코기를 이용하였다. 같은 실험을 6번씩 반복하여 청소 효율 평균을 구하였다.

브러쉬와 워터젯을 사용한 청소 방법 중 효율적인 청소 방법을 실험을 통해 확인한다. 그리고 이를 이용하여 블레이드 청소를 하여 접근하기 어려운 블레이드 설치 환경에서 보다 효율적인 청소를 하고자 한다.

2. 청소 실험

2.1 오염물 세팅

청소 실험에 앞서 실험을 위한 오염물 선정 및 오염물 세팅을 하였다.

표면 오염물은 소금, 물 때, 새의 피, 벌레를 실험의 오염물로 선정하였다. 위의 4가지 오염물은 실험실에서 같은 조건으로 오염물을 만들 수 있는 오염물이다. 소금 또는 물 때를 구현하기 위해서 소금물을 분무하여 건조시키는 방법을 선택하였다. 실제 해양의 농도는 평균적으로 35%이지만 소금 결정의 확보를 위해서 약 7배 초과 농도의 소금물을 사용하였다. 고농도의 소금물을 30cm의 거리에서 20회 분무하여 시편 당 같은 조건의 소금 결정을 발생하도록 오염물을 세팅 하였다. 새의 피와 벌레를 대체하기 위해서 실험실에서 세팅 할 수 있도록 돼지의 피와 돼지 살코기를 일정 비율로 혼합하였다. 피는 같은 구성물질로 이루어져 있기 때문에 구하기 쉬운 돼지피로 설정하였고, 벌레는 단백질 성분으로 이루어져 있어서 같은 단백질 성분인 돼지 살코기를 사용하였다. 벌레나

새가 죽으면 피가 시체와 같이 블레이드 표면에 붙기 때문에 같은 효과를 내기 위해서 돼지 피와 돼지 살코기를 섞어서 오염물을 세팅 하였다.

충돌에 의해 오염물이 블레이드 표면에 발생하는 것을 질량의 충돌모델로 단순화하여 오염물을 밀착시켰다. 벌레들은 온도와 영양분 섭취량에 따라 무게가 25mg~160mg 까지 다르기 때문에 100mg 으로 가정하였다.¹⁰ 구체적으로 현재 사용되고 있는 5MW 급 풍력터빈 블레이드인 REPOWER 5M 모델의 제품사양에 따라 충돌 모델을 계산하였다.

블레이드 회전 rpm이 10.7 rpm 이라고 하면 10.7 rpm 은 식(1)을 통해서 $\omega = 1.12\text{rads}$ 로 변형된다. 그 후에 질량이 100mg 인 벌레 한 마리가 블레이드의 날개 50m 시점에서 충돌이 발생 한다고 하면, 블레이드로부터 발생하는 선속도는 $v = 50\text{m} \times 1.12 \text{ rad/s} = 56\text{m/s}$ 가 나온다.

$$\omega = \left(\frac{\text{rpm}}{60} \right) \times 2\pi \quad (1)$$

이와 같은 충격량을 맞추기 위해서 필요한 힘을 식(2)을 이용하여 계산하였다. 결과값을 이용하여 280g 의 물체를 0.2초 동안 블레이드 표면에 밀착시켰다.

$$m\Delta v = \int F dt \quad (2)$$

따라서 100mg 의 벌레가 56m/s 에서 0m/s 으로 변하는 충격량을 0.2 초동안 280g 의 무게로 누름으로써 실제 블레이드와 같은 충격량을 구현하여 청소 실험을 위한 오염물을 제작하였다.

2.2 청소 실험 틀

워터젯은 고압세척기를 이용하였다. 분사압력을 측정하기 위해서 분사 하는 곳 앞 쪽에 압력계 이지를 추가 장착하였다. 워터젯을 분사하지 않는 상태는 100 bar 를 가리키고, 워터젯을 분사하는 상태는 80 bar 를 가리킨다. 따라서 워터젯 분사 압력은 20 bar 라는 것을 알 수 있다.

청소 실험에는 블레이드 시편에 워터젯 분사를 일정하게 유지하기 위해서 분사된 물이 시편 표면에 닿는 가로 길이를 12cm 가 되도록 위치 시켰다. 여기서 시편과 워터젯 분사 노즐까지의 수직 거리는 8.8cm 가 된다.

브러쉬는 모의 두께를 각각 0.5mm, 0.3mm,

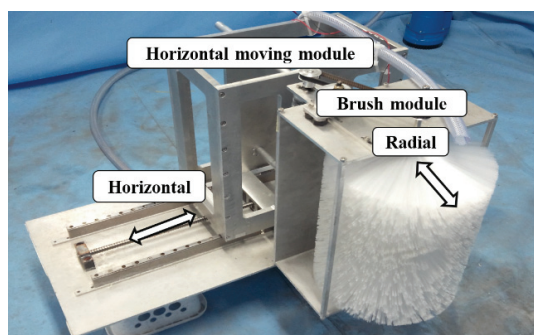


Fig. 1 Image of cleaning tool

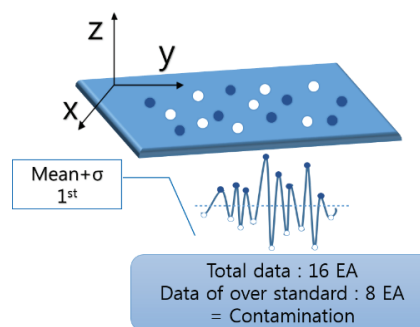


Fig. 2 Standard of contaminant decision

0.18 mm 로 3가지 종류 설정하였다. 두께에 따라 다른 특성을 갖는데, 모의 두께가 두꺼울수록 모로부터 시편의 표면에 대한 수직력이 강하게 작용하며, 두께가 얇을수록 시편의 표면에 보다 밀착하고 오염물을 쓸어 내리는 효과를 갖는다. 브러쉬는 나일론 재질로 제작하였다. 실제 블레이드의 표면과 동일한 재질로 청소 실험을 하기 위해서 5MW 급을 제작하는 테크항공에서 블레이드 시편 (1m×0.5m×0.015m)을 2개 제작하였다. 이를 8등분 하여 총 16개의 작은 시편으로 나누었다.

청소 툴은 Fig. 1과 같이 수평 이동 모듈과 브러쉬 모듈로 구성되어 있다. 청소 툴의 기능은 브러쉬를 장착하여 브러쉬를 회전 할 수 있고, 수평 이동 모듈에 브러쉬 모듈을 2개의 기둥으로 연결하여 수평이동을 하는 것이다. 수평 이동 모듈에 달린 모터는 볼 스크루에 연결되어 수평 이동 모듈을 최대 14mm/s 로 이동 할 수 있게 하였다.

2.3 청소 실험

청소 실험은 2가지의 오염물을 가지고 실시하였다. 변수는 워터젯의 분사 각도와 브러쉬의 모 두께, 회전속도 그리고 청소 툴의 이동속도, 브러쉬 회전 속도 이렇게 4가지로 하였다. 워터젯은 시편과 분사 노즐거리가 수직거리로 8.8cm 를 맞추어 90°, 45°, 30° 를 각각 6번씩 실험 하였다. 기본값은 청소 툴의 이동속도는 14mm/s 로 하였다. 브러쉬는 모의 두께에 따라 청소 수행 시 수직력, 수평력이 달라진다. 브러쉬 모가 두꺼울수록 수직력이 강하며, 브러쉬 모가 얇아질수록 수평력이 강하다. 수직력이 강하면 시편을 수직으로 내려쳐서 오염물과 시편을 분리 시킨다. 수평력이 강하면 옆에서 미는 힘이 작용하여 오염물을 시편으로부터 넓게 퍼트린다. 브러쉬 모는 0.5 mm, 0.3 mm,

0.18 mm 로 바꿔 가며 각각 6번씩 실험을 하였다. 기본값은 청소 툴의 수평 이동속도 14 mm/s 로 하였고, 브러쉬 회전 속도는 55 rpm 으로 설정하였다. 청소 툴의 이동속도에서는 브러쉬회전속도 와 청소 툴의 수평 이동 속도를 고려 하여 실험을 하였다. 브러쉬 회전속도는 83rpm, 55 rpm 으로 나누었고, 수평 이동속도는 14 mm/s, 10 mm/s 로 나누었다. 총 4가지 경우로 각각 6번씩 청소 실험을 하였다. 기본값은 브러쉬모의 두께 0.18 mm 로 하였다. 브러쉬 회전속도는 55 rpm, 83 rpm 으로 2가지로 나누었고, 청소 툴의 수평이동속도는 10 mm/s, 14 mm/s 로 나누었다.

3. 청소 결과 측정

3.1 3D 스캐너

청소 실험에 사용된 블레이드 시편 모양을 컴퓨터 상으로 그대로 옮겨오기 위해서 3D 스캐너를 사용하였다. 3D 스캐너를 사용한 이유는 블레이드 표면 거칠기, 즉 표면 높이가 Double stall 현상을 일으키는 중요한 요소이기 때문에 표면 높이를 파악하기 위해서 블레이드 시편을 형상 그대로 컴퓨터 상으로 가져 올 수 있는 3D 스캐너를 사용하게 되었다.

본 연구에 사용된 3D스캐너는 광삼각법을 이용한 3차원 측정을 한다. 교정하는 값은 광원과 카메라의 상대적인 위치와 변수들을 계산하여 맞추고, 스캐닝은 패턴이 물체의 표면에 투영된 모습을 영상으로 획득하여 깊이 정보를 계산한다.

3.2 오염물 판단기법

풍력발전 블레이드를 대상으로 오염물 제거 및 표면 상태를 알기 위해서 기본적으로 표면 오염에

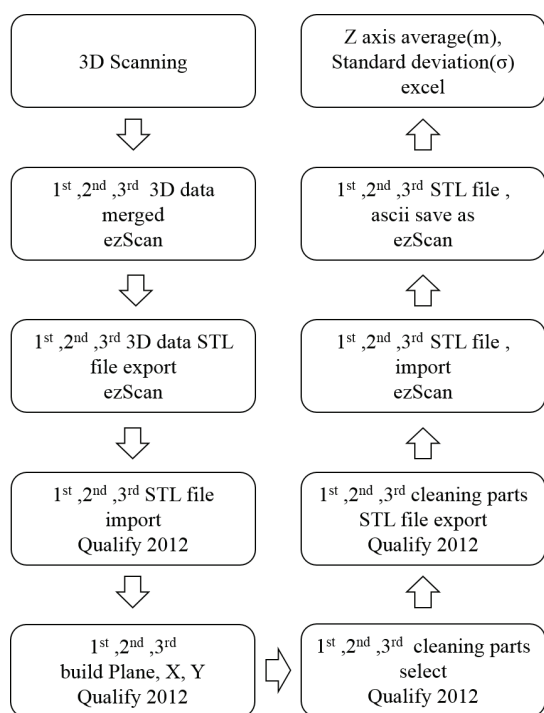


Fig. 3 Scanning data processing process

대한 정량적인 정의가 필요하다. Fig. 2는 오염물에 대한 기본 개념을 나타낸다. 16개의 높이 데이터 중에서 8개가 기준이 되는 높이를 넘었다면 그 8개가 오염물이라고 간주한다. 기준이 되는 높이는 깨끗한 시편에서 그 기준을 정하였다. 깨끗한 시편에서 기준높이를 선정한 이유는 시편자체의 높이를 반영해야 표면 거칠기를 판단 할 수 있기 때문이다. 깨끗한 시편의 높이 데이터를 추출하여 그에 대한 평균(m)과 표준편차(σ)를 구한 뒤 m + σ 보다 높은 수치에 있는 높이 데이터를 오염물로 간주 하였다.

3.3 데이터 처리 방법

Fig. 3은 청소 효율 실험을 위한 3D 스캐닝 프로세스를 나타낸다. 3D 카메라로 블레이드 시편을 측정 후 STL 파일로 변환 후 깨끗한 시편(1st), 오염된 시편(2nd), 청소 후 시편(3rd)의 STL파일을 Qualify 2012 프로그램으로 불러 온다. 3개의 다른 STL파일을 같은 동일한 평면으로 맞추기 위해서 같은 평면, X축, Y축으로 배열한다. 그 후에 블레이드 시편 중 청소된 영역을 따로 선택하여 추출한다. 추출된 STL파일을 ASCII 코드로 뽑아내면 X

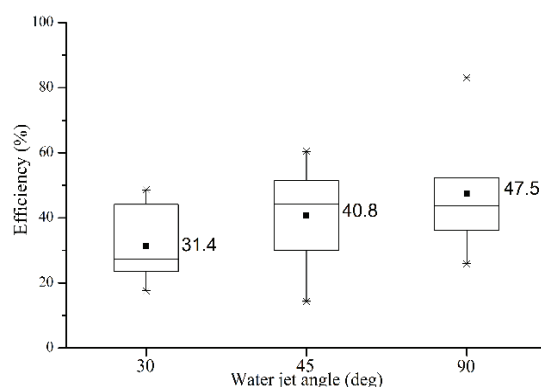


Fig. 4 Salt experiment result (water jet angle, default: 14mm/s)

축, Y축, Z축의 좌표 값들로 나온다. 그 좌표 값들 중 Z축이 높이 데이터이므로 이 Z축의 값들을 엑셀을 이용하여 평균, 표준편차를 구한다.

평균과 표준편차를 구한 후 m ± 2σ 외의 값들은 쓸모없는 값들로 취급하여 Z축의 값들 중에서 제외 시킨다. 그 후에 1st의 m + σ의 높이보다 높은 값을 갖은 데이터 수를 세어서 전체 데이터 개수의 비율을 측정한다. 청소 효율은 식(3)을 이용해서 측정하였다.¹¹ 청소 효율 식에서 before는 2nd의 오염물 비율이고, after는 3rd의 오염물 비율이다.

$$Efficiency = \left(1 - \frac{before}{after}\right) \times 100 \quad (3)$$

3.4 청소 효율 측정 결과

Fig. 4처럼 소금이 오염물일 경우에 청소 방법이 워터젯이었을 때 90° 인 경우가 47.5%로 30°, 40° 인 경우 보다 청소가 잘 되는 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 5에서 브러쉬는 0.18 mm 일 때 가장 청소 효율이 좋았다. 이는 소금 입자가 작아서 수직력보다는 수평력에 의하여 더 많이 제거 되기 때문이다. Fig. 6에서는 14 mm/s, 83 rpm 인 경우가 가장 청소효율이 좋았다. 하지만 14 mm/s, 83 rpm 와 차이가 없는 것으로 보아, 비중은 브러쉬 회전력이 더 크게 작용 되는 것을 알 수 있었다. 따라서 일정 rpm 이상에서는 수평 이동 속도가 10 mm/s 이상이면 된다는 것을 확인 하였다.

피&고기가 오염물이고 청소 방법이 워터젯인 경우에 Fig. 7에서처럼 소금일 경우와 마찬가지로 90° 인 경우가 청소가 45°, 30° 보다 잘 되었다. Fig.

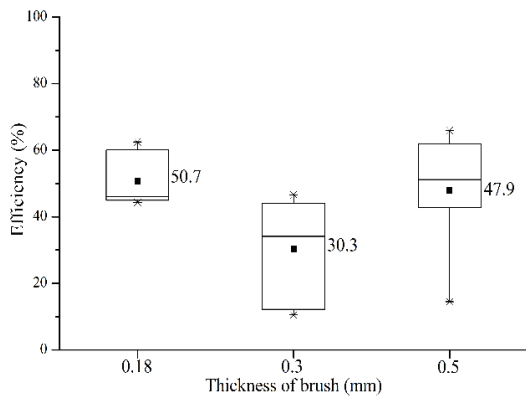


Fig. 5 Salt experiment result (brush hair thickness, default: 14mm/s, 55rpm)

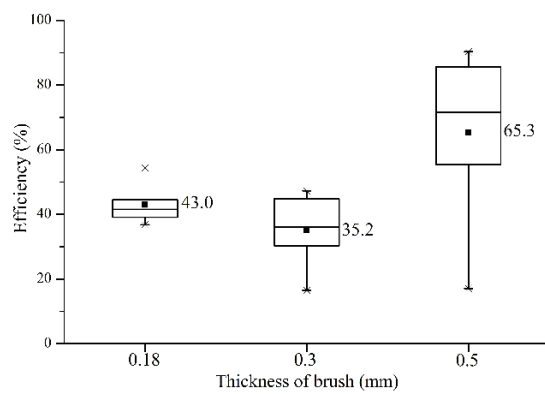


Fig. 8 Blood and insect experiment result (brush hair thickness, default: 14mm/s, 55rpm)

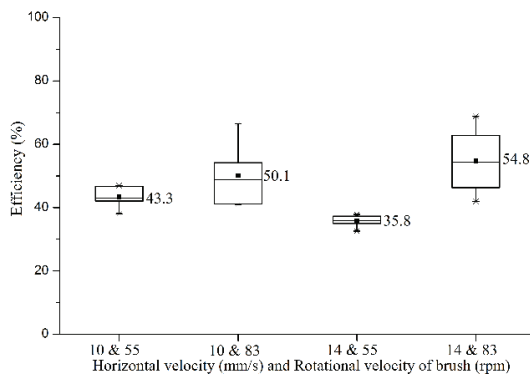


Fig. 6 Salt experiment result (velocity, revolution, default: 0.18mm)

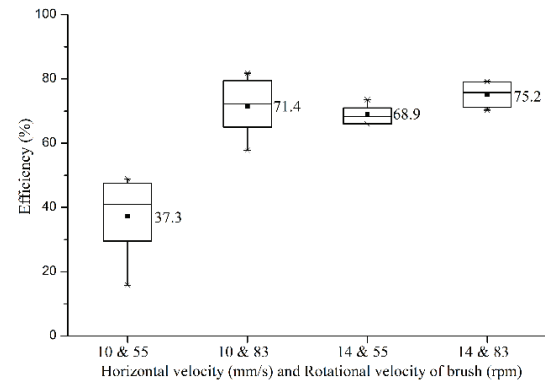


Fig. 9 Blood and insect experiment result (velocity, revolution, default: 0.18mm)

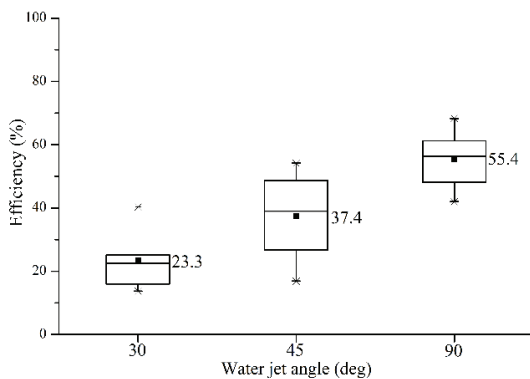


Fig. 7 Blood and insect experiment result (water jet angle, default 14mm/s)

8에서 브러시는 수직력이 강한 0.5 mm 인 경우가 청소가 잘 되었고, 0.18 mm 은 오염물이 소금인 경

우와는 다르게 청소 효율이 떨어졌다. 이는 덩어리진 오염물 경우 오염물과 시편 사이에 수직력으로 제거가 잘 되기 때문이다. Fig. 9에서 브러쉬 회전속도와 수평 이동속도의 경우는 소금과 마찬가지로 14 mm/s, 83 rpm 이 가장 청소 효율이 좋았다. 하지만 10 mm/s, 83 rpm 와 14 mm/s, 55 rpm 가 비슷한 청소 효율을 보이는 것으로 보아 오염물이 덩어리진 특성일 경우에는 일정 힘 이상의 청소 방법 시 청소 효율이 비슷한 것으로 확인되었다.

4. 결론

본 논문에서는 풍력발전기 블레이드 표면 청소 효율에 대해서 실험을 통해서 측정하였다. 블레이드 청소는 풍력발전기 특성상 접근하기 어려운 환경이므로 한번의 청소로 높은 청소 효율을 내는

것이 중요하다. 청소 결과에 따라 브러쉬 모의 두께를 0.5 mm 와 0.18 mm 가 섞인 브러쉬를 제작하면 소금과 새 피에 대한 오염물을 보다 효과적으로 제거 할 수 있을 것으로 예상된다.

또한 청소 효율 측정에 사용된 청소 방법인 워터젯과 브러쉬는 현재 블레이드 청소를 하는 대표적인 2가지 방법이다. 따라서 본 논문에서 나온 청소 효율 측정 결과는 대형화 되는 블레이드에 맞춰 개발되고 있는 다양한 블레이드 청소 로봇에 반영되어 효율 적인 청소를 수행하는데 도움이 될 것이다.

후 기

본 연구는 2012년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20124010203250)입니다.

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국 건설교통 기술 평가원에서 위탁 시행한 2010 년도 건설기술혁신사업(과제번호: 10 기술혁신 E03)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Global Wind Energy Council, "Offshore wind power developments," Global Wind Statistics, 2011.
2. Corten, G. P., Veldkamp, H. F., and Nederland, E. C., "Insects Cause Double Stall," Netherlands Energy Research Foundation, pp. 470-473, 2001.
3. Corten, G. P. and Veldkamp, H. F., "Aerodynamics: Insects can halve wind-turbine power," Nature, Vol. 412, Paper No. 6842, pp. 41-42, 2001.
4. EXTREME, "EXTREME Wind Service," <http://www.eahire.co.uk/Analysis-and-Cleaning.html> (accessed 08 June 2013)
5. BladeCleaning, S. A., "BladeCleaning," http://www.bladecleaning.com/index_EN.htm.html
6. Lim, S., Park, C., Hwang, J., Kim, D., and Kim, T., "The inchworm type blade inspection robot system," 9th International Conference on Ubiquitous robots and ambient intelligence, pp. 604-607, 2012.
7. Elkmann, N., Felsch, T., and Förster, T., "Robot for rotor blade inspection," 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry, pp. 1-5, 2010.
8. Dehhoda, S., Hood, M., Alehossein, H., and Buttsworth, D., "Analytical and experimental study of pressure dynamics in a pulsed water jet device," Flow, turbulence and combustion, Vol. 89, No. 1, pp. 97-119, 2012.
9. Daoming, G. and Jie, C., "ANFIS for high-pressure water jet cleaning prediction," Surface and Coatings Technology, Vol. 201, No. 3, pp. 1629-1634, 2006.
10. Pandian, T. J., Mathavan, S., and Jeyagopal, C. P., "Influence of temperature and body weight on mosquito predation by the dragonfly nymph *Mesogomphus lineatus*," Hydrobiologia, Vol. 62, No. 2, pp. 99-104, 1979.
11. Alvarez, N., Gésan-Guiziu, G., and Daufin, G., "The role of surface tension of re-used caustic soda on the cleaning efficiency in dairy plants," International Dairy Journal, Vol. 17, No. 4, pp. 403-411, 2007.